

การพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจบนเว็บในการจัดการของเสียจากการก่อสร้าง ตามแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน : กรณีศึกษาพื้นที่ภาคกลางของประเทศไทย

Development of A Web-Based Decision Support System for Construction Waste Management Based upon The Concept of a Circular Economy : A Case Study of Central Region of Thailand

กฤตชัย สุทธิลักษณ์

Kridchai Suthiluck

ดุษฎีนิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
2568



การพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจบนเว็บในการจัดการของเสียจากการก่อสร้าง ตามแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน : กรณีศึกษาพื้นที่ภาคกลางของประเทศไทย

Development of A Web-Based Decision Support System for Construction Waste Management Based upon The Concept of a Circular Economy : A Case Study of Central Region of Thailand

กฤตชัย สุทธิลักษณ์

Kridchai Suthiluck

ดุษฎีนิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
2568

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ชื่อดุษฎีนิพนธ์ การพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจบนเว็บในการจัดการของเสียจากการก่อสร้าง ตามแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน : กรณีศึกษาพื้นที่ภาคกลางของประเทศไทย

ชื่อ นามสกุล กฤตชัย สุทธิลักษณ์

ชื่อปริญญา วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน)

สาขาวิชา วิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน

คณะ วิศวกรรมศาสตร์

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริญญ์ บุญกนิษฐ

คณะกรรมการสอบดุษฎีนิพนธ์ได้ให้ความเห็นชอบดุษฎีนิพนธ์ฉบับนี้แล้ว

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุนิติ สุภาพ)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ณัฐวรพล รัชสิริวัชรบุล)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุวิทย์ แพงกันยา)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทอดพงษ์ แดงสี)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริญญ์ บุญกนิษฐ)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร อนุมัติให้นับดุษฎีนิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ พันธุนะ)

วันที่ 28 เดือน เมษายน พ.ศ. 2569

ชื่อดุษฎีนิพนธ์ การพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจบนเว็บในการจัดการของเสียจากการก่อสร้าง ตามแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน : กรณีศึกษาพื้นที่ภาคกลางของประเทศไทย
ชื่อ นามสกุล กฤตชัย สุทธิลักษณ์
ชื่อปริญญา วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน)
สาขาวิชา วิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน
คณะ วิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริญญ์ บุญกนิษฐ
ปีการศึกษา 2568

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแนวทางเชิงบูรณาการและระบบสนับสนุนการตัดสินใจ (Decision Support System: DSS) ในรูปแบบเว็บแอปพลิเคชัน ภายใต้ชื่อ “EcoRanker” สำหรับการบริหารจัดการของเสียจากอุตสาหกรรมก่อสร้าง โดยบูรณาการหลักการด้านความยั่งยืนร่วมกับเทคนิคการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจที่เป็นระบบ โปร่งใส และตั้งอยู่บนข้อมูลเชิงประจักษ์ ภายใต้บริบทของเกณฑ์การประเมินที่มีความซับซ้อนและหลากหลายมิติ

กรอบระเบียบวิธีวิจัยถูกพัฒนาขึ้นในลักษณะเชิงผสมผสาน โดยบูรณาการเทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ (QFD) กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ความคลุมเครือ (FAHP) และ TOPSIS ร่วมกับข้อมูลเชิงพื้นที่จากระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) QFD ถูกใช้เพื่อแปลงความต้องการของผู้ใช้งานจำนวน 15 รายการ ไปสู่คุณลักษณะเชิงเทคนิคของระบบจำนวน 12 รายการ ขณะที่ FAHP ถูกใช้เพื่อกำหนดค่าน้ำหนักเริ่มต้นของเกณฑ์การประเมินทั้ง 8 เกณฑ์ การวิเคราะห์พบว่าเกณฑ์ด้านการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าน้ำหนักสูงสุดเท่ากับ 0.2087 รองลงมาคือคุณภาพของผลลัพธ์จากการจัดการของเสีย (0.1644) และการใช้เชื้อเพลิงในการขนส่ง (0.1455) ส่วน TOPSIS ถูกใช้ในการประเมินและจัดลำดับทางเลือกของผู้ประกอบการจัดการของเสีย ทั้งนี้ตัวชี้วัดด้านสิ่งแวดล้อม ได้แก่ การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และปริมาณการใช้เชื้อเพลิง ถูกประเมินในเชิงปริมาณโดยอาศัยระยะทางการขนส่ง

EcoRanker DSS ได้รับการพัฒนาเพื่อรองรับการตัดสินใจแบบเรียลไทม์ผ่านเว็บแพลตฟอร์ม โดยประกอบด้วยระบบจัดการข้อมูล ระบบแบบจำลอง ฐานความรู้ และส่วนติดต่อผู้ใช้ การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยการเปรียบเทียบผลลัพธ์กับการคำนวณใน Microsoft

Excel พบว่าค่าดัชนี TOPSIS ของทุกทางเลือกมีความสอดคล้องกันอย่างสมบูรณ์ โดยไม่พบความคลาดเคลื่อน (Error = 0.0000%) และให้ผลการจัดอันดับตรงกันร้อยละ 100

การประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญจำนวน 12 ท่าน พบว่าระบบมีความเหมาะสมโดยรวมอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{x}$ = 4.31, SD = 0.72) ขณะที่ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานมีค่าดัชนีความพึงพอใจรวมเท่ากับร้อยละ 87 ซึ่งอยู่ในระดับมากที่สุด นอกจากนี้ การประเมินความสามารถในการเข้าถึงด้วยเครื่องมือ WAVE ไม่พบข้อผิดพลาดด้าน Accessibility และได้รับคะแนน AIM Score เท่ากับ 10.00 ส่วนการประเมินประสิทธิภาพของระบบด้วย Google PageSpeed Insights พบว่าระบบมีคะแนน Performance เท่ากับ 96 คะแนน และ Best Practices เท่ากับ 100 คะแนน

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า EcoRanker DSS สามารถบูรณาการการตัดสินใจแบบหลายมิติครอบคลุมด้านเศรษฐกิจ สิ่งแวดล้อม สังคม และเทคนิค ได้อย่างเป็นระบบ มีความโปร่งใส และตรวจสอบได้ พร้อมทั้งสนับสนุนการประยุกต์ใช้แนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียนในการจัดการของเสียจากการก่อสร้างในบริบทของประเทศกำลังพัฒนา

คำสำคัญ : การจัดการของเสียจากการก่อสร้าง, ระบบสนับสนุนการตัดสินใจ, การวิเคราะห์การตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์, แบบจำลองเชิงบูรณาการ QFD–FAHP–TOPSIS, เศรษฐกิจหมุนเวียน

Dissertation Title Development of A Web-Based Decision Support System for Construction Waste Management Based upon The Concept of a Circular Economy : A Case Study of Central Region of Thailand
Author Kridchai Suthiluck
Degree Doctor of Engineering (Sustainable Industrial Management Engineering)
Field of Study Sustainable Industrial Management Engineering
Faculty Engineering
Advisor Assistant Professor Dr.Prin Boonkanit
Academic Year 2025

Abstract

This research aims to develop an integrated framework and a web-based Decision Support System (DSS), namely “EcoRanker,” for construction waste management by integrating sustainability principles with Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) techniques. The proposed framework was designed to support systematic, transparent, and evidence-based decision-making under complex and multidimensional evaluation conditions.

The research methodology was developed using an integrated approach that combined Quality Function Deployment (QFD), Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP), and the Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) with Geographic Information System (GIS)-based spatial data. QFD was employed to convert 15 user requirements into 12 technical characteristics of the system. FAHP was applied to determine the default weights of eight evaluation criteria. The weighting analysis revealed that carbon dioxide (CO_2) emissions received the highest priority weight (0.2087), followed by the final quality of waste management outcomes (0.1644) and transportation fuel consumption (0.1455). TOPSIS was subsequently utilized to evaluate and rank construction waste management operators. Environmental indicators, including CO_2 emissions and fuel consumption, were

quantitatively assessed based on transportation distances derived from spatial analysis.

The EcoRanker DSS was developed to support real-time decision-making through a web platform consisting of a data management subsystem, a model management subsystem, a knowledge management subsystem, and a user interface subsystem. Model verification was conducted through comparison with Microsoft Excel calculations. The results demonstrated complete consistency in TOPSIS outputs across all alternatives, with no computational discrepancy detected (Error = 0.0000%) and 100% agreement in ranking results.

The system was evaluated by 12 experts, and the overall assessment indicated a very high level of appropriateness ($\overline{\boldsymbol{x}}$ = 4.31, SD = 0.72). User satisfaction evaluation revealed an overall Satisfaction Index (SI) of 87.00%, reflecting the highest level of user acceptance. In addition, accessibility assessment using the WAVE evaluation tool reported no accessibility errors and achieved an AIM score of 10.0. System performance evaluation using Google PageSpeed Insights showed a Performance score of 96 and a Best Practices score of 100.

The findings demonstrated that the EcoRanker DSS can effectively integrate multidimensional decision-making across economic, environmental, social, and technical dimensions in a systematic, transparent, and verifiable manner. Furthermore, the proposed framework can support the implementation of circular economy principles in construction waste management, particularly within the context of developing countries.

Keywords : Construction Waste Management, Decision Support System (DSS), Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA), QFD–FAHP–TOPSIS, Circular Economy

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริญญ์ บุญกนิษฐ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ได้ให้คำแนะนำ คำปรึกษา และการสนับสนุนทางวิชาการอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาการทำวิทยานิพนธ์นี้ ความรู้ ความสามารถ และคำชี้แนะของท่านเป็นที่ประจักษ์และมีค่ามากสำหรับการพัฒนาผลงานวิจัยของข้าพเจ้า

ข้าพเจ้ายังขอขอบพระคุณ รองศาสตรจารย์ ดร.สุนิติ สุภาพ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.ณัฐวรพล รัชสิริวัชรบุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุวิทย์ แพงกันยา และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทอดพงษ์ แดงสี คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ข้อเสนอแนะที่มีประโยชน์อย่างยิ่ง ทำให้ข้าพเจ้าได้รับความรู้และมุมมองใหม่ ๆ ในการปรับปรุงและพัฒนางานวิจัยนี้ให้มีคุณภาพมากยิ่งขึ้น

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษาวิจัยและทรัพยากรต่าง ๆ ที่จำเป็นต่อการทำวิทยานิพนธ์นี้ ตลอดจนบุคลากรทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำในด้านต่าง ๆ มาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอขอบคุณครอบครัวและเพื่อน ๆ ที่ให้กำลังใจและการสนับสนุนทุกด้านในการศึกษานี้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

กฤตชัย สุทธิลักษณ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
ABSTRACT	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ฌ
สารบัญภาพ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	4
1.3 ขอบเขตการศึกษา	4
1.4 ข้อกำหนดเบื้องต้น	5
1.5 สมมติฐาน	6
1.6 นิยามศัพท์เฉพาะ	7
1.7 กรอบแนวคิดการวิจัย (Research Framework)	8
1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	11
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	13
2.1 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	13
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	26
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	32
3.1 ภาพรวมของระเบียบวิธีวิจัย (Research Methodology Overview)	32
3.2 กรอบแนวคิดการวิจัย (Research Framework)	32
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย (Research Instruments)	34
3.4 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง	35
3.5 ระยะที่ 1: การออกแบบโดยอาศัยความต้องการของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียด้วยเทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ (Stakeholder-driven Design using Quality Function Deployment: QFD)	38

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.6 ระยะที่ 2: Decision Criteria Structuring and FAHP Weighting	45
3.7 ระยะที่ 3: Environmental and GIS Data Integration	49
3.8 ระยะที่ 4: Web-based DSS Development	53
3.9 ระยะที่ 5: แบบจำลองการตัดสินใจด้วยวิธี TOPSIS (Decision Model Using TOPSIS)	59
3.10 ระยะที่ 6 การตรวจสอบและยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง (Validation and Verification)	69
3.11 สรุปวิธีดำเนินการวิจัย (Summary of Research Methodology)	72
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและอภิปรายผล	73
4.1 ภาพรวมการพัฒนาระบบระบบสนับสนุนการตัดสินใจ	73
4.2 วิเคราะห์ด้วยวิธีเทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ (Quality Function Deployment)	74
4.3 ผลการกำหนดค่าน้ำหนักด้วยวิธีกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ความคลุมเครือ (FAHP Weighting Results)	77
4.4 ลำดับกระบวนการทำงานของระบบ EcoRanker DSS	80
4.5 การตรวจสอบความถูกต้อง การยืนยันความเหมาะสม และการประเมินประสิทธิภาพของระบบ EcoRanker DSS	88
4.6 การสังเคราะห์ผลการวิจัยเพื่อตอบคำถามวิจัย	109
4.7 สรุปท้ายบท	114
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	117
5.1 สรุปผลการวิจัย	117
5.2 ข้อจำกัดของงานวิจัยและข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต	119
เอกสารอ้างอิง	123
ภาคผนวก	142
ภาคผนวก ก หนังสือกรับรองจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์	143
ภาคผนวก ข แบบสอบถามรูปแบบ google form ที่ใช้ในงานวิจัย	146

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ค เอกสารประกอบการตีพิมพ์ในงานประชุมวิชาการนานาชาติ (Conference Proceedings)	174
ภาคผนวก ง หลักฐานการตีพิมพ์บทความวิจัยในวารสารระดับนานาชาติ (Q1): Sustainability (MDPI, 2023)	183
ภาคผนวก จ หลักฐานการตีพิมพ์บทความวิจัยในวารสารวิชาการระดับชาติ (TCI): The Journal of Industrial Technology (2026)	211
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	228

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 สรุปกลุ่มผู้ให้ข้อมูลและบทบาทในกระบวนการวิจัย	37
3.2 คุณลักษณะทางเทคนิคของระบบ (Technical Characteristics; TCs)	41
3.3 มาตราส่วนความสัมพันธ์มาตรฐานสำหรับการประเมิน CR–TC ใน QFD	43
3.4 สรุปเกณฑ์การตัดสินใจสำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธี TOPSIS ในระบบ EcoRanker DSS	67
4.1 ค่าน้ำหนักเริ่มต้นของเกณฑ์การประเมินทั้ง 8 รายการจากวิธี FAHP	78
4.2 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (EcoRanker DSS เปรียบเทียบกับการคำนวณด้วย Excel)	89
4.3 การตรวจสอบความถูกต้องของการคำนวณในขั้นตอนย่อย (Intermediate Calculation Verification)	90
4.4 ผลการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญ (Expert Validation) ของระบบ EcoRanker DSS	93
4.5 เกณฑ์การแปลผลดัชนีความพึงพอใจ (Satisfaction Index: SI)	95
4.6 ผลการประเมินการใช้งานและความพึงพอใจของผู้ใช้งานต่อระบบ EcoRanker DSS	97

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1.1	กรอบแนวคิดการวิจัยของระบบ EcoRanker DSS	9
3.1	กรอบแนวคิดการวิจัยสำหรับการพัฒนา EcoRanker DSS (Research Framework for EcoRanker DSS Development)	33
3.2	โครงสร้างบ้านแห่งคุณภาพ House of Quality (HoQ)	42
3.3	โครงสร้างลำดับชั้นของเกณฑ์การตัดสินใจสำหรับระบบ EcoRanker DSS	46
3.4	สถาปัตยกรรมของระบบ EcoRanker DSS แบบเว็บแอปพลิเคชัน	55
3.5	สถาปัตยกรรมเชิงโมดูลของระบบสนับสนุนการตัดสินใจ EcoRanker สำหรับการจัดการของเสียจากการก่อสร้างอย่างยั่งยืน	56
3.6	กระบวนการทำงานของระบบ EcoRanker DSS (System Workflow)	57
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่าง CR 15 ตัวและ TC 12 ตัวโดยใช้โครงสร้างของการสร้างบ้านแห่งคุณภาพ	75
4.2	หน้าจอเข้าสู่ระบบและลงทะเบียนผู้ใช้งานของระบบ EcoRanker DSS	82
4.3	หน้าจอการเลือกบทบาทเพื่อกำหนดเส้นทางการทำงานตามประเภทผู้ใช้งาน	82
4.4	หน้าจอกำหนดรายละเอียดและเงื่อนไขการประเมินโครงการ	83
4.5	หน้าจอกำหนดเกณฑ์การประเมินและค่าน้ำหนัก เพื่อใช้ในการประมวลผลและจัดอันดับ	84
4.6	หน้าจอตรวจสอบและยืนยันข้อมูลของผู้ก่อให้เกิดของเสียก่อนเข้าสู่กระบวนการประเมิน	84
4.7	หน้าจอการกำหนดตำแหน่งโครงการของผู้ก่อให้เกิดของเสียโดยใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS)	85
4.8	หน้าจอป้อนข้อมูลความยั่งยืนตามเกณฑ์ประเมินสำหรับนำไปประมวลผลและจัดอันดับ	86
4.9	หน้าจอแสดงผลลัพธ์การจัดอันดับและคะแนนของผู้ประกอบการ เพื่อประกอบการตัดสินใจ	87
4.10	หน้าจอแจ้งเตือนผลการคัดเลือกไปยังผู้ประกอบการ และการจัดการทางเลือกสำรอง	88
4.11	ผลการประเมินความสามารถในการเข้าถึงของระบบ EcoRanker DSS โดยใช้เครื่องมือ WAVE	103
4.12	ผลการประเมินสมรรถนะของระบบ EcoRanker DSS โดยใช้ Google PageSpeed Insights (โหมด Desktop)	106

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมก่อสร้างเป็นหนึ่งในภาคเศรษฐกิจหลักที่มีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐาน การขยายตัวของเมือง และการขับเคลื่อนการเติบโตทางเศรษฐกิจของประเทศ โดยมีส่วนสนับสนุนผลิตภัณฑ์มวลรวมภายในประเทศและการยกระดับคุณภาพชีวิตของประชาชนอย่างมีนัยสำคัญ [1] อย่างไรก็ตาม แม้อุตสาหกรรมก่อสร้างจะมีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจและคุณภาพชีวิตของประชาชน แต่อุตสาหกรรมก่อสร้างกลับเป็นหนึ่งในภาคส่วนที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระดับสูงตลอดวงจรชีวิตของอาคาร ทั้งในด้านการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ การใช้พลังงาน การปล่อยก๊าซเรือนกระจก ตลอดจนการก่อให้เกิดของเสียจากกิจกรรมการก่อสร้างและการรื้อถอน [2]

งานวิจัยหลายฉบับรายงานตรงกันว่า อุตสาหกรรมก่อสร้างเป็นหนึ่งในภาคส่วนที่ใช้ทรัพยากรธรรมชาติในสัดส่วนสูง โดยมีการใช้ทรัพยากรแร่ธรรมชาติประมาณร้อยละ 50 ของทรัพยากรที่ถูกใช้ทั่วโลก และมีส่วนในการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าร้อยละ 33 ของการปล่อยทั้งหมด [3-5] ข้อมูลดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าอุตสาหกรรมก่อสร้างมีบทบาทสำคัญต่อทั้งการพัฒนาเศรษฐกิจและการสร้างแรงกดดันต่อสิ่งแวดล้อมในระดับโลก ของเสียจากการก่อสร้างและการรื้อถอน (Construction and Demolition Waste: CDW) เป็นหนึ่งในปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมการก่อสร้าง โดย Wang และคณะ รายงานว่า CDW คิดเป็นประมาณร้อยละ 30–40 ของของเสียในเขตเมือง [6] ในระดับนานาชาติ ประเทศจีนมีปริมาณ CDW สูงถึงประมาณ 2.5 พันล้านตันต่อปี ขณะที่สหภาพยุโรปและสหรัฐอเมริกามีปริมาณมากกว่า 800 ล้านตันและ 548 ล้านตันตามลำดับ [7-9] ในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ แม้ข้อมูลจะยังมีข้อจำกัด แต่พบว่าปริมาณของเสียจากการก่อสร้างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เช่น สิงคโปร์มีประมาณ 1.54 ล้านตันต่อปี และมาเลเซียประมาณ 26,000 ตันต่อวัน [10] สำหรับประเทศไทย ฐานข้อมูลระดับประเทศยังมีข้อจำกัดด้านความต่อเนื่องและความเป็นระบบอย่างไรก็ตาม มีการประเมินว่ามีของเสียจากการก่อสร้างประมาณ 1.1 ล้านตันต่อปี คิดเป็นร้อยละ 7.7 ของของเสียทั้งหมด [11], [12] และส่วนใหญ่ยังคงถูกกำจัดด้วยวิธีฝังกลบหรือทิ้งอย่างไม่เหมาะสม [13] แม้ว่าจะมีความพยายามในการส่งเสริมการรีไซเคิล แต่มีเพียงประมาณร้อยละ 20–30 ของ CDW เท่านั้นที่ได้รับการนำกลับมาใช้ใหม่ [14], [15] สถานการณ์ดังกล่าวสะท้อนข้อจำกัดของระบบ

เศรษฐกิจแบบเส้นตรง (Linear Economy) ซึ่งนำไปสู่การสูญเสียทรัพยากรและเพิ่มภาระต่อสิ่งแวดล้อม [16]

แม้ว่าปัจจุบันเทคโนโลยีการออกแบบและการบริหารโครงการก่อสร้างสมัยใหม่ เช่น Building Information Modeling (BIM) ระบบประมาณปริมาณวัสดุแบบดิจิทัล และเทคโนโลยี Machine Learning จะช่วยเพิ่มความแม่นยำในการคำนวณปริมาณวัสดุก่อสร้างและลดของเสียจากกระบวนการก่อสร้างได้มากขึ้น อย่างไรก็ตาม ของเสียประเภทคอนกรีตยังคงเป็นองค์ประกอบหลักของของเสียจากการก่อสร้างและการรื้อถอน ในหลายประเทศทั่วโลก [17] ทั้งนี้ ของเสียประเภทคอนกรีตไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะจากงานก่อสร้างใหม่เท่านั้น แต่ยังรวมถึงกิจกรรมการรื้อถอนอาคาร การปรับปรุงอาคาร และการรื้อถอนโครงสร้างพื้นฐานอีกด้วย นอกจากนี้ ยังครอบคลุมของเสียจากองค์ประกอบที่ไม่ใช่โครงสร้าง เช่น ผนังคอนกรีต ทางเดิน และวัสดุคอนกรีตส่วนเกินจากหน้างานก่อสร้าง [18]

นอกจากนี้ คอนกรีตยังเป็นวัสดุที่มีปริมาณการใช้งานสูงและมีมวลมากที่สุดประเภทหนึ่งในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ส่งผลให้การขนส่ง การกำจัด และการนำกลับมาใช้ใหม่ของของเสียประเภทนี้มีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับการใช้พลังงาน การใช้น้ำมันเชื้อเพลิง และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดห่วงโซ่วงจรชีวิตของวัสดุ [19] ผลการศึกษาล่าสุดชี้ให้เห็นว่า การบริหารจัดการเศษวัสดุจากการรื้อถอนและการนำคอนกรีตกลับมาใช้ใหม่ มีบทบาทอย่างยิ่งต่อการลดการปล่อยคาร์บอนสะสมในวัสดุก่อสร้าง (Embodied Carbon) ซึ่งจะช่วยสนับสนุนให้อุตสาหกรรมก่อสร้างบรรลุเป้าหมายความเป็นกลางทางคาร์บอน(Carbon Neutrality) ได้อย่างยั่งยืน [20] ดังนั้น การพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับการจัดการของเสียคอนกรีตอย่างมีประสิทธิภาพจึงยังคงมีความสำคัญทั้งในมิติด้านสิ่งแวดล้อม เศรษฐกิจ และการพัฒนาอย่างยั่งยืน

จากข้อจำกัดของระบบเศรษฐกิจแบบเส้นตรงดังกล่าว แนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) จึงถูกนำเสนอเป็นแนวทางสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากรและลดของเสีย โดยมุ่งเน้นการใช้ซ้ำและการรีไซเคิล [21] และได้รับการผลักดันในประเทศไทยผ่านโมเดล Bio-Circular-Green (BCG) [22]

อย่างไรก็ตาม การนำแนวคิดดังกล่าวไปใช้ในทางปฏิบัติยังคงเผชิญกับข้อจำกัด โดยเฉพาะในการตัดสินใจเลือกแนวทางหรือผู้ประกอบการที่เหมาะสม การตัดสินใจเลือกผู้ประกอบการจัดการของเสียจากการก่อสร้างเป็นปัญหาที่ต้องพิจารณาหลายเกณฑ์พร้อมกัน ซึ่งครอบคลุมมิติด้านเศรษฐกิจ สิ่งแวดล้อม สังคม และเทคนิค โดยงานวิจัยก่อนหน้าได้ใช้วิธีการต่าง ๆ เช่น PROMETHEE, ELECTRE และ ANP เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจ [23, 24]

จากการทบทวนและสังเคราะห์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง พบว่า แม้งานวิจัยด้านการจัดการของเสียจากการก่อสร้างและการประยุกต์ใช้วิธีการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ จะมีพัฒนาการอย่างต่อเนื่อง แต่ยังคงมีข้อจำกัดเชิงโครงสร้างที่สำคัญหลายประการ

ประการแรก งานวิจัยส่วนใหญ่ยังขาดการบูรณาการการประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมในรูปแบบเชิงปริมาณ โดยเฉพาะการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการขนส่งของเสีย เข้าสู่กระบวนการตัดสินใจอย่างเป็นระบบ ทำให้ผลการประเมินยังไม่สามารถสะท้อนผลกระทบที่เกิดขึ้นจริงในเชิงปฏิบัติได้อย่างครบถ้วน

ประการที่สอง ยังขาดกรอบแนวทางที่สามารถเชื่อมโยงความต้องการของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียไปสู่เกณฑ์การตัดสินใจเชิงโครงสร้างอย่างเป็นระบบ ส่งผลให้การกำหนดเกณฑ์ในหลายงานวิจัยยังคงพึ่งพาการกำหนดโดยผู้วิจัยหรือผู้เชี่ยวชาญเป็นหลัก ซึ่งอาจไม่สะท้อนบริบทการใช้งานจริงได้อย่างเพียงพอ

ประการที่สาม งานวิจัยจำนวนมากยังคงมุ่งเน้นการพัฒนาแบบจำลองเชิงแนวคิดหรือการวิเคราะห์กรณีศึกษาเฉพาะพื้นที่ โดยยังขาดการต่อยอดไปสู่ระบบสนับสนุนการตัดสินใจที่สามารถใช้งานได้จริงในรูปแบบดิจิทัล และสามารถรองรับการประมวลผลข้อมูลแบบโต้ตอบในบริบทของผู้ใช้งานจริง

ประการสุดท้าย ยังขาดการบูรณาการองค์ประกอบสำคัญ ได้แก่ การกำหนดเกณฑ์ การให้น้ำหนัก การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม และการจัดอันดับทางเลือก เข้าไว้ในกรอบการพัฒนาเดียวอย่างเป็นระบบ ส่งผลให้การตัดสินใจยังคงกระจัดกระจายและขาดความต่อเนื่องในเชิงวิศวกรรม

จากการทบทวนวรรณกรรม พบว่างานวิจัยที่ผ่านมา ยังขาดการบูรณาการระหว่างการกำหนดเกณฑ์การตัดสินใจ การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมเชิงปริมาณ และการพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจที่สามารถใช้งานได้จริงในรูปแบบดิจิทัล โดยเฉพาะในบริบทของการจัดการของเสียจากการก่อสร้างภายใต้แนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนากรอบการตัดสินใจเชิงบูรณาการและระบบสนับสนุนการตัดสินใจบนเว็บ เพื่อสนับสนุนการคัดเลือกและจัดอันดับผู้ประกอบการจัดการของเสียจากการก่อสร้างอย่างเป็นระบบ โปร่งใส และตรวจสอบได้

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงกำหนดคำถามวิจัยหลัก (Research Questions: RQs) ดังนี้

RQ1: แนวทางการบริหารจัดการของเสียจากการก่อสร้างที่มีประสิทธิภาพภายใต้แนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียนควรมีลักษณะอย่างไร

RQ2: โครงสร้างของระบบสนับสนุนการตัดสินใจ (DSS) ที่เหมาะสมสำหรับการจัดการของเสียจากการก่อสร้างควรประกอบด้วยองค์ประกอบใดบ้าง

RQ3: เทคนิคและกระบวนการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ใดที่เหมาะสมสำหรับการประเมินและจัดอันดับผู้ประกอบการจัดการของเสียจากการก่อสร้างอย่างเป็นระบบ โปร่งใส และตรวจสอบได้

RQ4: จะสามารถพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจบนเว็บที่บูรณาการโครงสร้างเกณฑ์แบบจำลองสิ่งแวดล้อม และวิธีการตัดสินใจไว้ในระบบเดียวเพื่อรองรับการใช้งานจริงได้อย่างไร

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและประยุกต์ใช้ระบบสนับสนุนการตัดสินใจบนเว็บสำหรับการจัดการของเสียจากการก่อสร้างภายใต้แนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน โดยมีวัตถุประสงค์เฉพาะดังนี้

1.2.1 เพื่อพัฒนาโครงสร้างเกณฑ์การประเมินสำหรับการจัดการของเสียจากการก่อสร้างอย่างมีประสิทธิภาพ โดยครอบคลุมมิติด้านเศรษฐกิจ สิ่งแวดล้อม สังคม และเทคนิค

1.2.2 เพื่อพัฒนาแบบจำลองเชิงปริมาณสำหรับการประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมจากการขนส่งของเสีย โดยเฉพาะการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและการใช้เชื้อเพลิง

1.2.3 เพื่อพัฒนาและประยุกต์ใช้กรอบการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์สำหรับการประเมินและจัดอันดับผู้ประกอบการจัดการของเสียจากการก่อสร้างอย่างเป็นระบบ โปร่งใส และตรวจสอบได้

1.2.4 เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจบนเว็บที่สามารถบูรณาการโครงสร้างเกณฑ์ แบบจำลองสิ่งแวดล้อม และวิธีการตัดสินใจไว้ในระบบเดียว เพื่อรองรับการใช้งานจริง

1.3 ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้กำหนดขอบเขตของการศึกษาเพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ในการพัฒนาและประยุกต์ใช้ระบบสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับการคัดเลือกผู้ประกอบการจัดการของเสียจากการก่อสร้าง โดยขอบเขตของการศึกษาถูกกำหนดในหลายมิติ ได้แก่ ด้านเนื้อหา ด้านพื้นที่และบริบทของการศึกษา ด้านวิธีการ และด้านระบบ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

ในด้านเนื้อหา งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการประเมินและคัดเลือกผู้ประกอบการจัดการของเสียจากการก่อสร้าง โดยพิจารณาของเสียในกลุ่มวัสดุก่อสร้าง (building material waste) ที่เกิดจากโครงการก่อสร้างอาคาร โดยเฉพาะของเสียที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่หรือรีไซเคิลได้ เช่น ของเสียประเภทคอนกรีต ทั้งนี้ การประเมินดำเนินการภายใต้เกณฑ์ที่ครอบคลุม 4 มิติหลัก ได้แก่

ด้านเศรษฐกิจ ด้านสิ่งแวดล้อม ด้านสังคม และด้านเทคนิค เพื่อให้การตัดสินใจมีความรอบด้านและสอดคล้องกับแนวคิดการพัฒนาอย่างยั่งยืน

ในด้านพื้นที่และบริบทของการศึกษา งานวิจัยมุ่งเน้นบริบทของอุตสาหกรรมก่อสร้างในประเทศไทย โดยเฉพาะพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล รวมถึงพื้นที่ใกล้เคียงของโครงการก่อสร้าง ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีการพัฒนาโครงการก่อสร้างอย่างต่อเนื่องและมีปริมาณของเสียจากการก่อสร้างในระดับสูง การศึกษาอาศัยข้อมูลและความคิดเห็นจากผู้เชี่ยวชาญและผู้มีส่วนได้ส่วนเสียในอุตสาหกรรมก่อสร้างไทย ซึ่งครอบคลุมทั้งกลุ่มผู้ออกแบบ ผู้พัฒนาโครงการ ผู้รับเหมา ผู้ผลิตวัสดุก่อสร้าง และผู้ประกอบการจัดการของเสีย เพื่อให้ได้ข้อมูลที่สะท้อนบริบทการใช้งานจริงตลอดห่วงโซ่อุตสาหกรรม

ในด้านวิธีการงานวิจัยประยุกต์ใช้แนวคิดการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ (MCDA) เพื่อใช้ในการประเมินและจัดอันดับผู้ประกอบการจัดการของเสีย โดยมุ่งเน้นการบูรณาการเครื่องมือที่สามารถสะท้อนความสำคัญของเกณฑ์และความใกล้เคียงกับทางเลือกที่เหมาะสมที่สุด ทั้งนี้รายละเอียดของกระบวนการ วิธีการ และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยจะนำเสนอในบทที่ 3

ในด้านสิ่งแวดล้อม งานวิจัยกำหนดขอบเขตการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมให้อยู่ในระดับที่สามารถวัดเชิงปริมาณได้ โดยมุ่งเน้นผลกระทบจากกิจกรรมการขนส่งของเสียจากการก่อสร้างเป็นหลัก โดยใช้ตัวชี้วัด ได้แก่ ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และปริมาณการใช้เชื้อเพลิง ซึ่งนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการประเมินและเปรียบเทียบทางเลือกของผู้ประกอบการจัดการของเสีย

ของเสียประเภทคอนกรีตในงานวิจัยนี้ครอบคลุมทั้งของเสียที่เกิดจากงานโครงสร้าง (Structural Concrete Waste) เช่น เสา คาน พื้น ฐานราก และงานรื้อถอนโครงสร้าง รวมถึงของเสียที่ไม่ใช่องค์ประกอบโครงสร้าง (Non-Structural Concrete Waste) เช่น ผนังคอนกรีต ทางเดิน แผ่นพื้นสำเร็จรูป และวัสดุคอนกรีตส่วนเกินจากกิจกรรมการก่อสร้างและการปรับปรุงอาคาร

1.4 ข้อกำหนดเบื้องต้น

งานวิจัยนี้ได้กำหนดข้อตกลงเบื้องต้น เพื่อใช้เป็นกรอบในการควบคุมขอบเขตและความสม่ำเสมอของการวิเคราะห์ ตลอดจนเพื่อให้การพัฒนาแบบจำลองและระบบสนับสนุนการตัดสินใจเป็นไปอย่างมีทิศทางที่ชัดเจนและสอดคล้องกัน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ระยะทางในการขนส่งของเสียจากการก่อสร้างกำหนดโดยอ้างอิงจากระบบแผนที่ดิจิทัล และใช้เป็นค่าตัวแทนของระยะทางจริงในการคำนวณผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม

2. การประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกใช้ค่าปัจจัยการปล่อย (Emission Factor) ตามค่ามาตรฐานที่เป็นที่ยอมรับในระดับสากลหรือระดับประเทศ เพื่อให้ผลการคำนวณมีความน่าเชื่อถือและสามารถนำไปเปรียบเทียบได้
3. ค่าน้ำหนักของเกณฑ์การตัดสินใจที่ได้จากกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ความคลุมเครือ Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) กำหนดให้เป็นค่านำหนักเริ่มต้น (Default Weights) ของระบบ โดยถือว่าสามารถสะท้อนระดับความสำคัญของเกณฑ์ตามดุลยพินิจของผู้เชี่ยวชาญได้อย่างเหมาะสม
4. การประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมจำกัดขอบเขตเฉพาะกิจกรรมการขนส่งของเสียจากการก่อสร้าง (Transportation Stage) โดยพิจารณาตัวชี้วัดเชิงปริมาณ ได้แก่ ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และปริมาณการใช้เชื้อเพลิง
5. แบบจำลองการตัดสินใจและระบบสนับสนุนการตัดสินใจที่พัฒนาขึ้นมุ่งเน้นการใช้งานในระดับโครงการ (Project-level) และไม่ครอบคลุมการวิเคราะห์ในระดับนโยบายหรือระดับมหภาค

1.5 สมมติฐาน

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงพัฒนาแบบจำลองและระบบ (Model and System Development Research) โดยมุ่งเน้นการออกแบบและพัฒนาเครื่องมือสนับสนุนการตัดสินใจที่สามารถนำไปใช้งานได้จริงในบริบทของอุตสาหกรรมก่อสร้าง เนื่องจากลักษณะของงานวิจัยเป็นการพัฒนาเครื่องมือเชิงประยุกต์ จึงไม่ได้กำหนดสมมติฐานเชิงสถิติในรูปแบบดั้งเดิม (Statistical Hypothesis Testing) แต่ใช้แนวทางการประเมินผลแบบองค์รวม (Comprehensive Evaluation) ซึ่งประกอบด้วย

1. การตรวจสอบความถูกต้องของโครงสร้างแบบจำลอง (Model Validity)
2. การประเมินความสมเหตุสมผลของผลลัพธ์ (Result Plausibility)
3. การประเมินความสามารถในการใช้งานของระบบ (System Usability)
4. การประเมินประสิทธิภาพของระบบ (Performance Test)

ทั้งนี้ การประเมินดังกล่าวอาศัยความคิดเห็นจากผู้เชี่ยวชาญและผู้มีส่วนได้ส่วนเสียเพื่อยืนยันความเหมาะสมของระบบในบริบทการใช้งานจริง

1.6 นิยามศัพท์เฉพาะ

กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ความคลุมเครือแบบฟัซซี (Fuzzy Analytic Hierarchy Process; FAHP) คือ กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ความคลุมเครือที่ใช้ใน การกำหนดค่าน้ำหนักของเกณฑ์การตัดสินใจ โดยอาศัยการเปรียบเทียบแบบคู่ (pairwise comparison) ภายใต้ความไม่แน่นอนของข้อมูลจากผู้เชี่ยวชาญ

การกระจายหน้าที่ทางคุณภาพ (Quality Function Deployment; QFD) คือ เครื่องมือในการแปลงความต้องการของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย (Customer Requirements: CRs) ไปเป็นลักษณะเชิงเทคนิค (Technical Characteristics: TCs) เพื่อใช้ในการออกแบบและพัฒนาระบบให้สอดคล้องกับความต้องการของผู้ใช้งาน

การจัดอันดับ (Ranking) คือ กระบวนการเรียงลำดับความเหมาะสมของทางเลือก โดยพิจารณาจากค่าความใกล้เคียงกับทางเลือกที่ดีที่สุดตามวิธี TOPSIS

การตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ (Multi-Criteria Decision Analysis; MCDA) คือ แนวทางการตัดสินใจที่ใช้เกณฑ์หลายด้านในการประเมินและเปรียบเทียบทางเลือก เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุด

ของเสียจากการก่อสร้าง (Construction Waste) คือ วัสดุหรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการขนส่งจากสถานที่ก่อสร้างหรือใช้ที่อื่นนอกเหนือจากวัตถุประสงค์เฉพาะของโครงการ เนื่องจากความเสียหาย ส่วนเกินหรือไม่ได้ใช้ หรือไม่สามารถใช้ได้ และจากการไม่ปฏิบัติตามข้อกำหนดหรือเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการก่อสร้าง

ความต้องการของลูกค้า (Customer Requirements; CRs) คือ ความต้องการหรือความคาดหวังของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียที่เกี่ยวข้องกับการจัดการของเสียจากการก่อสร้าง ซึ่งถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลตั้งต้นในการพัฒนาเกณฑ์การตัดสินใจ

ความเที่ยงตรงของผลลัพธ์ (Result Validity) คือ ความเหมาะสมของผลลัพธ์จากระบบสนับสนุนการตัดสินใจสอดคล้องกับดุลยพินิจของผู้เชี่ยวชาญ และสามารถนำไปใช้ประกอบการตัดสินใจได้ในบริบทจริง

ค่าน้ำหนักของเกณฑ์ (Criteria Weights) คือ ค่าน้ำหนักของเกณฑ์ ที่แสดงถึงระดับความสำคัญของแต่ละเกณฑ์ในการตัดสินใจ ซึ่งได้มาจากกระบวนการวิเคราะห์ด้วย FAHP

คุณลักษณะทางเทคนิค (Technical Characteristics; TCs) คือ ตัวแปรหรือคุณลักษณะเชิงเทคนิคของระบบที่ถูกกำหนดขึ้นเพื่อตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้ และใช้ในการสร้างแบบจำลองการตัดสินใจ

ทางเลือก (Alternatives) คือ สิ่งที่ผู้ประกอบการจัดการของเสียจากการก่อสร้าง ที่ถูกนำมาเปรียบเทียบและจัดอันดับภายใต้ระบบสนับสนุนการตัดสินใจ

เทคนิคการจัดลำดับความชอบโดยอิงความคล้ายคลึงกับคำตอบอุดมคติ (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution; TOPSIS) คือ วิธีการจัดอันดับทางเลือกโดยพิจารณาความใกล้เคียงกับทางเลือกที่ดีที่สุด (ideal solution) และความห่างจากทางเลือกที่แย่ที่สุด (negative ideal solution)

ระบบสนับสนุนการตัดสินใจ (Decision Support System) คือ เป็นซอฟต์แวร์หรือตัวโปรแกรมที่ช่วยในการตัดสินใจเกี่ยวกับการบริหารจัดการ การรวบรวมข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูล และการสร้างตัวแบบที่ซับซ้อนภายใต้ซอฟต์แวร์เดียวกัน เพื่อแก้ปัญหาที่มีความยุ่งยากซับซ้อน

ระบบสนับสนุนการตัดสินใจEcoRanker (EcoRanker DSS) คือ ระบบสนับสนุนการตัดสินใจในรูปแบบเว็บแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ เพื่อใช้ในการประเมินและจัดอันดับผู้ประกอบการจัดการของเสียจากการก่อสร้าง โดยอาศัยแนวคิดการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์

เศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) คือ ระบบเศรษฐกิจหมุนเวียนหมายถึงระบบที่มีการนำทรัพยากรต่างๆ มาใช้ซ้ำหรือใช้ให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น และขยะจะถูกแปรเปลี่ยนเป็นทรัพยากรสำหรับการผลิตเพิ่มเติมและนำกลับมาใช้ใหม่

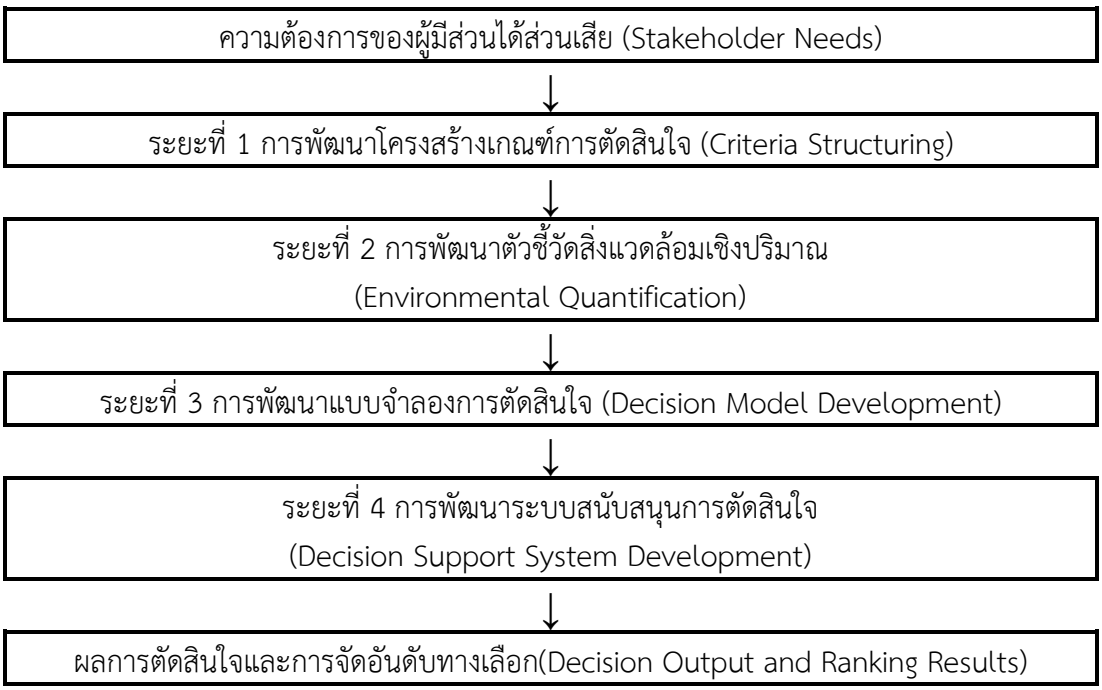
อุตสาหกรรมก่อสร้าง (Construction Industry) คือ สาขาการผลิตและการค้า การก่อสร้างอาคาร การบำรุงรักษา และการซ่อมแซมโครงสร้าง ซึ่งรวมถึงการขุดเจาะและการสำรวจแร่ที่เป็นของแข็ง

อุตสาหกรรมการก่อสร้างอาคาร (Building Industry) คือ ภาคเศรษฐกิจ ที่ประกอบด้วยทุกบริษัทที่เกี่ยวข้องในการก่อสร้าง

1.7 กรอบแนวคิดการวิจัย (Research Framework)

กรอบแนวคิดการวิจัยนี้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแสดงโครงสร้างและลำดับความสัมพันธ์ขององค์ประกอบหลักในงานวิจัย โดยมุ่งเน้นการบูรณาการองค์ความรู้ด้านเศรษฐกิจหมุนเวียน การจัดการของเสียจากการก่อสร้าง วิธีการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ และเทคโนโลยีระบบสนับสนุนการตัดสินใจบนเว็บเข้าไว้ด้วยกันอย่างเป็นระบบ ทั้งนี้ กรอบแนวคิดดังกล่าวถูกออกแบบให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์การวิจัยทั้งสี่ประการ และสะท้อนกระบวนการพัฒนางานวิจัยตั้งแต่การกำหนดเกณฑ์การประเมินไปจนถึงการนำไปสู่การประยุกต์ใช้งานจริงในรูปแบบระบบดิจิทัล โครงสร้างของกรอบแนวคิดการวิจัยสามารถแสดงลำดับกระบวนการพัฒนางานวิจัยตั้งแต่การระบุความต้องการของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย การพัฒนาโครงสร้างเกณฑ์การตัดสินใจ การพัฒนาตัวชี้วัด

ด้านสิ่งแวดล้อม การสร้างแบบจำลองการตัดสินใจ และการพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจ เพื่อนำไปสู่ผลลัพธ์การจัดอันดับทางเลือกอย่างเป็นระบบดังแสดงในภาพที่ 1.1 ดังนี้



ภาพที่ 1.1 กรอบแนวคิดการวิจัยของระบบ EcoRanker DSS

ระยะที่ 1 การพัฒนาโครงสร้างเกณฑ์การตัดสินใจ (Criteria Structuring)

ในระยะนี้ มุ่งเน้นการพัฒนาเกณฑ์การประเมินผู้ประกอบการจัดการของเสียจากการก่อสร้าง โดยอาศัยการระบุผู้มีส่วนได้ส่วนเสียที่เกี่ยวข้อง และการรวบรวมความต้องการที่สะท้อนมุมมองด้านเศรษฐกิจ สิ่งแวดล้อม สังคม และเทคนิค จากนั้นจึงทำการแปลงความต้องการดังกล่าวไปสู่เกณฑ์การประเมินที่มีโครงสร้างชัดเจน เป็นระบบ และสามารถนำไปใช้ในกระบวนการตัดสินใจได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวมีบทบาทสำคัญในการวางรากฐานของระบบการประเมิน และสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการวิจัยในการพัฒนาโครงสร้างเกณฑ์การตัดสินใจที่มีความเป็นระบบ

ระยะที่ 2 การพัฒนาตัวชี้วัดสิ่งแวดล้อมเชิงปริมาณ (Environmental Quantification)

ระยะนี้มุ่งเน้นการพัฒนาเกณฑ์ด้านสิ่งแวดล้อมให้อยู่ในรูปแบบเชิงปริมาณที่สามารถนำไปคำนวณและเปรียบเทียบได้อย่างเป็นระบบ โดยให้ความสำคัญกับตัวชี้วัดที่สะท้อนผลกระทบจากกิจกรรมการขนส่งของเสียจากการก่อสร้าง อาทิ การปล่อยก๊าซเรือนกระจกและการใช้พลังงาน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความยั่งยืนในภาคอุตสาหกรรมก่อสร้าง การพัฒนาตัวชี้วัดในลักษณะดังกล่าวช่วยให้สามารถบูรณาการมิติด้านสิ่งแวดล้อมเข้าสู่กระบวนการตัดสินใจได้อย่างเป็นรูปธรรม และสนับสนุนการประเมินทางเลือกบนพื้นฐานของข้อมูลเชิงปริมาณที่มีความชัดเจนและตรวจสอบได้ อันสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการวิจัยในการพัฒนาเกณฑ์ด้านสิ่งแวดล้อมเชิงปริมาณ

ระยะที่ 3 การพัฒนาแบบจำลองการตัดสินใจ (Decision Model Development)

ในระยะนี้ มุ่งเน้นการพัฒนาแบบจำลองการตัดสินใจที่สามารถบูรณาการเกณฑ์การประเมินหลายมิติร่วมกับค่าน้ำหนักของแต่ละเกณฑ์ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบและจัดอันดับทางเลือกอย่างเป็นระบบ แบบจำลองดังกล่าวถูกออกแบบให้มีความโปร่งใส สามารถตรวจสอบได้ และสะท้อนลักษณะความไม่แน่นอนในการตัดสินใจของผู้เชี่ยวชาญ ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการสนับสนุนการตัดสินใจที่มีเหตุผลและมีความน่าเชื่อถือ การพัฒนาแบบจำลองในลักษณะนี้ช่วยให้สามารถประเมินทางเลือกได้อย่างเป็นระบบภายใต้บริบทของหลายเกณฑ์พร้อมกัน และสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการวิจัยในการพัฒนาแบบจำลองการตัดสินใจสำหรับการจัดอันดับทางเลือก

ระยะที่ 4 การพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจ (Decision Support System Development)

ระยะสุดท้ายเป็นการบูรณาการองค์ประกอบทั้งหมดที่พัฒนาขึ้นเข้าสู่ระบบสนับสนุนการตัดสินใจในรูปแบบดิจิทัล โดยระบบถูกออกแบบให้สามารถรองรับการป้อนข้อมูลจากผู้ใช้งาน การประมวลผลข้อมูลตามแบบจำลองการตัดสินใจ และการแสดงผลลัพธ์ในรูปแบบที่เข้าใจง่ายและสามารถโต้ตอบได้ การพัฒนาระบบในลักษณะนี้มีบทบาทสำคัญในการเชื่อมโยงองค์ความรู้เชิงทฤษฎีไปสู่การประยุกต์ใช้งานจริงในภาคอุตสาหกรรม และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการตัดสินใจของผู้ใช้งานภายใต้บริบทของการจัดการของเสียจากการก่อสร้าง ซึ่งสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการวิจัยในการพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจที่สามารถนำไปใช้งานได้จริง

1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

งานวิจัยนี้คาดว่าจะก่อให้เกิดประโยชน์ในเชิงวิชาการ เชิงวิศวกรรมและการประยุกต์ใช้งาน ตลอดจนด้านสิ่งแวดล้อมและความยั่งยืน โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้

1.8.1 ด้านวิชาการ

งานวิจัยนี้มีส่วนช่วยในการพัฒนาองค์ความรู้ด้านการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ในบริบทของการจัดการของเสียจากการก่อสร้าง โดยนำเสนอกรอบแนวคิดและแบบจำลองการตัดสินใจแบบบูรณาการที่สามารถเชื่อมโยงความต้องการของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียเข้ากับเกณฑ์การประเมินเชิงระบบได้อย่างมีโครงสร้าง นอกจากนี้ ยังเป็นการขยายองค์ความรู้ด้านระบบสนับสนุนการตัดสินใจในรูปแบบดิจิทัล ซึ่งสามารถรองรับการวิเคราะห์ข้อมูลหลายมิติและช่วยให้การตัดสินใจมีความเป็นระบบ โปร่งใส และตรวจสอบได้มากยิ่งขึ้น

1.8.2 ด้านวิศวกรรมและการปฏิบัติ

ในเชิงวิศวกรรม งานวิจัยนี้นำไปสู่การพัฒนาเครื่องมือสนับสนุนการตัดสินใจที่สามารถใช้งานได้จริงในบริบทของอุตสาหกรรมก่อสร้าง โดยระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถรองรับการป้อนข้อมูล การประมวลผล และการแสดงผลลัพธ์ในรูปแบบที่เข้าใจง่าย ซึ่งช่วยให้ผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง เช่น ผู้ก่อสร้าง ผู้พัฒนาโครงการ และผู้บริหาร สามารถตัดสินใจเลือกผู้ประกอบการจัดการของเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ ลดความไม่แน่นอนในการตัดสินใจ และเพิ่มความเชื่อมั่นในผลลัพธ์ที่ได้

1.8.3 ด้านสิ่งแวดล้อมและความยั่งยืน

ในด้านสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้มีส่วนสนับสนุนการลดผลกระทบจากการจัดการของเสียจากการก่อสร้าง โดยเฉพาะการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและการใช้ทรัพยากรอย่างไม่มีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ยังส่งเสริมแนวทางการจัดการของเสียตามหลักเศรษฐกิจหมุนเวียน โดยสนับสนุนการเลือกแนวทางและผู้ประกอบการที่มีประสิทธิภาพเชิงสิ่งแวดล้อม ซึ่งนำไปสู่การใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าและการพัฒนาที่ยั่งยืนในระยะยาว

1.8.4 ด้านนโยบายและการขับเคลื่อนระดับประเทศ

งานวิจัยนี้มีศักยภาพในการสนับสนุนการกำหนดนโยบายและการตัดสินใจในระดับองค์กรและระดับประเทศ โดยเฉพาะการยกระดับระบบการจัดการของเสียจากการก่อสร้างให้สอดคล้องกับเป้าหมายของประเทศไทยในการมุ่งสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอน (Carbon Neutrality) และ

การปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero Emissions) กรอบแนวคิดและเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้เป็นแนวทางสำหรับหน่วยงานภาครัฐและองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นในการกำหนดเกณฑ์การคัดเลือกผู้ประกอบการที่มีความโปร่งใส เป็นระบบ และสอดคล้องกับหลักการพัฒนาที่ยั่งยืน

นอกจากนี้ ระบบ DSS ยังสามารถพัฒนาไปสู่กลไกสนับสนุนเชิงนโยบายเพื่อจูงใจให้ผู้ก่อให้เกิดของเสียจากการก่อสร้างเข้าสู่ระบบการจัดการของเสียอย่างยั่งยืน โดยข้อมูลและผลการประเมินจากระบบอาจถูกใช้เป็นส่วนหนึ่งของเกณฑ์การประเมินด้านสิ่งแวดล้อม การจัดซื้อจัดจ้างสีเขียว หรือการส่งเสริมผู้ประกอบการที่มีแนวปฏิบัติด้านเศรษฐกิจหมุนเวียนและการลดก๊าซเรือนกระจก

1.8.5 ด้านการบูรณาการหลักการสิ่งแวดล้อม สังคม และธรรมาภิบาล (ESG) และการบริหารจัดการคาร์บอน

งานวิจัยนี้ยังสนับสนุนการประยุกต์ใช้แนวคิดด้านสิ่งแวดล้อม สังคม และธรรมาภิบาล (Environmental, Social, and Governance: ESG) ในภาคอุตสาหกรรมก่อสร้าง โดยช่วยให้ผู้มีส่วนเกี่ยวข้องสามารถนำเกณฑ์ด้าน ESG ไปใช้ในการประเมินและคัดเลือกผู้ประกอบการได้อย่างเป็นรูปธรรม นอกจากนี้ ยังสามารถเชื่อมโยงกับแนวทางการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กรและผลิตภัณฑ์ตามกรอบขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) (TGO) ซึ่งช่วยยกระดับการตัดสินใจให้สะท้อนผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมในเชิงคาร์บอน และสอดคล้องกับแนวโน้มการพัฒนาองค์กรสู่ความยั่งยืนในระดับสากล

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 บริบทของของเสียก่อสร้าง (CDW Context)

อุตสาหกรรมก่อสร้างเป็นหนึ่งในกลไกสำคัญในการขับเคลื่อนการพัฒนาเศรษฐกิจและโครงสร้างพื้นฐานของประเทศ อย่างไรก็ตาม กิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการก่อสร้าง การปรับปรุง และการรื้อถอนอาคารก่อให้เกิดของเสียจากการก่อสร้างและการรื้อถอน (Construction and Demolition Waste: CDW) ในปริมาณสูง ซึ่งได้รับการยอมรับว่าเป็นหนึ่งในกระแสของเสียที่มีปริมาณมากที่สุดในระดับโลก โดยในหลายประเทศ CDW มีสัดส่วนสูงถึงประมาณร้อยละ 30–40 ของของเสียทั้งหมด [25] และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามการขยายตัวของเมืองและกิจกรรมทางเศรษฐกิจ [26]

การเพิ่มขึ้นของ CDW ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในหลายมิติ ทั้งการใช้พื้นที่ฝังกลบที่เพิ่มขึ้น การใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างสิ้นเปลือง และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกระบวนการจัดการของเสีย โดยเฉพาะในขั้นตอนการขนส่ง ซึ่งเป็นแหล่งสำคัญของการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์จากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล [27]

ในองค์ประกอบของ CDW วัสดุคอนกรีตถือเป็นสัดส่วนหลัก เนื่องจากเป็นวัสดุที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐาน เช่น อาคาร ถนน และสะพาน ส่งผลให้เกิดเศษคอนกรีตในทุกช่วงของวงจรโครงการ ตั้งแต่การก่อสร้าง การปรับปรุง ไปจนถึงการรื้อถอน [28] อย่างไรก็ตาม ของเสียคอนกรีตมีศักยภาพสูงในการนำกลับมาใช้ใหม่หรือแปรรูปเป็นวัสดุทดแทน เช่น มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (Recycled Concrete Aggregate: RCA) ซึ่งสามารถช่วยลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติและลดปริมาณของเสียที่ต้องนำไปกำจัดได้อย่างมีนัยสำคัญ [29]

แม้ว่าจะมีทางเลือกในการจัดการ CDW ที่หลากหลาย เช่น การนำกลับมาใช้ใหม่ (Reuse) การรีไซเคิล (Recycle) และการฝังกลบ (Landfill) แต่การตัดสินใจเลือกแนวทางที่เหมาะสมในทางปฏิบัติยังคงมีความซับซ้อน เนื่องจากต้องพิจารณาปัจจัยหลายมิติร่วมกัน ได้แก่ ต้นทุนการดำเนินงาน ระยะทางขนส่งและโลจิสติกส์ ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม การยอมรับของสังคม และความเป็นไปได้ทางเทคนิค ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มักมีความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนและอาจขัดแย้งกัน ทำให้การตัดสินใจไม่สามารถอาศัยเกณฑ์เพียงด้านเดียวได้ [30]

ในบริบทของประเทศไทย การจัดการ CDW ยังเผชิญกับข้อจำกัดหลายประการ เช่น การขาดระบบข้อมูลที่เป็นมาตรฐาน การบังคับใช้กฎหมายที่ยังไม่ครอบคลุม และการขาดเครื่องมือสนับสนุนการตัดสินใจที่สามารถบูรณาการข้อมูลหลายมิติได้อย่างเป็นระบบ ส่งผลให้การตัดสินใจในระดับโครงการก่อสร้างมักอาศัยประสบการณ์หรือการพิจารณาเชิงเดี่ยว มากกว่าการวิเคราะห์เชิงระบบที่สามารถสะท้อนมิติของความยั่งยืนได้อย่างครบถ้วน [31]

นอกจากนี้ จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า งานวิจัยส่วนใหญ่ให้ความสำคัญกับการเลือกวิธีการจัดการของเสีย เช่น การเปรียบเทียบระหว่างการรีไซเคิลและการฝังกลบ ขณะที่ประเด็น การเลือกผู้ประกอบการจัดการของเสีย (Waste Operator Selection) ซึ่งเป็นสถานการณ์ที่เกิดขึ้นจริงในระดับโครงการก่อสร้าง กลับได้รับความสนใจค่อนข้างจำกัด ทั้งที่ผู้ประกอบการแต่ละรายอาจมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในด้านต้นทุน ประสิทธิภาพด้านสิ่งแวดล้อม เทคโนโลยี และศักยภาพในการให้บริการ

ดังนั้น เพื่อยกระดับประสิทธิภาพและความยั่งยืนของการจัดการของเสียจากการก่อสร้าง โดยเฉพาะของเสียคอนกรีต จึงมีความจำเป็นในการพัฒนาแนวทางและเครื่องมือที่สามารถสนับสนุนการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ และสามารถบูรณาการข้อมูลที่เกี่ยวข้องในหลายมิติได้อย่างเป็นระบบ ซึ่งนำไปสู่การพิจารณาแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียนในหัวข้อถัดไป ในฐานะกรอบแนวคิดสำคัญสำหรับการจัดการทรัพยากรและของเสียอย่างยั่งยืน

2.1.2 เศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy)

แนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy : CE) ได้รับการพัฒนาและยอมรับอย่างกว้างขวางในฐานะกรอบแนวคิดสำคัญในการจัดการทรัพยากรและของเสียอย่างยั่งยืน โดยมีเป้าหมายในการลดการใช้ทรัพยากรใหม่ ลดการเกิดของเสีย และเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้ทรัพยากรผ่านการหมุนเวียนวัสดุในระบบเศรษฐกิจให้ยาวนานที่สุด [32]

หลักการสำคัญของเศรษฐกิจหมุนเวียนประกอบด้วยการออกแบบเพื่อลดของเสียตั้งแต่ต้นทาง การรักษามูลค่าของวัสดุและผลิตภัณฑ์ให้อยู่ในระบบ และการฟื้นฟูระบบธรรมชาติ ซึ่งแตกต่างจากแนวคิดเศรษฐกิจเชิงเส้น (Linear Economy) ที่ให้ความสำคัญกับรูปแบบ การนำทรัพยากรมาใช้ การผลิต และการทิ้ง ซึ่งก่อให้เกิดการใช้ทรัพยากรอย่างสิ้นเปลืองและการสะสมของของเสียในสิ่งแวดล้อม [33]

ในบริบทของอุตสาหกรรมก่อสร้าง แนวคิด CE มีบทบาทสำคัญในการส่งเสริมการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะการจัดการของเสียจากการก่อสร้างและการรื้อถอน ซึ่งสามารถนำวัสดุกลับมาใช้ใหม่ รีไซเคิล หรือแปรรูปเป็นวัสดุทดแทน เช่น มวลรวมคอนกรีตรีไซเคิล (Recycled Concrete Aggregate: RCA) เพื่อนำกลับมาใช้ในงานก่อสร้างใหม่ การดำเนินการดังกล่าว

ไม่เพียงช่วยลดปริมาณของเสียที่ต้องนำไปฝังกลบ แต่ยังช่วยลดความต้องการใช้ทรัพยากรธรรมชาติและลดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมในภาพรวม [34]

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าแนวคิด CE จะได้รับการสนับสนุนในเชิงนโยบายและเชิงวิชาการอย่างกว้างขวาง แต่การนำไปประยุกต์ใช้ในระดับปฏิบัติยังคงเผชิญกับความท้าทายหลายประการ โดยเฉพาะในภาคก่อสร้าง ซึ่งมีความซับซ้อนของห่วงโซ่อุปทาน ผู้มีส่วนได้ส่วนเสียหลายฝ่าย และข้อจำกัดด้านข้อมูลที่จำเป็นต่อการตัดสินใจ ส่งผลให้การเลือกแนวทางการจัดการของเสียหรือการเลือกผู้ประกอบการที่สอดคล้องกับหลักการ CE ยังไม่สามารถดำเนินการได้อย่างมีประสิทธิภาพในหลายกรณี [35-37]

นอกจากนี้ การดำเนินการตามหลัก เศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy: CE) จำเป็นต้องอาศัยกระบวนการตัดสินใจที่สามารถพิจารณาปัจจัยหลายมิติร่วมกัน ทั้งในด้าน เศรษฐกิจ สิ่งแวดล้อม สังคม และเทคนิค เนื่องจากแต่ละมิติล้วนมีบทบาทสำคัญต่อประสิทธิภาพและความยั่งยืนของระบบการจัดการทรัพยากรและของเสีย โดยปัจจัยเหล่านี้มักมีความสัมพันธ์เชิงซ้อนและอาจเกิดความขัดแย้งระหว่างกันในกระบวนการตัดสินใจ ทำให้ไม่สามารถใช้วิธีการตัดสินใจเชิงเดี่ยวได้อย่างเหมาะสม [38, 39]

ดังนั้น การขับเคลื่อนแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียนในภาคก่อสร้าง โดยเฉพาะในบริบทของการจัดการ CDW จึงจำเป็นต้องอาศัยเครื่องมือสนับสนุนการตัดสินใจที่สามารถบูรณาการข้อมูลหลายมิติและช่วยให้ผู้มีส่วนได้ส่วนเสียสามารถประเมินและเปรียบเทียบทางเลือกต่าง ๆ ได้อย่างเป็นระบบ โปร่งใส และตรวจสอบได้ ซึ่งนำไปสู่ความจำเป็นในการประยุกต์ใช้เทคนิคการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ เพื่อรองรับความซับซ้อนดังกล่าวในกระบวนการตัดสินใจ

2.1.3 มิติความยั่งยืนและเกณฑ์การตัดสินใจ

การตัดสินใจด้านการจัดการของเสียจากการก่อสร้างเป็นประเด็นที่มีความซับซ้อน เนื่องจากเกี่ยวข้องกับปัจจัยหลายด้านที่มีความสัมพันธ์กันและอาจขัดแย้งกันในทางปฏิบัติ ไม่ว่าจะเป็นต้นทุนในการดำเนินงาน ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การยอมรับของสังคม และความเป็นไปได้เชิงเทคนิค ด้วยเหตุนี้ แนวคิดความยั่งยืนจึงถูกนำมาใช้เป็นกรอบพื้นฐานในการกำหนดเกณฑ์การตัดสินใจ เพื่อให้การประเมินทางเลือกสามารถสะท้อนความเหมาะสมได้อย่างรอบด้านและสมดุลมากขึ้น [40]

โดยทั่วไป งานวิจัยด้าน การจัดการของเสียและการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ มักอ้างอิงมิติความยั่งยืนหลัก 4 ด้าน ได้แก่ มิติเศรษฐกิจ มิติสิ่งแวดล้อม มิติสังคม และมิติเทคนิค ซึ่งร่วมกันสะท้อน ความเหมาะสมของทางเลือกในภาพรวม การใช้กรอบการประเมินดังกล่าวช่วยให้การวิเคราะห์ ไม่จำกัดอยู่เพียงมิติใดมิติหนึ่ง แต่สามารถพิจารณา การแลกเปลี่ยนระหว่างข้อดีและ

ข้อจำกัดของปัจจัยต่าง ๆ ได้อย่างเป็นระบบ และสอดคล้องกับ แนวคิดการพัฒนาอย่างยั่งยืนที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลาย [41]

ในมิติเศรษฐกิจ เกณฑ์ที่มักถูกนำมาใช้ในการประเมินเกี่ยวข้องกับต้นทุนการดำเนินงาน ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ และค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องกับการขนส่งและการจัดการของเสีย ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการตัดสินใจในระดับโครงการ โดยเฉพาะในบริบทที่ผู้ตัดสินใจต้องเลือกทางเลือกที่สามารถดำเนินการได้จริงภายใต้ข้อจำกัดด้านงบประมาณ

ในมิติสิ่งแวดล้อม การประเมินมักมุ่งเน้นผลกระทบที่เกิดจากการจัดการของเสีย เช่น การปล่อยก๊าซเรือนกระจก การใช้พลังงาน การใช้ทรัพยากรธรรมชาติ และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในภาพรวม โดยมิตินี้มีความสำคัญอย่างยิ่งในบริบทของการจัดการของเสียจากการก่อสร้าง เนื่องจากเกี่ยวข้องโดยตรงกับเป้าหมายด้านการลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมและการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ

สำหรับมิติสังคม เกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินมักเกี่ยวข้องกับการยอมรับของสาธารณะ ความปลอดภัย สุขภาพของชุมชน และผลกระทบต่อผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย ซึ่งสะท้อนถึงความชอบธรรมและความเหมาะสมของทางเลือกในเชิงสังคม แม้ว่าปัจจัยเหล่านี้อาจวัดได้ยากกว่าปัจจัยทางเศรษฐกิจหรือเทคนิค แต่ก็เป็นองค์ประกอบสำคัญของการตัดสินใจอย่างยั่งยืน

ส่วนในมิติเทคนิค เกณฑ์ที่ใช้มักครอบคลุมความพร้อมของเทคโนโลยี ประสิทธิภาพของกระบวนการ คุณภาพของผลลัพธ์ และความเป็นไปได้ในการนำทางเลือกนั้นไปใช้จริง ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อความสำเร็จของการดำเนินงานในทางปฏิบัติ โดยเฉพาะในกรณีที่ผู้ประกอบการแต่ละรายมีศักยภาพและข้อจำกัดทางเทคนิคแตกต่างกัน

แม้ว่างานวิจัยที่ผ่านมาได้นำกรอบความยั่งยืนทั้ง 4 มิติมาใช้ในการกำหนดเกณฑ์การตัดสินใจอย่างแพร่หลาย แต่การเลือกเกณฑ์และตัวชี้วัดในแต่ละมิติมักขึ้นอยู่กับมุมมองของผู้วิจัยหรือผู้เชี่ยวชาญเป็นหลัก และอาจยังไม่สะท้อนบริบทการใช้งานจริงหรือความต้องการของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียอย่างเป็นระบบ นอกจากนี้ ตัวชี้วัดในบางมิติ โดยเฉพาะด้านสิ่งแวดล้อมและสังคม มักถูกกำหนดในลักษณะเชิงคุณภาพหรือเป็นดัชนีรวม ซึ่งอาจมีข้อจำกัดเมื่อต้องนำไปประยุกต์ใช้ในระบบที่ต้องการการคำนวณเชิงปริมาณและการเปรียบเทียบทางเลือกอย่างโปร่งใส [42]

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ กรอบความยั่งยืนที่ประกอบด้วยมิติเศรษฐกิจ สิ่งแวดล้อม สังคม และเทคนิค จึงถูกนำมาใช้เป็นโครงสร้างพื้นฐานในการกำหนดเกณฑ์การตัดสินใจสำหรับการเลือกผู้ประกอบการจัดการของเสียจากการก่อสร้าง เพื่อให้การประเมินทางเลือกสามารถสะท้อนทั้งความเหมาะสมเชิงเศรษฐกิจ ประสิทธิภาพเชิงสิ่งแวดล้อม การยอมรับทางสังคม และความเป็นไปได้เชิงเทคนิคได้อย่างสมดุล และเป็นระบบ อันเป็นพื้นฐานสำคัญสำหรับการพัฒนาเกณฑ์และแบบจำลองการตัดสินใจในหัวข้อถัดไป

2.1.4 ทฤษฎีผู้มีส่วนได้ส่วนเสียและการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ (QFD)

การตัดสินใจในบริบทของการจัดการของเสียจากการก่อสร้างไม่ได้เป็นเพียงกระบวนการเชิงเทคนิค แต่เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับผู้มีส่วนได้ส่วนเสียหลายฝ่าย ซึ่งแต่ละฝ่ายมีบทบาท ความคาดหวัง และผลประโยชน์ที่แตกต่างกัน แนวคิดทฤษฎีผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย (Stakeholder Theory) จึงถูกนำมาใช้เป็นกรอบในการทำความเข้าใจและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มผู้มีส่วนได้ส่วนเสียกับกระบวนการตัดสินใจ โดยเน้นว่าการตัดสินใจที่มีประสิทธิภาพควรคำนึงถึงความต้องการและผลกระทบต่อผู้มีส่วนได้ส่วนเสียทุกกลุ่มอย่างสมดุล [43]

ในบริบทของการจัดการของเสียจากการก่อสร้าง ผู้มีส่วนได้ส่วนเสียหลักประกอบด้วย ผู้ก่อกำเนิดของเสีย (Waste Generators) ผู้ประกอบการจัดการของเสีย (Waste Operators) หน่วยงานภาครัฐ ผู้เชี่ยวชาญด้านสิ่งแวดล้อม และชุมชนที่ได้รับผลกระทบ ซึ่งแต่ละกลุ่มมีมุมมองต่อความเหมาะสมของทางเลือกที่แตกต่างกัน เช่น ผู้ก่อกำเนิดของเสียอาจให้ความสำคัญกับต้นทุนและความสะดวกในการดำเนินงาน ขณะที่หน่วยงานภาครัฐและผู้เชี่ยวชาญด้านสิ่งแวดล้อมอาจให้ความสำคัญกับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและความสอดคล้องกับข้อกำหนดทางกฎหมาย ในขณะที่ชุมชนให้ความสำคัญกับความปลอดภัยและคุณภาพชีวิต [44]

อย่างไรก็ตาม ความต้องการของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียมักอยู่ในรูปของข้อมูลเชิงคุณภาพ เช่น ความคาดหวัง ความพึงพอใจ หรือการรับรู้ ซึ่งยากต่อการนำไปใช้โดยตรงในกระบวนการตัดสินใจเชิงปริมาณ โดยเฉพาะในระบบที่ต้องการเปรียบเทียบทางเลือกอย่างเป็นระบบและโปร่งใส ดังนั้น การแปลงความต้องการเชิงคุณภาพเหล่านี้ให้เป็นข้อมูลเชิงโครงสร้างหรือเกณฑ์การตัดสินใจที่สามารถนำไปวิเคราะห์ได้ จึงเป็นขั้นตอนสำคัญในการพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจ (DSS)

กระบวนการแปลงความต้องการเชิงคุณภาพ(QFD)โดยทั่วไปประกอบด้วยการรวบรวมข้อมูลจากผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย การจัดกลุ่มและสังเคราะห์ความต้องการ การกำหนดตัวชี้วัดที่สามารถสะท้อนความต้องการเหล่านั้น และการจัดลำดับความสำคัญของความต้องการในเชิงเปรียบเทียบ ขั้นตอนดังกล่าวช่วยให้สามารถลดความคลุมเครือของข้อมูลเชิงคุณภาพ และทำให้สามารถนำไปใช้ในกระบวนการตัดสินใจเชิงวิเคราะห์ได้อย่างเป็นระบบ [45]

นอกจากนี้ งานวิจัยในด้านการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ยังชี้ให้เห็นว่าการกำหนดเกณฑ์การตัดสินใจที่มีประสิทธิภาพควรสะท้อนทั้งมิติของข้อมูลเชิงปริมาณ (Quantitative Data) และข้อมูลเชิงคุณภาพ (Qualitative Judgments) เพื่อให้การประเมินทางเลือกมีความครอบคลุมและสอดคล้องกับบริบทจริงมากยิ่งขึ้น [46] การบูรณาการข้อมูลทั้งสองลักษณะจึงเป็นความท้าทายสำคัญในการออกแบบระบบตัดสินใจที่สามารถรองรับความซับซ้อนของปัญหาในโลกจริงได้

ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงเลือกใช้ QFD เป็นเครื่องมือหลักในการออกแบบโครงสร้างเกณฑ์การประเมินของระบบ DSS เพื่อให้สามารถสะท้อนความต้องการของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย

ได้อย่างเป็นระบบ และทำหน้าที่เป็นรากฐานสำคัญในการเชื่อมโยงไปสู่การประเมินเชิงปริมาณและการจัดลำดับทางเลือกในขั้นตอนของวิธีการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ในลำดับถัดไป

2.1.5 กรอบการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ (Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) Framework)

จากการอภิปรายในหัวข้อก่อนหน้า การตัดสินใจด้านการจัดการของเสียจากการก่อสร้างจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยหลายมิติที่มีลักษณะทั้งเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ รวมถึงความต้องการของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียที่มีความหลากหลายและอาจขัดแย้งกันในทางปฏิบัติ ด้วยเหตุนี้ แนวคิดการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ (MCDA) จึงถูกนำมาใช้เป็นกรอบแนวคิดสำคัญในการสนับสนุนการตัดสินใจในบริบทที่มีความซับซ้อนดังกล่าว

MCDA เป็นกลุ่มของวิธีการเชิงวิเคราะห์ที่ถูกพัฒนาเพื่อช่วยในการประเมินและจัดลำดับทางเลือกภายใต้เกณฑ์หลายด้าน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสนับสนุนผู้ตัดสินใจในการเลือกทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดตามเป้าหมายที่กำหนด โดยคำนึงถึงข้อดีข้อเสีย ระหว่างเกณฑ์ที่อาจขัดแย้งกัน [47] แนวคิดดังกล่าวได้รับการประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในงานวิจัยด้านสิ่งแวดล้อม วิศวกรรม และการจัดการของเสีย เนื่องจากสามารถรองรับปัญหาที่มีโครงสร้างซับซ้อนและมีเกณฑ์การตัดสินใจหลายมิติได้อย่างมีประสิทธิภาพ [48 - 50]

โดยทั่วไป กระบวนการของ MCDA ประกอบด้วยขั้นตอนสำคัญ ได้แก่

1) การกำหนดปัญหาและทางเลือก (Problem and Alternatives Definition)

2) การกำหนดเกณฑ์การตัดสินใจ (Criteria Selection)

3) การกำหนดค่าน้ำหนักของเกณฑ์ (Criteria Weighting)

4) การประเมินค่าทางเลือกตามเกณฑ์ (Performance Evaluation)

5) การวิเคราะห์และจัดลำดับทางเลือก (Ranking and Selection) ซึ่งช่วยให้กระบวนการตัดสินใจมีความเป็นระบบ โปร่งใส และสามารถตรวจสอบได้ [51]

ในบริบทของการจัดการของเสียจากการก่อสร้าง MCDA ถูกนำมาใช้เพื่อประเมินและเปรียบเทียบทางเลือกต่าง ๆ เช่น วิธีการจัดการของเสียหรือผู้ประกอบการจัดการของเสีย โดยอาศัยเกณฑ์ที่ครอบคลุมมิติด้านเศรษฐกิจ สิ่งแวดล้อม สังคม และเทคนิค ซึ่งสอดคล้องกับกรอบความยั่งยืนที่กล่าวถึงในหัวข้อก่อนหน้า การประยุกต์ใช้ MCDA ช่วยให้สามารถรวมข้อมูลที่มีลักษณะแตกต่างกัน เช่น ข้อมูลเชิงปริมาณ (ต้นทุน ระยะทาง ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก) และข้อมูลเชิงคุณภาพ (ความพึงพอใจของผู้ใช้ การยอมรับของสังคม) เข้าไว้ในกระบวนการตัดสินใจเดียวกันได้

ในบรรดาวิธีการ MCDA ที่ได้รับความนิยมคือกระบวนการจัดลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (AHP) และกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ความคลุมเครือ (FAHP) มักถูกใช้ในการกำหนดค่าน้ำหนัก

ของเกณฑ์ เนื่องจากสามารถสะท้อนการตัดสินใจของผู้เชี่ยวชาญและจัดการกับความไม่แน่นอนของข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ [52] ขณะที่เทคนิค TOPSIS ถูกนำมาใช้ในการจัดลำดับทางเลือก โดยพิจารณาระยะห่างของแต่ละทางเลือกจากทางเลือกที่ดีที่สุดและแย่ที่สุดในเชิงอุดมคติ ซึ่งช่วยให้สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพของทางเลือกได้อย่างชัดเจน [53]

อย่างไรก็ตาม แม้ว่า MCDA จะมีความสามารถในการสนับสนุนการตัดสินใจที่มีความซับซ้อน แต่การนำไปใช้งานในทางปฏิบัติยังคงเผชิญกับข้อจำกัด เช่น ความยากในการรวบรวมข้อมูล การกำหนดค่าน้ำหนักที่อาจมีความลำเอียง และการขาดระบบที่สามารถรวมกระบวนการทั้งหมดไว้ในแพลตฟอร์มเดียว [54] นอกจากนี้ การเชื่อมโยงระหว่าง โครงสร้างเกณฑ์การตัดสินใจ และกระบวนการประเมินและจัดลำดับยังมักถูกดำเนินการแยกส่วนในงานวิจัยที่ผ่านมา

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ MCDA จึงถูกนำมาใช้เป็นกรอบหลักในการพัฒนาแบบจำลองการตัดสินใจ โดยบูรณาการร่วมกับกระบวนการกำหนดเกณฑ์จากผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย และการพัฒนาเครื่องมือในรูปแบบระบบสนับสนุนการตัดสินใจบนแพลตฟอร์มเว็บ เพื่อให้สามารถดำเนินการตั้งแต่การกำหนดเกณฑ์ การกำหนดน้ำหนัก ไปจนถึงการจัดลำดับทางเลือกได้อย่างครบวงจรและสามารถนำไปใช้งานได้จริงในบริบทของการจัดการของเสียจากการก่อสร้าง

2.1.6 วิธี FAHP สำหรับการกำหนดค่าน้ำหนักของเกณฑ์

ในกรอบการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ (MCDA) การกำหนดค่าน้ำหนักของเกณฑ์ (criteria weighting) เป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากน้ำหนักสะท้อนระดับความสำคัญสัมพัทธ์ของแต่ละเกณฑ์ต่อผลลัพธ์ของการตัดสินใจ หากการกำหนดน้ำหนักไม่เหมาะสม อาจส่งผลให้ผลการจัดลำดับทางเลือกมีความคลาดเคลื่อนและไม่สอดคล้องกับความเป็นจริง [55]

เทคนิค กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (AHP) เป็นหนึ่งในวิธีการที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในการ กำหนดค่าน้ำหนักของเกณฑ์การตัดสินใจ โดยอาศัย กระบวนการเปรียบเทียบเป็นคู่ (Pairwise Comparison) เพื่อประเมิน ระดับความสำคัญเชิงสัมพัทธ์ระหว่างเกณฑ์ อย่างไรก็ตาม AHP แบบดั้งเดิม ยังมีข้อจำกัดในกรณีที่ ข้อมูลหรือการตัดสินใจของผู้เชี่ยวชาญมีความไม่แน่นอน ความคลุมเครือ หรือไม่สามารถระบุค่าเชิงตัวเลขที่แน่นอนได้อย่างชัดเจน เพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว จึงมีการพัฒนาแนวคิด กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์แบบฟัซซี (FAHP) โดยผสมผสาน ทฤษฎีฟัซซี (Fuzzy Theory) เข้ากับกระบวนการ AHP เพื่อรองรับ ความไม่แน่นอนและความคลุมเครือในการตัดสินใจของมนุษย์ ผ่านการใช้ ตัวเลขฟัซซี เช่น ตัวเลขฟัซซีแบบสามเหลี่ยม (Triangular Fuzzy Numbers) ในการแทนค่าการเปรียบเทียบเชิงภาษาและความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญ [56, 57]

กระบวนการของ กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์แบบฟัซซี (FAHP) โดยทั่วไปประกอบด้วย การสร้างเมทริกซ์การเปรียบเทียบแบบฟัซซี การคำนวณค่าน้ำหนักแบบฟัซซีของแต่ละเกณฑ์ และ การแปลงค่าฟัซซีให้เป็นค่าจริง (Defuzzification) เพื่อให้สามารถนำไปใช้ในกระบวนการตัดสินใจเชิงปริมาณ ต่อไปได้ โดย วิธีการวิเคราะห์เชิงขอบเขต (Extent Analysis) เป็นหนึ่งในแนวทางที่ได้รับความนิยม เนื่องจากมี ความเรียบง่ายและสามารถประยุกต์ใช้ได้สะดวก ในงานวิจัยด้านวิศวกรรมและการจัดการ [58-60]

ในบริบทของการจัดการของเสียจากการก่อสร้าง FAHP ถูกนำมาใช้เพื่อสะท้อนมุมมองของผู้เชี่ยวชาญและผู้มีส่วนได้ส่วนเสียในการกำหนดความสำคัญของเกณฑ์ในแต่ละมิติ เช่น ด้านเศรษฐกิจ สิ่งแวดล้อม สังคม และเทคนิค ซึ่งช่วยให้การกำหนดน้ำหนักมีความสอดคล้องกับบริบทจริงมากกว่าการกำหนดน้ำหนักแบบสมมติหรือกำหนดค่าเท่ากันทุกเกณฑ์

ข้อได้เปรียบที่สำคัญของ FAHP คือความสามารถในการจัดการกับความไม่แน่นอนของข้อมูลและความคลุมเครือของการตัดสินใจของมนุษย์ ทำให้สามารถสะท้อนความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญได้อย่างยืดหยุ่นและใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตาม การประยุกต์ใช้ FAHP ยังมีข้อจำกัด เช่น ความซับซ้อนของการคำนวณ และความไวต่อความไม่สอดคล้องของการเปรียบเทียบ ซึ่งจำเป็นต้องมีการตรวจสอบความสอดคล้องของเมทริกซ์เพื่อให้ผลลัพธ์มีความน่าเชื่อถือ [58], [61]

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ FAHP จึงถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือในการกำหนดค่าน้ำหนักเริ่มต้นของเกณฑ์ (Default Weights) โดยอาศัยความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญ เพื่อให้ค่าน้ำหนักสะท้อนความสำคัญของเกณฑ์ในบริบทของการจัดการของเสียจากการก่อสร้างอย่างเหมาะสม และสามารถนำไปใช้ร่วมกับเทคนิคการจัดลำดับทางเลือกในขั้นตอนถัดไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.1.7 Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) สำหรับการจัดลำดับ

ภายหลังจากการกำหนดค่าน้ำหนักของเกณฑ์ด้วยวิธี FAHP แล้ว ขั้นตอนสำคัญถัดไปในกรอบการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ คือการประเมินและจัดลำดับทางเลือก (Alternative Ranking) โดยพิจารณาจากประสิทธิภาพของแต่ละทางเลือกภายใต้เกณฑ์ที่กำหนด เทคนิค TOPSIS เป็นหนึ่งในวิธีการที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายสำหรับการจัดลำดับทางเลือก เนื่องจากมีแนวคิดที่ชัดเจน เข้าใจง่าย และสามารถประยุกต์ใช้ได้กับปัญหาที่มีหลายเกณฑ์และข้อมูลที่หลากหลาย [62]

หลักการพื้นฐานของ TOPSIS คือการเลือกทางเลือกที่มีระยะห่างใกล้กับ ทางเลือกที่ดีที่สุดในเชิงอุดมคติ (Positive Ideal Solution) และมีระยะห่างไกลจาก ทางเลือกที่แย่ที่สุดในเชิงอุดมคติ

(Negative Ideal Solution) โดยทางเลือกที่ดีที่สุดจะเป็นทางเลือกที่มีค่าประสิทธิภาพดีที่สุดในทุกเกณฑ์ ขณะที่ทางเลือกที่แย่ที่สุดจะเป็นทางเลือกที่มีค่าประสิทธิภาพต่ำที่สุดในทุกเกณฑ์ การเปรียบเทียบระยะห่างดังกล่าวช่วยให้สามารถประเมินความเหมาะสมของแต่ละทางเลือกได้อย่างเป็นระบบและชัดเจน กระบวนการของ TOPSIS โดยทั่วไปประกอบด้วยการสร้างเมทริกซ์การตัดสินใจ (Decision Matrix) การปรับค่ามาตรฐาน (Normalization) การคูณค่าน้ำหนักของเกณฑ์ การกำหนดค่า Ideal Solutions และการคำนวณค่าความใกล้เคียงสัมพัทธ์ (Relative Closeness) ของแต่ละทางเลือก ซึ่งใช้เป็นตัวชี้วัดในการจัดลำดับทางเลือกในขั้นตอนสุดท้าย [63]

ในบริบทของการจัดการของเสียจากการก่อสร้าง TOPSIS ถูกนำมาใช้ในการจัดลำดับผู้ประกอบการจัดการของเสียหรือทางเลือกในการจัดการของเสีย โดยพิจารณาจากเกณฑ์ที่ครอบคลุมมิติด้านเศรษฐกิจ สิ่งแวดล้อม สังคม และเทคนิค ซึ่งมีทั้งข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น ต้นทุน ระยะทาง และการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และข้อมูลเชิงคุณภาพ เช่น การยอมรับของสังคมและความเป็นไปได้ทางเทคนิค การใช้ TOPSIS ช่วยให้สามารถรวมข้อมูลที่มีลักษณะแตกต่างกันไว้ในกระบวนการตัดสินใจเดียวกัน และให้ผลลัพธ์ในรูปแบบการจัดลำดับที่เข้าใจง่ายและสามารถนำไปใช้ในการตัดสินใจได้โดยตรง [64]

ข้อได้เปรียบที่สำคัญของ TOPSIS คือความสามารถในการสะท้อนความสมดุลระหว่างเกณฑ์ต่าง ๆ และการพิจารณาทางเลือกโดยอิงจากระยะห่างเชิงสัมพัทธ์จากทางเลือกในอุดมคติ อย่างไรก็ตาม วิธีการนี้มีข้อจำกัดบางประการ เช่น ความไวต่อวิธีการปรับค่ามาตรฐาน และสมมติฐานเกี่ยวกับความเป็นอิสระของเกณฑ์ ซึ่งอาจส่งผลต่อผลลัพธ์ของการจัดลำดับในบางกรณี [65]

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ TOPSIS จึงถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือหลักในการจัดลำดับทางเลือกโดยบูรณาการร่วมกับค่าน้ำหนักของเกณฑ์ที่ได้จาก FAHP เพื่อประเมินและเปรียบเทียบผู้ประกอบการจัดการของเสียจากการก่อสร้างอย่างเป็นระบบ โปร่งใส และสามารถตรวจสอบได้ ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของการพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจในหัวข้อถัดไป

2.1.8 ตัวชี้วัดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมในการตัดสินใจจัดการของเสีย (Environmental Impact Indicators in Waste Management Decision-Making)

การประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมเป็นองค์ประกอบสำคัญของการตัดสินใจในการจัดการของเสีย โดยเฉพาะในบริบทของการพัฒนาอย่างยั่งยืน ซึ่งมุ่งเน้นการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ และการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในภาพรวม การกำหนดตัวชี้วัดที่เหมาะสมจึงมีบทบาทสำคัญในการสะท้อนความแตกต่างของแต่ละทางเลือกอย่างเป็นระบบ [66]

ในงานวิจัยที่ผ่านมา ตัวชี้วัดด้านสิ่งแวดล้อมที่ใช้ในการประเมินทางเลือกการจัดการของเสียมีความหลากหลาย โดยครอบคลุมทั้งการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gas Emissions) การใช้พลังงาน (Energy Consumption) การใช้ทรัพยากรธรรมชาติ และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในวงกว้าง ซึ่งมักอ้างอิงแนวคิดการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment) และการประเมินผลกระทบ (Life Cycle Impact Assessment) เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบทางเลือกได้อย่างเป็นระบบ [67]

อย่างไรก็ตาม การนำตัวชี้วัดด้านสิ่งแวดล้อมไปใช้ในบริบทของระบบสนับสนุนการตัดสินใจ (DSS) โดยเฉพาะในระดับโครงการก่อสร้าง ยังเผชิญกับข้อจำกัดสำคัญ เนื่องจากตัวชี้วัดหลายประเภทต้องอาศัยข้อมูลเชิงลึกและกระบวนการคำนวณที่ซับซ้อน ซึ่งไม่สอดคล้องกับลักษณะการใช้งานจริงที่ต้องการความรวดเร็ว ความยืดหยุ่น และการตอบสนองแบบการปรับปรุงข้อมูลแบบเวลาจริง [68]

แม้ว่าการใช้ตัวชี้วัดเฉพาะ เช่น การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะช่วยเพิ่มความแม่นยำในการประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีนัยสำคัญ แต่ยังคงมีข้อจำกัดในการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบ DSS โดยเฉพาะในลักษณะที่สามารถคำนวณได้แบบการปรับปรุงข้อมูลแบบเวลาจริง (Real-time) และสามารถเชื่อมโยงกับข้อมูลที่ผู้ใช้งานป้อนเข้าสู่ระบบโดยตรง เช่น ปริมาณของเสีย ระยะทางขนส่ง และประเภทของยานพาหนะ

ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยในระยะหลังจึงให้ความสำคัญกับการพัฒนาตัวชี้วัดด้านสิ่งแวดล้อมที่มีลักษณะเป็น ตัวชี้วัดเชิงปฏิบัติ (Operational Indicators) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากข้อมูลที่มีอยู่จริงในระบบ และสามารถอัปเดตได้แบบทันที เช่น การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากการขนส่ง และปริมาณการใช้เชื้อเพลิงซึ่งสามารถคำนวณได้จากระยะทางและค่าสัมประสิทธิ์ Emission Factor ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ที่อ้างอิงตามมาตรฐานสากล [69]

ในบริบทของการจัดการของเสียจากการก่อสร้าง โดยเฉพาะของเสียคอนกรีต การขนส่งของเสียจากแหล่งกำเนิดไปยังสถานที่กำจัดหรือแปรรูปถือเป็นแหล่งสำคัญของผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม เนื่องจากเกี่ยวข้องโดยตรงกับการใช้พลังงานและการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ดังนั้นการใช้ตัวชี้วัดที่สะท้อนผลกระทบจากการขนส่ง เช่น การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และการใช้เชื้อเพลิง ต่อหน่วยของเสีย (เช่น $kgCO_2$/ton หรือ L/ton) จึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมในการประเมินทางเลือกในระดับโครงการ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระบบ DSS ได้อย่างมีประสิทธิภาพ [70]

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ ตัวชี้วัดด้านสิ่งแวดล้อมจึงถูกกำหนดในลักษณะที่สามารถคำนวณได้จากข้อมูลที่ผู้ใช้งานป้อนเข้าสู่ระบบโดยตรง และสามารถประมวลผลได้แบบการปรับปรุงข้อมูลแบบเวลาจริง โดยเน้นตัวชี้วัดที่เกี่ยวข้องกับการขนส่ง ซึ่งสอดคล้องกับทั้งหลักการทางวิชาการและข้อจำกัดในการใช้งานจริงของระบบสนับสนุนการตัดสินใจ

2.1.9 ปัจจัยเชิงพื้นที่และระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ในการตัดสินใจ (Spatial Factors and Geographic Information Systems (GIS) in Decision-Making)

นอกจากปัจจัยด้านเศรษฐกิจ สิ่งแวดล้อม สังคม และเทคนิคแล้วปัจจัยเชิงพื้นที่ (spatial factors) ยังมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งในการตัดสินใจด้านการจัดการของเสียจากการก่อสร้าง โดยเฉพาะในขั้นตอนที่เกี่ยวข้องกับการขนส่งของเสีย ซึ่งระยะทาง เส้นทางคมนาคม และตำแหน่งที่ตั้งของแหล่งกำเนิดและสถานที่จัดการของเสีย ล้วนส่งผลโดยตรงต่อทั้งต้นทุนการดำเนินงาน การใช้พลังงาน และการปล่อยก๊าซเรือนกระจก [71]

ปัจจัยเชิงพื้นที่มีลักษณะเป็นข้อมูลเชิงภูมิศาสตร์ที่ไม่สามารถสะท้อนด้วยค่าคงที่หรือค่าทางสถิติทั่วไปได้ เนื่องจากมีความแปรผันตามตำแหน่ง (Location-specific Variability) และสภาพแวดล้อมของพื้นที่ เช่น ความหนาแน่นของจราจร สภาพโครงสร้างพื้นฐาน และข้อจำกัดด้านการเข้าถึงพื้นที่ ดังนั้น การนำข้อมูลเชิงพื้นที่มาใช้ในการตัดสินใจจึงจำเป็นต้องอาศัยเครื่องมือที่สามารถจัดการ วิเคราะห์ และแสดงผลข้อมูลเชิงภูมิศาสตร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ [72]

ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic Information System; GIS) เป็นเครื่องมือสำคัญที่ถูกนำมาใช้ในการสนับสนุนการตัดสินใจที่เกี่ยวข้องกับข้อมูลเชิงพื้นที่ โดยสามารถรวบรวม จัดเก็บ วิเคราะห์ และแสดงผลข้อมูลเชิงภูมิศาสตร์ในรูปแบบที่เข้าใจง่ายและสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์เชิงตัดสินใจได้ [73] การบูรณาการ GIS เข้ากับกระบวนการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ หรือที่เรียกว่า GIS-based MCDA ช่วยให้สามารถประเมินทางเลือกโดยคำนึงถึงทั้งปัจจัยเชิงพื้นที่และเกณฑ์การตัดสินใจอื่น ๆ ได้อย่างเป็นระบบ [74]

ในบริบทของการจัดการของเสียจากการก่อสร้าง GIS ถูกนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์ตำแหน่งที่ตั้งของสถานที่กำจัดหรือแปรรูปของเสีย การประเมินระยะทางขนส่ง และการวางแผนเส้นทางที่เหมาะสม ซึ่งมีผลโดยตรงต่อการประเมินตัวชี้วัดด้านสิ่งแวดล้อม เช่น การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และการใช้เชื้อเพลิงที่กล่าวถึงในหัวข้อก่อนหน้า การใช้ GIS ช่วยให้สามารถคำนวณข้อมูลเชิงพื้นที่ได้อย่างแม่นยำ และลดความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดจากการใช้ค่าประมาณหรือสมมติฐานแบบคงที่ [75]

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ผ่านมาแม้ว่าจะมีการใช้ GIS ร่วมกับ MCDA ในการวิเคราะห์เชิงพื้นที่ แต่ส่วนใหญ่มักอยู่ในลักษณะของการวิเคราะห์เชิงนโยบายหรือการวางแผนในระดับมหภาค เช่น การเลือกที่ตั้งสถานที่กำจัดของเสียหรือการวางแผนโครงสร้างพื้นฐาน ขณะที่การนำ GIS ไปประยุกต์ใช้ในระดับปฏิบัติ โดยเฉพาะในระบบสนับสนุนการตัดสินใจแบบการปรับปรุงข้อมูลแบบเวลาจริง ที่สามารถเชื่อมโยงกับข้อมูลจากผู้ใช้งานโดยตรง ยังมีข้อจำกัดและได้รับการศึกษาอย่างจำกัด [76]

ด้วยเหตุนี้ การบูรณาการข้อมูลเชิงพื้นที่ผ่าน GIS เข้ากับระบบสนับสนุนการตัดสินใจในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการใช้ข้อมูลที่สามารถเชื่อมโยงกับการใช้งานจริงได้ เช่น ตำแหน่งที่ตั้งของแหล่งกำเนิดของเสียและผู้ประกอบการจัดการของเสีย เพื่อคำนวณระยะทางขนส่งจริง และนำไปใช้ในการประเมินตัวชี้วัดด้านสิ่งแวดล้อมและเศรษฐกิจการปรับปรุงข้อมูลแบบเวลาจริง ซึ่งช่วยให้การตัดสินใจมีความแม่นยำ โปร่งใส และสอดคล้องกับบริบทการใช้งานจริงมากยิ่งขึ้น

2.1.10 ระบบสนับสนุนการตัดสินใจแบบเว็บและสถาปัตยกรรมระบบ (Web-Based Decision Support Systems and System Architecture)

ระบบสนับสนุนการตัดสินใจเป็นเครื่องมือที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อช่วยในการประมวลผลวิเคราะห์ และสนับสนุนการตัดสินใจในสถานการณ์ที่มีความซับซ้อน โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องพิจารณาข้อมูลหลายมิติและมีความไม่แน่นอน DSS โดยทั่วไปประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก ได้แก่ ระบบจัดการข้อมูล (Data Management), ระบบแบบจำลอง (Model Management), ฐานความรู้ (Knowledge Base) และส่วนติดต่อผู้ใช้ (User Interface) ซึ่งทำงานร่วมกันเพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถวิเคราะห์ข้อมูลและตัดสินใจได้อย่างมีประสิทธิภาพ [77]

ในบริบทของการจัดการของเสียและสิ่งแวดล้อม DSS ถูกนำมาใช้เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจในประเด็นที่มีความซับซ้อน เช่น การเลือกวิธีการจัดการของเสีย การประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม และการวางแผนทรัพยากร โดยมักบูรณาการร่วมกับเทคนิคการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ เพื่อให้สามารถประเมินและจัดลำดับทางเลือกได้อย่างเป็นระบบ [78]

นอกจากนี้ การพัฒนา DSS ในยุคปัจจุบันได้ขยายไปสู่รูปแบบแพลตฟอร์มบนเว็บ ซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการเข้าถึงข้อมูล การประมวลผลแบบการปรับปรุงข้อมูลแบบเวลาจริง และการโต้ตอบกับผู้ใช้งาน ทำให้ DSS สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในบริบทการตัดสินใจจริงได้มากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องอาศัยข้อมูลจากผู้ใช้งานและข้อมูลภายนอก เช่น ข้อมูลเชิงพื้นที่หรือข้อมูลสิ่งแวดล้อม [80]

อย่างไรก็ตาม ระบบ DSS ที่มีอยู่ในปัจจุบันยังคงมีข้อจำกัดในด้านการออกแบบเชิงบูรณาการโดยเฉพาะการเชื่อมโยงระหว่างโครงสร้างเกณฑ์การตัดสินใจที่สะท้อนความต้องการของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย แบบจำลองการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ และข้อมูลเชิงพื้นที่ที่เปลี่ยนแปลงตามบริบทการใช้งานจริง ภายในแพลตฟอร์มเดียวอย่างเป็นระบบและสอดคล้องกัน ข้อจำกัดดังกล่าวส่งผลให้ระบบ DSS จำนวนมากยังคงทำงานในลักษณะแยกส่วน เช่น การกำหนดเกณฑ์ การกำหนดน้ำหนัก และการจัดลำดับทางเลือกถูกพัฒนาในขั้นตอนที่ไม่เชื่อมโยงกัน หรือการใช้ข้อมูลเชิงพื้นที่

ที่ไม่สามารถอัปเดตหรือคำนวณได้แบบแบบอัตโนมัติตามข้อมูลปัจจุบัน ซึ่งลดทอนประสิทธิภาพและความสามารถในการนำไปใช้งานจริง

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจแบบบูรณาการในรูปแบบแพลตฟอร์มบนเว็บ ที่สามารถเชื่อมโยงองค์ประกอบสำคัญของกระบวนการตัดสินใจเข้าด้วยกันอย่างครบวงจร โดยเริ่มจากการแปลงความต้องการของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียไปสู่โครงสร้างเกณฑ์การตัดสินใจ การกำหนดค่าน้ำหนักด้วยวิธี FAHP การจัดลำดับทางเลือกด้วย TOPSIS และการบูรณาการข้อมูลเชิงพื้นที่ผ่าน GIS เพื่อให้ระบบสามารถประมวลผล วิเคราะห์ และแสดงผลการตัดสินใจได้อย่างเป็นระบบ โปร่งใส และสามารถนำไปใช้งานได้จริงในบริบทของการจัดการของเสียจากการก่อสร้าง

2.1.11 การตรวจสอบความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของระบบ DSS (Validation and Verification of Decision Support Systems)

การพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจ (DSS) ที่มีประสิทธิภาพไม่ได้จำกัดอยู่เพียงการออกแบบแบบจำลองหรือการบูรณาการข้อมูลเท่านั้น แต่ยังจำเป็นต้องมีการตรวจสอบความถูกต้อง (Verification) และการยืนยันความน่าเชื่อถือ (Validation) ของระบบ เพื่อให้มั่นใจว่าระบบสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องตามที่ออกแบบ และให้ผลลัพธ์ที่มีความน่าเชื่อถือในบริบทการใช้งานจริง

การตรวจสอบความถูกต้องเป็นกระบวนการที่มุ่งเน้นการประเมินว่าแบบจำลองหรืออัลกอริทึมภายในระบบถูกพัฒนาและดำเนินการอย่างถูกต้องตามหลักการที่กำหนดหรือไม่ โดยมักดำเนินการผ่านการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของระบบกับการคำนวณด้วยวิธีมาตรฐานหรือเครื่องมืออิสระ เช่น การตรวจสอบความสอดคล้องของผลลัพธ์จากแบบจำลอง MCDA กับการคำนวณในโปรแกรมสเปรดชีต เพื่อยืนยันความถูกต้องของกระบวนการคำนวณ [80]

ในขณะที่การยืนยันความน่าเชื่อถือเป็นกระบวนการที่มุ่งเน้นการประเมินว่าระบบสามารถตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้งานและเหมาะสมกับบริบทการใช้งานจริงหรือไม่ โดยอาจดำเนินการผ่านการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญ (Expert Validation) การทดสอบกับผู้ใช้งาน (User Evaluation) และการวิเคราะห์ความพึงพอใจของผู้ใช้ ซึ่งช่วยสะท้อนประสิทธิภาพของระบบในด้านความถูกต้อง ความมีประโยชน์ และความสามารถในการนำไปใช้งาน [81]

นอกจากนี้ การประเมินระบบ DSS ในปัจจุบันยังให้ความสำคัญกับมิติของการใช้งาน (Usability) และประสิทธิภาพของระบบ โดยอ้างอิงแนวคิดด้านปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และคอมพิวเตอร์ เช่น มาตรฐาน ISO 9241-11 ซึ่งกำหนดให้การประเมินระบบควรพิจารณาทั้งด้านประสิทธิผล (Effectiveness) ประสิทธิภาพ (Efficiency) และความพึงพอใจของผู้ใช้งาน (Satisfaction) เพื่อให้มั่นใจว่าระบบสามารถสนับสนุนการตัดสินใจได้อย่างเหมาะสมในสถานการณ์จริง [82]

ในบริบทของระบบ DSS ที่บูรณาการเทคนิค MCDA และข้อมูลเชิงพื้นที่ การตรวจสอบและยืนยันความน่าเชื่อถือยิ่งมีความสำคัญมากขึ้น เนื่องจากความซับซ้อนของแบบจำลองและความหลากหลายของข้อมูลที่ใช้ในระบบ การประเมินจึงควรครอบคลุมทั้งระดับแบบจำลอง (Model Level) ระดับระบบ (System Level) และระดับผู้ใช้งาน (User Level) เพื่อให้สามารถสะท้อนความถูกต้องและความเหมาะสมของระบบได้อย่างรอบด้าน [83]

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงให้ความสำคัญกับการตรวจสอบความถูกต้องและการยืนยันความน่าเชื่อถือของระบบ DSS ในลักษณะหลายมิติโดยครอบคลุมการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเชิงคำนวณ การประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญ และการทดสอบกับผู้ใช้งานจริง เพื่อให้มั่นใจว่าระบบที่พัฒนาขึ้นมีความถูกต้อง เชื่อถือได้ และสามารถนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพในบริบทของการจัดการของเสียจากการก่อสร้าง

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดการของเสียจากการก่อสร้างและการพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจด้านสิ่งแวดล้อมสามารถจำแนกออกเป็นหลายกลุ่มตามแนวทางและเครื่องมือที่ใช้ โดยเฉพาะกลุ่มงานที่ประยุกต์ใช้เทคนิคการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ (MCDA) ซึ่งได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในการสนับสนุนการตัดสินใจภายใต้เกณฑ์ที่มีความหลากหลายและบางครั้งมีความขัดแย้งกัน ทั้งในมิติด้านเศรษฐกิจ สิ่งแวดล้อม สังคม และเทคนิค [46], [48], [84] งานวิเคราะห์เชิงบรรณมิติของ Sohail et al.(2023) [84] ชี้ให้เห็นว่า MCDA ได้รับการประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในงานด้านการจัดการของเสีย ตั้งแต่การเลือกเทคโนโลยี การประเมินทางเลือกในการกำจัดของเสีย ไปจนถึงการกำหนดนโยบายด้านสิ่งแวดล้อม ขณะที่ Esmail and Geneletti (2018) [85] สรุปว่า MCDA เป็นเครื่องมือสำคัญในการสนับสนุนการตัดสินใจด้านสิ่งแวดล้อม เนื่องจากสามารถผสานเกณฑ์หลายมิติและรองรับความซับซ้อนของระบบนิเวศและผู้มีส่วนได้ส่วนเสียได้ดีกว่าวิธีการวิเคราะห์เชิงเดี่ยว

ในบริบทของการจัดการของเสียจากการรื้อถอนและอาคาร งานวิจัยร่วมสมัยเริ่มมุ่งสู่การบูรณาการแบบจำลองสารสนเทศอาคาร การประเมินวัฏจักรชีวิต และเทคนิคการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจด้านความยั่งยืน Han et al.(2024) [86] ได้พัฒนาระบบวางแผนการจัดการของเสียจากการรื้อถอนเชิงภาพที่อาศัยแบบจำลองสารสนเทศอาคาร ซึ่งสามารถผสานการวิเคราะห์รายการวัสดุและองค์ประกอบอาคารร่วมกับเทคนิคการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์เพื่อสนับสนุนการวางแผนรื้อถอนและการประเมินมูลค่าการรีไซเคิลของวัสดุ อันนำไปสู่การออกแบบและการวางแผนการรื้อถอนที่มีความยั่งยืนมากยิ่งขึ้น ต่อมา Han et al.(2025) [87] ได้พัฒนากรอบ

การประเมินความยั่งยืนตลอดวัฏจักรชีวิตบนพื้นฐานของแบบจำลองสารสนเทศอาคารร่วมกับเทคนิคการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์แบบผสมผสาน เพื่อสนับสนุนการประเมินความยั่งยืนและการจัดลำดับทางเลือกของสถานการณ์การจัดการของเสียจากการรื้อถอน โดยผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า การเพิ่มอัตราการรีไซเคิลสามารถช่วยยกระดับคะแนนด้านความยั่งยืนได้อย่างมีนัยสำคัญ งานวิจัยเหล่านี้สะท้อนให้เห็นถึงพัฒนาการสำคัญของการบูรณาการข้อมูลและแบบจำลองเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจด้านการจัดการของเสียจากการรื้อถอน อย่างไรก็ตาม ระบบส่วนใหญ่ยังคงมุ่งเน้นการวิเคราะห์ในระดับการวางแผนสถานการณ์หรือการประเมินกลยุทธ์การรื้อถอน มากกว่าการพัฒนาเป็นระบบสนับสนุนการตัดสินใจบนเว็บที่สามารถรองรับการป้อนข้อมูลจริงจากผู้ใช้งานและการจัดอันดับผู้ประกอบการจัดการของเสียในระดับโครงการก่อสร้างโดยตรง

สำหรับบริบทของเศรษฐกิจหมุนเวียนและการจัดการของเสีย เริ่มมีงานวิจัยที่ประยุกต์ใช้ MCDA เพื่อประเมินความยั่งยืนและศักยภาพเชิงเศรษฐกิจหมุนเวียนของระบบหรือผลิตภัณฑ์ในหลายบริบท Weerakoon et al.(2025) [23] เสนอการบูรณาการหลักเศรษฐกิจหมุนเวียนร่วมกับ MCDAเพื่อสนับสนุนการจัดการของเสียจากการก่อสร้าง ขณะที่ Torkayesh et al.(2022) [39] เน้นการบูรณาการหลักการคิดตลอดวัฏจักรชีวิต (LCA) ร่วมกับ MCDA เพื่อเพิ่มความครอบคลุมของการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมและความยั่งยืนในการจัดการของเสีย นอกจากนี้ งานวิจัยด้านเศรษฐกิจหมุนเวียนและการออกแบบเพื่อความยั่งยืนยังสะท้อนให้เห็นถึงการขยายขอบเขตของ MCDA ไปสู่การประเมินเศรษฐกิจหมุนเวียนในบริบทที่หลากหลาย เช่น การประเมินศักยภาพการจัดการปลายทางของอุปกรณ์ประมงตามหลักเศรษฐกิจหมุนเวียน การประยุกต์ใช้เทคนิคการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ (MCDA) ร่วมกับแนวคิดการออกแบบเชิงนิเวศ (Eco-design) เพื่อคัดเลือกผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบใหม่ (Redesign) และการใช้ตัวชี้วัดเศรษฐกิจหมุนเวียนร่วมกับวิธีการ AHP และ MCDA เพื่อประเมินสมรรถนะและระดับความก้าวหน้าด้านเศรษฐกิจหมุนเวียนของประเทศต่าง ๆ ในสหภาพยุโรป ซึ่งสะท้อนว่า MCDA มิได้ถูกจำกัดเฉพาะการประเมินของเสียหรือเทคโนโลยี แต่สามารถใช้เป็นกลไกในการประเมินด้านเศรษฐกิจหมุนเวียนและความยั่งยืนในระบบที่มีความซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ [87-89] แม้งานวิจัยเหล่านี้จะอยู่ในบริบทที่แตกต่างกัน แต่ล้วนสะท้อนให้เห็นว่า MCDA สามารถประยุกต์ใช้ในการประเมินระบบที่มีหลายมิติและมีความซับซ้อนสูง ซึ่งเป็นลักษณะร่วมกับบริบทการจัดการของเสียจากการก่อสร้างและเศรษฐกิจหมุนเวียนในภาคก่อสร้าง อย่างไรก็ตาม เกณฑ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ในงานวิจัยจำนวนมากยังคงถูกกำหนดจากวรรณกรรมหรือมุมมองของผู้วิจัยเป็นหลัก และยังขาดกระบวนการกำหนดเกณฑ์ที่ขับเคลื่อนโดยผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย ซึ่งอาจส่งผลให้แบบจำลองไม่สามารถสะท้อนบริบทการใช้งานจริงได้อย่างครบถ้วน [42], [85]

ในบริบทดังกล่าว งานวิจัยด้านการออกแบบระบบและการพัฒนาผลิตภัณฑ์ได้ให้ความสำคัญกับการนำมุมมองของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียเข้าสู่กระบวนการกำหนดคุณลักษณะและเกณฑ์ของระบบผ่านแนวคิด Quality Function Deployment (QFD) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มุ่งแปลงความต้องการของผู้ใช้งานหรือเสียงของลูกค้า (Voice of Customer: VOC) ไปสู่ข้อกำหนดทางเทคนิคและแนวทางการออกแบบอย่างเป็นระบบ [96], [106] โดย Akao (1990) [96] และ Hauser and Clausing (1988) [106] ได้วางรากฐานของ QFD ผ่านแนวคิด House of Quality (HOQ) เพื่อเชื่อมโยงความต้องการของผู้ใช้งานกับคุณลักษณะทางเทคนิคของผลิตภัณฑ์หรือระบบอย่างเป็นลำดับขั้น ต่อมางานวิจัยร่วมสมัยได้ขยายขอบเขตของ QFD ไปสู่บริบทของการออกแบบเพื่อความยั่งยืนและการสนับสนุนการตัดสินใจที่มีความซับซ้อนมากขึ้น เช่น การบูรณาการ QFD ร่วมกับวิธีการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์เพื่อสนับสนุนการออกแบบระบบพลังงานหมุนเวียนและการจัดลำดับความสำคัญของคุณลักษณะทางเทคนิค [103] รวมถึงการประยุกต์ใช้ในการออกแบบต้นแบบระบบสนับสนุนการตัดสินใจด้านการจัดการของเสียอย่างยั่งยืน ซึ่งมุ่งเชื่อมโยงความต้องการของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียเข้าสู่การกำหนดคุณลักษณะของระบบดิจิทัล [108] พัฒนาการดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่า QFD มีศักยภาพในการทำหน้าที่เป็นกลไกเชื่อมโยง stakeholder requirements กับการออกแบบระบบและการตัดสินใจเชิงบูรณาการได้มากขึ้น [45]

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ประยุกต์ใช้ QFD ร่วมกับระบบสนับสนุนการตัดสินใจด้านสิ่งแวดล้อมและการจัดการของเสียยังมีการศึกษาในวงจำกัด โดยเฉพาะในบริบทของการจัดการของเสียจากการก่อสร้าง ซึ่ง QFD มักถูกใช้ในฐานะเครื่องมือกำหนดข้อกำหนดหรือสนับสนุนการออกแบบเฉพาะส่วน มากกว่าการเป็นกลไกเชิงระบบสำหรับการกำหนดเกณฑ์ที่สะท้อนมุมมองของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียและเชื่อมโยงต่อไปสู่กระบวนการกำหนดค่าน้ำหนัก การวิเคราะห์ข้อมูล และการจัดลำดับทางเลือกภายใน DSS แบบบูรณาการ นอกจากนี้ งานวิจัยจำนวนมากยังคงประยุกต์ใช้ QFD ในลักษณะของการจัดลำดับความสำคัญของความต้องการหรือคุณลักษณะเชิงเทคนิค มากกว่าการเชื่อมโยงเข้าสู่ระบบดิจิทัลที่สามารถรองรับการประมวลผลและการตัดสินใจภายใต้ข้อมูลจริงและบริบทเฉพาะพื้นที่ [103]

ในด้านการกำหนดค่าน้ำหนักของเกณฑ์ งานวิจัยที่ใช้ AHP และ FAHP มีบทบาทสำคัญในการสนับสนุนการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ โดย AHP ของ Saaty(1980) [61] เป็นวิธีพื้นฐานที่ใช้การเปรียบเทียบแบบคู่เทียบเพื่อสะท้อนความสำคัญเชิงสัมพัทธ์ของเกณฑ์ ขณะที่ Chang(1996) [58] ได้พัฒนาวิธีการวิเคราะห์แบบขอบเขตเพื่อรองรับความไม่แน่นอนของข้อมูลและการตัดสินใจโดยใช้แนวคิดของทฤษฎีเซตคลุมเครือ ซึ่งต่อมาได้กลายเป็นพื้นฐานสำคัญของวิธีการวิเคราะห์ลำดับชั้นเชิงฟัซซี อันเป็นแนวทางที่ช่วยสะท้อนความคลุมเครือและความไม่แน่นอนของดุลยพินิจของมนุษย์ในการตัดสินใจได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในเวลาต่อมา งานของ Past et al.(2023) [30] แสดง

ให้เห็นถึงการประยุกต์ใช้วิธีการวิเคราะห์ลำดับชั้นเชิงฟัซซี (FAHP) ในการจัดการของเสียจากการก่อสร้างและการคัดเลือกทางเลือกในการกำจัดของเสีย ซึ่งสามารถสะท้อนความไม่แน่นอนของข้อมูลและการตัดสินใจของผู้เชี่ยวชาญได้ดีกว่าวิธีการวิเคราะห์ลำดับชั้นแบบดั้งเดิม (AHP) อย่างไรก็ตาม แม้ว่าวิธีการดังกล่าวจะมีจุดแข็งในการกำหนดค่าน้ำหนักของเกณฑ์การตัดสินใจ แต่ผลงานวิจัยส่วนใหญ่มักมุ่งเน้นการกำหนดค่าน้ำหนักหรือการประเมินทางเลือกในขั้นตอนการวิเคราะห์เชิงแบบจำลองที่ดำเนินการภายนอกระบบ มากกว่าการบูรณาการเข้าสู่ระบบสนับสนุนการตัดสินใจบนเว็บที่สามารถรองรับการประมวลผลและการปรับปรุงข้อมูลแบบอัตโนมัติ [55–57] ส่งผลให้ FAHP ในหลายกรณียังคงถูกใช้ในฐานะเครื่องมือวิเคราะห์เฉพาะส่วน มากกว่าการเป็นองค์ประกอบสำคัญภายในระบบสนับสนุนการตัดสินใจแบบครบวงจร

สำหรับการจัดลำดับทางเลือก TOPSIS ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีแนวคิดที่ชัดเจนในการประเมินความใกล้เคียงของทางเลือกต่อคำตอบในอุดมคติ (ideal solution) และทางเลือกที่แย่ที่สุด (Negative Ideal Solution) [53], [62] งานวิจัยจำนวนมากได้นำ TOPSIS ไปใช้ในการประเมินทางเลือกด้านสิ่งแวดล้อม การจัดการของเสีย และการกำหนดกลยุทธ์ด้านความยั่งยืน เช่น งานของ Demircan and Yetilmezsoy (2023) [64] ซึ่งประยุกต์ใช้ Hybrid Fuzzy AHP–TOPSIS เพื่อพัฒนากลยุทธ์การจัดการของเสียอย่างยั่งยืน อย่างไรก็ตาม การประยุกต์ใช้ TOPSIS ในหลายกรณียังคงอยู่ในลักษณะของ “เครื่องมือจัดอันดับขั้นสุดท้าย” ภายใต้ข้อมูลและค่าน้ำหนักที่กำหนดไว้ล่วงหน้า โดยผู้ใช้งานยังจำเป็นต้องปรับปรุงข้อมูลและคำนวณใหม่ในลักษณะ manual เมื่อเงื่อนไขเปลี่ยนแปลง อีกทั้งผลลัพธ์ของ TOPSIS ยังมีความอ่อนไหวต่อ การปรับมาตรฐาน และค่าน้ำหนักของเกณฑ์ ดังที่ Bánhidi and Dobos (2023) [65] ได้อภิปรายไว้ ข้อจำกัดดังกล่าวสะท้อนว่า แม้ TOPSIS จะเป็นเครื่องมือจัดลำดับที่มีประสิทธิภาพ แต่การเชื่อมโยงเข้าสู่ระบบ DSS ที่รองรับการประมวลผลอัตโนมัติและสามารถทำงานร่วมกับกระบวนการกำหนดเกณฑ์ ยังมีอยู่อย่างจำกัด ส่งผลให้กระบวนการตัดสินใจในหลายกรณียังคงแยกส่วนระหว่างการกำหนดเกณฑ์ การกำหนดค่าน้ำหนัก และการจัดลำดับทางเลือก ซึ่งอาจลดทอนประสิทธิภาพของการประยุกต์ใช้ TOPSIS ในบริบทการตัดสินใจจริง

นอกเหนือจากการกำหนดค่าน้ำหนักและการจัดลำดับทางเลือก งานวิจัยในช่วงหลังยังให้ความสำคัญกับการบูรณาการข้อมูลเชิงพื้นที่(GIS) ร่วมกับการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ผ่าน เพื่อสนับสนุนการวิเคราะห์ผลกระทบเชิงพื้นที่และเพิ่มความแม่นยำของการตัดสินใจ [73], [74] งานวิจัยกลุ่มนี้แสดงให้เห็นว่า GIS สามารถทำหน้าที่เป็นเครื่องมือสำคัญในการเชื่อมโยงข้อมูลด้านสิ่งแวดล้อม การใช้ประโยชน์ที่ดิน เครือข่ายคมนาคม และข้อจำกัดทางกายภาพเข้าสู่กระบวนการตัดสินใจเชิงระบบ Maurya and Kumar [73] อธิบายถึงบทบาทของ GIS ในการสนับสนุนการจัดการสิ่งแวดล้อมและการพัฒนาอย่างยั่งยืน ขณะที่ Dell’Ovo et al.(2018) [74] แสดงให้เห็นถึง

ศักยภาพของการบูรณาการ spatial analysis ร่วมกับ MCDA เพื่อสนับสนุนการเลือกทำเลหรือโครงสร้างพื้นฐานภายใต้ข้อจำกัดหลายมิติ

การประยุกต์ใช้ GIS ร่วมกับMCDA ในการวิเคราะห์ความเหมาะสมเชิงพื้นที่ด้านการจัดการของเสียและเศรษฐกิจหมุนเวียนอย่างเป็นรูปธรรม ตัวอย่างเช่น การประเมินความเหมาะสมของพื้นที่สำหรับโรงงานผลิตไบโอชาร์ ในประเทศจอร์แดนโดยใช้ GIS ร่วมกับ MCDA เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยด้านการใช้ที่ดิน แหล่งชีวมวล ระบบคมนาคม และข้อจำกัดด้านสิ่งแวดล้อม ซึ่งสามารถระบุพื้นที่ที่เหมาะสมสำหรับโครงสร้างพื้นฐานด้านของเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ [90] ในทำนองเดียวกัน งานศึกษาการเลือกพื้นที่ฝังกลบในเมือง Dar es Salaam โดย Kazuva, E. et al.(2021) [91] ได้ใช้ GIS ร่วมกับ AHP เพื่อประเมินความเหมาะสมของพื้นที่และพัฒนาตัวชี้วัดสำหรับการคัดเลือกพื้นที่ฝังกลบอย่างเป็นระบบ แม้ว่างานวิจัยเหล่านี้จะช่วยยืนยันศักยภาพของ GIS ร่วมกับ MCDA ในการสนับสนุนการตัดสินใจเชิงพื้นที่ แต่ส่วนใหญ่ยังคงมุ่งเน้นการวิเคราะห์ในระดับมหภาค (Macro Level) หรือการตัดสินใจเชิงพื้นที่ในภาพรวม เช่น การเลือกที่ตั้งของสถานที่กำจัดของเสียหรือโครงสร้างพื้นฐานด้านสิ่งแวดล้อมในระดับเมือง จังหวัด หรือภูมิภาค มากกว่าการประยุกต์ใช้ GIS ในระดับโครงการ (Project Level) เพื่อประเมินผลกระทบจากระยะทางขนส่ง ต้นทุน การใช้พลังงาน และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของผู้ประกอบการจัดการของเสียแต่ละรายหรือการเลือกที่ตั้งโครงสร้างพื้นฐาน มากกว่าการประยุกต์ใช้ GIS ในระดับโครงการเพื่อประเมินผลกระทบจากระยะทางขนส่ง ต้นทุน การใช้พลังงาน และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของผู้ประกอบการจัดการของเสียแต่ละราย

ในด้านระบบสนับสนุนการตัดสินใจ (DSS) งานวิจัยที่ผ่านมาได้แสดงให้เห็นถึงบทบาทสำคัญของ DSS ในการสนับสนุนการจัดการสิ่งแวดล้อมและการตัดสินใจด้านของเสีย โดยเฉพาะระบบที่บูรณาการ MCDA เพื่อเพิ่มความสามารถในการวิเคราะห์หลายมิติ งานวิจัยของ Banias et al.(2011) [79] พัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจบนเว็บสำหรับการจัดการของเสียจากการก่อสร้างและรื้อถอน ซึ่งถือเป็นหนึ่งในงานสำคัญที่แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของระบบเว็บในการสนับสนุนการจัดการของเสียในภาคก่อสร้าง ขณะที่ Vlachokostas et al.(2020) [92] ชี้ให้เห็นว่า MCDA มีบทบาทสำคัญในการสนับสนุนการกำหนดกลยุทธ์ด้านการจัดการของเสียเพื่อเป็นพลังงาน(Waste to Energy)และการประเมินทางเลือกภายใต้ข้อจำกัดด้านเศรษฐกิจ สิ่งแวดล้อม และสังคม อย่างไรก็ตาม งานวิจัยด้าน DSS จำนวนมากยังคงมีลักษณะการพัฒนาแบบแยกส่วน โดยองค์ประกอบสำคัญ เช่น การกำหนดเกณฑ์ การกำหนดค่าน้ำหนัก การวิเคราะห์เชิงพื้นที่ และการจัดลำดับทางเลือก มักถูกพัฒนาแยกจากกันและยังขาดการบูรณาการภายในแพลตฟอร์มเดียวอย่างเป็นระบบ ข้อจำกัดดังกล่าวได้รับการยืนยันเพิ่มเติมจากงานการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบ (Systematic Literature Review) ของ Adu et al. (2025) [78] ซึ่งทบทวนการประยุกต์ใช้ DSS

สำหรับเทคโนโลยีการจัดการของเสียเพื่อเป็นพลังงาน และพบว่า แม้ระบบ DSS จำนวนมากจะเริ่มบูรณาการ MCDA, GIS และ Life Cycle Assessment (LCA) เข้าด้วยกัน แต่หลายระบบยังคงพึ่งพาข้อมูลแบบคงที่ ส่งผลให้ไม่สามารถรองรับบริบทเฉพาะพื้นที่หรือการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลได้อย่างยืดหยุ่น และยังขาดการนำมุมมองของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียเข้ามาเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการตัดสินใจ [93] ข้อค้นพบดังกล่าวสะท้อนถึงความจำเป็นในการพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจที่สามารถตอบสนองต่อบริบทเฉพาะพื้นที่ ปรับตัวตามข้อมูลที่เปลี่ยนแปลง และให้ความสำคัญกับผู้ใช้งานมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะในประเทศกำลังพัฒนาและภาคการจัดการของเสียที่มีความซับซ้อนและมีเงื่อนไขการตัดสินใจหลากหลาย

แม้ว่าพัฒนาการของ DSS และเครื่องมือสนับสนุนการตัดสินใจดังกล่าวจะช่วยยกระดับการจัดการของเสียจากการก่อสร้างอย่างต่อเนื่อง แต่ยังมีข้อจำกัดในเชิงองค์ความรู้เกี่ยวกับวิธีการบูรณาการมุมมองของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย การกำหนดค่าน้ำหนักของเกณฑ์ การวิเคราะห์ผลกระทบเชิงพื้นที่ และการจัดลำดับทางเลือกให้สามารถทำงานร่วมกันภายใต้บริบทการตัดสินใจจริงในระดับโครงการก่อสร้างได้อย่างเป็นระบบ วรรณกรรมส่วนใหญ่ยังให้ความสำคัญกับการพัฒนาเครื่องมือหรือวิธีการในลักษณะแยกส่วน ส่งผลให้ยังมีความเข้าใจจำกัดเกี่ยวกับผลของการบูรณาการองค์ประกอบเหล่านี้ต่อคุณภาพ ความโปร่งใส และความสามารถในการยอมรับของกระบวนการตัดสินใจด้านการจัดการของเสียจากการก่อสร้าง โดยเฉพาะในบริบทของประเทศกำลังพัฒนาและการคัดเลือกผู้ประกอบการจัดการของเสียภายใต้เงื่อนไขเฉพาะพื้นที่

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง แม้งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีส่วนสำคัญในการพัฒนาองค์ความรู้ด้าน MCDA, AHP/FAHP, TOPSIS, GIS และ DSS สำหรับการจัดการของเสียและสิ่งแวดล้อม ทั้งในด้านการกำหนดค่าน้ำหนัก การจัดลำดับทางเลือก การวิเคราะห์เชิงพื้นที่ และการพัฒนาระบบดิจิทัลเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจ แต่ยังพบช่องว่างสำคัญในวรรณกรรม กล่าวคือ ยังขาดกรอบการตัดสินใจแบบบูรณาการที่สามารถเชื่อมโยงการกำหนดเกณฑ์ที่ขับเคลื่อนโดยผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย การกำหนดค่าน้ำหนักของเกณฑ์ การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพื้นที่และผลกระทบสิ่งแวดล้อม และการจัดลำดับทางเลือกเข้าด้วยกันภายในระบบสนับสนุนการตัดสินใจบนเว็บ โดยเฉพาะในบริบทของการคัดเลือกผู้ประกอบการจัดการของเสียจากการก่อสร้างหรือของเสียคอนกรีตในระดับโครงการ

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาแนวทางเชิงบูรณาการโดยผสานเทคนิค QFD, FAHP, GIS และ TOPSIS เข้ากับระบบสนับสนุนการตัดสินใจบนเว็บ เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจในการเลือกและจัดอันดับผู้ประกอบการจัดการของเสียจากการก่อสร้างอย่างเป็นระบบ โปร่งใส ตรวจสอบได้ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานจริงในบริบทของอุตสาหกรรมก่อสร้างไทยได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ภาพรวมของระเบียบวิธีวิจัย (Research Methodology Overview)

ระเบียบวิธีวิจัยในงานศึกษานี้ได้รับการออกแบบในลักษณะของกระบวนการเชิงบูรณาการ (Integrated Methodological Framework) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและประเมินระบบสนับสนุนการตัดสินใจบนเว็บสำหรับการจัดการของเสียจากการก่อสร้าง ซึ่งสามารถสะท้อนความต้องการของผู้ใช้งานในบริบทจริง ควบคู่ไปกับการวิเคราะห์เชิงปริมาณและการประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมอย่างเป็นระบบ

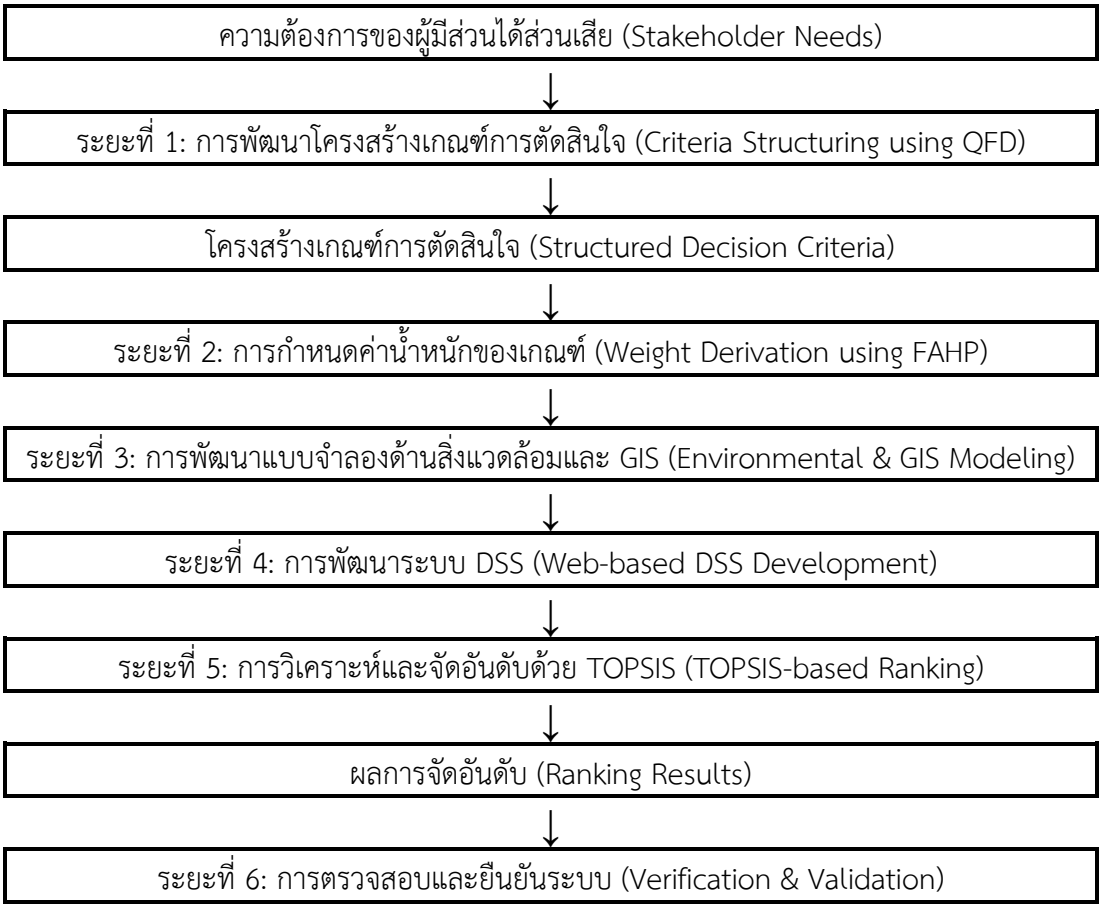
กรอบระเบียบวิธีดังกล่าวพัฒนาขึ้นจากการสังเคราะห์องค์ความรู้ในบทที่ 2 ซึ่งครอบคลุมแนวคิดการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ QFD การกำหนดค่าน้ำหนักด้วย FAHP การวิเคราะห์แบบหลายหลักเกณฑ์ด้วย TOPSIS และการบูรณาการข้อมูลด้านสิ่งแวดล้อมและเชิงพื้นที่

จากองค์ความรู้ดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงออกแบบกระบวนการวิจัยในลักษณะของกระบวนการแบบลำดับขั้นจำนวน 6 ระยะ ซึ่งเชื่อมโยงตั้งแต่การกำหนดโครงสร้างเกณฑ์การตัดสินใจ การพัฒนาแบบจำลองเชิงปริมาณ การพัฒนาระบบต้นแบบ ไปจนถึงการตรวจสอบและยืนยันความถูกต้องของระบบโดยรายละเอียดเชิงลึกของแต่ละระยะ รวมถึงวิธีการ เครื่องมือ และขั้นตอนการดำเนินงาน จะนำเสนอในหัวข้อถัดไป

3.2 กรอบแนวคิดการวิจัย (Research Framework)

กรอบแนวคิดการวิจัย (Research Framework) ในงานศึกษานี้ ดังแสดงในภาพที่ 3.1 ถูกออกแบบเพื่อแสดงความสัมพันธ์เชิงตรรกะขององค์ประกอบต่าง ๆ ตั้งแต่การกำหนดข้อมูลนำเข้า การพัฒนาแบบจำลอง ไปจนถึงการสร้างผลลัพธ์และการตรวจสอบความถูกต้องของระบบ ดังแสดงในภาพที่ 3.1

จากภาพที่ 3.1 กระบวนการวิจัยเริ่มต้นจากการรวบรวมความต้องการของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย (Stakeholder Needs) ซึ่งเป็นข้อมูลตั้งต้นที่สำคัญสำหรับการออกแบบระบบ จากนั้นจึงนำความต้องการดังกล่าวเข้าสู่ระยะที่ 1 เพื่อพัฒนาโครงสร้างเกณฑ์การตัดสินใจโดยใช้เทคนิค QFD ซึ่งช่วยแปลงความต้องการเชิงคุณภาพไปสู่ลักษณะเชิงเทคนิคของระบบ



ภาพที่ 3.1 กรอบแนวคิดการวิจัยสำหรับการพัฒนา EcoRanker DSS (Research Framework for EcoRanker DSS Development)

โครงสร้างเกณฑ์ที่ได้ถูกนำไปใช้ในระยะที่ 2 เพื่อกำหนดค่าน้ำหนักของเกณฑ์ด้วยวิธี FAHP ซึ่งสะท้อนความสำคัญเชิงสัมพัทธ์ของแต่ละปัจจัยในการตัดสินใจ

ในระยะที่ 3 งานวิจัยได้พัฒนาแบบจำลองเชิงปริมาณด้านสิ่งแวดล้อมและบูรณาการข้อมูลเชิงพื้นที่ เพื่อคำนวณตัวชี้วัดสำคัญ เช่น การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และการใช้พลังงาน

ระยะที่ 4 เป็นการพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจในรูปแบบเว็บ ซึ่งทำหน้าที่เป็นแพลตฟอร์มสำหรับการประมวลผลและแสดงผลลัพธ์

จากนั้นในระยะที่ 5 จะนำแบบจำลอง TOPSIS มาใช้ในการวิเคราะห์และจัดอันดับทางเลือก โดยอาศัยข้อมูลจากระยะก่อนหน้า

สุดท้าย ระยะที่ 6 เป็นการตรวจสอบและยืนยันความถูกต้องของระบบ เพื่อประเมินความน่าเชื่อถือ ความเหมาะสม และความสามารถในการนำไปใช้งานจริง

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย (Research Instruments)

งานวิจัยนี้ใช้เครื่องมือในการดำเนินการวิจัยทั้งในด้านการเก็บรวบรวมข้อมูล การวิเคราะห์เชิงการตัดสินใจ การพัฒนาระบบ และการประเมินผล โดยประกอบด้วย 4 กลุ่มหลัก ได้แก่ เครื่องมือเก็บข้อมูล เครื่องมือวิเคราะห์แบบหลายเกณฑ์ เครื่องมือพัฒนาระบบ และเครื่องมือสำหรับการตรวจสอบและประเมินผลระบบ

ประการแรก เครื่องมือสำหรับการเก็บรวบรวมข้อมูล ได้แก่ แบบสอบถามในรูปแบบ Google Forms ซึ่งใช้สำหรับการประเมินความสำคัญของความต้องการของผู้ใช้ (Customer Requirements: CRs) การประเมินความเหมาะสมของระบบโดยผู้เชี่ยวชาญ และการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานจริง โดยแบบสอบถามดังกล่าวได้รับการตรวจสอบความสอดคล้องระหว่างข้อคำถามกับวัตถุประสงค์การวิจัย (Item–Objective Congruence: IOC) โดยผู้เชี่ยวชาญจำนวน 5 คน และมีค่า IOC เฉลี่ยเท่ากับ 0.88 ซึ่งสะท้อนว่าแบบสอบถามมีความเหมาะสมและสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการเก็บรวบรวมข้อมูลสำหรับการวิจัยได้อย่างมีความน่าเชื่อถือ

ประการที่สอง เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์และแบบจำลองการตัดสินใจ ได้แก่ วิธีการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ QFD สำหรับแปลงความต้องการของผู้ใช้ไปสู่คุณลักษณะทางเทคนิค การใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ความคลุมเครือ FAHP สำหรับกำหนดค่าน้ำหนักของเกณฑ์ภายใต้ความไม่แน่นอนของข้อมูล และวิธี TOPSIS สำหรับจัดอันดับผู้ประกอบการจัดการของเสียในระบบ EcoRanker DSS

ประการที่สาม เครื่องมือสำหรับการพัฒนาระบบ ได้แก่ เทคโนโลยีเว็บพื้นฐาน เช่น HTML, CSS และ JavaScript สำหรับพัฒนาส่วนติดต่อผู้ใช้งาน ระบบจัดการฐานข้อมูล MySQL สำหรับจัดเก็บข้อมูลผู้ใช้ โครงการ และข้อมูลการประเมิน และ Google Maps API สำหรับคำนวณระยะทางจริงระหว่างแหล่งกำเนิดของเสียและสถานที่จัดการ ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อการคำนวณค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และการใช้เชื้อเพลิง

ประการสุดท้าย เครื่องมือที่ใช้สำหรับการตรวจสอบและประเมินผลระบบประกอบด้วย Microsoft Excel ซึ่งใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของขั้นตอนการคำนวณวิธี TOPSIS อย่างเป็นอิสระ Google PageSpeed Insights สำหรับประเมินประสิทธิภาพเชิงเทคนิคของเว็บไซต์ เช่น ความเร็วในการโหลดและการตอบสนองของระบบ และ ประเมินความสามารถในการเข้าถึงของระบบตามแนวทางมาตรฐานการเข้าถึงเว็บไซต์ WCAG 2.1 สำหรับประเมินความสามารถในการเข้าถึงของระบบตามแนวทางมาตรฐานการเข้าถึงเว็บไซต์ ตลอดจนใช้ประกอบการประเมินคุณภาพโดยรวมของระบบสารสนเทศ

ในการดำเนินการวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้คำนึงถึงหลักจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์อย่างเคร่งครัด โดยกระบวนการเก็บรวบรวมข้อมูลได้รับการรับรองจากคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก (Rajamangala University of Technology Tawan-ok) ภายใต้เลขที่รับรอง COA No. 051 และ RMUTTO REC No. 056/2024 ลงวันที่ 11 ธันวาคม 2567 ทั้งนี้ เพื่อให้มั่นใจว่าการดำเนินการวิจัยเป็นไปตามหลักจริยธรรมและมาตรฐานสากลด้านการวิจัยในมนุษย์

3.4 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

งานวิจัยนี้ได้กำหนดกลุ่มผู้ให้ข้อมูลออกเป็นหลายระดับตามบทบาทเชิงระเบียบวิธี เพื่อให้แต่ละขั้นตอนของกระบวนการ มีความเหมาะสมทั้งในด้านเนื้อหาและด้านเทคนิค โดยสามารถจำแนกออกเป็น 4 กลุ่มหลัก ดังนี้

กลุ่มแรก คือ ผู้เชี่ยวชาญสำหรับการตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหา (Item Objective Congruence: IOC) จำนวน 5 คน ซึ่งประกอบด้วยผู้เชี่ยวชาญจากหลากหลายสาขาวิชา ได้แก่ ผู้ประกอบการด้านการจัดการของเสีย นักวิชาการด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ผู้เชี่ยวชาญด้านระเบียบวิธีวิจัย ผู้เชี่ยวชาญด้านเทคโนโลยีสารสนเทศและระบบสนับสนุนการตัดสินใจ และผู้ปฏิบัติงานจากองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น การกำหนดจำนวนผู้เชี่ยวชาญในช่วง 3–5 คนสอดคล้องกับแนวทางที่แนะนำในวรรณกรรมสำหรับการประเมินความตรงเชิงเนื้อหา ซึ่งระบุว่าจำนวนผู้เชี่ยวชาญในช่วงดังกล่าวเพียงพอสำหรับการประเมินความสอดคล้องของข้อคำถามกับวัตถุประสงค์ของการวิจัยและช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือของเครื่องมือวิจัย [94]

กลุ่มที่สอง คือ กลุ่มผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย จำนวน 25 คน ซึ่งใช้ในการประเมินความสำคัญของของความต้องการของผู้ใช้งาน Customer Requirements (CRs) โดยประกอบด้วยเจ้าหน้าที่จากเทศบาล ผู้ประกอบการจัดการของเสีย ผู้รับเหมา และผู้พัฒนา/เจ้าของโครงการ ขนาดกลุ่มตัวอย่างในช่วง 15–30 คนดังกล่าวสอดคล้องกับข้อเสนอแนะในงานวิจัยด้านการวิเคราะห์ผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย และการประเมินการใช้งานระบบ (Usability Evaluation) ซึ่งเน้นความครอบคลุมของบริบทและความหลากหลายของมุมมองมากกว่าการแทนค่าทางสถิติ [13] กลุ่มตัวอย่างนี้สะท้อนผู้มีส่วนเกี่ยวข้องตลอดห่วงโซ่การจัดการของเสีย ส่งผลให้ข้อมูลความต้องการที่ได้มีความครอบคลุมและสามารถนำไปใช้ในการออกแบบระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

นอกจากนี้ กลุ่มผู้มีส่วนได้ส่วนเสียชุดเดียวกันยังถูกนำไปใช้ในขั้นตอนการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานในระยะถัดไป ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางการวิจัยด้านความสามารถในการใช้งานของระบบ(Usability Research) ซึ่งเป็นกระบวนการศึกษาและประเมินว่าผู้ใช้งานจริง

สามารถใช้งานระบบ EcoRanker DSS ได้ยากง่ายเพียงใด มีความสะดวกในการเข้าถึงฟังก์ชันต่าง ๆ มากน้อยแค่ไหน และเกิดความพึงพอใจในระดับใดขณะใช้งาน โดยมีการแนะนำให้ใช้กลุ่มตัวอย่างในช่วง 20–30 คนเพื่อให้ได้ผลการประเมินที่มีความน่าเชื่อถือ [95]

กลุ่มที่สาม คือ กลุ่มผู้เชี่ยวชาญเชิงเทคนิค จำนวน 7 คน ซึ่งมีบทบาทในประเมินระดับความสอดคล้องและความสัมพันธ์เชิงตรรกะระหว่างความต้องการของผู้ใช้งาน (CRs) และคุณลักษณะเฉพาะทางเทคนิค (TCs) เพื่อระบุความสำคัญของปัจจัยทางเทคนิคที่จะนำไปสู่การพัฒนาอัลกอริทึมและส่วนติดต่อผู้ใช้งาน ซึ่งประกอบด้วยผู้เชี่ยวชาญด้านการพัฒนาเว็บ การวิเคราะห์ระบบ การบริหารโครงการ วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ความยั่งยืน การวิเคราะห์ข้อมูลและการตัดสินใจหลายเกณฑ์ (MCDA) และการออกแบบประสบการณ์ผู้ใช้ (UX/UI design) ทั้งนี้การกำหนดจำนวนผู้เชี่ยวชาญสอดคล้องตามระเบียบวิธีวิจัยมาตรฐานของ QFD ที่มุ่งเน้นการใช้ผู้เชี่ยวชาญเชิงลึกในรูปแบบสหวิทยาการ (Interdisciplinary Integration) เพื่อให้ได้ข้อกำหนดของระบบ (System Specifications) ที่มีความเที่ยงตรงเชิงเนื้อหา (Content Validity) และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดการของเสียจากการก่อสร้างได้อย่างยั่งยืน

กลุ่มที่สี่ คือ ผู้เชี่ยวชาญสำหรับการยืนยันความเหมาะสมของระบบ (Expert Validation) จำนวน 12 คน ซึ่งประกอบด้วยผู้มีประสบการณ์ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ผู้ที่เกี่ยวข้องกับการจัดการของเสีย และผู้พัฒนาระบบโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยมีบทบาทในการประเมินความถูกต้อง ความน่าเชื่อถือ และศักยภาพในการนำระบบ EcoRanker DSS ไปประยุกต์ใช้จริง การกำหนดขนาดกลุ่มผู้เชี่ยวชาญในช่วงประมาณ 10–15 คนสอดคล้องกับแนวทางการประเมินระบบและการวิจัยเชิงประยุกต์ ซึ่งมุ่งเน้นการใช้ดุลยพินิจของผู้เชี่ยวชาญเพื่อยืนยันความเหมาะสมของระบบในบริบทการใช้งานจริง [95]

เพื่อให้เห็นภาพรวมของโครงสร้างกลุ่มผู้ให้ข้อมูลและบทบาทในแต่ละขั้นตอนของการวิจัยอย่างชัดเจน ผู้วิจัยได้สรุปรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สรุปกลุ่มผู้ให้ข้อมูลและบทบาทในกระบวนการวิจัย

กลุ่มผู้ให้ข้อมูล	จำนวน (คน)	บทบาทหลัก	ใช้ในขั้นตอนของการวิจัย
ผู้เชี่ยวชาญสำหรับการตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหา (IOC)	5	ตรวจสอบความสอดคล้องของข้อคำถามกับวัตถุประสงค์ของการวิจัย (Content Validity) และให้ข้อเสนอแนะเพื่อปรับปรุงเครื่องมือวิจัย	การพัฒนาเครื่องมือวิจัย (Research Instrument Development)
กลุ่มผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย (Stakeholders)	25	ประเมินความสำคัญของ Customer Requirements (CRs) และสะท้อนความต้องการของผู้ใช้งานในบริบทจริง	การสกัดความต้องการของผู้ใช้งาน (Requirement Elicitation) และการประเมินความพึงพอใจของระบบ (User Satisfaction Evaluation)
คณะผู้เชี่ยวชาญเชิงเทคนิค (Technical Experts)	7	กำหนด Technical Characteristics (TCs) และประเมินความสัมพันธ์ระหว่าง CRs และ TCs ใน QFD matrix	การสร้างและวิเคราะห์ QFD (QFD Development and Analysis)
ผู้เชี่ยวชาญสำหรับการยืนยันความเหมาะสมของระบบ (Expert Validation)	12	ประเมินความถูกต้อง ความน่าเชื่อถือ และความสามารถในการนำระบบไปประยุกต์ใช้จริงของ EcoRanker DSS	การยืนยันความเหมาะสมของระบบ (System Validation)

ข้อมูลที่ได้จากแต่ละกลุ่มถูกนำมาสังเคราะห์และพัฒนาเป็นชุดข้อมูลสำหรับใช้ในการทดลองระบบในลักษณะของกรณีศึกษา โดยไม่ได้อ้างอิงจากโครงการก่อสร้างเฉพาะแห่งใดแห่งหนึ่ง แต่เป็นการบูรณาการข้อมูลเชิงประสบการณ์และองค์ความรู้จากผู้เชี่ยวชาญและผู้มีส่วนได้ส่วนเสียที่ปฏิบัติงานจริงในบริบทการจัดการของเสียจากการก่อสร้างในพื้นที่ภาคกลางของประเทศไทย เพื่อให้สามารถสะท้อนสถานการณ์การใช้งานจริงได้อย่างเหมาะสม

3.5 ระยะที่ 1: การออกแบบโดยอาศัยความต้องการของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียด้วยเทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ (Stakeholder-driven Design using Quality Function Deployment: QFD)

ในงานวิจัยนี้ เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ (QFD) ถูกนำมาใช้ในฐานะเครื่องมือหลักสำหรับการออกแบบโครงสร้างของระบบสนับสนุนการตัดสินใจ (DSS) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อรวบรวม วิเคราะห์ และแปลงความต้องการของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย (Customer Requirements; CRs) ไปสู่ลักษณะทางเทคนิคของระบบ (Technical Characteristics; TCs) อย่างเป็นระบบ

การประยุกต์ใช้ QFD ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นในมิติของการออกแบบระบบ (System Design Perspective) มากกว่าการออกแบบผลิตภัณฑ์ โดยเน้นการเชื่อมโยงระหว่าง สิ่งที่ผู้ใช้งานต้องการ กับ สิ่งที่ระบบต้องสามารถทำได้ ผ่านโครงสร้างของแผนภาพบ้านแห่งคุณภาพ(House of Quality : HoQ) ซึ่งช่วยให้สามารถจัดลำดับความสำคัญขององค์ประกอบเชิงเทคนิคที่จำเป็นต่อการพัฒนาระบบได้อย่างมีเหตุผลและตรวจสอบได้

กระบวนการในระยะนี้ประกอบด้วย 5 ขั้นตอนหลัก ได้แก่

1) การพัฒนา Customer Requirements (CRs)

2) การประเมินความสำคัญของ CRs

3) การสร้างแผนภาพบ้านแห่งคุณภาพ (HoQ)

4) การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง CRs และ TCs

5) การคำนวณค่าความสำคัญเชิงเทคนิค (Technical Importance)

ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.5.1 การพัฒนาความต้องการของผู้ใช้ (Customer Requirements: CRs)

ในงานวิจัยนี้ดำเนินการอย่างเป็นระบบ โดยอาศัยการบูรณาการข้อมูลจาก 3 แหล่งหลัก ได้แก่

1) การทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบ (Systematic Literature Review)

2) ความต้องการของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย (Stakeholder Needs)

3) การตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหาโดยผู้เชี่ยวชาญ (Item–Objective Congruence; IOC)

ในขั้นตอนแรก ผู้วิจัยได้ทำการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับระบบสนับสนุนการตัดสินใจด้านการจัดการของเสียจากการก่อสร้าง แนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน และ

การประยุกต์ใช้เทคนิคกระบวนการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ เพื่อรวบรวมรายการความต้องการเบื้องต้นของผู้ใช้งาน

จากนั้น ข้อมูลดังกล่าวถูกนำมาปรับให้สอดคล้องกับบริบทการใช้งานจริงผ่านการพิจารณาความต้องการของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย ซึ่งครอบคลุมผู้ที่เกี่ยวข้องในห่วงโซ่การจัดการของเสีย เช่น หน่วยงานท้องถิ่น ผู้ประกอบการ และผู้ใช้งานระบบ

ในขั้นตอนสุดท้าย รายการ CRs ที่ได้ถูกนำไปตรวจสอบความสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยโดยผู้เชี่ยวชาญ ผ่านวิธีการ IOC โดยใช้เกณฑ์การประเมิน 3 ระดับ ได้แก่ +1 (สอดคล้อง), 0 (ไม่แน่ใจ), และ -1 (ไม่สอดคล้อง) โดยรายการที่มีค่า IOC ตั้งแต่ 0.67 ขึ้นไป จะถูกคัดเลือกเพื่อใช้ในขั้นตอนถัดไป

3.5.2 การประเมินความสำคัญของความต้องการของผู้ใช้

หลังจากได้รายการ CRs ที่ผ่านการตรวจสอบแล้ว ขั้นตอนถัดไปคือการประเมินระดับความสำคัญของแต่ละความต้องการ โดยใช้แบบสอบถามตามมาตราส่วนประมาณค่าแบบลิเคิร์ท (Likert Scale) 5 ระดับ ตั้งแต่ 1 (น้อยที่สุด) ถึง 5 (มากที่สุด)

ข้อมูลที่ได้จากผู้ตอบแบบสอบถามถูกนำมาคำนวณค่าเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต (Geometric Mean: GM) เพื่อสะท้อนระดับความสำคัญของแต่ละ CR โดยใช้สมการดังนี้

$$GM_j = \left(\prod_{i=1}^{n} x_{ij} \right)^{\frac{1}{n}} \tag{3.1}$$

เมื่อ GM_j คือ ค่า Geometric Mean ของ CR ที่ j

x_{ij} คือ คะแนนของผู้ตอบคนที่ i ต่อ CR ที่ j

n คือ จำนวนผู้ตอบแบบสอบถาม

จากนั้น ค่าที่ได้จะถูกทำให้เป็นค่าน้ำหนักสัมพัทธ์ (Normalization) เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบกันได้ โดยใช้สมการ

$$W_j = \frac{GM_j}{\sum_{j=1}^{m} GM_j} \tag{3.2}$$

เมื่อ W_j คือ ค่าน้ำหนักของ CR ที่ j

m คือ จำนวน CR ทั้งหมด

3.5.3 การกำหนดคุณลักษณะทางเทคนิคและการสร้างบ้านแห่งคุณภาพ (HoQ)

ภายหลังจากการกำหนดความต้องการของผู้ใช้ (Customer Requirements; CRs) งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการกำหนดคุณลักษณะทางเทคนิค (Technical Characteristics; TCs) เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวแทนเชิงวิศวกรรมของความต้องการดังกล่าว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อแปลง “เสียงของผู้ใช้” (Voice of Customer; VOC) ไปสู่ข้อกำหนดเชิงเทคนิคที่สามารถนำไปใช้ในการออกแบบและพัฒนาระบบได้อย่างเป็นรูปธรรม ตามหลักการของ QFD [96]

การพัฒนา TCs ในงานวิจัยนี้อาศัยการบูรณาการจาก 3 แหล่งองค์ความรู้หลัก ได้แก่

1) การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับระบบสนับสนุนการตัดสินใจและสถาปัตยกรรมระบบสารสนเทศ
2) การวิเคราะห์เชิงระบบ (System Analysis) เพื่อระบุองค์ประกอบหลักของระบบ EcoRanker DSS ทั้งในส่วนของ frontend และ backend
3) การระดมความคิดเห็นจากผู้เชี่ยวชาญเชิงเทคนิค เพื่อให้คุณลักษณะที่กำหนดมีความเหมาะสมทั้งในเชิงวิศวกรรมและการใช้งานจริง

ผลจากกระบวนการดังกล่าวนำไปสู่การกำหนดคุณลักษณะทางเทคนิคของระบบจำนวน 12 รายการ ซึ่งครอบคลุมมิติสำคัญของระบบ ได้แก่ การออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้ (User Interface), ประสิทธิภาพของระบบ (System Performance), ความปลอดภัยของข้อมูล (Data Security), ความสามารถในการเชื่อมโยงข้อมูล (Interoperability), ความน่าเชื่อถือของอัลกอริทึม (Algorithm Reliability) และการบูรณาการด้านสิ่งแวดล้อม (Environmental Integration) ซึ่งสะท้อนถึงการออกแบบระบบที่คำนึงถึงทั้งประสิทธิภาพและความยั่งยืน

เพื่อหลีกเลี่ยงความซ้ำซ้อนเชิงแนวคิด (Conceptual Overlap) งานวิจัยได้กำหนดขอบเขตของแต่ละคุณลักษณะทางเทคนิคอย่างชัดเจน โดยเฉพาะคุณลักษณะที่มีความใกล้เคียงกัน เช่น TC4: System Responsiveness ซึ่งมุ่งเน้นประสิทธิภาพการประมวลผลของระบบในฝั่ง backend และ TC12: Cross-device Compatibility ซึ่งมุ่งเน้นความสามารถในการแสดงผลของระบบในฝั่ง frontend การแยกองค์ประกอบดังกล่าวช่วยเพิ่มความชัดเจนในการออกแบบและลดความคลุมเครือในการวิเคราะห์

ตารางที่ 3.2 คุณลักษณะทางเทคนิคของระบบ (Technical Characteristics; TCs)

ลำดับ	คุณลักษณะทางเทคนิค (TCs)	แหล่งอ้างอิง
1	การออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้และการแสดงผล (User Interface & Visualization)	[97-99]
2	การจัดทำเอกสารวิธีการและระเบียบวิธี (Methodology Documentation)	[97][100]
3	โมดูลการปรับแต่งระบบ (Customization Module)	[97][99]
4	ความสามารถในการตอบสนองของระบบ (System Responsiveness)	[97]
5	การบูรณาการเกณฑ์การประเมินอย่างครอบคลุม (Comprehensive Criteria Integration)	
6	มาตรการด้านความปลอดภัยของข้อมูล (Data Security Protocols)	[97]
7	การทำงานร่วมกันของผู้ใช้หลายราย (Multi-User Collaboration)	[98], [99]
8	การปรับปรุงและบำรุงรักษาระบบ (Update & Maintenance)	[104]
9	การปรับปรุงข้อมูลแบบเวลาจริง (Real-time Data Updating)	[98]
10	ความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของอัลกอริทึม (Algorithm Accuracy & Reliability)	[99]
11	การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม (Environmental Impact Assessment)	[103], [104]
12	ความสามารถในการใช้งานข้ามอุปกรณ์ (Cross-Device Compatibility)	[99,105]

ภายหลังจากการกำหนดคุณลักษณะทางเทคนิค งานวิจัยนี้ได้นำ HoQ มาใช้เป็นกรอบการวิเคราะห์หลักในการเชื่อมโยงความต้องการของผู้ใช้กับคุณลักษณะทางเทคนิค โดย HoQ ทำหน้าที่เป็นเครื่องมือเชิงโครงสร้างที่ช่วยแปลงความต้องการเชิงคุณภาพไปสู่ข้อกำหนดเชิงเทคนิคในรูปแบบที่สามารถวิเคราะห์เชิงปริมาณได้

โครงสร้างของ HoQ ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 6 องค์ประกอบ ได้แก่

(1) ความต้องการของผู้ใช้ (Customer Requirements; WHATs)

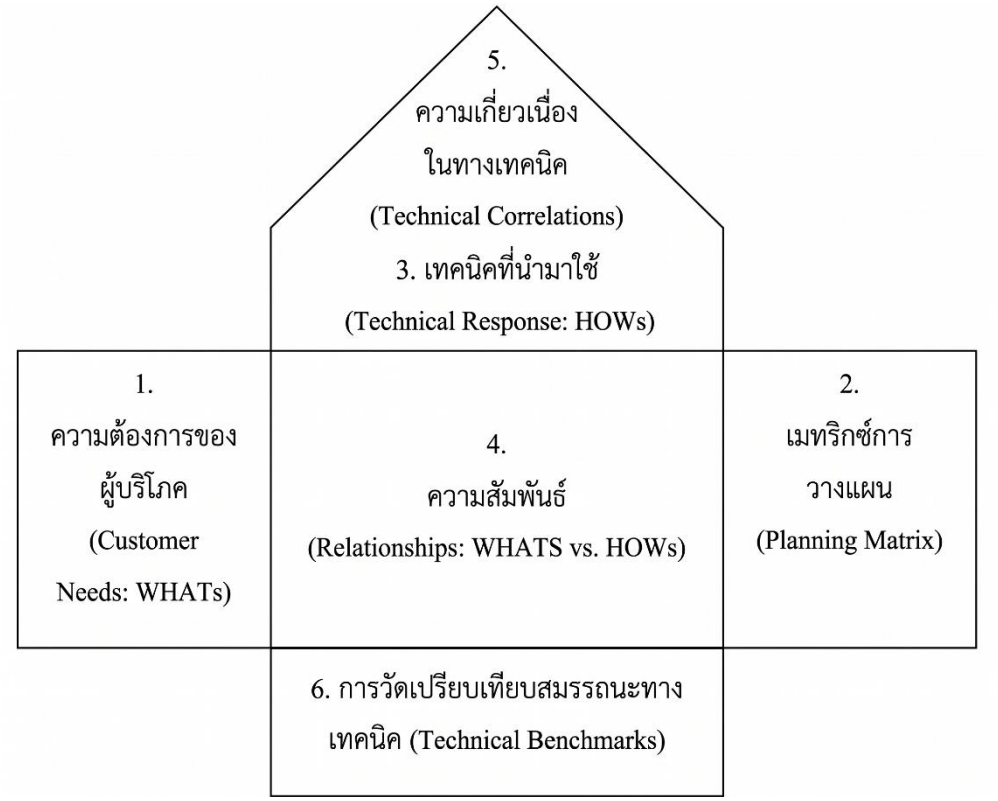
(2) เมทริกซ์การวางแผน (Planning Matrix) ซึ่งรวมถึงค่าน้ำหนักของ CRs

(3) คุณลักษณะทางเทคนิค (Technical Characteristics; HOWs)

(4) เมทริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่าง WHATs และ HOWs (Relationship Matrix)

(5) เมทริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างคุณลักษณะทางเทคนิค (Technical Correlation Matrix)

(6) การวัดเปรียบเทียบสมรรถนะทางเทคนิค



ภาพที่ 3.2 โครงสร้างบ้านแห่งคุณภาพ (HoQ)

ที่มา : ดัดแปลงจาก Akao [96]

ความสัมพันธ์ระหว่างความต้องการของผู้ใช้ (CRs) และคุณลักษณะทางเทคนิค (TCs) ถูกประเมินโดยใช้ระดับความสัมพันธ์ 4 ระดับ ได้แก่ 0 (ไม่มีความสัมพันธ์), 1 (ต่ำ), 3 (ปานกลาง) และ 9 (สูง) ซึ่งสะท้อนถึงระดับอิทธิพลของคุณลักษณะทางเทคนิคที่มีต่อความต้องการของผู้ใช้ในเชิงสัมพัทธ์

โครงสร้าง HoQ ดังกล่าวช่วยให้สามารถวิเคราะห์ได้อย่างเป็นระบบว่าคุณลักษณะทางเทคนิคแต่ละรายการมีบทบาทในการตอบสนองความต้องการของผู้ใช้อย่างไร รวมทั้งสามารถระบุความสอดคล้อง (Synergies) และความขัดแย้ง (Trade-offs) ระหว่างองค์ประกอบของระบบได้อย่างชัดเจน [16]

ผลการประเมินความสัมพันธ์ระหว่าง CRs และ TCs จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณความสำคัญเชิงเทคนิคของคุณลักษณะทางเทคนิคในหัวข้อถัดไป

3.5.4 การประเมินความสัมพันธ์ระหว่าง CR–TC และการคำนวณความสำคัญเชิงเทคนิค (CR-TC Relationship Scoring and Technical Importance Calculation)

ภายใต้โครงสร้าง HoQ ที่ได้กำหนดไว้ในหัวข้อ 3.5.3 งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการประเมินความสัมพันธ์ระหว่างความต้องการของผู้ใช้ (CRs) และคุณลักษณะทางเทคนิค (TCs) เพื่อแปลงความต้องการเชิงคุณภาพไปสู่พารามิเตอร์เชิงปริมาณที่สามารถนำไปใช้ในการออกแบบและพัฒนาระบบได้อย่างเป็นระบบตามหลักการของ QFD

การประเมินความสัมพันธ์ CR–TC ดำเนินการโดยคณะผู้เชี่ยวชาญเชิงเทคนิคจำนวน 7 คน ซึ่งมีความเชี่ยวชาญในด้านระบบสนับสนุนการตัดสินใจ วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และการพัฒนาระบบสารสนเทศ โดยผู้เชี่ยวชาญแต่ละคนทำการประเมินอย่างอิสระ (independent assessment) เพื่อลดอคติจากอิทธิพลระหว่างผู้ประเมิน จากนั้นจึงนำผลการประเมินมาสังเคราะห์ในรูปแบบค่าเฉลี่ยเชิงกลุ่ม (aggregation)

ระดับความสัมพันธ์ถูกกำหนดโดยใช้มาตราส่วนมาตรฐานของ QFD ซึ่งประกอบด้วย 4 ระดับ ได้แก่ ไม่มีความสัมพันธ์ (0) ความสัมพันธ์ต่ำ (1) ความสัมพันธ์ปานกลาง (3) และความสัมพันธ์สูง (9) โดยมาตราส่วนดังกล่าวถูกนำมาใช้เพื่อสะท้อนระดับอิทธิพลของคุณลักษณะทางเทคนิคต่อความต้องการของผู้ใช้ในเชิงปริมาณ [96]

ตารางที่ 3.3 มาตราส่วนความสัมพันธ์มาตรฐานสำหรับการประเมิน CR–TC ใน QFD

Relationship	Symbol	Score
No relationship		0
Weak relationship	Δ	1
Moderate relationship	○	3
Strong relationship	●	9

การใช้มาตราส่วนคะแนนดังกล่าวช่วยให้การประเมินมีความเป็นมาตรฐาน ลดความคลาดเคลื่อนเชิงอัตวิสัย และเพิ่มความสามารถในการเปรียบเทียบผลการประเมินระหว่างผู้เชี่ยวชาญ

จากนั้น ค่าความสำคัญเชิงเทคนิคของคุณลักษณะทางเทคนิคแต่ละรายการ (Technical Importance; TI_j) ถูกคำนวณโดยการรวมผลกระทบจาก CRs ทั้งหมดภายใต้การถ่วงน้ำหนักของความต้องการของผู้ใช้ ดังสมการ

$$TI_j = \sum_{i=1}^{m} w_i \times r_{ij} \tag{3.3}$$

โดยที่ w_i คือ ค่าน้ำหนักของ Customer Requirement ที่ i ซึ่งได้จากการคำนวณค่า Geometric Mean และการทำ Normalization ในขั้นตอนก่อนหน้า

r_{ij} คือ ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง CR ที่ i และ TC ที่ j

m คือ จำนวน Customer Requirements

เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบความสำคัญของ TCs ได้อย่างชัดเจน ค่า Technical Importance จะถูกปรับให้อยู่ในรูปของน้ำหนักสัมพัทธ์ (Relative Weight) โดยทำ Normalization ดังนี้

$$RW_j = \frac{TI_j}{\sum_{j=1}^{k} TI_j} \tag{3.4}$$

โดยที่ k คือ จำนวน Technical Characteristics

แนวทางการคำนวณดังกล่าวสอดคล้องกับหลักการพื้นฐานของ HoQ ซึ่งใช้การถ่วงน้ำหนักของ Customer Requirements เพื่อสะท้อนอิทธิพลเชิงระบบของแต่ละคุณลักษณะทางเทคนิค [99]

เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการประเมิน งานวิจัยนี้ได้ใช้การประเมินแบบอิสระร่วมกับการสังเคราะห์ความคิดเห็นเชิงกลุ่ม (Aggregation) ซึ่งกระบวนการรวบรวมผลการประเมินจากผู้เชี่ยวชาญแต่ละท่านซึ่งกระทำอย่างเป็นอิสระต่อกัน เพื่อลดอคติจากการชี้นำทางความคิด (Bias) จากนั้นจึงนำข้อมูลหรือผลคะแนนที่ได้มาวิเคราะห์และสังเคราะห์รวมกัน เพื่อหาข้อสรุปที่เป็นเอกฉันท์และสะท้อนภาพรวมของกลุ่มได้อย่างแม่นยำ และการถ่วงน้ำหนักด้วย w_i ซึ่งช่วยลด

ความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดจากความคิดเห็นหรือมุมมองส่วนบุคคลของผู้ประเมิน และเพิ่มความสอดคล้องของผลลัพธ์ในระดับระบบ

ผลลัพธ์ของการคำนวณค่า Technical Importance น้ำหนักสัมพัทธ์ของ TCs และการจัดลำดับความสำคัญ รวมถึงรายละเอียดเชิงปริมาณของค่า Geometric Mean (GM) และน้ำหนักของ CRs จะถูกนำเสนอและวิเคราะห์ในบทที่ 4 ซึ่งเป็นส่วนของผลการวิจัย

ผลลัพธ์ของระยะที่ 1 นำไปสู่การพัฒนาโครงสร้างเกณฑ์การตัดสินใจที่มีความสอดคล้องเชิงระบบ โดยเชื่อมโยงความต้องการของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย (CRs) กับคุณลักษณะทางเทคนิค (TCs) ผ่านกรอบ HoQ อย่างเป็นรูปธรรม โครงสร้างดังกล่าวช่วยแปลงความต้องการเชิงคุณภาพไปสู่พารามิเตอร์เชิงปริมาณที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบระบบได้อย่างเป็นระบบ ผลลัพธ์ที่ได้ทำหน้าที่เป็นทำหน้าที่เป็นกลไกเชื่อมโยงระหว่างการออกแบบที่ขับเคลื่อนด้วยความต้องการของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย กับการสร้างแบบจำลองเพื่อการตัดสินใจ อีกทั้งยังเป็นฐานข้อมูลสำคัญสำหรับการกำหนดค่าน้ำหนักด้วย FAHP และการจัดอันดับด้วย TOPSIS ในระยะถัดไป ส่งผลให้การพัฒนาระบบ EcoRanker DSS มีความโปร่งใส ตรวจสอบได้ และสอดคล้องกับการใช้งานจริง

3.6 ระยะที่ 2: Decision Criteria Structuring and FAHP Weighting

3.6.1 โครงสร้างลำดับชั้นของเกณฑ์ (Criteria Hierarchy)

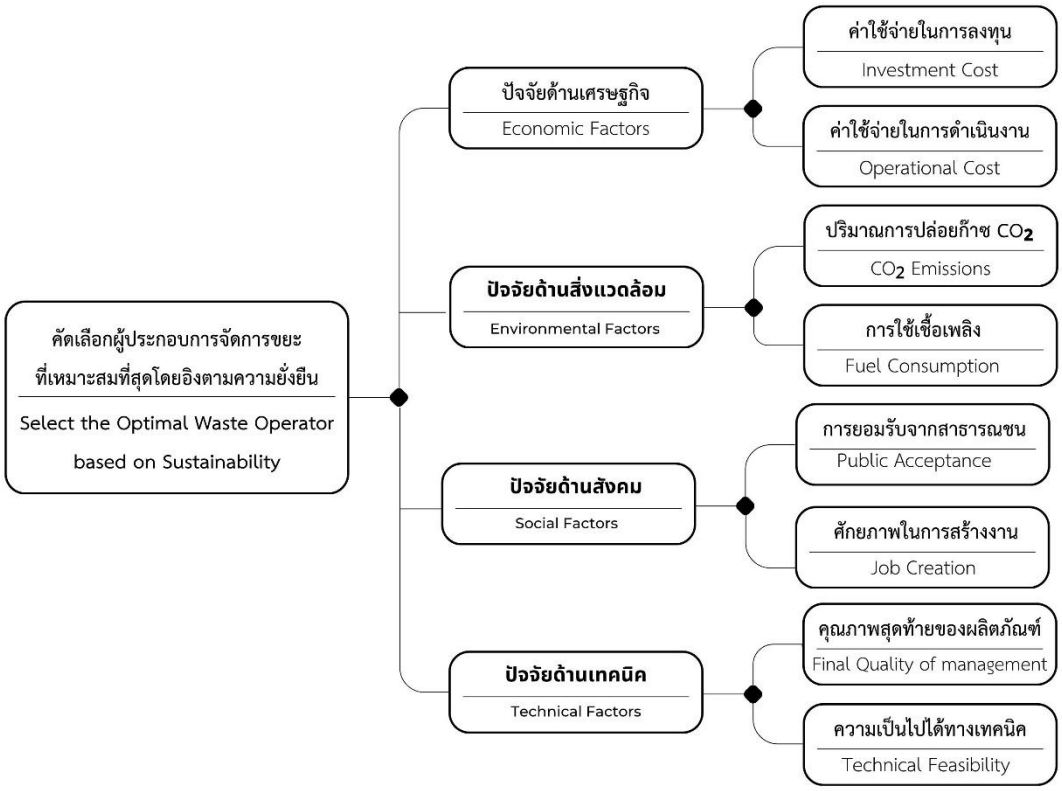
โครงสร้างลำดับชั้นของเกณฑ์การตัดสินใจ (Criteria Hierarchy) ในงานวิจัยนี้ถูกพัฒนาขึ้นโดยอาศัยการสังเคราะห์องค์ความรู้จากวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องและงานวิจัยก่อนหน้าในบริบทของการจัดการของเสียจากการก่อสร้างและการรื้อถอน (CDW) โดยเฉพาะงานวิจัยที่ประยุกต์ใช้เทคนิค FAHP ในการกำหนดเกณฑ์การตัดสินใจ ซึ่งโดยทั่วไปมีการจำแนกเกณฑ์ออกเป็น 4 มิติหลัก ได้แก่ ด้านเศรษฐกิจ (Economic) ด้านสิ่งแวดล้อม (Environmental) ด้านสังคม (Social) และด้านเทคนิค (Technical) [107]

นอกจากนี้ โครงสร้างดังกล่าวยังสอดคล้องกับแนวทางการพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจด้านการจัดการของเสียจากการก่อสร้างในบริบทของเศรษฐกิจหมุนเวียน ซึ่งเน้นการบูรณาการมิติด้านความยั่งยืนเข้ากับการพัฒนาระบบดิจิทัล [108]

อย่างไรก็ตาม แม้ว่างานวิจัยก่อนหน้าจะนำเสนอเกณฑ์การตัดสินใจที่ครอบคลุมมิติของความยั่งยืน แต่เกณฑ์ย่อยส่วนใหญ่มักอยู่ในลักษณะเชิงแนวคิด (Conceptual Indicators) เช่น มลพิษทางอากาศ (Air Pollution) และการใช้พลังงาน (Energy Consumption) ซึ่งยังไม่สามารถนำไปใช้ในการคำนวณเชิงปริมาณในระบบสนับสนุนการตัดสินใจแบบอัตโนมัติได้โดยตรง

ในมิติด้านสิ่งแวดล้อม ตัวชี้วัดจึงถูกปรับจากมลพิษทางอากาศและการใช้พลังงานไปสู่การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และ การใช้เชื้อเพลิง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากข้อมูลระยะทางการขนส่ง ประเภทของยานพาหนะ และอัตราการใช้เชื้อเพลิง โดยอ้างอิงหลักการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment; LCA) และปัจจัยการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตามแนวทางของ การปรับปรุงดังกล่าวสะท้อนถึงการเปลี่ยนผ่านจากเกณฑ์เชิงแนวคิดไปสู่เกณฑ์เชิงปฏิบัติ เป็นองค์ประกอบสำคัญในการพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจที่สามารถประมวลผลและให้ผลลัพธ์เชิงวิเคราะห์ได้อย่างเป็นระบบ โครงสร้างลำดับชั้นของเกณฑ์การตัดสินใจในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย 4 มิติหลัก และ 8 เกณฑ์ย่อย ดังนี้

1) ด้านเศรษฐกิจ: ค่าใช้จ่ายในการลงทุน และต้นทุนหรือค่าใช้จ่ายการดำเนินงาน
2) ด้านสิ่งแวดล้อม: การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และการใช้พลังงานเชื้อเพลิง
3) ด้านสังคม: การสร้างงานใหม่ และ การยอมรับของสาธารณะชน
4) ด้านเทคนิค: คุณภาพของของเสียหลังจากออกสู่กระบวนการกำจัด และความเป็นไปได้ทางเทคนิคในการจัดการของเสีย



ภาพที่ 3.3 โครงสร้างลำดับชั้นของเกณฑ์การตัดสินใจสำหรับระบบ EcoRanker DSS

ภาพที่ 3.3 แสดงโครงสร้างลำดับชั้นของเกณฑ์การตัดสินใจ ซึ่งประกอบด้วยเป้าหมายหลัก เกณฑ์หลัก 4 มิติ และเกณฑ์ย่อย 8 รายการ โดยโครงสร้างดังกล่าวถูกใช้เป็นพื้นฐานในการดำเนินการวิเคราะห์ด้วยวิธี FAHP เพื่อกำหนดค่าน้ำหนักของเกณฑ์ และนำไปใช้ในกระบวนการตัดสินใจของระบบ EcoRanker DSS

3.6.2 การคำนวณค่าน้ำหนักด้วย FAHP (FAHP Computation)

การกำหนดค่าน้ำหนักของเกณฑ์การตัดสินใจในงานวิจัยนี้ดำเนินการโดยใช้วิธี FAHP ซึ่งเป็นการผสานระหว่างแนวคิดของ AHP และทฤษฎีฟัซซี [109] เพื่อรองรับความไม่แน่นอนและความคลุมเครือในการประเมินของผู้เชี่ยวชาญ กระบวนการคำนวณค่าน้ำหนักด้วยวิธี FAHP โดยประกอบด้วยขั้นตอนหลัก ดังนี้

(1) การสร้างเมทริกซ์การเปรียบเทียบเชิงคู่ (Pairwise Comparison Matrix) ผู้เชี่ยวชาญทำการเปรียบเทียบความสำคัญของเกณฑ์เป็นคู่ ๆ ภายใต้โครงสร้างลำดับชั้นที่กำหนดไว้

(2) การแปลงค่าการประเมินเป็นจำนวนฟัซซี (Fuzzification) ค่าการประเมินเชิงภาษาถูกแปลงเป็นจำนวนฟัซซีแบบสามเหลี่ยม (Triangular Fuzzy Numbers; TFNs) เพื่อสะท้อนความไม่แน่นอนของการตัดสินใจ

(3) การคำนวณค่า Fuzzy Synthetic Extent สำหรับแต่ละเกณฑ์ เพื่อประเมินระดับความสำคัญเชิงสัมพัทธ์

(4) การทำ Defuzzification ค่าฟัซซีที่ได้ถูกแปลงเป็นค่าจำนวนจริง (Crisp Values) เพื่อให้สามารถนำไปใช้ในการคำนวณเชิงปริมาณได้

(5) การทำ Normalization ค่าที่ได้ถูกปรับให้อยู่ในรูปของน้ำหนักสัมพัทธ์ โดยผลรวมของน้ำหนักทั้งหมดเท่ากับ 1

เพื่อคำนวณค่าน้ำหนักของเกณฑ์ งานวิจัยนี้ใช้วิธี Extent Analysis ซึ่งมีขั้นตอนเชิงคณิตศาสตร์ โดยมีขั้นตอนดังนี้

1) Triangular Fuzzy Number (TFN)

ค่าการเปรียบเทียบถูกแทนด้วยจำนวนฟัซซีแบบสามเหลี่ยม

$$\widetilde{M} = (l, m, u) \tag{3.5}$$

โดยที่ l คือ ค่าต่ำสุด (lower bound)

m คือ ค่ากลาง (most likely value)

u คือ ค่าสูงสุด (upper bound)

2) Fuzzy Synthetic Extent (Si)

สำหรับแต่ละเกณฑ์ I ค่า fuzzy synthetic extent คำนวณได้ดังนี้

$$S_I = \left(\sum_{j=1}^{m} \widetilde{M}_{ij}\right) \otimes \left(\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} \widetilde{M}_{ij}\right)^{-1} \tag{3.6}$$

โดยที่ $\widetilde{M}_{ij}$ คือ ค่า TFN ของการเปรียบเทียบ

$\otimes$ คือ การคูณของฟัซซี

$^{-1}$ คือ การหาค่าผกผันของจำนวนฟัซซี

3) Degree of Possibility

การเปรียบเทียบระหว่างค่า fuzzy synthetic extent ใช้ degree of possibility

$$V(S_i \geq S_k) = \begin{cases} 1, & if\ m_i \geq m_k \\ 0, & if\ l_k \geq u_i \\ \dfrac{l_k - u_i}{(m_i - u_i) - (m_k - l_k)}, & otherwise \end{cases} \tag{3.7}$$

4) Weight Vector

ค่าน้ำหนักเบื้องต้นของแต่ละเกณฑ์คำนวณจาก

$$d_i = min\ V(S_i \geq S_k),\ i \neq k \tag{3.8}$$

และเวกเตอร์น้ำหนักคือ

$$W = (d_1, d_2, \ldots, d_n)^T \tag{3.9}$$

5) Normalization

การปรับค่าค่าน้ำหนักให้อยู่ในรูปมาตรฐาน เพื่อให้ผลรวมของค่าน้ำหนักทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 1

$$w_i = \frac{d_i}{\sum_{i=1}^{n} d_i} \tag{3.10}$$

ค่าน้ำหนักของเกณฑ์การตัดสินใจ w_i ที่ได้จากกระบวนการคำนวณด้วยวิธี FAHP ในหัวข้อ 3.6.2 ถูกนำมาใช้เป็นองค์ประกอบสำคัญในกระบวนการตัดสินใจของระบบ EcoRanker โดยค่าน้ำหนักดังกล่าวถูกกำหนดให้เป็นค่าเริ่มต้น (default weights) ภายในระบบ เพื่อสะท้อนความสำคัญเชิงสัมพัทธ์ของเกณฑ์การประเมินตามมุมมองของผู้เชี่ยวชาญ

3.7 ระยะที่ 3: Environmental and GIS Data Integration

ระยะที่ 3 ของงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการบูรณาการข้อมูลเชิงพื้นที่ (Geographic Information System; GIS) ร่วมกับแบบจำลองผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม เพื่อพัฒนาตัวชี้วัดเชิงปริมาณ (Quantitative Environmental Indicators) ที่สามารถนำไปใช้ในกระบวนการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ (MCDA) ภายในระบบ EcoRanker DSS ได้อย่างเป็นระบบ โปร่งใส และสามารถตรวจสอบย้อนกลับได้

แนวคิดการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมในงานวิจัยนี้อ้างอิงตามหลักการของ Life Cycle Impact Assessment (LCIA) ภายใต้มาตรฐาน IPCC 2013 Global Warming Potential (GWP 100a) ซึ่งเป็นกรอบมาตรฐานสากลในการประเมินศักยภาพการก่อภาวะโลกร้อน (Global Warming Potential) [110] และใช้ค่าปัจจัยการปล่อย (Emission Factors) จากองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทย (TGO) เพื่อให้สอดคล้องกับบริบทการใช้งานจริงในประเทศ [111]

3.7.1 การบูรณาการข้อมูลเชิงพื้นที่ (GIS Integration)

ระบบ EcoRanker DSS ใช้เทคโนโลยี GIS ในการคำนวณระยะทางการขนส่งของเสียระหว่าง

(1) แหล่งกำเนิดของเสีย (Construction Site)

(2) สถานที่จัดการของเสีย (Waste Processing Facility)

โดยเชื่อมต่อกับบริการแผนที่ดิจิทัล เช่น Google Maps API เพื่อให้ได้ระยะทางตามเส้นทางจริง (Actual Travel Distance; D) ซึ่งมีความแม่นยำมากกว่าการใช้ระยะทางเชิงเส้นตรงและสะท้อนสภาพการใช้งานจริง เช่น โครงข่ายถนนและข้อจำกัดของเส้นทาง ทั้งนี้ การใช้ข้อมูลระยะทางจริงถือเป็นแนวปฏิบัติที่สำคัญในการลดความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองด้านการขนส่งในงานประเมินสิ่งแวดล้อม [104] ข้อมูลระยะทางดังกล่าวถูกใช้เป็นตัวแปรนำเข้าในแบบจำลองสิ่งแวดล้อมในลำดับถัดไป

3.7.2 การพัฒนาแบบจำลองผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม (Environmental Impact Modeling)

งานวิจัยนี้พัฒนาแบบจำลองเชิงคำนวณ (Computational Models) เพื่อแปลงข้อมูลเชิงปฏิบัติการให้เป็นตัวชี้วัดด้านสิ่งแวดล้อม โดยยึดตามหลักการ LCIA ซึ่งสามารถอธิบายได้ในรูปแบบทั่วไป ดังนี้

$$Impact = Activity\ Data\ x\ Emission\ Factor \tag{3.11}$$

โดย Activity Data มาจากระยะทาง (GIS) และ ปริมาณของเสีย
Emission Factor อ้างอิงจากฐานข้อมูลองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (TGO)

แนวทางดังกล่าวสอดคล้องกับหลักการของ LCIA ที่ใช้ในการแปลงข้อมูลกิจกรรมให้เป็นค่าผลกระทบสิ่งแวดล้อม [97,111] แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย 2 ตัวชี้วัดหลัก ได้แก่

- C2: การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
- C3: การใช้เชื้อเพลิง

ซึ่งสะท้อนผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมและพลังงานจากกิจกรรมการขนส่งของเสียโดยตรง

3.7.2.1 แบบจำลองการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 Emission Model: C2)

แบบจำลองนี้ใช้แนวคิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกแบบอิงระยะทาง (Distance-based Emission Model) สำหรับการประเมินค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการขนส่ง โดยอ้างอิงค่า Emission Factors (EF) จากฐานข้อมูลขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (TGO) ซึ่งพัฒนาตามมาตรฐานสากล ทั้งนี้ ค่า EF ถูกจำแนกตามสภาวะการบรรทุก ได้แก่ สภาวะบรรทุก (Loaded) และสภาวะรถเปล่า (Unloaded) เพื่อสะท้อนพฤติกรรมการใช้พลังงาน

ของรถบรรทุกในสภาวะการทำงานจริงซึ่งเป็นแนวทางที่ได้รับการยอมรับในงานประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากภาคการขนส่ง [110]

<u>อัลกอริทึมการคำนวณ</u>

กำหนดให้การขนส่งหนึ่งรอบประกอบด้วยสองช่วง ได้แก่ ช่วงบรรทุกและช่วงรถเปล่า การคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดำเนินการตามลำดับขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดตัวแปรนำเข้า (Input Parameters)
    - ระยะทางในช่วงบรรทุก D_{loaded} และช่วงรถเปล่า D_{empty}
    - ปริมาณน้ำหนักบรรทุกต่อเที่ยว W_{load}
    - ค่า Emission Factor สำหรับแต่ละสภาวะ ได้แก่ EF_{loaded} และ $EF_{unloaded}$
2. คำนวณการปล่อยในแต่ละช่วงการเดินทาง

    ช่วงบรรทุก

$$E_{loaded} = EF_{loaded} \times D_{loaded} \times W_{load} \tag{3.12}$$

    ช่วงรถเปล่า

$$E_{empty} = EF_{unloaded} \times D_{empty} \tag{3.13}$$

3. คำนวณการปล่อยต่อหนึ่งรอบการขนส่ง

$$E_{trip} = E_{loaded} + E_{empty} \tag{3.14}$$

4. คำนวณจำนวนรอบการขนส่งทั้งหมด

$$N = \frac{Q}{W_{load}} \tag{3.15}$$

5. คำนวณการปล่อยรวมทั้งหมด

$$E_{total} = E_{trip} \times N \tag{3.16}$$

โดยค่า C2 มีหน่วยเป็น $kgCO_2eq$ (กิโลกรัมคาร์บอนเทียบเท่า) และถูกกำหนดให้เป็นเกณฑ์ประเภทต้นทุน (Cost Criterion) สำหรับการประเมินในขั้นตอนถัดไป

3.7.2.2 แบบจำลองการใช้เชื้อเพลิง (Fuel Consumption Model: C3)

แบบจำลองนี้สะท้อนประสิทธิภาพด้านพลังงานของการขนส่ง โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางและอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางการขนส่งและอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของรถบรรทุก (Fuel Efficiency) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากข้อมูลที่สามารถเก็บรวบรวมได้จริงในภาคสนามและเป็นตัวชี้วัดที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิเคราะห์ด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม [104]

<u>อัลกอริทึมการคำนวณ</u>

การคำนวณปริมาณการใช้เชื้อเพลิงดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดตัวแปรนำเข้า (Input Parameters)
   - ระยะทางรวมต่อรอบการขนส่ง D_{round}
   - อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง FE (km/L)
   - ปริมาณของเสียรวม Q
   - ปริมาณบรรทุกต่อเที่ยว W_{load}

2. คำนวณปริมาณเชื้อเพลิงต่อหนึ่งรอบ

$$Fuel_{trip} = \frac{D_{round}}{FE} \tag{3.17}$$

3. คำนวณจำนวนเที่ยวขนส่ง

$$N = \frac{Q}{W_{load}} \tag{3.18}$$

4. คำนวณปริมาณเชื้อเพลิงรวม

$$Fuel_{total} = Fuel_{trip} \times N \tag{3.19}$$

5. ปรับให้อยู่ในรูปต่อหนึ่งตันของเสีย

$$C3 = \frac{Fuel_{total}}{Q} \tag{3.20}$$

โดยค่า C3 มีหน่วยเป็นลิตรต่อตัน (L/ton) และถูกจัดอยู่ในกลุ่มเกณฑ์ประเภทต้นทุน (cost criterion)

ผลลัพธ์จากแบบจำลองในส่วนนี้ ได้แก่ ค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหนึ่งตันของของเสีย (C2) และค่าการใช้เชื้อเพลิงต่อหนึ่งตันของของเสีย (C3) จะถูกนำไปใช้เป็นตัวแทนของเกณฑ์ด้านสิ่งแวดล้อมในระบบ EcoRanker โดยค่าดังกล่าวจะถูกจัดรูปให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมสำหรับการประมวลผลในกระบวนการวิเคราะห์แบบหลายเกณฑ์ (MCDA) ร่วมกับเกณฑ์ด้านเศรษฐศาสตร์ สังคม และเทคนิค

3.8 ระยะที่ 4: Web-based DSS Development

ระยะนี้มุ่งเน้นการพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจ EcoRanker DSS ในรูปแบบเว็บแอปพลิเคชัน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อแปลงกรอบแนวคิดเชิงทฤษฎีจากระยะก่อนหน้า ได้แก่ การกำหนดโครงสร้างเกณฑ์ด้วยเทคนิค QFD การกำหนดค่าน้ำหนักด้วย FAHP และการจัดอันดับด้วยวิธี TOPSIS ให้กลายเป็นระบบที่สามารถใช้งานได้จริงในบริบทของการจัดการของเสียจากการก่อสร้าง

การพัฒนาระบบอาศัยแนวคิดสถาปัตยกรรมของระบบสนับสนุนการตัดสินใจ (DSS) ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก ได้แก่ การจัดการข้อมูล การจัดการแบบจำลอง การจัดการองค์ความรู้ และส่วนติดต่อผู้ใช้งาน เพื่อให้ระบบสามารถรองรับการประมวลผลข้อมูล การตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ และการโต้ตอบกับผู้ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โปร่งใส และสามารถตรวจสอบย้อนกลับได้

3.8.1 สถาปัตยกรรมของระบบ (System Architecture)

ระบบ EcoRanker DSS ถูกออกแบบภายใต้สถาปัตยกรรมแบบหลายชั้น (multi-layer architecture) ซึ่งประกอบด้วย 4 องค์ประกอบหลัก ได้แก่

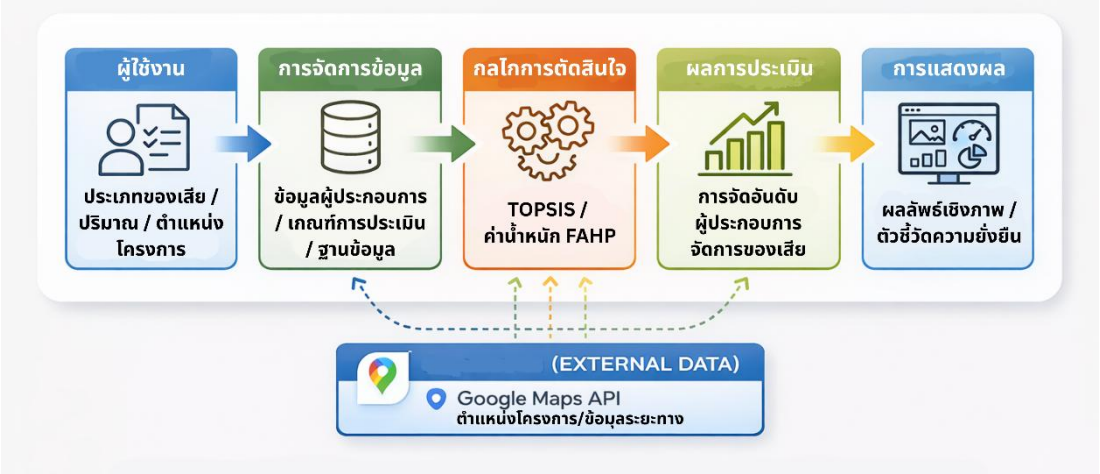
(1) ส่วนจัดการข้อมูล (Data Management Subsystem) ทำหน้าที่จัดเก็บและบริหารข้อมูลที่เกี่ยวข้องทั้งหมด เช่น ข้อมูลผู้ใช้งาน ข้อมูลโครงการ เกณฑ์การประเมิน และผลลัพธ์ โดยใช้ฐานข้อมูลเชิงสัมพันธ์เพื่อรองรับการเข้าถึงข้อมูลอย่างมีประสิทธิภาพ

(2) ส่วนจัดการแบบจำลอง (Model Management Subsystem) ทำหน้าที่ประมวลผลการตัดสินใจ โดยบูรณาการแบบจำลอง TOPSIS สำหรับการจัดอันดับทางเลือกภายใต้ค่าน้ำหนักที่ได้จาก FAHP ซึ่งช่วยให้การตัดสินใจมีความเป็นระบบและสอดคล้องกับความเห็นของผู้เชี่ยวชาญ

(3) ส่วนจัดการองค์ความรู้ (Knowledge Management Subsystem) ทำหน้าที่จัดเก็บองค์ความรู้ เช่น นิยามของเกณฑ์ ค่าน้ำหนัก และกฎการตัดสินใจ เพื่อเพิ่มความโปร่งใสและความสามารถในการอธิบายผลลัพธ์ของระบบ

(4) ส่วนติดต่อผู้ใช้งาน (User Interface Subsystem) เป็นส่วนที่ผู้ใช้งานโต้ตอบกับระบบโดยออกแบบในรูปแบบเว็บแอปพลิเคชัน เพื่อให้สามารถเข้าถึงได้ง่าย รองรับผู้ใช้งานหลายกลุ่ม และใช้งานได้อย่างสะดวก

สถาปัตยกรรมดังกล่าวช่วยให้ระบบมีความยืดหยุ่น สามารถพัฒนาเพิ่มเติม และรองรับการใช้งานจริงในบริบทของการจัดการของเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 3.4 สถาปัตยกรรมของระบบ EcoRanker DSS แบบเว็บแอปพลิเคชัน

หมายเหตุ: โครงสร้าง 4 ส่วนหลัก ได้แก่ Data, Model, Knowledge และ User Interface ซึ่งทำงานร่วมกันเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจ

3.8.2 โครงสร้างโมดูลของระบบ (System Modules)

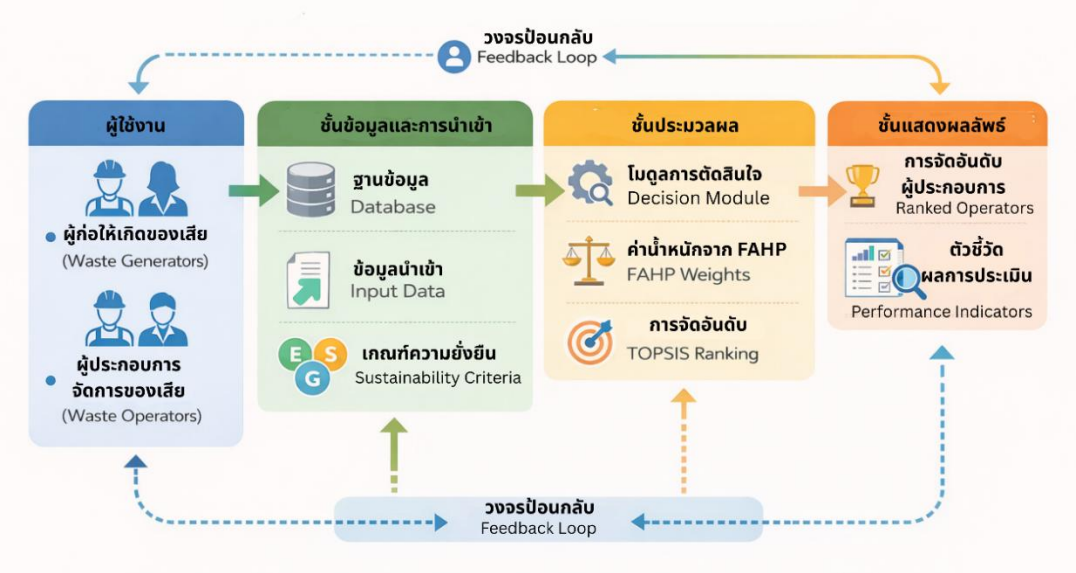
โครงสร้างของระบบถูกออกแบบในลักษณะโมดูลาร์ (modular design) เพื่อให้สามารถพัฒนาและปรับปรุงระบบได้อย่างยืดหยุ่น โดยแบ่งออกเป็น 3 โมดูลหลัก ได้แก่

(1) โมดูลนำเข้าข้อมูล (Input Module) ทำหน้าที่รับข้อมูลจากผู้ใช้งาน เช่น ข้อมูลโครงการ ประเภทและปริมาณของเสีย ตำแหน่งที่ตั้ง รวมถึงข้อมูลของผู้ประกอบการด้านความยั่งยืน และข้อมูลจากแหล่งภายนอก เช่น ระยะทางจากระบบ GIS

(2) โมดูลประมวลผล (Processing Module) เป็นแกนหลักของระบบ (Decision Engine) ซึ่งทำหน้าที่ประมวลผลข้อมูลโดยใช้วิธี TOPSIS ภายใต้ค่าน้ำหนักจาก FAHP เพื่อคำนวณและจัดอันดับความเหมาะสมของทางเลือก

(3) ส่วนแสดงผลลัพธ์ของระบบ ทำหน้าที่นำเสนอผลลัพธ์ในรูปแบบที่เข้าใจง่าย เช่น การจัดอันดับผู้ประกอบการ ค่าสัมประสิทธิ์ความใกล้เคียง (Closeness Coefficient) และ ตัวชี้วัดด้านสิ่งแวดล้อม เพื่อสนับสนุนกระบวนการตัดสินใจของผู้ใช้งาน

โครงสร้างโมดูลดังกล่าวช่วยให้ระบบสามารถแยกหน้าที่การทำงานอย่างชัดเจน และเพิ่มความสามารถในการบำรุงรักษาและขยายระบบในอนาคต



ภาพที่ 3.5 สถาปัตยกรรมเชิงโมดูลของระบบสนับสนุนการตัดสินใจ EcoRanker สำหรับการจัดการของเสียจากการก่อสร้างอย่างยั่งยืน

หมายเหตุ: การแบ่งระบบออกเป็น 3 โมดูลหลัก ได้แก่ Input, Processing และ Output พร้อมการเชื่อมโยงข้อมูลระหว่างส่วนต่าง ๆ ของระบบ

3.8.3 กระบวนการทำงานของระบบ (System Workflow)

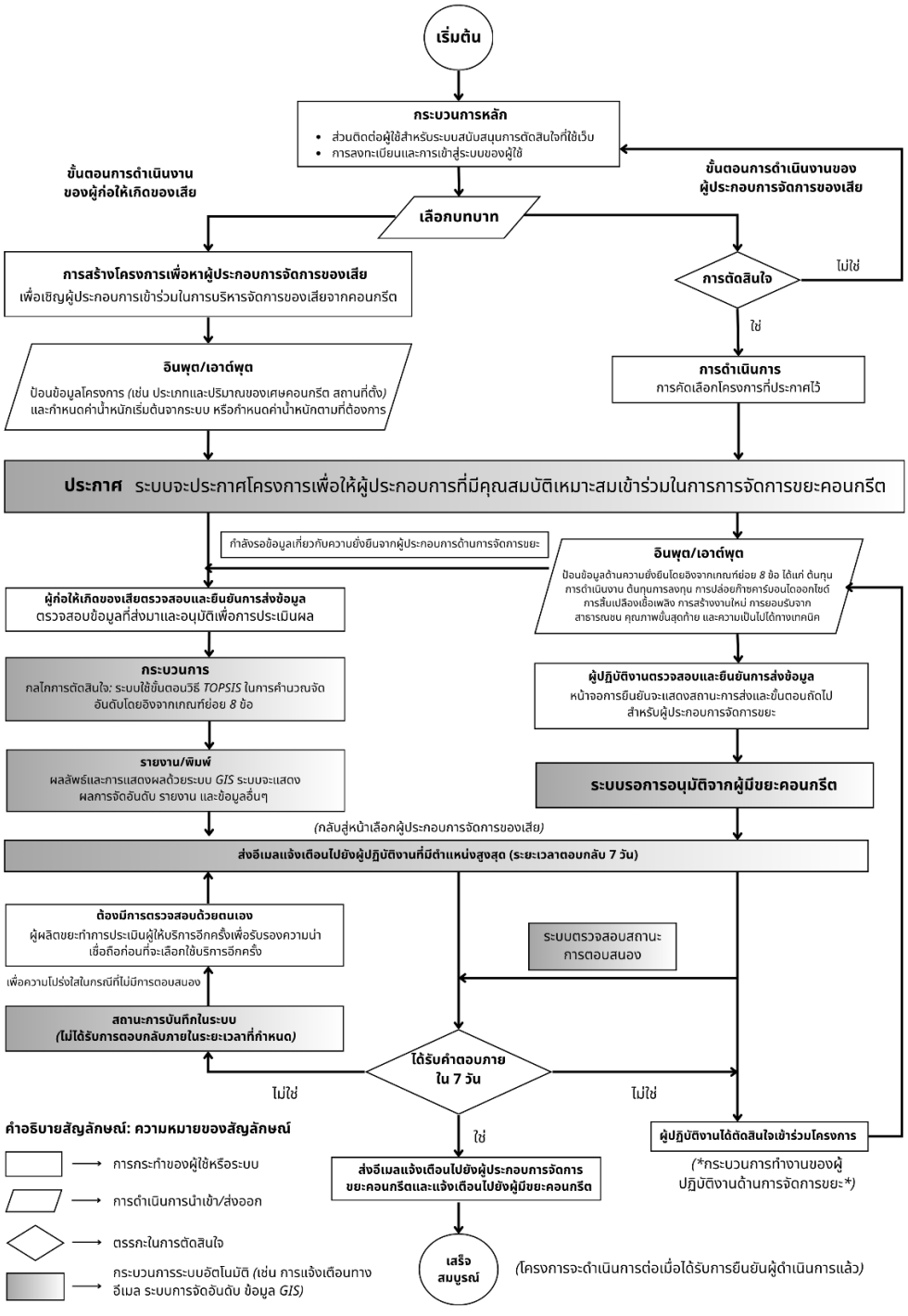
กระบวนการทำงานของระบบ EcoRanker DSS ถูกออกแบบในลักษณะลำดับขั้นเชิงตรรกะ (Logical Sequential Workflow) โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผู้ใช้งาน ระบบ และกลไกการตัดสินใจอย่างเป็นระบบ ดังแสดงในภาพที่ 3.6 ซึ่งสามารถอธิบายได้เป็น 3 ช่วงหลัก ได้แก่ (1) ช่วงการป้อนข้อมูล (Input Phase) (2) ช่วงการประมวลผล (Processing Phase) และ (3) ช่วงการแสดงผลและตอบสนอง (Output and Response Phase) ดังนี้

3.8.3.1 ช่วงการเริ่มต้นและกำหนดบทบาทผู้ใช้งาน (Initialization and Role Selection)

กระบวนการเริ่มต้นจากผู้ใช้งานเข้าสู่ระบบผ่านส่วนติดต่อผู้ใช้งาน (User Interface) และดำเนินการลงทะเบียนหรือเข้าสู่ระบบ (Login) จากนั้นผู้ใช้งานเลือกบทบาท (Select Role) ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลัก ได้แก่

- ผู้ก่อให้เกิดของเสีย (Waste Generator)
- ผู้ประกอบการจัดการของเสีย (Waste Operator)

การแยกบทบาทดังกล่าวช่วยให้ระบบสามารถกำหนดสิทธิ์การเข้าถึงข้อมูลและลำดับการทำงานที่แตกต่างกันได้อย่างชัดเจน



ภาพที่ 3.6 กระบวนการทำงานของระบบ EcoRanker DSS (System Workflow)

หมายเหตุ: แสดงลำดับขั้นตอนตั้งแต่การป้อนข้อมูล การประมวลผล ไปจนถึงการแสดงผลและการป้อนกลับของระบบ

3.8.3.2 ช่วงการป้อนข้อมูลและการประกาศโครงการ (Input and Project Announcement Phase)

ในฝั่งของผู้ก่อให้เกิดของเสีย กระบวนการเริ่มจากการสร้างโครงการ (Project Creation) โดยกำหนดรายละเอียดสำคัญ เช่น ประเภทของเสีย ปริมาณของเสีย และตำแหน่งที่ตั้งโครงการ จากนั้นผู้ใช้งานทำการป้อนข้อมูลเข้าสู่ระบบ (Input/Output) รวมถึงสามารถเลือกใช้ค่าน้ำหนักเริ่มต้นจากระบบหรือกำหนดค่าน้ำหนักเอง

เมื่อข้อมูลมีความครบถ้วน ระบบจะดำเนินการ ประกาศโครงการ ไปยังผู้ประกอบการที่เกี่ยวข้อง เพื่อเชิญเข้าร่วมเสนอข้อมูล ซึ่งเป็นกลไกสำคัญที่ทำหน้าที่ เชื่อมโยงระหว่างความต้องการในการจัดการของเสียของผู้ก่อให้เกิดของเสีย (Waste Generator) กับการให้บริการของผู้ประกอบการจัดการของเสีย (Waste Operator)

ในขณะเดียวกัน ผู้ประกอบการจะป้อนข้อมูลด้านความยั่งยืนตามเกณฑ์ที่กำหนด เช่น ต้นทุนการดำเนินงาน การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ การใช้เชื้อเพลิง การสร้างงาน การยอมรับของสังคม คุณภาพผลลัพธ์ และความเป็นไปได้ทางเทคนิค ก่อนเข้าสู่ขั้นตอน การตรวจสอบและยืนยันความถูกต้องของข้อมูล (Confirmation)

3.8.3.3 ช่วงการตรวจสอบและประมวลผลการตัดสินใจ (Validation and Processing Phase)

หลังจากได้รับข้อมูลจากผู้ประกอบการ ผู้ก่อให้เกิดของเสียจะดำเนินการตรวจสอบและยืนยันข้อมูล (Review and Confirm Submission) ก่อนเข้าสู่กระบวนการประมวลผล

ระบบจะทำงานผ่าน decision engine ซึ่งประยุกต์ใช้วิธี TOPSIS ในการจัดอันดับทางเลือก โดยพิจารณาจากหลายเกณฑ์ภายใต้ค่าน้ำหนักที่กำหนดจาก FAHP เพื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความใกล้เคียงและจัดอันดับผู้ประกอบการอย่างเป็นระบบ

3.8.3.4 ช่วงการแสดงผลและการแจ้งเตือน (Output and Notification Phase)

ผลลัพธ์จากระบบจะถูกนำเสนอในรูปแบบรายงาน (report/print) และการแสดงผลเชิงภาพ เช่น การจัดอันดับและข้อมูลเชิงพื้นที่ (GIS visualization) เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจของผู้ใช้งาน

ระบบจะส่งการแจ้งเตือนไปยังผู้ประกอบการที่ได้รับการจัดอันดับสูงสุด (top-ranked operator) โดยกำหนดระยะเวลาตอบกลับภายใน 7 วัน เพื่อยืนยันการเข้าร่วมโครงการ

3.8.3.5 ช่วงการตอบสนองและกลไกการป้อนกลับ (Response and Feedback Loop)

ในกรณีที่ผู้ประกอบการตอบรับภายในระยะเวลาที่กำหนด ระบบจะดำเนินการยืนยันผลและโครงการเข้าสู่ขั้นตอนดำเนินงาน (finished state)

อย่างไรก็ตาม หากไม่มีการตอบกลับ ระบบจะบันทึกสถานะ (system records status) และเปิดโอกาสให้ผู้ใช้งานดำเนินการประเมินใหม่ (re-selection) หรือดำเนินการตรวจสอบแบบ manual เพื่อรักษาความโปร่งใสและความน่าเชื่อถือของกระบวนการ

กลไกดังกล่าวสะท้อนถึงคุณลักษณะของระบบ DSS ที่มีการโต้ตอบ (interactive and iterative system) และมีวงจรการป้อนกลับ (feedback loop) ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการตัดสินใจและรองรับสถานการณ์จริงได้อย่างยืดหยุ่น

3.9 ระยะที่ 5: แบบจำลองการตัดสินใจด้วยวิธี TOPSIS (Decision Model Using TOPSIS)

ในระยะที่ 5 ของงานวิจัยนี้ ได้มีการพัฒนาแบบจำลองการตัดสินใจ สำหรับการจัดอันดับและคัดเลือกผู้ประกอบการจัดการของเสียจากคอนกรีต โดยประยุกต์ใช้วิธี TOPSIS ซึ่งเป็นวิธีการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ ที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถเปรียบเทียบทางเลือกโดยพิจารณาความใกล้เคียงกับทางเลือกในอุดมคติ (Positive Ideal Solution) และความห่างจากทางเลือกที่เลวร้ายที่สุด (Negative Ideal Solution) ได้อย่างเป็นระบบ

แบบจำลองดังกล่าวถูกบูรณาการเข้ากับระบบ EcoRanker DSS เพื่อให้สามารถประมวลผลและแสดงผลการจัดอันดับผู้ประกอบการได้แบบอัตโนมัติ โดยอาศัยข้อมูลเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพภายใต้กรอบการประเมินด้านความยั่งยืน

3.9.1 โครงสร้างเกณฑ์การตัดสินใจ (Criteria Structure and Decision Variables)

ระบบ EcoRanker DSS ได้กำหนดเกณฑ์การประเมินภายใต้กรอบความยั่งยืน 4 มิติ ได้แก่ มิติทางเศรษฐกิจ (Economic) มิติสิ่งแวดล้อม (Environmental) มิติทางสังคม (Social) และมิติด้านเทคนิค (Technical) โดยมีเกณฑ์รวมทั้งสิ้น 8 เกณฑ์ในส่วนของส่วนติดต่อผู้ใช้งาน (Interface) เพื่อสะท้อนกรอบการประเมินอย่างครบถ้วน

อย่างไรก็ตาม ในการพัฒนาแบบจำลอง TOPSIS สำหรับการจัดอันดับ ได้มีการใช้เกณฑ์จำนวน 7 เกณฑ์ ได้แก่

- C1: ต้นทุนการดำเนินงาน (Operational Cost) [THB/ton]
- C2: การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 Emissions) [kg CO_2/ton]
- C3: การใช้เชื้อเพลิง (Fuel Consumption) [L/ton]
- C4: การสร้างงาน (Job Creation) [1–9 scale]
- C5: การยอมรับของสาธารณชน (Public Acceptance) [1–9 scale]
- C6: คุณภาพของผลผลิตจากการแปรรูปของเสีย (Final Quality of Processed Waste) [1–9 scale]
- C7: ความเป็นไปได้ทางเทคนิค (Technical Feasibility) [1–9 scale]

แม้ว่าระบบจะแสดงเกณฑ์ต้นทุนการลงทุน (Investment Cost) ในส่วนของ interface แต่เกณฑ์ดังกล่าวถูกตัดออกจากกระบวนการคำนวณ TOPSIS เนื่องจากมีค่าคงที่เท่ากันสำหรับผู้ประกอบการทุกราย จึงไม่ก่อให้เกิดความแตกต่างในการจัดอันดับ และไม่ส่งผลต่อความสามารถในการจำแนกทางเลือกของแบบจำลอง การรวมตัวแปรดังกล่าวอาจส่งผลต่อกระบวนการปรับมาตรฐานข้อมูล (Normalization) โดยไม่เพิ่มประสิทธิภาพของผลลัพธ์ ดังนั้น แบบจำลองจึงใช้ 7 เกณฑ์ในการคำนวณ

นอกจากนี้ เกณฑ์สามารถจำแนกตามลักษณะของฟังก์ชันเป้าหมายได้เป็น

- Cost criteria: C1, C2, C3 (ค่าต่ำดีกว่า)
- Benefit criteria: C4, C5, C6, C7 (ค่าสูงดีกว่า)

3.9.2 การสร้างเมทริกซ์การตัดสินใจ (Decision Matrix Construction)

ให้กำหนดเมทริกซ์การตัดสินใจ $X = [x_{ij}]$ ซึ่งประกอบด้วยค่าประเมินของผู้ประกอบการแต่ละราย i ภายใต้เกณฑ์ j ดังนี้

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \tag{3.21}$$

โดยที่ m คือ จำนวนผู้ประกอบการ

n คือ จำนวนเกณฑ์ (ในงานวิจัยนี้ n = 7)

3.9.3 การปรับค่ามาตรฐานและการถ่วงน้ำหนัก (Normalization and Weighting)

ข้อมูลในเมทริกซ์จะถูกปรับมาตรฐานด้วยวิธี vector normalization ดังสมการ

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}^2}} \tag{3.22}$$

จากนั้นนำค่าที่ได้ไปคูณกับค่าน้ำหนัก w_j ซึ่งได้มาจากวิธี FAHP เพื่อสร้างเมทริกซ์แบบถ่วงน้ำหนัก

$$v_{ij} = w_j \cdot r_{ij} \tag{3.23}$$

โดยที่

$$\sum w_j = 1 \tag{3.24}$$

3.9.4 การกำหนดคำตอบในอุดมคติ (Ideal Solutions)

กำหนดค่า

- Positive Ideal Solution (A^+)
- Negative Ideal Solution (A^-)

โดยพิจารณาตามประเภทของเกณฑ์

สำหรับ Cost criteria

$$A^+ = min(v_{ij}), \quad A^- = max(v_{ij}) \tag{3.25}$$

สำหรับ Benefit criteria

$$A^+ = max(v_{ij}), \quad A^- = min(v_{ij}) \tag{3.26}$$

3.9.5 การคำนวณระยะห่างและค่าค่าสัมประสิทธิ์ความใกล้เคียง (Separation and Closeness Coefficient)

คำนวณระยะห่างจาก ideal solutions ดังนี้

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} \left(v_{ij} - v_j^+\right)^2} \tag{3.27}$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} \left(v_{ij} - v_j^-\right)^2} \tag{3.28}$$

จากนั้นคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความใกล้เคียง (closeness coefficient)

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \tag{3.29}$$

โดยที่

$$0 \le C_i \le 1 \tag{3.30}$$

3.9.6 การจัดอันดับในระบบ EcoRanker DSS (Ranking Mechanism)

ค่าสัมประสิทธิ์ความใกล้เคียง (Closeness Coefficient)ถูกนำมาใช้ในการจัดอันดับผู้ประกอบการ โดยค่าที่มีค่าค่าความใกล้เคียง สูงที่สุดจะถือว่าเป็นทางเลือกที่ดีที่สุด เนื่องจากมีความใกล้เคียงกับทางเลือกในอุดมคติสูงสุด และมีระยะห่างจากทางเลือกที่เลวร้ายที่สุดมากที่สุด

แบบจำลองดังกล่าวถูกฝังอยู่ในระบบ EcoRanker DSS ซึ่งทำหน้าที่รับข้อมูลจากผู้ใช้งาน คำนวณค่าตามขั้นตอน TOPSIS โดยอัตโนมัติ และแสดงผลการจัดอันดับผ่านแดชบอร์ดแบบเรียลไทม์ ส่งผลให้การตัดสินใจมีความเป็นระบบ โปร่งใส และสามารถตรวจสอบได้

3.9.7 การกำหนดค่าและแหล่งข้อมูลของเกณฑ์การประเมิน (Criteria Measurement and Data Acquisition)

เพื่อให้แบบจำลองการตัดสินใจสามารถนำไปใช้งานได้จริงในระบบ EcoRanker DSS เกณฑ์การประเมินแต่ละตัวได้ถูกแปลงให้อยู่ในรูปของตัวแปรเชิงปริมาณหรือเชิงลำดับ (Quantitative or Ordinal Variables) ที่สามารถนำไปใช้ในการคำนวณ TOPSIS ได้ โดยมีรายละเอียดดังนี้

C1: ต้นทุนการดำเนินงาน (Operational Cost)

ต้นทุนการดำเนินงาน (Operational Cost) หมายถึง ต้นทุนรวมที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมการจัดการของเสียในกระบวนการดำเนินงาน ซึ่งครอบคลุมค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องกับการขนส่ง การรวบรวม การคัดแยก การแปรรูป หรือการกำจัดของเสีย โดยพิจารณาเฉพาะต้นทุนที่เกิดขึ้นในระยะดำเนินงาน (Operation phase) และไม่รวมต้นทุนการลงทุนเริ่มต้น (Capital or Investment Cost)

ค่าต้นทุนดังกล่าวถูกแสดงในรูปของต้นทุนต่อหน่วยน้ำหนักของของเสีย โดยมีหน่วยเป็นบาทต่อตัน (THB/ton) เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงเศรษฐศาสตร์ระหว่างผู้ประกอบการได้อย่างเป็นธรรม

ทั้งนี้ เกณฑ์ดังกล่าวถูกจัดให้อยู่ในประเภท เกณฑ์ด้านต้นทุน (Cost Criterion) เนื่องจากค่าที่ต่ำกว่าสะท้อนถึงประสิทธิภาพในการดำเนินงานที่สูงกว่า

C2: การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 Emissions)

เกณฑ์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกใช้เพื่อประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมจากกิจกรรมการขนส่งของเสีย โดยพิจารณาปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนย้ายของเสียจากแหล่งกำเนิดไปยังสถานที่จัดการ

ในการศึกษานี้ การประเมินมุ่งเน้นเฉพาะการปล่อยก๊าซจากกระบวนการขนส่ง (Transport-Related Emissions) ซึ่งครอบคลุมทั้งเที่ยวไป (Loaded Trip) และเที่ยวกลับ (Empty Return) เพื่อให้สอดคล้องกับขอบเขตของระบบและความสามารถในการเข้าถึงข้อมูลเชิงปฏิบัติจริง

เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบระหว่างผู้ประกอบการได้อย่างเป็นธรรม ค่าการปล่อยก๊าซถูกทำให้อยู่ในรูปของค่าต่อหน่วยน้ำหนักของของเสีย โดยมีหน่วยเป็นกิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหนึ่งตันของของเสีย (kg CO_2/ton)

ค่าดังกล่าวคำนวณโดยอาศัยข้อมูลระยะทางขนส่งร่วมกับค่าปัจจัยการปล่อย (Emission Factors) ตามแนวทางขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (TGO) และหลักการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม (LCIA) ภายใต้มาตรฐาน IPCC 2013 Global Warming Potential (GWP 100a)

ทั้งนี้ เกณฑ์ดังกล่าวถูกจัดให้อยู่ในประเภท เกณฑ์ด้านต้นทุน (Cost Criterion) เนื่องจากค่าที่ต่ำกว่าสะท้อนถึงผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมที่น้อยกว่า

C3: การใช้เชื้อเพลิง (Fuel Consumption)

เกณฑ์ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงถูกนำมาใช้เพื่อประเมินประสิทธิภาพเชิงพลังงานของกระบวนการขนส่งของเสีย โดยในงานวิจัยนี้ได้ปรับปรุงแนวทางการประเมินจากการใช้ระยะทางขนส่ง (กิโลเมตร) ซึ่งเป็นเพียงตัวแปรตัวแทน ไปสู่การใช้ ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงจริงต่อหน่วยของเสีย เพื่อให้สามารถสะท้อนการใช้พลังงานได้อย่างแม่นยำและสอดคล้องกับสภาพการดำเนินงานจริงมากยิ่งขึ้น

ค่าปริมาณการใช้เชื้อเพลิงถูกแปลงให้อยู่ในรูปของค่าต่อหน่วยน้ำหนักของของเสีย โดยมีหน่วยเป็นลิตรของเชื้อเพลิงต่อหนึ่งตันของของเสีย (L/ton) ซึ่งช่วยให้สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงพลังงานระหว่างผู้ประกอบการได้อย่างเป็นธรรมและอยู่บนฐานเดียวกัน

การคำนวณค่าดังกล่าวอาศัยข้อมูลระยะทางขนส่งร่วมกับอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของยานพาหนะ และความสามารถในการบรรทุก (payload capacity) เพื่อประมาณปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการขนส่งของเสียในแต่ละกรณี โดยในกรณีที่ไม่มีข้อมูลเฉพาะของผู้ประกอบการงานวิจัยนี้ได้ใช้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเฉลี่ยของรถบรรทุกเครื่องยนต์ดีเซลเท่ากับ 6.369 กิโลเมตรต่อลิตร (km/L) ซึ่งอ้างอิงจากรายงานของ American Petroleum Institute เป็นค่าพื้นฐานในการคำนวณ

ทั้งนี้ เกณฑ์ดังกล่าวถูกจัดให้อยู่ในประเภท เกณฑ์ด้านต้นทุน (Cost Criterion) เนื่องจากค่าที่ต่ำกว่าสะท้อนถึงประสิทธิภาพในการใช้พลังงานที่สูงกว่า และส่งผลให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระดับที่ต่ำกว่า

C4: การสร้างงาน (Job Creation)

เกณฑ์การสร้างงานถูกใช้เพื่อประเมินผลกระทบด้านสังคมของผู้ประกอบการ โดยพิจารณาจากจำนวนตำแหน่งงานถาวร (permanent employment) ที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมการจัดการของเสีย ทั้งนี้ การพิจารณาเน้นเฉพาะการจ้างงานประจำ เนื่องจากสามารถสะท้อนถึงความมั่นคงทางเศรษฐกิจและการสร้างคุณค่าให้แก่ชุมชนในระยะยาวได้อย่างเหมาะสม

การประเมินใช้มาตรวัดเชิงอันดับ (ordinal scale) ระดับ 1–9 ดังนี้

- 9 คะแนน = มากกว่า 15 ตำแหน่ง (งานถาวร)
- 7 คะแนน = 10–15 ตำแหน่ง (งานถาวร)
- 5 คะแนน = 5–9 ตำแหน่ง (งานถาวร)
- 3 คะแนน = 1–4 ตำแหน่ง (งานถาวร)
- 1 คะแนน = ไม่มีการจ้างงานถาวร หรือมีเฉพาะการจ้างงานชั่วคราว

ทั้งนี้ เกณฑ์ดังกล่าวถูกจัดให้อยู่ในประเภท เกณฑ์ด้านผลประโยชน์ (benefit criterion) เนื่องจากค่าที่สูงกว่าสะท้อนถึงการสร้างโอกาสทางเศรษฐกิจและการมีส่วนร่วมของชุมชนที่มากขึ้น

C5: การยอมรับของสาธารณชน (Public Acceptance)

ระดับคะแนนของเกณฑ์การยอมรับของสาธารณะถูกกำหนดในลักษณะมาตรวัดเชิงอันดับ (ordinal scale) ตั้งแต่ 1 ถึง 9 โดยพิจารณาจากระดับการรับรองมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับความรับผิดชอบต่อสังคม ความปลอดภัย และสิ่งแวดล้อม ตลอดจนระดับการยอมรับจากชุมชน ดังนี้

- 9 คะแนน = มีการนำหลักการความรับผิดชอบต่อสังคมตามแนวทาง ISO 26000 มาใช้ ร่วมกับการได้รับการรับรองมาตรฐาน ISO 45001 และได้รับการยอมรับจากชุมชน
- 7 คะแนน = ได้รับการรับรองมาตรฐาน ISO 14064 และ ISO 14001 และมีการสนับสนุนจากชุมชนในระดับหนึ่ง
- 5 คะแนน = ได้รับการรับรองมาตรฐาน ISO 14001 หรือ ISO 14064 อย่างใดอย่างหนึ่ง
- 3 คะแนน = ได้รับการรับรองเฉพาะมาตรฐาน ISO 9001
- 1 คะแนน = ไม่มีการรับรองมาตรฐาน หรือมีข้อร้องเรียนจากชุมชน

ทั้งนี้ เกณฑ์ดังกล่าวถูกจัดให้อยู่ในประเภท เกณฑ์ด้านผลประโยชน์ (Benefit Criterion) เนื่องจากค่าที่สูงกว่าสะท้อนถึงระดับความยอมรับทางสังคมที่สูงขึ้นและส่งผลเชิงบวกต่อความยั่งยืนของการดำเนินงาน

C6: คุณภาพของผลผลิตจากการแปรรูปของเสีย (Final Quality of Processed Waste)

เกณฑ์คุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้ายถูกใช้เพื่อประเมินระดับการเพิ่มมูลค่า (Value Creation) ของของเสียคอนกรีตภายหลังผ่านกระบวนการจัดการ โดยพิจารณาจากลักษณะการนำกลับมาใช้ประโยชน์ และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ซึ่งสะท้อนถึงศักยภาพในการสนับสนุนแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน

การประเมินใช้มาตรวัดเชิงอันดับ (Ordinal Scale) ระดับ 1–9 ดังนี้

- 9 คะแนน = การอัพไซเคิล (Upcycling) เป็นผลิตภัณฑ์มูลค่าสูง เช่น วัสดุก่อสร้างคุณภาพสูงหรือผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์
- 7 คะแนน = วัสดุรีไซเคิล (Recycled Concrete Aggregate: RCA) ที่ผ่านการรับรองคุณภาพ และสามารถนำไปใช้ในงานโครงสร้าง
- 5 คะแนน = วัสดุรีไซเคิล (RCA) สำหรับงานชั้นฐานถนน (Road Base)
- 3 คะแนน = การนำไปใช้ในงานถมปรับระดับหรือโครงสร้างรองรับที่ไม่ต้องการคุณภาพสูง (Non-structural Applications)
- 1 คะแนน = การนำไปถมกลับ (Backfill) โดยไม่มีการเพิ่มมูลค่าอย่างมีนัยสำคัญ

ทั้งนี้ เกณฑ์ดังกล่าวถูกจัดให้อยู่ในประเภท เกณฑ์ด้านผลประโยชน์ (Benefit Criterion) เนื่องจากค่าที่สูงกว่าสะท้อนถึงระดับการเพิ่มมูลค่าและประสิทธิภาพในการใช้ทรัพยากรที่สูงขึ้น

C7: ความเป็นไปได้ทางเทคนิค (Technical Feasibility)

เกณฑ์ความเป็นไปได้ทางเทคนิคถูกใช้เพื่อประเมินความเหมาะสมและประสิทธิภาพของรูปแบบการจัดการของเสีย โดยพิจารณาจากลักษณะของกระบวนการจัดการ ระดับเทคโนโลยีที่ใช้ และประสิทธิภาพเชิงพลังงาน ซึ่งสะท้อนถึงความสามารถในการดำเนินงานอย่างมีประสิทธิภาพและลดการใช้ทรัพยากร

การประเมินใช้มาตรวัดเชิงอันดับ (Ordinal scale) ระดับ 1–9 ดังนี้

- 9 คะแนน = การรีไซเคิลในพื้นที่ก่อสร้าง (On-site Recycling) ร่วมกับเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพด้านพลังงานสูง
- 7 คะแนน = การรีไซเคิลในพื้นที่ก่อสร้าง (On-site Recycling)
- 5 คะแนน = การรีไซเคิลในโรงงานถาวรที่ใช้เทคโนโลยีขั้นสูง (Advanced Recycling Facility)
- 3 คะแนน = การรีไซเคิลในโรงงานพื้นฐาน (Basic Processing Facility)
- 1 คะแนน = การส่งต่อของเสียไปยังบุคคลที่สามโดยไม่มีการแปรรูปหรือเพิ่มมูลค่า (Transfer Without Processing)

ทั้งนี้ เกณฑ์ดังกล่าวถูกจัดให้อยู่ในประเภท เกณฑ์ด้านผลประโยชน์ (Benefit Criterion) เนื่องจากค่าที่สูงกว่าสะท้อนถึงประสิทธิภาพในการจัดการของเสียและความสามารถทางเทคนิคที่สูงขึ้น

เกณฑ์ทั้งหมดได้รับการออกแบบให้สามารถแปลงเป็นค่าที่ใช้ในการคำนวณได้โดยตรงในระบบ EcoRanker DSS ซึ่งช่วยให้แบบจำลอง TOPSIS สามารถประมวลผลข้อมูลจากผู้ใช้งานได้อย่างเป็นระบบ โปร่งใส และสามารถตรวจสอบย้อนกลับได้

ตารางที่ 3.4 สรุปเกณฑ์การตัดสินใจสำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธี TOPSIS ในระบบ EcoRanker DSS

เกณฑ์ (Criteria)	**รายละเอียด (Description)**	**หน่วย / มาตรวัด (Unit / Scale)**	**แหล่งข้อมูล (Data Source)**	**ประเภท (Type)**
C1: ต้นทุนการดำเนินงาน (Operational Cost)	ต้นทุนรวมในการจัดการของเสีย รวมถึงค่าขนส่งและการจัดการ	บาท/ตัน (THB/ton)	ผู้ประกอบการจัดการขยะ (waste operator)	ต้นทุน (Cost)
C2: การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 Emissions)	ปริมาณการปล่อย CO_2 จากการขนส่งของเสีย (รวมเที่ยวไปและเที่ยวกลับ)	กิโลกรัม CO_2/ตัน ($kgCO_2$ /ton)	คำนวณจากระยะทางขนส่งร่วมกับค่าปัจจัยการปล่อย (Emission Factors) ตามแนวทางของ TGO และ IPCC	ต้นทุน (Cost)
C3: การใช้เชื้อเพลิง (Fuel Consumption)	ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ต่อการขนส่งของเสียหนึ่งตัน	ลิตร/ตัน (L/ton)	คำนวณจากอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและระยะทางขนส่งรวม	ต้นทุน (Cost)
C4: การสร้างงาน (Job Creation)	จำนวนการจ้างงานถาวรที่เกิดขึ้นจากผู้ประกอบการจัดการของเสีย	ระดับคะแนน 1–9	กำหนดโดยผู้เชี่ยวชาญ (Expert-defined rating)	ผลประโยชน์ (Benefit)

ตารางที่ 3.4 สรุปเกณฑ์การตัดสินใจสำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธี TOPSIS ในระบบ EcoRanker DSS (ต่อ)

เกณฑ์ (Criteria)	**รายละเอียด (Description)**	**หน่วย / มาตรวัด (Unit / Scale)**	**แหล่งข้อมูล (Data Source)**	**ประเภท (Type)**
C5: การยอมรับของสาธารณะ (Public Acceptance)	ระดับการรับรองมาตรฐานและการยอมรับจากชุมชน	ระดับคะแนน 1–9	พิจารณาจากมาตรฐาน ISO และการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญ	ผลประโยชน์ (Benefit)
C6: คุณภาพของวัสดุที่ผ่านกระบวนการ (Final Quality of Processed Waste)	คุณค่าและความสามารถในการนำกลับมาใช้ประโยชน์ของวัสดุรีไซเคิล/อัพไซเคิล	ระดับคะแนน 1–9	กำหนดโดยผู้เชี่ยวชาญตามประเภทของผลิตภัณฑ์	ผลประโยชน์ (Benefit)
C7: ความเป็นไปได้ทางเทคนิค (Technical Feasibility)	ความเหมาะสมและประสิทธิภาพของเทคโนโลยีหรือวิธีการจัดการของเสีย	ระดับคะแนน 1–9	กำหนดโดยผู้เชี่ยวชาญ	ผลประโยชน์ (Benefit)

หมายเหตุ: แม้ว่าต้นทุนการลงทุน (Investment Cost) จะถูกแสดงในส่วนติดต่อผู้ใช้งานของระบบ (System Interface) แต่ไม่ได้ถูกนำมารวมในการคำนวณด้วยวิธี TOPSIS เนื่องจากมีค่าคงที่ในทุกทางเลือก ซึ่งไม่ก่อให้เกิดความแตกต่างเชิงเปรียบเทียบ (Discriminatory Power) ในแบบจำลองการตัดสินใจ

3.10 ระยะที่ 6 การตรวจสอบและยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง (Validation and Verification)

ระยะที่ 6 ของงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการตรวจสอบความถูกต้อง (Verification) และการยืนยันความน่าเชื่อถือ (Validation) ของแบบจำลองและระบบ EcoRanker ที่พัฒนาขึ้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินว่าแบบจำลองเชิงคำนวณสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องตามที่ออกแบบ และระบบสามารถนำไปใช้งานได้จริงในบริบทของการตัดสินใจเลือกผู้ประกอบการจัดการของเสียคอนกรีต ทั้งนี้ แนวคิดการตรวจสอบและยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองเป็นกระบวนการสำคัญในงานพัฒนาระบบจำลองและระบบสนับสนุนการตัดสินใจ

กระบวนการในระยะนี้ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ (1) การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเชิงคำนวณ (Model Verification) (2) การประเมินประสิทธิภาพของระบบ (System Performance Evaluation) และ (3) การยืนยันความเหมาะสมของระบบจากผู้เชี่ยวชาญและผู้ใช้งาน (Expert and User Validation)

3.10.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Verification)

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองในงานวิจัยนี้ดำเนินการโดยการเปรียบเทียบผลลัพธ์จากระบบ EcoRanker กับผลลัพธ์ที่คำนวณได้จากเครื่องมือภายนอก (External Calculation Tool) ซึ่งในที่นี้เลือกใช้โปรแกรม Microsoft Excel เป็นเครื่องมืออ้างอิง เนื่องจากสามารถคำนวณตามสมการทางคณิตศาสตร์ที่กำหนดได้อย่างโปร่งใสและตรวจสอบได้ แนวทางดังกล่าวสอดคล้องกับหลักการ verification ที่มุ่งตรวจสอบความถูกต้องของกระบวนการคำนวณของแบบจำลอง [112]

กระบวนการตรวจสอบดำเนินการโดยใช้วิธีการคำนวณซ้ำด้วยโปรแกรม Microsoft Excel ซึ่งทำหน้าที่เป็นเครื่องมืออ้างอิงในการคำนวณแบบอิสระ โดยใช้ชุดข้อมูลเดียวกันกับที่ใช้ในระบบ EcoRanker DSS ทั้งนี้ ได้มีการนำค่า เมทริกซ์การตัดสินใจ (Decision Matrix) จากระบบออกมาและดำเนินการคำนวณตามขั้นตอนของวิธี TOPSIS อย่างครบถ้วน ได้แก่ การทำ การปรับมาตรฐานข้อมูล (Normalization) การคูณค่าน้ำหนัก (Weighted Normalization) การกำหนดค่าทางเลือกอุดมคติที่ดีที่สุด (A^+) และค่าทางเลือกอุดมคติที่แย่ที่สุด (A^-) การคำนวณระยะห่าง (S^+ และ S^-) ตลอดจนการคำนวณค่าดัชนีความใกล้เคียง (Ci ผลการประเมินจะถูกนำไปใช้ในการปรับปรุงระบบและสนับสนุนข้อสรุปเกี่ยวกับความสามารถในการนำระบบไปใช้งานจริง

3.10.2 การยืนยันความเหมาะสมของระบบโดยผู้เชี่ยวชาญ (Expert Validation)

การยืนยันความเหมาะสมของระบบ EcoRanker DSS ในงานวิจัยนี้ ดำเนินการโดยผู้เชี่ยวชาญจำนวน 12 ท่าน ซึ่งประกอบด้วยผู้มีประสบการณ์ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง การจัดการของเสีย และการพัฒนาระบบสารสนเทศ เพื่อประเมินความถูกต้อง ความน่าเชื่อถือ และศักยภาพในการนำระบบไปประยุกต์ใช้ในบริบทจริง

การประเมินใช้แบบสอบถามเชิงโครงสร้างตามมาตราส่วนประมาณค่าแบบลิเคิร์ท 5 ระดับ (Likert Scale) โดยกำหนดค่าคะแนนตั้งแต่ 1 = Very Low ถึง 5 = Very High เพื่อสะท้อนระดับความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญอย่างเป็นระบบ ครอบคลุม 4 มิติหลัก ได้แก่

(1) ความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Accuracy)

(2) ความเหมาะสมของเกณฑ์การประเมิน (Criteria Appropriateness)

(3) ความน่าเชื่อถือของผลการตัดสินใจ (Decision Reliability)

(4) ความสามารถในการนำไปใช้งานจริง (Practical Applicability)

โครงสร้างการประเมินดังกล่าวสอดคล้องกับแนวคิดของระบบสนับสนุนการตัดสินใจ (DSS) ซึ่งให้ความสำคัญทั้งความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Validity) และความสามารถในการสนับสนุนการตัดสินใจในบริบทจริง (Decision Usefulness) รวมถึงแนวคิดด้านการใช้งานระบบ (Usability) ตามมาตรฐาน ISO 9241-11 ที่เน้นประสิทธิผล (Effectiveness) ประสิทธิภาพ (Efficiency) และความพึงพอใจของผู้ใช้งาน (Satisfaction) [113]

นอกจากนี้ การใช้ผู้เชี่ยวชาญในการประเมินถือเป็นแนวทางที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในงานวิจัยด้านการพัฒนาระบบและแบบจำลอง เพื่อยืนยันความเหมาะสมเชิงเนื้อหาและความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ โดยข้อมูลที่ได้จากการประเมินจะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยสถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD) และนำเสนอผลในบทที่ 4

3.10.3 การประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน (User Satisfaction)

การประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินการยอมรับ (Acceptance) และความสามารถในการใช้งาน (Usability) ของระบบ EcoRanker DSS ในบริบทการใช้งานจริง ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อความสำเร็จของระบบสารสนเทศ [114] การประเมินนี้อ้างอิงตามกรอบแนวคิดด้านความสามารถในการใช้งานของมาตรฐาน ISO 9241-11:2018 [97] ซึ่งประกอบด้วย 3 องค์ประกอบหลัก ได้แก่ ประสิทธิผล (Effectiveness) ประสิทธิภาพ (Efficiency) ความพึงพอใจ (Satisfaction)

กลุ่มตัวอย่างประกอบด้วยผู้ใช้งานที่เกี่ยวข้องกับระบบ ได้แก่ ผู้ก่อให้เกิดของเสีย (Waste Generators) และผู้ประกอบการจัดการของเสีย (Waste Operators) โดยผู้เข้าร่วมจะทดลองใช้งานระบบ EcoRanker DSS และตอบแบบสอบถาม

เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูลเป็นแบบสอบถามมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ (Likert Scale) ครอบคลุมประเด็นสำคัญ เช่นความง่ายในการใช้งาน ความชัดเจนของผลลัพธ์ ความเป็นประโยชน์ในการตัดสินใจ และความน่าเชื่อถือของระบบ ผลการประเมินจะถูกนำมาคำนวณเป็นค่าเฉลี่ย (Mean) และดัชนีความพึงพอใจ (Satisfaction Index: SI) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ระดับความพึงพอใจของผู้ใช้งานในบทที่ 4

3.10.4 การประเมินประสิทธิภาพของระบบ (System Performance Evaluation)

การประเมินประสิทธิภาพของระบบ EcoRanker DSS มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความสามารถในการทำงานของระบบในเชิงเทคนิค (Technical Performance) โดยมุ่งเน้นทั้งด้านความเร็วในการประมวลผลและการแสดงผลของระบบ (System Performance) รวมถึงความสามารถในการเข้าถึงของผู้ใช้งาน (accessibility) ซึ่งถือเป็นองค์ประกอบสำคัญของคุณภาพระบบสารสนเทศตามกรอบมาตรฐาน ISO/IEC 25010 [99]

การประเมินในส่วนนี้ดำเนินการโดยใช้เครื่องมือมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับในระดับสากล ดังนี้

- Google PageSpeed Insights ใช้สำหรับประเมินประสิทธิภาพของระบบในด้านความเร็วในการโหลดหน้าเว็บ (Page Loading Performance) ความเสถียรของการแสดงผล (layout stability) และประสิทธิภาพโดยรวมของเว็บไซต์
- WAVE Web Accessibility Evaluation Tool ใช้สำหรับประเมินความสามารถในการเข้าถึงของระบบ โดยตรวจสอบความสอดคล้องกับแนวทาง Web Content Accessibility Guidelines (WCAG)

ผลการประเมินจากเครื่องมือทั้งสองจะถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์และปรับปรุงระบบเพื่อให้ระบบ EcoRanker DSS สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีความเสถียร และรองรับผู้ใช้งานได้อย่างครอบคลุมตามหลักการออกแบบระบบที่เน้นผู้ใช้งานเป็นศูนย์กลาง (User-Centered Design)

3.11 สรุปวิธีดำเนินการวิจัย (Summary of Research Methodology)

งานวิจัยนี้ได้พัฒนากรอบวิธีดำเนินการวิจัยแบบบูรณาการสำหรับการออกแบบและพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจ (DSS) ภายใต้ชื่อ EcoRanker เพื่อใช้ในการประเมินและจัดอันดับผู้ประกอบการจัดการของเสียคอนกรีต โดยกระบวนการวิจัยถูกออกแบบให้ครอบคลุมตั้งแต่การกำหนดปัญหา การพัฒนาแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ ไปจนถึงการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงในรูปแบบระบบสารสนเทศ

กระบวนการวิจัยประกอบด้วยหลายระยะที่เชื่อมโยงกันอย่างเป็นระบบ โดยเริ่มจากการศึกษาทบทวนวรรณกรรมเพื่อกำหนดกรอบแนวคิดและเกณฑ์การประเมิน จากนั้นจึงดำเนินการออกแบบโครงสร้างเกณฑ์ (Criteria Structure) และกำหนดตัวชี้วัดที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในบริบทจริงได้ ต่อมาได้มีการพัฒนาแบบจำลองเชิงปริมาณสำหรับการประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม ซึ่งประกอบด้วยแบบจำลองการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (C2) และแบบจำลองการใช้เชื้อเพลิง (C3) โดยอ้างอิงข้อมูลมาตรฐานจากฐานข้อมูลของ TGO เพื่อให้เกิดความน่าเชื่อถือและสามารถตรวจสอบย้อนกลับได้

ในขั้นตอนการตัดสินใจ งานวิจัยได้นำวิธีการวิเคราะห์แบบหลายเกณฑ์ (MCDA) มาประยุกต์ใช้ โดยใช้วิธี FAHP สำหรับการกำหนดค่าน้ำหนักของเกณฑ์ และใช้วิธี TOPSIS สำหรับการจัดอันดับผู้ประกอบการ ซึ่งช่วยให้สามารถประเมินทางเลือกได้อย่างเป็นระบบและมีความโปร่งใส

นอกจากนี้ งานวิจัยยังได้พัฒนาระบบ EcoRanker ในรูปแบบ Web-based DSS เพื่อรองรับการประมวลผลและแสดงผลลัพธ์การตัดสินใจ โดยระบบสามารถรับข้อมูลจากผู้ใช้งานประมวลผลผ่านแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น และแสดงผลในรูปแบบที่เข้าใจง่ายและสนับสนุนการตัดสินใจได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในส่วนของการตรวจสอบและยืนยันความถูกต้อง ได้มีการดำเนินการทั้งในระดับแบบจำลองและระดับระบบ โดยการเปรียบเทียบผลลัพธ์กับการคำนวณจากเครื่องมือภายนอก การทดสอบความไวของผลลัพธ์ต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรสำคัญ และการประเมินจากผู้เชี่ยวชาญและผู้ใช้งานจริง เพื่อยืนยันว่าระบบมีความถูกต้อง มีเสถียรภาพ และสามารถนำไปใช้งานได้จริง

โดยสรุป กรอบวิธีดำเนินการวิจัยที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้มีลักษณะเป็นกระบวนการแบบบูรณาการที่เชื่อมโยงระหว่างแบบจำลองเชิงวิศวกรรม กระบวนการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ และการพัฒนาระบบสารสนเทศ ซึ่งช่วยให้สามารถนำผลการวิจัยไปประยุกต์ใช้ในบริบทจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเป็นพื้นฐานสำหรับการนำเสนอผลการวิจัยในบทถัดไป

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและอภิปรายผล

4.1 ภาพรวมการพัฒนาระบบระบบสนับสนุนการตัดสินใจ

กระบวนการทำงานของระบบ EcoRanker DSS ที่นำมาใช้ในการทดลองในงานวิจัยนี้ ถูกพัฒนาขึ้นตามโครงสร้าง workflow ที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3 (ภาพที่ 3.6) ซึ่งแสดงลำดับกระบวนการทำงานของระบบอย่างเป็นระบบ ตั้งแต่การป้อนข้อมูล การประมวลผล ไปจนถึงการแสดงผลลัพธ์ โดย workflow ดังกล่าวถูกนำไปประยุกต์ใช้จริงในกรณีศึกษา เพื่อสนับสนุนการคัดเลือกผู้ประกอบการจัดการของเสียคอนกรีตภายใต้บริบทของการตัดสินใจเชิงความยั่งยืน

เพื่อรองรับการทดลองใช้งานในสภาพแวดล้อมจริง ระบบ EcoRanker DSS ได้ถูกพัฒนาในรูปแบบแพลตฟอร์มบนเว็บ ซึ่งสามารถเข้าถึงได้ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต โดยผู้ใช้งานสามารถเข้าสู่ระบบผ่าน EcoRanker DSS web platform (https://www.ecoranker.com/) ซึ่งทำหน้าที่เป็นระบบต้นแบบ (Prototype System) สำหรับการประเมินและจัดอันดับผู้ประกอบการจัดการของเสียในงานวิจัยนี้ ทั้งนี้ ระบบดังกล่าวถูกใช้เป็นเครื่องมือหลักในการทดลองและเก็บข้อมูลเพื่อประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองการตัดสินใจที่พัฒนาขึ้น

ในการทดลองใช้งานระบบ ข้อมูลที่นำมาใช้ถูกพัฒนาในรูปแบบกรณีศึกษา (Case Study) โดยอาศัยการสังเคราะห์ข้อมูลจากผู้เชี่ยวชาญและผู้มีส่วนได้ส่วนเสียที่ปฏิบัติงานจริงด้านการจัดการของเสียจากการก่อสร้างในพื้นที่ภาคกลางของประเทศไทย ทั้งนี้ กรณีศึกษาดังกล่าวไม่ได้อ้างอิงจากโครงการก่อสร้างเฉพาะแห่งใดแห่งหนึ่ง แต่ถูกออกแบบให้เป็นตัวแทนของสถานการณ์การใช้งานจริง เพื่อใช้ในการทดสอบและประเมินประสิทธิภาพของระบบ EcoRanker DSS อย่างเป็นระบบ

ภาพรวมการดำเนินงานของระบบสามารถอธิบายได้เป็นลำดับขั้น โดยเริ่มจาก ผู้ใช้งานเข้าสู่ระบบและเลือกบทบาทการใช้งาน ได้แก่ ผู้ก่อให้เกิดของเสีย และ ผู้ประกอบการจัดการของเสีย จากนั้น ผู้ก่อให้เกิดของเสียจะสร้างโครงการและกำหนดข้อมูลที่เกี่ยวข้อง ขณะที่ ผู้ประกอบการจัดการของเสียสามารถเข้าร่วมและป้อนข้อมูล เพื่อใช้ในการประเมิน ระบบจะดำเนินการประมวลผลโดยอัตโนมัติและจัดอันดับผู้ประกอบการที่มีความเหมาะสม พร้อมทั้งแจ้งผลการคัดเลือกเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจและการดำเนินโครงการในลำดับถัดไป ซึ่งสะท้อนถึง กระบวนการทำงานแบบครบวงจร ที่เชื่อมโยง การป้อนข้อมูล การประมวลผล และการตัดสินใจ เข้าด้วยกันอย่างเป็นระบบ

แม้ว่ากระบวนการทำงานของระบบ EcoRanker DSS จะสะท้อนให้เห็นถึงการบูรณาการเชิงโครงสร้างของระบบสนับสนุนการตัดสินใจอย่างครบถ้วน อย่างไรก็ตาม เพื่อให้เข้าใจศักยภาพของระบบในเชิงปฏิบัติ จำเป็นต้องพิจารณาผลลัพธ์ที่ระบบสามารถสร้างขึ้นจากการประมวลผลข้อมูลจริง ดังนั้น ในหัวข้อถัดไปจึงนำเสนอผลลัพธ์จากการพัฒนาและการใช้งานระบบ

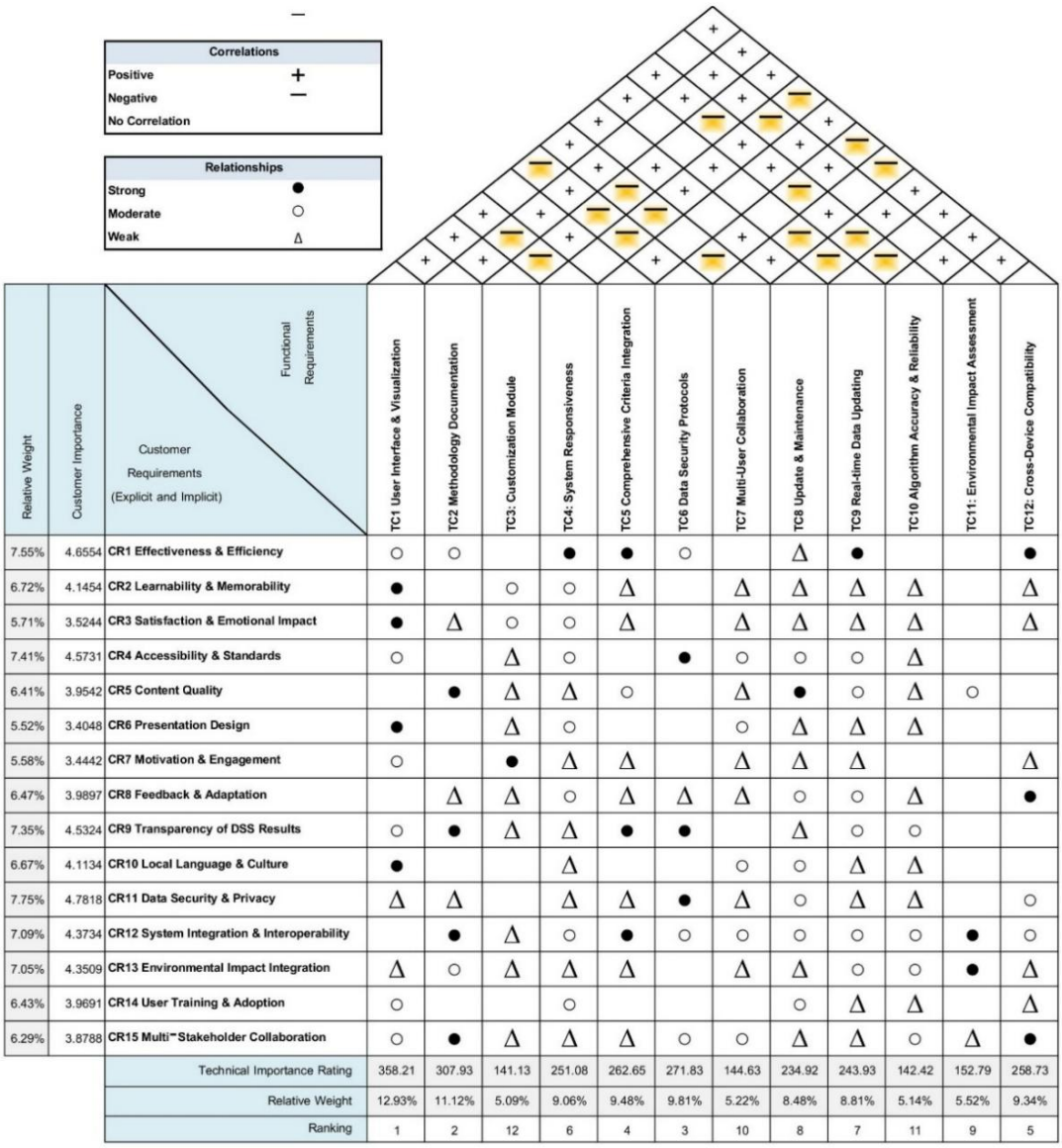
4.2 วิเคราะห์ด้วยวิธีเทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ (Quality Function Deployment)

4.2.1 ผลของการใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ (QFD) เพื่อแปลงความต้องการของผู้ใช้งาน (Customer Requirements; CRs) ไปสู่คุณลักษณะเชิงเทคนิคของระบบ (Technical Characteristics; TCs) สำหรับการพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจแบบเว็บ EcoRanker DSS โดยใช้โครงสร้าง HoQ เป็นเครื่องมือหลักในการวิเคราะห์ ดังแสดงในภาพที่ 4.1

ผลการวิเคราะห์พบว่า ระบบประกอบด้วยความต้องการของผู้ใช้งานจำนวน 15 รายการ และคุณลักษณะเชิงเทคนิคจำนวน 12 รายการ โดยความสัมพันธ์ระหว่าง CRs และ TCs ถูกประเมินด้วยระดับมาตรฐาน 0, 1, 3 และ 9 เพื่อสะท้อนระดับอิทธิพลของคุณลักษณะเชิงเทคนิคต่อการตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งานอย่างเป็นระบบ

ผลการวิเคราะห์ความสำคัญของความต้องการผู้ใช้งาน (CRs) พบว่า ปัจจัยด้านความปลอดภัยของข้อมูลและความเป็นส่วนตัว (CR11) มีค่าน้ำหนักสัมพัทธ์สูงที่สุด เท่ากับ 7.75% รองลงมาคือ ประสิทธิภาพและประสิทธิผลของระบบ (CR1) เท่ากับ 7.55% และความโปร่งใสของผลลัพธ์ (CR9) เท่ากับ 7.35% ตามลำดับนอกจากนี้ ปัจจัยด้านการเข้าถึงและมาตรฐาน (CR4: 7.41%) และความสามารถในการบูรณาการระบบ (CR12: 7.09%) ยังมีระดับความสำคัญสูง ขณะที่ปัจจัยด้านประสบการณ์ผู้ใช้งาน เช่น ความสามารถในการเรียนรู้ (CR2: 6.72%) ความพึงพอใจและผลกระทบทางอารมณ์ (CR3: 5.71%) และการออกแบบการนำเสนอ (CR6: 5.52%) มีระดับความสำคัญรองลงมา



Relative Weight	Customer Importance	Customer Requirements (Explicit and Implicit) / Functional Requirements	TC1 User Interface & Visualization	TC2 Methodology Documentation	TC3: Customization Module	TC4: System Responsiveness	TC5 Comprehensive Criteria Integration	TC6 Data Security Protocols	TC7 Multi-User Collaboration	TC8 Update & Maintenance	TC9 Real-time Data Updating	TC10 Algorithm Accuracy & Reliability	TC11: Environmental Impact Assessment	TC12: Cross-Device Compatibility
7.55%	4.6554	CR1 Effectiveness & Efficiency	○	○		●	●	○		Δ	●			●
6.72%	4.1454	CR2 Learnability & Memorability	●		○	○	Δ		Δ	Δ	Δ	Δ		Δ
5.71%	3.5244	CR3 Satisfaction & Emotional Impact	●	Δ	○	○	Δ		Δ	Δ	Δ	Δ		Δ
7.41%	4.5731	CR4 Accessibility & Standards	○		Δ	○		●	○	○	○	Δ		
6.41%	3.9542	CR5 Content Quality		●	Δ	Δ	○		Δ	●	○	Δ	○	
5.52%	3.4048	CR6 Presentation Design	●		Δ	○			○	Δ	Δ	Δ		
5.58%	3.4442	CR7 Motivation & Engagement	○		●	Δ	Δ		Δ	Δ	Δ			Δ
6.47%	3.9897	CR8 Feedback & Adaptation		Δ	Δ	○	Δ	Δ	Δ	○	○	Δ		●
7.35%	4.5324	CR9 Transparency of DSS Results	○	●	Δ	Δ	●	●		Δ	○	○		
6.67%	4.1134	CR10 Local Language & Culture	●			Δ			○	○	Δ	Δ		
7.75%	4.7818	CR11 Data Security & Privacy	Δ	Δ		Δ	Δ	●	Δ	○	Δ	Δ		○
7.09%	4.3734	CR12 System Integration & Interoperability		●	Δ	○	●	○	○	○	○	○	●	○
7.05%	4.3509	CR13 Environmental Impact Integration	Δ	○	Δ	Δ	Δ		Δ	Δ	○	○	●	Δ
6.43%	3.9691	CR14 User Training & Adoption	○			○				○	Δ	Δ		Δ
6.29%	3.8788	CR15 Multi‾Stakeholder Collaboration	○	●	Δ	Δ	Δ	○	○	Δ	Δ	○	Δ	●
		Technical Importance Rating	358.21	307.93	141.13	251.08	262.65	271.83	144.63	234.92	243.93	142.42	152.79	258.73
		Relative Weight	12.93%	11.12%	5.09%	9.06%	9.48%	9.81%	5.22%	8.48%	8.81%	5.14%	5.52%	9.34%
		Ranking	1	2	12	6	4	3	10	8	7	11	9	5

ภาพที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง CR 15 ตัวและ TC 12 ตัวโดยใช้โครงสร้างของการสร้างบ้านแห่งคุณภาพ

ในส่วนของ คุณลักษณะเชิงเทคนิคของระบบ (Technical Characteristics: TCs) พบว่า TC1: การออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้งานและการแสดงผลข้อมูล (User Interface and Visualization) มีความสำคัญสูงสุด (12.93%) รองลงมาคือ TC2: การจัดทำเอกสารอธิบายระเบียบวิธีและกระบวนการของระบบ (Methodology Documentation) (11.12%) และ TC6: มาตรการรักษาความปลอดภัยของข้อมูล (Data Security Protocols) (9.81%) ตามลำดับ ขณะเดียวกัน คุณลักษณะที่เกี่ยวข้องกับ ประสิทธิภาพของระบบ ได้แก่ TC4: ความสามารถในการตอบสนอง

ของระบบ (System Responsiveness) (9.06%) TC5: การบูรณาการเกณฑ์การประเมินอย่างครอบคลุม (Comprehensive Criteria Integration) (9.48%) TC9: การปรับปรุงข้อมูลแบบเวลาจริง (Real-time Data Updating) (8.81%) และ TC12: ความสามารถในการรองรับการใช้งานข้ามอุปกรณ์ (Cross-device Compatibility) (9.34%) ล้วนมีระดับความสำคัญในระดับสูงเช่นกัน ในทางตรงกันข้าม TC10: ความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของอัลกอริทึม (Algorithm Accuracy and Reliability) มีค่าน้ำหนักต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับคุณลักษณะอื่น โดยมีค่าเท่ากับ 5.14% โดยภาพรวม ค่าน้ำหนักของคุณลักษณะเชิงเทคนิคกระจายอยู่ในช่วงประมาณ 5–13% ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่า การพัฒนาระบบ EcoRanker DSS จำเป็นต้องพิจารณาหลายองค์ประกอบร่วมกัน ทั้งด้านการใช้งาน ความน่าเชื่อถือ และประสิทธิภาพของระบบ

4.2.2 การอภิปรายผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค QFD

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า ผู้ใช้งานให้ความสำคัญกับความปลอดภัยของข้อมูล ความโปร่งใสของผลลัพธ์ และความน่าเชื่อถือของระบบในระดับสูง ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่า การพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจ (DSS) ในปัจจุบัน มิได้มุ่งเน้นเฉพาะความสามารถในการคำนวณหรือความซับซ้อนของอัลกอริทึมเท่านั้น แต่ยังรวมถึงความสามารถในการสร้างความเชื่อมั่น ความโปร่งใส และการตรวจสอบผลลัพธ์ของระบบร่วมด้วย ทั้งนี้ แนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับ Information Systems Success Model ซึ่งระบุว่า คุณภาพของระบบ คุณภาพของข้อมูล และความพึงพอใจของผู้ใช้งาน เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความสำเร็จและการยอมรับระบบสารสนเทศ [115, 116] นอกจากนี้ ยังสอดคล้องกับแนวคิดด้าน Human-Centered AI ที่ให้ความสำคัญกับความน่าเชื่อถือ ความปลอดภัย และความโปร่งใสของระบบดิจิทัล เพื่อสร้างความไว้วางใจให้แก่ผู้ใช้งาน [117]

ในด้านคุณลักษณะเชิงเทคนิค ผลการวิเคราะห์พบว่า User Interface and Visualization และ Methodology Documentation ได้รับความสำคัญสูงกว่าปัจจัยด้านความถูกต้องของอัลกอริทึม (Algorithm Accuracy and Reliability) ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่า ผู้ใช้งานคาดหวังให้ระบบสามารถสื่อสาร อธิบาย และนำเสนอผลลัพธ์ในรูปแบบที่เข้าใจง่าย มากกว่าการเป็นเพียงระบบคำนวณเชิงเทคนิคเพียงอย่างเดียว ข้อค้นพบดังกล่าวสอดคล้องกับแนวคิดด้าน Explainable and Intelligible Systems ที่ระบุว่า การอธิบายผลลัพธ์และการแสดงข้อมูลในรูปแบบที่ผู้ใช้งานเข้าใจได้มีบทบาทสำคัญต่อความเข้าใจและความเชื่อมั่นของผู้ใช้งานต่อระบบ [118]

นอกจากนี้ ข้อค้นพบดังกล่าวยังสะท้อนแนวคิดของ Explainable Artificial Intelligence (XAI) ซึ่งให้ความสำคัญกับความสามารถของระบบในการอธิบายเหตุผล กระบวนการ และที่มาของผลลัพธ์ เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถตรวจสอบและทำความเข้าใจการตัดสินใจของระบบได้อย่างโปร่งใส [119, 120] ทั้งนี้ ระบบ EcoRanker DSS ได้รับการออกแบบให้ผู้ใช้งานสามารถ มองเห็นเกณฑ์

การประเมิน ค่าน้ำหนัก และผลการจัดอันดับในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการตัดสินใจ ซึ่งช่วยสนับสนุนแนวคิดด้าน ความโปร่งใส (Transparency) และ ความสามารถในการอธิบายที่มาของผลลัพธ์ (Explainability) ใน กระบวนการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ (MCDA-based DSS)

ผลการวิเคราะห์ยังแสดงให้เห็นว่า ผู้ใช้งานให้ความสำคัญกับ ความปลอดภัยของข้อมูล (Data Security) การปรับปรุงข้อมูลแบบเวลาจริง (Real-time Data Updating) และ ความสามารถในการรองรับการใช้งานข้ามอุปกรณ์ (Cross-device Compatibility) ในระดับสูง ซึ่งสะท้อนถึงความคาดหวังต่อระบบสนับสนุนการตัดสินใจที่สามารถรองรับการใช้งานจริงในระดับองค์กร ภายใต้สภาพแวดล้อมที่ข้อมูลมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง และผู้ใช้งานเข้าถึงระบบผ่านอุปกรณ์ที่หลากหลาย แนวโน้มดังกล่าวสะท้อนทิศทางของการพัฒนาระบบดิจิทัลสมัยใหม่ที่มุ่งเน้น ความยืดหยุ่น ความปลอดภัย และการเข้าถึงข้อมูลตามข้อมูลปัจจุบันแบบอัตโนมัติ เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจในองค์กรและการดำเนินงานด้านความยั่งยืน [121]

ในอีกด้านหนึ่ง แม้ว่าปัจจัยด้าน ความสามารถในการเรียนรู้การใช้งาน (Learnability) และ ความพึงพอใจเชิงอารมณ์ (Emotional Satisfaction) จะมีระดับความสำคัญต่ำกว่าปัจจัยอื่น แต่ยังคงมีบทบาทสำคัญต่อ การยอมรับระบบในระยะยาว โดยเฉพาะในบริบทของ ระบบสนับสนุนการตัดสินใจบนเว็บ (Web-based DSS) ที่มีผู้ใช้งานหลายกลุ่มและมีระดับความเชี่ยวชาญทางเทคนิคแตกต่างกัน ทั้งนี้ สอดคล้องกับแนวคิดด้าน ความสามารถในการใช้งานของระบบ (Usability) ซึ่งระบุว่า ความง่ายในการเรียนรู้ ความสะดวกในการใช้งาน และประสบการณ์เชิงบวกของผู้ใช้งานเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ส่งผลต่อ ประสิทธิภาพและการยอมรับระบบสารสนเทศ [97][122]

โดยสรุป ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค QFD ยืนยันว่า การพัฒนาระบบ EcoRanker DSS ที่มีประสิทธิภาพ จำเป็นต้องให้ความสำคัญทั้งด้านความถูกต้องของแบบจำลอง ความโปร่งใส ความสามารถในการอธิบายผลลัพธ์ ความปลอดภัยของข้อมูล และประสบการณ์การใช้งานของผู้ใช้ร่วมกัน ซึ่งสะท้อนแนวทางของการพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจเชิงบูรณาการที่มุ่งเน้นทั้งประสิทธิภาพเชิงเทคนิคและการยอมรับจากผู้ใช้งานจริงในบริบทของการจัดการสิ่งแวดล้อมและความยั่งยืน

4.3 ผลการกำหนดค่าน้ำหนักด้วยวิธีกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ความคลุมเครือ (FAHP Weighting Results)

4.3.1 ผลการกำหนดค่าน้ำหนักของเกณฑ์การประเมินด้วยวิธี FAHP

การกำหนดค่าน้ำหนักของเกณฑ์การประเมินในระบบ EcoRanker DSS ดำเนินการโดยใช้วิธีกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ความคลุมเครือ (FAHP) เพื่อสะท้อนระดับความสำคัญเชิง

สัมพัทธ์ของแต่ละเกณฑ์ภายใต้ดุลยพินิจของผู้เชี่ยวชาญในมิติเศรษฐกิจ สิ่งแวดล้อม สังคม และเทคนิค

ค่าน้ำหนักที่ได้จากกระบวนการ FAHP ถูกกำหนดให้เป็นค่าเริ่มต้นของระบบ (Default Weights) และถูกนำไปใช้ในกระบวนการจัดอันดับทางเลือกด้วยวิธี TOPSIS ภายในระบบ EcoRanker DSS โดยไม่มีการคำนวณใหม่ระหว่างการใช้งานจริง เพื่อให้ระบบสามารถสะท้อนลำดับความสำคัญของปัจจัยการตัดสินใจได้อย่างเป็นระบบและสอดคล้องกับความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญ ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า ค่าน้ำหนักของเกณฑ์ย่อยทั้ง 8 รายการมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าน้ำหนักเริ่มต้นของเกณฑ์การประเมินทั้ง 8 รายการจากวิธี FAHP

มิติหลัก	เกณฑ์ย่อย	ค่าน้ำหนักเริ่มต้น	ลำดับ
ด้านเศรษฐกิจ	ต้นทุนการดำเนินงาน	0.1151	5
ด้านเศรษฐกิจ	ต้นทุนการลงทุน	0.0875	6
ด้านสิ่งแวดล้อม	การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	0.2087	1
ด้านสิ่งแวดล้อม	การใช้เชื้อเพลิง	0.1455	3
ด้านสังคม	การสร้างงานใหม่	0.0655	8
ด้านสังคม	การยอมรับของสาธารณะ	0.0853	7
ด้านเทคนิค	คุณภาพของผลลัพธ์จากการจัดการของเสีย	0.1644	2
ด้านเทคนิค	ความเป็นไปได้ทางเทคนิค	0.1280	4

ผลการวิเคราะห์พบว่า เกณฑ์ที่มีค่าน้ำหนักสูงที่สุด คือ การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยมีค่าน้ำหนักเท่ากับ 0.2087 รองลงมาคือ คุณภาพของผลลัพธ์จากการจัดการของเสีย (0.1644) และการใช้เชื้อเพลิงในการขนส่ง (0.1455) ตามลำดับ ขณะที่ ความเป็นไปได้ทางเทคนิค (0.1280) และต้นทุนการดำเนินงาน (0.1151) อยู่ในลำดับถัดมา ส่วนต้นทุนการลงทุน (0.0875) การยอมรับของสาธารณะ (0.0853) และการสร้างงานใหม่ (0.0655) มีระดับความสำคัญต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์อื่น

เมื่อพิจารณาในระดับมิติหลัก พบว่า มิติด้านสิ่งแวดล้อมมีระดับความสำคัญรวมสูงที่สุด โดยเฉพาะเกณฑ์ด้านการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและการใช้เชื้อเพลิง ขณะที่มิติด้านเทคนิค โดยเฉพาะคุณภาพของผลลัพธ์จากการจัดการของเสียและความเป็นไปได้ทางเทคนิค ได้รับความสำคัญในระดับสูงเช่นกัน

ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่า ผู้เชี่ยวชาญให้ความสำคัญต่อทั้งผลกระทบสิ่งแวดล้อมและความสามารถในการนำผลลัพธ์ไปใช้งานจริงในการตัดสินใจด้านการจัดการของเสียจากการก่อสร้าง

4.3.2 การอภิปรายผลการกำหนดค่าน้ำหนักด้วยวิธี FAHP

ผลการกำหนดค่าน้ำหนักด้วยวิธีกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ความคลุมเครือ (FAHP) แสดงให้เห็นว่า ผู้เชี่ยวชาญให้ความสำคัญกับเกณฑ์ด้านสิ่งแวดล้อมในระดับสูงที่สุด โดยเฉพาะเกณฑ์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งมีค่าน้ำหนักสูงสุด รองลงมาคือ คุณภาพของผลลัพธ์จากการจัดการของเสีย และการใช้เชื้อเพลิงในการขนส่ง ข้อค้นพบดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่า ผู้เชี่ยวชาญให้ความสำคัญกับการลดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมควบคู่กับประสิทธิภาพของกระบวนการจัดการของเสีย ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดด้านเศรษฐกิจหมุนเวียน ที่มุ่งเน้นการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ การลดของเสีย และการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตลอดวงจรการจัดการทรัพยากร [123]

นอกจากนี้ การที่เกณฑ์ด้านการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและการใช้เชื้อเพลิงได้รับค่าน้ำหนักในระดับสูง ยังสะท้อนให้เห็นถึงความสำคัญของประเด็นด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในการตัดสินใจด้านการจัดการของเสียจากการก่อสร้าง ทั้งนี้ ภาคการก่อสร้างและการขนส่งวัสดุก่อสร้างถือเป็นหนึ่งในแหล่งสำคัญของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระดับโลก โดยเฉพาะจากกิจกรรมด้านการขนส่ง การใช้เชื้อเพลิง และกระบวนการก่อสร้างต่าง ๆ [124] ดังนั้น ผลการกำหนดค่าน้ำหนักที่ให้ความสำคัญกับการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และปริมาณการใช้เชื้อเพลิง จึงสะท้อนแนวโน้มของการตัดสินใจด้านความยั่งยืนที่ให้ความสำคัญกับการลดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมและการลดคาร์บอนมากขึ้น

ในด้านความเป็นไปได้ทางเทคนิคและต้นทุนการดำเนินงาน ซึ่งได้รับค่าน้ำหนักในระดับค่อนข้างสูง ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่า ผู้เชี่ยวชาญมิได้พิจารณาเฉพาะผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมเพียงอย่างเดียว แต่ยังให้ความสำคัญกับความสามารถในการนำระบบหรือแนวทางการจัดการของเสียไปประยุกต์ใช้งานได้จริงในบริบทของอุตสาหกรรมก่อสร้าง ทั้งนี้ แนวคิดดังกล่าวสอดคล้องกับหลักการของการตัดสินใจเชิงหลายเกณฑ์ ที่ระบุว่า การตัดสินใจด้านความยั่งยืนจำเป็นต้องพิจารณาทั้งมิติด้านสิ่งแวดล้อม เศรษฐกิจ และความเป็นไปได้ทางเทคนิคควบคู่กัน เพื่อให้ผลลัพธ์สามารถนำไปใช้งานได้จริงและเกิดประสิทธิภาพในการดำเนินงาน [125]

ในด้านเทคนิค ผลการวิเคราะห์พบว่า คุณภาพของผลลัพธ์จากการจัดการของเสียและความเป็นไปได้ทางเทคนิคได้รับค่าน้ำหนักในระดับสูง ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่า ผู้เชี่ยวชาญมิได้พิจารณาเฉพาะผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมเพียงอย่างเดียว แต่ยังให้ความสำคัญกับความสามารถในการนำระบบหรือแนวทางการจัดการของเสียไปประยุกต์ใช้งานได้จริงในบริบทของอุตสาหกรรมก่อสร้าง ทั้งนี้ แนวคิด

ดังกล่าวสอดคล้องกับหลักการของการตัดสินใจเชิงหลายเกณฑ์ ที่ระบุว่า การตัดสินใจด้านความยั่งยืนจำเป็นต้องพิจารณาทั้งมิติด้านสิ่งแวดล้อม เศรษฐกิจ และความเป็นไปได้ทางเทคนิคควบคู่กัน เพื่อให้ผลลัพธ์สามารถนำไปใช้งานได้จริงและเกิดประสิทธิภาพในการดำเนินงาน [125]

ผลการวิเคราะห์ยังแสดงให้เห็นว่า ต้นทุนการดำเนินงานได้รับค่าน้ำหนักสูงกว่าต้นทุนการลงทุน ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่า ผู้เชี่ยวชาญให้ความสำคัญกับต้นทุนที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในระยะยาวมากกว่าค่าใช้จ่ายเริ่มต้นเพียงครั้งเดียว ทั้งนี้ แนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับแนวคิดด้าน life-cycle thinking ที่ให้ความสำคัญกับผลกระทบและต้นทุนตลอดวงจรการดำเนินงาน มากกว่าการพิจารณาเฉพาะต้นทุนเริ่มต้นของโครงการ [126]

ในอีกด้านหนึ่ง แม้ว่าเกณฑ์ด้านการสร้างงานใหม่และการยอมรับของสาธารณะจะได้รับค่าน้ำหนักต่ำกว่าเกณฑ์ด้านสิ่งแวดล้อมและเทคนิค แต่ผลลัพธ์ดังกล่าวมิได้หมายความว่า ปัจจัยด้านสังคมไม่มีความสำคัญ หากแต่สะท้อนให้เห็นว่า ในบริบทของการตัดสินใจด้านการจัดการของเสียจากการก่อสร้าง ผู้เชี่ยวชาญให้ความสำคัญกับการลดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมและประสิทธิภาพในการดำเนินงานเป็นลำดับแรก ทั้งนี้ แนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยด้านระบบสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับการจัดการของเสียจากการก่อสร้างที่พบว่า เกณฑ์ด้านสิ่งแวดล้อมและเทคนิคมักได้รับความสำคัญสูงกว่าเกณฑ์ด้านสังคมในกระบวนการตัดสินใจของผู้เชี่ยวชาญ [127]

โดยสรุป ผลการกำหนดค่าน้ำหนักด้วยวิธี FAHP แสดงให้เห็นว่า ผู้เชี่ยวชาญให้ความสำคัญกับการลดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม ควบคู่กับความสามารถในการนำระบบไปใช้งานจริงและประสิทธิภาพของการดำเนินงาน ซึ่งสะท้อนแนวคิดของการตัดสินใจด้านความยั่งยืนที่ต้องพิจารณาทั้งมิติด้านสิ่งแวดล้อม เศรษฐกิจ เทคนิค และสังคมร่วมกัน ภายใต้บริบทของการจัดการของเสียจากการก่อสร้างและการเปลี่ยนผ่านสู่เศรษฐกิจหมุนเวียน

4.4 ลำดับกระบวนการทำงานของระบบ EcoRanker DSS

หัวข้อนี้นำเสนอภาพรวมการทำงานของระบบ EcoRanker DSS ในฐานะระบบสนับสนุนการตัดสินใจแบบบูรณาการ ครอบคลุมตั้งแต่การรับข้อมูล การประมวลผล ไปจนถึงการแสดงผลลัพธ์ เพื่อสนับสนุนการคัดเลือกผู้ประกอบการจัดการของเสียคอนกรีตอย่างเป็นระบบ

เนื้อหาแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่

(1) ลำดับกระบวนการทำงานของระบบ

(2) การออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้งาน

(3) กระบวนการประมวลผลและกลไกการตัดสินใจ

(4) การแสดงผลลัพธ์

4.4.1 ลำดับกระบวนการทำงานของระบบ (System Workflow)

ภาพที่ 4.2 แสดงลำดับกระบวนการทำงานของระบบ EcoRanker DSS ในรูปแบบ logical workflow ซึ่งอธิบายการไหลของข้อมูลและปฏิสัมพันธ์ระหว่างผู้ใช้งานกับระบบ

กระบวนการเริ่มจากการลงทะเบียนและเข้าสู่ระบบ ก่อนที่ผู้ใช้งานจะเลือกบทบาท ได้แก่ ผู้ก่อให้เกิดของเสีย และผู้ประกอบการจัดการของเสีย ซึ่งมีลำดับการดำเนินงานแตกต่างกันแต่เชื่อมโยงกันภายในระบบเดียวกัน

สำหรับผู้ก่อให้เกิดของเสีย กระบวนการเริ่มจากการสร้างโครงการ โดยกำหนดข้อมูลสำคัญ เช่น ประเภทและปริมาณของเสีย ตำแหน่งที่ตั้ง และเกณฑ์การคัดเลือก พร้อมกำหนดค่าน้ำหนักของเกณฑ์ ซึ่งสามารถปรับให้สอดคล้องกับบริบทของโครงการ

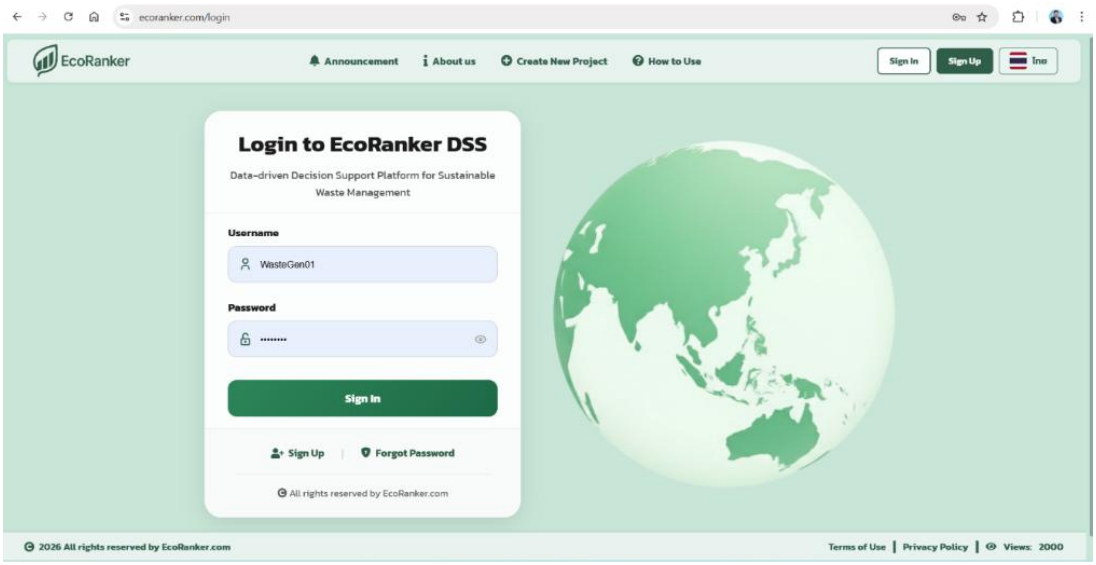
เมื่อโครงการถูกประกาศ ผู้ประกอบการที่มีคุณสมบัติตรงตามเงื่อนไขสามารถเข้าร่วมและป้อนข้อมูลตามเกณฑ์ที่กำหนด จากนั้นข้อมูลจะถูกตรวจสอบก่อนเข้าสู่กระบวนการประเมิน

ระบบดำเนินการประมวลผลและจัดอันดับผู้ประกอบการโดยอัตโนมัติ พร้อมแจ้งเตือนไปยังผู้ที่ได้รับการจัดอันดับสูงสุด และรองรับการเลือกทางเลือกถัดไปในกรณีที่ไม่มีการตอบรับภายในระยะเวลาที่กำหนด

กระบวนการดังกล่าวสะท้อนโครงสร้างการตัดสินใจแบบลำดับขั้น ซึ่งเชื่อมโยงระหว่างข้อมูล การประเมิน และการเลือกทางเลือกอย่างเป็นระบบ

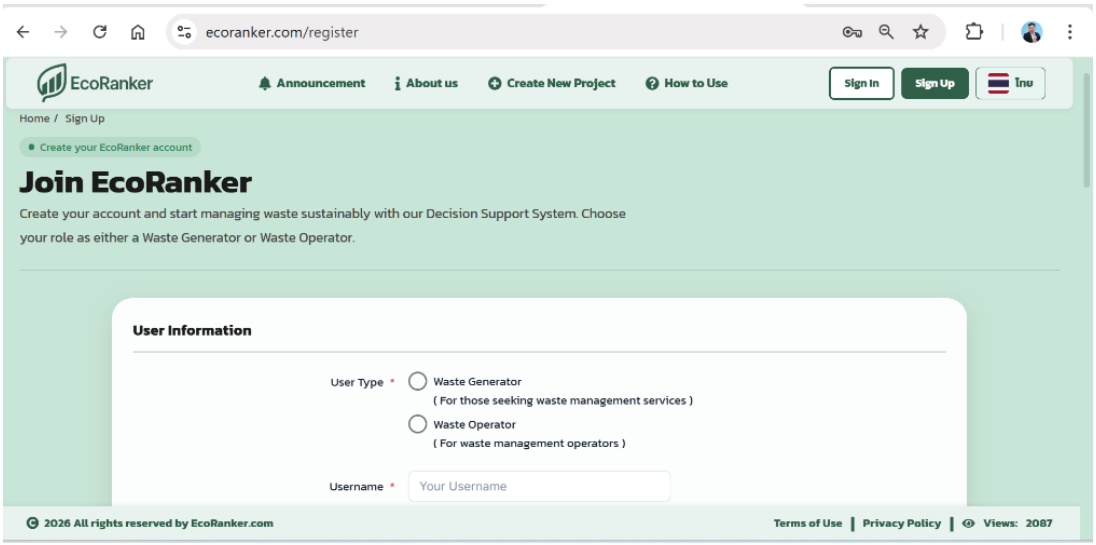
4.4.2 การออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้งาน (User Interface Design)

การออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้งานของระบบ EcoRanker DSS ถูกพัฒนาให้สอดคล้องกับลำดับกระบวนการทำงานของระบบ โดยมุ่งเน้นการสนับสนุนการป้อนข้อมูล การตรวจสอบ และการตัดสินใจในแต่ละขั้นตอน



ภาพที่ 4.2 หน้าจอเข้าสู่ระบบและลงทะเบียนผู้ใช้งานของระบบ EcoRanker DSS

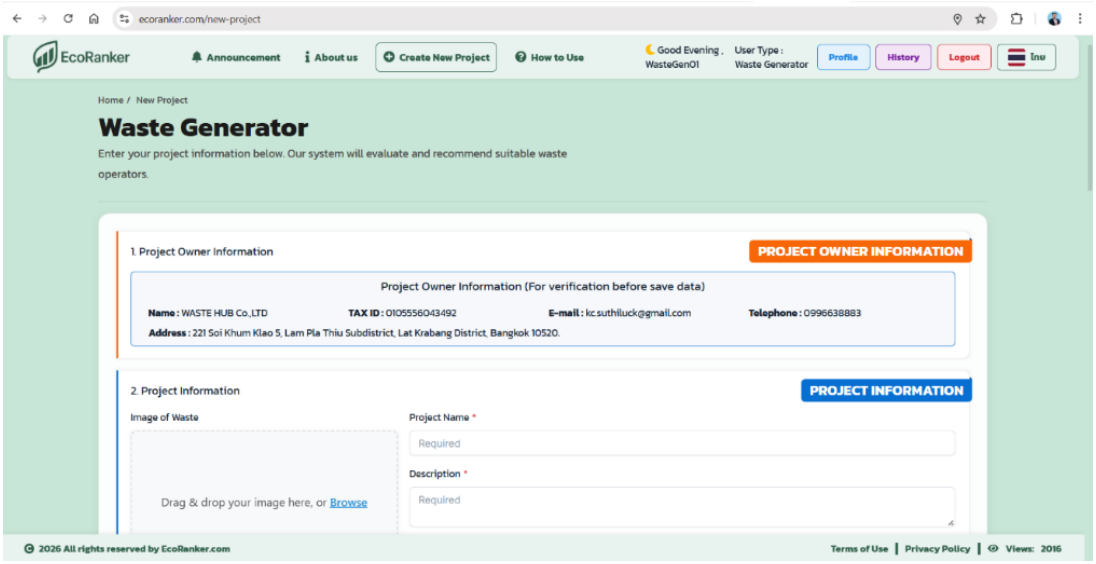
ระบบแบ่งส่วนการใช้งานตามบทบาทของผู้ใช้งานดังแสดงในภาพที่ 4.3 หน้าจอการเลือกบทบาทของผู้ใช้งาน ได้แก่ ผู้ก่อให้เกิดของเสียและผู้ประกอบการจัดการของเสีย



ภาพที่ 4.3 หน้าจอการเลือกบทบาทเพื่อกำหนดเส้นทางการทำงานตามประเภทผู้ใช้งาน

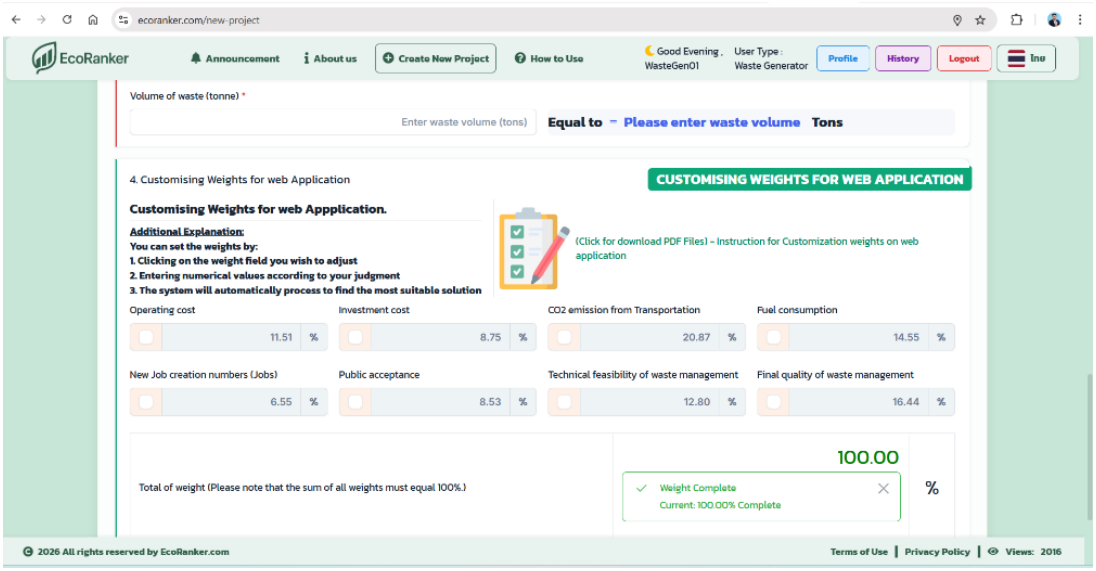
โดยแต่ละกลุ่มมีหน้าจอและฟังก์ชันที่สอดคล้องกับภารกิจของตน เช่น การสร้างโครงการ การกำหนดเงื่อนไข การป้อนข้อมูล และการตรวจสอบสถานะ การออกแบบอินเทอร์เฟซเน้น

ความชัดเจนของโครงสร้างข้อมูลและลำดับการทำงาน เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถดำเนินการตามขั้นตอนของระบบได้อย่างต่อเนื่อง ลดความซับซ้อนในการใช้งาน และสนับสนุนความถูกต้องของข้อมูลที่นำเข้าสู่ระบบ นอกจากนี้ ระบบยังรองรับการแสดงผลข้อมูลในรูปแบบที่ช่วยในการตัดสินใจ เช่น ตารางสรุปและการแสดงผลเชิงภาพ ซึ่งช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถเปรียบเทียบทางเลือกได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในส่วนของผู้ก่อให้เกิดของเสีย หน้าจอเริ่มต้นคือการสร้างโครงการ ดังแสดงในภาพที่ 4.4



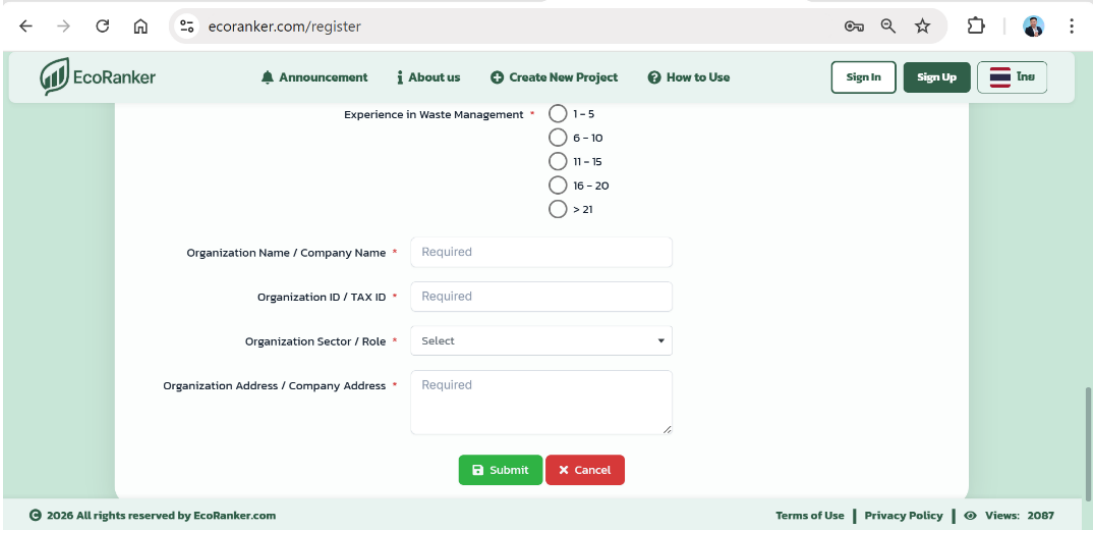
ภาพที่ 4.4 หน้าจอกำหนดรายละเอียดและเงื่อนไขการประเมินโครงการ

ถัดมา ผู้ใช้งานสามารถกำหนดเกณฑ์และค่าน้ำหนัก ดังแสดงในภาพที่ 4.5 ซึ่งเปิดโอกาสให้ผู้ใช้งานสามารถเลือกใช้ค่ามาตรฐานของระบบหรือปรับให้เหมาะสมกับบริบทของโครงการ โดยข้อมูลดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ในกระบวนการประมวลผลและจัดอันดับในขั้นตอนถัดไป



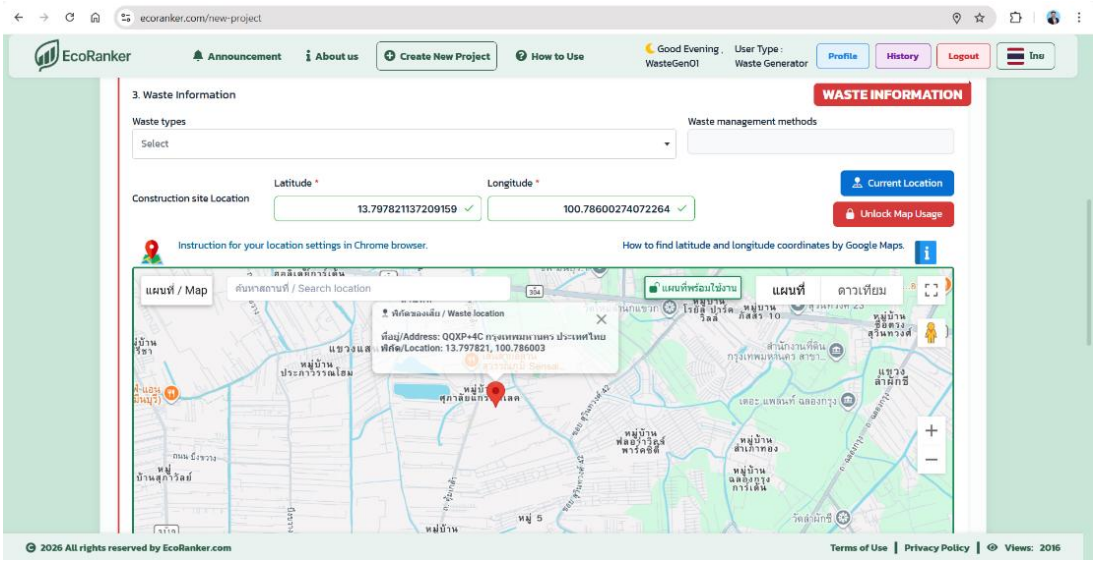
ภาพที่ 4.5 หน้าจอกำหนดเกณฑ์การประเมินและค่าน้ำหนัก เพื่อใช้ในการประมวลผลและจัดอันดับ

ก่อนเข้าสู่กระบวนการประเมิน ผู้ใช้งานต้องตรวจสอบและยืนยันข้อมูล ดังแสดงในภาพที่ 4.6 โดยช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถทบทวนความถูกต้องของข้อมูลและเงื่อนไขที่กำหนด ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญในการเตรียมข้อมูลเข้าสู่ระบบตัดสินใจ



ภาพที่ 4.6 หน้าจอตรวจสอบและยืนยันข้อมูลของผู้ก่อให้เกิดของเสียก่อนเข้าสู่กระบวนการประเมิน

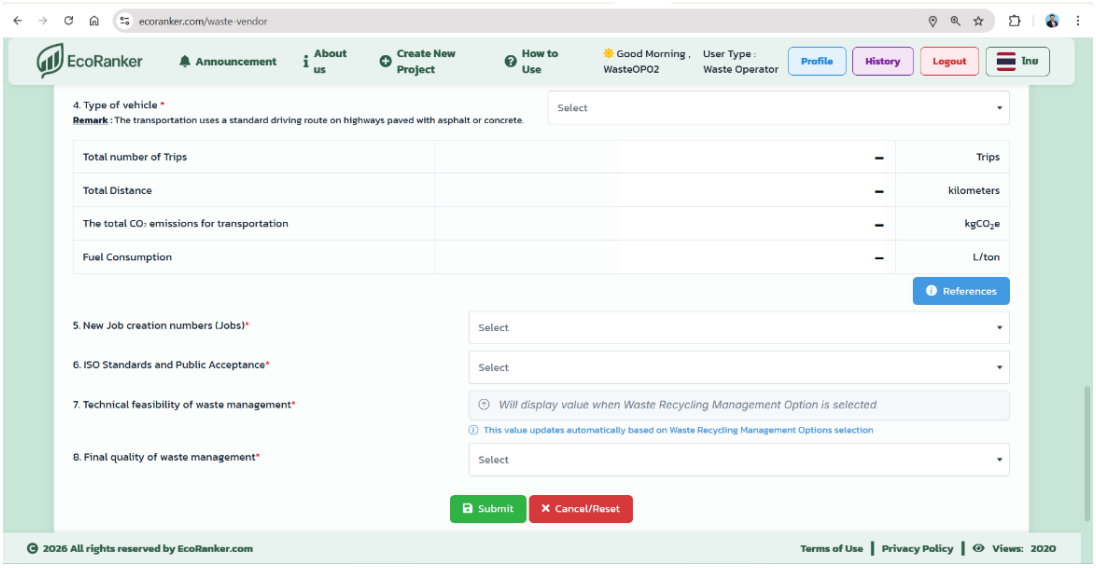
ในการใช้งาน ผู้ก่อให้เกิดของเสียจะระบุตำแหน่งจุดกำเนิดของของเสีย ขณะที่ผู้ประกอบการจัดการของเสียจะระบุตำแหน่งของสถานที่กำจัดหรือแปรรูปของเสียผ่านอินเทอร์เฟซแผนที่เดียวกัน เพื่อให้ข้อมูลเชิงพื้นที่มีความสอดคล้องและสามารถนำไปใช้ร่วมกันได้อย่างเป็นระบบ



ภาพที่ 4.7 หน้าจอการกำหนดตำแหน่งโครงการของผู้ก่อให้เกิดของเสียโดยใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS)

เมื่อมีการระบุข้อมูลตำแหน่งทั้งต้นทางและปลายทาง ระบบจะคำนวณระยะทางในการขนส่งโดยอัตโนมัติ ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญในการประเมินด้านสิ่งแวดล้อม ระยะทางดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ในการคำนวณตัวชี้วัด ได้แก่ การใช้เชื้อเพลิงและการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการขนส่ง โดยอ้างอิงแบบจำลองในบทที่ 3

สำหรับผู้ประกอบการจัดการของเสียระบบรองรับการป้อนข้อมูลค่าใช้จ่ายในการจัดการขยะ ตำแหน่งสถานที่กำจัด และข้อมูลด้านความยั่งยืนตามเกณฑ์ที่กำหนด



ภาพที่ 4.8 หน้าจอป้อนข้อมูลความยั่งยืนตามเกณฑ์ประเมินสำหรับนำไปประมวลผลและจัดอันดับ

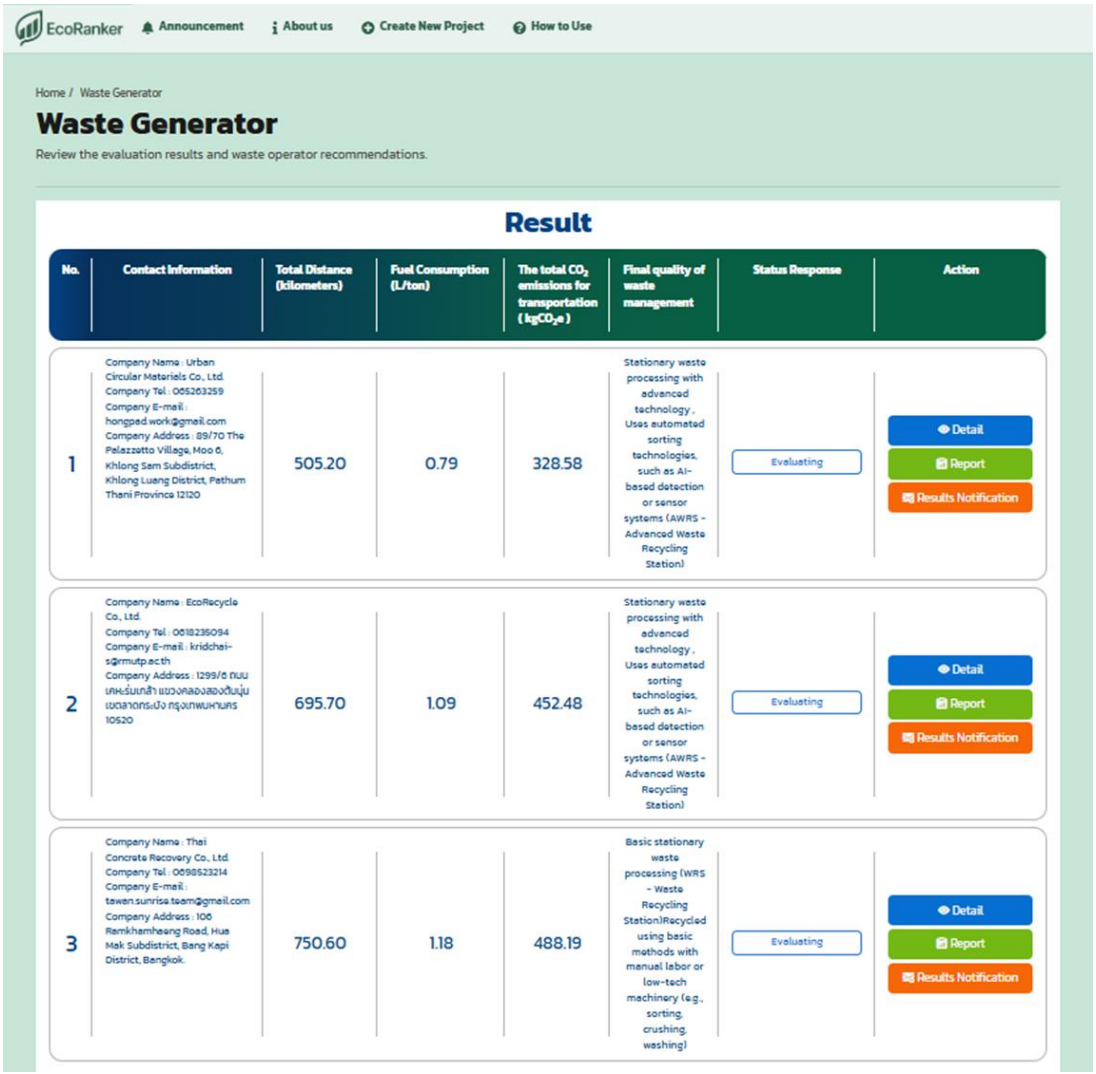
4.4.3 กระบวนการประมวลผลของระบบและกลไกการตัดสินใจ (System Processing and Decision Engine)

ระบบดำเนินการประมวลผลภายใต้กรอบแนวคิดของการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ โดยใช้วิธี TOPSIS เป็นกลไกหลักในการจัดอันดับผู้ประกอบการ เมื่อได้รับข้อมูล ระบบจะสร้าง decision matrix และคำนวณตามขั้นตอนของวิธี TOPSIS (รายละเอียดในบทที่ 3) โดยผลลัพธ์อยู่ในรูปของค่าความใกล้เคียง ซึ่งใช้ในการจัดอันดับทางเลือก แนวทางดังกล่าวช่วยให้การประเมินมีความเป็นระบบ ลดอคติ และสะท้อนความสำคัญของเกณฑ์ได้อย่างเหมาะสม

4.4.4 การแสดงผลลัพธ์ของระบบ (System Output and Result Presentation)

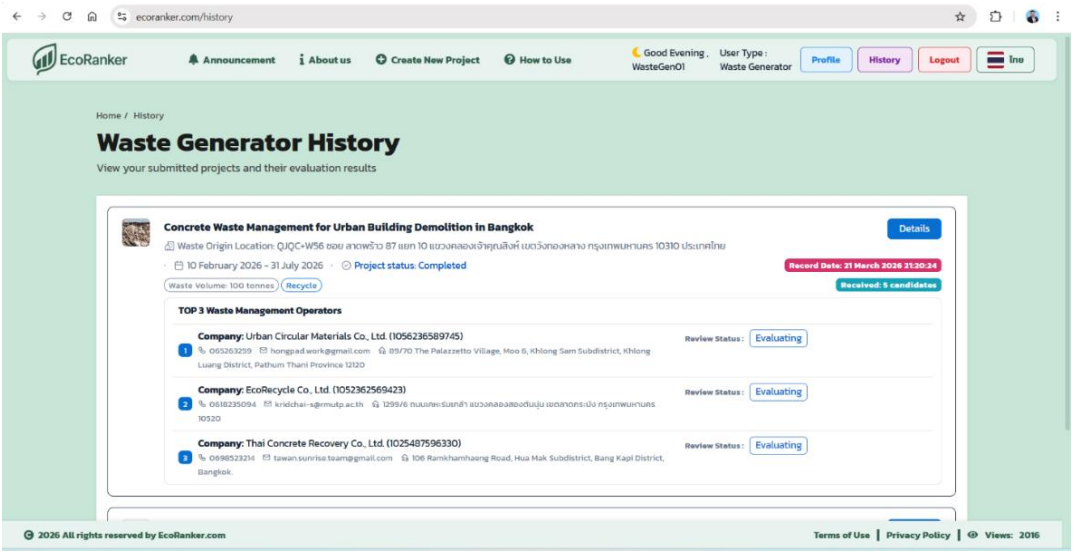
ผลลัพธ์จากการประมวลผลถูกนำเสนอในรูปแบบที่สนับสนุนการตัดสินใจ โดยแสดงข้อมูลการจัดอันดับผู้ประกอบการในรูปแบบตารางและการแสดงผลเชิงภาพ

ระบบแสดงคะแนน อันดับ และสถานะของผู้ประกอบการ พร้อมรองรับการแจ้งเตือนและการติดตามผลการดำเนินงาน



ภาพที่ 4.9 หน้าจอแสดงผลลัพธ์การจัดอันดับและคะแนนของผู้ประกอบการ เพื่อประกอบการตัดสินใจ

นอกจากนี้ยังรองรับการแจ้งเตือนผลการคัดเลือกไปยังผู้ประกอบการที่เกี่ยวข้อง และบันทึกสถานะการดำเนินงานของระบบเพื่อให้สามารถติดตามผลได้ การนำเสนอในลักษณะดังกล่าวช่วยเพิ่มความชัดเจนในการเปรียบเทียบทางเลือก และเสริมความโปร่งใสในกระบวนการคัดเลือก



ภาพที่ 4.10 หน้าจอแจ้งเตือนผลการคัดเลือกไปยังผู้ประกอบการ และการจัดการทางเลือกสำรอง

4.5 การตรวจสอบความถูกต้อง การยืนยันความเหมาะสม และการประเมินประสิทธิภาพของระบบ EcoRanker DSS

เพื่อให้มั่นใจว่าระบบสนับสนุนการตัดสินใจ EcoRanker DSS ที่พัฒนาขึ้นมีความถูกต้อง ความน่าเชื่อถือ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงในบริบทของการจัดการของเสียจากการก่อสร้าง งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการตรวจสอบและประเมินระบบอย่างเป็นระบบในหลายมิติที่สำคัญ ครอบคลุมทั้งด้านความถูกต้องเชิงการคำนวณ ความเหมาะสมในการใช้งาน และประสิทธิภาพของระบบโดยรวม การประเมินถูกออกแบบให้ครอบคลุม 4 มิติหลัก ได้แก่

(1) การตรวจสอบความถูกต้องเชิงการคำนวณของแบบจำลอง (Model Verification)

(2) การยืนยันความเหมาะสมของระบบโดยผู้เชี่ยวชาญ (Expert Validation)

(3) การประเมินความพึงพอใจและการยอมรับของผู้ใช้งาน (User Satisfaction)

(4) การประเมินประสิทธิภาพของระบบ (System Performance)

4.5.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Verification)

4.5.1.1 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ผลการตรวจสอบแสดงดังในตารางที่ 4.2 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างระบบ EcoRanker DSS และการคำนวณด้วย Microsoft Excel ในระดับผลลัพธ์สุดท้าย โดยพบว่าค่าของ S^+, S^- และ Ci ของทุกทางเลือกมีค่าเท่ากันทุกประการ โดยไม่พบความคลาดเคลื่อน (Error =

0.0000%) นอกจากนี้ ลำดับการจัดอันดับของทางเลือกยังมีความสอดคล้องกันอย่างสมบูรณ์ (สอดคล้องกัน 100%) ระหว่างทั้งสองวิธี

จากตารางที่ 4.2 พบว่า ผลลัพธ์ที่ได้จากระบบ EcoRanker DSS มีความสอดคล้องกับผลการคำนวณด้วยโปรแกรม Microsoft Excel อย่างสมบูรณ์ในทุกตัวชี้วัด ได้แก่ ค่า S^+ ค่า S^- และค่าดัชนีความใกล้เคียง (Closeness Coefficient: Ci) โดยไม่พบความคลาดเคลื่อน (Error = 0.0000%) นอกจากนี้ ผลการจัดอันดับของทางเลือกยังมีความสอดคล้องกัน 100% ระหว่างทั้งสองวิธี ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบ EcoRanker DSS สามารถนำอัลกอริทึม TOPSIS ไปประยุกต์ใช้ได้อย่างถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือในเชิงการคำนวณ

ตารางที่ 4.2 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (EcoRanker DSS เปรียบเทียบกับการคำนวณด้วย Excel)

ทางเลือก	วิธีการ	S^+ (ระยะห่างจากค่าอุดมคติที่ดีที่สุด)	S^- (ระยะห่างจากค่าอุดมคติที่แย่ที่สุด)	ค่าดัชนีความใกล้เคียง (Ci)	อันดับ
A	EcoRanker DSS	0.04377	0.07291	0.62485	2
	Excel	0.04377	0.07291	0.62485	2
	ค่าความคลาดเคลื่อน (%)	0.0000%	0.0000%	0.0000%	-
B	EcoRanker DSS	0.07543	0.04349	0.36572	4
	Excel	0.07543	0.04349	0.36572	4
	ค่าความคลาดเคลื่อน (%)	0.0000%	0.0000%	0.0000%	-
C	EcoRanker DSS	0.02251	0.10257	0.82003	1
	Excel	0.02251	0.10257	0.82003	1
	ค่าความคลาดเคลื่อน (%)	0.0000%	0.0000%	0.0000%	-
D	EcoRanker DSS	0.06858	0.05744	0.45580	3
	Excel	0.06858	0.05744	0.45580	3
	ค่าความคลาดเคลื่อน (%)	0.0000%	0.0000%	0.0000%	-
E	EcoRanker DSS	0.09170	0.04903	0.34840	5
	Excel	0.09170	0.04903	0.34840	5
	ค่าความคลาดเคลื่อน (%)	0.0000%	0.0000%	0.0000%	-

เพื่อยืนยันความถูกต้องในเชิงลึกของกระบวนการคำนวณ งานวิจัยนี้ยังได้ทำการตรวจสอบในระดับขั้นตอนย่อย ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งครอบคลุมตั้งแต่การปรับมาตรฐานข้อมูลไปจนถึงการคำนวณค่าดัชนีความใกล้เคียง โดยผลการตรวจสอบพบว่า ค่าที่ได้จากระบบ EcoRanker DSS มีความสอดคล้องกับการคำนวณจาก Excel ในทุกขั้นตอน โดยไม่พบความคลาดเคลื่อนในค่าระหว่างทาง

ตารางที่ 4.3 การตรวจสอบความถูกต้องของการคำนวณในขั้นตอนย่อย (Intermediate Calculation Verification)

ขั้นตอน	พารามิเตอร์	EcoRanker DSS	Excel	ค่าความคลาดเคลื่อน (%)
1	การทำ normalization (rij)	ตรงกันทั้งหมด	ตรงกันทั้งหมด	0.0000%
2	การทำ weighted normalization (vij)	ตรงกันทั้งหมด	ตรงกันทั้งหมด	0.0000%
3	ค่าอุดมคติที่ดีที่สุด (Ideal Best: A^+)	ตรงกันทั้งหมด	ตรงกันทั้งหมด	0.0000%
4	ค่าอุดมคติที่แย่ที่สุด (Ideal Worst: A^-)	ตรงกันทั้งหมด	ตรงกันทั้งหมด	0.0000%
5	การคำนวณระยะห่าง (Separation Measure: S^+ และ S^-)	ตรงกันทั้งหมด	ตรงกันทั้งหมด	0.0000%
6	ค่าดัชนีความใกล้เคียง (Closeness Coefficient: Ci)	ตรงกันทั้งหมด	ตรงกันทั้งหมด	0.0000%

จากตารางข้างต้น แสดงให้เห็นว่าค่าที่ได้จากระบบ EcoRanker DSS มีความสอดคล้องกับผลการคำนวณจาก Microsoft Excel อย่างสมบูรณ์ในทุกขั้นตอนของกระบวนการ TOPSIS โดยไม่พบความคลาดเคลื่อน (Error = 0.0000%) ทั้งในขั้นตอนการคำนวณระหว่างทางและผลลัพธ์สุดท้าย ซึ่งยืนยันถึงความถูกต้องเชิงการคำนวณของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น

โดยสรุป ผลการตรวจสอบยืนยันว่า ระบบ EcoRanker DSS สามารถดำเนินกระบวนการคำนวณ TOPSIS ได้อย่างถูกต้องครบถ้วนในทุกขั้นตอน และมีความน่าเชื่อถือในเชิงการคำนวณสำหรับการนำไปใช้งานจริงในการสนับสนุนการตัดสินใจด้านการจัดการของเสียจากการก่อสร้าง

4.5.1.2 การอภิปรายผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองแสดงให้เห็นว่า ระบบ EcoRanker DSS สามารถดำเนินกระบวนการคำนวณด้วยวิธี TOPSIS ได้อย่างถูกต้องและสอดคล้องกับการคำนวณด้วยโปรแกรม Microsoft Excel ทั้งในระดับผลลัพธ์สุดท้ายและระดับขั้นตอนย่อย โดยไม่พบความคลาดเคลื่อนในทุกขั้นตอนของกระบวนการคำนวณ

ข้อค้นพบดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึงความถูกต้องของการพัฒนาอัลกอริทึมและการประมวลผลภายในระบบ ซึ่งถือเป็นองค์ประกอบสำคัญของการพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจ โดยเฉพาะระบบที่ใช้วิธีการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ ในการประเมินและจัดอันดับทางเลือก

การที่ผลลัพธ์จากระบบ EcoRanker DSS มีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.0000% ในทุกตัวชี้วัด สะท้อนให้เห็นว่า ระบบสามารถดำเนินกระบวนการคำนวณตามหลักคณิตศาสตร์ของวิธี TOPSIS ได้อย่างครบถ้วนและถูกต้อง ตั้งแต่ การปรับข้อมูลให้อยู่ในรูปมาตรฐาน การคำนวณค่ามาตรฐานถ่วงน้ำหนัก การกำหนดค่าทางเลือกอุดมคติเชิงบวกและเชิงลบ ไปจนถึง การคำนวณค่าดัชนีความใกล้เคียง ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนถึงความถูกต้องทั้งในเชิงตรรกะและเชิงคณิตศาสตร์ของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น และแสดงให้เห็นถึงความน่าเชื่อถือของกระบวนการประมวลผลภายในระบบ

ข้อค้นพบดังกล่าวสอดคล้องกับแนวคิดของระบบสนับสนุนการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ที่ระบุว่า วิธี TOPSIS เป็นหนึ่งในเทคนิคที่ได้รับความนิยมสำหรับการจัดอันดับทางเลือกภายใต้หลายเกณฑ์ เนื่องจากสามารถประเมินระยะห่างของแต่ละทางเลือกจากค่าที่ดีที่สุดและค่าที่แย่ที่สุดได้อย่างเป็นระบบ [128]

นอกจากนี้ การตรวจสอบในระดับขั้นตอนย่อยยังมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อระบบ DSS ที่มีความซับซ้อนด้านการประมวลผล เนื่องจากช่วยลดความเสี่ยงจากข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการพัฒนาอัลกอริทึมหรือการเขียนโปรแกรม ซึ่งอาจส่งผลต่อผลลัพธ์สุดท้ายของการตัดสินใจได้

อีกประเด็นสำคัญ คือ ความสามารถในการตรวจสอบย้อนกลับของกระบวนการคำนวณ (Traceability) ซึ่งช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถอธิบายและตรวจสอบที่มาของผลลัพธ์ได้ในทุกขั้นตอน ทั้งนี้ แนวคิดด้านความโปร่งใส (Transparency) และ ความสามารถในการตรวจสอบย้อนกลับถือเป็นคุณลักษณะสำคัญของ ระบบสนับสนุนการตัดสินใจสมัยใหม่ ที่มุ่งเน้น ความน่าเชื่อถือและความโปร่งใสของกระบวนการตัดสินใจ [129]

นอกจากนี้ ความสอดคล้องของผลการจัดอันดับระหว่างระบบ EcoRanker DSS และ Microsoft Excel ยังสะท้อนให้เห็นถึงความเสถียรของแบบจำลองในการประเมินและจัดอันดับทางเลือก ซึ่งมีความสำคัญต่อการนำระบบไปใช้งานจริงในบริบทของการจัดการของเสียจากการก่อสร้าง ที่การตัดสินใจมักเกี่ยวข้องกับหลายเกณฑ์และหลายผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย

ในเชิงวิชาการ ผลการตรวจสอบดังกล่าวยังช่วยสนับสนุนความน่าเชื่อถือของการบูรณาการวิธี TOPSIS เข้ากับระบบเว็บแอปพลิเคชัน EcoRanker DSS โดยยืนยันว่าระบบสามารถ รักษาความถูกต้องของกระบวนการคำนวณได้ แม้จะถูกพัฒนาในรูปแบบของ แพลตฟอร์มสนับสนุนการตัดสินใจบนเว็บ (Web-based Decision Support Platform)

โดยสรุป ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองยืนยันว่า ระบบ EcoRanker DSS มีความถูกต้องและความน่าเชื่อถือในเชิงการคำนวณ สามารถดำเนินกระบวนการ TOPSIS ได้อย่างครบถ้วนและถูกต้องในทุกขั้นตอน และมีศักยภาพเพียงพอสำหรับการนำไปใช้งานจริงในการสนับสนุนการตัดสินใจด้านการจัดการของเสียจากการก่อสร้างภายใต้แนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียนและความยั่งยืน

4.5.2 การยืนยันความเหมาะสมของระบบโดยผู้เชี่ยวชาญ (Expert Validation)

4.5.2.1 ผลการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญ

การยืนยันความเหมาะสมของระบบ EcoRanker DSS ในงานวิจัยนี้ ดำเนินการโดยผู้เชี่ยวชาญจำนวน 12 ท่าน ซึ่งประกอบด้วยผู้มีประสบการณ์ด้านการจัดการของเสียจากการก่อสร้าง อุตสาหกรรมก่อสร้าง และการพัฒนาระบบสารสนเทศ เพื่อประเมินความถูกต้อง ความน่าเชื่อถือ และความสามารถในการนำระบบไปประยุกต์ใช้งานจริง โดยใช้แบบสอบถามเชิงโครงสร้างตามมาตราส่วนประมาณค่าแบบลิเคิร์ท 5 ระดับ

จากตารางที่ 4.4 พบว่า ผลการประเมินโดยรวมของระบบ EcoRanker DSS พบว่า มีค่าเฉลี่ยรวมเท่ากับ 4.31 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.72 ซึ่งอยู่ในระดับ “มากที่สุด” แสดงให้เห็นว่าผู้เชี่ยวชาญมีความคิดเห็นเชิงบวกต่อระบบในระดับสูง และเห็นว่าระบบมีความเหมาะสมต่อการใช้งานในภาพรวม

เมื่อพิจารณาเป็นรายมิติ พบว่า มิติด้านความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Accuracy) มีค่าเฉลี่ยรวมสูงที่สุด เท่ากับ 4.39 และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.70 อยู่ในระดับ “มากที่สุด”รองลงมาคือ มิติด้านความน่าเชื่อถือของผลการตัดสินใจ (Decision Reliability) ซึ่งมีค่าเฉลี่ยรวมเท่ากับ 4.33 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.73 อยู่ในระดับ “มากที่สุด”

สำหรับมิติด้านความเหมาะสมของเกณฑ์การประเมิน (Criteria Appropriateness) มีค่าเฉลี่ยรวมเท่ากับ 4.31 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.72 อยู่ในระดับ “มากที่สุด” โดยรายการ “น้ำหนักเกณฑ์ที่สมเหตุสมผล” มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.17 ซึ่งอยู่ในระดับ “มาก”ในส่วนของมิติด้านความสามารถในการนำไปใช้งานจริง (Practical Applicability) มีค่าเฉลี่ยรวมเท่ากับ 4.19 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.73 อยู่ในระดับ “มาก” ซึ่งเป็นมิติที่มีค่าเฉลี่ยต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับมิติอื่น

สำหรับมิติด้าน ความเหมาะสมของเกณฑ์ (Criteria Appropriateness) มีค่าเฉลี่ยรวมเท่ากับ 4.31 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.72 อยู่ในระดับ “มากที่สุด” สะท้อนว่าเกณฑ์ที่ใช้ในระบบมีความครอบคลุมปัจจัยสำคัญ มีความชัดเจน และสามารถนำไปใช้ได้จริง อย่างไรก็ตาม รายการ “น้ำหนักเกณฑ์ที่สมเหตุสมผล” มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.17 ซึ่งอยู่ในระดับ “มาก” แสดงให้เห็นว่า ผู้เชี่ยวชาญบางส่วนอาจมีมุมมองที่แตกต่างกันต่อความเหมาะสมของค่าน้ำหนักที่กำหนดไว้ในระบบ

ตารางที่ 4.4 ผลการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญ (Expert Validation) ของระบบ EcoRanker DSS

มิติการประเมิน	รายการประเมิน	ค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)	ระดับความคิดเห็น
ความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Accuracy)	ระบบสามารถจัดอันดับได้อย่างถูกต้อง	4.50	0.67	มากที่สุด
	ผลลัพธ์มีความสอดคล้องกับวิธี TOPSIS	4.42	0.67	มากที่สุด
	ค่าคะแนนสามารถสะท้อนความแตกต่างของทางเลือกได้อย่างชัดเจน	4.25	0.75	มากที่สุด
ค่าเฉลี่ยรวม		4.39	0.70	มากที่สุด
ความเหมาะสมของเกณฑ์การประเมิน (Criteria Appropriateness)	เกณฑ์การประเมินครอบคลุมปัจจัยสำคัญ	4.33	0.78	มากที่สุด
	ค่าน้ำหนักของเกณฑ์มีความสมเหตุสมผล	4.17	0.72	มาก
	ตัวชี้วัดมีความชัดเจนและสามารถนำไปใช้ได้จริง	4.42	0.67	มากที่สุด
ค่าเฉลี่ยรวม		4.31	0.72	มากที่สุด

ตารางที่ 4.4 ผลการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญ (Expert Validation) ของระบบ EcoRanker DSS (ต่อ)

มิติการประเมิน	รายการประเมิน	ค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)	ระดับความคิดเห็น
ความน่าเชื่อถือของผลการตัดสินใจ (Decision Reliability)	ผลลัพธ์มีความสม่ำเสมอ	4.33	0.78	มากที่สุด
	ผลลัพธ์สามารถใช้ประกอบการตัดสินใจได้จริง	4.25	0.75	มากที่สุด
	ระบบช่วยลดความลำเอียงในการตัดสินใจ	4.42	0.67	มากที่สุด
ค่าเฉลี่ยรวม		4.33	0.73	มากที่สุด
ความสามารถในการนำไปใช้งานจริง (Practical Applicability)	ระบบมีความเหมาะสมกับบริบทของการใช้งานจริง	4.17	0.72	มาก
	ระบบสามารถนำไปใช้งานในองค์กรได้จริง	4.17	0.72	มาก
	ระบบสามารถสนับสนุนการตัดสินใจด้านความยั่งยืนได้อย่างมีประสิทธิภาพ	4.25	0.75	มากที่สุด
ค่าเฉลี่ยรวม		4.19	0.73	มาก
รวมทั้งหมด	-	4.31	0.72	มากที่สุด

ในส่วนของมิติด้าน การประยุกต์ใช้งานจริง (Practical Applicability) มีค่าเฉลี่ยรวมเท่ากับ 4.19 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.73 ซึ่งอยู่ในระดับ “มาก” แม้ว่าจะเป็นมิติที่มีค่าเฉลี่ยต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับมิติอื่น แต่ก็ยังสะท้อนว่าระบบมีศักยภาพในการนำไปใช้งานจริงในองค์กรและสามารถสนับสนุนการจัดการของเสียอย่างยั่งยืนได้ ทั้งนี้ ค่าเฉลี่ยที่ต่ำกว่ามิติอื่นอาจเกิดจากข้อจำกัดด้านความพร้อมของข้อมูล ความคุ้นเคยของผู้ใช้งาน หรือการบูรณาการระบบเข้ากับกระบวนการทำงานเดิมขององค์กร

โดยสรุป ผลการประเมินจากผู้เชี่ยวชาญยืนยันว่า ระบบ EcoRanker DSS ที่พัฒนาขึ้นมีความถูกต้อง น่าเชื่อถือ และมีความเหมาะสมในระดับสูงต่อการนำไปประยุกต์ใช้จริงในการคัดเลือกผู้ประกอบการจัดการของเสียจากการก่อสร้าง

4.5.2.2) การอภิปรายผลการประเมินความเหมาะสมของระบบโดยผู้เชี่ยวชาญ

ผลการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญแสดงให้เห็นว่า ระบบ EcoRanker DSS ได้รับการยอมรับในระดับสูงทั้งในด้านความถูกต้องของแบบจำลอง ความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ และความเหมาะสมของเกณฑ์การประเมิน โดยมีค่าเฉลี่ยรวมอยู่ในระดับ “มากที่สุด” ($\bar{x}$ = 4.31) ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถตอบสนองต่อความคาดหวังของผู้เชี่ยวชาญทั้งในเชิงเทคนิคและเชิงการประยุกต์ใช้งานจริงได้อย่างเหมาะสม ผลการประเมินดังกล่าวสะท้อนแนวโน้มว่า การบูรณาการเทคนิคการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ ร่วมกับระบบสนับสนุนการตัดสินใจบนเว็บสามารถช่วยเพิ่มความเป็นระบบ ความโปร่งใส และความน่าเชื่อถือของกระบวนการคัดเลือกผู้ประกอบการ จัดการของเสียจากการก่อสร้างได้ โดยเฉพาะในบริบทที่เกี่ยวข้องกับการพิจารณาหลายเกณฑ์และหลายผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย ทั้งด้านเศรษฐกิจ สิ่งแวดล้อม สังคม และเทคนิค

ผลการประเมินที่สูงที่สุดในมิติด้านความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Accuracy) สะท้อนให้เห็นว่า ผู้เชี่ยวชาญมีความเชื่อมั่นต่อกระบวนการคำนวณและกลไกการจัดอันดับของระบบ โดยเฉพาะการประยุกต์ใช้วิธี TOPSIS ในการประเมินความเหมาะสมของทางเลือก ข้อค้นพบดังกล่าวสอดคล้องกับแนวคิดของระบบสนับสนุนการตัดสินใจสมัยใหม่ที่ให้ความสำคัญกับการใช้แบบจำลองเชิงปริมาณเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจในสถานการณ์ที่มีความซับซ้อนและมีตัวแปรหลายมิติ ทั้งนี้ งานวิจัยของ Sahu et al.(2021) [130] ระบุว่า ความถูกต้องของแบบจำลองและความสามารถในการอธิบายกระบวนการตัดสินใจ ถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการยอมรับระบบ DSS ในบริบทด้านสิ่งแวดล้อมและความยั่งยืน

ในทำนองเดียวกัน ผลการประเมินในมิติด้านความน่าเชื่อถือของผลการตัดสินใจ (Decision Reliability) ที่อยู่ในระดับสูง แสดงให้เห็นว่า ระบบสามารถสนับสนุนการตัดสินใจอย่างเป็นระบบและช่วยลดความลำเอียงในการประเมินทางเลือกได้ ซึ่งมีความสำคัญต่อการบริหารจัดการของเสียจากการก่อสร้างที่ต้องอาศัยการพิจารณาข้อมูลหลายประเภทและผลกระทบในระยะยาว ข้อค้นพบดังกล่าวมีความเชื่อมโยงกับแนวคิดของการตัดสินใจอย่างความยั่งยืนที่มุ่งเน้นการตัดสินใจบนพื้นฐานของข้อมูลเชิงประจักษ์และกระบวนการประเมินที่สามารถตรวจสอบย้อนกลับได้ [131]

สำหรับมิติด้านความเหมาะสมของเกณฑ์การประเมิน (Criteria Appropriateness) ที่ได้รับการประเมินในระดับสูง สะท้อนให้เห็นว่า โครงสร้างเกณฑ์ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้สามารถครอบคลุมปัจจัยสำคัญของการจัดการของเสียจากการก่อสร้างได้อย่างเหมาะสม ทั้งในด้านเศรษฐกิจ สิ่งแวดล้อม สังคม และเทคนิค ซึ่งสอดคล้องกับหลักการที่ให้ความสำคัญกับการประเมินแบบบูรณาการหลายมิติ มากกว่าการพิจารณาเฉพาะด้านต้นทุนหรือประสิทธิภาพเชิงเศรษฐกิจเพียงอย่างเดียว อย่างไรก็ตาม รายการ “น้ำหนักของเกณฑ์มีความสมเหตุสมผล” มีค่าเฉลี่ยต่ำกว่ารายการอื่นเล็กน้อย ซึ่งอาจสะท้อนให้เห็นถึงความแตกต่างของมุมมองและประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญแต่ละ

กลุ่มต่อระดับความสำคัญของปัจจัยการตัดสินใจ ทั้งนี้ ลักษณะดังกล่าวถือเป็นธรรมชาติของปัญหาการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ที่ผู้มีส่วนได้ส่วนเสียอาจให้ความสำคัญกับแต่ละเกณฑ์แตกต่างกันตามบริบทของการดำเนินงาน

ขณะเดียวกัน แม้ว่ามิติด้านความสามารถในการนำไปใช้งานจริง (Practical Applicability) จะมีค่าเฉลี่ยต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับมิติอื่น แต่ยังคงอยู่ในระดับ “มาก” ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ผู้เชี่ยวชาญมองว่าระบบมีศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้จริงในระดับองค์กร อย่างไรก็ตาม ผู้เชี่ยวชาญอาจมองเห็นข้อจำกัดบางประการที่เกี่ยวข้องกับความพร้อมของข้อมูล การบูรณาการระบบเข้ากับกระบวนการทำงานเดิม และความคุ้นเคยของผู้ใช้งานกับระบบดิจิทัล ซึ่งเป็นประเด็นที่พบได้ทั่วไปในการพัฒนาระบบ DSS สำหรับภาคอุตสาหกรรม โดย Bai et al.(2022) [132] ชี้ให้เห็นว่า ความพร้อมด้านข้อมูลและการยอมรับของผู้ใช้งานเป็นปัจจัยสำคัญต่อความสำเร็จของการนำระบบ DSS ไปประยุกต์ใช้ในองค์กร

นอกจากนี้ ผลการประเมินในระดับสูงยังสะท้อนให้เห็นถึงความสำคัญของการออกแบบระบบในลักษณะ user-centered DSS ซึ่งให้ความสำคัญทั้งด้านความถูกต้องของแบบจำลอง ความโปร่งใสของกระบวนการตัดสินใจ ความง่ายต่อการใช้งาน และการสื่อสารผลลัพธ์อย่างชัดเจน แนวทางดังกล่าวสอดคล้องกับแนวโน้มการพัฒนาระบบสารสนเทศด้านความยั่งยืนในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ที่มุ่งเน้นทั้งประสิทธิภาพเชิงเทคนิคและประสบการณ์ของผู้ใช้งานควบคู่กัน[133]

ผลการศึกษานี้สนับสนุนแนวคิดว่า การบูรณาการเทคนิคร่วมกับระบบสนับสนุนการตัดสินใจบนเว็บ สามารถพัฒนาเป็นเครื่องมือสนับสนุนการตัดสินใจด้านความยั่งยืนที่มีทั้งความถูกต้องเชิงเทคนิคและความสามารถในการประยุกต์ใช้งานจริงได้ ขณะเดียวกัน ในเชิงปฏิบัติ ระบบ EcoRanker DSS อาจเป็นแนวทางสำหรับหน่วยงานก่อสร้างหรือผู้ก่อกำเนิดของเสียในการประเมินและคัดเลือกผู้ประกอบการจัดการของเสียอย่างเป็นระบบ โปร่งใส และตรวจสอบได้ ซึ่งมีความเชื่อมโยงกับแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน และการพัฒนาอุตสาหกรรมก่อสร้างอย่างยั่งยืนในระยะยาว

โดยสรุป ผลการประเมินจากผู้เชี่ยวชาญแสดงให้เห็นว่า ระบบ EcoRanker DSS มีความเหมาะสมในระดับสูงทั้งด้านความถูกต้องของแบบจำลอง ความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ และศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง อีกทั้งยังสะท้อนแนวโน้มสำคัญของการพัฒนาระบบ DSS สมัยใหม่ที่ให้ความสำคัญควบคู่กันทั้งด้านประสิทธิภาพเชิงเทคนิค ความโปร่งใสของกระบวนการตัดสินใจ และประสบการณ์ของผู้ใช้งาน เพื่อสนับสนุนการยอมรับและการนำระบบไปใช้จริงในบริบทของการจัดการสิ่งแวดล้อมและความยั่งยืน

4.5.3 การประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน (User Satisfaction)

4.5.3.1) ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน

เพื่อประเมินระดับความพึงพอใจของผู้ใช้งานต่อระบบ EcoRanker DSS ภายใต้บริบทการใช้งานจริง งานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ผลการประเมินจากแบบสอบถามโดยใช้ค่าเฉลี่ย (Mean) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD) และดัชนีความพึงพอใจ (Satisfaction Index: SI) เพื่อสะท้อนระดับความพึงพอใจในรูปแบบร้อยละ (%)การแปลผลค่าดัชนีความพึงพอใจ (SI) ใช้เกณฑ์ดังแสดงในตารางที่ 4.5

จากเกณฑ์ดังกล่าว ค่าดัชนีความพึงพอใจ (SI) ที่ได้จากการประเมินในงานวิจัยนี้ถูกนำมาใช้ในการจำแนกระดับความพึงพอใจของผู้ใช้งานในแต่ละมิติ และใช้เป็นฐานในการอภิปรายผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานระบบ EcoRanker DSS แสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.5 เกณฑ์การแปลผลดัชนีความพึงพอใจ (Satisfaction Index: SI)

เกณฑ์การแปลผลดัชนีความพึงพอใจ SI (%)	ระดับความพึงพอใจ
80–100	มากที่สุด (Very High)
60–79	มาก (High)
40–59	ปานกลาง (Moderate)
20–39	น้อย (Low)
0–19	น้อยที่สุด (Very Low)

ที่มา: ดัดแปลงจาก Prasertwitayakarn et al.,[134]

จากตารางที่ 4.6 พบว่า ผลการประเมินโดยรวมพบว่า ผู้ใช้งานมีระดับความพึงพอใจต่อระบบ EcoRanker DSS อยู่ในระดับ “มากที่สุด” โดยมีค่าเฉลี่ยรวมเท่ากับ 4.35 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.56 และค่าดัชนีความพึงพอใจ (SI) เท่ากับ 87.00%

เมื่อพิจารณาในรายมิติ พบว่า มิติด้านประสิทธิภาพของระบบ (Efficiency) มีค่าดัชนีความพึงพอใจสูงที่สุด เท่ากับ 93.60% รองลงมาคือ ความพึงพอใจต่อฟังก์ชันการทำงานของระบบ (Satisfaction – Functions) เท่ากับ 91.20% และประสิทธิผลของระบบ (Effectiveness) เท่ากับ 90.40% ตามลำดับ ในด้านคุณภาพของข้อมูล (Information Quality) และการใช้งานระบบ (Usability) มีค่า SI เท่ากับ 88.00% และ 87.20% ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในระดับ “มากที่สุด” เช่นกัน อย่างไรก็ตาม มิติด้านความสามารถในการเรียนรู้ (Learnability) และความน่าเชื่อถือของระบบ (Reliability) มีค่า SI เท่ากับ 78.40% และ 77.60% ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในระดับ “มาก”

นอกจากนี้ ความพึงพอใจโดยรวมต่อระบบ (Overall Satisfaction) มีค่า SI เท่ากับ 89.60% อยู่ในระดับ “มากที่สุด” ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าผู้ใช้งานมีการยอมรับระบบในภาพรวม และเห็นว่าระบบสามารถสนับสนุนการตัดสินใจด้านการจัดการของเสียจากการก่อสร้างได้อย่างเหมาะสม

ทั้งนี้ การประเมินในงานวิจัยนี้เป็นการประเมิน “การรับรู้ของผู้ใช้งานต่อระบบ” (User-perceived Evaluation) ภายใต้กรอบแนวคิดด้าน ความสามารถในการใช้งานของระบบ (Usability) และ ประสบการณ์ของผู้ใช้งาน (User Experience) โดยมิติด้าน ประสิทธิภาพในการใช้งาน (Efficiency) ประสิทธิผลของระบบ (Effectiveness) และ ความน่าเชื่อถือของระบบ (Reliability) เป็นการประเมินจากมุมมองของผู้ใช้งานภายใต้บริบทการใช้งานจริง มิใช่การวัดสมรรถนะเชิงเทคนิคของระบบโดยตรง เช่น ความเร็วในการประมวลผลของระบบหรือความถูกต้องของอัลกอริทึม TOPSIS แต่เป็นการสะท้อนการรับรู้ของผู้ใช้งานว่าระบบสามารถช่วยลดเวลา เพิ่มความสะดวก และสนับสนุนการตัดสินใจได้อย่างมีประสิทธิผลเพียงใดจากประสบการณ์การใช้งานจริง ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดด้าน การยอมรับเทคโนโลยี (Technology Acceptance) และ การประเมินระบบสารสนเทศที่ให้ความสำคัญกับมุมมองของผู้ใช้งาน [135]

ตาราง 4.6 ผลการประเมินการใช้งานและความพึงพอใจของผู้ใช้งานต่อระบบ EcoRanker DSS

มิติการประเมิน	ค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)	ดัชนีความพึงพอใจ (SI, %)	ระดับการประเมิน
การใช้งานระบบ (Usability)	4.36	0.76	87.20	มากที่สุด
คุณภาพของข้อมูล (Information Quality)	4.40	0.50	88.00	มากที่สุด
ความสามารถในการเรียนรู้ (Learnability)	3.92	0.64	78.40	มาก
ความพึงพอใจต่อฟังก์ชัน (Satisfaction – Functions)	4.56	0.51	91.20	มากที่สุด
ความน่าเชื่อถือของระบบ (Reliability)	3.88	0.53	77.60	มาก
ประสิทธิภาพ (Efficiency)	4.68	0.48	93.60	มากที่สุด
ประสิทธิผล (Effectiveness)	4.52	0.51	90.40	มากที่สุด
ความพึงพอใจโดยรวม (Overall Satisfaction)	4.48	0.59	89.60	มากที่สุด
ค่าเฉลี่ยรวม (Overall Mean)	4.35	0.56	87.00	มากที่สุด

หมายเหตุ: มิติด้านประสิทธิภาพ (Efficiency) ประสิทธิผล (Effectiveness) และความน่าเชื่อถือของระบบ (Reliability) ในงานวิจัยนี้ เป็นการประเมินจากการรับรู้ของผู้ใช้งาน (User-perceived Evaluation) ต่อระบบ EcoRanker DSS ภายใต้บริบทการใช้งานจริง มิใช่การวัดสมรรถนะเชิงเทคนิคของระบบโดยตรง

แนวทางดังกล่าวยังมีความสอดคล้องกับ มาตรฐาน ISO 9241-11 ซึ่งระบุว่า ความสามารถในการใช้งานของระบบ (Usability) สามารถพิจารณาได้จากมิติด้าน ประสิทธิผล (Effectiveness) ประสิทธิภาพในการใช้งาน (Efficiency) และ ความพึงพอใจของผู้ใช้งาน (Satisfaction) ภายใต้บริบทการใช้งานจริงของผู้ใช้ (ISO 9241-11, 2018) นอกจากนี้ ยังสอดคล้องกับแนวคิดด้าน การ

ประเมินระบบสารสนเทศ (Information Systems Evaluation) และ ระบบสนับสนุนการตัดสินใจ (DSS) ที่นิยมใช้ การประเมินจากการรับรู้ของผู้ใช้งานผ่านแบบสอบถาม (Perception-based Assessment) เพื่อประเมินคุณภาพและประโยชน์ของระบบสารสนเทศ

โดยสรุป ผลการประเมินของผู้ใช้งานยืนยันว่า ระบบ EcoRanker DSS ไม่เพียงแต่มีความถูกต้องเชิงแบบจำลอง แต่ยังสามารถใช้งานได้จริง มีความเหมาะสมต่อบริบทการใช้งาน และได้รับการยอมรับจากผู้ใช้งานในระดับสูง ซึ่งสะท้อนถึงศักยภาพของระบบในการสนับสนุนการตัดสินใจด้านการจัดการของเสียจากการก่อสร้างภายใต้แนวคิดความยั่งยืนได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถประยุกต์ใช้งานในภาคปฏิบัติได้จริง

4.5.3.2 การอภิปรายผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน

ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานแสดงให้เห็นว่า ผู้ใช้งานมีความพึงพอใจต่อระบบ EcoRanker DSS ในระดับสูงมาก โดยเฉพาะในมิติด้านประสิทธิภาพของระบบ (Efficiency) ประสิทธิผลของระบบ (Effectiveness) และความพึงพอใจต่อฟังก์ชันการทำงานของระบบ ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่า ระบบสามารถช่วยลดความซับซ้อนของกระบวนการตัดสินใจและสนับสนุนการประเมินทางเลือกที่เกี่ยวข้องกับการจัดการของเสียจากการก่อสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ข้อค้นพบดังกล่าวสอดคล้องกับแนวคิดด้านการยอมรับเทคโนโลยีและการประเมินระบบสารสนเทศในช่วงปี 2020–2025 ซึ่งให้ความสำคัญกับการรับรู้ถึงประโยชน์ของระบบ และความง่ายในการใช้งานในฐานะปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการยอมรับและความพึงพอใจของผู้ใช้งานต่อระบบดิจิทัลและระบบสนับสนุนการตัดสินใจ [136]

การที่มิติด้านประสิทธิผลของระบบ ได้รับคะแนนสูงที่สุด แสดงให้เห็นว่า ผู้ใช้งานรับรู้ว่าระบบสามารถช่วยลดเวลาและภาระในการวิเคราะห์ข้อมูลที่มีหลายเกณฑ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งมีความเชื่อมโยงกับบทบาทหลักของระบบ DSS ที่ถูกออกแบบมาเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจในสถานการณ์ที่มีความซับซ้อนและมีข้อมูลจำนวนมาก ทั้งนี้ ข้อค้นพบดังกล่าวยังสะท้อนแนวโน้มของการพัฒนาระบบสารสนเทศสมัยใหม่ที่มุ่งเน้นการช่วยลดภาระด้านการประมวลผลข้อมูลของผู้ใช้งานและสนับสนุนการตัดสินใจที่รวดเร็วและเป็นระบบมากยิ่งขึ้น

ขณะเดียวกัน ผลการประเมินในมิติด้าน ประสิทธิผล (Effectiveness) และ ความพึงพอใจต่อฟังก์ชันการทำงานของระบบ (Satisfaction – Functions) ที่อยู่ในระดับสูง ยังสะท้อนให้เห็นว่าฟังก์ชันการทำงานของระบบสามารถตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้งานได้อย่างเหมาะสม ทั้งในด้าน การแสดงผล การจัดอันดับทางเลือก และการสนับสนุนการตัดสินใจ ภายใต้บริบทจริงของการจัดการของเสียจากการก่อสร้าง ซึ่งสนับสนุนแนวคิดของ ระบบสนับสนุนการตัดสินใจที่ออกแบบโดย

ยึดผู้ใช้งานเป็นศูนย์กลาง (User-centered DSS) ที่ให้ความสำคัญกับทั้ง ประสิทธิภาพของแบบจำลอง และ ประสบการณ์ของผู้ใช้งาน ควบคู่กัน

ในด้าน Information Quality และ Usability ซึ่งได้รับคะแนนในระดับสูงเช่นกัน แสดงให้เห็นว่า การออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้งาน (User Interface) และการนำเสนอข้อมูลของระบบมีความชัดเจน เข้าใจง่าย และเอื้อต่อการใช้งานจริง ข้อค้นพบดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยด้าน User Experience (UX) และ Human–Computer Interaction (HCI) ที่ระบุว่า คุณภาพของข้อมูลและความสามารถในการใช้งานเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสบการณ์ของผู้ใช้งานและความสำเร็จของระบบสารสนเทศ [137]

อย่างไรก็ตาม แม้ว่ามิติด้าน ความง่ายในการเรียนรู้การใช้งาน (Learnability) และ ความน่าเชื่อถือของระบบ (Reliability) จะยังอยู่ในระดับ “มาก” แต่มีคะแนนต่ำกว่ามิติอื่น ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงแนวทางในการพัฒนาระบบเพิ่มเติมในอนาคต โดยเฉพาะ การออกแบบระบบแนะนำการใช้งานสำหรับผู้ใช้งานใหม่ การพัฒนาคู่มือการใช้งานแบบโต้ตอบ (Interactive Guidance) และ การเพิ่มเสถียรภาพของระบบ เพื่อเสริมสร้างความเชื่อมั่นของผู้ใช้งานในระยะยาว ทั้งนี้ ข้อค้นพบดังกล่าวมีความสอดคล้องกับงานวิจัยด้าน วิศวกรรมความสามารถในการใช้งานของระบบ (Usability Engineering) และ การยอมรับแพลตฟอร์มดิจิทัล (Digital Platform Adoption) ที่ระบุว่า ระบบที่มีความซับซ้อนเชิงหน้าที่สูงมักต้องการ กลไกสนับสนุนการเรียนรู้ของผู้ใช้งาน เพื่อช่วยลดภาระทางความคิดของผู้ใช้งาน (Cognitive Load) และเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานจริง [138]

นอกจากนี้ ผลการประเมินยังสะท้อนแนวโน้มว่า ผู้ใช้งานในปัจจุบันให้ความสำคัญต่อ “ประสบการณ์ในการใช้งานระบบ” ควบคู่ไปกับ “ความถูกต้องของแบบจำลอง” มากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะในระบบสนับสนุนการตัดสินใจที่เกี่ยวข้องกับ ความยั่งยืนและการตัดสินใจด้านสิ่งแวดล้อม ซึ่งต้องรองรับผู้ใช้งานหลายกลุ่มและมีบริบทการใช้งานที่หลากหลาย ข้อค้นพบดังกล่าวมีความเชื่อมโยงกับแนวทางการพัฒนาระบบสารสนเทศสมัยใหม่ที่ให้ความสำคัญทั้งด้าน สมรรถนะเชิงเทคนิคของระบบ (Technical Performance) และ ประสบการณ์ของผู้ใช้งาน (User Experience) ควบคู่กัน

ในเชิงทฤษฎี ผลลัพธ์ดังกล่าวสอดคล้องกับกรอบแนวคิดของ องค์การระหว่างประเทศว่าด้วยการมาตรฐาน (International Organization for Standardization: ISO) ภายใต้มาตรฐาน ISO 9241-11:2018 ซึ่งระบุว่า ความสามารถในการใช้งานของระบบ (Usability) สามารถประเมินได้จากมิติด้าน ประสิทธิผล (Effectiveness) ประสิทธิภาพในการใช้งาน (Efficiency) และ ความพึงพอใจของผู้ใช้งาน (Satisfaction) ภายใต้บริบทการใช้งานจริง นอกจากนี้ ยังมีความเชื่อมโยงกับแนวคิด แบบจำลองความสำเร็จของระบบสารสนเทศ (Information Systems Success Model) ซึ่งให้ความสำคัญกับ คุณภาพของข้อมูล (Information Quality) คุณภาพของระบบ (System

Quality) และ ความพึงพอใจของผู้ใช้งาน (User Satisfaction) ในฐานะองค์ประกอบสำคัญของความสำเร็จของระบบสารสนเทศสมัยใหม่

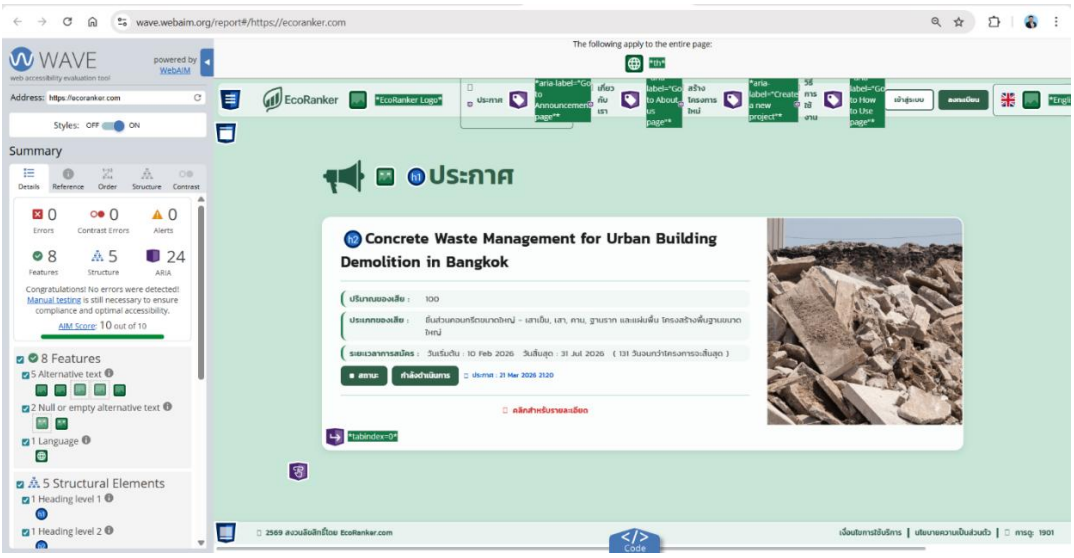
โดยสรุป ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานสนับสนุนข้อค้นพบว่า ระบบ EcoRanker DSS ไม่เพียงมีความถูกต้องเชิงแบบจำลอง แต่ยังสามารถตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้งานในบริบทจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ได้รับการยอมรับในระดับสูง และมีศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจด้านการจัดการของเสียจากการก่อสร้างภายใต้แนวคิดความยั่งยืนได้อย่างเหมาะสม

4.5.4 การประเมินความสามารถในการเข้าถึงของระบบ (Accessibility Evaluation using WAVE)

4.5.4.1 ผลการประเมินการเข้าถึงของระบบ

การประเมินความสามารถในการเข้าถึงของระบบ (Accessibility Evaluation) ของระบบ EcoRanker DSS ในงานวิจัยนี้ ได้ดำเนินการโดยใช้เครื่องมือ WAVE Web Accessibility Evaluation Tool ซึ่งเป็นเครื่องมือมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในการตรวจสอบความสอดคล้องของเว็บไซต์ตามหลักการด้านการเข้าถึง (Web Accessibility) โดยการประเมินครอบคลุมองค์ประกอบสำคัญ ได้แก่ โครงสร้างของหน้าเว็บ (Page Structure) ความสามารถในการอ่านและการนำเสนอเนื้อหา (Readability) ความคมชัดของสี (Color Contrast) การกำหนดข้อความทางเลือก (Alternative Text) สำหรับสื่อภาพ และการใช้โครงสร้าง HTML เชิงความหมาย (Semantic HTML)

จากผลการประเมินความสามารถในการเข้าถึงของระบบ EcoRanker DSS โดยใช้เครื่องมือ WAVE Web Accessibility Evaluation Tool ดังแสดงในภาพที่ 4.11 พบว่าระบบมีคุณภาพด้านการเข้าถึงอยู่ในระดับสูงมาก โดยไม่พบข้อผิดพลาด (Errors = 0) ไม่พบปัญหาด้านความคมชัดของสี (Contrast Errors = 0) และไม่พบคำเตือน (Alerts = 0) ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้ที่สอดคล้องกับหลักการด้านการเข้าถึงของเว็บไซต์



ภาพที่ 4.11 ผลการประเมินความสามารถในการเข้าถึงของระบบ EcoRanker DSS โดยใช้เครื่องมือ WAVE

นอกจากนี้ ระบบยังแสดงองค์ประกอบเชิงบวกด้านการเข้าถึง (Features) จำนวน 8 รายการ องค์ประกอบด้านโครงสร้าง (Structural Elements) จำนวน 5 รายการ และการใช้งาน ARIA attributes จำนวน 24 รายการ ดังที่ปรากฏในภาพที่ 4.11 ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงการใช้โครงสร้าง HTML เชิงความหมาย (Semantic Structure) และการสนับสนุนเทคโนโลยีช่วยเหลือ (Assistive Technologies) อย่างเหมาะสม

4.5.4.2 การอภิปรายผลการประเมินการเข้าถึงของระบบ

ผลการประเมินการเข้าถึงของระบบแสดงให้เห็นว่า ระบบ EcoRanker DSS มีคุณภาพด้าน accessibility อยู่ในระดับสูง โดยไม่พบข้อผิดพลาดสำคัญจากการประเมินด้วย WAVE Web Accessibility Evaluation Tool ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความเหมาะสมของการออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้งาน (User Interface Design) และโครงสร้างของระบบเว็บแอปพลิเคชันในการรองรับการใช้งานของผู้ใช้งานที่หลากหลาย

ข้อค้นพบดังกล่าวสอดคล้องกับแนวคิดด้าน ระบบดิจิทัลที่ครอบคลุมผู้ใช้งานทุกกลุ่ม (inclusive digital systems) และ การเข้าถึงได้อย่างทั่วถึงสำหรับทุกคน (universal accessibility) ซึ่งได้รับความสำคัญเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในการพัฒนาระบบดิจิทัลและเว็บแอปพลิเคชันในช่วงปี 2020–2025 โดยแนวคิดดังกล่าวมุ่งเน้น การออกแบบระบบที่เปิดโอกาสให้ผู้ใช้งานทุกกลุ่มสามารถ

เข้าถึงข้อมูลและใช้งานระบบได้อย่างเท่าเทียม โดยไม่ถูกจำกัดด้วย ความแตกต่างด้านความสามารถ อุปกรณ์ หรือประสบการณ์ในการใช้เทคโนโลยี [132, 133]

การที่ระบบ ไม่พบข้อผิดพลาดด้านการเข้าถึงการใช้งาน (Accessibility Errors) แสดงให้เห็นว่า การออกแบบหน้าเว็บของระบบมีความสอดคล้องกับแนวทางของ ข้อกำหนดการเข้าถึงเนื้อหาบนเว็บ (Web Content Accessibility Guidelines: WCAG) ในหลายองค์ประกอบสำคัญ เช่น การจัดโครงสร้างเนื้อหาอย่างเป็นระบบ การใช้ลำดับหัวข้อ (Heading Hierarchy) อย่างเหมาะสม การกำหนดข้อความอธิบายสำหรับองค์ประกอบของหน้าเว็บ (Alternative Text) และการออกแบบโครงสร้างการนำทาง (Navigation Structure) ที่เอื้อต่อการใช้งาน ทั้งนี้ ข้อค้นพบดังกล่าวสะท้อนแนวโน้มของการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันสมัยใหม่ที่ให้ความสำคัญกับ การเข้าถึงการใช้งานของระบบ (Accessibility) ตั้งแต่กระบวนการออกแบบระบบ มิใช่เพียงการแก้ไขข้อผิดพลาดภายหลังการพัฒนา

นอกจากนี้ ความสามารถในการเข้าถึงการใช้งานของระบบ (Accessibility) ยังมีความเชื่อมโยงกับแนวคิดด้าน ความสามารถในการใช้งานของระบบ (Usability) และ ประสบการณ์ของผู้ใช้งาน (User Experience: UX) โดยเฉพาะสำหรับระบบสนับสนุนการตัดสินใจที่ต้องรองรับผู้ใช้งานหลายกลุ่ม ซึ่งอาจมี ระดับความสามารถทางเทคนิค ประสบการณ์ หรือข้อจำกัดด้านอุปกรณ์ที่แตกต่างกัน ข้อค้นพบดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยด้าน ปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์กับคอมพิวเตอร์ (Human–Computer Interaction: HCI) และ ความสามารถในการใช้งานของระบบดิจิทัล (Digital Usability) ที่ระบุว่า การเข้าถึงการใช้งานของระบบ (Accessibility) มิได้เป็นเพียงองค์ประกอบด้านเทคนิคเท่านั้น แต่ยังเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อ ประสิทธิภาพ ความพึงพอใจ และการยอมรับระบบของผู้ใช้งานในระยะยาว [141]

ในบริบทของ ระบบสนับสนุนการตัดสินใจด้านความยั่งยืน ผลการศึกษานี้ยังสะท้อนให้เห็นว่า การออกแบบระบบที่สามารถเข้าถึงได้ง่ายและรองรับผู้ใช้งานที่หลากหลาย สามารถช่วยสนับสนุนแนวคิดด้าน การเปลี่ยนผ่านสู่ระบบดิจิทัลอย่างยั่งยืน (Sustainable Digital Transformation) ซึ่งมุ่งเน้นการพัฒนาระบบดิจิทัลที่มี ความครอบคลุม ความโปร่งใส และลดข้อจำกัดในการเข้าถึงข้อมูลและเทคโนโลยี ทั้งนี้ แนวทางดังกล่าวมีความเชื่อมโยงกับแนวคิดด้านการออกแบบโดยยึดผู้ใช้งานเป็นศูนย์กลาง (User-Centered Design) ที่ให้ความสำคัญกับ ผู้ใช้งานเป็นศูนย์กลางของการออกแบบระบบ ควบคู่ไปกับ สมรรถนะเชิงเทคนิคของระบบ [142]

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าผลการประเมินจะ ไม่พบข้อผิดพลาดด้านการเข้าถึงการใช้งานของระบบ (Accessibility) แต่ข้อค้นพบดังกล่าวยังสะท้อนแนวทางในการพัฒนาระบบเพิ่มเติมในอนาคต โดยเฉพาะ การรองรับการทำงานร่วมกับโปรแกรมอ่านหน้าจอ (Screen Readers) อย่างสมบูรณ์ การเพิ่มประสิทธิภาพของการนำทางผ่านแป้นพิมพ์ (Keyboard Navigation) และ การออกแบบ

อัตราส่วนความแตกต่างของสี (Contrast Ratio) สำหรับผู้ใช้งานที่มีข้อจำกัดด้านการมองเห็น เพื่อยกระดับความสามารถในการเข้าถึงของระบบให้สอดคล้องกับมาตรฐานสากลในระดับที่สูงขึ้น

โดยสรุป ผลการประเมิน การเข้าถึงการใช้งานของระบบ สนับสนุนข้อค้นพบว่า ระบบ EcoRanker DSS มีคุณภาพด้าน การเข้าถึงการใช้งานของระบบ (Accessibility) อยู่ในระดับสูง สามารถรองรับผู้ใช้งานที่มีความหลากหลายได้อย่างเหมาะสม และสะท้อนแนวโน้มของการพัฒนาระบบเว็บแอปพลิเคชันสมัยใหม่ที่ให้ความสำคัญทั้งด้าน ความสามารถในการใช้งานของระบบ (Usability) ความครอบคลุมในการรองรับผู้ใช้งาน (Inclusiveness) และ การออกแบบโดยยึดผู้ใช้งานเป็นศูนย์กลาง (User-centered Design) ควบคู่กัน เพื่อสนับสนุน การเข้าถึงเทคโนโลยีดิจิทัลอย่างเท่าเทียมและยั่งยืน

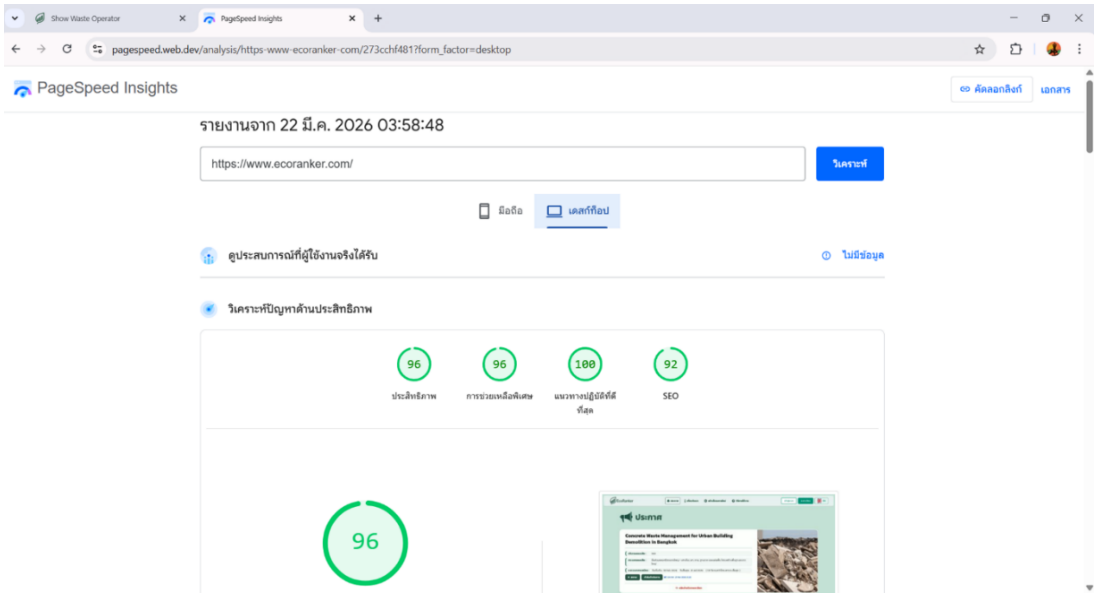
4.5.5 การประเมินประสิทธิภาพของระบบ (Performance Evaluation)

4.5.5.1) ผลการประเมินประสิทธิภาพของระบบ

การประเมินประสิทธิภาพของระบบ EcoRanker DSS ในงานวิจัยนี้ดำเนินการโดยใช้เครื่องมือ Google PageSpeed Insights ซึ่งเป็นเครื่องมือมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับในระดับสากลสำหรับการวิเคราะห์สมรรถนะของเว็บไซต์ โดยครอบคลุมการประเมินในมิติสำคัญ ได้แก่ ความเร็วในการโหลดหน้าเว็บ (Loading Performance) ความสามารถในการตอบสนองของระบบ (Interactivity) ความเสถียรของการแสดงผล (Visual Stability) และคุณภาพของประสบการณ์ผู้ใช้งาน (User Experience)

ผลการประเมินในโหมด Desktop แสดงให้เห็นว่า ระบบ EcoRanker DSS มีประสิทธิภาพอยู่ในระดับสูง โดยได้รับคะแนน Performance = 96 ซึ่งอยู่ในช่วงระดับ “ดีมาก” (90–100) นอกจากนี้ ระบบยังมีคะแนนในมิติอื่นที่สำคัญ ได้แก่ Accessibility = 96, Best Practices = 100 และ SEO = 92 ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงคุณภาพโดยรวมของระบบทั้งในด้านเทคนิค มาตรฐานการพัฒนาเว็บไซต์ และความสามารถในการเข้าถึงของผู้ใช้งาน

เมื่อพิจารณาค่าตัวชี้วัดเชิงลึก (Core Web Vitals และตัวชี้วัดที่เกี่ยวข้อง) ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.12 พบว่า ระบบ EcoRanker DSS มีสมรรถนะอยู่ในระดับที่ดีมาก โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้



ภาพที่ 4.12 ผลการประเมินสมรรถนะของระบบ EcoRanker DSS โดยใช้ Google PageSpeed Insights (โหมด Desktop)

ค่า ระยะเวลาการแสดงผลเนื้อหาเริ่มต้น (First Contentful Paint: FCP) เท่ากับ 0.4 วินาที สะท้อนให้เห็นว่า ระบบสามารถ แสดงผลเนื้อหาเริ่มต้นของหน้าเว็บได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งช่วยลดระยะเวลาการรอคอยของผู้ใช้งานในช่วงเริ่มต้นของการโหลดหน้าเว็บ

ค่า ระยะเวลาการแสดงผลขององค์ประกอบหลักบนหน้าเว็บ (Largest Contentful Paint: LCP) เท่ากับ 1.4 วินาที ซึ่งอยู่ใน เกณฑ์มาตรฐานที่ดี (น้อยกว่า 2.5 วินาที) สะท้อนให้เห็นว่าระบบมีความสามารถในการ โหลดและแสดงผลองค์ประกอบหลักของหน้าเว็บได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ค่า ระยะเวลาการหน่วงจากการประมวลผลที่ขัดขวางการตอบสนองของระบบ (Total Blocking Time: TBT) เท่ากับ 0 มิลลิวินาที บ่งชี้ว่า ระบบ ไม่เกิดการหน่วงของกระบวนการประมวลผลจากสคริปต์ ที่ส่งผลกระทบต่อ การโต้ตอบและการตอบสนองต่อผู้ใช้งาน

ค่า ดัชนีความเร็วในการแสดงผลหน้าเว็บ (Speed Index) เท่ากับ 1.1 วินาที สะท้อนให้เห็นถึง ความรวดเร็วในการแสดงผลภาพรวมของหน้าเว็บ ซึ่งอยู่ใน ระดับที่ดีมาก

ค่า ดัชนีความเปลี่ยนแปลงของโครงร่างหน้าเว็บสะสม (Cumulative Layout Shift: CLS) เท่ากับ 0.004 ซึ่งอยู่ใน เกณฑ์มาตรฐานที่ดีมาก (น้อยกว่า 0.1) สะท้อนให้เห็นว่า ระบบมี ความเสถียรในการแสดงผลหน้าเว็บ โดย ไม่เกิดการเคลื่อนหรือเปลี่ยนตำแหน่งขององค์ประกอบต่าง ๆ ระหว่างกระบวนการโหลดหน้าเว็บ

ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่า ระบบสามารถแสดงผลเนื้อหาได้อย่างรวดเร็ว มีความเสถียรระหว่างการโหลดหน้าเว็บ และไม่เกิดการหน่วงในการตอบสนองต่อผู้ใช้งาน โดยเฉพาะค่า LCP ซึ่งมีค่า 1.4 วินาที และค่า CLS ซึ่งมีค่า 0.004 ถือว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่ดีมากตามเกณฑ์การประเมินของ Google Core Web Vitals

โดยสรุป ผลการประเมินแสดงให้เห็นว่า ระบบ EcoRanker DSS มีประสิทธิภาพด้านการทำงานของเว็บแอปพลิเคชันอยู่ในระดับสูง ทั้งด้านความเร็ว ความเสถียร และคุณภาพของประสบการณ์ผู้ใช้งาน

4.5.5.2 การอภิปรายผลการประเมินประสิทธิภาพของระบบ

ผลการประเมินประสิทธิภาพของระบบ EcoRanker DSS แสดงให้เห็นว่า ระบบมีสมรรถนะด้านการทำงานของเว็บแอปพลิเคชันอยู่ในระดับสูง ทั้งในด้านความเร็วในการโหลดหน้าเว็บ ความสามารถในการตอบสนองของระบบ และความเสถียรของการแสดงผล ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงคุณภาพของการออกแบบและพัฒนาระบบในเชิงเทคนิค รวมถึงความพร้อมของระบบสำหรับการนำไปใช้งานจริงผ่านแพลตฟอร์มเว็บ

ข้อค้นพบดังกล่าวสอดคล้องกับแนวคิดด้าน ประสิทธิภาพของเว็บ (Web Performance) และ ระบบเว็บที่ออกแบบโดยยึดผู้ใช้งานเป็นศูนย์กลาง (User-centered Web Systems) ซึ่งได้รับความสำคัญอย่างต่อเนื่องในการพัฒนาระบบสารสนเทศและเว็บแอปพลิเคชันในช่วงปี 2020–2025 โดยแนวคิดดังกล่าวให้ความสำคัญกับ ความรวดเร็วในการตอบสนองของระบบ ความลื่นไหลในการโต้ตอบ และประสบการณ์ของผู้ใช้งาน ในฐานะปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อ ประสิทธิภาพและการยอมรับระบบดิจิทัล [135, 136]

นอกจากนี้ ค่า FCP และ LCP ที่อยู่ในระดับต่ำ ยังสะท้อนให้เห็นถึงความสามารถของระบบในการ แสดงผลเนื้อหาสำคัญของหน้าเว็บได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อ การรับรู้ของผู้ใช้งานต่อคุณภาพของระบบ และ ประสบการณ์ในการใช้งานระบบ ข้อค้นพบดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยด้าน ความสามารถในการใช้งานของเว็บ (Web Usability) และ ประสบการณ์ดิจิทัลของผู้ใช้งาน (Digital Experience) ที่ระบุว่า ระยะเวลาในการตอบสนองของระบบ มีความสัมพันธ์กับความพึงพอใจ ความเชื่อมั่น และการตัดสินใจกลับมาใช้งานระบบอย่างต่อเนื่องของผู้ใช้งาน [144]

ในด้านระยะเวลาการหน่วงจากการประมวลผลที่ขัดขวางการตอบสนองของระบบ (TBT) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0 มิลลิวินาที แสดงให้เห็นว่า ระบบไม่มีปัญหาการหน่วงของสคริปต์หรือการประมวลผลที่ส่งผลกระทบต่อการโต้ตอบของผู้ใช้งาน ซึ่งสะท้อนถึงประสิทธิภาพของการจัดการทรัพยากรและการประมวลผลภายในระบบ ทั้งนี้ คุณลักษณะดังกล่าวมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อระบบ

DSS ที่ต้องรองรับการโต้ตอบแบบแบบอัตโนมัติตามข้อมูลปัจจุบัน และการประมวลผลข้อมูลหลายมิติภายใต้สภาพแวดล้อมการตัดสินใจแบบโต้ตอบ (Interactive Decision Environment) [144]

ขณะเดียวกันค่าดัชนีความเปลี่ยนแปลงของโครงร่างหน้าเว็บสะสม (CLS) ที่มีค่าต่ำมาก (0.004) ยังสะท้อนให้เห็นถึง ความเสถียรของการแสดงผลหน้าเว็บ โดยไม่มีการเคลื่อนหรือเปลี่ยนตำแหน่งขององค์ประกอบบนหน้าเว็บระหว่างกระบวนการโหลดข้อมูล ซึ่งมีความเชื่อมโยงกับ ความสะดวกในการใช้งานของระบบ (Usability) และ ความเชื่อมั่นของผู้ใช้งานต่อระบบ (User trust) โดยเฉพาะในระบบที่เกี่ยวข้องกับการตัดสินใจและการวิเคราะห์ข้อมูลแบบหลายเกณฑ์ เนื่องจากความเสถียรของการแสดงผลช่วยลดความสับสนในการใช้งาน และเพิ่มความมั่นใจของผู้ใช้งานต่อผลลัพธ์และกระบวนการทำงานของระบบ

ข้อค้นพบดังกล่าวสอดคล้องกับแนวคิด Core Web Vitals ของ Google ซึ่งถูกใช้เป็นมาตรฐานสำคัญในการประเมินคุณภาพของเว็บแอปพลิเคชันสมัยใหม่ โดยให้ความสำคัญกับประสิทธิภาพในการโหลดหน้าเว็บ (Loading Performance) ความสามารถในการตอบสนองและการโต้ตอบของระบบ (Interactivity) และ ความเสถียรของการแสดงผลบนหน้าจอ (Visual Stability) ในฐานะองค์ประกอบหลักของ ระบบเว็บที่มุ่งเน้นผู้ใช้งานเป็นศูนย์กลาง (User-centered Web Systems) [143]

นอกจากนี้ คะแนน Accessibility ที่อยู่ในระดับสูง ยังสะท้อนให้เห็นว่า ระบบ EcoRanker DSS ถูกออกแบบโดยคำนึงถึงความสามารถในการเข้าถึงของผู้ใช้งานที่หลากหลาย ซึ่งมีความเชื่อมโยงกับแนวทางการพัฒนาระบบดิจิทัลอย่างยั่งยืน ที่ได้รับความสำคัญเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในงานวิจัยและการพัฒนาแพลตฟอร์มดิจิทัลสมัยใหม่ [139]

ในภาพรวม ผลการประเมินประสิทธิภาพของระบบสนับสนุนข้อค้นพบว่า EcoRanker DSS ไม่เพียงแต่มีความถูกต้องเชิงแบบจำลองการตัดสินใจเท่านั้น แต่ยังมีคุณภาพด้านประสิทธิภาพของระบบในระดับสูง สามารถรองรับการใช้งานจริงผ่านเว็บแอปพลิเคชันได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถสร้างประสบการณ์การใช้งานที่เหมาะสมต่อผู้ใช้งานในบริบทของการจัดการของเสียจากการก่อสร้าง [140]

โดยสรุป ผลการประเมินประสิทธิภาพของระบบสะท้อนแนวโน้มว่า การพัฒนาระบบ DSS บนเว็บในปัจจุบันจำเป็นต้องให้ความสำคัญทั้งด้านความถูกต้องของแบบจำลอง ความเร็วในการประมวลผล ความเสถียรของระบบ และประสบการณ์ของผู้ใช้งานควบคู่กัน ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางการพัฒนาระบบสารสนเทศสมัยใหม่ภายใต้บริบทของการเปลี่ยนผ่านสู่ดิจิทัลและการพัฒนาอย่างยั่งยืน

4.6 การสังเคราะห์ผลการวิจัยเพื่อตอบคำถามวิจัย

4.6.1 การตอบคำถามวิจัยข้อที่ 1

คำถามวิจัยข้อที่ 1: แนวทางการบริหารจัดการของเสียจากการก่อสร้างที่มีประสิทธิภาพภายใต้แนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียนควรมีลักษณะอย่างไร

จากการสังเคราะห์ผลการวิจัยในหัวข้อ 4.2–4.5 สามารถตอบคำถามวิจัยข้อที่ 1 ได้ว่า แนวทางการบริหารจัดการของเสียจากการก่อสร้างที่มีประสิทธิภาพภายใต้แนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียนควรมีลักษณะเป็นกรอบการจัดการเชิงบูรณาการที่สามารถพิจารณาปัจจัยหลายมิติร่วมกันอย่างเป็นระบบ โดยครอบคลุมทั้งมิติด้านเศรษฐกิจ สิ่งแวดล้อม สังคม และเทคนิค ควบคู่กับการคำนึงถึงบริบทการดำเนินงานจริงของแต่ละโครงการ ทั้งนี้ เนื่องจากการจัดการของเสียจากการก่อสร้างเป็นปัญหาที่มีความซับซ้อนและเกี่ยวข้องกับผู้มีส่วนได้ส่วนเสียหลายกลุ่ม การตัดสินใจจึงไม่ควรพิจารณาเฉพาะด้านต้นทุนหรือประสิทธิภาพเชิงเศรษฐกิจเพียงอย่างเดียว แต่จำเป็นต้องคำนึงถึงผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม ความเป็นไปได้ในการปฏิบัติจริง และความเหมาะสมต่อบริบทของพื้นที่ควบคู่กัน

ผลการวิจัยยังสะท้อนให้เห็นว่า แนวทางการจัดการของเสียที่มีประสิทธิภาพภายใต้แนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียนไม่ควรมุ่งเน้นเพียงการกำจัดของเสียออกจากพื้นที่ก่อสร้าง แต่ควรให้ความสำคัญกับการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า การลดการสูญเสียทรัพยากร และการลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมตลอดกระบวนการจัดการของเสีย โดยเฉพาะผลกระทบจากกิจกรรมการขนส่งซึ่งมีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับการใช้พลังงาน การใช้เชื้อเพลิง และการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ผลการศึกษาพบว่าตัวชี้วัดด้านสิ่งแวดล้อมเชิงปริมาณ เช่น ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และปริมาณการใช้เชื้อเพลิง เป็นองค์ประกอบสำคัญที่ช่วยให้การตัดสินใจสามารถสะท้อนผลกระทบด้านความยั่งยืนได้อย่างเป็นรูปธรรมและตรวจสอบได้

นอกจากนี้ ผลการวิจัยยังชี้ให้เห็นว่า แนวทางการบริหารจัดการของเสียที่มีประสิทธิภาพจำเป็นต้องเชื่อมโยงกับบริบทเชิงพื้นที่และเงื่อนไขการดำเนินงานจริงของโครงการ ทั้งในด้านระยะทางการขนส่ง ตำแหน่งที่ตั้งของผู้ประกอบการ และลักษณะของโครงการก่อสร้าง เนื่องจากปัจจัยดังกล่าวส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพด้านสิ่งแวดล้อม ต้นทุน และความเหมาะสมของทางเลือกในการจัดการของเสีย ดังนั้น การตัดสินใจที่ดีจึงควรตั้งอยู่บนพื้นฐานของข้อมูลเชิงประจักษ์และข้อมูลเชิงพื้นที่ที่สามารถสะท้อนสถานการณ์จริงได้ มากกว่าการอาศัยดุลยพินิจหรือประสบการณ์ส่วนบุคคลเพียงอย่างเดียว

ในอีกด้านหนึ่ง ผลการวิจัยยังสะท้อนว่า ระบบหรือแนวทางการจัดการของเสียที่สามารถนำไปใช้ได้จริงควรมีลักษณะที่โปร่งใส เข้าใจง่าย และสามารถอธิบายเหตุผลของผลการตัดสินใจได้

อย่างชัดเจน เพื่อสร้างความเชื่อมั่นให้แก่ผู้มีส่วนได้ส่วนเสียและสนับสนุนการนำผลลัพธ์ไปใช้ในทางปฏิบัติได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ ความสามารถในการใช้งานจริง ความน่าเชื่อถือของข้อมูล และความชัดเจนของกระบวนการตัดสินใจ ถือเป็นองค์ประกอบสำคัญของการบริหารจัดการของเสียอย่างยั่งยืนภายใต้บริบทของอุตสาหกรรมก่อสร้างสมัยใหม่

ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า แนวทางการบริหารจัดการของเสียจากการก่อสร้างที่มีประสิทธิภาพภายใต้แนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียนควรมีลักษณะสำคัญ ได้แก่

(1) เป็นการตัดสินใจแบบหลายมิติที่ครอบคลุมด้านเศรษฐกิจ สิ่งแวดล้อม สังคม และเทคนิค

(2) มุ่งเน้นการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าและลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมตามแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน

(3) ใช้ตัวชี้วัดด้านสิ่งแวดล้อมเชิงปริมาณที่สามารถตรวจสอบได้อย่างเป็นระบบ

(4) เชื่อมโยงกับบริบทเชิงพื้นที่และสภาพการดำเนินงานจริงของโครงการ

และ (5) สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงผ่านกระบวนการตัดสินใจที่มีความโปร่งใสน่าเชื่อถือ และตอบสนองต่อความต้องการของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียหลายกลุ่มอย่างเหมาะสม

4.6.2 การตอบคำถามวิจัยข้อที่ 2

คำถามวิจัยข้อที่ 2: โครงสร้างของระบบสนับสนุนการตัดสินใจ (DSS) ที่เหมาะสมสำหรับการจัดการของเสียจากการก่อสร้างควรประกอบด้วยองค์ประกอบใดบ้าง

จากผลการวิจัยในหัวข้อ 4.2, 4.3, 4.4 และ 4.5 สามารถตอบคำถามวิจัยข้อที่ 2 ได้ว่า โครงสร้างของระบบสนับสนุนการตัดสินใจที่เหมาะสมสำหรับการจัดการของเสียจากการก่อสร้างควรได้รับการออกแบบในลักษณะ สถาปัตยกรรมแบบบูรณาการและแยกส่วนการทำงานอย่างชัดเจน เพื่อให้ระบบสามารถรองรับการรับข้อมูล การประมวลผล การจัดการองค์ความรู้ และการแสดงผลเพื่อการตัดสินใจได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในระดับโครงสร้างพื้นฐาน ระบบที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยส่วนสำคัญ ได้แก่ ส่วนรับข้อมูล (Input Layer) ส่วนประมวลผล (Processing Layer) และส่วนแสดงผล (Output Layer) ซึ่งทำงานเชื่อมโยงกันอย่างเป็นลำดับ โดยในส่วนรับข้อมูล ระบบรองรับการป้อนข้อมูลจากผู้ใช้งานทั้งกลุ่มผู้ก่อให้เกิดของเสียและผู้ประกอบการจัดการของเสีย ครอบคลุมทั้งข้อมูลโครงการ ข้อมูลประเภทและปริมาณของเสีย ข้อมูลตำแหน่งที่ตั้ง ข้อมูลด้านต้นทุน และข้อมูลด้านความยั่งยืนตามเกณฑ์ที่กำหนด ส่วนประมวลผลทำหน้าที่คำนวณและจัดอันดับทางเลือกโดยอาศัยแบบจำลองการตัดสินใจที่ถูกฝังอยู่ในระบบ ขณะที่ส่วนแสดงผลทำหน้าที่นำเสนอคะแนน อันดับ และข้อมูลประกอบการพิจารณาในรูปแบบที่เข้าใจง่ายและสามารถเปรียบเทียบได้อย่างชัดเจน

อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาในระดับที่ลึกขึ้น โครงสร้างของ DSS ที่เหมาะสมไม่ควรจำกัดอยู่เพียงมิติของการไหลของข้อมูลเท่านั้น แต่ควรประกอบด้วยองค์ประกอบเชิงหน้าที่อย่างน้อย 4 ส่วน ได้แก่

(1) ระบบจัดการข้อมูล (Data Management Subsystem)

(2) ระบบแบบจำลอง (Model Management Subsystem)

(3) ระบบองค์ความรู้หรือกลไกเชิงตรรกะที่สะท้อนเกณฑ์และค่าน้ำหนักของการตัดสินใจ (Knowledge Subsystem)

(4) ส่วนติดต่อผู้ใช้ (User Interface Subsystem)

โดยผลจากการวิเคราะห์ QFD ยังช่วยยืนยันว่า โครงสร้างระบบที่ดีควรให้ความสำคัญกับคุณลักษณะเชิงเทคนิค เช่น การออกแบบส่วนติดต่อและการแสดงผล (User Interface and Visualization) การจัดทำคำอธิบายระเบียบวิธี (Methodology Documentation) ความปลอดภัยของข้อมูล (Data Security Protocols) การตอบสนองของระบบ (System Responsiveness) และความสามารถในการเข้าถึงได้จากหลากหลายอุปกรณ์ (Cross-device Compatibility)

ผลการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญยังสนับสนุนข้อค้นพบดังกล่าว โดยสะท้อนว่าองค์ประกอบและโครงสร้างของระบบมีความเหมาะสมและสามารถเชื่อมโยงกระบวนการจัดการข้อมูล การประมวลผล และการสื่อสารผลลัพธ์ได้อย่างเป็นระบบ

นอกจากนี้ ผลการวิจัยยังสะท้อนว่า โครงสร้างของระบบสนับสนุนการตัดสินใจ (DSS) ที่เหมาะสมควรมีลักษณะของ สถาปัตยกรรมแบบแยกส่วนและบูรณาการร่วมกัน (Modular and Integrated Architecture) กล่าวคือ แต่ละองค์ประกอบของระบบสามารถแยกหน้าที่การทำงานได้อย่างชัดเจน ขณะเดียวกันยังสามารถเชื่อมโยงข้อมูลและกระบวนการทำงานร่วมกันได้ภายในระบบเดียว ซึ่งช่วยเพิ่ม ความยืดหยุ่นในการพัฒนาและปรับปรุงระบบ การพัฒนาแบบจำลอง และการขยายขอบเขตการใช้งานในอนาคต อีกทั้งยังช่วยให้ระบบสามารถรองรับ การบูรณาการข้อมูลด้านสิ่งแวดล้อม ข้อมูลเชิงพื้นที่ และกลไกการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า โครงสร้างของระบบสนับสนุนการตัดสินใจที่เหมาะสมสำหรับการจัดการของเสียจากการก่อสร้างควรประกอบด้วย (1) ระบบจัดการข้อมูล (2) ระบบจัดการแบบจำลอง (3) ระบบองค์ความรู้หรือกลไกการตัดสินใจ และ (4) ส่วนติดต่อผู้ใช้ ภายใต้สถาปัตยกรรมแบบบูรณาการที่สามารถเชื่อมโยงข้อมูล การประมวลผล และการสื่อสารผลลัพธ์เข้าด้วยกันอย่างเป็นระบบ ยืดหยุ่น และสอดคล้องกับบริบทของอุตสาหกรรมก่อสร้างและการจัดการของเสียอย่างยั่งยืน

4.6.3 การตอบคำถามวิจัยข้อที่ 3

คำถามวิจัยข้อที่ 3: เทคนิคและกระบวนการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ใดที่เหมาะสมสำหรับการประเมินและจัดอันดับผู้ประกอบการจัดการของเสียจากการก่อสร้างอย่างเป็นระบบ โปร่งใส และตรวจสอบได้

จากผลการวิจัยในหัวข้อ 4.2–4.5 สามารถตอบคำถามวิจัยข้อที่ 3 ได้ว่า เทคนิคและกระบวนการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับการประเมินและจัดอันดับผู้ประกอบการจัดการของเสียจากการก่อสร้างควรมีลักษณะเป็นกรอบการตัดสินใจเชิงบูรณาการที่สามารถรองรับทั้งการกำหนดเกณฑ์ การสะท้อนความสำคัญของปัจจัยการตัดสินใจ และการจัดอันดับทางเลือกภายใต้ข้อมูลหลายมิติได้อย่างเป็นระบบ โปร่งใส และตรวจสอบได้ ทั้งนี้ เนื่องจากการจัดการของเสียจากการก่อสร้างเกี่ยวข้องกับเกณฑ์การประเมินที่มีทั้งลักษณะเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ รวมถึงมีความไม่แน่นอนจากดุลยพินิจของผู้เชี่ยวชาญและบริบทการดำเนินงานจริง การเลือกใช้เทคนิคเพียงวิธีเดียวจึงอาจไม่สามารถรองรับความซับซ้อนของปัญหาได้อย่างครอบคลุม

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า QFD มีบทบาทสำคัญในการเชื่อมโยงความต้องการของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียไปสู่คุณลักษณะเชิงเทคนิคของระบบ ช่วยให้การออกแบบระบบและการกำหนดโครงสร้างของปัจจัยที่เกี่ยวข้องมีความสอดคล้องกับบริบทผู้ใช้งานจริง ขณะที่ FAHP มีความเหมาะสมในการใช้กำหนดค่าน้ำหนักของเกณฑ์ภายใต้สภาวะที่การตัดสินใจมีความคลุมเครือและอาศัยดุลยพินิจของผู้เชี่ยวชาญ โดยช่วยสะท้อนระดับความสำคัญเชิงสัมพัทธ์ของแต่ละเกณฑ์ได้อย่างเป็นระบบ ส่วน TOPSIS มีความเหมาะสมในฐานะกลไกหลักสำหรับการประเมินและจัดอันดับทางเลือก เนื่องจากสามารถเปรียบเทียบผู้ประกอบการหลายรายภายใต้หลายเกณฑ์พร้อมกัน และแสดงผลในรูปแบบคะแนนความใกล้เคียงที่สามารถตีความได้ชัดเจนและตรวจสอบได้ในเชิงคำนวณ ยิ่งไปกว่านั้น ความเหมาะสมของกรอบการตัดสินใจดังกล่าวไม่ได้มาจากคุณสมบัติของวิธีกระบวนการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์เท่านั้น แต่เกิดจากการเชื่อมโยงวิธีการเหล่านี้เข้ากับแบบจำลองสิ่งแวดล้อมเชิงปริมาณและข้อมูลเชิงพื้นที่ผ่าน GIS ซึ่งช่วยทำให้ เมทริกซ์การตัดสินใจ ที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการ TOPSIS ไม่ได้ตั้งอยู่บนข้อมูลเชิงคุณภาพล้วน ๆ แต่ประกอบด้วยตัวชี้วัดที่สะท้อนผลกระทบจริงจากบริบทการดำเนินงาน เช่น ระยะทางการขนส่ง การใช้เชื้อเพลิง และการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ส่งผลให้กระบวนการจัดอันดับมีความสอดคล้องกับสถานการณ์จริงและแนวคิดการพัฒนาอย่างยั่งยืนมากยิ่งขึ้น

ในเชิงกระบวนการตัดสินใจ ผลการศึกษาพบว่า กระบวนการตัดสินใจที่เหมาะสมควรสามารถเปรียบเทียบผู้ประกอบการหลายรายภายใต้เกณฑ์การประเมินหลายด้านได้พร้อมกัน ทั้งในมิติด้านเศรษฐกิจ สิ่งแวดล้อม สังคม และเทคนิค รวมถึงสามารถสะท้อนความใกล้เคียงของแต่ละทางเลือกกับทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดได้อย่างชัดเจน ทั้งนี้ กระบวนการดังกล่าวควรมีความโปร่งใส

สามารถตรวจสอบขั้นตอนการคำนวณได้ และสามารถอธิบายเหตุผลของผลลัพธ์การจัดอันดับได้อย่างเป็นระบบ เพื่อสร้างความน่าเชื่อถือและความเชื่อมั่นให้แก่ผู้ใช้งานและผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย

ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า เทคนิคและกระบวนการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้ คือกรอบการตัดสินใจเชิงบูรณาการที่ประกอบด้วย QFD สำหรับการแปลงความต้องการของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียสู่โครงสร้างเชิงเทคนิค FAHP สำหรับการกำหนดค่าน้ำหนักของเกณฑ์ และ TOPSIS สำหรับการประเมินและจัดอันดับทางเลือก โดยมีข้อมูลเชิงพื้นที่และแบบจำลองสิ่งแวดล้อมเชิงปริมาณเป็นองค์ประกอบสนับสนุนที่ทำให้การตัดสินใจมีความสมจริง โปร่งใส และตรวจสอบได้มากยิ่งขึ้น

4.6.4 การตอบคำถามวิจัยข้อที่ 4

คำถามวิจัยข้อที่ 4: จะสามารถพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจบนเว็บที่บูรณาการโครงสร้างเกณฑ์ แบบจำลองสิ่งแวดล้อม และวิธีการตัดสินใจไว้ในระบบเดียวเพื่อรองรับการใช้งานจริงได้อย่างไร

จากผลการวิจัยในหัวข้อ 4.3–4.5 สามารถตอบคำถามวิจัยข้อที่ 4 ได้ว่า การพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจบนเว็บที่สามารถบูรณาการโครงสร้างเกณฑ์การตัดสินใจ แบบจำลองด้านสิ่งแวดล้อม และวิธีการตัดสินใจไว้ภายในระบบเดียวเพื่อรองรับการใช้งานจริง จำเป็นต้องออกแบบในลักษณะของ แพลตฟอร์มการตัดสินใจบนเว็บแบบบูรณาการ ซึ่งเชื่อมโยงกระบวนการตัดสินใจทั้งหมดตั้งแต่ การนำเข้าข้อมูล การประมวลผล การวิเคราะห์ และการสื่อสารผลลัพธ์ ไว้ภายใต้ลำดับกระบวนการทำงานเดียวที่สอดคล้องกับการปฏิบัติงานจริงของผู้ใช้งาน ส่งผลให้ระบบสามารถสนับสนุนการตัดสินใจได้อย่างต่อเนื่อง เป็นระบบ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริง

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า การพัฒนาระบบให้สามารถนำไปใช้งานได้จริงมิได้ขึ้นอยู่เพียงความถูกต้องของแบบจำลองการตัดสินใจเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับความสามารถของระบบในการเชื่อมโยงองค์ประกอบต่าง ๆ ของกระบวนการตัดสินใจให้สามารถทำงานร่วมกันได้อย่างต่อเนื่องภายในสภาพแวดล้อมของระบบเว็บ โดยระบบที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้เริ่มต้นจากการให้ผู้ใช้งานกำหนดข้อมูลโครงการและเงื่อนไขการประเมิน ก่อนเชื่อมโยงข้อมูลเชิงพื้นที่และข้อมูลด้านสิ่งแวดล้อมเข้าสู่กระบวนการคำนวณ จากนั้นจึงนำผลเข้าสู่กระบวนการประเมินและจัดอันดับทางเลือก พร้อมแสดงผลลัพธ์ในรูปแบบที่สามารถนำไปใช้ประกอบการตัดสินใจได้ทันที กระบวนการดังกล่าวสะท้อนว่า การพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจเพื่อรองรับการใช้งานจริงจำเป็นต้องออกแบบทั้ง กระบวนการประมวลผลของระบบ และ ลำดับการใช้งานของผู้ใช้งาน ควบคู่กัน เพื่อให้การวิเคราะห์ การประมวลผล และการตัดสินใจสามารถดำเนินไปได้อย่างต่อเนื่องและสอดคล้องกับบริบทการใช้งานจริง

นอกจากนี้ ผลการวิจัยยังชี้ให้เห็นว่า การพัฒนาระบบให้สามารถรองรับการใช้งานจริงได้ จำเป็นต้องให้ความสำคัญกับการออกแบบประสบการณ์การใช้งาน และลำดับขั้นตอนการทำงานของระบบอย่างเหมาะสม โดยระบบควรสามารถลดความซับซ้อนของกระบวนการตัดสินใจ ช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถป้อนข้อมูล ตรวจสอบผลลัพธ์ และเปรียบเทียบทางเลือกได้อย่างสะดวกและเข้าใจง่าย ทั้งนี้ ความชัดเจนของการแสดงผล ความสามารถในการตอบสนองของระบบ และความสะดวกในการเข้าถึงข้อมูล ถือเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ส่งผลต่อการยอมรับและการนำระบบไปใช้งานจริงในบริบทของอุตสาหกรรมก่อสร้าง

ผลการตรวจสอบและประเมินระบบยังสนับสนุนข้อค้นพบดังกล่าวอย่างชัดเจน โดยผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถดำเนินการคำนวณได้อย่างถูกต้องและสอดคล้องกับการคำนวณอ้างอิง ขณะที่ผลการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญและผู้ใช้งานสะท้อนว่าระบบมีความเหมาะสมในด้านการใช้งาน ความน่าเชื่อถือ และประสิทธิภาพในการสนับสนุนการตัดสินใจ นอกจากนี้ ผลการประเมินสมรรถนะและความสามารถในการเข้าถึงของระบบยังแสดงให้เห็นว่า ระบบสามารถรองรับการใช้งานผ่านเว็บได้อย่างมีประสิทธิภาพและสอดคล้องกับแนวทางการพัฒนาระบบดิจิทัลสมัยใหม่

ในเชิงสังเคราะห์ งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า การพัฒนา Web-based DSS ให้สามารถรองรับการใช้งานจริงได้ จำเป็นต้องอาศัยการเชื่อมโยงกระบวนการรับข้อมูล การประมวลผล การวิเคราะห์ และการแสดงผลลัพธ์ให้ทำงานร่วมกันอย่างต่อเนื่องภายใต้สภาพแวดล้อมของระบบเว็บ ควบคู่กับการออกแบบลำดับกระบวนการใช้งานของผู้ใช้ (User Workflow) ควบคู่กันและประสบการณ์การใช้งานที่สอดคล้องกับลักษณะการทำงานจริงของผู้ใช้งานในภาคอุตสาหกรรม

ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า การพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจบนเว็บสำหรับการจัดการของเสียจากการก่อสร้างให้สามารถรองรับการใช้งานจริงได้นั้น จำเป็นต้องพัฒนาในฐานะแพลตฟอร์มแบบบูรณาการที่สามารถเชื่อมโยงข้อมูล กระบวนการประมวลผล แบบจำลองสิ่งแวดล้อม กลไกการตัดสินใจ และการสื่อสารผลลัพธ์เข้าไว้ภายใต้ระบบเดียว โดยมุ่งเน้นทั้งความถูกต้องของกระบวนการตัดสินใจ ประสิทธิภาพของระบบ และความสอดคล้องกับลักษณะการใช้งานจริงของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียในอุตสาหกรรมก่อสร้างอย่างครบถ้วน

4.7 สรุปท้ายบท

บทที่ 4 นี้ได้นำเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูลและอภิปรายผลของงานวิจัยอย่างเป็นระบบ ครอบคลุมตั้งแต่ผลการพัฒนาโครงสร้างของระบบสนับสนุนการตัดสินใจ การวิเคราะห์ความต้องการของผู้ใช้งานและการแปลงไปสู่คุณลักษณะเชิงเทคนิคด้วยเทคนิค QFD การกำหนดค่าน้ำหนักของ

เกณฑ์ด้วยวิธี FAHP การออกแบบและพัฒนาระบบ EcoRanker DSS ในรูปแบบเว็บแอปพลิเคชัน ตลอดจนการตรวจสอบความถูกต้อง การยืนยันความเหมาะสม และการประเมินประสิทธิภาพของระบบในหลายมิติ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถบูรณาการโครงสร้างเกณฑ์แบบจำลองผลกระทบสิ่งแวดล้อมเชิงปริมาณ ข้อมูลเชิงพื้นที่ และกลไกการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์เข้าไว้ในระบบเดียวได้อย่างเป็นรูปธรรม และสามารถสนับสนุนการคัดเลือกผู้ประกอบการจัดการของเสียจากการก่อสร้างได้อย่างเป็นระบบ โปร่งใส และตรวจสอบได้

นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ยังชี้ให้เห็นว่า การจัดการของเสียจากการก่อสร้างอย่างมีประสิทธิภาพภายใต้แนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียนจำเป็นต้องอาศัยกรอบการตัดสินใจแบบบูรณาการที่พิจารณาปัจจัยด้านเศรษฐกิจ สิ่งแวดล้อม สังคม และเทคนิคควบคู่กัน โดยเฉพาะการใช้ตัวชี้วัดเชิงปริมาณด้านสิ่งแวดล้อม เช่น การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และการใช้เชื้อเพลิงจากการขนส่งของเสีย ซึ่งช่วยยกระดับการประเมินทางเลือกจากการพิจารณาเชิงประสบการณ์ไปสู่การตัดสินใจบนฐานข้อมูลเชิงประจักษ์ ขณะเดียวกัน ผลการสังเคราะห์เพื่อตอบคำถามวิจัยและวัตถุประสงค์การวิจัยยังยืนยันว่า งานวิจัยนี้สามารถพัฒนาได้ทั้งโครงสร้างเกณฑ์ แบบจำลองเชิงปริมาณ กรอบการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ และระบบสนับสนุนการตัดสินใจบนเว็บที่รองรับการใช้งานจริงได้อย่างครบถ้วน

ผลการวิจัยยังสะท้อนให้เห็นว่า การพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับการจัดการของเสียจากการก่อสร้างอย่างยั่งยืน ไม่สามารถพิจารณาเฉพาะมิติของ แบบจำลองการตัดสินใจ หรืออัลกอริทึมการประมวลผลเชิงคำนวณ เพียงด้านเดียว แต่จำเป็นต้อง บูรณาการข้อมูลเชิงพื้นที่ ตัวชี้วัดด้านสิ่งแวดล้อม ความต้องการของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย และกลไกการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์เข้าไว้ภายใต้ระบบเดียวอย่างเป็นระบบ ทั้งนี้ งานวิจัยได้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจบนเว็บแบบบูรณาการ (Web-based Integrated DSS) ที่สามารถเชื่อมโยง องค์ความรู้ด้านเศรษฐกิจหมุนเวียน สิ่งแวดล้อม และเทคโนโลยีดิจิทัล เข้าด้วยกัน เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจที่มี ความโปร่งใส สามารถตรวจสอบย้อนกลับได้ และสอดคล้องกับบริบทการใช้งานจริง ในอุตสาหกรรมก่อสร้างสมัยใหม่

ขณะเดียวกัน ผลการตรวจสอบและประเมินระบบในหลายมิติ ทั้งการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง การประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญ การประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน การประเมินความสามารถในการเข้าถึงของระบบ และการประเมินประสิทธิภาพของเว็บแอปพลิเคชัน ยังสะท้อนให้เห็นว่า EcoRanker DSS ไม่ได้เป็นเพียงกรอบแนวคิดเชิงทฤษฎีหรือแบบจำลองเชิงแนวคิดเท่านั้น แต่มีศักยภาพเพียงพอสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงในบริบทของการจัดการของเสียจากการก่อสร้างอย่างเป็นรูปธรรม ทั้งในด้านความถูกต้อง ความน่าเชื่อถือ ความสามารถในการใช้งาน และการรองรับกระบวนการตัดสินใจของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียในระบบจริง

กล่าวโดยสรุป บทที่ 4 ได้แสดงให้เห็นถึงทั้งผลลัพธ์เชิงวิชาการและผลลัพธ์เชิงระบบของงานวิจัย โดยไม่เพียงยืนยันความเป็นไปได้ของการพัฒนา EcoRanker DSS เท่านั้น แต่ยังสะท้อนศักยภาพของแนวทางเชิงบูรณาการในการยกระดับการตัดสินใจด้านการจัดการของเสียจากการก่อสร้างให้มีความเหมาะสม โปร่งใส ตรวจสอบได้ และสอดคล้องกับบริบทความยั่งยืนมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้ ผลการวิจัยที่ได้นำเสนอในบทนี้จะเป็นพื้นฐานสำคัญสำหรับการสรุปองค์ความรู้ การอภิปรายนัยเชิงวิชาการและเชิงปฏิบัติ ตลอดจนข้อจำกัดและข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคตในบทที่ 5 ต่อไป

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

บทนี้เป็นการสรุปผลการวิจัยโดยสังเคราะห์จากผลการวิเคราะห์ที่นำเสนอในบทที่ 4 เพื่อสะท้อนภาพรวมของการพัฒนาและประสิทธิภาพของระบบ EcoRanker DSS อย่างเป็นระบบ พร้อมทั้งอภิปรายเชิงบูรณาการในมิติของแบบจำลอง ข้อมูล และการประยุกต์ใช้งาน

5.1 สรุปผลการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจแบบเว็บภายใต้ชื่อ EcoRanker DSS สำหรับการคัดเลือกและจัดอันดับผู้ประกอบการจัดการของเสียจากการก่อสร้าง โดยบูรณาการแนวคิดการตัดสินใจเชิงหลายเกณฑ์ร่วมกับเทคโนโลยีสารสนเทศ เพื่อให้ได้เครื่องมือที่มีความถูกต้อง โปร่งใส และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริงภายใต้บริบทของการพัฒนาอย่างยั่งยืน

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานได้อย่างเป็นระบบ ครอบคลุมตั้งแต่กระบวนการรับข้อมูล การประมวลผล และการแสดงผล โดยสามารถรองรับข้อมูลเชิงพื้นที่ ข้อมูลด้านสิ่งแวดล้อม และข้อมูลเชิงปฏิบัติการที่เกี่ยวข้องกับการจัดการของเสียได้อย่างครบถ้วน ทั้งนี้ ระบบสามารถคำนวณและจัดอันดับทางเลือกได้โดยอัตโนมัติ พร้อมทั้งเปิดโอกาสให้ผู้ใช้งานสามารถกำหนดค่าน้ำหนักของเกณฑ์การตัดสินใจให้สอดคล้องกับบริบทของการใช้งาน ซึ่งสะท้อนถึงความยืดหยุ่นและความสามารถในการนำไปใช้ในสถานการณ์จริง

อย่างไรก็ตาม ผลการจัดอันดับจากระบบ EcoRanker DSS ไม่ได้มีวัตถุประสงค์เพื่อระบุว่า ผู้ประกอบการรายใดเป็น “ผู้ประกอบการที่ดีที่สุด” สำหรับทุกสถานการณ์ในลักษณะสากล แต่ระบบถูกออกแบบมาเพื่อช่วยสนับสนุนการตัดสินใจในการเลือกผู้ประกอบการที่ “เหมาะสมที่สุด” ภายใต้เงื่อนไขและบริบทเฉพาะของแต่ละโครงการกล่าวคือ ผลการจัดอันดับอาจเปลี่ยนแปลงได้ตามปัจจัยที่ผู้ใช้งานกำหนด เช่น ความสำคัญของเกณฑ์การประเมิน ค่าน้ำหนักที่ให้กับแต่ละปัจจัย ประเภทของของเสีย ระยะทางการขนส่ง ต้นทุน หรือข้อมูลนำเข้าของโครงการนั้น ๆ ตัวอย่างเช่น บางโครงการอาจให้ความสำคัญกับต้นทุนต่ำ ขณะที่บางโครงการอาจให้ความสำคัญกับการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกหรือคุณภาพของวัสดุรีไซเคิลมากกว่า ดังนั้น ผู้ประกอบการที่ได้รับอันดับสูงสุดในโครงการหนึ่ง อาจไม่ใช่ผู้ประกอบการที่เหมาะสมที่สุดในอีกโครงการหนึ่ง

แนวทางดังกล่าวสะท้อนลักษณะของ ระบบสนับสนุนการตัดสินใจที่คำนึงถึงบริบทของการใช้งาน ซึ่งให้ความสำคัญกับเงื่อนไข ข้อจำกัด และความต้องการเฉพาะของผู้ใช้งานในแต่ละสถานการณ์ มากกว่าการอาศัยผลการตัดสินใจแบบตายตัวเพียงรูปแบบเดียว ทั้งนี้ แนวคิดดังกล่าวสอดคล้องกับหลักการของ การตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ ที่มุ่งสนับสนุนการคัดเลือกทางเลือกที่มีความเหมาะสมภายใต้บริบทและเงื่อนไขเฉพาะของแต่ละกรณี

ในเชิงแบบจำลอง การประยุกต์ใช้ QFDช่วยให้สามารถถ่ายทอดความต้องการของผู้ใช้งานไปสู่เกณฑ์เชิงเทคนิคได้อย่างเป็นระบบ ขณะที่การใช้ FAHP ช่วยกำหนดค่าน้ำหนักของเกณฑ์ภายใต้ความไม่แน่นอน และวิธี TOPSIS ถูกนำมาใช้ในการจัดอันดับทางเลือกโดยพิจารณาความใกล้เคียงกับทางเลือกที่ดีที่สุดและห่างไกลจากทางเลือกที่แย่ที่สุด การบูรณาการวิธีการดังกล่าวทำให้เกิดกรอบการตัดสินใจแบบครบวงจรที่เชื่อมโยงตั้งแต่การกำหนดเกณฑ์ไปจนถึงการจัดอันดับผลลัพธ์อย่างเป็นระบบ

ผลการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักของเกณฑ์สะท้อนให้เห็นว่าปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีความสำคัญในระดับสูงสุด รองลงมาคือคุณภาพของผลลัพธ์และการใช้พลังงานเชื้อเพลิง ซึ่งสะท้อนถึงแนวโน้มของการตัดสินใจที่ให้ความสำคัญกับความยั่งยืนควบคู่กับประสิทธิภาพในการดำเนินงาน

ในด้านความถูกต้องของระบบ ผลการตรวจสอบพบว่าการคำนวณของระบบมีความสอดคล้องกับวิธีการคำนวณมาตรฐานอย่างสมบูรณ์ ซึ่งยืนยันถึงความถูกต้องของอัลกอริทึม ขณะที่ผลการประเมินจากผู้เชี่ยวชาญและผู้ใช้งานแสดงให้เห็นว่าระบบมีความเหมาะสมและได้รับการยอมรับในระดับสูง ทั้งในด้านความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ ความสามารถในการใช้งาน และประสิทธิภาพของระบบ นอกจากนี้ ระบบยังมีสมรรถนะด้านการทำงานและการเข้าถึงที่สอดคล้องกับมาตรฐานสากล

ในเชิงองค์ความรู้ งานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการบูรณาการเทคนิคการตัดสินใจเชิงหลายเกณฑ์เข้ากับระบบสารสนเทศในลักษณะของ end-to-end framework ที่สามารถเชื่อมโยงตั้งแต่ความต้องการของผู้ใช้งาน การกำหนดเกณฑ์การตัดสินใจ การประมวลผลข้อมูลเชิงปริมาณและข้อมูลเชิงพื้นที่ ไปจนถึงการจัดอันดับผลลัพธ์การตัดสินใจได้อย่างเป็นระบบ ขณะที่ในเชิงประยุกต์ ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถทำหน้าที่เป็นเครื่องมือสนับสนุนการตัดสินใจที่ช่วยยกระดับกระบวนการตัดสินใจจากการพึ่งพาประสบการณ์ส่วนบุคคลไปสู่การตัดสินใจที่มีข้อมูลและเข้าไว้ภายใต้ระบบเดียวได้อย่างชัดเจน ทั้งนี้ ผลการวิจัยยังสะท้อนให้เห็นถึงศักยภาพของการบูรณาการวิธีการตัดสินใจเชิงหลายเกณฑ์ ข้อมูลเชิงพื้นที่ ตัวชี้วัดด้านสิ่งแวดล้อม และเทคโนโลยีสารสนเทศ เพื่อสนับสนุนการจัดการของเสียจากการก่อสร้างอย่างยั่งยืนภายใต้บริบทของเศรษฐกิจหมุนเวียนและการพัฒนาอุตสาหกรรมก่อสร้างสมัยใหม่

งานวิจัยนี้มีส่วนช่วยเติมเต็มช่องว่างขององค์ความรู้ด้านการจัดการของเสียจากการก่อสร้างอย่างยั่งยืน โดยแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการบูรณาการเทคนิคการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ ข้อมูลเชิงพื้นที่ ตัวชี้วัดสิ่งแวดล้อม และเทคโนโลยีเว็บแอปพลิเคชันเข้าไว้ภายใต้ระบบเดียวอย่างเป็นรูปธรรม ซึ่งช่วยยกระดับทั้งในเชิงแนวคิด วิธีวิจัย และการประยุกต์ใช้งานจริงของระบบสนับสนุนการตัดสินใจในบริบทของเศรษฐกิจหมุนเวียนและอุตสาหกรรมก่อสร้างสมัยใหม่

5.2 ข้อจำกัดของงานวิจัยและข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

แม้ว่างานวิจัยนี้จะสามารถพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจ EcoRanker DSS ที่มีความถูกต้องและมีศักยภาพในการนำไปใช้งานจริง อย่างไรก็ตาม ยังมีข้อจำกัดบางประการที่ควรพิจารณาเพื่อการตีความผลการวิจัยอย่างรอบด้าน ข้อจำกัดดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึงช่องว่างขององค์ความรู้และโอกาสในการพัฒนาต่อยอดในอนาคต

5.2.1 ข้อจำกัดของงานวิจัย

ประการแรก แบบจำลองการตัดสินใจในงานวิจัยนี้อาศัยการกำหนดค่าน้ำหนักของเกณฑ์ผ่านวิธี FAHP ซึ่งแม้ว่าจะช่วยจัดการกับความไม่แน่นอนของการตัดสินใจได้ในระดับหนึ่ง แต่ยังคงมีลักษณะเป็นการประเมินเชิงอัตวิสัยจากผู้เชี่ยวชาญ ส่งผลให้ผลลัพธ์อาจมีความไวต่อองค์ประกอบของกลุ่มผู้เชี่ยวชาญและบริบทของการตัดสินใจ

ประการที่สอง แม้ว่าระบบ EcoRanker DSS จะได้รับการพัฒนาและสามารถใช้งานได้ในระดับระบบแล้ว การประเมินในงานวิจัยนี้ยังอยู่ในรูปแบบของการทดลองใช้งานโดยผู้เชี่ยวชาญและการประเมินผ่านแบบสอบถาม ซึ่งเป็นการประเมินในเชิงการรับรู้ของผู้ใช้งานมากกว่าการประเมินจากการใช้งานจริงในระยะยาวในสภาพแวดล้อมของโครงการจริง ดังนั้น ผลลัพธ์ที่ได้จึงสะท้อนศักยภาพของระบบมากกว่าผลกระทบเชิงปฏิบัติการอย่างแท้จริง

ประการที่สาม ข้อมูลที่ใช้ในการทดลองและทดสอบระบบยังอยู่ในลักษณะของกรณีศึกษาและยังไม่ได้เชื่อมโยงกับแหล่งข้อมูลแบบเรียลไทม์ทั้งหมด ซึ่งอาจส่งผลต่อความทันสมัยและความแม่นยำของผลลัพธ์ โดยเฉพาะในสถานการณ์ที่มีความเปลี่ยนแปลงของข้อมูลอย่างต่อเนื่อง

ประการที่สี่ แบบจำลองการจัดอันดับทางเลือกในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธี TOPSIS เป็นหลัก แม้ว่าวิธีดังกล่าวจะมีความเหมาะสมในด้านความเข้าใจง่ายและความสามารถในการอธิบายผลลัพธ์ แต่ยังไม่มีการศึกษาเปรียบเทียบกับวิธีการตัดสินใจเชิงหลายเกณฑ์อื่น ๆ ซึ่งอาจให้ผลลัพธ์หรือมุมมองที่แตกต่างกัน

5.2.2 การพัฒนาแบบจำลองและข้อมูลในอนาคต

จากข้อจำกัดของงานวิจัย แนวทางการพัฒนาในอนาคตควรมุ่งเน้นการยกระดับแบบจำลองและการจัดการข้อมูลให้มีความยืดหยุ่นและสามารถตอบสนองต่อบริบทของการตัดสินใจที่เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ในเชิงแบบจำลอง ควรมีการพัฒนาแนวทางการกำหนดค่าน้ำหนักแบบการกำหนดหรือปรับค่าน้ำหนักของเกณฑ์การตัดสินใจให้สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามบริบท ข้อมูลหรือสถานการณ์ที่แตกต่างกัน (Dynamic Weighting) แทนการใช้ค่าน้ำหนักคงที่เพียงชุดเดียวตลอดเวลา ซึ่งอาจประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องหรือปัญญาประดิษฐ์ เพื่อให้ระบบสามารถเรียนรู้และปรับค่าน้ำหนักของเกณฑ์ตามข้อมูลการใช้งานจริงและลักษณะของโครงการได้อย่างอัตโนมัติ

นอกจากนี้ ควรมีการวิเคราะห์ความไวของแบบจำลอง (Sensitivity Analysis) เพื่อทำความเข้าใจผลกระทบของพารามิเตอร์และค่าน้ำหนักที่มีต่อผลลัพธ์การจัดอันดับ รวมถึงการเปรียบเทียบผลลัพธ์ภายใต้บริบทหรือสถานการณ์ที่แตกต่างกัน เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือและความสามารถในการอธิบายผลลัพธ์ของระบบ

ในเชิงข้อมูล ควรมีการบูรณาการข้อมูลจากแหล่งภายนอกแบบเรียลไทม์ เช่น ข้อมูลตำแหน่งจากระบบนำทาง ข้อมูลการใช้พลังงาน ข้อมูลการจราจร และข้อมูลการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เพื่อเพิ่มความแม่นยำและความทันสมัยของผลลัพธ์ รวมถึงการเชื่อมโยงฐานข้อมูลจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เช่น หน่วยงานด้านสิ่งแวดล้อม องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น หรือฐานข้อมูลด้านคาร์บอน เพื่อยกระดับความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ใช้ในระบบ

นอกจากนี้ การพัฒนาและบูรณาการข้อมูลเชิงพื้นที่ (GIS integration) ในระดับที่มีความละเอียดมากขึ้น อาจช่วยให้ระบบสามารถ วิเคราะห์ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมและการขนส่งได้อย่างแม่นยำยิ่งขึ้น โดยเฉพาะในบริบทของ การจัดการของเสียจากการก่อสร้าง ซึ่งมีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับ ระยะทาง เส้นทางการขนส่ง และบริบทเชิงพื้นที่

5.2.3 การประยุกต์ใช้ AI และ LLMs ในระบบ DSS

งานวิจัยในอนาคตอาจพิจารณาการบูรณาการเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) และแบบจำลองภาษาขนาดใหญ่ (Large Language Models: LLMs) เข้ากับระบบ EcoRanker DSS เพื่อยกระดับความสามารถของระบบจากระบบสนับสนุนการตัดสินใจแบบดั้งเดิมไปสู่ระบบสนับสนุนการตัดสินใจอัจฉริยะ (Intelligent Decision Support System: IDSS)

ในเชิงแบบจำลอง AI และ Machine Learning อาจถูกนำมาใช้ในการเรียนรู้รูปแบบการตัดสินใจจากข้อมูลการใช้งานจริง เพื่อนำไปสู่การปรับค่าน้ำหนักแบบการกำหนดหรือปรับค่าน้ำหนักของเกณฑ์การตัดสินใจให้สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามบริบท ข้อมูล หรือสถานการณ์ที่

แตกต่างกัน และการพยากรณ์แนวโน้มของผลลัพธ์การตัดสินใจภายใต้บริบทที่เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ซึ่งอาจช่วยลดข้อจำกัดด้านความเป็นอัตวิสัยของการกำหนดน้ำหนักโดยผู้เชี่ยวชาญเพียงอย่างเดียว

ขณะเดียวกัน เทคโนโลยี Large Language Models (LLMs) อาจถูกประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มความสามารถในการปฏิสัมพันธ์ระหว่างผู้ใช้งานกับระบบในรูปแบบภาษาธรรมชาติ (Natural Language Interaction) เช่น การสอบถามข้อมูล การอธิบายเหตุผลของผลการจัดอันดับ การสรุปผลการวิเคราะห์เชิงความยั่งยืน หรือการให้คำแนะนำเบื้องต้นในการเลือกผู้ประกอบการจัดการของเสีย ซึ่งจะช่วยลดความซับซ้อนของการใช้งานระบบและเพิ่มการเข้าถึงของผู้ใช้งานที่ไม่มีพื้นฐานด้านเทคนิค

นอกจากนี้ LLMs ยังสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงข้อความ (Unstructured Data) จากแหล่งข้อมูลต่าง ๆ เช่น ข้อเสนอแนะของผู้ใช้งาน รายงานด้านสิ่งแวดล้อม เอกสาร ESG หรือข้อกำหนดด้านกฎหมาย เพื่อสนับสนุนการสกัดองค์ความรู้ (Knowledge Extraction) และการอัปเดตฐานความรู้ของระบบแบบอัตโนมัติ ซึ่งอาจช่วยเพิ่มความทันสมัยและความสามารถในการปรับตัวของระบบ DSS ในระยะยาว

ในอนาคต การบูรณาการ AI, LLMs, GIS และข้อมูลแบบการปรับปรุงข้อมูลแบบเวลาจริง อาจนำไปสู่การพัฒนา EcoRanker DSS ให้เป็นแพลตฟอร์มอัจฉริยะที่สามารถวิเคราะห์ เรียนรู้ อธิบายผลการตัดสินใจ และสนับสนุนการกำหนดนโยบายด้านการจัดการของเสียและเศรษฐกิจหมุนเวียนได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

5.2.4 การบูรณาการเชิงนโยบายและกลไกการจูงใจผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย

แม้ว่าระบบ EcoRanker DSS จะสามารถสนับสนุนการตัดสินใจในการคัดเลือกผู้ประกอบการจัดการของเสียจากการก่อสร้างได้อย่างเป็นระบบ โปร่งใส และตรวจสอบได้ แต่การผลักดันให้เกิดการใช้งานจริงในระดับอุตสาหกรรมยังจำเป็นต้องอาศัยกลไกเชิงนโยบายและแรงจูงใจ (incentive mechanisms) เพื่อส่งเสริมให้ผู้ก่อให้เกิดของเสียและผู้ประกอบการจัดการของเสียเข้ามามีส่วนร่วมในระบบอย่างต่อเนื่อง

ในบริบทของการจัดการของเสียจากการก่อสร้าง การตัดสินใจของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียมักเกี่ยวข้องกับต้นทุน ระยะเวลา ความสะดวก และผลประโยชน์ทางธุรกิจควบคู่กับประเด็นด้านสิ่งแวดล้อม ดังนั้น การสร้างแรงจูงใจเชิงนโยบายจึงมีบทบาทสำคัญในการสนับสนุนการเปลี่ยนผ่านจากระบบการกำจัดของเสียแบบดั้งเดิมไปสู่แนวทางเศรษฐกิจหมุนเวียน

ในอนาคต ระบบ EcoRanker DSS อาจถูกเชื่อมโยงกับ กลไกด้านสิ่งแวดล้อมและความยั่งยืน เช่น ระบบการจัดซื้อจัดจ้างสีเขียว (Green Procurement) เกณฑ์การประเมินด้าน

สิ่งแวดล้อม สังคม และธรรมาภิบาล (ESG) ระบบการรับรองอาคารเขียว หรือ มาตรการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยองค์กรหรือโครงการที่ใช้ระบบในการบริหารจัดการของเสียอย่างเป็นระบบ อาจได้รับ สิทธิประโยชน์เพิ่มเติม เช่น คะแนนด้านเทคนิคในการประมูล สิทธิประโยชน์ด้านสิ่งแวดล้อม หรือ การได้รับการพิจารณาในฐานะผู้รับเหมาที่มีความโดดเด่นด้านความยั่งยืน

นอกจากนี้ ระบบยังสามารถพัฒนาไปสู่ แพลตฟอร์มกลางสำหรับติดตามและบริหารจัดการข้อมูล ด้าน การรีไซเคิล การลดการฝังกลบ และการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากของเสียคอนกรีต เพื่อสนับสนุน การจัดทำรายงานด้านสิ่งแวดล้อม สังคม และธรรมาภิบาล (ESG) การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร (Carbon Footprint for Organization: CFO) และ การกำหนดนโยบายด้านการจัดการของเสีย ทั้งในระดับองค์กรและระดับประเทศ

ดังนั้น งานวิจัยในอนาคตควรให้ความสำคัญกับการพัฒนากลไกเชิงนโยบาย แรงจูงใจทางเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อม รวมถึงแนวทางการสร้างการมีส่วนร่วมของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย เพื่อสนับสนุนการนำระบบ DSS ไปใช้งานจริงในระดับอุตสาหกรรมและส่งเสริมการจัดการของเสียอย่างยั่งยืนในระยะยาว

5.2.5 การประยุกต์ใช้งานจริงและการขยายผลในระดับอุตสาหกรรม

ในอนาคต ควรมีการนำระบบ EcoRanker DSS ไปทดลองใช้งานจริงในโครงการที่หลากหลายและต่อเนื่อง เพื่อประเมินประสิทธิภาพเชิงปฏิบัติการ รวมถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจริงต่อกระบวนการตัดสินใจและประสิทธิภาพในการจัดการของเสีย ซึ่งอาจดำเนินการในรูปแบบของการศึกษาเชิงภาคสนามหรือการติดตามผลระยะยาว

นอกจากนี้ ควรมีการขยายขอบเขตของระบบไปยังการจัดการของเสียประเภทอื่นนอกเหนือจากของเสียคอนกรีต รวมถึงการบูรณาการแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน ระบบการจัดการคาร์บอน และแนวคิด ESG เพื่อยกระดับศักยภาพของระบบให้สามารถรองรับการประยุกต์ใช้งานในระดับอุตสาหกรรมและระดับนโยบายได้อย่างครอบคลุมมากยิ่งขึ้น

โดยสรุป การพัฒนาต่อยอดในอนาคตจะมีบทบาทสำคัญในการยกระดับ EcoRanker DSS จากระบบต้นแบบเชิงวิจัยไปสู่แพลตฟอร์มอัจฉริยะที่สามารถรองรับการตัดสินใจทั้งในระดับปฏิบัติการ ระดับองค์กร และระดับนโยบายได้อย่างมีประสิทธิภาพ โปร่งใส และสอดคล้องกับแนวทางการพัฒนาอย่างยั่งยืนในระยะยาว

เอกสารอ้างอิง

[1] Saka, N & Adegbembo T. F. (2022). An assessment of the impact of the construction sector on the gross domestic product (GDP) of Nigeria. *Journal of Surveying, Construction & Property*. https://doi.org/10.22452/jscp.vol13no1.4.

[2] Vasilca, I., Nen, M., Chivu, O., Radu, V., Simion, C., & Marinescu, N. (2021). The Management of Environmental Resources in the Construction Sector: An Empirical Model. *Energies, 14*, 2489. https://doi.org/10.3390/en14092489.

[3] Rykko-Polak, I., Komala, W., & Białowiec, A. (2022). The Reuse of Biomass and Industrial Waste in Biocomposite Construction Materials for Decreasing Natural Resource Use and Mitigating the Environmental Impact of the Construction Industry: A Review. *Materials, 15*. https://doi.org/10.3390/ma15124078.

[4] Ragossnig, A. (2020). Construction and demolition waste – Major challenges ahead!. *Waste Management & Research, 38*, 345 - 346. https://doi.org/10. 1177/0734242x20910309.

[5] Chen, L., Huang, L., Hua, J., Chen, Z., Wei, L., Osman, A., Fawzy, S., Rooney, D., Dong, L., & Yap, P. (2023). Green construction for low-carbon cities: a review. *Environmental Chemistry Letters, 21*, 1627-1657. https://doi.org/10. 1007/s10311-022-01544-4.

[6] Wang, J., Wu, H., Duan, H., Zillante, G., Zuo, J.,Yuan, H., 2018. Combining Life Cycle Assessment and Building Information Modelling to account for carbon emission of building demolition waste: a case study. *Journal of Cleaner Production,* 172, 3154–3166.

[7] Duan, H., & Li, J. (2016). Construction and demolition waste management: China's lessons. *Waste Management & Research, 34*, 397 - 398. https:// doi.org /10.1177/0734242x16647603.

[8] Akhtar, A., & Sarmah, A. (2018). Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. *Journal of Cleaner Production*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro. 2018.03.085.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[9] Zhang, C., Hu, M., Di Maio, F., Sprecher, B., Yang, X., & Tukker, A. (2021). An overview of the waste hierarchy framework for analyzing the circularity in construction and demolition waste management in Europe. *The Science of the total environment, 803*, 149892. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149892.

[10] Ting, S., Sakawi, A., Lau, H., & Whyte, A. (2022). Minimisation of Construction Waste Using the Principles of Waste Management. *ASM Science Journal*. https://doi.org/10.32802/asmscj.2022.1352.

[11] Uyasatean, U., & Utwarujikulchai, U. (2007). Estimation of building-related C&D waste generation and composition in Bangkok. *Nat. Resour. J*, *5*, 133-140.

[12] Kofoworola, O., & Gheewala, S. (2009). Estimation of construction waste generation and management in Thailand. *Waste management, 29 2*, 731-8 . https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.07.004.

[13] Yukalang, N., Clarke, B., & Ross, K. (2018). Solid Waste Management Solutions for a Rapidly Urbanizing Area in Thailand: Recommendations Based on Stakeholder Input. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 15*. https://doi.org/10.3390/ijerph15071302.

[14] Esa, M. R., Halog, A., & Rigamonti, L. (2017). Developing strategies for managing construction and demolition wastes in Malaysia based on the concept of circular economy. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, *19*(3), 1144-1154.

[15] Hoang, N., Ishigaki, T., Kubota, R., Yamada, M., & Kawamoto, K. (2019). A review of construction and demolition waste management in Southeast Asia. *Journal of Material Cycles and Waste Management, 22*, 315 - 325. https://doi.org/10.1007/s10163-019-00914-5.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[16] Purchase, C., Zulayq, D., Kowalewski, M., Berenjian, A., Tarighaleslami, A., & Seifan, M. (2021). Circular Economy of Construction and Demolition Waste: A Literature Review on Lessons, Challenges, and Benefits. *Materials, 15*. https://doi.org/10.3390/ma15010076.

[17] Kabirifar, K., Mojtahedi, M., Wang, C., & Tam, V. (2020). Construction and demolition waste management contributing factors coupled with reduce, reuse, and recycle strategies for effective waste management: A review. *Journal of Cleaner Production*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121265.

[18] Patil, Y., Dakwale, V., & Ralegaonkar, R. (2024). Recycling Construction and Demolition Waste in the Sector of Construction. *Advances in Civil Engineering*. https://doi.org/10.1155/2024/6234010.

[19] Zhang, C., Hu, M., Van Der Meide, M., Di Maio, F., Yang, X., Gao, X., Li, K., Zhao, H., & Li, C. (2022). Life cycle assessment of material footprint in recycling: A case of concrete recycling. *Waste management, 155*, 311-319 . https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.10.035.

[20] Tran, C., Illankoon, I., & Tam, V. (2025). Decoding Concrete's Environmental Impact: A Path Toward Sustainable Construction. *Buildings*. https://doi.org/10.3390/buildings15030442.

[21] Sanguino, R., Barroso, A., Fernández-Rodríguez, S., & Sánchez-Hernández, M. (2020). Current trends in economy, sustainable development, and energy: a circular economy view. *Environmental Science and Pollution Research, 27*, 1-7. https://doi.org/10.1007/s11356-019-07074-x.

[22] Edyvean, R. G., Apiwatanapiwat, W., Vaithanomsat, P., Boondaeng, A., Janchai, P., & Sophonthammaphat, S. (2023). The bio-circular green economy model in thailand–a comparative review. *Agriculture and Natural Resources*, *57*(1), 51-64.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[23] Weerakoon, T., Zvirgzdinš, J., Lapuke, S., Wimalasena, S., & Drukis, P. (2025). Integrating Circular Economy (CE) Principles into Construction Waste Management (CWM) Through Multiple Criteria Decision-Making (MCDM). *Sustainability*. https://doi.org/10.3390/su17177770.

[24] Özdemir, A., Özkan, A., Günkaya, Z., & Banar, M. (2020). Decision-making for the selection of different leachate treatment/management methods: the ANP and PROMETHEE approaches. *Environmental Science and Pollution Research, 27*, 19798-19809. https://doi.org/10.1007/s11356-020-08524-7.

[25] Papamichael, I., Voukkali, I., Loizia, P., & Zorpas, A. (2023). Construction and demolition waste framework of circular economy: A mini review. *Waste Management & Research, 41*, 1728 - 1740. https://doi.org/10.1177/0734242x231190804.

[26] Aslam, M., Huang, B., & Cui, L. (2020). Review of construction and demolition waste management in China and USA. *Journal of environmental management, 264*, 110445. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110445.

[27] Caro, D., Lodato, C., Damgaard, A., Cristóbal, J., Foster, G., Flachenecker, F., & Tonini, D. (2023). Environmental and socio-economic effects of construction and demolition waste recycling in the European Union. *The Science of the total environment*, 168295. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168295.

[28] Spišáková, M., Mandičák, T., Mésároš, P., & Špak, M. (2022). Waste Management in a Sustainable Circular Economy as a Part of Design of Construction. *Applied Sciences*. https://doi.org/10.3390/app12094553.

[29] Kryeziu, D., Selmani, F., Mujaj, A., & Kondi, I. (2023). Recycled Concrete Aggregates: A Promising and Sustainable Option for the Construction Industry. *Journal of Human, Earth, and Future*. https://doi.org/10.28991/hef-2023-04-02-03.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[30] Past, V., Yaghmaeian, K., Naderi, M., & Naderi, N. (2023). Management of the construction and demolition waste (CDW) and determination of the best disposal alternative by FAHP (Fuzzy Analytic Hierarchy Process): A case study of Tehran, Iran. *Journal of the Air & Waste Management Association, 73*, 271 - 284. https://doi.org/10.1080/10962247.2023.2178542.

[31] Sereewatthanawut, I., Ajayi, B., Emmanuel, B., Bunphot, A., Chayutthanabun, A., Niyomukiza, J., & Chinda, T. (2025). Sustainable Material Recovery from Demolition Waste: Knowledge Management and Insights from a Public Sector Building Renovation. *Buildings*. https://doi.org/10.3390/buildings15173167.

[32] MacArthur, E. (2013). Towards the circular economy. *Journal of industrial ecology*, *2*(1), 23-44.

[33] Sariatli, F. (2017). Linear Economy Versus Circular Economy: A Comparative and Analyzer Study for Optimization of Economy for Sustainability. *Visegrad Journal on Bioeconomy and Sustainable Development, 6*, 31 - 34. https://doi.org/10.1515/vjbsd-2017-0005.

[34] Ginga, C., Ongpeng, J., & Daly, M. (2020). Circular Economy on Construction and Demolition Waste: A Literature Review on Material Recovery and Production. *Materials, 13*. https://doi.org/10.3390/ma13132970.

[35] AlJaber, A., Martinez-Vazquez, P., & Baniotopoulos, C. (2023). Barriers and Enablers to the Adoption of Circular Economy Concept in the Building Sector: A Systematic Literature Review. *Buildings*. https://doi.org/10.3390/buildings 13112778.

[36] Martin, H., Chebrolu, D., Chadee, A., & Brooks, T. (2024). Too good to waste: Examining circular economy opportunities, barriers, and indicators for sustainable construction and demolition waste management. *Sustainable Production and Consumption*. https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.05.026.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[37] Oluleye, B., Chan, D., & Olawumi, T. (2022). Barriers to circular economy adoption and concomitant implementation strategies in building construction and demolition waste management: A PRISMA and interpretive structural modeling approach. *Habitat International*. https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2022.102615.

[38] Balasbaneh, A., Aldrovandi, S., & Sher, W. (2025). A Systematic Review of Implementing Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) Approaches for the Circular Economy and Cost Assessment. *Sustainability*. https://doi.org/10.3390/su17115007.

[39] Torkayesh, A., Rajaeifar, M., Rostom, M., Malmir, B., Yazdani, M., Suh, S., & Heidrich, O. (2022). Integrating life cycle assessment and multi criteria decision making for sustainable waste management: Key issues and recommendations for future studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112819.

[40] Van Den Berg, M., Hulsbeek, L., & Voordijk, H. (2023). Decision-support for selecting demolition waste management strategies. *Buildings and Cities*. https://doi.org/10.5334/bc.318.

[41] Rayhan, D., & Bhuiyan, I. (2024). A framework for evaluation of construction and demolition waste management alternatives using MCDA techniques in the context of Dhaka City. *International Journal of Construction Management, 25*, 481 - 493. https://doi.org/10.1080/15623599.2024.2337083.

[42] Purvis, B., & Genovese, A. (2023). Better or different? A reflection on the suitability of indicator methods for a just transition to a circular economy. *Ecological Economics*. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2023.107938.

[43] Zhao, X. (2021). Stakeholder-Associated Factors Influencing Construction and Demolition Waste Management: A Systematic Review. *Buildings, 11*, 149. https://doi.org/10.3390/buildings11040149.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[44] Tafesse, S., Girma, Y., & Dessalegn, E. (2022). Analysis of the socio-economic and environmental impacts of construction waste and management practices. *Heliyon, 8*. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09169.

[45] Wahjoedi, T. (2022). Improve customer satisfaction by quality functions deployment: Case in Indonesian SMEs. *World Journal of Advanced Research and Reviews*. https://doi.org/10.30574/wjarr.2022.13.1.0093.

[46] Taherdoost, H., & Madanchian, M. (2023). Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Methods and Concepts. *Encyclopedia*. https://doi.org/10.3390/encyclopedia 3010006.

[47] Zlaugotne, B., Zihare, L., Balode, L., Kalnbalkite, A., Khabdullin, A., & Blumberga, D. (2020). Multi-Criteria Decision Analysis Methods Comparison. *Environmental and Climate Technologies, 24*, 454 - 471. https://doi.org/10.2478/rtuect-2020-0028.

[48] Huang, I., Keisler, J., & Linkov, I. (2011). Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: ten years of applications and trends. *The Science of the total environment, 409 19*, 3578-94. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv. 2011.06.022.

[49] Akdogan, Z., & Güven, B. (2023). Multi-Criteria Decision Analysis in Assessing Watershed Scale Pollution Risk: A Review of Combined Approaches and Applications. *Environmental Reviews*. https://doi.org/10.1139/er-2023-0017.

[50] Lombardi, P., & Todella, E. (2023). Multi-Criteria Decision Analysis to Evaluate Sustainability and Circularity in Agricultural Waste Management. *Sustainability*. https://doi.org/10.3390/su152014878.

[51] Cinelli, M., Kadzinski, M., Gonzalez, M., & Słowinski, R. (2020). How to support the application of multiple criteria decision analysis? Let us start with a comprehensive taxonomy. *Omega, 96*. https://doi.org/10.1016/j.omega.2020. 102261.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[52] Rouyendegh, B., & Savalan, Ş. (2022). An Integrated Fuzzy MCDM Hybrid Methodology to Analyze Agricultural Production. *Sustainability*. https://doi.org/10.3390/su14084835.

[53] Uzun, B., Taiwo, M., Syidanova, A., & Ozsahin, D. (2021). The Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS). *Application of Multi-Criteria Decision Analysis in Environmental and Civil Engineering*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-64765-0_4.

[54] Oliveira, M., Mataloto, I., & Kanavos, P. (2019). Multi-criteria decision analysis for health technology assessment: addressing methodological challenges to improve the state of the art. *The European Journal of Health Economics, 20*, 891 - 918. https://doi.org/10.1007/s10198-019-01052-3.

[55] Odu, G. (2019). Weighting methods for multi-criteria decision making technique. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*. https://doi.org/10.4314/jasem.v23i8.7.

[56] Vinogradova, I., Podvezko, V., & Zavadskas, E. (2021). Comparative Assessment of the Stability of AHP and FAHP Methods. *Symmetry, 13*, 479. https://doi.org/10.3390/sym13030479.

[57] Chen, C., & Huang, J. (2022). Deriving Fuzzy Weights from the Consistent Fuzzy Analytic Hierarchy Process. *Mathematics*. https://doi.org/10.3390/math10193499.

[58] Chang, D. (1996). Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research, 95*, 649-655. https://doi.org/10.1016/0377-2217(95)00300-2.

[59] Kinay, A., & Tezel, B. (2021). Modification of the fuzzy analytic hierarchy process via different ranking methods. *International Journal of Intelligent Systems, 37*, 336 - 364. https://doi.org/10.1002/int.22628.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[60] Ahmed, F., & Kilic, K. (2016, April). Comparison of fuzzy extent analysis technique and its extensions with original eigen vector approach. In *International Conference on Enterprise Information Systems* (Vol. 3, pp. 174-179). SciTePress.

[61] Wind, Y., & Saaty, T. L. (1980). Marketing applications of the analytic hierarchy process. *Management science*, *26*(7), 641-658.

[62] Madanchian, M., & Taherdoost, H. (2023). A comprehensive guide to the TOPSIS method for multi-criteria decision making. *Sustainable Social Development*. https://doi.org/10.54517/ssd.v1i1.2220.

[63] Ciardiello, F., & Genovese, A. (2023). A comparison between TOPSIS and SAW methods. *Annals of Operations Research*, 1-28. https://doi.org/10.1007/s10479-023-05339-w.

[64] Demircan, B., & Yetilmezsoy, K. (2023). A Hybrid Fuzzy AHP-TOPSIS Approach for Implementation of Smart Sustainable Waste Management Strategies. *Sustainability*. https://doi.org/10.3390/su15086526.

[65] Bánhidi, Z., & Dobos, I. (2023). Sensitivity of TOPSIS ranks to data normalization and objective weights on the example of digital development. *Central European Journal of Operations Research, 32*, 29 - 44. https://doi.org/10.1007/s10100-023-00876-y.

[66] Loizia, P., Voukkali, I., Zorpas, A., Pedreño, J., Chatziparaskeva, G., Inglezakis, V., Vardopoulos, I., & Doula, M. (2020). Measuring the level of environmental performance in insular areas, through key performed indicators, in the framework of waste strategy development. *The Science of the total environment, 753*, 141974. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141974.

[67] Zhang, J., Qin, Q., Li, G., & Tseng, C. (2021). Sustainable municipal waste management strategies through life cycle assessment method: A review. *Journal of environmental management, 287*, 112238. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112238.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[68] Evola, G., Torrisi, M., Costanzo, V., Lazzaro, M., Arnone, D., & Margani, G. (2025). A Decision Support Tool to Assess the Energy Renovation Performance Through a Timber-Based Solution for Concrete-Framed Buildings. *Energies*. https://doi.org/10.3390/en18112839.

[69] Bastianoni, S., Marchi, M., Caro, D., Casprini, P., & Pulselli, F. (2014). The connection between 2006 IPCC GHG inventory methodology and ISO 14064-1 certification standard – A reference point for the environmental policies at sub-national scale. *Environmental Science & Policy, 44*, 97-107. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2014.07.015.

[70] Rybnytska, O., Burstein, F., Rybin, A., & Zaslavsky, A. (2018). Decision support for optimizing waste management. *Journal of Decision Systems, 27*, 68 - 78. https://doi.org/10.1080/12460125.2018.1464312.

[71] Wang, H., Yi, W., & Liu, Y. (2022). Optimal Route Design for Construction Waste Transportation Systems: Mathematical Models and Solution Algorithms. *Mathematics*. https://doi.org/10.3390/math10224340.

[72] Díaz-Vázquez, D., Carrillo-Nieves, D., Orozco-Nunnelly, D. A., Senés-Guerrero, C., & Gradilla-Hernández, M. S. (2021). An integrated approach for the assessment of environmental sustainability in agro-industrial waste management practices: the case of the tequila industry. *Frontiers in Environmental Science*, *9*, 682093.

[73] Maurya, A., & Kumar, A. (2024). The Role of GIS in the Study of Sustainable Development and Environmental Management. *International Journal For Multidisciplinary Research*. https://doi.org/10.36948/ijfmr.2024.v06i06.32879.

[74] Dell'Ovo, M., Capolongo, S., & Oppio, A. (2018). Combining spatial analysis with MCDA for the siting of healthcare facilities. *Land Use Policy*. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.02.044.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[75] Burrough, P. (2001). GIS and geostatistics: Essential partners for spatial analysis. *Environmental and Ecological Statistics, 8*, 361-377. https://doi.org/10.1023/a:1012734519752.

[76] Massei, G., Rocchi, L., Paolotti, L., Greco, S., & Boggia, A. (2014). Decision support systems for environmental management: a case study on wastewater from agriculture. *Journal of Environmental Management, 146*, 491-504. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.08.012.

[77] Fernando, J., & Baldelovar, M. (2022). Decision Support System: Overview, Different Types and Elements. *TechnoareteTransactions on Intelligent Data Mining and Knowledge Discovery*. https://doi.org/10.36647/ttidmkd/02.02.a003.

[78] Adu, T., Mensah, L., Rockson, M., & Kemausuor, F. (2025). Decision support systems for waste-to-energy technologies: A systematic literature review of methods and future directions for sustainable implementation in Ghana. *Heliyon, 11*. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42353.

[79] Banias, G., Achillas, C., Vlachokostas, C., Moussiopoulos, N., & Papaioannou, I. (2011). A web-based Decision Support System for the optimal management of construction and demolition waste. *Waste management, 31 12*, 2497-502. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.07.018.

[80] Sojda, R. (2007). Empirical evaluation of decision support systems: Needs, definitions, potential methods, and an example pertaining to waterfowl management. *Environ. Model. Softw., 22*, 269-277. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2005.07.023.

[81] Ghorayeb, A., Darbyshire, J., Wronikowska, M., & Watkinson, P. (2023). Design and validation of a new Healthcare Systems Usability Scale (HSUS) for clinical decision support systems: a mixed-methods approach. *BMJ Open, 13*. https://doi.org/10.1136/bmjopen-2022-065323.

[82] Wohlgemut, J., Pisirir, E., Kyrimi, E., Stoner, R., Marsh, W., Perkins, Z., & Tai, N. (2023). Methods used to evaluate usability of mobile clinical decision support systems for healthcare emergencies: a systematic review and qualitative synthesis. *JAMIA Open, 6*. https://doi.org/10.1093/jamiaopen/ooad051.

[83] Ji, M., Genchev, G., Huang, H., Xu, T., Lu, H., & Yu, G. (2020). Evaluation Framework for Successful Artificial Intelligence–Enabled Clinical Decision Support Systems: Mixed Methods Study. *Journal of Medical Internet Research, 23*. https://doi.org/10.2196/25929.

[84] Sohail, S., Javed, Z., Nadeem, M., Anwer, F., Farhat, F., Hussain, A., Himeur, Y., & Madsen, D. (2023). Multi-criteria decision making-based waste management: A bibliometric analysis. *Heliyon, 9*. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023. e21261.

[85] Esmail, B., & Geneletti, D. (2018). Multi‐criteria decision analysis for nature conservation: A review of 20 years of applications. *Methods in Ecology and Evolution, 9*, 42 - 53. https://doi.org/10.1111/2041-210x.12899.

[86] Han, D., Kalantari, M., & Rajabifard, A. (2024). The development of an integrated BIM-based visual demolition waste management planning system for sustainability-oriented decision-making. *Journal of Environmental Management*, *351*, 119856.

[87] Han, D., Kalantari, M., & Rajabifard, A. (2025). Improving the decision-making for sustainable demolition waste management by combining a BIM-based life cycle sustainability assessment framework and hybrid MCDA approach. Waste Management & Research, 43(7), 1086-1098.

[88] Fiore, E., Tamborrini, P., & Norese, M. F. (2016, September). Designing major appliances: A decision support model. In *2016 Electronics Goes Green 2016+(EGG)* (pp. 1-8). IEEE.

[89] D'Adamo, I., Favari, D., Gastaldi, M., & Kirchherr, J. (2024). Towards circular economy indicators: Evidence from the European Union. *Waste Management & Research*, *42*(8), 670-680.

[90] Abusmier, S. A., Jaber, M. M., Zubairu, A. M., Mustafa, M., & Abu Murshid, E. (2025). Assessing site suitability for biochar facilities in Irbid Governorate, Jordan using GIS and multicriteria decision analysis. *Discover Sustainability*, *6*(1), 1157.

[91] Kazuva, E., Zhang, J., Tong, Z., Liu, X. P., Memon, S., & Mhache, E. (2021). GIS- and MCD-based suitability assessment for optimized location of solid waste landfills in Dar es Salaam, Tanzania. *Environmental Science and Pollution Research*, *28*(9), 11259-11278.

[92] Vlachokostas, C., Michailidou, A., & Achillas, C. (2020). Multi-Criteria Decision Analysis towards promoting Waste-to-Energy Management Strategies: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110563.

[93] Newig, J., Jager, N., Challies, E., & Kochskämper, E. (2023). Does stakeholder participation improve environmental governance? Evidence from a meta-analysis of 305 case studies. *Global Environmental Change, 82*.

[94] Rovinelli, R. J., & Hambleton, R. K. (1977). On the use of content specialists in the assessment of content validity of objective tests. *Journal of Educational Measurement, 14*(2), 49–60.

[95] Vasileiou, K., Barnett, J., Thorpe, S., & Young, T. (2018). Characterizing and justifying sample size sufficiency in interview-based studies: Systematic analysis of qualitative health research over a 15-year period. *BMC Medical Research Methodology, 18*, 148. https://doi.org/10.1186/s12874-018-0594-7.

[96] Akao, Y. (1990). *Quality function deployment: Integrating customer requirements into product design*. Productivity Press.

[97] International Organization for Standardization. (2018). *ISO 9241-11:2018 ergonomics of human-system interaction—Part 11: Usability: Definitions and concepts*. ISO.

[98] Nesbit, J. C., Belfer, K., & Leacock, T. (2003). *Learning object review instrument (LORI).* E-Learning Research and Assessment Network. http://www.elera.net/eLera/Home/Articles/LORI%201.5.pdf.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[99] International Organization for Standardization. (2011). *ISO/IEC 25010:2011 systems and software engineering—Systems and software quality requirements and evaluation (SQuaRE)—System and software quality models*. ISO.

[100] International Organization for Standardization. (2011). *ISO/IEC/IEEE 42010:2011 systems and software engineering—Architecture description*. ISO.

[101] Ubaldi, B., & Okubo, T. (2020). *OECD digital government index (DGI): Methodology and 2019 results*. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/4de9f5bb-en.

[102] International Organization for Standardization. (2006). *ISO/IEC 14764:2006 software engineering—Software life cycle processes—Maintenance*. ISO.

[103] García-Orozco, S., Vargas-Gutiérrez, G., Ordóñez-Sánchez, S., & Silva, R. (2023). Using multi-criteria decision making in quality function deployment for offshore renewable energies. *Energies, 16*(18), 6533. https://doi.org/10.3390/en16186533.

[104] Finkbeiner, M., Inaba, A., Tan, R., Christiansen, K., & Klüppel, H. J. (2006). The new international standards for life cycle assessment: ISO 14040 and ISO 14044. *The International Journal of Life Cycle Assessment, 11*(2), 80–85. https://doi.org/10.1065/lca2006.02.002.

[105] World Wide Web Consortium. (n.d.). Internationalization. Retrieved November 2, 2025, from https://www.w3.org/International/.

[106] Hauser, J. R., & Clausing, D. (1988). The house of quality. *Harvard Business Review, 66*(3), 63–73.

[107] Khoshand, A., Khanlari, K., Abbasianjahromi, H., & Zoghi, M. (2020). Construction and demolition waste management: Fuzzy Analytic Hierarchy Process approach. *Waste Management & Research, 38*, 773 - 782. https://doi.org/10.1177/0734242x20910468.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[108] Boonkanit, P., & Suthiluck, K. (2023). Developing a Decision-Making Support System for a Smart Construction and Demolition Waste Transition to a Circular Economy. *Sustainability*. https://doi.org/10.3390/su15129672.

[109] Abdullah, L., & Najib, L. (2014). A new preference scale of intuitionistic fuzzy analytic hierarchy process in multi-criteria decision making problems. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 26*, 1039 - 1049. https://doi.org/10.3233/ifs-130796.

[110] Intergovernmental Panel on Climate Change. (2013). *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (T. F. Stocker et al., Eds.). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.

[111] Thailand Greenhouse Gas Management Organization (Public Organization). (2022). *Guidelines for organizational carbon footprint assessment*. https://www.tgo.or.th/

[112] Oberkampf, W., Trucano, T., & Hirsch, C. (2004). Verification, Validation, and Predictive Capability in Computational Engineering and Physics. *Applied Mechanics Reviews, 57*, 345-384. https://doi.org/10.1115/1.1767847.

[113] Ahmad, N., Hamid, N., & Lokman, A. (2021). Performing Usability Evaluation on Multi-Platform Based Application for Efficiency, Effectiveness, and Satisfaction Enhancement. *Int. J. Interact. Mob. Technol., 15*, 103. https://doi.org/10.3991/ijim.v15i10.20429.

[114] Kalankesh, L., Nasiry, Z., Fein, R., & Damanabi, S. (2020). Factors Influencing User Satisfaction with Information Systems: A Systematic Review. *Galen Medical Journal, 9*, e1686 - e1686. https://doi.org/10.31661/gmj.v9i0.1686.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[115] DeLone, W. H., & McLean, E. R. (2003). The DeLone and McLean model of information systems success: A ten-year update. *Journal of Management Information Systems, 19*(4), 9–30. https://doi.org/10.1080/07421222.2003.11045748.

[116] Petter, S., DeLone, W., & McLean, E. (2008). Measuring information systems success: Models, dimensions, measures, and interrelationships. *European Journal of Information Systems, 17*(3), 236–263. https://doi.org/10.1057/ejis.2008.15.

[117] Shneiderman, B. (2020). Human-centered artificial intelligence: Reliable, safe & trustworthy. *International Journal of Human–Computer Interaction, 36*(6), 495–504. https://doi.org/10.1080/10447318.2020.1741118.

[118] Abdul, A., Vermeulen, J., Wang, D., Lim, B. Y., & Kankanhalli, M. (2020). Trends and trajectories for explainable, accountable and intelligible systems: An HCI research agenda. *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1–18. https://doi.org/10.1145/3313831.3376493.

[119] Adadi, A., & Berrada, M. (2018). Peeking inside the black-box: A survey on explainable artificial intelligence (XAI). *IEEE Access, 6*, 52138–52160. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2870052.

[120] Arrieta, A. B., Díaz-Rodríguez, N., Del Ser, J., Bennetot, A., Tabik, S., Barbado, A., García, S., Gil-López, S., Molina, D., Benjamins, R., Chatila, R., & Herrera, F. (2020). Explainable Artificial Intelligence (XAI): Concepts, taxonomies, opportunities and challenges toward responsible AI. *Information Fusion, 58*, 82–115. https://doi.org/10.1016/j.inffus.2019.12.012.

[121] Rai, A. (2020). Explainable AI: From black box to glass box. *Journal of the Academy of Marketing Science, 48*(1), 137–141. https://doi.org/10.1007/s11747-019-00710-5.

[122] Tullis, T., & Albert, W. (2021). *Measuring the user experience: Collecting, analyzing, and presenting usability metrics* (3rd ed.). Morgan Kaufmann.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[123] Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling, 127*, 221–232. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005.

[124] Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). Climate change 2014: Mitigation of climate change. Cambridge University Press.

[125] Govindan, K., Khodaverdi, R., & Vafadarnikjoo, A. (2015). Intuitionistic fuzzy based DEMATEL method for developing green practices and performances in a green supply chain. *Expert Systems with Applications, 42*(20), 7207–7220. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.04.030.

[126] Lemer, A. (2015). Life Cycle Costing: For the Analysis, Management and Maintenance of Civil Engineering Infrastructure. *Construction Management and Economics, 33*, 689 - 691. https://doi.org/10.1080/01446193.2015.1085069.

[127] Gutierrez-Lopez, J., McGarvey, R., Costello, C., & Hall, D. (2023). Decision Support Frameworks in Solid Waste Management: A Systematic Review of Multi-Criteria Decision-Making with Sustainability and Social Indicators. *Sustainability*. https://doi.org/10.3390/su151813316.

[128] Velasquez, M., & Hester, P. T. (2013). An analysis of multi-criteria decision making methods. *International Journal of Operations Research, 10*(2), 56–66.

[129] Albahri, A. S., Duhaim, A. M., Fadhel, M. A., Alnoor, A., Baqer, N. S., Alzubaidi, L., Alamoodi, A. H., Bai, J., Salhi, A., Santamaría, J., Gupta, D., Kumar, Y., Habib, M. A., Albahri, O. S., & Zaidan, A. A. (2022). A systematic review of trustworthy and explainable artificial intelligence in healthcare: Assessment of quality, bias risk, and data fusion. *Information Fusion, 77*, 156–186. https://doi.org/10.1016/j.inffus.2021.08.008.

[130] Aouadni, S., Aouadni, I., & Rebaï, A. (2019). A systematic review on supplier selection and order allocation problems. *Journal of industrial engineering international*, *15*(Suppl 1), 267-289.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[131] Kamble, S. S., Gunasekaran, A., & Gawankar, S. A. (2018). Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review identifying the current trends and future perspectives. *Process safety and environmental protection*, *117*, 408-425.

[132] Bai, C., Dallasega, P., Orzes, G., & Sarkis, J. (2020). Industry 4.0 technologies assessment: A sustainability perspective. *International journal of production economics*, *229*, 107776.

[133] Chilluri, V., Oli, S., Sharma, C., & Kumar, A. (2025). Design and Implementation of a User Centered Design Framework for Software Development. *2025 First International Conference on Advances in Computer Science, Electrical, Electronics, and Communication Technologies (CE2CT)*, 1232-1236. https://doi.org/10.1109/ce2ct64011.2025.10941419.

[134] Praseptiawan, M., Gultom, M. O. N., & Untoro, M. C. (2022). The evaluation of e-commerce using the customer satisfaction index and importance–performance analysis. *Jurnal Sisfokom, 11*(1), 60–65.

[135] Barua, T., & Rahman, M. (2023). A systematic literature review of user-centric design in digital business systems enhancing accessibility, adoption, and organizational impact. *American Journal of Scholarly Research and Innovation.* https://doi.org/10.63125/36w7fn47.

[136] Widodo, K., Rachmawati, A., & Wijayanti, L. (2022). Using the Technology Acceptance Model to Analyze Information System Performance. *International Journal of Business, Humanities, Education and Social Sciences (IJBHES)*. https://doi.org/10.46923/ijbhes.v4i2.198.

[137] Melgis, S., Aryani, R., Lestari, D., & Abdulnazar, M. (2024). Analyzing the Quality of Academic Information Systems on System Success. *INTENSIF: Jurnal Ilmiah Penelitian dan Penerapan Teknologi Sistem Informasi*. https://doi.org/10.29407/intensif.v8i1.21512.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[138] Curum, B., & Khedo, K. (2020). Cognitive load management in mobile learning systems: principles and theories. *Journal of Computers in Education, 8*, 109 - 136. https://doi.org/10.1007/s40692-020-00173-6.

[139] World Wide Web Consortium (W3C). (2023). *Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) 2.2*. https://www.w3.org/TR/WCAG22/.

[140] Patan, L. (2024). Designing Inclusive Web Applications with Accessibility in Mind. *International Journal for Multidisciplinary Research*. https://doi.org/ 10.36948/ijfmr. 2024.v06i05.29091.

[141] Sauer, J., Sonderegger, A., & Schmutz, S. (2020). Usability, user experience and accessibility: towards an integrative model. *Ergonomics, 63*, 1207 - 1220. https://doi.org/10.1080/00140139.2020.1774080.

[142] Shivakumar, S., & Suresh, P. V. (2018). A survey and analysis of techniques and tools for web performance optimization. *Journal of Information Organization*, *8*(2), 31.

[143] Google. (2021). *Web performance best practices.* Google Developers. https://developers.google.com/.

[144] Nichifor, E., Lixăndroiu, R., Chitu, I., Brătucu, G., & Trifan, A. (2021). How Does Mobile Page Speed Shape in-between Touchpoints in the Customer Journey? A Research Regarding the Most Trusted Retailers in Romania. *J. Theor. Appl. Electron. Commer. Res., 16*, 1369-1389. https://doi.org/10.3390/jtaer16050077.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก หนังสือกรับรองจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์
ภาคผนวก ข แบบสอบถามรูปแบบ google form ที่ใช้ในงานวิจัย
ภาคผนวก ค เอกสารประกอบการตีพิมพ์ในงานประชุมวิชาการนานาชาติ
ภาคผนวก ง หลักฐานการตีพิมพ์บทความวิจัยในวารสารระดับนานาชาติ
ภาคผนวก จ หลักฐานการตีพิมพ์บทความวิจัยในวารสารวิชาการระดับชาติ

ภาคผนวก ก

หนังสือกรับรองจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์

REC/IRB No.๐๕๖/๖๗

บันทึกข้อความ

ส่วนราชการ คณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

ที่ อว ๐๖๕๑.๓๐๓(๖)/๑๗๓๔ **วันที่** ๑๓ ธันวาคม ๒๕๖๗

เรื่อง ขอส่งเอกสารรับรองจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ โครงการรหัส ๐๕๖/๒๕๖๗

เรียน นายกฤตชัย สุทธิลักษณ์

ตามที่ได้ยื่นขอพิจารณาจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ โครงการวิจัย รหัส ๐๕๖/๒๕๖๗ เรื่อง การพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจบนเว็บในการจัดของเสียจากการก่อสร้างตามแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน : กรณีศึกษาพื้นที่ภาคกลางของประเทศไทย เมื่อวันที่ ๓๐ ตุลาคม ๒๕๖๗ นั้น

ในการนี้ ฝ่ายเลขานุการคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ ขอส่งเอกสารรับรองจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ หมายเลข COA No. ๐๕๑ RMUTTO REC No. ๐๕๖/๒๕๖๗ วันที่รับรอง ๑๑ ธันวาคม ๒๕๖๗ วันหมดอายุ ๑๑ ธันวาคม ๒๕๖๘ โดยเอกสารการรับรองมีอายุ ๑ ปี โดยขอให้ท่านรายงานความก้าวหน้าในการดำเนินงานวิจัยอย่างน้อย ๑ ครั้ง ภายในวันที่ ๙ มิถุนายน ๒๕๖๘ และเมื่อท่านได้ดำเนินการโครงการวิจัยแล้วเสร็จภายในระยะเวลา ๑ ปี ขอให้ท่านรายงานสรุปผลการวิจัยและแจ้งปิดโครงการวิจัยมายังคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก หรือกรณีที่ท่านดำเนินการโครงการวิจัยไม่แล้วเสร็จภายในระยะเวลา ๑ ปี ขอให้ท่านดำเนินการขอต่ออายุเอกสารการรับรองก่อนล่วงหน้า ภายใน ๓๐ วัน (ภายในวันที่ ๑๑ พฤศจิกายน ๒๕๖๘) ก่อนเอกสารการรับรองหมดอายุ

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบและดำเนินการในส่วนที่เกี่ยวข้องต่อไป

(รองศาสตราจารย์ พันเอกถวัลย์ ฤกษ์งาม)
ประธานคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

AF 11-04

COA No. 051
RMUTTO REC No. 056/2567

คณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
43 หมู่ 6 ตำบลบางพระ อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี โทร. 033-136099 ต่อ 1185

เอกสารรับรองโครงการวิจัย

คณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ให้การรับรองโครงการวิจัยตามแนวทางหลักจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ที่เป็นมาตรฐานสากล ได้แก่ Declaration of Helsinki, The Belmont Report, CIOMS Guideline และ International Conference on Harmonization in Good Clinical Practice หรือ ICH-GCP

ชื่อโครงการวิจัย : การพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจบนเว็บในการจัดของเสียจากการก่อสร้างตามแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน : กรณีศึกษาพื้นที่ภาคกลางของประเทศไทย

รหัสโครงการวิจัย: -

ผู้วิจัยหลัก : นายกฤตชัย สุทธิลักษณ์

สังกัดหน่วยงาน : สาขาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

วิธีทบทวน : แบบเร็ว (Expedited)

รายงานความก้าวหน้า : ส่งรายงานความก้าวหน้าอย่างน้อย 1 ครั้ง/ปี หรือส่งรายงานฉบับสมบูรณ์หากดำเนินโครงการเสร็จสิ้นก่อน 1 ปี

เอกสารรับรอง :

1. แบบเสนอโครงการวิจัย	ฉบับลงวันที่ 11 ธันวาคม พ.ศ. 2567
2. ข้อมูลด้านจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ของโครงการวิจัย	ฉบับลงวันที่ 11 ธันวาคม พ.ศ. 2567
3. โครงการวิจัยฉบับเต็ม	ฉบับลงวันที่ 11 ธันวาคม พ.ศ. 2567
4. เอกสารชี้แจงอาสาสมัครผู้รับการวิจัย	ฉบับลงวันที่ 11 ธันวาคม พ.ศ. 2567
5. หนังสือแสดงเจตนายินยอมเข้าร่วมการวิจัย	ฉบับลงวันที่ 11 ธันวาคม พ.ศ. 2567
6. แบบสอบถาม	ฉบับลงวันที่ 11 ธันวาคม พ.ศ. 2567
7. แบบฟอร์มเปิดเผยการมีผลประโยชน์ทับซ้อน (Conflict of Interest) (กรณีไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อน)	ฉบับลงวันที่ 11 ธันวาคม พ.ศ. 2567
8. ประวัติผู้วิจัย	ฉบับลงวันที่ 11 ธันวาคม พ.ศ. 2567

ลงนาม
(รองศาสตราจารย์ พันเอกถวัลย์ ฤกษ์งาม)
ประธานกรรมการ

วันที่รับรอง : 11 ธันวาคม พ.ศ. 2567
วันหมดอายุ : 11 ธันวาคม พ.ศ. 2568

รับรองโดยคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
COA No. 051
COE No. -
RMUTTO REC No. 056/2567
วันที่รับรอง 11 ธ.ค. 2567

ภาคผนวก ข

แบบสอบถามรูปแบบ google form ที่ใช้ในงานวิจัย

แบบสอบถามประเมินความพึงพอในหลังการพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจบนเว็บ(DSS Web Application)สำหรับกลุ่มผู้เชี่ยวชาญผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย

แบบสอบถามชุดนี้จัดทำเพื่อสำรวจความพึงพอใจสำหรับกลุ่มผู้เชี่ยวชาญผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย วัตถุประสงค์เพื่อประเมินมุมมองและข้อเสนอแนะต่อระบบ DSS (Decision Support System) จากผู้ที่มีความเชี่ยวชาญหลากหลายสาขาแต่ไม่ได้อยู่ในอุตสาหกรรมก่อสร้างโดยตรง การสำรวจนี้มุ่งเน้นการเก็บข้อมูลเกี่ยวกับการใช้งานที่สะดวกและรวดเร็ว ความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ ความยืดหยุ่นในการปรับใช้งาน และการสนับสนุนเป้าหมายสำคัญ เช่น ความยั่งยืน (Sustainability) และเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) นอกจากนี้ยังมุ่งเน้นการประเมินศักยภาพของระบบ DSS ในฐานะนวัตกรรมที่สามารถขยายการใช้งานในวงกว้างและได้รับการยอมรับในเชิงวิชาการหรือวิชาชีพ แบบสำรวจนี้ยังเปิดโอกาสให้ผู้ตอบเสนอแนวทางการปรับปรุงหรือเสริมฟีเจอร์ที่อาจช่วยเพิ่มคุณค่าให้กับระบบ DSS เพื่อตอบสนองต่อความต้องการของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียในบริบทที่หลากหลายและสนับสนุนการพัฒนาระบบในอนาคตอย่างครอบคลุมและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

แบบสอบถาม ประกอบด้วยชุดคำถามจำนวน 3 ส่วน ดังนี้
ส่วนที่ 1 หนังสือแสดงความยินยอมเข้าร่วมการวิจัย
ส่วนที่ 2 ข้อมูลเบื้องต้นของผู้เชี่ยวชาญ
ส่วนที่ 3 ความพึงพอใจของผู้ใช้งานระบบสนับสนุนการตัดสินใจบนเว็บ (DSS Web Application)

* Indicates required question



ฉบับวันที่ 11 ธันวาคม 2567

ส่วนที่ 1 หนังสือแสดงความยินยอมเข้าร่วมการวิจัย

ข้าพเจ้า ได้รับทราบรายละเอียดเกี่ยวกับที่มาและวัตถุประสงค์ในการทำวิจัย รายละเอียดขั้นตอนต่างๆ ที่จะต้องปฏิบัติหรือได้รับการปฏิบัติ โดยได้อ่านรายละเอียดในเอกสารชี้แจงผู้เข้าร่วมการวิจัยโดยตลอด และได้รับคำอธิบายจากผู้วิจัย จนเข้าใจเป็นอย่างดีแล้ว ข้าพเจ้าจึงสมัครใจเข้าร่วมในโครงการวิจัยนี้ ตามที่ระบุไว้ในเอกสารชี้แจงผู้เข้าร่วมการวิจัย โดยข้าพเจ้ายินยอมตอบแบบสอบถามในโครงการนี้

ข้าพเจ้าขอยืนยันว่าข้าพเจ้ามีสัญชาติไทย ข้าพเจ้ามีสิทธิถอนตัวออกจากการวิจัยเมื่อใดก็ได้ตามความประสงค์ โดยไม่ต้องแจ้งเหตุผล ซึ่งการถอนตัวออกจากการวิจัยนั้น จะไม่มีผลกระทบในทางใดๆ ต่อข้าพเจ้าทั้งสิ้น

ข้าพเจ้าได้รับคำรับรองว่า ผู้วิจัยจะปฏิบัติต่อข้าพเจ้าตามข้อมูลที่ระบุไว้ในเอกสารชี้แจงผู้เข้าร่วมการวิจัย และข้อมูลใดๆ ที่เกี่ยวข้องกับข้าพเจ้า ผู้วิจัยจะเก็บรักษาเป็นความลับ โดยจะนำเสนอข้อมูลการวิจัยเป็นภาพรวมเท่านั้น ไม่มีข้อมูลใดในการรายงานที่จะนำไปสู่การระบุตัวข้าพเจ้า

หากข้าพเจ้าไม่ได้รับการปฏิบัติตรงตามที่ได้ระบุไว้ในเอกสารชี้แจงผู้เข้าร่วมการวิจัย ข้าพเจ้าสามารถร้องเรียนได้ที่
สำนักงานคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
สถาบันวิจัยและพัฒนา เลขที่ 43 หมู่ 6
ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110
หมายเลขโทรศัพท์ 033-136099 ต่อ 1187

1. **ท่านยืนยันที่จะเข้าร่วมการวิจัยหรือไม่** *

Mark only one oval.

- ยินยอม
- ไม่ยินยอม

ส่วนที่ 2 ข้อมูลเบื้องต้นของผู้เชี่ยวชาญ



2. ท่านอยู่ในกลุ่มผู้เชี่ยวชาญผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย กลุ่มใด *

Mark only one oval.

- 1.ผู้ใช้งานระดับปฏิบัติการ (เช่น วิศวกรประจำไซต์งาน,จป.วิชาชีพ)
- 2.เจ้าหน้าที่ด้านความยั่งยืน/ผู้จัดการด้านสิ่งแวดล้อม
- 3.ผู้มีอำนาจในการตัดสินใจทางธุรกิจ (เช่น ซีอีโอ, กรรมการบริหาร)
- 4. ผู้กำหนดนโยบายและผู้ควบคุมด้านกฎระเบียบข้อบังคับ
- 5. ผู้เชี่ยวชาญด้านไอที/นักพัฒนาซอฟต์แวร์
- 6.ผู้เชี่ยวชาญจากองค์กรไม่แสวงหาผลกำไรหรือกลุ่มสนับสนุนด้านความยั่งยืน
- 7.นักวิชาการและนักวิจัยในอุตสาหกรรมก่อสร้าง
- 8.ผู้ใช้งานจากอุตสาหกรรมอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมก่อสร้าง
- Other: _____

3. ประสบการณ์ การทำงาน *

Mark only one oval.

- 1-5
- 6–10
- 11-15
- 16-20
- above 21

ส่วนที่ 3 ความพึงพอใจของผู้ใช้งานระบบสนับสนุนการตัดสินใจบนเว็บ (DSS Web Application)



ฉบับวันที่ 11 ธันวาคม 2567
รับรองโดยคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
COA No. 051
COE No. -
RMUTTO REC No. 056/2567
วันที่รับรอง 11 ธ.ค. 2567

4. **3.1การใช้งานที่สะดวกและรวดเร็ว (Usability & Accessibility):** *

- ท่านคิดว่าระบบ DSS มีความง่ายในการใช้งานและเข้าถึงได้สะดวกหรือไม่?

Mark only one oval.

- ใช้งานง่ายมาก
- ใช้งานง่าย
- ปานกลาง
- ใช้งานยาก
- ใช้งานยากมาก

5. - การป้อนข้อมูลและการดูผลลัพธ์ทำได้รวดเร็วและไม่ซับซ้อนใช่หรือไม่? *

Mark only one oval.

- ใช่
- ไม่ใช่

6. **3.2 ความน่าเชื่อถือและประสิทธิภาพของผลลัพธ์ (Reliability & Performance):** *

- ท่านคิดว่าผลลัพธ์ที่ระบบ DSS แสดงมีความน่าเชื่อถือและสมเหตุสมผลหรือไม่?

Mark only one oval.

- น่าเชื่อถือมาก
- น่าเชื่อถือ
- ปานกลาง
- ไม่น่าเชื่อถือ
- ไม่น่าเชื่อถือเลย



7. - ระบบ DSS ตอบสนองรวดเร็วและไม่มีความล่าช้าในส่วนที่สำคัญใช่หรือไม่? *

Mark only one oval.

- ใช่
- ไม่ใช่

8. **3.3 ความสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ (Goal Alignment):** *

-ท่านคิดว่าระบบ DSS ช่วยสนับสนุนเป้าหมายด้านเศรษฐกิจหมุนเวียนได้ดีเพียงใด?

Mark only one oval.

- ดีมาก
- ดี
- ปานกลาง
- แย่
- แย่มาก

9. - ระบบ DSS สนับสนุนการตัดสินใจเชิงกลยุทธ์สำหรับการจัดการขยะได้ตรงตามเป้าหมายหรือไม่? *

Mark only one oval.

- ใช่
- ไม่ใช่



ฉบับวันที่ 11 ธันวาคม 2567

รับรองโดยคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
COA No. 031
COE No. -
RMUTTO REC No. 056/2567
วันที่รับรอง 11 ธ.ค. 2567

10. **3.4 ความปลอดภัยและความเป็นส่วนตัว (Security and Privacy):** *

-ท่านรู้สึกมั่นใจหรือไม่ว่าระบบ DSS ปกป้องข้อมูลของท่านจากการเข้าถึงโดยไม่ได้รับอนุญาต?

Mark only one oval.

- มั่นใจมาก
- มั่นใจ
- ปานกลาง
- ไม่มั่นใจ
- ไม่มั่นใจเลย

11. **3.5 การใช้งานที่ยืดหยุ่น (Flexibility):**

-ท่านคิดว่าระบบ DSS มีความยืดหยุ่นในการปรับเปลี่ยนการใช้งานตามความต้องการของผู้ใช้งานหรือไม่?

Mark only one oval.

- ยืดหยุ่นมาก
- ยืดหยุ่น
- ปานกลาง
- ไม่ยืดหยุ่น
- ไม่ยืดหยุ่นเลย



ฉบับวันที่ 11 ธันวาคม 2567
รับรองโดยคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
COA No. 051
COE No. -
RMUTTO REC No. 056/2567
วันที่รับรอง 11 ธ.ค. 2567

12. **3.6 ความยอมรับจากผู้ใช้งาน (User Acceptance):** *

- ท่านคิดว่าระบบ DSS น่าเชื่อถือและพร้อมสำหรับการใช้งานในวงกว้างหรือไม่?

Mark only one oval.

- ◯ เห็นด้วยอย่างยิ่ง
- ◯ เห็นด้วย
- ◯ ปานกลาง
- ◯ ไม่เห็นด้วย
- ◯ ไม่เห็นด้วยอย่างยิ่ง

13. - ท่านคิดว่าผู้ใช้งานในอุตสาหกรรมอื่นๆ จะยอมรับระบบ DSS นี้หรือไม่?

Mark only one oval.

- ◯ ยอมรับแน่นอน
- ◯ ยอมรับ
- ◯ ไม่แน่ใจ
- ◯ ไม่ยอมรับ
- ◯ ไม่ยอมรับแน่นอน

14. **3.7 ประเด็นด้านนวัตกรรม (Innovation Potential):**

-ท่านมองว่าระบบ DSS นี้ถือเป็นนวัตกรรมใหม่ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในงานจัดการขยะได้หรือไม่?

Mark only one oval.

- ◯ ใช่
- ◯ ไม่ใช่



15. **3.8 ความพึงพอใจโดยรวม (Overall Satisfaction):**

- โดยรวม ท่านพึงพอใจกับระบบ DSS ในมุมมองของท่านหรือไม่?

Mark only one oval.

- ◯ พอใจมาก
- ◯ พอใจ
- ◯ ปานกลาง
- ◯ ไม่พอใจ
- ◯ ไม่พอใจเลย

16. **-** หากมีข้อเสนอแนะเพิ่มเติมสำหรับการปรับปรุงระบบ DSS ท่านจะเสนออะไร? (โปรดระบุ)

17. **ชื่อ & นามสกุล***(ข้อมูลนี้จะไม่ถูกนำมาใช้เพื่อติดต่อทางด้านอื่น ใช้เฉพาะเพื่อดีดตามผลของการกรอกแบบสอบถามเท่านั้น*

18. **อีเมล** *(ข้อมูลนี้จะไม่ถูกนำมาใช้เพื่อติดต่อทางด้านอื่น ใช้เฉพาะเพื่อดีดตามผลของการกรอกแบบสอบถามเท่านั้น*

ฉบับวันที่ 11 ธันวาคม 2567



สิ้นสุดแบบสอบถาม

ขอขอบพระคุณท่านผู้เชี่ยวชาญที่ละเวลาตอบแบบสอบถามข้างต้นครับ

กระผม นายกฤตชัย สุทธิลักษณ์
บมจ.เนาวรัตน์พัฒนาการ
นักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล พระนคร
เบอร์ติดต่อ 0618235094

This content is neither created nor endorsed by Google.

Google Forms



ฉบับวันที่ 11 ธันวาคม 2567

แบบสอบถามเพื่อพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจบนเว็บ (DSS Web Application) สำหรับการจัดการของเสียจากอุตสาหกรรมก่อสร้าง

แบบสอบถามชุดนี้จัดทำเพื่อสอบถามความเห็นของผู้เชี่ยวชาญในกลุ่มความร่วมมือขององค์กรธุรกิจอุตสาหกรรมก่อสร้างไทยด้านเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy in Construction Industry- CECI)เพื่อพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจ (DSS) บนเว็บที่เลือกผู้ประกอบการจัดการขยะ

จากอุตสาหกรรมก่อสร้างและวิธีการจัดการขยะอย่างเหมาะสมที่สุด โดยข้อมูลจากแบบสอบถามและผลการศึกษานี้จะถูกนำไปใช้เพื่อเป็นประโยชน์ต่องานค้นคว้าอิสระ และ เป็นแนวทางของกลุ่ม CECI ในการจัดการของเสียก่อสร้างในอนาคต

แบบสอบถาม ประกอบด้วยชุดคำถามจำนวน 3 ส่วน ดังนี้
ส่วนที่ 1 หนังสือแสดงความยินยอมเข้าร่วมการวิจัย
ส่วนที่ 2 ข้อมูลเบื้องต้นของผู้เชี่ยวชาญ
ส่วนที่ 3 ความต้องการของผู้ใช้งานเพื่อพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจบนเว็บ (DSS Web Application)

* Indicates required question

ส่วนที่ 1 หนังสือแสดงความยินยอมเข้าร่วมการวิจัย

ข้าพเจ้า ได้รับทราบรายละเอียดเกี่ยวกับที่มาและวัตถุประสงค์ในการทำวิจัย รายละเอียดขั้นตอนต่างๆ ที่จะต้องปฏิบัติหรือได้รับการปฏิบัติ โดยได้อ่านรายละเอียดในเอกสารชี้แจงผู้เข้าร่วมการวิจัยโดยตลอด และได้รับคำอธิบายจากผู้วิจัย จนเข้าใจเป็นอย่างดีแล้ว ข้าพเจ้าจึงสมัครใจเข้าร่วมในโครงการวิจัยนี้ ตามที่ระบุไว้ในเอกสารชี้แจงผู้เข้าร่วมการวิจัย โดยข้าพเจ้ายินยอมตอบแบบสอบถามในโครงการนี้

ข้าพเจ้าขอยืนยันว่าข้าพเจ้ามีสัญชาติไทย ข้าพเจ้ามีสิทธิถอนตัวออกจากการวิจัยเมื่อใดก็ได้ตามความประสงค์ โดยไม่ต้องแจ้งเหตุผล ซึ่งการถอนตัวออกจากการวิจัยนั้น จะไม่มีผลกระทบในทางใดๆ ต่อข้าพเจ้าทั้งสิ้น

ข้าพเจ้าได้รับคำรับรองว่า ผู้วิจัยจะปฏิบัติต่อข้าพเจ้าตามข้อมูลที่ระบุไว้ในเอกสารชี้แจงผู้เข้าร่วมการวิจัย และข้อมูลใดๆ ที่เกี่ยวข้องกับข้าพเจ้า ผู้วิจัยจะเก็บรักษาเป็นความลับ โดยจะนำเสนอข้อมูลการวิจัยเป็นภาพรวมเท่านั้น ไม่มีข้อมูลใดในการรายงานที่จะนำไปสู่การระบุตัวข้าพเจ้า

หากข้าพเจ้าไม่ได้รับการปฏิบัติตรงตามที่ได้ระบุไว้ในเอกสารชี้แจงผู้เข้าร่วมการวิจัย ข้าพเจ้าสามารถร้องเรียนได้ที่
สำนักงานคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
สถาบันวิจัยและพัฒนา เลขที่ 43 หมู่ 6
ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110
หมายเลขโทรศัพท์ 033-136099 ต่อ 1187

ฉบับวันที่ 11 ธันวาคม 2567



1. **ท่านยืนยันที่จะเข้าร่วมการวิจัยหรือไม่** *

Mark only one oval.

- ยินยอม
- ไม่ยินยอม

ส่วนที่ 2 ข้อมูลเบื้อต้นของผู้เชี่ยวชาญ

2. What best describes your company position in this Thai construction industry supply chain(บริษัทของท่านอยู่ในกลุ่มใดของกลุ่มองค์กรธุรกิจอุตสาหกรรมก่อสร้าง) *

Mark only one oval.

- 1.Architect / Consultant Sector(กลุ่มบริษัทออกแบบและบริษัทที่ปรึกษา)
- 2.Developer / Owner Sector(กลุ่มบริษัทพัฒนาอสังหาริมทรัพย์/เจ้าของโครงการ)
- 3.Contractor Sector(กลุ่มบริษัทรับเหมาก่อสร้าง)
- 4.Supplier/ Distributor Sector(กลุ่มบริษัทผลิตและจัดจำหน่ายวัสดุก่อสร้าง)
- 5.Waste Management Sector(กลุ่มบริษัทบริหารจัดการของเสีย)
- Other: _____

3. Your years of experience in the construction industry?(ประสบการณ์ การทำงานในธุรกิจอุตสาหกรรมก่อสร้าง) *

Mark only one oval.

- 1-5
- 6–10
- 11-15
- 16-20
- above 21

4. Company ownership status?(ประเภทของบริษัท) *

Mark only one oval.

- Privately owned(บริษัทเอกชน)
- Partnership(ห้างหุ้นส่วน)
- Government-owned company(รัฐวิสาหกิจ)
- Public Limited Company(บริษัท มหาชน)



ฉบับวันที่ 11 ธันวาคม 2567
รับรองโดยคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
COA No. 051
COE No. -
RMUTTO REC No. 056/2567
วันที่รับรอง 11 ธ.ค. 2567

5. How old is your company?(บริษัท เริ่มดำเนินธุรกิจหรือก่อตั้งมาแล้ว กี่ปี?) *

Mark only one oval.

- 1 – 5yrs
- 6 – 10yrs
- 11 – 15yrs
- 16 - 20yrs
- above 21yrs

ส่วนที่ 3 ความต้องการของผู้ใช้งานเพื่อพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจบนเว็บ (DSS Web Application)

6. **ท่านคุ้นเคยกับกระบวนการเลือกผู้ประกอบการจัดการขยะ จากอุตสาหกรรมก่อสร้าง มากน้อยเพียงใด** *

Mark only one oval.

- ไม่คุ้นเคย
- คุ้นเคยบ้าง
- คุ้นเคยมาก

7. **ปัญหาที่ท่านพบบ่อยที่สุดในการจัดการขยะ จากอุตสาหกรรมก่อสร้าง** *(เลือกได้มากกว่าหนึ่งข้อ)* *

Check all that apply.

- ค่าใช้จ่ายในการจัดการขยะคอนกรีต
- ความพร้อมของสถานที่ในการจัดการขยะคอนกรีต(รีไซเคิล หรือ ฝังกลบ)
- ระยะทางไปยังสถานที่จัดการขยะคอนกรีต
- ข้อบังคับด้านสิ่งแวดล้อม
- การขาดเทคโนโลยีในการจัดการขยะคอนกรีต

8. **ปัญหาอื่นๆที่ท่านพบบ่อยที่สุดในการจัดการขยะ จากอุตสาหกรรมก่อสร้าง (*โปรดระบุ*)**



9. **ปัจจุบันท่านดำเนินการจัดหาผู้กำจัดขยะจากอุตสาหกรรมก่อสร้างด้วยวิธีการอะไร***(เลือกได้มากกว่าหนึ่งข้อ)* *

Check all that apply.

- [ ] การแนะนำผ่านเครือข่าย
- [ ] ออกหนังสือเชิญเสนอราคา
- [ ] สื่อสังคมออนไลน์
- [ ] สื่อสิ่งพิมพ์
- [ ] แอปพลิเคชัน
- [ ] การโฆษณาผ่าน Google Ads
- [ ] การประชาสัมพันธ์ผ่านเว็บไซต์

10. **หากท่านมีวิธีการจัดหาผู้กำจัดขยะ จากอุตสาหกรรมก่อสร้าง ด้วยวิธีการอื่นๆ *(โปรดระบุ)***

11. ท่านคิดว่าปัจจัยใดที่ส่งเสริมด้านความยั่งยืนในการจัดการขยะ **จากอุตสาหกรรมก่อสร้าง** *

Mark only one oval.

- ( ) ด้านเศรษฐกิจ
- ( ) ด้านสังคม
- ( ) ด้านสิ่งแวดล้อม
- ( ) ด้านเทคนิค

12. **ท่านคิดว่าปัจจัยใดต่อไปนี้ควรมีอิทธิพลต่อการเลือกผู้ประกอบการจัดการขยะ จากอุตสาหกรรมก่อสร้าง** *(ตอบได้มากกว่า 1 ข้อ)* *

Check all that apply.

- [ ] ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน
- [ ] ค่าใช้จ่ายในการลงทุน
- [ ] การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการจัดการ
- [ ] การใช้เชื้อเพลิงในกระบวนการจัดการ
- [ ] การสร้างงานในกระบวนการจัดการ
- [ ] การยอมรับจากสาธารณะ
- [ ] คุณภาพของขยะคอนกรีตเมื่อจัดการขั้นสุดท้าย
- [ ] ความเป็นไปได้และความเกมาะสมทางเทคนิคของการจัดการ

ฉบับวันที่ 11 ธันวาคม 2567
รับรองโดยคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
COA No. 051
COE No.
RMUTTO REC No. 056/2567
วันที่รับรอง 11 ธ.ค. 2567

13. **ท่านคิดว่าปัจจัยใดอื่นๆที่มีอิทธิพลต่อการเลือกผู้ประกอบการจัดการขยะ จากอุตสาหกรรมก่อสร้าง** *(โปรดระบุ)*

14. **ท่านต้องการเครื่องมือในการช่วยตัดสินใจเกี่ยวกับการเลือกผู้ประกอบการในการจัดการขยะจากอุตสาหกรรมก่อสร้างในปัจจุบัน** มากน้อยเพียงใด *(ให้คะแนน 1 ถึง 5 โดย 1 = น้อย และ 5 = มากที่สุด)* *

เครื่องมือดังกล่าวเป็นระบบ เว็บแอปพลิเคชัน การคัดเลือกผู้ให้บริการจัดการขยะคอนกรีตผ่านระบบออนไลน์โดยช่วยลดต้นทุนการดำเนินงานผ่านการประมวลผลอัตโนมัติและลดค่าใช้จ่ายด้านเอกสาร เพิ่มประสิทธิภาพการทำงานด้วยการเปรียบเทียบข้อมูลผู้ให้บริการได้อย่างรวดเร็ว สร้างความโปร่งใสผ่านระบบการประเมินที่เป็นมาตรฐาน ทำให้ผู้ประกอบการสามารถตัดสินใจได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำบนพื้นฐานของข้อมูลที่ครบถ้วน ส่งผลให้การจัดการขยะคอนกรีตมีประสิทธิภาพและยั่งยืนมากขึ้น

Check all that apply.

	1.	2	3.	4	5
ความต้องการเครื่องมือในการช่วยตัดสินใจ	☐	☐	☐	☐	☐



ฉบับวันที่ 11 ธันวาคม 2567
รับรองโดยคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
COA No. 051
COE No. -
RMUTTO REC No. 056/2567
วันที่รับรอง 11 ธ.ค. 2567

15. **ท่านคิดว่าคุณลักษณะต่อไปนี้มีความสำคัญต่อความเป็นมิตรกับผู้ใช้ของ DSS** เว็บแอปพลิเคชัน **มากน้อยเพียงใด** *(ให้คะแนน 1 ถึง 5 โดย 1 = ไม่สำคัญ และ 5 = สำคัญมาก)* *

รายละเอียดของคุณสมบัติที่จำเป็นที่ช่วยเพิ่มความสะดวกในการใช้งาน:

1. **การเข้าถึงที่ง่ายและเป็นลำดับ**: จัดวางหน้าและการไหลของข้อมูลให้ชัดเจนและเป็นลำดับ จะช่วยให้ผู้ใช้สามารถหาข้อมูลที่ต้องการได้ง่ายขึ้น อาจใช้ไอคอนเมนู โดยเฉพาะสำหรับผู้ใช้ที่ไม่เชี่ยวชาญด้านเทคโนโลยี
2. **แบบฟอร์มการกรอกข้อมูลที่ชัดเจน**: ออกแบบแบบฟอร์มที่เข้าใจง่ายและไม่ซับซ้อน พร้อมคำแนะนำหรือคำอธิบายให้ชัดเจนเพื่อลดความผิดพลาดในการกรอกข้อมูล โดยการแบ่งหมวดหมู่ให้ชัดเจนและใช้เมนูแบบเลื่อนลง (dropdown) ทำให้ผู้ใช้กรอกข้อมูลได้รวดเร็วโดยไม่รู้สึกวุ่นวาย
3. **ความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของอัลกอริทึม.** ระบบสนับสนุนการตัดสินใจควรใช้อัลกอริทึมที่มีความแข็งแกร่ง (เช่น WASPAS , AHP, PROMETHEE , VIKOR , TOPSIS) เพื่อรับประกันผลลัพธ์ที่แม่นยำและน่าเชื่อถือ โดยรักษาระดับความแม่นยำสูงในการจัดอันดับและประเมินผู้ประกอบการ
4. **การบูรณาการเกณฑ์อย่างครอบคลุม:** การบูรณาการเกณฑ์ที่กว้างและยืดหยุ่น (เช่น ต้นทุน ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ความเป็นไปได้ทางเทคนิค) เพื่อครอบคลุมทุกแง่มุมที่สำคัญของการคัดเลือกผู้ประกอบการจัดการขยะ
5. **ความสามารถในการปรับแต่งน้ำหนักของปัจจัย**: ระบบมีค่าเกณฑ์มาตรฐานที่มีความน่าเชื่อถือ และการอนุญาตให้ผู้ใช้ปรับน้ำหนักของเกณฑ์หรือปัจจัยในการตัดสินใจได้ตามต้องการ เพื่อเพิ่มความสอดคล้องและให้ผู้ใช้มีการควบคุมในการตัดสินใจมากขึ้น
6. **การบูรณาการการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม:** การเน้นปัจจัยสิ่งแวดล้อมภายในกระบวนการคัดเลือกเกณฑ์ เพื่อสนับสนุนการเลือกที่ยั่งยืนในการคัดเลือกผู้ประกอบการจัดการขยะ
7. **การพัฒนาระบบเพื่อตอบสนองการทำงานร่วมกันแบบครอบคลุม**: พัฒนาแพลตฟอร์มดิจิทัลที่เอื้อต่อการมีปฏิสัมพันธ์และความร่วมมืออย่างบูรณาการระหว่างผู้มีส่วนได้ส่วนเสียในระบบการจัดการของเสียก่อสร้าง(ผู้ก่อกำเนิดของเสีย และผู้ประกอบการจัดการของเสีย)
8. **การแสดงผลลัพท์แบบเรียลไทม์**: ให้ผู้ใช้ได้รับข้อมูลผลลัพท์ทันทีเมื่อกรอกแบบฟอร์มในระบบครบถ้วนสมบูรณ์
9. **การออกแบบให้ตอบสนองตามอุปกรณ์ที่ใช้**: ทำให้แอปพลิเคชันปรับการแสดงผลได้ดีทั้งบนอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ แท็บเล็ต และสมาร์ทโฟน เพื่อให้ผู้ใช้สามารถเข้าถึงได้ทุกที่ทุกเวลา
10. **ความเร็วและการตอบสนองของระบบ:** การปรับให้เหมาะสมสำหรับการประมวลผลข้อมูลที่รวดเร็วและเวลาตอบสนองที่เร็ว โดยลดความล่าช้าในส่วนต่อประสานของระบบสนับสนุนการตัดสินใจและการสร้างผลลัพธ์
11. **การออกแบบที่เป็นมิตรต่อการเข้าถึง**: รวมมาตรฐานการเข้าถึงเช่นการใช้งานด้วยคีย์บอร์ด, การสนับสนุนโปรแกรมอ่านหน้าจอ และการปรับแต่งสีคอนทราสต์สูงเพื่อสนับสนุนผู้ใช้ที่มีข้อจำกัดในการมองเห็น
12. **การแสดงผลที่เข้าใจง่าย**: การใช้ภาพประกอบ เช่น กราฟ แผนภูมิ และการจัดอันดับจะช่วยให้ผู้ใช้สามารถตีความข้อมูลได้ทันที การใช้สีและการอัปเดตตามเวลาจริงจะช่วยให้การตัดสินใจเป็นไปอย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ
13. **รองรับหลายภาษา**: การสนับสนุนหลายภาษา(ไทย -อังกฤษ) ช่วยขยายกลุ่มผู้ใช้และทำให้ผู้ใช้รู้สึกสะดวกสบายในการใช้งานในภาษาที่ถนัด
14. **ความปลอดภัยของข้อมูล**: ระบบมีการเข้ารหัสข้อมูลทั้งขณะรับส่งและจัดเก็บ เพื่อป้องกันการเข้าถึงที่ไม่ได้รับอนุญาต โดยใช้การยืนยันตัวตน และจำกัดการเข้าถึงเฉพาะข้อมูลที่เกี่ยวข้อง และการสำรองข้อมูลเป็นประจำยังช่วยให้สามารถกู้คืนข้อมูลได้อย่างรวดเร็วในกรณีที่เกิดความผิดพลาดหรือการโจมตีทางไซเบอร์
15. **การอัปเดตและบำรุงรักษา:** ระบบสำหรับการอัปเดตและบำรุงรักษาอย่างสม่ำเสมอ เพื่อรับประกันความถูกต้อง ความเกี่ยวข้อง และฟังก์ชันการทำงานของระบบสนับสนุนการตัดสินใจเมื่อเกณฑ์หรืออัลกอริทึมมีการพัฒนา

Mark only one oval per row.

	1	2	3	4	5
1.การเข้าถึงที่ง่ายและเป็นลำดับ	◯	◯	◯	◯	◯
2.แบบฟอร์มการกรอกข้อมูลที่ชัดเจน	◯	◯	◯	◯	◯
3.ความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของอัลกอริทึม	◯	◯	◯	◯	◯
4.การบูรณา					



รับรองโดยคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
COA No. 051
COE No. -
RMUTTO REC No. 056/2567
วันที่รับรอง 11 ธ.ค. 2567
ฉบับวันที่ 11 ธันวาคม 2567

1.การใช้งานที่ถูกต้องตามคู่มือการใช้งานอย่างครบถ้วน					
2.การใช้งานที่ครอบคลุมการใช้งานได้อย่างครบถ้วน					
3.การใช้งานที่สามารถใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้					
4.การใช้งานที่สามารถใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้					
5.การใช้งานที่สามารถใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้					
6.การใช้งานที่สามารถใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้					
7.การพัฒนาระบบให้สามารถใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้					
8.การแสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้					
9.การออกแบบให้สามารถใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้					
10.ความเร็วและการตอบสนองของระบบ					
11.การออกแบบที่เป็นมิตรต่อผู้ใช้งาน					
12.การแสดงผลที่เข้าใจง่าย					
13.รองรับหลายภาษา					
14.การปลอดภัยของข้อมูล					
15.การอัปเดตและบำรุงรักษา					



รับรองโดยคณะกรรมการ... ฉบับวันที่ 11 ธันวาคม 2567
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
COA No. 051
COE No. .....
RMUTTO REC No. 056/2567
วันที่รับรอง 11 ธ.ค. 2567

15.การอัปเดตและบำรุงรักษา

16. **คุณลักษณะเพิ่มเติมใดที่ท่านเชื่อว่าจะช่วยเพิ่มความเป็นมิตรกับผู้ใช้ของ DSS เว็บแอปพลิเคชัน** *(โปรดระบุ)*

17. **การป้อนข้อมูล ประเภทใด ที่ช่วยในสำหรับการตัดสินใจในการเลือกด้านการจัดการขยะจากอุตสาหกรรมก่อสร้าง** *(เลือกได้มากกว่าหนึ่งข้อ)* *

Check all that apply.

- [ ] ประเภทของขยะคอนกรีต
- [ ] ปริมาณขยะคอนกรีต
- [ ] สถานที่ที่เกิดขยะคอนกรีต
- [ ] ประเภทการจัดการขยะ (รีไซเคิล, ฝังกลบ)
- [ ] ระยะทางไปยังสถานที่กำจัด
- [ ] ประเภทรถบรรทุกและการใช้เชื้อเพลิง

18. **การป้อนข้อมูลประเภทอื่นๆ ใด ที่ช่วยในสำหรับการตัดสินใจในการเลือกด้านการจัดการขยะจากอุตสาหกรรมก่อสร้าง** *(โปรดระบุ)*

19. **ท่านต้องการป้อนข้อมูลเข้าระบบในรูปแบบใด** *(เลือกได้มากกว่าหนึ่งข้อ)* *

Check all that apply.

- [ ] ป้อนข้อมูลด้วยตนเอง
- [ ] อัพโหลดไฟล์ข้อมูล
- [ ] อัพโหลดไฟล์รูปภาพ
- [ ] การเลือกจากตัวเลือก

ฉบับวันที่ 11 ธันวาคม 2567
รับรองโดยคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
COA No. 051
COE No.
RMUTTO REC No. 056/2567
11 ธ.ค. 2567

20. **ท่านคาดหวังรูปแบบผลลัพธ์ข้อมูลแบบใด** *(เลือกได้มากกว่าหนึ่งข้อ)* *

Check all that apply.

- [ ] รายงาน (PDF/Word)
- [ ] ตารางเปรียบเทียบ
- [ ] การแสดงผลแบบภาพ (เวปไซต์)
- [ ] การแสดงผลแบบเรียลไทม์:
- [ ] แผนที่แสดงผล

21. **ท่านใช้อุปกรณ์ใดในการทำงานเป็นหลัก หากต้องการใช้ระบบ DSS เว็บแอปพลิเคชัน** *

Check all that apply.

- [ ] คอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะ
- [ ] แล็ปท็อปหรือโน้ตบุ๊ค
- [ ] แท็บเล็ตหรือไอแพด
- [ ] สมาร์ทโฟน

22. **รูปแบบการแนะนำขั้นตอนการใช้งานแบบใดที่จะเป็นประโยชน์ที่สุด สำหรับการแนะนำวิธีการใช้งาน DSS เว็บแอปพลิเคชัน** *

Mark only one oval.

- ( ) บทเรียนออนไลน์
- ( ) คู่มือการใช้งาน
- ( ) การสนับสนุนจากฝ่ายช่วยเหลือDSS เว็บแอปพลิเคชัน
- ( ) YouTube Clip
- ( ) ฟอรั่มชุมชนผู้ใช้งาน

23. ความคิดเห็นหรือข้อเสนอแนะเพิ่มเติมเกี่ยวกับการพัฒนา DSS **แอปพลิเคชัน** สำหรับการจัดการขยะจากอุตสาหกรรมก่อสร้าง

24. **ชื่อ & นามสกุล***(ข้อมูลนี้จะไม่ถูกนำมาใช้เพื่อติดต่อทางด้านอื่น ใช้เฉพาะเพื่อติดตามผลของการกรอกแบบสอบถามเท่านั้น*



25. **อีเมล** *(ข้อมูลนี้จะไม่ถูกนำมาใช้เพื่อติดต่อทางด้านอื่น ใช้เฉพาะเพื่อติดตามผลของการกรอกแบบสอบถามเท่านั้น*

****สิ้นสุดแบบสอบถาม****

ขอขอบพระคุณท่านผู้เชี่ยวชาญที่ละเวลาตอบแบบสอบถามข้างต้นครับ

กระผม นายกฤตชัย สุทธิลักษณ์
บมจ.เนาวรัตน์พัฒนาการ
นักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล พระนคร
เบอร์ติดต่อ 0618235094

This content is neither created nor endorsed by Google.

Google Forms



ฉบับวันที่ 11 ธันวาคม 2567

แบบสอบถามประเมินความพึงพอในหลังการพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจบนเว็บ(DSS Web Application)สำหรับผู้เชี่ยวชาญในกลุ่มความร่วมมือขององค์กรธุรกิจอุตสาหกรรมก่อสร้างไทยด้านเศรษฐกิจหมุนเวียน

แบบสอบถามชุดนี้จัดทำเพื่อสอบถามความเห็นของผู้เชี่ยวชาญในกลุ่มความร่วมมือขององค์กรธุรกิจอุตสาหกรรมก่อสร้างไทยด้านเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy in Construction Industry-CECI)หลังจากการพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจ (DSS) บนเว็บที่เลือกผู้ประกอบการจัดการขยะจากอุตสาหกรรมก่อสร้างและวิธีการจัดการขยะอย่างเหมาะสมที่สุด โดยข้อมูลจากแบบสอบถามและผลการศึกษานี้จะถูกนำไปใช้เพื่อเป็นประโยชน์ต่องานค้นคว้าอิสระ และ เป็นแนวทางของกลุ่ม CECI ในการจัดการของเสียก่อสร้างในอนาคต

วัตถุประสงค์ของแบบสอบถามชุดนี้เพื่อประเมินการตอบสนองของระบบ DSS (Decision Support System) ต่อความต้องการใช้งานจริงในกระบวนการจัดการขยะคอนกรีตในโครงการก่อสร้าง โดยเน้นการเก็บข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับการใช้งานที่สะดวกและเข้าใจง่าย ความแม่นยำและน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ ประสิทธิภาพในการลดต้นทุนและเวลา รวมถึงการสนับสนุนการตัดสินใจในสถานการณ์ที่ซับซ้อน พร้อมทั้งประเมินความปลอดภัยและความเป็นส่วนตัวของข้อมูลผู้ใช้งาน และความเหมาะสมของการสนับสนุนการใช้งานหรือการฝึกอบรมที่เกี่ยวข้อง แบบสำรวจยังมุ่งเน้นการเปิดโอกาสให้ผู้ใช้งานแสดงความคิดเห็นเพิ่มเติมเพื่อพัฒนาระบบให้ตอบโจทย์การใช้งานในบริบทเฉพาะของอุตสาหกรรมก่อสร้างได้อย่างเต็มที่ และสนับสนุนเป้าหมายความยั่งยืนในกระบวนการจัดการขยะอย่างมีประสิทธิภาพในระยะยาว

แบบสอบถาม ประกอบด้วยชุดคำถามจำนวน 3 ส่วน ดังนี้
ส่วนที่ 1 หนังสือแสดงความยินยอมเข้าร่วมการวิจัย
ส่วนที่ 2 ข้อมูลเบื้องต้นของผู้เชี่ยวชาญ
ส่วนที่ 3 ความพึงพอใจของผู้ใช้งานระบบสนับสนุนการตัดสินใจบนเว็บ (DSS Web Application)

* Indicates required question

ฉบับวันที่ 11 ธันวาคม 2567



ส่วนที่ 1 หนังสือแสดงความยินยอมเข้าร่วมการวิจัย

ข้าพเจ้า ได้รับทราบรายละเอียดเกี่ยวกับที่มาและวัตถุประสงค์ในการทำวิจัย รายละเอียดขั้นตอนต่างๆ ที่จะต้องปฏิบัติหรือได้รับการปฏิบัติ โดยได้อ่านรายละเอียดในเอกสารชี้แจงผู้เข้าร่วมการวิจัยโดยตลอด และได้รับคำอธิบายจากผู้วิจัย จนเข้าใจเป็นอย่างดีแล้ว ข้าพเจ้าจึงสมัครใจเข้าร่วมในโครงการวิจัยนี้ ตามที่ระบุไว้ในเอกสารชี้แจงผู้เข้าร่วมการวิจัย โดยข้าพเจ้ายินยอมตอบแบบสอบถามในโครงการนี้

ข้าพเจ้าขอยืนยันว่าข้าพเจ้ามีสัญชาติไทย ข้าพเจ้ามีสิทธิถอนตัวออกจากการวิจัยเมื่อใดก็ได้ตามความประสงค์ โดยไม่ต้องแจ้งเหตุผล ซึ่งการถอนตัวออกจากการวิจัยนั้น จะไม่มีผลกระทบในทางใดๆ ต่อข้าพเจ้าทั้งสิ้น

ข้าพเจ้าได้รับคำรับรองว่า ผู้วิจัยจะปฏิบัติต่อข้าพเจ้าตามข้อมูลที่ระบุไว้ในเอกสารชี้แจงผู้เข้าร่วมการวิจัย และข้อมูลใดๆ ที่เกี่ยวข้องกับข้าพเจ้า ผู้วิจัยจะเก็บรักษาเป็นความลับ โดยจะนำเสนอข้อมูลการวิจัยเป็นภาพรวมเท่านั้น ไม่มีข้อมูลใดในการรายงานที่จะนำไปสู่การระบุตัวข้าพเจ้า

หากข้าพเจ้าไม่ได้รับการปฏิบัติตรงตามที่ได้ระบุไว้ในเอกสารชี้แจงผู้เข้าร่วมการวิจัย ข้าพเจ้าสามารถร้องเรียนได้ที่
สำนักงานคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
สถาบันวิจัยและพัฒนา เลขที่ 43 หมู่ 6
ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110
หมายเลขโทรศัพท์ 033-136099 ต่อ 1187

1. **ท่านยืนยันที่จะเข้าร่วมการวิจัยหรือไม่** *

Mark only one oval.

- ยินยอม
- ไม่ยินยอม

ส่วนที่ 2 ข้อมูลเบื้องต้นของผู้เชี่ยวชาญ

ฉบับวันที่ 11 ธันวาคม 2567

รับรองโดยคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
COA No. 051
COE No.
RMUTTO REC No. 056/2567
วันที่รับรอง 11 ธ.ค. 2567

2. บริษัทของท่านอยู่ในกลุ่มใดของกลุ่มองค์กรธุรกิจอุตสาหกรรมก่อสร้าง) *

Mark only one oval.

- 1.Architect / Consultant Sector(กลุ่มบริษัทออกแบบและบริษัทที่ปรึกษา)
- 2.Developer / Owner Sector(กลุ่มบริษัทพัฒนาอสังหาริมทรัพย์/เจ้าของโครงการ)
- 3.Contractor Sector(กลุ่มบริษัทรับเหมาก่อสร้าง)
- 4.Supplier/ Distributor Sector(กลุ่มบริษัทผลิตและจัดจำหน่ายวัสดุก่อสร้าง)
- 5.Waste Management Sector(กลุ่มบริษัทบริหารจัดการของเสีย)
- Other: _____

3. ประสบการณ์ การทำงานในธุรกิจอุตสาหกรรมก่อสรา้ง *

Mark only one oval.

- 1-5
- 6–10
- 11-15
- 16-20
- above 21

4. ประเภทของบริษัท *

Mark only one oval.

- Privately owned(บริษัทเอกชน)
- Partnership(ห้างหุ้นส่วน)
- Government-owned company(รัฐวิสาหกิจ)
- Public Limited Company(บริษัท มหาชน)



ฉบับวันที่ 11 ธันวาคม 2567



5. บริษัท เริ่มดำเนินธุรกิจหรือก่อตั้งมาแล้ว กี่ปี?

Mark only one oval.

- 1 – 5yrs
- 6 – 10yrs
- 11 – 15yrs
- 16 - 20yrs
- above 21yrs

ส่วนที่ 3 ความพึงพอใจของผู้ใช้งานระบบสนับสนุนการตัดสินใจบนเว็บ (DSS Web Application)

6. **3.1 การใช้งาน (Usability):** *

- ท่านคิดว่าระบบ DSS มีความง่ายในการใช้งานและเข้าถึงได้สะดวกหรือไม่?

Mark only one oval.

- ใช้งานง่ายมาก
- ใช้งานง่าย
- ปานกลาง
- ใช้งานยาก
- ใช้งานยากมาก

7. -การป้อนข้อมูล (เช่น ประเภทและปริมาณขยะ) และการดูผลลัพธ์เป็นเรื่องง่ายสำหรับท่านหรือไม่? *

Mark only one oval.

- ใช่
- ไม่ใช่

ฉบับวันที่ 11 ธันวาคม 2567
รับรองโดยคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
COA No. 051
COE No. –
RMUTTO REC No. 056/2567
วันที่รับรอง 11 ธ.ค. 2567

8. **3.2 ฟังก์ชันการทำงาน (Functionality):** *

-ท่านคิดว่าผลลัพธ์ที่ระบบ DSS แสดงมีความน่าเชื่อถือหรือไม่?

Mark only one oval.

- น่าเชื่อถือมาก
- น่าเชื่อถือ
- ปานกลาง
- ไม่น่าเชื่อถือ
- ไม่น่าเชื่อถือเลย

9. - ท่านคิดว่าระบบ DSS ช่วยให้ท่านตัดสินใจได้ง่ายขึ้นในสถานการณ์ที่มีตัวเลือกหลายตัวหรือไม่? *

Mark only one oval.

- ใช่
- ไม่ใช่

10. **3.3 ความสามารถในการลดต้นทุนและเวลา (Cost and Time Efficiency):** *

-ระบบ DSS ช่วยลดต้นทุนในการจัดการขยะในโครงการก่อสร้างของท่านหรือไม่?

Mark only one oval.

- ลดต้นทุนมาก
- ลดต้นทุน
- ปานกลาง
- ไม่ช่วยลดต้นทุน
- ไม่ช่วยลดต้นทุนเลย

ฉบับวันที่ 11 ธันวาคม 2567



11. - ระบบ DSS ช่วยลดเวลาที่ใช้ในการเลือกผู้ให้บริการจัดการขยะได้หรือไม่? *

Mark only one oval.

- ลดเวลามาก
- ลดเวลา
- ปานกลาง
- ไม่ช่วยลดเวลา
- ไม่ช่วยลดเวลาเลย

12. **3.4 ความปลอดภัยและความเป็นส่วนตัว (Security and Privacy):** *

-ท่านรู้สึกมั่นใจหรือไม่ว่าระบบ DSS ปกป้องข้อมูลของท่านจากการเข้าถึงโดยไม่ได้รับอนุญาต?

Mark only one oval.

- มั่นใจมาก
- มั่นใจ
- ปานกลาง
- ไม่มั่นใจ
- ไม่มั่นใจเลย

13. **3.5 การสนับสนุนการใช้งานและการฝึกอบรม (User Support and Training):**

-ท่านคิดว่าระบบ DSS จำเป็นต้องมีคู่มือหรือการฝึกอบรมก่อนการใช้งานหรือไม่?

Mark only one oval.

- จำเป็นมาก
- จำเป็น
- ปานกลาง
- จำเป็นน้อย
- จำเป็นน้อยมาก



ฉบับวันที่ 11 ธันวาคม 2567
รับรองโดยคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
COA No. 051
COE No.
RMUTTO REC No. 056/2567
วันที่รับรอง 11 ธ.ค. 2567

14. - หากต้องการคู่มือหรือการฝึกอบรม ท่านคิดว่าควรเป็นรูปแบบใด? *

Mark only one oval.

- คู่มือออนไลน์
- วิดีโอแนะนำ
- การฝึกอบรมตัวต่อตัว

15. **3.6 ความพึงพอใจโดยรวม (Overall Satisfaction):** *

- ท่านพึงพอใจโดยรวมกับระบบ DSS ในด้านการจัดการขยะในโครงการก่อสร้างของท่านหรือไม่?

Mark only one oval.

- พอใจมาก
- พอใจ
- ปานกลาง
- ไม่พอใจ
- ไม่พอใจเลย

16. **-**ท่านมีข้อเสนอแนะเพิ่มเติมเพื่อปรับปรุงระบบ DSS หรือไม่? (โปรดระบุ)

17. **ชื่อ & นามสกุล***(ข้อมูลนี้จะไม่ถูกนำมาใช้เพื่อติดต่อทางด้านอื่น ใช้เฉพาะเพื่อดึดตามผลของการกรอกแบบสอบถามเท่านั้น*



18. **อีเมล** *(ข้อมูลนี้จะไม่ถูกนำมาใช้เพื่อติดต่อทางด้านอื่น ใช้เฉพาะเพื่อดึงตามผลของการกรอกแบบสอบถามเท่านั้น*

****สิ้นสุดแบบสอบถาม****

ขอขอบพระคุณท่านผู้เชี่ยวชาญที่ละเวลาตอบแบบสอบถามข้างต้นครับ

กระผม นายกฤตชัย สุทธิลักษณ์
บมจ.เนาวรัตน์พัฒนาการ
นักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล พระนคร
เบอร์ติดต่อ 0618235094

This content is neither created nor endorsed by Google.

Google Forms



ฉบับวันที่ 11 ธันวาคม 2567

ภาคผนวก ค

เอกสารประกอบการตีพิมพ์ในงานประชุมวิชาการนานาชาติ
(Conference Proceedings)

FH·W·S

Hochschule
für angewandte Wissenschaften
Würzburg-Schweinfurt

WIBF@RMUTP
Würzburg International Business Forum
BANGKOK 2022

Small Firm Internationalisation and International Entrepreneurship

Managing Sustainable Innovation

Editors:
Emin Akçaoğlu & Rainer Wehner

Würzburg International Business Forum
5th International Business Conference

CONFERENCE PROCEEDINGS

Bangkok, 1 - 2 September 2022

WIBP
Würzburg International Business Press

Conference Proceedings

Würzburg International Business Forum
5th International Business Conference 2022

Small Firm Internationalisation and
International Entrepreneurship
'Managing Sustainable Innovation'

Bangkok, 1 - 2 September 2022

Editors:
Emin Akcaoglu & Rainer Wehner

Contents

Keynote Speakers

International Advisory Board

Organisation Committee

Foreword 1

Proceedings of Plenary Session I

An AHP for Prioritizing and Selecting Concrete Waste Management Method Case Study: Circular economy construction industry group (CECI) 5
Prin Boonkanit & **Kridchai Suthiluck**

Cultural Impact on Entrepreneurial Expectations 10
Tiina Brandt, Isaac Wanasika, Mikus Dubickis, Stephen Treacy, Pihlajarinne Hanna, Rocco Acocella, Andreea Militaru, Diederich Bakker, J. Liu, Rong Liu, Yukie Tsuzuki & **Thu Vo**

The Effect of Marketing Factors on Decision to Use Domestic Airlines Service at Suvarnabhumi Airport by Thai Passengers 17
Thanakon Ratchatakulpat, Rattanavalee Maisak, Khanittha Khamwilai, Maneerat Ratchatakulpat & **Thanaphon Ratchatakulpat**

Maintaining balance for learners with diverse educational background and progression in a virtual teaching and learning environment 20
Dominik Winkler & **Markus Engert**

Decision-making model for participating in food safety production groups: A case study of Urban-Agricultural Plantations groups in Thailand 25
Weerakaset Suanpagaa & **Kamolbhan Sangmahachai**

An AHP for Prioritizing and Selecting Concrete Waste Management Method Case Study: Circular economy construction industry group (CECI)

Prin Boonkanit, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Thailand
Kridchai Suthiluck, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Thailand

The objective of this research is to study and consider the most suitable method for the management of concrete waste from construction. The research methods started with a study of the current status and problems of concrete waste management, a study of literature review on solving problems of concrete waste management from construction by employing an analytic hierarchy process (AHP) to prioritize factors affecting management as well as selecting the three most proper management methods, including landfill, recycled concrete aggregate (RCA) and upcycling recycled concrete. The data collection was from questionnaires and in-depth interviews with 15 experts in the Circular Economy in Construction Industry (CECI). The results of the study found that the experts attached the utmost importance to environmental criteria 33.9%, followed by social criteria 29.3%, economic criteria 25.1% and technical criteria 11.6%, respectively. The most proper concrete waste management method was upcycling recycled concrete.

Keywords: Analytic Hierarchy Process, Construction Waste Management, Circular Economy Construction Industry Group (CECI)

Introduction

Deteriorating environmental problems such as land degradation, carbon dioxide and greenhouse gas emissions, water pollution, high power consumption and loss of resources are partly from the construction industry (Akanbi, Oyedele, Akinade, Ajayi, Delgado, Bilal, & Bello, 2018). Industries use more than 50% of natural resources, causing 30% of waste and 30% of carbon dioxide emissions worldwide (Anink, Mak, & Boonstra, 1996). Most construction waste is generated by construction activities, building renovation and building demolition. The highest volume of waste compared to other activities around the world reaches 30 to 40% of the amount of trash and garbage in the city (Wang, Wu, Duan, Zillante, Zuo, & Yuan, 2018). The average composition of construction and demolition waste reaches 84% of concrete waste (Gálvez-Martos, Styles, Schoenberger, & Zeschmar-Lahl, 2018). According to data from the statistical office of the European Union in 2018, there are approximately 924 million tons of construction waste in the European Union (Eurostat, 2017), 548 million tons in the United States of America (EPA, 2018), 2.5 billion tons per year in China (Huang, Wang, & Harnwei, 2018). In 2005, there were 1.1 billion tons of construction and demolition waste or 7.7% of trash and garbage in Thailand (Kofowoeola, & Gheewala, 2009), abandoned in public spaces and open landfills with general waste (Manowong, & Brockmann, 2010). Only 20 to 30% of construction waste is recycled (World Economic Forum, 2016).

Due to the problems and effects of industry on the environment, the concept of a circular economy is proposed to reduce waste and make the most of resources. **On the other hand, the opposite of the production model we have today is using (resources) to create products and eliminate waste** (Brown, Bocken, & Balkenende, 2019). The concept of circular economy is used to generate a great contribution to sustainability in the construction industry (Hossain, Ng, Antwi- Afari, & Amor, 2020).

Determining the best ways to manage construction waste, such as reducing waste, recycling, reusing materials, and landfilling, is still a challenge. Each management strategy has unique environmental, social, economic, and technical characteristics. Multi-Criteria Decision Analysis, or MCDA, is a useful tool for assisting stakeholders in choosing the best management strategy. To manage waste, Analytical Hierarchy Process, or AHP, is used by more than 50 % (Huang, Keisler, & Linkov, 2011) as well as 49% (Cegan, Filion, Keisler, & Linkov, 2017) for diagnosis to facilitate decision-making of complex issues under the concept of pairwise comparison (Saaty,1980). This research uses the AHP to prioritize and select the best method.

As described earlier, concrete waste management problems from CECI's construction are still operated inefficiently because of the shortage of efficient management processes for recycling as well as the relationship between the waste generator and the waste receiver for treatment, elimination and making the most of the cost-efficiency. This has led to two research questions.

1. What is the interest in the circular economy concept and the importance of each construction waste management factor?

2. What is the effective management of concrete waste from the construction industry?

The purpose of this research is to thoroughly examine and analyze the best approach for managing construction-related concrete waste while also establishing a network of cooperation in waste management.

Material and Methodology

Questionnaires crafted from pertinent concepts, theories, and research were used as the research instrument for data collection. The sample group for in-depth interviews and online questionnaires was 27 related experts, only 15 of the experts responded, including 5 groups of the CECI: 3 people from the architect and project consultant group, 2 people from the property development group, 5 people from the contractor group, 3 people from the manufacturing and building material distributor group and 2 people from the waste management group. The questionnaire response rate was 55.6%, which was good (Berdie, Anderson and Niebuhr, 1986) and (Baruch, 1999). The research Framework was shown in Figure 1.

The methodology of research is as follows:

1. Study the current status and problems of concrete waste management as well as a literature review to question and set the research objectives.

2. Collect specify criteria from literature review studies, such as Khoshand, Khanlari, Abbasianjahromi, & Zoghi (2020), which examined the management of construction waste in Iran, and Mdallal, & Hammad (2019), which examined construction waste from a project in the United Arab Emirates. A hierarchy structure can then be made from the results of the assessment, as shown in Figure 2, by first creating a questionnaire for the experts to evaluate pertinent factors and take into account the consistency of specific waste management strategies. Create a questionnaire that was used to guide the analytical hierarchical decision-making process after that. According to the pair-wise comparison theory, each factor on the questionnaire was prioritized. Table 1 displays the scores for the significance of comparing two factors, which range from 1 to 9. Additionally, the computation of the AHP followed the method of Saaty (1990) and Boonkanit, & Kengpol (2010).

3. Submit the questionnaire via an online system to the related experts to rate before finding the mean of the value of the main and sub-criteria. Then, consider the suitable methods of concrete waste management. Next, analyze score data from the experts' assessment by Microsoft Excel to get the results in matrix form and the value of each factor in the eigenvector of each matrix by comparing pairs one by one following the structure of the hierarchical chart.

4. Verify the consistency of the data with the consistency ratio (CR). If CR < 0.1, the significance score data obtained from comparing pairs is consistent.

5. Prioritize the main-criteria and sub-criteria from the results of the score value to get the results for selecting the most suitable method for concrete waste management.

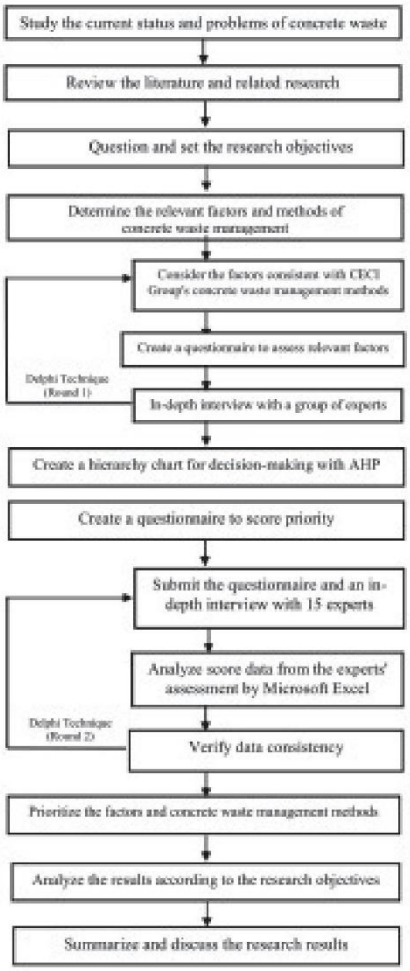


Figure 1: Research Framework

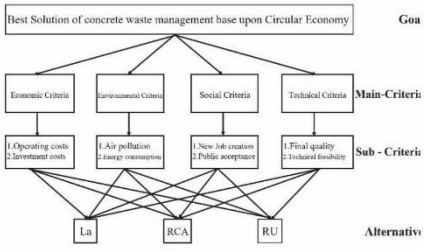


Figure 2: General Hierarchy Structure of Concrete Waste Management Alternative in Terms of Main-criteria and Sub-criteria

Locations: La = Landfill
: RCA = Recycled Concrete Aggregate
: RU = Recycled Concrete to Upcycling

Table 1. Fundamental Scale in Calculating AHP

Verbal Judgment of Preference	**Numerical**
Rating	
Equal importance	1
Moderate importance	3
Strong importance	5
Very strong importance	7
Extreme importance	9
The intermediate value between the two adjacent judgments	2, 4, 6, 8

An Example of Priority Analysis

Create a matrix table with the scores from the AHP questionnaire using a pair-by-pair comparison from the experts as in Table 2 to calculate the priority of the factors.

Table 2. An Example of the Questionnaire for the Pair-By-Pair Comparison

Criteria	**9**	**7**	**5**	**3**	**1**	**3**	**5**	**7**	**9**	Criteria
Economic						x				Environmental
Economic						x				Social
Economic				x						Technical
Environmental				x						Social
Environmental			x							Technical
Social			x							Technical

Metrix A

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{1j} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{2j} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{3j} \end{bmatrix}$$

Table 3. An Example for Evaluating Concrete waste management under main Criteria

Criteria	Economic	Environ mental	Social	Technical	**Eigenvector**
Economic	**1**	**1/3**	**1/3**	**3**	**0.15**
Environ mental	**3**	**1**	**3**	**5**	**0.49**
Social	**3**	**1/3**	**1**	**5**	**0.29**
Technical	**1/3**	**1/5**	**1/5**	**1**	**0.07**

For example, if $a_{42} = 5$ then objective Environmental is slightly more important than objective Technical then $a_{24} = 1/5$ (Table 3). Then the corresponding normalized matrix is

Example $a_{11} = 1/(1+1/3+1/3+3) = 0.14$,

$$A_{Normalized} = \begin{bmatrix} 0.14 & 0.18 & 0.07 & 0.21 \\ 0.41 & 0.54 & 0.66 & 0.36 \\ 0.41 & 0.18 & 0.22 & 0.36 \\ 0.05 & 0.11 & 0.04 & 0.07 \end{bmatrix}$$

Eigenvector = (0.14+0.18+0.07+0.21)/4 = 0.151, (0.41+0.54+0.66+0.36)/4 = 0.491, (0.41+0.18+0.22+0.36)/4 = 0.291, (0.05+0.11+0.04+0.07)/4 = 0.067

After that we compute Consistency Index (C.I.) by calculating λ_{max} , where λ_{max} is the largest or principal eigenvalue of Matrix A' = (a'_{ij}), the perturbed value of A = (a_{ij}) with $a'_{ji} = 1/a'_{ij}$, forced. (Saaty, 1996) It is interesting to note that $(\lambda_{max} - \eta)/(\eta - 1)$ is the variance of the error incurred in estimating a_{ij}. This can be shown by writing $a_{ij} = (w_i/w_j)\varepsilon_{ij}$, $\varepsilon_{ij} > 0$ and $\varepsilon_{ij} = 1+\delta_{ij}$, $\delta_{ij} > -1$ and substituting in the expression for λ_{max} . It is δ_{ij} that concerns us as the error component and its value $|\delta_{ij}| < 1$ for an unbiased estimator. The measure of inconsistency can be used to successively improve the consistency of judgments.

$$\begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 1/3 & 3 \\ 3 & 1 & 3 & 5 \\ 3 & 1/3 & 1 & 5 \\ 1/3 & 1/5 & 1/5 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0.15 \\ 0.49 \\ 0.29 \\ 0.07 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.603 \\ 1.964 \\ 1.165 \\ 0.268 \end{bmatrix}$$

λ_{max} = ((0.603/0.15) +(1.964/0.49) +(1.165/0.29) +(0.268/0.07))/4
= 4.199
C.I. = $(\lambda_{max} - n) / (n-1)$
C.I. = (4.199-4) / (4-1) = 0.066
C.R. = C.I./R.I. = 0.066/0.90 = 0.07< 0.1

The consistency ratio (C.R.) is obtained by comparing the C.I. with the appropriate one of the set of RI numbers shown in Table 4. (R.I. in Table 4 N=4, RI=0.90) each of which is an average random consistency index derived from a large sample of randomly generated reciprocal matrices using the scale 1/9, 1/8, ..., 1, ..., 8, 9. The resulting vector is

accepted if C.R. is about 0.10 or less (0.20 may be tolerated, but not more). For $n = 3$, it is 0.05, and for $n = 4$, it is 0.08. If it is not less than 0.10, study the problem and revise the judgments. In this decision, we accepted this decision-making because CI/RI ratio is less than 0.10.

Table 4. Table of Random Inconsistency for Different Size Matrix

N	1	2	3	4	5	6	7
R.I.	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32

Results

The experts attached the utmost importance to environmental criteria 33.9%, followed by social criteria 29.3%, economic criteria 25.1% and technical criteria 11.6%, respectively. The most proper concrete waste management methods were upcycling recycled concrete, reaching 45.7%, followed by recycled concrete aggregate (RCA), reaching 36.6% and landfill, reaching 17.6%, respectively. For sub-factors affecting construction concrete waste management, the experts attached the utmost importance to the three first factors including air pollution factor, which reached 24.6%, public acceptance, which reached 22.1%, and operation cost, which reached 15.8%, respectively. The score value for concrete waste management methods in terms of principle criteria and sub-criteria was shown in Figure 3.

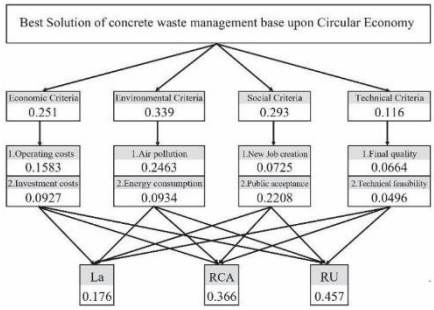


Figure 3. The Score Value for Hierarchy Structure of Concrete Waste Management Alternative in Terms of Criteria and Cub-criteria

Conclusion

The results showed that the Circular Economy concept for construction concrete waste management was greatly interesting because CECI attached the utmost importance to environmental criteria. Furthermore, CECI is expected to generate effective concrete waste management methods with a management system such as regulatory balance, technology system, people management and economic management. It was highly likely to develop the system, mainly to support matching waste on an online form, to create mutual benefits in economics and sustainability because the construction industries involve the government sectors, educational institutions, professional organizations and other industry sectors. The results of this research can be a reference and guidance for further sustainable operations in many sectors related to the construction industry.

Further Research

For further research in the future, the technology system should be developed reasonable match waste with a social network.

References

Akanbi, L.A., Oyedele, L.O., Akinade, O.O., Ajayi, A.O., Davila Delgado, M., Bilal, M., Bello,S.A. (2018). Salvaging building materials in a circular economy: A BIM-based whole-life performance estimator. Resour Conserv. Recycl. 129, 175-186.

Anink, D., Mak, J., and Boonstra, C. (1996). Handbook of Sustainable Building: An Environmental Preference Method for Selection of Materials for Use in Construction and Refurbishment. London: James andJames.

Baruch, Y. (1999). Response rates in academic studies-a comparative analysis. Human Relations.421-434.

Berdie, D.R., Anderson J.F., & Niebuhr MA. (1986). Questionnaires: design and use. Metuchen, N.J.: Scarecrow Press.

Brown, P., Bocken, N., Balkenende, R., Brown, P., Bocken, N., Balkenende, R., 2019. Why Do Companies Pursue Collaborative Circular Oriented Innovation ?. Sustainability 11, 635.

Cegan, J. C., Filion, A. M., Keisler, J. M., & Linkov, I. (2017). Trends and ap-plications of multi- criteria decision analysis in environmental sciences: Literature review. Environment Systems and Decisions, 37, 123–133.

Eurostat (2017). Generation of Waste by Wast Category, Hazardousness and NACE Rev 2 Activity.

Gálvez-Martos, J.-L., Styles, D., Schoenberger, H., & Zeschmar-Lahl, B. (2018). Construction and demolition waste best management practice in Europe. Resources, Conservation and Recycling, 136, 166–178.

Huang, I. B., Keisler, J., & Linkov, I. (2011). Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: Ten years of applications and trends. Science of The Total Environment, 409(19), 3578–3594.

Huang, B.J., Wang, X.Y., Harnwei, K., et al., 2018b. Construction and demolition waste management in China through the 3R principle. Resour. Conserv. Recy. 129, 36–

44.

Khoshand, A., Khanlari, K., Abbasianjahromi, H., & Zoghi, M. (2020). Construction and demolition waste management: Fuzzy Analytic Hierarchy Process approach. Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy, 38(7), 773–782.

Kofoworola, O.F.; Gheewala, S.H. Estimation of construction waste generation and management in Thailand. Waste Management. 2009, 29, 731–738.

Manowong E, Brockmann C. (2010). Construction waste management in newly industrialized countries. In: W107-Special Track 18th CIB World Building Congress May 2010 Salford, United Kingdom.

Mdallal, A. and Hammad, A. (2019), "Application of fuzzy analytical hierarchy process (FAHP) to reduce concrete waste on construction sites", Canadian Society for Civil Engineering (CSCE) Annual Conference, Montreal, Canada.

MU Hossain., ST Ng., P Antwi-Afari., B Amor. (2020). Circular economy and the construction industry: Existing trends, challenges and prospective framework for sustainable construction. Renewable and Sustainable Energy Reviews.130, 109948.

P.Boonkanit, A. Kengpol. (2010).The Development and Application of a Decision Support Methodology for Product Eco-Design: A Study of Engineering Firms in Thailand, International Journal of Management. 27 185-201.

Saaty TL (1980) The Aanalytic Hierarchy Process. New York: McGraw-Hill, p. 324.

Saginova, O., Tsennina E., Saginov Y.(2020).Sharing economy:Users' motivations from the sustainable development perspective, EWürzburg International Business Forum Proceedings of the International Business Conference.WIBF2020.25-28.

T.L. Saaty (*1990)*, "How to make a decision: the analytichierarchyprocess,"*EuropeanJournakofOperational Research, vol.48, on.1, pp., 9-26.*

U.S. EPA, 2018. Construction and Demolition Debris Generation in the United States, 2015. U.S.Environmental Protection Agency Office of Resource Conservation and Recovery.

Wang, J., Wu, H., Duan, H., Zillante, G., Zuo, J.,Yuan, H. (2018). Combining Life Cycle Assessment and Building Information Modelling to account for carbon emission of building demolition waste: a case study. J. Clean. Prod. 172, 3154–3166.

World Economic Forum, 2016. Shaping the Future of Construction, World Economic Forum (WEF) Web site: http://www3.weforum.org/docs/WEFShaping_the_Future_of_Construction_full_report.pdf.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge Rajamangala University of Technology Phra Nakhon (RMUTP), the Circular Economy in Construction Industry of Thailand (CECI) for support construction waste management data in this research.

ภาคผนวก ง

หลักฐานการตีพิมพ์บทความวิจัยในวารสารระดับนานาชาติ (Q1): Sustainability (MDPI, 2023)

sustainability

MDPI

Article

Developing a Decision-Making Support System for a Smart Construction and Demolition Waste Transition to a Circular Economy

Prin Boonkanit and Kridchai Suthiluck *

Sustainable Industrial Management Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangkok 10800, Thailand; prin.b@rmutp.ac.th
* Correspondence: kridchai-s@rmutp.ac.th; Tel.: +66-99-663-8883

Abstract: This research work aimed to develop a decision support system (DSS) to select the most appropriate concrete waste management method, which is the most critical issue in the construction industry. The research process began with the study of the current situation of concrete waste management problems. Related theories and literature were reviewed, and experts were interviewed in depth. After that, the Delphi technique and the fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) were used to analyze the decision-making structure and consider factors related to the waste management methods. Then, the FAHP process was analyzed, calculated, and prioritized using MS Excel until the results were obtained. Finally, decision structures were shown, evaluated, and prioritized using a case study by a group of experts belonging to the Thai circular economy construction industry (CECI). The contribution of this research line in the DSS model is by analyzing, calculating, and finding the most appropriate alternative solution for the construction waste industry. Limitations, recommendations, and future research directions are also presented.

Keywords: decision-making support system; fuzzy analytic hierarchy process (FAHP); concrete waste management; circular economy; Delphi method

check for updates

Citation: Boonkanit, P.; Suthiluck, K. Developing a Decision-Making Support System for a Smart Construction and Demolition Waste Transition to a Circular Economy. *Sustainability* **2023**, *15*, 9672. https://doi.org/10.3390/su15129672

Academic Editors: Zezhou Wu, Zhikun Ding, Huabo Duan and Jiayuan Wang

Received: 10 May 2023
Revised: 12 June 2023
Accepted: 14 June 2023
Published: 16 June 2023

Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

Currently, it is known that the construction industry highly influences three sustainability pillars, namely, the environment, economy, and society [1]. Smol et al. (2015) [2] stated that the construction industry is an industry that promotes employment opportunities, promotes habitat diversity, provides convenience, and supports GDP. Although there are many benefits to the economy and society, the construction industry also has a negative impact on the environment throughout the life cycle of a building. The negative impacts of project construction can include the use of natural materials, waste production, energy consumption, greenhouse gas emissions, water and resource depletion, noise and dust, and habitat destruction. Studies have explored the contributing factors and processes involved in these impacts, such as the extraction of materials, transportation, on-site operations, and the disposal of materials at the end of their life cycle [3]. These were considered to be the main cause of the deteriorating environment [4]. This issue is also linked directly to waste production. Natural minerals are used at a rate as high as 50% [5], and create as much as 35% of the waste going to landfill [6]. The construction sector's carbon emissions in 2020 reached 11.79 gigatons of carbon dioxide, representing 37% of all carbon emissions worldwide. Seventeen percent of these emissions were attributable to the operational carbon emissions of residential buildings [7,8]. The construction industry's rapid growth due to increased populations and city expansion around the world has created tremendous amounts of waste [9]. Global construction and demolition waste has the highest quantity when compared to other activities. Construction waste comprises as much as 40% of a city's total waste [10], mainly from construction, building renovation, and demolition. China

produces around 2.5 billion tons of construction waste per year due to its large-scale city expansion and city restoration [11]. Data from Euro-stat (2020) [12] showed that the total waste in European countries from the economy and households reached 2151 million tons. Waste from the construction industry occupied 37.1% of this, or 798 million tons. Data from US EPA (2018) [13] showed that construction waste in the USA reached about 600 million tons. During the year 2018–2019, Australia created 27 million tons of demolition waste (44% of total waste). Even though 76% of this waste was recycled, the waste increased by 61% from 2006 to 2017 [14]. In 1998, Hong Kong produced 32,710 tons of construction and demolition waste per year. Concrete, brick, and sand waste was deposited in public spaces [15,16].

Focusing on the south-east Asian region, Ngoc Han Hoang et al. [17] reviewed a lot of documents related to construction and demolition waste (CDW) and found that Malaysia, Singapore, and Vietnam were the only three countries in the region to publish construction waste statistics and data. Singapore has produced about 1.54 million tons of construction waste per year since 2015. Malaysia produced around 26,000 t per day. Vietnam did not specify the construction waste amount, but the report mentioned that construction waste comprises around 10–12% of the daily local waste, which is 6000–7200 t per day. Furthermore, no updated waste information for Vietnam has been posted for the past 8 years. There is no official construction waste report for the rest of this region, including for Thailand. Kofoworola and Gheewala [18] studied construction waste management and forecasts in Thailand. Manowong [19] investigated factors influencing construction waste management in developing countries and discovered that most of the construction waste is dumped in open landfills in almost every Southeast Asian country. The findings of Luangcharoenrat et al. (2019) indicate that project characteristics, including project size, duration, and complexity, have a significant influence on construction waste generation. Furthermore, management practices, including waste sorting and segregation, recycling initiatives, and waste management training, are crucial in reducing waste generation. The capabilities of contractors, including their experience and knowledge of sustainable construction practices, also impact waste generation rates [9]. Russia had a concrete waste ratio during demolition, building, and construction as high as 60% [20]. The US had a concrete waste ratio of about 67% of construction waste in 2018 [21], while the concrete waste in Canada comprised about 52% of the construction waste [22]. Begum et al. found that the construction waste ratio in Malaysia was as high as 65% [23].

Due to the high environmental impact of the construction industry and the high rate of waste production, waste management is a priority for global sustainable development [24]. Although reusing and recycling are common waste recovery methods, they are still not highly efficient, especially in emerging countries, where only 20–30% of construction and demolition waste is recovered and there are inadequate waste management plans [25]. Consequently, a substantial amount of waste ends up in landfills or is illegally discarded without adequate environmental measures [26]. The end-of-life (EOL) phase of the assets, in particular the demolition process, contributes significantly to the waste generated by the construction industry and accounts for 50% of waste worldwide [27]. In the UK alone, 30% of waste sent to landfills comes from demolitions, resulting in an annual cost of GBP 200 million [28]. As a result, researchers are increasingly interested in asset EOL management and construction and demolition waste (CDW), aiming to shift the industry toward the paradigm of a circular economy (CE) [29,30].

The CE approach, supported by the Ellen MacArthur Foundation and by initiatives such as the European Union's CE Implementation Action Plan, aims to shift from a linear system to one that promotes recycling, resource efficiency and reduced waste [31,32]. However, some limitations were identified during the implementation process. Although recycling has been extensively developed, it is considered a less favorable option compared to other aspects of the CE, and EU policy tends to focus on end-of-life solutions without adequately addressing the socio-ecological implications of the circularity transition [32,33]. In the construction industry, the predominant approach remains linear, where demolition

typically manages EOL [34]. Defining the circularity of a building was a challenge, mainly because of the unique nature of buildings compared to manufactured products. Each building is tailor-made to meet the requirements of individual owners (private, public, or corporate). Additionally, the management of a building throughout its life cycle involves diverse stakeholders with different skills and interests [35]. Furthermore, the different phases of a building's life cycle vary significantly in terms of timescale, with the operational phase typically lasting at least 30 years.

The transition to a circular economy system in the construction industry offers various benefits, including economic growth, improved material efficiency, increased value throughout life cycles, waste reduction, resource efficiency, and environmental sustainability [36,37]. Overcoming these barriers requires a comprehensive approach, including regulatory reforms, engagement with stakeholders, capacity building, and knowledge dissemination [38]. MU Hossain et al. [39] stated that the utilization of the circular economy in construction can facilitate the transition to sustainable construction practices.

The current situation regarding the sustainable development of the construction industry has made notable progress, accompanied by increased recognition of the importance of sustainable practices. Efforts to enhance energy efficiency and reduce carbon emissions have gained significant momentum, focusing on energy-efficient design and the integration of renewable energy sources. It has been widely acknowledged that incorporating advanced technologies and innovative approaches is crucial for improving sustainability performance [40]. The construction industry has placed a strong emphasis on sustainable materials and resource management, including the utilization of recycled materials and environmentally friendly products [41]. The adoption of circular economy principles and efficient waste management practices has led to a reduction in construction waste and a more efficient use of resources [42]. Social sustainability and stakeholder engagement have become critical aspects, highlighting the significance of fair labor practices, community involvement, and the creation of local employment opportunities [43]. Green building certifications and standards continue to drive sustainable practices in the construction industry, underscoring the necessity of green buildings for sustainable environmental development. However, the adoption of green building practices presents various dilemmas and challenges, such as cost considerations, limited awareness, regulatory hurdles, and the need for collaborative efforts [44,45]. Supportive policies and regulations play a crucial role in promoting sustainability in the construction industry. The implementation of building codes, certification systems, financial incentives, and sustainability standards aims to encourage and incentivize the adoption of sustainable practices [46].

Businesses in the Thai private sector related to the construction industry have gathered together as the "Network of Business Organizations for Circular Economy in the Construction Industry (CECI)". This network represents a collaboration among business sectors in the construction industry. This network was assembled for the first time at SCG's "SD Symposium 2020" to promote the concept of a "circular economy", encouraging the construction industry to use resources more efficiently and reduce environmental impacts. The main goal was to reduce landfilling as much as possible and to implement ideas for efficient waste management in the construction industry. Currently, there are 30 members from the private sector.

However, there are still issues in construction waste management, such as waste reduction, recycling and reusing materials, and landfilling. Each management choice has different environmental, technical, social, and economic characteristics. To select the most suitable management method, all aspects related to the environment, techniques, society, and the economy should be thoroughly considered, including both advantages and disadvantages. Multi-criteria decision analysis (MCDA) is a method of decision-making that considers multiple evaluations. The objective is to find a clear method for answering questions and supporting decision-making.

According to the literature review, waste management problems have been addressed for more than three decades using MCDA techniques. This involves integrating environ-

mental, political, social, cultural, and economic values with the preferences of stakeholders, while considering the challenges of monetizing non-monetary factors [47,48]. Several research papers have presented numerous applications of MCDA techniques in the context of waste management [49–53]. These studies typically emphasize the importance of a comprehensive decision-making process that considers a wide range of impacts, including social, cultural, environmental, economic, land use, resource use, reuse, and recycling. MCDA provides the advantage of incorporating both qualitative and quantitative data, which is valuable when decision-makers encounter challenges with qualitative information. In real-world decision-making scenarios, MCDA techniques are employed to address both types of data, often utilizing advanced approaches such as fuzzy set theory to handle data uncertainty [54]. Among the interactive methods available, pairwise comparison is frequently used to establish trade-off relationships between criteria [55,56].

Analytical hierarchy process (AHP) approaches have proven to be useful decision-making tools in real-life applications. Vaidya and Kumar [57] grouped the application areas as follows: selection, evaluation, benefit–cost analysis, allocations, planning and development, priority and ranking, and decision-making. Additionally, Williams [58] went further to elaborate that the natural simplicity and enormous flexibility of AHP have provided it with even wider applicability. For instance, it is adopted in education, engineering, government, industry, management, manufacturing, personnel, politics, society, marketing, and sports [58–60]. Many researchers have reported that the rationale for applying APH in this study, as has been seen in other applications of MCDA (e.g., ELECTRE, MacBeth, MAUT, MAVT, TOPSIS, SMART, PROMETHEE, and UTA), is simplicity, familiarity, and flexibility [61,62]. The AHP is noteworthy for its ability to assess both quantitative and qualitative data on the same preference scale of nine levels, which is particularly useful when involving multiple stakeholders. This ability distinguishes AHP from other multi-criteria decision analysis (MCDA) methods and enhances its advantages [60,61]. However, Huang et al. [62] pointed out that no matter which MCDA methods are used, similarities in the outcome of the methods are nearly guaranteed. Consequently, the choice of method is mainly based on the preference of the decision maker. Cegan, J.C. et al. [63] found that 26% of the articles used a combination of AHP and fuzzy logic. Penades-Pla, V. et al. [64] examined various methods and sustainability criteria for making decisions about each bridge's life cycle, from design to recycling or demolition. It was found that 68% of the methods used the fuzzy analytical hierarchy process (FAHP). It was used as a tool to support multiple-criteria decision-making (MCDM). The criteria could be both quantitative and qualitative. The FAHP was developed as an extension of the AHP. Thomas L. Saaty published this in the 1980s. Since then, FAHP has become a widely used methodology in decision making and has been applied to various fields, including engineering, finance, and environmental science. FAHP can make the decision under conditions of vagueness and uncertainty, like human thought, so the decision making was more efficient [65]. The FAHP model is a decision-making tool that integrates fuzzy logic to handle uncertainty and imprecise information. It allows decision-makers to express their judgments in linguistic terms and handles uncertainty through fuzzy inference. On the other hand, if the decision problem involves more precise and quantifiable data without significant uncertainty, models such as step-wise weight assessment ratio analysis (SWARA), the best-worst method (BWM), or the linear biased weighting approach (LBWA), which do not explicitly consider uncertainty or incorporate fuzzy logic, may be more appropriate [66]. In this project, fuzzy AHP was used as a prioritizing tool.

The conceptual "inverted pyramid" model of steps in the research is shown in Figure 1, and summarizes the overview of the Introduction to this study and addresses the problem of increasing amounts of construction and demolition waste around the world and their negative impact on the environment.

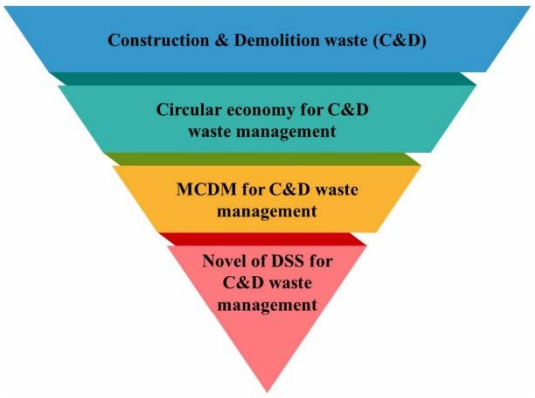


Figure 1. Conceptual "Inverted Pyramid" model of steps in the research.

The research study area focused on addressing waste management challenges in the construction sector, specifically concrete waste, by employing the concept of a circular economy. The research area was divided into four distinct components. These components were based on relevant theories and literature reviews. The ultimate aim of these components was to identify research gaps and questions, as presented in Figure 2.

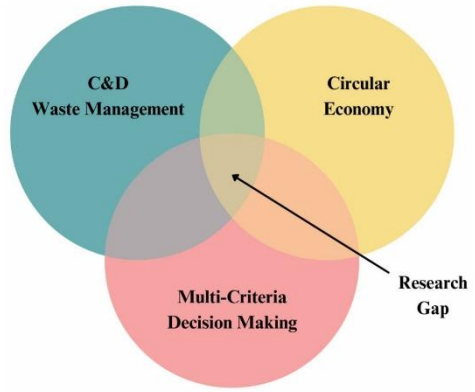


Figure 2. A diagrammatic representation of a research gap.

Research Study Area 1: The construction industry consumes significant amounts of resources and generates substantial amounts of construction waste. It is important to study this area to improve the efficiency of construction and reduce the environmental impact of construction waste. Numerous studies have focused on enhancing the efficiency of the construction sector and reducing waste production. Concrete waste, the most prevalent type of construction waste, is frequently disposed of in landfills or occupies space without providing any value or benefits.

Research Study Area 2: A circular economy is a term used to describe an economy where resources are used in a sustainable way on a global scale. The European Union's Circular Economy Action Package was introduced in 2018 to reduce waste and promote

more sustainable policies. Reducing landfill waste and increasing recycling rates contribute to the preservation of the environment. In Thailand, recycling is expected to account for approximately 30% of the total waste volume by 2030. Under the circular economy framework, the government prioritizes the development of environmental management systems, targeting industries such as construction materials, plastics, tires, electronic parts, electric vehicle batteries, and solar cells.

Research Study Area 3: The research and development of robust tools to address decision-making challenges involves the creation of decision support systems (DSS) with various analytical processes. Based on theories and literature reviews, the fuzzy analytical hierarchy process (FAHP) is considered an appropriate tool, having been employed by numerous researchers in waste management analysis.

Research Study Area 4: The integration of the three research study areas led to the identification of research questions and gaps, and the development of a decision-making support system to address challenges while promoting the concept of a circular economy. The research questions are as follows:

RQ 1: What is an appropriate hierarchy structure to find the best solution for concrete waste management?

RQ 2: What is the appropriate algorithm for solving problems with construction waste management?

RQ 3: What are the main criteria and sub-criteria, as well as the best alternative solutions?

2. Materials and Methods

The research methodology adopted in this study consisted of two main phases: the first phase involved identifying the research gap, defining research objectives, and creating a decision support system (DSS) using a hierarchy chart. In the second phase, a calculation method was used to determine priorities and alternatives based on the fuzzy analytical hierarchy process. Figure 3 presents the research methodology adapted within the study.

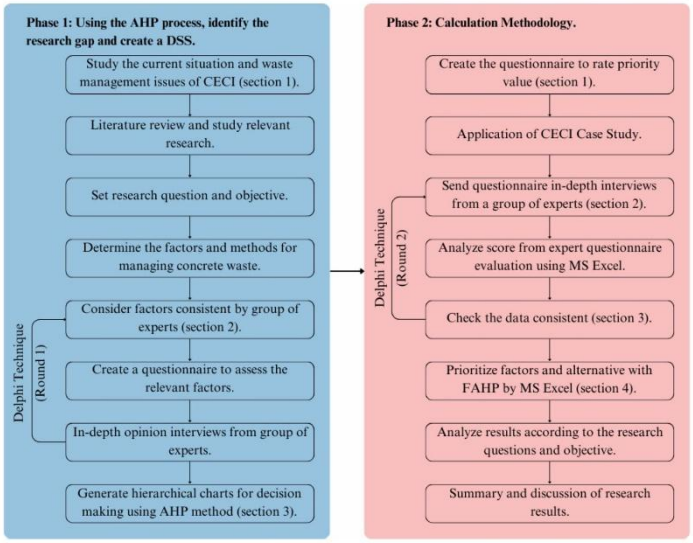


Figure 3. Research methodology.

Phase 1: Identifying the research gap and creating a DSS using the AHP process. The first phase aimed to identify the research gap and develop a decision support system (DSS) for evaluating and comparing options for concrete waste management in the construction industry. This phase proposed a new framework for determining the most suitable method of waste management using the analytical hierarchy process (AHP).

In Phase 1, Section 1, a theoretical study and a review of the relevant literature were conducted to investigate the current situation and issues related to concrete waste management in the circular economy of Thailand's construction industry (CECI). The outcomes of this section led to research questions and objectives, and alternatives, criteria, and sub-criteria were collected from previous studies [67–71].

In Phase 1, Section 2, criteria and options for construction concrete waste management were identified through a literature review. An in-depth interview with CECI experts was conducted using the Delphi technique to identify various criteria for proper selection.

In Phase 1, Section 3, the factors evaluated by experts from the CECI group were used to generate the structure of the decision hierarchy chart using the analytical hierarchy process (AHP), developed by Thomas L. Saaty in the 1980s. Hierarchical charts imitate human thought processes, and the chart was divided into several levels depending on the complexity of the problem.

Phase 2: Calculation Methodology: The second phase of the research framework involved the assessment and prioritization of decisions to determine the most appropriate way to manage concrete waste from the results of the questionnaire.

In Phase 2, Section 1, a questionnaire was created to use in decision making, using an analytical hierarchy process. The priority value was scored for each factor under the principle of pairwise comparison.

In Phase 2, Section 2, the questionnaire was used to perform in-depth interviews with a group of experts. The questionnaire was created by comparing the priorities of the evaluation criteria with the objective of the problem.

In Phase 2, Section 3, discretionary consistency checks were carried out using the AHP method [72]. This method measured the level of consistency of each discretionary set by calculating the consistency ratio (CR) in each matrix.

In Phase 2, Section 4, after the consistency ratio (C.R.) was checked, evaluated, and scored based on the questionnaires of every expert (the resulting consistency ratio had to be less than 0.1 for the pairwise comparison to be considered reasonable and reliable), the main factors and sub-factors were prioritized to decide the most suitable method for concrete waste management. The calculation was performed by using MS Excel, and the analysis was conducting according to the fuzzy AHP method. The geometric mean method was used [73]. In the case of multiple experts in hierarchical analysis ranking an option differently, the geometric mean was used to add up or sum all the data from the experts before calculating the weights from the matrix of mean values [74].

2.1. Delphi Method

The Delphi method is characterized by its ability to structure group communication procedures, enhance communication efficiency, foster group cohesion, and effectively address complex problems [75]. In particular, the expert Delphi method, which is commonly used, aims to gather expert opinions to obtain answers to specific questions. It is well-suited to identifying the core elements of a problem, reducing implicit and complex knowledge, and providing concise statements that objectively clarify diverse evaluations or opinions [76]. Through the Delphi technique, accurate and aligned conclusions can be obtained without requiring experts to attend a brainstorming meeting. This allows for the inclusion of diverse opinions from experts located in different locations, timeframes, and geographical conditions [77]. This technique facilitates the free expression of opinions by experts and is particularly valuable in expert group settings where problem-solving and research processes benefit from the gathered information [78]. In this study, a modified Delphi method was adopted to handle the complexity of selecting and determining key

performance indicators. In the realm of multi-criteria decision-making (MCDM), the Delphi method and the analytic hierarchy process (AHP) are widely utilized tools [79].

The Delphi method serves as a valuable approach to gather expert opinions and insights regarding decision problems. It employs techniques such as semi-structured interviews, group discussions, and questionnaires to facilitate effective communication and mutual understanding among professionals with relevant field experience [80]. Through this method, experts contribute their opinions, ideas, knowledge, and expertise to collectively address the problem at hand [75,81]. The Delphi process consists of several steps, including expert selection, multiple rounds of questionnaire surveys, and iterative feedback until a consensus is reached among the experts [82]. Notably, there are no strict limitations on the number of experts involved in providing feedback; however, it is generally recommended to have a minimum of 9 to 18 experts to ensure a comprehensive decision-making process [83]. To increase data accuracy, it is recommended to use Delphi groups comprising five to twenty experts, as suggested by G. Rowe et al., with the number of experts not being less than five [76]. In the present study, twenty experts were consulted to obtain meaningful feedback regarding the decision problem. The experts consulted in this study belonged to the Circular Economy of the Construction Industry Group (CECI), consisting of five subgroups, namely architects and project consultants, real estate developers, contractors, manufacturers and distributors, and waste management operators, as presented in Figure 4. The questionnaires were sent to 30 relevant experts from diverse backgrounds with over 10 years of experience in the construction industry, holding executive positions responsible for defining the organizational strategy and vision. However, only 20 out of the 30 experts responded to the questionnaires, resulting in a response rate of 74%, which was considered good [84,85].

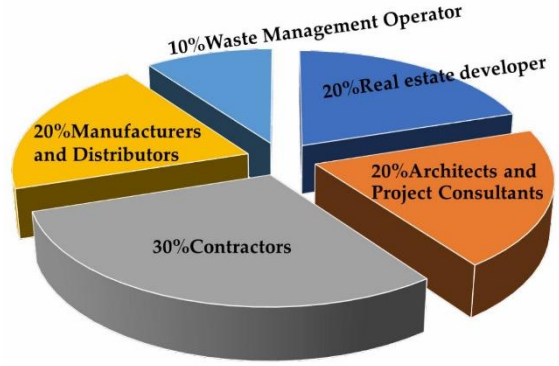


Figure 4. Work areas of the experts who comprised the decision-making group.

The experts were reached via e-mail and direct messages. The questionnaire prepared with Google Forms was sent to them via the same means. Furthermore, interviews with the expert group were conducted through online meetings. References [86,87] were consulted in the implementation of these methods. Microsoft® Excel® 2016, running under a Windows 10 system on a Dell Inc. (Round Rock, TX, USA) Inspiron 5767 (Intel® Core™ i7-7200U CPU, 2.70 GHz, 16 GB of RAM, 64-bit) laptop platform, was used for the calculations of the fuzzy AHP.

2.2. *The Analytical Hierarchy Process (AHP)*

The analytical hierarchy process (AHP) is a valuable method for addressing uncertain situations and decision-making problems that involve multiple evaluation criteria. Its main feature is its ability to structure complex and unstructured problems by using a hierarchical

framework to systematically establish relationships between influence factors. Decision makers can more effectively reflect their intentions through pairwise comparisons [88]. One of the main advantages of the AHP method is its ability to improve decision-making processes traditionally based on intuition. It achieves this by conducting hierarchical system integration analyses that involve clear layers and improve the reliability of assessments [89]. By applying an analysis-level procedure, the AHP method organizes complex multi-objective decision-making problems into a hierarchical structure. Each layer contains different elements that enable the systematic handling of numerous qualitative factors. The decision-making process is guided by hierarchical relationships between criteria and alternatives, which leads to the determination of priorities for each plan. The adopted plan has a higher priority if the values are higher [90]. Throughout the analysis, the AHP method uses eigenvectors to determine the priority order between elements within a particular hierarchical level. It calculates individual element eigenvalues, which serve as a basis for assessing the relative importance of pairwise comparison matrices performed on a nominal scale. When experts' opinions are consistent, the priority values represented by the eigenvectors can be used for decision making or selection according to reference [55]. The AHP method calculates the relative weights in eigenvector values. The weight of each alternative is then obtained by multiplying the eigenvector values for each hierarchy by the number of levels in the hierarchy. The purpose of this process is to determine the final weights for decision making.

The use of the analytic hierarchy process to solve practical problems generally includes four steps [91].

Step 1. Establish a hierarchical structure of the researched problem, define the performance index problem, confirm the goal, and identify the criteria and attributes that must meet the goal. In the problem hierarchy, goals are at the first level, criteria are at the second level, attributes are at the third level, and decision-making alternatives are at the fourth level.

Step 2. Establish a pairwise comparison judgment matrix: there are N factors in the hierarchy and a total of $[N * (N - 1)]/2$ combinations, according to the pairing method.

Step 3. The elements at a particular hierarchical level are compared using a nine-point numerical scale to define how much more important one element is from another [92]. An example of the pair comparison numerical scale of the AHP method is shown in Table 1 [93]. If A and B are the elements at a particular hierarchical level to compare, "1/9" means that B is of absolute importance, "1" means that A and B are of equal importance, and "9" means that A is of absolute importance. All pairwise comparisons are given in a judgment matrix [92].

Table 1. Analytic hierarchy process (AHP) method pair comparison numerical scale [93].

Pair Comparison of A and B										
Evaluating factor A	Absolute unimportance 1/9	Very strong unimportance 1/7	Essential unimportance 1/5	Weak unimportance 1/3	Equal Importance 1	Weak importance 3	Essential importance 5	Very strong importance 7	Absolute importance 9	Evaluating factor B

Solve the weight of each level and verify its consistency; for calculating the relative weight of each element from the judgment matrix, the AHP method adopts the eigenvector method. Because the comparisons in the judgement matrix are made subjectively, a consistency test needs to be performed. The consistency test is based on Saaty's [55] recommendations, using the consistency index (C.I.) and consistency ratio (C.R.) to test. C.I. is the degree of difference between the maximum eigenvalue (λ_{max}) and the order (n). The principal eigenvalue (max) for each matrix is calculated using Equation (1).

$$Aw = \lambda_{max} w \quad (1)$$

where A is the comparison matrix, λ_{max} is the principal eigenvalue and w is the normalized right eigenvector (priority vector). Second, we estimate the consistency index (CI) for each matrix with the dimension 'n' using Equation (2):

$$CI = \frac{\lambda_{max-n}}{n-1} \tag{2}$$

Then, we finally calculate the CR using Equation (3):

$$CR = \frac{CI}{RI} \tag{3}$$

where RI is the random index. The value of RI is selected depending on the dimension of the comparison matrix (n). Table 2 illustrates the different RI values for matrices having the order n from 1 to 10. The more the R.I. value increases with the order of the matrix, if C.R. $\leqq 0.1$, then the more acceptable the rating in the pairwise comparison matrix.

Table 2. Random index (RI) values for different matrix sizes [94].

Matrix Size (*n*)	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Random index	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Step 4. Solve the dominance value of each decision alternative; after passing the consistency test, the dominance value of each decision alternative can be calculated. This is obtained by multiplying the weights of each level and adding them up.

In this study, we checked the consistency ratio (CR) in the analytic hierarchy process (AHP) before prioritizing weights using the fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) geometric mean method. This was consistent with researchers discussing the importance of calculating the CR to evaluate the consistency of the pairwise comparison judgments made by the decision-maker. If the consistency ratio exceeds a predefined threshold, it indicates that the judgments are not consistent and may need to be revised before proceeding with the prioritization of weights using the fuzzy analytical hierarchy process geometric mean method [95–97].

2.3. Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP)

Fuzzy AHP is an extension of AHP and is a beneficial technique for solving complicated decision problems. Any complicated problem can be deconstructed into different hierarchical levels of criteria. Within each hierarchy, a series of pair-wise comparisons are conducted to determine the importance of criteria. In AHP, experts use crisp numbers (e.g., 1, 2, . . . , 9) to determine the importance of criteria, whereas fuzzy AHP experts use natural linguistic terms (e.g., equally important, weakly important) to express their judgments. The linguistic terms represent the corresponding fuzzy numbers defined in fuzzy membership functions [98].

2.3.1. Establishing Fuzzy Numbers

Zadeh [99] introduced fuzzy sets, which are sets with elements of different membership degrees. Fuzzy membership functions define the fuzzy sets based on a 0–1 interval. Triangular fuzzy membership functions are widely used [100,101]. The triangular fuzzy membership function is adopted for its computational simplicity and ability to deal with fuzzy data [102].

A fuzzy number Ne on R will be a triangular fuzzy number (TFN) if its membership function $\mu_{\tilde{N}}(x) : \mathbb{R} \to 0, 1$ is equal to Equation (4), as follows:

$$\mu_{\tilde{N}}(x) = \begin{cases} \frac{x-l}{m-l}, l \le x \le m, \\ \frac{u-x}{u-m}, m \le x \le u, \\ 0, otherwise, \end{cases} \quad (4)$$

where *l*, *m*, and u are the lower, mean, and upper bounds, respectively, of the fuzzy number $\tilde{N}$. TFN can be denoted by $\tilde{N}$ = (*l*, *m*, *u*). The operational laws of TFN $\tilde{N}$ = (l_1, m_1, u_1) and $\tilde{N}$ = (l_2, m_2, u_2) are provided by Equations (5)–(9) (Figure 5).

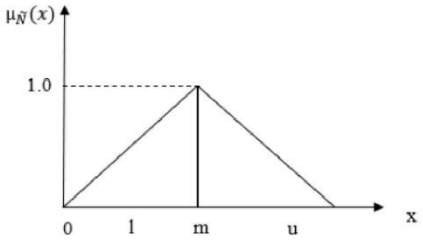


Figure 5. The membership functions of the triangular fuzzy number (TFN).

Addition of the fuzzy number ⊕:

$$\tilde{N_1} \oplus \tilde{N_2} = (l_1, m_1, u_1) \oplus (l_2, m_2, u_2) = (l_1 + l_2, m_1 + m_2, u_1 + u_2) \quad (5)$$

Subtraction of the fuzzy number ⊖:

$$\tilde{N_1} \ominus \tilde{N_2} = (l_1, m_1, u_1) \ominus (l_2, m_2, u_2) = (l_1 - l_2, m_1 - m_2, u_1 - u_2) \quad (6)$$

Multiplication of the fuzzy number ⊗:

$$\tilde{N_1} \otimes \tilde{N_2} = (l_1, m_1, u_1) \otimes (l_2, m_2, u_2) = (l_1 l_2, m_1 m_2, u_1 u_2) \quad (7)$$

for $l_1, l_2 > 0, m_1, m_2 > 0, u_1, u_2 > 0$.

Division of the fuzzy number ⊘:

$$\tilde{N_1} \oslash \tilde{N_2} = (l_1, m_1, u_1) \oslash (l_2, m_2, u_2) = (l_1/l_2, m_1/m_2, u_1/u_2) \quad (8)$$

for $l_1, l_2 > 0, m_1, m_2 > 0, u_1, u_2 > 0$.

Reciprocal of the fuzzy number:

$$\tilde{N}^{-1} = (l_1, m_1, u_1)^{-1} = (1/l_1, 1/m_1, 1/u_1)^{-1} \quad (9)$$

for $l_1, l_2 > 0, m_1, m_2 > 0, u_1, u_2 > 0$.

In Table 3, the triangular fuzzy scale implemented in the current study is introduced. For an example, let us assume that the criterion i has been strongly ranked by experts compared to criterion j. The criterion *i* will be evaluated with fuzzy number $\tilde{N}$ = (4, 5, 6). Alternatively, in the case where criterion *j* appears less important than criterion *i*, the pairwise comparison between criteria *j* and *i* could be represented by the reciprocal of the fuzzy number: $\tilde{N}^{-1}$ = (1/6, 1/5, 1/4).

Table 3. Fuzzy conversion scale of FAHP pair-wise comparisons [103].

Saaty Scale	The Relative Importance of the Two Sub-elements	Fuzzy Triangular Scale	Reciprocal Fuzzy
1	Equally important	1, 1, 1	1, 1, 1
2	Intermediate value between 1 and 3	1, 2, 3	1/3, 1/2, 1
3	Slightly important	2, 3, 4	1/4, 1/3, 1/2
4	Intermediate value between 3 and 5	3, 4, 5	1/5, 1/4, 1/3
5	Important	4, 5, 6	1/6, 1/5, 1/4
6	Intermediate value between 5 and 7	5, 6, 7	1/7, 1/6, 1/5
7	Strongly important	6, 7, 8	1/8, 1/7, 1/6
8	Intermediate value between 7 and	7, 8, 9	1/9, 1/8, 1/7
9	Extremely important	9, 9, 9	1/9, 1/9, 1/9

2.3.2. Determining the Linguistic Variables

Linguistic variables are words or sentences in a natural or artificial language. Each membership function (scale of fuzzy numbers) is defined by three parameters for a symmetrical triangular fuzzy number (i.e., left, middle, and right points) in the range over which a function is defined (see Table 3).

2.3.3. The Fuzzy AHP Method

Step 1: Conduct pair-wise comparison matrices for all criteria in the dimensions of the hierarchy system. Equation (10) shows that $\tilde{d}_{ij}^{k}$ represents the k^{th} decision-maker's preference of the i^{th} criterion over the j^{th} criterion via TFNs.

$$\tilde{A}^{k} = \begin{bmatrix} \tilde{d}_{11}^{k} & \tilde{d}_{12}^{k} & \cdots & \tilde{d}_{1n}^{k} \\ \tilde{d}_{21}^{k} & \tilde{d}_{22}^{k} & \cdots & d_{1n}^{k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{d}_{n1}^{k} & \tilde{d}_{n2}^{k} & \cdots & \tilde{d}_{ij}^{k} \end{bmatrix} \tag{10}$$

Step 2: If more than one decision-maker is present, then the preferences for each decision maker are averaged, as shown in the following equation:

$$\tilde{d}_{ij}^{k} = \frac{\sum_{k=1}^{k} \tilde{d}_{ij}^{k}}{K} \tag{11}$$

Step 3: Update the pair-wise comparison matrices for all criteria in the hierarchy system dimensions on the basis of the averaged preferences.

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} \tilde{d}_{11} & \cdots & \tilde{d}_{n1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{d}_{1n} & \cdots & \tilde{d}_{nn} \end{bmatrix} \tag{12}$$

Step 4: Use the geometrical mean technique to define the fuzzy geometrical mean and fuzzy weights of each criterion.

$$\tilde{r}_{i} = \left(\prod_{j=1}^{n} \tilde{d}_{ij} \right)^{1/n}, i = 1, 2, \ldots, n \tag{13}$$

Step 5: Determine the fuzzy weight of the criteria.

$$\tilde{w}_{i} = \tilde{r}_{i} \otimes \left(\tilde{r}_{1} \oplus \tilde{r}_{2} \ldots \oplus \tilde{r}_{n} \right)^{-1} \tag{14}$$

Step 6: Calculate the average and normalized weight criteria.

$$M_i = \frac{\widetilde{w_1} \oplus \widetilde{w_2} \oplus \ldots \oplus \widetilde{w_n}}{n} \tag{15}$$

$$N_i = \frac{M_i}{M_1 \oplus M_2 \oplus \ldots \oplus M_n} \tag{16}$$

3. Empirical Data Analysis

3.1. AHP Model Construction

The first step in the proposed AHP model is determining alternatives and criteria. For this purpose, a comprehensive literature review was carried out and most of the alternatives and criteria were derived through previous studies [50,68,69,94] (also [70,104–112]). In addition to the above methodology, the determination of alternatives and criteria was further refined through comprehensive discussions held during professional meetings with experts in this field. The criteria were effectively categorized into the following groups: social, economic, environmental, and technical. The social group encompasses factors such as new job creation and public acceptance. The economic group consists of operating costs and investment costs. The environmental group considers aspects such as air pollution and energy consumption. Finally, the technical group considers factors related to final quality and technical feasibility. These classifications are presented in Tables 4 and 5 for reference. Additionally, the decision hierarchy for AHP was constructed, as shown in Figure 6.

Table 4. Description of criteria and sub criteria in the analytical hierarchy process (AHP) model.

Main Criteria	Sub Criteria	Description
Economic	Operating costs (E1)	All operating costs occurred during the alternative's operation regarding concrete management.
	Investment costs (E2)	All investment costs occurred during the alternative's operation regarding concrete management.
Environmental	Air pollution (EN1)	Contaminants were distributed in the air during the alternative's operation regarding concrete management.
	Energy consumption (EN2)	Energy consumption during the alternative's operation regarding concrete management.
Social	New job creation (S1)	New employment opportunity during the alternative's operation regarding concrete management.
	Public acceptance (S2)	Creating motivations to stimulate public acceptance for the alternative's operation regarding concrete management.
Technical	Final quality (T1)	Efficiency and quality of the finished product after the alternative's operation regarding concrete management.
	Technical feasibility (T2)	Technology requiring expert personnel for the alternative's operation regarding concrete management.

Table 5. Description of concrete waste management alternatives used in AHP analysis.

Concrete Waste Management Alternative	Description
Landfill (LA)	All construction and demolition concrete waste is eliminated in landfill.
Recycled coarse aggregate (RCA)	Recycled coarse aggregate comes from the concrete pile remains from demolition, such as concrete pillars, beams, and walls, crushed into a standard size. The reinforced steel was separated from the concrete. The concrete was used as a substitute for Natural Coarse Aggregate (NCA) such as natural rock and gravel.
Upcycling recycled concrete. *(URC)*	Recycled concrete (RC) means concrete that is composed of mortar and recycled coarse aggregate (RCA), combined to produce new materials, new products with better quality, or new products with better environmental conservation value.

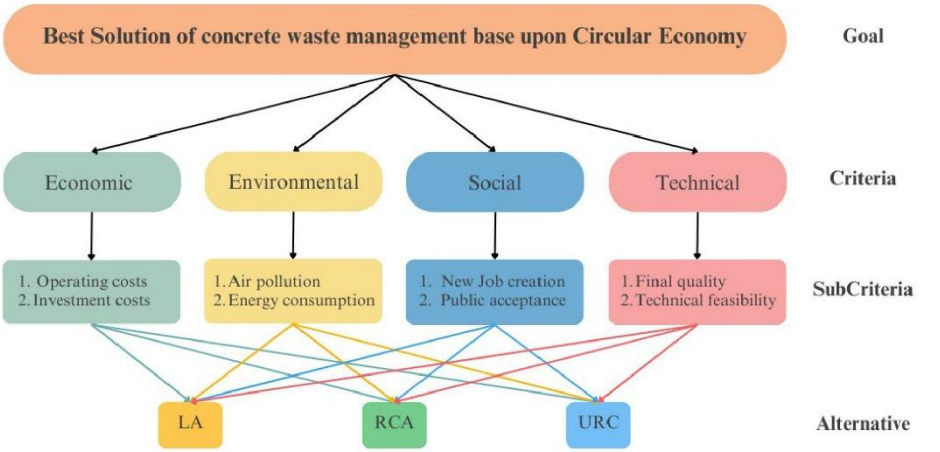


Figure 6. General hierarchical structure of concrete waste management alternatives in terms of criteria and sub-criteria. LA = landfill; RCA = recycled coarse aggregate; URC = upcycling recycled concrete.

3.2. *Pairwise Comparison by Solicitation of Experts' Opinions*

Upon receiving the responses from the online survey conducted among 20 experts, a rigorous analysis of the data was conducted. The experts were asked to evaluate, score, and compare various factors related to the management of concrete waste based on the objectives established for each issue. The priority values for each factor were determined through the process of pairwise comparison, where the experts indicated the factors that were either more or less important in relation to other factors influencing concrete waste management. These comparisons were represented using numerical values ranging from 1 to 9, as outlined in Table 6. The experts provided their assessments by marking factors that were either superior or equal to other factors in terms of their impact on concrete waste management.

Table 6. An example of an expert scoring for a pairwise comparison between each important factor which affects concrete waste management.

Criteria	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Criteria
Economic											x							Environmental
Economic											x							Social
Economic							x											Technical
Environmental							x											Social
Environmental					x													Technical
Social							x											Technical

Subsequently, the pairwise comparison results were translated into a matrix format, known as the pairwise comparison matrix. The weight for each factor within each matrix was then calculated using the eigenvector method, implemented in Microsoft Excel. In accordance with the hierarchical structure, experts made comparisons between factors in a pairwise manner. The analytic hierarchy process (AHP) was employed to ensure the consistency and agreement of experts' decisions before proceeding with the prioritization process. The desired method was then applied, and the data were further analyzed using fuzzy AHP with the geometric mean method.

This comprehensive approach ensured that the experts' judgments and preferences were carefully considered and incorporated into the decision-making process, ultimately leading to robust and reliable outcomes.

The experts' assessments regarding the importance of each factor in concrete waste management are presented in the matrix table below. The ratings for each factor were compared pairwise, and the results of these comparisons are displayed in Table 7.

Table 7. Examples of evaluating the values of design under cost criteria.

Criteria	Economic	Environmental	Social	Technical	Eigenvector
Economic	1	1/3	1/3	3	0.159
Environmental	3	1	3	5	0.501
Social	3	1/3	1	3	0.263
Technical	1/3	1/5	1/3	1	0.077

Matrix A

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{1j} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{2j} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{3j} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{4j} \end{bmatrix}$$

For example, if $a_{24} = 5$, then the Environmental (EN) objective is slightly more important than the Technical (T) objective, and $a_{42} = 1/5$.

Then, the corresponding normalized matrix is:

Example $a_{11} = 1/(1 + 3 + 3 + 1/3) = 0.136$
$a_{12} = 1/3/(1/3 + 1 + 1/3 + 1/5) = 0.179$
$a_{22} = 1/(1/3 + 1 + 1/3 + 1/5) = 0.536$
$a_{14} = 3/(3 + 5 + 3 + 1) = 0.250$

$$A_{\text{Normalized}} = \begin{bmatrix} 0.136 & 0.179 & 0.071 & 0.250 \\ 0.409 & 0.536 & 0.643 & 0.417 \\ 0.409 & 0.179 & 0.214 & 0.250 \\ 0.045 & 0.107 & 0.071 & 0.083 \end{bmatrix}$$

Eigenvector = (0.136 + 0.179 + 0.071 + 0.250)/4 = 0.159,
(0.409 + 0.536 + 0.643 + 0.417)/4 = 0.501, (0.409 + 0.179 + 0.214 + 0.250)/4 = 0.263,
(0.045 + 0.107 + 0.071 + 0.083)/4 = 0.077.

Following the pairwise comparisons, we computed the consistency index (C.I.) according to Saaty's method [55]. The consistency index measures the degree of inconsistency within the judgments provided. This metric allows for a systematic approach to enhance the consistency of the evaluations.

The measure of inconsistency was applied to ensure the accuracy and reliability of the judgments made by the experts. By analyzing the consistency index, adjustments can be made to improve the consistency of the provided judgments. The resulting matrix, displaying the calculated consistency index values is presented below:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 1/3 & 3 \\ 3 & 1 & 3 & 5 \\ 3 & 1/3 & 1 & 3 \\ 1/3 & 1/5 & 1/3 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0.159 \\ 0.501 \\ 0.263 \\ 0.077 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.644 \\ 2.152 \\ 1.138 \\ 0.318 \end{bmatrix}$$

λ_{max} = ((0.644/0.159) + (2.152/0.501) + (1.138/0.263) + (0.318/0.077))/4 = 4.201;
C.I. = $(\lambda_{max} - n)/(n - 1)$;
C.I. = $(4.201 - 4)/(4 - 1)$ = 0.067;
C.R. = C.I./R.I. = 0.067/0.90 = 0.075 < 0.1 (The judgments are consistent).

The consistency ratio (C.R.) is determined by comparing the consistency index (C.I.) with the corresponding values from the sets of random index (R.I.) numbers provided in Table 2. For this study, with a total of N = 4 factors, the appropriate R.I. value was 0.90. The R.I. values represent the average random consistency index obtained from a large sample of reciprocally generated matrices using a scale ranging from 1/9 to 9.

To evaluate the consistency of the judgments made by the decision-makers, the C.R. was calculated and compared to the threshold value of approximately 0.10. If the C.R. fell within this range, it indicates that the judgments were deemed consistent. In the present study, all of the judgments provided by the decision-makers demonstrated consistency, since the C.R. values were below the threshold of 0.10.

As part of the methodology, the consistency of the pairwise comparison data obtained from each expert (totaling 20 experts) was assessed using the analytical hierarchy process (AHP) approach. This step was undertaken to ensure the reliability and accuracy of the data, before proceeding with the prioritization of weights using the fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) with the geometric mean method.

3.3. Implementation of the Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) Method

Once the problem hierarchy structure had been defined and the consistency ratio (CR) had been checked using the analytic hierarchy process (AHP), the subsequent step involved estimating data to prioritize factors and identify the optimal alternative for problem resolution. To accomplish this, the fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) was employed. The FAHP methodology allows for a more comprehensive and nuanced analysis by considering the uncertainty and vagueness that may exist in decision making. By incorporating fuzzy logic principles, the FAHP enables a more flexible and robust evaluation of alternatives and criteria.

Therefore, in this study, the FAHP was utilized to estimate the necessary data for prioritizing factors and ultimately determine the most suitable alternative for addressing the problem at hand. This approach considers various aspects of uncertainty and

ensures a more comprehensive and accurate decision-making process. The FAHP method encompasses the following steps:

Step 1: The fuzzy conversion scale of the FAHP pair-wise comparison in Table 3 is used to construct a matrix for each criterion.

Steps 2 and 3: Since there were twenty decision-makers, the preferences of each decision-maker are averaged using Equation (11); the following calculation shows how to average the preference for the first criterion (Economic) over the second criterion (Environmental). Table 8 shows the pair-wise comparison matrices for all of the criteria in the hierarchy system dimensions based on average preferences.

$$\tilde{d}_{12} = \begin{pmatrix} \text{average}\left(2,\frac{1}{4},2,1,\frac{1}{6},2,\frac{1}{4},\frac{1}{4},3,\frac{1}{6}2,2,\frac{1}{4},2,1,\frac{1}{7},\frac{1}{4},\frac{1}{4},1,1\right), \\ \text{average}\left(3,\frac{1}{3},3,1,\frac{1}{5},3,\frac{1}{3},\frac{1}{3},4,\frac{1}{5},3,3,\frac{1}{3},3,2,\frac{1}{6},\frac{1}{3},\frac{1}{3},1,1,\right), \\ \text{average}\left(4,\frac{1}{2},4,1,\frac{1}{4},4,\frac{1}{2},\frac{1}{2}5,\frac{1}{4},4,4,\frac{1}{2},4,3,\frac{1}{5},\frac{1}{2},\frac{1}{2}1,1\right) \end{pmatrix} = \left(1,\frac{3}{2},2\right)$$

Table 8. Comparison matrix for criteria.

Criteria	Economic	Environmental	Social	Technical
Economic	(1, 1, 1)	$(1, \frac{3}{2}, 2)$	$(1, \frac{3}{2}, 2)$	$(\frac{12}{7}, \frac{5}{2}, \frac{13}{4})$
Environmental	$(\frac{3}{2}, 2, \frac{5}{2})$	(1, 1, 1)	$(\frac{11}{6}, \frac{5}{2}, \frac{16}{5})$	$(\frac{17}{7}, \frac{23}{7}, \frac{29}{7})$
Social	$(\frac{8}{5}, \frac{11}{5}, \frac{17}{6})$	$(\frac{6}{7}, \frac{6}{5}, \frac{8}{5})$	(1, 1, 1)	$(\frac{19}{9}, \frac{14}{5}, \frac{7}{2})$
Technical	$(\frac{1}{2}, \frac{5}{7}, 1)$	$(\frac{4}{9}, \frac{3}{5}, \frac{5}{6})$	$(\frac{2}{3}, 1, \frac{4}{3})$	(1, 1, 1)

Step 4: Calculate the fuzzy geometric mean. The economic criteria are calculated using Equation (13). Then, the same procedure is repeated for each criterion.

$$\tilde{r}_1 = \left[\left(1*1*1*\frac{12}{7}\right)^{\frac{1}{4}}, \left(1*\frac{3}{2}*\frac{3}{2}*\frac{5}{2}\right)^{\frac{1}{4}}, \left(1*2*2*\frac{13}{4}\right)^{\frac{1}{4}}\right] = (1.1809,\ 1.5357,\ 1.8832)$$

Table 9 shows the geometric mean of fuzzy comparison values for each criterion ($\tilde{r}_i$), the vector summation of each r_i and the inverse power of the summation vector in increasing order.

Table 9. Fuzzy geometric mean for criteria.

Criterion	$\tilde{r}_i$
Economic	(1.1809, 1.5357, 1.8832)
Environmental	(1.6056, 2.0101, 2.4067)
Social	(1.3016, 1.6432, 1.9917)
Technical	(0.6358, 0.8033, 1.0125)
Total	(4.7240, 5.9922, 7.2942)
Reverse	(0.2117, 0.1669, 0.1371)
Increasing order	(0.1371, 0.1669, 0.2117)

Step 5: Calculate the fuzzy weight of each criterion, $\tilde{w}_i$, using Equation (14). Below is the computation of the fuzzy weight for the Economic criterion:

$$\tilde{w}_i = (1.1809(0.1371), 1.5357(0.1669), 1.8832(0.2117)) = (0.1619, 0.2563, 0.3987)$$

The same process is repeated for the calculation of the fuzzy weight for each criterion. Table 10 shows the fuzzy weight ($\tilde{w}_i$), the weight (M_i), the relative weight of (N_i) and the rank for each criterion.

Table 10. Fuzzy weight, weight, relative weight and rank for each criterion.

Criteria	Fuzzy Weight ($\tilde{w}_i$)	Weight (M_i)	Relative Weight (N_i)	Rank
Economic	(0.1619, 0.2563, 0.3987)	0.2723	0.2559	3
Environmental	(0.2201, 0.3355, 0.5095)	0.3550	0.3337	1
Social	(0.1784, 0.2742, 0.4216)	0.2914	0.2739	2
Technical	(0.0872, 0.1341, 0.2143)	0.1452	0.1365	4

Step 6: Calculate the weight of each criterion. Below is the calculation of the weight for criteria using Equation (15), and by applying the same equation the weight acquired for each criterion was as follows: Economic = 0.2723, Environmental = 0.3550, Social = 0.2914 and Technical = 0.1452, respectively. The weight of each criterion is shown in Table 10.

$$M_1 = \frac{0.1619 + 0.2563 + 0.3987}{3} = 0.2723$$

Find the relative weight and rank all the criteria. Use Equation (16) to calculate the relative weight of each criterion and alternative. The working example below shows how to calculate the weight for the Economic criterion:

$$N_1 = \frac{0.2723}{0.2723 + 0.3550 + 0.2914 + 0.1452} = 0.2559$$

The same process of calculation is repeated to determine the relative weights for each criterion. The alternative concrete waste management options are ranked according to the following main criteria, with the results shown in Table 10.

The next crucial step in the assessment process involves calculating the score assessment matrix to determine the highest scores for each main criterion associated with concrete waste management options, namely landfill, RCA (recycled concrete aggregate), and upcycling recycled concrete. The weighted values for the pairwise sub-criteria comparisons for each main criterion can be found in Table 11.

Table 11. Pairwise comparison of sub-criteria with respect to relative criteria. (Note: CR = 0.0).

Criteria	Economic (E)		Environmental (EN)		Social (S)		Technical (T)		Priority Vector
Sub-criteria	(E1)	(E2)	(EN1)	(EN2)	(S1)	(S2)	(T1)	(T2)	
E1	1, 1, 1	$(\frac{3}{2}, 2, \frac{18}{7})$	--------	--------	--------	--------	--------	--------	0.4634
E2	$(\frac{11}{5}, \frac{11}{4}, \frac{10}{3})$	1, 1, 1	--------	--------	--------	--------	--------	--------	0.5366
EN1	--------	--------	1, 1, 1	$(\frac{24}{7}, \frac{38}{9}, 5)$	--------	--------	--------	--------	0.7144
EN2	--------	--------	$(\frac{1}{2}, \frac{2}{3}, \frac{5}{6})$	1, 1, 1	--------	--------	--------	--------	0.2856
S1	--------	--------	--------	--------	1, 1, 1	$(\frac{4}{9}, \frac{4}{7}, \frac{3}{4})$	--------	--------	0.2608
S2	--------	--------	--------	--------	$(\frac{23}{6}, \frac{33}{7}, \frac{17}{3})$	1, 1, 1	--------	--------	0.7392
T1	--------	--------	--------	--------	--------	--------	1, 1, 1	$(\frac{5}{2}, 3, \frac{29}{8})$	0.5676
T2	--------	--------	--------	--------	--------	--------	$(\frac{13}{9}, \frac{16}{9}, \frac{19}{9})$	1, 1, 1	0.4324

In the evaluation process, when a criterion consists of several sub-criteria, the ratings assigned to each alternative are multiplied by both the local weights and the global weights of each sub-criterion. As an example for the Economic criterion, which includes the sub-criteria of "operating costs" and "investment costs", the specific numerical values are provided in Table 12. The following procedure is followed to determine the priority vector for alternatives related to the Economic criterion:

$$\begin{bmatrix} 0.1361 & 0.1442 \\ 0.3914 & 0.3511 \\ 0.4724 & 0.5046 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.4634 \\ 0.5366 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1405 \\ 0.3698 \\ 0.4897 \end{bmatrix}$$

Table 12. Local and global weights of the main criteria and sub-criteria.

Criteria	Weight	Sub-Criteria	Local Weight	Alternatives	Global Weight
Economic	0.256	Operating costs	0.463	Landfill	0.136
				RCA	0.391
				URC	0.472
		Investment costs	0.537	Landfill	0.144
				RCA	0.351
				URC	0.505
Environmental	0.334	Air pollution	0.714	Landfill	0.329
				RCA	0.317
				URC	0.354
		Energy consumption	0.286	Landfill	0.216
				RCA	0.331
				URC	0.453
Social	0.274	New job creation	0.261	Landfill	0.160
				RCA	0.358
				URC	0.482
		Public acceptance	0.739	Landfill	0.095
				RCA	0.385
				URC	0.521
Technical	0.136	Final quality	0.568	Landfill	0.104
				RCA	0.398
				URC	0.498
		Technical feasibility	0.432	Landfill	0.234
				RCA	0.323
				URC	0.443

The computed priority values clearly demonstrate that upcycling recycled concrete attained the highest priority score for the Economic criterion, with a value of 0.489. This indicates that, among the various concrete waste management options evaluated, upcycling recycled concrete exhibited the strongest economic advantage.

Subsequently, the priority values for the selection of concrete waste were calculated for all of the main criteria. In the next stage, the focus shifted towards evaluating the most appropriate concrete waste management options that aligned with the objectives of this study. To achieve this, the rating of each alternative was multiplied by the weights assigned to each main criterion, as well as the priority vector representing the relative importance of alternatives for each criterion. By aggregating these calculated values, a priority vector could be obtained which highlighted the best alternatives for concrete waste management. The resulting priority vector is presented below:

$$\begin{bmatrix} 0.1405 & 0.2967 & 0.1118 & 0.1603 \\ 0.3698 & 0.3213 & 0.3778 & 0.3653 \\ 0.4897 & 0.3820 & 0.5104 & 0.4744 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.2559 \\ 0.3337 \\ 0.2739 \\ 0.1365 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1875 \\ 0.3552 \\ 0.4573 \end{bmatrix}$$

The calculated priority values indicate that the most optimal alternative for concrete waste management is the utilization of up-cycling recycled concrete, with a priority value of 0.457. Following closely behind is the option of recycled coarse aggregate, with a priority value of 0.355. Lastly, landfilling is the least preferable alternative for concrete waste management, with a priority value of 0.188.

4. Research Results and Discussion

The decision-making process in this study involved assigning weights to different criteria, and the criterion with the highest weight was considered the most important. The

FAHP priority weight estimates for each criterion were used to determine the criterion with the highest weight, and the results are presented in Table 12.

According to the findings, experts placed the highest priority on the environmental criteria, with a weight of 0.334. This suggests that construction industry groups involved in the study were particularly concerned about construction and demolition waste issues. The construction industry is widely recognized as a major source of pollution, as its waste significantly contributes to environmental degradation. Unfortunately, a significant portion of construction waste is often disposed of in landfills or open areas, leading to further pollution. The second-highest priority for the construction industry was given to the social criteria, with a weight of 0.274. This implies that the construction industry recognizes its role in enhancing overall quality of life and social welfare. The effective management of concrete waste can positively impact various social aspects, such as improving living conditions, community well-being, and public health. By effectively managing concrete waste, the industry can contribute positively to society by reducing negative impacts and promoting sustainable practices. The economic criteria represented the third-highest priority for the construction industry (0.256), suggesting that the industry values economic considerations in the decision-making process. The efficient management of concrete waste can lead to cost savings, resource optimization, and the potential creation of economic opportunities through the utilization of recycled materials.

This study conducted a comprehensive comparison of different concrete waste management alternatives, focusing on four key criteria: economic, social, environmental, and technical. The findings of this study, as presented in Figure 7, revealed that upcycling recycled concrete waste emerged as the most effective waste management option. Across all four criteria, upcycling recycled concrete received the highest priority score, indicating that it is considered the best method for managing concrete waste.

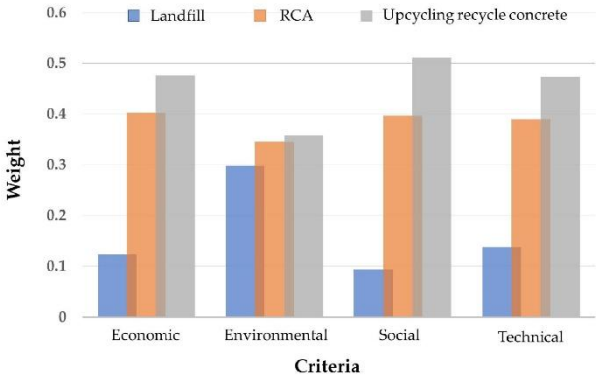


Figure 7. The priority weight of alternatives based on the considered criteria.

Upcycling, a process that involves reusing materials to create products of higher value or quality, offers a transformative approach to handling waste concrete. By repurposing waste concrete, it can be transformed into new and useful products, contributing to resource efficiency and reducing the need for virgin materials. This method demonstrates superiority across multiple aspects, including economics, social impact, environmental impact, and technical feasibility. Economically, upcycling recycled concrete can prove advantageous by promoting resource conservation and reducing material costs. This allows for the creation of valuable products, potentially opening up new markets and business opportunities. From a social perspective, upcycling contributes to sustainable development and improves the population's quality of life. It helps to mitigate the negative impacts

associated with traditional waste disposal methods and fosters a positive perception of the construction industry. In terms of environmental impact, upcycling recycled concrete is an environmentally friendly approach. It reduces the dependence on landfilling, which is associated with various environmental issues. Landfilling, on the other hand, emerged as the least-preferred option for managing concrete waste in this study. It obtained the lowest priority scores across all four criteria: environment, economy, social, and technical.

Landfilling involves the dumping of waste materials in designated areas, which can have detrimental effects on the environment. It contributes to land degradation, poses risks to groundwater and soil quality, and generates greenhouse gas emissions. Moreover, landfilling has negative social implications, such as causing the degradation of local communities' well-being and fostering negative perceptions of the construction industry. From an economic standpoint, reliance on landfilling is not sustainable in the long run due to land scarcity and limited landfill capacities.

This study carried out a comprehensive assessment of various alternative methods for managing concrete waste, and the results indicate that upcycling recycled concrete is the best option, with a priority weight of 0.457. This finding highlights the effectiveness of upcycling recycled concrete compared to other alternatives. Upcycling involves the process of reusing waste concrete to create new and valuable products, contributing to the circular economy and reducing the need for raw materials. By assigning the highest weight to upcycling, this study indicates that it is considered the most favorable method for managing concrete waste. The next most-viable alternatives identified in the study were recycled coarse aggregate, with a priority weight of 0.355, and landfilling, with a weight of 0.188, as presented in Figure 8.

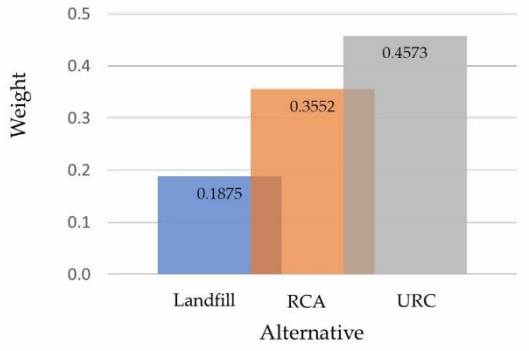


Figure 8. The priority weights of the alternatives for concrete waste management.

Recycled coarse aggregate involves crushing and reusing concrete waste as a replacement for natural aggregate in new construction projects. While this method provides some level of waste reduction and resource conservation, it falls behind upcycling in terms of its effectiveness. Landfilling, on the other hand, received the lowest priority weight among the alternatives, indicating that it is the least preferred option for managing concrete waste.

By prioritizing the upcycling of recycled concrete, the construction industry acknowledges the need to address these challenges and adopt more sustainable waste management practices. Upcycling not only offers an effective solution for reducing the environmental impact of concrete waste, but also provides economic and social benefits. It allows for the creation of new and valuable products, contributing to job creation, resource efficiency, and the overall sustainability of the construction industry.

In summary, this study's findings indicate that upcycling recycled concrete is the most effective alternative for managing concrete waste, surpassing other options such as recycled

coarse aggregate and landfilling. The prioritization of upcycling reflects the construction industry's concern about the high volume and weight of concrete waste and highlights the industry's commitment to sustainable waste management practices. By embracing upcycling and other innovative approaches, the construction industry can mitigate the environmental impact of its activities and contribute to a more sustainable and circular economy.

5. Conclusions

The conclusions of this study highlight several important achievements and contributions to the field of construction waste management. Firstly, in response to research question 1, this study successfully determined an appropriate hierarchical structure for a decision-support system in concrete waste management. The hierarchical chart was divided into four levels, each level containing different definitions and criteria. This hierarchical structure provides a systematic framework for evaluating concrete waste management options and facilitates informed decision-making.

Addressing research question 2, the study emphasized the importance of the circular economy concept in construction waste management. By focusing on environmental criteria and sustainable practices, the research identified upcycling recycled concrete as the best alternative for managing concrete waste, followed by the recycling of coarse aggregates and landfilling. This emphasis on sustainability aligns with the objectives of efficient resource utilization and reducing environmental impacts.

Regarding research question 3, this study proposed the fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) as an effective tool for determining the importance of factors in concrete waste management. The FAHP integrates fuzzy logic theory, enabling the evaluation of both quantitative and qualitative data. This approach considers uncertainty and ambiguity in decision-making, mimicking human thought processes. The FAHP is the preferred algorithm for solving construction waste management problems, providing a more comprehensive and nuanced analysis.

Furthermore, this study acknowledges several limitations that should be considered. Firstly, the focus of the CECI Group on residential and commercial construction projects limits the generalizability of the findings. Future research should explore concrete waste management in other construction project types, such as infrastructural, industrial, underground and marine work, to obtain a more comprehensive understanding of waste management practices in diverse contexts. Additionally, the number of experts involved in the FAHP method is crucial, as fewer than five experts may lead to limited preferences that can bias the results. The subjective nature of the FAHP method emphasizes the importance of addressing potential biases introduced by experts' linguistic judgments. Although the geometric mean can help consolidate individual judgments, it should not be solely relied upon to ensure the validity of the results. To strengthen validity and minimize individual biases, it is advisable to involve more experts who understand the subject matter and theoretical framework underpinning the analytical hierarchical decision-making process. The careful selection of experts who are committed, knowledgeable, and willing to invest their time in providing accurate opinions, coupled with clear and well-designed questionnaires, plays a crucial role in ensuring the reliability and consistency of the information obtained.

To advance the field of construction waste management, the authors have identified key areas that warrant further research. They propose the development of an online technology system that efficiently matches construction waste with potential users, thereby reducing environmental waste. This system would enhance the user experience by integrating with social networking platforms and web-based systems, facilitating improved communication and collaboration among relevant stakeholders. Given that selecting a construction waste management method often benefits from group decision making, the proposed system would enable waste management companies and users to effectively exchange information. Moreover, the authors emphasize the need for the construction industry to enhance its waste matching process to promote the adoption of a circular economy. To achieve this, they suggest designing a web-based system with an intuitive

and easily accessible interface, offering advanced search options, waste material listings, and a communication feature to facilitate material transfer negotiations between users.

The research findings and recommendations contribute to the development of effective concrete waste management methods. By incorporating regulatory balance, technology systems, human management and economic management, the proposed management system offers a holistic approach to waste reduction. The introduction of an online technology system to match construction waste with potential users is a particularly innovative suggestion. This system, integrated into social networking platforms and web-based systems, enhances communication, collaboration, and the efficient utilization of construction waste.

Overall, this research work provides valuable insights and serves as a reference and guide for future sustainable operations in various sectors related to the construction industry. The achievements obtained through this study, including the identified hierarchical structure, the emphasis on the circular economy concept, and the application of the FAHP algorithm, contribute to advancing construction waste management practices. These achievements promote waste reduction, enhance efficiency, and foster sustainability in the construction industry.

Author Contributions: K.S. collected the literature and data, prepared the questionnaire, conducted the interview with the experts to solicit their opinion, interpreted the data, analyzed the results of the pairwise comparisons, and prepared the original draft; P.B. was involved in conceptualization, methodology, investigation, data curation, and formal analysis, and participated in writing the text, project administration, and resource management. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: The study was approved by the Research Ethics Review Committee for Research Involving Human Subjects: The Research Ethics Review Committee at Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Chonburi, Thailand (The approval number: COA No.001, RMUTTO REC No. 036/2556, with an approval date of 12 January 2023).

Informed Consent Statement: Informed consent was obtained when questionnaires were filled out.

Data Availability Statement: The datasets generated and analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Acknowledgments: The completion of this study could not have been possible without Rajamagala University of Technology Phra Nakhon. The authors also thank the Thailand Circular Economy Construction Industry Group (CECI) for providing support in data collection.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Lima, L.; Trindade, E.; Alencar, L.; Alencar, M.; Silva, L. Sustainability in the construction industry: A systematic review of the literature. *J. Clean. Prod.* **2020**, *289*, 125730. [CrossRef]
2. Smol, M.; Kulczycka, J.; Henclik, A.; Gorazda, K.; Wzorek, Z. The possible use of sewage sludge ash (SSA) in the construction industry as a way towards a circular economy. *J. Clean. Prod.* **2015**, *95*, 45–54. [CrossRef]
3. Sandanayake, M.S. Environmental Impacts of Construction in Building Industry—A Review of Knowledge Advances, Gaps and Future Directions. *Knowledge* **2022**, *2*, 139–156. [CrossRef]
4. De Magalhães, R.F.; Danilevicz Ângela, D.M.F.; Saurin, T.A. Reducing construction waste: A study of urban infrastructure projects. *Waste Manag.* **2017**, *67*, 265–277. [CrossRef]
5. Anink, D.; Boonstra, C.; Mak, J. *Handbook of Sustainable Building: An Environmental Preference Method for Selection of Materials for Use in Construction and Refurbishment*; James & James: London, UK, 1996; p. 8.
6. Solís-Guzmán, J.; Marrero, M.; Montes-Delgado, M.V.; Ramírez-de-Arellano, A. A Spanish model for quantification and management of construction waste. *Waste Manag.* **2009**, *29*, 2542–2548. [CrossRef]
7. Yan, R.; Xiang, X.; Cai, W.; Ma, M. Decarbonizing residential buildings in the developing world: Historical cases from China. *Sci. Total Environ.* **2022**, *847*, 157679. [CrossRef]
8. Baek, C.; Park, S.-H.; Suzuki, M.; Lee, S.-H. Life cycle carbon dioxide assessment tool for buildings in the schematic design phase. *Energy Build.* **2013**, *61*, 275–287. [CrossRef]

9. Luangcharoenrat, C.; Intrachooto, S.; Peansupap, V.; Sutthinarakorn, W. Factors influencing construction waste generation in building construction: Thailand's perspective. *Sustainability* **2019**, *11*, 3638. [CrossRef]
10. Wang, J.; Wu, H.; Duan, H.; Zillante, G.; Zuo, J.; Yuan, H. Combining life cycle assessment and Building Information Modelling to account for carbon emission of building demolition waste: A case study. *J. Clean. Prod.* **2018**, *172*, 3154–3166. [CrossRef]
11. Duan, H.; Miller, T.R.; Liu, G.; Vivian, W.; Tam, Y. Construction Debris Becomes Growing Concern of Growing Cities. *Waste Manag.* **2019**, *83*, 1–5. [CrossRef]
12. Eurostat—Generation of Waste by Waste Category, Hazardousness and NACE Rev. 2 Activity. Available online: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_wasgen/default/table?lang=en (accessed on 28 March 2023).
13. U.S. EPA-Facts and Figures about Materials, Waste and Recycling, Construction and Demolition Debris: Material-Specific Data. Available online: https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling (accessed on 28 March 2023).
14. Jahan, I.; Zhang, G.; Bhuiyan, M.; Navaratnam, S.; Shi, L. Experts' Perceptions of the Management and Minimisation of Waste in the Australian Construction Industry. *Sustainability* **2022**, *14*, 11319. [CrossRef]
15. Poon, C.S.; Yu, A.T.; Ng, L. On-site sorting of construction and demolition waste in Hong Kong. *Resour. Conserv. Recycl.* **2001**, *32*, 157–172. [CrossRef]
16. Poon, C.S.; Yu, A.T.W.; Wong, S.W.; Cheung, E. Management of construction waste in public housing projects in Hong Kong. *Constr. Manag. Econ.* **2004**, *22*, 675–689. [CrossRef]
17. Hoang, N.H.; Ishigaki, T.; Kubota, R.; Yamada, M.; Kawamoto, K.K. A review of construction and demolition waste management in Southeast Asia. *J. Mater. Cycles Waste Manag.* **2020**, *22*, 315–325. [CrossRef]
18. Kofoworola, O.F.; Gheewala, S.H. Estimation of construction waste generation and management in Thailand. *Waste Manag.* **2009**, *29*, 731–738. [CrossRef]
19. Manowong, E. Investigating factors influencing construction waste management efforts in developing countries: An experience from Thailand. *Waste Manag. Res.* **2012**, *30*, 56–71. [CrossRef]
20. Fachratov, M. Crushed concrete as concrete aggregate in the manufacture of reinforced concrete structures. In Proceedings of the MATEC Web of Conferences-International Scientific Conference Environmental Science for Construction Industry—ESCI 2018, Ho Chi Minh City, Vietnam, 2–5 March 2018; Volume 193. [CrossRef]
21. U.S. EPA. Advancing Sustainable Materials Management: Facts and Figures Report. Available online: https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-01/documents/2018_ff_fact_sheet_dec_2020_fnl_508.pdf (accessed on 28 March 2023).
22. Abbas, A.; Fathifazl, G.; Isgor, O.B.; Razaqpur, A.G.; Fournier, B.; Foo, S. Environmental benefits of green concrete. In Proceedings of the 2006 IEEE EIC Climate Change Technology Conference, EICCCC 2006, Ottawa, ON, Canada, 10–12 May 2006. [CrossRef]
23. Begum, R.A.; Siwar, C.; Pereira, J.J.; Jaafar, A.H. A benefit-cost analysis on the economic feasibility of construction waste minimisation: The case of Malaysia. *Resour. Conserv. Recycl.* **2006**, *48*, 86–98. [CrossRef]
24. Esa, M.R.; Halog, A.; Rigamonti, L. Developing strategies for managing construction and demolition wastes in Malaysia based on the concept of circular economy. *J. Mater. Cycles Waste Manag.* **2017**, *19*, 1144–1154. [CrossRef]
25. Galvez-Martos, J.L.; Istrate, I.R. Construction and demolition waste management. In *Advances in Construction and Demolition Waste: Recycling Management, Processing and Environmental Assessment*; Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering; Elsevier Ltd.: Amsterdam, The Netherlands, 2020. [CrossRef]
26. Suárez, S.; Roca, X.; Gasso, S. Product-specific life cycle assessment of recycled gypsum as a replacement for natural gypsum in ordinary Portland cement: Application to the Spanish context. *J. Clean. Prod.* **2016**, *117*, 150–159. [CrossRef]
27. Kibert, C.J. *Sustainable Construction: Green Building Design and Delivery*; John Wiley & Sons: New York, NY, USA, 2016.
28. Osmani, M. Construction Waste Minimization in the UK: Current Pressures for Change and Approaches. *Procedia-Soc. Behav. Sci.* **2012**, *40*, 37–40. [CrossRef]
29. Charef, R.; Alaka, H.; Emmitt, S. Beyond the Third Dimension of BIM: A Systematic Review of Literature and Assessment of Professional Views. *J. Build. Eng.* **2018**, *19*, 242–257. [CrossRef]
30. Geissdoerfer, M.; Savaget, P.; Bocken, N.; Hultink, E.J. The Circular Economy—A new sustainability paradigm? *J. Clean. Prod.* **2017**, *143*, 757–768. [CrossRef]
31. Ellen MacArthur Foundation. Available online: https://ellenmacarthurfoundation.org/ (accessed on 28 March 2023).
32. Mhatre, P.; Panchal, R.; Singh, A.; Bibyan, S. A systematic literature review on the circular economy initiatives in the European Union. *Sustain. Prod. Consum.* **2021**, *26*, 187–202. [CrossRef]
33. Friant, M.C.; Vermeulen, W.J.; Salomone, R. Analysing European Union circular economy policies: Words versus actions. *Sustain. Prod. Consum.* **2021**, *27*, 337–353. [CrossRef]
34. Pomponi, F.; Moncaster, A. Circular economy for the built environment: A research framework. *J. Clean. Prod.* **2017**, *143*, 710–718. [CrossRef]
35. Charef, R.; Lu, W. Factor dynamics to facilitate circular economy adoption in construction. *J. Clean. Prod.* **2021**, *319*, 128639. [CrossRef]
36. Brown, P.; Bocken, N.; Balkenende, R.; Brown, P.; Bocken, N.; Balkenende, R. Why Do Companies Pursue Collaborative Circular Oriented Innovation? *Sustainability* **2019**, *11*, 635. [CrossRef]
37. Maury-Ramírez, A.; Illera-Perozo, D.; Mesa, J.A. Circular Economy in the Construction Sector: A Case Study of Santiago de Cali (Colombia). *Sustainability* **2022**, *14*, 1923. [CrossRef]

38. Charef, R.; Morel, J.-C.; Rakhshan, K. Barriers to Implementing the Circular Economy in the Construction Industry: A Critical Review. *Sustainability* **2021**, *13*, 2989. [CrossRef]
39. Hossain, M.U.; Ng, S.T.; Antwi-Afari, P.; Amor, B. Circular economy and the construction industry: Existing trends, challenges and prospective framework for sustainable construction. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2020**, *130*, 109948. [CrossRef]
40. Liu, T.; Chen, L.; Yang, M.; Sandanayake, M.; Miao, P.; Shi, Y.; Yap, P.-S. Sustainability Considerations of Green Buildings: A Detailed Overview on Current Advancements and Future Considerations. *Sustainability* **2022**, *14*, 14393. [CrossRef]
41. Chen, W.; Jin, R.; Xu, Y.; Wanatowski, D.; Li, B.; Yan, L.; Pan, Z.; Yang, Y. Adopting recycled aggregates as sustainable construction materials: A review of the scientific literature. *Constr. Build. Mater.* **2019**, *218*, 483–496. [CrossRef]
42. Ginga, C.P.; Ongpeng, J.M.C.; Daly, M.K.M. Circular Economy on Construction and Demolition Waste: A Literature Review on Material Recovery and Production. *Materials* **2020**, *13*, 2970. [CrossRef]
43. Rostamnezhad, M.; Thaheem, M.J. Social Sustainability in Construction Projects—A Systematic Review of Assessment Indicators and Taxonomy. *Sustainability* **2022**, *14*, 5279. [CrossRef]
44. Bungau, C.C.; Bungau, T.; Prada, I.F.; Prada, M.F. Green Buildings as a Necessity for Sustainable Environment Development: Dilemmas and Challenges. *Sustainability* **2022**, *14*, 13121. [CrossRef]
45. Zhang, Y.; Wang, H.; Gao, W.; Wang, F.; Zhou, N.; Kammen, D.M.; Ying, X. A survey of the status and challenges of green building development in various countries. *Sustainability* **2019**, *11*, 5385. [CrossRef]
46. Chan, A.P.C.; Darko, A.; Ameyaw, E.E. Strategies for promoting green building technologies adoption in the construction industry—An international study. *Sustainability* **2017**, *9*, 969. [CrossRef]
47. Nijkamp, P.; Rietveld, P.; Voogd, H. *Multicriteria Evaluation in Physical Planning*; Elsevier Science Publishing: Amsterdam, The Netherlands, 1990.
48. Khalili, N.R.; Duecker, S. Application of multi-criteria decision analysis in design of sustainable environmental management system framework. *J. Clean. Prod.* **2013**, *47*, 188–198. [CrossRef]
49. Karagiannidis, A.; Papageorgiou, A.; Perkoulidis, G.; Sanida, G.; Samaras, P. A multi-criteria assessment of scenarios on thermal processing of infectious hospital wastes: A case study for Central Macedonia. *Waste Manag.* **2010**, *30*, 251–262. [CrossRef]
50. Garfi, M.; Tondelli, S.; Bonoli, A. Multi-criteria decision analysis for waste management in Saharawi refugee camps. *Waste Manag.* **2009**, *29*, 2729–2739. [CrossRef]
51. Chung, S.S.; Poon, C.S. Evaluating waste management alternatives by the multiple criteria approach. *Resour. Conserv. Recycl.* **1996**, *17*, 189–210. [CrossRef]
52. De Feo, G.; de Gisi, S. Using an innovative criteria weighting tool for stakeholders involvement to rank MSW facility sites with the AHP. *Waste Manag.* **2010**, *30*, 2370–2382. [CrossRef] [PubMed]
53. Generowicz, A.; Kulczycka, J.; Kowalski, Z.; Banach, M. Assessment of waste management technology using BATNEEC options, technology quality method and multi-criteria analysis. *J. Environ. Manag.* **2011**, *92*, 1314–1320. [CrossRef] [PubMed]
54. Yeh, C.-H.; Willis, J.R.; Deng, H.; Pan, H. Task oriented weighting in multi-criteria analysis. *Eur. J. Oper. Res.* **1999**, *119*, 130–146. [CrossRef]
55. Saaty, T.L. *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*; McGraw-Hill: New York, NY, USA, 1980.
56. Saaty, T.L.; Sagir, M. An essay on rank preservation and reversal. *Math. Comp. Model.* **2009**, *49*, 1230–1243. [CrossRef]
57. Vaidya, O.S.; Kumar, S. Analytic hierarchy process: An overview of applications. *Eur. J. Oper. Res.* **2006**, *169*, 1–29. [CrossRef]
58. William, H. Integrated analytic hierarchy process and its applications—A literature review. *Eur. J. Oper. Res.* **2008**, *186*, 211–228.
59. Chiang, J.-T.; Chiou, C.-C.; Doong, S.-C.; Chang, I.-F. Research on the Construction of Performance Indicators for the Marketing Alliance of Catering Industry and Credit Card Issuing Banks by Using the Balanced Scorecard and Fuzzy AHP. *Sustainability* **2020**, *12*, 9005. [CrossRef]
60. Ishizaka, A.; Labib, A. Review of the main developments in the analytic hierarchy process. *Expert Syst. Appl.* **2011**, *38*, 14336–14345. [CrossRef]
61. Saaty, R.W. The analytic hierarchy process—What it is and how it is used. *Math. Model.* **1987**, *9*, 161–176. [CrossRef]
62. Huang, I.; Keisler, J.; Linkov, I. Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: Ten years of applications and trends. *Sci. Total Environ.* **2011**, *19*, 3578–3594. [CrossRef]
63. Cegan, J.C.; Filion, A.M.; Keisler, J.M.; Linkov, I. Trends and applications of multi-criteria decision analysis in environmental sciences: Literature review. *Environ. Syst. Decis.* **2017**, *37*, 123–133. [CrossRef]
64. Penades-Pla, V.; Garcia-Segura, T.; Marti, J.V.; Yepes, V. A Review of Multi-Criteria Decision-Making Methods Applied to the Sustainable Bridge Design. *Sustainability* **2016**, *8*, 1295. [CrossRef]
65. Chen, V.Y.C.; Lien, H.P.; Liu, C.H.; Liou, J.J.H.; Tzeng, G.H.; Yang, L.S. Fuzzy MCDM Approach for Selecting the Best Environment-Watershed Plan. *Appl. Soft Comput. J.* **2011**, *11*, 265–375. [CrossRef]
66. Zolfani, S.H.; Chatterjee, P. Comparative Evaluation of Sustainable Design Based on Step-Wise Weight Assessment Ratio Analysis (SWARA) and Best Worst Method (BWM) Methods: A Perspective on Household Furnishing Materials. *Symmetry* **2019**, *11*, 74. [CrossRef]
67. Khoshand, A.; Khanlari, K.; Abbasianjahromi, H.; Zoghi, M. Construction and demolition waste management: Fuzzy Analytic Hierarchy Process approach. *Waste Manag. Res.* **2020**, *38*, 773–782. [CrossRef]
68. Kourmpanis, B.; Papadopoulos, A.; Moustakas, K.; Kourmoussis, F.; Stylianou, M.; Loizidou, M. An integrated approach for the management of demolition waste in Cyprus. *Waste Manag. Res.* **2008**, *26*, 573–581. [CrossRef]

69. Banias, G.; Achillas, C.; Vlachokostas, C.; Moussiopoulos, N.; Papaioannou, I. A web-based Decision Support System for the optimal management of construction and demolition waste. *Waste Manag.* **2011**, *31*, 2497–2502. [CrossRef]
70. Abba, A.H.; Noor, Z.Z.; Yusuf, R.O.; Din, M.F.M.; Abu Hassan, M.A. Assessing environmental impacts of municipal solid waste of Johor by analytical hierarchy process. *Resour. Conserv. Recycl.* **2013**, *73*, 188–196. [CrossRef]
71. Mdallal, A.; Hammad, A. Application of Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP) to Reduce Concrete Waste on Construction Sites. In Proceedings of the Canadian Society for Civil Engineering (CSCE) Annual Conference, Montreal, QC, Canada, 12–15 June 2019; p. 10. Available online: https://scholar.google.com/scholar?cluster=12098353616466767773&hl=en&as_sdt=2005&sciodt=0,5 (accessed on 28 March 2023).
72. Saaty, T.L. How to make a decision: The analytic hierarchy process. *Interfaces* **1994**, *24*, 19–43. [CrossRef]
73. Buckley, J.J. Fuzzy hierarchical analysis. *Fuzzy Sets Syst.* **1985**, *17*, 233–247. [CrossRef]
74. Aczél, J.; Saaty, T.L. Procedures for synthesizing ratio judgements. *J. Math. Psychol.* **1983**, *27*, 93–102. [CrossRef]
75. Linstone, H.A.; Turoff, M. *The Delphi Method: Techniques and Applications*; Addison-Wesley Publishing Company: Houston, TX, USA, 1975.
76. Rowe, G.; Wright, G. The delphi technique as a forecasting tool: Issues and analysis. *Int. J. Forecast.* **1999**, *15*, 353–375. [CrossRef]
77. Md Arof, A. The Application of a Combined Delphi-AHP Method in Maritime Transport Research—A Review. *ASS* **2015**, *11*, 73. [CrossRef]
78. Grime, M.M.; Wright, G. Delphi Method. In *Wiley StatsRef: Statistics Reference Online*; Balakrishnan, N., Colton, T., Everitt, B., Piegorsch, W., Ruggeriund, F., Teugels, J., Eds.; John Wiley & Sons: Chichester, UK, 2014; pp. 1–6.
79. Khan, M.R.; Alam, M.J.; Tabassum, N.; Khan, N.A. A Systematic Review of the Delphi–AHP Method in Analyzing Challenges to Public-Sector Project Procurement and the Supply Chain: A Developing Country's Perspective. *Sustainability* **2022**, *14*, 14215. [CrossRef]
80. Prentkovskis, O.; Erceg, Ž.; Stević, Ž.; Tanackov, I.; Vasiljević, M.; Gavranović, M. A New Methodology for Improving Service Quality Measurement: Delphi-FUCOM-SERVQUAL Model. *Symmetry* **2018**, *10*, 757. [CrossRef]
81. Bernal, R.; San-Jose, L.; Retolaza, J.L. Improvement Actions for a More Social and Sustainable Public Procurement: A Delphi Analysis. *Sustainability* **2019**, *11*, 4069. [CrossRef]
82. Stewart, T.R. The Delphi Technique and Judgmental Forecasting. *Clim. Chang.* **1987**, *11*, 97–113. [CrossRef]
83. Solangi, Y.A.; Tan, Q.; Mirjat, N.H.; Valasai, G.D.; Khan, M.W.A.; Ikram, M. An Integrated Delphi-AHP and Fuzzy TOPSIS Approach toward Ranking and Selection of Renewable Energy Resources in Pakistan. *Processes* **2019**, *7*, 118. [CrossRef]
84. Baruch, Y. Response Rate in academic studies—A comparative analysis. *Hum. Relat.* **1999**, *52*, 421–438. [CrossRef]
85. Berdie, D.R.; Anderson, J.F.; Niebuhr, M.A. *Questionnaires: Design and Use*, 2nd ed.; The Scarecrow Press: Metuchen, NJ, USA, 1986.
86. Wright, K.B. Researching Internet-Based Populations: Advantages and Disadvantages of Online Survey Research, Online Questionnaire Authoring Software Packages, and Web Survey Services. *J. Comput. Mediat. Commun.* **2017**, *10*, JCMC1034. [CrossRef]
87. Lefever, S.; Dal, M.; Matthíasdóttir, Á. Online data collection in academic research: Advantages and limitations. *Br. J. Educ. Technol.* **2007**, *38*, 574–582. [CrossRef]
88. Zamparas, M.; Kapsalis, V.C.; Kyriakopoulos, G.L.; Aravossis, K.G.; Kanteraki, A.E.; Vantarakis, A.; Kalavrouziotis, I.K. Medical waste management and environmental assessment in the Rio University Hospital, Western Greece. *Sustain. Chem. Pharm.* **2019**, *13*, 100163. [CrossRef]
89. Deng, J.-Y.; Tzeng, G.-H. The Analytic Hierarchy Process: Concepts, Techniques and Applications(I). *J. Chin. Stat. Assoc.* **1989**, *27*, 13707–13724.
90. Ghodsypour, S.H.; O'Brien, C. A decision support system for supplier selection using an integrated analytic hierarchy process and linear programming. *Int. J. Prod. Econ.* **1998**, *56*, 199–212. [CrossRef]
91. Zahedi, F. The analytic hierarchy process-A survey of the method and its applications. *Interfaces* **1986**, *16*, 96–108. [CrossRef]
92. Kilincci, O.; Onal, S.A. Fuzzy AHP approach for supplier selection in a washing machine company. *Exp. Syst. Appl.* **2011**, *38*, 9656–9664. [CrossRef]
93. Saaty, T.L.; Takizawa, M. Dependence and independence: From linear hierarchies to nonlinear networks. *Eur. J. Oper. Res.* **1986**, *26*, 229–237. [CrossRef]
94. Kurbatova, A.; Abu-Qdais, H.A. Using multi-criteria decision analysis to select waste to energy technology for a mega city: The case of Moscow. *Sustainability* **2020**, *12*, 9828. [CrossRef]
95. Kulakowski, K. *Understanding the Analytic Hierarchy Process*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2020.
96. Mu, E.; Pereyra-Rojas, M. Understanding the Analytic Hierarchy Process. In *Practical Decision Making*; Springer: Cham, Switzerland, 2017; pp. 7–22.
97. Zeshui, X.; Cuiping, W. A consistency improving method in the analytic hierarchy process. *Eur. J. Oper. Res.* **1999**, *116*, 443–449. [CrossRef]
98. Chou, Y.-C.; Sun, C.-C.; Yen, H.-Y. Evaluating the criteria for human resource for science and technology based on integrated fuzzy AHP and fuzzy DEMATEL approach. *Appl. Soft Comput.* **2012**, *12*, 64–71. [CrossRef]
99. Zadeh, L.A. Fuzzy sets. *Inf. Control* **1965**, *8*, 338–353. [CrossRef]
100. Liou, J.J.H.; Yen, L.; Tzeng, G.H. Building an effective safety management system for airlines. *J. Air Transp. Manag.* **2007**, *14*, 20–26. [CrossRef]

101. Yang, C.C.; Chen, B.S. Key quality performance evaluation using fuzzy AHP. *J. Chin. Inst. Ind. Eng.* **2004**, *21*, 543–550. [CrossRef]
102. Hsieh, T.Y.; Lu, S.T.; Tzeng, G.H. Fuzzy MCDM approach for planning and design tenders selection in public office buildings. *Int. J. Proj. Manag.* **2004**, *22*, 573–584. [CrossRef]
103. Kaganski, S.; Majak, J.; Karjust, K. Fuzzy AHP as a Tool for Prioritization of Key Performance Indicators. *Procedia CIRP* **2018**, *72*, 1227–1232. [CrossRef]
104. Bovea, M.D.; Powell, J.C. Developments in life cycle assessment applied to evaluate the environmental performance of construction and demolition wastes. *Waste Manag.* **2016**, *50*, 151–172. [CrossRef]
105. Chen, Z.; Abdullah, A.B.; Anumba, C.J.; Li, H. ANP Experiment for Demolition Plan Evaluation. *J. Constr. Eng. Manag.* **2014**, *140*, 06013005. [CrossRef]
106. Martínez-Muñoz, D.; Martí, J.V.; Yepes, V. Social Impact Assessment Comparison of Composite and Concrete Bridge Alternatives. *Sustainability* **2022**, *14*, 5186. [CrossRef]
107. Khoshand, A.; Kamalan, H.; Rezaeli, H. Application of analytical hierarchy process (AHP) to assess options of energy recovery from municipal solid waste: A case study in Tehran, Iran. *J. Mater. Cycles Waste Manag.* **2018**, *20*, 1689–1700. [CrossRef]
108. Coelho, L.G.; Lange, L.C.; Coelho, H. Multi-criteria decision making to support waste management: A critical review of current practices and methods. *Waste Manag. Res.* **2017**, *35*, 3–28. [CrossRef]
109. Coronado, M.; Dosal, E.; Coz, A.; Viguri, J.R.; Andrés, A. Estimation of construction and demolition Waste (C&DW) generation and multicriteria analysis of C&DW management alternatives: A case study in Spain. *Waste Biomass Valori.* **2011**, *2*, 209–225.
110. Mahpour, A. Prioritizing barriers to adopt circular economy in construction and demolition waste management. *Resour. Conserv. Recycl.* **2018**, *134*, 216–227. [CrossRef]
111. Qazi, W.A.; Abushammala, M.; Azam, M.H. Multi-criteria decision making of waste-to energy technologies for municipal solid waste management in Sultanate of Oman. *Waste Manag. Res.* **2018**, *36*, 594–605. [CrossRef]
112. Vlachokostas, C.; Michailidou, A.V.; Achillas, C. Multi-Criteria Decision Analysis towards promoting Waste-to-Energy Management Strategies: A critical review. *Renew. Sustain. Energ. Rev.* **2021**, *138*, 110563. [CrossRef]

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

ภาคผนวก จ

หลักฐานการตีพิมพ์บทความวิจัยในวารสารวิชาการระดับชาติ (TCI): The Journal of Industrial Technology (2026)

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2026.04.006

บทความวิจัย

QFD-guided design of a Web-Based DSS Prototype for Sustainable Waste Management in Thailand

Prin Boonkanit and Kridchai Suthiluck*

Department of Sustainable Industrial Management Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangkok

* Corresponding author, E-mail: kridchai-s@rmutp.ac.th

Received: 4 November 2025; Revised: 16 February 2026; Accepted: 18 February 2026
Online Published: 20 April 2026

Abstract: This study applied the Quality Function Deployment (QFD) method to translate stakeholder opinions and needs into technical features for developing a prototype web-based Decision Support System (DSS). In Thailand, municipal solid waste (MSW) and construction and demolition (C&D) waste are still difficult to manage, because the rapid growth of cities keeps increasing waste volume and straining local systems. The Decision Support System was created mainly to support local government organizations (LGOs) in making decisions that are more transparent and practical for real operation. Accessibility and usability were carefully checked under WCAG 2.1 standards by using the WAVE tool. The test results showed full compliance with accessibility criteria. A satisfaction survey among 25 experts reported an average score of 4.35 (SD = 0.56) and a satisfaction index of 87 % and 0 accessibility errors, showing strong acceptance. The results indicate that user involvement and simple design are important for future system adoption and for promoting Thailand's Bio-Circular-Green (BCG) economy toward circular and sustainable waste management.

Keywords: Municipal Solid Waste (MSW) Management; Construction and Demolition (C&D) Waste; Decision Support System (DSS); Quality Function Deployment (QFD); Local Government Organizations (LGOs); Circular Economy

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2026.04.006

บทความวิจัย

1. Introduction

Municipal solid waste (MSW) management remains a major challenge in developing countries such as Thailand, where rising waste generation strains local decision-making and service delivery [1]. Increasing MSW volumes, combined with growing construction and demolition (C&D) waste, have exceeded management capacity. In 2023, Thailand generated 26.95 million tons of MSW (1.12 kg per capita per day) [2], intensifying operational pressures on Local Government Organizations (LGOs).

This situation reveals a clear gap: Thai LGOs still lack decision-support tools that systematically translate stakeholder needs (Voice of the Customer: VOC) into implementable DSS design features. Although DSS applications exist in waste management, many do not sufficiently incorporate VOC, reducing operational relevance and long-term adoption [3].

This study responds to that gap by applying Quality Function Deployment (QFD), originally proposed by Akao [4], to translate stakeholder needs into measurable technical characteristics for designing a web-based DSS tailored to the operational context of Thai LGOs.

The prototype is evaluated using (i) automated accessibility testing with WAVE [5] for WCAG 2.1 compliance and (ii) stakeholder surveys to assess usability and satisfaction [6].

This research focuses on developing and evaluating a prototype DSS, rather than full-scale deployment. The findings therefore validate requirement translation, prototype design soundness, and early usability/accessibility performance. The research objectives are as follows:

1. To identify and analyze key challenges in MSW and C&D waste management within Thai LGOs.

2. To translate stakeholder requirements (VOC) into measurable technical specifications using QFD.

3. To design and develop a prototype web-based DSS that integrates international web standards and stakeholder-driven requirements.

4. To evaluate the prototype using a dual-assessment approach: WAVE-based accessibility testing and structured user surveys assessing satisfaction, usability, and alignment with operational needs.

This paper is structured as follows: the introduction presents the research context and objectives, followed by the research methodology, results and discussion, and concluding remarks with limitations and future research directions.

บทความวิจัย
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2026.04.006

2. Research methodology

2.1 Research framework

The research framework adopted in this study (Fig. 1) presents a structured process integrating stakeholder input and methodological design. The process begins with a literature review to identify preliminary Customer Requirements (CRs), followed by the development and validation of research instruments through expert review. CR importance was assessed using a 5-point Likert scale and aggregated using the geometric mean to derive normalized weights. Quality Function Deployment (QFD) was then applied to translate CRs into Technical Characteristics (TCs), using weighted relationships and Pareto prioritization to guide system design. The prioritized TCs were used to support prototype web-based DSS development. Finally, the prototype was evaluated to verify compliance with technical standards and stakeholder expectations.

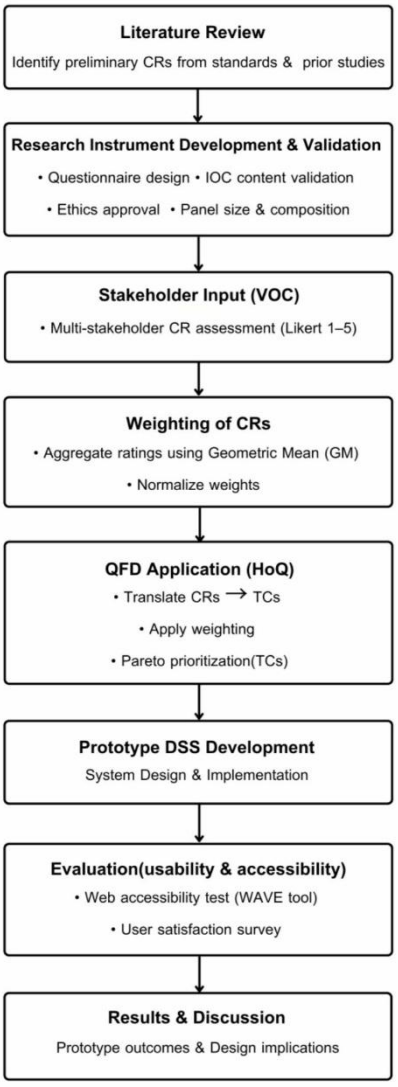


Fig. 1 Research framework

2.2 Instrument Development and Validation

2.2.1 Literature Review

A systematic literature review was conducted to identify Customer Requirements (CRs) for web-based Decision Support Systems (DSS) in municipal solid waste (MSW) and construction and demolition (C&D) waste management. The review integrated three evidence streams: (i) international web usability standards, (ii) prior DSS and MCDA studies, and (iii) public sector digital service

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2026.04.006

บทความวิจัย

guidelines relevant to Thailand. An initial set of 30 CRs was identified. To improve analytical clarity and reduce redundancy, overlapping CRs were consolidated based on thematic similarity and relevance to Local Government Organization (LGO) decision-making. This process yielded 15 key CRs (Table 1), later applied in the QFD analysis.

2.2.2 Questionnaire Design

A structured questionnaire was developed based on literature to collect data on Customer Requirements (CRs) and Technical Characteristics (TCs). The instrument employed a Likert-scale format for quantitative analysis, complemented by open-ended questions qualitatively used to support interpretation and contextual understanding. The detailed questionnaire items and full CR list are provided in the Supplementary Data.

2.2.3 IOC Validation

Content validity was evaluated using the Item Objective Congruence (IOC) method. Five experts independently assessed item relevance, resulting in an average IOC value of 0.88, indicating satisfactory content validity [14]. The reported IOC value of 0.88 represents the average of item-level content validity assessments provided by five experts, as IOC is evaluated per item rather than as a single global score.

2.2.4 Ethics Approval

The study received ethical approval from the Research Ethics Review Committee for Research Involving Human Subjects at Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Thailand, in December 2024.

2.2.5 Panel Size and Composition

Expert panels were structured to ensure methodological rigor across research stages. IOC validation involved five experts, consistent with content validity guidelines [12]. CR identification and evaluation engaged 25 stakeholders, including local government officers and industry representatives, aligning with recommended stakeholder sample sizes [13]. A technical panel of seven experts with QFD and DSS experience determined TCs and evaluated CR–TC relationships. The same 25 stakeholders also participated in CR weighting and user satisfaction assessment, ensuring consistency and meeting recommended usability sample ranges of 20–30 users [13].

2.2.6 Refinement of Customer Requirements (CRs)

An initial set of 30 CRs was derived from the literature (Section 2.2.1). To avoid redundancy and improve HoQ interpretability, a structured refinement was conducted. The process retained CRs aligned with international usability and accessibility standards, screened items using stakeholder ratings (n = 25) with Geometric Mean scores, consolidated

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2026.04.006

บทความวิจัย

Table 1 Overview of 15 key customer requirements (CRs)

No.	Customer Requirement (CR)	Reference
1	Effectiveness & Efficiency	[8][16]
2	Learnability & Memorability	[8][10][16]
3	Satisfaction & Emotional Impact	[8][10]
4	Accessibility & Standards Compliance	[8][9][16]
5	Content Quality	[10][16]
6	Presentation Design	[10][16]
7	Motivation & Engagement	[10]
8	Feedback & Adaptation	[8][10][16]
9	Transparency of DSS Results	[7][16]
10	Local Language & Cultural Adaptability	[8,9]
11	Data Security & Privacy	[16][18]
12	System Integration & Interoperability	[7][9][15]
13	Environmental Impact Integration	[7][16,17]
14	User Training & Ease of Adoption	[8][10]
15	Multi-Stakeholder Collaboration Portal	[7][15]

overlapping requirements, and reduced the set to 15 CRs for manageable prototyping. The refined CRs were subsequently used for weighting (Section 2.3) and CR–TC analysis (Section 2.5).

2.3 Weighting of Customer Requirements (CRs)

Experts evaluated the finalized 15 CRs using a five-point Likert scale. Geometric mean (GM) aggregation combined judgments and limited outlier effects. Normalized GM values yielded relative importance weights incorporated into the QFD matrix. GM computation followed Eq. (1) based on *n* experts.

$$G.M. = \sqrt[n]{N_1 \times N_2 \times N_3 \times \cdots \times N_n} \quad (1)$$

Where: Ni represents the rating value provided by each expert respondent, and n denotes the number of respondents. In this study, n = 25.

For illustration purposes, if Customer Requirement 1 (CR1) is rated by five experts as 5, 4, 4, 3, and 5, the geometric mean (GM) is calculated as:

$$GM_{CR1} = (5\times4\times4\times3\times5)^{1/5} = (1200)^{1/5} = 4.13$$

Normalized weights were then derived by dividing each GM value by the sum of all GM values. For example, if the GM values of three CRs are 4.13,

บทความวิจัย
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2026.04.006

3.80, and 3.20, the corresponding normalized weights are 0.37, 0.34, and 0.29, respectively.

This example illustrates the calculation procedure; the complete analysis applied all 15 CRs using the Excel GEOMEAN function.

2.4 Determination of Technical Characteristics (TCs)

A set of Technical Characteristics (TCs) was identified through literature review, system analysis, and expert brainstorming to define key functional requirements for the proposed web-based DSS. Most TCs follow standard DSS design terminology and address usability, interoperability, reliability, data security, and environmental impact considerations. TC4 and TC12 were further clarified to avoid conceptual overlap and to ensure accurate representation of system architecture. The finalized list of TCs is summarized in Table 2.

2.5 Transformation of Qualitative Requirements Using QFD

The House of Quality (HoQ), illustrated in Fig. 2, was used to translate validated Customer Requirements (CRs) into measurable Technical Characteristics (TCs). This approach links qualitative stakeholder needs with quantitative design parameters in a structured manner. The complete CR–TC relationship evaluation form used in the QFD process is presented in the Supplementary Data.

Table 2 A list of technical characteristics (TCs)

No.	TCs	Reference
1	User Interface & Visualization	[8][10][16]
2	Methodology Documentation	[8][15]
3	Customization Module	[8][16]
4	System Responsiveness	[8]
5	Comprehensive Criteria Integration	[7]
6	Data Security Protocols	[16]
7	Multi-User Collaboration	[10][16]
8	Update & Maintenance	[19]
9	Real-time Data Updating	[7][16]
10	Algorithm Accuracy & Reliability	[16]
11	Environmental Impact Assessment	[11][17]
12	Cross-Device Compatibility	[9][16]

Note: TC4 (System Responsiveness) and TC12 (Cross-device Compatibility) represent different system layers: backend performance and frontend adaptability, respectively and were therefore evaluated separately in the QFD matrix.

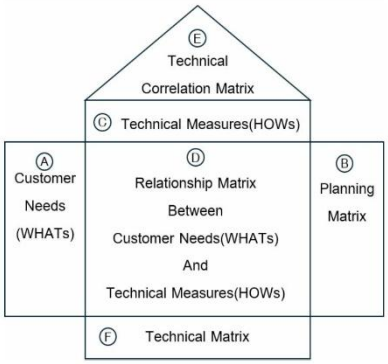


Fig. 2. Conceptual structure of the House of Quality (HoQ), adapted from Akao [4]

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2026.04.006

บทความวิจัย

In the HoQ, CRs (WHATs) were mapped to TCs (HOWs) using a standard relationship matrix and the relationship scale defined in Table 3. Based on these relationships, the absolute importance (AIj) of each TC was calculated and subsequently normalized to obtain Relative Importance (RIj) which was used to prioritize technical design elements for the prototype DSS.

The Absolute Importance (AIj)

$$AI_j = \sum_{i=1}^{m} (CR_i \times R_{ij}) \quad (2)$$

Where:

CRi = Importance weight of Customer Requirement i (derived from expert weight or normalized CR weight)

Rij = Relationship score (e.g., 9, 3, 1, 0) between Customer Requirement i and Technical Characteristic j in the HoQ

AIj = represents the weighted sum of the relationship strengths between CRs and the corresponding TC.

$$RI_j = \frac{AI_j}{\sum_{j=1}^{n} AI_j} \times 100 \quad (3)$$

Where:

RI_j used to convert the absolute importance (AI_j) into a percentage scale. The total sum of RI_j across all TCs equals 100%

Table 3 Standardized relationship scale for QFD analysis (Relationship symbols)

Relationship	Symbol	Score
No relationship		0
Weak relationship	Δ	1
Moderate relationship	○	3
Strong relationship	●	9

Source: Adapted from Akao [4]

2.6 Design and Development of the Prototype Web-Based DSS

The prototype DSS was developed using a modular architecture to support usability, scalability, and system expansion. It comprises four functional layers: user interface, data handling, application logic, and system integration, enhancing maintainability and transparent decision-making. System development followed the generic DSS framework proposed by Aql et al. [20], consisting of data, model, knowledge, and user interface subsystems (Fig. 3).

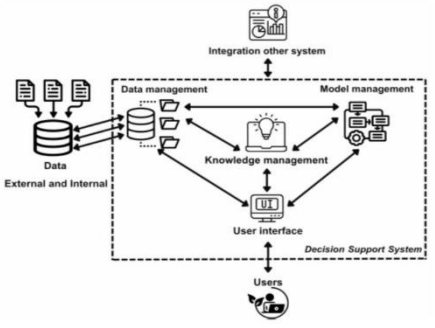


Fig. 3 Generic architecture of a Decision Support System, adapted from Aql et al. [20]

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2026.04.006

บทความวิจัย

2.7 MCDA Algorithm Specification for the Prototype DSS

To ensure transparent and reproducible decision-making, the Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) was implemented as the sole MCDA method for ranking waste management alternatives in the prototype DSS. Criteria weights were treated as predefined external inputs and directly applied within the TOPSIS procedure.

Step 1: Decision Matrix Normalization

The decision matrix was normalized using vector normalization, as shown in Eq. (4):

$$r_{ij} = x_{ij} \Big/ \sqrt{\sum_{i=1}^{m} {x_{ij}}^2} \qquad (4)$$

Where x_{ij} represents the performance value of alternative i under criterion j, i=1, 2, …, m ; j =1, 2…, n ; m denotes the number of alternatives, and n denotes the number of criteria.

Step 2: Weighted Normalized Decision Matrix (Predefined Criteria Weights)

The normalized decision matrix was multiplied by predefined normalized criteria weights to obtain the weighted normalized matrix, as expressed in Eq. (5):

$$v_{ij} = w_j \, r_{ij} \qquad (5)$$

where w_j is the normalized weight of criterion j, and $\sum_{j=1}^{n} w_j = 1$.

Step 3: Determination of Ideal Solutions

The positive ideal solution (PIS) and negative ideal solution (NIS) were defined as:

$$A^+ = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+\} \qquad (6)$$

$$A^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\} \qquad (7)$$

Where:

$$v_j^+ = \begin{cases} max_i(v_{ij}), & j \in J \text{ (benefit criteria)} \\ min_i(v_{ij}), & j \in J' \text{ (cost criteria)} \end{cases}$$

$$v_j^- = \begin{cases} min_i(v_{ij}), & j \in J \text{ (benefit criteria)} \\ max_i(v_{ij}), & j \in J' \text{ (cost criteria)} \end{cases}$$

Step 4: Separation Measures

The separation distances from the PIS and NIS were calculated using Euclidean distance, as shown in Eqs. (8) and (9):

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (v_{ij} - v_j^+)^2} \qquad (8)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (v_{ij} - v_j^-)^2} \qquad (9)$$

where S_i^+ and S_i^- represent the distances of alternative i from the PIS and NIS, respectively.

Step 5: Ranking Using Closeness Coefficient (θ_i)

The relative closeness to the ideal solution was calculated using Eq. (10):

$$\theta_i = S_i^- \Big/ \left(S_i^+ + S_i^-\right), \quad 0 < \theta_i < 1 \qquad (10)$$

Where θ_i denotes the closeness coefficient of alternative i.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2026.04.006

บทความวิจัย

Alternatives were ranked according to (θ_i), with higher values indicating closer proximity to the ideal solution. Accordingly, TOPSIS was the only MCDA algorithm implemented in the prototype DSS, with predefined criteria weights applied as external inputs to ensure transparent and reproducible ranking results.

2.8 System Evaluation

The prototype web-based DSS was evaluated from technical and stakeholder perspectives. Technical compliance was assessed using the WAVE tool to verify adherence to WCAG 2.1 guidelines. Stakeholder validation followed ISO 9241-11 principles, focusing on effectiveness, efficiency, and satisfaction. A five-point Likert-scale survey was administered to 25 stakeholders, and descriptive statistics (mean, SD, and Satisfaction Index: SI%) were calculated. The SI%, derived from normalized mean ratings, supports comparative interpretation of satisfaction levels (Table 4).

Table 4 Interpretation criteria of satisfaction index

No	Index value (100%)	Criteria
1	80%< SI <100%	Very Satisfied
2	60%< SI <80%	Satisfied
3	40%< SI <60%	Satisfied Enough
4	20%< SI <40%	Less Satisfied
5	0%< SI <20%	Not Satisfied

Source: Adapted from Praseptiawan et al. [6]

The detailed questionnaire items and CR–TC evaluation instruments used in this study are provided in the Supplementary Data.

3. Results and Discussion

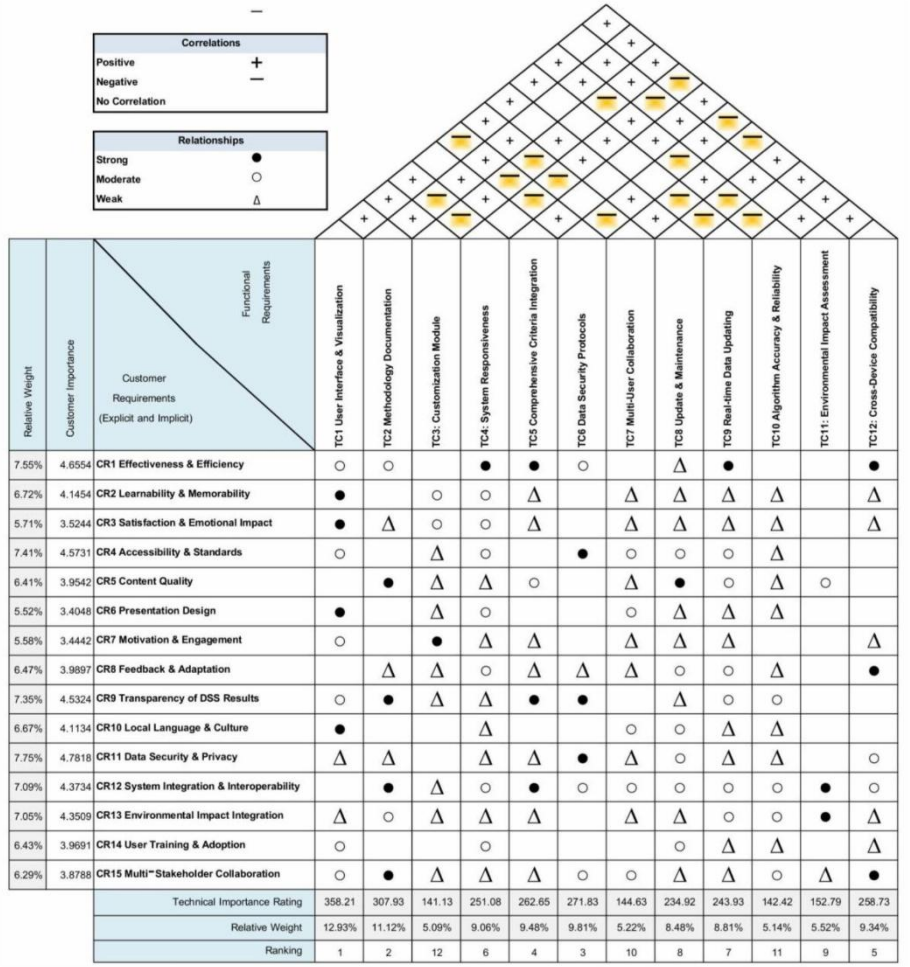
3.1 House of Quality (QFD Results)

The HoQ results (Fig. 4) illustrate relationships between 15 Customer Requirements (CRs) and 12 Technical Characteristics (TCs). The most influential CRs were Data Security & Privacy, Effectiveness & Efficiency, Accessibility & Standards, Transparency of DSS Results, and System Integration & Interoperability, reflecting priorities for secure and efficient system operation. Among TCs, User Interface & Visualization, Methodology Documentation, and Data Security Protocols ranked highest, underscoring the importance of interface design, methodological clarity, and data protection. Correlation analysis indicated positive design synergies across technical elements.

Pareto analysis (Fig. 5) shows that the first eight TCs account for 79.1% of cumulative importance, defining the primary focus for early-stage implementation, while the remaining TCs are scheduled for subsequent development phases.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2026.04.006

บทความวิจัย



Relative Weight	Customer Importance	Customer Requirements (Explicit and Implicit) \ Functional Requirements	TC1 User Interface & Visualization	TC2 Methodology Documentation	TC3: Customization Module	TC4: System Responsiveness	TC5 Comprehensive Criteria Integration	TC6 Data Security Protocols	TC7 Multi-User Collaboration	TC8 Update & Maintenance	TC9 Real-time Data Updating	TC10 Algorithm Accuracy & Reliability	TC11: Environmental Impact Assessment	TC12: Cross-Device Compatibility
7.55%	4.6554	CR1 Effectiveness & Efficiency	○	○		●	●	○		Δ	●			●
6.72%	4.1454	CR2 Learnability & Memorability	●		○	○	Δ		Δ	Δ	Δ	Δ		Δ
5.71%	3.5244	CR3 Satisfaction & Emotional Impact	●	Δ	○	○	Δ		Δ	Δ	Δ	Δ		Δ
7.41%	4.5731	CR4 Accessibility & Standards	○		Δ	○		●	○	○	○	Δ		
6.41%	3.9542	CR5 Content Quality		●	Δ	Δ	○		Δ	●	○	Δ	○	
5.52%	3.4048	CR6 Presentation Design	●		Δ	○			○	Δ	Δ	Δ		
5.58%	3.4442	CR7 Motivation & Engagement	○		●	Δ	Δ		Δ	Δ	Δ			Δ
6.47%	3.9897	CR8 Feedback & Adaptation		Δ	Δ	○	Δ	Δ	Δ	○	○	Δ		●
7.35%	4.5324	CR9 Transparency of DSS Results	○	●	Δ	Δ	●	●		Δ	○	○		
6.67%	4.1134	CR10 Local Language & Culture	●			Δ			○	○	Δ	Δ		
7.75%	4.7818	CR11 Data Security & Privacy	Δ	Δ		Δ	Δ	●	Δ	○	Δ	Δ		○
7.09%	4.3734	CR12 System Integration & Interoperability		●	Δ	○	●	○	○	○	○	○	●	○
7.05%	4.3509	CR13 Environmental Impact Integration	Δ	○	Δ	Δ	Δ		Δ	Δ	○	○	●	Δ
6.43%	3.9691	CR14 User Training & Adoption	○			○				○	Δ	Δ		Δ
6.29%	3.8788	CR15 Multi‴Stakeholder Collaboration	○	●	Δ	Δ	Δ	○	○	Δ	Δ	○	Δ	●
		Technical Importance Rating	358.21	307.93	141.13	251.08	262.65	271.83	144.63	234.92	243.93	142.42	152.79	258.73
		Relative Weight	12.93%	11.12%	5.09%	9.06%	9.48%	9.81%	5.22%	8.48%	8.81%	5.14%	5.52%	9.34%
		Ranking	1	2	12	6	4	3	10	8	7	11	9	5

Fig. 4 HoQ illustrates the relationship between 15 CRs and 12 TCs

บทความวิจัย
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2026.04.006

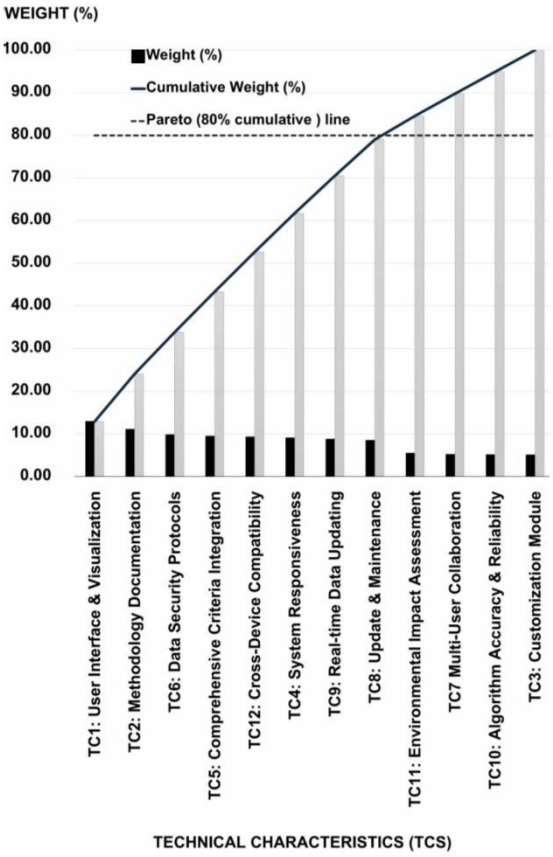


Fig. 5 Pareto analysis of TCs

3.2 DSS Prototype Development Results

3.2.1 System Architecture Overview

The prototype web-based DSS comprises four interconnected subsystems (Fig. 6). The data management subsystem stores user inputs and results to ensure consistency. The model management subsystem applies the MCDA algorithm for ranking alternatives. The knowledge management subsystem governs decision logic, while the user interface supports data input and visualization with external data integration.

บทความวิจัย
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2026.04.006

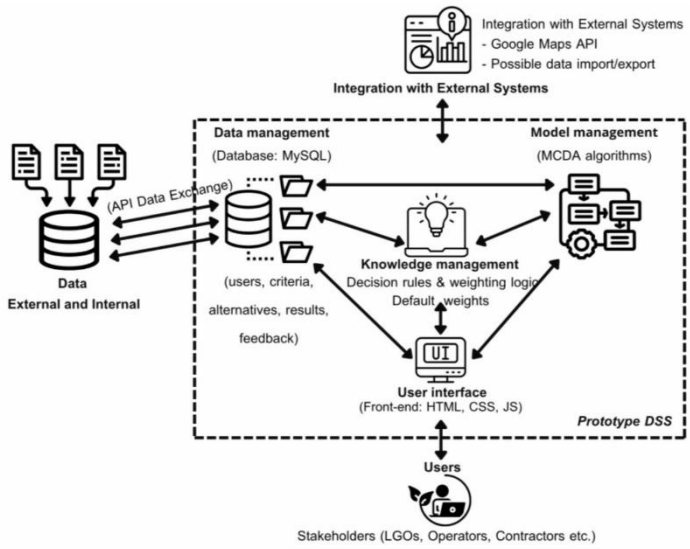


Fig. 6 Architecture of the prototype web-based DSS (developed in this study)

3.2.2 Functional Module Design

The functional workflow of the prototype web-based DSS (Fig. 7) supports collaboration between waste generators and operators through an automated process. Users register, select roles, and submit project data. The system applies an MCDA algorithm to recommend operators based on sustainability criteria, enabling automated notification, confirmation, and transparent project coordination. The prototype includes Waste Generator and Waste Operator modules enabling structured decision-related data aligned with QFD-derived priorities.

The system was deployed on a live server for demonstration and evaluation at https://www.dss-municipal-waste.com/, and representative user interface screens are presented in Fig. 8.

3.3 Evaluation (usability & accessibility)

3.3.1 Web Accessibility Evaluation Result

Automated testing using WAVE reported zero detected errors and contrast errors, which indicates strong alignment with WCAG 2.1 checks in the automated scan. In addition, the system incorporated six accessibility features, ten structural elements, and eleven ARIA elements, reflecting a high level of adherence to WCAG 2.1 principles and international web accessibility best practices.

บทความวิจัย
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2026.04.006

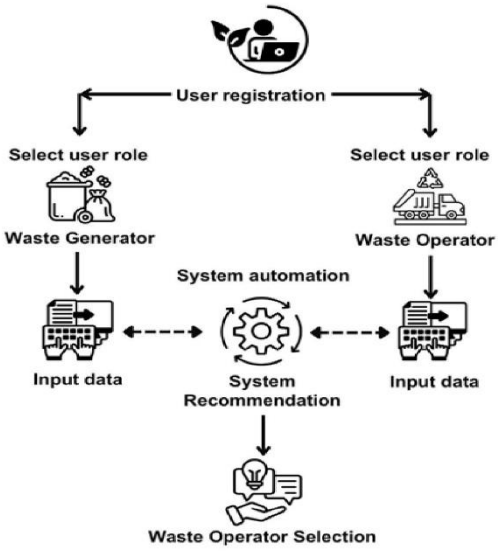


Fig. 7 Functional workflow of the prototype web-based DSS

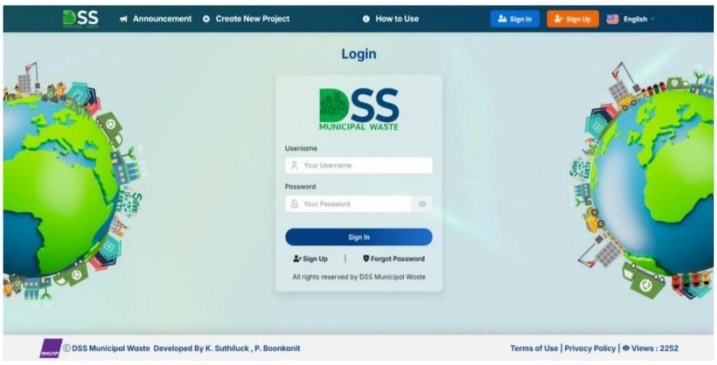


Fig. 8 Representative user interface screens of the prototype DSS

3.3.2 User Satisfaction Evaluation Results

User satisfaction was assessed through a structured survey of 25 participants using a five-point Likert scale. The mean score was 4.35 (SD = 0.56), corresponding to a Satisfaction Index of 87.00%, indicating high satisfaction. Strong ratings

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2026.04.006

บทความวิจัย

were observed for efficiency, functional performance, and effectiveness. Usability and information quality were also rated highly, while learnability and reliability, though slightly lower, remained within the high range. Detailed results are presented in Table 5.

3.4 Sensitivity Analysis of QFD Results

Sensitivity analysis was conducted by varying the weights of the three most influential customer requirements (CR11, CR9, and CR13) by ±10% while maintaining weight normalization. The recalculated HoQ results showed that the top-ranked technical characteristics remained unchanged, with only minor shifts among lower-ranked items.

3.5 Comparison with existing DSS applications

Existing DSS applications in developing regions primarily address policy-level analysis, landfill site selection, or technology comparison. Although they provide strategic insights, stakeholder requirements are seldom integrated into system architecture and decision algorithms, limiting operational relevance. In contrast, the proposed web-based DSS embeds stakeholder Voice of the Customer (VOC) through a structured QFD process and links QFD-derived priorities with a TOPSIS-based ranking mechanism. This integration enables transparent operator-level evaluation beyond macro-level policy analysis, strengthening the practical applicability of DSS in local government contexts.

Table 5 User satisfaction evaluation results

Dimension	$(\bar{X})$	SD	SI (%)	Interpretation
Usability	4.36	0.76	87.20	Very High
Information Quality	4.40	0.50	88.00	Very High
Learnability	3.92	0.64	78.40	High
Satisfaction (Functions)	4.56	0.51	91.20	Very High
Reliability	3.88	0.53	77.60	High
Efficiency	4.68	0.48	93.60	Very High
Effectiveness	4.52	0.51	90.40	Very High
Overall Satisfaction	4.48	0.59	89.60	Very High
Overall Mean	**4.35**	**0.56**	**87.00%**	**Very High**

Source: Research study

4. Conclusions and Recommendations

4.1 Conclusions

This study developed a QFD-guided web-based DSS prototype to address municipal and construction waste management challenges in Thailand. The framework translated stakeholder Voice of the Customer (VOC) into measurable technical characteristics, ensuring alignment between user requirements and system architecture.

By integrating QFD with a TOPSIS-based ranking mechanism, the system delivers transparent, operator-level decision support beyond conventional policy-oriented analyses. Accessibility testing and stakeholder evaluation

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2026.04.006

confirmed its technical feasibility and usability. Overall, the findings position QFD as an effective architectural bridge for stakeholder-driven, data-based sustainable waste management.

4.2 Recommendations

To enhance system effectiveness and practical implementation, the DSS should incorporate additional analytical functions, including GIS-based visualization and environmental-economic assessment tools. User training and guidance are also recommended to improve learnability and long-term usability.

4.3 Limitations and Future Research

This study developed and validated a prototype using a limited participant sample. Full-scale deployment, large-scale data testing, and high-concurrency evaluation were beyond its scope. Future research should implement wider pilot applications across multiple local governments and examine long-term performance, scalability, and operational integration.

5. Acknowledgments

The authors thank the experts who contributed to the IOC validation, CR weighting, and system evaluation, and the Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, for their academic and organizational support.

6. Reference

[1] N. Yukalang, B. Clarke and K. Ross, Barriers to effective municipal solid waste management in a rapidly urbanizing area in Thailand, International Journal of Environmental Research and Public Health, 2017, 14(9), 1013.

[2] National Statistical Office (NSO), Thailand Environment Statistics 2024, Statistical Forecasting and Policy Innovation Division, Ministry of Digital Economy and Society, Bangkok, Thailand, 2024. (in Thai)

[3] A.V. de Souza Melaré, S.M. González, K. Faceli and V. Casadei, Technologies and decision support systems to aid solid-waste management: A systematic review, Waste Management, 2017, 59, 567–584.

[4] Y. Akao, Quality Function Deployment: Integrating Customer Requirements into Product Design, Productivity Press, Cambridge, MA, USA, 1990.

[5] K. Boyalakuntla, A.S.M. Venigalla and S. Chimalakonda, Waccess -- A web accessibility tool based on WCAG 2.2, 2.1 and 2.0 guidelines, arXiv, 2021, Preprint, arXiv:2107.06799.

[6] M. Praseptiawan, M. O. N. Gultom and M.C. Untoro, The evaluation of e-commerce using the customer satisfaction index and importance performance analysis, Jurnal Sisfokom, 2022, 11(1), 60–65.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2026.04.006

บทความวิจัย

[7] B. Ubaldi and T. Okubo, OECD digital government index (DGI): Methodology and 2019 results, OECD Publishing, Paris, France, 2020.

[8] ISO 9241-11:2018, Ergonomics of human-system interaction, Part 11: Usability: Definitions and concepts, 2018.

[9] https://www.w3.org/International/ (Accessed on 2 November 2025).

[10] J.C. Nesbit, K. Belfer and T. Leacock, Learning object review instrument (LORI), E-learning Research and Assessment Network, 2003, 33–68.

[11] S. García-Orozco, G. Vargas-Gutiérrez, S. Ordóñez-Sánchez and R. Silva, Using multi-criteria decision making in quality function deployment for offshore renewable energies, Energies, 2023, 16(18), 6533.

[12] R.J. Rovinelli and R.K. Hambleton, On the use of content specialists in the assessment of content validity of objective tests, Journal of Educational Measurement, 1977, 14(2), 49–60.

[13] K. Vasileiou, J. Barnett, S. Thorpe and T. Young, Characterizing and justifying sample size sufficiency in interview-based studies: Systematic analysis of qualitative health research over a 15-year period, BMC Medical Research Methodology, 2018, 18.

[14] R.C. Turner and L. Carlson, Indexes of item-objective congruence for multidimensional items, International Journal of Testing, 2003, 3(2), 163–171.

[15] ISO/IEC/IEEE 42010:2011, Systems and Software Engineering – Architecture Description, 2011.

[16] ISO/IEC 25010:2011, Systems and Software Engineering – Systems and Software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) – System and Software Quality Models, 2011.

[17] M. Finkbeiner, A. Inaba, R. Tan, K. Christiansen and H.J. Klüppel, The new international standards for life cycle assessment: ISO 14040 and ISO 14044, The International Journal of Life Cycle Assessment, 2006, 11(2), 80–85.

[18] G. Disterer, ISO/IEC 27000, 27001 and 27002 for information security management, Journal of Information Security, 2013, 92–100.

[19] ISO/IEC 14764:2006, Software Engineering – Software Life Cycle Processes – Maintenance, 2006.

[20] M.J. Aqel, O.A. Nakshabandi and A.A. Adeniyi, Decision support systems classification in industry, Periodicals of Engineering and Natural Sciences, 2019, 7(2), 774-785.

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ นามสกุล นายกฤตชัย สุทธิลักษณ์

รหัสนักศึกษา 056380410504-4

ที่อยู่ปัจจุบัน 221 คุ้มเกล้า ลำปลาทิว ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

ประวัติการศึกษา

วุฒิการศึกษา	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	2541
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	2544

ตำแหน่งและสถานที่ทำงานปัจจุบัน

ผู้จัดการทั่วไปฝ่ายพัฒนาธุรกิจและการตลาด

บริษัท วี กรีน เคยู จำกัด

ประวัติการทำงาน

ผู้จัดการส่วนงานสิ่งแวดล้อม

บริษัท เนาวรัตน์พัฒนาการ จำกัด (มหาชน)

พ.ศ.2555-2568

ผู้ช่วยผู้จัดการแผนกพานิชยกรรม

บริษัท คริสเตียนี่และนีลเส็นไทย จำกัด (มหาชน)

พ.ศ.2551-2554

วิศวกรสิ่งแวดล้อม/สุขาภิบาล

บริษัท แอสดีคอน คอร์ปอเรชั่น จำกัด

พ.ศ.2546-2551