



รายงานโครงการวิจัยฉบับสมบูรณ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การประเมินวัฏจักรชีวิตสำหรับการตัดสินใจเกี่ยวกับตัวเลือกการจัดการแบตเตอรี่
ยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้แล้ว

ชื่อโครงการ (ภาษาอังกฤษ) Life Cycle Assessment for decision-making on end-of-life options
for used electric vehicle batteries

รหัสโครงการ 4707904

โดย

หัวหน้าโครงการ

ศาสตราจารย์ ดร. สนิท ธีระรังษี

ชื่อผู้ร่วมวิจัย

สุวิทย์ แสงกันยา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2568

งบประมาณสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2567

จากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม

บทคัดย่อภาษาไทย

เมื่อการใช้งานยานยนต์ไฟฟ้า (EV) ขยายตัวอย่างรวดเร็ว การทำความเข้าใจผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากแบตเตอรี่ EV โดยเฉพาะในช่วงสิ้นสุดอายุการใช้งาน (EOL) จึงเป็นสิ่งสำคัญ งานวิจัยนี้นำเสนอการประเมินวัฏจักรชีวิต (LCA) อย่างครอบคลุม โดยเปรียบเทียบกลยุทธ์การจัดการแบตเตอรี่สองแบบในช่วงสิ้นสุดการใช้งาน ได้แก่ (1) การรีไซเคิลทันที และ (2) การนำกลับมาใช้ใหม่เป็นเวลา 10 ปี แล้วจึงรีไซเคิล การวิเคราะห์ครอบคลุมตลอดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ โดยใช้ข้อมูลเฉพาะในบริบทจากวิสาหกิจชุมชนส่งออกผลไม้ของไทย และแหล่งที่มาของการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยภายใต้สามสถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าขั้นตอนการผลิตแบตเตอรี่และการใช้งานครั้งแรกในยานยนต์ไฟฟ้ามีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด สำหรับการวิเคราะห์ความอ่อนไหวในช่วงการใช้งานครั้งที่สองของแบตเตอรี่ พบว่าการเสื่อมของความจุและเปอร์เซ็นต์เซลล์แบตเตอรี่ที่ใช้งานได้ที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อการประหยัดพลังงานโดยรวมหรือผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมหากมีการชดเชยความจุที่สูญเสียไปด้วยการเพิ่มจำนวนแบตเตอรี่ที่นำกลับมาใช้ใหม่ ในบรรดาทุกสถานการณ์ กลยุทธ์การนำแบตเตอรี่กลับมาใช้ใหม่ก่อนการรีไซเคิลภายใต้นโยบาย 30@2030 เป็นทางเลือกที่ยั่งยืนที่สุดโดยพิจารณาจากปัจจัยผลกระทบทั้งสี่ร่วมกัน ได้แก่ ศักยภาพในการกักภาวะโลกร้อน พืชต่อระบบนิเวศในน้ำจืด พืชที่ไม่ก่อมะเร็งต่อมนุษย์ และความขาดแคลนทรัพยากรแร่ แนวทางนี้สามารถลดการปล่อยคาร์บอนและผลกระทบอื่น ๆ ต่อสิ่งแวดล้อมได้อย่างสมดุลตลอด นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้การประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ยังมีการให้น้ำหนักกับแต่ละหมวดผลกระทบตามความเห็นของผู้เชี่ยวชาญเพื่อเสริมความน่าเชื่อถือของการประเมิน ส่งผลให้งานวิจัยนี้ให้ข้อมูลเชิงลึกที่เป็นประโยชน์ต่อการจัดการแบตเตอรี่อย่างยั่งยืน สนับสนุนนโยบายเศรษฐกิจหมุนเวียน และชี้แนะแนวทางแก่ผู้มีส่วนเกี่ยวข้องในการเปลี่ยนผ่านสู่พลังงานคาร์บอนต่ำของประเทศไทย

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ

As electric vehicle (EV) adoption accelerates, understanding the environmental impacts of EV batteries—particularly at their end-of-life (EOL)—is essential. This study presents a comprehensive life cycle assessment (LCA) comparing two EOL strategies: (1) immediate recycling and (2) repurposing for an additional ten years prior to recycling. The analysis covers the entire battery life cycle, incorporating context-specific data from Thai fruit export community enterprise and modeling Thailand's electricity mix under three carbon emission scenarios. Results highlight that the battery production and primary use phases contribute most to environmental impacts. In the second-use phase, the sensitivity analysis showed that capacity degradation and variations in usable cell rates did not affect the total energy savings or environmental outcomes when the lost capacity was compensated by adding additional repurposed batteries. Among all scenarios, repurposing batteries before recycling under the 30@2030 policy emerged as the most sustainable overall option when all four impact categories were considered collectively: global warming potential, freshwater ecotoxicity, human non-carcinogenic toxicity, and mineral resource scarcity. It achieved a balanced reduction in carbon emissions and other environmental impacts across the entire product life cycle, with expert-weighted categories enhancing the robustness of the assessment. This study offers practical insights for sustainable battery management, supporting circular economy policies and guiding stakeholders in Thailand's low-carbon energy transition.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม ที่ให้งบประมาณสนับสนุนทุนวิจัย ในปีงบประมาณ 2567

และขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และทรัพยากรในการทำวิจัย รวมถึงขอขอบคุณ ศูนย์เทคโนโลยีพลังงานแห่งชาติ (ENTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) สมาคมเทคโนโลยีระบบกักเก็บพลังงานไทย และวิสาหกิจชุมชนส่งออกผลไม้ ในการให้ข้อมูลในการทำวิจัยครั้งนี้

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครที่สนับสนุนการทำวิจัยและเอื้อเฟื้อสถานที่สำหรับการทำวิจัยนี้



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญภาพประกอบ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 การกระจายตัวทางภูมิศาสตร์ของงานวิจัยด้าน LCA เกี่ยวกับแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้ซ้ำในระยะที่สอง	11
2.2 การตัดสินใจเชิงยุทธศาสตร์ในระยะยาวและการมีส่วนร่วมของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียในงาน LCA	11
2.3 การใช้ข้อมูลปฐมภูมิในการประเมินระบบกักเก็บพลังงาน	12
2.4 การพิจารณานโยบายการปล่อยคาร์บอนและโครงสร้างสัดส่วนพลังงานไฟฟ้า	12
2.5 ผลของคุณสมบัติของแบตเตอรี่ต่อประสิทธิภาพเชิงสิ่งแวดล้อมในการใช้งานระยะที่สอง	12
2.6 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ความหลากหลายของหน่วยหน้าที่ และขอบเขตของกระบวนการที่รวมอยู่ในการวิเคราะห์	13
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	21
3.1 การกำหนดวัตถุประสงค์และขอบเขตของการศึกษา	21
3.2 การเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล	23
บทที่ 4 ผลการวิจัย	30
4.1 การเก็บข้อมูลไหลพลังงาน	30

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัย (ต่อ)	
4.2 การประเมินวัฏจักรชีวิตของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า	31
บทที่ 5 สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	79
5.1 สรุปผลการวิจัย	79
5.2 อภิปรายผล	80
5.3 ข้อเสนอแนะ	86
บรรณานุกรม	87
ประวัติผู้วิจัย	93



สารบัญภาพประกอบ

รูปที่		หน้า
รูปที่ 3.1	ขอบเขตของระบบของทางเลือก EOL แบบที่ 1	21
รูปที่ 3.2	ขอบเขตของระบบของทางเลือก EOL แบบที่ 2	22
รูปที่ 4.1	การผสมผสานการผลิตไฟฟ้าที่คาดการณ์ในประเทศไทยภายใต้ 3 สถานการณ์ ได้แก่ PDP2018, 30@2030 และ 40@2030	37



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
ตารางที่ 2.1	การเปรียบเทียบข้อค้นพบของงานวิจัยก่อนหน้าและการศึกษานี้	5
ตารางที่ 2.2	ผลกระทบต่องานวิจัย, หน่วยหน้าที่ และขอบเขตของกระบวนการที่รวมอยู่ในการศึกษา	14
ตารางที่ 4.1	การใช้พลังงานของโหลตตอนกลางคืนรายเดือนของวิสาหกิจชุมชนส่งออกผลไม้แห้งหนึ่ง	30
ตารางที่ 4.2	การเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่และการประมาณความจุที่ใช้งานได้(กรณีดีที่สุด)	32
ตารางที่ 4.3	การเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่และการประมาณความจุที่ใช้งานได้(กรณีแย่ที่สุด)	33
ตารางที่ 4.4	ประสิทธิภาพของระบบกักเก็บพลังงานในระยะเวลา 10 ปี	35
ตารางที่ 4.5	บัญชีวัฏจักรชีวิตของแบตเตอรี่ในระหว่างการนำกลับมาใช้ใหม่	39
ตารางที่ 4.6	บัญชีวัฏจักรวงจรชีวิตของส่วนประกอบที่ไม่ได้นำกลับมาใช้ใหม่ในระหว่างการนำกลับมาใช้ใหม่	60
ตารางที่ 4.7	บัญชีวัฏจักรวงจรชีวิตของการรีไซเคิล (Mechanical pretreatment)	61
ตารางที่ 4.8	บัญชีวัฏจักรวงจรชีวิตของการรีไซเคิล (Graphite separation from black mass by flotation technology)	62
ตารางที่ 4.9	บัญชีวัฏจักรวงจรชีวิตของการรีไซเคิล (Regeneration of recycled graphite)	63
ตารางที่ 4.10	บัญชีวัฏจักรวงจรชีวิตของการรีไซเคิล (Hydrometallurgical recycling of black mass: Solvent-based extraction)	64
ตารางที่ 4.11	บัญชีวัฏจักรวงจรชีวิตของการรีไซเคิล (Aerophine 3418A)	65
ตารางที่ 4.12	บัญชีวัฏจักรวงจรชีวิตของการรีไซเคิล (Tri-butyl phosphate (tbp))	67
ตารางที่ 4.13	บัญชีวัฏจักรวงจรชีวิตของการรีไซเคิล (D2EHPA)	69
ตารางที่ 4.14	บัญชีวัฏจักรวงจรชีวิตของการรีไซเคิล (Cyanex272)	71
ตารางที่ 4.15	ผลกระทบต่องานวิจัยของตัวเลือกที่ 1: การนำกลับมาใช้ใหม่ 10 ปีและการรีไซเคิล	75
ตารางที่ 4.16	ผลกระทบต่องานวิจัยของตัวเลือกที่ 2: การรีไซเคิลทันที	76

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ตารางที่ 4.17	ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยรวมของทางเลือกที่ 1 ภายใต้นโยบายการผสมผสานแหล่งผลิตไฟฟ้าที่แตกต่างกัน	77
ตารางที่ 4.18	ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยรวมของตัวเลือกที่ 2 ภายใต้นโยบายการผสมผสานแหล่งผลิตไฟฟ้าที่แตกต่างกัน	77
ตารางที่ 4.19	คะแนนผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมแบบถ่วงน้ำหนักรวมสำหรับแต่ละนโยบายและตัวเลือก	78
ตารางที่ 5.1	ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตามเปอร์เซ็นต์สำหรับตัวเลือกที่ 1	83
ตารางที่ 5.2	ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตามเปอร์เซ็นต์สำหรับตัวเลือกที่ 2	84



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยเป็นหนึ่งในผู้นำด้านการผลิตยานยนต์ของเอเชีย และมีเป้าหมายจะก้าวสู่การเป็นศูนย์กลางการผลิตยานยนต์ไฟฟ้า (EV) ของภูมิภาค โดยรัฐบาลได้กำหนดเป้าหมาย “30@30” ซึ่งมุ่งหวังให้รถยนต์ที่ผลิตในประเทศอย่างน้อยร้อยละ 30 ภายในปี พ.ศ. 2573 เป็นยานยนต์ปล่อยมลพิษเป็นศูนย์ (Zero Emission Vehicles: ZEVs) เพื่อตอบสนองต่อการเปลี่ยนผ่านสู่เศรษฐกิจคาร์บอนต่ำ (Chonsalasin et al., 2024; Office of the Board of Investment, 2023) ภายใต้นโยบาย EV 3.5 (พ.ศ. 2567–2570) รัฐบาลไทยได้ออกมาตรการสนับสนุน เช่น การลดภาษี การให้เงินอุดหนุน และการส่งเสริมการผลิต EV ในประเทศ ซึ่งมีส่วนสำคัญในการกระตุ้นตลาด EV และดึงดูดผู้ลงทุนรายใหม่เข้าสู่อุตสาหกรรม (Chonsalasin et al., 2024)

จากข้อมูลของสมาคมยานยนต์ไฟฟ้าไทย (พ.ศ. 2566) พบว่าการจดทะเบียนรถยนต์ไฟฟ้าแบบแบตเตอรี่ (BEV) เพิ่มขึ้นกว่า 900% ระหว่างปี พ.ศ. 2562 ถึง 2566 สะท้อนถึงบทบาทที่เพิ่มขึ้นของ EV ในการลดการปล่อยมลพิษจากภาคการขนส่ง (Chaianong et al., 2024) อย่างไรก็ตาม แบตเตอรี่ EV มีอายุการใช้งานเฉลี่ยเพียง 8 ถึง 10 ปี (Casals et al., 2019) ทำให้ภายในปี พ.ศ. 2578 ประเทศไทยจะมีแบตเตอรี่หมดอายุ (End-of-Life: EOL) สะสมระหว่าง 4 ถึง 20 พันตัน ซึ่งเป็นความท้าทายต่อการจัดการอย่างยั่งยืน (Chaianong et al., 2024) หากไม่มีการจัดการที่เหมาะสม แบตเตอรี่เหล่านี้อาจกลายเป็นความเสี่ยงต่อสิ่งแวดล้อม (Petrauskienė et al., 2022; Shu et al., 2021; Zhu et al., 2021)

แนวทางการจัดการแบตเตอรี่หมดอายุ เช่น การกำจัด การรีไซเคิล การนำกลับมาใช้ใหม่ การผลิตซ้ำ หรือการปรับเปลี่ยนวัตถุประสงค์การใช้งาน ล้วนมีบทบาทสำคัญในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งวิธีการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) ตามมาตรฐาน ISO 14040 เป็นเครื่องมือที่สามารถใช้วิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์หรือระบบตลอดวงจรชีวิตได้อย่างเป็นระบบ (Kluppel, 2005) ทั้งนี้ LCA ยังเป็นประโยชน์ต่อภาคอุตสาหกรรมในการวางแผน ออกแบบผลิตภัณฑ์ และปรับปรุงกระบวนการผลิต (Ghasemi et al., 2024) รวมถึงดึงดูดกลุ่มลูกค้าสายเขียว และสนับสนุนกลยุทธ์การตลาดและการลงทุนอย่างยั่งยืน (Mansour et al., 2024)

แม้ว่าจะมีงานวิจัยมากกว่า 400 ชิ้นเกี่ยวกับ LCA ของแบตเตอรี่ EV (Lai et al., 2022) แต่กลับมีข้อมูลจำนวนน้อยมากเกี่ยวกับการประเมิน LCA ของแบตเตอรี่หมดอายุที่ถูกนำไปใช้ต่อในอุตสาหกรรมอื่น (Chayutthanabun et al., 2025; Cusenza et al., 2019) ทั้งที่การนำแบตเตอรี่หมดอายุมาใช้ในภาคอุตสาหกรรมอื่นที่ใช้พลังงานน้อยลงสามารถช่วยยืดอายุการใช้งานและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ (Aichberger and Jungmeier, 2020; Haram et al., 2021; Picatoste et al., 2024)

นอกจากนี้ การรีไซเคิลยังเป็นอีกทางเลือกสำคัญในการนำวัสดุมีค่ากลับมาใช้ใหม่ เช่น ลิเทียม โคบอลต์ และนิกเกิล ซึ่งช่วยลดการขุดแร่ใหม่และผลกระทบจากการทำเหมือง (Luo et al., 2024; Pagnanelli et al., 2024) อย่างไรก็ตาม กระบวนการรีไซเคิลยังเผชิญกับข้อจำกัด เช่น การใช้พลังงานสูง (Golmohammadzadeh et al., 2022) และการสูญเสียประสิทธิภาพของวัสดุ (Zhang et al., 2023) ทำให้จำเป็นต้องมีการวิจัยเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพทั้งด้านการรีไซเคิลและการนำกลับมาใช้ใหม่อย่างยั่งยืน

ดังนั้น ประเทศไทยจำเป็นต้องมีการศึกษาประเมินวัฏจักรชีวิตของแบตเตอรี่ EV หมดอายุอย่างละเอียด เพื่อพัฒนาแนวทางการจัดการอย่างยั่งยืน (Chayutthanabun et al., 2024) โดยเฉพาะในบริบทของประเทศไทย ที่แหล่งพลังงานสะอาดในการชาร์จยังมีข้อจำกัด ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อผลลัพธ์ด้านสิ่งแวดล้อมจากการนำแบตเตอรี่มาใช้ใหม่

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากสองแนวทางการจัดการหลังสิ้นอายุไขของแบตเตอรี่ EV ทั้งในด้านการผลิต การใช้งาน และการจัดการหลังสิ้นอายุไข

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การวิเคราะห์ครอบคลุมขั้นตอนการผลิต การใช้งานแบตเตอรี่ครั้งแรกในยานยนต์ไฟฟ้า และการจัดการการสิ้นสุดอายุการใช้งาน (EOL) ของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า การจัดการการสิ้นสุดอายุการใช้งาน (EOL) ของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า มี 2 ทางเลือกดังต่อไปนี้

- ทางเลือกที่ 1: การนำไปใช้ใหม่และรีไซเคิล
แบตเตอรี่ถูกนำไปใช้ในระบบกักเก็บพลังงานอีก 10 ปี โดยบางชิ้นส่วนที่ชำรุดได้ถูกรีไซเคิลทันที หลังจากแบตเตอรี่หมดอายุการใช้งานในระบบกักเก็บพลังงานแล้วจึงรีไซเคิลแบตเตอรี่ทั้งหมด
- ทางเลือกที่ 2: การรีไซเคิลทันที
แบตเตอรี่จะถูกรีไซเคิลทันทีหลังสิ้นสุดการใช้งานในรถยนต์

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1.4.1 หมวดหมู่ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมที่ศึกษา

หมวดหมู่ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมที่ศึกษา ได้แก่

- ศักยภาพในการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน (GWP) วัดเป็น kg CO₂ เทียบเท่า
- พิษต่อระบบนิเวศน้ำจืด วัดเป็น kg 1,4-DCB เทียบเท่า
- พิษต่อมนุษย์ที่ไม่ก่อมะเร็ง วัดเป็น kg 1,4-DCB เทียบเท่า

- ความขาดแคลนทรัพยากรแร่ วัดเป็น kg Cu เทียบเท่า

1.4.2 หน่วยหน้าที่ (Functional Unit)

ระบบตัวอย่างใช้แบตเตอรี่ 2 ก้อน รวมความจุ 148 kWh (จาก BMW iX3)

1.4.3 การเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์

1.4.3.1 การเก็บข้อมูลโหลดพลังงาน

ใช้ข้อมูลจากวิสาหกิจชุมชนส่งออกผลไม้ในประเทศไทย โดยเก็บโหลดกลางคืนจาก Smart Power Meter ตลอด 1 ปี

1.4.3.2 การประมวลผลโหลดและการกำหนดขนาดระบบกักเก็บพลังงาน (ESS)

การคำนวณโหลดสูงสุดรายวัน พิจารณาการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ ทั้งช่วงแรก (ปี 1–8) และช่วงที่สอง (ปี 9–10) วิธีการกำหนดขนาด ESS คำนวณตามโหลดที่คาดการณ์คำนึงถึงความจุแบตเตอรี่ที่ลดลงเป็นรายปี

1.4.3.3 ฐานข้อมูลวงจรชีวิต (LCI)

ใช้ฐานข้อมูล ecoinvent v3.9.1 ผ่านซอฟต์แวร์ SimaPro 9.5 โดยเลือกข้อมูลเฉพาะประเทศไทยเป็นหลัก หากไม่มีจึงใช้ข้อมูลระดับภูมิภาคหรือโลก

1.4.3.4 การประเมินผลกระทบของวงจรชีวิต (LCIA)

ใช้วิธี ReCiPe 2016 midpoint และ โมเดลระบบ APOS เพื่อให้สามารถจัดสรรผลกระทบได้อย่างเหมาะสม

1.4.3.5 การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis)

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้แก่ อัตราการเสื่อมของแบตเตอรี่, เซลล์แบตเตอรี่ที่ใช้ได้เป็นเปอร์เซ็นต์, กรณศึกษาส่วนผสมของพลังงานไฟฟ้า (Electricity mix) โดยเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมภายใต้ 3 นโยบาย ได้แก่ PDP2018, 30@2030, 40@2030 โดยใช้สัดส่วนพลังงานจากแหล่งต่าง ๆ (ถ่านหิน ก๊าซ แสงอาทิตย์ ฯลฯ)

1.4.4 การแปลผล (Interpretation)

การแปลผลมุ่งเน้นไปที่การระบุขั้นตอนของวงจรชีวิตที่มีผลกระทบสูง และเปรียบเทียบข้อดีข้อเสีย ระหว่าง การรีไซเคิลทันที กับ การใช้ซ้ำก่อนรีไซเคิล ภายใต้นโยบายพลังงานที่ต่างกัน (PDP2018, 30@2030, 40@2030) เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจและกำหนดนโยบายที่ยั่งยืนสำหรับแบตเตอรี่ EV ที่หมดอายุ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การศึกษานี้ให้ข้อมูลเชิงลึกเชิงปฏิบัติสำหรับการจัดการแบตเตอรี่อย่างยั่งยืน สนับสนุนนโยบายเศรษฐกิจหมุนเวียน และแนะนำผู้มีส่วนได้ส่วนเสียในการเปลี่ยนผ่านพลังงานคาร์บอนต่ำของประเทศไทย

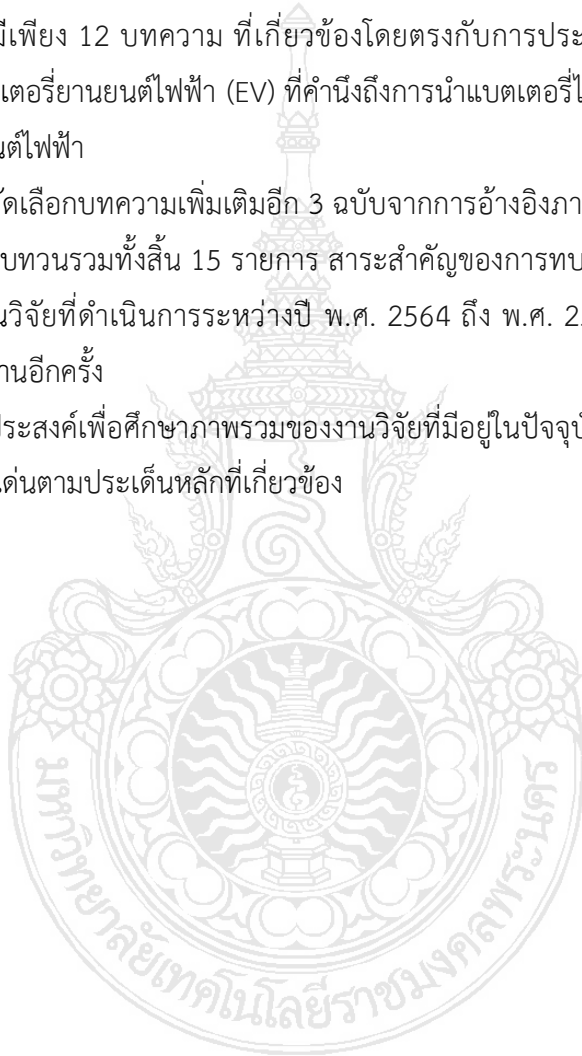
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษานี้ได้ทำการทบทวนบทความวิจัยที่เผยแพร่ระหว่างปี พ.ศ. 2564 ถึง พ.ศ. 2568 โดยใช้คำค้นว่า “second-life,” “reuse,” หรือ “repurpose” ร่วมกับคำว่า “life cycle assessment” และ “electric vehicle” ในฐานข้อมูล SCOPUS จากการสืบค้นเบื้องต้นพบบทความจำนวน 109 รายการ และหลังจากวิเคราะห์เนื้อหาอย่างละเอียด พบว่ามีเพียง 12 บทความ ที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) ของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า (EV) ที่คำนึงถึงการนำแบตเตอรี่ไปใช้งานในระยะที่สองหลังจากสิ้นสุดอายุการใช้งานในยานยนต์ไฟฟ้า

นอกจากนี้ ยังมีการคัดเลือกบทความเพิ่มเติมอีก 3 ฉบับจากการอ้างอิงภายในบทความที่เกี่ยวข้อง ส่งผลให้มีจำนวนบทความที่นำมาทบทวนรวมทั้งสิ้น 15 รายการ สารสำคัญของการทบทวนดังกล่าวสรุปไว้ในตารางที่ 2.1 ซึ่งแสดงภาพรวมของงานวิจัยที่ดำเนินการระหว่างปี พ.ศ. 2564 ถึง พ.ศ. 2568 ที่เกี่ยวข้องกับ LCA ของแบตเตอรี่ EV ที่นำกลับมาใช้งานอีกครั้ง

การทบทวนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาภาพรวมของงานวิจัยที่มีอยู่ในปัจจุบัน ระบุช่องว่างขององค์ความรู้ และจัดหมวดหมู่ผลการศึกษาดังตามประเด็นหลักที่เกี่ยวข้อง



ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบข้อค้นพบของงานวิจัยก่อนหน้าและการศึกษานี้

บทความ	ประเทศ	ความสำคัญของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมแต่ละด้านตามมุมมองของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย	ส่วนผสมของพลังงานไฟฟ้า (Electricity Mix)	การเปรียบเทียบกลยุทธ์การจัดการเมื่อสิ้นสุดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่	ใช้ข้อมูลปฐมภูมิเกี่ยวกับการใช้พลังงานในระบบจัดเก็บพลังงาน	กำหนดจุดตัดสินใจอย่างชัดเจนในปีที่เฉพาะเจาะจง	การวิเคราะห์ความไว			คุณสมบัติของแบตเตอรี่ที่พิจารณาในการวิเคราะห์ความไว	ประเภทของแบตเตอรี่ที่ศึกษา
							นโยบายการปล่อยคาร์บอน	ส่วนผสมของพลังงานไฟฟ้า (Electricity Mix)	คุณสมบัติของแบตเตอรี่		
(Schulz-Mönnighoff et al., 2021)	เยอรมนี		✓	✓	✓			✓	✓	ขนาดของระบบจัดเก็บพลังงานแบตเตอรี่ Second Life การปล่อยมลพิษที่เกี่ยวข้องกับพลังงาน และประสิทธิภาพในกรณีการใช้งานที่แตกต่างกัน	NMC
(Wilson et al., 2021)	จีน, ออสเตรเลีย		✓	✓					✓	อายุการใช้งานแบตเตอรี่ที่นำกลับมาใช้ใหม่, ความจุที่เหลืออยู่ของแบตเตอรี่, อัตราการเก็บโมดูลแบตเตอรี่	NMC
(Koroma et al., 2022)	สหภาพยุโรป		✓	✓		✓		✓	✓	ปีของการใช้งานในครั้งที่สองของแบตเตอรี่	NMC 111

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบข้อค้นพบของงานวิจัยก่อนหน้าและการศึกษานี้ (ต่อ)

บทความ	ประเทศ	ความสำคัญของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมแต่ละด้านตามมุมมองของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย	ส่วนผสมของพลังงานไฟฟ้า (Electricity Mix)	การเปรียบเทียบกลยุทธ์การจัดการเมื่อสิ้นสุดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่	ใช้ข้อมูลปฐมภูมิเกี่ยวกับการใช้พลังงานในระบบจัดเก็บพลังงาน	กำหนดจุดตัดสินใจอย่างชัดเจนในปีที่เฉพาะเจาะจง	การวิเคราะห์ความไว			คุณสมบัติของแบตเตอรี่ที่พิจารณาในการวิเคราะห์ความไว	ประเภทของแบตเตอรี่ที่ศึกษา
							นโยบายการปล่อยคาร์บอน	ส่วนผสมของพลังงานไฟฟ้า (Electricity Mix)	คุณสมบัติของแบตเตอรี่		
(Philippot et al., 2022)	เบลเยียม, เอสโตเนีย, สวีเดน		✓	✓				✓	✓	พลังงานการผลิตเซลล์, พลังงานการผลิตชุดแบตเตอรี่, ระยะทางรวม, การสิ้นเปลืองยานพาหนะ, แบตเตอรี่ที่ผ่านการรับรอง, ระยะเวลาการนำกลับมาใช้ใหม่, แบตเตอรี่ที่ผ่านการรับรอง	NMC-LTO
(Quan et al., 2022)	จีน		✓						✓	การใช้พลังงานในการผลิตแบตเตอรี่, ประสิทธิภาพการชาร์จ-คายประจุ, ชีต จำกัดการใช้พลังงาน	LFP, NCM

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบข้อค้นพบของงานวิจัยก่อนหน้าและการศึกษานี้ (ต่อ)

บทความ	ประเทศ	ความสำคัญของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมแต่ละด้านตามมุมมองของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย	ส่วนผสมของพลังงานไฟฟ้า (Electricity Mix)	การเปรียบเทียบกลยุทธ์การจัดการเมื่อสิ้นสุดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่	ใช้ข้อมูลปฐมภูมิเกี่ยวกับการใช้พลังงานในระบบจัดเก็บพลังงาน	กำหนดจุดตัดสินใจอย่างชัดเจนในปีที่เฉพาะเจาะจง	การวิเคราะห์ความไว			คุณสมบัติของแบตเตอรี่ที่พิจารณาในการวิเคราะห์ความไว	ประเภทของแบตเตอรี่ที่ศึกษา
							นโยบายการปล่อยคาร์บอน	ส่วนผสมของพลังงานไฟฟ้า (Electricity Mix)	คุณสมบัติของแบตเตอรี่		
(Wang et al., 2022)	จีน			✓					✓	ปีของการใช้งานในครั้งที่สองของแบตเตอรี่	LFP
(Cui et al., 2023)	จีน		✓						✓	ความจุของแบตเตอรี่, ประสิทธิภาพการแปลง, อัตราการเสื่อมประสิทธิภาพ, การสูญเสียไฟฟ้า	LFP , NMC811, PbA, LCO, and NCA
(Dunn et al., 2023)	สหรัฐอเมริกา		✓	✓	✓			✓	✓	การทดแทนวัสดุ, ปริมาณวัสดุรีไซเคิลที่ใช้เป็นส่วนประกอบ, การลดลงของความจุแบตเตอรี่, การลดลงของประสิทธิภาพการทำงาน	NMC111

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบข้อค้นพบของงานวิจัยก่อนหน้าและการศึกษานี้ (ต่อ)

บทความ	ประเทศ	ความสำคัญของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมแต่ละด้านตามมุมมองของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย	ส่วนผสมของพลังงานไฟฟ้า (Electricity Mix)	การเปรียบเทียบกลยุทธ์การจัดการเมื่อสิ้นสุดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่	ใช้ข้อมูลปฐมภูมิเกี่ยวกับการใช้พลังงานในระบบจัดเก็บพลังงาน	กำหนดจุดตัดสินใจอย่างชัดเจนในปีที่เฉพาะเจาะจง	การวิเคราะห์ความไว			คุณสมบัติของแบตเตอรี่ที่พิจารณาในการวิเคราะห์ความไว	ประเภทของแบตเตอรี่ที่ศึกษา
							นโยบายการปล่อยคาร์บอน	ส่วนผสมของพลังงานไฟฟ้า (Electricity Mix)	คุณสมบัติของแบตเตอรี่		
(Wrålsen and O'Born, 2023)	นอร์เวย์			✓					✓	การหลีกเลี่ยงการผลิตแบตเตอรี่ใหม่, กระบวนการปรับปรุงเพิ่มเติม	NMC811
(Silvestri et al., 2024)	ยุโรป		✓								LFP
(Vinci et al., 2024)	อิตาลี			✓							LFP
(Yang et al., 2024)	จีน			✓	✓				✓	มวลของแบตเตอรี่ที่ใช้ซ้ำเป็นครั้งที่สอง, การใช้พลังงานระหว่างการกำจัดขยะ, ประสิทธิภาพของเทคโนโลยีแบตเตอรี่	LFP, NMC

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบข้อค้นพบของงานวิจัยก่อนหน้าและการศึกษานี้ (ต่อ)

บทความ	ประเทศ	ความสำคัญของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมแต่ละด้านตามมุมมองของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย	ส่วนผสมของพลังงานไฟฟ้า (Electricity Mix)	การเปรียบเทียบกลยุทธ์การจัดการเมื่อสิ้นสุดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่	ใช้ข้อมูลปฐมภูมิเกี่ยวกับการใช้พลังงานในระบบจัดเก็บพลังงาน	กำหนดจุดตัดสินใจอย่างชัดเจนในปีที่เฉพาะเจาะจง	การวิเคราะห์ความไว			คุณสมบัติของแบตเตอรี่ที่พิจารณาในการวิเคราะห์ความไว	ประเภทของแบตเตอรี่ที่ศึกษา
							นโยบายการปล่อยคาร์บอน	ส่วนผสมของพลังงานไฟฟ้า (Electricity Mix)	คุณสมบัติของแบตเตอรี่		
(Chayutthanabun et al., 2025)	ไทย		✓	✓							
(Kang et al., 2025)	เกาหลี			✓					✓	อายุการใช้งานแบตเตอรี่ ความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ และการรีไซเคิล	NMC, LFP
(Spindlegger et al., 2025)	จีน, เยอรมัน			✓	✓				✓	วิธีการรีไซเคิล	NMC 111
จำนวนการศึกษาก่อนหน้านี้ทั้งหมด		0	9	12	4	1	0	4	12	9	

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบข้อค้นพบของงานวิจัยก่อนหน้าและการศึกษานี้ (ต่อ)

บทความ	ประเทศ	ความสำคัญของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมแต่ละด้านตามมุมมองของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย	ส่วนผสมของพลังงานไฟฟ้า (Electricity Mix)	การเปรียบเทียบกลยุทธ์การจัดการเมื่อสิ้นสุดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่	ใช้ข้อมูลปฐมภูมิเกี่ยวกับการใช้พลังงานในระบบจัดเก็บพลังงาน	กำหนดจุดตัดสินใจอย่างชัดเจนในปีที่เฉพาะเจาะจง	การวิเคราะห์ความไว			คุณสมบัติของแบตเตอรี่ที่พิจารณาในการวิเคราะห์ความไว	ประเภทของแบตเตอรี่ที่ศึกษา
							นโยบายการปล่อยคาร์บอน	ส่วนผสมของพลังงานไฟฟ้า (Electricity Mix)	คุณสมบัติของแบตเตอรี่		
การศึกษานี้		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	เปอร์เซ็นต์ของการเสื่อมสภาพความจุเปอร์เซ็นต์ของเซลล์แบตเตอรี่ที่ใช้กันได้	NMC 811



2.1 การกระจายตัวทางภูมิศาสตร์ของงานวิจัยด้าน LCA เกี่ยวกับแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้ซ้ำในระยะที่สอง

จากการศึกษาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง พบว่างานวิจัยด้านการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) ของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้ซ้ำในระยะที่สองส่วนใหญ่กระจุกตัวอยู่ในประเทศที่พัฒนาแล้วและประเทศจีน ซึ่งเป็นประเทศผู้นำในอุตสาหกรรมการผลิตแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าในระดับโลก โดย Sitcharangsie (2022) ได้ทบทวนงานวิจัยในช่วง พ.ศ. 2557–2565 และระบุว่ากรณีศึกษาส่วนใหญ่มีที่มาจากภูมิภาคดังกล่าว ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึง ช่องว่างขององค์ความรู้ (knowledge gap) ที่สำคัญในบริบทของประเทศกำลังพัฒนา

ในทำนองเดียวกัน การศึกษานี้ซึ่งได้ทบทวนงานวิจัยในช่วง พ.ศ. 2564–2568 พบว่า งานวิจัยที่ศึกษา LCA ของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้ซ้ำในระยะที่สองในบริบทของประเทศเศรษฐกิจเกิดใหม่ยังมีอยู่อย่างจำกัด ช่องว่างดังกล่าวชี้ให้เห็นถึงความจำเป็นในการพัฒนากรอบแนวคิดและเครื่องมือสนับสนุนการตัดสินใจที่ชัดเจนสำหรับการจัดการแบตเตอรี่เมื่อหมดอายุการใช้งาน (End-of-Life: EOL) โดยเฉพาะอย่างยิ่งเครื่องมือที่อ้างอิงจากแนวทาง LCA เพื่อให้สามารถปรับใช้ได้อย่างเหมาะสมในบริบทของประเทศกำลังพัฒนา

2.2 การตัดสินใจเชิงยุทธศาสตร์ในระยะยาวและการมีส่วนร่วมของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียในงาน LCA

งานวิจัยจำนวนมากที่เกี่ยวข้องกับการประเมินวัฏจักรชีวิตของแบตเตอรี่ EV มีสองมุมมองเน้นการวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อมในระยะยาว อย่างไรก็ตาม มีข้อบกพร่องในกรณีของ Silvestri et al. (2024) ซึ่งทำการวิเคราะห์ในระยะเวลาเพียง 1 ปี โดยส่วนใหญ่งานวิจัยเหล่านี้ไม่ได้บูรณาการมุมมองของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียในการจัดลำดับความสำคัญของหมวดหมู่ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมอย่างเป็นระบบ

การศึกษานี้มีความแตกต่างจากงานที่ผ่านมา โดยได้ออกแบบให้มีการรวบรวมความคิดเห็นจากผู้มีส่วนได้ส่วนเสียที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการจัดการแบตเตอรี่ EOL เพื่อนำมาใช้เป็นปัจจัยถ่วงน้ำหนัก (weighting factors) ในกระบวนการวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อม ซึ่งจะช่วยสนับสนุนการตัดสินใจเชิงนโยบายและการวางแผนที่มีความครอบคลุมและเป็นองค์รวมมากยิ่งขึ้น

ทั้งนี้ จากการศึกษาวรรณกรรม พบว่า Koroma et al. (2022) เป็นงานวิจัยเพียงชิ้นเดียวที่กำหนดจุดตัดสินใจ (decision points) ตามช่วงเวลาอย่างชัดเจน การศึกษานี้จึงได้ขยายองค์ความรู้ในประเด็นดังกล่าวโดยการพัฒนากรอบการตัดสินใจเชิงระบบที่อิงตามกรอบเวลา (time-dependent decision framework) เพื่อให้การจัดการแบตเตอรี่เมื่อสิ้นอายุสามารถปรับตัวตามการเปลี่ยนแปลงของเทคโนโลยี อุตสาหกรรม และข้อกำหนดทางกฎหมายในอนาคต

2.3 การใช้ข้อมูลปฐมภูมิในการประเมินระบบกักเก็บพลังงาน

ผลลัพธ์จากการประเมินวัฏจักรชีวิตที่น่าเชื่อถือ นั้น จำเป็นต้องอาศัยข้อมูลปฐมภูมิที่มีความแม่นยำ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่ยังคงพึ่งพาข้อมูลทุติยภูมิ ซึ่งอาจไม่สามารถสะท้อนสภาพแวดล้อมเชิงพื้นที่และบริบทเฉพาะของแต่ละพื้นที่ได้อย่างครบถ้วน

จากการทบทวนวรรณกรรม พบว่า มีเพียง 4 งานวิจัยเท่านั้นที่มีการใช้ข้อมูลปฐมภูมิในการประเมินระบบกักเก็บพลังงาน ได้แก่ Schulz-Mönnighoff et al. (2021), Dunn et al. (2023), Yang et al. (2024) และ Spindlegger et al. (2025) อย่างไรก็ตาม งานเหล่านี้ยังขาดความหลากหลายทางภูมิศาสตร์และไม่ครอบคลุมบริบทของประเทศกำลังพัฒนา

การศึกษานี้ได้อุดช่องว่างดังกล่าวโดยใช้ข้อมูลปฐมภูมิที่เก็บรวบรวมจากวิศวกรชุมชนส่งออกผลไม่ในประเทศไทย และข้อมูลสัดส่วนแหล่งที่มาในการผลิตไฟฟ้าเฉพาะประเทศไทย ซึ่งมีส่วนสำคัญในการเพิ่มความถูกต้องของแบบจำลองการใช้พลังงานในบริบทของตลาดเกิดใหม่

2.4 การพิจารณาโยบายการปล่อยคาร์บอนและโครงสร้างสัดส่วนพลังงานไฟฟ้า

แม้ประเด็นเรื่องความเป็นกลางทางคาร์บอนจะได้รับความสนใจในระดับสากลเพิ่มมากขึ้นในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา แต่งานวิจัยที่พิจารณาความแตกต่างของสัดส่วนแหล่งพลังงานในการผลิตไฟฟ้าในบริบทของแบตเตอรี่ EV มีสองยังมีอยู่อย่างจำกัด โดยมีเพียง 4 งานวิจัย ได้แก่ Schulz-Mönnighoff et al. (2021), Dunn et al. (2023), Koroma et al. (2022) และ Philippot et al. (2022) ที่กล่าวถึงประเด็นนี้

ที่สำคัญ ยังไม่พบงานวิจัยใดที่ทำการวิเคราะห์ความไว (sensitivity analysis) ของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมภายใต้บริบทของนโยบายการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยตรง ซึ่งถือเป็นช่องว่างที่สำคัญ โดยเฉพาะในบริบทของประเทศไทยที่กำลังเผชิญกับแรงกดดันในระดับชาติให้เร่งดำเนินการด้านการลดคาร์บอน

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการวิเคราะห์ความไวของนโยบายพลังงานควบคู่กับการเปลี่ยนแปลงของสัดส่วนแหล่งพลังงานไฟฟ้า เพื่อประเมินผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นต่อการตัดสินใจเชิงกลยุทธ์ด้านการจัดการแบตเตอรี่ EOL โดยมีเป้าหมายเพื่อสนับสนุนการวางแผนเชิงนโยบายที่สามารถบูรณาการเข้ากับบริบทของประเทศได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ

2.5 ผลของคุณสมบัติของแบตเตอรี่ต่อประสิทธิภาพเชิงสิ่งแวดล้อมในการใช้งานระยะที่สอง

งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการวิเคราะห์ความไวของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของแบตเตอรี่ต่อผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น อายุการใช้งาน อัตราการเสื่อมสภาพ และประสิทธิภาพในการแปลงพลังงาน ตัวอย่างเช่น Wilson et al. (2021) ได้ศึกษาความสามารถในการเก็บประจุ ส่วน Schulz-Mönnighoff et al. (2021) ได้วิเคราะห์การปล่อยพลังงานและประสิทธิภาพในช่วงใช้งานมือสอง ขณะที่ Wang et al. (2022) มุ่งเน้นแบตเตอรี่เคมีแบบ LFP และ NMC111 และ Koroma et al. (2022) ศึกษาการลดลงของความจุในระยะยาว

อย่างไรก็ตาม งานเหล่านี้ยังไม่ได้ประเมิน สัดส่วนของเซลล์ที่สามารถนำกลับมาใช้งานได้จริง ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการประยุกต์ใช้งานแบตเตอรี่ในระยะที่สองได้อย่างมีประสิทธิภาพ

นอกจากนี้ Dunn et al. (2023) ได้ศึกษาเรื่องการทดแทนวัสดุและการลดประสิทธิภาพของระบบ Philippot et al. (2022) วิเคราะห์การใช้พลังงานในกระบวนการผลิตแบตเตอรี่ ส่วน Wrålsen และ O'Born (2023) ได้ศึกษาแนวทางการลดความจำเป็นในการผลิตแบตเตอรี่ใหม่ผ่านกระบวนการซ่อมแซม แม้งานวิจัยเหล่านี้จะกล่าวถึงผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมในเชิงลึก แต่ยังขาดการพิจารณาปัจจัยด้านภูมิอากาศ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของแบตเตอรี่ในเชิงอุณหภูมิ

การศึกษานี้ได้เติมเต็มช่องว่างดังกล่าวโดยให้ความสำคัญกับการวิเคราะห์ผลของการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ และสัดส่วนของเซลล์ที่ยังสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ยังได้บูรณาการการคำนวณความต้องการพลังงานสำหรับระบบระบายความร้อน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในสภาพภูมิอากาศร้อนชื้นของประเทศไทย

ยิ่งไปกว่านั้น การศึกษานี้ยังได้ขยายขอบเขตการประเมินจากภาคการคมนาคมไปสู่ภาคอุตสาหกรรมอื่นที่ไม่เกี่ยวข้องกับยานยนต์ โดยพิจารณาจากสภาพแวดล้อมจริงของการใช้งานในธุรกิจชุมชน การกำหนดขนาดระบบกักเก็บพลังงานที่เหมาะสม และการตรวจสอบผลลัพธ์โดยผู้เชี่ยวชาญด้านระบบพลังงาน เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือและความสามารถในการนำไปปรับใช้จริงในระดับท้องถิ่นและระดับชาติ

2.6 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ความหลากหลายของหน่วยหน้าที่ และขอบเขตของกระบวนการที่รวมอยู่ในการวิเคราะห์

จากตารางที่ 2.1 พบว่างานวิจัยก่อนหน้านี้ส่วนใหญ่ได้พิจารณาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมหลายด้าน โดยที่ศักยภาพในการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global Warming Potential: GWP) เป็นปัจจัยที่ได้รับการวิเคราะห์บ่อยที่สุด อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีงานวิจัยใดที่ให้ความสำคัญหรือจัดลำดับความสำคัญของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในฐานะองค์ประกอบหลักสำหรับการตัดสินใจเกี่ยวกับกลยุทธ์การจัดการเมื่อหมดอายุการใช้งาน (End-of-Life: EOL)

ตรงกันข้าม การศึกษานี้ได้ให้ความสำคัญกับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างชัดเจน โดยอิงจากมุมมองของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย เพื่อให้การตัดสินใจเกี่ยวกับ EOL สอดคล้องกับเป้าหมายด้านความยั่งยืน นอกจากนี้ ตารางที่ 2.2 ยังแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของ หน่วยหน้าที่ (Functional Unit: FU) และขอบเขตของกระบวนการที่รวมอยู่ในการวิเคราะห์ในแต่ละงานวิจัย ซึ่งสะท้อนถึงความหลากหลายของแนวทางในการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA)

ตารางที่ 2.2 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม, หน่วยหน้าที่ และขอบเขตของกระบวนการที่รวมอยู่ในการศึกษา

บทความ	จำนวนหมวดหมู่ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่พิจารณา	ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม	หน่วยหน้าที่ (Functional Unit)	กระบวนการที่พิจารณา									
				การสกัดวัตถุดิบ	การผลิต	การกระจายสินค้า	การใช้ครั้งแรก	การผลิตซ้ำ	การนำกลับมาใช้ใหม่ในรูปแบบอื่น	การใช้ครั้งที่สอง	การรีไซเคิล	การจัดทำ	การจัดการเมื่อสิ้นอายุ
(Schulz-Mönninghoff et al., 2021)	3	การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และการใช้ทรัพยากรแร่ เชื้อเพลิงฟอสซิล และทรัพยากรหมุนเวียน	มุมมองของผู้ผลิตยานยนต์: 1 กิโลวัตต์ชั่วโมง มุมมองของผู้บริโภค พลังงาน: การใช้พลังงานของระบบไฟฟ้ากระแสตรง (DC grid) ในสถานที่ผลิตตลอดระยะเวลา 10 ปี		1		1	1	1	1	1	1	
(Wilson et al., 2021)	8	ศักยภาพในการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน, ความเป็นกรดในดิน, ความเป็นพิษต่อมนุษย์, ความเป็นพิษในน้ำจืด, ภาวะเกาะความร้อนในเมือง, การใช้ที่ดิน, การขาดแคลนแร่, การใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล	การจัดเก็บพลังงาน 1kWh	1	1				1	1			1

ตารางที่ 2.2 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม, หน่วยหน้าที่ และขอบเขตของกระบวนการที่รวมอยู่ในการศึกษา (ต่อ)

บทความ	จำนวนหมวดหมู่ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่พิจารณา	ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม	หน่วยหน้าที่ (Functional Unit)	กระบวนการที่พิจารณา									
				การสกัดวัตถุดิบ	การผลิต	การกระจายสินค้า	การใช้ครั้งแรก	การผลิตซ้ำ	การนำกลับมาใช้ใหม่ในรูปแบบอื่น	การใช้ครั้งที่สอง	การรีไซเคิล	การกำจัด	การจัดการเมื่อสิ้นอายุการใช้งาน
(Koroma et al., 2022)	18	ศักยภาพในการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน, ความขาดแคลนทรัพยากรแร่, การเกิดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5), ความเป็นพิษต่อมนุษย์แบบไม่ก่อมะเร็ง, ความเป็นพิษต่อมนุษย์แบบก่อมะเร็ง, การทำลายชั้นโอโซนในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์, การแผ่รังสีแบบไอออนไนซ์, การเกิดโอโซน (มลพิษโอโซนระดับพื้นดิน), การเกิดความเป็นกรดในสิ่งแวดล้อม, การเกิดยูโทรฟิเคชัน (ความสมบูรณ์เกินของสารอาหารในน้ำ), ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศ, การใช้ที่ดิน, ความขาดแคลนทรัพยากรจากเชื้อเพลิงฟอสซิล, การใช้น้ำ	รถยนต์ไฟฟ้าขนาด B-segment ของยุโรป ที่ติดตั้งแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนความจุ 54.6 กิโลวัตต์ชั่วโมง สำหรับการใช้งานระยะทาง 160,000 กิโลเมตรตลอดอายุการใช้งาน 12 ปี	1	1		1	1	1	1	1		1
(Philippot et al., 2022)	16	การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ, การทำลายชั้นโอโซน, ความเป็นพิษต่อมนุษย์ (ผลที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็ง), ความเป็นพิษต่อมนุษย์ (ผลที่ก่อให้เกิดมะเร็ง), การแผ่รังสีแบบไอออนไนซ์, การเกิดโอโซนจากปฏิกิริยาแสง, การเกิดความเป็นกรด, การเกิดยูโทรฟิเคชันบนบก, การเกิดยูโทรฟิเคชันในน้ำจืด, การเกิดยูโทรฟิเคชันในทะเล, ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศในน้ำจืด, การใช้ที่ดิน, การใช้น้ำ, การใช้ทรัพยากรจากเชื้อเพลิงฟอสซิล, การใช้ทรัพยากรแร่และโลหะ	กำลังขับ 1kWh		1		1		1	1	1		1

ตารางที่ 2.2 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม, หน่วยหน้าที่ และขอบเขตของกระบวนการที่รวมอยู่ในการศึกษา (ต่อ)

บทความ	จำนวนหมวดหมู่ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่พิจารณา	ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม	หน่วยหน้าที่ (Functional Unit)	กระบวนการที่พิจารณา									
				การสกัดวัตถุดิบ	การผลิต	การกระจายสินค้า	การใช้ครั้งแรก	การผลิตซ้ำ	การนำกลับมาใช้ใหม่ในรูปแบบอื่น	การใช้ครั้งที่สอง	การรีไซเคิล	การกำจัด	การจัดการเมื่อสิ้นอายุการใช้งาน
(Quan et al., 2022)	7	การปล่อยแหล่งทรัพยากรที่ไม่สามารถเกิดขึ้นใหม่ได้, การปล่อยแหล่งทรัพยากรที่ไม่สามารถเกิดขึ้นใหม่ได้, ศักยภาพในการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน, ศักยภาพในการเกิดความเป็นกรด, ศักยภาพในการเกิดยูโทรฟิเคชัน, ศักยภาพในการทำลายชั้นโอโซน, ศักยภาพในการสร้างโอโซนจากปฏิกิริยาแสง	ก้อนแบตเตอรี่ 1 kWh		1		1		1	1			
(Wang et al., 2022)	7	การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ, การปล่อยทรัพยากรเชื้อเพลิงฟอสซิล, การทำลายชั้นโอโซนในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์, การใช้น้ำจืด, การเกิดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5), ความเป็นพิษต่อมนุษย์, การปล่อยทรัพยากรโลหะ	แบตเตอรี่ LFP 1kWh	1	1		1		1	1	1		
(Cui et al., 2023)	11	ศักยภาพในการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน (ในช่วงเวลา 100 ปี), ศักยภาพในการเกิดความเป็นกรด, ศักยภาพในการทำลายชั้นโอโซน, ศักยภาพในการสร้างโอโซนจากปฏิกิริยาแสง, ศักยภาพในการเกิดยูโทรฟิเคชัน, ศักยภาพในการเกิดพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำจืด, ศักยภาพในการเกิดพิษต่อสิ่งมีชีวิตในทะเล, ศักยภาพในการเกิดพิษต่อสิ่งมีชีวิตบนบก, ศักยภาพในการเกิดพิษต่อมนุษย์, การปล่อยทรัพยากรอนินทรีย์ (ธาตุ), การปล่อยทรัพยากรอนินทรีย์ (เชื้อเพลิงฟอสซิล)	พลังงาน 1 kWh ที่ส่งมาจากแบตเตอรี่		1		1		1	1			

ตารางที่ 2.2 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม, หน่วยหน้าที่ และขอบเขตของกระบวนการที่รวมอยู่ในการศึกษา (ต่อ)

บทความ	จำนวนหมวดหมู่ ผลกระทบต่อ สิ่งแวดล้อมที่ พิจารณา	ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม	หน่วยหน้าที่ (Functional Unit)	กระบวนการที่พิจารณา								
				การสกัดวัตถุดิบ	การผลิต	การกระจายสินค้า	การใช้ครั้งแรก	การผลิตซ้ำ	การนำกลับมาใช้ ใหม่ในรูปแบบอื่น	การใช้ครั้งที่สอง	การรีไซเคิล	การจัดการเมื่อสิ้น อายุการใช้งาน
(Dunn et al., 2023)	21	ศักยภาพในการกรองทรัพยากรโลหะ, ศักยภาพในการเกิดยูโทรฟิเคชันในน้ำจืด, ศักยภาพในการเกิดพิษต่อมนุษย์, ศักยภาพในการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน, ศักยภาพในการเกิดพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำจืด, ศักยภาพในการเกิดพิษต่อสิ่งมีชีวิตบนบก, ศักยภาพในการใช้น้ำจืด, ศักยภาพในการเกิดพิษต่อมนุษย์ (ไม่ก่อให้เกิดมะเร็ง), ศักยภาพในการใช้ที่ดิน, ศักยภาพในการกรองทรัพยากรฟอสซิล, ศักยภาพในการแผ่รังสีแบบไอออน, ศักยภาพในการเกิดโอโซนจากปฏิกิริยาแสง, ศักยภาพในการเกิดความเป็นกรดบนบก, ศักยภาพในการเกิดโอโซนจากปฏิกิริยาแสง – ต่อบรรณิเวศ, ศักยภาพในการเกิดยูโทรฟิเคชันในทะเล, ศักยภาพในการเกิดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5), ศักยภาพในการเกิดพิษต่อสิ่งมีชีวิตในทะเล, ศักยภาพในการทำลายชั้นโอโซน, ความเสียหายต่อความพร้อมใช้งานของทรัพยากร, ความเสียหายต่อสุขภาพมนุษย์, ความเสียหายต่อบรรณิเวศ	แบตเตอรี่ 1kWh						1	1	1	
(Wrålsen and O’Born, 2023)	18	ภาวะโลกร้อน, การทำลายชั้นโอโซนในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์, การแผ่รังสีแบบไอออน, การเกิดโอโซน (ผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์), การเกิดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5), การเกิดโอโซน (ผลกระทบต่อระบบนิเวศบนบก), การเกิดความเป็นกรดบนบก, การเกิดยูโทรฟิเคชันในน้ำจืด, การเกิดยูโทรฟิเคชันในทะเล,	ความจุ 1 kWh สำหรับชุดแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนอายุการใช้งานซ้ำเป็นครั้งที่สอง		1			1	1	1	1	

ตารางที่ 2.2 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม, หน่วยหน้าที่ และขอบเขตของกระบวนการที่รวมอยู่ในการศึกษา (ต่อ)

บทความ	จำนวนหมวดหมู่ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่พิจารณา	ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม	หน่วยหน้าที่ (Functional Unit)	กระบวนการที่พิจารณา									
				การสกัดวัตถุดิบ	การผลิต	การกระจายสินค้า	การใช้ครั้งแรก	การผลิตซ้ำ	การนำกลับมาใช้ใหม่ในรูปแบบอื่น	การใช้ครั้งที่สอง	การรีไซเคิล	การกำจัด	การจัดการเมื่อสิ้นอายุการใช้งาน
		ความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตบนบก, ความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำจืด, ความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในทะเล, ความเป็นพิษต่อมนุษย์แบบก่อมะเร็ง, ความเป็นพิษต่อมนุษย์แบบไม่ก่อมะเร็ง, การใช้ที่ดิน, ความขาดแคลนทรัพยากรแร่, ความขาดแคลนทรัพยากรจากเชื้อเพลิงฟอสซิล, การใช้น้ำ											
(Silvestri et al., 2024)	3	ศักยภาพในการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน, การปล่อยทรัพยากรที่ไม่สามารถเกิดขึ้นใหม่ได้, ความเป็นพิษต่อมนุษย์	การใช้งานเครื่องบดบอลเป็นระยะเวลา 1 ปี	1	1	1	1		1	1	1		
(Vinci et al., 2024)	18	ผลกระทบทางบรรยากาศ (Atmospheric Effects): ศักยภาพในการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน, การทำลายชั้นโอโซนในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์, การแผ่รังสีแบบไอออนไนซ์, การเกิดโอโซน (ผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์), การเกิดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5), การเกิดโอโซน (ผลกระทบต่อระบบนิเวศบนบก), ศักยภาพในการเกิดความเป็นกรดบนบก ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication): ศักยภาพในการเกิดยูโทรฟิเคชันในน้ำจืด, ศักยภาพในการเกิดยูโทรฟิเคชันในทะเล ความเป็นพิษ (Toxicity):	แบตเตอรี่ 1kWh		1	1	1			1	1		

ตารางที่ 2.2 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม, หน่วยหน้าที่ และขอบเขตของกระบวนการที่รวมอยู่ในการศึกษา (ต่อ)

บทความ	จำนวนหมวดหมู่ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่พิจารณา	ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม	หน่วยหน้าที่ (Functional Unit)	กระบวนการที่พิจารณา									
				การสกัดวัตถุดิบ	การผลิต	การกระจายสินค้า	การใช้ครั้งแรก	การผลิตซ้ำ	การนำกลับมาใช้ใหม่ในรูปแบบอื่น	การใช้ครั้งที่สอง	การรีไซเคิล	การกำจัด	การจัดการเมื่อสิ้นอายุการใช้งาน
		ความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตบนบก, ความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำจืด, ความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในทะเล, ความเป็นพิษต่อมนุษย์แบบก่อมะเร็ง, ความเป็นพิษต่อมนุษย์แบบไม่ก่อมะเร็ง ทรัพยากรอนินทรีย์ (Abiotic Resources): การใช้ที่ดิน, ความขาดแคลนทรัพยากรแร่, ความขาดแคลนทรัพยากรจากเชื้อเพลิงฟอสซิล, การใช้น้ำ											
(Yang et al., 2024)	10	ภาวะโลกร้อน, การทำลายชั้นโอโซนในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์, การเกิดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5), การเกิดความเป็นกรดบนบก, การเกิดยูโทรฟิเคชันในน้ำจืด, ความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำจืด, ความเป็นพิษต่อมนุษย์แบบก่อมะเร็ง, ความขาดแคลนทรัพยากรแร่, ความขาดแคลนทรัพยากรจากเชื้อเพลิงฟอสซิล, การใช้น้ำ	แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่เลิกใช้งานแล้ว 1 กก.					1	1	1	1		
(Chayutthanabun et al., 2025)	6	การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ, ความเป็นพิษต่อมนุษย์, การเกิดความเป็นกรดบนบก, การเกิดฝุ่นละออง (PM), การพร่องทรัพยากรโลหะ, การพร่องทรัพยากรเชื้อเพลิงฟอสซิล	กำลังการผลิต EVB 75 kWh คิดเป็น 80% ของ EVB ทั้งหมดตลอดอายุการใช้งาน 10 ปีในประเทศไทย	1	1		1	1	1	1	1	1	

ตารางที่ 2.2 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม, หน่วยหน้าที่ และขอบเขตของกระบวนการที่รวมอยู่ในการศึกษา (ต่อ)

บทความ	จำนวนหมวดหมู่ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่พิจารณา	ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม	หน่วยหน้าที่ (Functional Unit)	กระบวนการที่พิจารณา									
				การสกัดวัตถุดิบ	การผลิต	การกระจายสินค้า	การใช้ครั้งแรก	การผลิตซ้ำ	การนำกลับมาใช้ใหม่ในรูปแบบอื่น	การใช้ครั้งที่สอง	การรีไซเคิล	การกำจัด	การจัดการเมื่อสิ้นอายุการใช้งาน
(Kang et al., 2025)	1	ศักยภาพในการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน	พลังงาน 1kWh ที่เก็บไว้เป็นเวลา 20 ปี		1		1			1	1	1	
(Spindlegger et al., 2025)	16	การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ, การเกิดฝุ่นละออง (PM), การปล่อยทรัพยากรฟอสซิล, ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศ: น้ำจืด, ทะเล, บก, ความเป็นพิษต่อมนุษย์: แบบก่อมะเร็ง, แบบไม่ก่อมะเร็ง, การแผ่รังสีแบบไอออนไนซ์, การเกิดยูโทรฟิเคชัน: น้ำจืด, ทะเล, การปล่อยทรัพยากรโลหะ, การเกิดโอโซนจากปฏิกิริยาแสง: ต่อระบบนิเวศ, ต่อสุขภาพมนุษย์, การทำลายชั้นโอโซนในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์, การเกิดความเป็นกรดบนบก	พลังงาน 1 kWh ที่ส่งมาจากแบตเตอรี่	1	1		1		1	1	1		
จำนวนการศึกษา ก่อนหน้าที่กล่าวถึงเรื่องนี้				6	13	2	11	5	13	15	13	3	3
การศึกษานี้	4	ศักยภาพในการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน, ความขาดแคลนทรัพยากรแร่, ความเป็นพิษต่อมนุษย์แบบไม่ก่อมะเร็ง, ความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำจืด	ระบบแบตเตอรี่สองก้อนที่มีความจุพลังงานรวม 148 กิโลวัตต์ชั่วโมง	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓		✓

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า (EV) ตลอดวงจรชีวิต โดยให้ความสำคัญกับสองทางเลือกในการจัดการเมื่อหมดอายุการใช้งาน (End-of-Life: EOL) ได้แก่ (1) การนำแบตเตอรี่ไปใช้ใหม่ (Repurposing) สำหรับระบบกักเก็บพลังงาน และต่อด้วยการรีไซเคิล และ (2) การรีไซเคิลทันทีหลังจากสิ้นสุดการใช้งานครั้งแรก ในการศึกษานี้ได้รวมการผลิตและการใช้งานครั้งแรกไว้เป็นฐานวิเคราะห์เดียวกันสำหรับทั้งสองกรณี เพื่อให้ได้การเปรียบเทียบที่ครอบคลุม

3.1 การกำหนดวัตถุประสงค์และขอบเขตของการศึกษา

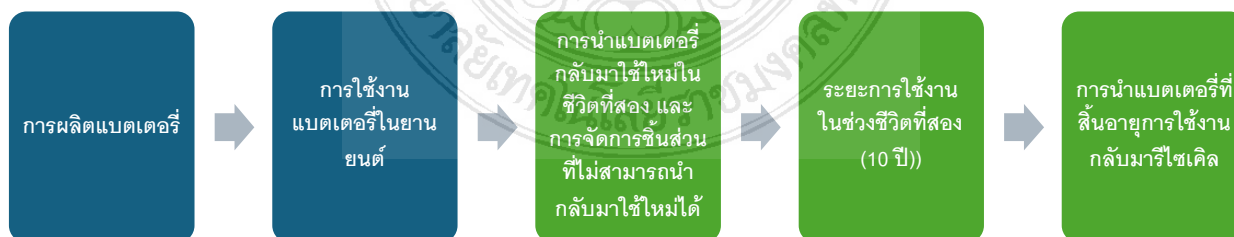
3.1.1 ขอบเขตของระบบ

การวิเคราะห์นี้ครอบคลุมถึงระยะการผลิต ระยะการใช้งานครั้งแรก และการจัดการเมื่อสิ้นอายุการใช้งาน (EOL) โดยมีการพิจารณาทางเลือกในการจัดการ EOL จำนวนสองรูปแบบตามที่แสดงในรูปที่ 3.1

3.1.1.1 ทางเลือกที่ 1: การนำกลับมาใช้ใหม่และการรีไซเคิล

รูปที่ 3.1 แสดงให้เห็นว่าขอบเขตของระบบได้ขยายออกไปเพื่อครอบคลุมถึงระยะการใช้งานในครั้งที่สอง (second-life phase) โดยแบตเตอรี่จะถูกนำกลับมาใช้ใหม่ในรูปแบบระบบกักเก็บพลังงานแบบอยู่กับที่ ซึ่งสามารถประหยัดพลังงานได้เพิ่มเติมอีกเป็นระยะเวลา 10 ปี

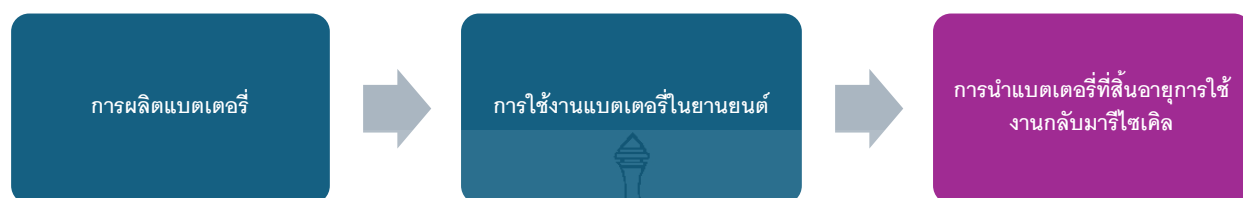
ในระหว่างกระบวนการปรับปรุงเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ในครั้งที่สองนั้น ส่วนประกอบที่ไม่สามารถนำมาใช้ใหม่ได้จะถูกแยกออกและนำไปรีไซเคิลทันที หลังจากการใช้งานในช่วงชีวิตที่สองครบ 10 ปี แบตเตอรี่ที่ปลดระวางทั้งหมดจะถูกรีไซเคิลอย่างสมบูรณ์



รูปที่ 3.1 ขอบเขตของระบบของทางเลือก EOL แบบที่ 1

3.1.1.2 ทางเลือกที่ 2: การรีไซเคิลทันที

รูปที่ 3.2 แสดงให้เห็นว่าแบตเตอรี่จะถูกนำไปรีไซเคิลโดยตรงทันทีหลังจากสิ้นสุดระยะการใช้งานครั้งแรกในยานยนต์ไฟฟ้า



รูปที่ 3.2 ขอบเขตของระบบของทางเลือก EOL แบบที่ 2

3.1.2 หมวดหมู่ของผลกระทบ

ในการศึกษานี้ ได้เลือกพิจารณาหมวดหมู่ของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมหลักจำนวน 4 หมวดหมู่ โดยอ้างอิงจากความเชื่อมโยงกับเป้าหมายการพัฒนาอย่างยั่งยืนระดับโลก และความท้าทายด้านสิ่งแวดล้อมเฉพาะของประเทศไทย โดยกระบวนการคัดเลือกนี้ยึดหลักวิทยาศาสตร์เชิงการตัดสินใจ ซึ่งมุ่งเน้นความครอบคลุมควบคู่กับความชัดเจน ด้วยการจำกัดจำนวนหมวดหมู่ให้อยู่ระหว่าง 3-5 รายการ

การศึกษานี้เน้นหมวดหมู่ผลกระทบสำคัญ 4 ด้าน ดังนี้:

1) ศักยภาพในการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global Warming Potential: GWP)

วัดในหน่วยกิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (kg CO₂-eq) โดยแสดงถึงศักยภาพในการก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ เนื่องจากก๊าซ CO₂ เป็นก๊าซหลักที่มีบทบาทสำคัญใน GWP ภายใต้บริบทของอุตสาหกรรมและนโยบาย จึงสามารถใช้ GWP เป็นตัวแทนของ “การปล่อยคาร์บอน” ได้ ดังนั้น ในรายงานฉบับนี้คำว่า “การปล่อยคาร์บอน” และ “GWP” จะใช้แทนกันได้ โดย GWP สะท้อนถึงผลกระทบรวมของแต่ละสถานการณ์ต่อสภาพภูมิอากาศโลก

2) ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศในน้ำจืด (Freshwater Ecotoxicity)

ประเมินศักยภาพของสารที่ก่อให้เกิดผลกระทบทางพิษต่อระบบนิเวศในแหล่งน้ำจืด วัดในหน่วยค่าความเป็นพิษเปรียบเทียบ (kg 1,4-DCB)

3) ความเป็นพิษต่อมนุษย์แบบไม่ก่อมะเร็ง (Human Non-Carcinogenic Toxicity)

ประเมินศักยภาพของสารที่ก่อให้เกิดผลกระทบทางพิษต่อสุขภาพมนุษย์โดยไม่ก่อให้เกิดมะเร็ง วัดในหน่วยค่าความเป็นพิษเปรียบเทียบกับมนุษย์ (kg 1,4-DCB)

4) ความขาดแคลนทรัพยากรแร่ (Mineral Resource Scarcity)

สะท้อนถึงการพร่องของทรัพยากรแร่ วัดในหน่วยกิโลกรัมทองแดงเทียบเท่า (kg Cu-eq) ซึ่งบ่งชี้ถึงความหายากของวัสดุสำคัญที่ใช้ในการผลิตแบตเตอรี่

3.1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

วัตถุประสงค์หลักคือการเปรียบเทียบทางเลือกการจัดการแบตเตอรี่ EV เมื่อหมดอายุการใช้งาน ทั้งแบบรีไซเคิลทันที และแบบนำไปใช้ใหม่ก่อนรีไซเคิล โดยคำนึงถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในทุกช่วงของวงจรชีวิต เพื่อเป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจเชิงนโยบายและแนวทางการจัดการแบตเตอรี่อย่างยั่งยืน

3.1.4 หน่วยหน้าที่ (Functional Unit)

หน่วยหน้าที่ของการศึกษานี้คือระบบแบตเตอรี่ 2 ก้อน รวมความจุพลังงาน 148 kWh โดยใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิด NMC 811 (แต่ละก้อนมีความจุปกติ 80 kWh และความจุใช้งานได้ 74 kWh น้ำหนักต่อก้อนประมาณ 477.42 กิโลกรัม)

3.2 การเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล

3.2.1 การเก็บข้อมูลโหลดการใช้พลังงานไฟฟ้า

เพื่อกำหนดความจุที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานจากแบตเตอรี่ใช้งานระยะที่สอง (second-life ESS) ได้มีการเก็บข้อมูลโหลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในระยะเวลา 1 ปี จากวิสาหกิจชุมชนส่งออกผลไม้แห่งหนึ่งในประเทศไทย โดยโหลดการใช้ไฟฟ้าในช่วงเวลากลางคืนใช้ Smart Power Meter 3 Phase (Wi-Fi) Mono Space PM2230 ระบบมิเตอร์อัจฉริยะนี้บันทึกข้อมูลการใช้พลังงานในช่วงเวลารายชั่วโมง ซึ่งสามารถสะท้อนถึงความแตกต่างของการใช้พลังงานในแต่ละวันและฤดูกาล ข้อมูลที่ได้จึงสะท้อนสภาพการดำเนินงานที่เป็นจริง

3.2.2 การประมวลผลข้อมูลโหลดและการคำนวณขนาดของ ESS

ข้อมูลดิบที่ได้ถูกประมวลผลเพื่อหาค่าพารามิเตอร์สำคัญ เช่น ค่าเฉลี่ยการใช้พลังงานรายวัน และโหลดสูงสุด ซึ่งมีความสำคัญต่อการกำหนดขนาดความจุที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ใช้งานในระยะที่สอง เพื่อรองรับความต้องการพลังงานสูงสุดในช่วงกลางคืนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.2.2.1 การคำนวณโหลดสูงสุด

โหลดพลังงานสูงสุดรายวันคำนวณโดยการหารโหลดสูงสุดที่บันทึกไว้ตลอดทั้งเดือน ด้วยจำนวนวันในเดือนตามสมการ (3.1):

$$\text{โหลดสูงสุดต่อวัน} = \text{โหลดสูงสุดทั้งหมดในเดือน} \div 30 \text{ วัน} \quad (3.1)$$

การคำนวณนี้ช่วยในการกำหนดความจุพื้นฐานของระบบกักเก็บพลังงานที่จำเป็นสำหรับรองรับโหลดสูงสุดในช่วงเวลากลางคืน

3.2.2.2 การพิจารณาการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่

การเสื่อมของแบตเตอรี่ถูกรวมในการคำนวณขนาดระบบ ESS โดยใช้โมเดลเอ็กซ์โพเนนเชียล เพื่อสะท้อนการลดลงของความจุเมื่อเวลาผ่านไป ดังสมการ (3.2)

$$C_t = C_0 \times (1 - r)^t \quad (3.2)$$

ซึ่ง C_0 คือความจุเริ่มต้น, C_t คือความจุที่เหลือหลัง t ปี, r คืออัตราเสื่อมต่อปี อัตราการเสื่อมในช่วง First life อยู่ที่ 2.75% (Ahmadi et al., 2014) และ 4.36% (Etxandi-Santolaya et al., 2024) ต่อปี ส่วน Second life อยู่ที่ 1.5–2.6% (Mathews et al., 2020) ความจุขั้นต่ำที่ยอมรับได้คือ 70–80% ในช่วงแรก และ 40% สำหรับช่วงที่สอง (Sobana & Ramesha, 2016; Wangsupphaphol et al., 2023) แบตเตอรี่ที่ศึกษาเป็น NMC 811 จาก BMW iX3 อายุการใช้งานรอบแรกประมาณ 8 ปี (EV Database, 2024) แนวทางนี้สอดคล้องกับ Su et al. (2022) และ Cuervo-Reyes & Flückiger (2019) ที่พบการเสื่อมแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบและขนาดระบบ

3.2.2.3 วิธีการคำนวณขนาด

แนวทางการคำนวณขนาดระบบ ESS ประกอบด้วยการประเมินความต้องการโหลดในอนาคตควบคู่กับความจุของแบตเตอรี่ที่ลดลงตามเวลา โดยพิจารณาทั้งอัตราการเสื่อมสภาพและรูปแบบการใช้งาน เพื่อกำหนดจำนวนแบตเตอรี่ใช้งานในระยะที่สองขั้นต่ำที่ต้องใช้ในการตอบสนองโหลดพลังงานสูงสุดในช่วงกลางคืนอย่างมั่นคง

3.2.2.4 การคำนวณพลังงานที่ประหยัดได้จากแบตเตอรี่ใช้งานระยะที่สอง

พลังงานที่ประหยัดได้ต่อปีจากการใช้แบตเตอรี่ใช้งานระยะที่สองร่วมกับระบบพลังงานแสงอาทิตย์ (PV) คำนวณโดยสมการ (3.3):

$$\text{พลังงานที่ประหยัดได้ทั้งหมด} = E_{\text{delivered}} - E_{\text{cooling}} - E_{\text{AC to DC}} \text{ (kWh/ปี)} \quad (3.3)$$

โดยที่:

$E_{\text{delivered}}$ = พลังงานที่ส่งมอบจากระบบ PV และแบตเตอรี่

E_{cooling} = พลังงานที่ใช้ในการระบายความร้อน

$E_{\text{AC to DC}}$ = พลังงานที่สูญเสียระหว่างการแปลงกระแสไฟฟ้าจาก AC เป็น DC

(1) ความต้องการพลังงานเพื่อระบายความร้อน (Cooling Energy Demand)

ในสภาพอากาศร้อน การควบคุมอุณหภูมิของแบตเตอรี่ให้อยู่ในระดับเหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญเพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพก่อนเวลา พลังงานที่ต้องใช้เพื่อการระบายความร้อนคำนวณโดยสมการ (3.4) จาก Sathre et al. (2015):

$$E_{\text{cooling}} = E_{\text{delivered}} \times (1 - n) / \text{COP} \quad (3.4)$$

โดยที่:

n = ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน (สมมติเป็น 0.9 หรือ 90%)

COP = ค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพของระบบทำความเย็น (สมมติเป็น 6)

เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์แล้ว สมการที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะกลายเป็น:

$$E_{\text{cooling}} = E_{\text{delivered}} \times 0.0167 \quad (3.5)$$

(2) การสูญเสียพลังงานจากการแปลงไฟฟ้า AC เป็น DC

ตามคำแนะนำจากผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบระบบกักเก็บพลังงาน พลังงานที่สูญเสียระหว่างการแปลงไฟฟ้าจาก AC เป็น DC ถูกประมาณไว้ที่ 10% ของพลังงานที่ส่งมอบ โดยใช้สมการ (3.6):

$$E_{\text{AC to DC}} = E_{\text{delivered}} \times 0.1 \quad (3.6)$$

3.2.3 ฐานข้อมูลวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Inventory: LCI)

ข้อมูล LCI ที่ใช้ในการศึกษานี้มาจากฐานข้อมูล ecoinvent v3.9.1 และทำการวิเคราะห์ด้วยซอฟต์แวร์ SimaPro 9.5 เพื่อให้ได้การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่ครอบคลุมและเชื่อถือได้ สำหรับกระบวนการที่มีข้อมูลเฉพาะของประเทศไทย ทางคณะวิจัยจะเลือกใช้ข้อมูลในประเทศก่อน เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับสภาพจริงมากที่สุด หากไม่มีข้อมูลของไทย จะใช้ข้อมูลของ Rest of Asia (RAS) เป็นตัวแทน และหากไม่มีข้อมูลของ RAS ก็จะใช้ข้อมูลจาก Rest of the World (RoW) หรือชุดข้อมูลระดับโลก เพื่อให้ได้ข้อมูลที่สอดคล้องและครอบคลุมในทุกกระบวนการ

3.2.4 การประเมินผลกระทบของวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Impact Assessment: LCIA)

งานวิจัยนี้ใช้วิธี ReCiPe 2016 midpoint method เพื่อประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม 4 ประเภทที่เกี่ยวข้องกับแบตเตอรี่ EV ตลอดช่วงชีวิตของมัน ครอบคลุมตั้งแต่กระบวนการผลิต การใช้งาน และการจัดการ EOL โดยเลือกใช้โมเดลระบบ APOS ซึ่งเหมาะสมในการจัดสรรผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมอย่างสอดคล้องตลอดทุกระยะของวัฏจักรชีวิต (Wernet et al., 2016)

Schulz-Mönnighoff et al. (2021) ก็เลือกใช้วิธีนี้ เนื่องจาก APOS ขยายขอบเขตของระบบให้ครอบคลุมห่วงโซ่การจัดการทั้งหมดในสถานการณ์ EOL และจัดสรรผลกระทบเฉพาะเมื่อมีผลผลิตที่มีมูลค่าเกิดขึ้น เช่น ไฟฟ้า หรือโลหะที่นำกลับมาใช้ใหม่ (Ecoinvent, 2024)

แนวทางนี้มีความสำคัญในการเปรียบเทียบตัวเลือก EOL เช่น การนำกลับมาใช้ใหม่กับการรีไซเคิลทันที โดยคำนึงถึงภาระที่หลีกเลี่ยงได้ (avoided burdens) จากการใช้งานชีวิตที่สอง การผลิตแบตเตอรี่ และการใช้พลังงานอย่างครบถ้วน โดยการเชื่อมโยงระยะการผลิตเข้ากับกระบวนการปลายน้ำ APOS จึงสามารถให้การประเมินผลกระทบแบบครอบคลุม และยังใช้แนวทางแบบการจัดสรรตามสภาพ (attributional approach) เพื่อให้ได้ฐานเปรียบเทียบที่โปร่งใส โดยไม่ต้องจำลองการเปลี่ยนแปลงของตลาดในอนาคต (Wernet et al., 2016)

3.2.5 การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis)

3.2.5.1 พารามิเตอร์ด้านสมรรถนะของแบตเตอรี่

ได้มีการวิเคราะห์ความไวของอัตราการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ และสัดส่วนของเซลล์แบตเตอรี่ที่ยังสามารถใช้งานได้ เพื่อประเมินผลกระทบต่อพลังงานที่ประหยัดได้ทั้งหมดจากการใช้งานแบตเตอรี่ในช่วงชีวิตที่สอง เนื่องจากพลังงานที่ประหยัดได้นี้ส่งผลโดยตรงต่อผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้น

3.2.5.2 สถานการณ์ของสัดส่วนแหล่งผลิตไฟฟ้า (Electricity Mix Scenarios)

การวิเคราะห์ความไวได้ประเมินอิทธิพลของสัดส่วนแหล่งพลังงานไฟฟ้าที่แตกต่างกันใน 3 สถานการณ์นโยบาย ได้แก่ PDP2018, 30@2030 และ 40@2030 เนื่องจากพบว่าสัดส่วนแหล่งพลังงานมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพด้านสิ่งแวดล้อมของแบตเตอรี่ EV การวิเคราะห์นี้มุ่งเน้นไปที่ระยะการใช้งานแรกและการใช้งานระยะที่สอง ซึ่งพึ่งพาไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงานหลัก และจึงมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างพลังงานไฟฟ้า

ในขณะที่ระยะของการผลิต การรีไซเคิล และการนำกลับมาใช้ใหม่ของแบตเตอรี่ EV ถูกจำลองโดยใช้กระบวนการอุตสาหกรรมที่เป็นมาตรฐาน พร้อมข้อมูลการปล่อยคาร์บอนจาก SimaPro ซึ่งได้รับผลกระทบน้อยจากความแตกต่างทางภูมิศาสตร์ของแหล่งพลังงาน และจึงถือว่าผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมคงที่ในทุกสถานการณ์นโยบาย

(1) การจำลองสัดส่วนแหล่งพลังงานไฟฟ้า (Electricity Mix Modeling)

ในสถานการณ์ 30@2030 และ 40@2030 มีการสมมุติว่าการปล่อยคาร์บอนต่อหน่วยไฟฟ้าจะลดลง 30% และ 40% ตามลำดับภายในปี 2030 เมื่อเปรียบเทียบกับระดับของปี 2010 ซึ่งสะท้อนถึงเป้าหมายการลดคาร์บอนในระดับปานกลางและสูง

ข้อมูลสัดส่วนพลังงานในปี 2563 ได้มาจากแนวโน้มในเอกสาร PDP2018 (Thailand's Ministry of Energy, 2020) และถือว่ามีส่วนแหล่งพลังงานเหมือนกันทั้งในสถานการณ์ 30@2030, 40@2030 และ PDP2018

จากปี 2564 ถึง 2573 ได้มีการประมาณการการเปลี่ยนแปลงของสัดส่วนแหล่งพลังงานแบบเส้นตรง (linear interpolation) เพื่อสะท้อนการเปลี่ยนผ่านไปสูเป้าหมายการลดคาร์บอน โดยคงค่ารวมของส่วนผสมพลังงานไว้ที่ 100%

แม้ว่าการจำลองนี้พัฒนาขึ้นโดยอิสระ แต่สัดส่วนของพลังงานหมุนเวียนแต่ละชนิดถูกจำกัดให้อยู่ในระดับที่ไม่เกินค่าที่ปรากฏในแผนพลังงานของรัฐ สำหรับปี 2030 อ้างอิงจาก PDP2018 และสำหรับปี 2037 อ้างอิงจากร่างแผน PDP2024 (Thailand's Department of Alternative Energy Development and Efficiency (DEDE), 2024)

ในช่วงปี 2573–2580 มีการใช้การประมาณค่าระหว่างปีแบบเส้นตรงเช่นกัน เพื่อสะท้อนถึงการเปลี่ยนผ่านที่สอดคล้องกับเป้าหมายการปล่อยคาร์บอนสุทธิเป็นศูนย์ของประเทศไทยในปี 2608 (UNDP, 2024) พร้อมการปรับเล็กน้อยเพื่อให้ผลรวมของสัดส่วนพลังงานคงที่ที่ 100% ตลอดช่วงที่จำลอง

(2) การคำนวณผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมใหม่ (Recalculation of Environmental Impact)

สำหรับแต่ละสถานการณ์นโยบาย ได้มีการคำนวณค่าปัจจัยผลกระทบ (Impact Indicator) ของการผลิตไฟฟ้าใหม่ โดยใช้ข้อมูลพื้นฐานจาก SimaPro สำหรับเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าหลายประเภท (เช่น ถ่านหิน, ก๊าซธรรมชาติ, พลังงานแสงอาทิตย์, ลม, พลังน้ำ)

ค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักของปัจจัยผลกระทบในแต่ละสถานการณ์นโยบายจะถูกคำนวณตามสมการ (3.7):

$$\text{Impact Indicator}_{\text{scenario}} = \sum_i (\text{Energy Source Percentage}_i \times \text{Impact Indicator}_i) \quad (3.7)$$

โดยที่:

i หมายถึงแต่ละแหล่งพลังงานในระบบโครงข่ายไฟฟ้า

Energy Source Percentage; คือสัดส่วนของพลังงานที่ผลิตจากแหล่งพลังงานแต่ละชนิดในแต่ละสถานการณ์นโยบาย

Impact Indicator; คือภาระทางสิ่งแวดล้อมต่อหน่วยพลังงาน (เช่น kg CO₂-eq สำหรับ GWP)

(3) การเปรียบเทียบระหว่างสถานการณ์

ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ความไวจะถูกเปรียบเทียบกันระหว่างทั้ง 3 สถานการณ์นโยบาย เพื่อประเมินผลของแนวทางการลดคาร์บอนที่แตกต่างกัน — โดยเฉพาะการเพิ่มสัดส่วนพลังงานหมุนเวียนในสถานการณ์ 30@2030 และ 40@2030 — ที่มีต่อหมวดหมู่ของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เลือกไว้

เนื่องจากแต่ละหมวดหมู่ของผลกระทบ เช่น ศักยภาพในการเกิดภาวะโลกร้อน (global warming potential), ความเป็นพิษในน้ำจืด (freshwater ecotoxicity), ความเป็นพิษต่อมนุษย์แบบไม่ก่อมะเร็ง (human non-carcinogenic toxicity), และ ความขาดแคลนทรัพยากรแร่ (mineral resource scarcity) ใช้หน่วยการวัดที่แตกต่างกัน จึงจำเป็นต้องดำเนินการกระบวนการ การทำให้เป็นมาตรฐาน (Normalization), การกำหนดน้ำหนัก (Weighting), และการรวมคะแนน (Aggregation)

ค่าน้ำหนักที่กำหนดให้กับแต่ละผลกระทบได้มาจากค่าเฉลี่ยของแบบสอบถามที่ตอบโดยผู้เชี่ยวชาญ 8 คนที่มีความเชี่ยวชาญด้านทางเลือก EOL สำหรับแบตเตอรี่ EV

ผู้ตอบ 4 คนเป็นนักวิจัยผู้เชี่ยวชาญทางวิชาการ ซึ่งมีประสบการณ์ตรงในสาขาที่เกี่ยวข้อง 2–6 ปี ส่วนอีก 4 คนเป็นผู้บริหารในอุตสาหกรรม EV ได้แก่ ผู้ผลิต, ผู้รวบรวมและรีไซเคิลแบตเตอรี่, และผู้ใช้งานแบตเตอรี่ชีวิตที่สอง ในจำนวนผู้เชี่ยวชาญทางวิชาการ 4 คน มี 2 คนที่เชี่ยวชาญด้าน EOL โดยตรง, 1 คนเชี่ยวชาญด้านการประเมินวัฏจักรชีวิตของแบตเตอรี่ EV (LCA), และอีก 1 คนศึกษาด้านวัสดุในแบตเตอรี่ EV

(4) การทำให้เป็นมาตรฐาน, การกำหนดน้ำหนัก และการรวมผลรวม (Normalization, Weight, and Aggregation)

ขั้นตอนต่อไปนี้ถูกใช้ในการคำนวณคะแนนถ่วงน้ำหนักสำหรับแต่ละสถานการณ์:

1. ทำให้ข้อมูลเป็นมาตรฐาน (Normalization)

การทำให้ข้อมูลเป็นมาตรฐานจะปรับค่าให้อยู่ในช่วงเดียวกัน โดยทั่วไปอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยใช้สมการ (3.8):

$$\text{Normalized Value} = (\text{Actual Value} - \text{Min Value}) / (\text{Max Value} - \text{Min Value}) \quad (3.8)$$

โดยที่:

Actual Value คือค่าจริงของสถานการณ์หนึ่งในหมวดหมู่ผลกระทบที่กำหนด

Min Value คือค่าน้อยที่สุดในหมวดหมู่ผลกระทบนั้นจากทุกสถานการณ์

Max Value คือค่ามากที่สุดในหมวดหมู่ผลกระทบนั้นจากทุกสถานการณ์

2. การกำหนดน้ำหนัก (Apply Weights)

เมื่อได้ค่าที่ทำให้เป็นมาตรฐานแล้ว จะนำมาคูณกับค่าน้ำหนักตามสมการ (3.9):

$$\text{Weighted Score} = \text{Normalized Value} \times \text{Importance Weight} \quad (3.9)$$

3. การรวมคะแนนถ่วงน้ำหนัก (Aggregate Weighted Scores)

ขั้นตอนสุดท้ายคือการรวมคะแนนถ่วงน้ำหนักจากทุกหมวดหมู่ผลกระทบเพื่อให้ได้คะแนนรวมของแต่ละสถานการณ์ คะแนนรวมที่สูงกว่าแสดงถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยรวมที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสถานการณ์อื่น ๆ



บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 การเก็บข้อมูลโหลดพลังงาน

การศึกษาได้ทำการเก็บข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าของวิสาหกิจชุมชนส่งออกผลไม้แห่งหนึ่งในประเทศไทย โดยเฉพาะช่วงกลางคืน (18.00–06.00 น.) มีการใช้พลังงานรวมทั้งปีอยู่ที่ **9,209.65 kWh** ข้อมูลถูกเก็บระหว่างเดือนมกราคม–ธันวาคม พ.ศ. 2567 โดยใช้ Smart Power Meter รุ่น PM2230 และสมมุติว่าแบตเตอรี่ NCM 811 จากรถ BMW iX3 ที่หมดอายุการใช้งานจะถูกนำมาใช้ใหม่เพื่อสำรองพลังงานสำหรับช่วงเวลากลางคืน ตารางที่ 4.1 แสดงการใช้โหลดพลังงานกลางคืนในแต่ละเดือน ซึ่งสูงสุดในเดือนเมษายนที่ 1,632.27 kWh และต่ำสุดในเดือนกันยายนที่ 366.58 kWh

ตารางที่ 4.1 การใช้พลังงานของโหลดในช่วงเวลากลางคืนรายเดือนของวิสาหกิจชุมชนส่งออกผลไม้แห่งหนึ่ง

เดือน	ปริมาณการใช้โหลดในเวลากลางคืน (kWh) (18.00 น. ถึง 6.00 น.)
มกราคม	536.36
กุมภาพันธ์	774.94
มีนาคม	1,172.12
เมษายน	1,632.27
พฤษภาคม	1,054.38
มิถุนายน	616.75
กรกฎาคม	589.39
สิงหาคม	593.57
กันยายน	366.58
ตุลาคม	656.65
พฤศจิกายน	646.16
ธันวาคม	570.48
ทั้งหมด	9,209.65

4.2 การประเมินวัฏจักรชีวิตของแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า

4.2.1 การเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่

ในช่วงระยะเวลา 18 ปีของการศึกษา ความจุของแบตเตอรี่ลดลงตามการเสื่อมแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล โดยเมื่อสิ้นสุดปีที่ 8 ความจุที่เหลืออยู่ประมาณ 59.20 kWh (80%) และ 51.80 kWh (70%) ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการเสื่อมรายปีที่ 2.75% และ 4.36% ตามลำดับ

ในช่วงการใช้งานระยะที่สอง (ปีที่ 9–18) การเสื่อมยังคงดำเนินต่อ แต่ในอัตราที่ลดลง (1.5% และ 2.6%) โดยสัดส่วนของเซลล์ที่ใช้งานได้ถูกลดลงทีละขั้นจาก 100% ในปีที่ 9 เพื่อจำลองการสูญเสียสมรรถภาพของเซลล์แต่ละก้อน เมื่อถึงปีที่ 18 ความจุที่ใช้งานได้รวมลดลงเหลือ 50.90 kWh (68.78%) ในกรณีดีที่สุด (ใช้เซลล์ได้ 100%) และ 31.84 kWh (43.03%) ในกรณีแย่ที่สุด (ใช้เซลล์ได้ 80%) ซึ่งแสดงถึงขอบเขตบนและล่างของสมรรถนะที่คาดการณ์ไว้ รายละเอียดผลการเสื่อมทั้งหมดแสดงในตาราง 4.2–4.3



ตารางที่ 4.2 การเสื่อมของความจุแบตเตอรี่และการประมาณความจุที่ใช้กันได้ (กรณีดีที่สุด)

	สิ้นสุดปีที่	เซลล์ที่ใช้งานได้ 100%			เซลล์ที่ใช้งานได้ 95 %		เซลล์ที่ใช้งานได้ 90 %		เซลล์ที่ใช้งานได้ 85 %		เซลล์ที่ใช้งานได้ 80 %		เซลล์ที่ใช้งานได้ 75 %		เซลล์ที่ใช้งานได้ 70 %	
		ความจุที่สูญเสียต่อปี (kWh)	ความจุที่เหลืออยู่ (kWh)	% ของความจุเริ่มต้น	ความจุที่เหลืออยู่ (kWh)	% ของความจุเริ่มต้น	ความจุที่เหลืออยู่ (kWh)	% ของความจุเริ่มต้น	ความจุที่เหลืออยู่ (kWh)	% ของความจุเริ่มต้น	ความจุที่เหลืออยู่ (kWh)	% ของความจุเริ่มต้น	ความจุที่เหลืออยู่ (kWh)	% ของความจุเริ่มต้น	ความจุที่เหลืออยู่ (kWh)	% ของความจุเริ่มต้น
การใช้แบตเตอรี่ในรถยนต์ไฟฟ้า	1	2.04	71.97	97.25												
	2	1.98	69.99	94.58												
	3	1.92	68.06	91.97												
	4	1.87	66.19	89.45												
	5	1.82	64.37	86.99												
	6	1.77	62.60	84.59												
	7	1.72	60.88	82.27												
	8	1.67	59.20	80.00												
การใช้แบตเตอรี่ในการกักเก็บพลังงาน	9	0.89	58.32	78.80	55.40	74.86	52.48	70.92	49.57	66.98	46.65	63.04	41.55	56.15	36.74	49.65
	10	0.87	57.44	77.62	54.57	73.74	51.70	69.86	48.82	65.98	45.95	62.10	40.93	55.31	36.19	48.90
	11	0.86	56.58	76.46	53.75	72.64	50.92	68.81	48.09	64.99	45.26	61.17	40.31	54.48	35.64	48.17
	12	0.85	55.73	75.31	52.94	71.55	50.16	67.78	47.37	64.01	44.58	60.25	39.71	53.66	35.11	47.45
	13	0.84	54.89	74.18	52.15	70.47	49.41	66.76	46.66	63.05	43.92	59.35	39.11	52.85	34.58	46.73
	14	0.82	54.07	73.07	51.37	69.42	48.66	65.76	45.96	62.11	43.26	58.46	38.53	52.06	34.06	46.03
	15	0.81	53.26	71.97	50.60	68.37	47.93	64.78	45.27	61.18	42.61	57.58	37.95	51.28	33.55	45.34
	16	0.80	52.46	70.89	49.84	67.35	47.22	63.80	44.59	60.26	41.97	56.71	37.38	50.51	33.05	44.66
	17	0.79	51.67	69.83	49.09	66.34	46.51	62.85	43.92	59.36	41.34	55.86	36.82	49.75	32.55	43.99
	18	0.78	50.90	68.78	48.35	65.34	45.81	61.90	43.26	58.47	40.72	55.03	36.27	49.01	32.07	43.33

ตารางที่ 4.3 การเสื่อมของความจุแบตเตอรี่และการประมาณความจุที่ใช้งานได้ (กรณีแย่งที่สุด)

	สิ้นสุดปีที่	ความจุที่สูญเสียต่อปี (kWh)	เซลล์ที่ใช้งานได้ 100%		เซลล์ที่ใช้งานได้ 95 %		เซลล์ที่ใช้งานได้ 90 %		เซลล์ที่ใช้งานได้ 85 %		เซลล์ที่ใช้งานได้ 80 %	
			ความจุที่เหลืออยู่ (kWh)	% ของความจุเริ่มต้น	ความจุที่เหลืออยู่ (kWh)	% ของความจุเริ่มต้น	ความจุที่เหลืออยู่ (kWh)	% ของความจุเริ่มต้น	ความจุที่เหลืออยู่ (kWh)	% ของความจุเริ่มต้น	ความจุที่เหลืออยู่ (kWh)	% ของความจุเริ่มต้น
การใช้แบตเตอรี่ในรถยนต์ไฟฟ้า	1	3.23	70.77	95.64								
	2	3.09	67.69	91.47								
	3	2.95	64.74	87.48								
	4	2.82	61.91	83.67								
	5	2.70	59.21	80.02								
	6	2.58	56.63	76.53								
	7	2.47	54.16	73.19								
	8	2.36	51.80	70.00								
การใช้แบตเตอรี่ในการกักเก็บพลังงาน	9	1.35	50.46	68.18	47.93	64.77	45.41	61.36	42.89	57.96	40.36	54.55
	10	1.31	49.14	66.41	46.69	63.09	44.23	59.77	41.77	56.45	39.31	53.13
	11	1.28	47.87	64.68	45.47	61.45	43.08	58.22	40.69	54.98	38.29	51.75
	12	1.24	46.62	63.00	44.29	59.85	41.96	56.70	39.63	53.55	37.30	50.40
	13	1.21	45.41	61.36	43.14	58.30	40.87	55.23	38.60	52.16	36.33	49.09
	14	1.18	44.23	59.77	42.02	56.78	39.81	53.79	37.59	50.80	35.38	47.81
	15	1.15	43.08	58.21	40.92	55.30	38.77	52.39	36.62	49.48	34.46	46.57
	16	1.12	41.96	56.70	39.86	53.87	37.76	51.03	35.66	48.20	33.57	45.36
	17	1.09	40.87	55.23	38.82	52.47	36.78	49.70	34.74	46.94	32.69	44.18
	18	1.06	39.81	53.79	37.81	51.10	35.82	48.41	33.83	45.72	31.84	43.03

4.2.2 การกำหนดขนาดระบบกักเก็บพลังงาน (ESS sizing)

การกำหนดขนาดของระบบกักเก็บพลังงาน (ESS) อ้างอิงจากความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดของวิสาหกิจชุมชน โดยการประมาณโหลดสูงสุดรายวันคำนวณจากปริมาณการใช้ไฟฟ้าสูงสุดที่บันทึกในเดือนเมษายนรวม 1,632.27 kWh หารด้วย 30 วัน (สมมติว่ามีการชาร์จไฟทุกวันอย่างสม่ำเสมอ) ซึ่งให้ค่าโหลดสูงสุดเฉลี่ยรายวันประมาณ 54.41 kWh

จำนวนแบตเตอรี่ที่ต้องใช้เพื่อรองรับโหลดนี้ถูกประเมินภายใต้สถานการณ์การทำงานที่หลากหลาย จากตาราง S19 ในกรณีที่ดีที่สุด (อัตราการเสื่อมช่วงแรก 2.75% ต่อปี และช่วงใช้งานที่สอง 1.5% ต่อปี โดยใช้เซลล์ได้ 100% ระหว่างปีที่ 9–13) พบว่าแบตเตอรี่ EV ที่นำกลับมาใช้เพียงลูกเดียวสามารถจ่ายพลังงานได้สูงสุดถึง 9,209.65 kWh ต่อปี ซึ่งเพียงพอต่อความต้องการพลังงานรายวันของวิสาหกิจ

อย่างไรก็ตาม เมื่อเวลาผ่านไป ความสามารถในการกักเก็บพลังงานของแบตเตอรี่ลดลงจากการเสื่อมจากรอบการชาร์จ (cycling degradation) ตั้งแต่ปีที่ 14 เป็นต้นไป แบตเตอรี่ลูกเดียวไม่สามารถรองรับโหลดได้อีกต่อไป และต้องใช้แบตเตอรี่ EV ที่นำกลับมาใช้จำนวนสองลูกเพื่อคงกำลังจ่ายพลังงานไว้เท่าเดิม

ในทางกลับกัน กรณีแย่มากที่สุด (อัตราการเสื่อมช่วงแรก 4.36% และช่วงที่สอง 2.6% โดยใช้เซลล์ได้เพียง 70%) ระบบจำเป็นต้องใช้แบตเตอรี่สองลูกตั้งแต่ต้นของช่วงใช้งานที่สองเพื่อรองรับโหลดเท่าเดิม

4.2.3 การประหยัดพลังงานจากการใช้แบตเตอรี่ EV มือสองเป็นระบบกักเก็บพลังงาน

พลังงานที่ต้องใช้สำหรับระบบทำความเย็น คำนวณโดยสมการ (5) เท่ากับ $9209.65 \times 0.0167 = 153.49$ kWh ส่วนการสูญเสียจากการแปลงไฟฟ้า AC เป็น DC คำนวณโดยสมการ (6) เท่ากับ $9209.65 \times 0.1 = 920.97$ kWh ตารางที่ 4.4 แสดงสมรรถนะของระบบกักเก็บพลังงานตลอดช่วงเวลา 10 ปี โดยเน้นที่ความจุแบตเตอรี่ พลังงานที่ส่งออกได้ และการสูญเสียจากระบบทำความเย็นและการแปลงพลังงาน

การเสื่อมของแบตเตอรี่ทำให้ความจุรวมของแบตเตอรี่สองลูกลดลงจาก 116.63–80.73 kWh ในปี 9 เหลือ 101.80–63.69 kWh ในปี 18 อย่างไรก็ตาม การปรับขนาดระบบอย่างเหมาะสม (อ้างอิงจากหัวข้อ 4.2.2) ช่วยให้การดำเนินงานยังคงต่อเนื่องได้โดยไม่มีปัญหา

การสูญเสียพลังงานยังคงอยู่ในระดับคงที่ คือ 153.49 kWh/ปี สำหรับการทำความเย็น และ 920.97 kWh/ปี สำหรับการแปลงไฟฟ้า คิดเป็น 1.67% และ 10% ของพลังงานที่ส่งออกตามลำดับ ดังนั้น พลังงานสุทธิที่ประหยัดได้ทั้งหมดในช่วงเวลา 10 ปี รวมเท่ากับ 81,351.9 kWh

ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพของระบบกักเก็บพลังงานในระยะเวลา 10 ปี

ปี	ความจุเริ่มต้น ต่ำสุดต่อแบตเตอรี่ 1 ลูก (kWh)	ความจุเริ่มต้นสูงสุด ต่อแบตเตอรี่ 1 ลูก (kWh)	ความจุเริ่มต้น ต่ำสุดรวม แบตเตอรี่ 2 ลูก (kWh)	ความจุเริ่มต้นสูงสุด รวมแบตเตอรี่ 2 ลูก (kWh)	พลังงานที่ส่งออกจาก ระบบโซลาร์เซลล์ และแบตเตอรี่ (kWh/ปี) (1)	ความต้องการ พลังงานสำหรับ ระบบทำความเย็น (kWh/ปี) (2)	พลังงานที่สูญเสียจาก การแปลงไฟ AC เป็น DC (kWh/ปี) (3)	พลังงานที่ประหยัดได้ ทั้งหมด (kWh/ปี) (4)=(1)-(2)-(3)
9	40.36	58.32	80.73	116.63	9,209.65	153.49	920.97	8,135.19
10	39.31	57.44	78.63	114.88	9,209.65	153.49	920.97	8,135.19
11	38.29	56.58	76.59	113.16	9,209.65	153.49	920.97	8,135.19
12	37.30	55.73	74.59	111.46	9,209.65	153.49	920.97	8,135.19
13	36.33	54.89	72.65	109.79	9,209.65	153.49	920.97	8,135.19
14	35.38	54.07	70.77	108.14	9,209.65	153.49	920.97	8,135.19
15	34.46	53.26	68.93	106.52	9,209.65	153.49	920.97	8,135.19
16	33.57	52.46	67.13	104.92	9,209.65	153.49	920.97	8,135.19
17	32.69	51.67	65.39	103.35	9,209.65	153.49	920.97	8,135.19
18	31.84	50.90	63.69	101.80	9,209.65	153.49	920.97	8,135.19

4.2.4 การจำลองสัดส่วนแหล่งผลิตไฟฟ้า (Electricity mix simulation)

รูปที่ 4.1 แสดงการจำลองเปรียบเทียบสัดส่วนแหล่งผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยภายใต้ 3 สถานการณ์ ได้แก่ PDP2018, 30@2030 และ 40@2030 ครอบคลุมช่วงปี พ.ศ. 2563–2580 (2020–2037) โดยแต่ละสถานการณ์แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสัดส่วนแหล่งพลังงานต่าง ๆ ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในอนาคต

4.2.4.1 สถานการณ์ PDP2018

สถานการณ์พื้นฐานนี้ยึดตามแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2561 (PDP2018) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องของพลังงานหมุนเวียน โดยเฉพาะพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการเติบโตชัดเจนหลังปี 2570 (2027) ขณะที่ก๊าซธรรมชาติยังคงเป็นแหล่งพลังงานหลักตลอดช่วงเวลาการศึกษา แม้ว่าสัดส่วนจะเริ่มลดลงอย่างมากหลังปี 2571 (2028) สำหรับถ่านหินและลิกไนต์ยังคงมีสัดส่วนคงที่หรือค่อย ๆ ลดลง ส่วนพลังงานหมุนเวียนอื่น เช่น พลังน้ำและชีวมวล มีการเติบโตในระดับปานกลาง

4.2.4.2 สถานการณ์ 30@2030

สถานการณ์นี้จำลองแนวทางเพื่อให้พลังงานหมุนเวียนมีสัดส่วน 30% ภายในปี 2573 (2030) โดยแสดงให้เห็นถึงการลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลอย่างเข้มข้น โดยเฉพาะก๊าซธรรมชาติซึ่งสัดส่วนลดลงอย่างต่อเนื่อง พลังงานแสงอาทิตย์กลายเป็นแหล่งผลิตไฟฟ้าหลักภายในปี 2579 (2036) โดยมีสัดส่วนเกินกว่า 30%

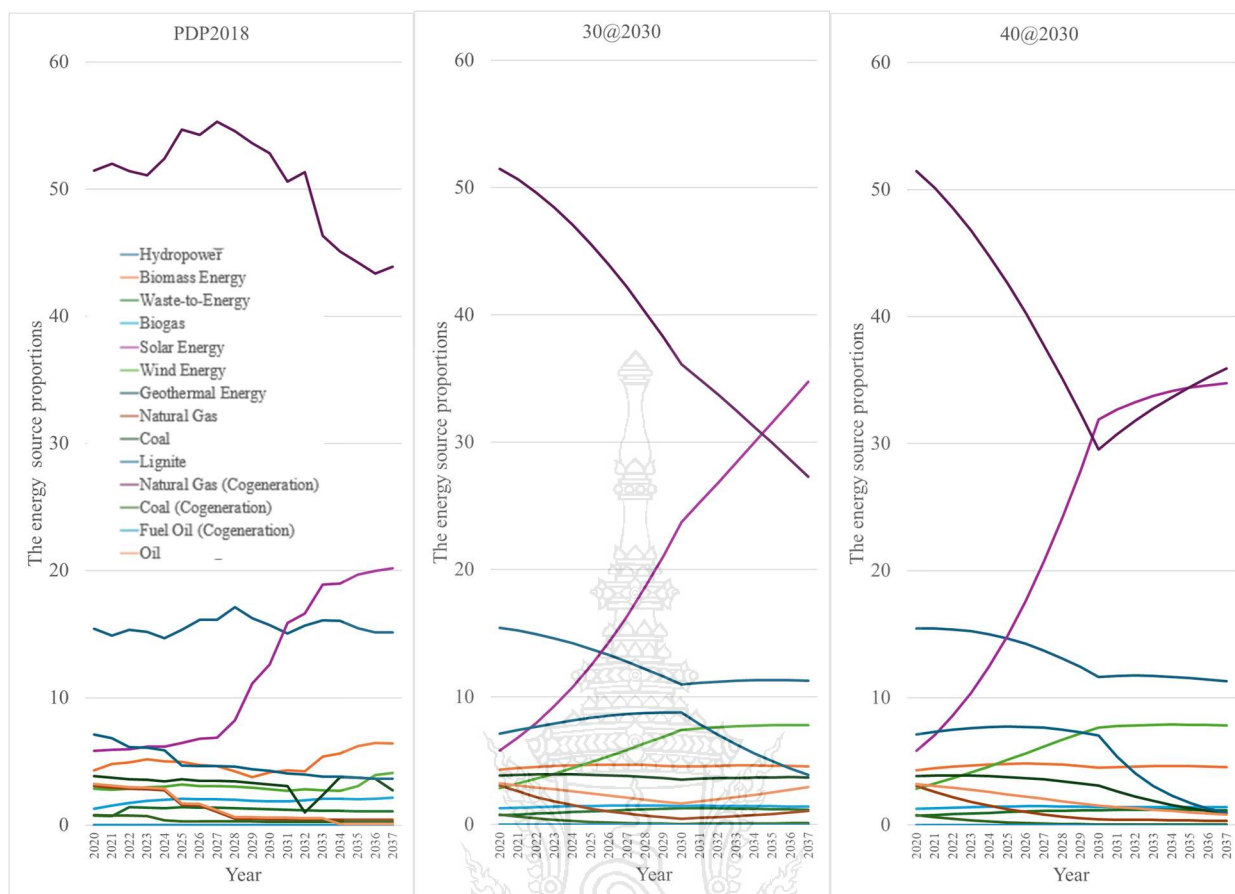
ขณะเดียวกัน พลังงานหมุนเวียนอื่น ๆ เช่น พลังน้ำ พลังงานลม ชีวมวล และพลังงานจากขยะ ก็มีบทบาทเพิ่มขึ้น ส่วนถ่านหินและลิกไนต์ค่อย ๆ ลดลง

4.2.4.3 สถานการณ์ 40@2030

ภายใต้สถานการณ์ 40@2030 ซึ่งมีเป้าหมายเพิ่มสัดส่วนพลังงานหมุนเวียนเป็น 40% ภายในปี 2573 (2030) โครงสร้างการผลิตไฟฟ้าของประเทศแสดงการลดลงอย่างรวดเร็วของก๊าซธรรมชาติ จากเดิมมากกว่า 50% เหลือต่ำกว่า 30% พร้อมกับการเพิ่มขึ้นอย่างชันของพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งกลายเป็นแหล่งหลักตั้งแต่ปี 2572 (2029) โดยมีสัดส่วนเกินกว่า 30% พลังงานหมุนเวียนอื่น ๆ เช่น พลังงานลมและชีวมวลก็มีการเติบโตอย่างต่อเนื่อง ขณะที่เชื้อเพลิงฟอสซิล โดยเฉพาะถ่านหินและลิกไนต์ ถูกยกเลิกการใช้งานเกือบทั้งหมดภายในปี 2573

เมื่อเปรียบเทียบกับสถานการณ์ 30@2030 พบว่าสถานการณ์ 40@2030 สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้มากกว่าในช่วงก่อนปี 2573 แม้ว่าทั้งสองแนวทางต่างมุ่งสู่เป้าหมายการปล่อยคาร์บอนสุทธิเป็นศูนย์ ภายในปี 2608 (2065) อย่างไรก็ตามการลดคาร์บอนอย่างเข้มข้นในช่วงต้นภายใต้สถานการณ์ 40@2030 ทำให้สามารถผ่อนคลายอัตราการเติบโตของพลังงานหมุนเวียนหลังปี 2573 ได้เล็กน้อย ซึ่งสะท้อนให้เห็นในแนวโน้มการใช้ก๊าซธรรมชาติที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย และการขยายตัวของพลังงานแสงอาทิตย์ที่ชะลอลงในระยะหลัง





รูปที่ 4.1 การผสมผสานการผลิตไฟฟ้าที่คาดการณ์ในประเทศไทยภายใต้ 3 สถานการณ์ ได้แก่ PDP2018, 30@2030 และ 40@2030

4.2.5 การจัดทำบัญชีวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Inventories)

4.2.5.1 ขั้นตอนการผลิตแบตเตอรี่ (Battery pack manufacturing phase)

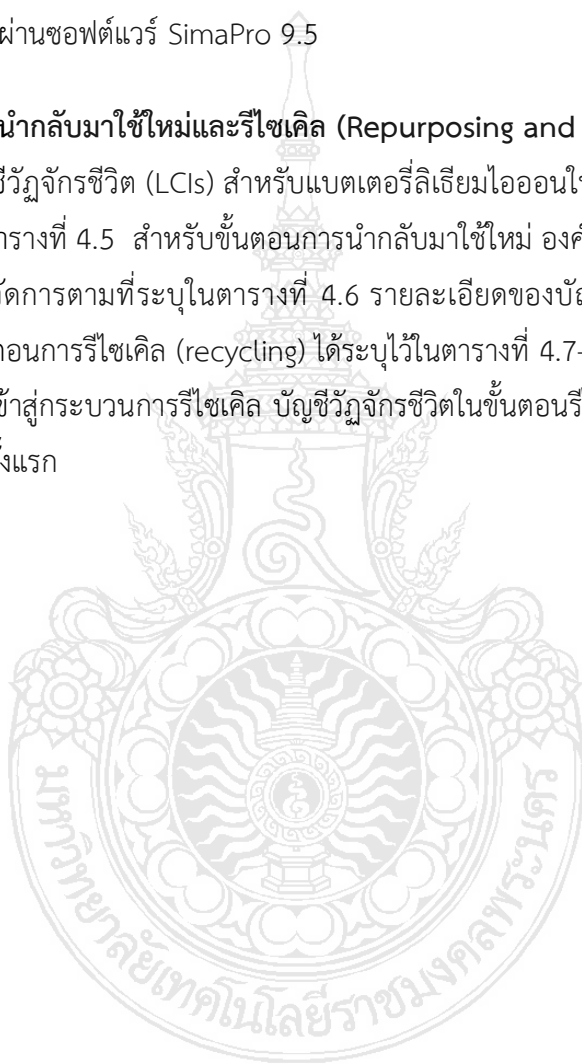
แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ใช้ในการจำลองในงานวิจัยนี้เป็นชนิด NMC 811 โดยมีความจุรวม (nominal capacity) เท่ากับ 80 kWh และความจุที่ใช้จริงได้ (usable capacity) เท่ากับ 74 kWh จากค่าความหนาแน่นพลังงานที่รายงานไว้ที่ 155 Wh/kg (Crenna et al., 2021; Dai et al., 2018) น้ำหนักของแบตเตอรี่จึงประมาณได้ที่ 477.42 กิโลกรัม สำหรับการจำลองผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ได้ใช้ระบบที่มีแบตเตอรี่จำนวน 2 ลูก รวมเป็นน้ำหนัก 954.84 กิโลกรัม โดยผลกระทบจากการผลิตแบตเตอรี่ถูกคำนวณโดยใช้ฐานข้อมูล ecoinvent เวอร์ชัน 3.9.1 และซอฟต์แวร์ SimaPro เวอร์ชัน 9.5

4.2.5.2 ขั้นตอนการใช้งานครั้งแรก (First-use phase)

การจำลองขั้นตอนนี้อ้างอิงจากรถยนต์ BMW iX3 ซึ่งมีการรับประกันการใช้งานครั้งแรกที่ระยะประมาณ 160,000 km โดยมีอัตราการใช้พลังงานเฉลี่ย 192 Wh/km (EV Database, 2024) ส่งผลให้พลังงานรวมที่ใช้ตลอดช่วงอายุการใช้งานครั้งแรก ซึ่งประมาณไว้ที่ 8 ปี เท่ากับ 30,720 kWh หรือประมาณ 3,840 kWh ต่อปี หากใช้ระบบที่ประกอบด้วยแบตเตอรี่ 2 ลูก ความต้องการพลังงานรายปีจะเพิ่มขึ้นเป็น 7,680 kWh ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมจากการใช้พลังงานไฟฟ้าถูกประเมินโดยใช้ข้อมูลสัดส่วนไฟฟ้าเฉพาะของประเทศไทยจากฐานข้อมูล ecoinvent 3.9.1 ผ่านซอฟต์แวร์ SimaPro 9.5

4.2.5.3 ขั้นตอนการนำกลับมาใช้ใหม่และรีไซเคิล (Repurposing and recycling phases)

รายละเอียดของบัญชีวัฏจักรชีวิต (LCIs) สำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนในขั้นตอนการนำกลับมาใช้ใหม่ (repurposing) ได้ระบุไว้ในตารางที่ 4.5 สำหรับขั้นตอนการนำกลับมาใช้ใหม่ องค์ประกอบบางส่วนที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้จะได้รับการจัดการตามที่ระบุในตารางที่ 4.6 รายละเอียดของบัญชีวัฏจักรชีวิต (LCIs) สำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนในขั้นตอนการรีไซเคิล (recycling) ได้ระบุไว้ในตารางที่ 4.7-4.14 ในสถานการณ์ที่มีการนำแบตเตอรี่กลับมาใช้ใหม่ก่อนเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิล บัญชีวัฏจักรชีวิตในขั้นตอนรีไซเคิลที่ใช้จะเหมือนกับกรณีรีไซเคิลทันทีหลังการใช้งานครั้งแรก



ตารางที่ 4.5 บัญชีวัฏจักรชีวิตของแบตเตอรี่ในระหว่างการนำกลับมาใช้ใหม่

หัวข้อหลัก	หัวข้อย่อย	จำนวน เดิม	%	หน่วย เดิม	ประเภท	แหล่งที่มาของ จำนวน	อ้างอิง Ecoinvent ชื่อ ผลิตภัณฑ์	จำนวน เดิม	หน่วย	จำนวน ต่อ 1 FU (FU = 1KWh)	หน่วย	หมายเหตุ
ก้อนแบตเตอรี่ NMC811	ก้อนแบตเตอรี่		100%		ผลิตภัณฑ์	Dai et al., 2018a; Dai et al., 2019 ; Crenna et al., 2021	battery, Li-ion, NMC811, rechargeable, prismatic	1.00	kg	6.451613	kg	ความหนาแน่น ของพลังงานเดิม คือ 155 Wh/kg หลังจากใช้งาน ไป 8 ปี ความจุ ของแบตเตอรี่ ลดลงเหลือ 81.87% ของค่า เริ่มต้น
	ส่วนประกอบเพิ่มเติม											
	ปลอกหุ้มแบตเตอรี่: อลูมิเนียม (97%)		14.2%		อินพุต	Dai et al., 2018a; Dai et al., 2019 ; Crenna et al., 2021	Aluminium, wrought alloy {GLO} aluminium ingot, primary, to aluminium, wrought alloy market APOS, S	0.14	kg	0.913645	kg	
	ปลอกหุ้มแบตเตอรี่: พลาสติก (3%)		0.4%		อินพุต	Dai et al., 2018a; Dai et al., 2019 ; Crenna et al., 2021	polyethylene, high density, granulate	0.00	kg	0.026130	kg	

ตารางที่ 4.5 บัญชีวัฏจักรชีวิตของแบตเตอรี่ในระหว่างการนำกลับมาใช้ใหม่ (ต่อ)

หัวข้อหลัก	หัวข้อย่อย	จำนวน เดิม	%	หน่วย เดิม	ประเภท	แหล่งที่มาของ จำนวน	อ้างอิง Ecoinvent ชื่อ ผลิตภัณฑ์	จำนวน เดิม	หน่วย	จำนวน ต่อ 1 FU (FU = 1KWh)	หน่วย	หมายเหตุ
	บรรจุภัณฑ์โมดูลแบตเตอรี่		5.7%		อินพุต	Dai et al., 2018a; Dai et al., 2019 ; Crenna et al., 2020	Battery module packaging	0.06	kg	0.367742	kg	
	ขั้วก้อนแบตเตอรี่: ทองแดง		0.1%		อินพุต	Dai et al., 2018a; Dai et al., 2019 ; Crenna et al., 2021	Copper {RAS} copper production, primary APOS, S	0.00	kg	0.006456	kg	
	ขั้วก้อนแบตเตอรี่: ฉนวนพลาสติก		0.0%		อินพุต	Dai et al., 2018a; Dai et al., 2019 ; Crenna et al., 2022	Glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulded {RoW} glass fibre reinforced plastic production, polyamide,	0.00	kg	0.002152	kg	

ตารางที่ 4.5 บัญชีวัฏจักรชีวิตของแบตเตอรี่ในระหว่างการการนำกลับมาใช้ใหม่ (ต่อ)

หัวข้อหลัก	หัวข้อย่อย	จำนวน เดิม	%	หน่วย เดิม	ประเภท	แหล่งที่มาของ จำนวน	อ้างอิง Ecoinvent ชื่อ ผลิตภัณฑ์	จำนวน เดิม	หน่วย	จำนวน ต่อ 1 FU (FU = 1KWh)	หน่วย	หมายเหตุ
							injection moulded APOS, S					
	แผ่นปิดอัดโมดูลและสายรัด: เหล็ก		0.6%		อินพุต	Dai et al., 2018a; Dai et al., 2019 ; Crenna et al., 2023	Reinforcing steel {RoW} reinforcing steel production APOS, S	0.01	kg	0.041399	kg	
	เซลล์แบตเตอรี่		71.4%		อินพุต	Dai et al., 2018a; Dai et al., 2019 ; Crenna et al., 2024	Battery cell, Li- ion, NMC811 {GLO} market for battery cell, Li-ion, NMC811 APOS, S	0.71	kg	4.603823	kg	
	พลังงานและกระบวนการ											
	การขนส่งรถบรรทุก >32 ตัน				อินพุต	Assume a transportation distance of 100 km within the Eastern	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 {RoW} transport,			0.142193	tkm	สมมติว่าการ ขนส่ง 100 กม. ภายในอีสเทิร์นซี บอร์ด

ตารางที่ 4.5 บัญชีวัฏจักรชีวิตของแบตเตอรี่ในระหว่างการนำกลับมาใช้ใหม่ (ต่อ)

หัวข้อหลัก	หัวข้อย่อย	จำนวน เดิม	%	หน่วย เดิม	ประเภท	แหล่งที่มาของ จำนวน	อ้างอิง Ecoinvent ชื่อ ผลิตภัณฑ์	จำนวน เดิม	หน่วย	จำนวน ต่อ 1 FU (FU = 1KWh)	หน่วย	หมายเหตุ
						Seaboard region of Thailand	freight, lorry >32 metric ton, EURO6 APOS, S					
	การทดสอบและไฟฟ้าสำหรับสิ่งอำนวยความสะดวกสำหรับการนำกลับมาใช้ใหม่				อินพุต	Wilson et al.,2021	Electricity, medium voltage {TH} market for electricity, medium voltage APOS, S			7.940000	kWh	
ปลดออกหุ้ม แบตเตอรี่: อลูมิเนียม (97%)	แจ็คเก็ตแบตเตอรี่:อลูมิเนียม				ผลิตภัณฑ์			1.00	kg			
	ส่วนประกอบ											
	อลูมิเนียมอัลลอยด์ตัด				อินพุต	Dai et al., 2018a; Dai et al., 2019 ; Crenna et al., 2021	Aluminium, wrought alloy {GLO} aluminium ingot, primary, to aluminium, wrought alloy market APOS, S	1.00	Kg			

ตารางที่ 4.5 บัญชีวัฏจักรชีวิตของแบตเตอรี่ในระหว่างการการนำกลับมาใช้ใหม่ (ต่อ)

หัวข้อหลัก	หัวข้อย่อย	จำนวน เดิม	%	หน่วย เดิม	ประเภท	แหล่งที่มาของ จำนวน	อ้างอิง Ecoinvent ชื่อ ผลิตภัณฑ์	จำนวน เดิม	หน่วย	จำนวน ต่อ 1 FU (FU = 1KWh)	หน่วย	หมายเหตุ
	พลังงานและกระบวนการ											
	การอัดขึ้นรูปอลูมิเนียม				อินพุต	Dai et al., 2018a; Dai et al., 2019 ; Crenna et al., 2021	Impact extrusion of aluminium, 1 stroke {RoW} impact extrusion of aluminium, 1 stroke APOS, S	1.00	kg			
ปลอกหุ้ม แบตเตอรี่: พลาสติก (3%)	แจ็คเก็ตแบตเตอรี่: พลาสติก				ผลิตภัณฑ์			1.00	kg			
	ส่วนประกอบ											
	โพลีเอทิลีน				อินพุต	Dai et al., 2018a; Dai et al., 2019 ; Crenna et al., 2021	Polyethylene, high density, granulate {RoW} polyethylene production, high density, granulate APOS, S	1.00	kg			

ตารางที่ 4.5 บัญชีวัฏจักรชีวิตของแบตเตอรี่ในระหว่างการนำกลับมาใช้ใหม่ (ต่อ)

หัวข้อหลัก	หัวข้อย่อย	จำนวน เดิม	%	หน่วย เดิม	ประเภท	แหล่งที่มาของ จำนวน	อ้างอิง Ecoinvent ชื่อ ผลิตภัณฑ์	จำนวน เดิม	หน่วย	จำนวน ต่อ 1 FU (FU = 1KWh)	หน่วย	หมายเหตุ
	พลังงานและกระบวนการ											
	การฉีดขึ้นรูป				อินพุต	Dai et al., 2018a; Dai et al., 2019 ; Crenna et al., 2021	Injection moulding {RoW} injection moulding APOS, S	1.00	kg			
น้ำหล่อเย็น: เอ ทิลีนไกลคอล	เอทิลีนไกลคอล				ผลิตภัณฑ์			1.00	kg			
	ส่วนประกอบ											
	เอทิลีนไกลคอล				อินพุต	Dai et al., 2018a; Dai et al., 2019 ; Crenna et al., 2021	Ethylene glycol {RoW} market for ethylene glycol APOS, S	1.00	kg			
น้ำหล่อเย็น: น้ำ	น้ำ				ผลิตภัณฑ์			1.00	kg			
	ส่วนประกอบ											
	น้ำ	น้ำ	น้ำ	น้ำ	น้ำ	water	Tap water {GLO} market group for tap water APOS, S	1.00	kg			

ตารางที่ 4.5 บัญชีวัฏจักรชีวิตของแบตเตอรี่ในระหว่างการการนำกลับมาใช้ใหม่ (ต่อ)

หัวข้อหลัก	หัวข้อย่อย	จำนวน เดิม	%	หน่วย เดิม	ประเภท	แหล่งที่มาของ จำนวน	อ้างอิง Ecoinvent ชื่อ ผลิตภัณฑ์	จำนวน เดิม	หน่วย	จำนวน ต่อ 1 FU (FU = 1KWh)	หน่วย	หมายเหตุ
ชิ้นส่วน อิเล็กทรอนิกส์: ระบบจัดการ แบตเตอรี่ (BMS)	ระบบจัดการแบตเตอรี่ (BMS)	1		กิโลกรัม	ผลิตภัณฑ์	Lewrén 2019; Ellingsen 2014 ; Crenna et al., 2021	battery management system	1	kg			
	ส่วนประกอบ											
	BMB	0.089		กิโลกรัม	อินพุต	Lewrén 2019; Ellingsen 2014 ; Crenna et al., 2021	Printed wiring board, through-hole mounted, unspecified, Pb free {GLO} market for printed wiring board, through-hole mounted, unspecified, Pb free APOS, S	0.089	kg			
	IBIS	0.48		กิโลกรัม	อินพุต	Lewrén 2019; Ellingsen 2014 ; Crenna et al., 2021	integrated battery interface system	0.48	kg			

ตารางที่ 4.5 บัญชีวัฏจักรชีวิตของแบตเตอรี่ในระหว่างการนำกลับมาใช้ใหม่ (ต่อ)

หัวข้อหลัก	หัวข้อย่อย	จำนวน เดิม	%	หน่วย เดิม	ประเภท	แหล่งที่มาของ จำนวน	อ้างอิง Ecoinvent ชื่อ ผลิตภัณฑ์	จำนวน เดิม	หน่วย	จำนวน ต่อ 1 FU (FU = 1KWh)	หน่วย	หมายเหตุ
	ยัด IBIS: เหล็ก	0.003		กิโลกรัม	อินพุต	Lewrén 2019; Ellingsen 2014 ; Crenna et al., 2021	steel, low- alloyed	0.003	kg			
	ระบบไฟฟ้าแรงสูง	0.3		กิโลกรัม	อินพุต	Lewrén 2019; Ellingsen 2014 ; Crenna et al., 2021	high voltage system	0.3	kg			
ชิ้นส่วน อิเล็กทรอนิกส์: ระบบเชื่อมต่อ แบตเตอรี่ในตัว (IBIS)	IBIS	1		กิโลกรัม	ผลิตภัณฑ์	Lewrén 2019; Ellingsen 2014; Crenna et al., 2021	integrated battery interface system	1.0000	kg			
	ส่วนประกอบ											
	อะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS) โคพอลิเมอร์	2.00E- 04		กิโลกรัม	อินพุต	Lewrén 2019; Ellingsen 2014 ; Crenna et al., 2021	Acrylonitrile- butadiene- styrene copolymer {RoW} acrylonitrile- butadiene- styrene copolymer	2.00E-04	kg			

ตารางที่ 4.5 บัญชีวัฏจักรชีวิตของแบตเตอรี่ในระหว่างการนำกลับมาใช้ใหม่ (ต่อ)

หัวข้อหลัก	หัวข้อย่อย	จำนวน เดิม	%	หน่วย เดิม	ประเภท	แหล่งที่มาของ จำนวน	อ้างอิง Ecoinvent ชื่อ ผลิตภัณฑ์	จำนวน เดิม	หน่วย	จำนวน ต่อ 1 FU (FU = 1KWh)	หน่วย	หมายเหตุ
							production APOS, S					
	แผงวงจรพิมพ์ BMS	1.10E- 01		กิโลกรัม	อินพุต	Lewrén 2019; Ellingsen 2014 ; Crenna et al., 2021	Printed wiring board, through-hole mounted, unspecified, Pb free {GLO} market for printed wiring board, through-hole mounted, unspecified, Pb free APOS, S	1.10E-01	kg			
	วงจรรวม (ประเภทลอจิก)	1.70E- 05		กิโลกรัม	อินพุต	Lewrén 2019; Ellingsen 2014 ; Crenna et al., 2021	Integrated circuit, logic type {GLO} integrated circuit production,	1.70E-05	kg			

ตารางที่ 4.5 บัญชีวัฏจักรชีวิตของแบตเตอรี่ในระหว่างการนำกลับมาใช้ใหม่ (ต่อ)

หัวข้อหลัก	หัวข้อย่อย	จำนวน เดิม	%	หน่วย เดิม	ประเภท	แหล่งที่มาของ จำนวน	อ้างอิง Ecoinvent ชื่อ ผลิตภัณฑ์	จำนวน เดิม	หน่วย	จำนวน ต่อ 1 FU (FU = 1KWh)	หน่วย	หมายเหตุ
							logic type APOS, S					
	เหล็กกล้าอัลลอยด์ต่ำ	8.50E-01		กิโลกรัม	อินพุต	Lewrén 2019; Ellingsen 2014 ; Crenna et al., 2021	Steel, low- alloyed {RoW} steel production, converter, low-alloyed APOS, S	8.50E-01	kg			
	ขั้วต่อไฟฟ้า (แคลมป์ยึดสายไฟ)	2.10E-02		กิโลกรัม	อินพุต	Lewrén 2019; Ellingsen 2014 ; Crenna et al., 2021	Electric connector, wire clamp {GLO} electric connector production, wire clamp APOS, S	2.10E-02	kg			
	โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) เม็ดสัณฐาน	6.80E-03		กิโลกรัม	อินพุต	Lewrén 2019; Ellingsen 2014 ; Crenna et al., 2021	Polyethylene terephthalate, granulate, amorphous {RoW}	6.80E-03	kg			

ตารางที่ 4.5 บัญชีวัฏจักรชีวิตของแบตเตอรี่ในระหว่างการนำกลับมาใช้ใหม่ (ต่อ)

หัวข้อหลัก	หัวข้อย่อย	จำนวน เดิม	%	หน่วย เดิม	ประเภท	แหล่งที่มาของ จำนวน	อ้างอิง Ecoinvent ชื่อ ผลิตภัณฑ์	จำนวน เดิม	หน่วย	จำนวน ต่อ 1 FU (FU = 1KWh)	หน่วย	หมายเหตุ
							polyethylene terephthalate production, granulate, amorphous APOS, S					
	ไนลอน 6-6	1.90E- 03		กิโลกรัม	อินพุต	Lewrén 2019; Ellingsen 2014 ; Crenna et al., 2021	Nylon 6-6 {RoW} market for nylon 6-6 APOS, S	1.90E-03	kg			
	ทองเหลือง	5.70E- 03		กิโลกรัม	อินพุต	Lewrén 2019; Ellingsen 2014 ; Crenna et al., 2021	Brass {RoW} market for brass APOS, S	5.70E-03	kg			
	พลังงานและกระบวนการ					Lewrén 2019; Ellingsen 2014 ; Crenna et al., 2021						
	การผลิตผลิตภัณฑ์เหล็ก	8.50E- 01		กิโลกรัม	อินพุต	Lewrén 2019; Ellingsen 2014 ; Crenna et al., 2021	Metal working, average for steel product manufacturing {RoW} metal	8.50E-01	kg			

ตารางที่ 4.5 บัญชีวัฏจักรชีวิตของแบตเตอรี่ในระหว่างการการนำกลับมาใช้ใหม่ (ต่อ)

หัวข้อหลัก	หัวข้อย่อย	จำนวน เดิม	%	หน่วย เดิม	ประเภท	แหล่งที่มาของ จำนวน	อ้างอิง Ecoinvent ชื่อ ผลิตภัณฑ์	จำนวน เดิม	หน่วย	จำนวน ต่อ 1 FU (FU = 1KWh)	หน่วย	หมายเหตุ
							working, average for steel product manufacturing APOS, S					
	การผลิตไนลอนและพลาสติก	8.80E-03		กิโลกรัม	อินพุต	Lewrén 2019; Ellingsen 2014 ; Crenna et al., 2021	Injection moulding {RoW} injection moulding APOS, S	8.80E-03	kg			
	การผลิตสลักเกลียวสำหรับไมโครสแตน	5.70E-03		กิโลกรัม	อินพุต	Lewrén 2019; Ellingsen 2014 ; Crenna et al., 2021	Casting, brass {RoW} casting, brass APOS, S	5.70E-03	kg			
ตัวยัด IBIS	ตัวยัด IBIS				ผลิตภัณฑ์			1.00E+00	kg			
	ส่วนประกอบ											
	การแก้ไข				อินพุต	Wilson et al.,2021	Steel, low- alloyed {RoW} steel production, converter,	1.00E+00	kg			

ตารางที่ 4.5 บัญชีวัฏจักรชีวิตของแบตเตอรี่ในระหว่างการการนำกลับมาใช้ใหม่ (ต่อ)

หัวข้อหลัก	หัวข้อย่อย	จำนวน เดิม	%	หน่วย เดิม	ประเภท	แหล่งที่มาของ จำนวน	อ้างอิง Ecoinvent ชื่อ ผลิตภัณฑ์	จำนวน เดิม	หน่วย	จำนวน ต่อ 1 FU (FU = 1KWh)	หน่วย	หมายเหตุ
							low-alloyed APOS, S					
	พลังงานและกระบวนการ											
	การผลิตอุปกรณ์ยึด				อินพุต	Wilson et al.,2021	Metal working, average for steel product manufacturing {RoW} metal working, average for steel product manufacturing APOS, S	1.00E+00	kg			
ระบบ ไฟฟ้าแรงสูง	ระบบไฟฟ้าแรงสูง				ผลิตภัณฑ์	Wilson et al.,2021		1.00E+00	kg			
	ส่วนประกอบ											
	ผลิตภัณฑ์เหล็ก				อินพุต	Wilson et al.,2021	Steel, low- alloyed {RoW} steel production, converter,	1.40E-03	kg			

ตารางที่ 4.5 บัญชีวัฏจักรชีวิตของแบตเตอรี่ในระหว่างการการนำกลับมาใช้ใหม่ (ต่อ)

หัวข้อหลัก	หัวข้อย่อย	จำนวน เดิม	%	หน่วย เดิม	ประเภท	แหล่งที่มาของ จำนวน	อ้างอิง Ecoinvent ชื่อ ผลิตภัณฑ์	จำนวน เดิม	หน่วย	จำนวน ต่อ 1 FU (FU = 1KWh)	หน่วย	หมายเหตุ
							low-alloyed APOS, S					
	HVC และฝาปิด				อินพุต	Wilson et al.,2021	Aluminium, primary, ingot {GLO} production APOS, S	1.20E-01	kg			
	คลิปและรัด				อินพุต	Wilson et al.,2021	Nylon 6-6 {RoW} market for nylon 6-6 APOS, S	4.40E-02	kg			
	ปะเก็นนีโอพรีน				อินพุต	Wilson et al.,2021	Synthetic rubber {RoW} synthetic rubber production APOS, S	3.60E-03	kg			
	พลาสติก				อินพุต	Wilson et al.,2021	Polyethylene terephthalate, granulate, amorphous {RoW} polyethylene	5.70E-02	kg			

ตารางที่ 4.5 บัญชีวัฏจักรชีวิตของแบตเตอรี่ในระหว่างการการนำกลับมาใช้ใหม่ (ต่อ)

หัวข้อหลัก	หัวข้อย่อย	จำนวน เดิม	%	หน่วย เดิม	ประเภท	แหล่งที่มาของ จำนวน	อ้างอิง Ecoinvent ชื่อ ผลิตภัณฑ์	จำนวน เดิม	หน่วย	จำนวน ต่อ 1 FU (FU = 1KWh)	หน่วย	หมายเหตุ
							terephthalate production, granulate, amorphous APOS, S					
	ฟิวส์ระหว่างโมดูล				อินพุต	Wilson et al.,2021	Copper {RAS} copper production, primary APOS, S	2.30E-01	kg			
	ฟิวส์ระหว่างโมดูล				อินพุต	Wilson et al.,2021	Polyphenylene sulfide {GLO} polyphenylene sulfide production APOS, S	4.10E-02	kg			
	ฟิวส์ระหว่างโมดูล				อินพุต	Wilson et al.,2021	Tin {RoW} tin production APOS, S	3.20E-02	kg			
	ฟิวส์ระหว่างโมดูล				อินพุต	Wilson et al.,2021	Cable, ribbon cable, 20-pin, with plugs {GLO} market	1.60E-02	kg			

ตารางที่ 4.5 บัญชีวัฏจักรชีวิตของแบตเตอรี่ในระยะเวลาการนำกลับมาใช้ใหม่ (ต่อ)

หัวข้อหลัก	หัวข้อย่อย	จำนวน เดิม	%	หน่วย เดิม	ประเภท	แหล่งที่มาของ จำนวน	อ้างอิง Ecoinvent ชื่อ ผลิตภัณฑ์	จำนวน เดิม	หน่วย	จำนวน ต่อ 1 FU (FU = 1KWh)	หน่วย	หมายเหตุ
							for cable, ribbon cable, 20-pin, with plugs APOS, S					
	สาย				อินพุต	Wilson et al.,2021	Copper, cathode {RoW} treatment of copper scrap by electrolytic refining APOS, S	4.50E-01	kg			
	พลังงานและกระบวนการ				อินพุต	Wilson et al.,2021						
	การผลิตผลิตภัณฑ์เหล็ก				อินพุต	Wilson et al.,2021	Metal working, average for steel product manufacturing {RoW} metal working, average for steel product	1.40E-03	kg			

ตารางที่ 4.5 บัญชีวัฏจักรชีวิตของแบตเตอรี่ในระหว่างการการนำกลับมาใช้ใหม่ (ต่อ)

หัวข้อหลัก	หัวข้อย่อย	จำนวน เดิม	%	หน่วย เดิม	ประเภท	แหล่งที่มาของ จำนวน	อ้างอิง Ecoinvent ชื่อ ผลิตภัณฑ์	จำนวน เดิม	หน่วย	จำนวน ต่อ 1 FU (FU = 1KWh)	หน่วย	หมายเหตุ
							manufacturing APOS, S					
	การผลิตผลิตภัณฑ์อลูมิเนียม				อินพุต	Wilson et al.,2021	Metal working, average for aluminium product manufacturing {RoW} metal working, average for aluminium product manufacturing APOS, S	1.20E-01	kg			
	การผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติก				อินพุต	Wilson et al.,2021	Injection moulding {RoW} injection moulding APOS, S	1.40E-01	kg			
	การผลิตทองแดงสำหรับพิวส์				อินพุต	Wilson et al.,2021	Metal working, average for copper	2.70E-01	kg			

ตารางที่ 4.5 บัญชีวัฏจักรชีวิตของแบตเตอรี่ในระหว่างการการนำกลับมาใช้ใหม่ (ต่อ)

หัวข้อหลัก	หัวข้อย่อย	จำนวน เดิม	%	หน่วย เดิม	ประเภท	แหล่งที่มาของ จำนวน	อ้างอิง Ecoinvent ชื่อ ผลิตภัณฑ์	จำนวน เดิม	หน่วย	จำนวน ต่อ 1 FU (FU = 1KWh)	หน่วย	หมายเหตุ
							product manufacturing {RoW} metal working, average for copper product manufacturing APOS, S					
	การผลิตผลิตภัณฑ์ตึก				อินพุต	Wilson et al.,2021	Metal working, average for metal product manufacturing {RoW} metal working, average for metal product manufacturing APOS, S	1.60E-02	kg			
สายเคเบิล ข้อมูล	สายเคเบิลข้อมูล				ผลิตภัณฑ์	Wilson et al.,2021		1.0000	kg			
	พลังงานและกระบวนการ					Wilson et al.,2021						

ตารางที่ 4.5 บัญชีวัฏจักรชีวิตของแบตเตอรี่ในระหว่างการนำกลับมาใช้ใหม่ (ต่อ)

หัวข้อหลัก	หัวข้อย่อย	จำนวน เดิม	%	หน่วย เดิม	ประเภท	แหล่งที่มาของ จำนวน	อ้างอิง Ecoinvent ชื่อ ผลิตภัณฑ์	จำนวน เดิม	หน่วย	จำนวน ต่อ 1 FU (FU = 1KWh)	หน่วย	หมายเหตุ
	การผลิตสายเคเบิลข้อมูล				อินพุต	Wilson et al.,2021	Cable, data cable in infrastructure {GLO} cable production, data cable in infrastructure APOS, S		kg			
การเชื่อมต่อระหว่างโมดูล	การเชื่อมต่อระหว่างโมดูล				ผลิตภัณฑ์	Wilson et al.,2021						
	ส่วนประกอบ											
	การเชื่อมต่อระหว่างโมดูล				อินพุต	Wilson et al.,2021	Copper {GLO} market for copper APOS, S	1.0000	kg			
	พลังงานและกระบวนการ					Wilson et al.,2021						
	การผลิตโมดูลเชื่อมต่อระหว่างกัน				อินพุต	Wilson et al.,2021	Metal working, average for copper product manufacturing {RoW} metal	1.0000	kg			

ตารางที่ 4.5 บัญชีวัฏจักรชีวิตของแบตเตอรี่ในระหว่างการนำกลับมาใช้ใหม่ (ต่อ)

หัวข้อหลัก	หัวข้อย่อย	จำนวน เดิม	%	หน่วย เดิม	ประเภท	แหล่งที่มาของ จำนวน	อ้างอิง Ecoinvent ชื่อ ผลิตภัณฑ์	จำนวน เดิม	หน่วย	จำนวน ต่อ 1 FU (FU = 1KWh)	หน่วย	หมายเหตุ
							working, average for copper product manufacturing APOS, S					
	การเชื่อมระหว่างกัน				อินพุต	Wilson et al.,2021	Electricity, medium voltage {TH} market for electricity, medium voltage APOS, S	0.0312	kWh			

ตารางที่ 4.6 บัญชีวัฏจักรวงจรชีวิตของส่วนประกอบที่ไม่ได้นำกลับมาใช้ใหม่ในระยะการนำกลับมาใช้ใหม่

หัวข้อหลัก	หัวข้อย่อย	ที่มา	แหล่งที่มาของ จำนวน	อ้างอิง Ecoinvent ชื่อผลิตภัณฑ์	จำนวน (FU = 1KWh)	หน่วย
การจัดการวัสดุที่ ไม่ได้ใช้ระหว่าง การนำกลับมาใช้ ใหม่	ปลอกหุ้มแบตเตอรี่: อลูมิเนียม (97%)	Dai et al., 2018a; Dai et al., 2019	งานวิจัยนี้	Aluminium (waste treatment) {GLO} recycling of aluminium APOS, S	0.913645	kg
	ปลอกหุ้มแบตเตอรี่: พลาสติก (3%)	Dai et al., 2018a; Dai et al., 2019	งานวิจัยนี้	PE (waste treatment) {GLO} recycling of PE APOS, S	0.026130	kg
	น้ำหล่อเย็น:	Dai et al., 2018a; Dai et al., 2019	งานวิจัยนี้	Spent antifreezer liquid (waste treatment) {RoW} treatment of, hazardous waste incineration APOS, S	0.296978	kg
	ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์: BMS	Dai et al., 2018a; Dai et al., 2019	งานวิจัยนี้	Electronics scrap (waste treatment) {GLO} market for electronics scrap APOS, S	0.156520	kg
	ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์: การเชื่อมต่อ ระหว่างโมดูล	Dai et al., 2018a; Dai et al., 2019	งานวิจัยนี้	Electronics scrap (waste treatment) {GLO} market for electronics scrap APOS, S	0.027782	kg
	สายเคเบิลข้อมูล	Dai et al., 2018a; Dai et al., 2019	งานวิจัยนี้	Electronics scrap (waste treatment) {GLO} market for electronics scrap APOS, S	0.000876	kg
	การขนส่งรถบรรทุก >32 ตัน	สมมติฐาน	งานวิจัยนี้	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 {RoW} transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 APOS, S	0.142193	tkm

ตารางที่ 4.7 บัญชีวัฏจักรวงจรชีวิตของการรีไซเคิล (Mechanical pretreatment)

หัวข้อหลัก	หัวข้อย่อย	ประเภท	แหล่งที่มาของจำนวน	อ้างอิง Ecoinvent ชื่อผลิตภัณฑ์	ปริมาณ	หน่วย
เซลล์แบตเตอรี่	เซลล์ที่ปิดใช้งาน	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023		561.3	g
	อากาศอัด เกจวัด 1200 kPa	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Compressed air, 1200 kPa gauge {RoW} market for compressed air, 1200 kPa gauge APOS, S	0.00014	m ³
ความต้องการไฟฟ้า แรงปานกลาง (RER) ทั้งหมด	ความต้องการไฟฟ้าโดย Shredder	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Electricity, medium voltage {TH} market for electricity, medium voltage APOS, S	7.5	Wh
	ความต้องการไฟฟ้าโดยเครื่องบด ย่อยสำหรับงานหนัก	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Electricity, medium voltage {TH} market for electricity, medium voltage APOS, S	10.1	Wh
	ความต้องการไฟฟ้าตามตารางการ แยก	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Electricity, medium voltage {TH} market for electricity, medium voltage APOS, S	0.4	Wh
	ความต้องการไฟฟ้าโดยตัวจำแนก ประเภทอากาศ	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Electricity, medium voltage {TH} market for electricity, medium voltage APOS, S	0.2	Wh
	ความต้องการไฟฟ้าโดยเครื่องแยก แม่เหล็ก	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Electricity, medium voltage {TH} market for electricity, medium voltage APOS, S	0.2	Wh
	ความต้องการไฟฟ้าโดยเครื่องดูดฝุ่น	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Electricity, medium voltage {TH} market for electricity, medium voltage APOS, S	42.1	Wh
เซลล์แบตเตอรี่	มวลสีดำ(Black mass)	ผลิตภัณฑ์	Abdelbaky et al., 2023		469.4	g
	เศษทองแดง	ผลิตภัณฑ์	Abdelbaky et al., 2023	Copper scrap, sorted, pressed {GLO} market for copper scrap, sorted, pressed APOS, S	53.9	g
	ขยะพลาสติก	ผลิตภัณฑ์	Abdelbaky et al., 2023	Waste plastic, mixture {RoW} market for waste plastic, mixture APOS, S	15.8	g
	ฝุ่น	ผลิตภัณฑ์	Abdelbaky et al., 2023	Hazardous waste, for incineration {RoW} market for hazardous waste, for incineration APOS, S	5.5	g

ตารางที่ 4.8 บัญชีวัตถุดิบจากรวบรวมชีวิตของการรีไซเคิล (Graphite separation from black mass by flotation technology)

หัวข้อหลัก	หัวข้อย่อย	ประเภท	แหล่งที่มาของจำนวน	อ้างอิง Ecoinvent ชื่อผลิตภัณฑ์	ปริมาณ	หน่วย
แกรไฟต์	มวลสีดำ	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023		469.400	g
	เอ็น-โดเตแคน	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Heptane {RoW} hydrocarbons purification, molecular sieve separation of naphtha APOS, S	0.141	g
	เอ็มไอพีซี	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	4-methyl-2-pentanone {RoW} 4-methyl-2-pentanone production APOS, S	0.070	g
	แอโรฟิน 3418A	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023		0.012	g
	น้ำ	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Water, decarbonised {RoW} market for water, decarbonised APOS, S	2.350	kg
	โซเดียมคาร์บอเนต	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Soda ash, dense {GLO} market for soda ash, dense APOS, S	6.260	mg
	ไฟฟ้า	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Electricity, medium voltage {GLO} market group for electricity, medium voltage APOS, S	3.000	Wh
	กราไฟท์รีไซเคิล	ผลิตภัณฑ์	Abdelbaky et al., 2023		129.300	g
	โลหะเข้มข้นที่นำกลับมาใช้ใหม่	ผลิตภัณฑ์	Abdelbaky et al., 2023		340.090	g
	น้ำเสีย	ผลิตภัณฑ์	Abdelbaky et al., 2023	Wastewater, average {RoW} market for wastewater, average APOS, S	2.350	kg

ตารางที่ 4.9 บัญชีวัฏจักรวงจรชีวิตของการรีไซเคิล (Regeneration of recycled graphite)

หัวข้อหลัก	หัวข้อย่อย	ประเภท	แหล่งที่มาของจำนวน	อ้างอิง Ecoinvent ชื่อผลิตภัณฑ์	ปริมาณ	หน่วย
กราไฟท์รีไซเคิล	กราไฟท์รีไซเคิล	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023		129.30	g
	เอทานอล	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Ethanol, without water, in 99.7% solution state, from ethylene {RoW} market for ethanol, without water, in 99.7% solution state, from ethylene APOS, S	9.70	g
	เรซินฟีนอล	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Phenolic resin {RoW} market for phenolic resin APOS, S	0.60	g
	ไนโตรเจนของเหลว	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Nitrogen, liquid {RoW} market for nitrogen, liquid APOS, S	19.00	g
	ความร้อน	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Heat, district or industrial, natural gas {RoW} market for heat, district or industrial, natural gas APOS, S	0.70	MJ
กราไฟท์ที่สร้างใหม่	กราไฟท์ที่สร้างใหม่	ผลิตภัณฑ์	Abdelbaky et al., 2023		129.30	g
	ไนโตรเจนสู่อากาศ	ผลิตภัณฑ์	Abdelbaky et al., 2023		19.00	g
	เอทิลีนสู่อากาศ	ผลิตภัณฑ์	Abdelbaky et al., 2023		1.00	g
	มีเทนสู่อากาศ	ผลิตภัณฑ์	Abdelbaky et al., 2023		2.08	g
	คาร์บอนมอนอกไซด์สู่อากาศ	ผลิตภัณฑ์	Abdelbaky et al., 2023		2.52	g
	อะเซทิลีนสู่อากาศ	ผลิตภัณฑ์	Abdelbaky et al., 2023		0.44	g
	ไฮโดรเจนสู่อากาศ	ผลิตภัณฑ์	Abdelbaky et al., 2023		3.65	g

ตารางที่ 4.10 บัญชีวัฏจักรวงจรชีวิตของการรีไซเคิล (Hydrometallurgical recycling of black mass: Solvent-based extraction)

หัวข้อหลัก	หัวข้อย่อย	ประเภท	แหล่งที่มาของจำนวน	อ้างอิง Ecoinvent ชื่อผลิตภัณฑ์	ปริมาณ	หน่วย
แบตเตอรี่ เยื่อไอออน Black Mass	สารเข้มข้น	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023		340.09	g
	กรดซัลฟิวริก	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Sulfuric acid {RoW} market for sulfuric acid APOS, S	1,023.90	g
	ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Hydrogen peroxide, without water, in 50% solution state {RoW} hydrogen peroxide production, product in 50% solution state APOS, S	246.60	g
	ไตรบิวทิลฟอสเฟต	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023		3.30	g
	D2EHPA	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023		8.30	g
	โซดาแอช 272	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023		3.10	g
	น้ำมันก๊าด	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Kerosene {RoW} market for kerosene APOS, S	39.90	g
	ต่างหับทิม	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Potassium permanganate {RoW} potassium permanganate production, manganese dioxide oxidation APOS, S	26.00	g
	โซดาไฟ	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {RoW} market for sodium hydroxide, without water, in 50% solution state APOS, S	715.70	g
	โซเดียมคาร์บอเนต	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Neutralising agent, sodium hydroxide-equivalent {RoW} soda ash, light, crystalline, heptahydrate, to generic market for neutralising agent APOS, S	159.30	g
	ไฟฟ้า	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Electricity, medium voltage (TH) market for electricity, medium voltage APOS, S	16.20	kWh
	น้ำ	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Water, deionised {RoW} water production, deionised APOS, S	13.60	l
	MnSO ₄	ผลิตภัณฑ์	Abdelbaky et al., 2023	Manganese sulfate {GLO} market for manganese sulfate APOS, S	126.40	g
	NiSO ₄	ผลิตภัณฑ์	Abdelbaky et al., 2023	Nickel sulfate {GLO} market for nickel sulfate APOS, S	130.50	g
	CoSO ₄	ผลิตภัณฑ์	Abdelbaky et al., 2023	Cobalt sulfate {RoW} market for cobalt sulfate APOS, S	129.80	g
	Li ₂ CO ₃	ผลิตภัณฑ์	Abdelbaky et al., 2023	Lithium carbonate {RoW} lithium carbonate production, from spodumene Conseq, S	4 74.60	g
	น้ำเสีย	ผลิตภัณฑ์	Abdelbaky et al., 2023	Wastewater, average {RoW} market for wastewater, average APOS, S	14.60	l
	ส่วนผสมของตัวทำละลายที่ใช้แล้ว	ผลิตภัณฑ์	Abdelbaky et al., 2023	Spent solvent mixture {RoW} market for spent solvent mixture APOS, S	54.70	g

ตารางที่ 4.11 บัญชีวัฏจักรวงจรชีวิตของการรีไซเคิล (Aerophine 3418A)

หัวข้อหลัก	หัวข้อย่อย	ประเภท	แหล่งที่มาของจำนวนเงิน	อ้างอิง Ecoinvent ชื่อผลิตภัณฑ์	ปริมาณ	หน่วย
แอโรฟิน 3418A	แอโรฟิน 3418A		Abdelbaky et al., 2023		1.00	kg
	กำมะถัน	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Sulfur {GLO} market for sulfur APOS, S	0.2905	kg
	โซดาไฟ	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Neutralising agent, sodium hydroxide-equivalent {RoW} sodium hydroxide to generic market for neutralising agent APOS, S	0.1812	kg
	ไอโซบิวทิลีน ดีไฮโดรเจนของไอโซบิวเทน	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Isobutane {GLO} market for isobutane APOS, S	0.5342	kg
	ฟอสฟีน	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Phosphane {GLO} market for phosphane APOS, S	0.1622	kg
	โรงงานเคมีอินทรีย์	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Chemical factory, organics {RoW} chemical factory construction, organics APOS, S	4E-10	Unit
	ไฟฟ้าแรงดันปานกลาง	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Electricity, medium voltage {TH} market for electricity, medium voltage APOS, S	0.41600	kWh
	ความร้อนในอุตสาหกรรมเคมี	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Heat, district or industrial, natural gas {RoW} market for heat, district or industrial, natural gas APOS, S	2.35000	MJ
	น้ำก๊อก	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Tap water {RoW} market for tap water APOS, S	0.02600	kg
	อากาศอัด เกจวัด 1,000 kPa	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Compressed air, 1000 kPa gauge {GLO} market for compressed air, 1000 kPa gauge APOS, S	0.50000	m ³
	ไนโตรเจน	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Nitrogen, liquid {GLO} market for APOS, S	0.01900	kg
	น้ำระบายความร้อนแหล่งกำเนิดตามธรรมชาติที่ไม่ระบุ	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023		0.16400	m ³
	น้ำแม่น้ำ	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023		0.00086	m ³
	น้ำบ่อน้ำในดิน	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023		0.00083	m ³
	ไนโตรเจนสู่อากาศ	ผลิตภัณฑ์	Abdelbaky et al., 2023		0.01900	kg
	น้ำสู่อากาศ	ผลิตภัณฑ์	Abdelbaky et al., 2023		0.00140	m ³

ตารางที่ 4.11 บัญชีวัฏจักรวงจรชีวิตของการรีไซเคิล (Aerophine 3418A) (ต่อ)

หัวข้อหลัก	หัวข้อย่อย	ประเภท	แหล่งที่มาของจำนวนเงิน	อ้างอิง Ecoinvent ชื่อผลิตภัณฑ์	ปริมาณ	หน่วย
แอโรฟิน 3418A	คาร์บอนไดออกไซด์สู่ อากาศ	ผลิตภัณฑ์	Abdelbaky et al., 2023		0.60148	Kg
	น้ำสู่น้ำ	ผลิตภัณฑ์	Abdelbaky et al., 2023		0.01670	m ³
	น้ำเสียเฉลี่ย	ผลิตภัณฑ์	Abdelbaky et al., 2023	Wastewater, average [RoW] market for wastewater, average APOS, S	0.0000027	m ³



ตารางที่ 4.12 บัญชีวัฏจักรวงจรชีวิตของการรีไซเคิล (Tri-butyl phosphate (tbp))

หัวข้อหลัก	หัวข้อย่อย	ประเภท	แหล่งที่มาของจำนวน	อ้างอิง Ecoinvent ชื่อผลิตภัณฑ์	ปริมาณ	หน่วย
	ไตรบิวทิลฟอสเฟต		Abdelbaky et al., 2023		1.00	kg
ไตรบิวทิลฟอสเฟต	ฟอสฟอริลคลอไรด์	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Phosphoryl chloride {GLO} market for APOS, S	0.60525	kg
	1-บิวทานอล	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	1-butanol {GLO} market for 1-butanol APOS, S	0.8774	kg
	โรงงานเคมีอินทรีย์	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Chemical factory, organics {GLO} market for chemical factory, organics APOS, S	4E-10	Unit
	ไฟฟ้าแรงดันปานกลาง	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Electricity, medium voltage {GLO} market group for electricity, medium voltage APOS, S	0.41600	kWh
	ความร้อนในอุตสาหกรรมเคมี	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Heat, in chemical industry {RER} steam production in chemical industry Alloc Rec, S- Copied from ecoinvent	2.35000	MJ
	น้ำก๊อก	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Tap water {RoW} market for tap water APOS, S	0.02600	kg
	อากาศอัด เกจวัด 1,000 kPa	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Compressed air, 1000 kPa gauge {GLO} market for compressed air, 1000 kPa gauge APOS, S	0.50000	m ³
	ไนโตรเจนของเหลว	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Nitrogen, liquid {RoW} market for nitrogen, liquid APOS, S	0.01900	kg
	น้ำระบายความร้อน แหล่งกำเนิดตามธรรมชาติที่ไม่ระบุ	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023		0.01640	m ³
	น้ำแม่น้ำ	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023		0.00086	m ³
	น้ำบ่อน้ำในดิน	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023		0.00083	m ³
	ไนโตรเจนสู่อากาศ	ผลิตภัณฑ์	Abdelbaky et al., 2023		0.01900	kg
	ความร้อน ของเสีย สู่อากาศ	ผลิตภัณฑ์	Abdelbaky et al., 2023		0.23000	MJ
	น้ำสู่อากาศ	ผลิตภัณฑ์	Abdelbaky et al., 2023		0.00140	m ³
	น้ำสู่น้ำ	ผลิตภัณฑ์	Abdelbaky et al., 2023		0.01670	m ³
	คลอไรด์ไอออนสู่น้ำ	ผลิตภัณฑ์	Abdelbaky et al., 2023		0.01120	kg

ตารางที่ 4.12 บัญชีวัฏจักรวงจรชีวิตของการรีไซเคิล (Tri-butyl phosphate (tbp)) (ต่อ)

หัวข้อหลัก	หัวข้อย่อย	ประเภท	แหล่งที่มาของจำนวน	อ้างอิง Ecoinvent ชื่อผลิตภัณฑ์	ปริมาณ	หน่วย
ไตรบิวทิลฟอสเฟต	คลอรีนสู่อากาศ	ผลิตภัณฑ์	Abdelbaky et al., 2023		0.000224	kg
	น้ำเสียเฉลี่ย	ผลิตภัณฑ์	Abdelbaky et al., 2023	Wastewater, average (waste treatment) {GLO} market for APOS, S	0.0000027	m ³



ตารางที่ 4.13 บัญชีวัฏจักรวงจรชีวิตของการรีไซเคิล (D2EHPA)

หัวข้อหลัก	หัวข้อย่อย	ประเภท	แหล่งที่มาของจำนวน	อ้างอิง Ecoinvent ชื่อผลิตภัณฑ์	ปริมาณ	หน่วย
D2EHPA	D2EHPA		Abdelbaky et al., 2023		1.00	kg
	เอ็น-บิวทิลดีไฮด์ จากไฮโดรฟอรมิลเลชันของโพรพิลีน	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	1-butanol {GLO} market for 1-butanol APOS, S	1.1556	kg
	ฟอสฟอรัสไตรคลอไรด์	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Phosphorus trichloride {GLO} market for phosphorus trichloride APOS, S	0.3140	kg
	ไฮโดรเจนของเหลว	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Hydrogen, liquid {GLO} market for APOS, S	0.0140	kg
	โรงงานเคมีอินทรีย์	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Chemical factory, organics {RoW} chemical factory construction, organics APOS, S	4E-10	Unit
	ไฟฟ้าแรงดันปานกลาง	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Electricity, medium voltage {TH} market for electricity, medium voltage APOS, S	0.416	kWh
	ความร้อนในอุตสาหกรรมเคมี	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Heat, in chemical industry {RER} steam production in chemical industry Alloc Rec, S- Copied from ecoinvent	2.35000	MJ
	น้ำก๊อก	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Tap water {RoW} market for tap water APOS, S	0.02600	kg
	อากาศอัด เกจวัด 1,000 kPa	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Compressed air, 1000 kPa gauge {GLO} market for compressed air, 1000 kPa gauge APOS, S	0.50000	m ³
	ไนโตรเจน	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Nitrogen, liquid {RoW} market for nitrogen, liquid APOS, S	0.01900	kg
	น้ำระบายความร้อน แหล่งกำเนิดตามธรรมชาติที่ไม่ระบุ	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023		0.16400	m ³
	น้ำแม่น้ำ	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023		0.00086	m ³
	น้ำบ่อน้ำในดิน	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023		0.00083	m ³
	ไนโตรเจนสู่อากาศ	ผลิตภัณฑ์	Abdelbaky et al., 2023		0.01900	kg
	ความร้อน ของเสีย สู่อากาศ	ผลิตภัณฑ์	Abdelbaky et al., 2023		0.09500	MJ
	น้ำสู่อากาศ	ผลิตภัณฑ์	Abdelbaky et al., 2023		0.00140	m ³

ตารางที่ 4.13 บัญชีวัฏจักรวงจรชีวิตของการรีไซเคิล (D2EHPA) (ต่อ)

หัวข้อหลัก	หัวข้อย่อย	ประเภท	แหล่งที่มาของจำนวน	อ้างอิง Ecoinvent ชื่อผลิตภัณฑ์	ปริมาณ	หน่วย
D2EHPA	น้ำสูบน้ำ	ผลิตภัณฑ์	Abdelbaky et al., 2023		0.01670	m ³
	คลอรีนไดออกไซด์สูบน้ำ	ผลิตภัณฑ์	Abdelbaky et al., 2023		0.02200	kg
	คลอรีนสู่อากาศ	ผลิตภัณฑ์	Abdelbaky et al., 2023		0.00044	kg
	น้ำเสียเฉลี่ย	ผลิตภัณฑ์	Abdelbaky et al., 2023	Wastewater, average (waste treatment) {GLO} market for APOS, S	0.0000027	m ³



ตารางที่ 4.14 บัญชีวัฏจักรวงจรชีวิตของการรีไซเคิล (Cyanex272)

หัวข้อหลัก	หัวข้อย่อย	ประเภท	แหล่งที่มาของจำนวน	อ้างอิง Ecoinvent ชื่อผลิตภัณฑ์	ปริมาณ	หน่วย
ไซยาเน็กซ์ 272	ไซยาเน็กซ์ 272		Abdelbaky et al., 2023		1.00	kg
	บิวเทน	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Butane {GLO} market for butane APOS, S	0.46665	kg
	ไอโซบิวทานอล	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Isobutanol {GLO} market for APOS, S	0.595133	kg
	ฟอสฟอรัส, สีขาว, ของเหลว	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Phosphorus, white, liquid {RoW} phosphorus production, white, liquid APOS, S	0.149674	kg
	ปูนขาว	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Lime, hydrated, packed {RoW} market for lime, hydrated, packed APOS, S	0.013428	kg
	กรดซัลฟิวริก	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Sulfuric acid {RoW} market for sulfuric acid APOS, S	0.118486	kg
	โซดาไฟ	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Sodium hydroxide, production mix, at plant/RNA	0.144968	kg
	ผงซีโอไลต์	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Zeolite, powder {RoW} zeolite production, powder APOS, S	0.000737	kg
	โรงงานเคมีอินทรีย์	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Chemical factory, organics {GLO} market for chemical factory, organics APOS, S	4E-10	Unit
	ไฟฟ้าแรงดันปานกลาง	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Electricity, medium voltage {TH} market for electricity, medium voltage APOS, S	0.41600	kWh
	ความร้อนในอุตสาหกรรมเคมี	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Heat, in chemical industry {RER} steam production in chemical industry Alloc Rec, S- Copied from ecoinvent	2.35000	kg
	น้ำก๊อก	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Tap water {RoW} market for tap water APOS, S	0.02600	kg
	อากาศอัด เกจวัด 1000 kPa	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Compressed air, 1000 kPa gauge {RoW} market for compressed air, 1000 kPa gauge APOS, S	0.50000	m ³
	ไนโตรเจน	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023	Nitrogen, liquid {RoW} market for nitrogen, liquid APOS, S	0.00083	kg
	น้ำระบายความร้อน แหล่งกำเนิดตามธรรมชาติที่ไม่ระบุ	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023		0.01640	m ³
	น้ำแม่น้ำ	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023		0.00086	m ³
	น้ำบ่อน้ำในดิน	อินพุต	Abdelbaky et al., 2023		0.00083	m ³
	ไนโตรเจนสู่อากาศ	ผลิตภัณฑ์	Abdelbaky et al., 2023		0.01900	kg

ตารางที่ 4.14 บัญชีวัฏจักรวงจรชีวิตของการรีไซเคิล (Cyanex272) (ต่อ)

หัวข้อหลัก	หัวข้อย่อย	ประเภท	แหล่งที่มาของจำนวน	อ้างอิง Ecoinvent ชื่อผลิตภัณฑ์	ปริมาณ	หน่วย
ไซยาเน็กซ์ 272	ความร้อนของเสีย	ผลิตภัณฑ์	Abdelbaky et al., 2023		0.01300	MJ
	ซิลเพอร์ไดออกไซด์สู่ อากาศ	ผลิตภัณฑ์	Abdelbaky et al., 2023		0.000147	kg
	ซิลไฟต์เป็นน้ำ	ผลิตภัณฑ์	Abdelbaky et al., 2023		0.009188	kg
	น้ำสู่อากาศ	ผลิตภัณฑ์	Abdelbaky et al., 2023		0.00140	m ³
	น้ำสู่น้ำ	ผลิตภัณฑ์	Abdelbaky et al., 2023		0.01670	m ³
	น้ำเสียเฉลี่ย	ผลิตภัณฑ์	Abdelbaky et al., 2023	Wastewater, average (waste treatment) [GLO] market for APOS, S	0.0000027	m ³



4.2.5.4 ขั้นตอนการใช้งานในชีวิตที่สอง (Second-use phase)

บัญชีวัฏจักรชีวิตในขั้นตอนนี้พิจารณาการไหลของพลังงานที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของแบตเตอรี่ที่นำกลับมาใช้ใหม่ รวมถึงพลังงานที่ใช้ในรอบการชาร์จและคายประจุ พลังงานสำหรับระบบจัดการแบตเตอรี่และระบบควบคุมอุณหภูมิ (เช่น ระบบทำความเย็น) รวมทั้งพลังงานที่สูญเสียจากการแปลงไฟฟ้าจาก AC เป็น DC ในช่วงชาร์จ และจาก DC เป็น AC ในช่วงคายประจุ

ผลประโยชน์สุทธิด้านพลังงานของระบบแบตเตอรี่ถูกคำนวณจากพลังงานทั้งหมดที่คายประจุได้ ลบด้วยพลังงานที่ใช้สำหรับการทำความเย็นและการสูญเสียจากการแปลงไฟฟ้า ข้อมูลเหล่านี้แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 และพื้นฐานสำหรับการประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมในขั้นตอนนี้ โดยใช้ข้อมูลสัดส่วนการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยจากฐานข้อมูล ecoinvent 3.9.1 ผ่านซอฟต์แวร์ SimaPro 9.5

4.2.6 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของทางเลือกการจัดการแบตเตอรี่เมื่อหมดอายุการใช้งาน (EOL Options)

4.2.6.1 ผลกระทบของแต่ละกระบวนการในสองทางเลือก EOL

ตารางที่ 4.15 และ 4.16 เปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมระหว่างสองทางเลือก ได้แก่

- **ทางเลือก 1:** นำแบตเตอรี่กลับมาใช้ใหม่เป็นเวลา 10 ปีก่อนรีไซเคิล
- **ทางเลือก 2:** รีไซเคิลทันทีหลังการใช้งานในรถยนต์ไฟฟ้า

ประเด็นที่ประเมินได้แก่

- ศักยภาพในการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน (global warming potential)
- ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศในแหล่งน้ำจืด (freshwater ecotoxicity)
- ความเป็นพิษต่อมนุษย์แบบไม่ก่อมะเร็ง (human non-carcinogenic toxicity)
- ความขาดแคลนทรัพยากรแร่ (mineral resource scarcity)

แม้ว่า ทางเลือก 1 จะมีผลกระทบด้านความขาดแคลนทรัพยากรแร่สูงกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ ทางเลือก 2 แต่ผลกระทบโดยรวมของ ทางเลือก 1 ต่ำกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ความเป็นพิษต่อแหล่งน้ำจืด และความเป็นพิษต่อมนุษย์ได้อย่างชัดเจน ตัวอย่างเช่น ทางเลือก 2 มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและความเป็นพิษต่อมนุษย์สูงกว่า ทางเลือก 1 กว่า 70% และมีค่าความเป็นพิษต่อแหล่งน้ำจืดสูงกว่าถึง 154–179% นอกจากนี้ ทางเลือก 1 ยังช่วยบรรเทาปัญหาทรัพยากรแร่ได้ดีกว่า ผ่านการใช้งานแบตเตอรี่ในระยะยาว ในขณะที่ ทางเลือก 2 ช่วยลดได้ในระดับต่ำมาก

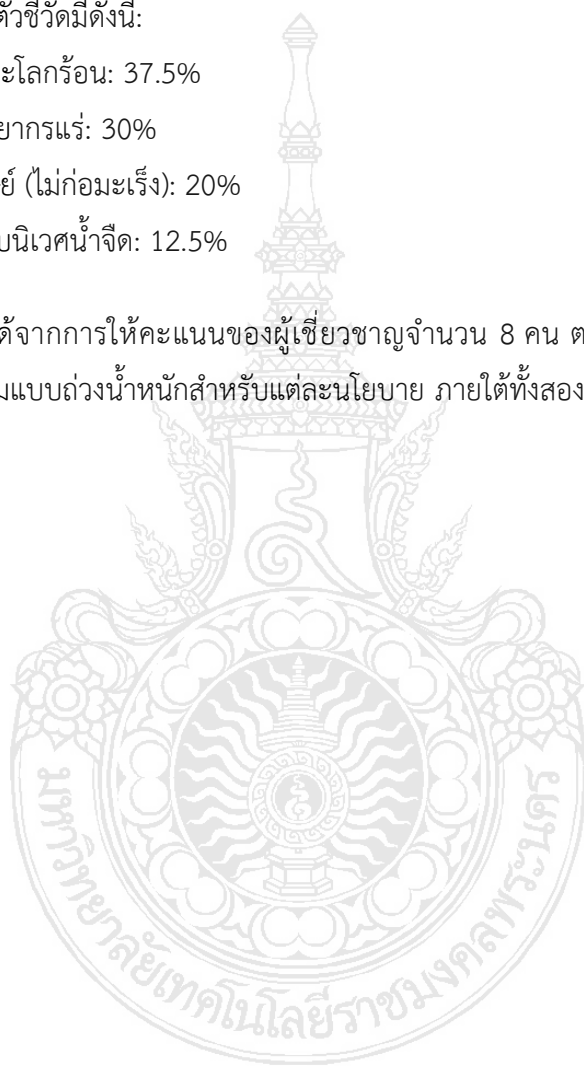
4.2.6.2 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยรวมของสองทางเลือก EOL

ตารางที่ 4.17 และ 4.18 แสดงผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมโดยรวมของแต่ละทางเลือก ภายใต้นโยบายผสมผสานแหล่งผลิตไฟฟ้าที่แตกต่างกัน เนื่องจากแต่ละตัวชี้วัดมีหน่วยการวัดต่างกัน จึงมีการทำให้เป็นมาตรฐาน (normalization) ก่อนเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบได้อย่างเหมาะสม จากนั้นจึงคูณด้วยค่าน้ำหนัก (weights) ที่กำหนดไว้เพื่อหาคะแนนรวมแบบถ่วงน้ำหนัก (aggregate weighted scores)

ค่าน้ำหนักของแต่ละตัวชี้วัดมีดังนี้:

- ศักยภาพการเกิดภาวะโลกร้อน: 37.5%
- ความขาดแคลนทรัพยากรแร่: 30%
- ความเป็นพิษต่อมนุษย์ (ไม่ก่อมะเร็ง): 20%
- ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน้ำจืด: 12.5%

ค่าน้ำหนักดังกล่าวได้จากการให้คะแนนของผู้เชี่ยวชาญจำนวน 8 คน ตามที่ระบุไว้ในระเบียบวิธีวิจัย ตารางที่ 4.19 สรุปคะแนนรวมแบบถ่วงน้ำหนักสำหรับแต่ละนโยบาย ภายใต้ทั้งสองทางเลือก



ตารางที่ 4.15 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของตัวเลือกที่ 1: การนำกลับมาใช้ใหม่ 10 ปีและการรีไซเคิล

ตัวเลือกที่ 1: นำกลับมาใช้ใหม่ 10 ปีและรีไซเคิล												
ขั้นตอน	ศักยภาพภาวะโลกร้อน (kgCO ₂ eq)			ความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมของน้ำจืด (kg 1,4-DCB)			ความเป็นพิษที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็งในมนุษย์ (kg 1,4-DCB)			การขาดแคลนทรัพยากรแร่ (kg Cu eq)		
	PDP2018	30@2030	40@2030	PDP2018	30@2030	40@2030	PDP2018	30@2030	40@2030	PDP2018	30@2030	40@2030
1. การผลิตแบตเตอรี่	15,632	15,632	15,632	6,474	6,474	6,474	113,395	113,395	113,395	1,149	1,149	1,149
2. การใช้งานหลักในรถไฟฟ้า	41,530	40,869	38,916	13,860	24,091	28,988	28,735	34,214	32,953	45	45	46
3. การนำกลับมาใช้ใหม่	-6,774	-6,774	-6,774	-4,287	-4,287	-4,287	-76,351	-76,351	-76,351	-954	-954	-954
4. การจัดการส่วนประกอบที่ไม่ได้นำกลับมาใช้ใหม่	-2,913	-2,913	-2,913	-95	-95	-95	-3,022	-3,022	-3,022	-33	-33	-33
5. การใช้งานครั้งที่สองในระบบกักเก็บพลังงาน	-37,492	-35,364	-30,031	-33,002	-57,251	-64,724	-27,401	-36,377	-29,272	-52	-59	-60
6.การรีไซเคิลแบตเตอรี่ที่หมดอายุการใช้งานแล้ว	711	711	711	3,945	3,945	3,945	-956	-956	-956	-1,350	-1,350	-1,350
ทั้งหมด	10,694	12,162	15,542	-13,104	-27,123	-29,699	34,400	30,903	36,747	-1,194	-1,202	-1,202

ตารางที่ 4.16 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของตัวเลือกที่ 2: การรีไซเคิลทันที

ตัวเลือกที่ 2: รีไซเคิลทันที												
แปรรูป	ศักยภาพภาวะโลกร้อน (kgCO ₂ eq)			ความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมของน้ำ จืด (kg 1,4-DCB)			ความเป็นพิษที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็งใน มนุษย์ (kg 1,4-DCB)			การขาดแคลนทรัพยากรแร่ (kg Cu eq)		
	PDP2018	30@2030	40@2030	PDP2018	30@2030	40@2030	PDP2018	30@2030	40@2030	PDP2018	30@2030	40@2030
1. การผลิต แบตเตอรี่	15,632	15,632	15,632	6,474	6,474	6,474	113,395	113,395	113,395	1,149	1,149	1,149
2. การใช้งานหลักใน รถไฟฟ้า	41,530	40,869	38,916	13,860	24,091	28,988	28,735	34,214	32,953	45	45	46
3. การรีไซเคิล แบตเตอรี่	711	711	711	3,945	3,945	3,945	-956	-956	-956	-1,350	-1,350	-1,350
ทั้งหมด	57,874	57,213	55,260	24,280	34,511	39,408	141,174	146,654	145,392	-156	-156	-155
เปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับตัวเลือก ที่ 1	82	79	72	154	179	175	76	79	75	666	669	674

ตารางที่ 4.17 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยรวมของทางเลือกที่ 1 ภายใต้นโยบายการผสมผสานแหล่งผลิตไฟฟ้าที่แตกต่างกัน

ตัวเลือกที่ 1: การนำกลับมาใช้ใหม่ 10 ปีและการรีไซเคิล												
	ศักยภาพภาวะโลกร้อน (kgCO ₂ eq)			ความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมของน้ำจืด (kg 1,4-DCB)			ความเป็นพิษที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็งในมนุษย์ (kg 1,4-DCB)			การขาดแคลนทรัพยากรแร่ (kg Cu eq)		
	PDP2018	30@2030	40@2030	PDP2018	30@2030	40@2030	PDP2018	30@2030	40@2030	PDP2018	30@2030	40@2030
ทั้งหมด	10,694	12,162	15,542	-13,104	-27,123	-29,699	34,400	30,903	36,747	-1,194	-1,202	-1,202
คะแนนจากการ normalization	1	0.9689	0.8972	0.7599	0.9627	1	0.9698	1	0.9495	0.9925	1	1

ตารางที่ 4.18 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยรวมของตัวเลือกที่ 2 ภายใต้นโยบายการผสมผสานแหล่งผลิตไฟฟ้าที่แตกต่างกัน

ตัวเลือกที่ 2: รีไซเคิลทันที												
	ศักยภาพภาวะโลกร้อน (kgCO ₂ eq)			ความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมของน้ำจืด (kg 1,4-DCB)			ความเป็นพิษที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็งในมนุษย์ (kg 1,4-DCB)			การขาดแคลนทรัพยากรแร่ (kg Cu eq)		
	PDP 2018	30@ 2030	40@ 2030	PDP 2018	30@ 2030	40@ 2030	PDP 2018	30@ 2030	40@ 2030	PDP 2018	30@ 2030	40@ 2030
ทั้งหมด	57,874	57,213	55,260	24,280	34,511	39,408	141,174	146,654	145,392	-156	-156	-155
	0	0.0140	0.0554	0.2189	0.0709	0	0.0473	0	0.0109	0.0004	0.0008	0

ตารางที่ 4.19 คะแนนผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมแบบถ่วงน้ำหนักรวมสำหรับแต่ละนโยบายและตัวเลือก

ตัวเลือกที่ 1: การนำกลับมาใช้ใหม่ 10 ปีและการรีไซเคิล		ตัวเลือกที่ 2: รีไซเคิลทันที	
PDP2018	0.961679	PDP2018	0.036968
30@2030	0.983539	30@2030	0.014356
40@2030	0.951369	40@2030	0.022956



บทที่ 5

สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้ได้ดำเนินการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) อย่างครอบคลุมครอบคลุมทุกช่วงของวัฏจักรชีวิตของแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า (EV) ตั้งแต่ขั้นตอนการผลิตไปจนถึงการจัดการเมื่อสิ้นอายุการใช้งาน (End-of-Life: EOL) โดยเปรียบเทียบกลยุทธ์การจัดการปลายทาง 2 รูปแบบ ได้แก่ การรีไซเคิลทันที และ การนำกลับมาใช้ใหม่ในระบบกักเก็บพลังงาน (second-life) ก่อนเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิล

การประเมินมุ่งเน้นในหลายหมวดหมู่ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม ได้แก่

- ศักยภาพในการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global warming potential)
- ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน้ำจืด (Freshwater ecotoxicity)
- ความขาดแคลนทรัพยากรแร่ (Mineral resource scarcity)
- ความเป็นพิษต่อมนุษย์แบบไม่ก่อมะเร็ง (Human non-carcinogenic toxicity)

หมวดผลกระทบเหล่านี้ได้รับการกำหนดค่าน้ำหนักตามความเห็นของผู้เชี่ยวชาญเฉพาะด้านจำนวน 8 คน เพื่อให้การประเมินมีความสมดุลและรอบด้าน

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การนำแบตเตอรี่ EV กลับมาใช้ใหม่ในชีวิตที่สองเพื่อการกักเก็บพลังงาน ให้ข้อได้เปรียบด้านสิ่งแวดล้อมอย่างชัดเจน เมื่อเทียบกับการรีไซเคิลทันที โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อดำเนินการควบคู่กับนโยบายไฟฟ้าคาร์บอนต่ำ เช่น 30@2030

แม้ว่าขั้นตอนการผลิตและการใช้งานครั้งแรกจะยังคงเป็นแหล่งหลักของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แต่การใช้งานในชีวิตที่สองสามารถยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่ก่อให้เกิดภาระทางสิ่งแวดล้อมเพิ่มเติมอย่างมีนัยสำคัญ แม้ในกรณีที่ความจุของแบตเตอรี่เสื่อมลง

ข้อค้นพบเหล่านี้ ตอกย้ำถึงคุณค่าของแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) และสนับสนุนเป้าหมายการลดการปล่อยคาร์บอนในระดับประเทศ นอกจากนี้ ยังสะท้อนให้เห็นถึงความสำคัญของการบูรณาการการวางแผนการจัดการแบตเตอรี่เมื่อหมดอายุการใช้งาน เข้ากับการออกแบบระบบพลังงานในภาพรวม เพื่อส่งเสริมความยั่งยืนในระยะยาวอย่างสูงสุด

5.2 อภิปรายผล

5.2.1 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตามกระบวนการในสองทางเลือก EOL

ภายใต้ ทางเลือก 1 (การนำแบตเตอรี่กลับมาใช้ใหม่ก่อนรีไซเคิล) แม้ว่าในสถานการณ์ 40@2030 จะมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนในช่วงการใช้งานครั้งแรกต่ำที่สุด แต่ปริมาณการลดการปล่อยก๊าซที่เกิดขึ้นในช่วงการใช้งานครั้งที่สองกลับต่ำกว่าสถานการณ์ 30@2030 และ PDP2018 สาเหตุหลักมาจากการพึ่งพาพลังงานสะอาดที่ลดลงหลังปี 2030

ประเด็นนี้สะท้อนให้เห็นว่า หากพิจารณาการชดเชยคาร์บอนทั้งหมดโดยรวมแล้ว สถานการณ์ 30@2030 และ PDP2018 เป็นตัวเลือกที่ให้ผลการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ดีกว่า โดยเฉพาะสถานการณ์ 30@2030 ซึ่งโดดเด่นที่สุดในด้านความยั่งยืน เมื่อพิจารณาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้ง 4 หมวด โดยสามารถทำคะแนนรวมแบบถ่วงน้ำหนักได้สูงสุดที่ 0.98

สถานการณ์ 30@2030 แสดงผลลัพธ์ที่สมดุล โดยสามารถลดทั้งการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ ได้ในระดับปานกลาง อย่างไรก็ตาม ข้อเสียที่ชัดเจนคือมีผลกระทบด้าน ความขาดแคลนทรัพยากรแร่สูงที่สุดในบรรดาทุกสถานการณ์

ในทางกลับกัน สถานการณ์ 40@2030 สามารถลด ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน้ำจืด และ ความขาดแคลนทรัพยากรแร่ ได้มากที่สุด แต่ต้องแลกมากับผลกระทบอื่น ๆ ที่สูงขึ้น ได้แก่ ศักยภาพในการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน และ ความเป็นพิษต่อมนุษย์แบบไม่ก่อมะเร็ง ซึ่งอยู่ในระดับสูงที่สุดเช่นกัน

สำหรับสถานการณ์ PDP2018 พบว่ามี ค่าการปล่อยคาร์บอนต่อหน่วยสูงที่สุด เนื่องจากมีการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นหลัก ทำให้เป็นตัวเลือกที่มีผลกระทบสูงที่สุดในช่วงการใช้งานครั้งแรก อย่างไรก็ตาม PDP2018 มี ศักยภาพสูงสุดในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในช่วงชีวิตที่สอง โดยการแทนที่พลังงานไฟฟ้าจากโครงข่ายที่มีการปล่อยสูง ด้วยพลังงานสะอาดที่เก็บไว้ในแบตเตอรี่ที่นำกลับมาใช้ใหม่ ส่งผลให้เกิดการลดผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนได้มากที่สุด

ข้อค้นพบนี้เน้นย้ำถึง คุณค่าของการใช้แบตเตอรี่ในชีวิตที่สอง ในการสร้างประโยชน์ด้านสิ่งแวดล้อมอย่างมีนัยสำคัญในระบบพลังงานที่ยังพึ่งพาคาร์บอนอยู่มาก นอกจากนี้ สถานการณ์ PDP2018 ยังแสดงผลลัพธ์ ในระดับปานกลางด้านความเป็นพิษต่อมนุษย์ แต่มีผลกระทบสูงสุดในหมวด ความเป็นพิษต่อน้ำจืด และ ความขาดแคลนทรัพยากรแร่

ในกรณีของ ทางเลือก 2 (การรีไซเคิลทันทีหลังการใช้งานครั้งแรก) สถานการณ์ PDP2018 และ 40@2030 เป็นตัวเลือกที่ยั่งยืนที่สุด โดยมีคะแนนรวมแบบถ่วงน้ำหนักสูงสุดที่ 0.04 และ 0.02 ตามลำดับ

แม้ว่า PDP2018 จะมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงที่สุด แต่กลับแสดงผลกระทบต่ำที่สุดในด้าน ความเป็นพิษต่อน้ำจืด และ ความเป็นพิษต่อมนุษย์แบบไม่ก่อมะเร็ง ในทุกสถานการณ์ ขณะที่สถานการณ์ 40@2030

แม้จะมีการปล่อยคาร์บอนต่ำที่สุด แต่กลับมีผลกระทบสูงสุดในด้าน ความเป็นพิษต่อน้ำจืด และ ความขาดแคลนทรัพยากรแร่

สำหรับสถานการณ์ 30@2030 แสดงระดับ ปานกลางของทั้งการปล่อยคาร์บอน และ ความเป็นพิษต่อน้ำจืด แต่กลับมีค่าผลกระทบ ด้านความเป็นพิษต่อมนุษย์แบบไม่ก่อมะเร็งสูงที่สุด ในบรรดาทุกสถานการณ์

ตารางที่ 5.1 แสดงการกระจายของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในรูปแบบร้อยละสำหรับ ทางเลือก 1: การนำกลับมาใช้ใหม่เป็นเวลา 10 ปีและรีไซเคิล ขณะที่ตารางที่ 5.2 แสดงผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของ ทางเลือก 2: การรีไซเคิลทันที

ทางเลือก 1: การนำกลับมาใช้ใหม่เป็นเวลา 10 ปีและรีไซเคิล

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในทางเลือกนี้มีความแตกต่างกันในแต่ละหมวดหมู่ ดังนี้:

(1) ศักยภาพในการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global warming potential)

การนำแบตเตอรี่กลับมาใช้ใหม่ก่อนรีไซเคิลเป็นเวลา 10 ปี ช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในแต่ละช่วงของวัฏจักรชีวิต โดยเฉพาะในช่วงการใช้งานครั้งที่สอง ซึ่งลดลงได้มากถึง -350.59% ถึง -193.22% และในช่วงการนำกลับมาใช้ใหม่ ลดลงที่ -63.34% ถึง -43.58% อย่างไรก็ตาม ช่วงการใช้งานครั้งแรกยังคงเป็นแหล่งการปล่อยที่สำคัญ โดยมีค่าเพิ่มสูงสุดถึง 388.34% แสดงให้เห็นว่าแม้การนำกลับมาใช้ใหม่จะช่วยลดการปล่อยได้อย่างมีนัยสำคัญ แต่ภาระด้านสิ่งแวดล้อมในช่วงต้นยังคงสูง

(2) ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน้ำจืด (Freshwater ecotoxicity)

ผลกระทบสูงสุดเกิดขึ้นในช่วงการใช้งานครั้งแรก (สูงถึง 105.77%) แต่ในช่วงการใช้งานครั้งที่สองสามารถลดลงได้อย่างชัดเจน โดยลดลงถึง -251.84% สะท้อนถึงศักยภาพของการใช้ซ้ำในการลดมลพิษทางน้ำ

(3) ความเป็นพิษต่อมนุษย์แบบไม่ก่อมะเร็ง (Human non-carcinogenic toxicity)

ช่วงการใช้งานครั้งแรกยังคงมีผลกระทบสูงสุด (สูงสุด 110.72%) แต่ช่วงการใช้งานในชีวิตที่สองสามารถลดผลกระทบได้อย่างมาก (สูงสุด -221.95%) แสดงถึงผลดีของการยืดอายุการใช้งานแบตเตอรี่ต่อสุขภาพมนุษย์

(4) ความขาดแคลนทรัพยากรแร่ (Mineral resource scarcity)

ขั้นตอนการผลิตแบตเตอรี่มีผลกระทบในด้านนี้สูง (สูงสุด 96.23%) เนื่องจากการสกัดแร่จำนวนมาก แต่ในช่วงใช้งานที่สอง การนำกลับมาใช้ใหม่ และการรีไซเคิล ช่วยลดผลกระทบได้อย่างมาก (-5.02% , -79.87% และประมาณ -113% ตามลำดับ) แสดงถึงประโยชน์ของแนวทางเศรษฐกิจหมุนเวียนในการอนุรักษ์ทรัพยากร

ทางเลือก 2: การรีไซเคิลทันที

ทางเลือกนี้เน้นการรีไซเคิลแบตเตอรี่ทันทีหลังการใช้งานครั้งแรก โดยมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างจาก ทางเลือก 1 ดังนี้:

(1) ศักยภาพในการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน

ผลกระทบยังคงสูง โดยช่วงการใช้งานครั้งแรกเป็นแหล่งหลักของการปล่อย (70.42% ถึง 71.76%) รองลงมาคือการผลิตแบตเตอรี่ (ประมาณ 27% ถึง 28%) ขณะที่กระบวนการรีไซเคิลมีส่วนร่วมเพียงเล็กน้อย (1.23% ถึง 1.29%) ซึ่งแสดงให้เห็นว่ารีไซเคิลทันทีไม่สามารถลดการปล่อยได้เท่ากับการนำกลับมาใช้ใหม่

(2) ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน้ำจืด

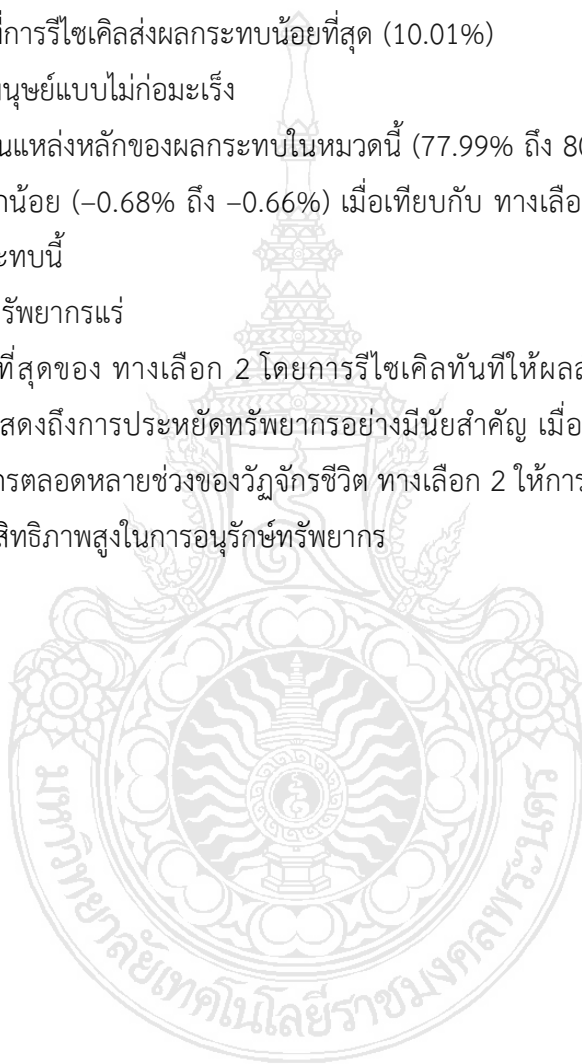
มีการปล่อยมลพิษในระดับสูงในช่วงการใช้งานครั้งแรก (57.09% ถึง 73.56%) และการผลิตแบตเตอรี่ (16.43% ถึง 26.67%) ขณะที่การรีไซเคิลส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศน้ำจืดน้อยที่สุด (10.01%)

(3) ความเป็นพิษต่อมนุษย์แบบไม่ก่อมะเร็ง

การผลิตแบตเตอรี่เป็นแหล่งหลักของผลกระทบในหมวดนี้ (77.99% ถึง 80.32%) ในขณะที่กระบวนการรีไซเคิลมีผลกระทบเชิงลบเล็กน้อย (-0.68% ถึง -0.66%) เมื่อเทียบกับ ทางเลือก 1 ซึ่งการนำกลับมาใช้ใหม่มีบทบาทสำคัญในการลดผลกระทบนี้

(4) ความขาดแคลนทรัพยากรแร่

หมวดนี้เป็นจุดแข็งที่สุดของ ทางเลือก 2 โดยการรีไซเคิลทันทีให้ผลลัพธ์เป็นค่าลบจำนวนมาก (-869.20% ถึง -866.52%) แสดงถึงการประหยัดทรัพยากรอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับ ทางเลือก 1 ที่มีการกระจายการประหยัดทรัพยากรตลอดหลายช่วงของวัฏจักรชีวิต ทางเลือก 2 ให้การประหยัดในขั้นตอนเดียวอย่างเข้มข้น จึงเป็นกลยุทธ์ที่มีประสิทธิภาพสูงในการอนุรักษ์ทรัพยากร



ตารางที่ 5.1 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตามเปอร์เซ็นต์สำหรับตัวเลือกที่ 1

ตัวเลือกที่ 1: นำกลับมาใช้ใหม่ 10 ปีและรีไซเคิล												
กระบวนการ	ศักยภาพภาวะโลกร้อน (kgCO ₂ eq)			ความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมของน้ำจืด (kg 1,4-DCB)			ความเป็นพิษที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็งในมนุษย์ (kg 1,4-DCB)			การขาดแคลนทรัพยากรแร่ (kg Cu eq)		
	PDP2018	30@2030	40@2030	PDP2018	30@2030	40@2030	PDP2018	30@2030	40@2030	PDP2018	30@2030	40@2030
1. การผลิตแบตเตอรี่	146.18%	128.53%	100.58%	49.41%	23.87%	21.80%	329.64%	366.94%	308.58%	96.23%	95.64%	95.60%
2. การใช้งานในรถไฟฟ้า	388.34%	336.03%	250.39%	105.77%	88.82%	97.61%	83.53%	110.72%	89.68%	3.78%	3.72%	3.79%
3. การปรับปรุงแบตเตอรี่มาใช้ใหม่	-63.34%	-55.70%	-43.58%	-32.72%	-15.81%	-14.44%	-221.95%	-247.07%	-207.78%	-79.87%	-79.38%	-79.35%
4. การจัดการส่วนประกอบที่ไม่ได้นำกลับมาใช้ใหม่	-27.24%	-23.95%	-18.74%	-0.73%	-0.35%	-0.32%	-8.79%	-9.78%	-8.22%	-2.73%	-2.71%	-2.71%
5. การใช้งานครั้งที่สองในระบบกักเก็บพลังงาน	-350.59%	-290.76%	-193.22%	-251.84%	-211.08%	-217.93%	-79.66%	-117.72%	-79.66%	-4.35%	-4.91%	-5.02%
6.การรีไซเคิลแบตเตอรี่ที่หมดอายุการใช้งานแล้ว	6.65%	5.85%	4.58%	30.11%	14.55%	13.28%	-2.78%	-3.09%	-2.60%	-113.06%	-112.36%	-112.31%

ตารางที่ 5.2 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตามเปอร์เซ็นต์สำหรับตัวเลือกที่ 2

ตัวเลือกที่ 2: รีไซเคิลทันที												
กระบวนการ	ศักยภาพภาวะโลกร้อน (kgCO ₂ eq)			ความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมของน้ำจืด (kg 1,4-DCB)			ความเป็นพิษที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็งในมนุษย์ (kg 1,4-DCB)			การขาดแคลนทรัพยากรแร่ (kg Cu eq)		
	PDP2018	30@2030	40@2030	PDP2018	30@2030	40@2030	PDP2018	30@2030	40@2030	PDP2018	30@2030	40@2030
1. การผลิตแบตเตอรี่	27.01%	27.32%	28.29%	26.67%	18.76%	16.43%	80.32%	77.32%	77.99%	737.56%	735.76%	739.84%
2. การใช้งานในรถไฟฟ้า	71.76%	71.43%	70.42%	57.09%	69.81%	73.56%	20.35%	23.33%	22.66%	28.97%	28.65%	29.36%
3. การรีไซเคิลแบตเตอรี่	1.23%	1.24%	1.29%	16.25%	11.43%	10.01%	-0.68%	-0.65%	-0.66%	-866.52%	-86442%	-86920%



5.2.2 การเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Comparison with a previous study)

การศึกษานี้นำเสนอการประเมินเชิงลึกของกลยุทธ์การจัดการแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า (EV) เมื่อสิ้นอายุการใช้งาน 2 รูปแบบ ได้แก่ การนำกลับมาใช้ใหม่ก่อนเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิล และการรีไซเคิลทันที โดยใช้แนวทางการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA)

แม้ว่าผลการศึกษของเราจะสอดคล้องกับงานวิจัยของ Schulz-Mönnighoff et al. (2021) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงข้อได้เปรียบด้านสิ่งแวดล้อมของการนำแบตเตอรี่กลับมาใช้ใหม่ก่อนการรีไซเคิล ในกรณีศึกษานี้พบว่าการนำแบตเตอรี่กลับมาใช้ใหม่ก่อนการรีไซเคิล สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้มากกว่า 268.38–318.78 kg CO₂eq/ kWh เมื่อเทียบกับการรีไซเคิลแบตเตอรี่ทันทีหลังการใช้งานในยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งในงานของ Schulz-Mönnighoff et al. (2021) พบว่าการนำแบตเตอรี่กลับมาใช้ใหม่ก่อนการรีไซเคิล สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้มากกว่า 210 kgCO₂eq/kWh เมื่อเทียบกับการรีไซเคิลแบตเตอรี่ทันทีหลังการใช้งานในยานยนต์ไฟฟ้า แต่อย่างไรก็ตามยังคงมีงานวิจัยที่สามารถนำมาเปรียบเทียบโดยตรงได้อย่างจำกัด

งานของ Schulz-Mönnighoff et al. (2021) เป็นหนึ่งในไม่กี่งานที่ศึกษากลยุทธ์ลักษณะเดียวกัน จึงเป็นแหล่งอ้างอิงที่มีคุณค่าสำหรับการเปรียบเทียบผลลัพธ์ อย่างไรก็ตาม ยังมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในด้านขนาดระบบ พื้นที่ศึกษา และแนวทางระเบียบวิธีวิจัย ซึ่งชี้ให้เห็นถึงความจำเป็นในการศึกษาต่อเพิ่มเติม ตัวอย่างเช่น Schulz-Mönnighoff et al. (2021) ได้จำลองระบบกักเก็บพลังงานขนาด 2,281 MWh ในประเทศเยอรมนี โดยใช้ระเบียบวิธี ILCD 2011 Midpoint+ ในขณะที่การศึกษานี้เน้นที่ระบบขนาดเล็ก 148 kWh ในประเทศไทย โดยใช้ระเบียบวิธี ReCiPe 2016 Midpoint ร่วมกับแบตเตอรี่เคมีประเภท NMC811

แม้ว่าทั้งสองงานจะประเมินหมวดผลกระทบด้าน การใช้ทรัพยากรแร่ (resource depletion) ร่วมกัน แต่ Schulz-Mönnighoff et al. รายงานผลกระทบในหน่วยที่แตกต่างกัน ทำให้การเปรียบเทียบเชิงตัวเลขโดยตรงทำได้ยาก

นอกจากนี้ การศึกษานี้ยังขยายขอบเขตของการวิเคราะห์เพิ่มเติม โดยรวมถึงหมวดผลกระทบอื่น ๆ เช่น ความเป็นพิษต่อมนุษย์แบบไม่ก่อมะเร็ง และ ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน้ำจืด ซึ่งไม่ครอบคลุมในงานของ Schulz-Mönnighoff et al. หมวดผลกระทบเหล่านี้ช่วยให้เข้าใจถึงความเสี่ยงต่อสุขภาพและระบบนิเวศมากขึ้น และชี้ให้เห็นถึงประเด็นเชิงสิ่งแวดล้อมที่อาจไม่ปรากฏชัดหากพิจารณาเฉพาะศักยภาพในการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนเพียงอย่างเดียว

ความขาดแคลนของงานวิจัยที่สามารถเปรียบเทียบผลลัพธ์ได้โดยตรง จึงเน้นย้ำถึง ความแปลกใหม่และคุณค่าของงานวิจัยนี้ ในการช่วยให้เข้าใจผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของกลยุทธ์การจัดการแบตเตอรี่เมื่อหมดอายุ ภายใต้เงื่อนไขของภูมิภาคและเทคโนโลยีที่แตกต่างกัน

5.3 ข้อเสนอแนะ

- 5.3.1 ทางด้านนโยบาย ภาครัฐควรสนับสนุนการใช้แบตเตอรี่หมดอายุในระบบกักเก็บพลังงานภาคชนบท หรือธุรกิจชุมชน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพทรัพยากร
- 5.3.2 ทางด้านการวิจัย ควรมีการศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมของเคมีแบตเตอรี่ชนิดอื่น และวิเคราะห์เชิงลึกในบริบทพลังงานของภูมิภาคอื่น ๆ รวมถึงขยายประเภทหมวดผลกระทบ
- 5.3.3 สำหรับการนำไปใช้จริง ควรส่งเสริมการนำผลการศึกษาไปใช้กับธุรกิจขนาดเล็ก เพื่อปรับปรุงระบบพลังงานและลดภาระค่าไฟฟ้าในระยะยาว รวมถึงประเมินสถานการณ์ในบริบทภูมิภาคที่หลากหลาย เพื่อพัฒนาความเข้าใจที่ครอบคลุมมากขึ้นเกี่ยวกับการจัดการวัฏจักรชีวิตของแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าอย่างยั่งยืน



บรรณานุกรม

- Casals, L.C., Amante García, B., Canal, C., 2019. Second life batteries lifespan: Rest of useful life and environmental analysis. *Journal of Environmental Management* 232, 354–363. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.046>
- Chaianong, A., Pharino, C., Langkau, S., Limthongkul, P., Kunanusont, N., 2024. Pathways for enhancing sustainable mobility in emerging markets: Cost-benefit analysis and policy recommendations for recycling of electric-vehicle batteries in Thailand. *Sustainable Production and Consumption* 47, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.03.025>
- Chayutthanabun, A., Chinda, T., Papong, S., 2025. End-of-life management of electric vehicle batteries utilizing the life cycle assessment. *Journal of the Air & Waste Management Association* 75, 131–143. <https://doi.org/10.1080/10962247.2024.2430325>
- Chonsalasin, D., Champahom, T., Jomnonkwao, S., Karoonsoontawong, A., Runkawee, N., Ratanavaraha, V., 2024. Exploring the Influence of Thai Government Policy Perceptions on Electric Vehicle Adoption: A Measurement Model and Empirical Analysis. *Smart Cities* 7, 2258–2282. <https://doi.org/10.3390/smartcities7040089>
- Crenna, E., Gauch, M., Widmer, R., Wäger, P., Hischer, R., 2021. Towards more flexibility and transparency in life cycle inventories for Lithium-ion batteries. *Resources, Conservation and Recycling* 170, 105619. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105619>
- Cui, J., Tan, Q., Liu, L., Li, J., 2023. Environmental Benefit Assessment of Second-Life Use of Electric Vehicle Lithium-Ion Batteries in Multiple Scenarios Considering Performance Degradation and Economic Value. *Environ. Sci. Technol.* 57, 8559–8567. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c00506>
- Dai, Q., Kelly, J.C., Dunn, C., 2018. Update of Bill-Of-Materials and Cathode Materials Production for Lithium-Ion Batteries in the GREET® Model. Energy Systems Division. Argonne National Laboratory (ANL), IL, US. Available at: <https://greet.es.anl.gov/publications>.

บรรณานุกรม(ต่อ)

- Dunn, J., Ritter, K., Velázquez, J.M., Kendall, A., 2023. Should high-cobalt EV batteries be repurposed? Using LCA to assess the impact of technological innovation on the waste hierarchy. *Journal of Industrial Ecology* 27, 1277–1290.
- Ecoinvent, 2024. System models: Allocation at the point of substitution (APOS). Available at: <https://support.ecoinvent.org/system-models>.
- EV Database, 2024. BMW iX3 (2021-2024). Available at: <https://ev-database.org/uk/car/1535/BMW-iX3>
- Ghasemi, K., Akbari, A., Jahani, S., Kazemzadeh, Y., 2024. A critical review of life cycle assessment and environmental impact of the well drilling process. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. <https://doi.org/10.1002/cjce.25539>
- Golmohammadzadeh, R., Faraji, F., Jong, B., Pozo-Gonzalo, C., Banerjee, P.C., 2022. Current challenges and future opportunities toward recycling of spent lithium-ion batteries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 159, 112202. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112202>
- Kang, H., Jung, S., Kim, H., An, J., Hong, J., Yeom, S., Hong, T., 2025. Life-cycle environmental impacts of reused batteries of electric vehicles in buildings considering battery uncertainty. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 207, 114936. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114936>
- Klüppel, H.-J., 2005. The revision of ISO Standards 14040-3-ISO 14040: Environmental management life cycle assessment principles and framework-ISO 14044: Environmental management life cycle assessment requirements and guidelines. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 10, 165.

บรรณานุกรม(ต่อ)

- Koroma, M.S., Costa, D., Philippot, M., Cardellini, G., Hosen, M.S., Coosemans, T., Messagie, M., 2022. Life cycle assessment of battery electric vehicles: Implications of future electricity mix and different battery end-of-life management. *Science of The Total Environment* 831, 154859. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154859>
- Luo, Y., Deng, Y., Shi, H., Yang, H., Yin, C., Ou, L., 2024. Green and efficient recycling method for spent Ni–Co–Mn lithium batteries utilizing multifunctional deep eutectic solvents. *Journal of Environmental Management* 351, 119814. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119814>
- Mansour, A., Al-Ahmed, H., Deek, A., Alshaketheep, K., Al-Ma’aitah, M., Asfour, B., Alshurideh, M.T., 2024. Developing Green Marketing Strategies: A Comprehensive Analysis of Consumer Behaviour and Business Practices. *International Review of Management and Marketing*.
- Office of the Board of Investment, 2023. Opportunities and Support Measures for EV Activities.
- Pagnanelli, F., Altimari, P., Colasanti, M., Coletta, J., D’Annibale, L., Mancini, A., Russina, O., Schiavi, P.G., 2024. Recycling Li-Ion Batteries via the Re-Synthesis Route: Improving the Process Sustainability by Using Lithium Iron Phosphate (LFP) Scraps as Reducing Agents in the Leaching Operation. *Metals* 14. <https://doi.org/10.3390/met14111275>
- Petrauskienė, K., Tverskytė, R., Dvarionienė, J., 2022. Environmental and economic benefits of electric, hybrid and conventional vehicle treatment: A case study of Lithuania. *Waste Management* 140, 55–62. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.01.009>
- Philippot, M., Costa, D., Hosen, M.S., Senécat, A., Brouwers, E., Nanini-Maury, E., Van Mierlo, J., Messagie, M., 2022. Environmental impact of the second life of an automotive battery: Reuse and repurpose based on ageing tests. *Journal of Cleaner Production* 366, 132872. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132872>

บรรณานุกรม(ต่อ)

- Quan, J., Zhao, S., Song, D., Wang, T., He, W., Li, G., 2022. Comparative life cycle assessment of LFP and NCM batteries including the secondary use and different recycling technologies. *Science of The Total Environment* 819, 153105.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153105>
- Schulz-Mönnhoff, M., Bey, N., Nørregaard, P.U., Niero, M., 2021. Integration of energy flow modelling in life cycle assessment of electric vehicle battery repurposing: Evaluation of multi-use cases and comparison of circular business models. *Resources, Conservation and Recycling* 174, 105773. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105773>
- Shu, X., Guo, Y., Yang, W., Wei, K., Zhu, G., 2021. Life-cycle assessment of the environmental impact of the batteries used in pure electric passenger cars. *Energy Reports* 7, 2302–2315. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.04.038>
- Silvestri, L., Forcina, A., Silvestri, C., Arcese, G., Falcone, D., 2024. Exploring the Environmental Benefits of an Open-Loop Circular Economy Strategy for Automotive Batteries in Industrial Applications. *Energies* 17. <https://doi.org/10.3390/en17071720>
- Sitcharangsie, S., 2022. A systematic literature review of the life cycle assessment of electric vehicle components with a second use, in: 2022 International Conference on Data Analytics for Business and Industry (ICDABI). Presented at the 2022 International Conference on Data Analytics for Business and Industry (ICDABI), pp. 223–227.
<https://doi.org/10.1109/ICDABI56818.2022.10041645>
- Spindlegger, A., Slotyuk, L., Jandric, A., De Souza, R.G., Prenner, S., Part, F., 2025. Environmental performance of second-life lithium-ion batteries repurposed from electric vehicles for household storage systems. *Sustainable Production and Consumption* 54, 227–240.
<https://doi.org/10.1016/j.spc.2025.01.003>
- Thailand’s Department of Alternative Energy Development and Efficiency (DEDE), 2024. Draft AEDP2024 Plan.

บรรณานุกรม(ต่อ)

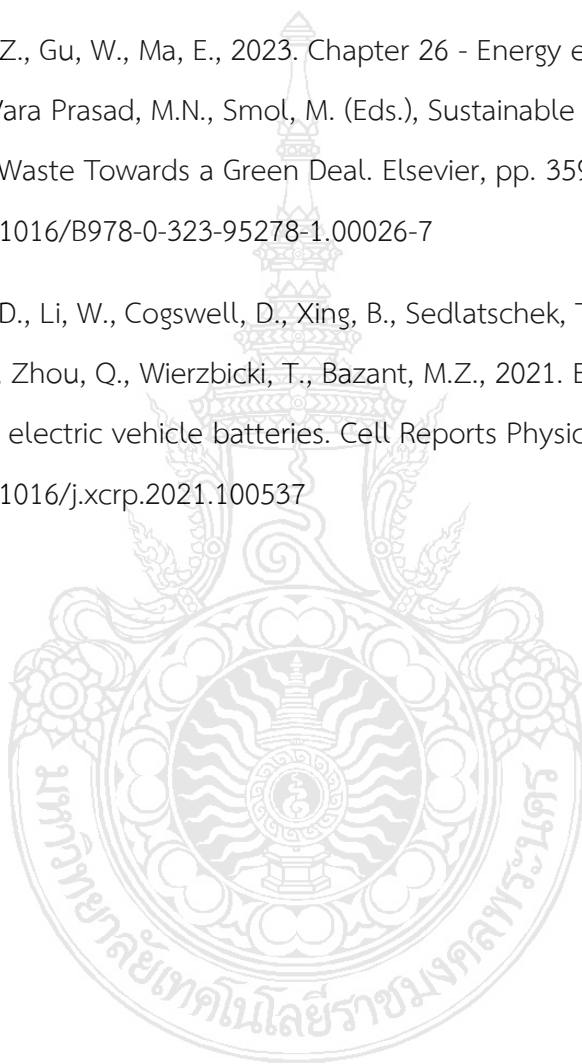
- Thailand's Ministry of Energy, 2020. Power Development Plan : PDP 2018 Revision 1. Available at: <https://www.egat.co.th/home/egat-development-plan/>
- UNDP, 2024. Everyone knows the world is getting hotter, but what is Thailand doing to address the problem? Let's take a closer look at the national action plan! Available at: <https://www.undp.org/stories-climate-master-plan-th>
- Vinci, G., Arangia, V.C., Ruggieri, R., Savastano, M., Ruggeri, M., 2024. Reuse of Lithium Iron Phosphate (LiFePO₄) Batteries from a Life Cycle Assessment Perspective: The Second-Life Case Study. *Energies* 17. <https://doi.org/10.3390/en17112544>
- Wang, Y., Tang, B., Shen, M., Wu, Y., Qu, S., Hu, Y., Feng, Y., 2022. Environmental impact assessment of second life and recycling for LiFePO₄ power batteries in China. *Journal of Environmental Management* 314, 115083. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115083>
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., Weidema, B., 2016. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 21, 1218–1230. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>
- Wilson, N., Meiklejohn, E., Overton, B., Robinson, F., Farjana, S.H., Li, W., Staines, J., 2021. A physical allocation method for comparative life cycle assessment: A case study of repurposing Australian electric vehicle batteries. *Resources, Conservation and Recycling* 174, 105759. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105759>
- Wrålsen, B., O'Born, R., 2023. Use of life cycle assessment to evaluate circular economy business models in the case of Li-ion battery remanufacturing. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 28, 554–565. <https://doi.org/10.1007/s11367-023-02154-0>

บรรณานุกรม(ต่อ)

Yang, H., Hu, X., Zhang, G., Dou, B., Cui, G., Yang, Q., Yan, X., 2024. Life cycle assessment of secondary use and physical recycling of lithium-ion batteries retired from electric vehicles in China. *Waste Management* 178, 168–175.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.02.034>

Zhang, X., Zong, Y., Chai, Z., Gu, W., Ma, E., 2023. Chapter 26 - Energy efficiency to improve sustainability, in: Vara Prasad, M.N., Smol, M. (Eds.), *Sustainable and Circular Management of Resources and Waste Towards a Green Deal*. Elsevier, pp. 359–386.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95278-1.00026-7>

Zhu, J., Mathews, I., Ren, D., Li, W., Cogswell, D., Xing, B., Sedlatschek, T., Kantareddy, S.N.R., Yi, M., Gao, T., Xia, Y., Zhou, Q., Wierzbicki, T., Bazant, M.Z., 2021. End-of-life or second-life options for retired electric vehicle batteries. *Cell Reports Physical Science* 2, 100537.
<https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2021.100537>



ประวัติผู้วิจัย

ข้อมูลหัวหน้าโครงการ

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย): สะคราญ สีชมรังษี

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ): Sakraan Sitcharangsie

2. หน่วยงาน และไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (e-mail)

- หน่วยงาน: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

- E-mail: sakraan.s@rmutp.ac.th

3. ประวัติการศึกษา

ระดับการศึกษา	คุณวุฒิและสถานศึกษา	ปีที่จบการศึกษา
ปริญญาเอก	Doctor of Philosophy (Design, Manufacturing and Engineering Management), University of Strathclyde	2563
ปริญญาโท	Master of Science (Advanced manufacturing: Technology and system) , University of Strathclyde	2559
ปริญญาโท	MBA (Global Entrepreneurship) (International Program), มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	2558
ปริญญาตรี	วศ.บ.(วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2554

4. สมรรถนะด้านการวิจัย

- ผลงานตีพิมพ์

ลำดับ	ชื่อบทความ	ชื่อวารสาร	ระดับชาติ/ นานาชาติ	ปีที่ตีพิมพ์
1	A systematic literature review of the life cycle assessment of electric vehicle components with a second use	2022 International Conference on Data Analytics for Business and Industry (ICDABI)	นานาชาติ	2566
2	Bi-objective optimisation of remanufacturing decisions with component commonality under different reworking scenarios	<i>International Journal of Computer Integrated Manufacturing</i>	นานาชาติ	2564
3	Decision makings in key remanufacturing activities to optimise remanufacturing outcomes: a review	<i>Journal of Cleaner Production</i>	นานาชาติ	2562
4	An investigation of the value recovery process in the automotive remanufacturing industry: an empirical approach	3rd International Conference on Remanufacturing, Linköping, Sweden, 24-26 October 2017	นานาชาติ	2561

ข้อมูลผู้ร่วมวิจัยคนที่ 1

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย): ผศ.ดร.สุวิทย์ แพงกันยา

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ): Dr.Suwit Paengkanya

2. หน่วยงาน และไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (e-mail)

- หน่วยงาน: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

- E-mail: suwit.p@rmutp.ac.th

3. ประวัติการศึกษา

ระดับการศึกษา	คุณวุฒิและสถานศึกษา	ปีที่จบการศึกษา
ปริญญาเอก	ปร.ด. (เทคโนโลยีพลังงาน) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	2558
ปริญญาโท	วศ.ม. (เทคโนโลยีพลังงาน) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	2553
ปริญญาตรี	วศ.บ. (วิศวกรรมพลังงาน) มหาวิทยาลัยรามคำแหง	2549

4. สมรรถนะด้านการวิจัย

- ผลงานตีพิมพ์

ลำดับ	ชื่อบทความ	ชื่อวารสาร	ระดับชาติ/ นานาชาติ	ปีที่ตีพิมพ์
1	Durian chips drying using combined microwave techniques with step-down microwave power input	Food and Bioproducts Processing	นานาชาติ	2019
2	Rehydration and textural properties of dried konjac noodles: Effect of alkaline and some gelling agents	Horticulturae	นานาชาติ	2016
3	Application of Microwaves for Drying of Durian Chips	Food and Bioproducts Processing	นานาชาติ	2015

4	การผลิตผักแต้ใหม่กรอบโดยการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน	วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา	ระดับชาติ	2564
5	ผลของระยะเวลาการลวกด้วยไมโครเวฟและอุณหภูมิฟัฟฟิงต่อเวลาการอบแห้งและคุณภาพของกล้วยกรอบ	วารสารเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสยาม	ระดับชาติ	2564
6	การศึกษาเปรียบเทียบผลของการลวกน้ำร้อนและการนึ่งต่อคุณภาพของกล้วยกรอบ	ASEAN Journal of Scientific and Technological Reports	ระดับชาติ	2564
7	การอบแห้งมะม่วงสุกด้วยเครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์แบบพีวีไฮบริดจ์	วารสารวิทยาศาสตร์ มข.	ระดับชาติ	2563
8	การผลิตทุเรียนแผ่นโดยการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับการย่างและลมร้อน	วารสารวิทยาศาสตร์ มข.	ระดับชาติ	2561
9	Effects of Ripening Level and Puffing Temperature on the drying time and quality characteristics of puffed Homtong Banana Slices	SNRU Journal of Science and Technology	ระดับชาติ	2018
10	การอบแห้งทุเรียนแผ่นด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้เทคนิคการปรับลดระดับกำลังไมโครเวฟ	วารสารวิทยาศาสตร์ มข. ฉบับบัณฑิตศึกษา	ระดับชาติ	2559