



การออกแบบและวิเคราะห์แม่พิมพ์โลหะเพื่อขึ้นรูปยางรันแฟลท
สำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคลโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
Design and Analysis of Metal Molds for Forming Run-flat Tires for
Passenger Cars Using the Finite Element Methodology

ประกาศิต ภูมิภักดิ์
Prakasit Poomipak

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร



การออกแบบและวิเคราะห์แม่พิมพ์โลหะเพื่อขึ้นรูปร่างรันแฟลท
สำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคลโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
Design and Analysis of Metal Molds for Forming Run-flat Tires for
Passenger Cars Using the Finite Element Methodology

ประกาศิต ภูมิภักดิ์
Prakasit Poomipak

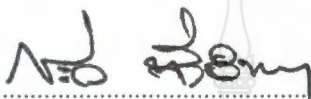
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

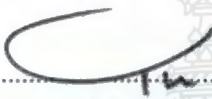
2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ชื่อวิทยานิพนธ์ การออกแบบและวิเคราะห์แม่พิมพ์โลหะเพื่อขึ้นรูปยางรันแพลทสำหรับ
รถยนต์นั่งส่วนบุคคลโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
ชื่อ นามสกุล ประกาศิต ภูมิภักดิ์
ชื่อปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
สาขาวิชา และคณะ วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.กฤษณ์ อภิญาวิศิษฐ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.ประกอบชาติภักดิ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ได้ให้ความเห็นชอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แล้ว


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำรรค)

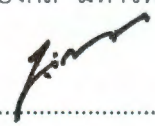

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่เรือตรี ดร.ทองวุฒิ มงคลเลิศมณี)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฎิภาณ ถิ่นพระบาท)


..... กรรมการ
(ดร.กฤษณ์ อภิญาวิศิษฐ์)


..... กรรมการ
(ดร.ประกอบ ชาติภักดิ์)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ พันธุ์นะ)

วันที่ 26 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2566

ชื่อวิทยานิพนธ์	การออกแบบและวิเคราะห์แม่พิมพ์โลหะเพื่อขึ้นรูปยางรันแพลทสำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคลโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
ชื่อ นามสกุล	ประกาศิต ภูมิภักดิ์
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
สาขาวิชา และคณะ	วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
ปีการศึกษา	2565

บทคัดย่อ

การออกแบบและวิเคราะห์แม่พิมพ์โลหะที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปวงล้อนिरภัยสำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคลโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน การกระจายตัวของความร้อน การสูญเสียความร้อนของแม่พิมพ์โลหะและวงล้อนिरภัย โดยใช้โปรแกรม SolidWorks ออกแบบขึ้นส่วนแม่พิมพ์และประกอบแม่พิมพ์เข้าด้วยกัน โดยเลือกใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม SolidWorks Simulation เพื่อสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับแม่พิมพ์โลหะและวงล้อนिरภัยสามมิติ ในกระบวนการอัดขึ้นรูปวงล้อนिरภัยรันแพลท แม่พิมพ์โลหะจะได้รับความร้อนที่ถูกส่งผ่านมาจากแท่นอัดที่มีการติดตั้งแท่งฮีตเตอร์อยู่ภายใน แม่พิมพ์ถูกออกแบบให้ทำงานภายใต้ความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงถึง 300 องศาเซลเซียส วัสดุ SKD11 เป็นวัสดุอีกชนิดหนึ่งที่มีสมบัติทางกลและสมบัติทางความร้อนที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเป็นแม่พิมพ์จึงถูกเลือกนำมาใช้ผลิตเป็นแม่พิมพ์โลหะและใช้ในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน แม่พิมพ์ยังได้รับการออกแบบให้สามารถวางโครงสร้างโลหะกันสนิมอยู่ภายในแม่พิมพ์เพื่อสร้างความแข็งแรงให้กับวงล้อนिरภัยรันแพลทและใช้ในการจับยึดวงล้อนिरภัยรันแพลทเข้าด้วยกัน ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงให้เห็นการถ่ายเทความร้อน การกระจายตัวของความร้อนและการสูญเสียความร้อนในแม่พิมพ์และวงล้อนिरภัย เมื่อความร้อนได้ถูกส่งผ่านจากแม่พิมพ์ไปยังผงพอลิเมอร์คอมโพสิตหรือเนื้อยางคอมโพสิตซึ่งถูกบรรจุอยู่ในแม่พิมพ์จะส่งผลให้เกิดการหลอมเหลวของผงพอลิเมอร์คอมโพสิตหรือเนื้อยางคอมโพสิต ผงพอลิเมอร์คอมโพสิตหรือเนื้อยางคอมโพสิตที่หลอมเหลวจะเข้าห่อหุ้มโครงเหล็กกันสนิมทำให้เกิดนวัตกรรมวงล้อนिरภัยที่มีความแข็งแรง นอกจากนี้ยังพบว่ามีการสูญเสียความร้อนที่ภายนอกแม่พิมพ์ซึ่งไม่ส่งผลต่อการกระจายตัวของความร้อนภายในแม่พิมพ์ ในการนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์จะต้องทำการหล่อเย็นแม่พิมพ์เพื่อลดอุณหภูมิเสียก่อนจึงจะสามารถนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ได้

คำสำคัญ: แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปร้อน, การถ่ายเทความร้อน, ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, วงล้อนिरภัย

Thesis Title	Design and Analysis of Metal Molds for Forming Run-flat Tires for Passenger Cars Using the Finite Element Methodology
Author	Prakasit Poomipak
Degree	Master of Engineering (Mechanical Engineering)
Major Program	Mechanical Engineering Faculty of Engineering
Academic Year	2022

ABSTRACT

The finite element method was implemented to design and analyze the metal molds used in forming processes of passenger car safety wheels. The objective is to analyze the heat transfer, heat dissipation, heat loss of the metal mold, and safety wheel by using the SolidWorks program to design mold parts and mold assembly. The finite element method was used to develop finite element models for metal molds and 3D safety wheels, particularly the SolidWorks Simulation program. The metal mold of run-flat safety wheels was heated during the extrusion process from a press with an internal heater. Molds were designed to function at temperatures up to 300°C. To create metal molds and conduct heat transfer studies, the SKD11 material, another substance with great mechanical and thermal properties for mold manufacturing was chosen. The mold was designed to place a rustproof metal structure inside the mold to strengthen the Run Flat Safety Wheel and to hold the Run Flat Safety Wheel together. The finite element analysis results showed heat transmission, heat distribution, and heat loss of the mold and safety wheel. The melting of the polymer composite powder or rubber composite occurred as a result of the heat being transferred from the mold to the polymer composite powder or rubber composite contained inside. The rust-proof steel structure would be covered with polymer composite powder or molten rubber composite. The strong, inventive, and resilient safety wheels would be constructed by encasing the rustproof steel frame in polymer composite powder or molten rubber composite. In addition, it was discovered that heat loss from the molds outside had no impact on how heat was distributed inside. Before the workpiece is taken from the mold, it must be cooled to lower its temperature.

Keywords: Mold for Heat Press Machine, Heat Transfer, Finite Element Methodology, Safety Wheel

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดีจากความอนุเคราะห์ ความเมตตากรุณาและความช่วยเหลือในทุกด้านจาก ดร.กฤษณ์ อภิญาวิศิษฐ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร.ประกอบชาติภักต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่ช่วยเหลือในด้านการออกแบบแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปและการวิเคราะห์ อาจารย์ทั้งสองท่านเป็นอาจารย์ผู้สอนและเป็นกรรมการคุมสอบวิทยานิพนธ์ ที่มอบความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ การแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ตลอดจนตรวจสอบวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงยิ่งไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำนรรค ผู้ซึ่งกรุณาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านให้ความรู้และการถ่ายทอดประสบการณ์ ตลอดจนตรวจสอบวิทยานิพนธ์ ให้คำแนะนำ ความรู้และความแนวความคิดในด้านต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อผู้เขียนอย่างมาก ขอขอบพระคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฎิภาณ ถิ่นพระบาท และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่เรือตรี ดร.ทรงวุฒิ มงคลเลิศมณี ซึ่งยังเป็นอาจารย์ผู้สอนที่ได้ถ่ายทอดความรู้ ประสบการณ์ที่หลากหลายที่น่าสนใจยิ่ง

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ อบรมสั่งสอน แนะนำ ตักเตือนผู้เขียนจนมีวันนี้

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร รวมถึงเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ อุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัยครั้งนี้ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา สมาชิกในครอบครัว บุคคลใกล้ชิดทั้งหลายที่คอยให้การส่งเสริม สนับสนุนต่างๆ ทั้งด้านทุนทรัพย์และกำลังใจเป็นแรงผลักดันผู้เขียนทั้งในด้านการเรียนและการดำเนินชีวิตมาโดยตลอด

ท้ายที่สุดนี้ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะมีประโยชน์สำหรับผู้อ่านต่อไป

ประกาศิต ภูมิภักดิ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	5
1.3 ขอบเขตการวิจัย	5
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	5
1.5 สถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและการทบทวนวรรณกรรม	
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	7
2.2 กรอบการวิจัย	28
2.3 การทบทวนวรรณกรรม	29
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	
3.1 ระเบียบวิธีวิจัย	47
3.2 การสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Pre-Processing)	49
3.3 กระบวนการคำนวณหรือวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Solve-Processing)	52
3.4 การแสดงผลการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Post-Processing)	52
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	
4.1 ผลการออกแบบแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปร้อนล้อนแพลทยางสำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคล	54
4.2 ผลการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนของแม่พิมพ์โลหะขึ้นรูปร้อนล้อนแพลทโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	56

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผล	59
5.2 ข้อเสนอแนะ	60
เอกสารอ้างอิง	61
ภาคผนวก ก บทความตีพิมพ์เผยแพร่และใบรับรองการนำเสนอ	64
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	78



สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

3.1 คุณสมบัติและค่าพารามิเตอร์ของวัสดุ SKD11 และ PE Composite

50



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 โครงสร้างภายในของยางธรรมชาติและยางรันแฟลท	2
1.2 ล้อรันแฟลทแบบ ก) Self-Supporting หรือ PAX System ข) Auxiliary supported หรือ Support ring system	3
1.3 ล้อรันแฟลทแบบ Self-Sealing	3
1.4 โมเดลล้อรันแฟลท 3 มิติ	4
1.5 แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปร้อนพลาสติก	4
2.1 ลักษณะความเค้นใน 3 มิติ	8
2.2 เอลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า	10
2.3 ลักษณะของการนำความร้อนใน 1 มิติ	14
2.4 ลักษณะของการนำความร้อนใน 2 มิติ	17
2.5 ลักษณะของการถ่ายเทความร้อนใน 1 มิติ	20
2.6 ลักษณะของการพาความร้อนที่ปลายเอลิเมนต์	23
2.7 ลักษณะของการถ่ายเทความร้อนใน 1 มิติ	24
2.8 กรอบการวิจัย	29
2.9 แบบจำลองควาวิตีของแม่พิมพ์งานฉีดขึ้นรูปพลาสติก	30
2.10 แบบจำลองโมเดลสามมิติ และการสร้างเมช	31
2.11 ผลของการฉีดขึ้นรูป	31
2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกล เวลา และอุณหภูมิที่ใช้ในการอบ	32
2.13 การตรวจสอบทางสัณฐานวิทยาของเมลามีนใหม่ที่ขึ้นรูปด้วยการอัดร้อนและอัดเย็น	32
2.14 ผลการวิเคราะห์การเสียรูปโดยโปรแกรม Moldex3D	34
2.15 แสดงการวิเคราะห์แบบ (a) Cooling Time และ (b) แบบ Shink Marks	34
2.16 การเปรียบเทียบระยะทางการไหลจากการเปลี่ยนแปลงความหนาของช่องทางการไหล	36
2.17 ตัวอย่างแสดงการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลกับปัจจัยการฉีดพลาสติก PP	37
2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยการฉีดขึ้นรูปกับค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น	37
2.19 ภาพขึ้นงานฉีดไม่เต็มแบบ	38
2.20 ภาพรอยยุบ	38
2.21 ภาพขึ้นงานติดในแม่พิมพ์	39

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.22	40
2.23	40
2.24	41
2.25	42
2.26	43
2.27	43
2.28	44
2.29	45
3.1	48
3.2	49
3.3	50
3.4	51
3.5	53
4.1	55
4.2	57
4.3	58
4.4	58
4.5	58

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันนี้รถยนต์เป็นยานพาหนะที่ได้รับความนิยมในการเดินทางบนท้องถนนเป็นอย่างมาก ซึ่งส่วนประกอบสำคัญที่ทำให้รถยนต์สามารถสัญจรบนท้องถนนได้อย่างราบลื่นนั้นส่วนหนึ่งคือล้อและยาง โดยยางมีหน้าที่ในการรับน้ำหนักตัวรถ ช่วยในการทรงตัว ยึดเกาะถนนและเพิ่มความปลอดภัยในการขับขี่ แต่ถ้าหากล้อยางเกิดปัญหาที่ไม่คาดคิดไม่ว่าจะเกิดจาก ยางแตก ยางรั่ว เหยียบตะปู หรือถูกลอบยิงก็จะทำให้รถยนต์นั้นไม่สามารถเดินทางต่อไปได้หรือถ้าหากฝืนขับต่อไปก็อาจจะทำให้เกิดความเสียหายต่อแก้มยางหรือกะทะล้อและอาจเกิดอุบัติเหตุร้ายแรงได้ จึงได้เกิดเทคโนโลยียางรันแฟลท (RFT) ขึ้นมาโดยยางรันแฟลทนี้เป็นหนึ่งในนวัตกรรมที่สามารถช่วยแก้ปัญหาของยางที่ประสบอุบัติเหตุยางรั่วหรือแบนให้รถยนต์ยังสามารถวิ่งต่อไปได้อีกแม้จะไม่มีลมยางแล้วก็ตาม โดยจะมีการเสริมลักษณะของแก้มยางให้เนื้อแก้มยางมีความแข็งแรงมากขึ้นเพื่อช่วยรองรับไม่ให้กะทะล้อรถยนต์เกิดการสัมผัสกับพื้นถนนอันเนื่องมาจากสูญเสียแรงดันลมยาง นำมาซึ่งความเสียหายของกะทะล้อแต่ยังคงมีแก้มยางที่หนาคอยช่วยรองรับน้ำหนักของตัวรถอยู่ รถยนต์ยังคงสามารถวิ่งต่อไปได้อีกประมาณ 80 กิโลเมตร ด้วยความเร็วไม่เกิน 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยที่รถยนต์จะยังไม่เสียการควบคุม ดังรูปที่ 1.1 แสดงโครงสร้างของยางธรรมดาเปรียบเทียบกับยางรันแฟลทในสภาพปกติกับสภาพเมื่อยางรั่ว [1] ล้อรันแฟลทอีกประเภทหนึ่งที่ได้รับความนิยมเช่นเดียวกันเป็นล้อรันแฟลทที่ใช้ในทางการทหาร เช่น รถหุ้มเกาะที่มีล้อยาง รถขนส่งเสบียง เป็นต้น ลักษณะของยานพาหนะแบบนี้กะทะล้อจะมีการเสริมในตัวของวงแหวนพลาสติกแข็งลงไปยึดติดเป็นวงรอบตัวกะทะล้อ ซึ่งล้อรันแฟลทประเภทนี้สามารถรองรับน้ำหนักจากตัวรถและไม่ทำให้กะทะล้อมีการสัมผัสกับพื้นถนนเมื่อยางสูญเสียแรงดัน ทำให้เป็นการป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นกับกะทะล้อและแก้มยางได้ ต่อมา มีการปรับปรุงโครงสร้างใหม่โดยเปลี่ยนไปใช้เหล็กแบบโปร่งแทนพลาสติก เนื่องจากมีน้ำหนักเบาและแข็งแรงกว่า

ในปัจจุบันรถยนต์ที่ต้องหยุดกลางคันเพราะว่ายางมีการเสื่อมสภาพขณะใช้งานนั้นแทบจะไม่มีให้เห็นเลย ยกเว้นจะเกิดจากลมรั่วหรือสูญเสียแรงดันลมยางเพราะถูกสิ่งแหลมคมทิ่มแทง ซึ่งเป็นเหตุสุดวิสัยที่จะป้องกันได้ วิธีแก้ปัญหาแบบดั้งเดิมที่ดีที่สุดเมื่อรถยนต์สูญเสียแรงดันลมยางทำให้รถยนต์นั้นไม่สามารถเดินทางต่อไปได้คือการหาที่จอดรถให้ปลอดภัยและทำการเปลี่ยนยางด้วยตนเอง ซึ่งการคลายนัทล้อก็ไม่ใช่เรื่องง่าย เนื่องจากนัทถูกขันด้วยแรงบิดที่สูงจากโรงงานจนแน่น อีกอย่างหากขาดเครื่องมือและทักษะแล้วยิ่งจะทำได้ยาก อีกทั้งยังต้องใช้แม่แรงประจํารถเพื่อทำให้ตัวรถสูงขึ้นแล้วจึงนำล้ออะไหล่มาเปลี่ยนใส่ จึงทำให้เกิดความยุ่งยากและเหน็ดเหนื่อยในการช่วยเหลือตนเอง ดังนั้นผู้ผลิตยางทั้งหลายจึงได้ทำการพัฒนายางรถยนต์เพื่อให้สามารถวิ่งอยู่ได้แม้จะไม่มีลมยาง

ลมยางอยู่เลยหรือเรียกได้ว่าสามารถขับได้ทั้งๆ ที่ยางแบน โดยมีหลักการทำงานที่สำคัญคือ เมื่อวิ่งอยู่บนถนนขอบยางจะต้องไม่หลุดออกจากกระทะล้อและแก้มยางที่พับงอขณะรถเคลื่อนที่ต้องไม่ชำรุด ยางรันแฟลทเป็นที่นิยมอย่างมากทั้งในผู้ผลิตรถยนต์และผู้ใช้งาน ผู้ผลิตที่ติดตั้งล้อยางรันแฟลทจะมีข้อดีคือไม่จำเป็นต้องเติมยางอะไหล่ให้กับลูกค้า ทำให้ต้นทุนในการผลิตลดลงและเมื่อไม่มีล้ออะไหล่แล้วทำให้พื้นที่ในการบรรทุกสัมภาระเพิ่มขึ้น เมื่อพื้นที่ในการเก็บล้ออะไหล่หายไปทำให้น้ำหนักของตัวรถหรือยานพาหนะนั้นลดลง ทำให้ช่วยลดความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงลงได้ แต่ยางประเภทรันแฟลทนั้นยังคงถูกใช้ในรถยนต์ที่มีราคาแพงเนื่องจากมีต้นทุนการผลิตที่สูง



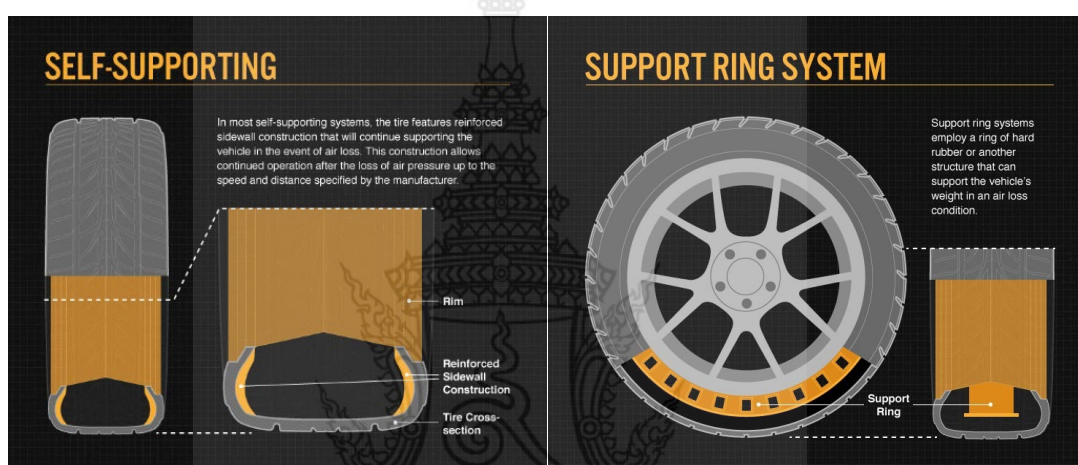
รูปที่ 1.1 โครงสร้างภายในของยางธรรมดาและยางรันแฟลท [1]

ยางรันแฟลทสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

1) แบบ Self-Supporting หรือ PAX System เป็นเทคโนโลยีที่ยางรันแฟลทในช่วงแรก ดังรูปที่ 1.2 ก) โดยในยางประเภทนี้ผู้ผลิตจะทำการเสริมความหนาของแก้มยางให้มากขึ้นกว่าปกติ เมื่อรถยนต์สูญเสียแรงดันลมยางไป ตัวแก้มยางที่หนานี้จะคอยพยุงและรับน้ำหนักของตัวรถยนต์ไว้ ทำให้กระทะล้อไม่เกิดการสัมผัสกับหน้ายางด้านใน ส่งผลให้สามารถควบคุมยานพาหนะต่อไปได้อีกด้วย ระยะทางที่จำกัดประมาณ 80 กิโลเมตรและทำความเร็วไม่เกิน 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยไม่ส่งผลให้เกิดความเสียหายกับกระทะล้อ ซึ่งเพียงพอสำหรับการหาร้านที่สามารถซ่อมหรือเปลี่ยนยางได้ [2]

2) แบบ Auxiliary-supported หรือ Support ring system ดังรูปที่ 1.2 ข) เป็นเทคโนโลยีที่มีการติดตั้งวงล้อนิรภัยรอบบริเวณกระทะล้อ ซึ่งอาจมีจำนวนวงล้อนิรภัย 2-3 ชั้น ทำการชันน็อตยึดวงล้อนิรภัยให้แน่นเพื่อไม่ให้เกิดการสั่นคลอน ในวงล้อนิรภัยจะมีโครงเหล็กกันสนิม ซึ่งเปรียบเสมือนกระดูกสันหลังของล้อนิรภัย ช่วยเพิ่มความแข็งแรง โดยเมื่อรถยนต์สูญเสียแรงดันลมยาง วงล้อนิรภัยนี้จะทำหน้าที่รองรับน้ำหนักของตัวรถต่อไป ทำให้รถยนต์ยังสามารถขับต่อไปได้และยังคอยป้องกันไม่ให้กระทะล้อมาสัมผัสกับหน้ายางด้านในเมื่อยางเกิดการท่หลุดตัว เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับกระทะล้อ โดยล้อรันแฟลทประเภทนี้นิยมใช้ในยานพาหนะทางการทหารหรือการบรรทุกหนัก ยกตัวอย่างเช่น รถหุ้มเกราะ รถบรรทุก รถที่ใช้ขนส่งผู้โดยสารระดับสูง [2]

3) แบบ Self-Sealing ดังรูปที่ 1.3 ยางรันแฟลทประเภทนี้เป็นยางรันแฟลทที่ไม่ได้มีการเสริมแก้มยางหรือเพิ่มวงล้อนิรภัยเข้ามาเพื่อช่วยรองรับน้ำหนักแต่อย่างใด แต่เป็นเทคโนโลยียางรันแฟลทที่อาศัยการเคลือบบริเวณใต้ดอกยางด้วยวัสดุประเภท Sealant หรือ Polymer ซึ่งเมื่อรถยนต์เหยียบเข้ากับตะปูหรือของแหลมคม เมื่อทำการดึงตะปูออกจากหน้ายาง วัสดุเคลือบ Sealant หรือ Polymer จะเคลื่อนที่เข้าไปแทนที่รอยร้าวและทำการซ่อมแซมด้วยตนเอง ยางรันแฟลทประเภทนี้ไม่มีการเพิ่มน้ำหนักของแก้มยางหรือวงล้อนิรภัยเข้ามาเหมือนประเภทของยางที่กล่าวมาก่อนหน้า ทำให้มีน้ำหนักที่เบาและยังไม่จำเป็นต้องสูญเสียแรงดันลมยางในการขับชิ่ง ทำให้ผู้ขับชิ่งสามารถขับชิ่งยานพาหนะต่อไปได้อย่างนิ่มนวล แต่ต้องแลกมาด้วยราคาของยางที่สูงขึ้น [3]



ก)

ข)

รูปที่ 1.2 ล้อรันแฟลท ก) แบบ Self-Supporting หรือ PAX System ข) แบบ Auxiliary-supported หรือ Support ring system [4]



รูปที่ 1.3 ล้อรันแฟลทแบบ Self-Sealing [2]

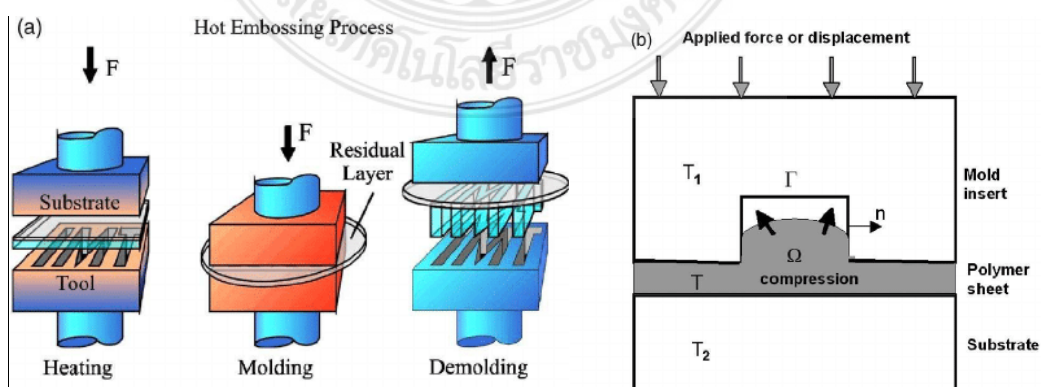
จากความสำคัญของงานวิจัยที่ดำเนินการผ่านมาโดยนุชนาถ ทองใหญ่ [5] ได้ทำการออกแบบแม่แบบล้อรันแฟลทโมเดล 3 มิติ สำหรับรถยนต์บรรทุกทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะ ดังรูปที่ 1.4 มีตัวแปรในการออกแบบคือ 1) ความกว้างที่เหมาะสมของล้อรันแฟลท 2) รัศมีภายในและภายนอก 3) วัสดุที่ใช้ในการสร้างล้อรันแฟลทและชุดอุปกรณ์การล้อค 4) น้ำหนักรถยนต์บรรทุกทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะ 2,500 กิโลกรัม 5) ขนาดล้ออัลลอย 7.5Jx17 นิ้ว 6) ยางเรเดียล 265/65 R17 7) ความดันลมยาง 8)

วงล้อรันแพลท โดยในขั้นตอนของการสร้างโมเดลได้ใช้เครื่องสแกนเลเซอร์ FARO Measurement FARO P06-05 เพื่อทำการสแกนสร้างพื้นผิวด้วยกระบวนการวิศวกรรมย้อนรอย ทำให้ได้โมเดลกะทะล้อขึ้นมาก่อนจะนำเข้าสู่โปรแกรม SolidWorks แล้วทำการออกแบบล้อรันแพลทเพื่อทำการประกอบเข้ากับกะทะล้อต่อไป โดยใช้วัสดุ UHMWPE Composite ในการวิเคราะห์ความเข้มของความเค้นที่เกิดขึ้น โดยใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 1.4 โมเดลล้อรันแพลท 3 มิติ [5]

ด้วยความสำคัญที่ต่อเนื่องตามมาโดยงานวิจัยของ งามพรรณ ชะโล [6] ได้ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติทางกลและความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของวัสดุโพลีเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด (UHMWPE) ผสมกับอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ที่ใช้ในการผลิตล้อรันแพลท เพื่อให้ทราบสภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสม โดยได้กำหนดตัวแปรในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนคือ แรงอัดขึ้นรูป อุณหภูมิและเวลา ผลที่ได้สภาวะการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะความดัน 5 MPa อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 90 นาที รวมถึงยังมีการกำหนดสัดส่วนในการผสมกันระหว่างวัสดุโพลีเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดเชิงประกอบและสารเติมแต่งอลูมิเนียมออกไซด์ ซึ่งสัดส่วนที่เหมาะสมคือ UHMWPE ผสมกับ Al_2O_3 เกรด HTM-30 ที่ 5% การทดสอบคุณสมบัติทางกลยังประกอบด้วย การทดสอบแรงกระแทก การทดสอบความแข็ง การทดสอบแรงดึง การทดสอบการสึกหรอ ค่าความเค้นที่จุดคราก ความต้านทานแรงดึงสูงสุด ค่าความร้อนจำเพาะ ค่าความแข็ง ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น



รูปที่ 1.5 แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปร้อนพลาสติก [4]

ในกระบวนการขึ้นรูปร้อนล้อนั้นสามารถใช้กระบวนการขึ้นรูปได้หลากหลายวิธี ยกตัวอย่าง เช่น การฉีดขึ้นรูปพลาสติก เป็นวิธีการที่สามารถผลิตชิ้นงานได้อย่างรวดเร็วและจำนวนมาก แต่เนื่องจากเป็นวิธีการที่ต้องใช้เครื่องจักรที่มีราคาสูงเกินไป ดังรูปที่ 1.5 [7] เป็นวิธีการขึ้นรูปพลาสติกแบบดั้งเดิมโดยผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการผลิตล้อนั้น แพลทได้เช่นกัน

ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้จึงได้ทำการออกแบบแม่พิมพ์ล้อนั้นแพลทสำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคล และวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนของแม่พิมพ์โลหะขึ้นรูปร้อนและวงล้อนั้นแพลทโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งเชื่อมโยงและต่อเนื่องจากงานวิจัยของนุชนาท ทองใหญ่ [5] และงามพรรณ ชะโล [6] โดยมุ่งหวังให้เห็นการสูญเสียความร้อนของแม่พิมพ์ไปยังสิ่งแวดล้อมรอบข้าง และการกระจายความร้อนภายในแม่พิมพ์และวงล้อนั้นแพลท และจะได้ต้นแบบโมเดลแม่พิมพ์ที่สามารถนำไปผลิตเป็นแม่พิมพ์ขึ้นรูปจริงได้ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อออกแบบแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปร้อนล้อนั้นแพลทสำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคล
- 1.2.2 เพื่อวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนของแม่พิมพ์โลหะขึ้นรูปร้อนล้อนั้นแพลทโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1.3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับแม่พิมพ์ คือวัสดุ SKD11
- 1.3.2 วิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Solidworks Simulation
- 1.3.3 การวิจัยเลือกวิธีการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เท่านั้น
- 1.3.4 วิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์โลหะขึ้นรูปร้อนและล้อนั้นแพลทเท่านั้น
- 1.3.5 ใช้โมเดลล้อนั้นแพลท 3 มิติ ของนุชนาท ทองใหญ่ [5] เพื่อออกแบบแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปร้อน
- 1.3.6 กำหนดวัสดุของชิ้นส่วนล้อนั้นแพลทเป็น UHMWPE Composite โดยอ้างอิงมาจากงานวิจัยของงามพรรณ ชะโล [6] ในการจำลองการถ่ายเทความร้อนเท่านั้น

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.4.1 ทราบพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนและความแข็งแรงของแม่พิมพ์โลหะอัดขึ้นรูปร้อนเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปร้อนของล้อนั้นแพลท
- 1.4.2 ได้รูปแบบโมเดล 3 มิติ แบบภาพฉาย และแบบสั่งผลิตของแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปร้อนของล้อนั้นแพลทสำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคล

- 1.4.3 ได้ผลงานวิจัยไปเผยแพร่ตีพิมพ์ลงวารสารหรืองานประชุมสัมมนาทางวิชาการ
- 1.4.4 ได้นวัตกรรมที่อาจจะสามารถนำไปจดทะเบียนทรัพย์สินทางปัญญาเป็นอนุสิทธิบัตรได้
- 1.4.5 ส่งเสริมความเข้มแข็งทางภาคอุตสาหกรรม

1.5 สถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
โทรศัพท์/โทรสาร: 0 2836 3000 ต่อ 4138 โทรศัพท์มือถือ: -



บทที่ 2

ทฤษฎีและการทบทวนวรรณกรรม

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [8], [9]

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) เป็นวิธีทางตัวเลข เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรม ไม่ว่าจะเป็นการวิเคราะห์ทางโครงสร้าง (Structural) หรืออื่น ๆ โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจะสามารถประมาณค่าผลเฉลยโดยการแก้สมการเชิงพีชคณิตแทนการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ ในการแก้ปัญหาดังกล่าว โครงสร้างหรือชิ้นงานจะถูกแบ่งออกเป็นชิ้นส่วนเล็ก ๆ (Element) ในจำนวนที่จำกัด (Finite) และผลเฉลยที่ได้จะเป็นคำตอบที่จุดต่อระหว่างเอลิเมนต์ (โหนด: Node) โดยที่แต่ละเอลิเมนต์จะมีผลเฉลยที่สามารถหาได้ง่าย และเมื่อนำมารวมกันจึงสามารถหาค่าผลเฉลยของทั้งโครงสร้างได้โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจะสามารถให้ผลเฉลยของค่าการเสียรูปและแรงที่กระทำ ณ จุดหรือโหนด และค่าความเค้นและความเครียดที่แต่ละเอลิเมนต์ได้ ความเครียดกับการเสียรูปและความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด เป็นสิ่งจำเป็นในการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ตัวอย่างปัญหาใน 1 มิติ ความสัมพันธ์ระหว่างการเสียรูปกับความเครียดเป็นดังนี้

$$\varepsilon_x = \frac{du}{dx} \quad (2.1)$$

ซึ่งเป็นสมการสำหรับปัญหาที่มีการเสียรูปน้อย (Small Displacement) และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดมีค่าเท่ากับ

$$\sigma_x = E\varepsilon_x \quad (2.2)$$

โดยที่ σ_x คือค่าความเค้นในแนวแกน x และ E คือ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ

$$[D] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ & & & & & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

เมื่อ $[D]$ คือ เมทริกซ์คุณสมบัติของวัสดุ

การหาสทิพเนสเมทริกซ์สำหรับเอลิเมนต์แบบสปริง เมื่อสปริงที่มีค่านิจของสปริง (Stiffness) เท่ากับ k รับแรงดึงเท่ากับ F สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำต่อชิ้นงานกับระยะสปริงยืดตัวได้ตามสมการที่ (2.4)

$$F=kx \quad (2.4)$$

เมื่อนำเอาหลักการของสปริงตามสมการที่ (2.4) มาประยุกต์ใช้กับหลักการไฟไนต์เอลิเมนต์ จะสามารถเขียนสมการที่ (2.5) ใหม่ในลักษณะของเมทริกซ์ได้เป็น

$$f'=k'd' \quad (2.5)$$

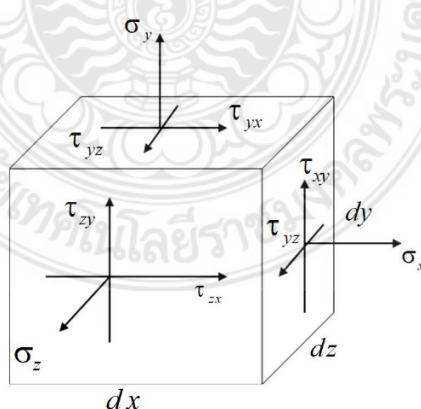
โดยที่ f' คือ เมทริกซ์ของแรงที่กระทำกับสปริง

k' คือ สทิพเนสเมทริกซ์ของสปริง

d' คือ เมทริกซ์ของระยะยืด/หดตัวของสปริง

ในการวิเคราะห์เอลิเมนต์ในระบบ 3 มิตินั้น เอลิเมนต์ประเภทนี้จะให้คำตอบมากกว่า เอลิเมนต์แบบ 2 มิติ หรือแบบแกนสมมาตร เอลิเมนต์แบบทรงสี่หน้า (Tetrahedral) เป็นเอลิเมนต์เบื้องต้นสำหรับ 3 มิติ ในส่วนนี้จะยกตัวอย่างจากหนังสือไฟไนต์เอลิเมนต์เบื้องต้น โดยผู้แต่ง รศ.ดร. ธงชัย ฟองสมุทร หน้า 175-180

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดใน 3 มิติ ตามรูปที่ 2.1 คือลักษณะของความเค้นที่เกิดขึ้นในเอลิเมนต์แบบ 3 มิติ และเมื่อพิจารณาตามหลักการสมดุล (Equilibrium) จะได้ว่า



รูปที่ 2.1 ลักษณะความเค้นใน 3 มิติ [8], [9]

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} \quad \tau_{zx} = \tau_{xz} \quad (2.6)$$

ดังนั้นจะมีความเค้นเฉือนแค่ 3 ตัวเท่ากันที่ต้องพิจารณารวมกับความเค้นตั้งฉากจะได้เป็น

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} \quad (2.7)$$

และความเค้นที่เกิดขึ้นในเอลิเมนต์จะมีดังนี้

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (2.8)$$

โดยที่

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = \gamma_{yx}, \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} = \gamma_{zy}, \quad \gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} = \gamma_{xz} \quad (2.9)$$

และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเท่ากับ

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (2.10)$$

โดยที่

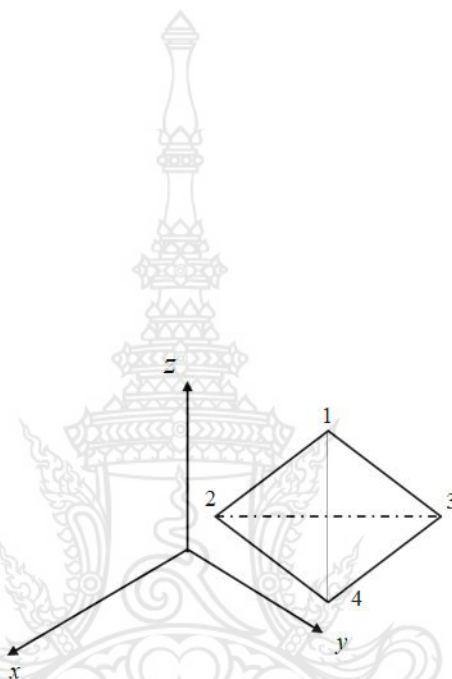
$$[D] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ & & & & & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

การหาสทิงเฟนสมเทริกซ์สำหรับเอลิเมนต์แบบทรงสี่หน้า

ขั้นตอนที่ 1 เลือกประเภทของเอลิเมนต์

พิจารณาเอลิเมนต์ 3 มิติแบบสี่หน้า (Tetrahedral) ดังรูปที่ 2.2 โดยที่ 1 เอลิเมนต์ประกอบด้วย 4 โหนด แต่ละโหนดมีระดับความเสรี (Degree of Freedom) เท่ากับ 3 และเมทริกซ์สำหรับการเสียรูปเท่ากับ

$$d = \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ \vdots \\ u_4 \\ v_4 \\ w_4 \end{Bmatrix} \quad (2.12)$$



รูปที่ 2.2 เอลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า [8]-[9]

ขั้นตอนที่ 2 เลือกฟังก์ชันของการเสียรูป

กำหนดให้การเสียรูปทั้งหมดยังอยู่ในช่วงของการยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic) อยู่ดังนั้นจะสามารถเขียนฟังก์ชันของการเสียรูป (u , v และ w) ในแต่ละแนวได้ดังนี้

$$\begin{aligned} u(x,y,z) &= a_1 + a_2x + a_3y + a_4z \\ v(x,y,z) &= a_5 + a_6x + a_7y + a_8z \\ w(x,y,z) &= a_9 + a_{10}x + a_{11}y + a_{12}z \end{aligned} \quad (2.13)$$

เป็นฟังก์ชันของการเสียรูปของ u , v และ w โดยที่ในการวิเคราะห์นั้นสามารถทำได้เหมือนกับกรณีของเอลิเมนต์สามเหลี่ยมจะได้ว่า

$$u(x,y,z) = \frac{1}{6v} \left\{ (\alpha_1 + \beta_1x + \gamma_1y + \delta_1z)u_1 + (\alpha_2 + \beta_2x + \gamma_2y + \delta_2z)u_2 \right. \\ \left. + (\alpha_3 + \beta_3x + \gamma_3y + \delta_3z)u_3 + (\alpha_4 + \beta_4x + \gamma_4y + \delta_4z)u_4 \right\} \quad (2.14)$$

โดยที่

$$6v = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad (2.15)$$

$$\alpha_1 = \begin{vmatrix} x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \\ x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad \beta_1 = \begin{vmatrix} 1 & y_2 & z_2 \\ 1 & y_3 & z_3 \\ 1 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad \gamma_1 = \begin{vmatrix} 1 & x_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad \delta_1 = \begin{vmatrix} 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \\ 1 & x_4 & y_4 \end{vmatrix} \quad (2.16)$$

$$\alpha_2 = - \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_3 & y_3 & z_3 \\ x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad \beta_2 = \begin{vmatrix} 1 & y_1 & z_1 \\ 1 & y_3 & z_3 \\ 1 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad \gamma_2 = - \begin{vmatrix} 1 & x_1 & z_1 \\ 1 & x_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad \delta_2 = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_3 & y_3 \\ 1 & x_4 & y_4 \end{vmatrix} \quad (2.17)$$

$$\alpha_3 = \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad \beta_3 = - \begin{vmatrix} 1 & y_1 & z_1 \\ 1 & y_2 & z_2 \\ 1 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad \gamma_3 = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & z_2 \\ 1 & x_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad \delta_3 = - \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_4 & y_4 \end{vmatrix} \quad (2.18)$$

$$\alpha_4 = - \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{vmatrix} \quad \beta_4 = \begin{vmatrix} 1 & y_1 & z_1 \\ 1 & y_2 & z_2 \\ 1 & y_3 & z_3 \end{vmatrix} \quad \gamma_4 = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & z_3 \end{vmatrix} \quad \delta_4 = - \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix} \quad (2.19)$$

สามารถที่จะเขียนรูปของเมทริกซ์สำหรับฟังก์ชันการเสียรูปเท่ากับ

$$\begin{pmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{v} \\ \mathbf{w} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ w_2 \\ u_3 \\ v_3 \\ w_3 \\ u_4 \\ v_4 \\ w_4 \end{pmatrix} \quad (2.20)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{(\alpha_1 + \beta_1 x + \gamma_1 y + \delta_1 z)}{6V} & N_2 &= \frac{(\alpha_2 + \beta_2 x + \gamma_2 y + \delta_2 z)}{6V} \\ N_3 &= \frac{(\alpha_3 + \beta_3 x + \gamma_3 y + \delta_3 z)}{6V} & N_4 &= \frac{(\alpha_4 + \beta_4 x + \gamma_4 y + \delta_4 z)}{6V} \end{aligned} \quad (2.21)$$

ขั้นตอนที่ 3 ระบุความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการเสียรูป และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดกับการเสียรูป ได้ว่า

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \end{Bmatrix} \quad (2.22)$$

หรือ

$$\{\varepsilon\} = [B]\{d\} \quad (2.23)$$

โดยที่

$$[B] = \begin{bmatrix} \underline{B}_1 & \underline{B}_2 & \underline{B}_3 & \underline{B}_4 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

และ

$$B_1 = \begin{bmatrix} N_{1,x} & 0 & 0 \\ 0 & N_{1,y} & 0 \\ 0 & 0 & N_{1,z} \\ N_{1,y} & N_{1,x} & 0 \\ 0 & N_{1,z} & N_{1,y} \\ N_{1,z} & 0 & N_{1,x} \end{bmatrix} = \frac{1}{6V} \begin{bmatrix} \beta_1 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_1 & 0 \\ 0 & 0 & \delta_1 \\ \gamma_1 & \beta_1 & 0 \\ 0 & \delta_1 & \gamma_1 \\ \delta_1 & 0 & \beta_1 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

และสำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

$$\{\sigma\} = [D]\{\epsilon\} \quad (2.26)$$

และ

$$\{\sigma\} = [D][B]\{d\} \quad (2.27)$$

ขั้นตอนที่ 4 หาสมการสทริกซ์และสมการสทิฟเนส
เมื่อพิจารณาในรูปของสมการ $F = Kd$ จะได้ว่า

$$[K] = \iiint_V [B]^T [D][B] dV \quad (2.28)$$

ในกรณีที่เป็นเอลิเมนต์แบบทรงสี่หน้า (Tetrahedron) จะมีค่าคงที่ ดังนี้

$$[K] = V [B]^T [D][B] \quad (2.29)$$

ผลจากน้ำหนัก (Body Force)

$$\{f_b\} = \iiint_V [N]^T \{X\} dV \quad (2.30)$$

โดยที่

$$\{X\} = \begin{Bmatrix} X_b \\ Y_b \\ Z_b \end{Bmatrix} \quad (2.31)$$

ผลจากแรงที่ผิว (Surface Force) จาก

$$\{f_s\} = \iint_S [N]^T \{T\} dS \quad (2.32)$$

โดยที่

$$\{T\} = \begin{Bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{Bmatrix} \quad (2.33)$$

2.1.2 การถ่ายเทความร้อน [8], [9]

สมการการถ่ายเทความร้อนจากการนำความร้อน (Conduction) ใน 1 มิติ โดยยังไม่รวมผลของการพาความร้อน (Convection) เริ่มต้นจากรูปที่ 2.3 แสดงถึงลักษณะของการนำความร้อนใน 1 มิติ โดยที่ตามหลักการคงตัวของพลังงาน จะได้ว่า

$$E_{in} + E_{generated} = \Delta U + E_{out} \quad (2.34)$$

หรือ

$$q_x A dt + Q A dx dt = \Delta U + q_{x+dx} A dt \quad (2.35)$$

โดยที่

E_{in} คือ พลังงานที่เข้าสู่ปริมาตรควบคุม (Control Volume) ในหน่วยของ Joules (J) หรือ kWh หรือ Btu

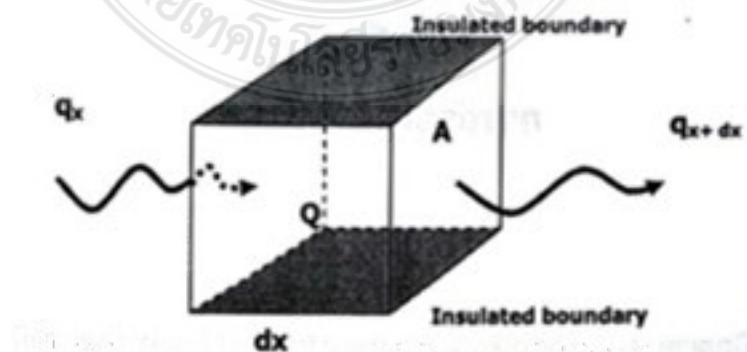
ΔU คือ ปริมาณการเปลี่ยนแปลงของพลังงานที่เก็บอยู่ภายใน มีหน่วยเป็น kWh หรือ Btu

q_x คือ ปริมาณความร้อนที่ไหลเข้ามาจากการนำความร้อนผ่านผนังด้านหนึ่ง (Heat Flux) ณ ตำแหน่ง x ใดๆ มีหน่วยเป็น kW/m^2 หรือ $\text{Btu}/(\text{h}\cdot\text{ft}^2)$

q_{x+dx} คือ ปริมาณความร้อนที่ไหลออกโดยการนำความร้อนผ่านผนังอีกด้านหนึ่ง (Heat Flux) ณ ตำแหน่ง $x+dx$ ใดๆ มีหน่วยเป็น kW/m^2 หรือ $\text{Btu}/(\text{h}\cdot\text{ft}^2)$

Q คือ ค่าความร้อนภายในที่เกิดขึ้น (Heat Source) ต่อเวลาต่อปริมาตร มีหน่วยเป็น kW/m^3 หรือ $\text{Btu}/(\text{h}\cdot\text{ft}^3)$ และสำหรับกรณีที่เป็น Heat Sink ก็จะมีค่าเป็นลบ

A คือ ค่าพื้นที่หน้าตัดด้านที่ตั้งฉากกับการไหลของความร้อน มีหน่วยเป็น m^2 หรือ ft^2



รูปที่ 2.3 ลักษณะของการนำความร้อนใน 1 มิติ

จากสมการของการนำความร้อน

$$q_x = -K_{xx} \frac{dT}{dx} \quad (2.36)$$

โดยที่

K_{xx} คือ ค่าความสามารถในการนำความร้อน (Thermal Conductivity) ในแนวแกน x มีหน่วยเป็น KW/(m °C) หรือ Btu/(h-ft-°F)

T คือ อุณหภูมิ มีหน่วยเป็น °C หรือ °F

dT/dx คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่อความยาว มีหน่วยเป็น °C/m หรือ °F/ft

และเหมือนกับสมการที่ (2.36) จะได้ว่า

$$q_{x+dx} = -K_{xx} \frac{dT}{dx} \Big|_{x+dx} \quad (2.37)$$

ด้วยวิธีของ Taylor เสนอไว้ว่า

$$f_{x+dx} = f_x + \frac{df}{dx} dx + \frac{d^2 f}{dx^2} dx^2 + \dots \quad (2.38)$$

ซึ่งจะทำให้ได้คำตอบว่า

$$q_{x+dx} = - \left[K_{xx} \frac{dT}{dx} + \frac{d}{dx} \left(K_{xx} \frac{dT}{dx} \right) dx \right] \quad (2.39)$$

สำหรับค่าพลังงานที่ถูกเก็บไว้ภายในนั้นสามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$\Delta U = c(\rho A dx) dT \quad (2.40)$$

โดยที่

c คือ ค่าความร้อนจำเพาะ มีหน่วยเป็น KWh/(Kg °C) หรือ Btu(slug °F)

ρ คือ ความหนาแน่น มีหน่วยเป็น kg/m³ หรือ slug/ft³

เมื่อนำค่าทั้งหมดแทนลงในสมการที่ (2.35) จะได้เป็น

$$-K_{xx} A dt + Q A dx dt = c \rho A dx dT - \left[K_{xx} \frac{dT}{dx} + \frac{d}{dx} \left(K_{xx} \frac{dT}{dx} \right) dx \right] A dt$$

$$Qdt = c\rho dT - \frac{d}{dx} \left(K_{xx} \frac{dT}{dx} \right) dt$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.41)$$

ในกรณีที่เป็นสภาวะคงที่ (Steady State) เวลาจะไม่มีผล ซึ่งจะทำให้เทอมทางขวามีค่าเท่าศูนย์ และสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + Q = 0 \quad (2.42)$$

และกำหนดให้ค่าความสามารถในการนำความร้อนมีค่าคงที่จะได้ว่า

$$K_{xx} \frac{d^2 T}{dx^2} + Q = 0 \quad (2.43)$$

และถ้ากำหนดว่าสภาวะที่ขอบคือ

$$T = T_B \text{ on } S_1 \quad (2.44)$$

โดยที่ T_B คือค่าอุณหภูมิที่ทราบค่าที่ผิว S_1 และ

$$q_x^* = -K_{xx} \frac{dT}{dx} = \text{const on } S_2 \quad (2.45)$$

โดยที่ S_2 คือผิวที่มีการไหลของความร้อน q_x^*

การนำความร้อนใน 2 มิติ (ไม่รวมการพาความร้อน)

พิจารณารูปที่ 2.4 แสดงถึงการนำความร้อนใน 2 มิติ การพิจารณาเหมือนกับกรณีของ 1 มิติ และในกรณีเป็นสภาวะคงที่ (Steady State) จะได้ว่า

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q = 0 \quad (2.46)$$

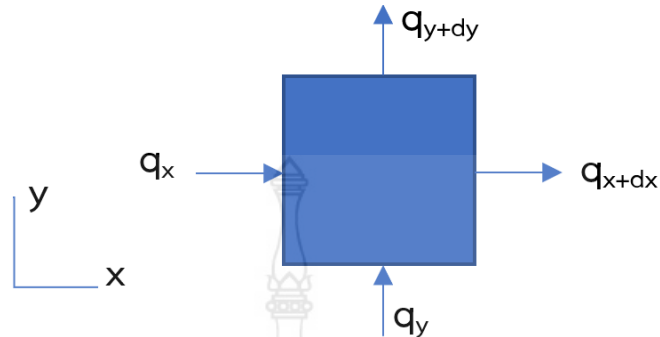
และถ้ากำหนดว่าสภาวะที่ขอบคือ

$$T = T_B \text{ on } S_1 \quad (2.47)$$

โดยที่ T_B คือค่าอุณหภูมิที่ทราบค่าที่ผิว S_1 และ

$$K_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} C_x + K_{yy} \frac{\partial T}{\partial y} C_y = \text{constant on } S_2 \quad (2.48)$$

โดยที่ C_x และ C_y คือค่าทิศทางโคไซน์ (Direction Cosine)



รูปที่ 2.4 ลักษณะของการนำความร้อนใน 2 มิติ [8], [9]

การถ่ายเทความร้อนรวมกับการพาความร้อน [8]

เมื่อวัตถุมีการสัมผัสกับของเหลวหรือของไหลต่างๆ ซึ่งจะทำให้การพาความร้อน ทั้งนี้จะมีการพาความร้อนทั้งแบบที่เป็นการพาความร้อนตามธรรมชาติหรือแบบบังคับ (Natural Convection and Forced Convection) การรวมผลของการพาเข้าไปจะทำให้สมการที่ (2.35) เขียนได้ใหม่เป็น

$$-K_{xx} \frac{dT}{dx} A dx + Q A dx = \rho c A dx \frac{dT}{dt} - \left[K_{xx} \frac{dT}{dx} + \frac{d}{dx} \left(K_{xx} \frac{dT}{dx} \right) dx \right] A dx + h(T - T_\infty) P dx \quad (2.49)$$

โดยที่เทอมของค่าการพาความร้อนจะได้ว่า

$$q_x = \frac{hP}{A} (T - T_\infty) \quad (2.50)$$

โดยที่

h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน มีหน่วยเป็น $\text{kW}/(\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$ หรือ $\text{Btu}/(\text{h}\text{-ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F})$

T คือ อุณหภูมิของผิววัตถุที่สัมผัสกับของไหล

T_∞ คือ อุณหภูมิของของไหล

P คือ ค่าเส้นรอบวงของพื้นที่หน้าตัด A

จากนั้นนำสมการที่ (2.49) ทหารด้วย $A dx dT$ จะได้ว่า

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{hP}{A} (T - T_\infty) \quad (2.51)$$

สมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับปัญหาการถ่ายเทความร้อน การแก้ปัญหานี้ในเรื่องของการถ่ายเทความร้อนในที่นี่จะได้ใช้วิธีการแปรผัน โดยเริ่มจากการมาพลังงานศักย์รวมของระบบที่เกิดจากการถ่ายเทความร้อนได้เท่ากับ

$$\Pi_p = U + \Omega_b + \Omega_s + \Omega_p \quad (2.52)$$

โดยที่

$$U = \iiint_v \left[K_{xx} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + K_{yy} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 \right] dV \quad (2.53)$$

$$\Omega_Q = - \iiint_v Q T dV \quad (2.54)$$

$$\Omega_q = - \iint_{S_2} q T dS \quad (2.55)$$

$$\Omega_h = \frac{1}{2} \iint_{S_3} h (T - T_\infty)^2 dS \quad (2.56)$$

ขั้นตอนที่ 1 เลือกประเภทของเอลิเมนต์โดยพิจารณาเอลิเมนต์ 2 มิติแบบสามเหลี่ยม (Triangle)

ขั้นตอนที่ 2 เลือกฟังก์ชันของอุณหภูมิ ในการเลือกฟังก์ชันของอุณหภูมิในแต่ละเอลิเมนต์ในเทอมของฟังก์ชันรูปร่างและค่าอุณหภูมิที่โหนด t เท่ากับ

$$\{T\} = [N] \{t\} \quad (2.57)$$

และ

$$d = \begin{Bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ \vdots \\ t_i \end{Bmatrix} \quad (2.58)$$

ขั้นตอนที่ 3 ระบุความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับอุณหภูมิ และ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการถ่ายเทความร้อนและการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ เมทริกซ์สำหรับแสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสามารถเขียนได้เป็น

$$\{g\} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \end{Bmatrix} \quad (2.59)$$

และค่าความร้อนต่อพื้นที่เท่ากับ

$$\begin{Bmatrix} q_x \\ q_y \end{Bmatrix} = -[D]\{g\} \quad (2.60)$$

โดยที่

$$[D] = \begin{pmatrix} K_{xx} & 0 \\ 0 & K_{xx} \end{pmatrix} \quad (2.61)$$

ขั้นตอนที่ 4 หาเมทริกซ์และสมการของการนำความร้อนของเอลิเมนต์

จากสมการที่ (2.57) ถึงสมการที่ (2.61) ลงในสมการที่ (2.53) ถึงสมการที่ (2.56) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \Pi_p = & \frac{1}{2} \iiint_V [\{g\}^T [D] \{g\}] dV - \iiint_V [\{t\}^T [N]^T] Q dV - \iint_{S_2} [\{t\}^T [N]^T] q dS \\ & + \frac{1}{2} \iint_{S_3} h \left[(\{t\}^T [N]^T - T_\infty)^2 \right] dS \end{aligned} \quad (2.62)$$

และเมื่อแทนสมการที่ (2.57) ลงในสมการที่ (2.59) และสมการที่ (2.60) จะได้ว่า

$$\{g\} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \dots & \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \dots & \frac{\partial N_i}{\partial y} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ \vdots \\ t_i \end{Bmatrix} \quad (2.63)$$

หรือ

$$\{g\} = [B]\{t\} \quad (2.64)$$

ทำให้เขียนสมการที่ (2.62) ใหม่ได้เป็น

$$\begin{aligned} \Pi_p = & \frac{1}{2} \{t\}^T \iiint_V [B]^T [D] [B] dV \{t\} - \{t\}^T \iiint_V [N]^T Q dV - \{t\}^T \iint_{S_2} [N]^T q^* dS \\ & + \frac{1}{2} \iint_{S_3} h \left[\{t\}^T [N]^T [N] \{t\} - (\{t\}^T [N]^T + [N] \{t\}) T_\infty + T_\infty^2 \right] dS \end{aligned} \quad (2.65)$$

จากหลักการของค่าต่ำสุดของสมการที่ (2.65) แล้วให้เท่ากับศูนย์ แล้วจะได้ว่า

$$\left[\iiint_V [B]^T [D] [B] dV + \iint_{S_3} h [N]^T [N] dS \right] \{t\} = \{f_o\} + \{f_q\} + \{f_h\} \quad (2.66)$$

โดยที่

$$\begin{aligned}\{f_Q\} &= \iiint_V [N]^T Q dV \\ \{f_q\} &= \iint_{S_2} [N]^T q dS\end{aligned}\quad (2.67)$$

$$\{f_h\} = \iint_{S_3} [N]^T h T_\infty dS$$

ดังนั้นจากสมการ

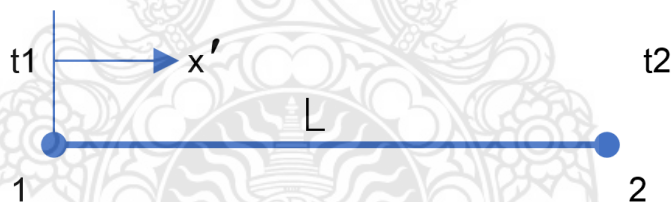
$$[k]\{t\} = \{f\} \quad (2.68)$$

จะได้ว่า

$$[k] = \iiint_V [B]^T [D][B] dV + \iint_{S_3} h [N]^T [N] dS \quad (2.69)$$

สมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการถ่ายเทความร้อน 1 มิติ [8], [9]

ทำการหาสมการสำหรับไฟไนต์เอลิเมนต์ใน 1 มิติ ของปัญหาการถ่ายเทความร้อน
ขั้นตอนที่ 1 เลือกประเภทของเอลิเมนต์ พิจารณาเอลิเมนต์แบบ 1 มิติ ประกอบด้วย 2 โหนดดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ลักษณะของการถ่ายเทความร้อนใน 1 มิติ

ขั้นตอนที่ 2 เลือกฟังก์ชันของอุณหภูมิ
ฟังก์ชันของอุณหภูมิของเอลิเมนต์สามารถเขียนได้เป็น

$$T = N_1 t_1 + N_2 t_2 \quad (2.70)$$

โดยที่

$$N_1 = 1 - \frac{x'}{L} \quad N_2 = \frac{x'}{L} \quad (2.71)$$

และสามารถเขียนอยู่ในรูปของเมทริกซ์ได้ว่า

$$[N] = \begin{bmatrix} 1 - \frac{x'}{L} & \frac{x'}{L} \end{bmatrix} \quad (2.72)$$

ขั้นตอนที่ 3 ระบุความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับอุณหภูมิ และ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการถ่ายเทความร้อนและการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเมทริกซ์สำหรับแสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสามารถเขียนได้เป็น

$$\{g\} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \end{Bmatrix} = [B]\{t\} \quad (2.73)$$

โดยที่

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{dN_1}{dx'} & \frac{dN_2}{dx'} \end{bmatrix} \quad (2.74)$$

เท่ากับ

$$[B] = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \quad (2.75)$$

และจากค่าความร้อนต่อพื้นที่เท่ากับ

$$\begin{Bmatrix} q_x \\ q_y \end{Bmatrix} = [D]\{g\} \quad (2.76)$$

โดยที่

$$[D] = [K_{xx}] \quad (2.77)$$

ขั้นตอนที่ 4 หาเมทริกซ์และสมการของการนำความร้อนของเอลิเมนต์จากสมการของการนำความร้อนเท่ากับ

$$[k] = \iiint_V [B]^T [D] [B] dV + \iint_{S_3} h [N]^T [N] dS \quad (2.78)$$

โดยที่

$$[k_c] = \iiint_V [B]^T [D][B] dV = \int_0^L \left\{ \begin{array}{c} -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{L} \end{array} \right\} [K_{xx}] \left[\begin{array}{cc} -\frac{1}{L} & \frac{1}{L} \end{array} \right] A dx \quad (2.79)$$

เท่ากับ

$$[k_c] = \frac{AK_{xx}}{L^2} \int_0^L \left[\begin{array}{cc} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{array} \right] dx \quad (2.80)$$

และสุดท้าย

$$[k_c] = \frac{AK_{xx}}{L} \left[\begin{array}{cc} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{array} \right] \quad (2.81)$$

สำหรับส่วนของการหาความร้อนจะได้ว่า

$$[k_h] = \iint_{S_3} h [N]^T [N] dS \quad (2.82)$$

โดยที่

$$[k_h] = \iint_{S_3} h [N]^T [N] dS = hP \int_0^L \left\{ \begin{array}{c} 1 - \frac{x'}{L} \\ \frac{x'}{L} \end{array} \right\} \left[\begin{array}{cc} 1 - \frac{x'}{L} & \frac{x'}{L} \end{array} \right] dx' \quad (2.83)$$

$$[k_h] = \frac{hPL}{6} \left[\begin{array}{cc} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{array} \right] \quad (2.84)$$

โดยที่

$$dS = P dx' \quad (2.85)$$

เมื่อรวมสมการที่ (2.81) และสมการที่ (2.84) จะได้ว่า

$$[k] = [k_c] + [k_h] \quad (2.86)$$

$$[k_h] = \frac{K_{xx}A}{L} \left[\begin{array}{cc} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{array} \right] + \frac{hPL}{6} \left[\begin{array}{cc} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{array} \right] \quad (2.87)$$

สำหรับเมทริกซ์ของค่าความร้อน จากสมการที่ (2.67) จะได้ว่า

$$\{f_Q\} = \iiint_V [N]^T Q dV = QA \int_0^L \begin{Bmatrix} 1 - \frac{x}{L} \\ \frac{x}{L} \end{Bmatrix} dx = QA \begin{Bmatrix} \frac{L}{2} \\ \frac{L}{2} \end{Bmatrix} = \frac{QAL}{2} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix}$$

$$\{f_q\} = \iint_{S_2} [N]^T q dS = qP \int_0^L [N]^T dx = \frac{qPL}{2} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (2.88)$$

$$\{f_h\} = \iint_{S_3} [N]^T hT_\infty dS = hT_\infty P \int_0^L [N]^T dx = \frac{hT_\infty PL}{2} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix}$$

รวมสมการที่ (2.88) จะได้ว่า

$$\{f\} = [QA + qP + hT_\infty P] \frac{L}{2} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (2.89)$$

สุดท้ายพิจารณาปลายของเอลิเมนต์ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งจะเป็นการหาค่าการพาความร้อนที่ปลายของเอลิเมนต์จะมีค่าเท่ากับ

$$[k_h]_{end} = \iint_{S_3} h [N]^T [N] dS \quad (2.90)$$

โดยที่

$$[k_h]_{end} = \iint_{S_3} h [N]^T [N] dS = hP \int_0^L \begin{Bmatrix} 0 \\ 1 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 & 1 \end{Bmatrix} dx' \quad (2.91)$$

$$[k_h]_{end} = hA \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.92)$$

และขนาดของความร้อนที่ถ่ายเทที่ปลายจะมีค่าเท่ากับ

$$\{f_h\} = hT_\infty P \int_0^L [N]^T dx = hT_\infty A \begin{Bmatrix} 0 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (2.93)$$

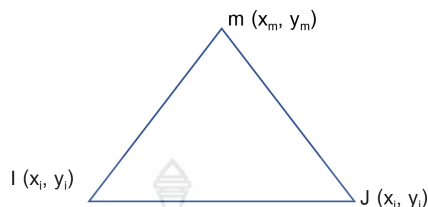


รูปที่ 2.6 ลักษณะของการพาความร้อนที่ปลายเอลิเมนต์

สมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการถ่ายเทความร้อน 2 มิติ ในหัวข้อนี้จะทำการหาสมการสำหรับไฟไนต์เอลิเมนต์ใน 2 มิติ สำหรับปัญหาการถ่ายเทความร้อน

ขั้นตอนที่ 1 เลือกประเภทของเอลิเมนต์

พิจารณาเอลิเมนต์แบบ 2 มิติเป็นเอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยมซึ่งประกอบด้วย 3 โหนด ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ลักษณะของการถ่ายเทความร้อนใน 1 มิติ

ขั้นตอนที่ 2 เลือกฟังก์ชันของอุณหภูมิ

ฟังก์ชันของอุณหภูมิของเอลิเมนต์สามารถเขียนได้เป็น

$$\{T\} = [N_i \quad N_j \quad N_k] \begin{Bmatrix} t_i \\ t_j \\ t_k \end{Bmatrix} \quad (2.94)$$

โดยที่

$$N_i = \frac{1}{2A}(\alpha_i + \beta_i x + \gamma_i y) \quad (2.95)$$

ขั้นตอนที่ 3 ระบุความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับอุณหภูมิ และความสัมพันธ์ระหว่างค่าการถ่ายเทความร้อนและการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ เมทริกซ์สำหรับแสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสามารถเขียนได้เป็น

$$\{g\} = [B]\{t\} \quad (2.96)$$

โดยที่

$$[B] = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} \beta_i & \beta_j & \beta_m \\ \gamma_i & \gamma_j & \gamma_m \end{bmatrix} \quad (2.97)$$

และจากค่าความร้อนต่อพื้นที่เท่ากับ

$$\begin{Bmatrix} q_x \\ q_y \end{Bmatrix} = -[D]\{g\} \quad (2.98)$$

โดยที่

$$[D] = \begin{bmatrix} K_{xx} & 0 \\ 0 & K_{yy} \end{bmatrix} \quad (2.99)$$

ขั้นตอนที่ 4 หาเมทริกซ์และสมการของการนำความร้อนของเอลิเมนต์

จากสมการของการนำความร้อนเท่ากับ

$$[k] = \iiint_V [B]^T [D] [B] dV + \iint_{S_3} h [N]^T [N] ds \quad (2.100)$$

โดยที่

$$[k_c] = \iiint_V [B]^T [D] [B] dV = \iiint_V \frac{1}{4A^2} \begin{bmatrix} \beta_i & \gamma_i \\ \beta_j & \gamma_j \\ \beta_m & \gamma_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{xx} & 0 \\ 0 & K_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_i & \beta_j & \beta_m \\ \gamma_i & \gamma_j & \gamma_m \end{bmatrix} dV \quad (2.101)$$

และถ้าความหนาคงที่จะได้เท่ากับ

$$[k_c] = \left(\frac{1}{4A^2} \right) \iiint_V [B]^T [D] [B] dV = \left(\frac{1}{4A^2} \right) tA [B]^T [D] [B] \quad (2.102)$$

สำหรับส่วนของการพาความร้อนจะได้ว่า

$$[k_h] = \iint_{S_3} h [N]^T [N] ds \quad (2.103)$$

โดยที่

$$[k_h] = \iint_{S_3} h [N]^T [N] ds = h \iint_S \begin{bmatrix} N_i N_i & N_i N_j & N_i N_m \\ N_j N_i & N_j N_j & N_j N_m \\ N_m N_i & N_m N_j & N_m N_m \end{bmatrix} dS \quad (2.104)$$

$$[k_h] = \frac{hL_{i-j}t}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.105)$$

โดยที่ L_{i-j} คือความยาวของด้าน $i-j$

สำหรับเมทริกซ์ของความร้อน จากสมการที่ (2.67) จะได้ว่า

$$[f_Q] = \iiint_V [N]^T Q dA = QA \iiint_V [N]^T dV = \frac{QV}{3} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (2.106)$$

และ

$$[f_q] = \iint_{S_2} [N]^T q dS = qP \int_0^L [N]^T dx = \frac{qL_{i-j}t}{2} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \text{ for } i-j \text{ side} \quad (2.107)$$

$$[f_q] = \frac{qL_{j-m}t}{2} \begin{Bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \text{ for } i-m \text{ side} \quad (2.108)$$

$$[f_q] = \frac{qL_{m-i}t}{2} \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix} \text{ for } m-i \text{ side} \quad (2.109)$$

และสำหรับการพาความร้อน จากสมการที่มีคือ

$$[f_h] = \iint_{S_3} [N]^T hT_\infty dS \quad (2.110)$$

2.1.3 Solidworks and Solidworks Simulation Software

การวิเคราะห์ความเสียหายของชิ้นงานในงานวิศวกรรม (Solidworks Simulation) กล่าวคือ โปรแกรม Finite Element Analysis (FEA) ที่สร้างขึ้นในอินเทอร์เน็ตเพช Solidworks CAD เป็นการจำลองและช่วยให้วิศวกรและนักออกแบบสำหรับการทดสอบการออกแบบอย่างรวดเร็วและทำซ้ำได้ง่าย การใช้โปรแกรมแก้ปัญหา FEA ที่ได้รับการตรวจสอบโดย NAFEMS ทำให้ Solidworks Simulation สามารถให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำและเชื่อถือได้สำหรับประเภทการศึกษาที่หลากหลาย ตั้งแต่การวิเคราะห์สถิติเชิงเส้นพื้นฐานไปจนถึงการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นและไดนามิกที่ซับซ้อนยิ่งขึ้น เร่งความเร็วขั้นตอนการทำซ้ำและการสร้างต้นแบบของกระบวนการออกแบบด้วย Solidworks Simulation ให้ผลลัพธ์ความแม่นยำและความน่าเชื่อถือได้ โดยมีหน่วยงานแห่งชาติทดสอบสำหรับวิธีการและมาตรฐานไฟไนต์เอลิเมนต์ (NAFEMS) ทดสอบโปรแกรมจำลองสถานการณ์กับการศึกษาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ทราบซึ่งได้รับการตรวจสอบทางคณิตศาสตร์และเชิงประจักษ์แล้ว การศึกษาทุกประเภทที่มีอยู่ใน SolidWorks Simulation ได้รับการทดสอบและตรวจสอบโดย NAFEMS การวิเคราะห์ที่หลากหลายประกอบด้วย

1. Linear Stress Analysis คือ การคำนวณความเค้นและการเสียรูปของชิ้นส่วนและส่วนประกอบอันเนื่องมาจากโหลดภายในและภายนอกเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพและความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์ในขณะที่คุณออกแบบ
2. การเพิ่มประสิทธิภาพโครงสร้าง (Structural Optimization) คือการปรับการออกแบบให้เหมาะสมเพื่อให้สอดคล้องกับประสิทธิภาพความแข็งแรงต่อน้ำหนัก ความถี่ หรือความแข็งแรงที่กำหนดไว้

3. การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน (Vibration Analysis) เป็นการตรวจสอบว่าโหมดสั่น มีความเสถียร สามารถลดอายุอุปกรณ์เพื่อขจัดความล้มเหลวได้อย่างไร
4. การวิเคราะห์การโก่งตัว (Buckling Analysis) เป็นการตรวจสอบความแข็งแรงในการโก่งงอของการออกแบบที่มีและไม่มีภาระด้านสิ่งแวดล้อม เพื่อให้แน่ใจว่าตรงตามข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ในด้านความแข็งแรง ประสิทธิภาพ และความปลอดภัย
5. การวิเคราะห์การโก่งตัว (Buckling Analysis) เป็นการตรวจสอบความแข็งแรงในการโก่งงอของการออกแบบที่มีและไม่มีภาระด้านสิ่งแวดล้อม เพื่อให้แน่ใจว่าตรงตามข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ในด้านความแข็งแรง ประสิทธิภาพ และความปลอดภัย
6. Finite Element Analysis (FEA) ใช้การวิเคราะห์องค์ประกอบไฟไนต์เพื่อคำนวณความเค้นและการกระจัดของชิ้นส่วนและส่วนประกอบภายใต้โหลดภายในและภายนอก
7. การวิเคราะห์ความล้า Fatigue Analysis คือ คาดการณ์ความล้มเหลวของส่วนประกอบโดยการตรวจสอบรอบการโหลดซ้ำหรือสุ่ม
8. การวิเคราะห์เชิงความร้อน (Thermal Analysis) คือ คำนวณอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนภายในและระหว่างส่วนประกอบ
9. การวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Analysis) คือ การวิเคราะห์ความเค้นและการเสียรูปของรูปทรงภายใต้สภาวะการรับน้ำหนักและวัสดุทั่วไป
10. การวิเคราะห์ความถี่ (Frequency Analysis) เป็นการระบุเงื่อนไขขอบเขตและทำให้แน่ใจว่าโหมดการสั่นสะเทือนตามธรรมชาติอยู่ห่างจากความถี่ที่บังคับจากสิ่งแวดล้อม
11. การวิเคราะห์แบบไดนามิก (Dynamic Analysis) คือ กำหนดผลกระทบของเวลาที่โหลดต่างกันต่อการตอบสนองเชิงโครงสร้างสำหรับการออกแบบ
12. การวิเคราะห์ชิ้นส่วนพลาสติกและยาง (Plastic and Rubber Part Analysis) เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการเลือกวัสดุสำหรับส่วนประกอบพลาสติกและยาง หรือส่วนประกอบที่มีชิ้นส่วนพลาสติกหรือยาง

2.1.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

ขั้นตอนที่ 1 (Pre-Processing)

เตรียมข้อมูลเบื้องต้นของแบบจำลองก่อนการวิเคราะห์ เป็นการกำหนดและการสร้างแบบจำลองที่จะทำการวิเคราะห์ โดยแบบจำลองที่กำหนดจะประกอบด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และกำหนดสภาวะขอบเขต จากนั้นจึงเริ่มดำเนินการสร้างแบบจำลองบนโปรแกรม CAD ชนิดต่าง ๆ ซึ่งอาจแบ่งขั้นตอนย่อย ๆ ได้เป็นดังนี้ การป้อนข้อมูลตัวแปรของรูปทรงเรขาคณิตแบบจำลอง เช่น ตำแหน่งพิกัดของโหนด เส้น พื้นผิว และปริมาตรของแข็ง กำหนดชนิดของเอลิเมนต์ ความถี่หรือการกำหนดข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับสมบัติของวัสดุ เช่น ค่าโมดูลัสของยัง ความหนาแน่นวัสดุ

สัมประสิทธิ์ความเสียหายเป็นต้น สภาวะที่กระทำต่อวัสดุ เช่น ตำแหน่ง ขนาดและทิศทางของสิ่ง
ที่มากระทำต่อวัสดุ ซึ่งอาจจะเป็นแรงหรือความดัน [9]

ขั้นตอนที่ 2 (Solve-Processing)

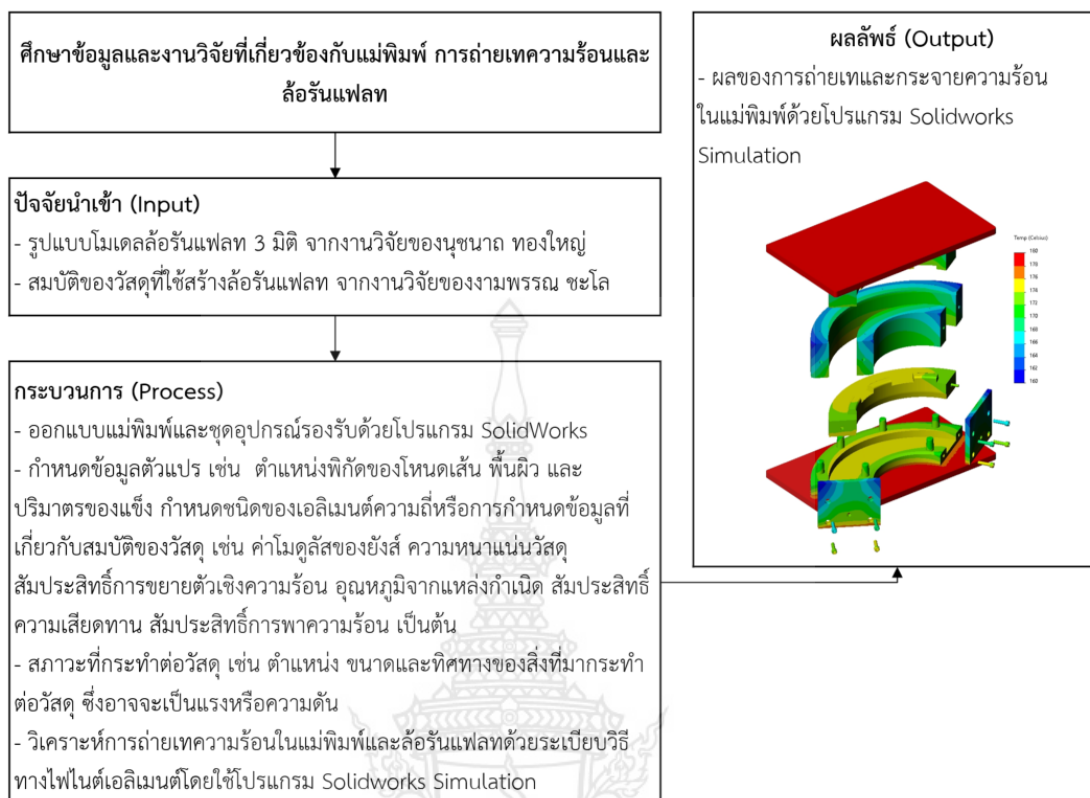
การวิเคราะห์แบบจำลองโดยการคำนวณบนคอมพิวเตอร์เพื่อทำการวิเคราะห์หรือจำลอง
พฤติกรรมตามธรรมชาติของระบบที่ต้องการ ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยความรู้และการเลือกใช้กฎทางฟิสิกส์
ที่สอดคล้องกัน เช่น จำลองการไหลแบบ Newtonian หรือ Non-newtonian ของไหลเป็นของไหล
ที่อัดตัวได้หรืออัดตัวไม่ได้ (Compressible or Incompressible Fluid) การไหลเป็นแบบ Lamina
หรือ Turbulent ปัญหาที่มีลักษณะเป็นแบบยืดหยุ่นก็ควรเลือกเป็นแบบ Elasticity หรือปัญหาที่มี
ลักษณะเปลี่ยนรูปถาวรก็ควรเลือกแบบ Plasticity เป็นต้น หลังจากวิเคราะห์แบบจำลองแล้วขั้นตอน
การพิจารณาผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น [9]

ขั้นตอนที่ 3 (Post-Processing)

หลังจากการวิเคราะห์ผลการจำลองจะมีลักษณะเป็นค่าตัวเลขของแต่ละจุดหรือโหนด
(Node) ค่าสมบัติของแต่ละเอลิเมนต์ (Element) ซึ่งจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์ผลลัพธ์และการจัด
แสดงในลักษณะที่เข้าใจง่ายเพื่อให้เกิดประโยชน์ต่อไป โดยทั่วไปแล้วสำหรับโปรแกรมคอมพิวเตอร์เชิง
พาณิชย์จะมีความสามารถแสดงผลแบบกราฟิกสามมิติผ่านหน้าจอ เช่น แสดงกราฟิกและค่าของ
โหนดที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมแสดงภาพกราฟิกและค่าของความเค้นในแต่ละเอลิเมนต์และโหนด
แสดงภาพกราฟของโครงข่ายที่บิดไปหลังจากถูกแรงมากระทำหรือแสดงภาพการเคลื่อนไหวของเอลิ
เมนต์หลังจากถูกแรงมากระทำ [9]

2.2 กรอบการวิจัย

สำหรับกรอบการวิจัย (Conceptual Framework) จะเป็นการวางแนวความคิดของ
กระบวนการการวิจัย ที่ต้องกล่าวถึงตัวแปรต้นและตัวแปรตามต่าง ๆ ที่ใช้ในแต่ละกรอบ จะต้องม
ความสัมพันธ์กันและกันซึ่งจะต้องสอดคล้องกับระเบียบวิธีวิจัยบนพื้นฐานของทฤษฎีต่าง ๆ มุ่งเน้นไป
ที่รูปแบบตามระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังนั้นจึงต้องมีขั้นตอนการเตรียมโมเดล 3 มิติ ของ
แม่พิมพ์ ชนิดของวัสดุที่ใช้สร้างแม่พิมพ์ สมบัติของวัสดุที่เป็นแม่พิมพ์และสมบัติของ UHMWPE
Composite การสร้าง Mesh Method และพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองต่าง ๆ (Pre-Processing)
เมื่อผ่านขั้นตอนเตรียมทำการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ที่มีสมรรถนะสูงวิเคราะห์กราฟเพื่อตรวจสอบ
ความถูกต้องและความคลาดเคลื่อน (Solve-Processing) หลังจากคอมพิวเตอร์คำนวณเสร็จ
เรียบร้อยแล้วแสดงผลการวิเคราะห์ต่าง ๆ เช่น การถ่ายเทความร้อน การกระจายตัวของความร้อน
ระยะเวลาในการถ่ายเทความร้อน การเย็นตัว อัตราการสูญเสียความร้อนที่ออกจากแม่พิมพ์อัดขึ้นรูป
พลาสติก (Post-Processing) โดยมีแนวคิดดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 กรอบการวิจัย

2.3 การทบทวนวรรณกรรม

รวีวัฒน์ รักสัจ และ ชาคริต สุวรรณจำรัส [10] ได้ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของยางล้อแบบไร้ลม โดยอ้างอิงตามสมการเชิงโครงสร้างวิโคไฮเปอร์อีลาสติกเพื่อใช้ในการทำนายการสูญเสียฮีสเตอร์ซีสของยางล้อไร้ลม มีการทดสอบการผ่อนคลายความเค้น (Relaxation Test) เพื่อศึกษาอิทธิพลของสมบัติวิโคไฮลาสติกบนชิ้นงานทดสอบ (Specimen) ที่เตรียมจากซีล้อยางล้อไร้ลม การพัฒนาตามแบบจำลองวิโคไฮเปอร์อีลาสติกถูกนำไปใช้กำหนดให้กับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของยางล้อไร้ลมเพื่อศึกษาการเกิดการสูญเสียฮีสเตอร์ซีสและนอกจากนี้ยังนำไปใช้ในการออกแบบยางล้อไร้ลม ผลสรุป จากการศึกษาการวิเคราะห์แบบจำลองวิโคไฮลาสติกนี้แสดงให้เห็นว่าสามารถนำมาใช้จำลองอิทธิพลของสมบัติวิโคไฮลาสติกในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบขึ้นกับเวลาได้

ศุภชัย ดวงทองพล [11] กล่าวว่า กระบวนการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปพลาสติกเริ่มต้นจากการออกแบบชิ้นงาน การเลือกวัสดุ ราคาต้นทุน ผลกำไรและปริมาณของชิ้นงาน เมื่อผ่านขั้นตอนเหล่านี้แล้วจึงสร้างแม่พิมพ์ การสร้างแม่พิมพ์โดยมีการวิเคราะห์รูปร่างชิ้นงาน การกำหนดค่าอัตราส่วนการหดตัว(Shrinkage Ratio) การกำหนด Core และคาวิตตี้ (Cavity) ของแม่พิมพ์การกำหนดทางเข้า (Gate) การกำหนดทางวิ่งน้ำพลาสติก (Runner) การออกแบบ Insert การออกแบบ

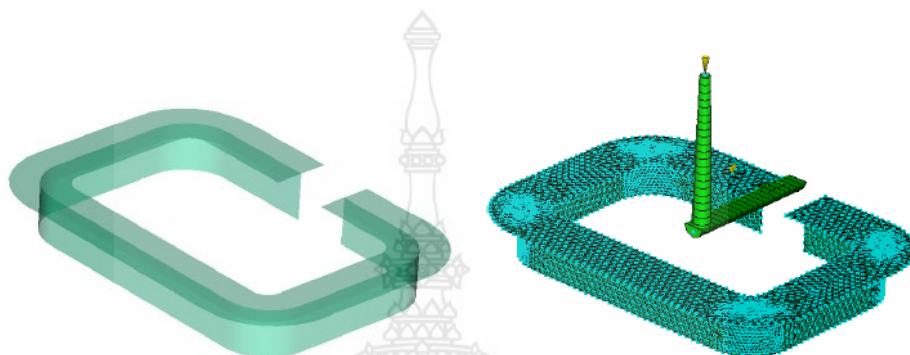
ระบบถอดชิ้นงาน และการออกแบบระบบหล่อเย็น เมื่อออกแบบแม่พิมพ์แล้ว ชิ้นส่วนของแม่พิมพ์จะ
 ได้ถูกผลิตโดยใช้วิธีการต่างๆ ซึ่งทำให้เสียเวลาในการทำงานและเสียทรัพยากรโดยไม่จำเป็น จึงใช้
 Computer Aided Engineering: CAE ผสานร่วมกับ (Computer Aided Design: CAD) ที่มุ่งเน้นไป
 ที่การวิจัยกระบวนการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานพลาสติกด้วยวิธีการผสาน CAD/CAE ด้วยการจำลอง 3 มิติ ดัง
 รูปที่ 2.9 วิเคราะห์การไหลของน้ำพลาสติกในแม่พิมพ์ที่มีรูปร่างและสภาวะการฉีดที่แตกต่างกัน จาก
 แบบจำลองแม่พิมพ์ที่ได้จากการออกแบบด้วยซอฟต์แวร์ TopSolid Mold ใช้พลาสติก
 Polyoxymethylene ในการฉีดขึ้นงาน มีความหนาแน่นหลอมเหลว (Melt Density) 1.16 กรัมต่อ
 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีอัตราการไหล (Melt Flow) 21 กรัมต่อนาที ทั้งนี้ ตัวแปรสำคัญที่เกี่ยวกับการ
 การฉีดขึ้นรูปที่ควรพิจารณาได้แก่ อุณหภูมิหลอมเหลว (Melt Temperature) อุณหภูมิผนังแม่พิมพ์
 (Wall Temperature) อุณหภูมิการฉีด (Ejection Temperature) แรงดันที่ควบคุมการฉีดเข้า
 แม่พิมพ์ (Pressure Control Filling) การควบคุมแหล่งความร้อน (Heater Setup) ตำแหน่งการปรับ
 การไหล (Position Screw Setup) แรงดันฉีดสูงสุด (Maximum Pressure) ช่วงเวลาการฉีด (Filling
 Time) ช่วงเวลาการรวมตัว (Packing Time) และช่วงเวลาการเย็นตัวลง (Cooling Time) ทั้งนี้เมื่อ
 นำแม่พิมพ์มาผลิตขึ้นจริงตามแบบจำลองและได้ทำการฉีดขึ้นงานพลาสติกลงในแม่พิมพ์ ได้ทำการ
 เปรียบเทียบพฤติกรรมของการไหลของน้ำพลาสติกเข้าสู่แม่พิมพ์โดยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ช่วยงาน
 วิศวกรรม TopSolid PlasticFlow และชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการฉีดขึ้นรูปจริง เมื่อเปรียบเทียบ
 ความแตกต่างระหว่างชิ้นงานพลาสติกจริงและชิ้นงานพลาสติกจำลอง ดังรูปที่ 2.10 พบว่ายังมีค่า
 ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 5.02 % ซึ่งยอมรับได้ การใช้วิธีผสาน CAD/CAE ยังสามารถลดเวลาใน
 การออกแบบแม่พิมพ์ลงได้ถึง 3 วัน



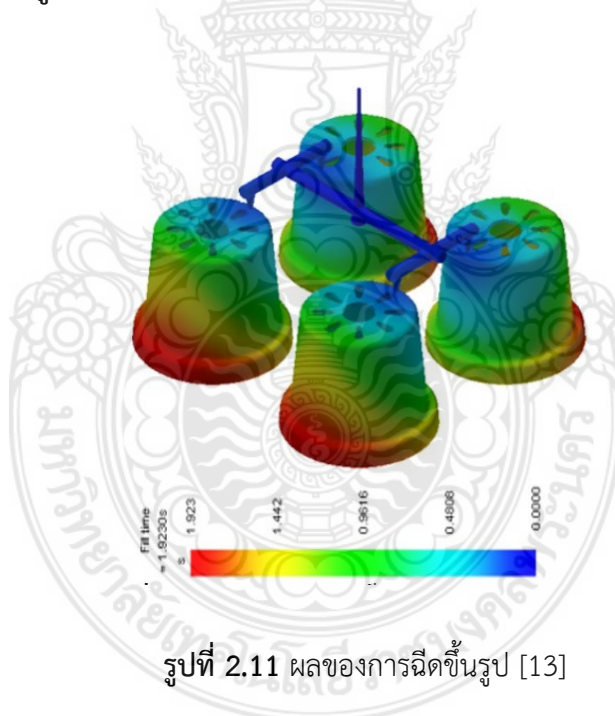
รูปที่ 2.9 แบบจำลองค่าวิถีของแม่พิมพ์งานฉีดขึ้นงานพลาสติก [11]

ชาติ ตระการกุล และคณะ [12] ได้มีการนำโปรแกรม Computer Aided Engineering:
 CAE เข้ามาในการช่วยออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกแบบใช้ก๊าซช่วยฉีด ดังรูปที่ 2.10 และเพื่อใช้
 วิเคราะห์การไหลของพลาสติกในแม่พิมพ์ ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในฉีดด้วย
 การใช้ก๊าซช่วยฉีดตลอดจนนำไปใช้ในการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ฉีด ซึ่งได้มีการวิเคราะห์การ
 จำลองการไหลตัวของพลาสติกและการเติมก๊าซด้วยโปรแกรม MoldFlow โดยงานวิจัยนี้สามารถ
 นำไปใช้ประโยชน์สำหรับการแก้ปัญหาหรือยุบตัว และการเสียรูปจากการโก่งตัวของแม่พิมพ์

นอกจากนี้ ความสำคัญของเทคโนโลยี CAE ยังช่วยในการหาค่าตัวแปรซึ่งมีผลกระทบต่อจนวนเงื่อนไขต่างๆ ที่เหมาะสมสำหรับการทำกรณีศึกษาเข้าไปในเป้าหมายเพื่อลดเวลาในการทดลองและเป็นแนวทางในการหาเงื่อนไขการฉีดที่เหมาะสมสำหรับแม่พิมพ์แบบใช้ก๊าซช่วยฉีด ซึ่งจะแตกต่างจากแม่พิมพ์ฉีดทั่วไป ซึ่งผลงานวิจัยยังระบุว่าสามารถลดปริมาณการใช้พลาสติกได้ถึง ร้อยละ 20-30 เมื่อเทียบกับน้ำหนักของชิ้นงาน



รูปที่ 2.10 แบบจำลองโมเดลสามมิติ และการสร้างเมช [12]

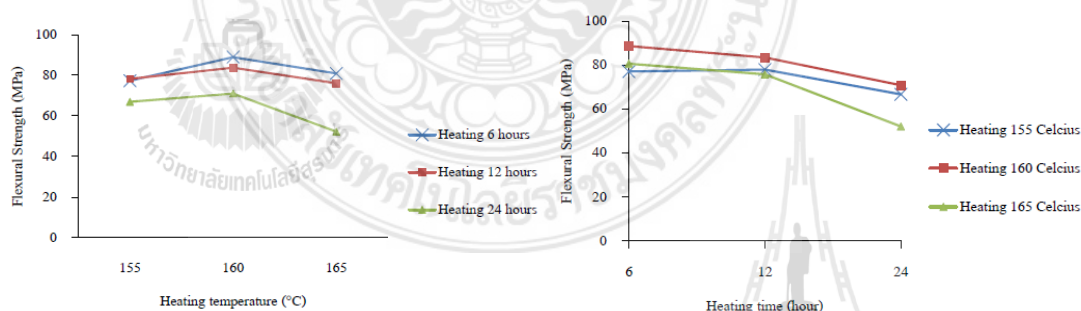


รูปที่ 2.11 ผลของการฉีดขึ้นรูป [13]

ผลงานวิจัยของ ระบุทธิ์ หล้าอมรชัยกุล และวรภุช ดอนคำเพ็ง [13] ได้ศึกษาและออกแบบกระบวนการผลิตกระถางต้นไม้ของเล่นโดยใช้เทคนิคทางด้าน CAD/CAM/CAE งานวิจัยนี้ได้แบ่งรูปแบบการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน คือ 1) การออกแบบชิ้นส่วนแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก 2) การจำลองกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติก 3) การจำลองกระบวนการกัดขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องจักร จากผลลัพธ์ของการศึกษาพบว่า การเลือกใช้เทคนิคที่เหมาะสมจะช่วยลดความซับซ้อนและช่วงเวลาในการออกแบบได้มาก ผลของการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพการฉีด

และพัฒนาผลิตภัณฑ์กระถางต้นไม้ของเล่นที่เป็นแนวทางในการทำธุรกิจขนาดเล็ก SME ทางผู้วิจัยได้มีการออกแบบโมเดลพลาสติกและฐานของแม่พิมพ์ 3 อัน คือ Sprue Runner, Sub Runner และ Gate จากโปรแกรม Invertor ร่วมกับ Invertor CAM (Computer Aided Manufacturing) โดยพิจารณาจากการวางตำแหน่งการฉีด ในระเบียบวิธีวิจัยเจ้าของผลงานวิจัยได้ทำการแบ่งรูปแบบในการศึกษาไว้เป็น 3 ส่วน ได้แก่ เทคนิคการสร้าง Core และ Cavity ที่เหมาะสมด้วย (Computer Aided Design: CAD) วิเคราะห์การฉีดขึ้นรูปพลาสติกเพื่อจำลองการไหลของเนื้อพลาสติกด้วย ซีเออี (Computer Aided Engineering: CAE) และศึกษารูปแบบของการกัดขึ้นรูปชิ้นงานของ Core และ Cavity เพื่อจำลอง Tool Path และทิศทางการเดินของใบมีดด้วย CAM (Computer Aided Manufacturing) โดยมีผลลัพธ์ของการฉีดขึ้นรูปกระถางต้นไม้ ตามรูปที่ 2.11

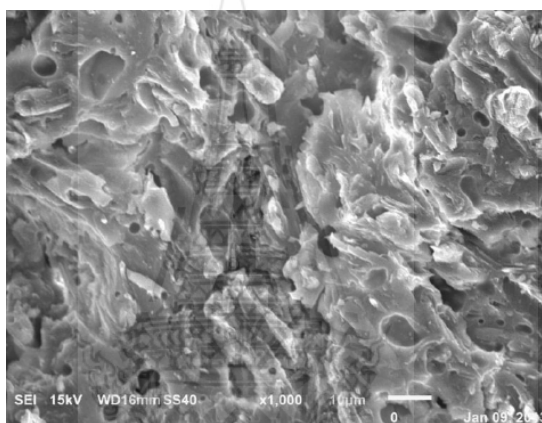
การวิจัยของ วรรณวนันช บุ่งสุด และจันทร์จิรา อภิรักษ์เมธาวงศ์ [14] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับกรรมวิธีในการขึ้นรูปแบบเย็นของวัสดุรีไซเคิลจากเศษเมลามีน ในกระบวนการผลิตที่มีปัญหาการเกิดครีบที่ไม่สามารถนำเศษผลิตภัณฑ์เมลามีนมาขึ้นรูปซ้ำได้อีก โดยรูปแบบของการวิจัยเป็นแบบศึกษาเชิงทดลอง ด้วยการผสมผงเมลามีน พอร์มาลดีไฮด์เรซิน ที่ยังไม่ผ่านกระบวนการขึ้นรูป เข้ากับ เศษครีบที่เหลือจากกระบวนการผลิต สำหรับการทดลองมี 2 วิธี ประกอบด้วย ขึ้นรูปด้วยการอัดพร้อมกับความร้อน (Compression Molding) และขึ้นรูปด้วยการอัดแล้วจึงให้ความร้อนภายหลังการอัด (Cold Molding) นอกจากนี้ จะมีการหาค่าคุณสมบัติเชิงกล นั่นคือ ความแข็งแรงดัด (Flexural Strength) ซึ่งมีความสัมพันธ์ร่วมกับเวลาที่ใช้ในการอบที่ 6, 12 และ 24 ชั่วโมง และอุณหภูมิที่ใช้อบ 155, 160 และ 165 เซลเซียส ตามรูปที่ 2.12 ยังถูกนำมาเป็นตัวแปรที่นำมาศึกษาอีกด้วย ตลอดจนนำผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทดลองทั้งแบบขึ้นรูปร้อนและเย็นแล้วมาตรวจตรวจสอบสัณฐานวิทยาตามรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ที่ระหว่างคุณสมบัติเชิงกล เวลา และอุณหภูมิที่ใช้ในการอบ [14]

ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองใช้การคำนวณทางสถิติด้วย Two – Way ANOVA ที่ความเชื่อมั่น 95% ของตัวแปรอุณหภูมิและเวลาในการอบ ผลของการวิจัยนี้สรุปได้ว่า การขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์เย็นต้องทำการอบไล่ความชื้น ภายหลังกระบวนการขึ้นรูป เนื่องจากสามารถลดอาการบวม

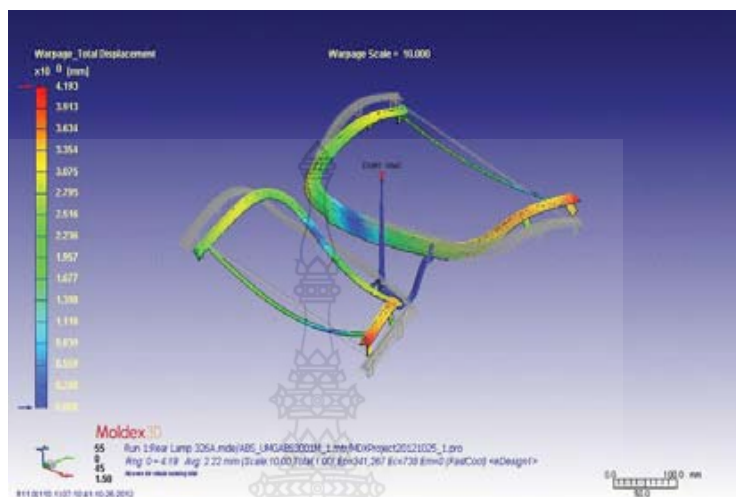
และการโค้งตัวของผลิตภัณฑ์ได้ ซึ่งในการอบไล่ความชื้นมีผลอย่างมากต่อคุณสมบัติเชิงกลแบบมีนัยสำคัญ โดยที่อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ 155, 160 และ 165 องศาเซลเซียส ไม่มีผล ในขณะที่เวลาในการอบมากขึ้นส่งผลให้สมบัติเชิงกลมีแนวโน้มลดลง ซึ่งอบไล่ความชื้นเวลา 15 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และหลังจากนั้นอบด้วย อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการภายหลังขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์เย็น ซึ่งการเพิ่มอนุภาคเศษเมลามีนเข้าไปในเมลามีนใหม่ทำให้ความแข็งแรงดัด (Flexural Strength) ลดลง



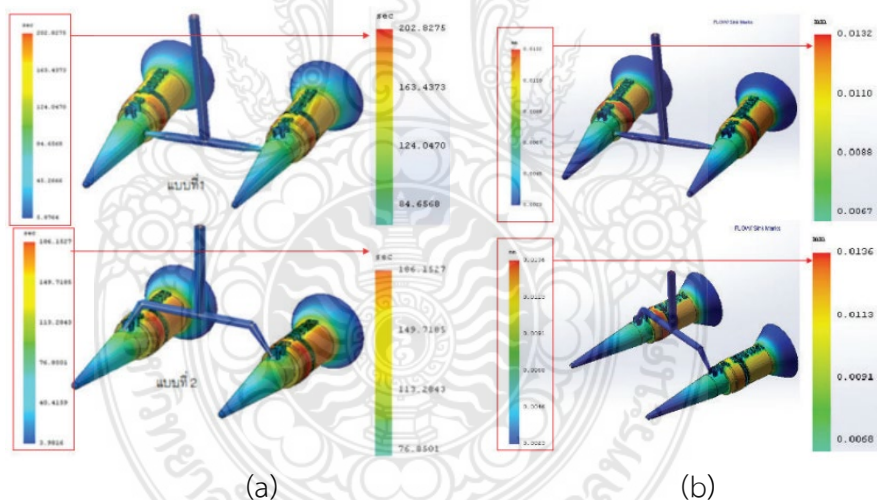
รูปที่ 2.13 การตรวจสอบทางสัณฐานวิทยาของเมลามีนใหม่ที่ขึ้นรูปด้วยการอัดร้อนและอัดเย็น [14]

ผลงานวิจัยของ อุดุลย์ จิตรอารี และคณะ [15] เป็นการศึกษาการออกแบบการทดลองเพื่อการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเสียรูปในการจำลองกระบวนการฉีดขึ้นส่วนพลาสติก ABS โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเสียรูปในการจำลองกระบวนการฉีดขึ้นส่วนพลาสติก ABS ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Moldex3D แสดงตามรูปที่ 2.14 โดยทำการศึกษาทั้งหมด 8 ปัจจัยกล่าวคือ แรงดันฉีด อัตราการฉีด ระยะการเปลี่ยนฉีดอัดย้า เวลาฉีดอัดย้า แรงดันฉีดอัดย้า อุณหภูมิหลอมเหลวพลาสติก อุณหภูมิแม่พิมพ์ และเวลาการหล่อเย็น โดยใช้วิธี Central Composite Design (CCD) เพื่อใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมจากการนำปัจจัยที่มีผลเข้ามาวิเคราะห์วิธีการออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab 15 ร่วมกับการจำลองการฉีดและวิเคราะห์การเสียรูปด้วยโปรแกรม Moldex3D ตามแผนการทดลอง 2^{8-4} Fractional Factorial ผลการวิจัยระบุว่า อัตราการฉีด เวลาหล่อเย็น อุณหภูมิหลอมเหลวพลาสติก และเวลาฉีดอัดย้า เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการเสียรูปของขึ้นส่วน ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองคือ ค่าการเสียรูปสูงสุดของขึ้นส่วนเท่ากับ 4.19 มิลลิเมตร ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.95 และค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.22 มิลลิเมตร ในส่วนของผลการทดลองฉีดจริงแสดงค่าการเสียรูปสูงสุดของขึ้นส่วนเฉลี่ยเท่ากับ 4.2 มิลลิเมตร ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าในการใช้โปรแกรม Moldex3D เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเสียรูปสามารถใช้งานได้และมีผลการ

ทำนายใกล้เคียงกับการทดลองจริงมาก นอกจากนี้ยังสามารถปรับค่าตัวแปรอื่นๆ ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปเพื่อทำนายการเสีรูปร่างเพื่อลดระยะเวลาการทำงานและต้นทุนการผลิตลงได้อีกด้วย



รูปที่ 2.14 ผลการวิเคราะห์การเสีรูปร่างโดยโปรแกรม Moldex3D [15]



รูปที่ 2.15 แสดงการวิเคราะห์แบบ (a) Cooling Time และ (b) แบบ Shink Marks [16]

วีระยุทธ หล้าอมรชัยกุล [16] ได้ทำการศึกษาเรื่องการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกด้วยเทคนิคการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งมีวัตถุประสงค์ที่เน้นไปที่การคำนวณหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับออกแบบโครงสร้างหลักและรูปทรงต่างๆ ของแม่พิมพ์ ได้แก่ ฐานโครงสร้าง สปริงคอร์ คาวีตี้ และโกดโพสท์ โดยใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์เข้ามาทำการวิเคราะห์การไหลและจำลองการสร้างสถานการณ์ และวิเคราะห์การขึ้นรูปพลาสติกที่ใช้ลูกกอล์ฟเป็นกรณีศึกษา ในกรณีของการวิเคราะห์ผลใช้แบบ 1) Flow Fill Time ด้วยโปรแกรม Mold Fill Analysis ที่ทำให้ทราบถึง

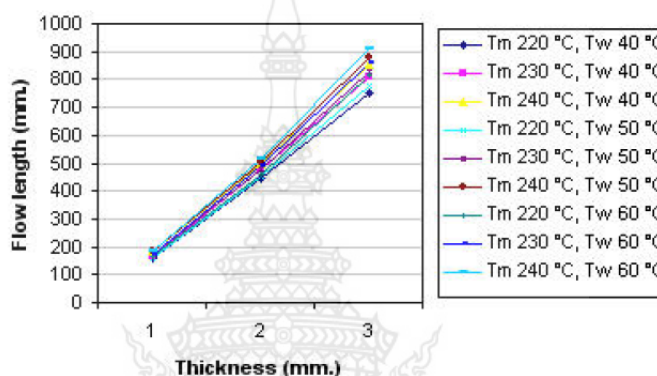
ทิศทางการไหลในแต่ละช่วงเวลา 2) วิเคราะห์แบบ Sink Marks สามารถวิเคราะห์รอยยุบตัวของเนื้อพลาสติกในกระบวนการฉีด แต่บางกรณีอาจเกิดการเกิดรอยยุบตัวซึ่งมีสาเหตุที่น้ำพลาสติกวิ่งไปไม่ทั่วในโพรง Cavity นั้นเอง 3) การวิเคราะห์แบบ Weld Line นั้นสามารถวิเคราะห์การเกิดรอยประสานของเนื้อพลาสติกในกระบวนการฉีดได้ โดยอาจมีสาเหตุที่กรณีที่น้ำพลาสติกวิ่งไปไม่ทั่วในโพรง Cavity เลยทำให้เกิดรอยประสานน้อยลง และมุมของรอยประสานเกิดขึ้นในทิศทางการวาง Runner และ Gate นั้นเอง 4) การวิเคราะห์เวลาการระบายความร้อนของเนื้อพลาสติก ซึ่งอาจเรียกว่า การวิเคราะห์แบบ Cooling Time ดังรูปที่ 2.15 โดยเมื่อการระบายความร้อนดีจะส่งผลให้การไหลของน้ำพลาสติกมีความคล่องตัวดีกว่า

มนัส เจริญญกิจ และคณะ [17] ได้ทำการศึกษาเรื่อง การพัฒนาวิธีการสร้างแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปพลาสติกแผ่นด้วยเทคนิควิศวกรรมย้อนรอยและศึกษาปัญหาการเสีรูปร่างด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การศึกษาใช้พลาสติกโพลีเอทิลีนและวัสดุอลูมิเนียมในการสร้างแม่พิมพ์ โดยใช้โปรแกรม ABAQUS สำหรับการวิเคราะห์ปัญหาการเสีรูปร่างเนื่องจากอุณหภูมิ กับชิ้นงานทดลองที่เป็นแผ่นรองเท้าภายในรถยนต์จำนวน 50 ชิ้น ในกระบวนการศึกษาวิจัยในขั้นเริ่มต้นมีการใช้วิศวกรรมย้อนรอยโดยการสแกน 3 มิติ (3-D Optical Scan) ในรูปแบบของ (Stereo Lithography: STL) เพื่อลดข้อผิดพลาดการวัดขนาดชิ้นส่วน กล่าวคือ การวัดขนาดความหนาบางจุดของชิ้นส่วน (แผ่นรองเท้าภายในรถ) ไม่ได้ และมีความคลาดเคลื่อนสูง โดยหากมีความคลาดเคลื่อนจะไม่สามารถดำเนินการทำแม่พิมพ์ได้ ยิ่งไปกว่านั้น การวัดในแบบสแกน 3 มิติ นี้ สามารถนำไฟล์ STL ไปสร้างแบบจำลองแบบผิวเรียบ (Surface) และสามารถนำไปออกแบบแม่พิมพ์ได้อย่างถูกต้องและรวดเร็วยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์ปัญหาการเสีรูปร่างของชิ้นงานเนื่องจากความร้อน เนื่องจากชิ้นงานมีลักษณะเป็นแผ่น การขึ้นรูปแผ่นพลาสติกมีการอ่อนตัวภายหลังการอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดทำให้ชิ้นงานได้รับทั้งความร้อนและแรงกดไปพร้อมกัน ซึ่งอาจเกิดการเสีรูปร่างได้ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงใช้โปรแกรม ABAQUS ในฟังก์ชันของ Thermal Displacement ซึ่งทำนายพฤติกรรมและการกระจายอุณหภูมิได้ ภายหลังการขึ้นรูป สำหรับการแก้ปัญหาใช้วิธีการเพิ่มความหนาหรือเสริมแรงในบางตำแหน่ง หรืออาจใช้อุปกรณ์จับเพื่อให้ชิ้นงานคงรูป

สถาพร ชาทาคม และคณะ [18] ได้ทำการศึกษาความสามารถในการไหลตัวของพลาสติกกลุ่ม Polyolefin ที่สัมพันธ์กับความหนาของช่องทางการไหล โดยที่ความหนาที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อระยะทางการไหลของพลาสติก โดยทำการทดลองฉีดพลาสติกชนิด Polypropylene (PP) เพื่อศึกษาอิทธิพลของความหนาช่องทางการไหล อุณหภูมิฉีด และอุณหภูมิแม่พิมพ์ ทำการกำหนดช่องทางการไหลเป็นรูปก้นหอยทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีความกว้าง 10 มิลลิเมตร ยาว 145 เซนติเมตร ระยะพิท 16 มิลลิเมตร ตามลำดับ และแม่พิมพ์ที่ออกแบบนี้สามารถเปลี่ยนขนาดความหนาของช่องทางการไหลได้ตามขอบเขตการศึกษาที่ 1, 2 และ 3 มิลลิเมตร ตามลำดับ ในการวิจัยต้องทราบคุณสมบัติที่จำเป็นของพลาสติกชนิด PP ที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ Melt Flow Index, Tensile

Strength at Yield, Charpy Notched Impact, Shear Modulus, Ball Indentation Hardness และ Heat Distortion Temperature โดยพลาสติกที่ฉีดมีอุณหภูมิ 220, 230 และ 240 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส

ผลการทดลองสรุปได้ว่า ความหนาของช่องทางการไหลส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของระยะทางการไหลตามรูปที่ 2.16 โดยการเปลี่ยนจากความหนาที่ 1 เป็น 2 มิลลิเมตร มีระยะทางไหลเพิ่มขึ้น 179% ในขณะที่เปลี่ยนจาก 2 เป็น 3 มิลลิเมตร มีระยะทางไหลเพิ่มขึ้น 73% ตามลำดับ



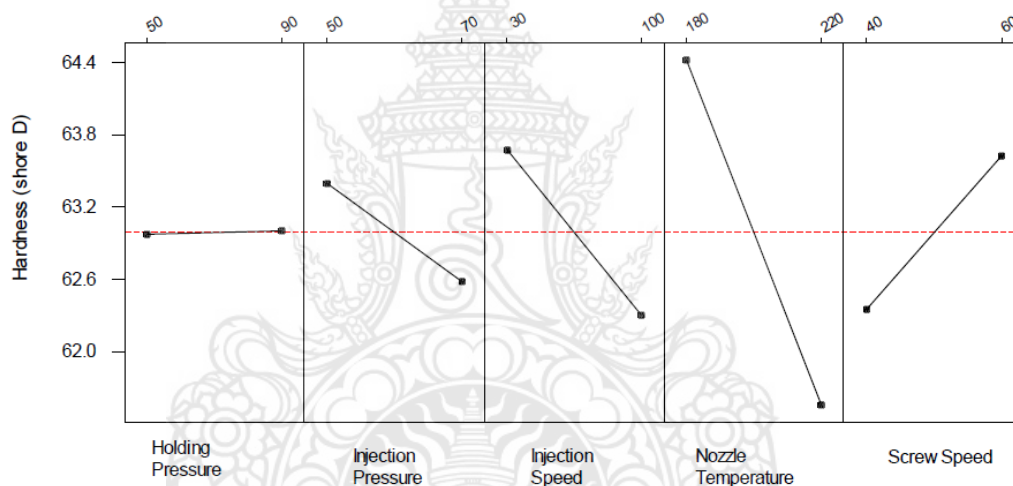
รูปที่ 2.16 การเปรียบเทียบระยะทางการไหลจากการเปลี่ยนแปลงความหนาของช่องทางการไหล [18]

ศรีสัจจา บุญญฤทธิ์ [19] ได้ทำการศึกษาปัจจัยในการฉีดขึ้นรูปที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของพลาสติกชนิด Polypropylene (PP) โดยการออกแบบการทดลองใช้แบบ แฟกตอเรียลแบบเต็มจำนวน 2^5 ทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ปัจจัยของฉีดขึ้นรูปที่ต้องการศึกษามี 5 ปัจจัย คือ แรงดันรักษาชิ้นงาน (Holding Pressure) แรงดันฉีด (Injection Pressure) ความเร็วฉีด (Injection Speed) อุณหภูมิหัวฉีด (Nozzle Temperature) และความเร็วรอบสกรู (Screw Speed) คุณสมบัติเชิงกลที่ต้องการวิเคราะห์ คือ ความทนต่อแรงดึง โมดูลัสความยืดหยุ่น เปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น และความแข็ง

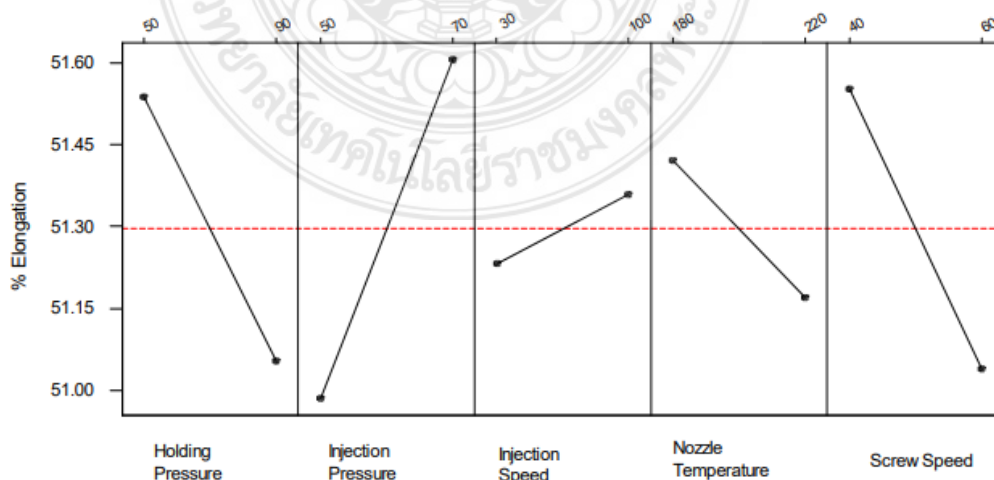
สำหรับการวิเคราะห์ผลการวิจัย ได้นำการวิเคราะห์การแปรปรวนของ P-value ที่ได้จากการทดสอบความแปรปรวน (ANOVA) ของปัจจัยฉีดขึ้นรูปที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลอย่างมีนัยสำคัญทั้ง 3 ประการ ได้แก่ ความทนต่อแรงดึง โมดูลัสความยืดหยุ่นและความแข็ง ผลจากการทดลองสรุปได้ คือ อุณหภูมิหัวฉีดมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงดันฉีด และมีปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างแรงดันฉีด อุณหภูมิหัวฉีดและความเร็วสกรู โดยมีผลต่อค่าความทนต่อแรงดึงของโพลิเมอร์ PP อย่างมีนัยสำคัญ โดยความทนต่อแรงดึงจะลดลงเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิหัวฉีดที่ 180 องศาเซลเซียส เป็น 220 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดจากการเสื่อมด้านโครงสร้างของโพลิเมอร์นั่นเอง ในขณะที่ ความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น จากแรงดันรักษาชิ้นงาน แรงดันฉีด และความเร็วฉีดที่เพิ่มขึ้น โดยมีตัวอย่างการวิเคราะห์ปัจจัยการฉีดตามรูปที่ 2.17

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น สรุปได้ว่า แรงดันรักษาชิ้นงาน แรงดันฉีด อุณหภูมิหัวฉีด และความเร็วสกรู มีอิทธิพลต่อค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ ซึ่งค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นลดลงเมื่ออุณหภูมิหัวฉีดเพิ่มขึ้น แต่ค่าโมดูลัสยังจะเพิ่มขึ้นเมื่อรักษาแรงดันชิ้นงาน และแรงดันฉีดเพิ่มขึ้น ในการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น ไม่มีปัจจัยใดส่งผลกระทบต่อ อาจเป็นเพราะจำนวนของระดับค่าของปัจจัยฉีดขึ้นรูปน้อยเกินไป ดังรูปที่ 2.18

สรุปได้ว่า หากอุณหภูมิสูงขึ้นเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกล คือ ค่าความทนต่อแรงดึง ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น และค่าความแข็ง จะทำให้มีค่าลดลง ส่วนในกรณีที่แรงดันรักษาและแรงดันหัวฉีดจะปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น โดยที่ปัจจัยหลักเพิ่มสูงส่งผลให้ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเพิ่มสูงตามไปด้วย ส่วนแรงดันฉีด ความเร็วฉีด อุณหภูมิฉีด และความเร็วสกรูเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าความแข็ง ซึ่งความแข็งจะลดลงเมื่อปัจจัยทั้งหมดเพิ่มสูงขึ้น



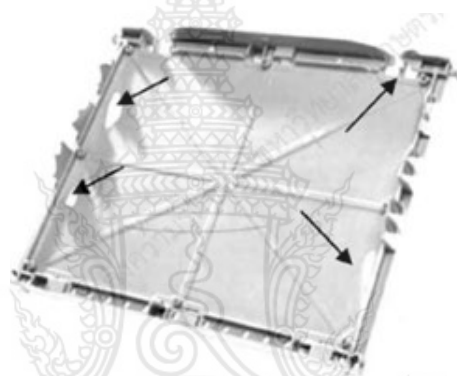
รูปที่ 2.17 ตัวอย่างแสดงการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลกับปัจจัยการฉีดพลาสติก PP [19]



รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยการฉีดขึ้นรูปกับค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น [19]

สมเจตน์ พัชรพันธ์ [20] มีการศึกษาและเสนอแนวทางและสรุปข้อบกพร่องต่างๆที่สำคัญและพบได้มากในชิ้นงานพลาสติกที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป สาเหตุและแนวทางการแก้ไข โดยสรุปสาเหตุข้อบกพร่องและแนวทางการปรับแก้ไขไว้จำนวน 5 ข้อต่อไปนี้

1. ชิ้นงานฉีดไม่เต็ม (Short Shots) ดังรูปที่ 2.19 เกิดจากความเหมาะสมของการปรับตั้งปริมาตรการฉีดหรือระยะการฉีด สามารถปรับตั้งค่าที่เครื่องฉีดพลาสติกด้วยการเพิ่มอุณหภูมิการฉีดและแม่พิมพ์ฉีด เพิ่มความดันฉีด เพิ่มความเร็วในการฉีด เพิ่มความดันหมุนด้านถอยกลับ และตรวจสอบการสึกหรอของแหวนกันไหลย้อนกลับ นอกจากนี้ยังสามารถปรับแก้ที่แม่พิมพ์ได้โดยเพิ่ม/ลดขนาดช่องการไหล เพิ่มตำแหน่งและขนาดของท่อทางเข้า ปรับขนาดความหนาของชิ้นงานเพิ่มขึ้น ตรวจสอบการวางตำแหน่งของช่องระบาย [20]



รูปที่ 2.19 ภาพชิ้นงานฉีดไม่เต็มแบบ [20]



รูปที่ 2.20 ภาพรอยยุบ [20]

2. ชิ้นงานเกิดรอยยุบ (Sink Marks) ดังรูปที่ 2.20 รอยยุบโดยทั่วไปจะเกิดบริเวณผิวของชิ้นงานซึ่งเกิดขึ้นหลังจากปรับตั้งค่าปริมาตรการฉีด แต่ยังไม่ได้มีการให้ความดันค้ำภายในหลังจากการฉีดขึ้นรูป รอยยุบมีสาเหตุหลักมาจากการหดตัวของชิ้นงานในขณะที่เย็นตัวภายในแม่พิมพ์ฉีด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการฉีดขึ้นงานที่มีความหนาหรือที่บริเวณแนวเสริมความแข็งแรงของชิ้นงาน ซึ่งมีแนวทางการแก้ไขดังนี้ 1) เพิ่มปริมาตรของพลาสติกที่สามารถไหลเข้าในแม่พิมพ์ฉีด 2) เพิ่มความ

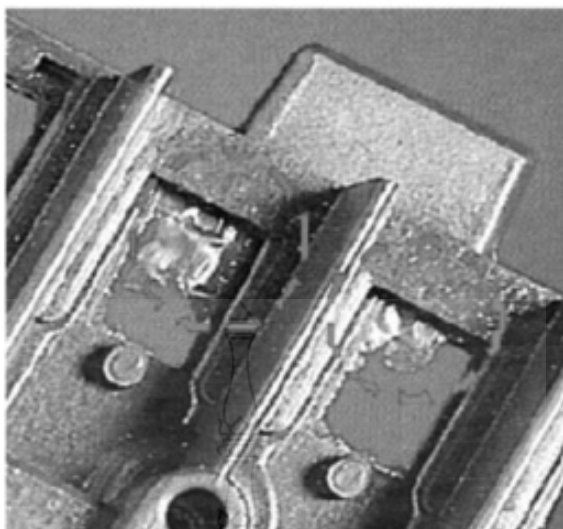
ดันค้ำ/เวลาในการให้ความดันค้ำ 3) ลดอุณหภูมิฉีดของพลาสติกหลอมเหลว/ลดอุณหภูมิของแม่พิมพ์ฉีด/ลดความเร็วฉีด 4) เพิ่มอุณหภูมิฉีดของพลาสติก/เพิ่มอุณหภูมิของแม่พิมพ์ฉีดเพิ่มความเร็วฉีด 5) เพิ่มเวลาในการเย็นตัวของชิ้นงานภายในแม่พิมพ์ฉีด 6) ตรวจสอบการสึกหรอของแหวนกันไหล [20]

3. ชิ้นงานติดภายในแม่พิมพ์ (Part Sticking) ดังรูปที่ 2.21 ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อรอบเวลาในการฉีด เนื่องจากเครื่องฉีดไม่สามารถทำงานต่อได้ทันที การที่ชิ้นงานติดแม่พิมพ์ฉีด มีสาเหตุมาจากทั้งแม่พิมพ์ฉีดและการปรับตั้งค่าตัวแปรในการฉีดที่ไม่เหมาะสม โดยมีแนวทางการแก้ไข ดังนี้ 1) ลดแรงดันฉีด 2) ลดอุณหภูมิฉีดของพลาสติก/ลดอุณหภูมิของแม่พิมพ์/ลดความเร็วฉีด 3) เพิ่มเวลาในการเย็นตัวของชิ้นงาน 4) ใช้น้ำยาหรือสารเคมีช่วยในการถอดแบบ 5) ตรวจสอบจำนวนและตำแหน่งในการนำปลัดของก้านกระทุ้ง 6) ตรวจสอบมุมเอียงต่าง ๆ ที่บริเวณภายในโพรงแม่พิมพ์ฉีด [20]



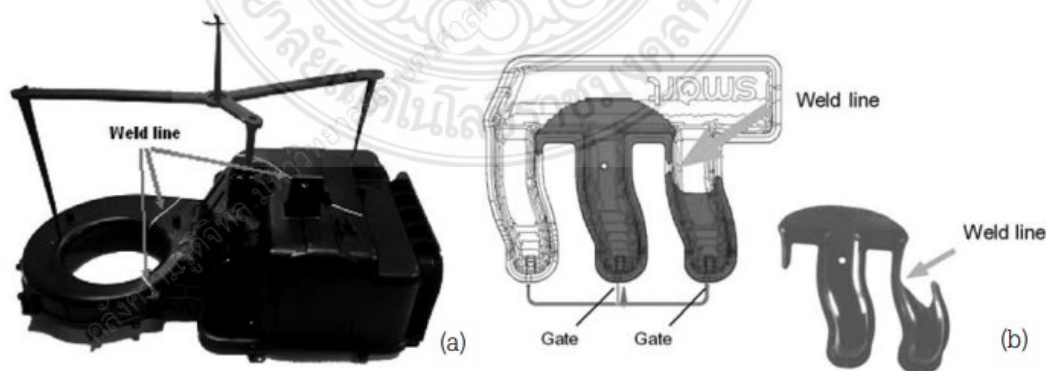
รูปที่ 2.21 ภาพชิ้นงานติดในแม่พิมพ์ [20]

4. ครีป (Flash) ดังรูปที่ 2.22 ครีปเป็นส่วนสำคัญที่เสียหายส่วนหนึ่งในงานของการฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน ครีบบนชิ้นงานอาจเกิดที่ตำแหน่งรอยประกบของแม่พิมพ์ หรืออาจเกิดที่บริเวณด้านหลังชิ้นงานที่ตำแหน่งรอยกระทุ้ง แนวทางการแก้ไขดังต่อไปนี้ 1) เพิ่มแรงปิดแม่พิมพ์ (Clamping Force) 2) ลดความดันค้ำ/ลดเวลาที่ใช้ในการให้ความดันค้ำ 3) ลดอุณหภูมิฉีดของพลาสติกหลอมเหลว/ลดอุณหภูมิของแม่พิมพ์ฉีด 4) ลดความเร็วในการฉีด/ลดแรงดันฉีด แนวทางการปรับแก้ที่แม่พิมพ์ฉีด มีดังนี้ 1) ตรวจสอบการสึกหรอที่เกิดขึ้นตามรอยประกบของแม่พิมพ์ โดยเฉพาะบริเวณที่เกิดครีป 2) ตรวจสอบช่องระบายอากาศ (Venting) 3) ตรวจสอบการสึกหรอของก้านกระทุ้งหากเกิดครีปที่บริเวณรอยกระทุ้ง [20]



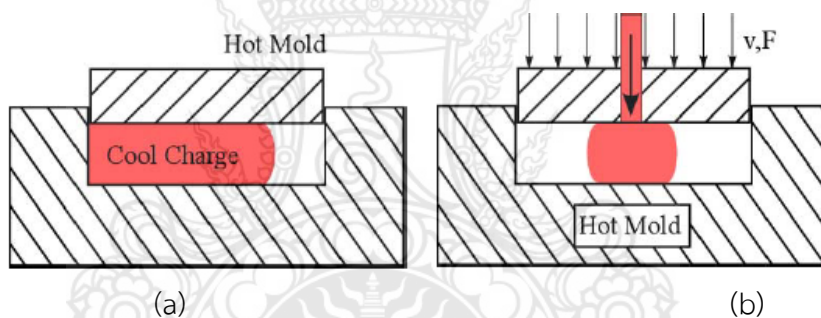
รูปที่ 2.22 ภาพการเกิดครีบในชิ้นงาน [20]

5. รอยเชื่อมประสาน (Weld Lines) ดังรูปที่ 2.23 เกิดจากพลาสติกหลอมเหลวไหลมาบรรจบกันภายในแม่พิมพ์ฉีด โดยมีสาเหตุมาจากการที่โพรงแม่พิมพ์มีทางเข้ามากกว่า 1 ตำแหน่ง ชิ้นงานที่มีความซับซ้อนหรือชิ้นงานมีความหนาผนังที่แตกต่างกันมาก ดังนั้นการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์หาการไหลที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์ฉีดก่อนนำไปผลิตเป็นแม่พิมพ์จริง เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดรอยเชื่อมประสานในตำแหน่งที่สำคัญ เช่น ตำแหน่งที่รับภาระแรงกระทำ หรือตำแหน่งที่ปรากฏต่อสายตาของลูกค้า แนวทางการแก้ไขมีดังนี้ คือ 1) เพิ่มอุณหภูมิฉีดของพลาสติก/เพิ่มอุณหภูมิของแม่พิมพ์ฉีด 2) เพิ่มความเร็วในการฉีด/เพิ่มความดันคงค้าง 3) เพิ่มความดันต้านการหมุนถอยหลังกลับของสกรู 4) เปลี่ยนตำแหน่งทางเข้าของพลาสติกหลอมเหลวภายในแม่พิมพ์ฉีด เพื่อลดจำนวนของรอยเชื่อมประสาน 5) ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์การไหลภายในแม่พิมพ์ฉีดเพื่อวิเคราะห์หาตำแหน่งและขนาดของทางเข้าที่เหมาะสม [20]



รูปที่ 2.23 การเกิดรอยเชื่อมประสานบนชิ้นงาน (a) และ การเปรียบเทียบของผลวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์และการทดลองฉีดขึ้นรูปจริง (b) [20]

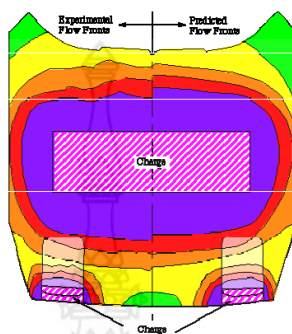
Antoine Rios และคณะ [21] ได้ทำการศึกษากระบวนการอัดขึ้นรูปได้ใช้กันในอุตสาหกรรมยานยนต์ การบินและอวกาศ สีนค้ำก็พาและอิเล็กทรอนิกส์สำหรับผลิตชิ้นส่วนที่มีขนาดใหญ่ บางน้ำหนักเบา แข็งแรงและแข็ง ส่วนประกอบของแม่พิมพ์อัด ดังแสดงในรูปที่ 2.25 เกิดขึ้นจากการบีบอัดประจุโพลีเอสเตอร์เสริมใยแก้วเย็นที่เรียกว่าสารประกอบการขึ้นรูปแผ่น (Sheet Molding Compound : SMC) ระหว่างพื้นผิวของคาวิตีที่ให้ความร้อน ปกติเส้นใยเสริมแรงจะมีความยาว 25 มม. จะถูกจัดวางแบบสุ่มในแผ่นตามแนวระนาบและคิดเป็นประมาณ 25% ของสัดส่วนปริมาตรของแม่พิมพ์พลาสติก โดยทั่วไปแม่พิมพ์จะมี SMC 1 ถึง 4 ชั้น แต่ละชั้นหนาประมาณ 3 มม. ส่วนกระบวนการของการอัดคือการฉีดขึ้นรูป เป็นกระบวนการขึ้นรูปผสมผสานที่รวมทั้งการฉีดขึ้นรูปและการอัดขึ้นรูปไว้ ในกรณีนี้ สารประกอบพลาสติกขึ้นรูปจำนวนมาก (BMC) จะถูกฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์แล้วบีบอัด โดยทั่วไปแล้ววัสดุ BMC โดยจะมีใยแก้วที่สั้นกว่า SMC และมีคุณสมบัติทางโครงสร้างที่ต่ำกว่า ข้อได้เปรียบหลักของการฉีดขึ้นรูปคือเครื่องจักรที่อัตโนมัติและรอบเวลาการอัดที่สั้นลง ดังแสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 การขึ้นรูปวัสดุ (a) แม่พิมพ์ขึ้นรูปแบบอัด (b) แม่พิมพ์ฉีดและขึ้นรูปแบบอัด [21]

การบรรจุแม่พิมพ์เพื่อศึกษาวัสดุภายในคาวิตีของแม่พิมพ์ โดยเริ่มจากจุดฉีดและจบด้วยแม่พิมพ์แบบเต็ม ข้อมูลนี้ใช้เพื่อทำนายรอบเวลา คำนวณความสมดุลของแรงดัน ทำนายเส้นถักและตรวจจับการดักจับของอากาศ ก่อนที่การออกแบบแม่พิมพ์จะเสร็จสิ้น การจำลองการเติมแม่พิมพ์สามารถหลีกเลี่ยงปัญหาการทำงานในอนาคตได้สำหรับสถานะการขึ้นรูปที่แตกต่างกัน ความหนาของแม่พิมพ์ และสำหรับชุดของการกำหนดค่าประจุหรือประตูการฉีด เส้นถักและอากาศซึ่งมีความสำคัญในการทำนายความสมบูรณ์ของโครงสร้างของส่วนสุดท้าย ความผิดปกติเหล่านี้ อาจทำให้เกิดจุดอ่อนและปัญหาด้านการตกแต่งพื้นผิว ซึ่งอาจนำไปสู่การแตกร้าวของชิ้นส่วนขั้นสุดท้าย เส้นถักเกิดขึ้นเมื่อน้ำการไหลที่แตกต่างกันมาบรรจบกันโดยไม่อนุญาตให้เส้นใยเชื่อมระหว่างสองหน้า การดักจับอากาศเกิดขึ้นเมื่อกระแสไหลทั้งสองไหลมาบรรจบกันรอบพื้นที่ที่ไม่มีการเติม ทำให้เกิดช่องว่างในส่วนสุดท้ายในกรณีของช่องว่างในแม่พิมพ์ (Mold Filling) ถูกใช้เพื่อศึกษาการพัฒนาารูปแบบของวัสดุที่อยู่ในพื้นที่กลวง (Cavity) ของแม่พิมพ์ตั้งแต่เริ่มต้น รวมไปถึงจุดที่เริ่มฉีดวัสดุเข้าแม่พิมพ์ไปจนถึง

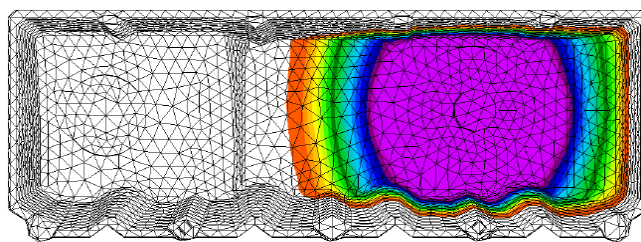
เติมแม่พิมพ์ โดยช่องว่างของแม่พิมพ์ยังสามารถใช้ในการทำนายจำนวนรอบการขึ้นรูป การสมดุล ความดันในการฉีด ปริมาณอากาศ และอื่น ๆ การทำนายด้วยการจำลองนิยมนำเปรียบเทียบกับผล การทดลองจริงตามตัวอย่างในรูปที่ 2.25 สามารถช่วยให้วิศวกรสามารถแก้ปัญหาการออกแบบ แม่พิมพ์และควบคุมผลิตภัณฑ์ให้เป็นไปตามเงื่อนไขการผลิตที่กำหนดได้



รูปที่ 2.25 เปรียบเทียบผลทำนายช่องว่างในแม่พิมพ์ (ซ้าย) การทดลองจริง (ขวา) การจำลอง [21]

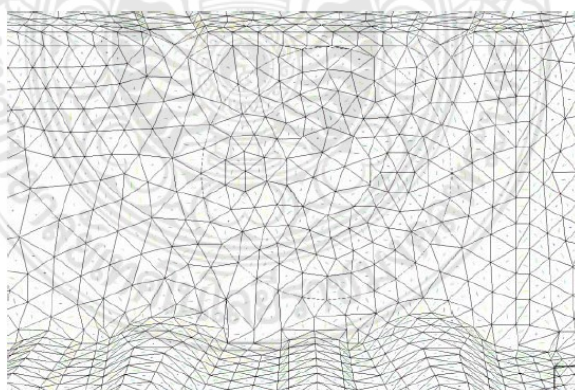
การจำลองที่เกี่ยวข้องกับแม่พิมพ์ขึ้นรูปแบบอัตโนมัติที่ใช้ Computer Aided Engineering: CAE นำมาอธิบายเสริมว่าสามารถใช้งานอย่างไรในงานแม่พิมพ์ขึ้นรูปแบบอัตโนมัติ และเกี่ยวข้องกับการทำนาย และหาความเหมาะสมต่อคุณสมบัติและคุณลักษณะในเรื่องนี้ คือ ค่าความเครียดตกค้าง (Residual Stress) การตอบสนองเชิงโครงสร้าง (Structural Response) การหดตัว(Post-processing Shrinkage) การผิดรูป (Warpage) งานวิจัยนี้ได้กล่าวไว้ว่า คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุและคุณลักษณะสุดท้ายของชิ้นส่วนที่ขึ้นรูปมีผลกระทบสูงมากจากรูปแบบการไหล (Flow Pattern) อุณหภูมิ และการบ่มตัวของวัสดุที่ทำแม่พิมพ์ ทั้งนี้งานวิจัยนี้อ้างว่า การใช้ Computer Aided Engineering: CAE สามารถแก้ปัญหาต่าง ๆ ในการออกแบบแม่พิมพ์ ที่สามารถลดค่าใช้จ่ายและเวลา ตลอดจนลดการสูญเสียจากการผลิตที่ผิดรูปไปซึ่งมีผลดีต่อการสร้างความเชื่อถือให้กับลูกค้าได้

การใช้งานของโปรแกรม Computer Aided Engineering: CAE เริ่มต้นการวิเคราะห์ด้วยการสร้างต้นแบบที่มีลักษณะกลวง (Cavity) โดยใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ หลังจากนั้นกำหนดเงื่อนไขที่จำเป็นในการจำลองได้แก่ ช่องว่างในแม่พิมพ์ (Mold Filling) รูปแบบการวางแนวของเส้นใย (Fiber Orientation) รายละเอียดของอุณหภูมิที่บ่มแม่พิมพ์ (Curing and Thermal History) การหดตัวและการผิดรูป (Shrinkage and Warpage) ซึ่งคุณสมบัติที่ต่างกันทางกายภาพและตามแกนยาวที่ต่างกันของวัสดุ (Anisotropic Material Properties) ถูกนำมาคำนวณพฤติกรรมทางโครงสร้างของชิ้นส่วน โดยภายหลังการวิเคราะห์เสร็จสิ้น ความเหมาะสมของชิ้นส่วนจากการลดลงของแนวของเส้นใย ความเหมาะสมในการควบคุมอุณหภูมิและการบ่ม และการหดตัวและการบิดเบี้ยวน้อยที่สุดจะถูกนำเสนอ โดยมีตัวอย่างการใช้ Computer Aided Engineering: CAE ในการวิเคราะห์ช่องว่างในแม่พิมพ์ตามรูปที่ 2.26 และตัวอย่างการวิเคราะห์รูปแบบการวางแนวของเส้นใยตามรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.26 ตัวอย่างการวิเคราะห์ช่องว่างในแม่พิมพ์ด้วย CAE [21]

Sooyoung Lee และคณะ [22] มีการแบบจำลองเชิงตัวเลข (Numerical Model) ในการพัฒนาการจำลองกระบวนการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์แบบอัดสำหรับวัสดุผสมที่มีชั้นเสริมแรงด้วยไฟเบอร์ (Fiber-reinforced Layers) ภายใต้เงื่อนไขการจำลองแบบเคลือบอย่างต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง (Laminated with Continuous and Discontinuous) โดยสามารถนำวิธีนี้ไปใช้กับวัสดุประเภทอื่นได้ เช่น พลาสติก ที่ไม่สามารถจัดการกับความต่อเนื่องได้พร้อมกัน โดยพฤติกรรมของความร้อนทางกล (Thermomechanical) แบบไหลต่อเนื่องและ พฤติกรรมการไหลแบบไม่ต่อเนื่อง (Rheological Behavior) ของชั้นเสริมแรงด้วยไฟเบอร์ถูกสร้างแบบจำลองแยกจากกันและถูกรวมเข้าด้วยกันในที่สุด โดยถือว่ามีส่วนต่อประสานที่สมบูรณ์แบบ ในการจำลองนี้พิจารณา (Long Fiber-reinforced Thermoplastic: LFT) ซึ่งนิยมใช้กันแพร่หลายในการวัสดุผสม โดยผลการทดลองต้องการพิจารณาหาค่าความสัมพันธ์ระหว่าง 1) ค่าความเค้นจริง (True Stress) และค่าความเครียดจริง (True Strain) ที่มีการเปลี่ยนแปลงไปขณะกดแม่พิมพ์ 2) คุณสมบัติของความร้อนทางกล (Thermomechanical Properties)

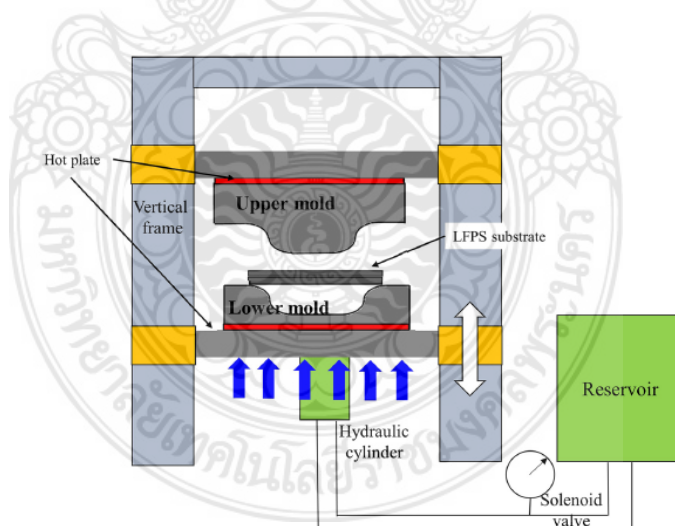


รูปที่ 2.27 ตัวอย่างวิเคราะห์รูปแบบการวางแนวของเส้นใยด้วย CAE [21]

Ho-Sang Kim และคณะ [23] มีการวิจัยเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับแม่พิมพ์ขึ้นรูปแบบอัด (Compression Molding) ฝาครอบไนต์บุกโดยใช้วัสดุคอมโพสิต โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) และระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element

Method: FEM) วัสดุคอมโพสิต (Composite Materials) เนื่องจากวัสดุคอมโพสิตสามารถขึ้นรูปได้
 อย่างดีและมีน้ำหนักที่เบา ซึ่งมีบทบาทสำคัญอย่างมากในการผลิต ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้ มุ่งที่จะ
 ทำนายการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างภายหลังการขึ้นรูปแบบอัดที่ใช้วัสดุผสมและพิจารณาถึงตัวแปร
 หลักที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตของงานอุตสาหกรรมผลิตฝาครอบโหนดบู้กด้วยวิธีการออกแบบ
 การทดลองและการใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ นอกจากนี้ สัดส่วนของสัญญาณต่อเสียง
 (Signal-to-Noise: S/N Ratio) มีการคำนวณเพื่อพิจารณาการเสียรูปทรงที่มีลักษณะบิดเบี้ยว
 (Warping Deformations) ที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของฝาครอบโหนดบู้ก สำหรับกระบวนการออกแบบ
 การทดลองถูกนำมาใช้ในการพิจารณาตัวแปรที่มีความเหมาะสมในกระบวนการผลิต โดยที่ระดับความ
 เหมาะสมของการผลิตถูกเลือกจากลักษณะบิดเบี้ยวที่ต่ำ

กระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์หรือฝาครอบโหนดบู้กที่ทำมาจากวัสดุผสมในงานวิจัยนี้แผ่น
 แพลต บางที่ทำจากวัสดุผสมคือแผ่นพรีเพกไฟเบอร์ยาว ถูกติดตั้งอยู่บนแม่พิมพ์ขึ้นรูปตัวล่าง โดยที่
 แม่พิมพ์กดหรือแม่พิมพ์ขึ้นรูปตัวบน ถูกทำให้เคลื่อนที่ด้วยต้นกำลังทางกลที่ได้มาจากไฮดรอลิกส์ โดย
 แม่พิมพ์ขึ้นรูปตัวล่างและตัวบนจะติดตั้งตรงกันข้ามเสมอ ในการเริ่มต้นการขึ้นรูป แผ่นพรีเพกไฟเบอร์
 ยาว: LFPS ถูกนำมาให้ความร้อนด้วยแผ่นทำความร้อน (Hot Plate) และควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 150
 องศาเซลเซียส จากนั้นแม่พิมพ์ขึ้นรูปตัวบนจะเลื่อนเข้ามากดอัดแบบแผ่นพรีเพก ภายใต้แรงกด 66
 kN ด้วยความเร็วคงที่ 2 mm/s โดยแผนภาพแม่พิมพ์ขึ้นรูปแบบอัดที่ใช้กับวัสดุผสมแสดงตามรูปที่
 2.28

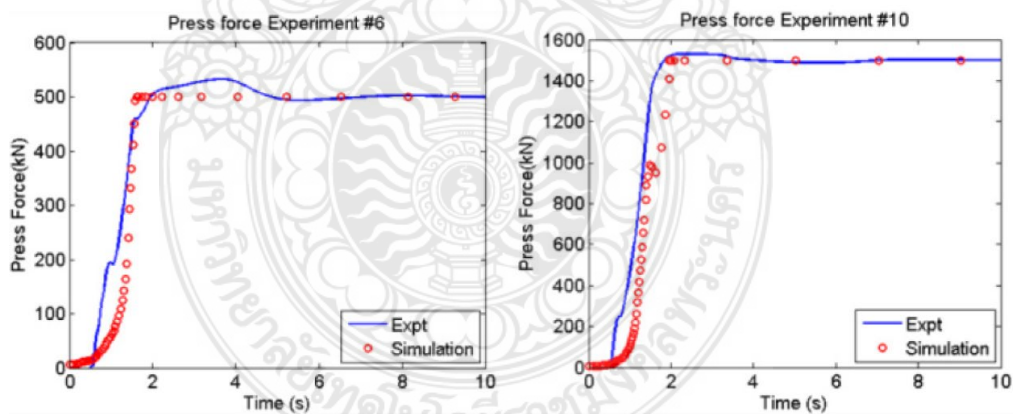


รูปที่ 2.28 แผนภาพแม่พิมพ์ขึ้นรูปแบบอัดที่ใช้กับวัสดุผสม [23]

สำหรับการใช้วิธีการออกแบบการทดลอง: DOE เพื่อควบคุมปัจจัยการผลิตฝาครอบโหนดบู้ก
 ใช้การวิเคราะห์การกดขึ้นรูป (Compression Molding Analysis) ด้วยการพิจารณาการไหล (Flow
 Analysis) จาก 3D Timon Compress Mold Module ในระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) ที่
 สามารถพิจารณาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการขึ้นรูปที่เหมาะสมยกตัวอย่างเช่น อุณหภูมิของแม่พิมพ์

(Temperature) ความดันที่กด (Pressure) เวลาการขึ้นรูป (Time) และอื่น ๆ โดยนำมาจำลองการวิเคราะห์รูปแบบการไหล (Flow Pattern) ควบคู่กับการใส่ค่าวิเคราะห์จากคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ใช้ในการทำแม่พิมพ์ นอกจากนี้ คุณสมบัติของความดัน-ปริมาตร-อุณหภูมิ (Pressure–Volume–Temperature: PVT) และคุณสมบัติของความหนืดจลน์ (Viscous Properties) ถูกเก็บผลเพื่อใช้ในการคำนวณหาการเสีรูปร่างที่มีลักษณะบิดเบี้ยว

ในกรณีของการทำนายตัวแปรที่มีความเหมาะสมในกระบวนการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ขึ้นรูปแบบอัดที่ผ่านกระบวนการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์มาแล้ว การใช้วิธีการออกแบบการทดลอง: DOE มาทำนายผลด้วยการพิจารณา 4 ตัวแปรหลัก คือ สัดส่วนความยาวแนวตั้ง และระนาบ (Aspect: H/V Ratio) แรงกด (Compression Force) อุณหภูมิ (Temperature) และเวลาการขึ้นรูป (Time) นอกจากนี้ สัดส่วนของสัญญาณต่อเสียง (Signal-to-Noise: S/N Ratio) โดย L_9 Orthogonal Array ยังถูกนำมาคำนวณอีกด้วยเพื่อการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตในเรื่องของน้ำหนักและรูปร่างที่เรียบซึ่งการคำนวณนี้ใช้การทำนายผลจากตัวแปรทั้ง 4 ด้วยการเก็บข้อมูลบนผิวของผลิตภัณฑ์จำนวน 25 จุด ทั้งนี้การเปรียบเทียบการทดสอบด้วยการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดลองขึ้นรูปจริงมีค่าการเสีรูปร่าง 13.2 และ 12.5 ซึ่งถือว่ามีความใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นวิธีการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ควบคู่กับวิธีการออกแบบการทดลอง: DOE สามารถให้ผลการทดลองใกล้เคียงกับการทดลองขึ้นรูปจริงได้



รูปที่ 2.29 การทำนายผลเปรียบเทียบกับ การทดลองจริง [25]

Giorgio Zampierollo [24] ซึ่งมีการกล่าวว่า อุตสาหกรรมการผลิตยามีกระบวนการผลิตที่ต้องมีการยกระดับทั้งเรื่องคุณภาพ การพิจารณาด้านพลังงานและความต้องการ ดังนั้นผู้วิจัยให้ความสนใจในปัจจัยต่าง ๆ ของการสร้างแม่พิมพ์อัดรีดร้อนและมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพและประสิทธิภาพการผลิต รวมไปถึงการลดการใช้พลังงาน ซึ่งตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการออกแบบแม่พิมพ์นี้ ได้แก่ การประมาณการฉีด การลดอุณหภูมิ ความดันฉีด และอื่น ๆ ในการวิจัยดังกล่าวใช้พลาสติก

Polypropylene: PP ผลการวิจัยเปิดเผยให้เห็นว่า Hot Runner ภายใต้การควบคุมอุณหภูมิ หลอมเหลวของพลาสติกและความหนืดที่สัมพันธ์กับการไหลของน้ำพลาสติกถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพที่ดีเป็นไปตามความต้องการ

Yang Li และคณะ [25] ได้ทำการจำลองด้วยโปรแกรม Autodesk Moldflow ภายใต้เงื่อนไขการทดลองเดียวกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองจริง (Experiment Data) ที่มุ่งเน้นในการสร้างต้นแบบและจำลองกระบวนการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์แบบอัดสำหรับวัสดุผสมแผ่นบาง SMC ที่ประกอบไปด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ (Carbon Fiber) และเรซินโพลีเมอร์ (Resin Polymer) โดยงานวิจัยนี้มีอธิบายให้เห็นถึงอิทธิพลตามเงื่อนไขที่การกระจายตัวของไฟเบอร์ (Fiber Orientation Distribution) ของวัสดุผสมแผ่นบาง SMC นอกจากนี้ยังได้ทำการจำลองด้วย Autodesk Moldflow ยืนยันด้วยว่างานวิจัยสามารถใช้การได้ดีจากการทำนายผลเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง ดังรูปที่ 2.29 จากการพิจารณาผลตัวแปรที่สำคัญได้แก่ แรงกด ค่า Tensile Modulus โดยการทำนายผลของค่า Tensile Modulus นั้นสรุปได้ว่ามีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับรูปแบบการวางแนวของเส้นใย (Fiber Orientation) ในรูปแบบของดิจิตอล (Digital Image Correlation: DIC) ในโปรแกรม Moldflow



บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการดำเนินงานวิจัยที่ประกอบไปด้วยระเบียบวิธีวิจัยที่แสดงถึงขั้นตอนหรือกระบวนการวิธีการดำเนินงานวิจัย เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่แสดงถึงกระบวนการเตรียมโมเดลทางไฟไนต์เอลิเมนต์ การเลือกใช้ตัวคำนวณ และการแสดงผล การวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปจะส่งผลอย่างไรต่อผลลัพธ์ที่ได้ ซึ่งต้องทดสอบการสร้างรูปแบบเมช โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 ระเบียบวิธีวิจัย

3.1.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.1.1.1 ศึกษาข้อมูลงานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้อง เช่น แม่พิมพ์อัดขึ้นรูป การใช้โปรแกรมช่วยออกแบบทางวิศวกรรม การถ่ายเทความร้อนในวัสดุ สมบัติของวัสดุแต่ละชนิดจากการทบทวนวรรณกรรม วิธีการออกแบบแม่พิมพ์

3.1.1.2 ศึกษาข้อมูลและวิธีการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม SolidWorks Simulation การตั้งค่าสมบัติของวัสดุ (Properties of Materials) พารามิเตอร์ของวัสดุ การใส่หน้าสัมผัส (Contact) การตรวจสอบการชนกันของชิ้นส่วนประกอบแม่พิมพ์

3.1.1.3 ทำการออกแบบและสร้างแบบจำลองแม่พิมพ์อัดขึ้นรูป 3 มิติด้วยโปรแกรม SolidWorks และ SolidWorks Simulation

3.1.1.4 กำหนดค่าข้อมูลตัวแปรของรูปทรงเลขาคณิตแบบจำลอง เช่น ตำแหน่งพิกัดของโหนด เส้น พื้นผิว ชนิดของเอลิเมนต์และคุณสมบัติของวัสดุ

3.1.1.5 วิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน การกระจายตัวของความร้อนและการสูญเสียความร้อนของแม่พิมพ์ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

3.1.1.6 สรุปผลการวิเคราะห์ทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ การถ่ายเทความร้อนของแม่พิมพ์ การกระจายตัวของความร้อนและการสูญเสียความร้อนของแม่พิมพ์

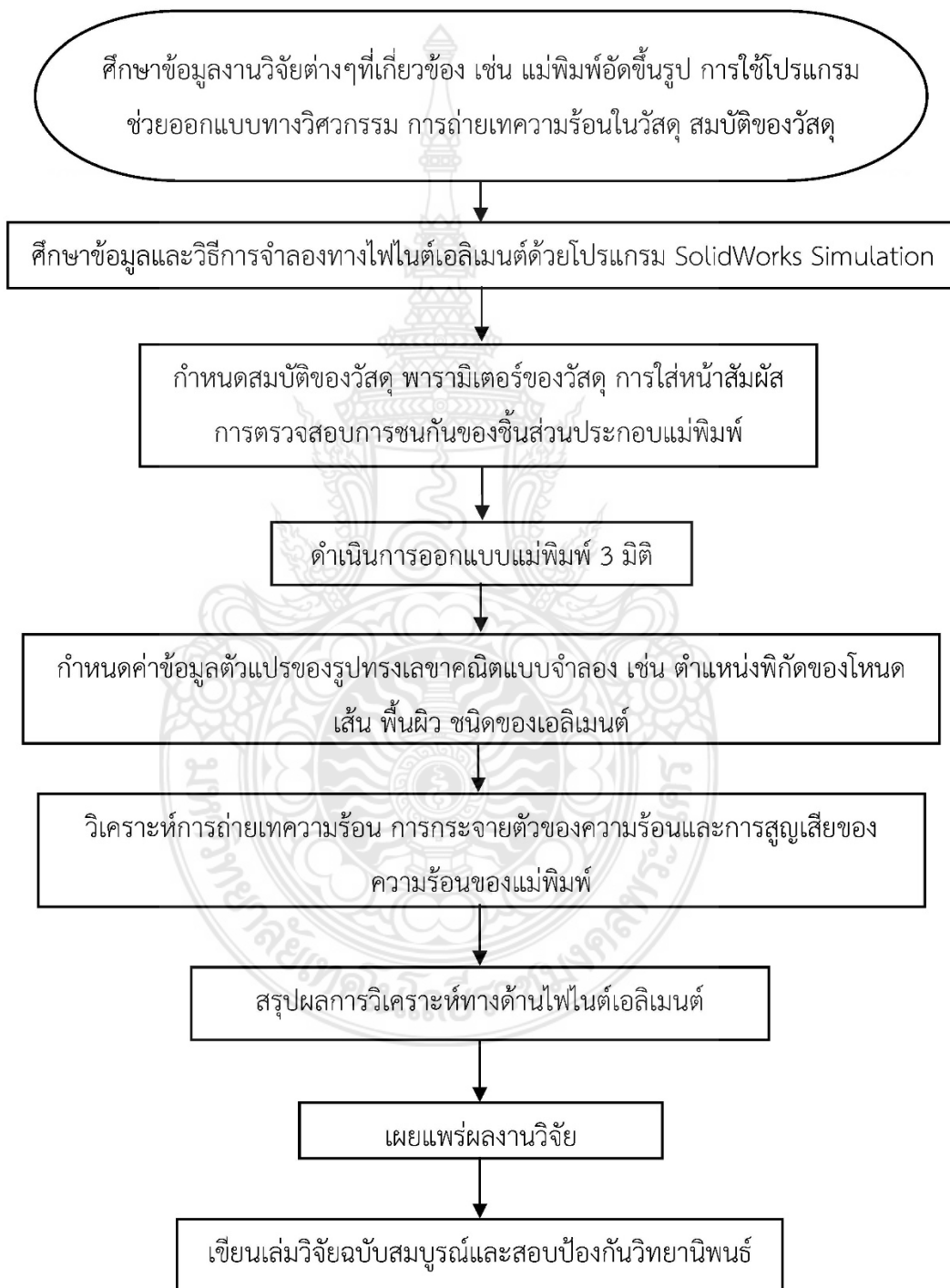
3.1.1.7 เผยแพร่ผลงานวิจัยด้วยการตีพิมพ์เผยแพร่ลงในวารสารทางวิชาการหรืองานสัมมนาทางวิชาการที่เป็นที่ยอมรับของคณะกรรมการบริหารหลักสูตรหรือตามที่มหาวิทยาลัยกำหนด

3.1.1.8 เขียนเล่มวิจัยฉบับสมบูรณ์และสอบป้องกันวิทยานิพนธ์

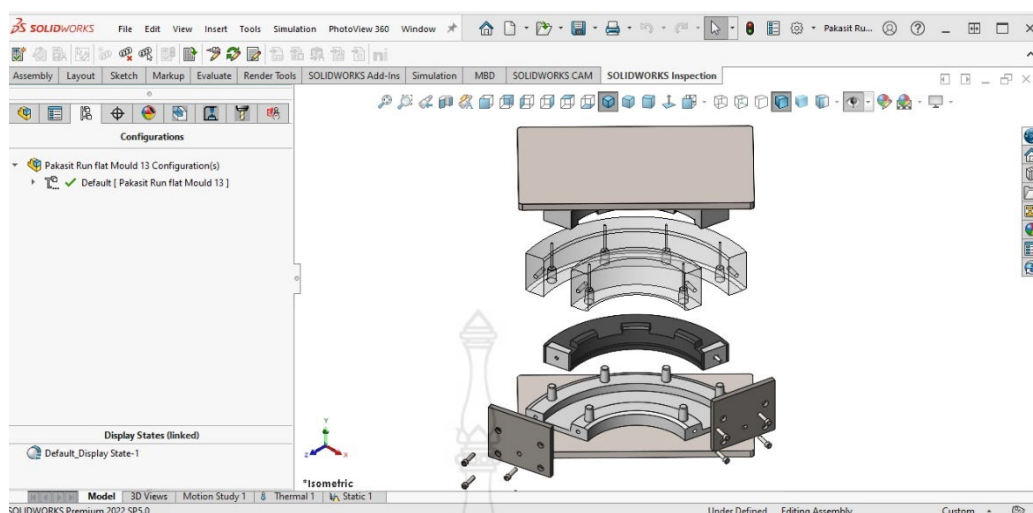
3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย

3.1.2.1 โปรแกรม SolidWorks Simulation ดังรูปที่ 3.2 เป็นโปรแกรมทางด้าน Finite Element Analysis (FEA) ที่สร้างขึ้นในอินเทอร์เฟซ SolidWorks CAD ซึ่งเป็นโปรแกรมที่มีความ

เชื่อมโยงสอดคล้องกับโปรแกรมการออกแบบ SolidWorks เป็นเครื่องมือที่จำเป็นสำหรับการทดสอบ ออกแบบอย่างรวดเร็วและทำซ้ำได้ง่าย โดยได้ทำการวิเคราะห์ผลลัพธ์ในด้านของการวิเคราะห์เชิงความร้อน (Thermal Analysis) คือ การคำนวณอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนภายในและระหว่าง ส่วนประกอบของแม่พิมพ์



รูปที่ 3.1 กระบวนการวิจัย



รูปที่ 3.2 โปรแกรม SolidWorks

3.1.2.2 เครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีหน่วยประมวลผลจำนวนมากและรวดเร็ว โดยในการวิเคราะห์หรือคำนวณทางระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโปรแกรม SolidWorks นี้ จำเป็นต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีคุณภาพสูง จึงจะสามารถวิเคราะห์ผลลัพธ์ต่างๆจากโปรแกรม SolidWorks ได้อย่างรวดเร็ว

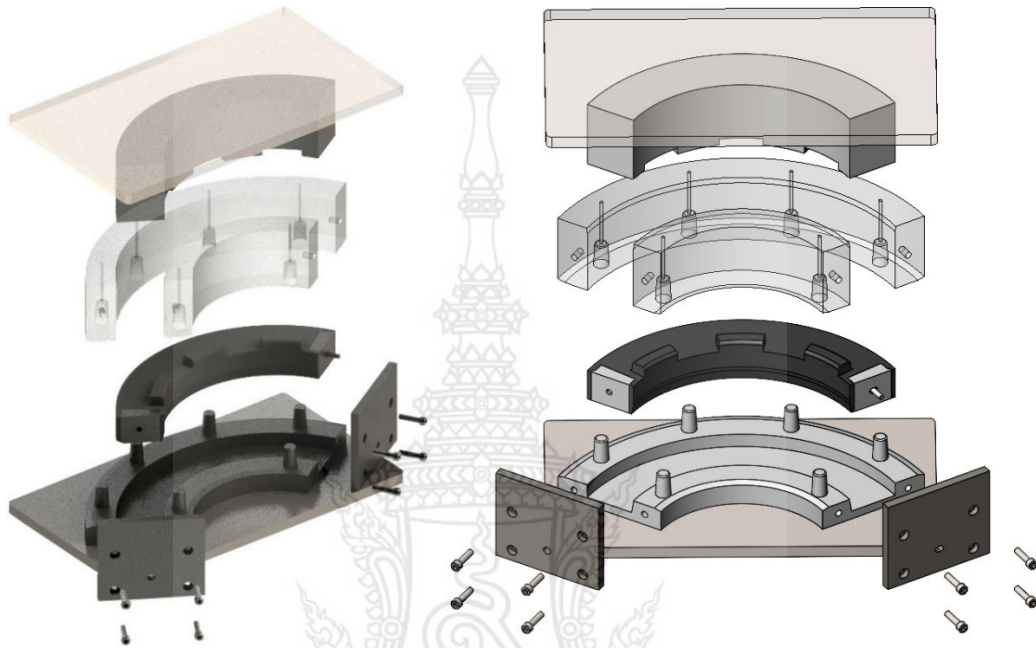
3.2 การสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Pre-Processing)

การสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์อยู่ภายใต้สมมติฐานในการวิเคราะห์โดยกำหนดสมมติฐานของวัสดุ SKD 11 ที่ใช้ทำแม่พิมพ์ล้อนิรภัยเป็นวัสดุที่มีเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) และมีสมบัติเหมือนกันในทุกทิศทาง (Isotropic Materials) พิจารณาการถ่ายเทความร้อนและกระจายความร้อนจนถึงสภาวะคงตัว (Steady State) และสำหรับในขั้นตอนการเตรียมข้อมูลเบื้องต้น ขั้นแรกต้องสร้างแบบจำลองทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ทางด้านกระจายความร้อนซึ่งประกอบไปด้วย 5 ส่วน

3.2.1 การสร้างแบบจำลองโมเดลแม่พิมพ์ล้อนิรภัยรันแพลทสามมิติ ดังรูปที่ 3.3 โดยใช้โปรแกรมช่วยออกแบบและวิเคราะห์ทางวิศวกรรม ในที่นี้เลือกใช้โปรแกรม SolidWorks เพื่อออกแบบและวิเคราะห์ความสามารถในการถ่ายเทความร้อน ซึ่งสามารถคำนวณและวิเคราะห์ทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ได้

3.2.2 การกำหนดชนิดของวัสดุแม่พิมพ์ (Applied Materials) เป็นวัสดุ SKD 11 เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความเหมาะสมและเป็นที่ยอมรับในการนำมาสร้างแม่พิมพ์ กำหนดคุณสมบัติต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 การกำหนดค่าคุณสมบัติของวัสดุ (Properties of Material) ซึ่งเป็นค่าจำเพาะของวัสดุนั้นๆ ประกอบไปด้วยค่าความหนาแน่น ความเค้นที่จุดคราก ความต้านทานแรงดึงสูงสุด ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น อัตราส่วนปัวซอง ค่าโมดูลัสของแรงบีบอัด ค่าโมดูลัสการเฉือน การนำความร้อน

การขยายตัวเชิงความร้อนและค่าความร้อนจำเพาะ ในการกำหนดค่าต่างๆ เหล่านี้เราจะกำหนดค่าตามลักษณะของปัญหาที่จะวิเคราะห์ โดยได้กำหนดวัสดุให้เป็นวัสดุที่มีเนื้อเดียวกันในทุกๆ ตำแหน่งของเนื้อวัสดุ (Homogeneous) วัสดุมีคุณสมบัติเหมือนกันในทุกทิศทาง (Isotropic Material) และเป็นวัสดุยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic Region)



ภาพไอโซเมตริก

ภาพด้านบน

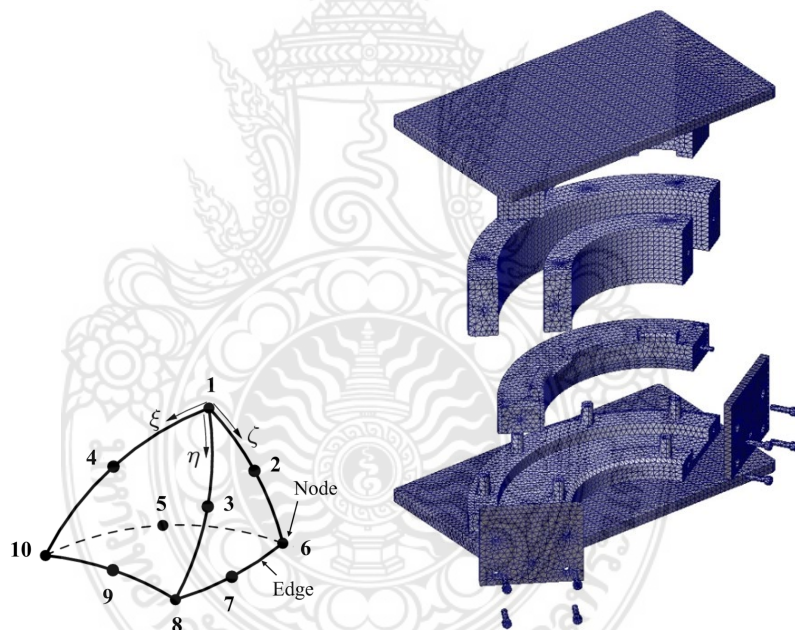
รูปที่ 3.3 โมเดลแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปร้อนล้อนिरภัยรันแพลท

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติและค่าพารามิเตอร์ของวัสดุ SKD11 และ PE Composite [6]

คุณสมบัติ	วัสดุ	
	SKD11	PE Composite
ความหนาแน่น	8,400 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร	1,246.5 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร
ความเค้นที่จุดคราก	470 เมกะปาสคา	20.52 เมกะปาสคา
ความต้านทานแรงดึงสูงสุด	745 เมกะปาสคา	29.96 เมกะปาสคา
ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น	208 จิกกะปาสคา	784.46 จิกกะปาสคา
อัตราส่วนปัวซอง	0.3	0.3
โมดูลัสของแรงบีบอัด	173 จิกกะปาสคา	-
ค่าโมดูลัสการเฉือน	80 จิกกะปาสคา	-
การนำความร้อน	20.5 วัตต์/เมตร-เคลวิน	0.461 วัตต์/เมตร-เคลวิน
การขยายตัวเชิงความร้อน	11 วัตต์/เมตร-เคลวิน	-
ความร้อนจำเพาะ	461 จูล/กิโลกรัม-เซลเซียส	1,796 จูล/กิโลกรัม-เคลวิน

3.2.3 การกำหนดชนิดวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์ล้อรันแพลท โดยได้กำหนดให้เป็นวัสดุผงพอลิเมอร์คอมโพสิต คือ โพลีเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด (UHMWPE) ผสมกับอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นวัสดุที่ได้จากงานวิจัยของ งามพรรณ ชะโล เรื่อง “การศึกษาสมบัติทางกลของโพลีเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดเชิงประกอบสำหรับล้อรันแพลท” มีการกำหนดค่าคุณสมบัติของวัสดุ (Properties of Material) ซึ่งเป็นค่าจำเพาะของวัสดุประกอบไปด้วย ค่าความหนาแน่น ค่าความเค้นที่จุดคราก ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น อัตราส่วนปัวซอง ค่าการนำความร้อนและค่าความร้อนจำเพาะ ตามตารางที่ 3.1

3.2.4 การกำหนดให้โปรแกรม SolidWorks วิเคราะห์ในโหมดการวิเคราะห์เชิงความร้อน (Thermal Analysis) คือ คำนวณอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนภายในและระหว่างส่วนประกอบของแม่พิมพ์ ในงานวิจัยนี้จะกำหนดภาระทางความร้อน (Thermal Load) ที่ประกอบด้วยการพาความร้อนและการนำความร้อน จะทำให้การวิเคราะห์ของโปรแกรม SolidWorks Simulation สามารถวิเคราะห์หาค่าการกระจายความร้อนในสภาวะคงตัวได้



รูปที่ 3.4 เอลิเมนต์เตตระฮีดรอล (Tetrahedral) 10 โหนดกับผลการแบ่งเอลิเมนต์

3.2.5 การเลือกเอลิเมนต์และแบ่งเอลิเมนต์ (Element and Mesh) ทำการแบ่งโครงสร้างของโมเดลออกเป็นเอลิเมนต์เล็กๆ การเลือกชนิดของเอลิเมนต์ที่จะนำไปวิเคราะห์นั้นควรเลือกให้เหมาะสมเนื่องจากขนาดของเอลิเมนต์นั้นมีผลต่อความแม่นยำในการวิเคราะห์อย่างมาก หากทำการแบ่งเอลิเมนต์โดยไม่มีการควบคุมอย่างเหมาะสมจะส่งผลให้ได้ผลลัพธ์ที่ไม่ถูกต้อง โดยโปรแกรมจะสร้างเอลิเมนต์และกำหนดจุดต่อ (Node) เป็นแบบ Bonded และ No Penetration พร้อมกับการกำหนดหมายเลขเอลิเมนต์และหมายเลขจุดต่อในการเลือกชนิดเอลิเมนต์ นับว่ามีความสำคัญมากที่ต้องเลือกชนิดเอลิเมนต์ให้เหมาะสมกับรูปร่างของแบบจำลอง การเลือกชนิดของเอลิเมนต์จะคำนึงถึง

คุณสมบัติของวัตถุหรือโครงสร้างและจำนวนแกน (x, y, z) ที่ใช้บอกตำแหน่งของเอลิเมนต์ เนื่องจากแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปผง UHMWPE+Al₂O₃ มีลักษณะเป็นพื้นที่ราบตรงและส่วนโค้งรวมกัน ดังนั้นเอลิเมนต์ 3 มิติที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ครั้งนี้คือ เตตระฮีดรอล (Tetrahedral) โดยแต่ละเอลิเมนต์มีจำนวน 10 โหนด ดังรูปที่ 3.5 ซึ่งจะให้คำตอบที่ถูกต้องมากกว่าเอลิเมนต์ชนิด 4 Nodes Tetrahedral ที่มีขอบข้างตรงแต่จะใช้เวลาในการคำนวณมากกว่า

จากรูปที่ 3.4 แสดงให้เห็นการแบ่งเอลิเมนต์ของแบบจำลองที่เข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ทางระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเอลิเมนต์ที่เลือกใช้คือเอลิเมนต์แบบเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) ซึ่งเป็นเอลิเมนต์ที่มีจำนวน 10 โหนด โดยทำการแบ่งเอลิเมนต์ออกเป็นจำนวนทั้งหมด 213,827 เอลิเมนต์ ขนาดเฉลี่ยของแต่ละเอลิเมนต์อยู่ที่ประมาณ 10 มิลลิเมตร และมีจำนวนโหนดทั้งหมด 336,760 โหนด กำหนดคู่สัมผัสระหว่างแต่ละชั้นส่วนของแบบจำลองให้ชั้นงานมีการเชื่อมติดกันเสมือนว่าเป็นชิ้นงานเดียวกัน (Bonded) และกำหนดให้ชั้นงานสามารถสัมผัสกันได้ หากมีแรงมากระทำให้ชั้นงานเคลื่อนที่มาชนกัน ชิ้นงานก็จะมีกีดกัน (No Penetration) จากนั้นทำการกำหนดอุณหภูมิลงในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยกำหนดให้ความร้อนที่พื้นผิวแทนอัดร้อนทั้งด้านบนและด้านล่างของแม่พิมพ์มีอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส จากนั้นสังเกตการถ่ายเทความร้อน การกระจายตัวของความร้อนที่เข้าสู่แม่พิมพ์และวัสดุ UHMWPE Composite และการสูญเสียความร้อน

3.3 กระบวนการคำนวณหรือวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Solve-Processing)

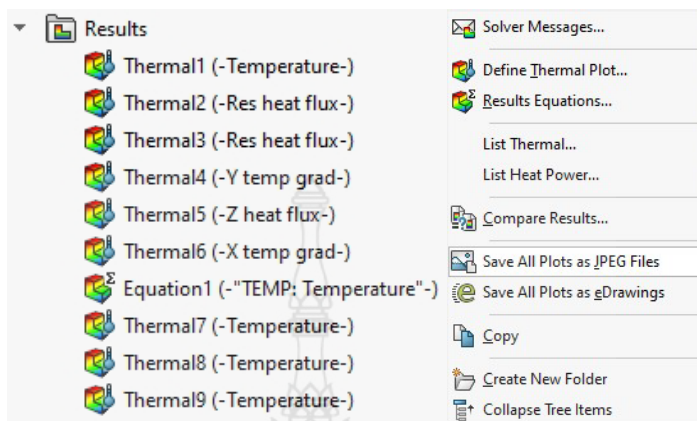
เป็นส่วนการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งปกติแล้วเราไม่สามารถแก้ไขกระบวนการส่วนนี้ได้แต่สามารถกำหนดรูปแบบและการวิเคราะห์ให้มีความเหมาะสมกับปัญหานั้นๆ โดยสามารถแสดงลำดับการวิเคราะห์หรือออกเป็นขั้นตอนดังนี้

- โปรแกรมทำการสร้าง Local Stiffness Matrix และสร้าง Element Temperature Vector ของแต่ละเอลิเมนต์
- ประกอบ Local stiffness matrix ของการถ่ายเทความร้อน [k] ซึ่งประกอบไปด้วยเมตริกซ์การนำความร้อนและเมตริกซ์การพาความร้อน และ Element Temperature Vector ของทุกเอลิเมนต์เข้าเป็น Global Stiffness Matrix และ Global Temperature Vector ตามลำดับอาศัยหมายเลขตัวแปรที่จุดต่อเป็นตำแหน่งของการประกอบ
- โปรแกรมจะตัดสมการที่ตรงกับเงื่อนไขขอบที่ค่าเท่ากับศูนย์ออกและแก้สมการ

3.4 การแสดงผลการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Post-Processing)

เป็นการแสดงผลการวิเคราะห์ที่ได้ออกมาในลักษณะของภาพกราฟิก โดยสามารถแสดงการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) โดยตรงรวมถึงสามารถแสดงค่าอุณหภูมิ พลังค์ความร้อน ในเอลิ

เมนูต่างๆ ออกมาเป็นภาพกราฟฟิคได้ ชุดคำสั่งสำหรับการแสดงผลประกอบด้วย Thermal, Results Equations..., List Thermal, List Heat Power... เป็นต้น ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ชุดคำสั่งสำหรับแสดงผลการวิเคราะห์



บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

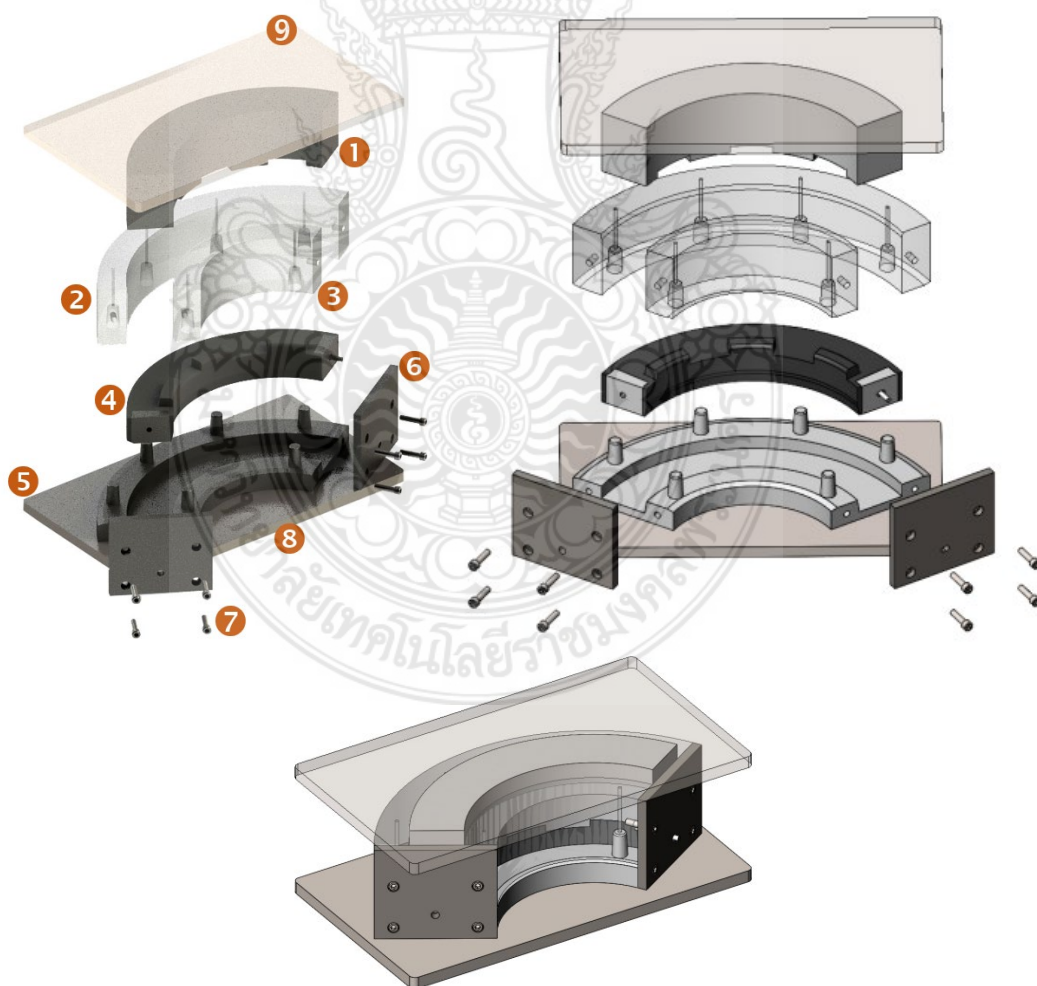
ในบทที่ 4 คือผลการดำเนินงานที่ต่อเนื่องมาจากบทที่ 3 ที่กล่าวถึงกระบวนการดำเนินงานต่างๆ ผลการดำเนินงานประกอบด้วยผลของการออกแบบแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปร้อนล้อนีรภัยรันแพลทยางสำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคล รวมไปถึงผลการวิเคราะห์การกระจายของความร้อนที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์และล้อนีรภัยรันแพลท มีรายละเอียดต่างๆ ดังต่อไปนี้

4.1 ผลการออกแบบแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปร้อนล้อนีรภัยรันแพลทยางสำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคล

ในการอัดขึ้นรูปด้วยการอัดและให้ความร้อนได้ถูกนำไปใช้กับการอัดวัสดุหลายชนิด เช่น พอลิเอทิลีน (PE), พอลิพรพิลีน ไนลอน (polyamides), สไตรีน , โพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC) Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) และโพลีคาร์บอนเนต เป็นต้น แม่พิมพ์ที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปพลาสติกนั้นมีความหลากหลาย อาจจะมี ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างชนิดของตาย (Die) และความซับซ้อนของตาย (Die) ทั้งหมด ต้องมีช่องทางอนุญาตให้มีการไหลออกมาอย่างต่อเนื่องของพอลิเมอร์ที่ละลาย งานวิจัยนี้ออกแบบแม่พิมพ์สำหรับการอัดขึ้นรูปแบบผสม โดยใช้โมเดลล้อนีรภัยรันแพลทของประกอบ ซาติภุคต์ และคณะ [26] และขนาด ท่อใหญ่ [5] การอัดขึ้นรูปแบบผสมเป็นกระบวนการที่ผสมพอลิเมอร์ UHMWPE กับสารเติมแต่งที่เป็น Al_2O_3 เพื่อให้ได้สารประกอบพลาสติกที่มีสมบัติทางกลบางอย่างที่ดีขึ้น โดยทั้ง UHMWPE และ Al_2O_3 จะอยู่ในรูปแบบเม็ดผง เพื่อใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน ซึ่งเป็นการอัดขึ้นรูปแบบดั้งเดิม เครื่องอัดมีขนาดเครื่องที่หลากหลายขึ้นอยู่กับการใช้งานและปริมาณงานที่ต้องการ จากการออกแบบแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปร้อนล้อนีรภัยรันแพลทยางสำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคล ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปร้อนหลากหลายรูปแบบ จนกระทั่งได้แม่พิมพ์ที่สามารถรองรับการถ่ายเทความร้อนและการกระจายตัวของความร้อนจากแม่พิมพ์ซึ่งกำหนดเป็นวัสดุ SKD11 ไปยังตัวผลิตภัณฑ์ซึ่งเป็น PE Composite ได้อย่างเหมาะสม ดังรูปที่ 4.1 โดยมีชิ้นส่วนประกอบสำหรับการทำงาน คือ

1. แกนอัดตัวบน (Upper Punch) ทำหน้าที่รับแรงอัดจากเครื่องอัดไฮดรอลิกที่มีการติดตั้งชุดให้ความร้อนที่แทนอัดไฮดรอลิก พื้นที่หน้าสัมผัสต้องแนบสนิทให้ความร้อนส่งถ่ายถึงกันอย่างเต็มที่ ในการติดตั้งจะต้องติดตั้งให้ได้ตำแหน่ง ไม่เอียง ไม่เบียดด้านข้างตัวเรือนแม่พิมพ์
2. ตัวเรือนด้านนอก (Outer housing) เป็นตัวเรือนรับแรงเบียดด้านข้างจากการอัดของแกนอัดตัวบน และใช้ถอดล้อนีรภัยรันแพลทออกจากแม่พิมพ์ และเป็นส่วนที่มีการสูญเสียความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อม จึงอาจต้องติดตั้งฉนวนก็สามารถทำได้ เพื่อให้ความร้อนเกิดการกระจายและเข้าสู่สภาวะคงตัวเร็วที่สุด

3. ตัวเรือนด้านใน (Inner Housing) เป็นตัวเรือนรับแรงเบียดด้านข้างจากการอัดของแกนอัดตัวบน และใช้ถอดล้อรันแพลทออกจากแม่พิมพ์เช่นเดียวกับตัวเรือนด้านนอก
4. ล้อรันแพลทสำเร็จรูป (Run-Flat Wheels) เป็นโมเดลล้อรันแพลท เพื่อใช้ในการออกแบบแม่พิมพ์จึงเห็นปรากฏอยู่ในแม่พิมพ์นี้
5. ตัวฐานแม่พิมพ์ (Mold Based) เป็นตัวรับความร้อนจากชุดให้ความร้อน และเป็นตัวเรือนหลักเพื่อให้ชิ้นส่วนต่างๆ ประกอบเข้ามารวมกัน การติดตั้งจะต้องทำการยึดด้วยแคลมป์ (Clamp) อย่างแน่นหนา และได้ระนาบ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการขบกันระหว่างผิวแม่พิมพ์กับตัวกด
6. แผ่นเปิด-ปิดด้านข้าง (Side Cover) และชุดยึดฝาเปิด-ปิด (Cover Fixing Kit) ทำหน้าที่ในการให้โครงเหล็กล้อรันแพลทเข้ามายึดติด และใช้ในการถอดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์
7. สลักเกลียวสำหรับเปิด-ปิดฝาด้านข้าง
8. แท่นรับแรงและความร้อนตัวล่าง
9. แท่นรับแรงและความร้อนตัวบน



รูปที่ 4.1 โมเดลแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปล้อรันแพลทและส่วนประกอบ

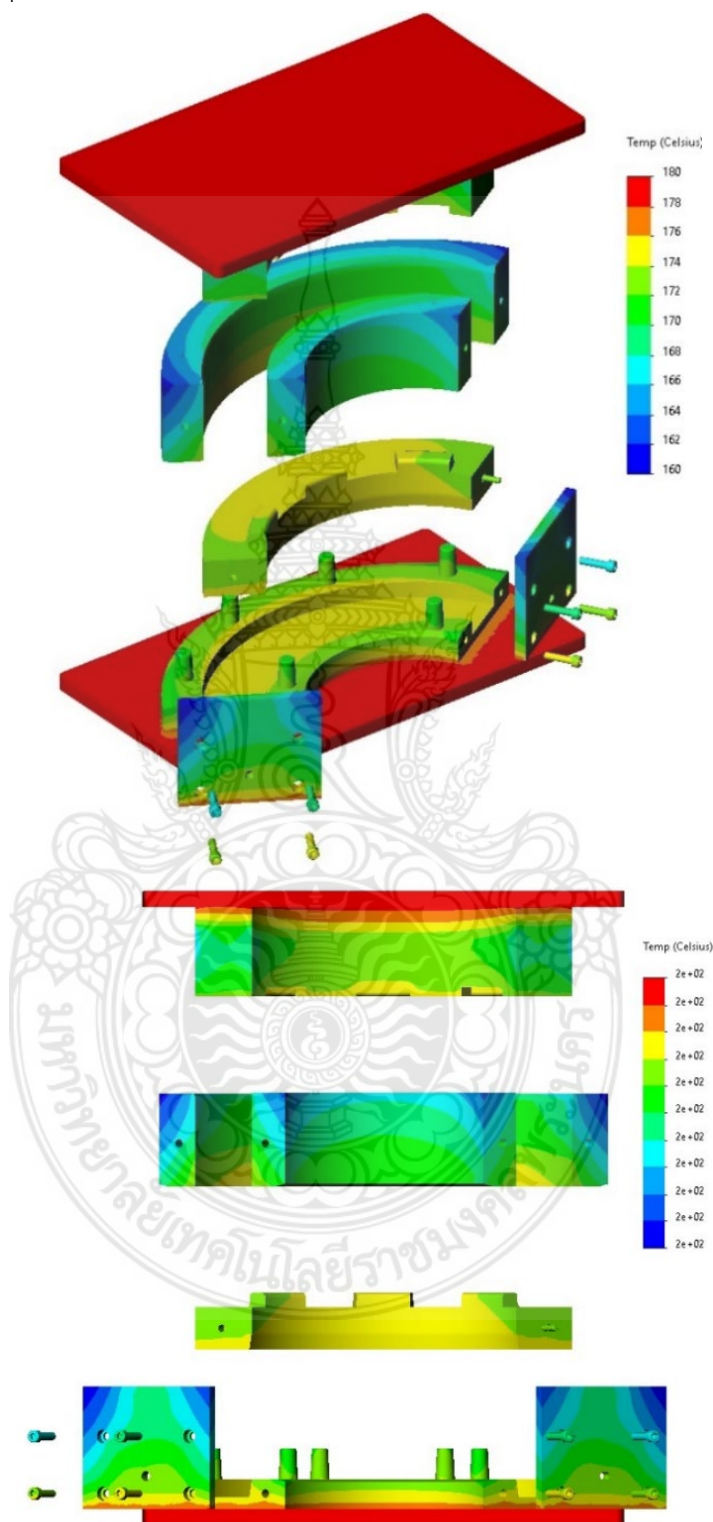
4.2 ผลการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนของแม่พิมพ์โลหะขึ้นรูปร้อนล่อร้อนแพลทโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

สำหรับการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนของแม่พิมพ์โลหะขึ้นรูปร้อนล่อร้อนแพลทโดยใช้โปรแกรม Solidworks Simulation ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ดังที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 จากรูปที่ 4.2 เป็นการแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายความร้อนด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปร้อนและล่อนิรภัยร้อนแพลทในมุมมองไอโซเมตริก จะเห็นสภาพการถ่ายเทความร้อนการกระจายของความร้อน พบว่าแม่พิมพ์สามารถถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ตัวผลิตภัณฑ์ได้เป็นอย่างดี มีการกระจายตัวของความร้อนที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียสอย่างทั่วถึงทั้งแม่พิมพ์ จากรูปที่ 4.3 เป็นภาพแสดงการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปร้อนและล่อนิรภัยร้อนแพลทในมุมมองด้านบน ทำให้สามารถเห็นความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้ชัดเจนขึ้นในการแสดงภาพตัดด้านหน้า โดยเฉพาะการกระจายตัวของความร้อนในผลิตภัณฑ์ สามารถทำได้ดี มีความแตกต่างของอุณหภูมิในตัวผลิตภัณฑ์เพียงแค่ 5-6 องศาเซลเซียส เท่านั้น ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ จากรูปที่ 4.5 จะแสดงภาพตัดจากด้านล่างไปยังด้านบนของตัวผลิตภัณฑ์ทำให้เห็นการกระจายความร้อนที่ชัดเจนมากขึ้น สังเกตได้ว่าการสูญเสียความร้อนสู่ภายนอกบริเวณขอบของแม่พิมพ์ ดังนั้นในการใช้งานจริงจะต้องมีการป้องกันการสูญเสียความร้อนออกด้านข้าง เพื่อให้เกิดการคงตัวของอุณหภูมิในแม่พิมพ์ โดยในการถอดผลิตภัณฑ์ออกจากแม่พิมพ์นิรภัยนี้จำเป็นต้องให้อุณหภูมิลดลงต่ำกว่า 35 องศาเซลเซียส จึงจะสามารถทำการถอดแม่พิมพ์ออกได้และเป็นข้อจำกัดในการใช้งานแม่พิมพ์ชนิดนี้ ข้อดีคือมีความสลับซับซ้อนที่น้อยและต้นทุนในการผลิตไม่สูงเกินไป

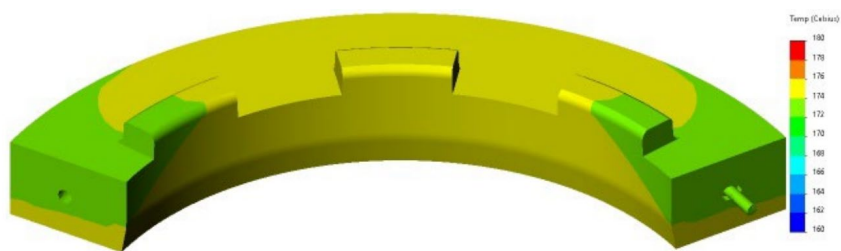
จากผลการวิเคราะห์สรุปได้ว่ากระบวนการวิเคราะห์จะส่งผลให้ถูกต้องได้จะต้องระมัดระวังในขั้นตอน Pre-Processing โดยเฉพาะอย่างยิ่งการกำหนดค่า Thermal Load การกำหนดค่าคู่สัมผัส (Contact) และการควบคุมขนาดเอลิเมนต์ (Element Mesh Control) จากนั้นทำการจำลองและปรับค่าจนกระทั่งได้รูปแบบที่เหมาะสมทั้งหมดแล้วจึงทำการอ่านค่าความร้อนที่เกิดขึ้น ผลลัพธ์ที่ถูกต้องได้แสดงถึงกระบวนการดำเนินการเตรียมโมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สามารถนำไปใช้กับแม่พิมพ์ที่จะออกแบบต่อไปสำหรับการขึ้นรูปล่อร้อนแพลท

การออกแบบแม่พิมพ์และการวิเคราะห์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นเครื่องมือสำคัญที่ใช้ในการทำนายพฤติกรรมการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์ล่อนิรภัยร้อนแพลท ผลิตภัณฑ์ซึ่งอยู่ด้านในแม่พิมพ์มีความหนาแน่นมากจำเป็นต้องได้รับความร้อนกระจายอย่างทั่วถึงและเกิดการหลอมเหลวที่เหมาะสมภายใต้อุณหภูมิหลอมเหลวที่เหมาะสม จากการวิเคราะห์พบว่าแม่พิมพ์เกิดการสูญเสียความร้อนภายนอกแม่พิมพ์และความร้อนที่ส่งผ่านมาจากแท่นอัดร้อนทั้งด้านบนและด้านล่าง ได้ถูกส่งผ่านเข้าไปยังผลิตภัณฑ์ด้านในส่งผลให้เกิดการกระจายตัวของความร้อนจนเข้าสู่สภาวะคงตัว มีความแตกต่างของอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งของผลิตภัณฑ์อยู่ในช่วง 5-6 องศาเซลเซียส ซึ่งยอมรับ

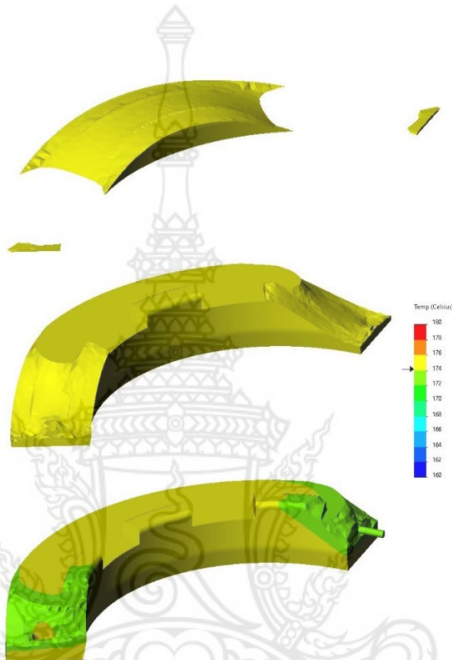
ได้ ซึ่งแม่พิมพ์นี้เป็นแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปร้อนอย่างง่ายและเป็นตัวอย่างในการนำไปสู่การสร้างแม่พิมพ์ที่มีความซับซ้อนโดยจุดประสงค์ในการถอดชิ้นงานออกได้อย่างรวดเร็วเพื่อผลิตในจำนวนมาก



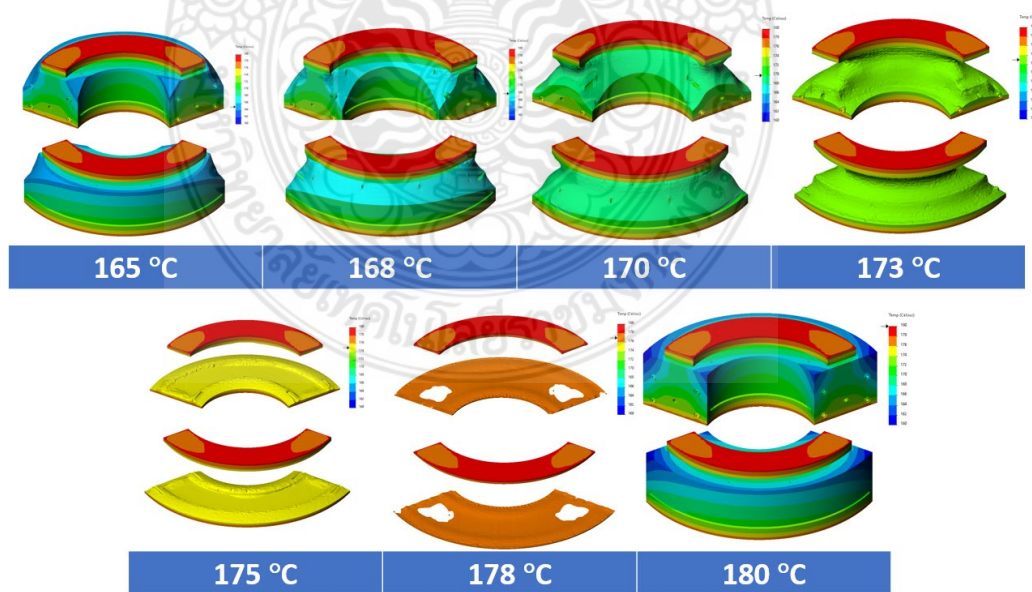
รูปที่ 4.2 ภาพแสดงการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปร้อนและล้อนิรภัยรันแพลทก) มุมมองไอโซเมตริก และ ข) มุมมองด้านหน้า



รูปที่ 4.3 ภาพแสดงการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นในล้อนิรภัยรันแพลท



รูปที่ 4.4 ภาพแสดงความแตกต่างของความร้อนที่เกิดขึ้นในตำแหน่งต่างๆของล้อนิรภัยรันแพลท



รูปที่ 4.5 การกระจายความร้อนเข้าของแม่พิมพ์และล้อนิรภัยรันแพลทที่ตำแหน่งต่างๆ ทั้งภายในและภายนอกแม่พิมพ์

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

โครงการวิจัยนี้เป็นการออกแบบและวิเคราะห์แม่พิมพ์โลหะเพื่อขึ้นรูปยางรันแพลทสำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคลโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ อีกทั้งยังเป็นโครงการวิจัยต่อเนื่องกับโครงการวิจัยของประกอบ ชาติภักต์ และคณะ [26] การวิจัยของนุชนาด ทองใหญ่ [5] ที่ได้ออกแบบล้อรันแพลทสำหรับรถยนต์บรรทุกทุกประเภทเล็กติดเกราะ รวมถึงการวิจัยของงามพรรณ ชะโล [6] ที่ได้ศึกษาสมบัติทางกลของวัสดุ Composite สำหรับล้อรันแพลท สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปล้อรันแพลทสำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคลและเพื่อวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนของแม่พิมพ์โลหะขึ้นรูปล้อรันแพลทโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเครื่องมือสำคัญในการวิจัย คือ การใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนที่วิเคราะห์โดยโปรแกรม Solidworks Simulation

การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นเครื่องมือสำคัญที่สามารถใช้ทำนายพฤติกรรม การกระจายความร้อนต่างๆที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์ล้อนิรภัยรันแพลทได้ ส่งผลให้ผู้ออกแบบสามารถปรับปรุงแม่พิมพ์ให้มีการกระจายความร้อนได้อย่างเหมาะสม จากการวิเคราะห์พบว่าแม่พิมพ์มีการสูญเสียความร้อนด้านนอกแม่พิมพ์ ซึ่งไม่มีนัยยะสำคัญที่ทำให้คุณภาพในการอัดขึ้นรูปลดลง ความร้อนที่ส่งมาจากแท่นอัดร้อนทั้งด้านบนและด้านล่างได้ถูกส่งผ่านเข้าไปยังผลิตภัณฑ์ ทำให้เกิดการกระจายตัวของความร้อนอย่างเหมาะสมจนเข้าสู่สภาวะคงตัว ทั้งนี้ ยังมีความแตกต่างของอุณหภูมิที่อยู่ในแม่พิมพ์และผลิตภัณฑ์

ผลลัพธ์จากการวิจัยสามารถตอบวัตถุประสงค์ของงานวิจัยได้ดังนี้

1. เพื่อออกแบบแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปล้อรันแพลทสำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคล พบว่า ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบแม่พิมพ์โลหะขึ้นรูปล้อรันแพลทจำนวนหลายครั้งและได้ทำการปรับปรุงแม่พิมพ์จนทำให้สามารถได้รูปแบบของแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปล้อรันแพลทที่มีความเหมาะสมในการถ่ายเทความร้อนและการกระจายตัวของความร้อน

2. การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนของแม่พิมพ์โลหะขึ้นรูปล้อรันแพลทโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่า ความร้อนที่ผู้วิจัยกำหนดให้กับชิ้นงานจากแท่นอัดร้อนทั้งด้านบนและด้านล่างนั้นสามารถถ่ายเทความร้อนและกระจายตัวไปยังแม่พิมพ์โลหะได้อย่างดี แต่ยังคงเกิดการสูญเสียความร้อนด้านนอกแม่พิมพ์ ซึ่งไม่ทำให้คุณภาพในการอัดขึ้นรูปลดลง มีถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ผลิตภัณฑ์ล้อรันแพลท ความร้อนสามารถกระจายตัวอย่างทั่วถึงในผลิตภัณฑ์ล้อรันแพลทที่ทำจากวัสดุ PE Composite เกิดอุณหภูมิที่เหมาะสมในการหลอมเหลววัสดุ PE Composite จนเข้าสู่สภาวะคงตัว มี

ความแตกต่างของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ลัอ์ร้อนแพลทเพียง 5-6 องศาเซลเซียสเท่านั้น ซึ่งสามารถยอมรับได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

ผู้วิจัยได้ออกแบบแม่พิมพ์นี้เป็นแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปร้อนอย่างง่าย ซึ่งสามารถนำไปต่อยอดในการสร้างแม่พิมพ์ที่มีความซับซ้อนมากขึ้นได้ เนื่องด้วยผลิตภัณฑ์ซึ่งอยู่ด้านในแม่พิมพ์มีความหนามาก จึงจำเป็นต้องวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ให้ได้รับความร้อนกระจายอย่างทั่วถึง จึงจะเกิดการหลอมเหลวที่เหมาะสมภายใต้อุณหภูมิหลอมเหลวที่เหมาะสม ในการถอดผลิตภัณฑ์ออกจากแม่พิมพ์ จำเป็นต้องรอให้อุณหภูมิลดลงต่ำกว่า 35 องศาเซลเซียส จึงจะสามารถทำการถอดแม่พิมพ์ออกได้และเป็นข้อจำกัดในการใช้งานแม่พิมพ์ชนิดนี้ แต่มีข้อดี คือ มีความสลับซับซ้อนที่น้อยและต้นทุนในการผลิตไม่สูงเกินไป

นอกเหนือจากการอัดขึ้นรูปร้อนแล้วยังสามารถใช้กระบวนการอื่นที่มีประสิทธิภาพในการขึ้นรูปได้เช่นกัน ยกตัวอย่าง การฉีดขึ้นรูป หรือกระบวนการอัดรีด (Extrusion) ทั้งนี้ โครงการวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เป็นต้นแบบในการผลิตแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปจริง เพื่อเป็นการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างการถ่ายเทความร้อนในชิ้นงานจริงและโมเดล 3 มิติต่อไป



เอกสารอ้างอิง

- [1] B-Quick. (2019). ยาง RUNFLAT คืออะไร??. [Online]. Available: <https://www.b-quick.com/th/advice/tyre/what-is-runflat-tyre>
- [2] Yukon. (2022). ยางรันแฟลต (Runflat Tires) คืออะไร?. [Online]. Available: <https://www.yukonlubricants.com/what-is-the-runflat-tyre/>
- [3] Chaichod. (2022). ยางรันแฟลต (ยาง Run Flat). [Online]. Available: <https://www.chaichod.com/blog-detail/37>
- [4] Bridgestone. (2023). RUN FLAT TIRES: HOW THEY WORK. [Online]. Available: <https://www.bridgestone.co.th/en/tire-clinic/tire-talk/run-flat-tires#>
- [5] นุชนาถ ทองใหญ่, "รูปแบบล้อ Run-Flat ที่เหมาะสมสำหรับรถยนต์บรรทุกทุกประเภทเล็กติดเกาะ" M. Eng. thesis, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangkok, 2022.
- [6] งามพรรณ ชะโล, "การศึกษาสมบัติทางกลของโพลีเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดเชิงประกอบสำหรับล้อ Run-flat" M. Eng. thesis, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangkok, 2022.
- [7] M. Worgull, M. Hecke, J. F. Héty and K. Kabanemi, "Modeling and Optimization of the Hot Embossing Process for Micro and Nanocomponent Fabrication," Journal of Microfabrication, Microlithography, and Micromachining, vol. 5, no. 1, pp. 011005-1-011005-13, 2006.
- [8] ธงชัย ฟองสมุทร, วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เบื้องต้น, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่: ห้างหุ้นส่วนจำกัด ดาราวรรณการพิมพ์ เชียงใหม่. 2549.
- [9] ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร, ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [10] รวิวัฒน์ รักสัจ และ ชาคริต สุวรรณจรัส, "การสร้างแบบจำลองวิสโคไฮเปอร์อีลาสติกของยางล้อไร้ลมโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์," วารสารวิชาการวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย, vol. 33, July. 2019.
- [11] ศุภชัย ดวงทองพล และ ชาคริต สุวรรณจรัส, "การฉีดขึ้นรูปชิ้นงานพลาสติกด้วยวิธีการผสมผสาน CAD/CAE," วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, ปีที่ 29 ฉบับที่ 4, 2561.
- [12] ชาลี ตรีการกุล, สถาพร ชาทาคม และ ไพบูลย์ สิ้นพระยากุล, "การใช้โปรแกรม CAE ช่วยออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกแบบใช้ก๊าซช่วยฉีด," วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, ปีที่ 2 ฉบับพิเศษ (ฉลองสิริราชสมบัติครบ 60 ปี), 2549.

- [13] วีระยุทธ หล้าอมรชัยกุล และ วรกฤษ ตอนคำเพ็ง, “การศึกษาและออกแบบสำหรับกระบวนการผลิตของกระถางต้นไม้ของเล่นโดยใช้เทคนิคทางด้าน CAD/CAM/CAE,” *Ladkrabang Engineering Journal*, vol. 39, no. 1, Mar. 2022.
- [14] วรณวนษ์ บุ่งสุด และ จันทร์จีรา อภิรักษ์เมธาวงศ์, “การศึกษากรรมวิธีการขึ้นรูปแบบเย็นของวัสดุรีไซเคิลจากเศษเมลามีน,” รายงานวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, ตุลาคม 2558.
- [15] อุดุลย์ จิตรอารี ศรีไร่ จารุภิญโญ และ ระพี กาญจนะ, “การออกแบบการทดลองเพื่อการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเสียรูปในการจำลองกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติก ABS,” สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ปทุมธานี, 2555.
- [16] วีระยุทธ หล้าอมรชัยกุล, “การออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกด้วยเทคนิคการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์,” *Naresuan University Engineering Journal*, vol. 11, no. 1, pp. 101-109, 2016.
- [17] มนัส เற்றுญกิจ วัชระ ลายลักษณ์ และ สถาพร ซาตาคม, “การพัฒนาวิธีการสร้างแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปพลาสติกแผ่นด้วยเทคนิควิศวกรรมย้อนรอยและศึกษาปัญหาการเสียรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์,” *ศรีปทุมปริทัศน์ ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*.
- [18] สถาพร ซาตาคม, สุเทพ บุตรีดี และ สรศักดิ์ วงศ์มณี, “การศึกษาหาอิทธิพลของความหนาที่ส่งผลกระทบต่อระยะทางการไหลของเทอร์โมพลาสติกกลุ่ม Polyolefin,” *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม*, ปีที่ 2 ฉบับพิเศษ (ฉลองสิริราชสมบัติครบ 60 ปี), 2549.
- [19] ศรีสัจจา บุญฤทธิ์, “อิทธิพลปัจจัยฉีดขึ้นรูปที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกล,” ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- [20] สมเจตน์ พชรพันธ์, “ข้อบกพร่องในชิ้นงานพลาสติกที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป,” *สาเหตุและแนวทางการแก้ไข*, วิศวกรรมสาร มก., ปีที่ 22, no. 69, 2552.
- [21] Antoine Rios, Bruce Davis and Paul Gramann Computer Aided Engineering in Compression Molding, Polymer Processing Research Corporation.
- [22] Sooyoung Lee, Dongwoo Shin, Gyeongchan Kim and Wooseok Ji, “Numerical model for compression molding process of hybridly laminated thermoplastic composites based on anisotropic rheology,” *Composites Part C: Open Access* 7, 2022.
- [23] H.-Sang Kim, W.-Gi Lee, Ch.-Hee Lee and K. Don Lee, “Optimization for the prepreg compression molding of notebook computer cover using design of experiment and finite element method,” *SN Applied Sciences*, vol. 2, no. 1619, 2020.

- [24] G.Zampierollo, “Design of Hot Extrusion Molding Device for the Continuous Production of Pharmaceutical Tablets, Bachelor of Science in Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 2010.
- [25] Yang Li, Zhangxing Chen, Hongyi Xu and et.al., “Modeling and Simulation of Compression Molding Process for Sheet Molding Compound (SMC) of Chopped Carbon Fiber Composites,” *SAE International Journal*, vol. 10, no. 2, 2017.
- [26] ประกอบชาติภูกต์ และคณะ, ล้อ Run-flat สำหรับรถยนต์บรรทุกทุกประเภทขนาดเล็กติดเกราะ รายงานวิจัย, สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, 2561.



ภาคผนวก ก

บทความตีพิมพ์เผยแพร่และใบรับรองการนำเสนอ





Proceedings

Conference 2023

24 - 26 พฤษภาคม 2566

ณ โรงแรมอมารี พัทยา / โอโซนอร์ส พัทยา
จังหวัดชลบุรี

The 8th Rajamangala Manufacturing & Management Technology Conference 2023

การประชุมวิชาการราชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ

MTC 2023

ครั้งที่ 

“ขับเคลื่อนงานวิจัยด้วย BCG

เพื่อตอบโจทย์เป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน SDGs”

Conference Topics

- Production and Operations Management
- Manufacturing Engineering
- Material Science and Application
- Supply Chain and Logistics
- Industrial Education
- Technology and Innovation

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ดำเนินการจัดงาน (Organizer)

โดย



อำนวยการจัดงาน (Hosts)

โดย



ร่วมจัดงาน (Co-Hosts)

โดย



ประวัติ

การประชุมวิชาการราชชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ

ครั้งที่ 1	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ	28 - 29 กรกฎาคม 2559 จังหวัดพระนครศรีอยุธยา
ครั้งที่ 2	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ณ โรงแรมเคปราชา	4 - 8 ธันวาคม 2560 จังหวัดชลบุรี
ครั้งที่ 3	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ณ โรงแรมตีวน้ำ พลาซ่า	30 - 31 พฤษภาคม 2561 จังหวัดกระบี่
ครั้งที่ 4	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ณ โรงแรมดิเอ็มเพรสเชียงใหม่	30 - 31 พฤษภาคม 2562 จังหวัดเชียงใหม่
ครั้งที่ 5	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ณ โรงแรม เค พี แกรนด์	3 - 4 กันยายน 2563 จังหวัดจันทบุรี
ครั้งที่ 6	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์	1 - 3 กันยายน 2564 จังหวัดนครปฐม
ครั้งที่ 7	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ณ โรงแรมแคนทารี	6 - 8 กรกฎาคม 2565 จังหวัดนครราชสีมา
ครั้งที่ 8	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ณ โรงแรมอมารี พัทยา / โอโซนอร์ธ พัทยา	24 - 26 พฤษภาคม 2566 จังหวัดชลบุรี
ครั้งที่ 9	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	2567



คำนำ

การประชุมวิชาการราชชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ครั้งที่ 8 ประจำปี 2566 (Rajamangala Manufacturing & Management of Technology Conference ; RMTC # 8) ถูกจัดขึ้น วันที่ 24 - 26 พฤษภาคม 2566 ณ โรงแรมอมารี พัทยา / โอโซนอร์ธ พัทยา จังหวัดชลบุรี โดยสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ได้รับเกียรติให้เป็นเจ้าภาพหลักในการดำเนินงานร่วมกับสมาคมเครือข่ายราชชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ (Association of Rajamangala Network of Manufacturing and Management Technology ; RNMT) และนอกจากนี้ยังได้รับการสนับสนุนจากเครือข่ายราชชมงคลทั่วประเทศอีก 8 แห่ง สำหรับการประชุมวิชาการครั้งที่ 8 หรือ RMTC 2023

ในปีนี้ งาน RMTC 2023 ได้รับความอนุเคราะห์จากหน่วยงานที่มีชื่อเสียงและมีบทบาทในสายงานด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการประกอบไปด้วย สมาคมเครือข่ายราชชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ (RNMT) สมาคมอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ไทย (TDIA) สถาบันไทย-เยอรมัน (TGI) สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (มว.) สมาคมผู้ผลิตเครื่องมือตัดไทย (TCTM) และเครือข่ายวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล 9 แห่ง ร่วมดำเนินการจัดงานประชุม ภายใต้ธีมงาน “ขับเคลื่อนงานวิจัยด้วย BCG เพื่อตอบโจทย์เป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน SDGs : BCG to SDGs” สำหรับหัวข้อการประชุมวิชาการ ประกอบไปด้วย 6 สาขา ได้แก่ Production and Operations Management (POM), Manufacturing Engineering (MFE), Material Science and Application (MSA), Supply Chain and Logistics (SCL), Industrial Education (IED) และ Technology and Innovation (TIN)

การประชุมวิชาการราชชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ครั้งที่ 8 ประจำปี 2566 มีผู้ให้ความสนใจส่งบทความเข้าร่วมเป็นจำนวน 215 บทความ จาก 35 หน่วยงาน มีผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความทั้งสิ้นจำนวน 125 ท่าน จากสถาบันที่หลากหลาย ซึ่งบทความทุกฉบับที่เข้าร่วมการประชุมวิชาการได้รับการอ่านและพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer Review) อย่างน้อย 3 ท่าน เพื่อคุณภาพของงานวิจัย

หากการดำเนินงานในครั้งนี้นักพร่องหรือผิดพลาดประการใด ทางคณะกรรมการดำเนินงาน RMTC 2023 ต้องขออภัยมา ณ โอกาสนี้


คณะกรรมการดำเนินงานการประชุมวิชาการ
ราชชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ครั้งที่ 8 (RMTC 2023)

24 – 26 พฤษภาคม 2566

สารบัญ

เรื่อง		หน้า
MFE-256	การออกแบบและสร้างเครื่องผลิตอนุภาคผงโลหะที่มีอุณหภูมิหลอมละลายสูงด้วยกรรมวิธี การระเบิดเส้นลวดด้วยไฟฟ้า	629
MFE-260	การเพิ่มอัตราการกำจัดเศษของดอกกัดคาร์ไบด์มมเล็ยสูงเคลือบด้วย TiAlN	637
MFE-261	การออกแบบและสร้างเครื่องขึ้นหมากเม่า กรณีศึกษา:	644
MFE-264	Parameters Optimization of Sand Core Manufacturing Process for Automotive Part Production Using Design of Experiment Approach	652
MFE-265	การออกแบบและพัฒนากระบวนการบรรจุเกลียวรีไฟน์	660
MFE-266	การออกแบบและสร้างเครื่องบรรจุเกลียวรีไฟน์	667
MFE-267	การออกแบบและสร้างแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปยางซิลิโคน กรณีศึกษา : ฝาครอบช่องปาก	674
MFE-268	การวิเคราะห์การไหลของชิ้นงานพลาสติกด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ กรณีศึกษา แทนต์ดัสท์ก๊อต เทป	681
MFE-269	ศึกษาผลกระทบของการออกแบบแม่พิมพ์ผลิตชิ้นงานฝาครอบหม้อน้ำด้วยโปรแกรมไฟไนต์ เอลิเมนต์เพื่อลดต้นทุนในกระบวนการผลิตชิ้นงาน	690
MFE-270	การเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการทำความสะอาดฟลักเจอร์จับชิ้นส่วนรถมอเตอร์ไซด์ กรณีศึกษาโรงงานพนีสี BDI 2	699
MFE-271	การศึกษาระบวนการชุบชั้นรูปร้อนแม่พิมพ์แบบมีครีบ	707
MFE-272	ออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ลากขึ้นรูปกล่องสี่เหลี่ยมเพื่อพับขอบ	713
MFE-273	การประเมินความแข็งแรงวิกฤตสำหรับงานเชื่อมซ่อมเหล็กทรงรถไฟ ณ บริเวณกระบวนด้วย ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเย็นตัว และ $\Delta T_{8/5}$	721
MFE-276	คุณภาพผิวของโพลีเมอร์ซูเปอร์ไลน์ลอนในกระบวนการแกะสลักด้วยซีเอ็นซี-เลเซอร์	729
MFE-277	การจำลองการฉีดพลาสติกทรงกลมด้วยเทคนิคทากูชิ สำหรับลูกบอลดำเพื่อลดการระเหย ของน้ำ	734
MFE-278	การออกแบบแม่พิมพ์โลหะสำหรับการขึ้นรูปวงล้อนिरภัยสำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคล	742
MFE-279	ความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของดอกกัดร่องตัวที่โดยประยุกต์ใช้การออกแบบ และวิเคราะห์การทดลอง	749
Material Science and Application (MSA) จำนวน 26 บทความวิจัย		
MSA-303	การควบคุมการซึมผ่านยาในอะซินด้วยไฟฟ้าจากไฮโดรเจลเจลาติน/พอลิอะคริลาไมด์	763
MSA-305	การปรับปรุงสมบัติการนำความร้อนของพอลิเอสเตอร์ไม่ิ่มตัวด้วยผงเขม่าดำ	769




 การประชุมวิชาการราชชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ครั้งที่ 8
 24 – 26 พฤษภาคม 2566 ณ โรงแรม อมารี พัทยา จังหวัดชลบุรี

การออกแบบแม่พิมพ์โลหะสำหรับการขึ้นรูปวงล้อนิรภัยสำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคล Metal Mold Design for a Safety Wheel Forming of a Passenger Car

ประกาศิต ภูมิภักดิ์ กฤษณ์ อภิญญาวิศิษฐ์ พลรัชต์ บุญมี สถาพร วันนาพอ และประกอบ ชาตภักดิ์*
 สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
 E-mail: prakorb.c@rmutp.ac.th*

Prakasit Poomipak Krit Apinyavisit Polrat Boonmee Sthaphorn wannapor and Prakorb Chartpuk*
 Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering
 Rajamangala University of Technology Phra Nakhon
 E-mail: prakorb.c@rmutp.ac.th*

บทคัดย่อ

แม่พิมพ์โลหะที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปวงล้อนิรภัยสำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคลได้รับการออกแบบและวิเคราะห์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แม่พิมพ์โลหะได้รับการออกแบบให้ใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปผงพอลิเมอร์หรือยาง ซึ่งจะได้รับความร้อนที่ส่งผ่านมาจากแท่นอัดซึ่งติดตั้งฮีตเตอร์รองรับอุณหภูมิสูงถึง 300 องศาเซลเซียส แม่พิมพ์โลหะนี้สร้างขึ้นจากวัสดุ SKD11 ซึ่งเป็นวัสดุสำหรับทำแม่พิมพ์โดยเฉพาะ ความร้อนได้ถูกส่งผ่านไปยังผงพอลิเมอร์หรือเนื้อยางซึ่งถูกบรรจุอยู่ในแม่พิมพ์ เนื้อวัสดุจึงเกิดการหลอมเหลว การถ่ายเทความร้อน การกระจายตัวของความร้อน การสูญเสียความร้อน ทำให้เห็นภาพที่ชัดเจนและใช้ในการออกแบบแม่พิมพ์ให้เกิดการกระจายตัวของความร้อนทั่วทั้งปริมาณของแม่พิมพ์ ภายในแม่พิมพ์ยังได้รับการออกแบบให้สามารถวางโครงสร้างโลหะสำหรับวงล้อนิรภัย ดังนั้นเมื่อเริ่มต้นกระบวนการอัดและหล่อลอมผงพอลิเมอร์คอมโพสิตหรือเนื้อยางแล้วจะทำให้ได้นวัตกรรมวงล้อนิรภัยที่มีโครงสร้างภายในที่แข็งแรง การนำผลิตภัณฑ์ออกจากแม่พิมพ์จะต้องทำการเปิดแม่พิมพ์ออกและนำผลิตภัณฑ์ที่พร้อมใช้ออกมา ซึ่งจะต้องทำการหล่อเย็นแม่พิมพ์เพื่อลดอุณหภูมิลงโดยในช่วงเวลาการหล่อเย็นจะต้องอัดแม่พิมพ์ด้วยไฮดรอลิกอยู่ตลอดเวลา

คำสำคัญ : แม่พิมพ์โลหะ, วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, ล้อนิรภัย, อัดขึ้นรูปร้อน

Abstract

The metal mold used in the process of forming a safety wheel for passenger cars was designed and analyzed using a Finite Element methodology. The metal mold was made to be used in a compression process to make the polymer or rubber powder, which received heat from the compressor and could withstand temperatures up to 300°C. This metal mold was made of SKD11 material. In the process, heat was specifically transferred to the rubber texture or polymer powder placed inside the mold. After melting, transferring, dissipating, and losing heat from the material texture, a clear picture was created that the mold would be constructed with heat dispersion evenly distributed throughout



the mold's whole volume. The interior of the mold was thus used for laying the metal structure for a safety wheel by starting the process at the compression and molding of the polymer composite powder or polymer texture. An innovative safety wheel with a sturdy internal structure would thus be incorporated. The mold had to be cooled to bring the temperature down before being opened and the finished product taken out. While cooling, the mold must be continuously hydraulically pressed.

Keywords : Metal Mold, Finite Element Method, Safety Wheels, Hot-compressed

1. บทนำ

ล้อนีรภัยหรือเรียกว่าล้อนั้นแพลทเป็นเทคโนโลยีอย่างหนึ่งที่ตั้งตั้งลงไปทีล้อย่างหรือติดตั้งที่กะทะล้อย ด้วยจุดประสงค์ที่ต้องการให้รถยนต์สามารถเคลื่อนที่ต่อไปและผู้ขับขี่สามารถควบคุมการบังคับได้ เมื่อยางรถยนต์แบนลงน้ำหนักของรถยนต์จะกดลงทำให้ยางเกิดการบดกับถนนและเสียหายอย่างรวดเร็ว ดังนั้นรันแพลทจึงเป็นสิ่งที่ป้องกันไม่ใหยางถูกบดโดยตรง รันแพลทที่ติดตั้งกับล้อนีมี 2 แบบคือ รันแพลทในตัวล้อยางจะถูกติดตั้งลงไปในตัวล้อยางรถยนต์ เปลี่ยนไปพร้อมกับการเปลี่ยนยาง แต่รันแพลทอีกประเภทหนึ่งคือวงล้อรันแพลทที่จะติดตั้งเข้าไปที่กะทะล้อด้านใน หากมีการเปลี่ยนยางก็ไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนวงล้อรันแพลท

กระบวนการขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์อัดมีความนิยมอย่างมากในงานอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ การบินและอวกาศ การกีฬาและอุตสาหกรรมชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ [1] ซึ่งการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อัดมีความครอบคลุมชิ้นส่วนขนาดใหญ่ บาง น้ำหนักเบา แข็งแรง ในขณะที่งานวิจัยของ Y. Li et al. [2] ได้เพิ่มเติมประเด็นไว้ว่าในปัจจุบันมีความจำเป็นต้องใช้วัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูงแต่น้ำหนักเบาที่มีการนำเอาวัสดุประเภทวัสดุผสมจำพวกคาร์บอนไฟเบอร์มาเป็นวัสดุหลักของชิ้นส่วนที่ถูกนำมาขึ้นรูป A. Rios et al. [1] เพิ่มเติมว่าการใช้แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปวัสดุผสมแผ่นบางที่บีบอัดเส้นใยโพลีเอสเตอร์มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อรองรับการใช้งานในอุตสาหกรรม ทั้งนี้งานวิจัยนี้กล่าวว่า การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรม (Computer Aided Engineering: CAE) สามารถแก้ปัญหาต่าง ๆ ในการออกแบบแม่พิมพ์ที่สามารถลดค่าใช้จ่ายและเวลา ตลอดจนลดการสูญเสียจากการผลิตที่ผิดรูปไปซึ่งมีผลต่อการสร้างความน่าเชื่อถือให้กับลูกค้าได้ นอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยที่

เกี่ยวข้องกับการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรม ผสานร่วมกับคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (Computer Aided Design: CAD) [3] ที่มุ่งเน้นไปที่กระบวนการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานพลาสติกด้วยวิธีการผสมผสาน CAD/CAE ด้วยการจำลอง 3 มิติในการวิเคราะห์การไหลของน้ำพลาสติกในแม่พิมพ์ที่มีรูปร่างและสภาวะการฉีดแตกต่างกัน พลาสติกที่ใช้ในการฉีดขึ้นงานเป็นชนิด Polyoxymethylene มีความหนาแน่นหลอมเหลว (Melt density) 1.16 กรัมต่อลูกบาศก์ เซนติเมตร และมีอัตราการไหล (Melt flow) 21 กรัมต่อนาที ทั้งนี้ ตัวแปรสำคัญที่เกี่ยวกับการฉีดขึ้นรูปที่ควรพิจารณาได้แก่ อุณหภูมิหลอมเหลว (Melt temperature) อุณหภูมิผนังแม่พิมพ์ อุณหภูมิการฉีด (Ejection temperature) แรงดันที่ควบคุมการฉีดเข้าแม่พิมพ์ (Pressure control filling) การควบคุมแหล่งความร้อน (Heater setup) ตำแหน่งการปรับการไหล (Position screw setup) แรงดันฉีดสูงสุด (Maximum pressure) ช่วงเวลาการฉีด (Filling time) ช่วงเวลาการรวมตัว (Packing time) และช่วงเวลาการเย็นตัวลง (Cooling time) B. Srisatja [4] นำเสนอตัวแปรที่มีผลต่อการฉีดขึ้นรูปโพลีโพรพิลีนที่เกี่ยวข้องกับสมบัติเชิงกลพบว่าอุณหภูมิที่หัวฉีดจะเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลและเป็นตัวแปรหลักเกี่ยวข้องกับค่าย้งโมดูลัส ค่าความแข็ง และความสามารถในการต้านทานแรงดึง ถ้าอุณหภูมิหัวฉีดสูงขึ้นจะทำให้สมบัติเชิงกลที่กล่าวมามีค่าลดลงแต่เมื่อพิจารณาในส่วนของความดันที่ใช้ในการฉีด ก็เป็นปัจจัยหลักที่สำคัญอีกตัวหนึ่งเช่นกัน

G. Zampierollo [5] กล่าวว่า ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการออกแบบแม่พิมพ์นี้ ได้แก่ การประมาณการฉีด การลดอุณหภูมิ ความดันฉีด และอื่น ๆ ทั้งนี้ การวิจัยดังกล่าวใช้พลาสติกพอลิโพรพิลีน (Polypropylene: PP) ผลการวิจัย



แสดงให้เห็นว่าภายใต้การควบคุมอุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติกและความหนืดที่สัมพันธ์กับการไหลของน้ำพลาสติกถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพที่ดี ต่อมา S. Patcharaphan [6] มีการศึกษาและสรุปข้อบกพร่องในชิ้นงานพลาสติกที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป ซึ่งให้ข้อมูลของสาเหตุไว้ดังนี้ 1. ชิ้นงานฉีดไม่เต็ม 2. ชิ้นงานเกิดรอยยุบ 3. ชิ้นงานติดภายในแม่พิมพ์ 4. เกิดครีบบนชิ้นงาน 5. เกิดรอยเชื่อมประสาน M. Hearunyakij et al. [7] ได้นำเสนอการพัฒนาวิธีการสร้างแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปพลาสติกแผ่นด้วยเทคนิควิศวกรรมย้อนรอย สแกนต้นแบบด้วยเครื่องสแกน 3 มิติ และศึกษาปัญหาการเสียรูปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม Abaqus เพื่อทำนายพฤติกรรมการเสียรูปและการกระจายอุณหภูมิ หลังกระบวนการขึ้นรูปจะไม่มีการหล่อเย็นภายในแม่พิมพ์แต่ให้เย็นตัวลงตามธรรมชาติ ผลที่ได้เป็นการลดระยะเวลาในการออกแบบแม่พิมพ์มากกว่า 40% R. Promjariyakoon and S.Kongiang [8] ได้นำเสนอผลของสารช่วยประสานต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการคงรูปของยางคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยสับปะรด โดยใช้สารเชื่อมประสานยางธรรมชาติอีพอกซีโคซ์ มีการทดสอบสมบัติเชิงกลและสมบัติการคงรูป ซึ่งการขึ้นรูปขึ้นงานจะใช้เครื่องกดอัดแบบร้อน H.-Sang Kim et al. [9] ดำเนินการวิจัยเกี่ยวกับแม่พิมพ์ขึ้นรูปแบบอัด (Compression molding) ผ่าครอบโหนดึกด้วยวิธีการทดลอง (Experiment) และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) โดยแม่พิมพ์ขึ้นรูปด้านบน (Upper mold) ถูกทำให้เคลื่อนที่ด้วยไฮดรอลิกแม่พิมพ์ขึ้นรูปด้านล่างและด้านบนจะติดตั้งตรงกันข้ามและให้ความร้อนผ่านแผ่นทำความร้อน (Hot plate) ทั้งด้านบนและด้านล่าง ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 150 องศาเซลเซียส จากนั้นแม่พิมพ์ขึ้นรูปด้านบนจะเคลื่อนเข้ามากดอัดแม่พิมพ์ด้วยแรงกด 66 กิโลนิวตัน ความเร็วคงที่ 2 มิลลิเมตรต่อวินาที P. Chartpuk et al. [10] ได้ออกแบบและสร้างเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนสำหรับแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปร้อนที่มีส่วนประกอบกลไกการทำงาน 2 แบบ คือการอัดร้อนเพื่อสร้างผลิตภัณฑ์ผลิตภัณฑ์ด้านในจะหลอมเหลวตามแบบที่สร้างขึ้น และการอัดเพื่อหล่อเย็น ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดคงรูป ไม่หดตัว และสามารถนำมาใช้ได้กับแม่พิมพ์ล้อนีรภัยของบทความนี้

จากการทบทวนวรรณกรรม งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ล้อนีรภัยรันแพลทด้วยวิธีการย้อนรอยจากต้นแบบล้อนีรภัยเดิม และนำมาสร้างเป็นแม่พิมพ์ล้อนีรภัยแบบใหม่ซึ่งเป็นรันแพลทประเภทวงล้อที่ต้องติดตั้งเข้าไปที่กะทะล้อด้านใน ออกแบบโมเดลด้วยคอมพิวเตอร์และวิเคราะห์การเสียรูปและการกระจายความร้อนโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SolidWorks Simulation เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ เพื่อให้ได้รูปแบบแม่พิมพ์ล้อนีรภัยที่เหมาะสมสำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคล

2. ระเบียบวิธีวิจัย

โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เลือกใช้เป็นโปรแกรม Solidworks Simulation ที่มีการเชื่อมโยงการทำงานร่วมกับโปรแกรมการออกแบบ SolidWorks ทำการวิเคราะห์ในโหมดการวิเคราะห์เชิงความร้อน (Thermal Analysis) คือ คำนวณอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนภายในและระหว่างส่วนประกอบของแม่พิมพ์

2.1 ขั้นตอนในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

2.1.1 Pre-processing เป็นการเตรียมข้อมูลของแบบจำลองก่อนการวิเคราะห์ ซึ่งต้องออกแบบและสร้างแบบจำลอง 3 มิติ และดำเนินการกำหนดข้อมูลตัวแปรของรูปทรงเรขาคณิตแบบจำลอง เช่น ตำแหน่งพิกัดของโหนด เส้น พื้นผิว และปริมาตรของแข็ง กำหนดชนิดของเอลิเมนต์ ความถี่หรือการกำหนดข้อมูลเกี่ยวกับสมบัติของวัสดุ เช่น ค่าโมดูลัสของยัง ความหนาแน่นวัสดุ สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงความร้อน อุณหภูมิจากแหล่งกำเนิด สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน สัมประสิทธิ์การพาความร้อน เป็นต้น สภาวะที่กระทำต่อวัสดุ เช่น ตำแหน่ง ขนาดและทิศทางของสิ่งที่มากระทำต่อวัสดุ ซึ่งอาจจะเป็นแรงหรือความดัน

2.1.2 Solve-processing คือการวิเคราะห์แบบจำลองโดยการคำนวณบนคอมพิวเตอร์เพื่อทำการวิเคราะห์หรือจำลองพฤติกรรมตามธรรมชาติของระบบที่ต้องการ ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยความรู้และการเลือกใช้กฎทางฟิสิกส์ที่สอดคล้องกัน

2.1.3 Post-processing เป็นการแสดงผลการวิเคราะห์เป็นค่าตัวเลขที่โหนด (Node) ด้วยการกระจายความร้อนและการสูญเสียความร้อนที่แม่พิมพ์ จำเป็นต้องใช้วิธีภาคตัดเพื่อให้เห็นรูปแบบการกระจายความร้อนด้านในแม่พิมพ์

2.2 สมมติฐานในการวิเคราะห์

ในการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้กำหนดสมมติฐานของวัสดุ SKD 11 ที่ใช้ทำแม่พิมพ์ล้อนีรภัยเป็นวัสดุที่มีเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) และมีสมบัติเหมือนกันในทุกทิศทาง (Isotropic Materials) พิจารณาการถ่ายเทความร้อนและกระจายความร้อนจนถึงสภาวะคงตัว (Steady state)

2.3 โมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับแม่พิมพ์

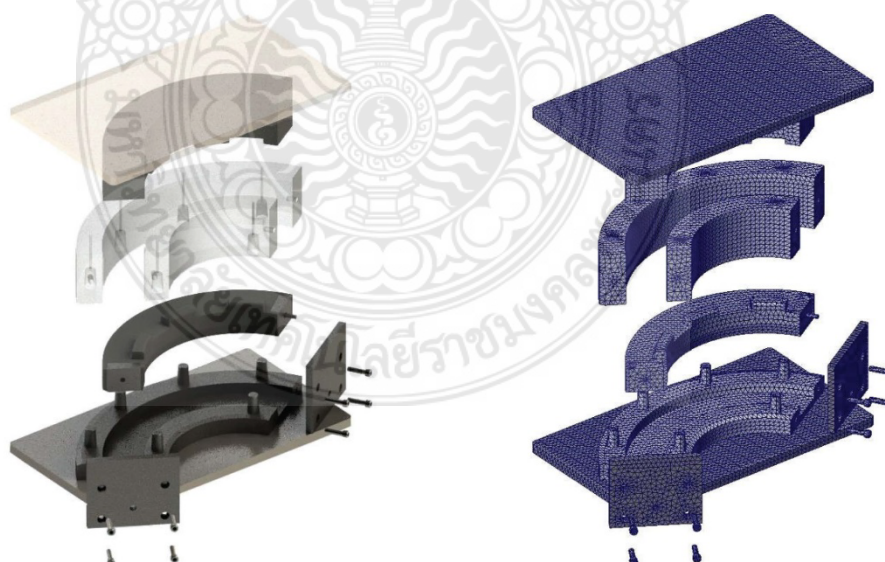
ออกแบบและสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ของแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปล้อนีรภัยด้วยโปรแกรม SolidWorks แสดงดังรูปที่ 1 จากนั้นทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อตรวจสอบการกระจายความร้อนในสภาวะคงตัว กำหนดภาระทางความร้อน (Thermal Load) ที่ประกอบด้วยการพาความร้อนและการนำความร้อน ชนิดของเอลิเมนต์ที่เลือกใช้คือเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) โดยแต่ละเอลิเมนต์มีจำนวน 10 โหนด ที่มีขนาดเอลิเมนต์เฉลี่ย 10 มิลลิเมตร จำนวน 213,827 เอลิเมนต์ และมี 336,760 โหนด การวิเคราะห์นี้ต้องกำหนดคู่สัมผัสระหว่างแต่ละชิ้นส่วนทั้งที่เป็นแบบ Bonded และ No Penetration สมบัติของวัสดุกำหนดตามตารางที่ 1 และ 2

ตารางที่ 1 Properties and parameter of SKD11 for Mold

Properties	SKD11 [11], [12], [13]
Density (ρ , kg/m ³)	8,400
Yield Strength (MPa)	470
Tensile Strength (MPa)	745
Modulus of elasticity (E, GPa)	208
Poisson ratio (ν)	0.3
Bulk modulus (GPa)	173
Shear modulus (GPa)	80
Thermal conductivity (W/mK)	20.5 (350°C)
Thermal expansion (W/mK)	11
Specific heat (J/kg °C)	461

ตารางที่ 2 Properties and parameter of PE High Density for Safety Wheel

Properties	PE Composite
Density (ρ , kg/m ³)	1,246.46 [14], [15]
Yield Strength (MPa)	20.52 [14], [15]
Tensile Strength (MPa)	29.96 [14], [15]
Modulus of elasticity (E, MPa)	784.46 [14], [15]
Poisson ratio (ν)	0.3 [14], [15]
Thermal conductivity (W/mK)	0.461 (350°C)
Specific heat (J/kg K)	1,796



รูปที่ 1 แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปร้อนล้อนีรภัยรันแพลท

รูปที่ 2 ผลการแบ่งเอลิเมนต์และควบคุมขนาดเอลิเมนต์

การดำเนินการในส่วนกระบวนการ Pre-Processing โดยเฉพาะในส่วนของการแบ่งเอลิเมนต์และการเลือกใช้เอลิเมนต์ จะส่งผลต่อความแม่นยำอย่างมากในการวิเคราะห์ หากทำการแบ่งเอลิเมนต์โดยไม่มีการควบคุมอย่างเหมาะสม จะส่งผลให้ผลลัพธ์ไม่ถูกต้อง

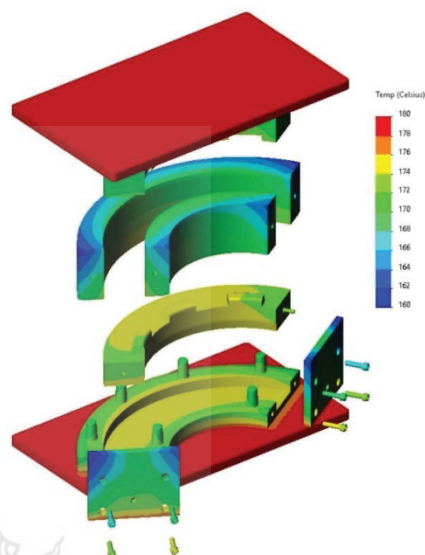
3. ผลการวิเคราะห์และอภิปรายผล

จากการออกแบบและวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เกี่ยวข้องกับการกระจายความร้อนของตัวผลิตภัณฑ์ได้รับการออกแบบแม่พิมพ์หลากหลายรูปแบบจนกระทั่งได้แม่พิมพ์ที่สามารถรองรับการถ่ายเทความร้อนไปยังตัวผลิตภัณฑ์ได้อย่างเหมาะสม ทั้งนี้ผลจากการออกแบบนี้เป็นผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปเท่านั้น สิ่งสำคัญในการวิเคราะห์และจากประสบการณ์ในการจำลองผลได้แสดงให้เห็นว่าการควบคุมขนาดของเอลิเมนต์มีผลต่อการวิเคราะห์อย่างมาก รวมถึงการกำหนดเงื่อนไขขอบทั้งในส่วนของแม่พิมพ์และตัวผลิตภัณฑ์ และรวมถึงหน้าสัมผัสต่างๆจะทำให้ผลการวิเคราะห์ในแต่ละครั้งมีการเปลี่ยนแปลงไป จากรูปที่ 3 เป็นการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปร้อนและล้อนิรภัยรันแพลทในมุมมองไอโซเมตริก

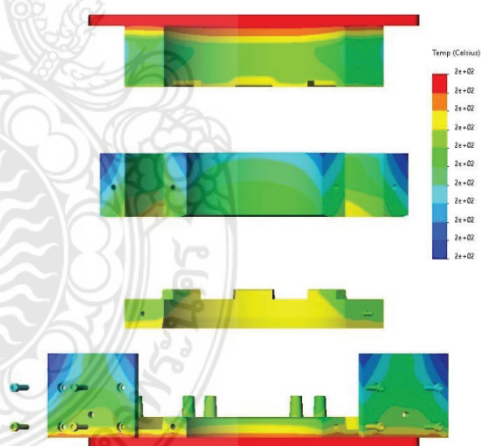
รูปที่ 3 เป็นการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปร้อนและล้อนิรภัยรันแพลทในมุมมองไอโซเมตริก

รูปที่ 4 เป็นการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปร้อนและล้อนิรภัยรันแพลทในมุมมองด้านหน้า

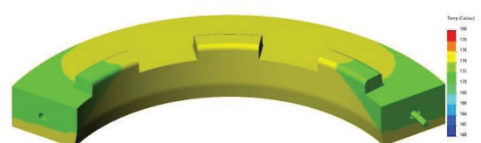
รูปที่ 5 เป็นการแสดงการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ล้อนิรภัยรันแพลทจะเห็นว่ามีความร้อนที่แตกต่างกันในผลิตภัณฑ์อยู่ระหว่าง 5-6 องศาเซลเซียส เท่านั้น ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ และรูปที่ 6 จะแสดงภาพตัดจากด้านล่างไปยังด้านบนของตัวผลิตภัณฑ์ทำให้เห็นการกระจายความร้อนที่ชัดเจนมากขึ้น



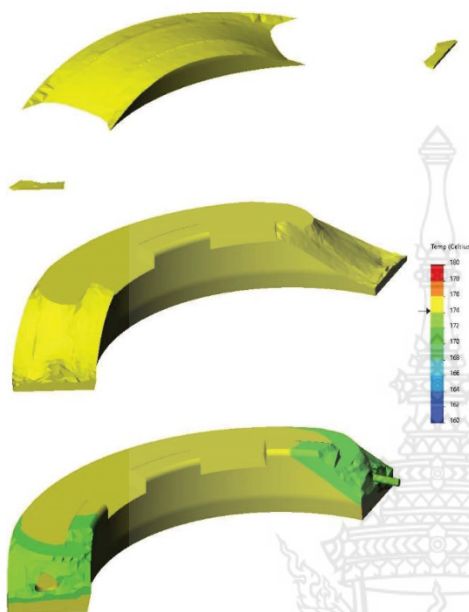
รูปที่ 3 การกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปร้อนและล้อนิรภัยรันแพลทในมุมมองไอโซเมตริก



รูปที่ 4 การกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปร้อนและล้อนิรภัยรันแพลทในมุมมองด้านหน้า



รูปที่ 5 การกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นในล้อนิรภัยรันแพลท



รูปที่ 6 ความแตกต่างของความร้อนที่เกิดขึ้นในตำแหน่งต่างๆ ของล้อนิริยารันแพลท

4. สรุปผลการวิจัย

การออกแบบแม่พิมพ์และการวิเคราะห์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งเป็นเครื่องมือสำคัญที่ใช้ในการทำนายพฤติกรรมการกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์ล้อนิริยารันแพลท ส่งผลให้ผู้ออกแบบสามารถปรับปรุงแม่พิมพ์ให้มีการกระจายความร้อนอย่างเหมาะสม เนื่องด้วยผลิตภัณฑ์ซึ่งอยู่ด้านในแม่พิมพ์มีความหนาแน่นมากจำเป็นต้องได้รับความร้อนกระจายอย่างทั่วถึงและเกิดการหลอมเหลวที่เหมาะสมภายใต้อุณหภูมิหลอมเหลวที่พอเหมาะ จากการวิเคราะห์พบว่าแม่พิมพ์เกิดการสูญเสียความร้อนภายนอกแม่พิมพ์และความร้อนที่ส่งผ่านมาจากแทนอัดร้อนทั้งด้านบนและด้านล่างได้ถูกส่งผ่านเข้าไปยังผลิตภัณฑ์ด้านในส่งผลให้เกิดการกระจายตัวของความร้อนจนเข้าสู่สภาวะคงตัว มีความแตกต่างของอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งของผลิตภัณฑ์อยู่ในช่วง 5-6 องศาเซลเซียส ซึ่งยอมรับได้

แม่พิมพ์นี้เป็นแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปร้อนอย่างง่ายและเป็นตัวอย่างในการนำไปสู่การสร้างแม่พิมพ์ที่มีความซับซ้อนโดย

จุดประสงค์ในการถอดชิ้นงานออกได้อย่างรวดเร็วเพื่อผลิตในจำนวนมาก ในการถอดผลิตภัณฑ์ออกจากแม่พิมพ์นิริยารันจำเป็นต้องให้อุณหภูมิลดลงต่ำกว่า 35 องศาเซลเซียส จึงจะสามารถทำการถอดแม่พิมพ์ออกได้และเป็นข้อจำกัดในการใช้งานแม่พิมพ์ชนิดนี้ แต่มีข้อดีคือมีความสลับซับซ้อนที่น้อยและต้นทุนในการผลิตไม่สูงเกินไป

5. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้เป็นบทความต่อเนื่องมาจากโครงการวิจัยที่ผู้เขียนได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) พ.ศ.2561 ตามสัญญาเลขที่ กบง./2559-194 และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร (มทร.พระนคร) ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือ อุปกรณ์และสถานที่ในการดำเนินงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Rios, B. Davis and P. Gramann, Computer Aided Engineering in Compression Molding, Polymer Processing Research Corporation.
- [2] Y. Li, Z. Chen, H. Xu, J. Dahl, D. Zeng, M. Mirdamadi and X. Su, “Modeling and Simulation of Compression Molding Process for Sheet Molding Compound (SMC) of Chopped Carbon Fiber Composites,” *SAE International Journal*, vol. 10, no. 2, 2017.
- [3] S. Dountongpol and C. Suvanjumrat, “The plastic injection molding by CAD/CAE integration method,” *Engineering Journal of Research and Development*, vol. 29, no. 4, Oct.-Dec. 2018.
- [4] B. Srisatja, “Effect of injection molding parameters on mechanical properties,” *Naresuan University Engineering Journal*, vol. 3, no. 1, Jan.-Apr. 2009.
- [5] G. Zampierollo, “Design of Hot Extrusion Molding Device for the Continuous Production of Pharmaceutical Tablets, Bachelor of Science



การประชุมวิชาการราชวมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ครั้งที่ 8
24 - 26 พฤษภาคม 2566 ณ โรงแรม อมารี พัทยา จังหวัดชลบุรี

- in Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 2010.
- [6] S. Patcharaphan, "Defects of injection molded parts: causes and troubleshooting," *Kasetsart Engineering Journal*, vol. 22, no. 69, pp. 91-104, 2009.
- [7] M. Hearunyakij, V. Layluk and S. Chatakorn, "The development of plastic sheet thermoforming mold making by using reverse engineering and study of part warpage with finite element method," *Journal of Sripatum Review of Science and Technology*, vol. 6, no. 1, pp. 46-56, Jan.-Dec. 2014.
- [8] Rattanaporn Promjariyakoon and Saowalak Kongiang, "Effect of Compatibilizer on the mechanical and cure properties of pineapple leaf fiber (PALF) reinforced natural rubber (NR) composites," *The Journal of KMUTNB*, vol. 30, no. 4, pp. 612-619, Oct.-Dec. 2020.
- [9] H.-Sang Kim, W.-Gi Lee, Ch.-Hee Lee and K. Don Lee, "Optimization for the prepreg compression molding of notebook computer cover using design of experiment and finite element method," *SN Applied Sciences* (2020), vol. 2, no. 1619, 2020.
- [10] P. Chartpuk, W. Phimpaphan, T. Janhuad and P. Chanpibal, "Design of Plastic Forming Compression Machine," in *Proceedings of the 3rd RMUTP Conference of Engineering and Technology*, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Thailand, 23 March 2018, pp. 25-28.
- [11] J. L. Li, L. L. Jing and M. Chen, "An FEM study on residual stresses induced by high-speed end-milling of hardened steel SKD11," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 209, no. 9, pp. 4515-4520, May 2009.
- [12] K. Navapon and C. Prakorb, "Parameter analysis of SKD11 and SUS304 bulletproof plate that resistance penetration of bullet 7.62 mm according to standard NIJ 4 by finite element method," *International Journal of Mechanical Engineer and Technology*, vol. 10, pp. 207 - 221, Sep. 2019.
- [13] V. Khrumum and P. Chartpuk, "Finite Element Analysis of Armor Piercing Bullet Penetrating Hard Steel Armor Plate," *RMUTP Research Journal*, vol. 16, no. 2, pp. 171-186. Jul.-Dec. 2022.
- [14] N. Chalo and P. Chartpuk, "Mechanical Properties of UHMWPE Composite with Al₂O₃ for Application in Engineering," *RMUTP Research Journal*, vol. 16, no. 1, pp. 192-202, 2022.
- [15] Nuchanat Tongyai and Prakorb Chartpuk, "A Pattern Design for Run Flat Wheel Suitable for Small Regular Armored Truck Using Finite Element Method," *RMUTP Research Journal*, vol. 16, no. 2, Jul.-Dec. 2022.



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ขอมอบไปประกาศเกียรติคุณ ให้ไว้เพื่อแสดงว่า

ประกาศิต ภูมิภักดี, กฤษณ์ อภิญญาวิศิษฐ์, พลรัชต์ บุญมี, สถาพร วันนาพ้อ, ประกอบ ชาตฤกษ์
ได้เข้ามาเสนอบทความเรื่อง

การออกแบบแม่พิมพ์โลหะสำหรับการขึ้นรูปวงล้อนิกายสำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคล

การประชุมวิชาการราชชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ครั้งที่ 8
ระหว่างวันที่ 24 - 26 พฤษภาคม 2566 ณ โรงแรมอมารี พัทยา จังหวัดชลบุรี

(รองศาสตราจารย์ ดร.พิชัย จันทรมณี)

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

(รองศาสตราจารย์ ดร.อนินท์ มิมนต์)

นายกสมาคมเครือข่ายราชชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ

ประวัติการศึกษาและการทำงาน



ชื่อ นามสกุล นายประกาศิต ภูมิภักดี
 วัน เดือน ปีเกิด 2 สิงหาคม 2538
 ภูมิลำเนา 660 หมู่ 1 ตำบลพนมสารคาม อำเภพนมสารคาม จังหวัดฉะเชิงเทรา

ประวัติการศึกษา

วุฒิการศึกษา	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
มัธยมศึกษาตอนปลาย	โรงเรียนเฉลิมพระเกียรติสมเด็จพระศรีนครินทร์	2556
ปริญญาตรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	2561

ตำแหน่งและสถานที่ทำงานปัจจุบัน

ตำแหน่ง ครู โรงเรียนพนมสารคาม “พนมอดุลวิทยา” จังหวัดฉะเชิงเทรา