

การพัฒนากระบวนการอัดขึ้นรูปแบบเยื่อสำหรับการผลิตผ้าเบรกที่มีความหนาแน่นสม่ำเสมอ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Development of Cold-pressing Process for Producing Brake Pad with Uniform Density



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Petrochemistry and Polymer Science

Field of Study of Petrochemistry and Polymer Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนากระบวนการอัดขึ้นรูปแบบเยื่อสำหรับการผลิตผ้าเบรคที่มีความหนาแน่นสม่ำเสมอ
โดย	นายจิตรเทพ สุกุลธนาศร
สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ธิตี บวรรัตนารักษ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธิตี บวรรัตนารักษ์)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ต้นพงศ์ แก้วคงคา)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชนัดต์ รัตนสุมาวงศ์)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ไชยยนต์ ไชยยะ)	

6072163123 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORD: Brake noise, cold-pressing or preform process, Flowability, Density of brake pad

Jittrathep Sukultanasorn : Development of Cold-pressing Process for Producing Brake Pad with Uniform Density. Advisor: Assoc. Prof. Thiti Bovornratanaraks, Ph.D.

This research aims to reduce the thickness and density variations generated within the process of brake pad manufacturing. According to the case study company's targets, the brake noise and the amount of defect caused by weak pad problem should be decreased. The cold-pressing or preform process of disc pad model X1725 production is selected for this study. The forming of a brake pad begins with densification of friction powder in a rigid mold having a cavity of complicated contour. In this operation, the powder is filled into the cavity of the rigid mold. It is then compacted by vertically compacting punches to form a brake pad shape with uniform density. In all portions of the mold cavity, the densification of the powder should take place simultaneously, in order to ensure a sufficiently good binding. The thickness specification of the preform is controlled between 16.6-16.7 mm. The research methodology consists of 3 steps: 1) Define and analysis phases 2) Measure phase, the flowability of fiction material and elastic property of the preform are investigated and 3) Improve phase. After improvement by implementing, it found that the thickness variation in the preforming processes depended on the cycle of pressing. In the sample of 82 samples, the variation of the brake pad and the thickness of the preform are decreased. The thickness of preform have an error from the target value of 1% in confidence interval 95%

Field of Study: Petrochemistry and
Polymer Science

Student's Signature

Academic Year: 2018

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี ได้รับความช่วยเหลือจากอาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.ธิตี บวรรัตนารักษ์ และ ดร.บรรพต หอบรรลือกิจ ที่กรุณาได้ให้ความรู้ค่าปรึกษา แนวคิด ข้อเสนอแนะ ข้อคิดเห็นต่าง ๆ และตรวจสอบข้อบกพร่อง อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการวิจัย ในครั้งนี้จนงานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมทั้งขอขอบคุณบริษัท คอมแพ็ค อินเทอร์เน็ต (1994) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการผลิตผ้าเบรกเพื่อการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ในงานวิจัยนี้ โดยเฉพาะคุณ มิชัย ศรีวิบูลย์ ผู้ช่วยกรรมการผู้จัดการสายงานวิจัยและพัฒนา คุณนันทวุฒิ แซ่ฉิน ผู้ช่วยผู้จัดการฝ่ายประกันคุณภาพ คุณกฤษณา แก้วลพ ผู้จัดการฝ่ายพัฒนาวัสดุผ้าเบรก พี่ๆ และเจ้าหน้าที่ในบริษัท คอมแพ็ค อินเทอร์เน็ต (1994) จำกัด

กราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ต้นพงศ์ แก้วคงคา รองศาสตราจารย์ ดร.ชนัดต์ รัตนสุมาวงศ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.ไชยยนต์ ไชยยะ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาได้รับเชิญเป็นกรรมการสอบตลอดจนให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ และความคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณทุนสนับสนุนจากโครงการย่อยที่ 1/2560 โครงการยกระดับความสามารถของอุตสาหกรรมขนาดกลางด้านงานวิจัย พัฒนาและอุตสาหกรรม (Research Development and Industrialization capability of Medium enterprise) ภายใต้บันทึกข้อตกลงความร่วมมือโครงการยกระดับความสามารถในการแข่งขันของภาคอุตสาหกรรมด้วยวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและนวัตกรรม โดยสำนักงานคณะกรรมการนโยบายวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและนวัตกรรมแห่งชาติ (สวทน.)

วิทยานิพนธ์นี้สามารถเสร็จสิ้นได้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณนายสมพงษ์ ภูษิต และครอบครัว ผู้เป็นกำลังใจ และแรงผลักดันให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

จิตรเทพ สุกุลธนาคร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	16
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	16
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	22
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	22
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	23
บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	24
2.1 ข้อมูลทั่วไปของผ้าเบรกรถยนต์.....	24
2.1.1 ระบบเบรกรถยนต์.....	24
2.1.2 ชนิดของระบบเบรก.....	25
2.1.3 ประเภทของผ้าเบรก.....	26
2.1.4 องค์ประกอบผ้าเบรก	27
▪ เส้นใย (Fiber).....	29
▪ สารยึดเหนี่ยว หรือสารยึดติด (Binder).....	31
▪ สารเติมเต็ม หรือสารตัวเติม (Filler).....	32
▪ สารเพิ่มแรงเสียดทาน หรือผงขัด (Abrasive).....	33

▪ สารหล่อลื่น (Lubricant)	33
2.1.5 กระบวนการผลิตผ้าเบรก.....	34
2.1.6 เสียงที่เกิดขึ้นจากการเบรก	34
2.2 ทฤษฎี และหลักการ.....	38
2.2.1 ประเภทของวัสดุยึดหยุ่น.....	38
▪ Isotropic material.....	38
▪ Transversely isotropic material.....	40
▪ Orthotropic material	42
▪ Monoclinic material	43
▪ Anisotropic material.....	43
2.2.2 คุณสมบัติทางกลของวัสดุ	44
2.2.3 การวัดด้วย Ultrasonic testing.....	48
2.2.4 เครื่องมือควบคุมกระบวนการผลิต.....	50
▪ ผังแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Diagram).....	50
▪ ภาวะความผิดพลาดและการวิเคราะห์ผลกระทบ (Failure Mode and Effect Analysis, FMEA).....	51
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	55
2.3.1 การศึกษาการเกิดเสียงเบรก	55
2.3.2 การศึกษาสภาพความยืดหยุ่นของวัสดุเสียดทาน	56
2.3.3 การอัดขึ้นรูปของผงเคมีโลหะ (Powder metallurgy).....	59
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	61
3.1 การศึกษาภาพรวมของกระบวนการผลิตผ้าเบรก.....	62
3.2 วัตถุประสงค์ในการผลิตผ้าเบรก.....	64
3.3 ตั้งเป้าหมายเพื่อการพัฒนาคุณภาพชิ้นงานผ้าเบรก.....	64

3.4 การออกแบบการวิจัย.....	67
3.5 การดำเนินการทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูล	67
3.5.1 การศึกษาคุณสมบัติการไหลของเคมีผสม	67
3.5.2 การศึกษาการอัดขึ้นรูปเย็น	70
3.5.3 การศึกษาความดันของเครื่องจักรกับคุณสมบัติของชิ้นงานอัดรูปเย็น	72
3.5.4 การศึกษาการอัดขึ้นรูปร้อน	73
3.6 การทดสอบชิ้นงานเชิงกายภาพ.....	73
3.6.1 การทดสอบความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity Testing).....	73
3.7 การทดสอบชิ้นงานเชิงกล.....	74
3.7.1 การทดสอบแรงอัด (Compression Testing).....	74
3.7.2 การทดสอบคุณสมบัติโมดูลัสของผ้าเบรก (Dynamic Modulus Measurement)...	75
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	77
4.1 ผลของการกำหนดเป้าหมาย และปัญหาในการผลิต.....	77
4.2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติการไหลของเคมีผสม.....	88
4.3 ผลการวิเคราะห์ความหนาของชิ้นงานอัดขึ้นรูปแบบเย็น	91
4.4 ผลการวิเคราะห์ความดันของเครื่องจักรกับคุณสมบัติของชิ้นงานอัดรูปเย็น.....	97
4.5 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่น และความยืดหยุ่นของชิ้นงานอัดขึ้นรูปร้อน.....	103
4.6 ผลการวิเคราะห์การนำไปปฏิบัติจริงในการผลิต	106
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	112
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	112
5.1.1 ปัจจัยที่ส่งผลหลักต่อปัญหาชิ้นงานมีมในกระบวนการอัดขึ้นรูปเย็น	112
5.1.2 อิทธิพลขององค์ประกอบเคมีผสมกับสมบัติการไหล.....	113
5.1.3 อิทธิพลของความดันกับสมบัติของชิ้นงานอัดรูปเย็น	113
5.1.4 อิทธิพลความดันกับความหนาแน่น และความยืดหยุ่นของชิ้นงานหลังอัดขึ้นรูปร้อน	113

5.2 ข้อเสนอแนะ	114
บรรณานุกรม.....	115
ภาคผนวก.....	119
ภาคผนวก ก ข้อมูลที่ใช้ประกอบในการทำวิทยานิพนธ์	120
ภาคผนวก ข อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองสำหรับโมเดล X1725	130
ประวัติผู้เขียน.....	137



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบลักษณะของเส้นใยแต่ละชนิด	31
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของสารเติมเต็มที่ส่งผลต่อผ้าเบรก[10]	33
ตารางที่ 2.3 เกณฑ์การให้ลำดับชั้นผลกระทบของความรุนแรง (S: Severity).....	53
ตารางที่ 2.4 การให้ลำดับโอกาสเกิดความผิดพลาด (O: Occurrence).....	54
ตารางที่ 2.5 โอกาสที่จะตรวจจับโดยการควบคุมกระบวนการ (D: Detection)	54
ตารางที่ 3.1 สารประกอบที่ใช้ในการผลิตผ้าเบรก	64
ตารางที่ 3.2 เป้าหมายของแต่ละกระบวนการ และค่าที่กำหนด	66
ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติการไหลกับมุมอง (Angle of repose)[36, 37]	69
ตารางที่ 3.4 สมบัติการไหลกับค่า compressibility และ Hausner ratio	70
ตารางที่ 4.1 เสียงเบรกจากผลการทดสอบ SAE J2522 ที่ความถี่เสียง 8,000 - 9,000 Hz และ 68 - 70 dB	80
ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ผลกระทบอันเนื่องมาจากความผิดพลาดในกระบวนการ	85
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติการอัดตัวได้	90
ตารางที่ 4.4 คุณสมบัติการไหลทั้ง 3 สูตร	91
ตารางที่ 4.5 ความหนาเฉลี่ยรวมของแต่ละวิธีการผลิตชิ้นงานพิมพ์เย็น	95
ตารางที่ 4.6 ความคลาดเคลื่อนของความหนาเฉลี่ยของชิ้นงานกับความดันของเครื่องจักร.....	98
ตารางที่ 4.7 ร้อยละของการขยายตัวของชิ้นงาน และค่าความยืดหยุ่นของชิ้นงาน	103
ตารางที่ 4.8 ความหนาที่ขยายตัวเมื่อเก็บชิ้นงานไว้เป็นเวลา 1 - 5 วัน	103
ตารางที่ 4.9 ความถ่วงจำเพาะ และค่าความยืดหยุ่นของชิ้นงานที่ผลิตด้วยวิธีการที่ 4.3.3	104
ตารางที่ 4.10 ค่าความถ่วงจำเพาะ และค่าความยืดหยุ่นของชิ้นงานที่ผลิตด้วยวิธีการที่ 4.3.2.....	105
ตารางที่ 4.11 ค่าความยืดหยุ่นของชิ้นงานระหว่างวิธีการผลิตแบบปรับยอดและไม่ปรับยอด	110

ตารางที่ 4.12 ค่าความยืดหยุ่นของชิ้นงานพิมพ์ร้อนในแต่ละบริเวณด้วยวิธีการผลิตแบบปรับยอด
และไม่ปรับยอด..... 111

ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบระหว่างการผลิตปัจจุบัน และเงื่อนไขที่ใช้ในการปรับปรุง..... 112



สารบัญรูปร่างภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 การผลิต จำหน่าย และส่งออกรถยนต์[1]	16
รูปที่ 1.2 แนวโน้มปริมาณการผลิตและการจำหน่ายรถยนต์ ในปี 2561-2563[2]	17
รูปที่ 1.3 มูลค่าการส่งออกสินค้าในปี 2560 - ไตรมาสสาม ปี 2561[4].....	18
รูปที่ 1.4 ประเภทของการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ในไทย.....	18
รูปที่ 1.5 กฎหมายบังคับเรื่องเสียงของรถยนต์[5].....	19
รูปที่ 1.6 ข้อร้องเรียนของลูกค้าในปี 2559.....	20
รูปที่ 1.7 จำนวนชิ้นงานที่ไม่ได้คุณภาพ โดยแยกตามประเภทของชิ้นงาน	21
รูปที่ 1.8 ปริมาณงานไม่ได้คุณภาพ โดยแยกตามสาเหตุการเกิดชิ้นงานนี้ม	21
รูปที่ 2.1 ระบบและส่วนประกอบของเบรกในรถยนต์[9].....	24
รูปที่ 2.2 ตำแหน่งที่ประกอบเบรกในรถยนต์[10].....	25
รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบดรัมเบรก (Drum Brake Pad)[12].....	26
รูปที่ 2.4 ภาพขยายของผ้าเบรกตัวอย่าง X	28
รูปที่ 2.5 ภาพขยายของผ้าเบรกตัวอย่าง Y.....	28
รูปที่ 2.6 การเกิดแผ่นผิวราบใหม่ (Plateaus) รอบเส้นใยที่เกิดขึ้นหลังจากการเบรก[10]	29
รูปที่ 2.7 ประเภทของเสียงที่เกิดขึ้นจากการเบรก โดยแบ่งตามความถี่[14].....	35
รูปที่ 2.8 ช่วงความถี่เสียงเบรกสเควลที่เกิดจากส่วนประกอบต่าง ๆ.....	35
รูปที่ 2.9 การสั่นของวัสดุที่มีค่าคงที่ของความยืดหยุ่น (k) มวล (m) และความหน่วง (c).....	36
รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจลน์ที่ลดลงตามอัตราเร็ว[16].....	37
รูปที่ 2.11 วัสดุที่มีสมมาตรแบบ transversely isotropic.....	40
รูปที่ 2.12 วัสดุ Orthotropic ที่ประกอบด้วยมัดเส้นใย	42
รูปที่ 2.13 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด[20]	45

รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ความเค้น และความเครียดของวัสดุแบบอ่อน (Soft material)[17].....	46
รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ความเค้น และความเครียดของวัสดุหยุ่นหนืด (Viscoelastic material)[17]	46
รูปที่ 2.16 อัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดของวัสดุหยุ่นหนืด[17].....	47
รูปที่ 2.17 การทดสอบความคืบของวัสดุหยุ่นหนืด	48
รูปที่ 2.18 โครงสร้างของแผนภาพสาเหตุและผลแบบวิเคราะห์ความผันแปร	50
รูปที่ 2.19 โครงสร้างของแผนภาพสาเหตุและผลแบบจำแนกตามกระบวนการ	51
รูปที่ 2.20 โครงสร้างของแผนภาพสาเหตุและผลแบบกำหนดรายการสาเหตุ	51
รูปที่ 2.21 การกระจายของค่า Young's Modulus ในแต่ละตำแหน่งของชิ้นงาน	57
รูปที่ 2.22 การกระจายของค่า Young's Modulus ในแนวราบ (In-plane) และตั้งฉาก (Out-of- plane).....	58
รูปที่ 2.23 การกระจายตัวของความหนาแน่นภายในวัสดุผ้าเบรกจากโปรแกรมการจำลอง	59
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	61
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการศึกษาภาพรวมของที่มาการพัฒนากระบวนการพิมพ์เย็น.....	62
รูปที่ 3.3 บริเวณชิ้นงานนิ่มของชิ้นงานตัวอย่าง (กรอบสี่แดง)	63
รูปที่ 3.4 ชิ้นงานหลังจากการอัดขึ้นรูปแบบเย็น	63
รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการตั้งเป้าหมายในการพัฒนาคุณภาพผ้าเบรก	65
รูปที่ 3.6 การเรียงตัวของสะพานเคมีผสมในแม่พิมพ์[32]	72
รูปที่ 3.7 การทดสอบแบบแรงกด (a) เครื่องทดสอบ Universal test (b) การติดตั้งทดสอบชิ้นงาน อัดขึ้นรูปเย็น และ (c) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (stress) และความเครียด (stain).....	75
รูปที่ 3.8 การวัดค่ามอดุลัสด้วยคลื่นความถี่สูง (ultrasonic wave) ของ IETEK.....	76
รูปที่ 4.1 จำนวนเสียงเบรกที่มีความถี่มากกว่า 1,000 Hz ในปี พ.ศ. 2559 - 2561	77
รูปที่ 4.2 จำนวนครั้งของการเกิดเสียงเบรกในช่วงความถี่เสียงและระดับความเข้มเสียงต่าง ๆ ในการ ทดสอบ Dynamometer	78

รูปที่ 4.3 จำนวนครั้งของการเกิดเสียงเบรกที่ระดับความเข้มเสียงต่าง ๆ ของช่วงการทดสอบตามมาตรฐาน SAE J2522.....	79
รูปที่ 4.4 กระบวนการที่จะก่อให้เกิดปัญหาชิ้นงานน้มน.....	82
รูปที่ 4.5 แผนภาพเหตุและผลของปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปัญหาชิ้นงานน้มนในกระบวนการอัดขึ้นรูปเย็น.....	83
รูปที่ 4.6 แผนภาพเหตุและผลของปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปัญหาชิ้นงานน้มนในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน.....	84
รูปที่ 4.7 สวนผสมของผ้าเบรก (ก) ผ้าเบรกสูตร ก. (ข) ผ้าเบรกสูตร ข. และ (ค) ผ้าเบรกสูตร ค.	88
รูปที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์มุมของทั้ง 3 สูตร.....	89
รูปที่ 4.9 จำนวนครั้งการเคาะกับปริมาตรหลังการเคาะของเคมีผสมสูตร ก.....	90
รูปที่ 4.10 (ก) 6 ตำแหน่งการวัดบนชิ้น (ข) การวัดความหนาด้วยเครื่องไมโครมิเตอร์.....	92
รูปที่ 4.11 ความหนาของชิ้นงานในแต่ละหลุมของเงื่อนไขการผลิตปัจจุบัน.....	93
รูปที่ 4.12 ความหนาของชิ้นงานในแต่ละหลุมด้วยวิธีการเพิ่มจำนวนครั้งการกด.....	94
รูปที่ 4.13 ความหนาของชิ้นงานในแต่ละหลุมของวิธีการกำหนดระยะการกด แบบไม่เกลี่ย.....	95
รูปที่ 4.14 ความหนา 6 ตำแหน่งในชิ้นงานหนึ่งชิ้นของหลุมที่ 2 และ 3 ของวิธีการอัดแบบไม่เกลี่ย.....	96
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาชิ้นงานและความดันของเครื่องจักรที่ใช้อัดขึ้นรูป.....	97
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยืดหยุ่นและความดันของจักรที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป.....	99
รูปที่ 4.17 ความหนาเฉลี่ยรวมของชิ้นงานในแต่ละครั้งการผลิตที่ความดันต่าง ๆ.....	100
รูปที่ 4.18 การขยายขนาดตามแนวความกว้างของชิ้นงานเทียบกับความกว้างของหลุมแม่พิมพ์.....	101
รูปที่ 4.19 การขยายขนาดตามแนวความยาวของชิ้นงานเทียบกับความยาวของหลุมแม่พิมพ์.....	102
รูปที่ 4.20 ตัวอย่างชิ้นงานขนาด 25×25 มิลลิเมตร ที่ถูกตัดจากชิ้นงานอัดขึ้นรูปร้อน.....	104
รูปที่ 4.21 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการผลิตต่อค่าทดสอบความถ่วงจำเพาะ และความยืดหยุ่น (Modulus).....	106
รูปที่ 4.22 ความหนาในแต่ละตำแหน่งของชิ้นงานอัดขึ้นรูปเย็นด้วยวิธีการผลิตแบบ 4.6.2.....	107
รูปที่ 4.23 แผนภาพฮิสโทแกรมของความหนาชิ้นงานอัดขึ้นรูปเย็น.....	108

รูปที่ 4.24 แผนภาพฮิสโทแกรมของความยาวชิ้นงานอัดขึ้นรูปเย็น.....	109
รูปที่ 4.25 แผนภาพฮิสโทแกรมของความหนาชิ้นงานอัดขึ้นรูปเย็น.....	109
รูปที่ 4.26 ตำแหน่งของการวัดค่าความยืดหยุ่นบนชิ้นงาน	110

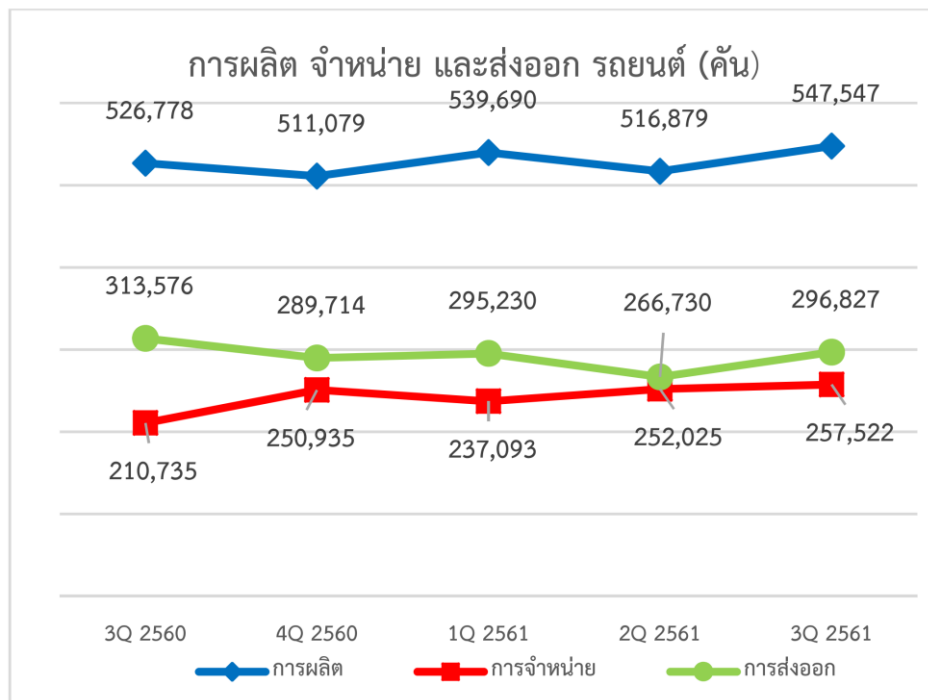


บทที่ 1

บทนำ

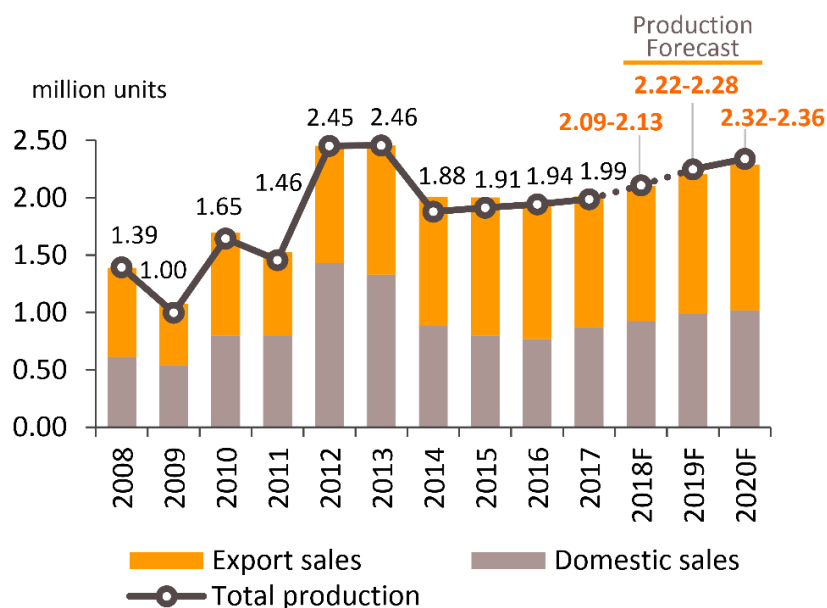
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

อุตสาหกรรมรถยนต์เป็นอุตสาหกรรมการผลิตที่รัฐบาลไทยให้การส่งเสริมการลงทุนอย่างต่อเนื่อง โดยมีมาตรการส่งเสริมการผลิตและใช้ชิ้นส่วนยานยนต์ในประเทศ ในไตรมาสที่ 3 ปี 2561 พบว่าปริมาณการผลิต จำหน่ายในประเทศ และส่งออกรถยนต์เพิ่มขึ้นจากไตรมาสที่ 2 ปี 2561 ร้อยละ 5.93 (%QoQ), 2.18 (%QoQ) และ 11.28 (%QoQ) ตามลำดับ[1] ดังที่แสดงในรูปที่ 1.1 ซึ่งมีการคาดการณ์แนวโน้มอุตสาหกรรมรถยนต์ของไทยในปี 2561-2563 ที่คาดว่าจะเติบโตต่อเนื่องทั้งตลาดในประเทศ และตลาดส่งออก โดยมีการผลิตอยู่ที่ 2.09-2.13 ล้านคันในปี 2561 (5-7%YoY), 2.22-2.28 ล้านคัน ในปี 2562 (5-8%YoY) และ 2.32-2.36 ล้านคัน ในปี 2563 (3-5%YoY)[2] ดังแสดงในรูปที่ 1.2



ที่มา : สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม รวบรวมจากกลุ่มอุตสาหกรรมยานยนต์ สภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย

รูปที่ 1.1 การผลิต จำหน่าย และส่งออกรถยนต์[1]



		2017	2018F	2019F	2020F
Production	units, m	1.99	2.09-2.13	2.22-2.28	2.32-2.36
	% YoY	2.3%	5-7%	5-8%	3-5%
Domestic Sales	units, m	0.72	0.92-0.93	0.98-0.99	1.01-1.03
	% YoY	13.4%	5-7%	6-8%	3-5%
Exports	units, m	1.14	1.16-1.19	1.21-1.23	1.26-1.28
	% YoY	-4.1%	3-5%	3-5%	3-5%

Source: Toyota, FTI, Forecast by Krungsri Research

รูปที่ 1.2 แนวโน้มปริมาณการผลิตและการจำหน่ายรถยนต์ ในปี 2561-2563[2]

เช่นเดียวกันกับอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ของไทยมีการพัฒนาในทิศทางเดียวกับการเติบโตของอุตสาหกรรมยานยนต์ในประเทศ พิจารณาจากความผันแปรของแต่ละไตรมาสของมูลค่าการส่งออกสินค้าที่ไตรมาสที่ 2 และไตรมาสที่ 3 ปี 2561 14.4 %YoY และ 6.2 %YoY ในสินค้าส่งออทยานยนต์ และ 13.4 %YoY และ 7.8 %YoY ในสินค้าส่งออกชิ้นส่วนยานยนต์ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 1.3 โดยชิ้นส่วนฯ ที่ผลิตในไทยมีทั้งตลาดเพื่อประกอบยานยนต์ (Original Equipment Manufacture: OEM) มีมูลค่าตลาดคิดเป็น 30-40% ของมูลค่าตลาดชิ้นส่วนฯ รวมภายในประเทศ และตลาดชิ้นส่วนฯ ทดแทน หรืออะไหล่ยานยนต์ (Replacement Equipment Manufacturer: REM) มีมูลค่าตลาดคิดเป็น 60-70% ของมูลค่าตลาดชิ้นส่วนฯ รวมภายในประเทศ โดยในตลาด REM การเติบโตของตลาดเป็นไปในทิศทางเดียวกับจำนวนยานยนต์จดทะเบียนสะสมในประเทศ[3] ซึ่งเป็นกลุ่มลูกค้าเป้าหมายที่มีความต้องการเปลี่ยนชิ้นส่วนยานยนต์ (อะไหล่) เช่น เครื่องยนต์ ตัวถัง ระบบเบรก เป็นต้น ดังที่แสดงในรูปที่ 1.4 ในปี 2560 ความต้องการชิ้นส่วนฯ เพื่อการทดแทน (ตลาด

REM) เด็บโตต่อเนื่อง เนื่องจากจำนวนรถยนต์ที่มีอายุมากกว่า 5 ปีในโครงการรถยนต์คันแรกทำให้มีความต้องการเปลี่ยนอะไหล่เร่งขึ้น[3]

สินค้าส่งออกสำคัญ ในรูปดอลลาร์ สหรัฐ.

%YoY	2560					2561			สัดส่วน Q3/61 (%)
	ทั้งปี	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	
สินค้าเกษตร	20.2	20.6	19.4	28.9	13.5	-1.6	7.8	1.3	7.0
ข้าว	17.6	7.1	19.6	45.1	20.9	20.9	14.5	7.6	2.2
ยาง	35.5	78.5	38.1	23.0	10.6	34.9	13.6	17.0	1.7
มันสำปะหลัง	6.1	18.1	11.9	6.6	3.4	28.1	4.7	2.3	0.7
สินค้าอุตสาหกรรม	10.2	5.8	12.2	9.9	12.9	14.1	10.7	6.7	89.6
น้ำตาล	12.5	7.6	32.8	31.2	6.5	13.4	13.9	2.3	1.1
กังหัน ปูกระป๋องและแปรรูป	4.6	13.0	11.6	4.7	5.8	6.0	14.1	20.1	0.4
ผลิตภัณฑ์ยาง	41.3	51.6	32.5	37.2	44.3	2.8	19.3	2.6	2.2
สิ่งทอและเครื่องนุ่งห่ม	3.9	3.1	1.1	4.0	7.4	8.4	8.4	6.3	2.9
อิเล็กทรอนิกส์	14.0	10.0	16.5	11.3	18.2	13.6	11.3	3.6	14.9
ชิ้นส่วนและอุปกรณ์คอมพิวเตอร์	5.7	0.8	4.4	2.5	16.4	16.1	16.8	7.4	6.0
แผงวงจรรวมและชิ้นส่วน	7.1	11.8	11.1	3.4	3.6	7.3	6.5	3.9	3.3
วงจรมินิพีซี	10.5	13.9	9.7	4.0	15.9	0.9	2.5	8.2	0.6
อุปกรณ์สื่อสารโทรคมนาคม	51.0	21.5	71.7	49.6	60.4	37.9	2.5	0.4	2.2
เครื่องใช้ไฟฟ้า	6.2	9.5	4.1	3.0	8.5	9.6	3.6	3.4	4.9
ผลิตภัณฑ์โลหะ	14.3	16.1	15.9	8.6	17.2	18.5	19.0	7.4	4.6
ยานยนต์	6.3	2.5	2.3	2.6	18.1	15.8	14.4	6.2	15.2
รถยนต์นั่ง	7.1	19.1	9.8	10.8	13.5	18.5	12.4	1.5	4.6
รถกระบะและรถบรรทุก	11.8	15.8	4.3	1.8	30.2	1.8	23.9	11.7	3.1
ชิ้นส่วนและอุปกรณ์ยานยนต์	13.6	13.2	9.6	14.5	16.9	15.6	13.4	7.8	6.9

รูปที่ 1.3 มูลค่าการส่งออกสินค้าในปี 2560 - ไตรมาสสาม ปี 2561[4]

Auto part systems	Thai potential part segments
Engines	Diesels, Motorcycles
Engines Components	Starters, Alternators, Filters, Hoses, Gears, Flywheels
Body Parts	Chassis, Bumpers, Fenders, Hoods, Door Panels
Brake Systems	Master Cylinders, Drums, Discs, Pads, Linings
Steering Systems	Steering Wheels, Gears, Columns, Pumps, Linkages
Suspensions	Shocks, Coils, Ball Joints
Transmissions	Gears, Casting, Rear Axles, Drive Shafts, Propeller Shafts
Electrical/Electronics	Aternators, Starters, Speedometers, Lamps, Motors, Flashers Relays
Interiors/Exteriors	Seats/ Mats, Weather Strips, Console Boxes
Others	Windshields, Seat Belts, Radiators, Wheels, Compressors

Source : FTI

รูปที่ 1.4 ประเภทของการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ในไทย

ด้วยเหตุนี้อุตสาหกรรมชิ้นส่วนรถยนต์จึงมีความจำเป็นจะต้องพัฒนา และปรับปรุงกระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เพื่อเพิ่มจำนวนการผลิตให้ทันต่อการจัดส่ง และต้องผลิตชิ้นส่วนที่มีคุณภาพให้ตอบสนองความต้องการและความพึงพอใจของลูกค้า ดังนั้น โรงงานอุตสาหกรรมยานยนต์ และชิ้นส่วนยานยนต์ จึงจำเป็นต้องสร้างระบบคุณภาพ เครื่องมือ และวิธีการ เพื่อที่จะส่งเสริมองค์ความรู้ให้กับการวิจัย พัฒนา ให้มีการขับเคลื่อนองค์กร (Research Development and Industrialization: RDI) อย่างยั่งยืน

อุตสาหกรรมผลิตรถยนต์ในอดีต จนถึงปัจจุบัน มีการต่อยอดการพัฒนาเครื่องยนต์ให้มีประสิทธิภาพในการลดมลภาวะทางเสียงที่รบกวนต่อสภาพแวดล้อมทั้งภายใน และภายนอกเครื่องยนต์ ตามกฎหมายข้อบังคับ[5] กำหนดค่าความดันของเสียงได้ไม่เกิน 72 dB ในปี 2559, 70 dB ในปี 2565 และ 68 dB ในปี 2569 ตามลำดับ ดังรูปที่ 1.5 นอกจากนี้ยังได้รับการร้องเรียนจากผู้ใช้งานรถยนต์ และผู้คนในท้องถนนเกี่ยวกับเสียงรบกวนอยู่ไม่ว่าจะเป็นเสียงที่เกิดขึ้นจากลมที่ผ่านตัวรถ เสียงเครื่องยนต์ แม้กระทั่งเสียงที่เกิดขึ้นในการเบรก[6]

ANNEX III

LIMIT VALUES

The sound level measured in accordance with the provisions of Annex II, mathematically rounded to the nearest integer value, shall not exceed the following limits:

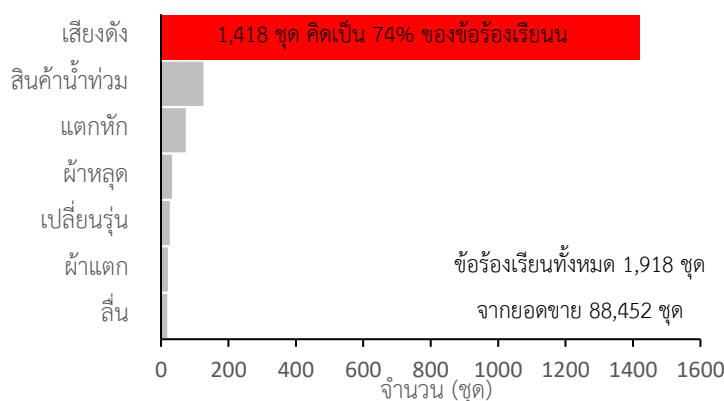
Vehicle category	Description of vehicle category	Limit values expressed in dB(A) [decibels (A)]		
		Phase 1 applicable for new vehicle types from 1 July 2016	Phase 2 applicable for new vehicle type from 1 July 2020 and for first registration from 1 July 2022	Phase 3 applicable for new vehicle type from 1 July 2024 and for first registration from 1 July 2026
M	Vehicles used for the carriage of passengers			
M ₁	power to mass ratio ≤ 120 kW/1 000 kg	72 (1)	70 (1)	68 (1)
M ₁	120 kW/1 000 kg < power to mass ratio ≤ 160 kW/1 000 kg	73	71	69
M ₁	160 kW/1 000 kg < power to mass ratio	75	73	71
M ₁	power to mass ratio > 200 kW/1 000 kg number of seats ≤ 4 R point of driver seat ≤ 450 mm from the ground	75	74	72

รูปที่ 1.5 กฎหมายบังคับเรื่องเสียงของรถยนต์[5]

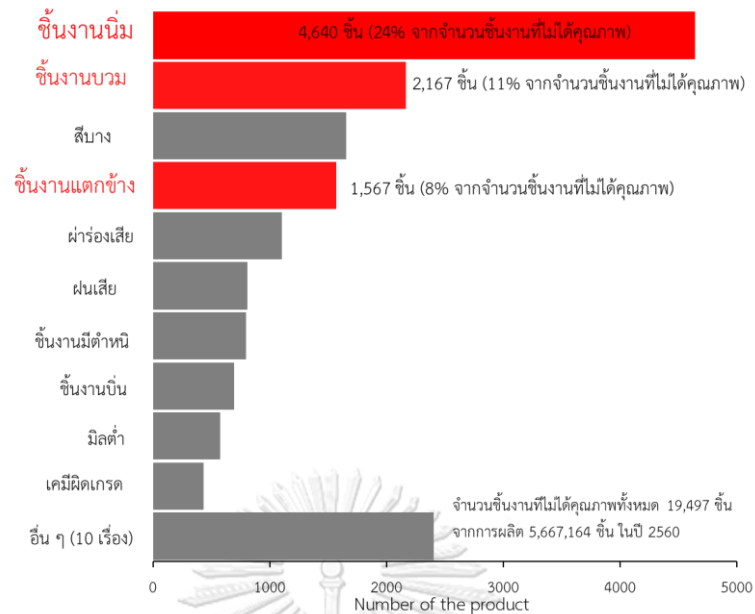
ทำนองเดียวกันกับบริษัท คอมแพ็ค อินเตอร์เนชันแนล(1994) จำกัด ที่เป็นบริษัทตัวอย่างที่ผู้วิจัยได้ทำการศึกษา และเป็นหนึ่งในผู้ผลิตผ้าเบรกในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ทดแทน (REM) และแหล่งการผลิตของตลาดหลังการขาย (After Market, AM) ประเภทระบบเบรก ในปี 2561 บริษัท คอมแพ็ค อินเตอร์เนชันแนล(1994) จำกัด ร่วมกับ บริษัท เอเชียคอมแพ็ค จำกัด มีพนักงานรวมกว่า 700 คน มีการผลิตผลิตภัณฑ์ที่จำหน่ายทั้งในประเทศ และต่างประเทศ ปีละ 2,500,000 ชุด/ปี[7] ซึ่งบริษัทมีความต้องการที่จะพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้มีคุณภาพสูง พร้อมกับการพัฒนาโรงงานอย่างต่อเนื่องให้เกิดนวัตกรรมต่าง ๆ เพื่อเป็นหนึ่งในบริษัทผู้ผลิตเบรกรถยนต์ที่สามารถตอบสนองความพึงพอใจของลูกค้า และสร้างผ้าเบรกที่ปลอดภัยต่อการขับขี่ที่มีความเหมาะสมกับพฤติกรรมการ

ขับเคลื่อนในประเทศไทย และต่างประเทศ ทางผู้บริหารของบริษัทที่มีแนวคิดที่จะสร้างระบบพัฒนาคุณภาพ และสร้างกำลังคนที่จะมาสร้างสรรค์นวัตกรรมต่าง ๆ ให้เกิดขึ้นในบริษัท ผ่านทางโครงการกระบวนการพัฒนาการวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (RDI) ร่วมมือกับสำนักงานคณะกรรมการนโยบายวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรมแห่งชาติ (สวทน.) และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย บริหารจัดการโครงการโดยบริษัท ไพร้ม แมเนจเม้นท์ โซลูชั่น จำกัด ทำให้ผู้วิจัยได้รับการศึกษาเกี่ยวกับระบบคุณภาพ (RDI Quality System) ตามผังแนวคิดที่วางลูกค้าเป็นศูนย์กลางของการขับเคลื่อนองค์กร (Customer Oriented Organization) จากตลาด ออกแบบผลิตภัณฑ์สู่การผลิต ตามผังความคิดนี้ ผู้วิจัยจึงได้ทำการสืบค้นข้อมูล ความพึงพอใจของลูกค้า พฤติกรรมการซื้อของลูกค้าในประเทศไทย ประกอบกับกฎหมายและแนวโน้มของตลาดชิ้นส่วนยานยนต์ และสำรวจผลิตภัณฑ์ในกระบวนการผลิต พบว่าประสิทธิภาพเรื่องลดเสียงจากการเบรกเป็นหนึ่งในเรื่องที่ถูกค่าให้การร้องเรียนต่อบริษัท คิดเป็น 74% ของข้อร้องเรียนทั้งหมด (2% จากยอดขายปี 2559) แสดงในรูปที่ 1.6 และปัญหาของชิ้นงานไม่ได้คุณภาพส่วนมากพบในสายการผลิตชนิดขึ้นรูปร้อน (Hot Molding) ถูกจำแนกไว้ในรูปที่ 1.7 พบว่าเกิดปัญหาชิ้นงานนี้ถึง 24% ของจำนวนชิ้นงานที่ไม่ได้คุณภาพ (0.1% ของจำนวนการผลิตชิ้นงานในปี 2560) และมีมูลค่าความเสียหายระหว่างการเก็บข้อมูลคิดเป็นมูลค่า 125,923 บาท ยังพบอีกว่าของเสียที่เกิดขึ้นไม่สามารถนำกลับมาทำใหม่ (Rework) ได้ สาเหตุของปัญหาชิ้นงานนี้ยังมีหลายสาเหตุสามารถจำแนกได้ดังแสดงในรูปที่ 1.8 ซึ่งพบว่าสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดชิ้นงานนี้คือการไล่เคมีไม่เสมอกันคิดเป็น 36% ของจำนวนชิ้นงานนี้ โดยการไล่เคมีนี้เกิดขึ้นในขั้นตอนการปฏิบัติงานของสายการผลิตขึ้นรูปเย็น (Cold Pressing) ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องอาศัยเทคนิคที่มีความเหมาะสมมาทำการพัฒนาการผลิต เพื่อลดต้นทุนการผลิตที่สูงเกินไปจากการผลิตชิ้นงานที่ไม่ได้คุณภาพ พร้อมกับคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ดีเหมาะสมกับความพึงพอใจของลูกค้า และสามารถผลิตผลิตภัณฑ์ได้ทันกับความต้องการของตลาดและแข่งขันในตลาดได้

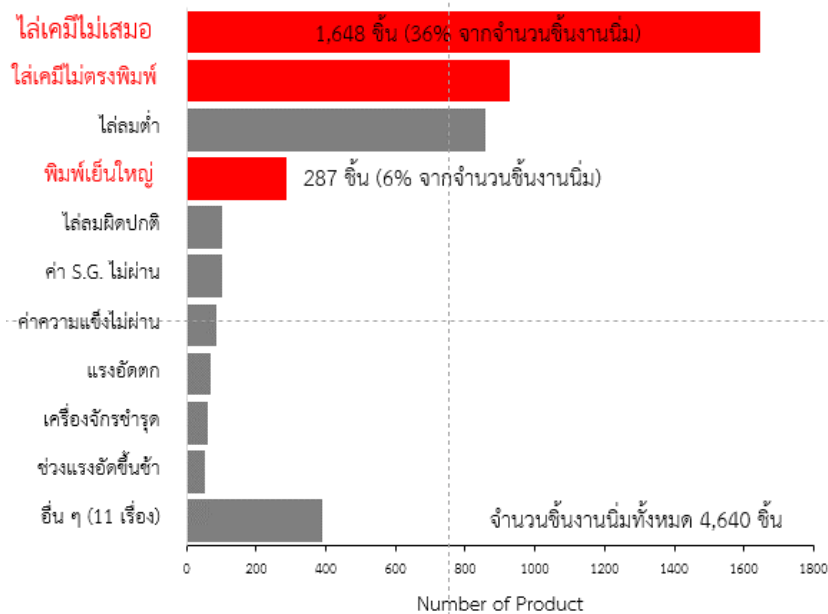
ข้อร้องเรียน ปี 2559



รูปที่ 1.6 ข้อร้องเรียนของลูกค้าในปี 2559



รูปที่ 1.7 จำนวนชิ้นงานที่ไม่ได้คุณภาพ โดยแยกตามประเภทของชิ้นงาน



รูปที่ 1.8 ปริมาณงานไม่ได้คุณภาพ โดยแยกตามสาเหตุการเกิดชิ้นงานนิ่ม

กระบวนการอัดขึ้นรูปแบบเย้นเป็นกระบวนการที่ทำเพื่อขึ้นรูปจากผงเคมีผสมให้กลายเป็นรูปร่างต่าง ๆ เบื้องต้นของผ้าเบรก โดยมีขั้นตอนเริ่มจากการชั่งน้ำหนักเคมีผสม เทเคมีผสมลงในแม่พิมพ์ โล่หรือเกลี่ยเคมีผสมให้ทั่วหลุมแม่พิมพ์ และทำการอัดเพื่อขึ้นรูป อย่างไรก็ตามวิธีการโล่เคมีในแม่พิมพ์เย้นเป็นหนึ่งในทำให้ขนาด ความหนาและความหนาแน่นของชิ้นงานอัดขึ้นรูปเย้นสม่ำเสมอ ถ้าความหนาแน่นไม่สม่ำเสมอจะเป็นผลสืบเนื่องให้คุณภาพชิ้นงานไม่ได้คุณภาพในกระบวนการขึ้นรูป

ร้อน และยังเพิ่มความเสี่ยงที่จะทำให้เกิดเสียงจากการเบรกสูงระหว่างการใช้งานอีกด้วย[8] คุณสมบัติหนึ่งที่เป็นข้อจำกัดของวิธีการเท และการเกลี่ย คือคุณสมบัติการไหลของเคมีผสม (Flowability) โดยคุณสมบัติการไหลของเคมีนั้นเป็นผลมาจากคุณสมบัติทางกายภาพของเคมีผสมหลาย ๆ ชนิด เช่น ความหนาแน่น ความแข็งแรงในการยึดติดกันภายใน (Cohesive Strength) และความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส (Wall Friction) ซึ่งจากคุณสมบัติการไหลของเคมีผสมนี้จะส่งผลกระทบต่อความสม่ำเสมอของชิ้นงาน และความแข็งแรงของชิ้นงานหลังการอัด

ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นแนวทางพัฒนากระบวนการอัดขึ้นรูปแบบเย็นให้ผลิตชิ้นงานที่มีความสม่ำเสมอในเรื่องของขนาด และความหนาของชิ้นงานให้มากขึ้น โดยการศึกษาผลกระทบของคุณสมบัติการไหลของเคมีผสม และความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปแบบเย็น ซึ่งจะส่งผลต่อวิธีการไล่หรือเกลี่ยเคมีผสม และความหนาของชิ้นงานอัดขึ้นรูปแบบเย็น จากการศึกษานี้จะเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถช่วยแก้ปัญหาจำนวนชิ้นงานล้ม ลดการผ่นความหนาที่เกินจากขนาดที่กำหนด เพื่อเป็นการเพิ่มคุณภาพของชิ้นงาน และสามารถผลิตได้ทันต่อความต้องการของลูกค้า

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาผลกระทบของคุณสมบัติการไหล (Flowability) ของเคมีผสมที่มีผลต่อความสม่ำเสมอของความหนาในชิ้นงานพิมพ์เย็น
- 1.2.2 ศึกษาผลกระทบของความดัน และความหนาในขั้นตอนการอัดของกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบเย็นที่มีผลกระทบต่อความสม่ำเสมอของความหนาแน่นในชิ้นงานอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อน

1.3 ขอบเขตการวิจัย

การวิจัยนี้มุ่งเน้นคุณภาพของชิ้นงานพิมพ์เย็นให้ได้ความหนาที่สม่ำเสมอ และส่งผลให้ความหนาแน่นของกระบวนการอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อนในขั้นถัดไปสม่ำเสมอขึ้น เริ่มแรกของการศึกษาคือการทดลองศึกษาความสามารถในการไหลของเคมีผสมที่จะส่งผลกับความหนาของชิ้นงานพิมพ์เย็น โดยรูปแบบการศึกษาจะเป็นการเปรียบเทียบผลระหว่างการเกลี่ยกับไม่มีการเกลี่ยเคมีหลังการเทบรรจุลงแม่พิมพ์ หลังจากนั้นจะเป็นการศึกษาหาวิธีที่ทำให้ความหนาสม่ำเสมอด้วยวิธีการเพิ่มจำนวนครั้งการอัดด้วยความดันค่าต่าง ๆ และวัดความหนาแน่นของชิ้นงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อน การวัดความหนาแน่นนี้จะเป็นการวัดความหนาแน่นเทียบกับความหนาแน่นของน้ำโดยตัดชิ้นงานเป็นชิ้นเล็ก ๆ นอกจากนี้เพื่อยืนยันความสม่ำเสมอของชิ้นงานจะมีการวัดค่ามอดูลัสของชิ้นงานเพิ่มอีก การศึกษานี้จะศึกษาในรุ่นของเบรกเพียงหนึ่งชนิด ในขั้นตอนการเตรียมเคมีผสมจะวัดค่า Bulk density, Tapped density และ Angle of repose อาจเลือกทดลองเพียงแค่บางสูตรผสมเคมีในขั้นตอนการอัดขึ้นรูปเท่านั้น เพื่อไม่ให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการทำชิ้นงาน และเวลาการผลิตของบริษัทฯ ขั้นตอน

การอัดขึ้นรูปจะมีการควบคุมน้ำหนักของเคมีผสมจากกระบวนการผสม และการบรรจุเคมีผสมลงแม่พิมพ์เพียงอย่างเดียว ในส่วนขั้นตอนการเกลี่ยจะมีการควบคุมความสูงหลังการเกลี่ย และจะไม่มี การควบคุมความสูงในกรณีไม่เกลี่ย และอาจจะมีผลลัพธ์ที่แตกต่างกันเนื่องมาจากชิ้นงานคนละหลุม ของแม่พิมพ์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. จำนวนของเสียในการผลิตลดลงเมื่อเทียบกับก่อนหน้าการเริ่มทำวิทยานิพนธ์ ที่มีสาเหตุมา จากความหนาแน่น
2. ความหนาที่ต้องฝนตกแต่งลดลง ซึ่งเป็นการลดน้ำหนักของฝุ่นที่เกิดจากการฝนของความหนา เกินที่



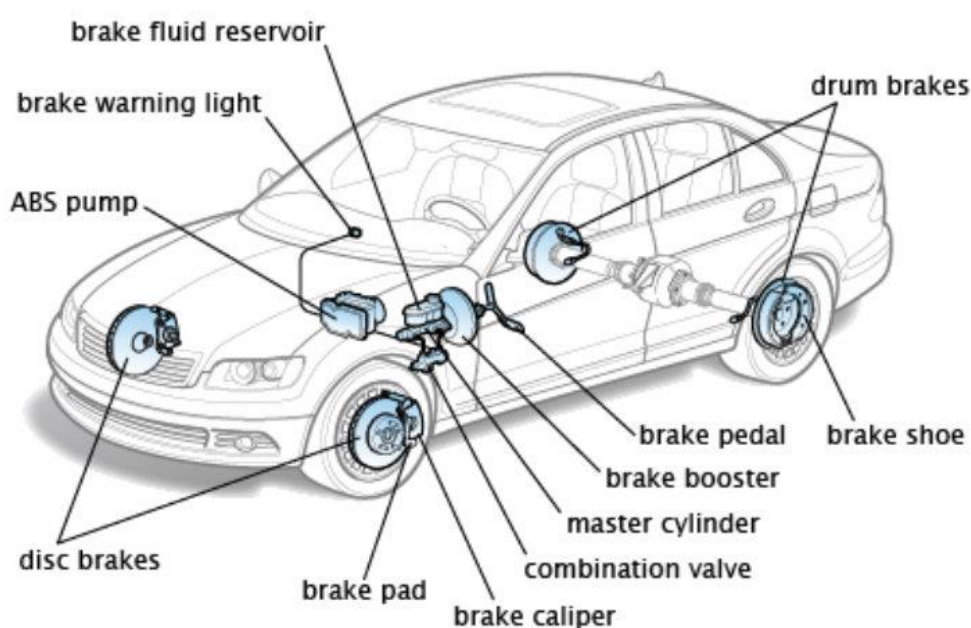
บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้อมูลทั่วไปของผ้าเบรกรถยนต์

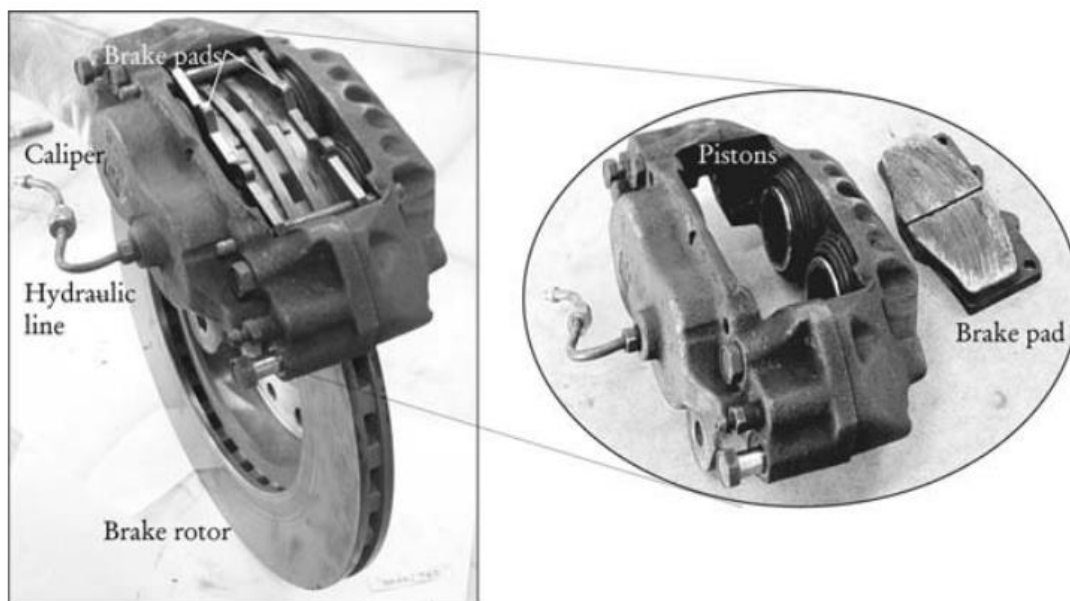
2.1.1 ระบบเบรกรถยนต์

ผลิตภัณฑ์ผ้าเบรกรถยนต์ (Brake Pad) เป็นส่วนประกอบหนึ่งของชิ้นส่วนยานยนต์ที่มีความสำคัญที่ช่วยในการลดอัตราเร็วรถในเวลาที่รถกำลังวิ่ง และหยุดหรือจอดรถยนต์ตามความต้องการของผู้ขับขี่ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 แสดงระบบและส่วนประกอบของเบรกในรถยนต์



รูปที่ 2.1 ระบบและส่วนประกอบของเบรกในรถยนต์[9]

หลักการหยุดรถทั่วไปจะใช้หลักการการถ่ายทอดแรงเหยียบไปที่แป้นเบรก (Brake Pedal) ไปถึงอุปกรณ์หยุดล้อด้วยระบบไฮดรอลิกซ์ (Hydraulic) โดยแรงเหยียบจากแป้นเบรกจะถูกส่งไปที่แม่ปั๊มน้ำมันเบรก (Brake Booster) เพื่อดันน้ำมันเบรกไปตามท่อ น้ำมันเบรกผ่านวาล์วแยกส่วนน้ำมัน (Master Cylinder) ไปถึงตัวผ้าเบรก จากลูกปั๊ม น้ำมันเบรก (Pistons) จะดันผ้าเบรกไปเสียดทานกับชุดจานเบรกที่อยู่กับดิสก์เบรก (Disc Brake) หรือดรัมเบรก (Drum Brake) เมื่อเกิดแรงเสียดทานล้อจะเริ่มหมุนช้าลง ชะลออัตราเร็วลง และหยุดในที่สุด ดังรูปที่ 2.2 แสดงตำแหน่งที่ประกอบเบรกในรถยนต์

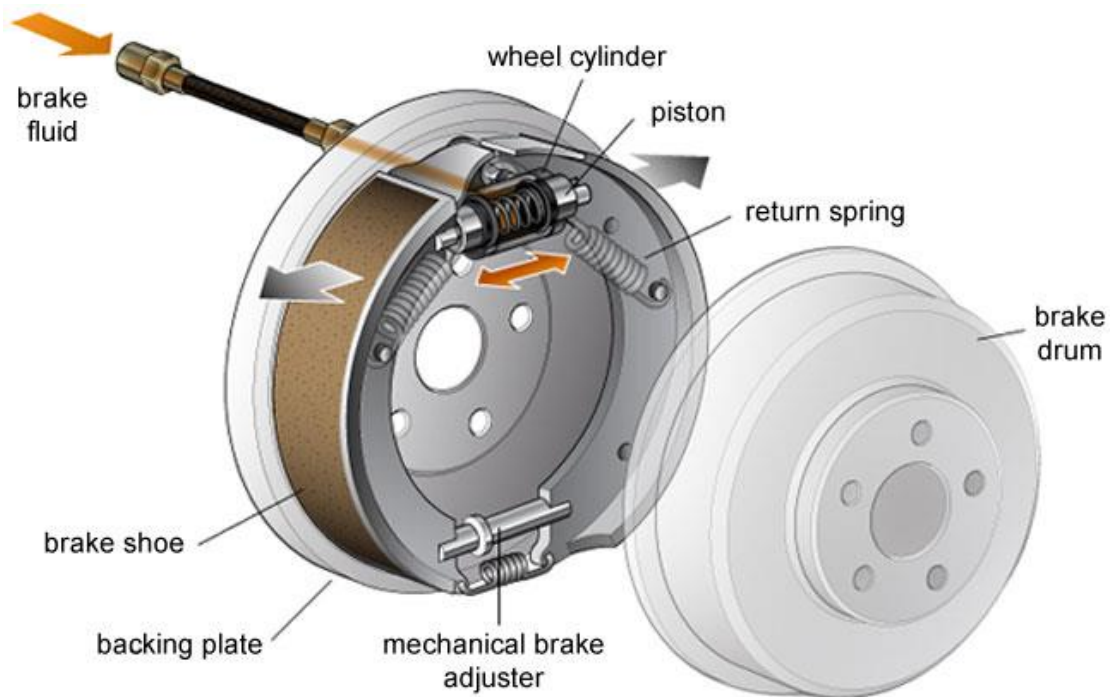


รูปที่ 2.2 ตำแหน่งที่ประกอบเบรกในรถยนต์[10]

2.1.2 ชนิดของระบบเบรก

1. ดิสก์เบรก (Disc Brake Pad) ประกอบด้วย แผ่นจานเบรก (Brake rotor) ติดตั้งลงบนแกนเพลาล้อ เมื่อรถเคลื่อนที่แผ่นจานเบรกจะหมุนไปพร้อมกับล้อ จากนั้นอุปกรณ์ที่เรียกว่าคาลิเปอร์ (Caliper) ซึ่งมีผ้าเบรกที่ประกบอยู่ด้านนอกและด้านในแผ่นจานเบรก ดังรูปที่ 2.2 ทำหน้าที่จับตัวผ้าเบรกแบบหนีบคดกับแผ่นจานเบรก ข้อดีของผ้าเบรกชนิดนี้คือ ระบายความร้อนได้เร็ว เนื่องจากสัมผัสกับอากาศอยู่ตลอดเวลา, จับตัวและรีดน้ำได้เร็วเวลาลุยน้ำ, ดูแลและบำรุงรักษาง่าย [11] แต่มีข้อเสียคือ ไม่เหมาะกับรถที่ใช้บรรทุกสิ่งของเนื่องจากมีหน้าสัมผัสเพื่อให้เกิดแรงเสียดทานน้อยผ้าเบรกจะทำงานมากกว่าปกติ

2. ทรัมเบรก (Drum Brake Pad) ประกอบด้วยทรัมเป็นโลหะวงกลมยึดติดกับคัมล้อ หมุนไปพร้อมกับล้อ กลไกปรับตั้งเบรกประกอบด้วยสปริงดึงกลับ และลูกสูบปั้มเบรก สายน้ำมันเบรกจะเชื่อมต่อกับตัวลูกสูบเพื่อดันผ้าเบรกให้เสียดทานกับทรัม ดังรูปที่ 2.3 ข้อดีคือ การจับตัวมันคงกว่าดิสก์เบรกเนื่องจากหน้าสัมผัสของผ้าเบรกที่มากกว่าเหมาะสำหรับรถที่ต้องบรรทุกน้ำหนัก แต่ข้อเสียคือ ระบายความร้อนได้ไม่ค่อยดี



รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบดรัมเบรก (Drum Brake Pad)[12]

2.1.3 ประเภทของผ้าเบรก

ปัจจุบันการผลิตผ้าเบรกมีหลากหลายชนิด เนื่องจากความต้องการที่แตกต่างกันของผู้ขับขี่ เช่น ราคาและคุณภาพ อุตสาหกรรมผ้าเบรกจึงต้องมีการพัฒนาตลอดเวลา นอกจากนี้การพัฒนาเทคโนโลยีของอุตสาหกรรมยานยนต์ และปัญหาข้อปฏิบัติต่าง ๆ เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ทำให้อุตสาหกรรมผ้าเบรกต้องมีการพัฒนาอยู่เสมอ โดยมีการพัฒนาผ้าเบรกดังนี้

ยุคที่หนึ่ง: ผ้าเบรกใยหิน (Asbestos) มีส่วนประกอบของใยหินเป็นหลัก แต่เนื่องด้วยใยหินก่อให้เกิดปัญหามลภาวะ ผ้าเบรกชนิดนี้จึงถูกยกเลิกใช้ แต่ยังมีผู้ผลิตค้าปลีกบางรายที่ยังผลิตเพราะผ้าเบรกใยหินนี้มีราคาถูก

ยุคที่สอง: ผ้าเบรกใช้ใยเหล็ก หรือผงเหล็กเป็นส่วนประกอบหลัก บางชนิดมีการผสมกราไฟต์ และคาร์บอนเพื่อให้ผ้าเบรกมีแรงเสียดทานมากขึ้น และลดปัญหาเรื่องเสียง แต่เนื่องจากปัญหาเรื่องเสียง และเขม่าดำผ้าเบรกชนิดนี้จึงถูกลดความนิยมลง

ยุคที่สาม: ผ้าเบรกใช้ใยสังเคราะห์ สารอนินทรีย์ หรือเส้นใยสังเคราะห์ต่าง ๆ เป็นส่วนประกอบหลัก นอกจากนี้ผ้าเบรกรังมีส่วนผสมของโลหะ เช่น ทองแดง เป็นตัวสร้างแรงเสียดทาน และนำความร้อน ปัจจุบันเป็นที่นิยมในอุตสาหกรรมผลิตรถยนต์ เนื่องจากวัสดุต่าง ๆ ของผ้าเบรกมีประสิทธิภาพที่ดี และยังคงตอบสนองการเบรกได้ดี ลักษณะที่สำคัญของวัสดุเสียดทานที่ผลิตเป็นผ้าเบรก ได้แก่ มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานคงที่ในช่วงอุณหภูมิ และอัตราเร็วที่กว้าง, ทนอุณหภูมิสูง, มีความคงทนสูง, มีอัตราการสึกหรอต่ำทั้งวัสดุเสียดทาน และผิวโลหะ, ทนต่อน้ำมัน และน้ำ, ให้

ความรู้สึกสบาย และตอบสนองในการเบรก ไม่มี NVH (Noise Vibration Harshness) และมีปริมาณฝุ่นต่ำ

การแบ่งประเภทของผ้าเบรก ใช้เกณฑ์แบ่งตามวัสดุที่ใช้ในการผลิต และแบ่งตามประเภทการใช้งาน ดังนี้

1. ผ้าเบรกแบ่งตามวัสดุที่ใช้ในการผลิต

ผ้าเบรกในตลาดค้าปลีกไทย สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ แบบใยหิน และแบบไร้ใยหิน โดยแบบไร้ใยหินแยกออกเป็น 2 ชนิด คือ แบบไร้ใยหินสูตรเมทัลลิกซ์ ได้แก่ โลหะ (Metallic), คาร์บอนผสมโลหะ (Carbon Metallic), กึ่งโลหะ (Semi Metallic) และแบบไร้ใยหินสูตรออร์แกนิกซ์ ได้แก่ ออแกนิกซ์ (Organic), เซรามิก (Ceramics)

2. ผ้าเบรกแบ่งตามการใช้งาน

ผู้ผลิตผ้าเบรกรถยนต์มี 2 ประเภท คือ ผู้ผลิตผ้าเบรกสำหรับอุตสาหกรรมผลิตรถยนต์ (Original Equipment Manufacturer, OEM) และ ผู้ผลิตผ้าเบรกสำหรับค้าปลีก (After Market) หรืออะไหล่ทดแทน (Replacement Equipment Manufacturer, REM)

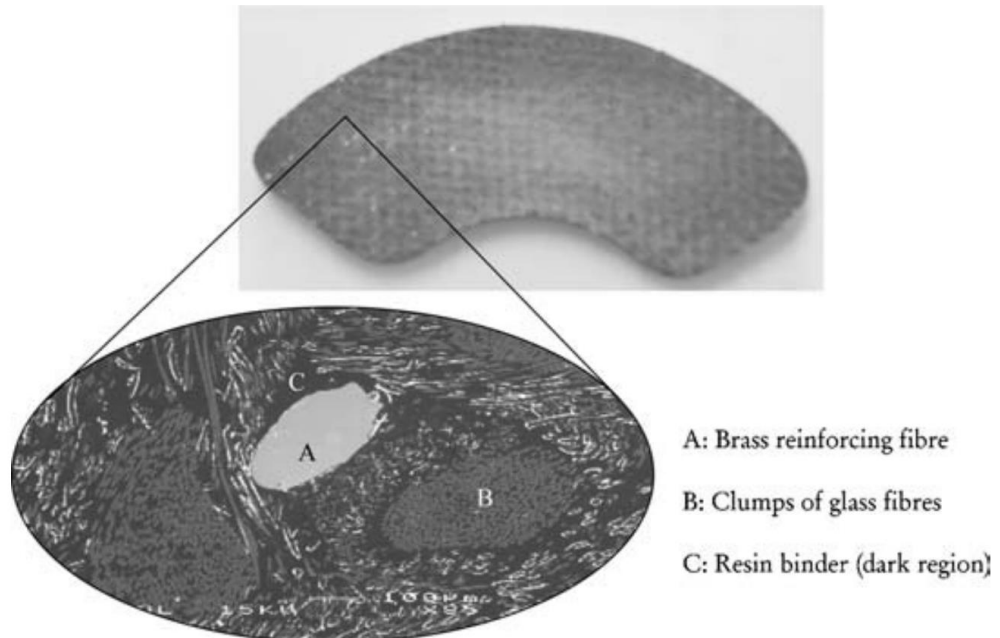
ผู้ผลิตผ้าเบรกสำหรับอุตสาหกรรมผลิตรถยนต์ (OEM) ผู้ผลิตมุ่งเน้นคุณภาพตามมาตรฐานอะไหล่สำหรับรถยนต์ใหม่ กลุ่มเป้าหมายจะเป็นโรงงานผลิตรถยนต์

ผู้ผลิตผ้าเบรกสำหรับค้าปลีก (After Market หรือ REM) ผลิตผ้าเบรกที่มีความหลากหลายเกรด หลากคุณภาพ และหลากหลายราคา บางผู้ผลิตอาจผลิตผ้าเบรกโดยบรรจุภายใต้หลากหลายยี่ห้อ เพื่อให้ตรงตามความต้องการของผู้จำหน่าย และผู้ขับขี่มากที่สุด

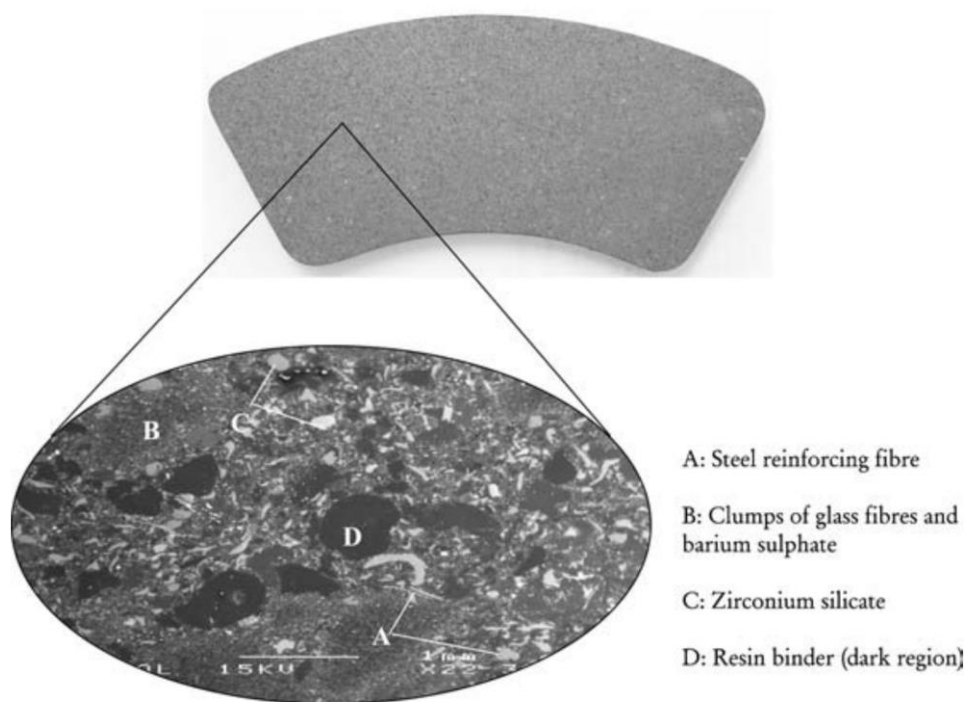
2.1.4 องค์ประกอบผ้าเบรก

ผ้าเบรก เป็นวัสดุเสียดทานประเภทหนึ่งที่มีการผสมหลายองค์ประกอบที่นำมายึดติดให้เป็นเนื้อเดียวกัน โดยองค์ประกอบของวัสดุเสียดทานนี้อาจมีมากถึง 10 – 25 ชนิด แต่ละองค์ประกอบมีหน้าที่เฉพาะ บางชนิดอาจมีหน้าที่มากกว่าหนึ่งอย่าง องค์ประกอบหลักของผ้าเบรกแบ่งได้เป็น 5 ประเภท ได้แก่ เส้นใย (Fibers), สารยึดเหนี่ยว (Binders), สารเติมเต็ม (Fillers), สารเพิ่มแรงเสียดทาน หรือผงขัด (Abrasives) และสารหล่อลื่น (Lubricants) รูปที่ 2.4 และ 2.5 แสดงภาพขยายของผ้าเบรก 2 ชนิด X และ Y ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ผ้าเบรก X เป็นสูตรผ้าเบรกที่ใช้ในการผลิตผ้าเบรกจากรถยนต์จะมีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานปานกลาง ส่วนผ้าเบรก Y เป็นสูตรผ้าเบรกที่ใช้ในการผลิตผ้าเบรกจากรถไฟจะมีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่สูง ดังนั้นผ้าเบรก X จะประกอบด้วยเส้นใยที่อ่อนกว่าที่ผลิตมาจากทองเหลือง (Brass, A) แต่ในผ้าเบรก Y จะประกอบด้วยเส้นใยที่มีความแข็งแรงมากกว่า โดยมี

ส่วนผสมของเซอร์โคเนียมซิลิเกต (Zirconium silicate, $ZnSiO_4$) ตำแหน่ง C ในรูป 2.5 และเส้นใยเหล็ก (Steel fiber) ตำแหน่ง A ในรูป 2.5 ซึ่งถูกยึดกันด้วยเรซิน



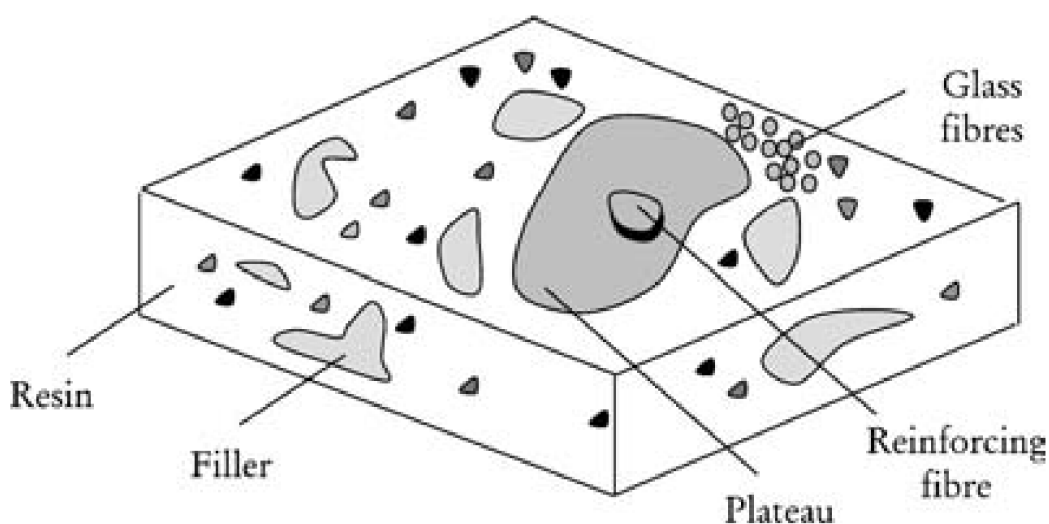
รูปที่ 2.4 ภาพขยายของผ้าเบรกตัวอย่าง X



รูปที่ 2.5 ภาพขยายของผ้าเบรกตัวอย่าง Y

▪ เส้นใย (Fiber)

เส้นใย มีหน้าที่สร้างความแข็งแรง และทำให้ขึ้นรูปผ้าเบรกได้ง่าย ในยุคแรกจะผลิตด้วยใยหิน ซึ่งมีข้อดีคือมีความคงทนที่อุณหภูมิสูงถึง 500 องศาเซลเซียส, เป็นฉนวนความร้อนได้ดี แต่ใยหินทำให้เกิดปัญหาทางสุขภาพจึงถูกประกาศห้ามใช้ ทำให้ผู้ผลิตผ้าเบรกต้องหาวัสดุอื่นทดแทน เช่น เส้นใยอินทรี (Aramid, Polyester) เส้นใยอนินทรี (เส้นใยแก้ว, เส้นใยโลหะ เส้นใยเซรามิก) ในผลการวิจัยพบว่าในขณะการเบรกผ้าเบรกจะเกิดแผ่นพื้นที่ราบเล็ก ๆ (Plateaus) เกาะบนผิวหน้าสัมผัสผ้าเบรกรอบเส้นใย[10] ซึ่งการเกิดแผ่นเหล่านี้เกิดขึ้นจากการรวมตัวกันของเศษฝุ่น หรือเศษเหล็กที่หลุดออกมาขณะเบรก และฝังตัวลงในผ้าเบรก ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ทำให้อัตราการสึกหรอของผ้าเบรกลดลง เมื่อมีองค์ประกอบของเส้นใยมากขึ้นที่ภาวะการเบรกที่เท่ากัน[10]



รูปที่ 2.6 การเกิดแผ่นผิวราบใหม่ (Plateaus) รอบเส้นใยที่เกิดขึ้นหลังจากการเบรก[10]

1.1 เส้นใยแก้ว (Glass)

เส้นใยแก้วมีความแข็งแรงมากเมื่อถูกยึดเกาะด้วยเรซิน และยึดหดได้เมื่ออยู่ในอุณหภูมิสูง ๆ โดยทั่วไปเส้นใยแก้วมีจุดหลอมเหลวที่ 1430 องศาเซลเซียส [10] ซึ่งมีค่าสูงกว่าจุดหลอมเหลวของใยหิน (800 – 850 องศาเซลเซียส) อย่างไรก็ตามเส้นใยแก้วมีความสามารถในการนำไฟฟ้า หรือการนำความร้อนได้ต่ำกว่าใยหิน และน้อยมาก ๆ เมื่อเทียบกับเส้นใยโลหะ เช่น ทองแดง ข้อเสียของเส้นใยแก้วอีกอย่างคือความเปราะ ซึ่งหมายความว่าเส้นใยแก้วไม่สามารถทำหน้าที่เป็นเส้นใยที่จะ

สร้างความแข็งแรงให้กับผ้าเบรกเพียงตัวเดียวได้ต้องมีส่วนผสมของเส้นใยประเภทอื่นที่มีความแข็งแรงสูงกว่าด้วย

1.2 เส้นใยโลหะ (Metallic)

เส้นใยโลหะเป็นตัวนำที่ดีที่สามารถลดความร้อนจากผิวหน้าสัมผัสได้อย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามเส้นใยโลหะมักเกิดสนิมโดยเฉพาะการจอตลอดวันนาน ๆ บริเวณที่เป็นชายฝั่งทะเล เมื่อเส้นใยโลหะเกิดสนิมจะทำให้เส้นใยเปราะ และหักง่ายขึ้น ดังนั้นผ้าเบรกที่ผสมเส้นใยโลหะมักจะมีส่วนประกอบของสังกะสีอยู่เพื่อลดการเกิดสนิมของโลหะ นอกจากนี้การผสมเส้นใยโลหะที่มากเกินไปอาจส่งผลให้อัตราการสึกหรอเกิดมากขึ้นโดยเฉพาะการสึกหรอของจานเบรก เส้นใยโลหะยังสามารถทำให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานไม่คงที่ได้ เนื่องจากเส้นใยโลหะจะขีดขวนแผ่นฟิล์มระหว่างผิวหน้าสัมผัสของผ้าเบรกกับจานเบรกจึงทำให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานไม่คงที่[10]

1.3 เส้นใยอารามิด (Aramid)

เส้นใยอารามิดโดยทั่วไปแล้วทำมาจากการควบแน่นของกรดไอโซพทาลิก (Isophthalic acid) หรือกรดเทเรพทาลิก (Terephthalic acid) และเมตา-ฟีนิลีนไดอะมีน (m-phenylenediamine) หรือพาราฟีนิลีนไดอะมีน (p-phenylenediamine)[10] เช่น เส้นใยเคฟลาร์ (Kevlar) มักถูกใช้เพื่อให้ความแข็งแรง และยึดติดกันเป็นรูปร่างของผ้าเบรก เส้นใยอารามิดเป็นเส้นใยที่มีน้ำหนักเบา และมีความเสถียรในการเปลี่ยนแปลงความร้อน โดยมีอัตราส่วนระหว่างความแข็งแรงและน้ำหนักที่ดี ซึ่งจะช่วยลดการเกิดสภาวะการเฟส (Fade) หรือประสิทธิภาพของการเบรกลดลงเมื่ออุณหภูมิสูง ๆ ของผ้าเบรกได้ดีกว่าใยหิน การผลิตเส้นใยอารามิดที่อยู่ในรูปของเยื่อแผ่น (Pulp form) มักถูกนำไปใช้ในการผลิตผ้าเบรกซึ่งจะช่วยให้เคมีผสมในผ้าเบรกเกิดความสม่ำเสมอขึ้นในกระบวนการอัดขึ้นรูปผ้าเบรก[10] นอกจากนี้เส้นใยอารามิดยังช่วยลดอัตราการสึกหรอของผ้าเบรก แต่ด้วยเส้นใยอารามิดไม่มีความแข็งแรงมากนัก ส่วนใหญ่มักจะถูกผสมร่วมกับเส้นใยที่มีความแข็งแรงกว่าเช่น เส้นใยโลหะ

1.4 เส้นใยเซรามิก (Ceramic)

เส้นใยเซรามิกผลิตมาจากออกไซด์ของโลหะ (Metal oxides) เช่น อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) หรือ คาร์ไบด์ (Carbides) เช่น ซิลิคอนคาร์ไบด์

(Silicon carbide) ซึ่งมีความต้านทานความร้อนสูง (จุดหลอมเหลวในช่วงอุณหภูมิ 1850 – 3000 องศาเซลเซียส), น้ำหนักเบา และมีความแข็งแรงที่สูง เหมาะสำหรับการทำหน้าที่เป็นตัวสร้างความแข็งแรงของผ้าเบรก ด้วยอัตราส่วนระหว่างความแข็งแรงและน้ำหนักที่สูงจึงเป็นที่ต้องการมากกว่าเส้นใยโลหะที่มีน้ำหนักมาก นอกจากนี้เส้นใยเซรามิกยังถูกใช้ในการผลิตจานเบรกได้อีกด้วย

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติของเส้นใยของแต่ละชนิด เส้นใยเซรามิกมักถูกใช้ในการเป็นเส้นใยสร้างความแข็งแรงให้กับผ้าเบรก เนื่องจากมีความเสถียรของความร้อนและความแข็ง (hardness) ที่สูง และเป็นเส้นใยที่มีน้ำหนักเบา อุตสาหกรรมผลิตเบรกที่ใช้เส้นใยเซรามิกอ้างว่าผ้าเบรกที่ผลิตด้วยเส้นใยเซรามิกช่วยลดการเกิดการสั่น (vibration), อัตราการสึกหรอของจานเบรก, เสียงเบรก และฝุ่นเมื่อเทียบกับผ้าเบรกชนิดอื่น[10] ในทางตรงกันข้ามกับผ้าเบรกที่ผลิตด้วยเส้นใยโลหะที่พบว่าอาจเป็นปัจจัยที่เพิ่มอัตราการสึกหรอของจานเบรก การเกิดเสียงดังสควอล (Noise squeals) และฝุ่นที่เกิดจากการเบรก

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบลักษณะของเส้นใยแต่ละชนิด

ชนิดเส้นใย	จุดเด่น	จุดด้อย
เส้นใยแก้ว	มีความคงทนความร้อนที่ดี โดยมีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 1430 °C แต่จะเริ่มอ่อนตัวที่อุณหภูมิประมาณ 600 °C	เปราะ (Brittle)
เส้นใยโลหะ	มีความคงทนความร้อนที่ดี โดยมีจุดหลอมเหลวมากกว่า 1,000°C	อาจส่งผลถึงอัตราการสึกหรอของจานเบรกที่มากขึ้น
เส้นใยอารามิด	มีค่าความแข็งแรง (stiffness) ที่ดีและน้ำหนักเบา, ทนต่อความร้อนได้ดี, ช่วยลดการสึกหรอ	ต้องมีการผสมกับเส้นใยชนิดอื่นทดแทนความนิ่ม
เส้นใยเซรามิก	คืนสภาพทางความร้อน (Thermally resilient) ได้ดี โดยมีจุดหลอมเหลวประมาณ 1,700-2040 °C มีความแข็งแรงสูงและน้ำหนักเบา	เปราะ (Brittle)

■ สารยึดเหนี่ยว หรือสารยึดติด (Binder)

วัตถุประสงค์ และหน้าที่ของสารยึดติดคือการยึดทุกองค์ประกอบต่าง ๆ ของผ้าเบรกไว้ด้วยกันเพื่อให้ได้ผ้าเบรกที่มีความแข็งแรง ทนต่อความดัน และทนต่อความร้อนได้

การเลือกชนิดของสารยึดติดมีความสำคัญอย่างมาก เพราะเป็นโครงสร้างหลักอย่างหนึ่งของผ้าเบรกที่ต้องสามารถทนต่อสภาพการใช้งานตลอดการขับขี่ ดังนั้นสารยึดติดเหล่านี้ต้องมีความต้านทานความร้อนที่ดี ชนิดของสารยึดติดทั่วไปจะเป็นสารในกลุ่มฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resin) ทั้งในรูปแบบที่บริสุทธิ์ หรือผ่านการดัดแปร (Modified phenolic resin) ฟีนอลิกเรซินจัดเป็นหนึ่งในสารโพลิเมอร์ (Polymer) ที่ผลิตมาจากปฏิกิริยาการควบแน่น (Condensation reaction) ระหว่างฟีนอล (Phenol) และฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde) จะถูกเรียกว่าฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน (Phenol-formaldehyde resin) ซึ่งสามารถหลอมเหลวได้เมื่อได้รับความร้อน ในรูปสารประกอบนี้ยังไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้โดยตรง จะต้องทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี เพื่อให้เกิดความเชื่อมโยงระหว่างแต่ละโมเลกุลที่ได้จากการควบแน่นกลายเป็นโครงสร้างร่างแหขนาดใหญ่ จึงจะมีความสามารถในการเป็นกลาง หรือตัวเมทริกซ์ (Matrix) ยึดกับสารองค์ประกอบอื่น ๆ ไว้ด้วยกัน ให้มีความแข็งแรง มีคุณสมบัติเชิงกลสูงและทนอุณหภูมิสูงได้ สำหรับอุตสาหกรรมผ้าเบรกสารที่ใช้ร่วมกับฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์เรซินคือ เฮกซะเมทิลินเตตระมีน (Hexmethylenetetramine) หรือเรียกว่า เฮกซะมีน (Hexamine) ซึ่งได้จากการควบแน่นของแอมโมเนีย (Ammonia) และฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde) อย่างไรก็ตามเฮกซะมีนไม่ค่อยมีความเสถียรภายใต้ความร้อน และอาจเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้หากมีน้ำอยู่ในระบบ สังเกตได้จากการมีกลิ่นแอมโมเนียที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน และอยู่ในอุณหภูมิสูงฟีนอลิกเรซินสามารถถูกทำให้แยกออกเป็นส่วน ๆ หรือสลายตัวได้ (Decompose) ผ่านทางกระบวนการที่เรียกว่า High-temperature oxidation จากผลการศึกษาการทำให้ฟีนอลิกเรซินเปลี่ยนเป็นคาร์บอนจะเกิดขึ้นเมื่อสารฟีนอลิกเรซินได้รับอุณหภูมิสูงกว่า 450 °C[10] ฟีนอลิกเรซินจะเกิดการไหม้เกรียม และเกิดการระเหย (Evaporation) เป็นแก๊สเกิดขึ้น ในกระบวนการคายแก๊สนี้จะทำให้ความหนาแน่นของผ้าเบรกลดลง และมีรูพรุนมากขึ้นในผ้าเบรก

■ *สารเติมเต็ม หรือสารตัวเติม (Filler)*

สารตัวเติมถูกนำมาใช้ในการพัฒนาความสามารถในกระบวนการผลิต (Manufacturability) เพื่อลดต้นทุนของการผลิตผ้าเบรก และเพิ่มประสิทธิภาพของผ้าเบรกตามความต้องการของผู้ผลิต และผู้ใช้งาน เช่น ผ้าเบรกชนิดโลหะที่มักเกิดเสียงเบรก ตัวเติมของผ้าเบรกชนิดนี้อาจเป็นผงมะม่วงหิมพานต์ (Cashew) และ แร่ไมกา (Mica) ที่มีคุณสมบัติยับยั้งการเกิดเสียง หรือดูดซับเสียง (Noise suppressors) มากกว่าการเติมสารเติมประเภทเพิ่มความเสถียรของความร้อน เช่น แบเรียมซัลเฟต ($BaSO_4$) ดังนั้นการเลือกเติมสารเติมเต็มจึงขึ้นอยู่กับองค์ประกอบอื่น ๆ ในผ้าเบรกที่จะส่งเสริมคุณสมบัติแก่กัน

โดยสารตัวเติมจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ สารอินทรีย์ (Organic) และ สารอนินทรีย์ (Inorganic) ดังแสดงในตารางที่ 2.2 แสดงคำอธิบายคุณสมบัติของสารเติมเต็มที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพผ้าเบรก

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของสารเติมเต็มที่ส่งผลต่อผ้าเบรก[10]

ชนิดสารตัวเติม	คุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับผ้าเบรก
แบเรียมซัลเฟต (Barium sulphate)	เสริมผ้าเบรกให้มีความเสถียรต่อความร้อนได้ดีขึ้น
แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate)	เสริมผ้าเบรกให้มีความเสถียรต่อความร้อนได้ดีขึ้น
แร่ไมกา (Mica)	ช่วยยับยั้งการเกิดเสียงเบรกในช่วงความถี่ต่ำ
ผงบดมะม่วงหิมพานต์ (Cashew dust)	ช่วยยับยั้งการเกิดเสียงเบรก แต่มีการยึดเกาะในผ้าเบรกได้ไม่ค่อยดี
ผงยาง (Rubber dust)	ช่วยยับยั้งการเกิดเสียงเบรก แต่มีการยึดเกาะในผ้าเบรกได้ไม่ค่อยดี

■ สารเพิ่มแรงเสียดทาน หรือผงขัด (Abrasive)

เป็นวัสดุอนินทรีย์ที่มีความแข็งสูงช่วยเพิ่มสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ในลักษณะการจับ หรือ จิก นอกจากนี้ยังช่วยรักษาความสะอาดของพื้นผิว เช่นลดการสะสมของสนิมบนหน้าจานเบรก และควบคุมการสะสมของฟิล์มที่เกิดบนผิวโลหะ ลักษณะ รูปร่าง และขนาดของอนุภาคผงขัด มีผลต่อประสิทธิภาพของผ้าเบรกในหน้าที่ที่ต้องการ เช่น ผงขัดอาจต้องมีอนุภาคที่มีเหลี่ยม มีมุม เพื่อให้สามารถขูด หรือจิกกับผิวโลหะได้ดีกว่าอนุภาคที่มีลักษณะมน ไม่มีเหลี่ยม

■ สารหล่อลื่น (Lubricant)

มีหน้าที่ช่วยหล่อลื่น หรือลดแรงเสียดทานระหว่างผ้าเบรก และผิวโลหะที่สัมผัส ซึ่งจะช่วยลดการสึกหรอของผิวโลหะลง อาจมีการใช้สารหล่อลื่นหลายชนิด เพื่อให้ผ้าเบรกสามารถทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้างขึ้น สารหล่อลื่นมักมีแรงยึดเหนี่ยวต่ำ ทำให้สามารถลื่นสไลด์ได้ง่าย โดยทั่วไปสารที่ถูกใช้ให้เป็นตัวหล่อลื่นคือ กราไฟต์ (Graphite) และโลหะซัลไฟด์ (Metal

sulphides) กราไฟต์ถูกใช้ในการเป็นตัวสารหล่อลื่นในผ้าเบรกเนื่องจากโครงสร้างภายในของ กราไฟต์มีลักษณะเป็นชั้น ๆ (Layers) ซึ่งจะทำให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานคงที่ อย่างไรก็ตาม กราไฟต์มีการนำความร้อนได้ดี และอาจทำให้ผ้าเบรรมีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิในส่วนอื่น ๆ ของระบบเบรรมีอุณหภูมิสูงขึ้นตามด้วย เช่น อุณหภูมิน้ำมันไฮดรอลิกในท่อ น้ำมันเบรก โดยเฉพาะอุณหภูมิที่สะสมในน้ำมันเบรกมากจนถึงค่าจุดเดือดของน้ำมันเบรก ระบบเบรกจะทำงานผิดพลาดได้ แต่ในสำหรับโลหะซัลไฟด์เช่น พลวง หรือแอนติโมนี (Antimony) จะมีคุณสมบัติเป็นตัวสารหล่อลื่นได้ดีเช่นเดียวกัน และมีการนำความร้อนต่ำกว่า กราไฟต์ ซึ่งจะลดปัญหาการสะสมความร้อนในน้ำมันเบรกได้ โดยที่แอนติโมนีซัลไฟด์มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 550°C[10] ซึ่งอาจเกิดรูพรุนเพิ่มมากขึ้น ทำให้ความแข็งแรงแนวเฉือนลดลงเมื่อผ้าเบรกถูกใช้งานที่อุณหภูมิดังกล่าว

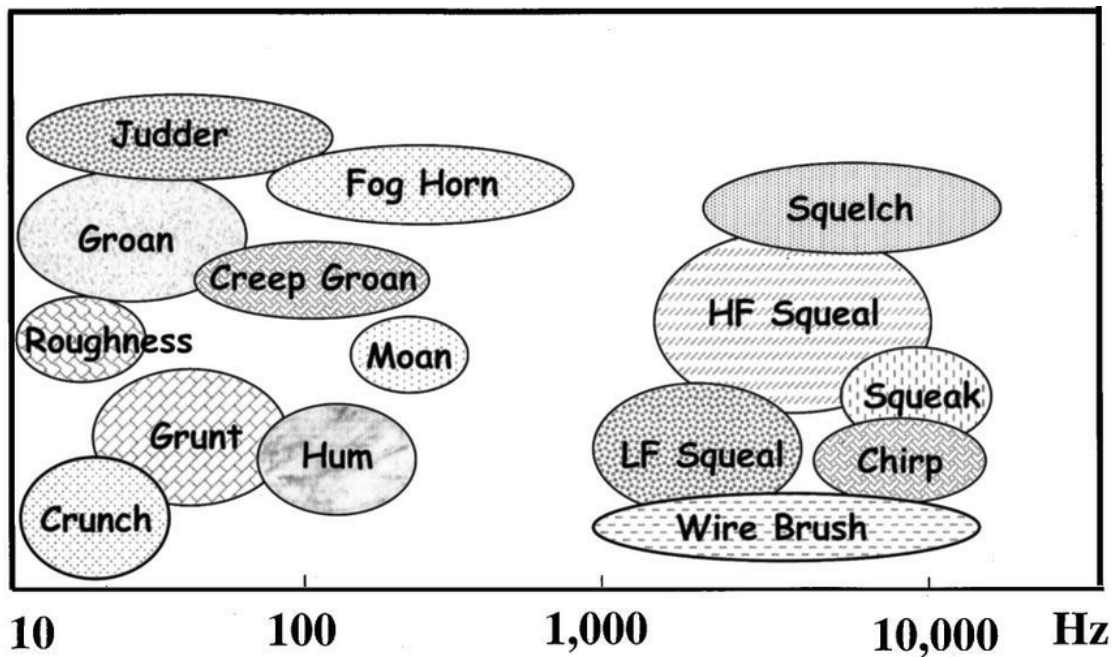
2.1.5 กระบวนการผลิตผ้าเบรก

กระบวนการผลิตผ้าเบรกประกอบด้วยขั้นตอนต่าง ๆ เริ่มต้นจากการผสมส่วนผสมต่าง ๆ ลง เครื่องผสมความเร็วสูง จากนั้นทำการอัดขึ้นรูปเย็นที่อุณหภูมิห้อง ความดัน 120 – 250 kg/cm² และทำการอัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 140-180°C ที่ความดัน 250-350 kg/cm² ต่อมานำชิ้นงานที่ขึ้นรูป ร้อนแล้วทำการอบบ่ม โดยใช้อุณหภูมิเริ่มต้น 100 – 250°C ระยะเวลา 2 – 6 ชั่วโมง และทำการฝน ตกแต่งชิ้นงานให้ได้ขนาดตรงกับที่ออกแบบไว้ หรืออาจมีการผ่าร่อง และปาดข้างเพื่อเพิ่ม ประสิทธิภาพการใช้งานผ้าเบรก สุดท้ายจะเป็นการพ่นสี และบรรจุลงกล่องบรรจุเพื่อส่งขายถัดไป

2.1.6 เสียงที่เกิดขึ้นจากการเบรก

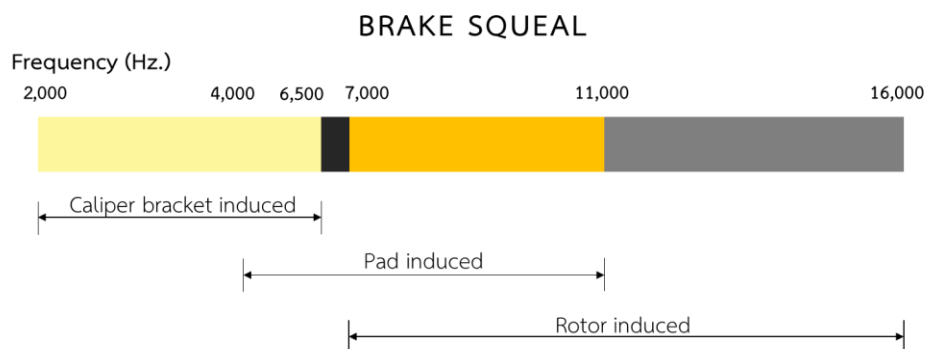
ระบบเบรกเป็นส่วนหนึ่งของความปลอดภัย และประสิทธิภาพของรถยนต์ ผู้ผลิตเบรกจึงได้ พัฒนาประสิทธิภาพการเบรกให้มีความก้าวหน้าสูงขึ้นไปพร้อมกับเครื่องยนต์ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น อย่างไรก็ตามผู้ผลิตรถยนต์ได้เริ่มการปรับตัวหันมาผลิตรถยนต์ที่ให้ความสะดวกสบายแก่ผู้ขับขี่มากขึ้นส่งผลให้การออกแบบ และการพัฒนารถยนต์เปลี่ยนแปลงไป เช่น การออกแบบตัวรถเพื่อลดการ เกิดเสียงของรถยนต์ (Vehicle acoustics) ซึ่งได้มีผลกระทบต่อผู้ผลิตผ้าเบรกที่ถูกข้อร้องเรียนจาก การเกิดเสียงรบกวนในขณะเบรก หรือหยุดรถ โดยลูกค้าให้ความเชื่อว่าการเกิดเสียงเบรกเกิดจากการ ผลิตผ้าเบรกที่ไม่ได้คุณภาพ[13] ดังนั้นการเกิดเสียงรบกวน และการยับยั้งการเกิดเสียงเบรกถูกกลาย มาเป็นที่ได้รับความสนใจแก่อุตสาหกรรมผ้าเบรก และผู้ผลิตผ้าเบรก

การเกิดเสียงเบรก และการสั่นสามารถเกิดขึ้นได้หลายสาเหตุ โดยเสียงจะถูกจำแนกตาม ความถี่ที่ได้ยิน เช่น เสียงสควิก (Squeak) สควอล (Squeal) โมน (Moan) ฮัม (Hum) จัดเดอะ (Judder) และ โกรน (Groan) ดังแสดงในรูป 2.7



รูปที่ 2.7 ประเภทของเสียงที่เกิดขึ้นจากการเบรก โดยแบ่งตามความถี่[14]

โดยทั่วไปแล้วเสียงสเควเวลจะเป็นเสียงที่สร้างความรบกวนให้กับผู้ขับขี่รถ และผู้คนที่โดยรอบ ยังไม่มีนิยามที่แน่ชัดสำหรับเสียงประเภทสเควเวลแต่ในทางทั่วไปจะหมายถึงเสียงที่เกิดขึ้นที่ความถี่สูง (มากกว่า 1,000 Hz) และเกิดได้จากหลายแหล่งกำเนิด เช่น เกิดจากการสั่นของคาร์ลิเปอร์ ผ้าเบรก หรือ จานเบรก ดังแสดงในรูปที่ 2.8 [15]



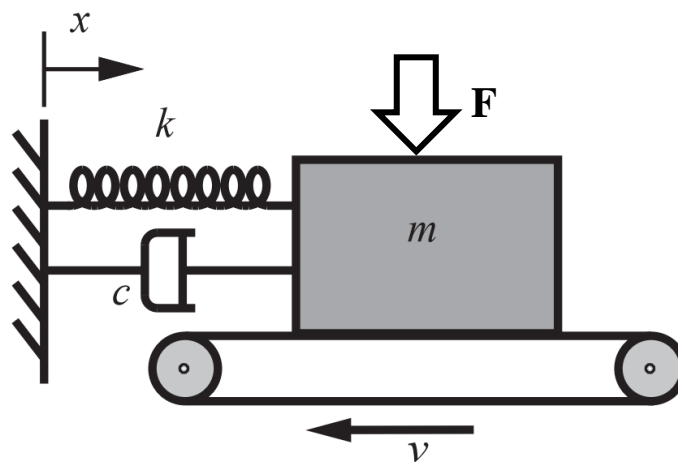
รูปที่ 2.8 ช่วงความถี่เสียงเบรกสเควเวลที่เกิดจากส่วนประกอบต่าง ๆ

การเกิดเสียงสเควเวลบางครั้งเป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นแบบสุ่มที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของผ้าเบรกนอกจากการเกิดเสียงความถี่สูงในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่ง แล้วหายไป เสียงสเควเวลยังส่งผลต่อการเกิดการสึกหรอของผ้าเบรกที่เร็วกว่าค่าอายุการใช้งานของผ้าเบรกที่ควรจะเป็น[13]

กลไกการเกิดเสียงขณะเบรกมีขั้นตอน ดังนี้

1. แหล่งกำเนิดของเสียง
2. ตัวกลางที่เสียงเคลื่อนที่ผ่าน และ
3. แหล่งกระจายเสียง

โดยแหล่งกำเนิดเสียงอาจเกิดขึ้นมาจากการสั่นของผิวสัมผัสระหว่างจานเบรกกับผ้าเบรก ซึ่งสามารถจำลองพฤติกรรมสั่นได้จากพฤติกรรมสั่นของสปริงติดมวลที่มีความยืดหยุ่น (k) มวล (m) และความหน่วง (c) ดังแสดงในรูปที่ 2.9

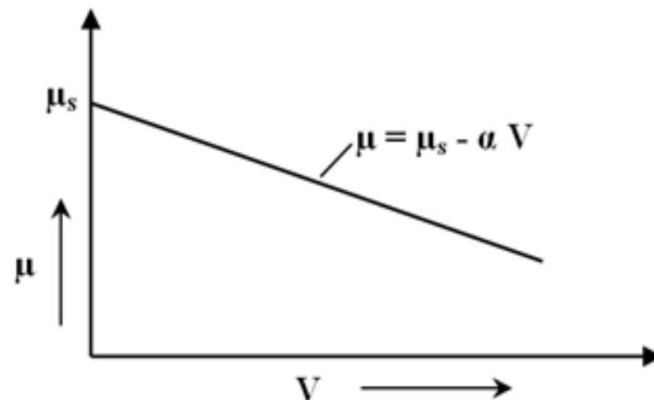


รูปที่ 2.9 การสั่นของวัสดุที่มีค่าคงที่ของความยืดหยุ่น (k) มวล (m) และความหน่วง (c)

สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจลน์ของระบบการสั่นนี้จะลดลงเป็นฟังก์ชันของอัตราเร็ว ($\mu_k(v)$) ดังความสัมพันธ์ที่แสดงในสมการที่ (2.1)

$$\mu_k = \mu_k(v) = \mu_s - \alpha v \quad (2.1)$$

โดยที่ μ_s คือสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิต และ α คือค่าคงที่ของการลดลง หรือความชัน ในรูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตที่ลดลงตามอัตราเร็ว



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจลน์ที่ลดลงตามอัตราเร็ว[16]

โดยพฤติกรรมการสั่น (Equation of motion) นี้สามารถเขียนได้เป็น สมการที่ (2.2)

$$m\ddot{x} + (c - \alpha F)\dot{x} + kx = F(\mu_s - \alpha v) \quad (2.2)$$

โดยที่ x คือระยะที่ยึดออกจากจุดสมดุลของมวล m

v คืออัตราเร็วของจาน

F คือแรงที่กระทำบนวัสดุมวล m

การเกิดเสียงสเควลในระบบการสั่นนี้สามารถเกิดได้เมื่อค่า $\alpha F > c$ ทำให้เทอมความหน่วงมีค่าเป็นลบ ซึ่งจะเป็นการเพิ่มขนาดการสั่น (amplitude) ที่จะก่อให้เกิดเสียงสเควลได้ เรียกกลไกการเกิดเสียงสเควลนี้ว่า Stick-slip Mechanism [16]

นอกจากการเกิดเสียงเนื่องจากแรงเสียดทานแล้วยังมีกลไกการเกิดเสียงสเควลอีกกลไกหนึ่งเรียกว่า Hammering Excitation Mechanism[16] ที่อธิบายการเกิดเสียงสเควลอันเนื่องมาจากความไม่สม่ำเสมอของผิวหน้าจานเบรกในขณะหมุน เนื่องมาจากขณะการใช้เบรกมักเกิดฝุ่น หรือเศษของแข็งที่เกาะตามผิวหน้าจานเบรก หรือเกิดจากการขยายตัวของจานเบรกเนื่องจากอุณหภูมิ (thermal distortion) สูง ทำให้ผิวสัมผัสไม่สม่ำเสมอเกิดเป็นผิวขรุขระ เมื่อทั้งสองผิวหน้าที่มีความขรุขระมากระทบกันจึงทำให้เกิดเสียงคล้ายกับการเคาะ (hammering) โดยเสียงที่เกิดขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับการทดสอบความถี่ธรรมชาติของระบบเบรกด้วยการทดสอบแบบเคาะ (Modal test)

ดังนั้นการเกิดเสียงนี้ได้หลายปัจจัย เช่น

1. สาร และวัสดุผิวที่ทำผ้าเบรก
2. กระบวนการผลิตผ้าเบรก เช่น ความเรียบ ความหนา ฯลฯ และ
3. การออกแบบ และวิธีติดตั้งผ้าเบรกับระบบเบรก

2.2 ทฤษฎี และหลักการ

2.2.1 ประเภทของวัสดุยืดหยุ่น

เมื่อวัสดุอยู่ภายใต้แรงดัน หรือภาระ (load) วัสดุจะมีพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และสมบัติที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 5 ประเภท คือ

■ *Isotropic material*

เป็นวัสดุที่มีสมบัติที่เท่ากันทุกทิศทาง ไม่ว่าจะรับภาระ (load) ในทิศทางใดก็ตาม ซึ่งจะมีคุณสมบัติตามกฎของฮุก (Hooke's law) ที่อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress, σ) และความเครียดของวัสดุ (Strain, ϵ) ดังสมการที่ (2.3)

$$\sigma = E\epsilon \quad (2.3)$$

เมื่อ E คือค่าคงที่ความยืดหยุ่น (Elastic constant) หรือ Young's modulus

ความเค้น (σ) คือแรงต้านทานการภายในวัสดุที่มีต่อแรงภายนอก (F) ที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (A) คำนวณได้จากสมการที่ (2.4)

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.4)$$

ความเครียด (ϵ) คือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ การเปลี่ยนแปลงของวัสดุนี้เป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ภายในของเนื้อวัสดุ คำนวณได้จากสมการที่ (2.5)

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (2.5)$$

โดยที่ Δl คือ ความยาวที่เปลี่ยนแปลงไป

l คือ ความยาวเดิม

จากสมการที่ (2.1) สามารถเขียนสมการได้ใหม่ให้มีรูปร่างทั่วไปมากขึ้น โดยใช้สัญลักษณ์เครื่องหมายคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า Cauchy's stress tensor และ strain tensor ดังแสดงในสมการที่ (2.6)

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}\epsilon_{kl} \quad (2.6)$$

โดยที่ C_{ijkl} คือ ตัวดำเนินการเปลี่ยนรูประหว่างความเค้น (Stress tensor) และความเครียด (strain tensor) ซึ่งเป็นค่าคงที่ของวัสดุที่เรียกว่าความแข็งแรงแรง (Stiffnesses)[17] โดยที่ทุกเวกเตอร์ และ tensor จะอยู่ในระบบพิกัด Cartesian $x_i, (i = 1,2,3)$

ดังนั้นในวัสดุชนิดนี้ที่มีสมบัติเท่ากันทุกทิศทางซึ่งจะมีตัวแปรอิสระอยู่ 2 ค่าในสมการที่ (2.6) จัดรูปใหม่ได้เป็นสมการที่ (2.7)[18]

$$\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij} \quad (2.7)$$

หรือจัดรูปให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2\mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2\mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2\mu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

โดยที่ δ_{ij} คือเครื่องหมายคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า Kronecker delta ซึ่งเป็นฟังก์ชันมีค่า 1 และ 0 ถ้า $i = j, \delta_{ii} = 1$ และ $i \neq j, \delta_{ij} = 0$

λ และ μ คือค่าคงที่ของ Lamé constant ซึ่งสามารถหาได้จากค่า Young's modulus, E และอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio), ν ดังสมการที่ (2.9) และ (2.10) โดยค่า μ มีค่าเดียวกับค่ามอดูลัสเฉือน (Shear modulus, G)

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (2.9)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} (= G) \quad (2.10)$$

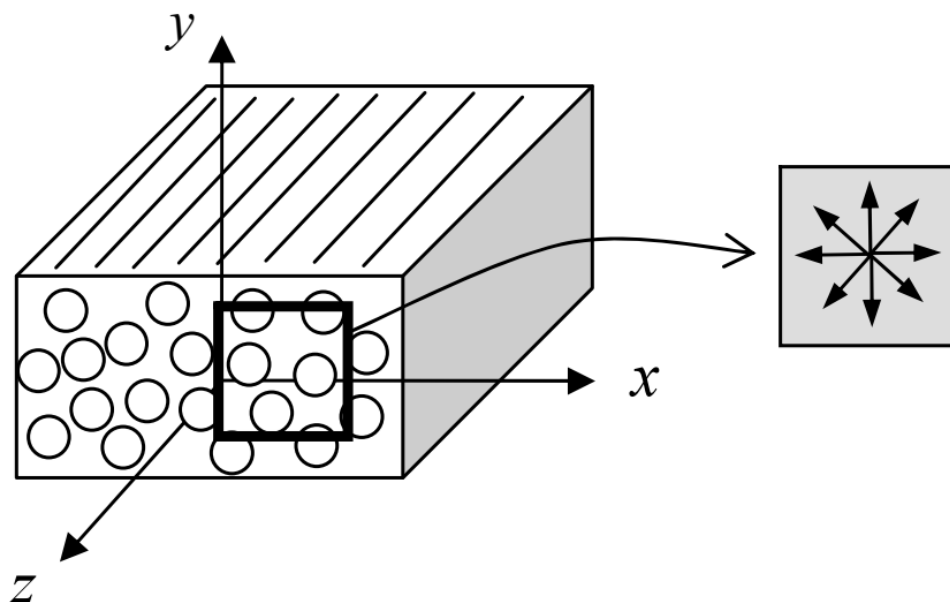
$\sigma_{ij, i \neq j}$ และ $\varepsilon_{ij, i \neq j}$ คือความเค้นเฉือน ความเครียดเฉือนในระนาบ ij ตามลำดับ

สมการที่ (2.8) เมื่อเขียนอยู่ในรูปผกผัน (invert) จะได้เมทริกซ์ใหม่ที่อยู่ในรูปของค่า E, ν และ G ในสมการที่ (2.9) และ (2.10) ได้เป็นสมการที่ (2.11)

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

■ *Transversely isotropic material*

คือวัสดุที่มีสมมาตรในแนวแกนยาว โดยที่ระนาบที่ตั้งฉากกับแนวยาวของวัสดุนั้นจะมีสมบัติเหมือนกัน ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.11 แสดงวัสดุที่มีเส้นใยแก้วเป็นองค์ประกอบหน้าตัดของวัสดุนี้จะพบการจัดเรียงตัวของเส้นใยที่มีรูปร่างเป็นวงกลมอยู่ในแนวแกน z ซึ่งวัสดุนี้จะมีลักษณะเป็น isotropic material ในระนาบที่ขนานกับระนาบ x - y และมีสมบัติที่เหมือนกันทุกทิศทางในระนาบที่ตั้งฉากกับแนวการเรียงตัวของเส้นใย (แกน z)



รูปที่ 2.11 วัสดุที่มีสมมาตรแบบ transversely isotropic

ซึ่งจะมีค่าคงที่ความยืดหยุ่น หรือความแข็งแรง (C_{ij}) ที่เป็นอิสระทั้งหมด 5 ตัว ดังแสดงในสมการที่ (2.12)[18]

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{11} - C_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

เมื่อทำการผกผันสมการที่ (2.10) เพื่อให้อยู่ในรูปของค่า E , ν และ G ได้เป็นสมการที่ (2.13)

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{E_1} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{13}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1+\nu_{12})}{E_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

โดยที่ E_i คือ ค่า Young's modulus ของวัสดุในทิศทาง $i = 1,2,3$ เช่น $\sigma_{11} = E_1 \varepsilon_{11}$ คือค่าความเค้นจากการดึง (uniaxial tension) ในทิศทางที่ 1

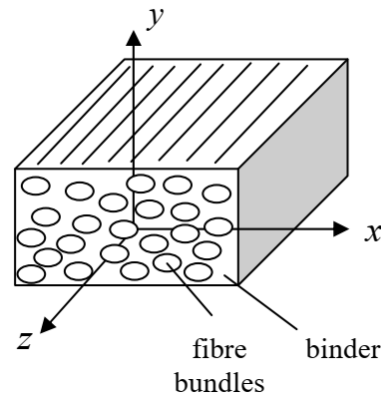
ν_{ij} คือ อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) ซึ่งแสดงถึงอัตราส่วนของความเครียดตามขวางต่อความเครียดตามแกนแรง เช่น $\nu_{12} = -\frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{11}}$ ค่าอัตราส่วนปัวซองตามแนวแกนแรงในทิศทางที่ 1

G_{ij} คือ มอดูลัสเฉือนที่แสดงถึงความแข็งแกร่งในระนาบที่ถูกเฉือน เช่น G_{13} คือความแข็งแกร่งเฉือน (shear stiffness) ของระนาบ 1-3

จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดในสมการที่ (2.13) วัสดุชนิดนี้ เมื่อถูกแรงดึงกระทำในทิศทางหนึ่ง วัสดุจะยืดออกตามแนวแกนแรง และเกิดการหดตัวใน 2 ทิศทางที่ตั้งฉากกับแนวแรงดึง

■ *Orthotropic material*

คือวัสดุที่มีสมบัติต่างกันในแนวแกนตั้งฉากหลัก 3 แกน ของโครงสร้างองค์ประกอบ เช่น วัสดุที่มีองค์ประกอบของมัดเส้นใย (fiber bundle) ที่มีลักษณะเป็นเกลียว และถูกยึดแต่ละมัดเข้าด้วยสารยึดเหนี่ยว (binder) ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 วัสดุ Orthotropic ที่ประกอบด้วยมัดเส้นใย

ซึ่งวัสดุนี้จะมีค่าคงที่อิสระทั้งหมด 9 ตัว ดังแสดงในสมการที่ (2.14)

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

เขียนอยู่ในรูปของ E , ν และ G ได้เป็นสมการที่ (2.15)

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{E_1} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

■ *Monoclinic material*

คือวัสดุที่มีสมมาตรในระนาบเดียว เช่น ถ้าวัสดุชนิดหนึ่งมีสมมาตรในระนาบ 1-2 บนระนาบนี้จะมีสมบัติที่เหมือนกัน ซึ่งจะประกอบไปด้วยตัวแปรความยืดหยุ่นทั้งหมด 13 ตัว ดังแสดงในสมการเมทริกซ์ที่ 2.16 ความเค้นเฉือนจากระนาบที่ตั้งฉากกับระนาบที่มีสมบัติสมมาตร (σ_{23} และ σ_{31}) จะสัมพันธ์กับความเครียดเฉือนในระนาบนั้น (ϵ_{23} และ ϵ_{31})

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & C_{36} \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{45} & C_{55} & 0 \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} \\ \epsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

■ *Anisotropic material*

วัสดุชนิดนี้มีสมบัติในแต่ละทิศทางไม่เหมือนกัน และไม่สมมาตรในแกนใด ๆ กล่าวคือ เมื่อทำการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุชนิดนี้ในทิศทางต่าง ๆ จะพบว่ามีค่าที่แตกต่างกัน เช่น แท่งไม้มีความแข็งในทางปลาย (ขนานกับแนวเสี้ยน) ต่างกับความแข็งที่รัศมี (radial) หรือด้านสัมผัส (tangential) และวัสดุชนิดนี้มักมีการจัดเรียงโครงสร้างหรือมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (deformation) ภายในที่อาจเกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต เช่น การผลิตผ้าเบรก ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดของวัสดุชนิดนี้ ซึ่งมีจะสัมพันธ์กันโดยค่าคงที่ความยืดหยุ่นที่ต่างกันทั้งหมด 21 ตัว ดังแสดงในสมการที่ (2.17)

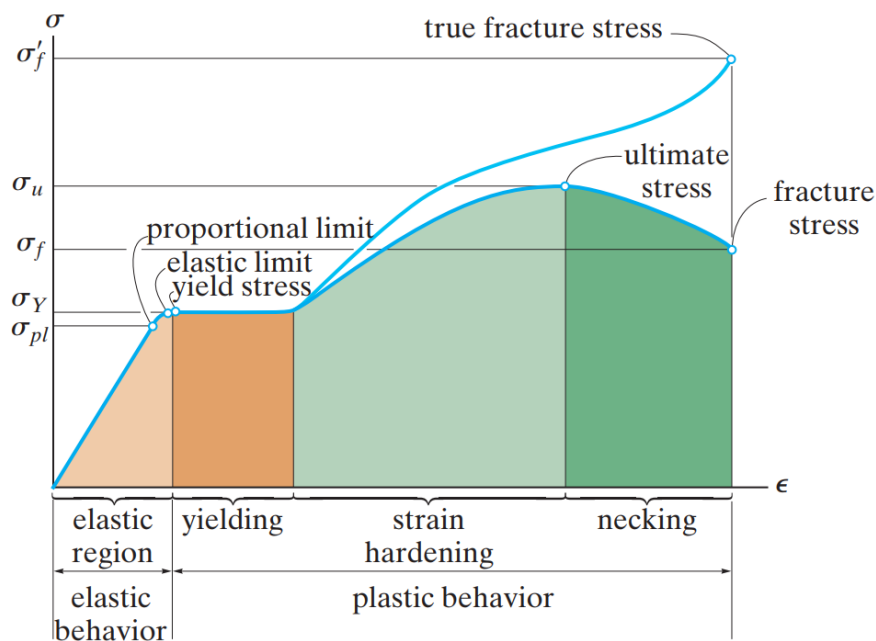
$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} \\ \epsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

จากสมการที่ (2.17) จะพบว่าเกิดการควบคู่กันระหว่างความเค้น และความเครียดในทุก ๆ ทิศทาง กล่าวคือ เมื่อให้แรงดันในทิศทางที่ตั้งฉากกับวัสดุ ความเค้น (σ_{33}) ที่เกิดขึ้นในวัสดุจะกระจายไปทั่วทั้งวัสดุ (ϵ_{11} , ϵ_{22} , ϵ_{33}) และส่งผลกระทบกับความเครียดเฉือนของ

วัสดุอีกด้วย ($\epsilon_{23}, \epsilon_{31}, \epsilon_{12}$) หรือในทางกลับกันความเค้นเฉือนไม่ได้ส่งผลแต่เฉพาะความเครียดเฉือน แต่ยังส่งผลต่อความที่ตึงฉากอีกด้วย

2.2.2 คุณสมบัติทางกลของวัสดุ

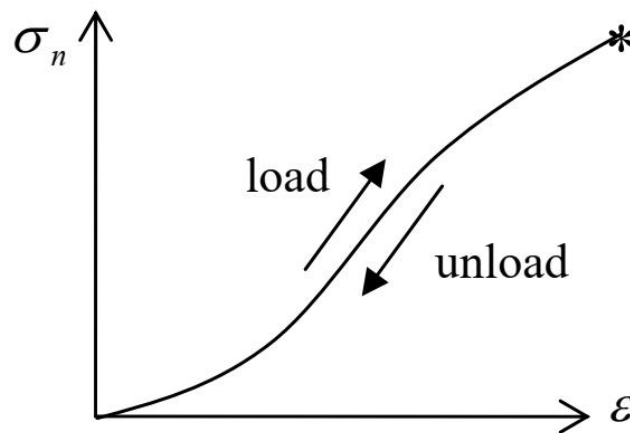
คุณสมบัติของวัสดุศึกษาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียด ซึ่งได้จากการทดสอบแรงดึง ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดยังแสดงถึงความสามารถในการรับแรงดึงของวัสดุ ความเปราะ (Brittleness) เหนียวของวัสดุ (Ductility) และอาจใช้บอกความสัมพันธ์ในการขึ้นรูปของวัสดุ (Formability) ดังแสดงในรูปที่ 2.13 เมื่อดึงวัสดุ วัสดุจะยืดออกจนถึงจุดหนึ่ง (σ_{pl}) ซึ่งในช่วงนี้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจะเป็นสัดส่วนคงที่ ทำให้กราฟเป็นเส้นตรง ตามกฎของฮุก (Hook's law) ซึ่งกล่าวว่าความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด จุด σ_{pl} นี้ เรียกว่าพิกัดสัดส่วน (Proportional Limit) และภายใต้พิกัดสัดส่วนนี้ วัสดุจะแสดงพฤติกรรมการคืนรูปแบบอีลาสติก (Elastic Behavior) นั่นคือเมื่อปล่อยแรงกระทำ ขึ้นทดสอบจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม เมื่อเพิ่มแรงกระทำต่อไปจนเกินพิกัดสัดส่วน เส้นกราฟจะค่อย ๆ โค้ง วัสดุยังคงแสดงพฤติกรรมการคืนรูปได้อีกเล็กน้อย เรียกว่า พิกัดยืดหยุ่น (Elastic limit) ซึ่งจุดนี้จะเป็นจุดกำหนดว่าความเค้นสูงสุดที่จะไม่ทำให้เกิดการแปรรูปถาวร (Permanent Deformation or Offset) กับวัสดุนั้น เมื่อผ่านจุดนี้ไปแล้ววัสดุจะมีการเปลี่ยนรูปร่างถาวร (Plastic Deformation) ที่จุด σ_Y ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก จุด σ_Y นี้เรียกว่าจุดคราก (Yield Point) และค่าของความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า ความเค้นจุดคราก (Yield Stress) หรือ Yield Strength ค่า Yield Strength นี้เป็นจุดแบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูปกับพฤติกรรมการคงรูป หลังจากจุดครากแล้ว วัสดุจะเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกด้วยความเค้นจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นช้า ๆ หรืออาจจะคงที่จนถึงจุดสูงสุด (σ_u) ค่าความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า Ultimate Strength หรือความเค้นแรงดึง (Tensile Strength) ซึ่งเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุจะทนได้ก่อนที่จะขาดหรือแตกออกจากกัน (Fracture) ที่จุดสุดท้าย (σ_f) ของกราฟ เป็นจุดที่วัสดุเกิดการแตกหรือขาดออกจากกัน (Fracture) โลหะที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น (Cold Work) มาแล้ว มักจะแตกหักที่จุดความเค้นสูงสุด โดยไม่มีการลดขนาดพื้นที่ภาคตัดขวาง[19]



รูปที่ 2.13 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด[20]

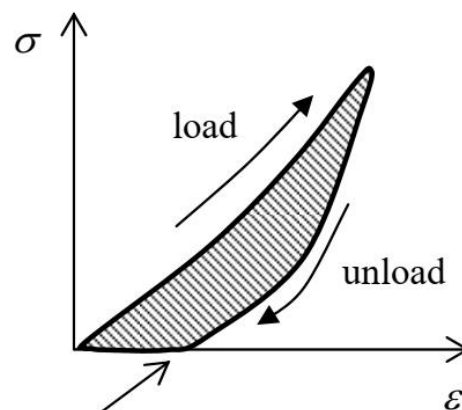
ความสัมพันธ์ความเค้น และความเครียดนี้ยังใช้แสดงสมบัติความเหนียว (Ductility) ของวัสดุอีกด้วย ค่าที่ใช้วัดจะเป็นร้อยละของการยืดตัว (Percentage Elongation, %EL) ซึ่งความเหนียวของวัสดุนี้จะเป็นตัวแสดงความสามารถในการขึ้นรูป คือวัสดุที่มีความเหนียวดี (%EL สูง) สามารถขึ้นรูปได้ง่าย แต่ถ้ามีความเหนียวต่ำ (เปราะ, Brittle) จะนำไปขึ้นรูปได้ยาก นอกจากนี้ค่าความยืดหยุ่น (Elastic modulus, E) และความยืดหยุ่นเฉือน (Shear modulus, G) ของวัสดุยังเป็นตัวแสดงความสามารถคงรูป (Stiffness หรือ Rigidity) คือ ถ้าวัสดุมีค่า E และค่า G สูง วัสดุจะเปลี่ยนรูปร่างอย่างอิลาสติกได้น้อย แต่ถ้า E และ G ต่ำ วัสดุจะเปลี่ยนรูปร่างอย่างอิลาสติกได้มาก

นอกจากนี้ยังมีวัสดุอีกชนิดหนึ่งที่เรียกว่า วัสดุแบบอ่อน (Soft material) เช่น ยาง (Rubber) ซึ่งมีความสัมพันธ์ความเค้น และความเครียดดังแสดงในรูปที่ 2.14 พิกัดยืดหยุ่นมีค่าสูงใกล้เคียงกับค่าจุดแตกหัก (*) ส่วนมากของเส้นโค้งนี้จะวัสดุมีพฤติกรรมแบบอิลาสติก ซึ่งไม่ได้มีลักษณะเป็นเชิงเส้นเหมือนวัสดุก่อนหน้า (nonlinear material) ดังนั้นวัสดุชนิดนี้จะมีค่าความยืดหยุ่นมากกว่าหนึ่งค่า และสมบัติอีกอย่างหนึ่งของวัสดุแบบอ่อนคือ เมื่อลดแรงดันจากจุดที่สูงที่สุดลงมายังจุดที่ต่ำสุด (unload) เส้นโค้งของความสัมพันธ์ความเค้น และความเครียดของวัสดุชนิดนี้จะมีลักษณะเหมือนกับเส้นโค้งตอนที่วัสดุได้รับแรงดันจากน้อยไปหามาก (load) และมีจุดบรรจบที่จุดเดียวกัน



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ความเค้น และความเครียดของวัสดุแบบอ่อน (Soft material)[17]

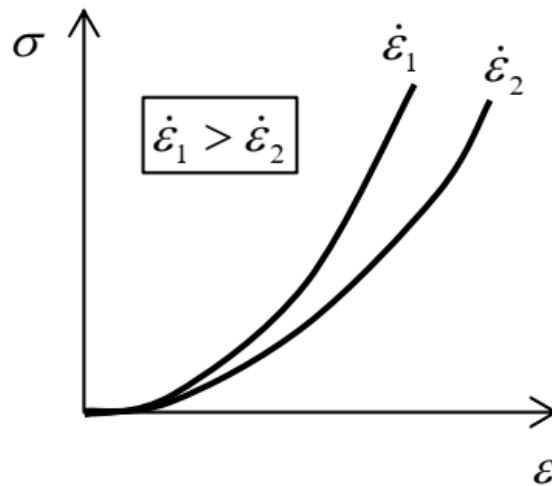
อย่างไรก็ตามวัสดุบางชนิดมีลักษณะพฤติกรรมคล้ายของเหลว หรือของไหล (Fluid-like material) ซึ่งเรียกการเปลี่ยนแปลงแบบนี้ว่า การเปลี่ยนรูปร่างหยุ่นหนืด (Viscoelastic deformation) เช่น วัสดุที่ไหล หรือเปลี่ยนรูปร่างเมื่อได้รับแรงอัด ซึ่งจะเปลี่ยนรูปร่างไปตามภาวะที่บรรจุอยู่คล้ายของไหล กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดของวัสดุชนิดนี้ แสดงในรูปที่ 2.15 วัสดุชนิดนี้เมื่อได้รับแรงอัด (loading) และลดแรงอัด (unloading) เส้นโค้งระหว่างขาขึ้น และขาลงอาจไม่เป็นเส้นเดียวกัน และจุดที่ไม่ได้รับการเริ่มต้น และสุดท้ายอาจบรรจบกันเป็นวงปิด หรือไม่เป็นจุดเดียวกันก็ได้ เนื่องจากกระบวนการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุชนิดนี้สามารถดูดซับพลังงานจากภายนอกไว้ในตัววัสดุได้ ซึ่งเป็นสมบัติหนึ่งที่สำคัญที่สามารถใช้เป็นวัสดุดูดซับพลังงานจากการสั่น หรือการหน่วง (Damping) จากการสั่น



possible permanent
deformation

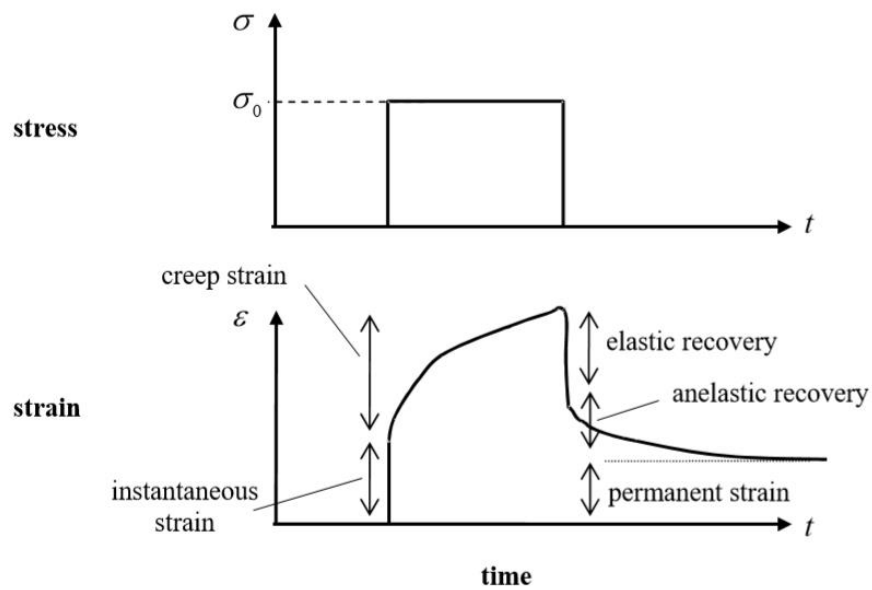
รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ความเค้น และความเครียดของวัสดุหยุ่นหนืด (Viscoelastic material)[17]

การเปลี่ยนแปลงของความเค้น และความเครียดของวัสดุชนิดนี้ยังขึ้นอยู่กับเวลา กล่าวคือ เมื่อต้องการเปลี่ยนแปลงความเครียดอย่างรวดเร็ว ($d\varepsilon/dt, \dot{\varepsilon}_1$) วัสดุจำเป็นต้องได้รับความเค้นที่สูงขึ้นกว่าในกรณีที่ต้องการเปลี่ยนแปลงความเครียดอย่างช้า ๆ ($\dot{\varepsilon}_2$) ค่าความเค้นที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงจะลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 อัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดของวัสดุหุ่่นหนืด[17]

ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในวัสดุหุ่่นหนืดนี้ถูกเรียกว่าการคืบ (Creep) การเกิดปรากฏการณ์ความคืบจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ ปริมาณของความดัน อุณหภูมิและเวลา การทดสอบการเกิดความคืบในวัสดุหุ่่นหนืด ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 2.17 (บน) ทำได้โดยการให้แรงกระทำที่คงที่ (σ_0) ค้างไว้ช่วงเวลาหนึ่ง หลังจากนั้นจึงหยุดให้แรงกระทำ รูปที่ 2.17 (ล่าง) ความเครียดเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก (instantaneous strain) ต่อมาจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นด้วยอัตราการเพิ่มที่ลดลงตามเวลาเรียกช่วงนี้ว่า ความเครียดคืบ (Creep strain) เมื่อไม่ได้รับแรงกระทำแล้ว (unload) ความเครียดจะคืนตัวอย่างรวดเร็ว หลังจากที่คืนตัวทันทีแล้ววัสดุยังมีการคืนตัวอย่างอยู่แต่ช้าลงจากตอนต้น เรียกว่าคืนตัวตอนท้ายว่า anelastic recovery การคืนตัวนี้จะไม่ได้คืนตัวกลับมาจนอยู่ในสภาพเหมือนตอนต้น



รูปที่ 2.17 การทดสอบความคืบของวัสดุหยุ่นหนืด

2.2.3 การวัดด้วย Ultrasonic testing

การใช้คลื่นความถี่สูง (Ultrasonic) ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุนี้มีพื้นฐานจากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของคลื่นเสียง และสมบัติค่าความยืดหยุ่นของวัสดุ การทดสอบค่าความยืดหยุ่นด้วยคลื่นความถี่สูงนี้เป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถวัดทุกค่า และทิศทางของสมบัติความยืดหยุ่นในวัสดุได้ คลื่นที่ใช้ในการทดสอบมักใช้คลื่นที่มีลักษณะเป็นคลื่นระนาบ (Plan wave) ผ่านไปยังวัสดุที่ต้องการทดสอบ บางครั้งอาจมีการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ และความดันที่อาจส่งผลกับสมบัติของวัสดุร่วมด้วย

ซึ่งผ้าเบรกเป็นหนึ่งในวัสดุที่ประกอบด้วยเส้นใย และคุณสมบัติกายภาพเบื้องต้นเป็นผลมาจากกระบวนการผลิตผ้าเบรก[21] กล่าวคือ ผ้าเบรกจะมีการเรียงตัวของเส้นใย และถูกห่อหุ้มรวมกับองค์ประกอบอื่น ๆ ที่เป็นส่วนผสมของผ้าเบรกจากการให้ความร้อน ความดัน และปฏิกิริยาเคมี ในวัสดุผ้าเบรกองค์ประกอบที่ใช้ในการผสมในผ้าเบรก และเส้นใยมีลักษณะเป็นของแข็งแกร่ง (rigid) จึงทำให้ผ้าเบรกมีความหลากหลายของสมบัติเชิงกล ดังนั้นสมบัติของส่วนผสมต่าง ๆ จึงเป็นตัวควบคุมพฤติกรรมความยืดหยุ่นของผ้าเบรก ผ้าเบรกจึงอาจจัดอยู่ในประเภท anisotropic และอาจมีความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด แต่การทดสอบค่าสมบัติการยืดหยุ่นของวัสดุด้วยคลื่นความถี่สูงนี้ยังคำนวณโดยทฤษฎีความยืดหยุ่นเชิงเส้นอยู่อาจส่งผลให้การวัดมีความคลาดเคลื่อน

ในวัสดุประเภท isotropic อัตราเร็วของคลื่นเสียงของคลื่นตามยาว (longitudinal wave, v^L) และคลื่นตามขวาง (transverse wave, v^T) คำนวณได้จากสมการที่ (2.18) และ (2.19) ตามลำดับ[18]

$$v^L = \sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\rho}} \quad (2.18)$$

$$v^T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2.19)$$

โดยที่ ρ คือ ความหนาแน่นของวัสดุ

สำหรับวัสดุประเภท orthotropic อัตราเร็วเสียงขึ้นอยู่กับทิศทางที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่าน โดยอัตราเร็วของคลื่นตามยาวในวัสดุทิศทาง i คือ

$$v_{ii}^L = \sqrt{\frac{C_{ii}}{\rho}} \quad (2.20)$$

โดยที่ C_{ii} คือค่าคงที่ในเมทริกซ์ ในสมการที่ (2.14)

และอัตราเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ตามขวางในทิศทาง i และทิศทางโพลาไรเซชันแกน j คือ

$$v_{ij}^T = \sqrt{\frac{C_{ij}}{\rho}} \quad (2.21)$$

เมื่อจัดรูปสมการ (2.13) ใหม่ โดยแทนค่าในสมการ (2.20) และ (2.21) จะได้เป็นสมการที่ (2.20) - (2.24) สำหรับวัสดุประเภท orthotropic[18]

$$E_1 = C_{11} - \frac{2C_{12}^2}{C_{22}+C_{23}} \quad (2.22)$$

$$E_2 = C_{22} + \frac{C_{12}^2(C_{22}-2C_{23})+C_{11}C_{23}^2}{C_{12}^2-C_{11}C_{22}} \quad (2.23)$$

$$v_{12} = \frac{C_{12}}{C_{22}+C_{23}} \quad (2.24)$$

$$G_{12} = C_{66} \quad (2.25)$$

$$G_{23} = C_{44} \quad (2.26)$$

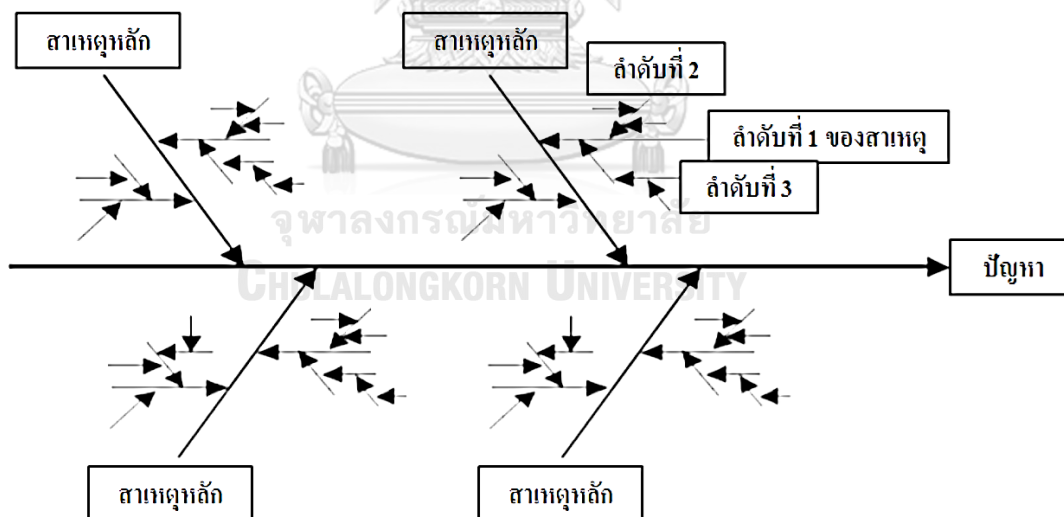
2.2.4 เครื่องมือควบคุมกระบวนการผลิต

ขั้นตอนในการดำเนินงานนี้จะมุ่งเน้นที่การแก้ไขปัญหาในกระบวนการเป็นหลัก ก่อนที่จะเริ่มเข้าสู่กระบวนการจะต้องทำการนิยามถึงปัญหาที่ต้องการจะนำมาปรับปรุง โดยควรเลือกปัญหาที่เป็นปัญหาสำคัญ เป็นต้นเหตุที่ทำให้ลูกค้าไม่พอใจ และส่งผลกระทบต่อกระบวนการ เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์จะประกอบด้วย ผังแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) และ ภาวะความผิดพลาดและการวิเคราะห์ผลกระทบในกระบวนการ (Failure Mode and Effect Analysis, FMEA)

■ ผังแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Diagram)

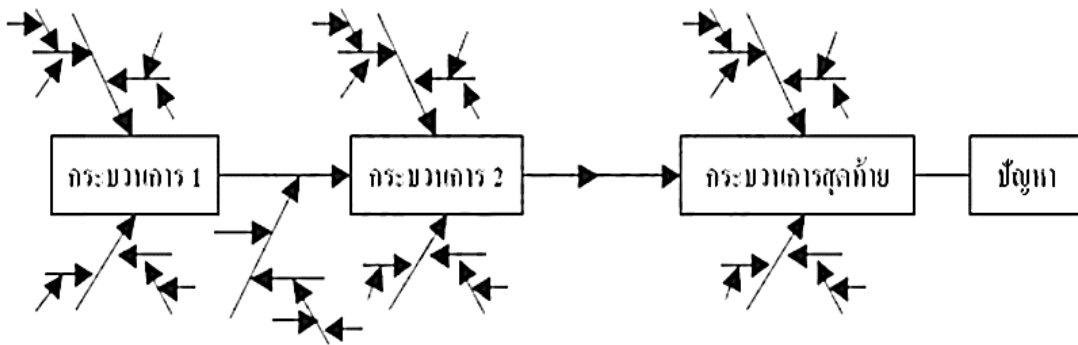
เป็นแผนภาพที่แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุ และผลสำหรับปัญหาที่ทำการศึกษา ซึ่งแผนภาพนี้มีส่วนช่วยให้การวิเคราะห์ปัญหามีความง่ายและเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ โดยจำแนกแผนภาพสาเหตุและผลออกเป็น 3 ประเภท[22]

1) การวิเคราะห์ความผันแปร (Dispersion Analysis) จะใช้แสดงสาเหตุของการเกิดความผันแปรในคุณภาพที่แสดงด้วยหัวปลาตามลำดับก่อนหลังด้วยการตั้งคำถามว่า “ทำไมจึงเกิดความผันแปรขึ้น” เป็นเช่นนี้เรื่อย ๆ ดังแสดงในโครงสร้างรูปที่ 2.18 โดยแผนภาพสาเหตุและผลประเภทนี้ความผันแปรทุกตัวสามารถตรวจจับและทำให้ลดลงได้



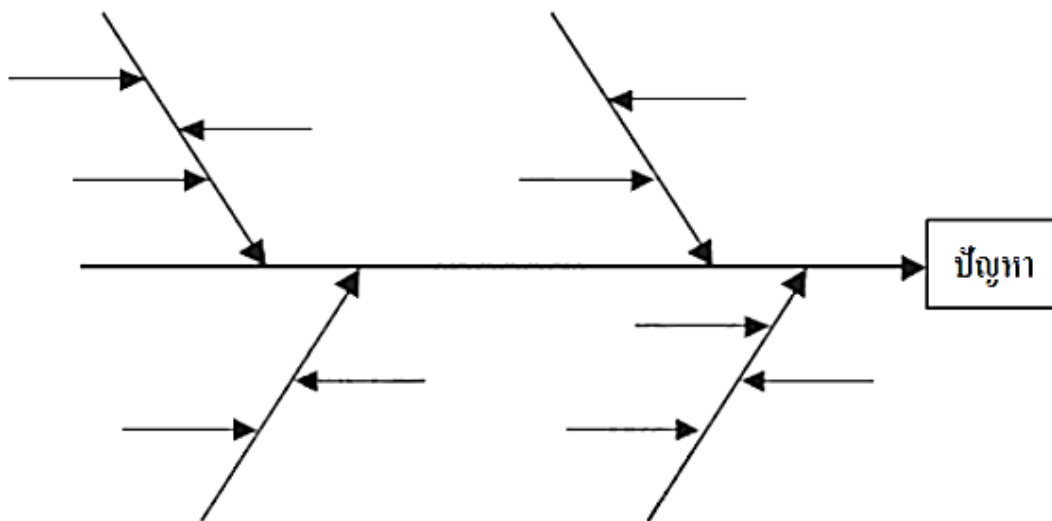
รูปที่ 2.18 โครงสร้างของแผนภาพสาเหตุและผลแบบวิเคราะห์ความผันแปร

2) การจำแนกตามกระบวนการผลิต (Process Classification) โดยแผนภาพสาเหตุและผลประเภทนี้ใช้สำหรับแสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล โดยมีการจำแนกตามกระบวนการย่อยต่าง ๆ ดังโครงสร้างในรูปที่



รูปที่ 2.19 โครงสร้างของแผนภาพสาเหตุและผลแบบจำแนกตามกระบวนการ

3) การกำหนดรายการของสาเหตุ (Cause Enumeration) แผนภาพสาเหตุและผลแบบนี้จะมีโครงสร้าง ดังรูปที่ แผนภาพสาเหตุและผลประเภทนี้จะมุ่งสู่รายการสาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหา (ตามหัวปลา) ค่อนข้างง่าย



รูปที่ 2.20 โครงสร้างของแผนภาพสาเหตุและผลแบบกำหนดรายการสาเหตุ

■ ภาวะความผิดพลาดและการวิเคราะห์ผลกระทบ (Failure Mode and Effect Analysis, FMEA)

เป็นการวิเคราะห์ภาวะความผิดพลาดและการวิเคราะห์ผลกระทบในกระบวนการ เพื่อช่วยเพิ่มความเที่ยงตรง (Reliability) และป้องกันการเกิดขึ้นของสาเหตุที่จะก่อให้เกิดปัญหา[23, 24]

1) ชนิดของการวิเคราะห์ภาวะความผิดพลาดและการวิเคราะห์ผลกระทบ เป็นวิธีการวิเคราะห์ปัญหาหรือความล้มเหลวอย่างเป็นระบบมีขั้นตอนสำหรับการค้นหา

สาเหตุของความผิดพลาดก่อนที่จะเกิดขึ้นจริง เพื่อเป็นการป้องกันก่อนที่จะเกิดปัญหา เลวร้ายขึ้นมาภายหลัง และเป็นการลดความเสี่ยงของการเกิดปัญหา โดยทั่วไปแล้ว FMEA สามารถแบ่งตามวิธีการใช้งานได้หลายอย่าง คือ

- (1) System FMEA จะใช้สำหรับการออกแบบหรือปรับปรุงระบบการทำงาน ในการใช้งานมักจะรวมอยู่ในขั้นตอนของ FMEA ชนิดอื่น ได้แก่ การสร้างแนวความคิดในการออกแบบ และกำหนดรายละเอียดของระบบงาน การออกแบบ การพัฒนา การทดสอบ และการประเมินผลระบบ
- (2) Design FMEA ซึ่งนิยมใช้สำหรับการวิเคราะห์ผลและการแก้ไขงานที่มีการทดลองหรือปฏิบัติเป็นครั้งแรกมักจะพิจารณาเกี่ยวข้องกับกลุ่มของการรวมส่วนประกอบต่าง ๆ หรือส่วนย่อย ๆ เข้าด้วยกัน และส่วนของผลิตภัณฑ์ว่ามีหน้าที่การใช้งานตามที่ต้องการเหมาะสมแล้วหรือไม่ และส่วนใดจะมีปัญหา จะป้องกัน หรือลดระดับความเสี่ยงได้มากน้อยแค่ไหน
- (3) Process FMEA ซึ่งนิยมใช้สำหรับกระบวนการผลิตมีลักษณะเหมือนกับ Design FMEA แต่จะทำการพิจารณาเกี่ยวกับปัจจัยการผลิตที่สำคัญ คือ วัสดุ เครื่องจักร วิธีการ พนักงาน การวัดและสภาพแวดล้อมของการผลิต
- (4) Service FMEA เกี่ยวข้องกับการให้บริการเป็นหลัก
- (5) Machinery FMEA ซึ่งนิยมใช้สำหรับการวิเคราะห์เครื่องจักรอุปกรณ์ หรือเครื่องมือที่ใช้ โดยแบ่งเป็นส่วนประกอบต่าง ๆ เช่น โครงสร้างเครื่องจักร เครื่องมือส่วนกำลังส่วนหล่อลื่น ฯลฯ

2) งานเอกสารของ FMEA การวิเคราะห์ปัญหาหรือความล้มเหลวที่เกิดขึ้นโดยวิธีการ FMEA ซึ่งถือว่าเป็นการวางระบบเตือนภัยล่วงหน้า และเป็นเทคนิคการป้องกันปัญหาชนิดหนึ่ง มักเริ่มต้นจากหน้าที่อย่างใดอย่างหนึ่งของกระบวนการผลิตที่จะนำมาพิจารณาอย่างละเอียดว่ามีชนิด หรือรูปแบบของปัญหาและความล้มเหลวที่อาจเกิดขึ้นหรือเคยเกิดขึ้นมาแล้วมีอะไรบ้าง มีสาเหตุมาจากเรื่องใด และจะมีผลกระทบอย่างไรหลังจากนั้นจะมีการประเมินตัวเลขระดับความเสี่ยงหรือที่เรียกกันว่า RPM ซึ่งย่อมาจาก Risk Priority Number ให้กับแต่ละปัญหา

3) การคำนวณค่า RPN มาจากผลคูณค่าพารามิเตอร์ 3 ตัว คือ $S \times O \times D$ เมื่อ

S คือ เกณฑ์การให้ลำดับชั้นผลกระทบของความรุนแรง (Severity)

O คือ การให้ลำดับโอกาสเกิดความผิดพลาด (Occurrence)

D คือ โอกาสที่จะตรวจจับโดยการควบคุมกระบวนการ

ค่า S, O และ D นิยมใช้เป็นตัวเลขจำนวนเต็มมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 10 ดังนั้นเมื่อค่าระดับความเสี่ยงต่ำของการเกิดปัญหา คือ $RPN = 1$ ซึ่งมาจาก $1 \times 1 \times 1$ หมายความว่า ความถี่ของการเกิดปัญหามีน้อยมาก และความรุนแรงของผลกระทบ เมื่อเกิดปัญหามีน้อยมากเช่นกัน และสามารถตรวจจับปัญหานี้ได้ก่อนส่งมอบให้กับลูกค้าได้อย่างสมบูรณ์ ทั้งนี้การให้คะแนนค่า S, O และ D ซึ่งประเมินค่าโดยการลำดับความสำคัญ[25] ดังตารางที่ 2.3 2.4 และ 2.5 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.3 เกณฑ์การให้ลำดับชั้นผลกระทบของความรุนแรง (S : Severity)

เกณฑ์ (ผลกระทบของความรุนแรง)	ลำดับที่ (Rank)
อาจจะทำให้เกิดอันตรายกับเครื่องจักรอื่น หรือผู้ปฏิบัติงานอย่างสูง	10
อาจทำให้เกิดอันตรายกับเครื่องจักรอื่น หรือกับผู้ปฏิบัติงาน	9
ทำให้การผลิตหยุดชะงักอย่างมาก และผลิตจำนวน 100% อาจจะต้องกลายเป็นผลิตภัณฑ์เสีย (Scrapped 100%)	8
ทำให้การผลิตหยุดชะงักบ้าง ผลิตภัณฑ์อาจจะต้องมีการนำมาเลือกบางส่วนที่เสียออก (<100% เป็นผลิตภัณฑ์เสีย)	7
ทำให้การผลิตหยุดชะงักบ้าง ผลิตภัณฑ์มีเสีย <100% แต่อาจไม่ต้องนำมาเลือกบางส่วนออก	6
ทำให้การผลิตหยุดชะงักบ้าง ผลิตภัณฑ์จำนวน <100% อาจจะต้องมาผลิตอีกครั้ง (Reworked 100%)	5
ทำให้การผลิตหยุดชะงักบ้าง ผลิตภัณฑ์อาจจะต้องมีการนำมาเลือกบางส่วนที่เสียออก แล้วนำส่วนที่เหลือมาทำอีกครั้ง (Reworked <100%)	4
ทำให้การผลิตหยุดชะงักบ้าง ผลิตภัณฑ์น้อยกว่า 100% อาจจะต้องนำมาทำใหม่ในสายการผลิต แต่ภายนอกสถานีการผลิต	3
ทำให้การผลิตหยุดชะงักบ้าง ผลิตภัณฑ์จำนวนน้อยกว่า 100% อาจจะต้องนำมาทำใหม่ในสายการผลิต และภายนอกสถานีการผลิต	2
ไม่มีผลกระทบ	1

ตารางที่ 2.4 การให้ลำดับโอกาสเกิดความผิดพลาด (O: Occurrence)

โอกาสในการเกิดความผิดพลาด (Occurrence Opportunity of Failure)	อัตราความเป็นไปได้ในการเกิดความ ผิดพลาด (Possible Failure Rate)	ลำดับที่ (Rank)
สูงมาก (ความผิดพลาดเกิดขึ้นแน่นอน)	มากกว่าหรือเท่ากับ 1 ใน 2	10
	1 ใน 3 ถึง 1 ใน 2	9
สูง (ความผิดพลาดมีบ่อยครั้ง)	1 ใน 8 ถึง 1 ใน 3	8
	1 ใน 20 ถึง 1 ใน 8	7
ปานกลาง (ความผิดพลาดเกิดขึ้นบ้าง)	1 ใน 80 ถึง 1 ใน 20	6
	1 ใน 400 ถึง 1 ใน 80	5
	1 ใน 2,000 ถึง 1 ใน 400	4
ต่ำ (ความผิดพลาดมีเกิดขึ้นน้อยครั้ง)	1 ใน 15,000 ถึง 1 ใน 2,000	3
	1 ใน 150,000 ถึง 1 ใน 15,000	2
ต่ำมาก (ความผิดพลาดมีโอกาสเกิดได้น้อยมาก)	มากกว่า 1 ใน 1,500,000 ถึง 1 ใน 150,000	1

ตารางที่ 2.5 โอกาสที่จะตรวจจับโดยการควบคุมกระบวนการ (D: Detection)

โอกาสการตรวจ (Detection Opportunity)	โอกาสที่จะตรวจจับโดยการควบคุมกระบวนการ (Opportunity of Detection by Process Control)	ลำดับที่ (Rank)
ไม่สามารถตรวจจับได้อย่าง แน่นอน	การออกแบบควบคุมไม่สามารถตรวจจับโอกาสที่จะเป็นสาเหตุหรือกลไกการเกิดความผิดพลาด (หรือไม่มีการควบคุมการออกแบบเลย)	10
มีโอกาสดตรวจจับได้เล็กน้อย ที่สุด	การออกแบบควบคุมมีโอกาสดตรวจจับที่จะเป็นสาเหตุหรือกลไกการเกิดความผิดพลาดได้เล็กน้อยที่สุด	9
มีโอกาสดตรวจจับได้เล็กน้อย มาก	การออกแบบควบคุมมีโอกาสดตรวจจับโอกาสที่เป็นสาเหตุหรือกลไกการเกิดความผิดพลาดได้เล็กน้อยมาก	8
มีโอกาสดตรวจจับได้ต่ำมาก	การออกแบบควบคุมมีโอกาสดตรวจจับโอกาสที่เป็นสาเหตุหรือกลไกการเกิดความผิดพลาดได้ต่ำมาก	7
มีโอกาสดตรวจจับได้ต่ำ	การออกแบบควบคุมมีโอกาสดตรวจจับโอกาสที่เป็นสาเหตุหรือกลไกการเกิดความผิดพลาดได้ต่ำ	6

โอกาสการตรวจ (Detection Opportunity)	โอกาสที่จะตรวจจับโดยการควบคุมกระบวนการ (Opportunity of Detection by Process Control)	ลำดับที่ (Rank)
มีโอกาสตรวจจับได้ปานกลาง	การออกแบบควบคุมมีโอกาสตรวจจับโอกาสที่เป็นสาเหตุหรือกลไกการเกิดความผิดพลาดได้ปานกลาง	5
มีโอกาสตรวจจับได้ค่อนข้างสูง	การออกแบบควบคุมมีโอกาสตรวจจับโอกาสที่เป็นสาเหตุหรือกลไกการเกิดความผิดพลาดได้ค่อนข้างสูง	4
มีโอกาสตรวจจับได้สูง	การออกแบบควบคุมมีโอกาสตรวจจับโอกาสที่เป็นสาเหตุหรือกลไกการเกิดความผิดพลาดได้สูง	3
มีโอกาสตรวจจับได้สูงมาก	การออกแบบควบคุมมีโอกาสตรวจจับโอกาสที่เป็นสาเหตุหรือกลไกการเกิดความผิดพลาดได้สูงมาก	2
มีโอกาสตรวจจับได้แน่นอน	การออกแบบควบคุมมีโอกาสตรวจจับโอกาสที่เป็นสาเหตุหรือกลไกการเกิดความผิดพลาดได้ค่อนข้างแน่นอน	1

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.3.1 การศึกษาการเกิดเสียงเบรก

Theodora Kokkinou, and Efthimios Zervas.[26] ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์เปรียบเทียบการเกิดเสียงรบกวนของรถยนต์ตามมาตรฐานยุโรป แบ่งเป็น Euro1, Euro2 ถึง Euro4 โดยแบ่งประเภทรถยนต์หลายประเภทด้วยกันประกอบด้วย รถยนต์ที่ใช้ระบบเกียร์ธรรมดาที่ระบบเกียร์อัตโนมัติ เครื่องยนต์เผาไหม้แบบดีเซลกับเบนซิน ซึ่งผลการวิเคราะห์ในการศึกษานี้พบว่าแนวโน้มของเสียงรบกวนมีค่าความดังลดลงตามมาตรฐาน Euro 1-4 ตามลำดับ โดยมีค่าต่ำสุดอยู่ที่ระดับเสียงเฉลี่ย 72 dB และในอนาคตลดลงเหลือ 70 และ 68 dB ตามลำดับ[27]

Ali Belhocine, and Nouby M. Ghazaly.[28] ได้ทำการจำลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติของผ้าเบรกกับการเกิดเสียงรบกวนขณะเบรกขึ้นด้วยการจำลองที่เรียกว่า Finite Element Model จากผลการทดลองพบว่าค่ามอดูลัสผ้าเบรก และงานเบรกมีความสัมพันธ์กับการเกิดเสียงรบกวนอยู่ในนัยสำคัญ เมื่อปรับเปลี่ยนค่ามอดูลัสให้มามีค่ามากขึ้น และน้อยลงจากค่าอ้างอิง พบว่ายิ่งมอดูลัสสูงขึ้นโอกาสการเกิดเสียงรบกวนลดลง แต่ในทางกลับกันเมื่อค่ามอดูลัสลดน้อยลงโอกาสการเกิดเสียงรบกวนมีมากขึ้น

Zaidi Bin Mohd Ripin[29] ได้ทำการอธิบายแนวความคิดที่ความแตกต่างของค่ามอดูลัสในแต่ละตำแหน่งที่ไม่สม่ำเสมอจะส่งผลอย่างไรกับกลไกการเบรก เช่น การจำลองค่ามอดูลัสในแต่ละตำแหน่งเสมือนกับการต่อสปริงหลาย ๆ ตัว ดังนั้นเมื่อด้านหนึ่งของผ้าเบรกได้รับแรงอัดกระทำจะพบว่าในแต่ละตำแหน่งของเบรกจะมีการรับแรงอัดที่ไม่เท่ากันจึงเป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดการสั่นขึ้นมา ซึ่งการสั่นนั้นเป็นต้นเหตุของการเกิดเสียงตามมา นอกจากนี้ยังได้มีการเสนอแบบจำลองของการกระจายความดันบนผิวหน้าสัมผัสระหว่างจานเบรก และผ้าเบรกที่มีความขรุขระ การกระจายแรงดันนี้ขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ค่ามอดูลัสของเคมึบนผ้าเบรก จากการวิเคราะห์พบว่าเกิดรูปร่างที่ไม่เสถียรของผ้าเบรกเกิดขึ้นในช่วงของค่ามอดูลัสของผ้าเบรกที่จะส่งผลถึงเสียงในการเบรกขณะเบรกได้เช่นกัน

2.3.2 การศึกษาสภาพความยืดหยุ่นของวัสดุเสียดทาน

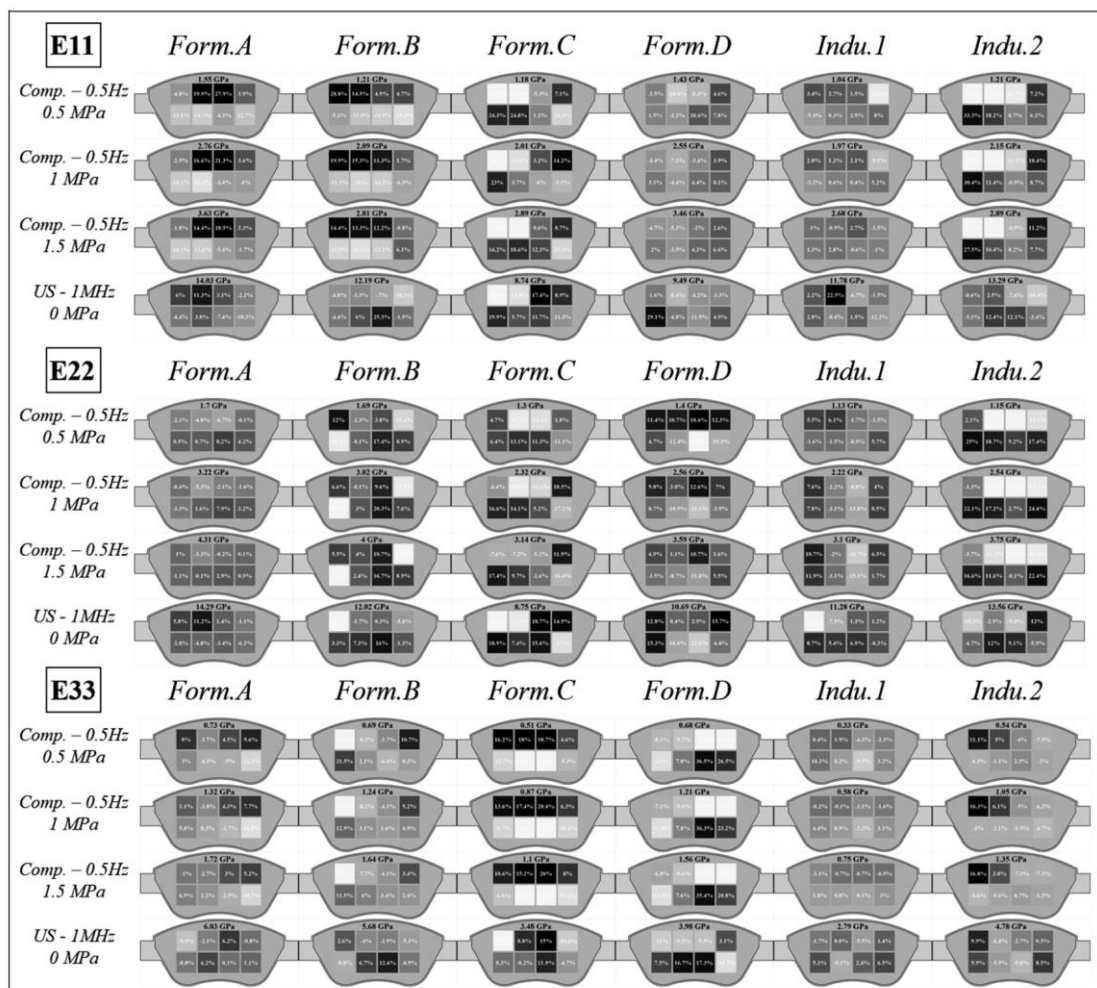
J. Brecht และ A. Elvenkemper [18] ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติความร้อนเชิงกล (Thermomechanical properties) ของวัสดุเสียดทาน (Friction materials) ที่ส่งผลต่อความนุ่มนวล (Comfort) การสั่น และประสิทธิภาพของระบบเบรก เช่น อิทธิพลของค่า Young's modulus (Young's modulus) กับความถี่ธรรมชาติของผ้าเบรก คุณสมบัติเชิงกายภาพที่มีอิทธิพลกับการเกิดการสั่นของเบรกประกอบด้วย

- ค่า Young's modulus
- ค่ามอดูลัสการเฉือน (Shear modulus)
- อัตราส่วนของปัวซอง (Poisson's ratio)
- การหน่วง (Damping) และ
- ความหนาแน่น

จากการศึกษาพบว่าผ้าเบรกส่วนใหญ่มีคุณสมบัติเชิงวัสดุที่เรียกว่า transversal isotropic และ viscoelastic ซึ่งมีความสำคัญมากในการนำค่าต่าง ๆ จากผลทดสอบวัสดุเสียดทานมาจำลอง (Simulate) การเกิดพฤติกรรมของผ้าเบรกที่ส่งผลต่อความนุ่มนวล และประสิทธิภาพของเบรก โดยเฉพาะค่ามอดูลัส (Young's modulus) ของผ้าเบรกซึ่งไม่ได้มีพฤติกรรมดั่งกฎของฮุก (Hook's law) ที่ค่ามอดูลัสมีความสัมพันธ์กับค่าความเค้นและความเครียด โดยทั่วไปผ้าเบรกรยังสามารถอธิบายได้จากกฎที่เรียกว่า Creep law ที่อธิบายด้วยคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน และยุ่งยาก

D. N. Ramasami, G. Rejdych และ คณะ[30] ได้ทำการศึกษาการกระจายของค่าความยืดหยุ่นของวัสดุเสียดทาน (Friction material) ที่เป็นปัจจัยหลักของการเกิดเสียง การสั่น และความแข็ง (Noise, Vibration and Harshness, NVH) ด้วยการตัดชิ้นส่วนของผลิตภัณฑ์ผ้าเบรกเป็น

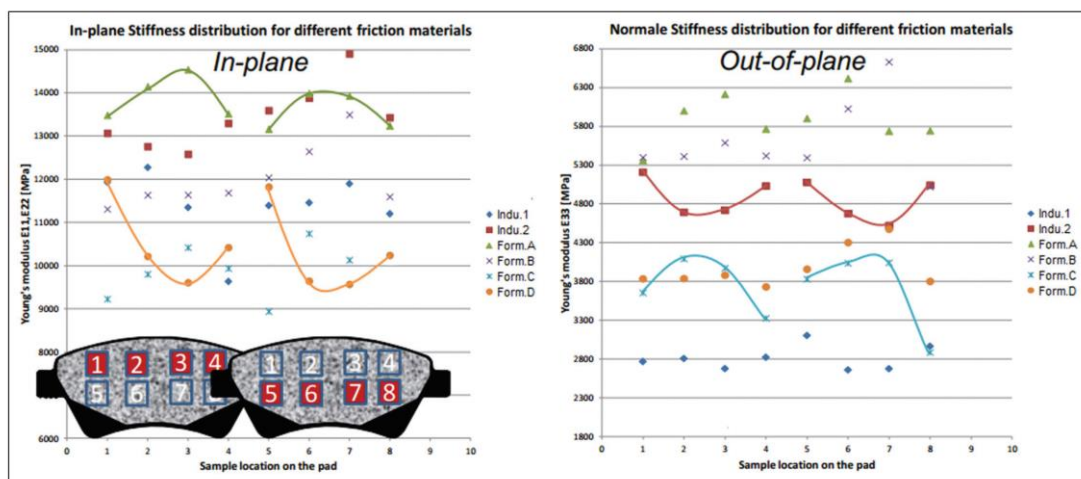
สี่เหลี่ยมขนาด 15 mm x 15 mm x 11 mm ในแต่ละตำแหน่งของผ้าเบรก แต่ละชิ้นงานจะถูกทดสอบด้วยเครื่องรับแรงดันแบบกดอัด (Compression test) และคลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonic measurement) จากการทดสอบด้วยคลื่นความถี่สูงพบว่า การกระจายตัวของค่าความแข็งแรงแบบพลวัต (Dynamic stiffness) มีหลายรูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.21 แสดงผลการทดสอบการรับแรงดัน (Compression, Comp) และการทดสอบด้วยคลื่นความถี่สูง (Ultrasonic, US) ของผ้าเบรกที่ต่างชนิดกัน และวัดในทิศทางต่าง ๆ 3 ทิศทาง (E_{11} , E_{22} , E_{33}) แทบสี่เท่า-ห้าเท่าแสดงถึงร้อยละการเบี่ยงเบนของค่า Young's modulus ในแต่ละตำแหน่งกับค่าเฉลี่ยรวมของผ้าเบรก ซึ่งผลการทดสอบทั้ง 2 แบบมีความสอดคล้องกันแสดงให้เห็นว่ารูปแบบการกระจายตัวของความแข็งแรงแบบพลวัตนั้นขึ้นอยู่กับสูตรของผ้าเบรก และกระบวนการผลิต



รูปที่ 2.21 การกระจายของค่า Young's Modulus ในแต่ละตำแหน่งของชิ้นงาน

การกระจายตัวในแนวราบ (E_{11} และ E_{22}) ในผ้าเบรกส่วนใหญ่พบว่ามีค่าแตกต่างกันระหว่างการกระจายตัวตามแนวรัศมี (E_{22}) และแนวข้าง (E_{11}) อาจเนื่องมาจากการเรียงตัวที่ไม่

สมมาตรของเส้นใย และความหนาแน่นของรูพรุนต่าง ๆ เมื่อเปรียบเทียบการกระจายของค่ามอดูลัสในแนวราบ (In-plane) กับการกระจายแนวตั้งฉากผ้าเบรก (Out-of-plane) พบว่ามีการกระจายตัวหลายรูปแบบ เช่น กระจายแบบสม่ำเสมอ แบบเว้า หรือแบบนูน ดังแสดงในรูปที่ 2.22 ดังนั้นจากการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าความแข็งในผ้าเบรกแต่ละตำแหน่งมีค่าไม่สม่ำเสมอ ซึ่งอาจมีผลต่อการเกิดเสียง การสั่น และความแข็ง (NVH) ในระบบเบรกได้ การทำความเข้าใจถึงอิทธิพลของสูตรที่ผลิตผ้าเบรก และกระบวนการผลิตผ้าเบรกเนื่องจากความแข็งในผ้าเบรกไม่สม่ำเสมอที่เกิดขึ้นจะต้องถูกควบคุมตั้งแต่การออกแบบ จนถึงการผลิตและการแข่งขันเพื่อลดการเกิดเสียง การสั่น และความแข็งที่มักเป็นปัญหาของระบบเบรก



รูปที่ 2.22 การกระจายของค่า Young's Modulus ในแนวราบ (In-plane) และตั้งฉาก (Out-of-plane)

K. Schiffner M. Heftrich และ J. Brecht [31] ได้ทำการศึกษา 2 อิทธิพลที่ส่งผลต่อโครงสร้างของผ้าเบรก โดยจำลองการเปลี่ยนแปลงระหว่างปริมาตรของเคมีผสม (Mixture) ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการอัดขึ้นรูป

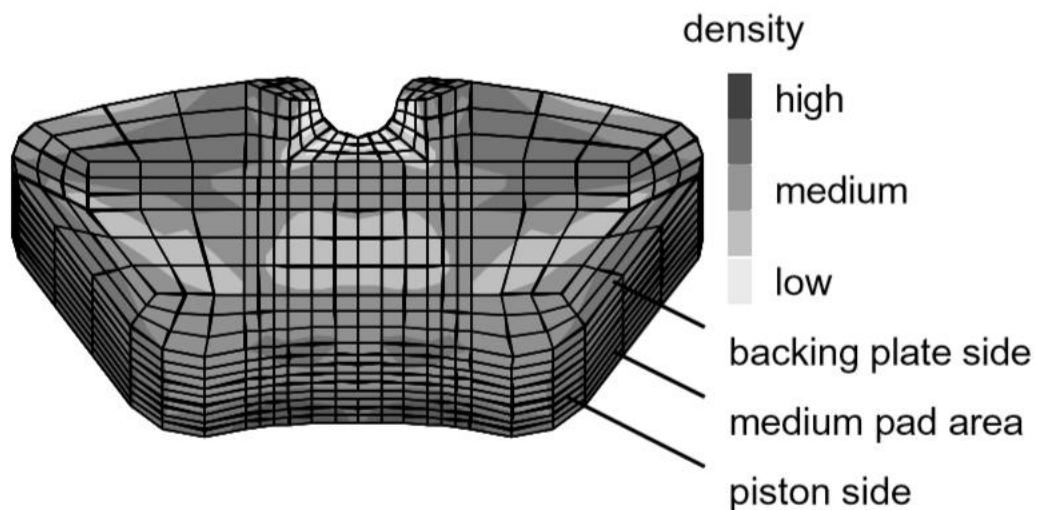
1. องค์ประกอบของเคมีผสมของผ้าเบรกที่ส่งผลต่อการอัดขึ้นรูป

ในกระบวนการอัดขึ้นรูปถูกแบ่งออกเป็น 2 ระยะ คือ ระยะก่อนการอัด และระยะอัดขึ้นรูปขึ้นงาน ในระยะก่อนการอัดพบว่าองค์ประกอบต่าง ๆ ของผ้าเบรกหลังการผสมมีการจัดเรียงตัวใหม่เมื่ออยู่ในหลุมแม่พิมพ์ โดยที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพการยืดหยุ่นของเคมีผสม (Elastic deformation) และเมื่ออยู่ในระยะอัดขึ้นรูปขึ้นงาน พบว่าแรงอัดมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับระยะของการกดของพินซ์ ภายในหลุมแม่พิมพ์ช่องว่าง หรือรูพรุนระหว่างแต่ละองค์ประกอบในเคมีผสมชิดกัน และเกาะแน่นกันมากขึ้นเกิดเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Deformation) จนเป็นขึ้นงาน ขณะที่พินซ์เคลื่อนที่ผ่านผนังแม่พิมพ์จะเกิดแรงเสียด

ทานขึ้นในทิศทางตรงข้ามกับแรงอัดที่พันธ์เคลื่อนที่ส่งผลให้ความเค้น (Stress) ของชิ้นงานไม่สม่ำเสมอระหว่างการอัดขึ้นรูป แรงเสียดทานระหว่างเคมีผสมกับผนังแม่พิมพ์ (Wall friction) ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการยึดเกาะด้านข้าง (Transvers contraction, Poisson's ratio) ของเคมีผสม เมื่อพันธ์เคลื่อนที่ออกจากชิ้นงานอัดขึ้นรูป ความเค้นที่ไม่สม่ำเสมอของชิ้นงานจะเกิดการเปลี่ยนแปลง หรือชิ้นงานมีการคืนตัวอีกครั้ง การเปลี่ยนแปลงความยืดหยุ่นของชิ้นงานอัดขึ้นรูปขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยวของอนุภาคในเมทริกซ์ที่ถูกเรียกว่าความเค้นภายในของชิ้นงาน (Internal stress) และการไหลของเคมีผสม

2. การกระจายตัวของโครงสร้างเคมีผสมในผ้าเบรกสำเร็จรูป

เป็นการศึกษาแบบจำลองการขึ้นรูปของวัสดุที่มีลักษณะเป็นผงเรียกว่า Powder compaction model, KELLER, J.U;(1979) พบว่าผ้าเบรกมีความหนาแน่นสูงบริเวณด้านที่ติดกับพันธ์ และจะลดลงจากด้านที่ติดพันธ์จนถึงด้านบนที่ติดกับเหล็ก (Backing plate) เนื่องจากแรงเสียดระหว่างผนังกับเนื้อวัสดุผ้าเบรก ดังแสดงในรูปที่ 2.23 และยังส่งผลต่อรูปร่างของชิ้นงานอัดขึ้นรูปที่มีขนาดไม่เสมอกันอีกด้วย เมื่อชิ้นงานอัดขึ้นรูปเคลื่อนที่ออกจากหลุมแม่พิมพ์ชิ้นงานจะเกิดการคืนตัว ซึ่งจะเป็นการเพิ่มความไม่สม่ำเสมอของความหนาแน่นในผลิตภัณฑ์ผ้าเบรก



รูปที่ 2.23 การกระจายตัวของความหนาแน่นภายในวัสดุผ้าเบรกจากโปรแกรมการจำลอง

2.3.3 การอัดขึ้นรูปของผงเคมีโลหะ (Powder metallurgy)

Hoganas Handbook for Sintered Components[32] ได้อธิบายหลักการเบื้องหลังของการขึ้นรูปผงเหล็กในแม่พิมพ์ตายตัวที่มีหลุมแม่พิมพ์รูปร่างทั้งซับซ้อน และไม่ซับซ้อนด้วยความดันสูง

เนื่องจากอยู่ภายใต้การกดอัดด้วยความดันสูงในขั้นตอนการขึ้นรูปจะทำให้ผงเคมีถูกอัดเข้าใกล้กันมากขึ้น จนทำให้เกิดการยึดติดกันภายในระหว่างผงเหล็ก ซึ่งกระบวนการอัดขึ้นรูปผงเหล็กดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นมีความคล้ายคลึงกับกระบวนการ และหลักการขึ้นรูปแบบเย็นของผ้าเบรกที่นำผงเคมีผสมบรรจุลงในหลุมแม่พิมพ์ หลังจากนั้นทำการอัดขึ้นงานด้วยความดันสูงเพื่อขึ้นรูปร่างชิ้นงาน โดยในแหล่งอ้างอิงนี้ได้มีอธิบายการศึกษาตัวแปรเช่น ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น รูพรุน และความดัน ความแข็งแรงของชิ้นงานจากการอัดขึ้นรูป โดยมีจุดมุ่งหมายเดียวกันคือ การทำให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นสม่ำเสมอ แข็งแรง และไม่แตกหัก

In-Hyung Moon และ Kyung-Hyup Kim[33] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความดันและความหนาแน่นของการอัดขึ้นรูปผงทองแดง พบว่าความหนาแน่นจะมีค่าสูงสุดค่าหนึ่งโดยไม่เปลี่ยนแปลงตามความดัน แต่ความแข็งแรงของการอัดขึ้นรูปมีความแข็งแรงขึ้นกับความดัน

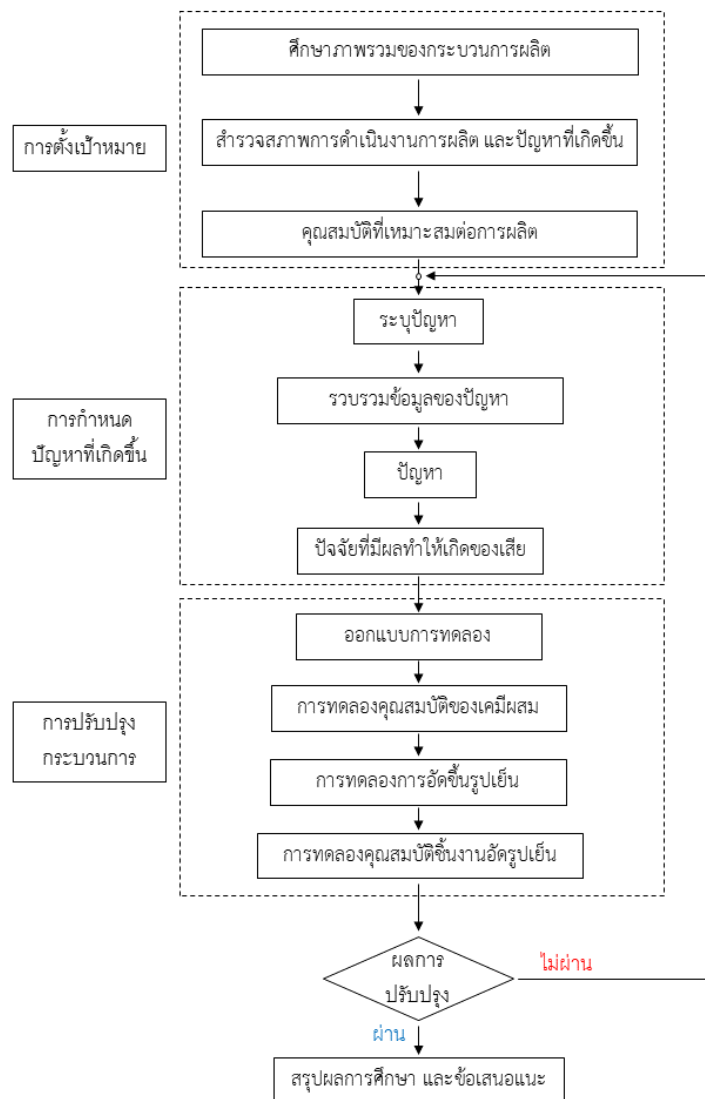
Geldart, Abdullah, Hassanpour, Nwoke และ Wouters[34] ได้ศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับสมบัติการไหลของเคมีด้วยการทดลอง Angle of repose และ Hausner's ratio ซึ่งผลแสดงว่า 2 ปัจจัยนี้มีแนวโน้มเดียวกัน และตัวชี้วัดสมบัติการไหลได้ดี การทดสอบด้วย Angle of repose นี้มีการใช้งานในหลากหลายอุตสาหกรรม โดยมี Hamzah M. B. Al-Hashemi และ Omar S. B. Al-Amoudi[35] ได้ทำการรวบรวมผลการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ Angle of repose ของผงเคมีไว้ เพื่อแสดงรวบรวมทฤษฎี การนิยามวิธีการทดสอบ และอิทธิพลต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการทดสอบ

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงภาพรวมขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย โดยประยุกต์ใช้ทฤษฎีและหลักการทางวิทยาศาสตร์ที่ได้กล่าวมาในบทที่ 2 เพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการวิจัย รวมถึงการปรับปรุงคุณภาพกระบวนการผลิต การตอบสนองความพึงพอใจของลูกค้า และช่วยลดต้นทุนภายในบริษัทลงอย่างมีประสิทธิภาพ

ระเบียบวิธีการวิจัย เริ่มจากการศึกษาภาพรวมของกระบวนการผลิต ตั้งเป้าหมายเพื่อการพัฒนาคุณภาพชิ้นงาน การออกแบบการทดลอง การดำเนินการทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูล สุดท้ายคือวิเคราะห์ผล อภิปรายผลจากผลการออกแบบการทดลอง ซึ่งสามารถแสดงเป็นแผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยได้ ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 การศึกษาภาพรวมของกระบวนการผลิตผ้าเบรก

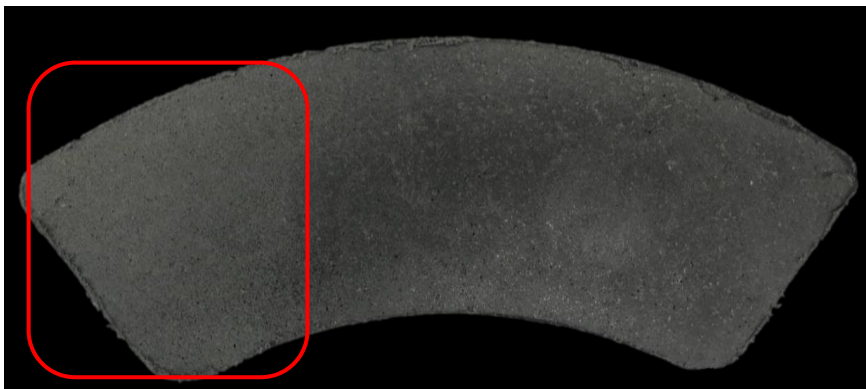
เป็นการดำเนินการศึกษาภาพรวมของความต้องการของลูกค้าในกลุ่มของผ้าเบรกแต่ละกลุ่มในตลาดรถยนต์ (ตลาด REM หรือ AF) ที่มีการใช้งานในลักษณะเดียวกันในประเทศไทย เพื่อให้ได้เป้าหมายของการออกแบบ และการพัฒนาประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ผ้าเบรก (Functional Specification) ที่ตรงกับกลุ่มของลูกค้าที่สนใจ หลังจากนั้นจึงทำการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตในโรงงาน การควบคุมขั้นตอนการผลิต และกฎเกณฑ์ของคุณภาพชิ้นงานที่เหมาะสมของแต่ละกระบวนการ เช่น กระบวนการผสมเคมี กระบวนการอัดขึ้นรูปแบบเย็น กระบวนการอัดขึ้นรูปแบบร้อน เป็นต้น โดยรวบรวมข้อมูลจากเอกสารในระบบคุณภาพของแต่ละแผนกที่เกี่ยวข้อง จนได้มาเป็นคุณลักษณะและคุณภาพของชิ้นงานที่เหมาะสม เพื่อเป็นการตั้งเป้าหมายในการพัฒนากระบวนการต่อไป ดังแสดงเป็นแผนภาพได้ในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการศึกษาภาพรวมของที่มาการพัฒนากระบวนการพิมพ์เย็น

โดยผลิตภัณฑ์ที่นำมาทำการวิเคราะห์เพื่อเพิ่มคุณภาพของชิ้นงาน และการหาแนวทางแก้ไขปัญหาในที่นี้คือปัญหาลักษณะชิ้นงานนิ่มแสดงในรูป 3.3 ที่บางบริเวณของชิ้นงานมีสีที่แตกต่างจาก

บริเวณรอบ ๆ (ในกรอบสีแดง) โดยมักจะมีสาเหตุจากกระบวนการผลิตชิ้นงานรูปแบบเย็น (Cold-pressing) วิทยาลัยพณิชยการเลือกใช้ผลิตภัณฑ์ผ้าเบรกโมเดล X1725 ในการศึกษา ซึ่งมีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างเป็น 3.05 และเป็นผ้าเบรกชนิดสารอินทรีย์ หรือ NAO



รูปที่ 3.3 บริเวณชิ้นงานนิ่มของชิ้นงานตัวอย่าง (กรอบสีแดง)

กระบวนการอัดขึ้นรูปแบบเย็นมีหน้าที่ขึ้นรูปร่างจากผงเคมีผสมให้มีรูปร่างเป็นผ้าเบรกที่สามารถขนย้ายได้ ในรูปที่ 3.4 และมีความหนาแน่นที่สม่ำเสมอ ซึ่งมีขั้นตอนหลัก 4 ขั้นตอน คือ

1. การชั่งน้ำหนักเคมีผสม โดยจะชั่งน้ำหนักเคมีผสมให้มีค่าที่กำหนดตามแต่ละรุ่นการผลิต
2. การเท และการไล่หรือเกลี่ยเคมีผสมในแม่พิมพ์ โดยเคมีผสมจะต้องเต็มทั่วทุกส่วนในหลุมแม่พิมพ์
3. การอัด โดยการให้แรงดันแก่เคมีผสมจนเคมีผสมยึดแน่นเป็นรูปร่างของชิ้นงานได้
4. การส่งออกจากชิ้นงาน จะเป็นขั้นตอนของเครื่องจักรที่จะดันให้ชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์โดยชิ้นงานไม่แตกหัก



รูปที่ 3.4 ชิ้นงานหลังจากการอัดขึ้นรูปแบบเย็น

3.2 วัตถุดิบในการผลิตผ้าเบรก

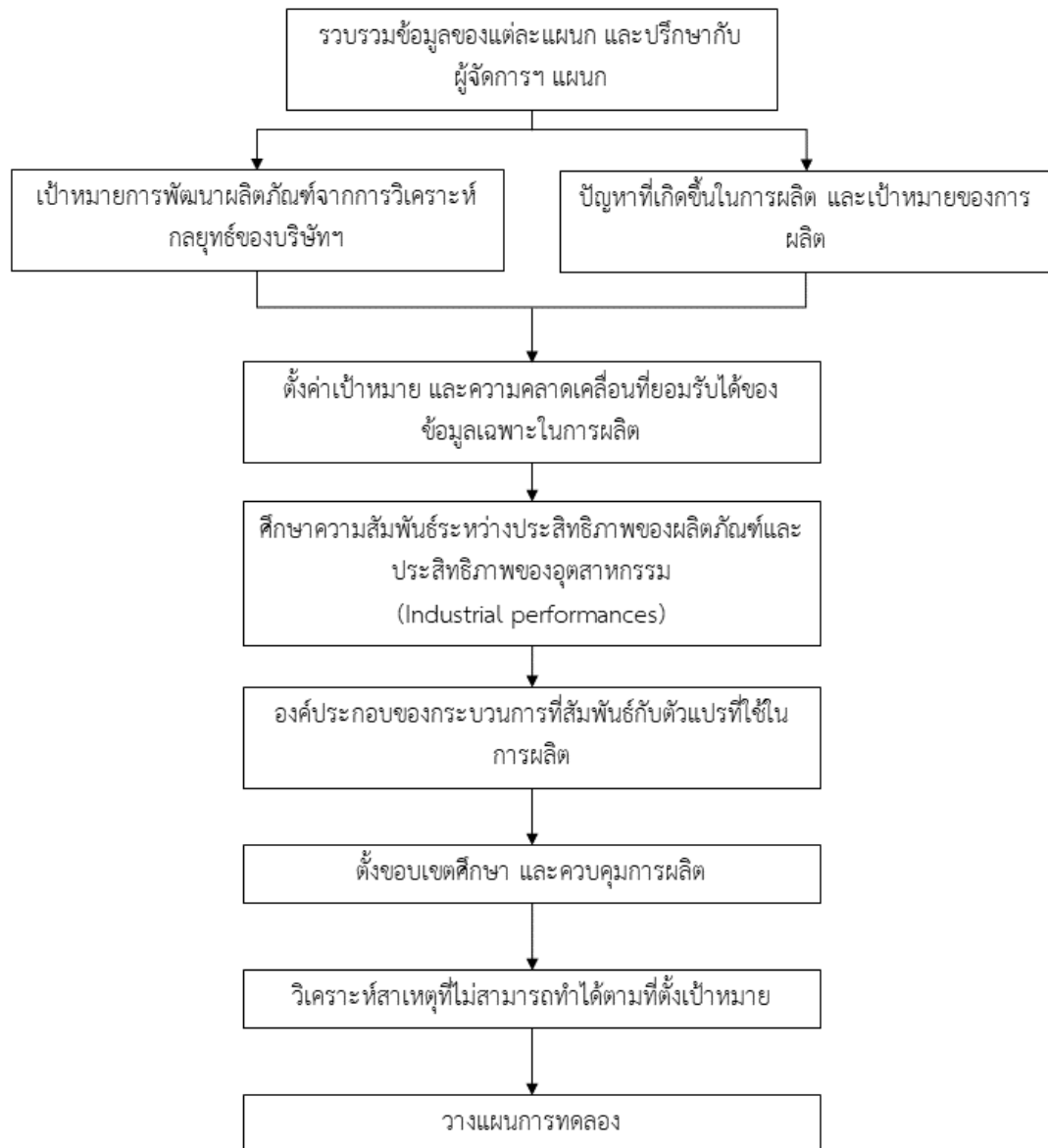
วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตผ้าเบรก X1725 จะมีส่วนผสมมากถึง 14 ชนิด แสดงในตารางที่ 3.1 โดยแต่ละชนิดสามารถแบ่งตามหน้าที่ได้เป็น 5 หน้าที่หลัก คือ เส้นใยเสริมสร้างความแข็งแรง (Reinforcing Fibers), สารเพิ่มการยึดเหนี่ยว (Binders), สารเติมเต็ม (Fillers), สารเพิ่มแรงเสียดทาน (Abrasives) และสารหล่อลื่น (Lubricants)

ตารางที่ 3.1 สารประกอบที่ใช้ในการผลิตผ้าเบรก

ชื่อสารประกอบ	ประเภท
Barium Sulphate	Filler
Kevlar	Fiber
Rock wool	Fiber
Copper	Filler
Calcium Hydroxide	Filler
Phenolic resin	Binder
Synthetic Graphite	Lubricant
Graphite / Natural Graphite	Lubricant
Zirconium Silicate / Zircron Flour	Abrasive
Calcined Alumina	Abrasive
Potassium Titanate	Filler
Friction dust	Filler
Rubber Particle/BAYMOD	Filler
Antimony	Lubricant

3.3 ตั้งเป้าหมายเพื่อการพัฒนาคุณภาพชิ้นงานผ้าเบรก

การตั้งเป้าหมายนี้เกิดจากความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ และการพัฒนาประสิทธิภาพกระบวนการผลิต เริ่มจากการรวบรวมข้อมูลต่าง ๆ ในแต่ละแผนกเพื่อนำเสนอถึงสถานการณ์ปัจจุบันของประสิทธิภาพผลิตภัณฑ์ และประสิทธิภาพการทำงานของการผลิตกับผู้จัดการฝ่ายของแต่ละแผนกในบริษัทให้เกิดการตั้งเป้าหมาย และแนวทางการพัฒนาใหม่ในผลิตภัณฑ์ และกระบวนการผลิต โดยมีขั้นตอนการดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการตั้งเป้าหมายในการพัฒนาคุณภาพผ้าเบรก

ซึ่งในการศึกษาของวิทยานิพนธ์นี้เป็นการพัฒนาประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ในเรื่องของเสียงที่เกิดขึ้นในขณะเบรก และลดสาเหตุหนึ่งของการเกิดของเสียงในกระบวนการผลิตจากวิธีการควบคุมการเคลื่อนด้วยการจำกัดความลึกของการอัดกับจำนวนครั้งการอัด และความดันที่เหมาะสมต่อการผลิตให้ได้ชิ้นงานที่มีข้อจำกัดเฉพาะแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 เป้าหมายของแต่ละกระบวนการ และค่าที่กำหนด

กระบวนการ	เป้าหมาย	ตัวแปร	ค่าที่กำหนด
กระบวนการผสม	ควบคุมการผสมผงเคมีให้สม่ำเสมอ	อัตราเร็วใบตี	รอบผสม 6000 ± 100 rpm
			รอบผสม 3000 ± 100 rpm
		อัตราเร็วใบกวน	รอบผสม 130 ± 10 rpm
			รอบผสม 100 ± 10 rpm
		เวลาการผสม	เวลารวม 8 นาที
		น้ำหนัก/ถัง	80 ± 1 kg
		Bulk Density	0.57 ± 0.05 g/ml
การเก็บรักษา	ไม่เกิน 1 วัน		
กระบวนการอัดขึ้นรูปเย็น	แม่พิมพ์ 1725	ความกว้าง	51.41 ± 0.03 mm
		ความยาว	156.84 ± 0.06 mm
		ความลึก	77.86 ± 0.08 mm
		ความสูงพินซ์	77.57 ± 0.06 mm
	ขนาดชิ้นงานสม่ำเสมอ	ระนาบแม่พิมพ์กับฐาน	ไม่เกิน 0.5 มม.
		ความกว้าง	51.41 ± 0.1 mm
		ความยาว	156.84 ± 0.1 mm
		ความหนา	16.6 ± 0.3 mm
		น้ำหนัก/ชิ้น	206 ± 1 g
		พื้นที่ผิว	7568.8 mm ²
		ความหนาแน่น	1.64 ± 0.01 g/cm ³
	วิธีการเกลี่ย	ความสูงเคมี	47 - 56 mm
		จำนวนชั้น/พิมพ์	4 ชั้น
กระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน	แม่พิมพ์ร้อน 1725	ความกว้าง	53.21 ± 0.04 mm
		ความยาว	158.23 ± 0.05 mm
		ความลึก	62.51 ± 0.03 mm
		ความสูงพินซ์	63.85 ± 0.05 mm

3.4 การออกแบบการวิจัย

การออกแบบการวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง เพื่อเป็นแนวทางการพัฒนาขั้นตอนการเกลี่ยในกระบวนการอัดขึ้นรูปเยื่อให้มีความสม่ำเสมอในด้านขนาด และความหนาแน่นของชิ้นงานที่มากขึ้น โดยมีเป้าหมายลดปัญหาการเกิดเสียงเบรกขณะใช้งาน และลดปัจจัยปัญหาชิ้นงานเสียในการผลิต ในงานวิจัยจะเริ่มศึกษาข้อมูลแนวโน้มความต้องการของตลาด กฎหมาย และข้อร้องเรียนต่อผลิตภัณฑ์เปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองไดนาโมมิเตอร์ของรุ่น X1725 ย้อนหลัง 3 ปี เพื่อยืนยันแนวโน้มของตลาด และปัญหาจากข้อร้องเรียน หลังจากนั้นทำการศึกษาปัญหาชิ้นงานในกระบวนการผลิตด้วยการวิเคราะห์อาการขัดข้อง และผลกระทบ (Failure Mode and Effects Analysis, FMEA) เพื่อเชื่อมโยงปัจจัยทางวิทยาศาสตร์ และการผลิต สุดท้ายเป็นการออกแบบการทดลองคุณสมบัติของการผลิตผ้าเบรกในทางวิทยาศาสตร์ (ทดสอบการไหลของเคมีผสม, ทดสอบความสัมพันธ์ความหนากับแรงอัด, ทดสอบค่ามอดูลัส) และศึกษาผลการนำไปใช้จริงในการผลิตชิ้นงานจำนวน 100 ชิ้น ด้วยการทดสอบความหนาแน่นของแต่ละตำแหน่ง และมอดูลัสของชิ้นงาน

3.5 การดำเนินการทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูล

จากการสำรวจข้อมูลในแต่ละแผนกเพื่อตั้งเป็นเป้าหมายที่จะพัฒนา และขอบเขตของการศึกษาแล้ว ถัดมาจะเป็นการดำเนินการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องที่จะส่งผลกระทบต่อการผลิตผ้าเบรกในกระบวนการระหว่างกระบวนการอัดขึ้นรูปเยื่อ และการอัดขึ้นรูปร้อน โดยจะแบ่งออกเป็น 3 การทดลองคือ เริ่มจากการศึกษาเคมีผสมที่เป็นตัวนำเข้าสู่กระบวนการอัดขึ้นรูปเยื่อในการดำเนินการทดลองจะเป็นการศึกษาคุณสมบัติการไหลของเคมีผสมที่ใช้ในการผลิต X1725 เพื่อจำแนก และคัดเลือกเคมีผสมที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการพัฒนาในการศึกษานี้เลือกเคมีผสมสูตรที่มีการไหลได้ดีที่สุด หลังจากเลือกเคมีผสมที่ไหลได้ดีที่สุดแล้ว ถัดไปคือการศึกษาคุณสมบัติการขึ้นรูปได้ของชิ้นงานอัดขึ้นรูปเยื่อในด้านความสม่ำเสมอของความหนา ความแข็งแรง และการขยายตัวของชิ้นงาน ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการปฏิบัติงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน ในการศึกษาการอัดขึ้นรูปร้อนจะเป็นการศึกษาความหนาแน่น และคุณสมบัติการยืดหยุ่นของชิ้นงานที่ผ่านวิธีการผลิตแบบต่างๆ ในกระบวนการอัดขึ้นรูปเยื่อ รายละเอียดในการดำเนินการทดลองมีดังนี้

3.5.1 การศึกษาคุณสมบัติการไหลของเคมีผสม

การศึกษาคุณสมบัติเคมีเป็นหนึ่งในจัดการของกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบเยื่อเพื่อจำแนกความแตกต่างของแต่ละสูตรที่จะผลิตเป็นผ้าเบรกในบริษัทฯ โดยในการศึกษานี้จะศึกษาความสามารถในการไหลได้ (Flowability) ของเคมีผสมหลังจากกระบวนการผสมจากคุณสมบัติการไหลนี้จะเป็นตัวแปรหนึ่งที่ทำให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นสม่ำเสมอ และเป็นตัวแปรของเวลาในการ

ทำงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปเป็นอีกด้วย โดยในการศึกษานี้ได้ทำการทดลอง 2 รูปแบบ เพื่อประเมินลักษณะการไหลของเคมีผสม และเป็นวิธีที่มีความสะดวกในเชิงอุตสาหกรรม คือ

1) การทดลองมุมกอง (Angle of Repose)

เป็นการทดลองหามุมที่เกิดขึ้นหลังการเทเคมีลงบนพื้นโดยเรียกมุมที่เกิดขึ้นนี้ว่ามุมกองของเคมี ซึ่งการทดลองดังกล่าวมีความเกี่ยวข้องกับแรงเสียดทานภายในระหว่างอนุภาคในเคมีผสม หรือแรงต้านทานต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาคในเคมีผสม จะพบได้ในการปฏิบัติงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปเป็นคือ ขั้นตอนการตักเคมี และการเทเคมีผสมลงในหลุมแม่พิมพ์ กล่าวคือถ้าเคมีผสมมีคุณสมบัติการไหลที่ดีมุมกองของเคมีมีค่าต่ำ หรือความสูงของยอดเคมีผสมมีค่าน้อย เมื่อทำการเทเคมีผสมลงในแม่พิมพ์เคมีผสมมีโอกาสที่จะไหลไปด้านข้างได้ดี หรือไหลเต็มทั่วทั้งหลุมแม่พิมพ์ การปฏิบัติงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปเป็นก็จะใช้เวลาในการจัดการลดลง แต่ถ้าเคมีผสมมีคุณสมบัติการไหลที่ต่ำจะต้องใช้เวลาเพิ่มมากขึ้นในการจัดการเคมีผสมให้เต็มทั่วทั้งหลุม โดยวิธีการทดสอบที่ง่าย และพบบ่อยในการหาค่ามุมกองคือ การใช้กรวย เรียกว่า fixed funnel method ซึ่งเป็นการวัดค่ามุมกองแบบสถิต (static angle of repose) ทำได้โดยการกำหนดความสูงของกรวยที่แน่นอนห่างจากพื้นประมาณ 10-15 ซม. จากนั้นชั่งปริมาณเคมีผสมที่แน่นอนโดยให้มีปริมาตรเท่ากับ 100 มล. และถาดรองด้านล่างที่มีเส้นรัศมี 5 ซม. (radius, r) สูงจากพื้น 7.35 มม. แล้วเทเคมีผสมผ่านกรวย ทำให้เกิดกองเคมีผสมรูปกรวยขึ้น จากนั้นวัดความสูงของกรวยเคมีผสม (height, h) นำค่าที่ได้มาคำนวณตามสมการ (3.1) โดยค่ามุมกองที่ได้สามารถบ่งบอกการไหลได้ดังตารางที่ 3.3

$$\tan\theta = \frac{h}{r} \quad (3.1)$$

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติการไหลกับมุมกอง (Angle of repose)[36, 37]

คุณสมบัติการไหล (Flow Property)	มุมกอง (Angle of Repose) (องศา)
ไหลได้ดีมาก (Excellent)	25-30
ไหลดี (Good)	31-35
ไหลได้ ไม่ต้องใช้สารช่วยไหล (Fair-aid not needed)	36-40
ไหลได้ อาจมีการค้างของเคมีบ้าง (Passable-may hang up)	41-45
ไหลน้อย ต้องมีการสั่นหรือเขย่าช่วย (Poor-must agitate, vibrate)	46-55
ไหลน้อยมาก (Very poor)	56-65
ไม่ไหล (Very, very poor)	> 66

2) การทดลองความสามารถการอัดตัวได้ (Compressibility และ Hausner ratio)

เป็นการทดลองคุณสมบัติของเคมีผสมในด้านการอัดตัวได้ซึ่งมีความสัมพันธ์กับขนาด รูปร่าง การยึดเกาะ และการจัดเรียงตัวของเคมีผสมที่แสดงถึงความสามารถในการไหลได้ของเคมี โดยการหาค่าความสามารถในการอัดได้ (Compressibility index) และ Hausner ratio ทั้งสองค่านี้จะต้องมีการทดสอบค่า Bulk density และ Tapped density ก่อนเพื่อนำมาคำนวณ

2.1) การหาค่า Bulk Density (ρ_{bulk}) คือ อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักต่อปริมาตรของเคมีผสมที่ไม่ผ่านการเคาะหรือการทำให้อัดแน่น ด้วยวิธีการเติมเคมีผสมลงในภาชนะทรงกระบอกที่มีปริมาตร 50 mL ให้ได้เคมีผสมปริมาตร 40 mL หลังจากนั้นจึงนำภาชนะทรงกระบอกไปชั่งน้ำหนัก และคำนวณ Bulk density ตามสมการ (3.2)

$$\rho_{bulk} = \frac{m}{V_{bulk}} \quad (3.2)$$

โดยที่ m คือ น้ำหนักเคมีผสม (กรัม, g)

V_{bulk} คือ ปริมาตรของเคมีผสมในทรงกระบอก (มิลลิลิตร, mL)

2.2) การหาค่า Tapped Density (ρ_{tapped}) คือ อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักต่อปริมาตรเคมีผสมที่ผ่านการเคาะหรือการทำให้แน่น ทำได้โดยการนำกระบอกตวงที่บรรจุเคมีผสมจากการทดสอบ bulk density มาเคาะด้วยเครื่อง tapped density tester ด้วยอัตราถี่ 250 ครั้งต่อนาที ด้วยจำนวนการเคาะทั้งหมด 1,000 ครั้ง อ่าน

ปริมาตรของเคมีผสมในการเคาะครั้งที่ 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 70, 80, 90, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 500 และ 1,000 โดยปริมาตรครั้งที่ 1,000 (V_f) จะนำมาคำนวณค่า Tapped density ในสมการ (3.3)

$$\rho_{tapped} = \frac{m}{V_f} \quad (3.3)$$

2.3) การคำนวณ Compressibility index เป็นการวัดความหนาแน่น และการยึดเกาะกันของเคมีผสมในทางอ้อม โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ (3.4)

$$\text{Compressibility index \%} = \frac{\rho_{tapped} - \rho_{bulk}}{\rho_{tapped}} \times 100\% \quad (3.4)$$

2.4) การคำนวณ Hausner ratio สามารถคำนวณได้จากสมการ (3.5)

$$\text{Hausner ratio} = \frac{\rho_{tapped}}{\rho_{bulk}} \quad (3.5)$$

ค่า Compressibility index และ Hausner ratio สามารถบ่งบอกสมบัติการไหลได้ ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 สมบัติการไหลกับค่า compressibility และ Hausner ratio

Compressibility index (%)	คุณสมบัติการไหล (Flow property)	Hausner ratio
≤10	ไหลดีมาก (Excellent)	1.00-1.11
11-15	ไหลดี (Good)	1.12-1.18
16-20	ไหลได้ (Fair)	1.19-1.25
21-25	ไหลได้ (Passable)	1.26-1.34
26-31	ไหลน้อย (Poor/cohesive)	1.35-1.45
32-37	ไหลน้อยมาก (Very poor/very cohesive)	1.46-1.59
>38	ไม่ไหล (Very, very poor/approx. non-flow)	>1.60

3.5.2 การศึกษาการอัดขึ้นรูปเย็น

การอัดขึ้นรูปแบบเย็นเป็นการทำให้เคมีผสมยึดเกาะกันให้เกิดเป็นรูปร่างผ้าเบรก และสามารถขนย้ายได้ การศึกษานี้จะเป็นการศึกษาเปรียบเทียบวิธีการเกลี่ยที่จะส่งผลต่อความหนาของ

ชิ้นงานหลังการอัดขึ้นรูปแบบเย็น โดยเลือกสูตรที่มีการไหลที่ดีที่สุดจากการวิเคราะห์ในการทดลองที่ 3.3.1 การอัดขึ้นรูปเย็นสามารถแบ่งออกเป็นกระบวนการย่อยได้ 3 ขั้นตอน คือ

1) การเทหรือเติมเคมีผสมลงในแม่พิมพ์ โดยเริ่มจากการชั่งน้ำหนักเคมีผสมสำหรับการผลิตผ้าเบรกรุ่น X1725 ที่น้ำหนัก 206 ± 1 กรัม ในถ้วยภาชนะ เทเคมีผสมลงในหลุมแม่พิมพ์เย็น หลังจากการเทเคมีผสมจะเกิดการกองเคมีผสมเป็นรูปกรวยคล้ายกับการทดลองมุกองในการทดลองก่อนหน้า และยังสามารถเกิดช่องว่างระหว่างเคมีผสมที่เติมลงในแม่พิมพ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ได้อีกด้วย โดยเรียกการเกิดลักษณะนี้ว่าการทอดสะพานข้ามของเคมีผสม (Bridging phenomena) ซึ่งจะทำให้การเทเคมีผสมไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งหลุมแม่พิมพ์ หลังจากนั้นจึงทำการเกลี่ยเคมีผสมในแม่พิมพ์ โดยการวิเคราะห์วิธีการเกลี่ยจะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 3 ตอน คือ

1.1) การวิเคราะห์ความหนาที่เกิดขึ้นหลังการอัดขึ้นรูปเย็นที่มีการเกลี่ยยอดกองเคมีให้ทั่วทั้งหลุมแม่พิมพ์ ซึ่งเป็นการปฏิบัติงานปกติของการผลิตผ้าเบรก

1.2) การวิเคราะห์ความหนาที่เกิดขึ้นหลังการอัดขึ้นรูปเย็นที่มีการเกลี่ยให้ทั่วในหลุมแม่พิมพ์ และเพิ่มจำนวนครั้งการอัดให้แต่ละหลุมมีความสูงของเคมีผสมในแม่พิมพ์แต่ละหลุมเท่ากัน โดยการคำนวณความสูงของเคมีผสมที่จะเติมในแม่พิมพ์คำนวณจากความสัมพันธ์ของความหนาแน่นรวม (Bulk density, ρ_{bulk}) และความหนาแน่นหลังการอัดขึ้นรูปเย็น (Compact density, ρ_{comp}) ในสมการที่ (3.6)

$$H = \frac{\rho_{comp}}{\rho_{bulk}} \times t \quad (3.6)$$

โดยที่ H คือ ความสูงของเคมีผสมในหลุมแม่พิมพ์หลังการปรับยอดเคมีผสม

t คือ ความหนาของเคมีผสมหลังการอัดด้วยความดันในแม่พิมพ์เย็นแล้ว

เมื่อคำนวณความสูงของเคมีผสมหลังการปรับยอด (H) แล้วจึงกำหนดความลึกของพื้นที่ที่จะกดลงในแม่พิมพ์ให้เคมีผสมทุกหลุมในแม่พิมพ์มีความสูงเท่ากับความสูง H



รูปที่ 3.6 การเรียงตัวของสะพานเคมีผสมในแม่พิมพ์[32]

1.3) การวิเคราะห์ความหนาที่เกิดขึ้นหลังการอัดขึ้นรูปเย็นที่มีการเพิ่มจำนวนครั้ง การอัดเพื่อปรับยอดกองเคมีผสม โดยที่ไม่มีการเกลี่ยยอดกองเคมีผสมในแม่พิมพ์ก่อนการอัด ซึ่งเป็นการศึกษาการไหลของเคมีผสมจะส่งผลอย่างไรกับการอัดขึ้นรูปชิ้นงาน และเป็นแนวทางในการพัฒนาวิธีการเกลี่ยโดยลดภาระให้กับผู้ปฏิบัติงาน

2) การอัดแน่นเคมีผสมให้มีรูปร่างผ้าเบรก ในการวิเคราะห์ความหนา 3 ตอนข้างต้น เคมีผสมทุกตอนจะถูกอัดขึ้นรูปด้วยความดันที่ให้แก่ชิ้นงานผ่านเครื่องอัดไฮดรอลิกที่มีกระบอกสูบเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.8 นิ้ว และมีจำนวนพื้นที่อัดแก่ชิ้นงาน 4 พื้นที่ โดยมีพื้นที่หน้าตัดรวม 302.72 ตารางเซนติเมตร อัดด้วยความดันเครื่องไฮดรอลิกที่ 1,100 PSI โดยเคมีผสมในแต่ละหลุมจะได้รับความดันเฉลี่ยที่ 124.59 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร

3) การดันชิ้นงานอัดรูปเย็นออกจากแม่พิมพ์ เป็นการเลื่อนพื้นที่ของแม่พิมพ์เพื่อดันให้ชิ้นงานพิมพ์เย็นเลื่อนออกจากแม่พิมพ์โดยที่ชิ้นงานไม่แตก ด้วยคุณสมบัติชิ้นงานพิมพ์เย็นที่มีลักษณะยืดหยุ่น (Elastic) ชิ้นงานพิมพ์เย็นจะมีการขยายออก (Spring back) เมื่อหลุดออกจากแม่พิมพ์ ทำให้ขนาดของชิ้นงานจะมีค่ามากกว่าขนาดของหลุมแม่พิมพ์เย็น ซึ่งจะส่งผลกับการปฏิบัติงานในการอัดขึ้นรูปร้อนที่ไม่สามารถใส่ชิ้นงานพิมพ์เย็นลงในหลุมแม่พิมพ์ร้อนได้ เนื่องจากชิ้นงานพิมพ์เย็นมีการขยาย และมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของหลุมแม่พิมพ์ร้อน

3.5.3 การศึกษาความดันของเครื่องจักรกับคุณสมบัติของชิ้นงานอัดรูปเย็น

ความแข็งแรง หรือความยืดหยุ่นของชิ้นงานพิมพ์เย็นเป็นอีกหนึ่งที่ส่งผลถึงการปฏิบัติงานทั้งการขนย้ายชิ้นงาน การหยิบจับชิ้นงาน ซึ่งเป็นคุณสมบัติหลักอีกอย่างหนึ่งของเส้นใยที่ใช้เป็นส่วนผสม

ของผ้าเบรก ทิศทางการเรียงตัวของเส้นใย และชนิดของเส้นใยจึงมีความสำคัญ ภายใต้ความดันที่ให้กับชิ้นงานโครงสร้างการเรียงตัวของเส้นใยจะเปลี่ยนแปลงไปจนกระทั่งเคมีผสมภายในจับกันแน่น เกิดเป็นรูปร่างและเสริมสร้างความแข็งแรงให้กับชิ้นงาน ในการศึกษาชิ้นเป็นการวิเคราะห์ความดันที่เหมาะสมแก่การผลิต และศึกษาการขยายตัวของชิ้นงานเมื่อความดันที่อัดชิ้นงานเปลี่ยนแปลงไปกับเวลาที่เก็บรักษาในอุณหภูมิห้อง

1) การศึกษาความดันที่ส่งผลต่อความยืดหยุ่นของชิ้นงาน วิธีการอัดชิ้นงานในการศึกษานี้ เป็นวิธีการเพิ่มการกดอัดด้วยการกำหนดระยะเวลาการกดในหัวข้อ 3.3.2 โดยมีการเปลี่ยนความดันเครื่องจักรที่ให้กับชิ้นงานเป็น 900, 1,100, 1,200, และ 1,700 PSI หลังจากนั้นจะนำชิ้นงานที่ได้จากแต่ละความดันไปทดสอบกับเครื่อง Universal test เพื่อวัดค่าความยืดหยุ่นจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ด้วยวิธีการอัด (Compression)

2) การศึกษาการขยายตัวของชิ้นงานอัดขึ้นรูปเย็น หลังจากอัดขึ้นงานที่ได้จากการศึกษาความดันกับความยืดหยุ่นแล้ว ชิ้นงานเหล่านั้นจะถูกเก็บไว้ในห้องที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 วัน และ 5 วัน แล้วนำกลับมาวัดความหนาของชิ้นงานอีกครั้งเพื่อศึกษาอัตราการขยายของชิ้นงาน

3.5.4 การศึกษาการอัดขึ้นรูปร้อน

เป็นการศึกษาความหนาแน่นของชิ้นงาน ในกระบวนการพิมพ์ร้อนซึ่งเป็นกระบวนการที่ให้ความร้อน และความดันแก่ชิ้นงานอัดขึ้นรูปเย็น เพื่อให้เคมีผสมภายในชิ้นงานเกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์ ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการพิมพ์ร้อนคือ 150 ± 10 องศาเซลเซียส ความดันเครื่องจักรที่ 1,000 PSI ในรูปแบบของการทดลองที่ผลิต 4 ชิ้น/ครั้ง และขั้นตอนการไล่แก๊สในชิ้นงาน นำชิ้นงานที่ผ่านการอัดรูปร้อนมาตัดเป็นชิ้นงานขนาด $25 \times 25 \times 10$ มิลลิเมตร จำนวน 3 ชิ้นต่อ 1 ชิ้นงานพิมพ์ร้อน ในบริเวณต่าง ๆ ของชิ้นงาน เพื่อนำไปทดสอบค่าความยืดหยุ่นของชิ้นงานด้วยเครื่อง Ultrasonic Measurement และค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำ

3.6 การทดสอบชิ้นงานเชิงกายภาพ

3.6.1 การทดสอบความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity Testing)

ในการทดสอบความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity, S.G.) เป็นการคำนวณอัตราส่วนความหนาแน่นของชิ้นงานอัดขึ้นรูปร้อนขนาด $25 \times 25 \times 10$ มิลลิเมตร (ρ_{hot}) กับความหนาแน่นของน้ำ (ρ_{water}) ที่อุณหภูมิเดียวกัน ดังแสดงในสมการที่ 3.7

$$S.G. = \frac{\rho_{hot}}{\rho_{water}} \quad (3.7)$$

นำชิ้นงานอัดขึ้นรูปร้อนชั่งน้ำหนักในอากาศ (m_{air}) ณ อุณหภูมิห้องด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักที่มีความละเอียดไม่น้อยกว่า 1/10 มิลลิกรัม หลังจากนั้นนำชิ้นงานอัดขึ้นรูปร้อนชั่งน้ำหนักในน้ำ

(m_{water}) ที่มีปริมาตรท่วมทั้งชิ้นงาน และแขวนชิ้นงานอัดขึ้นรูปด้วยลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่มากกว่า 0.1 มิลลิเมตร โดยชิ้นงานอัดขึ้นรูปลอยนิ่งอยู่ในน้ำ แช่ชิ้นงานช่วงเวลาแรก จะสังเกตเห็นฟองอากาศเกาะตามผิวของชิ้นงาน ฟองอากาศเหล่านี้จะส่งผลให้การอ่านค่าน้ำหนักผิดพลาดจึงต้องทำการแช่ทิ้งไว้ก่อนประมาณ 1 นาที ตามมาตรฐานการทดสอบ JIS D 4417[38] เพื่อไล่ฟองอากาศที่อยู่ในชิ้นงาน และเกาะตามผิวออกแล้วจึงอ่านค่าที่ได้จากการชั่ง และคำนวณค่าความถ่วงจำเพาะ ดังสมการที่ 3.8

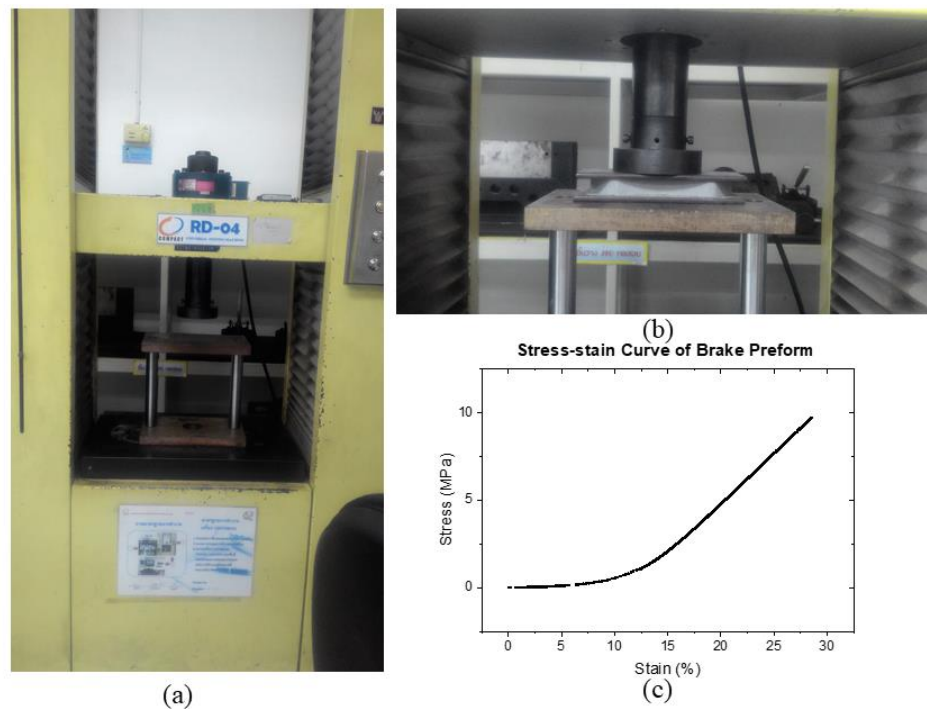
$$S.G. = \frac{m_{air}}{m_{air} - m_{water}} \quad (3.8)$$

3.7 การทดสอบชิ้นงานเชิงกล

3.7.1 การทดสอบแรงอัด (Compression Testing)

การทดสอบแรงอัด (Compression test) เป็นหนึ่งในการทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงานที่แสดงอยู่ในรูปค่าความยืดหยุ่น (Elastic value) ซึ่งการทดสอบนี้เป็นการให้แรงอัดแก่ชิ้นงานอัดขึ้นรูปเย็นด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ดังแสดงในรูปที่ 3.7 (a) และ (b) ในการทดสอบชิ้นงานอัดขึ้นรูปเย็นจะถูกแรงกดที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกว่าจะถึงข้อจำกัดของชิ้นงาน หรือเครื่องจักร เช่น ชิ้นงานพิมพ์เย็นเกิดการแตกหัก หรือแรงอัดที่ให้ถึงแรงอัดสูงสุดที่เครื่องกระทำได้ เมื่อถึงข้อจำกัดอย่างใดอย่างหนึ่งแล้วเครื่องจะหยุดการให้แรง และบันทึกผลลัพธ์ออกมาเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Stain, %) ซึ่งจากการทดสอบจะพบว่าแรงอัดที่เครื่อง Universal test ถึงข้อจำกัดที่ 80,000 นิวตัน โดยชิ้นงานอัดขึ้นรูปเย็นไม่เกิดการแตกหัก หรือขาดออกจากกัน กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดจะมีช่วงการเปลี่ยนแปลงเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 3.7 (c) เมื่อกำหนดค่าช่วงความชันดังกล่าวค่าที่ได้แสดงถึงค่าความยืดหยุ่นของชิ้นงานอัดขึ้นรูปเย็น (Elastic value) ดังสมการที่ (3.7)

$$\text{ความชันของกราฟ} = \frac{\Delta \text{Stress}}{\Delta \text{Stain}} = \text{Elastic value} \quad (3.7)$$



รูปที่ 3.7 การทดสอบแบบแรงกด (a) เครื่องทดสอบ Universal test (b) การติดตั้งทดสอบชิ้นงานอัดขึ้นรูปเย็น และ (c) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (stress) และความเครียด (strain)

3.7.2 การทดสอบคุณสมบัติโมดูลัสของผ้าเบรก (Dynamic Modulus Measurement)

การวัดค่าความยืดหยุ่นของชิ้นงานอัดขึ้นรูปร้อนถูกวัดด้วยเครื่องที่เรียกว่า iETEK ด้วยการส่งคลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonic wave) ผ่านชิ้นงานอัดขึ้นรูปร้อน ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (3.8)

$$E = k\rho v^2 \quad (3.8)$$

โดยที่ E คือ ค่าโมดูลัสของชิ้นงาน

k คือ ค่าคงที่ของการวัดขึ้นอยู่กับอัตราเร็ว และอัตราส่วน Poisson's ratio ($k =$

1.21 จากมาตรฐาน SAE J2725)

ρ คือ ความหนาแน่นของชิ้นงาน (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)

v คือ อัตราเร็วของคลื่นเสียงความถี่สูงที่เคลื่อนที่ผ่านชิ้นงาน (เมตร/วินาที)

คลื่นความถี่สูงจะถูกส่งออกจากตัวส่ง (transmitter) ผ่านชิ้นงานตัวอย่างหลังอัดขึ้นรูปร้อนที่มีขนาด 25×25 มิลลิเมตร ไปยังตัวรับ (receiver) ที่อยู่ด้านตรงข้ามของชิ้นงานตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 3.8 โดยเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวส่ง และตัวรับมีขนาดเท่ากับ 15 มิลลิเมตร ความละเอียดของการวัดจะขึ้นอยู่กับการวัดเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านในชิ้นงาน (time of flight, ToF) ในการทดลองความละเอียดของช่วงเวลาคือ 10 นาโนวินาทีด้วยอัตราการเก็บสัญญาณ 100 MHz เวลาที่คลื่น

เคลื่อนที่ในชั้นงานผ้าเบรกโดยทั่วไปมีค่าประมาณ 15 มิลลิวินาที จะได้ความละเอียดของการวัดนี้จะอยู่ที่ 0.6%[39] ซึ่งการคำนวณเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านชั้นงานจะคำนวณได้จากสมการที่ (3.9)

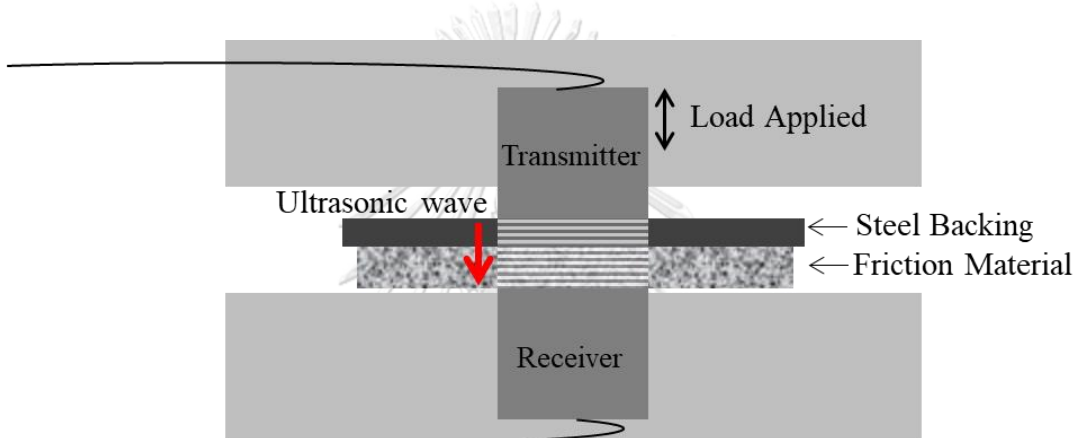
$$ToF_{fm} = ToF_{pad} - \frac{x_{steel}}{v_{steel}} \quad (3.9)$$

โดยที่ ToF_{fm} คือ เวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านเคมีผสมในผ้าเบรก (Friction material)

ToF_{pad} คือ เวลารวมที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านผลิตภัณฑ์ผ้าเบรก

x_{steel} คือ ความหนาของเหล็ก (Steel backing)

v_{steel} คือ อัตราเร็วของเสียงที่เคลื่อนที่ในเหล็ก



รูปที่ 3.8 การวัดค่ามอดูลัสด้วยคลื่นความถี่สูง (ultrasonic wave) ของ iETEK

ในการวัดตัวอย่างชิ้นงานอัดขึ้นรูปร้อนเวลาที่วัดได้จะมีค่าเท่ากับเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านเคมีผสม ($ToF_{pad} = ToF_{fm}$) อัตราเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านชิ้นงานตัวอย่างที่มีความหนา x_{fm} จะคำนวณได้จากสมการที่ (3.10)

$$v = \frac{x_{fm}}{ToF_{fm}} \quad (3.10)$$

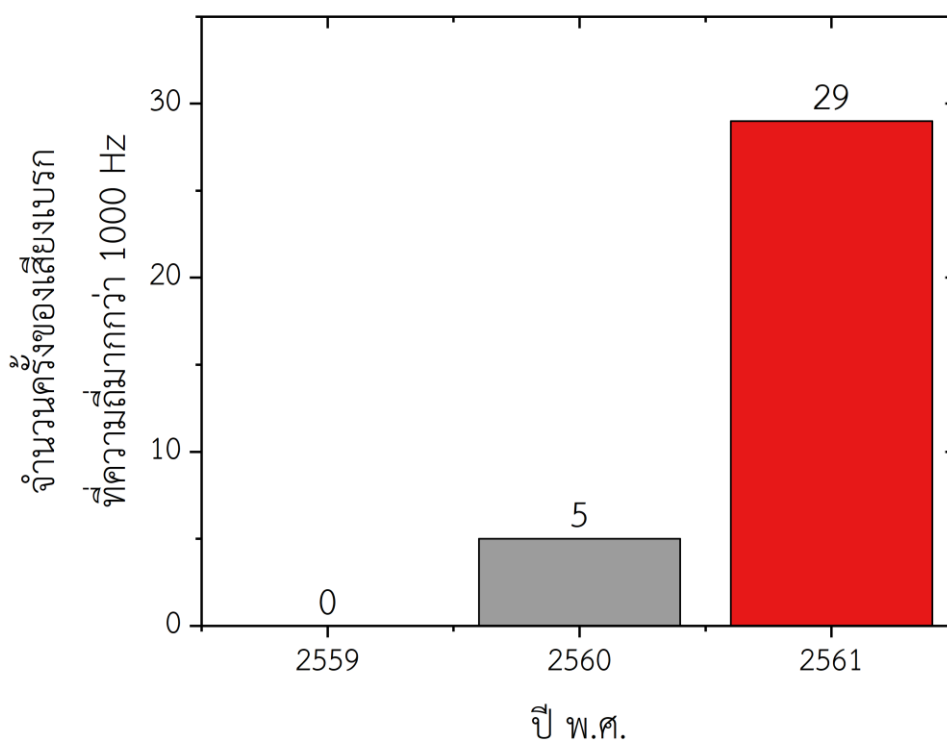
ในโปรแกรมการวัดด้วยเครื่อง iETEK มีการป้อนค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน โดยในตอนเริ่มต้นจะกำหนดให้มีความหนาแน่นเท่ากับ 1 หลังจากนั้นนำชิ้นงานตัวอย่างเดิมทดสอบความถ่วงจำเพาะของชิ้นงาน เมื่อได้ค่าความถ่วงจำเพาะของชิ้นงานตัวอย่างแล้วจึงนำค่าที่ได้มาคูณค่าเดิม ($E_{เดิม}$) จะได้เป็นค่ามอดูลัสค่าจริง ($E_{จริง} = \rho_{ทดสอบ} S.G. E_{เก่า}$)

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลของการกำหนดเป้าหมาย และปัญหาในการผลิต

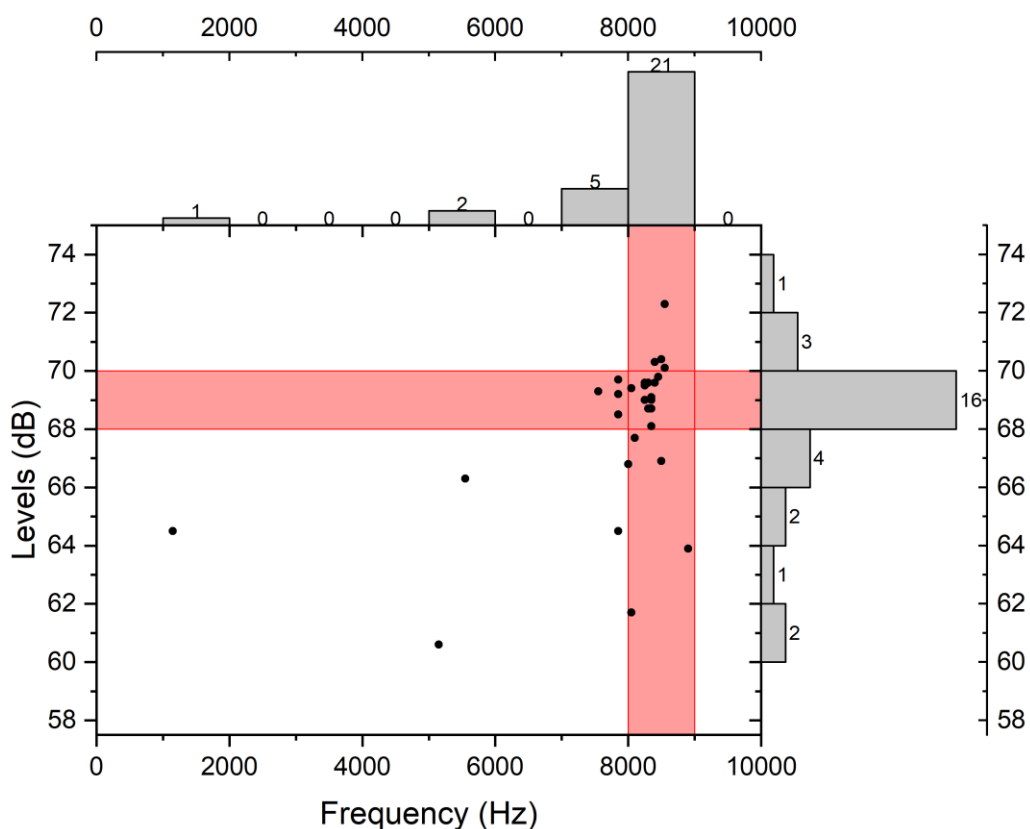
จากการรวบรวมข้อมูลของแต่ละแผนกในบริษัทฯ พบว่าผลการทดสอบประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ผ้าเบรกรุ่น X1725 จากเครื่องไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer) ตามมาตรฐานการทดสอบ SAE J2522 ในช่วงเวลา 3 ปี (พ.ศ. 2559 – 2561) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 มีจำนวนครั้งของเสียงเบรกที่ดังมากกว่าความถี่ 1,000 เฮิร์ตซ์ (Hz) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ. 2559 จากผลการทดสอบปี พ.ศ. 2559 ไม่พบการเกิดเสียงที่ดังกว่า 1,000 Hz แต่ในปีพ.ศ. 2560 เกิดการเบรกที่มีเสียงดังมากกว่า 1,000 Hz ขึ้นในการทดสอบมีจำนวนทั้งสิ้น 5 ครั้ง และมีจำนวนครั้งที่เกิดเสียงเบรกเพิ่มมากขึ้นอีกในปี 2561 ที่มีจำนวนเท่ากับ 29 ครั้ง



รูปที่ 4.1 จำนวนเสียงเบรกที่มีความถี่มากกว่า 1,000 Hz ในปี พ.ศ. 2559 - 2561

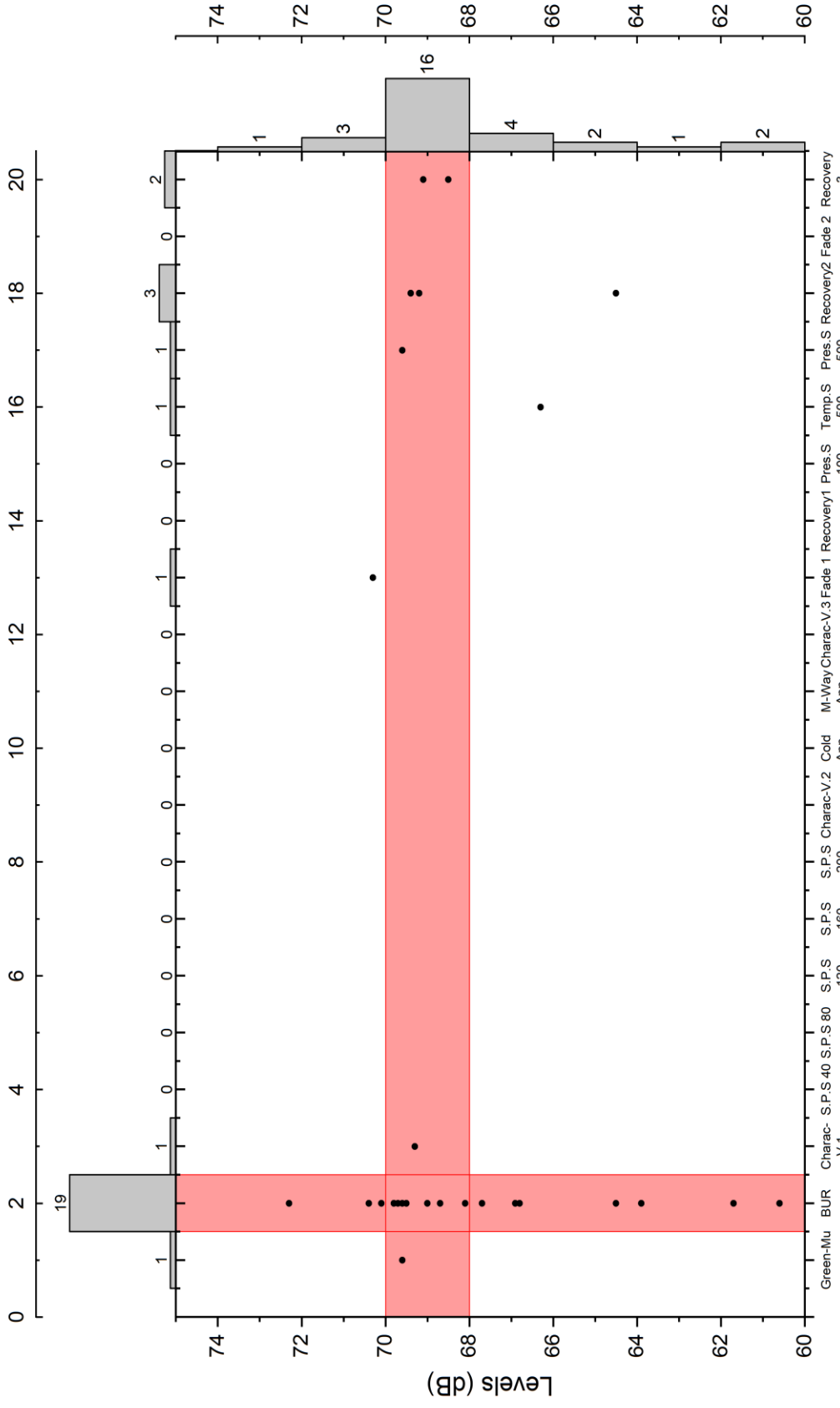
เมื่อวิเคราะห์การเกิดเสียงเบรกในข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพผลิตภัณฑ์ผ้าเบรก X1725 ในปี 2561 ที่ความถี่เสียงมากกว่า 1,000 เฮิร์ตซ์ จากจำนวนการเกิดเสียงดังทั้งหมด 29 ครั้ง พบว่าความถี่ของเสียงที่เกิดขึ้นขณะเบรกพบบ่อยที่สุดที่ช่วงความถี่ 8,000 – 9,000 Hz มีจำนวน 21 ครั้ง

และระดับความเข้มเสียงที่เกิดจากการเบรกที่พบบ่อยคือช่วง 68 – 70 dB จำนวน 16 ครั้ง ดังที่แสดงในรูปที่ 4.2 เมื่อทำการคัดกรองข้อมูลของเสียงเบรกที่เกิดขึ้นในบริเวณความถี่เสียงช่วง 8,000 – 9,000 Hz และมีระดับความเข้มเสียง 68 – 70 dB พบว่ามีจำนวนการเกิดเสียงเบรกที่บริเวณดังกล่าวมีจำนวนทั้งหมด 12 ครั้ง



รูปที่ 4.2 จำนวนครั้งของการเกิดเสียงเบรกในช่วงความถี่เสียงและระดับความเข้มเสียงต่าง ๆ ในการทดสอบ Dynamometer

การทดสอบในมาตรฐานการทดสอบประสิทธิภาพผ้าเบรก SAE J2522 จะมีช่วงการทดสอบทั้งสิ้น 20 ช่วงการทดสอบ เพื่อให้ครอบคลุมปัจจัย และสถานการณ์ทั้งหมดที่ผู้ใช้งานขับขี่บนท้องถนน การเกิดเสียงเบรกทั้งหมด 29 ครั้งจากการวิเคราะห์ในปี พ.ศ. 2561 พบว่า 19 ครั้งของเสียงเบรกเกิดขึ้นในช่วงการทดสอบที่มีชื่อเรียกว่า Burnish (BUR) ตามการทดสอบในมาตรฐาน SAE J2522 ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 จำนวนครั้งของการเกิดเสียงเบรคที่ระดับความเข้มเสียงต่าง ๆ ของช่วงการทดสอบตามมาตรฐาน SAE J2522

เมื่อทำการคัดกรองข้อมูลของเสียงเบรกที่เกิดขึ้นในช่วง 8,000 – 9,000 Hz และระดับความเข้มเสียงที่อยู่ในช่วง 68 – 70 dB ในจำนวน 16 ครั้ง พบว่าเสียงเบรกจำนวน 9 ครั้ง เกิดขึ้นในการทดสอบของ Burnish ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ดังนั้นเพื่อการเพิ่มประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ผ้าเบรก และตอบสนองต่อข้อร้องเรียนจากลูกค้า จากการรวบรวมข้อมูลเป็นที่ยืนยันได้ว่าเสียงเบรกที่เกิดขึ้นในรุ่น X1725 เป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์ที่พบปัญหาการเกิดเสียงเบรก และต้องถูกพัฒนาทั้งการออกแบบผลิตภัณฑ์ และกระบวนการผลิต

ตารางที่ 4.1 เสียงเบรกจากผลการทดสอบ SAE J2522 ที่ความถี่เสียง 8,000 - 9,000 Hz และ 68 - 70 dB

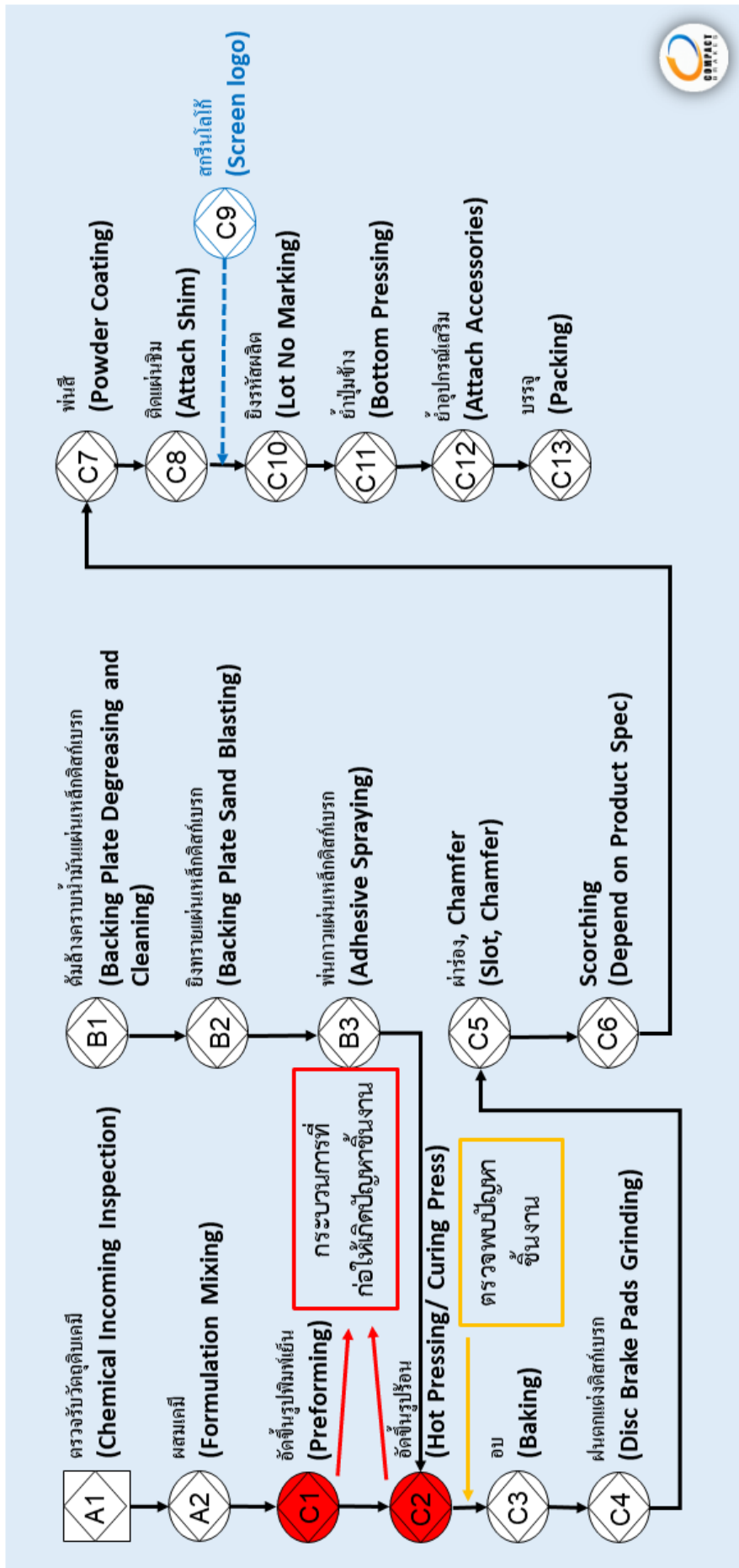
ช่วงการทดสอบ	ความถี่ของเสียงเบรก (Hz)	ระดับความเข้มเสียง (dB)
Green-Mu	8250	69.6
BUR	8350	69.0
BUR	7850	69.7
BUR	8250	69.5
BUR	8300	68.7
BUR	8250	69.0
BUR	8450	69.8
BUR	8350	68.7
BUR	8400	69.6
BUR	8350	68.1
Charac- V.1	7550	69.3
Pres.S 500	8300	69.6
Recovery 2	7850	69.2
Recovery 2	8050	69.4
Recovery 3	8350	69.1
Recovery 3	7850	68.5

ผลจากการศึกษากระบวนการผลิตผ้าเบรกทั้งกระบวนการพบว่า ในปี พ.ศ. 2560 พบปัญหาชิ้นงานนี้มากถึง 4,640 ชิ้น (คิดเป็นคะแนน RPN = $7 \times 4 \times 7 = 196$) และอาจเป็นหนึ่งในสาเหตุ

ที่เกิดปัญหาเสียงเบรกเพิ่มขึ้นในปี พ.ศ. 2561 โดยขั้นตอนที่ส่งผลทำให้เกิดปัญหาชิ้นงานนี้มันจะพบได้หลังจากกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน ดังแสดงในรูปที่ 4.4 เมื่อทำการเก็บข้อมูลที่ได้ศึกษา และรวบรวมถึงตัวแปรที่สำคัญของกระบวนการ พบว่านอกจากกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนแล้ว ชิ้นงานอัดขึ้นรูปเย็นจากกระบวนการอัดขึ้นรูปเย็นยังเป็นปัจจัยหนึ่งส่งผลให้เกิดปัญหาชิ้นงานนี้ได้

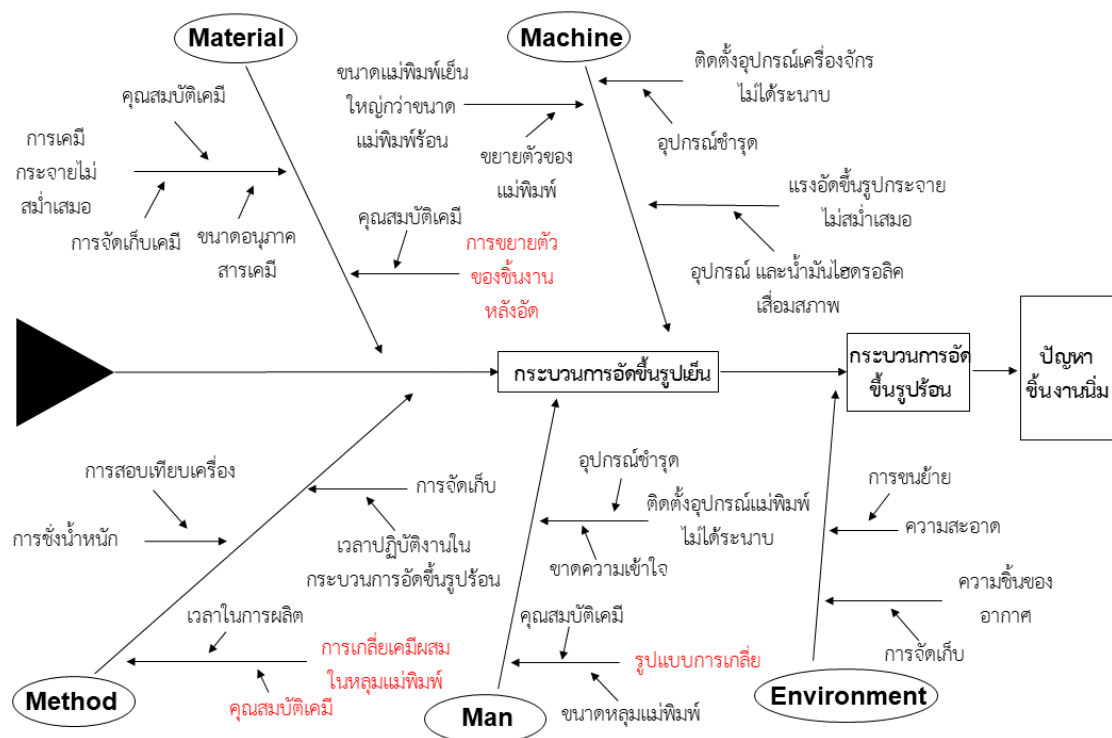


PROCESS FLOW CHART



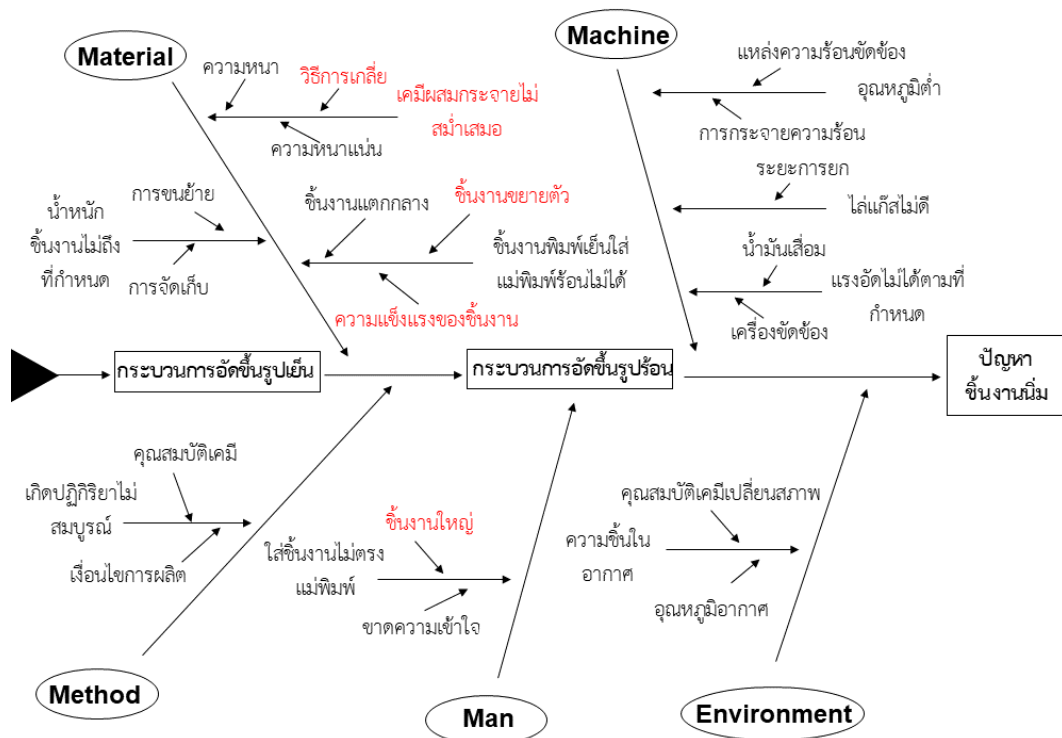
รูปที่ 4.4 กระบวนการที่จะก่อให้เกิดปัญหาขึ้นงานใหม่

โดยผู้วิจัย และผู้ที่เกี่ยวข้องหลาย ๆ ฝ่ายวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาดังกล่าว ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ซึ่งจากแผนภาพแสดงเหตุและผลของปัจจัยที่เกิดขึ้นในกระบวนการอัดขึ้นรูปเย็น จะพบว่าสาเหตุที่เป็นไปได้ทั้งหมดของปัญหานั้นมีจำนวนมากมาย โดยสามารถจัดจำแนกปัญหาให้อยู่ในองค์ประกอบของกระบวนการได้เป็น 5 ส่วน คือ ด้านวัตถุดิบ (Material) ด้านเครื่องจักร (Machine) ด้านวิธีการ (Method) ด้านทักษะผู้ปฏิบัติงาน (Man) และด้านสิ่งแวดล้อม (Environment)



รูปที่ 4.5 แผนภาพเหตุและผลของปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปัญหาขึ้นงานนึ่งในกระบวนการอัดขึ้นรูปเย็น

ขั้นตอนในกระบวนการพิมพ์ร้อนก็เป็นหนึ่งในปัจจัยที่ก่อให้เกิดปัญหาขึ้นงานนึ่งได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 จะพบว่าคุณลักษณะ ขนาด และวิธีการผลิตขึ้นงานอัดขึ้นรูปเย็นเป็นปัจจัยต่อเนื่องที่จะก่อให้เกิดปัญหาขึ้นงานนึ่งได้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนยกตัวอย่างเช่น การที่เคมีผสมมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอในชิ้นงานพิมพ์เย็นซึ่งเป็นผลมาจากการปฏิบัติงานในขั้นตอนการเคลือบ ส่งผลให้ขนาดและความหนาแน่นในแต่ละบริเวณของชิ้นงานพิมพ์เย็นไม่สม่ำเสมอ เมื่อชิ้นงานอัดขึ้นรูปเย็นถูกความร้อนเพื่อให้เคมีผสมเกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ (Curing) บริเวณที่มีความหนาแน่นต่ำ และไม่สม่ำเสมอนี้จึงมีโอกาสที่จะเกิดปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ทำให้เกิดปัญหาขึ้นงานนึ่งได้ และนอกจากนี้เมื่อชิ้นงานอัดขึ้นรูปเย็นที่มีขนาดไม่สม่ำเสมอทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานลดลง จึงทำให้การนำชิ้นงานใส่ลงในแม่พิมพ์ร้อนได้ยากขึ้น และมีโอกาสแตกหักระหว่างการปฏิบัติงาน



รูปที่ 4.6 แผนภาพเหตุและผลของปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปัญหาขึ้นงานน้มนในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน

ด้วยปัจจัยต่าง ๆ มากมายที่อาจก่อให้เกิดปัญหาขึ้นงานน้มนได้จึงจำเป็นต้องทำการคัดเลือกเฉพาะสาเหตุที่สำคัญ ดังนั้นจึงนำปัจจัยทั้งหมดมาวิเคราะห์ความผิดพลาด และผลกระทบ (FMEA) เพื่อให้คะแนน และควบคุมกระบวนการผลิต ดังตัวอย่างที่แสดงในตารางที่ 4.2 โดยปัญหาหลัก ๆ ที่จะมุ่งเน้นคือการควบคุมขั้นตอนการเกลี่ยเคมีผสมในหลุมแม่พิมพ์เย็นของผู้ปฏิบัติงาน (RPN = 256) ในขั้นกระบวนการอัดขึ้นรูปเย็น

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ผลกระทบอันเนื่องมาจากความผิดพลาดในกระบวนการ

ขั้นตอน	เป้าหมาย	ผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้	ผลกระทบจากความผิดพลาด	Severity	สาเหตุที่ทำให้เกิดความผิดพลาด	Occurrence	การควบคุม	Detection	RPN					
การซึ่ นำหนัก	ซึ่งนำหนักเคมีผสม ได้ตามที่กำหนด	น้ำหนักเคมีผสม มากกว่าค่าที่ กำหนด	<ul style="list-style-type: none"> - สิ้นเปลืองปริมาณเคมีผสม - ความหนาแน่นของชิ้นงาน พิมพ์เย็นมากขึ้น - ความหนาแน่นของชิ้นงาน มากขึ้น - ชิ้นงานนิ่มในกระบวนการ พิมพ์ร้อน 	7	<ul style="list-style-type: none"> - ผู้ปฏิบัติงานซึ่งเคมีผสม มากกว่าที่กำหนด - ฝุ่น หรือเคมีผสมที่ตก รอบ ๆ ร่วมกับชิ้นงาน 	4	<ul style="list-style-type: none"> - อบรมผู้ปฏิบัติงานถึง ความสำคัญของการซึ่ และค่าที่ยอมรับได้ 	6	1 6 8					
										<ul style="list-style-type: none"> - ความหนาแน่นของชิ้นงานลดลง - ชิ้นงานมีความแข็งแรง ลดลง - ความหนาแน่นของชิ้นงาน ลดลง 	<ul style="list-style-type: none"> - เครื่องซึ่งแต่ละตัว ไม่ได้ ถูกการทวนสอบ (Calibration) 	1	<ul style="list-style-type: none"> - ทวนสอบเครื่องซึ่ง 	4
การซึ่ นำหนัก	ซึ่งนำหนักเคมีผสม ได้ตามที่กำหนด	น้ำหนักเคมีผสม น้อยกว่าค่าที่ กำหนด	<ul style="list-style-type: none"> - ความหนาแน่นของชิ้นงานลดลง - ชิ้นงานมีความแข็งแรง ลดลง - ความหนาแน่นของชิ้นงาน ลดลง 	7	<ul style="list-style-type: none"> - ผู้ปฏิบัติงานซึ่งเคมีผสม น้อยกว่าที่กำหนด - เคมีผสมตกหล่น ระหว่างปฏิบัติงาน 	4	<ul style="list-style-type: none"> - อบรมผู้ปฏิบัติงานถึง ความสำคัญของการซึ่ และค่าที่ยอมรับได้ - เลือภภาษาขณะที่ เหมาะสมในการเท 	6	1 6 8 2 5 2					
										<ul style="list-style-type: none"> - เครื่องซึ่งแต่ละตัว ไม่ได้ ถูกการทวนสอบ (Calibration) 	1	<ul style="list-style-type: none"> - ทวนสอบเครื่องซึ่ง 	4	2 8
										<ul style="list-style-type: none"> - ความหนาแน่นของชิ้นงานลดลง - ชิ้นงานมีความแข็งแรง ลดลง - ความหนาแน่นของชิ้นงาน ลดลง 	<ul style="list-style-type: none"> - ผู้ปฏิบัติงานซึ่งเคมีผสม น้อยกว่าที่กำหนด - เคมีผสมตกหล่น ระหว่างปฏิบัติงาน 	4	<ul style="list-style-type: none"> - อบรมผู้ปฏิบัติงานถึง ความสำคัญของการซึ่ และค่าที่ยอมรับได้ - เลือภภาษาขณะที่ เหมาะสมในการเท 	6

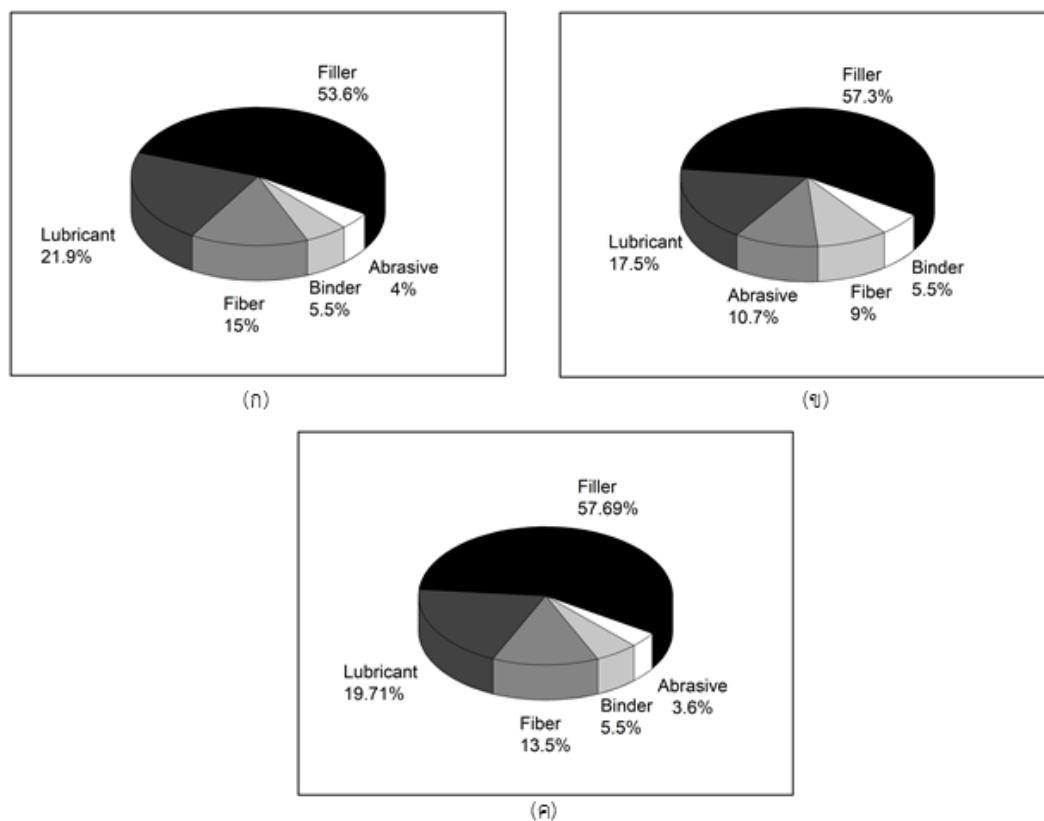
ขั้นตอน	เป้าหมาย	ผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้	ผลกระทบจากความผิดพลาด	Severity	สาเหตุที่ทำให้เกิดความผิดพลาด	Occurrence	การควบคุม	Detection	RPN	
ขั้นต้น		ผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้	ผลกระทบจากความผิดพลาด		ผิดพลาด	- เคมีผสมติดพันซ์	- ทำความสะอาดพันซ์	5	2	
								6		1
								0		
การเกลี่ยเคมีผสมในหลอดแม่พิมพ์	เคมีผสมกระจายทั่วทั้งหลอดแม่พิมพ์	เคมีผสมกองตรงกลางของหลอดแม่พิมพ์	- ชิ้นงานนิมิต้านข้าง - ชิ้นงานแตกหักง่ายหลังการอัด - ชิ้นงานหนาตรงกลาง	8	- ชิ้นงานถูกชูตระหว่างการขนย้าย	7	- ลดพื้นที่ชูตระ	4	1	
								9		
								6		
การเกลี่ยเคมีผสมในหลอดแม่พิมพ์	เคมีผสมกระจายทั่วทั้งหลอดแม่พิมพ์	เคมีผสมกองตรงกลางของหลอดแม่พิมพ์	- ชิ้นงานนิมิต้านข้าง - ชิ้นงานแตกหักง่ายหลังการอัด - ชิ้นงานหนาตรงกลาง	8	- เครื่องชั่งแต่ละตัวไม่ได้ถูกการทวนสอบ (Calibration)	1	- ทวนสอบเครื่องชั่ง	4	2	
								8		
การเกลี่ยเคมีผสมในหลอดแม่พิมพ์					ผิดพลาด	- ผู้ปฏิบัติงานไม่ได้เกลี่ยเคมีผสมหลังเทใส่หลอดแม่พิมพ์	- อบรมพนักงาน	8	2	
								4		5
										6

ขั้นตอน	เป้าหมาย	ผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้	ผลกระทบจากความผิดพลาด	Severity	สาเหตุที่ทำให้เกิดความผิดพลาด	Occurrence	การควบคุม	Detection	RPN
ขั้นตอน เคมีผสม	เป้าหมาย หยิบจับชิ้นงาน พิมพ์เย็นได้	เคมีผสมไม่เต็มทุก ส่วนในหลอด	<ul style="list-style-type: none"> - ชิ้นงานขอบนิม - ชิ้นงานแตกหักง่ายหลังการอัด - ขนาดชิ้นงานไม่สม่ำเสมอ 	6	<ul style="list-style-type: none"> - ผู้ปฏิบัติงานไม่ได้เกลี่ยเคมีผสมหลังเทใส่หลอดแม่พิมพ์ 	4	- อบรมพนักงาน	8	1 9 2
		ความดันต่ำกว่าที่กำหนด	<ul style="list-style-type: none"> - ความแข็งแรงชิ้นงานลดลงหยิบจับไม่ได้ - ความหนามากขึ้น - ชิ้นงานขยายตัวหลังการอัดมาก - ชิ้นงานนิม 	7	<ul style="list-style-type: none"> - น้ำมันไฮดรอลิคเสื่อมสภาพ มีความชื้น - พองอากาศในน้ำมัน - เครื่องจักรชำรุด 	3	<ul style="list-style-type: none"> - การอุ่นเครื่องก่อนการใช้ 	5 0 5	
ขั้นตอน เคมีผสม	เป้าหมาย หยิบจับชิ้นงาน พิมพ์เย็นได้	แรงอัดชิ้นรูป กระยายไม่ สม่ำเสมอ	<ul style="list-style-type: none"> - ความแข็งแรงชิ้นงานลดลง - ความหนาไม่สม่ำเสมอ - ชิ้นงานนิม 	7	<ul style="list-style-type: none"> - ระบายพ่นสีไม่สม่ำเสมอ 	6	<ul style="list-style-type: none"> - มีระยะเวลาบำรุงรักษา 	5	2 1 0
							<ul style="list-style-type: none"> - มีระยะเวลาบำรุงรักษา 	5	1 0
							<ul style="list-style-type: none"> - น้ำมันไฮดรอลิคเสื่อมสภาพ 	<ul style="list-style-type: none"> - การอุ่นเครื่องก่อนการใช้ 	5

โดยในการออกแบบการทดลองจะเริ่มศึกษาจากคุณสมบัติเคมีที่จะส่งผลต่อรูปแบบ และขั้นตอนการปรับปรุงการเคลือบเคมีผสมในหลุมแม่พิมพ์เย็น และสุดท้ายเป็นการศึกษาการขยายตัวของชิ้นงานอัดขึ้นรูปเย็นเพื่อการจัดเก็บชิ้นงานก่อนส่งให้แก่กระบวนการอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อน

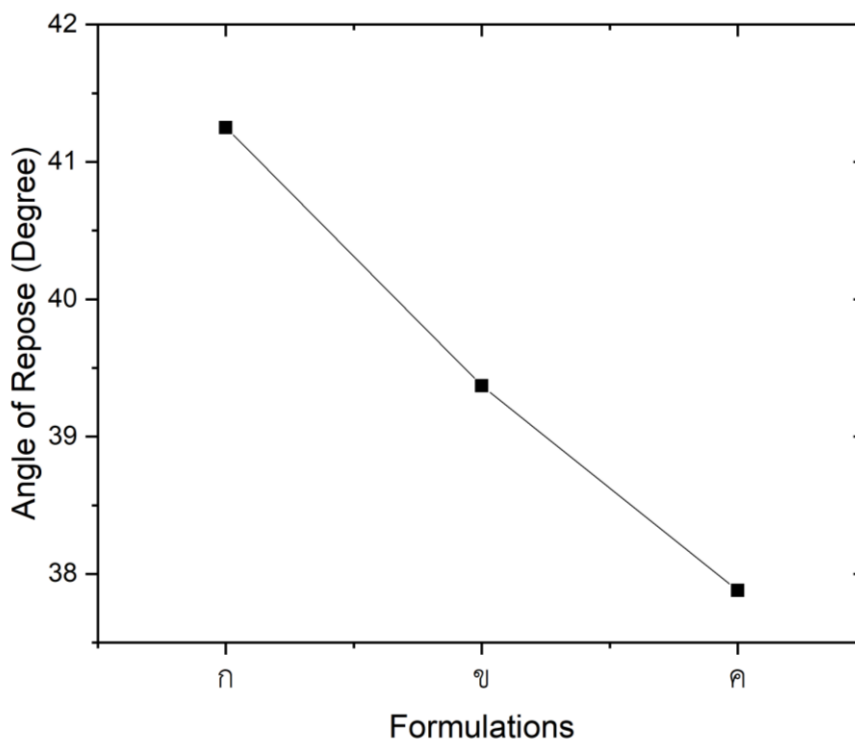
4.2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติการไหลของเคมีผสม

1) ขั้นตอนการวิเคราะห์จะดำเนินการเตรียมส่วนผสมของเคมีตามมาตรฐานจากกระบวนการผลิต จำนวน 3 สูตร โดยอัตราส่วนผสมแสดงอยู่ในรูปที่ 4.7 (ก) สูตร ก. มีสารประกอบประเภทสารหล่อลื่น (21% Lubricant) และเส้นใยมากที่สุด (15% Fiber) (ข) สูตร ข. เป็นสูตรที่มีส่วนประกอบของเส้นใยน้อยสุด (9% Fiber) และ (ค) สูตร ค. เป็นสูตรที่มีส่วนประกอบของสารเติมเต็มมากที่สุด (57.69% Filler) หลังจากนั้นนำเคมีผสมทั้ง 3 สูตรเข้าสู่กระบวนการผสม (Mixing) ตามมาตรฐานการปฏิบัติงานของโรงงานดังที่ได้อธิบายในบทที่ 3 และนำเคมีที่ได้หลังกระบวนการผสมมาทำการทดลองมูกองของเคมี



รูปที่ 4.7 ส่วนผสมของผ้าเบรก (ก) ผ้าเบรกสูตร ก. (ข) ผ้าเบรกสูตร ข. และ (ค) ผ้าเบรกสูตร ค.

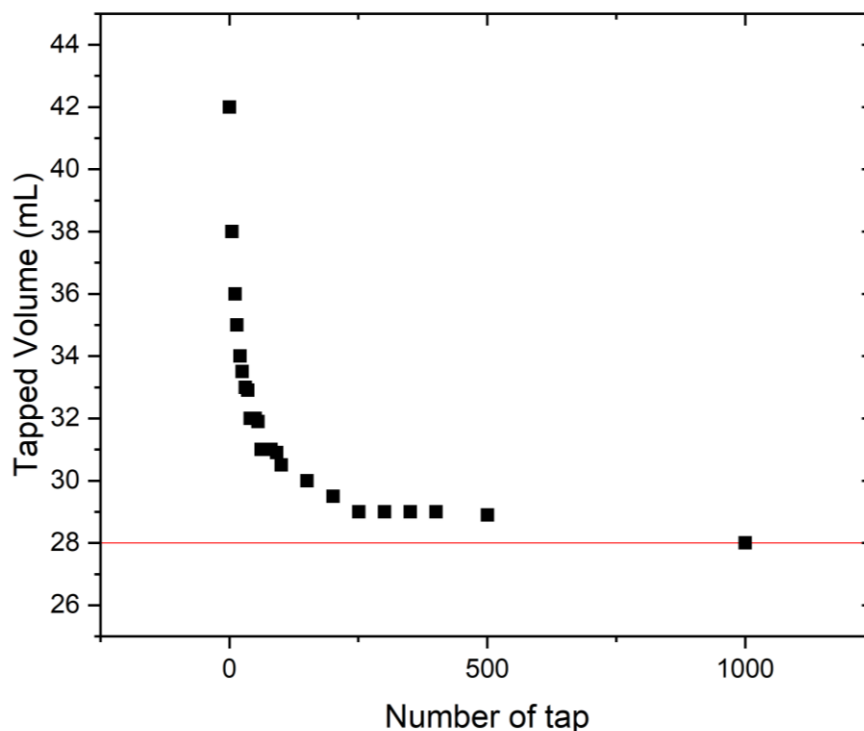
2) ในการทดลองมูกองของเคมี จะทำการทดสอบวัดมูกที่เกิดขึ้นหลังจากเทเคมีผสมผ่านอุปกรณ์การทดสอบ ดังที่ได้อธิบายในบทที่ 3 จำนวน 3 ครั้ง ต่อ 1 สูตรเคมี โดยมีปริมาตรที่เท่ากัน ผลการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์มุมกองของทั้ง 3 สูตร

เคมีผสมสูตร ก. เกิดมุมกองเฉลี่ยมากที่สุดโดยมีมุมเท่ากับ 41.25° ถัดมาเคมีผสมสูตร ข. มีขนาดมุมกองเฉลี่ยเท่ากับ 39.37° และขนาดมุมกองเฉลี่ยที่น้อยที่สุดเท่ากับ 37.88° คือเคมีสูตร ค. เมื่อวิเคราะห์เทียบกับเกณฑ์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมเภสัช ดังแสดงในตาราง 3.3 พบว่าเคมีสูตร ก. มีคุณสมบัติการไหลได้ อาจจะต้องมีอุปกรณ์ช่วยในการจัดการการไหลของเคมี ในอีก 2 สูตร ข. และ ค. อยู่ในเกณฑ์เดียวกันที่มีคุณสมบัติการไหลได้โดยอาจจะไม่มีความจำเป็นที่จะต้องใช้อุปกรณ์อื่นช่วยในการจัดการการไหลของเคมี 2 สูตรนี้

3) การทดลองความสามารถในการอัดตัวได้ จะทำการวัดค่า Bulk density และ Tapped density ของเคมีผสมทั้ง 3 สูตรก่อน ในการวัด tapped density ด้วยเครื่อง tapped density tester พบว่าปริมาตรของเคมีผสมในสูตร ก. มีการเปลี่ยนค่อนข้างเร็ว (ประมาณ 5%) ในช่วงการเคาะที่ 0 – 20 หลังจากนั้นปริมาตรเคมีผสมมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรลดลงจนเริ่มคงที่ในครั้งการเคาะที่ 250 และปริมาตรเคมีผสมหลังจากการเคาะ 1,000 ครั้ง ปริมาตรของเคมีผสมมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างต่ำ (น้อยกว่า 1%) ดังแสดงในรูปที่ 4.9 เช่นเดียวกับสูตร ข. และ ค. ที่ ปริมาตรหลังการเคาะจะคงที่เมื่อผ่านการเคาะถึง 1,000 ครั้ง ดังนั้นจึงใช้ปริมาตรการเคาะที่ 1,000 เป็นปริมาตรสุดท้าย (V_f) ในการคำนวณค่า tapped density



รูปที่ 4.9 จำนวนครั้งการเคาะกับปริมาตรหลังการเคาะของเคมีผสมสูตร ก.

หลังจากทำการทดลองหาค่า Bulk density และ tapped density แล้วพบว่าสูตร ข. มีค่า Compressibility index และ Hausner ratio น้อยที่สุดโดยมีค่าเท่ากับ 31% และ 1.45 ตามลำดับ ในสูตร ก. และ ค. มีค่า Compressibility index ที่ใกล้เคียงกันมีค่าเท่ากับ 36% และ 35% ตามลำดับ ทำนองเดียวกับค่า Hausner ratio ที่มีค่าเท่ากับ 1.56 และ 1.53 ตามลำดับ ดังที่แสดงในตารางที่ 4.3 เมื่อนำ 2 ค่ามาเปรียบเทียบกับคุณสมบัติการไหลในตารางที่ 3.4 พบว่า สูตร ข. มีการไหลน้อย ส่วนสูตร ก. และ สูตร ค. อยู่ในเกณฑ์การไหลเดียวกันที่มีคุณสมบัติการไหลน้อยมาก

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติการอัดตัวได้

สูตร (Formulation)	Bulk Density (g/mL)	Tapped Density (g/mL)	Compressibility index (%)	Hausner ratio
ก.	0.43 ± 0.02	0.67 ± 0.01	36	1.56
ข.	0.51 ± 0.02	0.74 ± 0.02	31	1.45
ค.	0.45 ± 0.01	0.69 ± 0.01	35	1.53

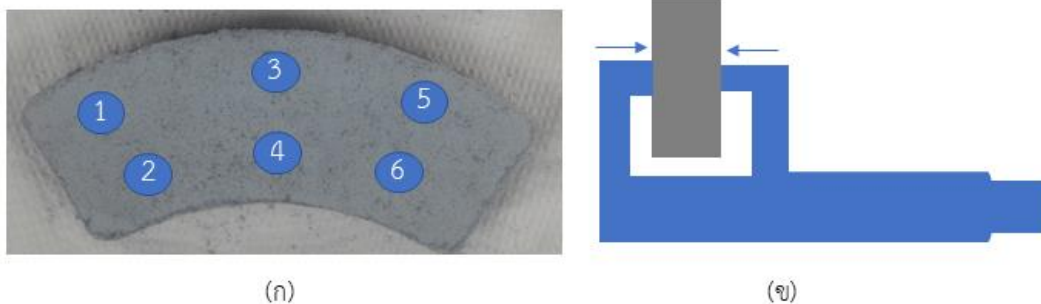
ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติการไหลของเคมีผสมระหว่าง 3 สูตร สามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 4.4 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการทดลองมุมกองสูตร ข. และสูตร ค. อยู่ในเกณฑ์การไหลพอใช้ได้ แต่ในการทดลองความสามารถในการอัดได้พบว่าสูตร ข. อยู่ในเกณฑ์การไหลน้อย ซึ่งมีการไหลได้ดีกว่าสูตร ค. ที่อยู่ในเกณฑ์การไหลได้น้อยมากเช่นเดียวกับสูตร ก. นอกจากนี้ในส่วนผสมการผลิตของสูตร ข. นั้นเป็นสูตรที่มีร้อยละของสารประกอบประเภทใยเส้นน้อยที่สุด โดยที่สูตร ข. มีอัตราส่วนสารหล่อลื่นต่อเส้นใย (Lubricant : Fiber) และอัตราส่วนสารเติมเต็มต่อเส้นใย (Filler : Fiber) มากที่สุดเท่ากับ 1.94 และ 6.36 ตามลำดับ 2 สารประกอบดังกล่าวอาจเป็นตัวช่วยให้สูตร ข. มีสมบัติการไหลที่ดีขึ้น ดังนั้นสูตร ข. จึงถูกเลือกในการศึกษาการอัดขึ้นรูปแผ่นหั่วข้อการศึกษา 3.3.2 เนื่องจากการลดปัจจัยความคลาดเคลื่อนความหนาแน่นจากคุณสมบัติการไหลของเคมีที่จะส่งผลกระทบต่อ การจัดการ และวิธีการกลี๋ยเคมีผสมในแม่พิมพ์เย็นต่อไป และสูตร ข. ยังเป็นสูตรที่ใช้ในการผลิตผ้าเบรกในรุ่น X1725 บ่อยครั้งที่สุดอีกด้วย

ตารางที่ 4.4 คุณสมบัติการไหลทั้ง 3 สูตร

สูตร	คุณสมบัติการไหล	
	การทดลองมุมกอง (Angle of repose)	การทดลองการอัดตัวได้ (Compressibility index %)
ก.	การไหลปานกลาง	การไหลน้อยมาก
ข.	การไหลพอใช้ได้	การไหลน้อย
ค.	การไหลพอใช้ได้	การไหลน้อยมาก

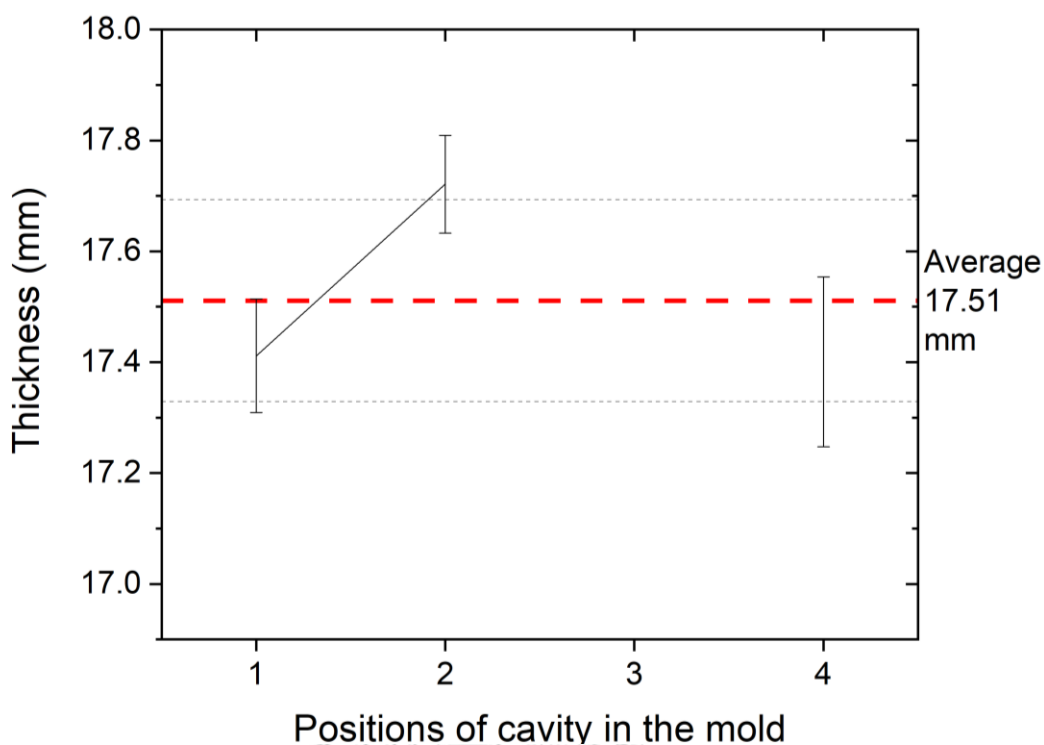
4.3 ผลการวิเคราะห์ความหนาของชิ้นงานอัดขึ้นรูปแบบเย็น

ในการวิเคราะห์ความหนาของชิ้นงานอัดขึ้นรูปแบบเย็นในรุ่น X1725 กำหนดให้ความหนาแน่นสุดท้ายของชิ้นงานมีค่าเท่ากับ 1.64 กรัม/ตารางเซนติเมตร และความหนาสุดท้ายที่ 16.6 มิลลิเมตร ค่าที่กำหนดนี้ได้มาจากการรวบรวมทางสถิติจากบริษัทฯ ในปี พ.ศ. 2560 ในการผสมเคมีสูตร ข. ที่ได้จากกระบวนการผลิตพบว่ามีค่า bulk density เท่ากับ 0.542 ± 0.005 กรัม/มิลลิลิตร จากเคมีผสมน้ำหนักรวม 4.95 กิโลกรัม โดยแต่ละชิ้นมีน้ำหนักเคมีผสมเท่ากับ 206 ± 1 กรัม/ชิ้น การวิเคราะห์ความหนาของชิ้นงานวัดโดยใช้เครื่องไมโครมิเตอร์บนตำแหน่ง 6 ตำแหน่งของชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งการวิเคราะห์นี้จะแบ่งออกเป็น 3 ตอน คือ



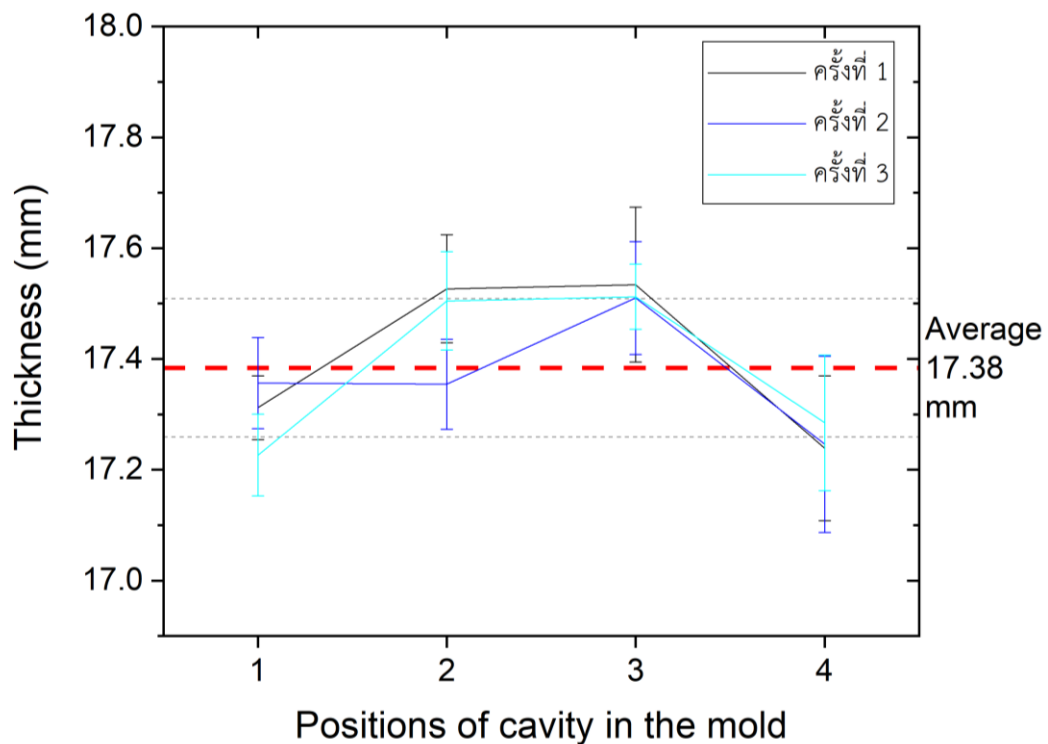
รูปที่ 4.10 (ก) 6 ตำแหน่งการวัดบนชิ้น (ข) การวัดความหนาด้วยเครื่องไมโครมิเตอร์

4.3.1) ผลการวิเคราะห์ความหนาของชิ้นงานพิมพ์เย้นที่ได้ทดลองตามเงื่อนไขการผลิตปัจจุบันของโรงงาน ดังแสดงในรูปที่ 4.11 แสดงความหนาของชิ้นงานในแต่ละหลุมด้วยความดันการอัดของเครื่องจักร 1,100 PSI จำนวน 1 ครั้ง ใน 4 หลุมแม่พิมพ์ ซึ่งจากการทดลองทำตามเงื่อนไขปัจจุบันพบว่าชิ้นงานในหลุมที่ 3 เกิดการแตกหัก อันเนื่องมาจากความหนาในหลุมที่ 3 มีค่ามากกว่าหลุมอื่นซึ่งจะแสดงในหัวข้อการวิเคราะห์ถัดไป จึงทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงน้อยกว่าหลุมอื่น ๆ จากกราฟความหนาเฉลี่ยที่มีค่ามากที่สุดคือหลุม 2 มีความหนาเฉลี่ยเท่ากับ 17.72 ± 0.09 มิลลิเมตร ความหนาเฉลี่ยในหลุมที่ 1 และความหนาเฉลี่ยในหลุมที่ 4 มีความหนาที่ใกล้เคียงกันโดยมีค่าเท่ากับ 17.41 ± 0.10 มิลลิเมตร และ 17.40 ± 0.15 มิลลิเมตร ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยรวมของทั้ง 3 ชิ้นมีค่าเท่ากับ 17.51 ± 0.18 มิลลิเมตร (เส้นประสีแดง และสีเทา)



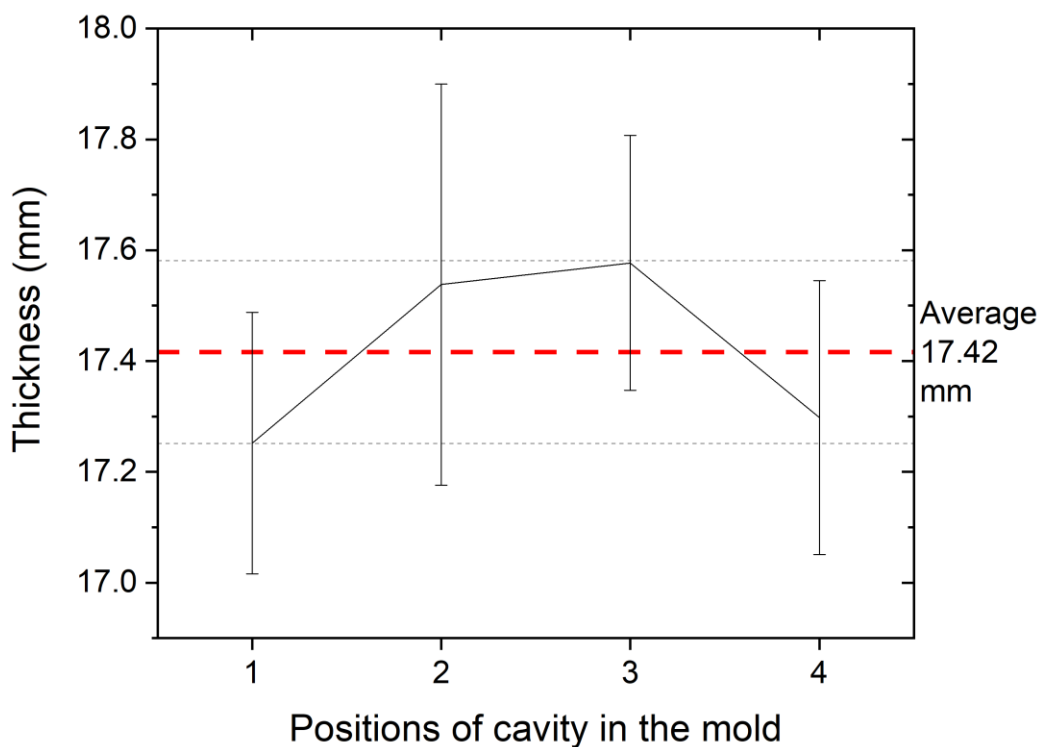
รูปที่ 4.11 ความหนาของชิ้นงานในแต่ละหลุมของเงื่อนไขการผลิตปัจจุบัน

4.3.2) ผลการวิเคราะห์ความหนาที่ได้กำหนดระยะเวลาการอัดเพิ่มขึ้นจากเงื่อนไขการผลิตชิ้นงานปัจจุบันของโรงงานผลิต โดยความสูงเคมีผสมหลังการปรับยอดที่ได้จากการคำนวณในสมการที่ (3.6) พบว่าเคมีผสมต้องมีความสูง 50.21 มิลลิเมตรจากฐานแม่พิมพ์ และระยะพื้นที่ที่ต้องเลื่อนลงเท่ากับ 27.36 มิลลิเมตร ในการวิเคราะห์นี้ได้มีการผลิตซ้ำจำนวน 12 ชิ้น หรือ 3 ครั้งการอัด ดังแสดงในรูปที่ 4.12 พบว่าหลุมที่ 3 มีความหนามากที่สุดเฉลี่ย 17.52 ± 0.14 มิลลิเมตร ถัดมาคือความหนาเฉลี่ยในหลุมที่ 2 มีค่าเท่ากับ 17.46 ± 0.10 มิลลิเมตร หลุมที่ 1 และหลุมที่ 4 มีความหนาใกล้เคียงกัน เช่นเดียวกับผลการวิเคราะห์ที่ 4.3.1 มีค่าความหนาเฉลี่ยเท่ากับ 17.30 ± 0.08 มิลลิเมตร และ 17.26 ± 0.16 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยที่ความหนาในแต่ละตำแหน่ง 6 ตำแหน่งของการวัด พบว่าหลุมที่ 4 มีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานสูงที่สุด (± 0.16 มิลลิเมตร) เมื่อเฉลี่ยความหนาของทั้ง 12 ชิ้น พบว่ามีค่าความหนาเฉลี่ยเท่ากับ 17.38 ± 0.12 มิลลิเมตร (เส้นประ)



รูปที่ 4.12 ความหนาของชิ้นงานในแต่ละหลุมด้วยวิธีการเพิ่มจำนวนครั้งการกด

4.3.3) ผลการวิเคราะห์ความหนาด้วยการเพิ่มระยะการอัดเพิ่ม โดยไม่มีการเกลี่ยปรับยอดเคมีผสม จำนวนชิ้นงาน 4 ชิ้น หรือ 1 ครั้ง เพื่อศึกษาผลกระทบของการไหลเคมีกับความหนาของชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 4.13 พบว่าความหนาของชิ้นงานเฉลี่ยที่หนาที่สุดคือหลุมที่ 3 มีค่าเท่ากับ 17.58 ± 0.23 มิลลิเมตร ลองลงมาคือความหนาเฉลี่ยของหลุมที่ 2 มีค่าเท่ากับ 17.54 ± 0.36 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงที่สุด หลุมที่ 1 และ หลุมที่ 4 มีความหนาเฉลี่ย 17.25 ± 0.24 และ 17.30 ± 0.25 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยมีความหนาเฉลี่ยของทั้ง 4 ชิ้น เท่ากับ 17.42 ± 0.16 มิลลิเมตร



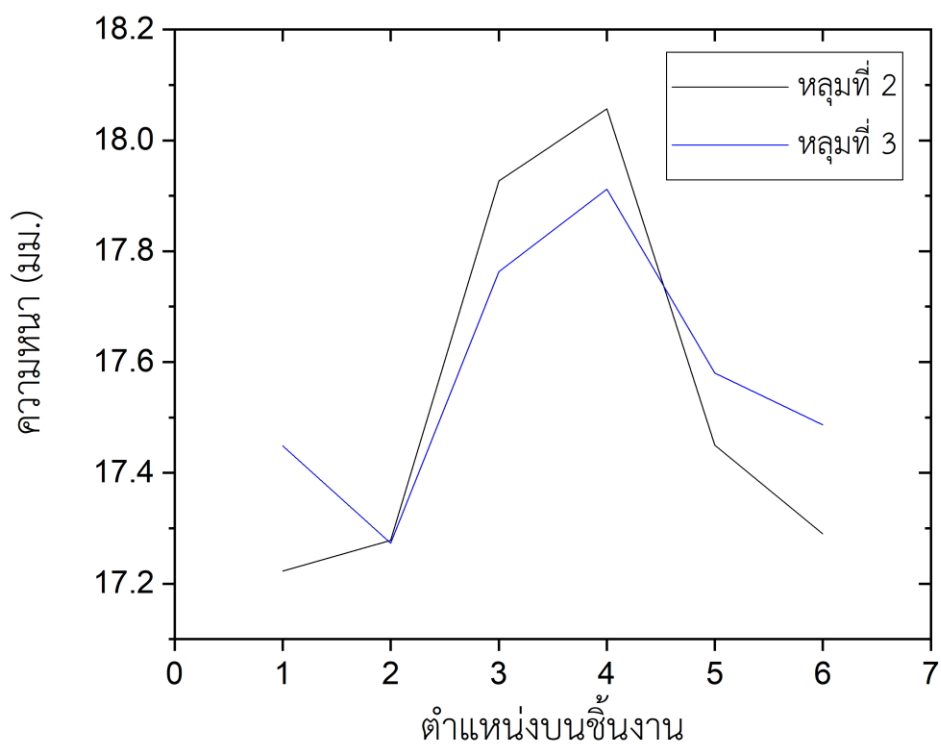
รูปที่ 4.13 ความหนาของชิ้นงานในแต่ละหลุมของวิธีการกำหนดระยะการกด แบบไม่เกลียว

เมื่อเปรียบเทียบความหนาเฉลี่ยรวมของทั้ง 3 วิธีการ พบว่าวิธีการเพิ่มจำนวนครั้งการกดอัด โดยมีระยะกำหนดไว้มีความหนาของชิ้นงานเฉลี่ยน้อยที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 4.5 และมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำที่สุดอีกด้วย ในวิธีการเพิ่มจำนวนครั้งการกดอัด แต่ไม่ได้ทำการเกลี่ยนั้นพบว่ามี ความหนาเฉลี่ยเพิ่มขึ้น และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมากขึ้น โดยวิธีการผลิตชิ้นงานที่มีความหนาเฉลี่ย มากที่สุดคือการผลิตในรูปแบบที่เป็นปัจจุบันของโรงงาน

ตารางที่ 4.5 ความหนาเฉลี่ยรวมของแต่ละวิธีการผลิตชิ้นงานพิมพ์เย็น

กระบวนการอัดขึ้นรูปเย็น	ความหนาเฉลี่ย (มิลลิเมตร)
การอัดในเงื่อนไขการกำหนดระยะกดยกก่อนการอัดด้วยความดันที่ 1,100 PSI	17.38 ± 0.12
การอัดในเงื่อนไขกำหนดระยะกดโดยไม่ทำการเกลี่ย	17.42 ± 0.16
การอัดในเงื่อนไขปัจจุบันของโรงงานผลิต	17.51 ± 0.51

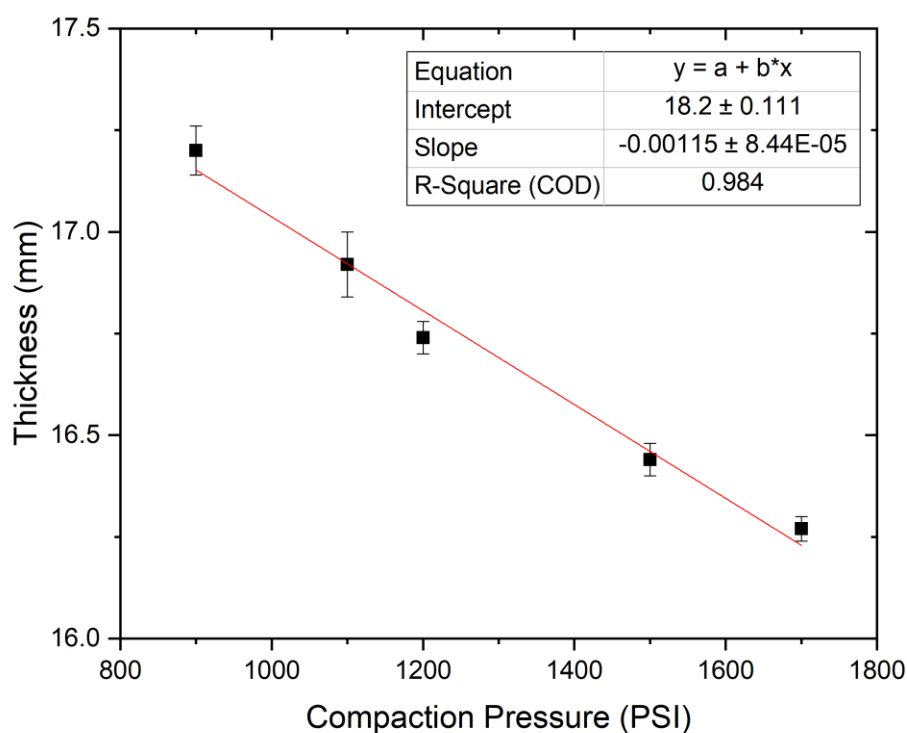
ดังนั้นวิธีการกำหนดระยะการกวดก่อนการอัดด้วยความดันสูงมีผลทำให้ความหนาเฉลี่ยของชิ้นงาน และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าลดลง เนื่องมาจากการเกลี่ย และระยะการกวดที่ตั้งไว้เป็นการจัดการกับคุณสมบัติการไหลของเคมีที่ไหลพอใช้ได้ถึงน้อย ซึ่งถ้าไม่มีการเกลี่ย (วิธีการที่ 4.3.3) จะพบว่าความหนาของชิ้นงานภายในบริเวณตรงกลาง (ตำแหน่งที่ 3 และ 4) มีความหนาสูงที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.14 โดยเฉพาะในหลุมที่ 2 และ 3 จึงแสดงให้เห็นว่าเคมีผสมถูกอัดแน่นเฉพาะตรงกลางที่เป็นผลสืบเนื่องมาจากการเกิดกองกรวยของเคมีผสมหลังการเทเคมีลงในแม่พิมพ์ นอกจากนี้การกำหนดระยะกวดของพื้นที่ก่อนการอัดด้วยความดันสูงนั้นเป็นการปรับลดช่องว่างที่เกิดขึ้นภายในเคมีผสมที่อยู่ในแม่พิมพ์ หรือที่เรียกว่าการเกิดสะพานข้ามของเคมีผสม (Bridging phenomena) ให้เคมีผสมสม่ำเสมอมากขึ้นในการเติมเต็มช่องว่างของหลุมแม่พิมพ์ และเป็นการทำให้เคมีผสมในทุก ๆ หลุมมีความสูงเท่ากันก่อนการอัดที่อีกด้วย ซึ่งเป็นการลดปัญหาของเคมีผสมในหลุมที่มีความสูงมากกว่าหลุมอื่น ๆ ที่จะด้านการอัดหรือการเคลื่อนตัวของพื้นที่ทำให้แต่ละหลุมได้รับความดันที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งความหนาเฉลี่ยที่ลดลงนี้จะส่งผลกับความแข็งแรงของชิ้นงาน และลดปัญหาความหนาเกินขนาดที่ตั้งไว้ที่จะส่งผลต่อการปฏิบัติงานในกระบวนการพิมพ์รีออน และกระบวนการฝนที่ต้องตัดความหนาส่วนเกินออกไป



รูปที่ 4.14 ความหนา 6 ตำแหน่งในชิ้นงานหนึ่งชิ้นของหลุมที่ 2 และ 3 ของวิธีการอัดแบบไม่เกลี่ย

4.4 ผลการวิเคราะห์ความดันของเครื่องจักรกับคุณสมบัติของชิ้นงานอัดรูปเย็น

การวิเคราะห์ปัจจัยความดันเครื่องที่ส่งผลต่อการผลิตชิ้นงานรุ่น X1725 ด้วยสูตรเคมีผสมสูตร ข. กำหนดให้ความดันการอัดของเครื่องจักรเป็น 900, 1,100, 1,200, 1,500 และ 1,700 PSI ตามลำดับ วิธีการอัดชิ้นรูปเย็นในการวิเคราะห์นี้คือการกำหนดระยะยกดตามทีคำนวณระยะยกดที่ได้จากสมการที่ (3.6) เคมีผสมที่ผลิตในการวิเคราะห์นี้มีความหนาแน่นรวม (bulk density) เฉลี่ยเท่ากับ 0.549 ± 0.02 จากเคมีผสมน้ำหนัก 10 กิโลกรัม การวัดความหนาแน่นรวมในการวิเคราะห์นี้ใช้วิธีการตักเคมีผสมลงในภาชนะขนาด 1246 มิลลิลิตร หลังจากนั้นนำภาชนะชั่งน้ำหนัก และคำนวณค่าความหนาแน่นรวม เมื่อคำนวณความสูงที่เคมีผสมต้องเติมลงในแม่พิมพ์จะต้องมีความสูงเท่ากับ 49.59 มิลลิเมตร พบว่าความหนาของชิ้นงานมีแนวโน้มลดลงกับความดันของเครื่องจักรที่ใช้ในการขึ้นรูป (Compaction pressure, PSI) ที่เพิ่มขึ้นจาก 900 PSI ถึง 1,700 PSI เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความหนาของชิ้นงาน และความดันของการอัดขึ้นรูป พบว่ามีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างสองตัวแปรดังกล่าว โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.984 ดังแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาชิ้นงานและความดันของเครื่องจักรที่ใช้อัดขึ้นรูป

จากรูปที่ 4.15 พบว่าความดันของเครื่องจักรที่ทำการขึ้นรูปที่ส่งผลให้ความหนาของชิ้นงานอัดขึ้นรูปเย็นมีค่าใกล้เคียงกับความหนาที่กำหนดไว้ (ความหนาเท่ากับ 16.6 ± 0.3 มิลลิเมตร) มาก

ที่สุดคือความดันเครื่องจักรที่ 1,200 PSI ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด (เท่ากับ 0.8%) ดังแสดงในตารางที่ 4.6 โดยความคลาดเคลื่อนคำนวณจากสมการที่ (4.1) จากผลการทดลองนี้ทำให้การออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ถัดไปจะเลือกความดันของเครื่องจักรที่สูงที่สุดที่ 1,200 PSI เท่านั้น เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการผลิตชิ้นงานของการทดลอง

$$\%Error = \frac{|x_m - x_t|}{x_t} \times 100\% \quad (4.1)$$

โดยที่ $\%Error$ คือร้อยละความคลาดเคลื่อนจากค่าที่วัดได้กับค่าที่กำหนดไว้

x_m คือค่าได้จากการวัด (Measure Value)

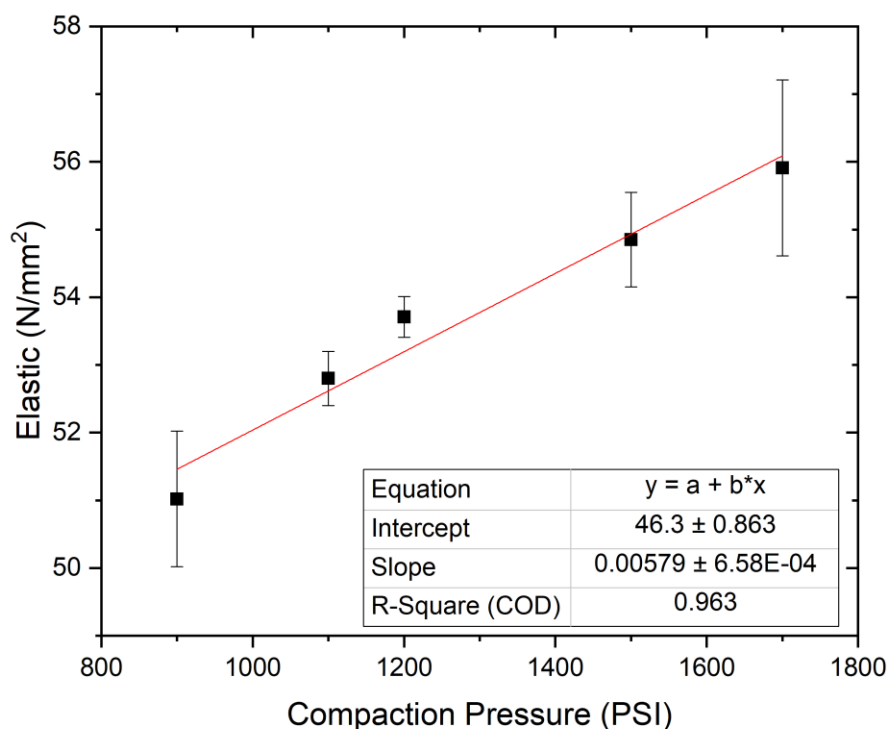
x_t คือค่าจริง (True Value) หรือค่าที่กำหนดไว้

ตารางที่ 4.6 ความคลาดเคลื่อนของความหนาเฉลี่ยของชิ้นงานกับความดันของเครื่องจักร

ความดันที่อัดขึ้นรูปของเครื่องจักร (PSI)	ความหนาเฉลี่ยของชิ้นงาน (มม.)	ความคลาดเคลื่อนกับความหนาที่กำหนด 16.6 มม.
900	17.20 ± 0.06	3.6%
1,100	16.92 ± 0.08	1.9%
1,200	16.74 ± 0.04	0.8%
1,500	16.44 ± 0.04	0.9%
1,700	16.27 ± 0.03	2.0%

4.4.1 ผลการทดสอบความยืดหยุ่นของชิ้นงานอัดขึ้นรูปเย็น

การวัดความยืดหยุ่นของชิ้นงานจะนำชิ้นงานในแต่ละหลุมมาทดสอบด้วยเครื่อง Universal test หลังจากนั้นจึงนำค่าความยืดหยุ่นของแต่ละหลุมมาเฉลี่ย และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยืดหยุ่น (Elastic, N/mm²) และความดันของเครื่องจักรที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 4.16 พบว่าค่าความยืดหยุ่นของชิ้นงานแปรผันตรงกับความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป โดยมีค่า R² เท่ากับ 0.963 ค่าความดันของเครื่องจักรที่ใช้ในการอัดที่มีค่าความแปรปรวนในแต่ละหลุมน้อยที่สุด (ค่าความแปรปรวนมาตรฐาน เท่ากับ 0.3) คือการผลิตด้วยความดันเครื่องเท่ากับ 1,200 PSI โดยมีค่าความยืดหยุ่นเท่ากับ 53.71 N/mm² และความดันที่มีความแปรปรวนมากที่สุด (ค่าความแปรปรวนมาตรฐาน เท่ากับ 1.3) คือ ความดันเครื่องจักรที่ 1,700 PSI และค่าความยืดหยุ่นเท่ากับ 55.91 N/mm²

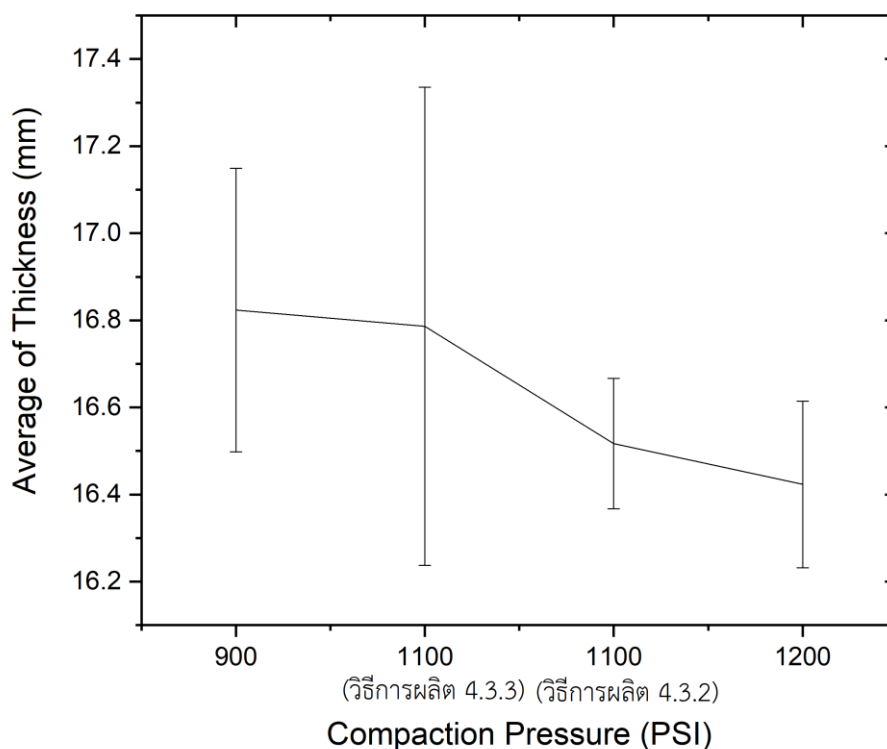


รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยืดหยุ่นและความดันของจักรที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป

4.4.2 ผลการวิเคราะห์การขยายตัวของชิ้นงานพิมพ์เย็นหลังการอัดขึ้นรูป

ในการวิเคราะห์การขยายตัวของชิ้นงานจะถูกอัดขึ้นรูปด้วยความดันของเครื่องจักรที่ 900, 1,100 และ 1,200 PSI โดยในการผลิตชิ้นงานที่ความดัน 1,100 PSI นั้นจะมีการอัดขึ้นรูปด้วยกัน 2 วิธีการ คือวิธีการผลิตชิ้นงานที่ได้กำหนดระยะการกด และเกลี่ยเคมีผสมในแม่พิมพ์ ตามวิธีการผลิตหัวข้อที่ 4.3.2 (วิธีการผลิต 4.3.2) และวิธีการผลิตชิ้นงานที่กำหนดระยะการกด แต่ไม่มีการเกลี่ยเคมีผสมในแม่พิมพ์ ตามวิธีการผลิตในหัวข้อที่ 4.3.3 (วิธีการผลิต 4.3.3) เพื่อเป็นการเปรียบเทียบผลของการอัดที่ไม่เท่ากันในชิ้นงานกับการอัดที่มีความสม่ำเสมอ ในความดันอื่น ๆ จะเป็นการผลิตด้วยวิธีการผลิตในหัวข้อ 4.3.2 รูปที่ 4.17 แสดงความหนาของชิ้นงานเฉลี่ยในแต่ละวิธีการผลิตที่ความดันของเครื่องจักรต่าง ๆ วิธีการผลิตชิ้นงานในหัวข้อ 4.3.3 พบว่าความหนาในแต่ละตำแหน่งของชิ้นงานที่ผลิตใน 1 พิมพ์มีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานที่มากที่สุด (ความหนาเฉลี่ย 16.79 ± 0.55 มิลลิเมตร) เมื่อเทียบกับวิธีการผลิตชิ้นงานแบบ 4.3.2 ที่มีความเบี่ยงเบนมาตรฐานของความหนาในแต่ละตำแหน่งของชิ้นงานน้อยกว่า (ความหนาเฉลี่ย 16.52 ± 0.15 มิลลิเมตร) โดยที่ความหนาเฉลี่ยมีค่าน้อยลงเมื่อความดันของเครื่องจักรมีค่าสูงขึ้น ทำนองเดียวกับผลการศึกษาในรูปที่ 4.9 แต่ความหนาเฉลี่ยของชิ้นงานมีค่าแตกต่างกันเนื่องมาจากเคมีผสมในการทดลองนี้ถูกผลิตในคนละ

ครั้งการผลิตกับการศึกษาในรูปที่ 4.15 ทำให้ความหนาเฉลี่ยของชั้นงานแตกต่างกัน ดังนั้นการผลิตที่ผลิตด้วยวิธีการ 4.3.2 ส่งผลให้ชั้นงานความหนาเฉลี่ยในแต่ละตำแหน่งของชั้นงานดีขึ้น



รูปที่ 4.17 ความหนาเฉลี่ยรวมของชั้นงานในแต่ละครั้งการผลิตที่ความดันต่าง ๆ

เนื่องจากคุณสมบัติความยืดหยุ่นของชั้นงานที่อัดขึ้นรูปแล้วจะส่งผลให้ขนาดของชั้นงานที่เคลื่อนที่ออกจากแม่พิมพ์เกิดการขยายออกทันที หรือที่เรียกว่าการเกิด spring back สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.2)

$$S (\%) = \frac{\lambda_f - \lambda_d}{\lambda_d} \times 100\% \quad (4.2)$$

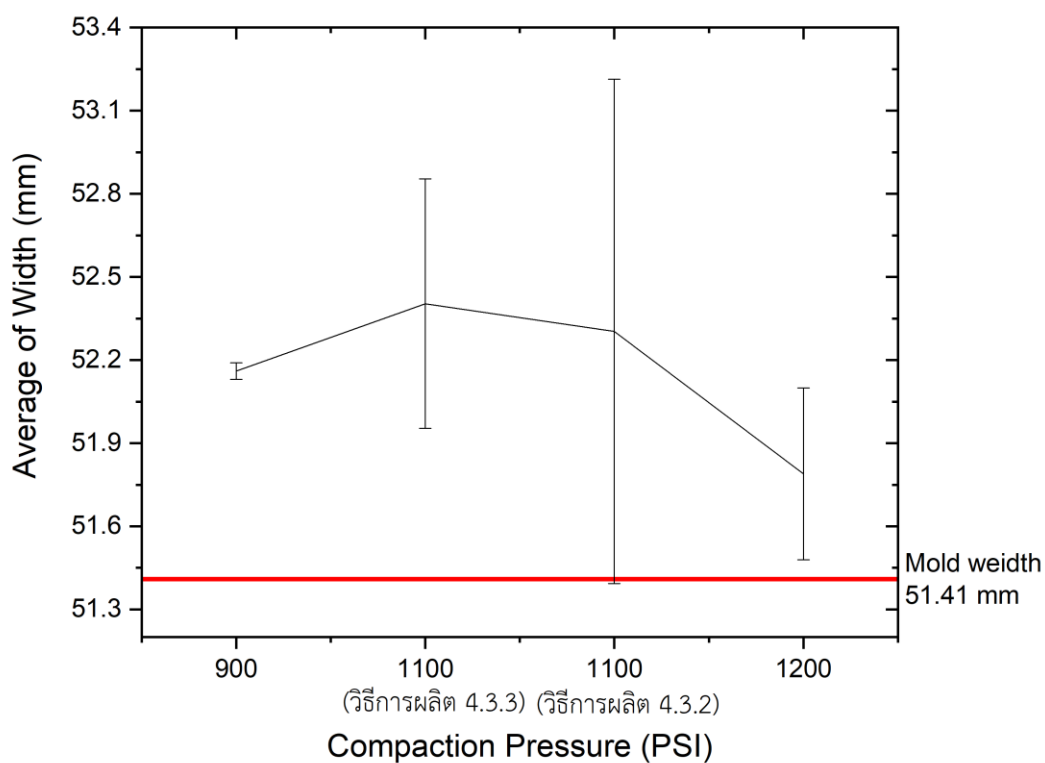
โดยที่ $S(\%)$ คือ ร้อยละของการขยายตัวออกของชั้นงานเมื่อเทียบกับขนาดของหลุมแม่พิมพ์

λ_f คือ ขนาดของชั้นงานอัดขึ้นรูปเย็น

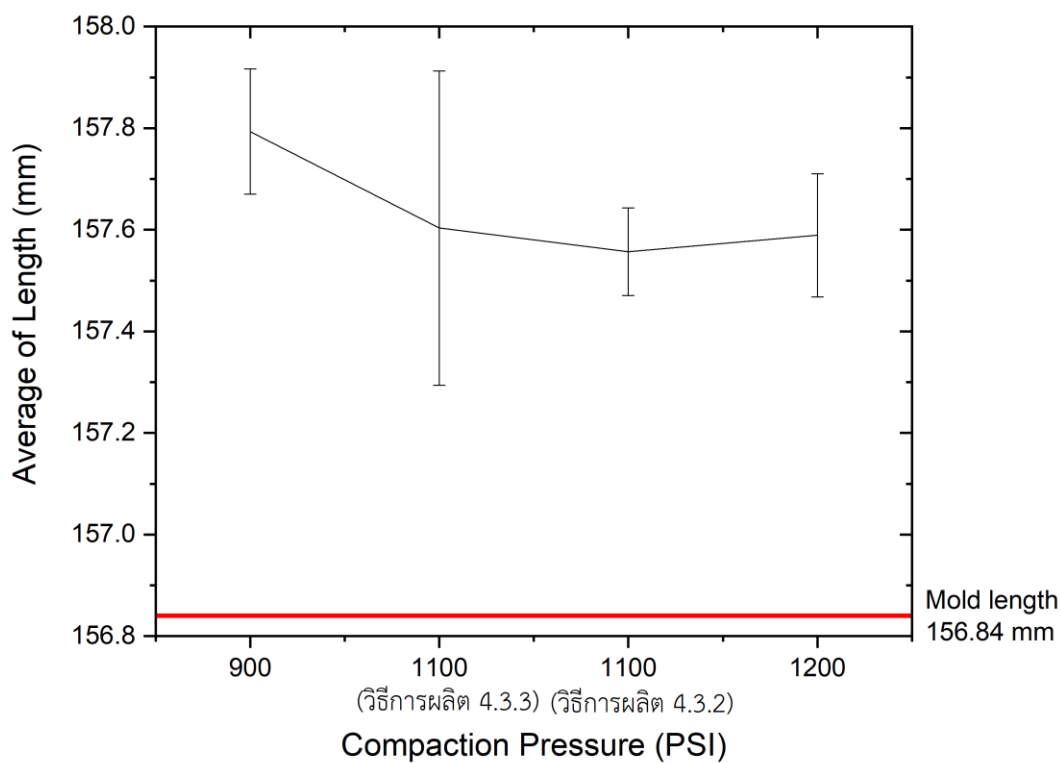
λ_d คือ ขนาดของหลุมแม่พิมพ์

ผลการศึกษาการเกิดการขยายตัวของชั้นงานเมื่อออกจากแม่พิมพ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.18 แสดงการขยายตัวของชั้นงานตามแนวความกว้าง และรูปที่ 4.19 แสดงการขยายตัวของชั้นงานตามความยาว โดยเส้นสีแดงคือความกว้าง และความยาวที่วัดจากขนาดของหลุมในแม่พิมพ์ จากรูปที่

4.18 พบว่าวิธีการผลิตแบบ 4.3.2 ที่มีการเคลือบเคมีผสมก่อนการอัดนั้นมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงที่สุดเมื่อขึ้นรูปชิ้นงานด้วยความดันเครื่องจักร 1,100 PSI แต่จะลดลงในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยความดัน 1,200 PSI และความเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุดเมื่อขึ้นรูปชิ้นงานด้วยความดันเครื่องจักร 900 PSI ในรูปที่ 4.19 พบว่าความยาวของชิ้นงานในวิธีการผลิต 4.3.3 มีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานมากที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีการผลิตชิ้นงาน 4.3.2



รูปที่ 4.18 การขยายขนาดตามแนวความกว้างของชิ้นงานเทียบกับความกว้างของหลุมแม่พิมพ์



รูปที่ 4.19 การขยายขนาดตามแนวความยาวของชิ้นงานเทียบกับความยาวของหลุมแม่พิมพ์

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าร้อยละของการขยายตัวของชิ้นงานตามแนวความกว้าง ความยาว และค่าความยืดหยุ่นของชิ้นงาน ซึ่งพบว่าวิธีการผลิตแบบ 4.3.3 ชิ้นงานมีการขยายตัวตามแนวความกว้างสูงที่สุด และชิ้นงานที่มีการขยายตัวตามแนวความกว้างน้อยที่สุดคือวิธีการผลิตชิ้นงานแบบ 4.3.2 ที่ความดันการขึ้นรูปของเครื่องจักร เท่ากับ 1,200 PSI โดยวิธีการผลิตทั้งสองนี้ที่ความดันการขึ้นรูป 1,100 PSI มีค่าร้อยละการขยายตัวตามแนวความยาวหลังจากออกแม่พิมพ์เท่ากัน และลดลงเมื่อความดันของเครื่องจักรที่ 1,200 PSI นอกจากนี้ผลการศึกษาคุนสมบัติความยืดหยุ่นของชิ้นงานในการทดลองนี้ให้ผลที่สอดคล้องกับการศึกษาที่ 4.4.1

ตารางที่ 4.7 ร้อยละของการขยายตัวของชิ้นงาน และค่าความยืดหยุ่นของชิ้นงาน

ความดันการอัดขึ้นรูป ของเครื่องจักร (PSI)	ร้อยละการขยายตัวตาม แนวความกว้าง (%)	ร้อยละการขยายตัว ตามแนวความยาว (%)	ค่าความยืดหยุ่น (N/mm ²)
วิธีการผลิต 4.3.3: 1,100	1.9	0.5	-
วิธีการผลิต 4.3.2: 900	1.5	0.6	50.56
1,100	1.7	0.5	52.58
1,200	0.7	0.4	53.70

จากการทดลองในรูปที่ 4.15 เมื่อนำชิ้นงานมาเก็บไว้ในอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ถึง 5 วัน เพื่อศึกษาการขยายตัวของชิ้นงานหลังอัดขึ้นรูปเย็น ผลของการขยายตัวแสดงในตารางที่ 4.8 ซึ่งพบว่าความดันของเครื่องจักรที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานเย็นส่งผลกระทบต่อค่าการขยายตัวของความหนาในชิ้นงานที่น้อยมาก โดยมีการขยายตัวจากเดิมเมื่อเก็บชิ้นงานอัดขึ้นรูปเย็นไว้ 1 วันเฉลี่ย 0.15 ± 0.02 มิลลิเมตร และเก็บไว้ 5 วันความหนาของชิ้นงานขยายเฉลี่ย 0.20 ± 0.01 มิลลิเมตร

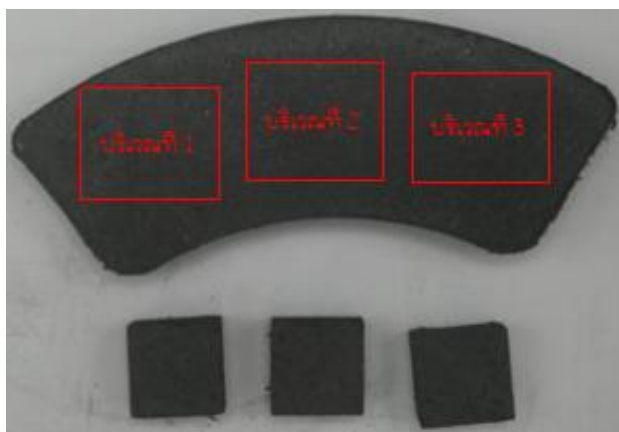
ตารางที่ 4.8 ความหนาที่ขยายตัวเมื่อเก็บชิ้นงานไว้เป็นเวลา 1 - 5 วัน

ความดันของ เครื่องจักร (PSI)	วัดความหนา ทันที (มม.)	เก็บไว้ 1 วัน ความหนา (มม.)	ผลต่าง ความหนา (มม.)	เก็บไว้ 5 วัน ความหนา (มม.)	ผลต่างความ หนา (มม.)
900	16.97 ± 0.10	-	-	17.20 ± 0.06	0.22
1,100	16.73 ± 0.08	16.89 ± 0.05	0.15	16.92 ± 0.08	0.19
1,200	16.53 ± 0.15	16.69 ± 0.16	0.17	16.75 ± 0.01	0.22
1,500	16.22 ± 0.12	16.35 ± 0.10	0.13	16.42 ± 0.10	0.20
1,700	16.04 ± 0.07	16.20 ± 0.04	0.15	16.24 ± 0.14	0.20

4.5 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่น และความยืดหยุ่นของชิ้นงานอัดขึ้นรูปร้อน

หลังจากผลิตชิ้นงานอัดขึ้นรูปเย็น กระบวนการถัดไปคือกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน ซึ่งจะ
เป็นกระบวนการที่ให้ความร้อน และความดันแก่ชิ้นงานอัดขึ้นรูปเย็นให้เกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ และให้
ชิ้นงานยึดติดกับเหล็กด้านหลัง ในการวิเคราะห์ชิ้นงานไม่ได้ถูกนำมาติดเหล็ก เนื่องจากการทดสอบใน
การศึกษาไม่จำเป็นที่จะต้องให้ชิ้นงานอัดขึ้นรูปติดกับเหล็ก ในการศึกษาเป็นการศึกษาต่อเนื่องจาก

ชิ้นงานที่ถูกผลิตในการศึกษาที่ 4.4.2 เมื่อนำชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนมาแล้วจะทำการแบ่งชิ้นงานให้มีขนาด 25×25 มิลลิเมตร ตามบริเวณต่าง ๆ ในชิ้นงาน ซึ่งจะได้จำนวนมาทั้งสิ้น 3 ตัวอย่างต่อ 1 ชิ้นงานพิมพ์ร้อน แสดงในรูปที่ 4.20 หลังจากนั้นนำชิ้นงานขนาด 25×25 มิลลิเมตร ผ่านการทดสอบค่าความยืดหยุ่นด้วยเครื่อง Ultrasonic measurement เมื่อทดสอบค่าความยืดหยุ่นแล้วจะนำชิ้นงานทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะต่อไป



รูปที่ 4.20 ตัวอย่างชิ้นงานขนาด 25×25 มิลลิเมตร ที่ถูกตัดจากชิ้นงานอัดขึ้นรูปร้อน

ในการผลิตชิ้นงานตามขั้นตอนที่ 4.3.3 ที่ความดันของเครื่องจักร 1,100 PSI พบว่าค่าบริเวณที่มีความถ่วงจำเพาะน้อยสุดคือบริเวณที่ 1 และสูงขึ้นในบริเวณที่ 2 และ 3 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4. ทำนองเดียวกับค่าความยืดหยุ่นบริเวณที่ 1 มีค่าความยืดหยุ่นต่ำที่สุด และบริเวณที่ 2 มีค่าความยืดหยุ่นสูงที่สุด ดังที่แสดงในตารางที่ 4.9 เนื่องจากเคมีผสมที่กองเป็นกรวยก่อนการอัด ทำให้ค่าความยืดหยุ่นสูง หรือมีความแข็งมากกว่าบริเวณที่ 1 และ 3

ตารางที่ 4.9 ความถ่วงจำเพาะ และค่าความยืดหยุ่นของชิ้นงานที่ผลิตด้วยวิธีการที่ 4.3.3

ชิ้นงานบริเวณที่	ค่าความถ่วงจำเพาะ	ค่าความยืดหยุ่น (GPa)
1	2.33	2.23
2	2.60	3.18
3	2.61	2.98

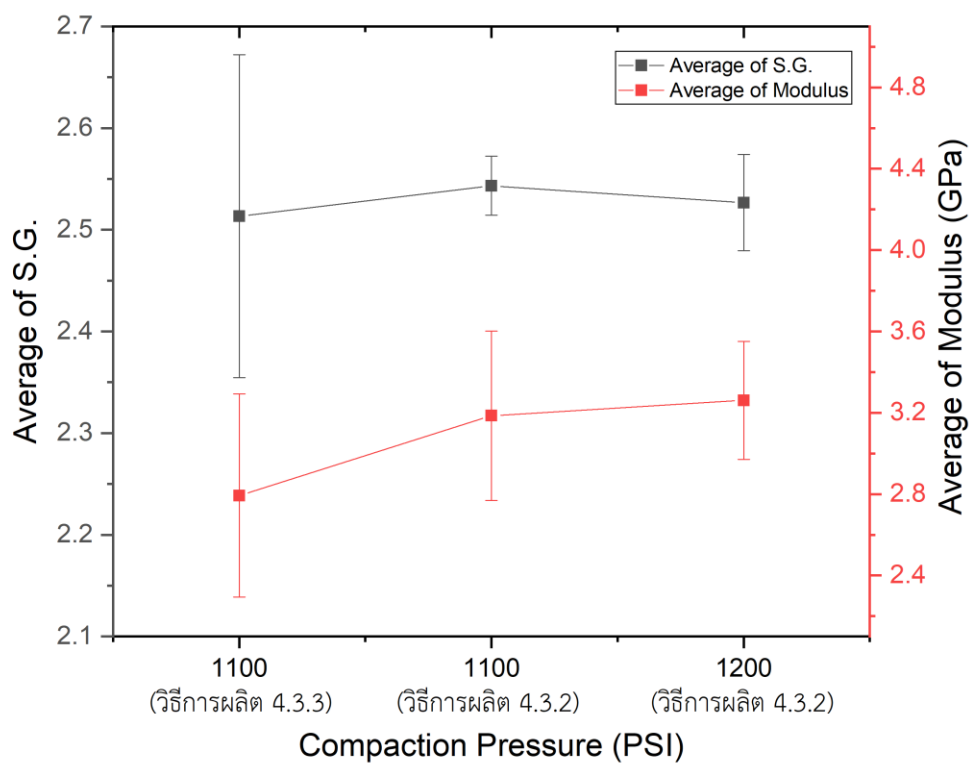
ชิ้นงานอัดขึ้นรูปเย็นที่ผลิตด้วยวิธีการที่ 4.3.2 ที่ความดันการอัดขึ้นรูปของเครื่องจักร 1,100 และ 1,200 PSI ดังแสดงในตารางที่ 4.10 พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะของชิ้นงานอัดขึ้นรูปร้อนมีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 3 บริเวณในชิ้นงานที่ใช้ความดันในการขึ้นรูป 1,100 PSI แต่ค่าความยืดหยุ่นในบริเวณที่ 2 มีค่าน้อยที่สุด อาจเนื่องมาจากภายในชิ้นงานอัดขึ้นรูปร้อนมีรูพรุนมากกว่าบริเวณอื่น ๆ หรืออาจเกิดมาความแปรปรวนของกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิการอัดกระจายไม่สม่ำเสมอ ในการอัด

ขึ้นรูปเยื่อที่ความดัน 1,200 PSI พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะ และค่าความยืดหยุ่นมีค่าใกล้เคียงกับชิ้นงานที่ได้รับความดันของเครื่องจักรที่ 1,100 PSI

ตารางที่ 4.10 ค่าความถ่วงจำเพาะ และค่าความยืดหยุ่นของชิ้นงานที่ผลิตด้วยวิธีการที่ 4.3.2

ความดันของเครื่องจักร (PSI)	ชิ้นงาน บริเวณที่	ค่าความ ถ่วงจำเพาะ	ค่าความยืดหยุ่น (GPa)
1,100	1	2.56	3.65
	2	2.56	2.85
	3	2.51	3.05
1,200	1	2.49	3.58
	2	2.51	3.02
	3	2.58	3.18

รูปที่ 4.21 แสดงผลการทดสอบของทั้งสองการทดสอบ พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการผลิตแบบ 4.3.3 มีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงที่สุดทั้งการทดสอบความถ่วงจำเพาะของชิ้นงาน และค่าความยืดหยุ่น (Modulus) ของชิ้นงานในแต่ละบริเวณ มีค่าความถ่วงจำเพาะเฉลี่ยเท่ากับ 2.51 ± 0.16 และค่าความยืดหยุ่นเฉลี่ยเท่ากับ 2.79 ± 0.50 GPa ซึ่งแสดงว่าสามบริเวณของชิ้นงานหนึ่งชิ้นมีความไม่สม่ำเสมอทั้งความหนาแน่น และความยืดหยุ่น สำหรับชิ้นงานที่ผลิตด้วยวิธีการ 4.3.2 พบว่าค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าลดลงทั้งค่าความถ่วงจำเพาะ และค่าความยืดหยุ่น โดยมีค่าความถ่วงจำเพาะเฉลี่ยเท่ากับ 2.54 ± 0.03 และค่าความยืดหยุ่นเฉลี่ยเท่ากับ 3.19 ± 0.42 GPa มากกว่าชิ้นงานที่ผ่านขั้นตอนการผลิตแบบ 4.3.3 และเมื่อเพิ่มความดันเครื่องจักรเป็น 1,200 PSI พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะมีค่าใกล้เคียงกับการอัดด้วยความดันเครื่องจักร 1,100 PSI มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.53 ± 0.05 แต่ค่าความยืดหยุ่นของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้นจากความอัดเครื่องจักร 1,100 PSI มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.26 ± 0.29 GPa



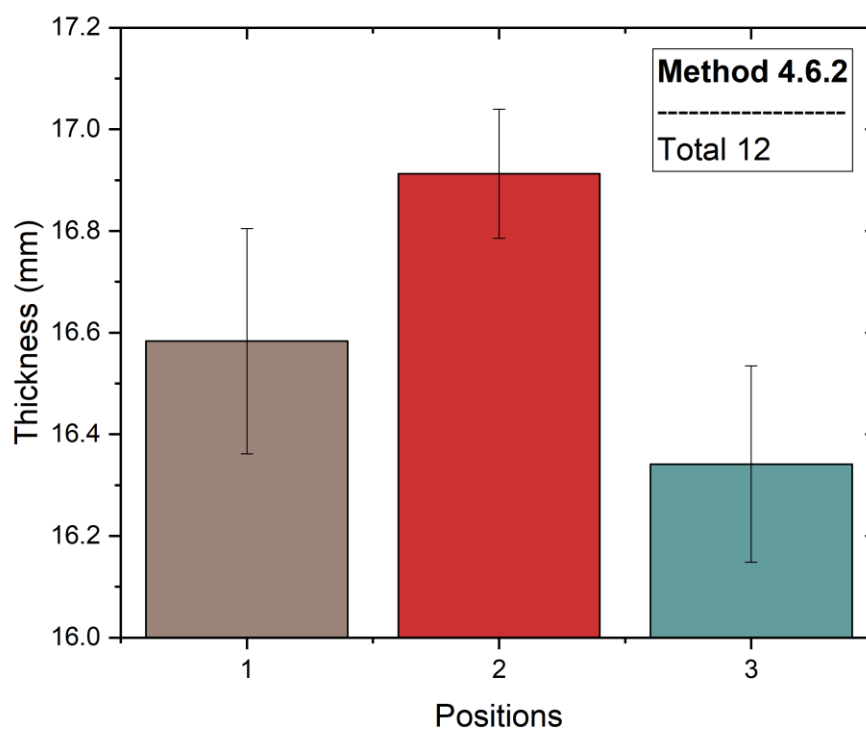
รูปที่ 4.21 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการผลิตต่อค่าทดสอบความถ่วงจำเพาะ และความยืดหยุ่น (Modulus)

4.6 ผลการวิเคราะห์การนำไปปฏิบัติจริงในการผลิต

หลังจากทำการทดลองหาเงื่อนไขที่เหมาะสมแก่การปรับปรุงกระบวนการผลิตในการอัดขึ้นรูปแบบเย็นแล้วในการทดลองที่ 4.5 พบว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดคือ การเพิ่มจำนวนครั้งการอัดซึ่งเป็นการปรับยอดเคมีผสมในแม่พิมพ์ให้มีความสูงเท่า ๆ กันจากความสัมพันธ์ของความหนาแน่นรวม (bulk density) ที่ได้จากการวัดในกระบวนการผสมก่อนหน้า จะได้ว่าระยะความลึกของพื้นที่ในการปรับยอดเคมีผสมอยู่ที่ประมาณ 25-30 มิลลิเมตร หลังจากนั้นทำการอัดแน่นด้วยแรงดันที่ 136 kg/cm² หรือที่ความดันของเครื่องเท่ากับ 2,400 PSI ในเครื่องจักรที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 7 นิ้ว เรียกวิธีการผลิตชิ้นงานนี้ว่า การผลิตแบบ 4.6.1 โดยจำนวนชิ้นงานที่ทำการผลิตในเงื่อนไขนี้มีจำนวนทั้งสิ้น 82 ชิ้น ซึ่งจะนำมาเปรียบเทียบผลกับวิธีการผลิตแบบ 4.6.2 โดยมีความแตกต่างจากการผลิตแบบ 4.6.1 คือไม่มีการเกลี่ยเคมีก่อนการปรับยอดเคมีผสม จำนวนการผลิต 12 ชิ้น

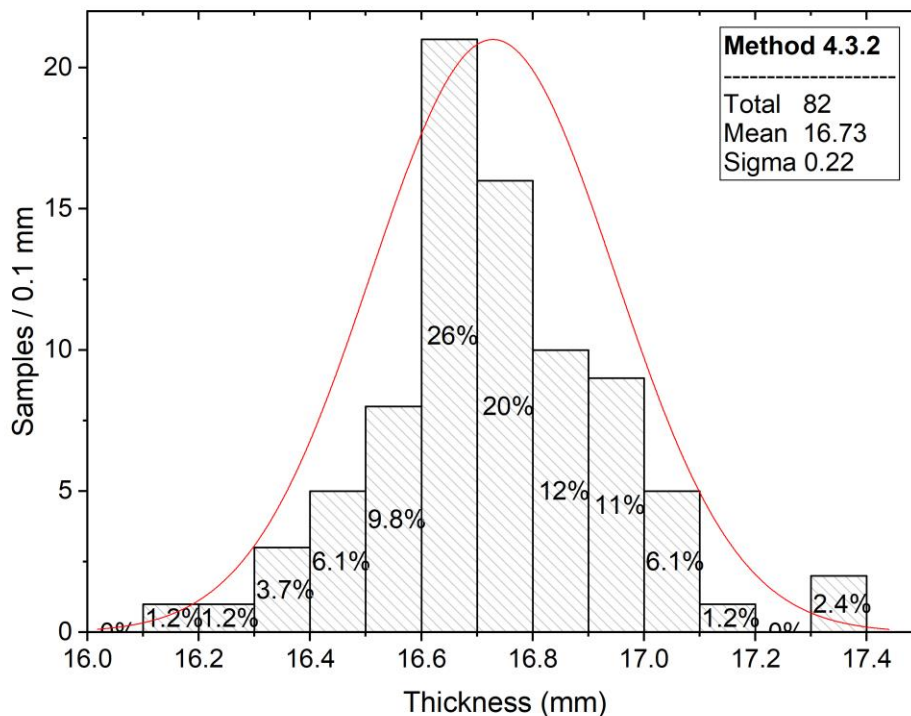
จากผลการผลิตในแต่ละวิธีการผลิตพบว่า วิธีการผลิตแบบ 4.6.2 ความหนาของชิ้นงานอัดขึ้นรูปเย็นบริเวณตรงกลางของชิ้นงานอัด (ตำแหน่งที่ 2) มีค่าสูงที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.22 แสดงความหนาของชิ้นงานบริเวณตรงกลางมีค่าสูงที่สุดมากกว่าตำแหน่งที่ 1 และ 3 เท่ากับ 0.33 มิลลิเมตร

และ 0.57 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่าที่ตั้งคุณสมบัติของชิ้นงานอัดขึ้นรูปเย็นไว้ในหัวข้อที่ 3.3 ที่ความหนาในชิ้นงานอัดขึ้นรูปเย็น 1 ชั้น มีความหนาไม่เกิน ± 0.3 มิลลิเมตร ดังนั้นกระบวนการอัดขึ้นรูปเย็นจำเป็นต้องมีการเกลี่ยเคมีผสมก่อนการอัดด้วยแรงดัน



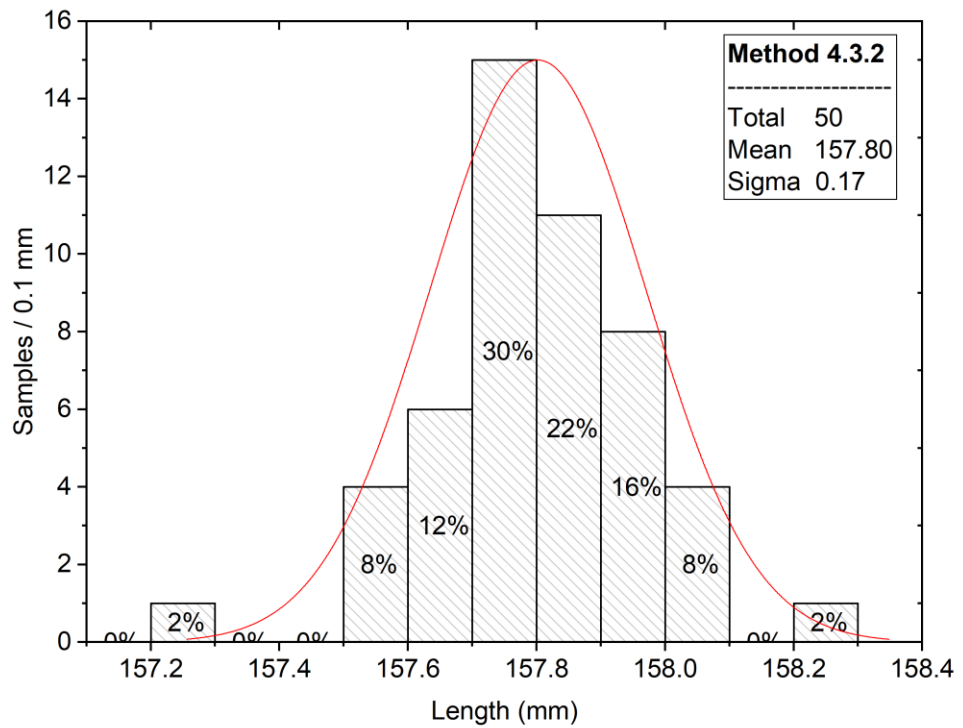
รูปที่ 4.22 ความหนาในแต่ละตำแหน่งของชิ้นงานอัดขึ้นรูปเย็นด้วยวิธีการผลิตแบบ 4.6.2

รูปที่ 4.23 แสดงการกระจายตัว (Histogram) ของความหนาชิ้นงานอัดขึ้นรูปเย็นด้วยวิธีการผลิต 4.6.1 พบว่าความหนาของชิ้นงานอัดขึ้นรูปเย็นมีค่าส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 16.6 – 16.8 มิลลิเมตร อยู่ร้อยละ 46% หรือในทางสถิติ (เส้นสีแดง) พบว่าความหนาของตัวอย่างที่เลือกเก็บมาจำนวน 82 ชิ้น จะพบช่วงความหนาของชิ้นงานที่ 16.68 – 16.77 มิลลิเมตรได้ในระดับความเชื่อมั่น 95% (confident level) ความหนาของชิ้นงานในช่วงความเชื่อมั่นนี้มีความคลาดเคลื่อนจากที่กำหนดความหนาตอนต้น (16.6 มิลลิเมตร) ไว้ 0.5 – 1%

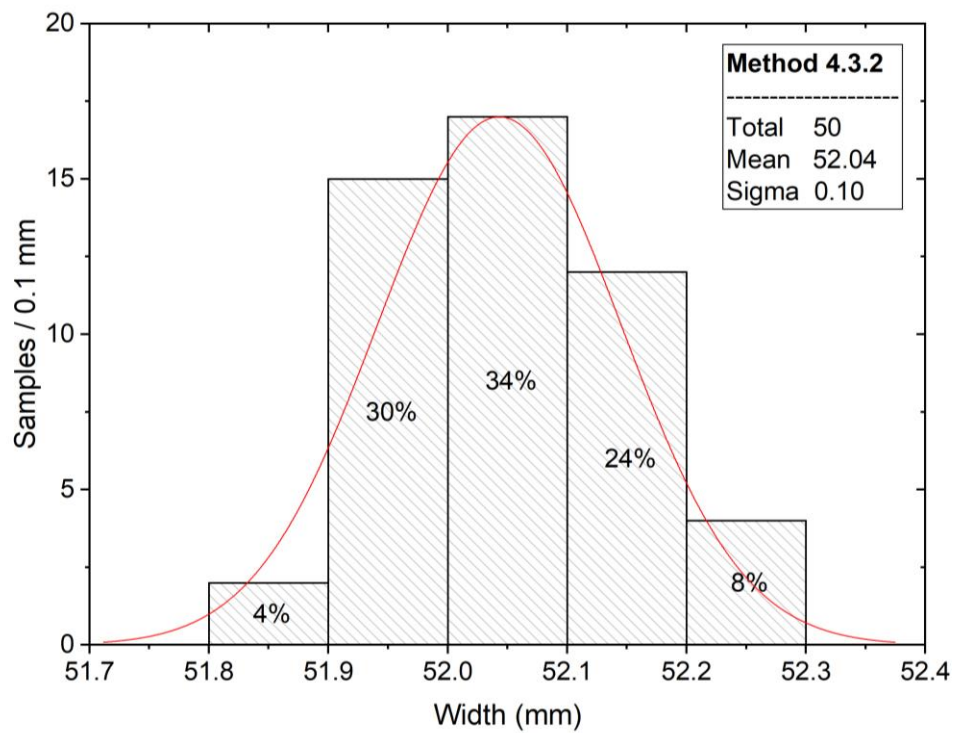


รูปที่ 4.23 แผนภาพฮิสโทแกรมของความหนาชิ้นงานอัดขึ้นรูปเย็น

ทำนองเดียวกันกับการวัดความยาว และความกว้างของชิ้นงานอัดขึ้นรูปเย็นด้วยวิธีการผลิตแบบ 4.6.1 รูปที่ 4.24 แสดงการกระจายตัวความยาวของชิ้นงานตัวอย่างทั้งสิ้น 50 ตัวอย่าง พบว่าความยาวของชิ้นงานอัดขึ้นรูปเย็นร้อยละ 52% อยู่ในช่วงความยาว 157.7 – 157.8 มิลลิเมตร และในทางสถิติ (เส้นสีแดง) พบว่าช่วงความยาวของชิ้นงานที่ระดับความเชื่อมั่น 95% คือ 157.75-157.84 มิลลิเมตร ในช่วงความหนาที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ผลต่างของความยาวชิ้นงานพิมพ์เย็นกับความยาวของแม่พิมพ์ร้อน (158.23 ± 0.05 มิลลิเมตร) ต่างกันน้อยสุดที่ 0.34 มิลลิเมตร และต่างกันมากที่สุดที่ 0.53 มิลลิเมตร ในรูปที่ 4.25 แสดงความกว้างของชิ้นงานอัดขึ้นรูปเย็น พบว่าชิ้นงานมีขนาดความกว้างอยู่ในช่วง 51.9 - 52.1 มิลลิเมตร ร้อยละ 64 และที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ความกว้างของชิ้นงานอยู่ในช่วง 52.01 - 52.07 มิลลิเมตร มีผลต่างกับความกว้างของแม่พิมพ์ร้อน (53.21 ± 0.04 มิลลิเมตร) น้อยสุดเท่ากับ 1.10 มิลลิเมตร และมากที่สุดเท่ากับ 1.24 มิลลิเมตร

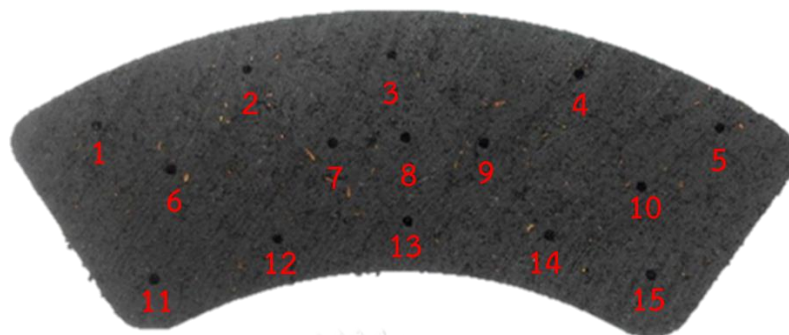


รูปที่ 4.24 แผนภาพฮิสโทแกรมของความยาวชิ้นงานอัดขึ้นรูปเย็น



รูปที่ 4.25 แผนภาพฮิสโทแกรมของความหนาชิ้นงานอัดขึ้นรูปเย็น

เมื่อนำชิ้นงานอัดขึ้นรูปเย็นเข้าสู่กระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน และทำการทดสอบคุณสมบัติความยืดหยุ่นของชิ้นงานด้วยเครื่องวัด iTEK ในแต่ละตำแหน่ง 15 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 ตำแหน่งของการวัดค่าความยืดหยุ่นบนชิ้นงาน







ในตารางที่ 4.11 แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติความยืดหยุ่นของชิ้นงาน พบว่าชิ้นงานที่ผลิตด้วยวิธีการปรับยอด (แบบ 4.6.1) มีค่าความแปรปรวนของค่ามอดูลัสน้อยกว่าชิ้นงานที่ผลิตด้วยวิธีการผลิตแบบไม่มีการปรับยอด (แบบ 4.6.2) ในชิ้นงานที่ผลิตแบบปรับยอดชิ้นงาน (4.6.1) มีค่าความยืดหยุ่นสูงบริเวณด้านข้างของชิ้นงาน (สีเทาเข้ม) และการผลิตชิ้นงานแบบไม่ปรับยอดชิ้นงาน (4.6.2) มีค่าความยืดหยุ่นต่ำในบริเวณตรงกลางของชิ้นงาน (สีเทาอ่อน) ดังแสดงในตารางที่ 4.12 ดังนั้นการผลิตชิ้นงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปเย็นแบบปรับยอดส่งผลให้ความยืดหยุ่นของชิ้นงานอัดขึ้นรูปร้อนมีค่าที่ใกล้เคียงกัน หรือสม่ำเสมอมากขึ้น

ตารางที่ 4.11 ค่าความยืดหยุ่นของชิ้นงานระหว่างวิธีการผลิตแบบปรับยอดและไม่ปรับยอด

วิธีการผลิต	ชิ้น ที่	ค่าเฉลี่ยความยืดหยุ่น (GPa)	Standard Deviation (GPa)	%Standard Deviation
แบบปรับยอด (4.6.1)	1	3.29	0.07	5.04%
	2	3.28	0.06	4.21%
	3	3.29	0.05	4.06%
แบบไม่มีการปรับยอด (4.6.2)	1	3.05	0.10	9.08%
	2	3.00	0.08	6.89%
	3	2.97	0.10	9.11%

ตารางที่ 4.12 ค่าความยืดหยุ่นของชิ้นงานพิมพ์ร้อนในแต่ละบริเวณด้วยวิธีการผลิตแบบปรับยอด และไม่ปรับยอด

การผลิตแบบปรับยอด

 <p>3.56 GPa 3.24 GPa 3.19 GPa</p>	 <p>3.22 GPa 3.27 GPa 3.36 GPa</p>	 <p>3.49 GPa 3.26 GPa 3.18 GPa</p>
<p>การผลิตแบบไม่ปรับยอด</p>		
 <p>3.32 GPa 2.92 GPa</p>	 <p>3.23 GPa 2.87 GPa 3.14 GPa</p>	 <p>3.22 GPa 2.83 GPa 3.14 GPa</p>

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความต้องการของลูกค้าที่ใช้ผลิตภัณฑ์ผ้าเบรกในด้านของเสียงที่เกิดขึ้นจากการเบรก และปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการขึ้นรูปเย็นของผ้าเบรกรถยนต์ในโรงงานผลิตของบริษัทตัวอย่าง โดยทำการศึกษาในเรื่องการผลิตชิ้นงานของโมเดล X1725 โดยใช้กระบวนการพัฒนาการวิจัย เพื่อขับเคลื่อนองค์กร (RDI) ซึ่งมีผลการดำเนินงานวิจัยดังนี้

5.1.1 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อปัญหาชิ้นงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปเย็น

คือวิธีการเคลือบเคมีผสมในหลุมแม่พิมพ์ก่อนการอัดขึ้นรูป ซึ่งสามารถสรุปแนวทางการปรับปรุงดังนี้

- 1) ทำการคำนวณระยะกดตัดโดยอดเคมีผสมของพื้นที่ จากความสัมพันธ์ความหนาแน่นรวมของเคมีผสมกับความหนา และความหนาแน่นสุดท้ายของชิ้นงาน
- 2) กำหนดระยะกดครั้งแรกของเครื่องจักรตามที่คำนวณไว้ หลังจากนั้นคำนวณความดันที่ใช้ในเครื่องจักร เมื่อต้องการอัดขึ้นรูปชิ้นงานด้วยความดันเท่ากับ 136 kg/cm^2 ต่อชิ้นงาน
- 3) ชั่งน้ำหนักเคมีผสมให้อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้แล้วเทลงในหลุมแม่พิมพ์ หลังจากนั้นทำการเคลือบให้เคมีกระจายสม่ำเสมอในแม่พิมพ์ และเริ่มการอัดขึ้นงาน

ผลการเปรียบเทียบระหว่างการผลิตปัจจุบัน และเงื่อนไขที่ใช้ในการปรับปรุง ดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบระหว่างการผลิตปัจจุบัน และเงื่อนไขที่ใช้ในการปรับปรุง

	การผลิตปัจจุบัน	ในเงื่อนไขการปรับปรุง
จำนวนครั้งการกด	1 ครั้ง	2 ครั้ง
วิธีการเคลือบ	ผู้ปฏิบัติงานอย่างเดียว	เพิ่มจำนวนการอัด เพื่อตัดยอดของเคมีผสม
ความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป	ความดันเครื่องจักร 1,100 PSI	ความดันเครื่องจักร 1,200 PSI
ความหนาของชิ้นงานแต่ละชิ้น	เฉลี่ย 17.51 ± 0.51 มิลลิเมตร	เฉลี่ย 17.38 ± 0.12 มิลลิเมตร

	การผลิตปัจจุบัน	ในเงื่อนไขการปรับปรุง
ความหนาของชิ้นงานในแต่ละ หลุม	หลุมที่ 2 & 3 มากกว่าหลุมที่ 1 & 4 เท่ากับ 0.3 มิลลิเมตร	หลุมที่ 2 & 3 มากกว่าหลุมที่ 1 & 4 ประมาณ 0.2 มิลลิเมตร

5.1.2 อิทธิพลขององค์ประกอบเคมีผสมกับสมบัติการไหล

สูตรเคมีที่ใช้ในการผลิตในอุตสาหกรรมเบรกที่ประกอบด้วยส่วนประกอบมากถึง 14 ชนิด และแบ่งตามหน้าที่ของแต่ละส่วนประกอบได้เป็น 5 ประเภท คือ 1) สารประกอบที่มีหน้าที่เป็นเส้นใยเสริมสร้างความแข็งแรง 2) สารประกอบที่มีหน้าที่ยึดเหนี่ยวให้เป็นเนื้อเดียวกัน 3) สารเติมเต็มที่มีหน้าที่เฉพาะในการเพิ่มประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ 4) สารประกอบที่มีหน้าที่เพิ่มแรงเสียดทานให้กับผลิตภัณฑ์ และ 5) สารประกอบที่มีหน้าที่เป็นตัวหล่อลื่น

ในการทดสอบคุณสมบัติการไหลได้ของเคมีพบว่า การทดลองมูกอง และการทดลองความสามารถในการไหลได้ แสดงให้เห็นว่าเคมีผสมที่ใช้ในการผลิตผ้าเบรกมีการไหลได้น้อย ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อปฏิบัติงานของกระบวนการผลิต และสูตรของเคมี โดยเฉพาะเส้นใย นอกจากนี้สูตรการผลิตที่ผสมด้วยสารหลายชนิดในแต่ละสูตรยังมีปัจจัยด้านขนาดของอนุภาคที่ไม่เท่ากันในแต่ละชนิดที่ผสมอยู่ภายใน ซึ่งจะมีปัญหาของการเกิดการแยกผสม (segregation) ขึ้นได้ระหว่างการปฏิบัติงาน

5.1.3 อิทธิพลของความดันกับสมบัติของชิ้นงานอัดรูปเย็น

เมื่อเพิ่มความดันของเครื่องจักรในการอัดขึ้นรูปชิ้นงานความหนาของชิ้นงานอัดขึ้นรูปเย็นลดลงแบบเชิงเส้นกับความดันที่เพิ่มขึ้น

ทำนองเดียวกับคุณสมบัติยืดหยุ่นของชิ้นงานอัดรูปเย็น ซึ่งมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปชิ้นงาน เมื่อความดันมากขึ้น ค่าความยืดหยุ่นสูงขึ้นด้วย

สุดท้ายการขยายตัวของชิ้นงานพบว่าที่ความดันในการขึ้นรูปชิ้นงานต่ำ การขยายตัวของชิ้นงานมีแนวโน้มมากขึ้น เมื่อชิ้นงานเกิดการคืนรูปหลังจากแม่พิมพ์

5.1.4 อิทธิพลความดันกับความหนาแน่น และความยืดหยุ่นของชิ้นงานหลังอัดขึ้นรูปร้อน

อิทธิพลความดันในการขึ้นรูปชิ้นงานเย็นไม่ส่งผลกระทบต่อความหนาแน่น และความยืดหยุ่นของชิ้นงานอัดขึ้นรูปร้อน แต่วิธีการเกลี่ยในกระบวนการอัดรูปเย็นส่งผลกระทบต่อความหนาแน่น และความยืดหยุ่นของการอัดขึ้นรูปร้อน

5.2 ข้อเสนอแนะ

การทดลองหมุกองของเคมีผสมในการวิเคราะห์คุณสมบัติการไหลของเคมีผสมอาจยังเป็นการทดลองที่ไม่เหมาะสมกับส่วนผสมที่ประกอบด้วยเส้นใย เนื่องจากเส้นใยที่ใช้ในการผลิตผ้าเบรกเป็นเส้นใยที่ยืดเหนียวให้ส่วนประกอบต่าง ๆ ยึดเกาะติดไปด้วยกัน ดังนั้นการทดลองจะมีความคลาดเคลื่อนมากในการสุ่มตัวอย่าง

การควบคุมและการจัดการปัจจัยต่าง ๆ มีความสำคัญมากต่อกระบวนการผลิต เช่น การควบคุมเครื่องจักรการผลิตที่ต้องมีสภาพที่พร้อม และมีเงื่อนไขการผลิตที่เหมือนกันทุกครั้งที่การผลิต หรือแม้กระทั่งทักษะของผู้ปฏิบัติงานที่ต้องมีความชำนาญในการติดตั้งเครื่องจักร และทักษะแก้ปัญหา

การวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นในการผลิตนี้ขึ้นอยู่กับช่วงเวลาที่ได้ทำการศึกษา และเป้าหมายของบริษัทเพื่อการพัฒนากระบวนการผลิต สามารถเปลี่ยนแปลงได้เมื่อเวลาหรือเป้าหมายเปลี่ยนไป

การผลิตชิ้นงานเพื่อการทดสอบต้องมีการคำนึงถึงผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นได้ต่อประสิทธิภาพการผลิตของกระบวนการผลิต เช่น การลดลงของกำลังการผลิต เป็นต้น จึงต้องมีการวางแผนการทดสอบที่รัดกุม และมีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งอาจไม่สามารถทดสอบครบทุกเงื่อนไข

บรรณานุกรม

- [1] สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, รายงานภาวะเศรษฐกิจอุตสาหกรรมไตรมาสที่ 3/2561 และแนวโน้มไตรมาสที่ 4/2561, กระทรวงอุตสาหกรรม, 2561.
- [2] ว. ยงพิศาลภพ, แนวโน้มธุรกิจ/อุตสาหกรรม ปี 2561-63 อุตสาหกรรมรถยนต์, วิจัยกรุงศรี (2561).
- [3] ว. ยงพิศาลภพ, แนวโน้มธุรกิจ/อุตสาหกรรม ปี 2561-63 อุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์, วิจัยกรุงศรี (2561).
- [4] สำนักยุทธศาสตร์และการวางแผนเศรษฐกิจมหภาค, NESDB ECONOMIC REPORT ภาวะเศรษฐกิจไทยไตรมาสที่สาม ปี 2561 และแนวโน้มปี 2561-2562, สำนักยุทธศาสตร์และการวางแผนเศรษฐกิจมหภาค, 2561.
- [5] THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION, Regulation (EU) No 540/2014 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 16 April 2014 on the sound level of motor vehicles and of replacement silencing systems, and amending Directive 2007/46/EC and repealing Directive 70/157/EEC, Official Journal of the European Union (2014) 162.
- [6] J. Youngs, Vehicle Dependability Study: Top 10 Problems in 3-Year-Old Vehicles, 2014. <http://www.jdpower.com/cars/articles/jd-power-studies/vehicle-dependability-study-top-10-problems-3-year-old-vehicles>. (Accessed Jul 4, 2018).
- [7] Asia Compact Industry co. ltd., ความเป็นมาของ คอมแพ็คเบรก, 2018. <https://www.compact-brake.com/about-us-detail/%E0%B8%9B%E0%B8%A3%E0%B8%B0%E0%B8%A7%E0%B8%B1%E0%B8%95%E0%B8%B4%E0%B8%84%E0%B8%A7%E0%B8%B2%E0%B8%A1%E0%B9%80%E0%B8%9B%E0%B9%87%E0%B8%99%E0%B8%A1%E0%B8%B2>. (Accessed Feb 13, 2019).
- [8] Y. Nishizawa, S. Wakamatsu, H. Yanagida, and et. al, Study of Dynamic Pad Stiffness Influencing Brake Squeal, SAE International (2007).
- [9] T. Automotive, What you need to know about your Automotive Brake System, 2019. <https://toytechs.com/what-you-need-to-know-about-your-automotive-brake-system/s>. (Accessed Feb 20, 2019).
- [10] D. Chan, G. W Stachowiak, Review of automotive brake friction materials, Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part D-journal of Automobile Engineering - PROC INST MECH ENG D-J AUTO 218 (2004) 953-966.

- [11] Auto Anything, Drums vs. Disc Brakes - Learn the Differences Between These Two Common Braking Systems. (Accessed Feb 20, 2019).
- [12] Dupont's Service Center, Brake Repair & Service In Dover, 2019. (Accessed Feb 20, 2019).
- [13] N.M. Kinkaid, O.M. O'Reilly, P. Papadopoulos, Review Automotive disc brake squeal, *Journal of Sound and Vibration* 267 (2003).
- [14] S. Khan, A. Rehman, Dynamic Investigation of Brake Squeal Problem in the Presence of Kinematic Nonlinearities, Mechanical Engineering Department, Istanbul Technical University, Turkey, 2014.
- [15] C.L. SAW, Squeal Suppression Approaches of a Disc Brake Assembly, Mechanical Engineering Department, University Technology Malaysia, Malaysia, 2009.
- [16] N. M. Ghazaly, M. El-Sharkawy, and I. Ahmed, A Review of Automotive Brake Squeal Mechanisms, *Journal of Mechanical Design and Vibration* 1 (2013).
- [17] P. Kelly, *Mechanics Lecture Notes: An introduction to Solid Mechanics*, 2015.
<http://homepages.engineering.auckland.ac.nz/~pkel015/SolidMechanicsBooks/index.html>
 (Accessed Feb 6, 2019).
- [18] J. Brecht, a.A. Elvenkemper, Elastic Properties of Friction Material, SAE International 01-3333 (2003).
- [19] Mechanical Properties of Materials.
<http://www.atom.rmutphysics.com/charud/metal/1/Mechanical%20Properties.htm>
 (Accessed Feb 7, 2019).
- [20] R. C. Hibbeler, *Mechanicals of Materials*, 8 ed., Prentice Hall: Pearson 2011.
- [21] F. Chen, C. A. Tan, a.R.L. Quaglia, 12.2 Ultrasonic Methods and Assumptions, Disc Brake Squeal Mechanism, Analysis, Evaluation, and Reduction/Prevention, SAE International 2006.
- [22] ส. วรรณฤมล, การลดจำนวนผลิตภัณฑ์ที่บกพร่อง โดยใช้เทคนิค ซิกส์ ซิกม่า, สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2550.
- [23] ธ. เกียรติบรรลือ, FMEA การวิเคราะห์ความล้มเหลวในการผลิต, *Industrial Technology Review* 73 (2543).

- [24] ว. ทองไพรวรรณ, การประยุกต์ใช้เทคนิค FMEA ในการปรับปรุงกระบวนการออกแบบ และพัฒนาแม่พิมพ์ขึ้นรูป แก้วที่ใช้บนโต๊ะอาหาร, สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2554.
- [25] ด. ทวีแสงสกุลไทย, การควบคุมคุณภาพสำหรับนักบริหารและกรณีศึกษา, บริษัทเอ็มแอนด์อี จำกัด กรุงเทพฯ 2547.
- [26] T. Kokkinou, E. Zervas, Comparative analysis of noise emissions of new European passenger car, Energy, Environment, Ecosystems, Development and Landscape Architecture.
- [27] M. Sriwiboon, N. Tiempan, K. Kaewlob, Influence of Formulation and Process Modifications on Brake Friction, Wear and Squeal: Low-Copper NAOs and Importance of Disc Wear, SAE Technical Paper (2014).
- [28] A. Belhocine, N.M. Ghazaly, Effects of Young's Modulus on Disc Brake Squal using Finite Element Analysis, International Journal of Acoustics and Vibration 21 (2016).
- [29] Z.B.M. Ripin, Analysis of Disc Brake Squeal Using the Finite Element Method, Department of Mechanical Engineering University of Leeds, 1995.
- [30] D. N. Ramasami, G. Rejdych, and et. al, Stiffness distributions of brake pad friction materials using static and dynamic measurement techniques, Automobile Engineering 229(6) (2015) 735-746.
- [31] K. Schiffner, M. Heftrich, and J.Brecht, Modeling of Compaction Processes of Friction Material Mixes, SAE International (2002).
- [32] H. AB, Production of Sintered Components Hoganas Handbook for Sintered Components, 2013.
- [33] I.-H. Moon, K.-H. Kim, Relationship Between Compacting Pressure, Green Density and Green Strength of Copper Powder Compacts, Powder Metallurgy 27:2 (1984) 80-84.
- [34] D. Geldart, E.C. Abdullah, A. Hassanpour, L.C. Nwoke, I. Wouters, Characterization of powder flowability using measurement of angle of repose, China Particuology 4(3-4) (2006) 104-107.
- [35] H.M. Beakawi Al-Hashemi, O.S. Baghabra Al-Amoudi, A review on the angle of repose of granular materials, Powder Technology 330 (2018) 397-417.
- [36] The United States Pharmacopeial Convention, USP 32/NF 27, United Book Press, Maryland, 2009.

[37] British Pharmacopoeia Commission 2009 volume IV, the Stationery Office, London, 2009.

[38] Japanese Industrial Standard, Test Procedure of Specific Gravity for Brake Linings and Pads of Automobiles, JIS D 4417, Japanese Standards Association, 1986.

[39] M. Sriwiboon , N. Tiempan , and K. Kaewlob, Disc Pad Physical Properties vs. Porosity: the Question of Compressibility as an Intrinsic Physical Property, SAE Int. J. Mater. Manf. 11(1) (2017).





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาคผนวก ก
ข้อมูลที่ใช้ประกอบในการทำวิทยานิพนธ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รายงานผลการทดลองคุณสมบัติการไหลของเคมีผสม

1. วัตถุประสงค์

- 1.1 ศึกษาคุณสมบัติการไหลได้ของเคมีผสมด้วยการทดลองแบบมุมกอง (Angle of Repose) และการอัดตัวได้ (Compressibility)
- 1.2 จำแนกคุณสมบัติการไหลของเคมี เพื่อเป็นแนวทางในการจัดการผงเคมีผสม

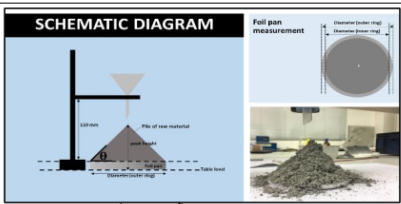
2. วิธีการทดลอง

การทดลอง 1: Angle of Repose

- 1.1 ติดตั้งอุปกรณ์ตามรูปที่ 1
- 1.2 ชั่งน้ำหนักเคมี และเทเคมีลงอย่างช้า ๆ ใช้วิธีเคาะให้เคมีไหลลงมา
- 1.3 วัดยอดความสูงของเคมีที่สูงที่สุดด้วยปลายวัดความลึกของเวอเนียร์
- 1.4 คำนวณมุมกอง (θ) $\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\text{ความสูงของกอง}}{\text{รัศมีของฐานรอง}} \right)$

การทดลอง 2: Compressibility

- 2.1 ตวงเคมีผสมมีความสูงประมาณ 40-45 ml ซึ่งน้ำหนัก และหาค่า Bulk density
- 2.2 เข้าเครื่องเคาะรูปที่ 2 ด้วยจำนวนครั้ง 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 70 80 90 100 150 200 250 300 350 400 500 และ 1000 ครั้งตามลำดับ
- 2.3 วัดปริมาตรที่ยุบตัวลงหลังการเคาะ คำนวณค่า Hausner's ration และ Compressibility

$$\text{Hausner's ratio} = \frac{\text{Tapped Density}}{\text{Bulk Density}} \quad \% \text{Compressibility} = \frac{(\text{Tapped} - \text{Bulk}) \text{Density}}{\text{Tapped Density}} \times 100\%$$


รูปที่ 1: การติดตั้งการทดลอง Angle of repose



รูปที่ 2: เครื่องทดสอบ Tapping

ผลการทดลอง

ทดสอบครั้งที่ 1

Grade	n	Weight (g)	16.48
int. Vol (ml)	40	Bulk Den. (g/ml)	0.412
#tap	Tap vol. (ml)	Hausner ratio	Compress. Index %
0	40		
5	37	1.08	7.5
11	35	1.14	12.5
16	33	1.21	17.5
20	32	1.25	20.0
25	31	1.29	22.5
31	31	1.29	22.5
36	30.9	1.29	22.8
41	30	1.33	25.0
45	30	1.33	25.0
51	30	1.33	25.0
55	29.9	1.34	25.3
60	29	1.38	27.5
66	29	1.38	27.5
70	29	1.38	27.5
81	28.9	1.38	27.8
101	28.2	1.42	29.5
101	28	1.43	30.0
151	27.8	1.44	30.5
201	27	1.48	32.5
251	27	1.48	32.5
302	27	1.48	32.5
351	26.9	1.49	32.8
401	26.2	1.53	34.5
506	26	1.54	35.0
1000	25	1.6	37.5

ทดสอบครั้งที่ 2

Grade	n	Weight (g)	19.05
int. Vol (ml)	42	Bulk Den. (g/ml)	0.454
#tap	Tap vol. (ml)	Hausner ratio	Compress. Index %
0	42		
5	38	1.11	9.5
11	36	1.17	14.3
15	35	1.20	16.7
21	34	1.24	19.0
25	33.5	1.25	20.2
31	33	1.27	21.4
36	32.9	1.28	21.7
41	32	1.31	23.8
45	32	1.31	23.8
50	32	1.31	23.8
56	31.9	1.32	24.0
62	31	1.35	26.2
70	31	1.35	26.2
81	31	1.35	26.2
92	30.9	1.36	26.4
101	30.5	1.38	27.4
151	30	1.40	28.6
201	29.5	1.42	29.8
251	29	1.45	31.0
301	29	1.45	31.0
351	29	1.45	31.0
401	29	1.45	31.0
501	28.9	1.45	31.2
1000	28	1.50	33.3

ทดสอบครั้งที่ 3

Grade	n	Weight (g)	17.28
int. Vol (ml)	40	Bulk Den. (g/ml)	0.432
#tap	Tap vol. (ml)	Hausner ratio	Compress. Index %
0	40		
5	37	1.08	7.5
10	35	1.14	12.5
15	34	1.18	15.0
21	33	1.21	17.5
25	32	1.25	20.0
31	31	1.29	22.5
37	31	1.29	22.5
40	30.9	1.29	22.8
45	30	1.33	25.0
51	30	1.33	25.0
55	29.9	1.34	25.3
61	29.5	1.36	26.3
65	29.2	1.37	27.0
70	29	1.38	27.5
80	29	1.38	27.5
90	29	1.38	27.5
101	28.9	1.38	27.8
152	28	1.43	30.0
201	27.9	1.43	30.3
252	27.2	1.47	32.0
301	27	1.48	32.5
352	27	1.48	32.5
403	27	1.48	32.5
501	27	1.48	32.5
1001	26	1.54	35.0

รูปที่ ก.1 รายงานผลการทดลองสมบัติการไหลด้วยเครื่อง Tapping ของเคมีผสมในสูตร ก

ผลการทดลอง

ทดสอบครั้งที่ 1

Grade	ข	Weight (g)	20.5
int. Vol (ml)	40	Bulk Den. (g/ml)	0.513
#tap	Tap vol. (ml)	Hausner ratio	Compress. Index %
0	40		
52	32	1.25	20.0
101	30	1.33	25.0
152	29.9	1.34	25.3
202	29.2	1.37	27.0
300	29	1.38	27.5
403	28.5	1.40	28.8
500	28	1.43	30.0
1001	28	1.43	30.0

ทดสอบครั้งที่ 2

Grade	ข	Weight (g)	21.44
int. Vol (ml)	40	Bulk Den. (g/ml)	0.536
#tap	Tap vol. (ml)	Hausner ratio	Compress. Index %
0	40		
5	38	1.05	5.0
10	36	1.11	10.0
15	35	1.14	12.5
20	34	1.18	15.0
25	33	1.21	17.5
31	33	1.21	17.5
36	32	1.25	20.0
42	32	1.25	20.0
51	31	1.29	22.5
62	31	1.29	22.5
72	31	1.29	22.5
101	30	1.33	25.0
150	29.9	1.34	25.3
201	29	1.38	27.5
251	29	1.38	27.5
302	29	1.38	27.5
401	28.9	1.38	27.8
501	28	1.43	30.0
1001	28	1.43	30.0

ทดสอบครั้งที่ 3

Grade	ข	Weight (g)	20.25
int. Vol (ml)	42	Bulk Den. (g/ml)	0.482
#tap	Tap vol. (ml)	Hausner ratio	Compress. Index %
0	42		
5	38	1.05	9.5
10	36	1.11	14.3
16	35	1.14	16.7
21	34	1.18	19.0
25	33	1.21	21.4
30	33	1.21	21.4
37	32	1.25	23.8
42	32	1.25	23.8
51	31	1.29	26.2
62	31	1.29	26.2
72	30	1.33	28.6
101	30	1.33	28.6
151	29	1.38	31.0
201	29	1.38	31.0
251	28.9	1.38	31.2
301	28.9	1.38	31.2
402	28	1.43	33.3
501	28	1.43	33.3
1001	28	1.43	33.3

รูปที่ ก.2 รายงานผลการทดลองสมบัติการไหลด้วยเครื่อง Tapping ของเคมีผสมในสูตร ข

ผลการทดลอง

ทดสอบครั้งที่ 1

Grade	ค	Weight (g)	18.97
int. Vol (ml)	41	Bulk Den. (g/ml)	0.463
#tap	Tap vol. (ml)	Hausner ratio	Compress. Index %
0	41		
5	39.9	1.03	2.7
10	37	1.11	9.8
15	36	1.14	12.2
21	35	1.17	14.6
25	34	1.21	17.1
31	33	1.24	19.5
35	33	1.24	19.5
40	32.9	1.25	19.8
45	32	1.28	22.0
51	32	1.28	22.0
57	31	1.32	24.4
61	31	1.32	24.4
71	31	1.32	24.4
81	30	1.37	26.8
91	30	1.37	26.8
101	30	1.37	26.8
151	29	1.41	29.3
201	29	1.41	29.3
251	29	1.41	29.3
301	28.2	1.45	31.2
352	28	1.46	31.7
401	28	1.46	31.7
500	28	1.46	31.7
1013	27.5	1.49	32.9

ทดสอบครั้งที่ 2

Grade	ค	Weight (g)	17.44
int. Vol (ml)	40	Bulk Den. (g/ml)	0.436
#tap	Tap vol. (ml)	Hausner ratio	Compress. Index %
0	40		
6	36	1.11	10.0
10	34	1.18	15.0
15	33	1.21	17.5
20	31.8	1.26	20.5
27	30.1	1.33	24.8
31	30	1.33	25.0
36	29.9	1.34	25.3
41	29	1.38	27.5
45	29	1.38	27.5
51	28.9	1.38	27.8
56	28.1	1.42	29.8
61	28	1.43	30.0
70	28	1.43	30.0
81	28	1.43	30.0
91	27	1.48	32.5
101	27	1.48	32.5
151	27	1.48	32.5
202	26	1.54	35.0
252	26	1.54	35.0
301	26	1.54	35.0
352	26	1.54	35.0
401	26	1.54	35.0
502	26	1.54	35.0
1001	25	1.60	37.5

ทดสอบครั้งที่ 3

Grade	ค	Weight (g)	17.8
int. Vol (ml)	40	Bulk Den. (g/ml)	0.445
#tap	Tap vol. (ml)	Hausner ratio	Compress. Index %
0	40		
5	37	1.08	7.5
11	34	1.18	15.0
16	33	1.21	17.5
21	32	1.25	20.0
27	31	1.29	22.5
31	31	1.29	22.5
36	30	1.33	25.0
41	30	1.33	25.0
45	30	1.33	25.0
51	29.9	1.34	25.3
58	29	1.38	27.5
60	29	1.38	27.5
77	28.5	1.40	28.8
81	28	1.43	30.0
91	28	1.43	30.0
101	28	1.43	30.0
150	27	1.48	32.5
201	27	1.48	32.5
251	27	1.48	32.5
302	26.8	1.49	33.0
351	26.2	1.53	34.5
402	26	1.54	35.0
501	26	1.54	35.0
1001	26	1.54	35.0

รูปที่ ก.3 รายงานผลการทดลองสมบัติการไหลด้วยเครื่อง Tapping ของเคมีผสมในสูตร ค

28/11/2018

รายงานการทดลองอัดขึ้นรูปเย็นด้วยการกำหนดระยะลึกการอัด

1. วัตถุประสงค์

- ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเคมีผสมที่ต้องเติม ความหนาสุดท้าย และ Bulk density
- เปรียบเทียบความสม่ำเสมอของความหนาของ 3 แบบ 1. วิธีปัจจุบันของโรงงาน 2. กำหนดระยะที่ต้องเติม และเพิ่มจำนวนครั้งการอัด และ 3. ไม่ทำการเกลี่ยเลย โดยยังไม่คำนึงถึงเวลาในการทำ

2. วิธีการทดลอง

Material	Method	Machine	Manpower
- Grade ข	- กำหนดให้ความหนาสุดท้ายเป็น 16.6 มม.*	- แม่พิมพ์รุ่น 1725 aspect ratio 3.05	- ตวงเคมีในถ้วยหนัก 206 กรัม
- Mixing weight = 4.95 kg	- ความสูงที่ต้องเติมจากฐานคือ 50.2 มม. ที่ 0.542 g/ml	- ความสูงของพื้นที่ 77.57 มม.	- ตั้ง PLC ปกติ
- Mixture bulk density = 0.542 ± 0.005 g/ml	- การอัดครั้งแรกความลึกของพื้นที่คือ 27.4 ประมาณเป็น 30 มม.	- ความหนาหลุม 77.86 มม.	- พิมพ์ขึ้นงานจำนวน 5 พิมพ์ - 1 พิมพ์ ปกติ - 3 พิมพ์ ตามเงื่อนไข
- Weight/pc = 206 g	- หลังจากอัดครั้งแรกแล้วใช้ความดันที่ 1100 PSI อัดอีกจำนวน 2 ครั้ง	- ความกว้างหลุม 51.44 มม.	- 1 พิมพ์ ไม่เกลี่ย
		- ความยาวของหลุม 156.8 มม.	- กรรณีนีออนไซ - ทำเครื่องหมายที่พื้นที่สูง 30 มม. - เลื่อนกระบอกลดลงจนถึง 30 มม. - กด Auto เครื่องอัด 1100 x 2 - หยิบขึ้นงาน วัดความหนา 6 จุด

$$\text{*ความสูงที่ต้องใส่} = \frac{\text{ความหนาแน่นหลังอัด}}{\text{Bulk density}} \times \text{ความหนาสุดท้าย}$$

3. ผลการทดลอง

ผลการทดลอง 5.1 ความหนาของการอัดปกติ											
ชั้นที่	น้ำหนักหลังอัด (g)	ค่าของขนาดความหนา (mm)						avg.	SD	Max-Min	
		1	2	3	4	5	6				
1	205.7	17.479	17.325	17.503	17.515	17.377	17.27	17.412	0.102309	0.245	
2	205.8	17.74	17.696	17.758	17.827	17.563	17.742	17.721	0.088313	0.284	
3				ขาด						0	
4	206	17.555	17.222	17.52	17.481	17.425	17.2	17.401	0.153162	0.355	
							total avg	17.511			
							total SD	0.182	0.1888	= each pc	

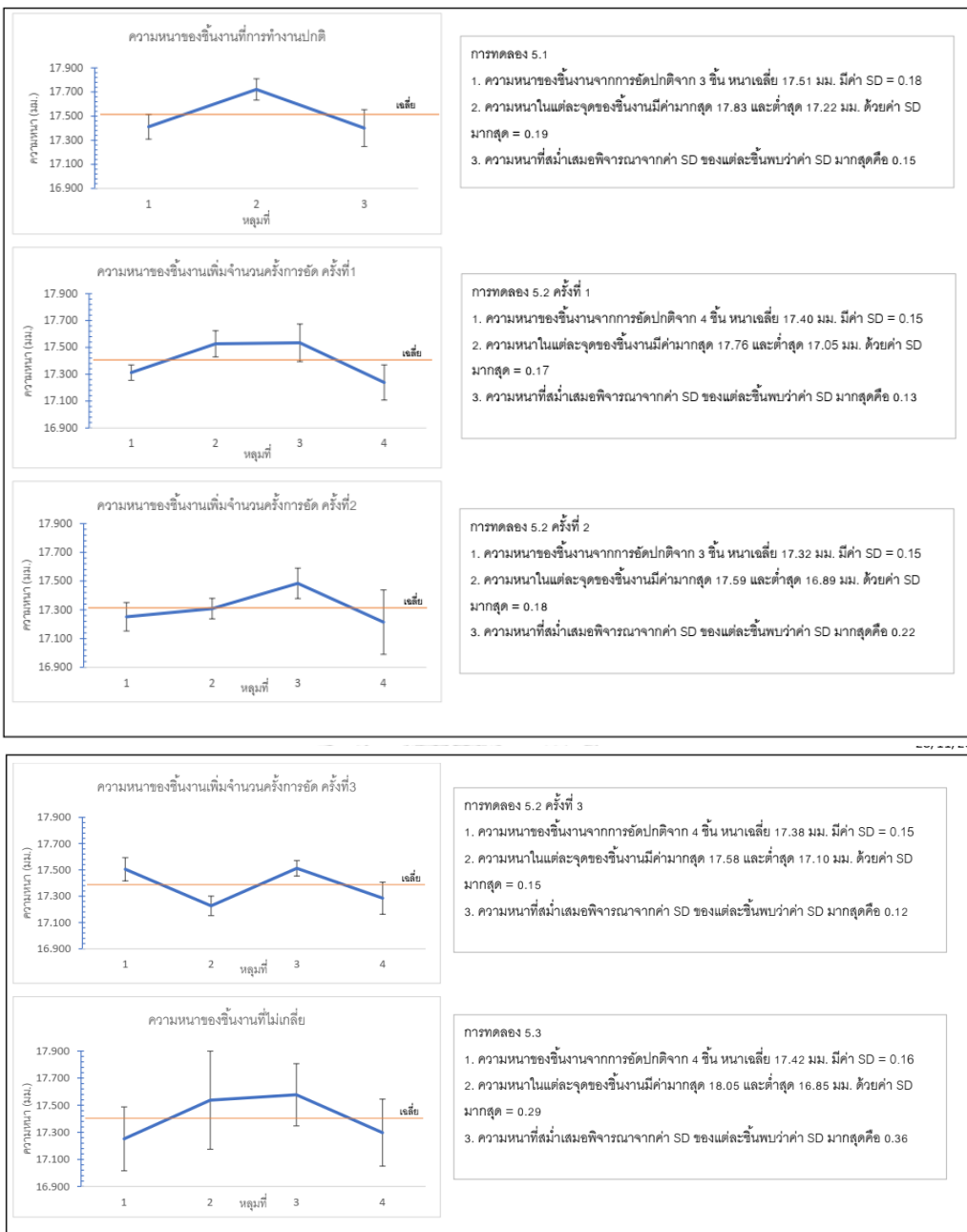
ผลการทดลอง 5.2 กรรณีนีออนไซ และกำหนดระยะอัด											
ชั้นที่	น้ำหนักหลังอัด (g)	ค่าของขนาดความหนา (mm)						avg.	SD	Max-Min	
		1	2	3	4	5	6				
1	206	17.394	17.261	17.355	17.332	17.248	17.282	17.312	0.058	0.146	
2	205.1	17.544	17.367	17.639	17.612	17.508	17.49	17.527	0.097	0.272	
3	205.7	17.617	17.46	17.548	17.412	17.765	17.403	17.534	0.140	0.362	
4	205.7	17.444	17.191	17.312	17.236	17.196	17.054	17.239	0.131	0.39	
							total avg	17.403			
							total SD	0.150	0.168632	= each pc	

ผลการทดลอง 5.3 กรรณีนีออนไซด้วยวิธีกำหนดระยะอัด											
ชั้นที่	น้ำหนักหลังอัด (g)	ค่าของขนาดความหนา (mm)						avg.	SD	Max-Min	
		1	2	3	4	5	6				
1	205.3	17.159	16.849	17.529	17.401	17.354	17.226	17.252	0.236	0.674	
2	205.6	17.223	17.278	17.927	18.057	17.45	17.29	17.538	0.362	0.834	
3	205.9	17.449	17.273	17.763	17.912	17.58	17.487	17.577	0.230	0.639	
4	206.1	17.079	16.962	17.503	17.6	17.392	17.252	17.298	0.247	0.638	
							total avg	17.416			
							total SD	0.165	0.294	= in each	

ผลการทดลอง 5.2 กรรณีนีออนไซ และกำหนดระยะอัด											
ชั้นที่	น้ำหนักหลังอัด (g)	ค่าของขนาดความหนา (mm)						avg.	SD	Max-Min	
		1	2	3	4	5	6				
1	205.8	17.467	17.35	17.583	17.559	17.574	17.496	17.505	0.089	0.233	
2	205.9	17.229	17.184	17.297	17.104	17.248	17.298	17.227	0.074	0.194	
3	205.9	17.508	17.527	17.511	17.571	17.554	17.403	17.512	0.059	0.168	
4	205.7	17.223	17.157	17.507	17.309	17.296	17.216	17.285	0.122	0.35	
							total avg	17.382			
							total SD	0.148	0.155	= in each	

รูปที่ ก.4 รายงานการทดลองอัดขึ้นรูปเย็นด้วยการกำหนดระยะลึกการอัด

4. สรุปผลการทดลอง



5. อภิปรายผล

1. จากผลการทดลองเปรียบเทียบกับสูตรที่นำมาคำนวณพบว่ายังมีความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าจริงกับค่าที่คำนวณอยู่ 5% ($\frac{17.4-16.6}{16.6} \times 100\%$) อาจเนื่องมาจากสูตรที่คำนวณยังไม่รวมผลของความดัน หรือสถานการณ์อื่นๆของเคมีผสมไม่เป็นเชิงเส้นตามแรงดันกับความหนา
2. ค่าเฉลี่ยรวมความหนาของชิ้นงานแต่ละชิ้น (จากข้อสรุป 1) ไม่สามารถแบ่งระหว่างขั้นตอนที่มีการเปลี่ยน และไม่เปลี่ยนได้ (ความหนาเฉลี่ย เปลี่ยน 17.51 มม. เพิ่มการวัด 17.37 มม. และไม่เปลี่ยน 17.42 มม.)
3. ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความหนาแต่ละจุดของชิ้นงาน (จากข้อสรุปที่ 2 และ 3) และผลต่างของความหนามากสุดและต่ำสุด สามารถแบ่งระหว่างขั้นตอนการเปลี่ยน และไม่เปลี่ยนได้ (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เปลี่ยน 0.19 เพิ่มการวัด 0.17 และไม่เปลี่ยน 0.29)
4. ขั้นตอนการเพิ่มจำนวนครั้งการวัดสามารถลดค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกระบวนการได้ จากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเกลียวปกติ 0.19 ลดลงเป็น 0.17 กรณีเพิ่มจำนวนการวัด

รูปที่ ก.2 รายงานการทดลองอัดขึ้นรูปเส้นด้วยการกำหนดระยะลึกการอัด (ต่อ)

รายงานการทดลองอัดขึ้นรูปเยนที่แรงอัดต่าง ๆ

1. วัตถุประสงค์

1. ศึกษาความหนาของชิ้นงานพิมพ์เยนที่ความดัน 900, 1100, 1200, 1500 และ 1700 PSI
2. ศึกษาการขยายตัวของชิ้นงานเมื่ออยู่ในความดัน 900, 1100, 1200, 1500, และ 1700 PSI
3. ศึกษาความแข็งแรง หรือค่า Modulus ของชิ้นงานพิมพ์เยนด้วยเครื่อง Universal test ที่ความดัน 900, 1100, 1200, 1500 และ 1700 PSI
4. ศึกษาสมการความสัมพันธ์ระหว่างความดัน ความแข็งแรง สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และอัตราความหนากับความกว้างของ

2. วิธีการทดลอง

Material	Method	Machine	Manpower
- Grade ข	- กำหนดให้ความหนาสุดท้ายเป็น 16.6 มม.*	- แม่พิมพ์รุ่น 1725 aspect ratio 3.05	- ตวงเคมีในถ้วยหนัก 206 กรัม
- Mixing weight = 10 kg - Mixed date 11/12/2018	- ความสูงที่ต้องเติมจากรูฐานคือ 49.59 มม. ที่ 0.549 g/ml	- ความสูงของท่อนซ์ 77.57 มม. - ความหนาหลุม 77.86 มม. - ความกว้างหลุม 51.44 มม. - ความยาวหลุม 156.8 มม.	- ตั้ง PLC ปกติ - ทำเครื่องหมายที่พื้นที่สูง 30 มม. - เลื่อนกระบอกลดลงจนถึง 30 มม. - กด Auto เครื่องอัด 1100 x 2
- Mixture bulk density = 0.549 ± 0.02 g/ml	- การอัดครั้งแรกความลึกของพื้นที่คือ 28.3 ประมาณเป็น 30 มม.		- พิมพ์ชิ้นงานจำนวน 11 พิมพ์ - 1 พิมพ์ ที่ 900 PSI และ 1100 PSI - 3 พิมพ์ ที่ 1200, 1500 และ 1700 PSI
- Weight/pc = 206 g	- หลังจากอัดครั้งแรกแล้วใช้ความดันที่ 900 1100 1200 1500 และ 1700 PSI ตามลำดับ อัดอีกจำนวน 2 ครั้ง		- หยิบชิ้นงาน วัดความหนา 6 จุด

*ความสูงที่ต้องใส่ = $\frac{\text{ความหนาแน่นหลังอัด}}{\text{Bulk density}} \times \text{ความหนาสุดท้าย}$

3. ผลการทดลอง

ผลการทดลอง 5.1 ความหนาที่ความดัน 900 PSI										
ชั้นที่	ตำแหน่งความหนา (mm)						avg.	SD	Max-Min	
	1	2	3	4	5	6				
1	17.077	16.992	17.13	17.255	17.13	17.322	17.151	0.120	0.33	
2	17.188	17.213	17.215	17.292	17.169	17.159	17.206	0.048	0.133	
3	17.296	17.202	17.331	17.352	17.253	17.283	17.286	0.054	0.15	
4	17.172	17.015	17.263	17.154	17.179	17.108	17.149	0.083	0.248	
	total avg						17.198			
	total SD						0.065	0.0948	= each pc	

ผลการทดลอง 5.2 ความหนาที่ความดัน 1100 PSI										
ชั้นที่	ตำแหน่งความหนา (mm)						avg.	SD	Max-Min	
	1	2	3	4	5	6				
1	16.852	16.911	16.888	16.928	16.763	16.912	16.876	0.061	0.165	
2	16.969	16.907	17.025	17.048	16.957	16.919	16.971	0.056	0.141	
3	17.085	16.915	17.035	16.985	17.007	17.061	17.015	0.061	0.17	
4	16.852		16.874		16.768		16.831	0.056	0.106	
	total avg						16.923			
	total SD						0.084	0.08897	= each pc	

ผลการทดลอง 5.3 ความหนาที่ความดัน 1200 PSI										
ชั้นที่	ตำแหน่งความหนา (mm)						avg.	SD	Max-Min	
	1	2	3	4	5	6				
1	16.785	16.864	16.764	16.844	16.498	16.616	16.729	0.143	0.366	
2	16.805		16.862		16.656		16.774	0.106	0.206	
3	16.733		16.869		16.773		16.792	0.070	0.136	
4	16.765		16.767		16.646		16.725	0.069	0.121	
	total avg						16.749			
	total SD						0.037	0.105	= in each	

ผลการทดลอง 5.4 ความหนาที่ความดัน 1500 PSI										
ชั้นที่	ตำแหน่งความหนา (mm)						avg.	SD	Max-Min	
	1	2	3	4	5	6				
1	16.625	16.542	16.798	16.864	16.762	16.742	16.722	0.118	0.322	
2	16.812		16.721		16.723		16.752	0.052	0.091	
3	16.706		16.856		16.912		16.825	0.107	0.206	
4	16.656		16.719		16.682		16.686	0.032	0.063	
	total avg						16.746			
	total SD						0.059	0.097	= in each	

ผลการทดลอง 5.5 ความหนาที่ความดัน 1700 PSI										
ชั้นที่	ตำแหน่งความหนา (mm)						avg.	SD	Max-Min	
	1	2	3	4	5	6				
1	16.646	16.704	16.797	16.958	16.574	16.62	16.717	0.141	0.384	
2	16.745		16.707		16.862		16.771	0.081	0.155	
3	16.653		16.769		16.795		16.739	0.076	0.142	
4	16.686		16.679		16.732		16.699	0.029	0.053	
	total avg						16.731			
	total SD						0.031	0.098	= in each	

รูปที่ ก.5 รายงานการทดลองอัดขึ้นรูปเยนที่แรงอัดต่าง ๆ

19/12/2018

3. ผลการทดลอง

ผลการทดลอง 5.4 ความหนาที่ความดัน 1500PSI									
พิมพ์ที่ 1									
ชั้นที่	1	2	3	4	5	6	avg.	SD	Max-Min
1	16.301	16.295	16.512	16.526	16.401	16.483	16.420	0.104	0.231
total avg							16.420		
total SD								#DIV/0!	0.104 = in each

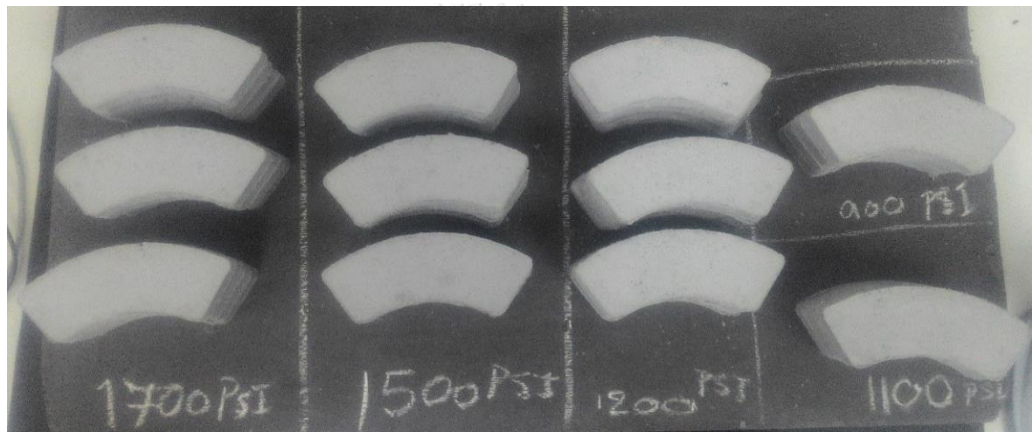
ผลการทดลอง 5.5 ความหนาที่ความดัน 1700PSI									
พิมพ์ที่ 1									
ชั้นที่	1	2	3	4	5	6	avg.	SD	Max-Min
1	16.212	16.103	16.28	16.497	16.163	16.203	16.243	0.137	0.394
total avg							16.243		
total SD								#DIV/0!	0.137 = in each

ผลการทดลอง 5.4 ความหนาที่ความดัน 1500PSI									
พิมพ์ที่ 2									
ชั้นที่	1	2	3	4	5	6	avg.	SD	Max-Min
1	16.381	16.349	16.51	16.578	16.351	16.504	16.446	0.098	0.229
2	16.492		16.51	16.473		16.492	16.492	0.019	0.037
3	16.433		16.518	16.575		16.509	16.509	0.071	0.142
4	16.28		16.442	16.56		16.427	16.427	0.141	0.28
total avg							16.468		
total SD								0.038	0.090 = in each

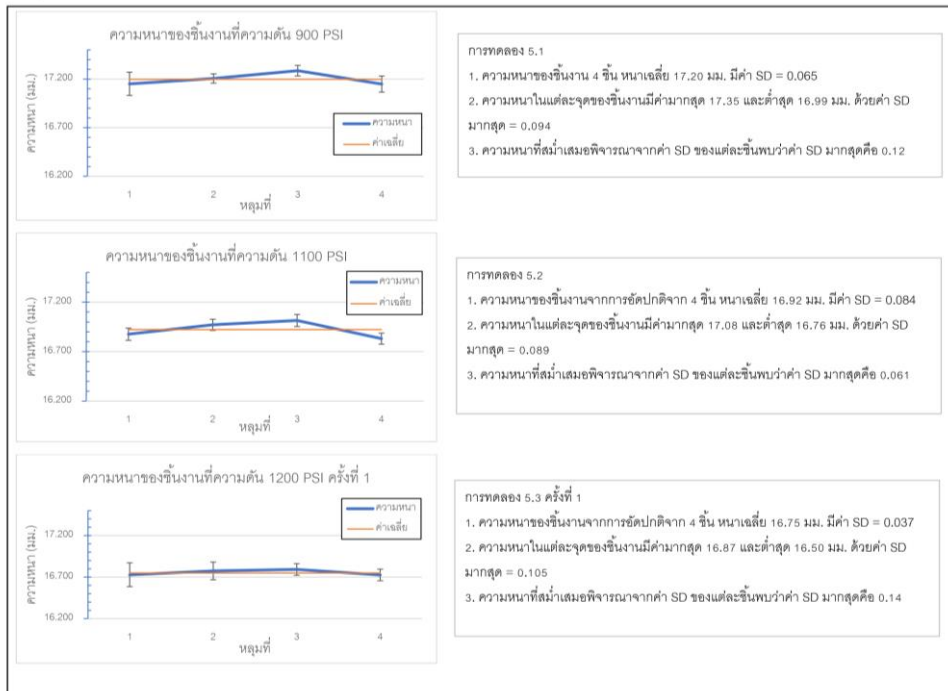
ผลการทดลอง 5.5 ความหนาที่ความดัน 1700PSI									
พิมพ์ที่ 2									
ชั้นที่	1	2	3	4	5	6	avg.	SD	Max-Min
1	16.233	16.246	16.361	16.42	16.174	16.321	16.293	0.091	0.246
2	16.301		16.251	16.351		16.301	16.301	0.050	0.1
3	16.404		16.293	16.319		16.339	16.339	0.058	0.111
4	16.144		16.232	16.437		16.271	16.271	0.150	0.293
total avg							16.301		
total SD								0.028	0.087 = in each

ผลการทดลอง 5.4 ความหนาที่ความดัน 1500PSI									
พิมพ์ที่ 3									
ชั้นที่	1	2	3	4	5	6	avg.	SD	Max-Min
1	16.359	16.301	16.623	16.465	16.464	16.45	16.444	0.110	0.322
total avg							16.444		
total SD								#DIV/0!	0.110 = in each

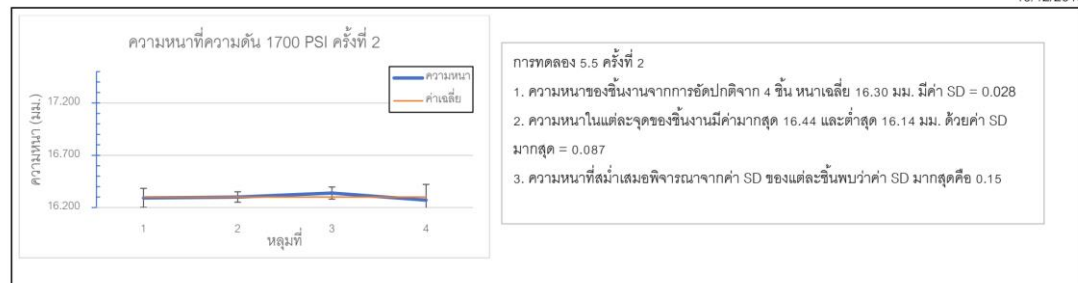
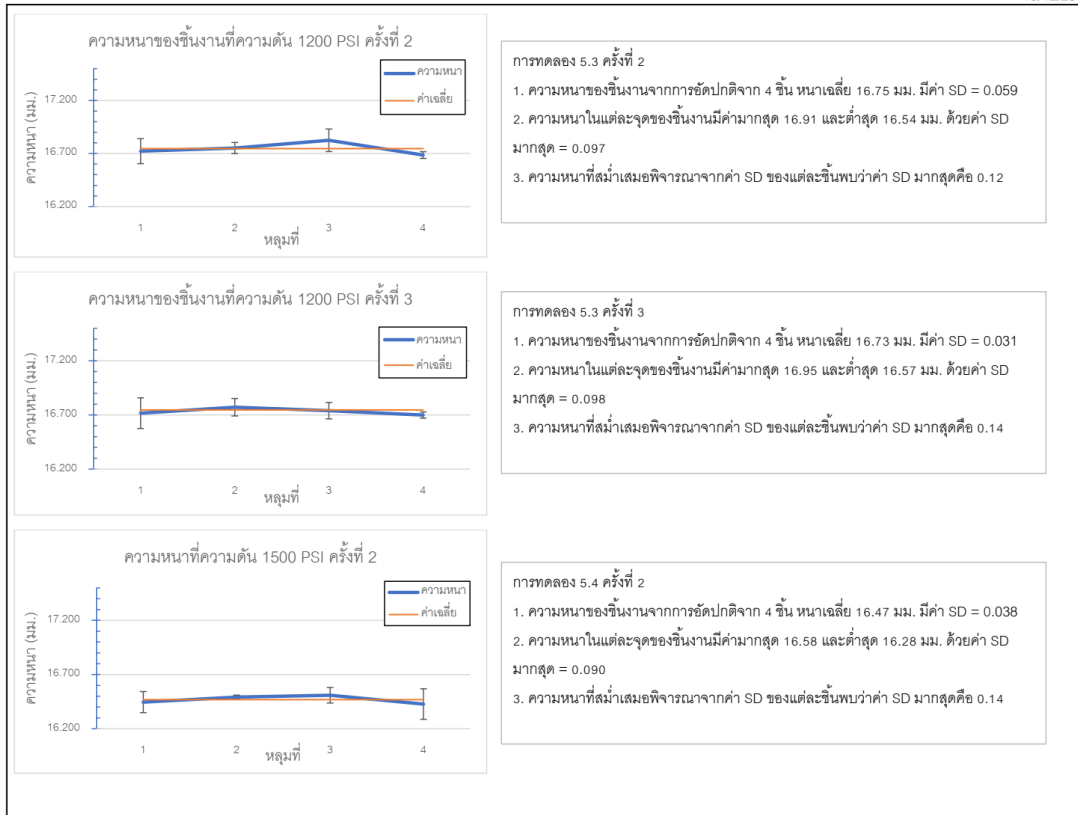
ผลการทดลอง 5.5 ความหนาที่ความดัน 1700PSI									
พิมพ์ที่ 3									
ชั้นที่	1	2	3	4	5	6	avg.	SD	Max-Min
1	16.231	16.118	16.368	16.373	16.222	16.297	16.268	0.098	0.255
total avg							16.268		
total SD								#DIV/0!	0.098 = in each



4. สรุปผลการทดลอง



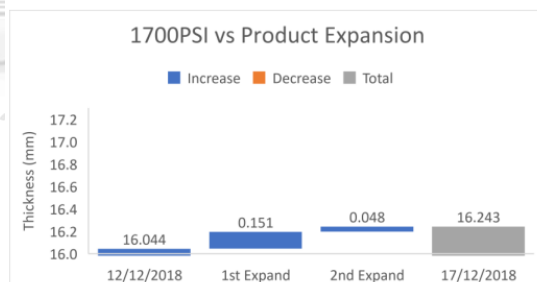
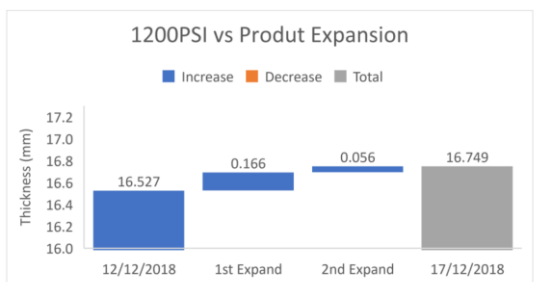
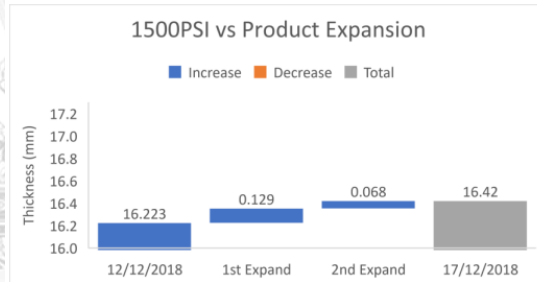
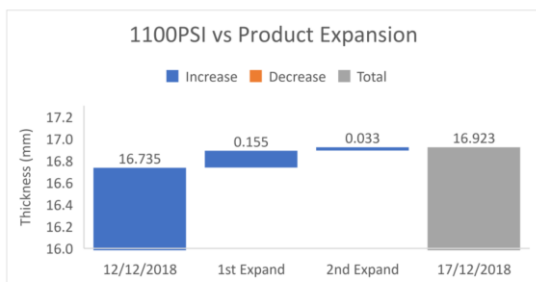
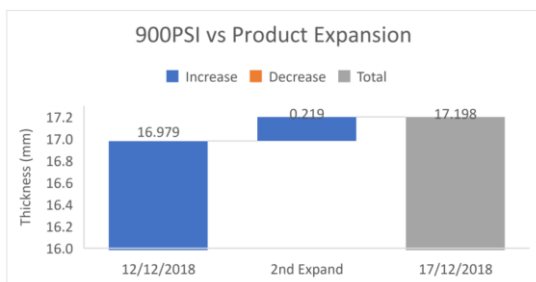
รูปที่ ก.3 รายงานการทดลองอัดขึ้นรูปเยื่อที่แรงอัดต่าง ๆ (ต่อ)



รูปที่ ก.3 รายงานการทดลองอัดขึ้นรูปเยนที่แรงอัดต่าง ๆ (ต่อ)

3. ผลการทดลอง

Pressure (PSI)	Measure thickness date(mm)								Total Expansion (mm)
	12/12/2018	S.D.	1st Expand	13/12/2018	S.D.	2nd Expand	17/12/2018	S.D.	
900	16.979	0.089	N/A	N/A	N/A	0.219	17.198	0.065	0.219
1100	16.735	0.077	0.155	16.89	0.05	0.033	16.923	0.084	0.188
1200	16.527	0.151	0.166	16.693	0.158	0.056	16.749	0.01	0.222
1500	16.223	0.121	0.129	16.352	0.1	0.068	16.42	0.104	0.197
1700	16.044	0.073	0.151	16.195	0.04	0.048	16.243	0.137	0.199



รูปที่ ก.6 รายงานการขยายตัวของชิ้นงานอัดขึ้นรูปเย็นเมื่อเก็บไว้ 1 และ 5 วัน

	Elastic(Standard) (N/mm ²)					
	กลุ่ม 1	กลุ่ม 2	กลุ่ม 3	กลุ่ม 4	avg.	SD.
แต่ละกลุ่ม 900 PSI	52.39	50.38	50.07	51.23	51.02	1.0
แต่ละกลุ่ม 1100 PSI	52.57	52.61	52.54	53.46	52.80	0.4
แต่ละกลุ่ม 1200 PSI	53.78	53.85	53.3	53.89	53.71	0.3
แต่ละกลุ่ม 1500 PSI	55.45	54.18	54.23	55.55	54.85	0.7
แต่ละกลุ่ม 1700 PSI	57.79	55.08	55.53	55.25	55.91	1.3

รูปที่ ก.7 ค่าความยืดหยุ่นของชิ้นงานอัดขึ้นรูปเป็นแต่ละกลุ่มที่ความดันเครื่องจักรต่าง ๆ







รูปที่ ข.1 เครื่องอัดขึ้นรูปเย็นแบบเก่า



รูปที่ ข.2 ความสูงของแต่ละหลุมแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปเย็นหลังเกลี่ยด้วยระยะกดตัดยอด



รูปที่ ข.3 เครื่องอัดขึ้นรูปแบบใหม่ที่ใช้เงื่อนไขในการผลิตจริง



รูปที่ ข.4 หน้าจอแสดงผลการควบคุมเครื่องอัดขึ้นรูปเย็นที่ระยะกด และเวลาการอัด



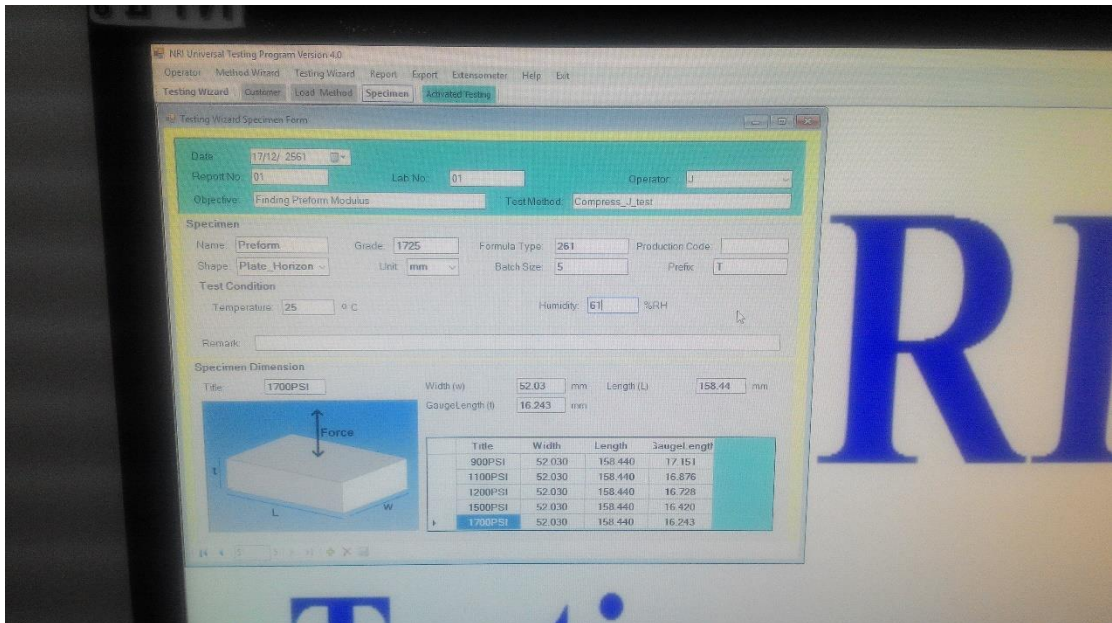
รูปที่ ข.5 ชิ้นงานอัดขึ้นรูปเย็นจากเครื่องอัดขึ้นรูปแบบใหม่



รูปที่ ข.6 เครื่องอัดขึ้นรูปแบบร้อน



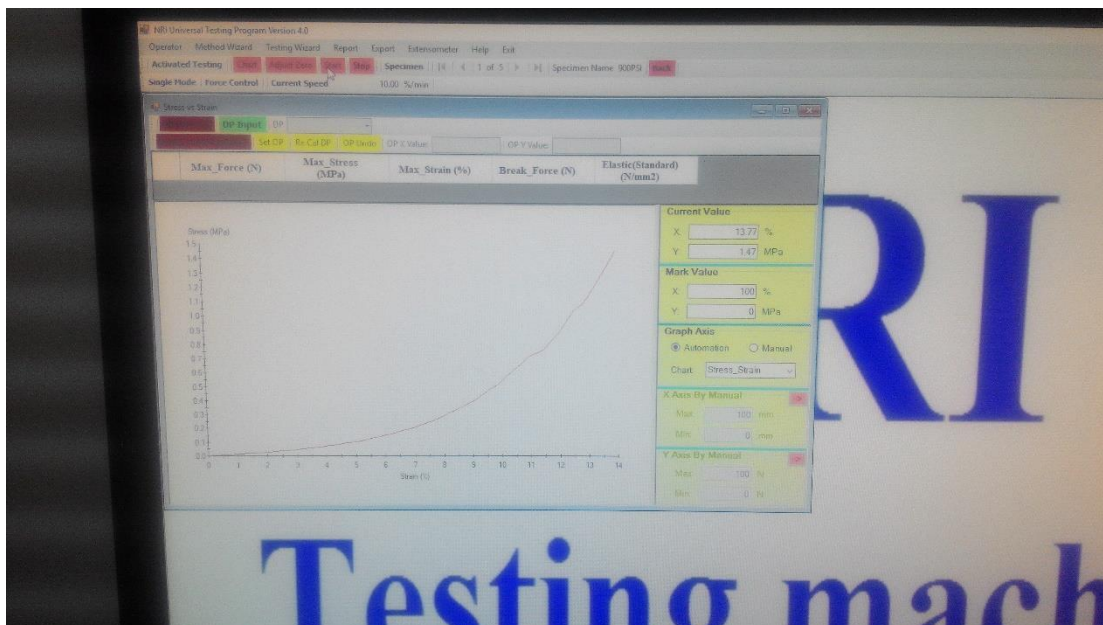
รูปที่ ข. 7 ชิ้นงานอัดขึ้นรูปร้อน (ซ้าย) แบบไม่ติดเหล็ก (ขวา) แบบติดเหล็ก



รูปที่ ข.8 หน้าจอแสดงเงื่อนไขการทดสอบชิ้นงานอัดขึ้นรูปเย็นของเครื่อง Universal test



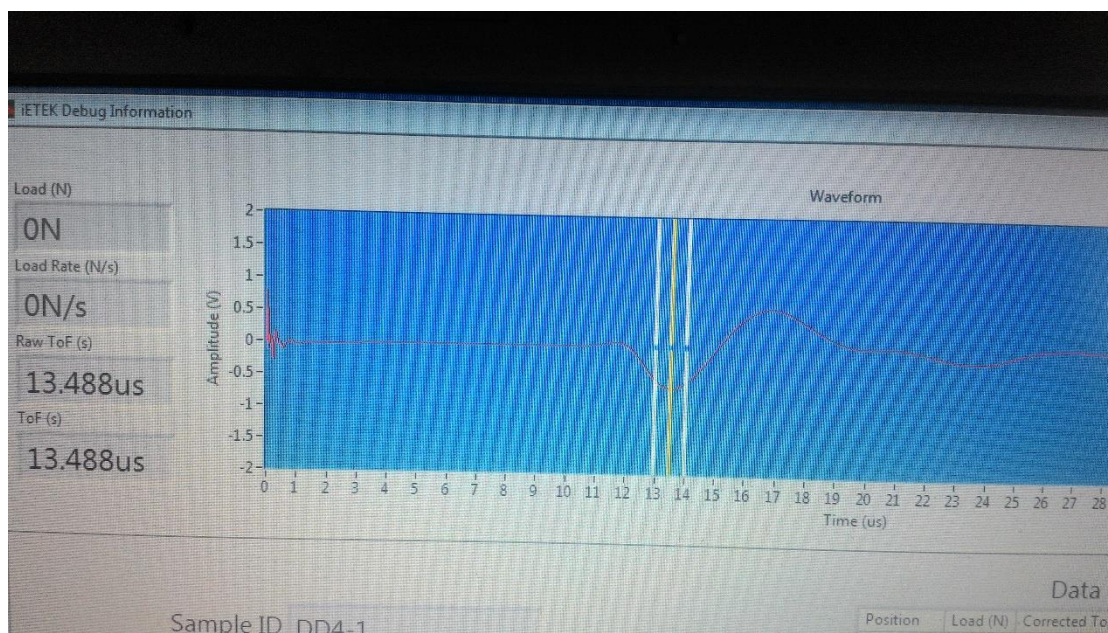
รูปที่ ข.9 เครื่องทดสอบ Universal test



รูปที่ ข.10 หน้าจอแสดงผลความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียด



รูปที่ ข.11 เครื่องทดสอบชิ้นงานอัดขึ้นรูปร้อนด้วยเครื่องเสียงความถี่สูง (Ultrasonic measurement)



รูปที่ ข.12 หน้าจอแสดงผลการวัดเวลาที่คลื่นความถี่สูงผ่านชิ้นงานอัดขึ้นรูปร้อน



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายจิตรเทพ สุกุลธนาศร
วัน เดือน ปี เกิด	01 มกราคม 2538
สถานที่เกิด	จังหวัดพะเยา
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง จากภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2560 และเข้าศึกษาต่อหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา ปิโตรเคมี และวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งได้รับการสนับสนุนการศึกษาจากโครงการกระบวนการพัฒนาการวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (RDI) ร่วมกับ บริษัท Compact International (1994) co. ltd. ในระดับปริญญา มหาบัณฑิต
ผลงานตีพิมพ์	J. Sukultanasorn, M. Sriwiboon, N. Saechin, T. Bovornratanaraks, "Development of Cold-pressing Process for Producing Brake Pad with Uniform Density", Pure and Applied Chemistry International Conference 2019 (PACCON 2019), Bangkok, Thailand, May 7-8th, 2019. (Poster) J. Sukultanasorn, T. Bovornratanaraks, N. Saechin, "Effect of Cold-Pressing Process for the Production of Brake Pad with Uniform Density", The 25th PPC Symposium on Petroleum, Petrochemicals, and Polymers and The 10th Research Symposium on Petrochemical and Materials Technology, Bangkok, Thailand, May 30th, 2019 (Poster), 308-313.