

ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนสูตรน้ำยาโฟมที่มีผลต่อความแข็งของเบาะรถยนต์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

The relationship of foam formula ratio affecting hardness of automobile seat
cushion



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Industrial Engineering

Department of Industrial Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนสูตรน้ำยาโพนที่มีผลต่อความ แข็งของเบาะรถยนต์
โดย	นายจรรูวัตร จินดาทองประภา
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ
.....	
(รองศาสตราจารย์จรัสวัฒน์ เงามประเสริฐวงศ์)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ธรรมมาภรณ์พิลาศ)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร)	

จารุวัตร จินดาทองประภา : ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนสูตรน้ำยาโฟมที่มีผลต่อความ
แข็งของเบาะรถยนต์. (The relationship of foam formula ratio affecting
hardness of automobile seat cushion) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.สมเกียรติ ตั้งจิต
สิตเจริญ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาหาความสัมพันธ์ของอัตราส่วนสูตรน้ำยาโฟมเบาะ
รถยนต์ที่มีต่อความแข็งของเบาะรถยนต์ เนื่องจากพบปัญหาเบาะรถยนต์มีค่าความแข็งที่ไม่ได้ตรง
ตามมาตรฐานของลูกค้าจำนวนมาก ถึง 34.95 เปอร์เซนต์ ของลูกค้าที่มีการผลิตสูงสุดในโรงงาน
กรณีศึกษา วิเคราะห์สาเหตุด้วยแผนภูมิแกงปลา พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งของโฟมนั้นคือ
สูตรน้ำยาโฟม ซึ่งประกอบด้วย 1) น้ำยาโฟม PA ที่มีส่วนผสมระหว่าง Polyol น้ำ สารลดแรงดึง
ผิว สารฟู เจล และซิลิโคน ในสัดส่วนเท่ากัน 2) น้ำยาโฟม PC ที่มีส่วนผสมระหว่าง โคพอลิเมอร์
(ระหว่าง Polyoxyalkylenepolol กับ styrene-acrylonitrile polymer) สารลดแรงดึงผิว สารฟู
เจล และซิลิโคน ในสัดส่วนเท่ากัน 3) น้ำยาโฟม ISO หรือ ที่เรียกว่า ไอโซไซยานต ออกแบบการ
ทดลองโดยมีสูตรน้ำยาโฟมเป็น 3 ปัจจัย และ ระดับของปัจจัยละ 3 ระดับ ทั้งหมด 27 การ
ทดลอง ภายใต้ข้อจำกัดของ ระยะเวลาในการบ่ม 6 นาที และ อุณหภูมิของแม่พิมพ์ 65 องศา
เซลเซียส วิเคราะห์ผลการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab โดยใช้การวิเคราะห์ความถดถอยเชิง
พหุคูณและการถดถอยแบบขั้นตอนผสมระหว่างการเลือกแบบก้าวหน้าและการตัดทิ้งแบบถอย
หลัง ซึ่งพบว่าที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 % นั้น PA, PC, ISO, ISO*ISO และ ISO*PC มีผลต่อค่า
ความแข็งของโฟมเบาะรถยนต์อย่างมีนัยสำคัญโดยที่ค่าความแข็งของโฟมเบาะรถยนต์มีทิศทาง
เพิ่มขึ้นนั้นเมื่อ น้ำยาโฟม PC และ น้ำยาโฟม ISO เพิ่มปริมาณขึ้น ขณะที่เมื่อเพิ่มปริมาณ น้ำ
ยาโฟม PA นั้นมีผลต่อค่าความแข็งของโฟมเบาะรถยนต์ในทิศทางลดลง โดยค่าความแข็งและ
ปัจจัยต่างๆมีความสัมพันธ์กันดังสมการ ค่าความแข็งของโฟม = $4551 - 2.991 PC - 30.70 ISO -$
 $0.2407 PA + 0.05192 ISO*ISO + 0.01288 PC*ISO$ มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของสมการ
เท่ากับ ถึง 98.6 เปอร์เซนต์ สำหรับความแม่นยำของสมการนั้นมีค่าเท่ากับ 98.15 เปอร์เซนต์ เมื่อ
พิจารณาน้ำหนักชิ้นงานที่ 1,180 กรัม ซึ่งอยู่ในมาตรฐานที่ลูกค้ากำหนด

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6170910321 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORD: Prediction, Foam, Hardness, Car seat

Jaruwat Jindathongphapar : The relationship of foam formula ratio affecting hardness of automobile seat cushion . Advisor: Assoc. Prof. Somkiat Tangjitsitcharoen, Ph.D.

The purpose of this research is to study the relative of PU (Polyurethane foam) mixing ratio affecting on hardness of automobile seat cushion. Due to the high defect rate of the seat cushion hardness being 34.95% of production in a case study factory. By Using fish bone analysis, The studied factors were 1) PA consisted of polyol, blowing catalyst, gelling catalyst, surfactant, silicone and H₂O; 2) PC consisted of copolymer (being Polyoxyalkylenepolol with Styrene-acrylonitrile polymer), blowing catalyst, gelling catalyst, surfactant and silicone; and 3) ISO (Isocyanate). This experiment has 3 factors with 3 difference levels of each, totally 27 experiments, under condition of foam formation time for 6 mins with molding temperature at 65 °C then, it was analyzed by MINITAB program with multiple regression method. The result was shown as 95% reliability, the mixing ratio of PA PC ISO ISO*ISO and ISO*PC was effect on hardness significantly. The hardness increased when PC and ISO increased, On the other hand, the more amount of PA increased; the more hardness decreased. The relationship equation of the hardness and the factors was found as $\text{Hardness} = 4551 - 2.991\text{PC} - 30.70\text{ISO} - 0.2407\text{PA} + 0.05192\text{ISO} * \text{ISO} + 0.01288\text{PC} * \text{ISO}$ with 98.6% prediction coefficient. The accuracy of this model is 98.15% where the weight of work piece was 1,180 grams, and also met the standard requirement of customer.

Field of Study: Industrial Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2019

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ต้องขอกราบขอบพระคุณ รอง ศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ ที่คอยสละเวลาในการสอนและให้แนวคิด ตลอดคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ อย่างยิ่งตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงการตรวจและแก้ไขในข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่ จนกระทั่งสำเร็จออกมาเป็นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมทุกท่านที่คอยประสิทธิ์ประสาทวิชา ความรู้ ตลอดจนให้คำแนะนำต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ บริษัท แอเดียนท์ แอนด์ ซัมมิท คอร์ปอเรชั่น จำกัด ที่เปิดโอกาสให้ในการ พัฒนาให้ในงานวิจัยนี้เกิดขึ้น และ ขอกราบพระคุณพ่อแม่ แม่ และครอบครัว ที่สนับสนุนและให้กำลังใจ ตลอดมา รวมทั้งขอบคุณนิสิตปริญญาโททุกท่าน ที่คอยช่วยเหลือด้วยดีเสมอมา

จารุวัตร จินดาทองประภา



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.1.1 ที่มาของงานวิจัย.....	5
1.1.2 กรอบแนวความคิดของงานวิจัย	10
1.2 วัตถุประสงค์ในงานวิจัย	13
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	13
1.4 ผลที่ได้รับ.....	14
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ	14
1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	14
บทที่ 2	16
2.1 โฟม (Foam).....	16
2.2 การผลิตโฟม (Processing foam).....	16
2.3 กรรมวิธีการทำโฟม	17
2.4 อุปกรณ์ที่ใช้หล่อ Integral Foam.....	18
2.5 การหล่อ Integral Foam	20

2.6	วิธีการผลิต แบบ แม่พิมพ์หล่อร้อน (Production Methods for Hot molding)	21
2.7	วัตถุดิบในการผลิตโฟมเบาะรถยนต์	22
2.8	แบบจำลองการถดถอยแบบเชิงเส้น	24
2.9	การประมาณค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น	25
2.10	การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับการถดถอยแบบพหุคูณ	26
2.11	การทดสอบนัยสำคัญของการถดถอย	27
2.12	วิธีการเลือกตัวแปรต้นใส่เข้าในสมการถดถอย	30
2.13	การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับการถดถอยพหุคูณ	31
2.14	การทดสอบสมมติฐานผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของสองประชากร เมื่อสุ่มตัวอย่างไม่เป็นอิสระกัน	33
2.14.1	ประชากร 2 กลุ่มเป็นอิสระกัน	34
2.14.2	ประชากร 2 กลุ่ม ไม่เป็นอิสระกัน	36
2.15	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	37
บทที่ 3		42
3.1	การออกแบบการทดลอง	42
3.1.1	ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง	42
3.1.2	การกำหนดระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง	42
3.2	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	45
3.2.1	เครื่องฉีดโฟม Line 36 เป็นเครื่องที่ใช้ในการผลิต	45
3.2.2	แม่พิมพ์หล่อร้อน	45
3.2.3	เครื่องทดสอบค่าความแข็ง หมายเลขที่ 1	46
3.2.4	ฐานรองรับชิ้นงาน (Test Box)	46
3.2.5	น้ำยาโฟมของโรงงานกรณีศึกษา	47
3.3	ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	47

3.3.1	วิธีการขึ้นรูปชิ้นงาน	47
3.3.2	วิธีการทดสอบค่าความแข็ง	48
3.4	การวิเคราะห์ข้อมูล	49
3.4.1	วิเคราะห์ข้อมูลจากผลการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab.....	49
3.5	การพัฒนาสมการการทำนายค่าความแข็งของโฟม.....	55
บทที่ 4	57
4.1	ผลการทดลอง.....	57
4.2	การวิเคราะห์ค่าความแข็งของชิ้นงาน	60
4.2.1	การทดสอบการกระจายแบบปกติ	61
4.2.2	การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล	61
4.2.3	การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปร.....	62
4.3	สมการทำนายค่าความแข็งของโฟมเบาะรถยนต์.....	63
4.3.1	การทดสอบนัยสำคัญของการถดถอย.....	64
4.3.2	การทดสอบสัมประสิทธิ์การถดถอยทีละตัว.....	67
4.4	การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ.....	72
4.5	การทดสอบความแม่นยำของสมการ	74
4.5.1	การทดสอบที่อยู่ในขอบเขตเงื่อนไขของปริมาณน้ำยาโฟมเดิม.....	74
4.5.2	การทดสอบที่อยู่นอกเขตเงื่อนไขของปริมาณน้ำยาโฟมเดิม	78
บทที่ 5	84
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	84
5.2	อภิปรายผลการวิจัย	85
5.3	ข้อจำกัดและอุปสรรคในการทำวิจัย	86
5.4	ข้อเสนอแนะ	86
ภาคผนวก	87

ภาคผนวก ก	88
ภาคผนวก ข	98
บรรณานุกรม	102
ประวัติผู้เขียน	105



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 ข้อมูลของเสีย และมูลค่างานเสีย ก่อนการปรับปรุง.....	6
ตารางที่ 1.2 แสดงค่าความแข็งของ PAD แต่ละ Part No. ของ ลูกค้ำที่ผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม (กรณีศึกษา).....	7
ตารางที่ 1.3 อธิบายผลการปัจจัยและสภาพปัจจุบันของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งของโฟม	9
ตารางที่ 1.4 งานวิจัยที่ผ่านมา	11
ตารางที่ 1.5 ปัจจัยและระดับปัจจัยในการทดลอง	14
ตารางที่ 2.1 กรรมวิธีการทำโฟม จากพลาสติกที่สำคัญบางชนิด[3]	17
ตารางที่ 2.2 ข้อมูลสำหรับการถดถอยแบบเชิงเส้นพหุคูณ	25
ตารางที่ 2.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการถดถอย.....	28
ตารางที่ 2.4 ผลลัพธ์ของ Stat graphics	29
ตารางที่ 3.1 ออกแบบการทดลอง 3 ³ แฟคทอเรียล	43
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลอง	58
ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการถดถอย Hardness	64
ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการถดถอย Hardness ด้วยวิธี Stepwise.....	65
ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการถดถอย Hardness ด้วยวิธี Stepwise (ตัดTeam ที่ไม่ significant ออกเอง)	66
ตารางที่ 4.5 การทดสอบสัมประสิทธิ์การถดถอยทีละตัวสำหรับ Hardness	67
ตารางที่ 4.6 ค่าความแข็งของโฟมเบาะรถยนต์ที่ได้จากการสมการ	73
ตารางที่ 4.7 เงื่อนไขปริมาณน้ำยาโฟมสำหรับทดสอบความแม่นยำของสมการ	74
ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองเพื่อทดสอบความแม่นยำ.....	75
ตารางที่ 4.9 การทดสอบความแตกต่างของค่ากลางของสองประชากรไม่อิสระ	76

ตารางที่ 4.10 เงื่อนไขปริมาณน้ำยาโฟมสำหรับทดสอบความแม่นยำของสมการ78

ตารางที่ 4.11 ผลการทดลองเพื่อนทดสอบความแม่นยำ78

ตารางที่ 4.12 การทดสอบความแตกต่างของค่ากลางของสองประชากรไม่อิสระ79

ตารางที่ 4.13 ทดสอบความแม่นยำของสมการกับชิ้นงานที่มีรูปร่างและต่างกัน81

ตารางที่ 4.14 ผลการทดลองเพื่อทดสอบความแม่นยำ กับชิ้นงานที่มีรูปร่างและน้ำหนัที่ต่างกัน..81

ตารางที่ 4.15 การทดสอบความแตกต่างของค่ากลางของสองประชากรไม่อิสระ82



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 การพยากรณ์รถยนต์สะสมที่อายุมากกว่า 5 ปี	2
รูปที่ 1.2 ส่วนประกอบของรถยนต์.....	2
รูปที่ 1.3 ส่วนประกอบของเบาะรถยนต์.....	3
รูปที่ 1.4 หุ่นจำลองเมื่อนั่งบนเบาะเพื่อหาตำแหน่งของสะโพก [1] [2]	4
รูปที่ 1.5 ค่าความแข็ง ของ PAD SEAT CUSH (AAAAAA) รุ่น AA	5
รูปที่ 1.6 แผนภูมิกำลังปลาแสดง ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งของโฟม.....	8
รูปที่ 1.7 กรอบแนวความคิดงานวิจัย.....	12
รูปที่ 1.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโฟม	13
รูปที่ 2.1 อุปกรณ์ผสมเตรียมส่งเข้าแม่พิมพ์ [3]	18
รูปที่ 2.2 แผนภูมิของเครื่องผลิต integral foam พร้อมอุปกรณ์ต่างๆ [3]	19
รูปที่ 2.3 หลักการของหัวผสมแบบใช้ใบกวน [3]	19
รูปที่ 2.4 หัวผสมแบบใช้หัวฉีด แบบมีกระเบื้องควบคุม [3].....	20
รูปที่ 2.5 แผนภูมิของการผลิตแบบแม่พิมพ์หล่อร้อน [4]	21
รูปที่ 2.6 โครงสร้างเคมีของไอโซไซยานต (Isocyanate) [4]	22
รูปที่ 2.7 โครงสร้างเคมีไดฟีนิลมีเทน ไดไอโซไซยานต (Diphenylmethane diisocyanate) [4]	23
รูปที่ 2.8 กราฟความน่าจะเป็นของการแจกแจงปกติของค่าความผิดพลาด	32
รูปที่ 2.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดและลำดับของการทดลอง	32
รูปที่ 2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดและค่าพีต.....	33
รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งของชิ้นงาน โฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมในแม่แบบปิด.....	39
รูปที่ 3.1 เครื่องฉีด โฟม.....	45
รูปที่ 3.2 แม่พิมพ์หล่อร้อน	45

รูปที่ 3.3 เครื่องทดสอบค่าความแข็ง	46
รูปที่ 3.4 ฐานรองรับชิ้นงาน (Test Box)	47
รูปที่ 3.5 Line การผลิตโฟม	48
รูปที่ 3.6 ตำแหน่งในการทดสอบเรียงเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 200 มิลลิเมตร	48
รูปที่ 3.7 แบบจำลองการกดโฟม	49
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของโฟมที่มีค่าความแข็งน้อยที่สุด	59
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของโฟมที่มีค่าความแข็งมากที่สุด	60
รูปที่ 4.3 Normal Probability Plot ของข้อมูลค่าความแข็งของโฟม	61
รูปที่ 4.4 การทดสอบความอิสระของข้อมูลค่าความแข็งของโฟม	62
รูปที่ 4.5 การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวน	63
รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ ระหว่าง ปริมาณ ISO และ PC ที่มีผลต่อค่าความแข็งของ โฟม	68
รูปที่ 4.7 โครงสร้างของโฟมเบาะรถยนต์ (Polyurethanes structure) [14]	68
รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความแข็ง กับ แต่ละปริมาณน้ำยาโฟม ISO กับปริมาณน้ำยา โฟม PA 228 g และ น้ำยาโฟม PC 456 g	69
รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความแข็ง กับ แต่ละปริมาณน้ำยาโฟม PC กับปริมาณน้ำยาโฟม PA 228 g และ น้ำยาโฟม ISO 268 g	70
รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความแข็ง กับ แต่ละปริมาณน้ำยาโฟม PA กับปริมาณน้ำยา โฟม PC 456 g และ น้ำยาโฟม ISO 268 g	71
รูปที่ 4.11 การทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายค่าความแข็งของ โฟมเบาะรถยนต์	77
รูปที่ 4.12 การทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายค่าความแข็งของ โฟมเบาะรถยนต์	80
รูปที่ 4.13 การทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายค่าความแข็งของ โฟมเบาะรถยนต์	83

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

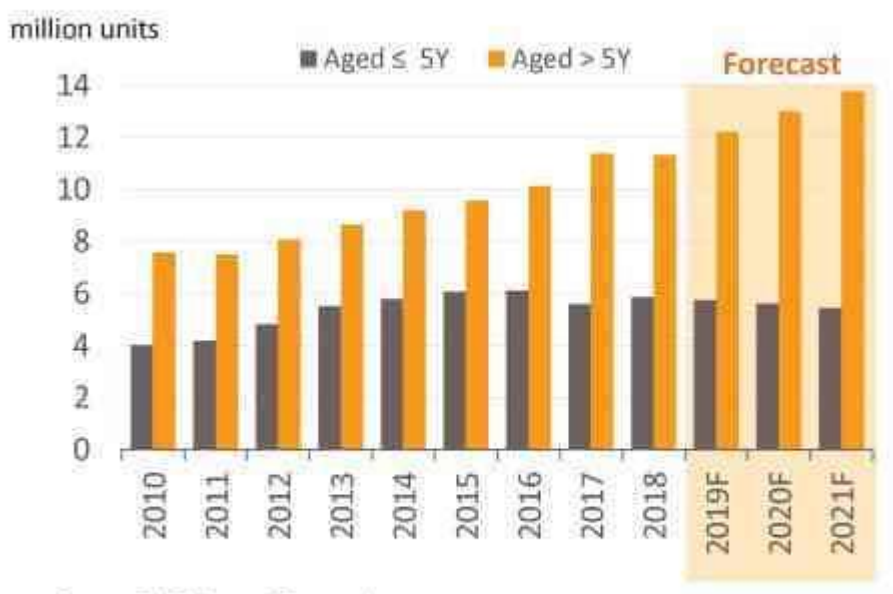
อุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ของไทยในปี 2562-2564 คาดว่าจะมีรายได้ (ในรูปเงินบาท) ขยายตัวต่อเนื่อง 3-5% ต่อปี โดยมีปัจจัยหนุนจากความต้องการชิ้นส่วนฯ OEM ทั้งตลาดในประเทศ และตลาดส่งออก รวมทั้งความต้องการชิ้นส่วนฯ REM ที่ยังขยายตัวต่อเนื่องการจำหน่ายชิ้นส่วนฯ ในประเทศปี 2562 คาดว่ารายได้จะเติบโต 0-3% YoY ส่วนในปี 2563-2564 น่าจะเติบโต 2-5% ต่อปี ตามทิศทางความต้องการ ชิ้นส่วนเพื่อใช้ในการประกอบยานยนต์ (OEM) (รูปที่ 1.1)

ทั้งนี้ วิจัยกรุงศรี คาดการณ์การผลิตรถยนต์ในปี 2562 จะหดตัว 0-2% YoY (ผลจากภาวะชะลอตัวทางเศรษฐกิจ กำลังซื้อภาคเกษตรที่ได้รับผลกระทบจากภาวะภัยแล้ง และการเทียบกับฐานสูงในปี 2561) และปี 2563-2564 จะเติบโตเฉลี่ย 0-2% ต่อปี ตามภาวะ เศรษฐกิจ และความต้องการเปลี่ยนรถยนต์ใหม่ของผู้บริโภคบางส่วนที่ซื้อรถยนต์ในโครงการรถคันแรกหลังจากรถยนต์มีอายุการใช้งาน 6-7 ปี รวมทั้งการเร่งผลิตตามแผนการส่งเสริมการลงทุน Eco-car ส่วนการผลิตรถจักรยานยนต์ในปี 2562-2564 จะขยายตัว 2-4% YoY, 0-2% YoY และ 0-2% YoY ตามลำดับ แรงหนุนจาก นโยบายช่วยเหลือผู้มีรายได้น้อยของรัฐบาลผ่านโครงการรัฐสวัสดิการ และโครงการ “บสย. รักพืชมิน” เพื่อช่วยเหลือผู้ประกอบการอาชีพรถจักรยานยนต์รับจ้างสาธารณะ ผ่นวกกับการผลิตรถจักรยานยนต์ขนาดใหญ่ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการย้ายฐานการผลิตเพื่อส่งออกของค่ายรถจักรยานยนต์ระดับโลก

ขณะที่ความต้องการชิ้นส่วนเพื่อการทดแทน (REM) คาดว่าจะเติบโตต่อเนื่อง ตามการเพิ่มขึ้นในอัตราเร่งของ จำนวนรถยนต์สะสมที่มีอายุมากกว่า 5 ปี (โดยเฉพาะรถยนต์ในโครงการรถคันแรกมีอายุมากกว่า 7 ปี) ซึ่งเป็นกลุ่มเป้าหมายที่ต้องเปลี่ยนชิ้นส่วนฯ ตามอายุและระยะทางการใช้งาน และโครงการ ซ่อปช่วยชาติที่สามารถนำค่าใช้จ่ายในการซื้อ ยานพาหนะมาหักลดหย่อนภาษีเงินได้บุคคลธรรมดาในปีภาษี 2561-2562 ส่วนการส่งออกชิ้นส่วนฯ มีแนวโน้มทรงตัวตามภาวะชะลอตัวทางเศรษฐกิจของประเทศคู่ค้า ทั้งนี้ การย้ายฐานเข้ามาลงทุนในไทยเพิ่มขึ้นของผู้ผลิตชิ้นส่วนฯ ต่างชาติ โดยเฉพาะญี่ปุ่นซึ่งมีความพร้อมด้านเงินทุน เทคโนโลยี และเป็นโครงข่ายเชื่อมโยงกับฐานการผลิตยานยนต์ทั่วโลก จะหนุนให้อุตสาหกรรมชิ้นส่วนฯ ไทยยกระดับคุณภาพและเทคโนโลยีการผลิต และสามารถขยายการส่งออกได้อย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม การที่ผู้ผลิตต่างชาติ โดยเฉพาะ SMEs ญี่ปุ่นเข้ามาตั้งฐานการผลิตในไทยมากขึ้น อาจกดดันให้การแข่งขันมีแนวโน้มรุนแรง

ขึ้น โดยเฉพาะตลาด REM ซึ่งมีผู้ประกอบการสัญชาติไทยจำนวนกว่า 1,100 ราย และส่วนใหญ่เป็นผู้ผลิตชิ้นส่วนฯ Tier 2 – Tier 3

Figure 9: Accumulated Registered Automobiles Forecast

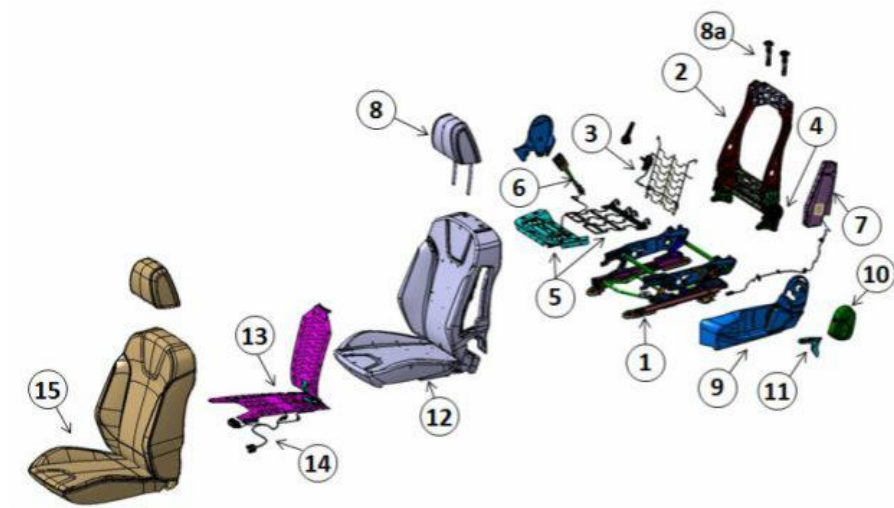


รูปที่ 1.1 การพยากรณ์รถยนต์สะสมที่อายุมากกว่า 5 ปี



รูปที่ 1.2 ส่วนประกอบของรถยนต์

จากรูปภาพที่ 1.2 จะเห็นว่าชิ้นส่วนประกอบของรถยนต์นั้นมีจำนวนมาก โดยเฉพาะรถยนต์นั้นถือเป็นส่วนประกอบหลักของรถยนต์ เนื่องจากเป็นชิ้นส่วนที่สัมผัสกับผู้ขับขี่และผู้โดยสาร โดยตรง ทำให้ต้องใส่ใจในเรื่องความพึงพอใจและความปลอดภัยของผู้บริโภค โดยส่วนประกอบของเบาะรถยนต์นั้นยังมีจำนวนมากและสามารถแยกส่วนประกอบหลักๆได้ดังนี้

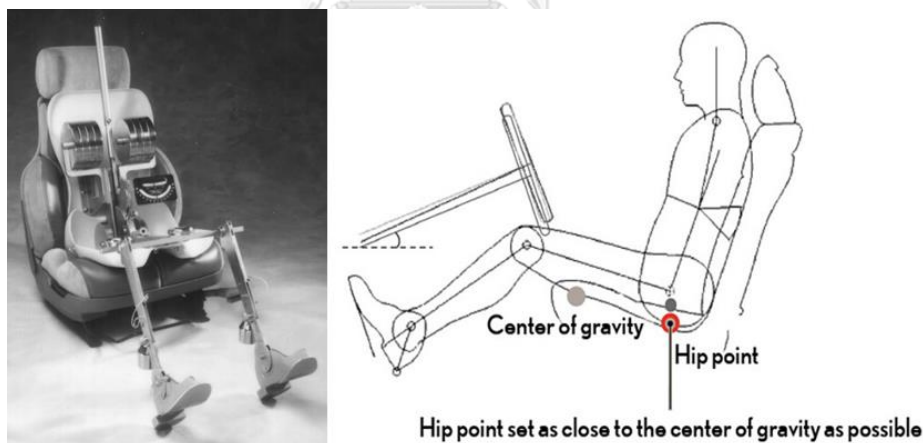


รูปที่ 1.3 ส่วนประกอบของเบาะรถยนต์

1. โครงเหล็กปรับตัวนั่งเบาะ (Seat frame adjuster assembly)
2. โครงเหล็กตัวพิงเบาะ (Seat frame back assembly)
3. รองหลัง (Lumbar mechanism)
4. ตัวปรับเอนเบาะ (Seat recliner assembly)
5. รองนั่ง (Suspension and Static mat assembly)
6. เข็มขัดเบาะ (Seat belt assembly)
7. ถุงลม (Air bag module)
8. รองหัว (Head restraint)
9. พลาสติกครอบด้านข้าง (Side Shield)
10. พลาสติกครอบ (Covers and Bezels)
11. มือปรับ (Handle)
12. โฟมรอง (Foam Pads)
13. แผงให้ความร้อน (Heater Mat)
14. ชุดควบคุมไฟฟ้า (Connectors / Electrical Wiring harness)
15. ผ้าหุ้ม (Trim cover)

ในอุตสาหกรรมเบาะรถยนต์มีอัตราการเจริญเติบโตสัมพันธ์ไปกับยอดการผลิตรถยนต์เพราะเบาะรถยนต์ถือเป็นชิ้นส่วนยานยนต์ที่มีความสำคัญในระดับต้นๆ ที่นำมาประกอบเข้ากับชิ้นส่วนต่างๆ ทำให้เกิดเป็นรถยนต์ได้ จากตัวเลขจำนวนการผลิตรถยนต์ที่เพิ่มขึ้นทุกปีชี้ให้เห็นว่าอัตราการเจริญเติบโตของอุตสาหกรรมผลิตเบาะรถยนต์ที่เพิ่มขึ้นด้วยทุกปี เมื่อจำนวนของการผลิตเบาะรถยนต์ที่มีอัตราเพิ่มขึ้นทุกปีเมื่อจำนวนของการผลิตเบาะรถยนต์ที่มีอัตราเพิ่มขึ้นทุกปีคุณภาพนั้นเป็นส่วนสำคัญที่สุดสำหรับในอุตสาหกรรมรถยนต์ หากผู้ผลิตนั้นผลิตนั้นไม่คงคุณภาพหรือไม่มีการพัฒนาให้ดีขึ้นก็มีโอกาสที่ผู้ผลิตรถยนต์จะเปลี่ยนแหล่งจัดซื้อเบาะรถยนต์ก็ยิ่งสูง

สำหรับคุณภาพนั้น ความสบายน่าจะเป็นปัจจัยหลักในการประเมินคุณภาพของเบาะซึ่ง ในอุตสาหกรรมรถยนต์นั้นผู้ผลิตรถยนต์แต่ละค่ายก็มีการกำหนดค่าความสบายของเบาะแต่ละค่าย และรุ่นที่ไม่เหมือนกัน เนื่องจากมีปัจจัยในเรื่องของการออกแบบ ไม่ว่าจะเป็น ความแข็งของโซ้ค หรือ น้ำหนักของตัวรถที่ออกแบบ จึงทำให้ในเบาะแต่ละรุ่นนั้นมีค่าความสบายที่แตกต่างกันไป โดยที่ค่าความสบายของการนั่งนั้นจะวัดค่าได้จากตำแหน่งของสะโพกของผู้โดยสารเมื่อนั่งบนเบาะ (Hip point) ซึ่งค่า Hip point นั้นจะสัมพันธ์กับค่าความแข็งของโฟม



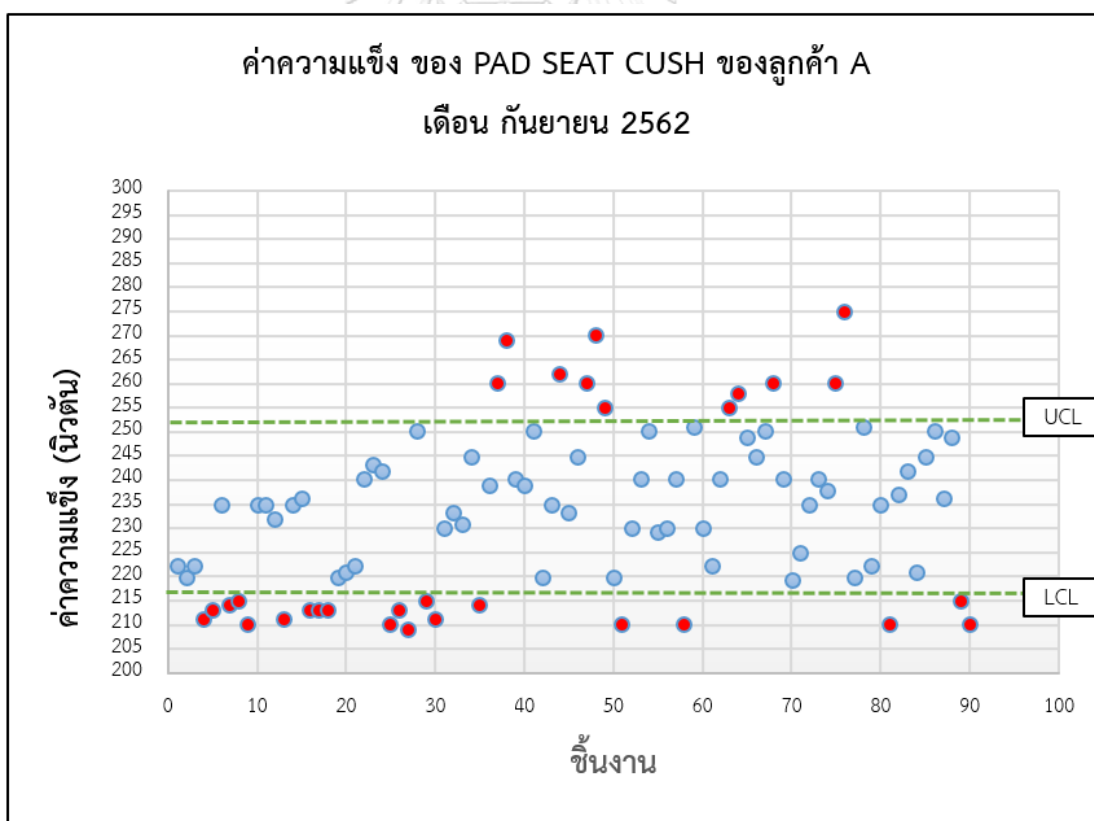
รูปที่ 1.4 หุ่นจำลองเมื่อนั่งบนเบาะเพื่อหาตำแหน่งของสะโพก [1] [2]

จาก รูปภาพที่ 1.4 จะพบว่าหาก โฟมของเบาะนั่งนั้นมีค่าความแข็งมาก ก็จะดันน้ำหนักของผู้โดยสารทำให้ค่า Hip point นั้นมีตำแหน่งที่สูง แต่ถ้าโฟมของเบาะนั้นมีค่าความแข็งน้อยทำให้ไม่สามารถดันน้ำหนักของผู้โดยสารก็จะทำให้ค่า Hip point ที่เกิดขึ้นมีตำแหน่งที่ต่ำ จึงเป็นที่มาของการกำหนดค่าความแข็งของโฟมเพื่อให้ได้คุณภาพของความสบาย

1.1.1 ที่มาของงานวิจัย

กรณีศึกษาบริษัทผู้ผลิตโฟมเบาะรถยนต์แห่งหนึ่ง ในนิคมอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรมอิสเทิร์นซีบอร์ด จังหวัดระยอง โดยข้อมูลตั้งแต่เดือน มิถุนายน 2562 ถึง เดือน ตุลาคม 2562 มียอดผลิตโฟมของลูกค้ำ A อยู่ที่ 22,140 ชิ้น ตรวจพบงานที่ไม่ได้ตามมาตรฐานมียอดรวมทั้งสิ้น 7,737 ชิ้น คิดเป็นร้อยละ 34.9 ลูกค้ำ B อยู่ที่ 12,686 ชิ้น ตรวจพบชิ้นงานที่ไม่ได้ตามมาตรฐานมียอดรวมทั้งสิ้น 4,141 ชิ้น คิดเป็นร้อยละ 32.6 และ ลูกค้ำ C อยู่ที่ 12,524 ชิ้น ตรวจพบชิ้นงานที่ไม่ได้ตามมาตรฐานมียอดรวมทั้งสิ้น 4,010 ชิ้น ซึ่งชิ้นงานที่ไม่ได้มาตรฐานนั้นเป็นเรื่องของค่าความแข็งที่ไม่ตรงตามมาตรฐานของลูกค้ำ โดยก่อนปี 2562 นั้น ลูกค้ำไม่เคยมีการสอบกลับหรือตรวจสอบในเรื่องของค่าความแข็ง แต่เมื่อทางลูกค้ำได้มีการเพิ่มมาตรฐานของค่าความแข็งลงใน แบบชิ้นงาน ลูกค้ำพบว่า ได้รับชิ้นงานที่ไม่ได้ตามมาตรฐานจำนวนมากจึง เข้ามาตรวจสอบระบบการผลิตและการตรวจสอบชิ้นงาน

จากข้อมูลในตารางที่ 1.1 พบว่าชิ้นงานที่มีการผลิต และ จำนวนของเสียมากที่สุด คือ งานที่เป็นของลูกค้ำ A ซึ่ง โดยมี ของเสีย ร้อยละ 34.95 คิดเป็นมูลค่า 928,440 บาท



รูปที่ 1.5 ค่าความแข็ง ของ PAD SEAT CUSH (AAAAAA) รุ่น AA

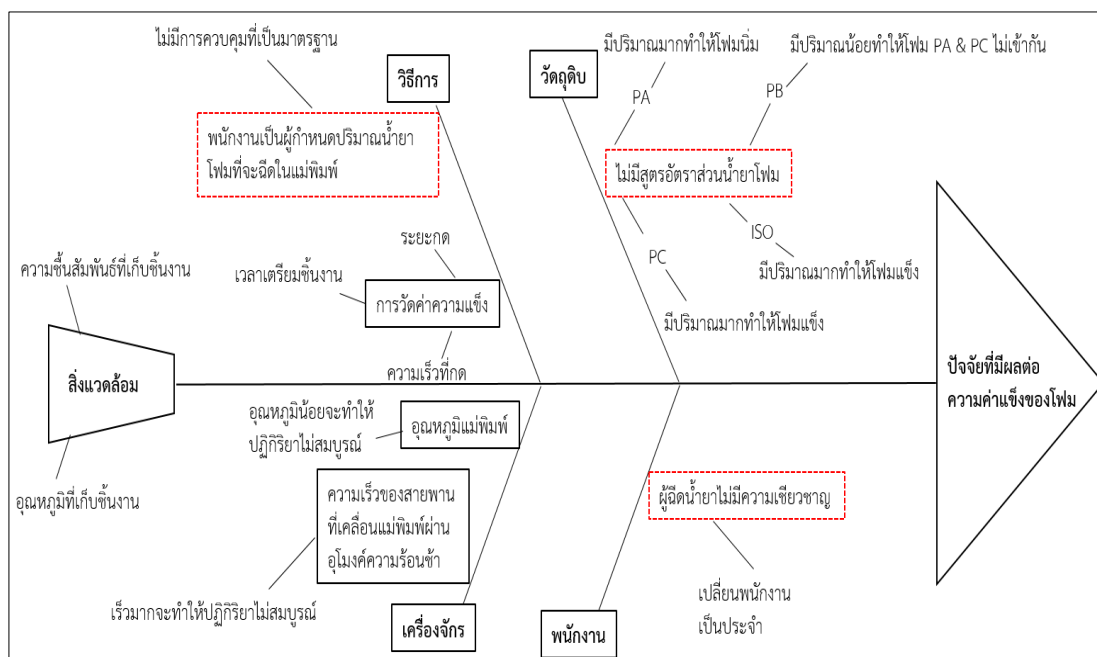
ตารางที่ 1.1 ข้อมูลของเสีย และมูลค่าทางเสีย ก่อนการปรับปรุง

ลูกค้ำ	ลูกค้ำ A			ลูกค้ำ B			ลูกค้ำ C		
	รุ่น	AA	BB	CC					
ช่วงเวลาการผลิต	2558-2568			2555-2564			2558-2564		
เดือน/ปี	ชิ้นงานที่มี การผลิต	ของเสียที่ลูกค้ำพบ จำนวนชิ้น	คิดเป็นร้อยละ	ชิ้นงานที่มี การผลิต	ของเสียที่ลูกค้ำพบ จำนวนชิ้น	คิดเป็นร้อยละ	ชิ้นงานที่มี การผลิต	ของเสียที่ลูกค้ำพบ จำนวนชิ้น	คิดเป็นร้อยละ
มิถุนายน 2562	4,040	1,535	38	2,560	840	32.81	2,340	750	32.05
กรกฎาคม 2562	3,950	1,343	34	2,106	650	30.86	2,589	770	29.74
สิงหาคม 2562	3,540	1,309	36.98	2,370	900	37.97	2,170	580	26.73
กันยายน 2562	6,540	2,289	35	3,080	980	31.82	2,865	1,020	35.6
ตุลาคม 2562	4,070	1,261	30.98	2,570	771	30	2,560	890	34.77
รวม	22,140	7,737	34.95	12,686	4,141	32.64	12,524	4,010	32.02
มูลค่าของเสีย(บาท)	928,440			496,920			481,200		

จากรูปภาพ 1.5 พบว่าค่าความแข็งนั้นมีการกระจายตัวทั้งที่ สูงกว่ามาตรฐานที่ลูกค้ากำหนด และน้อยกว่ามาตรฐานที่ลูกค้ากำหนด มากถึงร้อยละ 34.95 ของชิ้นงานที่ผลิตและค่าความแข็งของ ชิ้นงานแต่ละ Part No. และ แต่ละลูกค้านั้นมีจำนวนมาก ดังตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2 แสดงค่าความแข็งของ PAD แต่ละ Part No. ของ ลูกค้าที่ผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม (กรณีศึกษา)

ลำดับ.	ลูกค้า	หมายเลขชิ้นงาน	ชื่อชิ้นงาน	ค่าความแข็ง (ความเค้น)
				มาตรฐาน (นิวตัน/ 314 ตารางเซนติเมตร)
1	ลูกค้า A	AAAAAA	PAD FR SEAT CUSH RH	235
2		AAAAAB	PAD FR SEAT BACK	80
3		AAAAAC	PAD, RR SEAT CUSHION 60% (LH)	215
4		AAAAAD	PAD NO.1 SEAT BACK 100%	120
5		AAAAAE	PAD, NO.1 SEAT BACK 40%(RH)	95
6		AAAAAF	PAD, NO.1 SEAT CUSHION 40% (RH)	240
7		AAAAAG	PAD, NO.2 SEAT CUSHION, RH	225
8	ลูกค้า B	BBBBBA	PAD SUB ASSY FR SEAT BACK RH (WITH SAB)	135
9		BBBBBB	PAD SUB ASSY FR SEAT CUSHION 4W MAN	190
10		BBBBBC	PAD R/SEAT BACK WITH CTR H/R LH (60%)	130
11		BBBBBD	PAD R/SEAT CUSHION RH (40%)	185
12		BBBBBE	PAD BACK FR SEAT RH	110
13		BBBBBF	PAD CUSH FR SEAT RH	210
14		BBBBBG	PAD 3PT BELT1LOCK KEIPER L2000	140
15		BBBBBH	PAD NON ISOFIX	180
16	ลูกค้า C	CCCCCA	RR Seat Back 60%	127
17		CCCCCB	FSB w/o SAB	144
18		CCCCCC	FOAM, BACK, FRONT BENCH, RH	160
19		CCCCCD	PAD FRAME 100%	175
20		CCCCCE	ASM CUSHION FOAM AND FRAME	250
21		CCCCCF	PAD RSC 100%	220
22		CCCCCG	PAD ASM ARMREST FRAME	150
23		CCCCCH	ASM FOAM FSC POWER REDBACK	200



รูปที่ 1.6 แผนภูมิแก๊งปลาแสดง ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งของโฟม

จากปัญหาที่เกิดขึ้นนั้นทางโรงงานนั้นมีการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งของโฟมที่ทำให้ไม่ได้ตามมาตรฐานของลูกค้าได้ ดังรูปภาพที่ 1.6 ซึ่งทำเป็นแผนภูมิแก๊งปลา และพบว่าปัจจัยหลักๆ นั้นคือ

ให้พนักงานเป็นผู้กำหนดปริมาณน้ำยาโฟมที่จะฉีดในแม่พิมพ์ทำให้ไม่มีมาตรฐานความเชี่ยวชาญของผู้ฉีดน้ำยาเพราะมีการเปลี่ยนพนักงานเป็นประจำไม่มีสูตรอัตราส่วนของสูตรน้ำยาโฟม ซึ่งทำวัสดุที่จะมาเป็นสูตรนั้น

- ส่วนประกอบใน PA คือ Base polyol ,น้ำ และ สารเติมแต่ง โดยถ้ามีปริมาณมากทำให้โฟมนิ่ม
- ส่วนประกอบใน PB คือ Base polyol และ สารเติมแต่ง โดยถ้ามีปริมาณน้อยทำให้โฟม PA & PC ไม่เข้ากัน
- ส่วนประกอบใน PC คือ Copolymer KE880 และสารเติมแต่ง โดยถ้ามีปริมาณมากทำให้โฟมมีค่าความแข็งมาก
- ISO ถ้ามีปริมาณมากทำให้โฟมแข็ง

สารเติมแต่งนั้นคือ สารลดแรงตึงผิว สารฟู เจล และ ซิลิโคน โดยจะมีปริมาณเท่าๆกัน ใน PA ,PB และ PC

ซึ่งเมื่อพบปัจจัยที่เกิดขึ้นแล้วทางโรงงานได้ทำการแก้ไข ปัจจัยในข้อที่ 1 และ 2 โดยเปลี่ยนวิธีการฉีดน้ำยาโฟมลงในแม่พิมพ์ จากใช้พนักงานเปลี่ยนเป็น Robot แทน แต่ยังไม่สามารถแก้ไข ปัจจัยในข้อที่ 3 ได้เนื่องจากต้องใช้ระยะเวลาในการทดลองและค่าใช้จ่ายจำนวนมาก จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้

ตารางที่ 1.3 อธิบายผลการปัจจัยและสภาพปัจจุบันของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งของโฟม

ปัจจัย	อธิบายผลจากปัจจัย	สภาพปัจจุบัน
1.พนักงาน		
1.1 ความเชี่ยวชาญผู้ฉีดน้ำยา	1.1 เกิดความแตกต่างในการฉีดน้ำยาแต่ละครั้ง	1.1 เปลี่ยนพนักงานเป็นประจำ
2.วัตถุดิบ		
2.1 ไม่มีสูตรอัตราส่วนของสูตรน้ำยา	2.1 ค่าความแข็งที่เกิดขึ้น	2.1 ไม่มีสูตรน้ำยา
2.1.1 น้ำยาโฟม PA	2.1.1 ทำให้โฟมมีฟองอากาศมาก	2.2 ไม่มีการกำหนดอัตราส่วน
2.1.2 น้ำยาโฟม PB	2.1.2 ทำให้โฟมมีเนื้อโฟมมากและ PA กับ PC เข้ากันได้ดี	2.3 ไม่มีการกำหนดอัตราส่วน
2.1.3 น้ำยาโฟม PC	2.1.3 ทำให้เนื้อโฟมมีความหนืดและมีโมเลกุลขนาดใหญ่	2.4 ไม่มีการกำหนดอัตราส่วน
2.1.4 น้ำยา ISO	2.5 ทำให้เนื้อโฟมแข็ง	2.5 ไม่มีการกำหนดอัตราส่วน
3. วิธีการ		
3.1 พนักงานเป็นผู้กำหนดปริมาณน้ำยาโฟมที่จะฉีดในแม่พิมพ์	3.1 น้ำหนักของโฟมแต่ละตัวและค่าความแข็งไม่เท่ากัน	3.1 ไม่มีการควบคุมที่เป็นมาตรฐาน
3.2 การวัดค่าความแข็ง	3.2 ค่าความแข็งที่แท้จริง	3.2 มีมาตรฐานกำหนดไว้
3.2.1 ระยะเวลา	3.2.1 ระยะเวลาสั้นได้ค่าความแข็งน้อย	3.2.1 ระยะเวลา 75% ตามมาตรฐานที่ลูกค้ากำหนด
3.2.2 เวลาเตรียมชิ้นงาน	3.2.2 เวลามากค่าความแข็งน้อย	3.2.2 เวลา 1 นาทีตามมาตรฐานที่ลูกค้ากำหนด

ปัจจัย	อธิบายผลจากปัจจัย	สภาพปัจจุบัน
3.2.3 ความเร็วที่กัด	3.2.3 ความเร็วที่กัดมากค่าความแข็งน้อย	3.2.3 ความเร็ว 50 มิลลิเมตร/นาที ตามมาตรฐานที่ลูกค้ากำหนด
4. เครื่องจักร		
4.1 อุณหภูมิแม่พิมพ์	4.1 อุณหภูมิน้อยจะทำให้ปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์	4.1 ใช้อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาสมบูรณ์
4.2 ความเร็วของสายพาน	4.2 เร็วมากจะทำให้ปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์	4.2 ใช้ความเร็ว 6 นาทีต่อรอบปฏิกิริยาสมบูรณ์
5. สิ่งแวดล้อม		
5.1 ความชื้นสัมพัทธ์ที่เก็บชิ้นงาน	5.1 ความชื้นมากค่าความแข็งน้อย	5.1 50% ตามมาตรฐานที่ลูกค้ากำหนด
5.2 อุณหภูมิที่เก็บชิ้นงาน	5.2 อุณหภูมิสูงค่าความแข็งมาก	5.2 23 °C ตามมาตรฐานที่ลูกค้ากำหนด

1.1.2 กรอบแนวความคิดของงานวิจัย

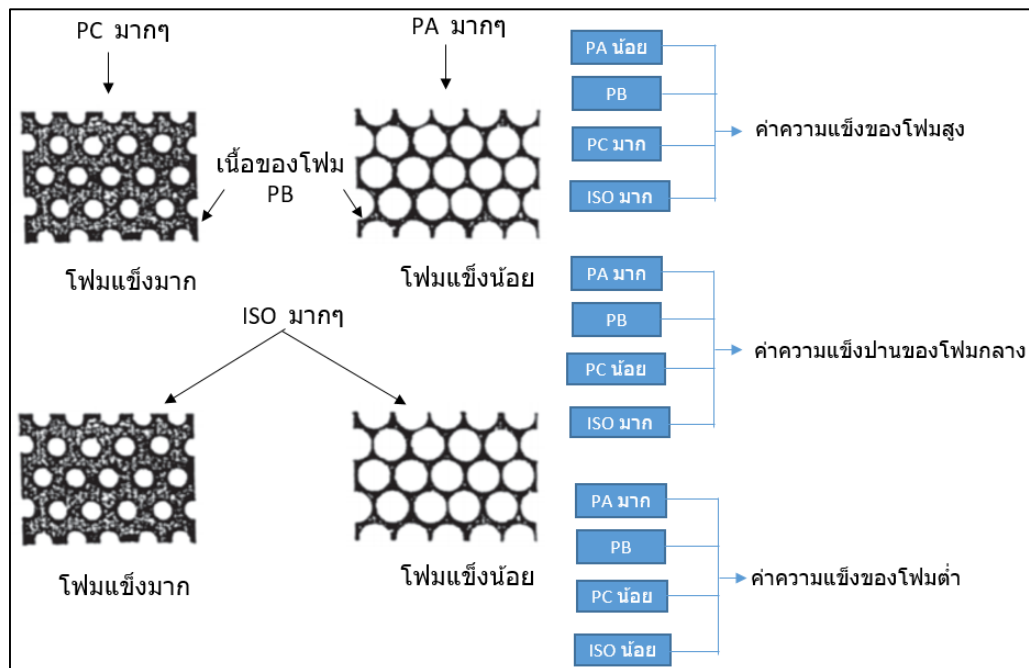
กรอบแนวความคิดของงานวิจัยเกิดจากการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุดิบแต่ละตัวโดยจะสามารถอธิบายได้ดังนี้

- PA มีคุณสมบัติเร่งให้โฟมแห้งเร็ว พูตัวเร็ว ความหนาแน่นต่ำ ทำให้เซลล์ของโฟมมีขนาดใหญ่เพราะตัวมันจะไปเพิ่มอากาศให้กับตัวโฟม
- PB มีคุณสมบัติเป็นตัวประสานให้สารละลาย PA และ PC ละลายเข้าด้วยการได้ดี เร่งให้เกิดปฏิกิริยาที่เร็วขึ้นในอุณหภูมิที่ต่ำได้
- PC มีคุณสมบัติที่ฟูตัวช้า ความหนาแน่นต่ำ ก่อให้เกิดความแข็ง มีคุณสมบัติด้านฟิสิกส์ที่ดี เช่น การทนทานต่อการขาด มีค่าความแข็งแรงสูง และมีน้ำหนักเบา
- ISO มีคุณสมบัติฟูตัวเร็ว ความหนาแน่นต่ำ ทำให้เซลล์ของโฟมมีขนาดใหญ่ ทนทานต่อแรงน้อย

ตารางที่ 1.4 งานวิจัยที่ผ่านมา

อ้างอิง	ตัวแปรที่มีผลต่อค่าความแข็งของโฟม			
	Isocyanate	PA (Blowing)	PB (Polyol)	PC (Co-polymer)
ฐิติมา ตะสุวรรณ (2014)		✓	✓	✓
วิชญ์ ธิมาบุตร (2009)	✓	✓	✓	✓
สถาพร โมคทิพย์ (2014)		✓		
ชาญวิทย์ พุนศรีไชยสิทธิ์ (2004)		✓		
H.C. Jung และคณะ (2001)		✓		
C. Oppon, P. M. Hackney, I. Shyha, M. Birkett (2015)	✓	✓	✓	✓
F. O. Aramide*, P. O. Atanda, E. O. Olorunniwo (2013)	✓			

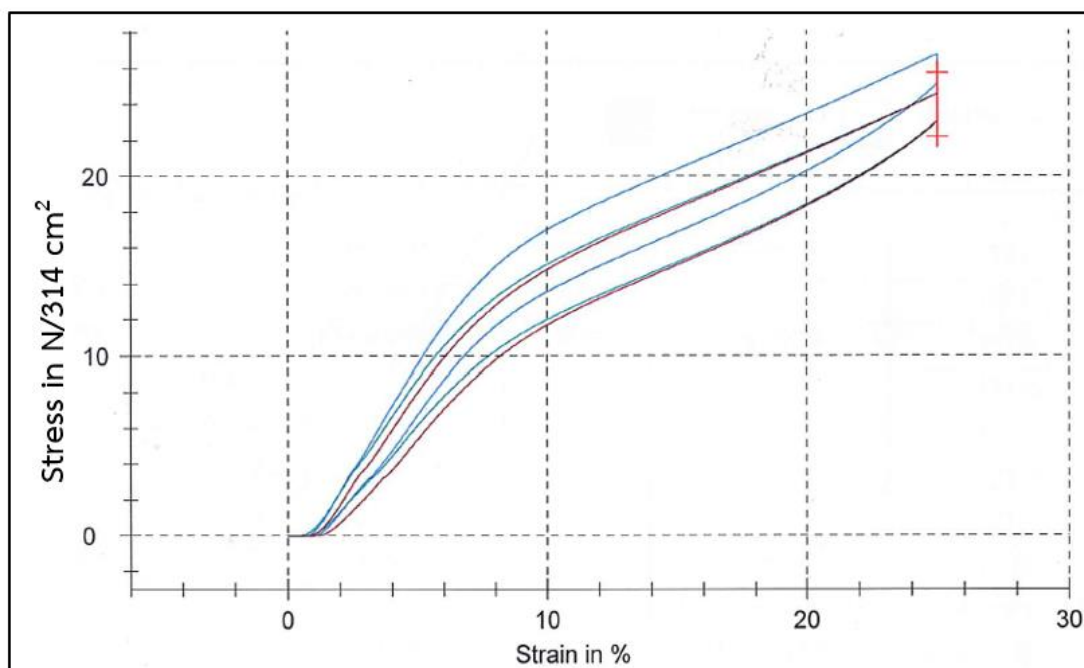
พบว่าจากงานวิจัยที่ผ่านมา ของ วิชญ์ ธิมาบุตร โดยการปรับเปลี่ยนสัดส่วนของ โพลีออลประเภทไฮโซลิต , โพลีออลประเภทไฮวอเตอร์, โพลีออลประเภทบาลานซ์เบส และไอโซไซยานต เพื่อคงคุณสมบัติของความแข็งตามที่กำหนด ซึ่ง ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแข็งมากที่สุดคือ โพลีออลประเภทไฮโซลิต โดยค่าความแข็งที่ได้ผลดีที่สุดคือการปรับโพลีออลประเภทไฮโซลิตที่ระดับ 85 เปอร์เซ็นต์ และไอโซไซยานตที่ระดับ 85 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ ชาญวิทย์ พุนศรีไชยสิทธิ์ ได้ศึกษาการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนความหนาแน่นต่ำชนิดแข็งสำหรับทำกระดานโต้คลื่นจากโพลูอินไดไอโซไซยานต พอลีออลชนิดต่างๆ และสารเติมแต่งที่จำเป็นที่จัดทำได้ภายในประเทศ โดยทำการแปรผันชนิดและปริมาณของพอลีออลรวมทั้งองค์ประกอบอื่นๆที่มีความสำคัญ เช่น สารเร่งปฏิกิริยา สารฟู และสารลดแรงตึงผิวเป็นต้น โดยจากงานวิจัยได้แสดงผลความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทน กับ ปริมาณสารฟู ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารฟู (PA สำหรับงานวิจัยนี้) ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น



รูปที่ 1.7 กรอบแนวความคิดงานวิจัย

จากภาพกรอบแนวความคิดนั้นสามารถอธิบายได้ว่าขณะเกิดปฏิกิริยานั้นหากเรามีน้ำยาโฟม PC มากๆนั้นจะทำให้เนื้อโฟมมีความหนามากก็จะทำให้ตัวโฟมนั้นมีความแข็งแรงมาก ซึ่งถ้ามีน้ำยาโฟม PA มากๆนั้น ก็จะทำให้โฟมมีอากาศมากทำให้เนื้อโฟมบาง ความแข็งแรงน้อย โดยที่ น้ำยาโฟม PB นั้นจะเป็นตัวประสาน น้ำยาโฟม PA และ PC ให้เข้าด้วยกันและเติมเนื้อของโฟม ซึ่ง ISO นั้นจะเป็นตัวทำให้เนื้อโฟมเกิดการแข็งตัวไม่ว่าจะกรณีใดๆก็ตาม ทำให้สามารถตั้งสมมติฐานได้ว่า

1. ถ้าสูตรนั้นมีค่า PA น้อย , PC มาก และ ISO มาก จะทำให้ค่าความแข็งแรงของโฟมสูง
2. ถ้าสูตรนั้นมีค่า PA มาก , PC น้อย และ ISO มาก จะทำให้ค่าความแข็งแรงของโฟมปานกลาง
3. ถ้าสูตรนั้นมีค่า PA มาก , PC น้อย และ ISO น้อย จะทำให้ค่าความแข็งแรงของโฟมต่ำ



รูปที่ 1.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโฟม

ค่าความแข็งนี้วัดจากค่าแรงต้านของโฟมที่เกิดจากการกดของเครื่องทดสอบ โดยจะกดไปที่โฟมเป็นระยะ 25% ของความหนาโฟมซึ่งจากรูปที่ 1.8 นั้นจะเป็นกราฟแนวอน และ ค่าความแข็งที่เกิดขึ้นนั้นจะเป็นกราฟแนวตั้ง ซึ่งค่าที่ได้นั้นจะเกิดขึ้น 3 ครั้งและนำค่าที่ได้มาเฉลี่ยเป็นค่าความแข็งที่แท้จริง

1.2 วัตถุประสงค์ในงานวิจัย

หาความสัมพันธ์ของอัตราส่วนสูตรน้ำยาโฟมที่มีผลต่อค่าความแข็งของโฟมเบาะรถยนต์

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. เพื่อหาอัตราส่วนของสูตรน้ำยาที่ใช้ในการผลิต PAD SEAT CUSH รุ่น AA ของ ลูกค้ำ A ใน ปี2562 ซึ่งผลิตที่ โรงงานอุตสาหกรรม (กรณีศึกษา) ในนิคมอุตสาหกรรมอีสเทิร์นซีบอร์ด
2. PAD SEAT CUSH รุ่น AA ที่นำไปหุ้มด้วยผ้าหนังในเบาะรถยนต์
3. ใช้เครื่องฉีดโฟม Line 36 ของ โรงงานอุตสาหกรรม (กรณีศึกษา)
4. Mold ที่ใช้ในการฉีดโฟม คือ Part No. AAAAAAA
5. เครื่องทดสอบค่าความแข็ง หมายเลข 1
6. ปัจจัยและระดับปัจจัยในการทดลอง ดังตารางที่ 1.5

ตารางที่ 1.5 ปัจจัยและระดับปัจจัยในการทดลอง

ปัจจัย	ระดับ
น้ำยาโฟม PA (g)	136 , 182 , 228
น้ำยาโฟม PC (g)	364 , 410 , 456
น้ำยาโฟม ISO (g)	253 , 268 , 283

โดยที่ปริมาณอัตราส่วนของ น้ำยาโฟม PB นั้น เป็นความสัมพันธ์ที่เกิดจากจาก

$$1180 \text{ (g)} - \text{PA (g)} - \text{PC (g)} - \text{ISO (g)} = \text{PB (g)}$$

อุณหภูมิ Mold นั้น คือ 65 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบของ Conveyer คือ 6 นาที/รอบซึ่งไม่สามารถ

1.4 ผลที่ได้รับ

ผลการแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับอัตราส่วนของน้ำยาที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน PAD SEAT CUSH ของโรงงานอุตสาหกรรม (กรณีศึกษา)

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

สามารถทำนายและวิเคราะห์ค่าความแข็งของ ชิ้นงาน PAD SEAT CUSH ในกรณีที่ถูกค่ามีความต้องการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของชิ้นงาน

1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งของ PAD SEAT CUSH ศึกษาข้อจำกัดของน้ำยาที่ใช้ในการทดลอง รวมถึงวิธีการเก็บข้อมูลค่าความแข็ง
2. ออกแบบการทดลองและกำหนดเงื่อนไขที่คาดว่าน่าจะมีผลต่อค่าความแข็ง
3. ทำการทดลองตามแผนการทดลอง เพื่อวิเคราะห์ผลของสูตรน้ำยาที่ใช้ในการผลิต PAD SEAT CUSH
4. วัดและเก็บค่าความแข็งของ PAD SEAT CUSH ตามเงื่อนไขที่กำหนด
5. ทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของน้ำยาและค่าความแข็งของชิ้นงาน PAD SEAT CUSH ด้วยวิธีการ Regression

7. วิเคราะห์ผลการทดลองด้วยการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบพหุคูณ (Multi Regression) เพื่อหาสมการแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของน้ำยาและค่าความแข็งของชิ้นงาน PAD SEAT CUSH
8. สรุปผลการดำเนินการวิจัย และข้อเสนอแนะ
9. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โฟม (Foam)

โฟม แบ่งออกได้เป็นสองลักษณะ คือ

1. แบบที่มีโครงสร้างเป็นโฟมทั้งชิ้น
2. แบบที่ตรงกลางมีโครงสร้างเป็นโฟม แต่ที่ขอบเป็นผิวเรียบไม่เป็นโฟม

แบบหลังนี้เรียกว่าโฟมโครงสร้าง (structural foam) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า integral foam ในระยะหลังๆนี้วัสดุโฟมได้แทรกเข้ามาในตลาดอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้นอกจากพลาสติกทุกชนิดจะสามารถทำให้เป็นโฟมได้แล้วยังสามารถผลิตเป็นชิ้นงานได้ทุกกรรมวิธีด้วย เช่น injection , extrusion , calendering และ compression ซึ่งในกรรมวิธีผลิตชิ้นงานจากโฟมก็ใช้หลักการเดียวกัน โดยโฟมที่มีการนำมาใช้งานมากที่สุด คือ polystyrene และ polyurethane ซึ่งวัสดุโฟมสามารถแยกออกได้หลายลักษณะ เช่น แยกตามโครงสร้างของเซลล์ (cell-structure) แยกตามความแข็งหรือแยกตามกรรมวิธีการผลิตก็ได้

การแบ่งแยกตามโครงสร้างของเซลล์ แบ่งออกได้เป็นแบบเซลล์ปิด เซลล์เปิด และเซลล์ผสม

1. เซลล์ปิด หมายถึง โฟมที่มีโพรงของเซลล์ไม่ต่อถึงกัน
2. เซลล์เปิด หมายถึง โฟมที่มีโพรงของเซลล์ต่อถึงกันจนทำให้เกิดก๊าซหรือ อากาศหมุนเวียนถึงกันได้ ถ้าโฟมประกอบด้วยเซลล์ปิดและเปิดอยู่ด้วยกัน เรียกว่า เซลล์ผสม โครงสร้างเซลล์นี้ขึ้นอยู่กับกรรมวิธีของการทำให้เกิดฟองโฟม และชนิดของสารทำให้เกิดโฟม ถ้าแบ่งชนิดของโฟมตามความแข็งจะแบ่งออกได้เป็น
 1. แบบด้านการแปรรูปมากและยืดหยุ่นได้น้อย เช่น โฟม PS , PVC (แข็ง) , PUR (แข็ง) , UF , PF , UP , EP , PIR , PMI
 2. แบบด้านการแปรรูปน้อยและยืดหยุ่นได้ดี เช่น PUR (อ่อน) , PVC (อ่อน)

2.2 การผลิตโฟม (Processing foam)

โฟมพลาสติกประกอบด้วยโครงสร้างของเซลล์ซึ่งได้จากการใช้สารเร่งให้ฟูเป็นฟอง สารเร่งให้เกิดฟองโฟมนี้หมายถึงสารที่เมื่อได้รับความร้อนถึงจุดหนึ่งจะเกิดปฏิกิริยาเป็นก๊าซขึ้น ทำให้พลาสติกฟูเป็นฟอง และในขณะที่ฟูออกนี้จะต้องขยายแม่พิมพ์ออกให้ปริมาตรโตขึ้น ซึ่งจำทำให้ได้ชิ้นงานซึ่งมีความหนาแน่นน้อยกว่าพลาสติกปกติที่ไม่ได้ทำให้เป็นโฟม โดยพลาสติกที่เหมาะสมที่จะนำมาทำโฟมจะต้องเป็นพลาสติกที่สามารถลดความหนาแน่นได้นั่นเอง

พลาสติกที่ทำเป็นโฟมได้แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มด้วยกันคือ

1. กลุ่มที่สามารถใช้ผงฟูเป็นโฟมขณะเป็นของแข็งได้ เช่น PS
2. กลุ่มที่หลอมเหลวแล้วจึงฟู เช่น PS , PE , PVC
3. กลุ่มสารเริ่มต้นเป็นของเหลวและทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีเป็นโฟม เช่น PUR, PF , UF

สำหรับการทำโฟม polyurethane นั้นไม่จำเป็นต้องใส่สารเร่งเพิ่มเติมก็สามารถทำโฟมได้ทั้งนี้ เพราะในระหว่างปฏิกิริยาของ isocyanate และ polyol จะมี CO₂ แยกตัวออกมาเร่งพลาสติกให้ เกิดโฟมได้ในทางปฏิบัติจะเติมสารเร่งทางฟิสิกส์เข้าไปอีกเล็กน้อย เพื่อให้โฟมมีคุณสมบัติตามต้องการ

2.3 กรรมวิธีการทำโฟม

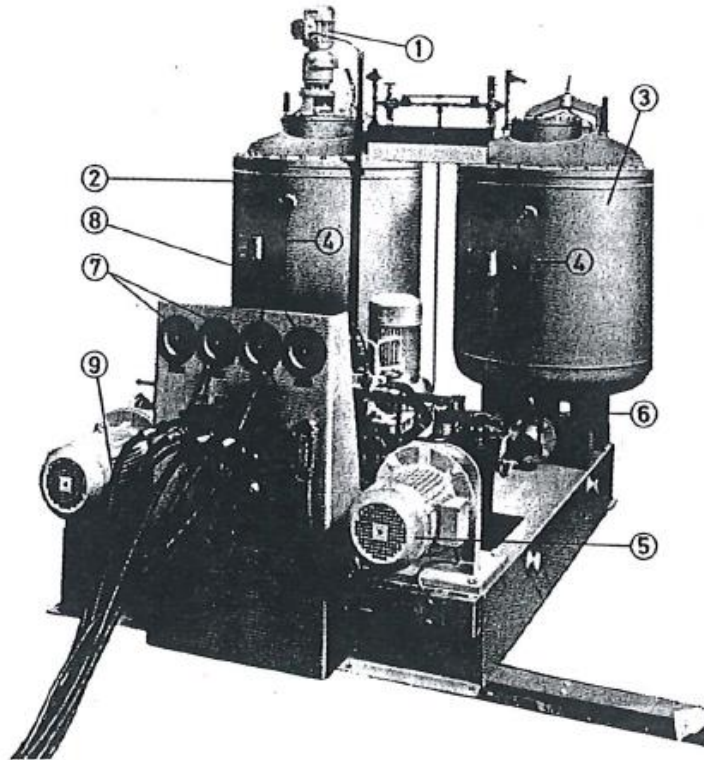
พลาสติกเกือบทุกชนิดสามารถทำเป็นโฟมได้และสามารถใช้กรรมวิธีทำให้เกิดโฟมที่กล่าว มาแล้วได้ทุกระบบวิธี นอกจากนี้ยังมีเทคนิคในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลายวิธี เช่น การทำเป็น รูปทรงต่างๆ ทำเป็นก้อน ทำเป็นแผ่น ดังในตารางที่ 2.1 แสดงถึงกรรมวิธีต่างๆ ที่ใช้ผลิตชิ้นงานโฟม และในระยะหลังๆ นี้ก็ได้มีกรรมวิธีอื่นๆ เกิดขึ้นมาอีกจำนวนมาก

ตารางที่ 2.1 กรรมวิธีการทำโฟม จากพลาสติกที่สำคัญบางชนิด[3]

โฟม	โฟมแบบมีความหนาแน่นสม่ำเสมอ		integral foam	
	กรรมวิธี	พลาสติก	กรรมวิธี	พลาสติก
ลักษณะของวัสดุที่ใช้				
เทอร์โมพลาสติก	extrusion	PS, SB, ABS	extrusion	PS, SB, ABS,
หลอมเหลว	calendering compression	PVC , PE	calendering injection foaming	PVC, PE, PC, PPO-ปรับปรุง
ผงที่สามารถทำให้ฟูได้	กรรมวิธีผลิต styropor	PS	-	-
สารพลาสติกเหลวที่จะทำปฏิกิริยาเป็นโฟมได้	การหล่อโฟมอย่าง ต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ในแม่พิมพ์ หรือนัดลง บนสายพานให้ยาวต่อเนื่อง	PF, UF, PUR	การหล่อโฟมปฏิกิริยา (SRG)	PUR

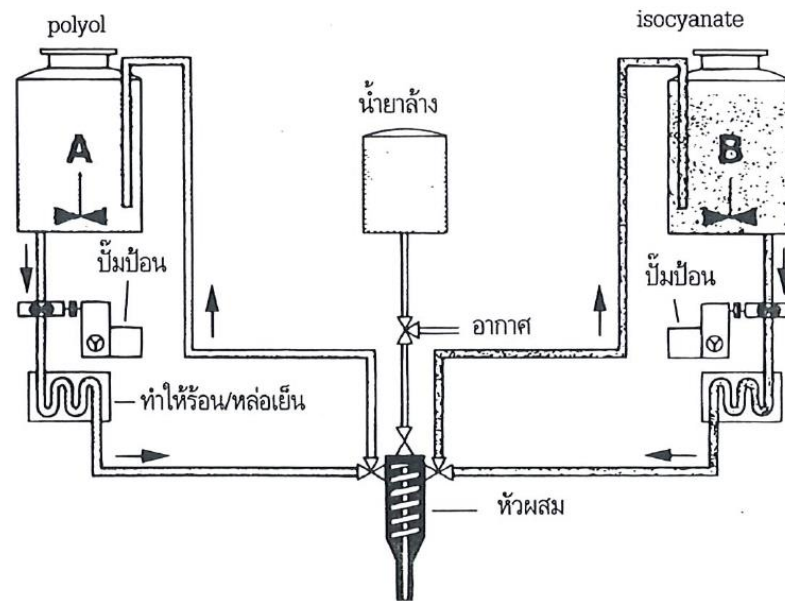
2.4 อุปกรณ์ที่ใช้หล่อ Integral Foam

1. อุปกรณ์ผสมเตรียมส่งเข้าแม่พิมพ์



รูปที่ 2.1 อุปกรณ์ผสมเตรียมส่งเข้าแม่พิมพ์ [3]

1. เครื่องกวน สำหรับ polyol
2. ถังสองชั้นบรรจุ polyol
3. ถังสองชั้นบรรจุ isocyanate
4. เกจบอกอัตราการเติมส่วนผสมของ polyol และ isocyanate
5. ชุดป้อน poly
6. ไฮดรอลิกสำหรับควบคุมหัวผสม
7. เกจควบคุมความดันของ polyol
8. เกจควบคุมความดันของ isocyanate
9. ท่อส่งไปยังหัวผสม

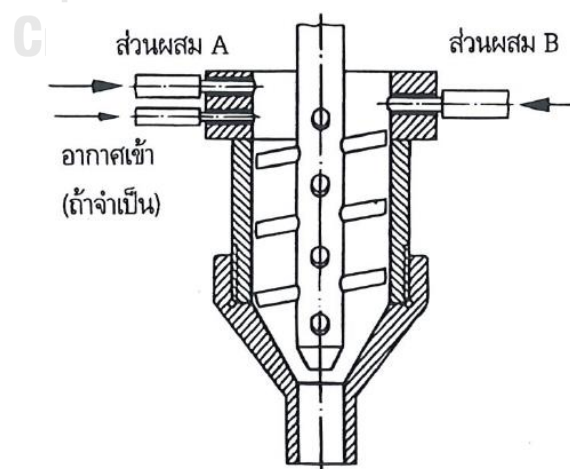


รูปที่ 2.2 แผนภูมิของเครื่องผลิต integral foam พร้อมอุปกรณ์ต่างๆ [3]

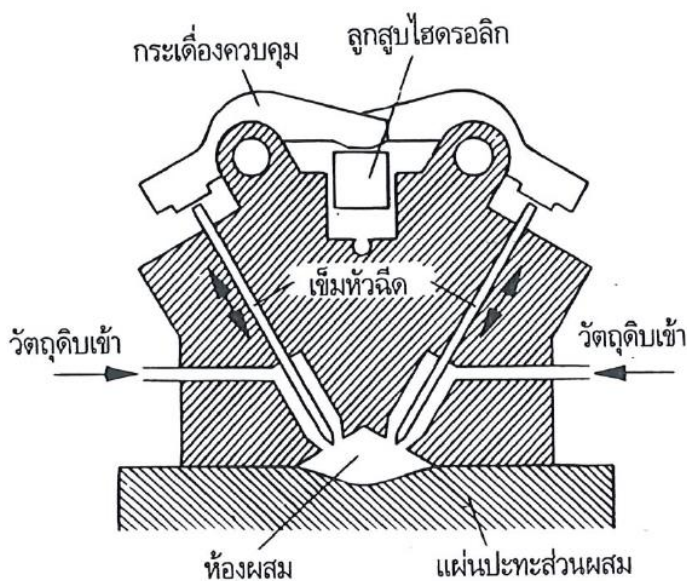
2. หัวผสม

การผสมนั้นมีสองชนิดคือ แบบใช้เครื่องกวนและผสมโดยการฉีด ในรูปภาพที่ 2.3 แสดงหลักการของการผสมแบบใช้ใบกวนและในรูปภาพที่ 2.4 เป็นแบบใช้หัวฉีดโดยมีกระเดื่องควบคุมการฉีด ในการฉีดเข้าผสมด้วยความดันสูงนั้นจะทำให้เกิดการผสมภายในชั้นระหว่างสารผสมในระยะเวลาอันสั้น และสามารถนำมาหล่อได้ครั้งละมากๆ สำหรับการผสมโดยใช้เครื่องกวนนั้นเหมาะที่จะใช้ในการผลิตชิ้นงานขนาดเล็กเท่านั้น ถ้าเป็นการผลิตชิ้นงานขนาดใหญ่ๆ จำนวนมากๆ จะไม่เป็นการประหยัด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.3 หลักการของหัวผสมแบบใช้ใบกวน [3]



รูปที่ 2.4 หัวผสมแบบใช้หัวฉีด แบบมีกระบอกควบคุม [3]

3. ที่จับยึดแม่พิมพ์หล่อ integral foam

สิ่งที่สำคัญที่สุดจับยึดแม่พิมพ์ควรมีคือ แผ่นติดแม่พิมพ์ควรโตที่สุดเท่าที่จะทำได้และสามารถเบี่ยงแม่พิมพ์ไปได้อย่างรอบตัว ซึ่งจากความต้องการเหล่านี้ ได้มีบริษัทผลิตซุบจับยึดแม่พิมพ์ออกจำหน่ายในตลาดเครื่องจักรกลเกี่ยวกับงานผลิตเป็นจำนวนมาก

4. แม่พิมพ์หล่อ intergal foam

ใช้วัสดุได้ทุกชนิดที่สามารถทนแรงอัดได้ประมาณ 3-6 บาร์ โดยอาจใช้ไม้ polyester, epoxy, silicone, อะลูมิเนียม หรือเหล็กก็ได้ การที่เลือกวัสดุชนิดใดนั้นขึ้นอยู่กับจำนวนชิ้นงานที่จะผลิตและอุณหภูมิที่ผิวของชิ้นงานจะต้องควบคุมให้อยู่ระหว่าง 40-80 องศาเซลเซียส ก็เป็นสิ่งที่ควรนำมาประกอบในการพิจารณาด้วย

สำหรับการผลิตชิ้นงานจำนวนมากๆจะใช้อะลูมิเนียมหรือเหล็กเท่านั้น สำหรับการทดลองหรือผลิตชิ้นงาน จำนวนน้อย ปกติจะใช้ไม้พลาสติก เช่น Polyester, epoxy หรือ silicone โดยผิวของงานจะเรียบมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับผิวแม่พิมพ์ เนื่องจาก PUR ติดแม่พิมพ์ง่าย ดังนั้นจึงต้องใช้วัสดุทากันติดเพื่อให้ถอดแบบได้ง่าย การออกแบบแม่พิมพ์จะต้องคำนึงถึงตำแหน่งที่อากาศในแม่พิมพ์จะต้องหนีออก ขณะที่โฟมฟูออก โดยปกติจะออกแบบให้อากาศเล็ดรอดออกตามแนวประกบของแม่พิมพ์

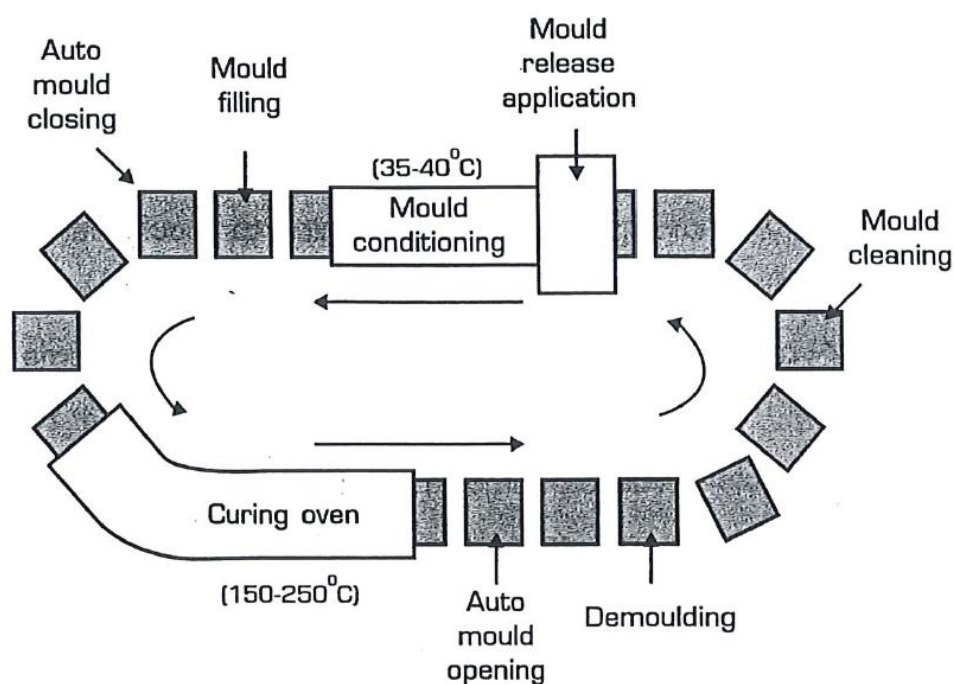
2.5 การหล่อ Integral Foam

การพัฒนาเกี่ยวกับการหล่อ integral foam เริ่มต้นจากพลาสติก PUR โดยการผลิตชิ้นงานจะเริ่มจากส่วนผสมของสารปฏิกิริยา อันมี diisocyanate และ polyol พร้อมทั้งตัวเร่งให้เกิดโฟม

รวมทั้งสารเสริมที่ต้องการเทลงในแม่พิมพ์หล่อ เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีจะเกิดความร้อนขึ้น จะทำให้สารเร่งให้เกิดโฟม โดยมากจะใช้ monofluorotrichlormethane หรือ trifluorochlorethane แตกตัวเป็นก๊าซ ทำให้สารผสมฟูออกเป็นโฟม ความดันที่ใช้อัดส่วนผสมในแม่พิมพ์จะใช้ประมาณ 3 ถึง 6 bar และจะต้องมีการศึกษาอุณหภูมิ และการระบายความร้อนของส่วนผสมตรงบริเวณผิวปิดเป็นอย่างดีที่จะทำให้โครงสร้างของเซลล์ตรงบริเวณผิวสลายตัวเป็นผิวเรียบ เนื่องจากกรรมวิธีนี้ใช้ความดันต่ำ จึงสามารถผลิตชิ้นงานขนาดใหญ่ได้โดยไม่ต้องใช้เครื่องขนาดใหญ่เกินความจำเป็น ระยะเวลาของชิ้นงานที่อยู่ในแม่พิมพ์ก็สั้น เพราะเพียงแต่รอให้ผิวปิดคงตัวดีแล้วก็สามารถจะเปิดแม่พิมพ์ปลดชิ้นงานออกได้ทันที

2.6 วิธีการผลิต แบบ แม่พิมพ์หล่อร้อน (Production Methods for Hot molding)

โดยทั่วไปแล้ว polyether triols กับ TDI นั้นอาศัยหลักการให้ความร้อนจากภายนอกไปยังที่ผิวของโฟม ก่อนปล่อยแม่พิมพ์ ดังนั้นในการลดระยะเวลาในการผลิตจึงจำเป็นต้องมีการกำหนดปริมาณของน้ำยาโฟมที่จ่ายไปยังแม่พิมพ์ ซึ่งอยู่ที่ประมาณ 40°C โดยมีการบ่มตัวความร้อนที่ $150\text{-}250^{\circ}\text{C}$ (อุณหภูมิที่ผิว ประมาณ 200°C) โดยขึ้นอยู่กับความต้องการปริมาณงานและการออกแบบแม่พิมพ์ ภายใต้เงื่อนไข ซึ่งจะใช้เวลา ประมาณ 10 นาที (ปกติจะอยู่ในช่วง 6-12 นาที) หลังจากนั้นถึงจะนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ได้ ในการผลิตจำนวนมากๆนั้นเพื่อให้การผลิตไหลอย่างคล่องตัว อาจจะต้องพึ่งระบบสายพานอัตโนมัติ ดังรูปภาพที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แผนภูมิของการผลิตแบบแม่พิมพ์หล่อร้อน [4]

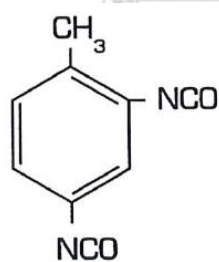
จากรูปภาพที่ 2.5 จะทำให้เข้าใจถึงกระบวนการไหลของแม่พิมพ์หล่อในสายพานการผลิต ดังนี้

1. แม่พิมพ์หล่อนั้นจะถูกติดตั้งบนสายพาน
2. ผ่านการควบคุมอุณหภูมิที่ 35-40o C
3. น้ำยาโฟมจะถูกเทลงในแม่พิมพ์หล่อ
4. แม่พิมพ์หล่อจะถูกปิด
5. แม่พิมพ์หล่อจะผ่านอุโมงเพื่อบ่มด้วยตัวร้อน 150-250o C
6. แม่พิมพ์หล่อจะถูกเปิดออก
7. ชิ้นงานจะถูกนำออกจากแม่พิมพ์หล่อ
8. ทำความสะอาดภายในแม่พิมพ์หล่อ

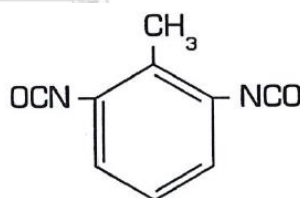
2.7 วัตถุดิบในการผลิตโฟมเบาะรถยนต์

1. ไอโซไซยาเนต (Isocyanate) : ไอโซไซยาเนตที่ใช้ในการผลิตมีอยู่ 2 ชนิดดังต่อไปนี้

1.1 โทลูอินไดไอโซไซยาเนต (Toluene diisocyanate) : การผลิตสารนี้ (TDI) เกิดจากปฏิกิริยาของไดอะมีโนโทลูอิน (Diamino toluene) กับฟอสจีน (Phosgene) สารนี้ใช้เป็นสารตัวกลางในการเชื่อมโพลีเอเธอร์และโพลีเอสเทอร์ ที่ใช้ในการผลิตโฟมพอลิยูรีเทนและสาร TDI ในรูปส่วนผสมของ 2.4 TDI และ 2.6 TDI ในอัตราส่วน 80 : 20



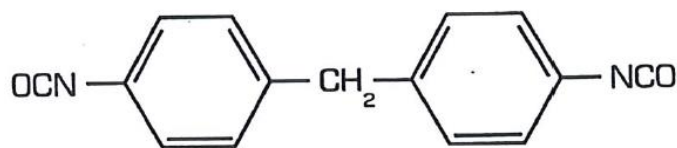
2,4-TDI



2,6-TDI

รูปที่ 2.6 โครงสร้างเคมีของไอโซไซยาเนต (Isocyanate) [4]

1.2 ไดฟีนิลมีเทน ไดไอโซไซยาเนต (Diphenylmethane diisocyanate) (MDI) : เกิดจากการ Condensation ของ Aniline และ Formaldehyde ได้เป็น Diphenylmethane diamine แล้วนำไปทำปฏิกิริยากับฟอสจีน (Phosgene) ก็จะได้ MDI และ สาร MDI นี้ยังมีไอโซเมอร์ที่พบบ่อยได้อีกคือ 4,4-Diisocyanatediphenylmethane ซึ่งใช้ในการผลิตโฟมพอลิยูรีเทน



รูปที่ 2.7 โครงสร้างเคมีไดฟีนิลมีเทน ไดไอโซไซยาเนต (Diphenylmethane diisocyanate) [4]

2. พอลิโออล (Polyol) เป็นส่วนประกอบหลักที่ใช้ในการผลิตเรซิน ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบพอลิเมริกไฮดรอกซิล ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในการเตรียมพอลิยูรีเทนโฟมมากในปัจจุบัน คือ โพลีอีเทอร์ (Polyether) , Propylene oxide & Ethylene oxide (จะเป็น Co-polymer ที่มีการจัดเรียงตัว แบบ Block co-polymer โดย Propylene จะเรียงตัวสลับกับ Ethylene ยกตัวอย่าง PPP-EEE-PPP-EEE-PPP-EEE-PPP-EEEE) บริษัทที่มีกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี จะเป็นผู้ผลิต ส่วนใหญ่ เช่น DOW, Bayer, BASF , Mitsui, Huntsman, TPI, ICI เป็นต้น
3. Blowing agent (H₂O) ในการเตรียมพอลิยูรีเทนโฟมจะต้องใช้น้ำเป็นตัวทำปฏิกิริยากับไอโซไซยาเนต ซึ่งจะทำให้เกิดสารประกอบที่มีพันธะยูเรีย (เพิ่มความแข็งแรงให้กับโฟม) และจะให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้โฟมฟูตัวและทำให้เซลล์โฟมมีลักษณะเป็นรูพรุน
4. Surfactant ส่วนใหญ่ที่ใช้ในการเตรียมพอลิยูรีเทนโฟมจะเป็นพวก Silicone surfactant สารจำพวกนี้เมื่อเติมเข้าไปแล้วทำให้การผสมของส่วนต่างๆเข้ากันได้ดียิ่งขึ้นและทำให้ปฏิกิริยาระหว่างไอโซไซยาเนตเกิดได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้เซลล์โฟมละเอียดยิ่งขึ้น สามารถควบคุมขนาดและปริมาณของเซลล์เปิดได้ ซึ่งผู้ผลิตส่วนใหญ่เป็นผู้ผลิตต่างประเทศ
5. Cross-linker เป็นสารจำพวกพอลิโออลที่มีหมู่ที่ทำปฏิกิริยาอยู่ 2 หมู่ เช่น ไกลคอลม ไดอะมิน หรือ ไฮดรอกซิลเอมีน เป็นต้น สารเหล่านี้เมื่อทำปฏิกิริยากับไอโซไซยาเนตจะเกิดพันธะยูรีเทนและพอลิยูเรียในโครงสร้างของพอลิยูรีเทนโฟม โดยสารชนิดนี้มีหน้าที่เชื่อมโยงสายโซ่ โมเลกุลของพอลิยูรีเทนโฟมที่ได้มีความแข็งแรงยิ่งขึ้น
6. Catalyst เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างไอโซไซยาเนตกับน้ำ และไอโซไซยาเนต กับพอลิโออล สารที่ใช้ส่วนมากจะเป็นพวกเอมีน ซึ่งที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันจะแบ่งเป็นสองพวก คือ Blowing catalyst (ช่วยเรื่องการฟูตัวของโฟม) และ Gelling catalyst (ช่วยเรื่องการยุบตัวของโฟม)
7. Additive เป็นสารที่เติมไปเพื่อเพิ่มสมบัติบางอย่างที่ลูกค้าต้องการตามวัตถุประสงค์ในการนำไปใช้งานของลูกค้า เช่น สารป้องกันการติดโฟม, Calcium carbonate และสารแต่งสี เป็นต้น [3]

2.8 แบบจำลองการถดถอยแบบเชิงเส้น

การสร้างแบบจำลองการถดถอยแบบเชิงเส้น สมมติว่าเราต้องการจะสร้างแบบจำลองที่ได้จากการทดลอง ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของสารโพลิเมอร์กับอุณหภูมิและอัตราป้อนของตัวเร่งปฏิกิริยา แบบจำลองซึ่งอาจจะใช้แสดงความสัมพันธ์นี้คือ [5]

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \epsilon \quad (2.1)$$

โดยที่ y คือค่าความหนืด, x_1 คืออุณหภูมิ, x_2 คืออัตราป้อนของตัวเร่งปฏิกิริยา แบบจำลองการถดถอยแบบเชิงเส้นพหุคูณนี้ประกอบด้วยตัวแปรอิสระ 2 ตัว เราจะเรียกตัวแปรอิสระว่า ตัวแปรทำนาย (Predictor Variable) หรือ ตัวถดถอย (Regressor) คำว่าเชิงเส้นถูกนำมาใช้เนื่องจากว่าสมการที่ 2.1 เป็นฟังก์ชันเชิงเส้นของพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า β_0 , β_1 และ β_2 แบบจำลองแสดงให้เห็นถึงระนาบเกินสองมิติของ x_1 และ x_2 พารามิเตอร์ β_0 จะเป็นตัวกำหนดจุดตัดของระนาบ ในบางครั้งเราเรียก β_1 และ β_2 ว่าค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยแบบบางส่วน (Partial Regression Coefficient) เนื่องจากว่า β_1 จะแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับค่าของ y ต่อหนึ่งหน่วยการเปลี่ยนแปลงของ x_1 เมื่อ x_2 คงที่, และ β_2 จะแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงที่จะเกิดขึ้นกับค่าของ y ต่อ หนึ่งหน่วยการเปลี่ยนแปลงของ x_2 เมื่อ x_1 คงที่

ปกติ แล้วตัวแปรผลตอบ y อาจจะถูกเกี่ยวข้องกับตัวแปรถดถอย k ตัว ซึ่งจะมีแบบจำลองเป็น

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \epsilon \quad (2.2)$$

ซึ่งสมการรูปแบบนี้เรียกว่า แบบจำลองการถดถอยแบบเชิงเส้นพหุคูณที่มีตัวแปรถดถอย k ตัว (Multiple Linear Regression Model with k Regressor Variables) พารามิเตอร์ β_j , $j = 0, 1, \dots, k$ ถูกเรียกว่า สัมประสิทธิ์การถดถอย แบบจำลองนี้แสดงระนาบแบบระนาบเกิน (Hyperplane) ที่มีมิติ k ของตัวแปรถดถอย (x_j) พารามิเตอร์ β_j แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงที่จะเกิดขึ้นกับผลตอบ y ต่อหนึ่งหน่วยของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับ x_j เมื่อตัวแปรอิสระที่เหลือทั้งหมด x_i ($i \neq j$) มีค่าคงตัว

สำหรับแบบจำลองที่มีความซับซ้อนมากกว่าที่ปรากฏในสมการที่ 2.2 ก็ยังอาจจะวิเคราะห์ได้โดยใช้เทคนิคของการถดถอยแบบเชิงเส้นพหุคูณ ตัวอย่างเช่น พิจารณาแบบจำลองที่มีการเติมพจน์ของอันตรกิริยาลงไปในแบบจำลองอันดับที่หนึ่งซึ่งมี 2 ตัวแปร กล่าวคือ

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \varepsilon \quad (2.3)$$

2.9 การประมาณค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น

วิธีกำลังสองน้อยสุด (Lest Square) เป็นวิธีการที่ใช้มากในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยสำหรับแบบจำลองการถดถอยแบบเชิงเส้นพหุคูณ สมมติว่า $n > k$ เป็นข้อมูลของตัวแปรผลตอบที่เก็บมาได้ กล่าวคือ y_1, y_2, \dots, y_n สำหรับค่า y_i ที่เก็บข้อมูลมาได้แต่ละตัวจะมีตัวแปรถดถอยที่เกี่ยวข้องกับมันอยู่ กำหนดให้ x_{ij} แทนระดับที่ i ของตัวแปร x_j ตารางของข้อมูลเช่นนี้แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ข้อมูลสำหรับการถดถอยแบบเชิงเส้นพหุคูณ

y	x_1	x_2	...	x_k
y_1	x_{11}	x_{12}	...	x_{1k}
y_2	x_{21}	x_{22}	...	x_{2k}
.
.
.
y_n	x_{n1}	x_{n2}	...	x_{nk}

เราสมมติว่าพจน์ของความผิดพลาด ε ในแบบจำลองมี $E(\varepsilon) = 0$ และ $V(\varepsilon) = \sigma^2$ และ (ε_i) เป็นตัวแปรสุ่มไม่มีสหสัมพันธ์ (Uncorrected) เราสามารถเขียนสมการ 2.2 ในรูปของข้อมูลจากตาราง ที่ 2.2 ได้คือ

$$\begin{aligned} y_i &= \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_k x_{ik} + \varepsilon_i \\ &= \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij} + \varepsilon_i \quad : \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (2.4)$$

จะเป็นการง่ายกว่าที่จะแก้สมการปกติเหล่านี้ ถ้าสมการเหล่านี้ถูกเขียนให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ ซึ่งเราอาจจะเขียนสมการ 2.4 ได้ใหม่ในรูปของเมทริกซ์คือ

$$y = X\beta + \epsilon \quad (2.5)$$

โดยที่

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nk} \end{bmatrix}$$

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix}, \quad \text{และ} \quad \epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_n \end{bmatrix}$$

ตามปกติแล้ว y จะเป็นเวกเตอร์ของข้อมูลที่เก็บได้ซึ่งมีขนาด $(n \times 1)$, X เป็นเมทริกซ์ขนาด $(n \times p)$ ของระดับของตัวแปรอิสระ, β เป็นเวกเตอร์ขนาด $(p \times 1)$ ของสัมประสิทธิ์การถดถอย, และ ϵ เป็นเวกเตอร์ขนาด $(n \times 1)$ ของความผิดพลาดแบบสุ่ม
ตัวประมาณค่ากำลังสองน้อยสุดของ β คือ

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1} X'y \quad (2.6)$$

2.10 การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับการถดถอยแบบพหุคูณ

สำหรับปัญหาเรื่องการถดถอยแบบพหุคูณนั้นการทดสอบสมมติฐานบางอย่างเกี่ยวกับพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองจะเป็นประโยชน์อย่างมากในการตรวจสอบถึงการใช้งานได้เหมาะสมของแบบจำลอง เพื่อใช้งานวิธีในการทดสอบสมมติฐานเหล่านี้ เราต้องสมมติว่าค่าความผิดพลาดในแบบจำลอง ϵ_i มีการกระจายแบบปกติและเป็นอิสระ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และมีความแปรปรวนเท่ากับ σ^2 ซึ่งเขียนย่อได้เป็น $\epsilon \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$ ผลที่ตามมาคือ ข้อมูลที่เก็บมาได้ y จะมีการกระจายแบบปกติและเป็นอิสระมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ

$$\beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij} \quad \text{และความแปรปรวนเท่ากับ } \sigma^2$$

2.11 การทดสอบนัยสำคัญของการถดถอย

การทดสอบนัยสำคัญของการถดถอยคือการทดสอบเพื่อที่จะตรวจสอบว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรผลตอบ y และเซตย่อยของตัวแปรถดถอย x_1, x_2, \dots, x_k หรือไม่ สมมติฐานที่เหมาะสมคือ

$$\begin{aligned} H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0 \\ H_1 : \beta_j \neq 0 \text{ for at least one } j \end{aligned} \quad (2.7)$$

การปฏิเสธ H_0 ในสมการ 2.7 บอกให้เราทราบว่า อย่างน้อยที่สุดตัวแปรถดถอย x_1, x_2, \dots, x_k หนึ่งตัวจะมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อแบบจำลอง วิธีในการทดสอบจะทำได้จากการแบ่งผลรวมทั้งหมดของกำลังสอง (SS_T) ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนออกเป็นผลรวมของกำลังสองที่เกิดจากแบบจำลองหรือการถดถอยและผลรวมของกำลังสองที่เกิดจากส่วนตกค้างหรือความผิดพลาด กล่าวคือ

$$SS_T = SS_R + SS_E \quad (2.8)$$

ถ้าสมมติฐานศูนย์ $H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$ เป็นจริงแล้ว SS_R / σ^2 จะมีการกระจายแบบ χ^2_k โดยที่ระดับชั้นความเสรีของ χ^2 เท่ากับจำนวนของตัวแปรการถดถอยในแบบจำลอง ในทำนองเดียวกันเราสามารถแสดงได้ว่า SS_E / σ^2 มีการกระจายแบบ χ^2_{n-k-1} และ SS_E และ SS_R จะเป็นอิสระ วิธีการในการทดสอบ $H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$ คือการคำนวณ

$$F_0 = \frac{SS_R/k}{SS_E/(n-k-1)} = \frac{MS_R}{MS_E} \quad (2.9)$$

และปฏิเสธ H_0 ก็ต่อเมื่อ F_0 มีค่ามากกว่า $F_{\alpha, k, n-k-1}$ ในทางกลับกันเราอาจจะใช้วิธีการ P -value เพื่อที่จะทดสอบสมมติฐานก็ได้ และจะปฏิเสธ H_0 ก็ต่อเมื่อ P -value สำหรับค่าสถิติ F_0 น้อยกว่า α ตารางทั่วไปในการวิเคราะห์ความแปรปรวนถูกสรุปอยู่ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการถดถอย

Source of Variation	Sum of Squares	Degrees of Freedom	Mean Square	F ₀
Regression	SS _R	k	MS _R	MS _R /MS _E
Error or residual	SS _E	n-k-1	MS _E	
Total	SS _T	n-1		

จากตารางที่ 2.3 จะได้สูตรดังนี้

$$SS_E = SS_T - SS_R$$

การถดถอยแบบผลรวมของกำลังสองคือ

$$SS_R = \hat{\beta}' X' y - \frac{\left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2}{n} \quad (2.10)$$

ค่าผิดพลาดของผลรวมของกำลังสองคือ

$$SS_E = y' y - \hat{\beta}' X' y \quad (2.11)$$

และผลรวมทั้งหมดของกำลังสองคือ

$$SS_T = y' y - \frac{\left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2}{n} \quad (2.12)$$

การคำนวณเช่นนี้ส่วนมากจะทำโดยใช้ซอฟต์แวร์ทางสถิติ ตัวอย่างเช่นตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ผลลัพธ์ของ Stat graphics

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	2	3171.84	1585.92	1303.10	0.000
Work Area Temp	1	392.45	392.45	322.46	0.000
Age of Mach.	1	2779.39	2779.39	2283.74	0.000
Error	27	32.86	1.22		
Lack-of-Fit	24	27.36	1.14	0.62	0.786
Pure Error	3	5.50	1.83		
Total	29	3204.70			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1.10319	98.97%	98.90%	98.76%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	122.63	2.85	43.01	0.000	
Work Area Temp	-0.6449	0.0359	-17.96	0.000	1.00
Age of Mach.	-3.3568	0.0702	-47.79	0.000	1.00

Regression Equation

Hot Sauce Produced = 122.63 - 0.6449 Work Area Temp - 3.3568 Age of Mach.

$$R^2 = \frac{SS_R}{SS_T} = 1 - \frac{SS_E}{SS_T} \quad (2.13)$$

R^2 เป็นตัววัดของจำนวนที่ลดลงในความแปรผันของ y เมื่อใช้ตัวถดถอย x_1, x_2, \dots, x_k ในแบบจำลองอย่างไรก็ตาม ค่าการที่ R^2 มีค่ามากไม่ได้แปลว่าแบบจำลองการถดถอยที่สร้างขึ้นมานี้ดี เนื่องจากการเติมตัวแปรเข้าไปในแบบจำลองจะทำให้ R^2 เพิ่มขึ้นไม่ว่าตัวแปรที่เติมเข้าไบนั้นจะมีความสำคัญทางสถิติหรือไม่ ดังนั้น อาจจะเป็นไปได้ว่าแบบจำลองที่มีค่า R^2 มาก อาจจะเป็นแบบจำลองที่ไม่ดีในการพยากรณ์ค่าผลตอบก็ได้

เนื่องจาก R^2 มีค่าเพิ่มขึ้นเสมอเมื่อเราเพิ่มพจน์ต่างๆ เข้าไปแบบจำลอง ทำให้เราชอบที่จะใช้ค่าสถิติ R^2 แบบปรับแล้วมากกว่า ซึ่งเขียนเป็นสมการได้เป็น

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{SS_E/(n-p)}{SS_E/(n-1)} = 1 - \left(\frac{n-1}{n-p} \right) (1 - R^2) \quad (2.14)$$

ตามปกติแล้วสถิติ R^2 แบบปรับแล้วจะไม่เพิ่มเมื่อจำนวนของตัวแปรเพิ่มขึ้นในแบบจำลอง แต่ในความเป็นจริง ถ้าเราเพิ่มตัวแปรที่ไม่จำเป็นลงไปในแบบจำลอง ค่าของ R_{adj}^2 จะมีค่าลดลงเสมอ และหาก R^2 และ R_{adj}^2 แตกต่างกันมาก จะหมายความว่ามีโอกาสสูงที่จะพบว่าพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญได้ถูกเติมลงไปไปในแบบจำลอง[5]

2.12 วิธีการเลือกตัวแปรต้นใส่เข้าในสมการถดถอย

การเลือกตัวแปรต้นใส่เข้าในสมการถดถอย ทำได้แตกต่างกันตามเกณฑ์ที่นักวิจัยกำหนด เป็นเกณฑ์ในการเลือก รวม 3 วิธี คือ การใส่ตัวแปรต้นทุกตัวเข้าในสมการ การใช้ค่าสถิติเป็นเกณฑ์ในการเลือกตัวแปร และการใช้กรอบแนวคิดวิจัยเป็นเกณฑ์ในการเลือกตัวแปร ทุกวิธีใช้คอมพิวเตอร์ได้ดังนี้

1. การใส่ตัวแปรต้นทุกตัวเข้าในสมการ (select all independent variables) สมการถดถอยที่ได้ เป็น สมการที่มีตัวแปรต้น อยู่ในสมการทุกตัวแปร ถือเป็นสมการถดถอยทั่วไป การตรวจสอบนัยสำคัญเป็นการตรวจสอบขนาดอิทธิพลของตัวแปรต้นแต่ละตัว เมื่อมีการควบคุมอิทธิพลจากตัวแปรต้นตัวอื่นๆ

2. การใช้ค่าสถิติเป็นเกณฑ์ในการเลือกตัวแปร (statistics-based selection) การเลือกตัวแปรต้นใส่เข้าในสมการถดถอยวิธีนี้เป็น การใส่ตัวแปรต้นเข้าในสมการเป็นขั้นตอน เพื่อเลือกตัวแปรต้นที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามสูงสุด และมีนัยสำคัญทางสถิติใส่เข้าในสมการถดถอยเป็นลำดับแรกได้ สมการถดถอยที่มีตัวแปรต้นที่ใส่เข้าในสมการเป็นลำดับแรก สามารถอธิบายความแปรปรวนในตัวแปรตามได้สูงที่สุด และมีตัวแปรต้นอื่นๆในสมการเฉพาะตัวแปรที่มีนัยสำคัญทางสถิติ สมการถดถอยที่ได้จึงเป็นสมการทำนาย (predicted equation) ที่ดีที่สุด เหมาะสำหรับการสร้างสมการทำนาย หรือ สมการพยากรณ์ การเลือกตัวแปรต้นวิธีนี้ยังแบ่งออกเป็น 3 วิธี ตามลักษณะการใส่ตัวแปรเข้าใน สมการ ดังต่อไปนี้

2.1 การเลือกแบบก้าวหน้า (forward selection) ขั้นตอนแรก ใส่ตัวแปรต้นที่มีสหสัมพันธ์กับตัวแปรตามสูงสุดเข้าในสมการ และตรวจสอบว่าอิทธิพลมีนัยสำคัญ ขั้นตอนที่สอง ใส่ตัวแปรต้นที่มีสหสัมพันธ์กับตัวแปรตามขนาดรองลงไป และตรวจสอบว่าอิทธิพลมีนัยสำคัญ ทำต่อไปเรื่อยๆซึ่งกระบวนการสิ้นสุดเมื่ออิทธิพลของตัวแปรต้นที่ใส่เข้าไปในขั้นตอนนั้นไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ

2.2 การตัดทิ้งแบบถอยหลัง (backward deletion) สร้างสมการถดถอยที่มีตัวแปรต้นทุกตัวใน สมการก่อนขั้นตอนแรก ตรวจสอบระดับนัยสำคัญ (p) ของตัวแปรต้นทุกตัว ตัดตัวแปรต้นตัวที่ค่าอิทธิพลมีระดับนัยสำคัญสูงสุด (ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ) ออกจากสมการ ขั้นตอนที่สอง ตรวจสอบ

ระดับนัยสำคัญของตัวแปรต้นทุกตัวที่เหลือในสมการ ตัดตัวแปรต้นตัวที่ค่าอิทธิพลมีระดับ นัยสำคัญสูงสุด (ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ) ออกจากสมการ ทำต่อไปเรื่อยๆ กระบวนการสิ้นสุดเมื่ออิทธิพลของตัวแปรต้นที่เหลืออยู่ในสมการมีนัยสำคัญทางสถิติทุกตัวแปร

2.3 การถดถอยแบบขั้นตอน (stepwise regression) เป็นวิธีการผสมระหว่างการเลือกแบบก้าวหน้าและการตัดทิ้งแบบถอยหลัง ขั้นตอนแรก ใส่ตัวแปรต้นที่มีสหสัมพันธ์กับตัวแปรตามสูงสุด โดยการเลือกแบบก้าวหน้า ตรวจสอบระดับนัยสำคัญของอิทธิพลของตัวแปรต้นตัวนั้น และตัดตัวแปรนั้น โดยการตัดทิ้งแบบถอยหลัง ขั้นตอนที่สอง ใส่ตัวแปรต้นที่มีสหสัมพันธ์กับตัวแปรตามมีขนาดรองลงมา โดยการเลือกแบบก้าวหน้า ตรวจสอบระดับนัยสำคัญของอิทธิพลของตัวแปรต้น นั้น และตัดตัวแปรนั้น โดยการตัดทิ้งแบบถอยหลัง ทำต่อไปเรื่อยๆ กระบวนการสิ้นสุดเมื่ออิทธิพล ของตัวแปรต้นที่เหลืออยู่ในสมการมีนัยสำคัญทางสถิติทุกตัวแปร

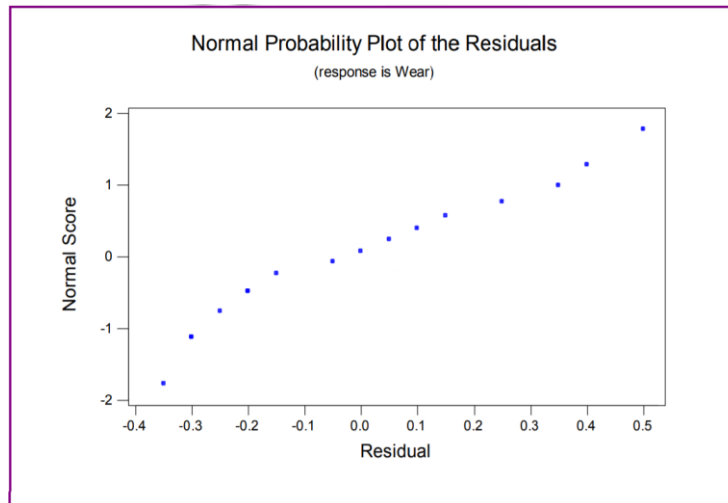
3. การใช้กรอบแนวคิดสำหรับการวิจัยเป็นเกณฑ์ในการเลือกตัวแปร (conceptual framework-based selection) หรือ การถดถอยแบบขั้นตอนระดับลดหลั่น (hierarchical stepwise regression) การเลือก ตัวแปรต้นใส่เข้าในสมการถดถอยวิธีนี้ เป็นการใส่ตัวแปรต้นเข้าในสมการตามลำดับก่อนหลัง โดยยึด ลำดับก่อนหลังของตัวแปรในกรอบแนวคิดสำหรับการวิจัย สมการถดถอยที่ได้จัดว่าเป็นสมการถดถอยที่ถูกต้องตามทฤษฎี

2.13 การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับการถดถอยพหุคูณ

เพื่อยืนยันว่าสมการทำนายค่าความแข็งของโพลีเมอร์ที่มีความเหมาะสมด้วยข้อมูลที่นำเชื่อถือ จะต้องทำการทดสอบว่า ความผิดพลาดในสมการ ϵ มีการกระจายแบบปกติและเป็นอิสระ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และมีความแปรปรวนเท่ากับ σ^2 ซึ่งเขียนย่อได้เป็น $\epsilon \sim \text{NID} (0, \sigma^2)$ ซึ่งจะส่งผลให้ ผลที่ตามมาคือค่า y จะมีการกระจายแบบปกติและเป็นอิสระ ขั้นตอนการทดสอบประกอบด้วย

สมมติฐานที่ 1: ค่าความผิดพลาดมีการแจกแจงแบบปกติ

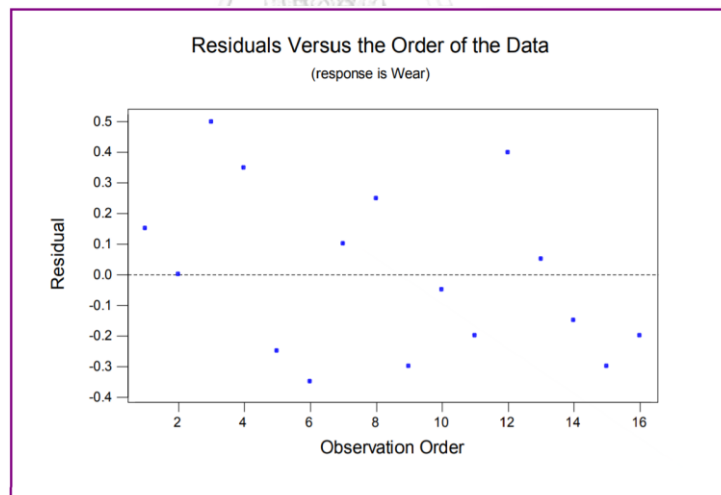
การทดสอบทำได้โดยพิจารณาผลการทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normality Test) ของค่าความผิดพลาด หรือพิจารณาจากกราฟความน่าจะเป็นแบบการแจกแจงปกติ (Normal Probability Plot) ซึ่งจะต้องมีลักษณะหรือแนวโน้มใกล้เคียงหรือ เป็นเส้นตรง



รูปที่ 2.8 กราฟความน่าจะเป็นของการแจกแจงปกติของค่าความผิดพลาด

สมมติฐานที่ 2: ค่าความผิดพลาดมีความเป็นอิสระต่อกัน

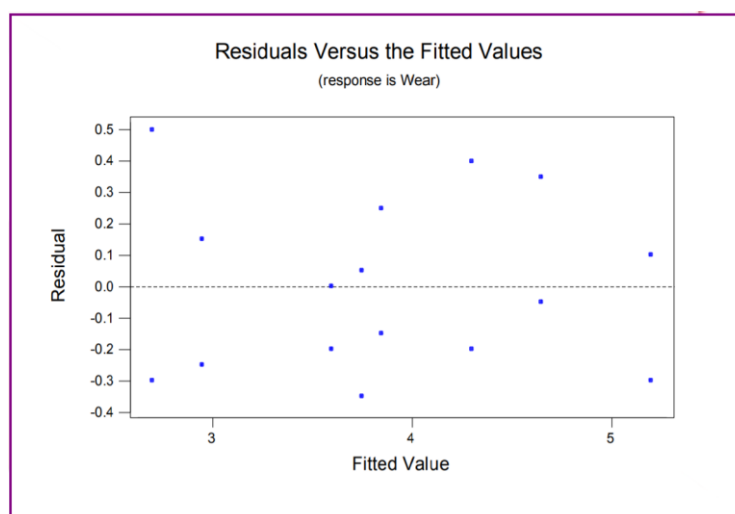
การทดสอบทำได้โดยพิจารณาจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาด และ ลำดับของการทดลอง ซึ่งจะต้องไม่แสดงสัญญาณของการเกิด แนวโน้มของข้อมูล



รูปที่ 2.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดและลำดับของการทดลอง

สมมติฐานที่ 3: ค่าผิดพลาดมีค่าความแปรปรวนคงที่

การทดสอบทำได้โดยพิจารณาจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาด และ ค่าพิต ซึ่งข้อมูลที่แสดงในกราฟควรมีลักษณะการกระจายตัวแบบ สุ่ม (ไม่มีรูปแบบ)



รูปที่ 2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดและค่าฟิต

2.14 การทดสอบสมมติฐานผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของสองประชากร เมื่อสุ่มตัวอย่างไม่เป็นอิสระกัน

การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของสองประชากรโดยสุ่มตัวอย่างจากประชากร 2 ประชากรอย่างเป็นอิสระกันซึ่งอาจมีอิทธิพลของ ลักษณะอื่น ๆ ที่ไม่ต้องการรวมอยู่ด้วย จึงต้องทำการขจัดอิทธิพลของลักษณะที่ไม่ต้องการออกไป การทดสอบสมมติฐานโดยวิธีนี้เรียกว่าการทดสอบสมมติฐานผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของสองประชากรเมื่อสุ่มตัวอย่างไม่เป็นอิสระกันหรือมีความสัมพันธ์กันหรือโดยวิธีจับคู่ (matched pair) เช่นการทดสอบคุณภาพของยางรถ 2 ยี่ห้อคือยี่ห้อเรเดียนและก๊อดเยียร์ถ้าแบ่งรถออกเป็น 2 กลุ่มอย่างเป็นอิสระกันแล้วให้รถกลุ่มที่ 1 ใช้นายี่ห้อเรเดียนส่วนรถกลุ่มที่ 2 ใช้นายี่ห้อก๊อดเยียร์แล้วบันทึกอายุการใช้งานของยางรถ หากอายุการใช้งานเฉลี่ย จะเห็นได้ว่าอายุการใช้งานของยางรถอาจไม่ได้มีอิทธิพลเนื่องมาจากคุณภาพของยางรถเพียงอย่างเดียว แต่อาจจะมีอิทธิพลเนื่องมาจากใช้นายี่ห้อที่แตกต่างกันชนิดหน้ายางแตกต่างกันใช้รถคนละยี่ห้อเป็นต้นดังนั้นควรเลือกรถให้แต่ละคู่มีขนาดเดียวกันหน้ายางชนิดเดียวกันและระยี่ห้อเดียวกันหรืออาจใช้รถคันเดียวกัน แต่ใช้นายี่ห้อข้างละยี่ห้อเช่น ด้านซ้ายใช้นายี่ห้อเรเดียนส่วนด้านขวาใช้นายี่ห้อก๊อดเยียร์เป็นต้น

การทดสอบสมมติฐานแบบจับคู่ในกรณีที่เป็นหน่วยตัวอย่างคนละหน่วยกันให้แบ่งหน่วยตัวอย่างออกเป็น 2 กลุ่มเท่า ๆ กันโดยที่หน่วยตัวอย่างของแต่ละกลุ่มที่มาจับคู่กันจะต้องมีลักษณะต่าง ๆ คล้ายคลึงกันหรือเหมือนกันให้มากที่สุด ส่วนหน่วยตัวอย่างต่างคู่กันจะมีลักษณะคล้ายคลึงกันหรือแตกต่างกันก็ได้ แล้วสุ่มสิ่งที่ต้องการทดสอบให้กับแต่ละกลุ่มการเลือกหน่วย

ตัวอย่างโดยให้หน่วยตัวอย่างแต่ละคู่มีลักษณะอื่น ๆ ที่ไม่ต้องการทดสอบคล้ายคลึงกัน เรียกว่า การเลือกหน่วยตัวอย่างที่ไม่เป็นอิสระกัน (dependent sample)

ส่วนการทดสอบสมมติฐานแบบจับคู่ในกรณีที่เป็นหน่วยตัวอย่างเดียวกัน แต่วัดผล 2 ครั้งมักจะใช้กับการทดสอบผลต่างของผลของการไม่ใช้สิ่งที่ต้องการทดสอบกับผลของการใช้สิ่งที่ต้องการทดสอบ เช่น การเปรียบเทียบจำนวนอุบัติเหตุในโรงงานทั้งก่อนและหลังได้รับโปรแกรม ป้องกันภัยจากอุบัติเหตุ หรือการเปรียบเทียบผลผลิตของพนักงานในโรงงานก่อนและหลังได้รับการฝึกอบรม เป็นต้น

ถ้าให้ μ_1 μ_2 , เป็นค่าเฉลี่ยของข้อมูลในประชากรกลุ่มที่ 1 และประชากรกลุ่มที่ 2 ตามลำดับ ในการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับค่าเฉลี่ยของประชากร 2 กลุ่ม สามารถตั้งสมมติฐานเชิง สถิติได้ดังนี้

$$\begin{array}{ccc} H_0 : \mu_1 = \mu_2 & H_0 : \mu_1 \leq \mu_2 & H_0 : \mu_1 \geq \mu_2 \\ \text{หรือ} & \text{หรือ} & \\ H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 & H_1 : \mu_1 > \mu_2 & H_1 : \mu_1 < \mu_2 \\ \text{หรือในรูปแบบของผลต่าง ดังนี้} & & \\ H_0 : \mu_1 - \mu_2 = 0 & H_0 : \mu_1 - \mu_2 \leq 0 & H_0 : \mu_1 - \mu_2 \geq 0 \\ \text{หรือ} & \text{หรือ} & \\ H_1 : \mu_1 - \mu_2 \neq 0 & H_1 : \mu_1 - \mu_2 > 0 & H_1 : \mu_1 - \mu_2 < 0 \end{array}$$

ดังนั้น ในบางครั้งจึงเรียกรูปการทดสอบสมมติฐานนี้ว่าการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับ เกี่ยวกับ ผลต่างของค่าเฉลี่ยของประชากร 2 กลุ่ม

ตัวสถิติทดสอบแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ

1. ประชากร 2 กลุ่มเป็นอิสระกัน
2. ประชากร 2 กลุ่มไม่เป็นอิสระกัน

2.14.1 ประชากร 2 กลุ่มเป็นอิสระกัน

ประชากร 2 กลุ่มที่เป็นอิสระกัน คือประชากร 2 กลุ่ม ที่ไม่เกี่ยวข้องกัน การทดสอบสมมติฐานกรณีนี้ ตัวสถิติทดสอบขึ้นอยู่กับความแปรปรวนของข้อมูลในประชากร 2 กลุ่ม ดังนี้

กรณีไม่ทราบ σ_1^2, σ_2^2 แต่ทราบว่า $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma^2$ จะประมาณค่า σ_1^2, σ_2^2 ด้วย ความแปรปรวนร่วม (pooled variance) เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ s_p^2 โดยที่

$$s_p^2 = \frac{(n_1-1)s_1^2 + (n_2-1)s_2^2}{n_1+n_2-2} \quad (2.15)$$

ดังนั้น ตัวสถิติทดสอบคือ

$$T = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{s_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (2.16)$$

- เมื่อ \bar{x}_1 แทน ค่าเฉลี่ยของข้อมูลจากตัวอย่างกลุ่มที่ 1
 \bar{x}_2 แทน ค่าเฉลี่ยของข้อมูลจากตัวอย่างกลุ่มที่ 2
 $\mu_1 - \mu_2$ แทน ผลต่างของค่าเฉลี่ยในสมมติฐาน หรือ ค่า μ_0
 s_p แทน ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานร่วม
 n_1 แทน จำนวนตัวอย่างกลุ่มที่ 1
 n_2 แทน จำนวนตัวอย่างกลุ่มที่ 2

โดยที่องศาแห่งความเป็นอิสระ คือ $n_1 + n_2 - 2$

ดังนั้น ค่าวิกฤตคือ $\pm t_{\frac{\alpha}{2}, n_1+n_2-2}$, t_{α, n_1+n_2-2} , $-t_{\alpha, n_1+n_2-2}$

กรณีไม่ทราบ σ_1^2, σ_2^2 แต่ทราบว่า $\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$ จะประมาณค่า σ_1^2, σ_2^2 ด้วย s_1^2, s_2^2 ดังนั้น ตัวสถิติทดสอบคือ

$$T = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{s_p \sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad (2.17)$$

- เมื่อ \bar{x}_1 แทน ค่าเฉลี่ยของข้อมูลจากตัวอย่างกลุ่มที่ 1
 \bar{x}_2 แทน ค่าเฉลี่ยของข้อมูลจากตัวอย่างกลุ่มที่ 2
 $\mu_1 - \mu_2$ แทน ผลต่างของค่าเฉลี่ยในสมมติฐาน หรือ ค่า μ_0

s_1^2	แทน ความแปรปรวนของตัวอย่างกลุ่มที่ 1
s_2^2	แทน ความแปรปรวนของตัวอย่างกลุ่มที่ 2
n_1	แทน จำนวนตัวอย่างกลุ่มที่ 1
n_2	แทน จำนวนตัวอย่างกลุ่มที่ 2

โดยที่องศาแห่งความเป็นอิสระ คือ V เมื่อ

$$V = \frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{\frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1}\right)^2}{n_1-1} + \frac{\left(\frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{n_2-1}} \quad (2.18)$$

ดังนั้น ค่าวิกฤตคือ $\pm t_{\frac{\alpha}{2}, v}$, $t_{\alpha, v}$, $-t_{\alpha, v}$

2.14.2 ประชากร 2 กลุ่ม ไม่เป็นอิสระกัน

ประชากร 2 กลุ่มที่ไม่เป็นอิสระกัน คือ ประชากร 2 กลุ่มที่เกี่ยวข้องกัน ถ้าให้

$\mu_1 - \mu_2 = \mu_d$ สมมติฐานเชิงสถิติสามารถเขียนได้อีกลักษณะ ดังนี้

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 \quad H_0: \mu_1 \leq \mu_2 \quad H_0: \mu_1 \geq \mu_2$$

หรือ หรือ

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \quad H_1: \mu_1 > \mu_2 \quad H_1: \mu_1 < \mu_2$$

ตัวสถิติทดสอบ คือ

$$T = \frac{\bar{d} - \mu_d}{s_d / \sqrt{n}} \quad (2.19)$$

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} \quad (2.20)$$

$$s_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{n-1}} \quad (2.21)$$

- เมื่อ \bar{d} แทนค่าเฉลี่ยของผลต่าง
 μ_d แทนค่าคงที่ในสมมติฐาน หรือ μ_0
 S_d แทนส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลต่าง
 n แทนจำนวนคู่ตัวอย่าง

ค่าวิกฤตคือ $\pm t_{\frac{\alpha}{2}, n-1}$, $t_{\alpha, n-1}$, $-t_{\alpha, n-1}$

2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ฐิติมา ตะสุวรรณ (2014) [6]

งานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นศึกษาผลกระทบขององค์ประกอบในพอลิออลเรซิน เช่น อัตราส่วนระหว่าง Base polyol และ Co-polymer polyol, ปริมาณ Crosslink, Surfactant, Gelling catalyst, Blowing catalyst และ Blowing agent ตามลำดับ ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของพอลิยูรีเทนโฟม เช่น Cream time, Set time, End of rise, ค่าความแข็ง และความหนาแน่นของพอลิยูรีเทนโฟมซึ่งค่าต่างๆ เหล่านี้มีบทบาทที่สำคัญกับคุณสมบัติของพอลิยูรีเทนโฟมได้ โดยจากการทดลองพบว่าปริมาณของ Base polyol และ Crosslink ทำให้ค่า Cream time, set time และ End of rise มีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ ซึ่งตรงข้ามกับ Co-polymer polyol, Gelling catalyst, Blowing catalyst และ Blowing agent แต่ Surfactant ส่งผลกับ Rise time ของปฏิกิริยาเพียงอย่างเดียวโดยผลการผลิตพอลิยูรีเทนโฟมให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับตัวอย่าง ได้ค่าปฏิกิริยาดังนี้ คือ Cream 13 วินาที, Set time 46 วินาที และ End of rise 64 วินาที ซึ่งในพอลิออลเรซิน มีส่วนประกอบดังนี้คือ อัตราส่วนระหว่าง Base polyol : Co-polymer polyol 70:30 โดยน้ำหนัก, Crosslink agent B 1.0 กรัม, Surfactant B 1.0 กรัม, Blowing catalyst 0.1 กรัม, Gelling catalyst A 0.56 กรัม, Gelling catalyst B 0.2 กรัม และ Blowing agent 4.0 กรัม โดยสูตรการผลิตพอลิยูรีเทนโฟมจะใช้สัดส่วนผสมของพอลิออลเรซิน 100 กรัม : ไอโซไซยาเนต 81.38 กรัม

วิษณุตร์ ทิมาบุตร (2009) [7]

งานวิจัยนี้ศึกษาการลดต้นทุนของเบาเรองนั่งรถยนต์ โดยการปรับเปลี่ยนสัดส่วนของ โพลีออลประเภทไฮโซลิต, โพลีออลประเภทไฮวอเตอร์, โพลีออลประเภทบาลานซ์เบส และไอโซไซยาเนต เพื่อคงคุณสมบัติของความแข็งตามที่กำหนด โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองเป็นเครื่องมือในการวิจัย แล้วทำการปรับเปลี่ยนปริมาณของการฉีดโฟม โดยใช้โพลีออลประเภทไฮโซลิตที่ระดับ 65

เปอร์เซ็นต์ และ 85 เปอร์เซ็นต์ , โพลีออล ประเภทบาลานซ์ที่ระดับ 50 เปอร์เซ็นต์ และ 100 เปอร์เซ็นต์ และไอโซไซยาเนต ระดับ 65 เปอร์เซ็นต์ และ 85 เปอร์เซ็นต์ ในเบื้องต้นพบว่ามีเพียง 2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแข็ง คือโพลีออลประเภทไฮโซลิต และไอโซไซยาเนต ส่วน 2 ปัจจัยคือ โพลีออลประเภทไฮวอเตอร์และ โพลีออลประเภทบาลานซ์เบส เป็นเพียงองค์ประกอบในการผลิตเท่านั้น ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแข็งมากที่สุดคือ โพลีออลประเภทไฮโซลิต โดยค่าความแข็งที่ได้ผลดีที่สุดคือ การปรับโพลีออลประเภทไฮโซลิตที่ระดับ 85 เปอร์เซ็นต์ และไอโซไซยาเนตที่ระดับ 85 เปอร์เซ็นต์ เพื่อให้โฟมพูดั้มเร็วตามลำดับ ส่วนโพลีออลประเภทไฮวอเตอร์และโพลีออลประเภทบาลานซ์เบสนั้นไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความแข็ง แม้จะทำการเพิ่มปริมาณแล้วก็ตาม ดังนั้นจึงใช้ปริมาณโพลีออลประเภทไฮโซลิตเป็นตัวหลักในการปรับค่าความแข็ง และทำการลดปริมาณสารประกอบอื่นเพื่อให้ น้ำหนักลดลงและปรับปรุงคุณลักษณะภายนอกด้วยสารอื่นได้

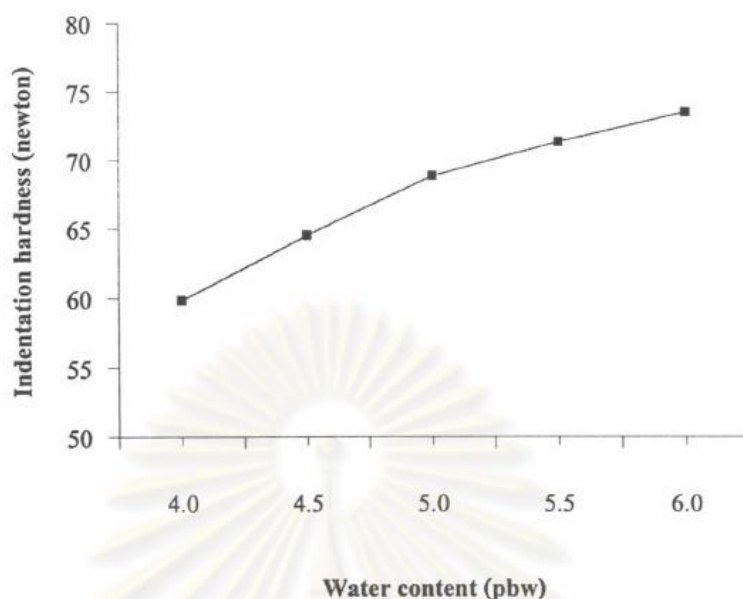
สถาพร โมคทิพย์ (2014) [8]

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของสารฟลูออรีเทนโพนแบบแข็งโดยการใช้สารฟลูออรีนใหม่คือ ไฮโคลเพนเทน (Cp) , 1,1,1,3,3-เพนตะฟลูออโรโพรเพน (HFC-245fa) , 1,1,1,3,3-เพนตะฟลูออโรบิวเทน (HFC-365mfc) และของผสมระหว่างเมทิลฟอร์มเมตและเมทานอล (MF+MeOH) เปรียบเทียบผลที่ได้กับโพนที่เตรียมจากสารฟลูออรีนที่ใช้ทางการค้า คือ 1,1-ไดคลอโร-1-ฟลูออโรอีเทน (HCFC 141b) ศึกษาเวลาในการเกิดพอลิเมอร์และเวลาและความหนาแน่นของโพนที่เตรียมจากสูตรที่ใช้สารฟลูออรีนใหม่ ปรับปริมาณของสารฟลูออรีนใหม่และปรับปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้ได้โพนที่มีสมบัติใกล้เคียงกับพอลิเมอร์โพนแบบแข็งที่เตรียมจากสาร 1,1-ไดคลอโร-1-ฟลูออโรอีเทน แล้วนำสูตรโพนที่มีสารฟลูออรีนใหม่ที่เหมาะสมแล้วไปขึ้นรูปขึ้นงานในพิมพ์เพื่อให้ได้ตัวอย่างโพนสำหรับทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล พบว่าโพนที่เตรียมจากสารฟลูออรีนใหม่และ , 1,1,1,3,3-เพนตะฟลูออโรบิวเทน มีค่าสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลที่ใกล้เคียงกับโพนที่เตรียมจากสารฟลูออรีนใหม่ 1,1-ไดคลอโร-1-ฟลูออโรอีเทน ซึ่งนำไปใช้ในทางอุตสาหกรรมได้ และในงานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นถึงผลการทดลองว่าปริมาณของสารฟลูออรีนในส่วนต่างๆ นั้นมีผลต่อการทนต่อแรงกดดันหรือความความแข็ง

ชาญวิทย์ พูนศรีไชยสิทธิ์ (2004) [9]

งานวิจัยเป็นการเตรียมโพนพอลิเมอร์ความหนาแน่นต่ำชนิดแข็งสำหรับทำกระดานโต้คลื่นจากโพลีเอทิลีนไดออกไซด์ ไอโซไซยาเนต พอลิออลชนิดต่างๆ และสารเติมแต่งที่จำเป็นที่จัดหาได้ภายในประเทศ เพื่อให้ได้กระดานโต้คลื่นที่มีคุณภาพใกล้เคียงหรือเทียบเท่าผลิตภัณฑ์ที่ผลิตโดยใช้

วัตถุดิบจากต่างประเทศ โดยเริ่มจากการนำสารตั้งต้นที่เป็นสูตรสำเร็จซึ่งนำเข้าจากต่างประเทศมาทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมี เพื่อให้ทราบถึงองค์ประกอบหลักที่สำคัญ จากนั้นจึงทำการตรวจสอบโครงสร้างเซลล์โฟม วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ และทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมจากสารตั้งต้นดังกล่าว โดยทำการแปรผันชนิดและปริมาณของพอลิออลรวมทั้งองค์ประกอบอื่น ๆ ที่มีความสำคัญ เช่น สารเร่งปฏิกิริยา สารฟู และสารลดแรงตึงผิว เป็นต้น โดยจากงานวิจัยนี้ได้แสดงผลความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทน กับ ปริมาณสารฟู (น้ำกลั่น)



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมในแม่แบบปิด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

H.C. Jung และคณะ (2001) [10]

ได้ทำการศึกษาการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งจาก MDI และพอลิเอสเตอร์พอลิออล โดยมีสารลดแรงตึงผิวประเภทซิลิโคน และใช้ไฮโดรคลอโรฟลูออโรคาร์บอน เป็นน้ำในการฟู ผลการศึกษาพบว่าความหนาแน่นของโฟมที่มีน้ำ และ HCFC เป็นสารฟู ลดลงจาก 175.7 เป็น 28.2 กก/ม³ เมื่อปริมาณสารฟูเพิ่มมากขึ้นจากภาพถ่าย SEM พบว่าขนาดของเซลล์โฟมที่มีน้ำเป็นสารฟูเพิ่มขึ้นจาก 150 μm เป็น 290 μm เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมากขึ้น และจาก DSC พบว่าอุณหภูมิกลาสทรานสิชันของโฟมที่มีน้ำเป็นสารฟูเพิ่มจาก 85.7 $^{\circ}\text{C}$ เป็น 101.7 $^{\circ}\text{C}$ เมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นในขณะที่เมื่อใช้ HCFC เป็นสารฟูพบว่าอุณหภูมิกลาสทรานสิชันของโฟมไม่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของ HCFC ที่เพิ่มขึ้น สำหรับความทนแรงกด , ค่าความแข็ง และค่ามอดูลัสของโฟมที่ใช้น้ำและ HCFC เป็นสารฟูร่วมกันนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.13 เป็น 0.25 MPa และจาก 3.00 เป็น 7.23 MPa ตามลำดับ

C. Oppon, P. M. Hackney, I. Shyha, M. Birkett (2015) [11]

การเจริญเติบโตอย่างต่อเนื่องของการใช้งานของยูรีเทนโพลีโพรพิลีนทำให้ต้องการให้นักออกแบบและผู้ผลิตตรวจสอบ ปัจจัยที่เหมาะสมที่มีผลต่อการผลิตและการใช้งานเต็มรูปแบบของพวกเขาเพื่อที่จะใช้ประโยชน์อย่างเต็มศักยภาพ งานวิจัยนี้ได้รับรายงานผลกระทบของ อัตราส่วนขององค์ประกอบหลัก (โพลีเอทิลีนไดไอโซไซยาเนต) ซึ่งรูปแบบโพลีโพรพิลีน ของสารเคมีที่แยกจากกันก่อนที่จะผสม งานที่ได้รับรับการบันทึกว่ามีการลดลงอย่างมีนัยสำคัญของเวลาเกิดฟอง 452 วินาทีที่ $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง 54 วินาทีที่ $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ส่วนผสมของสารเคมีนั้นถูกอุ่นก่อนผสม ส่วนความแข็งและแรงดึงจะดีขึ้นด้วยการเพิ่มอัตราส่วนของ di-isocyanate ถึง โพลีเอทิลีน โดยที่ความหนาแน่นของโพลีโพรพิลีนเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของโพลีเอทิลีนเพิ่มขึ้น

F. O. Aramide, P. O. Atanda, E. O. Olorunniwo (2013) [12]

ผลกระทบของสารเคมีที่แตกต่างกันและสารเติมแต่งที่ใช้ในการผลิตโพลีโพรพิลีนไดไอโซไซยาเนตถูกตรวจสอบ ตัวอย่างการอ้างอิงที่ผลิตจากโพลีเอทิลีนไดไอโซไซยาเนต (TDI) amine Stannous octoate กลั่นน้ำและน้ำมันซิลิโคนใช้สูตรผสมห้องปฏิบัติการบนพื้นฐาน 500 กรัม polyether ตามโพลีเอทิลีนไดไอโซไซยาเนต ตัวอย่างอื่น ๆ ที่ผลิตโดยต่อเนื่องที่แตกต่างกันของสารเติมแต่งเนื้อหาทั้งหมดที่มีข้อบกพร่องของโพลีเอทิลีน ไดไอโซไซยาเนต ขนาดตัวอย่างมาตรฐานสำหรับการทดสอบความหนาแน่นของการทดสอบการเยื้องทดสอบชุดอัดแรงดึงและความยืด การทดสอบได้รับการผลิตจากกลุ่มตัวอย่าง ทดสอบต่าง ๆ ถูกดำเนินการในกลุ่มตัวอย่างโดยใช้มาตรฐาน ASTM-D3574 มันถูกตั้งข้อสงสัยเกี่ยวกับระดับของการเยื้องส่งผลกระทบต่อค่าของความแข็งและเพิ่มที่ร้อยละของผล TDI ในค่าที่ตั้งไว้การบีบอัดที่ยอมรับได้สำหรับตัวอย่างโพลีเอทิลีน ไดไอโซไซยาเนต

Chiou, B. S. and P. E. Schoen (2002) [13]

ศึกษาผลกระทบของการเชื่อมขวางทางเคมีต่อสมบัติเชิงความร้อนและไดนามิกของระบบ Polyurethane โดยที่ Polyurethane เตรียมจาก propylene glycol diol; trimethylolpropane propoxylate, triol; และ propylene glycol, tolylene 2,4 - diisocyanate, diisocyanate monomer ความหนาแน่นของ การcrosslink ถูกควบคุมโดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ ทั้ง 3 สาร จาก 10 ถึง 70 mol% และอัตราส่วนของ isocyanate - ถึง - hydroxyl (NCO / OH) จาก 1.0 เป็น 1.3 ตัวอย่างทั้งหมดมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะหนึ่งแก้วและไม่มีบริเวณที่เป็นผลึก นอกจากนี้ยังมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงของแก้วในช่วงความเข้มข้นของ ทั้ง 3 สาร ที่

ศึกษามากกว่าช่วงอัตราส่วน NCO / OH ที่ศึกษา สำหรับตัวอย่างทั้งหมดสมการ Dibenedetto ที่เกี่ยวข้องกับอนุกรมการเปลี่ยนแปลงของแก้ว จนถึงขอบเขตของการเชื่อมขวางนั้นพอดีกับข้อมูลได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ตัวอย่างที่มีความหนาแน่นของการเชื่อมขวางสูงกว่านั้นมีโมดูลัสยืดหยุ่นสูงกว่มากสำหรับอนุกรมที่สูงกว่าอนุกรมการเปลี่ยนสถานะของแก้ว โดยสมมติว่าระบบนี้เป็นเครือข่ายที่มองไม่เห็น ความหนาแน่นของการเชื่อมขวางแบบคร่าวๆสำหรับตัวอย่างปริมาณสารสัมพันธ์นั้นได้มาจากข้อมูลเชิงกลแบบไดนามิกและสิ่งเหล่านี้เห็นด้วยค่อนข้างดีกับการทำนายเชิงทฤษฎี



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้ใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (Factorial Design) โดยนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งของโฟมกับอัตราส่วนของน้ำยาโฟม เพื่อนำไปพัฒนาสมการเพื่อทำนายค่าความแข็งของโฟม ที่ได้จากการปรับอัตราส่วนของน้ำยาโฟม

3.1.1 ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

จากงานวิจัยที่ผ่านมา มีการศึกษาถึงวัตถุดิบหรือสารเคมีที่ส่งผลต่อค่าความแข็งของโฟม (Polyurethane) ซึ่งพบว่ามีปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแข็งดังนี้ Isocyanate , Co-Polymer , Polyol , Blowing ซึ่งปัจจัยดังกล่าวได้อยู่ในส่วนผสมของวัตถุดิบที่ใช้การผลิตโฟมอยู่แล้วเพียงแต่อยู่ในรูปของ

- น้ำยาโฟม PA ซึ่ง ประกอบด้วย Polyol ,น้ำ, สารลดแรงตึงผิว สารฟู เจล และ ซิลิโคน ในสัดส่วนเท่ากัน
- น้ำยาโฟม PC ซึ่ง ประกอบด้วย Co-Polymer ที่เกิดจากการ Polyoxyalkylenepolol กับ styrene-acrylonitrile polymer และผสมกับ สารลดแรงตึงผิว สารฟู เจล และ ซิลิโคน ในสัดส่วนเท่ากัน
- น้ำยาโฟม ISO ซึ่งเป็น Isocyanate
- น้ำยาโฟม PB ซึ่งเป็น Polyol

ดังนั้นปัจจัยดังกล่าวจะถูกพิจารณาเพื่อใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ที่มีต่อค่าความแข็งและใช้ในการทำนายค่าความแข็งของโฟม

3.1.2 การกำหนดระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

การกำหนดระดับปัจจัยจะพิจารณาจากขีดความสามารถของเครื่องฉีดโฟมประกอบกับพิจารณาให้อยู่ในช่วงที่โฟมสามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นงานได้ ซึ่งสามารถแบ่งเป็นระดับต่างๆได้ดังนี้

- น้ำยาโฟม PA 136 g, 182 g , 228 g
- น้ำยาโฟม PC 364 g , 410 g , 456 g
- น้ำยาโฟม ISO (INDEX) 253 g, 268 g, 283 g

และ น้ำยาโพลีเมอร์ PB นั้นจะเป็นตัวเติมเต็มให้ปริมาณของน้ำหนักรวมนั้นเท่ากับน้ำหนักจริงซึ่งจากการทดลองนี้ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองนั้น มีน้ำหนัก 1180 g ทำให้ปริมาณน้ำยาโพลีเมอร์ PB ที่จะต้องใส่เข้าไปในแต่ละการทดลองนั้นจะเท่ากับ

$$\text{น้ำหนักรวม } 1180 \text{ g} - \text{ปริมาณน้ำยาโพลีเมอร์ PA (g)} - \text{ปริมาณน้ำยาโพลีเมอร์ PC (g)} - \text{ปริมาณน้ำยาโพลีเมอร์ ISO (g)} = \text{ปริมาณน้ำยาโพลีเมอร์ PB (g)}$$

น้ำยาโพลีเมอร์ PA : ทำการกำหนดระดับปัจจัยของน้ำยาโพลีเมอร์ PA เป็น 3 ระดับคือ 136 g , 182 g , 228 g เนื่องจากที่ระดับต่ำสุดที่เครื่องจักรทำงานได้นั้นคือที่ 136 g และเพิ่มอีก 2 ระดับ ที่ระดับที่ 46 g เนื่องจากต้องการทราบแนวโน้มของความสัมพัทธ์ที่เกิดขึ้น

น้ำยาโพลีเมอร์ PC : ทำการกำหนดระดับปัจจัยของน้ำยาโพลีเมอร์ PC เป็น 3 ระดับคือ 364 g , 410 g , 456 g เนื่องจากที่ระดับต่ำสุดที่โพลีเมอร์จะสามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้นั้นคือ ที่ 364 g และเพิ่มอีก 2 ระดับ ที่ระดับที่ 46 g เนื่องจากต้องการทราบแนวโน้มของความสัมพัทธ์ที่เกิดขึ้น

น้ำยาโพลีเมอร์ ISO : ทำการกำหนดระดับปัจจัยของ ISO เป็น 3 ระดับคือ 253 g , 268 g , 283 g เนื่องจากที่ระดับต่ำสุดที่โพลีเมอร์จะสามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้สมบูรณ์เป็นรูปร่างที่สุดนั้นคือที่ 253 g และเพิ่มอีก 2 ระดับที่ 15 g เพื่อให้ทราบแนวโน้มของความสัมพัทธ์ที่เกิดขึ้น

เนื่องจากการทดลองนี้มีปัจจัย 3 ตัว และมี ระดับการทดลอง 3 ระดับ จึงเหมาะสมที่จะทำการออกแบบการทดลอง 3^3 แฟคทอเรียล ซึ่งสามารถสร้างตารางออกแบบการทดลองใน โปรแกรม Minitab โดยที่โปรแกรมจะทำการจัดลำดับการทดลอง ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ออกแบบการทดลอง 3^3 แฟคทอเรียล

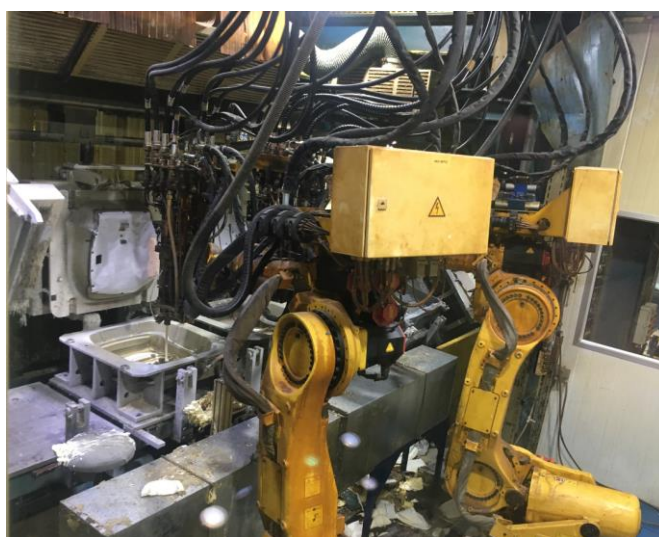
ลำดับ	น้ำยาโพลีเมอร์ PA (g)	น้ำยาโพลีเมอร์ PC (g)	น้ำยาโพลีเมอร์ ISO (g)
1	182	410	283
2	136	364	253
3	228	364	253
4	136	364	283
5	136	410	268

ลำดับ	น้ำยาโพน PA (g)	น้ำยาโพน PC (g)	น้ำยาโพน ISO (g)
6	182	456	268
7	136	364	268
8	228	364	283
9	182	364	283
10	182	456	253
11	228	410	283
12	228	364	268
13	136	410	283
14	228	456	268
15	136	456	253
16	136	456	283
17	136	456	268
18	182	410	253
19	228	456	253
20	136	410	253
21	182	364	268
22	182	410	268
23	182	364	253
24	228	410	268
25	228	410	253
26	182	456	283
27	228	456	283

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 เครื่องฉีดโฟม Line 36 เป็นเครื่องที่ใช้ในการผลิต

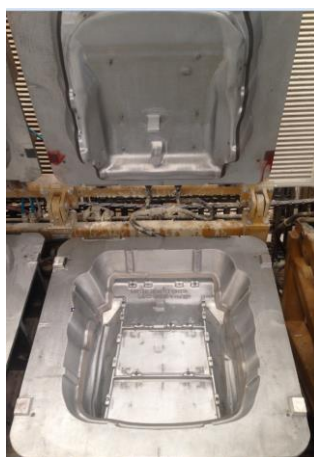
เครื่องฉีดโฟม Line 36 นั้นเป็นเครื่องฉีดโฟมแบบใช้ Robots เป็นตัวควบคุมปริมาณน้ำยาโฟมซึ่งน้ำยาโฟม PA , น้ำยาโฟม PC , น้ำยาโฟม ISO และ น้ำยาโฟม PB นั้นจะแยกกันอยู่ในแต่ละถังซึ่งจะถูกดูดจากแต่ละถังมาผสมกันที่ปลายหัวฉีดก่อนที่จะฉีดลงในแม่พิมพ์



รูปที่ 3.1 เครื่องฉีดโฟม

3.2.2 แม่พิมพ์หล่อร้อน

แม่พิมพ์ PAD SEAT CUSH Part No. AAAAAA เป็นแม่พิมพ์อลูมิเนียมโดยมีส่วนประกอบคือ ฝาล่าง และ ฝาด้านบนสำหรับเปิดออกโดยที่มีท่อน้ำฝังอยู่ภายในอลูมิเนียมเพื่อให้สามารถต่อน้ำร้อนหรือน้ำเย็น ในการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของแม่พิมพ์ได้



รูปที่ 3.2 แม่พิมพ์หล่อร้อน

3.2.3 เครื่องทดสอบค่าความแข็ง หมายเลขที่ 1

ใช้สำหรับวัดค่าความแข็งของชิ้นงาน โดยทดสอบแรงกดซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D3574 , ISO 3385 โดยเครื่องทดสอบจะต่อพ่วงกับชุดคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์และประมวลผลแรงที่เกิดจากการกด



รูปที่ 3.3 เครื่องทดสอบค่าความแข็ง

3.2.4 ฐานรองชิ้นงาน (Test Box)

ใช้สำหรับเป็นฐานรองชิ้นงานในการทดสอบการกดเพื่อหาค่าความแข็งของชิ้นงานโดยทำมาจากไม้และมีรูปร่างตาม รูปร่างของด้านหลังของโฟมเพื่อให้โฟมที่ทดสอบนั้นเป็นระนาบตั้งฉากกับจานกดทดสอบและมีรูจำนวนมากบนฐานรองเพื่อให้ขณะที่ทำการทดสอบกดนั้นจะได้ไม่เกิดแรงลมต้านที่มาจากฐานรองชิ้นงานเกิดขึ้น



รูปที่ 3.4 ฐานรองชิ้นงาน (Test Box)

3.2.5 น้ำยาโฟมของโรงงานกรณีศึกษา

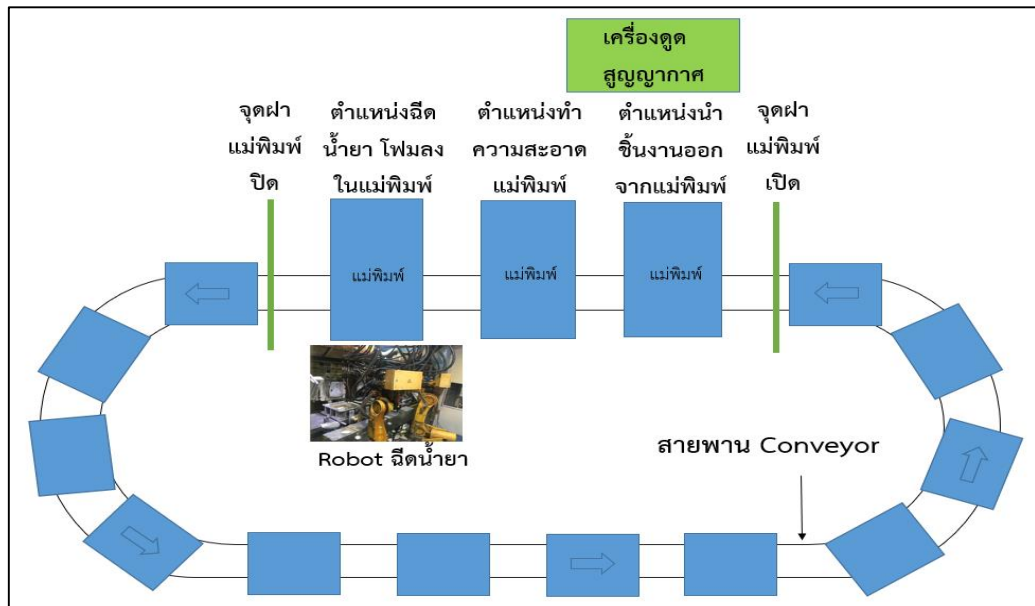
- น้ำยาโฟม PA ซึ่ง ประกอบด้วย Polyol ,น้ำ, สารลดแรงตึงผิว สารฟู เจล และ ซิลิโคน ผสมกันในอัตราส่วนเท่าๆกัน
- น้ำยาโฟม PC ซึ่ง ประกอบด้วย Co-Polymer ที่เกิดจากการ Polyoxyalkylenepolol กับ styrene-acrylonitrile polymer และผสมกับ สารลดแรงตึงผิว สารฟู เจล ซิลิโคน ผสมกันในอัตราส่วนเท่าๆกัน
- น้ำยาโฟม ISO ซึ่งเป็น Isocyanate
- น้ำยาโฟม PB ซึ่งเป็น Polyol

3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.3.1 วิธีการขึ้นรูปชิ้นงาน

ติดตั้งแม่พิมพ์บนเครื่องฉีดโฟม Line 36 ต่อท่อน้ำร้อนและเย็นเข้ากับแม่พิมพ์เพื่อให้ความร้อนบริเวณผิวของแม่พิมพ์

- ตั้งค่าอัตราส่วนการจ่ายน้ำยาโฟมในกับเครื่องฉีดโฟม ตามตารางที่ 3.1
- เมื่อฉีดโฟมลงในแม่พิมพ์แล้วแม่พิมพ์จะเคลื่อนตัวไปตามสายพานเพื่อปิดฝาบนลง ดังรูปที่ 3.5
- หลังจากนั้นน้ำยาโฟมจะบ่มตัวในแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียสโดยได้รับความร้อนจากท่อน้ำร้อนที่ฝังในแม่พิมพ์ เป็นระยะเวลา 6 นาที ซึ่งนั่นคือ 1 รอบในการหมุนของสายพาน
- เมื่อแม่พิมพ์เคลื่อนถึงจุดเปิดแม่พิมพ์ พนักงานจะออกนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์
- นำชิ้นงานใส่ในเครื่องสูญญากาศ เพื่อดูดอากาศออกจากชิ้นงาน

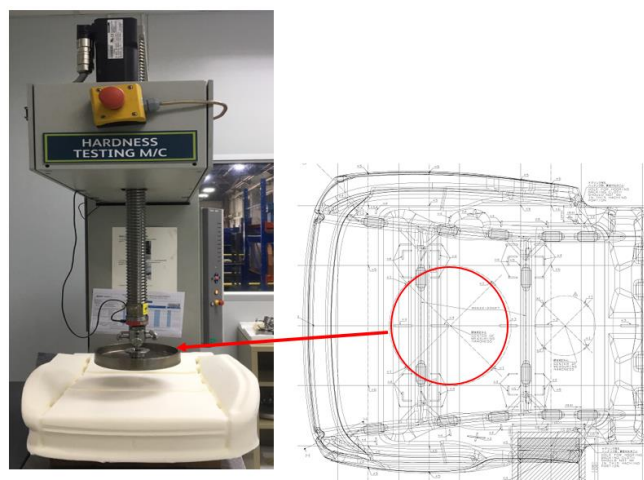


รูปที่ 3.5 Line การผลิตโฟม

3.3.2 วิธีการทดสอบค่าความแข็ง

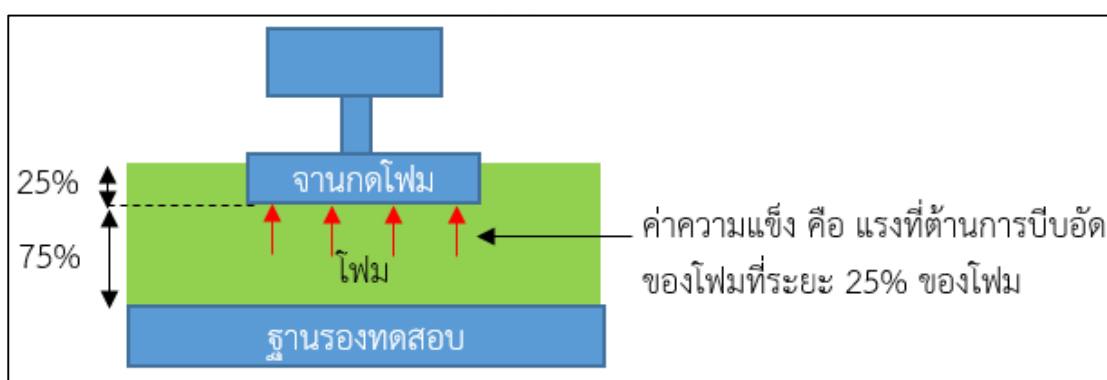
- หลังจากนั้น นำชิ้นงานเก็บที่ห้องที่มีอุณหภูมิ $23 \pm 1 \text{ C}^\circ$ และ มีความชื้นสัมพัทธ์ $50\% \pm 3.3\%$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนการทดสอบค่าความแข็งของชิ้นงาน
- ตั้งค่าเครื่องวัดค่าความแข็งโดยนำ Test box วางบนแท่นของเครื่องวัดค่าความแข็ง
- ตั้งระยะหัวกดให้สัมผัสกับ ผิวบนของ Test box เป็น 100 % ของความหนาชิ้นงาน
- วางชิ้นงานบน Test box ตั้งระยะหัวกดให้สัมผัสกับ ผิวบนของ ชิ้นงาน เป็น 0 % ของความหนาชิ้นงานโดยตำแหน่งของการกดนั้นจะมีตำแหน่งระบุบนชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.6

CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 3.6 ตำแหน่งในการกดงานเรียงเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 200 มิลลิเมตร

- ทำการกดชิ้นงานลงเป็นระยะ 75% ของความหนาชิ้นงาน จากระยะที่ตั้งค่าเครื่องด้วยความเร็ว 50 มิลลิเมตร/นาที เพื่อเป็นการไล่อากาศออกจากโฟมแล้วยกหัวกดชิ้นงานขึ้นให้
- รอ 1 นาทีก่อนจะทำการกดวัดค่าจริงเพื่อให้ชิ้นงานคืนสภาพ
- ทำการกดชิ้นงานลงเป็นระยะ 25% ของความหนาชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.
- อ่านค่าความแข็งของชิ้นงานหลังจากกดชิ้นงานลงเป็นระยะ 25% ของความหนาชิ้นงานเป็นเวลา 20 วินาที



รูปที่ 3.7 แบบจำลองการกดโฟม

โดยค่าที่ได้นั้นจะเป็นข้อมูลตัวเลขที่เกิดขึ้นจากการวัดแรงที่ต้านการบีบอัดทุกระยะการกดลงจนถึงระยะที่ 25% ของโฟมและแรงที่ดันขึ้นเมื่อจกยกตัวขึ้นโดย เมื่อนำตัวเลขที่ได้มาสร้างกราฟจะพบว่าแรงที่ต้านการบีบอัดของโฟมนั้นจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเนื่องจาก เมื่อมีการบีบอัดเกิดขึ้นทำให้ความหนาแน่นของโฟมบริเวณที่จกกดนั้นมีมากขึ้น

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

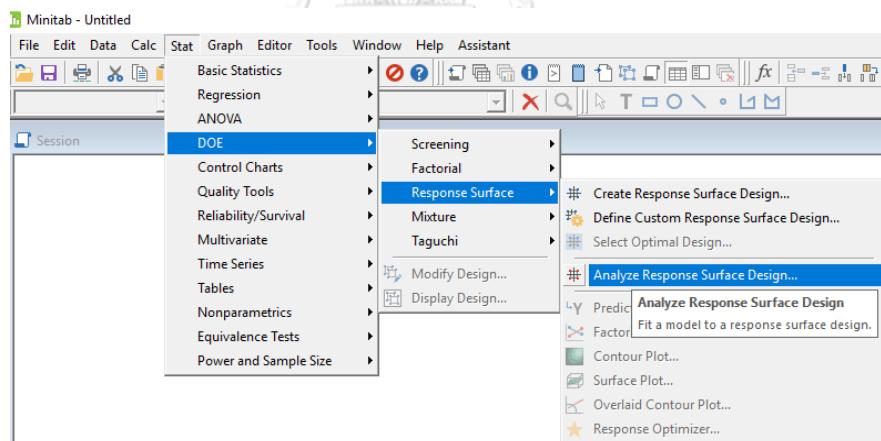
3.4.1 วิเคราะห์ข้อมูลจากผลการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab

ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลอง

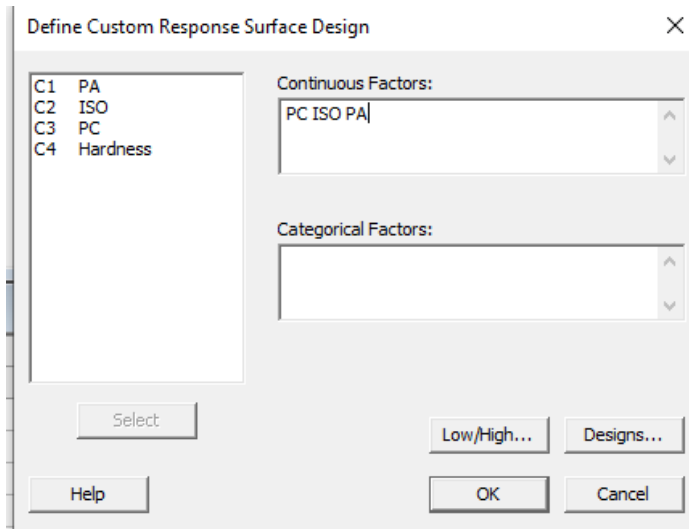
- กรอกข้อมูลปัจจัยและผลการทดลองลงใน Work sheet 1

↓	C1	C2	C3	C4
	PA	ISO	PC	Hardness
1	182	268	456	212.130
2	228	283	364	197.250
3	228	253	456	174.040
4	182	253	364	160.530
5	136	283	410	258.920
6	182	283	364	215.460
7	182	268	364	178.890
8	136	253	364	167.180
9	182	283	456	280.130
10	136	283	456	291.580
11	228	253	410	163.150
12	136	268	410	212.320
13	182	253	456	193.480
14	136	253	410	182.040
15	228	268	364	175.270
16	182	283	410	253.650
17	136	283	364	228.750
18	136	268	364	187.960
19	136	253	456	200.780
20	228	253	364	154.620
21	228	283	456	262.390

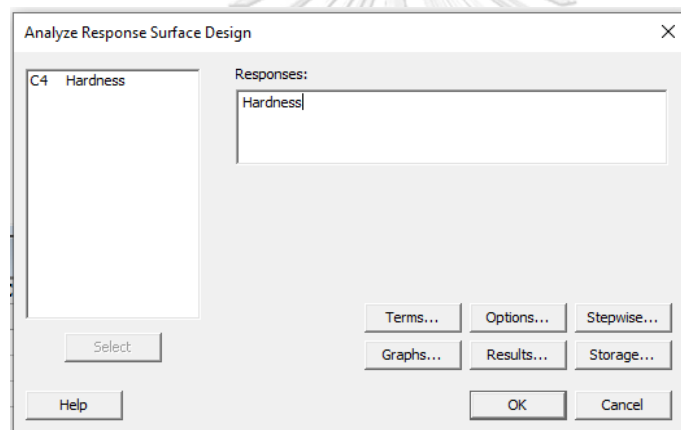
- เลือก Stat > DOE > Response Surface > Analyze เพื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่มีผลต่อค่าความแข็งทั้งหมด



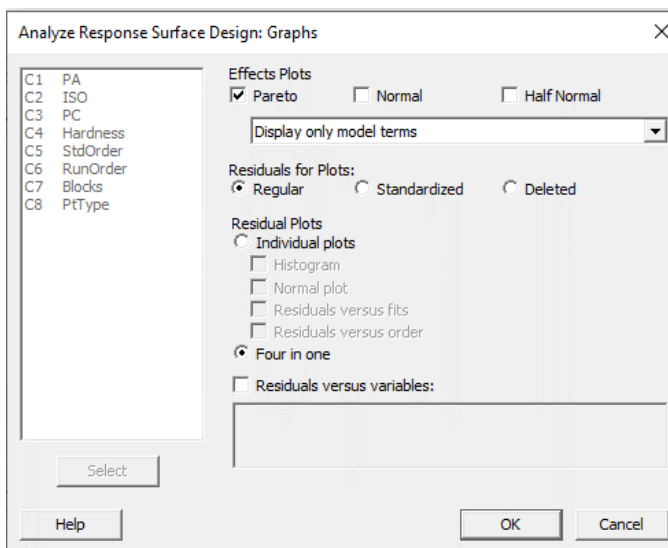
- เลือกปัจจัยจากทางด้านซ้ายแต่ละตัวที่ทำการทดลอง ลงในช่อง Continuous Factors ให้ครบทุกปัจจัย



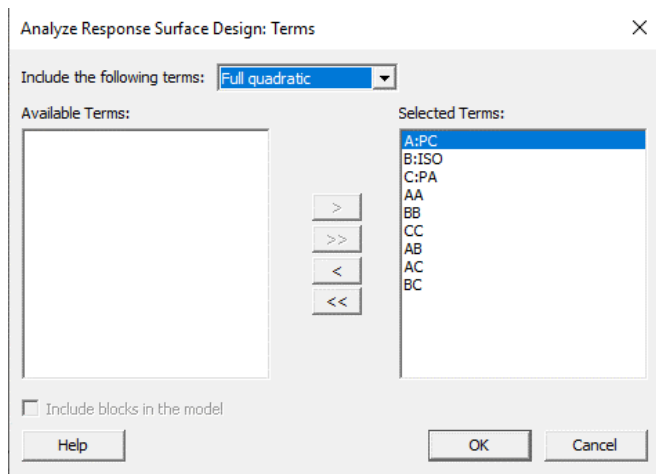
- เลือก ผลตอบสนอง จากทางด้านซ้ายลงใน ช่อง Responses



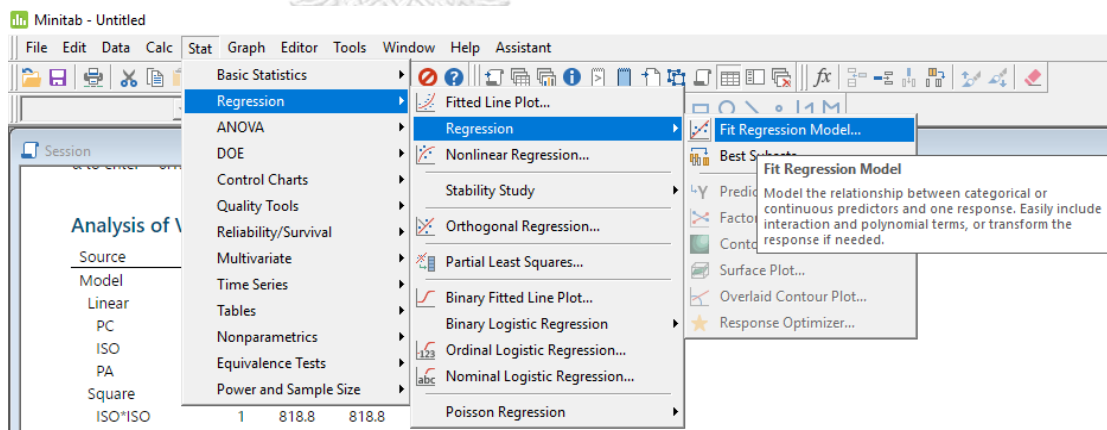
- เลือกลักษณะ กราฟ ที่ต้องการให้แสดงออกมา



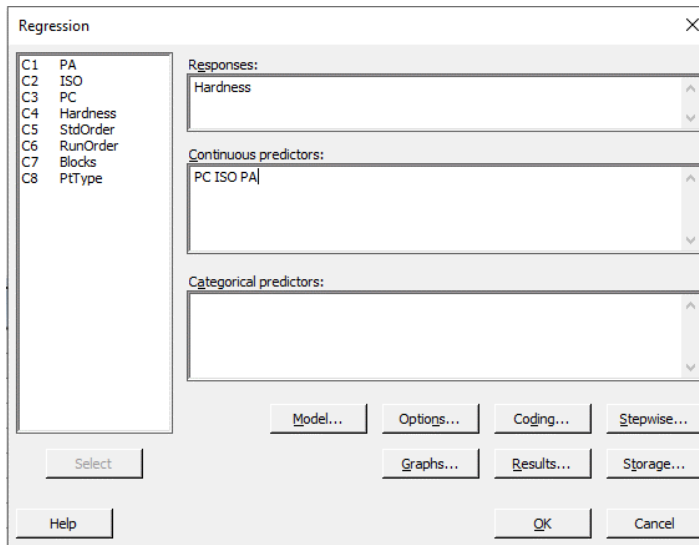
- เลือก Team ที่ต้องการวิเคราะห์ทั้งหมด ซึ่งจากการทดลองนี้มี 3 ปัจจัย จึงให้ตั้งวิเคราะห์ ทั้ง interaction และ quadratic ทั้งหมด



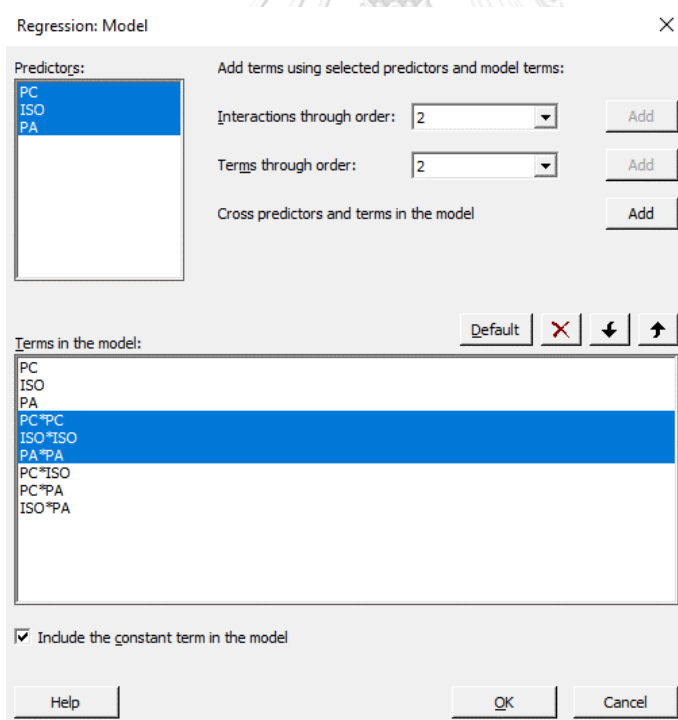
- หลังจากนั้นจะได้ตารางผลการวิเคราะห์ซึ่งจะแสดงค่าปัจจัยที่มีค่า P-Value ที่มีค่าน้อยกว่า 0.05 โดยแสดงถึงปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแบบมีนัยสำคัญ
- ทำการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณแบบ Step wise เพื่อตัดปัจจัยที่ไม่มีผลต่อค่าความแข็ง
- เลือก Stat > Regression > Regression > Fit Regression Model



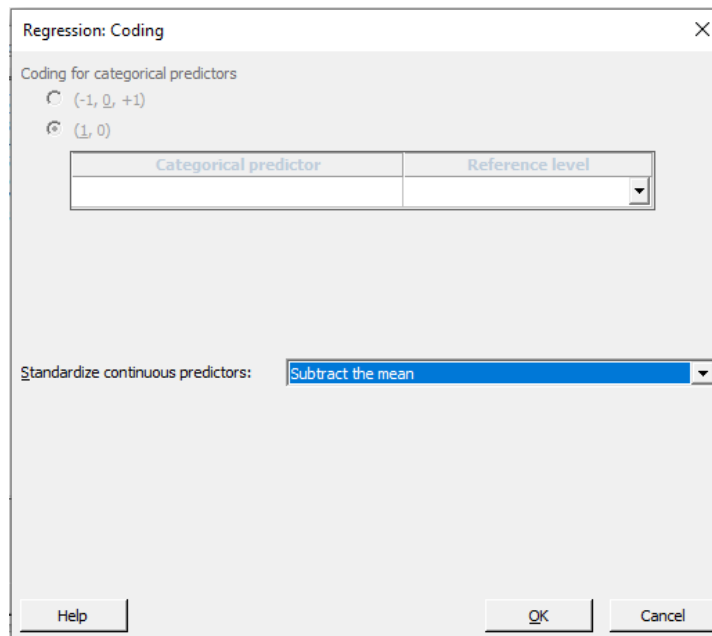
- เลือก ผลตอบสนองใส่ในช่อง Responses และ ปัจจัยในใส่ช่อง Continuous predictors



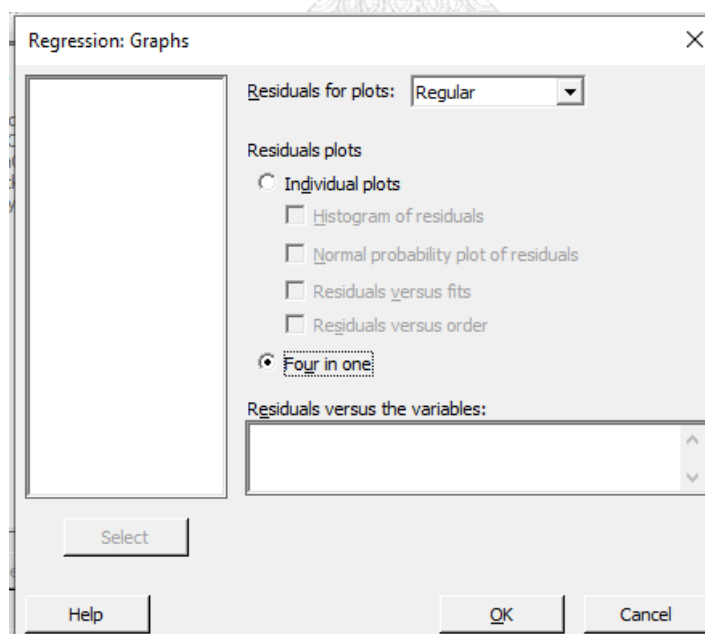
- เลือก Model โดยกำหนดทุกปัจจัยในช่อง Predictors และกำหนด Interactions through order เป็น 2 และ Term through order เป็น 2 ซึ่งจะวิเคราะห์ทั้ง interaction และ quadratic ทั้งหมด



- เลือก Coding เพื่อกำหนด Standize continuous predictors โดยกำหนด เป็น Subtract the mean จะทำให้ในกรณีที่มี Team ที่ interaction หรือ quadrati ที่ Significate นั้นมีค่า VIF < 10 ทำให้ผลการวิเคราะห์น่าเชื่อถือ



- เลือกลักษณะกราฟที่ต้องการให้แสดงออกมา



- เลือก Stepwise เพื่อให้สามารถคัดเลือกหรือตัดปัจจัยออกทำให้สมการสามารถทำนายตัวแปรเกณฑ์ได้สูงสุด

- หลังจากนั้นจะได้ตารางผลการวิเคราะห์ซึ่งจะแสดงค่าปัจจัยที่มีค่า P-Value ที่มีค่าน้อยกว่า 0.05 โดยแสดงถึงปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแบบมีนัยสำคัญ และ สมการทำนายค่าความแข็งของโฟม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.5 การพัฒนาสมการการทำนายค่าความแข็งของโฟม

จากค่าความแข็งที่ได้จากการเปลี่ยน อัตราส่วนของ PA , PC และ ISO นั้นจะได้สมการทำนายค่าความแข็งเขียนในรูปแบบสมการถดถอยพหุคูณอย่างง่าย ได้ดังนี้

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_1 X_2 + \beta_5 X_1 X_3 + \beta_6 X_2 X_3 + \varepsilon$$

โดยที่

y = ค่าความแข็งของโฟม

β_0 = ค่าคงที่ของสมการถดถอย

β_1 = ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของ X_1

β_2 = ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของ X_2

β_3 = ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของ X_3

β_4 = ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของปฏิสัมพันธ์ X_1 กับ X_2

β_5 = ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของปฏิสัมพันธ์ X_1 กับ X_3

β_6 = ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของปฏิสัมพันธ์ X_2 กับ X_3

X_1 = ปริมาณน้ำยาโฟม PA

X_2 = ปริมาณน้ำยาโฟม PC

X_3 = ปริมาณน้ำยาโฟม ISO

ϵ = ความผิดพลาดแบบสุ่ม

ซึ่งปัจจัยที่จะนำมาเขียนเป็นสมการถดถอยพหุคูณได้นั้นจะต้องมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05
ซึ่งจะได้จากการวิเคราะห์ผ่าน โปรแกรม Minitab

บทที่ 4

ผลการทดลอง และ วิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองและการวิเคราะห์ ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งของโพลีเอเธนเรซิน ได้แก่ น้ำยาโพลี ISO , น้ำยาโพลี PA , น้ำยาโพลี PC ซึ่งเป็นส่วนผสมที่ทำให้เกิด โพลีเอเธนเรซินโดย

4.1 ผลการทดลอง

ผลการทดลองเพื่อใช้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ ของ ค่าความแข็งของโพลีเอเธนเรซิน แสดง ตารางที่ 4.1 โดยมีปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง และผลในการทดลอง

ปัจจัยในการทดลอง

1. ปริมาณน้ำยาโพลี PA หน่วย เป็น กรัม
2. ปริมาณน้ำยาโพลี PC หน่วย เป็น กรัม
3. ปริมาณน้ำยาโพลี ISO หน่วย เป็น กรัม

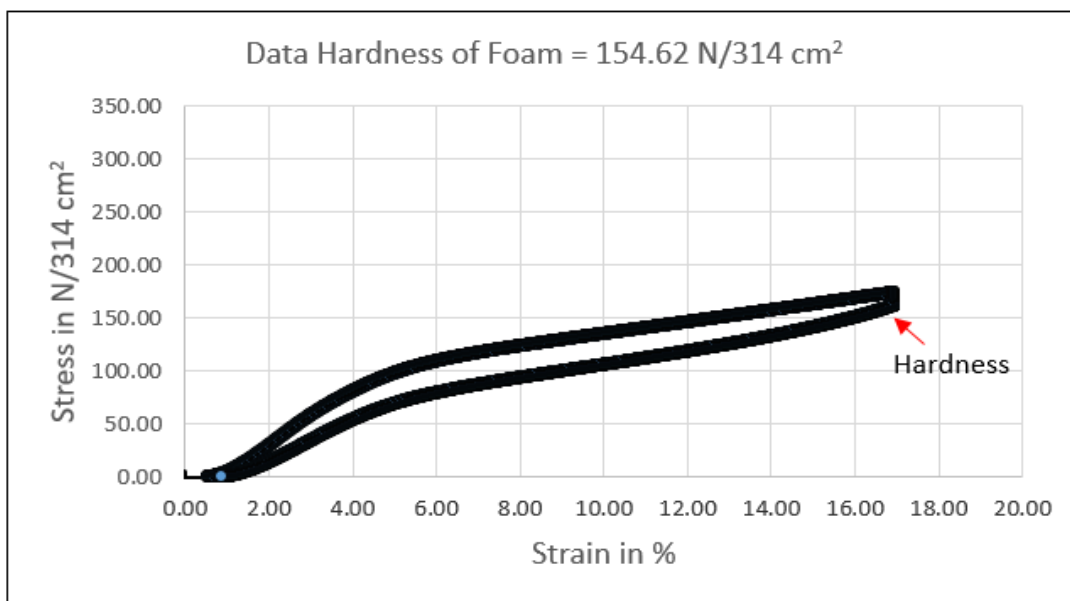
ผลในการทดลอง

- ค่าความแข็งของโพลี หน่วย นิวตัน ต่อ 314 ตารางเซนติเมตร
- น้ำหนักของโพลี หน่วย เป็น กรัม
- ค่าความหนาแน่นของโพลี

ในการวิเคราะห์นั้นเพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าความแข็งของโพลี และเพื่อดูว่าปัจจัยนั้นมีผลต่อน้ำหนักโพลี หรือ ค่าความหนาแน่นของโพลี จึงเก็บค่าเพิ่มเติมเพื่อดูว่าปัจจัยที่เปลี่ยนแปลงนั้นมีผลหรือไม่ และ ถ้ามีเปลี่ยนแปลงในทิศทางใด

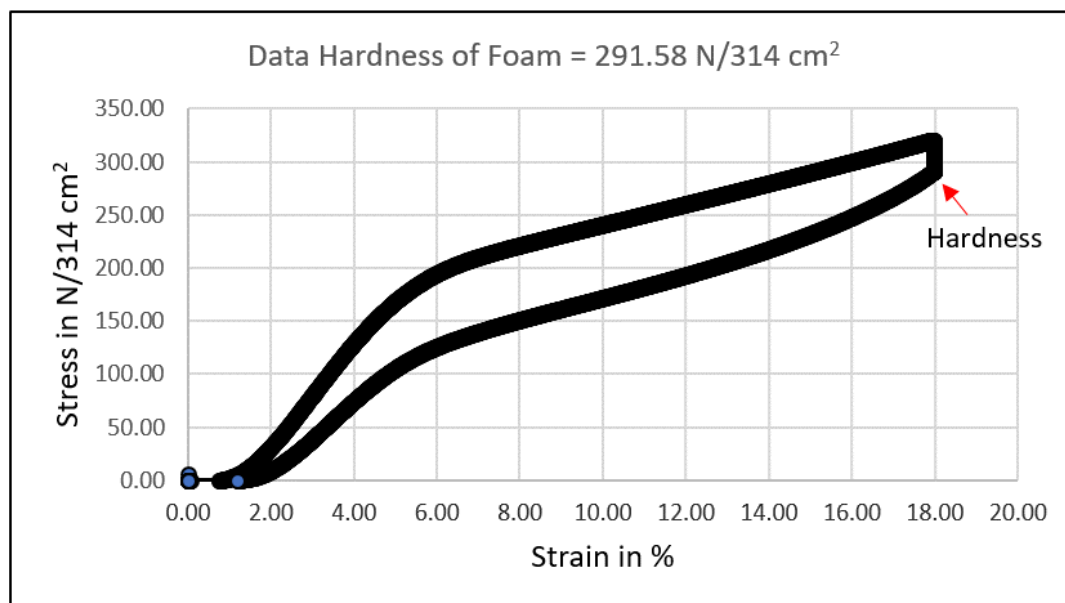
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลอง

Run	PA	ISO	PC	Hardness (N / 314 cm ²)	Density (g/cm ³)	Weight (kg)
1	182	268	456	212.130	0.050	1.14
2	228	283	364	197.250	0.050	1.14
3	228	253	456	174.040	0.050	1.13
4	182	253	364	160.530	0.050	1.14
5	136	283	410	258.920	0.050	1.14
6	182	283	364	215.460	0.050	1.13
7	182	268	364	178.890	0.050	1.14
8	136	253	364	167.180	0.050	1.14
9	182	283	456	280.130	0.050	1.13
10	136	283	456	291.580	0.050	1.14
11	228	253	410	163.150	0.050	1.14
12	136	268	410	212.320	0.050	1.14
13	182	253	456	193.480	0.050	1.13
14	136	253	410	182.040	0.050	1.13
15	228	268	364	175.270	0.050	1.13
16	182	283	410	253.650	0.049	1.13
17	136	283	364	228.750	0.049	1.13
18	136	268	364	187.960	0.050	1.13
19	136	253	456	200.780	0.050	1.13
20	228	253	364	154.620	0.050	1.13
21	228	283	456	262.390	0.050	1.14
22	228	283	410	235.550	0.050	1.14
23	182	268	410	197.730	0.050	1.14
24	182	253	410	175.970	0.050	1.14
25	228	268	456	203.570	0.050	1.14
26	228	268	410	194.540	0.049	1.13
27	136	268	456	230.190	0.050	1.13



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของโฟมที่มีค่าความแข็งน้อยที่สุด

จากรูปที่ 4.1 เป็นกราฟที่สร้างจากข้อมูลแรงที่ต้านการบีบอัดโฟมโดยลักษณะนั้นมีเพิ่มขึ้น และหยุดเมื่อตกลงไปถึง ระยะที่กำหนดไว้คือ 25% ของชิ้นงานโดยค้ำไว้ 20 วินาที และอ่านค่าซึ่งค่าที่อ่านได้นั้นคือค่าความแข็งของโฟม โดยจากกราฟนั้นจะพบว่าเมื่อจนกดยุคกกดที่ตำแหน่ง 25% ของโฟมจะพบว่าค่าความเค้นจะลดลงทันทีและจะหยุดลดลงดังกราฟ ซึ่งชิ้นงานตัวอย่างที่นำมาวัดค่าความแข็งนี้ มีอัตราส่วนของน้ำยาโฟม PA 228 กรัม น้ำยาโฟม ISO 253 กรัม น้ำยาโฟม PC 364 กรัม ซึ่งหากดู รูปที่ 4.2 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของโฟมที่มีค่าความแข็งมากที่สุด โดยมีอัตราส่วนของน้ำยาโฟม PA 136 กรัม น้ำยาโฟม ISO 283 กรัม น้ำยาโฟม PC 456 กรัม มีความแตกต่างกัน ระหว่างโฟมที่มีค่าความแข็งมากที่สุดกับ โฟมที่มีค่าความแข็งที่น้อยที่สุดใน ปริมาณน้ำยาโฟม PA น้อยกว่า 92 กรัม น้ำยาโฟม ISO มากกว่า 30 กรัม และน้ำยาโฟม PC มากกว่า 92 กรัม และค่าความแข็งของโฟมที่ต่างกัน คือ 136.96 N/314 cm²



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของโฟมที่มีค่าความแข็งมากที่สุด

แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนของปริมาณน้ำยาโฟม PA , น้ำยาโฟม PC และ น้ำยาโฟม ISO นั้น มีผลต่อค่าความแข็ง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย [7] ลดต้นทุนของเบาะรองนั่งรถยนต์ โดยการปรับเปลี่ยนสัดส่วนของ โพลีเอทิลีนประเภทไฮโซลิต , โพลีเอทิลีนประเภทไฮวอเตอร์, โพลีเอทิลีนประเภทบาลานซ์เบส และไอโซไซยานต เพื่อคงคุณสมบัติของความแข็งตามที่กำหนด โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองเป็นเครื่องมือในการวิจัย แล้วทำการปรับเปลี่ยนปริมาณของการฉีดโฟม โดยใช้โพลีเอทิลีนประเภทไฮโซลิตที่ระดับ 65 เปอร์เซ็นต์ และ 85 เปอร์เซ็นต์ , โพลีเอทิลีนประเภทบาลานซ์ที่ระดับ 50 เปอร์เซ็นต์ และ 100 เปอร์เซ็นต์ และไอโซไซยานต ระดับ 65 เปอร์เซ็นต์ และ 85 เปอร์เซ็นต์

4.2 การวิเคราะห์ค่าความแข็งของชิ้นงาน

ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองของค่าความแข็งชิ้นงานด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) จะต้องการทำการทดสอบข้อมูลโดยมีสมมติฐานว่ามีความผิดพลาดแบบสุ่มเป็นตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงแบบปกติ และเป็นอิสระด้วยค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และมีความแปรปรวน (σ^2) มีค่าคงตัวแต่ไม่ทราบค่าโดยสามารถทำการทดสอบตามลำดับดังนี้

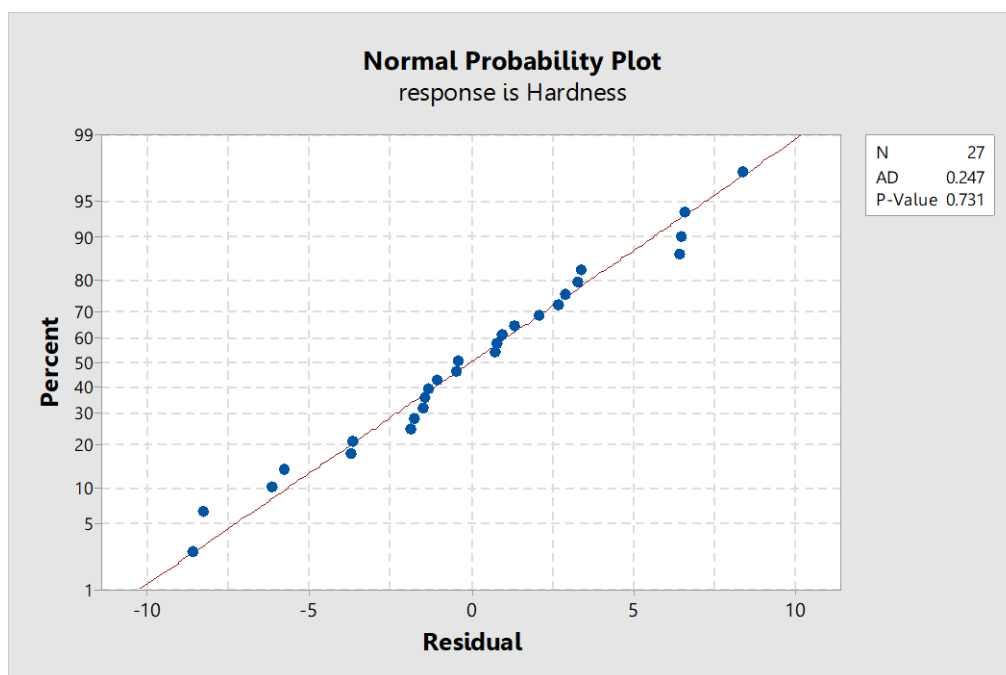
1. การทดสอบการกระจาย
2. การทดสอบความความเป็นอิสระของข้อมูล
3. การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวน

4.2.1 การทดสอบการกระจายแบบปกติ

การตรวจสอบสมมติฐานของความปกติสามารถทำได้โดยการสร้าง Normal Probability plot ของค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) โดยมีสมมติฐานการทดสอบดังนี้

H_0 : ข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ

H_a : ข้อมูลไม่ได้มีการกระจายตัวแบบปกติ



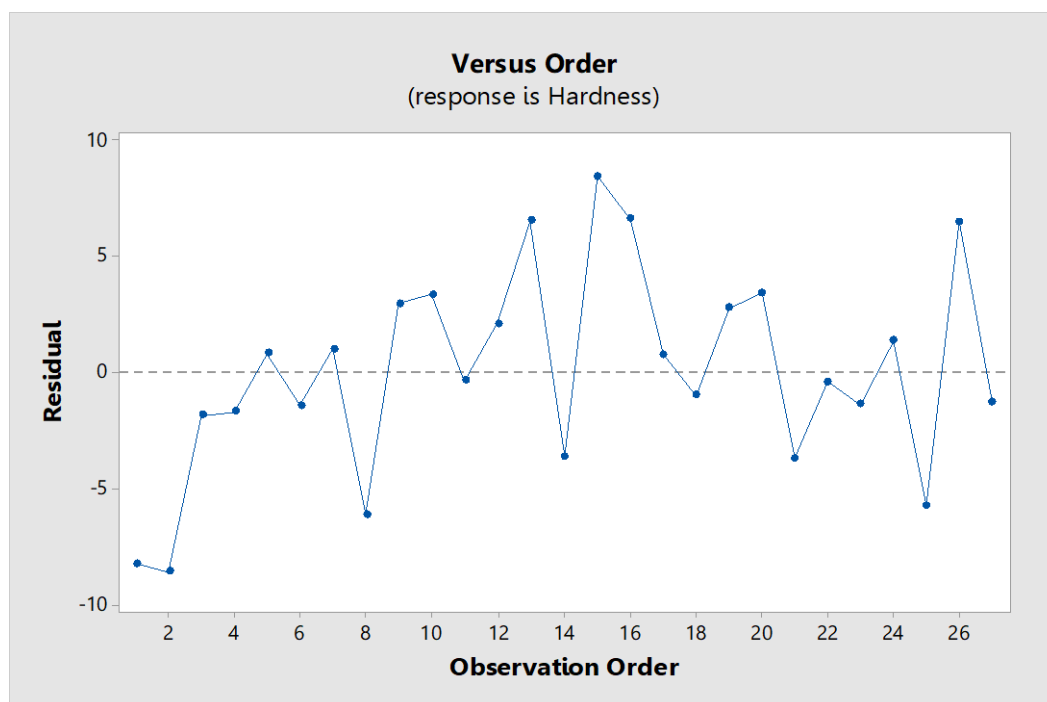
รูปที่ 4.3 Normal Probability Plot ของข้อมูลค่าความแข็งของโคม

การทดสอบการกระจายแบบปกติของค่าคลาดเคลื่อน (Residual) ของค่าความแข็งโคม (Hardness) แสดงในรูปที่ 4.3 จากการวิเคราะห์พบว่าค่าคลาดเคลื่อนมีแนวโน้มที่เป็นลักษณะของเส้นตรง และมีค่า P-value = 0.731 ซึ่งกำหนดให้ยอมรับความผิดพลาดที่ 5% ($\alpha = 0.05$) ดังนั้นเมื่อ P-Value > α จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ ทำให้สรุปได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงเป็นแบบปกติและเป็นข้อมูลที่น่าเชื่อถือได้

4.2.2 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลเป็นการตรวจความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อนว่ามีการเปลี่ยนแปลงไปตามลำดับการทดลองหรือไม่ โดยจากการทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนและลำดับการทดลอง พบว่าลักษณะของค่าความ

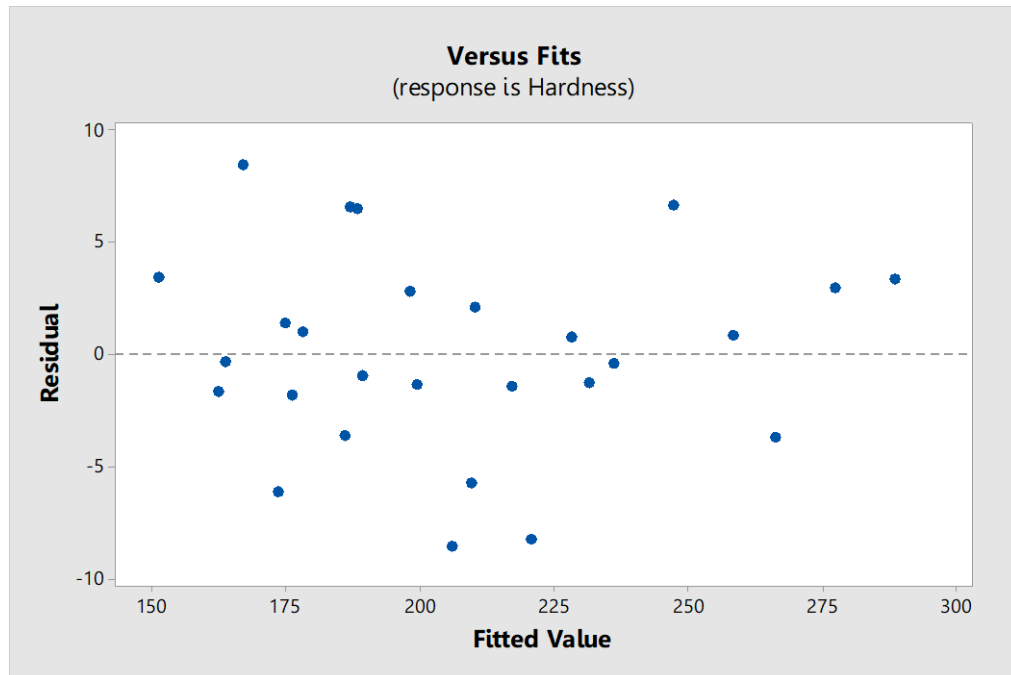
คลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวรอบศูนย์ และไม่มีรูปแบบเป็นอย่างไรอย่างหนึ่ง หรือเป็น วัฏจักร ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความเป็นอิสระต่อกัน



รูปที่ 4.4 การทดสอบความอิสระของข้อมูลค่าความแข็งของโฟม

4.2.3 การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวน

การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนเป็นการตรวจสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล โดยจำทำการทดสอบว่าค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นไม่มีรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคือไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรอิสระใดๆ รวมถึงค่าของตัวแปรที่สนใจที่ถูกทำนาย (Predicted Response) ซึ่งคือค่าความแข็งของโฟมเบาะรถยนต์ การทดสอบทำได้โดยพล็อตค่าคลาดเคลื่อนกับค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวน

จากรูปที่ 4.5 แสดงการทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของค่าความแข็งของโฟม (Hardness) พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนมีที่กระจายตัวอยู่รอบ ศูนย์อย่างสม่ำเสมอ โดยไม่มีลักษณะเป็นรูปแบบใดรูปแบบหนึ่งที่ชัดเจนและไม่มีจุดที่ออกห่างจากศูนย์มากกว่าจุดอื่นๆ อย่างผิดปกติ ทำให้สามารถสรุปได้ว่า ความแปรปรวนของชุดข้อมูลมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง

4.3 สมการทำนายค่าความแข็งของโฟมเบาะรถยนต์

จากผลการทดลองที่ได้ในตารางที่ 4.1 แสดงถึงปริมาณน้ำยาโฟมแต่ละตัวที่ส่งผลต่อค่าความแข็งของโฟมเบาะรถยนต์ที่สามารถนำมาพัฒนาสมการทำนายค่าความแข็ง โดยมีเงื่อนไขปริมาณอัตราส่วนน้ำยาโฟมแต่ละชนิด ได้แก่ PA , PC และ ISO มาวิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุคูณ (Multiple regression analysis) และใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดเพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของการถดถอยของสมการทำนายค่าความแข็งของเบาะรถยนต์ ดังนี้

$$\text{Hardness} = 4551 - 2.991 \text{ PC} - 30.70 \text{ ISO} - 0.2407 \text{ PA} + 0.05192 \text{ ISO} * \text{ISO} + 0.01288 \text{ PC} * \text{ISO} \quad (4.3-1)$$

4.3.1 การทดสอบนัยสำคัญของการถดถอย

การทดสอบนัยสำคัญของการถดถอย คือการทดสอบเพื่อที่จะตรวจสอบว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนอง หรือ ค่าความแข็งของโพลีเอทิลีน และตัวแปรอิสระ ที่ประกอบด้วย ปริมาณน้ำยาโพลี PA , ปริมาณน้ำยาโพลี PC , ปริมาณน้ำยาโพลี ISO หรือไม่ แสดงขั้นตอนดังนี้

เมื่อตัวแปรตอบสนองคือค่าความแข็งของโพลีเอทิลีน มีสมมติฐาน ดังนี้

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$$

$$H_1: \beta_j \text{ อย่างน้อย 1 ตัว } \neq 0$$

ซึ่งสามารถตรวจสอบความมีนัยสำคัญได้จากตารางที่ 4.2 ซึ่งแสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวน ได้ผลดังนี้

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการถดถอย Hardness

Response Surface Regression: Hardness versus PC, ISO, PA

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	35843.2	3982.6	186.31	0.0000
Linear	3	33939.5	11313.2	529.24	0.0000
PC	1	8123	8123	380	0.0000
ISO	1	23608.9	23608.9	1104.45	0.0000
PA	1	2207.6	2207.6	103.27	0.0000
Square	3	844.2	281.4	13.16	0.0000
PC*PC	1	20.8	20.8	0.97	0.3370
ISO*ISO	1	818.8	818.8	38.3	0.0000
PA*PA	1	4.6	4.6	0.22	0.6470
2-Way Inte	3	1059.4	353.1	16.52	0.0000
PC*ISO	1	948.2	948.2	44.36	0.0000
PC*PA	1	55.5	55.5	2.59	0.1260
ISO*PA	1	55.8	55.8	2.61	0.1250
Error	17	363.4	21.4		
Total	26	36206.6			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
4.62343	99.00%	98.46%	97.46%

Coded Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	201.01	2.35	85.38	0	
PC	21.24	1.09	19.49	0	1
ISO	36.22	1.09	33.23	0	1
PA	-11.07	1.09	-10.16	0	1
PC*PC	-1.86	1.89	-0.99	0.337	1
ISO*ISO	11.68	1.89	6.19	0	1
PA*PA	-0.88	1.89	-0.47	0.647	1
PC*ISO	8.89	1.33	6.66	0	1
PC*PA	-2.15	1.33	-1.61	0.126	1
ISO*PA	-2.16	1.33	-1.62	0.125	1

จากตารางที่ 4.2 ซึ่งเป็นผลวิเคราะห์จาก โปรแกรม Minitab โดยนำข้อมูลจากตารางที่ 4.1 นั้นไปวิเคราะห์ความแปรปรวนของการถดถอย ทำให้ค่าที่ออกมานั้นพบว่า P-Value ของ PC*PC = 0.337, PA*PA = 0.6470 และ PC*PA = 0.126 , ISO*PA = 0.125 นั้นมีค่ามีค่ามากกว่า α ซึ่งกำหนดให้ยอมรับความผิดพลาดที่ 5 % ($\alpha = 0.05$) ทำให้ยอมรับสมมติฐานหลัก (H_0) นั้นแสดงว่า quadratic ของ PC , PA และ interaction ของ PC*PA , ISO*PA นั้นไม่มีผลต่อค่าความแข็ง ดังนั้นจึงต้องตัด quadratic และ interaction ที่ไม่มีผลออก ซึ่งในที่นี้ ใช้วิธีการตัดแบบ Step wise คือวิธีการผสมระหว่างการเลือกแบบก้าวหน้าและการตัดทิ้งแบบถอยหลัง โดยใช้โปรแกรม Minitab ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการถดถอย Hardness ด้วยวิธี Stepwise

Regression Analysis: Hardness versus PC, ISO, PA

Method

Continuous predictor standardization

Subtract the mean

Predictor	Mean
PC	410
ISO	268
PA	182

Stepwise Selection of Terms

α to enter = 0.15, α to remove = 0.15

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	7	35817.7	5116.8	250	0
PC	1	8123	8123	396.88	0
ISO	1	23608.9	23608.9	1153.51	0
PA	1	2207.6	2207.6	107.86	0
ISO*ISO	1	818.8	818.8	40	0
PC*ISO	1	948.2	948.2	46.33	0
PC*PA	1	55.5	55.5	2.71	0.116
ISO*PA	1	55.8	55.8	2.72	0.115
Error	19	388.9	20.5		
Total	26	36206.6			

จากตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการถดถอย Hardness ด้วยวิธี Stepwise ยังคงพบว่าค่า P-value ของ PC*PA = 0.116 และ ISO*PA = 0.115 มีค่ามากกว่า α ซึ่งกำหนดให้ยอมรับความผิดพลาดที่ 5 % ($\alpha = 0.05$) ดังนั้นจึงต้องตัด Team ที่มีค่า P-value มากกว่า 0.05 เองและใช้โปรแกรม Minitab ทำการวิเคราะห์อีกครั้ง

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการถดถอย Hardness ด้วยวิธี Stepwise (ตัด Team ที่ไม่ significant ออกเอง)

Regression Analysis: Hardness versus PC, ISO, PA

Method

Continuous predictor standardization

Subtract the mean

Predictor	Mean
PC	410
ISO	268
PA	182

Stepwise Selection of Terms

α to enter = 0.15, α to remove = 0.15

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	5	35706.5	7141.3	299.87	0
PC	1	8123	8123	341.09	0
ISO	1	23608.9	23608.9	991.35	0
PA	1	2207.6	2207.6	92.7	0
ISO*ISO	1	818.8	818.8	34.38	0
PC*ISO	1	948.2	948.2	39.82	0
Error	21	500.1	23.8		
Total	26	36206.6			

จากตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการถดถอย Hardness ด้วยวิธี Stepwise ซึ่งได้ตัด Team ที่ไม่ significant ออกเองพบว่าค่า PC, ISO, PA, ISO*ISO และ PC*ISO มีค่า P-value = 0.00 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า α ซึ่งกำหนดให้ยอมรับความผิดพลาดที่ 5 % ($\alpha = 0.05$) ดังนั้นจึงทำการปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) และสรุปได้ว่า มีตัวแปรอิสระอย่างน้อย 1 ตัว ที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อตัวแปรตอบสนอง นั่นคือสมการถดถอยสามารถนำมาใช้ได้

4.3.2 การทดสอบสัมประสิทธิ์การถดถอยทีละตัว

เป็นการทดสอบว่าตัวแปรอิสระ (X) แต่ละตัวที่มีอยู่ในสมการ มีความสามารถในการอธิบาย การเปลี่ยนแปลงหรือการเคลื่อนไหวของตัวแปรตาม คือ ค่าความแข็งของโฟมเบาะรถยนต์ (Y) หรือไม่ โดยสามารถทำการทดสอบได้ดังต่อไปนี้

เมื่อตัวแปรตอบสนองคือค่าความแข็งของโฟมเบาะรถยนต์ มีสมมติฐาน ดังนี้

$$H_0: \beta_j = 0$$

$$H_1: \beta_j \neq 0$$

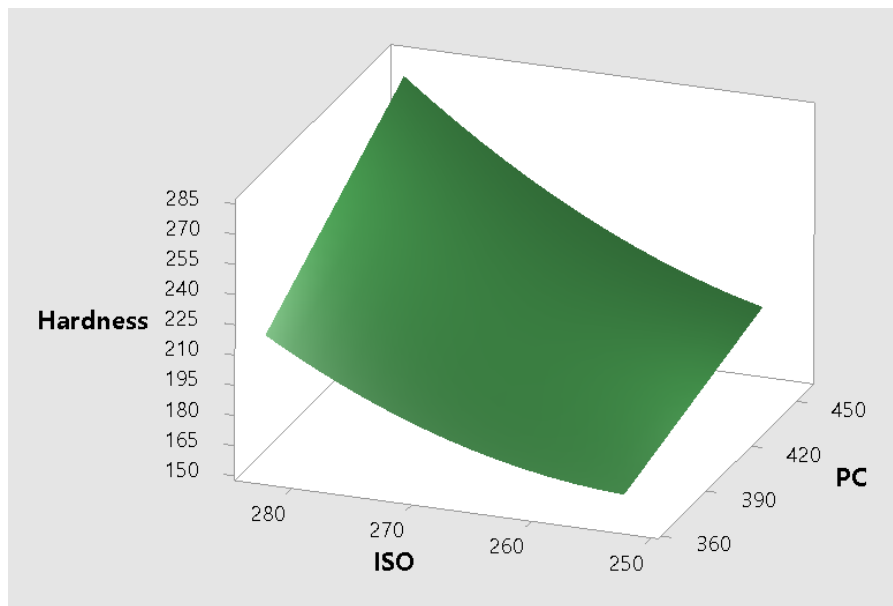
ซึ่งสามารถตรวจสอบความมีนัยสำคัญได้จากตารางที่ 4.4 ซึ่งทำการคำนวณด้วยโปรแกรม Minitab ให้ผลดังนี้

ตารางที่ 4.5 การทดสอบสัมประสิทธิ์การถดถอยทีละตัวสำหรับ Hardness

Coded Coefficients

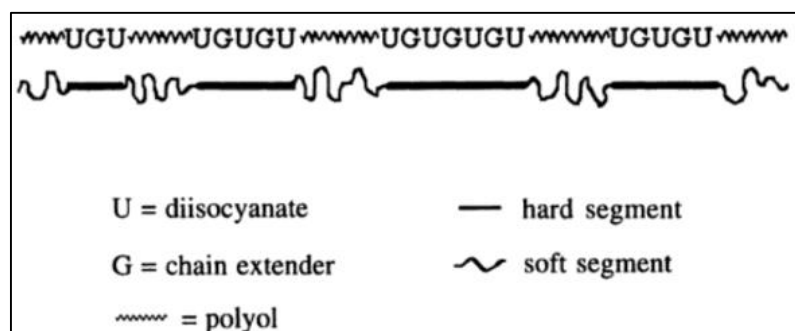
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	199.18	1.63	122.44	0	
PC	0.4618	0.025	18.47	0	1
ISO	2.4144	0.0767	31.49	0	1
PA	-0.2407	0.025	-9.63	0	1
ISO*ISO	0.05192	0.00885	5.86	0	1
PC*ISO	0.01288	0.00204	6.31	0	1

จากตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบสัมประสิทธิ์การถดถอยทีละตัว พบว่าตัวแปรที่อยู่ในสมการได้แก่ PA , ISO , PC ,ISO*ISO , ISO*PC โดยค่า P-value มีค่าน้อยกว่า α ซึ่งกำหนดให้ยอมรับความผิดพลาดที่ 5 % ($\alpha = 0.05$) ดังนั้นจึงทำการปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) และสรุปได้ว่าตัวแปรดังกล่าวควรมีอยู่ในสมการถดถอย และสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งของโฟมเบาะรถยนต์ได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยพบว่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของแต่ละปัจจัยมีค่าและเครื่องหมายที่แตกต่างกัน กล่าวคือค่าสัมประสิทธิ์สามารถบ่งบอกได้ทั้งขนาดและทิศทางของความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนั้นๆที่มีผลต่อ ค่าความแข็งของโฟมเบาะรถยนต์ โดยหากปัจจัยมีสัมประสิทธิ์ที่เป็นเครื่องหมายบวก จะหมายถึงปัจจัยนั้นมีความสัมพันธ์ต่อค่าความแข็งของโฟมเบาะรถยนต์ในลักษณะแปรผันตรงต่อกัน ในทางตรงกันข้ามถ้าปัจจัยมีสัมประสิทธิ์ที่เป็นเครื่องหมายลบ จะหมายถึงปัจจัยนั้นลักษณะแปรผกผันกับค่าความแข็งของโฟมเบาะรถยนต์

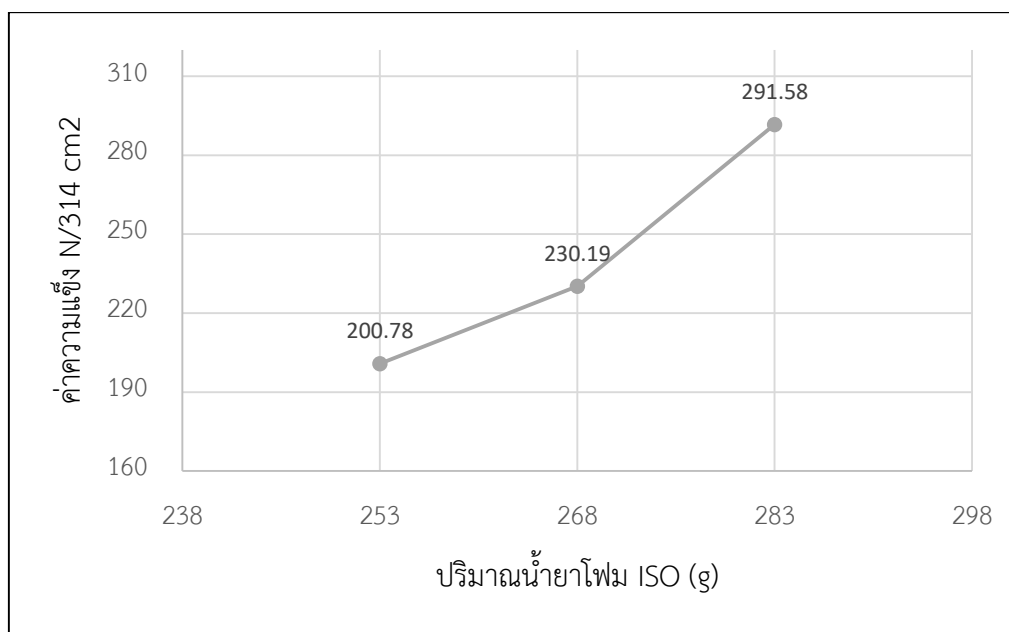


รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ ระหว่าง ปริมาณ ISO และ PC ที่มีผลต่อค่าความแข็งของโฟม

จากรูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ ระหว่าง ปริมาณ ISO และ PC ที่มีผลต่อค่าความแข็งของโฟม สอดคล้องกับการตารางที่ 4.5 ซึ่งขณะที่ ปริมาณน้ำยาโฟม ISO เพิ่มขึ้น จาก 253 g ไป 283 g และ ปริมาณ PC เพิ่มขึ้นจาก 364 g ไป 456 g ค่าความแข็งของโฟมเพิ่มขึ้น โดยที่น้ำยาโฟมทั้ง 2 นั้น เทอมที่ PC มีปฏิสัมพันธ์ กับ ISO มีค่าเป็นบวก ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อปริมาณน้ำยาโฟม PC ที่เพิ่มขึ้น และปริมาณน้ำยาโฟม ISO ที่เพิ่มขึ้นนั้น ค่าความแข็งของโฟมเบาะรถยนต์จะเพิ่มขึ้นทั้งนี้ เนื่องจาก ISO นั้น เป็น hard segment ตามรูปที่ 4.6 เมื่อปริมาณน้ำยาโฟม ISO เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความแข็งของโฟม เพิ่มขึ้นเนื่องจากจะมี hard segment จะเชื่อมสายโซ่ของ polyol มากขึ้น และ น้ำยาโฟม PC นั้นทำให้เกิดปฏิกิริยา Cross ring สายโซ่ของพอลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงจากการจับตัวของสายโซ่ที่มี hard segment ของ ISO ดังนั้นจึงให้โฟมนั้นมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น

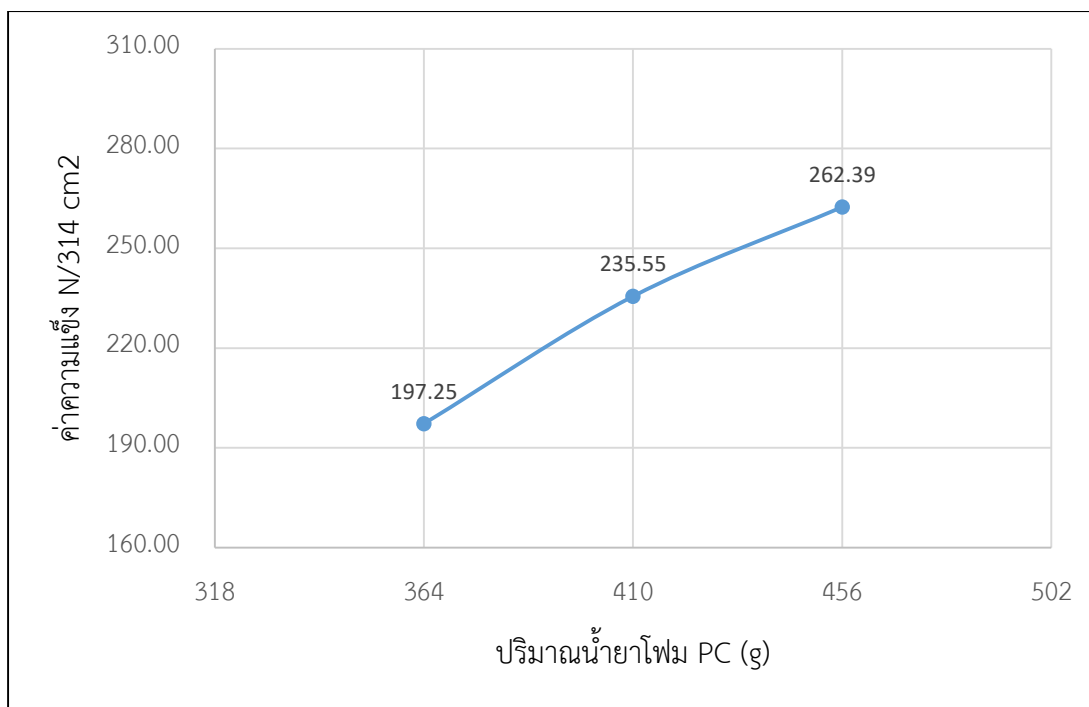


รูปที่ 4.7 โครงสร้างของโฟมเบาะรถยนต์ (Polyurethanes structure) [14]



รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความแข็ง กับ แต่ละปริมาณน้ำยาโฟม ISO กับปริมาณน้ำยาโฟม PA 228 g และ น้ำยาโฟม PC 456 g

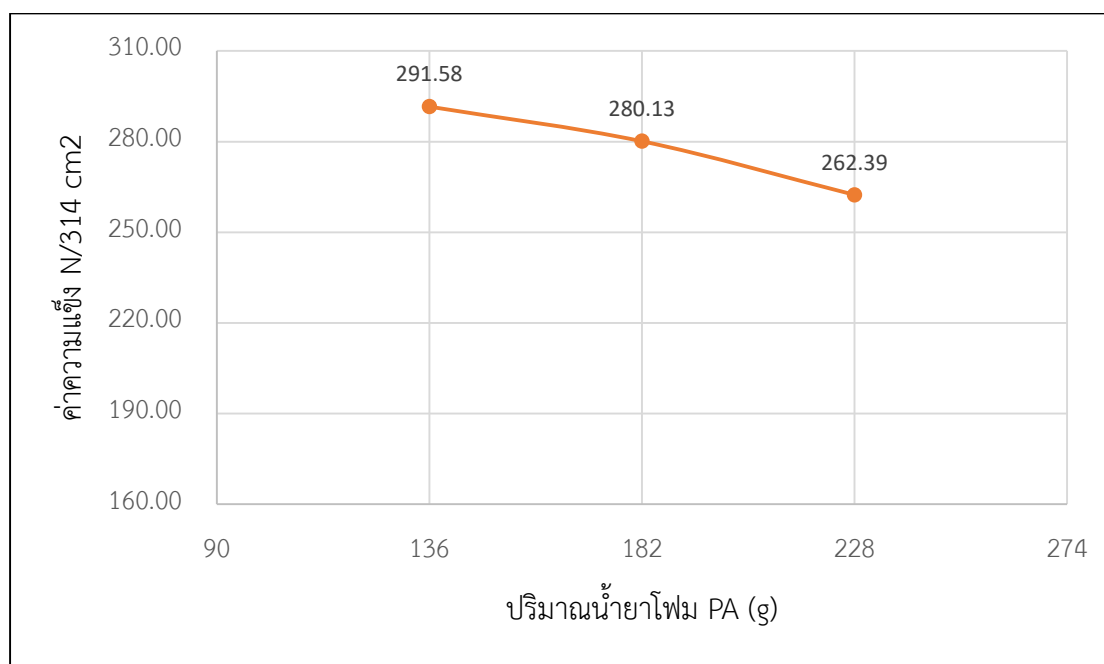
จากตารางที่ 4.5 ISO และมี เทอม ISO*ISO มีค่าเป็นบวก ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อ ปริมาณน้ำยาโฟม ISO นั้นเพิ่มมากขึ้น ค่าความแข็งของโฟมเบาะรถยนต์ เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับ รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความแข็งของแต่ละปริมาณน้ำยาโฟม ISO ที่ 253 g, 268 g และ 283 g โดยกำหนดปริมาณน้ำยาโฟม PA ที่ 228 g และน้ำยาโฟม PC ที่ 456 g ซึ่งปริมาณน้ำยาโฟม ทั้งสองนี้เป็นปริมาณสูงสุดของแต่ละปัจจัยในการทดลองนี้ พบว่าค่าความแข็งนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับ [7] งานวิจัย ศึกษาการลดต้นทุนของเบาะรองนั่งรถยนต์ โดยการปรับเปลี่ยนสัดส่วน ของ โพลีเอทิลีนประเภทไฮโซลิต , โพลีเอทิลีนประเภทไฮวอเตอร์, โพลีเอทิลีนประเภทบาลานซ์เบส และไอโซไซยานต เพื่อคงคุณสมบัติของความแข็งตามที่กำหนด ซึ่งทั้งนี้เนื่องจาก ISO นั้น เป็น hard segment ตามรูปที่ 4.7 โครงสร้างของโฟมเบาะรถยนต์ เมื่อปริมาณน้ำยาโฟม ISO เพิ่มขึ้นจะทำให้ ค่าความแข็งของโฟม เพิ่มขึ้นเนื่องจากจะมี hard segment จะเชื่อมสายโซ่ของ polyol มากขึ้น และมีทิศทางมากขึ้นแบบเป็นเส้นโค้ง



รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความแข็งแรง กับ แต่ละปริมาณน้ำยาโฟม PC กับปริมาณน้ำยาโฟม PA 228 g และ น้ำยาโฟม ISO 268 g

จากตารางที่ 4.5 PC นั้นเป็นมีค่าเป็นบวก ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อปริมาณน้ำยาโฟม PC นั้นเพิ่มขึ้นค่าความแข็งแรงของโพลีเมอร์จะเพิ่มขึ้นทั้งนี้ ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4.9 กราฟแสดงให้เห็นค่าความแข็งแรง ของแต่ละปริมาณน้ำยาโฟม PC ที่ 364 g ,410 g และ 456 g โดยกำหนดปริมาณน้ำยาโฟม PA ที่ 228 g และน้ำยาโฟม ISO ที่ 268 g ซึ่งปริมาณน้ำยาโฟมทั้งสองนี้เป็นปริมาณสูงสุดของแต่ละปัจจัยในการทดลองนี้ พบว่าค่าความแข็งแรงนั้นมีแนวโน้มเพิ่มเป็นเส้นตรงที่ความชัน 0.7 ที่มีค่าความเค้นสูงเมื่อมี Polyurethane copolymer เนื่องจากเกิดการ Cross-linking ขึ้นทำให้ สายโซ่ของ Polymer เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล ส่งผลให้โพลีเมอร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาดังกล่าว มีความแข็งแรงของสายโซ่มากทำให้มีความเค้นสูง นั่นคือทำให้โพลีเมอร์นั้นมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ซึ่งสำหรับงานวิจัยนี้นั้น น้ำยาโฟม PC คือ Copolymer จากรูปที่ 4.9 นั้นเมื่อ Copolymer เพิ่มปริมาณมากขึ้น ตามปริมาณที่น้ำยาโฟม PC เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ ค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นแบบมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย [15] การเตรียมและศึกษาสมบัติของ Polyurethane ที่ กราฟ ด้วยโซ่ Polystyrene และ [13] ผลของการ Cross-linking ต่อคุณสมบัติทางความร้อนและเชิงกลของ Polyurethane โดยที่ Polyurethane เตรียมจาก propylene glycol diol;trimethylolpropane propoxylate, triol; และ propylene glycol), tolylene 2,4 -

diisocyanate, diisocyanate monomer ความหนาแน่นของ การcrosslink ถูกควบคุมโดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ ทั้ง 3 สาร จาก 10 ถึง 70 mol%



รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความแข็ง กับ แต่ละปริมาณน้ำยาโฟม PA กับปริมาณน้ำยาโฟม PC 456 g และ น้ำยาโฟม ISO 268 g

จากตารางที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของ PA มีค่าเป็นลบ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อปริมาณน้ำยาโฟม PA เพิ่มขึ้น ค่าความแข็งของโฟมเบาะรถยนต์ ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4.10 กราฟแสดงให้เห็นค่าความแข็ง ของแต่ละปริมาณน้ำโฟม PA ที่ 136 g , 182 g และ 228 g โดยกำหนดปริมาณน้ำยาโฟม PC ที่ 456 g และน้ำยาโฟม ISO ที่ 268 g ซึ่งปริมาณน้ำยาโฟมทั้งสองนี้เป็นปริมาณสูงสุดของแต่ละปัจจัยในการทดลองนี้ พบว่าค่าความแข็งนั้นมีแนวโน้มลดลงเป็นเส้นตรงที่ความชัน -0.317 ซึ่งสอดคล้องกับ [16] [8] งานวิจัย ที่อธิบายถึง น้ำที่มีผลต่อขนาดของเซลล์โฟม ซึ่งเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นจะทำให้ขนาดของเซลล์เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งของโฟมนั้นลดลงเนื่องจากอากาศนั้นเข้าไปแทนที่เนื้อโฟมทำให้ความแข็งแรงของโฟมนั้นต่ำลง ยิ่ง PA มาก ฟองอากาศยิ่งใหญ่ค่าความแข็งโฟมจะยิ่งน้อย โดยงานวิจัยนี้ น้ำยาโฟม PA นั้นมีส่วนประกอบหลักคือน้ำที่ผสมอยู่

จากสมการทำนายค่าความแข็งนั้นจะพบว่ามีความขัดแย้งกับสัญญาณลักษณะหน้าสัมประสิทธิ์ของ ISO และ PC อยู่เนื่องจากมี Team ที่มี interaction ระหว่าง ISO กับ PC และมี Team ISO*ISO อยู่

$$\text{Hardness} = 4551 - 2.991 \text{ PC} - 30.70 \text{ ISO} - 0.2407 \text{ PA} + 0.05192 \text{ ISO*ISO} + 0.01288 \text{ PC*ISO}$$

โดยเมื่อพิจารณาแล้วสมการทำนายค่าความแข็งของโพนั้นไม่ได้ผิดแปรอะไรเนื่องจาก ค่าต่ำสุดที่จะสามารถเกิดโพนได้นั้นจะต้องมี ISO ไม่น้อยกว่า 253 g และ PC ไม่น้อยกว่า 364 g ทำให้เทอมที่เป็น interaction นั้นระหว่าง PC กับ ISO ที่มีสัมประสิทธิ์หน้าที่มีบวก จะมีค่าต่ำสุดคือ $0.01288 \times 364 \times 253 = 1,186.145$ ในขณะที่ สัมประสิทธิ์หน้า PC ที่เป็นลบนั้น จะมีค่า เป็น $-2.991 \times 364 = -1,088.724$ ทำให้เมื่อพิจารณาที่ PC จะพบว่า ผลรวมของสมการเป็นบวก $1,186.145 - 1,088.724 = 97.421$

ในขณะที่ สัมประสิทธิ์หน้า ISO ที่เป็นลบนั้นจะมีค่า เป็น $-30.7 \times 253 = -7,767.1$ ซึ่งในเทอมที่เป็น ISO*ISO ที่มีสัมประสิทธิ์หน้าที่มีบวก จะมีค่าต่ำสุดคือ $0.05192 \times 253 \times 253 = 3,323.347$ และ เทอมที่เป็น interaction นั้นระหว่าง PC กับ ISO ที่มีสัมประสิทธิ์หน้าที่มีบวก จะมีค่าต่ำสุดคือ $0.01288 \times 253 \times 364 = 1,186.144$ และเมื่อนำสัมประสิทธิ์ เป็นบวกมารวมกันจะเท่ากับ $3,323.347 + 1,186.144 = 4,509.491$ ซึ่งค่าที่ออกมา นั้น ผลรวมบวกมีค่าน้อยกว่าผลรวมลบไม่ได้บ่งบอกถึงทิศทางที่เพิ่มขึ้นซึ่งต้องพิจารณาในกรณีที่เพิ่ม ISO โดยเมื่อเพิ่ม ISO จาก 253 เป็น 254 ค่าสัมประสิทธิ์ที่เป็นลบ เท่ากับ $-7,797.8$ มีค่าผลต่างเท่ากับ 30.7 ในขณะที่ ค่าสัมประสิทธิ์ที่เป็นบวก เท่ากับ $4,540.503$ มีค่าผลต่างเท่ากับ 31.01 ซึ่งมีค่ามากกว่า ซึ่งสรุปได้ว่าสมการทำนายนั้นไม่ได้ผิดปกติ

4.4 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

ตัวแปรตอบสนองคือ ค่าความแข็งของโพนเบาะรถยนต์ จากการวิเคราะห์การถดถอย ตามที่แสดงในตาราง 4.5 พบว่าสมการทำนายค่าความแข็งของโพนเบาะรถยนต์ มีค่า R^2 และ R^2_{adj} เท่ากับ 98.62% และ 98.29 % ตามลำดับ นั้นหมายถึงตัวแปรอิสระสามารถอธิบายตัวแปรตอบสนอง หรือความแข็งของโพนเบาะรถยนต์ได้เป็นอย่างดี

ตารางที่ 4.6 ค่าความแข็งของโฟมเบาะรถยนต์ที่ได้จากการสมการ

No.	ปริมาณ (g)			เปอร์เซ็นต์ (%)		Index	ค่าความแข็งของโฟมที่ได้ จากสมการ(N/314 cm ²)
	PA	PC	ISO	PA	PC		
1	228	364	253	25	40	0.9	149.78864
2	182	364	253	20	40	0.9	160.86084
3	228	410	253	25	45	0.9	162.10008
4	228	364	268	25	40	0.95	165.36824
5	136	364	253	15	40	0.9	171.93304
6	182	410	253	20	45	0.9	173.17228
7	228	456	253	25	50	0.9	174.41152
8	182	364	268	20	40	0.95	176.44044
9	136	410	253	15	45	0.9	184.24448
10	182	456	253	20	50	0.9	185.48372
11	228	410	268	25	45	0.95	186.56688
12	136	364	268	15	40	0.95	187.51264
13	136	456	253	15	50	0.9	196.55592
14	182	410	268	20	45	0.95	197.63908
15	228	364	283	25	40	1	204.31184
16	228	456	268	25	50	0.95	207.76552
17	136	410	268	15	45	0.95	208.71128
18	182	364	283	20	40	1	215.38404
19	182	456	268	20	50	0.95	218.83772
20	136	364	283	15	40	1	226.45624
21	136	456	268	15	50	0.95	229.90992
22	228	410	283	25	45	1	234.39768
23	182	410	283	20	45	1	245.46988

No.	ปริมาณ (g)			เปอร์เซ็นต์ (%)		Index	ค่าความแข็งของโฟมที่ได้จากสมการ(N/314 cm ²)
	PA	PC	ISO	PA	PC		
24	136	410	283	15	45	1	256.54208
25	228	456	283	25	50	1	264.48352
26	182	456	283	20	50	1	275.55572
27	136	456	283	15	50	1	286.62792

4.5 การทดสอบความแน่นยำของสมการ

สมการทำนายค่าความแข็งของโฟมเบาะรถยนต์ที่ถูกพัฒนาขึ้นนี้ จะต้องมีการทดสอบความแน่นยำโดยคาดหวังว่าสมการนั้นสามารถใช้ทำนายค่าความแข็งของโฟมเบาะรถยนต์ได้ดี สำหรับปริมาณน้ำโฟมอื่นๆ โดยเงื่อนไขของปริมาณใหม่เพื่อใช้ทดสอบความแน่นยำได้แบ่งเป็น 2 การทดสอบคือ

1. การทดสอบที่อยู่ในขอบเขตเงื่อนไขปริมาณน้ำยาโฟมเดิม
2. การทดสอบที่อยู่นอกขอบเขตเงื่อนไขปริมาณน้ำยาโฟมเดิม

4.5.1 การทดสอบที่อยู่ในขอบเขตเงื่อนไขของปริมาณน้ำยาโฟมเดิม

เพื่อทดสอบความแน่นยำของสมการทำนายค่าความแข็งของโฟมเบาะรถยนต์ เงื่อนไขของปริมาณน้ำยาโฟมอยู่ภายใต้ขอบเขตการทดลองได้ถูกกำหนดและใช้ทดสอบ โดยแสดงได้ในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 เงื่อนไขปริมาณน้ำยาโฟมสำหรับทดสอบความแน่นยำของสมการ

ปัจจัย	ระดับ
น้ำยาโฟม PA (g)	159, 205
น้ำยาโฟม PC (g)	387, 433
น้ำยาโฟม ISO (g)	260.5, 275.5

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

จากตารางที่ 4.8 แสดงผลการทดลองที่ใช้ทดสอบความแม่นยำของสมการ โดยทำการวิเคราะห์ผล ซึ่งมีจำนวน 8 การทดลอง จากตารางประกอบด้วย เส้นใยปริมาณน้ำยาโฟมต่างๆ ค่าความแข็งของโฟมเบาะรถยนต์จากการวัดด้วยเครื่องวัดจริง และ ค่าความแข็งของโฟมเบาะรถยนต์จากการคำนวณด้วยสมการที่ถูกพัฒนาขึ้น

ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองเพื่อทดสอบความแม่นยำ

No.	ปริมาณ (g)			ค่าความแข็งของโฟม ที่ได้จากสมการ (N/314 cm ²)	ค่าความแข็งของ โฟมที่ได้จากการวัด จริง (N/314 cm ²)
	PA	PC	ISO		
1	159	387	260.5	179.6	181.5
2	159	387	275.5	211.3	215.7
3	159	433	260.5	196.4	190.3
4	159	433	275.5	237.0	242.4
5	205	387	260.5	168.6	165.6
6	205	387	275.5	200.3	207.9
7	205	433	260.5	185.3	185.8
8	205	433	275.5	225.9	229.1

จากตารางที่ 4.8 สังเกตได้ว่าค่าความแข็งของโฟมเบาะรถยนต์ที่ได้จากการวัดจริงนั้นกับค่าความแข็งของโฟมเบาะรถยนต์ที่ได้จากสมการทำนายค่าความแข็งของโฟมตามสมการที่ 4.3-1 ที่เส้นใยปริมาณน้ำยาโฟมต่างๆ จะเห็นได้ว่า ค่าความแข็งของโฟมเบาะรถยนต์ที่ได้จากการวัดจริง และจากการคำนวณด้วยสมการ มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถแสดงด้วยรูปที่ 4.11 ที่แสดงถึงความแม่นยำของสมการด้วยเส้นใยปริมาณน้ำยาโฟมต่างๆ

ตารางที่ 4.9 การทดสอบความแตกต่างของค่ากลางของสองประชากรไม่อิสระ

Paired T-Test and CI: ค่าความแข็งของโฟมที่ได้จากสมการ, ค่าความแข็งของโฟมที่ได้จากการวัด

Descriptive Statistics

Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
ค่าความแข็งของโฟมที่ได้จากสมการ	8	200.56	23.29	8.23
ค่าความแข็งของโฟมที่ได้จากการวัด	8	202.29	26	9.19

Estimation for Paired Difference

95% CI for				
Mean	StDev	SE Mean	$\mu_{\text{difference}}$	
-1.73	4.51	1.59	(-5.50, 2.04)	

$\mu_{\text{difference}}$: mean of (ค่าความแข็งของโฟมที่ได้จากสมการ - ค่าความแข็งของโฟมที่ได้จากการวัด)

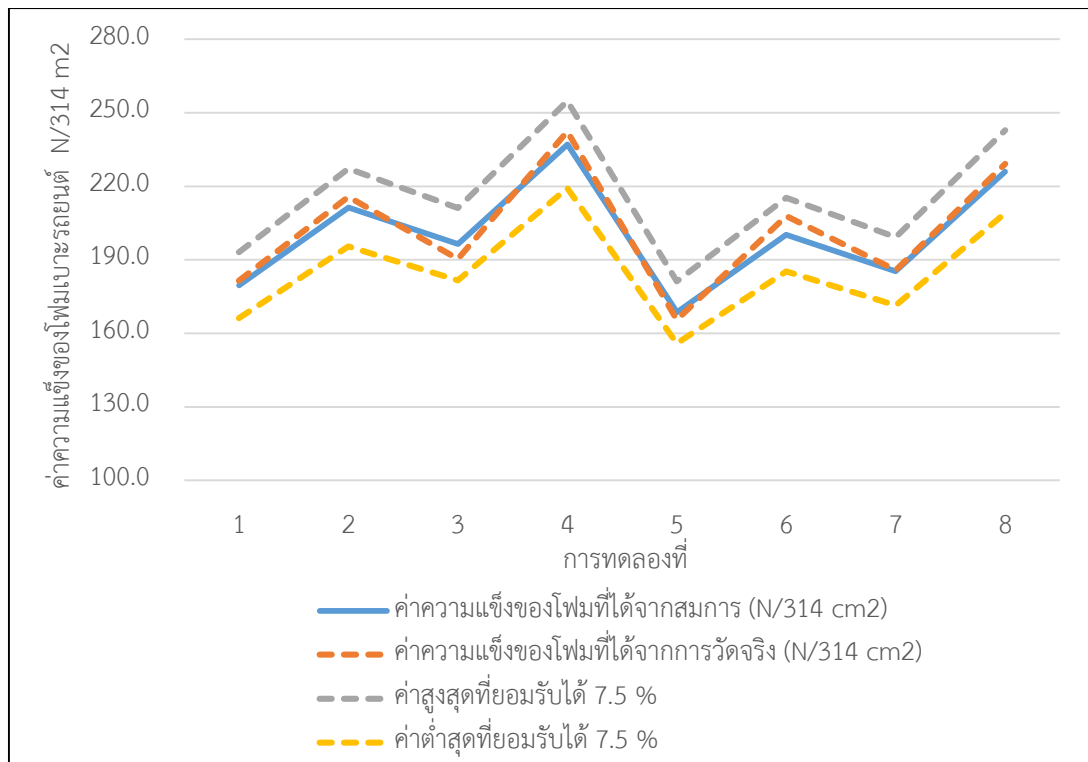
Test

Null hypothesis $H_0: \mu_{\text{difference}} = 0$

Alternative hypothesis $H_1: \mu_{\text{difference}} \neq 0$

T-Value	P-Value
-1.08	0.314

จากตารางที่ 4.9 การทดสอบความแตกต่างของค่ากลางของสองประชากรไม่อิสระ ซึ่งค่าทั้งสองนี้ นำมาจากผลจากตารางที่ 4.8 เพื่อทำการวิเคราะห์ค่ากลางของค่าความแข็งของโฟมที่ได้จากสมการ กับ ค่าความแข็งของโฟมที่ได้จากการวัดจริง ที่ใช้ปัจจัยที่อยู่ในขอบเขตเงื่อนไขเดิมโดยที่อัตราส่วนปริมาณน้ำยาโฟมที่เท่ากัน ซึ่งพบว่า P-value ที่ได้นั้น เท่ากับ 0.314 ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ซึ่งมากกว่า 0.05 ทำให้สรุปได้ว่าเชื่อในสมมติฐาน H_0 คือ $\mu_1 - \mu_2 = 0$ นั้นแสดงว่า ค่าเฉลี่ยระหว่างค่าความแข็งของโฟมที่ได้จากสมการ กับ ค่าความแข็งของโฟมที่ได้จากการวัดจริงไม่ต่างกัน



รูปที่ 4.11 การทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายค่าความแข็งแรงของโพลีโพรพิลีน

การคำนวณความแม่นยำของสมการ สามารถทำได้ผ่านการคำนวณค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ ของความคลาดเคลื่อน ตาม สมการที่ 4.4-1 ดังนี้

$$\text{ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน} = \frac{100\%}{n} \sum_{t=1}^n \frac{H_t - A_t}{A_t} \quad (4.4-1)$$

โดยที่ H คือ ค่าความแข็งแรงของโพลีโพรพิลีนที่ได้จากสมการทำนายค่าความแข็งแรง , A คือ ค่าความแข็งแรงของโพลีโพรพิลีนที่ได้จากการวัด และ t คือ ข้อมูลที่ 1 ถึง n โดยในที่นี้ n = 8

ซึ่งจากการคำนวณค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของสมการทำนายค่าความแข็งแรงของโพลีโพรพิลีนพบว่า มีค่าเท่ากับ 1.95 % ซึ่งถือว่าสามารถทำนาย ค่าความแข็งแรงของโพลีโพรพิลีนได้ในระดับที่สูงถึง 98.15 %

4.5.2 การทดสอบที่อยู่นอกเขตเงื่อนไขของปริมาณน้ำยาโฟมเต็ม

เพื่อทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายค่าความแข็งของโฟมเบาะรถยนต์ เงื่อนไข ปริมาณน้ำยาโฟมที่อยู่นอกขอบเขตการทดลองได้ถูกกำหนดและใช้ทดสอบสมการทำนายค่าความแข็งของโฟมเบาะรถยนต์ โดยแสดงได้ในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 เงื่อนไขปริมาณน้ำยาโฟมสำหรับทดสอบความแม่นยำของสมการ

ปัจจัย	ระดับ
น้ำยาโฟม PA (g)	251, 274
น้ำยาโฟม PC (g)	479, 502
น้ำยาโฟม ISO (g)	291, 299

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

จากตารางที่ 4.11 แสดงผลการทดลองที่ใช้ทดสอบความแม่นยำของสมการ โดยทำการวิเคราะห์ผลจากปริมาณน้ำยาโฟมที่เพิ่มมากขึ้นเท่านั้น ซึ่งมีจำนวน 8 การทดลอง จากตาราง ประกอบด้วย เงื่อนไขปริมาณน้ำยาโฟมต่างๆ ค่าความแข็งของโฟมเบาะรถยนต์จากการวัดด้วยเครื่องวัดจริง และ ค่าความแข็งของโฟมเบาะรถยนต์จากการคำนวณด้วยสมการที่ถูกพัฒนาขึ้น

ตารางที่ 4.11 ผลการทดลองเพื่อนทดสอบความแม่นยำ

No.	ปริมาณ (g)			ค่าความแข็งของโฟม ที่ได้จากสมการ (N/314 cm ²)	ค่าความแข็งของโฟม ที่ได้จากการวัดจริง (N/314 cm ²)
	PA	PC	ISO		
1	251	502	291	333.6	335.1
2	251	502	299	384.8	373.5
3	251	479	291	316.2	327.5
4	251	479	299	365.0	359.6
5	274	502	291	328.0	330
6	274	502	299	379.2	364.6
7	274	479	291	310.6	304.3
8	274	479	299	359.4	344.7

จากตารางที่ 4.11 สังเกตได้ว่าแม้เงื่อนไขของปริมาณจะอยู่นอกช่วงที่ใช้พัฒนาสมการทำนายค่าความแข็งของโฟมเบาะรถยนต์ แต่ค่าความแข็งของโฟมที่ได้จากการวัดจริงด้วยเครื่องทดสอบความแข็งหมายเลขที่ 1 กับ ค่าความแข็งของโฟมเบาะรถยนต์ที่ได้จากสมการทำนายค่าความแข็งของโฟมเบาะรถยนต์ตามสมการที่ 4.3-1 ที่เงื่อนไขปริมาณน้ำยาโฟมต่างๆนี้พบว่าค่าความแข็งเฉลี่ยที่ได้จากการวัดจริง และจากการคำนวณด้วยสมการ มีค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถแสดงด้วยรูปที่ 4.12 ที่แสดงถึงความแม่นยำของสมการด้วยเงื่อนไขปริมาณน้ำยาโฟมต่างๆ

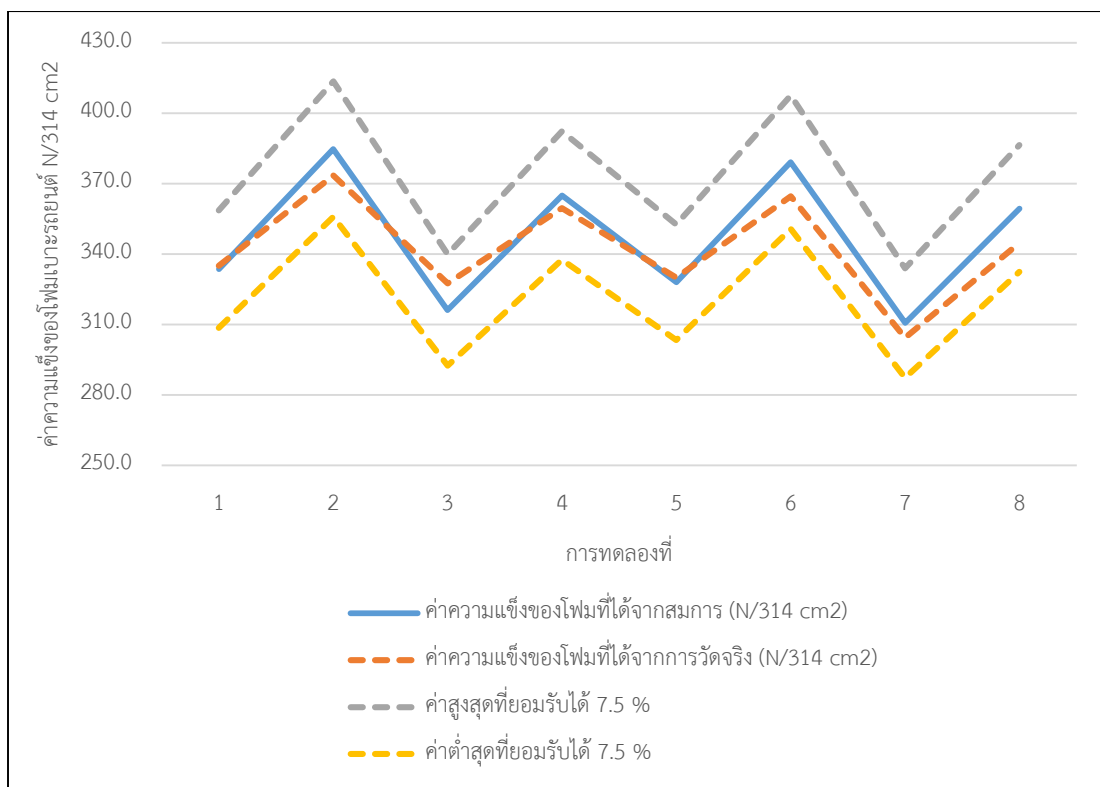
ตารางที่ 4.12 การทดสอบความแตกต่างของค่ากลางของสองประชากรไม่อิสระ

Paired T-Test and CI: ค่าความแข็งของโฟมที่ได้จากสมการ, ค่าความแข็งของโฟมที่ได้จากการวัด

Descriptive Statistics				
Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
ค่าความแข็งของโฟมที่ได้จากสมการ	8	347.1	28.7	10.1
ค่าความแข็งของโฟมที่ได้จากการวัด	8	342.4	22.8	8.1
Estimation for Paired Difference				
			95% CI for	
	Mean	StDev	SE Mean	$\mu_{\text{difference}}$
	4.69	9.15	3.23	(-2.96, 12.34)
$\mu_{\text{difference}}$: mean of (ค่าความแข็งของโฟมที่ได้จากสมการ - ค่าความแข็งของโฟมที่ได้จากการวัด)				
Test				
Null hypothesis	$H_0: \mu_{\text{difference}} = 0$			
Alternative hypothesis	$H_1: \mu_{\text{difference}} \neq 0$			
	T-Value	P-Value		
	1.45	0.19		

CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากตารางที่ 4.12 การทดสอบความแตกต่างของค่ากลางของสองประชากรไม่อิสระ ซึ่งค่าทั้งสองนี้มาจากผลจากตารางที่ 4.11 เพื่อทำการวิเคราะห์ค่ากลางของค่าความแข็งของโฟมที่ได้จากสมการ กับ ค่าความแข็งของโฟมที่ได้จากการวัดจริงที่ใช้ปัจจัยที่อยู่นอกขอบเขตเงื่อนไขเดิมโดยที่อัตราส่วนปริมาณน้ำยาโฟมที่เท่ากัน ซึ่งพบว่า P-value ที่ได้นั้น เท่ากับ 0.19 ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ซึ่งมากกว่า 0.05 ทำให้สรุปได้ว่าเชื่อในสมมติฐาน H_0 คือ $\mu_1 - \mu_2 = 0$ นั้นแสดงว่า ค่าเฉลี่ยระหว่างค่าความแข็งของโฟมที่ได้จากสมการ กับ ค่าความแข็งของโฟมที่ได้จากการวัดจริงไม่ต่างกัน

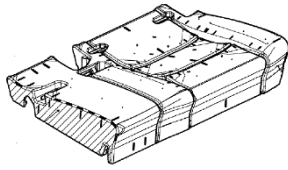


รูปที่ 4.12 การทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายค่าความแข็งแรงของโพลีโพรไพลีน

ในทำนองเดียวกัน เมื่อทำการคำนวณค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของสมการการทำนายค่าความแข็งแรงของโพลีโพรไพลีนตามสมการที่ 4.4-1 พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 2.43 % นั่นคือสมการทำนายค่าความแข็งแรงของโพลีโพรไพลีนมีความแม่นยำเท่ากับ 97.57 % ซึ่งถือว่าสามารถทำนายค่าความแข็งแรงของโพลีโพรไพลีนได้ในระดับสูงและเป็นที่ยอมรับได้แม้เงื่อนไขปริมาณน้ำยาโพลีโพรไพลีนจะอยู่นอกขอบเขต ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่าปริมาณน้ำยาโพลีโพรไพลีน PA , PC , ISO นั้นสามารถใช้อธิบายค่าความแข็งแรงของโพลีโพรไพลีนได้ เนื่องจากมีแนวโน้มความสัมพันธ์ในลักษณะเช่นเดียวกัน แม้เงื่อนไขปริมาณน้ำยาโพลีโพรไพลีนจะเปลี่ยนไป

นอกจากนี้เพื่อเป็นการทดสอบว่าสมการทำนายค่าความแข็งแรงของโพลีโพรไพลีนมีความสามารถในการทำนาย จึงทำการทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายค่าความแข็งแรงของโพลีโพรไพลีนด้วย โพลีโพรไพลีนหมายเลขชิ้นงานอื่นที่มีรูปร่าง และ น้ำหนักที่แตกต่างกัน จากสมการทำนายค่าความแข็งแรงที่ 4.3-1 ดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 ทดสอบความแม่นยำของสมการกับชิ้นงานที่มีรูปร่างและต่างกัน

หัวข้อ	ชิ้นงาน
	โฟมเบาะรถยนต์ที่มีรูปร่างต่างจากสมการทำนายค่าความแข็ง
หมายเลขชิ้นงาน	AAAAAC 
น้ำหนักชิ้นงาน	1580 g
ชื่อชิ้นงาน	PAD, NO.1 SEAT CUSHION 60% (LH)
ปริมาณน้ำยาโฟม PA (g)	182 ,228
ปริมาณน้ำยาโฟม PC (g)	410 ,456
ปริมาณน้ำยาโฟม ISO (g)	268 ,283

โดยทำการวิเคราะห์โดยใช้ปัจจัยระดับเดียวกับสมการทำนายค่าความแข็ง ซึ่งมีจำนวน 8 การทดลอง จากตารางประกอบด้วยเงื่อนไขปริมาณ PA , PC และ ISO และปริมาณที่เหลือจะเป็นน้ำยาโฟม PB เมื่อนำปริมาณมารวมกันจะเท่ากับน้ำหนักของโฟม คือ 1580 g

ตารางที่ 4.14 ผลการทดลองเพื่อทดสอบความแม่นยำ กับชิ้นงานที่มีรูปร่างและน้ำหนักที่ต่างกัน

No.	ปริมาณ (g)			ค่าความแข็งของโฟม ที่ได้จากสมการ (N/314 cm ²)	ค่าความแข็งของโฟม ที่ได้จากการวัดจริง (N/314 cm ²)
	PA	PC	ISO		
1	182	410	268	197.6	179.7
2	182	410	283	245.5	230.5
3	182	456	268	218.8	201.7
4	182	456	283	275.6	253.6
5	228	410	268	186.6	175.1
6	228	410	283	234.4	214.5
7	228	456	268	207.8	191.3
8	228	456	283	264.5	240.9

จากตารางที่ 4.14 สังเกตได้ว่าค่าความแข็งของโฟมเบาะรถยนต์ที่ได้จากการวัดจริงด้วยเครื่องทดสอบความแข็งหมายเลขที่ 1 กับค่าความแข็งที่ได้จากสมการทำนายค่าความแข็งของโฟมเบาะรถยนต์ ตาม สมการที่ 4.3-1 ที่เงื่อนไขปริมาณน้ำยาโฟมต่างๆ จะเห็นว่าค่าความแข็งที่ได้จากการวัดจริง และจากการคำนวณด้วยสมการ มีค่าที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถแสดงด้วยรูปที่ 4.13

ตารางที่ 4.15 การทดสอบความแตกต่างของค่ากลางของสองประชากรไม่อิสระ

Paired T-Test and CI: ค่าความแข็งของโฟมที่ได้จากสมการ, ค่าความแข็งของโฟมที่ได้จากการวัด

Descriptive Statistics

Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
ค่าความแข็งของโฟมที่ได้จากสมการ	8	228.8	31.8	11.2
ค่าความแข็งของโฟมที่ได้จากการวัด	8	210.9	28.9	10.2

Estimation for Paired Difference

95% CI for				
	Mean	StDev	SE Mean	$\mu_{\text{difference}}$
	17.93	3.88	1.37	(14.68, 21.17)

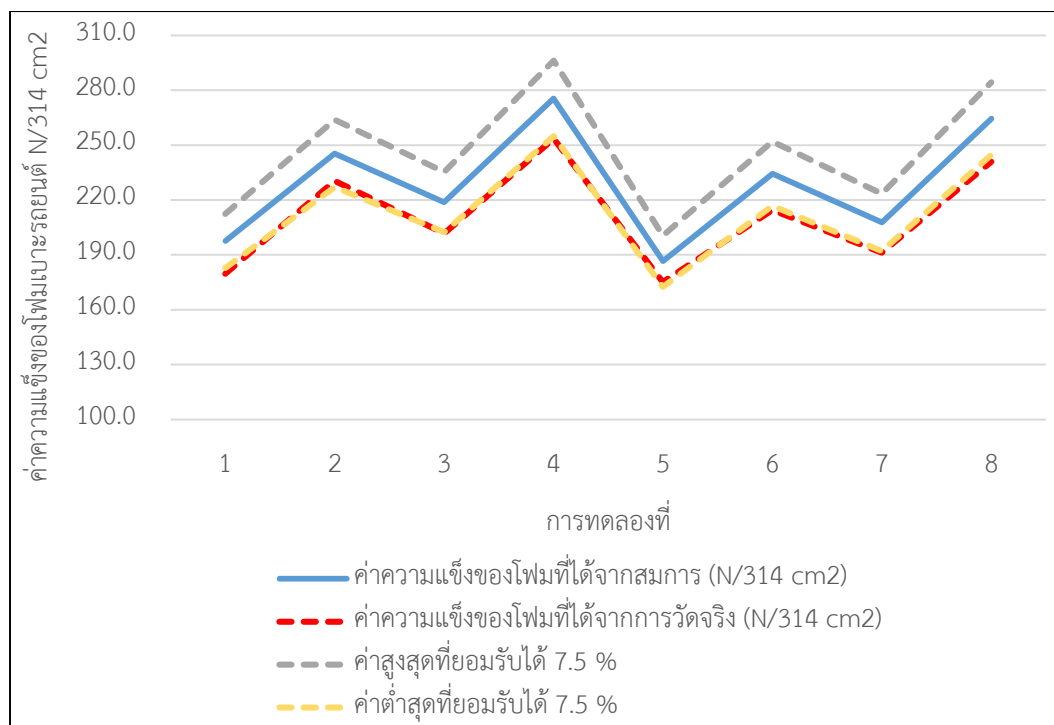
$\mu_{\text{difference}}$: mean of (ค่าความแข็งของโฟมที่ได้จากสมการ - ค่าความแข็งของโฟมที่ได้จากการวัด)

Test

Null hypothesis	$H_0: \mu_{\text{difference}} = 0$
Alternative hypothesis	$H_1: \mu_{\text{difference}} \neq 0$

	T-Value	P-Value
	13.07	0.000

จากตารางที่ 4.15 การทดสอบความแตกต่างของค่ากลางของสองประชากรไม่อิสระ ซึ่งค่าทั้งสองนี้มาจากผลจากตารางที่ 4.14 เพื่อทำการวิเคราะห์ค่ากลางของค่าความแข็งของโฟมที่ได้จากสมการ กับ ค่าความแข็งของโฟมที่ได้จากการวัดจริงที่ใช้ปัจจัยที่อยู่ในขอบเขตเงื่อนไขเดิมแต่ มีรูปร่างและ น้ำหนักที่แตกต่างกัน โดยที่อัตราส่วนปริมาณน้ำยาโฟมที่เท่ากัน ซึ่งพบว่า P-value ที่ได้้นั้นเท่ากับ 0.00 ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ซึ่งน้อยกว่า 0.05 ทำให้สรุปได้ว่าปฏิเสธ สมมติฐาน H_0 คือ $\mu_1 - \mu_2 = 0$ นั่นคือ เชื่อ สมมติฐาน H_1 คือ $\mu_1 - \mu_2 \neq 0$ แสดงว่า ค่าเฉลี่ย ระหว่างค่าความแข็งของโฟมที่ได้จากสมการ กับ ค่าความแข็งของโฟมที่ได้จากการวัดจริงมีค่าต่างกันมาก



รูปที่ 4.13 การทดสอบความเมื่อยาของสมการทำนายค่าความแข็งแรงของโพลิโพรไพลีน

เมื่อทำการคำนวณค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของสมการทำนายค่าความแข็งแรง และสมการทำนายค่าความแข็งแรงของโพลิโพรไพลีนตามสมการที่ 4.4-1 พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 8.48 % นั่นคือสมการทำนายค่าความแข็งแรงของโพลิโพรไพลีนมีความแม่นยำเท่ากับ 91.52 % ซึ่งถือว่าความสามารถในการทำนายค่าความแข็งแรงของโพลิโพรไพลีน ได้ลดลง เมื่อทดสอบกับชิ้นงานที่มีรูปร่างและน้ำหนักที่ต่างกัน ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่าเนื่องจาก ชิ้นงานที่มีน้ำหนักมากกว่าหรือน้อยกว่า เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงที่สมการทำนายค่าความแข็งแรงของโพลิโพรไพลีนที่ได้จากงานวิจัยนี้ยังไม่ได้ทำการพิจารณา ดังนั้นเพื่อให้มีความเหมาะสมในการใช้งานที่หลากหลายและได้สมการทำนายที่มีค่าความแม่นยำมากขึ้นสามารถพัฒนาต่อยอดในงานวิจัยอื่นๆได้ต่อไป

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของค่าความแข็งของโพลีเอทิลีนกับเงื่อนไขปริมาณน้ำยาโพลี PA , PC และ ISO ต่างๆ ที่เกิดจากกระบวนการผลิตโพลีของโรงงานกรณีศึกษา โดยอธิบายความสัมพันธ์ดังกล่าวด้วยการพัฒนาเป็นสมการความสัมพันธ์เพื่อใช้ทำนายค่าความแข็งของโพลีเอทิลีน

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากปัญหาโพลีเอทิลีนที่ค่าความแข็งไม่ตรงตามที่ลูกค้ากำหนดนั้นซึ่งเมื่อพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งนั้นโดยใช้แผนภูมิแก๊งปลาและทำการออกแบบการทดลอง 3^3 แฟคเตอร์เรียทั้งหมด 27 การทดลอง ได้สมการทำนายค่าความแข็งของโพลีเอทิลีนนี้ที่ทำการพัฒนาขึ้นมาขึ้นนี้คือ

$$\text{Hardness} = 4551 - 2.991 \text{ PC} - 30.70 \text{ ISO} - 0.2407 \text{ PA} + 0.05192 \text{ ISO} * \text{ISO} + 0.01288 \text{ PC} * \text{ISO}$$

โดยมีเงื่อนไข ของปริมาณน้ำยาโพลี PA , PC และ ISO จากการหาความสัมพันธ์แบบถดถอยพหุคูณถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของแบบจำลองค่าความแข็งของโพลีเอทิลีน โดยจากงานวิจัยพบว่า ปริมาณน้ำยาโพลี ISO นั้นมีผลต่อค่าความแข็งของโพลีในทิศทางเพิ่มขึ้น และ มีการเพิ่มขึ้นแบบทอแมกกำลัง 2 ด้วย กล่าวคือเมื่อปริมาณน้ำยาโพลี ISO เพิ่มขึ้นค่าความแข็งของโพลีก็จะเพิ่มขึ้น 2.4144 เท่าของ ปริมาณน้ำยาโพลี ISO และ 0.05192 เท่าของ ปริมาณน้ำยาโพลี ISO² และ ปริมาณน้ำยาโพลี PC นั้นมีผลต่อค่าความแข็งของโพลีในทิศทางเพิ่มขึ้น กล่าวคือ เมื่อปริมาณน้ำยาโพลี PC นั้นเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งของโพลีก็จะเพิ่มขึ้น 0.4618 เท่าของปริมาณน้ำยาโพลี PC และปริมาณน้ำยาโพลี PC และ น้ำยาโพลี ISO นั้นมีปฏิสัมพันธ์กัน ในทิศทางบวกโดยที่ค่าความแข็งจะเพิ่ม 0.01288 เท่าของ ปริมาณน้ำยาโพลี ISO และ ปริมาณน้ำยาโพลี PC ในขณะที่ ปริมาณน้ำยาโพลี PA นั้นมีผลต่อค่าความแข็งในทิศทางลดลง กล่าวคือเมื่อปริมาณน้ำยาโพลี PA เพิ่มขึ้น ค่าความแข็งของโพลีจะลดลง 0.2407 เท่าของปริมาณน้ำยาโพลี PA โดยจากงานวิจัยนี้ ค่าความแข็งที่ลูกค้าต้องการของโพลีเอทิลีนนั้นคือ 235 นิวตัน ซึ่ง ปริมาณน้ำยาโพลีที่เหมาะสมที่สุดนั้นคือ น้ำยาโพลี PA 228 กรัม , น้ำยาโพลี PC 410 กรัม และน้ำยาโพลี ISO 283 กรัม โดยสมการทำนายค่าความแข็งของโพลีนั้น มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของสมการการพยากรณ์ ถึง 98.6 % ซึ่งเมื่อแสดงความสัมพันธ์ของสมการทำนายค่าความแข็งของโพลีเอทิลีน

ที่ 4.3-1 จากการทำการทดลองเพื่อตรวจสอบความแม่นยำของสมการ ได้มีการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขของปริมาณน้ำยาโฟมเบาะรถยนต์ 2 แบบ คือ

1. ปริมาณน้ำยาโฟมให้อยู่ในขอบเขตเงื่อนไขปริมาณน้ำยาโฟมเดิม
2. ปริมาณน้ำยาโฟมให้อยู่นอกขอบเขตเงื่อนไขปริมาณน้ำยาโฟมเดิม

ซึ่งผลที่ได้ นั้น สำหรับ การทดสอบที่ปริมาณน้ำยาโฟมเบาะรถยนต์อยู่ในขอบเขตเงื่อนไขเดิมนั้นพบว่ามีความแม่นยำของสมการทำนายค่าความแข็งของโฟมเบาะรถยนต์ คือ 98.15 % และการทดสอบที่ปริมาณน้ำยาโฟมเบาะรถยนต์อยู่นอกขอบเขตเงื่อนไขเดิมนั้นพบว่ามีความแม่นยำของสมการทำนายค่าความแข็งของโฟมเบาะรถยนต์ คือ 97.53 % ซึ่งเป็นค่าที่สูงและยอมรับได้ ซึ่งถือว่าสามารถทำนายค่าความแข็งของโฟมเบาะรถยนต์ได้ดีที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยเมื่อเทียบกับมาตรฐานที่ลูกค้ากำหนดไว้ นั่นคือ ค่าความค่าแข็งของโฟมสามารถคาดเคลื่อนจากมาตรฐานได้ไม่เกิน 7.5 % นั่นคือ สมการทำนายค่าความแข็งของโฟมเบาะรถยนต์นั้นจะต้องมีความแม่นยำอย่างน้อย 92.5 % ซึ่งสมการทำนายค่าความแข็งของโฟมนั้นมีค่าความแม่นยำที่ดี มากกว่า 92.5 %

5.2 อภิปรายผลการวิจัย

1. ปัจจัยที่ใช้ในการพัฒนาสมการ ได้แก่ ปริมาณน้ำยาโฟม PA , ปริมาณน้ำยาโฟม PC และ ปริมาณน้ำยาโฟม ISO สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งเบาะรถยนต์ได้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งอาจมีปัจจัยอื่นที่มีผลอย่าง เช่น อุณหภูมิ ระยะเวลาในการบ่ม ซึ่งงานวิจัยนี้มีข้อจำกัดของโรงงานในการใช้การทดลอง

2. จากการทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายค่าความแข็งของโฟมเบาะรถยนต์นั้นพบว่าสมการทำนายค่าความแข็งนั้นสามารถใช้ได้กับโฟมเบาะรถยนต์ที่มี น้ำหนัก 1,180 กรัมเท่านั้น เพราะว่า ยังมีความความคาดเคลื่อนของสมการเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและน้ำหนักที่มากขึ้นของชิ้นงาน ซึ่งเกิดจากการออกแบบสูตรผิดพลาดตั้งแต่แรกทำให้ต้องเพิ่มปริมาณอัตราส่วนของ polyol มากกว่าสมการทำให้ปริมาณ polyol มากเกินกว่าที่ Isocyanate จะไปจับสายโซ่ได้และให้เกิดความแข็งของพอลิเมอร์นั้นคือจะทำให้โฟมมีค่าความแข็งน้อย ดังนั้นเมื่อนำสมการไปทำนายค่าความแข็งของโฟมที่น้ำหนักไม่เท่ากับโฟมเบาะรถยนต์ที่มาจากสมการทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนนั้นมีค่ามาก ซึ่งหากจะให้สมการสามารถทำได้กับทุกน้ำหนักนั้นควรเลือกใช้ หน่วย PHR (per hundred resin) เพื่อให้ปริมาณน้ำยาโฟมที่เปลี่ยนแปลงไปสอดคล้องกับน้ำหนักของโฟมที่เปลี่ยนแปลงไป

3. จากการทดลองพบว่าปริมาณน้ำยาโฟมที่เทลงในแม่พิมพ์นั้นมีค่า 1,180 กรัม แต่เมื่อน้ำยาโฟมผ่านกระบวนการบ่มและให้ความร้อน พบว่าเมื่อเป็นโฟมที่มีรูปร่างแล้ว น้ำหนักที่ได้นั้นลดลง เนื่องจากใน น้ำยาโฟม PA นั้นมีน้ำเป็นส่วนประกอบ ซึ่งเมื่อให้ความร้อนกับแม่พิมพ์ทำให้น้ำนั้นระเหย จึงทำให้น้ำหนักสุดท้ายที่ได้นั้น มีค่า 1,140 กรัม ดังนั้นควรมีการเผื่อปริมาณน้ำยาโฟม PA ทดแทนส่วนที่จะระเหยไปในกระบวนการตั้งแต่เริ่มต้น

5.3 ข้อจำกัดและอุปสรรคในการทำวิจัย

1. อุณหภูมิ และ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาทางเคมีในแม่พิมพ์ นั้น มีต่อค่าความแข็งของโฟมเบาชนิดนี้ แต่ เนื่องจากงานวิจัยนี้กำหนดเป็น ค่าเดียวซึ่งหากเพิ่มเงื่อนไขของ ปัจจัยทั้ง

อุณหภูมิ และ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาทางเคมีในแม่พิมพ์ จะทำให้ได้ความสัมพันธ์อีกหลายแบบ

2. ค่าใช้จ่ายในการทดลองมีราคาสูงเนื่องจากเป็นชิ้นงานเกี่ยวกับรถยนต์ จึงทำให้จำนวนการทดลองมีจำกัด

3. เมื่อทำการทดลองฉีดชิ้นงานขึ้นมาต้องเก็บในห้องควบคุมอุณหภูมิ และ ความชื้น ซึ่งจะต้องวัดค่าความแข็งหลังจาก ฉีด ชิ้นงาน 24 ชั่วโมง ซึ่งหากเกินกว่านั้นจะทำให้ค่าความแข็งนั้นคาดเคลื่อน

4. เครื่องจักรที่ใช้ทำการทดลองนั้นใช้ในการผลิตชิ้นงานตลอดเวลา และมีแม่พิมพ์จำนวนมากในสายการผลิต ซึ่งทำให้ใช้เวลาค่อนข้างนานต่อการได้ชิ้นงานทดลองในแต่ละครั้ง

5.4 ข้อเสนอแนะ

1. เพื่อให้สมการทำนายค่าความแข็งของโฟมนั้นมีประสิทธิภาพในการทำงานได้จริง ควรมีการนำสมการทำนายค่าความแข็งของโฟมไปเขียนเป็นซอฟต์แวร์เพื่อสามารถกำหนดปริมาณน้ำยาโฟมแต่ละตัวในการฉีดโฟมตามความต้องการของลูกค้า

2. ควรมีการทำการทดลองปริมาณน้ำยาโฟมแต่ละชนิดให้อยู่ใน อัตราส่วน เพื่อให้สามารถใช้ได้กับโฟมเบาชนิดที่มีน้ำหนักที่แตกต่างกัน

3. ควรมีการศึกษาถึงความคุ้มค่าของค่าใช้จ่ายของปริมาณน้ำยาโฟมแต่ละชนิดที่ทำให้ได้ค่าความแข็งที่ลูกค้าต้องการและมีค่าใช้จ่ายที่ถูกต้องที่สุด



ภาคผนวก

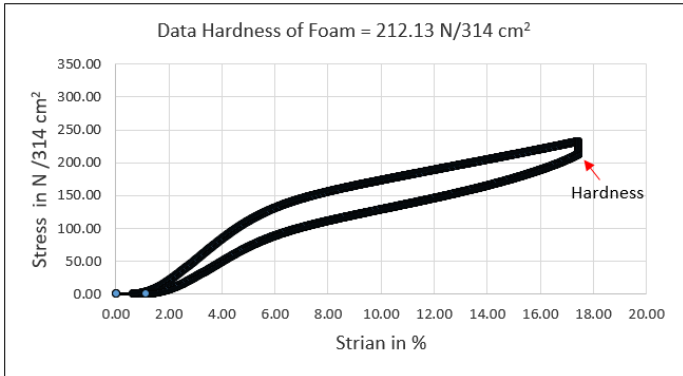
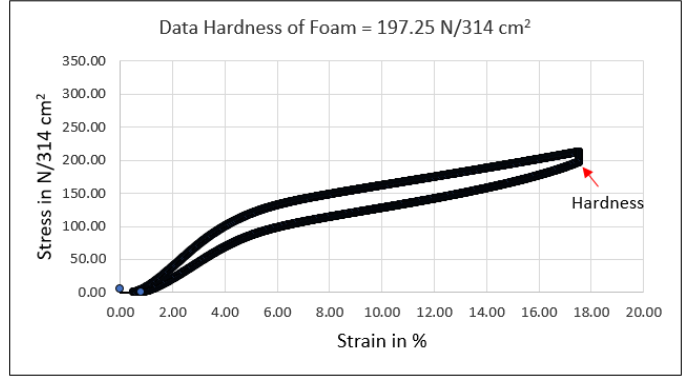
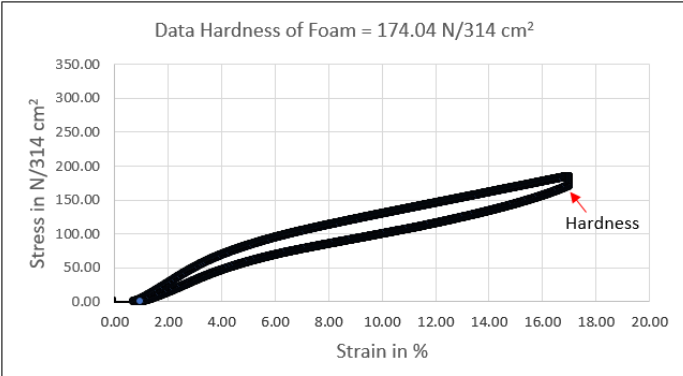
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



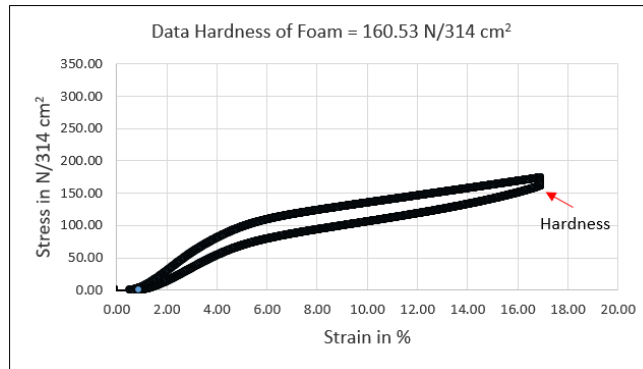
ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์ค่าความแข็งของโพลีเอเธนเรซินเกรด เจ็ดชนิด ปริมาณน้ำยาโพลีเมอร์ต่างๆ

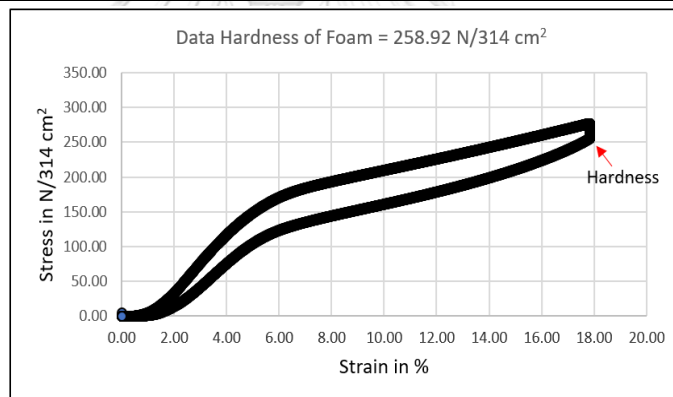
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Run	PA	ISO	PC	Hardness (N / 314 cm ²)	Density (g/cm ³)	Weight (kg)
1	182	268	456	212.130	0.050	1.14
<p style="text-align: center;">Data Hardness of Foam = 212.13 N/314 cm²</p> 						
Run	PA	ISO	PC	Hardness (N / 314 cm ²)	Density (g/cm ³)	Weight (kg)
2	228	283	364	197.250	0.050	1.14
<p style="text-align: center;">Data Hardness of Foam = 197.25 N/314 cm²</p> 						
Run	PA	ISO	PC	Hardness (N / 314 cm ²)	Density (g/cm ³)	Weight (kg)
3	228	253	456	174.040	0.050	1.13
<p style="text-align: center;">Data Hardness of Foam = 174.04 N/314 cm²</p> 						

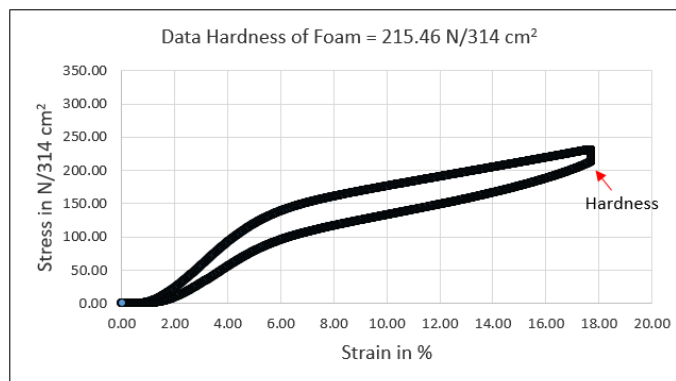
Run	PA	ISO	PC	Hardness (N / 314 cm ²)	Density (g/cm ³)	Weight (kg)
4	182	253	364	160.530	0.050	1.14



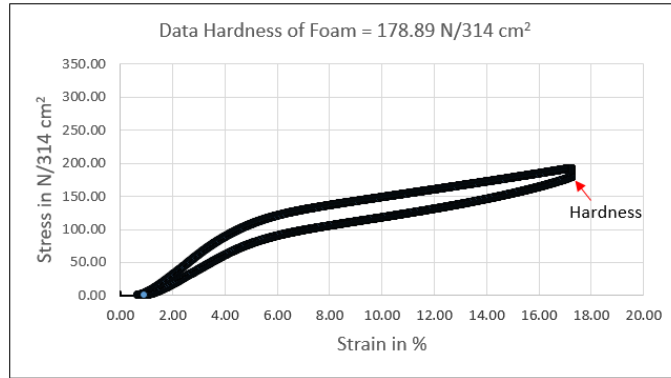
Run	PA	ISO	PC	Hardness (N / 314 cm ²)	Density (g/cm ³)	Weight (kg)
5	136	283	410	258.920	0.050	1.14



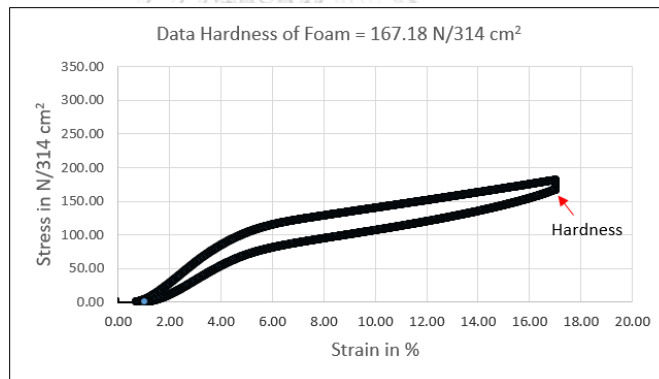
Run	PA	ISO	PC	Hardness (N / 314 cm ²)	Density (g/cm ³)	Weight (kg)
6	182	283	364	215.460	0.050	1.13



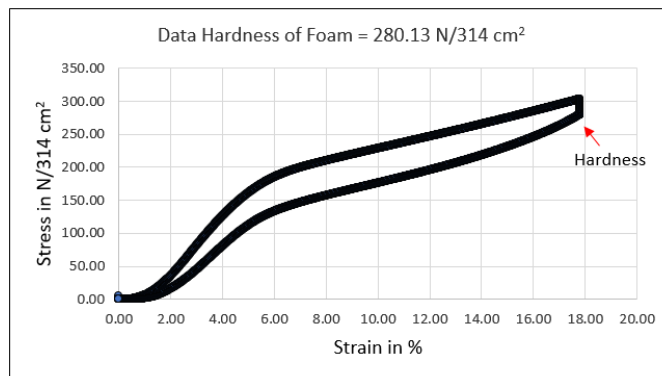
Run	PA	ISO	PC	Hardness (N / 314 cm ²)	Density (g/cm ³)	Weight (kg)
7	182	268	364	178.890	0.050	1.14



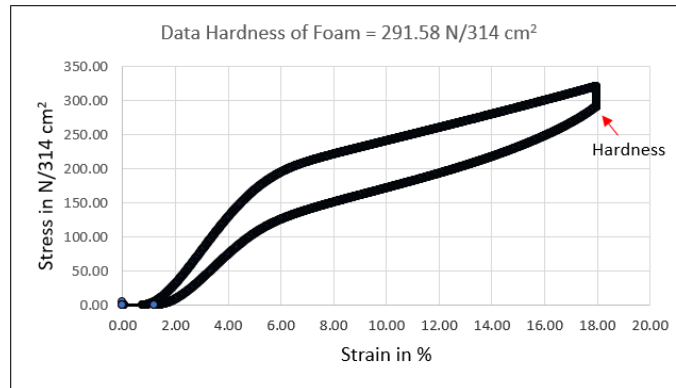
Run	PA	ISO	PC	Hardness (N / 314 cm ²)	Density (g/cm ³)	Weight (kg)
8	136	253	364	167.180	0.050	1.14



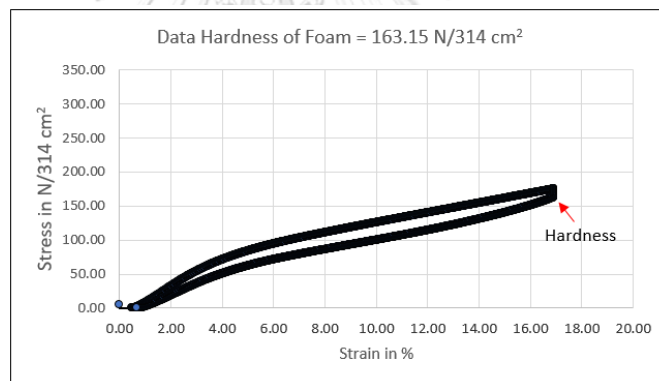
Run	PA	ISO	PC	Hardness (N / 314 cm ²)	Density (g/cm ³)	Weight (kg)
9	182	283	456	280.130	0.050	1.13



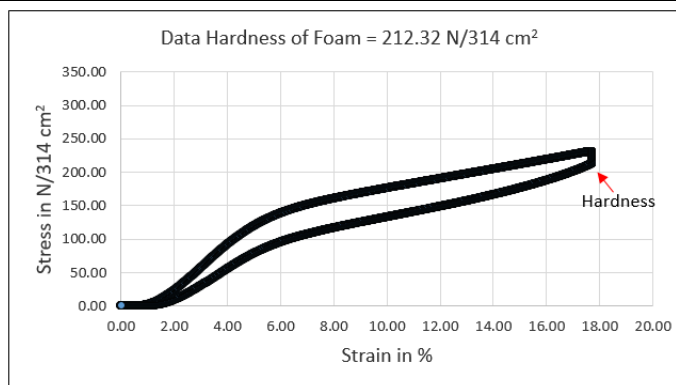
Run	PA	ISO	PC	Hardness (N / 314 cm ²)	Density (g/cm ³)	Weight (kg)
10	136	283	456	291.580	0.050	1.14



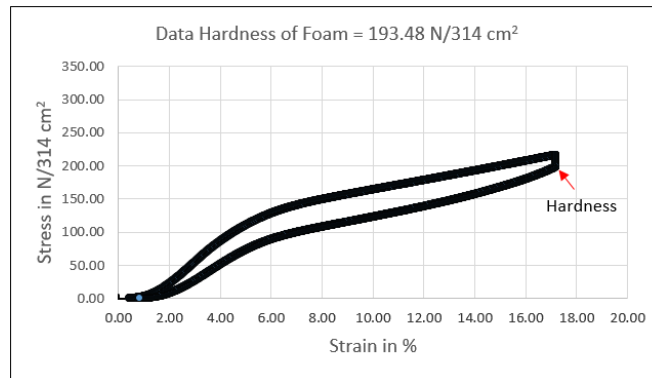
Run	PA	ISO	PC	Hardness (N / 314 cm ²)	Density (g/cm ³)	Weight (kg)
11	228	253	410	163.150	0.050	1.14



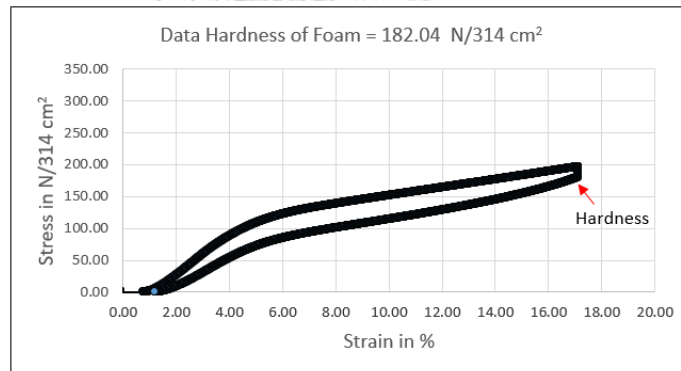
Run	PA	ISO	PC	Hardness (N / 314 cm ²)	Density (g/cm ³)	Weight (kg)
12	136	268	410	212.320	0.050	1.14



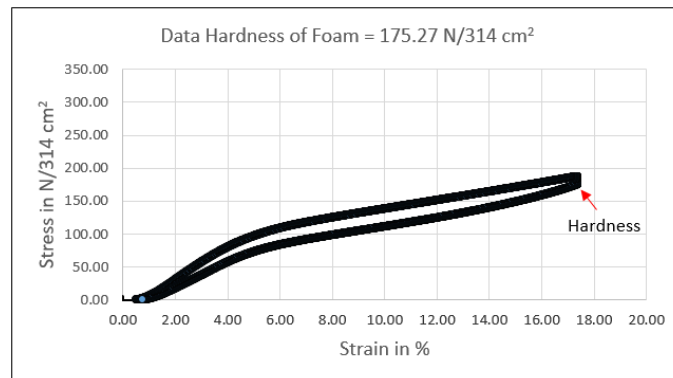
Run	PA	ISO	PC	Hardness (N / 314 cm ²)	Density (g/cm ³)	Weight (kg)
13	182	253	456	193.480	0.050	1.13



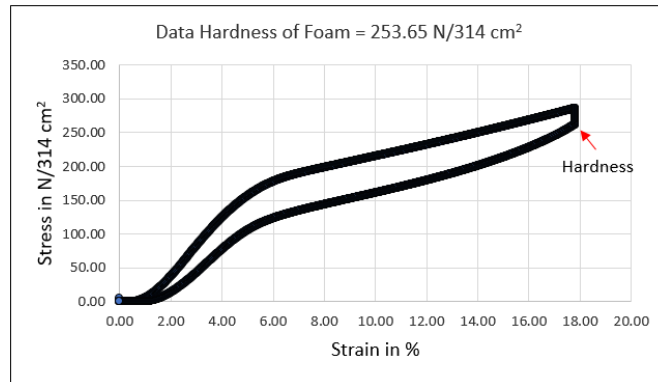
Run	PA	ISO	PC	Hardness (N / 314 cm ²)	Density (g/cm ³)	Weight (kg)
14	136	253	410	182.040	0.050	1.13



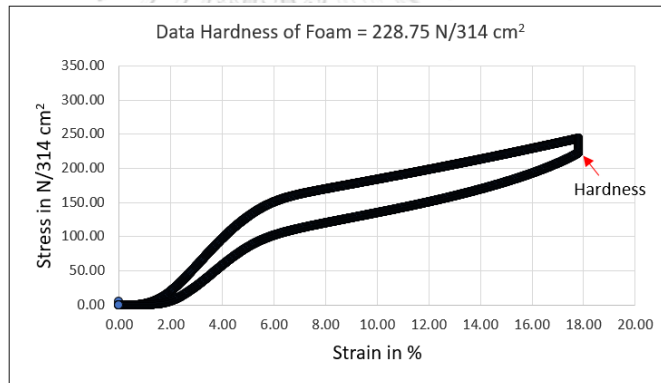
Run	PA	ISO	PC	Hardness (N / 314 cm ²)	Density (g/cm ³)	Weight (kg)
15	228	268	364	175.270	0.050	1.13



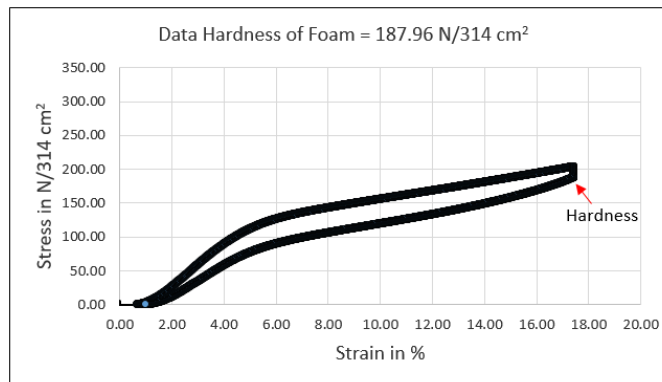
Run	PA	ISO	PC	Hardness (N / 314 cm ²)	Density (g/cm ³)	Weight (kg)
16	182	283	410	253.650	0.049	1.13



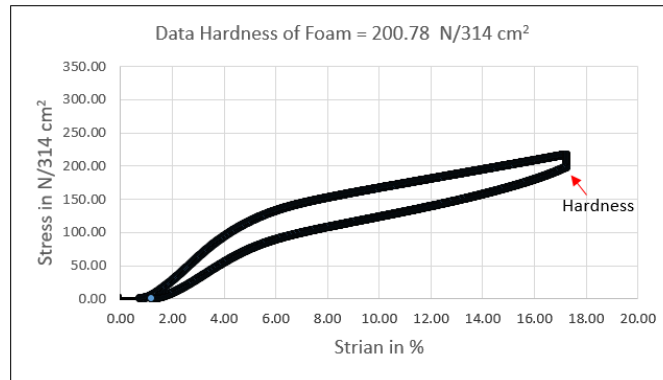
Run	PA	ISO	PC	Hardness (N / 314 cm ²)	Density (g/cm ³)	Weight (kg)
17	136	283	364	228.750	0.049	1.13



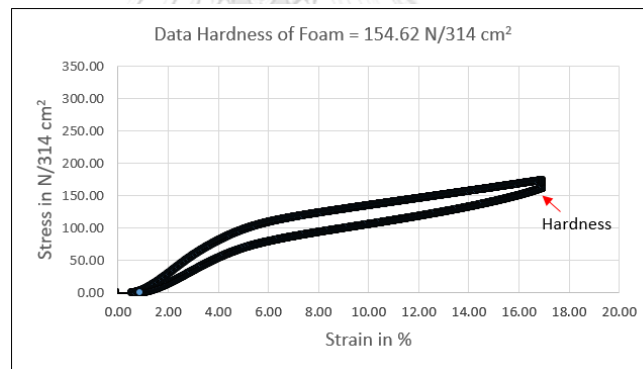
Run	PA	ISO	PC	Hardness (N / 314 cm ²)	Density (g/cm ³)	Weight (kg)
18	136	268	364	187.960	0.050	1.13



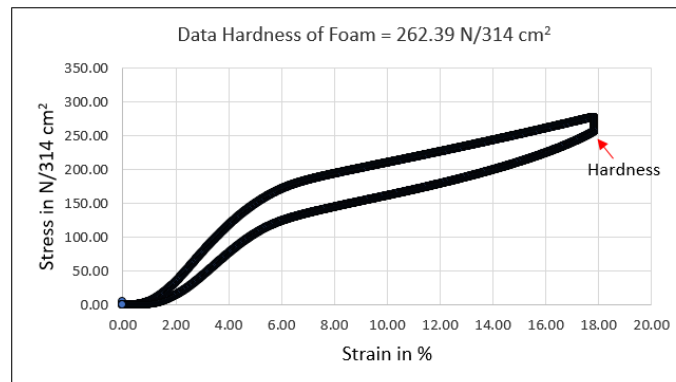
Run	PA	ISO	PC	Hardness (N / 314 cm ²)	Density (g/cm ³)	Weight (kg)
19	136	253	456	200.780	0.050	1.13



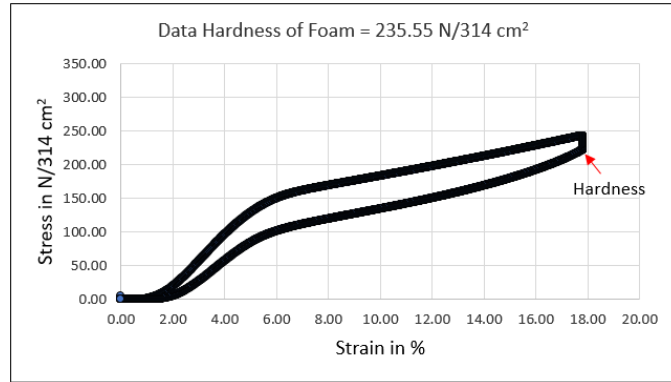
Run	PA	ISO	PC	Hardness (N / 314 cm ²)	Density (g/cm ³)	Weight (kg)
20	228	253	364	154.620	0.050	1.13



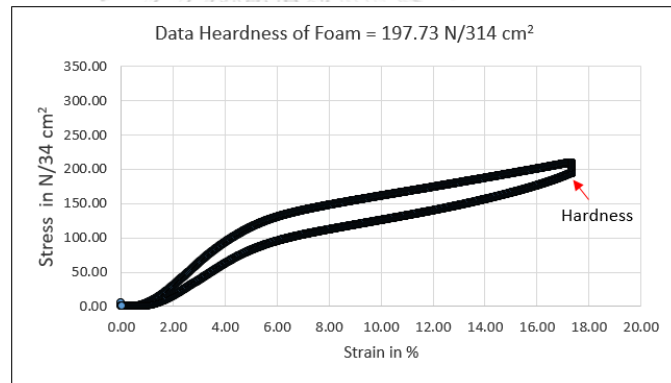
Run	PA	ISO	PC	Hardness (N / 314 cm ²)	Density (g/cm ³)	Weight (kg)
21	228	283	456	262.390	0.050	1.14



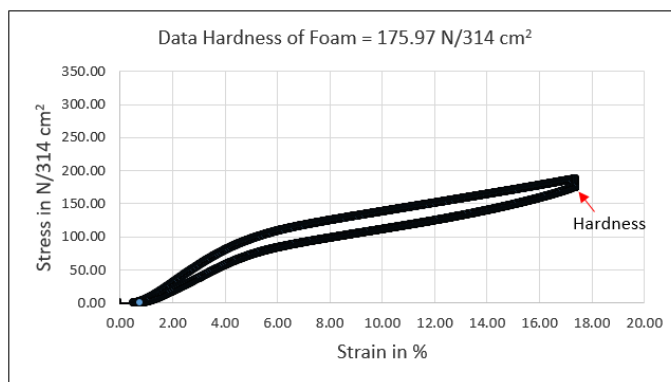
Run	PA	ISO	PC	Hardness (N / 314 cm ²)	Density (g/cm ³)	Weight (kg)
22	228	283	410	235.550	0.050	1.14



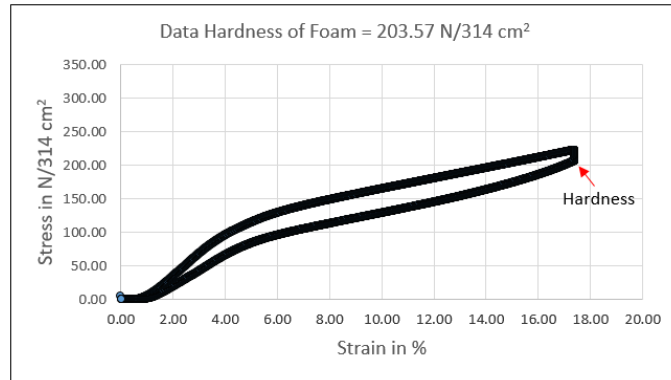
Run	PA	ISO	PC	Hardness (N / 314 cm ²)	Density (g/cm ³)	Weight (kg)
23	182	268	410	197.730	0.050	1.14



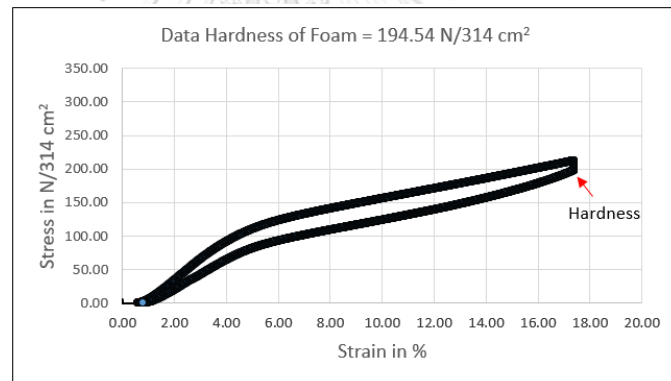
Run	PA	ISO	PC	Hardness (N / 314 cm ²)	Density (g/cm ³)	Weight (kg)
24	182	253	410	175.970	0.050	1.14



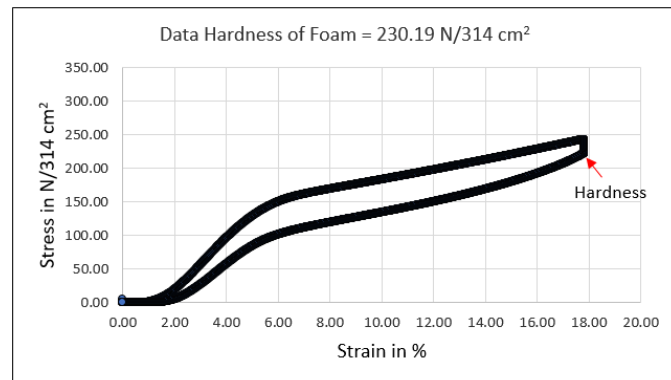
Run	PA	ISO	PC	Hardness (N / 314 cm ²)	Density (g/cm ³)	Weight (kg)
25	228	268	456	203.570	0.050	1.14



Run	PA	ISO	PC	Hardness (N / 314 cm ²)	Density (g/cm ³)	Weight (kg)
26	228	268	410	194.540	0.049	1.13



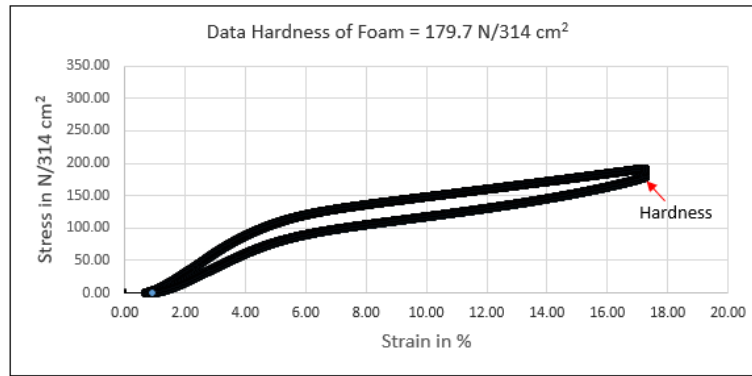
Run	PA	ISO	PC	Hardness (N / 314 cm ²)	Density (g/cm ³)	Weight (kg)
27	136	268	456	230.190	0.050	1.13



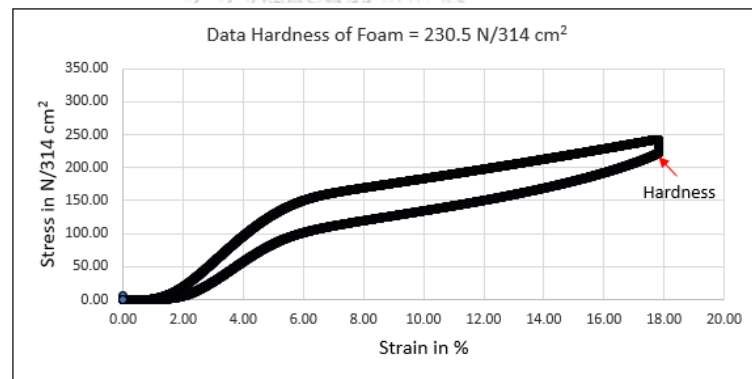
ภาคผนวก ข
การวิเคราะห์ค่าความแข็งของโคมเบาะรถยนต์นอกเงื่อนไขปริมาณน้ำยาโคมต่างๆที่มี
น้ำหนัก 1,580 g

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

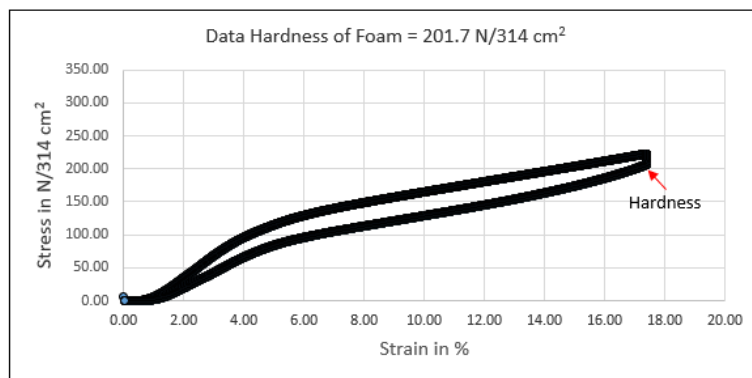
Run	PA	ISO	PC	Hardness (N / 314 cm ²)	Density (g/cm ³)	Weight (kg)
1	182	268	410	179.7	0.050	1.53



Run	PA	ISO	PC	Hardness (N / 314 cm ²)	Density (g/cm ³)	Weight (kg)
2	182	283	410	230.5	0.050	1.54

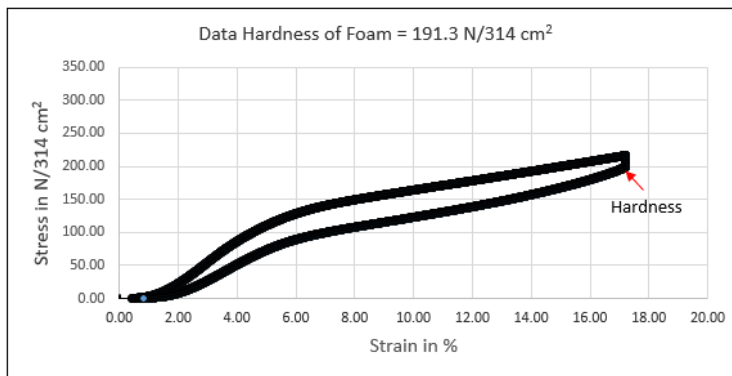


Run	PA	ISO	PC	Hardness (N / 314 cm ²)	Density (g/cm ³)	Weight (kg)
3	182	268	456	201.7	0.050	1.53

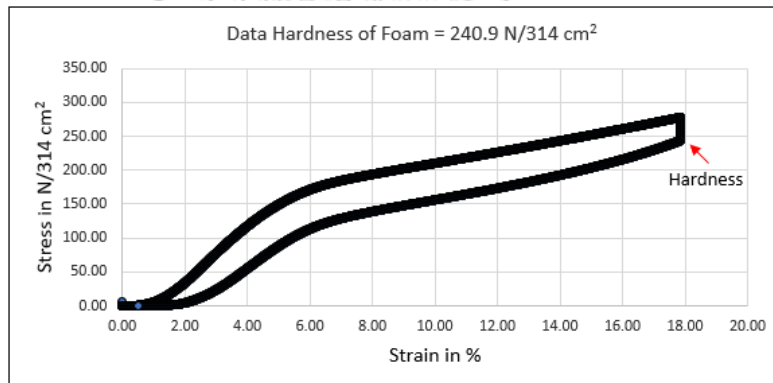


Run	PA	ISO	PC	Hardness (N / 314 cm ²)	Density (g/cm ³)	Weight (kg)
4	182	283	456	253.6	0.050	1.54
<p style="text-align: center;">Data Hardness of Foam = 253.6 N/314 cm²</p>						
5	228	410	268	175.1	0.050	1.53
<p style="text-align: center;">Data Hardness of Foam = 175.1 N/314 cm²</p>						
6	228	283	410	214.5	0.050	1.53
<p style="text-align: center;">Data Hardness of Foam = 214.5 N/314 cm²</p>						

Run	PA	ISO	PC	Hardness (N / 314 cm ²)	Density (g/cm ³)	Weight (kg)
7	228	268	456	191.3	0.050	1.53



Run	PA	ISO	PC	Hardness (N / 314 cm ²)	Density (g/cm ³)	Weight (kg)
8	228	283	456	240.9	0.050	1.54



บรรณานุกรม

1. Manary, M.A., et al., *Evaluation of the SAE J826 3-D manikin measures of driver positioning and posture*. 1994, SAE Technical Paper.
2. Reed, M.P., R.W. Roe, and L.W. Schneider, *Design and Development of the ASPECT Manikin*. 1999, SAE Technical Paper.
3. ศรีนิล., ร.บ., เทคโนโลยีพลาสติก(ฉบับปรับปรุง. 2546, กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
4. W.Ellis, D.P.a.J., *AN INRODUCTION TO PASTIC FOAMS*. 2005, Bangkok: Chulalongkorn University Press.
5. ชุติมา, ป., การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. 2545, กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
6. ตะสุวรรณ, ร., การพัฒนาพอลิออลเรซินสำหรับการผลิตพอลิยูรีเทนโฟมแบบยืดหยุ่น, in วิศวกรรมเคมี 2554, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
7. ทิมาบุตร, ว., การลดต้นทุนของโฟมเบาะรองนั่งรถยนต์โดยใช้การออกแบบทดลอง, in ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม. 2552, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
8. โมคทิพย์, ส., ผลของสารฟลูออรีนของพอลิยูรีเทนโฟมแบบแข็ง, in สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์.คณะวิทยาศาสตร์. 2547, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
9. พูนศรีไชยสิทธิ์, ช., การเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนความหนาแน่นต่ำชนิดแข็งสำหรับทำกระดานโต้คลื่น, in ภาควิชาวัสดุศาสตร์.คณะวิทยาศาสตร์. 2547, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
10. Jung, H.C., Ryu,S.C.,Kim,W.N.,Lee,Y.B.,Choe, K.H., and Kim, S.B, *Properties of Rigid Polyurethane Foams Blown by HCFC 141B and Distilled Water*. Journal of Applied Polymer Science 81, 2001: p. 486-493.
11. Oppon C. , et al., *Effect of Varying Mixing Ratios and Pre-Heat Temperature on the Mechanical Properties of Polyurethane (PU) Foam*. Procedia Engineering 132, 2015: p. 701 – 708.
12. Aramide F. O. , P.O.A., E. O. Olorunniwo, *Optimizing the Properties of Polyether Based Polyurethane Foam*. Polymer Chemistry, 2013: p. 86-91.
13. Chiou, B.S. and P.E. Schoen, *Effects of crosslinking on thermal and mechanical properties of polyurethanes*. Journal of applied polymer science, 2002. **83**(1): p. 212-223.

14. Lamba, N.M., K.A. Woodhouse, and S.L. Cooper, *Polyurethanes in biomedical applications*. 1997: CRC press.
15. Chung, Y.-C., et al., *Preparation and characterization of polyurethane copolymer grafted with polystyrene side chains*. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2015. **54**(10): p. 1066-1076.
16. Thirumal, M., et al., *Effect of foam density on the properties of water blown rigid polyurethane foam*. *Journal of applied polymer science*, 2008. **108**(3): p. 1810-1817.





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	จารุวัตร. จินดาทองประภา
วัน เดือน ปี เกิด	11 กรกฎาคม 2532
สถานที่เกิด	กรุงเทพฯ
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนปัญญาวรคุณ จังหวัดกรุงเทพฯ ต่อมาเข้า ศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยี วิศวกรรมเครื่องกล สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2553 จากนั้น ได้เข้าทำงานที่บริษัท ชัมมิท โอโตซัท จำกัด และ ย้ายไปที่ บริษัท แอเดียนท์ แอนด์ ชัมมิท คอร์ปอเรชั่น จำกัด พร้อมทั้งได้เข้าศึกษาต่อ ในหลักสูตรวิศวกรรมมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2560
ที่อยู่ปัจจุบัน	7/187 ถนนเลียบบคลองภาษีฝิ่งเหนือ 6/2 แขวงหนองแขม เขตหนองแขม กรุงเทพฯ 10160
ผลงานตีพิมพ์	การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม (IE NETWORK 2020) หน้า 358-362