

การพัฒนาโฟมพอลิยูรีเทนในกระบวนการฉีดแบบทำปฏิกิริยา

ศิริโรจน์ จันโท

TNI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

บัณฑิตวิทยาลัย สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

ปีการศึกษา 2557

IMPROVEMENT OF POLYURETHANE FOAM IN REACTION INJECTION MOLDING PROCESS

Sirirote Chantho

TNI

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for The Degree of Master of Engineering Program in Engineering Technology

Graduate School

Thai-Nichi Institute of Technology

Academic Year 2014

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพัฒนาโฟมพอลิยูรีเทนในกระบวนการฉีดแบบทำ
ปฏิกิริยา

โดย

ศิริโรจน์ จันทโท

สาขาวิชา

เทคโนโลยีวิศวกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิภาวดี วงษ์สุวรรณ

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. พิชิต สุขเจริญพงษ์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. มานพ เจริญไชยตระกูล)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์)

.....กรรมการ

(ดร. ดำรงเกียรติ รัตนอมรพิน)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิภาวดี วงษ์สุวรรณ)

ศิริโรจน์ จันท : การพัฒนาโฟมพอลิยูรีเทนในกระบวนการฉีดแบบทำปฏิกิริยา.
 อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิภาวดี วงษ์สุวรรณ, 98 หน้า.

งานวิจัยชิ้นนี้ทำเพื่อแก้ปัญหาข้อบกพร่องในกระบวนการผลิตพอลิยูรีเทนโฟม หรือ PU Foam โดยวิจัยอิทธิพลของคุณสมบัติของสารตั้งต้นพอลิอลอเรซิน (Part A) อาทิ สัดส่วนผสมสารเติมแต่งแคลเซียมคาร์บอเนต ระยะเวลาการเก็บรักษาพอลิอลอเรซิน และเงื่อนไขการผลิตโฟมพอลิยูรีเทนที่ใช้เป็นส่วนประกอบของข้อต่อใส่กรองอากาศรถยนต์ ในกระบวนการเครื่องฉีดแบบทำปฏิกิริยา (Reaction Injection Molding : RIM) ที่มีปัญหาผิวหน้าโฟมลอก ผิวขุ่นยุบยิบ ไม่เรียบมัน มีฟองอากาศที่ผิวหน้าผลิตภัณฑ์ขนาดใหญ่ทั้งแบบผิวปิดและผิวเปิด โดยตัวแปรที่สนใจศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ 20, 30, 40, 50 และ 60°C ปริมาณสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนัก และระยะเวลาการเก็บพอลิอลอเรซิน 0, 5 และ 14 วัน โดยวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรดังกล่าวต่อระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา ความแข็งและความยืดหยุ่น สภาพการเกิดข้อบกพร่อง สภาพสัณฐานวิทยา การกระจายขนาดและความหนาแน่นของเซลล์โฟม

ผลวิจัยแสดงว่าอุณหภูมิระดับ 30°C เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการ RIM ในขณะที่ สัดส่วนการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตไม่มีผลต่อข้อบกพร่องและระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาแต่มีผลทำให้ความหนืดและความแข็งเพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วงร้อยละ 20-40 โดยน้ำหนัก สภาพสัณฐานวิทยาจากการตรวจวัดด้วยด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) แสดงผลลักษณะของเซลล์โฟมเป็นวงกลมขนาดสม่ำเสมอทุกตำแหน่งการตรวจวัด ยกเว้นตำแหน่งขอบของโมลด์ที่มีลักษณะเป็นวงรี การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในช่วง 20-50°C ส่งผลให้ฟองหรือเซลล์โฟมที่ได้มีขนาดใหญ่ขึ้นเฉลี่ยจาก 70-160 μm และเนื้อของพอลิยูรีเทนแน่นขึ้น ผลจากการเติม CaCO_3 เพิ่มขึ้นในช่วง 20-40 %wt. ทำให้เซลล์โฟมเล็กลงจาก 120 μm เหลือประมาณ 80 μm แต่เมื่อเพิ่มปริมาณมากขึ้นในช่วง 50-60 %wt. เซลล์โฟมมีขนาดใหญ่ขึ้นกว่า 180 μm ส่วนระยะเวลาในการเก็บพอลิอลอเรซินที่เพิ่มขึ้นทำให้ %Foam และระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น จากการนำไปฉีดขึ้นรูปจะได้ชิ้นงานที่มีความแข็งและการสปริงตัวลดลง และเกิด Defect อย่างชัดเจนในระยะเวลาเก็บ 14 วัน ผลวิจัยนำมาซึ่งการปรับปรุงกระบวนการผลิตจนทำให้ข้อบกพร่องลดลงได้

บัณฑิตวิทยาลัย

สาขาวิชา เทคโนโลยีวิศวกรรม

ปีการศึกษา 2557

ลายมือชื่อนักศึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

SIRIROTE CHANTHO : IMPROVEMENT OF POLYURETHANE FOAM IN REACTION INJECTION MOLDING PROCESS. ADVISOR : ASST. PROF. WIPAWADEE WONGSUWAN, D. ENG., 98 PP.

The research work was conducted to solve defect problem of the production process of Polyurethane Foam (PU Foam). The research focused on the effect of polyols resin (Part A) property or ratio of calcium carbonate filler, storage duration of polyols resin, and PU Foam production factor or initial mold temperature of Reaction Injection Molding machine (RIM). The PU Foam product was the connector of the air filter in automobile that had problems on peeled, wrinkled or unsmoothed, and not shiny surface, or having air cavities (either closed or opened cavities). The research methodology comprised of 2 parts; Cup Test in the laboratory and production of PU Foam prototype by RIM. The variables of interest were; temperature of mold surface (20-60°C), ratio of calcium carbonate filler (10-60 %wt.) and duration of polyols resin storage time (0, 5, and 14 days). The influence of variables was analyzed by interpreting their effects on reaction time, hardness and flexibility, defect phenomena, morphology, particles size distribution, and particles density. The research findings showed that mold surface temperature influenced defects formation, which the optimum temperature for RIM process was 30°C. However, the ratio of calcium carbonate filler had no effect on defects formation and reaction time, though increased viscosity and hardness. The optimum calcium carbonate filler was in the range of 20-40 %wt. The morphology measured by Scanning Electron Microscope (SEM) illustrated the uniform circular cell foam in all measured locations, except at the mold periphery that cell foam had oval shape. Temperature increasing from 20-50°C resulted in larger cell foam, averaged to 70-160 μm , consequently foam body was softened. Increasing of CaCO_3 from 20-40 %wt led to cell foam size reduction from 120 to 80 μm . However, increasing of CaCO_3 further to 50-60 %wt would enlarge cell foam size to larger than 180 μm . Longer storage duration would increase %Foam and reaction time; consequently, the PU foam product from injection process had lower hardness and springiness and significantly had defects.

Graduate School

Field of Engineering of Technology

Academic Year 2014

Student's Signature.....

Advisor's Signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.วิภาวดี วงษ์สุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาเสียสละเวลา ให้คำปรึกษา ความรู้คำแนะนำต่างๆ ประสพการณ์ที่ดี และยังคงดูแลเอาใจใส่ผู้วิจัยเสมอมา

ขอขอบพระคุณคณะผู้บริหารบริษัทไทยโอโซนอล จำกัดทุกท่านที่มองเห็นค่าความสำคัญของการศึกษาและให้ความสนับสนุน ให้โอกาสที่ดี เพื่อร่วมงานและพนักงานทุกท่านที่ร่วมกันทำงานมาและช่วยเหลืออำนวยความสะดวกด้านอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำงานการฉีดยาขึ้นรูปพอลิยูรีเทนโฟมตลอดจนการทำงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรัตน์ อารีรัตน์ และคุณณัฐพงษ์ เชื้อพลพัทธ์ ห้องปฏิบัติการวิจัยพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำลำดับขั้นตอนในการตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิยูรีเทนโฟมตลอดจนการใช้เครื่องมือในการทดสอบ (Scanning Electron Microscope : SEM)

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.มานพ เจริญไชยตระกูล (มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์-วิทยาเขตบางเขน) ที่กรุณาเสียสละเวลาเป็นคณะกรรมการสอบในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์ (สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น) ที่กรุณาเสียสละเวลาเป็นคณะกรรมการสอบในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ดร. ดำรงเกียรติ รัตนอมรพิน (สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น) ที่กรุณาเสียสละเวลาเป็นคณะกรรมการสอบในครั้งนี้

และท้ายที่สุดขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่ให้โอกาสในการศึกษาและขอบคุณเพื่อนๆ อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน ทั้งผู้ที่กล่าวนามและไม่ได้กล่าวนามในที่นี้ ถ้ามีสิ่งผิดพลาดประการใดในรายงานนี้ ผู้วิจัยขอน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

ศิริโรจน์ จันท

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฌ
สารบัญรูป	ฎ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ขอบเขตการศึกษาและวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 แผนการดำเนินงานวิจัย	3
2 หลักการพื้นฐาน ทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.2 ส่วนประกอบของพอลิยูรีเทนโฟม	5
2.3 การสังเคราะห์พอลิยูรีเทน	11
2.4 กระบวนการผลิตแบบฉีดทำปฏิกิริยา (Reaction-Injection Molding : RIM)	14
2.5 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature Review)	19
3 ระเบียบวิธีการวิจัย	26
3.1 การกำหนดโจทย์ปัญหาจากกระบวนการผลิต	26
3.2 ระเบียบวิธีวิจัย	27
3.3 สารเคมี	36
3.4 เครื่องมือและอุปกรณ์	37

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3	3.5 วิธีการทดลอง..... 39
	3.6 การผลิตพอลิยูรีเทนโฟมต้นแบบ (Prototype Production)..... 41
4	การวิเคราะห์ผลการทดลองและผลการวิจัย..... 43
	4.1 ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Cup Test)..... 43
	4.2 กระบวนการฉีดขึ้นรูปของพอลิยูรีเทนโฟม..... 47
	4.3 ผลของอุณหภูมิต่อลักษณะสันฐานวิทยาของพอลิยูรีเทนโฟม..... 52
	4.4 อิทธิพลของแคลเซียมคาร์บอเนตต่อพอลิยูรีเทนโฟม..... 58
	4.5 ผลของแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลักษณะสันฐานวิทยาของพอลิยูรีเทนโฟม..... 62
	4.6 อิทธิพลของระยะเวลาในการเก็บพอลิออลเรซิน..... 67
5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... 70
	5.1 สรุปผลการวิจัย..... 70
	5.2 ข้อเสนอแนะของงานวิจัย..... 73
บรรณานุกรม	 74
ภาคผนวก	 77
	ภาคผนวก ก. อุณหภูมิของปฏิกิริยาระหว่างพอลิออลเรซินและไอโซไซยาเนต ในแก้วทดลอง (Cup Test)..... 78
	ภาคผนวก ข. อุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ..... 80
	ภาคผนวก ค. การเพิ่มสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3)..... 85
	ภาคผนวก ง. ระยะเวลาการเก็บพอลิออลเรซิน Part A..... 90
	ภาคผนวก จ. การถ่ายภาพโครงสร้างสันฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)..... 93
ประวัติย่อผู้วิจัย	 98

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงาน	3
2.1 คุณสมบัติเฉพาะของพอลิออล (Polyols)	7
2.2 พอลิอีเทอร์ที่นิยมใช้ในการเตรียมพอลิยูรีเทน.....	7
2.3 เปรียบเทียบค่าคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของ TDI และ MDI.....	9
2.4 สรุปวัตถุประสงค์ของการใช้สารเติมแต่งในพอลิออลเรซินเพื่อผลิตพอลิยูรีเทนโฟม	10
2.5 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	23
3.1 บันทึกเหตุการณ์การเก็บข้อมูลการผลิตช่วงเดือน ก.พ.-ส.ค. 2556	29
3.2 รายการเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง	37
3.3 การทดลองการทำ Prototype ของผลิตภัณฑ์	42
4.1 คุณสมบัติเบื้องต้นตามค่ามาตรฐานของปฏิกิริยาระหว่างพอลิออลเรซิน (Part A) และไอโซไซยาเนต (Part B).....	44
4.2 ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของปฏิกิริยาระหว่างพอลิออลเรซินและไอโซไซยาเนต	45
4.3 ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อความหนาแน่นของพอลิยูรีเทนโฟม	51
4.4 คุณสมบัติ PU Foam จาก Cup Test เมื่อเปลี่ยนค่าร้อยละโดยน้ำหนักของ CaCO_3	59
4.5 ผลการศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาในการเก็บพอลิออลเรซิน (Part A).....	68
ก-1 บันทึกผลของอุณหภูมิขณะการดำเนินไปของปฏิกิริยากับเวลา.....	79
ข-1 คุณสมบัติของพอลิยูรีเทนโฟมที่ระหว่าง Part A และ Part B ในแก้วทดลอง ในห้องปฏิบัติการ	81
ข-2 บันทึกผลการวัดสภาพอากาศขณะทำการทดลอง.....	81
ข-3 บันทึกผลการวัดอุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ที่ระดับอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส.....	82
ข-4 บันทึกผลการวัดอุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ที่ระดับอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส.....	82
ข-5 บันทึกผลการวัดอุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ที่ระดับอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส.....	83
ข-6 บันทึกผลการวัดอุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ที่ระดับอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส.....	83
ข-7 บันทึกผลการวัดอุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ที่ระดับอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส.....	84
ค-1 บันทึกผลการวัดสภาพอากาศขณะทำการทดลอง.....	86
ค-2 บันทึกผลการวัดอุณหภูมิการเติมสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตปริมาณ 10 %wt.....	86
ค-3 บันทึกผลการวัดอุณหภูมิการเติมสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตปริมาณ 20 %wt.....	87

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
ค-4	บันทึกผลการวัดอุณหภูมิการเติมสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตปริมาณ 30 %wt.....
ค-5	บันทึกผลการวัดอุณหภูมิการเติมสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตปริมาณ 40 %wt.....
ค-6	บันทึกผลการวัดอุณหภูมิการเติมสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตปริมาณ 50 %wt.....
ค-7	บันทึกผลการวัดอุณหภูมิการเติมสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตปริมาณ 60 %wt.....
ค-8	บันทึกผลการทดลองการเพิ่มแคลเซียมคาร์บอเนตในกระบวนการฉีดขึ้นรูป พอลิยูรีเทนโฟม.....
ง-1	บันทึกผลการวัดสภาพอากาศขณะทำการทดลอง.....
ง-2	บันทึกผลการวัดอุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปพอลิยูรีเทนโฟม ระยะเวลาเก็บพอลิออลเรซิน 5 วัน.....
ง-3	บันทึกผลการวัดอุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปพอลิยูรีเทนโฟม ระยะเวลาเก็บพอลิออลเรซิน 14 วัน.....



TNI

สารบัญรูป

รูป	หน้า
2.1 การเกิดปฏิกิริยาทางเคมี.....	6
2.2 โครงสร้างโมเลกุลของไดฟีนิลเมเทนไดไอโซไซยาเนต	8
2.3 อุปกรณ์และการทำงานของเครื่อง RIM.....	15
2.4 ไดอะแกรมแสดงอุปกรณ์และการทำงานของเครื่อง RIM.....	16
2.5 กระบวนการผลิตแบบ RIM.....	17
3.1 แผนภูมิพาเรโตแจกแจงความถี่ของการเกิดปัญหา.....	28
3.2 ผีลอก.....	32
3.3 ผีเป็นหลุมโพรงอากาศ	32
3.4 ผีนูนหรือผีวมะกูด.....	32
3.5 ผียุบยิบหรือผีเปลือกส้ม	33
3.6 แผนผังก้างปลา (Fish Bone Diagram).....	33
3.7 กระบวนการผลิตแบบ RIM.....	36
3.8 แผนภาพการทำงานของ RIM	38
3.9 แม่พิมพ์ขณะฉีดและตำแหน่งการวัดอุณหภูมิแม่พิมพ์.....	38
3.10 การตรวจวัดความหนืดของ Polyols Resin	39
3.11 การชั่งส่วนผสมของสารตั้งต้น.....	39
3.12 การปั่นกวนผสม	40
3.13 พอลิยูรีเทนโฟมหลังเสร็จสิ้นปฏิกิริยาและการหาค่า %Foam	40
3.14 การวัดค่าการสปริงตัวด้วย Shore A.....	41
4.1 ขั้นตอนและสภาพการเปลี่ยนแปลงของ PU Foam ขณะการเกิดปฏิกิริยาดำเนินไป	44
4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการเกิดปฏิกิริยา.....	46
4.3 การวัดอุณหภูมิที่ 3 ตำแหน่งทั้งภายนอกแม่พิมพ์ (Outer Mold) และภายในแม่พิมพ์ (Inner Mold).....	48
4.4 แผนภาพและกราฟแสดงคุณภาพและร้อยละความเสียหายของผลิตภัณฑ์ PU Foam.....	49
4.5 ผลของอุณหภูมิต่อความหนาแน่นของพอลิยูรีเทนโฟม.....	52
4.6 ตำแหน่งและสัญลักษณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	53
4.7 สัณฐานวิทยาของพอลิยูรีเทนโฟมที่อุณหภูมิการเกิดโฟม 20, 30, 40, 50 และ 60°C.....	54

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.8	ลักษณะการกระจายตัวของขนาดเซลล์โฟมของพอลิยูรีเทนที่อุณหภูมิการเกิดโฟม 20°C 55
4.9	ลักษณะการกระจายตัวของขนาดเซลล์โฟมของพอลิยูรีเทนที่อุณหภูมิการเกิดโฟม 30°C 55
4.10	ลักษณะการกระจายตัวของขนาดเซลล์โฟมของพอลิยูรีเทนที่อุณหภูมิการเกิดโฟม 40 °C 56
4.11	ลักษณะการกระจายตัวของขนาดเซลล์โฟมของพอลิยูรีเทนที่อุณหภูมิการเกิดโฟม 50°C 56
4.12	ลักษณะการกระจายตัวของขนาดเซลล์โฟมของพอลิยูรีเทนที่อุณหภูมิการเกิดโฟม 60°C 57
4.13	ผลของอุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ต่อขนาดเซลล์และความหนาแน่นเซลล์ของ PU Foam 57
4.14	กราฟแสดงผลของ %CaCO ₃ ต่อความหนืดของพอลิโอลเรซิน 59
4.15	กราฟแสดงผลของ %CaCO ₃ ต่อค่า Shore A ของพอลิยูรีเทนโฟม 60
4.16	ลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิยูรีเทนโฟมเมื่อปรับเปลี่ยนร้อยละโดยน้ำหนักของ CaCO ₃ 20, 30, 40, 50 และ 60 %wt 63
4.17	ลักษณะการกระจายตัวของขนาดเซลล์พอลิยูรีเทนโฟมด้วยปริมาณ CaCO ₃ 20 %wt 64
4.18	ลักษณะการกระจายตัวของขนาดเซลล์ของพอลิยูรีเทนโฟมด้วยปริมาณ CaCO ₃ 30 %wt. 64
4.19	ลักษณะการกระจายตัวของขนาดเซลล์ของพอลิยูรีเทนโฟมด้วยปริมาณ CaCO ₃ 40 %wt. 65
4.20	ลักษณะการกระจายตัวของขนาดเซลล์ของพอลิยูรีเทนโฟมด้วยปริมาณ CaCO ₃ 50 %wt. 65
4.21	ลักษณะการกระจายตัวของขนาดเซลล์ของพอลิยูรีเทนโฟมด้วยปริมาณ CaCO ₃ 60 %wt. 66
4.22	ผลของสัดส่วนโดยน้ำหนักของ CaCO ₃ ต่อขนาดเซลล์และความหนาแน่นเซลล์โฟม 66
4.23	ผลของระยะเวลาการเก็บต่อเวลาการเกิดปฏิกิริยา (Cream Time, Full Time, Tack Free Time) ค่า %Foam และค่า Shore A 68

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
ง-1 การตัดชิ้นส่วนพอลิยูรีเทนโฟม	94
ง-2 การแช่พอลิยูรีเทนโฟมในไนโตรเจนเหลว.....	95
ง-3 การแช่พอลิยูรีเทนโฟมในไนโตรเจนเหลว.....	95
ง-4 การหักบริเวณที่เกิดการบวมขึ้นงาน	96
ง-5 เครื่องเคลือบทอง	96
ง-6 เครื่องกลึงจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด	97
ง-7 ผลวิเคราะห์ขนาดเซลล์โฟมโดยใช้โปรแกรมอิมเมจ เจ (Image J).....	97

TNI

THAI

NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โฟมพอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่น (Polyurethane Flexible Foam) เป็นโฟมพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีความนิยมในการใช้งานสูง ทั้งในอุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ ใช้ผลิตเบาะรองนั่ง เบาะพนักพิง หมอนและที่นอน และอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการขนส่ง ฯลฯ ทั้งนี้เนื่องจากโฟมพอลิยูรีเทนเองมีคุณสมบัติที่เด่นคือ มีความยืดหยุ่น (Flexibility) ที่ดีมาก สามารถปรับคุณสมบัติได้ตั้งแต่แข็งเหมือนไม้จนถึงสภาพอ่อนนุ่มคล้ายฟองน้ำ ตามสภาพการใช้งานของอุตสาหกรรม มีสมบัติเกาะติดวัสดุได้หลายชนิด อาทิเช่น เหล็ก เหล็กกล้า ไรซินิม ปูนซีเมนต์ ไม้ และพลาสติกบางประเภท ทั้งยังรับน้ำหนักได้ดี ทนทานต่อตัวทำลายต่างๆ ทนความร้อน เก็บความเย็นได้ดี และเป็นฉนวนไฟฟ้า เป็นต้น

โดยทั่วไปคุณภาพของพอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่นขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของเนื้อโฟม อาทิ ขนาดของฟองก๊าซและความหนาแน่นของฟองก๊าซ ด้วยคุณสมบัติของพอลิยูรีเทนโฟมดังกล่าว อุตสาหกรรมการผลิตใส่กรองอากาศรถยนต์จึงได้นำพอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่นมาใช้ทดแทนพลาสติก แต่ยังคงพบปัญหาจากคุณภาพของวัสดุตั้งต้นในการผลิตใส่กรองอากาศรถยนต์สำหรับรถยนต์รุ่นวีโก้ (Vigo) ที่พบผิวหน้าโฟมลอก ผิวยุบยุบิบ ไม่เรียบมัน มีฟองอากาศที่ผิวหน้าทั้งขนาดใหญ่แบบผิวปิดและผิวเปิด เกิดความเสียหายต่อผลิตภัณฑ์ การศึกษาวิจัยอิทธิพลของปัจจัยในการผลิต การอธิบายและทำความเข้าใจพฤติกรรมของฟองก๊าซที่เกิดขึ้นระหว่างการขึ้นรูปพอลิยูรีเทนโฟม การลดความเข้มข้นและขนาดของฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาในการผลิตโฟมพอลิยูรีเทน จึงมีประโยชน์และความสำคัญต่อการพัฒนากระบวนการผลิต [1]

ปัญหาผลิตภัณฑ์ที่มีข้อบกพร่อง (Defect) เกิดจากคุณภาพของสารตั้งต้นพอลิโอลเรซินและปัจจัยในกระบวนการผลิต ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้มุ่งไปที่การศึกษาปัจจัยในกระบวนการผลิตพอลิโอลเรซิน อาทิ อุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่เป็นส่วนประกอบของพอลิโอลเรซิน และระยะเวลาการเก็บรักษาน้ำยาพอลิโอลเรซิน (Part A) งานวิจัยนี้ได้จำลองการผลิตพอลิยูรีเทนโฟมต้นแบบ ซึ่งจะทำให้ทราบถึงผลกระทบของปัจจัยดังกล่าวต่อคุณสมบัติของพอลิยูรีเทน เพื่อนำผลการวิจัยมาใช้ในการควบคุม ปรับปรุงและแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว นอกจากนั้นยังสามารถลดต้นทุนของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตพอลิยูรีเทนโฟมแบบยืดหยุ่นได้อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 ทราบอิทธิพลของอุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์พอลิยูรีเทนโฟมชนิดยืดหยุ่น

1.2.2 ทราบอิทธิพลของสารเคมีตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ที่เป็นองค์ประกอบในพอลิออลเรซิน (Part A) ต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์พอลิยูรีเทนโฟมแบบยืดหยุ่น

1.2.3 ทราบอิทธิพลของระยะเวลาในการเก็บพอลิออลเรซิน (Part A) ต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์พอลิยูรีเทนโฟมแบบยืดหยุ่น

1.3 ขอบเขตการศึกษาและวิจัย

1.3.1 อิทธิพลของอุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ต่อการดำเนินไปของปฏิกิริยาในกระบวนการฉีดขึ้นรูปพอลิยูรีเทนโฟม โดยอุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ที่ศึกษาคือ 20, 30, 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส

1.3.2 อิทธิพลของสัดส่วนสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ในพอลิออลเรซิน (Part A) โดยปริมาณที่สนใจศึกษา คือ ร้อยละ 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนัก

1.3.3 อิทธิพลของระยะเวลาการเก็บพอลิออลเรซิน (Part A) ระหว่าง 0, 5 และ 14 วัน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถพัฒนาองค์ความรู้เกี่ยวกับอิทธิพลของอุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ สัดส่วนสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต และระยะเวลาการเก็บพอลิออลเรซิน ที่มีผลต่อการเกิดข้อบกพร่อง (Defect) ของพอลิยูรีเทนโฟม

1.4.2 พัฒนาระบบการผลิตใหม่ที่ปรับปรุงให้สามารถควบคุมการเกิดข้อบกพร่อง อันเนื่องจากพอลิออลเรซิน และได้แนวทางในการแก้ไขปัญหาได้อย่างทันท่วงที

1.4.3 สามารถลดปัญหาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ลดค่าใช้จ่ายและต้นทุนการผลิต และเวลาที่ใช้ในการผลิตพอลิออลเรซิน (Part A) ได้

บทที่ 2

หลักการพื้นฐาน ทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับพอลิยูรีเทนโฟม ชนิดและส่วนประกอบของพอลิยูรีเทน วัตถุประสงค์สำหรับการผลิต การสังเคราะห์พียู ข้อเด่นของพียู กรรมวิธีการผลิตแบบฉีดทำปฏิกิริยา และการทำวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับงานวิจัยดังนี้

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 พอลิยูรีเทน (Polyurethane)

พอลิยูรีเทน (Polyurethane) ในทางการค้ามีชื่อย่อว่าพียู (PU) เป็นพอลิเมอร์ที่มีหมู่ยูรีเทน (-NHCOO-) อยู่ในโมเลกุล การผลิตในอุตสาหกรรมเริ่มตั้งแต่ปี ค.ศ. 1937 โดยเบเยอร์ (Bayer) จากบริษัท Farbenfabriken Bayer ในเยอรมัน ซึ่งหมู่ยูรีเทน (-NHCOO-) สามารถเตรียมจากปฏิกิริยาระหว่างไดไอโซไซยานาต (Diisocyanate) กับไดออล (Diols) จนได้พอลิยูรีเทน ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นพลาสติกและเส้นใย ต่อมาพบว่าทำเป็นกาว วัสดุเคลือบผิว และโฟมแข็งได้ด้วย ประวัติศาสตร์ของ PU สรุปได้ดังนี้

- ในปี ค.ศ. 1950 ได้มีการพัฒนาพอลิยูรีเทนเป็นอีลาสโตเมอร์ และโฟมยืดหยุ่นได้
- ในปี ค.ศ. 1955 ได้มีการผลิตโฟมพอลิยูรีเทนอย่างกว้างขวางโดยใช้พอลิเอสเทอร์ที่ปลายโมเลกุลมีหมู่ฟังก์ชัน -OH อยู่ 2 ข้างของพอลิออล
- ในปี ค.ศ. 1957 การผลิตพอลิยูรีเทนใช้พอลิเอเทอร์ที่ปลายโมเลกุลมีหมู่ฟังก์ชัน -OH แทนพอลิเอสเทอร์ เนื่องจากต้นทุนถูกกว่าใช้พอลิเอสเทอร์ และทนกรดทนด่างได้ดีกว่าเพราะหมู่เอเทอร์เสถียรกว่าเอสเทอร์ [2]

2.1.2 ชนิดของพอลิยูรีเทน (Types of Polyurethanes)

ปัจจุบันพอลิยูรีเทนสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท ดังนี้ [3-4]

2.1.2.1 พอลิยูรีเทนโฟม (Foam Polyurethane)

2.1.2.2 พอลิยูรีเทนแบบแข็ง (Solid Polyurethane)

2.1.2.3 พอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ (Solid Polyurethane Elastomers)

2.1.2.4 สารยึดติด สารเคลือบผิว และสารสี (Adhesive, Coating, Paints)

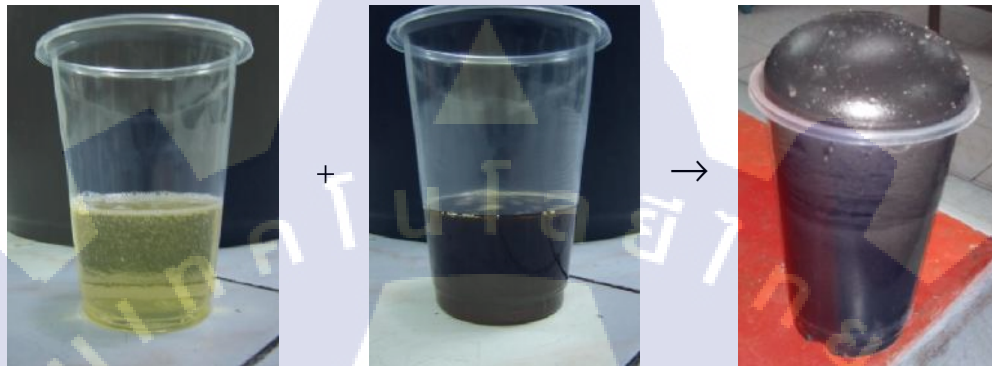
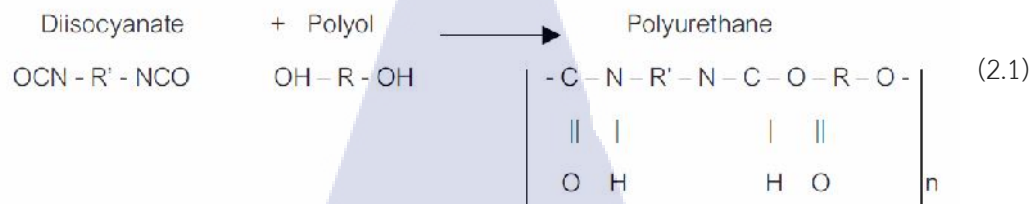
บทนี้จะกล่าวถึงพอลิยูรีเทนเฉพาะชนิดที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย คือ โฟมพอลิยูรีเทน (Foam Polyurethane) หรือ พอลิยูรีเทนโฟม (Polyurethane Foam) สามารถแบ่งออกได้เป็นสองกลุ่มโดยใช้เกณฑ์ความหนาแน่น คือ พอลิยูรีเทนโฟมชนิดยืดหยุ่น (Flexible Polyurethane Foam) และพอลิยูรีเทนโฟมชนิดแข็ง (Rigid Polyurethane Foam)

1. พอลิยูรีเทนโฟมชนิดยืดหยุ่น มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นแบบร่างแห มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 10-80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เนื้อโฟมมีโครงสร้างแบบเซลล์เปิด ซึ่งจะทำให้อากาศสามารถไหลผ่านภายในโครงสร้างได้โดยง่าย พอลิยูรีเทนโฟมชนิดยืดหยุ่นนี้จะมีความต้านทานแรงดึงสูง ทนทานต่อตัวทำละลายหลายชนิด พอลิยูรีเทนที่แห้งสามารถทนความร้อนได้ถึง 150 องศาเซลเซียส นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตเบาะเฟอร์นิเจอร์ เบาะรถยนต์ หมอนพนักรถยนต์ พวงมาลัยรถยนต์ สปอยเลอร์รถยนต์ และวัสดุกันกระแทกต่างๆ เป็นต้น

2. พอลิยูรีเทนโฟมชนิดแข็ง มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นแบบร่างแหอยู่ในปริมาณมาก ลักษณะของเซลล์เป็นแบบเซลล์ปิด ผนังของฟองก๊าซภายในเนื้อโฟมยังคงโครงสร้างอยู่ ดังนั้นการเคลื่อนที่ของฟองก๊าซจึงเกิดขึ้นไม่ได้ โฟมประเภทนี้มีสมบัติทางเคมีคล้ายคลึงกับพอลิยูรีเทนโฟมชนิดยืดหยุ่น มีความแข็งแรงที่สูงซึ่งจะสัมพันธ์กับน้ำหนักของโฟมมีความทนทานต่อการกดอัด มีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนความร้อนที่ดี นอกจากนี้ยังสามารถทนทานต่อการกัดกร่อนของน้ำมันและก๊าซโซลีนเป็นอย่างดี มีความหนาแน่นของเนื้อโฟมมากกว่า 30 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พอลิยูรีเทนโฟมชนิดแข็งส่วนใหญ่ใช้งานเป็นฉนวนกันความร้อน (Insulator) ในตู้เย็น ในการก่อสร้างผนังห้องเย็น ภาชนะเก็บความร้อนและเย็น ตู้คอนเทนเนอร์ นอกจากนี้ยังใช้เป็นส่วนประกอบของเรือเพื่อลดน้ำหนักของเรือและทำให้การลอยตัวดีขึ้น

2.2 ส่วนประกอบของพอลิยูรีเทนโฟม

พอลิยูรีเทนเป็นพอลิเมอร์ที่มีความหลากหลายและเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในรูปแบบต่างๆ กัน ได้แก่ โฟม (Foams) เส้นใย (Fibers) พอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ (Elastomer) กาว (Adhesive) และสารเคลือบผิววัสดุ (Coating Materials) พอลิยูรีเทนโฟม (PU Foams) สังเคราะห์โดยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างพอลิออล (Polyols) ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl Group, -OH) อยู่ในโมเลกุลตั้งแต่สองหมู่หรือมากกว่า เรียกว่า Diols หรือ Polyols กับไอโซไซยานาต (Isocyanate) หรือ สาร B ซึ่งมีโมเลกุลของหมู่ไอโซไซยานาตมากกว่าหนึ่งหมู่ โดยทั่วไปจะมีสารเร่งปฏิกิริยาหรือสารเติมแต่งผสมเพิ่มในส่วนของพอลิออล (Polyols) เพื่อเพิ่มการทำปฏิกิริยาให้ดีขึ้นของทั้งสองสาร ได้เป็นพอลิเมอร์พอลิยูรีเทนที่มีคุณสมบัติตามต้องการ สมการที่ (2.1) แสดงการสังเคราะห์พอลิยูรีเทน โดยรูปที่ 2.1 แสดงสภาพของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์จากการทำปฏิกิริยาเคมีดังสมการที่ (2.1)



รูปที่ 2.1 การเกิดปฏิกิริยาทางเคมี

2.2.1 วัตถุดิบสำหรับผลิตพอลิยูรีเทนโฟมแบบยืดหยุ่น (Polyurethane Foam Materials)

2.2.1.1 พอลิออล (Polyols)

พอลิออล (Polyols) เป็นวัตถุดิบสำคัญในการผลิตพอลิยูรีเทนที่ใช้ในการผลิตทางอุตสาหกรรม โดยที่ 90 เปอร์เซ็นต์ของพอลิออลที่ใช้เป็นพอลิออลชนิดพอลิอีเทอร์ (Polyether) ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล 3 หมู่ และถ้าใช้พอลิออลชนิดพอลิเอสเทอร์ (Polyester) จะได้ผลิตภัณฑ์พอลิยูรีเทนที่มีคุณสมบัติเฉพาะ แต่โดยปกติราคาของพอลิเอสเทอร์จะแพงกว่าพอลิอีเทอร์ ดังนั้นการเลือกพอลิออลจะต้องพิจารณาถึงขนาดและความยืดหยุ่นของโครงสร้าง ค่าฟังก์ชันนอลิตี้ (Functionality) ซึ่งเป็นปริมาณไฮดรอกซิลต่อปริมาณของหมู่ไฮดรอกซิลต่อปริมาณพอลิออล และระดับของการเกิดโครงสร้างร่างแหโมเลกุล ซึ่งค่านี้จะส่งผลต่อการควบคุมความแข็งและความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ นั่นคือโฟมคงรูปต้องการโครงสร้างโมเลกุลที่แข็งตัวจำเป็นต้องใช้พอลิออลที่มีค่าระดับของการเกิดโครงสร้างร่างแหที่สูง แต่สำหรับโฟมชนิดยืดหยุ่นต้องการพอลิออลที่มีระดับของการเกิดโครงสร้างร่างแหที่ต่ำ พอลิออล (Polyols) ถูกพัฒนาให้สามารถทำปฏิกิริยากับ Isocyanate ได้อย่างสมบูรณ์และทำให้ได้พอลิยูรีเทนที่มีคุณสมบัติตามต้องการ คุณสมบัติเฉพาะของพอลิออลสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตพอลิยูรีเทน สรุปดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติเฉพาะของพอลิออล (Polyols) [5]

Characteristic	Elastomer Foam and Flexible Foam	Solid Foam and Rigid Foam
Molecular Weight Range	1,000 to 6,500	400 to 1,200
Functionality Range	2 to 3	3 to 8
Hydroxyl Value Range	28 to 160	250 to 1,000

(1) พอลิอีเทอร์พอลิออล (Polyether Polyols) [2]

พอลิอีเทอร์ที่มีหมู่ปลายเป็นหมู่ไฮดรอกซี ($\text{H-(OR)}_n\text{-OH}$) จัดว่าเป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการเตรียมพอลิยูรีเทน พอลิอีเทอร์ไตรออลที่มีน้ำหนักโมเลกุลค่อนข้างสูงประมาณ 3000 มักใช้ผลิตโฟมชนิดยืดหยุ่น ในขณะที่พอลิอีเทอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลในช่วงประมาณ 500 มักใช้ผลิตโฟมชนิดแข็ง

ตารางที่ 2.2 พอลิอีเทอร์ที่นิยมใช้ในการเตรียมพอลิยูรีเทน

พอลิออล	น้ำหนักโมเลกุล	หมู่ฟังก์ชัน
$\text{CH}_3\text{-CH(OH)-CH}_2\text{-OH}$	400 – 4,000	2
$\text{HO-CH}_2\text{-CH(CH}_2\text{OH)-CH}_2\text{-OH}$	300 – 6,000	3
$\text{HOCH}_2\text{-C(CH}_2\text{OH)}_2\text{-CH}_2\text{-OH}$	400 – 600	4
$\text{HOCH}_2\text{-(CH(OH))}_4\text{-CH}_2\text{-OH}$	350 – 750	6

(2) พอลิเอสเทอร์พอลิออล (Polyester Polyols)

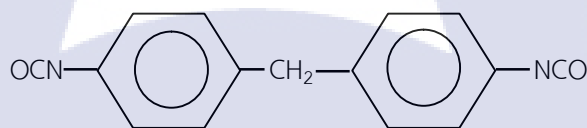
พอลิเอสเทอร์ที่มีหมู่ปลายเป็นหมู่ไฮดรอกซี ($\text{-(O-CO-R-OR)}_n\text{-OH}$) จัดเป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการเตรียมพอลิยูรีเทน เกิดจากการใช้ไดแอซิด เช่น กรดอะไดคิก กรดเซบาซิก เป็นต้น ทำปฏิกิริยากับไดออลที่มากเกินไป (Excess) น้ำหนักโมเลกุลที่นิยมใช้จะอยู่ในช่วง 1,000-4,000

2.2.1.2 ไอโซไซยาเนต (Isocyanate)

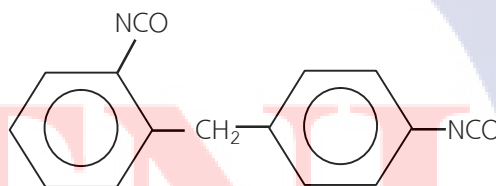
คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของพอลิยูรีเทนสามารถกำหนดโดยชนิดของ Isocyanate ที่นำมาใช้ สาร Isocyanate ที่นิยมใช้มี 2 ชนิดคือ Toluene Diisocyanate (TDI) และ Diphenyl Methane Diisocyanate (MDI) โดยประมาณร้อยละ 90 ของ Isocyanate ที่ใช้ในอุตสาหกรรม คือ MDI [2]

(1) Toluene Diisocyanate : TDI ที่อุณหภูมิห้อง มีสถานะเป็นของเหลวหรือเป็นผลึก มีจุดหลอมเหลวที่ 22 องศาเซลเซียส ทำปฏิกิริยากับน้ำที่อุณหภูมิสูงกว่า 50 องศาเซลเซียส และทำปฏิกิริยารุนแรงกับกรด เบส และแอลกอฮอล์ ซึ่งทำให้เสี่ยงต่อการเกิดเพลิงไหม้และการระเบิด เมื่อเกิดการสลายตัวจากการเผาไหม้ จะเกิด 2,4 -Toluenediamine ซึ่งเป็นสารอันตรายต่อมนุษย์

(2) Diphenyl Methane Diisocyanate : MDI ที่อุณหภูมิห้อง มีสถานะเป็นของแข็ง มีจุดหลอมเหลวที่ 37 องศาเซลเซียส ทำปฏิกิริยารุนแรงกับกรด เบส และแอลกอฮอล์ ซึ่งทำให้เสี่ยงต่อการเกิดเพลิงไหม้และการระเบิด เมื่อเกิดการสลายตัวจากการเผาไหม้จะเกิดไฮโดรเจนไซยาไนด์ ไอร์อะเซของไนตรัส และก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ ซึ่งส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ MDI ผลิตได้จากสารตั้งต้นอะนิลีน (Aniline) และฟอมัลดีไฮด์ (Formaldehyde) จะได้ผลิตภัณฑ์คือ Polymeric MDI ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตพอลิยูรีเทนโฟม นอกจากนั้นในขั้นตอนการผลิต Polymeric MDI จะสามารถแยก MDI บริสุทธิ์ออกมาใช้เป็นสารเคมีพื้นฐานสำหรับการปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆ ต่อไป



(4,4'-diphenylmethanediisocyanate)



(2,4'-diphenylmethanediisocyanate)

รูปที่ 2.2 โครงสร้างโมเลกุลของไดฟีนิลมีเทนไดไอโซไซยาเนต

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบค่าคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของ TDI และ MDI [3]

คุณสมบัติ	TDI	MDI
สถานะ	เหลว, ผลึก	ของแข็ง, แผ่น
สี	ขาวถึงเหลืองอ่อน	ขาวเหลืองอ่อน
กลิ่น	กลิ่นผลไม้	ไม่มีกลิ่น
น้ำหนักโมเลกุล	174.16	250.3
จุดเดือด °C	251	314
จุดหลอมเหลว °C	22	37
ความถ่วงจำเพาะ	1.22	1.2

2.2.1.3 สารช่วยให้เกิดฟอง (Blowing Agent (H_2O))

การเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนจะต้องใช้น้ำเป็นตัวทำปฏิกิริยากับไอโซไซยาเนต ซึ่งจะทำให้เกิดสารประกอบที่มีพันธะยูเรีย และเพิ่มความแข็งแรงให้กับโฟม ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แทรกอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ ทำให้โฟมขึ้นตัวและทำให้เซลล์โฟมมีลักษณะเป็นรูพรุน

2.2.1.4 สารลดแรงตึงผิว (Surfactant)

สารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในการเตรียมโฟม ส่วนใหญ่จะเป็นพวกซิลิคอนเซอร์แฟคแตนต์ (Silicon Surfactant) สารจำพวกนี้เมื่อเติมเข้าไปแล้วทำให้การผสมส่วนต่างๆ เข้ากันได้ดียิ่งขึ้น และทำให้ปฏิกิริยาระหว่างไอโซไซยาเนตเกิดได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้เซลล์โฟมละเอียดยิ่งขึ้น จึงสามารถควบคุมขนาดและปริมาณของเซลล์โฟมได้

2.2.1.5 สารเชื่อมโยง (Cross-Linker)

สารเชื่อมโยงเป็นสารจำพวกพอลิออล ที่มีหมู่ฟังก์ชัน (Functional Group) น้อยๆ และมีหมู่ที่ทำปฏิกิริยาอยู่ 2 หมู่ เช่น ไกลคอลไดอะมิน หรือ ไฮดรอกซิลเอมีน เป็นต้น สารเหล่านี้เมื่อทำปฏิกิริยากับไอโซไซยาเนต จะเกิดพันธะยูรีเทนและพอลิยูเรีย ในโครงสร้างของพอลิยูรีเทนโฟม โดยสารตัวนี้มีหน้าที่คอยเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลของพอลิยูรีเทน ซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นตรงและไม่เป็นระเบียบให้เรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ ทำให้โฟมที่ได้แข็งตัวยิ่งขึ้น

2.2.1.6 สารตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst)

สารตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างไอโซไซยาเนตกับน้ำ และระหว่างไอโซไซยาเนตกับพอลิออล ตัวเร่งที่เติมในปฏิกิริยามีหลายชนิด สารที่ใช้ส่วนมากจะเป็นพวกเอมีน ทั้งที่เป็นอะโรมาติกและอะลิฟาติกเทอร์ติเออรีเอมีน (Aliphatic and Aromatic Tertiary Amine) และสารประกอบของ Organo-Metallic โดยเฉพาะสารประกอบของดีบุก (Tin)

(1) Tertiary Amines เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมการผลิตพอลิยูรีเทน โดยที่ค่าความว่องไวในการทำปฏิกิริยา (Catalytic Activity) จะขึ้นอยู่กับโครงสร้างและสภาพความเป็นเบส (Basicity) ของสาร

(2) Organo-Metalic เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิยูรีเทนแบบยืดหยุ่น สารประกอบในกลุ่มนี้ที่นิยมใช้คือ Stannous Octoate โดยทั่วไปจะใช้ในกระบวนการผลิตแบบทำปฏิกิริยา (Reaction Injection Molding : RIM)

2.2.1.7 สารเติมแต่ง (Additive)

สารเติมแต่งใช้เพื่อเพิ่มสมบัติบางอย่างที่ต้องการ ช่วยควบคุมและปรับปรุงคุณสมบัติของพอลิยูรีเทน ตามวัตถุประสงค์ในการนำไปใช้งานของลูกค้า เช่น สารป้องกันการติดไฟ แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate) และสารแต่งสี เป็นต้น

ตารางที่ 2.4 สรุปวัตถุประสงค์ของการใช้สารเติมแต่งในพอลิออลเรซินเพื่อผลิตพอลิยูรีเทนโฟม [4]

Additive	Type of Materials	Purpose
Catalysts	Tertiary Amines Organometallic Compounds	To Speed Up the Reaction of Isocyanate and Polyols
Cross-Linking Chain-Extending Agents	Polyols Polyamines	To Give Polymer Cross-Linking or to Introduce Specialized Polymer Segments
Blowing Agents	Water (Reacts with Isocyanate Giving carbon Dioxide Gas) Chlorofluoromethanes	To Produce Foamed Structure
Surfactants	Silicone Fluids	To Aid and Help Foam Forming Processes
Colours	Various Pigments Carbon Black	To Identify Different Foam Grades and for Aesthetic Reasons

ตารางที่ 2.4 สรุปวัตถุประสงค์ของการใช้สารเติมแต่งในพอลิออลเรซินเพื่อผลิตพอลิยูรีเทนโฟม (ต่อ)

Additive	Type of Materials	Purpose
Fillers	Particulate Inorganic Materials Fibres (Chopped, Milled or as Continuous Fibres, Nets or Scrims)	To Modify Properties (Stiffness, Fire Performance etc.)
Flame Retardants	Phosphorous or Halogen Containing Molecules	To Reduce Flammability
Smoke Suppressants	Particulate Inorganic and/or Organic Materials. (Polycarboxylates, Hydrated Oxides, Borates, etc.)	To Reduce the Amount of Smoke or to Slowdown the Rate of Smoke Production on Burning.

2.3 การสังเคราะห์พอลิยูรีเทน

2.3.1 ปฏิกริยาการสังเคราะห์พอลิยูรีเทนโฟม [4]

การสังเคราะห์พอลิยูรีเทนโฟมจะอาศัยหลักที่ว่า เมื่อพรีพอลิเมอร์ ที่มีหมู่ $N=C=O$ อยู่ที่ยปลายโมเลกุลได้รับความชื้น (H_2O) จะสามารถเกิดปฏิกิริยาได้เป็นสารที่มีหมู่ยูเรีย ($-NH(C=O)OH$) เกิดขึ้น และจะสลายตัวให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งจะทำให้พอลิเมอร์ที่ได้มีพันธะยูเรียเกิดขึ้นพร้อมๆ กับการมีฟองอากาศเกิดขึ้นในชิ้นงานปฏิกิริยาการเกิดฟองจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จะเกิดพร้อมๆ กันกับการควบแน่นกันเอง (Self-Condensation) ของพรีพอลิเมอร์ที่ได้จากการสลายตัวให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นปฏิกิริยาทั้ง 2 นี้จะแข่งขันกัน โดยปฏิกิริยา ควบแน่น จะทำให้ได้พันธะยูเรีย ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยง ต่อกับหมู่ไอโซไซยาเนต ที่หลงเหลืออยู่ที่ปลายของพรีพอลิเมอร์ ทำให้ได้โฟมพอลิยูรีเทนที่แข็งตัวก่อนที่จะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะดันให้พอลิเมอร์แตกตัวจนไม่สามารถคงรูปทรงอยู่ได้

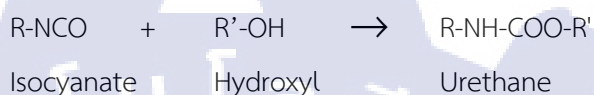
สำหรับกฎเกณฑ์สำคัญที่ควบคุมลักษณะของโฟมที่เกิดขึ้นว่าจะเป็น โฟมแข็ง (Rigid Foam) หรือโฟมอ่อน (Flexible Foam) นั้นจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของสารตั้งต้นไดออลที่ใช้ โดยถ้าใช้พอลิเอเทอร์พอลิออล ก็จะมีแนวโน้มที่จะได้โฟมที่มีความอ่อนตัว นอกจากนั้นถ้าใช้พรีพอลิเมอร์ที่มีปริมาณหมู่ไอโซไซยาเนตสูง (เช่นใน 1 โมเลกุลจะมีปริมาณหมู่ไอโซไซยาเนตมากกว่า 2 โมเลกุล) ก็จะทำให้มีโอกาสดำเนินการขั้นข้ามหรือระดับการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลสูง นอกจากนั้น จำนวน

หมู่ไฮดรอกซีในพอลิออลก็มีผลเช่นเดียวกัน โดยถ้าพอลิออลมีหมู่ไฮดรอกซีในปริมาณมาก เช่น Poly-Hydroxy Polyol ก็จะทำให้ได้โฟมที่มีลักษณะแข็งตัว

2.3.2 ปฏิกริยาพอลิเมอไรเซชัน

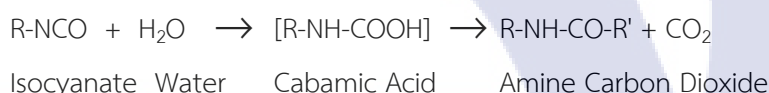
2.3.2.1 ปฏิกริยาลำดับที่ 1 ของไอโซไซยานาตแบ่งออกเป็น

(1) ปฏิกริยาของไอโซไซยานาตกับพอลิออล



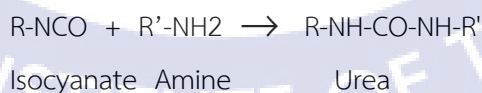
ปฏิกริยาระหว่างไอโซไซยานาตกับพอลิออล เป็นปฏิกริยาพอลิเมอไรเซชันแบบการเติมและเป็นปฏิกริยาคายความร้อน โดยอัตราเร็วของการเกิดพอลิเมอไรเซชันจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของโมเลกุลของไอโซไซยานาตและพอลิออล โดยที่อะลิฟาติกพอลิออล (Aliphatic Polyols) ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลแบบปฐมภูมิ เมื่อทำปฏิกริยากับไอโซไซยานาตจะมีอัตราเร็วกว่าพอลิออลที่มีหมู่ไฮดรอกซิลแบบทุติยภูมิประมาณ 10 เท่า สำหรับอัตราการเกิดปฏิกริยาของฟีนอลกับไอโซไซยานาต จะช้ามาก และพอลิยูรีเทนที่เกิดขึ้นนั้นจะสลายตัวกลับเป็นสารตั้งต้นได้ง่าย เมื่อได้รับความร้อน เรียกปฏิกริยาผ่นกลับนี้ว่า Blocked Isocyanate

(2) ปฏิกริยาของไอโซไซยานาตกับน้ำ



ปฏิกริยาระหว่างไอโซไซยานาตกับน้ำ จะได้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นคือ ยูเรีย และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ปฏิกริยานี้จัดเป็นปฏิกริยาพื้นฐานของการเกิดฟองก๊าซในอุตสาหกรรมการผลิต โฟมพอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่น ผลิตภัณฑ์เริ่มต้นจะเกิดเป็นกรดคาร์บามิก (Cabamic Acid) และจะแตกตัวเป็นเอมีนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

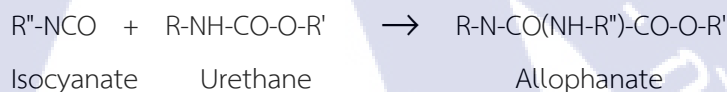
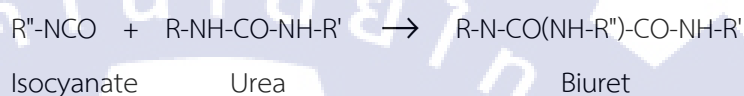
(3) ปฏิกริยาของไอโซไซยานาตกับเอมีน



สำหรับปฏิกิริยาของไดไอโซไซยาเนตกับสารประกอบของเอมีนชนิดปฐมภูมิและทุติยภูมิโดยเฉพาะอย่างยิ่งสารพวกไดเอมีน (Diamine) ความว่องไวในการทำปฏิกิริยาของเอมีนจะเพิ่มขึ้นตามความเป็นเบส และเอมีนแบบอะลิฟาติกจะว่องไวกว่าเอมีนแบบอะโรมาติก

2.3.2.2 ปฏิกิริยาลำดับที่ 2 ของไอโซไซยาเนต

ไอโซไซยาเนตภายใต้สภาวะที่เหมาะสม อาจจะทำปฏิกิริยากับอะตอมของไฮโดรเจน ในโมเลกุลของยูเรียและยูรีเทนเกิดเป็นพันธะไบยูเรต (Biuret) และพันธะอัลโลโฟเนต (Allophanate) ตามลำดับ ทั้งสองปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้จัดเป็นปฏิกิริยาของการเกิดโครงสร้างร่างแห และปฏิกิริยาของหมู่ยูเรียจะเกิดได้รวดเร็วและเกิดที่ภาวะอุณหภูมิต่ำกว่าของหมู่ยูรีเทน



2.3.3 ข้อเด่นของพอลิยูรีเทน [3]

- (1) ราคาไม่แพงมากจนเกินไป
- (2) มีสมบัติการเชื่อมติดที่ทนทาน (Toughness) และมีความยืดหยุ่น (Flexibility) ที่ดีมากจึงใช้ติดแผ่นฟิล์ม แผ่นฟอยล์ (Foil) และวัสดุยืดหยุ่น (Elastomer) อื่นๆ ได้
- (3) มีความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิเย็นเยือกได้ดีมาก
- (4) มีสมบัติการเกาะติดกับวัสดุได้หลากหลายชนิดรวมทั้งพลาสติกที่ติดยาก

2.3.4 ข้อด้อยของพอลิยูรีเทน

- (1) ใช้งานที่อุณหภูมิสูงไม่ได้ สามารถทนความร้อนได้ประมาณ 90°C เท่านั้น
- (2) ไม่เหมาะสมกับการใช้งานที่มีความชื้นสูง
- (3) สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ด้วยความร้อนและความชื้น
- (4) การผสมสารตั้งต้น 2 Component หรือ 1 Component จะอันตราย
- (5) ระยะเวลาที่กาวสามารถอยู่ในสถานะของเหลวในระหว่างการผสม (Pot Life) สั้น
- (6) ต้องใช้เครื่องมือพิเศษในการผสม

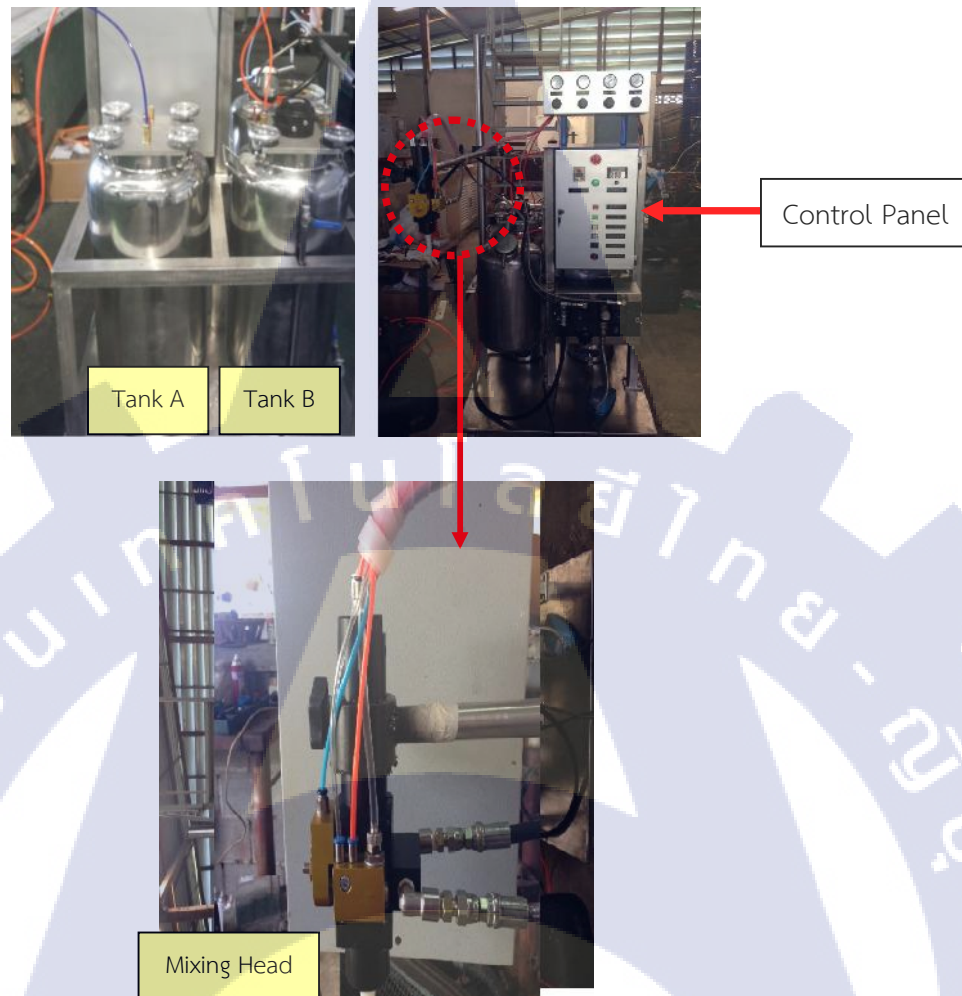
2.4 กรรมวิธีการผลิตแบบฉีดทำปฏิกิริยา (Reaction Injection Molding : RIM)

กระบวนการผลิตพอลิยูรีเทนด้วยกระบวนการฉีดแบบทำปฏิกิริยา (Reaction Injection Molding หรือ RIM เป็นกระบวนการทางเคมีที่ใช้วัตถุดิบที่เป็นของเหลว 2 ชนิด ฉีดเข้าในแม่พิมพ์ (Mold) เมื่อได้เวลาที่เหมาะสมชิ้นงานจะแข็งตัว และได้รูปทรงตามต้องการตามอัตราส่วนผสมของเหลวและสารผสมอื่นๆ สามารถกำหนดคุณสมบัติให้ได้วัสดุตามที่ต้องการ เช่น ความหนาแน่น ความอ่อนนุ่ม หรือ แข็งแกร่ง โดยมีถัง (Tank) สองถัง สำหรับบรรจุวัตถุดิบเหลว ถังแรกบรรจุ Polyols Resin (นิยมเรียกเป็นสาร A) ที่ผสมกับสารปรับปรุงคุณภาพ (Additive หรือ Compound เพื่อปรับแต่งให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ) และถังที่สองบรรจุ Isocyanate (นิยมเรียกเป็นสาร B) โดยสารทั้งสอง (A และ B) ไปผสมกันภายในห้องผสม Mixing Head ในอัตราส่วนที่กำหนด ที่ความดันระหว่าง 100 ถึง 200 บาร์ แล้วจึงฉีดเข้าสู่แม่พิมพ์ที่ความดันบรรยากาศ โดยมีอัตราการไหลประมาณ 5 ถึง 1,100 กรัมต่อนาที (เครื่อง Demo บริษัท ไทยไอโซนอล จำกัด)

เครื่องฉีด RIM (รูปที่ 2.3) ใช้สารเคมีสองตัวหลัก คือ Polyols กับ Isocyanate และสารอื่นๆ เพื่อใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุให้ได้ตามต้องการ Polyols และ Isocyanate และสาร Additive ต่างๆ ทำปฏิกิริยากันกลายเป็นพอลิยูรีเทน (Polyurethane หรือ PU) โดยสารทั้งสองผสมกันในห้องผสม (Mixing Chamber หรือ Mixing Head) ในการผสมนี้ อัตราการไหลของทั้งสองสารต้องควบคุมอย่างละเอียดในขณะผสม เครื่อง RIM สามารถผลิตโดยปรับอัตราการไหลที่ออกจาก Mixing Head (รูปที่ 2.3) ได้ละเอียดสุดที่ 5 กรัมต่อนาที โดยสามารถเลือกค่าอัตราการไหลของปั๊มได้ คือ 4 16 และ 40 ลิตรต่อนาที ดังนั้นเครื่อง RIM จึงสามารถปรับค่าเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องของอัตราส่วนที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาได้

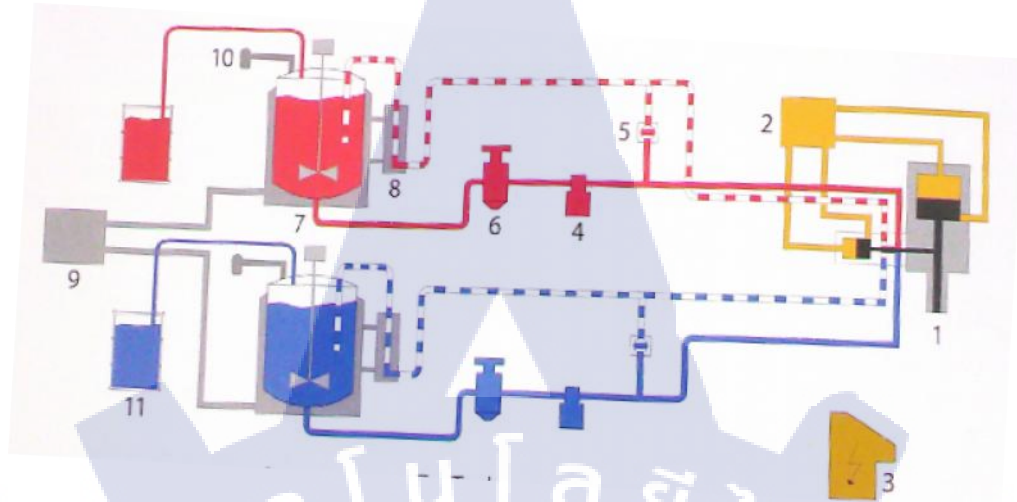
TNI

THAI - NICHII INSTITUTE OF TECHNOLOGY



รูปที่ 2.3 อุปกรณ์และการทำงานของเครื่อง RIM

TNI



รูปที่ 2.4 ไดอะแกรมแสดงอุปกรณ์และการทำงานของเครื่อง RIM

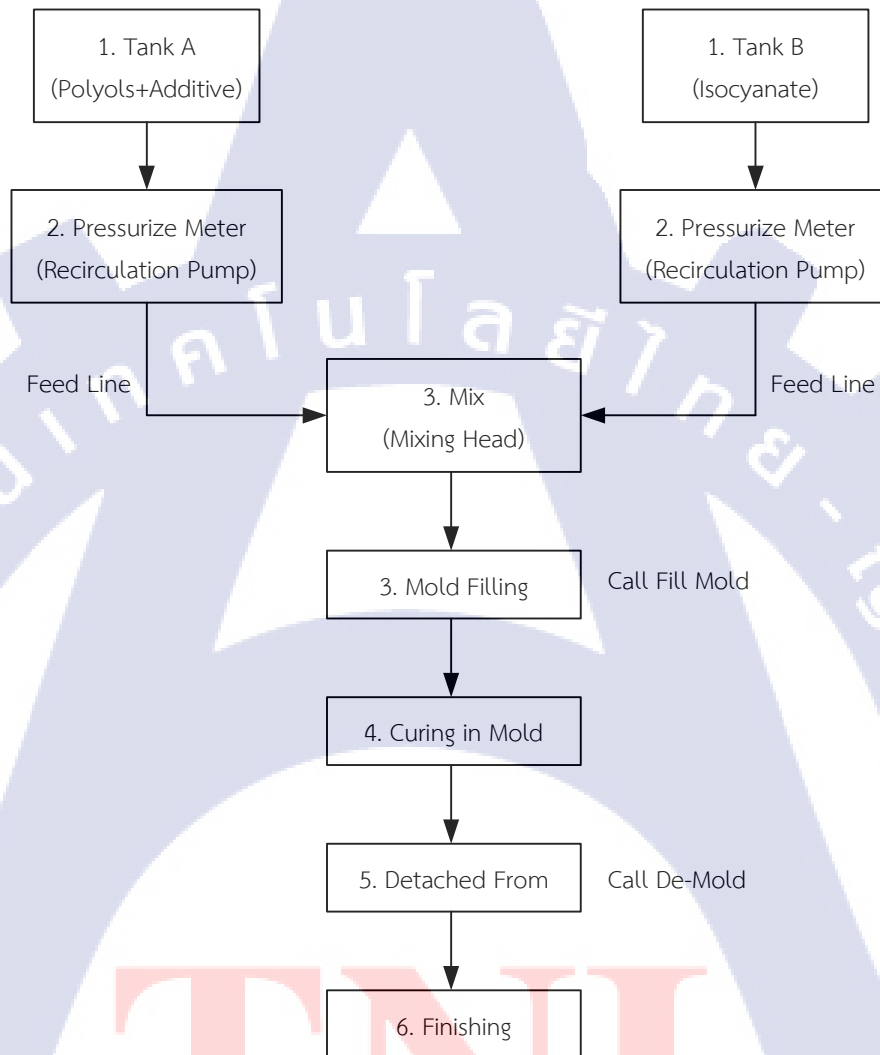
- | | |
|-------------------|----------------------------|
| 1. Mixing Head | 7. Tanks |
| 2. Hydraulic Unit | 8. Heat Exchanger |
| 3. Control Panel | 9. Refrigerating M/C |
| 4. Metering Pump | 10. Dry Air |
| 5. Safety Valves | 11. Auto Filling from Drum |
| 6. Filters | |

ลำดับกระบวนการผลิตแบบ RIM แบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอน ดังรูปที่ 2.4 โดยมีรายละเอียดด้านล่าง ซึ่งขั้นตอนที่ 1 ถึง 4 จัดเป็นกระบวนการหลัก (Primary Process) เกิดขึ้นในเครื่อง RIM ส่วนขั้นตอนที่ 5 และ 6 เป็นกระบวนการรอง (Secondary Process) ที่ต้องใช้แรงงานคนในการปฏิบัติ

- 1) บรรจุสารตั้งต้น A (Part A) และสารตั้งต้น B (Part B) ลงใน Tank
- 2) ควบคุมความดันของสารตั้งต้น A และ B ในหัวผสม เพื่อให้มีอัตราการไหลอย่างเพียงพอ โดยทำให้เกิดการผสมที่อัตราส่วนที่เหมาะสม สำหรับกระบวนการพอลิเมอร์ไรซ์เซชัน (Polymerization)
- 3) ขั้นตอนการผสม (Mix) โดยฉีดสารตั้งต้น A และ B ที่ผสมกันแล้วให้ไหลเต็ม (Fill) ในแม่พิมพ์
- 4) การแข็งตัว (Cure) เป็นช่วงเวลาที่สารทั้งสองเปลี่ยนสภาพกลายเป็นของแข็งประมาณ 12-15 นาที

5) การนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ (De-Mold)

6) การตัดแต่ง การทำความสะอาด การขัดแต่งผิว (Finishing)



รูปที่ 2.5 กระบวนการผลิตแบบ RIM

2.4.1 ข้อดีของกระบวนการ RIM [3]

- (1) สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้รวดเร็ว สามารถใช้ได้กับชิ้นงานขนาดใหญ่ และมีความซับซ้อนสูง หรือ ชิ้นงานที่มีการสอดใส่โลหะ
- (2) เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ใช้ความดันในการฉีดตัว ดังนั้น แม่พิมพ์ที่ใช้จึงมีน้ำหนักเบา และราคาถูกกว่า เมื่อเทียบกับวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์ชนิดเดียวกันในกระบวนการฉีดแบบอื่นๆ ราคาของแม่พิมพ์จะขึ้นอยู่กับความต้องการความทนทาน หรือ จำนวนที่ต้องการผลิต
- (3) การขยายตัวของก๊าซในแม่พิมพ์น้อย ค่าใช้จ่ายในการ Clamping จึงน้อยลงด้วย
- (4) การหดตัวของชิ้นงานที่ได้จากการฉีดน้อย
- (5) ทนทานต่อการกัด ความร้อน และสภาวะอากาศ
- (6) ค่าใช้จ่ายในการผลิตต่ำ เมื่อผลิตในจำนวนที่ไม่มาก

2.4.2 ข้อด้อยของกระบวนการ RIM

- (1) ความหนืดสูงทำให้เกิดปัญหาในขณะฉีดได้
- (2) การปลดชิ้นงานมีความยากลำบากเนื่องจากเป็นวัสดุเหลวที่มีความหนืดต่ำ จึงมีการแทรกซึมลงบนผิวแม่พิมพ์ได้ง่าย โดยเฉพาะพอลิยูรีเทนจะติดแน่นได้ดีกับผิวโลหะ
- (3) การแข็งตัวของชิ้นงานขนาดใหญ่ช้า ดังนั้นในกรณีที่ต้องการอัตราการผลิตสูงจึงต้องใช้แม่พิมพ์หลายชุด
- (4) สารเคมีที่ใช้ผลิตมีราคาค่อนข้างสูง
- (5) สารเคมีที่ใช้เป็นสารพิษ (Toxic) อาจเป็นอันตรายต่อผู้ใช้ และสิ่งแวดล้อม
- (6) พอลิยูรีเทนไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ จึงสิ้นเปลืองวัสดุที่เสียในระหว่างการผลิต
- (7) ระยะเวลาในการผลิตชิ้นงานนานเนื่องจากการตกแต่ง และทำสีหลังจากการฉีด
- (8) ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานสูง เนื่องจากมีหลายขั้นตอน และต้องใช้แรงงานคนจำนวนมากในการทำงานในขั้นตอนต่างๆ

2.5 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature Review)

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาค้นคว้าข้อมูลการผลิตพอลิยูรีเทนโฟมของบริษัทไทยโอโซนอล จำกัด ที่ผู้วิจัยได้ทำงานอยู่ และมีผลการศึกษาดังกล่าวต่อไปนี้

2.5.1 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชลิต อรรถคำภีวงศ์ [3] ค้นคว้าหาวิธีการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการ RIM การเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์พอลิยูรีเทนโดยใช้การวิเคราะห์การไหลของการฉีดแบบทำปฏิกิริยา ใช้ชิ้นงานฝาครอบประดับกรอบไฟท้าย (Decorative-Tail-Lamp Cover: DTLC) ของรถกระบะ Isuzu รุ่น D-Max ในการศึกษา ออกแบบโดยคอมพิวเตอร์ช่วยการออกแบบ (Computer-Aided Design: CAD) การออกแบบฝาครอบประดับกรอบไฟท้ายและแม่พิมพ์ และได้ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรม (Computer-Aided Engineering : CAE) จำลองการกระแทกโดยใช้หลักการไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite-Element Analysis : FEA) การออกแบบแม่พิมพ์ได้ใช้คอมพิวเตอร์จำลองการไหลของพอลิยูรีเทนในแม่พิมพ์ และใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบแม่พิมพ์และได้ผลิตเป็นชิ้นงานที่สามารถใช้งานได้จริง

พงษ์ประภาส ปิยมโนชา และสุรัตน์ อาริรัตน์ [1] ทำนายการขยายตัวของฟองก๊าซในพอลิยูรีเทนโฟม ด้วยการใช้สมการทางคณิตศาสตร์ สมการที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถอธิบายลักษณะการขยายขนาดของฟองก๊าซทรงกลมในของเหลวปริมาตรจำกัด อาศัยข้อมูลจากลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิยูรีเทนโฟม ที่ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ต่างๆ กันตั้งแต่ 7-77 องศาเซลเซียส ทำให้สามารถสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายขนาดของฟองก๊าซและขนาดของเซลล์ที่เป็นผลจากอุณหภูมิได้

อนุวัติ แซ่ตั้ง และอดิศักดิ์ รุ่งวิชานวัฒน์ [6] ศึกษาอิทธิพลของปริมาณไอโซไซยานตออิสรระในตัวประสานยูรีเทน ต่อสมบัติของโฟมอัดที่เตรียมจากเศษโฟม ลักษณะของโฟมอัดที่ได้จากการทดลองเมื่อใช้ปริมาณไอโซไซยานตออิสรระในตัวประสานพอลิยูรีเทนตั้งแต่ 4-16% จะให้โฟมอัดที่สมบูรณ์สามารถยึดติดกันเป็นรูปทรงได้ดีในทุกๆ ระดับของระยะอัด การเพิ่มปริมาณของไอโซไซยานตออิสรระในตัวประสานพอลิยูรีเทนและการเพิ่มระดับของระยะอัด จะส่งผลให้ความแข็งแรงของโฟมอัดเพิ่มขึ้น แต่สมบัติด้านความสามารถในการคืนรูป และความกระด้างตัวจะลดลง

ชวยากรณ์ เพ็ชฌุไพศิษฐ์ [7] ศึกษาวัฏกรรมใหม่ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมของน้ำมันธรรมชาติดัดแปลงพอลิเอสเตอร์ สำหรับการเตรียมพอลิยูรีเทนชีวภาพ การเตรียมน้ำมันพอลิเอสเตอร์โดยการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันนกกกระจอกเทศ และน้ำมันทั้งจากอุตสาหกรรมอาหาร จากนั้นจึงทำปฏิกิริยาการเปิดวงออกซิเรนโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ได้น้ำมันถั่วเหลืองพอลิเอสเตอร์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลแบบ 1,2-ไดโอลลน้ำมันพอลิเอสเตอร์ที่เตรียมได้มีทั้งชนิด 1° ไฮดรอกซิล 2° ไฮดรอกซิล และ 1,2-ไดโอลล ซึ่งเมื่อพิจารณาความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยากับไดไอ

โซโซยานเนตในการเตรียมพอลิยูรีเทน พบว่าน้ำมันพอลิโออลชนิด 1^o ไฮดรอกซิล มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าน้ำมันพอลิโออลชนิด 2^o ไฮดรอกซิล และ 1,2-ไดออล

วิรงรอง ศรีโง๊ะ [8] ศึกษาผลของสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อสมบัติเชิงกลของพอลิยูรีเทนโฟมแบบยืดหยุ่น ซึ่งมีการเติมสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 1 ไมโครเมตร ปริมาณร้อยละ 0, 3, 5, 7 และ 10 โดยน้ำหนักของพอลิโออล เมื่อนำโฟมที่ได้ไปวิเคราะห์โดยใช้เครื่องฟูรีเออร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ เพื่อตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของพอลิยูรีเทนโฟม จะพบว่าตำแหน่งพิกัดขึ้นที่ความถี่เดียวกัน โดยมีหมู่ฟังก์ชันอีเธอร์เพิ่มขึ้น แต่หมู่ฟังก์ชัน ยูรีเทนลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต โดยโครงสร้างของพอลิยูรีเทนโฟมแบบยืดหยุ่นเมื่อใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด จะสังเกตเห็นว่าเมื่อเพิ่มสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตลักษณะของเซลล์จะเปิดเหมือนกันทุกดัชนีการหักเหโฟม นอกจากนี้เมื่อนำพอลิยูรีเทนคอมโพสิต ไปทดสอบคุณสมบัติจะพบว่า ค่าความแข็งและความหนืดของพอลิโออลที่ผสมกับสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าสูงขึ้น แต่คุณสมบัติการดึงยืดและการกระดอนกลับของพอลิยูรีเทนมีค่าลดลง เนื่องจากพอลิยูรีเทนที่มีดัชนีการหักเหโฟมสูงขึ้น จะมีการสร้างพันธะเพิ่มขึ้นอีกทั้งยังมีผลจากการเติมสารตัวเติม จึงทำให้พอลิยูรีเทนมีคุณสมบัติความแข็งแรงและความแข็งเพิ่มขึ้น แต่คุณสมบัติการดึงยืดและการกระดอนกลับลดลง

ปัญญิ มาศไค้ง และคณะ [9] ศึกษาการเตรียมคอมโพสิตของพอลิยูรีเทนโฟมผสมเส้นใยปอจากธรรมชาติที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยด้วยวิธีทางเคมี โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และการปรับปรุงสมบัติด้วยวิธีทางกายภาพโดยการแช่เส้นใยปอในสารละลายเอทิลีนไกลคอลและสารละลายโพรพิลีนไกลคอล เพื่อปรับปรุงสมบัติการเปียกและการยึดเกาะระหว่างเส้นใยปอกับคอมโพสิตโฟม โดยทำการเตรียมคอมโพสิตโฟมที่ผสมเส้นใยปอในช่วง 0 ถึง 15 phr. กับพอลิยูรีเทนโฟมที่เตรียมจากการผสมพอลิโออลทำปฏิกิริยากับไดฟีนิลมีเทนไดไอโซไซยานเนต ขึ้นรูปในแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 60°C จากนั้นนำตัวอย่างคอมโพสิตโฟมไปทดสอบความต้านทานแรงดึงและศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าการปรับปรุงผิวของเส้นใยปอด้วยวิธีทางเคมีและวิธีทางกายภาพมีลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่บริเวณอินเตอร์เฟซแตกต่างกัน การปรับปรุงสมบัติของเส้นใยปอทั้งสองวิธีสามารถช่วยเพิ่มการยึดเกาะระหว่างเส้นใยปอกับพอลิยูรีเทนเมทริกซ์ได้ดีขึ้น และจากผลการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึงของพบว่าคอมโพสิตโฟมที่ผสมเส้นใยปอที่ปรับปรุงพื้นผิวสัมผัสให้เปียกด้วยเอทิลีนไกลคอล มีค่ามอดูลัสดัดงอต่อความหนาแน่นของโฟมดีมากมีค่าเท่ากับ 1,530 MPa cm³/g ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นตัวอย่างคอมโพสิตโฟมที่เสียสภาพหลังจากผ่านการทดสอบสมบัติมอดูลัสดัดงอ โดยพบว่าเส้นใยปอยึดเกาะกับพอลิยูรีเทนเมทริกซ์ได้ดี

ฐิติมา ตะสุวรรณ [10] ศึกษาผลกระทบขององค์ประกอบในพอลิออลเรซิน เช่น อัตราส่วนระหว่าง Base Polyols และ Co-Polymer Polyols ปริมาณ Cross Linker, Surfactant, Blowing Catalyst, Gelling Catalyst, Blowing Agent ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้จะส่งผลต่อคุณสมบัติของพอลิยูรีเทน เช่น Cream Time, Set Time, End of Rise และความหนาแน่นของโฟม ซึ่งค่าเหล่านี้มีบทบาทที่สำคัญกับคุณสมบัติของพอลิยูรีเทนโฟมได้ โดยจากการทดลองพบว่าปริมาณของ Base Polyols และ Cross Linker Agent ทำให้ค่า Cream Time, Set Time และ End of Rise มีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ ซึ่งตรงข้ามกับ Co-Polymer Polyols, Gelling Catalyst, Blowing Catalyst และ Blowing Agent แต่ Surfactant ส่งผลกับ Rise Time ของปฏิกิริยาเพียงอย่างเดียว โดยผลการผลิตพอลิยูรีเทนโฟมให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับตัวอย่าง ได้ค่าปฏิกิริยาดังนี้คือ Cream Time 13 วินาที Set Time 46 วินาที และ End of Rise 64 วินาที ซึ่งในพอลิออลเรซิน มีส่วนประกอบดังนี้คือ อัตราส่วนระหว่าง Base Polyols : Co-Polymer Polyols 70 : 30 โดยน้ำหนัก Cross Link Agent B 1g, Surfactant B 1g, Blowing Catalyst 0.1g, Gelling Catalyst A 0.56 g, Gelling Catalyst B 0.2 g, Blowing Agent 4 g. โดยสัดส่วนการผลิตพอลิยูรีเทนจะใช้สัดส่วนผสมของพอลิออลเรซิน 100 g : ไอโซไซยาเนต 81.38 g.

ณรงค์ จิตตปัญญาพงศ์ และคณะ [4] ศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยพื้นฐานและการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับกระบวนการฉีดขึ้นรูปพอลิยูรีเทนโฟม ในการทดลองได้ทำการฉีดพอลิยูรีเทนโฟมลงในแม่พิมพ์โปร่งใส่ที่ทำการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิพื้นผิวในช่วง 30, 55 และ 80 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ศึกษาลักษณะการไหลและการเกิดโฟมในแม่พิมพ์ (Flow Visualizations) จากนั้นทำการวัดค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์โฟมที่ได้รวมทั้งศึกษาลักษณะโครงสร้างภายในของเนื้อโฟมโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy : SEM) จากผลการศึกษาลักษณะการไหลและการเกิดโฟมในแม่พิมพ์โปร่งใส่พร้อมทั้งผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการฉีดพอลิยูรีเทนโฟม คณะผู้วิจัยสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาและระยะทางการไหลของโฟมในแม่พิมพ์ ซึ่งนำไปสู่การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เบื้องต้นที่สามารถใช้ทำนายคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์โฟมได้

ปริญวัฒน์ รักสวย และคณะ [5] ศึกษาปัจจัยพื้นฐานที่มีผลต่อการฉีดขึ้นรูปพอลิยูรีเทนโฟม ทดลองฉีดพอลิยูรีเทนโฟมลงในแม่พิมพ์ทรงกระบอก เพื่อใช้ศึกษาลักษณะการเกิดโฟมในแม่พิมพ์ จากนั้นทำการวัดค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์โฟมที่ได้ รวมทั้งศึกษาลักษณะโครงสร้างภายในของเนื้อโฟม โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy : SEM) จากผลการทดลองสามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ระหว่างกระบวนการฉีดพอลิยูรีเทนโฟม และจากการปรับเปลี่ยนช่วงอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นภายในท่อแม่พิมพ์ตั้งแต่ 10-80 องศา

เซลเซียส พบว่าพอลิยูรีเทนโฟมที่เตรียมได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 130-170 μm . และ 220-230 μm . สำหรับผิวด้านในและด้านนอกตามลำดับ โดยความหนาแน่นของพอลิยูรีเทนโฟมมีค่าประมาณ 0.360-0.400 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร พบว่าอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นมีผลต่อความหนาของผนังเซลล์โดยช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 30 องศาเซลเซียส ให้ความหนาของผนังเซลล์สูงสุดประมาณ 13.6 μm .

นิธิพงษ์ โชติวิทยพร [11] ศึกษาการปรับเปลี่ยนสารเปิดเซลล์ในสูตรโฟมพอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่น ที่ใช้ผลิตเบาะรถยนต์และเฟอร์นิเจอร์ หน้าที่ของสารเปิดเซลล์คือเพิ่มโครงสร้างเซลล์เปิดในโฟมพอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่น เพื่อป้องกันการหดตัวและการเสียรูปของโฟมภายหลังการเกิดปฏิกิริยาเสร็จสมบูรณ์ ปัจจุบันสารเคมีที่นิยมใช้เป็นสารเปิดเซลล์เชิงอุตสาหกรรม คือ พอลิอีเทอร์พอลิออลที่ประกอบด้วยเอทิลีนออกไซด์ในปริมาณสูง ซึ่งมีข้อด้อย คือ ราคาสูงและการแยกชั้นเนื่องจากความไม่เข้ากันและความเข้ากันได้ระหว่างเอทิลีนออกไซด์และน้ำ ซึ่งสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำ ส่งผลให้เกิดการแยกชั้นออกจากพอลิออลที่ใช้ในสูตรพอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่นในระหว่างการจัดเก็บก่อนนำไปใช้งาน ในงานวิจัยนี้ ใช้พอลิโพรพิลีนออกไซด์พอลิออลเป็นสารเปิดเซลล์ชนิดใหม่ในสูตรโฟมพอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่น ซึ่งจุดเด่นของพอลิโพรพิลีนออกไซด์พอลิออล คือ ราคาถูกและมีความเข้ากันได้ ศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิยูรีเทนโฟมชนิดยืดหยุ่นที่เตรียมได้จากการใช้พอลิโพรพิลีนออกไซด์พอลิออล คือ ความแข็ง ความสามารถในการดัดยัด ความทนทานต่อการดัดยัด และความทนทานต่อการฉีกขาดเปรียบเทียบกับพอลิยูรีเทนโฟมชนิดยืดหยุ่นที่เตรียมได้จากการใช้สารเปิดเซลล์เชิงอุตสาหกรรม จากผลการวิจัยพบว่า พอลิยูรีเทนโฟมชนิดยืดหยุ่นทั้ง 2 สูตรที่ใช้สำหรับเบาะรถยนต์และเฟอร์นิเจอร์ที่เตรียมได้จากการใช้พอลิโพรพิลีนออกไซด์พอลิออล ให้สมบัติเชิงกลที่ดี ในส่วนของปริมาณโครงสร้างเซลล์เปิด พบว่าในโฟมพอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่นในสูตรสำหรับเบาะรถยนต์ที่เตรียมได้จากการใช้พอลิโพรพิลีนออกไซด์พอลิออลมีปริมาณของเซลล์เปิดที่เทียบเท่ากับการใช้สารเปิดเซลล์เชิงอุตสาหกรรม ในขณะที่โฟมพอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่นในสูตรสำหรับเฟอร์นิเจอร์ที่เตรียมได้จากการใช้พอลิโพรพิลีนออกไซด์พอลิออล มีปริมาณเซลล์เปิดที่น้อยกว่าการใช้สารเปิดเซลล์เชิงอุตสาหกรรม

Ganiyu K. et al. [12] ศึกษาขนาดของอนุภาคสารแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกลของพอลิยูรีเทนโฟมแบบยืดหยุ่น โดยเปรียบเทียบขนาดของอนุภาค 6 ขนาด คือ 0.06, 0.5, 3.5, 10, 20 และ 841 ไมโครเมตร ปริมาณความแตกต่างที่เดิม 0-40% โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบสมบัติทางกลทั้ง 6 ขนาดของอนุภาค ซึ่งมีผลต่อการดัดยัดออกและแรงดึง อนุภาคที่ละเอียด (0.06, 0.5, 3.5 μm .) จะเพิ่มคุณลักษณะความแข็งแรงของพอลิยูรีเทนโฟมจนถึงปริมาณ 35%wt. ในขณะที่อนุภาคหยาบ (10, 20, 841 μm .) จะไม่แสดงคุณลักษณะความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นอย่าง

เด่นชัดเท่าอนุภาคละเอียด และศึกษาลักษณะโครงสร้างภายในของเนื้อโฟม โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy : SEM) พบว่าการเพิ่มแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณมากจะมีผลกระทบต่อโครงสร้างของโฟมและเซลล์โฟม

Chan Wen Shan. et al. [13] ใช้อนุภาครอยนดและเส้นใยเปลือกมะพร้าวเป็นฟิลเลอร์เสริมแรงในพอลิยูรีเทนโฟมชนิดยืดหยุ่นในการพัฒนาและวิเคราะห์ตรวจสอบโดยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM), XRF, TGA. สามารถแสดงให้เห็นว่าอนุภาครอยนดและเส้นใยเปลือกมะพร้าวมีความเหมาะสมในการใช้เป็นฟิลเลอร์และสลายตัวที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสสำหรับเส้นใยมะพร้าวและ 350 องศาเซลเซียส สำหรับอนุภาครอยนดการเพิ่มอนุภาครอยนดและเส้นใยมะพร้าวทำให้ความหนืดเพิ่ม และจะมีผลกระทบด้านลบต่อโครงสร้างของโฟมและเซลล์โฟม อย่างไรก็ตามลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเซลล์โฟมที่ได้มีขนาดเล็กและมีความหนาแน่นสูง

Usman. et al. [14] มีจุดหมายเพื่อหาปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่เหมาะสมในการเพิ่มเติมเข้าไปในสูตรของพอลิยูรีเทนโฟม โดยยังคงคุณสมบัติทางเคมีของเซลล์โฟมและคุณลักษณะที่ดีทางกลไว้ เช่น ค่าแรงดึง (Tensile Strength) และค่าการดัดยัด (Elastic) ของโฟมเพื่อลดต้นทุนในการผลิตพอลิยูรีเทนโฟม จากการศึกษาพบว่าปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่เหมาะสมในสูตรนี้คือ 20%wt.

2.5.2 สรุปเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตารางที่ 2.5 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ลำดับ	ชื่อผู้วิจัย/ปีที่พิมพ์	วัตถุประสงค์งานวิจัย	ผลการวิจัย
1	พงษ์ประภาส ปิยมโนชา และสุรัตน์ อารีรัตน์ [1]	ประยุกต์ใช้สมการทางคณิตศาสตร์ทำนายกระบวนการเกิดโฟมทางกายภาพและทางเคมีโดยวิเคราะห์จากผลกระทบของตัวแปรที่มีผลต่อการขึ้นรูปโฟม	อาศัยข้อมูลจากลักษณะทางสัณฐานวิทยา ของพอลิยูรีเทนโฟม ที่ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ต่างๆ กันตั้งแต่ 7-77°C และสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายขนาดของฟองก๊าซและขนาดของเซลล์ที่เป็นผลจากอุณหภูมิได้

ตารางที่ 2.5 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ลำดับ	ชื่อผู้วิจัย/ปีที่พิมพ์	วัตถุประสงค์งานวิจัย	ผลการวิจัย
2	ณรงค์ จิตตปัญญาพงศ์ และคณะ [4]	ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของพอลิยูรีเทนโฟมเน้นปัจจัยพื้นฐานที่มีผลกระทบต่ออัตราการขยายตัวของโฟม ลักษณะการไหลในแม่พิมพ์ ลักษณะสัณฐานวิทยาของโฟม	อัตราการขยายตัวของฟองก๊าซและความหนาแน่นของเนื้อโฟม ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ พบว่าอุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ที่ 55°C เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมกับสถานะการฉีดพอลิยูรีเทนโฟม
3	ปรียวัฒน์ รักสวย และคณะ [5]	ศึกษาปัจจัยพื้นฐานที่มีผลต่อความแข็งแรงของผิวโฟมโดยทำการฉีดพอลิยูรีเทนโฟมลงในแม่พิมพ์ทรงกระบอก และปรับอุณหภูมิแม่พิมพ์ในระหว่างกระบวนการฉีดพอลิยูรีเทนโฟม กำหนดอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นภายในท่อแม่พิมพ์ตั้งแต่ 10-80 องศาเซลเซียส	ความหนาของผนังเซลล์ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของน้ำหล่อแม่พิมพ์ โดยที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ทำให้ได้ความหนาของผนังเซลล์มากที่สุด และมีความหนาแน่นของโฟมด้านในเท่ากับ 0.3838 กรัมต่อ ลบ.ซม. ส่วนด้านนอก 0.336 กรัมต่อ ลบ.ซม.
4	วิรงรอง ศรีโง๊ะ [8]	ศึกษาผลของสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อสมบัติเชิงกลของพอลิยูรีเทนโฟมแบบยืดหยุ่นขนาดอนุภาค 1 ไมโครเมตร ปริมาณร้อยละ 0, 3, 5, 7 และ 10 โดยน้ำหนักของพอลิออล	ค่าความแข็งและความเหนียวของพอลิออลที่ผสมกับสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าสูงขึ้นแต่คุณสมบัติการดึงยืดและการคืนรูปกลับของพอลิยูรีเทนมีค่าลดลง

ตารางที่ 2.5 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ลำดับ	ชื่อผู้วิจัย/ปีที่พิมพ์	วัตถุประสงค์งานวิจัย	ผลการวิจัย
5	Ganiyu K. Latinwo et al. [12]	ศึกษาขนาดของอนุภาค แคลเซียมคาร์บอเนตที่มีผลต่อ คุณสมบัติทางกลของ พอลิยูรีเทนโฟมแบบยืดหยุ่น ขนาดของอนุภาค 6 ขนาด คือ 0.06, 0.5, 3.5, 10, 20, 841 ไมโครเมตร ปริมาณความ แตกต่างที่เติม 0-40% โดย น้ำหนัก	อนุภาคที่ละเอียด (0.06, 0.5, 3.5 μm) จะเพิ่มคุณลักษณะ ความแข็งแรงของพอลิยูรีเทนโฟม จนถึงปริมาณ 35%wt. ในขณะที่ ที่อนุภาคหยาบ (10, 20, 841 μm .) จะไม่แสดงคุณลักษณะ ความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัด เท่าอนุภาคละเอียด และจาก การศึกษาลักษณะโครงสร้าง ภายในของโฟม พบว่า การเพิ่ม CaCO_3 ในปริมาณมากจะมี ผลกระทบที่เสียต่อโครงสร้าง ของโฟมและเซลล์โฟม

จากการศึกษาข้อมูลที่ได้ของเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า มีอุณหภูมิที่ใช้ในการปรับเปลี่ยนพื้นผิวแม่พิมพ์ในการฉีดพอลิยูรีเทนโฟมอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 7-80 องศาเซลเซียส ถ้าอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่สูงมากเกินไป ปริมาตรสุดท้ายของโฟมจะขยายตัวมากขึ้น ซึ่งมีผลต่อขนาดของฟองก๊าซที่เกิดขึ้นและความหนาแน่นของโฟม ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 20-60 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ผู้วิจัยสามารถกำหนดได้ในการทดลอง

สำหรับปัจจัยในด้านสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) จากการศึกษาพบว่า มีปริมาณที่เติม 0-40%wt ขนาดอนุภาคที่ใช้มีความหลากหลายทั้งชนิดละเอียดและชนิดหยาบ (1-841 ไมโครเมตร) โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้ขนาดอนุภาค 7 ไมโครเมตร

ส่วนปัจจัยด้านระยะเวลาในการเก็บพอลิออลเรซิน (Part A) จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า ยังไม่มีงานวิจัยใดที่ศึกษาถึงคุณสมบัติของระยะเวลาในการเก็บพอลิออลเรซิน (Part A) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกศึกษาระยะเวลาในการเก็บพอลิออลเรซิน (Part A) เพื่อศึกษาผลกระทบในด้านของเวลาในการเก็บรักษาต่อผิวพอลิยูรีเทนโฟมในกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบทำปฏิกิริยา (Reaction Injection Molding : RIM)

บทที่ 3

ระเบียบวิธีการวิจัย

บทนี้กล่าวถึงระเบียบการทำวิจัยเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ ตามขอบเขตการวิจัย โดยเริ่มจากการวิเคราะห์ข้อมูลข้อบกพร่อง (Defect) ของผลิตภัณฑ์เพื่อนำไปสู่การกำหนดโจทย์ปัญหา การวางแผนการวิจัยการออกแบบการทดลอง ขั้นตอนและวิธีการทดลอง วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.1 การกำหนดโจทย์ปัญหาจากกระบวนการผลิต

การกำหนดโจทย์ปัญหาวิจัยเพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น (Defect) กับผลิตภัณฑ์โฟลียูรีเทนโฟม (PU Foam) เริ่มจากการวิเคราะห์กระบวนการผลิต เพื่อให้ทราบว่าปัจจัยใดหรือสารตั้งต้นใดที่อาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้บ้าง จากการเก็บข้อมูลการผลิตช่วงเดือน กุมภาพันธ์ ถึง สิงหาคม พ.ศ. 2556 แสดงผลสรุปเบื้องต้นได้ดังตารางที่ 3.1 ซึ่งเมื่อพิจารณาคุณภาพผลิตภัณฑ์จากหลายเงื่อนไข อาทิ Cream Time การเติม Close Cell ปริมาณร้อยละเปอร์เซ็นต์ โฟม การเพิ่มสารตัวเติม แคลเซียมคาร์บอเนต ระยะเวลาการเก็บรักษาพอลิออลเรซิน สามารถตั้งข้อสมมุติฐานเบื้องต้นได้ว่า

1. เมื่อผลิตภัณฑ์เกิดโพรงอากาศ (Bulk Defect) ได้แก้ไขโดยยึดค่า Cream Time (CT) จาก 25-30 วินาทีเป็น 30-35 วินาที พบว่าปัญหาหายไปช่วงระยะเวลาหนึ่ง จนถึงการเกิดปัญหารอบใหม่การยึดค่า Cream Time (CT) แก้ไขปัญหาไม่ได้ จนเมื่อเติม Close Cell ไม่พบปัญหาอีก จึงตั้งข้อสมมุติฐานว่า Close cell มีผลกระทบต่อการเกิดข้อบกพร่อง (Defect)

2. หากค่า Cream Time ช่วง 26-30 วินาที พบว่าไม่มีผลต่อการเกิดโพรงหรือผิวยุบยิบ แต่ถ้า Cream Time ช้าอาจก่อให้เกิดผิวยุบยิบได้จึงตั้งสมมุติฐานว่า อัตราความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาน่าจะมีผลต่อการเกิดปัญหาดังกล่าว

3. จากการผลิตสารตั้งต้นเก็บไว้แล้วนำไปใช้ในหลายครั้งพบว่ามีปัญหา (Defect) ที่ผิวหน้าผลิตภัณฑ์กล่าวคือมีหลุมโพรงอากาศเกิดขึ้นทั้งแบบผิวเปิดและผิวปิด ผิวหน้าผลิตภัณฑ์ลอยนํ้า ผิวยุบยิบอยู่เป็นครั้งคราวอาจเนื่องจากสารตั้งต้นพอลิออลเรซินถูกเก็บไว้หลายวันก่อนใช้ หรือใช้ไปจนเหลือจนถึงทำให้ผลิตภัณฑ์มักจะเกิด Defect นอกจากนี้พบว่าผลิตภัณฑ์มีปัญหาจากการที่มีโฟมเพิ่มขึ้น และบ่อยครั้งที่มีการโอนสารนี้ไปใช้ผลิตหน้า B ของผลิตภัณฑ์ จากที่บันทึกไว้ทั้งหมดมีการผลิต 9 ครั้งที่ได้เติม Close Cell 0.04% และปริมาณโฟมในช่วงไม่เกิน 85%-90% แล้วลูกค้าใช้ได้โดยไม่มีปัญหาในการเกิด Defect จึงตั้งสมมุติฐานได้ว่าระยะเวลาการเก็บและร้อยละของ Foam มีผลต่อการเกิดปัญหาดังกล่าว

4. จากการเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตมีการผลิตแล้วนำไปทดสอบหลายครั้งพบปัญหาข้อบกพร่องของผลิตภัณฑ์จึงตั้งสมมุติฐานว่าปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตน่าจะมีผลต่อการเกิดปัญหา แต่กระบวนการผลิตของลูกค้าไม่เคยมีการบันทึกสภาวะการฉีดขึ้นรูปในกระบวนการ RIM อาทิ อุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ อุณหภูมิและความชื้นของสภาวะแวดล้อม ฯลฯ อย่างไรก็ตามจากการค้นคว้าเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าตัวแปรเหล่านี้จะมีความสำคัญต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์พอลิยูรีเทนโฟมในกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบทำปฏิกิริยา เพราะแม้จะควบคุมเงื่อนไขอื่นๆ ให้อย่างดี แต่ก็ยังพบปัญหาการเกิด Defect อยู่บ่อยครั้ง จึงคาดว่าน่าจะมาจากเงื่อนไขจากกระบวนการผลิตพอลิยูรีเทนโฟมและคุณภาพของพอลิอีเธเรซิน

จากการวิเคราะห์ปัญหาข้างต้น นำมาซึ่งแนวทางการวิจัยเพื่อแก้ปัญหา Defect โดยกำหนดตัวแปรต้นและตัวแปรควบคุม ได้แก่

1. ศึกษาผลของการเติม Calcium Carbonate : CaCO_3 ว่าจะสามารถช่วยลดหรือเพิ่มการเกิด Defect ได้จริงหรือไม่
2. ศึกษาระยะเวลาการเก็บพอลิอีเธเรซิน ดูผลจากการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์โฟมในถังเก็บว่าก่อให้เกิด Defect กับผลิตภัณฑ์หรือไม่
3. ศึกษาผลของอุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ มีผลต่อการดำเนินไปของปฏิกิริยาอย่างไรในกระบวนการฉีดขึ้นรูปพอลิยูรีเทนโฟมและนำมาซึ่ง Defect หรือไม่

จากปัญหาดังกล่าวข้างต้นสามารถจัดเป็นหมวดหมู่หรือกลุ่ม โดยอ้างอิงกับจำนวนครั้งการเปลี่ยนสินค้าซึ่งหมายความว่าลูกค้านำสารตั้งต้นจากบริษัทไปผลิตแล้วเกิดปัญหา Defect ขึ้น จากนั้นสร้างเป็นกราฟแท่ง หรือ แผนภูมิพาเรโต เพื่อเรียงลำดับความถี่ของการเกิดปัญหา แต่ละกลุ่มแสดงให้เห็นความสำคัญของปัญหาจากมากไปหาน้อย และจะเห็นว่าแต่ละปัญหามีร้อยละเป็นเท่าใดเมื่อเทียบกับปัญหาทั้งหมด โดยกราฟแท่งที่สูงที่สุดคือปัญหาที่เกิดขึ้นร่วมกันมากที่สุดที่จำเป็นต้องเร่งแก้ไขดังรูปที่ 3.1

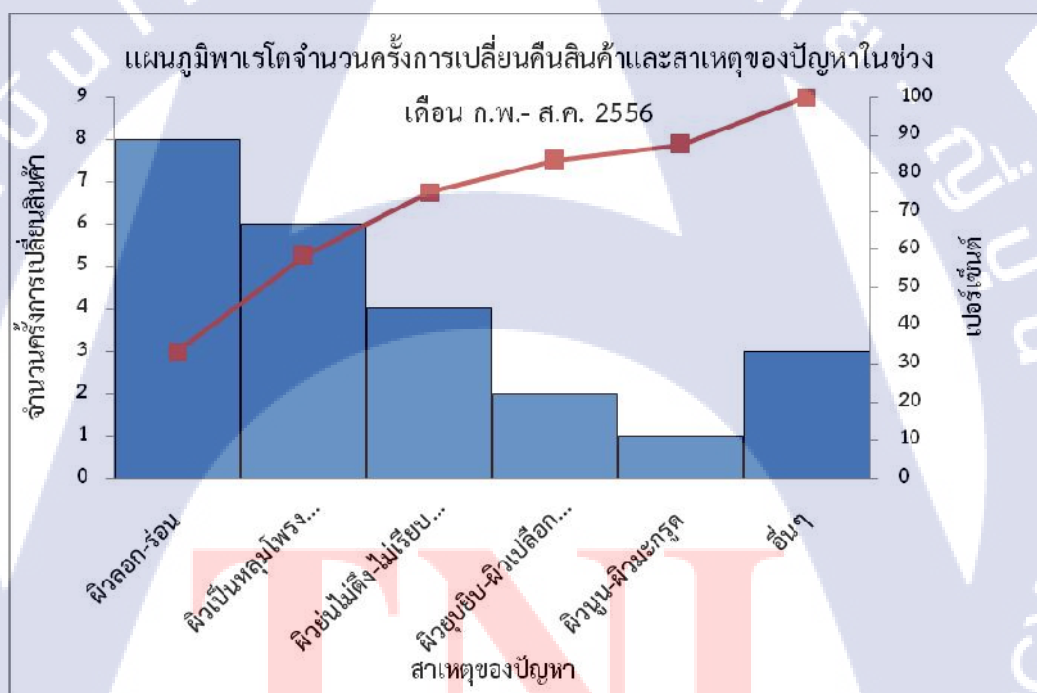
3.2 ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นเพื่อแก้ปัญหา ศึกษา และพัฒนาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมการผลิตพอลิยูรีเทนโฟมแบบยืดหยุ่น (Polyurethane Flexible Foam; PU Foam) สำหรับการผลิตไส้กรองอากาศรถยนต์ ที่จะลดปัญหาการเกิดข้อบกพร่องที่เกิดจากผิวหน้าพอลิยูรีเทนโฟมลอก ผิวยุบ ยุบยิบไม่เรียบมัน ดังรูปที่ 3.2-3.5 หรือเกิดมีฟองอากาศที่ผิวหน้าโฟมขนาดใหญ่ทั้งแบบผิวเปิดและผิวปิดในกระบวนการผลิตไส้กรองอากาศรถยนต์ ข้อบกพร่องดังกล่าวอาจเกิดได้จากหลากหลายสาเหตุ และสามารถสรุปได้ในแผนภูมิกระดูกปลา (Fish Bone Diagram) ที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัญหา (Problem) กับสาเหตุที่เป็นไปได้ที่อาจก่อให้เกิดปัญหานั้นดังรูปที่ 3.6

จากปัญหาหลักดังแสดงในรูปที่ 3.1 ปัญหาที่มีความถี่การเกิดมากที่สุด คือ ผิวลอกและ ร่อนผิวเป็นหลุมโพรงอากาศ และผิวยังไม่ตึง ไม่เรียบมัน ตามลำดับ แสดงว่าสาเหตุควรจะเกิดจาก กระบวนการผลิตโดย RIM และคุณภาพของพอลิออลเรซินซึ่งเป็นสารตั้งต้นของ PU Foam อย่าง ชัดเจน ดังนั้นการดำเนินงานวิจัยนี้มุ่งเน้นแก้ปัญหาและพัฒนาคุณภาพของพอลิยูรีเทนโฟม

กระบวนการทำงานแบ่งออกเป็น 2 ส่วน

1. ส่วนแรกเริ่มจากแบ่งน้ำยาจากกระบวนการผลิตในโรงงาน จากนั้นทดสอบคุณสมบัติ ทางกายภาพและทางเคมีของน้ำยาในห้องปฏิบัติการ
2. ส่วนที่สองทดสอบการขึ้นรูปชิ้นงาน (Prototype Production) ด้วยเครื่องฉีดแบบทำ ปฏิกริยา (Reaction Injection Molding Machine : RIM) นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปวิเคราะห์และสรุปผล การทดลองต่อไป



รูปที่ 3.1 แผนภูมิพาร์โตแจกแจงความถี่ของการเกิดปัญหา

ตารางที่ 3.1 บันทึกเหตุการณ์การเก็บข้อมูลการผลิตช่วงเดือน ก.พ.-ส.ค. 2556

Date	Batch No.	จำนวน ผลิต (กก.)	Action	Cream Time (วินาที)	%Foam	Appearance หน้า A
12/2/ 2013	130211	300	เติมตัวเร่งปฏิกิริยา 700 กรัมใน สารตั้งต้น 300 กก.ทิ้งข้ามวัน	33	85	ผิวลอก แต่ไม่เป็นหลุม โพรงอากาศ
16/2/ 2013	130216	40	เพิ่มแคลเซียมคาร์บอเนตเป็น 34% ไม่ได้เติม Close Cell Viscosity 1,610 mPa.s นำไป ทดสอบทันที	33	95	อัตราส่วน 6:1 ไม่ดี ผิว ลอกถลอกและมีหลุม โพรงอากาศ 4-5 จุดที่ สัดส่วน 6.5:1 Foam 74% ผิดผิวเรียบใช้ได้ จนหมด
17/2/ 2013	130217	40	ผลิตขึ้นใหม่ 40 กก. เพิ่ม แคลเซียมคาร์บอเนต 34% ไม่ได้ เติม Close Cell Viscosity 1,700 mPa.s นำไป Test ทันที	31	100	อัตราส่วนที่ 6:1 ไม่ดี ผิวลอกถลอกและมี หลุมโพรงอากาศที่ สัดส่วน 6.5:1 Foam 90% ใช้ไม่ได้อาการ เหมือน Lot No.130216
18/2/ 2013	130218	20	ผลิต 20 กก.เติมแคลเซียม คาร์บอเนต 30% นำไปทดสอบ ทันที	32	97	อัตราส่วนที่ 6:1 ไม่ดี อาการผิวหน้าลอกกร่อน ตันผิวหน้าเข้ากันจะเย็น ไม่ตึง
19/2/ 2013	130219	40	ผลิตอีก 40 กก.เติมแคลเซียม คาร์บอเนต 30% Close Cell 0.02% เช็คว่าโฟมได้ 85% นำไปทดสอบทันที	32	85	อัตราส่วนที่ 6:1 ใช้ได้ จนหมด ไม่มีอาการ
23/2/ 2013	130223 /1	20	นำ Lot No.130209 จำนวน 1 ถึง 20 กก. เช็คว่า CT. 36 s, Foam 82% เติม Close Cell 0.04% เช็คว่าโฟมได้ 82% นำไปทดสอบ	36	82	อัตราส่วนที่ 6:1 ผิดลง แม่พิมพ์ 17 ลูกมี 16 ลูกดีเสีย 1 ลูก คือ ผิวเป็นหลุมโพรงอากาศ ผิวเปิด 1 จุด ลูกค้าใช้ ต่อจนหมดไม่มีปัญหา

ตารางที่ 3.1 บันทึกเหตุการณ์การเก็บข้อมูลการผลิตช่วงเดือน ก.พ.-ส.ค. 2556 (ต่อ)

Date	Batch No.	จำนวน ผลิต (กก.)	Action	Cream Time (วินาที)	%Foam	Appearance หน้า A
23/2/ 2013	130223/2	200	นำ Lot No.130209 จำนวน 10 ถึง 200 กก. เช็คค่า CT, Foam เช็คได้เต็ม Close Cell 0.04% เช็คค่าได้เต็มผงดูด ความชื้น 2 กก. เช็คค่าได้	36 36 36	82 115 95	อัตราส่วนที่ 6:1 ใช้ได้ ไม่มีปัญหาผิวเรียบมัน ผ่านไป3วันในถังมีโฟม 120% ฉีดเครื่องผิวมี โพรงแต่ไม่มีอาการ ผิวยุบยิบ
28/2/ 2013	130228	200	ผลิตพอลิออลเรซินใหม่ตาม สูตร 200 กก. เต็ม Close Cell 0.04%	32	85	Feed Back ไม่มีปัญหา ใช้ฉีดได้กรองรุ่น Vigo จนเหลือ 5 ถึง เกิด โพรง ไปเช็คดูโฟมขึ้น 95%
3/3/ 2013	130303	40	นำเคมี Lot no. 130209 ปริมาณ 20 กก. + Lot no. 130211 ปริมาณ 20 กก. ปรับโฟม เต็ม Close Cell 0.04%	33	82	ลูกค้าใช้ไปไม่มีปัญหา จนเหลืออยู่จำนวนครึ่ง ถึง ฉีดกาว ทั้งข้ามคืน ตอนเข้ามาทำงานต่อ ฉีดเกิดโพรง เข้าไปเช็ค ดูโฟม 100%
7/3/ 2013	130307	100	นำ Lot no.130211 ปริมาณ 80 กก.+ Lot no.130223 ปริมาณ 20 กก. ปรับโฟมใหม่ เต็ม Close Cell 0.04%	35	84	อัตราส่วน 6.23:1 รอบ แรกทดสอบ 5 ตัวไม่มี โพรง รอบสอง 10 ตัว ไม่มีโพรงทั้งข้ามวันมา ฉิดยังใช้ได้ผ่านอีกวันยัง ใช้ได้จนหมดน้ำยา
10/3/ 2013	130310	100	นำของเก่าทุก Lot no.มาปรับ ลดโฟมใส่ Close Cell 0.04%	33	80	วันที่ 12/03/2013 ลูกค้ายังใช้ได้และใช้ต่อ จนหมด
28/3/ 2013	130328	200	ผลิตใหม่ตาม PO.+ Close Cell 0.04%	34	80	ใช้ได้จนหมด
1/4/ 2013	130401	200	ผลิตใหม่ตาม PO.+ Close Cell 0.02%	35	80	วันที่ 04/04/2013 ลูกค้าโทรมาบอกว่าใช้ ไม่ได้

ตารางที่ 3.1 บันทึกเหตุการณ์การเก็บข้อมูลการผลิตช่วงเดือน ก.พ.-ส.ค. 2556 (ต่อ)

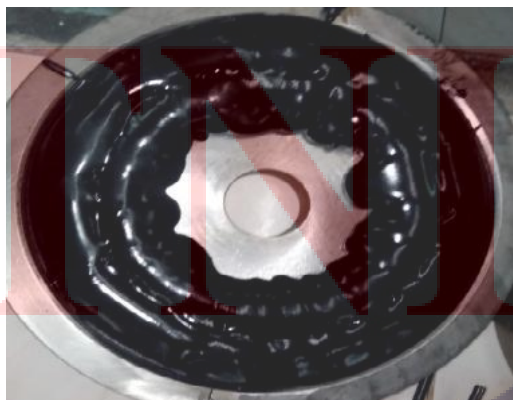
Date	Batch No.	จำนวน ผลิต (กก.)	Action	Cream Time (วินาที)	%Foam	Appearance หน้า A
6/4/ 2013	130406	200	ผลิตใหม่ตาม PO.+ Close Cell 0.04%	28	78	ลูกค้าใช้ได้จนหมด
18/4/ 2013	130418	200	นำ Lot no.130401 มาปรับ ใหม่โดยเติม Close Cell 0.02% Catalyst 200 กรัม ผงดูดความชื้น 2 กก.	28	80	ลูกค้าใช้ได้จนหมด
1/5/ 2013	130501	200	ผลิตเคมีใหม่ตาม PO	35	80	มีปัญหาเรื่องเคมีเซตตัว ช้ามีผิวยุบยิบ
6/5/ 2013	130506	200	ผลิตใหม่เพื่อเปลี่ยนของ Lot no.130501	27	80	ลูกค้าใช้ได้จนหมด
4/6/ 2013	130604	200	ผลิตเคมีใหม่ตาม PO	30	75	มีปัญหาไม่ทราบสาเหตุ
7/6/ 2013	130607	200	ผลิตใหม่เพื่อเปลี่ยนของ Lot no.130604	32	75	ใช้ได้เหลือประมาณ 140 กก. ใช้ไม่ได้
13/6/ 2013	130613	140	ปรับคืนเป็นของ Lot no.130607	28	75	ลูกค้าใช้ได้จนหมด
27/8/ 2013	130827	100	ปรับคืนเพราะทั้งวันงานเหลือ การใช้ลงแม่พิมพ์เซคดูมีโฟม 103%, 85%, 82%, 80%, 85%	30	75	ลูกค้าใช้ได้จนหมด



รูปที่ 3.2 ผิวลอก



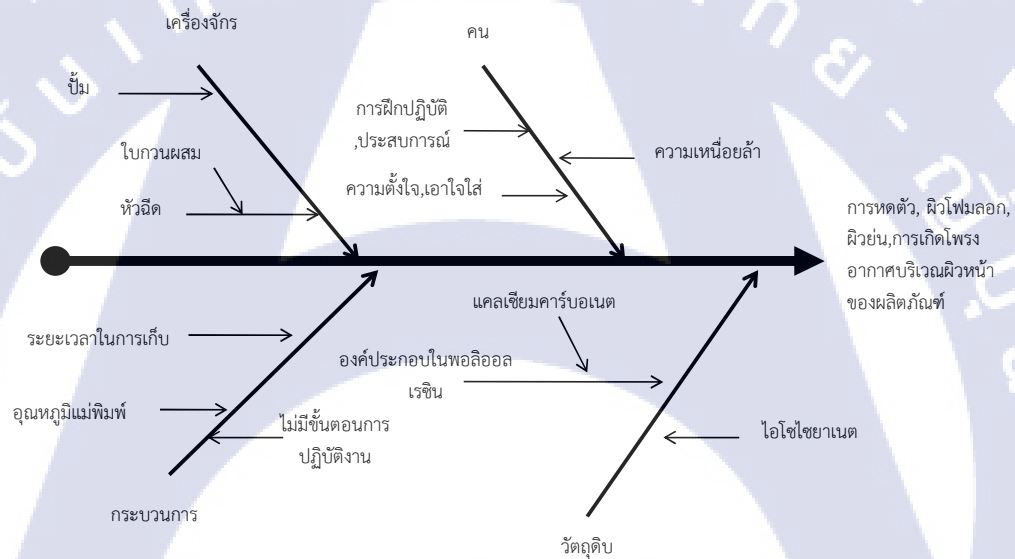
รูปที่ 3.3 ผิวเป็นหลุมโพรงอากาศ



รูปที่ 3.4 ผิวขุ่นหรือผิวมรกต



รูปที่ 3.5 ผิวยุบยิบหรือผิวเปลือกส้ม



รูปที่ 3.6 แผนผังก้างปลา (Fish Bone Diagram)

3.2.1 ขั้นตอนการทดลอง

3.2.1.1 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Cup Test)

การทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของพอลิยูรีเทนโฟมในแก้วทดลอง ดังนี้

1. การตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Property) หาค่าความหนืดของพอลิออลเรซินโดยมีวิธีการดังนี้

- ปรับอุณหภูมิของพอลิออลเรซินในแก้วทดลองไว้ที่ 30 องศาเซลเซียส
- เลือกเข็มทดสอบและความเร็วรอบให้เหมาะสมกับประเภทความหนืด

ของน้ำยาพอลิออลเรซิน

- กดปุ่ม Start ให้เครื่องทำงาน
- อ่านค่าความหนืดและเปอร์เซ็นต์ที่ได้ที่หน้าจอเครื่อง Viscometer
- บันทึกผล

2. การตรวจสอบหาค่าอุณหภูมิหลังเกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์

• นำพอลิออลเรซินสารตั้งต้น A และสารไอโซไซยานาตสารตั้งต้น B มาปรับอุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียส

- กวนให้เข้ากันอย่างรวดเร็วด้วยไม้กวนสแตนเลสกวนนาน 15 วินาที

ก่อนค่า Cream Time 30 วินาที

- วัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นด้วยเทอร์โมมิเตอร์ บันทึกผล
- เพิ่มปริมาณน้ำหนักรสจากข้างต้นเป็น 2 เท่าของสารตั้งต้น A และ B

3. การตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมี (Chemical Property)

• Cream Time (CT) : เวลาที่สารผสมระหว่างพอลิออลเรซิน และไอโซไซยานาตทำปฏิกิริยากันแล้วเริ่มฟุ้งให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)

- Full Time (FT) : เวลาที่สารผสมระหว่างพอลิออลเรซินและไอโซ

ไซยานาตทำปฏิกิริยากันแล้วเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเกิดเป็นโฟมของแข็งโดยสมบูรณ์

- Tack Free Time (TFT) : เวลาที่สารผสมระหว่างพอลิออลเรซิน

และไอโซไซยานาตทำปฏิกิริยากันแล้วเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็งและผิวหน้าโฟมแห้งไม่ติดมือ

- % Foam : ร้อยละของโฟมที่เกิดขึ้นในแก้วทดลอง ดังสมการที่ 3.1

$$\% \text{Foam} = \frac{\text{ความสูงของโฟมพอลิยูรีเทนที่เกิดขึ้นในแก้วทดลอง}}{\text{ความสูงของโฟมพอลิยูรีเทนเมื่อเริ่มต้นในแก้วทดลอง}} \times 100 \quad (3.1)$$

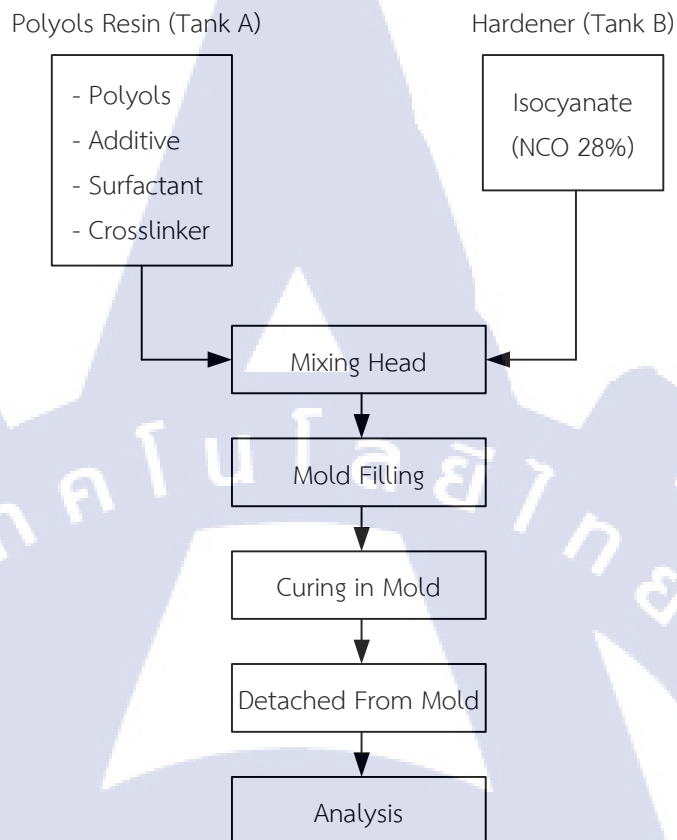
- Shore A เป็นเครื่องมือสำหรับวัดค่าความแข็งและการสปริงตัวของ

พอลิยูรีเทนโฟม

3.2.1.2 การขึ้นรูปต้นแบบโดยเครื่องฉีดแบบทำปฏิกิริยา (Reaction Injection Molding : RIM)

เครื่องฉีดแบบทำปฏิกิริยา (Reaction Injection Molding : RIM) ฉีดขึ้นงานที่ได้ผ่านการตรวจสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของผลิตภัณฑ์มาแล้วจากกระบวนการ Cup Test Method เพื่อผลิตพอลิยูรีเทนโฟมต้นแบบ โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. นำสารที่ได้ผ่านการตรวจสอบคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์มาแล้วจากกระบวนการ (1) Cup Test Method เข้าสู่กระบวนการฉีดขึ้นรูป
 2. เตรียมอุปกรณ์ทั้งหมดให้เรียบร้อย ได้แก่ ถังไอโซไซยาเนต (Isocyanate) ถังพอลิออลเรซิน (Polyols Resin) ปั๊ม (Pump) หัวฉีด และแม่พิมพ์
 3. นำแว็กซ์ (Wax) ทาลงบนแม่พิมพ์ เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ไม่ติดกับแม่พิมพ์เวลานำชิ้นงานออก
 4. ปรับตั้ง Timer A ให้น้ำยาพอลิออลเรซิน (Part A) ไหลเข้าสู่หัวฉีด ปริมาณ 80 ± 20 กรัมต่อวินาที
 5. ปรับตั้ง Timer B ให้น้ำยาไอโซไซยาเนต (Part B) ไหลเข้าสู่หัวฉีด ปริมาณ 15 ± 5 กรัมต่อวินาที
 6. ปั๊มของเหลวพอลิออลเรซิน (Part A) และ Isocyanate (Part B) ผ่านไปยังสายไหลผ่านหัวฉีด และเข้าไปยังแม่พิมพ์ขณะฉีด โดยควบคุมอัตราส่วนระหว่าง Part A และ Part B ที่ 6 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก
 7. ฉีดสารทั้งสองต้องฉีดด้วยความเร็วเพราะ Polyolsresin และ Isocyanate จะทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว
 - i. ทิ้งชิ้นงานให้อยู่ภายในแม่พิมพ์ประมาณ 15 นาที เพื่อให้สารที่อยู่ภายในแม่พิมพ์เกิดปฏิกิริยา (Curing) อย่างสมบูรณ์
 - ii. นำชิ้นงานออก ตัดแต่งชิ้นงาน
 - iii. นำชิ้นงานไปตรวจสอบบันทึกผล
- สามารถสรุปขั้นตอนการผลิตโดย RIM ได้ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 กระบวนการผลิตแบบ RIM

3.3 สารเคมี

3.3.1 พอลิอีเทอร์ พอลิออล (Polyether Polyols)

ชื่อทางการค้า Ep-330n เป็นของเหลวใสสีเหลืองอ่อนที่อุณหภูมิ 25°C มีค่าความหนืดเท่ากับ 924 mPa.s และความหนาแน่น 1.025 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

3.3.2 ไดเฟนิลมีเทน ไดไอโซไซยานาต (Diphenylmethane Diisocyanate : MDI)

ชื่อทางการค้า Suprasec®2030 เป็นของเหลวสีน้ำตาลแดง ที่อุณหภูมิ 25°C มีค่าความหนืดเท่ากับ 175 mPa.s และความหนาแน่น 1.22 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

3.3.3 แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate : CaCO_3)

ชื่อทางการค้า Polycal-F8 Mean Particle Size (d50%) 7 Micron Fineness
Pass 325 Mesh = 99.993%

3.4 เครื่องมือและอุปกรณ์

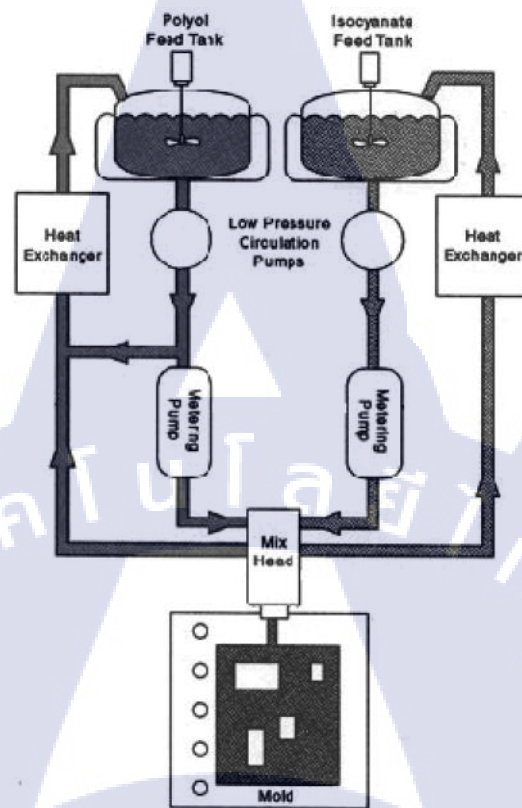
3.4.1 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 3.2 รายการเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง

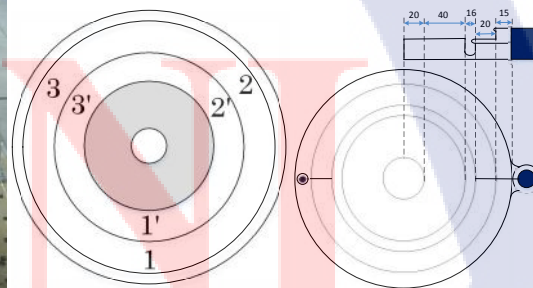
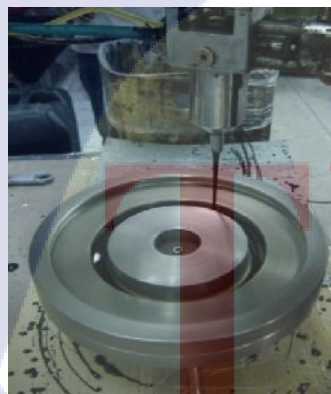
ลำดับที่	เครื่องมือ/อุปกรณ์	บริษัท	ขนาด/รุ่น
1	เครื่องชั่งน้ำหนัก	ไทยเครื่องชั่ง	0.01 - 3,000 g.
2	นาฬิกาจับเวลา	Casio	-
3	เครื่องผสม	-	0 - 2,000 รอบ/นาที
4	แม่พิมพ์	-	รุ่น vigo
5	ใบกวน	-	$\varnothing$ 3.50 ; 6.50 cm.
6	เทอร์โมมิเตอร์	-	-
7	Cup Test	ทานตะวัน	7 ออนซ์
8	Thermo - Hygrometer	-	-
9	Oven	Memmert	-
10	Viscometer	Bookfield LVT	-
11	Shore A	-	-

3.4.2 การผลิตต้นแบบ (Prototype Production)

เครื่องฉีดแบบทำปฏิกิริยา (Reaction Injection Molding Machine : RIM) ดังรูป
ที่ 3.8 และแม่พิมพ์ขณะฉีด (Casting Mold) ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.8 แผนภาพการทำงานของ RIM



รูปที่ 3.9 แม่พิมพ์ขณะฉีดและตำแหน่งการวัดอุณหภูมิแม่พิมพ์

3.5 วิธีการทดลอง

3.5.1 ขั้นตอนการทดลอง

1. แบ่งน้ำยาจากกระบวนการผลิตปกติที่จัดส่งให้ลูกค้าใส่ในแก้วทดลองขนาด 7 ออนซ์ ปรับอุณหภูมิให้เย็นลงที่ 30°C วัดด้วยเทอร์โมมิเตอร์ จากนั้นนำไปตรวจวัดหาความหนืดด้วยเครื่องวัดความหนืด (Viscometer) บันทึกผล



รูปที่ 3.10 การตรวจวัดความหนืดของ Polyols Resin

2. ชั่งสารตั้งต้น A (Polyols Resin) ปริมาณ 60 กรัม และสารตั้งต้น B (Isocyanate) จำนวน 10 กรัม ตามอัตราส่วนที่กำหนดไว้ลงในแก้วทดลองขนาด 7 ออนซ์



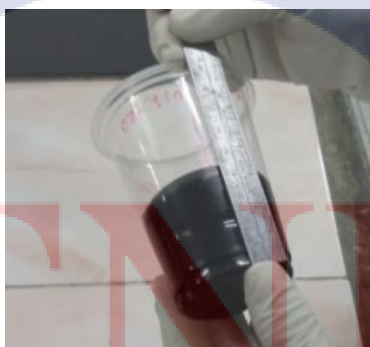
รูปที่ 3.11 การชั่งส่วนผสมของสารตั้งต้น

3. นำสารจากข้อ 2 ไปปั่นผสมด้วยเครื่องปั่นกวนให้เข้ากันด้วยใบกวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.50 cm เป็นเวลา 10 วินาที ที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที พร้อมกับจับเวลา



รูปที่ 3.12 การปั่นกวนผสม

4. นำสารผสมจากข้อ 3 ไปเทลงในแก้วทดลองที่เตรียมไว้จนความสูงของสารผสม 20 cm จากก้นแก้วทดลอง ขั้นตอนนี้ต้องทำอย่างรวดเร็ว เพราะขณะเกิดปฏิกิริยาซึ่งจะต้องผ่านช่วงค่า Cream Time, Full Time, Tack Free Time และหาค่า % Foam และ Shore A และสังเกตลักษณะทางกายภาพของพอลิยูรีเทนโฟม แล้วบันทึกผล



รูปที่ 3.13 พอลิยูรีเทนโฟมหลังเสร็จสิ้นปฏิกิริยาและการหาค่า %Foam



รูปที่ 3.14 การวัดค่าการสปริงตัวด้วย Shore A

3.6 การผลิตพอลิยูรีเทนโฟมต้นแบบ (Prototype Production)

เครื่องฉีดทำปฏิกิริยา (Reaction Injection Molding : RIM) ทำงานโดยอัดความดันอากาศเพื่อฉีดสารเคมี Part A และ Part B ให้ผสมกันที่ตำแหน่งหัวฉีด กำหนดการฉีด 2 ครั้ง (Two-Shots) ใน 1 แม่พิมพ์ (Mold) ซึ่งจะได้ปริมาณของพอลิออลเรซิน 180 ± 20 กรัม ปริมาณไอโซไซยาเนต 30 ± 5 กรัม ตามลำดับ เมื่อทำปฏิกิริยาสมบูรณ์ (Curing) แล้วจะใช้เวลาจนกระทั่งแกะชิ้นงาน ประมาณ 15 นาทีต่อครั้ง งานวิจัยนี้กำหนดเงื่อนไขที่มีอิทธิพลต่อการเกิดข้อบกพร่อง (Defect) สำหรับปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของพอลิยูรีเทนโฟม ดังนี้

3.6.1 สภาวะที่ 1

อิทธิพลของอุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ (Casting Mold) โดยควบคุมอุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ (Casting Mold) จากการผ่านตู้อบที่อุณหภูมิ 20, 30, 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส

3.6.2 สภาวะที่ 2

อิทธิพลของแคลเซียมคาร์บอเนต โดยแปรผันปริมาณส่วนผสมโดยน้ำหนัก 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 %wt.

3.6.3 สภาวะที่ 3

ระยะเวลาในการเก็บ (Storage Time) โดยกำหนดระยะเวลาในการเก็บน้ำยาพอลิออลเรซินเป็นเวลา 5 วันและ 14 วัน สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 การทดลองการทำ Prototype ของผลิตภัณฑ์

ตัวแปรต้น	ตัวแปรตาม	ตัวแปรควบคุม
อุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ ($^{\circ}\text{C}$) 20, 30, 40, 50, 60	1. ลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ 2. การหดตัวผิวลอกผิวชั้นการเกิดโพรงอากาศบริเวณผิวหน้าของผลิตภัณฑ์	1. เครื่องฉีดโฟม : Reaction Injection Molding 2. แม่พิมพ์ (Casting Mold) 3. ปริมาณสัดส่วนการทำปฏิกิริยา (A : B) (6 : 1) 4. Isocyanate ค่า NCO 28%
ปริมาณ CaCO_3 (%wt) 10, 20, 30, 40, 50, 60	1. ลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ 2. การหดตัวผิวลอกผิวชั้นการเกิดโพรงอากาศบริเวณผิวหน้าของผลิตภัณฑ์	1. เครื่องฉีดโฟม Reaction Injection Molding 2. แม่พิมพ์ (Casting mold) 3. ปริมาณสัดส่วนการทำปฏิกิริยา (A : B) (6 : 1) 4. Isocyanate ค่า NCO 28%
ระยะเวลาในการเก็บ (วัน) 5, 15	1. ลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ 2. การหดตัวผิวลอกผิวชั้นการเกิดโพรงอากาศบริเวณผิวหน้าของผลิตภัณฑ์	1. เครื่องฉีดโฟม Reaction Injection Molding 2. แม่พิมพ์ (Casting mold) 3. ปริมาณสัดส่วนการทำปฏิกิริยา (A : B) (6 : 1) 4. Isocyanate ค่า NCO 28%

จากการขึ้นรูป PU Foam ที่ผ่านการทดสอบเบื้องต้นมาจาก Cup Test ในห้องปฏิบัติการ แล้วกำหนดเงื่อนไขการผลิตดังตารางที่ 3.3 จนกระทั่งได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่มี Defect ซึ่งผู้วิจัยได้อภิปรายวิเคราะห์และวิจารณ์ผลการวิจัยโดยนำเสนอรายละเอียดไว้ในบทที่ 4

บทที่ 4

การวิเคราะห์ผลการทดลองและผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการตามวัตถุประสงค์ โดยทดสอบผลกระทบของสภาวะการขึ้นรูป PU Foam และส่วนผสมของ PU ทั้งในระดับห้องปฏิบัติการและในการผลิตต้นแบบข้อต่อของไส้กรองอากาศ ขั้นตอนการวิจัยได้นำเสนอไว้แล้วในบทที่ 3 โดยบทนี้ได้อภิปรายผลการวิเคราะห์วิจารณ์อิทธิพลของอุณหภูมิการผลิตในระหว่างการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Cup Test) และอิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ของ RIM ในกระบวนการผลิต Prototype ของข้อต่อฟิลเตอร์ (PU Foam Filter) อิทธิพลของอัตราส่วนผสมของ CaCO_3 และอิทธิพลของระยะเวลาการเก็บรักษาสารตั้งต้นพอลิออลเรซิน (Part A)

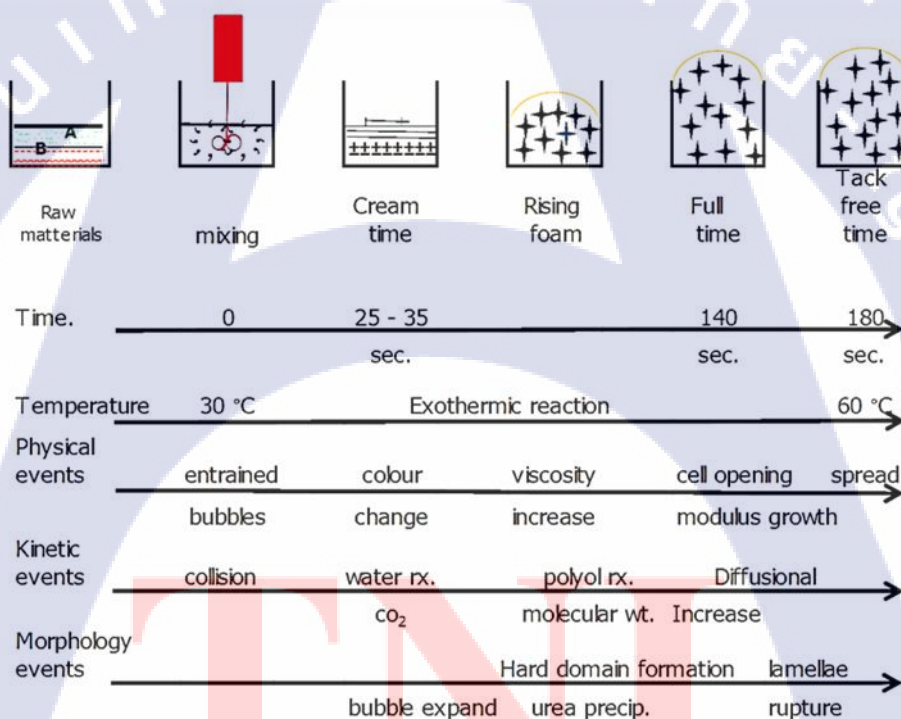
4.1 ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Cup Test)

การทดสอบการทำปฏิกิริยาระหว่างพอลิออลเรซิน (Part A) และไอโซไซยาเนต (Part B) ในห้องปฏิบัติการที่เรียกว่า Cup Test ต้องเป็นไปตามค่ามาตรฐาน (Specification) ที่กำหนดค่าความหนืดที่ 30°C (Viscosity@ 30°C) ค่า Cream Time (เมื่อเวลาผ่านไปราว 25-35 วินาที และสารมีสภาพเป็นครีม) การเปลี่ยนแปลงสภาพทางเคมีและทางกายภาพ ค่า Full Time และ ค่า Tack Free Time แสดงในรูปที่ 4.1 รวมถึงค่าร้อยละของโฟม หรือ % Foam และค่า Shore A ซึ่งบริษัทผู้ผลิต PU Foam เป็นผู้กำหนดขึ้น ช่วงค่าเหล่านี้นอกจากถูกกำหนดโดยมาตรฐานแล้ว ยังผ่านกระบวนการทดลองแบบลองผิดลองถูก (Trial and Error) และการนำผลตอบกลับจากลูกค้ามาปรับเปลี่ยนค่ามาตรฐานจนได้ค่าดังตารางที่ 4.1 ที่มีความเหมาะสมยิ่งขึ้น

ปฏิกิริยาระหว่าง Part A และ Part B เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ส่งผลให้อุณหภูมิสารผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น ดังนั้นอุณหภูมิของสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์จึงมีอิทธิพลต่อคุณภาพของสารผลิตภัณฑ์ ผู้วิจัยจึงได้วัดอุณหภูมิของสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์จากการทดสอบ Cup Test ดังแสดงผลในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติเบื้องต้นตามค่ามาตรฐานของปฏิกิริยาเคมีระหว่างพอลิโออลเรซิน (Part A) และไอโซไซยาเนต (Part B)

Property	Unit	Value
Viscosity@30°C	mPa.s	1,500 - 2,000
Cream Time	Sec.	28 - 32
Full Time	Sec.	120 - 180
Tack Free Time	Sec.	120 - 180
Foam	%	80 - 100
Shore A	-	10 - 25



รูปที่ 4.1 ขั้นตอนและสภาพการเปลี่ยนแปลงของ PU Foam ขณะการเกิดปฏิกิริยาดำเนินไป

4.1.1 อุณหภูมิและปริมาตรของผลิตภัณฑ์ระหว่าง Cup Test

การตรวจสอบหาค่าอุณหภูมิและปริมาตรหลังเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันอย่างสมบูรณ์ในแก้วทดลอง (Cup Test) ระหว่างพอลิออลเรซิน (Part A) และไอโซไซยานต (Part B) จากการทดลอง 2 ครั้ง โดยการทดลองที่สองเพิ่มปริมาณสารตั้งต้นทั้งสองเป็นสองเท่า ดังแสดงในตารางที่ 4.2 เห็นได้ชัดเจนว่าอุณหภูมิของสารผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิของสารตั้งต้นทั้งสองถึง 31.5-34.0 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นถึงการเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic Reaction)

ปริมาตรของสารผลิตภัณฑ์ก็เพิ่มขึ้นจากปริมาตรสารตั้งต้นอย่างชัดเจน อันเนื่องมาจากก๊าซที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาทำให้เกิดรูพรุนใน PU Foam และเมื่อก๊าซถ่ายโอนออกไปหมดก็เกิดโครงสร้างเป็นรูพรุนที่เป็นช่องว่างขนาดเล็กจำนวนมากในโฟม ทำให้ปริมาตรสุดท้ายของสารผลิตภัณฑ์ภายหลังจากสิ้นสุด Tack Free Time เพิ่มขึ้นจากปริมาตรรวมของสารตั้งต้นประมาณ 2 เท่า

ตารางที่ 4.2 ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของปฏิกิริยาระหว่างพอลิออลเรซินและไอโซไซยานต

รายละเอียด	Polyol Resin (Part A)	Isocyanate (Part B)	PU Foam Product
กรณีที่ 1			
ปริมาณสาร (กรัม)	48	8	56.0
อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	30	30	61.5
ปริมาตร (cm^3)	40	6.56	85.3
กรณีที่ 2			
ปริมาณสาร (กรัม)	96	16	112.0
อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	30	30	64.0

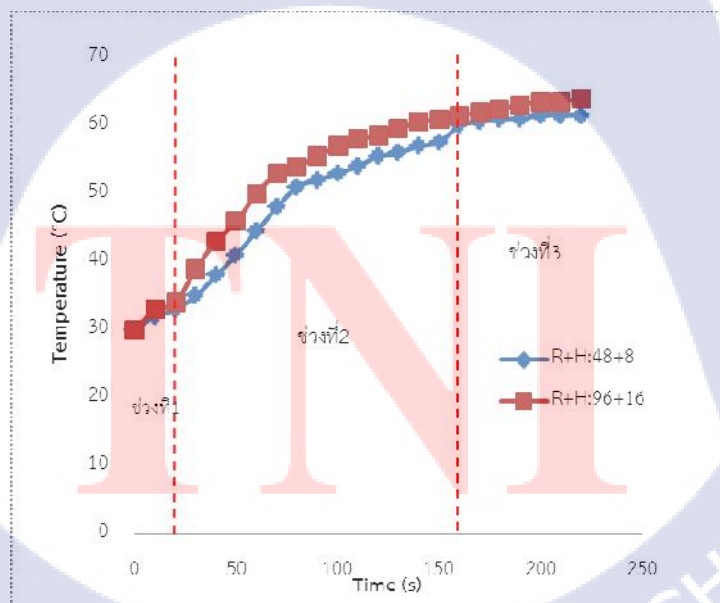
4.1.2 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์จาก Cup Test

การเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของพอลิยูรีเทนโฟม สารมีอุณหภูมิเริ่มต้น 30°C และเพิ่มขึ้นเป็น 60°C แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันของพอลิยูรีเทนโฟมเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน โดยมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิดังรูปที่ 4.2 ซึ่งเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและเพิ่มช้าลงจนค่อนข้างคงที่ในช่วงหลัง

เมื่อปริมาณสารตั้งต้นเพิ่มเป็น 2 เท่า จากกรณีที่ 1 ซึ่งมีปริมาณ [Part A + Part B] คือ $[48 \text{ g} + 8 \text{ g}]$ เพิ่มขึ้น 2 เท่าเป็น $[96 \text{ g} + 16 \text{ g}]$ พบว่ามีผลต่ออุณหภูมิผลิตภัณฑ์เล็กน้อยโดยทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 2.5°C

ตอนเริ่มต้นของปฏิกิริยาพอลิยูรีเทนมีสถานะของเหลว ปริมาตรสารตั้งต้น A โดยเฉลี่ย 40 ลูกบาศก์เซนติเมตร ปริมาตรสารตั้งต้นโดย B เฉลี่ย 6.56 ลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่อเกิด ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน พอลิยูรีเทนจะเปลี่ยนสภาพเป็นโฟมในสถานะของแข็ง ปริมาตรสารผลิตภัณฑ์เฉลี่ย 85.31 ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งเป็นผลจากปริมาตรฟองก๊าซที่แทรกอยู่ระหว่างเนื้อโฟม และสามารถแบ่งช่วงการเปลี่ยนแปลงปริมาตรฟองก๊าซออกเป็น 3 ช่วง อ้างอิงเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [4] และอธิบายได้ ดังนี้

1. ช่วงที่ 1 Bubble Formation เป็นช่วงของการเกิดฟองก๊าซเริ่มต้น โดยปริมาตรของฟองก๊าซจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก และอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเล็กน้อย
2. ช่วงที่ 2 Bubble Growth เป็นช่วงการเจริญเติบโตของฟองก๊าซ โดยในช่วงนี้ ปริมาตรของฟองก๊าซมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากนั้นอัตราการเพิ่มค่อยๆ ลดลง
3. ช่วงที่ 3 Bubble Stabilization เป็นการคงสภาพของฟองก๊าซ ปริมาตรของฟองก๊าซเริ่มคงที่ ซึ่งอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นช้ามากหรือแทบจะคงที่



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการเกิดปฏิกิริยา

4.2 กระบวนการฉีดขึ้นรูปของพอลิยูรีเทนโฟม

4.2.1 อิทธิพลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ต่อความเสียหายของผลิตภัณฑ์

อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์พอลิยูรีเทนโฟมเปลี่ยนแปลงตามเวลาขณะที่เกิดปฏิกิริยา ดังได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อ 4.1.2 จึงคาดว่าอุณหภูมิจะมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ PU Foam ที่ผลิตจากเครื่อง RIM เช่นกัน แต่เครื่อง RIM ที่ใช้ในปัจจุบันไม่มีระบบควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์ และไม่เคยมีการทดสอบว่าอุณหภูมิแม่พิมพ์มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์หรือไม่ ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อปฏิกิริยาเข้าสู่ช่วงที่ 2 อุณหภูมิของสารจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และความร้อนจะต้องถูกระบายออกไป มิฉะนั้นปฏิกิริยาอาจสิ้นสุดก่อนที่จะเข้าสู่ช่วงที่ 3 ก่อนเวลาอันควร ทำให้ฟองก๊าซไม่เสถียรก่อนการแข็งตัวของ PU Foam และเกิดเป็น Defect ได้

งานวิจัยนี้จึงทดสอบปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของแม่พิมพ์สำหรับการฉีดขึ้นรูป PU Foam ของเครื่องขึ้นรูป (RIM) ผลิตภัณฑ์ต้นแบบ คือ ข้อต่อพอลิยูรีเทนโฟมของฟิลเตอร์ จากข้อมูลในบทความที่ค้นคว้ามา พบว่าอุณหภูมิของแม่พิมพ์ไม่ควรเกิน 70°C ผู้วิจัยจึงออกแบบการทดลองโดยแปรผันอุณหภูมิเริ่มต้นของแม่พิมพ์ที่ $20-60^{\circ}\text{C}$ ผู้วิจัยได้ปรับสภาพอุณหภูมิแม่พิมพ์ไว้ที่ 5 ระดับอุณหภูมิ คือ 20, 30, 40, 50 และ 60°C องศาเซลเซียส โดยมีข้อสันนิษฐานว่าอุณหภูมิของผิวหน้าแม่พิมพ์ส่วนที่สัมผัสกับสารตั้งต้นจนกระทั่งกลายเป็นผลิตภัณฑ์จะมีอิทธิพลกับคุณภาพผิวของผลิตภัณฑ์ PU Foam

กรณีแรก ที่อุณหภูมิประมาณ 20°C ซึ่งต่ำกว่าบรรยากาศ แม่พิมพ์ถูกนำเข้าห้องเย็นจนมีอุณหภูมิเป็นอุณหภูมิของห้องเย็นซึ่งต่ำกว่า 20°C โดยเมื่อนำออกมาแล้ว จะรอจนกระทั่งแม่พิมพ์มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนเป็น 20°C จึงนำไปใช้ทดสอบ

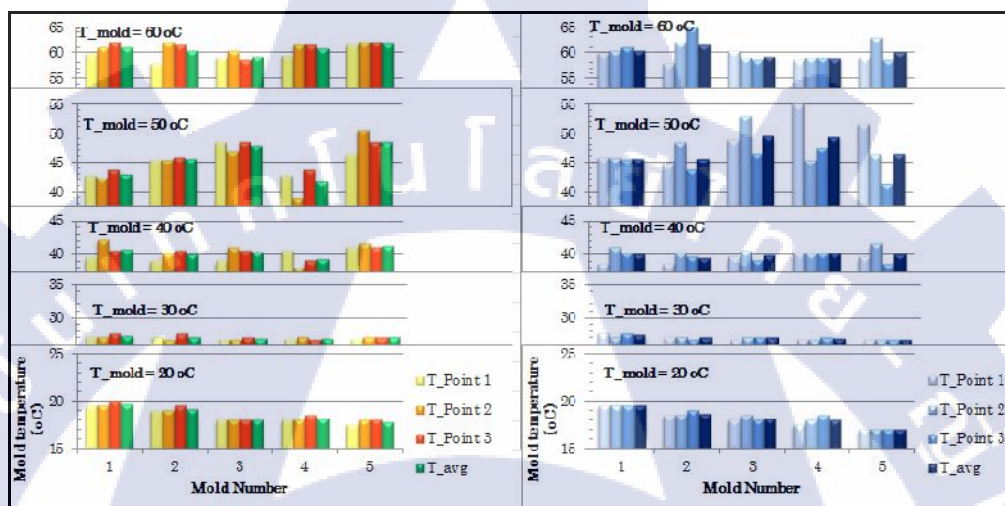
กรณีที่สอง อุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C ซึ่งใกล้เคียงกับอุณหภูมิบรรยากาศ จึงไม่ต้องปรับอุณหภูมิมากนัก

ส่วนกรณีที่ 3-5 ที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 40, 50 และ 60°C นั้น ได้นำแม่พิมพ์เข้าตู้อบเพื่อทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น และเมื่อนำออกจากเตาอบจึงนำแม่พิมพ์ไปใช้งานทันที

จากการสังเกตคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์แบ่งเป็น 5 กรณี ตามระดับอุณหภูมิของแม่พิมพ์ และสรุปได้ดังแผนภาพสัญลักษณ์และร้อยละของชิ้นงานที่ดีและเสีย ดังรูปที่ 4.3 และ 4.4

1. กรณีอุณหภูมิแม่พิมพ์ 20°C พบว่า เกิดผิวโฟมลอก ผิวไม่เรียบมัน ผิวย่น ยุบยิบ ทั้ง 5 ชิ้นงาน
2. กรณีอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30°C พบว่า เกิดผิวโฟมดี เรียบมัน ไม่มีผิวยุบยิบทั้ง 5 ชิ้นงาน

3. กรณีอุณหภูมิแม่พิมพ์ 40°C พบว่า เกิดผิวโฟมดี เรียบมัน ไม่มีผิวยุบยิบจำนวน 2 ชิ้นงาน แต่ผิวโฟมไม่ดี มีข้อบกพร่อง คือ เกิดผิวโฟมลอก ผิวไม่เรียบมัน ผิวยุบยิบ 3 ชิ้นงาน
4. กรณีอุณหภูมิแม่พิมพ์ 50°C พบว่า เกิดผิวโฟมดี เรียบมัน ไม่มีผิวยุบยิบจำนวน 1 ชิ้นงาน เกิดผิวโฟมที่ไม่ดี มีข้อบกพร่อง อันได้แก่ เกิดผิวโฟมลอก ผิวไม่เรียบมัน ผิวยุบยิบ 4 ชิ้นงาน
5. กรณีอุณหภูมิแม่พิมพ์ 60°C พบว่า เกิดผิวโฟมนิ่ม ผิวยุบยิบทั้ง 5 ชิ้นงาน

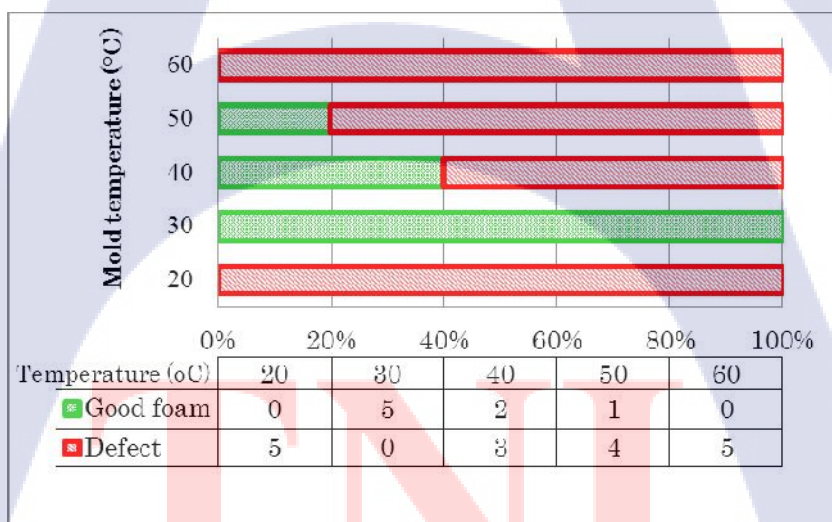


(a) Outer Mold

(b) Inner Mold

รูปที่ 4.3 การวัดอุณหภูมิที่ 3 ตำแหน่งทั้งภายนอกแม่พิมพ์ (Outer Mold) และภายในแม่พิมพ์ (Inner Mold)

Mold No.	Mold's controlled temperature (°C)				
	60	50	40	30	20
1	☒	✓	✓	✓	☐
2	☒	✗	✓	✓	☐
3	☒	✗	✗	✓	☐
4	☒	✗	✗	✓	☐
5	☒	✗	✗	✓	☐
✓	เกิดผิวโฟมดี เรียบมัน ไม่มีผิวยุบยิบ				
✗	เกิดผิวโฟมที่ไม่ดี มีข้อบกพร่องอันได้แก่เกิดผิวโฟมลอก ผิวยุบยิบ				
K	เกิดผิวโฟมลอก ผิวไม่เรียบมันผิวยุบยิบทั้ง 5 ชั้น				
☒	เกิดผิวโฟมนิ่ม				



รูปที่ 4.4 แผนภาพและกราฟแสดงคุณภาพและร้อยละความเสียหายของผลิตภัณฑ์ PU Foam

จากตารางผลการทดลองในรูปที่ 4.4 พบว่า อุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ที่ต่ำ (กรณี 20°C) เมื่อของเหลวทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน สารผสมไหลลงสู่แม่พิมพ์ แต่อุณหภูมิที่ผิวแม่พิมพ์ต่ำทำให้อุณหภูมิของปฏิกิริยาลดลงอย่างรวดเร็วเกินไปและมีอุณหภูมิไม่เหมาะสมต่อสภาวะการเกิดฟองก๊าซ ส่งผลให้เกิดการหน่วงของปฏิกิริยา หรือ ลดอัตราการเกิดปฏิกิริยา เป็นผลให้เกิดความเสียหาย ผิวไม่

เรียบมัน ผิวขุ่นและยุบยิบในชิ้นงานทั้งหมด แสดงว่าต้องตรวจสอบให้อุณหภูมิของแม่พิมพ์สูงกว่า อุณหภูมิสารตั้งต้นเสมอ หากสารตั้งต้นอยู่ที่อุณหภูมิบรรยากาศก็ต้องทำให้แม่พิมพ์มีอุณหภูมิสูงกว่า บรรยากาศ

อุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ที่สูงกว่าอุณหภูมิบรรยากาศ (กรณี 40°C ขึ้นไป) เมื่อของเหลวทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน สารผสมไหลลงสู่แม่พิมพ์ กรณีอุณหภูมิที่ผิวแม่พิมพ์ 50 องศาเซลเซียส ส่งผลทำให้น้ำยาบริเวณผิวมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นได้เร็วกว่ากรณีอุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ 40 องศาเซลเซียส และ 30 องศาเซลเซียส อภิปรายดังนี้

- อุณหภูมิที่ผิวแม่พิมพ์ $40-50^{\circ}\text{C}$ บางตำแหน่งเกิด Defect บางตำแหน่งไม่เกิด Defect เนื่องจากเมื่อน้ำยากระทบผิวแม่พิมพ์ อุณหภูมิที่ผิวแม่พิมพ์ที่สูงเกินไปย่อมส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้นและเกิดการขยายตัวของฟองก๊าซเร็วไป แต่ในขณะเดียวกันก็มีการแพร่ของความร้อนไปสู่บริเวณอื่นๆ ด้วย บางบริเวณจึงยังคงมีอุณหภูมิที่เหมาะสมจึงไม่เกิด Defect แต่บางบริเวณสารฟุ้งตัวก่อนจะพบกับมวลน้ำยาที่กำลังไหลลงมา ส่วนของน้ำยาที่กำลังไหลลงมาจะเกิดปฏิกิริยาช้ากว่า คล้ายกับว่าปฏิกิริยาไม่ต่อเนื่องกันไป โมเลกุลก๊าซจำนวนมากจะถูกผลักและกระจายออกไปอย่างไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งวัฏภาค และจะเคลื่อนที่ไปอยู่ในบริเวณจำกัดและใกล้กัน จึงเกิด Defect ได้ที่ตำแหน่งนั้น

- อุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ 50°C เกิดการเติบโตของฟองก๊าซเร็วขึ้นในช่วงที่ 2 หรือเกิดการฟุ้งตัวเร็วกว่า ขนาดเม็ดโฟมโตกว่า ทำให้เกิดเปลือก/ผิวชั้นนอก (Skin) ของพอลิยูรีเทนบางกว่า หรือเกิดเปลือก/ผิวชั้นนอกไม่สมบูรณ์ (Skin) หรือไม่เกิดเปลือก/ผิวชั้นนอก (Skin) ทำให้ผิวเซลล์โฟมบางไม่หนา เกิดเป็น Defect ได้ง่าย จำนวนชั้นที่เกิด Defect จึงมีมากกว่า ขนาดพื้นที่ผิวที่เป็นและตำแหน่งเกิดจึงมากกว่ากรณีอุณหภูมิที่ผิวแม่พิมพ์ 40 องศาเซลเซียส

- อุณหภูมิที่ผิวแม่พิมพ์ 60°C อุณหภูมิที่สูงเกินไปเช่นนี้ไม่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน เพราะแตกต่างจากอุณหภูมิตั้งต้นของปฏิกิริยามาก ทำให้ปฏิกิริยาเข้าสู่ช่วงที่ 2 และ 3 เร็วไป อุณหภูมิที่สูงเกินไปทำให้อัตราการขยายตัวของฟองก๊าซในระหว่างการเดินทางไปของปฏิกิริยามีอัตราการเพิ่มอย่างรวดเร็ว เมื่อเวลาผ่านไปและอุณหภูมิที่สูงเกินไป จะยังเกิดก๊าซเพิ่มมากขึ้นและเกิดการขยายตัว (Bubble Growth) และฟองก๊าซไม่เสถียร ทำให้ผิวโฟมนิ่มเพราะปฏิกิริยาคายความร้อนสิ้นสุดเร็วไป มีผิวยุบยิบบางครั้งเรียกว่าผิวตามดที่มีลักษณะคล้ายผิวเปลือกส้ม ซึ่งผิวฝืนก็เรียบดีไม่มีลรอย่น แต่ PU Foam ไม่ได้คุณภาพตามต้องการและไม่สามารถนำไปใช้งานได้

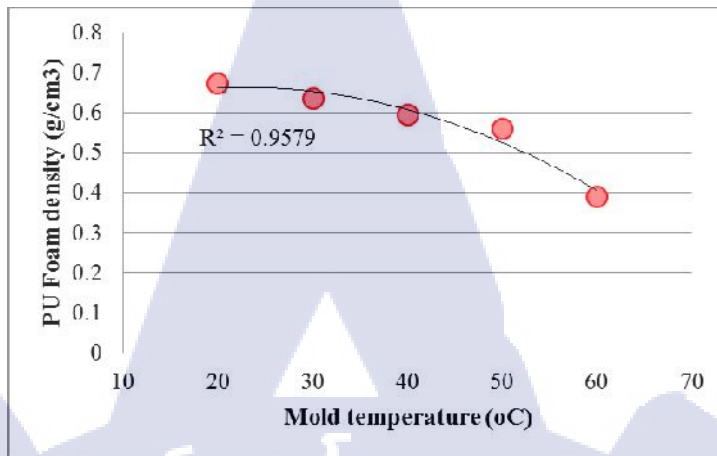
โดยสรุปผลการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิผิวหน้าแม่พิมพ์ที่ระดับอุณหภูมิ 20, 30, 40, 50, 60°C ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปของพอลิยูรีเทนโฟม แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการผลิตของกระบวนการฉีดขึ้นรูปของพอลิยูรีเทนโฟม คือ 30°C เพราะพอลิยูรีเทนโฟมที่ได้ไม่มี Defect ใดเลย คือ มีผิวโฟมดี เรียบมัน ไม่มีผิวยุบยุบิบ ไม่เกิดผิวโพรงอากาศ จึงควรรักษาอุณหภูมิของแม่พิมพ์ไว้ที่ 30°C ซึ่งใกล้เคียงกับอุณหภูมิตั้งต้นของปฏิกิริยา โดยความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาคายความร้อนก็จะแพร่ไปสู่ส่วนต่างๆ ของเครื่องจักรในขณะเกิดปฏิกิริยาได้ การเกิดฟองก๊าซและการขยายตัวของฟองก๊าซเป็นไปอย่างเหมาะสม จนกระทั่งได้ฟองก๊าซที่เสถียรมีขนาดเซลล์โฟม ใน PU Foam ที่ได้ตามคุณลักษณะจำเพาะที่ต้องการ

4.2.2 ผลของอุณหภูมิต่อความหนาแน่นของเนื้อโฟม

จากการทดลองฉีดพอลิยูรีเทนโฟมอย่างต่อเนื่องกันจำนวนแม่พิมพ์ 5 แม่พิมพ์ กำหนดอุณหภูมิผิวหน้าแม่พิมพ์ไว้ที่ 5 ระดับอุณหภูมิ คือ 20, 30, 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ผลของค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของชิ้นงานในแต่ละระดับอุณหภูมิ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อความหนาแน่นของพอลิยูรีเทนโฟม

Temperature (°C)	Good Foam (Pieces)	Defect Foam (Pieces)	Density (g/cm ³)
20	0	5	0.6723
30	5	0	0.6344
40	2	3	0.5948
50	1	4	0.5588
60	0	5	0.3898



รูปที่ 4.5 ผลของอุณหภูมิต่อความหนาแน่นของพอลิยูรีเทนโฟม

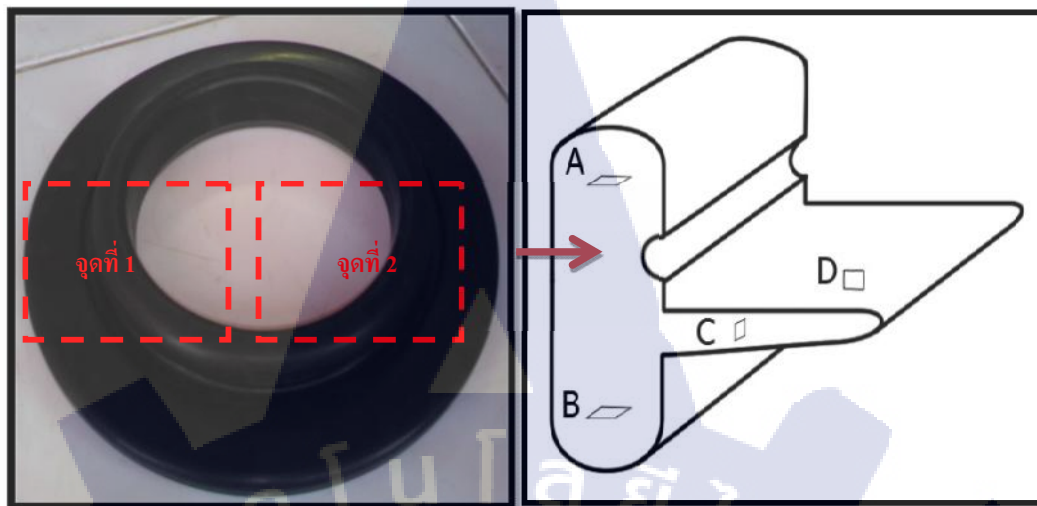
จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.5 พบว่าความหนาแน่นของเนื้อพอลิยูรีเทนโฟมแปรผกผันกับอุณหภูมิ อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่สูงขึ้นทำให้ความหนาแน่นของเนื้อโฟมลดลง มวลของผลิตภัณฑ์เกือบจะคงที่ ในขณะที่ปริมาตรเพิ่มขึ้นซึ่งเกิดจากฟองก๊าซขยายตัวและขยายตัวใหญ่ขึ้นเมื่ออุณหภูมิผิวแม่พิมพ์สูงขึ้น ซึ่งความหนาแน่นจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิแม่พิมพ์เพิ่มขึ้นมากกว่า 40 องศาเซลเซียส ดังแสดงแนวโน้มในกราฟรูปที่ 4.5

4.3 ผลของอุณหภูมิต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิยูรีเทนโฟม

ผลวิเคราะห์พอลิยูรีเทนโฟมเมื่อนำไปฉีดขึ้นรูปแบบทำปฏิกิริยา โดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิผิวเริ่มต้นของแม่พิมพ์ที่ระดับ 20, 30, 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส ในขณะที่กำหนดอัตราส่วนผสมของสารแคลเซียมคาร์บอเนตคงที่ พิจารณาคุณลักษณะของโครงสร้างภายในเซลล์โฟมตลอดจนความหนาแน่นและจำนวนของฟองอากาศของผลิตภัณฑ์ PU Foam และทดสอบด้วยเครื่องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy : SEM)

แต่ละชิ้นงานกำหนดตำแหน่งการตรวจวัด 2 ตำแหน่ง อยู่ตรงข้ามกัน (จุดที่ 1 และ 2) และแต่ละตำแหน่งการทดสอบ มีพื้นที่ในการวิเคราะห์จำนวน 4 จุด คือจุด A, B, C และ D ดังรูปที่ 4.6 ภาพสัณฐานของเซลล์โฟมในกรณีอุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ 20, 30, 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียสตามลำดับดังรูปที่ 4.7 โดยเปรียบเทียบลักษณะของเซลล์โฟมที่ตำแหน่ง A และ D

รูปที่ 4.8 ถึง 4.12 แสดงการกระจายตัวและขนาดเซลล์โฟมของพอลิยูรีเทน โดยแกนนอนคือ ขนาดของเซลล์โฟมหน่วยไมโครเมตร แกนตั้ง คือ จำนวนฟองอากาศ ค่าโดยเฉลี่ยของขนาดเซลล์และความหนาแน่นเซลล์ที่ได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ถูกสรุปไว้ดังรูปที่ 4.13



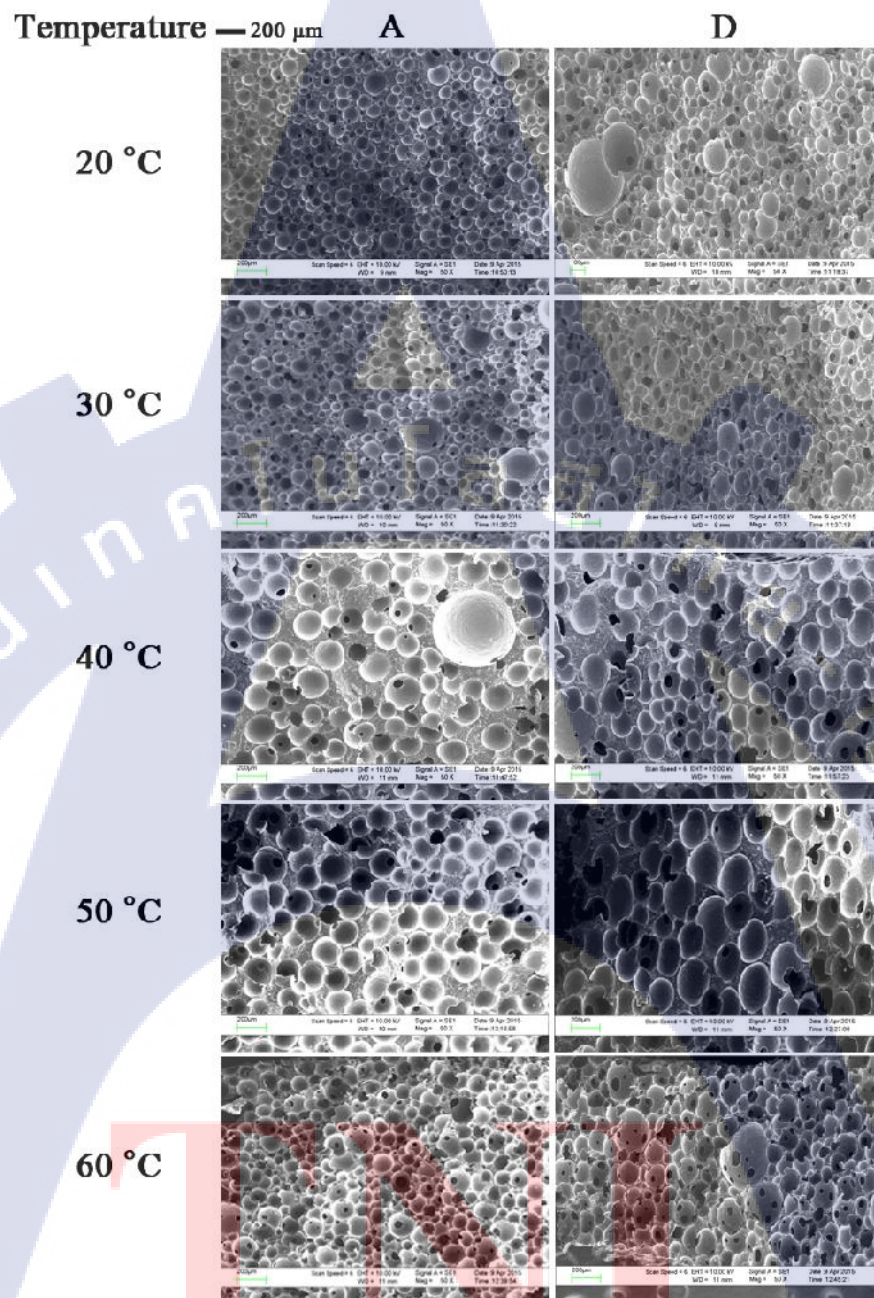
(a) Top View

(b) Slide View

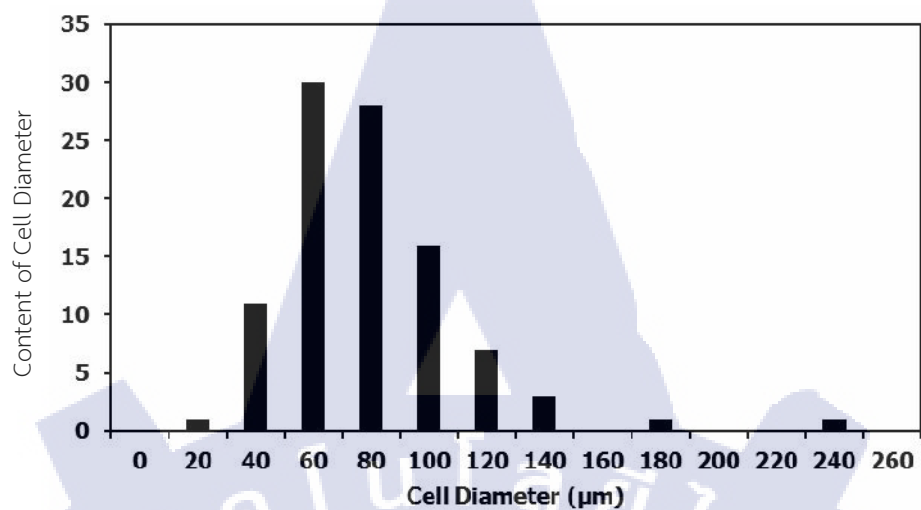
รูปที่ 4.6 ตำแหน่งและสัญลักษณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

TNI

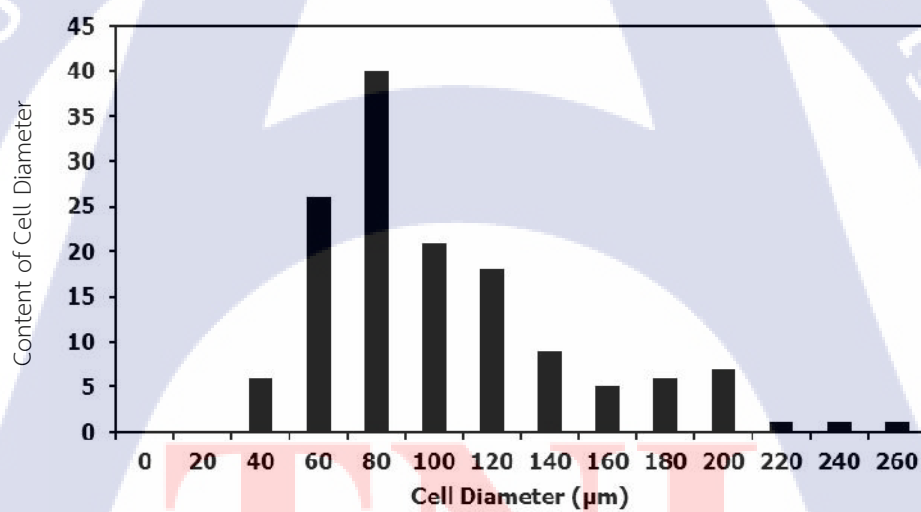
NICHII INSTITUTE OF TECHNOLOGY



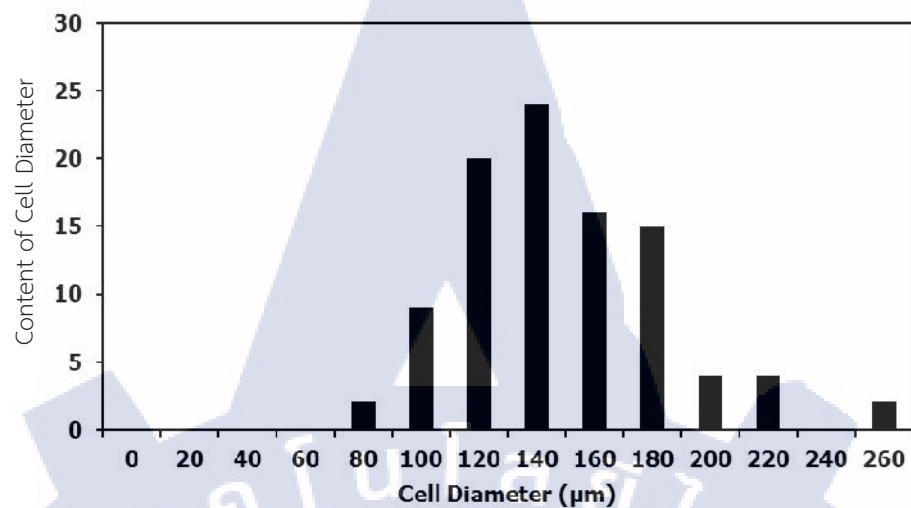
รูปที่ 4.7 สัณฐานวิทยาของพอลิยูรีเทนโฟมที่อุณหภูมิการเกิดโฟม 20, 30, 40, 50 และ 60 °C



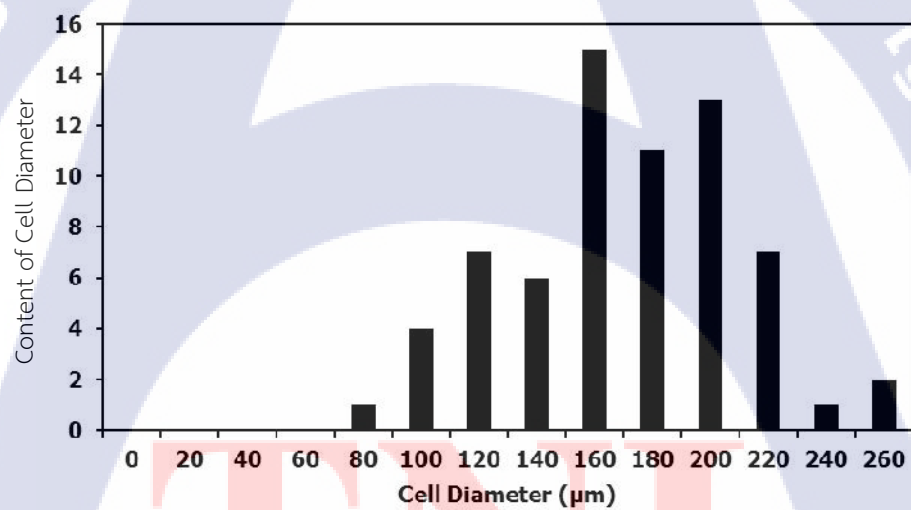
รูปที่ 4.8 ลักษณะการกระจายตัวของขนาดเซลล์โคมของพอลิยูรีเทนที่อุณหภูมิการเกิดโคม 20°C



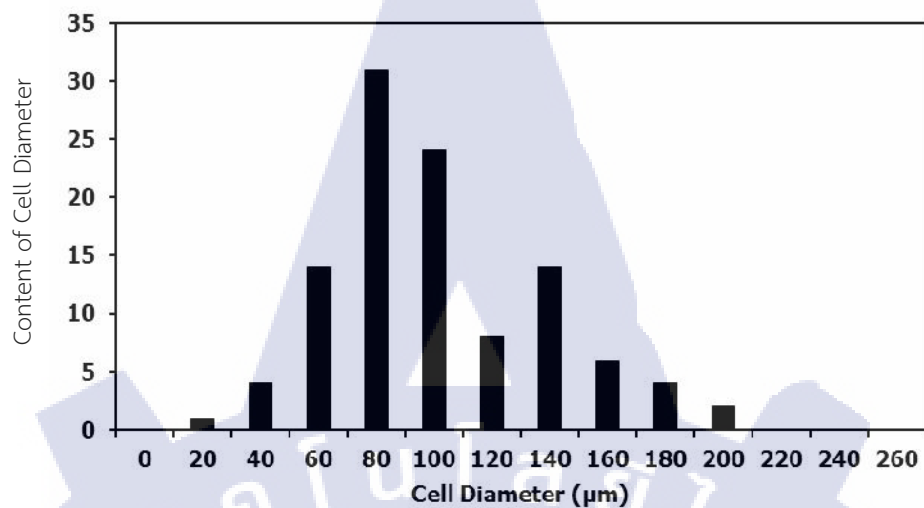
รูปที่ 4.9 ลักษณะการกระจายตัวของขนาดเซลล์โคมของพอลิยูรีเทนที่อุณหภูมิการเกิดโคม 30°C



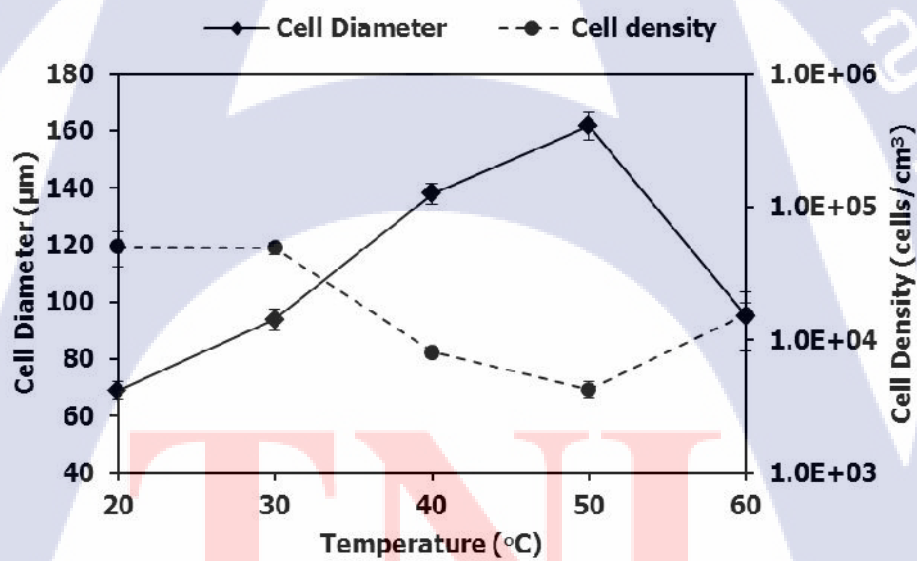
รูปที่ 4.10 ลักษณะการกระจายตัวของขนาดเซลล์โฟมของพอลิยูรีเทนที่อุณหภูมิการเกิดโฟม 40 °C



รูปที่ 4.11 ลักษณะการกระจายตัวของขนาดเซลล์โฟมของพอลิยูรีเทนที่อุณหภูมิการเกิดโฟม 50 °C



รูปที่ 4.12 ลักษณะการกระจายตัวของขนาดเซลล์โฟมของพอลิยูรีเทนที่อุณหภูมิการเกิดโฟม 60°C



รูปที่ 4.13 ผลของอุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ต่อขนาดเซลล์และความหนาแน่นเซลล์ของ PU Foam

จากผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy : SEM) สามารถวิจารณ์และสรุปผลได้ดังนี้

1. ในการฉีดแบบทำปฏิกิริยาของพอลิยูรีเทนโฟม ทุกตำแหน่งที่ตรวจวัดและทุกระดับอุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ที่ 20, 30, 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส พบขนาดเซลล์โฟมมีลักษณะเป็นวงกลมขนาดสม่ำเสมอทุกตำแหน่งการตรวจวัด แต่ในตำแหน่ง D ฟองมีลักษณะเป็นวงรีซึ่งเกิดจากในตำแหน่งนี้อยู่บริเวณขอบของแม่พิมพ์ เมื่อเกิดการขยายของฟองก๊าซในขณะที่ปฏิกิริยาดำเนินไป แต่ถูกจำกัดไว้ด้วยขอบของแม่พิมพ์ จึงทำให้รูปทรงของเซลล์โฟมที่แข็งตัวแล้วถูกบีบให้เป็นวงรี

2. การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในช่วง 20-50°C ส่งผลให้ฟองหรือเซลล์โฟมที่ได้มีขนาดใหญ่ขึ้นเฉลี่ยจาก 70-160 μm . และเนื้อของพอลิยูรีเทนมีความนุ่มเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากฟองมีขนาดใหญ่ขึ้นจึงส่งผลให้ความหนาแน่นเซลล์ลดลง แต่ในกรณีอุณหภูมิผิวแม่พิมพ์เพิ่มสูงที่ 60 °C ซึ่งใกล้เคียงกับอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะสภาพแก้ว (Glass Transition Temperature; T_g) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีการจัดเรียงสายโซ่โมเลกุลแบบไม่เป็นระเบียบ หรือ พอลิเมอร์อสัณฐาน ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่พอลิเมอร์เปลี่ยนสถานะจากของแข็งคล้ายแก้วเป็นของยืดหยุ่นคล้ายยาง แม้ว่าเซลล์โฟมจะมีขนาดโดยเฉลี่ย 80 μm . คล้ายกับกรณีที่อุณหภูมิ 30°C โดยฟองหรือเซลล์โฟมที่เกิดขึ้นนั้นเกิดได้ทั่วทั้งเนื้อของพอลิยูรีเทนและมีขนาดเล็กลง และทำให้ความหนาแน่นกลับมาเพิ่มขึ้น แต่กระบวนการขยายของฟองก๊าซมีระยะเวลาไม่เหมาะสม ฟองก๊าซอาจขยายตัวเกิดขึ้นเร็วเกินไปและเข้าสู่สมดุลเร็วกว่าที่ควรจะเป็นสภาพของ PU Foam จึงไม่ได้ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ คือ นุ่มไปจนกลายเป็น Defect แม้ว่าสัณฐานของเนื้อ PU foam จะไม่แตกต่างจากกรณี 30°C มากนัก

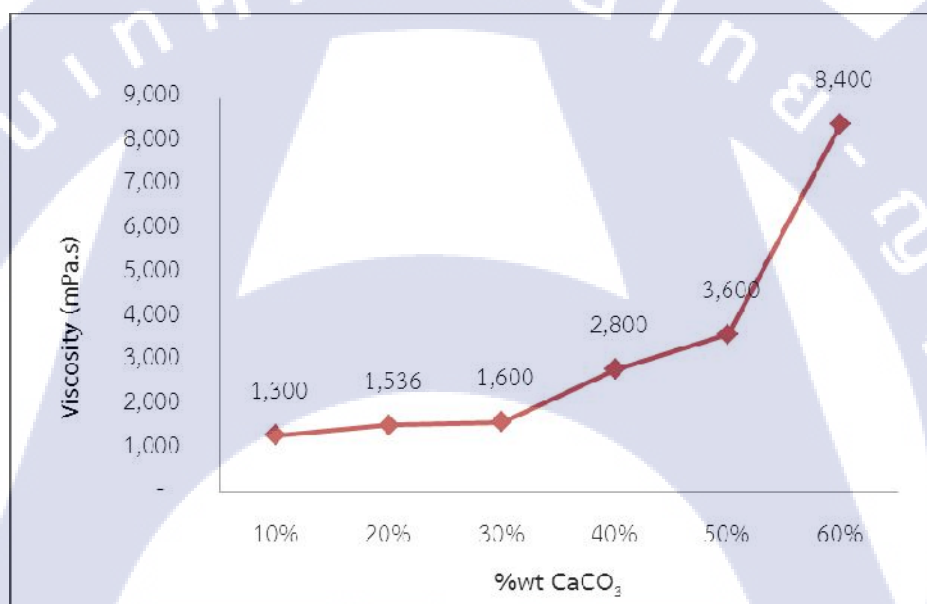
4.4 อิทธิพลของแคลเซียมคาร์บอเนตต่อพอลิยูรีเทนโฟม

4.4.1 อิทธิพลของแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลักษณะทางกายภาพและเคมีของพียูโฟมในห้องปฏิบัติการ

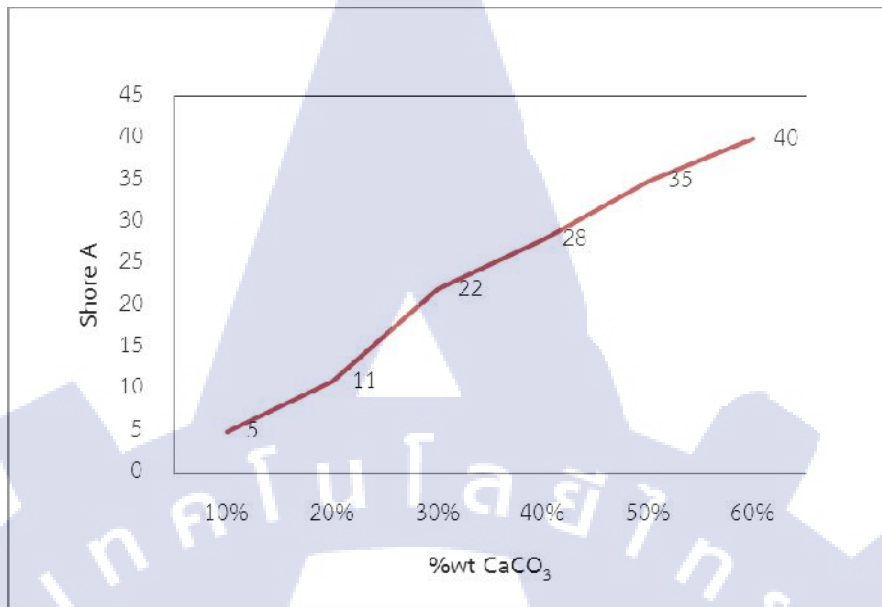
ผลของการเติมสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 7 ไมโครเมตร ด้วยสัดส่วนร้อยละ 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักของพอลิออล ที่มีต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ PU Foam ในแก้วทดลอง สรุปได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 คุณสมบัติ PU Foam จาก Cup Test เมื่อเปลี่ยนค่าร้อยละโดยน้ำหนักของ CaCO_3

CaCO_3 (% wt)	Viscosity (mPa.s)	Cream Time (s)	Full Time (s)	Tack Free Time (s)	% Foam	Shore A
10	1,300	30	160	180	80	5
20	1,536	30	120	150	80	11
30	1,800	30	110	150	80	22
40	2,800	30	120	150	80	28
50	3,600	30	120	150	80	36
60	8,400	30	150	180	82	40



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงผลของ $\%\text{CaCO}_3$ ต่อความหนืดของพอลิออลเรซิน



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงผลของ % CaCO_3 ต่อค่า Shore A ของพอลิยูรีเทนโฟม

พิจารณาตารางที่ 4.4 ซึ่งแสดงค่าคุณสมบัติตามมาตรฐาน 6 ประการของผลิตภัณฑ์ PU Foam จากการทดสอบ Cup Test ในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ ค่าความหนืดซึ่งวัดค่าที่ 30°C (Viscosity 30°C หน่วย mPa.s) ค่าครีมไทม์ (Cream Time หน่วย Sec.) ค่าฟูลไทม์ (Full time หน่วย Sec.) ค่าแทคฟรีไทม์ (Tack Free Time หน่วย Sec.) ค่าร้อยละของโฟม (% Foam) และค่าชอร์เอ (Shore A) ดังนิยามและสมการคำนวณที่แสดงในบทที่ 3

การเพิ่มสัดส่วนสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตปริมาณ ร้อยละ 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักของพอลิออล ทำให้คุณสมบัติด้านความหนืดของพอลิออลเรซิน (Part A) เพิ่มขึ้น ในช่วงของการเพิ่มสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต 10-30 %wt. ค่าความหนืดของพอลิออลเรซินจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ไม่มากเท่ากับผลจากช่วงของการเพิ่มสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต 30-50 %wt. และค่าความหนืดของพอลิออลเรซินจะเพิ่มขึ้นในอัตราสูงสุดในช่วงของการเพิ่มสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต 50-60 %wt. ดังแสดงในรูปที่ 4.14

คุณสมบัติค่าความแข็งตัว (Shore A) จะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อเพิ่มปริมาณของ CaCO_3 ในอัตราที่คงที่สม่ำเสมอ ยกเว้นในช่วงของการเพิ่มสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต 20-30 %wt. อัตราการเพิ่มขึ้นของค่า Shore A จะเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า เมื่อเทียบกับการเพิ่มสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตในช่วงอื่นแสดงในรูปที่ 4.15 ทำให้การสปริงตัวความยืดหยุ่นเมื่อกดด้วยมือของพอลิยูรีเทน

โฟมลดลง เมื่อฉีกเนื้อโฟมลิยรีเทนโฟมดูจะกรอบและไม่เหนียวเพิ่มขึ้น ตามสัดส่วนการเพิ่มสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต

ส่วนของคุณสมบัติด้านปฏิกิริยาเคมี (Reaction Time) ได้แก่ ค่า Cream Time, Full Time, Tack Free Time, %Foam มีค่าใกล้เคียงกัน ยกเว้นที่สัดส่วนปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ 10 และ 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เกิดค่า Full time และ Tack Free Time ยาวนานออกไป ส่วนลักษณะทางกายภาพของพอลิยูรีเทนโฟมที่ 10% wt. ในแก้วทดลอง เมื่อกดดูเนื้อโฟมนิ่ม อ่อนยวบ สปริงตัวคืนรูปช้า เมื่อทิ้งไว้นาน 1 ชั่วโมง เนื้อพอลิยูรีเทนโฟมเกิดการหดและเหี่ยวลง ไม่ทรงรูปเหมือนเดิมในแก้วทดลอง สรุปได้ว่าสัดส่วนของ CaCO_3 ที่เหมาะสมควรจะอยู่ในช่วง 20-40 %wt. เท่านั้น

4.4.2 อิทธิพลของแคลเซียมคาร์บอเนตในกระบวนการฉีดขึ้นรูปของพอลิยูรีเทนโฟมโดยกระบวนการ RIM

อิทธิพลของสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 7 ไมโครเมตรต่อพอลิยูรีเทนโฟม เติมด้วยสัดส่วนร้อยละ 10, 20, 30, 40, 50, และ 60 โดยน้ำหนักของพอลิออล ทำการฉีดขึ้นรูป PU Foam อย่างต่อเนื่องของเครื่องขึ้นรูป (RIM) จำนวน 5 แม่พิมพ์ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นต้นแบบของข้อต่อพอลิยูรีเทนโฟมของฟิลเตอร์รถยนต์ กำหนดอุณหภูมิแม่พิมพ์ราว 30 องศาเซลเซียส ที่ทุกเงื่อนไขการเพิ่มสารผสมแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ค่ามวลของผลิตภัณฑ์แสดงในภาคผนวกที่ ค ดังตารางที่ ค-8 และสรุปได้ว่า

1. กรณีแคลเซียมคาร์บอเนต 10%wt. ลักษณะทางกายภาพของพอลิยูรีเทนโฟม กดนิ่มอ่อนยวบยวบ การสปริงคืนตัวช้า โครงสร้างโฟมไม่แข็งแรงทั้ง 5 ชิ้นงาน ผิวโฟมเรียบมัน ไม่มีหลุมโพรงอากาศ ไม่มีผิวโฟมลอกย่นยุบยิบ การสปริงตัวน้อยมาก ทำให้ไม่เหมาะสมในการผลิตพอลิยูรีเทนโฟมที่มีค่าคุณสมบัติเบื้องต้นตามที่บริษัทและลูกค้าต้องการ
2. กรณีแคลเซียมคาร์บอเนต 20%wt. ถึง 40%wt. ลักษณะทางกายภาพของพอลิยูรีเทนโฟมดี การสปริงตัวดี โครงสร้างโฟมแข็งแรงดีทั้ง 5 ชิ้นงาน ผิวโฟมเรียบมัน ไม่มีหลุมโพรงอากาศ ไม่มีผิวโฟมลอกย่นยุบยิบ
3. กรณีแคลเซียมคาร์บอเนต 50%wt. ถึง 60%wt. ลักษณะทางกายภาพของพอลิยูรีเทนโฟมนั้นเนื้อโฟมแข็งกระด้างเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นของสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต ไม่เหนียว ฉีกกรอบง่ายแต่ผิวโฟมเรียบมัน ไม่มีหลุมโพรงอากาศ ไม่มีผิวโฟมลอกย่นยุบยิบ

ผลการปรับเปลี่ยนแคลเซียมคาร์บอเนตในกระบวนการฉีดขึ้นรูปของพอลิยูรีเทนโฟม สรุปได้ว่า ทุกร้อยละของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มเข้าไปในพอลิออลเรซิน เมื่อนำไปฉีดขึ้นรูปแม่พิมพ์ของ RIM ในกระบวนการผลิตโฟมต้นแบบ (Prototype) ของพอลิยูรีเทนโฟมฟิลเตอร์ (PU Foam Filter) ที่อุณหภูมิผิวหน้าแม่พิมพ์ราว 30 องศาเซลเซียส ทุกกรณีของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มเข้าไปไม่มีผลทำให้เกิดผิวโฟมลอกยับยวบยิบ ผิวไม่เรียบมัน หรือมีหลุมโพรงอากาศ และไม่มีผลต่อระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา (Reaction Time)

แคลเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มเข้าไปมีส่วนช่วยในการเพิ่มน้ำหนักของพอลิออลเรซินในการทำปฏิกิริยา ส่งผลให้ลดต้นทุนในกระบวนการผลิต แต่การเพิ่มในปริมาณที่น้อยเกินไปทำให้โครงสร้างเซลล์โฟมไม่แข็งแรง ไม่ทรงตัวดีนานในแก้วทดลอง การสปริงตัวน้อย ดังในกรณีแคลเซียมคาร์บอเนต 10%wt. แต่การเพิ่มแคลเซียมคาร์บอเนตที่มากเกินไป ดังในกรณีแคลเซียมคาร์บอเนต 50% และ 60% wt. พอลิยูรีเทนโฟมจะมีเนื้อโฟมแข็งกระด้างเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนปริมาณที่เพิ่มขึ้น ไม่เหนียว ฉีกกรอบง่าย ทำให้ไม่เหมาะสมในการผลิตพอลิยูรีเทนโฟมที่มีค่าคุณสมบัติเบื้องต้นตามที่บริษัทและลูกค้าต้องการ

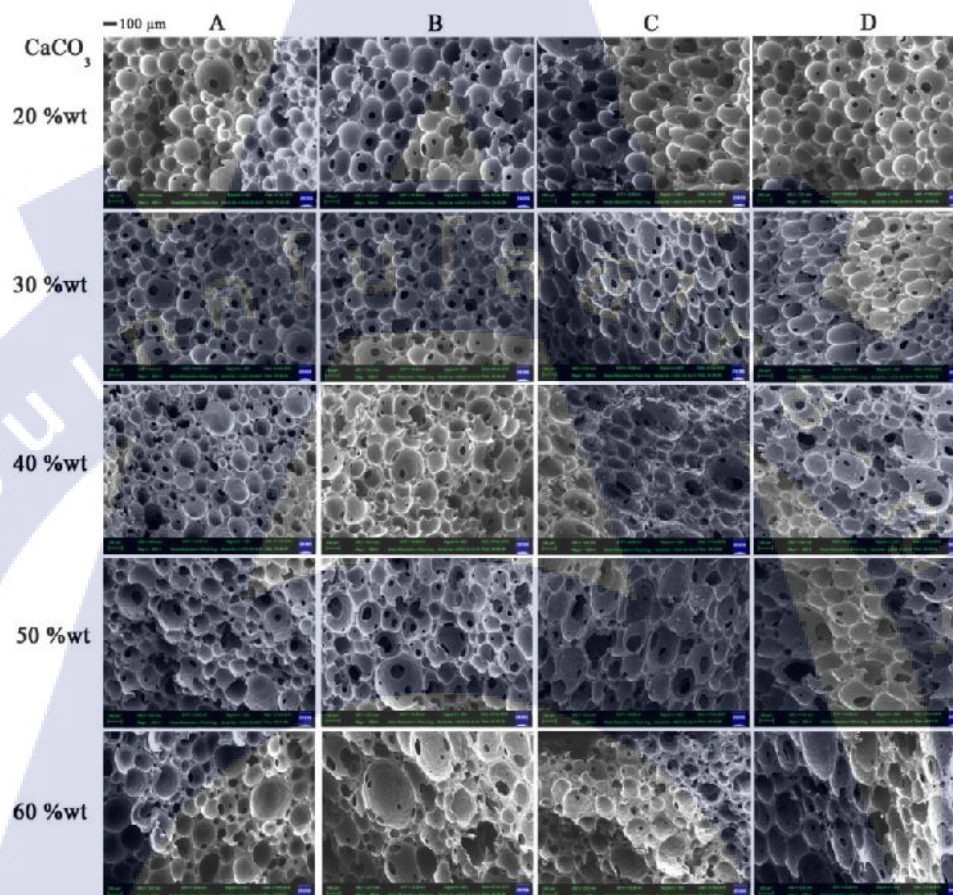
4.5 ผลของแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลักษณะฐานฐานวิทยาของพอลิยูรีเทนโฟม

ผลที่เกิดขึ้นต่อพอลิยูรีเทนโฟมเมื่อเติมสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ที่ร้อยละแคลเซียมคาร์บอเนตที่นำมาวิเคราะห์คือปริมาณ 20, 30, 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักของพอลิออลที่มีต่อคุณลักษณะของโครงสร้างภายในเซลล์โฟม ตลอดจนความหนาแน่นและจำนวนของฟองอากาศของผลิตภัณฑ์ PU Foam ทดสอบด้วย SEM เช่นเดียวกับในหัวข้อ 4.3 โดยการวิเคราะห์ไม่ได้พิจารณาผลจากกรณีร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของพอลิออล เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของพอลิยูรีเทนโฟมไม่ผ่าน คือ กดนิ่ม อ่อนยวบยาบ การสปริงคืนตัวช้า

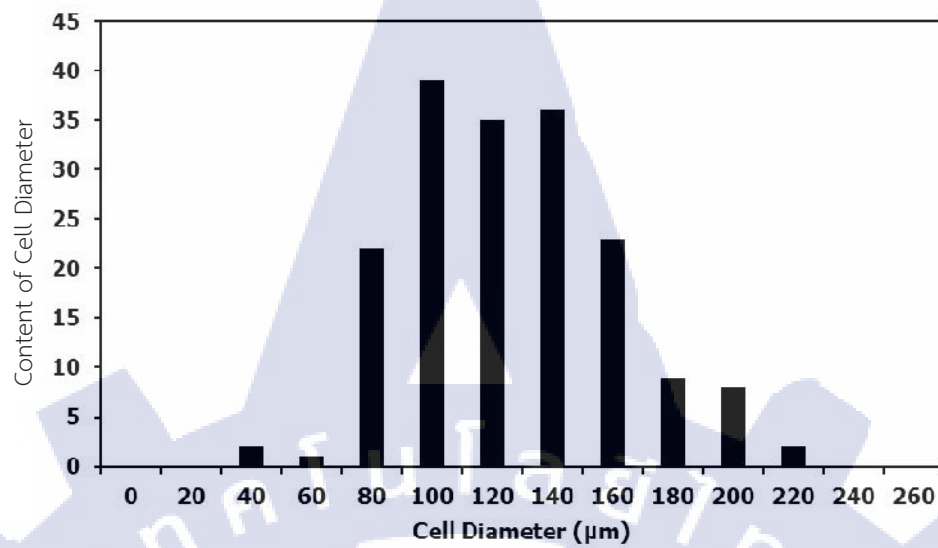
สามารถวิเคราะห์ลักษณะฐานฐานวิทยาของพอลิยูรีเทนโฟมได้ดังรูปที่ 4.16 และการกระจายของขนาดอนุภาคสำหรับกรณีร้อยละโดยน้ำหนักของพอลิออล 20, 30, 40, 50 และ 60 ดังกราฟแท่งในรูปที่ 4.17-4.21 แกนนอน คือ ขนาดของเซลล์โฟมในหน่วยไมโครเมตร แกนตั้ง คือ จำนวนฟองอากาศในแต่ละช่วงของขนาดเซลล์โฟม อันเป็นผลจากปริมาณ CaCO_3 ส่วนค่าเฉลี่ยของขนาดเซลล์และความหนาแน่นเซลล์สรุปไว้ดังรูปที่ 4.22

จากรูปที่ 4.16 วิเคราะห์ได้ว่าที่ปริมาณ CaCO_3 โดยน้ำหนัก 20% และ 30% เซลล์มีขนาดสม่ำเสมอและเรียงใกล้ชิดกัน โดยขนาดอนุภาคของกรณี 20% wt. อยู่ระหว่าง 100-140 ไมโครเมตร ส่วนของ 30% wt. มีขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 60-100 ไมโครเมตร สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตมีผลต่อลักษณะฐานฐานวิทยาของเซลล์โฟมอย่างแน่นอน โดยปริมาณ CaCO_3 ที่มากขึ้นในช่วง 20-40 %wt. ทำให้เซลล์โฟมที่มีฟองขนาดเล็กลงจาก 120 ไมโครเมตร เหลือประมาณ 80 ไมโครเมตร แต่

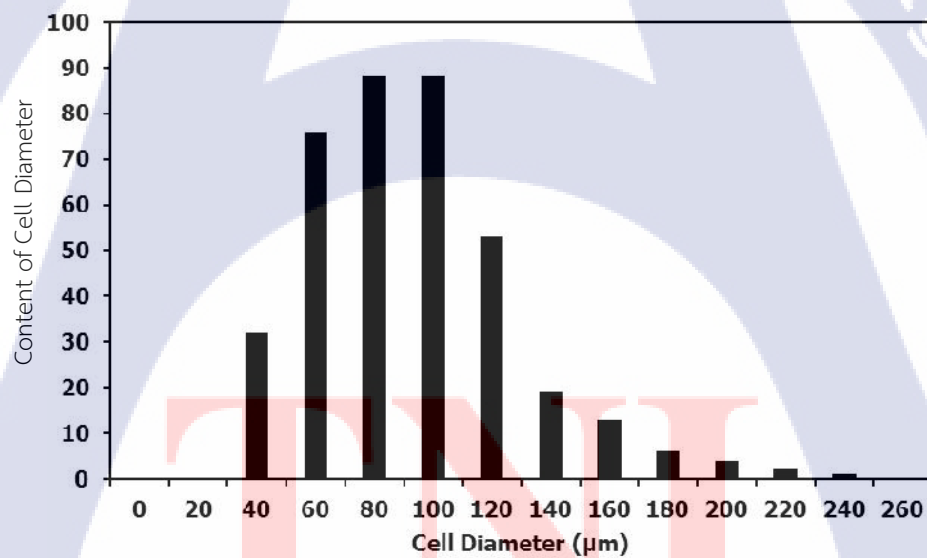
เมื่อเพิ่มปริมาณมากขึ้นในช่วง 50-60 %wt. เซลล์โฟมที่ได้มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งอาจเกิดจาก CaCO_3 กระตุ้นให้มีการขยายขนาดของฟองก๊าซขณะเกิดเซลล์ดีขึ้น จนทำให้เซลล์เกิดการรวมตัวและมีขนาดใหญ่ขึ้น



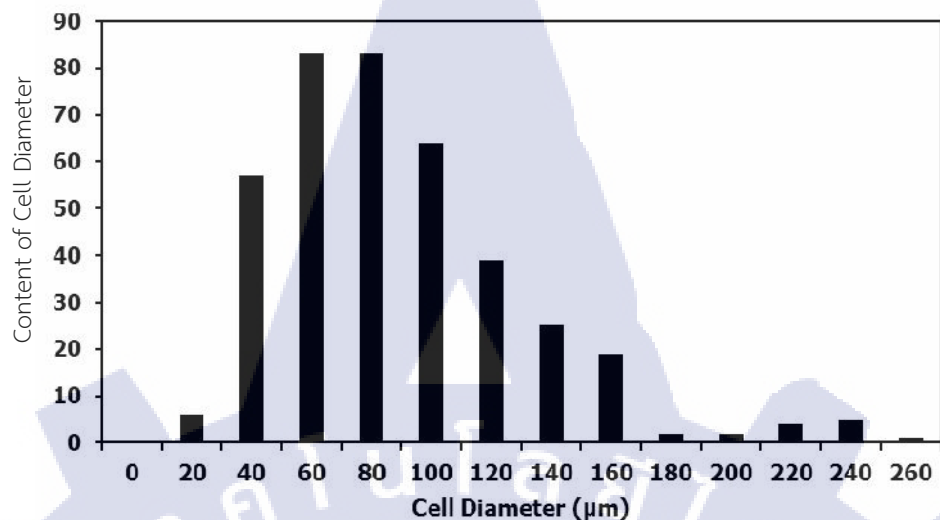
รูปที่ 4.16 ลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิยูรีเทนโฟมเมื่อปรับเปลี่ยนร้อยละโดยน้ำหนักของ CaCO_3 20, 30, 40, 50 และ 60 %wt.



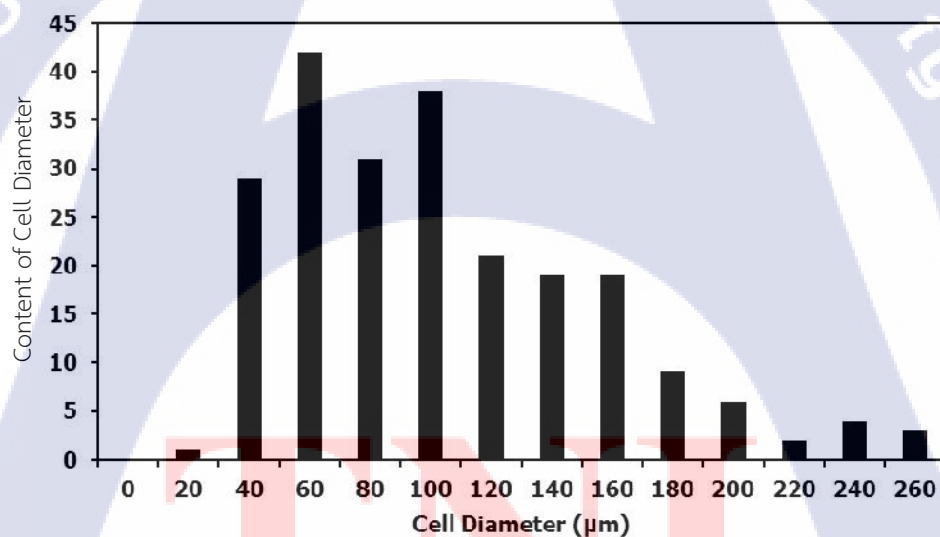
รูปที่ 4.17 ลักษณะการกระจายตัวของขนาดเซลล์พอลิยูรีเทนโฟมด้วยปริมาณ CaCO_3 20 %wt.



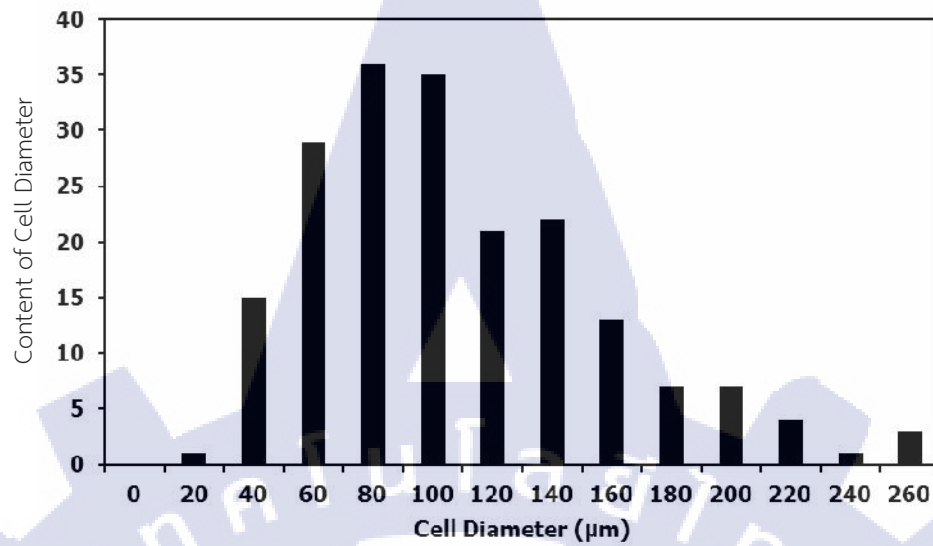
รูปที่ 4.18 ลักษณะการกระจายตัวของขนาดเซลล์ของพอลิยูรีเทนโฟมด้วยปริมาณ CaCO_3 30 %wt.



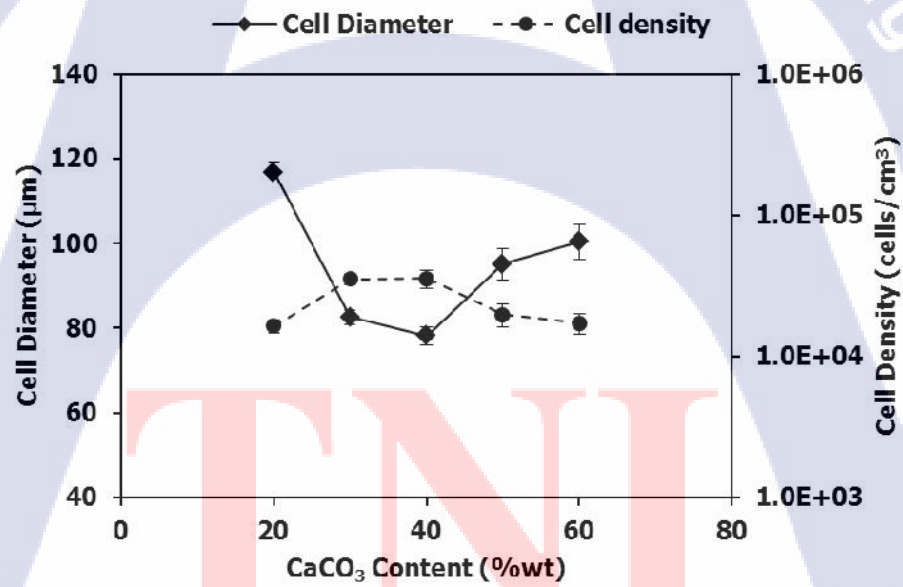
รูปที่ 4.19 ลักษณะการกระจายตัวของขนาดเซลล์ของพอลิยูรีเทนโพลิเมอร์ด้วยปริมาณ CaCO_3 40 %wt.



รูปที่ 4.20 ลักษณะการกระจายตัวของขนาดเซลล์ของพอลิยูรีเทนโพลิเมอร์ด้วยปริมาณ CaCO_3 50 %wt.



รูปที่ 4.21 ลักษณะการกระจายตัวของขนาดเซลล์ของพอลิยูรีเทนโฟมด้วยปริมาณ CaCO_3 60 %wt.



รูปที่ 4.22 ผลของสัดส่วนโดยน้ำหนักของ CaCO_3 ต่อขนาดเซลล์และความหนาแน่นเซลล์โฟม

จากผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยเครื่องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด สามารถสรุปผลเบื้องต้นได้ดังนี้

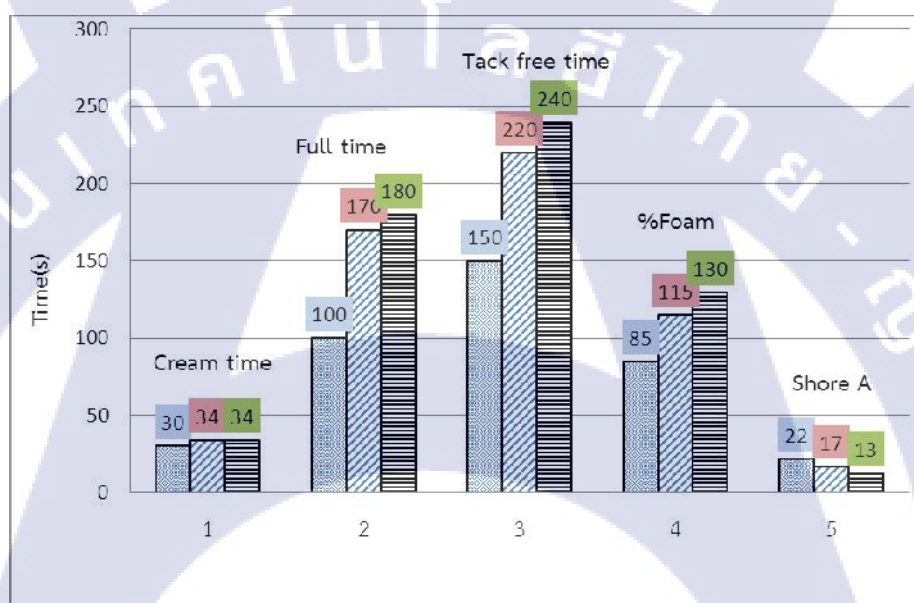
1. ขนาดเซลล์และความหนาแน่นเซลล์ของแต่ละตำแหน่ง A, B, C และ D มีค่าใกล้เคียงกัน
2. บริเวณ A และ B มีพื้นที่มากจึงทำให้ฟองที่ได้มีลักษณะเป็นวงกลม ในขณะที่ C และ D มีพื้นที่น้อยเพราะถูกจำกัดด้วยขอบของแม่พิมพ์ (Mold) จึงทำให้ฟองที่ได้มีแนวโน้มที่จะเป็นวงรี
3. ปริมาณ CaCO_3 ที่มากขึ้นในช่วง 20-40 %wt. ทำให้เซลล์โฟมที่มีฟองขนาดเล็กลงจาก 120 ไมโครเมตร เหลือประมาณ 80 ไมโครเมตร โดยลักษณะสัณฐานที่ดีควรจะมีเซลล์โฟมที่เล็กแต่สม่ำเสมอ แสดงว่าช่วงร้อยละการเติม 30-40 %wt. เหมาะสม แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ CaCO_3 มากขึ้นในช่วง 50-60 %wt. ทำให้เซลล์โฟมที่ได้มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งอาจเกิดจาก CaCO_3 กระตุ้นให้มีการขยายขนาดของฟองก๊าซในระหว่างการเกิดเซลล์ที่ดีขึ้น ฟองก๊าซบางส่วนรวมตัวกันและมีขนาดใหญ่ขึ้น
4. การเพิ่มปริมาณของ CaCO_3 ส่งผลให้มีการกระจายตัวหรือช่วงกว้างของขนาดเซลล์มากขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากการรวมตัวของฟองก๊าซจนได้เซลล์ขนาดใหญ่ขึ้น

4.6 อิทธิพลของระยะเวลาในการเก็บพอลิออลเรซิน

การทดสอบอิทธิพลของช่วงระยะเวลาในการเก็บรักษาน้ำยาพอลิออลเรซิน (Part A) ต่อคุณสมบัติของพอลิออลเรซิน โดยแบ่งน้ำยาจากกระบวนการผลิตปกติในโรงงาน ก่อนจัดส่งให้ลูกค้า โดยกำหนดระยะเวลาในการเก็บน้ำยา 5 และ 14 วัน แล้วนำมาตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำยาในห้องปฏิบัติการ (Cup Test) จากนั้นจึงนำไปเข้ากระบวนการฉีดขึ้นรูป (RIM) จนได้ชิ้นงานพอลิยูรีเทนโฟม ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.5 และแสดงเป็นกราฟแท่งเพื่อให้เปรียบเทียบข้อมูลได้ชัดเจนขึ้นดังกราฟรูปที่ 4.23

ตารางที่ 4.5 ผลการศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาในการเก็บพอลิออลเรซิน (Part A)

ระยะเวลาเก็บ (วัน)	Viscosity (mPa.s)	Cream Time (s)	Full Time (s)	Tack Free Time (s)	% Foam	Shore A	No. of Good Foam
0	1,600	30	100	150	85	22	5
5	1,632	34	170	220	115	17	5
14	1,634	34	180	240	130	13	0



รูปที่ 4.23 ผลของระยะเวลาการเก็บต่อเวลาการเกิดปฏิกิริยา (Cream Time, Full Time, Tack Free Time) ค่า %Foam และค่า Shore A

จากตารางที่ 4.5 พบว่า ช่วงเวลาเก็บของพอลิออลเรซินมีผลต่อคุณสมบัติทางเคมีของน้ำยาอย่างชัดเจน โดยระยะเวลาการเก็บที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่า Reaction Time ของปฏิกิริยา ได้แก่ ค่า Cream Time, Full Time, Tack Free Time, %Foam และค่าความหนืดเพิ่มขึ้น โดยจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 0-5 วันแรกของระยะเวลาการเก็บ หลังจากนั้นวันที่ 6-14 วันของระยะเวลาการเก็บค่าเหล่านี้จะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย

อิทธิพลของ %Foam มีความสำคัญมาก ระยะเวลาในการเก็บน้ำยาทำให้ %Foam ของ น้ำยาเพิ่ม ส่งผลให้ความแข็งแรงและการสปริงตัวลดลง ระยะเวลาการเก็บ 14 วัน ทำให้ %Foam เพิ่มขึ้น จาก 85% เป็น 130% และจากการนำไปฉีดขึ้นรูปจนได้ชิ้นงานพอลิยูรีเทนโฟมในแม่พิมพ์ 5 ชุด ก็เกิด Defect อย่างเห็นได้ชัดเจน กล่าวคือ ผิวโฟมลอก ผิวย่น ยุบยิบทั้ง 5 ชิ้นงาน และเกิดมีหลุมโพรงอากาศแบบผิวปิดในบางชิ้นงาน อาจเนื่องมาจากพอลิอีเทอร์พอลิออลที่ใช้เป็นส่วนประกอบหลักใน พอลิออลเรซินเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับความชื้นในอากาศในระหว่างการเก็บรักษา [2, 11] ที่แม้ว่าจะมีการป้องกันอย่างดีแล้ว แต่ก็มีความเป็นไปได้ที่ความชื้นจากอากาศในบรรยากาศจะแทรกซึมเข้าไป ทำให้เกิดเปอร์เซ็นต์ของโฟมมากขึ้น และส่งผลต่อ Defect ในชิ้นงานที่นำ Part A นี้ไปใช้ในที่สุด



TNIT

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยชิ้นนี้ทำเพื่อศึกษาผลของอิทธิพลของคุณสมบัติของสารตั้งต้นพอลิออลเรซิน (Part A) คือ สัดส่วนผสมสารเติมแต่งแคลเซียมคาร์บอเนต ระยะเวลาการเก็บรักษาพอลิออลเรซิน และเงื่อนไขการผลิตโฟมพอลิยูรีเทนโฟม (PU Foam) คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของแม่พิมพ์ในกระบวนการ RIM โดยมีเป้าหมายเพื่อลดข้อบกพร่อง (Defect) ที่เกิดกับผลิตภัณฑ์ข้อต่อของไส้กรองอากาศรถยนต์ ที่ได้รับแจ้งจากลูกค้าผู้ใช้น้ำยาพอลิออลเรซินว่าเกิดปัญหาผลิตภัณฑ์เสียหายมากที่สุด และมีการเปลี่ยนคีนน้ำยาพอลิออลเรซินบ่อยครั้ง

ระเบียบวิธีวิจัยประกอบด้วย การทดสอบน้ำยาพอลิออลเรซิน 2 ส่วน คือ การทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการ ที่เรียกว่า Cup Test และในการจำลองการผลิตผลิตภัณฑ์ PU Foam สำหรับชิ้นงานข้อต่อไส้กรองอากาศด้วยเครื่องจักร RIM ทำให้พบว่าปัจจัย 3 ประการ ได้แก่ (1) อุณหภูมิเริ่มต้นของแม่พิมพ์ (2) สัดส่วนการเติมสารแคลเซียมคาร์บอเนตในน้ำยาพอลิออลเรซิน และ (3) ระยะเวลาในการเก็บน้ำยาพอลิออลเรซิน มีอิทธิพลต่อคุณลักษณะและ Defect ที่เกิดกับโฟมพอลิยูรีเทน โดยอุณหภูมิแม่พิมพ์ขณะเริ่มต้นกระบวนการ RIM มีผลกระทบมากที่สุด ในขณะที่ระยะเวลาการเก็บรักษาทำให้ %Foam เพิ่มขึ้น และส่งผลให้เกิด Defect เมื่อนำน้ำยาพอลิออลเรซินไปใช้ อย่างไรก็ตาม สัดส่วนของ CaCO_3 ไม่มีผลต่อการเกิด Defect แต่ส่งผลต่อความแข็งแรงและการสปริงตัวของ PU Foam โดยสรุปผลการดำเนินการวิจัยได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Cup Test)

การทดสอบการทำปฏิกิริยาระหว่างพอลิออลเรซิน Part A และไอโซไซยานต Part B ในห้องปฏิบัติการที่เรียกว่า Cup test โดยปฏิกิริยาระหว่าง Part A และ Part B เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ส่งผลให้อุณหภูมิสารผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น ดังนั้นอุณหภูมิของสารตั้งต้นจึงมีอิทธิพลต่อคุณภาพของสารผลิตภัณฑ์โดยอุณหภูมิของสารผลิตภัณฑ์เพิ่มจาก อุณหภูมิเริ่มต้น 30°C โดยเพิ่มขึ้น $31.5-34.0^{\circ}\text{C}$ จนมีอุณหภูมิมากกว่า 60°C ในขณะที่ปริมาตรของสารผลิตภัณฑ์ก็เพิ่มขึ้นจากปริมาตรสารตั้งต้นประมาณ 2 เท่า โดยกราฟการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเวลาแสดงการเปลี่ยนแปลงเป็น 3 ช่วง คือ Bubble Formation, Bubble Growth และ Bubble Stabilization

5.1.2 กระบวนการฉีดขึ้นรูปของพอลิยูรีเทนโฟม

1. อิทธิพลของอุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปของพอลิยูรีเทนโฟม จากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผิวแม่พิมพ์ของเครื่อง RIM จำนวน 5 โมลต์ โดยปรับระดับอุณหภูมิ เริ่มต้นของแม่พิมพ์ 5 ระดับ คือ 20, 30, 40, 50 และ 60°C ได้ผลว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมกับ กระบวนการฉีดขึ้นรูปคือ 30°C ซึ่งทำให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพดีและปราศจากข้อบกพร่องทั้งหมด ในทางกลับกันหากอุณหภูมิเริ่มต้นของแม่พิมพ์ต่ำเกินไป (20°C) หรือสูงเกินไป (60°C) จะทำให้เกิด Defect ทั้งหมด

2. อิทธิพลของอุณหภูมิต่อความหนาแน่นของพอลิยูรีเทนโฟม

ความหนาแน่นของพอลิยูรีเทนโฟมลดลงเมื่ออุณหภูมิผิวแม่พิมพ์สูงขึ้น โดย ความหนาแน่นลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิแม่พิมพ์สูงกว่า 40°C เนื่องจากมวลของผลิตภัณฑ์ ค่อนข้างคงที่ ในขณะที่ปริมาตรเพิ่มขึ้นซึ่งเกิดจากฟองก๊าซจากปฏิกิริยาระหว่าง Part A และ Part B เกิดการขยายตัวและขยายตัวใหญ่ขึ้นเมื่ออุณหภูมิผิวแม่พิมพ์สูงขึ้น

5.1.3 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิยูรีเทนโฟม

คุณลักษณะของโครงสร้างภายในหรือสัณฐานวิทยาของเซลล์ของ PU Foam ซึ่ง ทดสอบด้วยเครื่องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy : SEM) โดยแสดง เป็นภาพขยายที่แสดงการกระจาย รูปร่าง และขนาดของเซลล์โฟม และให้ข้อมูลทางสถิติของความ หนาแน่นและจำนวนของฟองอากาศแต่ละขนาดเซลล์โฟมมีลักษณะเป็นวงกลมขนาดสม่ำเสมอทุก ตำแหน่งการตรวจวัด ยกเว้นตำแหน่งขอบของโมลด์พบฟองมีลักษณะเป็นวงรี การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ในช่วง 20-50°C ส่งผลให้ฟองหรือเซลล์โฟมที่ได้มีขนาดใหญ่ขึ้นเฉลี่ยจาก 70-160 μm . และเนื้อของ พอลิยูรีเทน มีความนุ่มเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากฟองมีขนาดใหญ่ขึ้นจึงส่งผลให้ความหนาแน่นเซลล์ลดลง แต่ในกรณีอุณหภูมิผิวแม่พิมพ์เพิ่มสูงที่ 60°C เซลล์โฟมจะมีขนาดโดยเฉลี่ย 80 μm . โดยฟองหรือ เซลล์โฟมที่เกิดขึ้นนั้นเกิดได้ทั่วทั้งเนื้อของพอลิยูรีเทนและมีขนาดเล็กและทำให้ความหนาแน่น เพิ่มขึ้นอีก แต่ฟองก๊าซขยายตัวเร็วเกินไปสภาพของ PU Foam นุ่มไปจนกลายเป็น Defect

5.1.4 อิทธิพลของแคลเซียมคาร์บอเนตต่อคุณสมบัติพอลิยูรีเทนโฟมจาก Cup Test

ผลของการเพิ่มสัดส่วนการเติมสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ทำให้ค่า ความหนืดของพอลิออลเรซินเพิ่มขึ้น โดยในช่วงของการเพิ่ม CaCO_3 10-30 %wt. ค่าความหนืดของ พอลิออลเรซินจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ไม่มากเท่ากับผลจากช่วงของการเพิ่มที่ 30-50 %wt. และค่าความ หนืดของพอลิออลเรซินจะเพิ่มขึ้นในอัตราสูงสุดในช่วงของการเพิ่ม CaCO_3 50-60 %wt.

ค่า Shore A ที่แสดงถึงความแข็งของ PU Foam จะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ทำให้ความสามารถในการสปริงตัวของผลิตภัณฑ์ลดลง อัตราการเพิ่มของ Shore A ค่อนข้างคงที่ ยกเว้นในช่วงของการเพิ่มแคลเซียมคาร์บอเนต 20-30 %wt. อัตราการเพิ่มขึ้นของค่า Shore A จะเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าในขณะที่คุณสมบัติด้านปฏิกิริยาเคมี ได้แก่ ค่า Cream Time, Full Time, Tack Free Time, %Foam มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าสัดส่วนของ CaCO_3 ไม่มีผลต่อระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา (Reaction time) และไม่มีผลต่อการเกิดผิวโฟมลอก่อนหรือโพรงอากาศที่ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ แต่ความแข็ง และน้ำหนักที่ไม่เหมาะสมก็ทำให้คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ PU Foam ไม่ผ่านมาตรฐานเช่นกัน

5.1.5 อิทธิพลของแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลักษณะพื้นฐานวิทยาของพอลิยูรีเทนโฟม

อิทธิพลของสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 7 ไมโครเมตรต่อพอลิยูรีเทนโฟม เมื่อเติมด้วยสัดส่วนร้อยละ 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักของพอลิออล ทำการฉีดขึ้นรูป PU Foam อย่างต่อเนื่องของเครื่องขึ้นรูป (RIM) จำนวน 5 แม่พิมพ์อุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากันที่ 30°C แคลเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มเข้าไปมีส่วนช่วยในการเพิ่มน้ำหนักของพอลิออลเรซินในการทำปฏิกิริยา ส่งผลให้ลดต้นทุนในกระบวนการผลิต กรณีแคลเซียมคาร์บอเนต 20-40%wt. ลักษณะทางกายภาพของโฟมพอลิยูรีเทนดี การสปริงตัวดี โครงสร้างโฟมแข็งแรงดีแต่ที่ 10%wt. ลักษณะทางกายภาพของพอลิยูรีเทนโฟมกดนิ่มอ่อนยวบยาบ การสปริงตัวช้าผิวโฟมเรียบมัน ไม่มีหลุมโพรงอากาศ ไม่มีผิวโฟมลอก่อนยุบยิบ การสปริงตัวน้อยมาก แต่หากเติมมากไปที่ 50-60%wt. เนื้อโฟมแข็งกระด้างเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น ไม่เหนียว ฉีกกรอบง่ายแต่ผิวโฟมเรียบมัน ไม่มีหลุมโพรงอากาศ ไม่มีผิวโฟมลอก่อน ยุบยิบ

ผลของสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลักษณะพื้นฐานวิทยาของพอลิยูรีเทนโฟมพบว่าปริมาณ CaCO_3 ที่มากขึ้นในช่วง 20-40 %wt. ทำให้เซลล์โฟมที่มีฟองขนาดเล็กลงจาก 120 ไมโครเมตร เหลือประมาณ 80 ไมโครเมตร แต่เมื่อเพิ่มปริมาณมากขึ้นในช่วง 50-60 %wt. เซลล์โฟมที่ได้มีขนาดใหญ่ขึ้นกว่า 180 ไมโครเมตรซึ่งอาจเกิดจาก CaCO_3 กระตุ้นให้มีการขยายขนาดของฟองก๊าซในระหว่างการเกิดเซลล์ที่ดีขึ้น ฟองก๊าซบางส่วนรวมตัวกันและมีขนาดใหญ่ขึ้นในขณะที่ความหนาแน่นจะลดลงเมื่ออัตราส่วนผสม CaCO_3 เพิ่มจาก 40%wt. เป็น 60 %wt. แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าสำหรับกรณีนี้อัตราส่วนผสมของ CaCO_3 ไม่ควรเกิน 40 %wt.

5.1.6 อิทธิพลของระยะเวลาในการเก็บฟอลิโอลเรซิน

ระยะเวลาเก็บรักษาฟอลิโอลเรซิน (Part A) 5 และ 14 วันก่อนนำไปฉีดขึ้นรูปมีผลต่อคุณสมบัติทางเคมีของน้ำยาพบว่าระยะเวลาการเก็บรักษาที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่า Reaction Time ของปฏิกิริยา ได้แก่ ค่า Cream Time, Full Time, Tack Free Time, %Foam และค่าความหนืดเพิ่มขึ้นระยะเวลาในการเก็บน้ำยาทำให้ %Foam ของน้ำยาเพิ่ม ส่งผลให้ความแข็งแรงและการสปริงตัวลดลง จากการนำไปฉีดขึ้นรูปจนได้ชิ้นงานพอลิยูรีเทนโฟมในแม่พิมพ์ก็เกิด Defect อย่างเห็นได้ชัดเจน คือ ผิวโฟมลอก ผิวย่น ยุบยิบ และเกิดมีหลุมโพรงอากาศแบบผิวปิดในบางชิ้นงานเนื่องจากพอลิอีเทอร์พอลิโอลที่ใช้เป็นส่วนประกอบหลักในพอลิโอลเรซินเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับความชื้นในอากาศในระหว่างการเก็บรักษา

5.2 ข้อเสนอแนะของงานวิจัย

ผลงานวิจัยนี้นำมาซึ่งข้อเสนอแนะในการดำเนินการวิจัยต่อเนื่อง ดังนี้

5.2.1 ควรพิจารณาปัจจัยอื่นที่อาจมีผลต่อคุณสมบัติของ PU Foam โดยทดสอบองค์ประกอบอื่นของพอลิโอลเรซิน อาทิ ปริมาณสารเชื่อมโยง (Crosslinker) ปริมาณสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) ปริมาณสารตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ว่าจะมีผลต่อการเกิดข้อบกพร่อง (Defect) ของพอลิยูรีเทนโฟมและคุณภาพของผลิตภัณฑ์หรือไม่

5.2.2 การพัฒนาระบบหล่อเย็นสำหรับแม่พิมพ์ของ RIM เพื่อควบคุมอุณหภูมิแม่พิมพ์ให้อยู่ในระดับใกล้เคียงกับอุณหภูมิบรรยากาศที่ 30°C

5.2.3 การพัฒนาระบบประเมินผลโดยภาพ (Image Processing) เพื่อตรวจสอบการเกิด Defect ในระหว่างกระบวนการผลิต

TNI



บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- [1] พงศ์ประภาส ปิยมโนชา, "การทำนายโครงสร้างของพอลิเมอร์โพลิโพรพิลีนโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์," วิทยานิพนธ์ วศ.ม. (วิศวกรรมเคมี), สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, 2549.
- [2] ปรีชา พหลเทพ, โพลีเมอร์. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยรามคำแหง, 2549.
- [3] ขวลิต อรรถคำถิวงศ์, "การเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์พอลิยูรีเทนโดยใช้การวิเคราะห์การไหลของการฉีดแบบทำปฏิกิริยา," วิทยานิพนธ์ วศ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล), มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, 2549.
- [4] ณรงค์ จิตตปัญญาพงศ์ และคณะ, "การศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยพื้นฐานและการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับกระบวนการฉีดขึ้นรูปพอลิยูรีเทนโพลิโพรพิลีน," วิทยานิพนธ์ วศ.บ. (วิศวกรรมเคมี), สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, 2546.
- [5] ปรีชาวัฒน์ รักสวย และคณะ, "การศึกษาปัจจัยพื้นฐานที่มีผลต่อการฉีดขึ้นรูปพอลิยูรีเทนโพลิโพรพิลีน," วิทยานิพนธ์ วศ.บ. (วิศวกรรมเคมี), สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, 2547.
- [6] อนุวัติ แซ่ตั้ง และ อติชัย รุ่งวิชานีวัฒน์, "อิทธิพลของปริมาณไอโซไซยาเนตอิสระในตัวประสานยูรีเทนต่อสมบัติของโพลิเมอร์," การประชุมทางวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, ครั้งที่ 39, กรุงเทพฯ, 5-7 กุมภาพันธ์ 2544, หน้า 244-249.
- [7] ขวยากรณ์ เพ็ชฌุฬาศิษฐ์, "นวัตกรรมใหม่ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมของน้ำมันธรรมชาติดัดแปรพอลิเอสเตอร์สำหรับการเตรียมพอลิยูรีเทนชีวภาพ," วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ, vol. 12, no. 2, pp. 66-74, กรกฎาคม-ธันวาคม 2552.
- [8] วรกร ศรีโง้ง, "ผลของสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อสมบัติเชิงกลของพอลิยูรีเทนโพลิโพรพิลีนแบบยืดหยุ่น," วิทยานิพนธ์ วศ.ม. (วิศวกรรมเคมี), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 2551.
- [9] ปิยะภูมิ มาศโค้ง และคณะ, "การเตรียมคอมโพสิตของพอลิยูรีเทนโพลิโพรพิลีนผสมเส้นใยปอ," วิศวกรรมลาดกระบัง, vol. 25, no. 3, pp. 42-47, กันยายน 2551.
- [10] จิตติมา ตะสุวรรณ, "การพัฒนาพอลิเอสเตอร์สำหรับการผลิตพอลิยูรีเทนโพลิโพรพิลีนแบบยืดหยุ่น," วิทยานิพนธ์ วศ.ม. (วิศวกรรมเคมี), มหาวิทยาลัยศิลปากร, กรุงเทพฯ, 2554.
- [11] นิธิพงษ์ โชติวิทยพร, "การใช้โพรพิลีนออกไซด์พอลิเอสเตอร์เป็นสารเปิดเซลล์ในโพลิเมอร์พอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่น," วิทยานิพนธ์ วศ.ม. (ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 2555.

- [12] K. Ganiyu et al., "Effective of Calcium Carbonate of Different Composition on Mechanical Properties of Flexible Polyurethane Foam," *Nature and Science*, vol. 8, no.9, pp. 92–101, 2010.
- [13] Chan Wen Shan et al., "Study of Flexible Polyurethane Foams Reinforced with Coir Fibres and TyreParticles," *International Journal of Applied Physics and Mathematics*, vol. 2, no.2, pp. 123-130, March 2012.
- [14] M.A. Usman et al., "Optimum Calcium Carbonate Filler Concentration for Flexible Polyurethane Foamcomposite," *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, vol. 11, no.3, pp. 311-320, 2012.
- [15] จตุพร วุฒิกนกกาญจน์. "การสังเคราะห์เทอร์โมเซต". [Online] Available : www.kmutt.ac.th/research/pentec/download/Chapter/209.pdf. [Accessed : March 20, 2015].
- [16] G. Oertel, *Polyurethane Handbook*, 2nd ed., Munich : Hanser, 1994.
- [17] G.K. Latinwo, "The predictive effects of filler materials on the mechanical Properties of flexible polyurethane foam," Ph.D desertation, (Chemical Engineering), University of Lagos, Nigeria, 2009.
- [18] K.J. Saunders, *Organic Polymer Chemistry*. London: Chapman and Hall, 1973.
- [19] Bryan D. Kaushiva, "Structure Property Relationships in Flexible Polyurethane Foams," Ph.D Dissertation, (Chemical Engineering), Polytechnic Institute and State University, Virginia, 1999.



ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

อุณหภูมิของปฏิกิริยาระหว่างพอลิออลเรซินและไอโซไซยาเนตในแก้วทดลอง
(Cup Test)

TNI

ตารางที่ ก-1 บันทึกผลของอุณหภูมิขณะการดำเนินไปของปฏิกิริยากับเวลา

เวลา (วินาที)	อุณหภูมิของปฏิกิริยา	
	ปริมาณสารตั้งต้น A+B : 48 + 8 (กรัม)	ปริมาณสารตั้งต้น A+B : 96+16 (กรัม)
0	30	30
10	32	33
20	33	34
30	35	39
40	38	43
50	41	46
60	44.5	50
70	48	53
80	51	54
90	52	55.5
100	53	57
110	54	58
120	55.5	58.5
130	56	59.5
140	57	60.5
150	57.5	61
160	60	61.5
170	60.5	62
180	61	62.5
190	61	63
200	61.5	63.5
210	61.5	63.5
220	61.5	64

ภาคผนวก ข.

อุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ

TNI

ตารางที่ ข-1 คุณสมบัติของพอลิยูรีเทนโฟมที่ระหว่าง Part A และ Part B ในแก้วทดลองในห้องปฏิบัติการ

Specification	Unit	Results/Date of Experiment		
		2-07-2014	6-08-2014	8-08-2014
Viscos@30 °C	mPa.s	1,600	1,680	1,680
Cream Time	sec	30	31	31
Full Time	sec	120	130	130
Tack Free Time	sec	170	170	170
% Foam	%	80	80	80
Shore A 1 hr.	-	20	20	20

ตารางที่ ข-2 บันทึกผลการวัดสภาพอากาศขณะทำการทดลอง

การทดลองที่ระดับ อุณหภูมิ ผิวแม่พิมพ์ (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิ บรรยากาศขณะ ทำการทดลอง (องศาเซลเซียส)	ค่าความชื้น บรรยากาศ (เปอร์เซ็นต์)	วันที่ทำการ ทดลอง (วัน-เดือน-ปี)	เวลาทำการ ทดลอง
20	18	37	6-08-14	16.40
30	26.5	38	6-08-14	10.30
40	36.0	10	2-07-14	15.00
50	32.5	43	2-07-14	16.43
60	35	15	8-08-14	11.40

ตารางที่ ข-3 บันทึกผลการวัดอุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ที่ระดับอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

ลำดับ แม่พิมพ์	ตำแหน่ง การวัด อุณหภูมิ	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	อุณหภูมิ เฉลี่ย (°C)	น้ำหนัก ชิ้นงาน (กรัม)
1	รอบวงนอก	19.5	19.5	20.0	19.7	198.06
	รอบวงใน	19.5	19.5	19.5	19.5	
2	รอบวงนอก	19.0	19.0	19.5	19.2	190.08
	รอบวงใน	18.5	18.5	19.0	18.7	
3	รอบวงนอก	18.0	18.0	18.0	18.0	199.4
	รอบวงใน	18.0	18.5	18.0	18.2	
4	รอบวงนอก	18.0	18.0	18.5	18.2	200.02
	รอบวงใน	17.5	18.0	18.5	18.0	
5	รอบวงนอก	17.5	18.0	18.0	17.8	187.78
	รอบวงใน	17.0	17.0	17.0	17.0	

ตารางที่ ข-4 บันทึกผลการวัดอุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ที่ระดับอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

ลำดับ แม่พิมพ์	ตำแหน่ง การวัด อุณหภูมิ	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	อุณหภูมิ เฉลี่ย (°C)	น้ำหนัก ชิ้นงาน (กรัม)
1	รอบวงนอก	27	27	27.5	27.17	199.33
	รอบวงใน	27.5	27	27.5	27.33	
2	รอบวงนอก	27.5	26.5	27.5	27.17	195.58
	รอบวงใน	27	27	26.5	26.83	
3	รอบวงนอก	26.5	26.5	27	26.67	192.02
	รอบวงใน	26.5	27	27	26.83	
4	รอบวงนอก	26.5	27	26.5	26.67	194.69
	รอบวงใน	26.5	26.5	27	26.67	
5	รอบวงนอก	26.5	27	27	26.83	190.84
	รอบวงใน	26.5	26.5	26.5	26.50	

ตารางที่ ข-5 บันทึกผลการวัดอุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ที่ระดับอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

ลำดับ แม่พิมพ์	ตำแหน่ง การวัด อุณหภูมิ	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	อุณหภูมิ เฉลี่ย (°C)	น้ำหนัก ชิ้นงาน (กรัม)
1	รอบวงนอก	39.5	42	40.5	40.67	212.51
	รอบวงใน	38.5	41	40	39.83	
2	รอบวงนอก	39	40	40.5	39.83	211.13
	รอบวงใน	38.5	40	39.5	39.33	
3	รอบวงนอก	39	41	40.5	40.17	210.96
	รอบวงใน	39.5	40.5	39	39.67	
4	รอบวงนอก	40.5	38	39	39.17	211.35
	รอบวงใน	40	40	40	40.00	
5	รอบวงนอก	41	41.5	41	41.17	207.15
	รอบวงใน	39.5	42	40.5	40.67	

ตารางที่ ข-6 บันทึกผลการวัดอุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ที่ระดับอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

ลำดับ แม่พิมพ์	ตำแหน่ง การวัด อุณหภูมิ	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	อุณหภูมิ เฉลี่ย (°C)	น้ำหนัก ชิ้นงาน (กรัม)
1	รอบวงนอก	43	42.5	44	43.17	209.80
	รอบวงใน	46	46	45.5	45.83	
2	รอบวงนอก	45.5	45.5	46	45.67	209
	รอบวงใน	45	48.5	44	45.83	
3	รอบวงนอก	48.5	47	48.5	48.00	207.9
	รอบวงใน	49	53	46.5	49.50	
4	รอบวงนอก	43	43	44	43.33	208
	รอบวงใน	55	45.5	47.5	49.33	
5	รอบวงนอก	46.5	50.5	48.5	48.50	208
	รอบวงใน	43	42.5	44	43.17	

ตารางที่ ข-7 บันทึกผลการวัดอุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ที่ระดับอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

ลำดับ แม่พิมพ์	ตำแหน่ง การวัด อุณหภูมิ	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	อุณหภูมิ เฉลี่ย (°C)	น้ำหนัก ชิ้นงาน (กรัม)
1	รอบวงนอก	60	61	62	61.00	198.48
	รอบวงใน	60	60.5	61	60.50	
2	รอบวงนอก	58	62	61.5	60.50	204.07
	รอบวงใน	58	62	65	61.67	
3	รอบวงนอก	59	60.5	58.5	59.33	201.89
	รอบวงใน	60.5	59	58.5	59.33	
4	รอบวงนอก	59.5	61.5	61.5	60.83	201.24
	รอบวงใน	58.5	59	59	58.83	
5	รอบวงนอก	61.5	62	62	61.83	199.7
	รอบวงใน	60	61	62	61.00	

ภาคผนวก ค.

การเพิ่มสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3)

TNI

ตารางที่ ค-1 บันทึกผลการวัดสภาพอากาศขณะทำการทดลอง

ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	อุณหภูมิบรรยากาศขณะทำ การทดลอง (องศาเซลเซียส)	ค่าความชื้นบรรยากาศ (เปอร์เซ็นต์)
10	33	24
20	29	40
30	32	10
40	31.5	35
50	31.5	38
60	32	22

ตารางที่ ค-2 บันทึกผลการวัดอุณหภูมิการเติมสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตปริมาณ 10 %wt.

ลำดับ แม่พิมพ์	ตำแหน่ง การวัด อุณหภูมิ	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	อุณหภูมิ เฉลี่ย (°C)	น้ำหนัก ชิ้นงาน (กรัม)
1	รอบวงนอก	32.5	33	33	32.83	205.2
	รอบวงใน	32.5	32	34	32.83	
2	รอบวงนอก	32	32	32.5	32.17	204.83
	รอบวงใน	32.5	32.5	32.5	32.50	
3	รอบวงนอก	32.5	33	32.5	32.67	209.24
	รอบวงใน	32.5	33	32.5	32.67	
4	รอบวงนอก	32	32	32.5	32.17	209.58
	รอบวงใน	32	32.5	32	32.17	
5	รอบวงนอก	32	32	33	32.33	209.64
	รอบวงใน	32	32	32.5	32.17	

ตารางที่ ค-3 บันทึกผลการวัดอุณหภูมิการเติมสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตปริมาณ 20 %wt.

ลำดับ แม่พิมพ์	ตำแหน่ง การวัด อุณหภูมิ	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	อุณหภูมิ เฉลี่ย (°C)	น้ำหนัก ชิ้นงาน (กรัม)
1	รอบวงนอก	31.5	31	31.5	31.33	200.37
	รอบวงใน	31.5	31.5	31.5	31.50	
2	รอบวงนอก	31.5	31.5	31.5	31.50	198.00
	รอบวงใน	31.5	31.5	31.5	31.50	
3	รอบวงนอก	31	31.5	31.5	31.33	193.02
	รอบวงใน	31	31	31.5	31.17	
4	รอบวงนอก	31.5	31	31.5	31.33	199.73
	รอบวงใน	31.5	30.5	30.5	30.83	
5	รอบวงนอก	30.5	31	30.5	30.67	197.92
	รอบวงใน	31	30.5	31	30.83	

ตารางที่ ค-4 บันทึกผลการวัดอุณหภูมิการเติมสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตปริมาณ 30 %wt.

ลำดับ แม่พิมพ์	ตำแหน่ง การวัด อุณหภูมิ	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	อุณหภูมิ เฉลี่ย (°C)	น้ำหนัก ชิ้นงาน (กรัม)
1	รอบวงนอก	33	33	34	33.33	199.72
	รอบวงใน	34	33	34	33.67	
2	รอบวงนอก	35	32.5	34	33.83	196.77
	รอบวงใน	36	33.5	34	34.50	
3	รอบวงนอก	37	33	34	34.67	199.95
	รอบวงใน	38	34	34.5	35.50	
4	รอบวงนอก	32.5	33	33	32.83	199.96
	รอบวงใน	32	33	32.5	32.50	
5	รอบวงนอก	33	33.5	33.5	33.33	195.77
	รอบวงใน	33	33	33	33.00	

ตารางที่ ค-5 บันทึกผลการวัดอุณหภูมิการเติมสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตปริมาณ 40 %wt.

ลำดับ แม่พิมพ์	ตำแหน่ง การวัด อุณหภูมิ	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	อุณหภูมิ เฉลี่ย (°C)	น้ำหนัก ชิ้นงาน (กรัม)
1	รอบวงนอก	32	31	32	31.67	210.17
	รอบวงใน	32	31.5	32	31.83	
2	รอบวงนอก	32	31	32.5	31.83	208.57
	รอบวงใน	31.5	32.5	31.5	31.83	
3	รอบวงนอก	32	32	32.5	32.17	209.54
	รอบวงใน	32	32	31.5	31.83	
4	รอบวงนอก	31.5	31	32	31.50	210.12
	รอบวงใน	31.5	32	32	31.83	
5	รอบวงนอก	32	31.5	32	31.83	209.39
	รอบวงใน	31.5	31.5	32	31.67	

ตารางที่ ค-6 บันทึกผลการวัดอุณหภูมิการเติมสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตปริมาณ 50 %wt.

ลำดับ แม่พิมพ์	ตำแหน่ง การวัด อุณหภูมิ	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	อุณหภูมิ เฉลี่ย (°C)	น้ำหนัก ชิ้นงาน (กรัม)
1	รอบวงนอก	32	32	32	32.00	210.41
	รอบวงใน	32	32	32.5	32.17	
2	รอบวงนอก	32	32	32	32.00	208.56
	รอบวงใน	32.5	32	32	32.17	
3	รอบวงนอก	32	32	32	32.00	208.88
	รอบวงใน	32.5	32	32	32.17	
4	รอบวงนอก	32	32	32.5	32.17	209.62
	รอบวงใน	32	31.5	32	31.83	
5	รอบวงนอก	32	32	32	32.00	210.14
	รอบวงใน	32	32	32	32.00	

ตารางที่ ค-7 บันทึกผลการวัดอุณหภูมิการเติมสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตปริมาณ 60 %wt.

ลำดับ แม่พิมพ์	ตำแหน่ง การวัด อุณหภูมิ	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	อุณหภูมิ เฉลี่ย (°C)	น้ำหนัก ชิ้นงาน (กรัม)
1	รอบวงนอก	32.5	33	33	32.83	205.20
	รอบวงใน	32.5	32	34	32.83	
2	รอบวงนอก	32	32	32.5	32.17	204.83
	รอบวงใน	32.5	32.5	32.5	32.50	
3	รอบวงนอก	32.5	33	32.5	32.67	209.24
	รอบวงใน	32.5	33	32.5	32.67	
4	รอบวงนอก	32	32	32.5	32.17	209.58
	รอบวงใน	32	32.5	32	32.17	
5	รอบวงนอก	32	32	33	32.33	209.64
	รอบวงใน	32	32	32.5	32.17	

ตารางที่ ค-8 บันทึกผลการทดลองการเพิ่มแคลเซียมคาร์บอเนตในกระบวนการฉีดขึ้นรูปพอลิยูรีเทนโฟม

ลำดับแม่พิมพ์	ร้อยละ CaCO_3 โดยน้ำหนัก/น้ำหนักชิ้นงาน (กรัม)					
	10%	20%	30%	40%	50%	60%
1	212.7	200.4	203.4	210.2	210.4	205.2
2	212.8	198.0	203.9	208.6	208.6	204.8
3	212.5	193.0	204.2	209.5	208.9	209.2
4	209.6	199.7	202.6	210.1	209.6	209.6
5	215.5	197.9	203.1	209.4	210.1	209.6
Average (g)	212.6	197.8	203.4	209.6	209.5	207.7
T_mold_av (°C)	30.71	31.20	33.58	31.80	30.05	32.45

ภาคผนวก ง.

ระยะเวลาการเก็บพอลิออลเรซิน Part A

TNI

ตารางที่ ง-1 บันทึกผลการวัดสภาพอากาศขณะทำการทดลอง

ระยะเวลาเก็บ (วัน)	อุณหภูมิบรรยากาศขณะทำ การทดลอง (องศาเซลเซียส)	ค่าความชื้นบรรยากาศ (เปอร์เซ็นต์)
5	32	10
14	30	15

ตารางที่ ง-2 บันทึกผลการวัดอุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปพอลิยูรีเทนโฟม ระยะเวลา
เก็บพอลิออลเรซิน 5 วัน

ลำดับ แม่พิมพ์	ตำแหน่ง การวัด อุณหภูมิ	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	อุณหภูมิ เฉลี่ย (°C)	น้ำหนัก ชิ้นงาน (กรัม)
1	รอบวงนอก	34	33.5	34	33.83	203.36
	รอบวงใน	34	33.5	34	33.83	
2	รอบวงนอก	33	33.5	33	33.17	203.88
	รอบวงใน	34	33.5	34	33.83	
3	รอบวงนอก	34	33.5	33	33.50	204.19
	รอบวงใน	34	33.5	33.5	33.67	
4	รอบวงนอก	34	33	34	33.67	202.64
	รอบวงใน	34	33	33.5	33.50	
5	รอบวงนอก	33	33.5	33.5	33.33	203.14
	รอบวงใน	33.4	33.5	33.5	33.47	

ตารางที่ ง-3 บันทึกผลการวัดอุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปพอลิยูรีเทนโฟม ระยะเวลา
เก็บพอลิออลเรซิน 14 วัน

ลำดับ แม่พิมพ์	ตำแหน่ง การวัด อุณหภูมิ	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	อุณหภูมิ เฉลี่ย (°C)	น้ำหนัก ชิ้นงาน (กรัม)
1	รอบวงนอก	31	30	30	30.33	210.88
	รอบวงใน	30	31.5	30	30.50	
2	รอบวงนอก	30.5	30	30.5	30.33	209.96
	รอบวงใน	31	30	30.5	30.50	
3	รอบวงนอก	30	29.5	30	29.83	208.94
	รอบวงใน	31	29.5	30	30.17	
4	รอบวงนอก	30.5	30	30.5	30.33	207.36
	รอบวงใน	29.5	30	30	29.83	
5	รอบวงนอก	30	30	30.5	30.17	209.13
	รอบวงใน	30	30.5	31	30.50	

ภาคผนวก จ.

การถ่ายภาพโครงสร้างพื้นฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
(Scanning Electron Microscope)

TNI

การถ่ายภาพโครงสร้างพื้นฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) มีขั้นตอนดังนี้

1. ตัดชิ้นส่วนพอลิยูรีเทนโฟมให้เป็นชิ้นเล็กๆ แสดงในรูปที่ จ-1
2. ทำการบากด้านข้างตามแนวขวางบริเวณตรงกลางของชิ้นงานพอลิยูรีเทนโฟมเพียงเล็กน้อย
3. นำชิ้นส่วนพอลิยูรีเทนโฟมที่ได้ขนาด แขนในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 2 นาทีเพื่อให้โฟมมีความแข็งและเปราะซึ่งจะสามารถหักได้ง่าย แสดงในรูปที่ จ-2 และรูปที่ จ-3
4. จากนั้นทำการหักโฟม ตอนที่แช่อยู่ในไนโตรเจนเหลว โดยใช้ปากคีบจับที่ปลายด้านข้างทั้ง 2 ด้านของชิ้นงานและกดเข้าหากันจะทำให้เกิดการหักบริเวณที่เกิดการบากบนชิ้นงานแสดงในรูปที่ จ-4 จากนั้นเก็บตัวอย่างของพอลิยูรีเทนโฟมสำหรับศึกษาสัณฐานวิทยา
5. นำตัวอย่างพอลิยูรีเทนโฟมที่ได้ไปเคลือบทองด้วยเครื่องเคลือบทองเพื่อให้พอลิยูรีเทนโฟมมีคุณสมบัติของการนำไฟฟ้าแสดงในรูปที่ จ-5
6. ถ่ายภาพไมโครกราฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดแสดงในรูปที่ จ-6
7. วิเคราะห์ผลหาขนาดเซลล์โฟมโดยใช้โปรแกรมอิมเมจ เจ (Image J) แสดงในรูปที่ จ-7



รูปที่ จ-1 การตัดชิ้นส่วนพอลิยูรีเทนโฟม



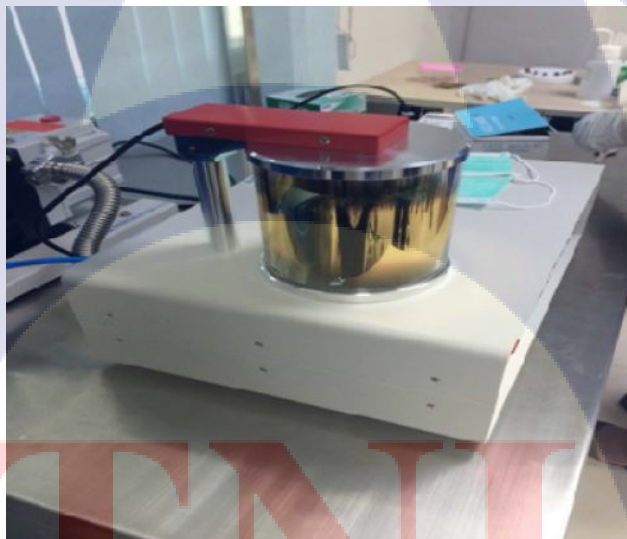
รูปที่ จ-2 การแช่พอลิยูรีเทนโฟมในไนโตรเจนเหลว



รูปที่ จ-3 การแช่พอลิยูรีเทนโฟมในไนโตรเจนเหลว



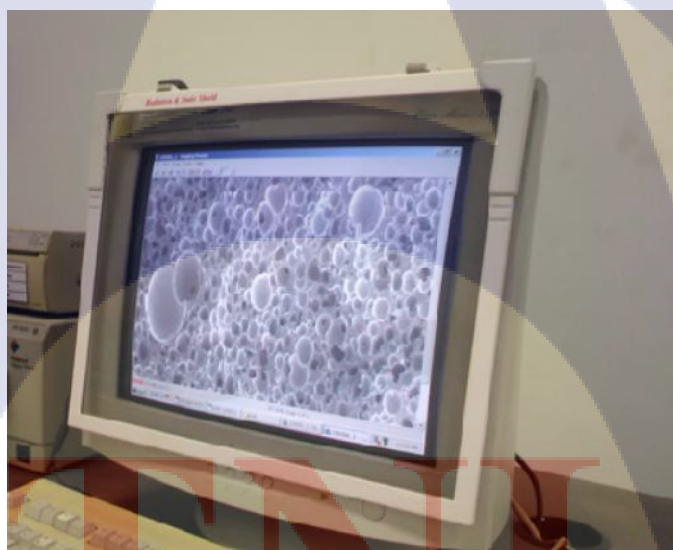
รูปที่ จ-4 การหักบริเวณที่เกิดการบากบนชิ้นงาน



รูปที่ จ-5 เครื่องเคลือบทอง



รูปที่ จ-6 เครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด



รูปที่ จ-7 ผลวิเคราะห์ขนาดเซลล์โฟมโดยใช้โปรแกรมอิมเมจ เจ (Image J)