สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาปัจจัยพื้นฐานที่มีผลต่อการฉีดขึ้นรูปพอลิยูรีเทนโฟม

นายปรียวัฒน์ รักสวย
นายสาธิต ผไทวณิชย์
นายเอกรัฐ นารีแพงศรี

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....61513
วัน,เดือน,ปี 18 ก.ค. 2549

.b.....
.i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2547

STUDY OF PROCESSING PARAMETERS OF POLYURETHANE FOAM IN REACTION INJECTION MOLDING

MR. PREEYAWAT RUGSOUY
MR. SATIT PHATHAIWANIT
MR. EKARAT NAREEPANGSRI

A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2004

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การศึกษาปัจจัยพื้นฐานที่มีผลต่อการฉีดขึ้นรูปพอลิยูรีเทนโฟม

โดย นายปรียวัฒน์ รักสวย
นายสาธิต ผไทวณิชย์
นายเอกรัฐ นารีแพงศรี

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์ ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์)

.....กรรมการ
(ดร.อภินันท์ นัมคณิสรณ์)

.....กรรมการ
(อ.ศิริพันธ์ มุรธาธัญลักษณ์)

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การศึกษาปัจจัยพื้นฐานที่มีผลต่อการฉีดขึ้นรูปพอลิยูรีเทนโฟม
โดย นายปรียวัฒน์ รักสวย
นายสาธิต ผไทวณิชย์
นายเอกรัฐ นารีแพงศรี
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์ ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.
ปริญญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาแนวทางเบื้องต้นในการปรับปรุงคุณภาพของพอลิยูรีเทนโฟมสำหรับกระบวนการฉีดขึ้นรูปพวงมาลัยรถยนต์ ด้วยการมุ่งเน้นพัฒนาและเสริมสร้างความเข้าใจ ในปัจจัยพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิยูรีเทนโฟม เช่น ความหนาแน่นของโฟม ขนาดของฟองก๊าซและความหนาของผนังเซลล์ ในการทดลองได้ทำการฉีดพอลิยูรีเทนโฟมลงในแม่พิมพ์ทรงกระบอก เพื่อใช้ศึกษาลักษณะการเกิดโฟมในแม่พิมพ์ จากนั้นทำการวัดค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์โฟมที่ได้รวมทั้งศึกษาลักษณะโครงสร้างภายในของเนื้อโฟม โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning electron microscopy : SEM) และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยพื้นฐานต่างๆ กับคุณภาพของผลิตภัณฑ์พอลิยูรีเทน จากผลการทดลอง สามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการฉีดพอลิยูรีเทนโฟม และจากการปรับเปลี่ยนช่วงอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นภายในท่อแม่พิมพ์ ตั้งแต่ 10 ถึง 80 องศาเซลเซียส พบว่า พอลิยูรีเทนโฟมที่เตรียมได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 130-170 ไมโครเมตร และ 220-230 ไมโครเมตร สำหรับผิวด้านในและด้านนอก ตามลำดับ โดยความหนาแน่นของพอลิยูรีเทนโฟมมีค่าประมาณ 0.360-0.400 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร พบว่า อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นมีผลต่อความหนาของผนังเซลล์ โดยช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 30 องศาเซลเซียส ให้ความหนาของผนังเซลล์สูงสุดประมาณ 13.6 ไมโครเมตร นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ได้นำเสนอสมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ทำนายความหนาของผนังเซลล์ที่เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นภายในแม่พิมพ์ พบว่าค่าที่ประมาณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ อยู่ในช่วง 35 ไมโครเมตร ซึ่งมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงสอดคล้องกับผลการทดลอง แต่อย่างไรก็ตาม ค่าความหนาของผนังเซลล์ที่ทำนายได้จากแบบจำลองยังมีความแตกต่างกับผลการทดลอง ซึ่งต้องได้รับการพัฒนาต่อไป

Report Title Study of Processing Parameters of Polyurethane foam in Reaction Injection Molding

By Mr. Preeyawat Rugsouy
Mr. Satit Phathaiwanit
Mr. Ekarat Nareepangsri

Thesis Advisor Dr. Surat Areerat

Report for Bachelor's Degree of Chemical Engineering
Department of Chemical Engineering
Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Abstract

This project presents a primary study aiming to improve the quality of polyurethane (PU) foam from the molding process of steering wheels. It focuses on the development and understanding of the basic factors relating to the morphological properties, such as foam density, bubble size and thickness of cell wall. In this experiment, PU foam was injected into a cylindrical mold and the foam formation was studied. The density of PU foam was measured and the internal structure was investigated by a scanning electron microscopy (SEM). The relationship among basic factors was demonstrated in terms of temperature changed during injection process. Changing water cooling temperature inside cylindrical mold ranged from 10 to 80 °C produced PU foam with average bubble diameter about 130-170 μm and 220-230 μm for internal surface and outer surface, respectively. Subsequently, average density of foam about 0.360-0.400 g/cm^3 could be obtained. SEM micrograph of PU foam revealed that water cooling temperature affects the thickness of cell wall. The suitable cooling temperature at 30 °C yielded the highest thickness of cell wall about 13.6 μm. In addition, this project introduced a simple mathematic equation of bubble growth during foaming process to estimate thickness of cell wall as a function of water cooling temperature. From this equation, the estimated thickness of about 35 μm exhibited a similar trend as observed in the experiment. However, there exist a discrepancy when comparing the calculated thickness to that obtained from SEM micrograph. Therefore, an improvement on this equation deserves further investigation.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี คณะผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณดร.สุรัตน์ อารีรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำต่างๆ และดูแลเอาใจใส่การทำงานของคณะผู้วิจัยตลอดมา รวมทั้งให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดี

ขอขอบพระคุณคุณวารินทร์ ฤกษ์ฉวี กรรมการผู้จัดการ และเจ้าหน้าทุกฝ่ายของบริษัทซัมมิทสเตียริงวีล จำกัด สำหรับการให้ความสนับสนุนและอำนวยความสะดวกด้านอุปกรณ์ต่างๆ ในการฉีดขึ้นรูปพอลิยูรีเทนโฟม

ขอขอบคุณ ศูนย์เครื่องมือวิเคราะห์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับความช่วยเหลือและแนะนำการใช้เครื่องมือทดสอบต่างๆ และเพื่อนๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือตลอดการทำงานวิจัย

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน

อนึ่งยังมีผู้มีพระคุณอีกหลายท่านที่ผู้วิจัยไม่ได้กล่าวนาม ถ้ามีสิ่งผิดพลาดประการใดในรายงานนี้ คณะผู้วิจัยขอน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้

คณะผู้วิจัย

นายปรียวัฒน์ รักสวย

นายสาธิต ผไทวณิชย์

นายเอกรัฐ นารีแพงศรี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... II

กิตติกรรมประกาศ..... III

สารบัญ..... IV

สารบัญตาราง..... VII

สารบัญรูป..... IX

บทที่ 1 บทนำ..... 1

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย..... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... 1

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย..... 2

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย..... 2

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย..... 2

บทที่ 2 ทฤษฎี.....3

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....3

2.2 โฟม (Foam)..... 3

2.2.1 การแบ่งประเภทของโฟม 4

2.2.2 การผลิตโฟม..... 5

2.3 หลักการของการเกิดโฟม (Principles of foam formation)..... 6

2.3.1 การเกิดโฟม 6

2.3.2 การหาจำนวนของฟองก๊าซในเนื้อโฟม..... 7

2.4 สมการการขยายตัวของฟองก๊าซ.....8

2.4.1 การขยายตัวของฟองก๊าซในสภาพไม่จำกัดปริมาณของเหลว.....8

2.4.2 การขยายตัวของฟองก๊าซในสภาพจำกัดปริมาณของเหลว.....12

2.5 พอลิยูรีเทน (Polyurethane)..... 14

2.5.1 ชนิดของพอลิยูรีเทน..... 14

2.5.2 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการผลิตพอลิยูรีเทนโฟม..... 16

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.3 ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน..... 22

2.5.4 การผลิตพอลิยูรีเทนโฟม..... 23

2.6 Reaction Injection Molding Process (RIM)..... 24

2.6.1 ขั้นตอนการทำงาน..... 26

2.6.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ RIM..... 27

บทที่ 3 การทดลอง..... 30

3.1 สารเคมี..... 30

3.2 วัสดุและอุปกรณ์..... 30

3.3 การทดลอง..... 31

3.3.1 การออกแบบและจัดทำแม่พิมพ์..... 31

3.3.2 การกำหนดค่าต่างๆ ของเครื่องฉีดพอลิยูรีเทนโฟม..... 32

3.3.3 วิธีการทดลอง..... 32

3.3.4 การทดสอบสมบัติต่างๆ ของชิ้นงาน..... 33

บทที่ 4 ผลการทดลอง..... 34

4.1 ลักษณะการเกิดโฟม..... 34

4.2 ผลการศึกษาค่าอุณหภูมิที่มีต่อกระบวนการฉีดขึ้นรูปพอลิยูรีเทนโฟม..... 35

4.2.1 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ ณ ช่วงเวลาต่างๆ ของแม่พิมพ์..... 35

4.2.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของเนื้อโฟม... 36

4.2.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าความหนาแน่นโฟม.....39

4.2.4 การคำนวณหาจำนวนของฟองก๊าซที่เกิดขึ้นในเนื้อโฟม..... 39

4.2.5 ผลของอุณหภูมน้ำหล่อแม่พิมพ์ต่อความความหนาของผนังเซลล์.....40

4.3 การทำนายความหนาของผนังเซลล์โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์.....41

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....44

5.1 สรุปผลการทดลอง.....44

5.2 ข้อเสนอแนะ.....44

เอกสารอ้างอิง.....45

ภาคผนวก ก การหาความหนาแน่นของพอลิยูรีเทนโฟม

โดยเครื่องวัดความหนาแน่นแบบอิเล็กทรอนิกส์..... 46

สารบัญ (ต่อ)

ภาคผนวก ข การคำนวณหาจำนวนของฟองก๊าซที่เกิดขึ้นในเนื้อโฟม.....47
ภาคผนวก ค การคำนวณหาความหนาของผนังเซลล์ที่เกิดขึ้นในเนื้อโฟม.....48
ภาคผนวก ง ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ณ สภาวะต่างๆ.....49
ภาคผนวก จ ผลการคำนวณ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....52

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 คุณสมบัติของพอลิออลสำหรับอุตสาหกรรมผลิตพอลิยูริเทนโฟม..... 17
2.2 พอลิอีเทอร์ที่นิยมใช้ในการเตรียมพอลิยูรีเทน..... 17
2.3 ลักษณะการใช้งานของ MDI ที่ค่าฟังก์ชันนอลิตี้ในช่วง 2.0-3.0..... 19
2.4 สมบัติของสารช่วยให้เกิดฟอง..... 21
2.5 วัตถุประสงค์ของการใช้สารเติมแต่งชนิดต่างๆ..... 21
2.6 การเปรียบเทียบคุณสมบัติการใช้งานระหว่างกระบวนการ RIM กับ TIM..... 25
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง..... 30
4.1 ผลของอุณหภูมิน้ำหล่อที่มีผลต่อขนาดของฟองก๊าซที่ผิวด้านในของแม่พิมพ์..... 37
4.2 ผลของอุณหภูมิน้ำหล่อที่มีผลต่อขนาดของฟองก๊าซที่ผิวด้านนอกของแม่พิมพ์..... 38
4.3 ผลของอุณหภูมิน้ำหล่อแม่พิมพ์ต่อความหนาของชั้นของเหลวจากการคำนวณ..... 40
ข-1 ผลการศึกษาลักษณะการเกิดโฟม..... 46
ค-1 การทดลองศึกษาลักษณะการเกิดโฟม..... 47
ง-1 ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำหล่อแม่พิมพ์ 10 องศาเซลเซียส..... 48
ง-2 ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำหล่อแม่พิมพ์ 30 องศาเซลเซียส..... 49
ง-3 ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำหล่อแม่พิมพ์ 80 องศาเซลเซียส..... 50
จ-1 ผลการศึกษาความหนาแน่นของพอลิยูริเทนโฟมที่อุณหภูมิต่างๆ..... 51
จ-2 แสดงผลการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์..... 52

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 โครงสร้างภายในของโฟม....4

2.2 แสดงลักษณะการขยายตัวของฟองก๊าซในสภาพจำกัดปริมาณของเหลว....12

2.3 คุณสมบัติการใช้งานของพอลิยูรีเทนชนิดต่างๆ.... 16

2.4 โครงสร้างโมเลกุลของโทลูอีนไดไอโซไซยาเนต....18

2.5 โครงสร้างโมเลกุลของไดเฟนิลเมเทนไดไอโซไซยาเนต....19

2.6 แผนภาพกระบวนการผลิตพอลิยูรีเทน โดยใช้วิธี Reaction injection molding.... 26

2.7 แผนภาพการทำงานของกระบวน Reaction injection molding และหลักการทำงาน ของหัวผสม (Piston-ejector mixers).... 27

3.1 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ทำการทดลอง....31

4.1 ลักษณะการไหลของโฟมในช่วงต่างๆ....34

4.2 ลักษณะภาพตัดขวางของโฟมในแต่ละช่วงของการไหล....35

4.3 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของการไหล ระหว่างขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันที่เวลาต่างๆ....35

4.4 ภาพตัดขวางลักษณะสัณฐานวิทยาบริเวณผิวด้านในของพอลิยูรีเทนโฟม ด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็คตรอนแบบส่องกวาด ที่กำลังขยาย 13 เท่า ที่อุณหภูมิน้ำหล่อแม่พิมพ์ต่าง ๆ.... 36

4.5 ภาพตัดขวางลักษณะสัณฐานวิทยาบริเวณผิวด้านในของพอลิยูรีเทนโฟม ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกวาด ที่กำลังขยาย 20 เท่า ที่อุณหภูมิน้ำหล่อแม่พิมพ์ต่าง ๆ.... 36

4.6 ภาพตัดขวางลักษณะสัณฐานวิทยาบริเวณผิวด้านในของพอลิยูรีเทนโฟม ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องกวาด ที่กำลังขยาย 100 เท่า ที่อุณหภูมิน้ำหล่อแม่พิมพ์ต่าง ๆ.... 37

4.7 ภาพตัดขวางลักษณะสัณฐานวิทยาบริเวณผิวด้านนอกของพอลิยูรีเทนโฟม ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องกวาด ที่กำลังขยาย 100 เท่า ที่อุณหภูมิน้ำหล่อแม่พิมพ์ต่าง ๆ.... 38

4.8 ผลของอุณหภูมิน้ำหล่อแม่พิมพ์ที่มีผลต่อความหนาแน่นของโฟม....39

4.9 ผลของอุณหภูมิน้ำหล่อแม่พิมพ์ที่มีผลต่อจำนวนฟองก๊าซที่เกิดขึ้น.... 40

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.10 ผลการเปรียบเทียบความหนาของผนังเซลล์ที่ได้จากกึ่งการคำนวณกับผล
จากการทดลองที่อุณหภูมิน้ำหล่อแม่พิมพ์ต่างๆ.....41
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของผนังเซลล์โดยการทำนายจากแบบจำลอง
ทางคณิตศาสตร์กับอุณหภูมิน้ำหล่อแม่พิมพ์ต่างๆ.....42
4.12 เปรียบเทียบความหนาของผนังเซลล์ที่ได้จากการทดลองและการทำนาย
จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อุณหภูมิน้ำหล่อแม่พิมพ์ต่างๆ.....42
ก-1 เครื่องวัดความหนาแน่นแบบอิเลคทรอนิกส์ (Electronic densimeter ; MD-200S).....45

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ โดยอาศัยกระบวนการฉีดขึ้นรูปพอลิ-ยูรีเทนโฟม (Polyurethane foam) มีบทบาทอย่างมาก เพื่อใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ที่เป็นส่วนประกอบของยานยนต์ เช่น พวงมาลัย ด้ามจับเกียร์ แผงคอนโซล อุปกรณ์ตบแต่งภายนอกและอุปกรณ์อำนวยความสะดวกต่างๆ ในห้องโดยสาร เป็นต้น ซึ่งบริษัท ซัมมิท สเตียริง วีล จำกัด ก็เป็นหนึ่งในบริษัทผู้ประกอบการ การผลิตพวงมาลัยรถยนต์จากพอลิยูรีเทนโฟม บริษัทต้องประสบกับปัญหาการส่งคืนสินค้าของลูกค้า เนื่องจากการสึกกร่อนของพวงมาลัยรถยนต์ก่อนระยะเวลาประกัน ทำให้ต้องสูญเสียรายได้เป็นจำนวนมาก ดังนั้นบริษัทจึงต้องเพิ่มความแข็งแรงให้กับพวงมาลัยซึ่งวิธีการที่บริษัทนำมาใช้ คือ การเพิ่มปริมาณสารตั้งต้นในการฉีดและลดขนาดรูล้นเพื่อเพิ่มความหนาแน่นให้พวงมาลัย แต่วิธีการดังกล่าวทำให้ต้นทุนในการผลิตเพิ่มขึ้น เนื่องจากต้องใช้สารตั้งต้นเพิ่มขึ้นจากการฉีดปกติ 30-40 เปอร์เซ็นต์ บริษัทจึงต้องการลดต้นทุนลง โดยการเพิ่มความหนาแน่นเฉพาะบริเวณผิวของพวงมาลัยเท่านั้น นอกจากนี้ทางบริษัทยังใช้สารเคลือบผิว (In-mold coating) ดังนั้นการทำวิจัยร่วมระหว่างภาควิชาวิศวกรรมเคมีและผู้ประกอบการ จะมีส่วนช่วยพัฒนาผลิตภัณฑ์จากพอลิยูรีเทนโฟมได้เป็นอย่างดี

งานวิจัยนี้ศึกษาแนวทางเบื้องต้น ในการนำเสนอวิธีการเพิ่มความแข็งแรงให้กับผิวของพอลิยูรีเทนโฟม ด้วยการมุ่งเน้นการพัฒนาและเสริมสร้างความเข้าใจในปัจจัยพื้นฐาน ที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มความหนาแน่นของผิวพอลิยูรีเทนโฟมภายในแม่พิมพ์ โดยทำการฉีดพอลิยูรีเทนโฟมลงในแม่พิมพ์ ซึ่งออกแบบให้สามารถควบคุมอุณหภูมิพื้นผิวของแม่พิมพ์ได้ และศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของเนื้อโฟม จากนั้นคณะผู้วิจัยจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยพื้นฐานกับความหนาแน่นของโฟม เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเพิ่มความความแข็งแรงให้กับผิวโฟมต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาถึงปัจจัยพื้นฐานที่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของผิวโฟม โดยคาดหมายว่าจะสามารถนำผลมาสร้างแม่พิมพ์ที่เหมาะสมในการฉีดโฟมได้

1.2.2 เพื่อศึกษาหาแนวทางปรับแก้ไขงานฉีดโฟมที่เหมาะสม โดยมุ่งหวังให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพตามมาตรฐานที่โรงงานกำหนด

1.2.3 เพื่อหาแนวทางที่ได้พัฒนาขึ้นในการช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับผิวของผลิตภัณฑ์

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยด้านการฉีดขึ้นรูปพอลิยูรีเทนโฟม

1.3.2 ศึกษาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิ ที่มีผลต่อความหนาแน่นของเนื้อโฟมและการกระจายตัวของฟองก๊าซ เพื่อช่วยในงานฉีดขึ้นรูปพอลิยูรีเทนโฟมและนำความเข้าใจมาแก้ไขคุณภาพของผลิตภัณฑ์พอลิยูรีเทนโฟม

1.3.3 ทดลองฉีดพอลิยูรีเทนโฟมในสายการผลิต พร้อมทั้งทำการปรับแก้ปัจจัยพื้นฐานที่มีผลกระทบต่องานฉีดโฟม โดยมุ่งเน้นการเพิ่มแข็งแรงให้กับผิวของผลิตภัณฑ์และเปรียบเทียบผลการศึกษาในแม่พิมพ์ที่สร้างขึ้น

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

1.4.1 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดพอลิเมอไรเซชันของพอลิยูรีเทน กระบวนการฉีดขึ้นรูปและกลไกการเกิดโฟม

1.4.2 ทดลองฉีดพอลิยูรีเทนในแม่พิมพ์ที่สร้างขึ้น เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยพื้นฐานกับความหนาแน่นของผิวโฟมที่ผลิตได้

1.4.3 ทดลองทำการฉีดพอลิยูรีเทนโฟมในสายการผลิต พร้อมการปรับแก้ปัจจัยหลักที่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของผิวโฟม

1.4.4 สรุปผลการดำเนินงาน

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1.5.1 ความเข้าใจพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการฉีดขึ้นรูปพอลิยูรีเทนโฟม เพื่อช่วยสนับสนุนการผลิตให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีมาตรฐานตรงตามที่โรงงานกำหนด

1.5.2 สามารถปรับปรุงแม่พิมพ์ สำหรับกระบวนการฉีดขึ้นรูปพอลิยูรีเทนโฟมให้มีความแข็งแรง ซึ่งช่วยลดปริมาณการส่งคืนสินค้าของลูกค้าได้

1.5.3 ลดต้นทุนในการผลิตลง

บทที่ 2
ทฤษฎี

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวกับกลไกการเกิดพอลิเมอร์โฟมนั้น ได้รับความสนใจจากนักวิจัยหลายท่าน ดังจะเห็นได้จากผลงานทางวิชาการต่างๆ ที่มีการศึกษาค้นคว้ากันอย่างมากมาย ในส่วนนี้เสนองานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องการศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของพอลิยูรีเทนโฟมและกลไกการขยายตัวของฟองก๊าซในระหว่างการไหลภายในแม่พิมพ์ โดยพัฒนาแบบ จำลองจากสมการเคมีพื้นฐาน เพื่อใช้แสดงผลการทำนายขนาดของรูพรุนและอัตราการขยายตัวของพอลิยูรีเทนโฟม ดังนี้

Chang Dae Han และคณะ [2] ได้แสดงผลงานวิจัยทั้งเชิงทฤษฎีและการทดลอง เพื่อศึกษากระบวนการฉีดพลาสติกโฟมลงในแม่พิมพ์ และใช้อธิบายกลไกการขยายตัวของฟองก๊าซในระหว่างการไหลของพลาสติกเหลวภายในแม่พิมพ์ โดยใช้แม่พิมพ์ที่ประกอบด้วยแผ่นกระจกใส ซึ่งสามารถติดตามพฤติกรรมของการไหลและการขยายตัวของฟองก๊าซในระหว่างกระบวนการเกิดโฟม โดยพบว่าการฉีดพลาสติกโฟมให้ได้เนื้อโฟมที่สม่ำเสมอนั้น จะขึ้นอยู่กับอัตราการฉีด อุณหภูมิของแม่พิมพ์ ความหนืดของพลาสติก และลักษณะของแม่พิมพ์ที่ใช้ นอกจากนี้ลักษณะสัณฐานวิทยาของเนื้อโฟม ยังขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของก๊าซ ที่ใช้เป็นสารให้ฟองรวมทั้งความสามารถในการละลาย (Solubility) และอัตราการซึมผ่านของก๊าซ (Diffusivity)

2.2 โฟม (Foam) [5-7]

"โฟม" หมายถึง วัตถุที่มีน้ำหนักเบา ภายในเนื้อมีรูฟองอากาศ ลักษณะทั่วไปคล้ายกับฟองน้ำธรรมชาติ

"โฟม" หรือ "พลาสติกโฟม" หมายถึง พลาสติกที่มีโพรงก๊าซเล็กๆ แทรกปะปนกระจัดกระจายอยู่มากมายภายในโครงสร้างของเนื้อพลาสติก ซึ่งโพรงก๊าซเหล่านี้จะเกิดจากสารเคมีที่เรียกว่า "Blowing agent" หรือ "สารช่วยให้เกิดฟอง" เป็นตัวทำหน้าที่ลดความหนาแน่นของเนื้อพลาสติกโฟม เพื่อที่จะสามารถนำไปใช้งานแตกต่างออกไป

"เซลลูลาร์พลาสติก" หรือ "พลาสติกโฟม" หมายถึง พลาสติกที่ขยายตัว หรือพองฟูคล้ายฟองน้ำ โดยทั่วไปพลาสติกโฟม จะมีส่วนประกอบอย่างน้อย 2 วัฏภาค ได้แก่ วัฏภาคที่เป็นพอลิเมอร์ของแข็ง และวัฏภาคก๊าซซึ่งเกิดขึ้นจากสารที่เรียกว่า "สารช่วยให้เกิดฟอง"

สำหรับส่วนที่เป็นวัฏภาคของแข็งนั้น อาจประกอบด้วยพอลิเมอร์หนึ่งชนิดหรือมากกว่า เช่น ในกรณีที่ผสมพอลิเมอร์สองชนิดเข้าด้วยกัน โฟมอาจมีลักษณะยืดหยุ่นหรือแข็งก็ได้ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature : T_g) ว่าอยู่ในช่วงที่ต่ำหรือสูงกว่าอุณหภูมิห้อง สารเคมีที่ใช้ในการผลิตโฟม ระดับของการเกิดผลึก (Crystallinity) และระดับการเกิดโครงสร้างร่างแห (Cross-linking)

รูปทรงของเซลล์อาจเป็นแบบเซลล์เปิดหรือเซลล์ปิด โฟมแบบเซลล์ปิดเหมาะสำหรับเป็นฉนวนกันความร้อน และโดยทั่วไปจะมีลักษณะแข็ง ในขณะที่โฟมแบบเซลล์เปิดจะเหมาะสำหรับทำเบาะที่นั่งในรถยนต์ เฟอร์นิเจอร์ ฉนวนกันเสียง การใช้งานอื่นๆ ที่มีลักษณะยืดหยุ่น

อุตสาหกรรมหลัก ที่ใช้โฟมยืดหยุ่น (Flexible foam) ได้แก่ อุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ การขนส่ง การผลิตที่นอน บรรจุภัณฑ์ สิ่งทอ ของเล่น วงแหวนสำหรับอัดข้อต่อ ปะเก็น อุปกรณ์กีฬา รองเท้า และวัสดุกันกระแทกต่างๆ

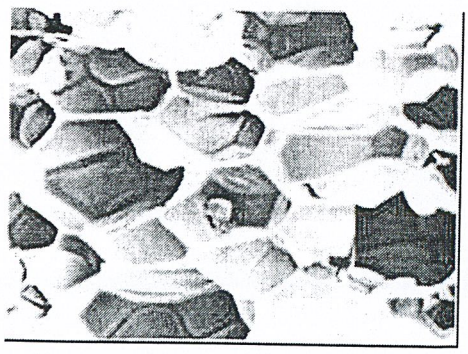
อุตสาหกรรมหลักที่ใช้โฟมคงรูป (Rigid foam) ได้แก่ อุตสาหกรรมก่อสร้าง การขนส่ง เครื่องใช้ไฟฟ้า การผลิตถังและท่อ บรรจุภัณฑ์ เฟอร์นิเจอร์ ทุ่นลอย และการผลิตตู้เก็บอาหารและเครื่องดื่ม

2.2.1 **การแบ่งประเภทของโฟม**

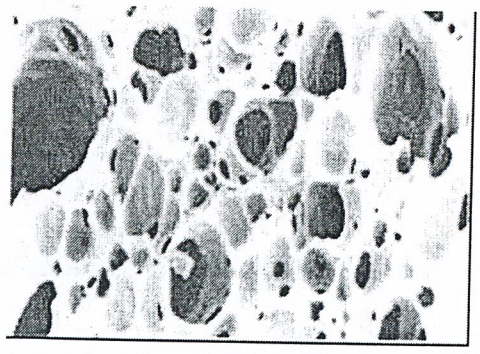
1) การแบ่งประเภทโฟมตามโครงสร้างของเซลล์ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ

-โฟมแบบเซลล์ปิด (Closed cell) หมายถึง โฟมที่มีโพรงของช่องว่างหรือเซลล์ไม่ต่อถึงกัน

-โฟมแบบเซลล์เปิด (Open cell) หมายถึง โฟมที่มีโพรงของเซลล์ต่อถึงกันจนทำให้ก๊าซหรืออากาศหมุนเวียนถึงกันได้



(ก) แบบเซลล์ปิด



(ข) แบบเซลล์เปิด

รูปที่ 2.1 โครงสร้างภายในของโฟม

2) การแบ่งประเภทโฟมตามประเภทของพลาสติก สามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ

- โฟมชนิดเทอร์โมเซตติง (Thermosetting foam) : คือ พลาสติกโฟมที่ไม่สามารถผ่านกระบวนการนำกลับมาใหม่ได้ โฟมประเภทนี้ที่รู้จักกันดี คือ พอลิยูรีเทนโฟม (Polyurethane foam) ซึ่งเป็นโฟมที่เกิดจากสารเคมี 2 ชนิด ซึ่งมีลักษณะเป็นสารผสมของเหลว ได้แก่ โฟมคงรูปและโฟมยืดหยุ่น เป็นต้น

- โฟมชนิดเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic foam) : คือ พลาสติกโฟมที่สามารถผ่านกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ได้แก่ EPS foam EPE foam เป็นต้น ซึ่ง EPS foam (Expandable polystyrene foam) เป็นพลาสติกโฟมที่ประกอบด้วยสารพอลิสไตรีน มีลักษณะเป็นเม็ดกลมสีขาว ขนาดตั้งแต่ 0.3-2.5 มิลลิเมตร โดยอาศัยก๊าซเพนเทน เป็นสารช่วยให้เกิดฟอง

2.2.2 การผลิตโฟม

ขั้นตอนทั่วไป สำหรับการเกิดพอลิเมอร์โฟม

1) การสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนของสารทำให้เกิดฟอง จะทำให้เกิดก๊าซไนโตรเจนหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือทั้งสองชนิด โดยอาศัยความร้อนจากภายนอกหรือความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน

2) กลไกการก่อให้เกิดฟองก๊าซในระบบของพอลิเมอร์ (พอลิเมอร์หลอมเหลว สารละลายพอลิเมอร์ และพอลิเมอร์แขวนลอย) โดยการเร่งของปฏิกิริยาหรือความร้อน ดังนั้น จะทำให้ฟองก๊าซเกิดขึ้นภายในโครงสร้างของพอลิเมอร์

3) การระเหยของของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำ เช่น สารฟลูออโรคาร์บอน (Fluorocarbons) หรือเมทิลลีนคลอไรด์ (Methylene chloride) ที่อยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาการคายความร้อนหรือความร้อนจากภายนอกระบบ

4) การระเหย ซึ่งเป็นผลจากความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันทำให้เกิดเป็นฟองก๊าซ เช่น ปฏิกิริยาของไอโซไซยาเนตกับน้ำ จะทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นในระบบ

5) การขยายตัวของก๊าซที่ละลายอยู่ในสารละลายพอลิเมอร์ จะขึ้นอยู่กับการลดลงของความดันในระบบ

6) การรวมตัวกันของฟองก๊าซ ซึ่งกระจายตัวอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์

การผลิตโฟมสามารถทำได้ 2 วิธี คือ

1) วิธีทางกายภาพ คือ ใช้ก๊าซอัดหรือผสมสารเคมีทำให้เกิดก๊าซแทรกในเนื้อพอลิเมอร์เมื่อนำพอลิเมอร์ไปขึ้นรูปโดยใช้ความร้อน ก๊าซซึ่งอยู่ภายในจะขยายตัวทำให้เนื้อพอลิเมอร์ฟูขึ้นเป็นโฟม ตัวอย่าง เช่น พอลิสไตรีนโฟม (Expandable polystyrene)

2) วิธีทางเคมี คือ ใช้ปฏิกิริยาของสารเคมีสองชนิดทำให้เกิดโฟม วัตถุดิบที่ใช้มักประกอบด้วยของเหลวหรือมากกว่านั้น โดยชนิดหนึ่งเป็นพอลิเมอร์เหลวอีกชนิดหนึ่งเป็นส่วนผสมของวัสดุตกผลึกหรือตัวทำให้แข็งและสารเคมีที่ทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์เหลว เพื่อให้เกิดฟองก๊าซ ตัวอย่าง เช่น พอลิยูรีเทนโฟม (Polyurethane foam)

รูปแบบกระบวนการผลิตโฟม สามารถกระทำได้หลายวิธี กล่าวโดยสรุปได้ ดังนี้

1) การผลิตโฟมแบบแผ่น (Slabstock)

2) การผลิตโฟม โดยใช้แม่พิมพ์แบบกดอัด (Compression molding)

3) การผลิต โดยใช้กระบวนการอาร์ไอเอ็ม (Reaction injection molding; RIM)

4) การผลิตโฟม โดยวิธีการผสมสารจากหัวผสมตั้งแต่ 2 องค์ประกอบขึ้นไป

5) การผลิตโฟม โดยใช้วิธีการสเปรย์ (Spray)

6) การผลิตโฟม โดยใช้วิธีการอัดรีด (Extrusion) ซึ่งจะใช้สารช่วยในการขยายตัวแบบเม็ด

7) การผลิตโฟม โดยใช้วิธีการฉีดขึ้นรูป (Injection molding)

8) การผลิตโฟม โดยใช้วิธีการหล่อ

9) การผลิตโฟม โดยใช้ก๊าซหรือสารละลายที่มีจุดเดือดต่ำ

10) การผลิตโฟมแผ่นบาง (Foam board production)

11) การผลิตโฟมแบบที่ใช้ประกอบ (Composite)

12) การผลิตโฟม โดยใช้วิธีการตกตะกอน

2.3 หลักการของการเกิดโฟม (Principles of foam formation) [7]

2.3.1 การเกิดโฟม (Foam)

การเกิดโฟม เป็นปรากฏการณ์ของการเกิดวัฏภาคใหม่ที่เกี่ยวข้องกับทางด้านฟิสิกส์และเคมี เมื่อพิจารณาปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์นั้น การเกิดวัฏภาคใหม่ สามารถเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การเกิดนิวเคลียส (Nucleation) ซึ่งสามารถเกิดได้จากการปรับเปลี่ยนโครงสร้างภายในตัวเองหรือจากสารอื่นที่เข้ามา พื้นฐานของการเกิดโฟมเกี่ยวข้องกับการเกิดฟองก๊าซ (Bubble nucleation) และ การเจริญเติบโตของฟองก๊าซ (Bubble growth) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์โฟม

การเกิดโฟม มีหลักการสำคัญคือ โมเลกุลของก๊าซจะแพร่กระจายในวัฏภาคของพอลิเมอร์และมีพลังงานเพียงพอที่จะเอาชนะแรงดันภายนอก เพื่อขยายขนาด จึงมองเห็นโฟมที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นฟองพองออกมา หากความไม่เสถียรทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic instability) เกิดขึ้นมาก ก็จะไปกระตุ้นการเกิดนิวเคลียส ทำให้เกิดกลุ่มของฟองจำนวนมากจะได้ภายในช่วงเวลาสั้นๆ ซึ่งวิธีการในการทำให้เกิดความไม่เสถียรทางเทอร์โมไดนามิกส์อย่างเพียงพอสำหรับการเกิดนิวเคลียสมี 2 วิธีการ คือ การลดความดันและการเพิ่มอุณหภูมิ เนื่องจากความไม่

เสถียรทางเทอร์โมไดนามิกส์ พอลิเมอร์แบบเทอร์โมพลาสติก มีการนำความร้อนที่ไม่ดีและจะสลายตัวที่อุณหภูมิสูง จึงนิยมใช้วิธีการลดความดันมากกว่าการเพิ่มอุณหภูมิ

กระบวนการเกิดโฟม ประกอบด้วยขั้นตอนพื้นฐาน 3 ขั้นตอน ได้แก่

1) การเกิดฟองก๊าซ (Bubble Formation) เป็นขั้นตอนที่เริ่มเกิดฟองก๊าซขนาดเล็กๆ จำนวนมาก กระจายตัวอยู่ในเนื้อของพอลิเมอร์

2) การเจริญเติบโตของฟองก๊าซ (Bubble Growth) เป็นขั้นตอนที่ฟองก๊าซมีการขยายขนาดเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการแพร่ของก๊าซจากสารละลายเข้าไปในฟองก๊าซ ผลจากการขยายตัวของฟองก๊าซ เมื่อได้รับความร้อนหรือความดันของระบบลดลง และผลจากการรวมตัวกันของฟองก๊าซ (Coalescence) ของฟองก๊าซมากกว่า 2 ฟอง

3) การคงสภาพของฟองก๊าซ (Bubble Stability) เป็นขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการเกิดโฟม ฟองก๊าซในขั้นนี้ จะคงสภาพและไม่มีการเปลี่ยนแปลงขนาด

2.3.2 การหาจำนวนของฟองก๊าซในเนื้อโฟม

โดยทั่วไป โฟมพลาสติกที่มีเนื้อเดียวสม่ำเสมอและมีคุณสมบัติเหมือนกันตลอดปริมาตร 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร จะประกอบด้วยฟองก๊าซ 1,000 ถึง 10,000 ฟอง โดยจะมีความแตกต่างของขนาดฟองก๊าซที่แท้จริงกับขนาดของฟองก๊าซโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วงตั้งแต่ 12% ถึง 25% ขนาดของฟองก๊าซและการกระจายขนาดของฟองก๊าซไม่เพียงแต่จะขึ้นอยู่กับเกรดของพอลิเมอร์แต่ยังขึ้นอยู่กับสภาวะของกระบวนการโฟมด้วย จำนวนฟองก๊าซต่อหน่วยปริมาตรโฟม (N_c) เป็นตัวแปรที่สำคัญและมีการใช้อยู่บ่อยครั้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการประมาณค่าประสิทธิภาพของสารที่ทำให้เกิดนิวเคลียส (Nucleating agent) หรือ ความเป็นเนื้อเดียวกันของโครงสร้างโดยรวมในส่วนของตัวอย่างนั้น ตัวแปร N_c เป็นฟังก์ชันกับขนาดของฟองก๊าซและความหนาแน่นของโฟมพลาสติก และจำนวนฟองก๊าซต่อหน่วยปริมาตรโฟม (N_c) มีค่าดังสมการ

$$N_c \cong \left(\frac{1-\rho/\rho_p}{10^{-4} d} \right) \qquad \text{...(2.1)}$$

โดยที่ N_C คือ จำนวนฟองก๊าซต่อปริมาตรโฟม 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร

ρ คือ ความหนาแน่นของโฟม ในหน่วยกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ρ_p คือ ความหนาแน่นของพอลิเมอร์ ในหน่วยกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของฟองก๊าซ ในหน่วยมิลลิเมตร

การเตรียมพอลิยูรีเทนโฟมที่ดีนั้น จะต้องให้มีฟองก๊าซอยู่ภายในเนื้อของพอลิเมอร์อย่างเหมาะสม ถ้าเกิดฟองก๊าซเร็วเกินไป จะทำให้การขยายตัวของโฟมไม่เสถียร โดยจะเกิด

การยุบตัวของเนื้อพอลิเมอร์ เนื่องจากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันที่เกิดขึ้นยังไม่ได้สร้างพอลิ-เมอร์ที่มีความแข็งแรงเพียงพอที่จะเก็บกักก๊าซเหล่านี้ไว้ได้ แต่ถ้าการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันเร็วเกินไป โฟมจะไม่เกิดการขยายตัว ดังนั้น จำเป็นต้องควบคุมสภาวะที่มีผลกระทบในการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของพอลิยูรีเทนให้เหมาะสม

วิธีการผลิตพอลิเมอร์โฟมที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง คือ การทำให้เกิดการแพร่กระจายของก๊าซผ่านไปในสารละลายพอลิเมอร์และทำให้เกิดการคงสภาพเป็นโฟม ซึ่งวิธีการนี้ โฟมจะขยายตัว โดยเป็นผลมาจากการขยายขนาดของฟองก๊าซก่อนที่พอลิเมอร์จะคงสภาพ โฟมที่ผลิตโดยอาศัยวิธีการแพร่กระจายของก๊าซ ได้แก่

1) เทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์ : เริ่มต้นกระบวนการจากพอลิเมอร์ที่มีสถานะเป็นของแข็ง ทำการหลอมให้เป็นของเหลว จากนั้นทำให้เกิดฟองก๊าซภายในเนื้อพอลิเมอร์และทำการหล่อเย็นให้พอลิเมอร์มีสถานะกลับไปเป็นของแข็ง จะได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นพอลิเมอร์โฟม

2) โฟมแบบเทอร์โมเซต : สารตั้งต้นจะทำปฏิกิริยาเกิดเป็นโฟม ขณะที่ปฏิกิริยาเกิดขึ้นเพียงบางส่วนและยังคงมีสภาพเป็นพอลิเมอร์เหลวอยู่ จากนั้นทำให้โฟมมีสภาพเป็นเทอร์โมเซต (Curing) จะเกิดเป็นโฟมที่มีความเสถียร

3) ลาเทกซ์ (Latex) คือ กระบวนการทำให้เกิดโฟมที่มีความเสถียร ซึ่งเกิดขึ้นในระบบที่มีสถานะต่างกัน

ก๊าซที่ใช้ในการผลิตโฟม อาจจะได้มาจากหลายแหล่ง ดังนี้

1) อากาศภายในพอลิเมอร์เหลว ตัวอย่าง เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อาจจะละลายอยู่ในพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ภาวะความดันปกติ และอาจจะเกิดการแพร่ ขยายตัว เมื่อความดันในระบบลดลง หรือเมื่อสารละลายที่มีจุดเดือดต่ำได้รับความร้อนจากปฏิกิริยา อาจจะเปลี่ยนไปเป็นฟองก๊าซได้

2) ก๊าซอาจจะเกิดจากปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น เช่น ปฏิกิริยาของไอโซไซยาเนตกับน้ำหรือการสลายตัวของสารพวกเอโซไดคาร์บอนาไมด์ (Azodicarbonamide)

2.4 สมการการขยายตัวของฟองก๊าซ

2.4.1 การขยายตัวของฟองก๊าซในสภาพไม่จำกัดปริมาณของเหลว (An Infinite Amount of Liquid) [14]

สมการการเกิดฟองก๊าซเดี่ยวในของเหลวปริมาตรไม่จำกัด กำหนดให้การเกิดฟองก๊าซอยู่ภายใต้สภาวะอุณหภูมิคงที่ ดังนั้นการเกิดฟองก๊าซจึงขึ้นอยู่กับการถ่ายเทโมเมนตัม และการถ่ายเทมวลเท่านั้น

กำหนดให้ความหนาแน่นของของเหลวมีค่าคงที่ และฟองก๊าซมีรูปทรงกลมสมมาตรหรือความเร็วของการขยายตัวของฟองก๊าซในแนวรัศมีเท่ากันทุกด้าน โดยสามารถหาได้จากสมการ

$$v_r = \left[\frac{R}{r}\right]^2 \frac{dr}{dt} \qquad \text{...(2.2)}$$

เมื่อ $R(t)$ คือ รัศมีของฟองก๊าซ

และ t คือ เวลา

ความสัมพันธ์ของสมการที่ (2.2) หาได้จาก การหาปฏิยานุพันธ์ของสมการมวลสาร (Overall integral mass balance) โดยกำหนดให้ ความหนาแน่นของของเหลวสูงกว่าความหนาแน่นของก๊าซมากๆ

การไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่มีความหนืดสูงๆ จะมีเลขเรย์โนลด์ (Reynold Number) ต่ำ (Re<<1) จากสมการ Navier-Stokes กำหนดให้การไหลของพอลิเมอร์เป็นแบบราบเรียบ (Creeping Flow) และฟองก๊าซเป็นทรงกลมเท่ากันทุกด้าน นำสมการของ Navier-Stokes มารวมกับสมการของความเร็วในแนวรัศมีของของเหลว ณ จุดสมดุลที่ผิวของฟองก๊าซ จะได้ว่า

$$P_b - P_\infty - \frac{2\sigma}{R} = \frac{4\mu}{R}\left(\frac{dR}{dt}\right) \qquad \text{....(2.3)}$$

เมื่อ $P_b(t)$ คือ ความดันภายในฟองก๊าซ

P_∞ คือ ความดันภายนอก (ความดันบรรยากาศขณะทดลอง)

δ คือ ความตึงผิว (Surface Tension)

และ μ คือ ความหนืดของของเหลว

สภาวะเริ่มต้นสำหรับสมการที่ (2.3) คือ

$$R = R_0 \quad \text{ที่} \quad t = 0 \qquad \text{...(2.4)}$$

จากสมการที่ (2.3) แสดงให้เห็นว่า เมื่อเกิดฟองก๊าซ $\left(\left(\frac{dR}{dt}\right) > 0\right)$ ก็ต่อเมื่อ รัศมีเริ่มต้นของฟองก๊าซต้องมากกว่ารัศมีวิกฤต หรือ

$$R_{cr} = \frac{2\sigma}{P_{b0} - P_\infty} \qquad \text{...(2.5)}$$

สมการอนุพันธ์ (Differential Equation) ของสมการสมดุลมวลของระบบสองสาร กำหนดให้ ฟองก๊าซทรงกลมสมมาตรทุกด้านและความหนาแน่นคงที่ จะได้สมการของสัมประสิทธิ์การแพร่คือ

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \upsilon_r \frac{\partial c}{\partial r} = D\left[\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2 \frac{\partial c}{\partial r}\right)\right] \qquad \ldots(2.6)$$

เมื่อ c คือ ความเข้มข้นของก๊าซที่ระเหยออกมาเป็นโมลาร์ (Molar)

สภาวะเริ่มต้นสำหรับสมการที่ (2.6) คือ

$$c = c_s(t) \qquad \text{ที่} \quad r = R(t) \qquad \ldots(2.7)$$

$$c = c_\infty \qquad \text{ที่} \quad r = \infty \qquad \ldots(2.8)$$

$$c = c_\infty \qquad \text{ที่} \quad t = 0 \qquad \ldots(2.9)$$

จะเห็นได้ชัดว่า ในของเหลวที่มีปริมาตรไม่จำกัด ความเข้นข้นขององค์ประกอบที่ระเหยได้มีค่าเสมอและฟองก๊าซจะเกิดไม่ชัดเจน

กำหนดให้องค์ประกอบที่ระเหยได้ มีอยู่เฉพาะในฟองก๊าซเท่านั้น เมื่อปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุลระหว่างผิวสัมผัสของพอลิเมอร์และฟองก๊าซ นำสมการของออองรี (Henry's Law) มาใช้ดังนี้

$$P_b = Kc_s \qquad \ldots(2.10)$$

เมื่อ K คือ ค่าคงที่ Henry ในหน่วยโมลาร์

หาปฏิยานุพันธ์ของสมการสมดุลมวลสารขององค์ประกอบที่ระเหยได้ ดังนี้

$$\frac{1}{4\pi R^2}\frac{dn}{dt} = D\left(\frac{\partial c}{\partial r}\right)_{r=R} \qquad \ldots(2.11)$$

เมื่อ n คือ จำนวนโมลขององค์ประกอบที่ระเหยได้ ที่อยู่ในฟองก๊าซ สมการ (2.11) มีสภาวะเริ่มต้นดังนี้

$$n = n_0 \qquad \text{ที่} \quad t = 0 \qquad \ldots(2.12)$$

จากการศึกษาของ Patel [14] จะกำหนดให้ความหนาแน่นของก๊าซในสมการที่ (2.2) และ (2.3) มีค่าคงที่ แต่ไม่คงที่ในสมการที่ (2.11) กรณีความหนาแน่นของก๊าซไม่คงที่ Patel ได้เสนอให้มีการปรับปรุงสมการที่ (2.11) อย่างไรก็ตาม ถ้าความเข้มข้นของก๊าซต่ำมากๆ อาจไม่มีผลต่อผลลัพธ์ของสมการหรือต่างกันน้อยมาก

สุดท้ายจะใช้สมการของก๊าซอุดมคติ (Ideal Gas) คำนวณสภาวะของก๊าซภายในฟองก๊าซ ดังนี้

$$P_b V = nR_g T \qquad \text{...(2.13)}$$

เมื่อ V คือ ปริมาตรของฟองก๊าซ

R_g คือ ค่าคงที่ของก๊าซ

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ซึ่งมีค่าคงที่

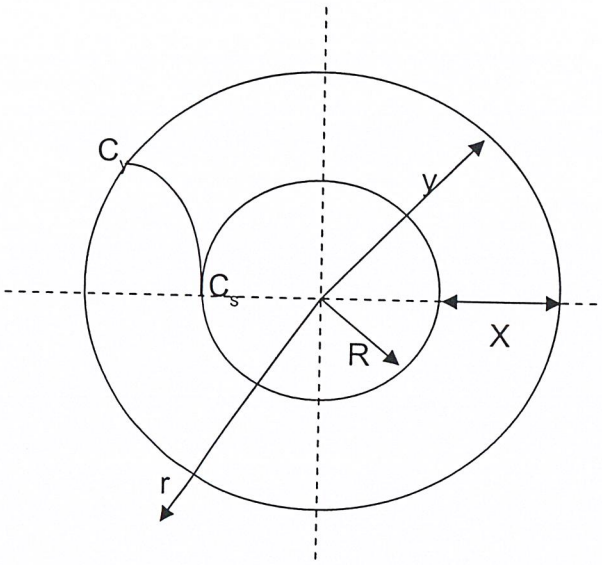
หนึ่งในปัญหาที่สำคัญของการสร้างสมการคำนวณการเกิดฟองก๊าซ คือการกำหนดหรือประมาณค่าความดันเริ่มต้นในฟองก๊าซ (P_{b0}) โดยอาจกำหนดได้ดังนี้

ประการแรก อาจกำหนดสมดุลเคมีเหมือนสมการ (2.10) โดยแทนค่า c_s ด้วยความเข้มข้นของก๊าซในของเหลว (c_∞)

ประการที่สอง หาได้จากสมการสมดุลเชิงกล ในสมการที่ (2.3) โดยกำหนดให้ t=0 จะได้ $R=R_0$, $\frac{dR}{dt}=0$ ก็จะสามารถคำนวณความดันเริ่มต้นในฟองก๊าซได้

ประการที่สาม ที่ใช้สมการ (2.3) เช่นกัน โดยกำหนดให้ที่ $t=0$, $R=R_{cr}$, $\frac{dR}{dt}=0$

ประการสุดท้าย เมื่อรัศมีของฟองก๊าซมีค่ามากกว่ารัศมีวิกฤต ($R_0=R_{cr}$) ฟองก๊าซก็จะขยายตัวได้ แต่ถ้าฟองก๊าซมีรัศมีน้อยกว่ารัศมีวิกฤต ($R_0<R_{cr}$) ฟองก๊าซก็จะไม่สามารถขยายตัวได้และยุบหายไป ดังนั้นการหาค่าตัวแปรใดๆ จากสมการ ต้องประมาณค่ารัศมีวิกฤตให้ได้ก่อน เพื่อหาค่าความดันของฟองก๊าซเริ่มต้น และนำไปใช้คำนวณในสมการต่อไป



รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะการขยายตัวของฟองก๊าซในสภาพจำกัดปริมาณของเหลว

2.4.2 การขยายตัวของฟองก๊าซในสภาพจำกัดปริมาณของเหลว

(A Finite Amount of Liquid)

รูปที่ 2.2 แสดงการเกิดฟองก๊าซทรงกลมในของเหลวปริมาตรจำกัด ในส่วน$0 \leq r \leq R(t)$ คือ ส่วนที่ฟองก๊าซจะขยายตัวออก และในส่วน $R(t) \leq r \leq y(t)$ คือ ส่วนของพอลิเมอร์รอบ ๆ ฟองก๊าซโดย $y(t) = R(t) + x(t)$ สภาวะดังกล่าว Amon และ Denson [16] ได้เสนอสมการ Cell model โดยกำหนดการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ระเหยได้ที่เป็นชั้นที่ผนังของของเหลว (Liquid Shell) เมื่อนำการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นที่เป็นสมการพาราโบลาของ Rosner และ Epstein [14] มาใช้จะได้ว่า

$$\frac{C_y - C}{C_y - C_s} = (1 - \eta)^2 \qquad \ldots(2.14)$$

เมื่อ $$\eta = \frac{r - R}{x} \qquad \ldots(2.15)$$

และจะได้ว่า $\partial C / \partial r = 0$ ที่ $r = y$ ดังนั้นก๊าซจากองค์ประกอบที่ระเหยได้ทั้งหมดจึงอยู่ในฟองก๊าซทั้งหมด และตลอดเวลา แทนค่าสมการ (2.2)-(2.3) ลงในสมการที่ (10) จะได้

$$\frac{dn}{dt} = 8\pi R^2 D \frac{(C_y - C_s)}{x} \qquad \ldots(2.16)$$

ผลลัพธ์ของสมการจะอยู่ในรูปสมการ ODE (Ordinary Differential Equation) เท่านั้น ทำให้สามารถวิเคราะห์คำตอบของสมการได้โดยง่าย

นอกจากนี้ Newman และ Simon [14] ได้ใช้สภาวะกึ่งคงตัว (Quasi-Steady State) ซึ่งใช้สมการการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นจากทฤษฎีการแทรกซึม (Penetration Theory) สำหรับพื้นผิวคงที่ และความแตกต่างของความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ระเหยได้ในการแก้ปัญหา ส่วนในกรณีที่เซลล์ของฟองก๊าซที่เกิดขึ้นเป็นเซลล์ปิด Ramesh และ Malwitz [14] ได้เสนอสมการแบบจำลองเซลล์ (Cell model) ที่ยอมให้ก๊าซออกจากเซลล์ไปสู่สิ่งแวดล้อมได้ โดยอาจเกิดที่ผิวของชิ้นโฟม หรือในกรณีที่แผ่นโฟมมีความบางมาก

เมื่อความเข้มข้นของก๊าซจากองค์ประกอบที่ระเหยได้มีค่าน้อย ๆ การประมาณที่ดีที่สุดคือให้ความหนาแน่นของวัฏภาคของของเหลวมีค่าคงที่ตลอดกระบวนการ เมื่อมวลรวมในหน่วยเซลล์มีค่าคงที่ หาปฏิยานุพันธ์ของสมการสมดุลมวล ได้ดังนี้

$$(\rho_{b0} - \rho_b)\frac{4}{3}\pi R^3 + \rho_L \frac{4}{3}\pi [(y_0^3 - y^3) - (R_0^3 - R^3)] = 0 \quad \ldots(2.17)$$

เมื่อ ρ_b คือความหนาแน่นของฟองก๊าซ (ไม่คงที่)

ρ_L คือความหนาแน่นของของเหลว (คงที่)

ตัวห้อย 0 คือสถานะที่ t =0

จากสมการแบบจำลองเซลล์ (Cell model) มวลขององค์ประกอบที่ระเหยได้จะมีค่าคงที่เสมอในหนึ่งหน่วยเซลล์ หาปฏิยานุพันธ์ของสมการสมดุลมวล ขององค์ประกอบที่ระเหยได้ ดังนี้

$$(n_0 - n) + \frac{4}{3}\pi (y_0^3 - R_0^3) c_{ave}(0) - \int_R^{R+x} 4\pi R^2 C dr = 0 \quad \ldots(2.18)$$

เมื่อ $C_{ave}(0)$ คือความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ระเหยได้ในวัฏภาคของของเหลวที่เวลาเริ่มต้น แต่วิธีการอย่างง่ายนี้ไม่สามารถคำนวณหาความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ระเหยได้ในวัฏภาคของของเหลวที่สภาวะเริ่มต้นได้

ในกระบวนการกำจัดก๊าซออกจากพอลิเมอร์หลอมเหลว การออกแบบสมการให้คำตอบของสมการมีเทอมของความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ระเหยได้ในวัฏภาคของของเหลว หาปฏิยานุพันธ์ของสมการสมดุลมวล ขององค์ประกอบที่ระเหยได้ ดังนี้

$$(n_0 - n) + \frac{4}{3}\pi [(y_0^3 - R_0^3) C_{ave}(0) - (y^3 - R^3) C_{ave}(t)] = 0 \quad \ldots(2.19)$$

ในทางกลับกัน การโฟมพอลิเมอร์ก็จะสนใจเทอมของความหนาแน่นในหนึ่งหน่วยเซลล์ โดยอาจละมวลของก๊าซได้ เมื่อเทียบกับมวลของพอลิเมอร์ จะได้ว่า

$$\rho_{cell} = \rho_L [1-(\frac{R}{y})^3] \qquad \ldots(2.20)$$

2.5 พอลิยูรีเทน (Polyurethane) [8-10]

พอลิยูรีเทนเป็นพอลิเมอร์ที่มีหมู่ยูรีเทน (-NHCOO-) เป็นหมู่แสดงสมบัติเฉพาะตัวอยู่ภายในโมเลกุล ซึ่งหมู่ของยูรีเทนสามารถเตรียมจากปฏิกิริยาระหว่างไดออล (Diols) และไดไอโซ-ไซยาเนต (Diisocyanate) พอลิยูรีเทนเป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างแอลกอฮอล์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group, -OH) อยู่ในโมเลกุลตั้งแต่สองหมู่หรือมากกว่า (Diols or polyols) กับไอโซไซยาเนต ซึ่งมีโมเลกุลของหมู่ไอโซไซยาเนตมากกว่าหนึ่งหมู่ (Diisocyanate or polyisocyanate) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ จัดเป็นปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบการเติม (Addition polymerization) และเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน โดยความร้อนที่เกิดขึ้น จะทำให้สารช่วยให้เกิดฟอง ซึ่งเป็นพวกฟลูออโรคาร์บอนเกิดการระเหยในขั้นตอนการเกิดพอลิเมอไรเซ-ชัน เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์พอลิยูรีเทนโฟม หรืออาจจะใช้น้ำผสมกับพอลิออล ดังนั้น เมื่อเกิดปฏิกิริยากับไอโซไซยาเนต จะทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้น

2.5.1 ชนิดของพอลิยูรีเทน (Types of polyurethanes)

พอลิยูรีเทน สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท ดังนี้

1. พอลิยูรีเทนโฟม (Foam polyurethane)
2. พอลิยูรีเทนแบบแข็ง (Solid polyurethane)
3. พอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ (Solid polyurethane elastomers)
4. สารยึดติด สารเคลือบผิว และสารสี (Adhesive, coating, paints)

สำหรับในหัวข้อนี้ จะกล่าวถึงเฉพาะชนิดของพอลิยูรีเทนที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ คือ พอลิยูรีเทนโฟม

พอลิยูรีเทนโฟม สามารถแบ่งโดยใช้เกณฑ์ของความหนาแน่น ได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

1) โฟมยืดหยุ่นความหนาแน่นต่ำ (Low density flexible foam)

- สมบัติและการนำไปใช้งาน

โฟมยืดหยุ่นความหนาแน่นต่ำ เป็นโฟมที่มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 10-80 กิโลกรัมต่อ

ลูกบาศก์เมตร โครงสร้างของโมเลกุลเป็นแบบร่างแห เนื้อโฟมมีโครงสร้างเป็นแบบเซลล์เปิด ซึ่งจะทำให้อากาศสามารถไหลผ่านภายในโครงสร้างได้โดยง่าย พอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่นนี้ จะมีความต้านทานแรงดึงสูง ทนทานต่อตัวทำละลายหลายๆ ชนิด แต่จะสลายตัวลงโดยกรด-เบสและไอน้ำ นอกจากนี้ พอลิยูรีเทนที่แห้ง สามารถทนต่อความร้อนได้ถึง 150 องศาเซลเซียส

โฟมยืดหยุ่น จะใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตเบาะเฟอร์นิเจอร์ เบาะรถยนต์ หมอนพนักรถยนต์ พวงมาลัยรถยนต์ สปอยเลอร์รถยนต์และวัสดุกันกระแทกต่างๆ เป็นต้น

- การเตรียมพอลิยูรีเทนโฟมชนิดยืดหยุ่น

ก๊าซที่ใช้ในการผลิตพอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่นได้ โดยทั่วไป คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างไอโซไซยาเนตและน้ำ ดังนั้น ระบบจะประกอบด้วยไดไอโซไซยาเนต พอลิออลและน้ำ โดยพอลิออลที่ใช้นั้น มักใช้พอลิเอสเทอร์และพอลิอีเทอร์ สำหรับเหตุผลที่ใช้พอลิออล เพื่อต้องการให้พอลิเมอร์เกิดการเชื่อมโยงและมีความยืดหยุ่น (Flexibility)

2) โฟมคงรูปความหนาแน่นต่ำ (Low density rigid foam)

- สมบัติและการนำไปใช้งาน

โฟมคงรูปความหนาแน่นต่ำ ภายในเนื้อโฟมจะมีโครงสร้างแบบร่างแหอยู่ในปริมาณมาก ลักษณะของเซลล์เป็นแบบเซลล์ปิด ผนังของฟองก๊าซภายในเนื้อโฟมยังคงโครงสร้างอยู่ ดังนั้น การเคลื่อนที่ของก๊าซจึงเกิดขึ้นไม่ได้ โฟมประเภทนี้ มีสมบัติทางเคมีคล้ายคลึงกับพอลิยูรีเทนโฟมชนิดยืดหยุ่น มีความแข็งแรงที่สูง ซึ่งจะสัมพันธ์กับน้ำหนักของโฟม มีความทนทานต่อการกดอัด มีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนความร้อนที่ดี นอกจากนี้ยังสามารถต่อต้านน้ำมันและแก๊สโซลีนเป็นอย่างดี โดยจะมีความหนาแน่นของเนื้อโฟมมากกว่า 30 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

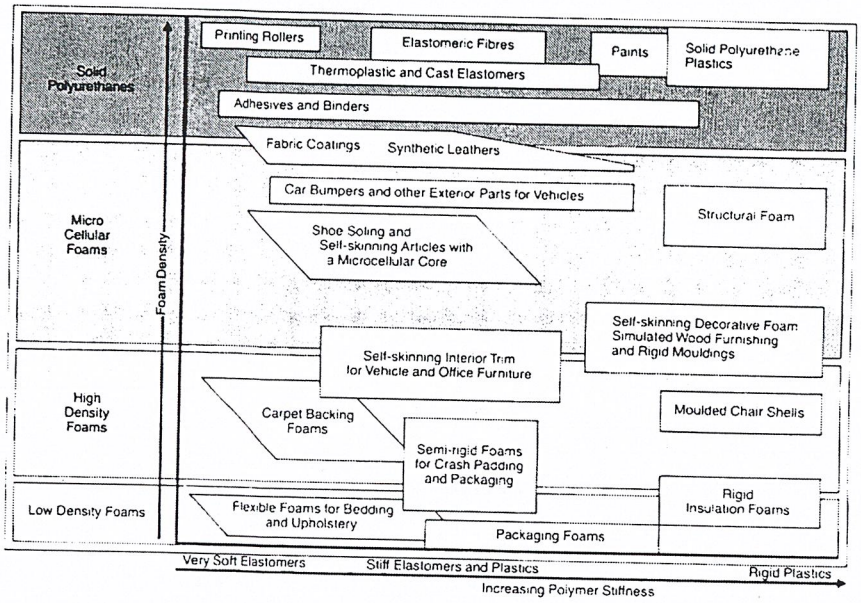
พอลิยูรีเทนโฟมชนิดแข็ง ส่วนใหญ่ใช้งานเป็นฉนวนความร้อน (Insulator) ในตู้เย็น ในการก่อสร้าง ผนังห้องเย็น ภาชนะเก็บความร้อนและเย็น นอกจากนี้ยังใช้เป็นส่วนประกอบของเรือเพื่อลดน้ำหนักของเรือและทำให้การลอยตัวดีขึ้น

- การเตรียมพอลิยูรีเทนโฟมชนิดแข็ง (Rigid urethane foam)

การเตรียมพอลิยูรีเทนชนิดนี้ อาศัยหลักการเดียวกับการเตรียมพอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่น กล่าวคือ ใช้สารตั้งต้นประเภทเดียวกันและก๊าซชนิดเดียวกัน แตกต่างกันเพียงค่าองศาของการเชื่อมโยง โดยที่โฟมชนิดนี้มีค่าองศาของการเชื่อมโยงสูงมาก ซึ่งทำได้โดยใช้พอลิออลที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

3) โฟมยืดหยุ่นความหนาแน่นสูง (High density flexible foam) : มีความหนาแน่นของเนื้อโฟมมากกว่า 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยช่วงความหนาแน่นนี้จะรวมถึงโฟมแบบ self-skinning foams และ microcellular elastomers ซึ่ง self-skinning foam มีโครงสร้างของเซลล์ 2 แบบ คือ แบบเซลล์เปิด จะมีความหนาแน่นประมาณ 450 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ

แบบเซลล์ปิด จะมีความหนาแน่น 500 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ส่วนโฟมชนิด microcellular elastomers จะมีความหนาแน่นที่ค่อนข้างสม่ำเสมอและโดยทั่วไปมักมีโครงสร้างแบบเซลล์ปิด



รูปที่ 2.3 คุณสมบัติการใช้งานของพอลิยูรีเทนชนิดต่างๆ

2.5.2 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการผลิตพอลิยูรีเทนโฟม

สารเคมีสำคัญที่ใช้ในกระบวนการผลิตพอลิยูรีเทน มีดังต่อไปนี้

2.5.2.1 พอลิออล (Polyols)

พอลิออล ถือเป็นวัตถุดิบสำคัญในการผลิตพอลิยูรีเทน โดยที่ 90 เปอร์เซนต์ของพอลิออลที่ใช้ จะเป็นพอลิออลชนิด พอลิอีเทอร์ (Polyether) ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล 3 หมู่ และถ้าใช้พอลิออลชนิดพอลิเอสเทอร์ (Polyester) จะได้ผลิตภัณฑ์พอลิยูรีเทนที่มีคุณสมบัติเฉพาะ แต่โดยปกติราคาของพอลิเอสเทอร์จะแพงกว่าพอลิอีเทอร์ ดังนั้น การเลือกพอลิออล จะต้องพิจารณาถึงขนาดและความยืดหยุ่นของโครงสร้าง ค่าฟังก์ชันนอลิตี้ (Functionality) ซึ่งเป็นปริมาณของไอโซไซยาเนตกับปริมาณของหมู่ไฮดรอกซิลต่อปริมาณพอลิออล และระดับของการเกิดโครงสร้างร่างแหในโมเลกุล ซึ่งค่านี้ จะส่งผลต่อการควบคุมความแข็งและความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ นั่นคือ โฟมคงรูป ต้องการโครงสร้างโมเลกุลที่แข็งตัว จำเป็นต้องใช้พอลิออลที่มีค่าระดับของการเกิดโครงสร้างร่างแหที่สูง แต่สำหรับโฟมยืดหยุ่น ต้องการพอลิออลที่มีระดับของการเกิดโครงสร้างร่างแหที่ต่ำ

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของพอลิออลสำหรับอุตสาหกรรมผลิตพอลิยูรีเทน

Characteristic	Flexible foams and elastomers	Rigid foams, rigid plastics and stiff coatings
Molecular weight range Functionality range Hydroxyl value range (mg KOH/g)	1,000 to 6,500 2.0 to 3.0 28 to 160	150 to 1,600 3 to 8 250 to 1,000

เดิมการเตรียมพอลิยูรีเทน สามารถใช้สารอะลิฟาติกไดออล (ไกลคอล) เช่น 1,4-บิวเทนไดออล แต่ปัจจุบันนิยมใช้สารประกอบพอลิเมอริกไฮดรอกซี (Polymeric hydroxyl) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลไม่มากนัก เช่น พอลิเอสเทอร์และพอลิอีเทอร์ ซึ่งทำให้ผลิตผลที่ได้มีสมบัติการใช้งานได้กว้างขวาง

- พอลิอีเทอร์ (Polyethers)

พอลิอีเทอร์ที่มีหมู่ปลายเป็นหมู่ไฮดรอกซี ($H-(OR)_n-OH$) จัดว่าเป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการเตรียมพอลิยูรีเทน พอลิอีเทอร์ไตรออลที่มีน้ำหนักโมเลกุลค่อนข้างสูง (ประมาณ 3000) มักใช้ผลิตโฟมยืดหยุ่น ในขณะที่พอลิอีเทอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วงประมาณ 500 มักจะใช้ผลิตโฟมคงรูป

ตารางที่ 2.2 พอลิอีเทอร์ที่นิยมใช้ในการเตรียมพอลิยูรีเทน

พอลิออล	น้ำหนักโมเลกุล	หมู่ฟังก์ชัน
$CH_3-\underset{\underset{OH}{|}}{CH}-CH_2-OH$	400-4000	2
$HO-CH_2-\underset{\underset{CH_2-OH}{|}}{CH}-CH_2-OH$	300-6000	3
$HOCH_2-\underset{\underset{CH_2OH}{|}}{\overset{\overset{CH_2OH}{|}}{C}}-CH_2-OH$	400-600	4
$HOCH_2-CH(OH)-CH(OH)-CH(OH)-CH_2OH$	350-750	6

61513

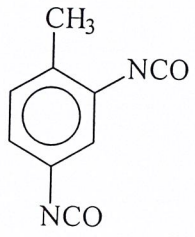
- พอลิเอสเทอร์ (Polyester)

พอลิเอสเทอร์ที่มีหมู่ปลายเป็นหมู่ไฮดรอกซี (—(O—C(=O)—R—OR)n—OH) จัดเป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการเตรียมพอลิยูรีเทน เกิดจากการใช้ไดแอซิด เช่น กรดอะไดปิก กรดเซบาซิก เป็นต้น ทำปฏิกิริยากับไดออลที่มากเกินพอ (Excess) น้ำหนักโมเลกุลที่นิยมใช้จะอยู่ในช่วง 1000 - 4000

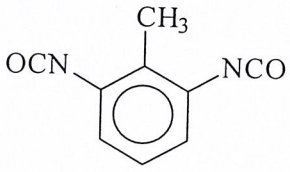
2.5.2.2 ไอโซไซยาเนต (Isocyanate)

ไอโซไซยาเนตถือเป็นวัตถุดิบสำคัญในการผลิตพอลิยูรีเทน วิธีการที่ใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของพอลิยูรีเทน คือ การปรับเปลี่ยนชนิดของไอโซไซยาเนตที่ใช้ โดยที่ 95 เปอร์เซนต์ของอุตสาหกรรมการผลิตพอลิยูรีเทน พบว่า จะใช้ไอโซไซยาเนตที่สำคัญอยู่ 2 ชนิด คือ โทลูอีนไดไอโซไซยาเนต (Toluene diisocyanate, TDI) และไดไอโซไซยาเนโต้ ไดเฟนิลมีเทน (Diisocyanatodiphenylmethane, MDI) หรืออาจใช้อนุพันธ์ของสาร 2 ชนิดนี้

- โทลูอีนไดไอโซไซยาเนต สามารถเตรียมได้โดยใช้โทลูอีน (Toluene) เป็นสารตั้งต้น ซึ่งผลิตผลสุดท้ายจะเป็นของผสมของโทลูอีนไดไอโซไซยาเนต 2 ไอโซเมอร์ คือ โทลูอีน 2,4 ไดไอโซไซยาเนต (2,4-diisocyanate) และโทลูอีน 2,6 ไดไอโซไซยาเนต (2,6-diisocyanate) ซึ่งของผสมของไอโซเมอร์ทั้ง 2 นี้ มีสถานะเป็นของเหลว ณ อุณหภูมิห้อง โทลูอีนไดไอโซไซยาเนตที่นิยมส่วนใหญ่ จะเป็นของผสมระหว่างสาร 2 ชนิด คือ 2,4 และ 2,6 ไอโซเมอร์ ในสัดส่วน 80 : 20 ตามลำดับ ไอโซไซยาเนตชนิดนี้ จะใช้ในการผลิตโฟมความหนาแน่นต่ำ สำหรับอุตสาหกรรมการผลิตวัสดุกันกระแทก



(2,4-diisocyanate)

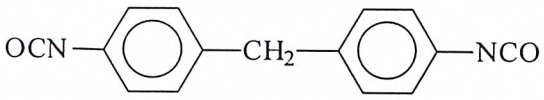


(2,6-diisocyanate)

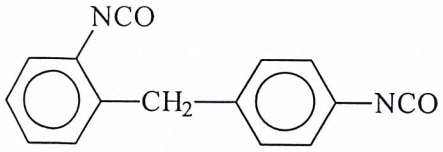
รูปที่ 2.4 โครงสร้างโมเลกุลของโทลูอีนไดไอโซไซยาเนต

- ไดเฟนิลเมเทนไดไอโซไซยาเนต (Dipheylmethane diisocyanate, DPMI หรือ MDI) ผลิตได้จากสารตั้งต้นอะนิลีน (Aniline) และฟอลมัลดีไฮด์ (Formaldehyde) จะได้ผลิตภัณฑ์ คือ polymeric MDI ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตโฟมแบบแข็ง นอกจากนั้นในขั้นตอน

การผลิต polymeric MDI จะสามารถแยก MDI บริสุทธิ์ ออกมาใช้เป็นสารเคมีพื้นฐานสำหรับการปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆ ต่อไป



(4,4′-diphenylmethanediisocyanate)



(2,4′-diphenylmethanediisocyanate)

รูปที่ 2.5 โครงสร้างโมเลกุลของไดเฟนิลเมเทนไดไอโซไซยาเนต

ตารางที่ 2.3 ลักษณะการใช้งานของ MDI ที่ค่าฟังก์ชันนอลิตี้ในช่วง 2.0-3.0

Average functionality	Product description	Polyurethane type	Main applications
2.0	Pure MDI	High performance elastomers	Shoe-soling Spandex fibres. Flexible coatings. Thermoplastics.
2.01 - 2.1	Modified, liquid pure MDI	High performance elastomers. Microcellular elastomers.	Shoe-soling. Flexible coatings RIM and RRIM. Cast elastomers.
2.1 - 2.3	Liquid, low functionality polyisocyanates.	Flexible, semi-rigid and rigid (structural) foams. One-component froth	Automotive parts. Cabinets for electronic equipment. Insulating sealants. Cast elastomers.
2.5	Low viscosity liquid polyisocyanates.	High density flexible foams. Structural foams.	Foam-backs for carpets/vinyls. Computer cabinets and other moulded articles.
2.7	Low viscosity polymeric MDI.	Low density rigid foams. Semi-rigid foams. Isocyanurate foams. Particle binders.	Insulating foams. Energy absorbing foams. Isocyanurate foam building panels. Mine-face consolidation. Chipboard and foundry sand binders.
2.8 - 3.1	High functionality polymeric MDI.	Rigid polyurethane and isocyanurate foams.	Continuous lamination of rigid foam and rigid foam slabstock.

2.5.2.3 สารเติมแต่ง (Additive)

นอกจากพอลิไอโซไซยาเนตและพอลิออล ซึ่งเป็นสารเคมีสำคัญในการผลิตพอลิยูรีเทนแล้ว ยังมีสารเคมีอื่นๆ ที่เติมลงในขั้นตอนการผลิต เพื่อช่วยควบคุมและปรับปรุงคุณสมบัติของพอลิยูรีเทน สารเติมแต่งเหล่านี้ ประกอบด้วย ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) สารเร่งการเกิดโครงสร้างร่างแห (Cross-link agents) สารช่วยให้เกิดฟอง (Blowing agents) สารลดแรงตึงผิว (Surfactants) เม็ดสี (Coloring materials) ฟิลเลอร์ (Filler) สารลดการเกิดควัน (Smoke suppressants) และสารต้านการติดไฟ (Flame retardants)

ก) ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งที่เติมในปฏิกิริยาของไอโซไซยาเนตกับพอลิออล มีหลายชนิด โดยตัวเร่งที่เป็นที่นิยม ได้แก่ สารพวกอะลิฟาติกและอะโรมาติก เทอเทียรี เอมีน (Aliphatic and aromatic tertiary amine) และสารประกอบของ Organo-metalic โดยเฉพาะ สารประกอบของดีบุก (Tin)

- tertiary amines เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมการผลิตพอลิยูรีเทนโฟม โดยที่ค่าความว่องไวในการทำปฏิกิริยา (Catalytic activity) จะขึ้นอยู่กับโครงสร้างและสภาพความเป็นเบส (Basicity) ของสาร

- organo-metallic เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิ-ยูรีเทนแบบยืดหยุ่น สารประกอบในกลุ่มนี้ที่นิยมใช้ คือ stannous octoate โดยทั่วไปจะใช้ในกระบวนการผลิตแบบอาร์ไอเอ็ม (Reaction injection mold, RIM)

ข) สารช่วยให้เกิดฟอง

พอลิยูรีเทนโฟม สามารถผลิตได้โดยใช้สารช่วยให้เกิดฟอง เพื่อที่จะทำให้เกิดฟองก๊าซขึ้นระหว่างการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน สารช่วยให้เกิดฟองที่นิยมใช้กับพอลิยูรีเทน-โฟม คือ CFCs หรือ HCFEs ซึ่งเป็นสารเคมีที่ฤทธิ์ทำลายโอโซนในชั้นบรรยากาศ (Ozone-depleting chemicals : ODCs) มักพบในพอลิยูรีเทนโฟมแบบคงรูปเท่านั้น ส่วนน้ำและ Methylene chloride เป็นสารช่วยให้เกิดฟองชนิดที่ไม่ทำลายโอโซนในชั้นบรรยากาศ ซึ่งจะพบในพอลิยูรีเทนโฟมแบบยืดหยุ่น สำหรับพอลิยูรีเทนแบบยืดหยุ่น โดยปกติจะใช้การทำปฏิกิริยาของไดไอโซไซยาเนตกับน้ำไตรคลอโรโมโนฟลูออโรมีเทน (Trichloromonofluoromethane,CFC11) เพื่อให้เกิดฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้น

สารช่วยให้เกิดฟองที่ใช้ได้ผลดี จะต้องละลายเข้ากับพอลิเมอร์ที่หลอมเหลวในปริมาณที่เพียงพอในสภาวะที่ความดันสูงพอเหมาะ แต่อย่างไรก็ตาม ณ อุณหภูมิแวดล้อม จะต้องไม่ละลายจนเกินไปเข้าไปในผนังเซลล์ของพอลิเมอร์ที่ขยายตัว สารช่วยให้เกิดฟองจะต้องผ่านเข้าสู่ผนังเซลล์อย่างช้าๆ และช้ากว่าอากาศ เพราะหากการผ่านเข้าสู่ผนังเซลล์ของสารช่วยให้เกิดฟองเร็วกว่าอากาศจะเป็นสาเหตุให้โฟมเกิดการหดตัวในช่วงอายุการใช้งาน

ตารางที่ 2.4 สมบัติของสารช่วยให้เกิดฟอง

ชนิดสารช่วยให้เกิดฟอง	น้ำหนักโมเลกุล	ความหนาแน่น (กรัมต่อลบ.ซม.)	จุดเดือด (องศาเซลเซียส)
Cyclohexane	84.00	0.774	80.8
Trichloethylene	131.40	1.466	87.2
1,2 Dichloroethane	98.97	1.245	83.5
1,1,2-Trichlorotrifluororthane	187.39	1.565	47.6
Acetone	58.08	0.785	56.2

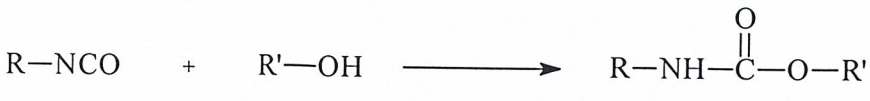
ตารางที่ 2.5 วัตถุประสงค์ของการใช้สารเติมแต่งชนิดต่างๆ

Additive	**Type of material**	**Purpose**
Catalysts	Tertiary amines Organometallic compounds	To speed up the reaction of isocyanate and polyol
Cross-linking chain-extending agents	Polyols Polyamines	To give polymer cross-linking or to introduce specialised polymer segments
Blowing agents	Water (reacts with isocyanate giving carbon dioxide gas). Chlorofluoro-methanes	To produce foamed structures
Surfactants	Silicone fluids	To aid and help foam-forming processes
Colours	Various pigments Carbon black	To identify different foam grades and for aesthetic reasons
Fillers	Particulate inorganic materials Fibres (chopped, milled or as continuous fibres, nets or scrims)	To modify properties (stiffness, fire performance etc.)
Flame retardants	Phosphorus 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.

2.5.3 ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน

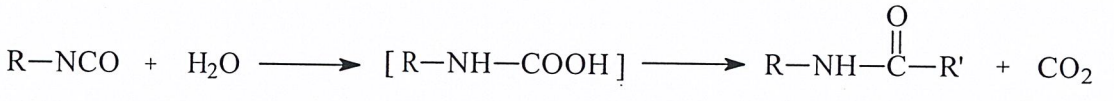
2.5.3.1 ปฏิกิริยาลำดับที่ 1 ของไอโซไซยาเนต แบ่งออกได้เป็น

1) ปฏิกิริยาของไอโซไซยาเนตกับพอลิออล



ปฏิกิริยาระหว่างไดไอโซไซยาเนตกับพอลิออล เป็นปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบการเติม และเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน โดยอัตราเร็วของการเกิดพอลิเมอไรเซชันจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างโมเลกุลของไอโซไซยาเนตและพอลิออล โดยที่อะลิฟาติกพอลิออล (Aliphatic polyols) ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลแบบปฐมภูมิ เมื่อทำปฏิกิริยากับไอโซไซยาเนต จะมีอัตราเร็วกว่าพอลิออลที่มีหมู่ไฮดรอกซิลแบบทุติยภูมิ ประมาณ 10 เท่า สำหรับอัตราการเกิดปฏิกิริยาของฟีนอลกับไอโซไซยาเนตจะช้ามากและพอลิยูรีเทนที่เกิดขึ้นนั้น จะสลายตัวกลับเป็นสารตั้งต้นได้ง่าย เมื่อได้รับความร้อน เรียกปฏิกิริยาผันกลับนี้ว่า Blocked isocyanate

2) ปฏิกิริยาของไอโซไซยาเนตกับน้ำ



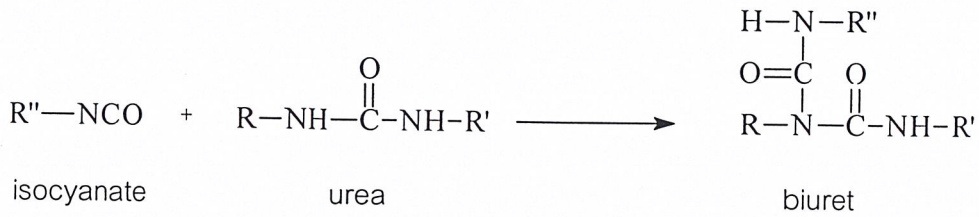
ปฏิกิริยาระหว่างไดไอโซไซยาเนตกับน้ำ จะได้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น คือ ยูเรีย และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ปฏิกิริยานี้จัดเป็นปฏิกิริยาพื้นฐานของการเกิดฟองก๊าซของอุตสาหกรรมการผลิตโฟมยืดหยุ่นความหนาแน่นต่ำ ผลิตภัณฑ์เริ่มต้นจะเกิดเป็นกรดคาร์บามิค (Carbamic acid) และจะแตกตัวเป็นเอมีนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

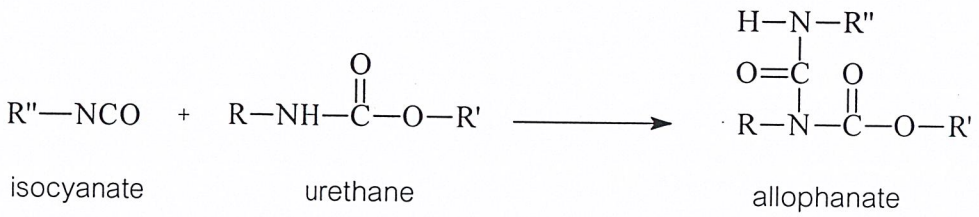
3) ปฏิกิริยาของไอโซไซยาเนตกับเอมีน

สำหรับปฏิกิริยาของไดไอโซไซยาเนตกับสารประกอบของเอมีนชนิดปฐมภูมิและทุติยภูมิ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง สารพวกไดเอมีน (Diamine) ความว่องไวในการทำปฏิกิริยาของเอมีนจะเพิ่มขึ้นตามความเป็นเบสและเอมีนแบบอะลิฟาติกจะว่องไวกว่าเอมีนแบบอะโรมาติก

2.5.3.2 ปฏิกิริยาลำดับที่ 2 ของไอโซไซยาเนต

ไอโซไซยาเนตภายใต้สภาวะที่เหมาะสม อาจจะทำปฏิกิริยากับอะตอมของไฮโดรเจนในโมเลกุลของยูเรียและยูรีเทน เกิดเป็นพันธะไบยูเร็ต (Biuret) และพันธะอัลโลโฟเนต (Allophonate) ตามลำดับ ทั้งสองปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ จัดเป็นปฏิกิริยาของการเกิดโครงสร้างร่างแหและปฏิกิริยาของหมู่ยูเรียจะเกิดได้รวดเร็วและเกิดที่ภาวะอุณหภูมิต่ำกว่าของหมู่ยูรีเทน





2.5.4 การผลิตพอลิยูรีเทนโฟม

กระบวนการเตรียมโฟมยืดหยุ่นที่ใช้ทั่วๆไปมี 3 แบบ คือ one-shot, prepolymer และ quasi-prepolymer

- One-shot polyester foams and one-shot polyether foams

วิธีนี้นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากราคาไม่ค่อยแพง โดยจะใช้พอลิเอสเทอร์ที่ใช้มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 2000 ปกติจะเตรียมจากกรดอะไดปิกกับไดเอธิลีนไกลคอล หรือใช้พอลิอีเทอร์ได้ผลิตผลเป็นของเหลวหนืด ของผสมทั้งหมดผ่านเข้าไปในเตาปฏิกรณ์ประมาณ 2-3 นาที โฟมจะเกิดเต็มที่ การทำเป็นรูปร่างต่างๆ ใช้เครื่องมือ Henecke type

- Polyether prepolymer

วิธีนี้ให้พอลิอีเทอร์ทำปฏิกิริยากับไดไอโซไซยาเนตมากเกินพอก่อน จะได้พรีพอลิเมอร์ (Prepolymer) ปลายโมเลกุลเป็นไอโซไซยาเนต ซึ่งเสถียรในภาวะที่แห้ง ถ้าเติมน้ำและตัวเร่งลงไปรวมทั้งตัวปรับปรุง จะเกิดโฟมชนิดยืดหยุ่นตามต้องการ วิธีนี้ราคาถูกกว่าวิธี one-shot

- Quasi-prepolymer polyether foams

วิธีนี้คล้ายๆ วิธีแบบ Prepolymer แต่ใช้ปริมาณไดไอโซไซยาเนตปริมาณมากๆ ทำปฏิกิริยากับพอลิอีเทอร์ จะได้พอลียูรีเทนน้ำหนักโมเลกุลต่ำๆ และมีไดไอโซไซยาเนตอิสระเหลืออยู่

มาก ผ่านเข้าไปในขั้นที่ 2 เพื่อทำปฏิกิริยากับพอลิอีเทอร์ เติมน้ำ เติมตัวเร่งและตัวดัดแปลงลงไป จะได้ผลิตภัณฑ์โฟมยืดหยุ่น วิธีนี้จะช่วยลดความหนืดของ prepolymer ลง เพราะน้ำหนักโมเลกุลในขั้นตอนแรกจะต่ำทำให้ผลิตง่ายขึ้น

2.6 Reaction Injection Molding Process (RIM)

RIM คือ กระบวนการที่มีขนาดใหญ่และซับซ้อน ประกอบไปด้วยการฉีดหลายๆ สารเคมี (โดยทั่วไปจะเป็น 2 ชนิด) ลงในแม่พิมพ์ในอัตราการไหลที่เหมาะสมกับการใช้งานแบบฉีดขึ้นรูป (Injection Molding) ซึ่งจะเป็นลักษณะการไหลในทิศทางตรงกันข้ามและมาผสมกันที่บริเวณหัวฉีด เพื่อให้เกิดเป็นพอลิเมอร์แบบแข็ง (solid polymeric) ของเหลวที่ใช้จะมีความว่องไวสูง ค่าความหนืดและน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เมื่อผ่านกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน จะได้พอลิเมอร์ที่มีลักษณะโมเลกุลแบบร่างแหตามรูปแบบของแม่พิมพ์

ในส่วนของกระบวนการผลิตพอลิยูรีเทน โดยวิธีอาร์ไอเอ็ม โดยทั่วไปในกระบวนการผลิตจะทำการฉีดสารเคมีที่เป็นของเหลว 2 ชนิด คือ พอลิออล และ ไอโซไซยาเนต เข้าไปในแม่พิมพ์เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างตามต้องการ

ในช่วงเวลาไม่กี่ปีที่ผ่านมาได้ มีการใช้กระบวนการผลิตพอลิยูรีเทน โดยวิธีอาร์ไอเอ็มอย่างกว้างขวาง เนื่องจากเหตุผลดังต่อไปนี้

- สามารถผลิตชิ้นส่วนขนาดใหญ่ได้ ชิ้นส่วนที่ขนาดจนถึงประมาณ 10 กิโลกรัม สามารถผลิตได้ด้วยเครื่องจักรพื้นฐานทั่วไป สำหรับชิ้นส่วนที่มีขนาดใหญ่กว่านี้ จะต้องใช้เครื่องจักรพิเศษที่มีความสามารถผลิตชิ้นงานได้สูง แต่จะทำให้ต้นทุนเพิ่มขึ้น

- ความต้องการพลังงานต่ำ ใช้พลังงานน้อยกว่ากระบวนการขึ้นรูปอื่นๆ

- ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับอุปกรณ์มีราคาต่ำ แม้แต่ในการผลิตชิ้นส่วนขนาดใหญ่ กระบวนการต้องการเพียงแค่แม่พิมพ์ที่มีน้ำหนักเบาและอุปกรณ์กำเนิดแรงดันเท่านั้น โดยเมื่อเปรียบเทียบค่าอุปกรณ์จะพบว่า กระบวนการอาร์ไอเอ็ม จะต่ำกว่ากระบวนการฉีดขึ้นรูปพอลิเมอร์ ชนิดเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic injection molding; TIM)

- สามารถผลิตอิลาสโตเมอร์ของพอลิยูรีเทนโดยกระบวนการอาร์ไอเอ็ม ให้มีความเหนียว (Tough) และความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact resistance) ที่ดี

- ชิ้นงานมีผิวหน้าที่เกลี้ยงเกลา ทาหรือพ่นสีได้ดี ปราศจากรอยหมุนวน (Swirl mark) สามารถใช้ผลิตชิ้นส่วนยานยนต์เกรดเอได้

- สามารถผลิตชิ้นส่วนที่มีรูปแบบซับซ้อนยุ่งยากได้เที่ยงตรง เนื่องมาจากการใช้ส่วนผสมซึ่งเป็นของเหลวมีความหนืดต่ำและมีการขยายตัวหลังจากทำปฏิกิริยากัน ช่วยให้ชิ้นงานสัมผัสกับแม่พิมพ์ที่ซับซ้อนได้ดี

- การขึ้นรูป โดยกระบวนการอาร์ไอเอ็ม จะเกิดตำหนิที่พื้นผิว (Surface defect) หรือสิ่งกีดขวางน้อยกว่าการฉีดขึ้นรูปพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติก

- สิ่งที่เติมหรือแทรกลงไปเพื่อเสริมแรง สามารถรวมตัวเข้าด้วยกันโดยสมบูรณ์กับชิ้นงาน

- ชิ้นงานทั้งขนาดใหญ่และขนาดเล็กไม่ได้รับผลจากความเค้นของแม่พิมพ์ (Molding stress) โดยไม่ต้องใช้ระบบท่อเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งมีราคาแพง

- สามารถดำเนินการผลิตที่อัตราการผลิตขนาดสูงที่เหมาะสมทางการค้า

- การเคลือบสีที่ผิวหน้า ช่วยป้องกันต้านทานความเสียหายได้ดีมาก

โดยทั่วไปงานหรือชิ้นส่วนที่ขนาดใหญ่และมีโครงสร้างซับซ้อน เหมาะสมที่ใช้กระบวนการอาร์ไอเอ็ม เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการทีไอเอ็ม (Thermoplastic injection molding; TIM) ซึ่งกระบวนการทีไอเอ็ม จะใช้งานกับพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติกที่มีความหนืดและน้ำหนักโมเลกุลสูง โดยจะทำการฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์และทำการหล่อเย็น เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้าย

ตารางที่ 2.6 การเปรียบเทียบคุณสมบัติการใช้งานระหว่างกระบวนการ RIM กับ TIM

คุณสมบัติการใช้งาน	RIM	TIM
อุณหภูมิของสารที่ทำการฉีด	45 ^{o}C	200 ^{o}C
อุณหภูมิของแม่พิมพ์	70 ^{o}C	25 ^{o}C
ความหนืดของสารที่ทำการฉีด	0.1-1 Pa.S	100-100,000 Pa.s
ความดันที่ใช้ในการฉีด	10 Mpa	100 Mpa
mold clamping force (for 1 m^2 part)	50 ton	3000 ton
เวลาที่ใช้ในการฉีด	50-180 s	70-100 s
การนำเศษชิ้นงานกลับมาใช้ใหม่	ไม่มี	มี
เศษของเสียจากการตกแต่งชิ้นงาน	10-15%	10%
ชิ้นงานที่มีตำหนิ	2%	3%
พลังงานที่ใช้ต่อหน่วยน้ำหนัก	7,900 kJ/kg	18,600 kJ/kg
molded in stress	ไม่มี	สูง

2.6.1 ขั้นตอนการทำงาน

- เตรียมสารเคมีทั้ง 2 ชนิดให้อยู่ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมก่อนทำการฉีด เช่น การปรับช่วงอุณหภูมิให้เหมาะสม และการแยกก๊าซออก เป็นต้น

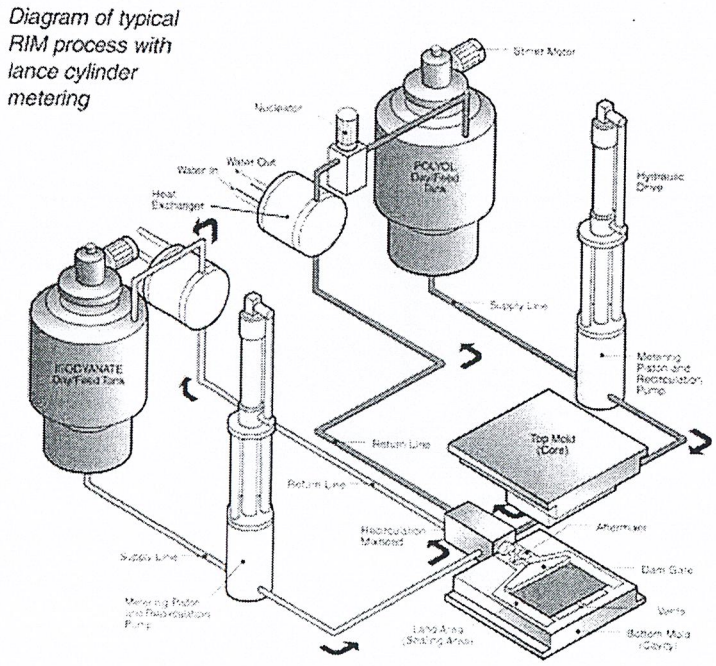
- เตรียมสารเคมีแต่ละชนิด ในอัตราส่วนที่เหมาะสม กับการเกิดปฏิกิริยาและทำการป้อนเข้าสู่บริเวณหัวฉีด โดยใช้ปั๊มควบคุม

- ทำการผสมสารเคมีทั้งสองเข้าด้วยกันบริเวณหัวฉีด เพื่อให้เกิดเป็นสารผสมที่พร้อมสำหรับการฉีดเข้าในแม่พิมพ์

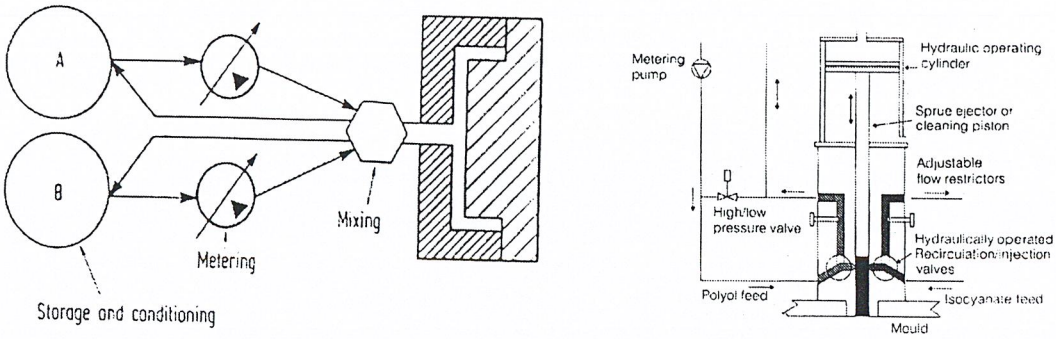
- ทำการฉีดสารผสมผ่านทางช่องที่ได้ทำการออกแบบไว้ลงในแม่พิมพ์ พร้อมทั้งควบคุมอุณหภูมิแม่พิมพ์ให้เหมาะสม เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence) และหลีกเลี่ยงการเกิดช่องว่างอากาศ (Air entrapment)

- การเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน และรอให้พอลิเมอร์ขยายตัวจนเต็มแม่พิมพ์

- การนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์และทำการตกแต่งชิ้นงาน



รูปที่ 2.6 แผนภาพกระบวนการผลิตพอลิยูรีเทน โดยใช้วิธี Reaction injection molding



(ก) (ข)

รูปที่ 2.7 แผนภาพการทำงานของกระบวน Reaction injection molding (ก) และหลักการทำงานของหัวผสม (Piston-ejector mixers) (ข)

2.6.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ RIM

2.6.2.1 วัสดุที่ใช้ในทำแม่พิมพ์ (Material)

การเลือกวัสดุสำหรับทำแม่พิมพ์ จะขึ้นอยู่กับจำนวนชิ้นส่วนต่างๆ ของแม่พิมพ์ ชนิดและอนุภาคของพื้นผิวงานที่ต้องการ อัตราการผลิตต่อแม่พิมพ์ และความเป็นไปได้ในการปรับปรุงแม่พิมพ์ในอนาคต

โลหะเป็นวัสดุที่มีความทนทานสำหรับการจัดทำแม่พิมพ์ และเหมาะสมสำหรับการใช้ในงานในกระบวนการอาร์ไอเอ็ม แม่พิมพ์แบบอีพอกซีเรซิน (Epoxy resin mold) หรือ แม่พิมพ์โลหะที่มีการเติมอีพอกซีเรซิน (Metal filled epoxy mold) สามารถให้ความแข็งแรงเพียงพอสำหรับกระบวนการ RIM และง่ายต่อการปรับปรุง เหมาะสำหรับงานที่มีกำลังการผลิตขนาดเล็ก สาเหตุสำคัญเนื่องจาก คุณภาพของพื้นผิว การผ่อนคลายและความเร็วของการนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ (Release) จะเป็นฟังก์ชันโดยตรงกับคุณภาพพื้นผิวแม่พิมพ์และการควบคุมอุณหภูมิของพื้นผิวแม่พิมพ์ เนื่องจากระบบนี้จะมีความร้อนเกิดขึ้นสูง ความร้อนนี้ต้องถูกถ่ายทอดออกจากพื้นผิวแม่พิมพ์ก่อนที่จะนำชิ้นงานออก พื้นผิวของแม่พิมพ์แบบอีพอกซีเรซิน จะด้อยกว่าของแม่พิมพ์โลหะในด้านของคุณภาพและความคงทน รวมทั้งการควบคุมอุณหภูมิ เป็นผลให้เกิดปัญหาเรื่องการนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์

แม่พิมพ์โลหะ จะผลิตโดยใช้เหล็กกล้า อะลูมิเนียมและสังกะสีอัลลอยด์ เป็นต้น ซึ่งเป็นวัสดุที่ทนทานและสามารถนำชิ้นงานออกได้ง่าย

แม่พิมพ์แบบเหล็กกล้า ใช้ในกระบวนการผลิตขนาดใหญ่ โดยมีกำลังการผลิตประมาณ 100,000 - 200,000 ครั้ง

แม่พิมพ์แบบสังกะสีอัลลอยด์ จะมีน้ำหนักมาก และเนื่องจากมีค่าการนำความร้อนต่ำ โดยทั่วไปจะมีท่อสำหรับถ่ายเทความร้อนหล่อแม่พิมพ์ไว้ วัสดุชนิดนี้จะสามารถนำชิ้นงานออก และตกแต่งชิ้นงานง่าย อายุการใช้งานมากกว่า 50,000 ครั้ง

2.6.2.2 การควบคุมอุณหภูมิ (Temperature control)

การควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์เป็นปัจจัยสำคัญสำหรับในกระบวนการ RIM ซึ่งจะช่วยให้คุณภาพของพื้นผิวชิ้นงานสูงและสามารถแกะออกจากแม่พิมพ์ได้ง่าย โดยแม่พิมพ์ทั้งสองส่วนจะมีท่อซึ่งใช้ในการถ่ายเทความร้อนจากของเหลว ปกติจะใช้น้ำ กระบวนการนี้โดยทั่วไปจะควบคุมอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 50–70 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับกระบวนการที่ใช้, ปริมาณของของเหลวที่ใช้ถ่ายเทความร้อน และค่าการนำความร้อนของแม่พิมพ์ สำหรับอุณหภูมิที่สูงกว่า 70 องศาเซลเซียส อาจจะใช้ในกระบวนการผลิตพอลิยูเรีย โดยวิธีการ RIM นอกจากนั้นสำหรับชิ้นส่วนที่ต้องการคุณภาพของพื้นผิวที่สูง จะถูกผลิตโดยใช้แม่พิมพ์ที่มีการควบคุมอุณหภูมิในช่วง 40-50 องศาเซลเซียส อุณหภูมิผิวของแม่พิมพ์ ควรจะมีความสม่ำเสมอ ความคลาดเคลื่อนประมาณ $\pm$ 2 องศาเซลเซียส กระบวนการ RIM จะมีการคายความร้อน ซึ่งปกติจะเกิดความร้อนประมาณ 50 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัมของสาร การหล่อเย็นแม่พิมพ์อย่างสม่ำเสมอเป็นสิ่งที่จำเป็น เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการเกิดปัญหาการรวมกันของความร้อน (Hot spot) และอัตราการถ่ายเทความร้อนจากแม่พิมพ์ จะส่งผลต่อเวลาในการนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ (Demold time) และอัตราการผลิต

2.6.2.3 การระบายอากาศในแม่พิมพ์ (Mold venting)

การมีระบบระบายอากาศในแม่พิมพ์ อย่างเพียงพอเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อที่จะไล่อากาศภายในแม่พิมพ์ออกขณะทำการฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน เวลาในการฉีด จะเปลี่ยนจากประมาณ 1 วินาที หรือมากกว่านั้น ขึ้นอยู่กับขนาดของชิ้นงานและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น เวลาในการฉีดโดยปกติจะอยู่ในช่วงระหว่าง 1–2 วินาที แม่พิมพ์จะมีช่องทางระบายอากาศอยู่ที่จุดสูงสุด ซึ่งจะห่างจากช่วงที่ทำการฉีด วิธีการนี้ จะมีการถ่ายเทของอากาศอย่างเพียงพอ เพื่อหลีกเลี่ยงความดันอากาศที่มากเกินไปภายในแม่พิมพ์และลดการล้นของโฟมที่เกิดขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยานี้ เมื่อเกิดการพอลิเมอไรเซชัน พอลิเมอร์จะมีการขยายตัวขึ้นไปตามแนวของแม่พิมพ์ สำหรับบางชิ้นส่วนอาจจะนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ โดยใช้การอัดอากาศที่หัวฉีด ซึ่งวิธีนี้ไม่สามารถ จะใช้กับงานที่ต้องการพื้นผิวที่มีคุณภาพและอาจจะต้องใช้ช่องระบายอากาศขนาดใหญ่ ทางแก้ไข คือ การทำช่องว่าง (Cavity) ขึ้นภายในแม่พิมพ์ และจึงทำการตกแต่งชิ้นงานภายหลังการนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ วิธีนี้จะใช้สำหรับอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์

2.6.2.4 การหล่อลื่นแม่พิมพ์ (Mold release)

สารหล่อลื่นแม่พิมพ์ (Mold release agent or Parting agent) สำหรับการฉีดขึ้นรูป เพื่อที่จะป้องกันไม่ให้ชิ้นงานติดกับผิวของแม่พิมพ์ นอกจากนั้น ยังช่วยป้องกันน้ำและความชื้น ไม่ให้เข้าทำปฏิกิริยา วิธีการที่เหมาะสมที่สุดในการใช้การหล่อลื่นแม่พิมพ์ คือ การพ่นลงบน พื้นผิวของแม่พิมพ์

บทที่ 3
การทดลอง

3.1 สารเคมี

3.1.1 ไดเฟนิลมีเทน ไดไอโซไซยาเนต (Diphenylmethane diisocyanate, MDI) ชื่อทางการค้า Suprasec 2511 isocyanate เป็นของเหลว ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีค่าความหนืดเท่ากับ 1.55 พอยส์ (poise) และความหนาแน่น 1.22 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

3.1.2 พอลิอีเทอร์ พอลิออล (Polyether polyol) ชื่อทางการค้า Daltorim JW 89140 เป็นของเหลวสีขาว ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีค่าความหนืดเท่ากับ 10 พอยส์ และความหนาแน่น 1.025 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

3.2 วัสดุและอุปกรณ์

3.2.1 ท่อเหล็ก เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 8.0 เซนติเมตร ความยาว 30 เซนติเมตร จำนวน 1 ท่อ และเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 เซนติเมตร ยาว 50 เซนติเมตร จำนวน 1 ท่อ

3.2.2 เครื่องให้ความร้อนแบบวงแหวน (Annual heater) ความยาวท่อ 14.7 เซนติเมตร 1500 วัตต์ 1 ตัว

3.2.3 เทอร์โมคัปเปิลแบบหัวเข็ม ชนิดเค (Type K) มีค่า Sheath Outer Diameter 1.6 มิลลิเมตร ช่วงอุณหภูมิใช้งาน -220 ถึง 1370 องศาเซลเซียส จำนวน 5 ตัว

3.2.4 ระบบน้ำหล่อเย็น

3.2.5 ชุดขาตั้งและแขนจับ

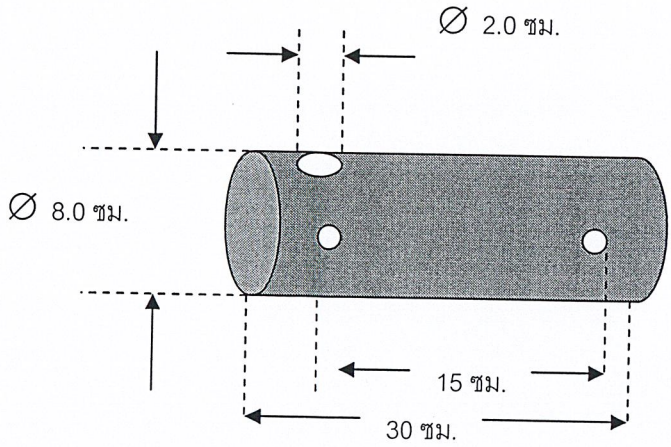
ตารางที่ 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

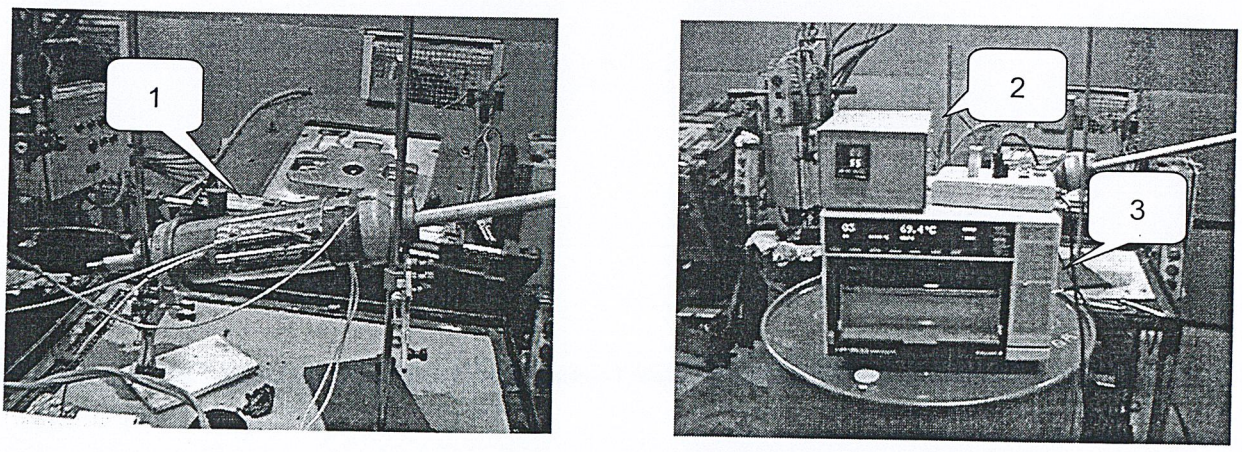
อุปกรณ์	บริษัทผู้ผลิต
เครื่องฉีดโฟม	Canon; A-system 40
เครื่องบันทึกข้อมูลแบบหลายช่องสัญญาณ (Recorder)	Yokogawa;HR-1300
เครื่องวัดความหนาแน่นแบบอิเลคทรอนิกส์ (Electronic Densimeter)	Alfamirage Co.,Ltd; MD-200S
กล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope, SEM)	LEO Electron Microscopy Ltd; 1455 VP
เครื่องควบคุมอุณหภูมิ	Shinko, FCS
กล้องถ่ายรูปแบบดิจิตอล (Digital Camera)	Canon, Power Shot A75

3.3 การทดลอง

3.3.1 การออกแบบและจัดทำแม่พิมพ์

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องและการประชุมร่วมกับทางโรงงาน ทางคณะผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและจัดทำแม่พิมพ์ ดังรูปที่ 3.1 ประกอบด้วยท่อเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 8.0 เซนติเมตร ความยาว 30 เซนติเมตร มีการเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 2.0 เซนติเมตร เพื่อใช้เป็นตำแหน่งในการฉีดโฟม และทำการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล โดยทำการเจาะท่อ ณ จุดฉีดเป็นจุดเริ่มต้น (0 เซนติเมตร) และเจาะจุดต่อไปห่างจากจุดเริ่มไปตามแนวท่อเป็นระยะทาง 15 เซนติเมตร จากนั้นครอบรอบท่อเหล็กด้วยเครื่องให้ความร้อนแบบวงแหวน ซึ่งต่อเข้ากับชุดควบคุมอุณหภูมิและเครื่องบันทึกข้อมูลแบบหลายช่องสัญญาณ





รูปที่ 3.1 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ทำการทดลอง (1) ชุดแม่พิมพ์และเครื่องให้ความร้อน (2) ชุดควบคุมอุณหภูมิ และ (3) เครื่องบันทึกข้อมูลแบบหลายช่องสัญญาณ

3.3.2 การกำหนดค่าต่าง ๆ ของเครื่องฉีดพอลิยูรีเทนโฟม

เครื่องฉีดโฟมจะทำงานโดยการอัดความดัน เพื่อทำการฉีดสารเคมีผสมกันที่ตำแหน่งหัวฉีด โดยปกติ เครื่องจะฉีดไอโซไซยาเนตในอัตรา 48±20 กรัมต่อวินาที ฉีดพอลิออล ในอัตรา 80±20 กรัมต่อวินาที และฉีดสีในอัตรา 3.3±2 กรัมต่อวินาที

ขั้นตอนการผลิตพวงมาลัยรถยนต์ในแต่ละรุ่น จะทำการกำหนดเวลาในการฉีด (Injection time) ที่แตกต่างกัน ในช่วงเวลา 3-4 วินาที และกำหนดเวลาในการรอชิ้นงานก่อนการแกะออกมาต่อครั้ง (Demold time) เท่ากับ 3 นาที โดยทำการฉีดพอลิยูรีเทนลงในแม่พิมพ์ที่เอียง 20 องศากับแนวระดับ และควบคุมอุณหภูมิพื้นผิวของแม่พิมพ์ที่ 55 องศาเซลเซียส

ในการทดลองนี้ กำหนดเวลาในการฉีดที่ 5 วินาที ซึ่งจะได้ปริมาณของไอโซไซยาเนตและพอลิออล เท่ากับ 240±20 และ 400±20 กรัมตามลำดับ และใช้เวลาในการรอชิ้นงานก่อนการแกะออกมาต่อครั้ง เท่ากับ 8 นาที โดยทำการฉีดพอลิยูรีเทนโฟม ลงในแม่พิมพ์ที่เอียง 20 องศากับแนวระดับ แต่ทำการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของน้ำหล่อแม่พิมพ์ด้านใน เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลกระทบต่อการเกิดผิวของพอลิยูรีเทนโฟม ดังสภาวะต่อไปนี้

สภาวะที่ 1 ควบคุมอุณหภูมิน้ำหล่อแม่พิมพ์ด้านในที่ 10 องศาเซลเซียส

สภาวะที่ 2 ควบคุมอุณหภูมิน้ำหล่อแม่พิมพ์ด้านในที่ 30 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิห้อง)

สภาวะที่ 3 ควบคุมอุณหภูมิน้ำหล่อแม่พิมพ์ด้านในที่ 80 องศาเซลเซียส

3.3.3 วิธีการทดลอง

ขั้นตอนการฉีดพอลิยูรีเทนโฟม

1) จัดเตรียมแม่พิมพ์และอุปกรณ์ต่างๆ ดังรูปที่ 3.1

2) ทำการปรับค่าเวลาในการฉีดโฟมที่ 5 วินาที

3) พ่นน้ำยาหล่อลื่น (Mold release) ที่ผิวแม่พิมพ์ เพื่อป้องกันชิ้นงานติดกับแม่พิมพ์

4) ติดตั้งระบบน้ำหล่อแม่พิมพ์ด้านใน ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของน้ำหล่อแม่พิมพ์ เท่ากับ 50 ลบ.ซม. ต่อนาที

5) เปิดเครื่องบันทึกผลและเครื่องควบคุมอุณหภูมิ โดยควบคุมอุณหภูมิพื้นผิวด้านนอกของแม่พิมพ์ที่ 55 องศาเซลเซียส

6) บันทึกภาพและค่าของอุณหภูมิ ณ เวลาต่างๆ

7) กำหนดเวลาในการรอชิ้นงานก่อนการแกะออกมาเท่ากับ 8 นาที เพื่อรอให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์

8) เก็บชิ้นงานแกะได้จากแม่พิมพ์ในที่แห้ง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้โครงสร้างของเนื้อโฟมเกิดความเสถียร แล้วจึงนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์

9) ทำการทดลองซ้ำตามวิธีข้างต้น โดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของน้ำหล่อแม่พิมพ์ด้านในเป็น 30 และ 80 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

3.3.4 การทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงาน

คุณสมบัติต่างๆ ที่ทดสอบ มีดังนี้

ก) ลักษณะสัณฐานวิทยา โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องกวาด ส่องชิ้นโฟมที่ได้จากการฉีดในแต่ละสภาวะ ที่ระยะกึ่งกลางของเครื่องให้ความร้อน เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวด้านในและพื้นผิวด้านนอก จากนั้นคำนวณหาเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของฟองก๊าซในเนื้อโฟมและจำนวนฟองก๊าซในเนื้อโฟม

ข) ความหนาแน่น ใช้เครื่องวัดความหนาแน่นอิเลคทรอนิกส์ (Electronic densimeter ; MD-200S) โดยอาศัยหลักการของอาร์คีมิดิส (Archimedes method) (ขั้นตอนการหาค่า แสดงไว้ในภาคผนวก ก)

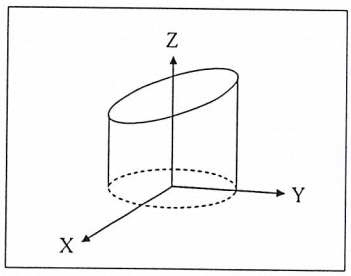
บทที่ 4
ผลการทดลอง

4.1 ลักษณะการเกิดโฟม

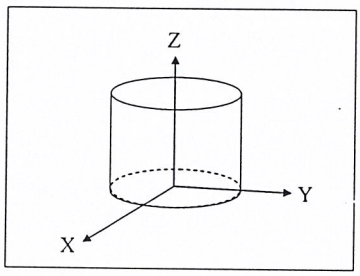
4.1.1 ผลการศึกษาลักษณะการไหลและลักษณะสัณฐานวิทยาของโฟม

กระบวนการฉีดขึ้นรูปพวงมาลัยรถยนต์ชนิดพอลิยูรีเทนโฟม ปัญหาที่สำคัญ คือ ผิวของผลิตภัณฑ์พอลิยูริเทนโฟมที่ได้ มีความแข็งแรงไม่เพียงพอ เมื่อนำไปใช้งาน จึงเกิดการสึกกร่อนและหลุดลอกเป็นขุย

ในงานวิจัยชิ้นนี้ ได้ทำการทดลองฉีดพอลิยูรีเทนโฟม ลงในแม่พิมพ์ทรงกระบอก ซึ่งมีน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ ไหลผ่านท่อด้านในของแม่พิมพ์ เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อลักษณะการเกิดโฟม ลักษณะการไหลของโฟม [1] ที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปในทรงกระบอก แบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงเริ่มต้นการไหลของโฟมจะยังไม่สม่ำเสมอ ใช้เวลาประมาณ 30 วินาทีจึงจะเข้าสู่การไหลในช่วงสุดท้าย ซึ่งเป็นการไหลแบบราบเรียบ ดังรูปที่ 4.1



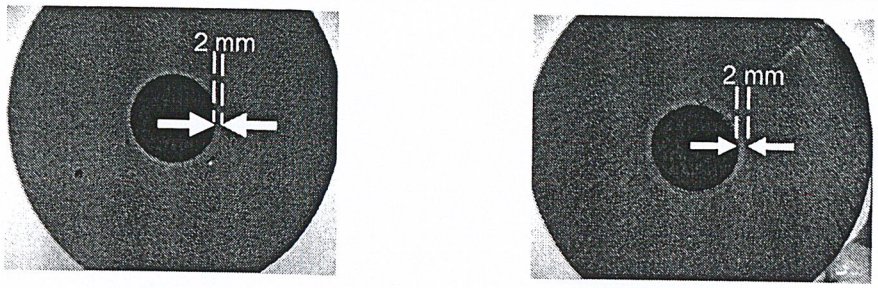
(ก) ช่วงเริ่มต้น



(ข) ช่วงสุดท้าย

รูปที่ 4.1 ลักษณะการไหลของโฟมในช่วงต่างๆ

จากรูปที่ 4.2 พบว่า การเกิดโฟมในแต่ละช่วงของการไหล มีลักษณะคล้ายกัน โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 บริเวณ ซึ่งจะสังเกตเห็นว่า บริเวณที่เป็นผิวด้านในมีรูพรุนขนาดเล็ก เนื้อโฟมมีการอัดตัวแน่นกว่าด้านนอก มีความหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร และบริเวณที่อยู่ถัดออกมาตามแนวรัศมีทรงกระบอก เนื้อโฟมจะมีความหนาประมาณ 27 มิลลิเมตร และมีรูพรุนขนาดใหญ่ ดังรูปที่ 4.2



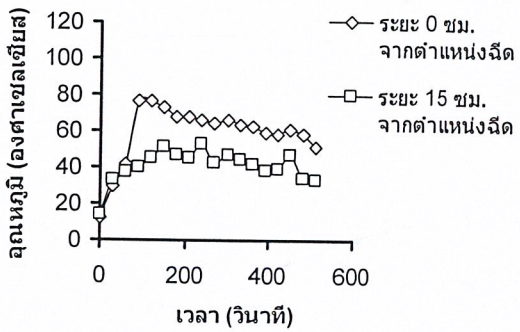
(ก) ช่วงเริ่มต้น (ข) ช่วงสุดท้าย

รูปที่ 4.2 ลักษณะภาพตัดขวางของโฟมในแต่ละช่วงของการไหล

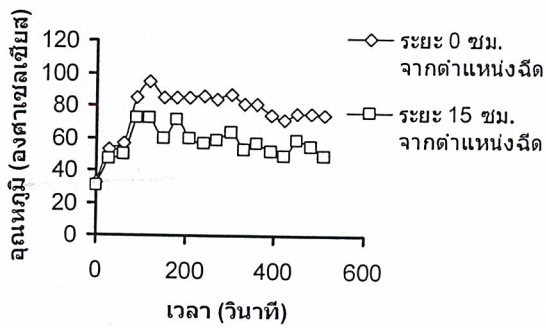
4.2 ผลการศึกษาค่าอุณหภูมิที่มีต่อกระบวนการฉีดขึ้นรูปพอลิยูรีเทนโฟม

4.2.1 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในช่วงเวลาต่าง ๆ ของแม่พิมพ์

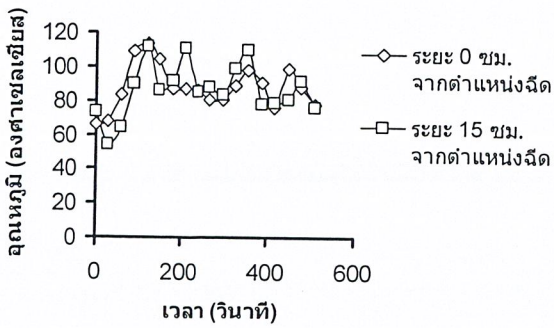
จากรูปที่ 4.3 จะพบว่า เมื่อเริ่มเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของพอลิยูรีเทนโฟม อุณหภูมิภายในแม่พิมพ์จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะสังเกตได้จากอุณหภูมิที่ระยะ 0 เซนติเมตร จากจุดฉีด จะสูงกว่าที่ระยะ 15 เซนติเมตร จากจุดฉีด



(ก) อุณหภูมิน้ำหล่อ 10 องศาเซลเซียส



(ข) อุณหภูมิน้ำหล่อ 30 องศาเซลเซียส



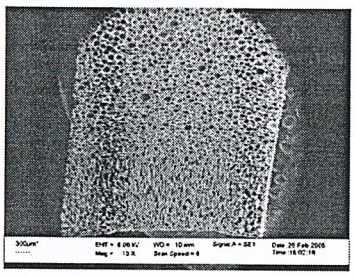
(ค) อุณหภูมิน้ำหล่อ 80 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของการไหลระหว่างขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันที่เวลาต่างๆ

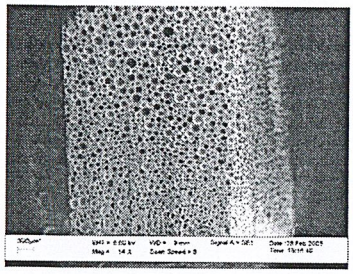
จากผลดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนและมีการคายความร้อนในปริมาณมาก โดยที่แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในแม่พิมพ์มีลักษณะแนวโน้มใกล้เคียงกัน แต่จะมีช่วงเวลาเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลจากการเคลื่อนที่ของพอลิยูรีเทนโฟมผ่านจากตำแหน่งจุดฉีด (0 เซนติเมตร) ไปยังตำแหน่งถัดไปตามแนวของแม่พิมพ์

4.2.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของเนื้อโฟม

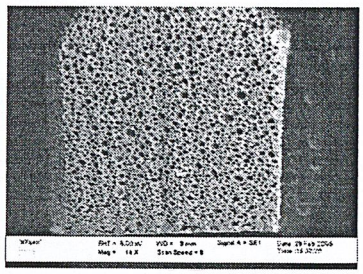
จากการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ส่องชิ้นโฟม พบว่าลักษณะพื้นผิวของเนื้อพอลิยูรีเทนโฟมมีโครงสร้างเป็นแบบเซลล์เปิด และมีลักษณะเป็นรูพรุน ซึ่งรูพรุนนี้เกิดจากฟองก๊าซขนาดต่างๆกระจายตัวอยู่ทั่วทั้งเนื้อโฟม



(ก) 10 องศาเซลเซียส

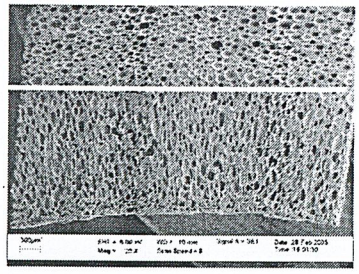


(ข) 30 องศาเซลเซียส

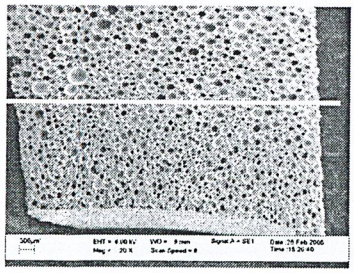


(ค) 80 องศาเซลเซียส

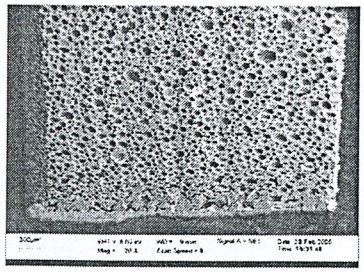
รูปที่ 4.4 ภาพตัดขวางลักษณะสัณฐานวิทยาบริเวณผิวด้านในของพอลิยูรีเทนโฟม ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องกวาด ที่กำลังขยาย 13 เท่า ที่อุณหภูมิน้ำหล่อแม่พิมพ์ต่าง ๆ



(ก) 10 องศาเซลเซียส



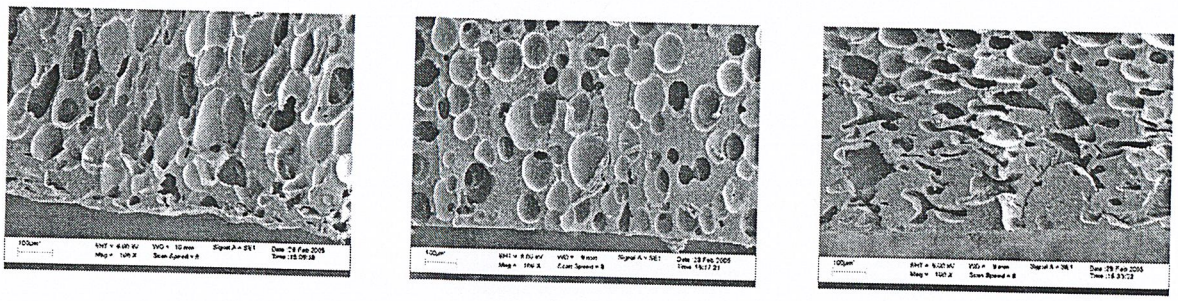
(ข) 30 องศาเซลเซียส



(ค) 80 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.5 ภาพตัดขวางลักษณะสัณฐานวิทยาบริเวณผิวด้านในของพอลิยูรีเทนโฟม ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกวาด ที่กำลังขยาย 20 เท่า ที่อุณหภูมิน้ำหล่อแม่พิมพ์ต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.5 พบว่า ที่อุณหภูมิน้ำหล่อ 10 องศาเซลเซียส ฟองก๊าซไม่ขยายตัวเป็นทรงกลม และเป็นทรงรีที่บริเวณผิวด้านใน ดังแสดงรูปที่ 4.5(ก) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นลักษณะดังกล่าวจะหายไป ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนระหว่างความแตกต่างของรูปที่ 4.5(ก) กับ 4.5 (ข) แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของน้ำหล่อ จะมีค่าเหมาะสมอยู่ค่าหนึ่ง ที่ให้ลักษณะสัณฐานวิทยาสม่ำเสมอตลอดทั่วทั้งชิ้นงาน



(ก) 10 องศาเซลเซียส (ข) 30 องศาเซลเซียส (ค) 80 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.6 ภาพตัดขวางลักษณะสัณฐานวิทยาบริเวณผิวด้านในของพอลิยูรีเทนโฟม ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องกวาด ที่กำลังขยาย 100 เท่า ที่อุณหภูมิน้ำหล่อแม่พิมพ์ต่าง ๆ

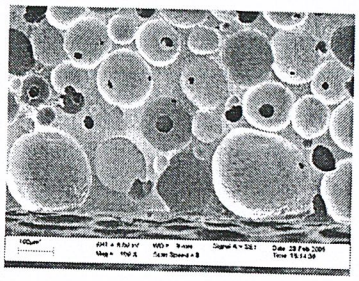
จากรูปที่ 4.4, 4.5 และ 4.6 สามารถหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของฟองก๊าซ ณ ตำแหน่งผิวด้านในของแม่พิมพ์ แสดงได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลของอุณหภูมิน้ำหล่อที่มีต่อขนาดของฟองก๊าซที่ผิวด้านในของแม่พิมพ์

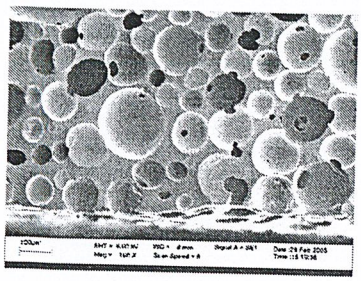
อุณหภูมิน้ำหล่อแม่พิมพ์ (องศาเซลเซียส)	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของฟองก๊าซ (ไมโครเมตร)
10	137
30	170
80	129

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นว่ามีฟองก๊าซเกิดขึ้นในเนื้อพอลิยูรีเทนโฟม โดยที่อุณหภูมิน้ำหล่อแม่พิมพ์ต่างๆ จะทำให้ได้ขนาดของฟองก๊าซแตกต่างกัน นั่นคือ เมื่ออุณหภูมิน้ำหล่อแม่พิมพ์มากขึ้น ฟองก๊าซจะมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายผลที่เกิดขึ้นได้ดังนี้ ที่อุณหภูมิน้ำหล่อแม่พิมพ์ต่ำ จะเกิดฟองก๊าซขนาดเล็ก เนื่องจากพอลิเมอร์มีค่าความตึงผิว (Surface Tension) มาก ส่วนที่

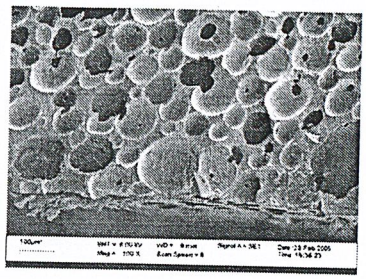
อุณหภูมิน้ำหล่อแม่พิมพ์สูง พอลิเมอร์จะมีค่าความตึงผิวลดลง ส่งผลให้ฟองก๊าซเกิดการขยายตัวได้ง่ายขึ้น และมีแนวโน้มที่จะเกิดการรวมตัวกันของฟองก๊าซ เกิดเป็นฟองก๊าซที่มีขนาดใหญ่



(ก) 10 องศาเซลเซียส



(ข) 30 องศาเซลเซียส



(ค) 80 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.7 ภาพตัดขวางลักษณะสัณฐานวิทยาบริเวณผิวด้านนอกของพอลิยูรีเทนโฟม ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องกวาด ที่กำลังขยาย 100 เท่า ที่อุณหภูมิน้ำหล่อแม่พิมพ์ต่าง ๆ

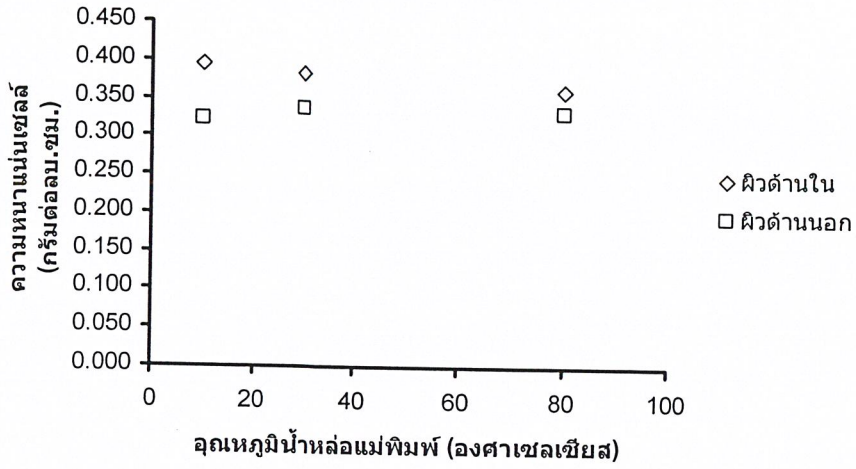
จากรูปที่ 4.7 สามารถหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของฟองก๊าซ ณ ตำแหน่งผิวด้านนอกของแม่พิมพ์ แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิน้ำหล่อที่มีผลต่อขนาดของฟองก๊าซที่ผิวด้านนอกของแม่พิมพ์

อุณหภูมิน้ำหล่อแม่พิมพ์ (องศาเซลเซียส)	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของฟองก๊าซ (ไมโครเมตร)
10	230
30	220
80	220

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นว่า ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นในเนื้อพอลิยูรีเทนโฟม จะมีขนาดของฟองก๊าซใกล้เคียง นั่นคือ ณ ตำแหน่งผิวทางด้านนอกของแม่พิมพ์ได้ถูกควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่ 55 องศาเซลเซียสเท่ากันทุกอุณหภูมิน้ำหล่อ ซึ่งสามารถอธิบายผลที่เกิดขึ้นได้ดังนี้ การเกิดโฟมที่อุณหภูมิคงที่ ขนาดของฟองก๊าซที่เกิดขึ้นในเนื้อพอลิเมอร์ก็จะมีค่าใกล้เคียงกัน และเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของฟองก๊าซ จากการทดลองที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส มีค่าประมาณ 220 - 230 ไมโครเมตร

4.2.3 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อค่าความหนาแน่นของเนื้อโฟม

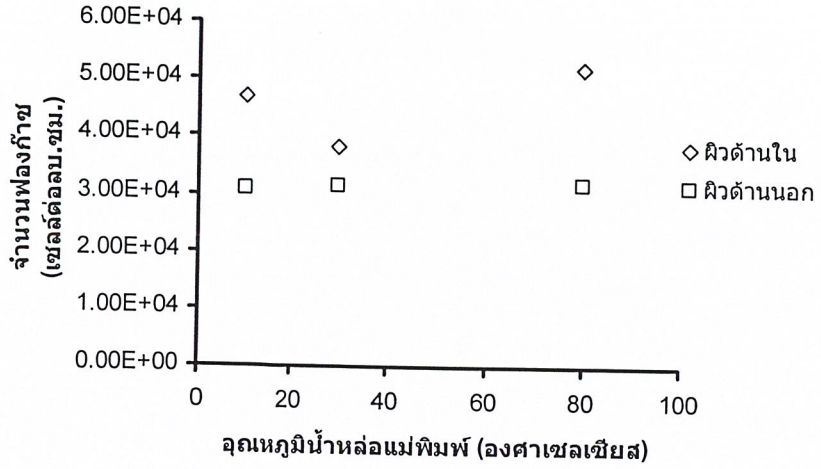


รูปที่ 4.8 ผลของอุณหภูมิน้ำหล่อแม่พิมพ์ที่มีผลต่อความหนาแน่นของโฟม

จากรูปที่ 4.8 พบว่า เนื้อโฟมที่สภาวะของอุณหภูมิน้ำหล่อแม่พิมพ์ เท่ากับ 10 องศาเซลเซียส มีค่าความหนาแน่นสูงที่สุดเท่ากับ 0.3955 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำ ค่าความหนืดของพอลิเมอร์จะสูง โมเลกุลของฟองก๊าซที่จะแพร่กระจายในวัฏภาคของพอลิเมอร์มีพลังงานไม่เพียงพอที่จะเอาชนะแรงดันภายนอกเพื่อขยายขนาด ส่งผลให้ความหนาแน่นมีค่าสูง ส่วนเนื้อโฟมที่สภาวะอุณหภูมิน้ำหล่อแม่พิมพ์ เท่ากับ 30 และ 80 องศาเซลเซียส จะมีความหนาแน่นโดยเฉลี่ย เท่ากับ 0.3838 และ 0.3610 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าบริเวณผิวด้านในมีค่าความหนาแน่นมากกว่าด้านนอก เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิน้ำหล่อแม่พิมพ์เดียวกัน เนื่องจากขณะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันอุณหภูมิที่ผิวด้านในมีค่าต่ำกว่าด้านนอก

4.2.4 การคำนวณหาจำนวนฟองก๊าซที่เกิดขึ้นในเนื้อโฟม

จากตารางที่ 4.1 สามารถหาค่าขนาดส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของฟองก๊าซได้ และรูปที่ 4.8 สามารถหาค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของโฟมตามสภาวะการทดลองต่างๆ ได้ เพื่อที่จะนำมาคำนวณหาจำนวนฟองก๊าซที่เกิดขึ้นในเนื้อโฟม จากสมการ (2.1)



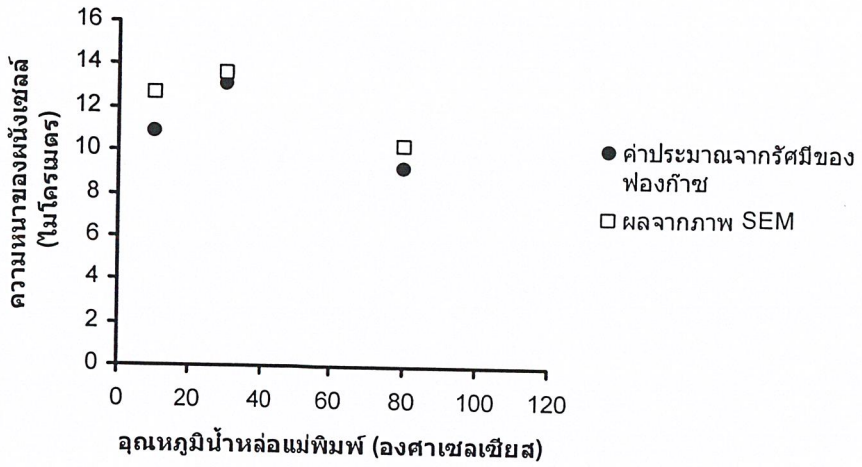
รูปที่ 4.9 ผลของอุณหภูมิน้ำหล่อแม่พิมพ์ที่มีผลต่อจำนวนฟองก๊าซที่เกิดขึ้น

4.2.5 ผลของอุณหภูมิน้ำหล่อแม่พิมพ์ต่อความหนาของผนังเซลล์

ตารางที่ 4.3 ผลของอุณหภูมิน้ำหล่อแม่พิมพ์ต่อความหนาของผนังเซลล์จากการคำนวณ

อุณหภูมิน้ำหล่อแม่พิมพ์ (องศาเซลเซียส)	ความหนาของผนังเซลล์จากการประมาณรัศมีของฟองก๊าซ (ไมโครเมตร)	ความหนาของผนังเซลล์จากผลของภาพ SEM (ไมโครเมตร)
10	10.9	12.7
30	13.1	13.6
80	9.2	10.3

จากตารางที่ 4.3 พบว่า เมื่อนำค่าความหนาแน่นและรัศมีของฟองก๊าซมาคำนวณตามสมการที่ 2.20 สามารถหาความหนาของผนังเซลล์ได้ โดยที่อุณหภูมิน้ำหล่อแม่พิมพ์ 30 องศาเซลเซียส ผนังเซลล์มีความหนาเท่ากับ 13.1 ไมโครเมตร ซึ่งมีความหนามากกว่าที่อุณหภูมิน้ำหล่อแม่พิมพ์ 10 และ 80 องศาเซลเซียส ทำให้เนื้อโฟมมีความแข็งแรงมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบผลจากภาพ SEM กับค่าประมาณจากรัศมีของฟองก๊าซ พบว่าให้ค่าความหนาของผนังเซลล์ที่ใกล้เคียง ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ผลการเปรียบเทียบความหนาของผนังเซลล์ที่ได้จากกึ่งการคำนวณกับผลจากการทดลองที่อุณหภูมิน้ำหล่อแม่พิมพ์ต่างๆ

แต่อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ยังไม่เหมาะสำหรับนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิต เนื่องจากยังต้องใช้ผลจากภาพ SEM ในการประมาณค่า ดังนั้นคณะผู้วิจัย จึงได้ขยายผลการทดลองต่อ โดยประยุกต์ใช้สมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังผลการทดลองตอนต่อไป

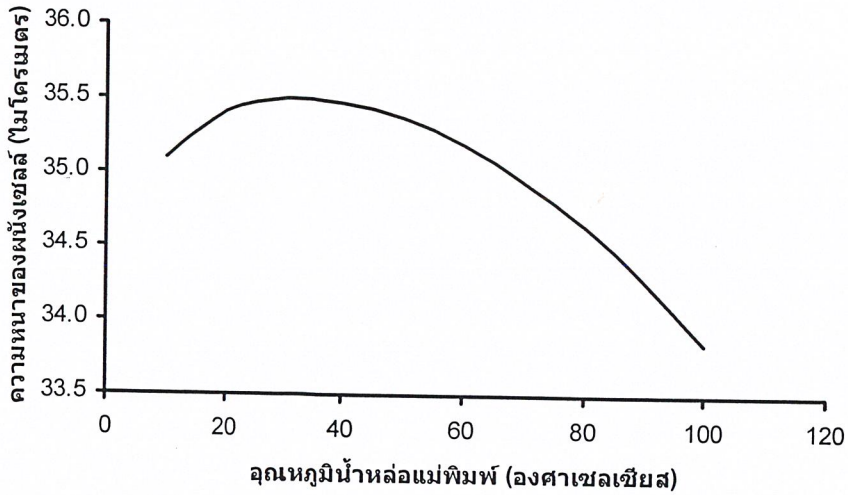
4.3 การทำนายความหนาของผนังเซลล์โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์

จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.2 พบว่า ปัญหาความยุ่งยากในการประมาณค่าความหนาของผนังเซลล์ยังจำเป็นต้องใช้ภาพ SEM ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีราคาแพง โรงงานระดับผู้ประกอบการขนาดย่อมไม่นิยมใช้ ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงนำสมการที่มีการศึกษาการขยายขนาดของฟองก๊าซในพอลิเมอร์มาประยุกต์ใช้ โดยสมการดังกล่าวได้แสดงรายละเอียดแล้วในส่วนทฤษฎีบทที่ 2

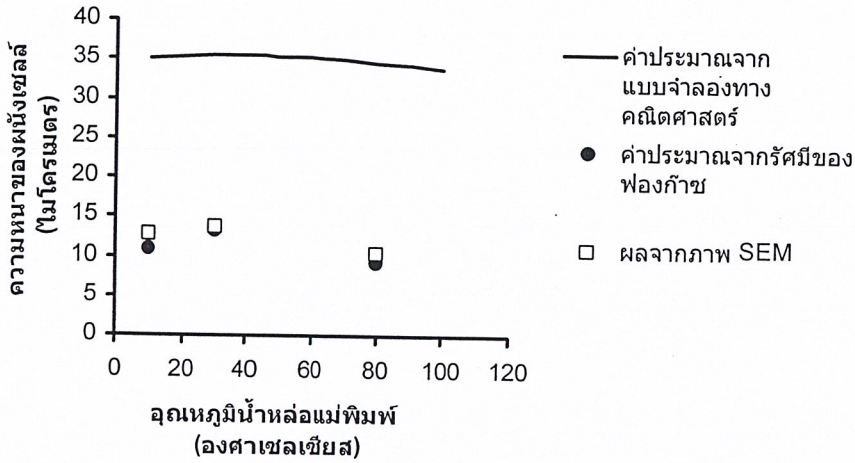
$$\rho_{cell} = \rho_L [1-(\frac{R}{y})^3]$$

$$x = y-R$$

มีพารามิเตอร์บางตัวที่สามารถทำนายได้ตามสมการทางคณิตศาสตร์[1] ซึ่งวิธีการคำนวณหาพารามิเตอร์แต่ละตัวแสดงในภาคผนวก ผลในการทำนายเบื้องต้นพบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความหนาของผนังเซลล์จะเพิ่มขึ้นถึงค่าๆหนึ่งประมาณ 35 ไมโครเมตรหลังจากนั้นก็จะลดลง ซึ่งเป็นปรากฏการณ์โดยทั่วไปของการขยายขนาดของฟองก๊าซ ลักษณะดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของผนังเซลล์โดยการทำนายจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับอุณหภูมิน้ำหล่อแม่พิมพ์ต่างๆ



รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบความหนาของผนังเซลล์ที่ได้จากการทดลองและการทำนายจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อุณหภูมิน้ำหล่อแม่พิมพ์ต่างๆ

จากรูปที่ 4.12 แสดงผลการทำนายความหนาของผนังเซลล์ที่อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ เปรียบเทียบผลการทดลอง พบว่า ผลการคำนวณจากแบบจำลองให้ค่าความหนาของผนังเซลล์สูงกว่าผลการทดลองอย่างเห็นได้ชัด สามารถอธิบายได้จากแบบจำลองที่ใช้เป็นแบบจำลองเบื้องต้น ไม่นำผลการเปลี่ยนแปลงความหนืดของพอลิเมอร์มาใช้ในการคำนวณ โดยทั่วไปปฏิกิริยาการเตรียมพอลิยูรีเทน ค่าความหนืดในช่วงเริ่มต้นของการเกิดปฏิกิริยา มีค่าเพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้น เมื่อแบบจำลองไม่นำค่าการเปลี่ยนแปลงความหนืด มาใช้ในการคำนวณ จึงเป็นผลให้ความหนาของผนังเซลล์จากแบบจำลองมีค่าสูงกว่าผลการทดลองจากแบบจำลองสามารถ

นำไปใช้ประโยชน์ในการทำนายความหนาของผนังเซลล์ของผลิตภัณฑ์โฟม เมื่อทราบค่าอุณหภูมิน้ำหล่อแม่พิมพ์ที่ใช้ในการเตรียมโฟม

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาปัจจัยพื้นฐานที่มีผลกระทบกับกระบวนการฉีดขึ้นรูปพวงมาลัยรถยนต์ชนิดพอลิยูรีเทนโฟม และผลการศึกษาลักษณะการเกิดโฟมในแม่พิมพ์ พร้อมทั้งผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการฉีดพอลิยูรีเทนโฟม และแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับเวลาเกิดขึ้นในขั้นตอนการฉีดพอลิยูรีเทนของโฟมในแม่พิมพ์ เพื่อใช้เป็นแนวทางปรับปรุงค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์โฟมในแม่พิมพ์ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ความหนาของผนังเซลล์ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของน้ำหล่อแม่พิมพ์ ในการทดลองพบว่าความหนาของผนังเซลล์อยู่ในช่วง 10-15 ไมโครเมตร

5.1.2 ความหนาแน่นของโฟมบริเวณผิวด้านในมีค่ามากกว่าที่บริเวณผิวด้านนอก โดยที่อุณหภูมิน้ำหล่อแม่พิมพ์ 30 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นของโฟมด้านในมีค่าเท่ากับ 0.3838 กรัมต่อลบ.ซม. และความหนาแน่นของโฟมด้านนอกมีค่าเท่ากับ 0.336 กรัมต่อลบ.ซม.

5.1.3 จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิของน้ำหล่อแม่พิมพ์ที่ 30 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิเหมาะสมที่ทำให้ได้ความหนาของผนังเซลล์มากที่สุด

5.1.4 สามารถพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เบื้องต้นที่ใช้ทำนายความหนาของผนังเซลล์ของผลิตภัณฑ์โฟมได้ โดยลดขั้นตอนของการใช้ภาพ SEM ซึ่งมีต้นทุนในการวิจัยสูง

5.2 ข้อเสนอแนะ

เรื่องที่ควรจะศึกษาต่อ คือ

5.2.1 การทดลองศึกษาผลของความหนืดที่มีต่อการขยายตัวของฟองก๊าซ

5.2.2 การทดลองศึกษาผลของความดันที่มีต่อการขยายตัวของฟองก๊าซ

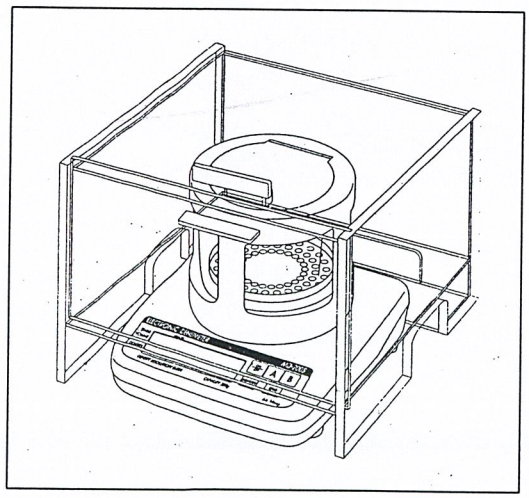
5.2.3 การทดลองศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดนิวเคลียสของพอลิยูรีเทนโฟม

5.2.4 การทดลองศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำหล่อแม่พิมพ์ที่มีต่อการขยายขนาดของฟองก๊าซ

ภาคผนวก ก
การหาความหนาแน่นของพอลิยูรีเทนโฟม โดยเครื่องคำนวณค่าความหนาแน่น

- ตัดชิ้นโฟมตัวอย่าง ที่ได้จากการฉีดในแต่ละสภาวะ ที่บริเวณผิวด้านในและผิวด้านนอก ระยะ 15 ซม. จากตำแหน่งฉีด ขนาดความกว้างxความยาวxความสูง เท่ากับ 0.5x1x0.3 เซนติเมตร
- ตั้งค่าจอแสดงผลให้เป็นศูนย์ (set zero)
- ชั่งน้ำหนักชิ้นโฟมตัวอย่างในอากาศ กดปุ่ม memory เพื่อให้เครื่องบันทึกค่าไว้
- ชั่งน้ำหนักชิ้นโฟมตัวอย่างอีกครั้งในน้ำ (หากมีฟองอากาศเกาะอยู่ที่ชิ้นโฟมตัวอย่างให้พยายามกำจัดออก) กดปุ่ม memory เพื่อให้เครื่องคำนวณค่าความหนาแน่นของชิ้นโฟมตัวอย่าง
- เครื่องจะแสดงผลค่าความหนาแน่นในหน่วย ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม (สามารถเลือกให้แสดงผลเป็นปริมาตรในหน่วยลูกบาศก์เมตรได้ โดยการกลุ่มปุ่ม A)
- นำชิ้นโฟมตัวอย่างออกจากเครื่อง

<u>หมายเหตุ</u> : ในการนำชิ้นโฟมตัวอย่างเข้าหรือออกจากเครื่องควรใช้คีมจับ เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำล้นออกมาทำความเสียหายแก่อุปกรณ์อิเลคทรอนิกส์



รูป ก-1 เครื่องวัดความหนาแน่นแบบอิเลคทรอนิกส์ (Electronic densimeter ; MD-200S)

ภาคผนวก ข
การคำนวณหาจำนวนของฟองก๊าซที่เกิดขึ้นในเนื้อโฟม

การหาจำนวนฟองก๊าซต่อหน่วยปริมาตรโฟม สามารถคำนวณได้ จากสมการ

$$N_c \cong \left(\frac{1-\rho/\rho_p}{10^{-4} d} \right)$$

โดยอาศัยผลข้อมูลที่ได้จากการทดลองศึกษาลักษณะการเกิดโฟม ดังตาราง ข-1

ตาราง ข-1 ผลการศึกษาลักษณะการเกิดโฟม

Temperature (°C)	Polymer density ; ρ_p (g/cm^3)	Foam density ; ρ (g/cm^3)	Avg. diameter of bubble ; d (mm)	No. Cell ; N_c ($cell/cm^3$)
10	1.098	0.3955	0.137	46700
30	1.098	0.3838	0.170	38262
80	1.098	0.3610	0.129	52032

ตัวอย่างการคำนวณ

กรณีอุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ 10 องศาเซลเซียส

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการ $$N_c = \left(\frac{1-\frac{0.3838}{1.098}}{10^{-4}(0.170)} \right)$$

$$N_c = \left(\frac{0.6505}{10^{-4}(0.170)} \right)$$

$N_c \cong 38262$ เซลล์ต่อลบ.ซม.

ภาคผนวก ค
การคำนวณหาความหนาของผนังเซลล์ที่เกิดขึ้นในเนื้อโฟม

การหาความหนาของผนังเซลล์ต่อหนึ่งหน่วยเซลล์ สามารถคำนวณได้ จากสมการ

$$\rho_{cell} = \rho_L \left[1-\left(\frac{R}{y}\right)^3\right]$$

$$x = y-R$$

โดยอาศัยผลข้อมูลที่ได้จากการทดลองศึกษาลักษณะการเกิดโฟม ดังตาราง ค-1

ตาราง ค-1 การทดลองศึกษาลักษณะการเกิดโฟม

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความหนาแน่นของเหลว (กรัมต่อลบ.ซม.)	ความหนาแน่นของเซลล์ (กรัมต่อลบ.ซม.)	รัศมีของฟองก๊าซ (ไมโครเมตร)	รัศมีของเซลล์ (ไมโครเมตร)	ความหนาของผนังเซลล์ (ไมโครเมตร)
10	1.098	0.3955	68	78.90	10.9
30	1.098	0.3838	85	98.10	13.1
80	1.098	0.3610	64	73.20	9.2

ตัวอย่าง

กรณีอุณหภูมิน้ำหล่อแม่พิมพ์ 10 องศาเซลเซียส

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการ $0.3955 = 1.098[1-(68/y)^3]$

$y = 78.9$

ดังนั้น $x = 10.9$

ภาคผนวก ง

ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ณ สภาวะต่างๆ

ตาราง ง-1 ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำหล่อแม่พิมพ์ 10 องศาเซลเซียส

เวลา (วินาที)	อุณหภูมิน้ำ (องศาเซลเซียส)		อุณหภูมิของปฏิกิริยา ณ ตำแหน่งต่างๆ จากจุดฉีด (องศาเซลเซียส)	
	เข้า	ออก	0 ซม.	15 ซม.
0	7	8	11.8	14
30	11	13	29.9	33
60	7	8	41.8	37
90	10	12	76.9	40
120	10	13	76.5	45
150	5	6	73.3	51
180	2	3	67.8	47
210	9	11	67.5	45
240	6	6	65.9	53
270	9	11	64.1	43
300	9	10	66.2	47
330	8	9	63.4	44
360	10	2	62.2	42
390	7	9	58.9	38
420	9	10	58.2	39
450	10	11	60.6	47
480	7	7	58.2	34
510	5	6	51.6	33

ตาราง ง-2 ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำหล่อแม่พิมพ์ 30 องศาเซลเซียส

เวลา (วินาที)	อุณหภูมิน้ำ (องศาเซลเซียส)		อุณหภูมิของปฏิกิริยา ณ ตำแหน่งต่างๆ จากจุดฉีด (องศาเซลเซียส)	
	เข้า	ออก	0 ซม.	15 ซม.
0	31	32	32.2	30
30	37	38	53.1	47
60	30	32	57	50
90	23	23	85	72
120	28	30	95	72
150	22	22	85	60
180	29	32	85	71
210	27	32	85	60
240	29	30	86	57
270	30	30	84	59
300	23	27	87	63
330	31	32	81	53
360	35	36	81	57
390	37	38	74	52
420	34	35	71	49
450	29	29	75	59
480	28	29	75	55
510	30	29	74	49

ตาราง ง-3 ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำหล่อแม่พิมพ์ 80 องศาเซลเซียส

เวลา (วินาที)	อุณหภูมิน้ำ (องศาเซลเซียส)		อุณหภูมิของปฏิกิริยา ณ ตำแหน่งต่างๆ จากจุดฉีด (องศาเซลเซียส)	
	เข้า	ออก	0 ซม.	15 ซม.
0	65	68	66	73
30	53	65	68	54
60	59	68	83	64
90	59	68	109	90
120	52	52	114	112
150	55	64	104	86
180	55	61	87	92
210	69	79	87	111
240	55	62	86	85
270	79	85	81	88
300	71	72	81	83
330	82	82	89	99
360	52	52	98	110
390	68	80	91	78
420	79	84	76	79
450	64	71	99	81
480	81	83	88	92
510	78	84	78	76

ภาคผนวก จ

ผลการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ตาราง จ-1 ผลการศึกษาความหนาแน่นของพอลิยูริเทนโฟมที่อุณหภูมิต่างๆ

ครั้งที่	ρcell,g/cm3		
	T =10 C	T = 30 C	T = 80 C
1	0.3940	0.3770	0.3710
2	0.3900	0.3870	0.3640
3	0.4080	0.3830	0.3590
4	0.3900	0.3880	0.3500
Average	0.3955	0.3838	0.3610

สมการที่ใช้ในการคำนวณ

$$T_{final} = 17.66Ln(T_{cond}) + 11.39$$

$$\rho_{cell} = 0.3999Exp(-0.0013T_{cond})$$

$$P_{1bub} = (90.4)T_{cond}^2 - (1.96840x10^4)T_{cond} + (4.31616x10^6)$$

$$V_{1bub} = (n_{co2}x82.057xT_K)/P_{1bub}$$

$$R = \left[\left(\frac{V_{1bub}x3x7}{4x22}\right)^{1/3}\right]$$

$$\rho_{cell} = \rho_L\left[1-\left(\frac{R}{y}\right)^3\right]$$

$$X = Y - R$$

ตาราง จ-2 แสดงผลการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Tcond,C	Tfinal,K	P1bub,bar	V1bub,cm3	R(model),cm	ρ_{cell}(model)	y(model),cm	x(model),um
10	325.204	4.12836E+06	4.41664E-05	0.02193	0.394735	0.02543533	35.1016
20	337.445	3.95864E+06	4.77937E-05	0.02251	0.389637	0.02605061	35.4094
30	344.605	3.80700E+06	5.07520E-05	0.02296	0.384604	0.02651473	35.4990
40	349.686	3.67344E+06	5.33727E-05	0.02335	0.379637	0.02690118	35.4768
50	353.626	3.55796E+06	5.57260E-05	0.02369	0.374733	0.02722907	35.3726
60	356.846	3.46056E+06	5.78161E-05	0.02398	0.369893	0.02750411	35.1973
70	359.568	3.38124E+06	5.96238E-05	0.02423	0.365116	0.02772732	34.9553
80	361.927	3.32000E+06	6.11219E-05	0.02443	0.3604	0.02789791	34.6485
90	364.007	3.27684E+06	6.22828E-05	0.02459	0.355745	0.02801462	34.2784
100	365.867	3.25176E+06	6.30840E-05	0.02469	0.35115	0.02807642	33.8466