

โครงการลดของเสียจากงานฉีดพอลิยูรีเทนโฟมสำหรับอุตสาหกรรมผลิตพวงมาลัยรถยนต์

ณรงค์ จิตตปัญญาพงศ์ ปิยะวัฒน์ ศุภศรีรุ่งเจริญ และ มาลิน มุ่งมาตร

อภินันท์ นัมคณิสสรณ์ และ สุรัตน์ อาริรัตน์*

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนฉลองกรุง, เขตลาดกระบัง, กรุงเทพฯ 10520

โทรศัพท์ 0-2739-2416-9

โทรสาร 0-2739-2416-9 กต 4

Email kasurat@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาแนวทางเบื้องต้นในการปรับลดขยะพอลิยูรีเทนโฟมจากกระบวนการฉีดขึ้นรูปพวงมาลัยรถยนต์ ด้วยการมุ่งเน้นพัฒนาและเสริมสร้างความเข้าใจ ในปัจจัยพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของพอลิยูรีเทนโฟม, ลักษณะสัณฐานวิทยาของเนื้อโฟมและสมบัติการไหลของโฟมในแม่พิมพ์ โดยทำการฉีดพอลิยูรีเทนโฟมลงในแม่พิมพ์โปร่งใส ที่ควบคุมอุณหภูมิพื้นผิวในช่วง 30 ถึง 80 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ศึกษาลักษณะการไหลและการเกิดโฟมในแม่พิมพ์ และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยพื้นฐานต่างๆ ในลักษณะของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายอัตราการขยายตัวของพอลิยูรีเทนโฟม เพื่อใช้เป็นแนวทางในการปรับลดเศษโฟมจากรูลันในแม่พิมพ์ต่อไป

คำสำคัญ การฉีดขึ้นรูปพอลิยูรีเทนโฟม, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และอัตราการขยายตัวของฟองก๊าซ

1. บทนำ

ในปัจจุบัน อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ โดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปพอลิยูรีเทนโฟม มีบทบาทเป็นอย่างมาก ในการพัฒนาอุตสาหกรรมยานยนต์และชิ้นส่วนยานยนต์ต่างๆ ในประเทศ เพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ที่เป็นส่วนประกอบของยานยนต์ ซึ่งปัญหาของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการฉีดพอลิยูรีเทนโฟม แบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะสำคัญ คือ งานฉีดที่ไม่เต็มแม่พิมพ์ทำให้เกิดรอยตำหนิบนผลิตภัณฑ์และการฉีดเนื้อโฟมปริมาณมากเกินไปจนล้นแม่พิมพ์ ทำให้เกิดเศษโฟมจากรูลันของแม่พิมพ์เป็นจำนวนมาก ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม เนื่องจากเศษโฟมพอลิยูรีเทนจัดเป็นขยะอุตสาหกรรมที่เป็นพิษชนิดหนึ่ง ดังนั้นการพัฒนาเทคโนโลยีการฉีดพอลิยูรีเทนโฟม เพื่อช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวจึงเป็นงานวิจัยที่มีความสำคัญมาก

2. การทดลอง

2.1 สารเคมี

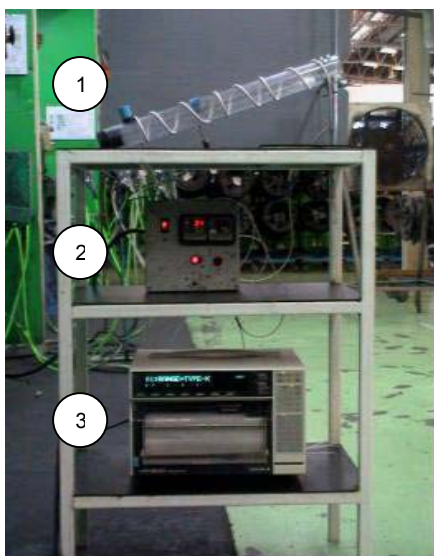
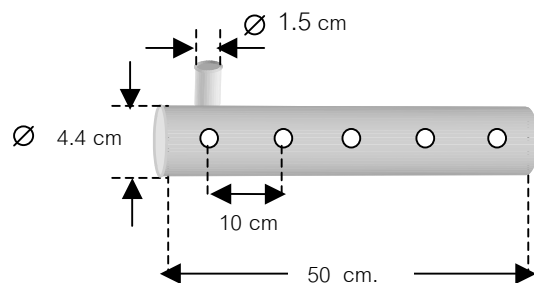
- 1) ไดเฟนิลมีเทนไดไอโซไซยาเนต
(Diphenylmethane diisocyanate, MDI)
- 2) พอลิอีเทอร์ พอลิออล (Polyether polyol)

2.2 วัสดุและอุปกรณ์

- 1) ท่ออะครีลิคใส ϕ 4.4 ซม. ความยาว 50 ซม.
- 2) ขดลวดให้ความร้อน
- 3) เทอร์โมคัปเปิลแบบหัวเข็ม ชนิดเค (Type K)
- 4) เครื่องฉีดพอลิยูรีเทนโฟม
- 5) เครื่องบันทึกข้อมูลแบบหลายช่องสัญญาณ
- 6) เครื่องควบคุมอุณหภูมิ
- 7) เครื่องวัดความหนาแน่นแบบอิเล็กทรอนิกส์
- 8) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกาว
- 9) กล้องวิดีโอแบบดิจิทัล

2.3 การออกแบบและจัดทำแม่พิมพ์

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องและการประชุมร่วมกับทางโรงงาน ทางคณะผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและจัดทำแม่พิมพ์ ดังรูปที่ 1 ประกอบด้วยท่ออะคริลิกใสที่ทำการต่อท่อ เพื่อใช้เป็นตำแหน่งในการฉีดโฟมและทำการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล โดยทำการเจาะท่อ ณ จุดฉีดเป็นจุดเริ่มต้น (0 เซนติเมตร) และเจาะจุดต่อไปห่างจากจุดเริ่มไปตามแนวท่อเป็นระยะทาง 10, 20, 30, 40 เซนติเมตรตามลำดับ พันรอบท่ออะคริลิกด้วยขดลวดให้ความร้อน ซึ่งต่อเข้ากับชุดควบคุมอุณหภูมิและเครื่องบันทึกข้อมูลแบบหลายช่องสัญญาณ



รูปที่ 1 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ชุดแม่พิมพ์
2. เครื่องควบคุมอุณหภูมิ
3. เครื่องบันทึกผลแบบหลายช่องสัญญาณ

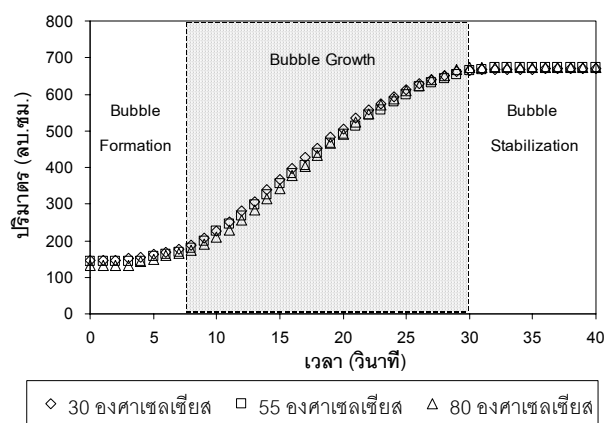
2.3 วิธีการทดลอง

กำหนดเวลาในการฉีดโฟมที่ 0.6 วินาที ซึ่งจะได้ปริมาณของไอโซไซยานตและพอลิออล 28.8 ± 20 และ

48 ± 20 กรัมตามลำดับ และใช้เวลาในการรอขึ้นงานก่อนการแกะออกมาต่อครั้ง 3 นาที โดยทำการฉีดพอลิยูรีเทนโฟมลงในแม่พิมพ์ที่เอียงทำมุม 20 องศา ควบคุมอุณหภูมิพื้นผิวของแม่พิมพ์ที่ 30, 55 และ 80 °C ตามลำดับ เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลกระทบต่อการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของโฟมในแม่พิมพ์โปร่งใส

3. ผลการทดลอง

3.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อลักษณะการไหลของโฟมและการเกิดโฟม



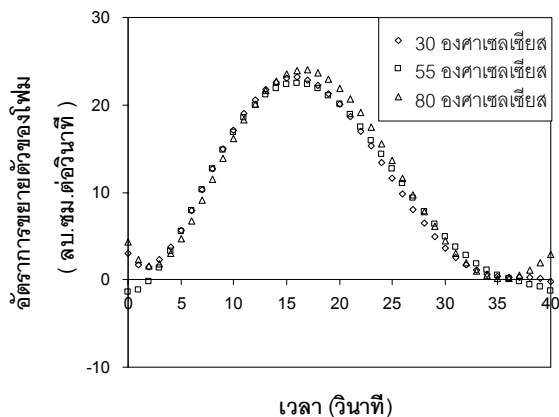
รูปที่ 2 ผลของอุณหภูมิพื้นผิวของแม่พิมพ์ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของพอลิยูรีเทนโฟมที่ผลิตได้จากการฉีดขึ้นรูปในแม่พิมพ์โปร่งใส ณ ช่วงเวลาต่างๆ

จากรูปที่ 2 พบว่า ภายหลังจากการฉีดพอลิยูรีเทน โฟมนั้น ช่วงแรกพอลิยูรีเทน จะมีสถานะเป็นของเหลว ปริมาตรโดยเฉลี่ยเท่ากับ 142 ลูกบาศก์เซนติเมตร และเมื่อเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน พอลิยูรีเทนจะเริ่มเปลี่ยนสภาพเป็นโฟมและมีปริมาตรสุดท้ายของโฟม เท่ากับ 673 ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของฟองก๊าซที่เกิดขึ้น และสามารถแบ่งช่วงการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของฟองก๊าซออกเป็น 3 ช่วง คือ

ช่วงที่ 1 Bubble Formation เป็นช่วงของการเกิดฟองก๊าซเริ่มต้น โดยที่ปริมาตรของฟองก๊าซจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

ช่วงที่ 2 Bubble Growth เป็นช่วงการเจริญเติบโตของฟองก๊าซ โดยในช่วงนี้ ปริมาตรของฟองก๊าซมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

ช่วงที่ 3 Bubble Stabilization เป็นช่วงการคงสภาพของฟองก๊าซ ปริมาตรของฟองก๊าซเริ่มคงที่



รูปที่ 3 ผลของอุณหภูมิพื้นผิวของแม่พิมพ์ที่มีต่ออัตราการขยายตัวของพอลิยูรีเทนโฟมที่ผลิตได้จากการฉีดขึ้นรูปในแม่พิมพ์โปร่งใส ณ ช่วงเวลาต่างๆ

จากรูปที่ 3 แสดงอัตราการขยายของฟองก๊าซต่อเวลา ที่สภาวะอุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์ต่างๆ พบว่า แนวโน้มของอัตราการขยายของทุกๆ สภาวะมีลักษณะเดียวกัน คือ เพิ่มขึ้นในช่วงแรกและลดลงในช่วงหลัง เนื่องจากเมื่อเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของพอลิยูรีเทน จะเกิดฟองก๊าซขึ้นในเนื้อพอลิเมอร์ ซึ่งในช่วงแรกของการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันนั้น เนื้อโฟมยังไม่ได้สร้างพอลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงเพียงพอที่จะเก็บกักก๊าซไว้ได้ เมื่อก๊าซได้รับความร้อนจึงเกิดการขยายตัวได้ดี ทำให้ค่าอัตราการขยายตัวมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งมีอัตราการขยายตัวสูงสุด โดยเฉลี่ยเท่ากับ 23.20 ลบ.ซม.ต่อวินาที ณ เวลา 16 วินาที แต่เมื่อการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันดำเนินต่อไป โครงสร้างของพอลิเมอร์จะมีความเสถียรและความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ทำให้ฟองก๊าซขยายตัวไม่ได้หรือได้เพียงเล็กน้อย จึงทำให้อัตราการขยายตัวของฟองก๊าซลดลง เมื่อทราบอัตราการขยายตัวสูงตามรูปที่ 3 ช่วยให้การออกแบบรูปลักษณ์และช่องไล่อากาศในแม่พิมพ์ สามารถหลีกเลี่ยงการสูญเสียพอลิยูรีเทนใน

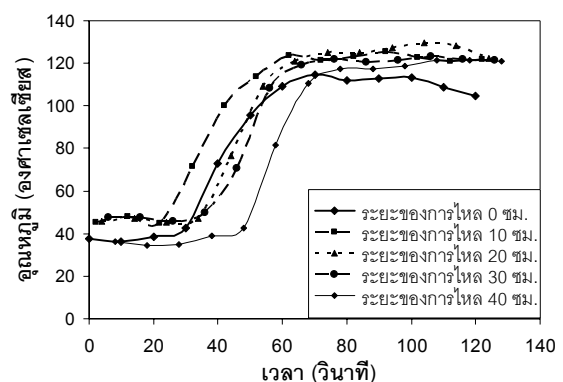
ระหว่างการฉีดได้ กล่าวคือ ตำแหน่งของรูปลักษณ์ ไม่ควรอยู่ตรงกับระยะการไหลของโฟม ในเวลาประมาณ 16 วินาทีหลังจากการฉีด เพราะในช่วงเวลาดังกล่าว พอลิยูรีเทนโฟม เกิดการขยายตัวสูงสุด จะล้นออกในช่องไล่อากาศมากกว่าการไหลในแม่พิมพ์

3.2 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิใน ช่วงเวลาต่างๆ

จากรูปที่ 4 จะพบว่า เมื่อเริ่มเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของพอลิยูรีเทนโฟม อุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว จากที่อุณหภูมิห้อง ประมาณ 55 องศาเซลเซียส เพิ่มขึ้นสูงสุดเป็น 120 องศาเซลเซียส

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

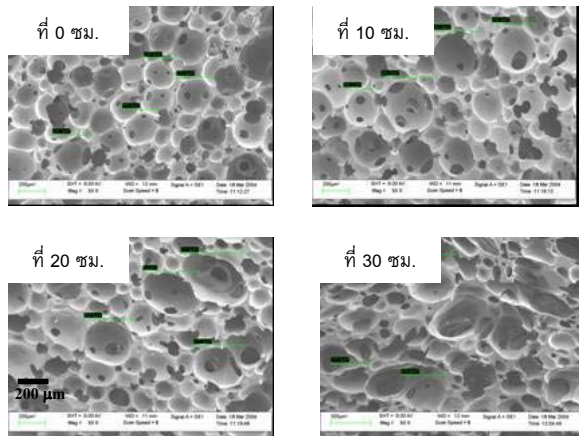
จากผลการทดลอง ซึ่งให้เห็นว่าขดลวดความร้อนทำหน้าที่หล่อเย็นพื้นผิวของแม่พิมพ์ โดยต้องการควบคุมการถ่ายเทความร้อนออกจากระบบ เพื่อให้อุณหภูมิภายในแม่พิมพ์มีความสม่ำเสมอ ซึ่งจะส่งผลทำให้ได้ชิ้นงานพอลิยูรีเทนโฟมที่มีคุณภาพ



รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ ณ ระยะต่างๆ ของการไหล ระหว่างขั้นตอนการฉีดขึ้นรูป

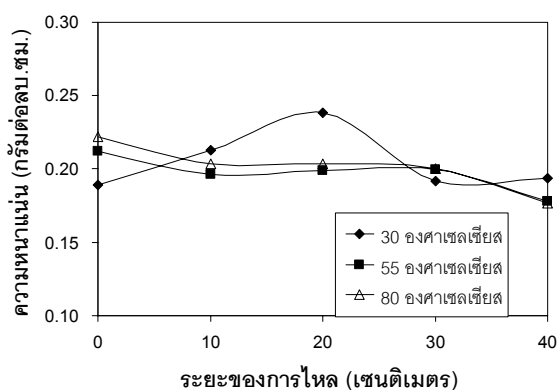
3.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเนื้อโฟม

จากการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ส่องชิ้นโฟม ตามรูปที่ 5 พบว่าลักษณะพื้นผิวของเนื้อพอลิยูรีเทนโฟมมีโครงสร้างเป็นแบบเซลล์เปิด และมีลักษณะเป็นรูพรุน ซึ่งรูพรุนนี้เกิดจากฟองก๊าซขนาดต่างๆ กระจายตัวอยู่ทั่วทั้งเนื้อโฟม



รูปที่ 5 SEM micrographs ของพอลิยูรีเทนโฟมที่ตำแหน่งของระยะการไหลต่างๆ จากสภาวะที่ควบคุมอุณหภูมิพื้นผิวของแม่พิมพ์เท่ากับ 55 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 6 แสดงความหนาแน่นของโฟมมีแนวโน้มคงที่ตลอดความยาวของแม่พิมพ์ ประมาณ 0.2 กรัมต่อลบ.ซม. ในช่วงอุณหภูมิ 55-80 องศาเซลเซียส

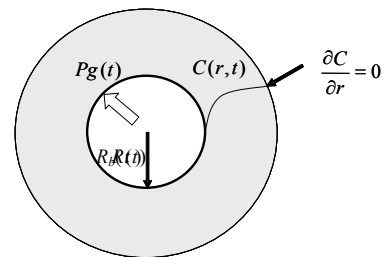


รูปที่ 6 ผลของอุณหภูมิพื้นผิวของแม่พิมพ์ที่มีต่อความหนาแน่นของโฟมที่ผลิตได้จากการฉีดขึ้นรูปในแม่พิมพ์โปร่งใส ณ ระยะของการไหลต่างๆ

4. การพัฒนาและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในงานวิจัยนี้ ได้พัฒนาและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อทำนายอัตราการขยายตัวของฟองก๊าซภายในพอลิยูรีเทนโฟม โดยใช้ผลข้อมูลจากการทดลองฉีดพอลิยูรีเทนโฟมในแม่พิมพ์โปร่งใส และกำหนดสมมติฐานที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง ดังนี้

1. ฟองก๊าซที่เกิดขึ้น มีลักษณะเป็นทรงกลม ดังรูปที่ 7
2. ฟองก๊าซประพฤติตัวเป็นแบบก๊าซอุดมคติ
3. ไม่พิจารณาผลของความหนืดของพอลิเมอร์
4. ระบบเป็นระบบปิด



รูปที่ 7 Cell growth model

จากสมการของก๊าซอุดมคติ

$$P_g(t)V(t) = C(r,t)RT(t) \quad (1)$$

$$\frac{4}{3}\pi[R_b(t)]^3 = \frac{C(r,t)RT(t)}{P_g(t)} = f(t) \quad (2)$$

โดยที่ $P_g(t)$ = ความดันภายในฟองก๊าซ

$V(t)$ = ปริมาตรต่อหนึ่งฟองก๊าซ

$R_b(t)$ = รัศมีของฟองก๊าซ

$C(r,t)$ = จำนวนโมลของก๊าซที่เกิดขึ้น

R = ค่าคงที่ของก๊าซ

$T(t)$ = อุณหภูมิภายในแม่พิมพ์

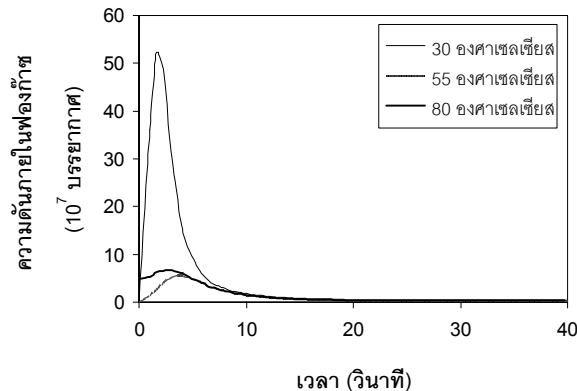
จากผลการศึกษาลักษณะการไหลและการเกิดโฟมที่สภาวะอุณหภูมิ 55 °C สามารถแสดงคุณลักษณะของพอลิยูรีเทนโฟมที่เตรียมได้จากแม่พิมพ์โปร่งใส ดังตารางที่ 1 ซึ่งข้อมูลนี้ ถูกใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของพอลิยูรีเทนโฟม

Foam properties	Unit	Result
Avg. diameter of bubble	μm	334
No. of bubble	cell/cm ³	42600
Vol. of bubble	cm ³	1.95 x 10 ⁻⁵
Foam density	g/cm ³	0.197

4.1 การคำนวณหาความสัมพันธ์ของเทอม $P_g(t)$

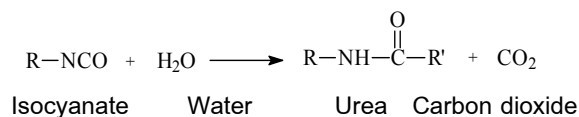
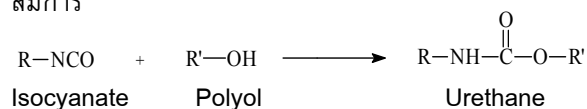
ความดันภายในฟองก๊าซที่เป็นฟังก์ชันกับเวลา ไม่สามารถทำการวัดค่าได้โดยตรง ทางคณะผู้วิจัยได้เสนอวิธีการใช้โปรแกรมพอลิแมทคำนวณความดันดังกล่าว โดยอ้างอิงผลของอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์และปริมาตรของโฟมที่ได้จากการทดลอง ตามรูปที่ 8



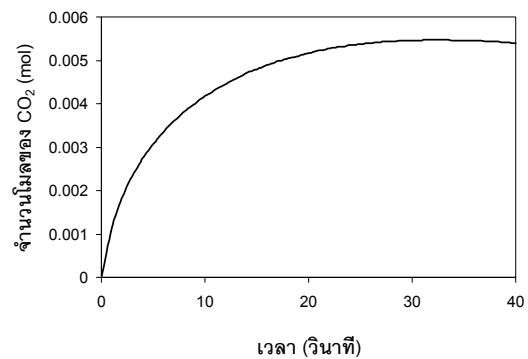
รูปที่ 8 ผลการเปลี่ยนแปลงความดันภายในฟองก๊าซที่อุณหภูมิต่างๆ

4.2 การคำนวณหาความสัมพันธ์ของเทอม $C(r,t)$

จำนวนโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นและเป็นฟังก์ชันกับเวลานั้น ไม่สามารถทำการวัดค่าได้โดยตรง เนื่องจากมีข้อจำกัดทางด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ ทางคณะผู้วิจัยจึงได้อ้างอิงข้อมูลจากงานวิจัยของ Ohshima และคณะ (2000) ที่ได้ทำการทดลองศึกษาการทำปฏิกิริยาของพอลิออลและไอโซไซยาเนต ดังสมการ



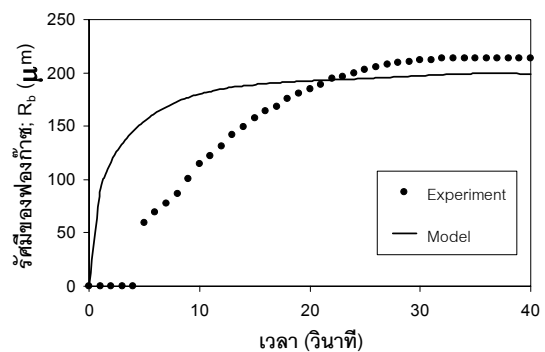
เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงของสารต่างๆ ระหว่างการเกิดปฏิกิริยาและวัดปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการทดลอง โดยใช้ NIR สเปกโตรมิเตอร์สามารถแสดงปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นได้ ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 จำนวนโมลของก๊าซที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาต่างๆ

4.3 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เมื่อทราบความสัมพันธ์ของตัวแปรที่เป็นฟังก์ชันกับเวลา ที่จำเป็นสำหรับการคำนวณ ตามสมการที่ (2) เช่น $P_g(t)$, $C(r,t)$ และ $T(t)$ อัตราการขยายตัวของฟองก๊าซในระหว่างกระบวนการฉีดพอลิยูรีเทนโฟมสามารถทำนายได้จากผลลัพธ์ของสมการที่ (2) ซึ่งแสดงได้ในเทอมของ $R_b(t)$ ตามรูปที่ 10

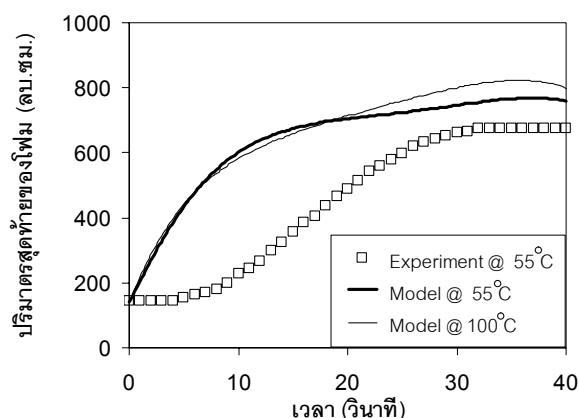


รูปที่ 10 ผลการเปรียบเทียบรัศมีของฟองก๊าซที่ทำนายโดยแบบจำลองกับผลการทดลอง

พบว่า ในช่วง 20 วินาทีแรก ผลการคำนวณจากแบบจำลองให้ค่าอัตราการขยายตัวของฟองก๊าซสูงกว่าผลการทดลองอย่างเห็นได้ชัด สามารถอธิบายได้จากแบบจำลองที่ใช้ไม่นำผลการเปลี่ยนแปลงของความหนืดของพอลิเมอร์มาใช้ในการคำนวณ โดยทั่วไปปฏิกิริยาการเตรียมพอลิยูรีเทน ค่าความหนืดในช่วงเริ่มต้นของการเกิดปฏิกิริยามีค่าเพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้น

เมื่อแบบจำลองไม่นำค่าการเปลี่ยนแปลงความหนืดมาใช้ในการคำนวณ จึงเป็นผลให้อัตราการขยายตัวจากแบบจำลองมีค่าสูงกว่าผลการทดลอง แต่อย่างไรก็ตามในช่วงท้ายของปฏิกิริยาการเกิดโฟม ความหนืดของพอลิยูรีเทน มีค่าสูงมากจนไม่สามารถวัดได้ เนื่องจากโครงสร้างตาข่ายของพอลิยูรีเทนเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้การทำนายอัตราการขยายตัวของฟองก๊าซในช่วงท้ายของการเกิดปฏิกิริยาหลังวินาทีที่ 20 มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการทำนายคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์โฟมที่ผลิตได้

จากรูปที่ 11 แสดงผลการทำนายปริมาตรสุดท้ายของผลิตภัณฑ์โฟมที่อุณหภูมิ 55 และ 100 °C เปรียบเทียบกับผลจากการทดลองที่อุณหภูมิ 55 °C พบว่า แบบจำลองให้ผลการคำนวณมีค่าสูงกว่าการทดลอง และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 100 °C ปริมาตรสุดท้ายของโฟมจะขยายตัวมากขึ้น ซึ่งมีผลต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์โฟม เช่น ขนาดของฟองก๊าซและความหนาแน่นของโฟม เป็นต้น



รูปที่ 11 ผลการทำนายปริมาตรสุดท้ายของผลิตภัณฑ์โฟมจากแบบจำลองเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

จากการพัฒนาและสร้างแบบจำลองสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการทำนายปริมาตรสุดท้ายของผลิตภัณฑ์โฟม เมื่อทราบค่าอุณหภูมิพื้นผิวแม่พิมพ์และปริมาณของสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมโฟม

5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาลักษณะการไหลและการเกิดโฟมในแม่พิมพ์โปร่งใส พร้อมทั้งผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการฉีดพอลิยูรีเทนโฟม คณะผู้วิจัยสามารถสร้างความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับเวลาและระยะทางการไหลของโฟมในแม่พิมพ์ นำไปสู่การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เบื้องต้นที่สามารถใช้ทำนายคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์โฟม

6. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่องนี้ได้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี ทางคณะผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ

1. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยฝ่ายอุตสาหกรรม โครงการโครงการอุตสาหกรรม สำหรับนักศึกษาปริญญาตรี ประจำปี 2546 ผู้ให้เงินสนับสนุนการวิจัย
2. คุณวรินทร์ ฤกษ์ฉวี กรรมการผู้จัดการ และเจ้าหน้าที่ฝ่ายต่างๆ ของบริษัทซัมมิตสตีลเวิล จำกัด ที่ให้การสนับสนุนและอำนวยความสะดวกด้านอุปกรณ์ต่างๆ ในการฉีดขึ้นรูปพอลิยูรีเทนโฟม
3. ศูนย์เครื่องมือวิเคราะห์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

7. เอกสารอ้างอิง

- Himanshu Sheth and Lee Chen. Initial Stages of Bubble Growth During Foaming Process. Technical Paper, Trexel, Inc.
- Klempner D. and Kurt C. Frisch. *Handbook of Polymeric Foams and Foam Technology.*, Hanser Publishers.: New York, 1991.
- Nakagawa Toshi, Takefumi Nagata, Masataka Tanigaki and Masahiro Ohshima Simulation of Polyurethane Foam *Proc. of Symposium Chemical Engineering Japan.*, C105, 2000
- Woods, G. *The ICI polyurethanes Book.*, ICI Polyurethanes and John Wiley & son : New York., 1995.