



วารสารปริทัศน์

2.1 น้ำมันปาล์ม (Palm oil) [1]

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชในตระกูล Palmae มีชื่อทางพฤกษศาสตร์ว่า *Elaeis Guineensis Jacq.* เป็นพืชที่อยู่ในเขตร้อนชื้นที่มีฝนตกชุก การเพาะปลูกปาล์มน้ำมันของโลกจึงจำกัดอยู่ในเขตที่ราบต่ำของภูมิภาคแถบเส้นศูนย์สูตรที่มีความชื้นสูง ซึ่งอยู่ในช่วงละติจูด 20 องศาเหนือ-ใต้ เป็นที่ราบใกล้ฝั่งทะเล เนื้อดินสมบูรณ์และไม่มีน้ำขัง ดินต้องมีความสามารถในการดูดซึมน้ำ ถ่ายเทอากาศได้ดี เช่น ดินเหนียวปนทราย

ผลปาล์มน้ำมันประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนเนื้อของผล (pericarp) ซึ่งให้น้ำมันปาล์ม (palm oil) และส่วนเมล็ดซึ่งมีเนื้ออยู่ข้างในเมล็ด (palm kernel) ซึ่งส่วนนี้ให้น้ำมันเมล็ดปาล์ม (palm kernel oil) โดยปริมาณน้ำมันในเนื้อขึ้นกับพันธุ์ สภาพดินฟ้าอากาศ การดูแลบำรุงรักษา และวิธีการสกัด แต่โดยเฉลี่ยตามมาตรฐานสากลแล้ว ปริมาณเนื้อผลของปาล์มจะมีน้ำมันร้อยละ 20 ส่วนเมล็ดปาล์มมีน้ำมันร้อยละ 45-50 ซึ่งขณะนี้ทั่วโลกมีการใช้เนื้อของผลปาล์มสกัดน้ำมันปาล์มร้อยละ 60-80 และมีการใช้เมล็ดปาล์มสกัดน้ำมันปาล์มร้อยละ 20-40 สมบัติทางเคมี สมบัติทางกายภาพ และร้อยละโดยน้ำหนักของกรดไขมันในน้ำมันปาล์มแสดงในตารางที่ 2.1

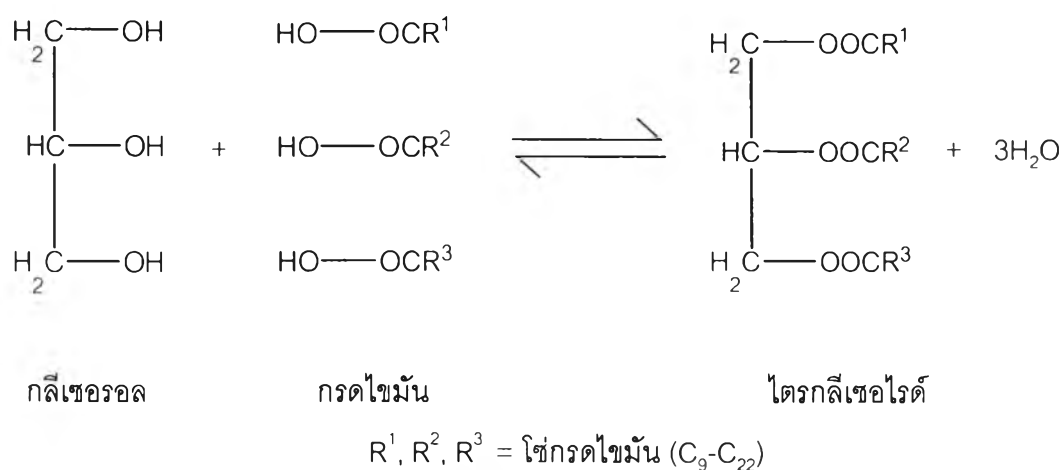
ตารางที่ 2.1 สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของน้ำมันปาล์ม

สมบัติทางเคมีและทางกายภาพ	Palm kernel oil	Palm oil
ค่าไอโอดีน	14-20	43-59
ค่าความถ่วงจำเพาะ ที่ 25°C	0.900-0.913	0.893-0.905
ค่าสะพอนิฟาย	240-257	195-210
ค่าของกรด (น้ำมันดิบ)	20	15
สารที่สะพอนิฟายไม่ได้ (%)	1	1
ค่าดัชนีหักเหที่ 25°C	1.449-1.452	1.445-1.449

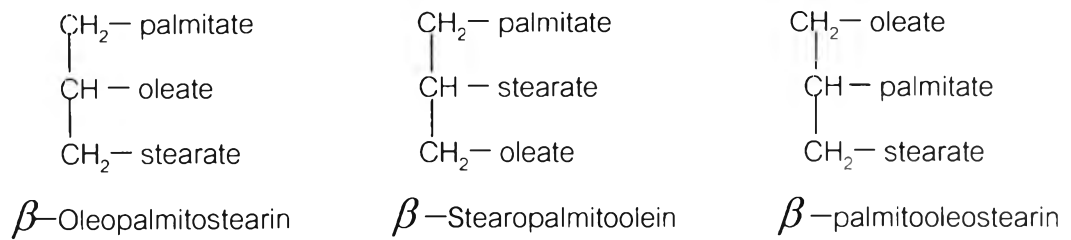
การสกัดน้ำมันปาล์มออกจากผลปาล์มทำโดยการอัดแบบไฮดรอลิก หรือใช้การหมุนเหวี่ยง ภายหลังจากอบผลปาล์มในถังที่มีชั้นไอน้ำร้อนอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส น้ำมันปาล์มดิบที่ได้จะมีสีแดงเข้มอมส้มซึ่งเป็นสีของแคโรทีนอยด์ (carotinoid) ซึ่งมีอยู่ในน้ำมันปาล์มดิบประมาณร้อยละ 0.03-0.15 สีของน้ำมันปาล์มถูกทำให้จางลงในขั้นตอนการฟอกสี และการอัดแก๊สไฮโดรเจน

น้ำมันปาล์มถูกใช้ในการปรุงอาหารมากกว่า 5000 ปี ซึ่งปัจจุบันส่วนใหญ่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ทำมาร์การีน เนยเหลว ครีม และสบู่ นอกจากนี้ ยังเป็นส่วนผสมของน้ำมันหล่อลื่น น้ำมันเครื่อง ส่วนผสมของน้ำยาขัดรองเท้า ใช้ในการผลิตกรดไขมัน ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตดินสอสี และ สีเทียน เป็นต้น น้ำมันปาล์มยังมีส่วนช่วยในการทำเครื่องสำอาง เพราะสามารถแทรกซึมเข้าไปในผิวหนังได้ดีกว่าน้ำมันชนิดอื่น

น้ำมันเป็นสารประกอบไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) กล่าวคือ เป็นไตรเอสเทอร์ (triester) ของกลีเซอรอล (glycerol) กับกรดไขมัน (fatty acid) ชนิดต่างๆ ดังนี้



ถ้า  $R^1, R^2$  และ  $R^3$  มีโครงสร้างทางเคมีเหมือนกัน ก็จะได้ไตรกลีเซอไรด์แบบง่าย ๆ แต่ถ้าไม่เหมือนกัน จะได้ของผสมของไตรกลีเซอไรด์ ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ ดังนั้น ถ้าไฮโดรไลซ์ (hydrolyze) น้ำมัน จะได้กลีเซอริน (glycerine) และน้ำมันไขมัน (fatty oils) ซึ่งแต่ละโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์สามารถเกิดได้ 3 ไอโซเมอร์ โดยต่างกันตรงชนิดของกรดไขมันที่อยู่ตำแหน่งกลางหรือตำแหน่งเบตา ( $\beta$ ) ตัวอย่างเช่น ถ้าโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ประกอบด้วยกรดโอเลอิก (oleic acid) กรดสเตียริก (stearic acid) และกรดปาล์มมิติก (palmitic acid) จะแสดงไอโซเมอร์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างไอโซเมอร์ของไตรกลีเซอไรด์

สำหรับปริมาณและสูตรโครงสร้างของกรดไขมันที่มีในน้ำมันปาล์มแสดงไว้ในตารางที่ 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.2 ร้อยละโดยน้ำหนักของกรดไขมันในน้ำมันปาล์ม

ไขมัน/น้ำมัน	Unsat/Sat Ratio	Saturated			Mono unsaturated	Poly unsaturated
		Myristic acid	Palmitic acid	Stearic acid	Oleic acid	Linoleic acid
น้ำมันปาล์ม	1.0	1	45	4	40	10

ตารางที่ 2.3 สูตรโครงสร้างของกรดไขมันที่มีในน้ำมันปาล์ม

กรดไขมัน	สูตรโครงสร้าง
กรดไมริสติก (Myristic)	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{COOH}$
กรดปาล์มมิติก (Palmitic)	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOH}$
กรดสเตียริก (Stearic)	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$
กรดโอเลอิก (Oleic)	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$
กรดลิโนเลอิก (Linoleic)	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$

## 2.2 ความหมายหรือคำนิยามของโฟม [2-4]

โฟม (foam) หรือโฟมพลาสติก (plastic foam) หรือเซลลูลาร์พอลิเมอร์ (cellular polymer) หรือ เอกซ์แพนเดดพลาสติก (expanded plastic) หมายถึง วัสดุที่มีโพรงแก๊สเล็ก ๆ มากมายกระจายอยู่ในเนื้อพลาสติก หรือพลาสติกที่ทำให้ขยายตัวโดยเกิดจากสารเคมีที่เรียกว่า สารฟู (blowing agent) ซึ่งทำหน้าที่ลดความหนาแน่นของเนื้อพลาสติก ทำให้มีน้ำหนักเบา ลักษณะทั่วไปคล้ายกับฟองน้ำธรรมชาติ (sponge) อาจมีได้ตั้งแต่โฟมชนิดแข็ง (rigid foam) ไปจนถึงชนิดยืดหยุ่น (flexible foam)

โฟมจัดว่าเป็นวัสดุเชิงประกอบ (composite material) ชนิดหนึ่ง เนื่องจากโฟมประกอบด้วยองค์ประกอบอย่างน้อยที่สุด 2 ส่วน (phase) คือส่วนของพอลิเมอร์เมทริกซ์ (polymer matrix phase) และส่วนของแก๊ส (gaseous phase) ส่วนบางกรณีอาจมีองค์ประกอบมากกว่า 2 ส่วน เช่น มีการใส่สารเสริมแรง (reinforcing agent) จำพวกเส้นใย (fiber) หรือมีการใส่สารตัวเติม (fillers) เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) เม็ดแก้ว (glass microsphere) และแป้ง (starch) ต่าง ๆ เป็นต้น

โฟมเป็นวัสดุที่สามารถผลิตออกมาให้มีความหนาแน่นต่างๆ แล้วแต่การใช้งานซึ่งสามารถทำให้มีความหนาแน่นตั้งแต่ 1.6 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ( $\text{kg/m}^3$ ) จนถึงมากกว่า 960 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร เนื่องจากโดยทั่วไปสมบัติเชิงกล (mechanical properties) ของโฟมจะขึ้นกับความหนาแน่น ดังนั้นในการเลือกโฟมมาใช้งานจะพิจารณาที่ความหนาแน่นเป็นสำคัญ อาทิเช่น โฟมชนิดแข็งสำหรับเป็นวัสดุรับแรง (load-bearing) ต้องมีความหนาแน่นสูงๆ ในขณะที่โฟมชนิดแข็งที่มีความหนาแน่นต่ำ มักใช้ในงานฉนวนความร้อน (thermal insulation) ส่วนโฟมชนิดยืดหยุ่นความหนาแน่นต่ำ (ประมาณ  $30 \text{ kg/m}^3$ ) มักใช้ในงานเบาะรถยนต์ นวม หรือหมอน (cushioning) และวัสดุดูดซับเสียง (sound absorption) เป็นต้น โดยปกติแล้วโฟมชนิดแข็งจะมีลักษณะโครงสร้างเซลล์แบบปิด (closed-cell) และโฟมชนิดยืดหยุ่นจะมีโครงสร้างเซลล์แบบเปิด (open cell) การที่โฟมชนิดยืดหยุ่นต้องมีโครงสร้างเซลล์แบบเปิดนั้น เนื่องจากต้องการให้มีความสามารถในการยืดหยุ่นที่สูง (high flexibility) ซึ่งขณะที่โฟมถูกกดอากาศจะสามารถหนีออกไปได้

## 2.3 การจำแนกประเภทของโฟม

โฟมสามารถจำแนกประเภทได้หลายลักษณะขึ้นอยู่กับการศึกษา โดยส่วนมากมักจำแนกตามลักษณะทางกายภาพของโฟมซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น โฟมชนิดยืดหยุ่น โฟมชนิดแข็ง และโฟมชนิดกึ่งแข็ง แต่ถ้าจำแนกตามลักษณะของเซลล์โฟมจะแบ่งออกเป็น โฟมเซลล์เปิด และโฟมเซลล์ปิด นอกจากนี้หากพิจารณาตามประเภทของพลาสติกหลักที่ใช้ ยังสามารถแบ่งออกเป็น โฟมเทอร์โมเซต และโฟมเทอร์โมพลาสติก ซึ่งโฟมแต่ละประเภทจะมีลักษณะและรายละเอียดแตกต่างกันออกไปดังนี้

### 2.3.1 ประเภทของโฟมจำแนกตามลักษณะของเซลล์

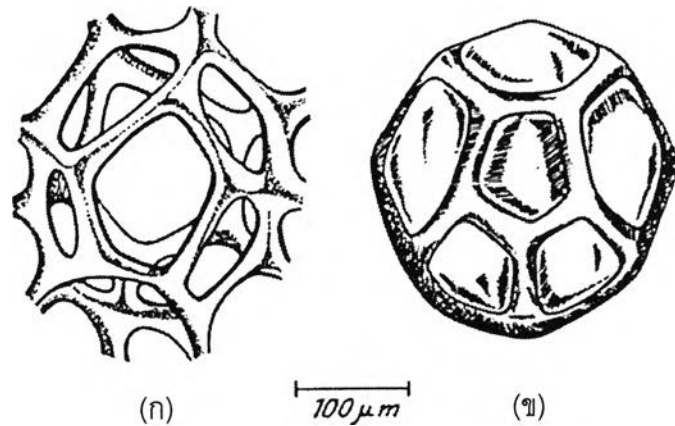
#### 1) โฟมเซลล์เปิด (open cell foam)

เป็นโครงสร้างที่เกิดจากการเชื่อมต่อกันระหว่างเซลล์ซึ่งแก๊สสามารถผ่านจากเซลล์หนึ่งไปยังเซลล์อื่น ๆ ได้ภายใต้การกระทำของแรงขับ (driving force) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ก) โดยทั่วไปโฟมเซลล์เปิดจะเตรียมจากเทคนิคความดันต่ำ (low-pressure technique) ภายใต้ภาวะบรรยากาศ ซึ่งโฟมที่มีสัณฐานโครงสร้างแบบนี้จะยืดหยุ่นเหมาะในการนำไปใช้ทำเบาะนั่งในรถยนต์ เฟอร์นิเจอร์ ที่นอน บรรจุกัมมันต์ และวัสดุกันกระแทก เป็นต้น

#### 2) โฟมเซลล์ปิด (closed-cell foam)

สัณฐานโครงสร้างของเซลล์จะประกอบด้วยเยื่อบาง ๆ เรียกว่า หน้าต่างเซลล์ ทำให้แก๊สไม่สามารถผ่านไปมาระหว่างเซลล์ได้ แต่การเคลื่อนที่ของแก๊สจะกระทำโดยการแพร่ (diffusion) ผ่านผนังเซลล์ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ข) โดยปกติโฟมเซลล์ปิดจะเตรียมโดยใช้เทคนิคความดันสูง (high-pressure technique) และโฟมแบบนี้จะแข็ง และเหมาะในการนำไปใช้งาน เช่น ฉนวนความร้อน ทุ่นลอย หรือใช้ในเสื้อชูชีพ เป็นต้น

ในทางปฏิบัติโครงสร้างของเซลล์ทั้ง 2 ชนิดจะอยู่ร่วมกัน ซึ่งจะไม่เป็นโฟมเซลล์เปิดหรือเซลล์ปิดโดยสมบูรณ์ ความแตกต่างระหว่างโฟมเซลล์เปิดและโฟมเซลล์ปิดจะอยู่ที่โฟมเซลล์เปิดจะประกอบด้วยโครงสร้างเป็นแกนคล้าย ๆ เสาค้ำ (strut) ขณะที่โฟมเซลล์ปิดจะมีหน้าต่าง (window) หรือเยื่อบาง ๆ (membrane) เชื่อมปิดระหว่างแกน พฤติกรรมเชิงกลของระบบขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของเซลล์เปิดต่อเซลล์ปิด เช่น ถ้าโฟมมีอัตราส่วนของเซลล์ปิดที่สูงจะทำให้โฟมมีค่าความแข็งตึง (stiffness) และความแข็งแรง (strength) ที่สูง



รูปที่ 2.2 สัณฐานโครงสร้างของโฟม  
(ก) เซลล์เปิด (ข) เซลล์ปิด

### 2.3.2 ประเภทของโฟมจำแนกตามลักษณะทางกายภาพ

ประเภทของโฟมหากจำแนกตามลักษณะทางกายภาพ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ โฟมชนิดยืดหยุ่น และโฟมชนิดแข็ง ซึ่งขึ้นกับองค์ประกอบทางเคมี ความแข็งแรงของสายโซ่พอลิเมอร์ องศาของการเกิดผลึก (degree of crystallinity) และองศาการเชื่อมขวาง (degree of crosslinking) ของโฟมนั้น

#### 1) โฟมชนิดยืดหยุ่น (flexible foam)

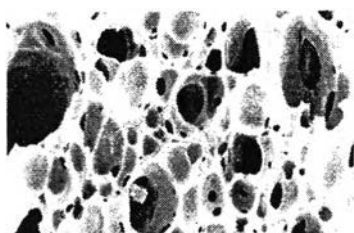
โฟมชนิดนี้พอลิเมอร์เมทริกซ์จะมีอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (glass transition temperature:  $T_g$ ) ที่ต่ำ มีลักษณะอ่อนนุ่ม ยืดหยุ่น และคืนตัวเมื่อถูกกดได้ง่าย (รูปที่ 2.3 ก) เช่น โฟมยาง (elastomeric foam) โฟมพลาสติกไฮดรอกซีโพลีไวนิลคลอไรด์ (plasticized PVC foam) และ โฟมพอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่น เป็นต้น

#### 2) โฟมชนิดแข็ง (rigid foam)

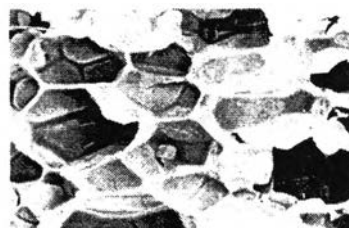
โฟมชนิดนี้พอลิเมอร์เมทริกซ์จะอยู่ในสถานะผลึก (crystalline state) หรือถ้าอยู่ในสถานะอสัณฐาน (amorphous state) จะมีอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ( $T_g$ ) ที่สูง มีลักษณะที่แข็ง ไม่คืนตัวเมื่อถูกกด หรือบีบ (รูปที่ 2.3 ข) เช่น โฟมพอลิโอเลฟินส์ (polyolefin foam) โฟมพอลิสไตรีน (polystyrene foam) โฟมพอลิคาร์บอเนต (polycarbonate foam) โฟมฟีนอลิก (phenolic foam) และโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็ง (rigid polyurethane foam) เป็นต้น

### 3) โฟมชนิดกึ่งแข็ง (semi-rigid foam)

มีลักษณะอยู่ระหว่างโฟมชนิดแข็งและชนิดยืดหยุ่นกล่าวคือ โฟมชนิดนี้จะมีโมดูลัสยืดหยุ่น (elastic modulus) ที่สูงกว่าโฟมชนิดยืดหยุ่น แต่มีพฤติกรรมทางความเค้น-ความเครียด (stress-strain behavior) คล้ายกับโฟมชนิดยืดหยุ่นมากกว่าโฟมชนิดแข็ง



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.3 ตัวอย่างสัณฐานวิทยาของโฟมบางชนิด

(ก) ชนิดยืดหยุ่น (ข) ชนิดแข็ง

### 2.3.3 ประเภทของโฟมจำแนกตามประเภทของพลาสติก

#### 1) โฟมเทอร์โมเซต (thermoset foam)

เป็นโฟมพลาสติกที่สามารถนำกลับมาใช้หรือรีไซเคิล (recycle) ได้ยาก เพราะต้องอาศัยการรีไซเคิลด้วยกระบวนการทางเคมีที่ซับซ้อน โฟมชนิดนี้ที่รู้จักกันดีได้แก่ โฟมพอลิยูรีเทน โฟมอีพอกซี (epoxy foam) และโฟมฟีนอลิก (phenolic foam) เป็นต้น

#### 2) โฟมเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic foam)

โฟมประเภทนี้สามารถนำกลับมาใช้หรือรีไซเคิลได้ง่าย เช่น โฟมพอลิสไตรีน โฟมพอลิไวนิลคลอไรด์ และโฟมพอลิเอทิลีน เป็นต้น

## 2.4 กระบวนการการเกิดโฟม (foam formation) [2, 3]

โฟมพลาสติกสามารถเตรียมได้หลายวิธี โดยวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย คือกระบวนการเอกซ์แพนชัน (expansion process) ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ได้แก่

### ขั้นตอนที่ 1 การเกิดฟอง (bubble formation or initiation)

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนแรกของกระบวนการเกิดโฟม โดยทำให้เกิดฟองแก๊สขึ้นและขยายตัวต่อไปในสารละลายหรือพอลิเมอร์เหลว กระบวนการการเกิดฟองนี้จะเรียกว่า nucleation ซึ่งมีอยู่ 2 แบบด้วยกัน คือ

- 1) Self nucleation – ฟองแก๊สจะเกิดขึ้นในขณะที่ของเหลวหรือสารละลายพอลิเมอร์เริ่มผสมเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous)
- 2) Nucleation process – ฟองแก๊สจะเกิดขึ้นบนผิวสัมผัสระหว่างของเหลวและของแข็ง (liquid-solid interphase) ซึ่งของแข็งนี้เรียกว่า nucleating agent

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดฟอง ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน และความชื้น ความเรียบของผิวหน้าวัสดุ คุณลักษณะของผิวของอนุภาคตัวเติม ผลของความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวหรือขนาดของ nucleator ขนาดและปริมาณของฟองที่เกิดขึ้น อัตราการเกิดแก๊ส และแรงตึงผิว (surface tension)

ในขั้นตอนการเกิดฟองในสารละลายพอลิเมอร์ต้องการพลังงานอิสระ ( $F$ ) ของระบบที่เพิ่มขึ้น ดังสมการที่ 2.1

$$F = \gamma A \quad (2.1)$$

เมื่อ  $\gamma$  คือแรงตึงผิวของสารละลายพอลิเมอร์ (surface tension of polymer solution) และ  $A$  คือพื้นที่ผิวสัมผัสรวมทั้งหมด (total interfacial area) โดยที่ค่าแรงตึงผิวต่ำจะทำให้เกิดฟองได้ง่าย



## การทำให้พลาสติกเกิดโครงสร้างโฟมหรือฟองแก๊ส

การทำให้พลาสติกเกิดโครงสร้างโฟมหรือฟองแก๊สมีหลายวิธีด้วยกัน ได้แก่

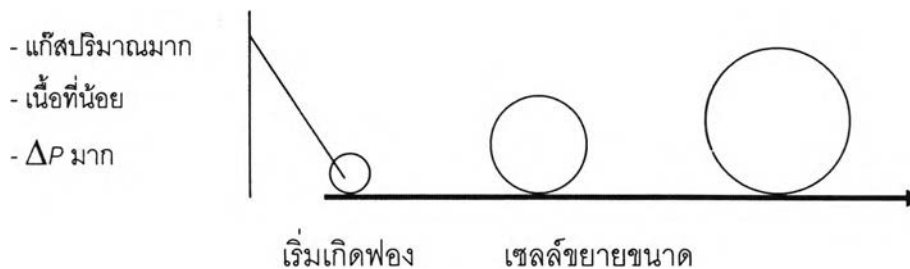
- 1) การสลายตัวทางความร้อนของสารฟูทางเคมี (thermal decomposition of a chemical blowing agent) จากการผสมสารฟูที่เป็นของแข็งกับพอลิเมอร์ (ปกติพอลิเมอร์จะอยู่ในสถานะของเหลว) และให้ความร้อนทำให้สารฟูสลายตัวเกิดเป็นแก๊สขึ้น เช่น แก๊สไนโตรเจน ( $N_2$ ) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) เป็นต้น
- 2) การเกิดฟองแก๊สเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี (blowing due to an 'in situ' chemical reaction) แก๊สจะเกิดขึ้นเนื่องจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารเคมี 2 ชนิด ซึ่งแก๊สจะปล่อยออกมาพร้อมกับการพอลิเมอไรเซชันและการเชื่อมขวาง เช่น ปฏิกิริยาระหว่างไอโซไซยาเนต (isocyanate) กับน้ำ ได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์ ในกระบวนการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทน เป็นต้น
- 3) การลดความดัน (low pressure release of a gas) เป็นการขยายตัวของแก๊ส (gas expansion) ในเนื้อพอลิเมอร์โดยการลดความดันในระบบพอลิเมอร์ ตัวอย่างเช่น การอัดรีด (extrusion) เอกซ์แพนเดดพอลิสไตรีน (expanded polystyrene :EPS)
- 4) การกลายเป็นไอของของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำในเนื้อพลาสติก (blowing by vapor from a volatile liquid) ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาคายความร้อนหรือการให้ความร้อนกับสารฟูที่เป็นของเหลว ตัวอย่างของสารฟูที่เป็นของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำ ได้แก่ ฟลูออโรคาร์บอน (fluorocarbon) และ เมทิลีนคลอไรด์ (methylene chloride) เป็นต้น
- 5) การใช้ฟิลเลอร์ชั่วคราว (use of a temporary filler) วิธีนี้ไม่มีการผลิตแก๊สขึ้นแต่จะใช้อุณหภูมิของแข็งผสมกับพอลิเมอร์ แล้วขึ้นรูปเป็นพลาสติกแข็ง จากนั้นชะ (leach) ฟิลเลอร์ออกด้วยตัวทำละลาย (solvent) ที่เหมาะสม ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีเซลล์เปิดเกิดขึ้น วิธีนี้มักใช้ในการเตรียมโฟมพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน (polytetrafluoroethylene foam : PTFE foam) เนื่องจาก PTFE เป็นพอลิเมอร์ที่ทำให้เกิดการขยายตัวได้ยาก
- 6) การเก็บกักแก๊สเชิงกล (mechanical entrapment of gas) คือการทำให้เกิดฟองแก๊สโดยการกวนเชิงกลในระบบพอลิเมอร์เหลว หรือสารละลายพอลิเมอร์ หรือสารแขวนลอยพอลิเมอร์ แล้วทำให้แข็งตัวโดยสารเร่งปฏิกิริยาและ/หรือความร้อน ทำให้เกิดการกักฟองแก๊สไว้ในเนื้อพลาสติก วิธีนี้เป็นวิธีที่เก่า และมีข้อเสียคือโฟมที่ได้จะมีเซลล์ที่ไม่สม่ำเสมอ
- 7) การเติมไมโครสเฟียร์ (use of microspheres) เป็นการเติมฮอลโลว์ไมโครสเฟียร์ (hollow microspheres) ในพอลิเมอร์ ซึ่งไมโครสเฟียร์ดังกล่าวอาจเป็นเม็ดแก้ว หรือเม็ดพลาสติก โดยส่วนใหญ่จะเป็นการผสมเม็ดฟีนอลิก (phenolic spheres) ใน unsaturated polyester resin ขณะเกิดการบ่ม (curing)

### ขั้นตอนที่ 2 การเพิ่มขนาดของฟอง (bubble growth)

การเพิ่มขนาดของฟองเกิดจาก การแพร่ของแก๊สจากเฟสของเหลว หรือสารละลายพอลิเมอร์เข้าไปสู่ฟองแก๊ส ฟองที่เกิดขึ้นในขั้นแรกจะมีลักษณะเป็นทรงกลม (sphere) ซึ่งจะขยายตัวต่อไปภายใต้ภาวะที่กำหนด และสามารถควบคุมได้โดยอาศัยความแตกต่างของค่าความดันระหว่างภายในและภายนอกฟองแก๊สหรือเซลล์ ( $\Delta P$ ) แรงตึงผิวที่สัมผัส ( $\gamma$ ) และรัศมีของฟอง ( $r$ ) ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงดังสมการที่ 2.2

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{r} \quad (2.2)$$

กล่าวคือ เมื่อเริ่มต้นเกิดฟองแก๊ส เซลล์จะมีขนาดเล็ก หรือรัศมีของเซลล์ ( $r$ ) มีค่าน้อย จะทำให้ความแตกต่างของความดันระหว่างภายในกับภายนอกฟองแก๊สหรือเซลล์ ( $\Delta P$ ) มีค่ามาก เซลล์จึงมีการขยายตัวเร็วในช่วงแรก และเมื่อเซลล์มีขนาดใหญ่ขึ้น ความดันระหว่างภายในกับภายนอกฟองแก๊สหรือเซลล์น้อยลง ทำให้ฟองขยายช้า และหยุดขยายในที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.4

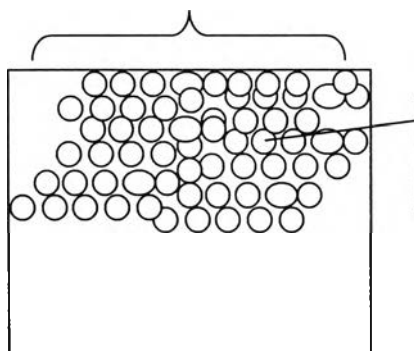


รูปที่ 2.4 การเพิ่มขนาดของฟอง

โดยการเพิ่มขนาดของฟองทั้งระบบจะต้องคำนึงถึงความดันของฟองข้างเคียงด้วย ซึ่งความดันของฟองขนาดเล็กจะมากกว่าความดันของฟองขนาดใหญ่ดังแสดงในรูปที่ 2.5 และสมการที่ 2.3 เมื่อ  $\Delta P_{1,2}$  คือค่าความแตกต่างของความดันระหว่างฟอง 2 ฟอง ซึ่งมีขนาดรัศมีของฟอง เท่ากับ  $r_1$  และ  $r_2$  ตามลำดับ

$$\Delta P_{1,2} = 2\gamma \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (2.3)$$

เซลล์ด้านริมจะสามารถขยายขนาดได้ง่ายกว่าเซลล์  
ภายในเพราะเปรียบเทียบความดันกับอากาศภายนอก



การโตของเซลล์ที่อยู่ภายใน  
จะขึ้นกับเซลล์ข้างเคียงด้วย

รูปที่ 2.5 การเพิ่มขนาดของฟองทั้งระบบ

ในขณะที่เกิดการขยายตัวของฟองในโฟมพลาสติก สมบัติต่าง ๆ ของวัสดุจะเปลี่ยนไปอย่างมาก โดยอัตราการขยายตัวของฟองจะขึ้นกับสมบัติวิสโคอีลาสติก (viscoelastic) ของพอลิเมอร์เฟส ความดันที่เกิดเนื่องจากสารฟู ความดันภายนอกที่เกิดบนโฟมพลาสติก ขนาดของเซลล์ อัตราการซึมผ่านของสารฟูในเฟสพอลิเมอร์ และการเปลี่ยนแปลงความหนืดของของไหลซึ่งมีอิทธิพลต่ออัตราการขยายตัวของเซลล์ และการไหลของพอลิเมอร์จากผนังเซลล์สู่บริเวณเชื่อมต่อกันของเซลล์ซึ่งนำไปสู่การยุบตัว (collapse) ของโฟมพลาสติก

### ขั้นตอนที่ 3 ความเสถียรหรือการคงรูปของฟอง (bubble stability)

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนสุดท้ายและสำคัญที่สุดในกระบวนการเกิดโฟม ซึ่งฟองที่เกิดขึ้นในเฟสพอลิเมอร์เหลวอาจจะไม่เสถียร และยุบตัวภายใต้แรงโน้มถ่วง ความเสถียรของโครงสร้างโฟมขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง ซึ่งปัจจัยหนึ่ง คือการถ่ายเท (drainage) ของของเหลวจากผนังเซลล์ไปยังรอยต่อระหว่างเซลล์ (cell junction) โดยขณะที่ฟองกำลังขยายตัวจะเกิดการสัมผัสกันของเซลล์ทำให้เกิดผนังเซลล์และสัน (ribs) ของเซลล์ขึ้น เมื่อการขยายตัวเกิดต่อไปอีก ของเหลวจะเกิดการถ่ายเทไปยังรอยต่อระหว่างเซลล์มากขึ้น ถ้าการถ่ายเทของเหลวในลักษณะนี้ยังคงเกิดต่อไป จะทำให้เกิดรอยแตกขึ้นที่ผนังเซลล์ และถ้าทำให้ระบบโฟมขณะนี้เสถียรจะทำให้ได้โฟมพลาสติกแบบเซลล์เปิด

การป้องกันการเกิดรอยแตกของผนังเซลล์ ทำได้โดยทำให้ระบบโฟมเกิดการเสถียรก่อนที่จะเกิดรอยแตกขึ้นที่ผนังเซลล์ สำหรับในระบบโฟมพอลิเมอร์สามารถทำได้โดยการเพิ่มความหนืด

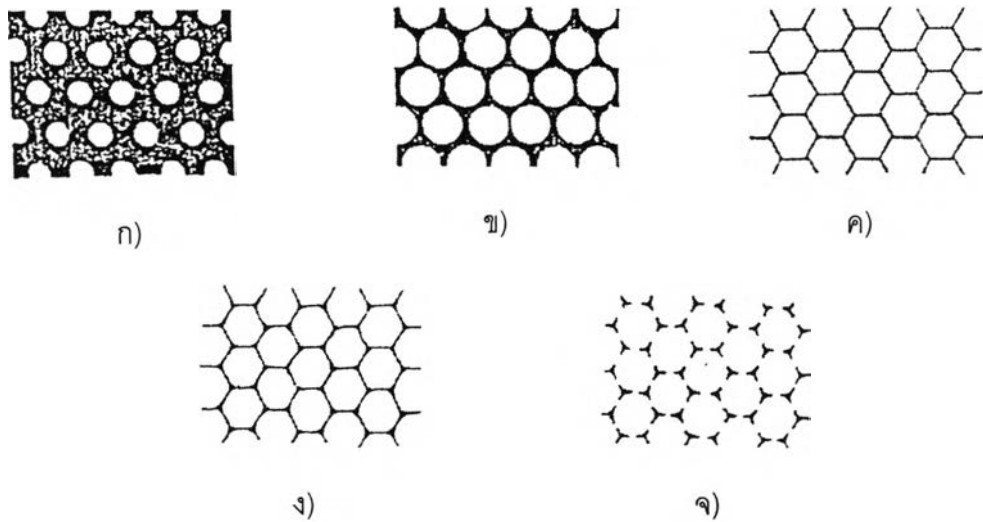
ของเฟสพอลิเมอร์ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดต่อความเสถียรของโฟม การเพิ่มความหนืดจะเป็นการลดผลของการถ่ายเทของของเหลวไปรอยต่อระหว่างเซลล์ (drainage effect) ซึ่งการทำให้ความหนืดของเฟสพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นสามารถทำได้โดยการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลระหว่าง การพอลิเมอไรเซชัน หรือการเชื่อมขวาง (crosslinking) หรือการลดอุณหภูมิ

นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อความเสถียรของโฟม ได้แก่

- 1) การขยายตัวของฟองที่มากเกินไป (excessive expansion) ทำให้เกิดสถานการณ์โครงสร้างแบบเซลล์เปิดที่มากเกินไปจนความต้องการ ซึ่งแก้ไขได้โดยการจำกัดระดับการขยายตัวของโฟม
- 2) การเกิดแรงแวนเดอร์วาลส์ ระหว่างผิวหน้าของผนังเซลล์ ทำให้ผนังเซลล์มีความหนาแน่นลง นำไปสู่การเกิดรอยแตกบนผนังเซลล์
- 3) การลดลงของแรงตึงผิวที่บางจุดในพอลิเมอร์เหลว อันเนื่องมาจากความร้อนในระบบพอลิเมอร์เหลวมีมากเกินไป หรือมีสารต้านการเกิดโฟม (anti-foaming agents) ปนอยู่

วิธีทำให้ภาวะโฟมเสถียรมีหลายวิธี ได้แก่ วิธีทางเคมี เช่น กระบวนการพอลิเมอไรเซชันของเทอร์โมเซตพอลิเมอร์ หรือวิธีทางกายภาพ เช่น การทำให้เทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์ที่ขยายตัวเย็นตัวลงที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิกลาสทรานสิชันเพื่อป้องกันการไหลของพอลิเมอร์

จากขั้นตอนต่าง ๆ ในกระบวนการการเกิดโฟม ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดฟอง (nucleation) การเติบโต (growth) ของฟองแก๊ส และการขยายตัวของแก๊สในระบบพอลิเมอร์เหลว สามารถแสดงขั้นตอนต่าง ๆ ได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แผนภาพขั้นตอนต่าง ๆ ในกระบวนการเกิดโฟม

- ก) การเกิดฟองในระบบพอลิเมอร์เหลว โดยฟองจะมีรูปร่างทรงกลม
- ข) การเติบโตของฟองแก๊ส
- ค) ฟองแก๊สขยายตัวและสัมผัสกันระหว่างฟองทำให้รูปร่างของฟองเปลี่ยนเป็นทรง pentagonal dodecahedron
- ง) โฟมพลาสติกจะมีลักษณะเป็นแบบเซลล์ปิดซึ่งอาจจะเกิดการแตก (rupture) ของผนังเซลล์ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความหนืด พลังงานอิสระ เป็นต้น
- จ) ผลจากการขาดของผนังเซลล์ของฟองทำให้สัณฐานโครงสร้างโฟมเป็นแบบเซลล์เปิด

## 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างและสมบัติของโฟมพลาสติก (structure properties relationship of plastic foam) [2,3]

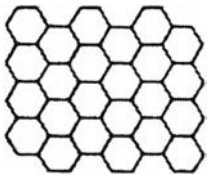
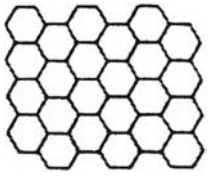
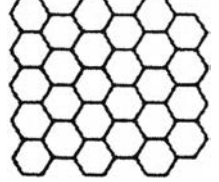
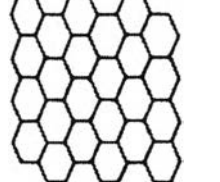
ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างและสมบัติของโฟมพลาสติกสามารถประเมินได้ในเชิงปริมาณโดยปัจจัยพื้นฐานทางโครงสร้างมหภาค (macrostructure) ของโฟมจะถูกนำมาใช้อธิบายสมบัติของโฟม ปัจจัยเหล่านี้ได้แก่ ปริมาณเซลล์แบบเปิด ความหนาแน่นปรากฏ (apparent density) ขนาดเซลล์ รูปร่างเซลล์ ความหนาของผนังเซลล์ (wall thickness) ค่าการกระจายตัวของขนาดและรูปร่างของเซลล์ภายใต้ปริมาตรที่กำหนด และพื้นที่ผิวหน้าจำเพาะ (specific surface area) ของวัสดุ

โดยทั่วไปโฟมพลาสติกมีพื้นฐานโครงสร้าง 2 แบบ คือแบบเซลล์เปิดและแบบเซลล์ปิด ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของพอลิเมอร์และภาวะการเกิดโฟม ความแตกต่างทางโครงสร้างทางกายภาพนี้ทำให้โฟมพลาสติกมีสมบัติแตกต่างกันไป โดยสมบัติจะแปรผันไปตามอัตราส่วนของเซลล์แบบเปิด เมื่อเปรียบเทียบโฟมแบบเซลล์เปิดกับโฟมแบบเซลล์ปิด พบว่าโฟมแบบเซลล์เปิดมีสมบัติการดูดซับน้ำและความชื้น การซึมผ่าน (permeability) ของแก๊สและไอน้ำ และความสามารถในการดูดซับเสียงได้ดีกว่า แต่จะมีสมบัติความเป็นฉนวนความร้อนและไฟฟ้าที่ต่ำกว่าโฟมแบบเซลล์ปิด โดยทั่วไปโฟมพอลิเมอร์ที่มีพื้นฐานโครงสร้างแบบเซลล์เปิด ได้แก่ โฟมฟีนอลิก (phenolic foam) โฟมคาร์บาไมด์ (carbamide foam) และโฟมพอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่น เป็นต้น สำหรับโฟมพอลิเมอร์ที่มีพื้นฐานโครงสร้างแบบเซลล์ปิด ได้แก่ โฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็ง โฟมอีพอกซี โฟมซิลิโคน โฟมพีวีซี และโฟมพอลิสไตรีน เป็นต้น

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและอัตราส่วนของเซลล์แบบเปิดและเซลล์แบบปิดเป็นดังนี้คือ เมื่ออัตราส่วนของเซลล์แบบเปิดเพิ่มขึ้นความหนาแน่นของโฟมพลาสติกจะลดลง เนื่องจากโครงสร้างเซลล์แบบเปิดจะเกิดได้ก็ต่อเมื่อค่าเฉลี่ยของขนาดเซลล์เพิ่มขึ้นจนกระทั่งทำให้เกิดรอยแตกที่ผนังเซลล์ในขั้นสุดท้ายของกระบวนการเกิดโฟม นอกจากนี้โครงสร้างเซลล์แบบเปิดสามารถทำให้เกิดได้โดยการเปลี่ยนโครงสร้างเซลล์แบบปิดด้วยกระบวนการบางอย่าง เช่น กระบวนการไฮโดรลิซิส (hydrolysis) กระบวนการออกซิเดชัน (oxidation) การเพิ่มหรือลดความดันในระบบโฟม การใช้ความร้อนหรือวิธีปฏิบัติเชิงกล (mechanical treatment) เป็นต้น

สมบัติที่ขึ้นกับทิศทาง (anisotropy) ของรูปร่างเซลล์จะสัมพันธ์กับทิศทางการยืดหรือการขยายตัวของเซลล์ฟองแก๊สในพอลิเมอร์ โดยเซลล์จะขยายตัวในทิศทางที่มีความเค้นเชิงกลต่ำ

ความเค้นเหล่านี้เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเกิดโฟม ซึ่งจะกระจายตัวอย่างไม่เป็นระเบียบตลอดทั่วทั้งปริมาตรของพอลิเมอร์ โดยทิศทางการขยายตัวของเซลล์สามารถขยายได้หลายทิศทาง และทำมุมต่าง ๆ กันกับแนวระนาบ ตัวอย่างเช่น การขยายตัวของ dodecahedral cell ดังแสดงในรูปที่ 2.7

Cell section plane	Shape of cells	
	Ideal	Real
Perpendicular to direction of foaming		
Parallel to direction of foaming		

รูปที่ 2.7 การขยายตัวของ dodecahedral cell ในทิศทางตั้งฉากและขนานกับทิศทางการเกิดโฟม

สมบัติที่ขึ้นกับทิศทางของรูปร่างเซลล์ของโฟมพลาสติกจะมีผลต่อความแข็งแรง ความเป็นฉนวน สมบัติความร้อนเชิงกายภาพ (thermophysical) และสมบัติอื่นๆ ซึ่งสมบัติที่ขึ้นกับทิศทางนี้จะมีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของโฟมพลาสติกมากกว่าปัจจัยอื่นๆ ได้แก่ธรรมชาติทางเคมีของพอลิเมอร์ ความหนาแน่นของโฟมพลาสติก หรือปริมาณเซลล์แบบเปิดในโฟมพลาสติก

ภายใต้ภาวะเงื่อนไขการเกิดโฟมที่คล้ายคลึงกัน (องค์ประกอบทางเคมี ความหนาแน่น การจัดตัวของเซลล์ เป็นต้น) ขนาดของเซลล์จะมีอิทธิพลต่อสมบัติของโฟมพลาสติกได้เช่นกัน ตัวอย่างเช่น ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของโฟมจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเซลล์มีขนาดใหญ่ เพราะเมื่อเซลล์มีขนาดเพิ่มขึ้นจะทำให้การถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีความร้อน และการพาความร้อนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ขนาดเซลล์ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) เพิ่มขึ้นทั้งในโฟมแบบยืดหยุ่น และโฟมแบบแข็ง

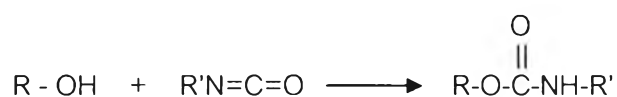
## 2.6 โฟมพอลิยูรีเทน [1]

พอลิยูรีเทน คือ พอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยหมู่ยูรีเทน ( $-\text{NHCOO}-$ ) ในสายโซ่โมเลกุล โดยพอลิยูรีเทนในทางการค้าสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาแบบรวมตัว (addition reaction) ระหว่างได- หรือพอลิไอโซไซยาเนต (di- or polyisocyanate) กับ ได- หรือพอลิไฮดรอกซิลแอลกอฮอล์ (di- or polyhydric alcohol) หรือสารประกอบอื่นๆ ที่มีไฮโดรเจนอะตอมที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาอยู่ในโครงสร้างโมเลกุล

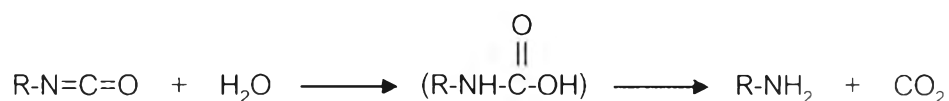
### 2.6.1 ปฏิกิริยาการเกิดโฟมพอลิยูรีเทน

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการสังเคราะห์โฟมพอลิยูรีเทนมีดังนี้

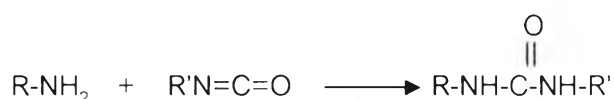
1. ปฏิกิริยาระหว่างไอโซไซยาเนตกับไฮดรอกซิลเกิดเป็นยูรีเทน



2. ปฏิกิริยาระหว่างไอโซไซยาเนตกับน้ำเกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และเอมีน



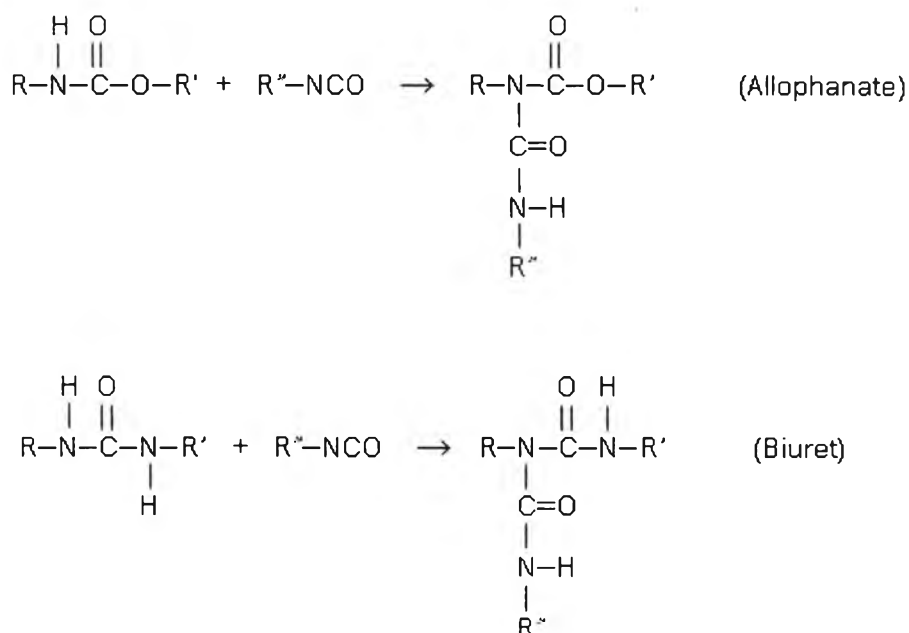
3. ปฏิกิริยาระหว่างเอมีนกับไอโซไซยาเนตเกิดเป็นพันธะยูเรีย



ถ้าไดไอโซไซยาเนตทำปฏิกิริยากับไดออลจะได้พอลิยูรีเทนแบบเชิงเส้น (linear polyurethane) และถ้าทำปฏิกิริยากับพอลิออลที่มีหมู่ไฮดรอกซิลมากกว่า 2 หมู่ จะได้พอลิยูรีเทนแบบกิ่งหรือแบบเชื่อมขวาง (branched or crosslinked polyurethane) นอกจากนี้ พอลิยูรีเทนแบบเชื่อมขวางยังสามารถเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างหมู่ยูรีเทนที่เกิดขึ้นกับหมู่ไอโซไซยาเนต ได้เป็นหมู่อัลโลฟาเนต (allophanate) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 หรือเกิดหมู่ไบยูเรต (biuret) เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า  $100^\circ\text{C}$  โดยจะเกิดหมู่ยูเรียขึ้นก่อนจากการที่หมู่เอมีนทำปฏิกิริยากับหมู่ไอโซไซยาเนต ซึ่งหมู่เอมีนอาจอยู่ในรูปของไดเอมีนที่ใช้เป็นสารเพิ่มขนาดสายโซ่ (chain extender) หรือจากปฏิกิริยา



ระหว่างน้ำกับไอโซไซยาเนต และเมื่อหมู่ยูเรียที่เกิดขึ้นทำปฏิกิริยากับหมู่ไอโซไซยาเนตจะได้ หมู่ไบยูเรต ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งทั้งหมู่อัลโลฟานาต และไบยูเรตจะเป็นส่วนที่ทำให้เกิดพอลิยูรีเทนแบบเชื่อมขวาง



รูปที่ 2.8 ปฏิกิริยาการเกิดอัลโลฟานาต และไบยูเรต

## 2.6.2 ประเภทของโฟมพอลิยูรีเทน [2,4]

โฟมพอลิยูรีเทน (polyurethane foam) เป็นโฟมที่สามารถประยุกต์ในงานต่าง ๆ ได้หลากหลาย และมีปริมาณการใช้ที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากโฟมประเภทนี้ผลิตได้หลายชนิดคือ ชนิดยืดหยุ่น (flexible) ชนิดแข็ง (rigid) และชนิดกึ่งแข็ง (semi-rigid) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับภาวะของการเตรียม องค์ประกอบ รวมทั้งอัตราส่วนขององค์ประกอบที่ใช้ สำหรับการใช้งานของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่นนั้น ได้แก่ อุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ เบาะรถยนต์ วัสดุกันกระแทก บรรจุภัณฑ์ ผนังรองเท้า และอุตสาหกรรมสิ่งทอ ในขณะที่โฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งจะนิยมใช้ในงานก่อสร้าง ฉนวนความร้อน ใช้ทำเฟอร์นิเจอร์แทนไม้ กระดานโต้คลื่น และส่วนประกอบของเรือ เป็นต้น

โฟมพอลิยูรีเทนแบ่งได้เป็น 3 ประเภทตามความหนาแน่น (ตารางที่ 2.4) ดังนี้คือ

- 1) โฟมพอลิยูรีเทนยืดหยุ่นความหนาแน่นต่ำ โฟมประเภทนี้มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 10-80 กก./ลบม. และมีโครงสร้างเป็นแบบเซลล์เปิดที่มีการเชื่อมขวางเล็กน้อย ทำให้อากาศสามารถแพร่ผ่านได้สะดวก และจากการที่โฟมชนิดนี้มีสมบัติความยืดหยุ่น และการคืนตัวที่ดี จึงนิยมใช้ผลิตเป็นแผ่นกันกระแทก
- 2) โฟมพอลิยูรีเทนแข็งความหนาแน่นต่ำ โฟมประเภทนี้มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 30-80 กก./ลบม. และมีโครงสร้างเป็นแบบเซลล์ปิดที่มีการเชื่อมขวางสูง ทำให้อากาศไม่สามารถแพร่ผ่านได้สะดวก จึงมีสมบัติเป็นฉนวนความร้อนที่ดีมาก ดังนั้นโฟมพอลิยูรีเทนประเภทนี้จึงนิยมใช้งานเป็นวัสดุฉนวนความร้อน
- 3) โฟมพอลิยูรีเทนยืดหยุ่นความหนาแน่นสูง โฟมประเภทนี้มีความหนาแน่นมากกว่า 100 กก./ลบม. และยังสามารถแบ่งย่อยอีกได้เป็น 2 ชนิดคือ self-skinning และ ไมโครเซลลูลาร์อีลาสโตเมอร์ โดยโฟมชนิด self-skinning มีโครงสร้างเป็นแบบเซลล์เปิด และมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 100-450 กก./ลบม. ในขณะที่ไมโครเซลลูลาร์อีลาสโตเมอร์มีโครงสร้างเป็นแบบเซลล์ปิดที่มีขนาดเล็กมองเห็นได้ไม่ชัดเจนด้วยตาเปล่า และมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 400-800 กก./ลบม. สำหรับการใช้งานของ self-skinning foams และไมโครเซลลูลาร์อีลาสโตเมอร์ส่วนใหญ่ใช้เป็นวัสดุกันกระแทก บังโคลนเรือ และ พื้นรองเท้า

ตารางที่ 2.4 ความหนาแน่น และ ปริมาณการใช้งานของโฟมทั้ง 3 ประเภท

Foam Type	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Approx. usage (millions of tones/year)
Low density flexible	10-80	2
Low density rigid	30-80	0.9
High density flexible		0.6
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Self-skinning foams</li> <li>● Microcellular elastomers</li> </ul>	100-450	
	400-800	

สำหรับโฟมพอลิยูรีเทนชนิดไมโครเซลลูลาร์อิลาสโตเมอร์ ได้มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง ในอุตสาหกรรมผลิตพื้นรองเท้า (อัตราการผลิตประมาณ 150,000 ตัน/ปี) เนื่องจากมีสมบัติเด่นหลายประการคือ มีความต้านทานการขัดถูสูง มีความทนทานและความยืดหยุ่นสูง น้ำหนักเบา มีสมบัติเป็นฉนวนความร้อนที่ดี และสามารถรับแรงกระแทกได้ดี นอกจากนี้ยังมีการยึดเกาะพื้นผิวที่เปียกได้ดี และมีความทนทานต่อน้ำมันปิโตรเลียมและตัวทำละลายต่างๆ ได้ดี

ในการผลิตพื้นรองเท้า และแผ่นรองเท้าจากพอลิยูรีเทนชนิดไมโครเซลลูลาร์อิลาสโตเมอร์ อาจผลิตด้วยการเทพอลิยูรีเทนที่เกิดจากการผสมลงในโมลด์เปิด หรือการฉีดลงในโมลด์ปิด ซึ่งการยึดติดระหว่างพื้นรองเท้ากับส่วนบนของรองเท้า (shoe uppers) สามารถผลิตจากแม่พิมพ์โดยตรงของพื้นรองเท้ากับส่วนบนของรองเท้าโดยไม่ต้องใช้สารยึดติดหรือการเย็บ ทำให้เป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมรองเท้าเป็นอย่างมาก

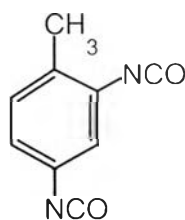
### 2.6.3 สารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์โฟมพอลิยูรีเทน [2-5]

#### 1) ไอโซไซยาเนต (isocyanates)

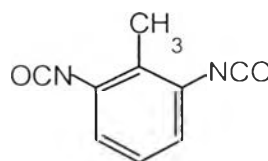
วิธีหนึ่งที่ทำให้พอลิยูรีเทนมีสมบัติแตกต่างกัน คือ การเลือกใช้ไอโซไซยาเนตต่างชนิดกัน ซึ่งจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลแตกต่างกัน ไอโซไซยาเนตที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์โฟมพอลิยูรีเทน ได้แก่ ไดฟีนิลมีเทนไดไอโซไซยาเนต (diphenylmethane diisocyanate : MDI) และโทลูอินไดไอโซไซยาเนต (toluene diisocyanate: TDI) ซึ่งอาจใช้เป็นของผสมระหว่าง 2,4'- และ 2,6'-TDI หรือใช้ 2,4'-TDI อย่างเดียวก็ได้ โดย TDI ใช้ทำได้ทั้งโฟมชนิดยืดหยุ่นและโฟมชนิดแข็ง แต่เนื่องจาก TDI เป็นพิษ จึงเปลี่ยนมาใช้พอลิเมอร์ MDI แทน

#### 1.1 TDI

TDI มีสถานะเป็นของเหลวระเหยง่าย และมีความเป็นพิษต่อระบบทางเดินหายใจ โดย TDI ที่ผลิตทางการค้ามี 2 ประเภท คือ TDI 80/20 และ TDI 60/40 ซึ่งตัวเลขที่ตามหลังแสดงอัตราส่วนร้อยละของผสมของ 2,4 และ 2,6-isomer ตามลำดับ ดังสูตรโครงสร้างต่อไปนี้



2,4-toluene diisocyanate

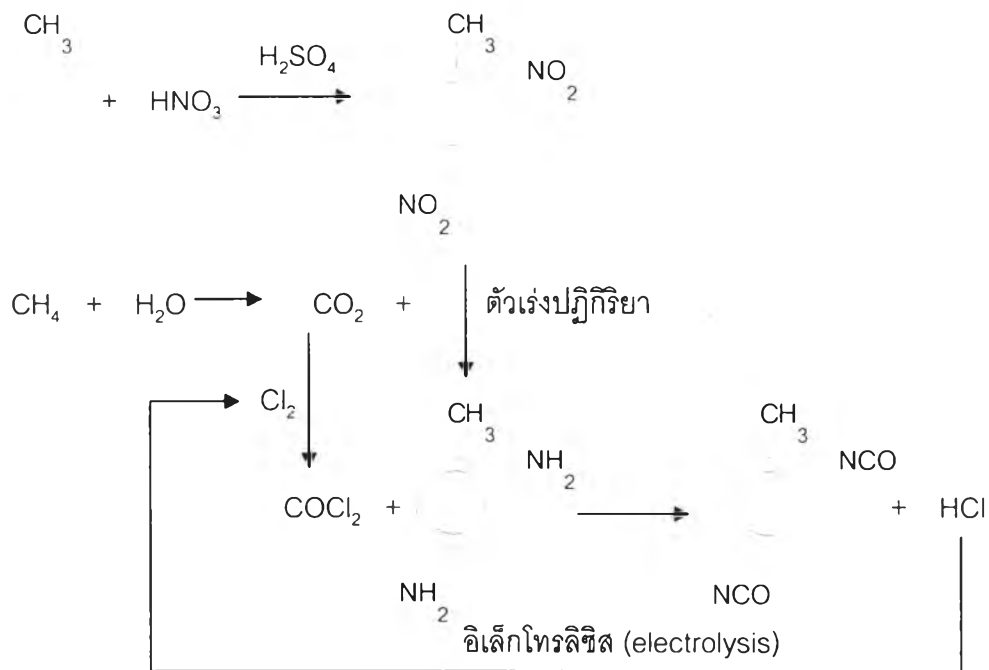


2,6-toluene diisocyanate

TDI-ไอโซเมอร์ที่ใช้ส่วนมากเป็น TDI 80/20 (TDI-80) และที่ใช้ TDI 60/40 (TDI-60) มีเป็นส่วนน้อย แต่ที่จำหน่ายในรูป TDI บริสุทธิ์ (TDI-100) ก็มีอยู่บ้าง การใช้ TDI ควรกระทำในภาวะเฉื่อยหรือภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนเพื่อป้องกันการสัมผัสกับอากาศ เพราะถ้า TDI สัมผัสกับอากาศจะตกตะกอนและจับตัวเป็นผลึก อุณหภูมิที่เก็บควรอยู่ที่ประมาณ 21-30°C

TDI สังเคราะห์ได้จากโทลูอินโดยกระบวนการไนเตรชัน (nitration) รีดักชัน (reduction) และฟอสจีนเนชัน (phosgenation) โดย TDI 80/20 จะผลิตโดยผ่านกระบวนการไนเตรชัน 2 ครั้ง ติดต่อกันจากนั้นทำการรีดักชันเพื่อให้ได้เอมีน จากนั้นตามด้วยกระบวนการฟอสจีนเนชันเพื่อให้ได้ไดไอโซไซยานาต ซึ่งกระบวนการผลิตแสดงได้ดังรูปที่ 2.9

ส่วน TDI 60/40 จะผ่านกระบวนการไนเตรชัน 1 ครั้ง จากนั้นผ่านกระบวนการเกิดผลึก (crystallization) ทำให้ออร์โธไนโตรโทลูอินบริสุทธิ์ (pure *o*-nitrotoluene) หรือพาราไนโตรโทลูอินบริสุทธิ์ (pure *p*-nitrotoluene) แล้วจึงผ่านกระบวนการไนเตรชัน รีดักชัน และฟอสจีนเนชัน ตามลำดับ โดยที่อุณหภูมิห้อง 2,4-TDI จะมีความว่องไวต่อปฏิกิริยามากกว่า 2,6-TDI เนื่องจากผลของหมู่แทนที่ (steric hindrance effect) แต่ที่อุณหภูมิใกล้ 100°C ผลของหมู่แทนที่ จะไม่มีผลต่อความว่องไวของปฏิกิริยา ทำให้ไอโซเมอร์ทั้ง 2 มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาเท่ากัน



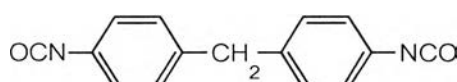
รูปที่ 2.9 กระบวนการผลิต TDI 80/20

TDI มีความเป็นพิษ โดยไอระเหยและฝุ่นละอองของ TDI ทำให้เกิดความระคายเคืองต่อเยื่อปอดทางเดินหายใจตอนบนและตอนล่าง แม้จะได้รับไอในช่วงเวลาสั้นๆ ก็ตาม ส่งผลทำให้เกิดการระคายเคือง หายใจไม่ออก เกิดอาการแสบคอ ไอ หรือเป็นแผลถาวรในปอด นอกจากนี้ยังทำให้เกิดอาการอาเจียน และเจ็บช่องท้อง รวมทั้งทำให้ปอดทำงานผิดปกติ ถ้ามีการสัมผัสกับ TDI นานๆ จะทำให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนัง เกิดการเป็นผื่นแดง บวม เป็นแผลหรือไหม้ นอกจากนี้ ไอของ TDI ถึงแม้มีความเข้มข้นต่ำ แต่ถ้าโดนจะทำให้ น้ำตาไหลและแสบตาเล็กน้อย แต่ถ้าโดนสารที่มีความเข้มข้นสูงจะทำให้ปวดและแสบตาอย่างมาก ถ้า TDI เข้าตาจะทำให้ระคายเคืองอย่างรุนแรงและทำให้ตาอักเสบเรื้อรังได้

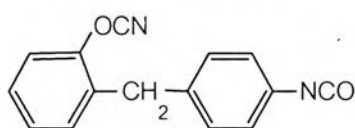
## 1.2 MDI

โดยทั่วไป MDI จะมี 2 ประเภท คือ MDI บริสุทธิ์ และพอลิเมอร์ MDI (PMDI) ซึ่งส่วนใหญ่ MDI บริสุทธิ์จะเป็น 4,4'-MDI และมี 2,4'-MDI ผสมอยู่เล็กน้อย เพื่อช่วยลดจุดหลอมเหลว ดังแสดงในรูปที่ 2.10

4,4' MDI



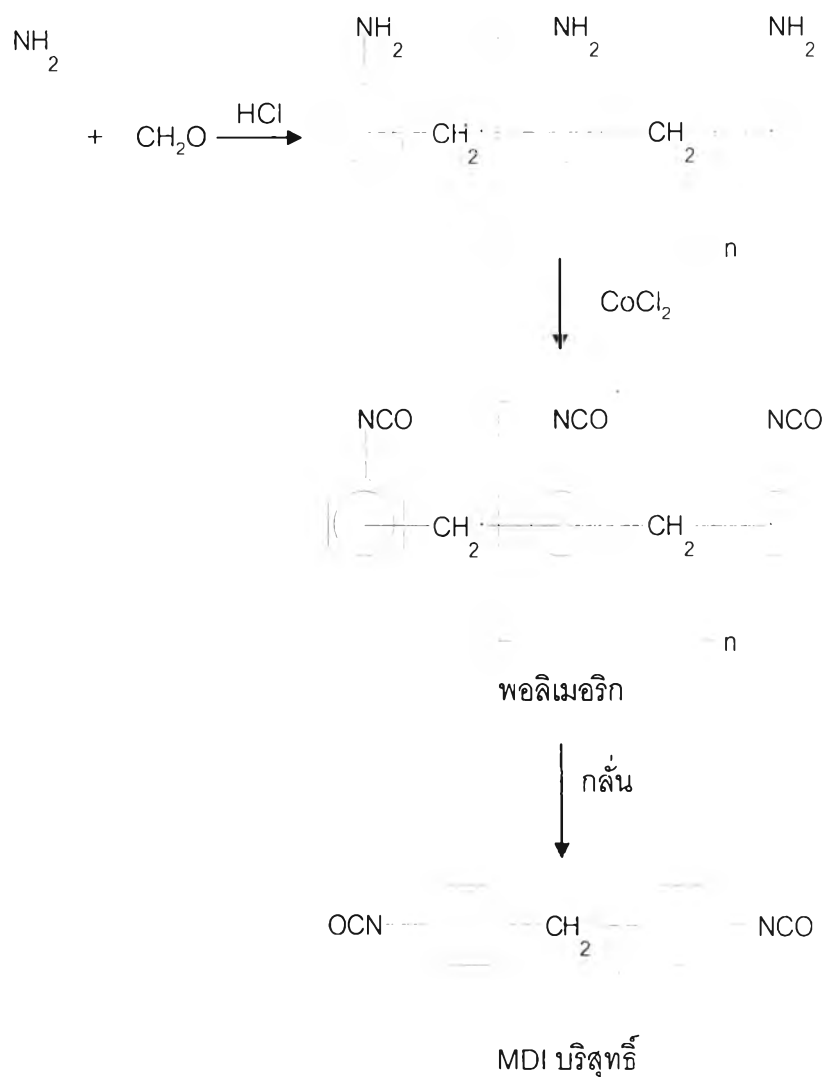
2,4' MDI



รูปที่ 2.10 โครงสร้างทางเคมีของ 4,4'-MDI และ 2,4'-MDI

MDI บริสุทธิ์ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเป็นของแข็งสีขาวถึงสีเหลืองอ่อน มีจุดหลอมเหลวที่ประมาณ 38°C ผลิตได้ยาก และมีราคาแพง เมื่อเก็บที่อุณหภูมิสูงกว่า 40°C อาจทำให้เกิดเป็นไดเมอร์ (dimer) และกลายเป็นของเหลวได้ ด้วยเหตุผลดังกล่าวทำให้มีการพัฒนากระบวนการผลิตเพื่อที่จะตัดแปร MDI บริสุทธิ์ ให้เป็นพอลิเมอร์ MDI ซึ่งมีลักษณะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิใช้งานปกติ และลดการเปลี่ยนเป็นไดเมอร์

พอลิเมอร์ MDI สังเคราะห์ได้จากฟอร์มัลดีไฮด์ อะนิลีน และฟอสจีน ซึ่งกระบวนการผลิตพอลิเมอร์ MDI แสดงไว้ในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 กระบวนการผลิตพอลิเมอร์ MDI และ MDI บริสุทธิ์

## 2) พอลิออล (polyols)

ทำหน้าที่ทำให้โพลีที่ผลิตได้มีโครงสร้างเชื่อมโยงกันเป็นหมู่ยูรีเทน โดยทั่วไปจะมี 2 ชนิด คือพอลิอีเทอร์พอลิออล (polyether polyol) และพอลิเอสเทอร์พอลิออล (polyester polyol) ซึ่งลักษณะโพลีที่ผลิตได้จะขึ้นอยู่กับการใช้พอลิออลแต่ละชนิดกล่าวคือ ขนาด และความยืดหยุ่น ตลอดจนจำนวนหมู่ไฮดรอกซิลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต่อ 1 โมเลกุลของพอลิออลจะเป็น

ตัวควบคุมดัดกรีของการเชื่อมขวาง หรือความแข็ง (stiffness) ของโฟมที่ผลิตได้ นั่นคือโฟมที่ยืดหยุ่นจะมีดัดกรีของการเชื่อมขวางต่ำและเตรียมจากพอลิออลที่มีน้ำหนักโมเลกุลระหว่าง 1,000 - 6,500 มีฟังก์ชันนัลลิตี 2.0 - 3.0 ในขณะที่โฟมชนิดแข็งจะมีดัดกรีของการเชื่อมขวางสูง ซึ่งจะเตรียมจากพอลิออลที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า คือระหว่าง 150 - 1,600 และมีฟังก์ชันนัลลิตีระหว่าง 3.0 - 8.0 เพื่อลดความยาวของสายโซ่โมเลกุล และมีการเชื่อมขวางที่สูงทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งแรงมากขึ้น ซึ่งแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ลักษณะของพอลิออลที่ใช้ในการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนประเภทต่างๆ

ลักษณะของพอลิออล	โฟมยืดหยุ่น และ elastomers	โฟมแข็ง
น้ำหนักโมเลกุล	1,000-6,500	150-1,600
ฟังก์ชันนัลลิตี	2.0-3.0	3.0-8.0
ค่าไฮดรอกซิล (mg KOH/g)	28-160	250-1,000

ค่าไฮดรอกซิลหรือไฮดรอกซิลนัมเบอร์ (hydroxyl value, OHV หรือ hydroxyl number) เป็นค่าซึ่งใช้วัดความเข้มข้นของหมู่ไฮดรอกซิลที่ว่องไวต่อปฏิกิริยากับไอโซไซยาเนตต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของพอลิออล มีหน่วยเป็น mg KOH/g โดยปกติพอลิออลที่มีจำหน่ายในท้องตลาดจะแสดงค่าไฮดรอกซิลไว้เพื่ออำนวยความสะดวกในการคำนวณในการออกสูตรโฟมของลูกค้า สำหรับค่าไฮดรอกซิลสามารถคำนวณได้จาก

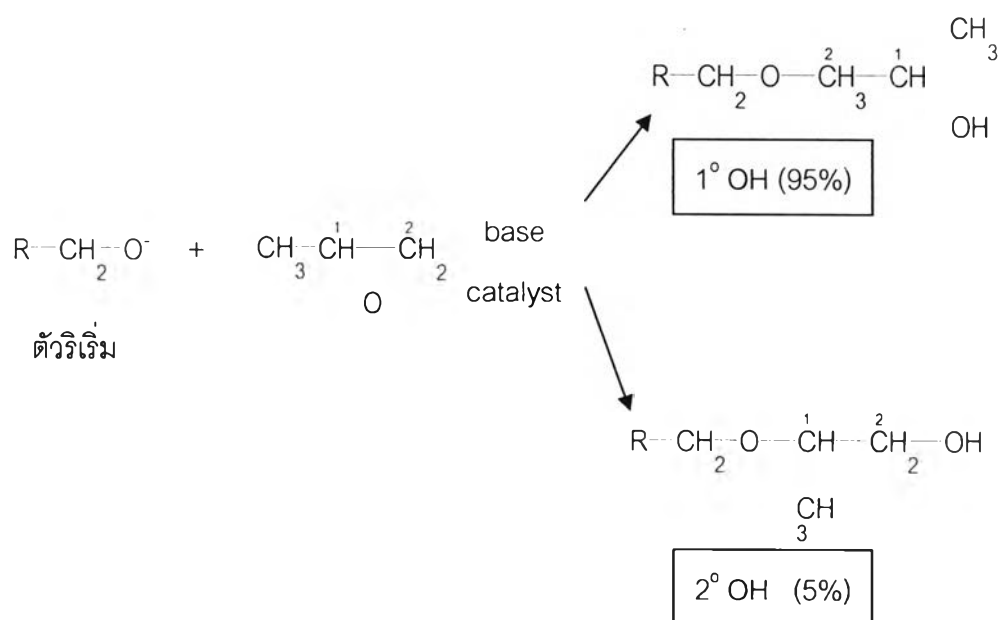
$$\begin{aligned} \text{Hydroxyl value (OHV)} &= \frac{56.1 \times \text{functionality} \times 1000}{\text{molecular weight}} \\ &= \frac{56.1 \times 1000}{\text{equivalent weight}} \end{aligned}$$

## 2.1 พอลิอีเทอร์พอลิออล

ประมาณ 90% ของโฟมพอลิยูรีเทนเตรียมได้จากพอลิอีเทอร์พอลิออล เนื่องจากมีราคาถูกกว่าพอลิเอสเทอร์พอลิออล มีความเหนียวต่ำ ง่ายต่อการควบคุม ได้โฟมที่มีสมบัติการคืนตัวที่ดี และทนต่อการไฮโดรลิซิส (hydrolysis) ซึ่งส่วนใหญ่สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาเปิดวง (ring-



opening reaction) ของอัลคิลีนออกไซด์ (alkylene oxide) เช่น โพรพิลีนออกไซด์ (propylene oxide) หรือเอทิลีน-โพรพิลีนออกไซด์โคพอลิเมอร์ (ethylene-propylene oxide copolymer) โดยใช้ตัวริเริ่ม (initiator) ประเภทพอลิฟังก์ชันนัลแอลกอฮอล์หรือเอมีน ดังปฏิกิริยาในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ปฏิกิริยาเปิดวงโพรพิลีนออกไซด์ที่ใช้ผลิตพอลิอีเทอร์พอลิแอลกอฮอล์

ในส่วน of พอลิอีเทอร์พอลิแอลกอฮอล์สำหรับการทำโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งจะมี equivalent weight ที่ต่ำกว่าชนิดที่ใช้ทำโฟมพอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่นโดยพอลิอีเทอร์พอลิแอลกอฮอล์ที่เตรียมจากตัวริเริ่มประเภทเอมีน (amine) จะว่องไวต่อปฏิกิริยากับไอโซไซยาเนตมากกว่าที่เตรียมจากประเภทแอลกอฮอล์ โดยพอลิอีเทอร์พอลิแอลกอฮอล์สำหรับโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งที่เตรียมจากตัวริเริ่มต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2.6

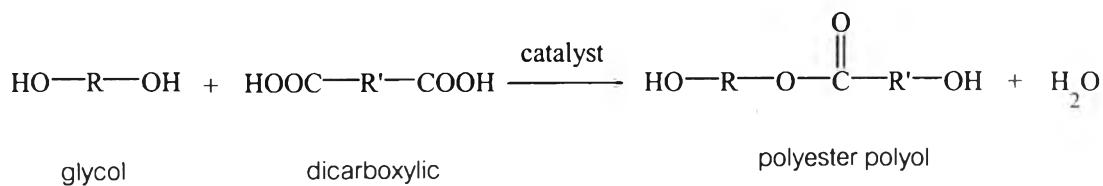
ตารางที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวริเริ่มปฏิกิริยาทั้ง 2 ประเภทและฟังก์ชันนัลลิตี้

Alcohols	Amines	Functionality
Water		2
Ethylene glycol		2
Diethylene glycol		2
Glycerol	Triethanolamine	3
Trimethylolpropane		3
Pentaerythritol	Toluene diamine	4
	Ethylene diamine	4
	4,4'-diaminodiphenylmethane	4
	Diethylene triamine	5
Sorbitol		6
Sucrose		8

## 2.2 พอลิเอสเทอร์พอลิออล

พอลิเอสเทอร์พอลิออลมีความว่องไวต่อปฏิกิริยามากกว่า และให้โฟมที่มีสมบัติเชิงกลดีกว่าพอลิอีเทอร์พอลิออล แต่จะเปลี่ยนสีเป็นสีเหลืองได้ง่ายเมื่อถูกแสงแดด นอกจากนี้ ยังมีความหนืดมาก ยากต่อการใช้งาน และพอลิเอสเทอร์พอลิออลมีราคาแพงกว่า ดังนั้นพอลิเอสเทอร์พอลิออลจึงนิยมใช้ในงานที่ต้องการสมบัติที่ดีมากเท่านั้น เช่น งานทำเบาะรถยนต์ และงานปรับปรุงสมบัติความต้านทานความร้อนของโฟมชนิดแข็งบางประเภท เป็นต้น และโฟมยืดหยุ่นที่ทำจากพอลิเอสเทอร์พอลิออลและ TDI จะมีค่าการดึงยืด (elongation) ที่สูง และมีความทนทานต่อสารซักแห้ง (dry cleaning solvent) ได้ดี โดยตารางที่ 2.7 แสดงสมบัติและการใช้งานของพอลิเอสเทอร์พอลิออลในการผลิตโฟมพอลิยูรีเทนชนิดต่างๆ

พอลิเอสเทอร์พอลิออลเตรียมได้จากปฏิกิริยาควบแน่น (condensation reaction) ระหว่างไกลคอล (glycol) กับไดคาร์บอกซิลิกแอซิด (di-carboxylic acid) ดังรูปที่ 2.13 เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน (esterification) จึงทำให้เกิดน้ำในปฏิกิริยาถึง 15% ดังนั้น ผลผลิตที่ได้มากที่สุด คือ 85% โดยน้ำหนักของวัตถุดิบที่ใช้ ซึ่งต่างจากพอลิอีเทอร์พอลิออลที่ได้ผลผลิต 100% ด้วยเหตุนี้ จึงทำให้พอลิเอสเทอร์พอลิออลมีราคาแพงกว่าพอลิอีเทอร์พอลิออล



รูปที่ 2.13 ปฏิกิริยาการเตรียมพอลิเอสเตอร์พอลิออล

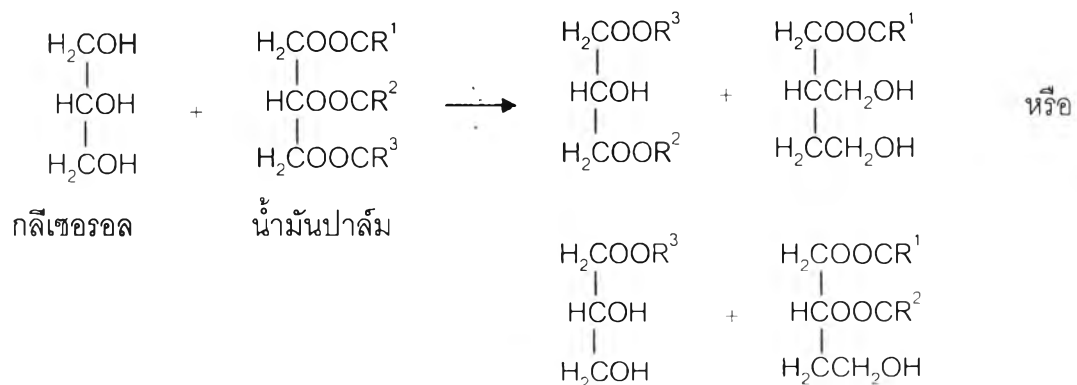
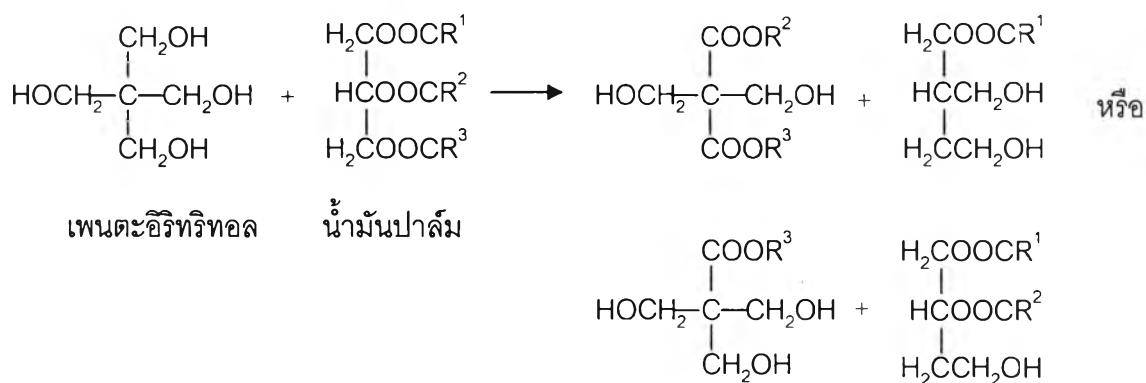
ตารางที่ 2.7 สมบัติและการใช้งานของพอลิเอสเตอร์พอลิออลในการผลิตโฟมพอลิยูรีเทนชนิดต่างๆ

การใช้งาน	ชนิดของพอลิ-เอสเตอร์พอลิออล	ค่าไฮดรอกซิล (mg KOH/g)	ความหนืด (mPa s ที่ 25°C)	ค่าความเป็นกรด (mg KOH/g)
โฟมยืดหยุ่น	สายโซ่ตรง	45-60	10,000-20,000	มากกว่า 2.0
โฟมยืดหยุ่น ชนิดความหนาแน่นต่ำ	มีกิ่ง	60-70	15,000-20,000	มากกว่า 5.0
โฟมแข็ง	มีกิ่งมาก	200	20,000	มากกว่า 1.0
ยาง	สายโซ่ตรง	50-60	3,000-10,000	มากกว่า 1.0

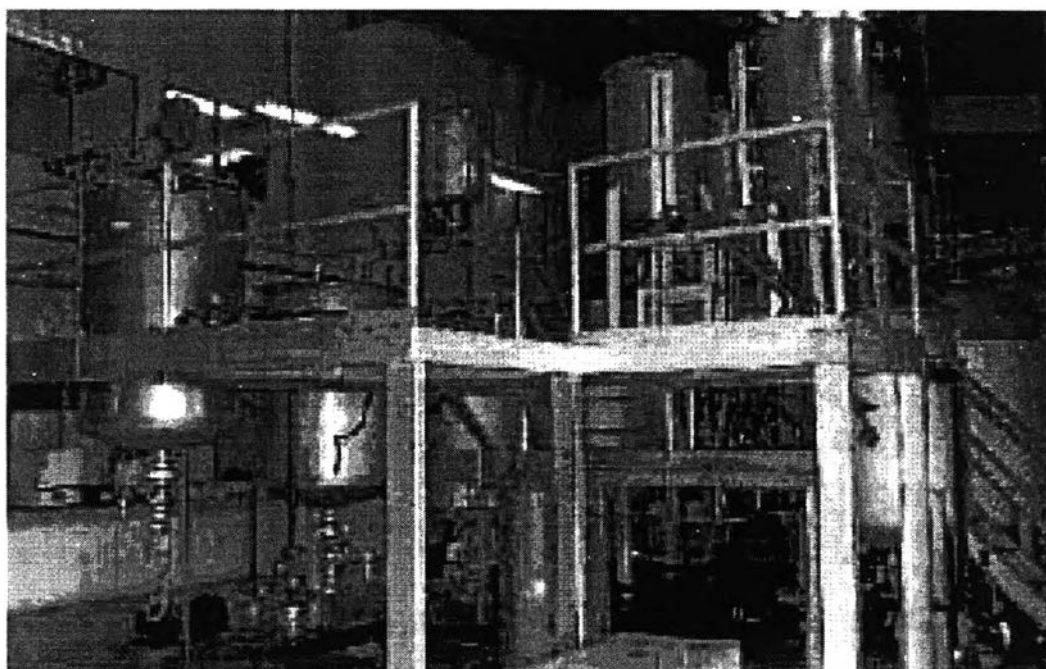
สำหรับการผลิตพื้นรองเท้าจากโฟมพอลิยูรีเทนชนิดไมโครเซลลูลาร์อีลาสโตเมอร์ในยุโรป จะนิยมใช้พอลิเอสเตอร์พอลิออลมากกว่าพอลิอีเทอร์พอลิออล เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความต้านทานการขัดถู (abrasion resistance) ความต้านทานต่อการฉีกขาด (tear strength) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (percentage strain at break) สูงกว่า

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้พอลิเอสเตอร์พอลิออล ในการเตรียมพอลิยูรีเทนชนิดไมโครเซลลู-  
ลาร์อีลาสโตเมอร์ โดยพอลิออลที่นำมาใช้ได้มาจาก 2 แหล่งคือ จากการสังเคราะห์เองโดยการนำ  
น้ำมันปาล์มมาดัดแปร และจากสถาบันน้ำมันปาล์มของประเทศมาเลเซีย

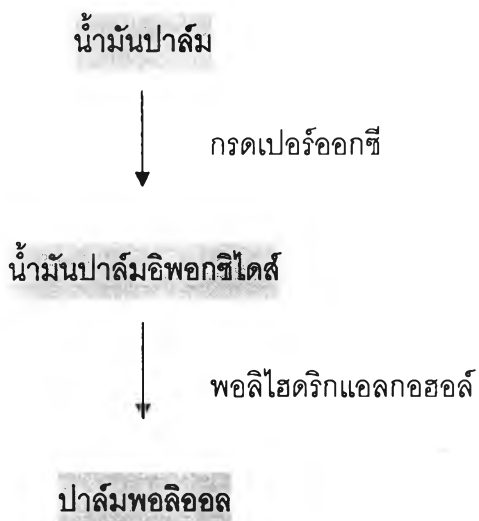
สำหรับพอลิเอสเตอร์พอลิออลที่เตรียมขึ้นในงานวิจัยนี้ ได้จากปฏิกิริยาระหว่างน้ำมัน  
ปาล์ม และพอลิออลซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ เพนตะอริทริทอล และกลีเซอรอล ได้เป็นสารประกอบเอส-  
เทอร์พอลิออล ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังนี้



สำหรับพอลิเอสเทอร์พอลิออลที่ได้รับความนิยมจาก สถาบันน้ำมันปาล์มของ ประเทศมาเลเซีย เริ่มต้นมาจากการค้นคว้าการผลิตน้ำมันปาล์มอีพอกไซด์ (epoxidized palm oil) ในปีค.ศ. 1987 โดย Salmiah และคณะ จากนั้นน้ำมันปาล์มอีพอกไซด์ก็ได้มีการพัฒนาให้เป็น พอลิออลโดย Hazimah และคณะ ในปีค.ศ. 1993 ต่อมาในปีค.ศ. 1994 บริษัทท้องถิ่น InterMed Sdn. Bhd. ได้ลงนามข้อตกลงในการผลิตน้ำมันปาล์มอีพอกไซด์ ปาล์มพอลิออล และผลิตภัณฑ์ อื่นๆ ของพอลิออล ซึ่งต่อมาได้มีการจัดสิทธิบัตรการผลิตปาล์มพอลิออลโดย Salmiah และคณะ ในปีค.ศ. 1995 และในปีค.ศ. 2000 ได้เกิดโรงงานแบบทดลอง (pilot plant) ดังแสดงในรูปที่ 2.14

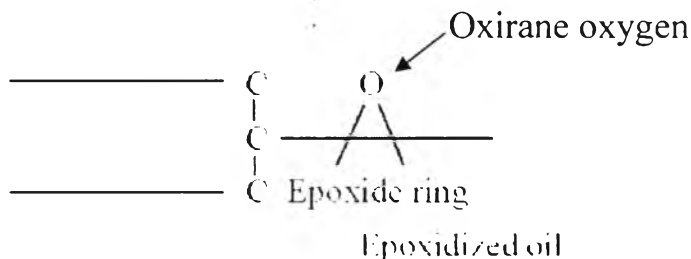


รูปที่ 2.14 โรงงานแบบทดลองในการผลิตปาล์มพอลิออล

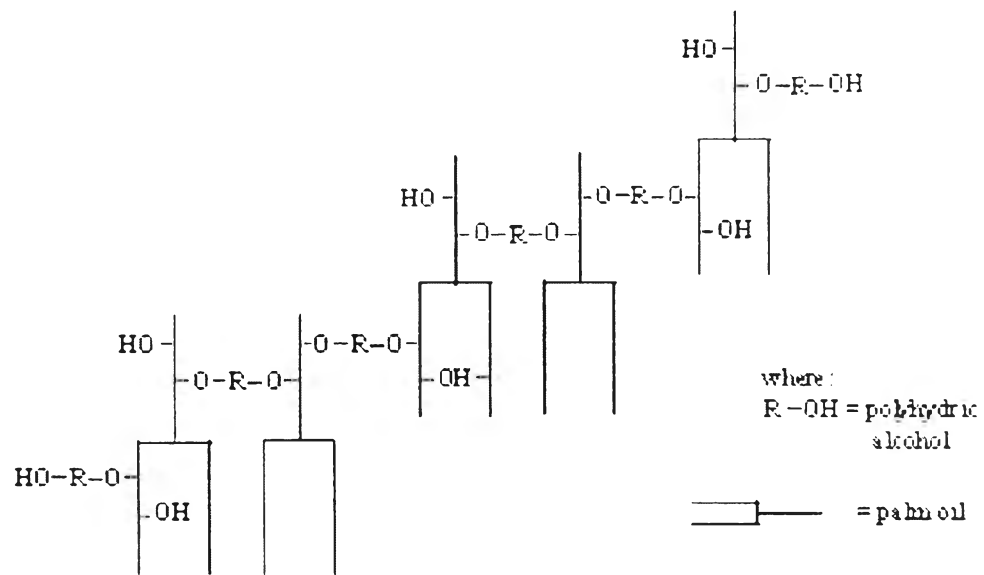


รูปที่ 2.15 ขั้นตอนการผลิตพอลิมอล

รูปที่ 2.15 แสดงขั้นตอนการผลิตพอลิมอลโดยขั้นแรกน้ำมันปาล์มที่มีพันธะไม่อิ่มตัว จะถูกอีพอกไซด์ด้วยกรดเปอร์ออกซี ซึ่งได้แก่ กรดเปอร์อะซิติก และกรดเปอร์ฟอร์มิก เป็นต้น จนได้น้ำมันปาล์มอีพอกไซด์ ในขั้นตอนนี้มีการตรวจหาปริมาณออกซิเจนออกซิเจน (oxirane oxygen content) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้สำคัญที่ใช้วัดปริมาณของออกซิเจนที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา โดยสันนิษฐานว่าพันธะไม่อิ่มตัวทั้งหมดของน้ำมันปาล์มถูกเปลี่ยน เป็นวงอีพอกไซด์ (epoxide ring) ดังแสดงในรูปที่ 2.16 และเนื่องจากวงอีพอกไซด์มีความว่องไวต่อปฏิกิริยา จึงสามารถถูกเปิดวงได้ด้วยพอลิไฮดรอกซีแอลกอฮอล์ เช่น กลีเซอรอล เกิดเป็นพอลิเอสเตอร์พอลิอล โดยจำนวนหมู่ไฮดรอกซิลของพอลิเอสเตอร์พอลิอล ขึ้นกับชนิดของพอลิไฮดรอกซีแอลกอฮอล์ และอัตราส่วนโดยโมลของพอลิไฮดรอกซีแอลกอฮอล์ต่อโมลของวงอีพอกไซด์ สำหรับโครงสร้างที่น่าจะเป็นของพอลิมอลแสดงไว้ในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.16 น้ำมันปาล์มอีพอกไซด์



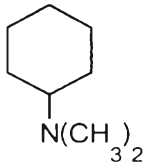
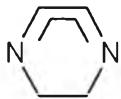
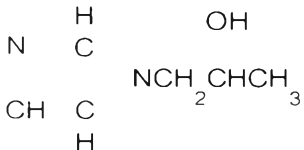
รูปที่ 2.17 โครงสร้างที่นำจะเป็นของพอลิเมอร์พอลิออล

### 3) สารเติมแต่ง (additives)

ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ที่นิยมใช้มี 2 ชนิด คือ

1. เทอร์เชียรีเอมีน (tertiary amine): เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางทำให้เกิดสมดุลระหว่างการเกิดเจลกับปฏิกิริยาการเกิดฟอง ทำให้สามารถควบคุมการผลิตโฟมได้ง่าย แต่ข้อเสียของเอมีน คือ จะมีกลิ่นเหลืออยู่ ทำให้มีข้อจำกัดในการใช้งานโฟม ซึ่งหลีกเลี่ยงได้โดยการใช้อะมีนที่ระเหยได้ ตัวอย่างของตัวเร่งปฏิกิริยาเทอร์เชียรีเอมีนแสดงไว้ในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ตัวอย่างของตัวเร่งปฏิกิริยาเทอร์เชียรีเอมีน

ตัวเร่งปฏิกิริยา	การใช้งาน
1. N,N-ไดเมทิลอะมิโนเอทานอล (N,N-dimethylaminoethanol) $(\text{CH}_3)_2\text{NCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$	ราคาถูก กลิ่นไม่รุนแรง ใช้ในโฟมยืดหยุ่นที่ใช้พอลิอีเทอร์เป็นพอลิออล
2. N,N-ไดเมทิลไซโคลเฮกซิลลามีน (N,N-dimethylcyclohexylamine) 	เป็นของเหลวที่มีกลิ่นรุนแรง ใช้ทำโฟมแข็ง โฟมยืดหยุ่น และโฟมกึ่งแข็งบางชนิด ที่ใช้พอลิเอสเทอร์เป็นพอลิออล
3. Bis- (2-ไดเมทิลอะมิโนเอทิล)อีเทอร์ Bis- (2-dimethylaminoethyl)ether $(\text{CH}_3)_2\text{NCH}_2\text{CH}_2\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{N}(\text{CH}_3)_2$	มีกลิ่นไม่รุนแรง ใช้ทำโฟมยืดหยุ่น
4. ไดอะมิโนไบไซโคลออกเทน diaminobicyclooctane (DABCO) 	เป็นของแข็งที่ละลายได้ในน้ำ ไกลคอล และพอลิอีเทอร์
5. 1-(2-ไฮดรอกซิลโพรพิล)อิมิดาโซล 1-(2-hydroxypropyl)imidazole 	ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในโฟมที่ใช้พอลิอีเทอร์เป็นพอลิออลและโฟมแข็งชนิดความหนาแน่นต่ำ



2. โลหะอินทรีย์ (organo-metallic): ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทนี้ที่นิยมใช้ ได้แก่ สแตนนัสออกโทเอท (stannous octoate) ซึ่งเป็นสารประกอบดีบุก และไดบิวทิลทินไดลอรูเรท (dibutyltin dilaurate) โดยจะทำหน้าที่คล้ายลูอิสแอซิด (Lewis acid) ซึ่งจะเข้าทำปฏิกิริยากับส่วนที่เป็นเบสของสารไอโซไซยานาตและพอลิออล

#### สารลดแรงตึงผิว (surfactant)

สารลดแรงตึงผิวเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในกระบวนการสังเคราะห์โฟมพอลิยูรีเทน โดยทำหน้าที่ช่วยในการเกิดโฟม ช่วยลดแรงตึงผิว ช่วยควบคุมขนาดเซลล์ของโฟมและความสม่ำเสมอของเซลล์ และควบคุมปริมาณเซลล์ปิด จากการทำให้ฟองแก๊สเสถียร และช่วยลดความเข้มข้นของความเค็มที่ผนังเซลล์

สารลดแรงตึงผิวที่นิยมใช้ คือ ออกาโนซิลอกเซน (organosiloxanes) หรือสารลดแรงตึงผิวที่มีซิลิกอนเป็นองค์ประกอบ โดยสารลดแรงตึงผิวที่มีความสำคัญและมีการใช้งานมากจะเป็นประเภทพอลิอีเทอร์ซิลอกเซนที่สามารถละลายน้ำได้ ตัวอย่างเช่น พอลิไดเมทิลซิลอกเซน [poly(dimethyl siloxane), PMDS] และพอลิฟีนิลเมทิลซิลอกเซน [poly(phenyl siloxane)] เป็นต้น ในการสังเคราะห์โฟมพอลิยูรีเทนอาจใช้สารลดแรงตึงผิวมากกว่า 1 ชนิด ก็ได้ ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นสารอินทรีย์ที่ไม่มีประจุ (non-ionic)

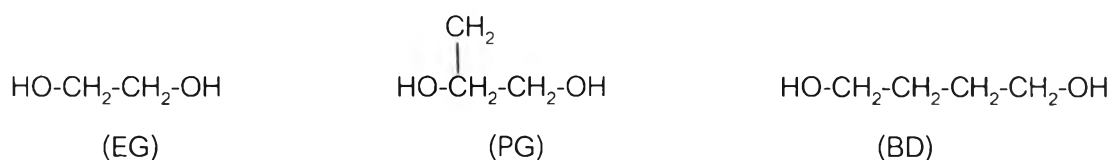
#### สารฟู (blowing agent)

สารฟู ทำหน้าที่ทำให้เกิดฟองหรือรูเล็กๆ ขึ้นในโครงสร้างของพลาสติก ตัวอย่างของสารฟู ได้แก่ น้ำ และคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (chlorofluorocarbon : CFCs) หรือที่เรียกว่า "ฟร็อน" (Freon) โดยน้ำจะทำปฏิกิริยากับไอโซไซยานาตเกิดเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา โดยทั่วไปอัตราส่วนระหว่างน้ำและพอลิออลจะแตกต่างกัน ขึ้นกับชนิดของพอลิออลที่ใช้ นั่นคืออัตราส่วนระหว่างน้ำและพอลิเอสเตอร์พอลิออล คือ 3-5 : 100 ในขณะที่อัตราส่วนระหว่างน้ำ และพอลิอีเทอร์พอลิออลจะเป็น 1.8-5 : 100 สำหรับ CFCs นั้นเป็นของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำและกลายเป็นไอได้โดยอาศัยปฏิกิริยาคายความร้อนระหว่างไอโซไซยานาตกับพอลิออล แต่เนื่องจากปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่เรียกว่า greenhouse effect ซึ่งเกิดจากการที่ฟร็อนไปทำลายชั้นโอโซนในบรรยากาศ ทำให้การผลิตโฟมพอลิยูรีเทนได้หันมาใช้สารฟูที่ไม่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบ เช่น สารไฮโดรคาร์บอน หรือไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (hydrofluorocarbon : HFCs) เป็นต้น ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว ไนโตรเฮลลูโลลาริอิลาสโตเมอร์ นิยมใช้ สารฟู CFM-11 หรือ เมทิลีนคลอไรด์ ปริมาณ 0 – 1.0 pbw (parts by weight) และน้ำปริมาณ 0.3 – 0.7 pbw

### เชนเอ็กซ์เทนเดอร์ (chain extenders)

เชนเอ็กซ์เทนเดอร์คือ พอลิเอทเธอร์ หรือพอลิเอมีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำและมีหมู่ฟังก์ชัน 2 หมู่ ซึ่งใช้ในพอลิยูรีเทนยืดหยุ่นเช่น โฟมยืดหยุ่น ไมโครเซลลูโลสอาร์อีลาสโตเมอร์ และ cast elastomer ตัวอย่างเชนเอ็กซ์เทนเดอร์ที่ใช้ได้แก่ เอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol, EG) 1,4-บิวเทนไดออล (1,4-butanediol) เอทิลีนไดเอมีน (ethylene diamine) และสารอื่น ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.9 โดยทั่วไปแล้ว ไมโครเซลลูโลสอาร์อีลาสโตเมอร์ นิยมใช้ 1,4-บิวเทนไดออล (1,4-butanediol, BD) หรือ เอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol) ปริมาณ 5 – 15 pbw

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้ เอทิลีนไกลคอล โพรพิลีนไกลคอล (propylene glycol, PG) และ 1,4-บิวเทนไดออล ซึ่งมีโครงสร้างเคมีดังรูปที่ 2.18

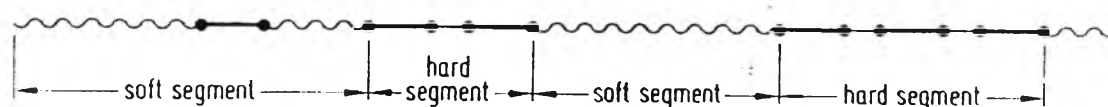






รูปที่ 2.18 โครงสร้างเคมีของ EG PG และ BD

ตารางที่ 2.9 เชนเอ็กซ์เทนเดอร์สำหรับโฟมพอลิยูรีเทน

Additive	Functionality	Mole weight	OH value (mg KOH/g)	Weight of diisocyanate (g per 100 g of required additive)	
				TDI	MDI
Ethylene glycol $\text{C}_2\text{H}_4(\text{OH})_2$	2	62.07	1801	280	401
Diethylene glycol $\text{O}(\text{C}_2\text{H}_4\text{OH})_2$	2	106.12	1057	164	235
Propylene glycol $\text{C}_3\text{H}_6(\text{OH})_2$	2	76.11	1474	229	329
Dipropylene glycol $\text{O}(\text{C}_3\text{H}_6\text{OH})_2$	2	134.18	836	130	186
1,4-Butane diol $\text{C}_4\text{H}_8(\text{OH})_2$	2	90.12	1245	193	278
Polypropylene glycol 400	2	400	280	43.5	62
<i>m</i> -Phenylene diamine $\text{C}_6\text{H}_4(\text{NH}_2)_2$	2	108.15	1037	161	231
Diethyl toluene diamine $\text{C}_6\text{H}_4\text{CH}_3(\text{C}_2\text{H}_5)_2(\text{NH}_2)_2$	2	178.27	629	97.7	140
Dimethylthio toluene diamine $\text{C}_6\text{H}_4\text{CH}_3(\text{SCH}_3)_2(\text{NH}_2)_2$	2	214.34	523	81.2	116

การใช้เซโนเอกซ์เทนเดอร์ทำให้โครงสร้างของพอลิยูรีเทนเกิดเป็น segment หรือ block copolymer ในสายโซ่หลัก โดยพอลิยูรีเทนที่เตรียมจากปฏิกิริยาระหว่างไดออลที่สายโซ่โมเลกุลยาวและไดไอโซไซยานต และใช้ไดออลที่สายโซ่โมเลกุลสั้นเป็นเซโนเอกซ์เทนเดอร์ จะมีโครงสร้างทางทฤษฎีดังรูปที่ 2.19 โดยไดออลที่มีสายโซ่ยาวจะเกิดเป็น soft segments ซึ่งเคลื่อนไหวได้ สลับอยู่กับส่วน hard segments ที่แข็งเคลื่อนไหวไม่ได้ ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างเซโนเอกซ์เทนเดอร์กับไดไอโซไซยานต ซึ่งส่วนที่เป็น hard segments จะช่วยเพิ่มสมบัติต่างๆ เช่น ความแข็งและค่ามอดุลัส เป็นต้น สำหรับในกรณีที่ไม่ได้ใส่เซโนเอกซ์เทนเดอร์ พอลิยูรีเทนที่สังเคราะห์ได้จะไม่มีโครงสร้างที่เป็น hard segment หรือ block copolymer ในสายโซ่หลักทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งต่ำ



-  = rest of long chain diol (high molecular weight)
-  = rest of the short chain diol (low molecular weight)
-  = rest of the diisocyanate
-  = urethane group

รูปที่ 2.19 โครงสร้างในสายโซ่หลักของ พอลิยูรีเทนที่เป็น segment

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Chian และคณะ [6] ได้หาแนวทางการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งจากน้ำมันปาล์ม โดยนำน้ำมันปาล์ม RBD (refined-bleached-deodorized palm oil) มาผ่านกระบวนการ derivatisation ซึ่งเป็นเทคนิคของ Nanyang Technological University มาเปลี่ยนให้เป็นสารพอลิออล โดยกระบวนการนี้เป็นเทคนิคที่ไม่ได้เปิดเผย ซึ่งเมื่อให้สารประกอบพอลิออลทำปฏิกิริยากับพอลิเมอริก MDI โดยมีน้ำมันซิลิโคนเป็นสารลดแรงตึงผิว *n*-dibutyl-tin-dilaurate เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารฟูจะได้โฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งที่มีความหนาแน่นมากกว่า  $200 \text{ kg/m}^3$  และมีความทนแรงกดสูงกว่า  $1 \text{ MPa}$

Zhang และคณะ [7] ได้เตรียมโฟมพอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่น (flexible polyurethane foam) โดยการใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดกราฟท์โคพอลิเมอร์ซึ่งประกอบด้วยพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (poly-dimethylsiloxane) เป็นสายโซ่หลัก และพอลิเอทิลีนออกไซด์/โพรพิลีนออกไซด์โคพอลิเมอร์เป็นโซ่กิ่ง เพื่อทำให้เซลล์ที่เกิดในโฟมเสถียร จากการทดลองพบว่าสารลดแรงตึงผิวที่มีปริมาณซิลิโคนสูงกว่าจะมีแรงตึงผิวต่ำกว่า และช่วยเพิ่มปริมาณฟองอากาศในระหว่างการผสม ซึ่งฟองอากาศเหล่านี้เป็นจุดเริ่มต้นที่ทำให้เซลล์ของโฟมแผ่ขยายออกไป ด้วยเหตุนี้ โฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมจากสารลดแรงตึงผิวที่มีปริมาณซิลิโคนสูงกว่าจะมีฟองที่เล็กกว่า

Andrew และคณะ [8] ได้เตรียมโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งจากพอลิออลที่ได้จากน้ำมันถั่วเหลือง โดยใช้สารฟู 2 ชนิด คือ HCFC และไซโคลเพนเทน (cyclopentane) เขาได้ศึกษาผลของชนิดและปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา สารลดแรงตึงผิว สารเชื่อมขวาง (crosslinker) และสารฟูต่อสมบัติของโฟม ซึ่งเขาได้พบว่าความทนแรงกดของโฟมจะมีค่ามากที่สุดเมื่อใช้สารลดแรงตึงผิว B-8404 ปริมาณ 2 pph และความทนแรงกดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณน้ำ กลีเซอริน (glycerin) และไอโซไซยาเนตเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ยังพบว่าโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งที่เตรียมได้จากน้ำมันถั่วเหลืองมีสมบัติเชิงกลและสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนเทียบได้กับโฟมที่เตรียมได้จากพอลิออลทางการค้า และการที่ปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความทนแรงกดเพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำทำปฏิกิริยากับไอโซไซยาเนตเกิดเป็นพอลิยูเรีย (polyurea) ขึ้นด้วย เป็นผลทำให้ความทนแรงกดของโฟมเพิ่มขึ้น

Tuan Noor Maznee และคณะ [9] ได้ศึกษาผลของสารตัวเติม ซึ่งได้แก่ Ethacure 100, Ethacure 300, Amisol (CDE และ KD-1), N-methyl-2,2'-iminodiethanol (MDEA) และฟทาลิกแอนไฮไดรด์ (phthalic anhydride) ต่อสมบัติ (ความหนาแน่น ความแข็ง และเวลาการบ่ม) ของ

โพลียูรีเทนที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่างพอลิออลผสม (พอลิออลจากน้ำมันปาล์ม 40 กรัม และพอลิออลจากสารปีโตรเลียม 60 กรัม) กับ MDI และใช้น้ำเป็นสารฟู่ โดยเขาพบว่าการใส่ Ethacure 100 ปริมาณ 5 pph และ Amisol (ทั้ง CDE และ KD-1) ปริมาณ 10 pph มีผลทำให้ความหนาแน่นของโพลีเพิ่มจาก  $264 \text{ kgm}^{-3}$  เป็น  $398.28 \text{ kgm}^{-3}$  และความแข็งเพิ่มจาก 34.5 เป็น 55 shore D ในขณะที่เวลาการบ่มลดจาก 20 นาที เป็น 5 นาที

Yan Hong Hu และคณะ [10] ได้เตรียมโพลียูรีเทนชนิดแข็งจากน้ำมันเรพซีด (rape seed oil) โดยการนำน้ำมันเรพซีดมาเตรียมเป็นพอลิออลจากระบวนการไฮดรอกซิเลชัน (hydroxylation) พันธะคู่อะซิติกในสายโซ่อะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัวของน้ำมันเรพซีด ด้วยกรดเปอร์ออกซี (peroxy acid) จากนั้นนำมาผ่านกระบวนการแอลกอฮอล์ลิซิส (alcoholysis) ด้วยไตรเอทานอลามีน (triethanolamine) เพื่อเพิ่มค่าไฮดรอกซิล (hydroxyl value) ของผลิตภัณฑ์ที่ได้ แล้วจึงนำไปผสมกับสารไอโซไซยาเนต พบว่าโพลียูรีเทนชนิดแข็งที่เตรียมจากน้ำมันเรพซีดมีความทนแรงกดต่ำกว่าโพลีที่เตรียมจากพอลิออลที่ได้จากสารปีโตรเลียม ถึงแม้ความหนาแน่นของโพลีที่เตรียมได้จะมีค่าสูงกว่า

Jian Feng Jin และคณะ [11] ได้เตรียมโพลีเอสเตอร์พอลิออล (rosin-based polyester polyols) จากโรซินมาเลอิกแอนไฮไดรด์แอดดัก (rosin-maleic anhydride adduct), ไดเอทิลีนไกลคอล (diethylene glycol), เอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol) และสารเร่งปฏิกิริยาโดยการใส่และไมใส่กรดอะดิพิก (adipic acid) และฟทาลิกแอนไฮไดรด์ (phthalic anhydride) ซึ่งโพลียูรีเทนชนิดแข็งได้ถูกเตรียมจากโพลีเอสเตอร์พอลิออลเหล่านี้ แล้วนำไปเปรียบเทียบกับโพลีที่เตรียมพอลิเอสเตอร์พอลิออลทางการค้า (Daltolac™ P744) ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า พฤติกรรมการเกิดโพลีของผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้จากโพลีเอสเตอร์พอลิออลคล้ายกับที่เตรียมจากพอลิออลทางการค้า แต่ค่าความทนแรงกดทั้งในแนวขนานและตั้งฉากกับทิศทางของการเกิดโพลีมีค่าสูงกว่า ส่วนเสถียรภาพทางความร้อนที่อุณหภูมิ 100 และ  $-30^{\circ}\text{C}$  มีค่าใกล้เคียงกัน หรือบางค่าดีกว่าโพลีที่ผลิตจากพอลิออลทางการค้า นอกจากนี้ โพลีที่เตรียมจากโพลีเอสเตอร์พอลิออลยังมีสภาพนำความร้อนต่ำกว่า และมีพลังงานกระตุ้น (activation energy) ระหว่างกระบวนการไพโรลิซิส (pyrolysis) ที่สูงกว่ามาก

Badri และคณะ [12] ได้ทำการสังเคราะห์โพลีเอสเตอร์พอลิออลจากน้ำมันเมล็ดปาล์ม RBD ที่มีหมู่ฟังก์ชันอยู่มาก พบว่า เมื่อนำพอลิออลที่ได้ไปเตรียมโพลียูรีเทนจะทำให้ได้สมบัติความทนแรงกดที่ดี ซึ่งในการเติมซอร์บิทอล (sorbitol) ลงในระบบของพอลิออลจะเป็นการเพิ่มหมู่

ฟังก์ชันของพอลิโออล เป็นผลทำให้มีมวลโมเลกุลและกิ่งของสารประกอบพอลิไฮดริก (polyhydric) มากขึ้น ซึ่งจะช่วยปรับปรุงการนำความร้อน (thermal conductivity) และความเสถียรต่อรูปร่าง (dimensional stability) ทำให้โฟมสามารถทนแรงกดได้ดีขึ้น

Eid และคณะ [13] ได้ทำการเตรียมสารลดแรงตึงผิวที่สามารถละลายน้ำได้ (water-soluble surfactant) โดยการผสม TDI ลงในพอลิเอทิลีนไกลคอล (polyethylene glycol) และ/หรือน้ำมันละหุ่ง และเอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol) พบว่า สารลดแรงตึงผิวที่สามารถละลายน้ำได้นั้นให้สมบัติการลดแรงตึงผิว การเกิดโฟม (foaming) และแนวโน้มของการเปียก (wetting tendency) ที่ดีมาก เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวที่มีความเฉพาะตัว โดยมีมวลโมเลกุลสูง มีหมู่อะโรมาติก และ/หรือส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ของส่วนที่หลงเหลือจากน้ำมันละหุ่ง และมีส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic) ของสายโซ่พอลิออกซีเอทิลีน (polyoxyethylene)

Bharadwaj และคณะ [14] ได้ทดลองเตรียมแผ่นพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ที่มีความโปร่งใส โดยใช้พอลิโออลที่ได้จากน้ำมันละหุ่ง พอลิเอทิลีนไกลคอล (polyethylene glycol, PEG) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่างๆ (200, 400 และ 600) และโทลูอีนไดไอโซไซยาเนต โดยทำการศึกษาผลจากน้ำหนักโมเลกุลของ PEG ที่มีต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้ ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบด้านความเค้น-ความเครียด แสดงให้เห็นว่าการใช้ PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 200 อีลาสโตเมอร์ที่ได้จะมีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด และอุณหภูมิการสลายตัวของอีลาสโตเมอร์ทั้งหมดเริ่มที่ประมาณ 250 องศาเซลเซียส

Hamid และคณะ [15] ได้เตรียมมิลเลเบลพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ (millable polyurethane elastomers, MPEs) ซึ่งเป็นยางสังเคราะห์ชนิดพิเศษที่กำลังได้รับความสนใจเนื่องจากมีสมบัติด้านการผสม การขึ้นรูป และการบ่ม (ด้วยซิลเฟอร์ เปอร์ออกไซด์ หรือไอโซไซยาเนต) ได้เช่นเดียวกับยางทั่วไป โดยมีสมบัติความต้านทานการขีดถู ความทนน้ำมัน ไอโซน และสถานะแวดล้อมที่ดีเยี่ยม นอกจากนี้ ยังมีความทนแรงดึงและการฉีกขาดสูง เขาได้เตรียม MPEs จากน้ำมันละหุ่ง และพอลิโพรพิลีนไกลคอล [poly(propylene glycol)] โดยให้ทำปฏิกิริยากับ TDI และ 1,4-บิวเทนไดออล (เป็นเซนเอกเทนเดอร์) โดยใช้โทลูอีนไดไอโซไซยาเนตไดเมอร์ (toluene diisocyanate dimer) เป็นสารบ่ม และจากการศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน และสมบัติเชิงกลของอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้ พบว่า สามารถเอามาใช้ประโยชน์ และตอบสนองความต้องการของอุตสาหกรรมได้เป็นอย่างดี

Shaari และคณะ [16] ได้ศึกษาผลของการใช้ไตรเอทานอลามีนต่อสมบัติของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่นที่เตรียมด้วยพอลิโอลจากน้ำมันปาล์ม และ MDI โดยทดสอบหาเวลาที่ตะไคร่ไม่ติด (tack free time) ความหนาแน่น ปริมาณเซลล์เปิด การดูดซับพลังงาน ความทนแรงกด และความต้านทานการฉีกขาด ซึ่งเปรียบเทียบกับตัวอย่างทางการค้า ผลจากการทดลอง พบว่าไตรเอทานอลามีนช่วยปรับปรุงค่าเวลาที่ตะไคร่ไม่ติด เปอร์เซ็นต์ปริมาณเซลล์เปิด และความนิ่มของโฟม แต่ไม่ปรับปรุงความต้านทานการฉีกขาด จึงเหมาะกับงานที่ไม่ต้องการสมบัติความแข็งแรงมากนัก เช่น งานบรรจุภัณฑ์ และงานดูดซับแรงกระแทก