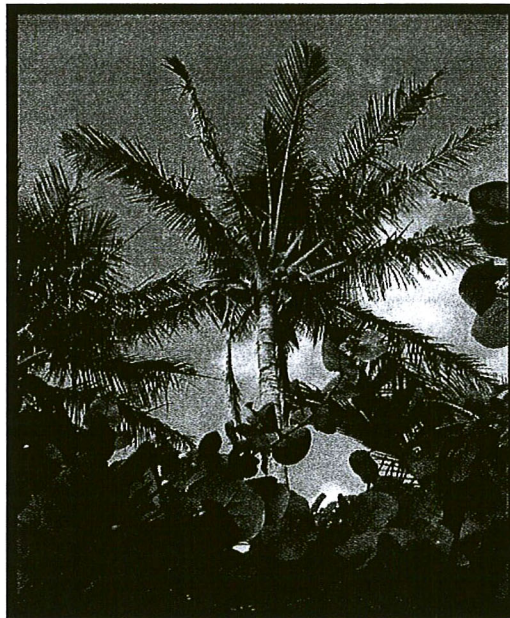


บทที่ 2

ความรู้ทางวิชาการและวารสารปริทรรศน์

2.1 น้ำมันปาล์ม (Palm oil)

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชในตระกูล Palmae มีชื่อทางพฤกษศาสตร์ว่า *Elaeis Guineensis Jacq.* เป็นพืชที่อยู่ในเขตร้อนชื้นที่มีฝนตกชุก การเพาะปลูกปาล์มน้ำมันของโลกจึงจำกัดอยู่ในเขตที่ราบต่ำของภูมิภาคแถบเส้นศูนย์สูตร ที่มีความชื้นสูง ซึ่งอยู่ในช่วงละติจูด 20 องศาเหนือ-ใต้ [2] เป็นที่ราบใกล้ฝั่งทะเล เนื้อดินสมบูรณ์และไม่มีน้ำขัง ดินจะต้องมีความสามารถในการดูดซับน้ำ ถ่ายเทอากาศได้ดี เช่น ดินเหนียวปนทราย รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะของต้นปาล์ม



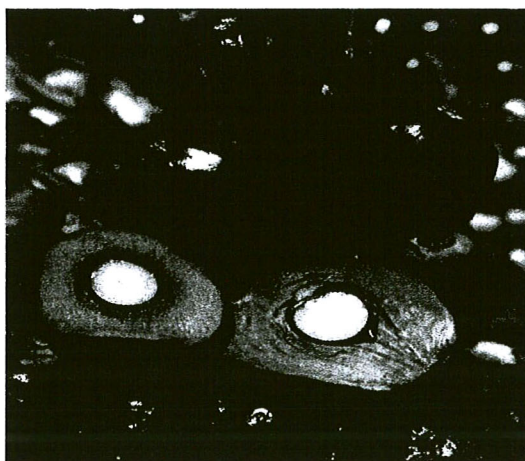
รูปที่ 2.1 ลักษณะของต้นปาล์ม

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 และร้อยละโดยน้ำหนักของกรดไขมันในน้ำมันปาล์มแสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของน้ำมันปาล์ม [2]

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

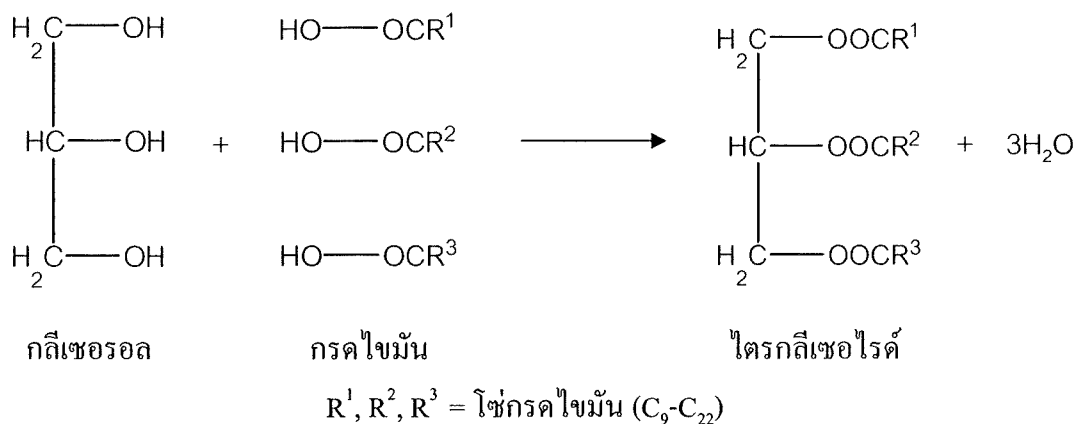
การสกัดน้ำมันปาล์มออกจากผลปาล์ม (รูปที่ 2.2) ทำโดยการอัดแบบไฮดรอลิกหรือใช้การเหวี่ยง ภายหลังการอบผลปาล์มในถังที่มีชั้นไอน้ำร้อนอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส น้ำมันปาล์มดิบที่ได้จะมีสีแดงเข้มอมส้มซึ่งเป็นสีของแคโรทีนอยด์ (carotinoid) ซึ่งมีอยู่ในน้ำมันปาล์มดิบประมาณร้อยละ 0.03-0.15 สีของน้ำมันปาล์มถูกทำให้จางลงในขั้นตอนการฟอกสี และการอัดแก๊สไฮโดรเจน



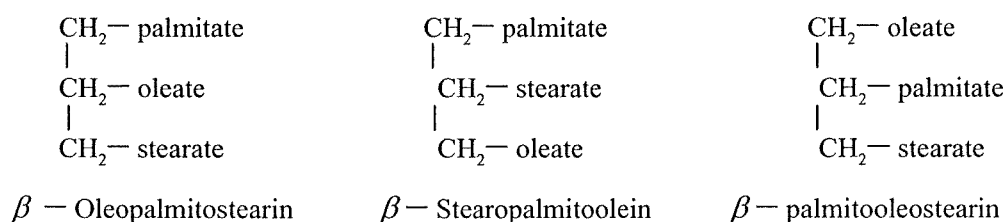
รูปที่ 2.2 ผลปาล์มน้ำมัน

น้ำมันปาล์มได้ถูกใช้ในการปรุงอาหารมากกว่า 5,000 ปี ซึ่งปัจจุบันส่วนใหญ่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร มาร์การีน เนยเหลว ครีม สบู่ นอกจากนี้ ยังเป็นส่วนผสมของน้ำมันหล่อลื่น น้ำมันเครื่อง ส่วนผสมของน้ำยาขัดรองเท้า ใช้ในการผลิตกรดไขมัน ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตดินสอสีและเทียน เป็นต้น น้ำมันปาล์มยังมีส่วนช่วยในการทำเครื่องสำอางเพราะสามารถแทรกซึมเข้าไปในผิวหนังได้ดีกว่าน้ำมันชนิดอื่น

น้ำมันเป็นสารประกอบไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) กล่าวคือ เป็นไตรเอสเทอร์ (triester) ของกลีเซอรอล (glycerol) กับกรดไขมัน (fatty acid) ชนิดต่างๆ ดังนี้ [3]



ถ้า R^1, R^2 และ R^3 มีโครงสร้างทางเคมีเหมือนกัน ก็จะได้ไตรกลีเซอไรด์แบบง่ายๆ แต่ถ้าไม่เหมือนกัน จะได้ของผสมของไตรกลีเซอไรด์ ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ ดังนั้น ถ้าทำการไฮโดรไลซ์ (hydrolyze) น้ำมันจะได้กลีเซอริน (glycerine) และน้ำมันไขมัน (fatty oils) ซึ่งแต่ละโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์สามารถเกิดได้ 3 ไอโซเมอร์ โดยต่างกันตรงชนิดของกรดไขมันที่อยู่ตำแหน่งกลางหรือตำแหน่งบีตา (β) ตัวอย่างเช่น ถ้าโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ประกอบด้วยกรดโอเลอิก (oleic acid) กรดสเตียริก (stearic acid) และกรดปาล์มมิก (palmitic acid) จะแสดงไอโซเมอร์ได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างไอโซเมอร์ของไตรกลีเซอไรด์

สำหรับปริมาณและสูตรโครงสร้างของกรดไขมันที่มีในน้ำมันปาล์มแสดงไว้ในตารางที่ 2.2 และ 1.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.2 ร้อยละโดยน้ำหนักของกรดไขมันในน้ำมันปาล์ม [2]

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)	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{18}\text{COOH}$
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 โฟมพลาสติก (Plastic foams)

โฟมพลาสติกหรือเซลล์ลูลาร์พลาสติก (cellular plastics) คือพลาสติกที่สามารถถูกทำให้ขยายตัวหรือพลาสติกที่มีลักษณะคล้ายฟองน้ำ (sponge) โดยทั่วไปประกอบด้วยเฟสตั้งแต่ 2 เฟสขึ้นไป คือ เฟสของพอลิเมอร์เมทริกซ์ (polymer matrix phase) และเฟสที่เป็นแก๊สซึ่งเกิดจากการแตกตัวของสารฟู (blowing agents) [4] กระจายตัวอยู่ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ในรูปของช่องว่าง (void) ที่เรียกว่า เซลล์ (cell) [5] สำหรับเฟสที่เป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์อาจเป็นพอลิเมอร์ชนิดเดียวหรือพอลิเมอร์ผสม (polymer blend) นอกจากนี้ อาจมีเฟสที่เป็นของแข็งชนิดอื่นๆ อยู่ด้วย ได้แก่ สารตัวเติม (filler) ซึ่งอาจเป็นสารประกอบอนินทรีย์เช่น แก้ว เซรามิก และโลหะ หรือสารประกอบอินทรีย์เช่น พอลิเมอร์ที่เป็นเส้นใยธรรมชาติ

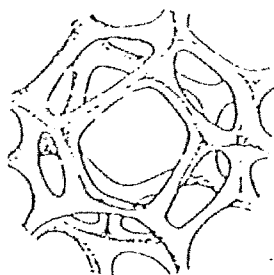
2.2.1 ลักษณะของโฟม

โฟมพลาสติกอาจมีลักษณะยืดหยุ่น (flexible) หรือแข็งเกร็ง (rigid) โดยขึ้นกับอุณหภูมิกลาสแทรนซิชัน (T_g) องค์ประกอบทางเคมี (chemical composition) ระดับขั้นของความเป็นผลึก (degree of crystallinity) และระดับขั้นของการเชื่อมขวาง (degree of crosslinking) ของพอลิเมอร์ นอกจากนี้ โฟมพลาสติกยังอาจมีสมบัติกึ่งยืดหยุ่น (semi-flexible) หรือ กึ่งแข็ง (semi-rigid) ก็ได้

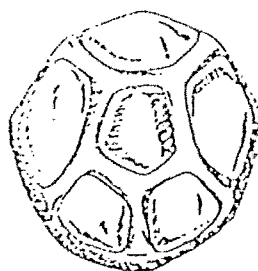
สัณฐานโครงสร้าง (structure configuration) ของโฟมมี 2 รูปแบบ [6] คือ

1. แบบเซลล์เปิด (open-cell type) เป็นโครงสร้างที่มีการเชื่อมต่อกันระหว่างเซลล์ ซึ่งแก๊สสามารถไหลผ่านจากเซลล์หนึ่งไปยังเซลล์อื่นๆ ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ก) โดยทั่วไปโฟม ที่มีสัณฐานโครงสร้างแบบนี้จะมีความยืดหยุ่นเหมาะกับการนำไปใช้ทำเบาะนั่งในรถยนต์ ที่นอน เฟอร์นิเจอร์ บรรจุภัณฑ์ วัสดุกันกระแทก และฉนวนกันเสียง เป็นต้น

2. แบบเซลล์ปิด (close-cell type) เป็นโครงสร้างที่เซลล์ประกอบด้วยเยื่อบางๆ ซึ่งเรียกว่าหน้าต่างเซลล์ ทำให้แก๊สไม่สามารถไหลผ่านระหว่างเซลล์ได้ แต่สามารถแพร่ผ่านหน้าต่างเซลล์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ข) โดยทั่วไปโฟมที่มีโครงสร้างแบบนี้จะแข็ง และเหมาะกับการนำไปใช้เป็นอุปกรณ์การกีฬา เช่น กระดานโต้คลื่น หรือใช้เป็นฉนวนกันความร้อน เป็นต้น



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.4 สัณฐานโครงสร้างของเซลล์ (ก) เซลล์เปิด และ (ข) เซลล์ปิด

2.2.2 กระบวนการเกิดโฟม (Foam formation) [11]

โฟมพลาสติกสามารถเตรียมได้หลายวิธี โดยวิธีที่นิยมกันอย่างแพร่หลาย คือ กระบวนการขยายตัว (expansion process) ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังนี้

ความเรียบของผิวหน้าวัสดุ ลักษณะผิวของอนุภาคสารตัวเติม ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว หรือขนาดของ nucleator ขนาดและปริมาณของฟองที่เกิดขึ้น อัตราการเกิดแก๊ส และแรงตึงผิว (surface tension)

ในขั้นตอนการเกิดฟอง สารละลายพอลิเมอร์ต้องการพลังงานอิสระ (F) ของระบบเพิ่มขึ้น ดังสมการที่ 2.1

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

γ คือ แรงตึงผิวของสารละลายพอลิเมอร์ (surface tension of polymer solution) และ A คือ พื้นที่สัมผัสทั้งหมด (total interfacial area) โดยเมื่อค่าแรงตึงผิวมีค่าต่ำจะทำให้เกิดฟองได้ง่าย

การเกิดโครงสร้างโฟมของพลาสติกมีได้หลายวิธีด้วยกัน ได้แก่

- การสลายตัวของสารฟูจากการให้ความร้อนหรือผลจากปฏิกิริยาคายความร้อนระหว่างปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันซึ่งจะทำให้เกิดแก๊สในโตรเจน หรือคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น
- การเกิดฟองแก๊สเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีโดยแก๊สจะเกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างสารเคมี 2 ชนิด ซึ่งแก๊สจะถูกปล่อยออกมาพร้อมกับการพอลิเมอไรเซชันและการเชื่อมขวาง เช่น ปฏิกิริยาระหว่างไอโซไซยานตกับน้ำ ได้แก่ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทน เป็นต้น
- การลดความดัน ซึ่งเป็นการขยายตัวของแก๊สในเนื้อพอลิเมอร์ ตัวอย่างเช่น การอัดรีด (extrusion) โฟมพอลิสไตรีน
- การทำให้เกิดฟองแก๊สโดยการกวนเชิงกลในระบบพอลิเมอร์เหลวหรือสารละลายพอลิเมอร์หรือสารแขวนลอยพอลิเมอร์แล้วทำให้แข็งตัวโดยตัวเร่งและ/หรือการลดความร้อนทำให้เกิดการกักฟองแก๊สไว้ในเนื้อพลาสติก
- การเติมฮอลโลว์ไมโครสเฟียร์ (hollow microsphere) ในเนื้อพอลิเมอร์ ซึ่งอาจเป็นเม็ดแก้วหรือเม็ดพลาสติก
- การกลายเป็นไอของของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำในเนื้อพอลิเมอร์ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาคายความร้อนหรือการให้ความร้อนกับสารฟูที่เป็นของเหลว ตัวอย่างของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำ ได้แก่ ฟลูออโรคาร์บอน (fluorocarbon) และเมทิลีนคลอไรด์ (methylene chloride) เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 2: การเพิ่มขนาดของฟอง (bubble growth)

การเพิ่มขนาดของฟองเกิดจากการแพร่ของแก๊สจากเฟสของเหลวหรือสารละลายพอลิเมอร์เข้าไปสู่ฟองแก๊ส ฟองที่เกิดขึ้นในขั้นแรกจะมีลักษณะเป็นทรงกลม (sphere) ซึ่งจะขยายตัวต่อไปภายใต้ภาวะที่กำหนด และสามารถควบคุมได้โดยอาศัยความแตกต่างของความดันระหว่างภายในกับภายนอกฟองแก๊สหรือเซลล์ (ΔP) ค่าแรงตึงผิวที่สัมผัส (γ) และรัศมีของฟอง (r) ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงดังสมการที่ 2.2

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

ค่าความแตกต่างของความดันจะมีค่ามากในฟองที่มีขนาดเล็ก (ที่ค่าแรงตึงผิวหนึ่ง) ฟองที่เล็กกว่ามีแนวโน้มที่จะทำให้ค่าความแตกต่างของความดันเท่ากันได้โดยการขยายตัว หรือเพิ่มขนาดขึ้น จากฟองที่มีขนาดเล็กไปยังขนาดใหญ่ ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงได้ดังสมการที่ 2.3

$$\Delta P_1^2 = 2\gamma \left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right] \quad (2.3)$$

เมื่อ ΔP_1^2 คือ ค่าความแตกต่างของความดันระหว่างฟอง 2 ฟอง ซึ่งมีขนาดรัศมีของฟองเท่ากับ r_1 และ r_2 ตามลำดับ

ขณะเกิดการขยายตัวของฟองในโฟมพลาสติก สมบัติต่างๆ ของวัสดุจะเปลี่ยนไปอย่างมาก โดยอัตราการขยายตัวของฟองขึ้นกับสมบัติวิสโคอิลาสติก (viscoelastic) ของพอลิเมอร์เฟส ความดันที่เกิดเนื่องจากสารฟู ความดันภายนอกที่เกิดบนโฟมพลาสติก ขนาดของเซลล์ อัตราการซึมผ่านของสารฟูในเฟสพอลิเมอร์ และการเปลี่ยนแปลงความหนืดของของไหลซึ่งมีผลต่ออัตราการขยายตัวของเซลล์และการไหลของพอลิเมอร์จากผนังเซลล์สู่บริเวณที่เชื่อมต่อกันของเซลล์ ซึ่งนำไปสู่การยุบตัว (collapse) ของโฟมพลาสติก

ขั้นตอนที่ 3: ความเสถียรของฟอง (bubble stability)

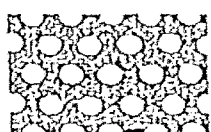
ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนสุดท้ายและเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในกระบวนการเกิดโฟม ซึ่งฟองที่เกิดขึ้นในเฟสพอลิเมอร์เหลวอาจจะไม่เสถียรและยุบตัวภายใต้แรงโน้มถ่วง ซึ่งเสถียรภาพของโครงสร้างของโฟมขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ อุณหภูมิ โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ จะทำให้ความหนืดและแรงตึงผิวลดลง ส่วนอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ผนังเซลล์บางลง และเกิดการยุบตัวเมื่อได้รับแรง นอกจากนี้ เสถียรภาพของโครงสร้างโฟมยังขึ้นกับการเชื่อมขวางอีกด้วย

การป้องกันการเกิดรอยแตกของผนังเซลล์ทำได้โดยทำให้เกิดเสถียรภาพก่อนที่จะเกิดรอยแตกขึ้นที่ผนังเซลล์ สำหรับในระบบโฟมพอลิเมอร์สามารถทำได้โดยการเพิ่มความหนืดของเฟสพอลิเมอร์

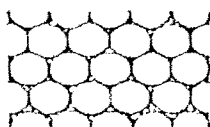
ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่สุดต่อความเสถียรของโฟม [4] การเพิ่มความหนืดจะเป็นการลดผลของการถ่ายเทของของเหลว (drainage effect) ไปรอยต่อระหว่างเซลล์ ซึ่งการทำให้ความหนืดของเฟสพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น สามารถทำได้โดยเพิ่มน้ำหนักระหว่างโมเลกุลระหว่างการพอลิเมอไรเซชัน หรือการเชื่อมขวาง (crosslinking) หรือการลดอุณหภูมิ

วิธีทำให้โฟมมีเสถียรภาพมีหลายวิธี ได้แก่วิธีการทางเคมีเช่น กระบวนการพอลิเมอไรเซชันของเทอร์โมเซตพอลิเมอร์ หรือวิธีทางกายภาพ เช่น การทำให้เทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์ที่ขยายตัวเย็นลงที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันเพื่อป้องกันการไหลของพอลิเมอร์ [8]

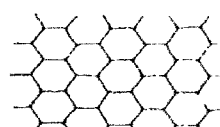
จากขั้นตอนต่างๆ ในกระบวนการเกิดโฟม ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดฟอง (nucleation) การเติบโต (growth) ของฟองแก๊ส และการขยายตัวของแก๊สในระบบพอลิเมอร์เหลว สามารถแสดงขั้นตอนต่างๆ ไว้ในรูปที่ 2.5 โดยรูป(ก) แสดงการเกิดฟองในระบบพอลิเมอร์เหลว โดยฟองจะมีรูปร่างทรงกลม รูป(ข) แสดงการเติบโตของฟองแก๊ส รูป(ค) ฟองแก๊สขยายตัวและสัมผัสกันระหว่างฟองทำให้เกิดการเปลี่ยนของรูปร่างเป็นทรง pentagonal dodecadhedron รูป (ง) โฟมพลาสติกจะมีลักษณะเป็นแบบเซลล์ปิดซึ่งอาจเกิดการแตก (rupture) ของผนังเซลล์ ซึ่งขึ้นกับปัจจัยต่างๆ เช่น ความหนืด พลังงานอิสระ เป็นต้น และรูป (จ) แสดงผลจากการขาดของผนังเซลล์ของฟองทำให้สัณฐานโครงสร้างโฟมเป็นแบบเซลล์เปิด



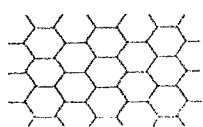
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

รูปที่ 2.5 แผนภาพขั้นตอนต่างๆ ในกระบวนการเกิดโฟม [9]

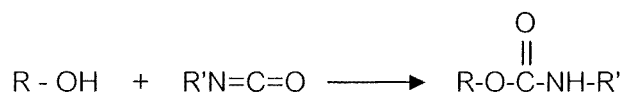
2.3 โฟมพอลิยูรีเทน (Polyurethane foam) [10]

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

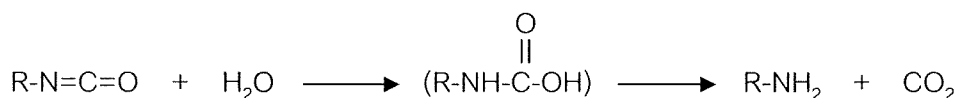
2.3.1 ปฏิกิริยาการเกิดโฟมพอลิยูรีเทน [4]

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการสังเคราะห์โฟมพอลิยูรีเทนมีดังนี้

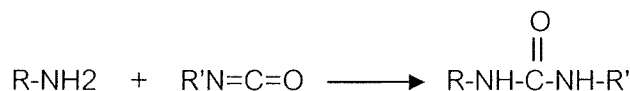
1. ปฏิกิริยาระหว่างไอโซไซยานตกับไฮดรอกซิลเกิดเป็นยูรีเทน



2. ปฏิกิริยาระหว่างไอโซไซยานตกับน้ำเกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และเอมีน

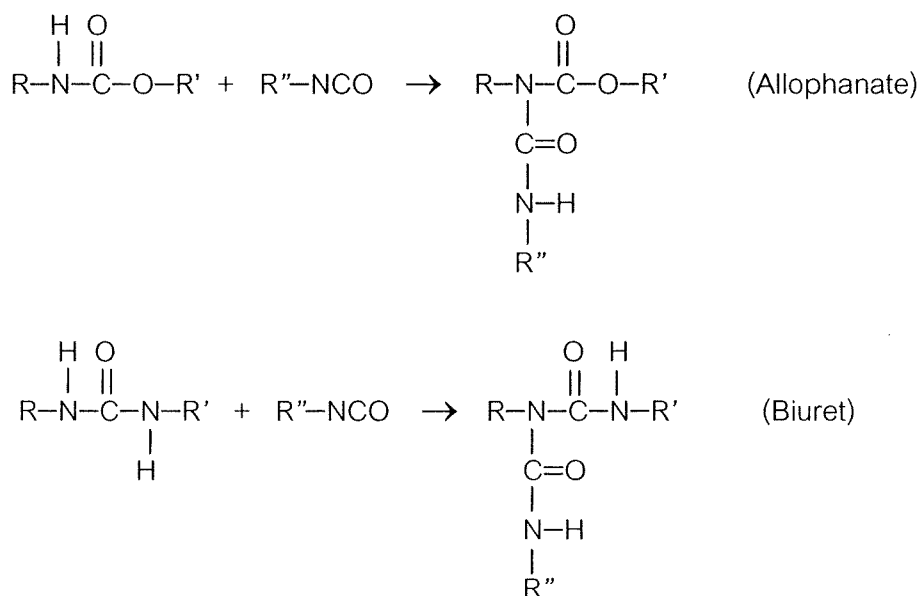


3. ปฏิกิริยาระหว่างเอมีนกับไอโซไซยานตเกิดเป็นพันธะยูเรีย



ถ้าไดไอโซไซยานตทำปฏิกิริยากับไดออลจะได้พอลิยูรีเทนแบบเชิงเส้น (linear polyurethane) และถ้าทำปฏิกิริยากับพอลิออลที่มีหมู่ไฮดรอกซิลมากกว่า 2 หมู่ จะได้พอลิยูรีเทนแบบกิ่งหรือแบบเชื่อมขวาง (branched or crosslinked polyurethane) นอกจากนี้ พอลิยูรีเทนแบบเชื่อมขวางยังสามารถเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างหมู่ยูรีเทนที่เกิดขึ้นกับหมู่ไอโซไซยานต ได้หมู่อัลโลฟานต (allophanate) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 หรือเกิดหมู่ไบยูเรต (biuret) เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 100°C โดยเกิดหมู่ยูเรียขึ้นก่อนจากการที่หมู่เอมีนทำปฏิกิริยากับหมู่ไอโซไซยานต ซึ่งหมู่เอมีนอาจอยู่ในรูปของไดเอมีนที่ใช้เป็นสารเพิ่มขนาดสายโซ่ (chain extender) หรือจากปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับไอโซไซยานต และเมื่อหมู่ยูเรียที่เกิดขึ้นทำปฏิกิริยากับหมู่ไอโซไซยานตจะได้หมู่ไบยูเรต (รูปที่ 2.6) ซึ่งทั้งหมู่อัลโลฟานตและไบยูเรตจะเป็นส่วนที่ทำให้เกิดพอลิยูรีเทนแบบเชื่อมขวาง

พอลิยูรีเทนเป็นพอลิเมอร์ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีตั้งแต่เป็นวัสดุยืดหยุ่นที่เป็นเทอร์โมพลาสติกชนิดอ่อนนุ่มจนถึงโฟมเทอร์โมเซตชนิดแข็ง พอลิยูรีเทนแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม คือ โฟมชนิดยืดหยุ่น (flexible foam) โฟมชนิดแข็ง (rigid foam) และอีลาสโตเมอร์ (elastomer) โดยโฟมชนิดยืดหยุ่นมีโครงสร้างแบบเซลล์เปิด และโฟมชนิดแข็งมีโครงสร้างแบบเซลล์ปิด



รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาการเกิดอัลโลฟานาตและไบยูเรต

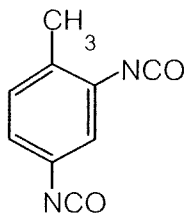
2.3.2 สารตั้งต้นที่ใช้สังเคราะห์โฟมพอลิยูรีเทน

ไอโซไซยานาต (Isocyanates)

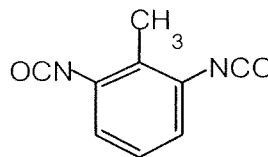
วิธีที่ทำให้พอลิยูรีเทนมีสมบัติแตกต่างกัน คือ การเลือกใช้ไอโซไซยานาตต่างชนิดกัน ซึ่งทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลแตกต่างกัน ไอโซไซยานาตที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์โฟมพอลิยูรีเทน ได้แก่ ไดฟีนิลมีเทนไดไอโซไซยานาต (diphenylmethane diisocyanate, MDI) และโทลูอีนไดไอโซไซยานาต (toluene diisocyanate, TDI) ซึ่งอาจใช้เป็นของผสมระหว่าง 2,4'-และ 2,6'-TDI หรือใช้ 2,4'-TDI อย่างเดียวก็ได้ โดย TDI ใช้ทำได้ทั้งโฟมชนิดยืดหยุ่นและโฟมชนิดแข็ง แต่เนื่องจาก TDI เป็นพิษ จึงเปลี่ยนมาใช้พอลิเมอร์ MDI แทน

TDI

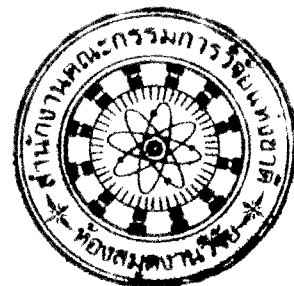
TDI มีสถานะเป็นของเหลวระเหยง่าย และมีความเป็นพิษต่อระบบทางเดินหายใจ โดย TDI ที่ผลิตทางการค้ามี 2 ประเภท คือ TDI 80/20 และ TDI 60/40 ซึ่งตัวเลขที่ตามหลังแสดงอัตราส่วนร้อยละของผสมของ 2,4 และ 2,6-isomer ตามลำดับ ดังสูตรโครงสร้างต่อไปนี้



2,4-toluene diisocyanate



2,6-toluene diisocyanate

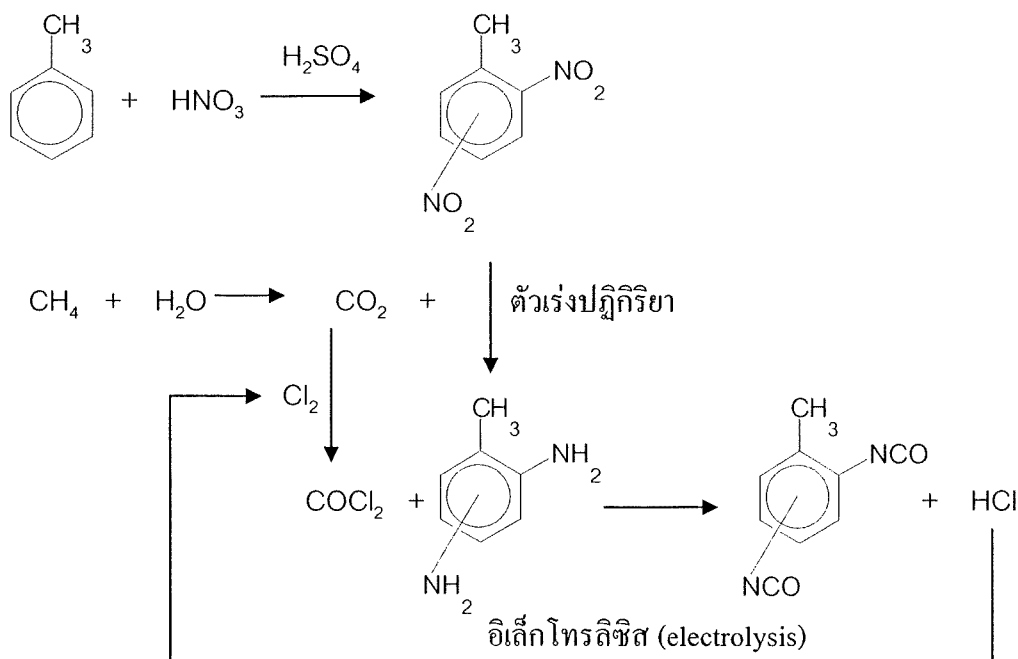


TDI-ไอโซเมอร์ที่ใช้ส่วนมากเป็น TDI 80/20 (TDI-80) และที่ใช้ TDI 60/40 (TDI-60) มีเป็นส่วนน้อย แต่ที่จำหน่ายในรูป TDI บริสุทธิ์ (TDI-100) ก็มีอยู่บ้าง การใช้ TDI ควรกระทำในภาวะเฉื่อยหรือภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนเพื่อป้องกันการสัมผัสกับอากาศ เพราะถ้า TDI สัมผัสกับอากาศจะตกตะกอนและจับตัวเป็นผลึก อุณหภูมิที่ใช้เก็บควรอยู่ที่ประมาณ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

TDI สังเคราะห์ได้จากโทลูอินโดยกระบวนการไนเตรชัน (nitration) รีดักชัน (reduction) และฟอสจีนเนชัน (phosgenation) โดย TDI 80/20 จะผลิตโดยผ่านกระบวนการไนเตรชัน 2 ครั้ง ติดต่อกันจากนั้นทำการรีดักชันเพื่อให้ได้เอมีน จากนั้นตามด้วยกระบวนการฟอสจีนเนชันเพื่อให้ได้ไดไอโซไซยานาต ซึ่งกระบวนการผลิตแสดงได้ดังรูปที่ 2.7 [4]

ส่วน TDI 60/40 จะผ่านกระบวนการไนเตรชัน 1 ครั้ง จากนั้นผ่านกระบวนการเกิดผลึก ทำให้ออร์โทไนโตรโทลูอินบริสุทธิ์ (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 ผลของหมู่แทนที่จะไม่มีผลต่อความว่องไวของปฏิกิริยา ทำให้ไอโซเมอร์ทั้ง 2 มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาเท่ากัน

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ	
ห้องสมุดฯ	
วันที่.....	6 มี.ค. 2555
เลขทะเบียน.....	246003
เลขเรียกหนังสือ.....	

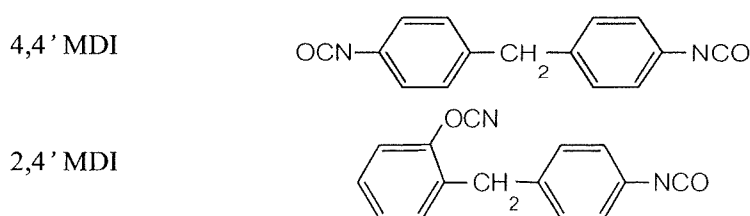


รูปที่ 2.7 กระบวนการผลิต TDI 80/20

TDI มีความเป็นพิษ โดยไอระเหยและฝุ่นละอองของ TDI ทำให้เกิดอาการระคายเคือง ต่อเยื่อทางเดินหายใจตอนบนและตอนล่าง แม้จะได้รับไอน้ำในช่วงเวลาสั้นๆ ก็ตาม ส่งผลทำให้เกิดการระคายเคือง หายใจไม่ออก เกิดอาการแสบคอ ไอ หรือเป็นแผลถาวรในปอด นอกจากนี้ ยังทำให้เกิดอาการอาเจียน และเจ็บช่องท้อง รวมทั้งทำให้ปอดทำงานผิดปกติ ถ้ามีการสัมผัสกับ TDI นานๆ จะทำให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนัง เกิดการเป็นผื่นแดง บวม เป็นแผลหรือไหม้ นอกจากนี้ ไอของ TDI ถึงแม้มีความเข้มข้นต่ำ แต่ถ้าโดนจะทำให้ น้ำตาไหลและแสบตาเล็กน้อย แต่ถ้าโดนสารที่มีความเข้มข้นสูงจะทำให้ปวดและแสบตาอย่างมาก ถ้า TDI เข้าตาจะทำให้ระคายเคืองอย่างรุนแรงและทำให้ตาอักเสบเรื้อรังได้ [11]

MDI

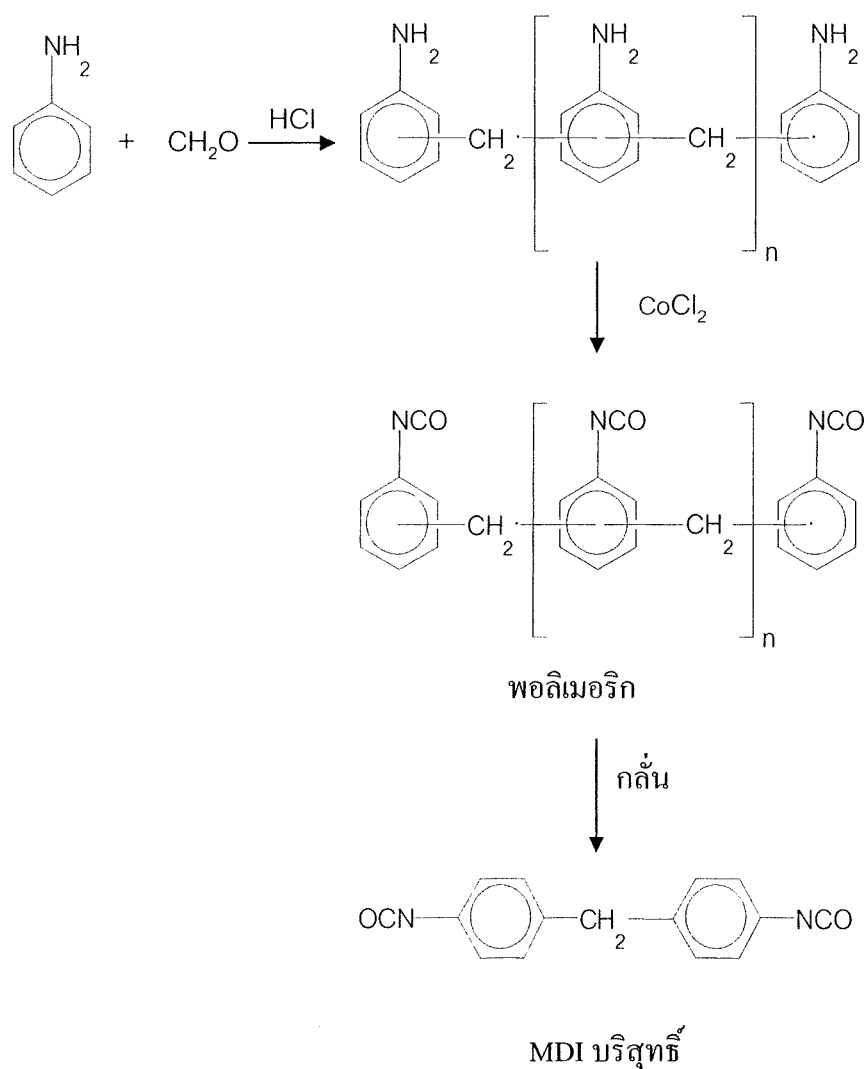
โดยทั่วไป MDI [10] มี 2 ประเภท คือ MDI บริสุทธิ์ และพอลิเมอร์ MDI (PMDI) ซึ่งส่วนใหญ่ MDI บริสุทธิ์จะเป็น 4,4'-MDI และมี 2,4'-MDI ผสมอยู่เล็กน้อย เพื่อช่วยลดจุดหลอมเหลว ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีของ 4,4'-MDI และ 2,4'-MDI

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

พอลิเมอร์ MDI สังเคราะห์ได้จากฟอร์มาลดีไฮด์ อะนิลีน และฟอสจีน ซึ่งกระบวนการผลิตพอลิเมอร์ MDI แสดงไว้ในรูปที่ 2.9 [4]



รูปที่ 2.9 กระบวนการผลิตพอลิเมอร์ MDI และ MDI บริสุทธิ์

พอลิเอเธอร์พอลิเอเธอร์ (polyols)

พอลิเอเธอร์พอลิเอเธอร์ที่ใช้ในการผลิตโฟมพอลิยูรีเทนมีหลายรูปแบบ โดยพอลิเอเธอร์พอลิเอเธอร์ที่นิยมใช้อาจเป็นพอลิเอเธอร์พอลิเอเธอร์ (polyether polyols) และพอลิเอสเตอร์พอลิเอเธอร์ (polyester polyols) ซึ่งสมบัติต่างๆ และความยากง่ายในการขึ้นรูปโฟมขึ้นกับการเลือกใช้พอลิเอเธอร์ โดยลักษณะจำเพาะและสมบัติของโฟมพอลิยูรีเทนที่ได้จะขึ้นกับขนาด น้ำหนักโมเลกุล ฟังก์ชันนัลลิตี (functionality) และโครงสร้างของพอลิเอเธอร์ สำหรับพอลิเอเธอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและฟังก์ชันนัลลิตีต่ำจะนิยมใช้ในการผลิตโฟมชนิดยืดหยุ่นและอีลาสโตเมอร์ ส่วนโฟมชนิดแข็งจำเป็นต้องใช้พอลิเอเธอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำและมีฟังก์ชันนัลลิตีสูงเพื่อให้เกิดโครงสร้างแบบเชื่อมขวางที่มีความหนาแน่นสูง ตารางที่ 2.4 แสดงความแตกต่างระหว่างพอลิเอเธอร์สำหรับผลิตโฟมพอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่นและชนิดแข็ง

ตารางที่ 2.4 ลักษณะของพอลิเอเธอร์ที่มีผลต่อการเกิดโฟมพอลิยูรีเทน

ลักษณะของพอลิเอเธอร์	โฟมยืดหยุ่น	โฟมแข็ง
มวลโมเลกุล	1,000-6,500	150-1,600
ฟังก์ชันนัลลิตี	2.0-3.0	3-8
ค่าไฮดรอกซิล (mg KOH/g)	28-160	250-1,000

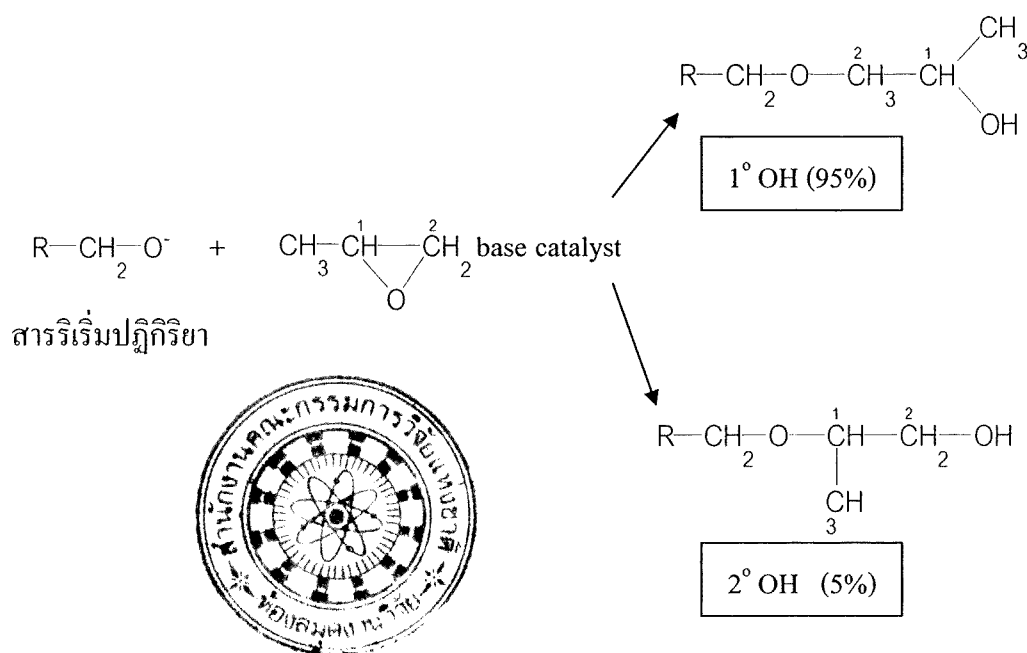
ค่าไฮดรอกซิลหรือไฮดรอกซิลนัมเบอร์ (hydroxyl value, OHV หรือ hydroxyl number) เป็นค่าซึ่งใช้วัดความเข้มข้นของหมู่ไฮดรอกซิลที่ว่องไวต่อปฏิกิริยากับไอโซไซยานเนตต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของพอลิเอเธอร์ มีหน่วยเป็น mg KOH/g โดยปกติพอลิเอเธอร์ที่มีจำหน่ายในท้องตลาดจะแสดงค่าไฮดรอกซิลไว้เพื่อง่ายต่อการคำนวณในการออกสูตรโฟมของลูกค้า สำหรับค่าไฮดรอกซิลสามารถคำนวณได้จาก

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

พอลิเอเธอร์พอลิเอเธอร์

ประมาณ 90% ของโฟมพอลิยูรีเทนเตรียมได้จากพอลิเอเธอร์พอลิเอเธอร์เนื่องจากมีราคาถูกกว่าพอลิเอสเตอร์พอลิเอเธอร์ มีความหนืดต่ำง่ายต่อการควบคุม ได้โฟมที่มีสมบัติการคืนตัวที่ดีและทนต่อ

การถูกไฮโดรไลซ์ ซึ่งส่วนใหญ่สังเคราะห์จากปฏิกิริยาเปิดวง (ring-opening reaction) ของอัลคิลีนออกไซด์ (alkylene oxide) เช่น โพรพิลีนออกไซด์ (propylene oxide) หรือเอทิลีน-โพรพิลีนออกไซด์โคพอลิเมอร์ (ethylene-propylene oxide copolymer) โดยใช้สารริเริ่มปฏิกิริยาประเภทพอลิฟังก์ชันนัล แอลกอฮอล์หรือเอมีน ดังปฏิกิริยาในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ปฏิกิริยาเปิดวงโพรพิลีนออกไซด์ที่ใช้ผลิตพอลิเอเทอร์พอลิแอลกอฮอล์

พอลิเอเทอร์พอลิแอลกอฮอล์

พอลิเอเทอร์พอลิแอลกอฮอล์มีความว่องไวต่อปฏิกิริยามากกว่าและให้โฟมที่มีสมบัติเชิงกลดีกว่าพอลิเอเทอร์พอลิแอล แต่จะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองได้ง่ายเมื่อถูกแสงแดด นอกจากนี้ ยังมีความหนืดสูง ขาดการใช้งาน และมีราคาแพงกว่าพอลิเอเทอร์พอลิแอล ดังนั้น จึงนิยมใช้ในงานที่ต้องการสมบัติที่ต่ำเท่านั้น เช่น งานเบาะรถยนต์ และงานปรับปรุงสมบัติความทนความร้อนของโฟมชนิดแข็ง และโฟมยืดหยุ่นที่ทำจากพอลิเอเทอร์พอลิแอลและ TDI มีค่าการยืดตัว (elongation) สูง และมีความทนทานต่อสารซักแห้ง (dry cleaning solvent) ได้ดี ตารางที่ 2.5 แสดงสมบัติและการใช้งานของพอลิเอเทอร์พอลิแอลในการผลิตโฟมพอลิยูรีเทนชนิดต่างๆ

พอลิเอเทอร์พอลิแอลมีความต้านทานการออกซิไดส์ และสามารถทนอุณหภูมิสูงได้ดีกว่าพอลิเอเทอร์พอลิแอลซึ่งสมบัตินี้เป็นสมบัติที่สำคัญมากต่อการผลิตโฟมชนิดแข็ง

พอลิเอเทอร์พอลิแอลเตรียมได้จากปฏิกิริยาควบแน่นระหว่างไกลคอลและไดคาร์บอนิกแอซิด เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาเอสเตอร์ริฟเคชัน จึงเกิดน้ำในปฏิกิริยาถึง 15% ดังนั้น ผลผลิตที่ได้มากที่สุด คือ 85% โดยน้ำหนักของวัตถุดิบ ซึ่งต่างจากพอลิเอเทอร์พอลิแอลที่ได้ผลผลิต 100% ด้วยเหตุนี้ จึงทำให้พอลิเอเทอร์พอลิแอลมีราคาแพงกว่าพอลิเอเทอร์พอลิแอล

ตารางที่ 2.5 สมบัติและการใช้งานของพอลิเอสเทอร์พอลิออลในการผลิตโฟมพอลิยูรีเทน

การใช้งาน	ชนิดของพอลิ- เอสเทอร์พอลิออล	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 ชนิดความ หนาแน่นต่ำ	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

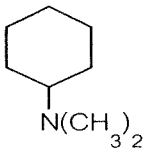
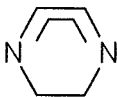
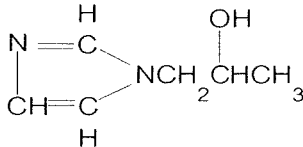
สำหรับงานวิจัยนี้ เป็นการทดลองนำน้ำมันปาล์มมาดัดแปรให้เป็นสารประกอบพอลิออล แล้วนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมพอลิยูรีเทนชนิดแข็ง

สารเติมแต่ง (Additives)

ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ที่นิยมใช้มี 2 ชนิด คือ

1. เทอร์เทียรีเอมีน (tertiary amine) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางทำให้เกิดสมดุลระหว่างการเกิดเจลกับปฏิกิริยาการเกิดฟอง ทำให้สามารถควบคุมการผลิตโฟมได้ง่าย แต่ข้อเสียของเอมีน คือ จะมีกลิ่นเหลืออยู่ ทำให้มีข้อจำกัดในการใช้งาน ซึ่งหลีกเลี่ยงได้โดยการใช้อเอมีนที่ระเหยได้ ตัวอย่างของตัวเร่งปฏิกิริยาเทอร์เทียรีเอมีนแสดงไว้ในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ตัวอย่างของตัวเร่งปฏิกิริยาเทอร์เชียรีเอมีน

ตัวเร่งปฏิกิริยา	การใช้งาน
1. N,N-ไดเมทิลอะมิโนเอทานอล (N,N-dimethylaminoethanol) $(\text{CH}_3)_2\text{NCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$	ราคาถูก กลิ่นไม่รุนแรง ใช้ในโฟมยืดหยุ่นที่ใช้พอลิเอเทอร์เป็นพอลิออล
2. N,N-ไดเมทิลไซโคลเฮกซิลลามีน (N,N-dimethylcyclohexylamine) 	เป็นของเหลวที่มีกลิ่นรุนแรง ใช้ทำโฟมแข็ง โฟมยืดหยุ่น และโฟมกึ่งแข็งบางชนิด ที่ใช้พอลิเอสเตอร์เป็นพอลิออล
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 และพอลิเอเทอร์
5. 1-(2-ไฮดรอกซิลโพรพิล)อิมิดาโซล 1-(2-hydroxypropyl)imidazole 	ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในโฟมที่ใช้พอลิเอเทอร์เป็นพอลิออลและ โฟมแข็งชนิดความหนาแน่นต่ำ

2. โลหะอินทรีย์ (organometallic) ได้แก่ สแตนนัสออกโทเอต (stannous octoate) ซึ่งเป็นสารประกอบดีบุก และไดบิวทิลทินไดลอูเรต (dibutyltin dilaurate) โดยทำหน้าที่คล้ายลูอิสแอซิด (Lewis acid) ซึ่งจะเข้าทำปฏิกิริยากับส่วนที่เป็นเบสของสารไอโซไซยานาตและพอลิออล

สารลดแรงตึงผิว (surfactant)

สารลดแรงตึงผิวเป็นส่วนประกอบสำคัญในกระบวนการสังเคราะห์โฟมพอลิยูรีเทน ซึ่งทำหน้าที่ช่วยในการเกิดโฟม ช่วยลดแรงตึงผิว ควบคุมขนาดและความสม่ำเสมอของเซลล์ และควบคุมปริมาณเซลล์ปิด โดยทำให้เกิดเสถียรภาพของฟองแก๊ส และช่วยลดความเข้มข้นของความเค็มที่ผนังเซลล์

สารลดแรงตึงผิวที่นิยมใช้ คือ ออแกโนซิลอกเซน (organosiloxane) หรือสารลดแรงตึงผิวที่มีซิลิกอนเป็นองค์ประกอบ โดยสารลดแรงตึงผิวที่สำคัญและมีการใช้งานมากจะเป็นประเภทพอลิอีเทอร์ซิลอกเซนที่สามารถละลายน้ำได้ เช่น พอลิไดเมทิลซิลอกเซน [poly(dimethyl siloxane), PMDS] และพอลิฟีนิลเมทิลซิลอกเซน [poly(phenyl siloxane)] เป็นต้น ในการสังเคราะห์โฟมพอลิยูรีเทนอาจใช้สารลดแรงตึงผิวมากกว่า 1 ชนิด ซึ่งโดยทั่วไปเป็นสารอินทรีย์ที่ไม่มีประจุ (non-ionic)

สารฟู (blowing agent)

สารฟูทำให้เกิดฟองหรือรูเล็กๆ ในโครงสร้างของพลาสติก ได้แก่ น้ำ และคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (chlorofluorocarbon, CFC) หรือที่เรียกว่า “ฟรียอน” (Freon) โดยน้ำทำปฏิกิริยากับไอโซไซยานตเกิดเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา ซึ่งอัตราส่วนระหว่างน้ำและพอลิออลจะแตกต่างกันขึ้นกับชนิดของพอลิออลที่ใช้ โดยอัตราส่วนระหว่างน้ำและพอลิเอสเทอร์พอลิออล คือ 3-5:100 ในขณะที่อัตราส่วนระหว่างน้ำและพอลิอีเทอร์พอลิออลจะเป็น 1.8-5:100 สำหรับ CFC เป็นของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำ และกลายเป็นไอได้โดยอาศัยปฏิกิริยาคายความร้อนระหว่างไอโซไซยานตกับพอลิออล แต่เนื่องจากปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่เรียกว่า greenhouse effect ซึ่งเกิดจากฟรียอนที่ไปทำลายชั้นโอโซนในบรรยากาศ จึงได้เปลี่ยนมาใช้สารฟูที่ไม่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ สารไฮโดรคาร์บอน หรือไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (hydrofluorocarbon, HFC) เป็นต้น

สารตัวเติม (filler)

สารตัวเติมที่ใช้เป็นสารอินทรีย์ที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยา ซึ่งวัตถุประสงค์ในการใช้ คือ เพิ่มน้ำหนัก ลดต้นทุน และเพิ่มความแข็งแรง สารตัวเติมที่ใช้ อาจมีลักษณะเป็นผงหรือเส้นใย

การใส่สารตัวเติมที่เป็นผงในโฟมยืดหยุ่น จะช่วยลดความสามารถในการตีไฟ เพิ่มน้ำหนัก อีกทั้งยังช่วยเพิ่มความต้านแรงกด (compressive strength) อีกด้วย

สารตัวเติมที่เป็นเส้นใยจะเพิ่มความต้านแรงดึง (tensile strength) ความแข็งแรง และเพิ่มช่วงอุณหภูมิในการใช้งานของโฟมอีกด้วย

บางครั้งอาจใช้สารตัวเติมที่เป็นแร่ (mineral filler) เพื่อลดต้นทุน และเพิ่มความต้านแรงกดของโฟมแข็ง

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Chian และคณะ [12] ได้หาแนวทางการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งจากน้ำมันปาล์ม โดยนำน้ำมันปาล์ม RBD (refined-bleached-deodorized palm oil) มาผ่านกระบวนการ derivatization ซึ่งเป็นเทคนิคของ Nanyang Technological University มาเปลี่ยนให้เป็นสารพอลิเอสเตอร์ ซึ่งเมื่อให้สารประกอบพอลิเอสเตอร์ทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ MDI โดยมีน้ำมันซิลิโคนเป็นสารลดแรงตึงผิว *n*-dibutyl-tin-dilaurate เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารฟุ้งจะได้โฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งที่มีความหนาแน่นมากกว่า 200 kg/m^3 และมีความต้านแรงกดมากกว่า 1 MPa

Zhang และคณะ [13] ได้เตรียมโฟมพอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่น โดยใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ซึ่งมีพอลิไดเมทิลซิลอกเซนเป็นสายโซ่หลักและพอลิเอทีลีนออกไซด์/โพรพิลีนออกไซด์โคพอลิเมอร์เป็นโซ่กิ่งเพื่อทำให้เซลล์ที่เกิดในโฟมเสถียร จากการทดลองพบว่าสารลดแรงตึงผิวที่มีปริมาณซิลิโคนสูงจะมีแรงตึงผิวต่ำกว่า และช่วยเพิ่มปริมาณฟองอากาศในระหว่างการผสม ซึ่งฟองอากาศเหล่านี้เป็นจุดเริ่มต้นที่ทำให้เซลล์ของโฟมแผ่ขยายออกไป ด้วยเหตุนี้ โฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมจากสารลดแรงตึงผิวที่มีปริมาณซิลิโคนสูงกว่าจะมีฟองที่เล็กกว่า

Andrew และคณะ [14] ได้เตรียมโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งจากพอลิเอสเตอร์ที่ได้จากน้ำมันถั่วเหลือง โดยใช้สารฟุ้ง 2 ชนิด คือ HCFC และไซโคลเพนเทน (cyclopentane) โดยได้ศึกษาผลของชนิดและปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา สารลดแรงตึงผิว สารเชื่อมขวาง และสารฟุ้ง ต่อสมบัติของโฟม พบว่า ความต้านแรงกดของโฟมมีค่ามากที่สุดเมื่อใช้สารลดแรงตึงผิว B-8404 ปริมาณ 2 pph และความต้านแรงกดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณน้ำ กลีเซอริน และไอโซไซยานาตเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ พบว่า โฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งที่เตรียมจากน้ำมันถั่วเหลืองมีสมบัติเชิงกลและสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนเทียบได้กับโฟมที่เตรียมจากพอลิเอสเตอร์ทางการค้า และการที่น้ำเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความต้านแรงกดเพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำทำปฏิกิริยากับไอโซไซยานาตเกิดเป็นพอลิยูเรีย (polyurea) ขึ้นด้วย เป็นผลทำให้ความทนแรงกดของโฟมเพิ่มขึ้น

Maznee และคณะ [15] ได้ศึกษาผลของสารตัวเติม ซึ่งได้แก่ Ethacure 100, Ethacure 300, Amisol (CDE และ KD-1), N-methyl-2,2'-iminodiethanol (MDEA) และฟทาสิกแอนไฮไดรด์ (phthalic anhydride) ต่อสมบัติ (ความหนาแน่น ความแข็ง และเวลาการบ่ม) ของโฟม พอลิยูรีเทนที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่างพอลิเอสเตอร์ผสม (พอลิเอสเตอร์จากน้ำมันปาล์ม 40 กรัม และพอลิเอสเตอร์จากสารปิโตรเลียม 60 กรัม) กับ MDI และใช้น้ำเป็นสารฟุ้ง โดยพบว่าการใส่ Ethacure 100 ปริมาณ 5 pph และ Amisol (ทั้ง CDE และ KD-1) ปริมาณ 10 pph มีผลทำให้ความหนาแน่นของโฟมเพิ่มจาก 264 kgm^{-3} เป็น 398.28 kgm^{-3} และความแข็งเพิ่มจาก 34.5 เป็น 55 shore D ในขณะที่เวลาการบ่มลดจาก 20 นาที เป็น 5 นาที

Badri และคณะ [18] ได้ทำการสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์พอลิออลจากน้ำมันเมล็ดปาล์ม RBD ที่มีหมู่ฟังก์ชันจำนวนมาก พบว่า เมื่อนำพอลิออลที่ได้ไปเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนจะทำให้ได้สมบัติความทนแรงกดที่ดี ซึ่งในการเติมซอร์บิทอล (sorbitol) ลงในระบบของพอลิออลจะเป็นการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันของพอลิออล เป็นผลทำให้มีมวลโมเลกุลและกิ่งของสารประกอบพอลิไฮดริก (polyhydric) มากขึ้น ซึ่งช่วยปรับปรุงการนำความร้อน (thermal conductivity) และเสถียรภาพต่อรูปร่าง (dimensional stability) ทำให้โฟมสามารถต้านแรงกดได้ดีขึ้น

Eid และคณะ [19] ได้เตรียมสารลดแรงตึงผิวที่ละลายน้ำได้ (water-soluble surfactant) โดยผสม TDI ในพอลิเอทิลีน ไกลคอล (polyethylene glycol) และ/หรือน้ำมันละหุ่ง และเอทิลีน ไกลคอล พบว่า สารลดแรงตึงผิวที่ละลายน้ำได้นั้นให้สมบัติการลดแรงตึงผิว การเกิดโฟม และแนวโน้มของการเปียก (wetting tendency) ที่ดีมาก เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวมีความเฉพาะตัว โดยมีมวลโมเลกุลสูง มีหมู่อะโรมาติก และ/หรือส่วนไม่ชอบน้ำของส่วนที่เหลือจากน้ำมันละหุ่ง และมีส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic) ของสายโซ่พอลิออกซีเอทิลีน (polyoxyethylene)