

บทที่ 2

วารสารปริทรรศน์

2.1 น้ำมันปาล์ม (Palm oil)

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



รูปที่ 2.1 ลักษณะของต้นปาล์ม

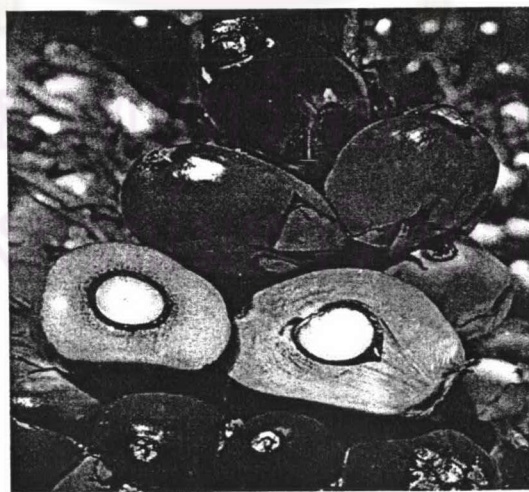
ผลปาล์มน้ำมันประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 2 ส่วนที่ให้น้ำมัน คือ ส่วนที่เป็นเนื้อของผล (pericarp) ซึ่งให้น้ำมันปาล์ม และส่วนที่เป็นเมล็ดซึ่งมีเนื้ออยู่ข้างในเมล็ด (palm kernel) ซึ่งส่วนนี้ จะให้น้ำมันเมล็ดปาล์ม (palm kernel oil) โดยปริมาณน้ำมันในเนื้อขึ้นอยู่กับพันธุ์ สภาพดินฟ้า อากาศ การดูแลบำรุงรักษา และกรรมวิธีในการสกัด แต่โดยเฉลี่ยตามมาตรฐานสากลแล้ว ปริมาณเนื้อผลของปาล์มจะมีน้ำมันอยู่ร้อยละ 20 ส่วนเมล็ดปาล์มจะมีน้ำมันอยู่ร้อยละ 45-50 ซึ่งขณะนี้ทั่วโลกมีการใช้เนื้อของผลปาล์มสกัดน้ำมันปาล์มอยู่ร้อยละ 60-80 และมีการใช้เมล็ดปาล์ม

สกัดน้ำมันปาล์มอยู่ร้อยละ 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

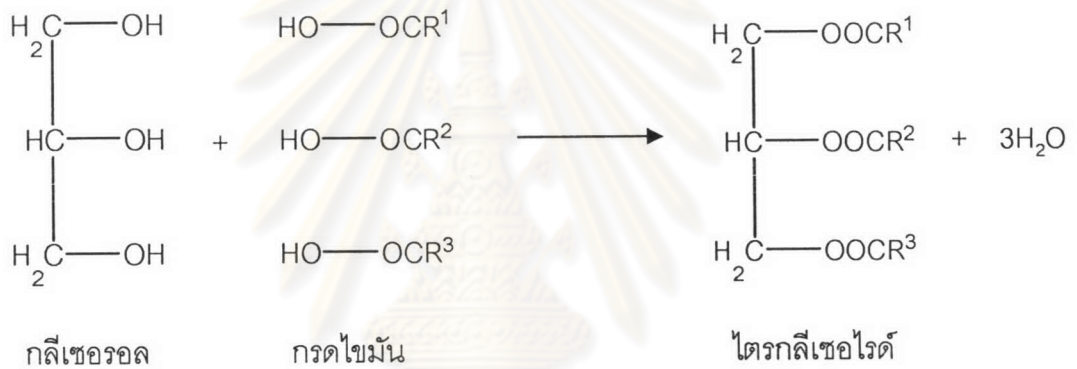
การสกัดน้ำมันปาล์มออกจากผลปาล์ม (รูปที่ 2.2) ทำโดยการอัดแบบไฮดรอลิกหรือใช้การเหยียง ภายหลังจากการอบผลปาล์มในถังที่มีชั้นไอน้ำร้อนอุณหภูมิ 95°C น้ำมันปาล์มดิบที่ได้จะมีสีแดงเข้มอมส้มซึ่งเป็นสีของแคโรทีนอยด์ (carotenoid) ซึ่งมีอยู่ในน้ำมันปาล์มดิบประมาณร้อยละ 0.03-0.15 สีของน้ำมันปาล์มถูกทำให้จางลงในขั้นตอนการฟอกสี และการอัดแก๊สไฮโดรเจน



รูปที่ 2.2 ผลปาล์มน้ำมัน

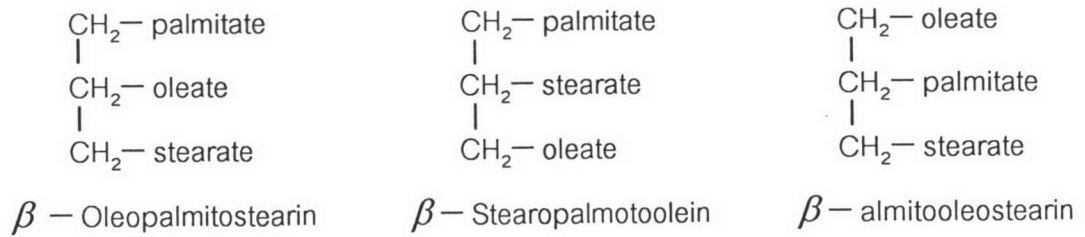
น้ำมันปาล์มได้ถูกใช้ในการปรุงอาหารมากกว่า 5,000 ปี แล้ว ปัจจุบันส่วนใหญ่จะใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร มาร์การีน เนยเหลว ครีม สปู นอกจากนี้ ยังเป็นส่วนผสมของน้ำมันหล่อลื่น น้ำมันเครื่อง ส่วนผสมของน้ำยาขัดรองเท้า ใช้ในการผลิตกรดไขมัน ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตดินสอสี และเทียน เป็นต้น น้ำมันปาล์มยังมีส่วนช่วยในการทำเครื่องสำอางเพราะสามารถแทรกซึมเข้าไปในผิวหนังได้ดีกว่าน้ำมันชนิดอื่น

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



$R^1, R^2, R^3 =$ โซ่กรดไขมัน ($\text{C}_9\text{-C}_{22}$)

ถ้า R^1, R^2 และ R^3 มีโครงสร้างทางเคมีเหมือนกัน ก็จะได้ไตรกลีเซอไรด์แบบง่าย ๆ แต่ถ้าไม่เหมือนกัน ก็จะได้ของผสมของไตรกลีเซอไรด์ ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ ดังนั้น ถ้าไฮโดรไลซ์ (hydrolyze) น้ำมัน จะได้กลีเซอริน (glycerine) และน้ำมันไขมัน (fatty oils) แต่ละโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์สามารถเกิดได้ 3 ไอโซเมอร์ โดยต่างกันตรงชนิดของกรดไขมันที่อยู่ตำแหน่งกลางหรือตำแหน่งเบตา (β) ตัวอย่างเช่น ถ้าโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ประกอบด้วยกรดโอเลอิก (oleic acid) กรดสเตียริก (stearic acid) และกรดปาล์มมิติก (palmitic acid) จะแสดงไอโซเมอร์ได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างไอโซเมอร์ของไตรกลีเซอไรด์

สำหรับปริมาณและสูตรโครงสร้างของกรดไขมันที่มีในน้ำมันปาล์มแสดงไว้ในตารางที่ 2.2 และ 2.3 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)

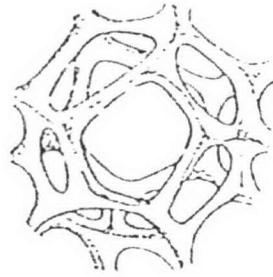
โฟมพลาสติก หรือเซลลูลาร์พลาสติก (cellular plastics) คือ พลาสติกที่สามารถถูกทำให้ขยายตัว หรือพลาสติกที่มีลักษณะคล้ายฟองน้ำ (sponge) โดยทั่วไปวัสดุประเภทนี้ประกอบด้วยเฟส (phase) ตั้งแต่สองเฟสขึ้นไป คือ เฟสที่เป็นพอลิเมอร์ของแข็ง (solid polymer matrix phase) และเฟสที่เป็นแก๊สซึ่งเกิดจากการแตกตัวของสารฟู (blowing agent) [4] กระจายตัวอยู่ในเฟสพอลิเมอร์ในรูปของช่องว่าง (void) ที่เรียกว่า เซลล์ (cell) [5] สำหรับเฟสที่เป็นพอลิเมอร์ของแข็ง อาจเป็นพอลิเมอร์ชนิดเดียวหรือพอลิเมอร์ผสม (polymer blend) นอกจากนี้ อาจมีเฟสที่เป็นของแข็งชนิดอื่นๆ อยู่ด้วย ได้แก่ สารตัวเติม (filler) ซึ่งอาจเป็นสารประกอบอนินทรีย์ เช่น แก้ว เซรามิก และโลหะ หรือสารประกอบอินทรีย์ เช่น พอลิเมอร์ที่เป็นเส้นใยธรรมชาติ

2.2.1 ลักษณะของโฟม

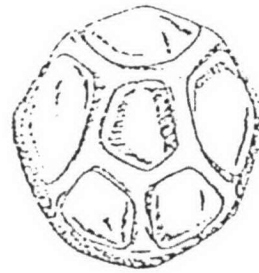
โฟมพลาสติกอาจมีลักษณะยืดหยุ่น (flexible) หรือแข็ง (rigid) ขึ้นกับอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature) องค์ประกอบทางเคมี (chemical composition) ระดับความเป็นผลึก (degree of crystallinity) และระดับการเชื่อมขวาง (degree of crosslinking) ของพอลิเมอร์ นอกจากนี้ โฟมพลาสติกยังอาจมีสมบัติกึ่งยืดหยุ่น (semi-flexible) หรือกึ่งแข็ง (semi-rigid) ก็ได้

สัณฐานโครงสร้าง (structure configuration) ของโฟมมีอยู่สองรูปแบบ [6] คือ

1. แบบเซลล์เปิด (open-cell type) เป็นโครงสร้างที่เกิดจากการเชื่อมต่อกันระหว่างเซลล์ ซึ่งแก๊สสามารถไหลผ่านจากเซลล์หนึ่งไปยังเซลล์อื่นๆ ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ก) โดยทั่วไปโฟมที่มีสัณฐานโครงสร้างแบบนี้จะมีความยืดหยุ่นเหมาะกับการนำไปใช้ทำเบาะนั่งในรถยนต์ ที่นอน เฟอร์นิเจอร์ บรรจุกัมภ์ วัสดุกันกระแทก และฉนวนกันเสียง เป็นต้น
2. แบบเซลล์ปิด (close-cell type) เป็นโครงสร้างที่เซลล์จะประกอบด้วยเยื่อบางๆ ซึ่งเรียกว่าหน้าตาเซลล์ ทำให้แก๊สไม่สามารถไหลผ่านไปมาระหว่างเซลล์ได้แต่สามารถแพร่ผ่านหน้าตาเซลล์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ข) โดยทั่วไปโฟมที่มีโครงสร้างแบบนี้จะแข็ง และเหมาะที่จะนำไปใช้เป็นอุปกรณ์การกีฬา เช่น กระดานโต้คลื่น หรือใช้เป็นฉนวนกันความร้อน เป็นต้น



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.4 สัณฐานโครงสร้างของเซลล์ [4]

2.2.2 กระบวนการเกิดโฟม (Foam formation) [11]

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

ขั้นตอนที่ 1 : การเกิดฟอง (bubble formation or initiation)

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนแรกของกระบวนการเกิดโฟม โดยทำให้เกิดฟองแก๊สขึ้นและขยายตัวต่อไปในสารละลายหรือพอลิเมอร์เหลว ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดฟอง ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน ความชื้น 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 คือพื้นที่สัมผัสทั้งหมด (total interfacial area) โดยเมื่อค่าแรงตึงผิวมีค่าต่ำจะทำให้เกิดฟองได้ง่าย

การเกิดโครงสร้างโฟมของพลาสติกมีได้หลายวิธีด้วยกัน ได้แก่

- การสลายตัวของสารฟูจากทำให้ความร้อนหรือผลจากปฏิกิริยาคายความร้อนระหว่างปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันซึ่งจะทำให้เกิดแก๊สไนโตรเจน หรือคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น
- การเกิดฟองแก๊สเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี โดยแก๊สจะเกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างสารเคมี 2 ชนิด ซึ่งแก๊สจะถูกปล่อยออกมาพร้อมกับการพอลิเมอไรเซชันและการเชื่อมขวาง เช่น ปฏิกิริยาระหว่างไอโซไซยานูเรตกับน้ำ ได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทน เป็นต้น
- การลดความดัน ซึ่งเป็นการขยายตัวของแก๊สในเนื้อพอลิเมอร์ ตัวอย่างเช่น การอัดรีด (extrusion) โฟมพอลิสไตรีน
- การทำให้เกิดฟองแก๊สโดยการกวนเชิงกลในระบบพอลิเมอร์เหลว หรือสารละลายพอลิเมอร์ หรือสารแขวนลอยพอลิเมอร์ แล้วทำให้แข็งตัวโดยตัวเร่ง และ/หรือการลดความร้อนทำให้เกิดการกักฟองแก๊สไว้ในเนื้อพลาสติก
- การเติมฮอลโลว์ไมโครสเฟียร์ (hollow microsphere) ในเนื้อพอลิเมอร์ซึ่งไมโครสเฟียร์อาจเป็นเม็ดแก้วหรือเม็ดพลาสติก
- 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) ฟองที่เล็กกว่ามีแนวโน้มที่จะทำให้ค่าความแตกต่างของความดันเท่ากันได้โดยการขยายตัวหรือเพิ่มขนาดขึ้น 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

ขณะที่เกิดการขยายตัวของฟองในโพลิเมอร์พลาสติก สมบัติต่างๆของวัสดุจะเปลี่ยนไปอย่างมาก โดยอัตราการขยายตัวของฟองขึ้นกับสมบัติวิสโคอีลาสติก (viscoelastic) ของพอลิเมอร์ ความดันที่เกิดเนื่องจากสารฟู ความดันภายนอกที่เกิดบนโพลิเมอร์พลาสติก ขนาดของเซลล์ อัตราการซึมผ่านของสารฟูในพอลิเมอร์ และการเปลี่ยนแปลงความหนืดของของไหลซึ่งมีผลต่ออัตราการขยายตัวของเซลล์และการไหลของพอลิเมอร์จากผนังเซลล์สู่บริเวณที่เชื่อมต่อกันของเซลล์ ซึ่งนำไปสู่การยุบตัว (collapse) ของโพลิเมอร์พลาสติก

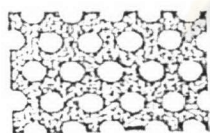
ขั้นตอนที่ 3 : ความเสถียรของฟอง (bubble stability)

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนสุดท้ายและเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในกระบวนการเกิดโฟม ซึ่งฟองที่เกิดขึ้นในพอลิเมอร์เหลวอาจจะไม่เสถียรและยุบตัวภายใต้แรงโน้มถ่วง ซึ่งความเสถียรของโครงสร้างของโฟมขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ อุณหภูมิ โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ จะทำให้ความหนืดและแรงตึงผิวลดลง ส่วนอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ผนังเซลล์บางลง และเกิดการยุบตัวเมื่อได้รับแรง นอกจากนี้ ความเสถียรของโครงสร้างโฟมยังขึ้นกับการเชื่อมขวางอีกด้วย

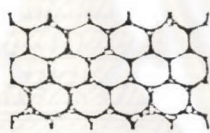
การป้องกันการเกิดรอยแตกของผนังเซลล์ ทำได้โดยทำให้เกิดความเสถียรก่อนที่จะเกิดรอยแตกขึ้นที่ผนังเซลล์ สำหรับในระบบโพลิเมอร์สามารถทำได้โดยการเพิ่มความหนืดของพอลิเมอร์ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่สุดต่อความเสถียรของโฟม [4] การเพิ่มความหนืดจะเป็นการลดผลของการถ่ายเทของของเหลว (drainage effect) ไปรอยต่อระหว่างเซลล์ ซึ่งการเพิ่มความหนืดของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น สามารถทำได้โดยเพิ่มน้ำหนักระหว่างโมเลกุลระหว่างการพอลิเมอไรเซชัน หรือการเชื่อมขวาง (crosslinking) หรือการลดอุณหภูมิ

วิธีทำให้โฟมมีความเสถียรมีหลายวิธี ได้แก่ วิธีการทางเคมี เช่น กระบวนการพอลิเมอไรเซชันของเทอร์โมเซตพอลิเมอร์ หรือวิธีทางกายภาพ เช่น การทำให้เทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์ที่ขยายตัวเย็นลงที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันเพื่อป้องกันการไหลของพอลิเมอร์ [7]

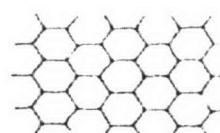
จากขั้นตอนต่างๆในกระบวนการเกิดโฟม ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดฟอง (nucleation) การเติบโต (growth) ของฟองแก๊ส และการขยายตัวของแก๊สในระบบพอลิเมอร์เหลว สามารถแสดงขั้นตอนต่างๆ ไว้ในรูปที่ 2.5 โดยรูป (ก) แสดงการเกิดฟองในระบบพอลิเมอร์เหลว โดยฟองจะมีรูปร่างทรงกลม รูป (ข) แสดงการเติบโตของฟองแก๊ส รูป (ค) ฟองแก๊สขยายตัวและสัมผัสกันระหว่างฟองทำให้เกิดการเปลี่ยนของรูปร่างเป็นทรง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



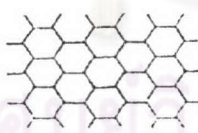
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

รูปที่ 2.5 แผนภาพขั้นตอนต่างๆ ในกระบวนการเกิดโฟม [8]

2.3 โฟมพอลิยูรีเทน (Polyurethane foam)

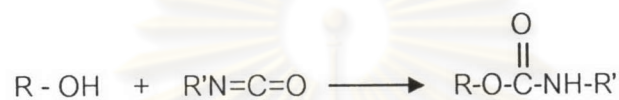
พอลิยูรีเทน คือ พอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยหมู่ยูรีเทน ($-NHCOO-$) ในสายโซ่โมเลกุล โดยพอลิยูรีเทนในทางการค้าสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาแบบรวมตัว (addition reaction) ระหว่างได- หรือพอลิไอโซไซยานาต (di- or polyisocyanate) กับ ได- หรือพอลิไฮดรอกซิลแอลกอฮอล์

(di- or polyhydric alcohol) หรือสารประกอบอื่นๆ ที่มีไฮดรอกซิลอะตอมที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาอยู่ในโครงสร้างโมเลกุล

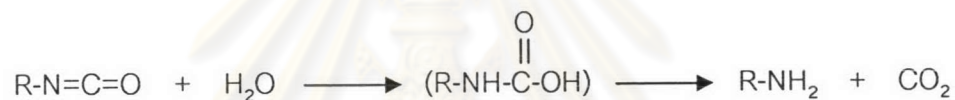
2.3.1 ปฏิกิริยาการเกิดโฟมพอลิยูรีเทน [4]

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการสังเคราะห์โฟมพอลิยูรีเทนมีดังนี้

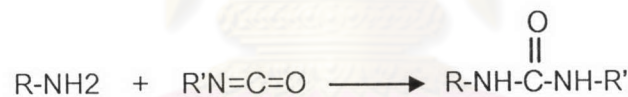
1. ปฏิกิริยาระหว่างไอโซไซยาเนตกับไฮดรอกซิลเกิดเป็นยูรีเทน



2. ปฏิกิริยาระหว่างไอโซไซยาเนตกับน้ำเกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และเอมีน



3. ปฏิกิริยาระหว่างเอมีนกับไอโซไซยาเนตเกิดเป็นพันธะยูเรีย

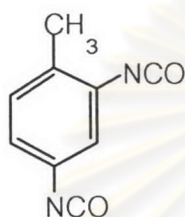


ถ้าไดไอโซไซยาเนตทำปฏิกิริยากับไดออลจะได้พอลิยูรีเทนแบบเชิงเส้น (linear polyurethane) และถ้าทำปฏิกิริยากับพอลิออลที่มีหมู่ไฮดรอกซิลมากกว่า 2 หมู่ จะได้พอลิยูรีเทนแบบกิ่งหรือแบบเชื่อมขวาง (branched or crosslinked polyurethane) นอกจากนี้ พอลิยูรีเทนแบบเชื่อมขวางยังสามารถเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างหมู่ยูรีเทนที่เกิดขึ้นกับหมู่ไอโซไซยาเนต ได้เป็นหมู่อัลโลฟานาต (allophanate) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 หรือเกิดหมู่ไบยูเรต (biuret) เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 100°C โดยจะเกิดหมู่ยูเรียขึ้นก่อนจากการที่หมู่เอมีนทำปฏิกิริยากับหมู่ไอโซไซยาเนต ซึ่งหมู่เอมีนอาจอยู่ในรูปของไดเอมีนที่ใช้เป็นสารเพิ่มขนาดสายโซ่ (chain extender) หรือจากปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับไอโซไซยาเนต และเมื่อหมู่ยูเรียที่เกิดขึ้นทำปฏิกิริยากับหมู่ไอโซไซยาเนตจะได้หมู่ไบยูเรต ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งทั้งหมู่อัลโลฟานาต และไบยูเรตจะเป็นส่วนที่ทำให้เกิดพอลิยูรีเทนแบบเชื่อมขวาง

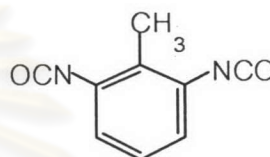
พอลิยูรีเทนเป็นกลุ่มพอลิเมอร์ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่มีตั้งแต่เป็นวัสดุยืดหยุ่นที่เป็นเทอร์โมพลาสติกชนิดอ่อนนุ่มจนถึงโฟมเทอร์โมเซตชนิดแข็ง พอลิยูรีเทนสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม คือ โฟมชนิดยืดหยุ่น (flexible foam) โฟมชนิดแข็ง (rigid foam) และ

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

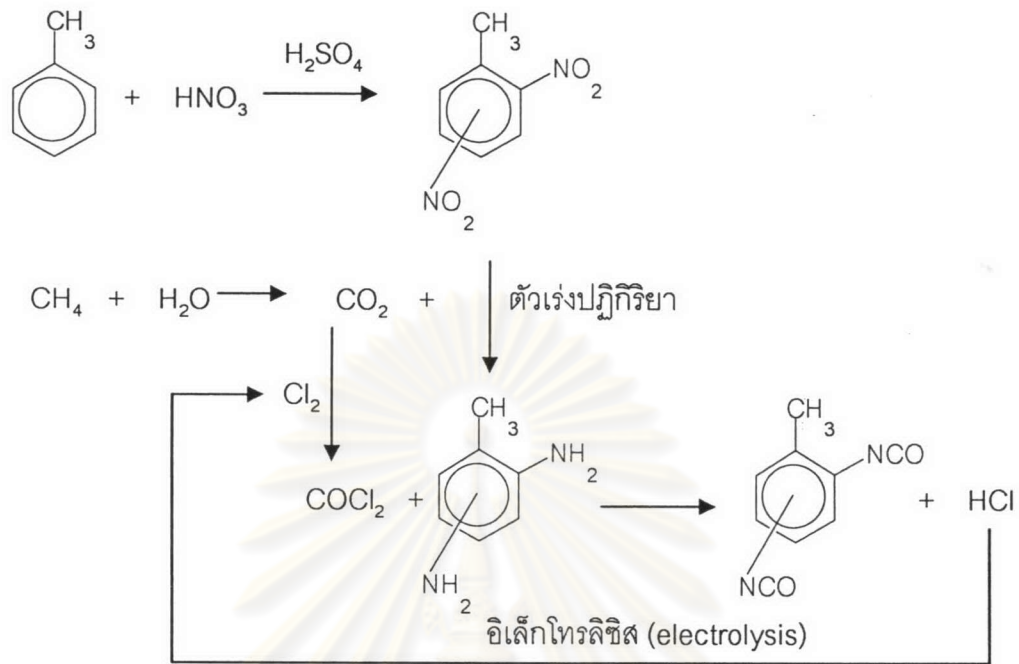


2,6-toluene diisocyanate

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 สังเคราะห์ได้จากโทลูอีนโดยกระบวนการไนเตรชัน (nitration) รีดักชัน (reduction) และฟอสจีนชัน (phosgenation) โดย TDI 80/20 จะผลิตโดยผ่านกระบวนการไนเตรชัน 2 ครั้ง ติดต่อกันจากนั้นทำการรีดักชันเพื่อให้ได้เอมีน จากนั้นตามด้วยกระบวนการฟอสจีนชันเพื่อให้ได้ ไดไอโซไซยาเนต ซึ่งกระบวนการผลิตแสดงได้ดังรูปที่ 2.7 [4]

ส่วน TDI 60/40 จะผ่านกระบวนการไนเตรชัน 1 ครั้ง จากนั้นผ่านกระบวนการเกิดผลึก (crystallization) ทำให้ได้ออร์โธไนโตรโทลูอีนบริสุทธิ์ (pure *o*-nitrotoluene) หรือพาราไนโตรโทลูอีนบริสุทธิ์ (pure *p*-nitrotoluene) แล้วจึงผ่านกระบวนการไนเตรชัน รีดักชัน และฟอสจีนชัน ตามลำดับ โดยที่อุณหภูมิห้อง 2,4-TDI จะมีความไวต่อปฏิกิริยามากกว่า 2,6-TDI เนื่องจากผลของหมู่แทนที่ (steric hindrance effect) แต่ที่อุณหภูมิใกล้ 100°C ผลของหมู่แทนที่จะไม่มีผลต่อความไวของปฏิกิริยา ทำให้ไอโซเมอร์ทั้ง 2 มีความไวต่อปฏิกิริยาเท่ากัน

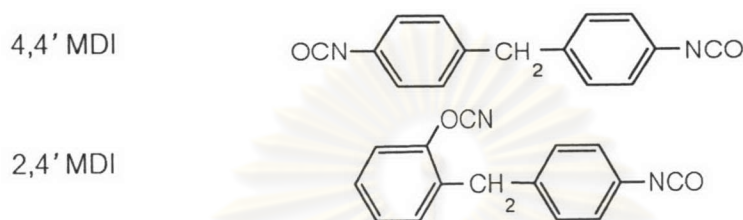


รูปที่ 2.7 กระบวนการผลิต TDI 80/20

TDI มีความเป็นพิษ โดยไอระเหยและฝุ่นละอองของ TDI ทำให้เกิดความระคายเคืองต่อเยื่อทางเดินหายใจตอนบนและตอนล่าง แม้จะได้รับไอในครั้งสั้นๆ ก็ตาม ส่งผลทำให้เกิดการระคายเคือง หายใจไม่ออก เกิดอาการแสบคอ ไอ หรือเป็นแผลถาวรในปอด นอกจากนี้ยังทำให้เกิดอาการอาเจียน และเจ็บช่องท้อง รวมทั้งทำให้ปอดทำงานผิดปกติ ถ้ามีการสัมผัสกับ TDI นานๆ จะทำให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนัง เกิดการเป็นผื่นแดง บวม เป็นแผลหรือไหม้ นอกจากนี้ ไอของ TDI ถึงแม้มีความเข้มข้นต่ำ แต่ถ้าโดนจะทำให้หน้าตาไหลและแสบตาเล็กน้อย แต่ถ้าโดนสารที่มีความเข้มข้นสูงจะทำให้ปวดและแสบตาอย่างมาก ถ้า TDI เข้าตาจะทำให้ระคายเคืองอย่างรุนแรงและทำให้ตาอักเสบเรื้อรังได้ [9]

MDI

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

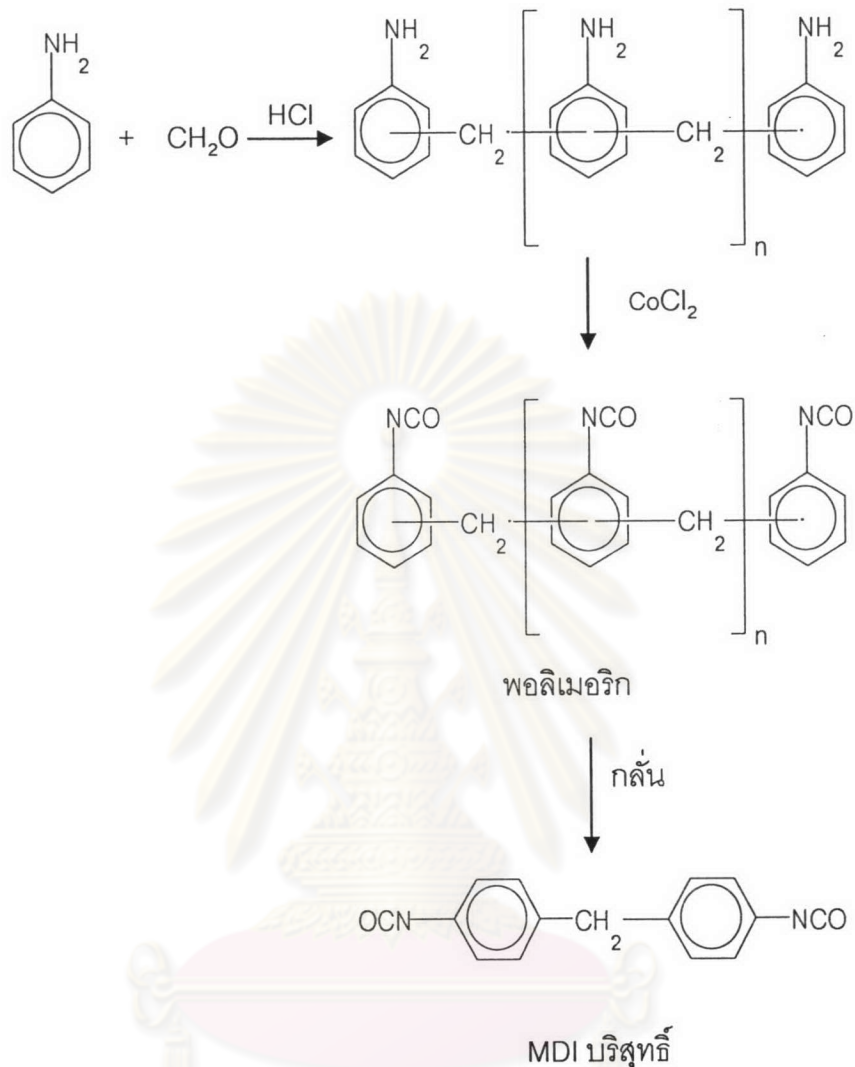


รูปที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีของ 4,4'-MDI และ 2,4'-MDI

MDI บริสุทธิ์ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเป็นของแข็งขาวถึงสีเหลืองอ่อน 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 2.9 [4]

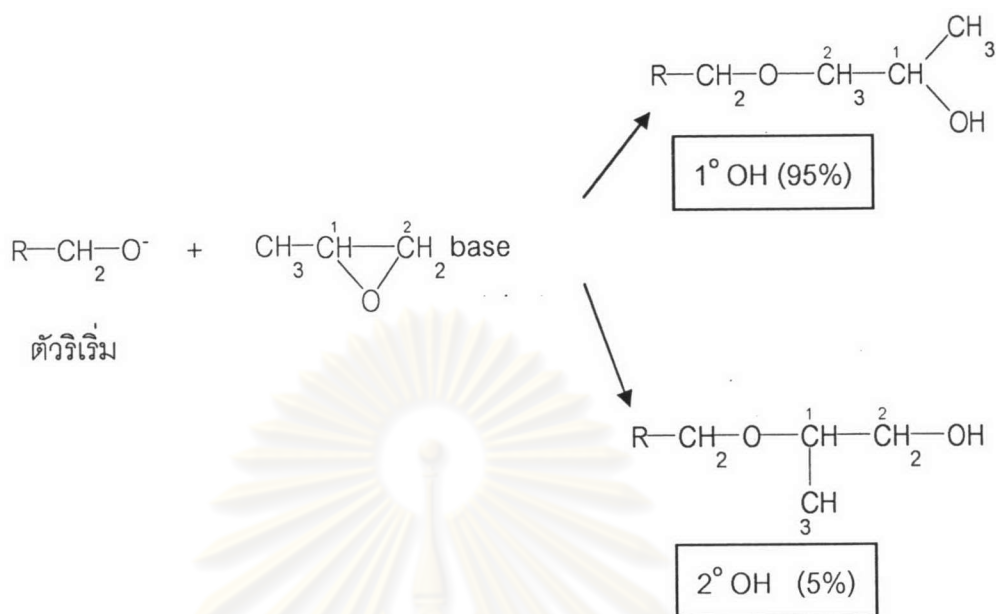
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.9 กระบวนการผลิตพอลิเมอร์ริก MDI และ MDI บริสุทธิ์

พอลิออล (polyols)

พอลิออลที่ใช้ในการผลิตโฟมพอลิยูรีเทนมีหลายรูปแบบ โดยพอลิออลที่นิยมใช้อาจเป็นพอลิอีเทอร์พอลิออล (polyether polyols) และพอลิเอสเทอร์พอลิออล (polyester polyols) ซึ่งสมบัติต่างๆ และความยากง่ายในการขึ้นรูปโฟมขึ้นกับการเลือกใช้พอลิออล โดยลักษณะจำเพาะและสมบัติของโฟมพอลิยูรีเทนที่ได้จะขึ้นกับขนาด น้ำหนักโมเลกุล ฟังก์ชันนัลลิตี (functionality) และโครงสร้างของพอลิออล สำหรับพอลิออลที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและฟังก์ชันนัลลิตีต่ำจะนิยมใช้ในการผลิตโฟมชนิดยืดหยุ่นและอีลาสโตเมอร์ ส่วนโฟมชนิดแข็งจำเป็นต้องใช้พอลิออลที่มีน้ำหนัก



รูปที่ 2.10 ปฏิกิริยาเปิดวงไพโรฟีนออกไซด์ที่ใช้ผลิตพอลิเอเทอร์พอลิออล

พอลิเอเทอร์พอลิออล

พอลิเอเทอร์พอลิออลมีความว่องไวต่อปฏิกิริยามากกว่าและให้โฟมที่มีสมบัติเชิงกลดีกว่าพอลิเอเทอร์พอลิออล แต่จะเปลี่ยนสีเป็นสีเหลืองได้ง่ายเมื่อถูกแสงแดด นอกจากนี้ ยังมีความหนืดมาก ยากต่อการใช้งาน และมีราคาแพงมากกว่าพอลิเอเทอร์พอลิออล ดังนั้น จึงนิยมใช้ในงานที่ต้องการสมบัติที่ดีมากเท่านั้น เช่น งานเบาะรถยนต์ และงานปรับปรุงสมบัติความทนความร้อนของโฟมชนิดแข็งบางประเภท และโฟมยืดหยุ่นที่ทำจากพอลิเอเทอร์พอลิออลและ TDI จะมีค่าการดึงยืด (elongation) ที่สูง และมีความทนทานต่อสารซักแห้ง (dry cleaning solvent) ได้ดี

พอลิเอเทอร์พอลิออลมีความต้านทานต่อการออกซิไดส์ และสามารถทนอุณหภูมิสูงได้ดีกว่าพอลิเอเทอร์พอลิออลซึ่งสมบัตินี้เป็นสมบัติที่สำคัญมากต่อการผลิตโฟมชนิดแข็ง

พอลิเอเทอร์พอลิออลเตรียมได้จากปฏิกิริยาควบแน่น (condensation reaction) ระหว่างไกลคอล (glycol) กับไดคาร์บอกซิลิกแอซิด (di-carboxylic acid) เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน (esterification) จึงทำให้เกิดน้ำในปฏิกิริยาถึง 15% ดังนั้น ผลผลิตที่ได้มากที่สุด คือ 85% โดยน้ำหนักของวัตถุดิบที่ใช้ ซึ่งต่างจากพอลิเอเทอร์พอลิออลที่ได้ผลผลิต 100% ด้วยเหตุนี้ จึงทำให้พอลิเอเทอร์พอลิออลมีราคาแพงกว่าพอลิเอเทอร์พอลิออล

ตารางที่ 2.5 สมบัติและการใช้งานของพอลิเอสเทอร์พอลิออลในการผลิตโฟมพอลิยูรีเทน
ชนิดต่างๆ

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

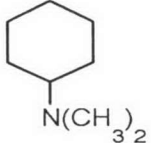

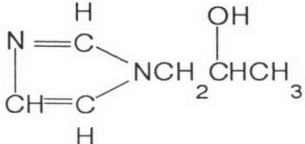
สำหรับงานวิจัยนี้ เป็นการทดลองนำน้ำมันปาล์มมาดัดแปรให้เป็นสารประกอบพอลิออล
แล้วนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมพอลิยูรีเทนชนิดแข็ง

สารเติมแต่ง (additives)

ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ที่นิยมใช้มี 2 ชนิด คือ

1. เทอร์เทียรีเอมีน (tertiary amine) : เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้อย่างกว้างขวาง
ทำให้เกิดสมดุลระหว่างการเกิดเจลกับปฏิกิริยาการเกิดฟอง ทำให้สามารถควบคุมการผลิตโฟมได้
ง่าย แต่ข้อเสียของเอมีน คือ จะมีกลิ่นเหลืออยู่ ทำให้มีข้อจำกัดในการใช้งานโฟม ซึ่งหลีกเลี่ยงโดย
การใช้เอมีนที่ระเหยได้ 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 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 สแตนเนสออกโทเอท (stannous octoate) ซึ่งเป็นสารประกอบดีบุก และไดบิวทิลทินไดลอูเรท (dibutyltin dilaurate) โดยจะทำหน้าที่คล้ายลูอิสแอซิด (Lewis acid) ซึ่งจะเข้าทำปฏิกิริยากับส่วนที่เป็นเบสของสารไอโซไซยาเนตและพอลิออล

สารลดแรงตึงผิว (surfactant)

สารลดแรงตึงผิวเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในกระบวนการสังเคราะห์พอลิยูรีเทนโฟม ซึ่งทำหน้าที่ช่วยในการเกิดโฟม ช่วยลดแรงตึงผิว ช่วยควบคุมขนาดเซลล์ของโฟมและความสม่ำเสมอของเซลล์ และควบคุมปริมาณเซลล์ปิด โดยทำให้เกิดความเสถียรของฟองแก๊ส และช่วยลดความเข้มข้นของความเค็มที่ผนังเซลล์

สารลดแรงตึงผิวที่นิยมใช้ คือ ออแกนซิลอกเซน (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 "ฟรีออน" (Freon) โดยน้ำจะทำปฏิกิริยากับไอโซไซยาเนตเกิดเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา โดยทั่วไปอัตราส่วน ระหว่างน้ำและพอลิออลจะแตกต่างกันขึ้นกับชนิดของพอลิออลที่ใช้ นั่นคืออัตราส่วนระหว่างน้ำและพอลิเอสเตอร์พอลิออล คือ 3-5 : 100 ในขณะที่อัตราส่วนระหว่างน้ำและพอลิอีเทอร์พอลิออลจะเป็น 1.8-5 : 100 สำหรับ CFCs นั้นเป็นของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำและกลายเป็นไอได้โดยอาศัยปฏิกิริยาคายความร้อนระหว่างไอโซไซยาเนตกับพอลิออล แต่เนื่องจากปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่เรียกว่า greenhouse effect ซึ่งเกิดจากการที่ฟรีออนไปทำลายชั้นโอโซนในบรรยากาศ ทำให้การผลิตโฟมพอลิยูรีเทนได้หันมาใช้สารฟูที่ไม่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบ เช่น สารไฮโดรคาร์บอน หรือไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (hydrofluorocarbon : HFCs) เป็นต้น

สารตัวเติม (filler)

สารตัวเติมที่ใช้เป็นสารอนินทรีย์ที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยา (inert inorganic filler) ซึ่งวัตถุประสงค์ในการใช้สารตัวเติม คือ เพื่อเพิ่มน้ำหนัก ลดต้นทุน และเพิ่มความแข็งแรง สารตัวเติมที่ใช้อาจมีลักษณะเป็นผงหรือเส้นใย

การเติมสารตัวเติมที่เป็นผงเข้าในโฟมยืดหยุ่น จะช่วยลดความสามารถในการตีไฟ ช่วยเพิ่มน้ำหนัก อีกทั้งยังช่วยเพิ่มความทนแรงกด (compression strength) ด้วย

สารตัวเติมที่เป็นเส้นใยจะช่วยเพิ่มความทนแรงดึง (tensile strength) เพิ่มความแข็งแรง และช่วยเพิ่มช่วงของอุณหภูมิในการใช้งานของโฟมอีกด้วย

ในบางครั้งอาจใช้สารตัวเติมที่เป็นแร่ (mineral filler) เพื่อลดต้นทุน และเพิ่มความทนแรงกดของโฟมแข็ง

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

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

Zhang และคณะ [13] ได้เตรียมโฟมพอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่น (flexible polyurethane foam) โดยการใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดกราฟท์โคพอลิเมอร์ซึ่งประกอบด้วยพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (poly-dimethylsiloxane) เป็นสายโซ่หลัก และพอลิเอทิลีนออกไซด์/โพรพิลีนออกไซด์โคพอลิเมอร์เป็นโซ่กิ่ง เพื่อทำให้เซลล์ที่เกิดในโฟมเสถียร จากการทดลองพบว่าสารลดแรงตึงผิวที่มีปริมาณซิลิโคนสูงกว่าจะมีแรงตึงผิวต่ำกว่า และช่วยเพิ่มปริมาณฟองอากาศในระหว่างการผสม ซึ่งฟองอากาศเหล่านี้เป็นจุดเริ่มต้นที่ทำให้เซลล์ของโฟมแผ่ขยายออกไป ด้วยเหตุนี้ โฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมจากสารลดแรงตึงผิวที่มีปริมาณซิลิโคนสูงกว่าจะมีฟองที่เล็กกว่า

Andrew และคณะ [14] 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 [15] ได้ศึกษาผลของสารตัวเติม ซึ่งได้แก่ Ethacure 100, Ethacure 300, Amisol (CDE และ KD-1), N-methyl-2,2'-iminodiethanol (MDEA) และฟทาลิกแอนไฮไดรด์ (phthalic anhydride) ต่อสมบัติ (ความหนาแน่น ความแข็ง และเวลาการบ่ม) ของโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่างพอลิออลผสม (พอลิออลจากน้ำมันปาล์ม 40 กรัม และพอลิออลจากสารปิโตรเลียม 60 กรัม) กับ MDI และใช้น้ำเป็นสารฟู โดยเขาพบว่าการใช้ 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

Yan Hong Hu และคณะ [16] ได้เตรียมโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งจากน้ำมันเรพซิด (rape seed oil) โดยการนำน้ำมันเรพซิดมาเตรียมเป็นพอลิออลจากกระบวนการไฮดรอกซิเลชัน (hydroxylation) พันธะคู่มืออยู่ในสายโซ่อะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัวของน้ำมันเรพซิด ด้วยกรดเปอร์ออกซี (peroxy acid) จากนั้นนำมาผ่านกระบวนการแอลกอฮอล์ลิซิส (alcoholysis) ด้วยไตรเอทานอลามีน (triethanolamine) เพื่อเพิ่มค่าไฮดรอกซิล (hydroxyl value) ของผลิตภัณฑ์ที่ได้ แล้วจึงนำไปผสมกับสารไอโซไซยาเนต พบว่าโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งที่เตรียมจากน้ำมันเรพซิดมีความทนแรงกดต่ำกว่าโฟมที่เตรียมจากพอลิออลที่ได้จากสารปิโตรเลียม ถึงแม้ความหนาแน่นของโฟมที่เตรียมได้จะมีค่าสูงกว่า

Jian Feng Jin และคณะ [17] ได้เตรียมโรซินพอลิเอสเทอร์พอลิออล (rosin-based polyester polyols) จากโรซินมาเลอิกแอนไฮไดรด์แอดดัก (rosin-maleic anhydride adduct), ไดเอทิลีนไกลคอล (diethylene glycol), เอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol) และสารเร่งปฏิกิริยา โดยการใส่และไมใส่กรดอะดิพิค (adipic acid) และฟทาลิกแอนไฮไดรด์ (phthalic anhydride) ซึ่งโคมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งได้ถูกเตรียมจากโรซินพอลิเอสเทอร์พอลิออลเหล่านี้ แล้วนำไปเปรียบเทียบกับโคมที่เตรียมพอลิเอสเทอร์พอลิออลทางการค้า (Daltolac™ P744) ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า พฤติกรรมการเกิดโคมของผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้จากโรซินพอลิเอสเทอร์พอลิออลคล้ายกับที่เตรียมจากพอลิออลทางการค้า แต่ค่าความทนแรงกดทั้งในแนวขนานและตั้งฉากกับทิศทางของการเกิดโคมมีค่าสูงกว่า ส่วนเสถียรภาพทางความร้อนที่อุณหภูมิ 100 และ -30°C มีค่าใกล้เคียงกัน หรือบางค่าดีกว่าโคมที่ผลิตจากพอลิออลทางการค้า นอกจากนี้ โคมที่เตรียมจากโรซินพอลิเอสเทอร์พอลิออลยังมีสภาพนำความร้อนต่ำกว่า และมีพลังงานกระตุ้น (activation energy) ระหว่างกระบวนการไพโรลิซิส (pyrolysis) ที่สูงกว่ามาก

Badri และคณะ [18] ได้ทำการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์พอลิออลจากน้ำมันเมล็ดปาล์ม RBD ที่มีหมู่ฟังก์ชันอยู่มาก พบว่า เมื่อนำพอลิออลที่ได้ไปเตรียมโคมพอลิยูรีเทนจะทำให้ได้สมบัติความทนแรงกดที่ดี ซึ่งในการเติมซอร์บิทอล (sorbitol) ลงในระบบของพอลิออลจะเป็นการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันของพอลิออล เป็นผลทำให้มีมวลโมเลกุลและกิ่งของสารประกอบพอลิไฮดริค (polyhydric) มากขึ้น ซึ่งจะช่วยปรับปรุงการนำความร้อน (thermal conductivity) และความเสถียรต่อรูปร่าง (dimensional stability) ทำให้โคมสามารถทนแรงกดได้ดีขึ้น

Eid และคณะ [19] ได้ทำการเตรียมสารลดแรงตึงผิวที่สามารถละลายน้ำได้ (water-soluble surfactant) โดยการผสม TDI ลงในพอลิเอทิลีนไกลคอล (polyethylene glycol) และ/หรือน้ำมันละหุ่ง และเอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol) พบว่า สารลดแรงตึงผิวที่สามารถละลายน้ำได้นั้นให้สมบัติการลดแรงตึงผิว การเกิดโคม (foaming) และแนวโน้มของการเปียก (wetting tendency) ที่ดีมาก เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวที่มีความเฉพาะตัว โดยมีมวลโมเลกุลสูง มีหมู่อะโรมาติก และ/หรือส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ของส่วนที่หลงเหลือจากน้ำมันละหุ่ง และมีส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic) ของสายโซ่พอลิออกซีเอทิลีน (polyoxyethylene)