

บทที่ 4



ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การเตรียมสารประกอบพอลิออลจากน้ำมันปาล์ม

4.1.1 ลักษณะของสารประกอบพอลิออล

เมื่อนำน้ำมันปาล์มมาทำปฏิกิริยากับเพนตะอิริทริทอล (หรือกลีเซอรอล) โดยใช้แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบพอลิออลที่มีลักษณะทางกายภาพ และค่าไฮดรอกซิล ดังแสดงในตารางที่ 4.1

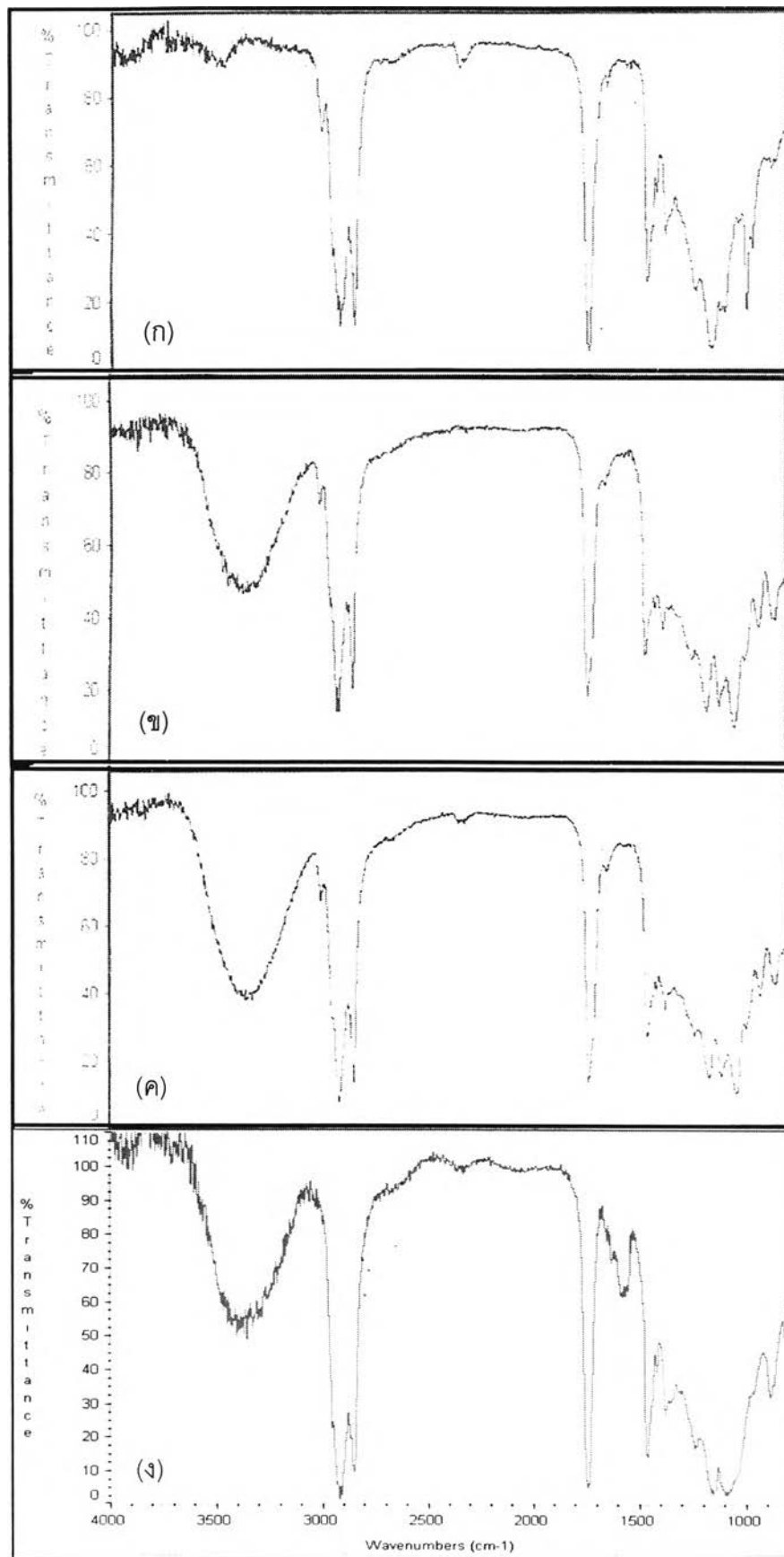
ตารางที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพ และค่าไฮดรอกซิลของสารประกอบพอลิออลจากน้ำมันปาล์ม

สารประกอบพอลิออล	ลักษณะทางกายภาพ	ค่าไฮดรอกซิล (mg KOH /g)
ปาล์มพอลิออล-P	ของเหลวที่มีความหนืด สีน้ำตาลอ่อน	385
ปาล์มพอลิออล-G	ของแข็งเป็นไข เหมือนขี้ผึ้ง สีเหลืองอ่อน	154

4.1.2 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค FT-IR

เมื่อนำน้ำมันปาล์ม ปาล์มพอลิออล-P ปาล์มพอลิออล-G และปาล์มพอลิออล-M มาวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR และเปรียบเทียบสเปกตรัมระหว่างน้ำมันปาล์ม กับพอลิออลทั้ง 3 ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 4.1 พบว่า FT-IR สเปกตรัมของปาล์มพอลิออลทั้ง 3 ชนิด ปรากฏพีกของหมู่ไฮดรอกซิลที่ตำแหน่ง $3300-3500\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งไม่ปรากฏใน FT-IR สเปกตรัมของน้ำมันปาล์ม ดังนั้น จึงอาจสรุปได้ว่าปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันปาล์มและเพนตะอิริทริทอล (หรือกลีเซอรอล) ได้สารประกอบเอสเทอร์พอลิออลเป็นผลิตภัณฑ์

การตรวจสอบเพื่อยืนยันว่าเป็นสารประกอบพอลิออล ทำได้โดยนำผลิตภัณฑ์ไปทดสอบการละลายในเอทานอล (สารตัวอย่าง 1 ส่วน ในเอทานอล 3 ส่วน) เนื่องจากโดยปกติน้ำมันปาล์มไม่ละลายในเอทานอล แต่พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถละลายในเอทานอลได้ดี แสดงให้เห็นว่าน้ำมันปาล์มเข้าทำปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์กับเพนตะอิริทริทอล (หรือกลีเซอรอล) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบเอสเทอร์พอลิออล



รูปที่ 4.1 FT-IR สเปกตรัมของ (ก) น้ำมันปาล์ม (ข) ปาล์มพอลิออล-G (ค) ปาล์มพอลิออล-P และ (ง) ปาล์มพอลิออล-M

4.1.3 การตรวจสอบความหนืดของสารประกอบพอลิออล และ modified MDI

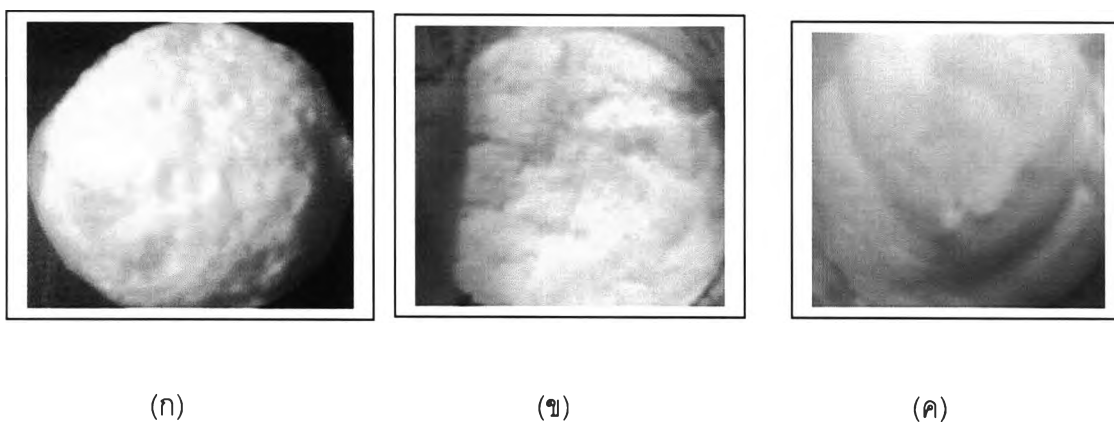
เนื่องจากความหนืดมีผลต่อการเกิดฟองของโพลียูรีเทน จึงนำพอลิออล-P พอลิออล-M พอลิออลทางการค้า และ modified MDI มาวัดความหนืด ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งผลที่ได้แสดงในตารางที่ 4.2 และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความหนืดของพอลิออล 3 ชนิด พบว่าความหนืดของพอลิออล-P สูงกว่าพอลิออลทั้ง 2 ชนิดมาก (พอลิออล-G เป็นของแข็ง)

ตารางที่ 4.2 ความหนืดของพอลิออล-P พอลิออล-M พอลิออลทางการค้า และ modified MDI

ประเภทสารเคมี	ความหนืด (cp)
พอลิออล-P	35,500
พอลิออล-M	7,940
พอลิออลทางการค้า	6,060
modified MDI	1,420

4.2 การเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนจากปาล์มพอลิออล

เมื่อนำปาล์มพอลิออลทั้ง 3 ชนิด ไปทำปฏิกิริยากับ modified MDI ได้โฟมพอลิยูรีเทนที่มีลักษณะทางกายภาพ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และตารางที่ 4.3 โดยพบว่า โฟมพอลิพอลิยูรีเทนที่ได้จากปาล์มพอลิออล-P และปาล์มพอลิออล-G มีลักษณะทางกายภาพไม่ใกล้เคียงกับโฟมพอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่นประเภทไมโครเซลลูลาร์อิลาสโตเมอร์ ที่ต้องการนำไปใช้ทำพื้นรองเท้านอกจากนี้ เมื่อทดลองนำปาล์มพอลิออลทั้ง 2 ชนิดไปผสมกับพอลิออลทางการค้า แล้วเตรียมเป็นโฟมพอลิยูรีเทน พบว่าโฟมที่ได้ยังคงมีลักษณะทางกายภาพที่ไม่สามารถนำไปใช้ทำเป็นพื้นรองเท้าได้ จึงไม่ได้ศึกษาสมบัติต่างๆ ของโฟมพอลิยูรีเทนที่ได้จากปาล์มพอลิออลทั้ง 2 ชนิดอีกต่อไป



รูปที่ 4.2 ลักษณะทางกายภาพที่สังเกตได้ของโฟมพอลิยูรีเทนจาก (ก) ปาล์มพอลิออล-P (ข) ปาล์มพอลิออล-G และ (ค) ปาล์มพอลิออล-M

ตารางที่ 4.3 ลักษณะทางกายภาพของโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมจากปาล์มพอลิออล

ปาล์มพอลิออล	ลักษณะทางกายภาพของโฟมพอลิยูรีเทน
ปาล์มพอลิออล-P	แข็ง เปราะ เนื้อโฟมหยาบ สีเหลืองอ่อน
ปาล์มพอลิออล-G	เนื้อโฟมแฉะเล็กน้อย ไม่มีความเหนียว เนื้อร่วน สีเหลืองอ่อน
ปาล์มพอลิออล-M	แข็ง เนื้อโฟมละเอียด มีสีเหลืองอ่อน และมีความเหนียวเล็กน้อย

สำหรับโฟมพอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่นที่ได้จากปาล์มพอลิออล-M พบว่า มีลักษณะทางกายภาพที่พอจะนำไปใช้เป็นไมโครเซลล์ลูลารีอิลาสโตเมอร์ที่ใช้ทำเป็นพื้นรองเท้าได้ แต่ต้องนำไปผสมกับพอลิออลทางการค้าเพื่อปรับปรุงสมบัติให้เหมาะกับการใช้งาน ดังนั้น การทดลองขั้นต่อไปเป็นการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่นจากพอลิออลผสมระหว่างปาล์มพอลิออล-M และพอลิออลทางการค้า

4.3 การเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนจากของผสมระหว่างปาล์มพอลิออล-M และพอลิออลทางการค้า

การทดลองในขั้นตอนนี้ เป็นการนำพอลิออลผสมระหว่างปาล์มพอลิออล-M และพอลิออลทางการค้าที่อัตราส่วนต่างๆ มาทำปฏิกิริยากับ modified MDI เพื่อใช้เตรียมไมโครเซลล์ลูลารีอิลาสโตเมอร์แล้วนำมาเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพ เวลาที่ใช้ในการเกิดโฟม สันฐานวิทยา และสมบัติทางกายภาพ กับไมโครเซลล์ลูลารีอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากพอลิออลทางการค้า 100% (สูตร P0) ซึ่งสามารถใช้งานเป็นพื้นรองเท้าได้จริง โดยต่อไปจะเรียกว่า โฟมอ้างอิง เพื่อพิจารณาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างปาล์มพอลิ-ออล-M และ พอลิออลทางการค้า

4.3.1 ลักษณะทางกายภาพ

เมื่อนำพอลิออลผสมระหว่างปาล์มพอลิออล-M และพอลิออลทางการค้าที่อัตราส่วนต่างๆ มาทำปฏิกิริยากับ modified MDI โดยใส่สารเติมแต่งปริมาณ 17.65 pbw ของพอลิออลลงไปด้วย ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นโฟมพอลิยูรีเทนที่มีลักษณะทางกายภาพดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ลักษณะทางกายภาพของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่น

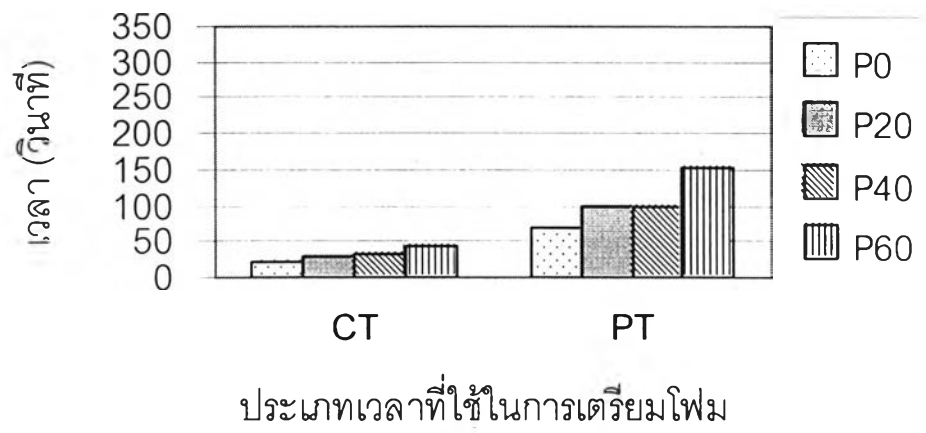
ชื่อสูตร	ลักษณะทางกายภาพของโฟมพอลิยูรีเทน
P0	ยืดหยุ่น เนื้อโฟมละเอียด สีขาว
P20	ยืดหยุ่น เนื้อโฟมละเอียด สีขาว
P40	ยืดหยุ่น เนื้อโฟมละเอียด สีขาว
P60	ยืดหยุ่น เนื้อโฟมละเอียด สีครีม
P80	แข็ง เนื้อโฟมหยาบ สีเหลืองอ่อน
P100	แข็ง เนื้อโฟมหยาบ สีเหลืองอ่อน

จากตารางที่ 4.4 พบว่าโฟมอ้างอิง (โฟมที่เตรียมได้จากสูตร P0) มีความยืดหยุ่น เนื้อโฟมละเอียด มีสีขาวย และสามารถนำไปใช้ทำพื้นรองเท้าได้ ในขณะที่โฟมซึ่งเตรียมจากพอลิออลผสมสูตร P20 P40 และ P60 มีความยืดหยุ่น เนื้อโฟมละเอียด มีสีขาวยและสีครีม ซึ่งน่าจะนำไปใช้งานเป็นไมโครเซลล์ลูลารีอิลาสโตเมอร์ได้ เนื่องจากมีลักษณะทางกายภาพที่ใกล้เคียงกับโฟมอ้างอิง

สำหรับโฟมที่เตรียมได้จากสูตร P80 และ P100 มีลักษณะทางกายภาพไม่เหมาะสมจะนำไปใช้เป็นไมโครเซลล์ลูลารีอิลาสโตเมอร์ เนื่องจากเนื้อโฟมแข็ง และหยาบ นอกจากนี้ ยังพบว่าความสามารถในการฟูในแม่แบบของโฟมต่ำเกินไป ทำให้ชิ้นงานไม่เต็มแม่แบบ ดังนั้น จึงไม่ศึกษาสมบัติของโฟม 2 สูตรนี้ต่อไป

4.3.2 เวลาที่ใช้ทำให้โฟมเริ่มฟูตัว และเวลาที่หยิกไม่ขาด

รูปที่ 4.3 แสดงเวลาที่ใช้เตรียมโฟมพอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่นประเภทไมโครเซลล์ลูลารีอิลาสโตเมอร์



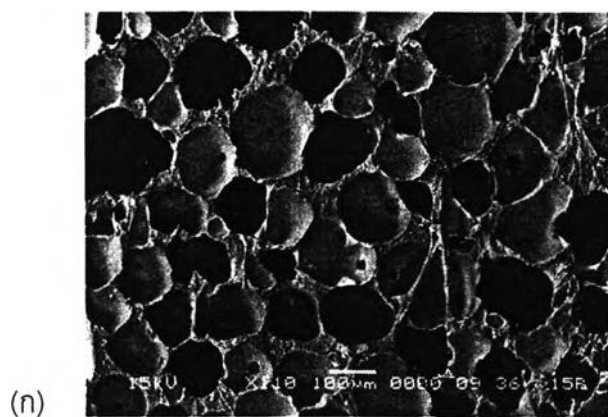
รูปที่ 4.3 เวลาที่ใช้เตรียมโฟมพอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่นประเภทไมโครเซลล์ลูลารีอิลาสโตเมอร์

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่า เวลาที่ใช้ทำให้โฟมเริ่มฟูตัว (cream time, CT) และเวลาที่หยิกไม่ขาด (pinch time, PT) ของโฟมอ้างอิงเท่ากับ 22.5 วินาทีและ 67.5 วินาที ตามลำดับ ในขณะที่

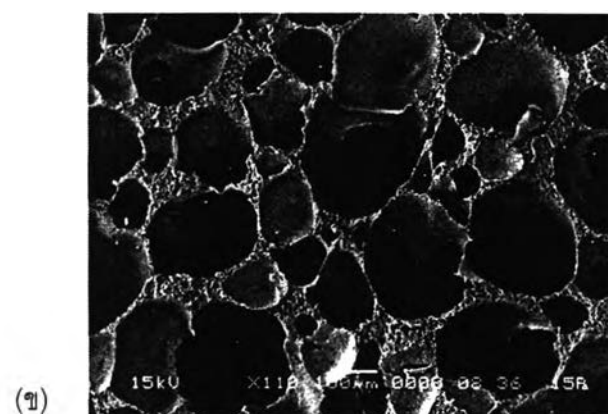
CT และ PT ของโม่ที่เตรียมจากพอลิโพลีเอทิลีนอยู่ในช่วงระหว่าง 30-42.5 วินาที และ 97.5-152.5 วินาที ตามลำดับ โดยเมื่อปริมาณปาล์มพอลิโพลีเอทิลีนในพอลิโพลีเอทิลีนเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ทั้ง CT และ PT เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะปาล์มพอลิโพลีเอทิลีนมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาต่ำกว่าพอลิโพลีเอทิลีน เนื่องจากโครงสร้างของปาล์มพอลิโพลีเอทิลีนมีความเกาะเกาะมากกว่า นอกจากนี้ยังพบว่า ทั้ง CT และ PT ของโม่สูตร P20 และ P40 สูงกว่าโม่อ้างอิงเล็กน้อย ในขณะที่โม่สูตร P60 มี CT และ PT เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และเนื่องจากในการทำพื้นรองเท้าต้องการ CT นาน เพื่อความสะดวกในขั้นตอนการผลิต และต้องการ PT สั้น เพื่อเพิ่มปริมาณผลผลิต ดังนั้น จึงได้เลือกสูตร P20 และ P40 ไปใช้เตรียมโม่พอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่นประเภทไมโครเซลลูลาร์อีลาสโตเมอร์ต่อไป

4.3.3 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของโม่พอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่นด้วยเทคนิค SEM

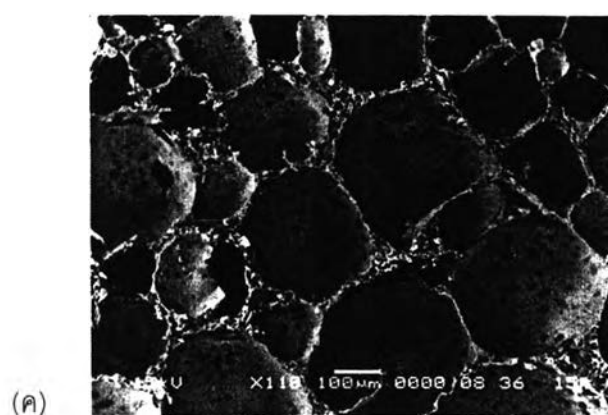
รูปที่ 4.4 แสดงสัณฐานวิทยาของโม่อ้างอิง โม่สูตร P20 และโม่สูตร P40 ซึ่งตรวจสอบด้วยเทคนิค SEM โดยพบว่าเซลล์ของโม่อ้างอิงมีลักษณะค่อนข้างกลม และส่วนใหญ่เป็นเซลล์แบบปิด ขนาดของเซลล์ค่อนข้างสม่ำเสมอ ปริมาณหน้าต่างเซลล์น้อย และเซลล์มีขนาดเล็ก ในขณะที่เซลล์ของโม่สูตร P20 และโม่สูตร P40 มีลักษณะเป็นเซลล์ปิด ค่อนข้างกลม เช่นเดียวกัน แต่ขนาดเซลล์มีความสม่ำเสมอน้อยกว่า และมีปริมาณหน้าต่างเซลล์มากกว่าในโม่อ้างอิง โดยโม่สูตร P20 มีขนาดหน้าต่างเซลล์ใหญ่กว่าโม่สูตร P40 แต่ปริมาณมากกว่า นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นว่า เซลล์เปิดในโม่อ้างอิงมีปริมาณใกล้เคียงกับในโม่สูตร P40 ขณะที่โม่สูตร P20 มีปริมาณเซลล์เปิดมากกว่า



P0



P20



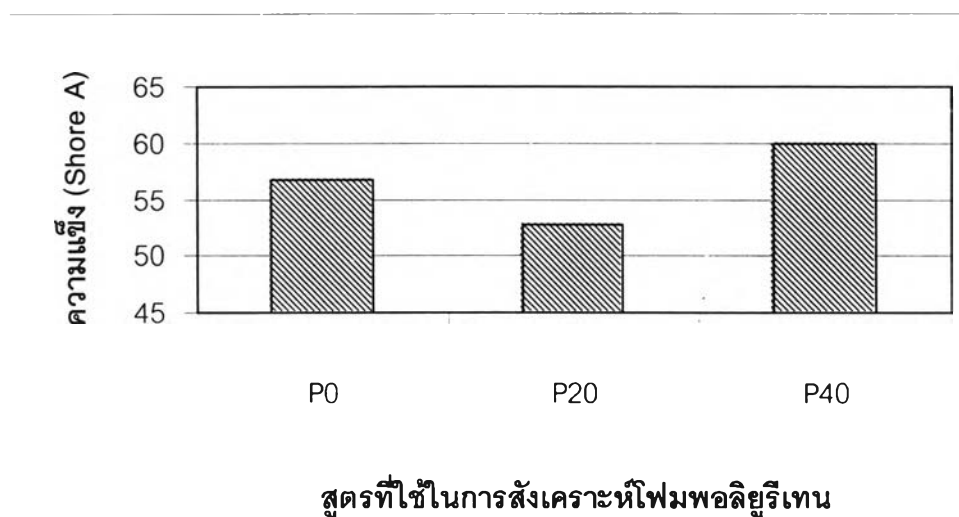
P40

รูปที่ 4.4 สัณฐานวิทยาของโฟมพอลิยูรีเทนสูตร (ก) P0 (ข) P20 และ (ค) P40

4.3.4 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

การทดสอบความแข็ง

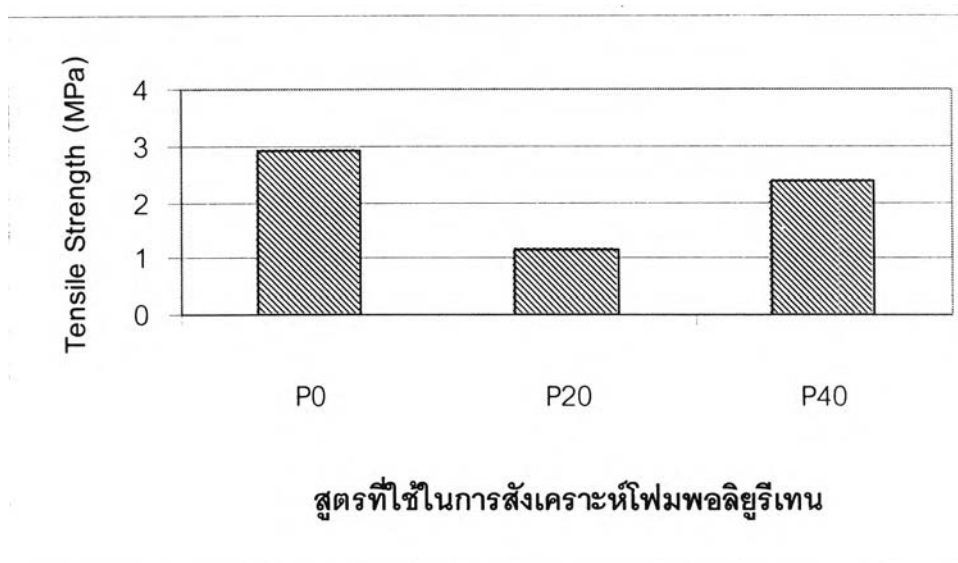
รูปที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบค่าความแข็งของโพลีเมอร์ต่างๆ โดยพบว่าความแข็งของโพลีเมอร์ที่เตรียมจากสูตร P20 และ P40 มีค่าใกล้เคียงกับโพลีเมอร์อ้างอิงโดยโพลีเมอร์ P40 มีความแข็งมากกว่าเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องจากมีปริมาณพลาสติไซเซอร์ซึ่งมีโครงสร้างเกาะเกาะมากกว่า จึงทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้นเล็กน้อย



รูปที่ 4.5 ความแข็งของโพลีเมอร์ชนิดยืดหยุ่น

การทดสอบด้านการดึง

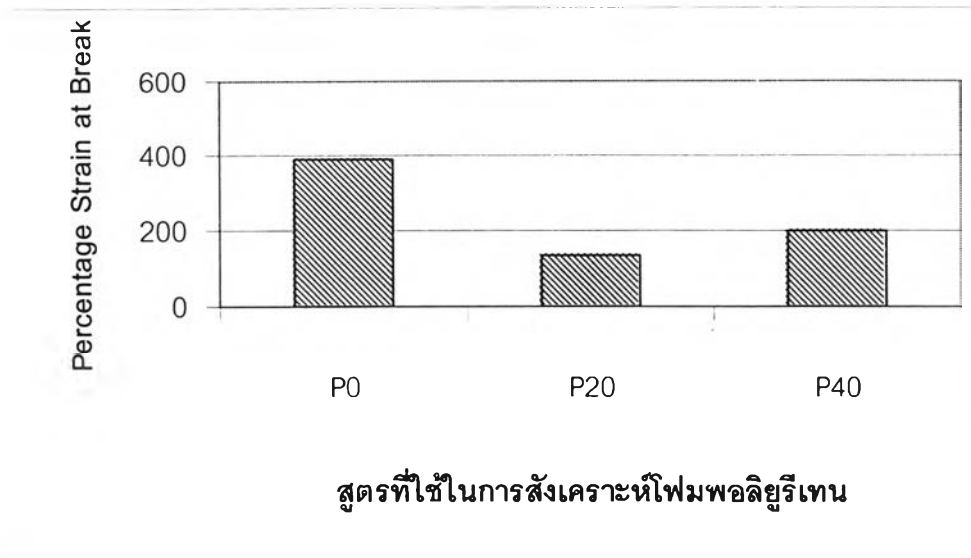
รูปที่ 4.6 แสดงผลการทดสอบค่าความต้านแรงดึง (tensile strength) ของโฟมสูตรต่างๆ โดยพบว่าโฟมสูตร P40 มีความต้านแรงดึงต่ำกว่าโฟมอ้างอิงเล็กน้อย ขณะที่โฟมสูตร P20 มีความต้านแรงดึงต่ำมาก ทั้งนี้อาจมีผลเนื่องจากโฟมสูตร P20 มีขนาดหน้าตัดเซลล์ใหญ่ ซึ่งเป็นจุดอ่อนของโฟม



รูปที่ 4.6 ความต้านแรงดึงของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่น

เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด

รูปที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบหาค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (% strain at break) ของไฟมสูตรต่างๆ

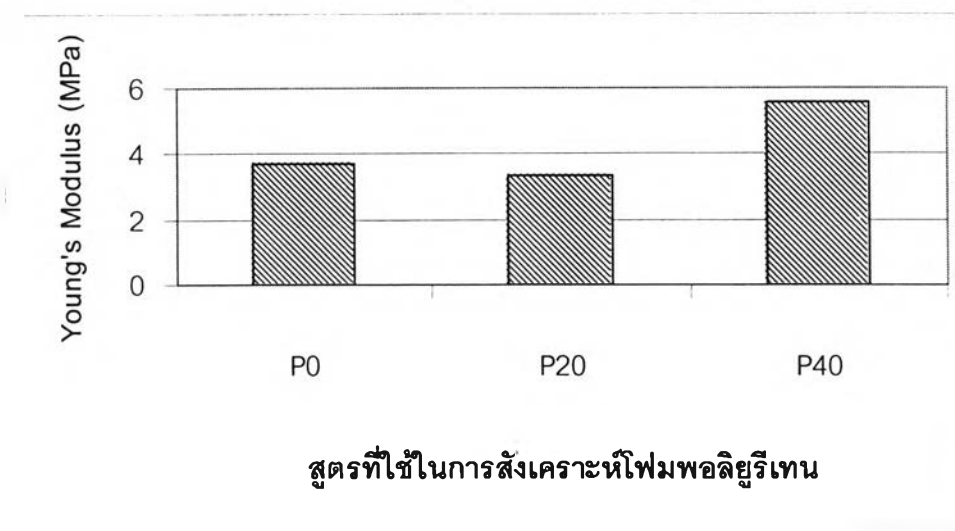


รูปที่ 4.7 เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่น

จากรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าโฟมพอลิยูรีเทนสูตร P20 มีเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดต่ำที่สุดในขณะที่โฟมอ้างอิงมีค่าสูงที่สุด ทั้งนี้ น่าจะเป็นผลมาจากโฟมสูตร P20 มีปริมาณเซลล์เปิดมากที่สุด และมีขนาดหน้าตาต่างเซลล์ใหญ่ที่สุด

ยังส์มอดุลัส

รูปที่ 4.8 แสดงค่ายังส์มอดุลัส (Young's modulus) ของโฟมสูตรต่างๆ

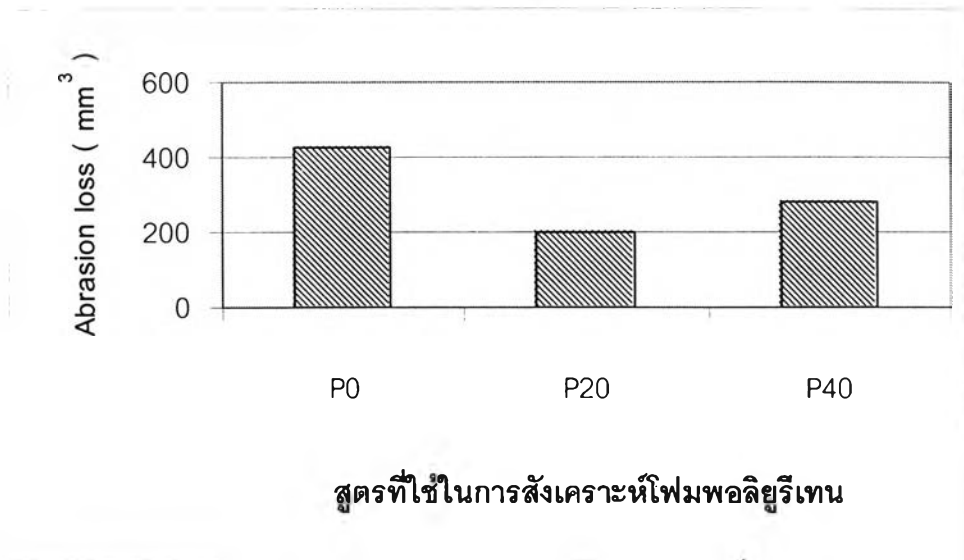


รูปที่ 4.8 ยังส์มอดุลัสของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่น

รูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าโฟมพอลิยูรีเทนสูตร P20 มีค่ายังส์มอดุลัสใกล้เคียงกับโฟมอ้างอิง ในขณะที่โฟมสูตร P40 มีค่าสูงกว่าซึ่งน่าจะเป็นผลจากการที่มีปริมาณปาล์มพอลิออลที่มีความเกาะเกาะมากกว่า จึงเปลี่ยนแปลงรูปร่างยากกว่า

การทดสอบความต้านทานการขัดถู

รูปที่ 4.9 แสดงผลการทดสอบหาค่าความต้านทานการขัดถู (abrasion resistance) ของ โฟมสูตรต่างๆ

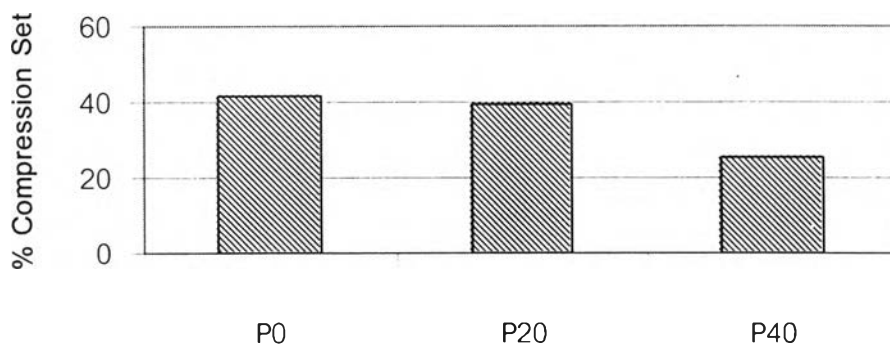


รูปที่ 4.9 ผลการสูญเสียเนื่องจากการขัดถูของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่น

รูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่าโฟมอ้างอิงมีความต้านทานการขัดถูต่ำที่สุด (มีการสูญเสียมาก) เพราะไม่มีโครงสร้างเกาะก่คอยขัดขวางการสูญเสียเหมือนสูตรที่มีปาล์มพอลิโอด อย่างไรก็ตามการมีหมู่เกาะก่คามากเกินไป (โฟมสูตร P40) เมื่อถูกขัดถูจะพาเอาส่วนอื่นหลุดออกไปด้วย ซึ่งโฟมสูตร P20 มีความต้านทานการขัดถูมากที่สุด (มีการสูญเสียน้อยที่สุด)

การทดสอบความสามารถในการคืนตัว

รูปที่ 4.10 แสดงผลการทดสอบหาค่าความสามารถในการคืนตัว หรือ compression set ของโฟมสูตรต่างๆ



สูตรที่ใช้ในการสังเคราะห์โฟมพอลิยูรีเทน

รูปที่ 4.10 % compression set ของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่น

จากรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าโฟมอ้างอิงมีการคืนตัวต่ำที่สุด (เปอร์เซ็นต์ compression set สูงที่สุด) เพราะไม่มีโครงสร้างเกาะกดยึดเหนี่ยวไว้ ซึ่งโฟมสูตร P40 มีการคืนตัวดีที่สุด (เปอร์เซ็นต์ compression set ต่ำที่สุด) เพราะมีปาล์มพอลิโอลที่มีโครงสร้างเกาะกจ่ายาวจำนวนมาก เกี่ยวพันไว้ไม่ให้เกิดเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปอย่างถาวร

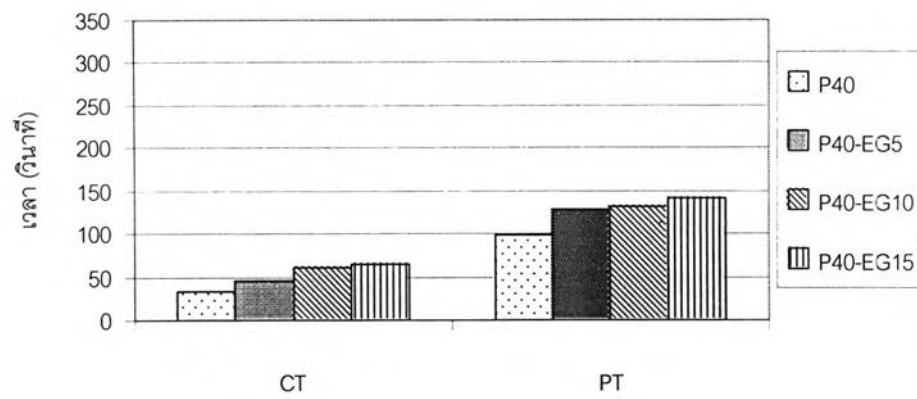
จากการพิจารณาสมบัติทางกายภาพของโฟมที่เตรียมจากพอลิโอลผสมเปรียบเทียบกับโฟมอ้างอิง พบว่า โฟมสูตร P40 มีสมบัติดีกว่าโฟมสูตร P20 ยกเว้นสมบัติความต้านทานการขาดุด อย่างไรก็ตาม โฟมสูตร P40 มีความต้านทานการขาดุดสูงกว่าโฟมอ้างอิง นอกจากนี้ ยังมี ความแข็ง ความสามารถในการคืนตัว และมอดุลัสสูงกว่าโฟมอ้างอิง ความต้านแรงดึงใกล้เคียงกัน ขณะที่ % การยึด ณ จุดขาดต่ำกว่า ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า สูตรที่ดีที่สุดสำหรับเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนยืดหยุ่นชนิดไม่โครเซลลูลาร์อิลาสโตเมอร์คือสูตร P40 นั่นคือ อัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างปาล์มพอลิโอล-M ต่อพอลิโอลทางการค้าเท่ากับ 60 : 40 การทดลองขั้นต่อไป จึงเป็นการศึกษาผลของเซนเอกซ์เทนเดอร์ต่อสมบัติทางกายภาพของโฟมสูตร P40

4.4 การศึกษาผลของเซนเอกซ์เทนเดอร์ต่อสมบัติทางกายภาพของโฟมพอลิยูรีเทนสูตร P40

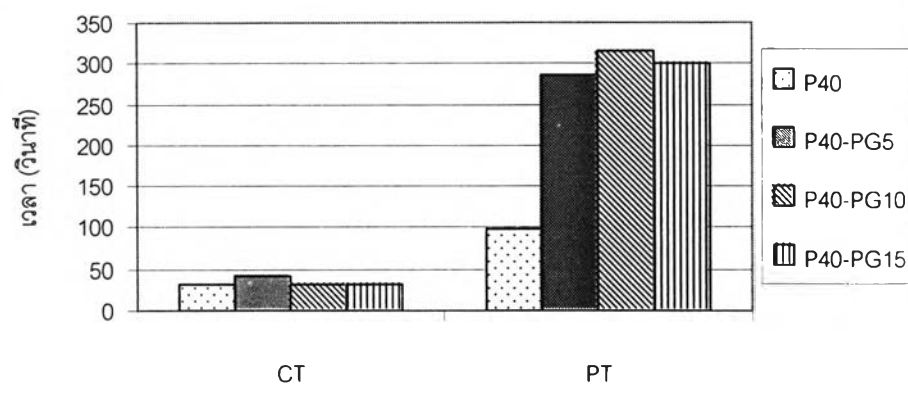
การทดลองจากนี้เป็นการศึกษาผลของเซนเอกซ์เทนเดอร์ 3 ชนิดได้แก่ เอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol, EG) โพรพิลีนไกลคอล (propylene glycol, PG) และ 1,4-บิวเทนไดออล (1,4-butanediol, BD) ต่อสมบัติทางกายภาพของโฟมพอลิยูรีเทนสูตร P40

4.4.1 เวลาที่ใช้ในการทำให้โฟมเริ่มฟูตัว และเวลาที่หยิกไม่ขาด

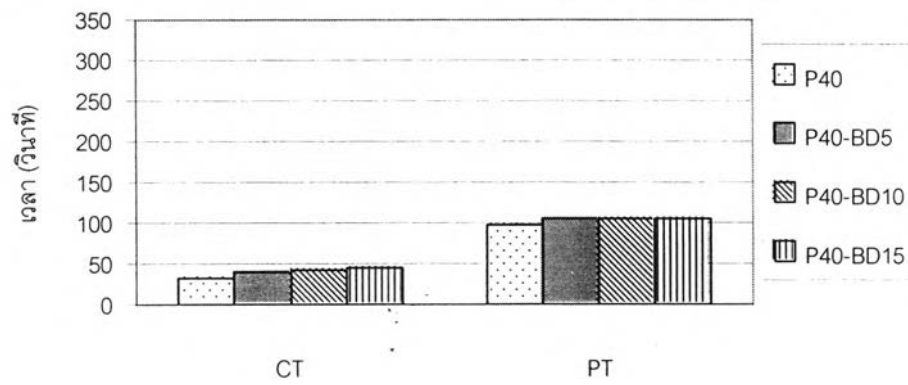
รูปที่ 4.11 แสดงผลของเซนเอกซ์เทนเดอร์ต่อเวลาที่ใช้ในการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทน โดยพบว่าโฟมสูตร P40 มี CT และ PT เท่ากับ 33 และ 98 วินาที ตามลำดับ การใส่ EG PG และ BD ซึ่งเป็นเซนเอกซ์เทนเดอร์ปริมาณ 5 10 และ 15 ส่วนโดยน้ำหนัก มีผลต่อทั้ง CT และ PT กล่าวคือ โฟมที่ใส่ EG มี CT และ PT อยู่ในช่วง 45-65 และ 128-143 วินาที ตามลำดับ ส่วนโฟมที่ใส่ PG มี CT และ PT อยู่ในช่วง 33-43 และ 258-300 วินาที ตามลำดับ และที่ใส่ BD มี CT และ PT อยู่ในช่วง 40-46 และ 105 วินาที ตามลำดับ โดยการใส่ PG มีผลทำให้ค่า CT ต่ำกว่าการใช้ EG และ BD และใกล้เคียงกับโฟมสูตร P40 แต่ PG มีผลทำให้ค่า PT เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจาก PG มีโครงสร้างที่เกาะก่กว่า จึงส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาได้ช้ากว่า ในขณะที่ BD มีผลต่อทั้ง CT และ PT น้อยที่สุด ส่วน EG มีผลทำให้ CT และ PT เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ EG เพิ่มขึ้น



ประเภทเวลาที่ใช้ในการเตรียมโคม



ประเภทเวลาที่ใช้ในการเตรียมโคม

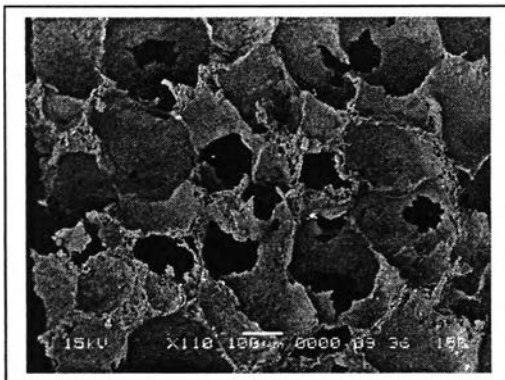


ประเภทเวลาที่ใช้ในการเตรียมโคม

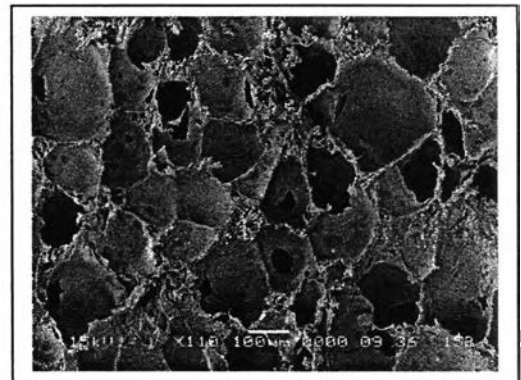
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงผลของเซนเอกซ์เทนเดอร์ต่อเวลาที่ใช้ในการเตรียมโคมพอลิยูรีเทนสูตร P40

4.4.2 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของโฟมพอลิยูรีเทนด้วยเทคนิค SEM

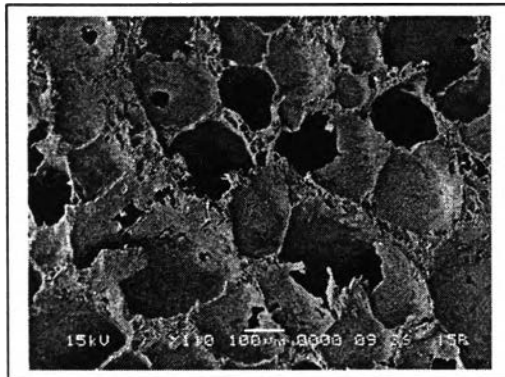
จากการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของโฟมพอลิยูรีเทนที่ใช้เซนเอกซ์เทนเดอร์ 3 ชนิด ด้วยเทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 110 เท่า ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.12 โดยพบว่า การใส่เซนเอกซ์เทนเดอร์ดังกล่าว มีผลต่อขนาด และรูปร่างของเซลล์ ปริมาณเซลล์เปิด และเซลล์ปิด รวมทั้งปริมาณ และขนาดหน้าตาต่างเซลล์ ซึ่งผลสรุปที่ได้จากภาพถ่าย SEM แสดงไว้เป็นตารางในภาคผนวก



(ก) P40-EG5

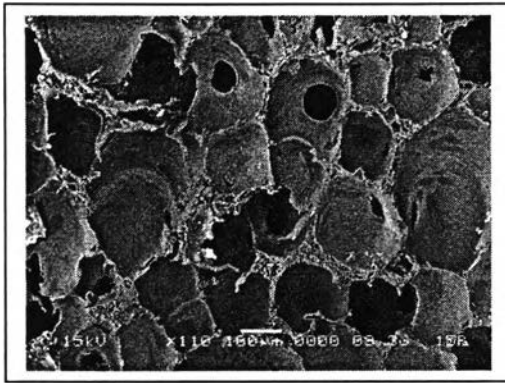


(ข) P40-EG10

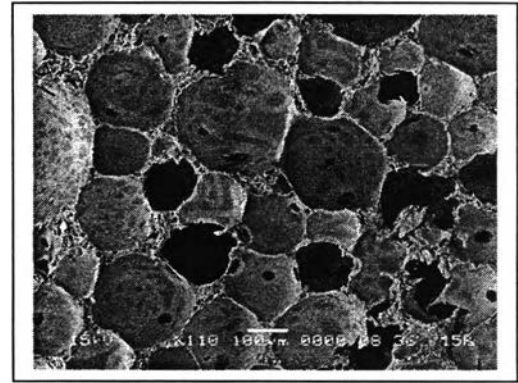


(ค) P40-EG15

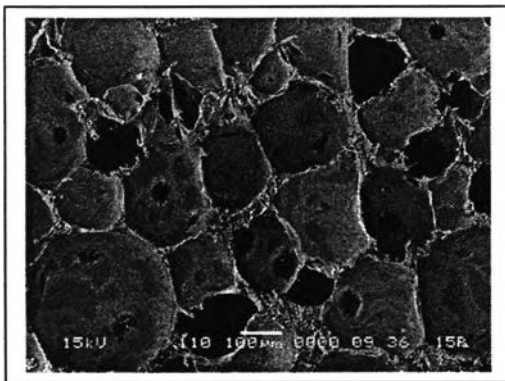
รูปที่ 4.12 ลักษณะเซลล์ของโฟมพอลิยูรีเทนที่ใส่ EG PG และ BD ปริมาณต่างๆ กัน



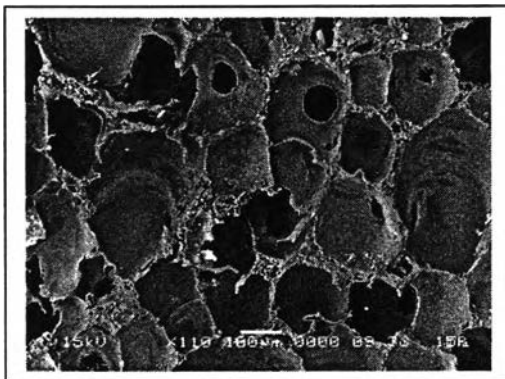
(ง) P40-PG5



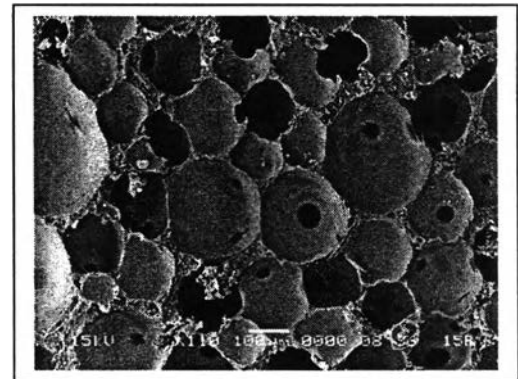
(จ) P40-PG10



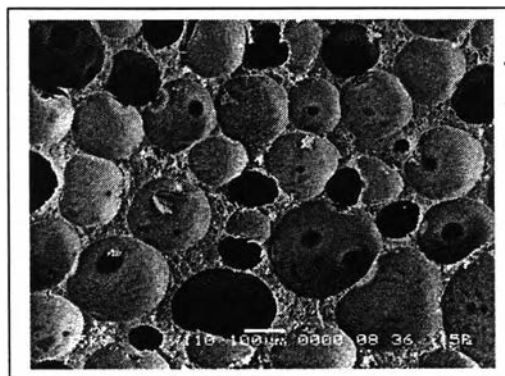
(ฉ) P40-PG15



(ช) P40-BD5



(ฌ) P40-BD10



(ฉ) P40-BD15

รูปที่ 4.12 (ต่อ) ลักษณะเซลล์ของโฟมพอลิยูรีเทนที่ใส่ EG PG และ BD ปริมาณต่างๆ กัน

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะสัณฐานวิทยาของเซลล์ของโคมที่ใส่เซนเอกซ์เทนเดอร์กับเซลล์ของโคมสูตร P40 ซึ่งมีลักษณะค่อนข้างกลม และส่วนใหญ่เป็นแบบเซลล์ปิด ปริมาณหน้าตาต่างมาก และขนาดหน้าตาต่างเล็ก (รูปที่ 4.4 ค) พบว่าการใส่ EG (รูปที่ 4.12 ก-ค) จะทำให้โคมมีเซลล์เป็นแบบเซลล์ปิดที่มีขนาดเล็กลง แต่รูปร่างไม่สม่ำเสมอ มีทั้งทรงรีและทรงเหลี่ยม ปริมาณหน้าตาต่างมาก และขนาดหน้าตาต่างเล็กเช่นเดียวกันกับ โคมสูตร P40

ในขณะที่โคมสูตรที่ใส่ PG (รูปที่ 4.12 ง-ฉ) เซลล์ส่วนใหญ่เป็นแบบเซลล์ปิดที่มีขนาดเล็กลง แต่รูปร่างไม่สม่ำเสมอ เป็นแบบทรงกลมและทรงเหลี่ยมปะปนกัน ปริมาณหน้าตาต่างมาก แต่ขนาดหน้าตาต่างใหญ่กว่า โคมสูตร P40

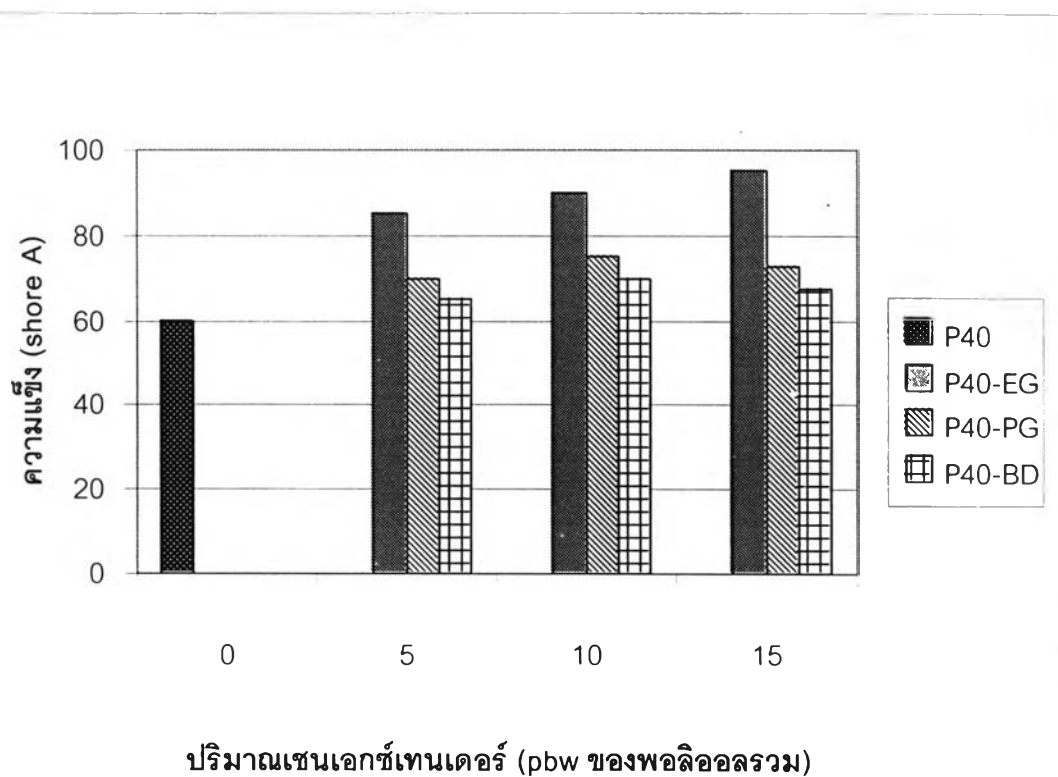
สำหรับการใช้ BD เป็นเซนเอกซ์เทนเดอร์ (รูปที่ 4.12 ช-ณ) พบว่า เมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์ของโคมทุกสูตร เซลล์ส่วนใหญ่ของโคมที่ใช้เซนเอกซ์เทนเดอร์ชนิดนี้ มีลักษณะเป็นเซลล์ปิดที่มีขนาดเล็กที่สุด และมีรูปร่างเป็นแบบทรงกลมและมีความสม่ำเสมอมากที่สุด ปริมาณหน้าตาน้อยที่สุด และขนาดหน้าตาต่างเล็ก

จากการเปรียบเทียบลักษณะสัณฐานวิทยาของโคมที่ใส่เซนเอกซ์เทนเดอร์ทั้ง 3 ชนิด ทำให้สรุปได้ว่าการใช้ BD เป็นเซนเอกซ์เทนเดอร์ที่ปริมาณ 10-15 ส่วนโดยน้ำหนัก จะทำให้ได้โคมที่มีลักษณะสัณฐานวิทยาดีที่สุด เนื่องจากเซลล์ส่วนใหญ่เป็นแบบเซลล์ปิดที่มีขนาดเล็ก รูปร่างกลม และมีความสม่ำเสมอ ปริมาณหน้าตาน้อย และขนาดหน้าตาต่างเล็ก

4.4.3 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

การทดสอบความแข็ง

รูปที่ 4.13 แสดงผลการทดสอบหาค่าความแข็งของโฟมสูตรที่ใส่เซนเอกซ์เทนเดอร์ชนิดและปริมาณต่างๆ กัน

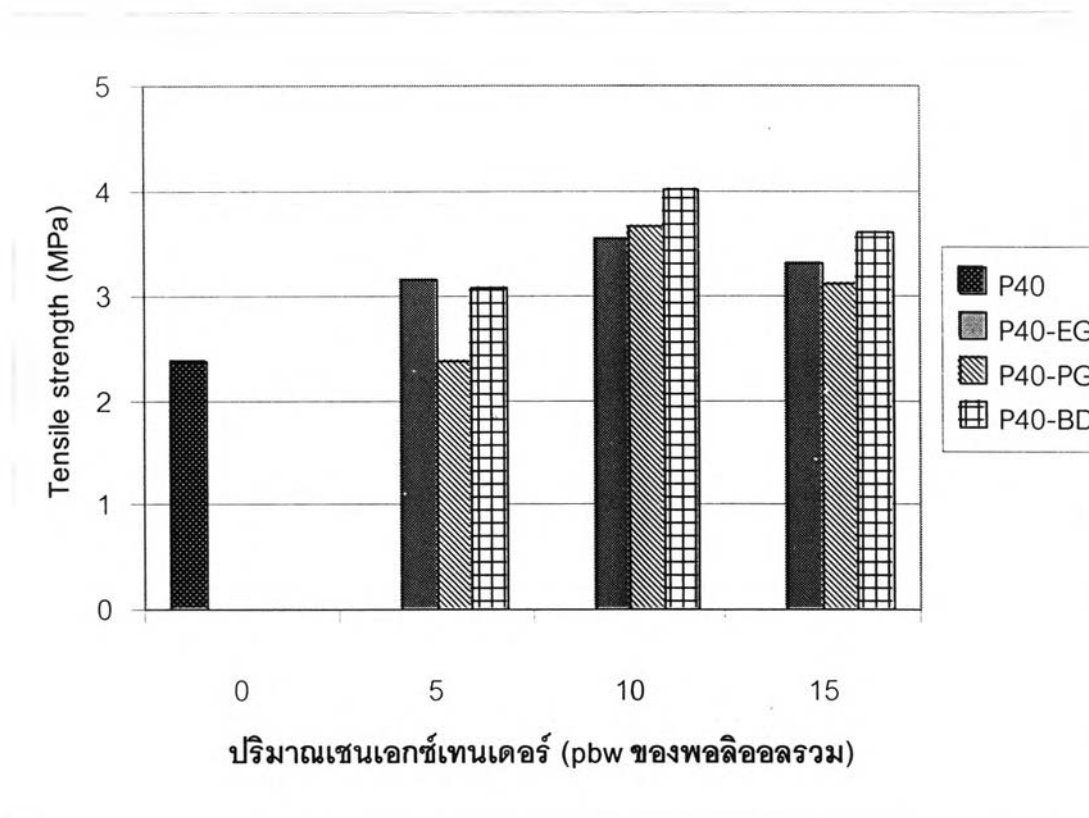


รูปที่ 4.13 ผลของเซนเอกซ์เทนเดอร์ต่อความแข็งของโฟมพอลิเอทิลีนชนิดยืดหยุ่น

รูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่า เซนเอกซ์เทนเดอร์ประเภท EG มีผลทำให้ความแข็งของโฟมเพิ่มขึ้นได้มากกว่าการใช้ PG และ BD โดยความแข็งเพิ่มขึ้นตามปริมาณ EG ที่ใส่เข้าไป เนื่องจากความยาวโมเลกุลของ EG สั้นที่สุดเมื่อเทียบกับเซนเอกซ์เทนเดอร์ชนิดอื่น จึงทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิเอทิลีนมีความแข็งมากกว่าเซนเอกซ์เทนเดอร์ที่มีสายโซ่ยาวกว่า

การทดสอบด้านการดึง

รูปที่ 4.14 แสดงผลการทดสอบหาค่าความต้านแรงดึงของโพลีเอสเตอร์ต่างๆ

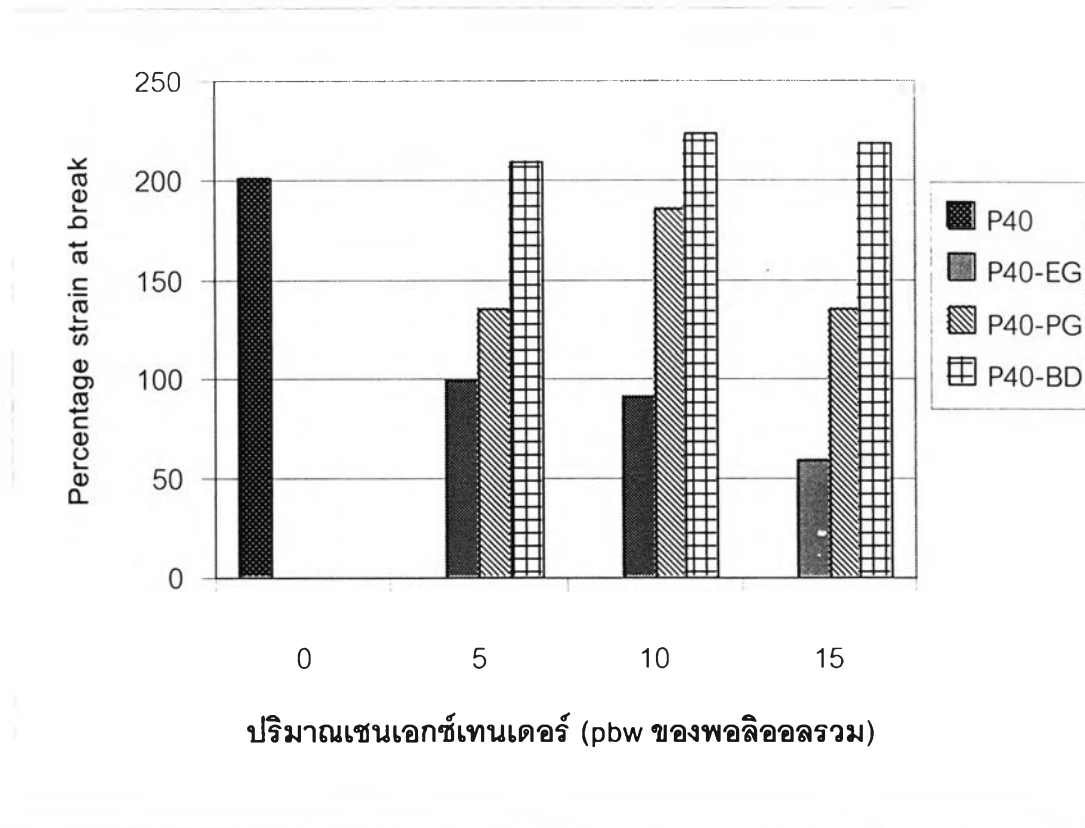


รูปที่ 4.14 ผลของเซนเอกซ์เทนเดอร์ต่อความต้านแรงดึงของโพลีเอสเตอร์ชนิดยืดหยุ่น

รูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่าเซนเอกซ์เทนเดอร์มีผลทำให้ความต้านแรงดึงของโพลีเอสเตอร์เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเซนเอกซ์เทนเดอร์ทำให้เกิดหมู่ยูรีเทนมากขึ้น จึงอาจทำให้มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลหรือทำให้เกิดการเชื่อมขวางเพิ่มขึ้น ซึ่งการใส่ PG เป็นเซนเอกซ์เทนเดอร์ในปริมาณ 10 ส่วน ทำให้มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงที่สุด แต่การใส่ปริมาณเพิ่มขึ้นกลับทำให้ความต้านแรงดึงลดลง เพราะมีส่วนของ hard segment เพิ่มขึ้น จึงขาดได้ง่ายกว่า

เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด

รูปที่ 4.15 แสดงผลการทดสอบหาค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด ของโพลิเมอร์ต่างๆ

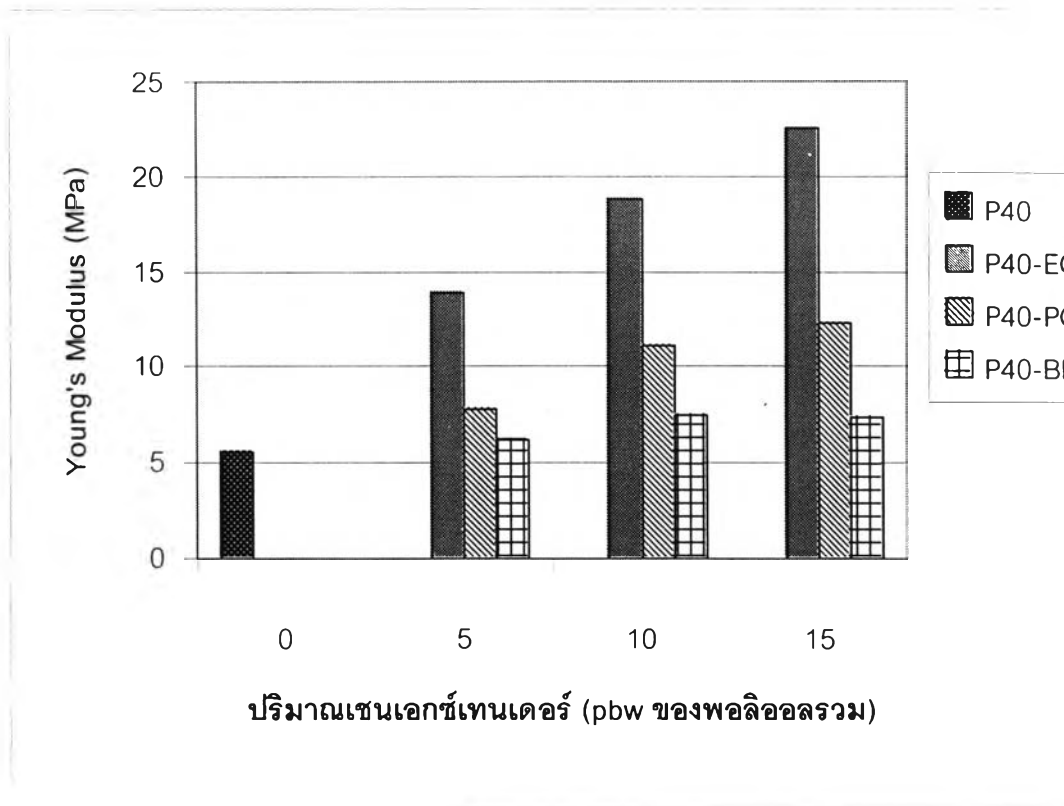


รูปที่ 4.15 ผลของเซนเอกซ์เทนเดอร์ต่อ % การยืด ณ จุดขาดของโพลิเมอร์ชนิดยืดหยุ่น

รูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่าชนิดและปริมาณของเซนเอกซ์เทนเดอร์มีต่อ % การยืด ณ จุดขาด โดย EG มีผลทำให้ % การยืด ณ จุดขาด ของโพลิเมอร์ลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของ EG มีขนาดสั้นที่สุด การยืดตัวจึงเกิดได้น้อยกว่าเซนเอกซ์เทนเดอร์ที่สายโซ่ยาวกว่า อีกทั้งการใส่ EG ทำให้มี hard segment จำนวนมาก จึงยืดตัวได้น้อย และ % การยืด ณ จุดขาด ลดลงเมื่อปริมาณ EG เพิ่มขึ้น ในขณะที่ การใส่ PG ทำให้มีการยืดตัวได้มากกว่า EG และมีแนวโน้มลดลงเมื่อใส่ปริมาณมากกว่า 10 ส่วน เพราะ PG มีโครงสร้างที่เกาะกันจึงช่วยให้มีการเกี่ยวพันกันได้ในระดับหนึ่ง แต่ถ้ามีมากเกินไปการยืดตัวจะลดลง สำหรับ BD ซึ่งมีโครงสร้างที่ยืดหยุ่นกว่า จึงทำให้มีการยืดตัวเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ BD เพิ่มขึ้น

ยังส์มอดุลัส

รูปที่ 4.16 แสดงผลการทดสอบหาค่ายังส์มอดุลัสของโพลีเอสเตอร์ต่างๆ

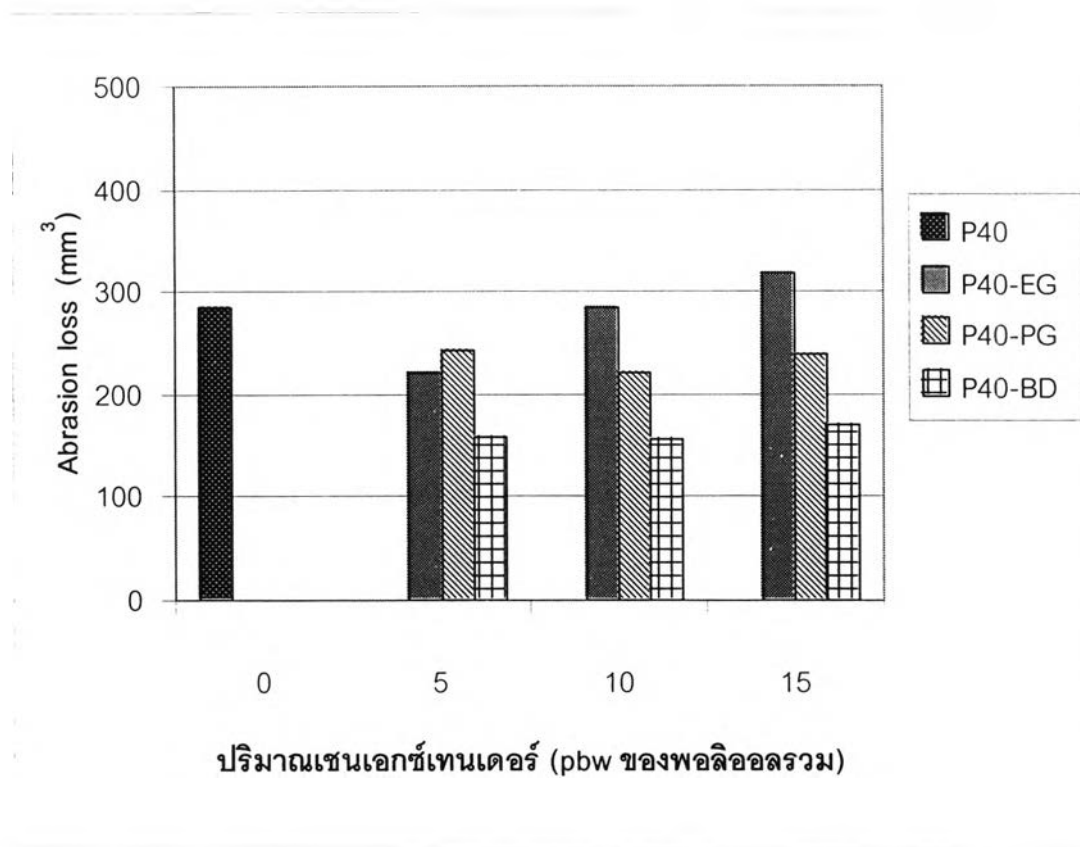


รูปที่ 4.16 ผลของเซนเอกซ์เทนเดอร์ต่อค่ายังส์มอดุลัสของโพลีเอสเตอร์ชนิดยืดหยุ่น

รูปที่ 4.16 แสดงให้เห็นว่า เซนเอกซ์เทนเดอร์ช่วยให้ค่ายังส์มอดุลัสของโพลีเอสเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะการใส่ EG มีผลทำให้ค่ายังส์มอดุลัสเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจาก EG มีส่วนทำให้ hard segment เพิ่มขึ้น ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว และโมเลกุลของ BD มีความยืดหยุ่นมากที่สุด จึงเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ง่ายกว่า ดังนั้น ค่ายังส์มอดุลัสจึงเพิ่มขึ้นไม่มากนัก ส่วน PG มีส่วนช่วยให้ยังส์มอดุลัสเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันเนื่องจากมีโครงสร้างที่เกาะเกาะ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

ความต้านทานการขัดถู

รูปที่ 4.17 แสดงผลการทดสอบหาค่าความต้านทานการขัดถูของโพลีเมอร์ต่างๆ

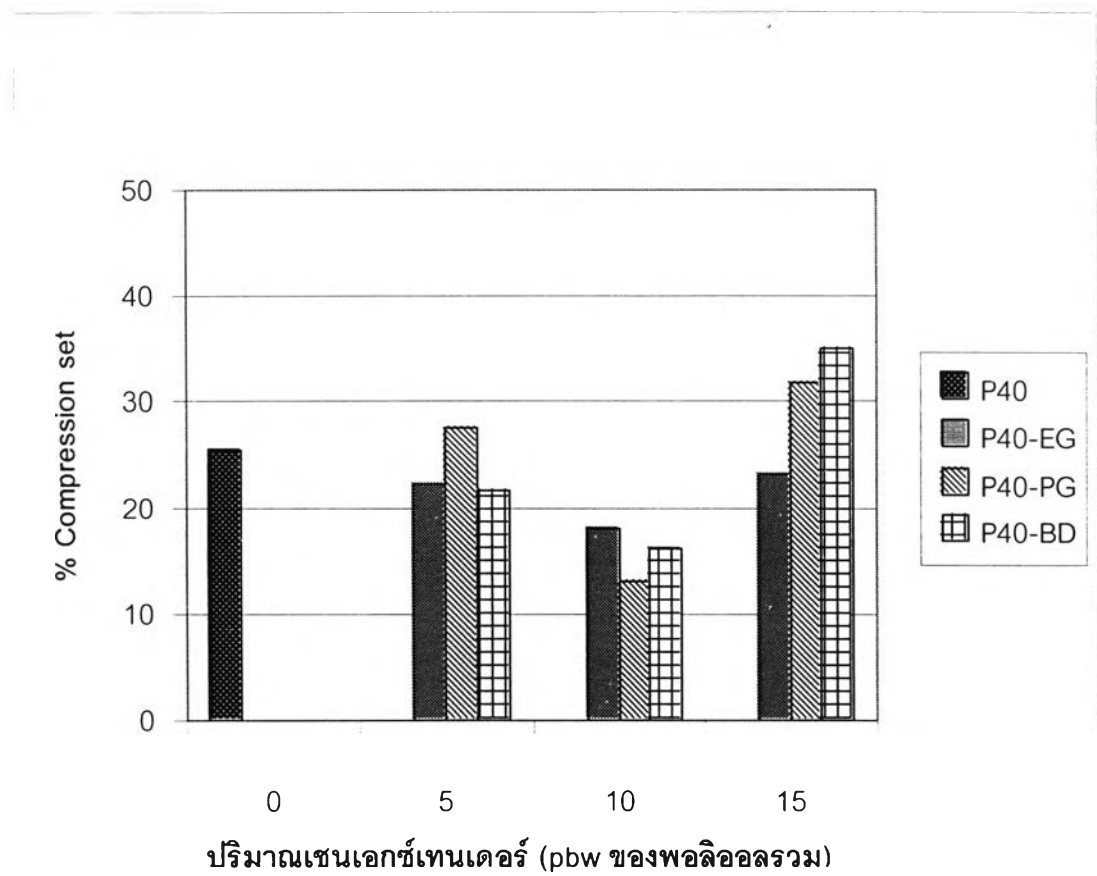


รูปที่ 4.17 ผลของเซนเอกซ์เทนเดอร์ต่อการสูญเสียเนื่องจากการขัดถูของ โพลีเมอร์ชนิดยืดหยุ่น

รูปที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่าโพลีเมอร์ที่ใส่เซนเอกซ์เทนเดอร์ส่วนใหญ่มีความต้านทานการขัดถูดีกว่าที่ไม่ได้ใส่เซนเอกซ์เทนเดอร์ โดยเฉพาะเซนเอกซ์เทนเดอร์ประเภท BD ซึ่งช่วยให้มีความต้านทานการขัดถูเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด (มีการสูญเสียที่น้อยที่สุด) ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของ BD มีความยืดหยุ่นมากกว่า PG และ EG ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

ความสามารถในการคั่นตัว

รูปที่ 4.18 แสดงผลการทดสอบหาค่าความสามารถในการคั่นตัว หรือ compression set ของโฟมสูตรต่างๆ



รูปที่ 4.18 ผลของเซนเอกซ์เทนเดอร์ต่อ % compression set ของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่น

รูปที่ 4.18 แสดงให้เห็นว่าการใส่เซนเอกซ์เทนเดอร์ทุกชนิดปริมาณ 10 ส่วนโดยน้ำหนัก มีผลทำให้โฟมมีการคั่นตัวดีที่สุด (% compression set ต่ำสุด) โดยเฉพาะการใส่ PG 10 ส่วนโดยน้ำหนัก ทำให้โฟมมีการคั่นตัวดีที่สุด และการใส่เซนเอกซ์เทนเดอร์ทุกชนิดปริมาณ 15 ส่วนโดยน้ำหนัก กลับทำให้โฟมมีการคั่นตัวได้ไม่ดี โดยเฉพาะการใส่ BD 15 ส่วนโดยน้ำหนัก เนื่องจาก BD มีโครงสร้างที่ยืดหยุ่น ไม่มีการเกาะเกี่ยวของสายโซ่โมเลกุล เมื่อโมเลกุลเคลื่อนที่ไปแล้วจึงมักไม่คืนกลับเหมือนโครงสร้างที่มีการเกาะเกี่ยวหรือมีการเชื่อมขวาง

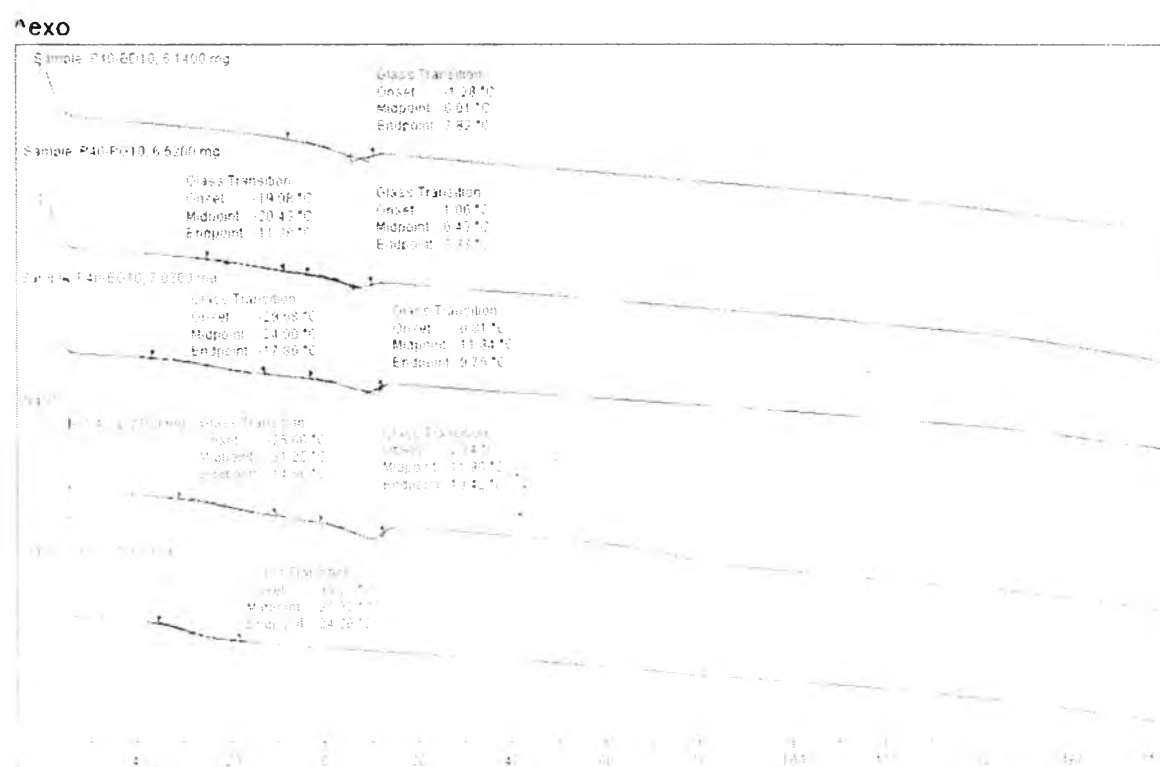
จากผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่าสูตรที่น่าสนใจในการนำมาใช้งาน คือ สูตร P40-BD10 เนื่องจากให้โพลีเมอร์ที่มีความต้านแรงดึง เฟอร์เซนต์การยืดตัว หนา จุดขาด และความต้านทานการขีดถูสูงที่สุด มีความแข็งประมาณ 70 Shore A ซึ่งไม่สูงและไม่ต่ำเกินไป นอกจากนี้ยังมีความสามารถในการคืนตัวที่ดี มีค่ายังส์มอดุลัสค่อนข้างต่ำ (ประมาณ 7 MPa) แต่ก็ยังสูงกว่าโพลีเมอร์ P40 (ประมาณ 6 MPa)

เมื่อเปรียบเทียบโพลีเมอร์ P40-BD10 กับโพลีเมอร์อ้างอิง พบว่าโพลีเมอร์ P40-BD10 มีความต้านแรงดึง ความแข็ง ค่ายังส์มอดุลัส ความต้านทานการขีดถู และความสามารถในการคืนตัวที่สูงกว่า แต่มีเฟอร์เซนต์การยืดตัว หนา จุดขาดต่ำกว่า

4.4.4 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC

รูปที่ 4.19 แสดง DSC เทอร์โมแกรมของโพลีเมอร์ชนิดยืดหยุ่นที่เตรียมจากสูตร P0, P40, P40-EG10, P40-PG10 และ PG40-BD10

ตารางที่ 4.4 แสดงค่า T_g ของโพลีเมอร์ชนิดยืดหยุ่นที่เตรียมจากสูตร P0, P40, P40-EG10, P40-PG10 และ PG40-BD10 ที่อ่านได้จาก DSC เทอร์โมแกรม



รูปที่ 4.19 DSC เทอร์โมแกรมของโพลีเมอร์ชนิดยืดหยุ่นที่เตรียมจากสูตร P0, P40, P40-EG10, P40-PG10 และ PG40-BD10

ตารางที่ 4.4 T_g ของโพลีเอทิลีนชนิดยืดหยุ่นที่เตรียมจากสูตร P0, P40, P40-EG10, P40-PG10 และ P40-BD10

ลำดับที่	สูตร	$T_{gs1}(\text{onset})(^{\circ}\text{C})$	$T_{gs2}(\text{onset})(^{\circ}\text{C})$
1	P0	-33.33	-
2	P40	-25.66	2.14
3	P40-EG10	-29.58	0.81
4	P40-PG10	-19.98	1.06
5	P40-BD10	-	-1.28

จากรูปที่ 4.19 พบว่า โพลีที่เตรียมได้มีลักษณะเทอร์โมแกรมได้ 2 แบบ คือ ลักษณะที่แสดงอุณหภูมิกลาสแทรนซิชัน (T_g) 1 ค่า และ 2 ค่า ซึ่งแสดงค่าไว้ในตารางที่ 4.4 ซึ่งโพลีอ้างอิง (โพลีสูตร P0) มีอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันค่าเดียว และเมื่อมีส่วนผสมของพอลิเมอร์ พบว่า มีอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันปรากฏขึ้นอีก 1 ค่า ซึ่งแสดงถึงความไม่เข้ากันของพอลิเมอร์กับพอลิเมอร์ทางการค้า จึงทำให้โพลีเอทิลีนชนิดยืดหยุ่นที่ได้มีอุณหภูมิกลาสแทรนซิชัน 2 ค่า นอกจากนี้ การใส่เซกเมนต์เทอร์โมแกรมทำให้อุณหภูมิกลาสแทรนซิชันเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีส่วนของ hard segment มากขึ้น ยกเว้นสูตร P40-BD10 ซึ่งมีอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันเพียงค่าเดียว อาจเนื่องจาก 1,4 บิวเทนไดออล ช่วยให้พอลิเมอร์กับพอลิเมอร์ทางการค้าเข้ารวมตัวกันได้ดีขึ้น