

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

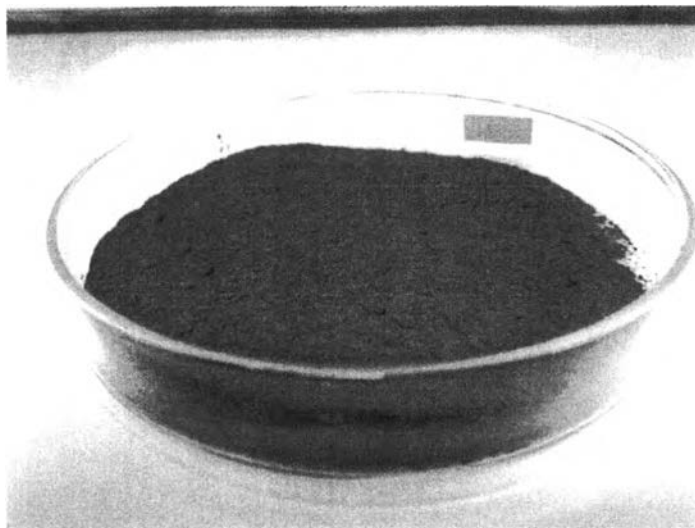
4.1 การสกัดและการตรวจสอบคุณลักษณะของลิกนิน

4.1.1 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการสกัดลิกนินจากน้ำดำ

สกัดลิกนินจากน้ำดำปริมาณ 100 มิลลิลิตร ด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยกรดซัลฟิวริก ตามหัวข้อที่ 3.3.1 พบว่าน้ำดำก่อนสกัดลิกนินมีสีน้ำตาล มีค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 12 หลังจากเติมกรดลงไปน้ำดำจะมีสีที่จางลงจนเป็นสีน้ำตาล เมื่อปรับค่าความเป็นกรด-ด่างที่ค่าประมาณ 6 จะเกิดฟองก๊าซที่มีกลิ่นเหม็นขึ้นจำนวนมาก โดยฟองก๊าซและกลิ่นเหม็นที่เกิดขึ้นน่าจะเกิดจากสารละลายไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อยู่ในน้ำดำเปลี่ยนสถานะเป็นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่าง ลดต่ำลง [14] เมื่อทำการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 1, 3 และ 5 แล้วจึงนำน้ำดำไปกรอง และอบตะกอนที่ได้จนแห้ง พบว่าตะกอนจะจับตัวกันเป็นก้อนแข็งมีลักษณะสีน้ำตาลดังรูปที่ 4.1 แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำไปบดด้วยเครื่องบด โดยลิกนินที่ได้มีลักษณะดังรูปที่ 4.2 ซึ่งได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.1 พบว่าเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างลดลง ปริมาณลิกนินที่สกัดได้จะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของวิชา [23] ซึ่งทำการตกตะกอนลิกนินด้วยกรดซัลฟิวริกโดยปรับความเป็นกรด-ด่างที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 และจากผลการทดลองพบว่าที่ความเป็นกรด-ด่างต่ำลง (นั่นคือมีความเป็นกรดมากขึ้น) ตะกอนลิกนินที่ได้จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.1 ลักษณะของลิกนินที่ยังไม่ผ่านการบด



รูปที่ 4.2 ลักษณะของลิกนินที่ผ่านการอบ

ตารางที่ 4.1 ปริมาณของลิกนินที่ตกตะกอนได้ที่ความเป็นกรด-ด่างต่างๆ กัน

ค่าความเป็นกรด-ด่าง	น้ำหนักลิกนินที่สกัดได้ (กรัม)					
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	น้ำหนักเฉลี่ย
1	4.89	4.84	4.70	4.72	4.79	4.79±0.08
3	4.26	4.23	4.40	4.29	4.31	4.30±0.07
5	2.49	2.68	2.74	2.70	2.78	2.68±0.11

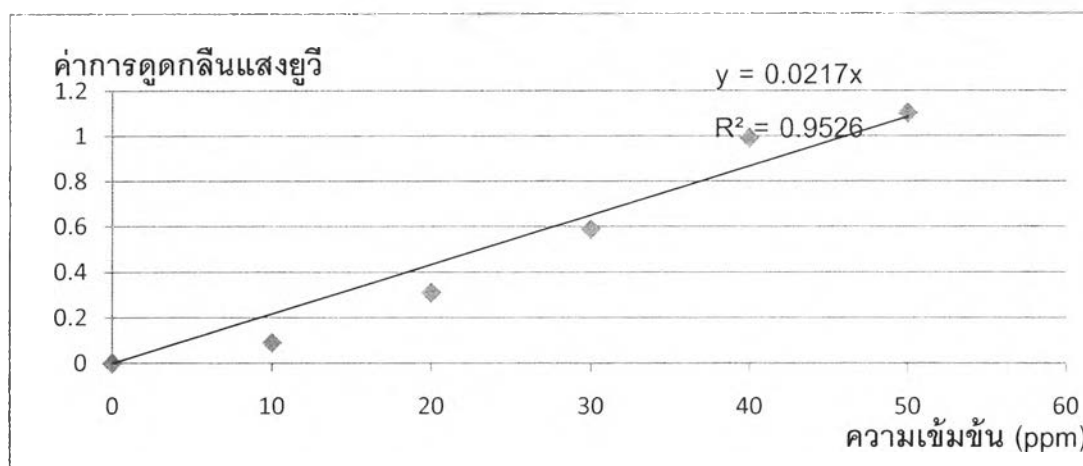
จากผลการทดลองพบว่าที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 1 และค่าความเป็นกรด-ด่าง 3 มีปริมาณลิกนินที่สกัดออกมามากกว่าที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 5 อย่างเห็นได้ชัด คือประมาณเกือบสองเท่า ในขณะที่ที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 3 ปริมาณลิกนินที่สกัดได้มีค่าใกล้เคียงกับที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 1 จึงสรุปว่าภาวะที่เหมาะสมในการสกัดลิกนินด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยกรดซัลฟิวริก คือที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 3 เนื่องจากมีการใช้ปริมาณกรดซัลฟิวริกที่น้อยกว่าแต่ให้ปริมาณลิกนินที่น้อยกว่าที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 1 เพียงเล็กน้อย

4.1.2 ปริมาณผลิตภัณฑ์ (yielding) ของลิกนินที่สกัดได้

จากการทดสอบด้วยเครื่องยูวี-วิชิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-visible spectrophotometer) นำค่าดูดกลืนแสงยูวีของสารละลายลิกนินที่ความเข้มข้น 10, 20, 30, 40 และ 50 ppm ดังแสดงในตารางที่ 4.2 มาสร้างกราฟมาตรฐานตามรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 ค่าการดูดกลืนแสงยูวีที่ความเข้มข้นของลิกนินต่างๆ กัน

ค่าความเข้มข้นสารละลายลิกนิน (ppm)	ค่าการดูดกลืนแสงยูวี
10	0.09
20	0.31
30	0.59
40	0.99
50	1.10



รูปที่ 4.3 กราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของลิกนินและค่าการดูดกลืนแสงยูวี

หลังจากนั้นนำมาคำนวณสมการความสัมพันธ์ของกราฟเส้นตรง ได้สมการเป็น

$$Y = 0.021X$$

โดยค่า Y คือ ค่าดูดกลืนแสงยูวี

X คือ ค่าความเข้มข้นหน่วยเป็น ส่วนในล้านส่วน (ppm)

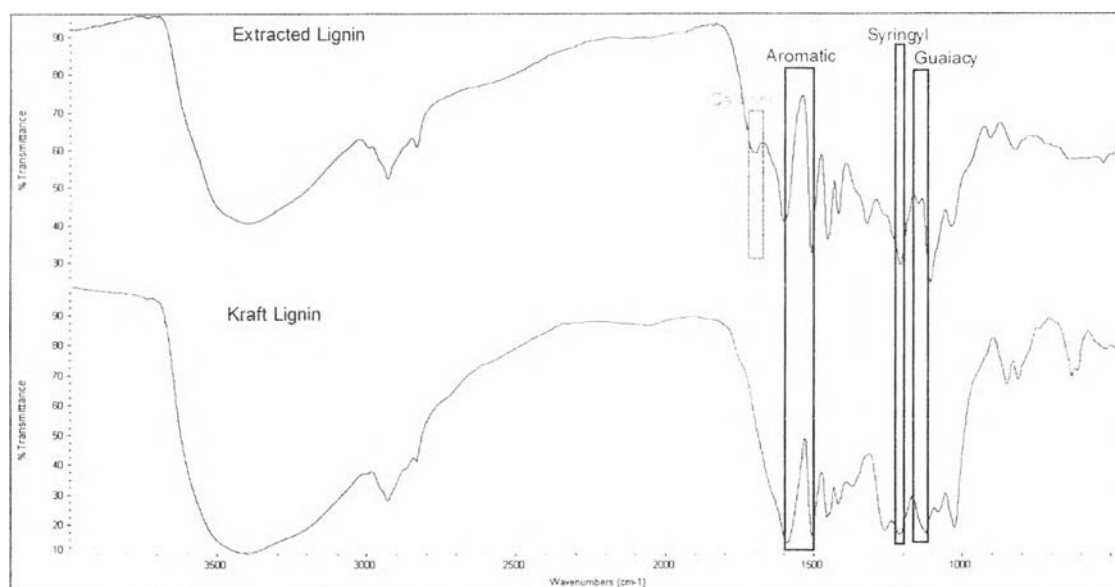
จากนั้นนำค่าดูดกลืนแสงยูวีของสารละลายน้ำดำซึ่งได้เท่ากับ 0.78 ไปแทนค่าในสมการ จะได้ค่า $X = 37.142$ ส่วนในล้านส่วน (หน่วยส่วนในล้านส่วนมีค่าเท่ากับ หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร) แปลงหน่วยเป็น 0.037 กรัมต่อลิตร แสดงว่าในสารละลาย 1 ลิตร มีลิกนิน อยู่ 0.037 กรัม

สารละลายน้ำดำที่เตรียมมีความเข้มข้น 0.4 ส่วนในล้านส่วน (หรือเท่ากับ 0.4 มิลลิลิตร ในสารละลาย 1 ลิตร) และจากปริมาณลิกนินที่คำนวณได้ข้างต้น แสดงว่าน้ำดำ 0.4 มิลลิลิตร มีปริมาณลิกนิน 0.037 กรัม ดังนั้นน้ำดำ 100 มิลลิลิตร จะมีปริมาณลิกนินเท่ากับ $(0.037 \times 100) / (0.4 \times 10^{-3}) = 9.29$ กรัม

แต่จากการทดลองพบว่าน้ำดำ 100 มิลลิลิตรสามารถสกัดลิกนินออกมาได้ 4.3 กรัม ดังนั้นการสกัดลิกนินที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 3 ให้ปริมาณผลิตผลร้อยละ 46.29 ($= (4.3/9.29) \times 100$)

4.1.3 ผลการตรวจสอบคุณลักษณะของลิกนิน

(1) ตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของลิกนินด้วยเครื่อง *Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR)* รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะของอินฟราเรดสเปกตรัมของลิกนินที่สกัดได้เปรียบเทียบกับคราฟต์ลิกนิน ของบริษัทลิกโนเทค (Lignotech)



รูปที่ 4.4 infrared spectrum ของลิกนินที่สกัดได้

จากรูปที่ 4.4 พบว่าลิกนินที่สกัดได้มีความแตกต่างจากคราฟต์ลิกนินของบริษัทลิกโนเทค เล็กน้อย โดยในช่วงของ wave number $1600 - 1500 \text{ cm}^{-1}$, $1340-1330 \text{ cm}^{-1}$ และ $1272-1220 \text{ cm}^{-1}$ แสดงถึง วงแหวนอะโรมาติก (Aromatic) ไซริงจิล (Syringyl) และวงแหวนกัวไอซิล (Guaiacyl) ตามลำดับ มีตำแหน่งคล้ายคลึงกัน ส่วนที่มีความแตกต่างคือช่วง wave number ที่ $1720-1710 \text{ cm}^{-1}$ (หมู่คาร์บอนิล) ของคราฟต์ลิกนินจากบริษัทลิกโนเทค ไม่ปรากฏให้เห็น โดยสาเหตุที่ wave number ในช่วงนี้หายไปนั้นคาดว่า คราฟต์ลิกนินของบริษัทลิกโนเทคอาจทำปฏิกิริยากับลิเทียมอะลูมิเนียมไฮเดรต (lithium aluminium hydrate) ซึ่งจะทำปฏิกิริยารีดักชันกับลิกนินทำให้หมู่คาร์บอนิลนั้นหายไป [26] และจากการศึกษารวบรวมของ Bykov [26] พบว่าลิกนินที่มาจากชนิดของไม้และวิธีการสกัดที่แตกต่างกัน จะมีหมู่ฟังก์ชันที่แตกต่างกัน โดยจากการเปรียบเทียบหมู่ฟังก์ชันของลิกนินที่ได้รวบรวมโดย Bykov กับหมู่ฟังก์ชันของลิกนินที่สกัดได้ดังตารางที่ 4.3 พบว่า wave number ของลิกนินที่สกัดได้มีความใกล้เคียงกับ wave number ของ

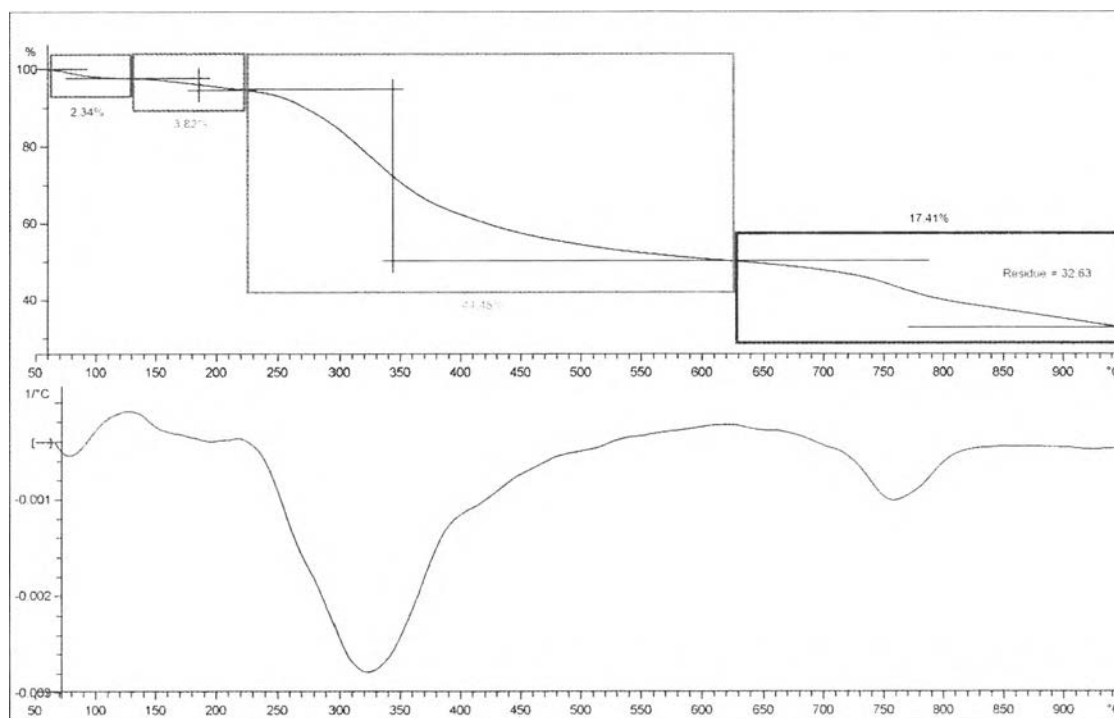
ลิกนินที่ได้มาจากไม้เนื้อแข็ง (Hard wood lignin) เนื่องจากถ้าเป็นลิกนินที่ได้จากไม้เนื้ออ่อน (Soft wood lignin) จะไม่ปรากฏพีคที่ $1340-1330\text{ cm}^{-1}$ และ 1125 cm^{-1} ซึ่งเป็นส่วนที่แสดงหมู่ฟังก์ชันของ ไซริงจิล (ไซริงจิล จะมีมากในไม้เนื้อแข็ง) ซึ่งเป็นไปตามคาดเนื่องจากน้ำดำที่นำมาสกัดเป็นผลิตภัณฑ์มาจากไม้ยูคาลิปตัสซึ่งเป็นไม้เนื้อแข็ง

ตารางที่ 4.3 หมู่ฟังก์ชันของลิกนินที่ตำแหน่ง Wave number ต่างๆ [26]

wave number (cm^{-1})		หมู่ฟังก์ชัน	wave number ของลิกนิน (cm^{-1})
Softwood lignin	Hardwood lignin		
3550-3200		O-H (H-bonded) Stretching	3406
3000-2850		C-H methy group Stretching	3000, 2934, 2839
1720-1710		C=O (ketone) Stretching	1711
1605-1595		C_6H_4 (Aromatic ring)	1607
1515-1500			1515
1465			1457
1430-1425			1420
-	1340-1330	Syryngyl rings,C-O- bond	1327
1272-1265		Guaiacyl, C-O- bond	1266
1225-1220			1216
1140	1150	Deformation vibration of C-H bond in guaiacyl rings	1155
-	1125	Deformation vibration of C-H bond in syryngyl rings	1113
1035-1130		Deformation vibration of C-H bond in the aromatic rings and deformation of C-O in vibrations bonds primary alcohols	1041
945		Deformation vibration of C-H bond in associated to aromatic ring	910
870-850			830

(2) ตรวจสอบอุณหภูมิการสลายตัวด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) จากกราฟ TG ในรูปที่ 4.5 พบว่าลิกนินมีช่วงอัตราการสลายตัวอยู่ที่ช่วง ได้แก่การสลายที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 63 ถึง 125 องศาเซลเซียส โดยมีน้ำหนักที่หายไปประมาณร้อยละ 2 ซึ่งเป็นช่วง

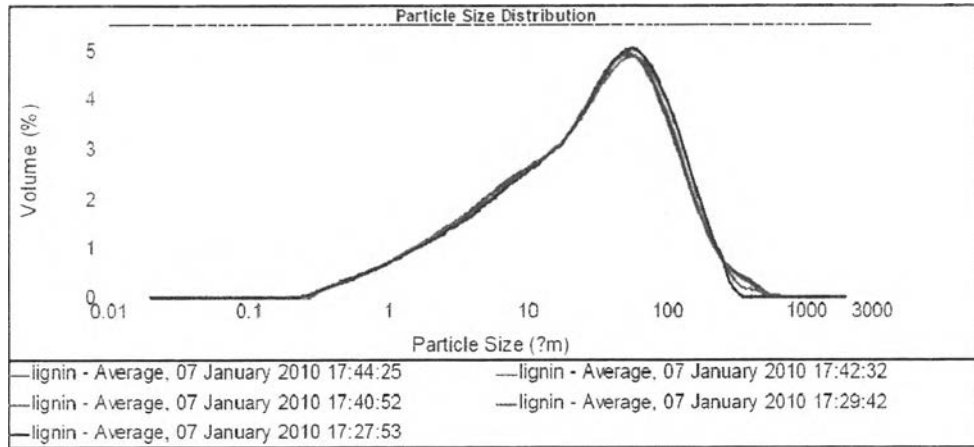
ที่มีการระเหยออกของน้ำที่มีอยู่ในลิกนิน ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 127 ถึง 233 องศาเซลเซียสมี น้ำหนักที่หายไปประมาณร้อยละ 4 ซึ่งเป็นการสลายตัวของน้ำ ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ โดยซัลเฟอร์ที่เกิดการสลายตัวน่าจะมาจากกรดซัลฟิวริกที่ใช้ในการสกัดและจากกระบวนการทำเอ็กระดาษที่ใช้ซัลเฟอร์ในการฟอกไม้ ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 248 ถึง 648 องศาเซลเซียส มีน้ำหนักที่หายไปประมาณร้อยละ 44 ซึ่งเกิดจากการกลายเป็นไอของคาร์บอนไดออกไซด์และเอทิลไอโซไซยานาต และสุดท้ายช่วงอุณหภูมิระหว่าง 702 ถึง 950 องศาเซลเซียสมีน้ำหนักที่หายไปประมาณร้อยละ 32 ซึ่งเกิดจากการปลดปล่อยของคาร์บอนไดออกไซด์ เอทิลไอโซไซยานาต และ เทอร์เทียรีไอโซไซยานาต โดยทั้งเอทิลไอโซไซยานาตและ เทอร์เทียรีไอโซไซยานาต เกิดจากการทำปฏิกิริยากันของไนโตรเจนและสารประกอบอัลคิลในระหว่างการสลายตัวของลิกนิน โดยจากผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับการงานวิจัยของ Ibrahim [27] ซึ่งมีการสลายตัวของลิกนินในช่วงเหมือนกัน นอกจากนี้กราฟ DTG ดังแสดงในรูปที่ 4.5 แสดงค่าอัตราการสลายตัวของลิกนินที่ 335 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิการสลายตัวตามปกติของลิกนินซึ่งเป็นเฮมิเซลลูโลส (hemicelluloses) โดยเฮมิเซลลูโลสจะมีค่าการสลายตัวอยู่ระหว่าง 260 – 350 องศาเซลเซียส [28, 29]



รูปที่ 4.5 กราฟ TG และ DTG ของลิกนินที่สกัดได้

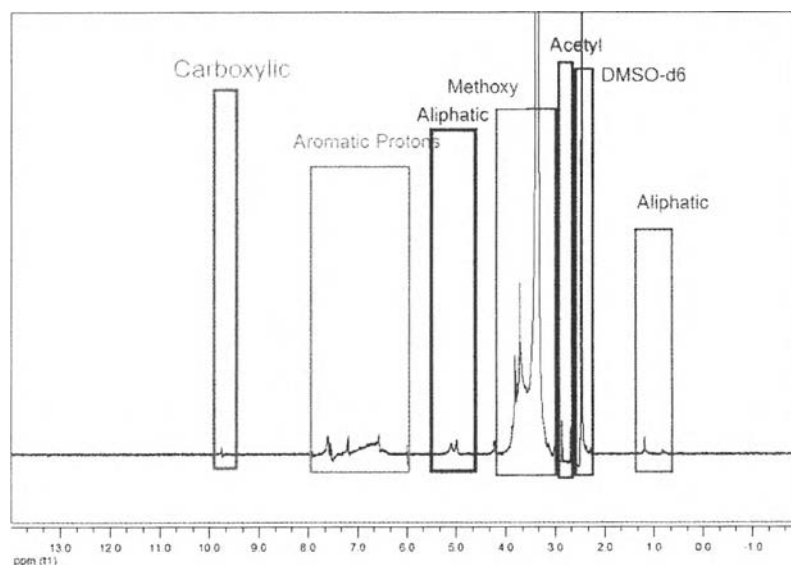
(3) ตรวจสอบขนาดของอนุภาคด้วยเครื่อง Laser light scattering ผลการทดสอบจากเครื่อง Laser light scattering ได้ขนาดของอนุภาคโดยเฉลี่ยประมาณ 31.73 ไมโครเมตร โดยขนาดของอนุภาคที่เล็กที่สุดคือประมาณ 0.28 ไมโครเมตร และมีขนาดใหญ่ที่สุดคือ 363.08

ไมโครเมตร โดยการกระจายตัวของขนาดอนุภาคส่วนใหญ่จะอยู่ระหว่าง 40 ถึง 70 ไมโครเมตร ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 21.95 ของทั้งหมด โดยกราฟที่ได้จากเครื่อง Laser light scattering มีลักษณะดังรูปที่ 4.6 โดยผลการทดสอบทั้งหมดของเครื่อง laser light scattering แสดงไว้ในภาคผนวก ก



รูปที่ 4.6 ขนาดอนุภาคของลิกนินที่ตรวจสอบด้วยเครื่อง Laser light scattering

(4) ตรวจสอบลักษณะโครงสร้างของลิกนินด้วยเทคนิค NMR จากผลการตรวจสอบดังรูปที่ 4.7 พบว่าลิกนินที่สกัดได้ปรากฏเคมีคัลชิฟต์ (chemical shift) ที่ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งเป็นส่วนประกอบของลิกนิน โดยในส่วนที่เป็นวงแหวนอะโรมาติกที่เป็นส่วนประกอบของ ไชรินจีล และ กัวไอซิล มีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับ เมททอกซี โดยตัว เมททอกซี นั้นก็เป็นส่วนหนึ่งในวงแหวนของ ไชรินจีล และ กัวไอซิล แต่การที่เมททอกซี มีปริมาณมากกว่าหลายเท่า นั้น คาดว่าเนื่องมาจากอนุพันธ์ของลิกนินที่หลงเหลือจากการล้างตะกอนไม่หมด ส่วนในช่วงสัญญาณอื่นๆ ของลิกนิน จะแสดงในตารางที่ 4.4

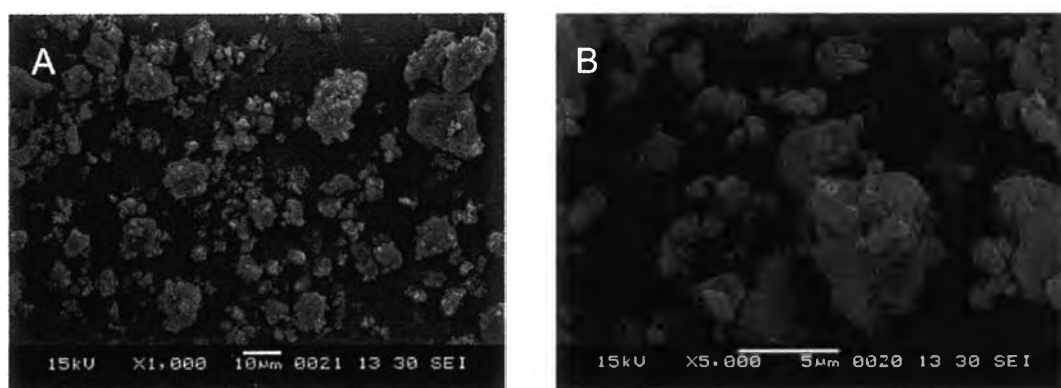


รูปที่ 4.7 ¹H NMR สเปกตรัมของลิกนินที่ได้จากผลการทดสอบ NMR

ตารางที่ 4.4 หมู่ฟังก์ชันของลิกนินที่ช่วงสัญญาณต่างๆ [27]Okd

Signal (ppm)	Assignment
10.5-12	Carboxylic
8.0-6.0	Aromatic H in Syringyl and Guaiacyl units
6.9	Aromatic H in Guaiacyl
6.6	Aromatic H in Syringyl
5.0-5.5	Aliphatic H
4.2-3.1	Methoxyl H
2.5-2.2	H in aromatic acetates
2.2-1.9	H in aliphatic acetates
1.5-0.8	Aliphatic H

(5) ตรวจสอบลักษณะอนุภาคลิกนินด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ด้วยกำลังขยาย 1,000 และ 5,000 เท่า ผลจากการตรวจสอบด้วย SEM พบว่าพื้นผิวของลิกนินมีลักษณะเป็นผลึกที่รูปร่างไม่แน่นอน ผิวค่อนข้างเรียบดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ลักษณะของลิกนิน A) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ B) กำลังขยาย 5,000 เท่า

4.2 การเตรียมและทดสอบชิ้นงานโฟม

4.2.1 ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมชิ้นงานโฟม

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.5 พบว่าระยะเวลาเย็นตัวของโฟมจะส่งผลต่อขนาดของโฟมที่เตรียมได้ สังเกตพบว่าที่ระยะเวลาเย็นตัว 10 นาที โฟมมีการบวมตัวเกินกว่าแม่พิมพ์ (ขนาดของแม่พิมพ์ 175 × 175 × 30 มิลลิเมตร) โดยมีความหนาประมาณ 55 มิลลิเมตร มีรูปร่างในลักษณะโค้งงอ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากอุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่ระยะเวลาดังกล่าวอยู่ที่ประมาณ 80

องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่พอลิเอทิลีนนั้นคงรูปได้ไม่สมบูรณ์ (ซึ่งจากการทดสอบด้วยเทคนิค DSC โดยแสดงไว้ในภาคผนวก ข พบว่าคอมพาวนด์จะเริ่มแข็งตัวที่อุณหภูมิ 99 องศาเซลเซียส และ แข็งตัวสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 94 องศาเซลเซียส และที่กล่าวว่าอุณหภูมิ 80 องศาพอลิเอทิลีนยังคงรูปไม่สมบูรณ์นั้นเนื่องมาจาก อุณหภูมิที่วัดได้นั้นเป็นอุณหภูมิของแม่พิมพ์ซึ่งน่าจะน้อยกว่าตัวโพลีเอทิลีนที่อยู่ภายใน) ดังนั้นเมื่อเปิดแม่พิมพ์ โพลีจึงเกิดการขยายตัว ในขณะที่ระยะเวลาเย็นตัว 15 นาที อุณหภูมิของแม่พิมพ์อยู่ที่ประมาณ 50 องศาเซลเซียส พบว่าโพลีที่เตรียมคงรูปแล้ว จึงไม่พบการบวมตัวเกินกว่าแม่พิมพ์ ในทำนองเดียวกัน ที่ระยะเวลาเย็นตัวที่ 20 นาที อุณหภูมิของแม่พิมพ์อยู่ที่ประมาณ 46 องศาเซลเซียส จึงไม่พบการบวมตัวเกินกว่าแม่พิมพ์เช่นกัน โดยสีเหลืองที่เกิดขึ้นคาดว่าเป็นสีเหลืองของ ADC ที่หลงเหลือจากการสลายตัวไม่สมบูรณ์

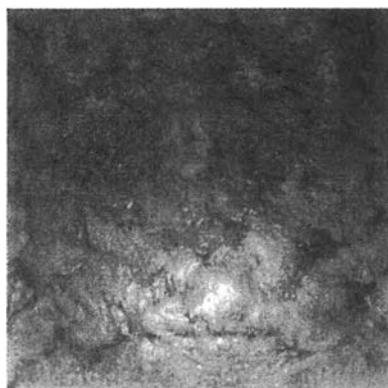
ในส่วนของอุณหภูมิที่ใช้ขึ้นรูป พบว่าที่อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส เซลล์โพลีมีการกระจายที่สม่ำเสมอมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส โดยคาดว่าน่าจะเป็นผลจากการสลายตัวของสารฟูที่ใช้ คือ ADC ที่มีการสลายตัวที่ดีกว่าที่อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส ซึ่งโดยปกติแล้ว ADC จะสลายตัวที่อุณหภูมิ 190-240 องศาเซลเซียสแต่ในงานวิจัยนี้ได้มีการเติมซิงค์ออกไซด์ซึ่งทำหน้าที่เป็นคิกเกอร์ ช่วยลดอุณหภูมิการสลายตัวของ ADC ให้ต่ำลง และเมื่อเปรียบเทียบโพลีที่ใช้อุณหภูมิขึ้นรูป 175 องศาเซลเซียส กับโพลีที่ใช้อุณหภูมิขึ้นรูป 180 องศาเซลเซียส พบว่าโพลีที่ใช้อุณหภูมิขึ้นรูป 175 องศาเซลเซียส ให้ผลการกระจายตัวของเซลล์ที่ดีกว่า อาจเนื่องมาจากโพลีที่ใช้อุณหภูมิขึ้นรูป 175 องศาเซลเซียส พอลิเอทิลีนจะเกิดการเย็นตัวและคงรูปได้เร็วกว่าโพลีที่ใช้อุณหภูมิขึ้นรูป 180 องศาเซลเซียส ส่งผลให้การขยายตัวของฟองก๊าซสำหรับโพลีที่ใช้อุณหภูมิขึ้นรูป 180 องศาเซลเซียสนั้นมีมากกว่า ให้เซลล์ที่มีขนาดใหญ่กว่า นอกจากนี้การที่เนื้อพอลิเอทิลีนนั้นคงรูปช้ากว่าน่าจะมีผลให้มีก๊าซบางส่วนหลุดลอดออกจากเนื้อพอลิเมอร์ ซึ่งน่าจะเป็นอีกเหตุผลที่ทำให้เซลล์มีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอน้อยกว่าโพลีที่ใช้อุณหภูมิขึ้นรูป 175 องศาเซลเซียส

ในส่วนขอระยะเวลาให้ความร้อนที่เวลา 15 และ 20 นาที พบรอยหยักสีเหลือง และลักษณะการกระจายตัวของเซลล์ที่ไม่แตกต่างกัน แต่เมื่อเปรียบเทียบที่ระยะเวลาให้ความร้อน 15 และ 10 นาทีพบว่าที่ระยะเวลาให้ความร้อน 10 นาที โพลีบวมตัวไม่เต็มแม่พิมพ์ น่าจะเป็นผลมาจากที่ระยะเวลาให้ความร้อน 10 นาที ฟองก๊าซที่เกิดจากการสลายตัวของสารฟูอาจจะขยายตัวไม่เต็มที่เมื่อพอลิเอทิลีนเกิดการคงรูป

เมื่อปรับความดัน พบว่าความดันที่ลดลงมีผลทำให้รอยหยักลดน้อยลง ซึ่งน่าจะเกิดจากการที่โพลีบวมตัวได้มากขึ้น เนื่องจากการลดความดันส่งผลให้อากาศที่ถูกขังอยู่ในแม่พิมพ์สามารถไหลผ่านออกจากแม่พิมพ์ทำให้มีปริมาตรที่โพลีจะฟูตัวได้มากขึ้น แต่ถ้าลดความดันต่ำ

กว่า 50 บาร์ พบว่าเนื้อพอลิเมอร์ในบางส่วนจะไหลออกจากแม่พิมพ์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ความดันที่ 50 บาร์ ซึ่งมีค่าที่ต่ำกว่าและใช้พลังงานน้อยกว่า

จากการศึกษาปัจจัยการขึ้นรูปข้างต้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ภาวะในการเตรียมชิ้นงานโฟมที่ อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส ความดัน 50 บาร์ ระยะเวลาให้ความร้อน 15 นาที และระยะเวลาเย็นตัว 15 นาที ซึ่งต่อมาพบว่าอุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่ลดลงไม่สอดคล้องกับระยะเวลาเย็นตัว ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์แทนที่จะควบคุมระยะเวลาเย็นตัว

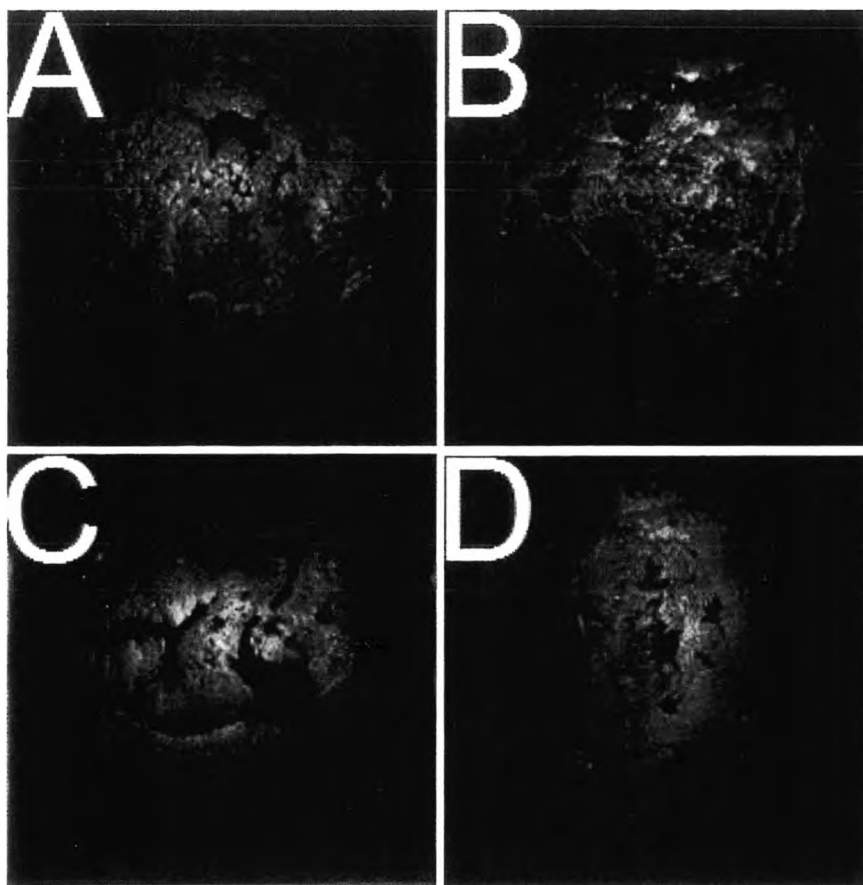


รูปที่ 4.9 แสดงลักษณะชิ้นงานที่ขึ้นรูปตามภาวะที่เลือก

จากรูปที่ 4.9 แสดงลักษณะชิ้นงานโฟมที่ขึ้นรูปตามภาวะที่เลือก เมื่อมีการผสมลิกนิน พบว่าโฟมที่เตรียมเกิดการบวมตัวไม่เต็มแม่พิมพ์และมีการยุบตัวบางส่วน ดังแสดงในรูปที่ 4.10 คาดว่าสาเหตุเนื่องมาจากการเติมลิกนินลงไปอาจจะมีความหนืดของคอมพาวนด์

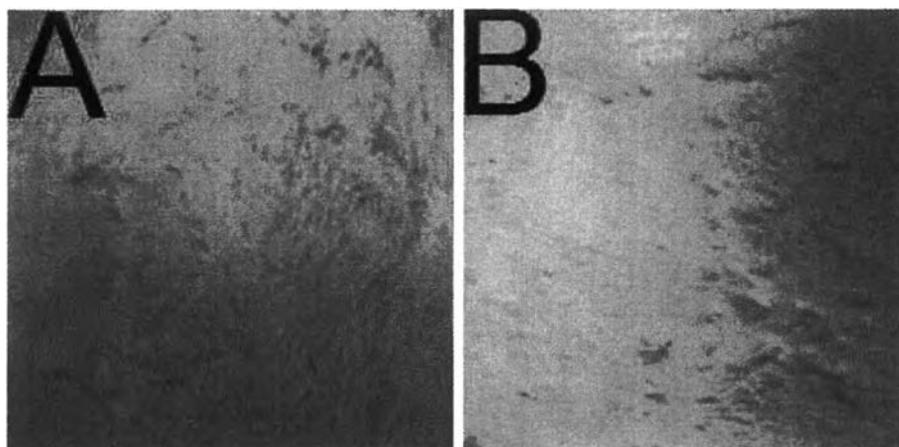
ตารางที่ 4.5 ลักษณะของโฟมที่เตรียมได้ในภาวะการขึ้นรูปต่างๆ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความดัน (บาร์)	ระยะเวลาให้ความ ร้อน (นาที)	ระยะเวลาเย็นตัว (นาที)	ลักษณะของโฟมที่เตรียมได้
180	150	15	10	โฟมบวมตัวเกินกว่าขนาดของแม่พิมพ์ พบรอยหยักสีเหลืองค่อนข้างลึกกระจายทั่วแผ่นโฟม เซลล์โฟมมีขนาดต่างๆ และมีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอ
			15	ไม่พบการบวมตัวเกินกว่าแม่พิมพ์ แต่ยังพบรอยหยักสีเหลืองกระจายทั่วแผ่น
			20	ไม่พบการบวมตัวเกินกว่าแม่พิมพ์ แต่ยังพบรอยหยักสีเหลืองกระจายทั่วแผ่น
180	150	15	15	ไม่พบการบวมตัวเกินกว่าแม่พิมพ์ แต่ยังพบรอยหยักสีเหลืองกระจายทั่วแผ่น
175				พบรอยหยักสีเหลือง เซลล์ของโฟมมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ
170				พบรอยหยักสีเหลือง เซลล์ของโฟมมีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอ
175	150	20	15	พบรอยหยักสีเหลือง เซลล์ของโฟมมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ
		15		พบรอยหยักสีเหลือง เซลล์ของโฟมมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ
		10		โฟมบวมตัวไม่เต็มแม่พิมพ์ รอยหยักสีเหลืองกระจายไปทั่วแผ่น
175	150	15	15	พบรอยหยักสีเหลืองอยู่ เซลล์ของโฟมมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ
	100			รอยหยักสีเหลืองลดลง เซลล์ของโฟมมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ
	50			รอยหยักสีเหลืองลดลง เซลล์ของโฟมมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ



รูปที่ 4.10 ลักษณะขึ้นงานโพนที่มีการผสมลิกนินลงไป A) PE+LIG 5phr, B) PE+LIG 10phr, C)PE+LIG 15 phr และ D)PE+LIG 20 phr

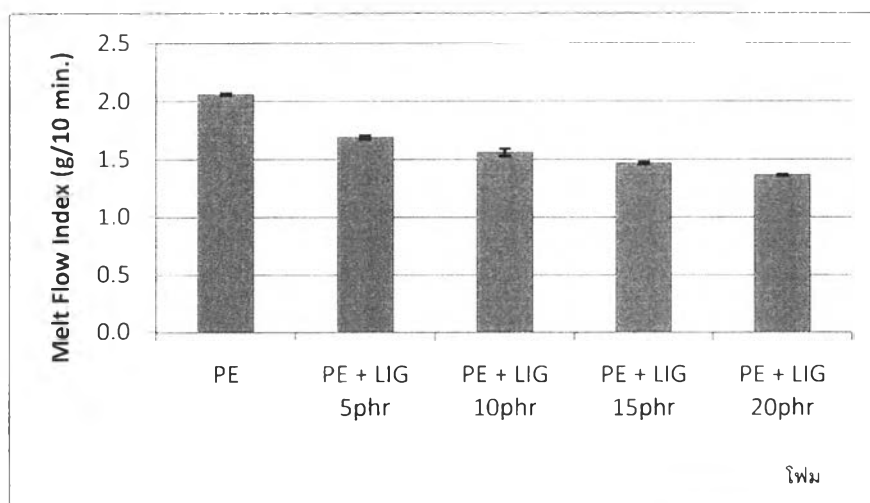
เมื่อมีการเติมสารหน่วงไฟเชิงการค้าลงไปพบว่าลักษณะขึ้นงานโพนบวมตัวเต็มแม่พิมพ์ตามปกติ ดังรูปที่ 4.11 โดยคาดว่า การเติมสารหน่วงไฟเชิงการค้าไปนั้นไม่ส่งผลต่อค่าความหนืดของคอมพาวนด์



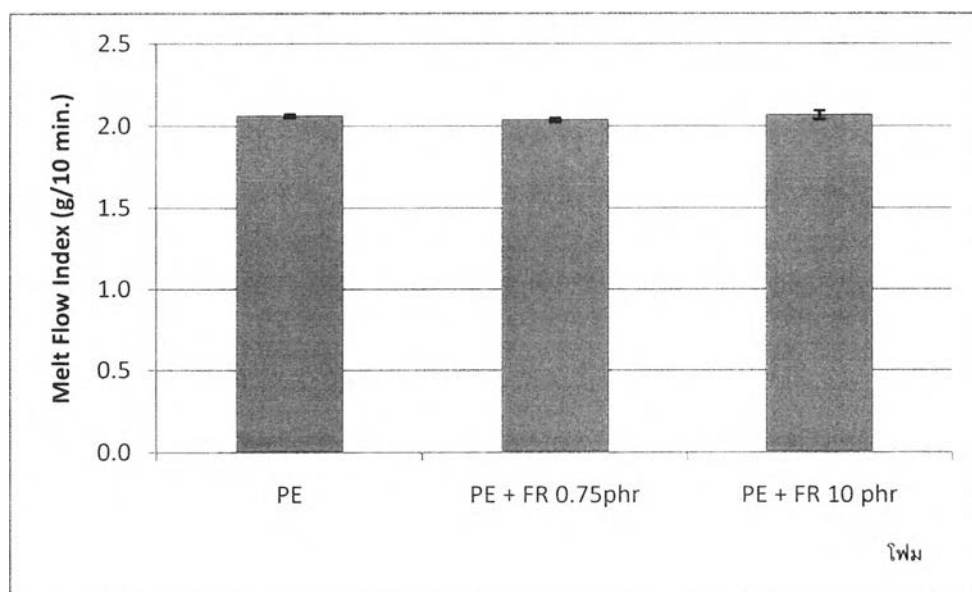
รูปที่ 4.11 ลักษณะขึ้นงานโพนที่มีการผสมสารหน่วงไฟเชิงการค้าลงไป A) PE+FR 0.75 phr และ B) PE+FR 10 phr

4.2.2 ค่าความหนืดของคอมพาวนด์

ทดสอบค่า Melt Flow Index (MFI) ของคอมพาวนด์ (compound) ใช้อุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียส และตมน้ำหนัก 10 กิโลกรัม ผลการทดสอบค่าความหนืด พบว่าความหนืดของคอมพาวนด์มีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณลิกนินลงไป ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ซึ่งสอดคล้องกับคำอธิบายในข้อ 4.2.1 ว่าลิกนินอาจจะมีผลต่อความหนืดของคอมพาวนด์ ในขณะที่ เมื่อมีการเพิ่มปริมาณสารหน่วงไฟเชิงการค้ากลับพบว่าค่าความหนืดของคอมพาวนด์แทบจะไม่เปลี่ยนแปลง ดังผลการทดสอบในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.12 ค่าความหนืดของโพลีที่มีส่วนผสมของลิกนิน



รูปที่ 4.13 ค่าความหนืดของโพลีที่มีการเติมสารหน่วงไฟเชิงการค้า

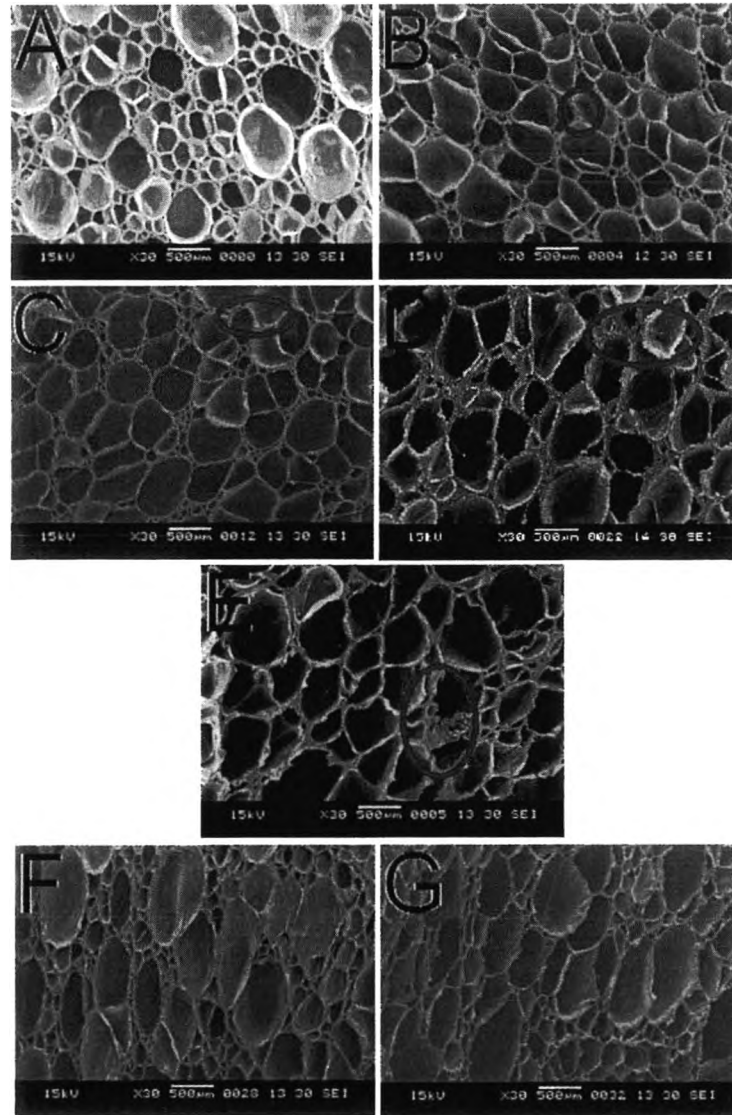
4.2.3 ผลการทดสอบชิ้นงานโคม

(1) สมบัติทางกายภาพของโคม

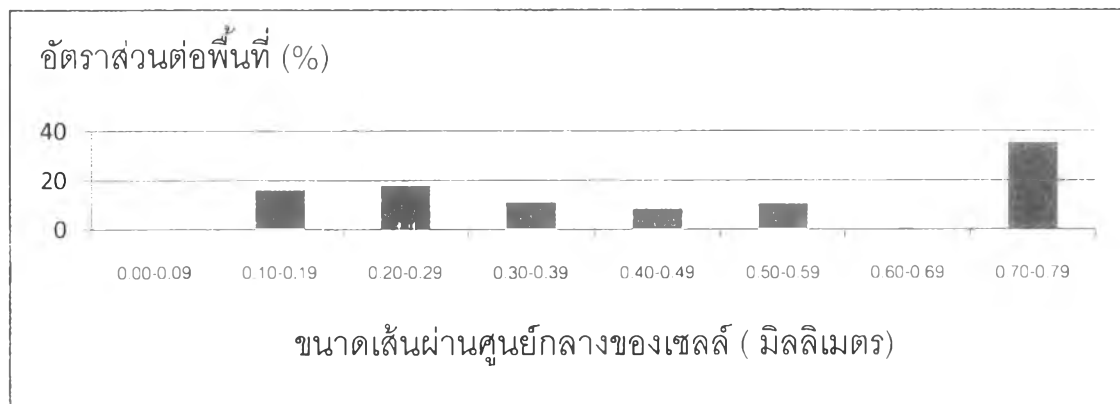
- ตรวจสอบโครงสร้างเซลล์ของโคมโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากรูปที่ 4.14 แสดงลักษณะของเซลล์โคมที่กำลังขยาย 30 เท่า พบว่าโคมที่เตรียมมีลักษณะเซลล์แบบปิด ความหนาของผนังเซลล์โคมมีความไม่สม่ำเสมอมากขึ้นเมื่อมีการเติมลิแกนด์ลงไป โดยเปรียบเทียบจากรูปที่ 4.14A ซึ่งไม่มีการเติมลิแกนด์ กับรูปที่ 4.14B ถึง 4.14E ที่มีการเติมลิแกนด์ลงไป โดยจะสังเกตเห็นได้ชัดในส่วนที่วงกลมสีแดง ซึ่งผนังเซลล์มีลักษณะขรุขระและความหนามากกว่าบริเวณอื่น โดยคาดว่าสาเหตุเนื่องมาจากการที่เติมลิแกนด์ไปในปริมาณที่มากจะส่งผลให้ลิแกนด์เกาะตัวกันและขัดขวางการขยายตัวของฟองก๊าซในขณะขึ้นรูป นอกจากนี้ยังพบว่ารูปร่างของเซลล์โคมเปลี่ยนจากวงกลมสำหรับโคมที่ไม่มีการเติมลิแกนด์ เป็นรูปหลายเหลี่ยม ในส่วนของสารหน่วงไฟเชิงการค้าพบว่าปริมาณของสารหน่วงไฟเชิงการค้าไม่ส่งผลต่อลักษณะและรูปร่างของเซลล์โคมซึ่งคาดว่าสารหน่วงไฟเชิงการค้าน่าจะเข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์ได้ดีทำให้ไม่ส่งผลต่อผนังเซลล์และรูปร่างของเซลล์ จากการตรวจสอบขนาดของเซลล์ด้วยโปรแกรม SemAfore โดยการวัดขนาดพื้นที่ภายในของเซลล์จากนั้นนำไปคำนวณเป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ ผลที่ได้จะแสดงดังรูปที่ 4.15 ถึงรูปที่ 4.21 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนต่อพื้นที่เซลล์ต่อพื้นที่เซลล์ทั้งหมดและขนาดของเซลล์ในช่วงต่างๆ ซึ่งพบว่าการกระจายตัวของขนาดเซลล์มีค่าแคบที่มีการเติมปริมาณลิแกนด์ 5 และ 10 phr ซึ่งการกระจายที่แคบและกว้างขึ้นเป็นผลเนื่องจากการที่ผนังเซลล์ของโคมไม่สม่ำเสมอ โดยยิ่งผนังเซลล์มีความไม่สม่ำเสมอมากขึ้นการกระจายตัวของขนาดเซลล์จะกว้างขึ้นไปด้วย ในส่วนของสารหน่วงไฟเชิงการค้าพบว่าปริมาณการเติมสารหน่วงไฟเชิงการค้าส่งผลต่อค่าการกระจายตัวของเซลล์โคมมากนั้น น่าจะมาจากสารหน่วงไฟเชิงการค้าเข้ากันได้กับเนื้อพอลิเมอร์ได้ดีทำให้ไม่ส่งผลต่อการกระจายตัวของเซลล์โคม

ลักษณะโคมที่กำลังขยาย 1,000 เท่าของชิ้นงานโคม แสดงในรูปที่ 4.22 พบว่าการเพิ่มปริมาณลิแกนด์จะทำให้ลิแกนด์เกาะกลุ่มกันมากขึ้นที่บริเวณผนังเซลล์ โดยสามารถเห็นได้ชัดเจนในรูปที่ 4.22D และ 4.22E

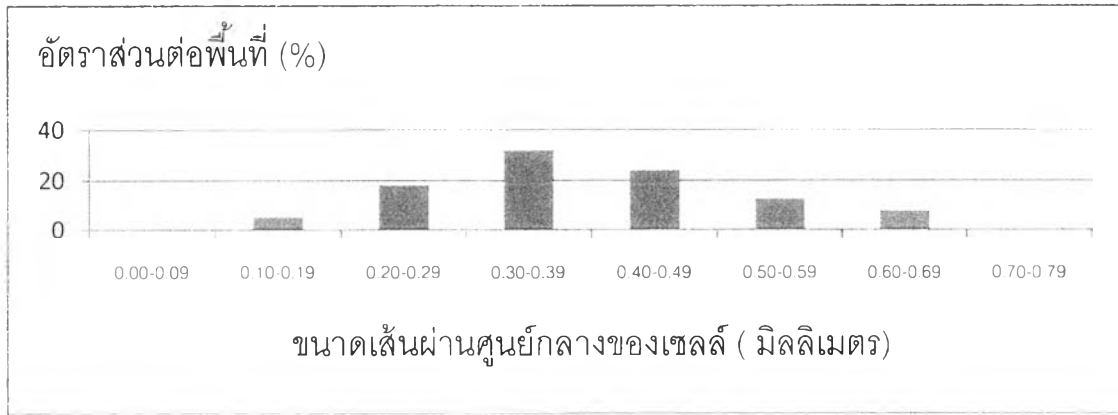
จากรูปที่ 4.23 พบว่า ลักษณะโคมที่กำลังขยาย 5,000 เท่าลิแกนด์ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกับพอลิเมอร์ โดยสามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจนจากรูปที่ 4.23C และ 4.23D ซึ่งพบว่ามีช่องว่างระหว่างเนื้อพอลิเมอร์และลิแกนด์ คาดว่าสาเหตุเนื่องมาจากสภาพผิวที่แตกต่างกัน โดยลิแกนด์มีขั้วแต่พอลิเอทิลีนไม่มีขั้วจึงทำให้เกิดการแยกเฟสออกจากกัน และในส่วนของรูปที่ 4.23F และ 4.23G เป็นรูปของโคมที่มีการเติมสารหน่วงไฟทางการค้า จากภาพแสดงว่าสารหน่วงไฟทางการค้าเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ดีกว่าลิแกนด์ โดยคาดว่าส่วนที่เป็นสีขาวคือสารหน่วงไฟทางการค้า ซึ่งจะเห็นได้ว่าไม่มีการแยกเฟสระหว่างสารหน่วงไฟเชิงการค้ากับพอลิเมอร์



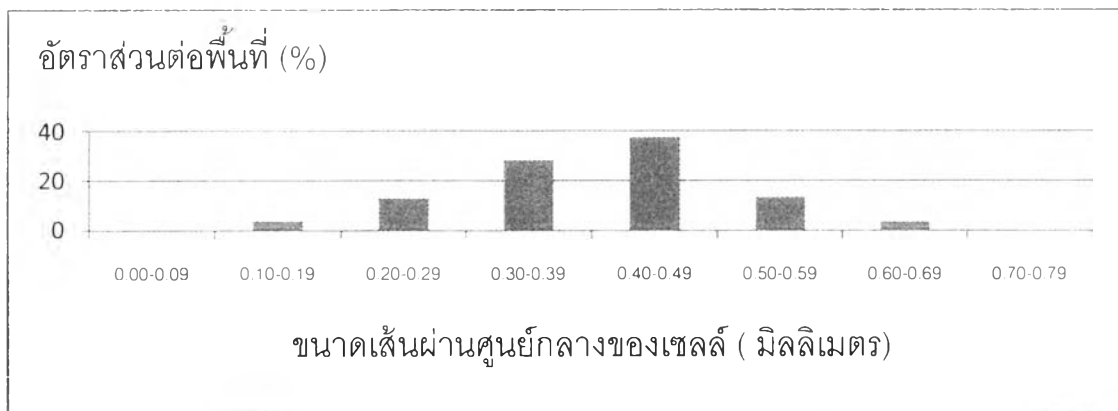
รูปที่ 4.14 ลักษณะโครงสร้างเซลล์ของโพลิเอทิลีนที่กำฉวย 30 เท่า A) PE, B) PE+LIG 5phr, C) PE+LIG 10phr, D) PE+LIG 15phr, E) PE+LIG 20phr, F) PE+FR 0.75phr และ G) PE+FR 10phr



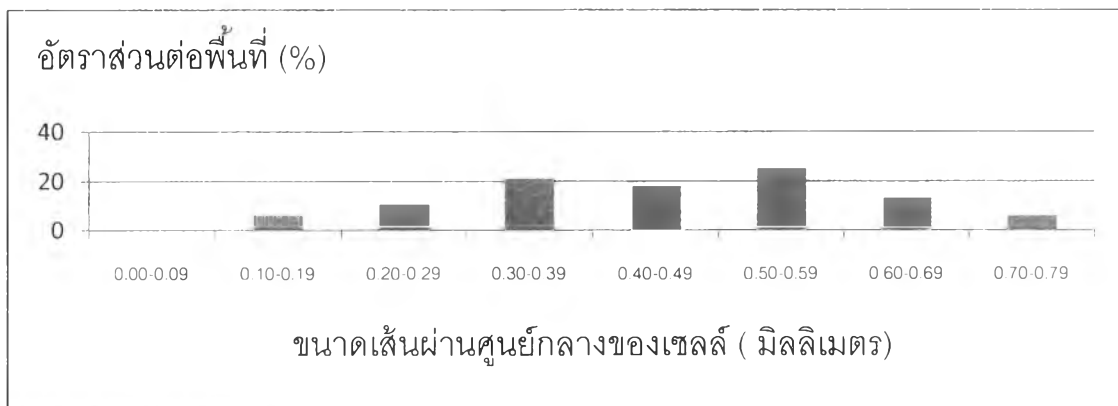
รูปที่ 4.15 การกระจายตัวของขนาดเซลล์โพลิเอทิลีน



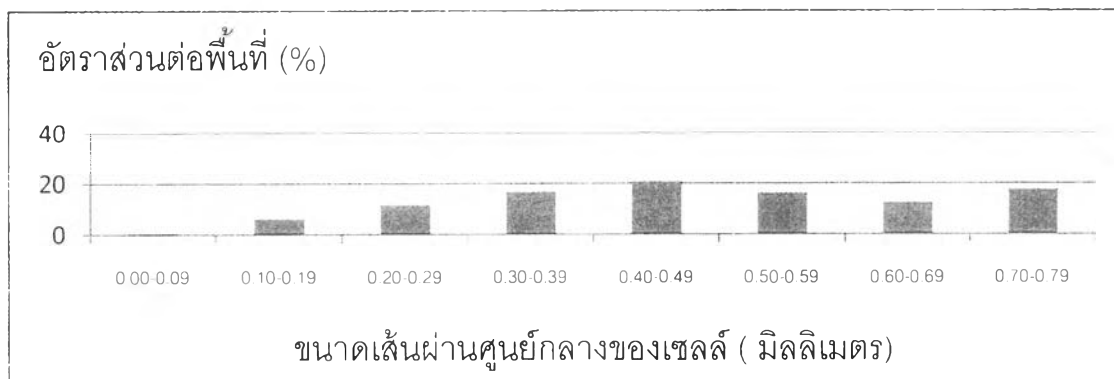
รูปที่ 4.16 การกระจายตัวของขนาดเซลล์โฟมที่มีการเติมลิกนินลงไป 5 phr



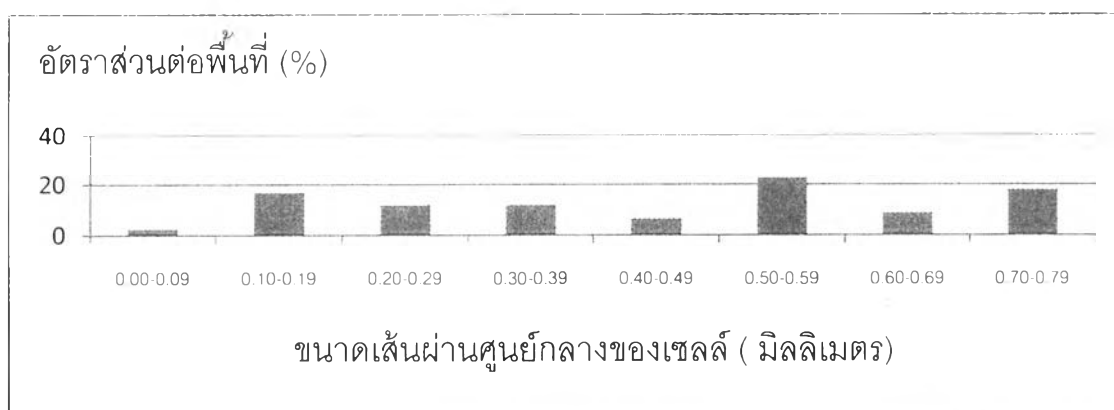
รูปที่ 4.17 การกระจายตัวของขนาดเซลล์โฟมที่มีการเติมลิกนินลงไป 10 phr



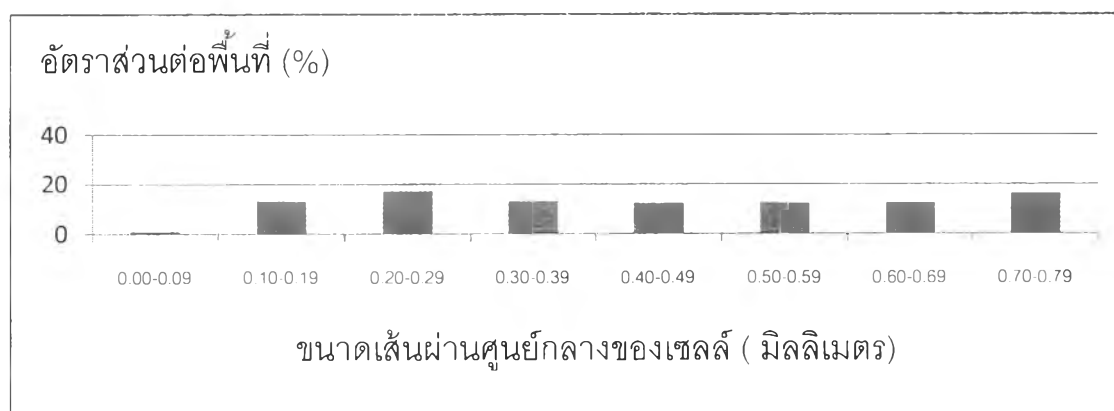
รูปที่ 4.18 การกระจายตัวของขนาดเซลล์โฟมที่มีการเติมลิกนินลงไป 15 phr



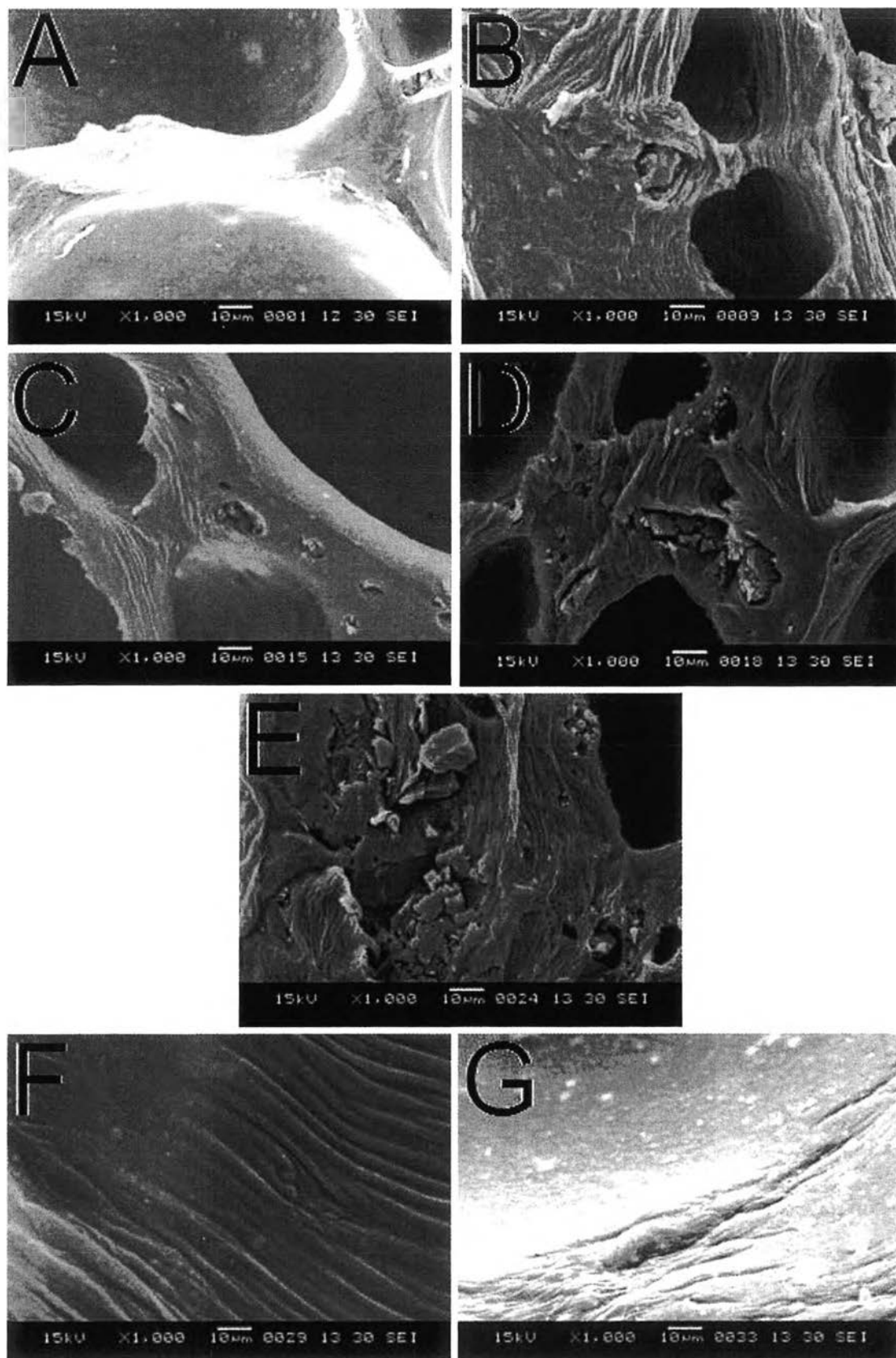
รูปที่ 4.19 การกระจายตัวของขนาดเซลล์โพลีเมอร์ที่มีการเติมลิกนินลงไป 20 phr



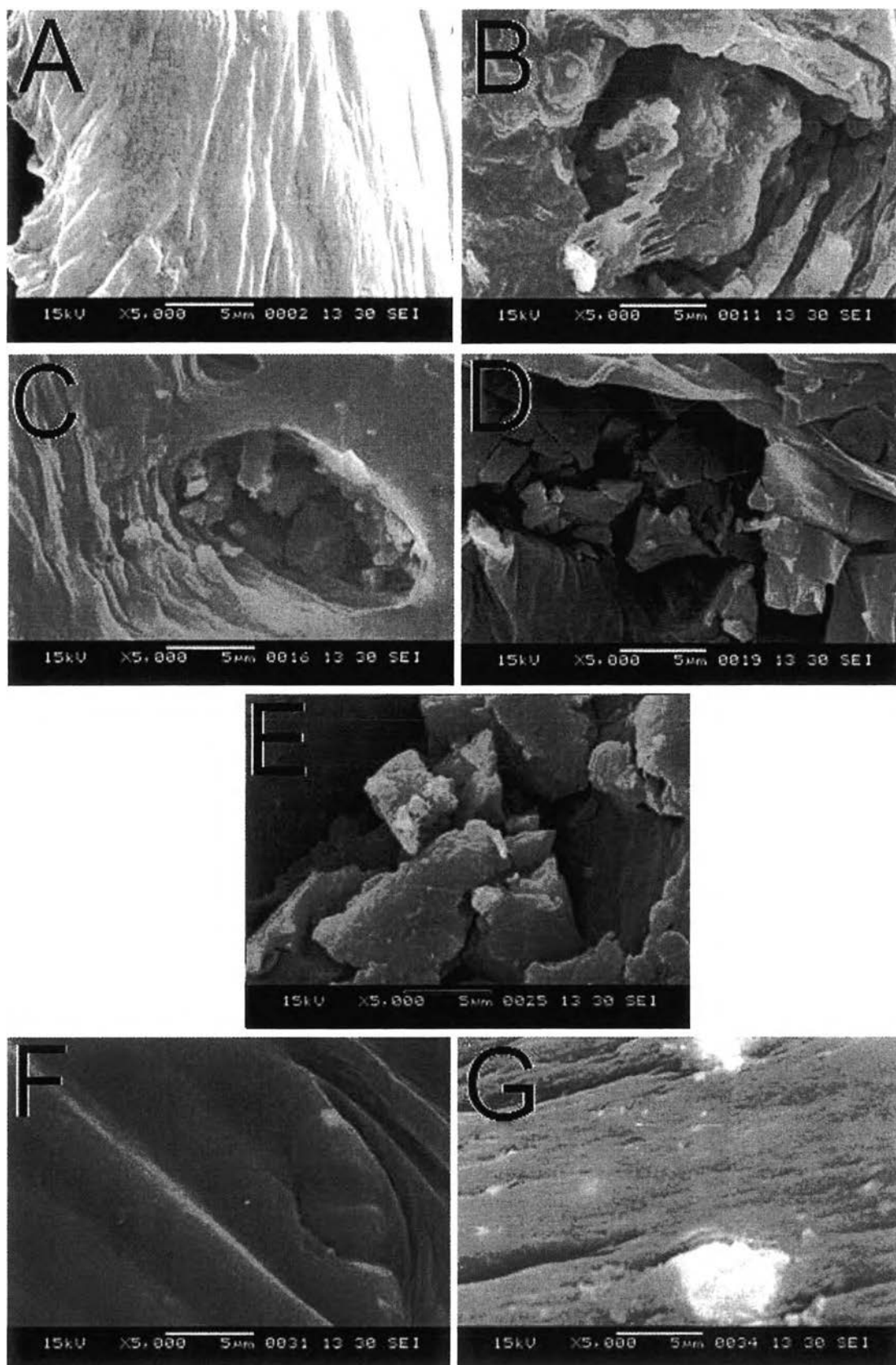
รูปที่ 4.20 การกระจายตัวของขนาดเซลล์โพลีเมอร์ที่มีการเติมสารหน่วงไฟเชิงการค้าลงไป 0.75 phr



รูปที่ 4.21 การกระจายตัวของขนาดเซลล์โพลีเมอร์ที่มีการเติมสารหน่วงไฟเชิงการค้าลงไป 10 phr

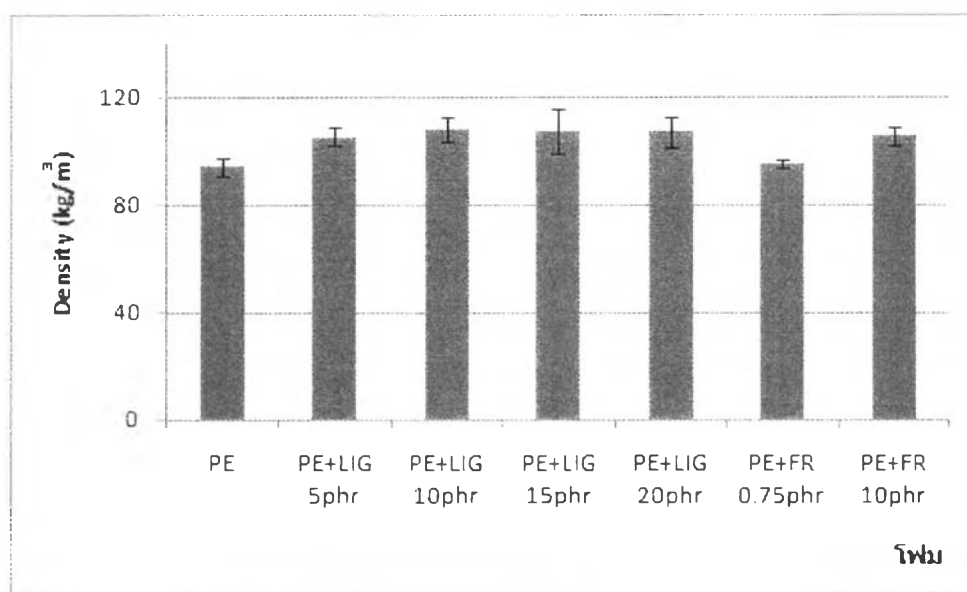


รูปที่ 4.22 ลักษณะพื้นผิวของโพลีเอทิลีนที่กำลังขยาย 1,000 เท่า A) PE, B) PE+LIG 5phr, C) PE+LIG 10phr, D) PE+LIG 15phr, E) PE+LIG 20phr, F) PE+FR 0.75phr และ G) PE+FR 10phr



รูปที่ 4.23 ลักษณะพื้นผิวของโพลีที่กำลังขยาย 5,000 เท่า A) PE, B) PE+LIG 5phr, C) PE+LIG 10phr, D) PE+LIG 15phr, E) PE+LIG 20phr, F) PE+FR 0.75phr และ G) PE+FR 10phr

- ทดสอบค่าความหนาแน่นของโฟม จากชิ้นงานโฟมที่มีขนาด 50X50X25 มิลลิเมตร โดยมีการตัดผิวทั้งด้านบนและด้านล่างออกประมาณ 2.5 มิลลิเมตร โดยชิ้นงานที่ใช้ทดสอบ จะใช้ทิศทางฟูตัวของโฟม จากผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.24 พบว่าค่าความหนาแน่นของโฟมที่มีการเติมลิกนินมีค่าความหนาแน่นมากกว่าโฟมพอลิเอทิลีน น่าจะเป็นเหตุจากโฟมที่มีการเติมลิกนินจะเกิดการยุบตัวดังรูปที่ 4.10 ทำให้ปริมาตรของชิ้นงานที่เตรียมมีค่าน้อยกว่าปกติ ซึ่งส่งผลให้ค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ในขณะที่โฟมที่มีการเติมลิกนินลงไปปริมาณต่างๆ พบว่าค่าความหนาแน่นแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย



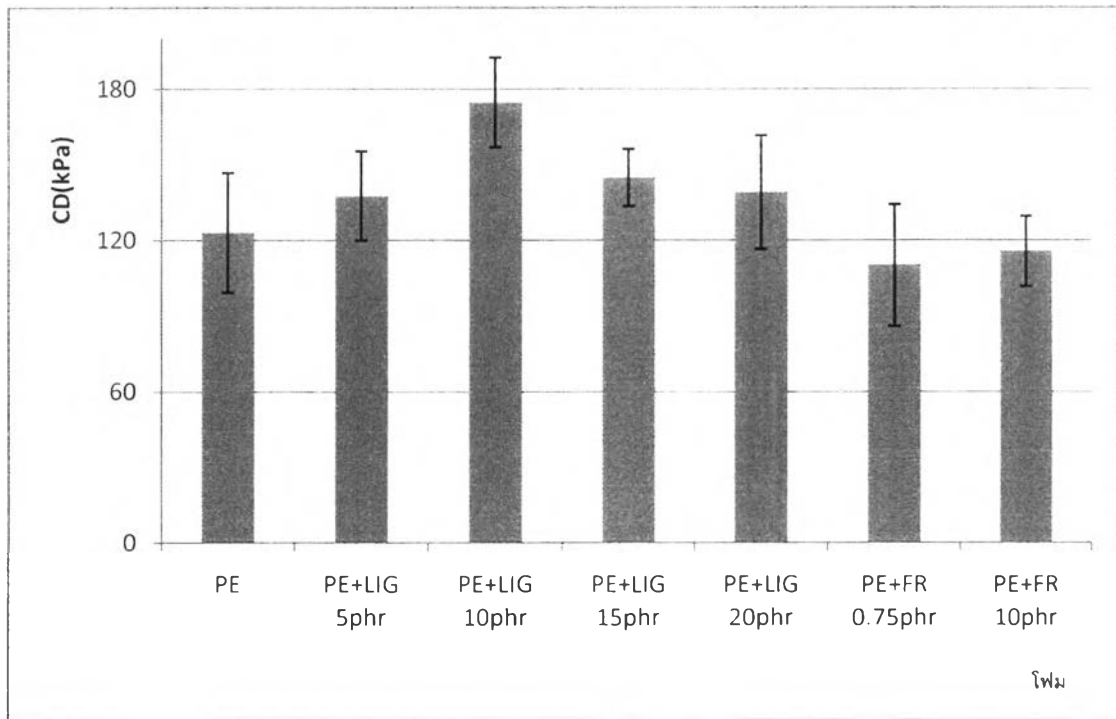
รูปที่ 4.24 ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานโฟมที่สูตรต่างๆ กัน

สำหรับโฟมที่มีเติมสารหน่วงไฟเชิงการค้า พบว่าค่าความหนาแน่นของโฟมที่เติมสารหน่วงไฟเชิงการค้า 0.75 phr นั้นใกล้เคียงกับโฟมพอลิเอทิลีนแต่เมื่อเติมสารหน่วงไฟเชิงการค้า 10 phr ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นเพิ่มใกล้เคียงกับโฟมที่เติมลิกนิน

(2) สมบัติเชิงกลของโฟม

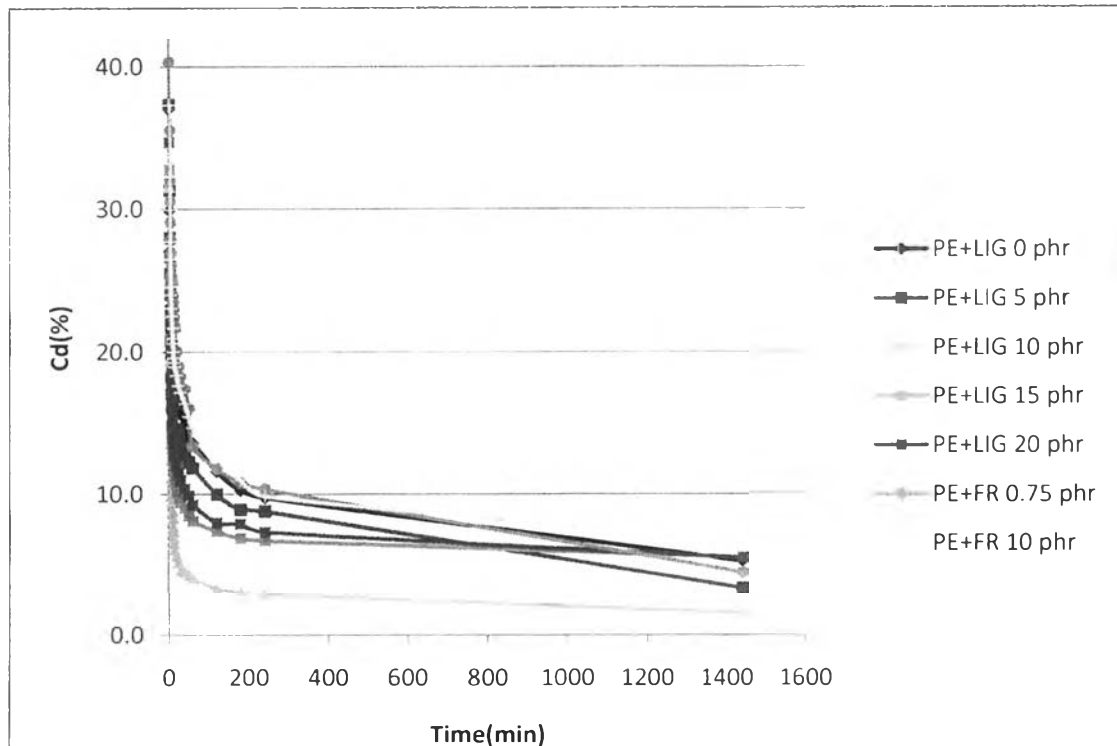
- ทดสอบความทนแรงกด (Compression Deflection, CD) จากรูปที่ 4.25 พบว่าค่า CD มีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณลิกนินจนถึง 10 phr หลังจากนั้นค่า CD ค่อยๆ ลดลง ในขณะที่ปริมาณสารหน่วงไฟเชิงการค้าส่งผลต่อค่าความทนแรงกดของโฟมน้อยมาก ซึ่งในการให้แรงกดกับโฟม แรงจะถูกถ่ายเทจากผิวของโฟมลงไปตามเนื้อพอลิเมอร์ ดังนั้นโฟมที่มีการกระจายตัวของขนาดเซลล์โฟมที่แคบและมีรูปร่างของโฟมที่ดีจะทำให้มีการกระจายแรงที่ดีกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลการตรวจสอบลักษณะการกระจายตัวของโฟมด้วย SEM เนื่องจากในการทดสอบความทนแรง

กดดัน จะกดขึ้นงานเพียงร้อยละ 25 ของความหนา และอัตราเร็วที่กด 12.5 มิลลิเมตรต่อนาที จึงทำให้ผลการต้านแรงกดของก๊าซในเซลล์จะมีไม่มากนัก



รูปที่ 4.25 ความทนแรงกดของโฟมที่สูตรต่างๆ

- ความสามารถในการคืนตัว (Compression set under constant deflection, Cd) จากรูปที่ 4.26 พบว่าโฟมทุกชิ้นงานจะมีอัตราเร็วในการคืนตัวที่เร็วมากในช่วงแรก (ที่ 0 ถึง 800 นาที) จากนั้นเริ่มช้าลงและคงที่ ที่ในช่วงเวลา 0 ถึง 800 นาที พบว่าโฟมที่เติมลิกนินจะมีอัตราเร็วในการคืนตัวที่ดีกว่าโฟมที่ไม่เติมลิกนิน ส่วนโฟมที่เติมสารหน่วงไฟเชิงการค้า พบว่าอัตราในการคืนตัวมีแนวโน้มที่แตกต่างจากเวลาที่ 0 ถึง 800 นาที เพียงเล็กน้อยโดยการคืนตัวของโฟมนั้นน่าจะเป็นผลมาจากเนื้อพอลิเมอร์และความดันในเซลล์ก๊าซที่เปลี่ยนแปลงเมื่อโฟมได้รับแรงกด โดยโฟมที่มีการกระจายตัวของโครงสร้างเซลล์ที่แคบและรูปร่างเซลล์ที่มีความสม่ำเสมอจะให้ผลในการคืนตัวที่ดีกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ SEM และที่ระยะเวลาคืนตัว 1440 นาทีพบว่าโฟมทุกชิ้นงานมีอัตราการคืนตัวที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยโดยเมื่อคำนวณแล้วโฟมที่มีค่าการคืนตัวสูงสุดคือโฟมสูตรที่เติมลิกนินลงไป 10 phr และโฟมที่มีค่าการคืนตัวต่ำที่สุดคือโฟมสูตรที่มีสารเติมสารหน่วงไฟเชิงการค้า 10 phr ทั้งสองสูตรมีค่าแตกต่างกันเพียง 2.5 มิลลิเมตรจากความหนาทั้งหมด 50 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.26 ความสามารถในการคั่นตัวของโพลีที่สูตรต่างๆ

(3) การทดสอบสมบัติการติดไฟ

-การทดสอบด้วยเครื่อง UL-94 พบว่าโพลีที่ไม่เติมลิทินินจะมีอัตราการเผาไหม้เร็วที่สุด 2.10 เซนติเมตรต่อนาที ขณะที่โพลีที่เติมลิทินินพบว่าอัตราการเผาไหม้ลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณลิทินิน ดังผลการทดลองในตารางที่ 4.8 โดยสูตรที่มีการเติมลิทินิน 20 phr มีอัตราการเผาไหม้ที่ช้าที่สุด ซึ่งการที่เพิ่มปริมาณลิทินินแล้วส่งผลให้อัตราการเผาไหม้ช้าลงนั้น น่าจะเป็นผลมาจากปริมาณแก้วที่เพิ่มมากขึ้นซึ่งแก้วที่เพิ่มขึ้นจะไปปกคลุมในส่วนของพอลิเมอร์ทำให้ออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยากับเนื้อพอลิเมอร์ได้น้อยลง ส่งผลให้อัตราการเผาไหม้ช้าลง นอกจากนี้ยังพบว่าโพลีที่เติมลิทินิน 15 และ 20 phr บางชิ้นงาน จะมีลักษณะการเผาไหม้ไม่เหมือนกับโพลีสูตรอื่นดังรายละเอียดที่แสดงในภาคผนวก จ-4 และ จ-5 การเผาไหม้จะมีลักษณะที่หลอมแล้วหดตัวซึ่งแตกต่างจากโพลีชนิดอื่นที่เป็นการหลอมหยุด ในกรณีที่โพลีหลอมแล้วหยุดจะทำให้ผ้าฝ้ายที่รองอยู่ที่ด้านล่างของชิ้นงานเกิดการเผาไหม้ แต่อย่างไรก็ตามชิ้นงานโพลีบางชิ้น ที่ปริมาณลิทินิน 15 และ 20 phr ยังคงมีการหยุดอยู่แต่ลักษณะการหยุดจะช้าลงมากกว่าโพลีสูตรอื่น ซึ่งจากการที่โพลีสูตรเดียวกันแสดงสมบัติการเผาไหม้ที่ต่างกันอย่างคาดว่าเป็นผลจากการที่ลิทินินเกาะกลุ่มกันเองดังที่เคยกล่าวมาในผลการทดลองของ SEM ในหัวข้อที่ 4.2.3 ซึ่งลิทินินอาจทำหน้าที่เป็นสารต้านการหยุด (anti dripping agent) ซึ่งลิทินินจะเกิดแก้วไปปกคลุมผิวหน้าชิ้นงานขณะเกิด

การเผาไหม้ซึ่งเกิดขึ้นจะจับตัวกันทำให้พลาสติกหลอมไม่หยดออกมา นอกจากนี้ยังพบว่า ลิกนินไม่ส่งผลต่อการเกิดควันมากนัก การเพิ่มปริมาณลิกนินไม่พบการเปลี่ยนแปลงของสีและ ปริมาณของควัน โดยควันที่เกิดขึ้นจะมีสีดำ มีกลิ่นคล้ายไม้เผาและมีปริมาณเพียงเล็กน้อย

ตารางที่ 4.6 อัตราการเผาไหม้ของโฟม

โฟม	ความหนาเฉลี่ย (มิลลิเมตร)	อัตราการเผาไหม้ (เซนติเมตรต่อนาที)	ลักษณะการเผาไหม้	ควันที่เกิดขึ้น
PE	12.68 + 0.22	2.10 ± 0.22	โฟมเผาไหม้จนหมด มีการหลอมและหยด ขณะเผาไหม้	สีดำ มีปริมาณเพียงเพียง เล็กน้อย
PE+LIG 5 phr	13.21 + 0.31	1.41 ± 0.14	โฟมเผาไหม้จนหมด มีการหลอมและหยด ขณะเผาไหม้	สีดำ มีปริมาณเพียงเพียง เล็กน้อย มีกลิ่นเหมือนไม้ เผา
PE+LIG 10 phr	13.40 + 0.10	1.38 ± 0.10	โฟมเผาไหม้จนหมด มีการหลอมและหยด ขณะเผาไหม้	สีดำ มีปริมาณเพียงเพียง เล็กน้อย มีกลิ่นเหมือนไม้ เผา
PE+LIG 15 phr	13.33 + 0.31	1.36 ± 0.28	โฟมเผาไหม้จนหมด มีการหลอมและหยด ตัว บางชิ้นงานไม่มี การหยด ชิ้นงานที่ หยดจะหยดแค่ ช่วงแรก	สีดำ มีปริมาณเพียงเพียง เล็กน้อย มีกลิ่นเหมือนไม้ เผา
PE+LIG 20 phr	13.14 + 0.26	1.29 ± 0.26	โฟมเผาไหม้จนหมด มีการหลอมและหยด ตัว บางชิ้นงานไม่มี การหยด ชิ้นงานที่ หยดจะหยดแค่ ช่วงแรก	สีดำ มีปริมาณเพียงเพียง เล็กน้อย มีกลิ่นเหมือนไม้ เผา
PE+FR 0.75 phr	13.14 + 0.15	1.56 ± 0.15	โฟมเผาไหม้จนหมด มีการหลอมและหยด ขณะเผาไหม้	ควันมีสีดำ มีเพียง เล็กน้อย มีกลิ่นเหม็นมาก เมื่อสูดเข้าไปจะมีอาการ เจ็บคอ
PE+FR 10 phr	13.43 + 0.12	0.58 ± 0.15 (ไฟดับ)	หลอมและหยดขณะ เผาไหม้	ควันมีสีดำ มีปริมาณมาก มีกลิ่นเหม็นมากเมื่อสูด เข้าไปจะมีอาการเจ็บคอ

ในส่วนของโพลีเมอร์ที่มีการเติมสารหน่วงไฟเชิงการค้าพบว่าเมื่ออัตราการเผาไหม้ที่ช้ากว่าโพลีเอทิลีน จากการทดลองพบว่าโพลีเมอร์ที่เติมสารหน่วงไฟเชิงการค้าปริมาณ 10 phr จะหยุดการเผาไหม้ก่อนถึงระยะ 125 มิลลิเมตร ดังนั้นอัตราการเผาไหม้ที่แสดงในตารางที่ 4.8 จะคำนวณอัตราการเผาไหม้จากระยะเผาไหม้ที่เกิดขึ้นจริง การที่สารหน่วงไฟเชิงการค้ามีผลให้อัตราการเผาไหม้ช้าลง เนื่องจากสารหน่วงไฟเชิงการค้าที่ใช้ คือ เดคะโบรโมไดเฟนิลออกไซด์ โดยสารดังกล่าวถูกจัดอยู่ในกลุ่มสารหน่วงไฟที่มีฮาโลเจนเป็นส่วนประกอบ ซึ่งทำงานในก๊าซเฟส โดยจะเข้าทำปฏิกิริยาและยับยั้งไม่ให้อนุภาคลิโธสทำปฏิกิริยาต่อ อัตราการเผาไหม้จึงลดลง

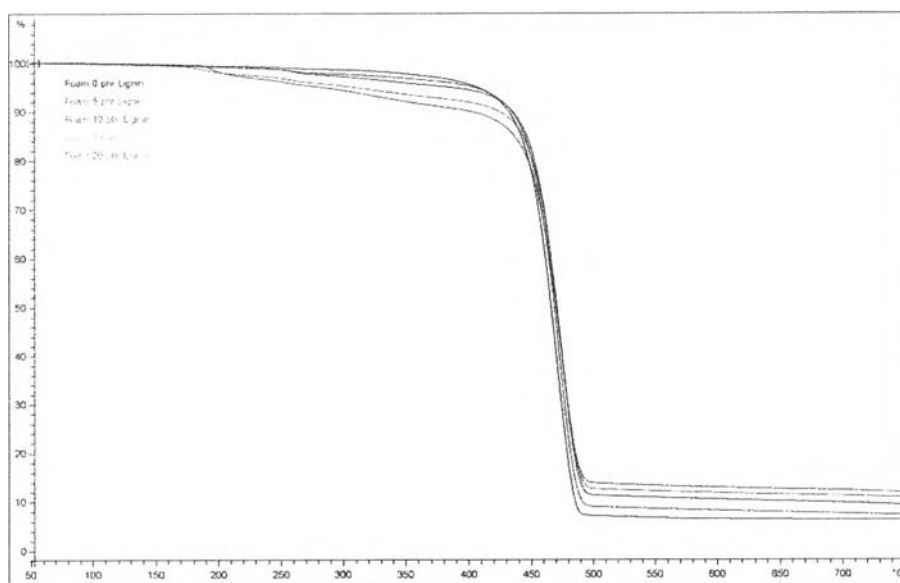
จากการทดสอบยังพบว่าโพลีเมอร์ที่เติมลิทินมีอัตราการเผาไหม้ช้ากว่าโพลีเมอร์ที่เติมสารหน่วงไฟเชิงการค้า 0.75 phr ซึ่งเป็นปริมาณของสารหน่วงไฟที่ใช้จริงในอุตสาหกรรม แต่ควันทที่เกิดขึ้นจะมีกลิ่นเหม็นมาก และส่งผลให้เกิดอาการแสบคอและจามเมื่อสูดดมเป็นเวลานาน

- ผลการทดสอบด้วยเทคนิค TGA ที่สภาวะไนโตรเจน พบว่าโพลีเมอร์ที่เติมลิทินมีแนวโน้มที่จะมีการสลายตัวได้เร็วขึ้น ดังรูปที่ 4.27 และตารางที่ 4.9 โดยโพลีเอทิลีนจะเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิ 302 องศาเซลเซียส ส่วนโพลีเมอร์ที่เติมลิทิน 5 และ 10 phr มีอุณหภูมิที่เริ่มสลายตัว 239 และ 240 องศาเซลเซียสตามลำดับ โดยอุณหภูมิดังกล่าวเป็นช่วงอุณหภูมิที่คาร์บอนไดออกไซด์และ เอทิลไฮไดรเจนในลิทินเกิดการกลายเป็นไอ ส่วนโพลีเมอร์ที่เติมลิทิน 15 และ 20 phr มีอุณหภูมิที่เริ่มสลายตัว 169 และ 172 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงที่น้ำ ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ในลิทินเกิดการสลายตัว โดยโพลีเมอร์ที่เติมลิทินลงไป 5 และ 10 phr ไม่พบช่วงการสลายตัวที่ประมาณ 160 องศาเซลเซียส เนื่องจากในช่วงนี้เป็นช่วงที่เกิดการสลายตัวในปริมาณน้อย ดังนั้นการเติมลิทินลงปริมาณเพียง 5 และ 10 phr อาจไม่มากพอที่จะตรวจพบได้ จากรูปที่ 4.28 พบว่าโพลีเมอร์ที่เติมสารหน่วงไฟเชิงการค้าปริมาณ 0.75 phr มีอุณหภูมิที่เริ่มสลายตัวไม่ต่างจากโพลีเอทิลีนมากนัก คาดว่าเป็นผลจากการเติมสารในปริมาณน้อยมากจึงไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิที่เริ่มสลายตัว ในส่วนของสูตรที่เติมสารหน่วงไฟเชิงการค้าลงไป 10 phr มีอุณหภูมิที่เริ่มการสลายตัวที่ 281 องศาเซลเซียสซึ่งคาดว่าเป็นอุณหภูมิที่สารหน่วงไฟเชิงการค้าเกิดการสลายตัว

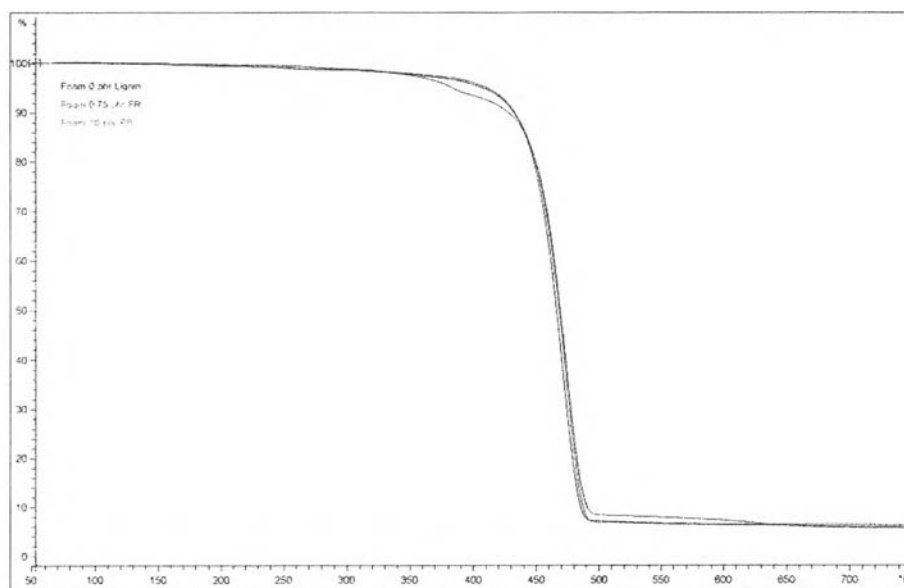
ส่วนอุณหภูมิสุดท้ายที่เกิดการสลายตัวของโพลีเมอร์มีค่าใกล้เคียงกันทุกชิ้นงานโดยมีอุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส ในส่วนของปริมาณเถ้า (char) ที่เกิดขึ้นแสดงดังตารางที่ 4.9 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณลิทินปริมาณเถ้าที่เหลืออยู่จะเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Chirico [16] ที่บอกว่าลิทินมีการสร้างเถ้ามาปกคลุมผิวของพลาสติกขณะเกิดการเผาไหม้

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง TGA ของโพลีที่สภาวะไนโตรเจน

โพลี	อุณหภูมิเริ่มสลายตัว (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัว (องศาเซลเซียส)	ปริมาณถ้ำ (ร้อยละ)
PE	302	498	6.12
PE+LIG 5 phr	239	504	7.10
PE+LIG 10 phr	240	503	9.19
PE+LIG 15 phr	168	504	10.67
PE+LIG 20 phr	172	504	11.72
PE+FR 0.75 phr	306	505	5.63
PE+FR 10 phr	281	502	5.42



รูปที่ 4.27 การสลายตัวของโพลีที่มีการเติมลิกนินลงไปทีสภาวะไนโตรเจน

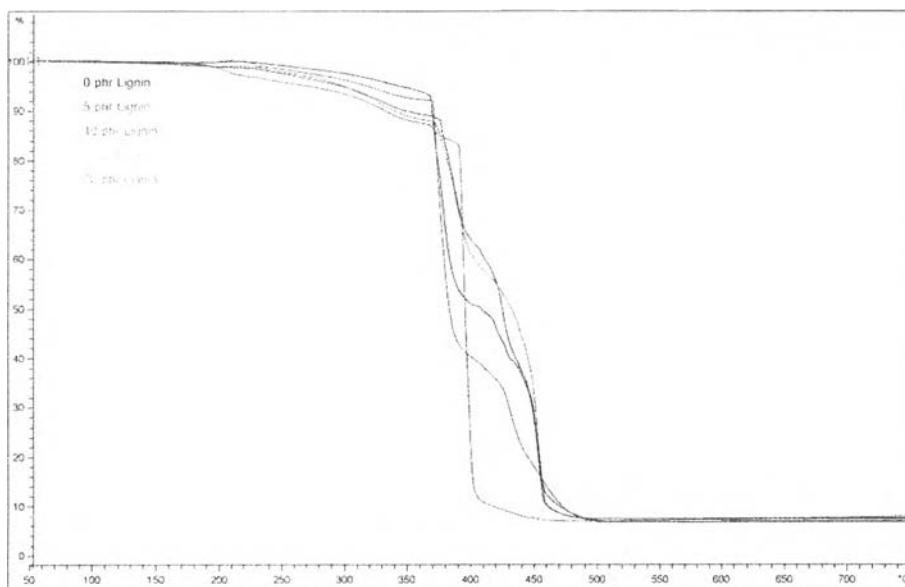


รูปที่ 4.28 การสลายตัวของโพลิเมอร์ที่มีการเติมสารหน่วงไฟเชิงการค้าลงที่สภาวะไนโตรเจน

- ผลการทดสอบด้วย เทคนิค TGA ที่สภาวะออกซิเจน พบว่าโพลิเมอร์ทุกชนิดมีการสลายตัวที่แตกต่างจากสภาวะไนโตรเจนดังรูปที่ 4.29 โดยโพลิเมอร์ที่เติมลิกนินและผ่านการเผาไหม้จะมีปริมาณเถ้าที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ซึ่งจากงานวิจัยของ Li [22] กล่าวว่าลิกนินเมื่อเผาไหม้ในสภาวะออกซิเจนเถ้าที่เกิดขึ้นจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันไปจนหมด โดยไม่ว่าเติมในปริมาณเท่าใดจะเกิดการเผาไหม้จนหมด โดยคาดว่าสาเหตุปริมาณเถ้าสุดท้ายของชิ้นงานมีค่าแตกต่างกันบ้างเล็กน้อย น่าจะเกิดจากสารเจือปนที่หลงเหลือจากการสกัดจึงทำให้มีปริมาณของเถ้าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ถึงอย่างไรก็ตามจากรูปที่ 4.29 จะพบว่าโพลิเมอร์ที่เติมลิกนิน 20 phr มีลักษณะการเผาไหม้ที่คล้ายกับการเผาไหม้ของโพลิเมอร์ในสภาวะไนโตรเจน จึงคาดว่าโพลิเมอร์ที่เติมลิกนิน 20 phr มีปริมาณลิกนินมากพอที่จะสร้างเถ้ามาปกคลุมเนื้อของโพลิเมอร์ทำให้ออกซิเจนไม่สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับเนื้อโพลิเมอร์ได้ จึงทำให้การเผาไหม้มีลักษณะออกมามีคล้ายกับโพลิเมอร์ที่เผาไหม้ในสภาวะไนโตรเจน โดยผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Canetti [30] ที่ทำการทดลองผสมลิกนินลงในพอลิโพรพิลีน ซึ่งได้ผลออกมาว่าเมื่อเติมลิกนินลงไปปริมาณที่เหมาะสมจะทำให้ลิกนินไปปกคลุมผิวของพอลิเมอร์ทำให้ออกซิเจนไม่สามารถทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ได้ และนอกจากนี้ในงานวิจัยดังกล่าวยังพบว่า อุณหภูมิเริ่มต้นในการสลายตัวของพอลิโพรพิลีนในสภาวะไนโตรเจนและพอลิโพรพิลีนที่มีการเติมลิกนินลงไป ในสภาวะออกซิเจนไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งจากการทดลองก็พบว่าอุณหภูมิเริ่มต้นในการสลายตัวของโพลิเอทิลีนที่สภาวะไนโตรเจนและโพลิเมอร์ที่เติมลิกนินลงไป 20 phr ในสภาวะออกซิเจนไม่ต่างกันมากนัก

ในส่วนของการหน่วงไฟเชิงการค้าพบว่าระหว่างการศึกษาการทดสอบสารมีการระเบิดขึ้นขณะทำการทดลองและจากการศึกษาเพิ่มเติมพบว่าเมื่อสารหน่วงไฟเชิงการค้าแตกตัวจะให้ HBr ซึ่งเป็น

กรดและทำปฏิกิริยากัดกร่อนชิ้นส่วนในตัวเครื่อง และ ก๊าซ HBr จะทำปฏิกิริยากับน้ำในส่วนของ ตัวดักก๊าซทำให้เกิดการระเบิดขึ้น จึงไม่สามารถทำการทดลองได้



รูปที่ 4.29 การสลายตัวของโพลีเอทิลีนที่มีการเติมลิกนินลงไปที่สภาวะออกซิเจน

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง TGA ของโพลีเอทิลีนที่สภาวะออกซิเจน

โพลีเอทิลีน	อุณหภูมิเริ่มสลายตัว (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัว (องศาเซลเซียส)	ปริมาณเถ้า (ร้อยละ)
PE	210	509	6.84
PE+LIG 5 phr	215	505	6.65
PE+LIG 10 phr	216	490	7.39
PE+LIG 15 phr	220	490	7.47
PE+LIG 20 phr	181	489	7.82