

บทที่ 4

ผลการวิจัย

การวิเคราะห์สมบัติของฟิล์ม

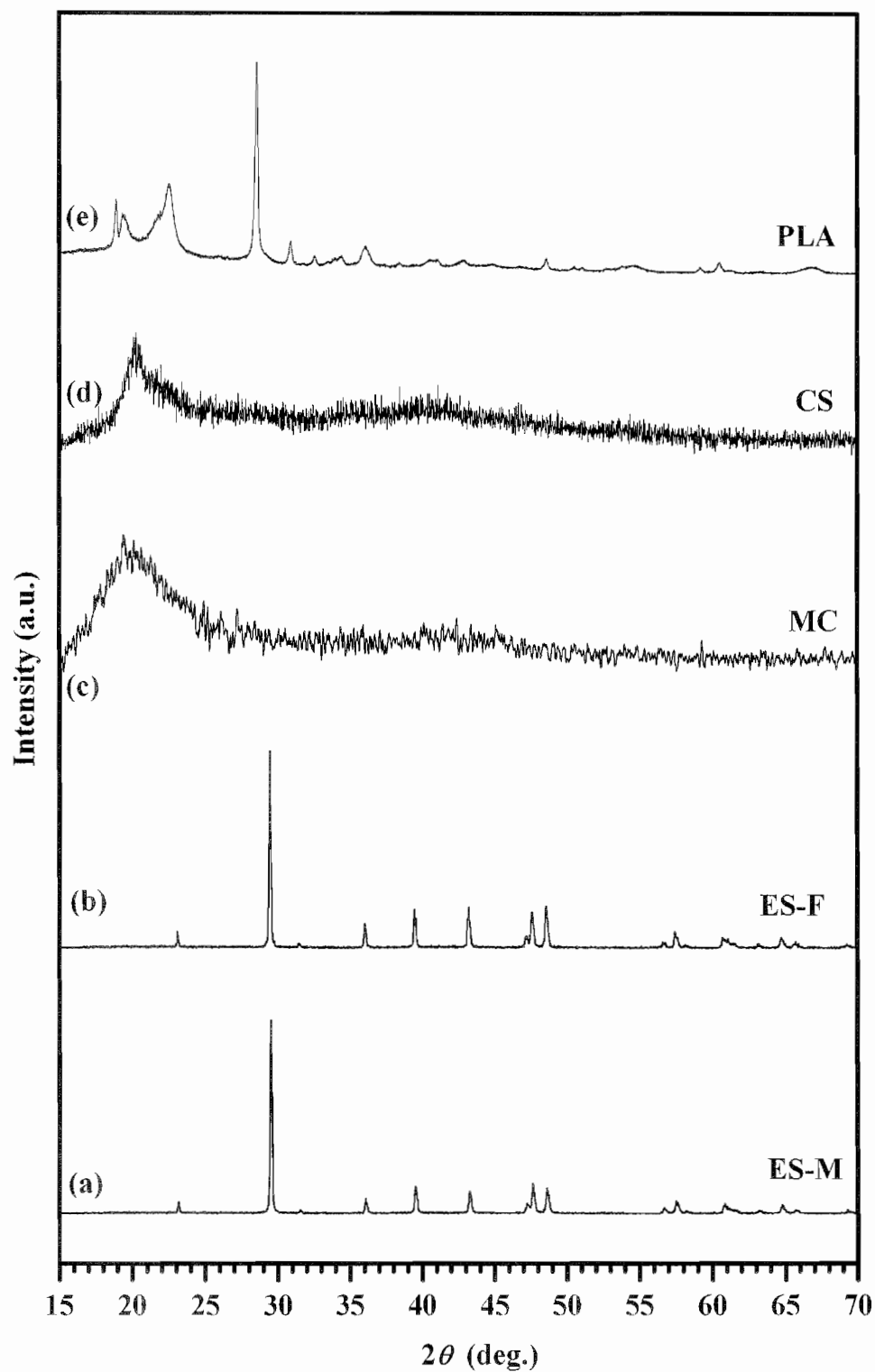
การวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด: ไคโตซาน (PLA:CS) ฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด:เมทิลเซลลูโลส (PLA:MC) และ ฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด:ผงเปลือกไข่ (PLA:ES) แสดงดังหัวข้อ

- 4.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุ
- 4.2 ลักษณะของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมวัสดุธรรมชาติ
- 4.3 คุณสมบัติทางด้านความชื้น-ไส
- 4.4 คุณสมบัติลักษณะด้านโครงสร้างผลึก
- 4.5 คุณสมบัติลักษณะทางเคมี
- 4.6 คุณลักษณะด้านพื้นผิว
- 4.7 คุณสมบัติด้านความหนา
- 4.8 คุณสมบัติด้านความสามารถในการละลายน้ำ
- 4.9 คุณสมบัติด้านแรงดึงและการยืด
- 4.10 คุณสมบัติการด้านเชื้อจุลินทรีย์

4.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุ

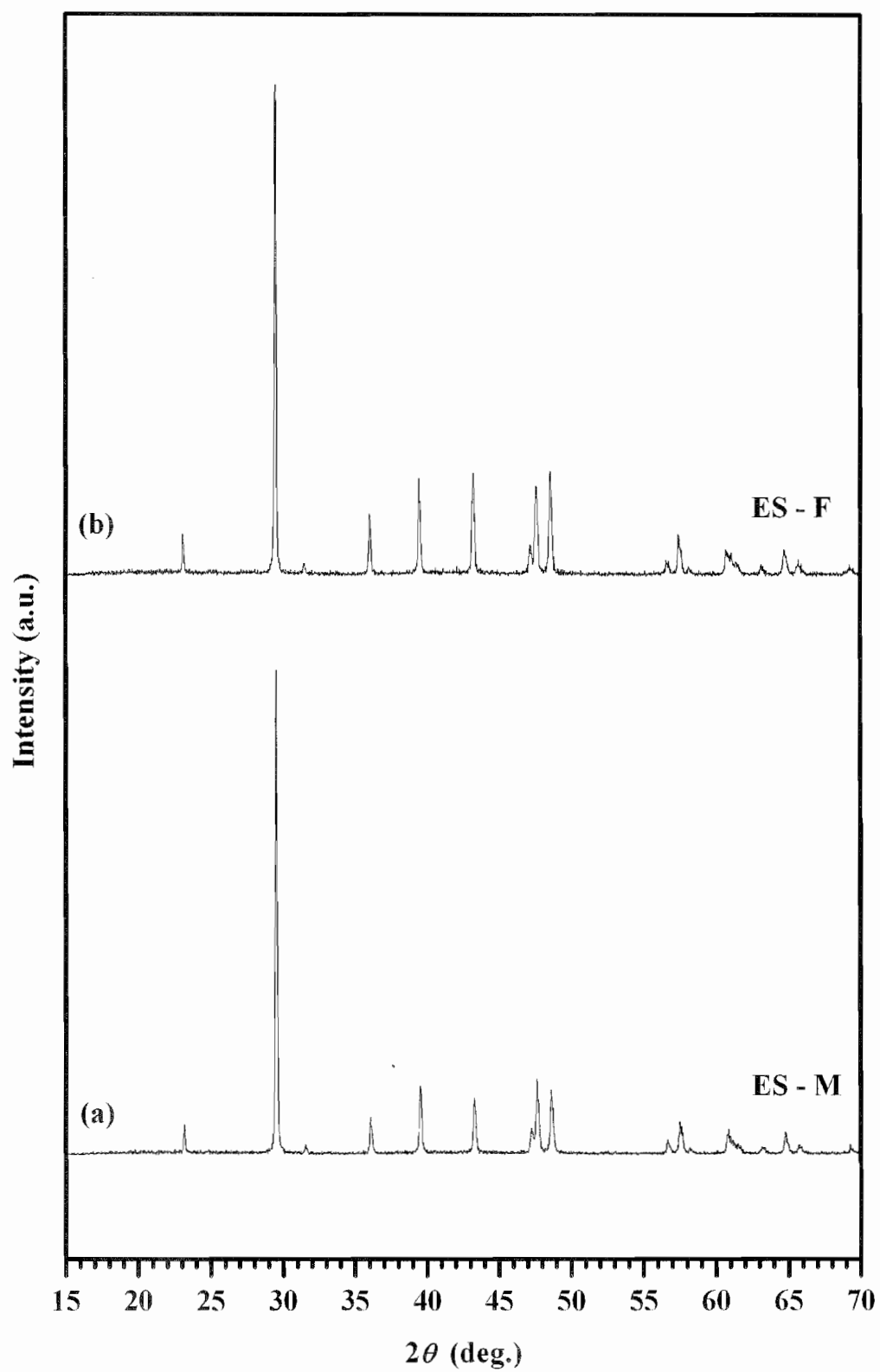
ในเบื้องต้น ก่อนที่จะทำการสังเคราะห์ พลาสติกจากวัสดุธรรมชาติ จากพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ที่เป็นส่วนประกอบหลัก และวัสดุผสม ได้แก่ ไคโตซาน(CS) เมทิลเซลลูโลส(MC) และเปลือกไข่(ES) เพื่อให้ได้ข้อมูลพื้นฐานของลักษณะเฉพาะของวัสดุแต่ละชนิด จึงควรทำการศึกษาลักษณะเฉพาะของลักษณะทางโครงสร้างทางเคมีของวัสดุต่าง ๆ โดยเริ่มจากการศึกษาด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction, XRD) ผลการศึกษาลักษณะการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 26 (a) - (e) ซึ่งจะสังเกตได้ว่า PLA และ ES จะมีลักษณะรูปแบบของยอดแหลม (Peak) ที่ชัดเจนมากกว่า CS และ MC ซึ่งจากลักษณะการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ทำให้สามารถจำแนกลักษณะทางโครงสร้างของวัสดุได้ว่า วัสดุ PLA และ ES มีลักษณะเป็นผลึก และมีความเป็นผลึกสูงกว่า CS และ MC ที่มีลักษณะเป็นอสัณฐาน (amorphous) ซึ่งสอดคล้องกับ Pinotti (2007) ที่ได้รายงานว่า CS และ MC มีลักษณะโครงสร้าง

เป็นแบบกึ่งผลึก (semi-crystalline) ในขณะเดียวกันลักษณะการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ PLA ตามผลการวิจัยของ Oksman (2006) ได้รายงานลักษณะการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ที่แสดงความเข้มการสะท้อนในลักษณะยอดแหลมที่ตำแหน่ง $2\theta = 16.53, 19.65, 28.75, 34.53$ และ 36.38° ตามลำดับ



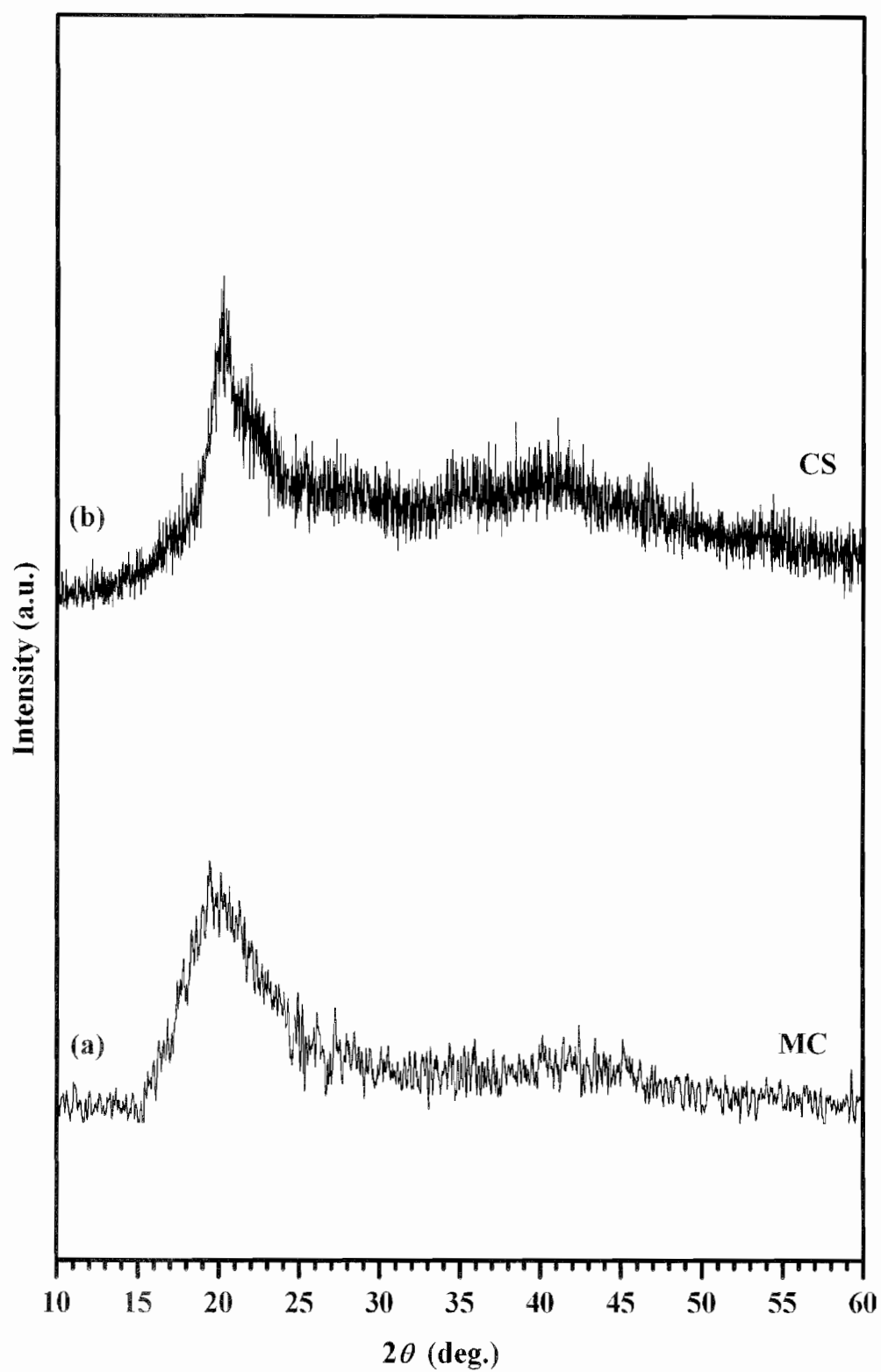
ภาพที่ 26 แผนภาพ XRD ของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ไคซาน (CS) เมทิลเซลลูโลส (MC) เปลือกไข่จากโรงงาน (ES-F) และ เปลือกไข่จากห้างสรรพสินค้า (ES-M)

และเมื่อพิจารณาลักษณะการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ของ ES สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 27 (a) และ 27 (b) โดยพบว่าโครงสร้างของ ES เมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จาก แฟ้มข้อมูล JCPDs (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) พบว่าสอดคล้องกับ ลักษณะการเลี้ยวเบนของสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) โดยมีลักษณะ โครงสร้าง เป็นผลึกแบบ 6 เหลี่ยม (Hexagonal) เรียกว่า แคลไซต์ (Calcite) และจากข้อมูลลักษณะการ เลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ ES-M สอดคล้องกับแฟ้มข้อมูล JCPDs หมายเลข 01-085-1108 ส่วน ES-F สอดคล้องกับ แฟ้มข้อมูล JCPDs หมายเลข 01-086-2335 ซึ่งเป็นเฟส แมกนีเซียม-แคลไซต์ (magnesium calcite phase) ซึ่งส่งผลให้ลักษณะการวางตัวของระนาบโครงสร้างผลึกใน ES-F มีความ แตกต่างจาก ES-M ลักษณะการเลี้ยวเบนที่แตกต่างกันคาดว่าเป็นผลมาจากสารปนเปื้อนใน สารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต และเมื่อพิจารณาผลการทดลองจาก เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-ray fluorescence, XRF) เพื่อยืนยันการปนเปื้อนพบว่า ES-F มีโลหะ โพแทสเซียม (K) และ ไทเทเนียม (Ti) ปนเปื้อนอยู่ และมีโพแทสเซียมมากถึง 0.48% โดยน้ำหนัก จึงน่าจะเป็นสาเหตุที่ ทำให้ ลักษณะการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ มีลักษณะการเลี้ยวเบนบางตำแหน่งแตกต่างออกไป



ภาพที่ 27 แผนภาพ XRD ของเปลือกไข่จากโรงงาน (ES-F) และห้างสรรพสินค้า (ES-M)

สำหรับภาพที่ 28 ได้แสดง ลักษณะการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ CS และ MC ที่มีลักษณะการเลี้ยวเบนแบบแถบกว้างยอดไม่แหลม (broad peak) อันเป็นการแสดงถึงลักษณะผลึกอสัณฐาน สำหรับลักษณะการเลี้ยวเบนดังภาพที่ 28 (a) และ 28 (b) สอดคล้องกับผลการวิจัยของ Pinotti (2007) และผลรายงานของ Donhowe and Fennema (1993a) และ (1993b) ที่ได้กล่าวถึงลักษณะการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ CS และ MC ว่า MC จะมีลักษณะผลึกอสัณฐาน (amorphous-crystalline) โดย MC จะมียอดแหลมที่มุม $2\theta = 8^\circ$ ที่แสดงถึงลักษณะผลึก และลักษณะการเลี้ยวเบนเป็นแบบแถบกว้างยอดไม่แหลม ที่มุม $2\theta = 20.5-21.5^\circ$ แสดงถึงลักษณะอสัณฐาน ส่วนลักษณะการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ CS จะแสดงถึงลักษณะอสัณฐานมากกว่า MC เนื่องจาก CS มีความเข้มการสะท้อนในลักษณะที่เป็นแถบกว้างยอดไม่แหลมที่มุม $2\theta = 22.8^\circ$ ซึ่งสอดคล้องกับ Fan et al. (2009) ที่ได้อธิบายถึง รูปแบบของ CS ว่ามีรูปแบบโครงสร้างของอสัณฐาน



ภาพที่ 28 แผนภาพ XRD ของ ไคโตซาน (CS) และเมทิลเซลลูโลส (MC)

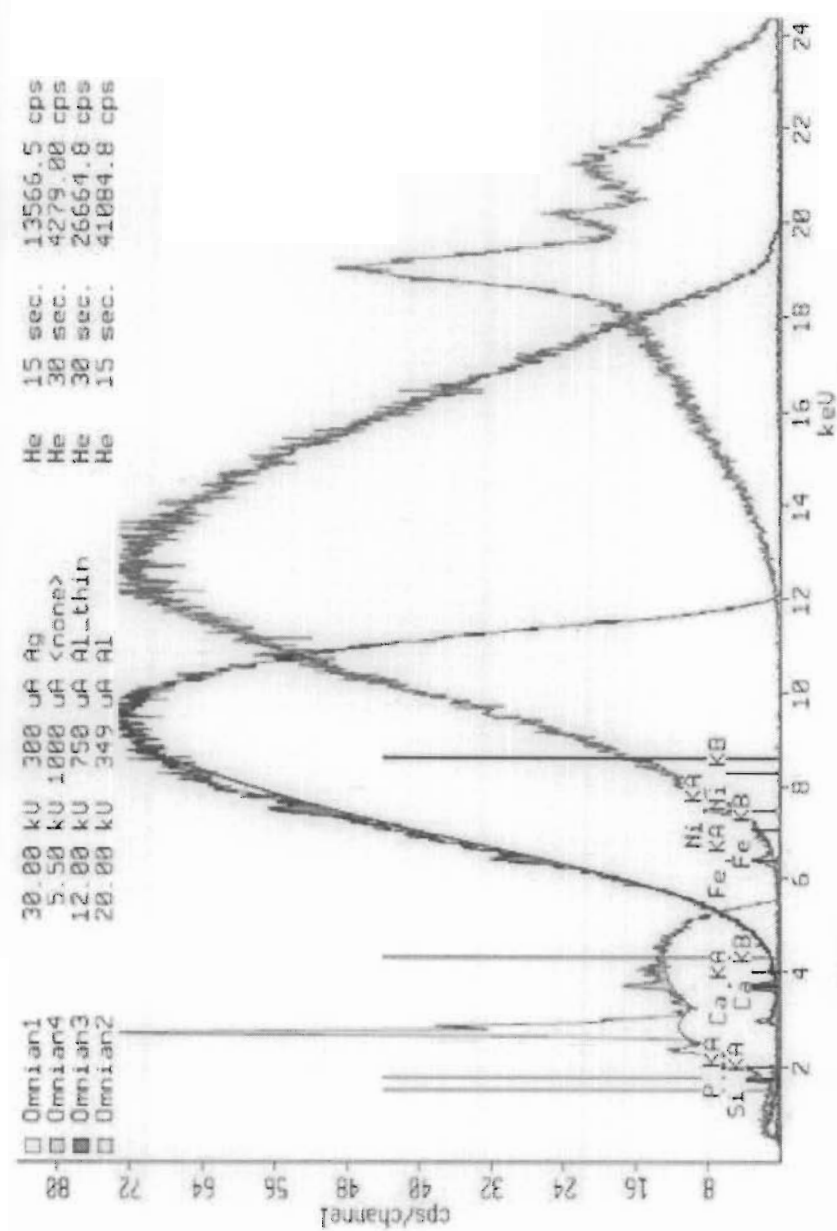
ในส่วนของการทดลองทางเคมี ได้ทำการศึกษาดังธาตุองค์ประกอบของวัสดุทั้ง 5 ชนิด ซึ่งพบว่า PLA มีจำนวนธาตุองค์ประกอบ 5 ธาตุ ซึ่งมี Si (Silicon) และ P (Phosphorous) เป็นธาตุองค์ประกอบหลัก สำหรับ CS มีธาตุองค์ประกอบ Ca ที่มีปริมาณมากกว่าธาตุอื่นอย่างมีนัยสำคัญ ส่วน MC มี P ในปริมาณที่สูง โดยมีปริมาณมากถึง 0.028 wt% ขณะที่ ES มีธาตุองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็น Ca โดยมีธาตุอื่นเจือปนเพียงเล็กน้อย ดังภาพที่ 29 ถึงภาพที่ 33

เมื่อพิจารณาถึงธาตุองค์ประกอบของวัสดุทั้ง 5 ชนิด จากตารางที่ 6 ซึ่งพบว่า P, Ca, และ Fe พบในวัสดุทั้ง 5 ชนิด แต่ Si และ Ni (Nickel) พบเฉพาะใน PLA ส่วน Cr (Chromium) พบเฉพาะใน CS และ Ca พบเฉพาะใน ES จากผลของเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (XRF) ทำให้สังเกตได้ว่า P, Ca และ Fe น่าจะเป็นธาตุองค์ประกอบหลักของฟิล์มจากธรรมชาติที่จะทำการสังเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป

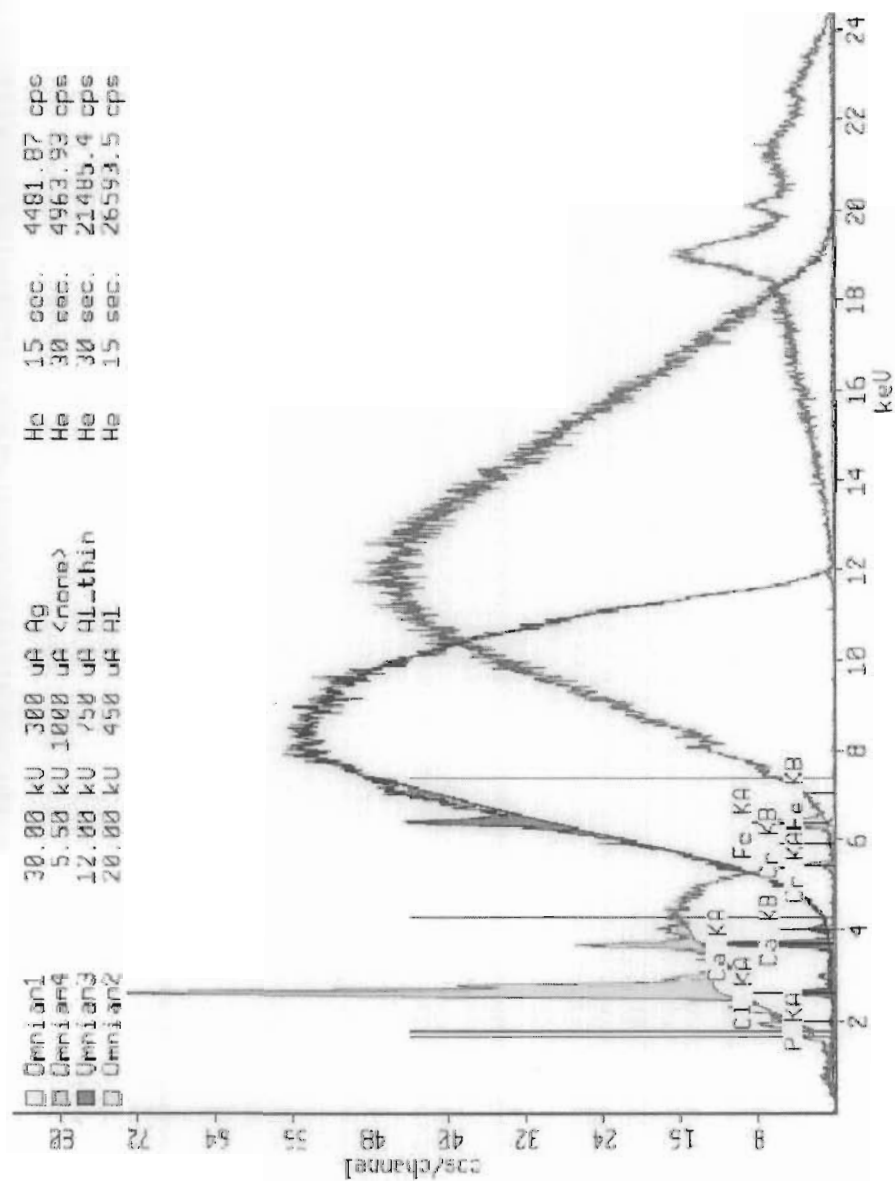
ตารางที่ 6 ปริมาณธาตุองค์ประกอบของวัสดุธรรมชาติ

ธาตุ องค์ประกอบ	ปริมาณ (wt%)				
	PLA	CS	MC	ES-F	ES-M
P	0.032	0.023	0.028	0.075	0.069
Ca	0.012	0.033	0.009	86.703	86.907
Fe	0.002	0.005	0.001	0.027	0.021
S	ND	ND	ND	0.072	0.064
Si	0.053	ND	ND	ND	ND
Ni	0.002	ND	ND	ND	ND
Cr	ND	0.001	ND	ND	ND
K	ND	ND	ND	0.023	ND
CHO	99.900	99.850	99.873	13.143	12.895

ND*-NoData

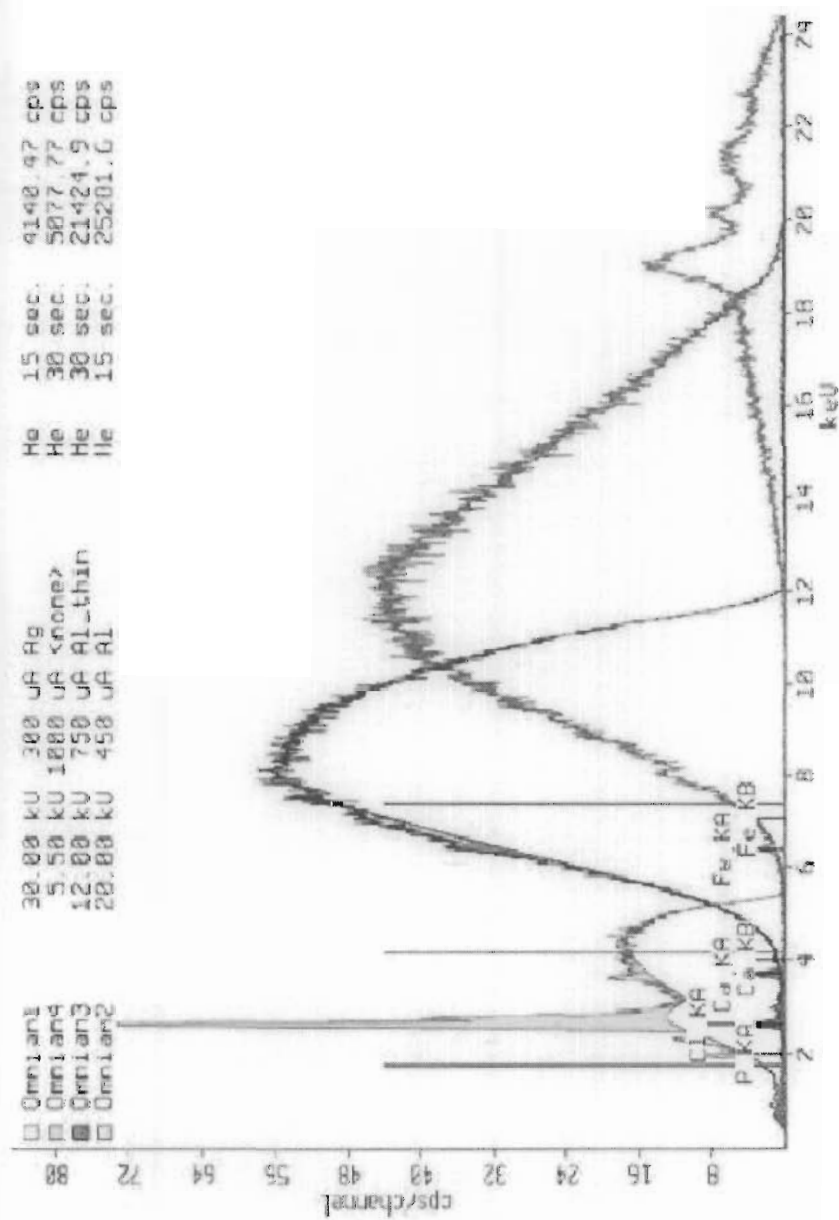


ภาพที่ 29 ปริมาณธาตุองค์ประกอบของพอลิแลคติกแอซิด (PLA)



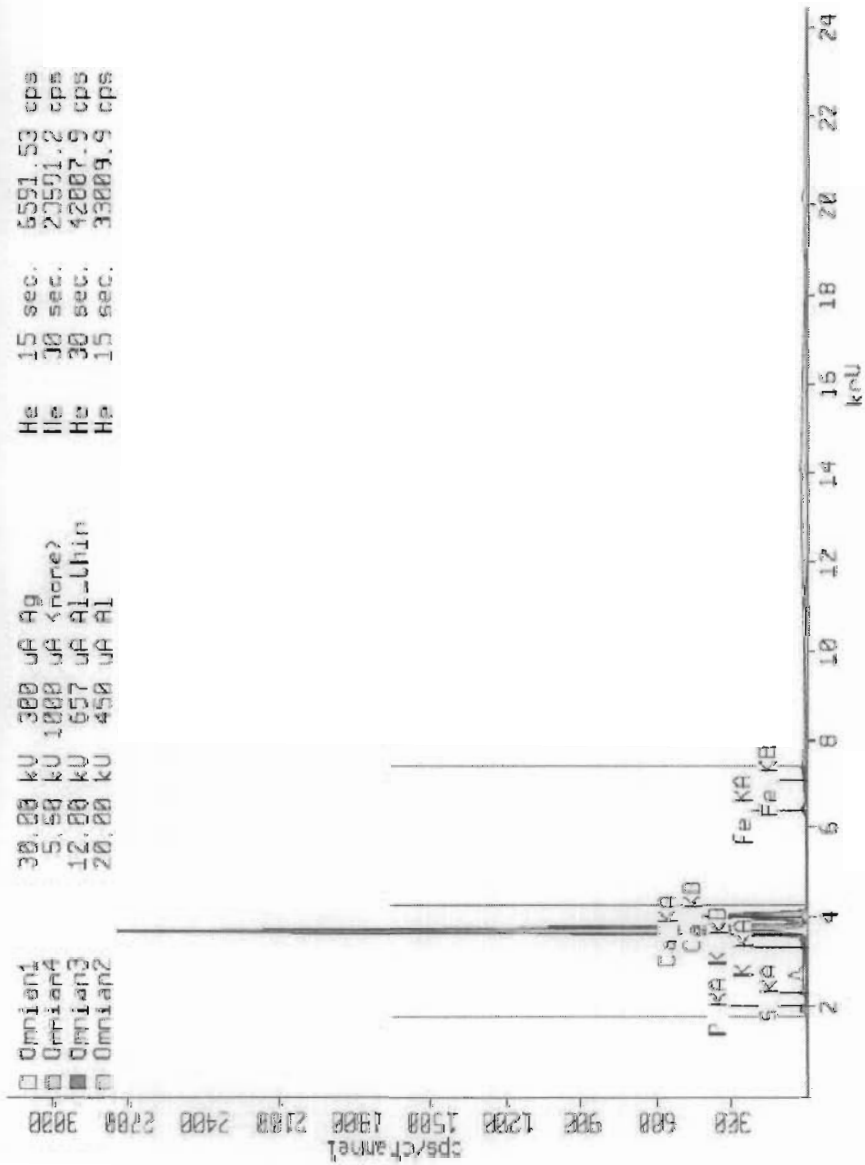
ธาตุองค์ประกอบ	ปริมาณ (wt%)
P	0.023
Ca	0.033
Fe	0.005
Cr	0.001
CHO	99.85

ภาพที่ 30 ปริมาณธาตุองค์ประกอบของไคโตซาน (CS)



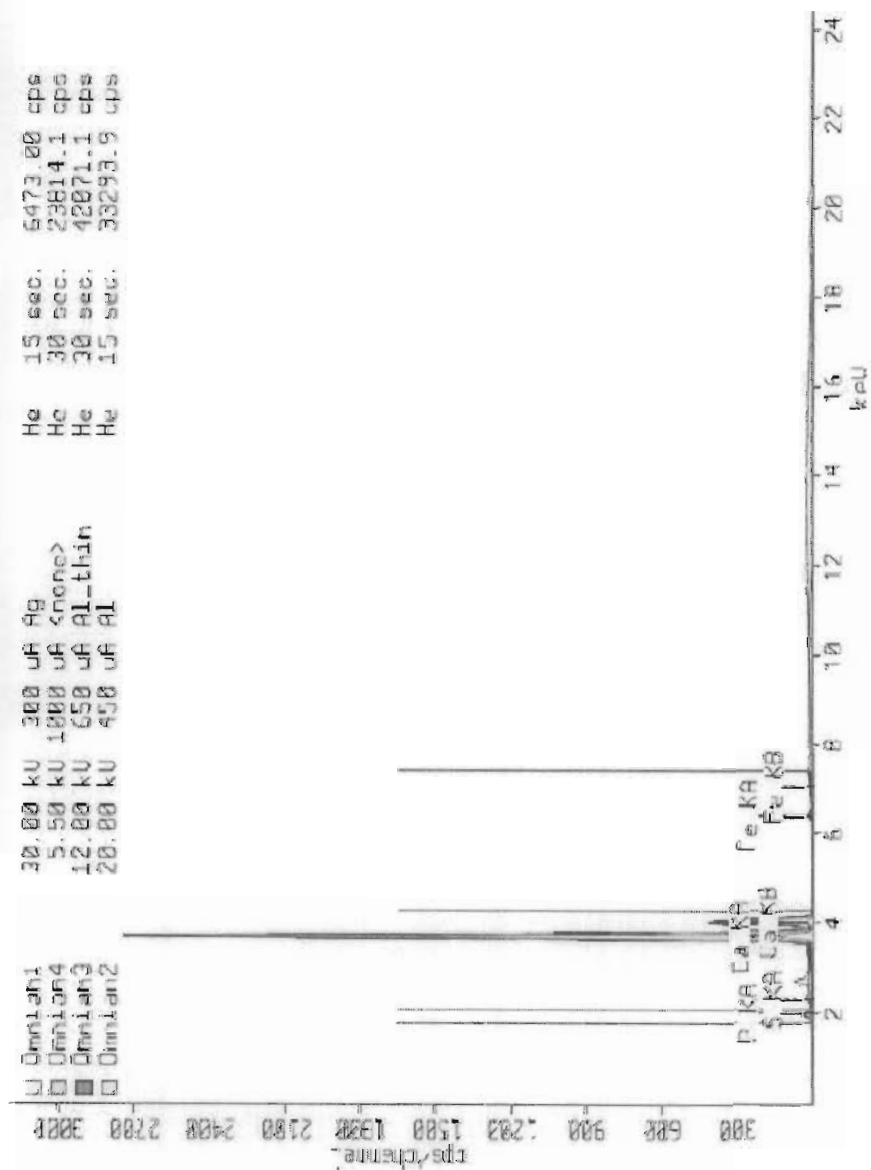
ธาตุองค์ประกอบ	ปริมาณ (wt%)
P	0.028
Ca	0.009
Fe	0.001
CHO	99.873

ภาพที่ 31 ปริมาณธาตุองค์ประกอบของเมทิลเซลลูโลส (MC)



ภาพที่ 32 ปริมาณธาตุองค์ประกอบของเปลือกไข่จากโรงงาน (ES-F)

ธาตุองค์ประกอบ	ปริมาณ (wt%)
P	0.075
Ca	86.703
Fe	0.027
S	0.72
K	0.023
CHO	13.143



ภาพที่ 33 ปริมาณธาตุองค์ประกอบของเปลือกไข่จากห้างสรรพสินค้า (ES-M)

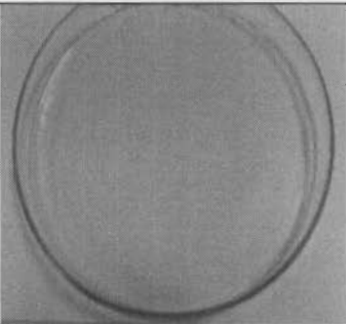
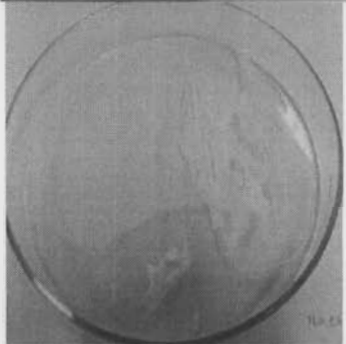
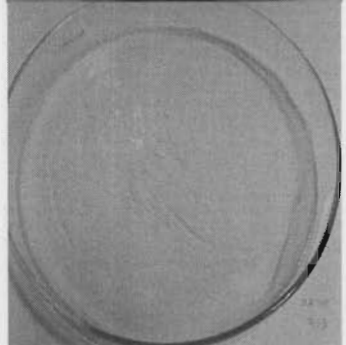
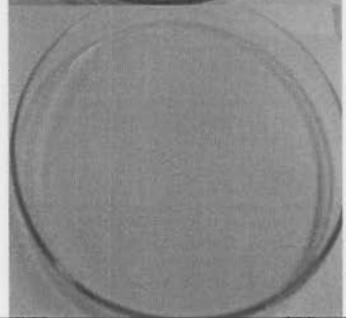
4.2 ลักษณะของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมวัสดุธรรมชาติ

หลังจากที่ทำการสังเคราะห์ฟิล์ม PLA, PLA:CS, PLA:MC, PLA:ES พบว่าฟิล์ม PLA บริสุทธิ์ และ ฟิล์ม PLA:ES ตามสัดส่วน 7:3 สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้ ยกเว้น PLA:CS และ PLA:MC ที่ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้ โดยพบว่าแผ่นฟิล์มในเพลทมีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน มีรอยแยก แดกเป็นส่วน ๆ อย่างชัดเจน ทำให้ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้ ผลการทดลองสามารถแสดงในตารางที่ 7 และลักษณะของแผ่นฟิล์มแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 7 แสดงความเป็นได้ของฟิล์มผสม

สูตร	สัดส่วน	ขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้	หมายเหตุ
PLA	10	✓	มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน มีความใส ลอกเป็นแผ่นฟิล์มได้ง่าย
PLA : CS	7 : 3	✗	ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน มีรอยแยกแตกเป็นลักษณะริ้วๆ ไม่สามารถลอกเป็นแผ่นฟิล์มได้
PLA : MC	7 : 3	✗	มีการแยกเฟสอย่างชัดเจน จึงไม่สามารถลอกเป็นแผ่นฟิล์มได้
PLA : ES	7 : 3	✓	-มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน มีสีขุ่น สามารถลอกเป็นแผ่นฟิล์มได้

ตารางที่ 8 ลักษณะของแผ่นฟิล์ม

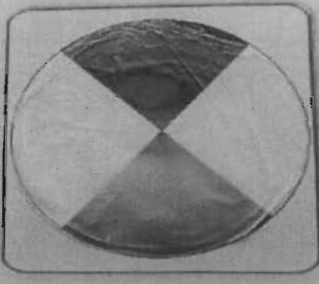
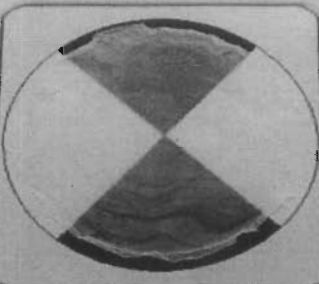
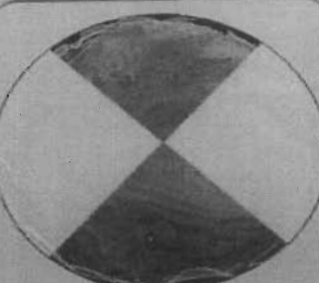
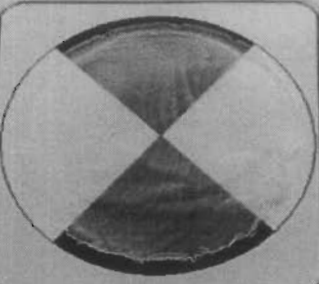
สูตร	สัดส่วน	ลักษณะของแผ่นฟิล์ม	หมายเหตุ
PLA	10		มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน มีความใส ลอกเป็นแผ่นฟิล์มได้ ง่าย
PLA : CS	7 : 3		ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน มี รอยแยกแตกเป็น ลักษณะริ้วๆ ไม่ สามารถลอกเป็น แผ่นฟิล์มได้
PLA : MC	7 : 3		มีการแยกเฟสอย่าง ชัดเจน จึงไม่สามารถ ลอกเป็นแผ่นฟิล์มได้
PLA : ES	7 : 3		มีลักษณะเป็นเนื้อ เดียวกัน มีสีขาวขุ่น สามารถลอกเป็น แผ่นฟิล์มได้

จากตารางที่ 8 ผลทดสอบพบว่าแผ่นฟิล์มที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันเกิดขึ้นเฉพาะ PLA : ES จึงได้ทำการทดสอบในอัตราส่วนผสมที่น้อยลง คือ PLA : ES (9:1) และ PLA : ES (8:2) เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพการเกิดฟิล์มผสมของ PLA : ES ผลการทดลองได้แสดงในตารางที่ 9 และลักษณะของแผ่นฟิล์มในอัตราส่วนต่าง ๆ ได้ดังแสดงในตารางที่ 10

ตารางที่ 9 แสดงความเป็นได้ของฟิล์มผสม PLA : ES

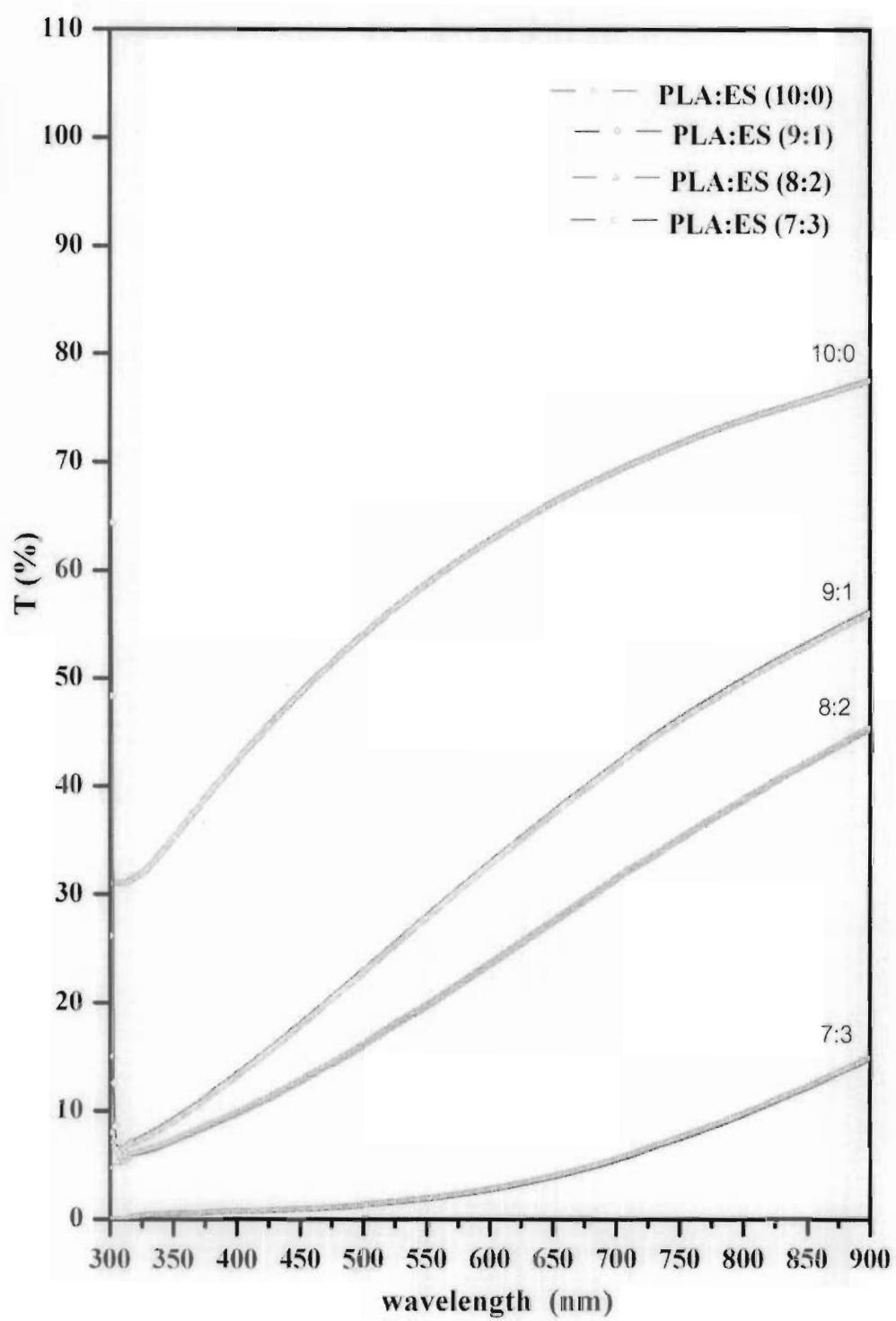
สูตร	สัดส่วน	ขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้	หมายเหตุ
PLA	10	✓	แผ่นฟิล์มมีลักษณะโปร่งใส
PLA : ES	9 : 1	✓	แผ่นฟิล์มมีลักษณะโปร่งใส แต่น้อยกว่า PLA (10)
PLA : ES	8 : 2	✓	แผ่นฟิล์มมีลักษณะโปร่งแสง
PLA : ES	7 : 3	✓	แผ่นฟิล์มมีลักษณะโปร่งแสง แต่น้อยกว่า PLA (8:2)

ตารางที่ 10 ลักษณะของแผ่นฟิล์ม PLA และ PLA:ES ในอัตราส่วนต่างๆ

สูตร	สัดส่วน	ลักษณะของแผ่นฟิล์ม	หมายเหตุ
PLA	10		แผ่นฟิล์มมี ลักษณะ โปร่งใส
PLA : ES	9 : 1		แผ่นฟิล์มมี ลักษณะ โปร่งใสแต่ น้อยกว่า PLA (10)
PLA : ES	8 : 2		แผ่นฟิล์มมี ลักษณะ โปร่งแสง
PLA : ES	7 : 3		แผ่นฟิล์มมี ลักษณะ โปร่งแสงแต่ น้อยกว่า PLA (8:2)

4.3 คุณสมบัติทางด้านความขุ่น-ใส

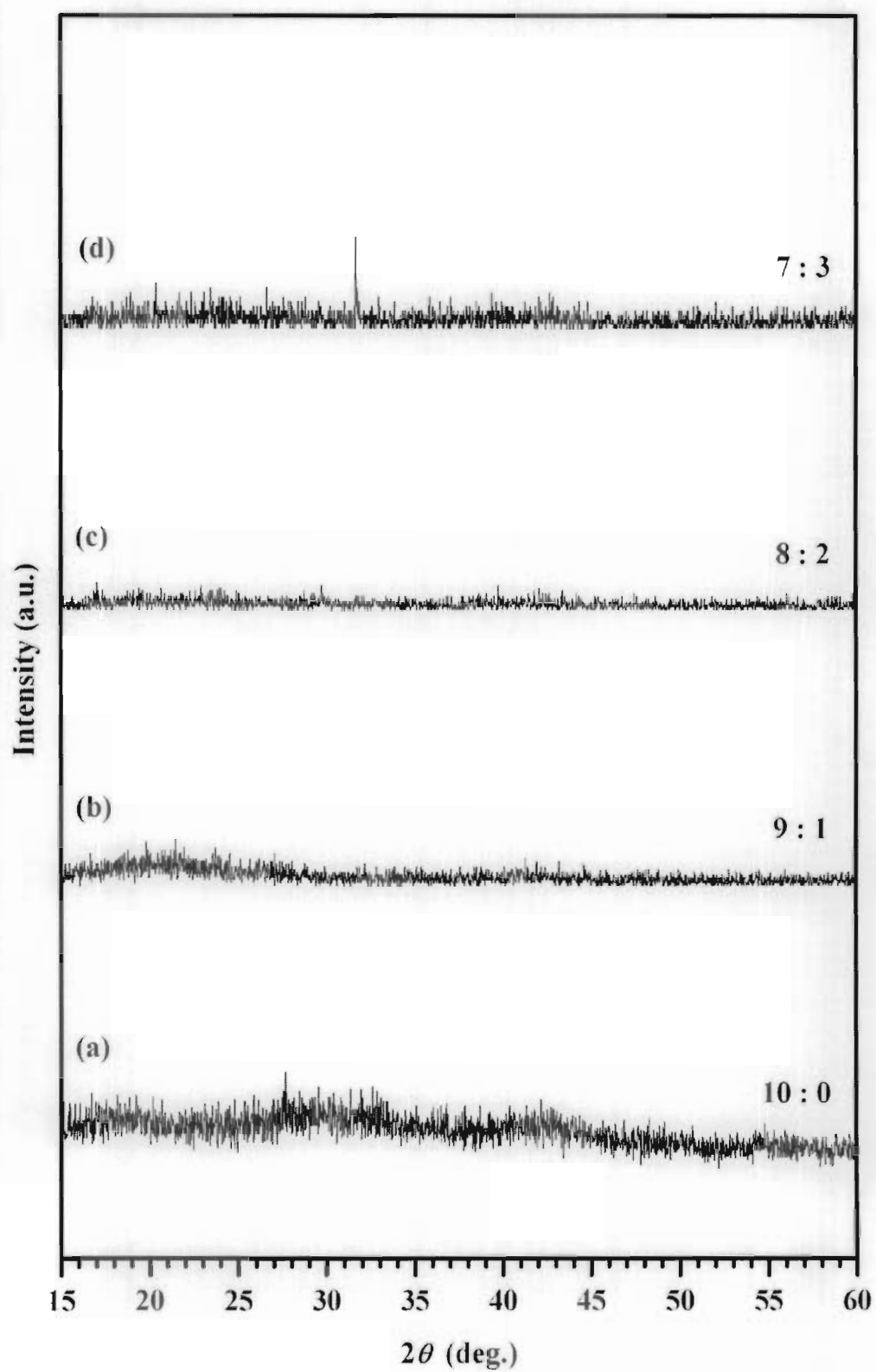
จากการศึกษาสมบัติการส่องผ่านของฟิล์มด้วยเทคนิค UV-visible spectrophotometry ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ได้สมบัติการส่องผ่านแสงของฟิล์มแสดงดังภาพที่ 34 พบว่า PLA มีลักษณะของแผ่นฟิล์มโปร่งใสมากที่สุด สำหรับฟิล์ม PLA ที่ผสม ES ทุกอัตราส่วนมีความใสลดลงอย่างชัดเจน โดยจะเห็นได้ว่าในอัตราส่วนที่เท่ากันความสามารถในการส่องผ่านของแสงจะเพิ่มขึ้นและความสามารถในการส่องผ่านแสงที่ได้ยังแปรผันตรงกับปริมาณของผง ES ที่ผสมลงใน PLA ในช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ สอดคล้องกับ Younes (2011) ที่รายงานว่า การผสมพอลิเมอร์เบสชนิดที่เป็นตัวก่ออิมัลชัน (emulsifier) ทำให้ฟิล์มมีลักษณะฟิล์มอิมัลซิไฟด์ (emulsified films) ส่งผลให้มีลักษณะเป็นอนุภาคแขวนลอยอยู่ในฟิล์ม ทำให้ฟิล์มมีความขุ่นมากขึ้น



ภาพที่ 34 แสดงสมบัติการส่องผ่านแสงของฟิล์ม

4.4 คุณสมบัติลักษณะด้านโครงสร้างผลึก

จากผลการศึกษาถึงลักษณะทางโครงสร้างของฟิล์ม PLA ผสม ES ในอัตราส่วนต่าง ๆ ตามภาพที่ 35 พบว่าลักษณะการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ของฟิล์ม PLA ผสม ES ในอัตราส่วน 9:1 และ 8:2 ไม่พบการเลี้ยวเบนซึ่งแสดงถึงลักษณะฟิล์มที่ไม่ได้เกิด โครงผลึกใด ๆ ยกเว้นในอัตราส่วน 7:3 ซึ่งมีปริมาณ ES สูงที่สุด พบว่ามีลักษณะการเลี้ยวเบนเป็นแบบยอดแหลม ซึ่งแสดงถึงลักษณะผลึกที่ก่อตัวขึ้นในฟิล์ม สร้างลักษณะยอดแหลมนั้นมีความเข้มของการสะท้อนที่มุม $2\theta = 32^\circ$ ซึ่งเป็นโครงสร้างของสารประกอบแคลไซต์ที่เติมลงไปเนื้อฟิล์มและหลอมรวมกันเป็นเนื้อเดียวกันเป็นชั้นของฟิล์มที่ชัดเจนและสอดคล้องกับภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ในภาพที่ 43 (b)



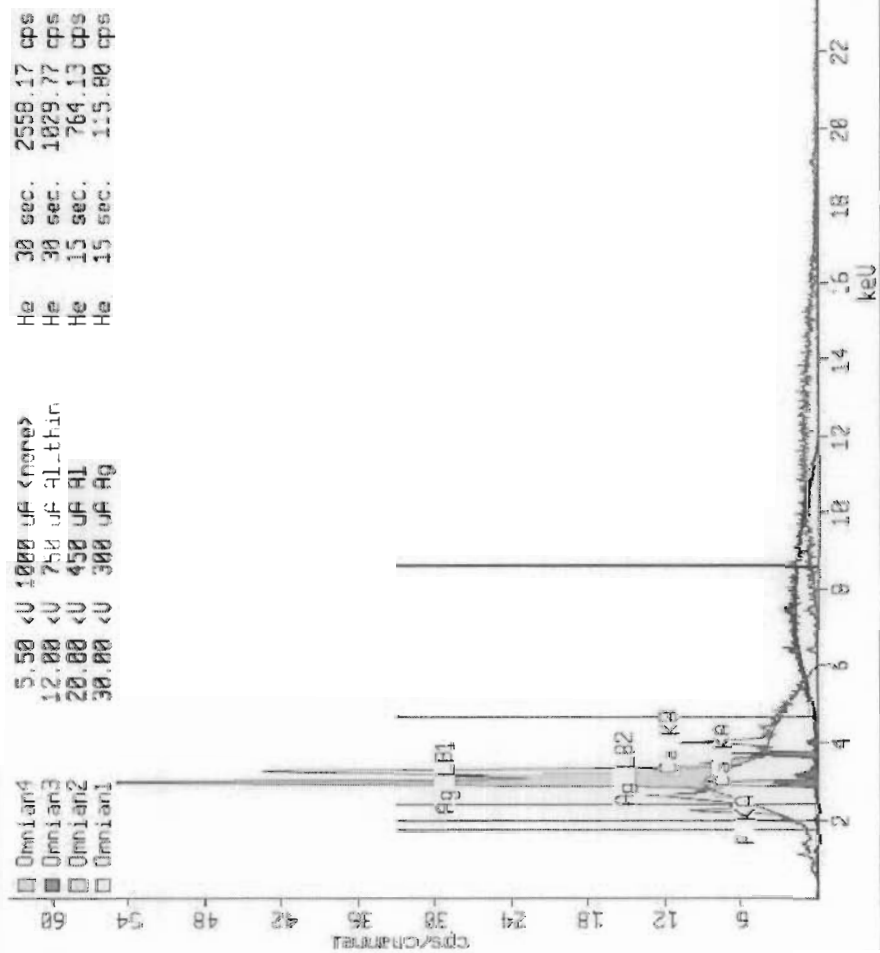
ภาพที่ 35 แผนภาพ XRD ของฟิล์มพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต ที่ผสมกับเปลือกไข่จากห้างสรรพสินค้า

4.5 คุณสมบัติลักษณะทางเคมี

ในส่วนของการประกอบทางเคมีของแผ่นฟิล์ม สามารถแสดงได้ตามตารางที่ 11 ซึ่งเป็นการทดลองจากการศึกษาถึงธาตุองค์ประกอบของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมผงเปลือกไข่ ในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน พบว่า Ca ซึ่งเป็นธาตุองค์ประกอบหลักของเปลือกไข่ และเป็นธาตุองค์ประกอบธาตุหนึ่งของพอลิแลคติกแอซิดมีปริมาณเพิ่มขึ้นและปริมาณที่เพิ่มขึ้นสอดคล้องกับอัตราส่วนของเปลือกไข่ที่ผสมลงไป ในพอลิแลคติกแอซิด สำหรับ P ที่พบเฉพาะในพอลิแลคติกแอซิดมีปริมาณที่เพิ่มขึ้นตาม อัตราส่วนของเปลือกไข่ที่ผสมด้วยเช่นกัน ส่วน Fe มีอัตราส่วนคงที่ จากการทดลองอาจเป็นไปได้ที่ P จะหลุดออกมาจากเปลือกไข่ (สุวรรณ เกษตรสุวรรณ, 2529) หลังจากเกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับตัวทำละลายต่าง ๆ โดยกราฟของธาตุองค์ประกอบแสดงในภาพที่ 36 ถึงภาพที่ 39

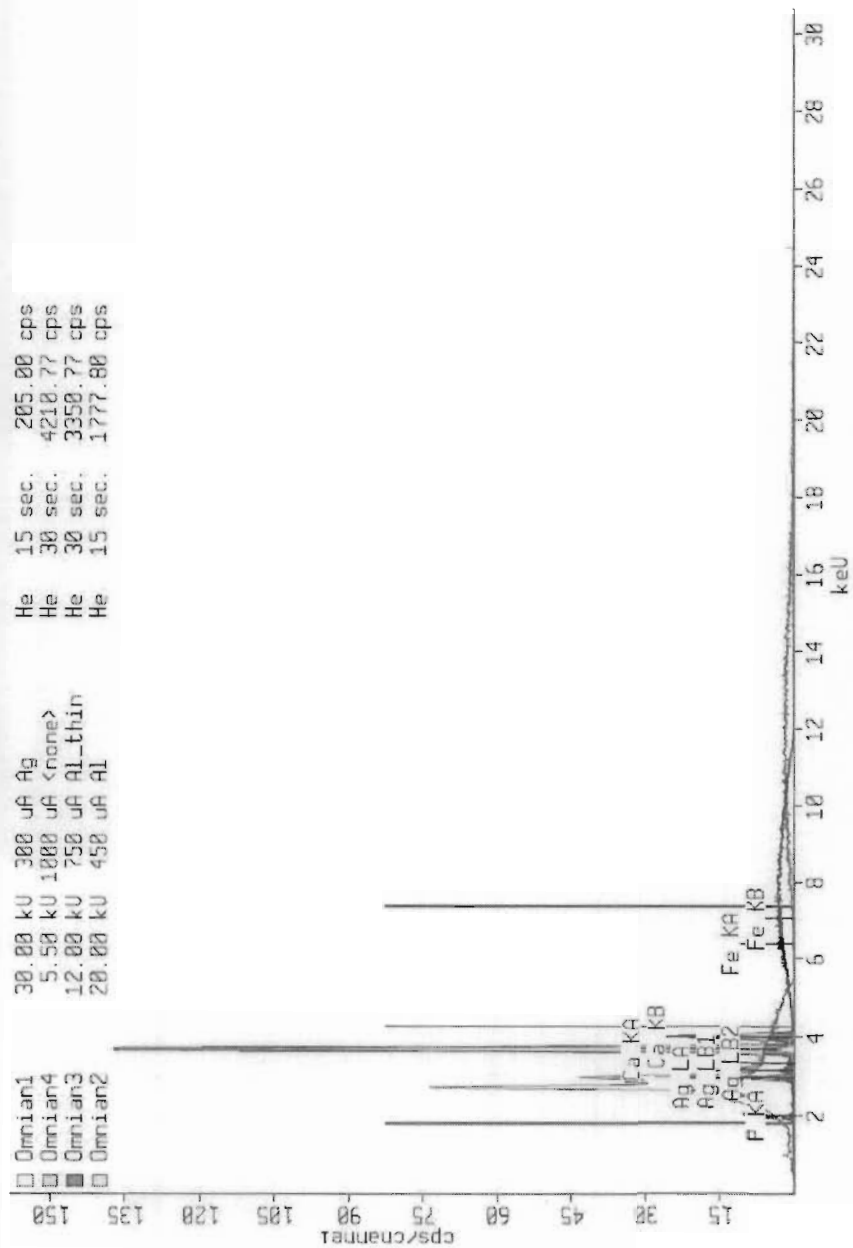
ตารางที่ 11 ปริมาณธาตุองค์ประกอบทางเคมีของแผ่นฟิล์ม

ธาตุองค์ประกอบ	ปริมาณ (wt%)			
	PLA	PLA/ES	PLA/ES	PLA/ES
		9:1	8:2	7:3
P	0.02	0.104	0.143	0.167
Ca	0.051	0.331	0.631	1.754
Fe	0.001	0.001	0.001	0.001
CHO	99.701	99.29	99.055	97.762

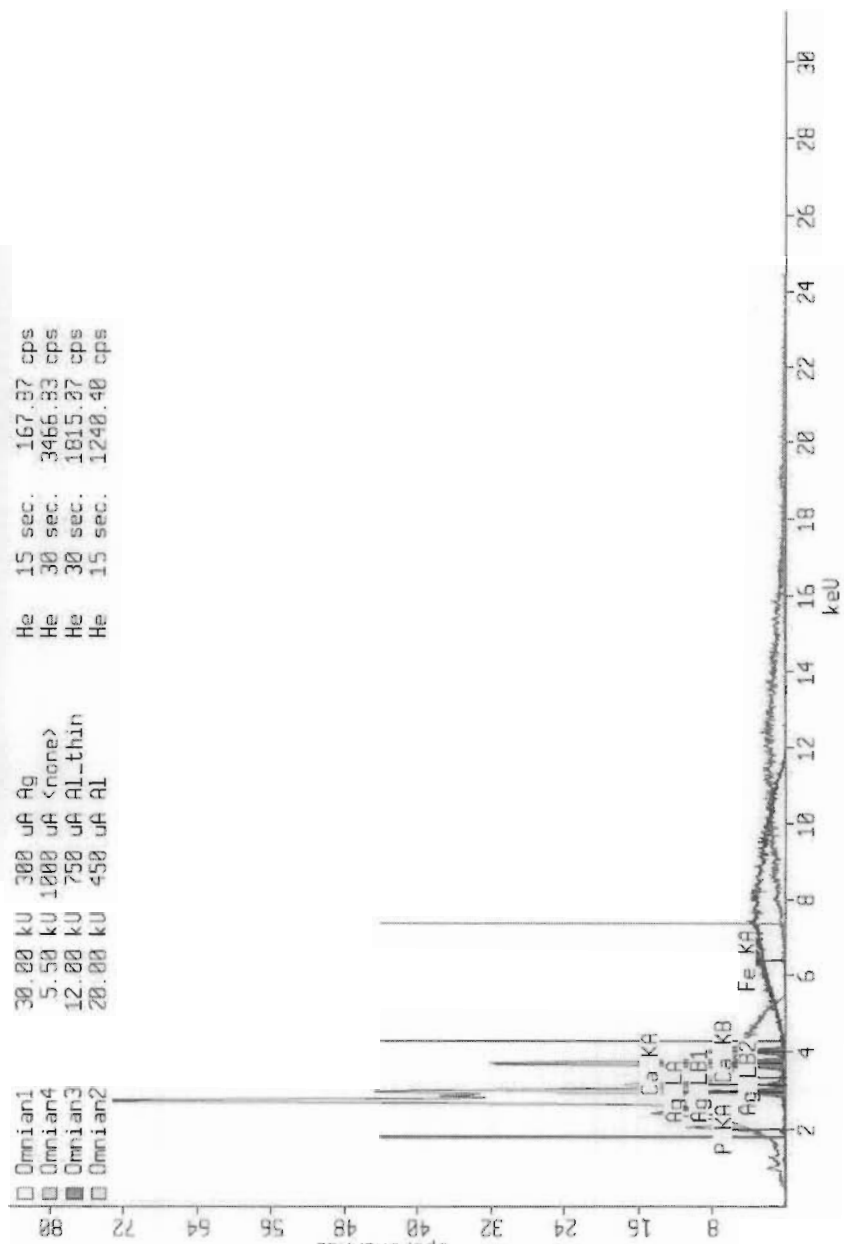


ภาพที่ 36 ปริมาณธาตุองค์ประกอบของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด (PLA)

ธาตุองค์ประกอบ	ปริมาณ (wt%)
P	0.02
Ca	0.051
Fe	0.001
CHO	99.701

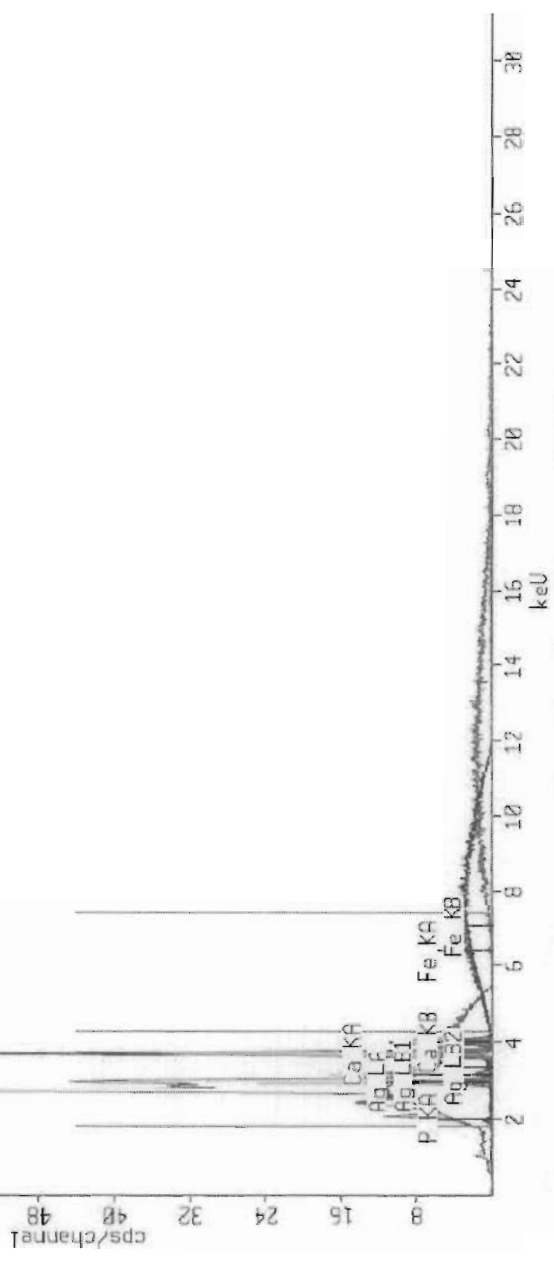


ภาพที่ 37 ปริมาณธาตุองค์ประกอบของฟิล์มพอลิแลกติกแอซิดผสมผงเปลือกไข่ (9:1)



ภาพที่ 38 ปริมาณธาตุองค์ประกอบของฟิล์มพอลิแลกติกเอซิดผสมผงเปลือกไข่ (8.2)

☐ Omnic1	30.00 kV	300 uA Ag	He	15 sec.	175.33 cps
☐ Omnic4	5.50 kV	1000 uA <none>	He	30 sec.	3539.67 cps
☐ Omnic3	12.00 kV	750 uA Al_thin	He	30 sec.	2883.00 cps
☐ Omnic2	20.00 kV	450 uA Al	He	15 sec.	1299.00 cps



ภาพที่ 39 ปริมาณธาตุองค์ประกอบของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมผงเปลือกไข่ (7:3)

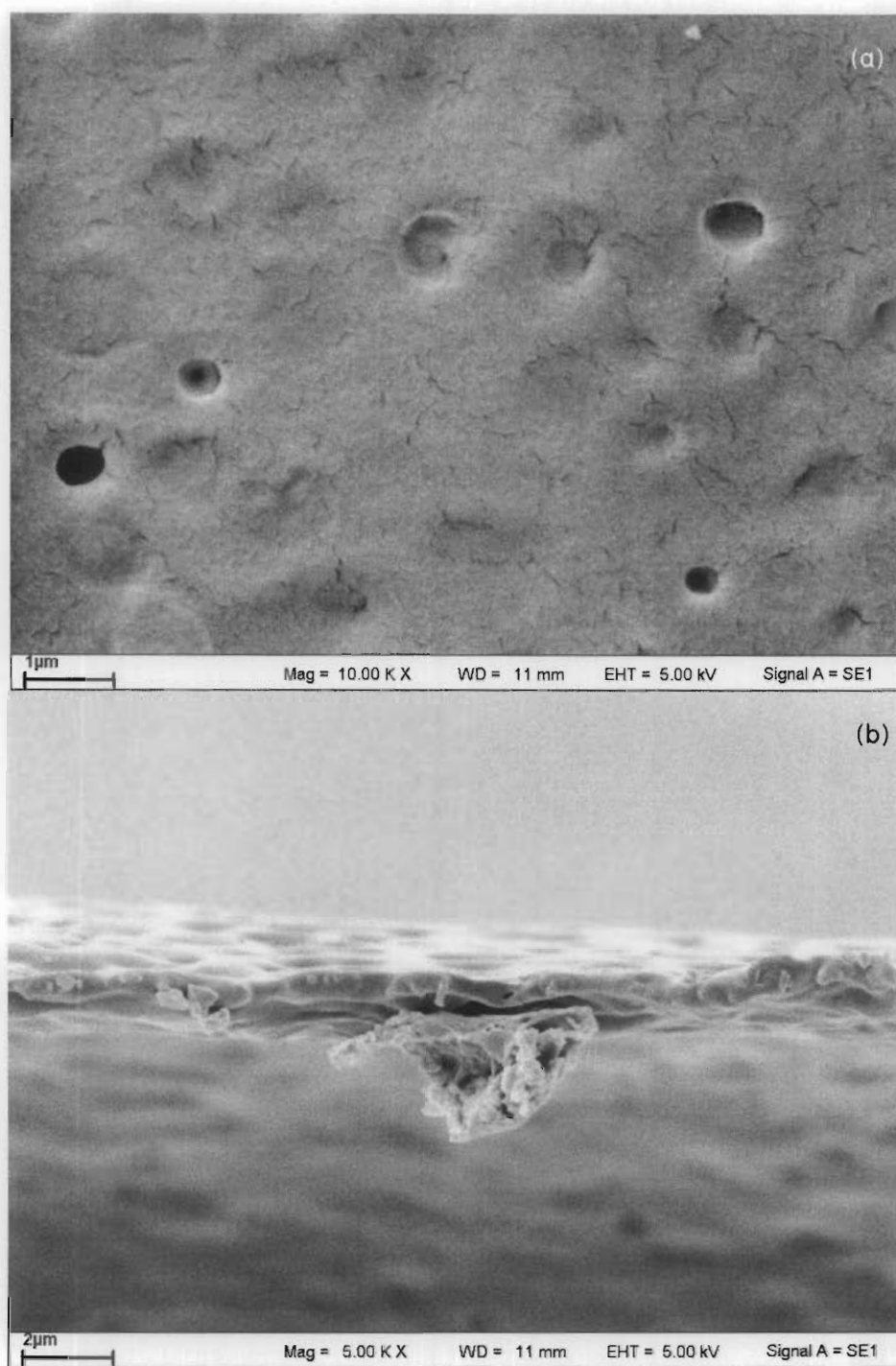
ธาตุองค์ประกอบ	ปริมาณ (wt%)
P	0.167
Ca	1.754
Fe	0.001
CHO	97.762

4.6 คุณลักษณะด้านพื้นผิว

ลักษณะทางกายภาพด้านพื้นผิว ในส่วนที่เป็นภาพพื้นผิวด้านบน และภาพตัดขวางของแผ่นฟิล์ม PLA ที่ผสมกับวัสดุธรรมชาติสามารถแสดงได้ด้วยภาพถ่ายจาก SEM โดยจากภาพที่ 40 แสดงภาพถ่ายของฟิล์ม PLA ภาพที่ 41 แสดงภาพถ่ายของฟิล์ม PLA ผสม ES ในอัตราส่วน 9:1 ภาพที่ 42 แสดงภาพถ่ายของฟิล์ม PLA ผสม ES ในอัตราส่วน 8:2 และภาพที่ 43 แสดงภาพถ่ายของฟิล์ม PLA ผสม ES ในอัตราส่วน 7:3 ที่กำลังขยาย 10000X และ 5000X ตามลำดับ สำหรับภาพจาก SEM ในรูปที่ 45 (a) แสดงให้เห็นมีรอยร้าว และรูพรุนบนผิวฟิล์ม ขนาด 500 nm และภาพที่ 45 (b) แสดงให้เห็นถึงความสม่ำเสมอของฟิล์ม (homogeneous) ที่ประกอบด้วยโครงสร้างชั้นเดียว

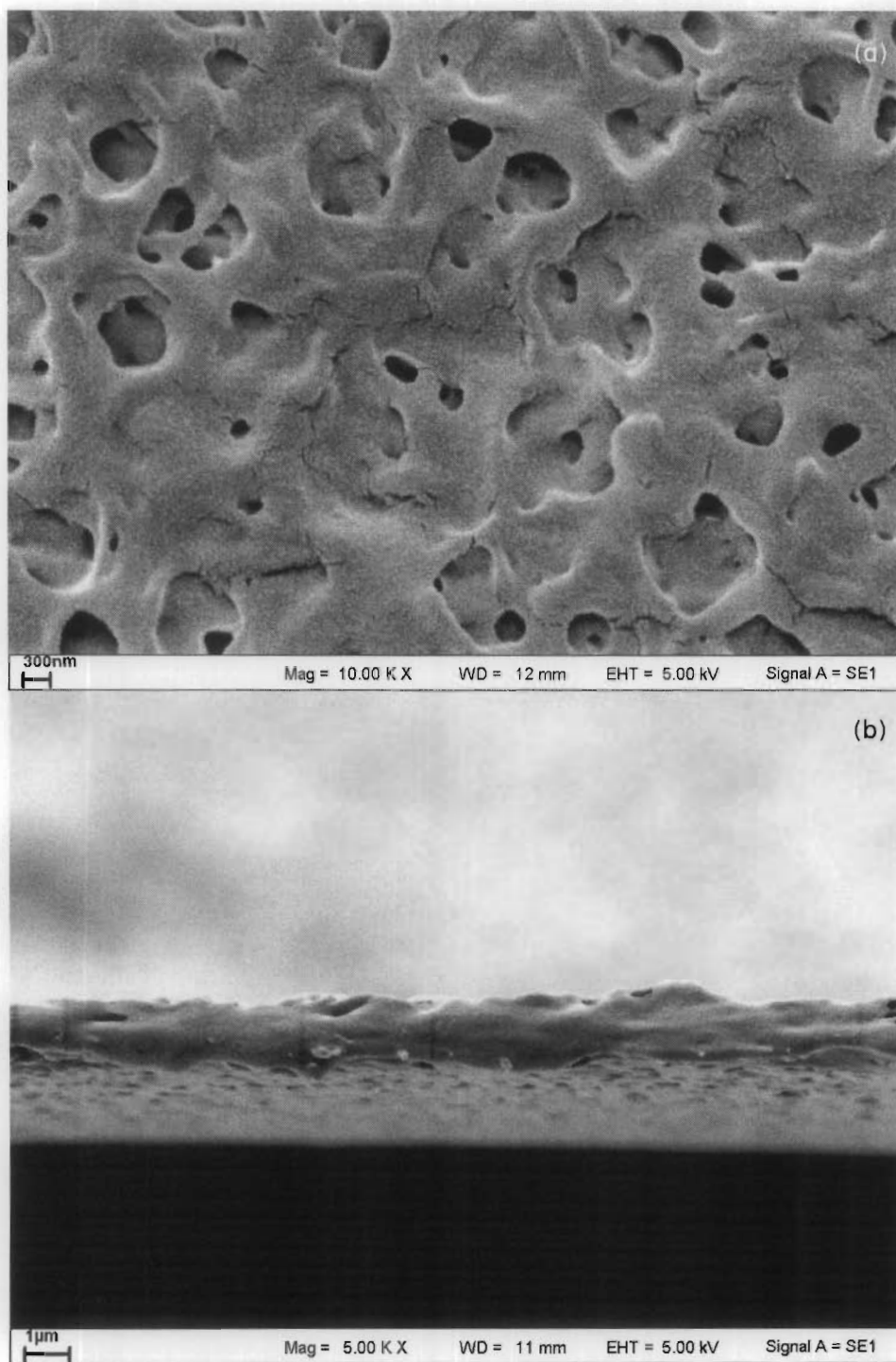
4.7 สมบัติด้านความหนา

สำหรับความหนาของฟิล์ม พบว่า PLA มีความหนาน้อยที่สุดคือ 400 nm และฟิล์ม PLA ผสม ES จะมีค่าระหว่าง $14.12 \pm 1.59 \mu\text{m}$ ดังแสดงในตารางที่ 12 ซึ่งความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของ ES ที่ผสมในฟิล์ม PLA



ภาพที่ 40 ภาพถ่ายของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด (PLA)

(a คือภาพพื้นผิว; b คือภาพตัดขวาง)

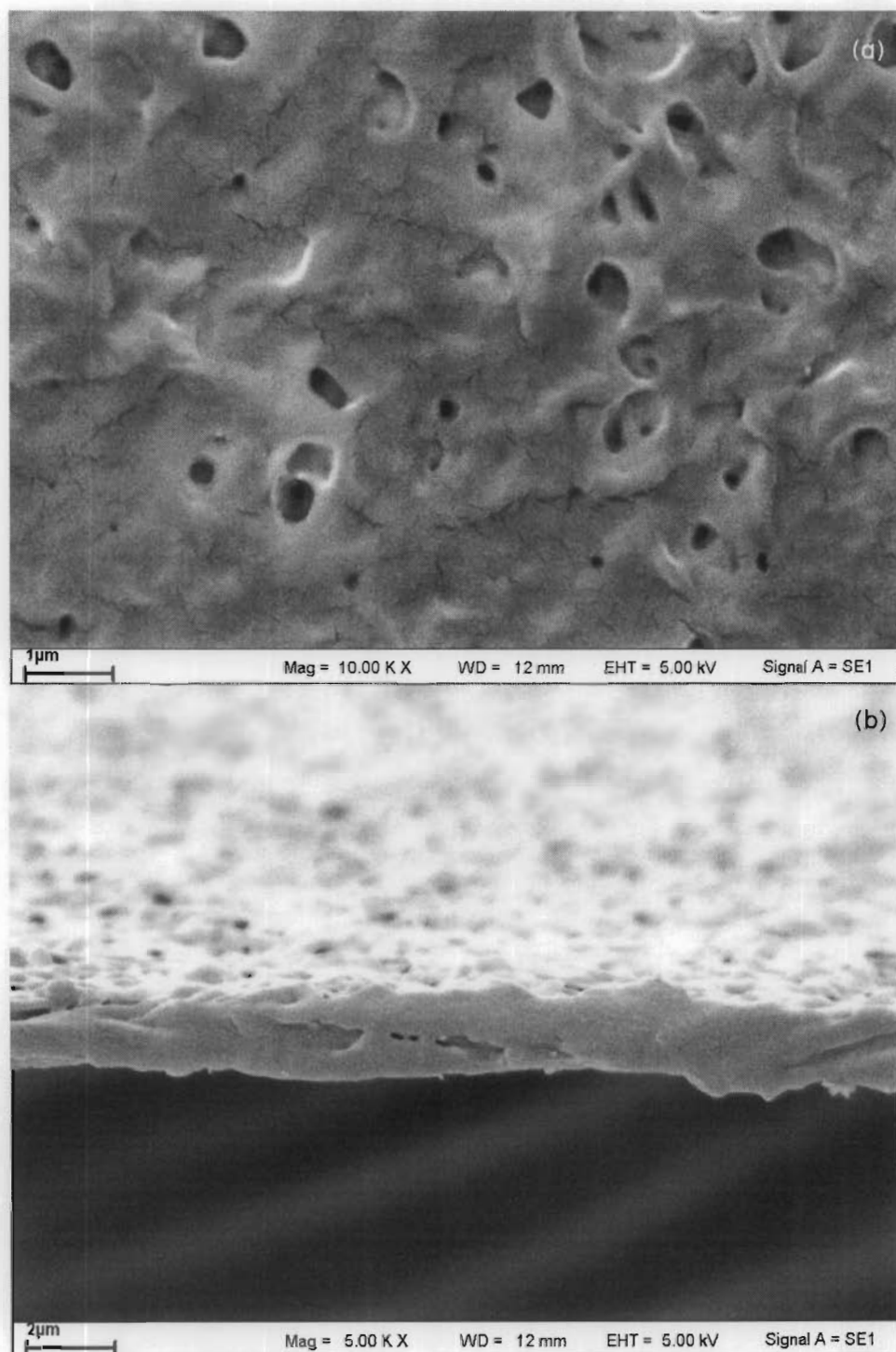


ภาพที่ 41 แสดงภาพถ่ายของฟิล์มพอลิเอทิลีนไดอะครีเลตผสมผงเปลือกไข่ในอัตราส่วน 9:1
(a คือภาพพื้นผิว; b คือภาพตัดขวาง)

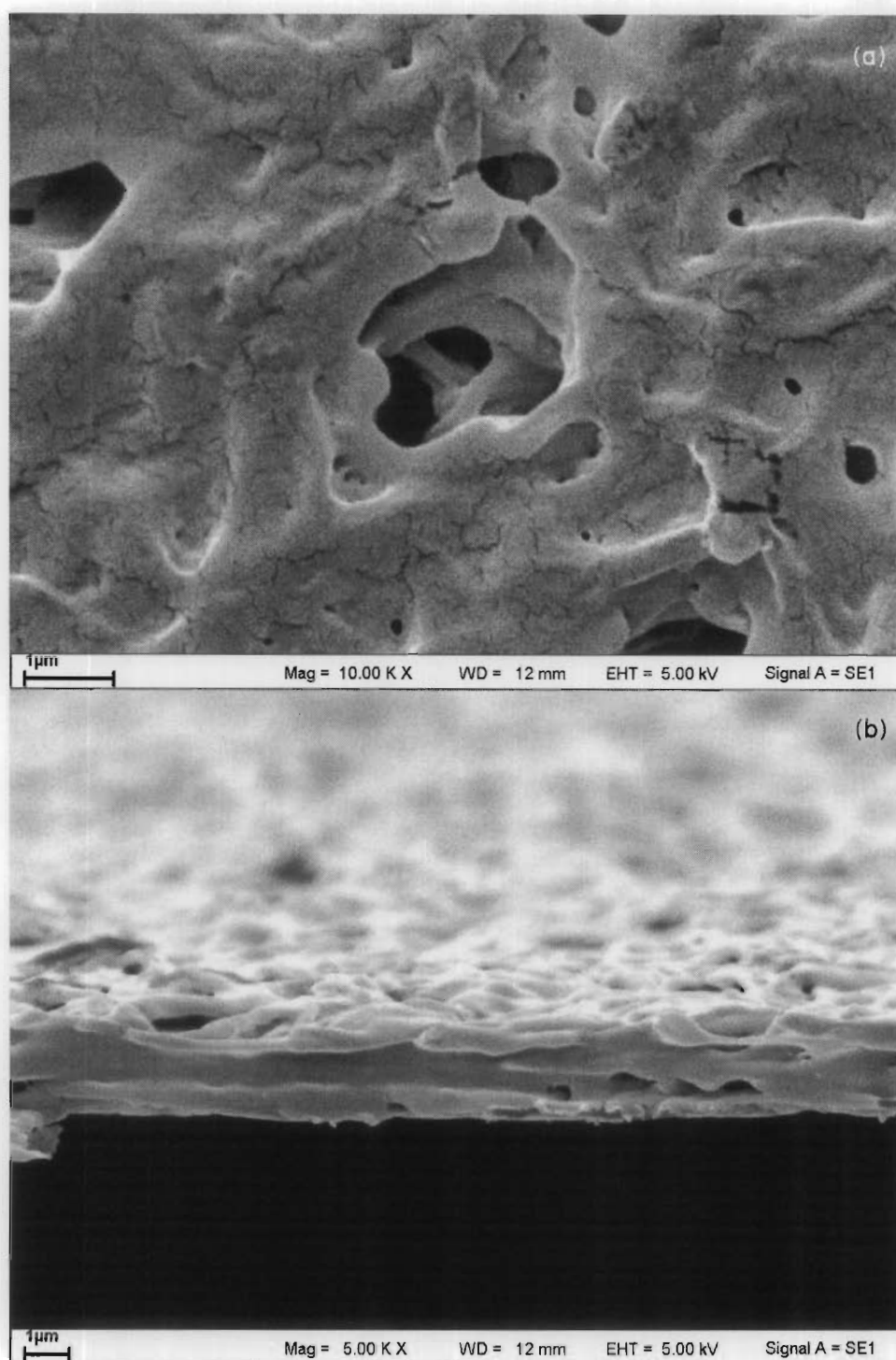
สำหรับภาพจาก SEM ในภาพที่ 41 (a) แสดงให้เห็นว่ามีรูพรุนบนผิวฟิล์มเพิ่มมากขึ้น โดยรูพรุนดังกล่าวมีขนาด 600 nm โดยผิวฟิล์มของ PLA ผสม ES ในอัตราส่วน 9:1 มีลักษณะเป็นเส้นใยวางซ้อนกัน และภาพที่ 41 (b) แสดงให้เห็นถึงความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของฟิล์ม โดยพบว่ามีลักษณะเม็ดเล็ก ๆ ของอนุภาคกระจายตัวอยู่ในเนื้อฟิล์มแต่ยังไม่มีการแยกชั้น

สำหรับภาพจาก SEM ในภาพที่ 42 (a) แสดงให้เห็นว่ามีรูพรุนบนผิวฟิล์มมีจำนวนลดลงโดยยังคงมีขนาด 600 nm แต่ลักษณะของผิวฟิล์มของ PLA ผสม ES ในอัตราส่วน 8:2 มีลักษณะเป็นเส้นใยที่ประสานรวมกันเป็นชั้นมากขึ้น และภาพที่ 42 (b) แสดงให้เห็นถึงความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของฟิล์ม โดยพบว่ามีลักษณะเม็ดเล็ก ๆ ของอนุภาคกระจายตัวอยู่ในเนื้อฟิล์มในปริมาณที่มากขึ้น

สำหรับภาพจาก SEM ในภาพที่ 43 (a) แสดงให้เห็นว่ามีรูพรุนบนผิวฟิล์มมีขนาดใหญ่ขึ้น เป็นขนาด 1-2 μm แต่ลักษณะของผิวฟิล์มของ PLA ผสม ES ในอัตราส่วน 7:3 มีลักษณะเป็นเส้นใยที่ประสานรวมกันเป็นชั้นวางซ้อนกันอย่างชัดเจน และมีรอยแตกกระจายทั่วผิวฟิล์ม โดยภาพที่ 43 (b) แสดงให้เห็นถึงความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของฟิล์ม โดยพบว่ามีหลายชั้นในลักษณะที่เป็นชั้นของฟิล์มที่วางซ้อนกันอย่างชัดเจน

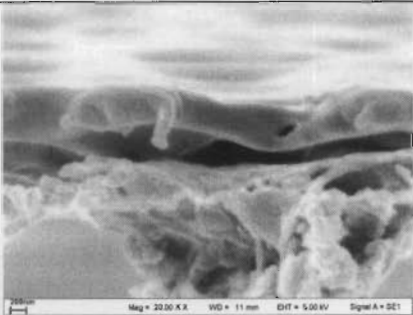
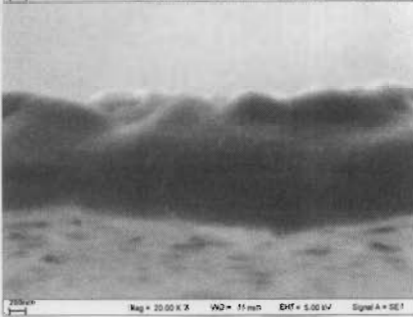
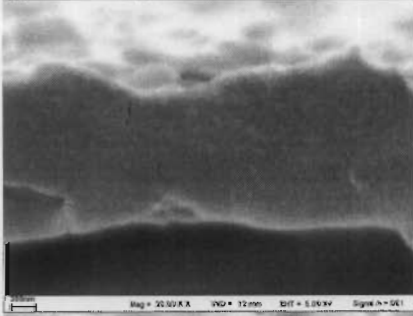
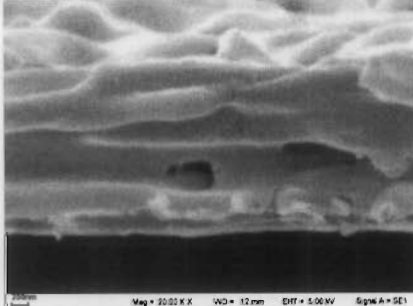


ภาพที่ 42 แสดงภาพถ่ายของฟิล์มพอลิเอทเธอร์อีเทอร์ซัลโฟเนตในอัตราส่วน 8:2
(a คือภาพพื้นผิว; b คือภาพตัดขวาง)



ภาพที่ 43 แสดงภาพถ่ายของฟิล์มพอลิเอไมด์ที่เคลือบด้วยสिलิโคนในอัตราส่วน 7:3
(a คือภาพพื้นผิว; b คือภาพตัดขวาง)

ตารางที่ 12 แสดงความสามารถในการละลายน้ำและความหนาของฟิล์ม

สูตร	สัดส่วน	ความสามารถ ในการละลาย น้ำ (%)	ความหนา ของ แผ่นฟิล์ม	ลักษณะ ภาพตัดขวางของฟิล์ม
PLA	10	10.40	400 nm	
PLA : ES	9 : 1	9.58	1.3 μm	
PLA : ES	8 : 2	7.58	1.5 μm	
PLA : ES	7 : 3	6.02	1.8 μm	

4.8 คุณสมบัติการละลายน้ำ

จากผลการทดลองในตารางที่ 12 พบว่าฟิล์ม PLA : ES ในอัตราส่วน 7:3 ละลายน้ำได้น้อยกว่าและมีการละลายน้ำได้มากขึ้นเมื่ออัตราส่วนการผสม ES เพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ PLA มีเปอร์เซ็นต์การละลายน้ำสูงสุด

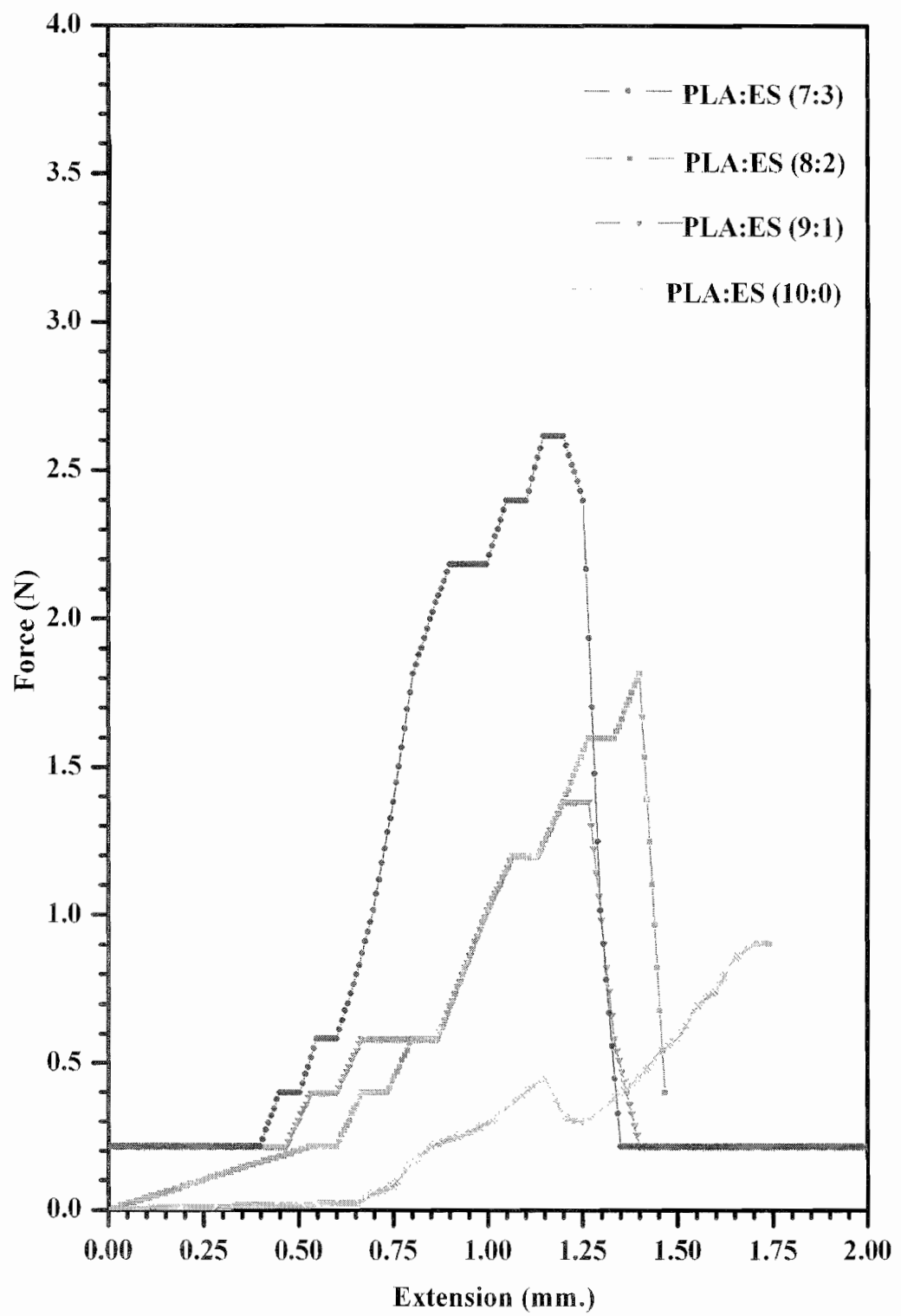
โดยทั่วไป ES มีองค์ประกอบหลักเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งมีคุณสมบัติเฉพาะคือไม่สามารถละลายได้ในน้ำ แต่สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ แล้วกลายเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สามารถละลายน้ำได้เล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้ว่าเมื่ออัตราส่วนของ ES เพิ่มมากขึ้นทำให้เปอร์เซ็นต์การละลายน้ำลดลง

4.9 คุณสมบัติด้านแรงดึงและการยืด

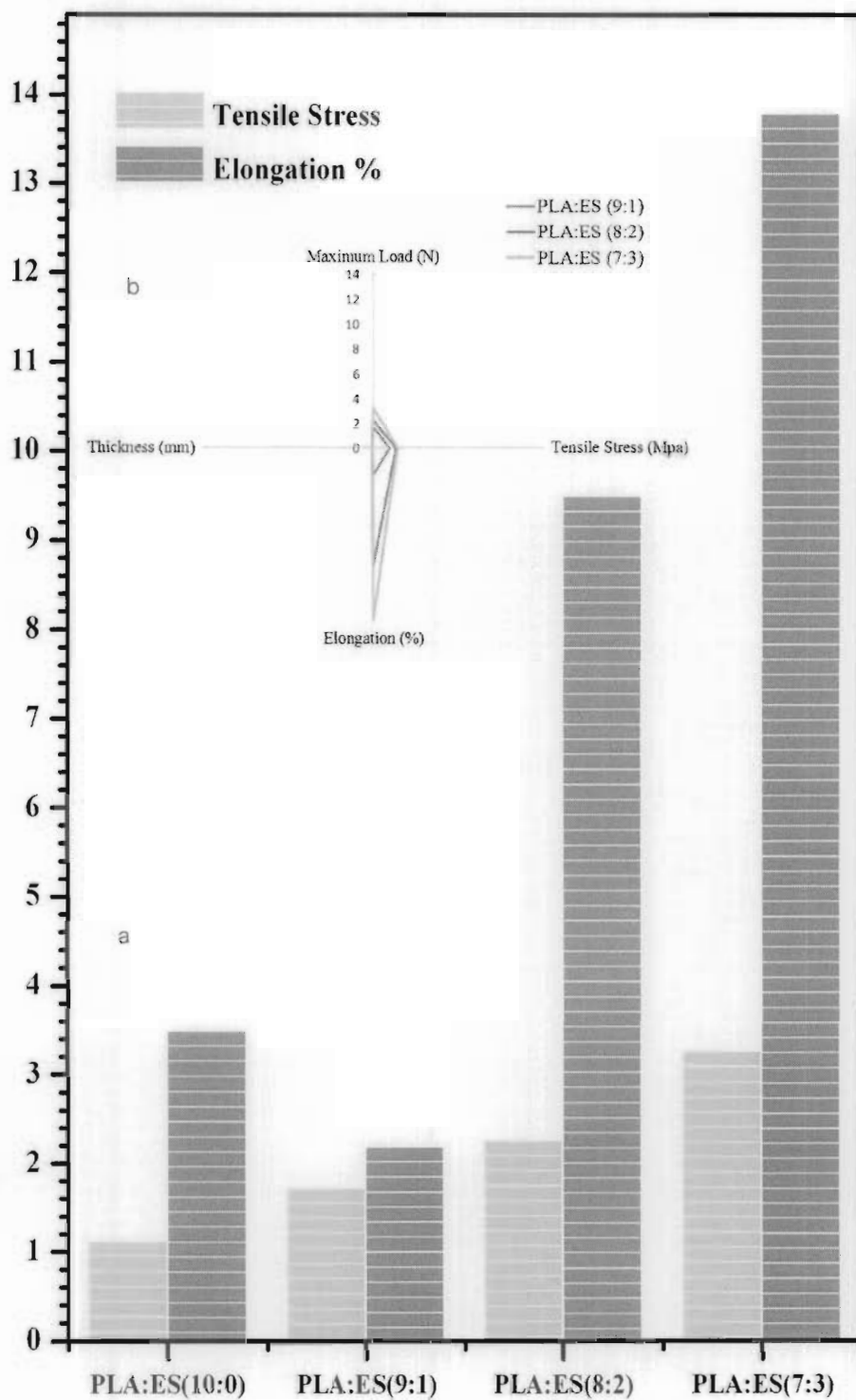
จากการศึกษาคุณสมบัติด้านกายภาพของฟิล์ม PLA ผสม ES ผลการทดลองคุณสมบัติด้านแรงดึงและการยืดสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 44 โดยได้แสดงถึง พฤติกรรมเชิงกลของวัสดุภายใต้แรงดึงหรือการยืดในแนวแกน ได้แก่ ขีดจำกัดการยืดหยุ่น (elastic limit) ร้อยละการยืด (percent elongation) และ โมดูลัสความยืดหยุ่น (modulus of elasticity) ในการอธิบายพฤติกรรมและความเครียดที่เกิดขึ้น ได้แสดงค่าของแรงเค้นเป็นแกนตั้งและความเครียดที่เกิดขึ้นเป็นแกนนอน ใน ภาพที่ 44 ช่วงยืดหยุ่นคือช่วงเริ่มแรกของ กราฟจนถึงช่วงขีดจำกัดการยืดหยุ่น ช่วงขีดจำกัดการยืดหยุ่นคือตำแหน่งซึ่งแรงเค้นเพิ่มขึ้น และเริ่มเข้าสู่ช่วงของการเสียรูปถาวร ส่วนค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นสามารถหาได้จากความชันของเส้นกราฟในช่วงของการเสียรูปแบบยืดหยุ่น หรือ ช่วงขีดจำกัดแบบสัดส่วน ดังที่แสดงในภาพที่ 44 สำหรับภาพที่ 45 แสดงถึงการทดสอบแรงดึงของฟิล์ม PLA ผสมกับ ES ที่ระดับต่าง ๆ ทั้งหมด 3 ระดับ ได้แก่ 10, 20 และ 30% ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด แสดงใน ภาพที่ 45 พบว่าปริมาณ ES ที่เพิ่มเข้าไปนั้นไม่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง กล่าวคือ เมื่อเติม ES 10% แรงดึงเพิ่มขึ้นเป็น 1.730 N จาก ฟิล์ม PLA บริสุทธิ์ ซึ่งมีแรงดึงคือ 1.130 N และ สำหรับการเติม ES 20% แรงดึงเพิ่มขึ้นเป็น 2.270 N นอกจากนี้เมื่อมีการเติม ES 30% จะมีค่าแรงดึงสูงถึง 3.270 N ดังนั้นจะเห็นว่า เมื่อมีการ ES จะส่งผลให้ค่าแรงดึงสูงขึ้นอย่างชัดเจน เป็นการเสริมความแข็งแรงให้กับฟิล์ม PLA โดยแสดงถึงความแข็งแรงต่อการแตกหักของวัสดุหรือความสามารถที่จะทนต่อแรงกระทำบิดพลิ้ว และยังทำให้วัสดุมีความสามารถในการขึ้นรูปเพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้ภาพที่ 44 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงเค้นกับความเครียด เพื่อพิจารณาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของฟิล์ม PLA ที่บริสุทธิ์ และฟิล์ม PLA ผสม ES 30% โดยค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นจะสัมพันธ์กับความแข็งแรงของพันธะ

ระหว่างอะตอม

จากเส้นตรงในช่วงที่เกิดการเสียรูปแบบยืดหยุ่นพบว่าฟิล์ม PLA ผสม ES 30% จะมีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นสูงกว่า ฟิล์ม PLA บริสุทธิ์ อันแสดงถึง ความแข็งแรงของพันธะระหว่างอะตอมของฟิล์ม PLA ผสม ES 30% ว่ามีความแข็งแรงมากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับความสัมพันธ์จากภาพที่ 45 (a) ที่พบว่า ฟิล์ม PLA ผสม ES 30% จะมีร้อยละการยืดสูงสุดที่สุด คือ 13.8 % ฟิล์ม PLA ผสม ES 20% และ 10% จะมีร้อยละการยืด เป็น 9.5 % และ 3.5% ตามลำดับ ในขณะที่ฟิล์ม PLA บริสุทธิ์ มีร้อยละการยืดเพียง 2.2 % ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขีดจำกัดการยืดหยุ่น ร้อยละการยืดและโมดูลัสความยืดหยุ่นได้ดังภาพที่ 45 (b)



ภาพที่ 44 คุณสมบัติด้านแรงดึงและการยืด



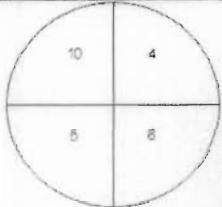
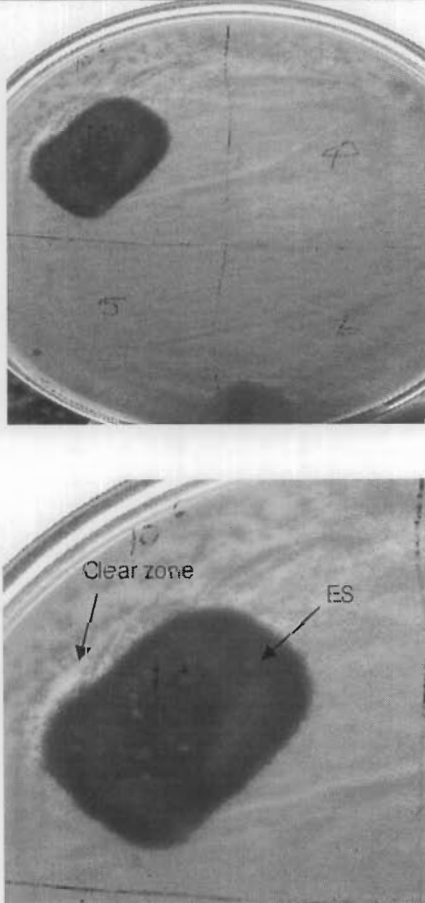
ภาพที่ 45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ขีดจำกัดการยืดหยุ่น (Tensile stress) และร้อยละการยืด (Elongation)

4.10 คุณสมบัติการต้านเชื้อจุลินทรีย์

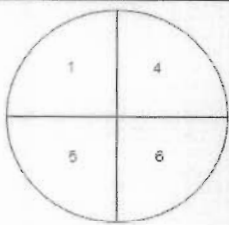
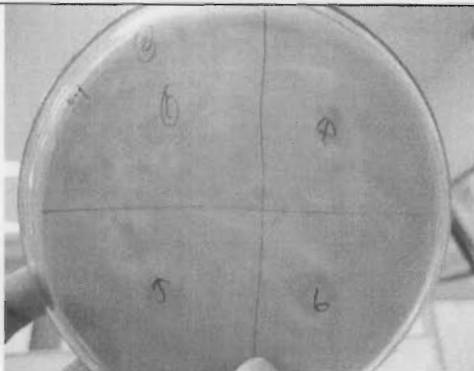
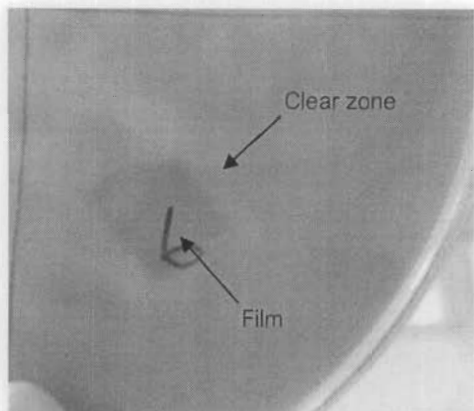
การทดสอบประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

ในงานวิจัยนี้ทดสอบประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียโดยทดสอบด้วยวิธีการแปรผลจากเกรตริ์คมีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียซึ่งถือเป็นการทดสอบเชิงคุณภาพ และในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบการยับยั้งด้วยเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* โดยผลของการทดสอบแสดงในตารางที่ 13

ตารางที่ 13 แสดงประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

สัดส่วน	ลักษณะการเกิดพื้นที่ปลอดเชื้อ (clear zone)	หมายเหตุ
(a)  4 = PLA : ES (9:1) 5 = PLA : ES (8:2) 6 = PLA : ES (7:3) 10 = ES powder		

ตารางที่ 8 (ต่อ)

สัดส่วน	ลักษณะการเกิดพื้นที่ปลอดเชื้อ (clear zone)		หมายเหตุ
(b)	 1 = PLA 4 = PLA : ES (9:1) 5 = PLA : ES (8:2) 6 = PLA : ES (7:3)	 	

ผลการทดสอบพบว่ารัศมีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียจากตารางที่ 13 โดยเปรียบเทียบจาก PLA, PLA : ES (9:1), PLA : ES (8:2), PLA : ES (7:3) และ ผงเปลือกไข่ (ES powder) พบว่ารัศมีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่เกิดขึ้นกับชุดทดสอบมีขนาดที่แตกต่างกัน จากตารางที่ 13(a) จะพบว่ารัศมีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียเกิดขึ้นบริเวณของ ES powder โดยเห็นได้อย่างชัดเจน เมื่อเทียบกับ PLA : ES (9:1), PLA : ES (8:2) และ PLA : ES (7:3) โดยสอดคล้องกับ Rai and Singh (2003) ที่ศึกษาผลของแคลเซียมคาร์บอเนตในพอลิแลคติกแอซิดพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตในพอลิแลคติกแอซิดจะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ของแบคทีเรียมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้น และยังพบว่าแคลเซียมคาร์บอเนตในพอลิแลคติกแอซิดนอกจากจะช่วยเป็นสารเพิ่มเนื้อพลาสติกแล้วยังเป็นสารเสริมแรงสำหรับพอลิแลคติกแอซิดอีกด้วย และจากรายงานเดียวกันนี้ ในกรณีของพอลิไวนิลคลอไรด์พบว่าการมีแคลเซียมคาร์บอเนตส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การลดลงของแบคทีเรียมีค่าสูงขึ้น และสูงขึ้นตามปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้น

และจากตารางที่ 13(b) เป็นชุดการทดสอบของ PLA, PLA : ES (9:1), PLA : ES (8:2), PLA : ES (7:3) ซึ่งบริเวณที่พบรัศมีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียเกิดขึ้นมากที่สุดคือ PLA : ES (7:3) เนื่องจาก PLA : ES (7:3) มีปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตมากที่สุด จึงทำให้เกิดประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อสูงที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบในตารางที่ 13 (a) ที่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันคือเกิดรัศมีการยับยั้งน้อยลงเมื่ออัตราส่วนการผสมของ ES น้อยลง และจากรายงานวิจัยของ Sahebian et al. (2009) ที่พบว่าแคลเซียมคาร์บอเนตมีผลต่อการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย โดยได้ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตลงในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงพบว่าที่ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตสูง(30%) มีเปอร์เซ็นต์การยับยั้งมากกว่าเมื่อเทียบกับที่ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตต่ำ(10%) จากงานวิจัยนี้จึงสรุปได้ว่าการผสมแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณที่สูงทำให้มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่สูงขึ้นตามไปด้วย