

บทที่ 4

ผลการวิจัย

ในการสังเคราะห์สารประกอบไดคาร์บอนิล (1-2) และไตรคาร์บอนิล (3) สำหรับเป็นสารเติมแต่งอินทรีย์เพื่อใช้ในการผสมกับพอลิเมอร์ชนิด LDPE และขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม โดยในแต่ละขั้นตอนจะต้องผ่านการวิเคราะห์ผลดังนี้ พิสูจน์เอกลักษณ์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค FT-IR, ^1H NMR และ ^{13}C NMR จากนั้นนำสารที่สังเคราะห์ได้แต่ละตัวไปผสมในพอลิเมอร์ LDPE ในอัตราส่วน 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้นนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มพลาสติก DOM/LDPE, DCM/LDPE และ TCM/LDPE แล้วจึงนำไปทดสอบสมบัติทางกายภาพด้วยเทคนิคต่างๆ ดังนี้ ทดสอบความแข็งแรงเชิงกลด้วยเทคนิค Tensile strength, ศึกษาการสั่นฐานและการกระจายตัวของสารผสมด้วยเทคนิค SEM, ศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของพอลิเมอร์แต่ละสูตรด้วยเทคนิค TGA และ DSC ศึกษาพฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์ (Rheology) และประสิทธิภาพในการป้องกันรังสี IR ด้วยเทคนิค UV/Vis/NIR spectroscopy

การสังเคราะห์และพิสูจน์เอกลักษณ์โครงสร้างทางเคมีของสารประกอบไดคาร์บอนิล (1-2) และไตรคาร์บอนิล (3)

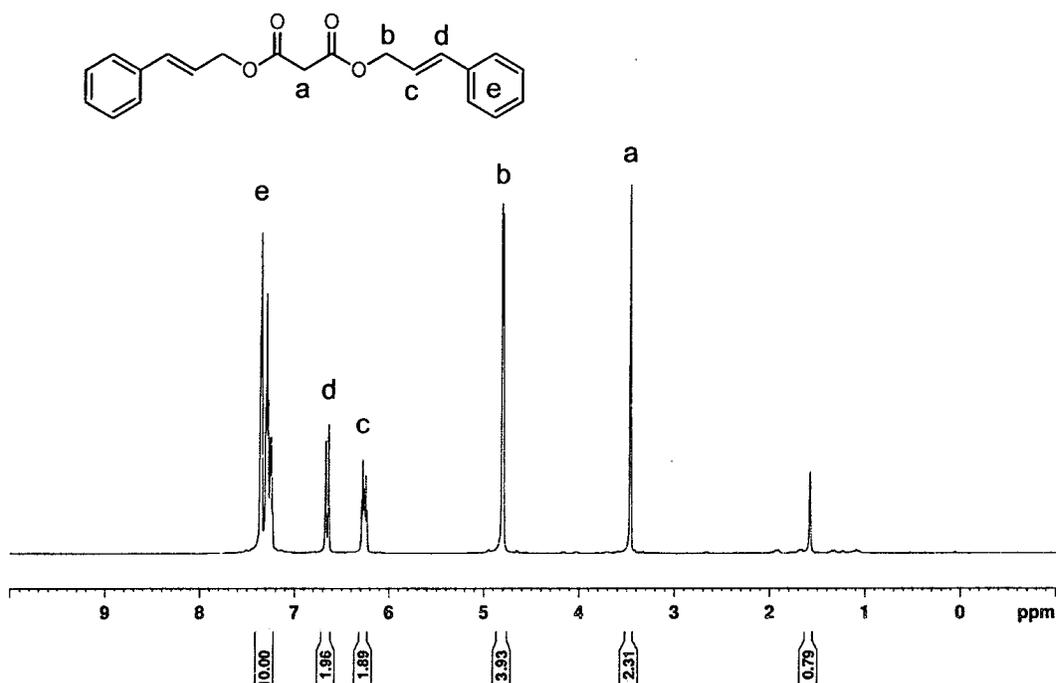
สารเติมแต่งอินทรีย์ช่วยลดการส่องผ่านรังสี IR ที่สังเคราะห์ขึ้นเป็นอนุพันธ์ของสารประกอบคาร์บอนิล แบ่งออกได้ 2 กลุ่ม คือ สารประกอบไดคาร์บอนิล (1-2) และสารประกอบไตรคาร์บอนิล (3) โดยทำการสังเคราะห์ผ่านปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างกรดคาร์บอกซิลิกและแอลกอฮอล์ โดยมี DCC ทำหน้าที่เป็น coupling reagent ทั้งนี้ DCC ทำหน้าที่กระตุ้นให้หมู่ OH เป็น leaving group ที่ดีขึ้นและทำให้เกิดพันธะเอสเทอร์เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งมีกลไกการเกิดปฏิกิริยา (ภาพ 60)

1. สารประกอบไดคาร์บอนิล (1-2)

1.1 ไดซินนามิลมาโลเนต (Dicinnamyl malonate, DCM) (1)

การสังเคราะห์ DCM (1) นั้นเป็นการออกแบบให้มีจำนวนของหมู่คาร์บอนิล 2 กลุ่ม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดกลืนพลังงานในช่วง IR ผ่าน enol form ของ 1, 3-dicarbonyl group และเพิ่มกลุ่มของ phenyl group ในโครงสร้างเพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างพลาสติกที่ไม่มีขั้วกับ DCM (1) เพิ่มความสามารถในการกระจายตัว และส่งผลให้ประสิทธิภาพในการคัดกรองรังสี IR เพิ่มขึ้น

ในการสังเคราะห์ DCM (1) สามารถทำได้โดยผ่านปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่าง 1 equivalence ของ malonic acid (4) กับ 2 equivalence ของ cinnamyl alcohol (5) โดยมี DCC เป็น coupling reagent [36] ภายในเวลา 24 ชั่วโมง จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นผลึกสีขาว โดยตกผลึกจากสารละลายเอทานอล คิดเป็นร้อยละ 90 ทั้งนี้เทคนิค $^1\text{H NMR}$, $^{13}\text{C NMR}$ และ FT-IR ถูกนำมาใช้เพื่อเป็นการยืนยันโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น

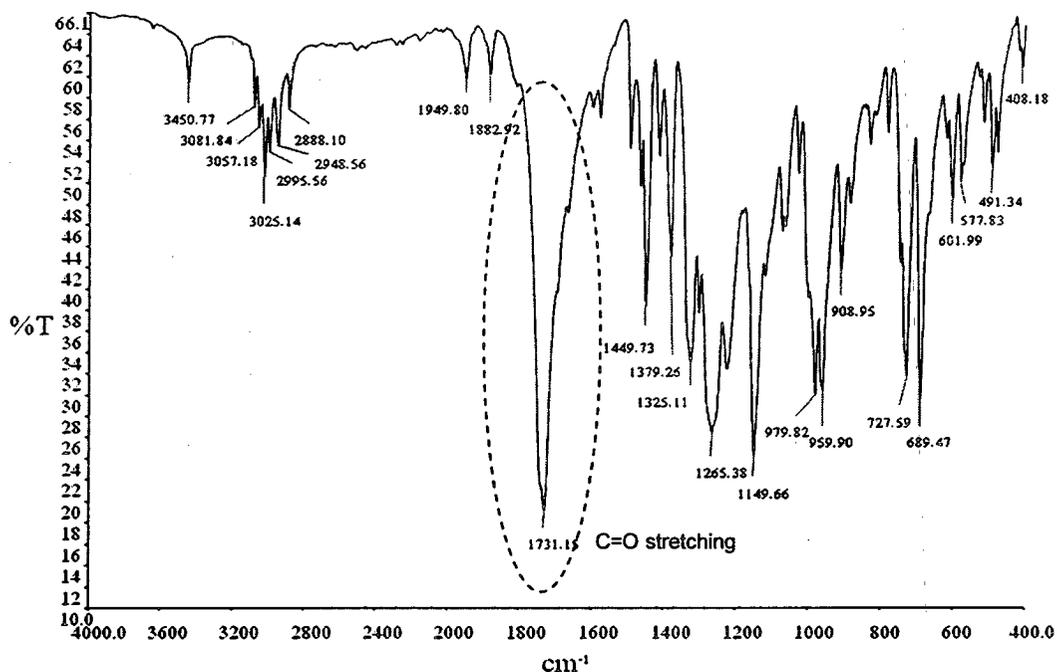


ภาพ 36 สเปกตรัม $^1\text{H NMR}$ ของ Dicinnamyl malonate, DCM (1)

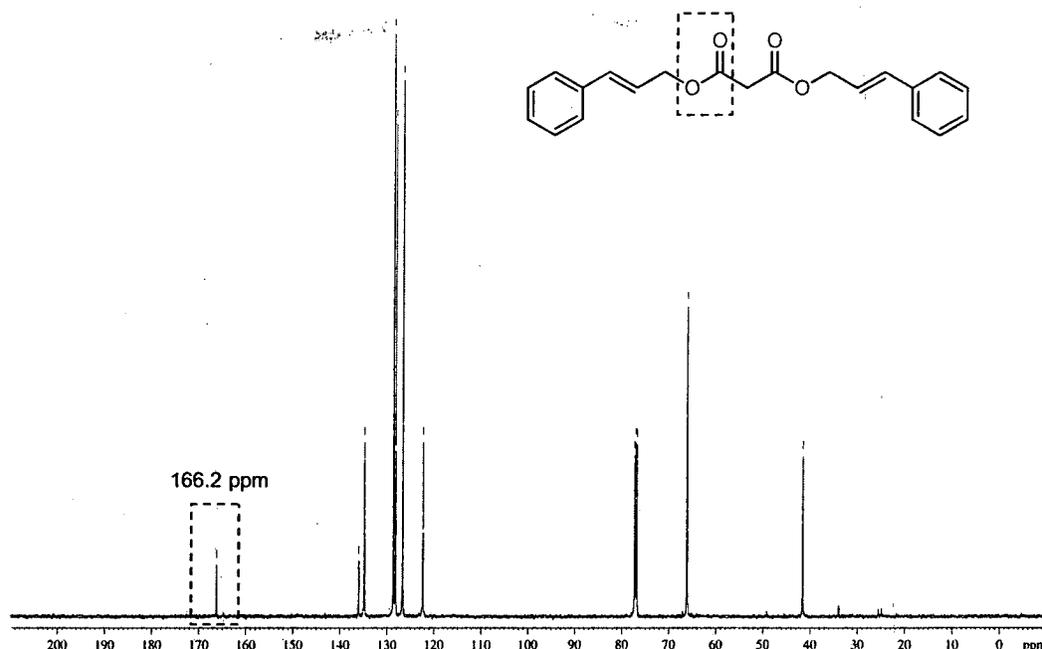
จาก $^1\text{H NMR}$ พบสัญญาณที่ตำแหน่ง δ 3.41 ppm (s, 2H) ซึ่งเป็นของ $-\text{CH}_2$ (a) จากส่วนของ malonic acid และที่ตำแหน่ง δ 4.80 ppm (d, 4H) ซึ่งเป็นของ $-\text{CH}_2$ (b) จากส่วนของ cinnamyl alcohol ที่ตำแหน่งติดกับพันธะ ester

สำหรับส่วน trans alkene unit ของ cinnamyl alcohol พบอยู่ในช่วง δ 6.25 ถึง 6.31 ppm (m, 2H) ซึ่งเป็นของ $-\text{CH}$ (c) และ ที่ δ 6.67 ppm (d, 2H) ซึ่งเป็นของหมู่ $-\text{CH}$ (d) และ ส่วนสุดท้ายหมู่ aromatic พบที่ตำแหน่ง 7.26-7.38 ppm (m, 10H) ของหมู่ aromatic (e) จาก cinnamyl alcohol (ภาพ 36)

เพื่อเป็นการยืนยันว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้ DCM (1) จริงสามารถใช้เทคนิค ^{13}C NMR และ FT-IR ตรวจสอบหาหมู่ ester ในโครงสร้างของสารที่สังเคราะห์ขึ้น จาก ^{13}C NMR สเปกตรัมพบสัญญาณที่ตำแหน่ง \square 166.2 ppm ของ carbonyl ester และ จาก FT-IR สเปกตรัมพบสัญญาณที่ 1731 cm^{-1} ของ C = O stretching (ภาพ 37 และ 38) เกิดขึ้น จากข้อมูลทั้งสองเทคนิค ทำให้สามารถยืนยันการเกิดของ DCM (1) ได้ ทั้งนี้วิธีการทำให้ DCM (1) บริสุทธิ์นั้น สามารถทำได้โดยการตกผลึกจากเฮกซานอล ทำให้สามารถทำการสังเคราะห์ได้ในระดับ multigram scale



ภาพ 37 สเปกตรัม FT-IR ของ Dicinnamyl malonate, DCM (1)



ภาพ 38 สเปกตรัม ^{13}C NMR ของ Dicinnamyl malonate, DCM (1)

1.2 ไดโอเลิลมาโลเนต (Dioleoyl malonate, DOM) (2)

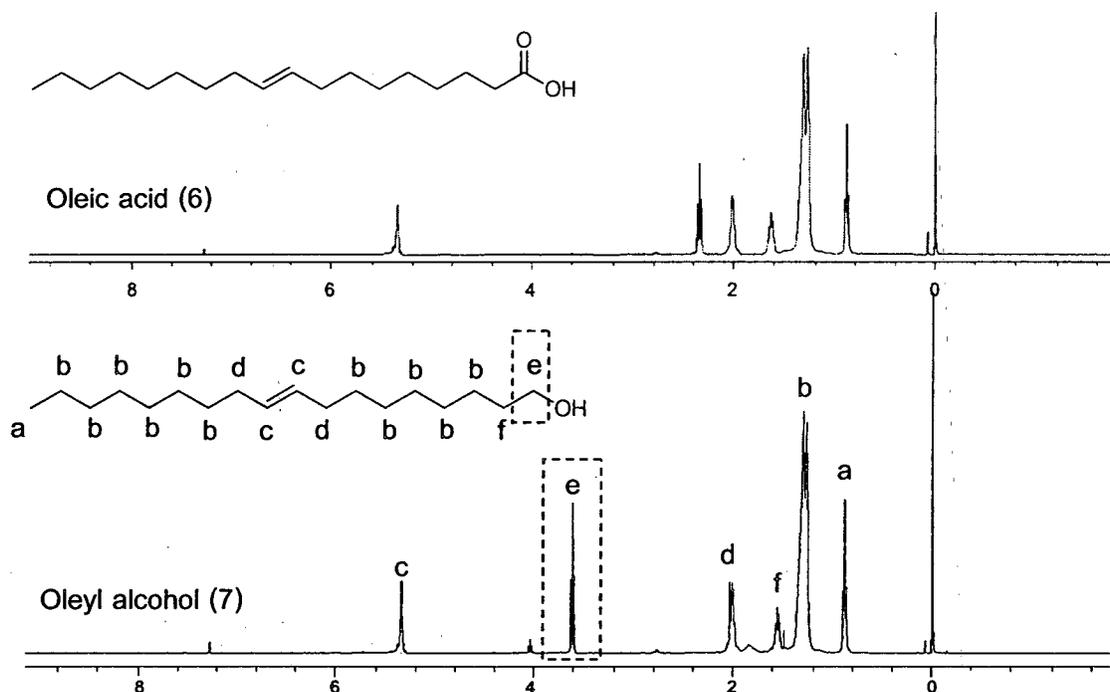
สำหรับการสังเคราะห์ DOM (2) นั้น เป็นการออกแบบที่ให้สารคงมีจำนวนของหมู่คาร์บอนเท่ากับ 2 หมู่เหมือนเดิม แต่เปลี่ยนกลุ่มแทนที่จาก phenyl เป็น long chain hydrocarbon เพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้กับเนื้อพอลิเมอร์ผ่าน hydrophobicity และเพิ่มความสามารถในการเกิดการเกี่ยวพันของสายโซ่พอลิเมอร์กับ long chain hydrocarbon unit ลดการเกิด blooming ของ additive ที่เติมลงไป

ในการสังเคราะห์สามารถทำได้โดยผ่าน 2 ขั้นตอน คือ ผ่านปฏิกิริยารีดักชันเพื่อรีดิวซ์ Oleic acid (6) ให้กลายเป็น Oleyl alcohol (7) จากนั้นนำ Oleyl alcohol (7) ที่ได้ไปทำการ coupling กับ malonic acid (4) ผ่านปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน และได้ผลิตภัณฑ์เป็น dioleoyl malonate (2)

ปฏิกิริยารีดักชัน

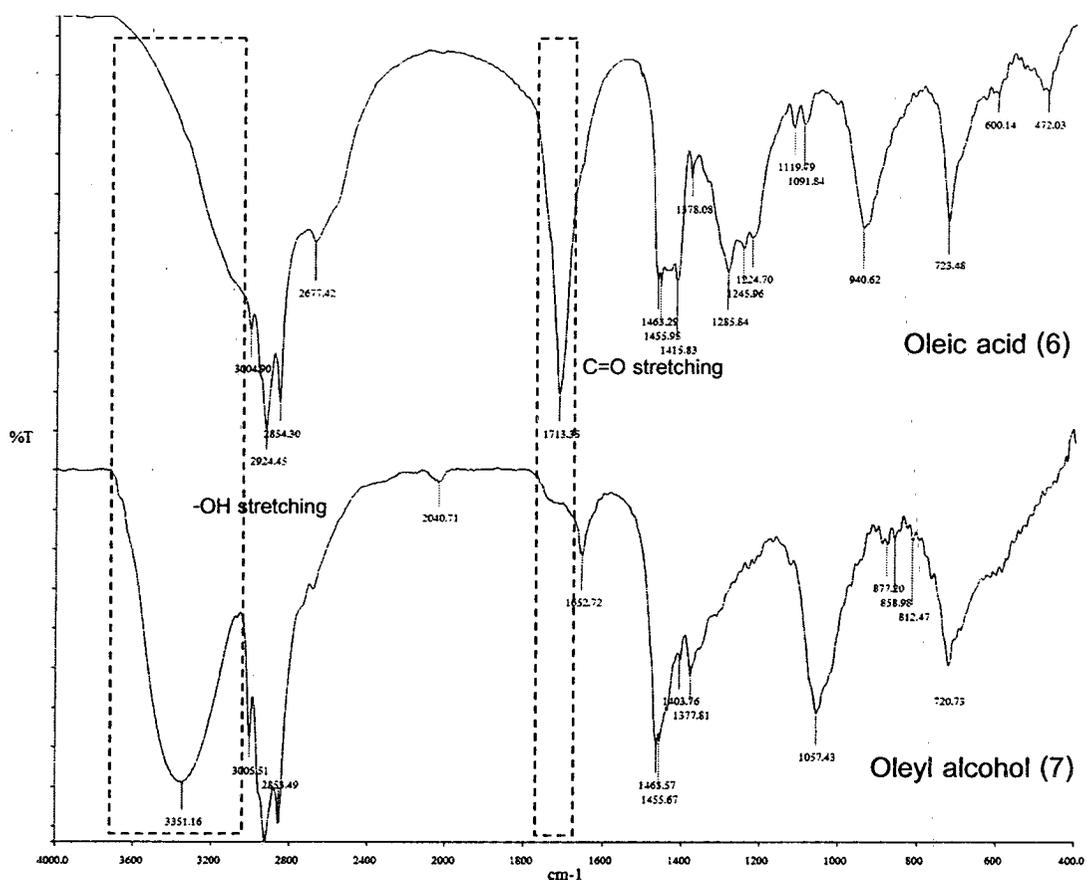
เนื่องจาก Oleic acid (6) ประกอบไปด้วยหมู่คาร์บอกซิลิกที่เกิดการรีดิวซ์ค่อนข้างยาก ดังนั้นในการสังเคราะห์จึงเลือกใช้ LiAlH_4 ซึ่งเป็น reducing agent ที่แรง [37] เพื่อให้ปฏิกิริยารีดักชันเปลี่ยนหมู่คาร์บอกซิลิกเป็นแอลกอฮอล์อย่างสมบูรณ์ (ภาพ 61) จากผลการวิเคราะห์

โครงสร้างทางเคมีของผลิตภัณฑ์ (7) ด้วยเทคนิค ^1H NMR พบสัญญาณของ $-\text{CH}_2$ (e) ที่ตำแหน่ง \square 3.61 ppm ซึ่งบ่งชี้ถึงการเกิดแอลกอฮอล์ปฐมภูมิของ oleyl alcohol (7) (ภาพ 39)



ภาพ 39 สเปกตรัม ^1H NMR ของ Oleic acid (6) และ Oleyl alcohol (7)

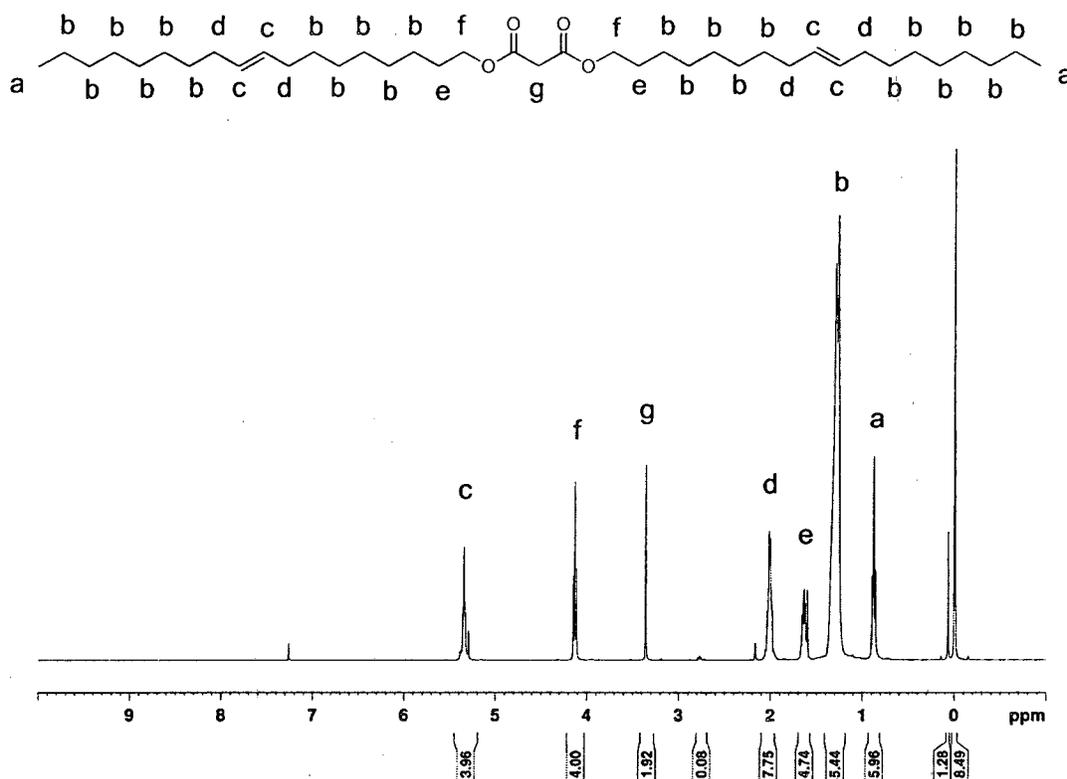
นอกจากนั้น ยังมีการยืนยัน oleyl alcohol (7) ด้วยเทคนิค FT-IR พบสัญญาณของ $-\text{OH}$ stretching ของแอลกอฮอล์เกิดขึ้นที่ 3351 cm^{-1} และไม่ปรากฏสัญญาณของหมู่ $\text{C}=\text{O}$ ของคาร์บอนิลที่ตำแหน่ง 1713 cm^{-1} (ภาพ 40) ถือว่าเป็นการเกิดปฏิกิริยารีดักชันอย่างสมบูรณ์



ภาพ 40 สเปกตรัม FT-IR ของ Oleic acid (6) และ Oleyl alcohol (7)

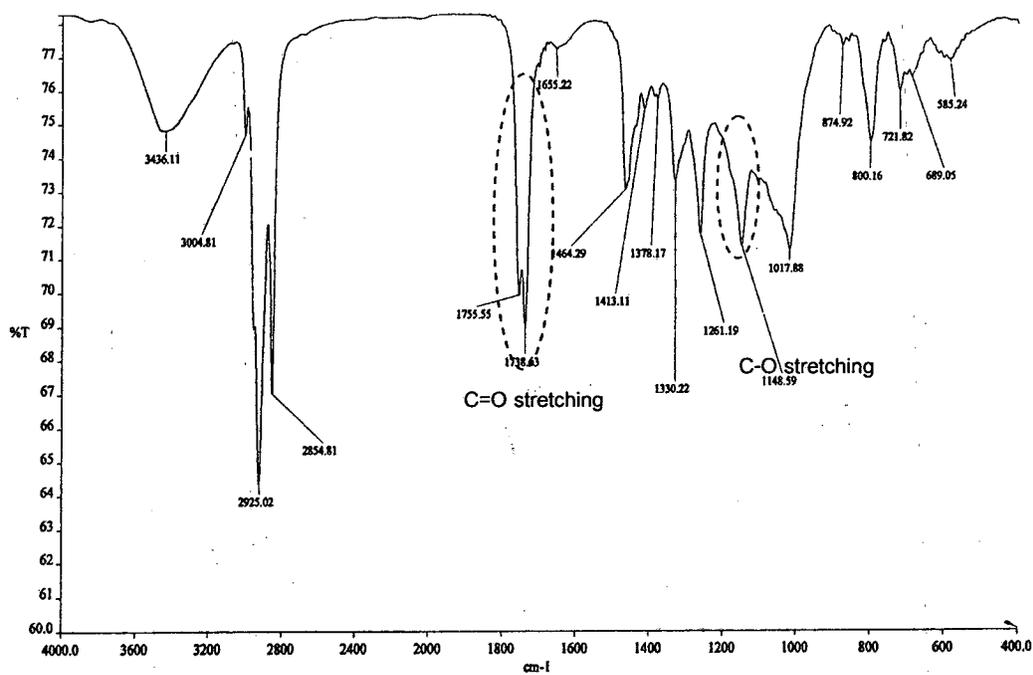
ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

ในการสังเคราะห์ DOM (2) จะใช้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน [39] ระหว่าง malonic acid (4) และ oleyl alcohol (7) โดยมี DCC เป็นตัว coupling reagent โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้ คิดเป็นร้อยละ 80 มีค่า $R_f = 0.64$ (100% CH_2Cl_2) ทั้งนี้พิสูจน์เอกลักษณ์ของโครงสร้างโดยเทคนิค $^1\text{H NMR}$ พบสัญญาณที่ตำแหน่ง δ 3.36 ppm (s, 2H) ซึ่งเป็น $-\text{CH}_2$ ของ malonic acid (4) และที่ตำแหน่ง δ 4.13 ppm (t, 4H) ซึ่งเป็นของ $-\text{CH}_2$ จากส่วนของ oleyl alcohol (7) ที่ติดกับพันธะ ester (ภาพ 41)

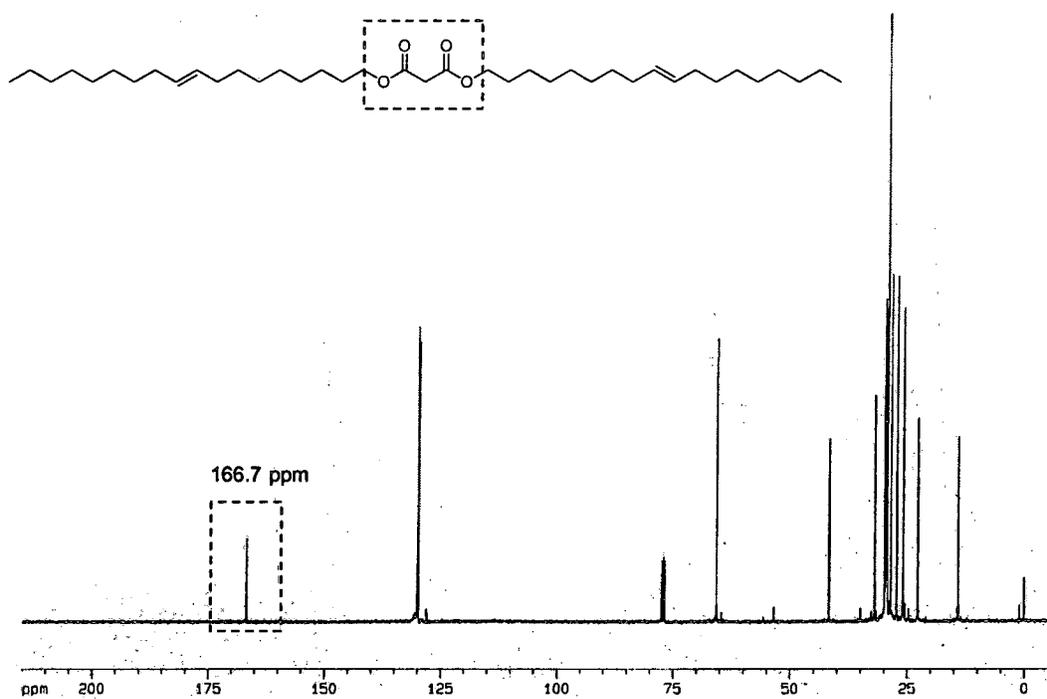


ภาพ 41 สเปกตรัม ^1H NMR ของ Dioleoyl malonate, DOM (2)

เพื่อยืนยันว่าเป็น DOM (2) ซึ่งเป็น ester นั้น ต้องใช้เทคนิค ^{13}C NMR และ FT-IR ในการยืนยันการเกิดของสาร DOM (2) แสดงดังสเปกตรัม (ภาพ 42, 43) จะพบเห็นตำแหน่งของสัญญาณ เกิดขึ้นที่ 1738 cm^{-1} และสัญญาณของ C-O stretching ที่ 1148 cm^{-1} ใน FT-IR spectrum และพบตำแหน่งของสัญญาณ ^{13}C NMR ที่ 166.7 ppm ของ carbonyl ester ซึ่งทั้งสองข้อมูลยืนยันไปในทิศทางเดียวกันว่ามีพันธะเอสเทอร์เกิดขึ้นในสารผลิตภัณฑ์ DOM (2)



ภาพ 42 สเปกตรัม FT-IR ของ Dioleoyl maonate, DOM (2)



ภาพ 43 สเปกตรัม ^{13}C NMR ของ Dioleoyl maonate, DOM (2)

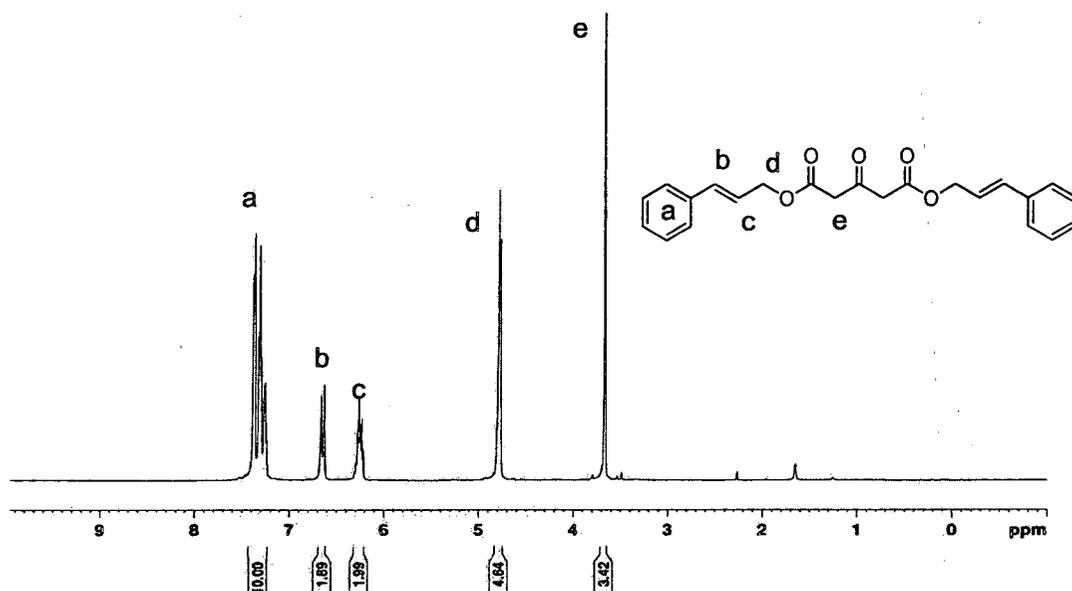
2. สารประกอบไตรคาร์บอนิล (3)

2.1 ไดซินามิล อะซิโตนไดคาร์บอกซิเลต (Dicinnamyl-3-acetonedicarboxylate, TCM) (3)

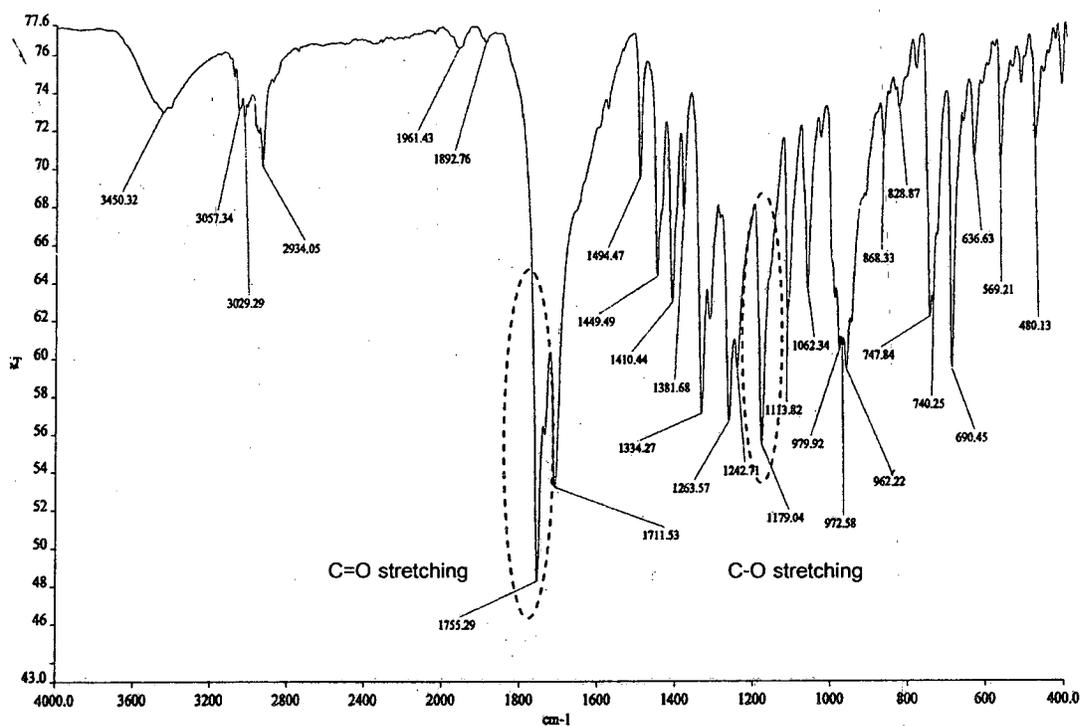
ในการสังเคราะห์ TCM (3) นั้นเป็นการเพิ่มจำนวนของหมู่คาร์บอนิลเป็น 3 กลุ่ม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดรังสี IR ได้ช่วงกว้างขึ้นและมีประสิทธิภาพมากขึ้น ผ่านการเกิด enol formation 2 ตำแหน่ง ในโครงสร้างเดียวกับ

ทั้งนี้สามารถทำการสังเคราะห์ผ่านปฏิกิริยาเอสเตอร์ฟิเคชันระหว่าง 1, 3-acetonedicarboxylic acid (8) กับ cinnamyl alcohol (5) และใช้ DCC เป็นตัว coupling reagent ของปฏิกิริยานี้ ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ คิดเป็นร้อยละ 83

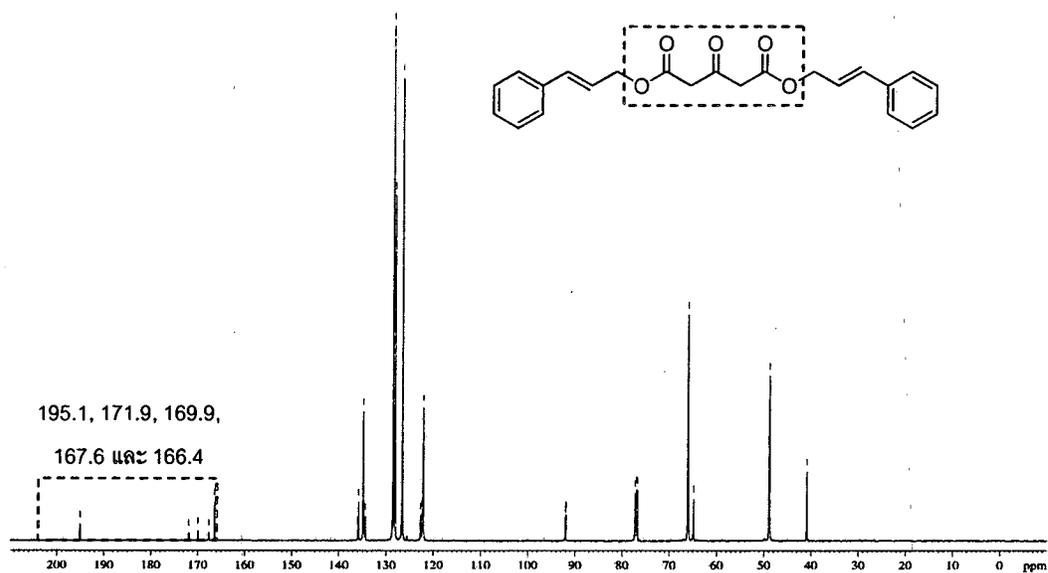
จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ของโครงสร้างเคมีด้วยเทคนิค ^1H NMR แสดงผลสเปกตรัม (ภาพ 44) พบสัญญาณที่ตำแหน่ง δ 3.66 ppm (s, 4H) ซึ่งเป็นของ $-\text{CH}_2-$ จากส่วนของ 1, 3-acetonedicarboxylic acid (8) และที่ δ 4.77 ppm (d, 4H) ซึ่งเป็นของ $-\text{CH}_2-$ จาก cinnamyl alcohol (5) ซึ่งติดกับพันธะ ester เพื่อเป็นการยืนยันการเกิดสาร TCM (3) ดังสเปกตรัม (ภาพ 45, 46) จึงได้ใช้เทคนิค FT-IR ที่และ ^{13}C NMR ในการวิเคราะห์ ester bond ทั้งนี้พบพีคของ $\text{C}=\text{O}$ stretching ของพันธะ ester เกิดขึ้นที่ 1755 cm^{-1} และพีค $\text{C}-\text{O}$ stretching ของพันธะ ester ที่ 1179 cm^{-1} รวมทั้งสัญญาณของ ^{13}C NMR ที่ตำแหน่ง δ 195.1, 171.9, 169.9, 167.6 และ 166.4 ซึ่งเป็นการยืนยันว่ามีคาร์บอนิล 2 กลุ่มเป็น ester และ 1 กลุ่มเป็น ketone



ภาพ 44 สเปกตรัม ^1H NMR ของสาร Dicinnamyl 1, 3-acetonedicarboxylate, TCM (3)



ภาพ 45 สเปกตรัม FT-IR ของ Dicinnamyl 1, 3-acetonedicarboxylate, TCM (3)



ภาพ 46 สเปกตรัม ^{13}C NMR ของ Dicinnamyl 1, 3-acetonedicarboxylate, TCM (3)

ผลการศึกษาสสมบัติในด้านต่างๆ ของฟิล์ม LDPE ที่มีสารประกอบไดคาร์บอนิล (1-2) และไตรคาร์บอนิล (3) เป็นสารเติมแต่ง

หลังจากที่ได้สารประกอบไดคาร์บอนิล DCM (1), DOM (2) และไตรคาร์บอนิล TCM (3) เป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่า การผสมสารเติมแต่งทุกชนิดลงในพอลิเมอร์บริสุทธิ์นั้นจะส่งผลกระทบต่อคุณลักษณะเฉพาะที่บ่งชี้ถึงลักษณะฐานที่เปลี่ยนแปลง อันเนื่องมาจากรูปแบบของโครงสร้างฐานของพอลิเมอร์ถูกรบกวน ตัวแปรสำคัญตัวแปรหนึ่งที่ใช้ในการบ่งบอกลักษณะที่เปลี่ยนแปลงของโครงสร้างฐานของพอลิเมอร์เมตริกซ์ ก็คือ สมบัติเชิงกล ที่บ่งชี้ถึงความสามารถในการต้านการถูกกระทำจากแรงภายนอก ในการวิเคราะห์ผลการทดลองของส่วนนี้จะใช้รูปแบบการให้แรงกระทำ ด้วยวิธีการแบบดึงยึดที่อุณหภูมิห้อง มาประยุกต์ใช้กับชิ้นงานตัวอย่างที่พัฒนาขึ้น ภายใต้วิทยานิพนธ์นี้

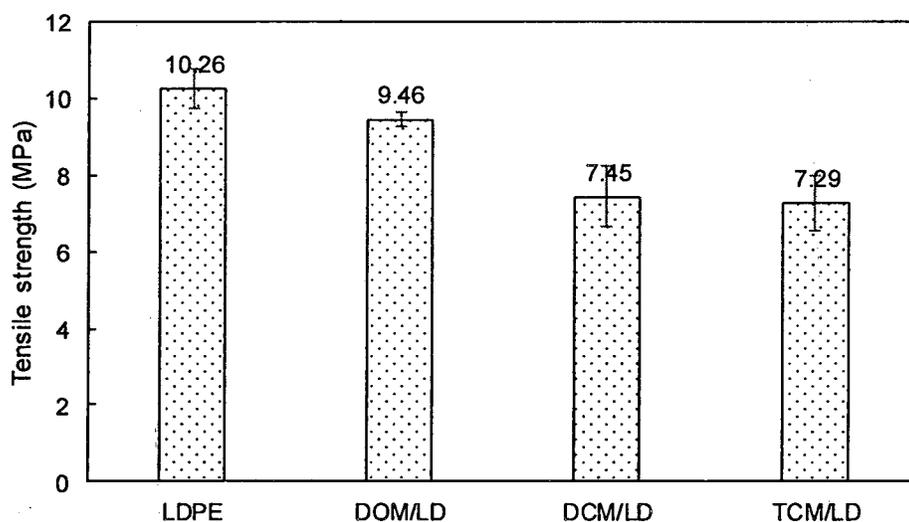
ในการทดลองได้ทำการผสมสารประกอบไดคาร์บอนิล (1-2) และไตรคาร์บอนิล (3) ที่มีลักษณะโครงสร้างโมเลกุลและขนาดของโมเลกุลแตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ DOM (1), DCM (2) และ TCM (3) ผสมลงในเนื้อ LDPE ที่ความเข้มข้นเดียวกัน คือ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยมีรหัสตัวอย่างของแต่ละสูตรดังนี้ LDPE ผสมสารประกอบ DCM (1) ปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก (DCM/LDPE) LDPE ผสมสารประกอบ DOM (2) ปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก (DOM/LDPE) LDPE ผสมสารประกอบ TCM (3) ปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก (TCM/LDPE)

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

จากการทดสอบและวิเคราะห์หาค่าสมบัติเชิงกล ตามมาตรฐาน ASTM D882 ดังแสดงผลการทดลองในภาพ 47-49 พบว่าการลดลงของประสิทธิภาพทางเชิงกลของชิ้นงานตามลำดับ ดังนี้ LDPE > DOM/LDPE > DCM/LDPE > TCM/LDPE

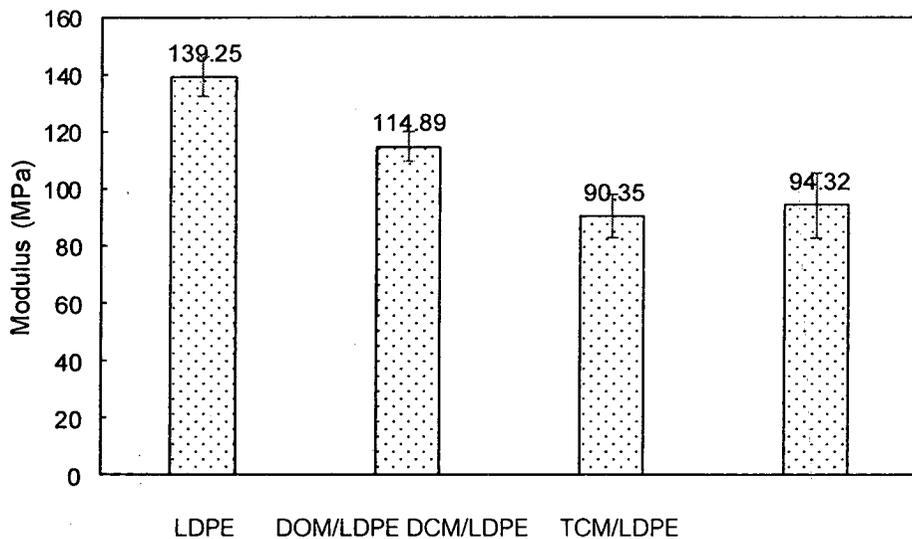
ในการลดลงของประสิทธิภาพในการต้านแรงกระทำแบบดึงยึดนี้ อาจเป็นผลของการผสมสารเติมแต่ง ที่มีขนาดโมเลกุลแตกต่างกัน ขณะผสมเกิดการเกี่ยวพันกันระหว่างสายโซ่แบบ entanglement กับโมเลกุลของ LDPE ก่อให้เกิดช่องว่างเล็กจำนวนมากระหว่างสายโซ่โมเลกุลของ LDPE โดยที่โมเลกุลของ DOM ซึ่งมีขนาดเล็กสามารถสอดแทรกและกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอที่ระหว่างสายโซ่โมเลกุลของ LDPE ผนวกด้วยการมีขนาดเล็กมากจึงมีแรงกระทำที่พื้นผิวหน้าตัดของอนุภาค DOM (2) กับพื้นผิวของ LDPE ได้ในสัดส่วนที่สูง เมื่อเทียบกับชิ้นงาน DCM/LDPE และ TCM/LDPE ที่ผสมสารประกอบ DCM (1) และ TCM (3) ซึ่งมีขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้นตามลำดับ การที่อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น อาจส่งผลกระทบต่อชิ้นงานที่พัฒนาขึ้น เนื่องจากการมีขนาดอนุภาคไม่เล็กมากนักนั้น นอกจากจะเกิดปรากฏการณ์การเกาะกลุ่มเป็นก้อนระหว่างอนุภาคด้วยตัวเอง [40] สูญเสียประสิทธิภาพการกระจายอย่างสม่ำเสมอ

ในเนื้อ LDPE เมตริกซ์ และเกิดการลดลงของพื้นที่ผิวที่ก่อให้เกิดแรงกระทำระหว่างพื้นผิวอนุภาค กับผิว LDPE แล้ว ยังก่อให้เกิด ช่องว่างขนาดใหญ่ที่ส่งผลต่อการเกิดรอยแยกระหว่างเฟส นำไปสู่ การลดลงของสมบัติเชิงกล พบว่า มีการลดลงของประสิทธิภาพการต้านทานแรงกระทำแบบดึงยึด ประมาณร้อยละ 7.8-28.9 (ภาพ 47)



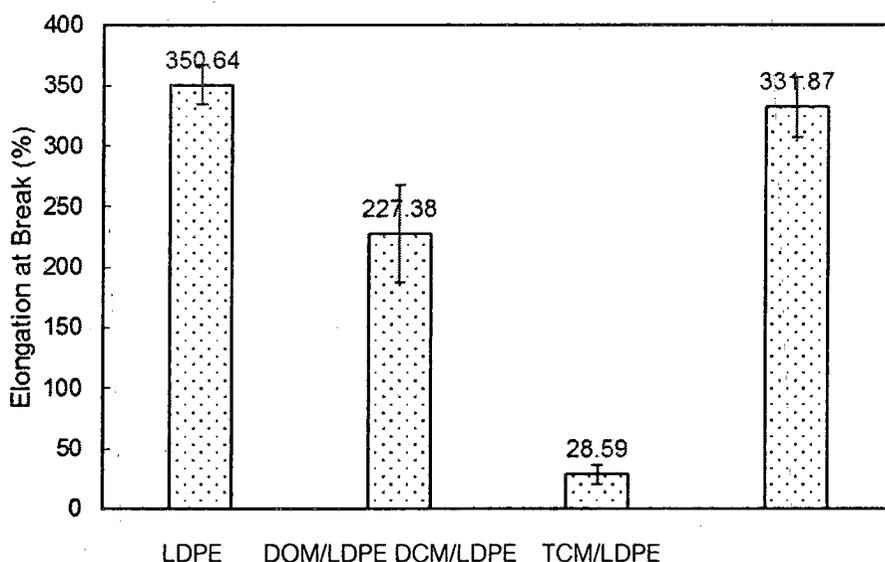
ภาพ 47 ความต้านทานแรงดึงของฟิล์ม LDPE และฟิล์ม LDPE ที่มีการเติมสารประกอบ ไตคาร์บอนิล (1-2) และไตรคาร์บอนิล (3) DOM/LDPE, DCM/LDPE และ TCM/LDPE

ผลของมอดูลัสของฟิล์ม LDPE, DOM/LDPE, DCM/LDPE และ TCM/LDPE (ภาพ 48) มีความสอดคล้องกับค่าความต้านทานแรงดึงของฟิล์มขึ้นงานตัวอย่างฟิล์ม LDPE บริสุทธิ์ (LDPE) จะมอดูลัสมากที่สุด ในขณะที่ฟิล์มคอมโพสิต DOM/LDPE, DCM/LDPE และ TCM/LDPE จะมีค่าลดลง โดยฟิล์ม LDPE ที่มีการเติมสารประกอบ DOM (2) (DOM/LDPE) จะมีค่ามอดูลัสลดลงประมาณร้อยละ 11.49 และฟิล์ม LDPE ที่มีการเติมสารประกอบ DCM (1) และ TCM (3) (DCM/LDPE และ TCM/LDPE) จะมีค่ามอดูลัสลดลงประมาณร้อยละ 35.11 และ 32.26 ตามลำดับ



ภาพ 48 มอดูลัสของฟิล์ม LDPE และฟิล์ม LDPE ที่มีการเติมสารประกอบไดคาร์บอนิล (1-2) และไตรคาร์บอนิล (3) DOM/LDPE, DCM/LDPE และ TCM/LDPE

นอกจากสมบัติเชิงกลที่แสดงค่าทางความสามารถในการต้านแรงกระทำจากภายนอกแบบดึงยืด และค่าแสดงความแข็งแรง (มอดูลัส) ยังพบว่า ในการแสดงผลถึงประสิทธิภาพของสมบัติเชิงกลนั้น จำเป็นต้อง แสดงค่าความแข็งแรงในรูปแบบของ ความสามารถในการถูกดึงยืดอีกด้วย ดังนั้นในส่วนนี้จึงได้วิเคราะห์ผลการตอบสนองต่อสมบัติเชิงกลในรูปแบบของการแสดงค่าความสามารถในการถูกดึงยืด จากการวิเคราะห์และประเมิน แสดงผลการทดสอบใน (ภาพ 49) พบว่า LDPE ที่ไม่ได้ผสมสารเติมแต่งใดๆ มีความสามารถในการดึงยืดได้สูงสุดประมาณร้อยละ 350.64 ในขณะเดียวกัน พบการลดลงของความสามารถในการดึงยืดของฟิล์ม DOM/LDPE, DCM/LDPE และ TCM/LDPE โดยที่ TCM/LDPE มีความสามารถในการดึงยืดได้ร้อยละ 331.87 DOM/LDPE มีความสามารถในการดึงยืดได้ร้อยละ 227.38 และ DCM/LDPE มีความสามารถในการดึงยืดได้ร้อยละ 28.59 ซึ่งมีความสามารถในการดึงยืดที่น้อยที่สุด อาจเป็นผลเนื่องมาจากสารประกอบ DCM (1) สามารถเกิดเป็นผลึกในฟิล์ม LDPE ได้ ซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากผลการทดสอบ DSC (ภาพ 52) ผลึกที่เกิดขึ้นจะทำหน้าที่ขัดขวางการเลื่อนผ่านของสายโซ่ LDPE ทำให้ความสามารถในการดึงยืดต่ำ ในขณะที่สารประกอบ DOM (2) และ TCM (3) ไม่เกิดปรากฏการณ์การก่อแบบผลึกได้ในฟิล์ม LDPE

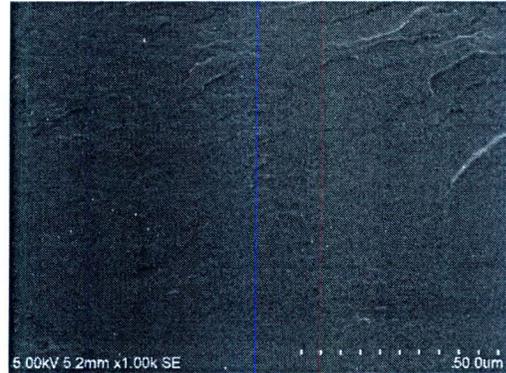


ภาพ 49 ความสามารถในการดึงยึดของฟิล์ม LDPE และฟิล์ม LDPE ที่มีการเติมสารประกอบไดคาร์บอนิล (1-2) และไตรคาร์บอนิล (3) 10% โดยน้ำหนัก DOM/LDPE, DCM/LDPE และ TCM/LDPE

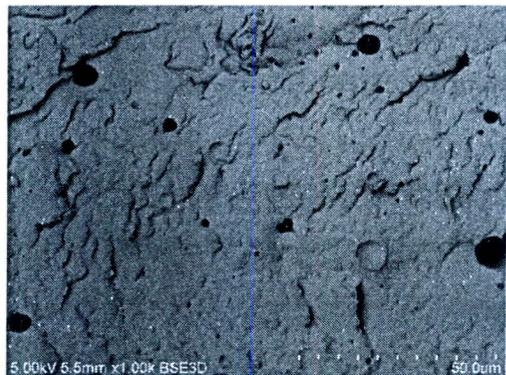
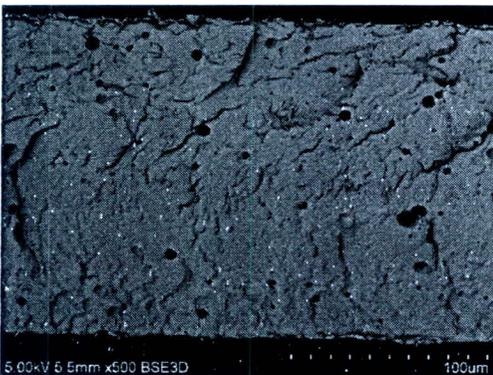
ผลการศึกษาโครงสร้างพื้นฐาน

การศึกษาลักษณะการกระจายตัวและการแทรกอยู่ในฟิล์ม LDPE ของสารประกอบคาร์บอนิล (1-3) โดยการหักตัวอย่างฟิล์มในไนโตรเจนเหลว หลังจากนั้นนำชิ้นงานฟิล์มที่ถูกหักไปแช่ในสารละลาย CH_2Cl_2 เพื่อให้สารประกอบ DCM (1), DOM (2) และ TCM (3) ถูกสกัดออกมา เป็นเวลานาน 72 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำผิวชิ้นฟิล์มที่ถูกหักไปเคลือบทอง และตรวจสอบการกระจายตัวของสารประกอบคาร์บอนิล (1-3) ด้วยเทคนิค SEM (ภาพ 50) พบว่า ลักษณะผิวฟิล์มของ LDPE ที่ไม่มีการเติมสารประกอบคาร์บอนิลมีลักษณะเป็นผิวเรียบ ขณะที่ฟิล์ม DCM/LDPE พบว่า เกิดการหลุดออกของสารประกอบ DCM (1) มีลักษณะเป็นหลุมกลม กระจายโดยทั่วทั้งผิวฟิล์ม โดยมีทั้งขนาดใหญ่และขนาดเล็ก สามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนในการใช้เทคนิคการส่องแบบ Backscattered electrons แสดงให้เห็นว่าสารประกอบ DCM (1) กระจายตัวได้ไม่ค่อยดีในเฟสของ LDPE อาจเนื่องมาจากสารประกอบ DCM (1) สามารถเกิดผลึกได้ดี ดังแสดงผลในสมบัติเชิงความร้อนด้วยเทคนิค DSC (ภาพ 52) จึงชอบที่จะรวมกลุ่มกันอยู่ในเฟสของ LDPE เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์ม TCM/LDPE พบว่าสารประกอบ TCM (3) สามารถกระจายตัวอย่างทั่วถึง (homogeneous) ในเฟสของ LDPE ขณะที่ฟิล์ม DOM/LDPE ไม่พบการมีอยู่ของสารประกอบ DOM (2) เลย ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบเชิงความร้อนโดยเทคนิค TGA (ภาพ 53) เนื่องจากสารประกอบ

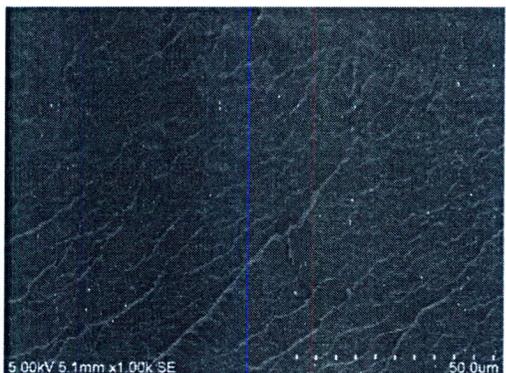
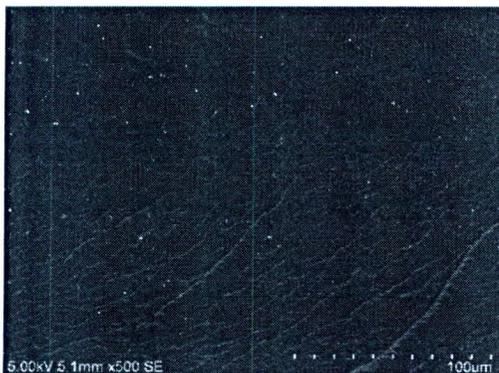
DOM (2) มีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำมากที่ประมาณ 1.6 องศาเซลเซียส ดังนั้นในระหว่างกระบวนการผลิตฟิล์ม ซึ่งใช้ความร้อนสูงถึง 160 องศาเซลเซียส สารประกอบ DOM (2) จึงเกิดการสลายตัวในระหว่างกระบวนการผลิต



LDPE

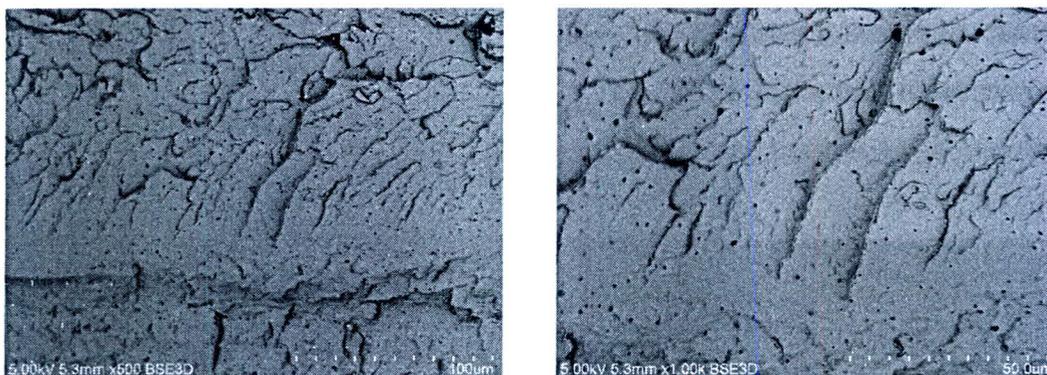


DCM/LDPE



DOM/LDPE

ภาพ 50 ภาพ SEM ของฟิล์ม LDPE และฟิล์ม LDPE ที่มีการเติมสารประกอบ
โดคาร์บอนิล (1-2) และไตรคาร์บอนิล (3) 10% โดยน้ำหนัก DOM/LDPE,
DCM/LDPE และ TCM/LDPE

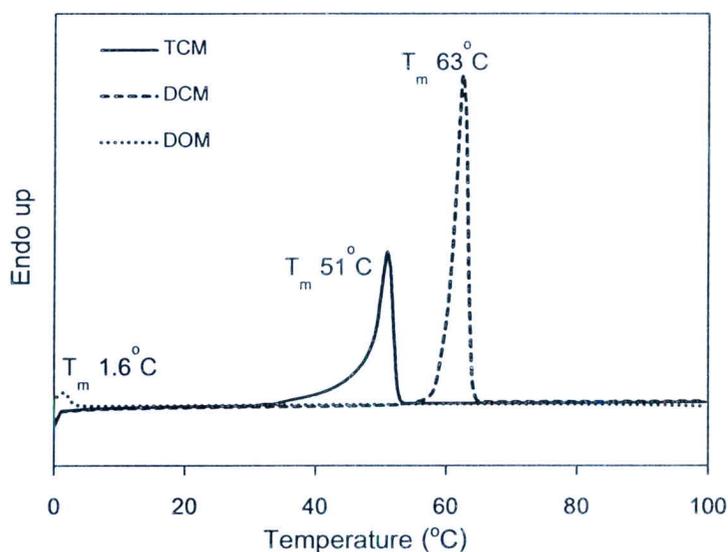


TCM/LDPE

ภาพ 50 (ต่อ)

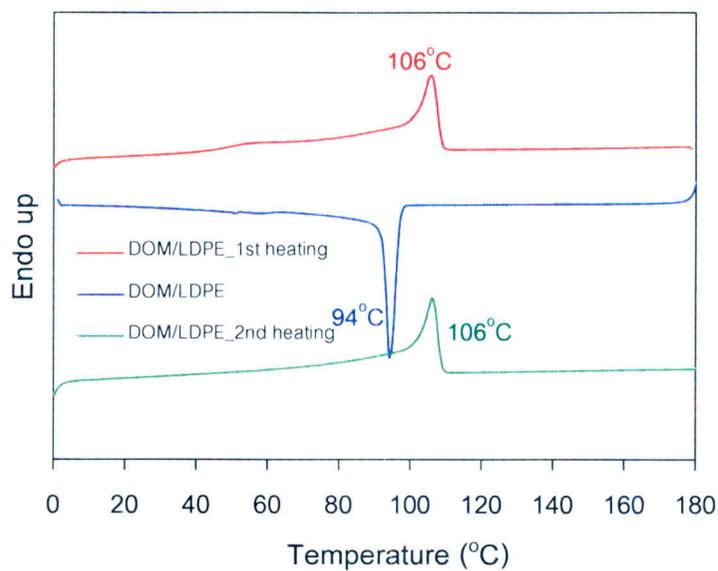
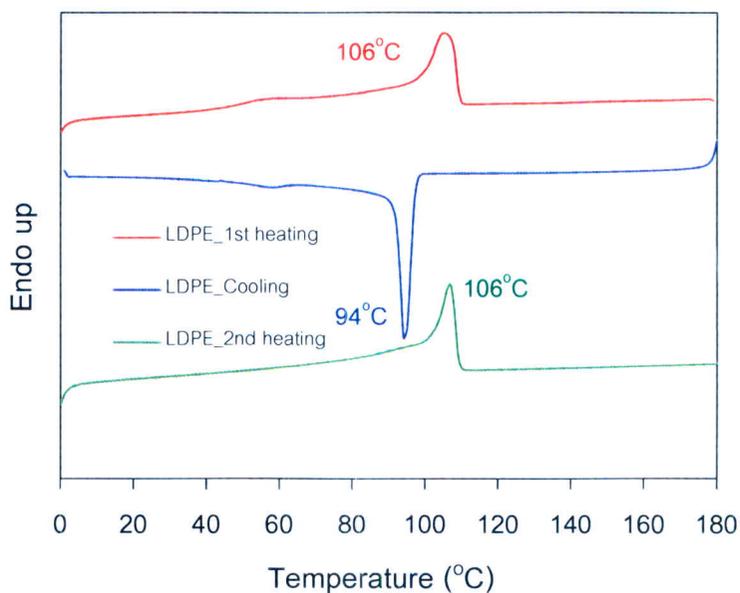
ผลการศึกษสมบัติเชิงความร้อน

ในการศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของสารประกอบไดคาร์บอนิล (1-2) และไตรคาร์บอนิล (3) เพื่อวิเคราะห์อุณหภูมิหลอมเหลวของสารประกอบคาร์บอนิลแต่ละตัว (ภาพ 51) พบว่าสารประกอบ DCM (1) แสดงอุณหภูมิหลอมเหลวที่ 62.67 องศาเซลเซียส และมีการกระจายตัวของขนาดผลึกที่แคบ แสดงให้เห็นว่ามีความสามารถในการเกิดผลึกได้ดี มีสถานะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง สารประกอบ TCM (3) มีค่าอุณหภูมิหลอมเหลวที่ 51 องศาเซลเซียส มีสถานะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง มีการกระจายตัวของขนาดผลึกที่กว้าง โดยสารประกอบ TCM (3) เริ่มมีการหลอมตั้งแต่อุณหภูมิเพียง 30 องศาเซลเซียส ขณะที่สารประกอบ DOM (2) มีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำเพียง 1.6 องศาเซลเซียส ซึ่งมีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง

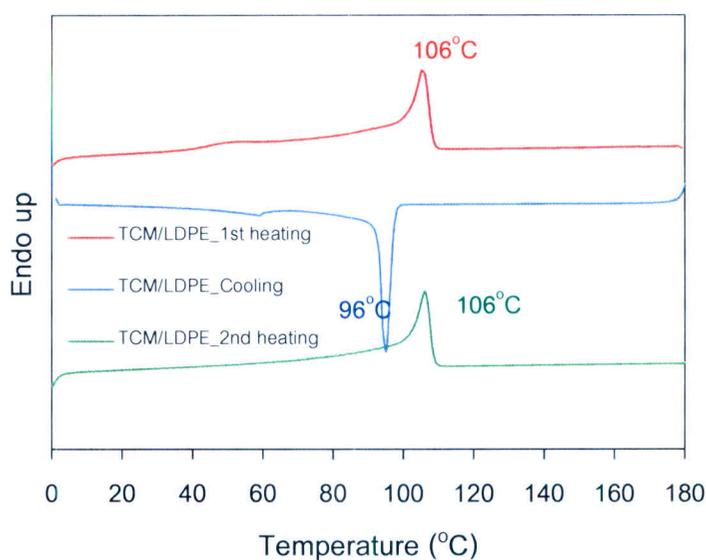
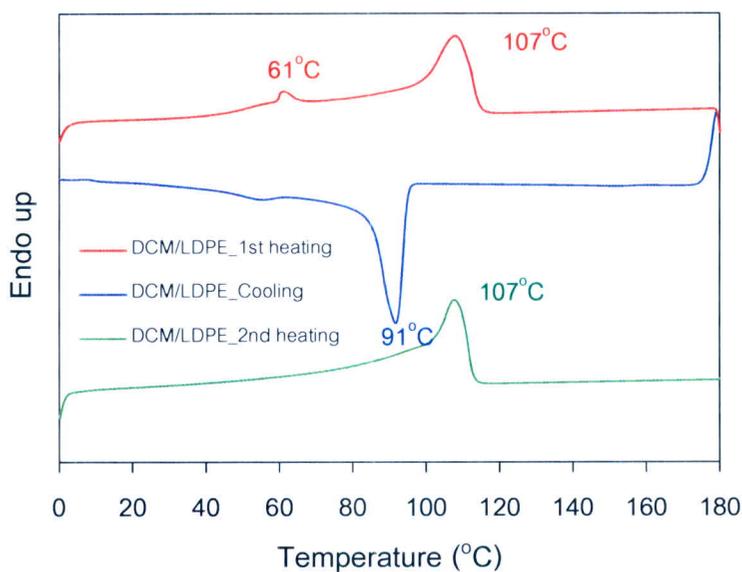


ภาพ 51 เทอร์โมแกรม DSC ของสารประกอบ DCM (1), DOM (2) และ TCM (3)

การศึกษสมบัติเชิงความร้อนของฟิล์ม LDPE ที่มีการเติมสารประกอบคาร์บอนิล (1-3) เพื่อศึกษาผลของการเติมสารประกอบไดคาร์บอนิล (1-2) และไตรคาร์บอนิล (3) ที่มีผลต่อการเกิดผลึกของพอลิเอทิลีน จากผลการทดสอบโดยเทคนิค DSC (ภาพ 52) พบว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของ LDPE เมื่อเปรียบเทียบ LDPE กับ LDPE ที่มีการเติมสารประกอบคาร์บอนิล (1-3) ได้แก่ DOM/LDPE, DCM/LDPE และ TCM/LDPE มีค่าประมาณ 105 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าการเติมสารประกอบคาร์บอนิลไม่ส่งผลต่อการเกิดผลึกของ LDPE อย่างไรก็ตามการเติมสารประกอบ DCM (1) จะสังเกตได้ว่า มีผลึกเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 59 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าสารประกอบ DCM (1) สามารถเกิดผลึกแทรกอยู่ในโมเลกุลของพอลิเอทิลีนได้ โดยสารประกอบ DOM (2) และ TCM (3) ไม่สามารถเกิดผลึกเหมือนสารประกอบ DCM (1) ได้



ภาพ 52 เทอร์โมแกรม DSC ของฟิล์ม LDPE และฟิล์ม LDPE ที่มีการเติมสารประกอบ
ไตรคาร์บอนิล (1-2) และไตรคาร์บอนิล (3) 10% โดยน้ำหนัก DOM/LDPE,
DCM/LDPE และ TCM/LDPE

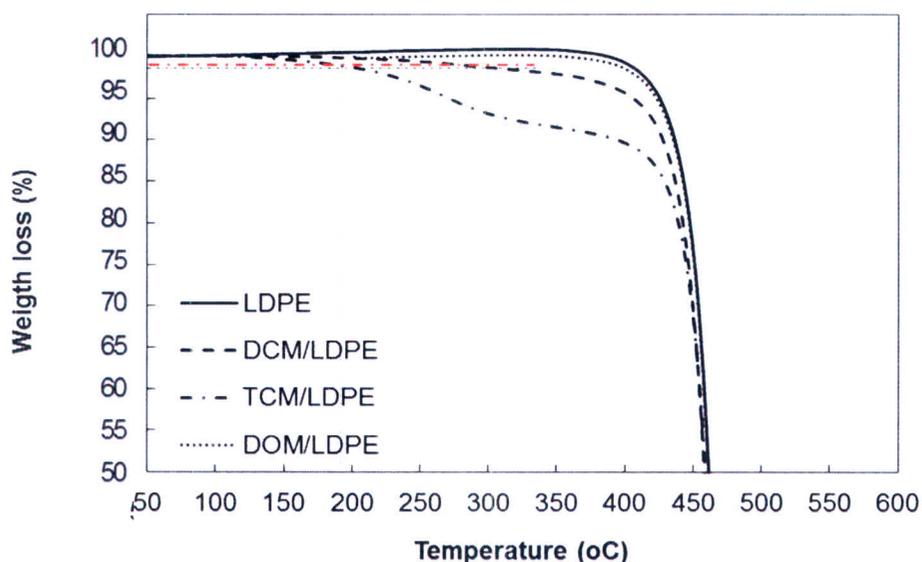


ภาพ 52 (ต่อ)

จากการศึกษาวิเคราะห์ ประสิทธิภาพการสลายตัวทางความร้อนของ LDPE คอมโพลีเมอร์ ได้แก่ DOM/LDPE, DCM/LDPE และ TCM/LDPE จากเทคนิค TGA (ภาพ 53) พบว่า ฟิล์ม LDPE เริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 380 องศาเซลเซียส ขณะที่ฟิล์ม DCM/LDPE เริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส และฟิล์ม TCM/LDPE เริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส และปรากฏว่ามีการสลายตัวหมดอย่างรวดเร็ว เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราเร็วการสลายตัวของ DCM/LDPE และ LDPE ตามลำดับ จากลักษณะการสลายตัวของ TCM/LDPE ที่มีอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนต่ำนั้น อาจมีสาเหตุมาจากการที่สารประกอบ TCM (3) มีการกระจาย

ตัวอยู่ในเนื้อของ LDPE ได้ดีกว่าสารประกอบ DCM (1) เมื่อขึ้นงานตัวอย่างได้รับความร้อน ในช่วงแรก โมเลกุลของ LDPE จะยังไม่สลายตัว เนื่องจากการที่ LDPE เป็นพอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ แต่จะทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนไปยังโมเลกุลของสารประกอบ TCM (3) ซึ่งกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอในเนื้อ LDPE เมื่อความร้อนถูกถ่ายเทที่ประมาณ 190 องศาเซลเซียส โมเลกุลของสารประกอบ TCM (3) จะเริ่มเกิดการสลายตัวให้เห็น เมื่อพิจารณาการประเมินผลการสลายตัวของ DCM/LDPE พบว่ามีการสลายตัวที่ค่อนข้างคงที่และช้ากว่า TCM/LDPE ด้วยเหตุผลที่ว่า สารประกอบ DCM (1) มีการกระจายตัวที่ไม่ดีในเนื้อ LDPE และเกิดการรวมกลุ่มกันอย่างชัดเจน (ภาพ 50) ทำให้ความร้อนที่ถูกถ่ายเทผ่าน LDPE ไปยัง DCM (1) ใช้เวลานานกว่า จึงทำให้ DCM/LDPE มีอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวสูงกว่า TCM/LDPE

ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ค่าการสลายตัวของสารนี้ นอกจากจะใช้ช่วยประเมินลักษณะหรือรูปแบบการกระจายตัวของอนุภาคแล้ว ยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการ วิเคราะห์ปริมาณของสารประกอบคาร์บอนิลที่สามารถแทรกอยู่ใน LDPE ได้อีกด้วย จากการ วิเคราะห์ ปริมาณคงเหลือของ อนุภาค ของฟิล์มขึ้นงานตัวอย่างของ LDPE ผสม 10% โดยน้ำหนักของสารประกอบ DCM (1) และ TCM (3) พบว่าสารประกอบ DCM (1) มีปริมาณเหลืออยู่ในฟิล์มเพียงร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ขณะที่สารประกอบ TCM (3) มีปริมาณเหลืออยู่ในฟิล์มร้อยละ 9 โดยน้ำหนัก เนื่องมาจากในระหว่างกระบวนการผสมระหว่าง LDPE และสารประกอบคาร์บอนิล ต้องผ่านความร้อนและแรงเฉือนจากสกรูในกระบวนการผสมและขึ้นรูป ทำให้สารประกอบคาร์บอนิลบางส่วนเกิดการสลายตัวไปขณะอยู่ในกระบวนการผสม อย่างไรก็ตามพบว่า สารประกอบ TCM (3) มีการสูญเสียในระหว่างการผสมและขึ้นรูปน้อยกว่าสารประกอบ DCM (1) อาจเป็นผลเนื่องมาจากโมเลกุลของ TCM (3) มีขนาดใหญ่กว่าสารประกอบ DCM (1) ทำให้ทนทานต่อการสลายตัวทางความร้อนได้ดีกว่า



ภาพ 53 การสลายตัวทางความร้อนของฟิล์ม LDPE และฟิล์ม LDPE ที่มีการเติมสารประกอบไดคาร์บอนิล (1-2) และไตรคาร์บอนิล (3) 10% โดยน้ำหนัก DOM/LDPE, DCM/LDPE และ TCM/LDPE

จากผลการทดสอบฟิล์ม LDPE และฟิล์ม LDPE ที่มีการเติมสารประกอบคาร์บอนิล (1-3) 10 % โดยน้ำหนัก DOM/LDPE, DCM/LDPE และ TCM/LDPE ด้วยเทคนิค TGA และ SEM นั้น ทำให้ทราบถึงความสามารถในการผสมเข้ากันได้ระหว่างสารประกอบคาร์บอนิล (1-3) ที่สังเคราะห์ขึ้นและพอลิเมอร์ชนิด LDPE ในเบื้องต้น หากพิจารณาจากภาพ SEM ที่ส่องด้วยกำลังขยายเท่ากัน จะเห็นร่องรอยการหลุดออกของสารประกอบ DCM (1) และ TCM (3) ทำให้บนเนื้อ LDPE เกิดเป็นลักษณะหลุมทั่วทั้ง LDPE อย่างชัดเจน แต่กลับไม่พบร่องรอยการใดๆ ในเนื้อ LDPE ซึ่งอาจจะสันนิษฐานได้ 2 ทาง คือ สารประกอบ DOM (2) เข้ากับเนื้อ LDPE ได้ดีมาก จนไม่สามารถสกัดให้สารหลุดออกมาได้หรือสารประกอบ DOM (2) ไม่สามารถผสมเข้าไปในเนื้อ LDPE ได้เลยจึงไม่ปรากฏร่องรอยการหลุดออกของสารในเนื้อ LDPE

ดังนั้นเพื่อเป็นการยืนยันถึงการมีอยู่สารเหล่านี้ในเนื้อ LDPE จึงได้ใช้เทคนิค TGA เพื่อดูเปอร์เซ็นต์ค่าการสลายตัวทางความร้อนของฟิล์มแต่ละตัว DOM/LDPE, DCM/LDPE และ TCM/LDPE หากฟิล์มใดมีค่าการสลายตัวทางความร้อนสูง แสดงว่ามีสารที่ผสมอยู่ในปริมาณที่มาก ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าฟิล์มของ TCM/LDPE มีเปอร์เซ็นต์การสลายตัวทางความร้อนมากกว่า DCM/LDPE 5 เปอร์เซ็นต์ แต่ฟิล์ม DOM/LDPE มีค่าการสลายตัวทางความร้อนสารประกอบ DOM (2) ที่น้อยมาก จนเทอร์โมแกรมมีค่าใกล้เคียงกับฟิล์ม LDPE ที่ไม่ได้ผสมสารใดๆ

ในเมื่อสารประกอบ DOM (2) นั้น ไม่มีความสามารถในการผสมเข้ากับเนื้อพอลิเมอร์ LDPE ได้ จะไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นสารเติมแต่ง IR-blocking agent สำหรับพลาสติกคลุมโรงเรือน ทำให้การทดสอบหลังจากนี้ผู้วิจัยจึงขอไม่นำ DOM/LDPE มาพิจารณาต่อ แต่จะของศึกษาพฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์และประสิทธิภาพการป้องกันรังสี IR ต่อไป

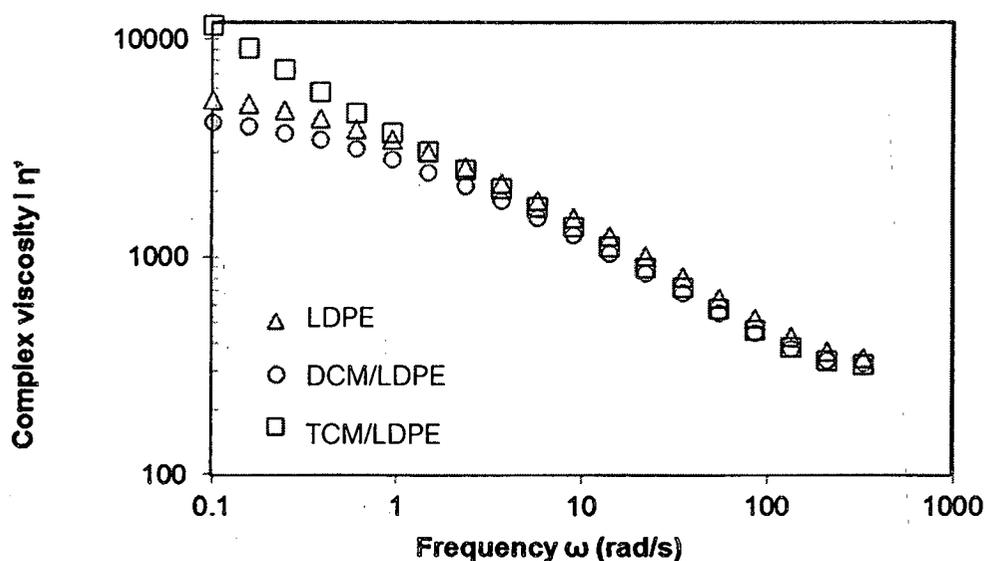
ผลการศึกษาพฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์

นอกจากการศึกษาสมบัติเชิงกลแล้ว การศึกษาพฤติกรรมการของพอลิเมอร์หลอมเหลว มีความสำคัญอย่างมากสำหรับการศึกษาความสามารถในการขึ้นรูป พฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว สามารถศึกษาได้จากเครื่อง oscillatory rheometer ดังแสดงผลการทดสอบ (ภาพ 54 และ 55) พบว่า ในช่วงความถี่ต่ำ 0.1-1 rad/s ความหนืดเชิงซ้อนของ LDPE และ DCM/LDPE แสดงพฤติกรรมการไหลแบบ Newtonian จากกราฟแสดงรูปแบบการไหลของ LDPE, DCM/LDPE และ TCM/LDPE เมื่อเปรียบเทียบค่าความหนืดเชิงซ้อนระหว่าง TCM/LDPE กับ LDPE และ DCM/LDPE ในช่วงความถี่ต่ำ พบว่าค่าความหนืดเชิงซ้อนของ TCM/LDPE มีค่าสูงสุด แต่ขณะเดียวกันพบว่ามีอัตราการลดลงของค่าความหนืดสูงสุด เช่นกัน สามารถอธิบายปรากฏการณ์เช่นนี้ได้ จากการที่กลุ่มอนุภาคของสารประกอบ TCM (3) ที่มีขนาดใหญ่และแทรกตัวจนถ่างระยะระหว่างการแพ็คตัวของสายโซ่โมเลกุล LDPE ให้มีระยะห่างระหว่างสายโซ่ ก่อให้เกิดช่องว่างขนาดใหญ่ระหว่าง สายโซ่โมเลกุล LDPE ที่พันกันอยู่ ส่งผลต่อการลดลงของแรงกระทำระหว่างสายโซ่โมเลกุลของ LDPE ด้วยตัวเอง และแรงกระทำระหว่างกลุ่มอนุภาค TCM (3) กับ โมเลกุล LDPE ดังนั้นเมื่อให้แรงกระทำแบบเฉือนภายใต้อุณหภูมิสูง ในเบื้องต้นของอัตราเร็วของการเฉือนอย่างช้าๆ จะเป็นการสนองตอบของแรงเฉือนที่เกิดจาก ก้อนกลุ่มอนุภาค TCM (3) และเมื่อยังคงให้แรงเฉือนต่อไปจนถึงความถี่ต่ำ 1 rad/s จะพบว่ามีปรากฏของเส้นทางการไหลเด่นชัดขึ้นและมีค่าความต้านทานต่อแรงเฉือนหรือแสดงออกด้วยค่าความหนืดเชิงซ้อนที่ลดลงอย่างรวดเร็วอันเป็นผลเนื่องมาจากการลดลงของแรงกระทำระหว่างเฟสที่เด่นชัดขึ้น ตามลำดับ เมื่อพิจารณาในการให้แรงกระทำแบบเฉือน ภายในช่วงความถี่ต่ำเดียวกันของ LDPE และ DCM/LDPE พบว่ามีค่าความหนืดที่ต่ำกว่า ค่าความหนืดของ TCM/LDPE และมีค่าใกล้เคียงกัน ระหว่างค่าความหนืดของ LDPE และ DCM/LDPE เมื่อให้แรงกระทำแบบเฉือนต่อไปอีก จะปรากฏค่าความหนืดของกราฟแสดงเส้นทางการไหลที่ค่อนข้างคงที่และมีลักษณะกราฟที่คล้ายกันระหว่าง LDPE และ DCM/LDPE

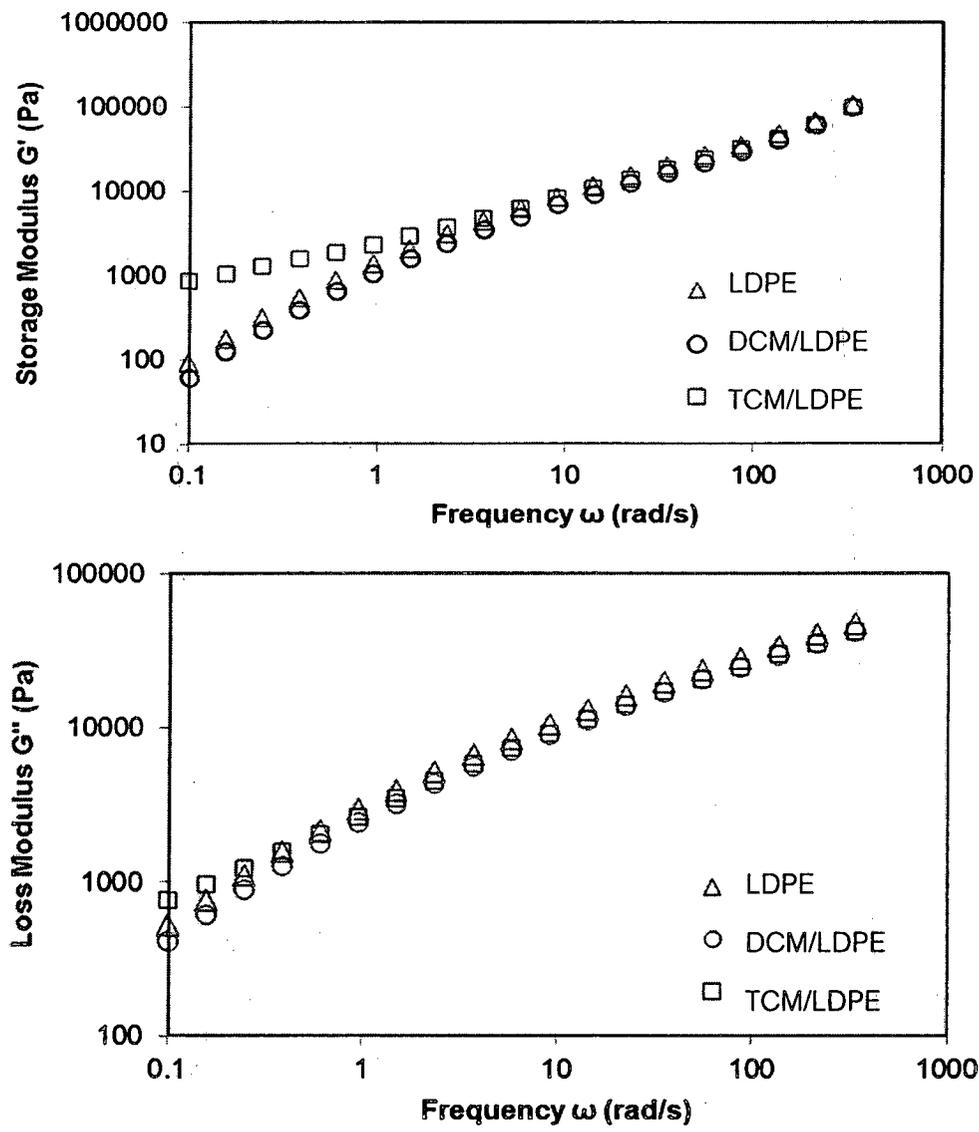
ที่ช่วงความถี่ หรืออัตราเร็วของการให้แรงกระทำแบบเฉือนสูงขึ้น พบว่าขึ้นงานตัวอย่างทุกชนิดจะพบปรากฏการณ์ของพฤติกรรมแบบ shear thinning ซึ่งเป็นปรากฏการณ์แสดงลักษณะเฉพาะของวัสดุชนิดเทอร์โมพลาสติกหรือ Pseudo-plastic เท่านั้น และพฤติกรรม

แบบ shear thinning นี้ จะปรากฏเด่นชัดมากที่สุดในช่วงอัตราเร็วของการให้แรงกระทำระหว่าง 1-100 rad/s โดยทั่วไป พฤติกรรมการไหลแบบ shear thinning เกิดขึ้นกับวัสดุที่มีพฤติกรรมแบบ solid-like เช่น cross-linked polymer และ polymer composites [41, 42]

หลังจากนั้นในช่วงความถี่ 1-1000 rad/s พอลิเมอร์หลอมเหลวทั้งหมดจะมีแนวโน้ม พฤติกรรมการไหลแบบ shear thinning และมีค่าความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ใกล้เคียงกัน และหากยังคงให้แรงกระทำต่อไปอีก จะปรากฏเส้นทางการไหลแบบแนวราบคงที่ที่มีค่าความหนืดเชิงซ้อนน้อยมาก เพราะสายโซ่พอลิเมอร์ทั้งที่มีสารประกอบและไม่มีสารประกอบคาร์บอนิล นั้นได้ถูกเฉือนจนกระทั่งไม่เหลือแรงต้านการเฉือนอีกต่อไป หากมองในด้านกระบวนการผลิต พบว่า ลักษณะการถูกเฉือนจนกลายเป็นสภาพคล้ายน้ำพอลิเมอร์เช่นนี้ จะส่งผลต่อการไม่คงรูปของผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ผลิตได้ ดังนั้นประโยชน์จากกราฟแสดงรูปแบบการไหลนี้ทำให้ สามารถกำหนดสภาวะที่เหมาะสมของการผสมในกระบวนการผลิตจริง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่มีคุณภาพตามที่กำหนดได้อย่างแม่นยำ



ภาพ 54 ความหนืดเชิงซ้อนของฟิล์ม LDPE และฟิล์ม LDPE ที่มีการเติมสารประกอบ DCM (1) และ TCM (3) 10% โดยน้ำหนัก DCM/LDPE และ TCM/LDPE ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส



ภาพ 55 มอดุลัสสะสมและมอดุลัสสูญเสียของฟิล์ม LDPE และฟิล์ม LDPE ที่มีการเติมสารประกอบ DCM (1) และ TCM (3) 10% โดยน้ำหนัก DCM/LDPE และ TCM/LDPE ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส

จากภาพ 49 และ 50 แสดงความสัมพันธ์ของความถี่ที่เปลี่ยนแปลงกับมอดุลัสสะสม (G') และมอดุลัสสูญเสีย (G'') ของ LDPE และ LDPE ที่มีการเติมสารประกอบคาร์บอนิลมอดุลัสสะสมเป็นตัวแทนของความเป็นอีลาสติกของวัสดุ และมอดุลัสสูญเสียเป็นตัวแทนของความเป็น viscous ของวัสดุ เมื่อพิจารณาที่ความถี่มากกว่า 10 rad/s พฤติกรรมของ viscoelastic ทุกตัวอย่างจะมีความคล้ายกัน อย่างไรก็ตามที่ความถี่ต่ำกว่า 10 rad/s การเติมสารประกอบคาร์บอนิลส่งผล

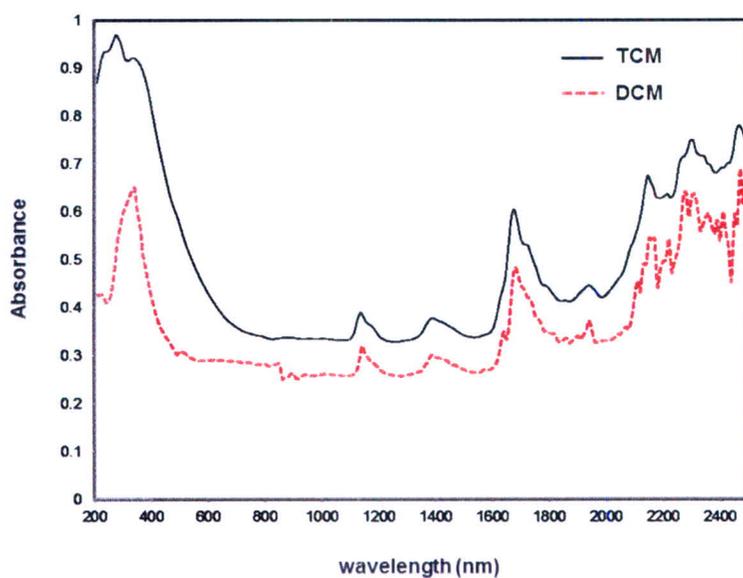
ต่อการเปลี่ยนแปลงค่ามอดูลัสสะสมและมอดูลัสสูญเสียของ LDPE โดยพบว่าการเติมสารประกอบ DCM (1) ส่งผลต่อการลดลงของค่ามอดูลัสสะสมและมอดูลัสสูญเสีย เนื่องมาจากสารประกอบ DCM (1) ไม่สามารถเกิดแรงกระทำระหว่างโมเลกุลกับโมเลกุลของ LDPE ได้ แสดงความไม่เข้ากันระหว่างสารประกอบ DCM (1) กับโมเลกุลของ LDPE โดยสอดคล้องกับผลการศึกษาโครงสร้างพื้นฐานของฟิล์ม LDPE มีการเติมสารประกอบคาร์บอนิล

ขณะที่การเติมสารประกอบ TCM (3) ในฟิล์ม LDPE พบว่าค่ามอดูลัสสะสมและมอดูลัสสูญเสียมีค่ามากกว่า LDPE ในช่วงความถี่น้อยกว่า 10 rad/s แสดงถึงการกระจายตัวที่ดีของสารประกอบ TCM (3) ในเมทริกซ์ของ LDPE นำไปสู่การขัดขวางกันเคลื่อนที่ของโมเลกุล LDPE มีผลทำให้ค่ามอดูลัสสะสมและมอดูลัสสูญเสียมีค่าเพิ่มมากขึ้น อาจเป็นผลเนื่องมาจากขนาดโมเลกุลของสารประกอบ TCM (3) ที่มีขนาดใหญ่กว่าสารประกอบ DCM (2)

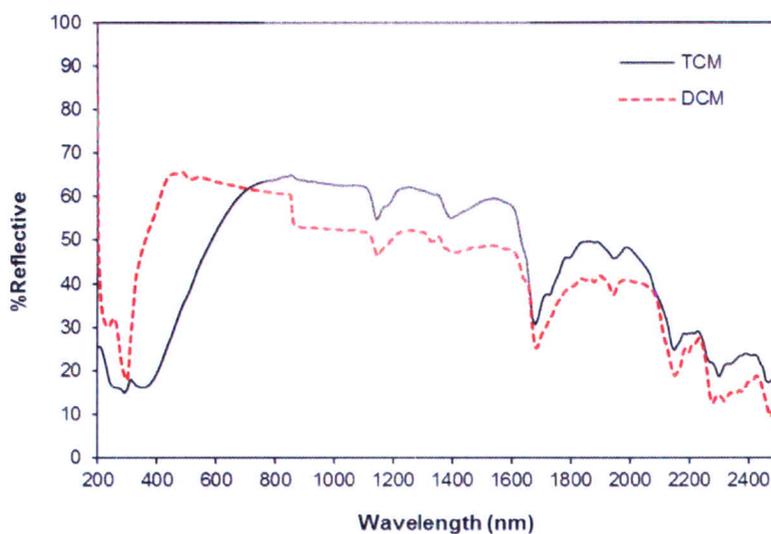
ผลการศึกษาประสิทธิภาพการป้องกันรังสี IR

ในการพิจารณาถึงประสิทธิภาพการป้องกันรังสี IR ทางผู้วิจัยได้ทำการศึกษาทั้งตัวของสารประกอบและแผ่นฟิล์มที่ผสมสารประกอบดังกล่าว โดยจะศึกษาค่าการดูดกลืนและสะท้อนรังสี IR (%R) ของสารประกอบคาร์บอนิล DCM (1) และ TCM (3) ส่วนแผ่นฟิล์ม DCM/LDPE และ TCM/LDPE จะนำไปศึกษาค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่าน (%T) ของรังสี IR ด้วยเทคนิคของ UV/Vis/NIR spectroscopy ที่มีช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 200-2500 นาโนเมตร ด้วยอัตราเร็ว 10 นาโนเมตรต่อวินาที ผลการทดสอบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ค่าการดูดกลืนและสะท้อนรังสีในช่วงความยาวคลื่น 200-2500 นาโนเมตรของสารประกอบคาร์บอนิล DCM (1) และ TCM (3) พบว่าสารประกอบคาร์บอนิล TCM (3) สามารถดูดกลืนรังสีตลอดทั้งช่วงความยาวคลื่น 200-2500 นาโนเมตร ได้ดีกว่าสาร DCM (1) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงของรังสี UV ที่ความยาวคลื่น 200-400 นาโนเมตร สารประกอบคาร์บอนิล TCM (3) สามารถดูดกลืนได้เกือบ 100% (ภาพ 56) อีกทั้งยังมีค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อน (%R) รังสี NIR ในช่วง 800-1600 นาโนเมตร ได้มากกว่า 50%R (ภาพ 57)



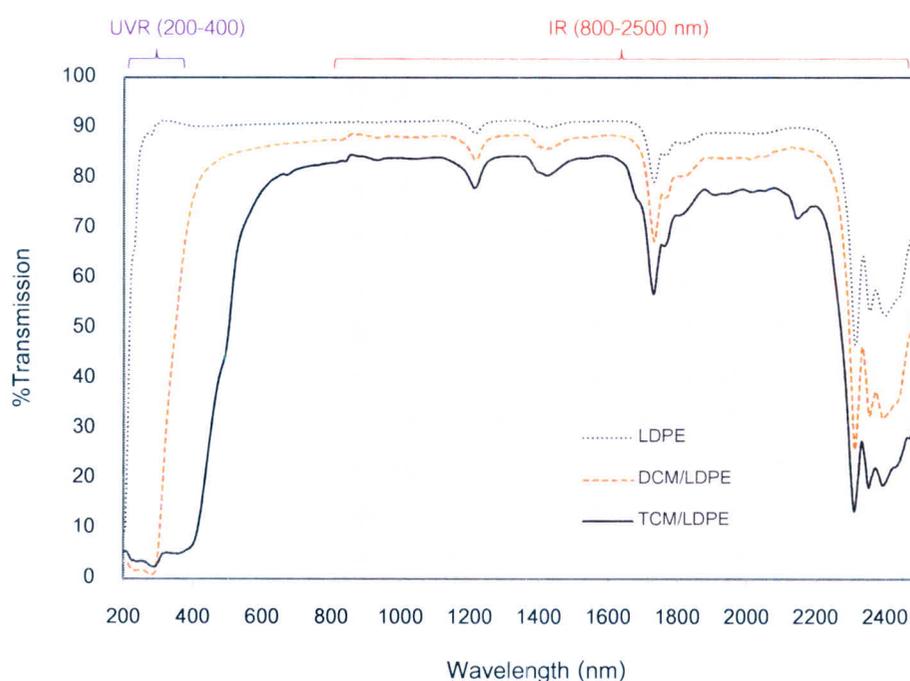
ภาพ 56 ค่าการดูดกลืนรังสีของสารประกอบ DCM (1) และ TCM (3) ในช่วงความยาวคลื่น 200-2500 นาโนเมตร



ภาพ 57 ค่าการสะท้อนรังสีของสารประกอบ DCM (1) และ TCM (3) ในช่วงความยาวคลื่น 200-2500 นาโนเมตร

2. ค่าการส่องผ่านของรังสีในช่วงความยาวคลื่น 200-2500 นาโนเมตร ของฟิล์ม DCM/LDPE และ TCM/LDPE (ภาพ 58)

เมื่อนำสารประกอบคาร์บอนิล DCM (1) และ TCM (3) เติมลงในฟิล์ม LDPE ที่ปริมาณ 10% โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มด้วยกระบวนการเป่าได้เป็นฟิล์ม DCM/LDPE และ TCM/LDPE มาวัดการส่องผ่านรังสี IR เปรียบเทียบกับฟิล์ม LDPE พบว่าฟิล์ม DCM/LDPE และ TCM/LDPE สามารถช่วยลดการส่องผ่านของรังสี UV และ IR ได้มากกว่าฟิล์ม LDPE ประมาณ 10-20%T อีกทั้งยังช่วยลดการส่องผ่านของรังสี UV ได้สูงถึง 58 และ 95 %block IR ตามลำดับ (ตาราง 3)



ภาพ 58 การส่องผ่านรังสีของฟิล์ม LDPE และฟิล์ม LDPE ที่มีการเติมสารประกอบ DCM (1) และ TCM (3) 10% โดยน้ำหนัก DCM/LDPE และ TCM/LDPE ในช่วงความยาวคลื่น 200-2500 นาโนเมตร

ตาราง 3 ค่าความสามารถในการป้องกันรังสี UV และ IR

ตัวอย่างที่	ชนิดของแผ่นฟิล์ม	%Block UV	%Block IR
1	DCM/LDPE	58	19
2	TCM/LDPE	95	30

จากการคำนวณค่า % Block UV และ IR (ตาราง 3) ด้วยโปรแกรมภายในเครื่องมือ UV/Vis/NIR spectrometer จะเห็นได้ว่า สารประกอบคาร์บอนิล DCM (1) และ TCM (3) มีประสิทธิภาพในการเป็นสารป้องกันรังสี IR ได้ อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบระหว่างสารประกอบคาร์บอนิล DCM (1) และ TCM (3) สารประกอบคาร์บอนิล TCM (3) มีประสิทธิภาพในการป้องกันทั้งรังสี UV และ IR ได้ดีกว่าสารประกอบคาร์บอนิล DCM (1) ถึง 2 เท่า