ผลการทดลอง

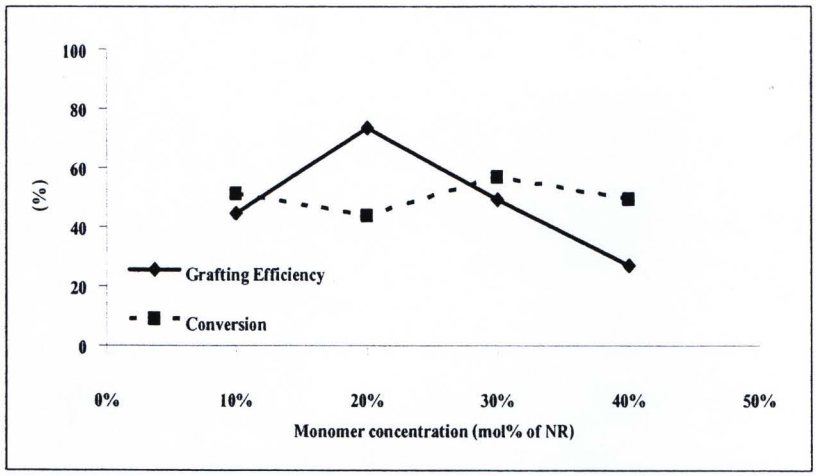
1. การเตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติและไดเมทิลอะมิโนเอทิลเมทาคริเลต

1.1 การศึกษาผลของปริมาณมอนอเมอร์ที่มีผลต่อการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์

จากการศึกษาผลของปริมาณมอนอเมอร์ต่อการกราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติและไดเมทิลอะมิโนเอทิลเมทาคริเลต แสดงในตารางที่ 1 และภาพที่ 4 พบว่าเมื่อปริมาณมอนอเมอร์เพิ่มขึ้นจะให้ค่าร้อยละประสิทธิภาพการกราฟต์ (% Grafting Efficiency) เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงค่าสูงสุดเท่ากับ 73.56 และร้อยละการเปลี่ยนแปลงมอนอเมอร์เท่ากับ 43.60 เมื่อใช้ปริมาณมอนอเมอร์ 20 %โดยโมลของยางธรรมชาติ จากนั้นเมื่อปริมาณมอนอเมอร์เพิ่มสูงขึ้นอีก พบว่าร้อยละประสิทธิภาพการกราฟต์มีค่าลดลงแต่ร้อยละการเปลี่ยนแปลงมอนอเมอร์กลับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากตำแหน่งการกราฟต์บนพื้นผิวบนอนุภาคยางมีจำกัด เมื่อเพิ่มปริมาณมอนอเมอร์จึงมีเพียงบางส่วนของมอนอเมอร์เท่านั้นที่สามารถกราฟต์ลงบนผิวของอนุภาคยางธรรมชาติและมอนอเมอร์ส่วนที่เหลือทำปฏิกิริยากันเองแล้วเกิดเป็นโฮโมพอลิเมอร์ [8]

ตารางที่ 1 ผลของปริมาณมอนอเมอร์ที่มีผลต่อร้อยละประสิทธิภาพการกราฟต์และร้อยละการเปลี่ยนแปลงมอนอเมอร์

ปริมาณมอนอเมอร์ (% โดยโมลของยาง)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง (%Conversion)	ร้อยละประสิทธิภาพการกราฟต์ (%Grafting Efficiency)
10.0	51.18	44.71
20.0	43.60	73.56
30.0	56.53	49.15
40.0	49.52	27.10



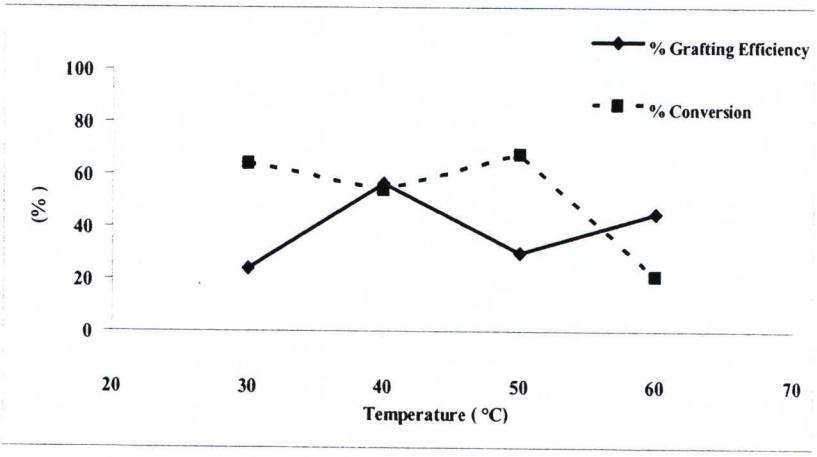
ภาพที่ 4 ผลของปริมาณมอนอเมอร์ที่มีผลต่อร้อยละประสิทธิภาพการกราฟต์และร้อยละการเปลี่ยนแปลงมอนอเมอร์

1.2 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์

ผลการศึกษาอุณหภูมิที่มีผลต่อการกราฟต์ไดเมทิลอะมิโนเอทิลเมทาคริเลตบนยางธรรมชาติดังแสดงในตารางที่ 2 และภาพที่ 5 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการกราฟต์เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงร้อยละประสิทธิภาพการกราฟต์สูงสุดเท่ากับ 56.35 และร้อยละการเปลี่ยนแปลงมอนอเมอร์เท่ากับ 54.16 ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เนื่องจากการตัวริเริ่มปฏิกิริยาสามารถแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระได้เร็วเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ โดยอนุมูลอิสระนี้จะถูกถ่ายโอนไปยังสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติทำให้เกิดการกราฟต์ เนื่องจากพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาการถ่ายเทดังกล่าวสูงกว่าปฏิกิริยาการแผ่ขยาย [8] ทำให้ร้อยละประสิทธิภาพการกราฟต์มีค่าสูง แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นอีก ร้อยละประสิทธิภาพการกราฟต์กลับลดลงและร้อยละการเปลี่ยนแปลงมอนอเมอร์เพิ่มขึ้น สาเหตุมาจากตัวริเริ่มปฏิกิริยาแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระเกิดขึ้นจำนวนมากเกินพอทำให้เกิดรวมตัวกันกับอนุมูลอิสระตัวอื่น (Combination or coupling) ส่งผลให้เกิดการสิ้นสุดของปฏิกิริยา (Termination) เร็วขึ้น และอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่สูงขึ้นทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดโฮโมพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น [12]

ตารางที่ 2 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อร้อยละประสิทธิภาพการกราฟต์และร้อยละการเปลี่ยนแปลงมอนอเมอร์

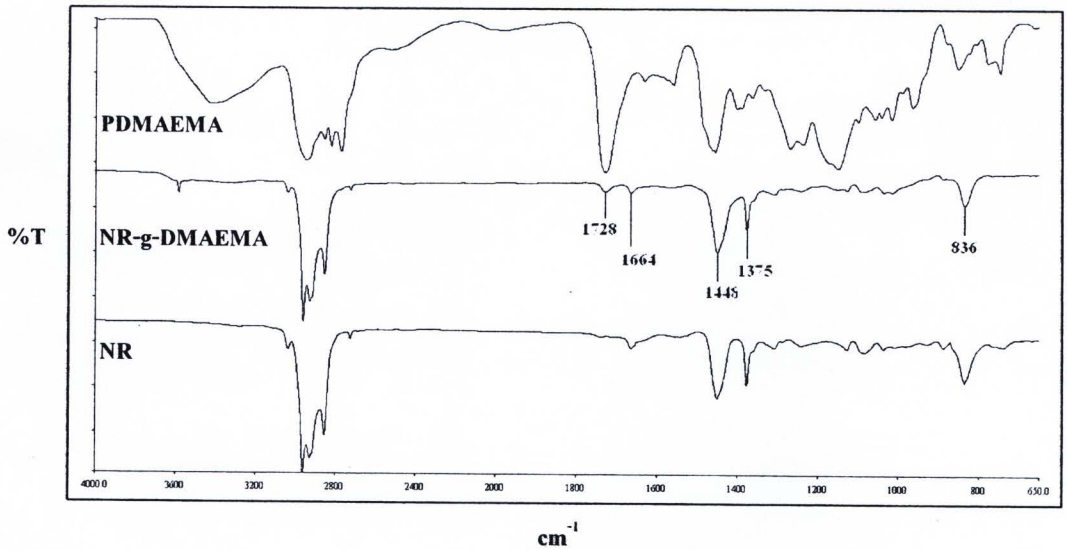
อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)	ร้อยละการเปลี่ยนแปลง (%Conversion)	ร้อยละประสิทธิภาพการกราฟต์ (%Grafting Efficiency)
30	64.25	24.10
40	54.16	56.35
50	67.58	29.96
60	75.91	15.53



ภาพที่ 5 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อร้อยละประสิทธิภาพการกราฟต์และร้อยละการเปลี่ยนแปลง

1.3 การศึกษาโครงสร้างของกราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติและไดเมทิลอะมิโนเอทิลเมทาคริเลตด้วยเทคนิค FTIR

ผลจากการศึกษาโครงสร้างทางเคมีโดยใช้เทคนิคอินฟราเรดของกราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติและไดเมทิลอะมิโนเอทิลเมทาคริเลต ที่ได้จากการสังเคราะห์ (ภาพที่ 6) พบว่ากราฟต์โคพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ปรากฏพีคที่สำคัญที่ 1664 cm^{-1} ที่เกิดจากการยืดของพันธะ C=C และ 836 cm^{-1} ซึ่งเป็นการงอของพันธะ C=CH ของยางธรรมชาติ และพอลิไดเมทิลอะมิโนเอทิลเมทาคริเลต ปรากฏพีคที่สำคัญที่ 1728 cm^{-1} ที่เกิดจากการยืดของพันธะ C=O ของหมู่เอสเทอร์ แสดงให้เห็นว่ามีการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ของพอลิไดเมทิลอะมิโนเอทิลเมทาคริเลตบนอนุภาคของยางธรรมชาติ [13-14]



ภาพที่ 6 เปรียบเทียบอินฟราเรดสเปกตรัมกราฟต์โคพอลิเมอร์ของ A) ยางธรรมชาติ (NR) B) กราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติและไดเมทิลอะมิโนเอทิลเมทาคริเลต (NR-g-DMAEMA) และ C) พอลิไดเมทิลอะมิโนเอทิลเมทาคริเลต (PDMAEMA)

1.4 การศึกษาสมบัติเชิงความร้อนด้วยเทคนิค TG/DTG

จากการศึกษาสมบัติเชิงความร้อนด้วยเครื่อง TG/DTG ซึ่งเปลี่ยนแปลงปริมาณมอนอเมอร์ที่ใช้ในการสังเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติและไดเมทิลอะมิโนเอทิลเมทาคริเลต ยางธรรมชาติมีการลดลงของน้ำหนักที่อุณหภูมิ 287-400 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการสลายตัวของไอโซพรีน 39% และไดเพนทีน 13.2% [24] จากการศึกษาพบว่ายางธรรมชาติมีการลดลงของน้ำหนักสูงสุดที่ 373 องศาเซลเซียส ดังแสดงในตารางที่ 3 พอลิไดเมทิลอะมิโนเอทิลเมทาคริเลตมีการลดลงของน้ำหนักที่อุณหภูมิ 321 องศาเซลเซียส

กราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติและไดเมทิลอะมิโนเอทิลเมทาคริเลต มีการลดลงของน้ำหนักสองช่วงคือ ช่วงแรกที่อุณหภูมิ 313-315 องศาเซลเซียส และช่วงที่สองที่อุณหภูมิประมาณ 379 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการสลายตัวของยางธรรมชาติที่ถูกกราฟต์ จะเห็นว่ากราฟต์โคพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้น (Graft 20 และ 30%) มีความเสถียรต่อความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ เนื่องจากความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์ที่กราฟต์บนอนุภาคของยางธรรมชาติเป็นสายโซ่ยาว จึงอาจจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างสายโซ่ของหมู่ที่มีขั้วของกราฟต์โคพอลิเมอร์ ส่งผลให้เกิดการสลายตัวได้ยากขึ้น [8]

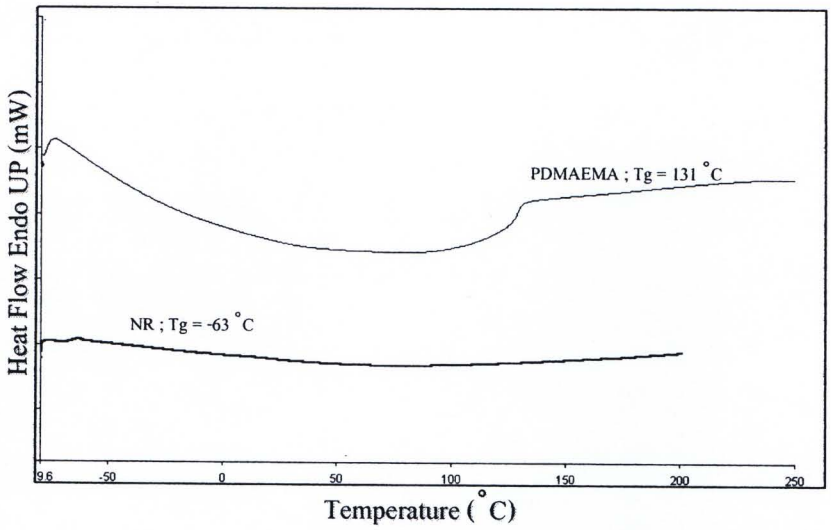
ตารางที่ 3 TG และ DTG แสดงอุณหภูมิที่มีอัตราการลดลงของน้ำหนักพอลิเมอร์และกราฟต์โคพอลิเมอร์

ตัวอย่าง	อุณหภูมิที่มีอัตราการลดลงของน้ำหนักสูงสุด ($^{\circ}$C)
NR-pure	373.0
PDMAEMA	321.0
Graft 10%	315.0 และ 342.5
Graft 20%	315.0 และ 379.5
Graft 30%	313.0 และ 379.0

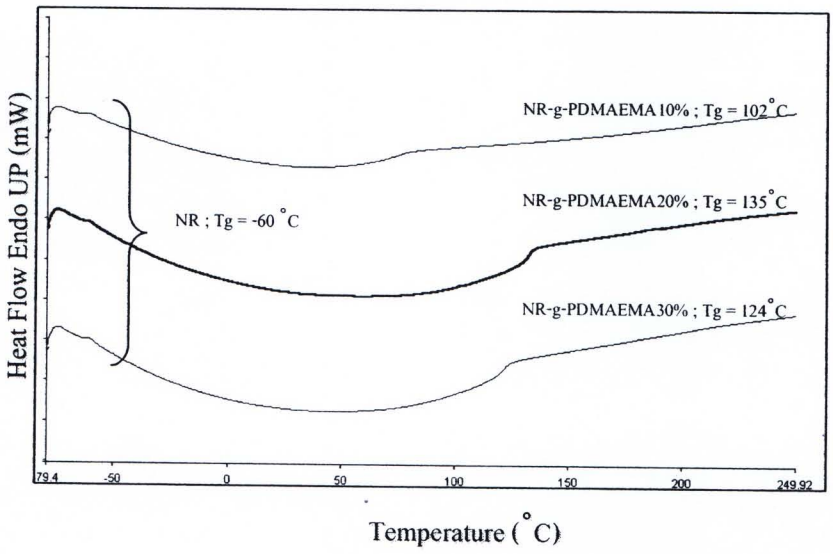
1.5 การศึกษาสมบัติเชิงความร้อนด้วยเทคนิค DSC

จากการศึกษาสมบัติเชิงความร้อนด้วยเทคนิค DSC ช่วงอุณหภูมิ -80 ถึง 250 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที กราฟต์โคพอลิเมอร์เปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ และพอลิไดเมทิลอะมิโนเอทิลเมทาคริเลต ซึ่งแสดงในภาพที่ 7 พบว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของยางธรรมชาติที่ -63 องศาเซลเซียส พอลิไดเมทิลอะมิโนเอทิลเมทาคริเลตที่ 131 องศาเซลเซียส ส่วนกราฟต์โคพอลิเมอร์ ปรากฏอุณหภูมิกลาสทรานสิชันอยู่ 2 ค่า คือ ที่อุณหภูมิต่ำซึ่งแสดงค่าอุณหภูมิกลาสทรานสิชันของส่วนที่เป็นยางธรรมชาติ และอุณหภูมิสูง ซึ่งเป็นส่วนของพลาสติกของกราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติและไดเมทิลอะมิโนเอทิลเมทาคริเลต

จากภาพที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณมอนอเมอร์ที่ใช้สังเคราะห์ (10, 20 และ 30 %โดยโมลของยางธรรมชาติ) พบอุณหภูมิกลาส ทรานซิชันของยางธรรมชาติอยู่ในช่วงเดียวกันคือที่ -60 องศาเซลเซียส และพบอุณหภูมิกลาสทรานสิชันส่วนพลาติกของกราฟต์โคพอลิเมอร์แตกต่างกันตามค่าร้อยละประสิทธิภาพการกราฟต์ ที่ปริมาณมอนอเมอร์ร้อยละ 20 ซึ่งมีค่าร้อยละประสิทธิภาพการกราฟต์สูงสุด แสดงอุณหภูมิกลาสทรานสิชันที่ 135 องศาเซลเซียส รองลงมาคือปริมาณมอนอเมอร์ร้อยละ 30 และ 10 ซึ่งแสดงค่าอุณหภูมิที่ 124 และ 102 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เนื่องจากการกราฟต์ไดเมทิลอะมิโนเอทิลเมทาคริเลตบนโครงสร้างโมเลกุลยางธรรมชาติทำให้พอลิเมอร์มีความเป็นขั้วเพิ่มขึ้นในโมเลกุล เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลสูง ส่งผลให้การเคลื่อนไหวของสายโซ่ลดลง ดังนั้นจึงต้องใช้อุณหภูมิสูงขึ้นเพื่อที่จะทำให้สายโซ่โมเลกุลเคลื่อนไหวได้อย่างอิสระ [15]



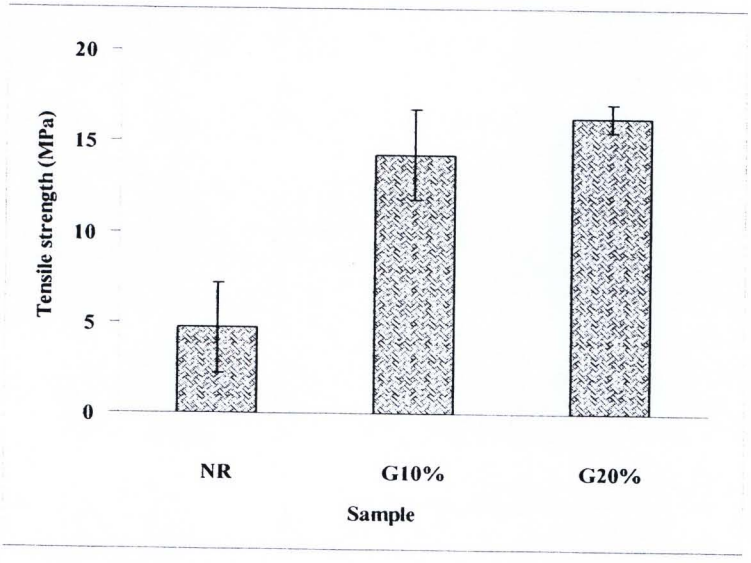
ภาพที่ 7 เทอร์โมแกรม DSC แสดงอุณหภูมิกลาสทรานสิชันยางธรรมชาติ และพอลิไดเมทิลอะมิโนเอทิลเมทราคริเลต



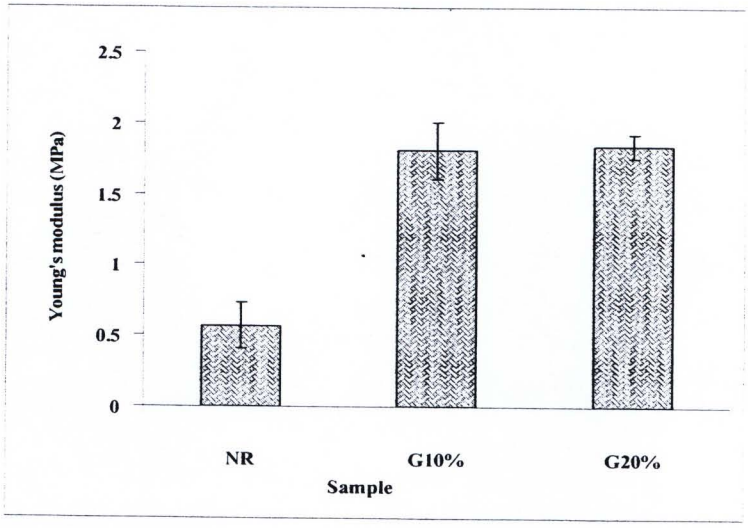
ภาพที่ 8 เทอร์โมแกรม DSC แสดงอุณหภูมิกลาสทรานสิชันกราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติและไดเมทิลอะมิโนเอทิลเมทาคริเลต (10, 20 และ 30 mol%)

1.6 การศึกษาสมบัติเชิงกลของกราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติและไดเมทิลอะมิโนเอทิลเมทาคริเลต

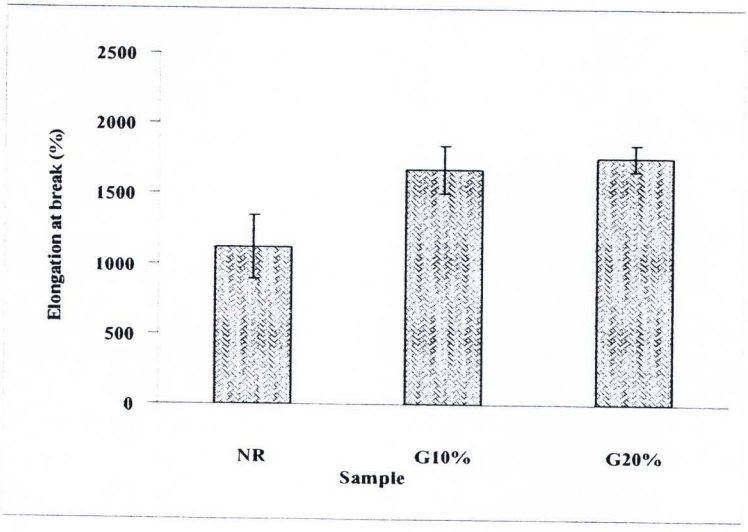
ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของกราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติและไดเมทิลอะมิโนเอทิลเมทาคริเลต โดยศึกษาผลของปริมาณมอนอเมอร์ที่ใช้สังเคราะห์ (10 และ 20 %โดยโมลของยางธรรมชาติ) ดังแสดงในภาพที่ 9-11 พบว่าปริมาณมอนอเมอร์มีผลต่อสมบัติเชิงกลคือ ค่าความต้านทานต่อแรงดึง ค่ายังมอดูลัส และค่าเปอร์เซ็นต์ความเครียดที่วัตถุขาด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณไดเมทิลอะมิโนเมทาคริเลตที่ใช้ในปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ไรซ์ เนื่องจากการกราฟต์พอลิเมอร์บน อนุภาคของยางธรรมชาติมากขึ้น ส่งผลให้สภาพขั้วของกราฟต์โคพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น ทำให้มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลสูงขึ้น จึงเพิ่มความแข็งแรงและความสามารถในการยืดให้โมเลกุลของกราฟต์โคพอลิเมอร์ [15]



ภาพที่ 9 ผลของปริมาณมอนอเมอร์ที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของยางธรรมชาติ และกราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติและไดเมทิลอะมิโนเอทิลเมทาคริเลต โดยใช้ปริมาณมอนอเมอร์ที่ 10 และ 20 %โดยโมลของยางธรรมชาติ (Graft 10 และ 20%)



ภาพที่ 10 ผลของปริมาณมอนอเมอร์ที่มีผลต่อค่ายังมอดูลัสของยางธรรมชาติ และกราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติและไดเมทิลอะมิโนเอทิลเมทาคริเลต โดยใช้ปริมาณมอนอเมอร์ที่ 10 และ 20 %โดยโมลของยางธรรมชาติ (Graft 10 และ 20%)



ภาพที่ 11 ผลของปริมาณมอนอเมอร์ที่มีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์ความเครียดที่จุดขาดของยางธรรมชาติและกราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติและไดเมทิลอะมิโนเอทิลเมทาคริเลต โดยใช้ปริมาณมอนอเมอร์ที่ 10 และ 20 %โดยโมลของยางธรรมชาติ (Graft 10 และ 20%)

2. การเตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์ของไคโตซานและไดเมทิลอะมิโนเอทิลเมทาคริเลต

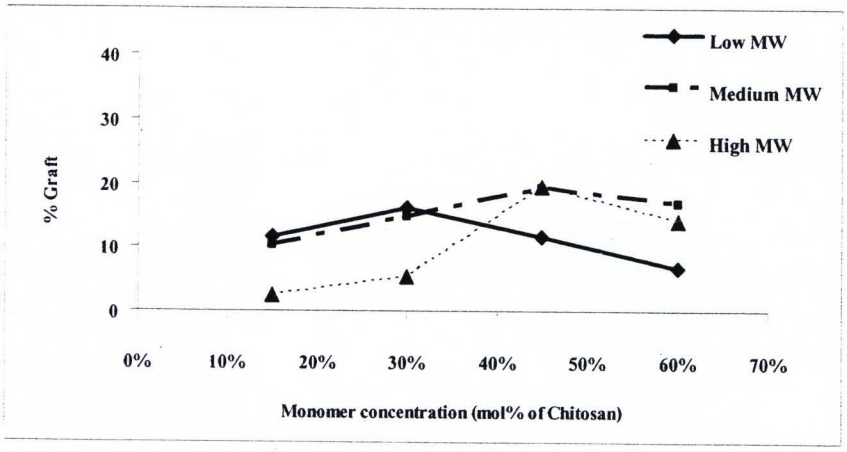
2.1 การศึกษาผลของน้ำหนักโมเลกุลและปริมาณมอนเมอร์ที่มีผลต่อการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์

การสังเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอร์ของไคโตซานกับไดเมทิลอะมิโนเอทิลเมทาคริเลต ใช้ไคโตซานที่มีความหนืดดังนี้ คือ น้ำหนักโมเลกุลต่ำ (Viscosity < . 200 mPa.s) น้ำหนักโมเลกุลปานกลาง (Viscosity 200-400 mPa.s) และน้ำหนักโมเลกุลสูง (Viscosity > 400 mPa.s) ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4 และภาพที่ 12 พบว่าที่ความเข้มข้นของมอนอเมอร์ต่ำ (15 และ 30 %โดยโมลของไคโตซาน) ไคโตซานน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะแสดงร้อยละการกราฟต์ใกล้เคียงกับไคโตซานน้ำหนักโมเลกุลปานกลางซึ่งสูงกว่าไคโตซานน้ำหนักโมเลกุลสูง แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นมอนอเมอร์ (45 % โดยโมลของไคโตซาน) ไคโตซานน้ำหนักโมเลกุลปานกลางและสูง แสดงร้อยละการกราฟต์เพิ่มสูงขึ้นใกล้เคียงกัน ขณะที่ไคโตซานน้ำหนักโมเลกุลต่ำแสดงค่าร้อยละการกราฟต์ลดลง

จะเห็นว่าไคโตซานน้ำหนักโมเลกุลสูงเกิดการกราฟต์สูงเมื่อเปรียบเทียบกับไคโตซานน้ำหนักโมเลกุลปานกลางและต่ำ เนื่องจากไคโตซานน้ำหนักโมเลกุลสูงมีความยาวของสายโซ่มากกว่าส่งผลให้สายโซ่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระจึงทำให้โอกาสที่จะเกิดการกราฟต์โคพอลิเมอร์เพิ่มมากขึ้น[16] ส่วนผลจากปริมาณมอนอเมอร์ที่ใช้สังเคราะห์ พบว่าเมื่อปริมาณมอนอเมอร์เพิ่มขึ้นร้อยละการกราฟต์สูงขึ้นเช่นกัน แต่เมื่อเพิ่มปริมาณมอนอเมอร์เพิ่มสูงขึ้นอีก ร้อยละการกราฟต์กลับลดลง เนื่องจากปริมาณมอนอเมอร์มากมีโอกาสเกิดการกราฟต์บนโมเลกุลไคโตซานเพิ่มขึ้น ในขณะเดียวกันก็เกิดเป็นโฮโมพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันจึงส่งผลให้ร้อยละการกราฟต์ลดลง [17]

ตารางที่ 4 ผลของน้ำหนักโมเลกุลของไคโตซานและปริมาณมอนอเมอร์ที่มีผลต่อร้อยละการกราฟต์

ปริมาณมอนอเมอร์ (%โมลของไคโตซาน)	ร้อยละการกราฟต์ (% Graft)		
	ไคโตซานน้ำหนักโมเลกุลต่ำ	ไคโตซานน้ำหนักโมเลกุลปานกลาง	ไคโตซานน้ำหนักโมเลกุลสูง
15%	11.51	10.34	2.53
30%	16.09	14.82	5.39
45%	11.64	19.25	19.45
60%	6.81	16.77	14.11

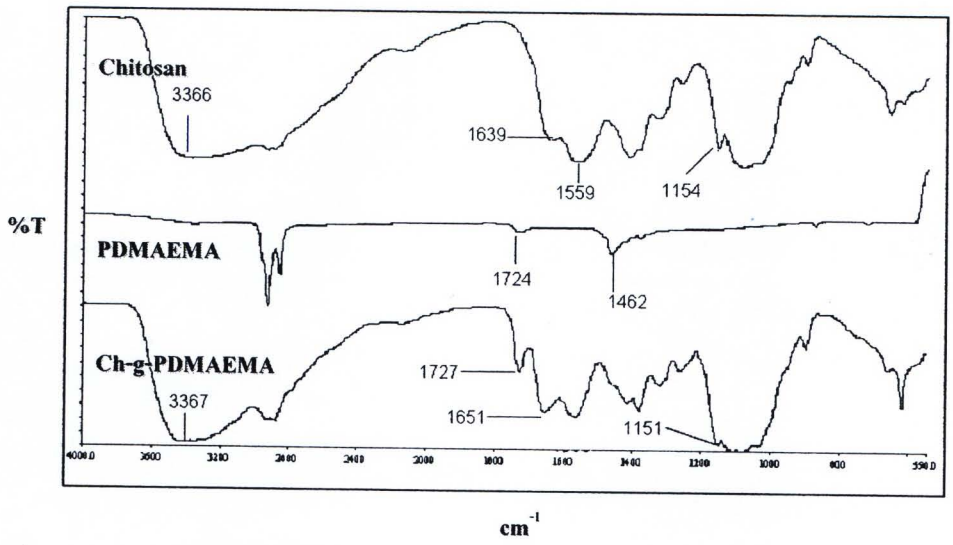


ภาพที่ 12 ผลของน้ำหนักโมเลกุลและปริมาณมอนเมอร์ที่มีผลต่อการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์

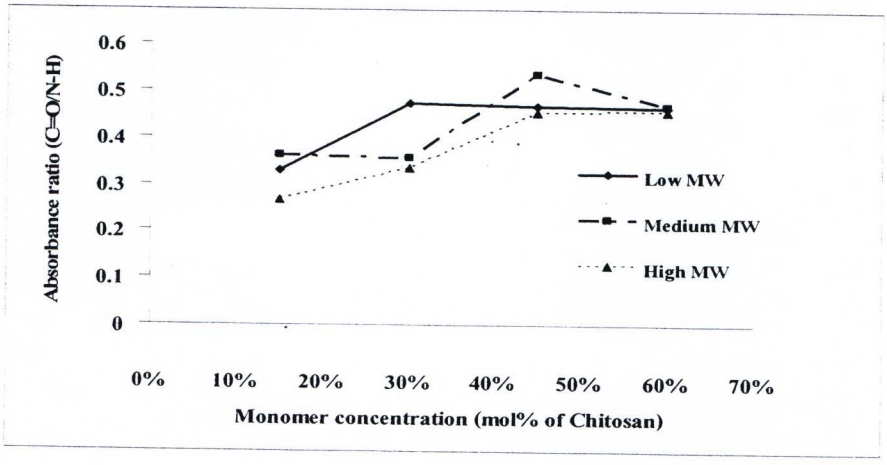
2.2 การศึกษาโครงสร้างของกราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างไคโตซานและไดเมทิลอะมิโนเอทิลเมทาคริเลตด้วยเทคนิค FTIR

ผลการศึกษาโครงสร้างเคมีของกราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างไคโตซานและไดเมทิลอะมิโนเอทิลเมทาคริเลตโดยเทคนิค FTIR ดังแสดงในภาพที่ 13 พบว่ากราฟต์โคพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้แสดงพีคการดูดกลืนการยืดของพันธะ C=O ที่ 1727 cm^{-1} ของหมู่เอสเทอร์ในพอลิไดเมทิลอะมิโนเอทิลเมทาคริเลต และปรากฏพีคที่สำคัญของไคโตซานที่ตำแหน่ง 1651 และ 1563 cm^{-1} ของพันธะเอไมด์ และการยืดของพันธะ C-O-C ที่ตำแหน่ง 1151 cm^{-1} ยืนยันการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างไคโตซานและไดเมทิลอะมิโนเอทิลเมทาคริเลต[18-19]

ข้อมูลจาก FTIR ยังสามารถนำมาคำนวณหาค่าอัตราการดูดกลืน (Absorbance ratio) จากพีคการดูดกลืนของพันธะ C=O ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1727 cm^{-1} และพันธะ N-H ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1563 cm^{-1} ดังแสดงในภาพที่ 14 ซึ่งค่าอัตราการดูดกลืนมีค่าสูงจะแสดงถึงระดับการกราฟต์ของไดเมทิลอะมิโนเอทิลเมทาคริเลตบนโมเลกุลไคโตซาน พบว่าสอดคล้องกับร้อยละการกราฟต์ คือ ไคโตซานน้ำหนักโมเลกุลปานกลางที่ปริมาณมอนอเมอร์ร้อยละ 45 แสดงค่าการดูดกลืนสูงสุด



ภาพที่ 13 เปรียบเทียบอินฟราเรดสเปกตรัมกราฟต์โคพอลิเมอร์ของ (A) กราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างไคโตซานและพอลิไดเมทิลอะมิโนเอทิลเมทาคริเลต (Ch-g-PDMAEMA) (B) พอลิไดเมทิลอะมิโนเอทิลเมทาคริเลต (PDMAEMA) และ (C) ไคโตซาน (Chitosan)



ภาพที่ 14 ผลของน้ำหนักโมเลกุลและปริมาณมอนเมอร์ที่มีผลต่อการเกิดกราฟต์โคพอลิเมอร์

2.3 การศึกษาสมบัติเชิงความร้อนด้วยเทคนิค TG/DTG

จากการศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของไคโตซาน พอลิไดเมทิลอะมิโนเอทิลเมทาคริเลต และกราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างไคโตซานและไดเมทิลอะมิโนเอทิลเมทาคริเลต ไคโตซานมีการสลายตัวประกอบด้วย 2 ช่วงโดยช่วงแรกเริ่มต้นที่อุณหภูมิประมาณ 35-120 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นส่วนของน้ำที่ดูดซับอยู่ในพื้นผิวและรูพรุนของไคโตซาน และช่วงที่ 2 เริ่มต้นที่ประมาณ 220-415 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของวงแซคคาร์ไรด์และหน่วยดีอะซิเลชันของไคโตซาน [20-21] จากตารางที่ 5 จะเห็นว่าไคโตซานมีการลดลงของน้ำหนัก 2 ช่วงคือ ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิ 303 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการสลายตัวของสายโซ่หลักของไคโตซานและพอลิไดเมทิลอะมิโนเอทิลเมทาคริเลตมีการลดลงของน้ำหนักที่อุณหภูมิ 321 องศาเซลเซียส

กราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างไคโตซานและพอลิไดเมทิลอะมิโนเอทิลเมทาคริเลต พบว่ามีการสลายตัว 2 ช่วงเช่นเดียวกัน คือที่อุณหภูมิประมาณ 112 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการสลายตัวของน้ำ และที่อุณหภูมิ 252-260 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของไคโตซานที่กราฟต์ด้วยไดเมทิลอะมิโนเอทิลเมทาคริเลต จะเห็นว่ากราฟต์โคพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้แต่ละอัตราส่วนของมอนอเมอร์ที่ใช้สังเคราะห์แสดงการลดลงของน้ำหนักที่อุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งอุณหภูมิที่เกิดการลดลงของน้ำหนักสูงสุดของกราฟต์โคพอลิเมอร์ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับไคโตซาน และไดเมทิลอะมิโนเอทิลเมทาคริเลต พบว่าความเสถียรต่อความร้อนของกราฟต์โคพอลิเมอร์ลดลง เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนบางส่วนของไคโตซานถูกกราฟต์ด้วยไดเมทิลอะมิโนเอทิลเมทาคริเลตภายในโครงสร้างของสายโซ่ [22]

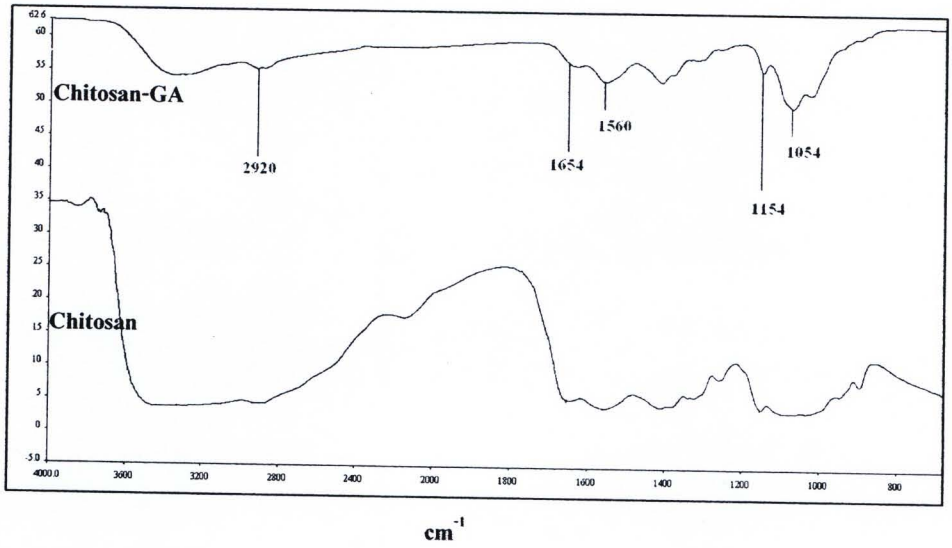
ตารางที่ 5 TG และ DTG แสดงอุณหภูมิที่มีอัตราการลดลงของน้ำหนักพอลิเมอร์และกราฟต์โคพอลิเมอร์

ตัวอย่าง	อุณหภูมิที่มีอัตราการลดลงของน้ำหนักสูงสุด ($^{\circ}$C)
Chitosan	55.0 และ 303.0
PDMAEMA	321.0
Chitosan-g-PDMAEMA 30%	112.0 และ 252.5
Chitosan-g-PDMAEMA 45%	111.0 และ 258.0
Chitosan-g-PDMAEMA 60%	111.0 และ 260.0

3. การเตรียมไคโตซานที่มีการเชื่อมขวางโดยกลูตารัลดีไฮด์

3.1 การศึกษาโครงสร้างของไคโตซานที่มีการเชื่อมขวางโมเลกุลโดยใช้กลูตารัลดีไฮด์ด้วยเทคนิค FTIR

จากการวิเคราะห์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FTIR ของไคโตซานที่เชื่อมขวางโมเลกุลโดยใช้กลูตารัลดีไฮด์เป็นสารเชื่อมขวาง พบว่าไคโตซานที่มีการเชื่อมขวางโมเลกุลปรากฏพีคที่สำคัญ (ภาพที่ 15) ซึ่งแสดงการดูดกลืนของพันธะ N=C ที่ 1654 cm^{-1} เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับไคโตซานที่ไม่มีการเชื่อมขวางโมเลกุล นอกจากนั้นยังแสดงพีคของพันธะ C-O-C ในสายโซ่ไกลโคซิดิก (Glycosidic) ของไคโตซานที่ 1154 และ 1054 cm^{-1} และการยืดของพันธะ C-H ที่ 2928 cm^{-1} [23]

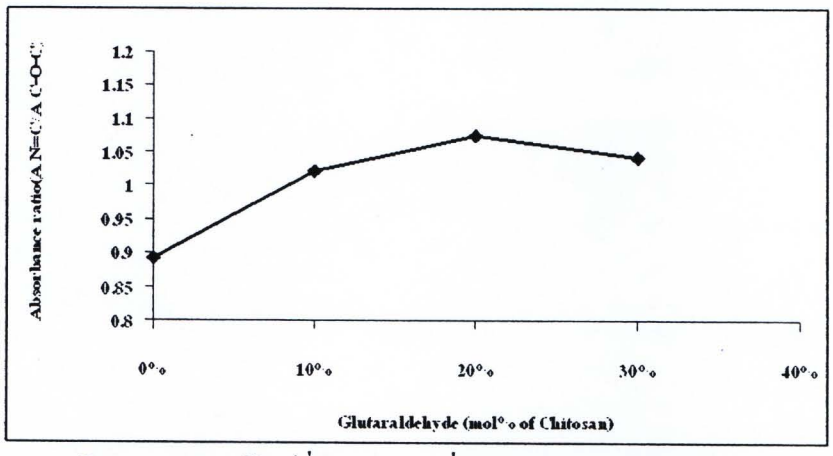


ภาพที่ 15 เปรียบเทียบอินฟราเรดสเปกตรัม (A) ไคโตซาน (Chitosan) และ (B) ไคโตซานที่มีการเชื่อมขวางโมเลกุลโดยใช้กลูตารัลดีไฮด์ (Chitosan-GA)

3.1 การศึกษาผลของปริมาณกลูตารัลดีไฮด์ต่อการเชื่อมขวางโมเลกุลไคโตซาน

ผลจากการสังเคราะห์การเชื่อมขวางโมเลกุลของไคโตซานโดยกลูตารัลดีไฮด์เป็นสารเชื่อมขวาง สารละลายไคโตซานที่ได้ในแต่ละความเข้มข้นของกลูตารัลดีไฮด์ที่ใส่ไปพบว่าสีของสารละลายจะเป็นสีน้ำตาล โดยสีจะเข้มขึ้นเรื่อยๆ ตามปริมาณของกลูตารัลดัไฮด์ที่เพิ่มขึ้น และจากการศึกษาโดยใช้เทคนิค FTIR สามารถนำมาคำนวณค่าอัตราการดูดกลืน (Absorbance ratio) [8] ระหว่างค่าการดูดกลืนของพันธะ N=C ของไคโตซานที่มีการเชื่อมขวางโมเลกุล (1654 cm^{-1}) และการดูดกลืนของพันธะ C-O-C ของไคโตซาน (1154 cm^{-1}) แสดงผลในภาพที่ 16 ซึ่งสามารถนำมาวิเคราะห์หาระดับการเชื่อมขวางโมเลกุลของไคโตซาน ถ้าค่าอัตราการดูดกลืนมีค่าสูงจะแสดงถึงการเชื่อมขวาง

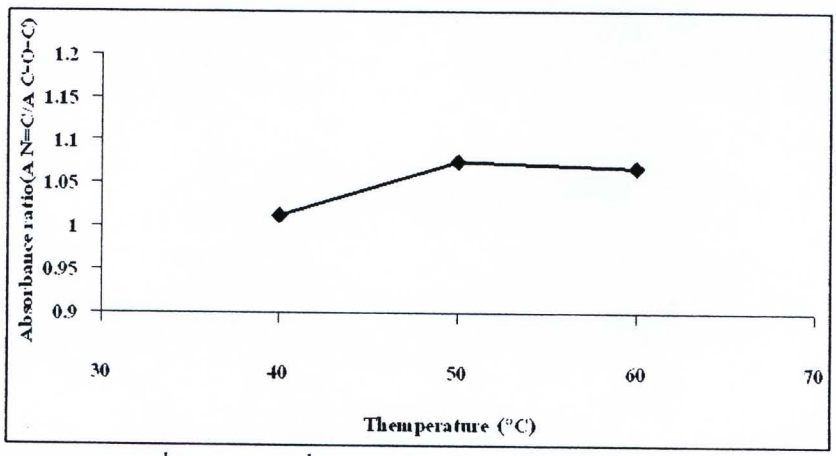
โมเลกุลของไคโตซานสูง จากการคำนวณพบว่ากลูตารัลดีไฮด์ 20 %โมลของไคโตซาน มีค่าการดูดกลืนสูงสุด



ภาพที่ 16 ผลของปริมาณกลูตารัลดีไฮด์ที่มีผลต่อการเชื่อมขวางโมเลกุลไคโตซาน

3.2 การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการเชื่อมขวางโมเลกุลไคโตซาน

ผลจากการศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการเชื่อมขวางโมเลกุลของไคโตซาน โดยใช้กลูตารัลดีไฮด์เป็นสารเชื่อมขวาง (20 % โมลของไคโตซาน) ที่อุณหภูมิ 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชม. แล้วจึงนำไปพิสูจน์เอกลักษณะโดยใช้เทคนิค FTIR ดังแสดงในภาพที่ 17 และเมื่อนำค่าการดูดกลืนของพีค 1654 cm^{-1} (N=C ของไคโตซานที่เชื่อมขวาง) กับพีคที่ 1154 cm^{-1} (C-O-C ของไคโตซาน) มาคำนวณหาค่าอัตราการดูดกลืน (Absorbance ratio) พบว่าที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีการเชื่อมขวางของไคโตซานสูงสุด เนื่องจากอัตราการดูดกลืนสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิ 40 และ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงดังภาพที่ 17

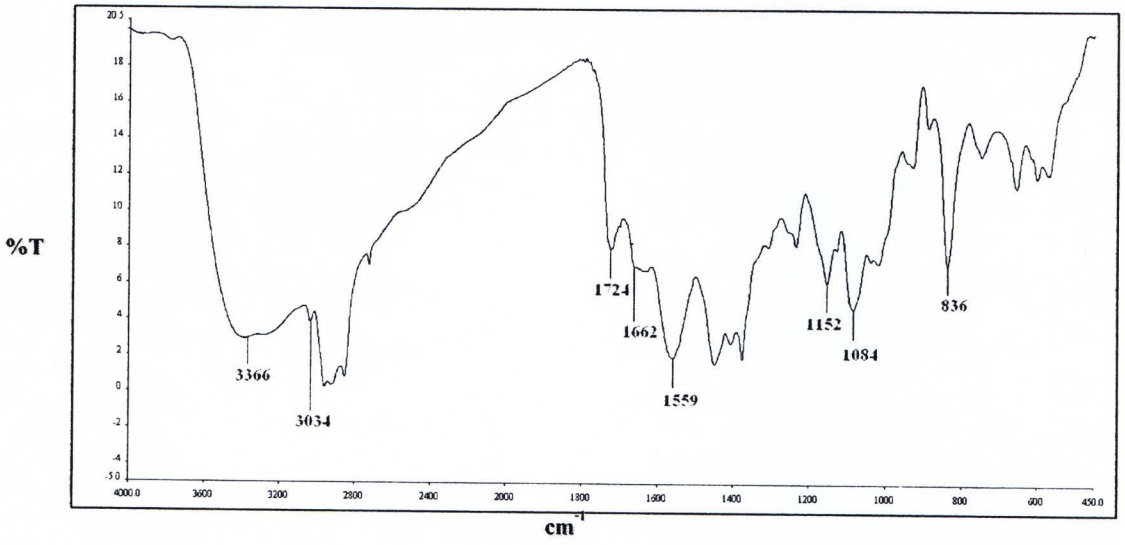


ภาพที่ 17 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการเชื่อมขวางโมเลกุลไคโตซาน

4. การเตรียมวัสดุ Semi-IPN ของยางธรรมชาติและไคโตซาน

4.1 การศึกษาโครงสร้างทางเคมีของวัสดุ Semi-IPN

จากการศึกษาการเตรียมวัสดุ Semi-IPN ของยางธรรมชาติและไคโตซาน โดยการกราฟต์ไดเมทิลอะมิโนเอทิลเมทาคริเลต (20 %โดยโมลของยางธรรมชาติ) บนอนุภาคของยางธรรมชาติ ผสมกับไคโตซานที่มีการเชื่อมขวางโมเลกุลโดยใช้กลูตารัลดีไฮด์ (20 %โดยโมลของไคโตซาน) จากนั้นนำไปพิสูจน์เอกลักษณ์โดยใช้เทคนิค FTIR (ภาพที่ 18) แสดงพีคที่สำคัญของยางธรรมชาติที่ 836 cm^{-1} การงอของพันธะ C=CH และการยืดของพันธะ C=C ที่ 3034 cm^{-1} พีคที่ตำแหน่ง 1724 cm^{-1} ของพันธะ C=O ไดเมทิลอะมิโนเอทิลเมทาคริเลต นอกจากนี้ยังพบพีคที่ตำแหน่ง 3366 cm^{-1} แสดงการชิพของพันธะ –OH ไคโตซานเมื่อเกิดการกราฟต์ ปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 1662 cm^{-1} ซึ่งแสดงพันธะเอไมด์ (amide I) ที่ตำแหน่ง 1559 cm^{-1} แสดงการงอของพันธะ $-NH_2$ ของไคโตซาน ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับการเกิดการเชื่อมขวางโมเลกุลของไคโตซานโดยใช้กลูตารัลดีไฮด์ (N=C, 1640-1650 cm^{-1}) และพันธะ C=C ของยางธรรมชาติ (1667 cm^{-1}) [13,17,19]



ภาพที่ 18 สเปกตรัม Semi-IPN ของยางธรรมชาติและไคโตซาน

4.2 การศึกษาสมบัติเชิงความร้อนด้วยเทคนิค TG/DTG

จากการศึกษาสมบัติเชิงความร้อนด้วยเทคนิค TG/DTG วัสดุ Semi-IPN ของยางธรรมชาติและไคโตซาน ดังแสดงในตารางที่ 6 พบว่าอุณหภูมิที่มีการลดลงของน้ำหนักสูงสุดของวัสดุ Semi-IPN เกิดขึ้น 2 ช่วง คือที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการสลายตัวของไคโตซาน และที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 379-382 องศาเซลเซียส แสดงถึงการสลายตัวของยางธรรมชาติ [24] จะเห็นว่า

วัสดุ Semi-IPN ของยางธรรมชาติและไคโตซานที่เตรียมได้มีความเสถียรต่อความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ ยางธรรมชาติที่กราฟต์ด้วยมอนอเมอร์และไคโตซาน

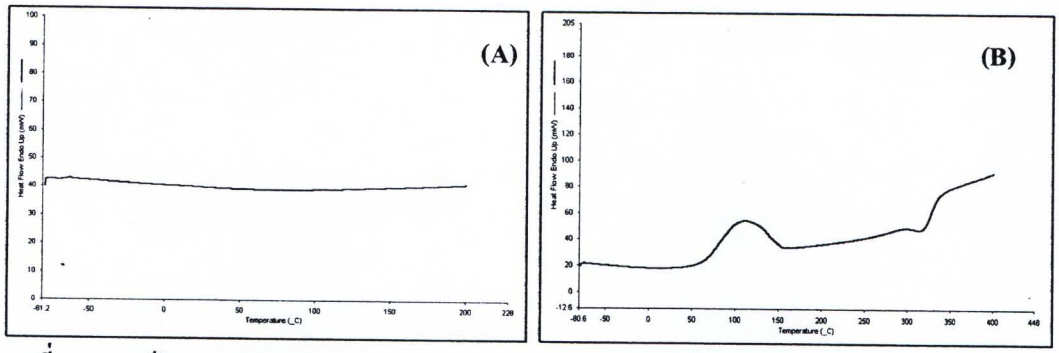
ผลจากการศึกษาปริมาณสารเชื่อมขวาง (GA.) ที่มีผลต่อสมบัติเชิงความร้อนของวัสดุ Semi-IPN ที่อัตราส่วนยางธรรมชาติและไคโตซาน 10 : 1 (GA. 10 20 และ 30%) พบว่าอุณหภูมิการลดลงของน้ำหนักอยู่ในช่วงเดียวกัน จึงสามารถสรุปได้ว่าอัตราส่วนและปริมาณสารเชื่อมขวางไม่มีผลต่อการลดลงของน้ำหนักสูงสุดของวัสดุ Semi-IPN

ตารางที่ 6 TG และ DTG แสดงอุณหภูมิที่มีอัตราการลดลงของน้ำหนักวัสดุ Semi-IPN ของยางธรรมชาติและไคโตซาน

ตัวอย่าง	อุณหภูมิที่มีอัตราการลดลงของน้ำหนักสูงสุด (°C)
NR-pure	373.0
Chitosan	55.0 และ 303.0
Semi-IPN 2.5 : 1 GA.20%	308.9 และ 380.4
Semi-IPN 5.0 : 1 GA.20%	304.0 และ 381.0
Semi-IPN 7.5 : 1 GA.20%	309.0 และ 382.2
Semi-IPN 10 : 1 GA.10%	307.0 และ 382.5
Semi-IPN 10 : 1 GA.20%	307.0 และ 382.8
Semi-IPN 10 : 1 GA.30%	307.0 และ 379.4

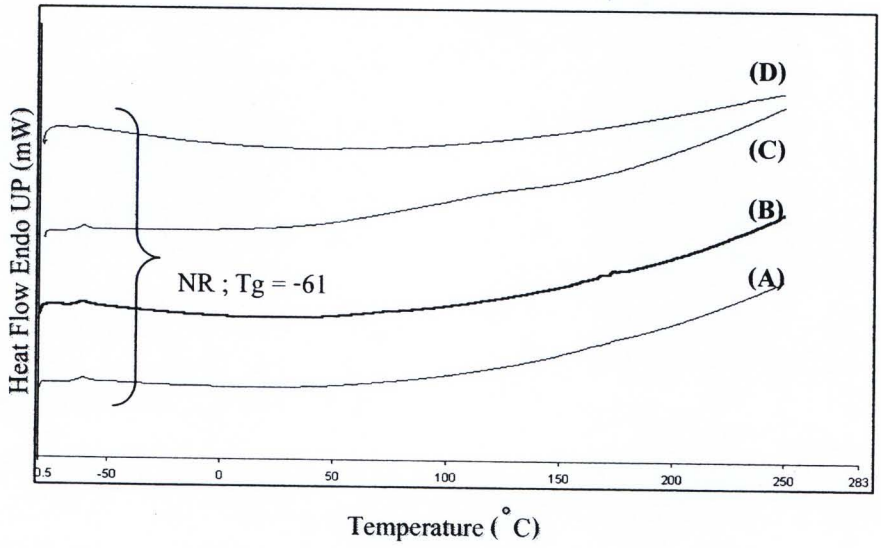
4.3 การศึกษาสมบัติเชิงความร้อนด้วยเทคนิค DSC

จากการศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของยางธรรมชาติและไคโตซาน ช่วงอุณหภูมิ -80 ถึง 250 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่าอุณหภูมิกลาสทรานสิชันของยางธรรมชาติ เท่ากับ -63 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 19A) และไคโตซานเกิดการเปลี่ยนแปลงที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งอาจแสดงถึงการสูญเสียความชื้นของสายโซ่พอลิแซคคาร์ไรด์ และที่อุณหภูมิ 308 องศาเซลเซียส แสดงการสลายตัวของไคโตซาน [17] ดังแสดงในภาพที่ 19B



ภาพที่ 19 เทอร์โมแกรม DSC ของ (A) ยางธรรมชาติ และ (B) ไคโตซาน

ผลจากการศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของวัสดุ Semi-IPN ของยางธรรมชาติและไคโตซาน ที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและไคโตซาน (Semi-IPN 10 :1, 7.5 : 1, 5 :1 และ 2.5 : 1) เปรียบเทียบกับยางธรรมชาติและไคโตซาน ดังแสดงผลภาพที่ 20 พบเพียงอุณหภูมิกลาสทรานสิชันของยางธรรมชาติของทุกๆอัตราส่วนอยู่ที่ช่วงอุณหภูมิเดียวกันคือที่ -61 องศาเซลเซียส แต่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงในส่วนของไคโตซาน

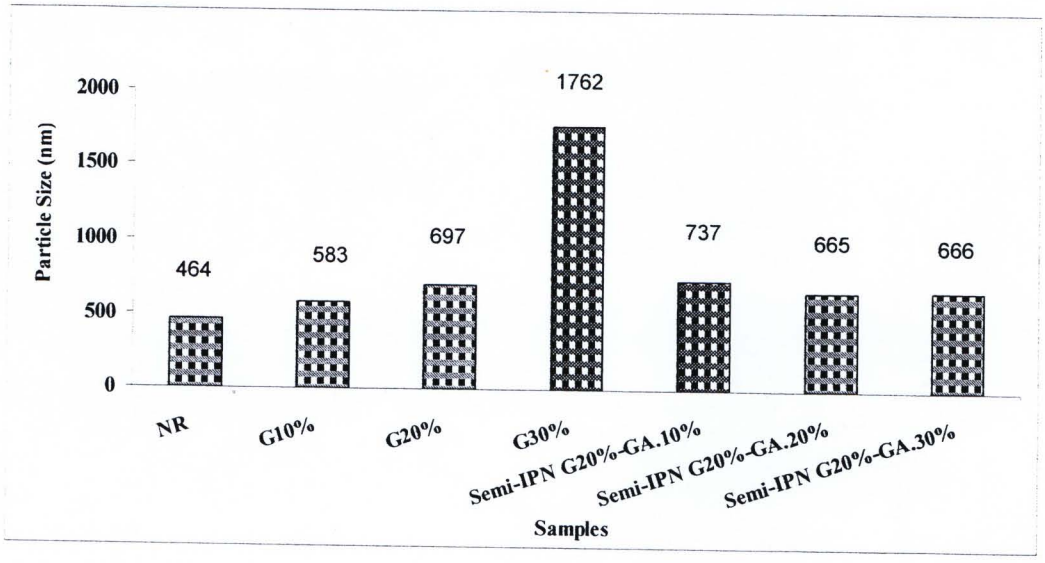


ภาพที่ 20 เทอร์โมแกรม DSC ของ (A) Semi-IPN 10 :1 (B) Semi-IPN 7.5:1 (C) Semi-IPN 5:1 และ(D) Semi-IPN 2.5:1

4.4 การศึกษาขนาดอนุภาคของวัสดุ Semi-IPN ด้วยเทคนิค Dynamic Light Scattering (DLS)

จากการศึกษาขนาดอนุภาคโดยใช้เทคนิค Dynamic Light Scattering (DLS) ดังภาพที่ 21 พบว่าขนาดอนุภาคของยางธรรมชาติเท่ากับ 464 nm เมื่อทำการเปรียบเทียบกับกราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติและไดเมทิลอะมิโนเอทิลเมทาคริเลต จะเห็นว่าขนาดอนุภาคเพิ่มขึ้น การมีโมเลกุลของไดเมทิลอะมิโนเอทิลเมทาคริเลตกราฟต์บนโมเลกุลยางธรรมชาติทำให้ขนาดอนุภาคของยางมีขนาดขยายใหญ่ขึ้นตามปริมาณของไดเมทิลอะมิโนเอทิลเมทาคริเลตที่กราฟต์บนอนุภาคของยางธรรมชาติ

และผลจากการศึกษาขนาดอนุภาคของ Semi-IPN ที่อัตราส่วนยางธรรมชาติ (G20%) และไคโตซาน 10 : 1 โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณสารเชื่อมขวางกลูตารัลดีไฮด์ (GA. 10 20 และ 30 %โดยโมลของไคโตซาน) พบว่าขนาดอนุภาคมีค่าใกล้เคียง ดังนั้นสารเชื่อมขวางจึงไม่มีผลต่อขนาดอนุภาค Semi-IPN ของยางธรรมชาติและไคโตซาน



ภาพที่ 21 เปรียบเทียบขนาดอนุภาคของ Semi-IPN ที่มีการการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารเชื่อมขวาง (GA. 10 20 และ 30 %โดยโมลของไคโตซาน) กับยางธรรมชาติและกราฟต์โคพอลิเมอร์ (Graft 10%, 20% และ30%)

4.5 การทดสอบความสามารถในการขึ้นรูปของกราฟต์โคพอลิเมอร์ และวัสดุ Semi-IPN

ความสามารถในการขึ้นรูปของกราฟต์โคพอลิเมอร์ และวัสดุ Semi-IPN ของกราฟต์โคพอลิเมอร์และไคโตซานวัดได้โดยใช้เครื่อง Osciilating Disc Rheometer (ODR) อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบที่ 150 องศาเซลเซียส ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 7 พบว่าค่า Scorch time (t_s1) ของกราฟต์โคพอลิเมอร์ต่ำกว่าของยางธรรมชาติ แสดงว่า DMAEMA ทำให้การเชื่อมขวางของซัลเฟอร์เกิดเร็วขึ้น และผลต่างของแรงบิด (MH-ML) ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าค่านี้จะแปรผันตรงกับความหนาแน่นในการเชื่อมขวางโมเลกุลของยาง [27] เพิ่มขึ้น แสดงประสิทธิภาพการเชื่อมขวางมากขึ้นด้วย แต่ค่า ML ก็มากขึ้นด้วยแสดงว่ากราฟต์โคพอลิเมอร์มีความหนืดเพิ่มขึ้นทั้งนี้เกิดจาก PDMAEMA ที่กราฟต์บนสายโซ่ยางธรรมชาติทำให้การเคลื่อนไหวของสายโซ่ยากขึ้น ส่วนวัสดุ Semi-IPN ของกราฟต์โคพอลิเมอร์และไคโตซานพบว่ามีค่า Scorch time (t_s1) ต่ำกว่าของ NR แต่สูงกว่าค่าของกราฟต์โคพอลิเมอร์แสดงว่าไคโตซานต่อค่า Scorch time (t_s1) เนื่องจากไคโตซานมีหมู่ $-NH_2$ ซึ่งแสดงความเป็นเบสเป็นผลให้ปฏิกิริยาการเชื่อมขวางเกิดเร็วขึ้น ค่า ML ต่ำกว่ากราฟต์โคพอลิเมอร์แต่สูงกว่า NR แสดงว่าไคโตซานที่เชื่อมขวางด้วยกูลตารัลดีไฮด์ทำให้ความหนืดลดลง ผลต่างแรงบิด (MH-ML) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของกราฟต์โคพอลิเมอร์สูงขึ้น ขณะที่ระยะเวลาคงรูปที่เหมาะสม (t_c90) แสดงค่าใกล้เคียงกับยางธรรมชาติ

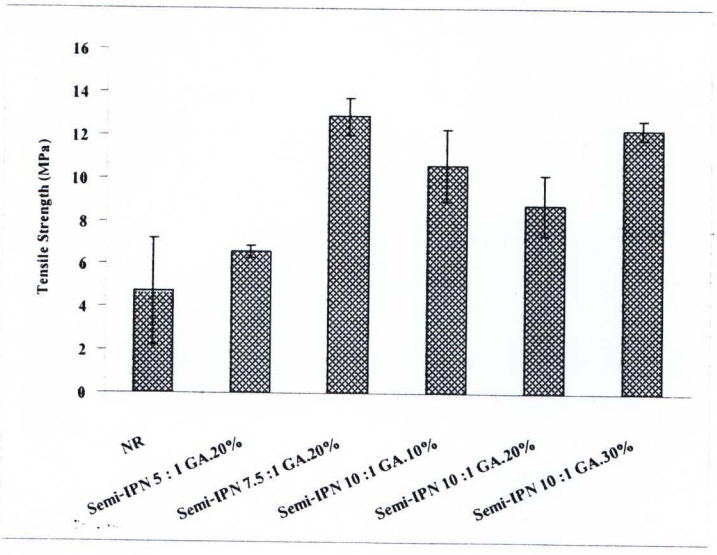
ตารางที่ 7 ศึกษาเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปของวัสดุ Semi-IPN ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส

ตัวอย่าง	MH (dNm)	ML (dNm)	MH-ML (dNm)	t_s1 (s)	t_c90 (s)
NR	4.44	0.84	3.60	2.17	2.42
Graft 10%	25.15	2.89	22.26	0.47	2.49
Graft 20%	26.56	4.55	22.01	0.54	3.35
Graft 30%	15.04	4.23	10.81	0.47	2.04
Semi-IPN 5.0 : 1 GA.20%	4.31	0.99	3.32	1.20	3.02
Semi-IPN 7.5 : 1 GA.20%	2.88	1.32	1.56	2.26	3.15
Semi-IPN 10 : 1 GA.10%	28.64	2.22	26.42	1.12	2.12
Semi-IPN 10 : 1 GA.30%	29.52	2.26	27.26	1.06	2.24

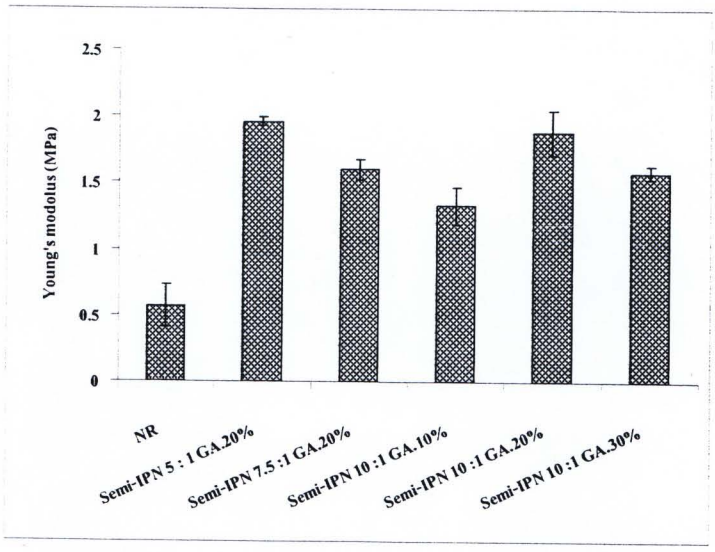
4.6 การศึกษาสมบัติเชิงกล

ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุ Semi-IPN ของยางธรรมชาติและไคโตซาน โดยมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติที่กราฟต์ด้วยมอนอเมอร์ 20% โมลของยางธรรมชาติ (Graft 20%) และไคโตซาน 5 :1, 7.5 : 1 และ 10 :1 ที่ปริมาณสารเชื่อมขวาง (GA.) 20% โมลของไคโตซานเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงลดลงเมื่อปริมาณไคโตซานเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 22 แสดงค่าต่ำสุดที่อัตราส่วนยางธรรมชาติและไคโตซาน 5 : 1 เนื่องจากคุณสมบัติตามยืดหยุ่นของยางธรรมชาติลดลงจากการที่สายโซ่โมเลกุลที่มีการเคลื่อนที่อย่างอิสระถูกจำกัด ซึ่งการเติมไคโตซานเป็นการเพิ่มสมบัติความเป็นพลาสติกให้กับวัสดุ จะเห็นได้จากการลดลงของค่าเปอร์เซ็นต์ความเครียดที่วัตถุขาด (ภาพที่ 24) และค่ายังมอดูลัสมีแนวโน้มสูงขึ้น (ภาพที่ 23) เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของไคโตซาน [25]

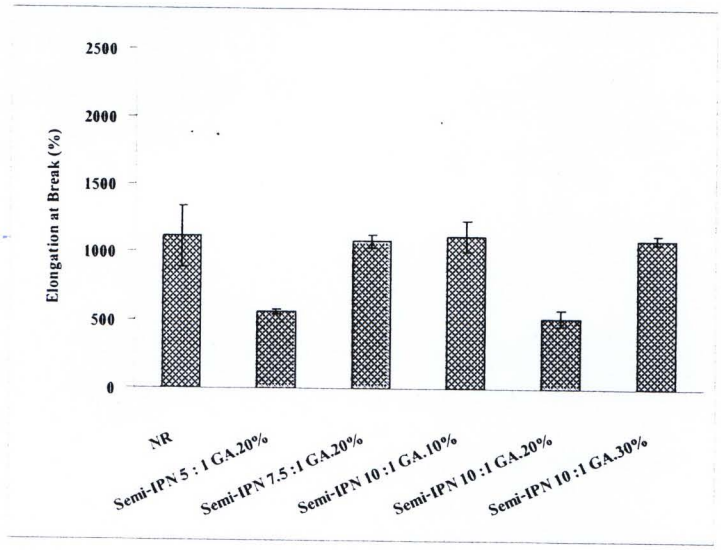
นอกจากนั้นยังทำการศึกษาผลของสารเชื่อมขวาง (GA.) ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุ Semi-IPN ของยางธรรมชาติและไคโตซานที่อัตราส่วน 10 : 1 โดยมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารเชื่อมขวางที่ 10, 20 และ 30% โมลของไคโตซาน พบว่าไม่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุมากนัก



ภาพที่ 22 ค่าความต้านทานแรงดึงของยางธรรมชาติเปรียบเทียบกับวัสดุ Semi-IPN ของยางธรรมชาติ (Graft 20%) และไคโตซาน



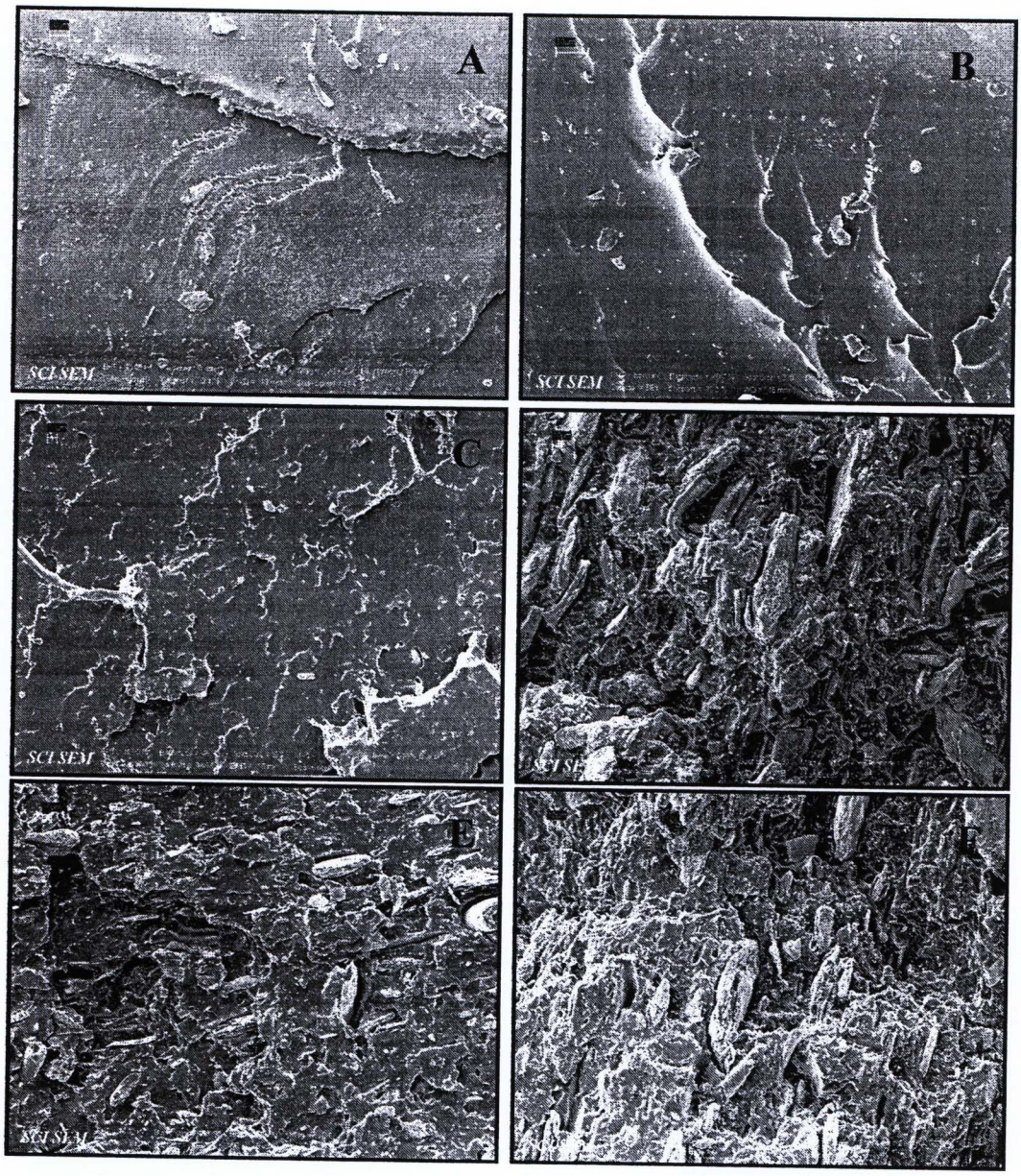
ภาพที่ 23 ค่ายังมอดูลัสของยางธรรมชาติเปรียบเทียบกับวัสดุ Semi-IPN ของยางธรรมชาติ (Graft 20%) และไคโตซาน



ภาพที่ 24 ค่าเปอร์เซ็นต์ความเครียดที่จุดขาดของยางธรรมชาติเปรียบเทียบกับวัสดุ Semi-IPN ของยางธรรมชาติ (Graft 20%) และไคโตซาน

4.7 การศึกษาสัณฐานวิทยาวัสดุ Semi-IPN ของยางธรรมชาติและไคโตซาน

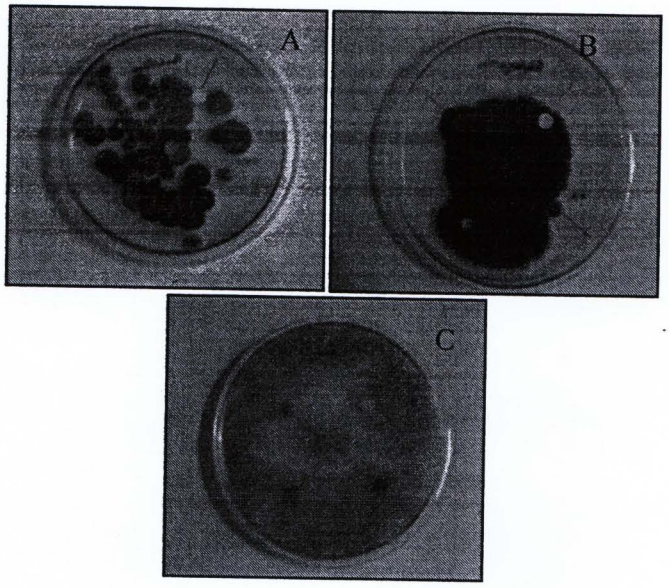
การศึกษาสัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติ กราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติและไดเมทิลอะมิโนเอทิลเมทาคริเลต (Graft 10% และ 20%) วัสดุ Semi-IPN (5 : 1 GA.20%, 10 : 1 GA.20 และ 30%) ดังแสดงในภาพที่ 25 (A-F) โดยใช้เครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (SEM) ชิ้นงานตัวอย่างที่ทำการศึกษาได้จากการทดสอบสมบัติเชิงกลโดยใช้เครื่อง Tensometer ลักษณะของสัณฐานวิทยาที่ใช้กำลังขยาย 200 เท่า รอยฉีกขาดของยางธรรมชาติ (ภาพที่ 25A) และกราฟต์โคพอลิเมอร์ (ภาพที่ 25B และ 25C) คล้ายกันคือ พื้นผิวมีลักษณะการฉีกขาดเป็นรอยเส้น ซึ่งแตกต่างจากรอยฉีดขาดของวัสดุ Semi-IPN ของยางธรรมชาติและไคโตซานที่อัตราส่วนต่างๆ (ภาพที่ 25D, 25E และ 25F) มีลักษณะรอยขาดขรุขระไม่สม่ำเสมอซึ่งเกิดจากการค่อยๆ ยืดออกแล้วจึงขาด ส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ของวัสดุ Semi-IPN (7.5 : 1 GA.20%, 10 : 1 GA.10, 20 และ 30%) มีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ



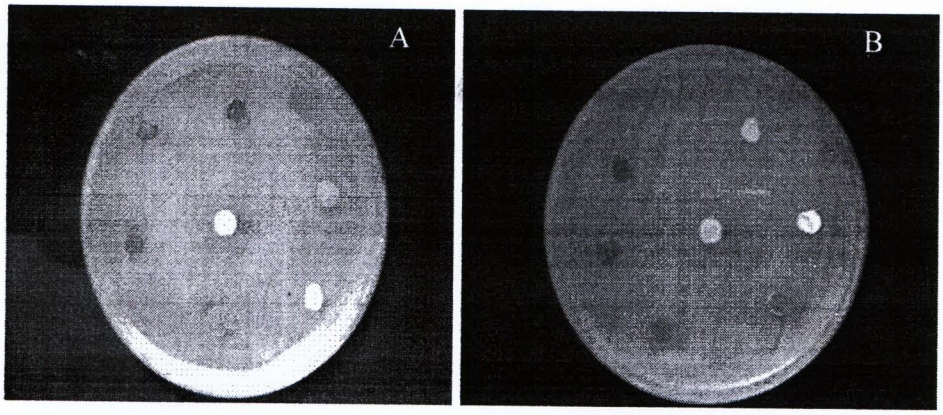
ภาพที่ 25 เปรียบเทียบโครงสร้างสัณฐานวิทยาของ (A) ยางธรรมชาติ (B) G 10% (C) G 20% (D) Semi-IPN 5 :1 GA.20% (E) Semi-IPN 10 :1 GA.20% และ (F) Semi-IPN 10 :1 GA.30% กำลังขยาย 200 เท่า

4.8 การทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราและแบคทีเรีย

ผลจากการศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราและแบคทีเรียของวัสดุ Semi-IPN ที่อัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อไคโตซาน 10 : 1, 7.5 : 1, 5 : 1 และ 2.5 : 1 เปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ โดยใช้วิธีการ Agar diffusion test เชื้อราที่ใช้ในการทดสอบคือ *Aspergillus niger* *Rhizopus sp.* และ *Penicilium sp.* เลี้ยงบนอาหาร PDA แบคทีเรียชนิด *Escherichia coli* และ *Staphylococcus aureus* เลี้ยงบนอาหาร NA ตัดชิ้นตัวอย่างเป็นลักษณะวงกลมแล้ววางบนจานอาหารเลี้ยงเชื้อ ซึ่งเชื้อราใช้เวลาในการทดสอบ 3 วันและแบคทีเรียใช้เวลา 18 ชั่วโมง จากการทดสอบปรากฏว่าไม่พบ clear zone เกิดขึ้นรอบตัวอย่าง แสดงให้เห็นว่าวัสดุที่เตรียมได้ไม่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราและแบคทีเรียได้ จากการศึกษาพบว่ามีหลายปัจจัยที่ผลต่อการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราและแบคทีเรีย เช่น น้ำหนักโมเลกุลของไคโตซาน ซึ่งพบว่าไคโตซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 10,000-100,000 แบคทีเรียสามารถเจริญเติบโตได้ [28] ความเข้มข้นและเปอร์เซ็นต์ดีอะซิเลชันของไคโตซาน รวมทั้งสภาวะที่ใช้ในการศึกษา เช่น pH เวลาและอุณหภูมิ เป็นต้น [26] จึงต้องมีการศึกษาปรับปรุงวัสดุต่อไปในอนาคตเพื่อให้ได้วัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและไคโตซานที่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราและแบคทีเรียได้



ภาพที่ 26 ทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อรา (A) *Penicilium sp.* (B) *Aspergillus niger sp.* และ (C) *Rhizopus sp.*



ภาพที่ 27 ทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย (A) *Escherichia coli* และ (B) *Staphylococcus aureus*