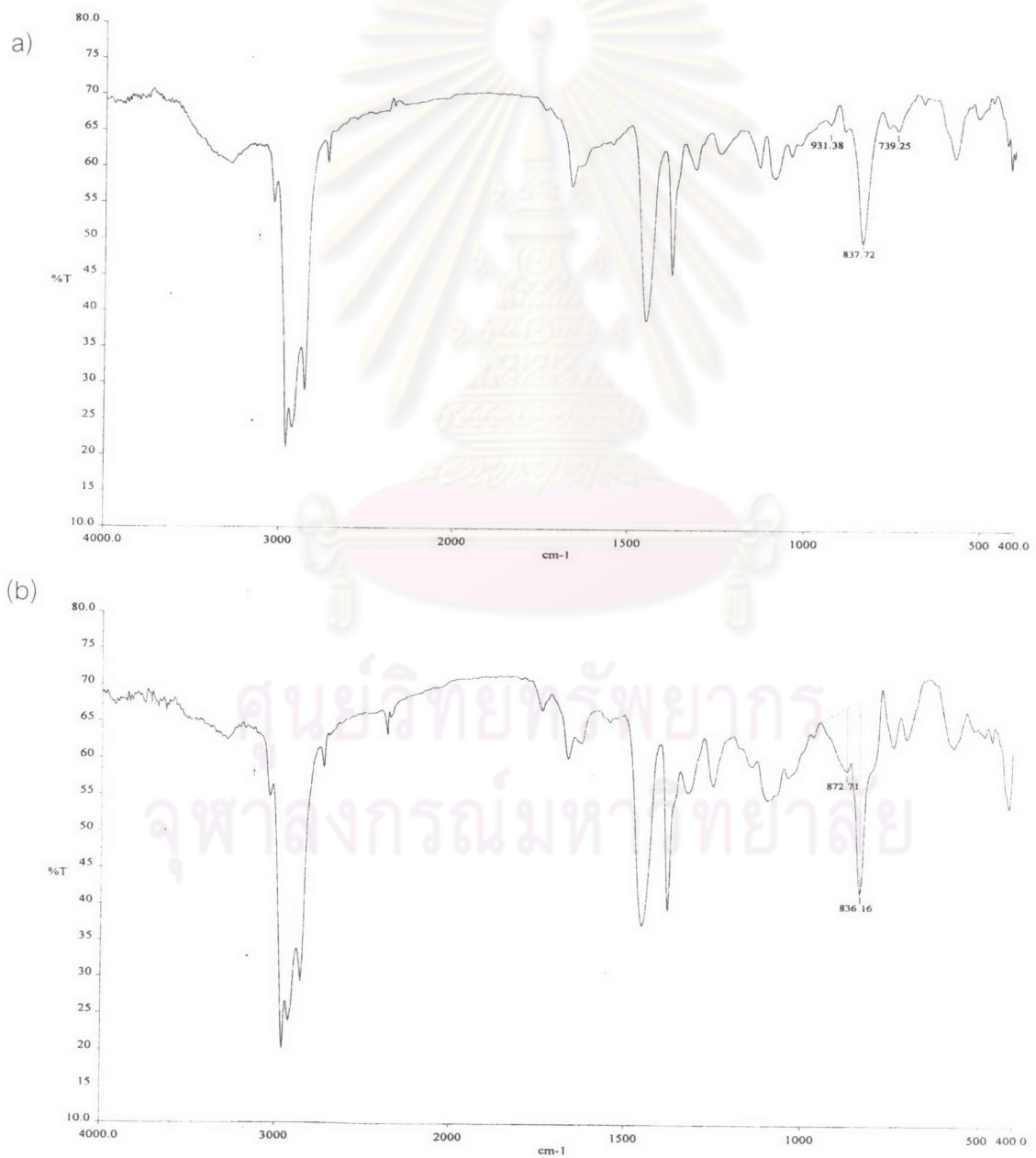


บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การวิเคราะห์หาปริมาณหมู่ไอพอกไซด์ของยาง ENR ด้วยเทคนิค FT-IR

รูปที่ 4.1 แสดงตัวอย่าง FT-IR สเปกตรัม ของยางธรรมชาติ และยาง ENR ที่เตรียมได้จำนวน 1 ตัวอย่าง สำหรับ FT-IR สเปกตรัมของยาง ENR อื่นๆ แสดงไว้ในรูปที่ ข-1 (ในภาคผนวก ข)



รูปที่ 4.1 FT-IR สเปกตรัม ของ (a) ยางธรรมชาติ (b) ยาง ENR

จากรูปที่ 4.1 (b) และรูปที่ ข-1 (ในภาคผนวก ข) แสดงให้เห็นพีคที่เลขคลื่น 870 cm^{-1} (การสั่นแบบเส้นของ C-O ของหมู่เอพอกไซด์) ในขณะที่พีคที่เลขคลื่น 835 cm^{-1} (แสดงพันธะ C-H ต่ออยู่กับ $-\text{C}=\text{C}-$ ของ *cis*-1,4-polyisoprene) ลดลงเมื่อเกิดการเอพอกซิไดซ์มากขึ้น (เทียบกับรูปที่ 4.1 (a))

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการคำนวณหาปริมาณหมู่เอพอกไซด์ในยาง ENR ที่เตรียมจากสูตรและภาวะการทดลองในตารางที่ 3.2 ซึ่งปริมาณหมู่เอพอกไซด์คำนวณได้จากอัตราส่วนการดูดกลืนแสง (absorbance ratio) ของแถบการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่ตำแหน่งเลขคลื่น 870 cm^{-1} ต่อแถบการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งเลขคลื่น 835 cm^{-1} ดังสมการต่อไปนี้ (Davey and Loadman, 1984) [9]

$$\text{อัตราส่วนการดูดกลืน} = \frac{a_{870}}{a_{870} + a_{835}}$$

โดย a_{870} คือ ค่าการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่ตำแหน่งเลขคลื่น 870 cm^{-1}
 a_{835} คือ ค่าการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่ตำแหน่งเลขคลื่น 835 cm^{-1}

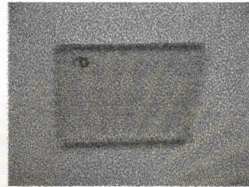
เมื่อได้อัตราส่วนการดูดกลืนแสงแล้วให้คุณด้วย 100 จะเป็นร้อยละของหมู่เอพอกไซด์ในยาง ENR และเพื่อความสะดวก ต่อไปนี้ในวิทยานิพนธ์นี้จะเรียกยาง ENR ที่มีเปอร์เซ็นต์เอพอกซิไดซ์ 24.70, 40.00, 52.34, 62.50, 69.80 และ 77.42 ว่า ENR 25, ENR 40, ENR 50, ENR 60, ENR 70 และ ENR 80 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 เปอร์เซ็นต้อพอกซิไดซ์ของยาง ENR

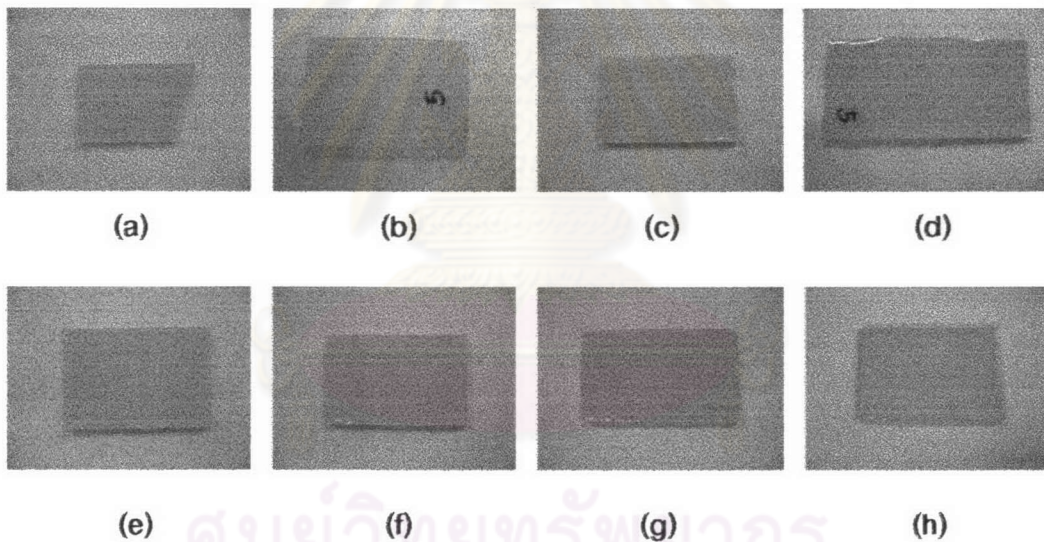
ยาง ENR	เปอร์เซ็นต้อพอกซิไดซ์	ยาง ENR
ENR A	$(8.75/(8.75 + 26.67)) \times 100 = 24.70\%$	ENR 25
ENR B	$(2.50/(2.50 + 3.75)) \times 100 = 40.00\%$	ENR 40
ENR C	$(4.58/(4.58 + 4.17)) \times 100 = 52.34\%$	ENR 50
ENR D	$(6.25/(6.25 + 3.75)) \times 100 = 62.50\%$	ENR 60
ENR E	$(6.75/(6.75 + 2.92)) \times 100 = 69.80\%$	ENR 70
ENR F	$(10.0/(10.0 + 2.92)) \times 100 = 77.42\%$	ENR 80

4.2 ลักษณะชิ้นงานของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับยาง ENR

รูปที่ 4.2 และ 4.3 แสดงลักษณะชิ้นงานของอิพอกซีเรซิน และตัวอย่างชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับยางชนิดต่างๆ (CTBN, ยางธรรมชาติ และยาง ENR) ปริมาณ 10 phr ตามลำดับ สำหรับชิ้นงานของพอลิเมอร์ผสมอื่นๆ แสดงไว้ในรูป ค-1 ถึง ค-9 (ในภาคผนวก ค)



รูปที่ 4.2 ลักษณะชิ้นงานของอิพอกซีเรซิน



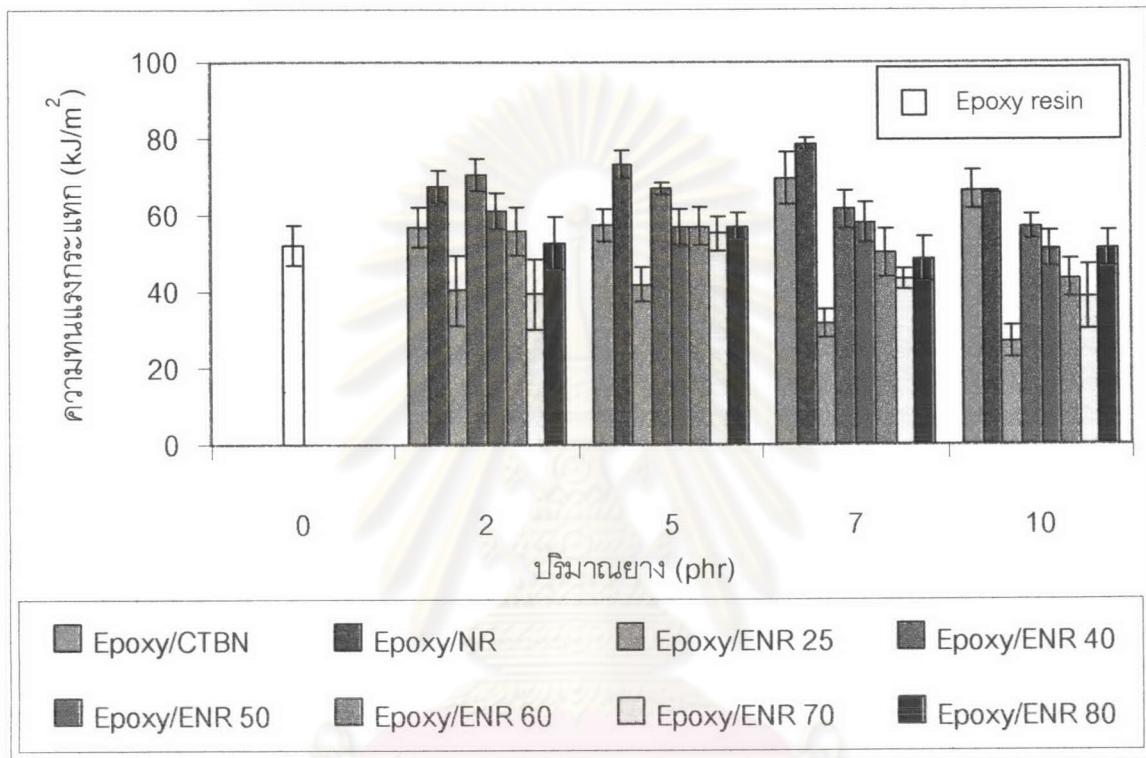
รูปที่ 4.3 ลักษณะชิ้นงานของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับยาง (a) CTBN (b) NR (c) ENR 25 (d) ENR 40 (e) ENR 50 (f) ENR 60 (g) ENR 70 และ (h) ENR 80 ปริมาณ 10 phr

รูปที่ 4.2-4.3 แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานทั้งหมดมีสีเหลืองอมน้ำตาลอ่อน ซึ่งเป็นสีที่มาจากสารบ่ม และชิ้นงานของอิพอกซีเรซินมีความใสมากกว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับยางชนิดต่างๆ

4.3 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอีพอกซีเรซินกับยางชนิดต่างๆ

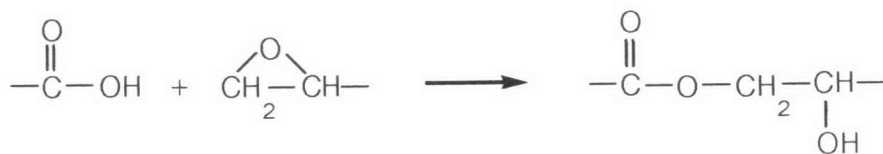
4.3.1 ความทนแรงกระแทก

รูปที่ 4.4 แสดงค่าความทนแรงกระแทกของอีพอกซีเรซินเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมระหว่างอีพอกซีเรซินกับยางชนิดต่างๆ (CTBN, ยางธรรมชาติ และยาง ENR) ในปริมาณต่างๆ กัน



รูปที่ 4.4 ความทนแรงกระแทกของอีพอกซีเรซินเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมระหว่างอีพอกซีเรซินกับยาง CTBN, ยางธรรมชาติ และยาง ENR ปริมาณต่างๆ

รูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าการเติมยาง CTBN มีผลทำให้ความทนแรงกระแทกของชิ้นงานสูงขึ้น และมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อปริมาณ CTBN เพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคของ CTBN ที่มีลักษณะเป็นเม็ดกลมเล็กๆ กระจายอย่างสม่ำเสมอในอีพอกซีเรซิน ซึ่งเมื่อชิ้นงานได้รับแรงกระแทกทำให้แรงกระแทกไม่สามารถส่งผ่านชิ้นงานเป็นแนวตรงได้ เพราะแรงบางส่วนเมื่อเดินทางผ่านอนุภาคของ CTBN จะถูกซับไว้ด้วยสมบัติยืดหยุ่นของ CTBN ส่วนแรงที่เหลือค่อยๆ ถูกส่งต่อไปยังอีพอกซีเรซิน นอกจากนี้ CTBN ยังสามารถเกิดพันธะปฏุมุมกับอีพอกซีเรซินได้ โดยเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างหมู่คาร์บอกซิลใน CTBN และหมู่อีพอกไซด์ในอีพอกซีเรซิน ดังแสดงในรูปที่ 4.5 จึงทำให้ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอีพอกซีเรซินและ CTBN สูงกว่าอีพอกซีเรซิน และในงานวิจัยนี้ความทนแรงกระแทกมีค่ามากที่สุดเมื่อใส่ CTBN ปริมาณ 7 phr



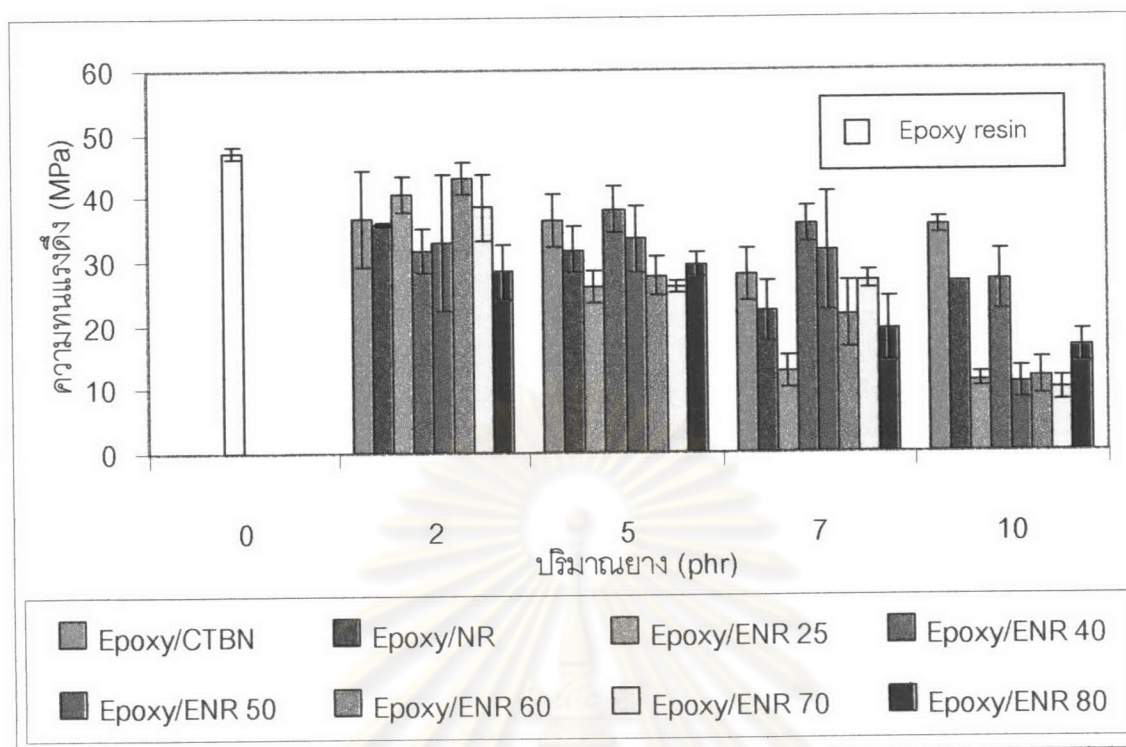
รูปที่ 4.5 ปฏิกิริยาระหว่างหมู่คาร์บอกซิลใน CTBN และหมู่อีพอกไซด์ในอีพอกซีเรซิน [2]

ส่วนการเติมยางธรรมชาติ (NR) ในอีพอกซีเรซิน มีผลทำให้ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมมีค่าสูงขึ้นเช่นเดียวกับพอลิเมอร์ผสมระหว่างอีพอกซีเรซิน/CTBN เนื่องจากอนุภาคของ NR มีลักษณะเป็นเม็ดกลมเล็กๆ กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในอีพอกซีเรซิน จึงมีผลเพิ่มความทนแรงกระแทกได้เช่นเดียวกับ CTBN และในงานวิจัยนี้ความทนแรงกระแทกมีค่าสูงที่สุดเมื่อใส่ NR ปริมาณ 7 phr ซึ่งการเติม NR ปริมาณ 10 phr กลับทำให้ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมลดลง เพราะปริมาณน้ำที่เพิ่มมากขึ้นทำให้ชิ้นงานมีฟองอากาศเกิดเป็นจำนวนมากในขณะบ่มชิ้นงาน

สำหรับการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างอีพอกซีเรซินกับยาง ENR มีผลทั้งที่ทำให้ความทนแรงกระแทกสูงกว่าและต่ำกว่าอีพอกซีเรซิน กรณีผสมอีพอกซีเรซินกับยาง ENR 25 ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง เนื่องจากยาง ENR 25 มีหมู่อีพอกไซด์ยังไม่มากพอที่จะทำให้ยาง ENR กระจายตัวได้ดีในอีพอกซีเรซิน จึงควรใช้ยาง ENR ที่มีหมู่อีพอกไซด์เพิ่มขึ้นเพื่อเพิ่มการกระจายตัวของยาง ENR ในอีพอกซีเรซิน ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานที่ใช้ยาง ENR 40 ปริมาณ 2 phr มีความทนแรงกระแทกสูงที่สุด และหากใช้ยาง ENR 40 เพิ่มขึ้น กลับทำให้ความทนแรงกระแทกลดลง ทั้งนี้เนื่องจากมีหมู่อีพอกไซด์ที่แข็งตึงมากขึ้น จึงทำให้แตกหักง่ายขึ้น ส่วนยาง ENR 50, ENR 60, ENR 70 และ ENR 80 ที่มีหมู่อีพอกไซด์ที่แข็งตึงมากขึ้น และต้องใช้เวลาในการเตรียมค่อนข้างนาน ซึ่งอาจทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางขาดออกได้มากกว่ายาง ENR ที่มีหมู่อีพอกไซด์ต่ำ จึงมีผลทำให้ความทนแรงกระแทกมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้ในปริมาณเพิ่มขึ้น

4.3.2 ความทนแรงดึง

รูปที่ 4.6 แสดงค่าความทนแรงดึงของอีพอกซีเรซินเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมระหว่างอีพอกซีเรซินกับยางชนิดต่างๆ (CTBN, ยางธรรมชาติ และยาง ENR) ในปริมาณต่างๆ กัน



รูปที่ 4.6 ความทนแรงดึงของอีพอกซีเรซินเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมระหว่างอีพอกซีเรซินกับยาง CTBN, ยางธรรมชาติ และยาง ENR ปริมาณต่างๆ

รูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอีพอกซีเรซินกับยางชนิดต่างๆ ทั้งหมดมีค่าต่ำกว่าของอีพอกซีเรซิน ทั้งนี้เนื่องจากยางเป็นพอลิเมอร์ที่มีความทนแรงดึงต่ำกว่าอีพอกซีเรซินซึ่งเป็นเทอร์โมเซตพลาสติก ดังนั้น การเติมยางเข้าไปในอีพอกซีเรซินจึงมีผลทำให้ชิ้นงานมีความทนแรงดึงลดลง

สำหรับชิ้นงานที่ผสมกับยาง CTBN ค่าความทนแรงดึงมีแนวโน้มลดลงไม่มากเมื่อปริมาณ CTBN เพิ่มขึ้น เนื่องจาก CTBN สามารถเกิดพันธะปฏุมุมกับอีพอกซีเรซินดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

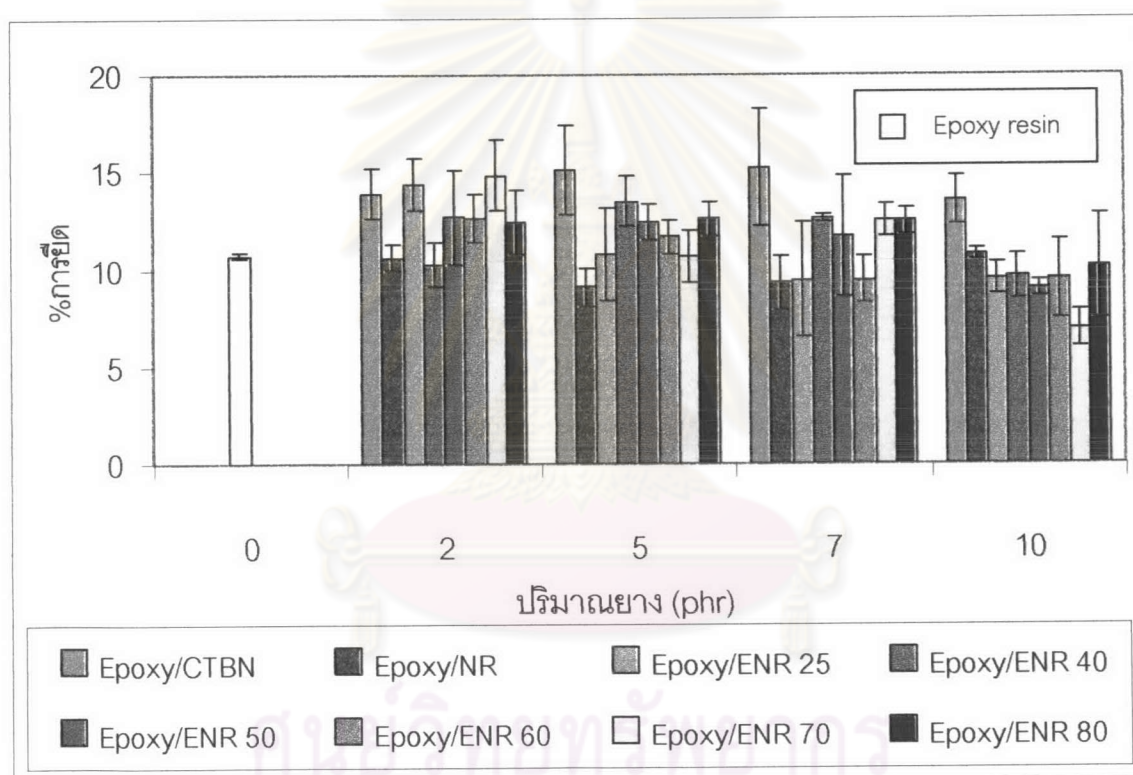
ส่วนการผสมยาง NR กับอีพอกซีเรซิน ทำให้ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมต่ำกว่าการผสมกับ CTBN ทั้งนี้เพราะ CTBN สามารถเข้ากับอีพอกซีเรซินได้ดีกว่ายาง NR

จากการทดลอง พบว่ายาง ENR มีผลทำให้พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีค่าความทนแรงดึงค่อนข้างต่ำ โดยเฉพาะเมื่อใส่ปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งการใส่ยาง ENR 60 ปริมาณ 2 phr ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีความทนแรงดึงสูงที่สุด แต่จะลดลงมากเมื่อใส่ปริมาณเพิ่มขึ้นไปถึง 10 phr ซึ่งหากพิจารณาการใส่ยาง ENR 40 พบว่าความทนแรงดึงมีค่าสูงสุดเมื่อใส่ปริมาณ 5 phr และมีค่าไม่ต่างจากการใส่ยาง ENR 60 ปริมาณ 2 phr มากนัก หากแต่ยาง ENR 40 มีข้อดี คือ ใช้เวลาเตรียมเพียง 4 ชั่วโมง ซึ่งน้อยกว่ายาง ENR 60 ซึ่งใช้เวลาถึง 10 ชั่วโมง

นอกจากนี้ ยังพบว่าการใช้ยาง ENR ที่มีหมู่อีพอกไซด์สูงในปริมาณมาก จะทำให้ชิ้นงานมีความทนแรงดึงที่ต่ำมาก ทั้งนี้เนื่องจากยาง ENR ที่มีหมู่อีพอกไซด์สูงจะมีพันธะคู่ในโครงสร้างของยาง ENR น้อย ซึ่งเมื่อทำการดึงจะเกิดผลึกน้อยหรือมี strain crystallization ต่ำ จึงทำให้มีความทนแรงดึงต่ำมาก [6]

4.3.3 เปอร์เซนต์การยืด

รูปที่ 4.7 แสดงเปอร์เซนต์การยืดของอีพอกซีเรซินเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมระหว่างอีพอกซีเรซินกับยางชนิดต่างๆ (CTBN, ยางธรรมชาติ และยาง ENR) ในปริมาณต่างๆ กัน



รูปที่ 4.7 เปอร์เซนต์การยืดของอีพอกซีเรซินเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมระหว่างอีพอกซีเรซินกับยาง CTBN, ยางธรรมชาติ และยาง ENR ปริมาณต่างๆ

รูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าการผสมยางกับอีพอกซีเรซินทำให้ชิ้นงานมีเปอร์เซนต์การยืดสูงกว่าหรือใกล้เคียงกับอีพอกซีเรซิน ทั้งนี้เพราะยางเป็นพอลิเมอร์ที่มีการยืดตัวมากกว่าอีพอกซีเรซิน จึงช่วยในการยืดตัวของพอลิเมอร์ผสม ดังเช่นการเติมยาง CTBN ในพอลิเมอร์ผสมทำให้เปอร์เซนต์การยืดของชิ้นงานสูงขึ้น เนื่องจากยาง CTBN สามารถเกิดพันธะปฏิกิริยากับอีพอกซีเรซินดังที่ได้กล่าวมาแล้ว แต่ถ้าเติมยาง CTBN ในปริมาณ 10 phr กลับทำให้ชิ้นงานยืดตัวได้น้อยลง เนื่องจาก ยาง CTBN ที่กระจาย

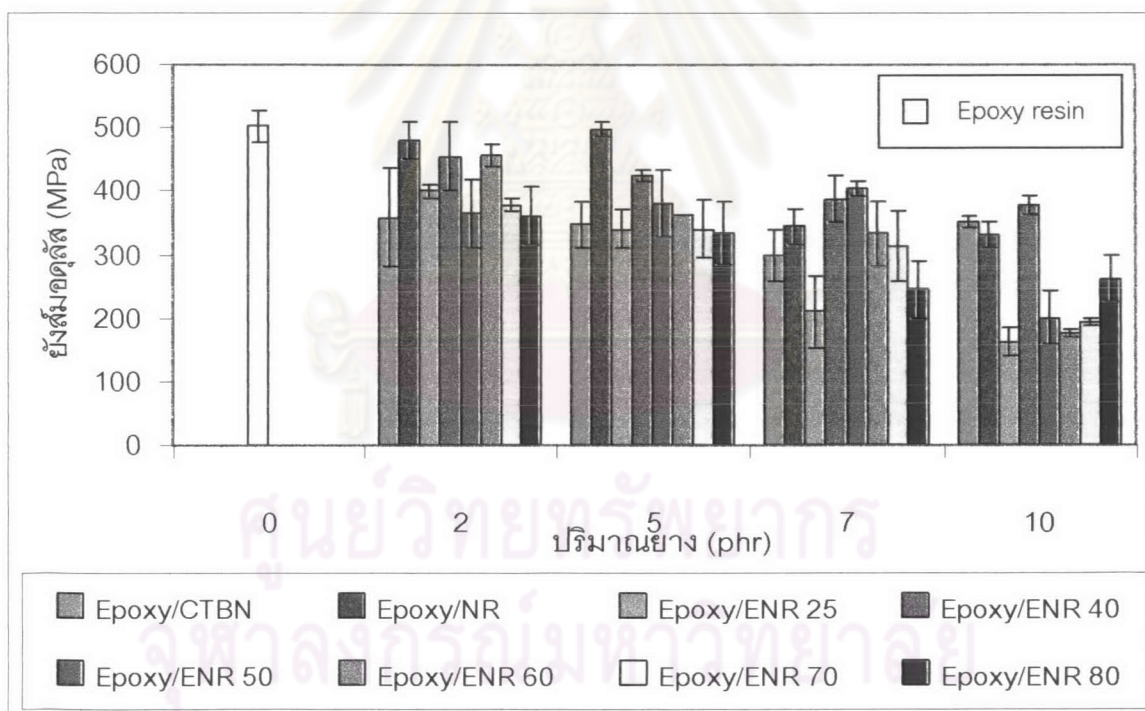
ตัวอยู่ในอีพอกซีเรซินมีลักษณะเป็นเม็ดกลมๆ ซึ่งถ้าเติมในปริมาณมากๆ จะเกิดช่องว่างเล็กๆ (microvoids) จำนวนมากที่ส่งผลทำให้เปอร์เซ็นต์การยึดของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง [18]

การใส่ยาง NR ในพอลิเมอร์ผสมทำให้การยึดตัวของชิ้นงานลดลง เนื่องจาก NR ที่ใช้ในการทดลองมีน้ำเป็นองค์ประกอบ ซึ่งส่งผลทำให้ชิ้นงานมีฟองอากาศเกิดขึ้นในขณะบ่มชิ้นงานดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

สำหรับพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากยาง ENR แสดงผลที่พอสรุปได้ว่าเปอร์เซ็นต์การยึดของชิ้นงานลดลงเมื่อปริมาณหมู่อีพอกไซด์ในยาง ENR เพิ่มขึ้น เพราะหมู่อีพอกไซด์เป็นหมู่ที่แข็งตึง ซึ่งเมื่อเข้าร่วมตัวกับอีพอกซีเรซินได้ดีทำให้ยึดตัวได้ยาก โดยเฉพาะเมื่อใส่ในปริมาณมากๆ

4.3.4 ยังสัมมอดุลัส

รูปที่ 4.8 แสดงค่ายังสัมมอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอีพอกซีเรซินกับยางชนิดต่างๆ (CTBN, ยางธรรมชาติ และยาง ENR) ในปริมาณต่างๆ กัน



รูปที่ 4.8 ค่ายังสัมมอดุลัสของอีพอกซีเรซินเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมระหว่างอีพอกซีเรซินกับยาง CTBN, ยางธรรมชาติ และยาง ENR ปริมาณต่างๆ

รูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าเมื่อใส่ยางในอีพอกซีเรซินมากขึ้น มีผลทำให้ค่ายังสัมมอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมต่ำกว่าอีพอกซีเรซิน เนื่องจากยางเป็นพอลิเมอร์ที่มีค่ายังสัมมอดุลัสต่ำกว่าอีพอกซีเรซิน ดังนั้น

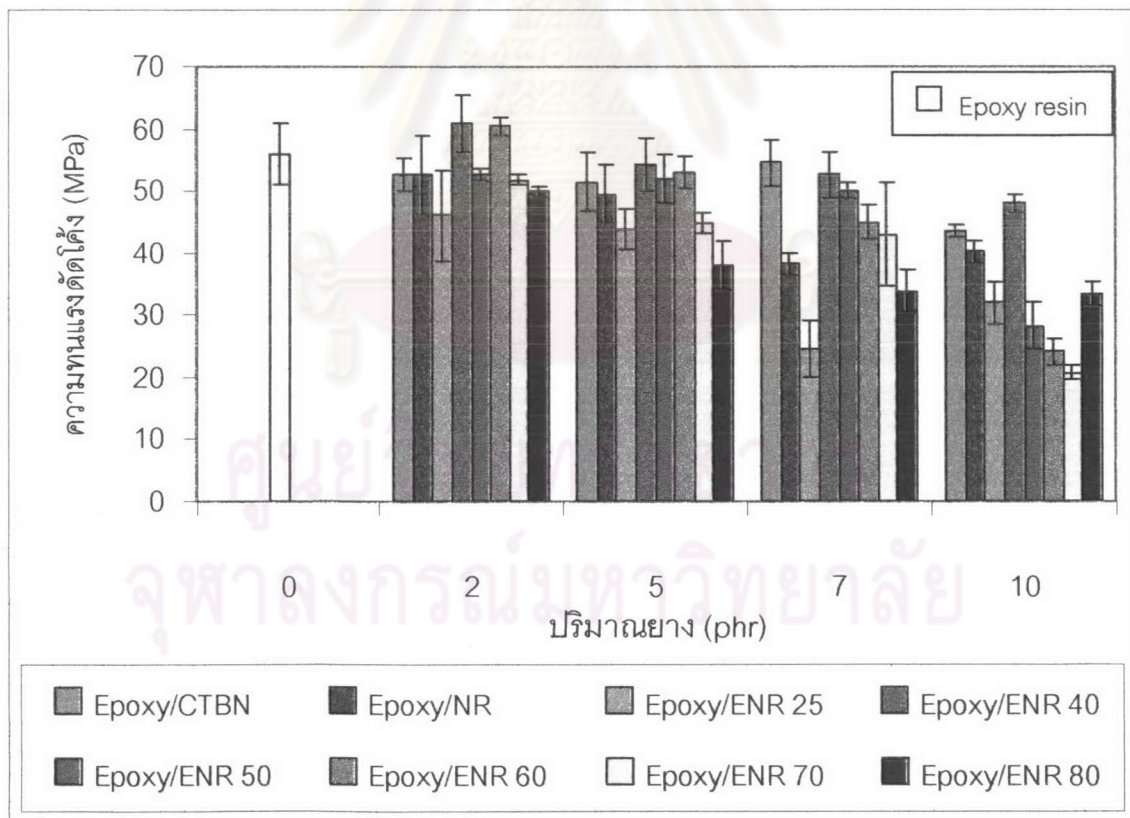
เมื่อเติมเข้าไปในอีพอกซีเรซินปริมาณมาก จะทำให้พอลิเมอร์ผสมมีค่ายังสัมมอดูล์สลดลงมาก เช่น การเติมยาง CTBN ในพอลิเมอร์ผสมทำให้ยังสัมมอดูล์สของชิ้นงานลดลง

การใส่ยาง NR ในพอลิเมอร์ผสมไม่เกิน 5 phr พบว่า ยังสัมมอดูล์สของชิ้นงานมีค่าค่อนข้างสูง แต่ถ้าใส่ปริมาณมากขึ้น สมบัติความยืดหยุ่นของยางทำให้มอดูล์สมีค่าลดลง

พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากยาง ENR แสดงผลที่สามารถสรุปได้ว่ายังสัมมอดูล์สของชิ้นงาน มีค่าลดลงมากเมื่อปริมาณหมู่อีพอกไซด์ในยาง ENR เพิ่มขึ้น ยกเว้นยาง ENR 40 ที่ค่ายังสัมมอดูล์สของชิ้นงานลดลงไม่มากนัก เนื่องจากยาง ENR 40 ใช้เวลาเตรียมเพียง 4 ชั่วโมง ในขณะที่ยาง ENR อื่นๆ ใช้เวลาเตรียมนานกว่า จึงอาจทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางขาดออก จึงทำให้ยังสัมมอดูล์สลดลงมากเมื่อปริมาณเพิ่มขึ้น

4.3.5 ความทนแรงดัดโค้ง

รูปที่ 4.9 แสดงค่าความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอีพอกซีเรซินกับชนิดต่างๆ (CTBN, ยางธรรมชาติ และยาง ENR) ในปริมาณต่างๆ กัน



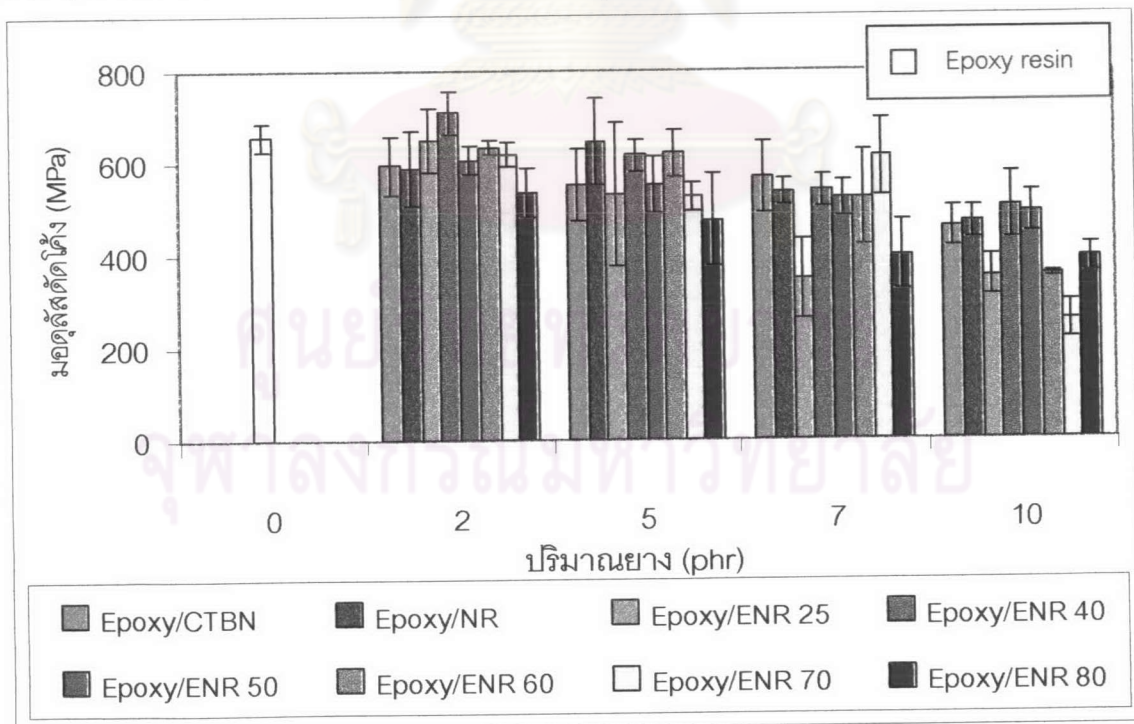
รูปที่ 4.9 ค่าความทนแรงดัดโค้งของอีพอกซีเรซินเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมระหว่างอีพอกซีเรซินกับยาง CTBN, ยางธรรมชาติ และยาง ENR ปริมาณต่างๆ

รูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่าเมื่อใส่ยางในอีพอกซีเรซิน มีผลทำให้ค่าความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมมีทั้งสูงกว่าและต่ำกว่าอีพอกซีเรซิน แต่มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณยางในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น เนื่องจากยางมีความอ่อนนิ่มกว่าอีพอกซีเรซิน ดังนั้น เมื่อใส่เข้าไปในปริมาณมาก จะทำให้ชิ้นงานมีความทนแรงดัดโค้งลดลง ซึ่งการเติมยาง CTBN ก็มีผลทำให้ค่าความทนแรงดัดโค้งของชิ้นงานลดลง หากแต่ลดลงไม่มากนักเนื่องจากยาง CTBN สามารถเข้ารวมตัวกับอีพอกซีเรซินได้ดี

การใส่ยาง NR ในพอลิเมอร์ผสมจะให้ผลใกล้เคียงกับการใส่ยาง CTBN คือ ชิ้นงานมีค่าความทนแรงดัดโค้งต่ำกว่าอีพอกซีเรซินเล็กน้อย แต่จะมีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อใส่ในปริมาณตั้งแต่ 7 phr ขึ้นไป ทั้งนี้เพราะปริมาณน้ำที่อยู่ในยาง NR เพิ่มขึ้น จึงอาจเกิดฟองอากาศมากขึ้นขณะทำการบ่ม มีผลทำให้ชิ้นงานมีค่าความทนแรงดัดโค้งที่ต่ำลง

พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากยาง ENR มีค่าความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมมีทั้งสูงกว่าและต่ำกว่าอีพอกซีเรซิน แต่ก็มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณยาง ENR ในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น และจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใส่ยาง ENR 40 ปริมาณ 2 phr มีผลทำให้พอลิเมอร์ผสมมีค่าความทนแรงดัดโค้งสูงสุด และลดลงไม่มากนักเมื่อใส่ในปริมาณเพิ่มขึ้น

รูปที่ 4.10 แสดงค่ามอดูลัสดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอีพอกซีเรซินกับยางชนิดต่างๆ (CTBN, ยางธรรมชาติ และยาง ENR) ในปริมาณต่างๆ กัน

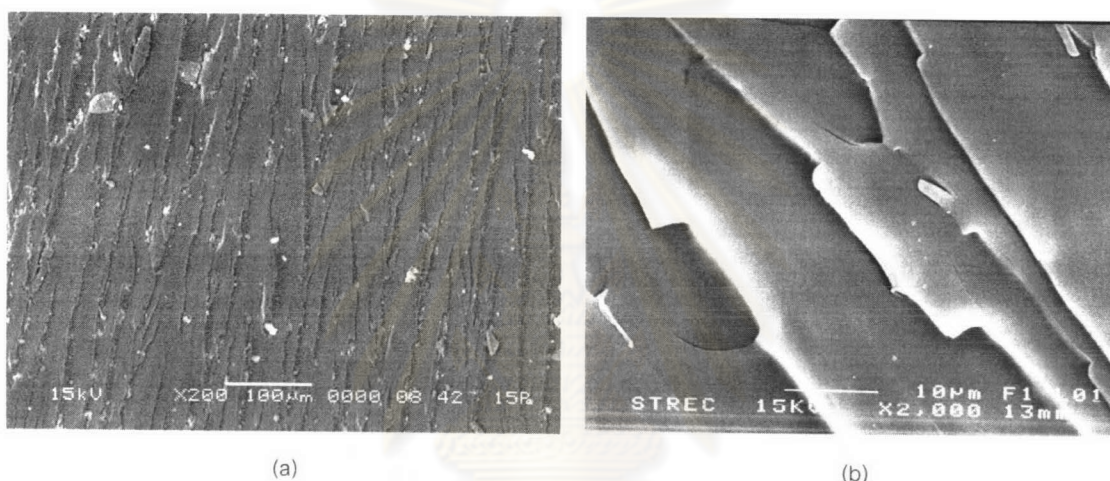


รูปที่ 4.10 ค่ามอดูลัสดัดโค้งของอีพอกซีเรซินเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมระหว่างอีพอกซีเรซินกับยาง CTBN, ยางธรรมชาติ และยาง ENR

จากรูปที่ 4.10 พบว่า มอดุลัสตัดโค้งของชิ้นงานมีค่าไปในทำนองเดียวกับค่าความทนแรงดัดโค้ง ซึ่งสามารถอธิบายเหตุผลไปในแนวทางเดียวกัน

4.4 สัณฐานวิทยาของอีพอกซีเรซินและพอลิเมอร์ผสมระหว่างอีพอกซีเรซินกับยางชนิดต่างๆ

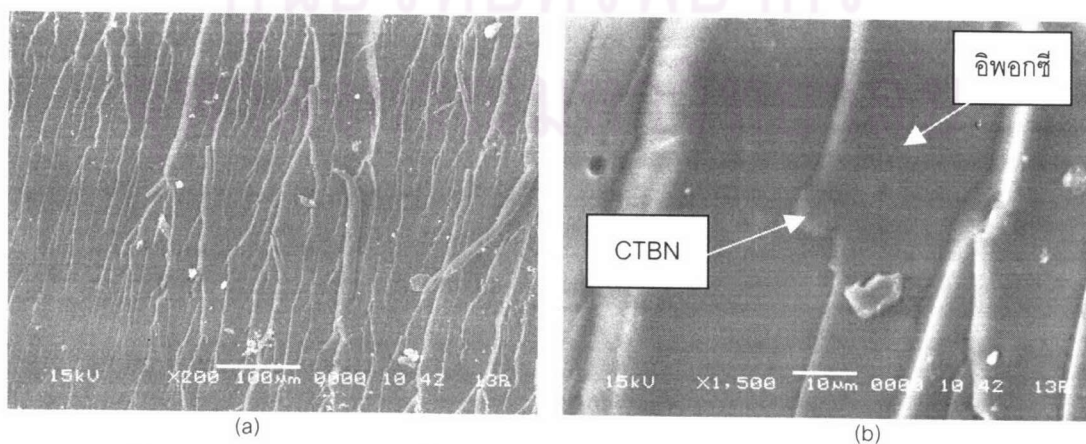
ภายหลังจากทดสอบความทนแรงกระแทก ชิ้นงานที่เกิดการแตกหักตามแนวภาคตัดขวาง ได้ถูกนำไปตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยเครื่อง SEM โดยรูปที่ 4.11 แสดงสัณฐานวิทยาของอีพอกซีเรซิน ซึ่งพบว่าอีพอกซีเรซินแตกหักโดยเป็นการเลื่อนระนาบของโมเลกุลออกจากกัน ทำให้พื้นผิวของรอยแตกหักไม่เรียบ



รูปที่ 4.11 สัณฐานวิทยาของพื้นผิวรอยแตกของอีพอกซีเรซิน

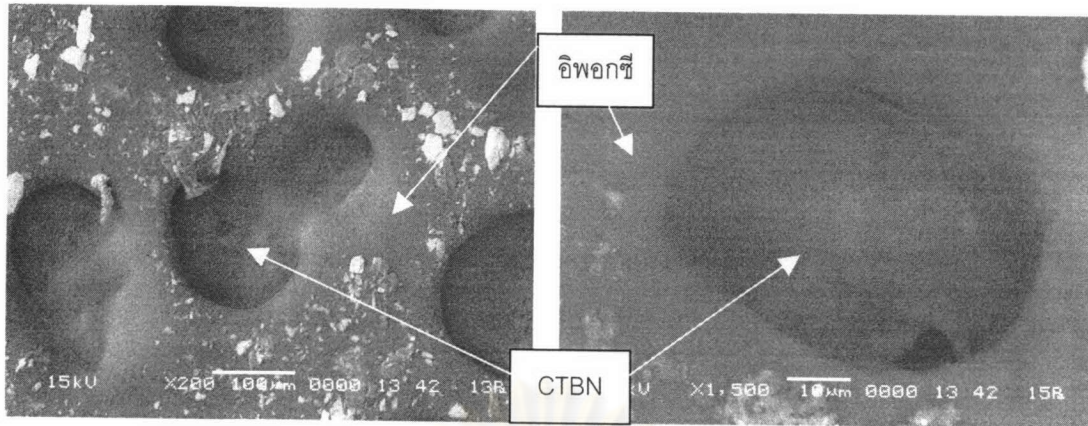
(a) กำลังขยาย 200 เท่า (b) กำลังขยาย 2,000 เท่า

รูปที่ 4.12-4.27 สัณฐานวิทยาของพื้นผิวรอยแตกหักของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอีพอกซีเรซินกับยางชนิดต่างๆ (CTBN, ยางธรรมชาติ และยาง ENR) ในปริมาณต่างๆ กัน

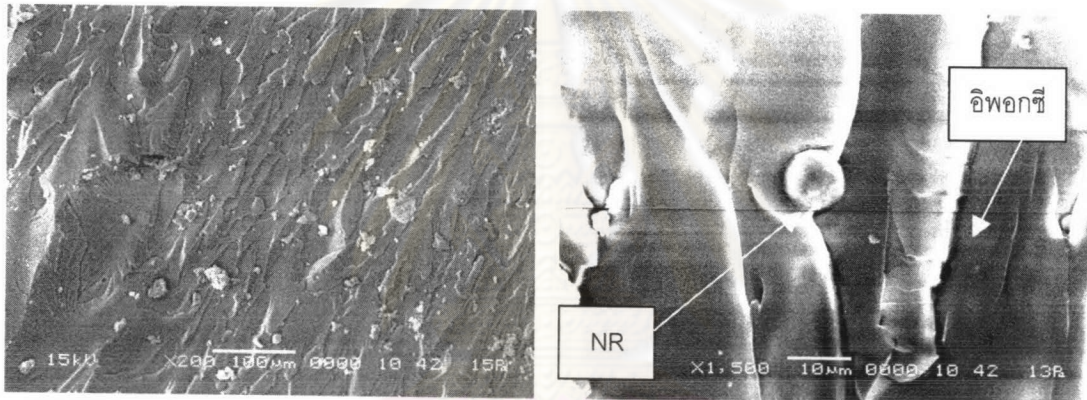


รูปที่ 4.12 สัณฐานวิทยาของพื้นผิวรอยแตกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอีพอกซีเรซินกับ

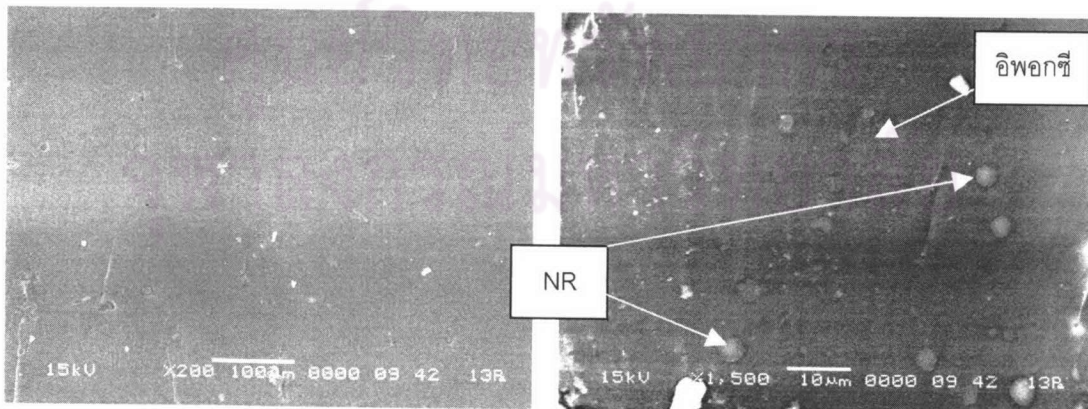
ยาง CTBN ปริมาณ 5 phr (a) กำลังขยาย 200 เท่า (b) กำลังขยาย 1,500 เท่า



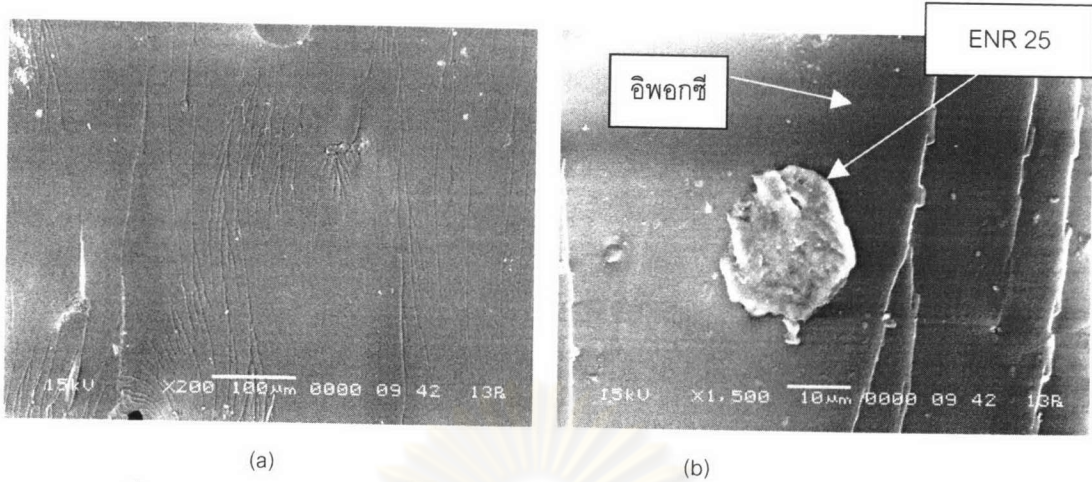
รูปที่ 4.13 สัณฐานวิทยาของพื้นผิวรอยแตกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอีพอกซีเรซินกับยาง CTBN ปริมาณ 10 phr (a) กำลังขยาย 200 เท่า (b) กำลังขยาย 1,500 เท่า



รูปที่ 4.14 สัณฐานวิทยาของพื้นผิวรอยแตกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอีพอกซีเรซินกับยาง NR ปริมาณ 5 phr (a) กำลังขยาย 200 เท่า (b) กำลังขยาย 1,500 เท่า



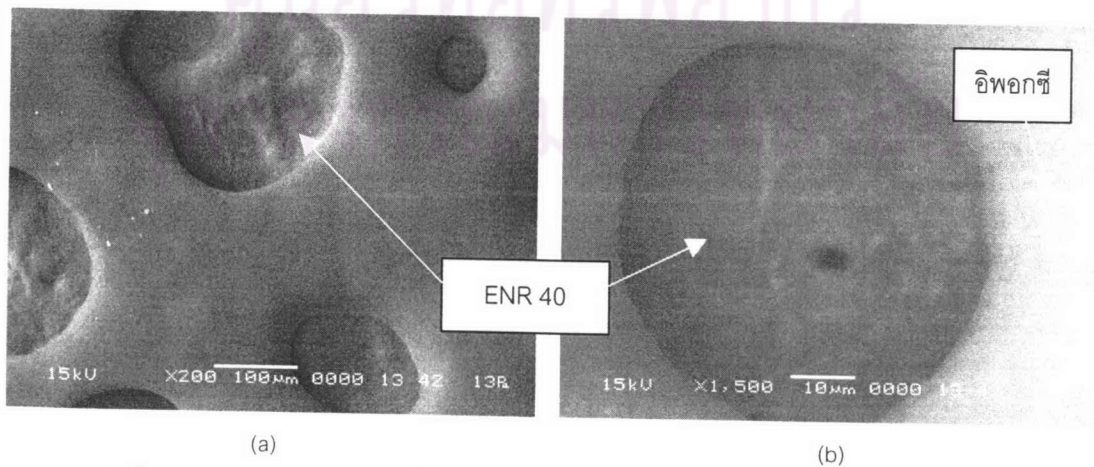
รูปที่ 4.15 สัณฐานวิทยาของพื้นผิวรอยแตกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอีพอกซีเรซินกับยาง NR ปริมาณ 10 phr (a) กำลังขยาย 200 เท่า (b) กำลังขยาย 1,500 เท่า



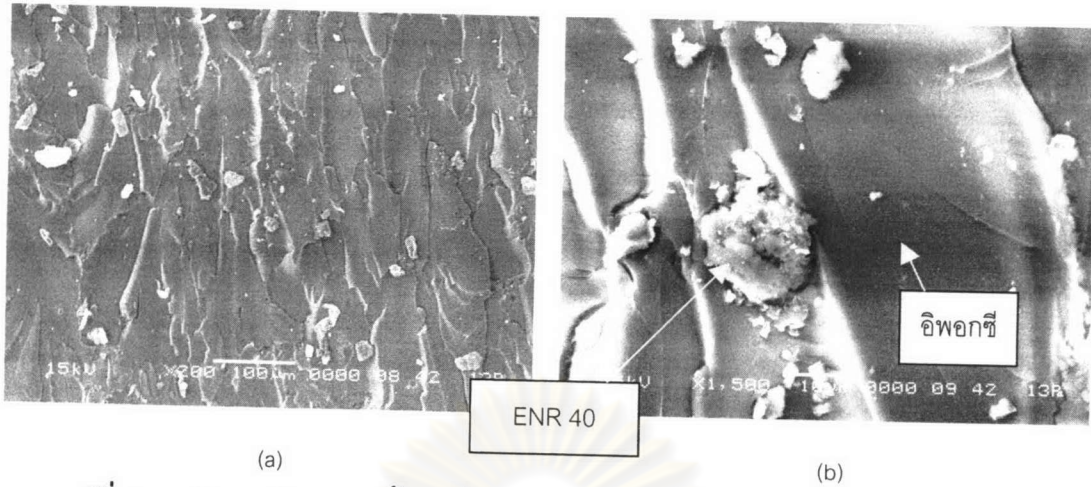
รูปที่ 4.16 สัณฐานวิทยาของพื้นผิวรอยแตกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับ ENR 25 ปริมาณ 5 phr (a) กำลังขยาย 200 เท่า (b) กำลังขยาย 1,500 เท่า



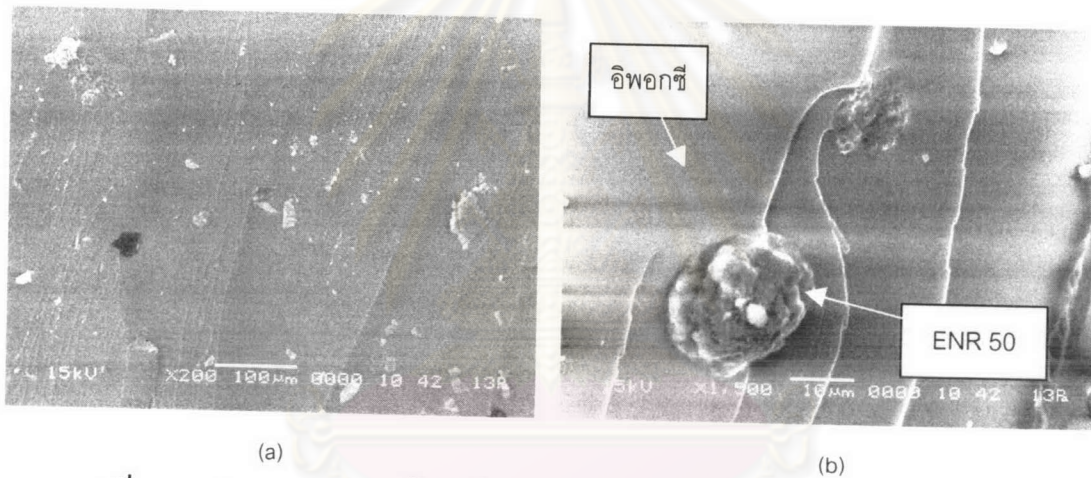
รูปที่ 4.17 สัณฐานวิทยาของพื้นผิวรอยแตกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับ ENR 25 ปริมาณ 10 phr (a) กำลังขยาย 200 เท่า (b) กำลังขยาย 1,500 เท่า



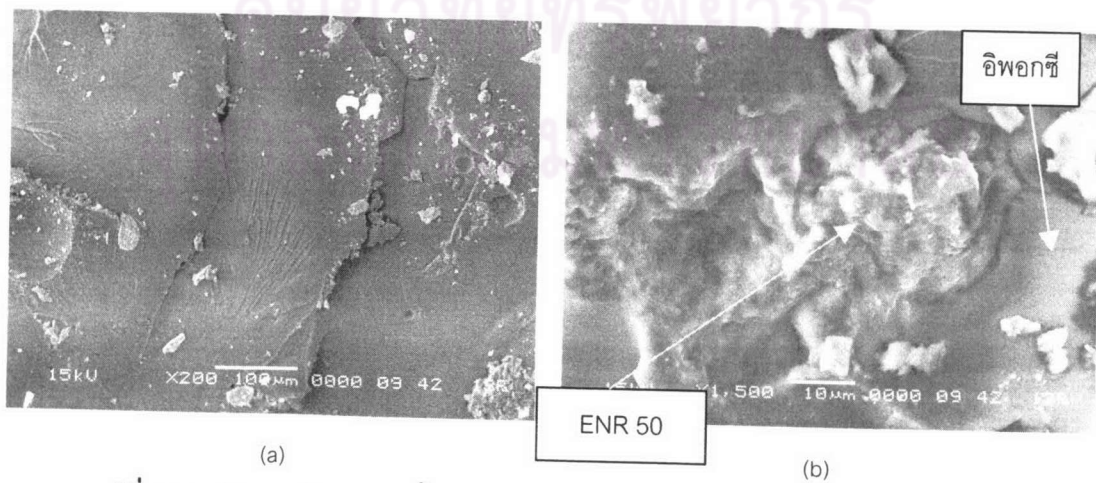
รูปที่ 4.18 สัณฐานวิทยาของพื้นผิวรอยแตกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับ ENR 40 ปริมาณ 5 phr (a) กำลังขยาย 200 เท่า (b) กำลังขยาย 1,500 เท่า



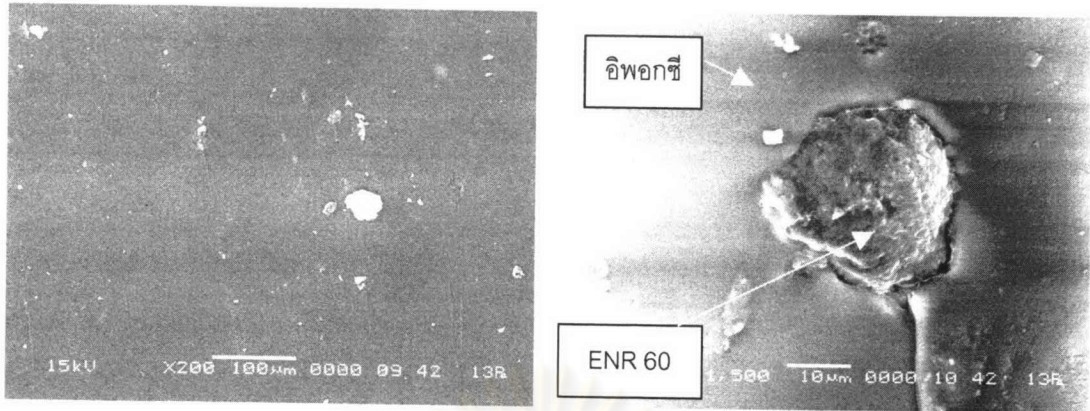
รูปที่ 4.19 สัณฐานวิทยาของพื้นผิวที่รอยแตกหักของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับ ENR 40 ปริมาณ 10 phr (a) กำลังขยาย 200 เท่า (b) กำลังขยาย 1,500 เท่า



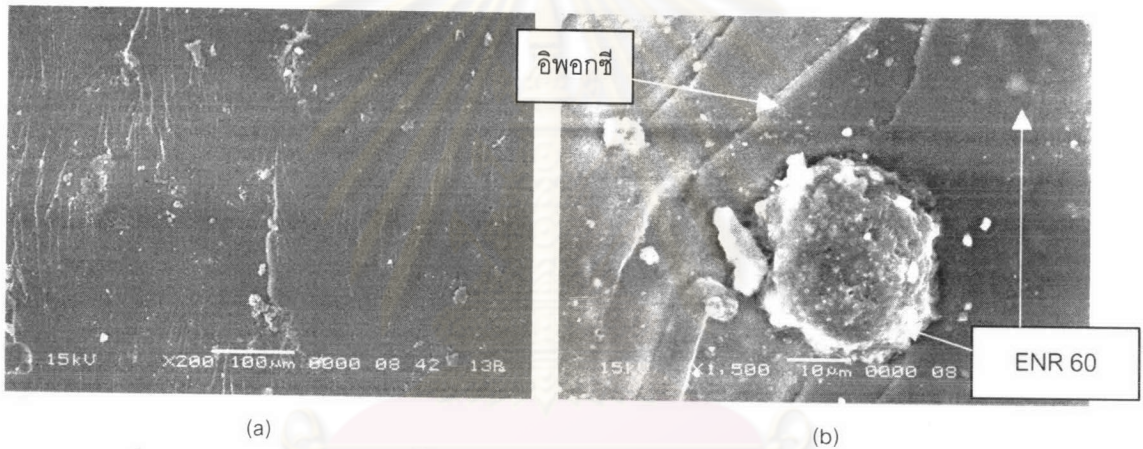
รูปที่ 4.20 สัณฐานวิทยาของพื้นผิวที่รอยแตกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับ ENR 50 ปริมาณ 5 phr (a) กำลังขยาย 200 เท่า (b) กำลังขยาย 1,500 เท่า



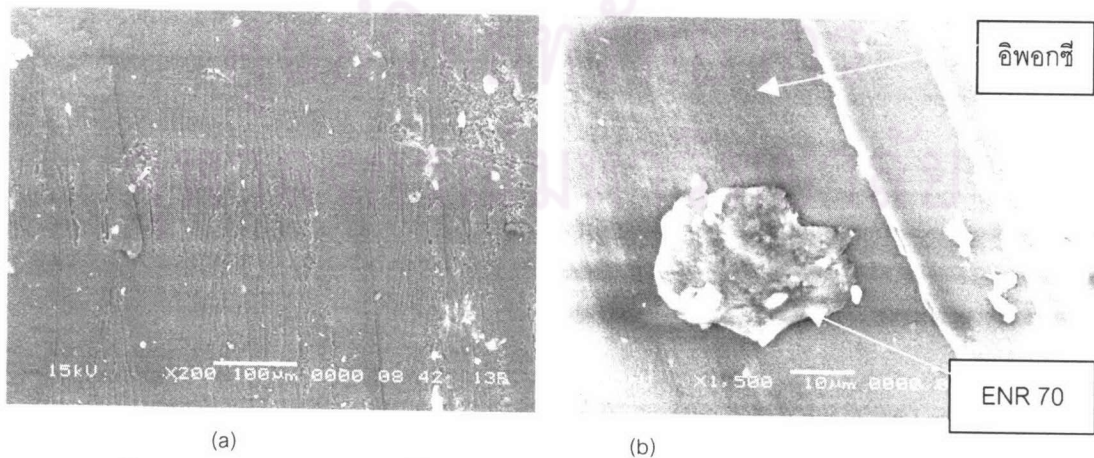
รูปที่ 4.21 สัณฐานวิทยาของพื้นผิวรอยแตกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับ ENR 50 ปริมาณ 10 phr (a) กำลังขยาย 200 เท่า (b) กำลังขยาย 1,500 เท่า



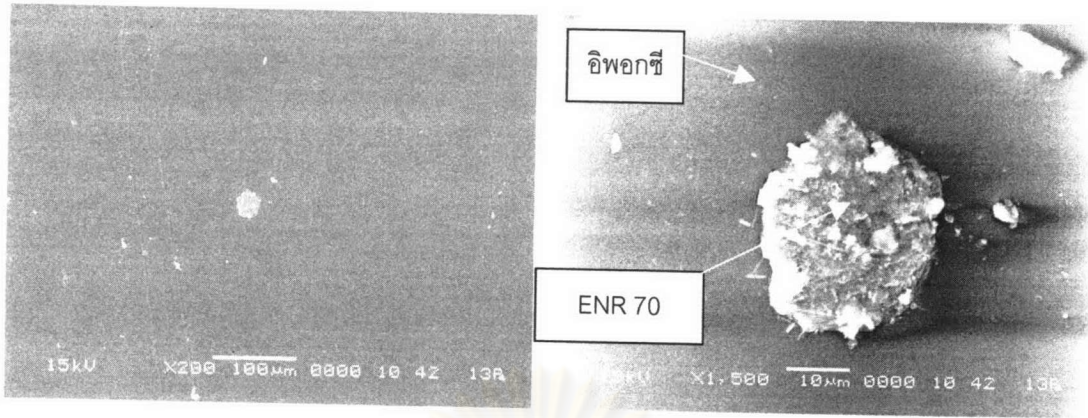
รูปที่ 4.22 สัณฐานวิทยาของพื้นผิวรอยแตกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับ ENR 60 ปริมาณ 5 phr (a) กำลังขยาย 200 เท่า (b) กำลังขยาย 1,500 เท่า



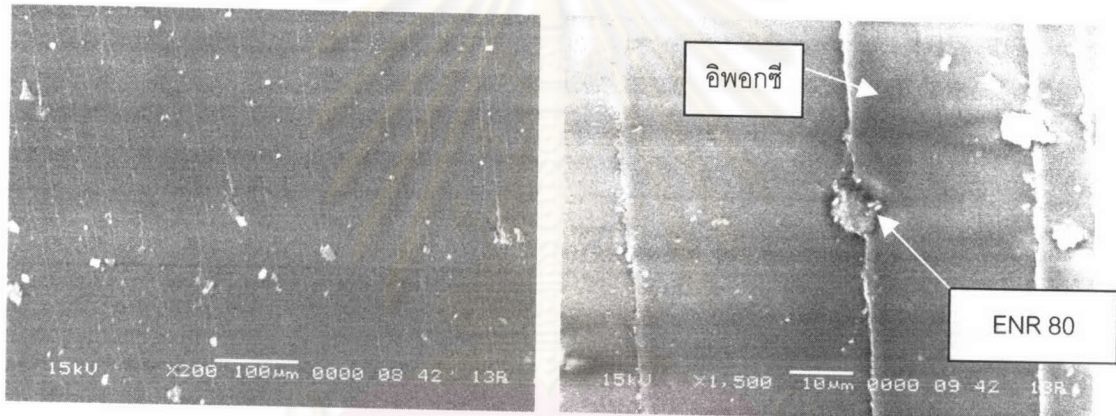
รูปที่ 4.23 สัณฐานวิทยาของพื้นผิวรอยแตกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับ ENR 60 ปริมาณ 10 phr (a) กำลังขยาย 200 เท่า (b) กำลังขยาย 1,500 เท่า



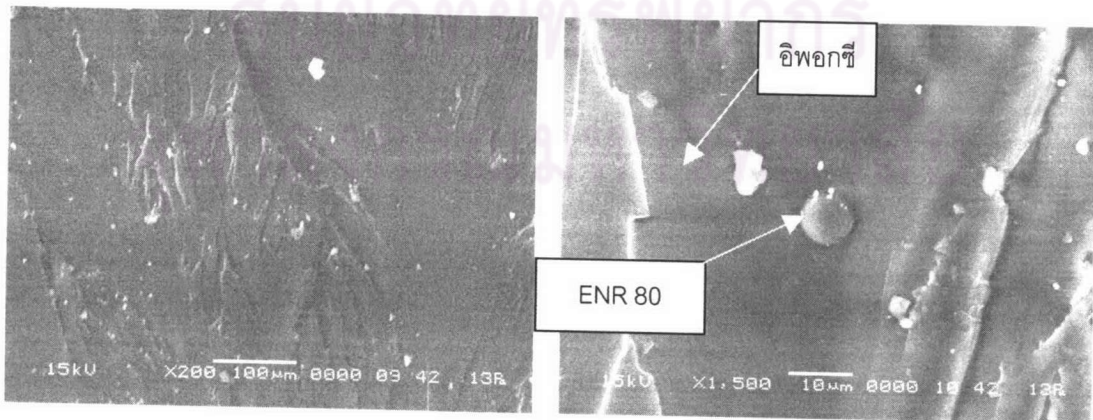
รูปที่ 4.24 สัณฐานวิทยาของพื้นผิวรอยแตกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับ ENR 70 ปริมาณ 5 phr (a) กำลังขยาย 200 เท่า (b) กำลังขยาย 1,500 เท่า



รูปที่ 4.25 สัณฐานวิทยาของพื้นผิวรอยแตกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับ ENR 70 ปริมาณ 10 phr (a) กำลังขยาย 200 เท่า (b) กำลังขยาย 1,500 เท่า



รูปที่ 4.26 สัณฐานวิทยาของพื้นผิวรอยแตกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับ ENR 80 ปริมาณ 5 phr (a) กำลังขยาย 200 เท่า (b) กำลังขยาย 1,500 เท่า



รูปที่ 4.27 สัณฐานวิทยาของพื้นผิวรอยแตกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับ ENR 80 ปริมาณ 10 phr (a) กำลังขยาย 200 เท่า (b) กำลังขยาย 1,500 เท่า

รูปที่ 4.12-4.27 แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับยาง CTBN, ยาง NR และยาง ENR ปริมาณ 5 phr และ 10 phr มีลักษณะของพื้นผิวรอยแตกเช่นเดียวกับอิพอกซีเรซิน โดยเป็นการเลื้อยระนาบของโมเลกุลออกจากกัน ทำให้พื้นผิวของรอยแตกไม่เรียบ แต่พอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับยาง CTBN, ยาง NR และยาง ENR จะมี interfacial bonding ระหว่างเรซินกับอนุภาคของยาง CTBN, ยาง NR และยาง ENR ซึ่งพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับยาง ENR 40 ปริมาณ 5 phr แสดง interfacial bonding ระหว่างอิพอกซีเรซินกับยาง ENR 40 อย่างเห็นได้ชัด

4.5 สมบัติทางความร้อนของอิพอกซีเรซินและพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับยางชนิดต่าง ๆ

4.5.1 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA

ตารางที่ 4.2 แสดงอุณหภูมิเริ่มสลายตัวของยาง CTBN, ยาง NR, ยาง ENR, สารบ่ม และอิพอกซีเรซินที่ไม่ได้บ่ม

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิเริ่มสลายตัวของยาง CTBN, ยาง NR, ยาง ENR, สารบ่ม และอิพอกซีเรซินที่ไม่ได้บ่ม

สาร	อุณหภูมิเริ่มสลายตัว (°C)
ยาง CTBN	430.19
ยาง NR	363.12
ENR 25	383.77
ENR 40	387.99
ENR 50	387.62
ENR 60	387.37
ENR 70	385.69
ENR 80	381.97
สารบ่ม	431.40
อิพอกซีที่ไม่ได้บ่ม	298.63

จากตารางที่ 4.2 พบว่า อิพอกซีเรซินที่ยังไม่ได้บ่มมีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวต่ำกว่ายางทุกประเภทรวมทั้งสารบ่มที่ใช้ด้วย แต่เมื่ออิพอกซีเรซินถูกบ่มจนกลายเป็นเทอร์โมเซตพลาสติคแล้ว จะมีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวเท่ากับ 352.95 องศาเซลเซียส

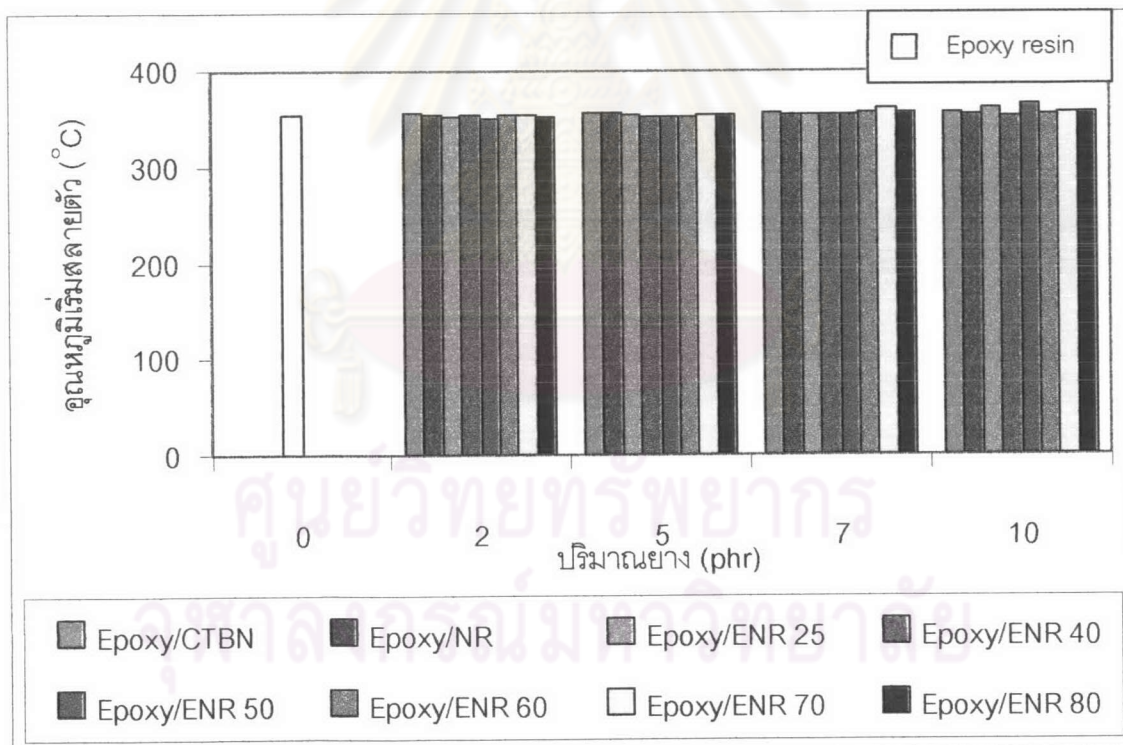
เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิเริ่มสลายตัวของยาง NR กับยาง ENR พบว่า ยาง ENR มีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวสูงกว่ายาง NR นอกจากนี้ ยาง ENR ที่มีปริมาณหมู่อีพอกไซด์แตกต่างกันจะมีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวใกล้เคียงกันมาก โดยอยู่ในช่วง 382-388 องศาเซลเซียส ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากของยาง ENR ที่มีปริมาณหมู่อีพอกไซด์จำนวนมากเกิดการขาดออกซิเจนในระหว่างการเตรียม ซึ่งยาง ENR เหล่านี้จำเป็นต้องใช้เวลาในการเตรียมที่ค่อนข้างนาน และการที่ยาง CTBN มีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวสูงเพราะเป็นโมเลกุลที่มีขั้วจึงมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลทำให้เกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า

ตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.28 แสดงอุณหภูมิเริ่มสลายตัวของอีพอกซีเรซินที่ผ่านการบ่มแล้ว และพอลิเมอร์ผสมระหว่างอีพอกซีเรซินกับยาง CTBN, ยาง NR และยาง ENR ที่ปริมาณต่างๆกัน

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิเริ่มสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมของอีพอกซีเรซินกับยาง CTBN, ยาง NR และยาง ENR

พอลิเมอร์ผสม	ปริมาณยาง (phr)	อุณหภูมิเริ่มสลายตัว (°C)	
อีพอกซีเรซิน/CTBN	2	356.12	
	5	355.25	
	7	355.92	
	10	355.52	
อีพอกซีเรซิน/ยาง NR	2	352.95	
	5	354.99	
	7	353.60	
อีพอกซีเรซิน/ยาง NR	10	354.38	
	อีพอกซีเรซิน/ENR 25	2	351.26
		5	353.28
7		354.32	
อีพอกซีเรซิน/ENR 25	10	360.71	
	อีพอกซีเรซิน/ENR 40	2	353.91
		5	351.42
7		352.88	
อีพอกซีเรซิน/ENR 40	10	351.47	
	อีพอกซีเรซิน/ENR 50	2	350.74
		5	351.38
7		353.02	
10		363.82	

พอลิเมอร์ผสม	ปริมาณยาง (phr)	อุณหภูมิเริ่มสลายตัว (°C)
อีพอกซีเรซิน /ENR 60	2	353.61
	5	352.75
	7	355.42
	10	353.34
อีพอกซีเรซิน /ENR 70	2	353.20
	5	353.61
	7	359.40
	10	356.20
อีพอกซีเรซิน/ENR 80	2	352.17
	5	353.79
	7	355.25
	10	355.35



รูปที่ 4.28 อุณหภูมิเริ่มสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอีพอกซีเรซิน
กับยาง CTBN, ยาง NR และยาง ENR

ตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.28 แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับยาง CTBN, ยาง NR และยาง ENR มีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวใกล้เคียงกับอิพอกซีเรซิน เนื่องจากยาง CTBN, ยาง NR และยาง ENR ถูกเติมเข้าไปในอิพอกซีในปริมาณน้อย จึงไม่ทำให้ค่าอุณหภูมิเริ่มสลายตัวของอิพอกซีเรซินเปลี่ยนแปลงไปมากนัก โดยอุณหภูมิเริ่มสลายตัวของชิ้นงานอยู่ในช่วง 351-364 องศาเซลเซียส ดังนั้น เพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพ จึงควรใช้งานพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับยาง CTBN, ยาง NR และยาง ENR ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300 องศาเซลเซียส

4.5.2 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC

ตารางที่ 4.4 แสดงอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันของยาง ENR และอิพอกซีเรซินที่ไม่ได้ผ่านการบ่ม

ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิกลาสแทรนซิชันของยาง ENR และอิพอกซีที่ไม่ได้ผ่านการบ่ม

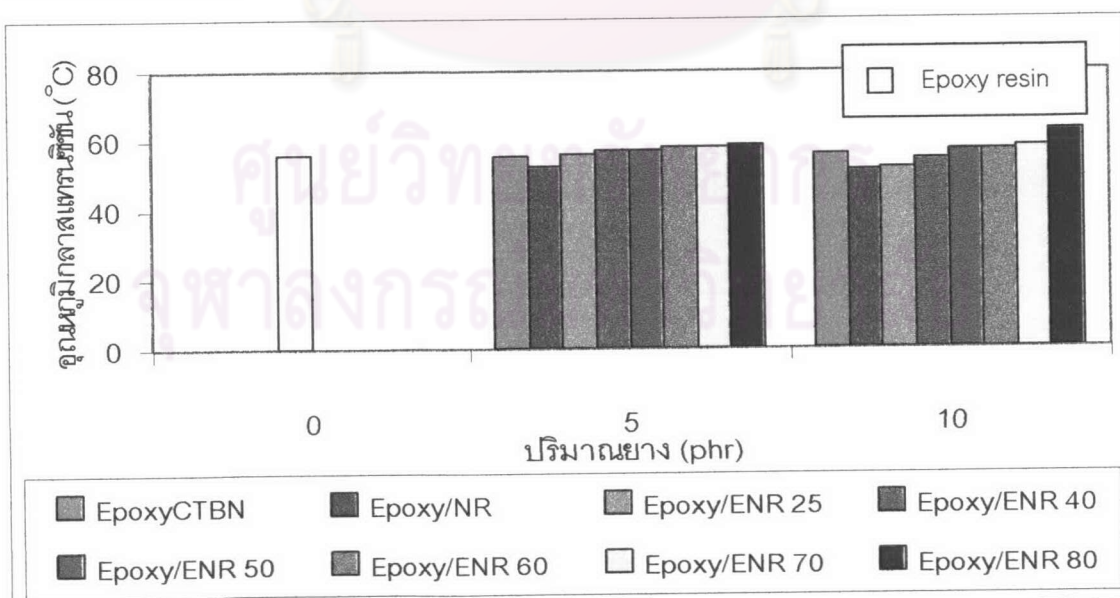
สาร	อุณหภูมิกลาสแทรนซิชัน (°C)
ENR 25	-37.31
ENR 40	-28.13
ENR 50	-22.53
ENR 60	-21.43
ENR 70	-17.17
ENR 80	-9.61
อิพอกซีที่ไม่ได้ผ่านการบ่ม	-16.19

ตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันของยาง ENR เพิ่มขึ้นตามปริมาณหมู่อิพอกซีไดซ์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากวงแหวนของหมู่อิพอกไซด์ทำให้สายโซ่โมเลกุลมีความแข็งตึงเพิ่มขึ้น [6] และอิพอกซีเรซินที่ไม่ได้ผ่านการบ่มมีอุณหภูมิกลาสแทรนซิชัน -16.19 องศาเซลเซียส ซึ่งเมื่ออิพอกซีเรซินผ่านการบ่มแล้วจะมีอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันสูงขึ้นเป็น 55.77 องศาเซลเซียส ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.29 แสดงอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันของอิพอกซีเรซินที่ผ่านการบ่ม และพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับยาง CTBN, ยาง NR และยาง ENR ที่ปริมาณต่าง ๆ กัน

ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิกลาสแทรนซิชันของอีพอกซีเรซินที่ผ่านการบ่ม และพอลิเมอร์ผสมระหว่างอีพอกซีเรซินกับยาง CTBN ยาง NR และยาง ENR

พอลิเมอร์ผสม	ปริมาณยาง (phr)	อุณหภูมิกลาสแทรนซิชัน (°C)
อีพอกซีเรซินที่ผ่านการบ่ม	-	55.77
อีพอกซีเรซิน/CTBN	5	55.33
	10	55.68
อีพอกซีเรซิน/ยาง NR	5	52.20
	10	51.10
อีพอกซีเรซิน/ENR 25	5	55.89
	10	51.58
อีพอกซีเรซิน/ENR 40	5	56.86
	10	54.43
อีพอกซีเรซิน : ENR 50	5	56.98
	10	56.81
อีพอกซีเรซิน/ENR 60	5	57.87
	10	56.91
อีพอกซีเรซิน/ENR 70	5	58.07
	10	58.13
อีพอกซีเรซิน/ENR 80	5	58.36
	10	62.74



รูปที่ 4.29 อุณหภูมิกลาสแทรนซิชันของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอีพอกซีเรซินกับยาง CTBN, ยาง NR และยาง ENR

ตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.29 แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับยาง CTBN, ยาง NR และยาง ENR มีอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันใกล้เคียงกับของอิพอกซีเรซิน เนื่องจากการเติมยาง CTBN, ยาง NR และยาง ENR เข้าไปในอิพอกซีในปริมาณน้อย นอกจากนี้ ยางที่เติมเข้าไปสามารถเข้ากันได้ดีกับอิพอกซีเรซิน จึงแสดงค่าอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันของพอลิเมอร์ผสมเพียงค่าเดียว



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย