

การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค Transmission Electron Microscopy ,TEM

ทำการทดสอบด้วยเครื่อง TEM ของ JEOL JEM-1230 ซึ่งเทคนิค TEM นี้ใช้ตรวจสอบ Morphology ของ PVC Sheet ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยสัดส่วนของน้ำยางและ CNR ที่แตกต่างกัน เพื่อดูความเข้ากันได้ของ PVC compound น้ำยางพารา และ CNR และดูการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลเมื่อถูกดึงยืดจากชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ Tensile strength และ PVC Sheet ที่ผ่านกระบวนการ Vacuum Thermoforming

3.2.5 การทดสอบความสามารถในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการ Vacuum Thermoforming

เพื่อทดสอบความสามารถในการขึ้นรูปของ PVC sheet ที่ใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น impact modifier โดยใช้หลักการขึ้นรูปพลาสติกในขณะที่อ่อนตัว เนื่องจากความร้อนโดยการให้พลาสติกยืดตัวออก(stretching) ภายใต้แรงดันลม (air pressure) และแรงดันสุญญากาศ (vacuum) หรือการดึงเชิงกล (mechanical drawing) ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีรูปร่างตามแม่พิมพ์ หลังขึ้นรูป นำชิ้นงานที่ขึ้นรูปได้มาตรวจสอบขนาด ลักษณะ ความคม เพื่ออธิบายสถานะที่เหมาะสมในการปรับสถานะการขึ้นรูปให้เหมาะสมกับสูตรการขึ้นรูปของ PVC แต่ละสูตร

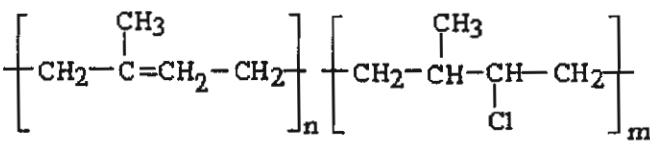
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การวิเคราะห์ด้วย Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

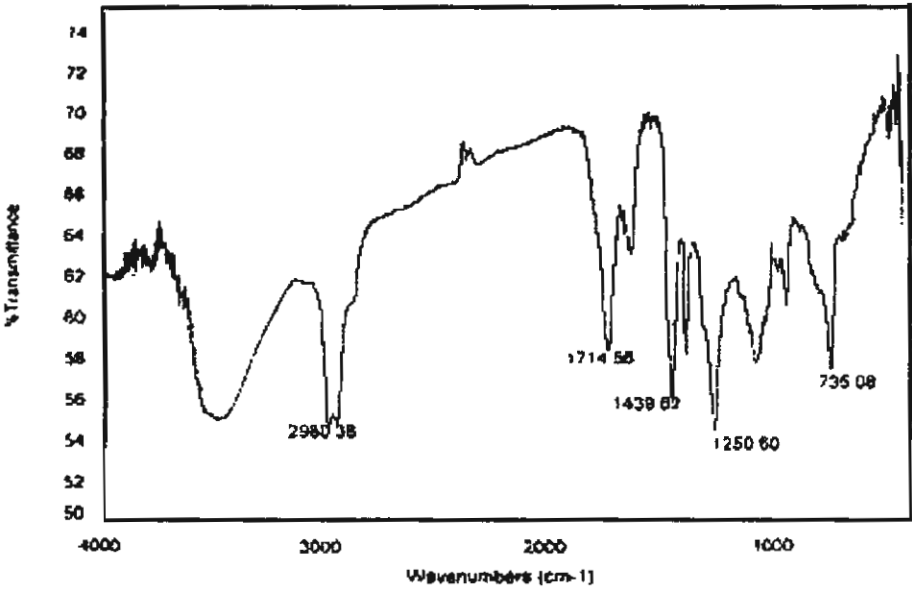
4.1.1 Chlorinated Natural Rubber (CNR)

จากการสันนิษฐาน สูตร โครงสร้างของ CNR น่าจะเป็นดังรูป 4.1



รูปที่ 4.1 สูตรโครงสร้างของ Chlorinated Natural Rubber (CNR)

เมื่อวิเคราะห์ CNR ด้วย FTIR ได้ลักษณะของสเปกตรัมเป็นดังรูปที่ 4.2



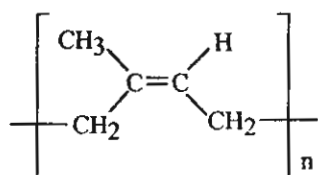
รูปที่ 4.2 FTIR spectrum ของ CNR

พิกที่สำคัญของ CNR ซึ่งสามารถยืนยันว่ามีหมู่ฟังก์ชันของ C-Cl อยู่ในโครงสร้างของ โมเลกุลของยางธรรมชาติจริง โดยรายละเอียดของพิกที่ปรากฏมีดังต่อไปนี้

Wave number range, cm ⁻¹	Functional group
2900 – 2950	C-H stretching(อิมตัว)
1700 – 1740	C=O
1400 – 1470	-CH ₃ (Scissoring)
1200 – 1250	C=C
700 – 800	C-Cl (Rocking)

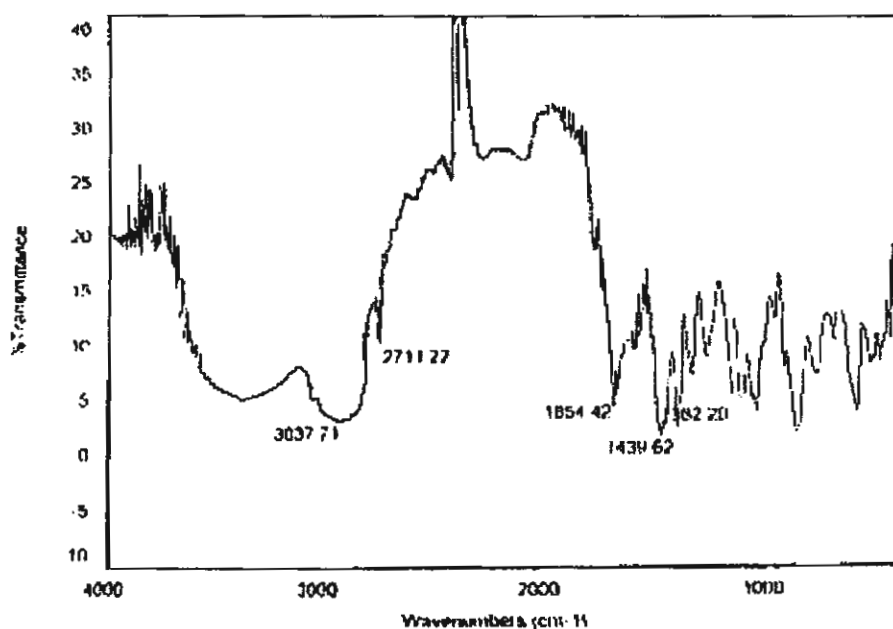
4.1.2 น้ำยางธรรมชาติ (Natural Rubber Latex)

สูตรโครงสร้างของน้ำยางธรรมชาติเป็นดังรูป 4.3



รูปที่ 4.3 สูตรโครงสร้างของน้ำยางธรรมชาติ (cis 1,4 polyisoprene)

เมื่อนำน้ำยางธรรมชาติไปวิเคราะห์ด้วย FTIR จะได้ลักษณะของสเปกตรัมเป็นดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 FTIR spectrum ของน้ำยางธรรมชาติ

พิกที่สำคัญใน spectrum ของน้ำยางธรรมชาติ ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่ามีสูตร โครงสร้าง ดังรูปที่ 4.2 มีดังต่อไปนี้คือ

Wave number range,cm ⁻¹	Functional group
3030 – 3050	=C-H
2700 – 2740	C-H ใน aldehyde (-CHO)
1650 – 1660	C=C
1400 – 1470	-CH ₃

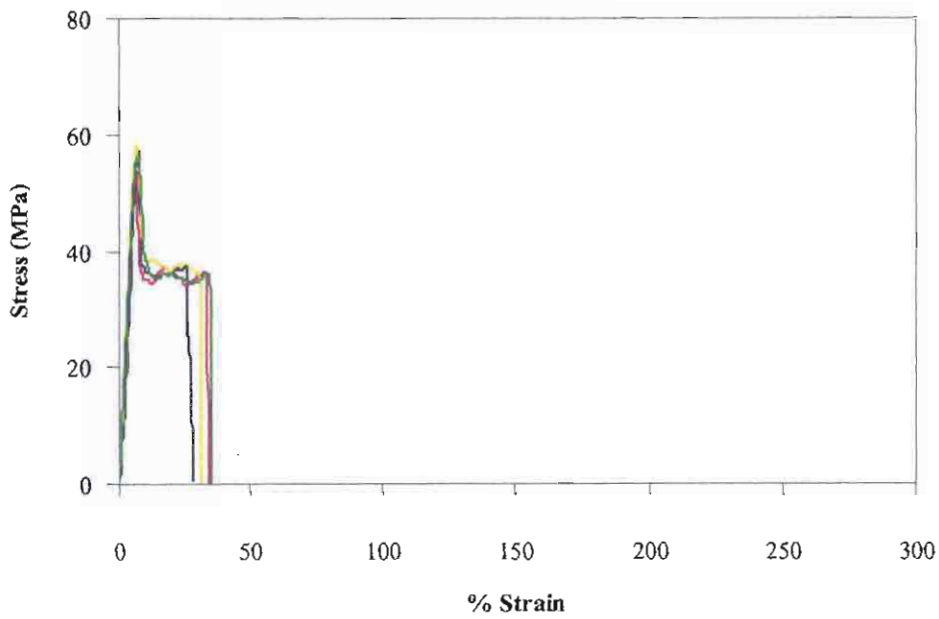
เมื่อพิจารณาสูตรโครงสร้างของน้ำยางธรรมชาติ(cis 1,4 polyisoprene) และ CNR พบว่ามีโครงสร้างที่คล้ายกันแต่ต่างกันที่ CNR มีการแทนที่ที่ตำแหน่งพันธะคู่ของน้ำยางธรรมชาติด้วยอะตอมของคลอรีน จากการศึกษา IR spectrum ของ CNR และ น้ำยางธรรมชาติ (รูปที่ 4.2 และ 4.4 ตามลำดับ) พบว่ามีลักษณะของหมู่ฟังก์ชันที่เหมือนกันแต่ IR spectrum ของ CNR จะปรากฏพิกที่ประมาณ 700-800 cm⁻¹ ซึ่งเป็นพิกของ C-Cl ซึ่ง สอดคล้องกับงานวิจัยของ C.C. Ho และ M.C. Khew ที่ได้ทำการสังเคราะห์ CNR โดยการใช้ แก๊สคลอรีนที่ได้จาก ปฏิกิริยาของสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์กับกรดไฮโดรคลอริกที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไป ตรวจสอบโดย FTIR [12] แสดงให้เห็นว่า CNR ที่สังเคราะห์ได้มีโครงสร้างคล้ายน้ำยางธรรมชาติและมีคลอรีนอยู่ในโครงสร้างของ CNR

4.2 คุณสมบัติของ PVC Sheet

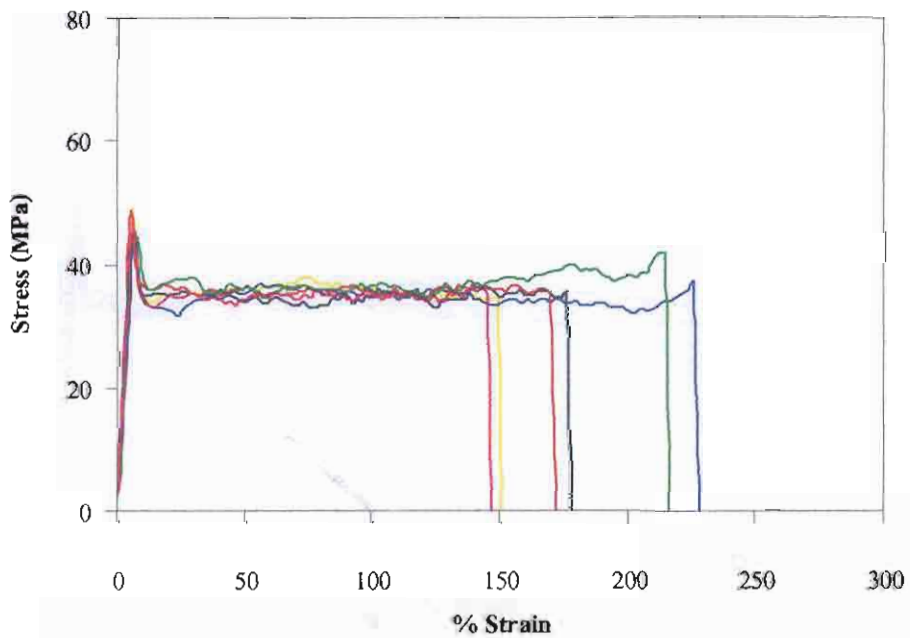
4.2.1 สมบัติเชิงกล

4.2.1.1 สมบัติด้านการดึงยึด (Tensile Properties)

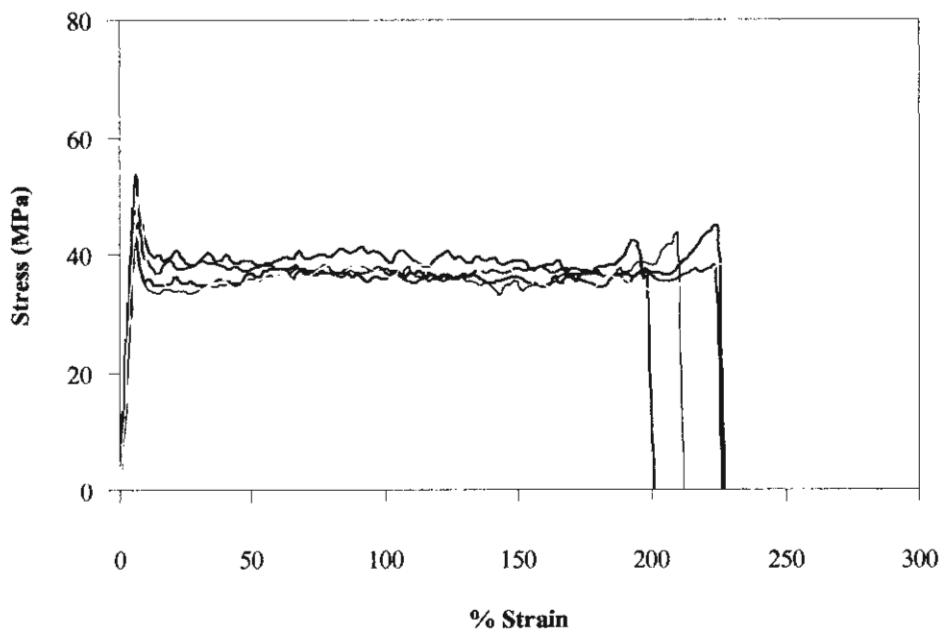
จากการทดสอบ Tensile properties ที่สภาวะอุณหภูมิ 25 °C ด้วยอัตราการดึง 50 mm/min ของ PVC sheet ที่ขึ้นรูปได้ในสูตรต่างๆ ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.5-4.9



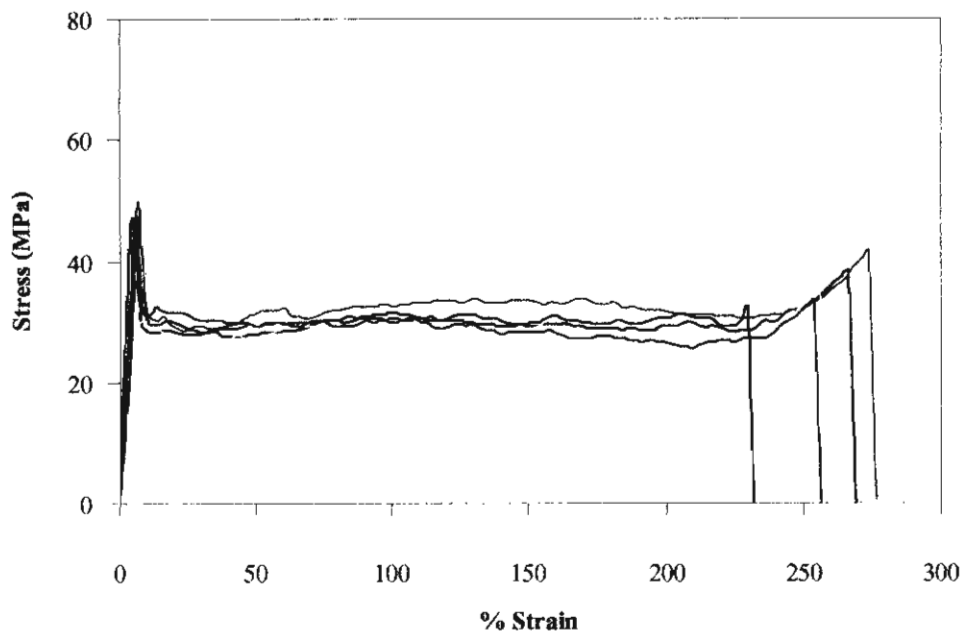
รูปที่ 4.5 กราฟ stress-strain ของ PVC sheet ที่ไม่มีการเติม impact modifier
(สูตร No impact)



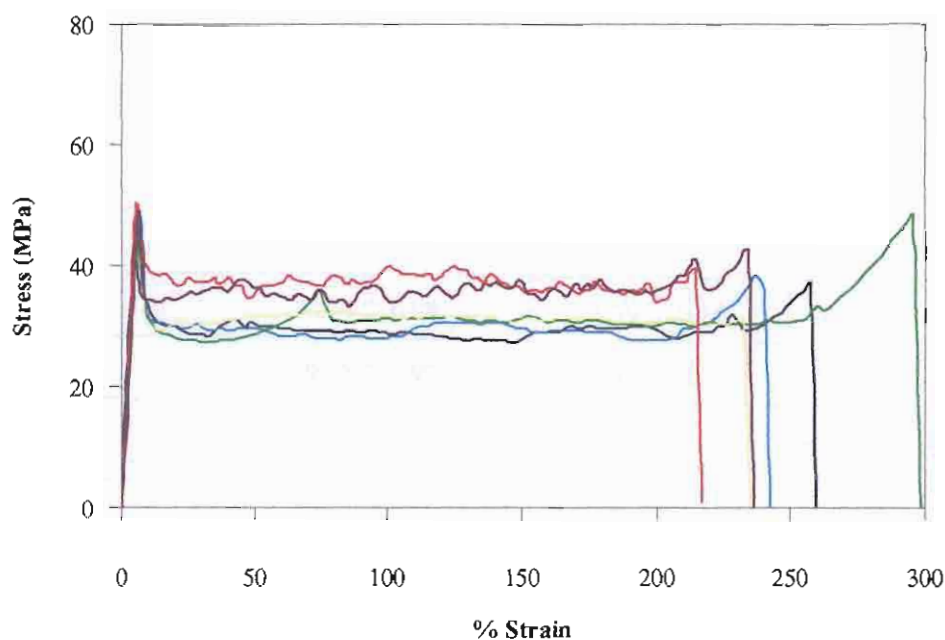
รูปที่ 4.6 กราฟ stress-strain ของ PVC sheet ที่มีการเติม MBS เป็น impact modifier
(สูตร STD)



รูปที่ 4.7 กราฟ stress-strain ของ PVC sheet ที่มีการเติมน้ำยางธรรมชาติเป็น impact modifier โดยไม่มีการเติม CNR เป็นตัวประสาน (สูตร 0CNR4NR)



รูปที่ 4.8 กราฟ stress-strain ของ PVC sheet ที่มีการเติมน้ำยางธรรมชาติเป็น impact modifier โดยมีการเติม CNR เป็นตัวประสาน(สูตร 0.2CNR3NR)



รูปที่ 4.9 กราฟ stress-strain ของ PVC sheet ที่มีการเติมน้ำยางธรรมชาติเป็น impact modifier โดยมีการเติม CNR เป็นตัวประสาน (สูตร 0.2CNR4NR)

จากกราฟ stress-strain แสดง %strain ที่จุดขาด, stress ที่สูงที่สุดและค่า Young's modulus สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 Tensile properties ของ PVC sheet ที่ขึ้นรูปได้ทั้ง 16 สูตร

Tensile Properties สูตร	Stress at Maximum Load (MPa)	Young's Modulus (GPa)	%Strain at Break
STD	48.93 ± 0.91	1.22 ± 0.27	181.84 ± 33.54
No Impact	56.42 ± 1.78	1.22 ± 0.23	31.92 ± 3.05
0CNR4NR	52.07 ± 2.27	1.33 ± 0.25	222.70 ± 18.05
0.1CNR1NR	55.63 ± 2.75	1.26 ± 0.28	106.59 ± 93.02
0.1CNR2NR	55.98 ± 2.52	1.21 ± 0.22	100.14 ± 71.23
0.1CNR3NR	53.84 ± 2.35	1.06 ± 0.10	116.11 ± 27.71
0.1CNR4NR	54.79 ± 0.68	1.12 ± 0.14	127.48 ± 68.92
0.2CNR1NR	50.76 ± 2.96	1.04 ± 0.25	173.63 ± 81.98

สูตร Tensile Properties	Stress at Maximum Load (MPa)	Young's Modulus (GPa)	%Strain at Break
0.2CNR2NR	49.10 ± 5.12	1.35 ± 0.18	229.05 ± 25.02
0.2CNR3NR	48.38 ± 1.98	1.43 ± 0.30	258.48 ± 17.00
0.2CNR4NR	51.48 ± 3.10	1.27 ± 0.28	248.09 ± 28.21
0.3CNR3NR	50.79 ± 0.99	1.39 ± 0.26	203.81 ± 14.39
0.3CNR4NR	49.67 ± 2.97	1.44 ± 0.91	233.13 ± 15.51
0.3CNR5NR	51.46 ± 3.42	1.58 ± 0.14	219.15 ± 14.59
0.3CNR6NR	50.00 ± 1.60	1.42 ± 0.21	167.48 ± 76.80
0.3CNR7NR	51.72 ± 1.44	1.52 ± 0.17	171.81 ± 55.91

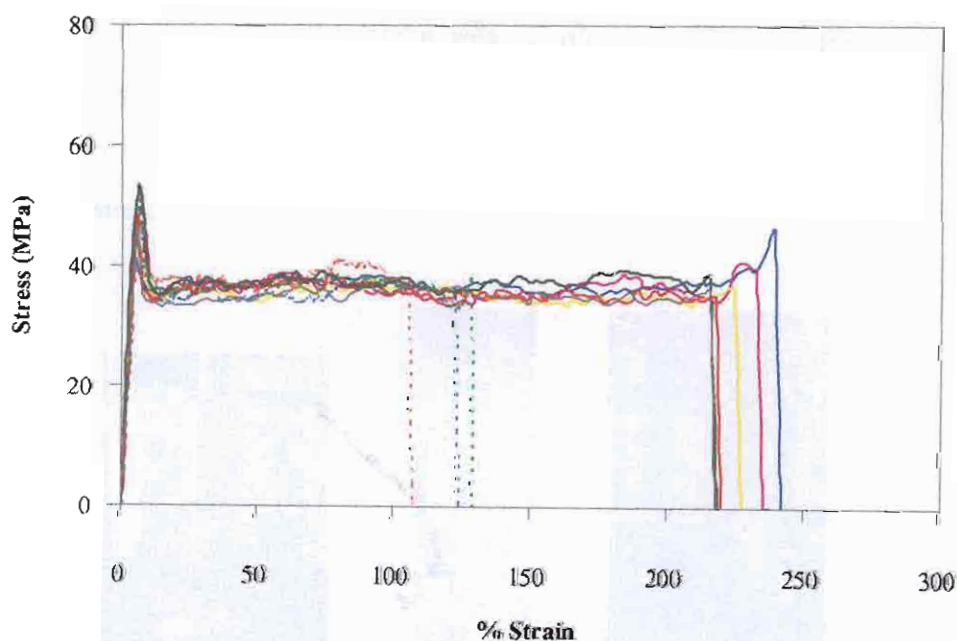
หมายเหตุ

1. STD คือ PVC sheet ที่มีการเติม MBS เป็น impact modifier
2. No impact คือ PVC sheet ที่ไม่มีการเติม impact modifier
3. 0CNR4NR คือ PVC sheet ที่มีการเติมน้ำยางธรรมชาติเป็น impact modifier ในปริมาณ 4 กรัม โดยไม่มีการเติม CNR เป็นตัวประสาน
4. CNR คือ Chlorinated Natural Rubber และ NR คือ น้ำยางธรรมชาติ (Natural Rubber Latex) ตัวเลขหน้า CNR และ NR แสดงปริมาณการใช้เป็นกรัมต่อ PVC resin 200 กรัม เช่น 0.2CNR3NR คือ PVC sheet ที่มีการเติม CNR 0.2 กรัม และ NR 3 กรัม

จากผลการทดลองกราฟ stress-strain รูปที่ 4.5 – 4.9 และตารางที่ 4.1 ซึ่งแสดงค่า Tensile properties แสดงให้เห็นว่า PVC sheet ที่ไม่มีการเติม impact modifier จะมีค่าเปอร์เซ็นต์ strain ที่จุดขาดต่ำ เมื่อเทียบกับสูตรอื่นที่มีการเติม impact modifier แต่ค่า stress สูงสุดมีค่าสูงที่สุด ซึ่งเป็นลักษณะทั่วไปของ PVC ที่มีความแข็งแรงและดึงยึดได้น้อย ทั้งนี้เนื่องจากการเติม Plasticizer (แสดงดังรูปที่ 4.5) แต่เมื่อมีการเติม impact modifier พบว่าการดึงยึดได้มากขึ้น เห็นได้จากเปอร์เซ็นต์ strain ที่จุดขาดมีค่าสูงขึ้น ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.6 – 4.9 และตารางที่ 4.1 PVC sheet ที่ เติม MBS เป็น impact modifier มีค่าเปอร์เซ็นต์ strain ที่จุดขาดมีค่าประมาณ 181.84 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าสูงกว่า PVC sheet ที่ไม่ได้เติม impact modifier ถึง 6 เท่า ส่วน PVC sheet ที่ใช้น้ำยางธรรมชาติ 4 กรัม เป็น impact modifier โดยไม่มีการเติม CNR พบว่ามีเปอร์เซ็นต์ strain ที่จุดขาดประมาณ 222.70 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าน้ำยางธรรมชาติสามารถทำให้ PVC sheet มีความเป็น ductile เพิ่มขึ้น และเมื่อมีการ

เดิม CNR ไปเป็นตัวประสานยิ่งทำให้เปอร์เซ็นต์ strain ที่จุดขาดมีค่าสูงขึ้น เช่นในสูตร 0.2CNR3NR และ 0.2CNR4NR ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ นั้นแสดงว่าการเติม CNR 0.2 กรัมเป็นตัวประสานระหว่าง NR กับ PVC ทำให้ NR มีการกระจายตัวเข้าไปใน PVC matrix ได้ดี จึงสามารถปรับปรุงการดึงยึดดีกว่าไม่ใช้ CNR เป็นตัวประสาน

เมื่อพิจารณาสัดส่วนของปริมาณ CNR และ NR พบว่าเมื่อใช้ปริมาณ CNR 0.1 กรัม %strain ที่จุดขาดมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณ NR ที่เพิ่มขึ้น สำหรับการใส่ CNR 0.2 กรัม พบว่า %strain ที่จุดขาดมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อปริมาณ NR สูงขึ้นเช่นเดียวกัน แต่เมื่อพิจารณาจากปริมาณ NR ที่เท่ากันพบว่าการใช้ CNR 0.2 กรัม ให้ค่า %strain ที่จุดขาดสูงกว่าในทุกปริมาณ NR แสดงให้เห็นว่าการใช้ปริมาณ CNR 0.2 กรัม มีความเหมาะสมมากกว่าการใช้ CNR 0.1 กรัม แต่เมื่อใช้ CNR 0.3 กรัม พบว่าเปอร์เซ็นต์ strain ที่จุดขาดมีแนวโน้มที่ไม่แน่นอน ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากปริมาณ CNR ที่ใช้ไม่เหมาะสมกับปริมาณ NR และ PVC ที่ใช้ ซึ่งน่าจะเป็นปริมาณ CNR ที่มากเกินไป (สามารถดูได้จากผลการทดสอบ TEM ซึ่งจะเห็นอนุภาค ของยาง ที่ไม่กระจายตัวและมีลักษณะเป็นก้อนใหญ่) ทั้งนี้เพราะจะเกิดการรวมกลุ่มก้อนกันของน้ำยาง ทำให้ไม่กระจายตัวทั่วทั้งเนื้อ PVC sheet ดังนั้นคุณสมบัติของ PVC sheet ที่ได้จะไม่เหมือนกัน ทั้งชิ้นงาน คือ มีทั้งส่วนที่สามารถทนแรงดึงยึดได้สูงและต่ำแสดงดังรูปที่ 4.10

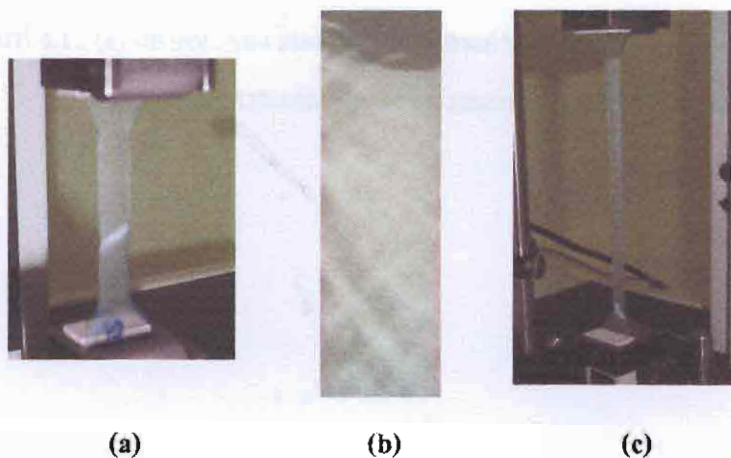


รูปที่ 4.10 กราฟ stress-strain ของ PVC sheet ที่มีการเติมน้ำยางธรรมชาติเป็น impact modifier โดยมีการเติม CNR เป็นตัวประสาน (สูตร 0.3CNR7NR)

การเปลี่ยน impact modifier จาก MBS เป็น NR รวมถึงการปรับเปลี่ยนสัดส่วนของปริมาณ CNR และ NR มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า Young's modulus น้อยมาก แสดงว่าปริมาณ NR และ CNR ที่ใช้ในสัดส่วนต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองช่วยปรับปรุง Elongation และ toughness ให้ดีขึ้น โดยไม่ไปลดความแข็งแรงของ PVC

สำหรับค่า stress สูงสุด จะมีค่าต่ำลงเมื่อมีการเติม impact modifier เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรการขึ้นรูปที่ไม่มีการเติม impact modifier และในปริมาณ CNR ที่เท่ากัน ค่า stress สูงสุดมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากเมื่อปริมาณ NR เพิ่มขึ้น แต่ค่า Young's modulus มีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากน้ำยางธรรมชาติมีค่า modulus ต่ำถ้าเติมในปริมาณที่มากจะส่งผลต่อความแข็งแรงของ PVC

ในการขึ้นรูป PVC sheet ที่ใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น impact modifier โดยใช้ CNR เป็นตัวประสาน จากผลของ Tensile properties แสดงให้เห็นว่าการใช้ปริมาณ CNR ในสัดส่วนที่เหมาะสม(สูตร 0.2CNR3NR และ 0.2CNR4NR) จะช่วยปรับปรุงสมบัติด้าน Tensile properties ให้ดีขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก CNR มีส่วนที่มีข้อเช่นเดียวกับ PVC สามารถเกิดแรงกระทำระหว่างข้อกับ PVC และมีสูตรโครงสร้างคล้ายน้ำยางธรรมชาติ จึงช่วยให้น้ำยางธรรมชาติสามารถกระจายตัวอยู่ในโครงข่ายของ PVC ด้วยแรงดึงดูดระหว่างข้อ ดังนั้น ในการดึงยืดของ PVC จะสามารถดึงยืดได้ดีขึ้น เนื่องจากน้ำยางธรรมชาติเป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีสายโซ่โมเลกุลที่ยาวและสามารถเกิด Entanglement ได้มาก ซึ่งเป็นลักษณะของ Elastomer ทำให้ต้องใช้เวลาและแรงมากในการทำให้สายโซ่ยืดตรง เมื่อ PVC ได้รับแรงดึงยืดจะมีลักษณะการเกิด shear band ดังแสดงในรูปที่ 4.11 เนื่องจาก แรงส่วนหนึ่งถูกยาง absorb ไว้จึงมีการเปลี่ยนแปลงแบบ ductile โดยมีการเกิด yield และ cold drawing ซึ่งสามารถเห็นพฤติกรรมนี้จากกราฟ stress - strain

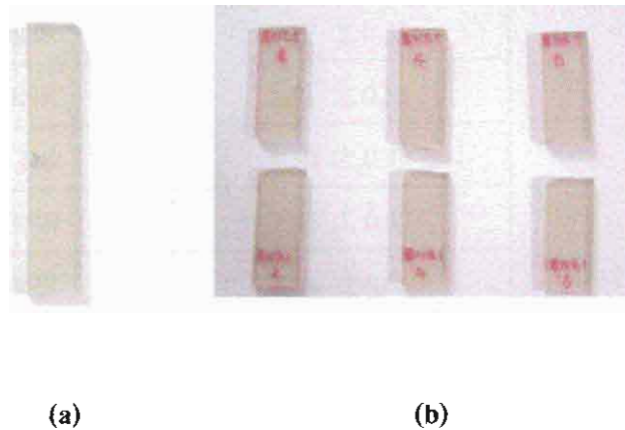


รูปที่ 4.11 ลักษณะ (a) neck initiate, (b) Shear band และ (c) Cold drawing

จากรูปที่ 4.11 แสดงการเกิด shear band เมื่อชิ้นงานทดสอบถูกดึงยืดเนื่องจากอนุภาคของ impact modifier ช่วยดูดซับพลังงาน(แรงที่ได้รับ)เป็นผลให้ชิ้นงานที่ทดสอบเกิด orientation และการเลื่อนผ่านกันของสายโซ่ทำให้เกิด neck initiate และ neck propagation ตามลำดับ

4.2.1.2 สมบัติด้านการทนต่อแรงกระแทก (Impact Resistance)

จากการทดสอบ Impact strength ของชิ้นงาน PVC ด้วยเครื่อง Impact tester รุ่น ZWICK วิธีการทดสอบแบบ Izod impact test สภาวะการทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C ตารางที่ 4.2 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบ impact resistance ซึ่งเป็นค่าพลังงานที่สามารถดูดซับได้ ก่อนที่ชิ้นงานจะเกิดการแตกหัก จากการทดสอบ Impact resistance พบว่า ชิ้นงานทั้งหมดเกิดการแตกหักแบบ complete ดังแสดงในรูปที่ 4.12 a - b



รูปที่ 4.12 (a) ลักษณะของชิ้นงาน PVC ก่อนทำการทดสอบ Impact resistance

(b) ลักษณะการแตกหักของชิ้นงานหลังจากการทดสอบ impact resistance

ตารางที่ 4.2 ค่าพลังงานที่ชิ้นงานสามารถรับได้ก่อนเกิดการแตกหัก

สูตร	พลังงาน (kJ/m ²)
STD	0.91 ± 0.20
No Impact	0.73 ± 0.13
0CNR4NR	0.82 ± 0.13
0.1CNR1NR	1.25 ± 0.44
0.1CNR2NR	1.17 ± 0.47
0.1CNR3NR	1.38 ± 0.27
0.1CNR4NR	1.59 ± 0.18
0.2CNR1NR	1.63 ± 0.32
0.2CNR2NR	1.69 ± 0.17
0.2CNR3NR	1.76 ± 0.18
0.2CNR4NR	1.77 ± 0.23
0.3CNR1NR	1.21 ± 0.55
0.3CNR2NR	1.30 ± 0.48
0.3CNR3NR	1.35 ± 0.47
0.3CNR4NR	1.64 ± 0.68
0.3CNR5NR	1.76 ± 0.26
0.3CNR6NR	1.82 ± 0.10
0.3CNR7NR	1.79 ± 0.24

ค่าพลังงานในตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่า PVC sheet ที่ไม่มีการเติม impact modifier มีค่าพลังงานต่ำที่สุด PVC ที่ไม่มีการเติม impact modifier นั้นมีความแข็งแรงแต่เปราะ ทำให้แตกหักง่ายเมื่อได้รับแรงกระแทก สำหรับ PVC สูตร STD ซึ่งใช้ MBS เป็น impact modifier มีค่าพลังงานสูงขึ้น เนื่องจาก MBS เข้าไปทำหน้าที่รับแรงกระแทก PVC จึงทนต่อการแตกหักได้มากขึ้น เมื่อพิจารณาผิวหน้าของชิ้นงานตัวอย่างจะเห็นลักษณะการแตกหักของชิ้นงานจึงเป็นแบบ ductile (สามารถดูได้จาก SEM(4.2.3.1))

พิจารณา PVC sheet ที่ใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น Impact modifier จะเห็นว่า พลังงานมีค่าสูงขึ้นกว่า PVC sheet ที่ไม่มีการเติม impact modifier และมีค่าสูงกว่า PVC sheet ที่มีการใช้

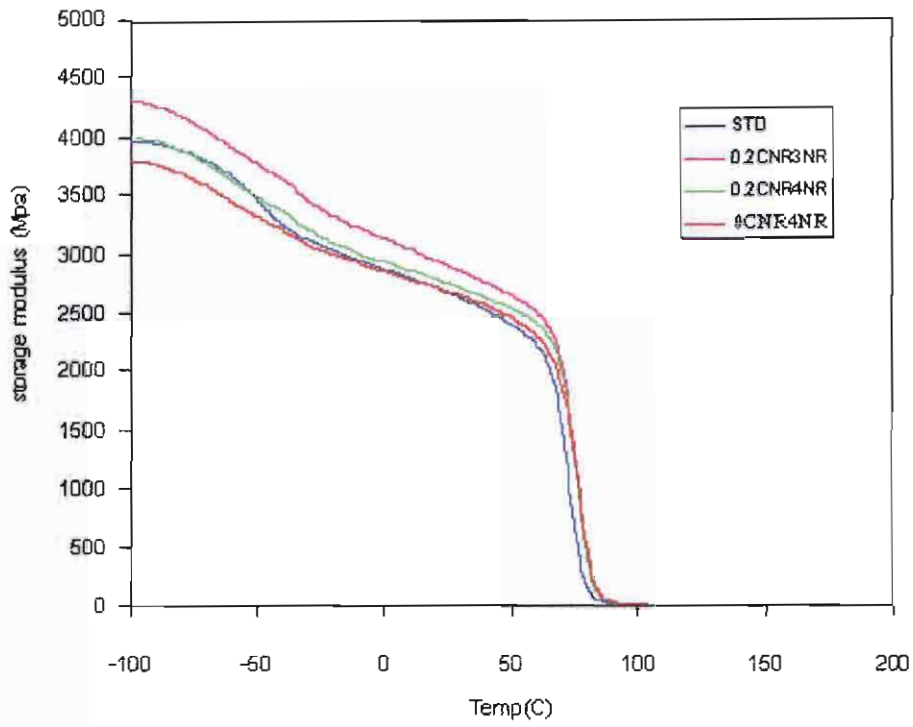
MBS เป็น impact modifier เนื่องจากน้ำยางธรรมชาติที่กระจายอยู่ใน PVC เป็นสารที่มีโมเลกุลใหญ่และมี Entanglement มาก ทำให้มีความยืดหยุ่นและสามารถรับแรงกระแทกได้มาก พิจารณาสมบัติด้าน impact resistance ของ PVC sheet ซึ่งใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น impact modifier พบว่า สูตรที่ใช้ CNR เป็นตัวประสานระหว่าง PVC และ NR จะมีค่าพลังงานที่สูงกว่าสูตร 0CNR4NR แสดงว่าการใช้ CNR เป็นตัวประสาน ระหว่าง PVC และ NR ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของ PVC กับ NR และช่วยให้ NR กระจายตัวใน PVC matrix ได้ดี จึงสามารถดูดซับพลังงานได้มากเมื่อได้รับแรงกระแทก จึงทำให้ PVC ทนต่อแรงกระแทกได้สูงขึ้น

สำหรับสัดส่วนปริมาณ CNR และ NR ที่แตกต่างกัน มีผลต่อ impact resistance คือเมื่อเพิ่มปริมาณ CNR จาก 0.1 กรัม ถึง 0.3 กรัม ค่าพลังงานมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย โดยพลังงานมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณน้ำยางมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณ NR 4 กรัม เท่ากัน แต่ปริมาณ CNR ต่างกัน จะเห็นว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ CNR จาก 0, 0.1 และ 0.2 กรัม ตามลำดับ ค่าพลังงานเพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ CNR เป็น 0.3 กรัม พลังงานมีค่าลดลง อาจเนื่องมาจากปริมาณ CNR 0.3 กรัม เป็นปริมาณที่มากเกินไปสำหรับ NR 4 กรัม การที่มีปริมาณ CNR มากเกินไปทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของ PVC กับ NR ลดลง เพราะ CNR ส่วนที่มากเกินไปเกิดการรวมเป็นกลุ่มก้อนขัดขวาง interaction ของ PVC และ NR เป็นเหตุให้มีสมบัติเชิงกลลดลง ดังที่กล่าวไปแล้วในสมบัติด้านการดึงยึด(4.2.1)

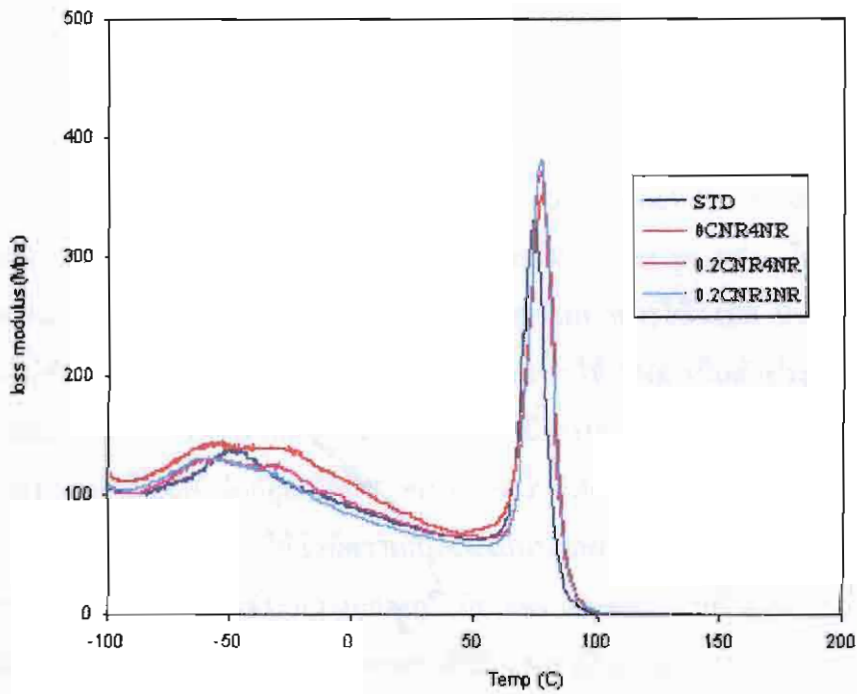
เมื่อเปรียบเทียบ impact resistance ของ PVC ที่มีปริมาณ NR เพิ่มขึ้น ค่าพลังงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำยาง การใช้ CNR 0.2 กรัม เป็นตัวประสาน เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมในการ compound PVC กับ NR เพราะมีการเพิ่มขึ้นของพลังงานอย่างชัดเจนเมื่อมีการเพิ่มปริมาณ NR จากการทดสอบสมบัติด้านการดึงยึดพบว่าเปอร์เซ็นต์ strain ที่จุดขาดมีค่าสูง และศึกษาความเข้ากันได้ด้วย TEM พบว่า NR มีการกระจายตัวเข้าไปใน PVC matrix ได้ดี

4.2.1.3 สมบัติด้าน Dynamic Mechanical (DMA)

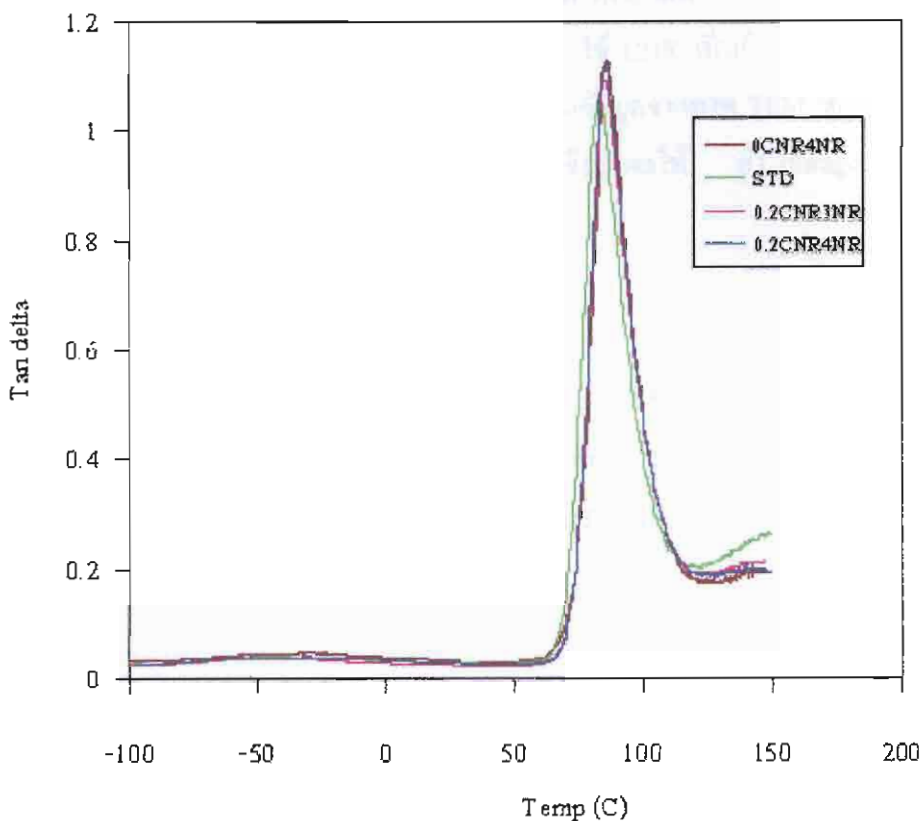
DMA เป็นการศึกษาสมบัติเชิงกลภายใต้ Oscillatory load ซึ่งจะถูก วัดเป็น ฟังก์ชันของอุณหภูมิ ในขณะที่ขึ้นทดสอบถูกควบคุมด้วยโปรแกรมเวลา โปรแกรม อุณหภูมิจะสัมพันธ์กับการควบคุม heating และ cooling หรือ คงอุณหภูมิให้คงที่ การทดลองจะกระทำภายใต้ บรรยากาศของแก๊สเฉื่อย(N_2) ช่วงอุณหภูมิที่ทำการทดสอบจะอยู่ในช่วง -100 ถึง 150 °C Amplitude $15 \mu m$ ความถี่ 1 Hz ข้อมูลที่ได้จะอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่าง storage modulus (MPa), loss modulus (MPa) และ Tan δ กับอุณหภูมิ (°C) ดังแสดงในรูปที่ 4.13, 4.14 และ 4.15 ตามลำดับ



รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ กับ storage modulus



รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ กับ loss modulus



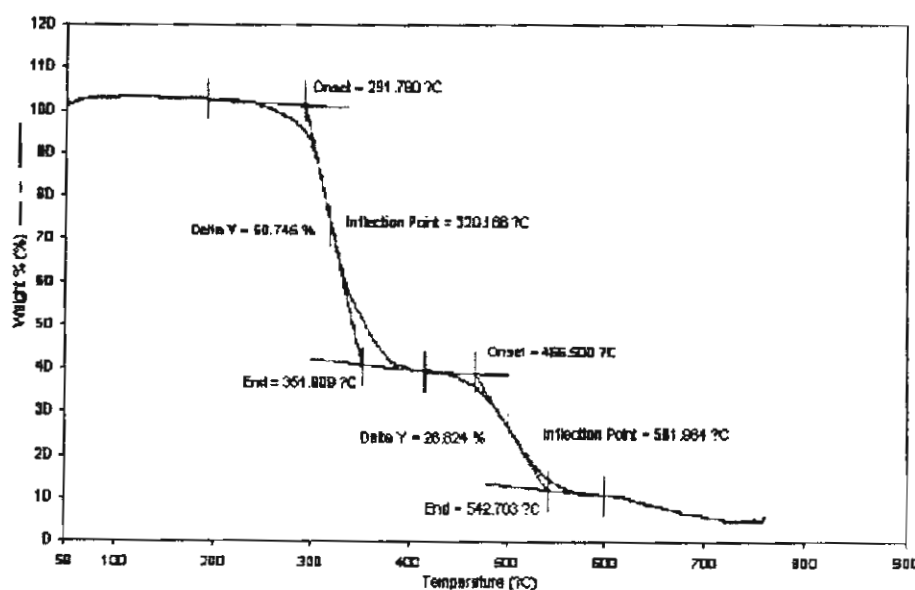
รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ กับ Tan δ

จากรูปที่ 4.13 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับ storage modulus โดยที่ค่า storage modulus เป็นค่าที่บอกถึง stiffness ของวัสดุมีค่า storage มากแสดงว่าวัสดุมีความแข็งแรงมาก พิจารณาที่อุณหภูมิห้อง (25°C) สูตร 0.2CNR3NR มีค่า storage modulus สูงกว่าสูตร STD นั้นแสดงว่าการใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น impact modifier โดยมี CNR เป็นตัวประสานสามารถปรับปรุง stiffness ของ PVC ให้สูงขึ้นกว่าการใช้ MBS เป็น impact modifier แต่การใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น impact modifier โดยไม่ใช้ CNR เป็นตัวประสาน มีค่า storage modulus แตกต่างจาก STD เพียง เล็กน้อยแสดงว่าน้ำยางธรรมชาติไม่ได้ส่งผลให้ stiffness มีค่าต่ำลงโดยปกติเมื่อเข้าใกล้อุณหภูมิ T_g ของสารจะทำให้ค่า stiffness ลดลงเนื่องจากสายโซ่โมเลกุลสามารถเคลื่อนไหวได้ซึ่งมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับค่า Tan δ ดังแสดงดังรูปที่ 4.15 และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ กับ loss modulus (รูปที่ 4.14) สามารถอธิบายถึงความเข้ากันได้ของ PVC กับน้ำยางธรรมชาติที่มี CNR เป็นตัวประสาน พิจารณาจากเส้นกราฟของสูตร 0CNR4NR ซึ่งแสดงให้เห็นว่า PVC และน้ำยางมีการแยกเฟสกันอย่างชัดเจนโดยพิจารณาที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ -60°C ถึง -30°C ซึ่งเป็น T_g ของน้ำยางธรรมชาติ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ลักษณะเส้นกราฟของ STD และ 0.2CNR3NR มีลักษณะเป็นเนินเดียว นั่นคือมีการปะปนกันอยู่ระหว่างเฟสของ impact modifier กับ PVC matrix ส่วนสูตร 0CNR4NR และ

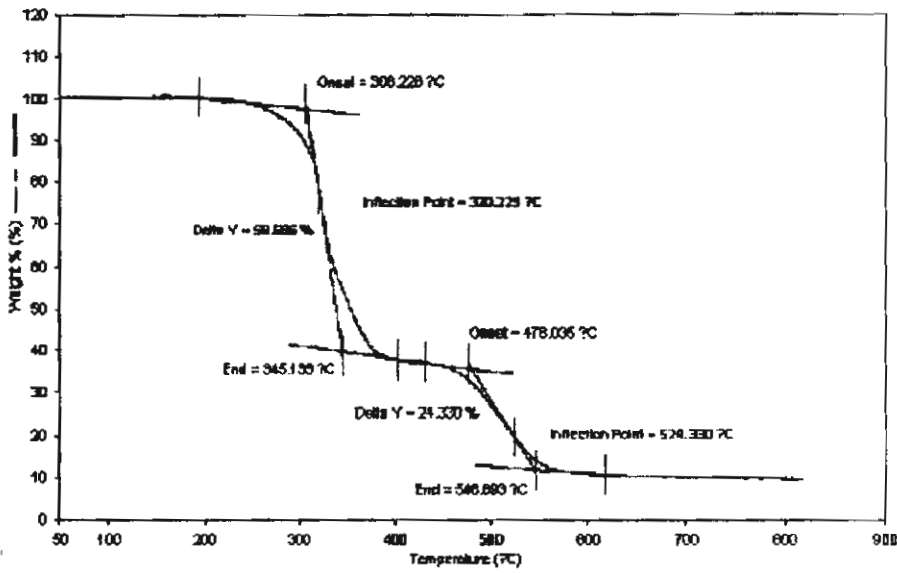
0.2CNR4NR มีลักษณะเป็นเนิน 2 เนิน นั้นแสดงว่ามีการแยกเฟสกัน ทั้งนี้ความสูงของเนินไม่เด่นชัด เนื่องจากใช้น้ำยางในปริมาณน้อย ดังนั้นการใช้ CNR เป็นตัวประสานช่วยให้น้ำยางธรรมชาติ กับ PVC เข้ากันได้ ซึ่งสามารถสนับสนุนข้อมูลจากภาพ TEM ซึ่งการขึ้นรูป PVC sheet ด้วยสูตร 0.2CNR3NR เป็นสัดส่วนที่เหมาะสม จึงส่งผลให้ ค่า storage modulus มีค่าสูงกว่าการใช้ MBS เป็น impact modifier

4.2.2 สมบัติทางความร้อน (Thermal Properties)

การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA ซึ่งเป็นวิธีการที่สามารถศึกษาอุณหภูมิในการสลายตัวของชิ้นงาน PVC ภายใต้สภาวะแก๊สเฉื่อย(N_2) โดยทำการทดสอบจากอุณหภูมิ 40–800°C heating rate 10 °C/min พบว่าการสลายตัวของ PVC แบ่งออกเป็น 2 ช่วง ดัง TGA Thermogram ในรูปที่ 4.16 และ 4.17



รูปที่ 4.16 TGA thermogram ของ PVC sheet สูตร STD



รูปที่ 4.17 TGA thermogram ของ PVC sheet สูตร 0.2CNR3NR

จาก TGA thermogram พบว่า ลักษณะการสลายตัวของ PVC แบ่งออกเป็น 2 ช่วง ในช่วงแรก เกิดการปลดปล่อยโมเลกุลของ HCl ทำให้ PVC เกิดการเปลี่ยนทางโครงสร้าง กลายเป็น Polyene และในช่วงที่สอง เป็นการสลายตัวของ Polyene โดย Decomposition temperature ของ PVC ของ PVC ทั้ง 2 ช่วงแสดงได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 Decomposition temperature (T_d) ของ PVC

สูตร	T_{d1} (°C)	T_{d2} (°C)
CNR	191.23	473.19
STD	291.78	466.50
No Impact	304.83	487.86
0CNR4NR	305.58	487.42
0.1CNR1NR	316.08	487.02
0.1CNR2NR	313.53	485.60
0.1CNR3NR	315.10	488.90
0.1CNR4NR	315.90	486.01
0.2CNR1NR	305.17	488.72
0.2CNR2NR	305.28	478.65

สูตร	$T_{d1} (^{\circ}\text{C})$	$T_{d2} (^{\circ}\text{C})$
0.2CNR3NR	306.23	476.04
0.2CNR4NR	303.60	482.33
0.3CNR1NR	313.63	490.90
0.3CNR2NR	314.00	484.87
0.3CNR3NR	303.34	469.98
0.3CNR4NR	311.19	486.44
0.3CNR5NR	302.72	480.14
0.3CNR6NR	313.49	494.70
0.3CNR7NR	301.57	474.94

หมายเหตุ

- T_{d1} เป็นอุณหภูมิที่ PVC เริ่มเกิดการปลดปล่อยโมเลกุลของ HCl ทำให้ PVC เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างกลายเป็น Polyene
- T_{d2} เป็นอุณหภูมิที่ polyene เริ่มเกิดการสลายตัว

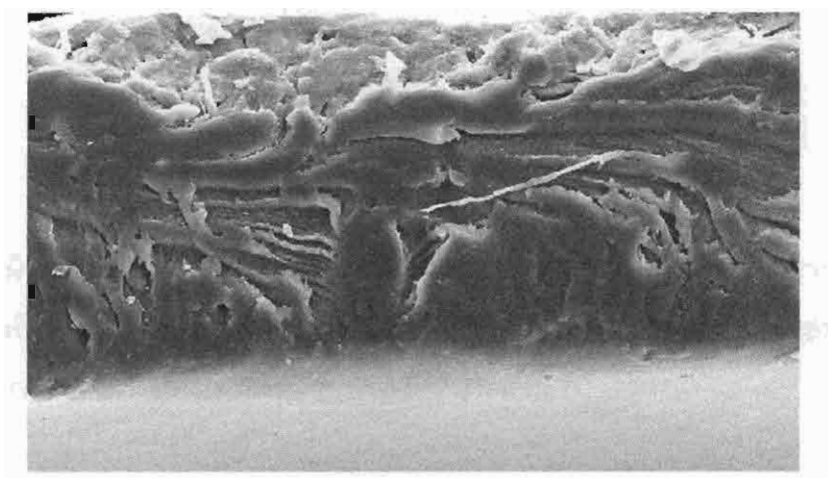
โดยปกติแล้ว PVC ที่ไม่มีการเติม additive จะมีค่า T_{d1} ประมาณ 200°C [2] ซึ่งเป็นจุดที่เริ่มมีการปลดปล่อยโมเลกุลของ HCl ในการ compound PVC จะต้องทำให้อุณหภูมิสูงกว่า 80°C จึงต้องมีการเติม heat stabilizer ลงไปเพื่อให้ PVC สามารถขึ้นรูปได้โดยไม่เกิดการ decompose ไปก่อน ซึ่งในการดำเนินงานวิจัยนี้ มีการใช้ additive ต่างๆในการ compound และสภาวะการcompoundเดียวกันแต่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณ impact modifier และตัวประสาน (CNR)

จากตารางที่ 4.3 เมื่อพิจารณาและเปรียบเทียบ T_d ของตัวอย่างกับ T_d ของ STD การใช้ น้ำยางธรรมชาติเป็น impact modifier โดยมี CNR เป็นตัวประสาน สามารถช่วยให้ PVC sheet มีความทนทานต่อการเกิด decomposition เนื่องจากอุณหภูมิการสลายตัวมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย เมื่อพิจารณาจากค่า % Weight loss จะพบว่าในช่วงแรกที่มีการสลายตัวของ PVC โดยมีการปลดปล่อยโมเลกุลของ HCl , %Weight loss ในทุกสูตรจะลดลงประมาณ 60% ซึ่งน้ำหนักที่หายไปนั้นเป็นน้ำหนักของคลอรีนที่มีอยู่ในโครงสร้างของ PVC ซึ่งมีอยู่ประมาณ 56-60% [2] ส่วนในช่วงที่สองจะกลายเป็นการสลายตัวของ polyene ซึ่งเป็นสายโซ่หลักมี % Weight loss และที่เหลืออีก 10 % จะเป็นน้ำหนักของซีเมนต์และสิ่งเจือปนอื่นๆ

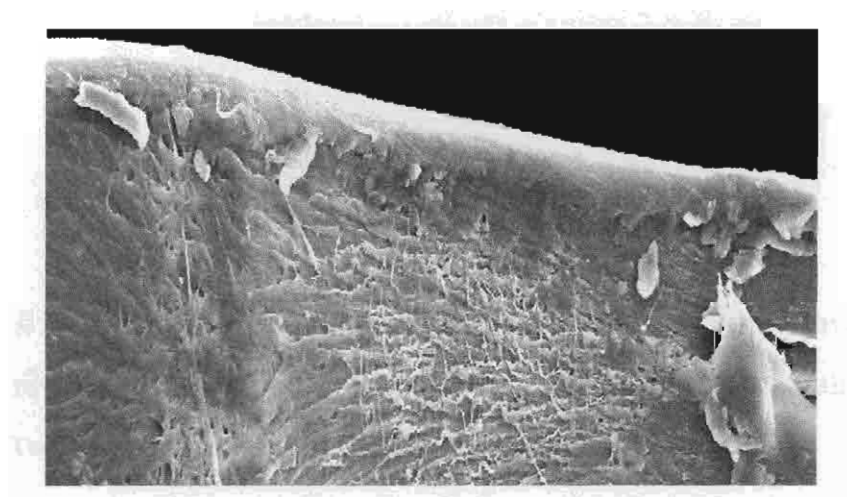
4.2.3 สมบัติทาง Morphology

4.2.3.1 การตรวจสอบด้วย Scanning Electron Microscopy (SEM)

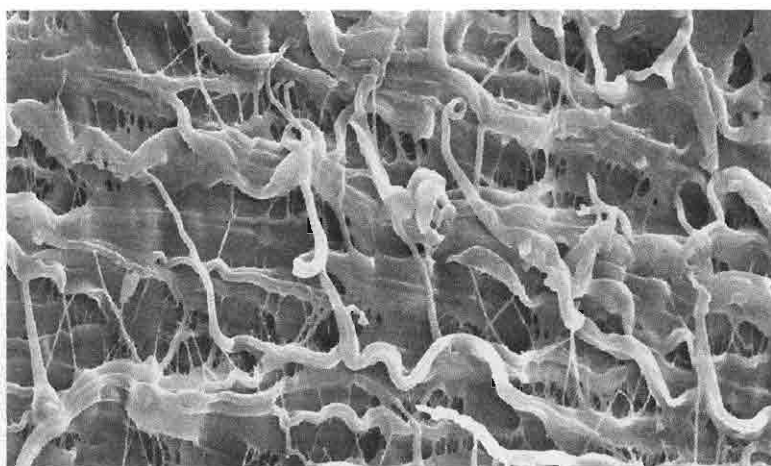
จากการทดสอบ Morphology ของที่ผ่านการทดสอบ Impact resistance และ Tensile strength โดยตรวจสอบที่ผิวชิ้นงานที่แตกหัก ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.18-4.30



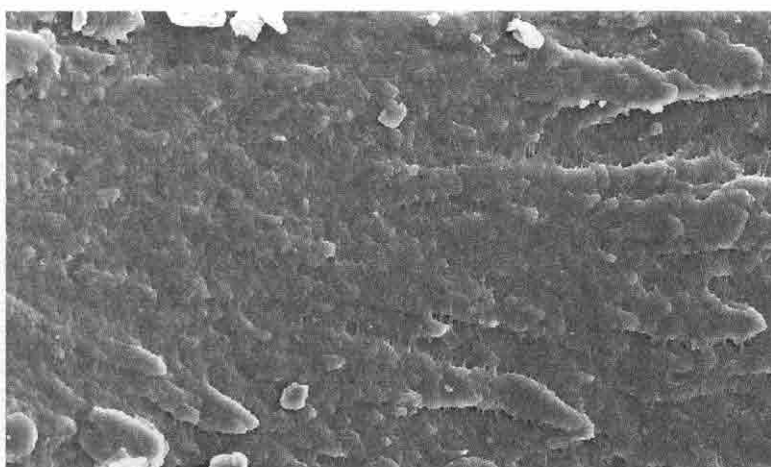
รูปที่ 4.18 ผิวของรอยขาดจากการตรวจสอบ SEM ของชิ้นงาน PVC ที่ใช้ MBS เป็น Impact modifier ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ Tensile strength (กำลังขยาย 400 เท่า)



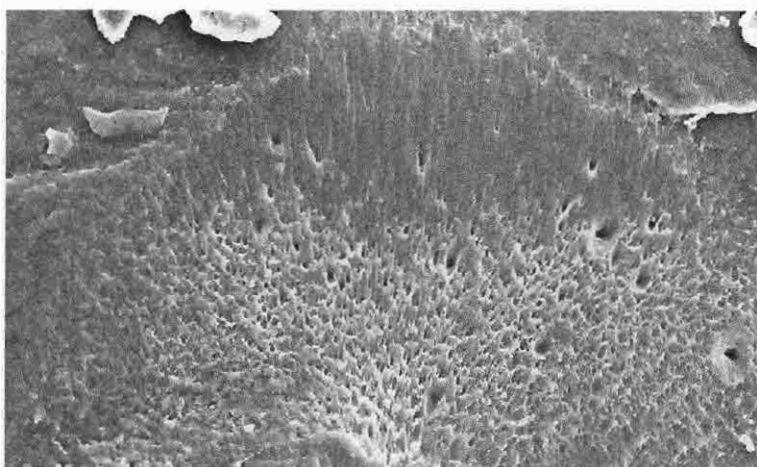
รูปที่ 4.19 ผิวของรอยขาดจากการตรวจสอบ SEM ของชิ้นงาน PVC ที่ใช้น้ำยางธรรมชาติ เป็น impact modifier (สูตร 0CNR4NR) ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ Tensile strength (กำลังขยาย 400 เท่า)



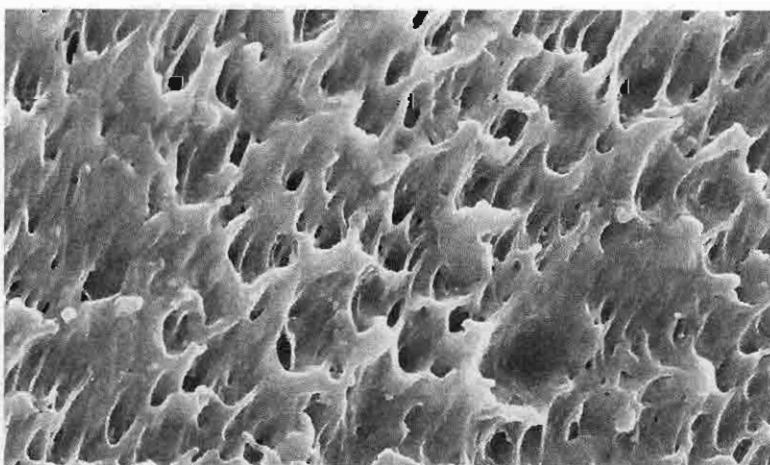
รูปที่ 4.20 ผิวของรอยขาดจากการตรวจสอบ SEM ของชิ้นงาน PVC ที่ใช้น้ำยางธรรมชาติ เป็น impact modifier (สูตร 0CNR4NR) ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ Tensile strength (กำลังขยาย 3000 เท่า บริเวณที่ 1)



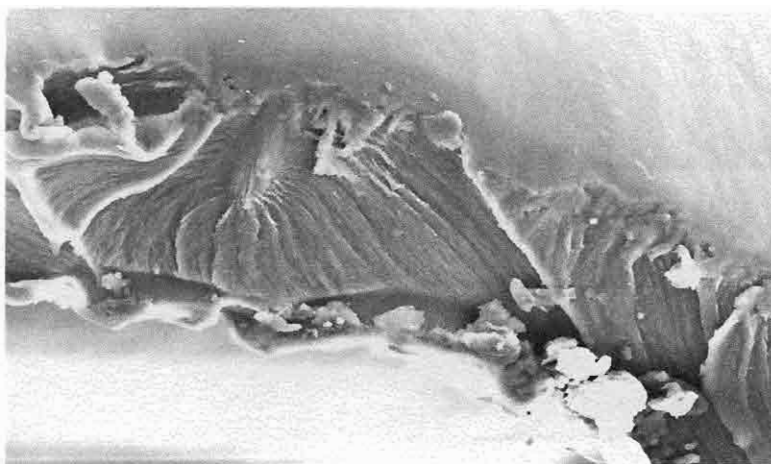
รูปที่ 4.21 ผิวของรอยขาดจากการตรวจสอบ SEM ของชิ้นงาน PVC ที่ใช้น้ำยางธรรมชาติ เป็น impact modifier (สูตร 0CNR4NR) ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ Tensile strength (กำลังขยาย 3000 เท่า บริเวณที่ 2)



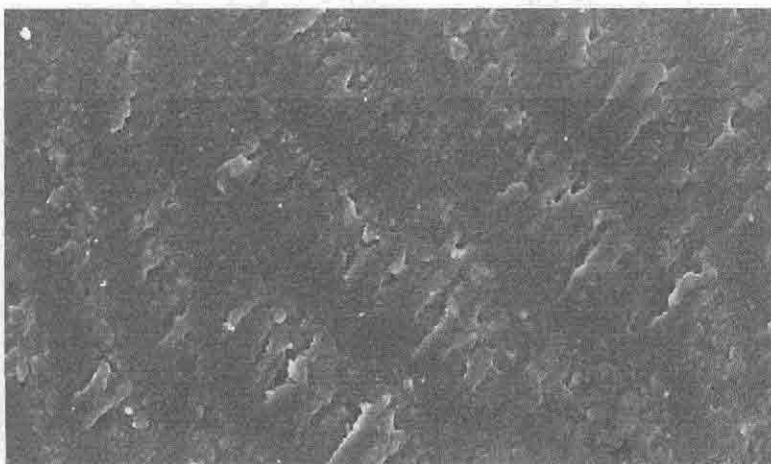
รูปที่ 4.22 ผิวของรอยขาดจากการตรวจสอบ SEM ของชิ้นงาน PVC ที่ใช้น้ำยางธรรมชาติ เป็น impact modifier (สูตร 0.2CNR3NR) ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ผ่านการ ทดสอบ Tensile strength (กำลังขยาย 400 เท่า)



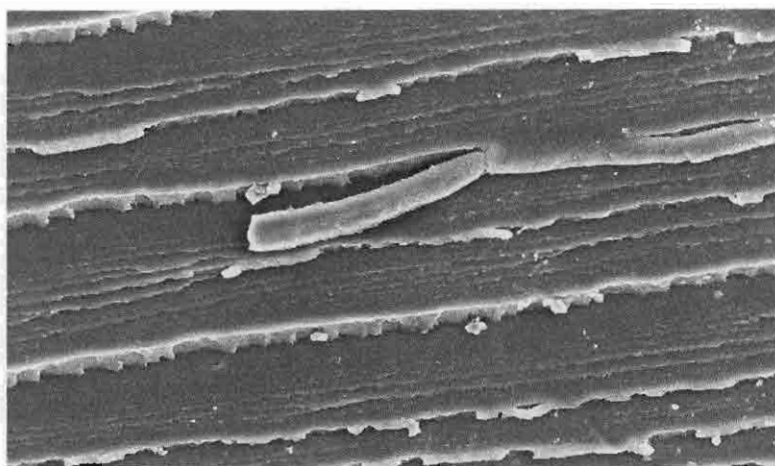
รูปที่ 4.23 ผิวของรอยขาดจากการตรวจสอบ SEM ของชิ้นงาน PVC ที่ใช้น้ำยางธรรมชาติ เป็น impact modifier (สูตร 0.2CNR3NR) ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ผ่านการ ทดสอบ Tensile strength (กำลังขยาย 3000 เท่า)



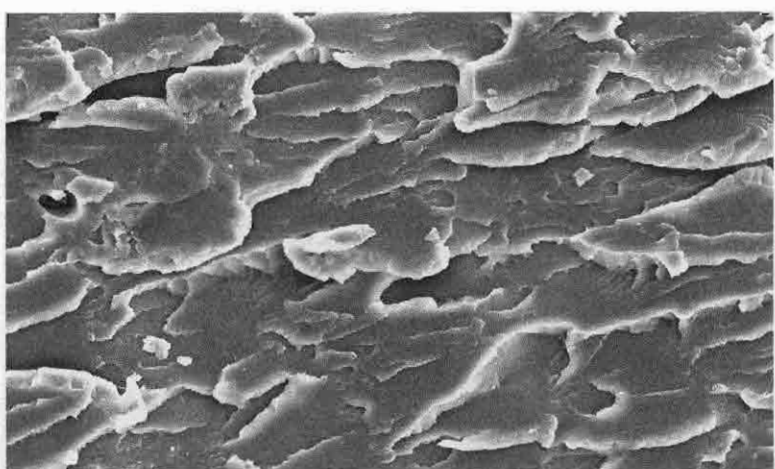
รูปที่ 4.24 ผิวของรอยขาดจากการตรวจสอบ SEM ของชิ้นงาน PVC ที่ใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น impact modifier (สูตร 0.2CNR4NR) ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ Tensile strength (กำลังขยาย 400 เท่า)



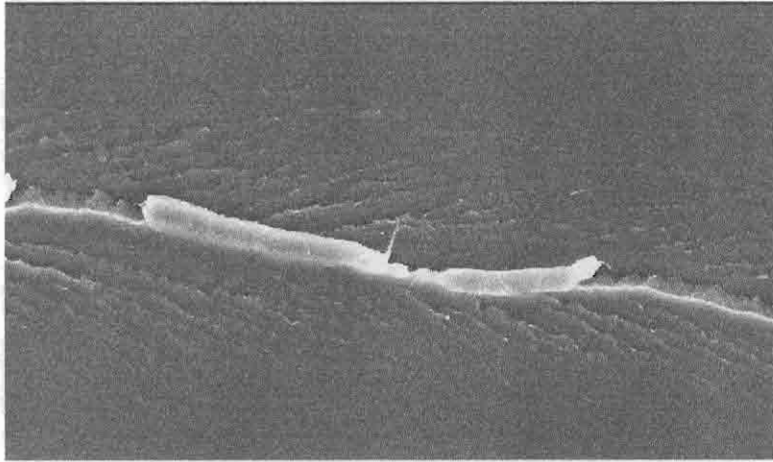
รูปที่ 4.25 รอยแตกหักที่ผิวหน้าจากการตรวจสอบ SEM ของชิ้นงาน PVC ที่ใช้ MBS เป็น impact modifier (สูตร STD) ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ Impact resistance (กำลังขยาย 400 เท่า)



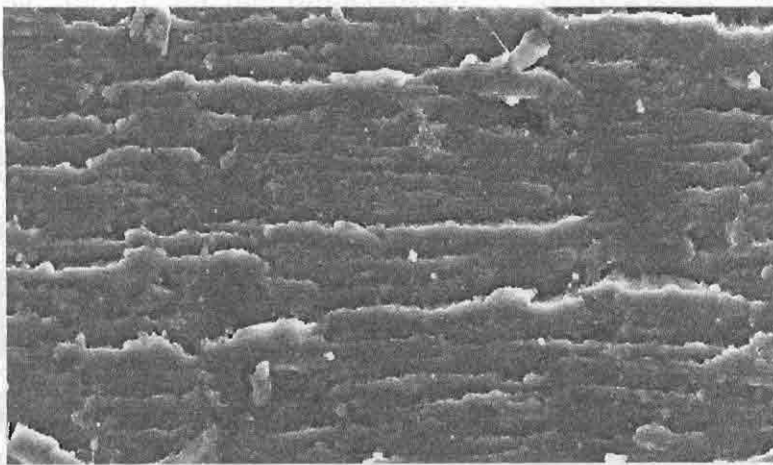
รูปที่ 4.26 รอยแตกหักที่ผิวหน้าจากการตรวจสอบ SEM ของชิ้นงาน PVC ที่ไม่มีการเติม Impact modifier ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ Impact resistance (ที่กำลังขยาย 400 เท่า)



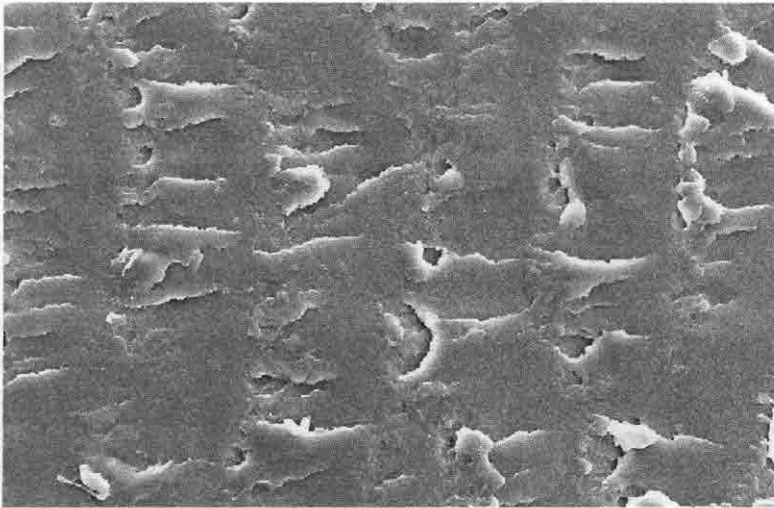
รูปที่ 4.27 รอยแตกหักที่ผิวหน้าจากการตรวจสอบ SEM ของชิ้นงาน PVC ที่ไม่มีการเติม Impact modifier ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ Impact resistance (ที่กำลังขยาย 3000 เท่า)



รูปที่ 4.28 รอยแตกหักที่ผิวหน้าจากการตรวจสอบ SEM ของชิ้นงาน PVC ที่ใช้น้ำยางธรรมชาติ เป็น Impact modifier โดยไม่มีการเติม CNR (สูตร 0CNR4NRซึ่งเป็นชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ Impact resistance(ที่กำลังขยาย 400 เท่า)



รูปที่ 4.29 รอยแตกหักที่ผิวหน้าจากการตรวจสอบ SEM ของชิ้นงาน PVC ที่ใช้น้ำยางธรรมชาติ เป็น Impact modifier (สูตร 0.2CNR3NRซึ่งเป็นชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ Impact resistance (ที่กำลังขยาย 400 เท่า)



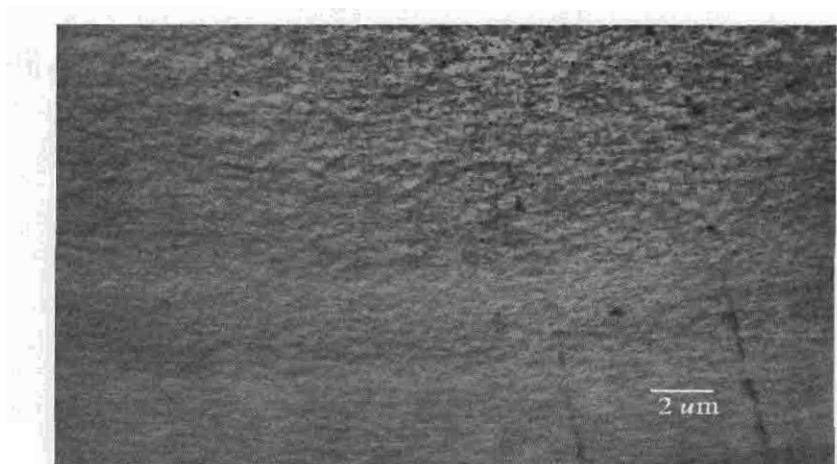
รูปที่ 4.30 รอยแตกหักที่ผิวหน้าจากการตรวจสอบ SEM ของชิ้นงาน PVC ที่ใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น Impact modifier (สูตร 0.2CNR4NR) ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ Impact resistance (ที่กำลังขยาย 400 เท่า)

จากการดูลักษณะการแตกหักของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ impact resistance และทดสอบ Tensile พบว่า เมื่อดูการแตกหักที่ผิวของชิ้นงาน PVC ที่ไม่ได้เติม impact modifier โดยชิ้นงานที่ตี impact จะเห็นรอยการแตกหักที่เป็นลักษณะหยาบไม่แสดงการเกิด yield ที่ชัดเจน ดังรูปที่ 4.27 และเมื่อดูด้วยกำลังขยายสูงขึ้นก็จะเห็นรอยการแตกหักเป็นรอยหยาบขนาดใหญ่ ซึ่งสามารถสันนิษฐานได้ว่าการแตกหักแบบ brittle เมื่อพิจารณาชิ้นงาน PVC ที่มีการเติม impact modifier คือ กรณีที่ใช้ MBS ซึ่งเป็นตัวที่ใช้เทียบมาตรฐาน และชิ้นงานที่ปรับปรุงสมบัติด้าน impact resistance โดยใช้น้ำยางธรรมชาติพบว่า กรณีที่ใช้ MBS จะเห็นแนวการแตกหักที่มีแนวโน้มไปตามแนวแรงที่มากระทำ ดังรูปที่ 4.18 และ 4.25 ซึ่งเป็นชิ้นงานของสูตรมาตรฐานที่ใช้ MBS เป็น impact modifier จะเห็นการกระจายตัวของแนวการแตกหักเป็นแนวยาว ค่อนข้างสม่ำเสมอ และสังเกตเห็น yield อย่างชัดเจน ซึ่งเป็นพฤติกรรมของการแตกหักที่เป็น ductile และพิจารณาการแตกหักและรอยการขาดของชิ้นงานที่ใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น impact modifier โดยเริ่มพิจารณาจากสูตรที่เติมน้ำยางโดยที่ไม่มีการเติม CNR เป็นตัวประสาน จะเห็นลักษณะการแตกหักที่เป็น ductile เช่นกัน แต่การกระจายตัวของรอยแตกหักไม่มาก ดังรูปที่ 4.19 และรูปที่ 4.28 ซึ่งจะแสดงการแตกหักของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ impact resistance จะเห็นแนวเส้นสีขาวที่เป็นเส้นใหญ่ไม่มีลักษณะของการกระจายของรอยแตก และเมื่อดูการแตกหักของชิ้นงานจากการดึง Tensile สังเกตเห็นว่าที่กำลังขยาย 400 เท่า จะเห็นรอยแตกกระจายกันอยู่เป็นแนวที่ใกล้เคียงกันและเป็นแนวการแตกหักขนาดเล็ก แต่เมื่อดูด้วยกำลังขยายสูงขึ้นเป็น 3000 เท่าดังในรูปที่ 4.20 เห็นได้อย่างชัดเจนว่า มีลักษณะผิว

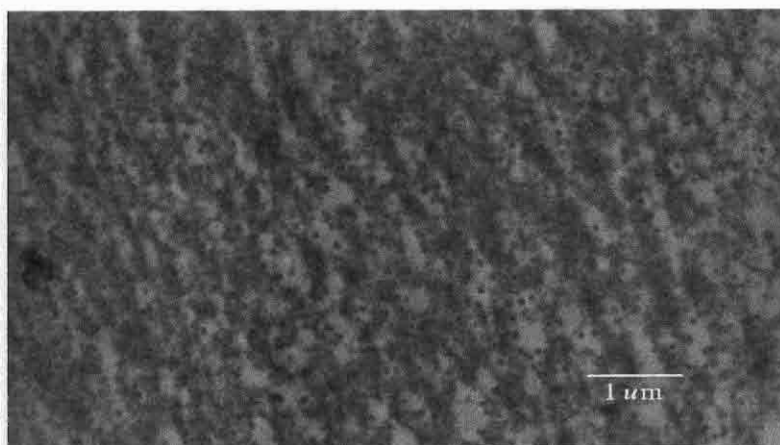
ที่ไขว้ไปมาแบบสุ่มคล้ายการค้ำยัดเนื่องมาจากแรงภายนอก แต่แนวการเปลี่ยนแปลงไม่ชัดเจน แต่เมื่อดูการแตกหักของชิ้นงาน PVC ที่ใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น Impact modifier และใช้ CNR เป็นตัวประสาน ดังรูปที่ 4.22, 4.24 และ 4.30 จะเห็นลักษณะการแตกหักที่มีสีขาวกระจายอยู่เป็นจำนวนมากโดยเฉพาะเมื่อดูรูปที่ 4.23 ที่ได้จากการส่องรูป 4.22 ด้วยกำลังขยายที่สูงขึ้นจะเห็นแนวการเปลี่ยนแปลงรอยแตกเป็นไปในแนวเดียวกัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการที่ใช้ CNR เป็นตัวประสานมีส่วนช่วยให้เกิดการยึดเกาะระหว่างองค์ประกอบที่ดีแล้วยังมีส่วนช่วยในการรับแรงและต่อต้านการแตกหักให้มีแนวโน้มไปในทางเดียวกันด้วย ซึ่งโดยเฉพาะรอยการแตกหักของชิ้นงาน PVC ที่ผ่านการค้ำ Tensile ของสูตร 0.2CNR3NR และ 0.2CNR4NR ซึ่งมีรอยและลักษณะการแตกหักคล้ายกับรอยการแตกหักของชิ้นงานมาตรฐานที่ใช้ MBS เป็น impact modifier แสดงให้เห็นว่าการใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น impact modifier ช่วยปรับปรุงให้ PVC มีพฤติกรรมการแตกหักแบบ ductile ได้ดีและคงความแข็งแรงของ PVC ไว้

4.2.3.2 การตรวจสอบด้วย Transmission Electron Microscopy (TEM)

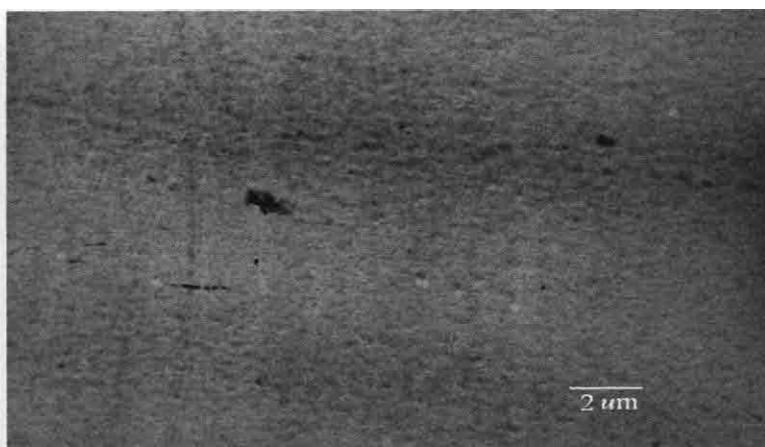
จากการตรวจสอบความเข้ากันได้ของ PVC กับ Impact modifier ด้วย TEM โดยดูลักษณะการกระจายตัวของ Impact modifier ใน PVC matrix ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.31-4.58



รูปที่ 4.31 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 3,000 เท่า)
ของ PVC sheet สูตร STD



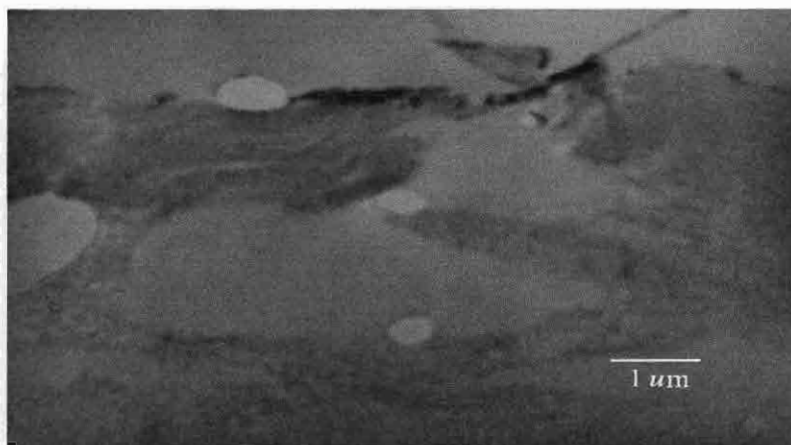
รูปที่ 4.32 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 8,000 เท่า)
ของ PVC sheet สูตร STD



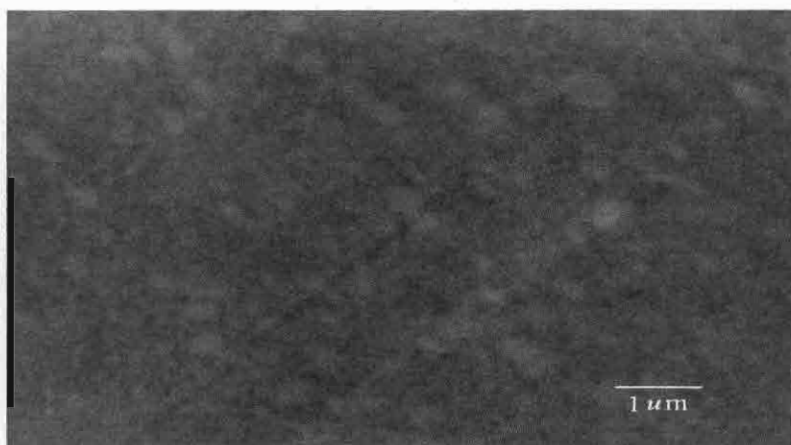
รูปที่ 4.33 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 3,000 เท่า)
ของ PVC sheet ที่ผ่านการดึงยืด สูตร STD



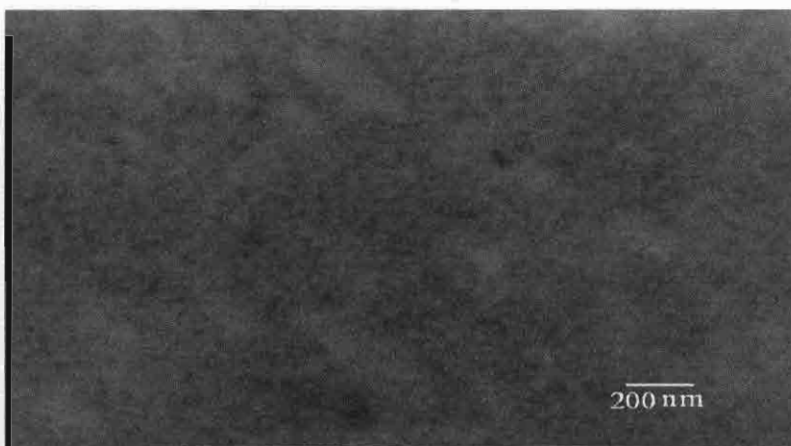
รูปที่ 4.34 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 8,000 เท่า)
ของ PVC sheet ที่ผ่านการดึงยืด สูตร STD



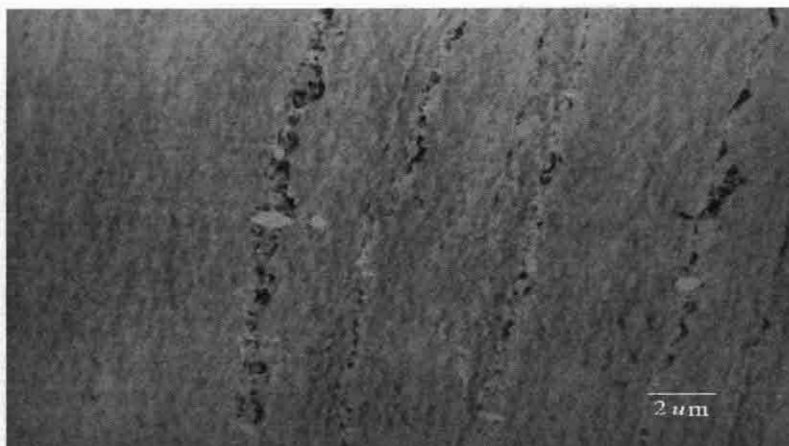
รูปที่ 4.35 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 8,000 เท่า)
ของ PVC sheet สูตร 0CNR4NR



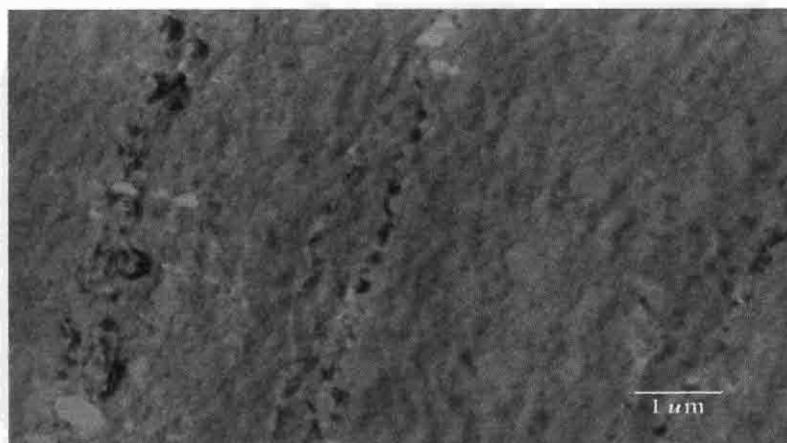
รูปที่ 4.36 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 8,000 เท่า)
ของ PVC sheet สูตร 0.2CNR3NR



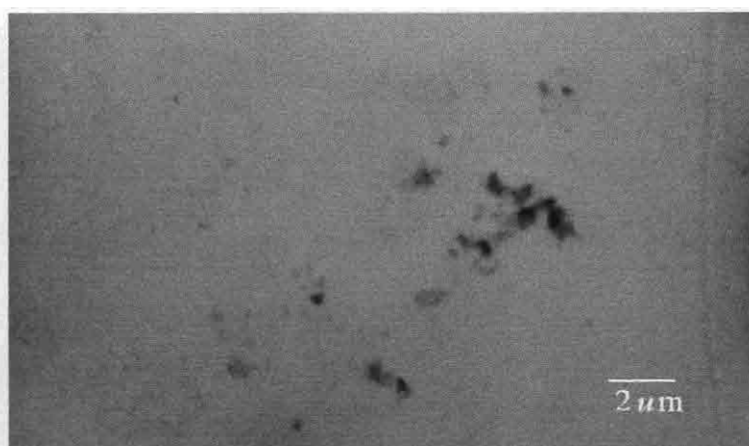
รูปที่ 4.37 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 25,000 เท่า)
ของ PVC sheet สูตร 0.2CNR3NR



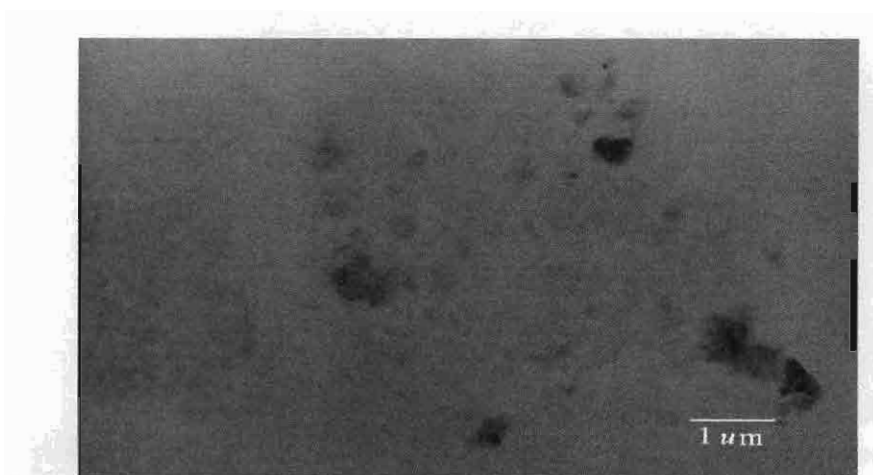
รูปที่ 4.38 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 3,000 เท่า)
ของ PVC sheet ที่ผ่านการดิงยัด สูตร 0.2CNR3NR



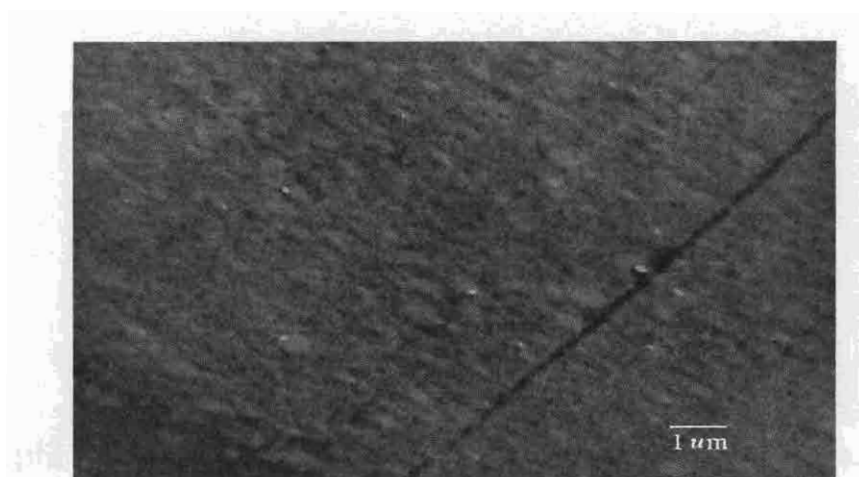
รูปที่ 4.39 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 8,000 เท่า)
ของ PVC sheet ที่ผ่านการดิงยัด สูตร 0.2CNR3NR



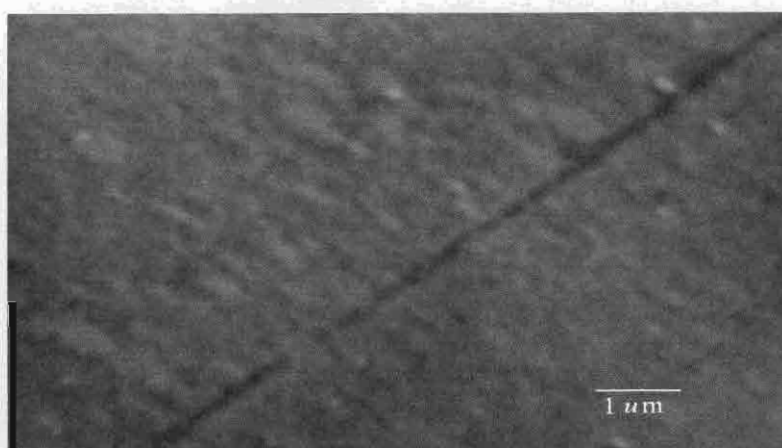
รูปที่ 4.40 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 3,000 เท่า)
ของ PVC sheet สูตร 0.2CNR3NR ที่ผ่านการ Vacuum thermoforming



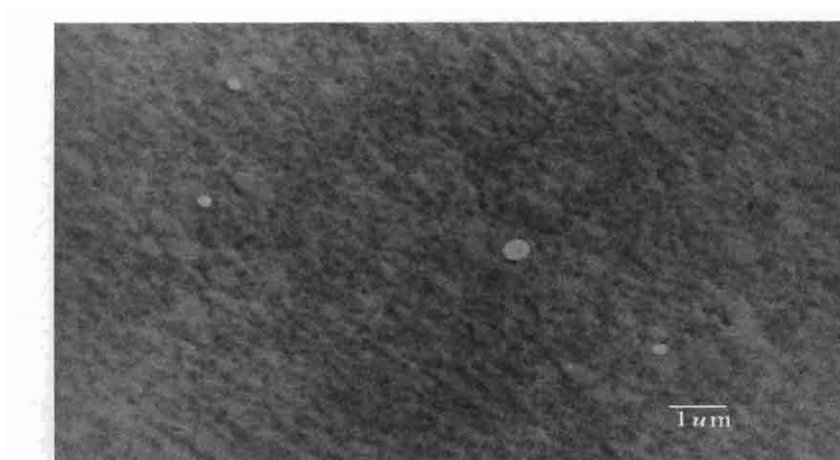
รูปที่ 4.41 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 8,000 เท่า)
ของ PVC sheet สูตร 0.2CNR3NR ที่ผ่านการ Vacuum thermoforming



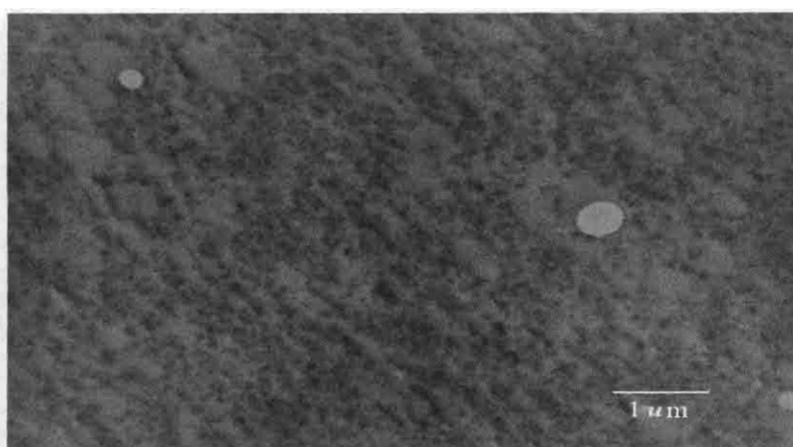
รูปที่ 4.42 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 5,000 เท่า)
ของ PVC sheet สูตร 0.2CNR4NR



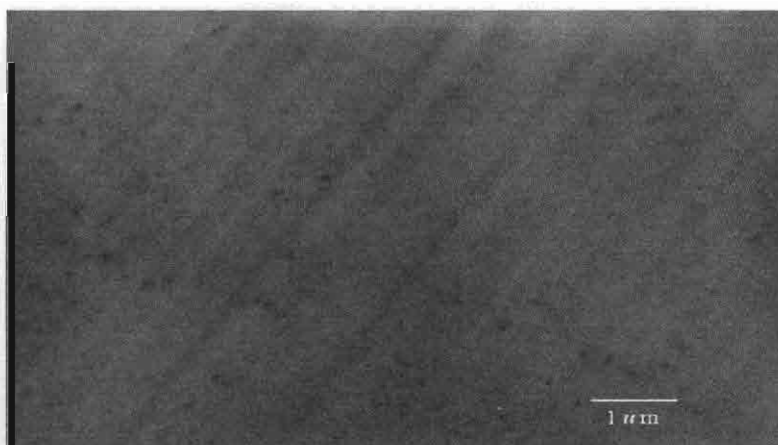
รูปที่ 4.43 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 8,000 เท่า)
ของ PVC sheet สูตร 0.2CNR4NR



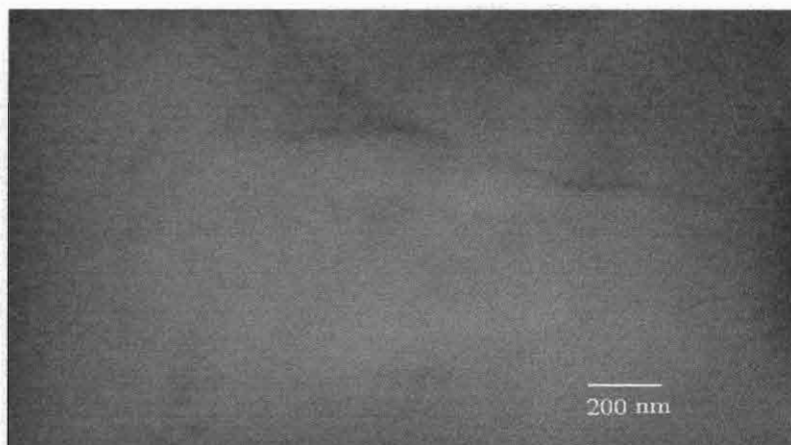
รูปที่ 4.44 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 5,000 เท่า)
ของ PVC sheet ที่ผ่านการดึงยืด สูตร 0.2CNR4NR



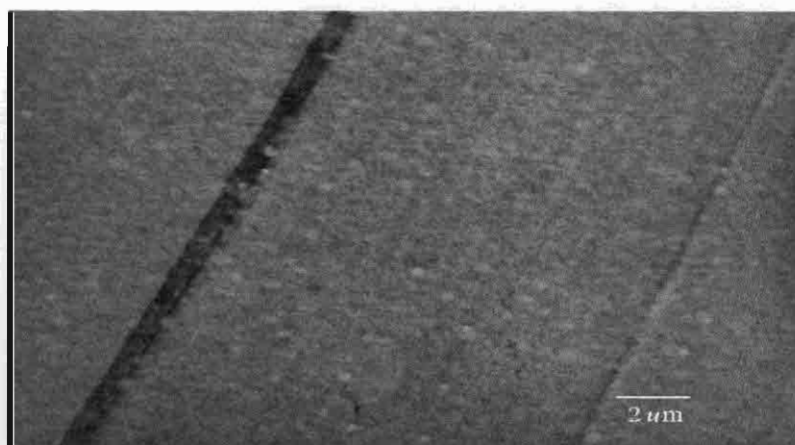
รูปที่ 4.45 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 8,000 เท่า)
ของ PVC sheet ที่ผ่านการดึงยืด สูตร 0.2CNR4NR



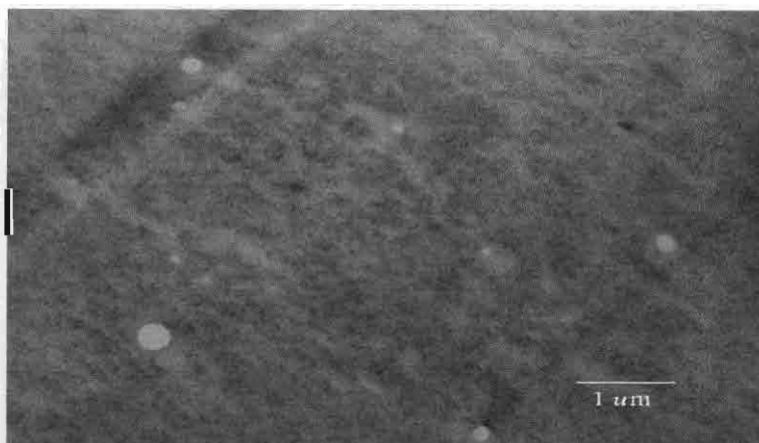
รูปที่ 4.46 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 8,000 เท่า)
ของ PVC sheet สูตร 0.2CNR4NR ที่ผ่านการ Vacuum Thermoforming



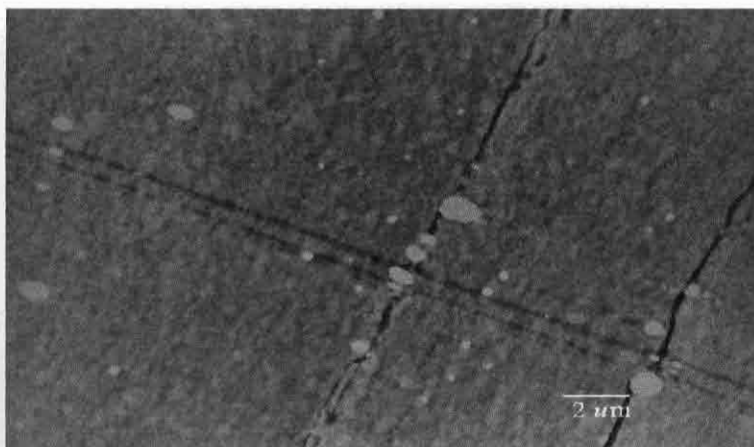
รูปที่ 4.47 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 25,000 เท่า)
ของ PVC sheet สูตร 0.2CNR4NR ที่ผ่านการ Vacuum Thermoforming



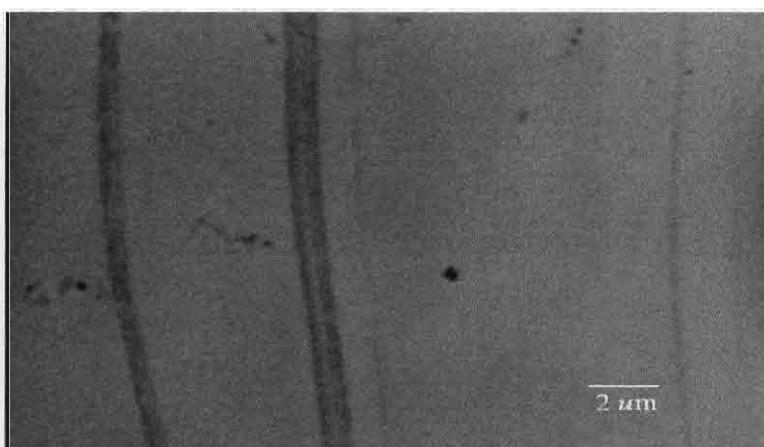
รูปที่ 4.48 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 3,000 เท่า)
ของ PVC sheet สูตร 0.3CNR3NR



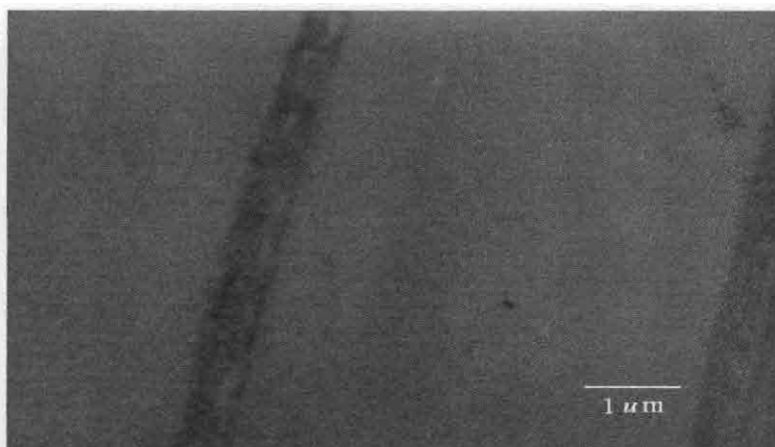
รูปที่ 4.49 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 8,000 เท่า)
ของ PVC sheet สูตร 0.3CNR3NR



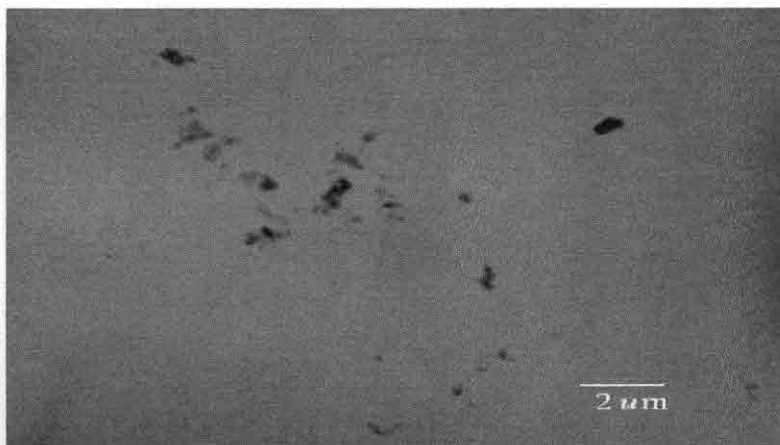
รูปที่ 4.50 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 3,000 เท่า)
ของ PVC sheet สูตร 0.3CNR4NR



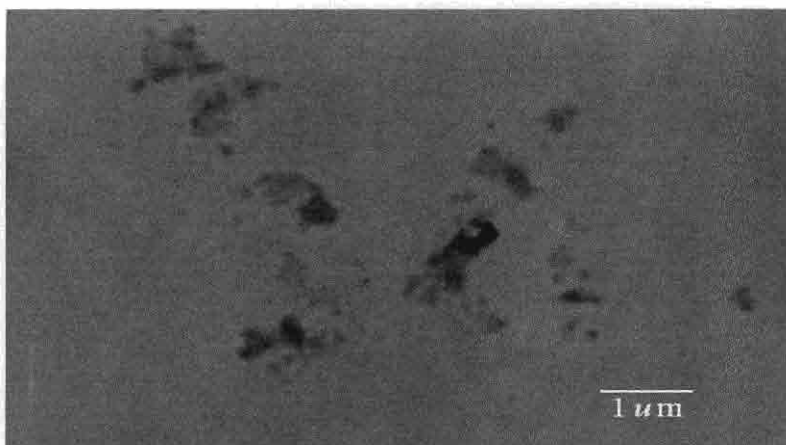
รูปที่ 4.51 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 3,000 เท่า)
ของ PVC sheet ที่ผ่านการดึงยืด สูตร 0.3CNR4NR



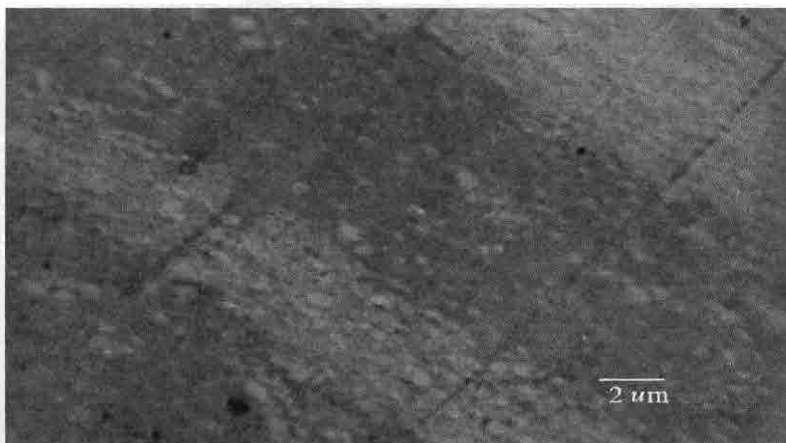
รูปที่ 4.52 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 8,000 เท่า)
ของ PVC sheet ที่ผ่านการดึงยืด สูตร 0.3CNR4NR



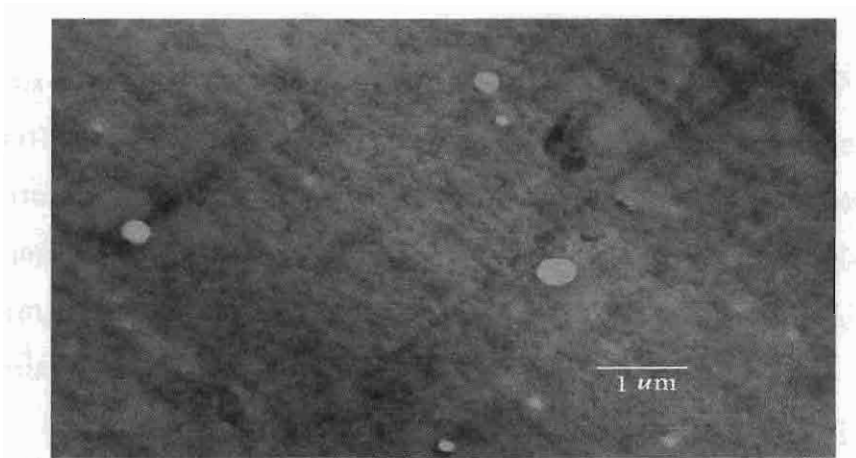
รูปที่ 4.53 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 3,000 เท่า)
ของ PVC sheet ที่มี % strain ต่ำ สูตร 0.3CNR6NR



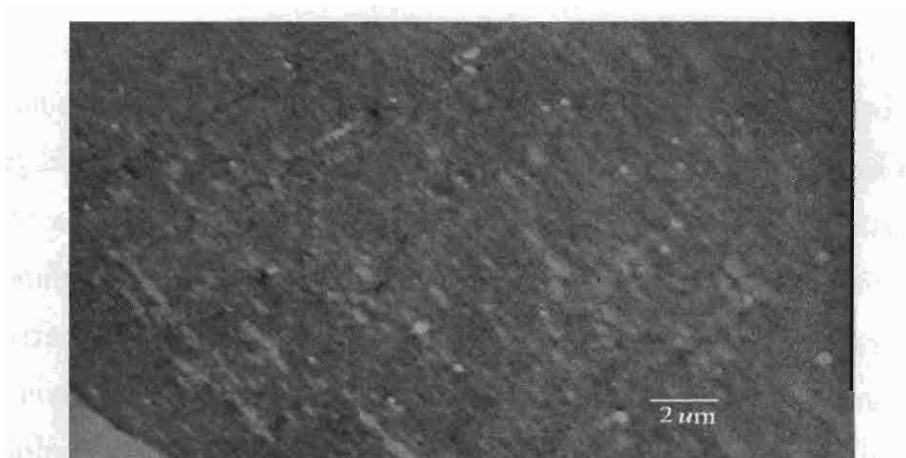
รูปที่ 4.54 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 8,000 เท่า)
ของ PVC sheet ที่มี % strain ต่ำ สูตร 0.3CNR6NR



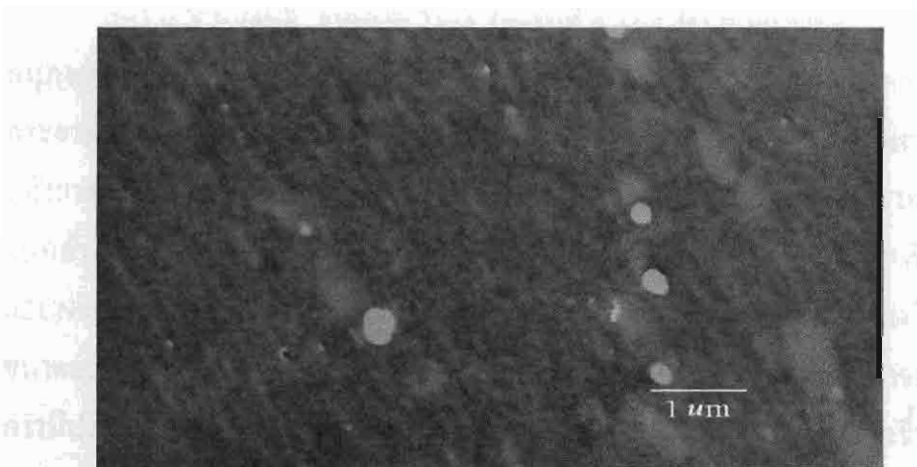
รูปที่ 4.55 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 3,000 เท่า)
ของ PVC sheet ที่มี % strain สูง สูตร 0.3CNR6NR



รูปที่ 4.56 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 8,000 เท่า)
ของ PVC sheet ที่มี % strain สูง สูตร 0.3CNR6NR



รูปที่ 4.57 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 3,000 เท่า)
ของ PVC sheet สูตร 0.3CNR7NR



รูปที่ 4.58 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 8,000 เท่า)
ของ PVC sheet สูตร 0.3CNR7NR

โดยพิจารณากระจายตัวของยาง ใน PVC เทียบกับการกระจายตัวของ MBS ใน PVC matrix สำหรับ PVC sheet ที่ใช้ MBS เป็น impact modifier (สูตร STD) ดังรูปที่ 4.31-4.34 พบว่า MBS มีการกระจายใน PVC อย่างสม่ำเสมอ และกระจายตัวไปในแนวเดียวกัน และเมื่อพิจารณา TEM ของ PVC สูตร STD หลังการดึงยืด สังเกตเห็นส่วนที่เป็นอนุภาคของ MBS มีขนาดเล็กลงและมีการเปลี่ยนแปลงแนวการกระจายตัวไปตามแนวแรงดึง มีการจัดเรียงตัวใหม่ของอนุภาค MBS ได้มากขึ้นจึงเห็นลักษณะการกระจายตัวของ MBS ใน PVC matrix เป็นเฟสที่ต่อเนื่องกัน

ภาพ TEM ของ PVC ที่ใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น Impact modifier โดยไม่มีการเติม CNR พบว่า เฟสของยางมีการรวมกันเป็นกลุ่มก้อนและแยกเฟสจาก PVC อย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบด้วย DMA ของ สูตร 0CNR4NR ที่เห็นลักษณะการแยกเฟสของยางจาก PVC matrix ในกราฟ loss modulus กับ temperature ดังรูปที่ 4.14 ส่วนภาพ TEM ของ PVC สูตรที่ใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น impact modifier และมีการใช้ CNR เป็นตัวประสาน โดยเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของน้ำยางก่อนทดสอบดึง Tensile และหลังการดึง Tensile ดังรูปที่ 4.36-4.39 , 4.42-4.45 และ 4.50-4.52 จะเห็นว่าก่อนดึงยืดมีการกระจายตัวของยางใน PVC matrix อยู่ทั่วไปและขนาดอนุภาคของยางที่กระจายอยู่ใน PVC matrix มีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับสูตรที่ไม่ได้เติมตัวประสาน และไม่เห็นลักษณะการแยกเฟสของยางกับ PVC และพิจารณาหลังการดึงยืด พบการเปลี่ยนแปลงของขนาดอนุภาคของยางที่กระจายอยู่ใน PVC โดยการกระจายตัวเป็นไปตามแนวแรงดึง และลักษณะอนุภาคมีการเปลี่ยนแปลงจากรูปวงกลมไปเป็นลักษณะคล้ายวงรีและมีการจัดเรียงอนุภาคของ PVC กับน้ำยางใกล้ชิดกันมากขึ้น เนื่องจากเมื่อมีการให้แรงดึงจะเกิดการดึงยืดโดยอนุภาคของ PVC และ impact modifier จะเกิดการแพร่ไปตามแนวแรงดึง [3]

สูตร 0.2CNR4NR จากภาพ TEM (ดังรูปที่ 4.42-4.45) มีลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคยางใน PVC ที่คล้ายกับสูตร 0.2CNR3NR (รูปที่ 4.36-4.39) คืออนุภาคของยางมีการกระจายตัวที่ดีใน PVC และขนาดอนุภาคของยางที่กระจายตัวอยู่ มีขนาดเล็ก และภาพ TEM หลังการดึงยืดก็มีลักษณะ เช่นเดียวกัน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าปริมาณน้ำยางธรรมชาติที่ใส่ไม่แตกต่างกันมากจึงมีการกระจายตัวของยางธรรมชาติใน PVC ที่คล้ายกัน สำหรับสูตร 0.3CNR3NR (รูปที่ 4.48) และ 0.3CNR4NR (รูปที่ 4.50) มีการกระจายตัวของยางใน PVC ที่ดี ขนาดอนุภาคที่กระจายตัวอยู่มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับสูตร 0.2CNR3NR ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการมีปริมาณ CNR มากขึ้น ช่วยให้น้ำยางธรรมชาติกระจายตัวใน PVC ได้มากขึ้น สำหรับสูตร 0.3CNR6NR จากผล Tensile properties พบว่าลักษณะการดึงยืดแยกออกเป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มที่ดึงยืดได้น้อย และ กลุ่มที่ดึงยืดได้มาก เมื่อนำชิ้นงานตัวอย่างจากทั้งสองกลุ่มนี้ไปทดสอบ TEM พบว่า ในกลุ่มที่มีการดึงยืดได้น้อย จะไม่พบอนุภาคของยางกระจายตัวอยู่ใน

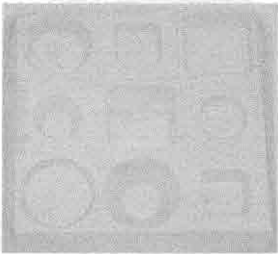
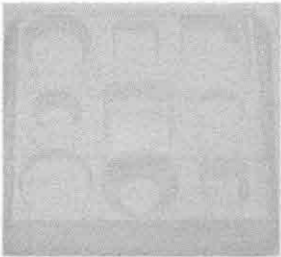
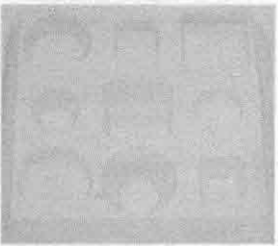
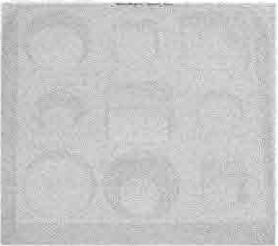
PVC matrix ซึ่งต่างจากกลุ่มที่มีการดึงยึดได้มาก จะพบว่ามีอนุภาคของยางกระจายอยู่ใน PVC ความแข็งแรงจึงเป็นจำนวนมาก ด้วยสาเหตุนี้จึงทำให้ PVC sheet สามารถดึงยึดได้มากกว่ากลุ่มที่ไม่พบอนุภาคของยางกระจายอยู่ใน PVC และ สูตร 0.3CNR7NR (รูปที่ 4.57) ได้ผลการทดสอบ TEM คล้ายกับ 0.3CNR6NR (รูปที่ 4.55) โดยกลุ่มที่มีการดึงยึดได้มากจะพบการกระจายของ CNR อยู่ใน PVC เป็นจำนวนมาก กล่าวได้ว่าการใช้น้ำยางธรรมชาติในปริมาณที่มากมีผลทำให้ยางไม่สามารถกระจายตัวได้หมด โดยส่วนที่ไม่มีการกระจายตัวยังคงจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน และเฉพาะส่วนที่มีการกระจายของยางธรรมชาติใน PVC จึงสามารถดึงยึดได้มาก

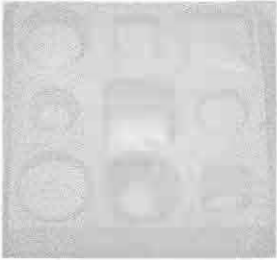
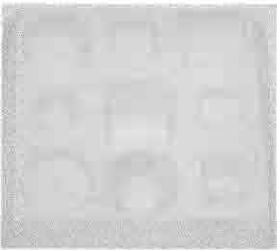
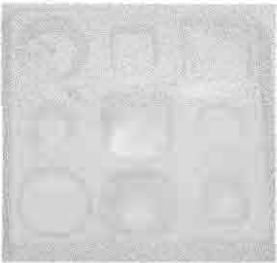
จากการศึกษาผลของ Tension ที่เกิดจากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการ vacuum thermoforming ที่มีต่อการกระจายตัวของ impact modifier ใน PVC matrix โดยนำชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วย vacuum thermoforming มาตรวจสอบ TEM พิจารณารูปที่ 4.40-4.41 และ 4.46-4.47 ไม่เห็นการกระจายตัวของอนุภาค impact modifier แต่เห็นลักษณะเป็นเฟสที่เป็นเนื้อเดียวกันและเห็นแนวการดึงยึดเนื่องมาจาก Tension ในการขึ้นรูป ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ในกระบวนการขึ้นรูปด้วย vacuum thermoforming โดยมีการให้ความร้อนจนแผ่น sheet อ่อนตัวนั้น ความร้อนดังกล่าวอาจมีผลทำให้ PVC กับ ยาง fuse เข้าหากันได้จนรวมเป็นเนื้อเดียวกัน เราจึงไม่เห็นลักษณะการกระจายตัวของยางใน PVC จากแผนภาพ TEM

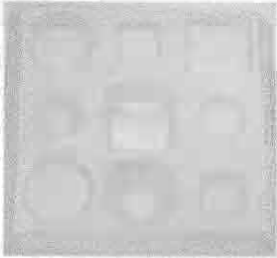
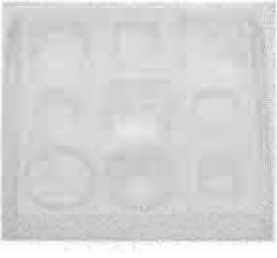
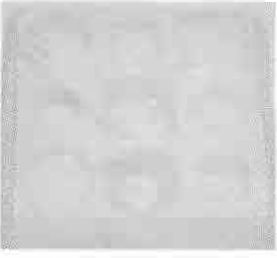
4.2.4 ความสามารถในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการ Vacuum thermoforming

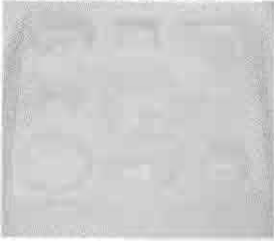
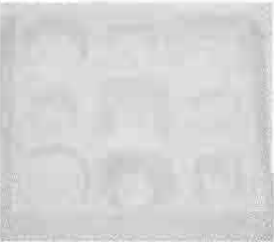
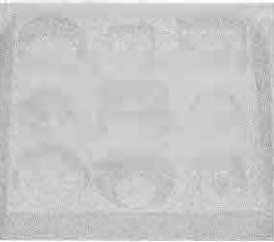
จาก PVC compound ที่ได้เมื่อขึ้นรูปเป็น sheet แล้วนำไปทำการทดสอบสมบัติด้านความทนทานต่อแรงกระแทกและสมบัติด้านการดึงยึดจึงได้มีการนำ PVC sheet ที่ได้มาขึ้นรูปด้วยเทคนิค Vacuum thermoforming ที่สภาวะอุณหภูมิ 200 °C, Heater relay ประมาณ 30 วินาที, Vacuum 8 วินาที, Cool 30 วินาที และดันชิ้นงานออก (Blow) 0.4 วินาที ได้ผลการทดสอบ ดังตารางที่ 4.4 ซึ่ง PVC sheet ที่ขึ้นรูปทั้ง 18 สูตร มีการควบคุมการขึ้นรูปที่สภาวะเดียวกันทั้งหมด ดังนั้น จะมีบางสูตรที่มีความหนาแตกต่างกันบ้างเล็กน้อยทำให้มีรอยย่นที่ขอบชิ้นงาน ซึ่งสามารถปรับปรุงได้โดยการปรับ condition ให้เหมาะสมกับความหนาของแผ่น sheet

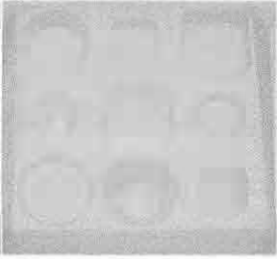
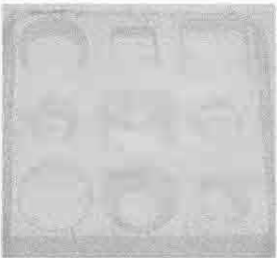
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบความสามารถในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการ Vacuum thermoforming

สูตร	รูป PVC sheet ที่ขึ้นรูปด้วย กระบวนการ Vacuum thermoforming	ผลการทดสอบ	
		ผ่าน	ไม่ผ่าน
STD		✓	
No Impact		✓	
0CNR 4NR		✓	
0.1CNR1NR		✓	

สูตร	รูป PVC sheet ที่ขึ้นรูปด้วย กระบวนการ Vacuum thermoforming	ผลการทดสอบ	
		ผ่าน	ไม่ผ่าน
0.1CNR2NR		✓	
0.1CNR3NR		✓	
0.1CNR4NR		✓	
0.2CNR1NR		✓	

สูตร	รูป PVC sheet ที่ขึ้นรูปด้วย กระบวนการ Vacuum thermoforming	ผลการทดสอบ	
		ผ่าน	ไม่ผ่าน
0.2CNR2NR		✓	
0.2CNR3NR		✓	
0.2CNR4NR		✓	
0.3CNR1NR		✓	

สูตร	รูป PVC sheet ที่ขึ้นรูปด้วย กระบวนการ Vacuum thermoforming	ผลการทดสอบ	
		ผ่าน	ไม่ผ่าน
0.3CNR2NR		✓	
0.3CNR3NR		✓	
0.3CNR4NR		✓	
0.3CNR5NR		✓	

สูตร	รูป PVC sheet ที่ขึ้นรูปด้วย กระบวนการ Vacuum thermoforming	ผลการทดสอบ	
		ผ่าน	ไม่ผ่าน
0.3CNR6NR		✓	
0.3CNR7NR		✓	

จากการทดสอบขึ้นรูปด้วยกระบวนการ Vacuum thermoforming พบว่า PVC sheet ทุกสูตร ผ่านการทดสอบ โดยพิจารณาจากชิ้นงานที่ขึ้นรูปได้นั้นมีลักษณะตามแม่พิมพ์และไม่เกิดการฉีกขาดหรือไหม้ในระหว่างการขึ้นรูป โดย PVC sheet ที่นำมาขึ้นรูปมีความหนาประมาณ 0.3 mm และแม่พิมพ์ที่ใช้มีขนาด 20 x 20 cm เป้ามีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม วงกลม และรูปถ้วย (ตามรูป) โดยแต่ละเป้าหมายมีความลึกแตกต่างกัน เป้าที่ลึกที่สุดประมาณ 30 mm และเป้าหมายที่ตื้นที่สุด ประมาณ 10 mm PVC sheet ที่ขึ้นรูปได้จากการ compound ด้วยสูตรต่างๆมีลักษณะเหมือนกัน แสดงว่าการใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น impact modifier โดยมี CNR เป็นตัวประสานนั้น ไม่มีผลกระทบต่อความสามารถในการขึ้นรูปของ PVC sheet ด้วยกระบวนการ Vacuum thermoforming

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยครั้งนี้ เมื่อทำการผลิต Poly(vinyl chloride) sheet สำหรับใช้ในงาน Vacuum Thermoforming โดยใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น Impact Modifier ได้ข้อสรุปดังนี้

1.จากการขึ้นรูป PVC Compound ให้เป็น sheet ด้วย Two roll mill โดยมีการปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำยางธรรมชาติที่ใช้จาก 1 ถึง 7 กรัม และปริมาณของ CNR จาก 0 ถึง 0.3 กรัม พบว่า PVC sheet ที่ขึ้นรูปโดยใช้ปริมาณ CNR 0.3 กรัม และใช้น้ำยางธรรมชาติตั้งแต่ 5 ถึง 7 กรัม แผ่น sheet ที่ได้จะมีสีค่อนข้างเหลืองเนื่องจากสารที่ก่อให้เกิดความเหลืองในน้ำยาง ซึ่งไม่เหมาะสมในการนำมาใช้สำหรับขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความใส ไม่มีสี

2.จากผลการทดสอบ Tensile properties ทำให้ทราบว่าการเติม Impact Modifier ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้น้ำยางธรรมชาติ (NR) ช่วยปรับปรุงการดึงยึดของ PVC sheet ให้มี Elongation สูงขึ้น โดยค่า Stress สูงสุดลดลงเล็กน้อย สำหรับสูตรที่ให้ค่า เปอร์เซ็นต์ Strain ที่จุดขาดสูงสุดที่สุด คือสูตร 0.2 CNR3NR

3.การทดสอบสมบัติด้าน Impact Resistance พบว่าชิ้นงานที่มีความสามารถในการทนแรงกระแทกมีแนวโน้มเช่นเดียวกับสมบัติด้านการดึงยึด นั่นคือ สูตรที่ไม่มีการเติม Impact Modifier นั้นจะมีลักษณะการแตกหักแบบเปราะ ค่าพลังงานที่วัดได้จากการทดสอบ impact resistance มีค่าต่ำ สำหรับ PVC ที่มีการเติม impact modifier มีความทนต่อแรงกระแทกสูงขึ้น ดังเห็นได้จากค่าพลังงานในการทดสอบ impact resistance มีค่าสูงขึ้น โดยสูตร 0.2CNR3NR มีความต้านทานต่อแรงกระแทกสูงที่สุด ทั้งนี้เนื่องมาจากเป็นสูตรที่มีปริมาณขององค์ประกอบที่เหมาะสม ทำให้มีความเข้ากันได้ดีระหว่างองค์ประกอบที่เป็น PVC และน้ำยางธรรมชาติ โดย CNR ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวประสาน ที่ช่วยให้ PVC และน้ำยางธรรมชาติ เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันได้ดี จึงทำให้ PVC sheet ที่ได้มีลักษณะการแตกหักที่เป็น ductile มากขึ้น

4. การทดสอบ Dynamic Mechanical Analysis (DMA) สามารถใช้ประกอบการพิจารณาความเข้ากันได้ในการ blend PVC กับ น้ำยางธรรมชาติ ซึ่งกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Storage Modulus, Loss Modulus, Tan δ กับอุณหภูมิ ของ PVC sheet สูตร 0CNR4NR นั้นมีการแยกเฟสกันอย่างชัดเจน ดังเห็นลักษณะของกราฟที่มีการแยกออกเป็น 2 peak ที่ช่วงอุณหภูมิ Tg ของยางธรรมชาติบนกราฟ loss modulus-temperature เนื่องจากการไม่มีการเติม CNRประสานระหว่าง PVC resin กับน้ำยางธรรมชาติ ทำให้การ blend เป็น incompatibilized blend แต่ PVC sheet สูตร 0.2CNR3NR ซึ่ง blend PVC กับน้ำยางธรรมชาติโดยใช้ CNR เป็นตัวประสาน เป็นการ blend ที่เข้ากันได้ ดัง peak ที่ช่วงอุณหภูมิ Tg บนกราฟ loss modulus-Temperature ที่แสดงการมีเฟสปะปนกันของ PVC และน้ำยางธรรมชาติ

5.สมบัติทางความร้อนของ PVC sheet ที่ศึกษาได้จาก TGA thermogram ซึ่งแสดงการสลายตัวทางความร้อนของ PVC ได้ข้อสรุปว่า การใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น impact modifier ในการผลิต PVC sheet มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของ PVC เพียงเล็กน้อย โดยมีลักษณะการสลายตัวทางความร้อนเป็น 2 ช่วง ช่วงแรกเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 300°C ซึ่งเป็นการปลดปล่อยโมเลกุลของ HCl นั้นมีการลดลงของน้ำหนักประมาณ 60 % ซึ่งเป็นปริมาณของคลอรีนที่มีอยู่ในโครงสร้างของ PVC และช่วงที่สองเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 490°C โดยมี % Weight loss ประมาณ 30% ซึ่งเป็นการสลายตัวของ Polycene ที่เหลืออีก 10% นั้นเป็น residue

6.ผลจากการตรวจสอบลักษณะการแตกหักที่ผิวของรอยขาดและรอยที่เกิดการแตกหัก โดยเทคนิค SEM PVC sheet ที่ไม่ได้เติม impact modifier มีรอยการแตกหักแบบ brittle ส่วน PVC sheet ที่เติม impact modifier ทั้งที่ใช้น้ำยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์มีลักษณะการแตกหักที่เป็น ductile ดัง SEM image ที่เห็นรอยการเกิด yield ที่รอยขาดและรอยการแตกหักของชิ้นงานตัวอย่าง

7. ผลจากการตรวจสอบ Morphology โดยใช้เทคนิค TEM เพื่อดูลักษณะการกระจายตัวของน้ำยางธรรมชาติใน PVC Matrix พบว่าใน PVC sheet ที่ไม่ได้ใส่ตัวประสาน เช่น สูตร 0CNR4NR มีการแยกเฟสของ PVC และน้ำยางอย่างชัดเจน โดยยางมีการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนใน PVC matrix แต่เมื่อสูตรที่มีการเติม CNR เข้าไปเป็นตัวประสานจะเห็นการกระจายตัวของน้ำยางธรรมชาติเป็นจุดเล็ก ๆ อยู่ทั่วทั้ง PVC Matrix และเมื่อได้รับความร้อนและแรง Shear จากกระบวนการขึ้นรูป จะเกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะของอนุภาคของยางที่กระจายอยู่ใน PVC matrix คือเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเป็นรูปทรงรี มีพื้นที่ที่สัมผัสกับ PVC มากขึ้นจัดเรียงตัวยาวไปตามแนวแรงที่ให้

8.จากการทดสอบการขึ้นรูป PVC sheet ด้วยกระบวนการ Vacuum Thermoforming ชิ้นงานทุกสูตรสามารถขึ้นรูปได้และชิ้นงานที่ขึ้นรูปได้ ได้รับการรับรองผ่านการตรวจสอบคุณภาพจากผู้เชี่ยวชาญด้านเทคนิคการขึ้นรูป PVC sheet โดยเทคนิค vacuum thermoforming โดยพิจารณาจากชิ้นงานที่ขึ้นรูปได้มีลักษณะตามแม่พิมพ์ ไม่มีการฉีกขาดหรือไหม้ในระหว่างการขึ้นรูป

ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

1. การใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น impact modifier สำหรับ PVC สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติก PVC ด้วยกระบวนการอื่นๆ ได้ เช่น injection, blow molding, extrusion และ compression เนื่องจากการใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น impact modifier นั้นสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ PVC ให้เหมาะสมแก่การนำไปใช้งานได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามการนำน้ำยางมาใช้โดยตรงอาจมีปัญหาเนื่องจากสารที่ก่อให้เกิดความเหลืองในน้ำยาง ดังนั้น อาจลดปัญหานี้โดยการกำจัดสารเหล่านี้ไปก่อน แต่ในการขึ้นรูป PVC แบบ sheet จะพบปัญหาจากความเหลืองน้อยกว่าปัญหาที่พบใน PVC Overlay

2. เนื่องจากยางมีสมบัติยืดหยุ่นอยู่แล้ว การทำให้น้ำยางเกิดการ crosslink ขณะขึ้นรูปจะทำให้มีความสามารถในการใช้งานได้กว้างและยังสามารถนำมาใช้ในการผลิต Shrink film สำหรับงานบรรจุภัณฑ์ได้อีกด้วย ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีวัตถุประสงค์จะพัฒนางานนี้ไปสู่ Shrink film