



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การผลิต Poly(vinyl chloride) sheet สำหรับงาน Vacuum thermoforming
โดยใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น Impact modifier

โดย อาจารย์ ดร.จันทร์ฉาย ทองปิ่น และคณะ

เมษายน 2547



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การผลิต Poly(vinyl chloride) sheet สำหรับงาน Vacuum thermoforming
โดยใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น Impact modifier

โดย อาจารย์ ดร.จันทร์ฉาย ทองปิ่น และคณะ

เมษายน 2547

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การผลิต Poly(vinyl chloride) Sheet สำหรับงาน Vacuum Thermoforming
โดยใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น Impact Modifier

คณะผู้วิจัย

- | | | |
|--------------------|------------|--------------------|
| 1. นางสาวเจียมจิตร | สีแดง | มหาวิทยาลัยศิลปากร |
| 2. นายศักดิ์ชัย | ปะทะโก | มหาวิทยาลัยศิลปากร |
| 3. นางสาวสุกัญ | มหาพราหมณ์ | มหาวิทยาลัยศิลปากร |

ชุดโครงการ “กลุ่มโครงการวิจัยย่อยการประยุกต์ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์-มศก.(1)”

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย(สกว.)
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

สัญญาเลขที่ RDG 4750003
โครงการ" กลุ่มวิจัยย่อยการประยุกต์ใช้น้ำยางธรรมชาติในการผลิตผลิตภัณฑ์-มสก.(1)"
สรุปรายงานความก้าวหน้า ครั้งที่ 1

ชื่อโครงการ” การผลิต Poly(vinyl chloride) sheet สำหรับงาน Vacuum thermoforming โดยใช้
น้ำยางธรรมชาติเป็น Impact modifier” สัญญาโครงการเลขที่ RDG 4750003

โครงการเริ่มเมื่อวันที่ 1 เดือน พฤศจิกายน พ.ศ.2546

1. ในรอบ 6 เดือน ที่ผ่านมาได้

- ติดต่อทางโทรศัพท์/โทรสาร กับ user 30 ครั้ง
- ไปพบเจ้าหน้าที่ฝ่ายเทคนิคปฏิบัติการ ณ สถานที่ 27 ครั้ง
- ประชุมทีมงานวิจัย 42 ครั้ง เป็นเรื่อง ทบทวน/ วางแผนงาน 5 ครั้ง
 - หรือปัญหาการทำวิจัย 10 ครั้ง
 - วิเคราะห์ผล 10 ครั้ง
 - มอบหมายงาน 12 ครั้ง
 - การจัดหาจัดจ้าง 5 ครั้ง

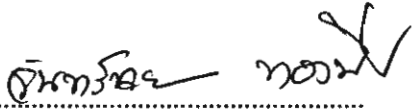
- บันทึกการทำวิจัย(สมุดเล่มดำ) จำนวน 97 หน้า

- อ่าน paper ที่เกี่ยวข้อง 17 ชิ้น
- ค้นหาข้อมูลทาง internet 20 ครั้ง

รายละเอียดการดำเนินงานวิจัยของโครงการวิจัยโดยสังเขป

ผลที่คาดว่าจะได้รับ	ผลที่ได้รับจริง	ผลสำเร็จ(%)
1. ศึกษาค้นคว้าข้อมูลที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย	ทำให้ทราบข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยเช่น PVC, สารเติมแต่งที่ใช้ใน PVC, น้ำยางธรรมชาติและตัวประสาน (CNR)	100%
2. สังเคราะห์ Chlorinated Natural Rubber (CNR) เพื่อใช้เป็นตัวประสาน(compatibilizer) ในการ blend ระหว่าง PVC กับ น้ำยางธรรมชาติ	สามารถสังเคราะห์ CNR ที่มีสมบัติที่เหมาะสม คือ CNR ที่มีปริมาณคลอรีน 12% สำหรับใช้เป็นตัวประสานในการ blend PVC กับ น้ำยางธรรมชาติ	100%
3. ทำการ blend PVC กับ น้ำยางธรรมชาติและสารเติมแต่งต่างๆ และทำการบดผสมขึ้นรูปเป็นแผ่น PVC sheet ด้วย Two-roll mill	ได้ PVC sheet แบบใหม่ซึ่งใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น impact modifier ซึ่งได้ออกแบบสูตรการขึ้นรูปรวม 18 สูตร	100%
4.ทดสอบ Tensile properties ของ PVC sheet ที่ได้	พบว่า PVC sheet ใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น impact modifier มีสมบัติด้าน tensile ที่ดี และมีค่าสูงกว่าการใช้ MBS เป็น impact modifier ซึ่งใช้เป็นมาตรฐาน	100%
5. ทดสอบ Impact resistance ของ PVC sheet ที่ขึ้นรูปได้	ชิ้นงาน PVC ที่เติมน้ำยางธรรมชาติเป็น impact modifier มีสมบัติด้านความทนต่อแรงกระแทกสูงกว่าการใช้ MBS เป็น impact modifier ซึ่งใช้เป็นมาตรฐาน	100%
6. ทดสอบ Dynamics Mechanical Analysis (DMA)	ทำให้ทราบว่า การใช้ CNR เป็นตัวประสานในการ blend ระหว่าง PVC กับ NR นั้นทำให้การ blend มีความเข้ากันได้ดี กว่าที่ไม่ใช้ตัวประสาน โดยปริมาณของ CNR และ NR จะต้องเป็นสัดส่วนที่เหมาะสม	100%

ผลที่คาดว่าจะได้รับ	ผลที่ได้รับจริง	ผลสำเร็จ(%)
7.ทดสอบสมบัติทางความร้อนของ PVC sheet ด้วย TGA	ทำให้ทราบว่าการใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น impact modifier โดยมี CNR เป็นตัวประสาน แทนการใช้ MBS เป็น impact modifier นั้น มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง decomposition temperature เพียงเล็กน้อย	100%
8.ตรวจสอบ Morphology ที่ผิวรอยขาด และรอยแตกหักของ PVC sheet ด้วยเทคนิค SEM	ให้ทราบถึงลักษณะการขาดและการแตกหักของ PVC sheet ที่ใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น impact modifier ที่มีลักษณะการแตกหักแบบ ductile	100%
9.ตรวจสอบ Morphology ของ PVC sheet ด้วยเทคนิค TEM	ทำให้ทราบถึงความเข้ากันได้ระหว่าง PVC กับ NR โดยมี CNRเป็นตัวประสาน แต่การไม่ใช้ตัวประสานทำให้การ blend PVC กับ NR นั้นเป็น incompatibilized blend	100%
10.ทดสอบขึ้นรูป PVC sheet ด้วยกระบวนการ Vacuum thermoforming	PVC sheet ที่ใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น impact modifier สามารถขึ้นรูปด้วยเทคนิค Vacuum thermoforming ได้ โดยชิ้นงานที่ได้มีรูปร่างถูกต้อง และได้ขนาดตามแม่พิมพ์	100%

ลงนาม.....
(อาจารย์ ดร.จันทรฉาย ทองปิ่น)
หัวหน้ากลุ่มโครงการวิจัยย่อยผู้รับทุน
วันที่ 31 ม.ค. 47

ตาราง output

output		หมายเหตุ
กิจกรรมของโครงการ	ผลสำเร็จ (%)	
1. ศึกษาค้นคว้าข้อมูลที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย	100%	
2. วางแผนการดำเนินการทดลอง	100%	
3. ติดต่อประสานงานกับเจ้าหน้าที่ฝ่ายเทคนิค ปฏิบัติการที่ให้ความช่วยเหลือด้านการขึ้นรูป PVC sheet ณ ฝ่ายวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ บริษัท เอพีเค พลาสติก จำกัด จ.สมุทรสาคร	100%	
4. ทำการ compound และขึ้นรูป PVC sheet โดย ใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น impact modifier โดย Two-roll mill	100%	
5. ทดสอบสมบัติเชิงกลของPVC sheet ที่ขึ้นรูป ได้	100%	
6.ทดสอบสมบัติทางความร้อนของ PVC sheet	100%	
7.ทดสอบความเข้ากันได้ของการ blend ระหว่าง PVC กับ น้ำยางธรรมชาติ	100%	
8.ศึกษา Morphology ของ PVC sheet	100%	
9. สรุปและเขียนรายงานวิจัย	100%	

ลงนาม.....อ.จันทร์ฉาย ทองปิ่น.....
(อาจารย์ ดร.จันทร์ฉาย ทองปิ่น)
(หัวหน้ากลุ่มโครงการวิจัยย่อยผู้รับทุน)
วันที่.....31 ม.ค. 47.....

บทสรุปย่อสำหรับผู้บริหาร

1. ชื่อโครงการ “ การผลิต Poly(vinyl chloride) sheet สำหรับงาน Vacuum thermoforming โดยใช้ น้ำยางธรรมชาติเป็น Impact Modifier ”

“ Production of Poly(vinyl chloride) Sheet for Vacuum Thermoforming Process using
Natural Rubber Latex as Impact Modifier ”

2. หัวหน้าโครงการ อาจารย์ ดร.จันทร์ฉาย ทองปิ่น

ผู้ร่วมโครงการ นางสาวเจียมจิตร สีแดง

นายศักดิ์ชัย ปะทะ โก

นางสาวสุภักดิ์ มหาพราหมณ์

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร

วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ นครปฐม

โทรศัพท์ 034 219 363

โทรสาร 034 219 363

E-mail Chanchai@su.ac.th

U0943024@su.ac.th

U0943113@su.ac.th

U0943132@su.ac.th

3. งบประมาณทั้งโครงการ 110,000 บาท

4. ระยะเวลาดำเนินการ 6 เดือน

5. ปัญหาที่ทำการวิจัยและความสำคัญของปัญหา

PVC โดยทั่วไปจะมีลักษณะแข็งเปราะ ไม่ทนแรงกระแทก จึงจำเป็นต้องเติมสารเติมแต่งประเภท impact modifier เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติด้านความทนต่อแรงกระแทกให้ดีขึ้น ให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน ปัจจุบันยางสังเคราะห์ได้รับความนิยมในการนำมาใช้เป็น impact modifier ไม่ว่าจะเป็น Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS), Methlymethacrylate-Butadiene-Styrene (MBS) แต่เนื่องจากยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่มีราคาแพงทำให้ต้นทุนในการผลิตผลิตภัณฑ์จาก PVC สูงตามไปด้วย จึงมีแนวคิดที่จะนำน้ำยางธรรมชาติ (cis-1,4 polyisoprene) ซึ่งมีอยู่มากในประเทศไทย มาใช้ทดแทนยางสังเคราะห์ โดยยางธรรมชาติมีความเป็น elastomer สูง ดังนั้นเมื่ออนุภาคของยางแทรกตัวอยู่ในโครงข่ายของพีวีซี จะทำให้ PVC สามารถทนต่อแรงกระแทกได้มากขึ้น จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็น impact modifier ใน PVC

จากการศึกษาโครงสร้างของพีวีซีและน้ำยางธรรมชาติพบว่าองค์ประกอบทั้งสองนี้ไม่สามารถผสมเข้ากันได้ จึงจำเป็นต้องใช้ตัวประสาน (compatibilizer) โดยตัวประสานที่ใช้คือ Chlorinated Natural Rubber (CNR) เนื่องจาก CNR มีโครงสร้างที่คล้ายยางธรรมชาติและมีสภาพเป็นขั้วเหมือน PVC เมื่อนำมาใช้เป็นตัวประสาน จึงทำให้ PVC และน้ำยางธรรมชาติสามารถผสมเข้ากันได้ดีขึ้น

6. วัตถุประสงค์

- 1. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น impact modifier สำหรับปรับปรุงสมบัติด้านการทนต่อแรงกระแทกของแผ่น poly(vinyl chloride) (PVC) สำหรับงาน Vacuum Thermoforming
- 2. ศึกษาสมบัติเชิงกลของ PVC sheet ที่ใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น impact modifier
- 3. เพื่อเป็นแนวทางในการเพิ่มมูลค่าน้ำยาง ซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศ
- 4. เพื่อเป็นการส่งเสริมความร่วมมือกันระหว่างมหาวิทยาลัยกับโรงงานอุตสาหกรรมในการดำเนินงานวิจัยที่เป็นตามความต้องการของโรงงานอุตสาหกรรม

7. ระเบียบวิธีวิจัย

- 7.1 ทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 7.2 ออกแบบวิธีการทดลอง และวางแผนการทดสอบ
- 7.3 ดำเนินงานวิจัย
 - 7.3.1 สังเคราะห์ CNR และคำนวณ % Chlorination ของ CNR ที่สังเคราะห์ได้ นำ CNR ที่ได้มาใช้เป็นตัวประสานในการผสม PVC resin กับน้ำยางธรรมชาติ ทำการ compound และ ขึ้นรูป PVC sheet
 - 7.3.2 ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของ PVC sheet ที่ขึ้นรูปได้
 - 7.3.3 ศึกษาคุณสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermal Gravimetry Analysis (TGA) เพื่อดูการสลายตัวทางความร้อนของ PVC sheet
 - 7.3.4 ศึกษาลักษณะการแตกหักของ PVC sheet ด้วย Scanning Electron Microscopy (SEM)
 - 7.3.5 ศึกษา Morphology ด้วยเทคนิค Transmission Electron Microscopy (TEM) เพื่อดูการกระจายตัวของยางธรรมชาติใน PVC matrix
 - 7.3.6 ทดสอบความสามารถในการขึ้นรูปของ PVC sheet ด้วยกระบวนการ Vacuum Thermoforming

8. สิ่งที่ได้คาดว่าจะได้รับ

- 8.1 สามารถใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น Impact modifier แทนยางสังเคราะห์ สำหรับผลิต PVC sheet ที่ใช้ในงาน Vacuum Thermoforming
- 8.2 ทำให้ทราบปริมาณส่วนประกอบที่เหมาะสมในการผลิต PVC sheet ที่มีการใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น Impact modifier
- 8.3 สามารถลดต้นทุนในการผลิต PVC sheet
- 8.4 ส่งเสริมความร่วมมือระหว่างมหาวิทยาลัยกับโรงงานอุตสาหกรรมในด้านการวิจัยร่วมกัน
- 8.5 สามารถนำน้ำยางธรรมชาติซึ่งเป็นทรัพยากรธรรมชาติของประเทศมาใช้ในการเกิดประโยชน์สูงสุด

9. ผลการวิจัย

แผนการดำเนินงานวิจัย	ผลที่ได้รับ	หมายเหตุ
1. สังเคราะห์ CNR ให้ได้ % Chlorination ประมาณ 12 %	ได้ CNR ที่มี % Chlorination ประมาณ 12 % สำหรับนำมาใช้ในการ compound	100 %
2. ทำการ compound PVC resin น้ำยางธรรมชาติ CNR และสารเติมแต่งต่างๆ จากนั้น ขึ้นรูปตามสูตรการ compound โดยจะมีการปรับเปลี่ยนปริมาณ CNR และน้ำยางธรรมชาติให้เหมาะสม	สามารถขึ้นรูป PVC sheet ได้ทุกสูตรการ compound	100%
3. ทดสอบคุณสมบัติเชิงกล เช่น tensile และ impact resistant ของ PVC sheet ที่ได้	เมื่อทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของ PVC sheet ที่ได้ พบว่า PVC sheet ที่มีการใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น impact modifierและมีการเติม CNR เป็นตัวประสาน (สูตร0.2CNR3NR) ให้ค่า% elongation, stress at break และค่า young's modulus สูงที่สุดและมีความสามารถในการต้านทานต่อแรงกระแทกได้สูงกว่าการใช้อย่างสังเคราะห์(MBS) เป็น impact modifier	100 %

แผนการดำเนินงานวิจัย	ผลที่ได้รับ	หมายเหตุ
4. ทดสอบคุณสมบัติทางความร้อนของ PVC sheet ด้วยเทคนิค Thermal Gravimetry Analysis (TGA)	PVC sheet ทุกสูตรการ compound มีการสลายตัวแบ่งเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงแรกเป็นการปลดปล่อย โมเลกุลของ HCl ช่วงที่ 2 เป็นการสลายตัวของ Polyene	100 %
5. ตรวจสอบลักษณะการแตกหักด้วย Scanning Electron Microscopy (SEM)	เมื่อนำ PVC sheet ที่ผ่านการทดสอบ tensile และ impact resistant ไปตรวจสอบลักษณะการแตกหักด้วยเทคนิค SEM พบว่ามีลักษณะการแตกหักเป็นแบบ Ductile	100 %
6. ตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค Transmission Electron Microscopy (TEM)	เมื่อนำ PVC sheet ไปตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM พบว่า PVC sheet ที่ไม่มีการเติม CNR เป็นตัวประสาน (สูตร 0CNR4NR) มีลักษณะแยกเฟสกันระหว่าง PVC และน้ำยางธรรมชาติอย่างชัดเจนแต่เมื่อมีการเติม CNR เป็นตัวประสานพบว่าน้ำยางธรรมชาติสามารถกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอบน PVC matrix	100 %
7. ทดสอบการขึ้นรูปด้วยกระบวนการ Vacuum Thermoforming	PVC sheet ทุกสูตรการ compound สามารถขึ้นรูปด้วยกระบวนการ Vacuum Thermoforming ได้	100 %

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก อ.ดร.จันทร์ฉาย ทองปิ่น อ.ดร. อำนาจ สิทธิศระกุล และ อ.ดร. วิมลรัตน์ ศรีจรัสสิน ซึ่งได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ในการวิจัยมาตลอด ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย(สกว.) ที่สนับสนุนทุนการวิจัย บริษัทเอเพ็ค พลาสติก จำกัด ที่ให้ความเอื้อเฟื้อในด้านวัตถุดิบและสารเคมี รวมทั้งเครื่องมือที่ใช้ใน กระบวนการทำงานวิจัยในครั้งนี้ ศูนย์เครื่องมือกลางฝ่ายปฏิบัติการวิจัยและเรือนปลูกพืชทดลอง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ที่ให้ความอนุเคราะห์การใช้เครื่องวิเคราะห์ TEM คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์การใช้เครื่อง SEM คุณพินิจ เกียรระลึก นักวิทยาศาสตร์ประจำภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ ที่ได้ให้ คำแนะนำและควบคุมดูแลการใช้เครื่องมือต่างๆ รวมถึงการอำนวยความสะดวกในการใช้อุปกรณ์และ เคมีภัณฑ์ต่างๆ และภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ได้เปิดโอกาสให้ทางคณะผู้วิจัยได้ศึกษาวิจัยในเรื่อง การผลิต Poly(vinyl chloride) sheet สำหรับใช้ในงาน vacuum thermoforming โดยใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น impact modifier และงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นางสาวเจียมจิตร	สีแดง
นายศักดิ์ชัย	ปะทะโก
นางสาวสุภัค	มหาพราหมณ์

บทคัดย่อ

PVC เป็นพลาสติกที่มีความแข็งแรงเปราะแตกหักง่ายเมื่อได้รับแรงกระแทก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเติมสารเติมแต่งเพื่อเพิ่มความทนทานต่อแรงกระแทก โดยผสมกับวัสดุจำพวก Impact modifier เพื่อให้ PVC สามารถถูกนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ได้อย่างเต็มที่ โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น impact modifier ในกระบวนการผลิต PVC sheet สำหรับใช้ในงาน Vacuum thermoforming ในการทำงานวิจัยต้องทำการ blend PVC กับ น้ำยางธรรมชาติ โดยใช้ Chlorinated Natural Rubber (CNR) เป็นตัวประสานช่วยให้ PVC กับ น้ำยางธรรมชาติ blend เข้ากันได้มากขึ้น ในการทดลองมีการปรับเปลี่ยนสัดส่วนของปริมาณน้ำยางและ CNR เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการ compound ขึ้นรูป PVC sheet โดยทำการขึ้นรูป PVC sheet ด้วย Two-roll mill หลังจากนั้นทดสอบสมบัติด้าน tensile และ Impact resistance เพื่อศึกษาความแข็งแรงเชิงกลของ modified PVC sheet ตรวจสอบความเข้ากันได้ของ PVC, NR และ CNR ด้วย Dynamic Mechanical Analysis (DMA) และ Transmission Electron Microscopy (TEM) และดูลักษณะการแตกหักที่ผิวบริเวณรอยแตกด้วย SEM ทั้งนี้ PVC ศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA เพื่อดูการสลายตัวทางความร้อนของ PVC ที่ modified ด้วยน้ำยางธรรมชาติ และทดสอบความสามารถในการขึ้นรูปด้วย Vacuum thermoforming

จากการศึกษาพบว่าการใช้ น้ำยางธรรมชาติเป็น Impact modifier สามารถปรับปรุงสมบัติด้านความทนต่อแรงกระแทกของ PVC ได้ เนื่องจากมีความแข็งแรงเชิงกลที่ดี เมื่อเทียบกับการใช้ MBS เป็น Impact modifier สัดส่วนปริมาณของ PVC, NR และ CNR ที่เหมาะสมในการ compound คือ NR 3 กรัม และ CNR 0.2 กรัม ต่อ PVC resin 200 กรัม เนื่องจากสมบัติเชิงกลด้านต่างๆ ดีเช่นเดียวกับการใช้ยางสังเคราะห์เป็น Impact modifier นอกจากนี้ลักษณะของ sheet ที่ได้ไม่เหลือง และผลการตรวจสอบลักษณะรอยการแตกหักด้วย SEM พบว่ามีการแตกหักแบบ ductile ผลของ TEM และ DMA ช่วยสนับสนุนและยืนยันว่าการ blend ระหว่าง PVC กับ น้ำยางธรรมชาติโดยใช้ CNR เป็นตัวประสาน เป็น การ blend ที่ทำให้องค์ประกอบทั้งหมดเข้ากันได้ดี โดยมีลักษณะการรวมเป็นเฟสเดียวกันบนกราฟ Loss modulus-temperature และในแผนภาพ TEM มีการกระจายตัวที่ดีของน้ำยางใน PVC matrix และไม่เห็นรอยการแยกเฟสกัน และจากการศึกษาการสลายตัวทางความร้อนด้วย TGA มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการสลายเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการใช้ยางสังเคราะห์ และ PVC sheet ที่มีสมบัติต่างๆ ข้างต้นที่เหมาะสม สามารถขึ้นรูปได้ตามแบบแม่พิมพ์ที่ต้องการ นั่นหมายความว่า สามารถใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น Impact modifier แทนยางสังเคราะห์ ในการผลิต PVC sheet สำหรับงาน Vacuum thermoforming ได้

Abstract

Poly(vinyl chloride) or PVC is usually brittle and has limitations in any field of applications. Impact modifier is one of the important additive in production of PVC product. The aim of this project is to modify the impact property of PVC in production of PVC sheet for vacuum thermoforming using natural rubber latex (NR) as impact modifier. Chlorinated natural rubber is used as compatibilizer in blending of PVC and NR. However, the suitable component ratio in blending PVC with NR and CNR is important. In experiment, blending of PVC/NR/CNR were prepared at various ratios. The production of PVC sheets were carried out on two-roll mill. The obtained sheets were examined tensile strength and impact resistance. Scanning Electron Microscopy (SEM) and Transmission Electron Microscopy (TEM) were used to investigate morphology of the blends. Dynamic Mechanical Analysis (DMA) was also used to ensure compatibility of the blend. Thermal property of the blends was examined by Thermogravimetric Analysis (TGA) . The results of tensile properties showed that using NR and CNR as compatibilizer in the blend can improve the flexibility of PVC . The result from DMA and TEM confirmed the compatibility of blends. Moreover, the suitable component ratio in blending is 0.2g CNR/3g NR per 200g PVC resin because of the good mechanical properties and the blend is compatibilized blend as the result of DMA which showed monophasic at the T_g range of rubber, also there were not separated domain phase of rubber from the continuous phase of PVC as shown in TEM picture. The processability of the NR impact modified sheet was obtained in the right shape up to the molds and give good clarity.

สารบัญเรื่อง

หน้า

กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ	ข
Abstract	ค
สารบัญเรื่อง	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
 บทที่ 1 บทนำ	 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษาและข้อจำกัดของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
 บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	 4
2.1 บทนำ	
2.1.1 Poly(vinyl chloride) หรือ PVC	4
2.1.2 น้ำยางธรรมชาติ	15
2.1.3 Chlorinated Natural Rubber	26
2.1.4 Vacuum thermoforming	27
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	32
 บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	 36
3.1 วัสดุดิบ	36
3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย	39
3.2.1 การสังเคราะห์ Chlorinated Natural Rubber (CNR)	39
3.2.2 การตรวจสอบคุณลักษณะของ CNR ด้วย FTIR	40
3.2.3 การ compound และ ขึ้นรูป PVC Sheet	41
3.2.4 การทดสอบคุณสมบัติของ PVC Sheet	43
3.2.5 การทดสอบความสามารถในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการ Vacuum Thermoforming	45

สารบัญเรื่อง (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	46
4.1 การวิเคราะห์ด้วย FTIR (Fourier Transform Infared Spectroscopy)	46
4.1.1 Chlorinated Natural Rubber	46
4.1.2 น้ำยางธรรมชาติ	47
4.2 คุณสมบัติของ PVC	
4.2.1 สมบัติเชิงกล	48
4.2.1.1 สมบัติด้านการดึงยืด	48
4.2.1.2 สมบัติด้านความทนต่อแรงกระแทก	55
4.2.1.3 สมบัติด้าน Dynamic Mechanical	57
4.2.2 สมบัติทางความร้อน	60
4.2.3 สมบัติทาง morphology	63
4.2.3.1 การตรวจสอบด้วย Scanning Electron Microscopy (SEM)	63
4.2.3.2 การตรวจสอบด้วย Transmission Electron Microscopy (TEM)	70
4.2.4 ความสามารถในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการ Vacuum thermoforming	81
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	87
5.1 สรุปผลการทดลอง	87
5.2 ข้อเสนอแนะ	88
เอกสารอ้างอิง	90

สารบัญตาราง

หน้า

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตารางที่ 2.1 Impact Modifiers and Applications 11

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 3.1 สูตรการ compound PVC Sheet ความหนา 0.3 mm 42

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.1 Tensile properties ของ PVC sheet ที่ขึ้นรูปได้ทั้ง 16 สูตร 51

ตารางที่ 4.2 ค่าพลังงานที่ขึ้นงานสามารถรับได้ก่อนเกิดการแตกหัก 56

ตารางที่ 4.3 Decomposition temperature (T_d) ของ PVC 61

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบความสามารถในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการ Vacuum thermoforming 82

สารบัญรูป

หน้า

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

รูปที่ 2.1 โครงสร้างของ PVC	4
รูปที่ 2.2 Degradation of PVC	4
รูปที่ 2.3 TGA thermogram ของ PVC และ polymer อื่นๆ	5
รูปที่ 2.4 การแยกส่วนประกอบของน้ำยางโดยใช้แรงเหวี่ยง	16
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของ cis-1,4-polyisoprene	17
รูปที่ 2.6 การเกิดแรงผลักดันระหว่างอนุภาคยาง	19
รูปที่ 2.7 การป้องกันประจุไฟฟ้าบนอนุภาคยางของชั้นน้ำ	19
รูปที่ 2.8 สมการการย่อยสลายคาร์โบไฮเดรตโดยแบคทีเรีย	21
รูปที่ 2.9 สมการการสลายตัวของโปรตีนในน้ำยางพารา	21
รูปที่ 2.10 การสลายตัวของไลปีด	22

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

รูปที่ 3.1 การสังเคราะห์ CNR	40
รูปที่ 3.2 เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์	40
รูปที่ 3.3 การบดผสมด้วย Two-roll mill	43

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

รูปที่ 4.1 สูตรโครงสร้างของ Chlorinated Natural Rubber	46
รูปที่ 4.2 FTIR spectrum ของ CNR	46
รูปที่ 4.3 สูตรโครงสร้างของยางธรรมชาติ	47
รูปที่ 4.4 FTIR spectrum ของ น้ำยางธรรมชาติ	47
รูปที่ 4.5 กราฟ stress-strain ของ PVC sheet ที่ไม่มีการเติม impact modifier (สูตร No impact)	49
รูปที่ 4.6 กราฟ stress-strain ของ PVC sheet ที่มีการเติม MBS เป็น impact modifier (สูตร STD)	49

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.7 กราฟ stress-strain ของ PVC sheet ที่มีการเติมน้ำยางธรรมชาติเป็น impact modifier โดยไม่มีการเติม CNR เป็นตัวประสาน (สูตร 0CNR4NR)	50
รูปที่ 4.8 กราฟ stress-strain ของ PVC sheet ที่มีการเติมน้ำยางธรรมชาติเป็น impact modifier โดยมีการเติม CNR เป็นตัวประสาน(สูตร 0.2CNR3NR)	50
รูปที่ 4.9 กราฟ stress-strain ของ PVC sheet ที่มีการเติมน้ำยางธรรมชาติเป็น impact modifier โดยมีการเติม CNR เป็นตัวประสาน (สูตร 0.2CNR4NR)	51
รูปที่ 4.10 กราฟ stress-strain ของ PVC sheet ที่มีการเติมน้ำยางธรรมชาติเป็น impact modifier โดยมีการเติม CNR เป็นตัวประสาน (สูตร 0.3CNR7NR)	53
รูปที่ 4.11 ลักษณะ neck initiate, Shear band และ Cold drawing	54
รูปที่ 4.12 (a) ลักษณะของชิ้นงาน PVC ก่อนทำการทดสอบ Impact resistance (b) ลักษณะการแตกหักของชิ้นงานหลังจากการทดสอบ impact resistance	55
รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ กับ storage modulus	57
รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ กับ loss modulus	58
รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ กับ Tan δ	59
รูปที่ 4.16 TGA thermogram ของ PVC sheet สูตร STD	60
รูปที่ 4.17 TGA thermogram ของ PVC sheet สูตร 0.2CNR3NR	61
รูปที่ 4.18 ผิวของรอยขาดจากการตรวจสอบ SEM ของชิ้นงาน PVC ที่ใช้ MBS เป็น Impact modifier ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ Tensile strength(กำลังขยาย 400 เท่า)	63
รูปที่ 4.19 ผิวของรอยขาดจากการตรวจสอบ SEM ของชิ้นงาน PVC ที่ใช้น้ำยางธรรมชาติ เป็น impact modifier (สูตร 0CNR4NR) ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ Tensile strength (กำลังขยาย 400 เท่า)	63
รูปที่ 4.20 ผิวของรอยขาดจากการตรวจสอบ SEM ของชิ้นงาน PVC ที่ใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น impact modifier (สูตร 0CNR4NR) ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ Tensile strength (กำลังขยาย 5000 เท่า บริเวณที่ 1)	64
รูปที่ 4.21 ผิวของรอยขาดจากการตรวจสอบ SEM ของชิ้นงาน PVC ที่ใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น impact modifier (สูตร 0CNR4NR) ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ Tensile strength (กำลังขยาย 3000 เท่า บริเวณที่ 2)	64

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.22	ผิวของรอยขาดจากการตรวจสอบ SEM ของชิ้นงาน PVC ที่ใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น impact modifier (สูตร 0.2CNR3NR) ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ Tensile strength (กำลังขยาย 400 เท่า)	65
รูปที่ 4.23	ผิวของรอยขาดจากการตรวจสอบ SEM ของชิ้นงาน PVC ที่ใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น impact modifier (สูตร 0.2CNR3NR) ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ Tensile strength (กำลังขยาย 3000 เท่า)	65
รูปที่ 4.24	ผิวของรอยขาดจากการตรวจสอบ SEM ของชิ้นงาน PVC ที่ใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น impact modifier (สูตร 0.2CNR4NR) ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ Tensile strength (กำลังขยาย 400 เท่า)	66
รูปที่ 4.25	รอยแตกหักที่ผิวหน้าจากการตรวจสอบ SEM ของชิ้นงาน PVC ที่ใช้ MBS เป็น impact modifier (สูตร STD) ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ Impact resistance (กำลังขยาย 400 เท่า)	66
รูปที่ 4.26	รอยแตกหักที่ผิวหน้าจากการตรวจสอบ SEM ของชิ้นงาน PVC ที่ไม่มีการเติม Impact modifier ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ Impact resistance (ที่กำลังขยาย 400 เท่า)	67
รูปที่ 4.27	รอยแตกหักที่ผิวหน้าจากการตรวจสอบ SEM ของชิ้นงาน PVC ที่ไม่มีการเติม Impact modifier ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ Impact resistance (ที่กำลังขยาย 3000 เท่า)	67
รูปที่ 4.28	รอยแตกหักที่ผิวหน้าจากการตรวจสอบ SEM ของชิ้นงาน PVC ที่ใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น Impact modifier โดยไม่มีการเติม CNR (สูตร No CNR4NR) ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ Impact resistance (ที่กำลังขยาย 400 เท่า)	68
รูปที่ 4.29	รอยแตกหักที่ผิวหน้าจากการตรวจสอบ SEM ของชิ้นงาน PVC ที่ใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น Impact modifier (สูตร 0.2CNR3NR) ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ Impact resistance (ที่กำลังขยาย 400 เท่า)	68
รูปที่ 4.30	รอยแตกหักที่ผิวหน้าจากการตรวจสอบ SEM ของชิ้นงาน PVC ที่ใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น Impact modifier (สูตร 0.2CNR4NR) ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ Impact resistance (ที่กำลังขยาย 400 เท่า)	69
รูปที่ 4.31	การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 3,000 เท่า) ของ PVC sheet สูตร STD	70
รูปที่ 4.32	การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 8,000 เท่า) ของ PVC sheet สูตร STD	71

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.33 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 3,000 เท่า) ของ PVC sheet ที่ผ่านการดึงยืด สูตร STD	71
รูปที่ 4.34 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 8,000 เท่า) ของ PVC sheet ที่ผ่านการดึงยืด สูตร STD	71
รูปที่ 4.35 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 8,000 เท่า) ของ PVC sheet สูตร 0CNR4NR	72
รูปที่ 4.36 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 8,000 เท่า) ของ PVC sheet สูตร 0.2CNR3NR	72
รูปที่ 4.37 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 25,000 เท่า) ของ PVC sheet สูตร 0.2CNR3NR	72
รูปที่ 4.38 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 3,000 เท่า) ของ PVC sheet ที่ผ่านการดึงยืด สูตร 0.2CNR3NR	73
รูปที่ 4.39 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 8,000 เท่า) ของ PVC sheet ที่ผ่านการดึงยืด สูตร 0.2CNR3NR	73
รูปที่ 4.40 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 3,000 เท่า) ของ PVC sheet สูตร 0.2CNR3NR ที่ผ่านการ Vacuum thermoforming	73
รูปที่ 4.41 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 8,000 เท่า) ของ PVC sheet สูตร 0.2CNR3NR ที่ผ่านการ Vacuum thermoforming	74
รูปที่ 4.42 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 5,000 เท่า) ของ PVC sheet สูตร 0.2CNR4NR	74
รูปที่ 4.43 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 8,000 เท่า) ของ PVC sheet สูตร 0.2CNR4NR	74
รูปที่ 4.44 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 5,000 เท่า) ของ PVC sheet ที่ผ่านการดึงยืด สูตร 0.2CNR4NR	75
รูปที่ 4.45 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 8,000 เท่า) ของ PVC sheet ที่ผ่านการดึงยืด สูตร 0.2CNR4NR	75
รูปที่ 4.46 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 8,000 เท่า) ของ PVC sheet สูตร 0.2CNR4NR ที่ผ่านการ Vacuum Thermoforming	75
รูปที่ 4.47 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 25,000 เท่า) ของ PVC sheet สูตร 0.2CNR4NR ที่ผ่านการ Vacuum Thermoforming	76

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.48	การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 3,000 เท่า) ของ PVC sheet สูตร 0.3CNR3NR	76
รูปที่ 4.49	การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 8,000 เท่า) ของ PVC sheet สูตร 0.3CNR3NR	76
รูปที่ 4.50	การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 3,000 เท่า) ของ PVC sheet สูตร 0.3CNR4NR	77
รูปที่ 4.51	การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 3,000 เท่า) ของ PVC sheet ที่ผ่านการดึงยืด สูตร 0.3CNR4NR	77
รูปที่ 4.52	การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 8,000 เท่า) ของ PVC sheet ที่ผ่านการดึงยืด สูตร 0.3CNR4NR	77
รูปที่ 4.53	การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 3,000 เท่า) ของ PVC sheet ที่มี % strain ต่ำ สูตร 0.3CNR6NR	78
รูปที่ 4.54	การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 8,000 เท่า) ของ PVC sheet ที่มี % strain ต่ำ สูตร 0.3CNR6NR	78
รูปที่ 4.55	การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 3,000 เท่า) ของ PVC sheet ที่มี % strain สูง สูตร 0.3CNR6NR	78
รูปที่ 4.56	การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 8,000 เท่า) ของ PVC sheet ที่มี % strain สูง สูตร 0.3CNR6NR	79
รูปที่ 4.57	การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 3,000 เท่า) ของ PVC sheet สูตร 0.3CNR7NR	79
รูปที่ 4.58	การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 8,000 เท่า) ของ PVC sheet สูตร 0.3CNR7NR	79

บทที่ 1

บทนำ

1.1 เหตุผลและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันนี้ Poly (vinyl chloride) หรือ PVC เป็นพลาสติกที่นิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย ในอุตสาหกรรมพลาสติกและเป็นพอลิเมอร์ที่ถูกนำมาใช้มากที่สุดชนิดหนึ่ง เนื่องจากสามารถปรับปรุงคุณสมบัติให้เหมาะสมต่อการใช้งานในด้านต่างๆได้ โดยการใส่สารเติมแต่งลงไปในช่วงขั้นตอนการ compound ตัวอย่างการนำ PVC ไปใช้งานเช่น งานด้านก่อสร้างอาคาร งานด้านการแพทย์ งานด้านไฟฟ้า งานด้านการเกษตรและงานด้านบรรจุภัณฑ์โดยเฉพาะงานขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์ด้วยกระบวนการ vacuum thermoforming จาก PVC sheet ซึ่งได้รับความนิยมเป็นอย่างมากเพราะเป็นกรรมวิธีที่ง่าย สะดวก รวดเร็ว และอัตราการผลิตสูง

PVC ที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการเติมสารเติมแต่งจะมีลักษณะแข็งเปราะ ไม่ทนแรงกระแทก จึงมีความจำเป็นอย่างมากในการเติมสารเติมแต่งประเภท impact modifier เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติดังกล่าวให้ดีขึ้น และเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน โดยปัจจุบันนี้ยังสังเคราะห์ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในการนำมาใช้เป็น impact modifier ไม่ว่าจะเป็น Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS), Methymethacrylate-Butadiene-Styrene (MBS) แต่เนื่องจากยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่มีราคาแพงทำให้อัตราต้นทุนการผลิตสูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้น เราจึงพยายามที่จะหา impact modifier ตัวใหม่มาทดแทนการใช้ยางสังเคราะห์ โดยที่สมบัติด้านความทนต่อแรงกระแทกของพลาสติก PVC ยังเหมาะสมต่อการใช้งานเหมือนเดิม

เนื่องจากยางธรรมชาติ (cis-1,4 polyisoprene) มีสมบัติเป็น elastomer สูง เมื่ออุณหภูมิของยางแทรกตัวอยู่ในโครงข่ายของพืวิซี จะทำให้พืวิซีสามารถดูดซับพลังงานได้มากขึ้น จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็น impact modifier เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติด้านการทนต่อแรงกระแทกให้ดีขึ้น อีกทั้งในประเทศไทยมีปริมาณการปลูกยางพาราเป็นจำนวนมาก ซึ่งนับได้ว่าเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่ง หากสามารถนำน้ำยางธรรมชาติมาเป็น impact modifier สำหรับ PVC sheet ที่ใช้ในงาน vacuum thermoforming ได้จะเป็นการให้ทรัพยากรในประเทศให้เกิดประโยชน์สูงสุด จากการศึกษาโครงข่ายของพืวิซีและน้ำยางธรรมชาติพบว่าองค์ประกอบทั้งสองนี้ไม่สามารถผสมเข้ากันได้ จึงต้องใช้ chlorinated natural rubber(CNR) เป็นตัวประสาน(compatibilizer) เนื่องจาก CNR มีโครงข่ายที่คล้ายน้ำยางธรรมชาติและมีสภาพเป็นขั้วเหมือนพืวิซี จึงทำให้พืวิซีและน้ำยางธรรมชาติสามารถผสมเข้ากันได้ดีขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น impact modifier สำหรับปรับปรุงสมบัติด้านการทนต่อแรงกระแทกของแผ่น poly(vinyl chloride) (PVC) สำหรับงาน Vacuum Thermoforming
2. ศึกษาสมบัติเชิงกลของ PVC sheet ที่ใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น impact modifier
3. เพื่อเป็นแนวทางในการเพิ่มมูลค่าน้ำยาง ซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศ
4. เพื่อเป็นการส่งเสริมความร่วมมือกันระหว่างมหาวิทยาลัยกับโรงงานอุตสาหกรรมในการดำเนินงานวิจัยที่เป็นตามความต้องการของโรงงานอุตสาหกรรม

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. สังกะสี CNR ให้ได้ปริมาณคลอรีนประมาณ 12%
2. การผสมน้ำยางธรรมชาติและ CNR ให้เกิดการกระจายตัวที่ดีใน PVC resin
3. สภาพในการผสมและขึ้นรูป PVC sheet คือ อุณหภูมิ 180 °C เป็นเวลา 20 นาที
4. ขึ้นรูป PVC sheet สำหรับกระบวนการ vacuum thermoforming โดยใช้สูตร food grade ความหนา 0.3 มิลลิเมตร

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ออกแบบวิธีการทดลอง และวางแผนการทดสอบ
3. ดำเนินงานวิจัย
 - 3.1 สังกะสี CNR แล้วนำไปทดสอบคุณสมบัติเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณด้วย FTIR เพื่อให้ได้ปริมาณคลอรีนประมาณ 12%
 - 3.2 นำ CNR ที่ได้มาใช้เป็นตัวประสานในการผสมน้ำยางธรรมชาติกับ PVC resin และขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วย Two-roll mill โดยมีการปรับเปลี่ยนปริมาณ CNR และน้ำยางธรรมชาติ เพื่อให้ได้สัดส่วนที่เหมาะสม
 - 3.3 นำชิ้นงานที่ได้มาทดสอบสมบัติเชิงกลดังนี้
 - Tensile properties เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลด้านการดึงยืด
 - Impact resistance เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลด้านความทนต่อแรงกระแทก
 - Dynamic Mechanical Analysis (DMA) เพื่อศึกษา Dynamic mechanical
 - 3.4 นำชิ้นงานที่ได้มาทดสอบ Morphology ด้วยเทคนิค Transmission Electron Microscopy (TEM) เพื่อดูการกระจายตัวของยางธรรมชาติใน PVC matrix

3.5 นำชิ้นงานที่ได้มาทดสอบสมบัติทางความร้อน ด้วยเทคนิค Thermal Gravimetry Analysis (TGA) เพื่อดูการสลายตัวทางความร้อนของ modified PVC

3.6 นำชิ้นงานที่มีคุณสมบัติตามต้องการมาทำการทดสอบการขึ้นรูปด้วยกระบวนการ Vacuum Thermoforming

4. วิเคราะห์ผลการวิจัย

5. สรุปผลการวิจัย

6. รายงานผลการวิจัย

6.1 เสนอผลงานวิจัยในรูปแบบของรายงาน

6.2 เสนอผลงานวิจัยในรูปแบบโปสเตอร์

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น Impact modifier แทนยางสังเคราะห์ สำหรับผลิตแผ่น PVC ที่ใช้ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ Vacuum Thermoforming
2. ได้ปริมาณส่วนประกอบที่เหมาะสมในการผลิตแผ่น PVC โดยใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น Impact modifier
3. สามารถลดต้นทุนในการผลิตแผ่น PVC
4. สามารถนำน้ำยางธรรมชาติซึ่งเป็นทรัพยากรธรรมชาติมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด
5. ส่งเสริมความร่วมมือระหว่างมหาวิทยาลัยกับโรงงานอุตสาหกรรมในด้านการวิจัยร่วมกัน

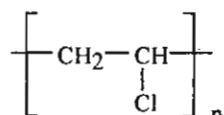
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

2.1.1 Poly(vinyl chloride) หรือ PVC

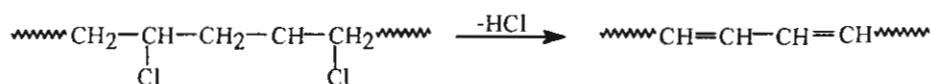
PVC เป็นวัสดุพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติกชนิดหนึ่งซึ่งมีลักษณะการจัดเรียงตัวของโมเลกุลเป็นสายโซ่ตรง จากสูตรโครงสร้างทางเคมีของ PVC นั้นมีคลอรีนอะตอมในสายโซ่โมเลกุลจึงทำให้ PVC มีสมบัติต่างไปจากพอลิเมอร์ที่เป็นไวนิลพอลิเมอร์อื่นๆเช่น โพลีเอทิลีน เนื่องจากการที่มีคลอรีนอะตอมในสายโซ่โมเลกุลทำให้มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมากขึ้น นอกจากนี้สภาพความเป็นขั้วทำให้ PVC มีความแข็งแรงมากขึ้น PVC มี glass transition temperature (T_g) ประมาณ $80 - 85^{\circ}\text{C}$ และมี crystalline melting point อยู่ในช่วงประมาณ $210 - 240^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของ PVC [1]

ลักษณะการเรียงตัวของคลอรีนในสายโซ่โมเลกุลของ PVC เป็นแบบอะแทกติก (atactic) ทำให้มีลักษณะความเป็นผลึกต่ำ มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูง ไม่ติดไฟ ทนต่อสารเคมี ไม่ละลายในตัวทำละลายชนิดไม่มีขั้ว

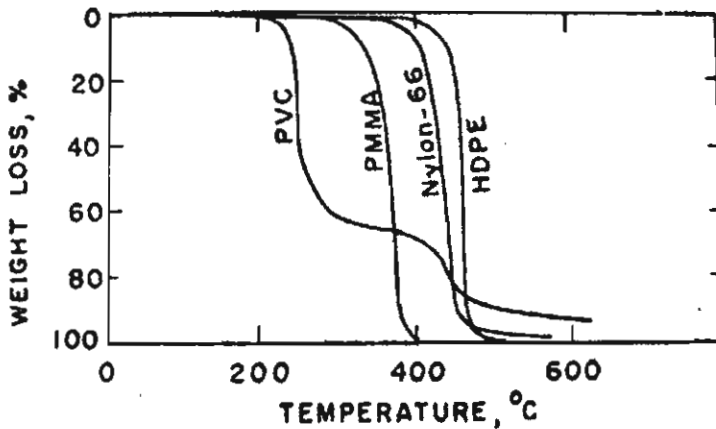
น้ำหนักโมเลกุล M_w ของ PVC อยู่ในช่วง $100,000 - 200,000$, $M_n = 45,000 - 64,000$ ลักษณะทางกายภาพภายนอกไม่มีสี แต่ในกระบวนการแปรรูปอาจเติมสีลงไปได้ นอกจากนี้ในกระบวนการแปรรูป เมื่อ PVC ได้รับความร้อนอาจทำให้เกิดการเสื่อมสลายได้ เนื่องจากการสูญเสีย HCl ออกไปซึ่งแสดงการสลายตัวดังรูปที่ 2.2 และ TGA thermogram แสดงการสลายตัวทางความร้อนดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 Degradation ของ PVC [1]

ดังนั้น จึงจำเป็นต้องเติม stabilizer ลงไปป้องกันการเสื่อมสลายของ PVC เนื่องจากการเสื่อมสลายของ PVC ทำให้การใช้งานไม่ได้นัก ชิ้นงานอาจไม่ทนต่อสภาพแวดล้อมและอาจแตกหักง่าย สีซีด

เป็นต้น สำหรับสารเคมีแต่งอื่นๆ ที่ผสมอยู่ใน PVC ได้แก่ plasticizers, fillers, pigments, lubricants เป็นต้น



รูปที่ 2.3 TGA thermogram ของ PVC และ polymer อื่นๆ ซึ่งถูกให้ความร้อนด้วยอัตรา $10^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$ ภายใต้สภาวะแก๊สไนโตรเจน[2]

ข้อดีของ PVC

1. มีความเสถียรและทนต่อการซึมผ่านของอากาศได้ดี
2. ความสามารถในการดับไฟได้ด้วยตัวเอง
3. ความสามารถในการรวมตัวได้ดีกับสารเคมีแต่ง เพื่อการปรับปรุงคุณภาพ
4. สามารถทำให้มีสีสันท่างๆ ได้ดีด้วยการเติมสารให้สี
5. สามารถทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงหรือนิ่มตามต้องการ
6. เป็นฉนวนที่ดีและมีความต้านทานต่อกระแสไฟฟ้า
7. สามารถนำมาหลอมขึ้นรูปใหม่ได้ง่าย
8. ราคาถูก
9. ผลิตง่ายและทำได้หลายวิธี
10. มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี

ด้วยคุณสมบัติที่ดีดังกล่าวจึงทำให้ PVC เข้าไปมีบทบาทในอุตสาหกรรมต่างๆ มากมาย รวมทั้งการนำไปใช้เพื่อทดแทนวัสดุทางธรรมชาติ อย่างเช่น ไม้ ซึ่งกำลังมีปริมาณลดน้อยลงไปเรื่อยๆ ซึ่งถือว่าการรักษาทรัพยากรทางธรรมชาติอีกทางหนึ่งด้วย

การนำ PVC ไปใช้ประโยชน์

1. งานด้านก่อสร้างและอาคาร (Building & Construction)
- มีการนำ PVC ไปใช้ในด้านก่อสร้างกันมากเนื่องจาก PVC มีความแข็งแรงและสามารถทนต่อสภาพแวดล้อมได้ดี ตัวอย่างของการนำ PVC ไปใช้ในงานด้านก่อสร้างและ

อาคารได้แก่ กรอบและตัวประตู PVC กรอบและหน้าต่าง PVC ท่อน้ำ ท่อน้ำทิ้ง ท่อน้ำเพื่อการเกษตร ท่อร้อยสายไฟ รวมทั้งข้อต่อที่ใช้ในการเดินท่อ ทำสายยางพลาสติก แผ่นลอนโสมงหลังคา ฝาผนังบ้าน ฝาเพดาน แผ่นปูพื้น เครื่องสุขภัณฑ์ ไม้เทียม

2. งานด้านเกี่ยวกับไฟฟ้า (Electrical)

มีการนำ PVC มาใช้ในงานที่เกี่ยวกับไฟฟ้า เนื่องจาก PVC มี Dielectric strength สูง จึงเหมาะในการนำมาทำเป็น ฉนวน ปลอกนอกหุ้มสายไฟ สายโทรศัพท์ ปลั๊กเสียบ รางเก็บสายไฟและสายโทรศัพท์

3. งานด้านบรรจุภัณฑ์ (Packaging)

มีการนำ PVC มาใช้ในงานด้านบรรจุภัณฑ์ เนื่องจาก PVC เป็นพลาสติกที่มีน้ำหนักเบา และสามารถขึ้นรูปด้วยกระบวนการต่างๆ ทางพลาสติกได้ง่าย เช่น กระบวนการ Injection Calendering Blow molding นอกจากนั้นยังสามารถทำให้มีสีและพิมพ์สีต่างๆ ได้ง่ายตามต้องการ และยังทำผลิตภัณฑ์ที่มีความใส กิ่งใส หรือทึบแสงได้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก PVC เช่น ขวดน้ำมันพืช ขวดแชมพู ขวดน้ำดื่ม ฟิล์มหด (ฟิล์มหดรัดตัวสินค้าเพื่อแสดงเครื่องหมายการค้า)

ฟิล์มยืด (ฟิล์มสำหรับห่อขนม ผัก ผลไม้) แผ่นพลาสติก (Plastic sheet) ทั้งนิ่มทั้งแข็ง เพื่อนำไปใช้ในการหุ้มสินค้า เช่น แปรงสีฟัน ของเด็กเล่น (Blister pack) เป็นต้น

4. งานด้านการเกษตร (Agricultural)

ผลิตภัณฑ์จาก PVC ที่ใช้ในงานด้านการเกษตรได้แก่ แผ่นพลาสติกสำหรับปูแหล่งน้ำ และแผ่นพลาสติกที่ใช้คลุมผลผลิตทางการเกษตร

5. งานด้านการแพทย์ (Medical)

คุณสมบัติอย่างหนึ่งที่สำคัญของ PVC ที่นิยมนำมาใช้ในทางการแพทย์คือ มีความทนทานต่อสารเคมี กรด ด่าง ผลิตภัณฑ์จาก PVC ในด้านการแพทย์ ได้แก่ สายน้ำเกลือ สายให้เลือด

ถุงน้ำเกลือ ถุงให้เลือด ถุงปัสสาวะ และหน้ากากออกซิเจน เป็นต้น

6. ผลิตภัณฑ์อื่นๆ

ผลิตภัณฑ์อื่นๆ ของ PVC นั้น ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการนำไปใช้ โดยโดยการเติมสารเติมแต่งและใช้เทคนิคเฉพาะในการผลิตเช่น หนังเทียม เลื่อน้ำมัน รองเท้า ถุงมือ ดันไม้เทียม ของเด็กเล่น ภาชนะเครื่องใช้พลาสติก เป็นต้น

ถึงแม้ปัจจุบัน จะมีการนำ PVC ไปใช้ประโยชน์อย่างมากมายแล้วก็ตาม แต่โลกแห่ง

อนาคตมนุษย์ก็พยายามคิดค้นพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ๆ เพื่อการนำ PVC ไปใช้ประโยชน์ให้มากยิ่งขึ้น

คุณสมบัติของ PVC เกรดต่างๆ

Property	GRADE			
	AS 60	AS 65R	AS 65S	AS 70
K-value	62±1	67±1	67±1	72±1
Polymerization degree (DP)	800±40	1030±50	1030±50	1300±70
Bulk density (g/ml)	0.51-0.67	0.55-0.58	0.49-0.54	0.48-0.53
Volatile matter (%)	0.3 (max)	0.3 (max)	0.3 (max)	0.3 (max)
Appearance	white powder	white powder	white powder	white powder
Partice size pass 42 mesh (%)	100	100	100	100

หมายเหตุ K-value เป็นค่าที่บอกถึงความสามารถในการขึ้นรูปโดย การPVC ที่มีค่า K-value สูงกว่าจะต้อง process ที่อุณหภูมิสูง เสี่ยงต่อการเกิด degradation

ส่วนประกอบต่างๆ ที่ใช้ในการ Compound PVC

PVC resin หน้าที่ เป็นวัตถุดิบหลักจะเป็นเนื้อของผลิตภัณฑ์

แบ่งตามกระบวนการสังเคราะห์ได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. Emulsion PVC (Paste Resin)
2. Suspension PVC ใช้กับเครื่อง Calender แบ่งเป็น 3 เกรด ตามการใช้งาน

เกรด	ค่า K-value	Degree of Polymerization	การใช้งาน
PVC 103 (AS 60)	60-61	800±20	Rigid sheet
PVC 104 (AS 65)	65-66	1000±20	Soft sheet
PVC 106 (AS 70)	70-71	1300±20	Soft sheet

ปัญหาเมื่อใช้ผิดประเภท

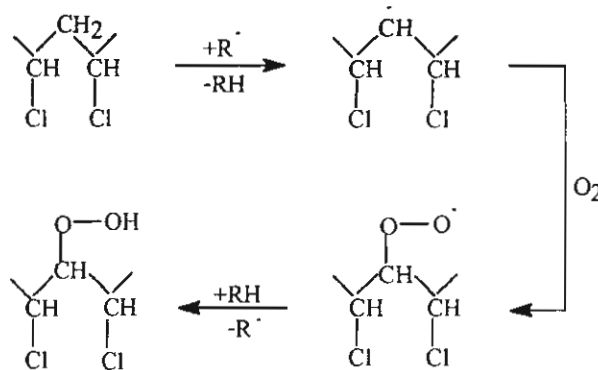
PVC resin เกรดที่มี K-value ต่ำหากใช้ plasticizer ในปริมาณมากเกินไปจะทำให้ PVC compound มีความนิ่มมาก เหนียวติด น้ำมันเยิ้ม และ คึงเป็นแผ่นยาก สำหรับในกรณีที่ใช้ PVC resin เกรดที่มี K-value สูงหากใช้ plasticizer ในปริมาณน้อย จะทำให้ PVC sheet ที่ได้มีความแข็งกว่าปกติ แดงหักง่าย หลอมไม่ทั่วถึง เป็นเม็ดชิดแป๊ะ

Stabilizer ทำหน้าที่ ป้องกันการเสื่อมสภาพ เมื่อโดนความร้อน เนื่องจาก PVC เมื่อได้รับความร้อนหรือแสงอุลตราไวโอเลต มีแนวโน้มที่จะสูญเสีย HCl จากโมเลกุลของพอลิเมอร์ได้ ทั้งนี้เป็นเพราะความร้อนจากการขึ้นรูปและแสง UV ในแสงแดด ซึ่งมีพลังงาน 71-95 kJ/mol เพียงพอต่อการสลายพันธะ C-C, C-Cl, C-H ซึ่ง PVC สลายตัวโดยสูญเสีย HCl ปฏิกริยาเป็นแบบลูกโซ่และสามารถจะ catalyze โดยตัวเอง (Auto catalyst) การสูญเสีย HCl เป็นแบบถอดซิป (zipper reaction)

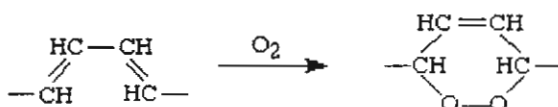
พอลิเมอร์หลังจากสูญเสีย HCl เกิดหมู่เอทิลีน เป็นจำนวนมาก และมีลักษณะเป็นคอนจูเกต (conjugate) กัน ซึ่งหมู่เหล่านี้ สามารถดูดกลืนแสงในช่วงของช่วงแสงที่มองเห็นได้ (visible light) ถ้าสูญเสีย HCl ไปจำนวนมาก จะค่อยๆ เกิดการเปลี่ยนจากสีเหลืองกลายเป็นสีน้ำตาลและสีดำในที่สุด ขึ้นอยู่กับปริมาณของ HCl ที่เสียไปหรือจำนวนหมู่เอทิลีนที่เกิดขึ้นในสายโซ่คาร์บอนพอลิเมอร์

ในการเกิด Thermal degradation ของ PVC ถ้ามี O_2 อยู่จะทำให้เกิดการสลายตัวเร็วขึ้น โดยมีหลายตำแหน่งที่สามารถถูก attack โดย O_2 ได้ เช่น

1. ออกซิเจนเข้า attack ที่ methylene group ที่ให้เกิด radical chain reaction กลายเป็นไฮโดรเปอร์ออกไซด์



2. ออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยากับ polyene ที่เกิดจาก dehydrochlorination โดยจะเกิดเป็นไฮโดรเปอร์ออกไซด์ ใน polyene ที่สั้นๆ และเป็น cyclic peroxide ใน polyene ที่ยาวกว่า
3. ออกซิเจนจะสามารถรวมกับ carbon free radical กลายเป็น peroxide radical ได้



สารผลิตภัณฑ์ทั้งหมดจากการเกิด auto oxidation ทั้ง peroxy radical, peroxide และ hydroperoxide จะไม่เสถียรในสภาวะของการขึ้นรูปซึ่งต้องใช้อุณหภูมิสูงจึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างใหม่ แล้วสามารถกลับไปเร่งการเกิด dehydrochlorination ได้อีก นอกจากนี้ยังทำให้เกิด chain scission มีผลทำให้น้ำหนักโมเลกุลของ PVC ต่ำลง จึงมีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้อย่างมาก

ดังนั้น ในการขึ้นรูป PVC ซึ่งต้องใช้ความร้อนสูงประมาณ 150-200 °C จึงจำเป็นต้องเติม heat stabilizer ลงไป เพื่อที่จะไปหน่วงหรือไปยับยั้งการเกิด dehydrochlorination และ auto oxidation ซึ่งมีผลทำให้สมบัติทั้งทางกายภาพและทางกลของ PVC เสียไปในกระบวนการขึ้นรูป

กลไกการทำงานของ Stabilizer

การป้องกันการสลายตัวทำได้โดยเติมสารจำพวกเกลือของ Heavy metal หรือพวก Heavy metal soap เป็นตัวจับ HCl ที่หลุดจากโมเลกุลทำให้ Stable มากขึ้น

แบ่งได้เป็น 2 function คือ

1. Preventive function
 - Absorption of HCl
 - Elimination of initiation sites
 - Preventive of auto oxidation
2. Curative function
 - Addition of Polyene sequence
 - Destruction of carbenium salts

สำหรับ Rigid PVC ประเภทของ stabilizer ที่นิยมใช้จะเป็นกลุ่มของ Tin stabilizer ซึ่งมีความใส ทนความร้อนสูงมาก

Plasticizer คือสารที่ใส่เข้าไปในพลาสติกเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่น และเพิ่มความสามารถในการใช้งานโดยจะทำให้ความแข็งแรงของพลาสติกลดลง (Tg ลดลง) และ ช่วยให้แปรรูปได้ง่ายขึ้น สามารถแบ่งตามกลไกการทำงานออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. Internal Plasticizer

plasticizer ประเภทนี้ จะเข้าไปเป็นส่วนหนึ่งของพอลิเมอร์ โดยการเกิดพันธะอย่างแข็งแรง คือ พันธะโควาเลนต์ ระหว่างโมเลกุลของ plasticizer และพอลิเมอร์ ก็คือสามารถเกิดโคพอลิเมอร์ระหว่าง มอนอเมอร์ของไฮโดรพอลิเมอร์ และ มอนอเมอร์ที่ทำหน้าที่เป็น plasticizer ทำให้ไม่สามารถแยกออกจากกันได้โดยการสกัด ทำให้สมมาตรของโมเลกุลสูญเสียไป เป็นสาเหตุให้พอลิเมอร์นี้มีสมบัติยืดหยุ่นขึ้น ไม่แตกง่าย Tg ต่ำลงอย่างมาก ตัวอย่างของ plasticizer ชนิดนี้ ตัวอย่างของ Internal Plasticizer ที่นิยมใช้ใน PVC ได้แก่ Dioctyl phthalate หรือ Di-2-ethylhexyl Phthalate (DOP) ซึ่งใช้กับผลิตภัณฑ์ทั่วไป Di-2-ethylhexyl adipate (DOA) ใช้ผสมร่วมกับ DOP เพื่อให้

ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตทนต่อความเย็นและ DINP ใช้กับผลิตภัณฑ์ที่ไม่ให้ใช้ DOP หรือผลิตภัณฑ์ที่ไม่มีพิษ เช่น ปุ๋บนํ้า ผ้าย้อม

2. External Plasticizer

plasticizer ประเภทนี้ จะผสมกับ polymer หรือ ละลายอยู่ในพอลิเมอร์ โดยแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง โมเลกุลของพอลิเมอร์และ plasticizer จะเป็นแบบ โคโพล คือในระหว่างหมู่แสดงสมบัติเฉพาะตัวที่มีสภาพขั้ว การเลือกชนิดของ plasticizer ที่ใช้กับพอลิเมอร์ ต้องพิจารณาถึงการเข้ากันได้กับพอลิเมอร์และคงสภาพอยู่ในพอลิเมอร์ได้นานโดยไม่ซึมหรือระเหยออกมา ข้อเสียของ plasticizer ประเภทนี้ก็คือ สามารถหลุดออกจากตัวพลาสติกได้ง่าย บทบาทของ external plasticizer คือไปทำหน้าที่ลดแรงดึงดูดระหว่าง โมเลกุลของพอลิเมอร์เป็นผลให้พอลิเมอร์มีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น ความเปราะลดลง จึงไม่แตกหักง่าย ตัวอย่างของ plasticizer ชนิดนี้ เช่น Epoxidize soy bean (EPO) ช่วยเพิ่มความนิ่มและช่วยทนความร้อนใน PVC

Impact Modifier พอลิเมอร์ส่วนใหญ่ต้องมีการปรับปรุงคุณสมบัติด้านการทนต่อแรงกระแทกเพื่อให้มีสมบัติที่เหมาะสมและทนทานเวลานำไปใช้งาน ในการปรับปรุงสมบัติดังกล่าวสามารถทำได้โดยการเติมอนุภาคยางเข้าไปให้กระจายอยู่ใน polymer matrix แต่ต้องมีการปรับขนาดอนุภาคของส่วนที่เป็น elastomeric ให้เข้ากับพอลิเมอร์แต่ละชนิดและโดยมากแล้ววัสดุที่ทำหน้าที่ เช่น impact modifier จะต้องควบคุมให้ใช้ในปริมาณน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบต่อสมบัติด้านการมองเห็น สมบัติด้านการไหลและสมบัติทางกายภาพ

สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการใช้ impact modifier ได้แก่

1. อุณหภูมิ glass transition temperature
2. ลักษณะการกระจายอยู่ใน polymer matrix
3. ความสามารถในการกระจายตัว
4. การยึดติดระหว่างตัว impact modifier และ polymer matrix

พลาสติกที่นำมาใช้เป็นตัวปรับปรุงความเหนียว (toughness) เช่น ใช้กับพลาสติก PVC และ วัสดุจำพวก engineering polymer การใช้ MBS จะใช้กับวัสดุที่ต้องการความใสและไม่ทนต่อสภาวะอากาศแต่ต้องการให้มีประสิทธิภาพในด้านการทนต่อแรงกระแทกที่อุณหภูมิต่างๆ วิธีการทำให้เกิดความเหนียวสามารถแบ่งวิธีการปรับปรุงความเหนียวได้เป็น 3 ประการ คือ

1. การรวมกันของอนุภาคส่วนที่เป็น elastomeric core-shell
2. การทำให้มีการกระจายตัวของ elastomer ในเทอร์โมพลาสติกระหว่างกระบวนการ compound
3. การใส่สารที่เป็น elastomer เข้าไประหว่างกระบวนการ polymerization

Impact modifier ที่ใช้กับ PVC แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ประเภทแรกเป็น thermoplastic ที่ graft อยู่กับ rubber และกลุ่มของ plasticizing polymer ที่เป็นวัสดุจำพวก semi-compatible ตัวอย่าง

ของวัสดุจำพวกนี้ได้แก่ methacrylate-butadiene-styrene หรือ MBS และ acrylonitrile-butadiene-styrene หรือ ABS

ตารางที่ 2.1 Impact Modifiers and Applications [3]

ABS Types	Application
Non- transparent	Opaque, extruded profiles; calendared film and sheet; extruded film and sheet; pipe and pipe fitting; moldings
Transparent	Clear, calendared film and sheet; clear bottles
All Acrylics	Siding; window profiles; gutters; furniture; cellular products
MBS Types	Application
Non- transparent	Pipe and opaque extrusion; moldings
Transparent	Clear, calendared film, sheet; clear bottles, moldings
CPE's	Pipe; siding; fitting; molding
EVA's	Extruded sheet, window profile

Lubricant ทำหน้าที่ ช่วยในการหล่อลื่นระหว่างกระบวนการผลิต แบ่งเป็น 2 ชนิด วัตถุประสงค์หลักในการเติม lubricant เพื่อช่วยให้การ process ง่ายขึ้น แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. External Lubricant (สารหล่อลื่นภายนอก) เป็นสารจำพวกเดียวกับ internal lubricant แต่ขนาดใหญ่กว่า เข้ากับ PVC ได้ยาก ถ้าใส่มากจะเกิดฝ้าที่ผิว Sheet มีหน้าที่ช่วยป้องกันการยึดติดในขณะที่ PVC ออกจาก extruders และ injection และช่วยให้ชิ้น สามารถไหลได้ง่ายขึ้น เมื่อผ่านหัวตาย (dies) โดยที่ lubricant จะมีความสามารถในการช่วยลดแรง shear ช่วยให้ไหลผ่านกันง่ายขึ้น ปกติแล้ว external lubricant จะเคลือบอยู่ที่ผิว ในระหว่างการขึ้นรูปเพื่อลดการเสียดทานระหว่าง PVC กับเครื่องจักร

2. Internal Lubricant (สารหล่อลื่นภายใน) เป็นสารพวก Amide wax และ Glycerol ester เช่น G161 มีหน้าที่ ลดการเสียดสีระหว่าง PVC compound ทำให้กระจายตัวสม่ำเสมอ ลด Flow mark

Processing Aid ในพลาสติกจะมีการเติมเป็นอันดับแรก มีหน้าที่ ช่วยให้ส่วนผสมของ PVC หลอมตัวเร็วและสม่ำเสมอ เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิต โดยอยู่ในรูปของ solid plasticizer ที่มี melt viscosity ต่ำและเป็นตัวประสานที่ดีใน PVC การลดลงของ melt viscosity ของ compound ทำให้การ

process และขึ้นรูปหลังการ process ทำให้เร็วขึ้น processing aid ส่วนใหญ่เป็นสารจำพวก Acrylic Copolymer เช่น PA-20

ข้อดีของการใช้ processing aid

1. ใช้อุณหภูมิในการ process ต่ำลง
2. สามารถขึ้นรูปสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงได้ทันที
3. เกิดเจลได้อย่างรวดเร็วและสมบูรณ์
4. ลดความไม่สม่ำเสมอของผิวหน้า
5. เพิ่มความใสเป็นมันวาว
6. ปรับปรุงความสามารถในการคงรูปในกระบวนการ blowing molding, vacuum forming, embossing ช่วยให้เห็นรายละเอียดของชิ้นงานชัดเจนขึ้น

ข้อเสียของการใช้ processing aid

1. มีราคาแพง (แพงกว่า PVC อยู่ประมาณ 2-3 เท่า)
2. มีความสามารถในการทนต่อสารเคมีและสารละลายได้ลดลง
3. มี heat distortion temperature ลดลง
4. มี impact strength ลดลง

Anti-Blocking ทำหน้าที่ ป้องกันการเหนียวติดกันของพลาสติกใส ได้แก่สารจำพวก Fatty Bisamide

การทำงานของ Anti-Blocking จะเคลือบอยู่ที่ผิว Sheet ข้อดี คือ ทำให้ sheet ใส ป้องกันการเหนียวติดดี ข้อเสีย ถ้าใส่มากเกินไปจะทำให้ พิมพ์หรือสกรีนไม่ได้

Anti-Fungi ทำหน้าที่ ป้องกันเชื้อราหรือแบคทีเรีย การใช้งาน ใช้กับผลิตภัณฑ์ที่ต้องสัมผัส ความชื้น เช่น ปูบ่อ ม่านห้องน้ำ หมวกคลุมผม ที่ติดผนัง หรือตามลูกค้าต้องการ

Blowing Agent ทำหน้าที่ ช่วยให้เกิดการฟูตัวในชั้น โฟมของหนังเทียมและ Sponge Sheet

Kicker & cell control ทำหน้าที่ ควบคุมอุณหภูมิ การทนความร้อนและลักษณะ cell ของการ

ฟูตัว

Tackifier ทำหน้าที่ ช่วยประสานส่วนผสมต่างๆ ของพื้นผิว และช่วยให้เกาะติดลูกกลิ้ง

Pigment ทำหน้าที่ ให้สีต้นแก่ผลิตภัณฑ์ แบ่งออกเป็นชนิดที่เป็นผง pigment ซึ่งส่วนใหญ่จะ

ใช้กับ rigid PVC และชนิดที่เป็น Master Batch (เกล็ดหรือเม็ด) จะใช้กับ soft PVC

Flame Retardant ทำหน้าที่ ลดการติดไฟของ Sheet เมื่อโดนเปลวไฟ Flame Retardant ส่วนใหญ่เป็นสารจำพวก Antimony Trioxide กลไกการทำงาน คือ จะเข้าไปจับกับออกซิเจน ในอากาศ เพื่อไม่ให้เกิดการลุกติดไฟ

UV-Absorber ทำหน้าที่ ดูดซับแสง UV ป้องกันการเสื่อมสภาพของแผ่น sheet เมื่อสัมผัสกับแสงแดด

Filler ทำหน้าที่ เพิ่มเนื้อผลิตภัณฑ์ ทำให้ทึบแสง และเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพในการเติม filler ทำให้ช่วยลดต้นทุน ลดการหดตัว ทึบแสง ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความคงรูป แต่มีข้อเสีย คือ ทำให้ sheet นึกขาคง่าย ทนแรงกระแทกลดลง ความยืดหยุ่นลดลง

Mechanism of Gelation of Rigid PVC [4]

ความสำคัญที่ต้องเข้าใจการเกิด gelation เนื่องจากว่าในการที่จะนำ PVC ไปขึ้นรูปนั้นต้องมีการทำให้เกิดเจลก่อนซึ่งระหว่างกระบวนการ compound PVC จะเกิดการเปลี่ยนขนาดของ grain ไปจากเดิม ซึ่งเดิมมีขนาด 130 μm ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกระบวนการที่ใช้และเครื่องมือ โดยกระบวนการ compound และขึ้นรูปของ PVC นั้นจะเป็นกระบวนการที่ต่อเนื่องกันประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกคือ PVC mixing โดยจะเป็นการผสม PVC กับสารเติมแต่ง จากนั้นเป็นการ compound โดยมีการใช้ความร้อนกับแรงเฉือน (shear force) ขั้นสุดท้ายคือกระบวนการขึ้นรูป ซึ่ง PVC สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการต่างๆดังนี้คือ single screw extrusion, banbury mixing, brabendor, plasticorder และ two-roll-milling

Premixing with additive เป็นขั้นตอนแรกในกระบวนการขึ้นรูป PVC ซึ่งเป็นการผสม PVC กับสารเติมแต่ง โดยสามารถใช้เครื่อง low speed mixer หรือ ribbon blender ทั้งนี้ในการ premixing จะใช้อุณหภูมิและความเร็วในการผสมให้สอดคล้องกับสมบัติที่ต้องการ มีการทำการทดลองทำ dry blending ของ PVC grade ที่เป็น high porosity โดยทำการผสมที่หลายช่วงอุณหภูมิพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้มี porosity ลดลง แต่พบว่าความหนาแน่นในการ pack ตัวเพิ่มสูงขึ้น โดยขั้นตอนสุดท้ายของการทำ dry blending คือต้องการทำให้เกิดการกระจายตัวของสารเติมแต่งระหว่าง grain ซึ่งจะบ่งชี้ได้ว่าเป็นการผสมที่เข้ากันได้ดีที่สุด อุณหภูมิที่ใช้ในการทำ dry blend อาจใช้ที่ T_m ของสารเติมแต่งตัวใดตัวหนึ่ง ในการทดสอบหลังจากทำการ dry blend การกระจายตัวบนผิวของ grain

Effect of Processing Parameter ปัจจัยพื้นฐานที่มีผลต่อการขึ้นรูปมีอยู่ 3 ประการคือ ความร้อน แรงอัดหรือความดันและแรงเฉือน ถ้า polymer powder สามารถให้ความร้อนได้ง่าย อนุภาคจะค่อยๆเปลี่ยนไปจนถึงอุณหภูมิที่ 150°C ดังนั้นจะทำให้ porosity ลดลง เนื่องจากมีลดลงของพื้นที่ผิวในกระบวนการขึ้นรูปที่มีการให้ความร้อนและความดันเข้าไปพร้อมกัน จะเกิดการเปลี่ยนแปลงในด้านของความหนาแน่นของ powder ซึ่งจะเป็น T_g ของ PVC อยู่ที่ประมาณ 80 °C

Grain morphology มีความสำคัญในการควบคุมการอัดตัวของ powder ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าพอลิเมอร์ที่มีความหนาแน่นหรือมี porosity ต่างกัน จะถูกอัดภายใต้สภาวะคงตัวให้แน่นเพื่อเพิ่มความแข็งแรง ซึ่งในระหว่างนี้หากมีการให้แรงเฉือนเข้าไปด้วยจะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมากจากการทดลองพบว่า powder เกิดการเคลื่อนที่ เนื่องจาก ความร้อนและแรง ที่ได้รับ โดยจะสามารถวัดค่าความต้านทานการเปลี่ยนแปลงได้จากการวัดค่า ทอร์ค (torque) จากเครื่อง Transducer ผลของความดันและแรงเฉือน ที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการเกิด gelation นั่นคือ ที่อุณหภูมิและความดันต่ำๆ จะไม่สามารถทำให้วัสดุเคลื่อนที่และ ไม่เกิดการส่งผ่านของแรงเฉือน ดังนั้น หากต้องการให้มีการส่งผ่านของแรงเฉือนและ grain เกิดการเคลื่อนที่จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการให้ความร้อนเข้าไปด้วย ในสถานะที่มีการให้ความดันเพิ่มเข้าไปจะทำให้มีแรงเฉือนมาก ส่งผลให้การทำงานมีประสิทธิภาพดีขึ้น เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิเข้าไปอีกก็จะทำให้วัสดุเกิดการหลอมรวมกันมากขึ้น

การเกิด gelation ใน Banbury mixer

ในขั้นตอนแรก สารเติมแต่งต่างๆ จะอยู่ที่ผิวของ grain โดยยังมีลักษณะแยกกันอยู่ การทำงานของ Banbury mixer จะทำให้ สารเติมแต่ง เกิดการเข้าไปรวมกับ grain เป็นผลทำให้เกิดการรวมตัวกันมากขึ้น เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ grain เกิดการแตกออกและสารเติมแต่ง เข้าไปรวมตัวได้มากขึ้น จึงเกิดการกระจายตัวของ สารเติมแต่งใน polymer matrix ได้สม่ำเสมอได้มากขึ้นที่อุณหภูมิ 140-150 °C bulk compound จะเป็นการรวมตัวของอนุภาคในขั้นต้นจากนั้นอนุภาคต่างๆ จะเกิดการสูญเสียพื้นที่เนื่องจากเกิดการรวมตัวกับอนุภาคอื่นๆ มากขึ้น

การเกิด gelation ใน Two roll mill

ในการ compound ด้วย two roll mill จะมีการตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 160 °C ที่อุณหภูมินี้จะป้อนตัวอย่างที่ทำการผสมไว้แล้ว ในการผสมมีหลักการเดียวกันกับใน Twin screw extruder คือ จะมีการบดผสมและให้แรงเฉือน ให้เคลื่อนที่ผ่านกันและเกิดการรวมตัวกันอย่างรวดเร็วดังจะเห็นได้จากขณะที่ทำการ compound สามารถดึงยืดได้มากที่สุดจะไม่พบ grain เมื่อให้ rate มากขึ้น และมีการดึงยืดสูงขึ้น

กลไกการเกิด gelation ของ UPVC

จะเริ่มจาก grain ของ PVC ที่มีสารเติมแต่ง ล้อมรอบเกิดการรวมกันเป็น primary particle จากนั้น อนุภาคจะมีการ pack ตัวใกล้กันมากขึ้น ซึ่งจะทำให้ พื้นที่ผิวลดลง และเมื่อมีการให้แรงเฉือนและอุณหภูมิเข้าไปจะทำให้เกิดการหลอมรวมกันมากขึ้น จนในที่สุดจะรวมเป็นเนื้อเดียวกันและมีลักษณะเป็นเจล โดยจะไม่ปรากฏ grain อยู่ใน bulk compound อีกต่อไป

2.1.2 น้ำยางธรรมชาติ (Natural Rubber Latex)[5]

ยางธรรมชาติที่นำมาใช้ในทางการค้า เป็นยางซึ่งได้จากต้นไม้ใหญ่ชื่อว่า “ยางพารา” มีชื่อเรียกทางวิทยาศาสตร์ว่า Hevea Brasiliensis ซึ่งเดิมมีอยู่เฉพาะในทวีปอเมริกาใต้เท่านั้น ต่อมาได้นำมาปลูกในทวีปเอเชียและแอฟริกา ยางสามารถออกงามได้ดีในภาคใต้ และภาคตะวันออกของประเทศไทย ปลูกดี

จะปลูกด้วยพันธุ์พื้นเมืองแล้วต่อตาด้วยพันธุ์ที่ให้น้ำยางดี ทั้งนี้เพื่อให้ได้รากและโคนต้นที่แข็งแรง ส่วนลำต้นและยอดจะเป็นพันธุ์ที่ให้น้ำยางดี เมื่อต้นยางโตได้อายุประมาณ 7 ปี ชาวสวนจะเก็บน้ำยางด้วยการกรีดเปลือกของลำต้นให้น้ำยางซึมออกมา ต้นยางจะให้ น้ำยางไปจนอายุประมาณ 30 ปี ชาวสวนก็จะตัดต้นยางเพื่อปลูกใหม่ ไม่นำไปทำเฟอร์นิเจอร์ กิ่งและเศษนำไปทำฟืนและถ่าน

ความหมายของน้ำยางธรรมชาติ

น้ำยางธรรมชาติ ขณะสดจะมีสีขาวหรือขาวออกเหลือง มีความหนืดประมาณ 12 – 15 centipoise (น้ำบริสุทธิ์มีความหนืด 1 centipoise) มีความหนาแน่นประมาณ 0.975 – 0.980 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีความเป็นกรด – เบส (pH) ที่ 6.5 - 7.0 นอกจากนี้มีส่วนประกอบของสารต่าง ๆ ในปริมาณที่ไม่คงที่อย่างกว้างขวาง โดยขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ เช่น พันธุ์ยาง อายุยาง ฤดูกาลกรีดยาง และวิธีการกรีดยาง เป็นต้น

องค์ประกอบของน้ำยางธรรมชาติ

น้ำยางธรรมชาติเป็นสารแขวนลอยชนิดหนึ่ง ประกอบด้วยสารที่มีน้ำเป็นตัวกลาง นอกจากนี้ในส่วนที่เป็นของเหลวยังมีส่วนที่ไม่ใช่ยางอยู่ในรูปของสารแขวนลอยและสารละลายอีกด้วย

ส่วนประกอบของน้ำยางธรรมชาติ

ปริมาณของแข็งทั้งหมด	22-48 %
ปริมาณเนื้อยาง	20-45 %
สารจำพวกโปรตีน	1.5 %
สารจำพวกเรซิน	2.0 %
คาร์โบไฮเดรต	1.0 %
สารอนินทรีย์	0.5 %
น้ำ	45-60 %

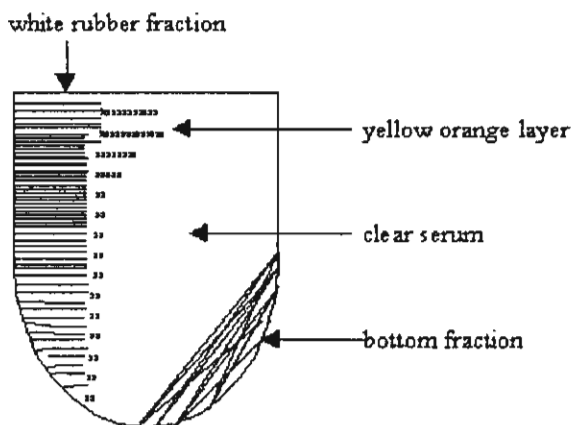
องค์ประกอบต่าง ๆ เหล่านี้ สามารถแยกส่วนออกได้เป็น 4 พวกใหญ่ ๆ ด้วยกัน (รูปที่ 2.4) โดยอาศัยแรงเหวี่ยง (centrifuging force) ที่ความเร็ว 200,000 รอบต่อวินาที ดังนี้ คือ

(1) ส่วนที่เป็นยางล้วน ๆ (white rubber fraction) เป็นส่วนที่เบาที่สุด อยู่ส่วนบนสุดของส่วนอื่น ๆ เป็นครีมของอนุภาคยาง มีสีขาว

(2) ส่วนที่ติดอยู่กับส่วนล่างสุดของส่วนที่เป็นยางล้วน ๆ (yellow orange layer) มีลักษณะเป็นอนุภาคเช่นเดียวกับยาง แต่มีสีเหลือง ส่วนใหญ่เป็นอนุภาคของ Frey – Wyssling ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกลม

(3) ส่วนที่เป็นของเหลวใส (clear serum) เป็นส่วนที่อยู่ถัดมาจาก 2 ส่วนแรก มีสีใสออกน้ำตาลเล็กน้อย บางทีจึงเรียก C – serum มีลักษณะค่อนข้างเหนียว เป็นฟองง่าย ส่วนใหญ่ประกอบด้วย โปรตีน ฟอสฟอรัส โปแตสเซียม ทองแดง เกลือ และแมกนีเซียม

(4) ส่วนล่างสุด (bottom fraction) เป็นส่วนที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่าส่วนอื่น ๆ ทั้งหมด มีสีขาวออกเหลือง มีลักษณะเป็นของแข็ง



รูปที่ 2.4 การแยกส่วนประกอบของน้ำยางโดยใช้แรงเหวี่ยงที่ 200,000 รอบต่อวินาที [5]

เสถียรภาพของน้ำยาง

ความเสถียรภาพของสารละลายที่มีลักษณะคอลลอยด์ขึ้นกับแรง 2 ชนิดที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคเหล่านั้น คือ

1. แรงดึงดูด (attractive forces) หรือเรียกว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ (vander waals forces) เป็นแรงที่สำคัญที่ทำให้เกิดความเสถียรภาพของคอลลอยด์ โดยแรงประเภทนี้ขึ้นกับขนาดของอนุภาคและระยะห่างระหว่างอนุภาค

2. แรงผลัก (repulsive forces) มีหลายชนิดที่เกิดขึ้นในคอลลอยด์ ดังนี้

Electrostatic stabilization เกิดจากประจุบนผิวของอนุภาคผลัดกันทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคในสารละลาย โดยประสิทธิภาพในการกระจายตัวของอนุภาคนั้นขึ้นกับระยะห่างจากผิวของอนุภาค

Stearic stabilization เป็นผลจากการดูดซับสารประเภท non-ionic surfactants และสาร โมเลกุลใหญ่บนผิวของอนุภาคคอลลอยด์ ทำให้ความเสถียรเกิดขึ้น จากการเกิดแรงดันออสโมติกในบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคทั้งสอง และหรือ จากความสามารถในการยืดหยุ่นแรงอัดของพื้นผิวที่ดูดซับสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กระบวนการ ดังนี้

กระบวนการแรก เกิดเมื่อความเข้มข้นของผิวดูดซับมีปริมาณน้อย ดังนั้นเมื่ออนุภาคของคอลลอยด์อยู่ใกล้กับชั้นพื้นผิวที่ดูดซับจะเกิดการแทนที่ในบางส่วนโดยสารละลาย ซึ่งเป็นการเพิ่ม

พลังงานอิสระในสารละลายจึงเกิดแรงผลัก (steric effect) ระหว่างอนุภาคที่มีพลังงานมากกว่า Van der Waals ทำให้เกิดความเสถียรของคอลลอยด์ขึ้น

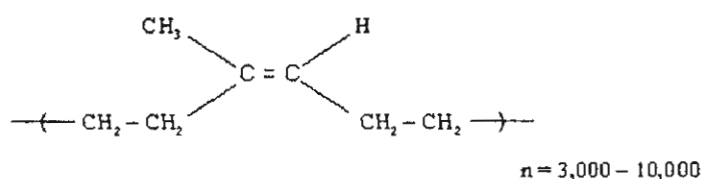
กระบวนการที่สอง เกิดเมื่อความเข้มข้นของพื้นผิวดูดซับมีปริมาณมากในการดูดซับของพื้นผิวนิวภาค เมื่อมีการดูดซับที่ผิวหนาแน่นแล้วอนุภาคที่ยังอยู่ในสารละลายจะถูกกันจากชั้นของการดูดซับที่ผิวเอง ทำให้ไม่สามารถเกิดการดูดซับที่ผิวนิวภาคได้อีก หากมีอนุภาคอื่น ๆ เข้าใกล้บริเวณพื้นผิวดูดซับจะเกิดการผลักจากชั้นดูดซับที่ผิวเอง ทำให้ไม่สามารถเกิดการดูดซับที่ผิวนิวภาคได้อีก เกิดความเสถียรของคอลลอยด์ขึ้น

น้ำยางสดที่กรีดได้มาใหม่ ๆ จะเป็นของเหลวสีขาวอยู่ในสภาพที่เรียกว่า สารแขวนลอยองค์ประกอบต่าง ๆ แขวนลอยอยู่ในส่วนที่เป็นของเหลวซึ่งเป็นตัวกลาง โดยมีองค์ประกอบดังนี้

อนุภาคยาง

มีรูปร่างและขนาดต่าง ๆ ตั้งแต่รูปยาวเป็นแท่ง กลมรีเหมือนลูกแพร์ (Pear-shaped rubber hydrocarbon) หรือเรียกว่า globules ขนาดกว้าง 0.5 – 3 ไมครอน ยาว 4 – 6 ไมครอน โดยเฉลี่ยประมาณ 1.04 ไมครอน เคลื่อนที่ไปมาแบบไม่มีทิศทางที่แน่นอนอยู่เสมอ กระจายตัวแบบที่เรียกว่า polydispersed system โดยอนุภาคยางประกอบด้วยส่วนประกอบ 3 ส่วน คือ

1. ส่วนในสุด__ เป็นส่วนที่เป็นเนื้อยางล้วน ๆ หรือเรียกว่า Rubber hydrocarbon มีประมาณ 96% โดยน้ำหนักของอนุภาค ประกอบขึ้นจากการ Polymerization ของ isoprene เป็น cis – 1, 4 (รูปที่ 2.3) จำนวน 3,000 – 10,000 โมเลกุล มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 200,000 – 600,000



รูปที่ 2.5 cis – 1, 4 – polyisoprene

2. ส่วนนอกออกมาเป็นชั้นของ lipids มีประมาณ 3% โดยน้ำหนักของอนุภาค โดยปริมาณ lipid ที่อยู่ในอนุภาคยางขึ้นกับพันธุ์ยาง

3. ส่วนนอกสุดเป็นส่วนของโปรตีน มีประมาณ 1% โดยน้ำหนักของอนุภาคยาง ทำหน้าที่เป็นชั้นหุ้มอนุภาคยาง ส่วนใหญ่ได้แก่ α - globulin ชั้นของโปรตีนมีความสำคัญมาก เพราะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของอนุภาคยาง คือ กำหนดชนิดของประจุ ซึ่งได้แก่ ประจุไฟฟ้าลบ กำหนดคุณสมบัติ Electrophoresis และกำหนดเสถียรภาพของน้ำยาง

ของเหลวที่เป็นตัวกลาง (Serum)

ส่วนนี้เป็นสารละลาย เป็นส่วนที่อนุภาคยางและส่วนที่ไม่ใช่ยางแขวนลอยอยู่ สารที่ละลายอยู่ภายในเป็นสารประกอบมีหลายชนิดดังนี้

1. สารประกอบโพลีไฮดริค (polyhydric) ส่วนใหญ่ได้แก่ คิวบราชิตอล (Quebrachitol) มีอยู่ประมาณ 1% ส่วนคาร์โบไฮเดรตมีอยู่น้อยมาก ได้แก่ กาแลคโตส กลูโคส ฟรักโตส

2. โปรตีนและกรดอะมิโน มีโปรตีนหลายชนิดที่มีค่า iso - electric points หลายค่าที่ละลายอยู่ในเซรัม แต่ที่สำคัญนั้นมีอยู่ 2 ชนิด คือ แอลฟาโกลบูลิน (α - globulin) และ เฮวิน (hevein) สำหรับกรดอะมิโนขนาดเล็กหรือขนาดใหญ่ที่พบในน้ำยางมีอยู่ประมาณ 0.1% ของน้ำหนักน้ำยาง ส่วนใหญ่ที่พบได้แก่ ลิวซีน (leucine) ไอโซลิวซีน (isoleucine) อลานีน (alanine) ฟีนีลอลานีน (phenylalanine)

นอกจากโปรตีนและกรดอะมิโนในเซรัมยังมีสารประกอบจำพวกเบสที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบด้วย ยกตัวอย่างเช่น โคลีน (choline) เมทิลเอมีน (methyl amine) กรดอินทรีไซยาไนด์ (cyanide) อนุมูลบ อนินทรีไซ เช่น ฟอสเฟต (phosphate) คาร์บอเนต (carbonate) ไอออนโลหะหนัก ได้แก่ โพแทสเซียม แมกนีเซียม เหล็ก โซเดียม และทองแดง

3. ส่วนที่อยู่ล่างสุดหลังการปั่น (bottom fraction)

ส่วนนี้เป็นส่วนที่มีน้ำหนักหรือความถ่วงจำเพาะมากที่สุด ดังนั้น เมื่อนำไปปั่นด้วยแรงเหวี่ยงขนาด 200,000 รอบต่อนาที ส่วนนี้จะรวมตัวกันอยู่กันสุด แต่ในสภาพน้ำยางสด องค์ประกอบเหล่านี้จะแขวนลอยอยู่ในตัวกลางปนกันอยู่กับอนุภาคยาง องค์ประกอบเหล่านี้ประกอบด้วย ลูทอยด์ (lutoids) เป็นสำคัญ

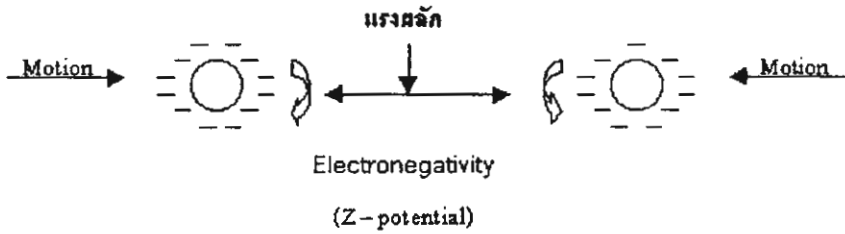
ลูทอยด์ มีลักษณะคล้ายกับอนุภาคยาง ประกอบด้วยเนื้อเยื่อเชิงเดี่ยวหุ้มอยู่ด้านนอก ด้านในมีทั้งสารละลายและสารที่แขวนลอยอยู่ ลูทอยด์เป็นอนุภาคที่แตกง่าย เพราะหุ้มด้วยเนื้อเยื่อชั้นเดียว จึงเกิดการออสโมซิส (osmosis) ได้ง่าย สักเกตได้จากการเติมน้ำลงในน้ำยางสดใหม่ ๆ น้ำยางจะหนืดขึ้น เพราะลูทอยด์เกิดออสโมซิสดูดน้ำเข้าไปจึงพองตัวออก ทำให้น้ำยางมีความหนืดสูงขึ้น แต่ภายหลังความหนืดของน้ำยางจะลดลง เพราะว่าเมื่อลูทอยด์พองตัวเต็มที่แล้วจะแตก ความหนืดจึงลดลง ดังนั้น น้ำยางที่เติมด้วยแอมโมเนียจึงไม่พบลูทอยด์เหลืออยู่ นอกจากนี้ ความร้อนก็เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ลูทอยด์แตกได้ ดังนั้น ในสภาพภูมิอากาศเขตร้อน หลังการกรีดยางออกมาจึงไม่พบลูทอยด์

เมื่อลูทอยด์แตก ของเหลวภายในซึ่งมีสารแขวนลอยที่มีประจุบวก เช่น กรดและไอออนโลหะ ได้แก่ Ca^{++} และ Mg^{++} (pH 5.4) จะไหลปนกับของเหลวในเซรัมซึ่งมีอนุภาคที่มีประจุลบแขวนลอยอยู่ เช่น อนุภาคยาง เป็นต้น จึงเป็นสาเหตุประการหนึ่งที่ทำให้น้ำยางธรรมชาติเกิดการจับก้อน

ลักษณะเชิงโครงสร้างของน้ำยางสด

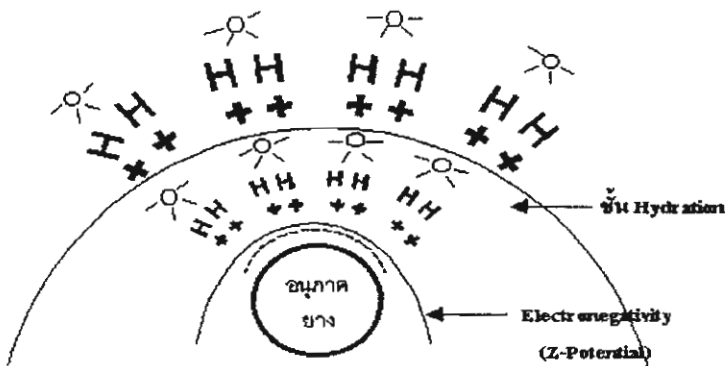
น้ำยางสดอนุภาคยางยังมีการเคลื่อนไหวอยู่ โดยอนุภาคยางกระจายตัวและเคลื่อนที่ภายในตัวกลางได้โดยไม่ลอยเป็นครีမ်ที่ผิวด้านบนของของเหลวตัวกลางนั้น เพราะแรงที่เกิดจากการเคลื่อนไหวมีมากกว่าแรงลอยตัวของแรงโน้มถ่วง

แรงผลักดันของประจุไฟฟ้า อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าลบ ดังนั้น เมื่อลอยเข้าใกล้กันจะเกิดแรงผลักซึ่งกันและกัน ทำให้อนุภาคแยกออกจากกัน (electro negativity or Z – potential)(รูปที่ 2.4)



รูปที่ 2.6 การเกิดแรงผลักดันซึ่งกันและกันของอนุภาค[5]

กันชนเชิงกล (physical buffering) เกิดจากการที่โปรตีนบนผิวของอนุภาคเกาะกับน้ำเป็นจำนวนมาก เนื่องจากน้ำเป็นสารที่มีขั้ว (polar material) จึงเป็นการป้องกันประจุลบของผิวอนุภาคได้ (รูปที่ 2.5)



รูปที่ 2.7 การป้องกันประจุไฟฟ้าบนอนุภาคของชั้นน้ำ[5]

การรักษาสภาพและการเสถียรภาพของน้ำยาง

น้ำยางจัดเป็นสารแขวนลอยที่มีส่วนของอนุภาคยาง (Rubber particle) แขวนลอยกระจัดกระจายอยู่ในตัวกลางที่เรียกว่า เซรัม (serum) และมีส่วนประกอบของโปรตีนดูดซับอยู่บริเวณรอบผิวของอนุภาคยางโดยห่อหุ้มอนุภาคยางไว้ ชั้นห่อหุ้มนี้มีความสำคัญต่อสถานะความคงตัวเป็นของเหลวของน้ำยาง เพราะชั้นโปรตีนนี้จะป้องกันไม่ให้เกิดอนุภาคยางมารวมกัน หากมีการสูญเสีย (dehydrated) ในชั้นของโปรตีนที่ห่อหุ้มอนุภาคยางอยู่ซึ่งอาจเกิดขึ้นโดยการเติมแอลกอฮอล์หรือสาร

บางอย่างลงในน้ำยาง น้ำยางจะสูญเสียความคงตัวและเกิดการรวมของอนุภาคยางจับกันเป็นก้อนยาง เรียกว่า โคแอกกูลัม (coagulum) แยกออกจากส่วนของเซรัม

นอกจากนี้ชั้นของโปรตีนจะทำหน้าที่รักษาความคงสถานะเป็นของเหลวให้น้ำยางแล้ว ความคงสถานะของเหลวของน้ำยางยังเนื่องมาจากประจุไฟฟ้าลบบรรอบ ๆ อนุภาคยางซึ่งทำให้เกิดแรงผลักระหว่างอนุภาคยาง และเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ช่วยรักษาสถานะการกระจาย (Dispersion) ของอนุภาคยางให้น้ำยางเป็นของเหลวอยู่ได้ ถ้าหากเกิดผลกระทบกระเทือนที่ทำให้ประจุไฟฟ้าลบลดลง อนุภาคยางก็จะรวมกันได้ ขนาดอนุภาคจะใหญ่ขึ้น การเคลื่อนย้ายการกระจายของอนุภาคก็ค่อย ๆ ลดลงทำให้เกิดโคแอกกูลัม ในทางตรงกันข้ามหากประจุไฟฟ้าลบที่อยู่รอบอนุภาคยางเพิ่มขึ้นความคงสถานะเป็นน้ำยางก็จะเพิ่มขึ้น น้ำยางสดเมื่อตั้งทิ้งเอาไว้ในสภาพธรรมชาติ จะจับตัวแข็งโดยธรรมชาติภายในเวลา 4-24 ชั่วโมง สาเหตุเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นในน้ำยางดังนี้

1. การแตกของอนุภาคคอลลอยด์

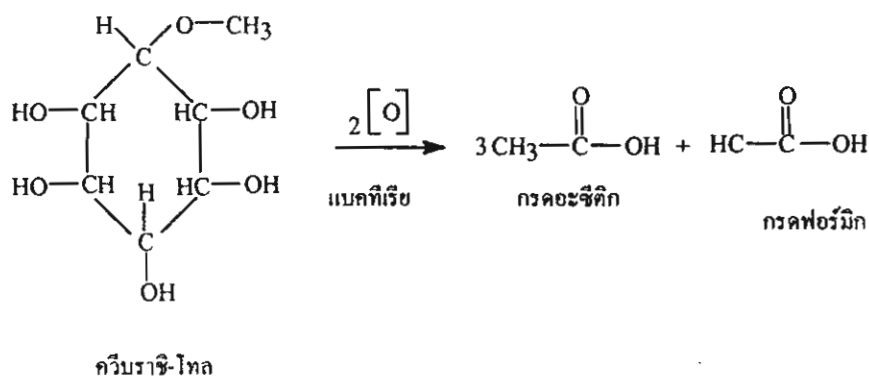
เมื่ออนุภาคคอลลอยด์แตกจะปล่อยประจุไฟฟ้าบวกจากส่วนที่เป็น B-เซรัม และจากโลหะธาตุเข้าไปในส่วนที่เป็นเซรัมของน้ำยาง ซึ่งจะทำให้ประจุบวกเหล่านี้ไปจับตัวกับประจุลบบนอนุภาคยาง ทำให้อนุภาคยางเปลี่ยนสถานะทางไฟฟ้าไปเป็นสภาพที่เป็นกลาง

2. การเกิดกรดในน้ำยาง

กรดในน้ำยางเกิดขึ้นจากการที่แบคทีเรีย หรือจุลินทรีย์ (ส่วนใหญ่เป็นแบคทีเรีย) ในน้ำยางเข้าไปย่อยองค์ประกอบส่วนที่ไม่ใช่ยางให้เกิดกรด องค์ประกอบดังกล่าวได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไลปิด (Lipids) แต่ส่วนใหญ่แล้วเป็นพวกคาร์โบไฮเดรต แบคทีเรียจะติดอยู่ตามรอยกรีดบนหน้ายาง ตามด้วยรับน้ำยาง ตลอดจนตามภาชนะเก็บน้ำยางและอุปกรณ์การกรีดอื่น ๆ ดังนั้น เวลากรีดยางจึงเข้าไปในน้ำยางได้โดยง่าย และโดยที่น้ำยางมีสารอาหารที่เหมาะสมแก่การเจริญเติบโต มีสภาพความเป็นกรดที่ pH 6.8-7.0 ภายใต้อุณหภูมิของภูมิอากาศเขตร้อนประมาณ 30-35°C ซึ่งนับว่ามีความใกล้เคียงกับสภาพความต้องการสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียมากที่ต้องการความเป็นกรดที่ pH 7-8 อุณหภูมิ 42 °C

3. การย่อยสลายคาร์โบไฮเดรตของแบคทีเรีย

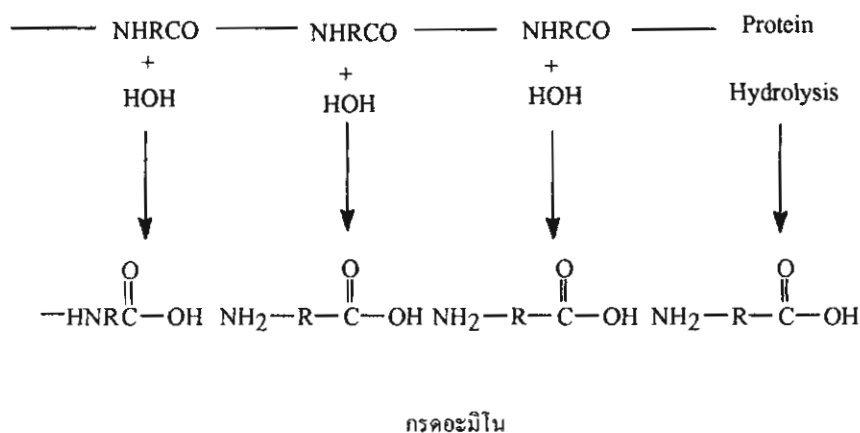
คาร์โบไฮเดรต ส่วนใหญ่ที่อยู่ในเซรัมได้แก่ คิวบราซิ-โทล ซึ่งแบคทีเรียย่อยให้เป็นกรดได้ดังสมการ กรดไขมันที่เกิดขึ้นจะทำให้น้ำยางเสียเสถียรภาพ



รูปที่ 2.8 สมการการย่อยสลายคาร์โบไฮเดรตโดยแบคทีเรีย[5]

4. การสลายตัวของโปรตีน

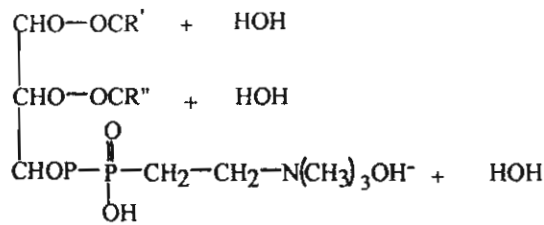
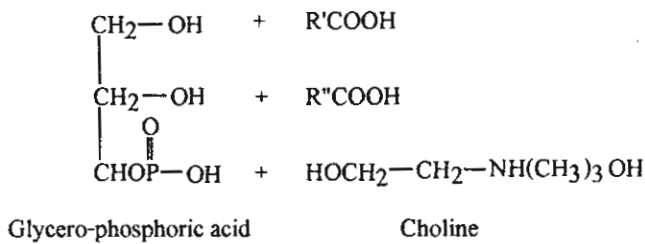
ในน้ำยางมีน้ำย่อยที่เรียกว่า ไฮโดรเลส (Hydrolase) น้ำย่อยตัวนี้จะช่วยให้โปรตีนสลายตัวในน้ำได้ดีขึ้น กรดอะมิโนเหล่านี้จะค่อย ๆ เกิดขึ้น และจะมีปริมาณไม่มาก ไม่ได้ทำให้กรดไขมันที่ระเหยได้สูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำยางขึ้น



รูปที่ 2.9 สมการสลายตัวของโปรตีนในน้ำยางพารา[5]

5. การสลายตัวของไลปิด

ไลปิดก็เช่นเดียวกันกับ โปรตีน คือ สลายตัวด้วยน้ำ โดยมีเอนไซม์เป็นตัวช่วย ดังนี้

 α -lecithin

รูปที่ 2.10 การสลายตัวของไลปิด [5]

การสลายตัวเกิดขึ้นช้ามากหลายชั่วโมงภายหลังจากกริด จะทำให้ค่า KOH No. ในน้ำยางขึ้นสูง คือ โมเลกุลของน้ำที่หุ้มห่ออยู่รอบ ๆ อนุภาคยางเป็นตัวกลางช่วยกีดกันไม่ให้อนุภาคยางมารวมตัวกัน

น้ำยางเมื่อเสียความคงสภาพการเป็นน้ำยางจะด้วยวิธีการใด ๆ ก็ตาม ส่วนของอนุภาคยางจะรวมตัวหรือจับตัวเกาะกันเป็นก้อน และแยกตัวออกจากส่วนที่เป็นเซรุ่มในที่สุดอาจแบ่งความแตกต่างของลักษณะการจับตัวของอนุภาคยางได้เป็น 3 แบบ คือ แบบแรกเรียกว่า เจล (gel) และกระบวนการที่ก่อให้เกิดเจล (gelation) โดยกระบวนการนี้ น้ำยางจะค่อย ๆ เปลี่ยนสภาพของของเหลวไปเป็นสภาพกึ่งแข็งของเจลที่มีขนาดและรูปร่างเท่ากับเมื่อแรกก่อนเกิดการเปลี่ยนแปลง เมื่อเกิดกระบวนการเกิดเจลแล้วมักจะมีการบวนการตามมาคือ กระบวนการหดตัวของเจลซึ่งส่วนของเซรุ่มจะถูกบีบออกในปริมาณที่เท่ากับปริมาณของการหดตัวของเจล กระบวนการบีบเซรุ่มออกมานี้เรียกว่า ซิเนอริซิส (syneresis) แบบที่สองของการจับตัวของอนุภาคยางเรียกว่ากระบวนการโคแอกกูเลชัน (coagulation) การจับตัวแบบนี้ ก้อนยางจะแยกออกจากส่วนของน้ำและลอยอยู่ในตัวกลาง ก้อนยาง (coagulum) นี้ประกอบด้วยส่วนของอนุภาคโพลีเมอร์ที่รวมตัวกันและมีส่วนของเซรุ่มซึ่งติดอยู่ภายในก้อนยาง แบบสุดท้ายของการจับตัวแบบนี้จะก่อให้เกิดเม็ดเล็ก ๆ ของก้อนยางที่จับตัวเป็นจำนวนมากมาย ซึ่งอาจกล่าวได้ว่ากระบวนการ ฟล็อกคิวเลชัน ก็คือ micro coagulation นั่นเอง ความต้องการให้น้ำยางจับตัวแบบต่าง ๆ ดังกล่าวนี้นั้นขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการผลิตวัสดุต่าง ๆ

อนึ่ง ความไม่คงตัวของน้ำยางเกิดขึ้นได้โดยสารเคมีที่ทำให้ น้ำยางจับตัว (chemical coacervants) หรือโดยตัวการที่ก่อให้เกิดความไม่คงตัวทางกายภาพ (physical destabilizing agencies)

น้ำยางข้น

น้ำยางสดจากต้นยางโดยปกติมีปริมาณเนื้อยางแห้งเพียงประมาณ 25-45 % หรือเฉลี่ยเพียง 35% นอกนั้นเป็นน้ำเสียส่วนใหญ่ ซึ่งไม่เป็นการประหยัดเลยหากจะต้องทำการขนย้ายน้ำยางสดจากสวนไปสู่โรงงานที่อยู่ใกล้ ๆ วิธีการปฏิบัติกันในกรณีต้องการใช้ยางในสถานะของน้ำยางไปผลิตเป็นวัตถุสำเร็จรูป คือ ทำให้น้ำยางมีความเข้มข้นเป็น 60% เนื้อยางแห้ง ซึ่งการขนย้ายน้ำยางในสถานะที่เข้มข้นย่อมประหยัดและได้เปรียบกว่า และกรรมวิธีการผลิตวัตถุสำเร็จรูปบางประเภทที่ต้องใช้น้ำยางเป็นวัตถุดิบเป็นต้นว่า กรรมวิธีจุ่มแบบพิมพ์ (dipping process) เช่น การผลิตลูกโป่ง ผลิตภัณฑ์มือยาง กรรมวิธีผลิตยางฟองน้ำ (latex foam process) กรรมวิธีผลิตผ้าใบฉาบด้วยยาง (coating) กรรมวิธีเหล่านี้ต้องใช้น้ำยางที่มีเนื้อยางอย่างน้อยไม่ต่ำกว่า 60% และอีกประการหนึ่งน้ำยางจะเข้มข้นจะให้ผลผลิตที่มีคุณภาพสม่ำเสมอดีกว่าน้ำยางสด ทั้งนี้เนื่องด้วยสารพวกที่ไม่ใช่ยางข้นจะให้ผลผลิตที่มีคุณภาพสม่ำเสมอดีกว่าน้ำยางสดเข้มข้น การกล่าวถึงยางธรรมชาติในความหมายของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตวัตถุสำเร็จรูปมักจะหมายถึงน้ำยางในลักษณะที่ทำให้ข้นแล้ว

การผลิตน้ำยางข้น

วิธีการสำคัญสำหรับการผลิตน้ำยางข้น คือ วิธีระเหยน้ำ (evaporation) วิธีการทำให้เกิดครีม (creaming) วิธีการปั่น (centrifuging) และวิธีการแยกด้วยไฟฟ้า (electro-decantation) วิธีแรกเป็นการระเหยหรือแยกเอาแต่ส่วนของน้ำเพียงอย่างเดียวออกจากน้ำยาง ดังนั้นปริมาณของสารที่ไม่ใช่ยาง (ที่นอกเหนือจากน้ำ) จึงยังคงอยู่ในน้ำยางข้นและอนุภาคขนาดต่าง ๆ ของยางที่กระจายอยู่ในน้ำยางก็ยังคงเหมือนเดิม ส่วนวิธีการ 3 วิธีหลังนั้นเป็นวิธีการที่มีการแยกเอาบางส่วนของสารอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ยางออกจากอนุภาคต่าง ๆ ของยางที่กระจายอยู่ในน้ำยางที่ข้นแล้วนี้จะต่างไปจากที่อยู่ในสถานะน้ำยางก่อนทำให้ข้น เพราะอนุภาคขนาดเล็ก ๆ ได้ถูกแยกออกกระหว่างกรรมวิธีการผลิตน้ำยางข้น วิธีการผลิตน้ำยางข้นทั้ง 4 วิธีดังกล่าว วิธีการปั่นน้ำยางเป็นวิธีที่นิยมและทำกันเป็นการค้ามากที่สุด ส่วนวิธีอื่น ๆ นั้นจำกัดการใช้ เพราะเป็นวิธีที่ค่อนข้างยุ่งยาก ล้มเปลืองเวลาจึงไม่ค่อยนิยมทำเป็นการค้า

1. วิธีการระเหยน้ำ น้ำยางสดจากสวนก่อนการทำให้ข้น โดยวิธีการระเหยน้ำจะต้องเติมสารที่ทำให้ให้น้ำยางคงตัว (Stabilizers) เช่น potassium soap เสียก่อนการระเหยน้ำออกจากน้ำยางจะเกิดขึ้นภายในถัง หรือภาชนะที่หมุนได้รอบ ๆ แกนตามแนวนอนและถังนี้ถูกให้ความร้อนรอบ ๆ ถัง โดยวิธีการระเหยน้ำจากน้ำยางจะทำให้ได้น้ำยางข้นซึ่งมีส่วนประกอบโดยประมาณ คือ ส่วนของแข็งทั้งหมด 75% ปริมาณเนื้อยาง 60% caustic potash 1.5% และสารพวกช่วยทำให้น้ำยางคงตัวกับสาร โปรตีนและสารอื่น ๆ อีก 13.5% น้ำยางข้นที่ได้จากวิธีนี้มีความคงสภาพเป็นน้ำยางดีมาก จึงเหมาะสำหรับการที่จะต้องขนย้ายน้ำยางไปไกล ๆ และเหมาะกับการนำไปผลิตวัตถุสำเร็จรูปประเภทที่ต้องใส่พวกสารเติม (filler) จำนวนมาก ตัวอย่างเช่น การผลิตกาว (latex-cement) น้ำยางนี้เหมาะหรือใช้ได้ผลดีกรณีที่ต้องการนำไป

ทำการประเภที่สารอื่น ๆ ที่อยู่ในน้ำยางและคุณสมบัติความคงตัวของน้ำยางเป็นข้อได้เปรียบกับการทำกาวนั้น ๆ

2. วิธีการทำให้เกิดครีม น้ำยางธรรมชาติไม่ว่าอยู่ในสถานะสด (fresh latex) หรือสถานะที่มีการใส่สารเคมีรักษาสภาพน้ำยางแล้ว (preserved latex) ประกอบด้วยระบบของสารละลายคอลลอยด์แบบอิมัลชันของอนุภาคยางที่แขวนลอยอยู่ในตัวกลางที่เรียกว่าเซรัม อนุภาคเล็ก ๆ ของยางที่แขวนลอยอยู่ในเซรัมแสดงการเคลื่อนไหวแบบ Brownian (เคลื่อนไหวในทุกทิศทางอย่างไม่เป็นระเบียบ) และการเคลื่อนไหวของอนุภาคยางในน้ำยางสดจะรวดเร็วกว่าของน้ำยางที่ใส่สารเคมีรักษาสภาพและเนื่องจากอนุภาคของยางเบากว่าเซรัม ดังนั้นอนุภาคยางเหล่านี้จึงมีแนวโน้มลอยตัวขึ้นสู่ผิวของน้ำยางได้ ดังนั้นการแยกตัวของอนุภาคยางเกิดเป็นลักษณะครีมอยู่ผิวหน้าน้ำยางจะรวดเร็วขึ้นถ้าอนุภาคยางมีลักษณะใหญ่ขึ้น และอนุภาคยางจะใหญ่ขึ้นได้เมื่อเติมสารพวกคอลลอยด์ที่จะไปทำหน้าที่พอกหรือเคลือบอนุภาคยาง สารนี้จึงเรียกว่าเป็นตัวการทำให้เกิดครีม-creaming agent ตัวอย่างสารพวกนี้ได้แก่ sodium alginate, locust bean gum, gum Karaya, gum tragacanth เป็นต้น อนึ่งการผลิตน้ำยางข้นโดยวิธีทำให้เกิดครีมในปัจจุบันไม่นิยมผลิตกัน เพราะยุ่งยากและสิ้นเปลืองเวลา แต่เป็นที่น่าสนใจเกี่ยวกับวิธีการนี้ คือสามารถทำให้น้ำยางข้นที่ผลิตโดยวิธีนี้บริสุทธิ์ และมีโปรตีนน้อยลงเมื่อผ่านกรรมวิธีการทำให้เกิดครีมซ้ำหลาย ๆ ครั้ง

3. วิธีการปั่น เครื่องปั่นน้ำยางข้นมีอยู่ด้วยกันหลายแบบ แต่แบบที่นิยมใช้กันคือ de Laval หลักการสำคัญของเครื่องประกอบด้วยการปั่นแยกน้ำยางโดยอาศัยเครื่องปั่นความเร็วสูงประมาณ 6,000 รอบ/นาที และภายในของเครื่องประกอบด้วยชุดของจานแยก (separator discs) วางซ้อน ๆ กัน จำนวนหลายชั้น น้ำยางจะถูกป้อนเข้าเครื่องผ่านที่จ่ายน้ำยาง (distributor) ลงสู่ก้นถังปั่น และจากนี้ น้ำยางจะไหลผ่านชุดของจานแยกซึ่งมีรูให้น้ำยางไหลเข้าสู่ภายในของถังปั่น โดยเนื้อยางจะไหลเข้าหาศูนย์กลางของเครื่องปั่นและลอยตัวไหลออกตามทางออกด้านบนสู่ถังเก็บน้ำยางข้น ส่วนอีกส่วนหนึ่งของน้ำยางที่ถูกแยกจะเป็นส่วนของหางน้ำยาง (skim latex) ไหลออกจากศูนย์กลางของเครื่องปั่นสู่ทางออกของหางน้ำยางและลงสู่ถังเก็บหางน้ำยาง

ปกติ น้ำยางข้นที่ได้จากเครื่องปั่นจะมีความเข้มข้นประมาณ 60% เนื้อยางแห้งเครื่องปั่นน้ำยางขนาดเล็ก ๆ สามารถผลิตน้ำยางข้นได้วันละ 200-250 แกลลอน และเครื่องขนาดใหญ่อาจผลิตน้ำยางข้นได้ถึงวันละ 450 แกลลอน และปกติการเดินเครื่องปั่นจะทำติดต่อกันได้อย่างมากครั้งละเพียง 6 ชั่วโมง เพราะจำต้องหยุดเครื่องเพื่อทำความสะอาดเครื่องปั่น ถังพวคคม (sludge) ที่ติดเครื่องปั่น

4. วิธีการแยกด้วยไฟฟ้า จากการที่ในสถานะของน้ำยางสด อนุภาคยางที่แขวนลอยในเซรัมต่างถูกห่อหุ้มด้วยอนุโมล คาร์บอกซิเลต (carboxylate ion) ที่มีประจุเป็นลบ ดังนั้นจึงสามารถที่จะอาศัยไฟฟ้าเข้ามาช่วยในการแยกส่วนของเนื้อยางจากส่วนของเซรัมได้ โดยวิธีการจุ่มขั้วไฟฟ้าที่เป็นขั้วบวก ลงในน้ำยางที่ได้เติมสารเคมีช่วยทำให้น้ำยางคงตัวไว้แล้ว อนุภาคยางซึ่งมีประจุเป็นลบจะค่อย ๆ เคลื่อนไปรวมอยู่ทางขั้วบวกและลอยตัวสูงขึ้นไปสู่ผิวหน้าของน้ำยางในที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากความหนาแน่นของ

อนุภาคยาค่ำกว่าความหนาแน่นของเซรุ่ม อย่างไรก็ตามวิธีการทำน้ำยางให้ข้นโดยใช้ไฟฟ้านี้เป็นวิธีที่ยุ่งยากและไม่ประหยัดจึงไม่เป็นที่นิยมกัน

สารเคมีรักษาสภาพน้ำยาง

น้ำยางเมื่อไหลออกจากต้นจะมีแบคทีเรียในอากาศและในสภาพแวดล้อมลงปะปนใช้สารที่ไม่ใช่อนุภาคยาค่ำเป็นอาหาร สารที่เป็นอาหารของแบคทีเรียส่วนใหญ่เป็นน้ำตาลกลูโคสและฟรุคโตส แม้ว่าโดยปกติจะมีน้ำตาลเหล่านี้อยู่ในน้ำยางในปริมาณน้อย แต่เนื่องจากในน้ำยางมีน้ำตาลซูโครสประมาณ 0.1 ถึง 1.0% ที่สามารถเปลี่ยนเป็นกลูโคสและฟรุคโตสได้โดย enzyme invertase ที่มีอยู่ในน้ำยาง ปฏิกริยาที่แบคทีเรียย่อยสลายน้ำตาลนั้นจะเกิดกรด ซึ่งเป็นกรดไขมันที่ระเหยได้ (volatile fatty acid ; VFA) พวก formic acetic และ propionic เป็นส่วนใหญ่และมีกรดอื่น ๆ บ้างเล็กน้อย นอกจากนี้สารพวก lipid ที่มีอยู่ในน้ำยางเกิดการ hydrolyse กลายเป็นกรดไขมัน กรดไขมันนี้จะเข้าไปแทนที่สารโปรตีนที่หุ้มอนุภาคยาค่ำอยู่และกรดไขมันเหล่านี้ยังทำปฏิกริยากับโลหะไอออนพวก แคลเซียม แมกนีเซียม ที่มีอยู่ในน้ำยางทำให้เกิดการเสียสถานะการเป็นของเหลวของน้ำยาง ดังนั้นน้ำยางสดที่เดิมตอนไหลออกจากต้นมีสถานะเป็นเบสจะถูกเปลี่ยนสถานะเป็นกรดได้หากไม่มีการเติมสารเคมีรักษาน้ำยาง (preservatives) สภาวะเป็นกรดจะทำให้ชั้นโปรตีนที่ห่อหุ้มอนุภาคยาค่ำอยู่ ทำให้น้ำยางเสียความคงสถานะเป็นของเหลวโดยความหนืดเพิ่มขึ้น และจับตัวเป็นเม็ดเล็ก ๆ ที่ชาวบ้านเรียกว่า “เม็ดพริก” มีกลิ่นเหม็นของสารบูดเน่าภายในเวลาเพียงไม่กี่ชั่วโมงนับจากไหลออกจากต้นยาง การจับตัวดังกล่าวเรียกว่า “การจับตัวที่เกิดตามธรรมชาติ” (natural or spontaneous coagulation) ซึ่งการเกิดช้าหรือเร็วขึ้นขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น สภาพแวดล้อม อุณหภูมิ และคุณสมบัติการคงตัวของน้ำยางแต่ละพันธุ์ เป็นต้น อย่างไรก็ตามเมื่อน้ำยางเกิดเสียสถานะความเป็นของเหลวไปแล้วจะเกิดการแยกส่วนเป็นก้อนโคแอกกูลัมกับส่วนที่เป็นน้ำ คือ เซรุ่ม และมีกลิ่นบูดเหม็น ดังนั้นเพื่อป้องกันมิให้น้ำยางจับเป็นก้อนก่อนเวลาที่ต้องการหรือเพื่อให้ น้ำยางอยู่ในสภาพของเหลวตามที่ ต้องการ จึงจำเป็นต้องเติมสารเคมีรักษาสภาพน้ำยาง

สารเคมีที่จะใช้รักษาสถานะของเหลวของน้ำยางควรมีคุณสมบัติดังนี้

1. สามารถทำลายแบคทีเรียหรือลดการทำงานและการเจริญเติบโตของแบคทีเรียได้
2. ควรส่งเสริมสถานะการเป็นสารแขวนลอยของน้ำยาง โดยการเพิ่มประจุและเพิ่มพลังงานระหว่างอนุภาคยาค่ำกับส่วนที่เป็นน้ำ (rubber-water interface) และเนื่องจากสภาพโดยธรรมชาติของน้ำยางเป็นเบส ดังนั้นสารเคมีรักษาสภาพน้ำยางควรเป็นเบสด้วย
3. ควรเป็นสารที่ทำให้พวกอนุผลของโลหะหนักไม่่วงไวต่อการเกิดปฏิกริยา โดยการขัดขวางการเกิดปฏิกริยา หรือโดยการทำให้เกิดการตกตะกอนเป็นเกลือที่ไม่ละลายน้ำก็ได้ เนื่องจากอนุผลของโลหะเป็นตัวการสำคัญในการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย และไอออนโลหะเองโดยเฉพาะแมกนีเซียมทำให้น้ำยางเกิดการเสียสภาพ

4. สามารถระงับการทำงานของเอนไซม์ที่มีอยู่ในน้ำยาง

5. นอกจากสมบัติข้างต้นแล้ว สารรักษาสภาพของน้ำยางควรมีคุณสมบัติที่ไม่เป็นพิษต่อทั้งคนและทั้งเนื้อยาง ไม่ควรทำให้สีของน้ำยางหรือสีของยางที่แห้งแล้วเปลี่ยนแปลง ไม่ควรมีกลิ่นรุนแรงและไม่ควรก่อให้เกิดปัญหายุ่งยากต่อกระบวนการนำน้ำยางไปแปรรูปเพื่อใช้งาน มีราคาถูกลงและขนย้ายได้สะดวก

2.1.3 Chlorinated Natural Rubber (CNR)[6]

ในอดีตที่ผ่านมา CNR เป็นวัสดุ modified rubber ที่ถูกนำมาใช้เป็นสารในอุตสาหกรรมการผลิตสีและกาว ซึ่ง CNR เตรียมได้จากการผ่านแก๊สคลอรีนเข้าไปในสารละลายเจือจางของยางในตัวทำละลายอินทรีย์ อย่างไรก็ตามยังมีการพัฒนาความเป็นไปได้ที่จะทำปฏิกิริยา Chlorination ยางธรรมชาติและพอลิเมอร์ไม่อิมิตัวอื่นๆในรูปแบบของ latex โดยใช้โมเลกุลของคลอรีนซึ่งมีคลอรีนซึ่งมีข้อดีและหลักการคือ

1. น้ำหนักเริ่มต้นของพอลิเมอร์ที่จะทำ Chlorination มีค่าสูงกว่าใน solution process เพราะการทำคลอรีนชัน ไม่จำเป็นต้องอาศัยการละลายตัวของอะตอมใดๆจากสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ และน้ำหนักโมเลกุลยังมีค่าสูงระหว่างการทำปฏิกิริยาคลอรีนชัน
2. ปฏิกิริยาคลอรีนชันสามารถทำได้แม้ความเข้มข้นของพอลิเมอร์สูงๆและได้ผลดีกว่าการทำปฏิกิริยาในสารละลาย
3. การทำปฏิกิริยาในรูปแบบ latex นี้มีปัญหาด้านการกระจายความร้อนน้อยกว่าการทำปฏิกิริยาในสารละลาย เพราะความหนืดของระบบปฏิกิริยานี้น้อยกว่า ระบบที่ทำคลอรีนชันในสารละลาย
4. ระบบของปฏิกิริยา Chlorination เหมาะกับสภาพของน้ำยางซึ่งอยู่ในรูปของคอลลอยด์เสถียร

อย่างไรก็ตามการเข้าทำปฏิกิริยาของโมเลกุลของคลอรีนบางชนิดไม่แน่ชัด แต่มีการสันนิษฐานว่าปฏิกิริยาคลอรีนชันน่าจะเป็นปฏิกิริยาการเติมคลอรีนเข้าไปในส่วนที่เป็น Olefinic บนโมเลกุลของยาง

กระบวนการสังเคราะห์ CNR สามารถทำได้จากปฏิกิริยา Chlorination โดยมีกระบวนการสังเคราะห์ดังที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมได้แก่ วิธีการทำ Chlorination ที่ทำได้โดยให้ คลอรีนทำปฏิกิริยากับน้ำยางธรรมชาติโดยตรงและกระบวนการสังเคราะห์จากการละลายยางในตัวทำละลาย CCl_4 แล้วผ่านแก๊สคลอรีนเข้าไปทำปฏิกิริยาแต่วิธีการนี้ใช้ในกรณีที่ต้องการสังเคราะห์ให้ได้ CNR ในปริมาณมากๆ แต่มีข้อจำกัดเนื่องจากความหนืด ในการทำปฏิกิริยา chlorination ในสารละลาย rubber (4 – 6% concentration) จะทำให้ได้ CNR ที่มีปริมาณคลอรีน 65 – 68% ส่วน HCl ที่เหลือจะถูกดูดซับออกและล้างด้วยสารละลายเบสเจือจาง จนกระทั่งสารละลายปราศจากคลอรีนจาก HCl ที่มากเกินไป จากนั้น

มาก เนื่องจากมีราคาไม่แพง ความหนาแน่นต่ำ จึงทำให้ได้ชิ้นงานที่เบา ชิ้นงานมีความแข็งแรงปานกลาง ใช้ทำผลิตภัณฑ์ เช่น บรรจุภัณฑ์ที่มีความคงตัว(dimensional stable packing) บรรจุภัณฑ์ของบอร์ดคอมพิวเตอร์ และใช้บรรจุสินค้าที่ต้องการโชว์ให้เห็นตัวสินค้าภายใน(Point -of - purchase displays) เป็นต้น

เทอร์พอลิเมอร์ของอะคริโลไนไตรล์ บิวตะไดอินและสไตรีน (ABS) เป็นโคพอลิเมอร์ของสไตรีนชนิดหนึ่ง ใช้ทำผลิตภัณฑ์ที่ต้องการให้ทนต่อแรงกระแทกที่อุณหภูมิห้อง เช่น ตกแต่งภายในตู้เย็น และเครื่องทำน้ำแข็ง ทำส่วนประกอบของเฟอร์นิเจอร์ และอุปกรณ์ตกแต่งภายในบ้าน เป็นต้น

เรซินไนไตรล์ (PAN) ใช้ทำบรรจุภัณฑ์เนื่องจากมีสมบัติในการกั้นอากาศ (barrier properties) ดีมาก

พลาสติกอะคริลิก เช่น PMMA เป็นต้น นิยมทำผลิตภัณฑ์ที่มีความใส

พลาสติกเซลลูโลสติก เช่น เซลลูโลสอะซิเตต (CA) และเซลลูโลสอะซิโตนไบไทเรต (CAB) เป็นต้น ทำผลิตภัณฑ์ที่มีความใส

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ใช้ทำบรรจุภัณฑ์ชนิดต่างๆ กล่อง และถาดใส่ของ (material handing tray) เป็นต้น ข้อดีของ HDPE ในการทำการแปรรูปด้วยเทอร์โมฟอร์ม คือ ราคาถูก ความหนาแน่นต่ำ น้ำหนักเบา ทนต่อแรงกระแทกดีมาก และทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงชนิดน้ำหนักโมเลกุลสูง (HMW-HDPE) ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติคล้ายกับกรณี HDPE แต่มีความแข็ง (stiffness) และทนต่อแรงกระแทกที่อุณหภูมิห้องดีกว่า นิยมใช้ทำถาดที่ใช้ในทางการแพทย์ ถาดใส่ของ เป็นต้น

พอลิโพรไพลีน (PP) และ พอลิเอไมด์ (PA) เป็นพลาสติกในกลุ่มกึ่งผลึกจึงต้องควบคุมอุณหภูมิในการแปรรูปอย่างละเอียด เนื่องจากมีช่วงอุณหภูมิในการอ่อนตัวแคบ PP ที่นิยมใช้ในการแปรรูปด้วยเทคนิคเทอร์โมฟอร์มมากที่สุดคือ PP ที่ผสมด้วย Talc เนื่องจากเป็นวัสดุที่ให้ความแข็งแรง ทนแรงกระแทกได้ดีมาก นอกจากนี้ยังสามารถทำผลิตภัณฑ์ได้หลายสี และมีอุณหภูมิการบิดตัว (heat distortion temperature) สูงมาก นิยมใช้วัสดุชนิดนี้ในการใช้ในที่อุณหภูมิสูง

พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) ผลิตภัณฑ์เทอร์โมฟอร์มจากวัสดุชนิดนี้มีสมบัติเด่นคือ ทนแรงกระแทกสูง แข็ง มีความเป็นมันสูง ทนสารเคมี ทนไฟ และทนต่อสภาวะอากาศภายนอก จึงเหมาะแก่การผลิตประตูห้องน้ำ ปูพื้นสระว่ายน้ำ ถังใส่สารเคมี อุปกรณ์ใช้นอกบ้าน กล่องบรรจุคอมพิวเตอร์ เป็นต้น

เครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการ Thermoforming

1. Machine safety

2. Basic machinery requirement มีอุปกรณ์ที่ใช้แบ่งออกได้ดังนี้

Uniform heat เป็นอุปกรณ์ปรับความร้อนที่ช่วยให้มีความร้อนสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น sheet เป็นส่วนที่มีความสำคัญ ในกรณีที่ sheet มีความหนามากกว่า 0.030 นิ้ว (0.76

มิลลิเมตร) ควรที่จะต้องมีแผงความร้อนที่มีทั้งด้านบนและด้านล่างที่ประกบกันเหมือนแซนวิช โดยจะมีการปรับอุณหภูมิให้เหมาะสมกับชิ้นงาน ซึ่งวิธีการ heating นี้ จะมีการถ่ายเทความร้อนแบบการแผ่รังสีความร้อน

Vacuum/compressed air system เป็นเครื่องมือที่ทำหน้าที่ดูดหรือเป่าอากาศ ซึ่งต้องตั้งให้อยู่ใกล้กับ mold เนื่องจากจะต้องมีแรงลมอย่างเพียงพอ แต่ในระบบที่ใช้ vacuum จะไม่สามารถทำให้มีรูปร่างเป็นฉากได้ ทำได้เพียงแค่รูปทรงโค้งงอหรือเป็นมุม 45 องศา

Sheet film clamps ใช้สำหรับยึดแผ่น film ในขณะที่ทำการขึ้นรูปในกระบวนการ vacuum thermoforming

Forming platens สามารถเคลื่อนที่เข้าออกได้ตามต้องการ โดยจะต้องมีแรงที่เพียงพอสำหรับใช้ในการดึง mold เข้าหรือออกในขณะที่แผ่น sheet ยังร้อนอยู่ และใช้แรงดันลมในการขึ้นรูปให้เป็นไปตามที่ต้องการ

Control system เป็นสิ่งจำเป็นมากในกระบวนการ vacuum thermoforming เนื่องจากจะต้องมีระบบ heating และ cooling ที่ดีสำหรับควบคุมการขึ้นรูปของแผ่น sheet ให้เป็นไปตามต้องการ

3. Sheet-fed single- station machine

4. Roll-fed single-station machine เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับงานด้านบรรจุภัณฑ์และเกี่ยวข้องกับงานที่มีความบางของแผ่น sheet มากๆ มีหลักการ คือ จะมีการส่งชิ้นงานมาจาก roll และทำการตัดชิ้นงานด้วยที่ตัดกระดาษ ซึ่งจะต้องทำหลังจากทำการขึ้นรูป เป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ ที่ไม่มีกำลังการผลิตที่สูงมากนัก

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการไหลของวัสดุพอลิเมอร์หลอมเหลวและการถ่ายเทความร้อนของกระบวนการ Thermoforming

พอลิเมอร์หลอมแสดงพฤติกรรมสอดคล้องกับการไหลแบบของไหลแบบนิวโตพลาสติก ซึ่งเป็นการไหลที่ไม่ขึ้นกับเวลา แต่เป็นที่ยอมรับกันทั่วไปว่า พอลิเมอร์หลอมแสดงสมบัติเป็นของไหลที่มีสมบัติขึ้นกับเวลาด้วย กล่าวคือ มีสมบัติการไหลเป็นแบบของไหลวิสโคอีลาสติกด้วย เนื่องจากมีปรากฏการณ์หลายอย่างที่บ่งชี้ถึงการมีสมบัติการไหลของวิสโคอีลาสติกของพอลิเมอร์หลอม เช่น การบวมพองที่หัวดาย (Die Swell หรือ Extrudate Swell) การบวมพองในขณะรีด (Calender Swell) และการเกิด Frozen-in ในกระบวนการฉีดพอลิเมอร์

พอลิเมอร์หลอมเป็นของไหลนิวโตพลาสติก

การประเมินสมบัติข้างต้นของพอลิเมอร์หลอม นิยมใช้สมการยกกำลังเป็นเกณฑ์ในการพิจารณา ดังนั้นในกรณีนี้ พอลิเมอร์หลอมจะมีพฤติกรรมการไหลแบบของไหลนิวโตพลาสติก เส้นกราฟของความหนืดเทียบกับอัตราเฉือน ในสเกล log-log มีลักษณะเป็นเส้นตรงที่มีความความหนืดต่ำมาก

และสูงมาก กล่าวได้ว่า ที่สองช่วงของอัตราเฉือนนี้ พอลิเมอร์หลอมมีสมบัติเป็นของไหลนิวทอเนียน ค่าความหนืดเฉือนที่ค่าอัตราเฉือนต่ำมาก เรียกว่า ค่าความความหนืดเฉือนที่มีอัตราเฉือนเป็นศูนย์ (Zero shear viscosity) ส่วนค่าความหนืดที่มีอัตราเฉือนสูงมาก เรียกว่า ค่าความหนืดเฉือนที่มีอัตราเฉือนอนันต์ (Infinity shear viscosity) ช่วงกลางของเส้นกราฟของความหนืด ค่าความหนืดเฉือนมีค่าลดลงเมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้น ในช่วงกลางนี้เอง พอลิเมอร์หลอมจะแสดงพฤติกรรมเป็นไปตามสมการยกกำลัง และเป็นของไหลซิวโคพลาสติก

สมบัติของพอลิเมอร์หลอม ในช่วงที่มีสมบัติเป็นของไหลซิวโคพลาสติก ซึ่งอธิบายด้วยสมการยกกำลัง สอดคล้องกับการจัดเรียงตัวของโมเลกุลระหว่างที่เกิดการไหล กล่าวคือ ขณะที่อัตราเฉือนเพิ่มขึ้น โมเลกุลจะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ไปในแนวเดียวกัน เพื่อให้โมเลกุลเคลื่อนผ่านโมเลกุลอื่นๆ ได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้การต่อต้านต่อการไหล (ความหนืด) ลดลงตามค่าอัตราเฉือนที่เพิ่มขึ้นจากการสังเกตเส้นกราฟของความหนืด ถ้าพอลิเมอร์หลอมไม่มีสมบัติการไหลเป็นของไหลซิวโคพลาสติก กล่าวคือ ความหนืดไม่ลดลงตามอัตราเฉือน จะทำให้การแปรรูปของพอลิเมอร์ทำได้ยากมาก เนื่องจากค่าความหนืดที่สูง แต่เป็นที่โชคดีที่เมื่ออัตราเฉือนมีค่ามาก ค่าความหนืดของพอลิเมอร์หลอมลดลง จึงทำให้สามารถแปรรูปได้ง่ายขึ้น การมีสมบัติเป็นของไหลซิวโคพลาสติกในพอลิเมอร์หลอม มีข้อดีหลายประการดังนี้

1. ทำให้ลดพลังงานที่ใช้ในการแปรรูป
2. สามารถผลิตชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ขึ้น
3. สามารถใช้เครื่องจักรที่ต้องการกำลังต่ำได้
4. เพิ่มปริมาณการผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ได้ดี
5. ความดันในการแปรรูปต่ำ
6. สามารถให้พอลิเมอร์หลอมไหลเข้าเบ้าที่ซับซ้อนได้

การถ่ายเทความร้อนที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ Thermoforming มีอยู่ด้วยกัน 3 วิธี คือ

1. การพาความร้อน (Convection)
2. การนำความร้อน (Conduction)
3. การแผ่รังสีความร้อน (Radiation)

การพาความร้อน (Convection) การพาความร้อนในกระบวนการ Thermoforming จะเป็นไปอย่างช้าๆ และเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นหลังสุด การถ่ายเทความร้อนโดยการพาไปสู่อีกวัสดุหนึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อวัสดุมีการสัมผัสกับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ซึ่งจะเป็นไปตามกฎของนิวตัน (Newton's law of cooling)

$$q = hA\Delta T$$

เมื่อ hA คือ convective heat transfer coefficient

ΔT คือ temperature gradient ระหว่างผิวหน้าของแผ่นซีทและอากาศหรือลมร้อน (hot air)

การพาความร้อนสำหรับกระบวนการ Thermoforming คือ การแพร่กระจายของอากาศหรือลมร้อนในเตาอบ ซึ่งเราจะต้องควบคุมอุณหภูมิภายในเตาอบให้คงที่ ในช่วงการขึ้นรูปของวัสดุที่ใช้กระบวนการ Thermoforming อากาศจะเป็นฉนวนความร้อนที่ดีและพลาสติกจะทำการดูดซับความร้อนอย่างช้าๆ นั่นเป็นเหตุผลว่าทำไม กระบวนการนี้จึงเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นอย่างช้าๆ specific heat ของวัสดุแต่ละชนิดจะเป็นค่าเฉพาะตัวของวัสดุ ซึ่งจะส่งผลต่อความร้อนของทั้งระบบ

ข้อดีของการพาความร้อนก็คือ ความร้อนที่วัสดุได้รับนั้นจะค่อนข้างสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่นพลาสติกและสามารถทำให้ที่ผิวหน้าของแผ่นพลาสติกมีความร้อนอยู่สูงกว่าอุณหภูมิของเตาอบ ซึ่งจะใช้ในงานที่มีความต้องการให้มีความร้อนมากๆ เช่นในการทำ foam sheet, solid sheet ที่มีความหนาหลายๆ ซึ่งการควบคุมอุณหภูมิให้อุณหภูมิและเป็นไปตามที่ต้องการนั้นทำได้ยาก ที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นพลาสติกมีโอกาสที่จะเกิดการเสียหายได้ง่ายหากเราให้ความร้อนสูงเกินไปแต่ที่อุณหภูมิสูงๆ จะมี cycle time ที่เร็วกว่าการขึ้นรูปพลาสติกปกติ

การนำความร้อน (Conduction) การนำความร้อนจะเกิดขึ้นเร็วกว่าการพาความร้อนแต่ช้ากว่าการแผ่รังสีความร้อน การถ่ายเทความร้อนโดยวิธีการนำความร้อนจะเป็นไปตามเงื่อนไขของ Fourier's law

$$q = -kA\partial T/\partial \lambda$$

เมื่อ q คือ rate of heat transfer

$\partial T/\partial \lambda$ คือ temperature gradient

A คือ พื้นที่

k คือ thermal conductivity หรือ “k” factor ซึ่งเป็นสมบัติที่ไม่ขึ้นกับรูปร่างของวัสดุ

แผ่น plate ที่ใช้เป็นตัวนำความร้อนในกระบวนการ Thermoforming ส่วนใหญ่ คือ electrically heated PTFE ซึ่งจะเคลือบอยู่ที่แผ่นอลูมิเนียม ความร้อนที่อยู่ที่แผ่นพลาสติกค่อนข้างที่จะสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น เมื่อเราใช้ electricity ผิวหน้าของแผ่นพลาสติกที่ใช้มีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมอัดประกบกันเหมือนแซนวิช ในการพาความร้อนแผ่น plate ที่ประกบกันอยู่จะต้องมีอุณหภูมิที่เหมือนหรือใกล้เคียงกัน การขึ้นรูปแผ่น sheet จะต้องป้องกันการเกิดการเสียหายที่ผิวหน้าและจะต้องได้รับความร้อนที่สม่ำเสมอกันมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่น sheet

สำหรับในกระบวนการ Thermoforming ในขั้นตอนของการป้อนแผ่น sheet แผ่นประกบที่มีลักษณะเหมือนแซนวิชจะทำหน้าที่ในการ preheat ก่อนที่จะเข้าไปในเครื่องอบที่เป็น single station rotary machine ซึ่งในส่วนนี้ความร้อนของทั้งวงจรจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว สำหรับวัสดุส่วนใหญ่ความร้อนของแผ่น plate จะอยู่ในช่วง $300^\circ\text{F}(149^\circ\text{C})$ เมื่อเทียบกับการให้ความร้อนโดยวิธีการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งจะมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง $900\text{--}1200^\circ\text{F}(482\text{--}649^\circ\text{C})$

ในงานบางประเภทมีการใช้เครื่อง extrude ในการผลิตแผ่น sheet ออกมาและไม่มีกระบวนการควบคุมความหนาของแผ่น sheet ให้จะให้ความร้อนที่สัมผัสกับแผ่น sheet นั้นใช้อุณหภูมิเดียวกันตลอดซึ่งมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในแผ่น sheet เกิด hot tensile strength ของวัสดุจำพวกเทอร์โมพลาสติก เมื่อแผ่น sheet ในส่วนที่ได้รับความร้อนจะเกิดการดึงยืด ซึ่งจะทำได้มากกว่าในส่วน cooler อย่างไรก็ตาม ถ้าความหนาของแผ่น sheet ไม่เท่ากันตลอดทั้งแผ่นแต่มีการให้อุณหภูมิเดียวกันตลอดแผ่น sheet ที่นำเข้าไปในตอนสุดท้ายของกระบวนการจะมี hot tensile strength ที่เหมือนกัน ผลก็คือ เมื่อเราใช้เทคนิค Thermoforming ในการดึงยืดแผ่น sheet มันจะดึงยืดได้สม่ำเสมอในทุกทิศทาง ซึ่งมันไม่ถูกต้องถ้ามีการเปลี่ยนแปลงความหนาจากปกติแต่เพราะว่าแผ่น sheet จะใช้อุณหภูมิโดยรวมทั้งกระบวนการเหมือนกัน จึงเป็นไปได้ยากมากที่แผ่น sheet จะขยายตัวอย่างทั่วถึงและเหมาะสมกันทั้งแผ่น sheet

การแผ่รังสีความร้อน (radiation) การแผ่รังสี คือ การถ่ายเทพลังงานระหว่าง 2 ส่วน ที่แยกกัน (ในกระบวนการ Thermoforming คือ ส่วนของแผ่น sheet และ การแผ่รังสีความร้อนที่ผิวหน้า) ที่มีอุณหภูมิต่างกัน โดยมีความหมายถึง คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ควบคุม โดยจะมีการใช้หลายส่วน มีการวัดอุณหภูมิ พลังงานที่แผ่กระจาย สิ่งหนึ่งที่มีความสำคัญในการแผ่รังสี คือ การได้มาซึ่งพลังงานจาก black body การแผ่รังสีตามทฤษฎีจะเกี่ยวข้องกับ spectrum แต่ส่วนสำคัญ คือ การวัดความเข้มของ Thermoformer ในช่วง visible และในช่วง infrared

Infrared ใช้กับงานที่เกี่ยวข้องกับความร้อน อย่างไรก็ตาม ความยาวคลื่นจะสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ใช้ในการแผ่รังสีเป็นจุดหลัก ซึ่งพื้นที่ส่วนนี้ได้รับความร้อนพอที่จะขึ้นรูปด้วยกระบวนการ Thermoforming ได้ อุณหภูมิที่แผ่ออกจากผิวนั้น ส่วนมากจะสามารถปรับเปลี่ยนได้ ซึ่งจะอยู่ในช่วง 300-1300 °F (149-704°C) พลาสติกส่วนใหญ่ในกระบวนการ Thermoforming จะต้องการอุณหภูมิที่แผ่รังสีในช่วง 950-1190 °F (510-643°C) ความยาวคลื่นจะเปลี่ยนแปลงเมื่อเราใช้พลาสติกที่แตกต่างกัน และส่วนประกอบของ heater ที่ใช้ชนิดต่างๆ

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Chantara Thevy Ratnam และคณะได้ทำงานวิจัยเรื่องการปรับปรุงความเสถียรของ Poly(vinyl chloride)/epoxidized natural rubber blend [8] การ blend เป็นการผสมระหว่าง Polymer ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปเป็นอีกวิธีหนึ่งที่นิยมทำในการปรับปรุงสมบัติเชิงกล สมบัติความทนต่อสารเคมี ความทนต่อสภาวะอากาศ และสมบัติด้าน rheology ของพอลิเมอร์ ด้วยเหตุนี้จึงเกิดงานวิจัยที่จะ blend PVC กับ Epoxidized natural rubber (ENR) ทั้งนี้เพื่อปรับปรุงสมบัติของ PVC ให้เหมาะสมและสามารถนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวางมากขึ้น แต่ทั้งนี้การ blend ที่ทำให้วัสดุมีความแข็งแรงและสมบัติดังกล่าวข้างต้นที่ดีนั้น ต้องคำนึงถึงสภาวะที่เหมาะสมของสารองค์ประกอบของ blend โดยการอ้างอิงถึงงานวิจัยก่อนหน้านี้ซึ่งทำการ blend ของ PVC/ENR เช่นกันจากข้อมูลในงานวิจัยกล่าวว่า PVC blend กับ ENR50 ซึ่ง

หมายถึง Natural rubber ที่มี level of epoxidation 50% เป็นการ blend ที่เข้ากันได้ดี (miscible blend) และจากการทำงานที่ต่อเนื่องคณะผู้ทำงานวิจัยพบว่า PVC/ENR50 blend ที่ถูกฉายด้วยรังสีอิเล็กตรอน จะมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น จึงน่าจะเป็นไปได้ว่า การฉายรังสีอิเล็กตรอนสามารถทำให้ PVC/ENR50 blend มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น แต่ปัญหาที่พบคือ เมื่อมีการฉายรังสีอิเล็กตรอนลงไปจะทำให้ PVC เกิดการสลายตัวซึ่งเชื่อว่าเป็นการปลดปล่อย HCl ออกมา ดังนั้นจุดประสงค์ของการทำงานวิจัยนี้คือพยายามปรับปรุงความเสถียรของ PVC ด้าน positive effect เมื่อ PVC ได้รับการฉายรังสี โดยการหา stabilizer ที่เหมาะสมที่จะทำให้ PVC/ENR50 blend เกิดการสลายตัวได้น้อยที่สุด

ในการดำเนินงานวิจัยจะใช้สัดส่วน PVC/ENR เป็น 70/30 มาผสมกันโดยผสม PVC กับ stabilizer ก่อน โดยผสมในเครื่อง high speed mixer เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นจะทำ melt blending ที่อุณหภูมิ 160°C โดยใช้เครื่อง Brabender เมื่ออุณหภูมิได้ตามที่ต้องการแล้ว เติม ENR ลงไปก่อน ผสมเป็นเวลา 1 นาที แล้วค่อยเติม PVC compound ลงไป ผสมต่อไปเป็นเวลา 4 นาที PVC/ENR blend ที่ได้ นำไปเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบสมบัติต่างๆต่อไป

จากการทดสอบสมบัติของ PVC/ENR blend พบว่า ความเสถียรของ PVC/ENR มีความสัมพันธ์ต่อปฏิกิริยา autocatalytic degradation ของ PVC โดยความเสถียรเริ่มต้นของ PVC ระหว่างกระบวนการขึ้นรูปมีความจำเป็นอย่างยิ่งเพราะมีส่วนที่จะทำให้ PVC/ENR blend มีความเสถียรเมื่อถูกฉายรังสี เพราะถ้ามี free radical เกิดขึ้นเมื่อใด ก็จะเริ่มมีการปลดปล่อย HCl ออกมา ซึ่งจะทำให้เกิด auto oxidation ระหว่างกระบวนการขึ้นรูป ส่วน stabilizerที่เหมาะสมโดยเปรียบเทียบ stabilizer ทุกตัวที่ใช้ พบว่าการเติม stabilizer จำพวก tribasic lead sulfate ทำให้ PVC/ENR blend ทนต่อการสลายตัวได้นานขึ้น โดย PVC/ENR ที่ถูกฉายรังสีจะเกิด crosslink มีการสลายเกิดขึ้นน้อย และสมบัติเชิงกลของ PVC/ENR blend ก็ดีขึ้นด้วย

งานวิจัยของ Si-dong Li และคณะ ได้ทำการศึกษาการสลายตัวทางความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยา oxidation ของ Chlorinated natural rubber[9] Chlorinated Natural Rubber (CNR) มีลักษณะที่เป็นผงสีขาว ซึ่งเตรียมได้จากกระบวนการ Chlorinated modification ของ น้ำยางธรรมชาติ เนื่องจากสมบัติที่ดีของ CNR ซึ่งได้แก่ ก่อตัวเป็นฟิล์มได้ดี ทนต่อกรด-ด่างได้ดี ด้านทานการกัดกร่อน ด้านทานการซึมผ่านและมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดี CNR จึงนิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตสีและกาวยาสารเติมแต่งในหมึกพิมพ์ เป็นต้น สำหรับกระบวนการทำปฏิกิริยา chlorination นั้น มีวิธีการทำคือละลายน้ำยางธรรมชาติใน คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (CCl₄) เพราะสายโซ่โมเลกุลของยางจะได้คลอรีนออกในสารละลาย ปฏิกิริยาคลอรีนชัน จะได้เกิดขึ้นโดยง่าย โครงสร้างและสมบัติของผลิตภัณฑ์จะได้เป็นอันเดียวกัน แต่วิธีดังกล่าวที่ทำในสารละลายคาร์บอนเตตระคลอไรด์ ถูกห้ามใช้ในหลายประเทศ เพราะจำเป็นต้องมีค่าใช้จ่ายสูงในด้านเครื่องมือ อุปกรณ์ และด้านเทคนิค มีผลกระทบต่อมลภาวะและสิ่งแวดล้อม และเป็นอันตรายต่อสุขภาพของการทำงาน จึงต้องทำปฏิกิริยาคด้วยความระมัดระวัง โดยควบคุมสภาวะการทำปฏิกิริยา และทำให้น้ำยางธรรมชาติมีความเสถียร โดยการเติมสารประเภท nonionic surfactant

ลงไปด้วย และเนื่องจากยางธรรมชาติโดยทั่วไปอยู่ในสภาพของน้ำยางที่เป็นคอลลอยด์ จึงต้องใส่ใจในเรื่องของความสามารถในการเกิดปฏิกิริยา ที่ต้องเกิดจากด้านนอกเข้าไปยังข้างในของอนุภาคยาง โดยเป็นการยากที่จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดที่ด้านนอกแล้วค่อยๆเกิดเข้าไปข้างใน สามารถวิเคราะห์โครงสร้างของ CNR ด้วย FTIR จากสารละลายและน้ำยาง โดยจะพบหมู่ฟังก์ชันที่มีได้มีทั่วไป บนสายโซ่ของ CNR คือ carbonyl group สิ่งที่เราพบนี้แสดงให้เห็นว่าเกิด thermo oxidative degradation ของ CNR และจากการศึกษาพบว่า CNR เกิดการเสื่อมสลายในอากาศ เกิดขึ้นได้เป็น 2 step ที่มีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนัก ขั้นตอนแรกจะเกิดขึ้นในช่วง $160-390^{\circ}\text{C}$ และช่วงที่สองจะเกิดขึ้นในช่วง $390-585^{\circ}\text{C}$ ในขั้นตอนแรกเป็นการกำจัดโมเลกุลของ HCl ออกจากโมเลกุลของ CNR โดยมี CO_2 ปริมาณเล็กน้อยถูกปลดปล่อยออกมาด้วย และทำให้เกิดเป็น conjugate polyene และขั้นตอนที่สอง สิ่งที่เกิดขึ้นคือ สายโซ่หลักของ CNR ถูก oxidize ให้เป็น คาร์บอนไดออกไซด์

T. Kamol และคณะ ได้ทำการศึกษาผลของความดันต่อการสลายตัวของ Poly(vinyl chloride) [10] ซึ่งเป็นการดำเนินงานวิจัยเพื่อศึกษาผลของความดันที่มีต่อการสลายตัวของ PVC และดูการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายตัวของ PVC โดยในการดำเนินงานวิจัยเรื่องนี้ ผู้ทำงานวิจัยได้ทำการสลาย PVC ด้วยความดันและอุณหภูมิที่เป็นช่วงกว้างเพื่อศึกษากลไกการเปลี่ยนแปลงของ dehydrochlorinated PVC ไปเป็น solid carbon โดยปฏิกิริยา Polycondensation การเปลี่ยนไปเป็นสารประกอบ alkyl aromatic โดยปฏิกิริยา cyclization และการเปลี่ยนไปเป็น linear paraffin โดยปฏิกิริยา hydrogenation

จากการทำการวิจัยพบว่า การสลายตัวทางความร้อน ที่อุณหภูมิ 400 และ 440°C โดยมากแล้วจะเป็นคลอรีนใน PVC ซึ่งถูกปลดปล่อยออกมาในรูปของ HCl เมื่อเกิดการสลายตัวทางความร้อนโดยปลดปล่อย HCl แล้ว PVC จะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของของเหลวและ residue และมีผลิตภัณฑ์ในรูปของแก๊สบ้างเล็กน้อย เมื่อเพิ่มความดันในการทดลองการสลายตัวและการเกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวจะลดลงแต่ผลิตภัณฑ์ที่เป็น residue จะเพิ่มมากขึ้น ผลของความดันต่อ product distribution จากการสลายตัวทางความร้อนและค่า H/C value ของผลิตภัณฑ์ แสดงให้เห็นว่าการใช้ความดันสูงจะทำให้ product ที่เป็นของเหลวที่อยู่ใน condensate phase จากนั้นจะทำปฏิกิริยากับ THF-insoluble dehydrochlorinated PVC (idcPVC) แล้วกลายเป็น residue อย่างไรก็ตาม ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวยังทำหน้าที่ป้องกันการเกิดปฏิกิริยา Polycondensation ของ idcPVC ภายใต้อุณหภูมิสูง

H/C มีประโยชน์ในการใช้เป็น parameter ในการวัดการเกิดปฏิกิริยา polycondensation ของ residue ผลของอุณหภูมิต่อ H/C value แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยา polycondensation ของ residue เกิดขึ้นเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกเป็นการเกิดปฏิกิริยา polycondensation ก่อนที่อุณหภูมิจะถึง 400°C โดยจะมีการลดลงของ H/C ตั้งแต่ 1.0 - 0.8 โดยเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และเกิดขึ้นสมบูรณ์ก่อนที่อุณหภูมิจะถึง 400°C ขั้นตอนที่ 2 เกิดปฏิกิริยา polycondensation ต่อโดยมีการเปลี่ยนแปลงของ H/C value จาก 0.8 - 0.5 เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 400°C

การทดสอบการสลายตัวของ PVC ที่ความดันบรรยากาศ ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน จะได้ liquid product ที่เป็น benzene จำนวนมาก แต่เมื่อมีการเพิ่มความดัน การเกิด benzene จะลดลงอย่างมาก แต่จะเกิดเป็น liquid polyene มากขึ้น ผลของความดันต่อ product distribution ของของเหลวแสดงให้เห็นว่า polyene chain ที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของ idcPVC และ sdcPVC จะถูกเปลี่ยนให้เป็น benzene โดยปฏิกิริยา cyclization เมื่ออยู่ในภาวะความดันบรรยากาศ แต่อย่างไรก็ตาม polyene chain บางส่วนสามารถถูก hydrogenated ได้เพราะปฏิกิริยา polycondensation ของ idcPVC ทำให้เกิด hydrogen ซึ่งสามารถไปทำปฏิกิริยากับ polyene chain ได้

J.W. COOK และคณะได้ทำการศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนของการ blend ระหว่าง Natural rubber(NR) กับ Chlorinated natural rubber (CNR) [11] โดยศึกษาการ blend ระหว่าง masticated natural rubber กับ chlorinated natural rubber อัตราส่วน 1:1 (2%w/v in xylene) ที่อุณหภูมิ 150 °C ในบรรยากาศ เป็นเวลา 2 ชั่วโมงเพื่อศึกษาสมบัติทางความร้อนผลที่ได้ พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงทาง morphology อย่างมาก โดยเมื่อ blend NR กับ CNR แล้วตรวจสอบ morphology ด้วย SEM จะเห็นการแยกเป็น 2 เฟส และเมื่อให้ความร้อน 150 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าทำให้ NR และ CNR เกิดการรวมเป็นเฟสเดียว ซึ่งตรวจสอบได้จากการศึกษาความเข้ากันได้ด้วยเทคนิค DSC พบว่าสามารถรวมตัวกันได้เป็น phase เดียว จากการเห็นอุณหภูมิ Tg เพียง 1 ตำแหน่งที่ -60 °C นอกจากนี้ DSC ยังสามารถบอกอีกว่าเมื่อทำการ blend โดยให้ความร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะไม่พบ Tg ที่ -60 °C ซึ่งเป็น Tg ของยางธรรมชาติ นั่นคือ อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้าง และเมื่อศึกษา NMR และ FTIR จะพบหมู่ carbonyl group ออกซิเจนในอากาศเข้าทำปฏิกิริยา oxidation กับยาง จึงทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติสั้นลง

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุดิบ

3.1.1 การสังเคราะห์ Chlorinated Natural Rubber (CNR)

น้ำยางธรรมชาติ (Natural Rubber Latex)

น้ำยางธรรมชาติที่ใช้คือ น้ำยางชั้นประเภท High Ammonia

จากสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร

สูตร โมเลกุล $\sim C_5H_8 \sim$

ปริมาณเนื้อยางแห้ง

(DRC ;Dry Rubber Content) 60%

ลักษณะทางกายภาพ ของเหลวสีขาวขุ่นคล้ายน้ำมัน

สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid)

สูตร โมเลกุล HCl

น้ำหนักโมเลกุล 36.5

จุดเดือด $65.6 - 110^\circ C$

จุดเยือกแข็ง $-74^\circ C$

ความถ่วงจำเพาะ 1.17 (ที่ $20^\circ C$)

ความดันไอ 78 mmHg (ที่ $20^\circ C$)

ความเข้มข้น 37 % (w/v)

ลักษณะทางกายภาพ ของเหลวใส ไม่มีสี มีกลิ่นรุนแรง

โซเดียมคลอเรต (Sodium chlorate)

สูตร โมเลกุล $NaClO_3$

น้ำหนักโมเลกุล 106.4

ค่า pH 7

ลักษณะทางกายภาพ ผงสีขาวแกมเหลือง

ความสามารถในการละลายน้ำ $79 \text{ g}/100 \text{ ml}$ (ที่ $0^\circ C$),
 $230 \text{ g}/100 \text{ ml}$ (ที่ $100^\circ C$)

จุดเดือด $248^\circ C$

โซเดียมซัลเฟต (Sodium sulphate)

สูตรโมเลกุล	Na_2SO_4
น้ำหนักโมเลกุล	142.04
ความถ่วงจำเพาะ	2.6
ความเข้มข้น	99.98% (w/w)
ลักษณะทางกายภาพ	เป็นผงผลึกสีขาว
ค่า pH	6.0 – 9.0 (for 1% solution)
จุดเดือด	สลายตัวที่ 1,100 °C
จุดหลอมเหลว	884 °C
ความสามารถในการละลายน้ำ	15.9% (ที่ 20 °C)

โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide)

สูตรโมเลกุล	NaOH
น้ำหนักโมเลกุล	40
ความถ่วงจำเพาะ	2.13
ความเข้มข้น	99.98% (w/w)
ลักษณะทางกายภาพ	ของแข็งสีขาว
จุดเดือด	1,390 °C
จุดหลอมเหลว	318 °C

3.1.2 การ compound และ ขึ้นรูป Poly(vinyl chloride) Sheet**PVC resin**

PVC resin ที่ใช้เป็น FVC ที่ได้จากกระบวนการ suspension polymerization

สูตรโมเลกุล	$\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}$
ค่า K value	62 ± 1
Polymerization degree	800 ± 40
Bulk density (g/ml)	0.59 ± 0.08
Volatile matter (%)	0.3(max)
ลักษณะทางกายภาพ	เป็นผงละเอียดสีขาว
Particle size pass 42 mesh(%)	100

Heat Stabilizer

Heat stabilizer ที่ใช้คือ TH 811 เป็นสารจำพวก mono methyltin หรือ Di methyltin ที่ทนความร้อนสูงมาก นิยมใช้เป็น stabilizer ใน food grade plastic

ลักษณะทางกายภาพ เป็นของเหลวใส หนืดเล็กน้อย

color (gardner) 2 or less

ความหนืด(cs) 50 (ที่ 25 °C)

ความถ่วงจำเพาะ 1.17 (ที่ 25 °C)

Transmittance(%) 93.0 (440 nm)

Refractive index 1.51(25°C)

Processing aids

Processing aids ที่ใช้คือ PA 20 เป็นสารจำพวก methyl methacrylate copolymer

ลักษณะทางกายภาพ เป็นผงละเอียดสีขาว

Processing aids อีกตัวที่ใช้ คือ K 175

ลักษณะทางกายภาพ เป็นผงสีขาว

Lubricant

Lubricant ที่ใช้คือ G 161 เป็นสารจำพวก stearic acid

ลักษณะทางกายภาพ เป็นของเหลวใส, สีเหลืองอ่อน

Pigment

Pigment ที่ใช้คือ RC 50

ลักษณะทางกายภาพ เป็นของแข็งสีฟ้า

Plasticizer

Plasticizer ที่ใช้คือ Di-2-ethyl hexyl phthalate หรือ Dioctyl phthalate (DOP)

สูตร โมเลกุล $C_{24}H_{38}O_4$

ลักษณะทางกายภาพ เป็นของเหลวใส ไม่มีสี มันวาว ลื่น

ความหนืด(cs)

74 – 76

Impact modifier

Impact modifier ที่ใช้มี 2 ตัวคือ B 51 ซึ่งเป็นสารประเภท methacrylate-butadiene-styrene (MBS) และ น้ำยางธรรมชาติ ที่มีความเข้มข้นเนื้อยาง 60%

3.1.2 การวิเคราะห์ เชนปริมาณด้วยเทคนิค FTIR**กรดคลอโรอะซีติก (Chloroacetic acid)**

กรดคลอโรอะซีติก ใช้เป็นสารมาตรฐานในการเปรียบเทียบและคำนวณหาปริมาณ chlorination ของ Chlorinated Natural Rubber (CNR) ที่สังเคราะห์ได้

สูตร โมเลกุลคือ	$C_2H_3ClO_2$
น้ำหนัก โมเลกุล	94.5
จุดเดือด	189 °C
จุดหลอมเหลว	61-63 °C
ความสามารถในการละลายน้ำ	85 g/100 ml (ที่ 20 °C)
ลักษณะทางกายภาพ	เป็นผลึกสีขาว

3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย แบ่งออกเป็น 5 ส่วน คือ การสังเคราะห์ CNR ให้ได้ปริมาณคลอรีนประมาณ 12%, การตรวจสอบคุณลักษณะของ CNR ด้วย FTIR, การcompound และ ขึ้นรูป PVC Sheet, การทดสอบคุณสมบัติ PVC Sheet ที่ขึ้นรูปได้ และการทดสอบขึ้นรูปด้วยกระบวนการ Vacuum Thermoforming

3.2.1 การสังเคราะห์ Chlorinated Natural Rubber (CNR)[12]

สังเคราะห์ CNR โดยปฏิกิริยา chlorination ที่อุณหภูมิห้องโดยใช้แก๊สคลอรีนที่เกิดจากปฏิกิริยาของ HCl กับ $NaClO_3$ ให้ทำปฏิกิริยาโดยตรงกับน้ำยางธรรมชาติ โดยค่อยๆหยด HCl ความเข้มข้น 32%(w/v) และน้ำยางธรรมชาติที่มีความเข้มข้นของเนื้อยาง 10% ปริมาตร 50 ml ที่ผสมด้วย Na_2SO_4 ความเข้มข้น 30%(w/v) ปริมาตร 30 ml ลงไปในขวด 5 ลอ ที่มีสารละลาย $NaClO_3$ เข้มข้น 50%(w/v) ปริมาตร 20 ml ใช้เวลาในการหยดสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที โดยกวนด้วย magnetic stirrer และมีการผ่านแก๊สออกซิเจนตลอดเวลาระหว่างการหยดสารตั้งต้น ดังรูปที่ 3.1 หลังจากนั้นปิดแก๊สออกซิเจน แล้วกวนต่อไปอีก 1 ชั่วโมง 30 นาที เก็บสารที่สังเคราะห์ได้ไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาเติม NaOH ที่มีความเข้มข้น 1 M เพื่อสะเทินกรดหลังจากนั้นนำไปกรองตะกอนและล้าง

ด้วยน้ำกลั่นให้สะอาด ตะกอนที่ได้ (CNR) เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปเก็บไว้ที่
โถดูลความชื้น



รูปที่ 3.1 การสังเคราะห์ CNR

3.2.2 การตรวจสอบคุณลักษณะของ CNR ด้วย FTIR

FTIR เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ สารเชิงคุณภาพโดยตรวจสอบหมู่
ฟังก์ชัน และวิเคราะห์สารเชิงปริมาณโดยนำเปอร์เซ็นต์ Absorbance ของสารตัวอย่าง
เทียบกับสารมาตรฐาน ซึ่งสารมาตรฐานที่ใช้คือ Chloroacetic acid แล้วนำไป
คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ Chlorination



รูปที่ 3.2 เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ รุ่น Impact 410

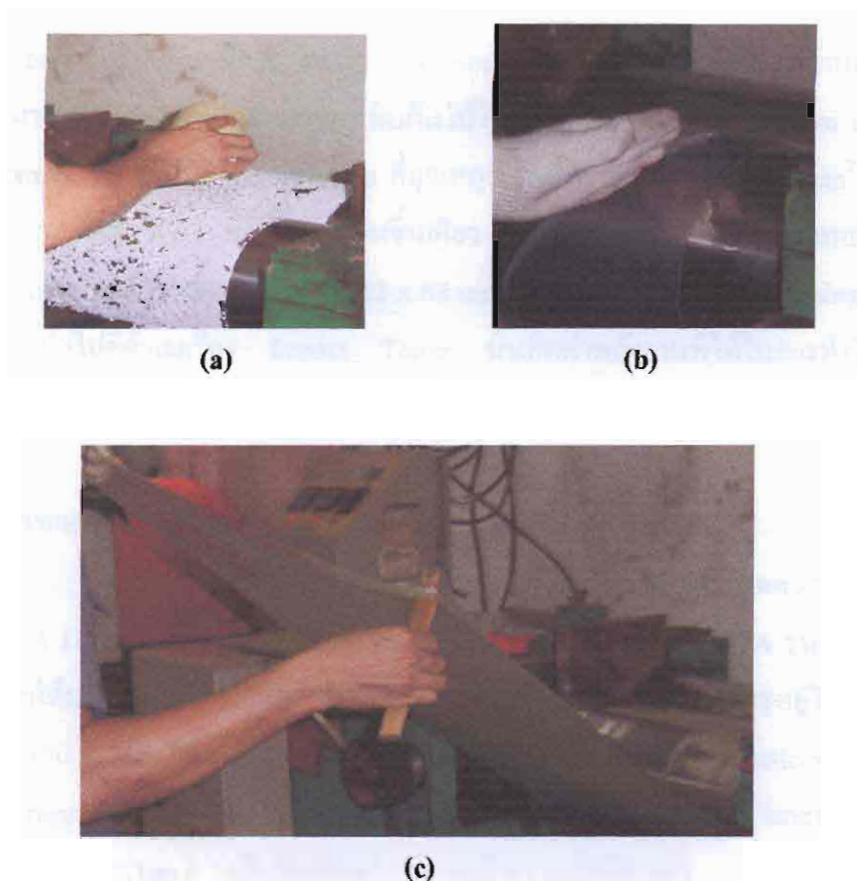
เครื่องที่ใช้ในการตรวจสอบคุณลักษณะของ CNR ที่สังเคราะห์ได้คือ เครื่อง Fourier Transformer Infrared Spectrophotometer รุ่น Impact 410 โดยเริ่มจากการวัดค่า Absorbance ของ Chloroacetic acid ก่อนซึ่งใช้เป็นสารมาตรฐานในการเปรียบเทียบ Absorbance เพื่อนำไปวิเคราะห์หาระดับการเกิด Chlorination จากนั้นทำการตรวจสอบลักษณะ spectrum ของ CNR ที่สังเคราะห์ได้โดย นำ Absorbance ของ CNR ไปหา %Chlorination ที่ได้โดยเทียบกับสารมาตรฐาน Chloroacetic acid ซึ่งมีวิธีการคำนวณหาปริมาณการเกิดปฏิกิริยา Chlorination ดังแสดงวิธีการคำนวณในภาคผนวก ก

3.2.3 การ compound และ ขึ้นรูป PVC Sheet

ในการ compound และขึ้นรูปเป็น PVC sheet ทำโดยใช้เครื่อง Two-roll mill อุณหภูมิที่ทำการ compound และขึ้นรูปคือ 180 - 190°C ความเร็วการหมุนของลูกกลิ้ง 25 - 30 rpm ซึ่งเริ่มต้นการ compound โดยชั่ง PVC resin และสารเติมแต่งต่างๆตามสูตรการ compound ดังแสดงในตารางที่ 3.3 แล้วทำ dry mixing ก่อนที่จะนำไปบดผสมใน Two-roll mill เมื่ออุณหภูมิใน Two-roll mill ได้ตามที่ต้องการแล้ว นำ PVC ที่ผสมกับสารเติมแต่งต่างๆเรียบร้อยแล้วใส่เข้าไปยังบริเวณระหว่างลูกกลิ้งทั้งสองดังรูปที่ 3.3(a) โดยปรับระยะห่างของลูกกลิ้งให้เหมาะสมเพื่อไม่ให้ compound ที่ใส่ลงไปตกลงมาด้านล่าง เมื่อ PVC เริ่มหลอมและจับติดลูกกลิ้ง ทำการปาด sheet พับไปมา ดังรูปที่ 3.3 (b) โดยแรง shear และความร้อนจะทำให้เกิดการ gel ตัวของ PVC และองค์ประกอบต่างๆรวมเป็นเนื้อเดียวกัน ใช้เวลาในการบดผสมใน Two-roll mill 20 นาที จากนั้นปรับระยะห่างของลูกกลิ้งเพื่อให้ความหนาของ sheet ได้ขนาด 0.2 - 0.3 mm แล้วดึงแผ่น sheet ออกมาจาก Two-roll mill ดังรูปที่ 3.3 (c) แล้วตรวจสอบเช็คความหนาของแผ่น sheet ถ้าไม่ได้ความหนาประมาณ 0.3 mm นำเข้าไปหลอมและปรับความหนาใน Two-roll mill อีกครั้ง

ตารางที่ 3.1 สูตรการ compound PVC Sheet ความหนา 0.3 mm

สารเคมี สูตร	AS 60 (g)	TH 811 (g)	PA 20 (g)	K 175 (g)	G 161 (g)	RC 50 (g)	DOP (g)	B 51 (g)	CNR (g)	NR (g)
STD	200.0	3.0	4.0	0.4	0.6	3.0	10.0	13.0	-	-
No Impact	200.0	3.0	4.0	0.4	0.6	3.0	10.0	-	-	-
0 CNR/4NR	200.0	3.0	4.0	0.4	0.6	3.0	10.0	-	-	4.0
0.1CNR1NR	200.0	3.0	4.0	0.4	0.6	3.0	10.0	-	0.1	1.0
0.1CNR2NR	200.0	3.0	4.0	0.4	0.6	3.0	10.0	-	0.1	2.0
0.1CNR3NR	200.0	3.0	4.0	0.4	0.6	3.0	10.0	-	0.1	3.0
0.1CNR4NR	200.0	3.0	4.0	0.4	0.6	3.0	10.0	-	0.1	4.0
0.2CNR1NR	200.0	3.0	4.0	0.4	0.6	3.0	10.0	-	0.2	1.0
0.2CNR2NR	200.0	3.0	4.0	0.4	0.6	3.0	10.0	-	0.2	2.0
0.2CNR3NR	200.0	3.0	4.0	0.4	0.6	3.0	10.0	-	0.2	3.0
0.2CNR4NR	200.0	3.0	4.0	0.4	0.6	3.0	10.0	-	0.2	4.0
0.3CNR1NR	200.0	3.0	4.0	0.4	0.6	3.0	10.0	-	0.3	1.0
0.3CNR2NR	200.0	3.0	4.0	0.4	0.6	3.0	10.0	-	0.3	2.0
0.3CNR3NR	200.0	3.0	4.0	0.4	0.6	3.0	10.0	-	0.3	3.0
0.3CNR4NR	200.0	3.0	4.0	0.4	0.6	3.0	10.0	-	0.3	4.0
0.3CNR5NR	200.0	3.0	4.0	0.4	0.6	3.0	10.0	-	0.3	5.0
0.3CNR6NR	200.0	3.0	4.0	0.4	0.6	3.0	10.0	-	0.3	6.0
0.3CNR7NR	200.0	3.0	4.0	0.4	0.6	3.0	10.0	-	0.3	7.0



รูปที่ 3.3 การบดผสม PVC ด้วย Two roll mill โดย

(a) การเทสารลงบน Two roll mill, (b) ลักษณะการผสมและ
 (c) ลักษณะการดึงแผ่น PVC ออกจาก Two roll mill

3.2.4 การทดสอบคุณสมบัติของ PVC Sheet

3.2.4.1 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกล

การทดสอบสมบัติเชิงกลด้าน Tensile strength

นำ PVC sheet ที่ขึ้นรูปได้ มาทดสอบ Tensile strength ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D638 ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ของ LLOYD Instruments, UK รุ่น LR 50K โดยใช้ Load cell ขนาด 5 kN และความเร็วในการดึงยึด 50 mm/min

การทดสอบสมบัติเชิงกลด้าน Impact resistance

ทดสอบสมบัติเชิงกลด้านความทนต่อแรงกระแทกตามวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256 โดยใช้เครื่อง Impact Tester รุ่น ZWICK น้ำหนัก pendulum 4 จูล วัดค่าพลังงานที่ทำให้ชิ้นงานแตกหัก สำหรับการเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบ

Impact resistance นั้นทำโดยนำ PVC sheet ที่ขึ้นรูปได้ไปตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 12 x 12 cm นำมาซ้อนทับกันให้ได้ความหนาประมาณ 3.0 mm แล้วนำไป compress ด้วยเครื่อง compression ที่อุณหภูมิ 150 °C ความดัน 200 kg/cm² เป็นเวลา 10 นาทีให้ PVC หลอมรวมเป็นชิ้นเดียว เพื่อจะเตรียมชิ้นงานที่ทดสอบเป็น bulk specimen แล้วตัดชิ้นงาน ขนาด 12 x 63 mm นำไปบากด้วยเครื่อง notching machine แล้วนำไปตีด้วยเครื่อง Impact Tester บันทึกค่าพลังงานที่ได้ในการทำให้ชิ้นงาน แตกหัก

การทดสอบสมบัติเชิงกลด้าน Dynamics Mechanical Analysis

นำ PVC sheet ที่ได้จากการ compress ที่มีมาตัดชิ้นงานขนาดความยาว 63 mm กว้าง 12 mm แล้วทดสอบ Dynamics Mechanical ด้วยเครื่อง DMA รุ่น DMA 2980 ภายใต้บรรยากาศของแก๊สเฉื่อย(N₂) ช่วงอุณหภูมิที่ทำการทดสอบจะอยู่ในช่วง -100 ถึง 150 °C Amplitude 15 μ m และความถี่ 1 Hz เพื่อวิเคราะห์ค่า Elastic modulus หรือ Storage modulus(E') Viscous modulus หรือ loss modulus(E'') และค่า Damping Coefficient (Tan δ) เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ ความถี่หรือเวลา

3.2.4.2 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetry Analysis (TGA)

นำ PVC sheet, PVC resin และ CNR ไปทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA เครื่องที่ใช้คือ Perkin Elmer Thermal Analysis รุ่น TGA7 เพื่อหา Decomposition temperature (T_d) ของชิ้นงานตัวอย่าง โดยทำการทดสอบในสภาวะ แก๊สเฉื่อย (N₂) ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบคือ 50 – 800 °C และ heating rate 10 °C/min

3.2.4.3 การตรวจสอบ Morphology

การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy, SEM

ทำการทดสอบด้วยเครื่อง SEM ของ JEOL JSM-5800 ซึ่งเทคนิค SEM นี้ใช้ตรวจสอบ Morphology ของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ Impact resistance และ Tensile เพื่อศึกษาลักษณะผิวหน้าของชิ้นงานที่บริเวณรอยแตกหักโดยตัดชิ้นงานขนาด 1x1 cm แล้วเตรียมผิวหน้าชิ้นงานโดยเคลือบด้วยทองคำเพื่อให้ผิวหน้าของชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบด้วย SEM มีสภาพที่นำไฟฟ้า แล้วส่องกราดด้วยลำแสงอิเล็กตรอน ปรับกำลังขยายให้เหมาะสมเพื่อให้เห็นพื้นผิวรอยการแตกหักอย่างชัดเจน

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

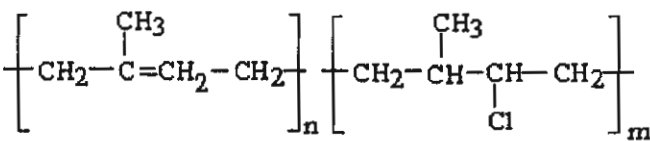
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การวิเคราะห์ด้วย Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

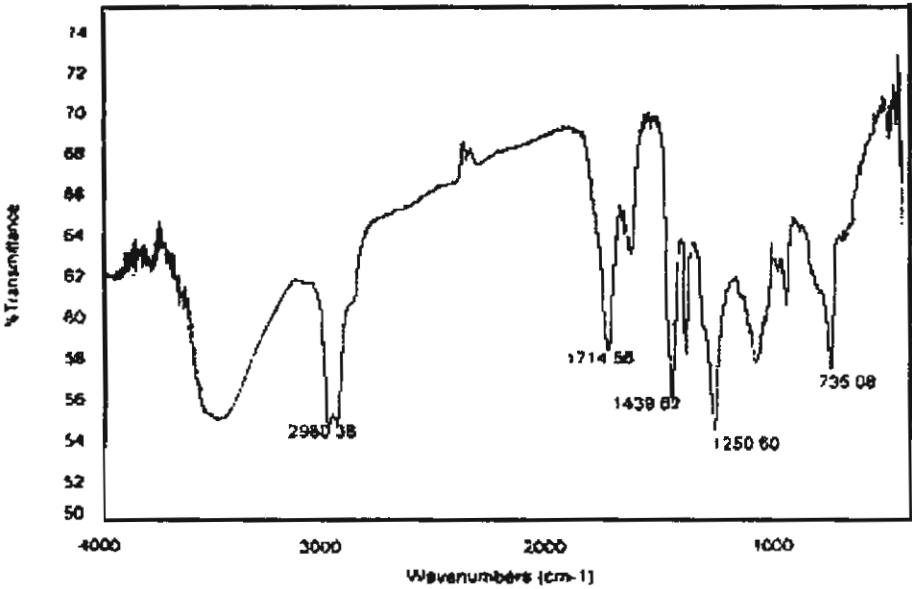
4.1.1 Chlorinated Natural Rubber (CNR)

จากการค้นนิฐาน สูตร โครงสร้างของ CNR น่าจะเป็นดังรูป 4.1



รูปที่ 4.1 สูตรโครงสร้างของ Chlorinated Natural Rubber (CNR)

เมื่อวิเคราะห์ CNR ด้วย FTIR ได้ลักษณะของสเปกตรัมเป็นดังรูปที่ 4.2



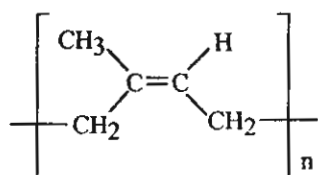
รูปที่ 4.2 FTIR spectrum ของ CNR

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)

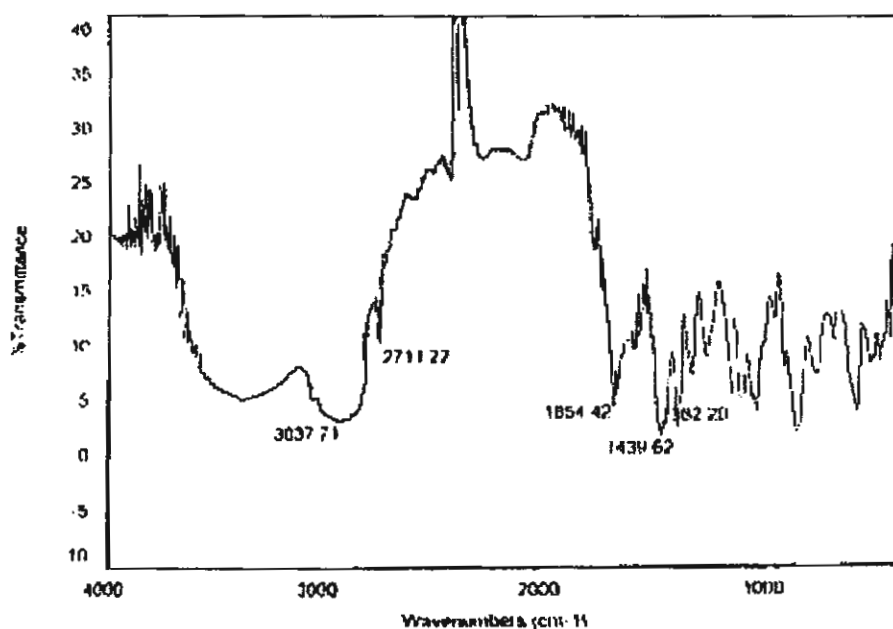
4.1.2 น้ำยางธรรมชาติ (Natural Rubber Latex)

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

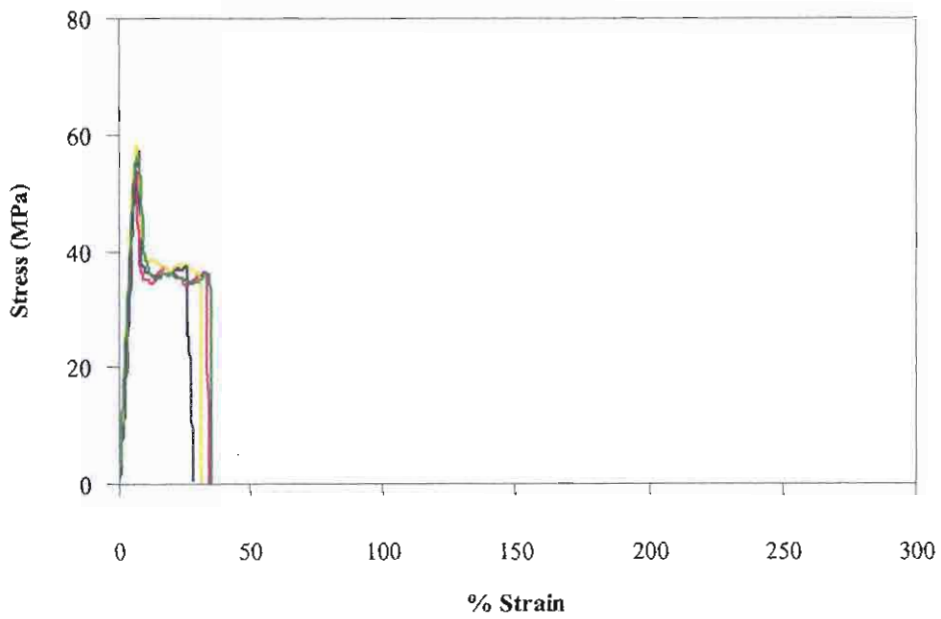
เมื่อพิจารณาสูตรโครงสร้างของน้ำยางธรรมชาติ(cis 1,4 polyisoprene) และ CNR พบว่ามีโครงสร้างที่คล้ายกันแต่ต่างกันที่ CNR มีการแทนที่ที่ตำแหน่งพันธะคู่ของน้ำยางธรรมชาติด้วยอะตอมของคลอรีน จากการศึกษา IR spectrum ของ CNR และ น้ำยางธรรมชาติ (รูปที่ 4.2 และ 4.4 ตามลำดับ) พบว่ามีลักษณะของหมู่ฟังก์ชันที่เหมือนกันแต่ 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

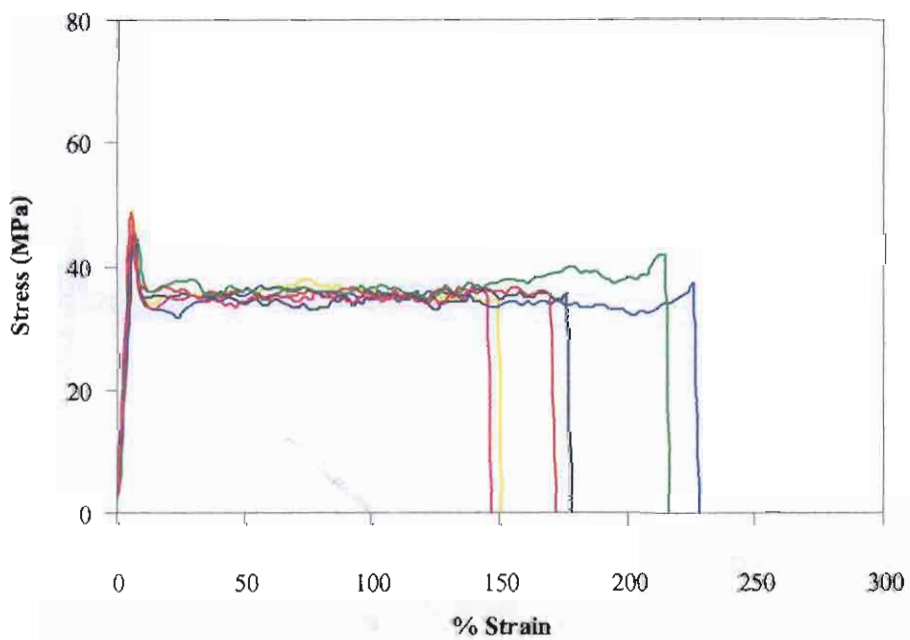
4.2.1 สมบัติเชิงกล

4.2.1.1 สมบัติด้านการดึงยึด (Tensile Properties)

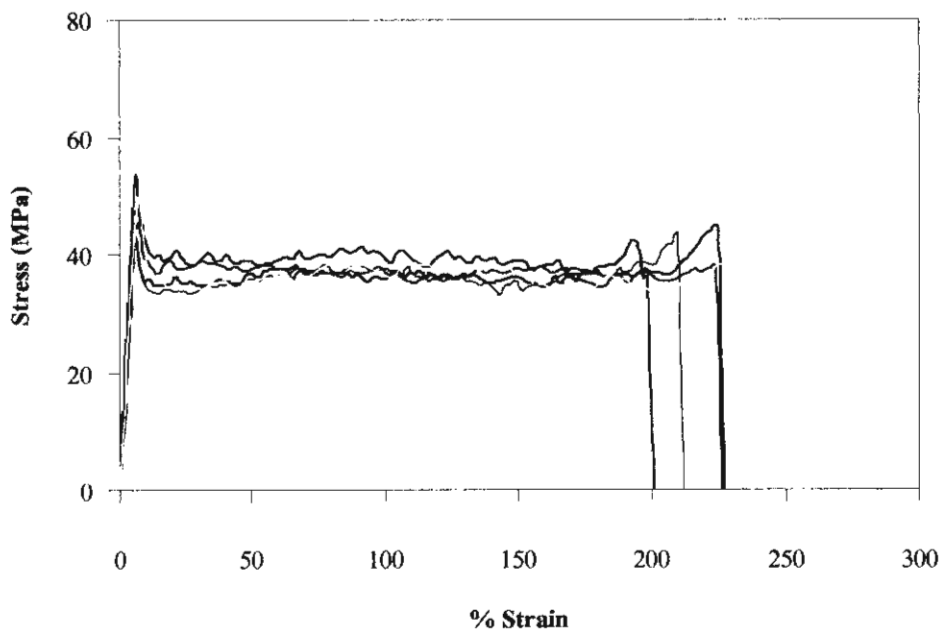
จากการทดสอบ Tensile properties ที่สภาวะอุณหภูมิ 25 °C ด้วยอัตราการดึง 50 mm/min ของ PVC sheet ที่ขึ้นรูปได้ในสูตรต่างๆ ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.5-4.9



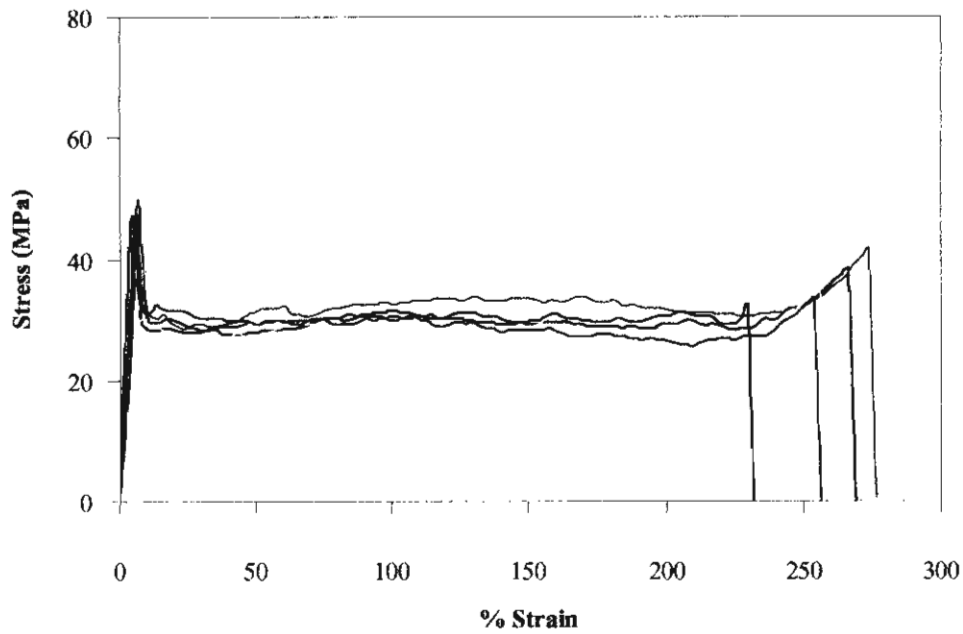
รูปที่ 4.5 กราฟ stress-strain ของ PVC sheet ที่ไม่มีการเติม impact modifier
(สูตร No impact)



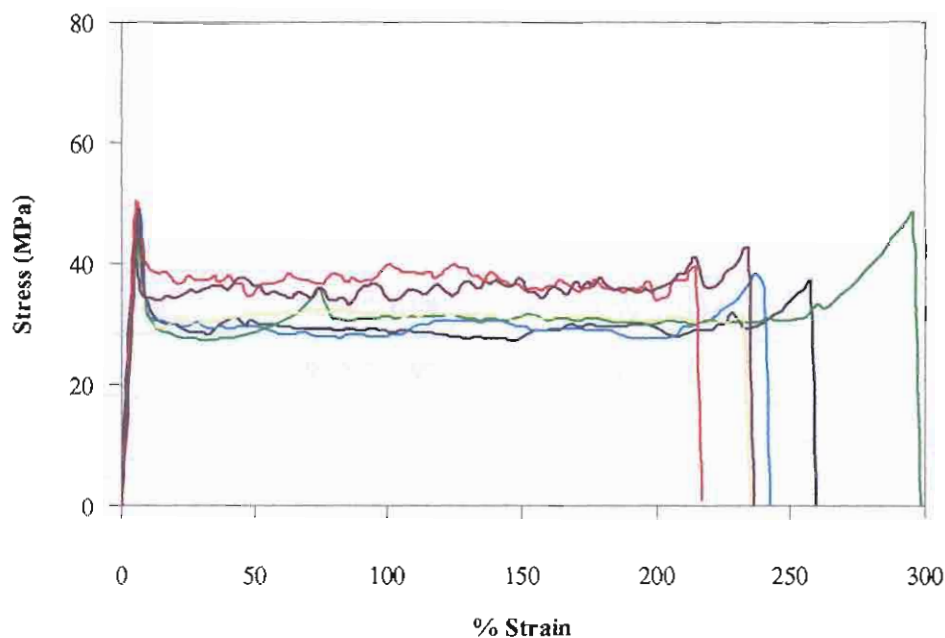
รูปที่ 4.6 กราฟ stress-strain ของ PVC sheet ที่มีการเติม MBS เป็น impact modifier
(สูตร STD)



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

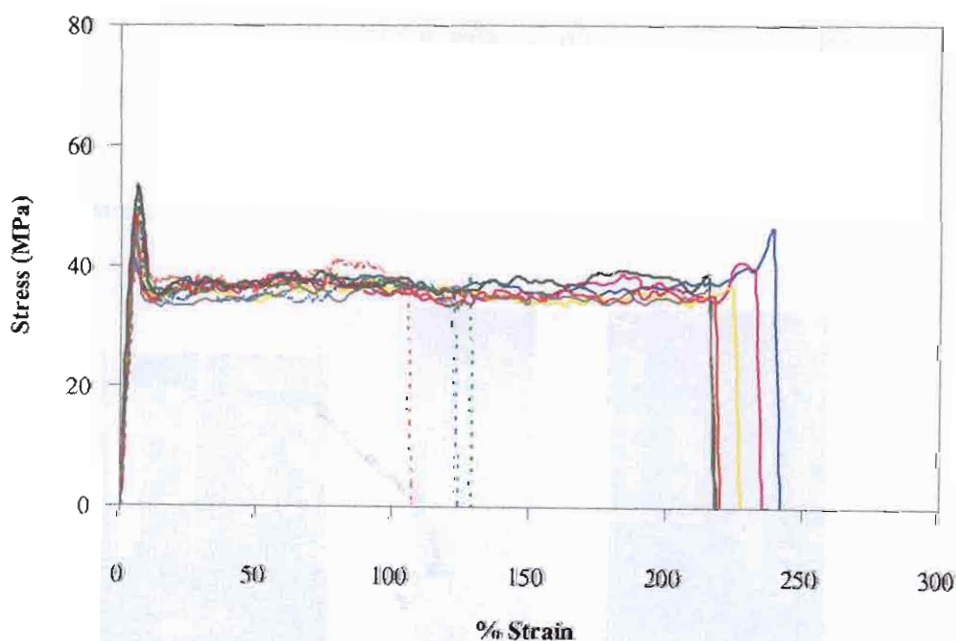
หมายเหตุ

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 พบว่ามีการดึงยึดได้มากขึ้น 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

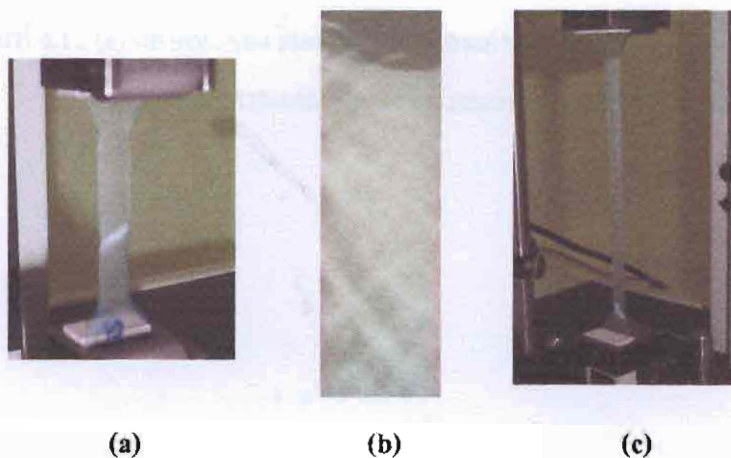


รูปที่ 4.10 กราฟ stress-strain ของ PVC sheet ที่มีการเติมน้ำยางธรรมชาติเป็น impact modifier โดยมีการเติม CNR เป็นตัวประสาน (สูตร 0.3CNR7NR)

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 ในการดึงยึดของ PVC จะสามารถดึงยึดได้ดีขึ้น เนื่องจากน้ำยางธรรมชาติเป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีสายโซ่โมเลกุลที่ยาวและสามารถเกิด Entanglement ได้มาก ซึ่งเป็นลักษณะของ Elastomer ทำให้ต้องใช้เวลาและแรงมากในการทำให้สายโซ่ยึดตรง เมื่อ PVC ได้รับแรงดึงยึดจะมีลักษณะการเกิด shear band ดังแสดงในรูปที่ 4.11 เนื่องจาก แรงส่วนหนึ่งถูกยาง absorb ไว้จึงมีการเปลี่ยนแปลงแบบ ductile โดยมีการเกิด yield และ cold drawing ซึ่งสามารถเห็นพฤติกรรมนี้จากกราฟ stress - strain

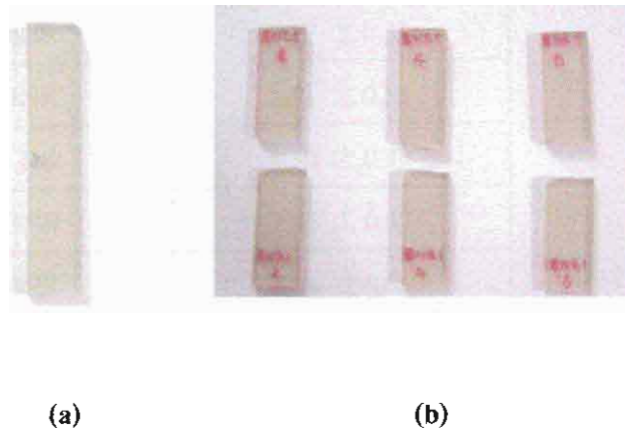


รูปที่ 4.11 ลักษณะ (a) neck initiate, (b) Shear band และ (c) Cold drawing

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 นั้นมีความแข็งแรงเปราะ 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

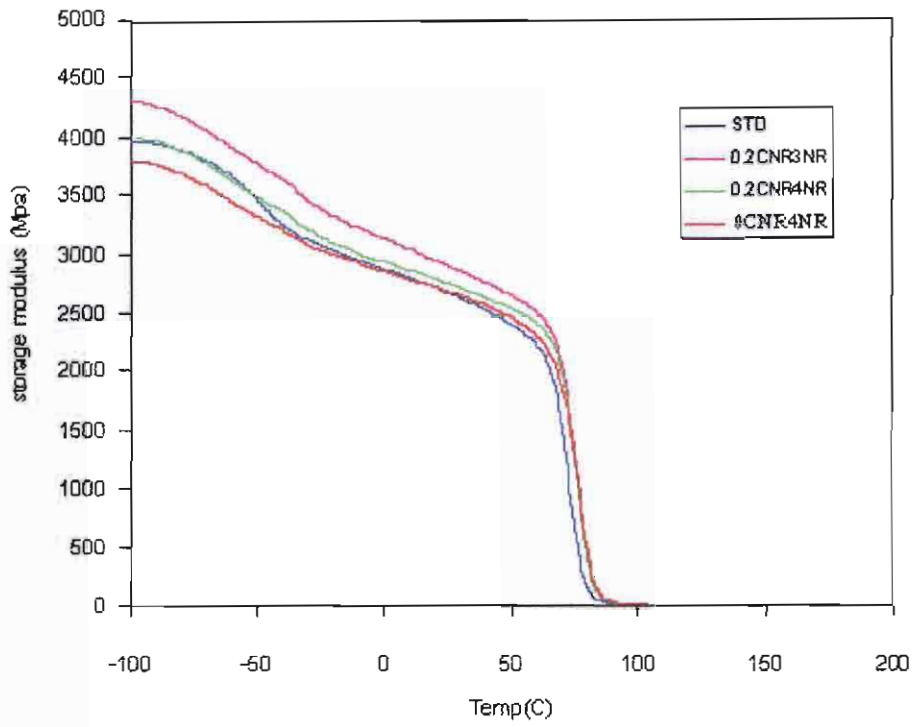
MBS เป็น impact modifier เนื่องจากน้ำยางธรรมชาติที่กระจายอยู่ใน PVC เป็นสารที่มีโมเลกุลใหญ่และมี Entanglement มาก ทำให้มีความยืดหยุ่นและสามารถรับแรงกระแทกได้มาก พิจารณาสมบัติด้าน impact resistance ของ PVC sheet ซึ่งใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น impact modifier พบว่า สูตรที่ใช้ CNR เป็นตัวประสานระหว่าง PVC และ 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)

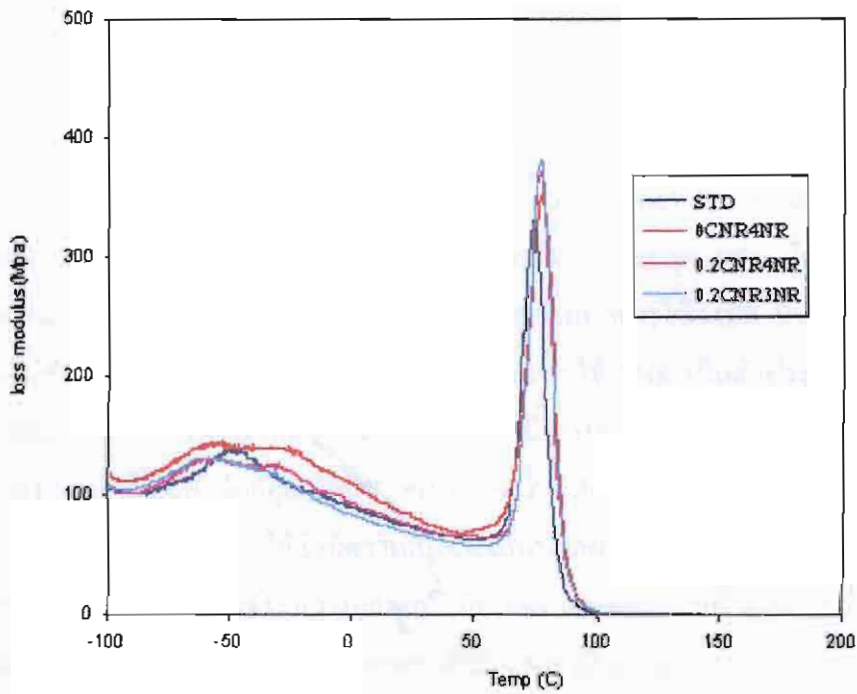
เมื่อเปรียบเทียบ impact resistance ของ PVC ที่มีปริมาณ NR เพิ่มขึ้น ค่าพลังงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำยาง การใช้ CNR 0.2 กรัม เป็นตัวประสาน เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมในการ compound PVC กับ NR เพราะมีการเพิ่มขึ้นของพลังงานอย่างชัดเจนเมื่อมีการเพิ่มปริมาณ NR จากการทดสอบสมบัติด้านการดึงยึดพบว่าเปอร์เซ็นต์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

4.2.1.3 สมบัติด้าน Dynamic Mechanical (DMA)

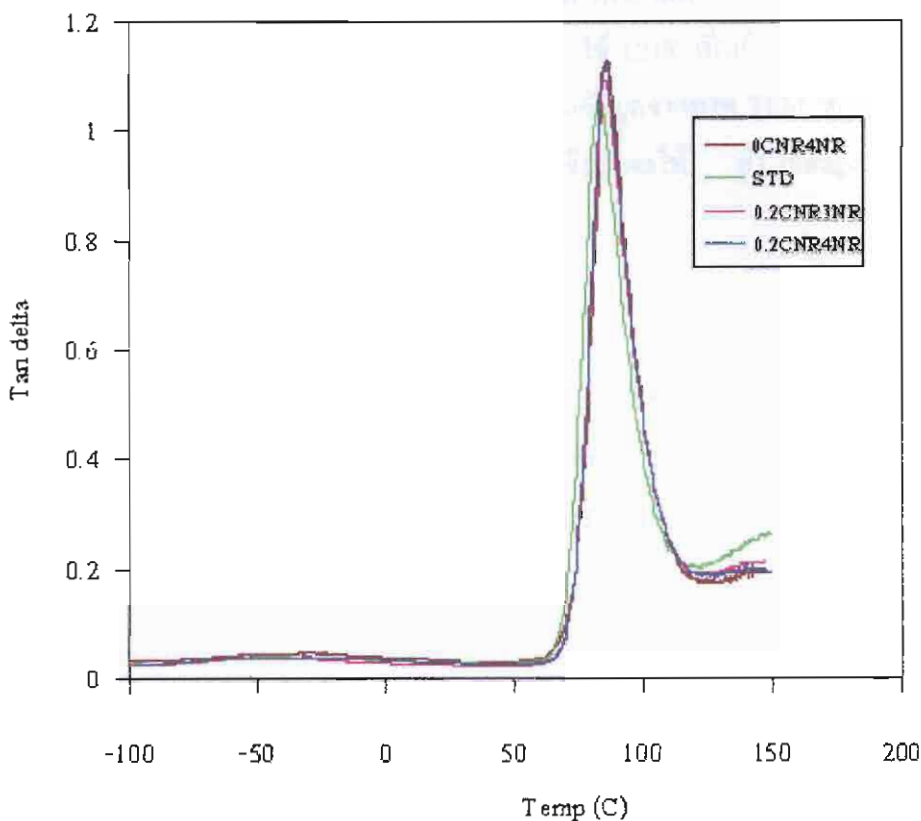
DMA เป็นการศึกษาสมบัติเชิงกลภายใต้ Oscillatory load ซึ่งจะถูก วัดเป็น ฟังก์ชันของอุณหภูมิ ในขณะที่ขึ้นทดสอบถูกควบคุมด้วยโปรแกรมเวลา โปรแกรม อุณหภูมิจะสัมพันธ์กับการควบคุม heating และ cooling หรือ คงอุณหภูมิให้คงที่ การทดลองจะกระทำภายใต้ บรรยากาศของแก๊สเฉื่อย(N_2) ช่วงอุณหภูมิที่ทำการทดสอบจะอยู่ในช่วง -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



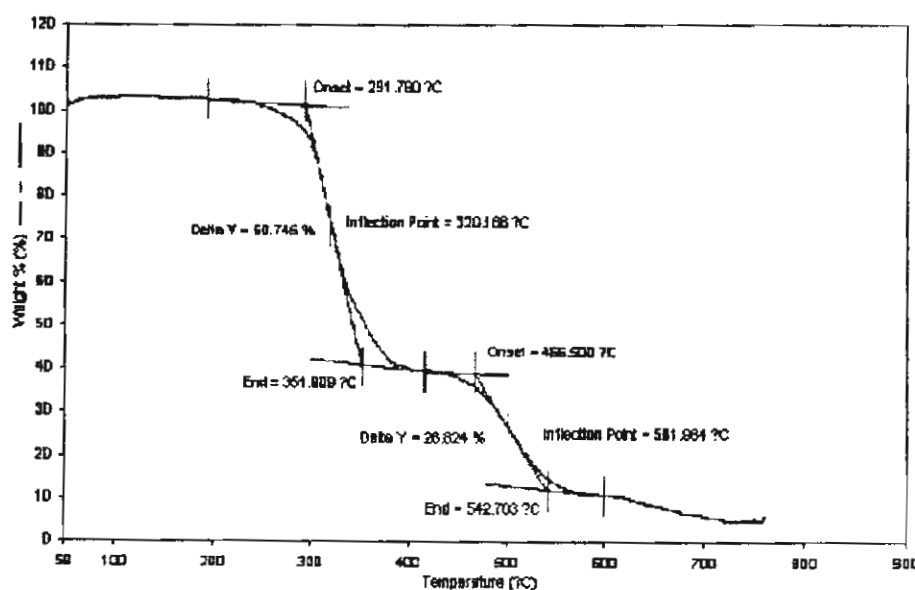
รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ กับ Tan δ

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

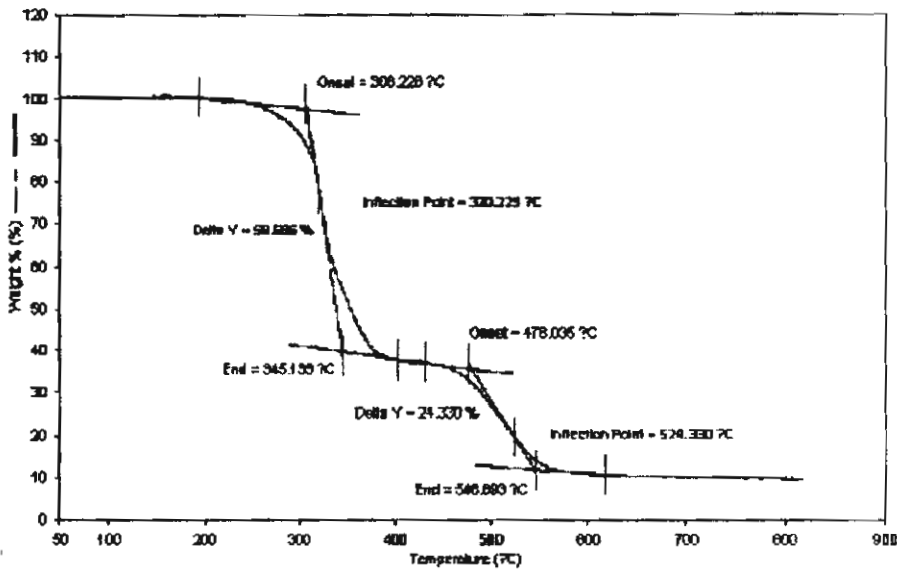
0.2CNR4NR มีลักษณะเป็นเนิน 2 เนิน นั้นแสดงว่ามีการแยกเฟสกัน ทั้งนี้ความสูงของเนินไม่เด่นชัด เนื่องจากใช้น้ำยางในปริมาณน้อย ดังนั้นการใช้ CNR เป็นตัวประสานช่วยให้น้ำยางธรรมชาติ กับ PVC เข้ากันได้ ซึ่งสามารถสนับสนุนข้อมูลจากภาพ TEM ซึ่งการขึ้นรูป PVC sheet ด้วยสูตร 0.2CNR3NR เป็นสัดส่วนที่เหมาะสม จึงส่งผลให้ 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

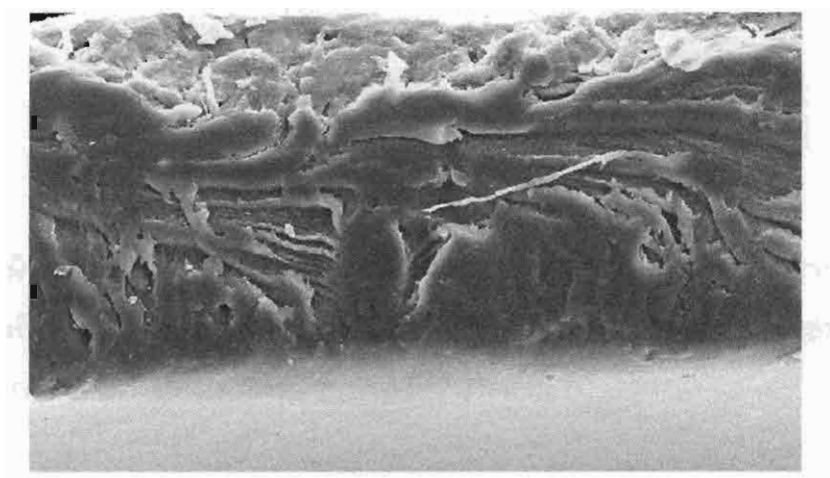
โดยปกติแล้ว PVC ที่ไม่มีการเติม additive จะมีค่า T_{d1} ประมาณ 200°C [2] ซึ่งเป็นจุดที่เริ่มมีการปลดปล่อยโมเลกุลของ HCl ในการ compound PVC จะต้องทำให้อุณหภูมิสูงกว่า 80°C จึงต้องมีการเติม heat stabilizer ลงไปเพื่อให้ PVC สามารถขึ้นรูปได้โดยไม่เกิดการ decompose ไปก่อน ซึ่งในการดำเนินงานวิจัยนี้ มีการใช้ 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

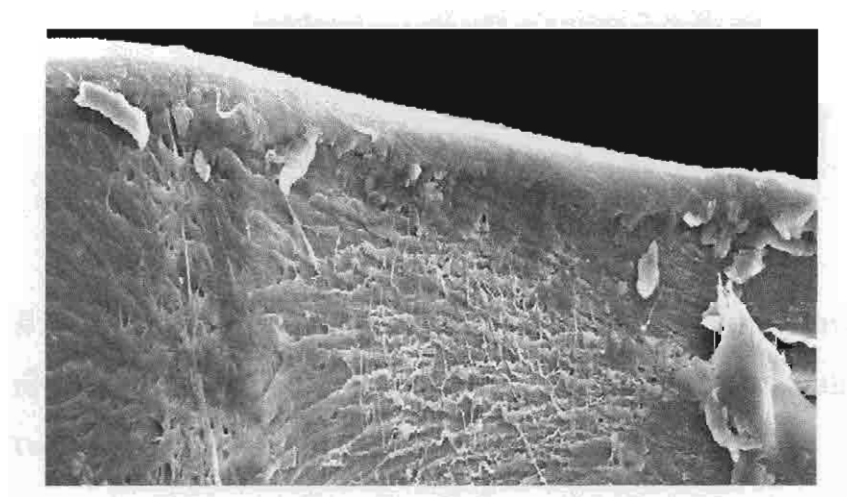
4.2.3 สมบัติทาง Morphology

4.2.3.1 การตรวจสอบด้วย Scanning Electron Microscopy (SEM)

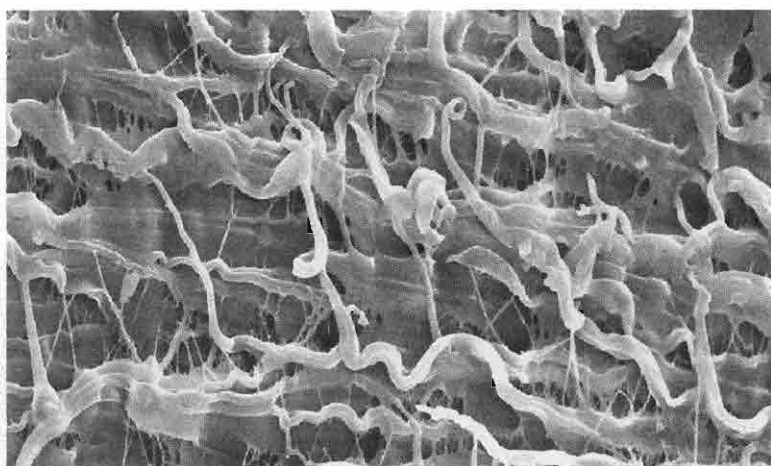
จากการทดสอบ Morphology ของที่ผ่านการทดสอบ Impact resistance และ Tensile strength โดยตรวจสอบที่ผิวชิ้นงานที่แตกหัก ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.18-4.30



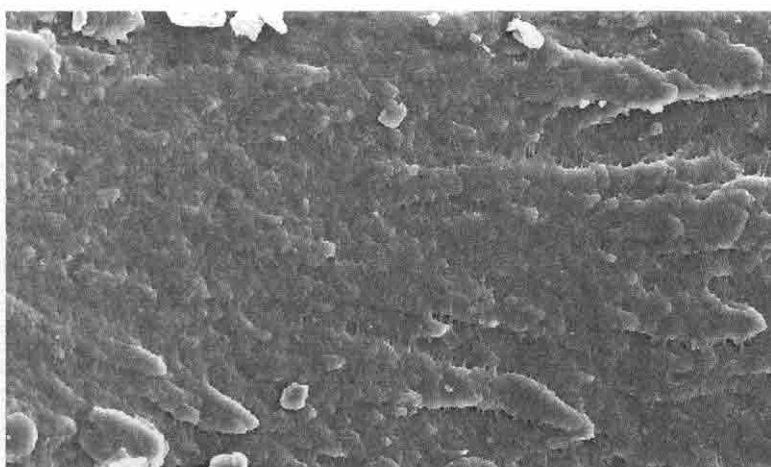
รูปที่ 4.18 ผิวของรอยขาดจากการตรวจสอบ SEM ของชิ้นงาน PVC ที่ใช้ MBS เป็น Impact modifier ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ Tensile strength (กำลังขยาย 400 เท่า)



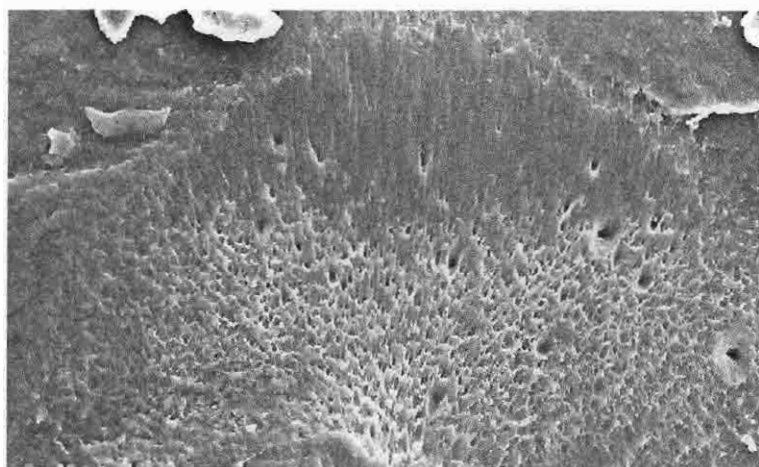
รูปที่ 4.19 ผิวของรอยขาดจากการตรวจสอบ SEM ของชิ้นงาน PVC ที่ใช้น้ำยางธรรมชาติ เป็น impact modifier (สูตร 0CNR4NR) ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ Tensile strength (กำลังขยาย 400 เท่า)



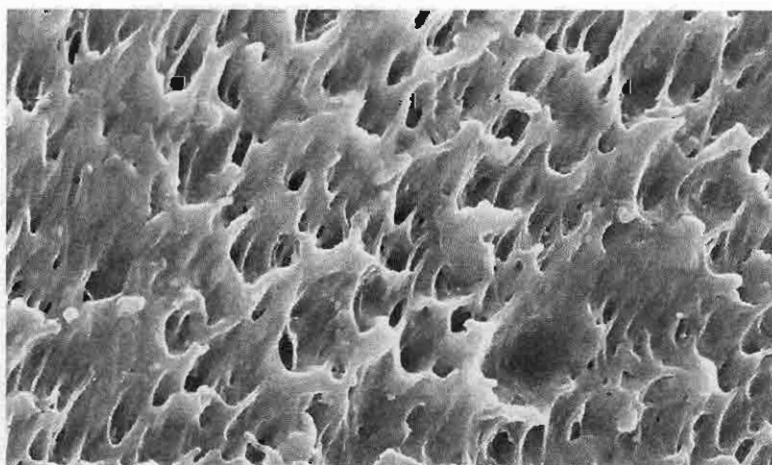
รูปที่ 4.20 ผิวของรอยขาดจากการตรวจสอบ SEM ของชิ้นงาน PVC ที่ใช้น้ำยางธรรมชาติ เป็น impact modifier (สูตร 0CNR4NR) ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ Tensile strength (กำลังขยาย 3000 เท่า บริเวณที่ 1)



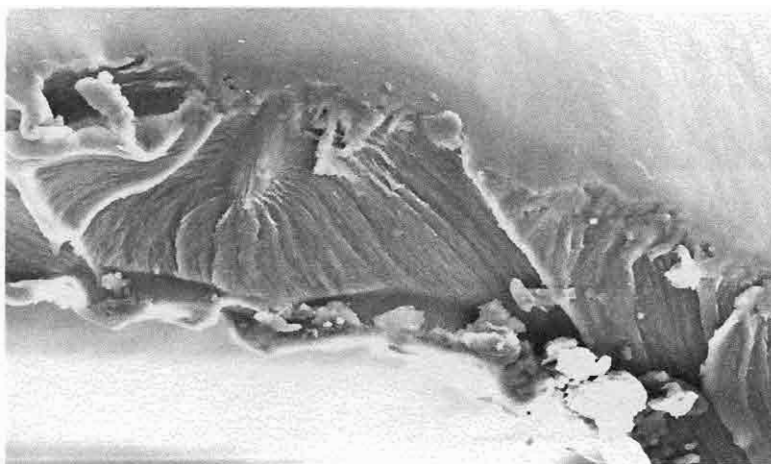
รูปที่ 4.21 ผิวของรอยขาดจากการตรวจสอบ SEM ของชิ้นงาน PVC ที่ใช้น้ำยางธรรมชาติ เป็น impact modifier (สูตร 0CNR4NR) ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ Tensile strength (กำลังขยาย 3000 เท่า บริเวณที่ 2)



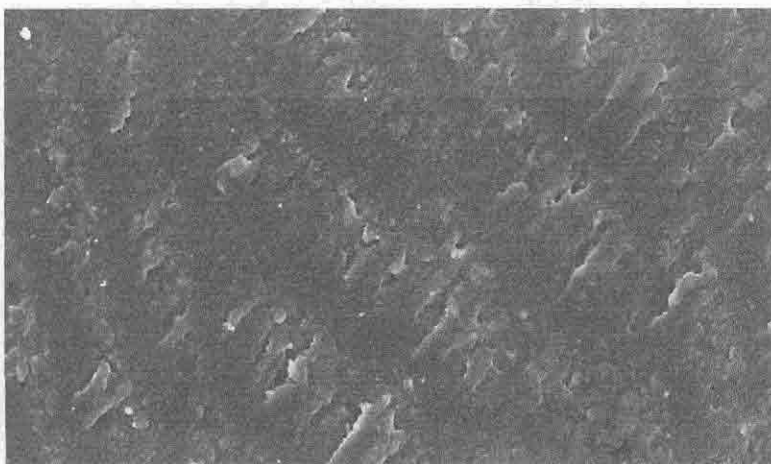
รูปที่ 4.22 ผิวของรอยขาดจากการตรวจสอบ SEM ของชิ้นงาน PVC ที่ใช้น้ำยางธรรมชาติ เป็น impact modifier (สูตร 0.2CNR3NR) ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ผ่านการ ทดสอบ Tensile strength (กำลังขยาย 400 เท่า)



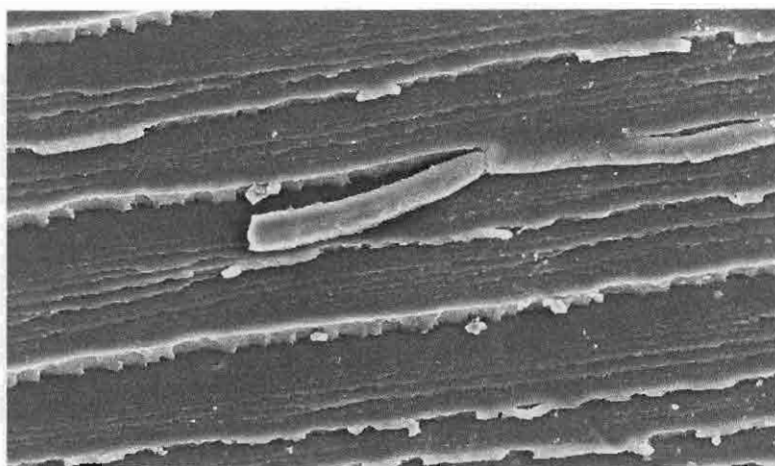
รูปที่ 4.23 ผิวของรอยขาดจากการตรวจสอบ SEM ของชิ้นงาน PVC ที่ใช้น้ำยางธรรมชาติ เป็น impact modifier (สูตร 0.2CNR3NR) ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ผ่านการ ทดสอบ Tensile strength (กำลังขยาย 3000 เท่า)



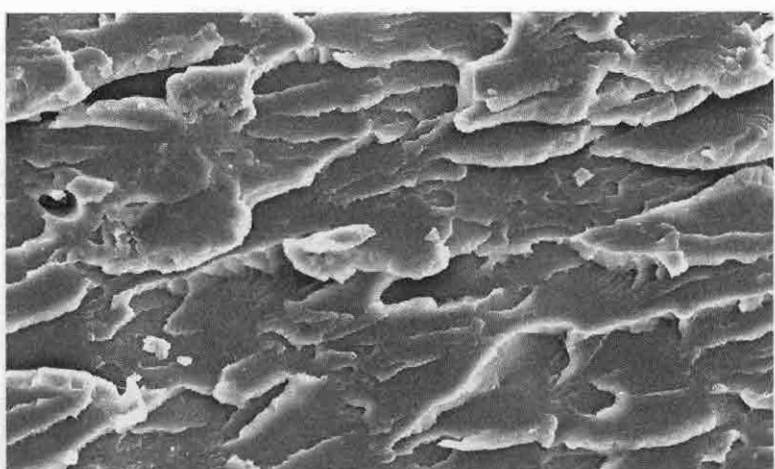
รูปที่ 4.24 ผิวของรอยขาดจากการตรวจสอบ SEM ของชิ้นงาน PVC ที่ใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น impact modifier (สูตร 0.2CNR4NR) ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ Tensile strength (กำลังขยาย 400 เท่า)



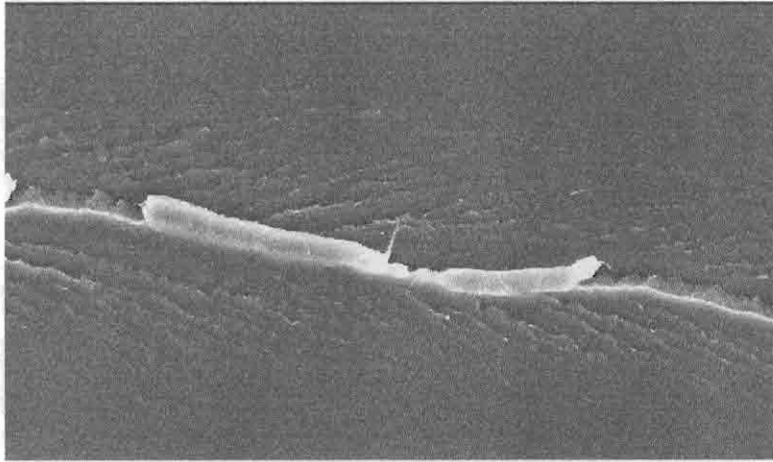
รูปที่ 4.25 รอยแตกหักที่ผิวหน้าจากการตรวจสอบ SEM ของชิ้นงาน PVC ที่ใช้ MBS เป็น impact modifier (สูตร STD) ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ Impact resistance (กำลังขยาย 400 เท่า)



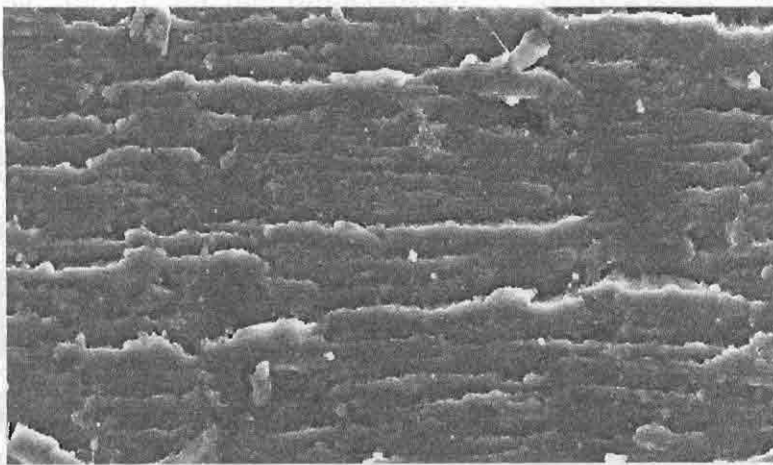
รูปที่ 4.26 รอยแตกหักที่ผิวหน้าจากการตรวจสอบ SEM ของชิ้นงาน PVC ที่ไม่มีการเติม Impact modifier ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ Impact resistance (ที่กำลังขยาย 400 เท่า)



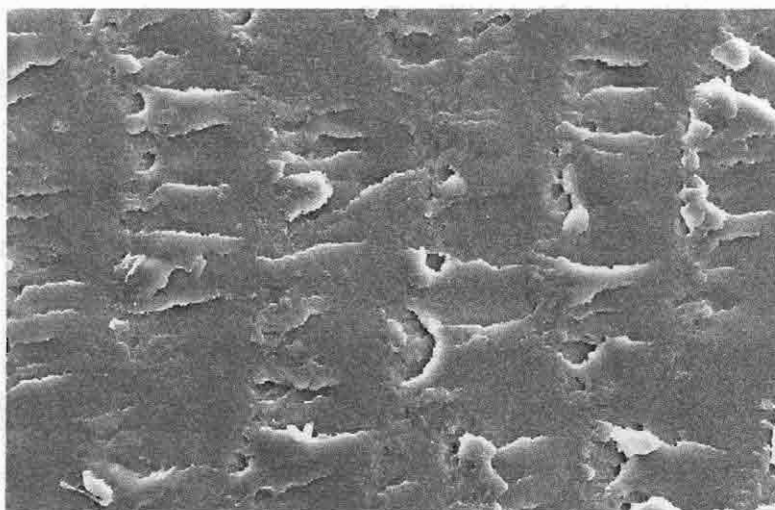
รูปที่ 4.27 รอยแตกหักที่ผิวหน้าจากการตรวจสอบ SEM ของชิ้นงาน PVC ที่ไม่มีการเติม Impact modifier ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ Impact resistance (ที่กำลังขยาย 3000 เท่า)



รูปที่ 4.28 รอยแตกหักที่ผิวหน้าจากการตรวจสอบ SEM ของชิ้นงาน PVC ที่ใช้น้ำยางธรรมชาติ เป็น Impact modifier โดยไม่มีการเติม CNR (สูตร 0CNR4NR ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ Impact resistance (ที่กำลังขยาย 400 เท่า)



รูปที่ 4.29 รอยแตกหักที่ผิวหน้าจากการตรวจสอบ SEM ของชิ้นงาน PVC ที่ใช้น้ำยางธรรมชาติ เป็น Impact modifier (สูตร 0.2CNR3NR ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ Impact resistance (ที่กำลังขยาย 400 เท่า)



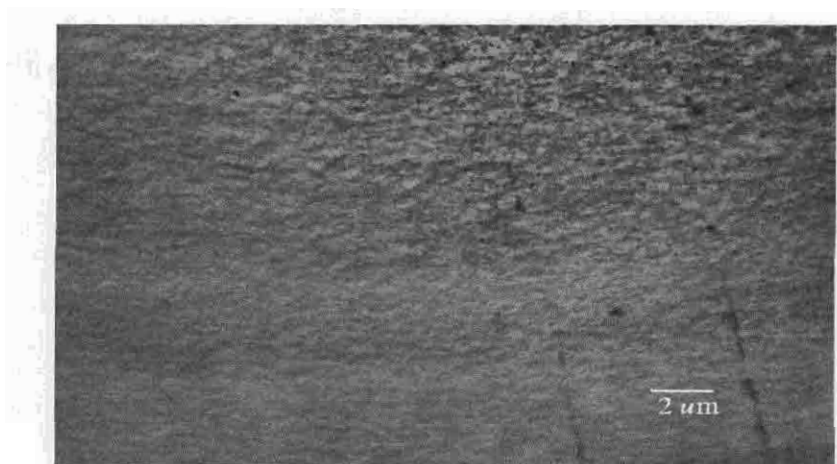
รูปที่ 4.30 รอยแตกหักที่ผิวหน้าจากการตรวจสอบ SEM ของชิ้นงาน PVC ที่ใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น Impact modifier (สูตร 0.2CNR4NR) ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบ Impact resistance (ที่กำลังขยาย 400 เท่า)

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

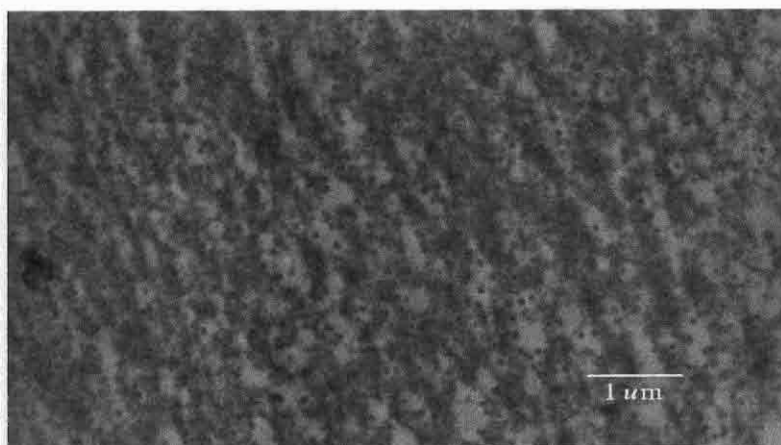
ที่ไขว้ไปมาแบบสุ่มคล้ายการค้ำยัดเนื่องมาจากแรงภายนอก แต่แนวการเปลี่ยนแปลงไม่ชัดเจน แต่เมื่อดูการแตกหักของชิ้นงาน PVC ที่ใช้น้ำยางธรรมชาติเป็น Impact modifier และใช้ CNR เป็นตัวประสาน ดังรูปที่ 4.22, 4.24 และ 4.30 จะเห็นลักษณะการแตกหักที่มีสีขาวกระจายอยู่เป็นจำนวนมากโดยเฉพาะเมื่อดูรูปที่ 4.23 ที่ได้จากการส่องรูป 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)

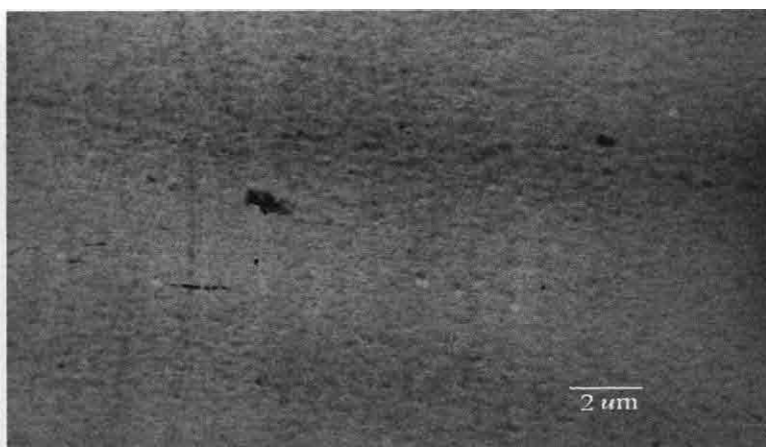
จากการตรวจสอบความเข้ากันได้ของ PVC กับ Impact modifier ด้วย TEM โดยดูลักษณะการกระจายตัวของ Impact modifier ใน PVC matrix ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.31-4.58



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



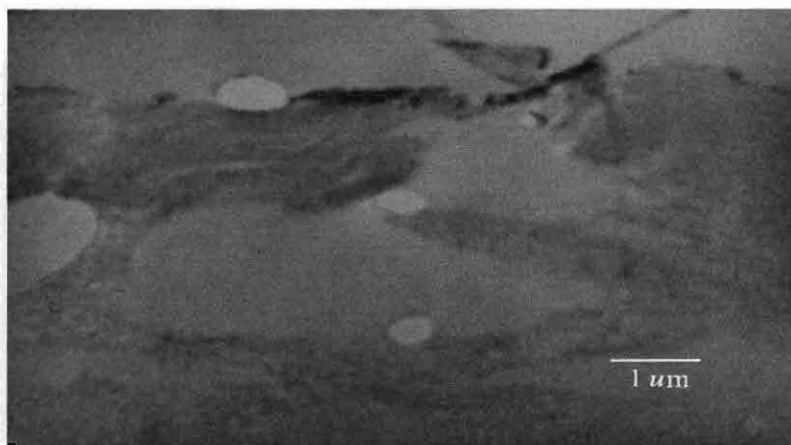
รูปที่ 4.32 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 8,000 เท่า)
ของ PVC sheet สูตร STD



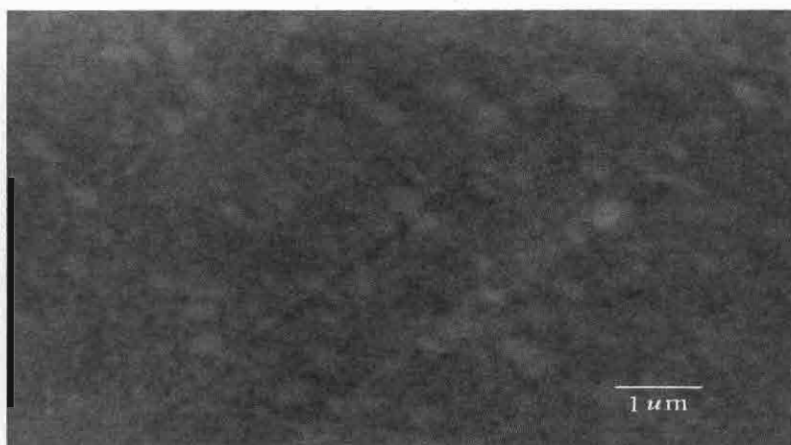
รูปที่ 4.33 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 3,000 เท่า)
ของ PVC sheet ที่ผ่านการดึงยืด สูตร STD



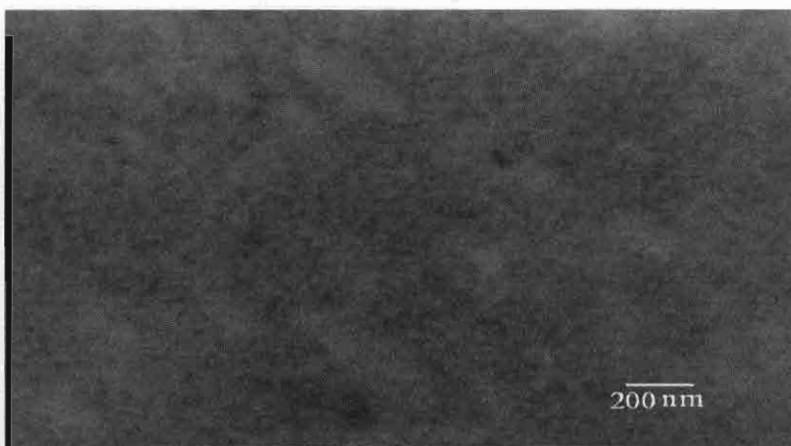
รูปที่ 4.34 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 8,000 เท่า)
ของ PVC sheet ที่ผ่านการดึงยืด สูตร STD



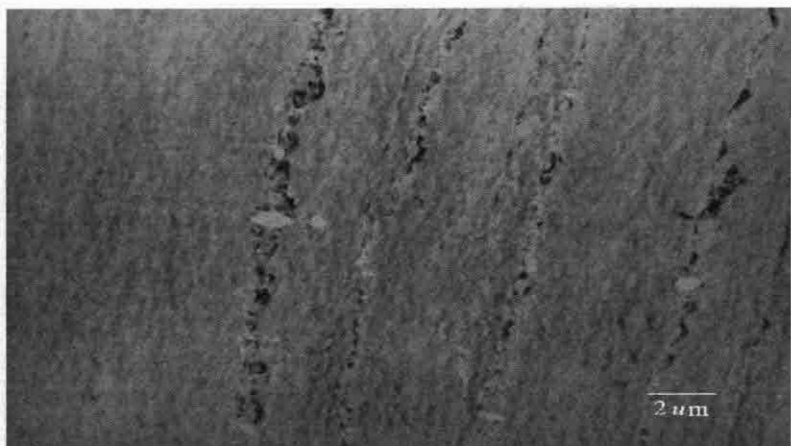
รูปที่ 4.35 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 8,000 เท่า)
ของ PVC sheet สูตร 0CNR4NR



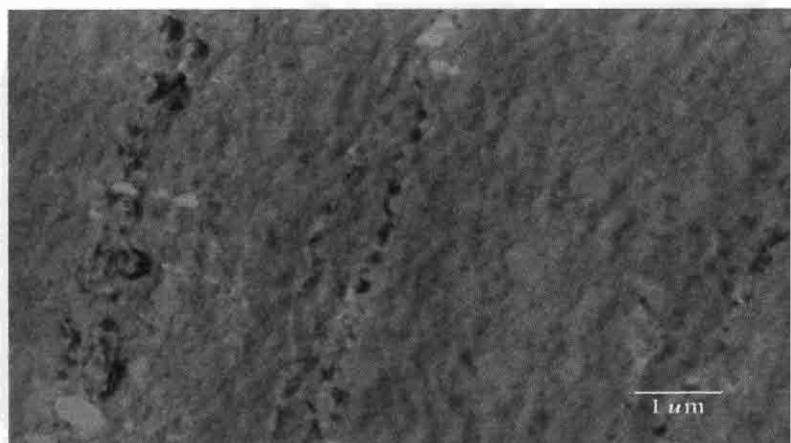
รูปที่ 4.36 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 8,000 เท่า)
ของ PVC sheet สูตร 0.2CNR3NR



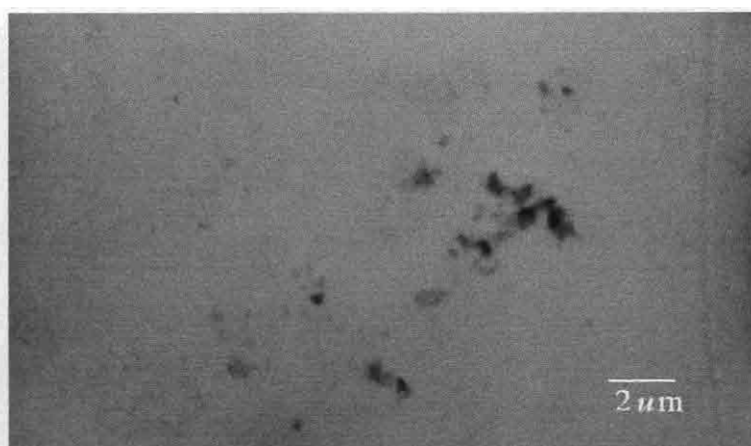
รูปที่ 4.37 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 25,000 เท่า)
ของ PVC sheet สูตร 0.2CNR3NR



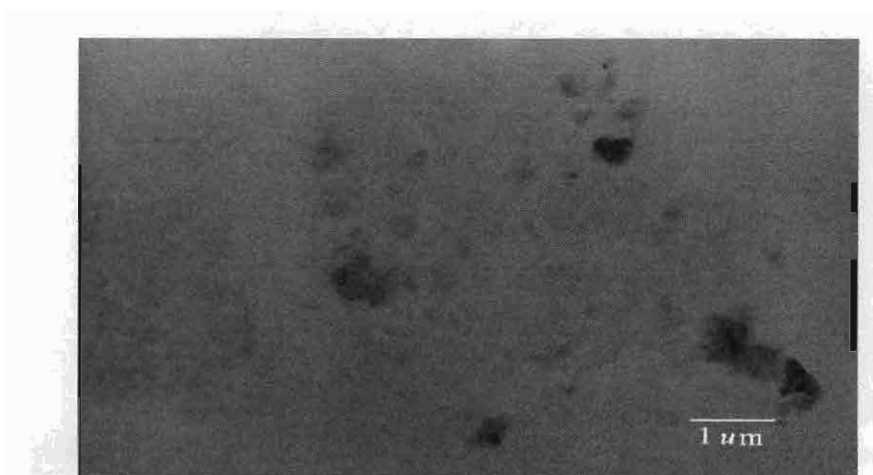
รูปที่ 4.38 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 3,000 เท่า)
ของ PVC sheet ที่ผ่านการดึงยืด สูตร 0.2CNR3NR



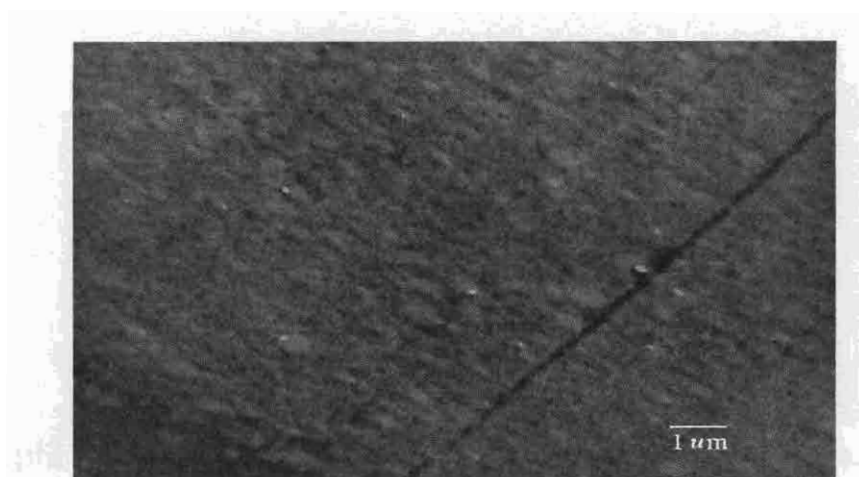
รูปที่ 4.39 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 8,000 เท่า)
ของ PVC sheet ที่ผ่านการดึงยืด สูตร 0.2CNR3NR



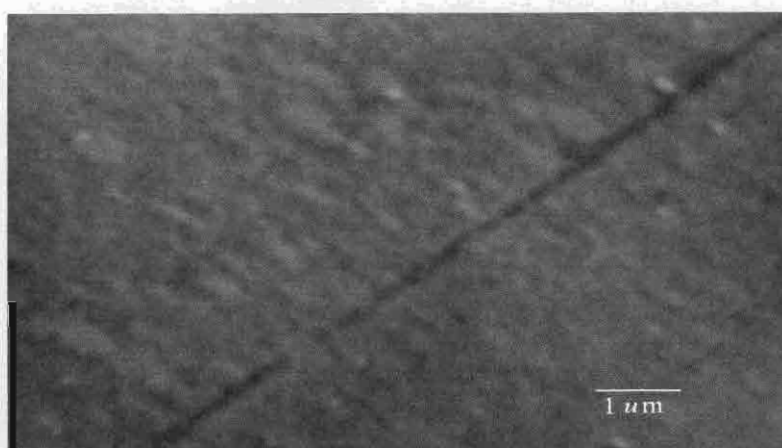
รูปที่ 4.40 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 3,000 เท่า)
ของ PVC sheet สูตร 0.2CNR3NR ที่ผ่านการ Vacuum thermoforming



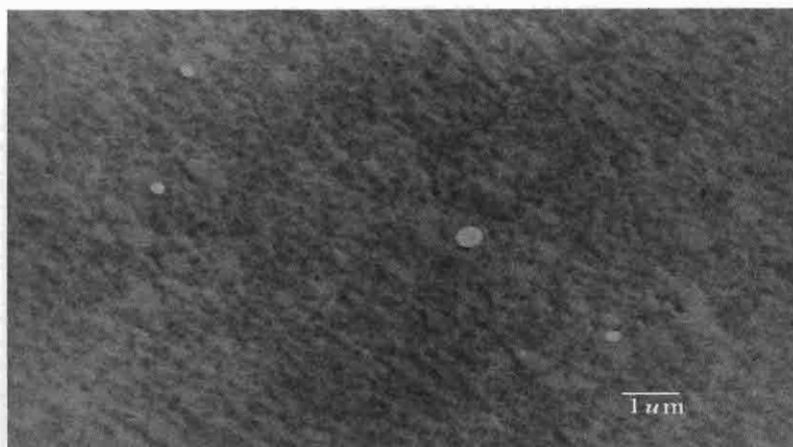
รูปที่ 4.41 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 8,000 เท่า)
ของ PVC sheet สูตร 0.2CNR3NR ที่ผ่านการ Vacuum thermoforming



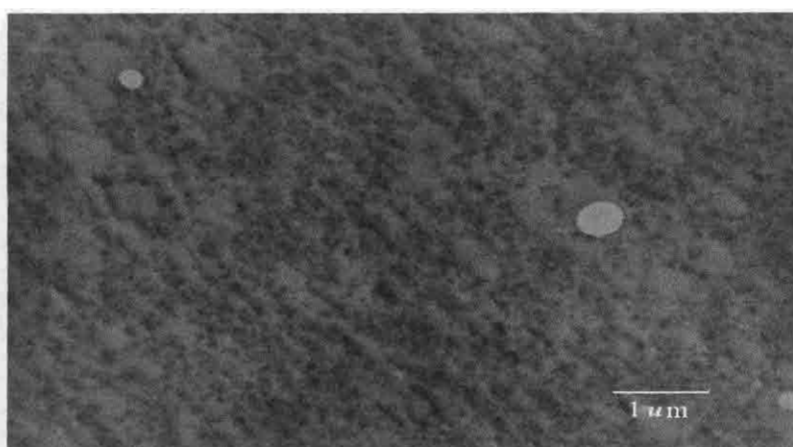
รูปที่ 4.42 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 5,000 เท่า)
ของ PVC sheet สูตร 0.2CNR4NR



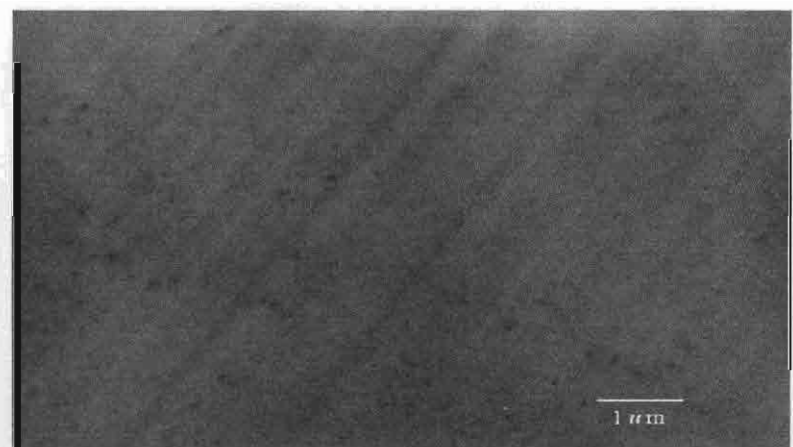
รูปที่ 4.43 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 8,000 เท่า)
ของ PVC sheet สูตร 0.2CNR4NR



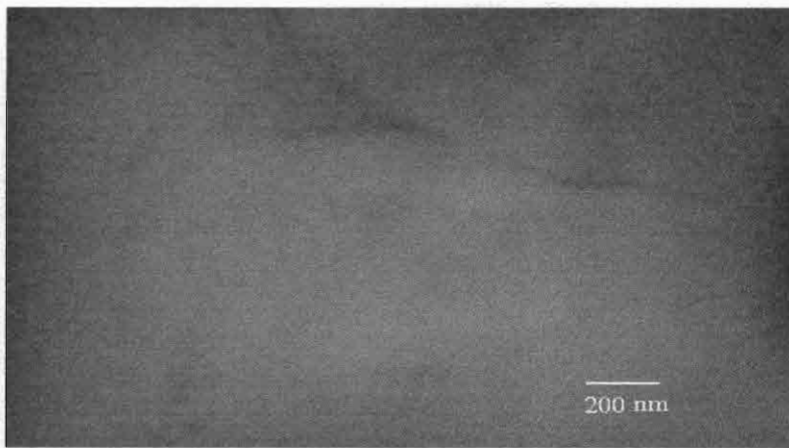
รูปที่ 4.44 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 5,000 เท่า)
ของ PVC sheet ที่ผ่านการดึงยืด สูตร 0.2CNR4NR



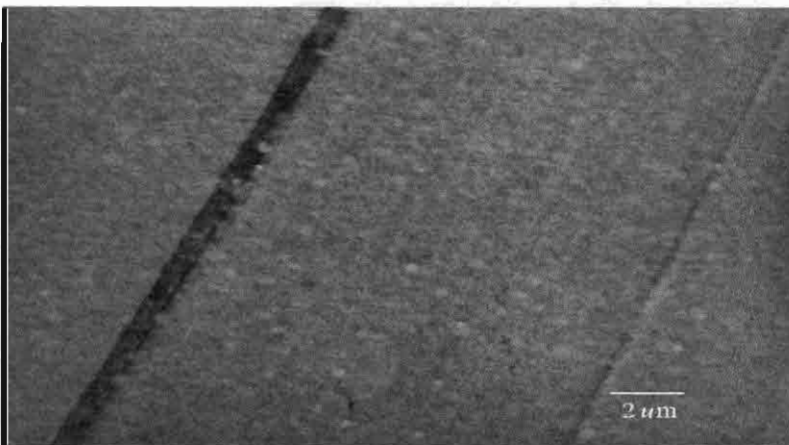
รูปที่ 4.45 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 8,000 เท่า)
ของ PVC sheet ที่ผ่านการดึงยืด สูตร 0.2CNR4NR



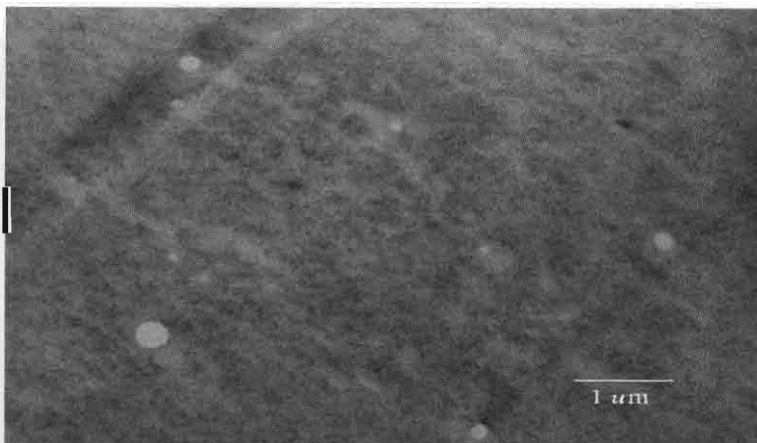
รูปที่ 4.46 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 8,000 เท่า)
ของ PVC sheet สูตร 0.2CNR4NR ที่ผ่านการ Vacuum Thermoforming



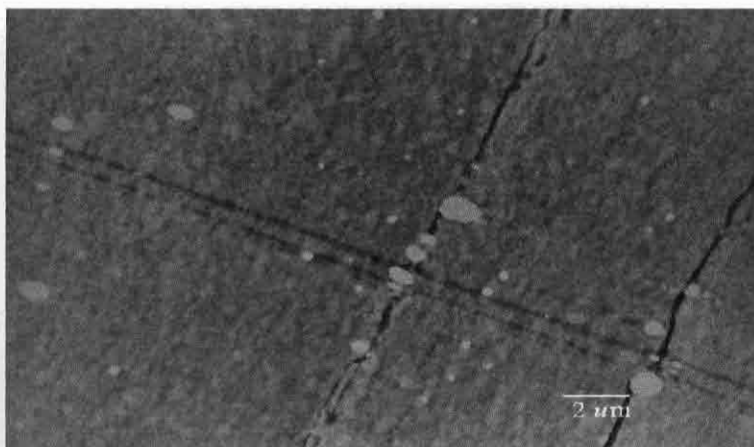
รูปที่ 4.47 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 25,000 เท่า)
ของ PVC sheet สูตร 0.2CNR4NR ที่ผ่านการ Vacuum Thermoforming



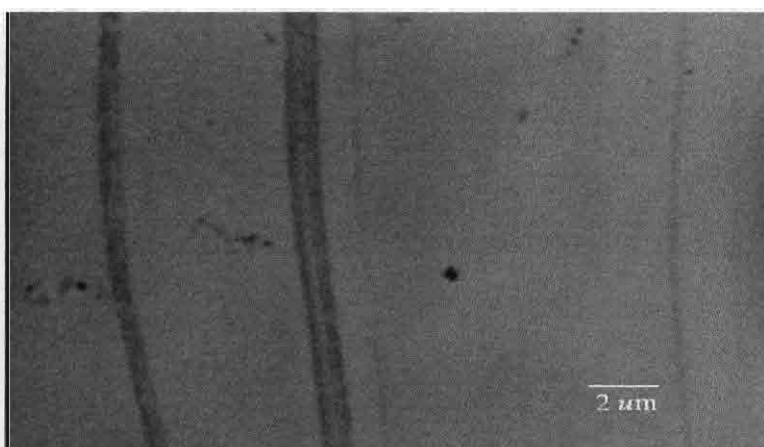
รูปที่ 4.48 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 3,000 เท่า)
ของ PVC sheet สูตร 0.3CNR3NR



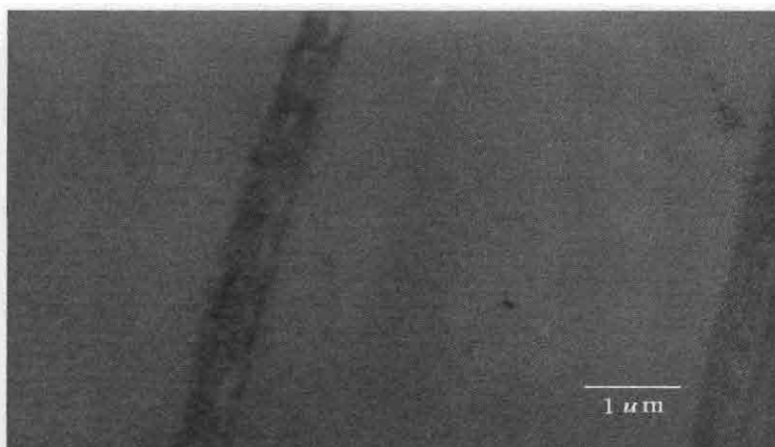
รูปที่ 4.49 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 8,000 เท่า)
ของ PVC sheet สูตร 0.3CNR3NR



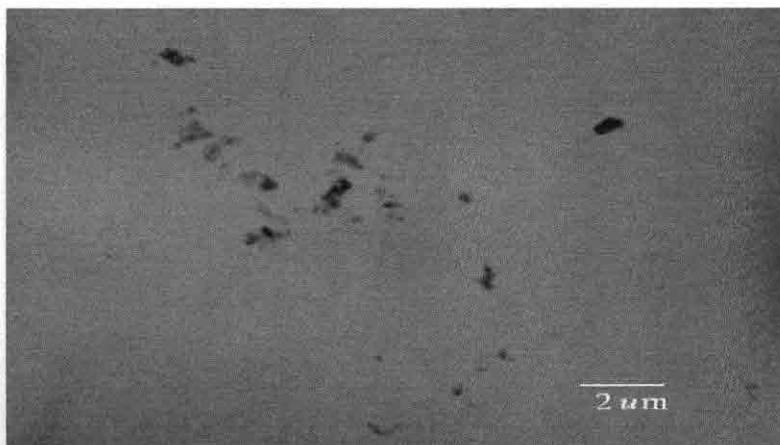
รูปที่ 4.50 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 3,000 เท่า)
ของ PVC sheet สูตร 0.3CNR4NR



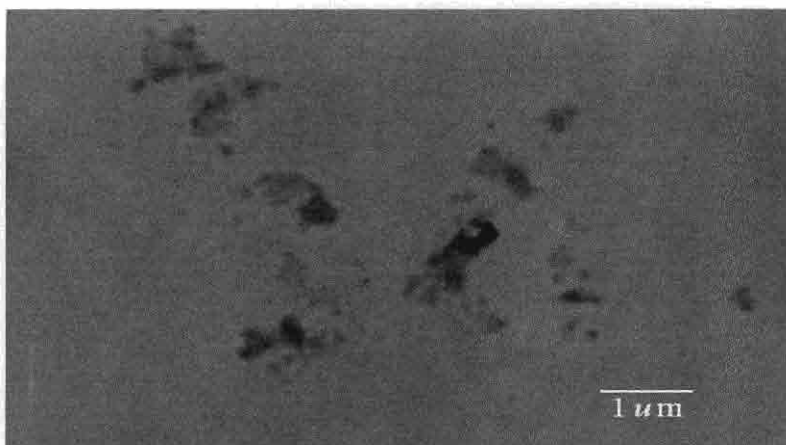
รูปที่ 4.51 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 3,000 เท่า)
ของ PVC sheet ที่ผ่านการดึงยืด สูตร 0.3CNR4NR



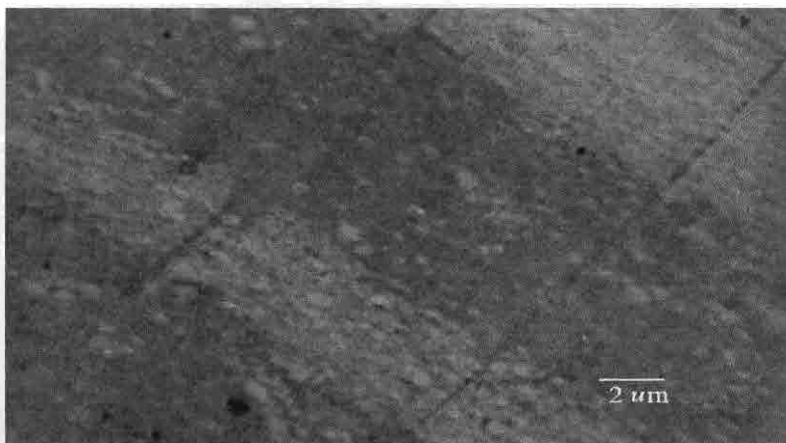
รูปที่ 4.52 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 8,000 เท่า)
ของ PVC sheet ที่ผ่านการดึงยืด สูตร 0.3CNR4NR



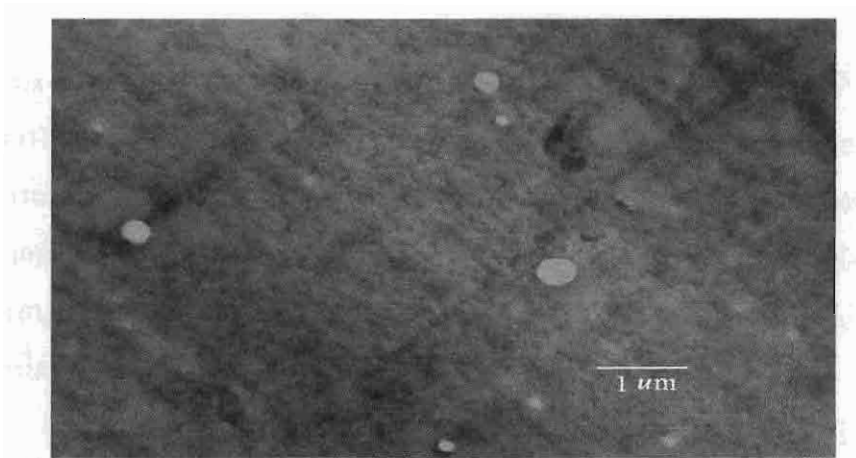
รูปที่ 4.53 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 3,000 เท่า)
ของ PVC sheet ที่มี % strain ต่ำ สูตร 0.3CNR6NR



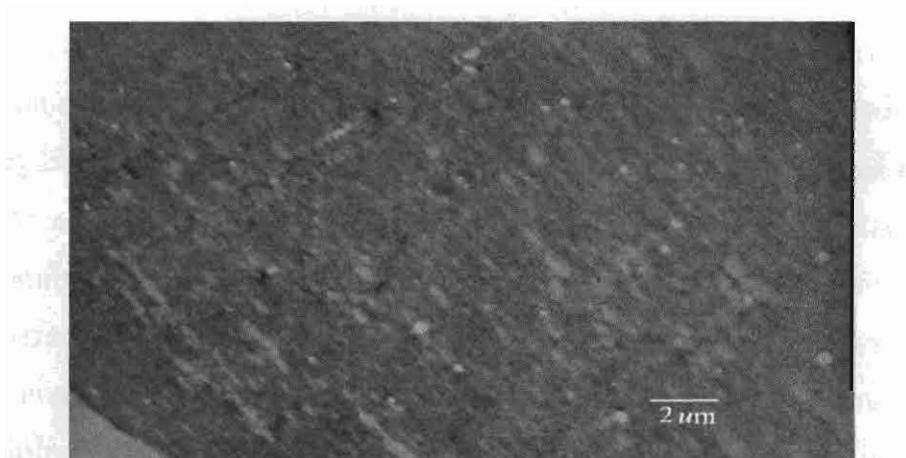
รูปที่ 4.54 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 8,000 เท่า)
ของ PVC sheet ที่มี % strain ต่ำ สูตร 0.3CNR6NR



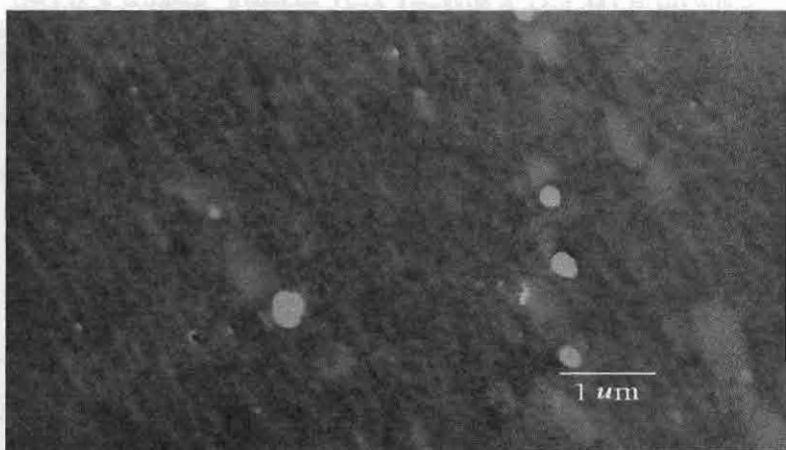
รูปที่ 4.55 การตรวจสอบ Morphology ด้วยเทคนิค TEM (กำลังขยาย 3,000 เท่า)
ของ PVC sheet ที่มี % strain สูง สูตร 0.3CNR6NR



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

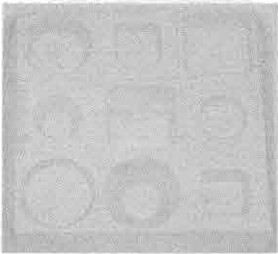
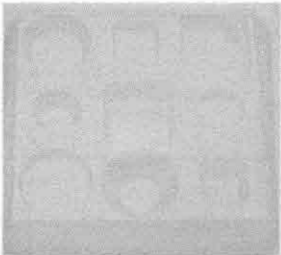
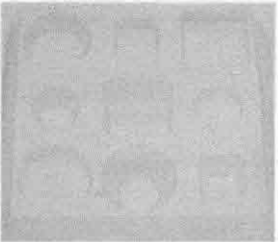
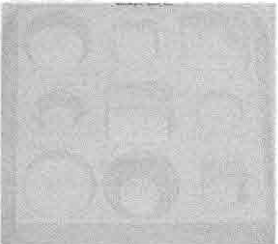
PVC matrix ซึ่งต่างจากกลุ่มที่มีการดึงยึดได้มาก จะพบว่ามีอนุภาคของยางกระจายอยู่ใน PVC ความแข็งแรงจึงเป็นจำนวนมาก ด้วยสาเหตุนี้จึงทำให้ PVC sheet สามารถดึงยึดได้มากกว่ากลุ่มที่ไม่พบอนุภาคของยางกระจายอยู่ใน PVC และ สูตร 0.3CNR7NR (รูปที่ 4.57) ได้ผลการทดสอบ TEM คล้ายกับ 0.3CNR6NR (รูปที่ 4.55) โดยกลุ่มที่มีการดึงยึดได้มากจะพบการกระจายของ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

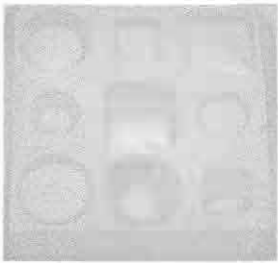
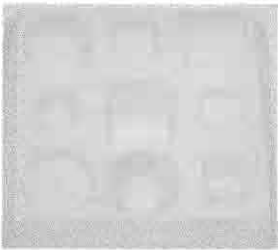
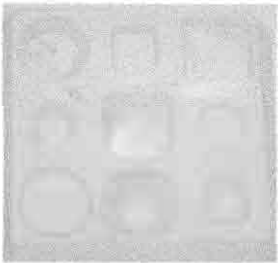
จากการศึกษาผลของ Tension ที่เกิดจากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการ vacuum thermoforming ที่มีต่อการกระจายตัวของ impact modifier ใน PVC matrix โดยนำชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วย vacuum thermoforming มาตรวจสอบ TEM พิจารณารูปที่ 4.40-4.41 และ 4.46-4.47 ไม่เห็นการกระจายตัวของอนุภาค impact modifier แต่เห็นลักษณะเป็นเฟสที่เป็นเนื้อเดียวกันและเห็นแนวการดึงยึดเนื่องมาจาก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

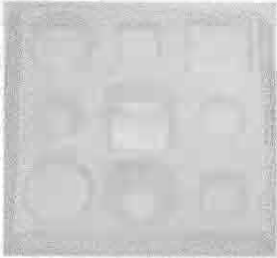
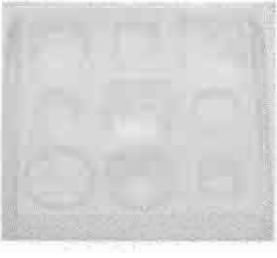
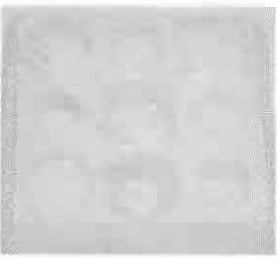
4.2.4 ความสามารถในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการ Vacuum thermoforming

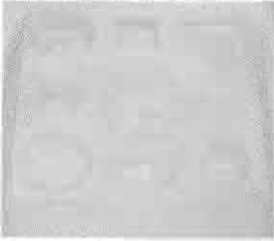
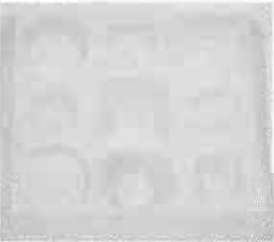
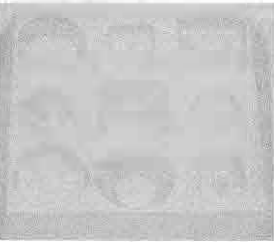
จาก PVC compound ที่ได้เมื่อขึ้นรูปเป็น sheet แล้วนำไปทำการทดสอบสมบัติด้านความทนทานต่อแรงกระแทกและสมบัติด้านการดึงยึดจึงได้มีการนำ PVC sheet ที่ได้มาขึ้นรูปด้วยเทคนิค Vacuum thermoforming ที่สภาวะอุณหภูมิ 200 °C, Heater relay ประมาณ 30 วินาที, Vacuum 8 วินาที, Cool 30 วินาที และดันชิ้นงานออก (Blow) 0.4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

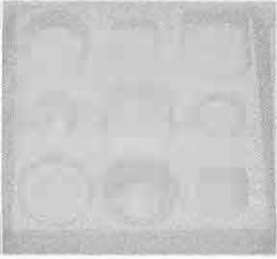
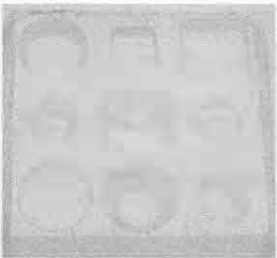
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบความสามารถในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการ Vacuum thermoforming

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 และเป้าที่ตื้นที่สุด 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 ที่ขึ้นรูปโดยใช้น้ำยางธรรมชาติ 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