

การลดปริมาณสารไดออกซิลพลาเลทในผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ขึ้นรูปจากพอลิไวนิลคลอไรด์  
ด้วยผงยางระดับนาโนเมตร



นายวัฒน์ศิษย์ ผดุงเศรษฐกิจ

# ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

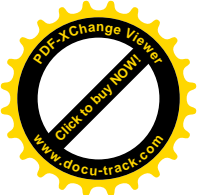
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



REDUCTION OF DIOCTHYL PHTHALATE IN PLASTIC PRODUCTS PRODUCED FROM  
POLY(VINYL CHLORIDE) BY USING NANO POWDER RUBBER



Mr.Wattanasit Padungsestakit

ศูนย์วิทยทรัพยากร

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University



วัฒน์ศิษย์ ผดุงเศรษฐกิจ : การลดปริมาณสารไดออกทิลพธาลาเทในผลิตภัณฑ์พลาสติก ที่ขึ้นรูปจากพอลิไวนิลคลอไรด์ด้วยผงยางระดับนาโนเมตร (REDUCTION OF DIOCTHYL PHTHALATE IN PLASTIC PRODUCTS PRODUCED FROM POLY(VINYL CHLORIDE) BY USING NANO POWDER RUBBER ) อ. ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์หลัก : อ.ดร. สิริจุฑารัตน์ ไคววารักษ์, 123 หน้า.

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อลดปริมาณสารไดออกทิลพธาลาเท (Diocetyl Phthalate, DOP) ในการเสริมสภาพพลาสติกพอลิไวนิลคลอไรด์หรือพีวีซี (Poly(vinyl chloride), PVC) โดยใช้ผงยางนาโน Acrylonitrile butadiene rubber (NBR) และยางนาโน Styrene butadiene rubber (SBR) ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 100 นาโนเมตร งานวิจัยนี้แบ่งการผสม PVC กับ DOP เป็น 2 กลุ่ม คือ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน ที่ปริมาณ DOP 15, 20, 25 และ 30 phr และปริมาณยางนาโนแต่ละ 1, 3, 5, 7, 9 และ 11 phr ผลการวิจัยสมบัติเชิงกล เหนียว ความร้อน และเชิงกายภาพของ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน พบว่าในเชิงสมบัติแรงดึง สามารถลดปริมาณ DOP จาก 25 phr เป็น 20 phr เมื่อใช้ยางนาโน SBR 3 phr หรือลดจาก 20 phr เหลือ 15 phr เมื่อใช้ยาง NBR 11 phr ร่วมด้วย ในเชิงการทนต่อแรงดัดโค้ง สามารถปริมาณ DOP จาก 20 phr เป็น 15 phr ซึ่งเติมยางนาโน SBR เพียง 1 phr หรือลดปริมาณ DOP 25 phr เหลือ 20 phr เมื่อมียาง NBR ร่วมอยู่ด้วย 3 phr ในด้านการทนต่อพลังงานกระแทก พบว่ายางนาโน NBR สามารถดูดซับพลังงานได้ดีกว่ายางนาโน SBR เนื่องจากยางนาโน NBR ยึดติดกับ PVC เมทริกซ์ได้ดี และสามารถลดปริมาณ DOP จาก 20 phr เป็น 15 phr โดยมียางนาโน NBR ร่วมอยู่ด้วย 7 phr ในด้านการทนต่อการโค้งงอโดยความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ DOP ลดลง ขณะที่การเติมยางนาโน NBR หรือ SBR ร่วมกับ DOP ทำให้ความสามารถการทนต่อการโค้งงอโดยความร้อนของ PVC/DOP/ยางนาโน ลดลง และการเติมยางนาโน NBR ปริมาณมากทำให้ PVC ดูดซึมน้ำได้เพิ่มขึ้น เนื่องจากยางนาโน NBR มีความเป็นขั้วสูง การใส่ยางนาโนทั้ง 2 ชนิดร่วมกับ DOP ยังช่วยปรับปรุงพฤติกรรมการไหลของ PVC ให้ดีขึ้น แต่ทำให้ความใสของ PVC ลดลง โดย PVC ที่ปรับปรุงความเป็นหมอกเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณยางนาโนทั้ง 2 ชนิดสูงขึ้น

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่อนิสิต วัฒน์ศิษย์ ผดุงเศรษฐกิจ

สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....สิริจุฑารัตน์

ปีการศึกษา.....2553.....

# # 5270492121: MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS: PLASTICIZER / DIOCTHYL PHTHALATE / ACRYLONITRILE BUTADIENE RUBBER / STYRENE BUTADIENE RUBBER

WATTANASIT PADUNGSESTAKIT: REDUCTION OF DIOCTHYL PHTHALATE IN PLASTIC PRODUCTS PRODUCED FROM POLY(VINYL CHLORIDE) BY USING NANO POWDER RUBBER. ADVISOR: SIRIJUTARATANA COVAVISARUCH, Ph.D., 123 pp.

The aim of this research was to reduce the amount of Diocthyl Phthalate (DOP) plasticizer in Poly(vinyl chloride) (PVC) by using nano particles rubber of acrylonitrile butadiene rubber (NBR) and styrene butadiene rubber (SBR) with average particle size of 100 nm. Compounds of PVC/DOP and PVC/DOP/nano rubber were prepared. The amount of DOP was varied at 15, 20, 25 and 30 phr in both compounds while the PVC/DOP/nano rubber contained NBR or SBR at 1, 3, 5, 7, 9 and 11 phr. Experimental results showed that for identical tensile strength, DOP content could be reduced from 25 phr to 20 phr when 3 phr of nano SBR was added while the DOP could also be reduced from 20 to 15 phr with an addition of 3 phr of nano NBR. For flexural strength, the DOP content could be reduced from 20 phr to 15 phr when 1 phr of nano SBR was combined. Likewise, it was possible to reduce DOP content from 20 phr to 15 phr when NBR was applied at 3 phr. The heat deflection temperature (HDT) increased when the DOP content was reduced. The additional of NBR or SBR combined with DOP, make HDT of PVC/DOP/Nano-rubber decreased. The nano NBR absorbed more moisture than the nano SBR because nano NBR possessed greater polarity. With greater nano rubber content, the transparency of the modified PVC was further reduced. Both types of nano rubber improve the rheological properties and hence the processability of the modified PVC.

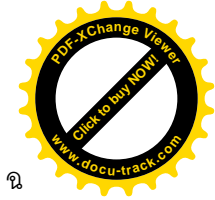
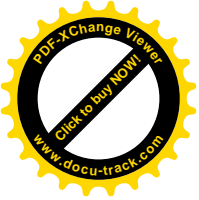
Department :..Chemical Engineering.....Student's Signature

*Wattanasit Padungsestakit*

Field of Study :..Chemical Engineering....Advisor's Signature

*J. Covavisaruch*

Academic Year :.....2010.....



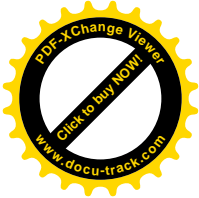
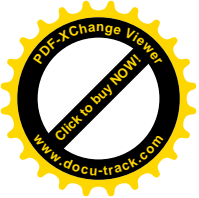
## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี ได้รับความช่วยเหลือจากอาจารย์  
ที่ปรึกษา อ.ดร.สิริจุฑาทวีตน์ โค้ววิสารัช อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมีคณะ  
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและวิเคราะห์งานวิจัยจนสำเร็จ  
เป็นอย่างดี ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เหมือนเดือน พิศาลพงศ์ และอ. ดร.อภิวัฒน์  
สุทธิธรรพ์ชัย อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย และ อ.ดร.นวดล เพ็ชรวัฒนา อาจารย์จากคณะเทคโนโลยีและนวัตกรรมผลิตภัณฑ์  
การเกษตร มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่คอยให้คำปรึกษาจนวิทยานิพนธ์สำเร็จ และ  
ขอขอบคุณ นายบูรณินท์ กัมพลพันธ์ และนายกิงชม พิซวงค์ สำหรับคำปรึกษาในการดำเนินงาน  
วิจัยเป็น อีกทั้ง ขอขอบคุณเพื่อนๆและพี่ๆทุกคนที่ช่วยเหลือในทุกๆด้านและสุดท้ายนี้ขอขอบคุณ  
ครอบครัวที่คอยให้การสนับสนุนตลอดมา

ขอขอบคุณบริษัท นวพลาสติกอินดัสทรี จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ วัสดุดิบ บริษัท SIAM  
EXTEK จำกัด ที่เอื้อเฟื้ออย่างนาโนสำหรับ งานวิจัยนี้ รวมถึงสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย  
(สกว.) ที่คอยสนับสนุนและส่งเสริมการทำงานวิจัยในครั้งนี้

จึงขอกล่าวนามและแสดงความขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

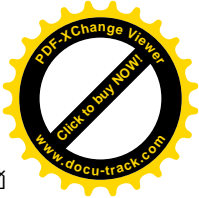
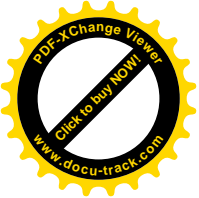
ศุภณีย์วิทย์ทรัพย์ากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
<b>1    บทนำ</b> .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
<b>2  ทฤษฎี</b> .....	6
2.1 พอลิเมอร์คอมพาวนด์ดี.....	6
2.2 พอลิไวนิลคลอไรด์หรือพีวีซี.....	6
2.2.1 สมบัติเชิงความร้อนของ PVC.....	8
2.2.2 สารเติมแต่งสำหรับ PVC.....	9
2.3 สารเสริมสภาพพลาสติก.....	10
2.3.1 ทฤษฎีการทำงานของสารเสริมสภาพพลาสติก.....	13
2.3.1.1 ทฤษฎีการหล่อลื่น.....	13
2.3.1.2 ทฤษฎีเจล.....	13
2.3.1.3 ทฤษฎีปริมาตรอิสระ.....	13
2.3.2 อุณหภูมิแปรผ่านสภาพแก้ว.....	14
2.3.3 ไดออกทิลพธาลเอท.....	16
2.4 ยางนาโน.....	18
2.4.2 ยางไนไตรล์.....	18
2.4.3 ยางสไตรีนบิวทาไดอีน.....	19

คู่มือการพิมพ์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



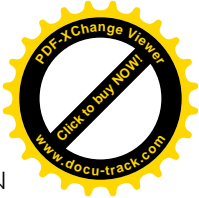
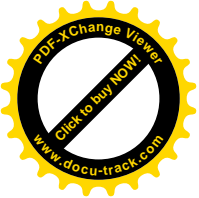
บทที่

หน้า

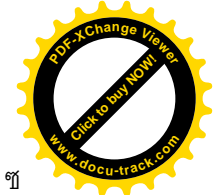
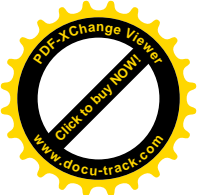
2.5	กระบวนการขึ้นรูป PVC.....	20
2.5.1	การผสม.....	21
2.5.1.1	เครื่องผสมความเร็วสูง.....	21
2.5.1.2	เครื่องผสมแบบ 2 ลูกกลิ้ง.....	21
2.5.1.3	การกดอัดในแม่พิมพ์.....	22
2.6	การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	23
2.6.1	การทดสอบแรงดึง.....	23
2.6.2	การทดสอบแรงดัดโค้ง.....	24
2.6.3	การทดสอบแรงกระแทก.....	25
2.7	การทดสอบสมบัติเชิงความร้อน.....	26
2.7.1	การศึกษาอุณหภูมิแปรผ่านสภาพแก้ว.....	26
2.7.2	การเสื่อมสลายด้วยความร้อน.....	27
2.8	การศึกษาสมบัติด้านการไหล โดยเครื่องทอร์ก รีโอมิเตอร์.....	28
2.9	การศึกษาสัณฐานวิทยา.....	29
3	วารสารปริทัศน์.....	30
4	วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	37
4.1	วัตถุประสงค์.....	37
4.2	การเตรียมชิ้นงานทดสอบ.....	38
4.2.1	ส่วนผสม PVC คอมพาวนด์.....	38
4.2.2	ขั้นตอนการผสม.....	38
4.3	คุณสมบัติของ PVC.....	40
4.3.1	สมบัติเชิงกล.....	40
4.3.1.1	การทนต่อแรงดึง.....	40
4.3.1.2	การทนต่อแรงดัดโค้ง.....	41
4.3.1.3	การทนต่อแรงกระแทก.....	42
4.3.2	สมบัติเชิงความร้อน.....	43
4.3.2.1	อุณหภูมิแปรสภาพแก้ว.....	43
4.3.2.2	อุณหภูมิการเสื่อมสลาย.....	43
4.3.2.3	อุณหภูมิการโค้งงอโดยความร้อน.....	44

ศูนย์บริการทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





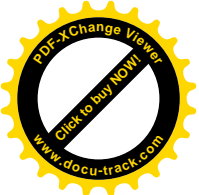
บทที่	ณ หน้า
4.3.3 สมบัติเชิงกายภาพ.....	45
4.3.3.1 ความแข็ง.....	45
4.3.3.2 ความใส/ทึบ.....	46
4.3.3.3 ความหนาแน่น.....	47
4.3.3.4 การดูดซึมน้ำ.....	48
4.3.3.5 กระแสวิทยา.....	48
4.3.4 การศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาค.....	49
<b>5 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....</b>	<b>50</b>
5.1 สมบัติเชิงกล.....	50
5.1.1 การทนต่อแรงดึง.....	50
5.1.2 การทนต่อแรงดัดโค้ง.....	54
5.1.3 การทนต่อแรงกระแทก.....	56
5.2 สมบัติเชิงความร้อน.....	58
5.2.1 อุณหภูมิแปรสภาพแก้ว.....	58
5.2.2 อุณหภูมิการเสื่อมสลาย.....	59
5.2.3 อุณหภูมิการโค้งงอโดยความร้อน.....	63
5.3 สมบัติเชิงกายภาพ.....	64
5.3.1 ความแข็ง.....	64
5.3.2 ความใส/ความทึบ.....	65
5.3.3 ความหนาแน่น.....	66
5.3.4 การดูดซึมน้ำ.....	67
5.3.5 กระแสวิทยา.....	73
5.4 การศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาค.....	87
<b>6 สรุปและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>93</b>
6.1 สรุป.....	93
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	94
รายการอ้างอิง.....	95
ภาคผนวก.....	101
ภาคผนวก ก.....	102
ภาคผนวก ข.....	108



บทที่	หน้า
ภาคผนวก ค.....	112
ภาคผนวก ง.....	114
ภาคผนวก จ.....	116
ภาคผนวก ฉ.....	117
ภาคผนวก ช.....	119
ภาคผนวก ซ.....	121
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	123



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



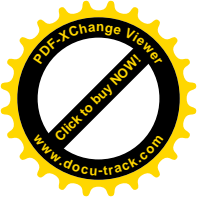
ญ

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 สมบัติทั่วไปของ PVC ที่ไม่ใส่สารเติมแต่ง.....	7
2.2 สมบัติทางกายภาพและเคมีของ DOP.....	17
5.1 สมบัติกระแสวิทยาของ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน.....	84
5.2 ราคาวัตถุดิบ.....	91
5.3 ราคาต้นทุนของ PVC/DOP และ PVC/DOP/NBR.....	92
5.4 ราคาต้นทุนของ PVC/DOP และ PVC/DOP/SBR.....	92

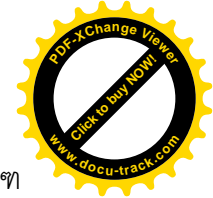
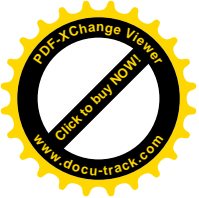


ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

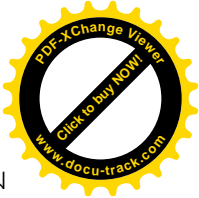
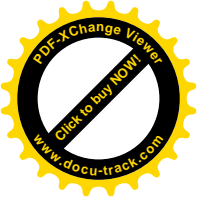


## สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
1.1 การนำ PVC ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกในยุโรป.....	1
1.2 ผลิตภัณฑ์ PVC.....	3
2.1 ปฏิกริยาการเกิดพอลิไวนิลคลอไรด์.....	7
2.2 ขั้นตอนหลุดออกของคลอรีนอะตอมจาก PVC (Dehydrochlorination of PVC).....	9
2.3 โครงสร้างของ PVC.....	11
2.4 แบบจำลองของแควงซ์ซาฟท์.....	12
2.5 ปฏิกริยาการสังเคราะห์ DOP.....	16
2.6 โครงสร้างทางเคมีของ DOP.....	17
2.7 โครงสร้างทางเคมี; (ก) อะคริโลไนไตรล์มอนอเมอร์, (ข) บิวทาไดอีนมอนอเมอร์.....	18
2.8 โครงสร้างทางเคมีของยาง NBR.....	19
2.9 โครงสร้างทางเคมี; (ก) สไตรีนมอนอเมอร์, (ข) บิวทาไดอีนมอนอเมอร์.....	20
2.10 สูตรเคมีของยาง SBR.....	20
2.11 เครื่องผสมความเร็วสูง.....	21
2.12 เครื่องรีดแบบ 2 ลูกกลิ้ง.....	22
2.13 แม่พิมพ์แบบกดอัด.....	23
2.14 กราฟความเค้น-ความเครียด ภายใต้แรงดึง.....	24
2.15 การทดสอบแรงดัดโค้ง.....	25
2.16 การทดสอบแรงกระแทกแบบ Izod.....	26
2.17 แสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DMA.....	27
2.18 กราฟแสดงผลของเครื่อง Thermogravimetric analysis.....	28
2.19 ส่วนประกอบของเครื่องเทอร์โมมิเตอร์.....	29
4.1 วัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัย.....	37
4.2 เครื่องมือที่ใช้ในการผสมและเตรียมชิ้นงาน PVC.....	39
4.3 การทดสอบแรงดึง.....	40
4.4 การทดสอบแรงดัดโค้ง.....	41
4.5 การทนต่อแรงดัดโค้ง.....	42
4.6 การทดสอบ DMA.....	43
4.7 เครื่อง Thermogravimetric Analyzer.....	44



ภาพประกอบ	หน้า
4.8 การทดสอบการโค้งงอด้วยความร้อน.....	45
4.9 การทดสอบความแข็ง.....	46
4.10 ซึ่่งงานทดสอบหาค่า Haze.....	46
4.11 เครื่อง Haze meter.....	47
4.12 เครื่องวัดความหนาแน่น.....	48
4.13 เครื่อง Brabender.....	49
4.14 Scanning electron microscope.....	49
5.1 Tensile modulus ของ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน.....	51
5.2 Tensile strength ของ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน.....	52
5.3 Elongation at break ของ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน.....	53
5.4 การยึดติดกันระหว่างส่วนที่มีขั้วของ DOP กับ Cl ของ PVC.....	54
5.5 Flexural modulus ของ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน.....	55
5.6 Flexural strength ของ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน.....	56
5.7 Impact energy ของ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน.....	57
5.8 Glass transition temperature ของ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน.....	58
5.9 การเสื่อมสลายของ PVC คอมพาวนด์ ยางนาโน NBR และ SBR.....	60
5.10 การเสื่อมสลายของ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน ที่ปริมาณ DOP 15 phr โดยของปริมาณยางนาโน NBR และ SBR เท่ากับ 11 phr.....	62
5.11 Heat deflection temperature ของ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน.....	63
5.12 Hardness ของ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน.....	65
5.13 Haze ของ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน.....	66
5.14 Density ของ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน.....	67
5.15 Water absorption ของ PVC และ PVC/DOP.....	69
5.16 Water absorption ของ PVC/DOP และ PVC/DOP/NBR ที่ปริมาณ DOP 15 phr.....	69
5.17 Water absorption ของ PVC/DOP และ PVC/DOP/NBR ที่ปริมาณ DOP 20 phr.....	70
5.18 Water absorption ของ PVC/DOP และ PVC/DOP/NBR ที่ปริมาณ DOP 25 phr.....	70
5.19 Water absorption ของ PVC/DOP และ PVC/DOP/NBR ที่ปริมาณ DOP 30 phr.....	71
5.20 Water absorption ของ PVC/DOP และ PVC/DOP/SBR ที่ปริมาณ DOP 15 phr.....	71
5.21 Water absorption ของ PVC/DOP และ PVC/DOP/SBR ที่ปริมาณ DOP 20 phr.....	72
5.22 Water absorption ของ PVC/DOP และ PVC/DOP/SBR ที่ปริมาณ DOP 25 phr.....	72



ภาพประกอบ	หน้า
5.23 Water absorption ของ PVC/DOP และ PVC/DOP/SBR ที่ปริมาณ DOP 30 phr.....	73
5.24 กระแสวิทยา ของ PVC/DOP ที่ปริมาณ DOP 15, 20, 25 และ 30 phr.....	75
5.25 กระแสวิทยา ของ PVC/DOP/NBR ที่ปริมาณ DOP 15 phr.....	76
5.26 กระแสวิทยา ของ PVC/DOP/NBR ที่ปริมาณ DOP 20 phr.....	77
5.27 กระแสวิทยา ของ PVC/DOP/NBR ที่ปริมาณ DOP 25 phr.....	78
5.28 กระแสวิทยา ของ PVC/DOP/NBR ที่ปริมาณ DOP 30 phr.....	79
5.29 กระแสวิทยา ของ PVC/DOP/SBR ที่ปริมาณ DOP 15 phr.....	80
5.30 กระแสวิทยา ของ PVC/DOP/SBR ที่ปริมาณ DOP 20 phr.....	81
5.31 กระแสวิทยา ของ PVC/DOP/SBR ที่ปริมาณ DOP 25 phr.....	82
5.32 กระแสวิทยา ของ PVC/DOP/SBR ที่ปริมาณ DOP 30 phr.....	83
5.33 แสดงลักษณะองค์ประกอบแต่ละชนิด.....	88
5.34 การกระจายตัวของผงยางนาโน NBR 11 phr.....	89
5.35 การกระจายตัวของผงยางนาโน SBR 11 phr.....	90



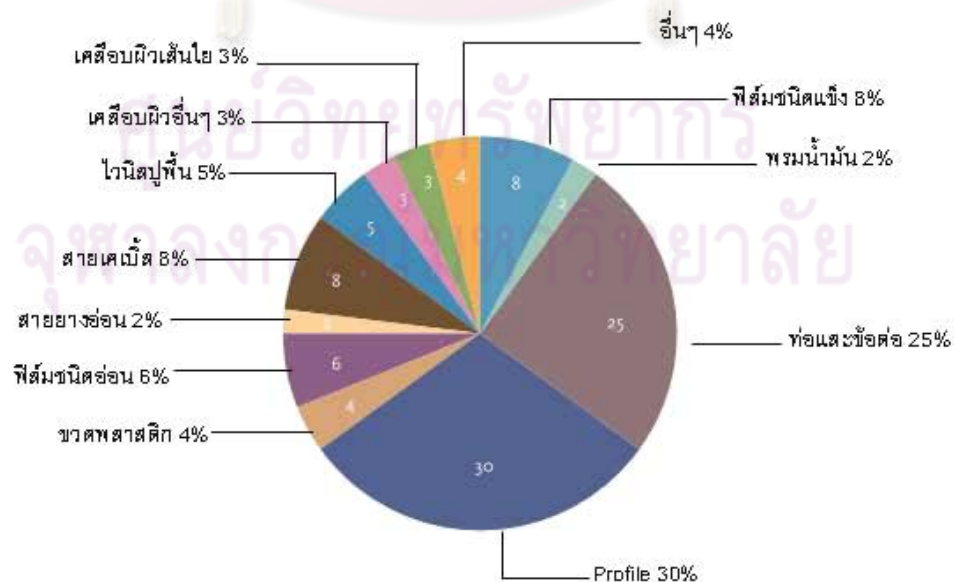
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พอลิไวนิลคลอไรด์หรือพีวีซี (Poly(vinyl chloride), PVC) เป็นวัสดุพอลิเมอร์เอนกประสงค์ที่ถูกนำมาไปใช้กันอย่างกว้างขวาง การประชุมผู้ผลิต PVC ของกลุ่ม Vinyl 2010 รายงานว่าในปี 2007 ทวีปยุโรปมีกำลังการผลิตพีวีซี 6.5 ล้านตันต่อปี คิดเป็น 15 เปอร์เซ็นต์ของพลาสติกทั้งหมดในตลาดยุโรป [1] รูปที่ 1.1 แสดงการใช้พีวีซีผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ในทวีปยุโรป ประเทศไทยมีกำลังการผลิตพีวีซีมากถึง 920,000 ตันต่อปี คิดเป็น 10 เปอร์เซ็นต์จากพลาสติกทั้งหมดที่ผลิตในประเทศไทย และประเทศไทยส่งออก PVC มากที่สุดเป็นอันดับที่ 1 ของอาเซียน [2] มีการใช้งาน PVC อย่างกว้างขวางทั้งในด้านบรรจุภัณฑ์ เช่น ขวดพลาสติก ด้านการก่อสร้างและตกแต่ง เช่น กรอบ ประตูหน้าต่าง ท่อน้ำ สายยางรดน้ำ ด้านของใช้ในบ้าน เช่น ม่านห้องน้ำ ม่านอาคาร บ้านเรือน ม่านห้องเย็น ม่านโรงงาน หนังสือพิมพ์ ถุงมือ ของเล่น หรือด้านการแพทย์ เช่น ท่อล้างไต ถุงเลือด เป็นต้น [3] เหตุผลที่ทำให้ PVC ถูกนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์อย่างหลากหลาย เนื่องจาก PVC มีคุณสมบัติเฉพาะตัวที่ดีหลายประการ เช่น มีน้ำหนักเบา มีความทนต่อกรดและสารเคมีทั่วไป แข็งแรง คงทน ทำความสะอาดได้ง่าย ไม่เป็นสนิม เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี และเมื่อติดไฟสามารถดับไฟได้ [4]



รูปที่ 1.1: การนำ PVC ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกในทวีปยุโรป [1]

PVC จึงเป็นพลาสติกที่มีการนำมาใช้งานอย่างหลากหลายมากกว่าพลาสติกชนิดอื่น เพราะ PVC สามารถออกแบบได้ให้มีความแข็งแรง นุ่มและยืดหยุ่น มีสีสันสดใส โปร่งแสงหรือทึบแสงได้ตามสภาวะการนำไปใช้งานและตามความต้องการ เนื่องจาก PVC มีสมบัติที่สามารถเข้ากันได้ดีกับสารเติมแต่ง ( Additive) ชนิดต่างๆ เช่น สารเพิ่มความเสถียร ( Stabilizer) สารสี (Colorant) สารหล่อลื่น (Lubricant) และสารเสริมสภาพพลาสติก (Plasticizer) เป็นต้น

ก่อนที่ PVC จะถูกนำมาประยุกต์ใช้เป็นผลิตภัณฑ์ พลาสติกประเภทต่างๆ ต้องเข้าสู่กระบวนการ คอมพาวนด์ด้วย สารเติมแต่งเพื่อ ปรับสมบัติ ให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมแก่การจะนำไปใช้งาน สารเติมแต่งที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรม เพื่อเพิ่มความอ่อนตัวให้แก่ผลิตภัณฑ์ PVC คือ สารเสริมสภาพพลาสติก โดยเฉพาะสารกลุ่มพธาเลท ( Phthalate Plasticizers) เช่น ไดออกทิลพธาเลท (Diocetyl Phthalate, DOP) ซึ่งเป็นสารเสริมสภาพพลาสติกที่ใช้มากถึง 95 เปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ PVC ทั้งหมด [3] เนื่องจาก DOP ใช้ได้ดีกับ PVC และสามารถกำหนดคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ได้ตามความต้องการ โดยการปรับปริมาณของสารเสริมสภาพพลาสติกที่เติมลงไป อีกทั้ง DOP เป็นสารละลายไม่มีสี ไม่มีกลิ่น มีความสามารถในการกลายเป็นไอต่ำ ละลายได้ในไขมัน แต่ไม่ละลายน้ำ และมีราคาถูก ด้วยเหตุนี้ DOP จึงมีความสำคัญอย่างมากต่ออุตสาหกรรม PVC ซึ่งปริมาณ DOP ที่ใช้ในอุตสาหกรรมราว 20-50 phr [5] นับเป็นปริมาณที่สูง เมื่อเทียบกับสารเติมแต่งประเภทอื่น ๆ DOP ได้มีการศึกษาถึงผลกระทบของผลิตภัณฑ์ PVC ที่เติม DOP โดยเฉพาะเครื่องบรรจุภัณฑ์อาหาร ( Food Packaging) DOP ระเหยออกมาที่ผิวผลิตภัณฑ์ เกิดการสะสมของ DOP ในอาหารที่ปริมาณ 4.9-18 µg/kg/day ของเล่นและผลิตภัณฑ์สำหรับเด็กอ่อน DOP ระเหยออกมา 5.7-44 µg/kg/day [6] ซึ่งเป็นสาเหตุก่อให้เกิดโรคต่างๆ และจากการทดลองกับสัตว์ อย่างเช่น หนู พบว่า DOP มีผลเป็นพิษอ่อนๆ ต่อหนู ทำให้เกิด การต่อต้าน DOP ในตลาดโลก จึงเกิดมาตรการกีดกันทางการค้าเพื่อ นำเข้าผลิตภัณฑ์ PVC ที่มีสาร DOP ผสมอยู่ในผลิตภัณฑ์ เช่น ของเล่น ของใช้ในบ้าน ท่อ ม่าน เป็นต้น รายการสินค้าเหล่านี้กำลังขยายตัวขึ้นเรื่อยๆ ดังรูปที่ 1.2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

**รูปที่ 1.2:** ผลิตภัณฑ์ PVC: (ก) ถุงบรรจุเลือด, (ข) ท่อล้างไต, (ค) ของเล่นเด็ก, (ง) เสื้อกันฝน และ (จ) ผ้าม่าน

ผู้ประกอบการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ PVC ในประเทศไทยต้องรับผิดชอบต่อการใช้ DOP ให้น้อยลงและยกเลิกการใช้ DOP ในที่สุด เพราะ DOP เพิ่งได้รับการจัดเป็นหมู่สารเคมีที่มีพิษ [7] นอกจากนี้ DOP ยังมีพฤติกรรมเคลื่อนย้ายสู่วิวนอกของผลิตภัณฑ์ และสามารถระเหยสู่บรรยากาศหรือซึมเข้าสู่ผิวหนังมนุษย์ อันตรายจาก DOP ก่อให้เกิดการตกเลือดในปอด ตับโต เป็นพิษต่อเซลล์ในร่างกาย ก่อให้เกิดโรคมะเร็ง ทำลายระบบหายใจและระบบสืบพันธุ์ (ลดฮอร์โมนเพศชาย) [7] อีกทั้งความเป็นพิษของสาร DOP ในสิ่งมีชีวิตในน้ำ (Aquatic organisms) พบว่ามีสาร DOP ในปลาและน้ำบริเวณอเมริกาเหนือ นอกจากนี้สิ่งมีชีวิตในน้ำยังสามารถสะสมสาร DOP โดยหลังจาก 7 วัน ความเข้มข้นของสาร DOP ในสิ่งมีชีวิตในน้ำจะเปลี่ยนจาก 350 เป็น 3900 เท่าที่พบในน้ำ [7, 8] ทำให้อุตสาหกรรมพลาสติก PVC และผู้ประกอบการขึ้นรูปที่ใช้ PVC เป็นวัตถุดิบจำเป็นต้องหาสารอื่นเพื่อเสริมสภาพพลาสติกทดแทนหรือลดปริมาณการใช้ DOP

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการลดปริมาณการใช้สารไดออกซิลพธาลาเทท ( DOP) โดยศึกษาแนวโน้มของการใช้ยงอนุภาคขนาดนาโน (Nano-scale) ร่วมกับหรือทดแทนสาร DOP ในผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นไปจาก PVC รวมทั้งศึกษา หาสัดส่วนของยงสังเคราะห์อนุภาคขนาดนาโนกลุ่มบิวทาไดอี น

(Butadiene) ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้ร่วมกับ DOP เพื่อลดปริมาณ DOP โดยพิจารณาจากสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงกายภาพ และสมบัติเชิงความร้อน เมื่อเปรียบเทียบกับ PVC ที่เติม DOP เพียงอย่างเดียว

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาการใช้ยางนาโนในกลุ่มบิวทาไดอีน ( Butadiene) ร่วมหรือทดแทนสาร DOP ในผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปจาก PVC เพื่อลดปริมาณการใช้สารเสริมสภาพพลาสติกชนิดไดออกทิลฟทาเลท (Diocetyl Phthalate, DOP)

1.2.2 เพื่อหาสัดส่วนยางนาโน Butadiene ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้ร่วมกับ DOP เพื่อลดปริมาณ DOP โดยพิจารณาจากสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงกายภาพ และสมบัติเชิงความร้อน

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ยางนาโนในกลุ่ม Butadiene ที่ใช้ในงานวิจัย คือ ยางสไตรีนบิวทาไดอีน ( Styrene butadiene rubber, SBR) และยางไนไตรล์บิวทาไดอีน (Nitrile butadiene rubber, NBR)

1.3.2 ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคยางนาโน NBR และ SBR คือ 100 นาโนเมตร

1.3.3 สารเสริมสภาพพลาสติกที่ใช้ในการวิจัยนี้ คือ สารไดออกทิลฟทาเลท (Diocetyl Phthalate, DOP) โดยที่ปริมาณการผสม DOP ใน PVC เมื่อไม่มีและเมื่อมี คือ 15, 20, 25 และ 30 phr

1.3.4 ปริมาณของยางนาโนแต่ละชนิดที่ใช้ในการศึกษา คือ 1, 3, 5, 7, 9 และ 11 phr

1.3.5 การผสม PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน ใช้ลูกรีดคู่ (Two-roll mill) ที่อุณหภูมิ 140 °C และการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบใช้เครื่องกดอัดร้อนที่อุณหภูมิ 180 °C

1.3.6 สมบัติเชิงกลที่ศึกษาได้แก่ สมบัติด้านแรงดึง ( Tensile properties) สมบัติด้านแรงดัดโค้ง (Flexural properties) สมบัติด้านการกระแทก (Impact properties)

1.3.7 สมบัติเชิงความร้อนที่ศึกษาได้แก่ อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( Glass transition temperature,  $T_g$ ) อุณหภูมิการเสื่อมสภาพ (Degradation temperature,  $T_d$ ) อุณหภูมิการโค้งงอโดยความร้อน (Heat deflection temperature)

1.3.8 สมบัติเชิงกายภาพที่ศึกษาได้แก่ ความแข็ง (Hardness) ความใส/ทึบ (Transparency) ความหนาแน่น (Density) การดูดซึมน้ำ (Water absorbance) และกระแสวิทยา (Rheological properties)

1.3.9 การวิเคราะห์โครงสร้างในระดับจุลภาคใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

#### 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจาก PVC ซึ่งมีสาร DOP ลดน้อยลง สอดคล้องกับนโยบายเพิ่มความปลอดภัยแก่สังคมและผู้บริโภค

1.4.2 การพัฒนาโดยใช้วัตถุดิบใหม่ทดแทนวัตถุดิบเดิมที่ใช้มานานแล้วและไม่ปลอดภัย

1.4.3 ปรับปรุงวัตถุดิบเพื่อหลีกเลี่ยงมาตรการทางการค้าที่กีดกันการใช้ DOP เพิ่มโอกาสทางธุรกิจแก่ผลิตภัณฑ์จาก PVC ของประเทศไทย ในเวทีการค้าระดับภูมิภาคและตลาดโลก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

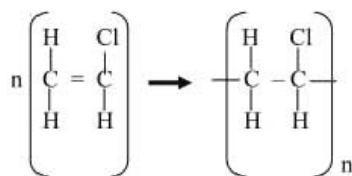
### ทฤษฎี

#### 2.1 พอลิเมอร์คอมพาวนด์ดิ่ง (Polymer compounding)

การนำเอาพอลิเมอร์เพียงอย่างเดียวไปใช้งานหรือขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีต่างๆ เช่น ขึ้นรูปด้วยการอัดรีด (Extrusion) ขึ้นรูปแบบฉีดเข้าเบ้า ( Injection molding) การอัดรีดด้วยลูกกลิ้ง (Calendering) การอัดส่ง (Transfer molding) การอัดเข้าเบ้า ( Compression molding) เป็นต้น [9] นั้นทำได้ยาก จำเป็นต้องนำพอลิเมอร์มาผสมกับสารเติมแต่ง ( Additives) เช่น สารช่วยในการขึ้นรูป สารเสริมสภาพพลาสติก สารเพิ่มความเสถียร ในอัตราส่วนที่เหมาะสม เพื่อให้พอลิเมอร์มีสมบัติดีขึ้น คงทนต่อการใช้งานมากขึ้น ช่วยให้กระบวนการผลิตทำได้ง่ายและไม่ทำให้พอลิเมอร์เกิดการเสื่อมสภาพระหว่างขึ้นรูป การผสมสารเติมแต่งชนิดต่างๆ ลงไปในพอลิเมอร์เรียกว่า พอลิเมอร์คอมพาวนด์ดิ่ง ( Polymer compounding) และของผสมระหว่างพอลิเมอร์กับสารเติมแต่งเรียกว่า คอมพาวนด์ (Compound) [10] ยกตัวอย่างเช่น PVC เป็นพอลิเมอร์ที่นำมาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์มากมายหลายประเภท แต่ PVC เสื่อมสภาพได้ง่าย เมื่อได้รับความร้อนในการขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูง จึงเติมสารเพิ่มความเสถียรลงไปใน PVC เพื่อยับยั้งการเสื่อมสภาพของ PVC เช่น แบเรียม/ซิงค์ (Ba/Zn) แบเรียม/แคดเมียม/ซิงค์ (Ba/Cd/Zn) เป็นต้น

#### 2.2 พอลิไวนิลคลอไรด์หรือพีวีซี (Poly(vinyl chloride), PVC)

PVC จัดเป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติก ( Thermoplastic) ซึ่งสามารถผ่านความร้อนได้หลายครั้ง จึงสามารถ ผ่านกระบวนการต่างๆ เพื่อขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลายครั้ง ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอน ( C) ไฮโดรเจน ( H) รวมกันประมาณ 43 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีคลอรีน ( Cl) 57 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก PVC ผลิตได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบรวมตัว (Addition polymerization) ของไวนิลคลอไรด์มอนอเมอร์ ( Vinyl chloride monomer, VCM) [4] ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยไวนิลคลอไรด์มอนอเมอร์จำนวนมากซึ่งผลิตมาจากคลอรีนและเอทิลีนต่อเรียงกันเป็นสายโซ่ยาวและมีน้ำหนักโมเลกุลเป็นหลายพันเท่าของมอนอเมอร์ การผลิต PVC ได้รับการประเมินว่าใช้พลังงานจากธรรมชาติได้แก่ แก๊ส ก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น น้อยกว่าการผลิตพลาสติกชนิดอื่น เช่น พอลิโพรพิลีน ( Polypropylene, PP) พอลิสไตรีน ( Polystyrene, PS) อีกทั้งยังใช้พลังงานในกระบวนการผลิตน้อย จึงมีส่วนช่วยในการอนุรักษ์พลังงาน



**รูปที่ 2.1:** ปฏิกิริยาการเกิดพอลิไวนิลคลอไรด์ [4]

กระบวนการเกิดสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่จากสารที่มีโมเลกุลเล็ก เรียกว่า กระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) มีหลายเทคนิคทั้งแบบบัลค์ (Bulk) แบบอิมัลชัน (Emulsion) และแบบแขวนลอย (Suspension) ร้อยละ 90 ของการผลิต PVC ใช้เทคนิคแบบแขวนลอย [11] โดยไวนิลคลอไรด์มอนอเมอร์ และน้ำถูกส่งเข้าไปในถังปฏิกรณ์ที่รักษาความดันไว้ประมาณ 15 บรรยากาศ ไวนิลคลอไรด์ มอนอเมอร์เป็นหยดเล็กๆ ในน้ำมีขนาด 30-150 ไมครอนเมตร มีคอลลอยด์ป้องกันและไบฟัดควมหยดมอนอเมอร์มารวมกัน ตัวอย่างของคอลลอยด์ป้องกัน (Protective colloids) ได้แก่ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ อนุพันธ์เซลลูโลส เช่น เมทิลเซลลูโลส โซเดียมคาร์บอกซีเอทิลเซลลูโลส ฯลฯ กระบวนการพอลิเมอไรเซชันจะเกิดกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ขึ้น จึงต้องเติมเกลืออนินทรีย์ทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ควบคุม pH PVC ที่ผลิตได้มีโครงสร้างแบบอะแทกติก (Atactic) PVC มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยตามน้ำหนักเท่ากับ 100,000 ถึง 200,000 และน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยตามจำนวน 45,000 ถึง 64,000 [12] และคุณสมบัติโดยทั่วไปของ PVC แสดงดังตารางที่ 2.1

**ตารางที่ 2.1** สมบัติทั่วไปของ PVC ที่ไม่ใส่สารเติมแต่ง [13]

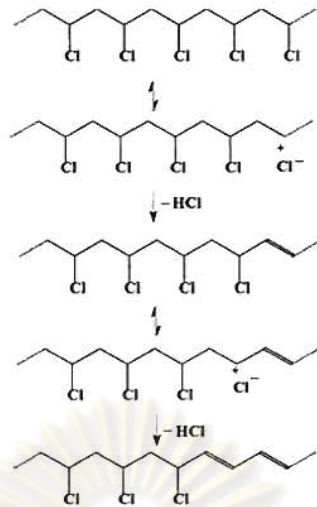
คุณสมบัติ	PVC ที่ไม่ใส่สารเติมแต่ง
ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	1.42
การดูดซึมน้ำ (%)	0.06
ค่ามอดูลัสการทนต่อแรงดึง (kPa)	2.83x10 <sup>6</sup>
ค่าทนแรงดึง ณ จุดขาด (kPa)	5.17x10 <sup>4</sup>
ค่ามอดูลัสการทนต่อแรงดัดโค้ง (kPa)	3.32x10 <sup>6</sup>

คุณสมบัติ	PVC ที่ไม่ใส่สารเติมแต่ง
อุณหภูมิการโค้งตัวภายใต้แรงดัดโค้ง (°C)	82
การติดไฟ	ติดไฟและดับได้ด้วยตัวเอง

ปัญหาหลักของ PVC คือ แข็งและเปราะ จึงมีการนำ PVC เข้าสู่กระบวนการคอมพาวนด์ คือการผสมกับสารเติมแต่ง (Additives) เช่น สารเสริมสภาพพลาสติก (Plasticizer) สารเพิ่มความเสถียร (Stabilizer) สารหล่อลื่น (Lubricant) สารปรับปรุงแรงกระแทก (Impact modifier) สารเติมเนื้อ (Filler) เป็นต้น PVC แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ PVC ชนิดแข็ง (Rigid PVC) มีการใส่สารเติมแต่งประมาณ 10 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ PVC ชนิดอ่อนตัว (Flexible PVC) มีการใส่สารเติมแต่งมากถึง 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก [11] ก่อนจะนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ PVC ต่อไปวัตถุประสงค์ของการคอมพาวนด์คือ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติด้านต่างๆ ของ PVC เช่น ทนทานต่อสภาพอากาศ ป้องกันการรั่วซึมผ่านของออกซิเจน นิ่มและดัดโค้งง่าย ทนทานต่อการฉีกขาด ใส และเป็นมันวาว

### 2.2.1 สมบัติเชิงความร้อนของ PVC (Thermal properties of PVC)

การจะนำพอลิเมอร์ไปประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ ต้องพิจารณาสมบัติร่วมกับอุณหภูมิแปรสภาพแก้ว (Glass transition temperature,  $T_g$ ) ของพอลิเมอร์ด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง PVC ซึ่งมีอุณหภูมิแปรสภาพแก้วประมาณ 80 °C [4] จึงมีลักษณะเป็นของแข็ง เปราะ ณ อุณหภูมิห้อง แต่ข้อดีของ PVC คือ ติดไฟและสามารถดับไฟได้ด้วยตัวเอง เนื่องจากภายในโมเลกุลของ PVC ประกอบด้วยธาตุหมู่ฮาโลเจนคือ คลอรีนอะตอม (Chlorine atom, Cl) เมื่อ PVC ได้รับความร้อนขึ้นรูปหรือใช้งาน ณ อุณหภูมิสูง จะเร่งให้เกิดการสูญเสียคลอรีน (Dehydrochlorination) หลุดจากสายโซ่หลักของ PVC กลายเป็นกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid, HCl) ทำให้เกิดพันธะคู่ระหว่างคาร์บอนอะตอม (C=C) ภายในสายโซ่หลัก PVC [4, 14] แสดงดังรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นสาเหตุให้การเสื่อมสภาพของ PVC เกิดขึ้นได้ง่าย ทำให้ PVC แข็งและเปลี่ยนจากสีขาวจนกลายเป็นสีดำ



รูปที่ 2.2: ขั้นตอนหลุดออกของคลอรีนอะตอมจาก PVC (Dehydrochlorination of PVC) [4]

อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ PVC ใช้อุณหภูมิค่อนข้างสูงในการขึ้นรูปที่ทำให้ PVC อาจเกิดการเสื่อมสภาพขณะขึ้นรูป จึงจำเป็นต้องใส่สารเติมแต่ง ( Additives) เช่น สารเพิ่มความเสถียร (Stabilizer) สารหล่อลื่น ( Lubricant) สารเสริมสภาพพลาสติก ( Plasticizer) สารเติมเนื้อ ( Filler) สารช่วยการขึ้นรูป (Processing aid) เป็นต้น เพื่อยับยั้งการเสื่อมสภาพของ PVC

### 2.2.2 สารเติมแต่งสำหรับ PVC

สารเติมแต่ง (Additive) ช่วยปรับปรุงให้ PVC มีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกล ความคงทนต่อแสง ความร้อนและสภาพภูมิอากาศ และนำไปสู่การผลิตผลิตภัณฑ์ PVC ต่างๆ อีกมากมายโดยการเติมสารเติมแต่งลงไปในช่วงกระบวนการผลิตเม็ด PVC หรือระหว่างการผลิตก่อนเข้าสู่กระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ก็ได้ สารเติมแต่งที่สำคัญสำหรับ PVC ได้แก่

#### ก) สารเพิ่มความเสถียร (Stabilizers)

จุดประสงค์หลักของการเติมสารเพิ่มความเสถียร เพื่อยับยั้งการเกิดการเสื่อมสภาพของ PVC ระหว่างกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ เนื่องจากกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ PVC ใช้อุณหภูมิที่ค่อนข้างสูง ทำให้เกิดกรดไฮโดรคลอริก ( HCl) ซึ่งเป็นสาเหตุการเสื่อมสภาพของ PVC การใส่สารเพิ่มความเสถียรจึงช่วยเพิ่มความคงทนและช่วยคงสมบัติระหว่างการขึ้นรูป และช่วยเพิ่มช่วงอายุการใช้งาน สารเพิ่มความเสถียรที่นิยมใช้กับ PVC เป็นกลุ่มสารประกอบโลหะผสม ได้แก่ แบเรียม-สังกะสี (Barium-Zinc) แคดเมียม-สังกะสี (Cadmium-Zinc) เป็นต้น [15, 16]

## ข) สารหล่อลื่น (Lubricant)

เป็นสารเติมแต่งที่ช่วยลดแรงเสียดทานระหว่าง PVC กับเครื่องจักร และแม่แบบ ระหว่างการขึ้นรูป ทำให้ชิ้นงานไม่ติดกับแม่แบบและแกะออกได้ง่าย สารหล่อลื่นแบ่งเป็น 2 ชนิด ได้แก่ สารหล่อลื่นภายใน (Internal lubricant) เป็นสารเติมแต่งที่ช่วยลดแรงเสียดทานระหว่าง โมเลกุล PVC จึงทำให้ความหนืดของ PVC ลดลง สามารถขึ้นรูปได้ง่ายและใช้พลังงานในการขึ้น รูปน้อยลง สารหล่อลื่นภายในที่นิยมใช้กับ PVC ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบโลหะสเตียเรต (Metal stearate) ได้แก่ แคลเซียม-สเตียเรต (Calcium stearate) ขณะที่สารหล่อลื่นภายนอก (External lubricant) ช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างแม่แบบขึ้นรูปกับผิวผลิตภัณฑ์ ทำให้แกะผลิตภัณฑ์ออกจากแม่แบบได้ง่าย ได้แก่ กรดไขมัน (Fatty acid) พาราฟิน-แวกซ์ (Paraffin Wax) เป็นต้น [15]

## ค) สารปรับปรุงแรงกระแทก (Impact modifier)

เป็นสารช่วยเพิ่มความทนทานต่อแรงกระแทกให้กับ PVC สารปรับปรุงแรงกระแทกที่ใช้สำหรับ PVC ได้แก่ ยางเอบีเอส (Acrylonitrile butadiene styrene, ABS) ยางเอ็มบีเอส (Methacrylate butadiene styrene, MBS), ยางอะคริลิก (Acrylic, AR) เป็นต้น [15]

## ง) สารเสริมสภาพพลาสติก (Plasticizer)

เป็นสารเติมแต่งที่นิยมใช้มากที่สุดใน PVC ช่วยเพิ่มความอ่อนตัวและความยืดหยุ่น ให้แก่ผลิตภัณฑ์ PVC และยังช่วยปรับปรุงด้านการขึ้นรูปด้วย ซึ่งสารเสริมสภาพพลาสติกแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ สารเสริมสภาพพลาสติกภายใน (Internal plasticizer) และสารเสริมสภาพพลาสติก ภายนอก (External plasticizer) ซึ่งนิยมใช้สารกลุ่มฟทาเลท (Phthalate plasticizers)

## 2.3 สารเสริมสภาพพลาสติก (Plasticizer)

PVC มีสมบัติแข็ง เปราะ ไม่อ่อนตัว และแตกหักง่ายเมื่อได้รับแรงกระแทกจึงไม่เหมาะกับการใช้งานบางอย่างจนกว่าจะมีการทำให้ PVC มีความอ่อนตัว (Flexibility) เสียก่อนสารเติมแต่งที่ใส่เพื่อเพิ่มความอ่อนตัวนี้เรียกว่า สารเสริมสภาพพลาสติก (Plasticizer) ซึ่งทำหน้าที่โดยเข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างโมเลกุลของ PVC ทำให้สมมาตรของโมเลกุล PVC เสียไปและแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของ PVC ลดลง จึงส่งผลให้มีการเคลื่อนขยับหรือไถลได้มากขึ้น เป็นผลทำให้ PVC มีความอ่อนตัวและการยืดตัว อีกทั้งยังช่วยปรับปรุงสมบัติด้านการขึ้นรูป (Processability) โดยสารเสริมสภาพพลาสติกสามารถลดความหนืดของ PVC หลอมเหลว เกิดการไหลแบบ



พลาสติกและลดอุณหภูมิแปรสภาพแก้ว (Glass transition temperature,  $T_g$ ) โดยไม่เปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นฐานทางเคมีของ PVC [17] กระบวนการผสมสารเสริมสภาพพลาสติกใน PVC โดยไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นเรียกว่า การเสริมสภาพพลาสติกภายนอก (External plasticization) และเรียกละสารเสริมสภาพพลาสติกที่ผสมลงไปว่า สารเสริมสภาพพลาสติกภายนอก (External plasticizer) ขณะที่สารเสริมสภาพพลาสติกที่สามารถเข้ากันได้กับ PVC จนกลายเป็นส่วนหนึ่งของสายโซ่ของ PVC จะเรียกว่า สารเสริมสภาพพลาสติกภายใน (Internal plasticizer) และเรียกกระบวนการนี้ว่า การเสริมสภาพพลาสติกภายใน (Internal plasticization) [10]

โดยทั่วไป สารเสริมสภาพพลาสติกภายนอกเป็นของเหลวที่มีจุดเดือดสูง มีความดันไอต่ำ ระเหยยาก ละลายได้ในพอลิเมอร์ และมีอุณหภูมิ แปรสภาพแก้ว ( $T_g$ ) ประมาณ  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็นสองชนิดคือ สารเสริมสภาพพลาสติกแบบปฐมภูมิ (Primary plasticizer) และ สารเสริมสภาพพลาสติกแบบทุติยภูมิ (Secondary plasticizer) โดยสารเสริมสภาพพลาสติกแบบปฐมภูมิสามารถเข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับ PVC ที่อุณหภูมิขึ้นรูปได้ดี สามารถใช้เดี่ยวๆ ได้และไม่เยิ้มออกมาจาก PVC ในขณะที่สารเสริมสภาพพลาสติกแบบทุติยภูมิสามารถเข้าเป็นเนื้อเดียวกับ PVC ได้จำกัด จึงไม่สามารถใช้ตามลำพังได้ต้องใช้ควบคู่สารเสริมสภาพพลาสติกแบบปฐมภูมิ และช่วยเสริมประสิทธิภาพของสารเสริมสภาพพลาสติกแบบปฐมภูมิ นอกจากนี้การใช้สารเสริมสภาพพลาสติกแบบทุติยภูมิ ยังช่วยลดต้นทุนการผลิต และปรับปรุงสมบัติอื่นๆ ของ PVC ด้วย [16, 18]

สารเสริมสภาพพลาสติกภายนอกมีหลายประเภท ส่วนใหญ่คือ สารประกอบเอสเทอร์ ที่นิยมใช้คือ กลุ่มเอสเทอร์ของฟทาเลท (Phthalate esters) ได้แก่ ไดบิวทิลฟทาเลท (DBP) ไดไอโซบิวทิลฟทาเลท (DIBP) บิวทิลเบนซิลฟทาเลท (BBP) ไดฟีนิลฟทาเลท (DPP) ไดไอโซนิลฟทาเลท (DINP) สารที่ใช้มากที่สุดคือ ได-2-เอทิลเฮกซิลฟทาเลท (Di-2-ethylhexyl phthalate, DEHP) หรือมักเรียกว่า ไดออกทิลฟทาเลท (Dioctyl Phthalate, DOP)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวอย่างของสารเสริมสภาพพลาสติกที่นิยมใช้ใน PVC ได้แก่

1) ไดออกทิลฟทาเลท (Diocyl Phthalate, DOP)

นิยมใช้มากที่สุดกับ PVC และ vinyl chloride/vinyl acetate (VC/VAC) นอกจากนี้ ยังใช้กับพอลิเมอร์อื่นๆ ด้วยฟทาเลท ชนิดนี้มีอัตราการระเหยปานกลาง มีเสถียรภาพทางความร้อน ทนน้ำได้ดี ช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์มีความอ่อนตัว ณ อุณหภูมิต่ำได้ดี

2) ไดบิวทิลฟทาเลท (Di-n butyl phthalate, DBP)

สามารถรวมตัวได้ดีกับ PVC VC/VAC Poly(methyl methacrylate) (PMMA) และอนุพันธ์ของเซลลูโลส จึงใช้ได้ดีในพลาสติกเหล่านี้แต่เนื่องจาก DBP ระเหยค่อนข้างง่าย จึงมีข้อจำกัดในการนำไปใช้

3) บิวทิลเบนซิลฟทาเลท (Butylbenzyl phthalate, BBP)

เข้ากันกับ PVC ได้ดีมาก มีอัตราการระเหยต่ำกว่า DBP และมีประสิทธิภาพต่ำกว่า DOP ส่วนใหญ่ใช้ BBP ใน PVC plastisols ที่เป็นผลิตภัณฑ์โฟมและนิยมใช้ในแผ่นโวนิลปูพื้น เนื่องจากต้านทานฝุ่น (Dirt repellent)

4) ไดฟีนิลฟทาเลท (Di-phenyl phthalate, DPP)

ใช้เป็นสารช่วยการขึ้นรูปสำหรับ PVC ชนิดแข็ง รวมทั้งใช้ในผลิตภัณฑ์โฟมจาก PVC ชนิดแข็งด้วย

5) ไดไอโซโนนิลฟทาเลท(Di-isononyl phthalate, DINP)

เมื่อเปรียบเทียบกับ DOP สารชนิดนี้มีความสามารถในการรวมตัวกับ PVC ได้ต่ำกว่าและทำให้ผลิตภัณฑ์มีความอ่อนตัว ณ อุณหภูมิต่ำได้น้อยกว่า แต่จะระเหยน้อยกว่ารวมทั้งมีความหนาแน่นต่ำกว่า DINP ที่ผลิตขึ้นส่วนใหญ่ได้รับอนุญาตให้นำมาใช้ในผลิตภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับอาหาร

## 2.3.1 ทฤษฎีการทำงานของสารเสริมสภาพพลาสติก

### 2.3.1.1 ทฤษฎีการหล่อลื่น (Lubricity theory)

สารเสริมสภาพพลาสติกทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น (Lubricant) โดยโมเลกุลของสารเสริมสภาพพลาสติกแทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ ทำให้แรงเสียดทานระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ลดลง ทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์เกิดการเคลื่อนที่เลื่อนไถลไปมาได้ง่ายขึ้น [17, 18]

### 2.3.1.2 ทฤษฎีเจล (Gel theory)

สารเสริมสภาพพลาสติกทำลายแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์โดยการแยกส่วนที่มีขั้วของพอลิเมอร์ให้อยู่ห่างกัน ดังนั้น สารเสริมสภาพพลาสติกจะต้องประกอบด้วยทั้งส่วนที่มีขั้ว (Polar) และไม่มีขั้ว (Nonpolar) โดยสารเสริมสภาพพลาสติกส่วนที่มีขั้วจะเข้ายึดกับไดโพลหรือบริเวณที่มีขั้วของพอลิเมอร์ ในขณะที่สารเสริมสภาพพลาสติกส่วนที่ไม่มีขั้วจะกำบัง (Shield) บริเวณไดโพลของพอลิเมอร์ออกจากกัน [10, 18]

### 2.3.1.3 ทฤษฎีปริมาตรอิสระ (Free-Volume theory)

สารเสริมสภาพพลาสติกเข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ ทำให้เพิ่มพื้นที่ว่างหรือปริมาตรอิสระระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้การเคลื่อนไหวหรือการหมุนรอบพันธะภายในสายโซ่พอลิเมอร์สามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น [18]

ทั้ง 3 ทฤษฎีที่กล่าวมานี้แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างของพอลิเมอร์ก่อนและหลังใส่สารเสริมสภาพพลาสติกแสดงดังรูปที่ 2.3 ซึ่งมีผลต่อสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ อีกทั้งขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารเสริมสภาพพลาสติกที่ใส่ลงไป ปัจจุบันเหล่านี้ยังส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิแปรผ่านสภาพแก้ว (Glass transition temperature,  $T_g$ ) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงพฤติกรรมของพอลิเมอร์ในการนำไปใช้งาน



(ก)

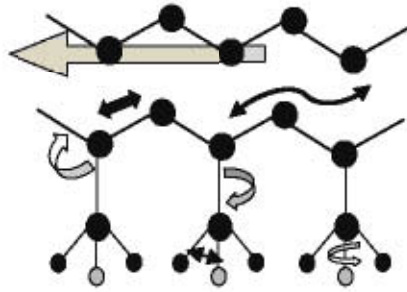


(ข)

**รูปที่ 2.3:** โครงสร้างของ PVC [10] (ก) กรณีที่ไม่ใส่สารเสริมสภาพพลาสติก (Unplasticized)  
(ข) กรณีที่ใส่สารเสริมสภาพพลาสติก (Plasticized)

### 2.3.2 อุณหภูมิแปรสภาพแก้ว (Glass transition temperature, $T_g$ )

อุณหภูมิแปรสภาพแก้ว คือ อุณหภูมิที่พอลิเมอร์เปลี่ยนจากสภาวะคล้ายยางไปเป็นสภาวะคล้ายแก้วซึ่งทำให้สมบัติของ พอลิเมอร์ เปลี่ยนไป เช่น ความแข็ง ( Hardness) และการโค้งงอ ( Flexibility) การแปรเปลี่ยนนี้เป็นผลโดยตรงจากการหยุดเคลื่อนไหวของสายโซ่พอลิเมอร์ ดังนั้นค่า  $T_g$  จึงขึ้นกับอัตราการเปลี่ยนแปลงความร้อนหรืออุณหภูมิที่ใช้ในการทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนไหว แบบจำลองของ แครนคshaft (Crankshaft model) อธิบายพฤติกรรม การเคลื่อนที่ของอะตอมแต่ละส่วนในสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อปริมาณอิสระในพอลิเมอร์เพิ่มมากขึ้น ทำให้อะตอมแต่ละส่วนในสายโซ่พอลิเมอร์สามารถเคลื่อนที่เพิ่มมากขึ้น เมื่ออะตอมในสายโซ่หลัก (Backbone) สามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้นส่งผลให้อะตอมในสายโซ่ข้างเคียง ( Side chains) มีความอ่อนตัวและเคลื่อนที่ได้ง่ายมากขึ้น [19, 20] แสดงดังรูปที่ 2.4 และด้วยเหตุนี้ทำให้วัสดุพอลิเมอร์ มีค่า  $T_g$  และค่ามอดูลัส (Modulus) ลดลง



รูปที่ 2.4: แบบจำลองของแครงค์ซาฟท์ (Crankshaft model) [20]

### ปัจจัยที่มีผลต่ออุณหภูมิแปรสภาพแก้วมีดังนี้

i) ความโค้งงอได้ของสายโซ่ (Chain flexibility) เกิดจากความสามารถในการหมุนรอบพันธะของอะตอมในโมเลกุล สายโซ่ที่โค้งงอได้มากและสะดวกจะมีปริมาตรอิสระมาก ทำให้มีค่า  $T_g$  ต่ำ กลุ่มอะตอมฟอสฟอรัสยาวๆ กลุ่มอีเธอร์ หรือเอสเทอร์ จะเพิ่มความสามารถในการโค้งงอของโมเลกุลพอลิเมอร์ส่วนกลุ่มที่เป็นวงต่างๆ เช่น วงเบนซีน จะลดความสามารถดังกล่าวทำให้พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างวงดังกล่าวในแกนสายโซ่มีค่า  $T_g$  ที่สูง [19]

ii) หมู่ที่ต่อด้านข้างของโซ่หลัก (Side group) ที่มีขนาดใหญ่และอยู่ค่อนข้างชิดติดกับแกนสายโซ่หลักจะหน่วงเหนี่ยวการหมุนรอบพันธะของสายโซ่หลัก ทำให้ปริมาตรอิสระลดต่ำลง และการที่หมู่ที่ต่อด้านข้างของสายโซ่หลักเป็นหมู่ที่มีขั้ว เช่น  $-Cl$ ,  $-OH$ ,  $-CN$  ส่งผลให้ค่า  $T_g$  มีค่าสูงขึ้น [10, 19]

iii) ความยาวของกลุ่มข้างเคียงที่มีความโค้งงอได้ดี (Flexible side chain) แม้จะมีขนาดค่อนข้างใหญ่ จะผลักดันให้สายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ออกห่างกันมากขึ้นได้ ทำให้ค่าปริมาตรอิสระสูงขึ้น เนื่องจากกลุ่มข้างเคียงที่โค้งงอได้ดี เคลื่อนที่ได้สะดวก ส่งผลให้ค่า  $T_g$  มีค่าลดต่ำลง [19]

iv) ความสมมาตร (Symmetry) ของแกนสายโซ่หรือการมีอยู่ของพันธะคู่ในแกนสายโซ่หลัก มีผลต่อค่า  $T_g$  คือ พอลิเมอร์ที่ไม่สมมาตรปกติจะมีค่า  $T_g$  สูงกว่าพอลิเมอร์แบบสมมาตร เช่น ที่พบในพอลิโพรพิลีนกับพอลิไอโซบิวทิลีน หรือในพอลิไวนิล คลอไรด์กับพอลิไวนิลิดีนคลอไรด์ เป็นต้น ซึ่งอธิบายได้โดยการเพิ่มของกลุ่มข้างเคียง (side group) เพื่อให้โมเลกุล

สมมาตรทำให้พอลิเมอร์ถูกบังคับให้มีการจัดเรียงโมเลกุลในที่ว่างที่โปร่งขึ้นทำให้ปริมาตรอิสระสูงขึ้น ส่งผลให้  $T_g$  ของกลุ่มสมมาตรต่ำกว่ากลุ่มไม่สมมาตร [19]

v) แรงกระทำระหว่างโมเลกุล (interchain attractive forces) แรงทุติยภูมิ (secondary forces) จากความเป็นขั้ว (Polarity) หรือพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonding) ในโมเลกุล ทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่แบบอิสระได้ยากขึ้นเนื่องจากถูกแรงจากโมเลกุลข้างเคียง กระทำส่งผลให้  $T_g$  มีค่าสูงขึ้น [19]

vi) อิทธิพลของสารเสริมสภาพพลาสติก ซึ่งมักเป็นของเหลวที่มี  $T_g$  ต่ำ ดังนั้นจึงส่งผลต่อค่า  $T_g$  ของพอลิเมอร์ ทำให้ค่า  $T_g$  ของพอลิเมอร์ลดต่ำลง

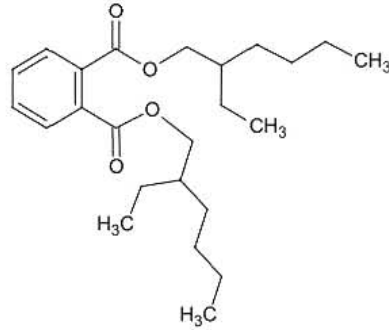
### 2.3.3 ไดออกทิลพธาลเอท (Dioctyl Phthalate, DOP)

ได-2-เอทิลเฮกซิลพธาลเอท (Di-2-ethylhexyl Phthalate, DEHP) หรือที่มักเรียกกันว่า ไดออกทิลพธาลเอท (Dioctyl Phthalate, DOP) เป็นสารเสริมสภาพพลาสติกจำพวกพธาลเอทเอสเทอร์ (Phthalate esters) มีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี ที่อุณหภูมิห้อง มีกลิ่นเล็กน้อย สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันระหว่างพธาลิกแอนไฮไดรด์ (Phthalic anhydride, PAN) จำนวน 1 โมล กับโมโนไฮดรอลกอฮอล์ (Monohydric alcohol) จำนวน 2 โมล [18] ดังแสดงในรูปที่ 2.5 และมีโครงสร้างทางเคมี ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5: ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ DOP

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.6: โครงสร้างทางเคมีของ DOP [7]

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงสมบัติทางกายภาพและเคมีของ DOP [7]

คุณสมบัติ	ลักษณะ/ปริมาณ
สูตรโมเลกุล	$C_{24}H_{38}O_4$
น้ำหนักโมเลกุล	390.6
ลักษณะทางกายภาพ	ของเหลวใส ไม่มีสี
จุดหลอมเหลว	$-55^{\circ}C$
จุดเดือด	$230^{\circ}C$ ที่ 5 mmHg
ความหนืด	81 mPa s ที่ $20^{\circ}C$
จุดวาบไฟ	$370^{\circ}C$
ความหนาแน่น	$0.98 \text{ g/cm}^3$ ที่ $20^{\circ}C$
ความดันไอ	$0.000034 \text{ Pa}$ ที่ $20^{\circ}C$
ความสามารถในการละลายน้ำ	$3 \mu\text{g/l}$ ที่ $20^{\circ}C$

DOP นิยมใช้กันมากที่สุดใน PVC มีอุณหภูมิการละลายใน PVC ที่  $120^{\circ}C$  พหาลักษณ์ชนิดนี้มีอัตราการระเหยปานกลาง มีเสถียรภาพทางความร้อน ความทนน้ำ และช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์มีความอ่อนตัวดี ณ อุณหภูมิที่ต่ำได้ อย่างไรก็ตาม จากการทดลองของนักวิทยาศาสตร์แห่ง National Cancer Institute สหรัฐอเมริกา พบว่า DOP นี้มีผลอ่อนๆ ต่อการทำให้เกิดโรคมะเร็งในสัตว์ทดลอง The International Agency for Research on Cancer (IARC) แห่งสหรัฐอเมริกา ได้จัดให้ DOP อยู่ในกลุ่มสารที่อาจทำให้เกิดโรคมะเร็งในมนุษย์ (An agent possibly carcinogenic to humans) [10]

## 2.4 ยางนาโน (Nano rubber)

ยางนาโนเป็นยางที่สังเคราะห์ขึ้น เพื่อใช้งานเฉพาะด้าน เช่น การทนทานต่อน้ำมัน การทนต่อการขีดสี ซึ่งสมบัติเด่นที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของยาง งานวิจัยนี้ใช้ยางนาโนอะคริไโนไตรล์บิวทาไดอีน (Acrylonitrile butadiene rubber, NBR) และยางนาโนสไตรีนบิวทาไดอีน (Styrene butadiene rubber, SBR) ซึ่งเป็นยางที่มีความยืดหยุ่น (Elastic) สูง เพื่อทดแทนปริมาณที่ลดลงของการใช้สาร DOP ในการเสริมสภาพพลาสติก PVC

### 2.4.1 ยางไนไตรล์ (Nitrile or Acrylonitrile butadiene rubber, NBR)

ยาง NBR เป็นโคพอลิเมอร์ของอะคริไโนไตรล์มอนอเมอร์ (Acrylonitrile monomer) และบิวทาไดอีนมอนอเมอร์ (Butadiene monomer) ซึ่งประกอบด้วยอะคริไโนไตรล์ร้อยละ 18-51 จากโครงสร้างโมเลกุล แสดงดังรูปที่ 2.7 จะเห็นว่าในส่วนของอะคริไโนไตรล์มีหมู่ฟังก์ชัน -CN ทำให้โมเลกุลของยาง NBR มีความเป็นขั้ว จึงมีสมบัติเด่นคือ ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียมและตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วต่างๆ ได้ดี ในขณะที่ส่วนของบิวทาไดอีนที่มีอยู่ในโมเลกุลของยาง NBR เป็นส่วนที่ให้ความยืดหยุ่น และเป็นตำแหน่งที่โมเลกุลเกิดการเชื่อมโยงในปฏิกิริยาของยาง NBR ทนต่อการขูดถูเสียดสี ทนน้ำ และสามารถใช้งานได้ดีที่อุณหภูมิสูง (ประมาณ 300 °F หรือ 150 °C) จึงนิยมใช้ยาง NBR ทำผลิตภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับน้ำมัน เช่น ปะเก็นน้ำมัน สายยางส่งน้ำมัน ชิ้นส่วนรถยนต์ในห้องเครื่อง เป็นต้น [15, 21]



รูปที่ 2.7: โครงสร้างทางเคมี [15] (ก) อะคริไโนไตรล์มอนอเมอร์ (Acrylonitrile monomer)

(ข) บิวทาไดอีนมอนอเมอร์ (Butadiene monomer)

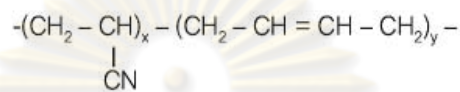
เมื่อมอนอเมอร์ทั้งสองของอะคริไโนไตรล์และบิวทาไดอีน ทำพอลิเมอร์โรเซชันร่วมกันแบบอิมัลชัน (Emulsion polymerization) ได้พอลิเมอร์คือยาง NBR ที่มีการจัดเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ (Random) มีสูตรทั่วไปดังแสดงในรูปที่ 2.8



โครงสร้างทางเคมีของยาง NBR มีผลต่อสมบัติของยาง NBR ดังนี้ [17]

i) การมีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล ทำให้ยาง NBR สามารถวัลคาไนซ์ได้ด้วยกำมะถัน และยาง NBR ถูกออกซิไดซ์และทำปฏิกิริยากับโอโซนได้ง่าย

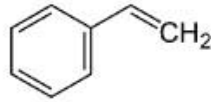
ii) การมีอะโครโลไนไตรล์ในโมเลกุล ทำให้ยาง NBR ทนต่อน้ำมัน สามารถเข้า PVC ได้เป็นอย่างดีและความสามารถในการหักงอที่อุณหภูมิต่ำไม่ค่อยดี (ถ้าไม่มีสารเสริมสภาพพลาสติก)



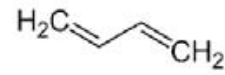
รูปที่ 2.8: โครงสร้างทางเคมีของยาง NBR [17]

#### 2.4.2 ยางสไตรีนบิวทาไดอีน (Styrene butadiene rubber, SBR)

ยาง SBR เป็นโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยมอนอเมอร์ของสไตรีน (Styrene monomer) และมอนอเมอร์ของ บิวทาไดอีน (Butadiene monomer) แสดงดังรูปที่ 2.9 โดยมีปริมาณของสไตรีนสูงร้อยละ 23-40 มอนอเมอร์ เมื่อนำมอนอเมอร์ทั้งสองทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันร่วมกัน จะได้โคพอลิเมอร์คือยาง SBR ที่มีการจัดเรียงตัวแบบสุ่ม (Random copolymer) สายโมเลกุลของยาง SBR จัดเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ ทำให้ไม่สามารถเกิดการตกผลึกได้เมื่อถูกยืด ยางจึงมีค่าความทนต่อแรงดึงต่ำ เวลาใช้งานจึงจำเป็นต้องเติมสารเสริมแรงเข้าช่วยให้มีสมบัติที่ดีสามารถใช้งานได้หลากหลาย เช่น ผลิตสายพาน พื้นรองเท้า ขนวนุ่มสายไฟ และส่วนมากจะใช้ในอุตสาหกรรมผลิตยางล้อยานพาหนะขนาดเล็ก ยาง SBR จะช่วยลดการสึกหรอของหน้ายาง เนื่องจากมีสมบัติทนต่อการขีดถูเสียดสี โดยใช้ผสมกับยางชนิดอื่นๆ เช่น ยางธรรมชาติ ยางบิวทาไดอีน [21]



(ก)

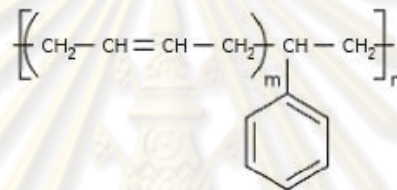


(ข)

**รูปที่ 2.9:** โครงสร้างทางเคมี (ก) สไตรีนมอนอเมอร์ (Styrene monomer)

(ข) บิวทาไดอีนมอนอเมอร์ (Butadiene monomer) [21]

เมื่อมอนอเมอร์ทั้งสองมาทำพอลิเมอร์ไว้เซชันร่วมกัน จะได้พอลิเมอร์ที่มีการจัดเรียงตัวแบบสุ่ม (Random copolymer) มีสูตรทั่วไปดังแสดงรูปที่ 2.10



**รูปที่ 2.10:** สูตรเคมีของยาง SBR [21]

## 2.5 กระบวนการขึ้นรูป PVC

ก่อนที่ PVC จะเข้าสู่กระบวนการขึ้นรูปประเภทต่างๆ PVC มีความเป็นต้องเติมสารเติมแต่งประเภทต่างๆ เพื่อปรับปรุงสมบัติของ PVC ดีขึ้น เช่น สารเพิ่มความเสถียร (Stabilizer) สารเสริมสภาพพลาสติก (Plasticizer) และสารเติมแต่งอื่นๆ อีกมากมาย PVC ที่ได้จากการผสมด้วยสารเติมแต่ง เรียกว่า PVC คอมพาวนด์ (PVC compound) การผสม PVC เข้ากับสารเติมแต่งมีอยู่หลายวิธี เช่น เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) เครื่องผสมแบบถังหมุน (Drum Tumbler) เป็นต้น แต่ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงการผสมด้วยเครื่องผสมความเร็วสูง (High speed mixer) แล้วนำไปผสมด้วยเครื่องรีด 2 ลูกกลิ้ง (Two-roll mill) แล้วนำ PVC ที่ได้จากการหลอมผสมไปขึ้นรูปขึ้นงานด้วยแผ่นกดอัด (Hot press) เพื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติด้านต่างๆ ของ PVC

### 2.5.1 การผสม (Mixing)

การผสมเป็นการผสมสารเติมแต่งเข้ากับพอลิเมอร์ ส่วนใหญ่จะเป็นการผสมของแข็งกับของแข็งหรือของแข็งกับของเหลวเข้าด้วยกัน โดยใช้เครื่องผสม ( Mixer) เช่น ผสมผง PP เข้ากับสารเติมแต่ง ได้แก่ สี แอนติออกซิแดนท์ และ แคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น ผลการผสมทำให้เกิดการกระจายตัวของวัสดุต่างชนิดกัน เข้ากันอย่างทั่วถึงเป็นเนื้อเดียวกัน

#### 2.5.1.1 เครื่องผสมความเร็วสูง (High speed mixer)

เครื่องผสมความเร็วสูง ( High speed mixer) แสดงรูปที่ 2.11 เทคนิคการผสมนี้เป็นการผสมให้สารเติมแต่งกระจายตัวในพอลิเมอร์ โดยไม่ให้พอลิเมอร์ได้รับแรงเฉือนมากนัก เครื่องผสมที่ใช้มีลักษณะการผสมเป็นแบบแบทช์ ( Batch mixer) ซึ่งทำให้เกิดการผสมโดยการทำให้สารเติมแต่งกับพอลิเมอร์เกิดการเคลื่อนที่คลุกเคล้าจนเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน



รูปที่ 2.11: เครื่องผสมความเร็วสูง (High speed mixer)

#### 2.5.1.2 เครื่องผสมแบบ 2 ลูกกลิ้ง (Two-roll mill)

เครื่องผสมแบบ 2 ลูกกลิ้ง แสดงดังรูปที่ 2.12 ประกอบด้วยลูกกลิ้ง 2 ลูกที่ทำจากเหล็กหล่อเคลือบผิว มอเตอร์ควบคุมอุณหภูมิ ตัวปรับความห่างของลูกกลิ้ง ส่วนอุปกรณ์ประกอบอื่นๆ เช่น ไม้ตบปาด เป็นต้น เครื่องผสมแบบ 2 ลูกกลิ้งใช้ได้ทั้งการผสมสารเติมแต่งบดยางและพอลิเมอร์ หลักการทำงานเบื้องต้นของเครื่องผสมนี้ ลูกกลิ้ง 2 ลูกจะหมุนเข้าหากันแต่อัตราเร็วในการหมุนของลูกกลิ้งแต่ละลูกจะแตกต่างกัน คือ ลูกกลิ้งด้านหน้า (ด้านที่ติดกับผู้ปฏิบัติงาน) จะหมุนด้วยอัตราที่เร็วกว่าลูกกลิ้งด้านหลัง ความร้อนของลูกกลิ้งได้มาจากชุดให้ความร้อนซึ่งอาจจะทำให้ความร้อนด้วยไฟฟ้า หรือความร้อนโดยการไหลเวียนของน้ำหรือน้ำมันร้อนผ่านภายในลูกกลิ้ง [22]

ข้อดีของการผสมด้วยวิธีการนี้คือ สามารถมองเห็นลักษณะและระดับการผสมเข้ากันของพอลิเมอร์กับสารเติมแต่งได้อย่างเด่นชัด สามารถผสมในปริมาณที่แตกต่างกันได้ กล่าวคือแบทช์ขนาดเล็กถึงขนาดใหญ่ มีความสะดวกในการทำความสะดวกเครื่องผสม การผสมแบบนี้จะได้พอลิเมอร์ในลักษณะเป็นแผ่น ซึ่งเหมาะสำหรับการแปรรูปต่อโดยการกดอัดในแม่พิมพ์ (Compression molding)

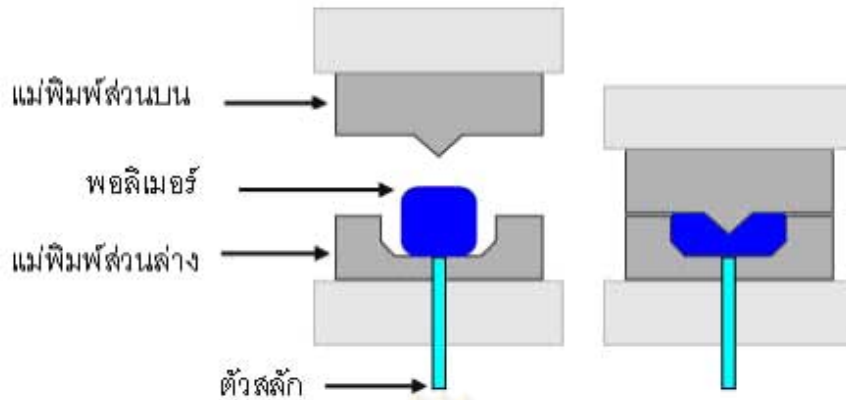


รูปที่ 2.12: เครื่องรีดแบบ 2 ลูกกลิ้ง (Two-roll mill)

### 2.5.3 การกดอัดในแม่พิมพ์ (Compression molding)

เครื่องในกดอัดแม่พิมพ์ประกอบด้วย แม่พิมพ์ 2 ชั้น บนและล่าง แม่พิมพ์ส่วนบน จะทำหน้าที่เลื่อนขึ้นลงด้วยระบบไฮดรอลิกเพื่ออัดและส่งแรงดันไปสู่แม่พิมพ์ที่อยู่ตรงกลางระหว่างแผ่นกดอัดทั้งสอง เครื่องกดอัดต้องมีแรงดันสูงเพียงพอสำหรับการใช้งาน ต้องมีระบบให้ความร้อนและควบคุมอุณหภูมิของแผ่นกดอัดให้คงที่ในระหว่างการใช้งาน โดยทั่วไป แหล่งให้ความร้อนแก่แผ่นกดอัดได้แก่ น้ำ น้ำมัน หรือไฟฟ้า เป็นต้น

ลักษณะโดยทั่วไปของแม่พิมพ์แบบกดอัดประกอบด้วยแม่พิมพ์ 2 ส่วนคือ แม่พิมพ์ส่วนบน (Lid) และแม่พิมพ์ส่วนล่าง ( Base) แม่พิมพ์ส่วนล่างจะมีช่องเป็นรูปร่างของผลิตภัณฑ์ เรียกว่าเบ้าพิมพ์ (Cavity) ซึ่งเวลาขึ้นรูปก็นำพอลิเมอร์ที่ต้องการขึ้นรูปใส่ลงในเบ้าพิมพ์ จากนั้นจึงนำแม่พิมพ์ส่วนบนมาปิดทับด้านบน ตัวสลัก (Pin) ที่ติดอยู่กับแม่พิมพ์ส่วนล่าง จะช่วยในการแกะพอลิเมอร์ออกจากแม่พิมพ์ เมื่อให้แรงดันแก่แม่พิมพ์พอลิเมอร์ที่นำมาขึ้นรูปก็ถูกบังคับให้ลงจนเต็มเบ้าของแม่พิมพ์ แสดงดังรูปที่ 2.13 ซึ่งความร้อนจากแม่พิมพ์จะทำให้พอลิเมอร์เกิดการคงรูป



รูปที่ 2.13: แม่พิมพ์แบบกดอัด (Compression molding) [23]

## 2.6 การทดสอบสมบัติเชิงกล

### 2.6.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile testing)

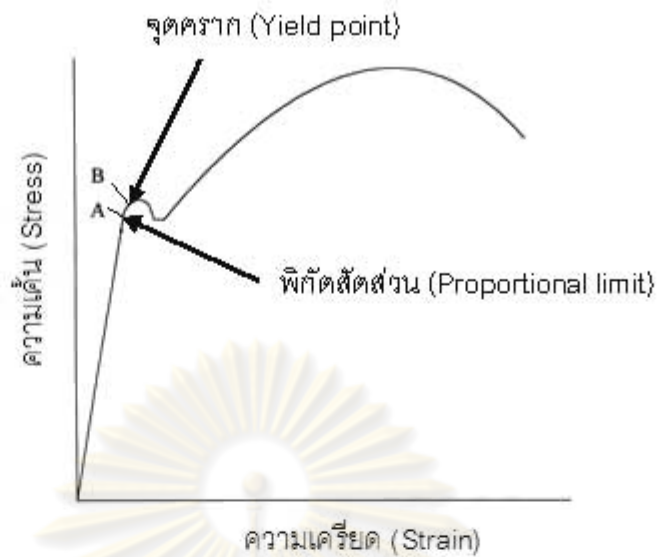
การทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบพื้นฐานของวัสดุ ใช้ในการตรวจพฤติกรรมของวัสดุภายใต้แรงดึง ผลการทดสอบแรงดึงบันทึกเป็นกราฟความเค้น (Stress) กับความเครียด (Strain) แสดงดังรูปที่ 2.14 โดยความเค้นเป็นแกนตั้งและค่าความเครียดเป็นแกนนอน เมื่อออกแรงดึง วัสดุจะค่อยๆ ยืดออกจนถึงจุด A ในช่วงนี้กราฟระหว่างความเค้น-ความเค้น เป็นเส้นตรง แสดงดังสมการที่ ( 2.1) ซึ่งเป็นตามกฎของฮุกเคียน ( Hookean's law) ที่กล่าวว่าความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด เรียกจุด A ว่าพิสัยสัดส่วน (Proportional limit) ภายใต้พิสัยสัดส่วนนี้ วัสดุแสดงพฤติกรรมการคืนรูปแบบยืดหยุ่น ( Elastic Behavior) เมื่อออกแรงกระทำต่อไปจนถึงจุด A เส้นกราฟจะค่อยๆ โค้งออกจากเส้นตรง วัสดุยังคงแสดงพฤติกรรมการคืนรูปได้เล็กน้อยจนถึงจุด B เรียกว่าจุดคราก (Yield point) เมื่อผ่านจุดนี้วัสดุจะแสดงพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (Plastic deformation) [24]

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $E$  คือ มอดูลัสความยืดหยุ่น (Yung's modulus)

$\sigma$  คือ ความเค้น

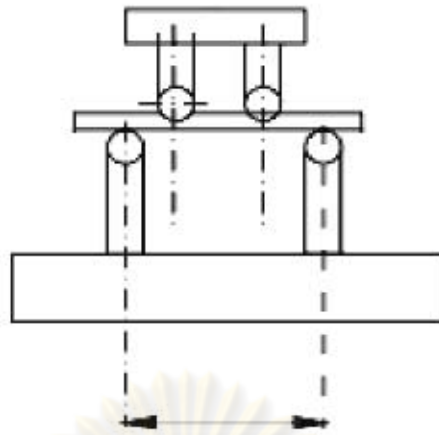
$\epsilon$  คือ ความเครียด



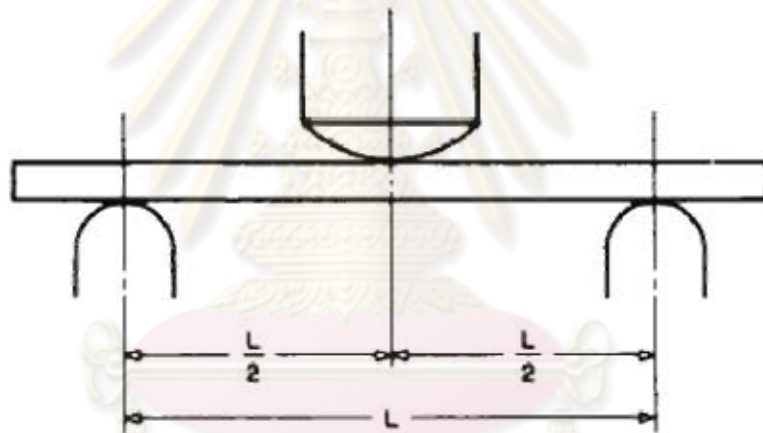
รูปที่ 2.14: กราฟความเค้น-ความเครียด ภายใต้แรงดึง [24]

### 2.6.2 การทดสอบแรงดัดโค้ง (Flexural testing)

เป็นการทดสอบที่แสดงความสามารถของวัสดุในการต้านทานแรงที่กระทำในทิศทางตั้งฉากกับความยาวของชิ้นงาน โดยแรงที่กระทำนั้นเป็นผลเนื่องมาจากความเค้นของ แรงกด (Compressive stress) และความเค้นของแรงดึง (Tensile stress) ที่เกิดขึ้นในขณะเดียวกัน ที่จุดรับแรง สมบัติการดัดโค้งแสดงในรูปค่าแรงดัดโค้งสูงสุด (Maximum flexural strength) ซึ่งเกิดขึ้นที่ผิวบนของชิ้นงานเมื่อเริ่มเกิดการแตกหัก สามารถคำนวณมอดูลัสการดัดโค้ง (Flexural modulus) ได้จากความชันของกราฟระหว่างความเครียดกับความเค้น โดยทั่วไปการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 วิธีได้แก่ วิธีใส่แรงกระทำ 3 จุด (Three-point bending) และวิธีใส่แรงกระทำ 4 จุด (Four-point bending) แสดงดังรูปที่ 2.15(ก) การทดสอบแบบแรงกระทำ 3 จุด แสดงดังรูปที่ 2.15(ข) เป็นวิธีที่นิยมใช้กับพอลิเมอร์ การทดสอบควบคุมด้วยแรงกระทำที่ให้แก่ชิ้นงาน และความกว้างของจุดรองรับ (Support span) ซึ่งมีค่าเป็น 16 เท่าของความหนา วัสดุบางชนิดความกว้างของจุดรองรับอาจมีค่าเป็น 32 และ 64 เท่าของความหนา [25, 26]



จุดรองรับ (Support span)  
(ก)



จุดรองรับ (Support span)

(ข)

รูปที่ 2.15: การทดสอบแรงดัดโค้ง: (ก) วิธีใส่แรงกระทำ 4 จุด

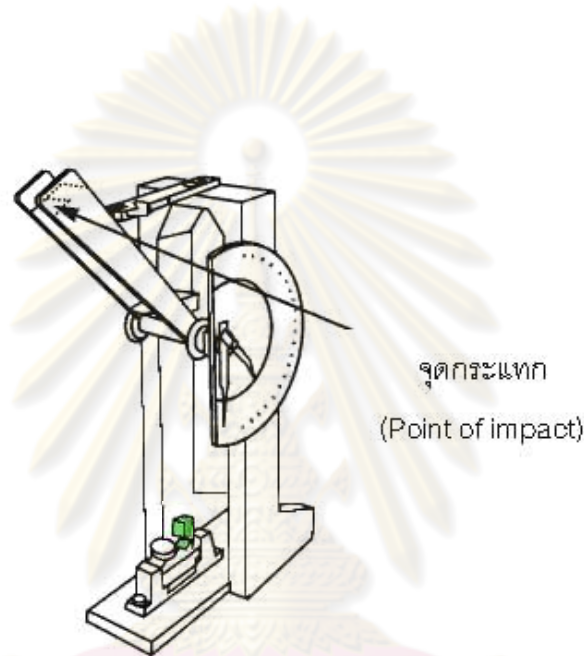
(ข) วิธีใส่แรงกระทำ

3 จุด [26]

### 2.6.3 การทดสอบแรงกระแทก (Impact testing)

การทนต่อแรง กระแทกเป็นความต้านทาน ของวัสดุต่อแรงกระแทกที่กระทำอย่างทันที ผล การทดสอบแสดงในรูปของความสามารถดูดซับแรงหรือพลังงานในการ ต้านทานแรงกระแทกนี้ มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเหนียวทนทานของพอลิเมอร์ พอลิเมอร์ที่มีความเหนียวมากจะ สามารถดูดซับพลังงานในการกระแทกได้มาก การทดสอบแรงกระแทกด้วยลูกตุ้มกระแทก

(Pendulum impact test) เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุด ทำได้โดยการปล่อยลูกตุ้มลงมา กระแทกกับวัสดุ แล้ววัดค่าพลังงานจลน์ที่ลูกตุ้มกระทบกับชิ้นงาน พลังงานที่กระทบชิ้นงาน ขึ้นกับมวลของลูกตุ้ม และความเร็วของการกระทบ จุดกระทบเป็นจุดต่ำสุดของการเหวี่ยงซึ่งเป็นจุดที่ลูกตุ้มมีความเร็วสูงสุด เมื่อลูกตุ้มกระทบกับชิ้นงาน ลูกตุ้มจะเสียพลังงานไปจำนวนหนึ่ง ในการทำให้ชิ้นงานทดสอบหัก พลังงานที่เสียไปนี้ก็คือ พลังงานการกระทบ [24, 27] รูปที่ 2.16 แสดงการทดสอบรับแรงกระแทกแบบไอซอด ( Izod impact test) เป็นวิธีการหนึ่งของการทดสอบของลูกตุ้มกระทบ



รูปที่ 2.16: การทดสอบรับแรงกระแทกแบบ Izod [28]

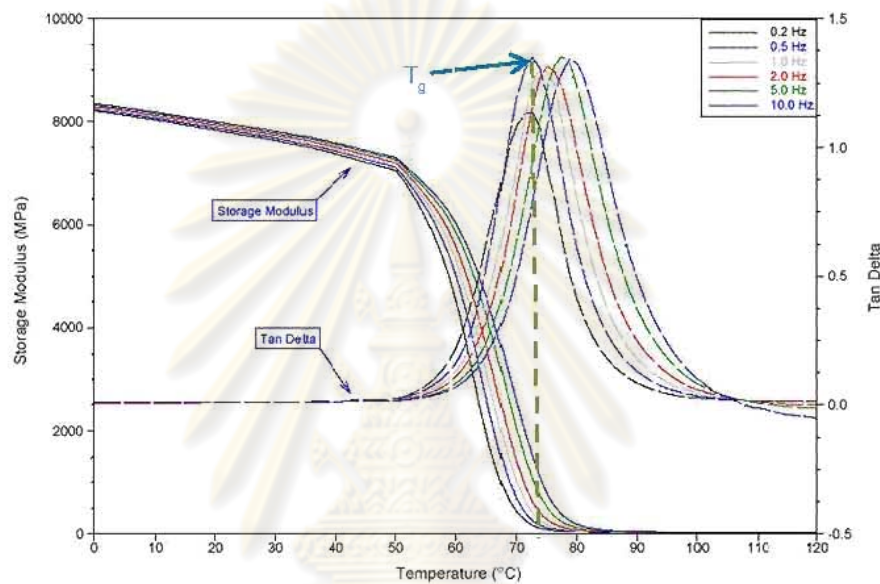
## 2.7 การทดสอบสมบัติเชิงความร้อน

### 2.7.1 การศึกษาอุณหภูมิแปรสภาพแก้ว ( Glass transition temperature, $T_g$ ) โดยเทคนิค Dynamic mechanical analysis (DMA)

DMA เป็นเทคนิคการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุ ที่ใช้ศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติวิสโคอีลาสติก และกำหนดสมบัติของวัสดุที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ เวลา ความถี่ ความเค้น หรือตัวแปรเหล่านี้ประกอบกัน โดยการอาศัยแรงแกว่ง ( Oscillating force) หรือความถี่ (Frequency) ที่ให้แก่ชิ้นงานทดสอบอย่างต่อเนื่อง สามารถเลือกความถี่ได้หลายค่า หรือเพียงค่าเดียวขณะทำการทดสอบ ขึ้นอยู่กับสภาวะกำหนดในการทดสอบ วัดค่าที่วัสดุตอบสนองต่อแรง



แกว่ง รูปแบบที่นิยมใช้กันมากสำหรับพอลิเมอร์ คือการใส่แรงกระทำ 3 จุด (Three-point bending) วิธีการนี้สามารถระบุตำแหน่งของอุณหภูมิแปรสภาพแก้วของพอลิเมอร์ ด้วยค่าของมอดูลัสสะสมความยืดหยุ่น (Storage modulus) ระบุเมื่อเส้นกราฟของมอดูลัสสะสมเริ่มลดลง หรือจุดสูงสุด (Peak) ของกราฟ  $\tan \delta$  หมายถึงค่าอุณหภูมิแปรผ่านสภาพแก้ว [29, 30] แสดงดังรูปที่ 2.17

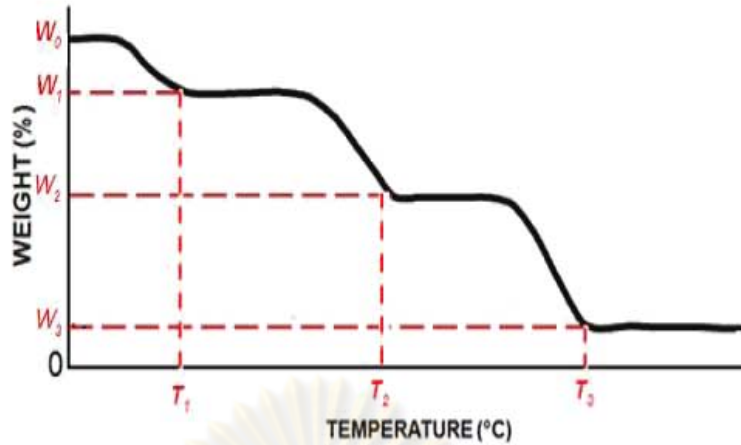


รูป 2.18: แสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DMA [30]

## 2.7.2 การเสื่อมสลายด้วยความร้อน โดยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA)

TGA เป็นเทคนิคเพื่อหาน้ำหนักของวัสดุที่หายไปเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามอัตราที่กำหนด ทดสอบโดยนำวัสดุใส่ในเตาเผาที่มีแขนต่อกับเครื่องชั่งน้ำหนักที่อยู่ภายในเครื่อง TGA เครื่องจะบันทึกค่าน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นด้วยอัตราคงที่ สามารถใช้ TGA ศึกษาอุณหภูมิการเสื่อมสลาย (Degradation temperature,  $T_d$ )

ผลการทดสอบจากเครื่อง TGA เป็นกราฟที่พล็อตกันระหว่างน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปกับอุณหภูมิ แสดงดังรูปที่ 2.18 หรืออาจกล่าวได้ว่าน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ เมื่อ  $W_0$  คือน้ำหนักเริ่มต้นของวัสดุ และ  $W_1$  ถึง  $W_3$  เป็นน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของวัสดุ และ  $T_1$  ถึง  $T_3$  คืออุณหภูมิของการเสื่อมสลายขององค์ประกอบต่างๆ ในวัสดุ [31]



รูปที่ 2.18: กราฟแสดงผลของเครื่อง Thermogravimetric analysis (TGA) [31]

## 2.8 การศึกษาสมบัติด้านการไหล โดยเครื่องทอร์ก ริโอมิเตอร์ (Torque rheometer)

ศึกษาโดยใช้เครื่องทอร์ก ริโอมิเตอร์ ( Torque rheometer) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้วัดค่าทอร์ก ( Torque) และอุณหภูมิ ( Temperature) ภายใต้สภาวะการเดินเครื่องที่ต่อเนื่อง เปรียบเสมือนสภาวะจริงกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ ภายใต้เตาเผาของเครื่องทอร์ก ริโอมิเตอร์ ประกอบด้วย เตาเผา ( Closing chamber) และสกรูคู่ (Twin screw extruder) เป็นตัวเกลียวหมุนเพื่อให้แรงเฉือนแก่พอลิเมอร์ แสดงดังรูปที่ 2.19 ในอุตสาหกรรมขึ้นรูปพอลิเมอร์ ก่อนที่จะนำพอลิเมอร์ไปขึ้นรูปต้องผ่านกระบวนการใส่สารเติมแต่งลงไป เช่น สารเพิ่มความเสถียร สารเสริมสภาพพลาสติก สารหล่อลื่น สารสี เป็นต้น สารเติมแต่งเหล่านี้มีผลต่อกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ ทางอุตสาหกรรมจึงมีความจำเป็นที่ต้องทดสอบประสิทธิภาพของสารเหล่านี้ว่ามีผลต่อกระบวนการผลิตอย่างไร จึงนิยมใช้วิธีการนี้ทดสอบเพื่อหาเวลาในการเดินเครื่องผลิต เพื่อไม่ให้พอลิเมอร์เกิดการเสื่อมสภาพระหว่างกระบวนการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.19: ส่วนประกอบเครื่องทอร์ก รีโอมิเตอร์ (Torque rheometer)

## 2.9 การศึกษาพื้นฐานวิทยา

### กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ลำอนุภาคอิเล็กตรอนพลังงานสูงในการตรวจสอบวัตถุแทนแสงธรรมดา เนื่องจากความยาวคลื่นของลำอนุภาคอิเล็กตรอนนั้นสั้นกว่าความยาวคลื่นแสงถึง 100,000 เท่า ทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนสามารถการแจกแจงรายละเอียดของวัตถุได้ดี

หลักการทำงานของเครื่อง SEM ระบบหลักทดสอบของเครื่องอยู่ในสภาพสุญญากาศ ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่ง ทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน สามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) บนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอ มอนิเตอร์ และสามารถเลือกภาพที่ต้องการได้อย่างง่าย [32, 33]

### บทที่ 3

#### วารสารปริทัศน์

Z. Mrklic และคณะ [34] ศึกษาการระเหยของสารเสริมสภาพพลาสติกไดออกทิลพทาเลท (Diocetyl phthalate, DOP) ออกจาก PVC โดยวัดการเปลี่ยนแปลงไปของน้ำหนัก (Thermogravimetric measurements) ของ DOP ใน PVC เมื่อได้รับความร้อน ที่ช่วงอุณหภูมิ 120-150 องศาเซลเซียส โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของ DOP ที่เติมลงใน PVC เท่ากับ 10.15, 20.26, 30.06 และ 37.11 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก การศึกษานี้พบว่าอัตราการระเหยของ DOP เป็นปฏิกิริยาเคมีอันดับหนึ่ง (First-order reaction) ซึ่งการระเหยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความเข้มข้น DOP จากนั้นศึกษาอิทธิพลของตัวแปรระหว่างอุณหภูมิและความเข้มข้นว่าตัวแปรใดมีอิทธิพลต่อการระเหยมากกว่ากัน ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ดังนี้ ศึกษาตัวแปรอุณหภูมิจากสมการ ;  $k = ze^{-E/RT}$  ขณะที่ความเข้มข้นศึกษาจากสมการ ;  $k = k_0c_0 + q$  ( $k$  คือ ค่าคงที่ของการระเหย) พบว่าอุณหภูมิมีอิทธิพลต่อการระเหยของ DOP ออกจาก PVC มากกว่าความเข้มข้น ดังนั้น ความเข้มข้นของ DOP จึงเป็นขั้นตอนการควบคุม (Rate controlling step) ของกระบวนการระเหยและเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ปริมาตรว่างใน PVC เมทริกซ์จึงเพิ่มมากขึ้น ทำให้การระเหยของ DOP ออกมาที่ผิวของ PVC เพิ่มมากขึ้น

L. Yan และคณะ [35] ศึกษาการเสริมสภาพพลาสติก PVC ด้วยโพลีเอสเตอร์สายโซ่ตรงยาว (Long-chain linear polyester, LP) เปรียบเทียบกับ PVC ที่เสริมสภาพพลาสติกด้วย DOP โดยตรวจสอบจากความสามารถในการขึ้นรูป ( Processing) และสมบัติเชิงกล ( Mechanical properties) พบว่า PVC/LP ใช้ค่าทอร์กในการขึ้นรูปมากกว่า PVC/DOP เมื่อความเข้มข้นของ LP และ DOP เท่ากัน แต่เมื่อความเข้มข้นของสารเสริมสภาพพลาสติก LP และ DOP ใน PVC เพิ่มขึ้น ทอร์กที่ใช้ในกระบวนการมีค่าลดลง การทดสอบแรงดึง ( Tensile properties) พบว่า แรงดึง (Tensile strength) ของ PVC/LP และ PVC/DOP มีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของ LP และ DOP เพิ่มขึ้น ทำให้ระยะยืด ณ จุดขาด ( Elongation at break) ของ PVC/LP และ PVC/DOP เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่าง PVC/LP กับ PVC/DOP พบว่า PVC/DOP ทนต่อแรงดึงที่ต่ำกว่า และระยะยืด ณ จุดขาดที่สูงกว่า เพียงเล็กน้อยที่ปริมาณ DOP และ LP เท่ากัน ทั้งนี้คุณสมบัติดังกล่าวขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight) และโครงสร้างโมเลกุล (Molecular structure) ของ LP และ DOP โดยที่ LP มีสายโซ่ตรงที่ค่อนข้างยาวและมีความเป็นผลึกเล็กน้อยเมื่อใส่ลงใน PVC แต่ตรงกันข้าม เมื่อเติม DOP ลงไป DOP เข้าไปสร้างความพันพัน ( Entanglement) ให้กับ

สายโซ่ PVC และเข้าไปลดแรงดึงดูดระหว่างสายโซ่ของ PVC ทำให้สายโซ่สามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น จึงได้นำ PVC มาเสริมสภาพพลาสติก ร่วมกับกันกับ DOP และ LP (PVC/DOP/LP) พบว่า LP 20 phr และ DOP 40 phr เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการเสริมสภาพพลาสติก PVC โดยให้ค่าทนต่อแรงดึง 18.9 MPa และ 346% ของระยะยืด ณ จุดขาด และยังให้ผลที่ดีกว่า PVC/DOP ที่ปริมาณ DOP 40 phr นอกจากนี้ยังพบว่า LP มีความคงสภาพ (Permanent deformation) ต่อการถูกสกัดออกจากผิว PVC ดีกว่า DOP

V. Pita และคณะ [36] ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลและความสามารถในการกระบวนการผลิตด้วยเครื่องอัดรีด (Extruder) ภายใต้อิทธิพลของความเข้มข้น ของ DOP เท่ากับ 10, 30, 50, 90 และ 100 phr และความเร็วรอบสกรู เท่ากับ 30, 60 และ 100 รอบต่อนาที ในกระบวนการผลิต PVC ที่เสริมสภาพด้วยสารไดไอโซเดซิลฟทาเลท (Di-isodecyl phthalate, DIDP) และเทอร์โมพลาสติกโพลียูรีเทน (Thermoplastic polyurethane, TPU) เปรียบเทียบกับสารไดออกทิลฟทาเลท (Diocetyl phthalate, DOP) ซึ่งสมบัติเชิงกลที่ศึกษาได้แก่ แรงดึง (tensile strength) มอดูลัส (modulus) และค่าการดูดซับพลังงาน (energy absorbed) พบว่า ที่ความเร็วรอบสกรู 30 รอบต่อนาที PVC ที่ผสมด้วย DOP ปริมาณต่างๆ แสดงพฤติกรรมต่างๆ ดังนี้ DOP 10 phr วัสดุมีความแข็งและเปราะ ขณะที่วัสดุมีความเหนียวและนุ่มที่ปริมาณสาร DOP 50 และ 90 phr เมื่อเปลี่ยนความเร็วรอบสกรูเป็น 100 รอบต่อนาที ที่ปริมาณสาร DOP 10 phr วัสดุเปลี่ยนพฤติกรรมเป็นแข็งและแกร่ง แต่ที่ปริมาณสาร DOP 50 และ 90 phr วัสดุยังคงแสดงพฤติกรรมเช่นเดิม เนื่องจากการเติมสารเสริมสภาพพลาสติกในปริมาณน้อยทำให้เกิดที่ว่างระหว่างสายโซ่ของ PVC ซึ่งส่งผลให้สายโซ่ PVC เคลื่อนที่และเกิดการจับตัวเป็นระเบียบได้ดีขึ้น หรือที่เรียกว่า แอนติพลาสติไซเซชัน

(Antiplasticization) ในกรณีเช่นนี้การเติมสารเสริมสภาพพลาสติกเพิ่มเข้าไปในปริมาณสูงจะขัดขวางการเกิดแอนติพลาสติไซเซชัน และยังพบว่า PVC ที่เติมสาร DIDP ปริมาณเดียวกันกับ DOP วัสดุแสดงพฤติกรรมที่คล้ายคลึงกัน ทั้งนี้เนื่องจาก DOP และ DIDP เป็นสารเสริมสภาพพลาสติกโมเลกุลต่ำและมีสูตรโครงสร้างโมเลกุลที่คล้ายคลึงกัน ขณะที่ PVC ที่เติม TPU ณ ความเร็วรอบสกรู 100 รอบต่อนาที วัสดุแสดงพฤติกรรมดังนี้ TPU 10 phr วัสดุมีความแข็งและแกร่ง และกลายเป็นวัสดุที่มีความแข็งและเหนียวที่ปริมาณ TPU 30 และ 50 phr และเมื่อเติมลงไป 100 phr ทำให้วัสดุมีความนุ่มและเหนียว เมื่อเปลี่ยนความเร็วรอบของสกรูวัสดุ PVC/TPU ยังคงแสดงพฤติกรรมเช่นเดิม แสดงให้เห็นว่าความเร็วรอบของสกรูไม่มีผลต่อพฤติกรรมของวัสดุ และ TPU ยังแสดงพฤติกรรมคล้ายคลึงกับสารเสริมสภาพพลาสติก นอกจากนี้การเติมสาร DOP และ DIDP ในสัดส่วนที่มากขึ้นจะทำให้มอดูลัสและการดูดซับพลังงานมีค่าลดลง เนื่องจากโครงสร้างของ PVC ถูกทำลาย แต่ TPU มีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย เนื่องจาก TPU เป็นเทอร์โม

พลาสติกน้ำหนักโมเลกุลสูง โครงสร้างโมเลกุลแข็งแรงกว่าซึ่งส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของ PVC เมื่อเทียบกับ DOP และ DIDP

Y. Soong และคณะ [37] ศึกษาการเสริมสภาพพลาสติก PVC ด้วย Polyhedral oligomeric silsesquioxane (POSS) ร่วมกับ DOP เพื่อลดปริมาณการใช้ DOP ในการเสริมสภาพพลาสติก PVC เนื่องจาก DOP มีพฤติกรรมบางอย่างที่ส่งผลกระทบต่อ PVC เช่น การระเหยและซีมีออกของ DOP จากผิว PVC ทำให้วัสดุ PVC สูญเสียคุณสมบัติในการนำไปใช้งาน และข้อดีของ POSS เป็นสารที่มีพฤติกรรมก่อยุ่ที่ต่ำ พบว่าอุณหภูมิแปรผ่านสภาพแก้วของ PVC/DOP และ PVC/POSS ลดลง เมื่อความเข้มข้นของ DOP และ POSS เพิ่มขึ้น เมื่อใช้ DOP และ POSS ร่วมกันในการเสริมสภาพพลาสติก PVC ที่ปริมาณ POSS 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักขึ้นไป POSS มีความเข้ากันได้ (Miscibility) กับ DOP และให้ค่าอุณหภูมิแปรผ่านสภาพแก้วต่ำสุดคือ  $25.6^{\circ}\text{C}$  ที่สัดส่วนของ DOP และ POSS (PVC/DOP/POSS) เท่ากับ 20 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้วัสดุ PVC ที่มีความเปราะกลายเป็นวัสดุที่มีความเหนียวและการใช้ POSS ร่วมกับปริมาณ DOP น้อยๆ ยังลดการเกิด แอนติพลาสติกไซเซชัน ในวัสดุ PVC อีกด้วย เนื่องจาก POSS โครงสร้างโมเลกุลที่ใหญ่ จะเข้าไปเพิ่มพื้นที่ว่างภายในสายโซ่ PVC ลดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล PVC ซึ่งทำให้สายโซ่ PVC เคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น เหตุนี้จึงทำให้ PVC มีความเหนียวและมีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น

S. Yu และคณะ [38] ศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติของเรซินอีพ็อกซี (Epoxy resin) ด้วยยางอนุภาคขนาดนาโน (Nano-rubber particles) เรซินอีพ็อกซี เป็นพอลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงแรงและค่ามอดูลัสของการยืดหยุ่นสูง จึงนิยมนำเรซินอีพ็อกซี มาใช้งานในด้านการบิน อุตสาหกรรม ยานยนต์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ วัสดุวิศวกรรม แต่เรซินอีพ็อกซี มีความเปราะสูง จึงมีโอกาที่จะเกิดการเกิดรอยแตก (Micro crack) ได้ง่าย เพราะมีโครงสร้างร่างแห 3 มิติ งานวิจัยนี้จึงได้นำยางอนุภาคขนาดนาโนใส่ลงไป เพื่อเพิ่มความเหนียว (Toughness) และลดการเกิดรอยแตกของเรซินอีพ็อกซี โดยเปรียบเทียบปริมาณยางที่เติมลงไป 5, 10 และ 16 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อเติมยางลงไปมากขึ้นการสึกหรอของเรซินอีพ็อกซี มีค่าลดลง เนื่องจากยางจะเข้าไปเพิ่มความเหนียว และลดการสูญเสียมวลของอีพ็อกซี เรซิน เมื่อได้รับแรงเสียดทาน เนื่องจากจะเข้าไปเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของเรซินอีพ็อกซี และปริมาณของยางอนุภาคขนาดนาโน 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีผลต่อค่าการต้านแรงเสียดทานและสัมประสิทธิ์การเสียดทานที่ดีที่สุด นอกจากนี้เมื่อเติมปริมาณยางอนุภาคขนาดนาโนลงไปมากขึ้น อนุภาคยางก็จะเกิดการรวมตัวกัน ส่งผลให้ค่าความแข็ง

ของเรซินอีพ็อกซี มีค่าลดลง ซึ่งเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เรซินอีพ็อกซี มีอัตราการสึกหรอจำเพาะ (Specific wear rate) ลดลง

L. Daishuang และคณะ [39] ศึกษาการนำผงยางนาโนสไตรีนบิวทาไดอีน ( NPSBR) ที่ได้จากการเตรียมด้วยการฉายรังสีลงไปบนน้ำยาง SBR ซึ่งมี ไดเอทิลเฮกซิล อะคริเลท (2-Ethyl hexyl acrylate, 2-EHA) และไตรเมทิลออลโพรเพน ไตรอะคริเลท ( Trimethylolpropane triacrylate, TMPTA) เป็นสารที่ช่วยในการเชื่อมโครงสร้าง ( Crosslink agent) ระหว่างอนุภาคของน้ำยาง SBR แล้วผ่านกระบวนการพ่นแห้งจนได้ผงยางนาโน SBR พบว่า TMPTA มีผลต่อค่าความหนืดมากกว่า 2-EHA เนื่องจากโครงสร้างของ TMPTA มีจำนวนพันธะคู่ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามากกว่า 2-EHA และส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของโครงสร้างที่ใช้ TMPTA สูงขึ้นตามไปด้วย และขนาดอนุภาคของผงยางที่ได้ออกมามีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับอนุภาคของน้ำยาง จากนั้นนำผงยางนาโน SBR ที่เตรียมได้ไปผสมกับพอลิสไตรีนทนแรงกระแทกสูง ( HIPS) และพอลิสไตรีน (PS) เพื่อเพิ่มความเหนียว พบว่าปริมาณผงยางนาโน SBR 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักสามารถปรับปรุงแรงกระแทกได้ดีใน HIPS และมีความแข็งแรงลดลงเพียงเล็กน้อย ขณะเดียวกันที่ปริมาณผงยางนาโน SBR 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สามารถปรับปรุงความเหนียวให้กับ PS ได้ดีเช่นเดียวกัน และแสดงให้เห็นว่าผงยางนาโน SBR สามารถใช้ได้ดีกับ HIPS ที่ปริมาณผงยางนาโน SBR น้อยกว่าเติมลงใน PS เนื่องจากผงยางนาโน SBR กระจายตัวได้ดีใน HIPS เมทริกซ์

Q. Wang และคณะ [40] ศึกษาของผสม 3 องค์ประกอบ คือ PVC/ultrafine full-vulcanized powder rubber (UFPR)/untreated nano-sized calcium carbonate (UNCC) เพื่อปรับปรุงสมบัติของ PVC เนื่องจาก PVC เป็นพลาสติกที่ได้รับความนิยมในอุตสาหกรรมพลาสติก เพราะมีความแข็งแรง ( Stiffness) สูง ทนไฟ ( Flame retardant) ด้านทานการเกิดปฏิกิริยาเคมี ( Chemical resistance) และมีราคาไม่สูงมาก แต่ข้อเสียของ PVC คือ ทนแรงกระแทกได้ต่ำ ด้านทานความร้อนได้น้อย ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการนำไปใช้งาน เนื่องด้วย nano-sized calcium carbonate (NCC) เป็นสารเสริมที่ช่วยในการปรับปรุงสมบัติของพลาสติก เนื่องจาก NCC สามารถในการกระจายตัวได้ดีในเมทริกซ์ที่เป็นพลาสติก ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพลาสติก โดยเฉพาะความแข็งแรง NCC มีราคาสูง อุตสาหกรรมพลาสติกจึงไม่นิยม ดังนั้นคณะวิจัยนี้จึงได้นำ untreated NCC (UNCC) มาใช้ แต่ UNCC กระจายตัวไม่ดี ทำให้สมบัติเชิงกลของพลาสติกด้อยลง จึงได้นำเอา Nitrile ultrafine full-vulcanized power rubber (NBR-UFPR) ที่สามารถกระจายตัวได้ดีใน PVC เมทริกซ์ นำไปสู่การเพิ่มความเหนียวและด้านทานการติดไฟของ PVC การศึกษาพบว่า NBR-UFPR และ UNCC

สามารถเข้ากันได้และกระจายตัวแยกออกจากกันได้ดีใน PVC เมทริกซ์ และยังพบว่าเมื่อใส่ NBR-UFPR เพียงอย่างเดียว และใส่ NBR-UFPR ร่วมกับ UNCC ลงใน PVC ทำให้ค่าอุณหภูมิแปรสภาพแก้ว (Glass transition temperature,  $T_g$ ) เพิ่มขึ้นจาก neat PVC เท่ากับ 4 และ 10 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสในการทำปฏิกิริยาระหว่าง UNCC กับ PVC เพิ่มขึ้น จึงทำให้ PVC ต้านทานความร้อนได้ดีขึ้น เพราะ UNCC สามารถยับยั้งการเคลื่อนที่ของโมเลกุล PVC ได้ขณะได้รับความร้อน ขณะที่สมบัติเชิงกลพบว่าการเติม UNCC ร่วมกับ NBR-UFPR สามารถทนรับแรงกระแทกได้ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ neat PVC PVC/UNCC แต่ด้อยกว่า PVC/NBR-UFPR แสดงว่าเมื่อเติม NBR-UFPR ช่วย UNCC การกระจายตัวดีขึ้นและเกิดงานร่วมกัน (Synergy) ได้ดีระหว่าง NBR-UFPR กับ UNCC

Y. Liu และคณะ [41] ศึกษาการนำผงยางสไตรีนบิวทาไดอีน (SBR) และผงยางไนไตรด์บิวทาไดอีน (NBR) อนุภาคขนาดนาโน เพื่อปรับปรุงสมบัติของผ้าเบรก แทนการใช้ยางทั่วไปในอุตสาหกรรม เนื่องจากผ้าเบรกเป็นวัสดุใช้ในการต้านแรงเสียดทานที่มีส่วนผสมของฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resin) กับผงเหล็ก เส้นใยอนินทรีย์ และเส้นใยอื่นๆ ทำให้ผ้าเบรกที่ผลิตมีจุดด้อยด้านความเหนียว มีรอยแตกบนผิวหน้า และมีเสียงรบกวน เนื่องจากเรซินมีลักษณะแข็งและเปราะ การศึกษาพบว่าผ้าเบรกของดิสเบรก (Disk brake pads) และเบรกคลัชต์ (Clutching break) ที่ปรับปรุงด้วยผงยาง NBR มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานค่อนข้างเสถียรโดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูง ส่วนผงยาง SBR ใส่ผ้าเบรกของแบบดรัม (Drum break) นั้นให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ค่อนข้างเสถียร แม้ว่าสภาวะการทดสอบจะแตกต่างกัน นอกจากนี้ผงยาง SBR ยังช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของผ้าเบรกได้ดีกว่าตามที่มาตรฐานอุตสาหกรรมยานยนต์กำหนด ทั้งนี้เนื่องจากผงยางนาโนมีสมบัติที่ดีและแตกต่างจากผงยางทั่วไป เช่น การกระจายตัวในเนื้อผิวของเมทริกซ์ ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างยางนาโนกับเมทริกซ์เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ผงยางนาโนยังช่วยเพิ่มสมบัติการรับแรงกระแทกและต้านทานความร้อนได้ดีกว่าผงยางทั่วไป

Q. Wang และคณะ [42] ศึกษาสมบัติของสารประกอบ PVC ที่เติมด้วยผงยาง ultrafine full-vulcanized NBR ที่มีขนาดอนุภาค 150 นาโนเมตร (NBR-UFPR-1) และขนาด 90 นาโนเมตร (NBR-UFPR-2) จากการศึกษาสมบัติเชิงกลพบว่าอุณหภูมิแปรสภาพแก้ว (Glass transition temperature,  $T_g$ ) ของสารประกอบ PVC เพิ่มขึ้นจาก 77.5 °C เป็น 82.37 °C สำหรับ NBR-UFPR-1 และ 85.6 °C สำหรับ NBR-UFPR-2 เนื่องจากการกระจายตัวที่ดีของอนุภาคยางใน PVC เมทริกซ์ เพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างยางนาโนกับ PVC เมทริกซ์ และยังทำให้ PVC มีสมบัติต้านทานความร้อนได้ดีขึ้น นอกจากนี้พบว่า PVC ที่เติมอนุภาคนาโนลงไป มีสมบัติการ



รับแรงกระแทกเพิ่มขึ้นจาก  $3.1 \text{ kJ/m}^2$  เป็น  $5.2 \text{ kJ/m}^2$  สำหรับ NBR-UFPR-1 และ  $5.5 \text{ kJ/m}^2$  สำหรับ NBR-UFPR-2 เนื่องจากอนุภาคยางที่เติมมีขนาดเล็กมากและกระจายตัวได้ดี ทำให้ระยะห่างระหว่างอนุภาคสั้นลง รอยแตกที่เกิดขึ้นสามารถเคลื่อนที่ได้เพียงระยะทางสั้นๆ เท่านั้น จึงทำให้ PVC มีความเหนียวเพิ่มขึ้น

A. Mousa และคณะ [43] ศึกษาพฤติกรรมด้านการไหลของ PVC ที่เสริมสภาพพลาสติกด้วยยางอะครีโลไนไตรล์บิวทาไดอีน (NBR) ด้วยเครื่องทอร์กรีโอมิเตอร์ (Torque rheometer) ณ อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส และที่ความเร็ว 50 รอบต่อนาที PVC ที่ใช้มีค่า K คือ 65 และยาง NBR มีปริมาณอะครีโลไนไตรล์อยู่ 34 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก การหลอมผสม PVC กับยาง NBR ที่อัตราส่วน (เปอร์เซ็นต์) ของ PVC/NBR ดังนี้ 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 จากการศึกษพบว่า PVC มีค่าความหนืดลดลงเมื่ออัตราแรงเฉือนและปริมาณยาง NBR เพิ่มขึ้น เนื่องจากยาง NBR ทำให้โมเลกุลของ PVC มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลลดลง จึงง่ายต่อการอ่อนตัวเพิ่มมากขึ้น เมื่อได้รับแรงเสียดทานและความร้อน ส่งผลให้มีค่าดัชนีการไหลเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการขาดกันของสายโซ่โมเลกุลเมื่อได้รับความร้อนและแรงเฉือน อีกทั้งความหนืดยังขึ้นอยู่กับความแข็งแรงโครงสร้างโมเลกุลของ PVC/NBR และเนื่องด้วยการวิจัยนี้ใช้ NBR เป็นองค์ประกอบ ซึ่งเป็นตัวช่วยให้ PVC ไหลตัวได้ดีขึ้น มีความยืดหยุ่น (Elastic) สูงและยังทำให้ค่าพลังงานกระตุ้นมีค่าลดลงอีกด้วย

M. Zhang และคณะ [44] ศึกษาอิทธิพลสารยืดหยุ่นอนุภาคนาโน (Elastomeric nano-particles, ENP) ที่นำมาใช้ปรับปรุงด้านความเหนียวของโพลีโพรพิลีน (Polypropylene, PP) เนื่องจากวิธีการเติมที่เติมยางนั้นทำให้มีความเหนียวเพิ่มขึ้น โดยทำให้มีค่ามอดูลัส (Modulus) ลดลงด้วย ในงานวิจัยนี้ จึงได้นำยางอนุภาคนาโน 3 ชนิด ได้แก่ ยางสไตรีนบิวทาไดอีน ที่ประกอบด้วยบิวทาไดอีน 70 (DB-70 ENP) และบิวทาไดอีน 50 (DB-50 ENP) เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ยางสไตรีนบิวทาไดอีนที่ประกอบด้วยบิวทาไดอีน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปรับผิวด้วยไซเดียมเบนไซเอท (Modified DB-50 ENP) จากนั้นศึกษาการกระจายตัวของ ENP โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) พบว่า DB-50 ENP สามารถกระจายตัวได้ดีใน PP และมีการเชื่อมกันระหว่างอนุภาค ENP สูง เนื่องจากได้รับแรงเฉือนขณะหลอมผสม และช่วยป้องกันการเกาะตัวรวมกันระหว่างอนุภาค ENP จากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope, AEM) พบว่า modified DB-50 ENP กระจายตัวได้ดีใน PP เช่นเดียวกัน และมีขนาดอนุภาค เล็กกว่า 100 นาโนเมตร จึงทำให้ PP มีความเหนียวขึ้น การศึกษาสมบัติเชิงกลพบว่า PP ที่เติม modified DB-50 ENP

2 เฟอร์เซ็นโดยน้ำหนัก PP มีความแข็งแรงและความเหนียวสูงสุด และเมื่อเปรียบกันระหว่าง PP บริสุทธิ์กับ PP ที่เติม DB-70 ENP ลงไป 5 เฟอร์เซ็นโดยน้ำหนัก พบว่ามีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเหนียวให้กับ PP นั้นขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคของยาง ENP ที่รวมตัวกันและการกระจายตัวที่สม่ำเสมอใน PP



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 4.1 วัสดุดิบ

ผง PVC คอมพาวนด์ (PVC compound) เกรด K66 มีช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลว 170-190°C และความหนาแน่น 1.4 g/cm<sup>3</sup> โดยผสม PVC คอมพาวนด์กับสารเสริมสภาพพลาสติก (Plasticizer) คือ ไดออกทิลฟทาเลท (Diocetyl Phthalate, DOP) มีลักษณะเป็นของเหลวใสคล้ายน้ำมัน อุณหภูมิแปรสภาพแก้ว -50°C และน้ำหนักโมลกุล 390 g/mol ส่วนยางนาโน (Nano-rubber) ที่ใช้ 2 ชนิด คือ อะคริไนด์ไนไตรล์ บิวทาไดเอิน (Acrylonitrile butadiene, NBR) และ สไตรีน บิวทาไดเอิน (Styrene butadiene, SBR) มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 100 นาโนเมตร รูปที่ 4.1 แสดงวัสดุดิบที่ใช้ในงานวิจัย



(ก) PVC คอมพาวนด์ (PVC compound)



(ข) DOP



(ค) ยางนาโน NBR



(ง) ยางนาโน SBR

รูปที่ 4.1: วัสดุดิบที่ใช้ในงานวิจัย

## 4.2 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

### 4.2.1 ส่วนผสม PVC คอมพาวนด์

การผสม PVC คอมพาวนด์กับสารเสริมสภาพพลาสติก DOP แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ ผสม PVC กับ DOP (PVC/DOP) และผสม PVC กับ DOP และยางนาโนแต่ละชนิด (PVC/DOP/ยางนาโน) โดยทั้งสองลักษณะใช้ DOP ปริมาณเดียวกันคือ 15, 20, 25 และ 30 phr ขณะที่ PVC/DOP/ยางนาโน แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ใช้ยางนาโน NBR (PVC/DOP/NBR) และ ยางนาโน SBR (PVC/DOP/SBR) ซึ่งแต่ละกลุ่มผสมยางนาโนแต่ละชนิดเป็นปริมาณ 1, 3, 5, 7, 9 และ 11 phr

### 4.2.2 ขั้นตอนการผสม

ผสมแห้งองค์ประกอบเพื่อการผสม PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน ที่เตรียมไว้ในปริมาณดังหัวข้อที่ 4.2.1 ด้วยเครื่องผสมความเร็วสูง (Thermo electron, PRISM Pilot 3) แสดงดังรูปที่ 4.2(ก) ที่ความเร็วรอบ 2,500 รอบ/นาที เป็นเวลา 3 นาที จากนั้นนำไปหลอมผสมด้วยเครื่องลูกรีดคู่ (Two-roll mill) แสดงดังรูปที่ 4.2 (ข) ที่อุณหภูมิ 140°C โดยผสมไปมาเพื่อให้ PVC กับส่วนผสมเข้ากันเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นใช้ใบมีดปาด PVC ที่หลอมผสมเสร็จแล้วออกมาเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า เพื่อนำไปขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องกดอัดร้อน แสดงดังรูปที่ 4.2(ค) ที่อุณหภูมิ 180°C และความดัน 70 kg/cm<sup>2</sup> ใช้เวลา 3 นาที เป็นชิ้นงานต่างๆ รูปร่างตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM (American Society for Testing and Materials) เช่น ชิ้นงานทดสอบการทนต่อแรงดึง (Tensile test) การทนต่อแรงดัดโค้ง (Flexural test) การทนต่อแรงกระแทก (Impact test) ตามมาตรฐาน ASTM D638, ASTM D790 และ ASTM D256 ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก) เครื่องผสมความเร็วสูง (High speed mixer)



(ข) เครื่องลูกรีดคู่ (Two-roll mill)



(ค) เครื่องกดรีด (Hydraulic press)

รูปที่ 4.2: เครื่องมือที่ใช้ในการผสมและเตรียมชิ้นงาน PVC

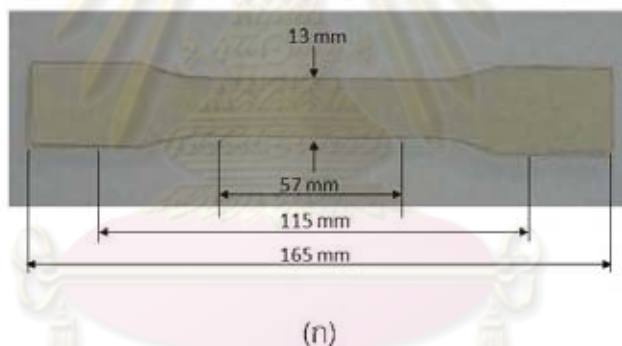
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 4.3 คุณสมบัติของ PVC (Characterization of PVC)

### 4.3.1 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

#### 4.3.1.1 การทนต่อแรงดึง (Tensile test)

ทดสอบการทนต่อแรงดึงของ PVC คอมพาวนด์ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน ตามมาตรฐาน ASTM D638-03 [45] ซึ่งงานมีลักษณะเป็นรูปดัมเบล ขนาดความยาว 165 mm. ความหนา 3 mm. และความกว้าง 13 mm. แสดงดังรูปที่ 4.3(ก) ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (INSTRON Instrument, model5567) แสดงดังรูปที่ 4.3(ข) ซึ่งความเร็วที่ใช้ดึงขึ้นงาน (Crosshead speed) 50 mm./min และแรงดึงขึ้นงานก่อนทดสอบ (Pre-loading) 150 Nการทดสอบนี้ให้ผลด้านมอดูลัสภายใต้แรงดึง ( Tensile modulus) การทนต่อแรงดึง ( Tensile strength) และระยะยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) ผลของค่าต่างๆ เหล่านี้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดสอบขึ้นงานจำนวน 5 ชิ้น



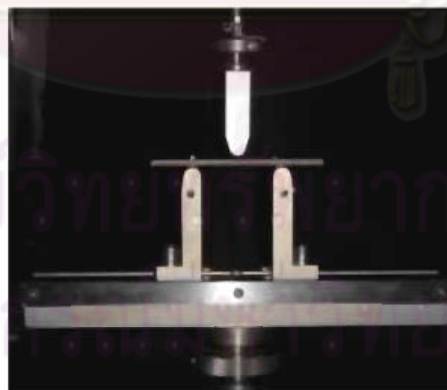
รูป 4.3: การทดสอบแรงดึง: (ก) ขนาดและรูปร่างชิ้นงานทดสอบ และ(ข) เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Instron)

#### 4.3.1.2 การทนต่อแรงดัดโค้ง (Flexural test)

ชิ้นงานทดสอบการทนต่อแรงดัดโค้งของ PVC คอมพาวนด์ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน เป็นสีเหลืองมันวาว โดยมีความยาว 96 mm. ความกว้าง 12.7 mm. และความหนา 3 mm. แสดงดังรูปที่ 4.4(ก) ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D790-03 [46] ทดสอบโดยเครื่อง Universal Testing Machine (INSTRON Instrument, model5567) รับแรงกระทำ 3 จุด (Three-point bending) จุดรองรับมีระยะห่าง (Support span) 48 mm. แสดงดังรูปที่ 4.4(ข) อัตราเร็วที่ใช้ในการทดสอบ 12.7 mm./min การทดสอบให้ผลด้านมอดูลัสภายใต้แรงกด (Flexural modulus) และการทนต่อแรงกด (Flexural strength) ผลที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดสอบชิ้นงานจำนวน 5 ชิ้น



(ก)

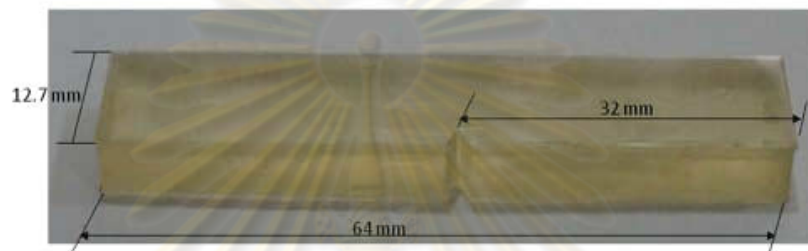


(ข)

**รูปที่ 4.4:** การทดสอบแรงดัดโค้ง: (ก) ขนาดและรูปร่างของชิ้นงานทดสอบ และ(ข) การทดสอบแบบรับแรงกระทำ 3 จุด (Three-point bending)

#### 4.3.1.3 การทนต่อแรงกระแทก (Impact test)

การศึกษากการทนต่อพลังงานกระแทก ( Impact energy) ของ PVC คอมพาวนด์ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน ขนาดและรูปร่างของชิ้นงานทดสอบ ตามมาตรฐาน ASTM D 256-06 [47] แสดงดังรูปที่ 4.5(ก) ทำรอยบากตรงกลางของชิ้นงานเป็นรูปตัว V มุม  $45^{\circ}$  ทดสอบด้วยวิธีของ Izod โดยเครื่อง Impact tester (Yasuda, model158) แสดงดังรูปที่ 4.5(ข) ค่าการทนพลังงานกระแทกเฉลี่ยจากการทดสอบชิ้นงานจำนวน 5 ชิ้น



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.5: การทดสอบแรงกระแทก : (ก) ขนาดและรูปร่างชิ้นงาน และ(ข) เครื่องทดสอบแรงกระแทก (Impact tester)



#### 4.3.2 สมบัติเชิงความร้อน (Thermal properties)

##### 4.3.2.1 อุณหภูมิแปรผ่านสภาพแก้ว (Glass transition temperature, $T_g$ )

ชิ้นงานทดสอบมีความหนา 3 mm, ความกว้าง 10 mm, และความยาว 50 mm. แสดงดังรูปที่ 4.6(ก) เครื่อง Dynamic Mechanical Analyzer (DMA, NETZSCH, model DMA242) แสดงดังรูปที่ 4.6(ข) เป็นเครื่องมือที่ใช้ตรวจสอบสมบัติเชิงกลพลวัตของ PVC คอมพาวนด์ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน ตามมาตรฐาน ASTM E1640-94 [48] ทดสอบแบบรับแรง 3 จุด (Three-point bending) ด้วยความถี่ 1 Hz และอัตราการให้ความร้อน  $3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  ในช่วงอุณหภูมิ  $-100$  ถึง  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ศึกษาอุณหภูมิแปรผ่านสภาพแก้ว จาก  $\tan \delta$



(ก)



(ข)

**รูปที่ 4.6:** การทดสอบ DMA: (ก) ขนาดของชิ้นงาน และ (ข) เครื่อง Dynamic mechanical analyzer

##### 4.3.2.2 อุณหภูมิการเสื่อมสลาย (Degradation temperature, $T_d$ )

ศึกษาพฤติกรรมการเสื่อมสลายของ PVC คอมพาวนด์ ยางนาโน NBR และ SBR รวมไปถึง PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน ได้จากอุณหภูมิการเสื่อมสลายด้วยเครื่อง Thermogravimetric (TGA, TA instruments, SDT Q600) แสดงดังรูปที่ 4.7 ปริมาณตัวอย่างทดสอบ 10 mg อัตราการให้ความร้อน  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  ในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่อัตราการไหล  $100\text{ ml}/\text{min}$  ผลที่ได้จากเครื่อง TGA เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียไป (Weight loss) ของแต่ละองค์ประกอบกับอุณหภูมิ (temperature) ที่แต่ละองค์ประกอบเสื่อมสลาย



รูปที่ 4.7: เครื่อง Thermogravimetric Analyzer (TGA)

#### 4.3.2.3 อุณหภูมิการโค้งงอด้วยความร้อน (Heat deflection temperature)

ชิ้นงานทดสอบมีขนาดและรูปร่าง แสดงดังรูปที่ 4.8 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน การทดสอบ ASTM D648-06 [49] การทดสอบอุณหภูมิการโค้งงอใช้วิธีแบบกระทำ 3 จุด (Three-point bending) แรงกดที่ใช้การทดสอบคือ 0.455 MPa หรือ 66 psi ขณะเดียวกันก็ให้ความร้อน แก่ชิ้นงานไปเรื่อยๆ ด้วยอัตราการให้ความร้อน  $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$  จนกระทั่งจุดตรงกลางของชิ้นงานโค้งงอ เท่ากับ 0.25 mm. ค่าที่อ่านได้จากจุดนี้เป็นอุณหภูมิโค้งงอของ PVC คอมพาวนด์ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ก)



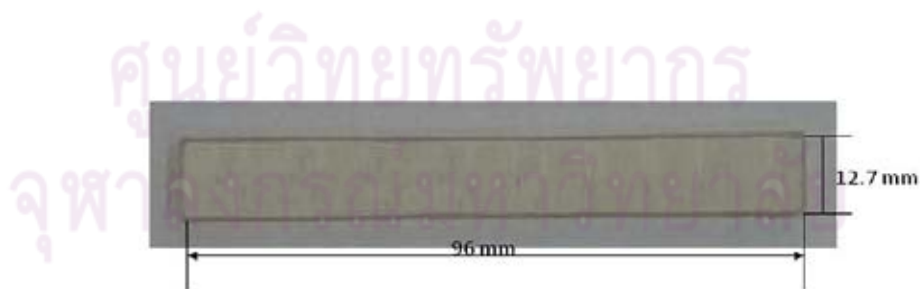
(ข)

รูป 4.8: การทดสอบการโค้งงอด้วยความร้อน: (ก) รูปร่างและขนาดชิ้นงานทดสอบ และ(ข)เครื่องทดสอบหาค่าอุณหภูมิที่มีผลต่อการเสียรูปของชิ้นงาน

#### 4.3.3 สมบัติเชิงกายภาพ (Physical properties)

##### 4.3.3.1 ความแข็ง (Hardness)

ทดสอบความแข็งของ PVC คอมพาวนด์ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน โดยวัดจากการกดด้วยหัวกดชนิด A ของเครื่อง Durometer (PTC®'s, Models 473) แสดงดังรูปที่ 4.9 และเป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D2240-00 [50] ค่าความแข็งที่ได้เฉลี่ยจากการวัดความแข็งของชิ้นงาน PVC แต่ละสูตร จำนวน 3 ชิ้น



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.9: การทดสอบความแข็ง; (ก) ขนาดและรูปร่างชิ้นงาน และ(ข)เครื่อง Durometer หัวกดชนิด A

#### 4.3.3.2 ความใส/ทึบ (Transparency)

ความใส/ทึบของ PVC คอมพาวนด์ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน สามารถวัดได้ด้วยเครื่อง Haze meter (Hunter Lab, model D25P) แสดงดังรูปที่ 4.10 เป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D1003-00 [51] ซึ่งทดสอบโดยการยิงลำแสงทะลุผ่านชิ้นงานทดสอบ แสงที่สามารถส่องผ่านชิ้นงานได้ต้องมีมุมการกระเจิงแสงน้อยกว่า  $2.5^{\circ}$  ค่าที่เครื่องแสดงเป็นค่าความเป็นหมอก (Haze) การรายงานผลของค่า Haze เป็นค่าเฉลี่ยจากการวัด 3 จุดบนชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 4.10: ชิ้นงานทดสอบหาค่า Haze



รูปที่ 4.11: เครื่อง Haze meter

#### 4.3.3.3 ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่นของ PVC คอมพาวนด์ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน วัดด้วยเครื่อง Electronic Densimeter (Alfa Mirage Co., Ltd., MD-300S) แสดงดังรูปที่ 4.11 เริ่มต้นด้วยการชั่งน้ำหนักขณะแห้งในอากาศแล้วกดบันทึกค่า จากนั้นนำชิ้นงานแช่ในน้ำเพื่อวัดน้ำหนักขณะเปียก ค่าความหนาแน่นคำนวณจากสมการ (4.1) ตามหลักของ Archimedes' principle ผลของค่าความหนาแน่นเฉลี่ยจากการตรวจวัดชิ้นงานของ PVC แต่ละสูตรจำนวน 5 ชิ้น

$$\rho = \left[ \frac{A}{(A - B)} \right] \times \rho_0 \quad (4.1)$$

เมื่อ

- $\rho$  คือ ความหนาแน่นของ PVC, PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน ( $\text{g/cm}^3$ )
- A คือ น้ำหนักแห้งในอากาศ (g)
- B คือ น้ำหนักเปียกในน้ำ (g)
- $\rho_0$  คือ ความหนาแน่นของน้ำ ณ อุณหภูมิห้อง ( $\text{g/cm}^3$ )



รูปที่ 4.12 เครื่องวัดความหนาแน่น (Electronic Densimeter)

#### 4.3.3.4 การดูดซึมน้ำ (Water absorption)

ศึกษาพฤติกรรมการดูดซึมน้ำของ PVC คอมพาวนด์ PVC/DOP และ PVC/DOP/ ยางนาโน โดยวัดน้ำหนักแห้งในอากาศของ PVC แต่ละสูตร ก่อนนำไปแช่น้ำเป็นเวลา 6 เดือน ในช่วง 1-2 เดือนแรก ชั่งน้ำหนักขึ้นงานทุกๆ 7 วัน หลังจากนั้นชั่งน้ำหนักทุกๆ 15 และ 30 วัน ตามลำดับ การดูดซึมน้ำของชิ้นงานแต่ละสูตรแสดงค่าเป็นร้อยละคำนวณได้ตามสมการที่ (4.2) ผลที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยจากชิ้นงานจำนวน 3 ชิ้น

$$\% \text{ Water Absorption} = \left[ \frac{\text{Wet weight} - \text{Dry weight}}{\text{Dry weight}} \right] \times 100 \quad (4.2)$$

#### 4.3.3.5 กระแสวิทยา (Rheology)

การตรวจวัดความสามารถในการขึ้นรูป (Processability) ใช้เครื่องทอร์ค รีโอ มิเตอร์ (Brabender, model 815606) แสดงดังรูปที่ 4.12 โดยดูจากพฤติกรรมของกระแสวิทยา ผลจากการทดสอบแสดงค่าทอร์ค (Torque) และเวลา (time) ที่จุดเริ่มหลอม (Fusion) และจุดเสื่อมสภาพ (Decomposition) ของ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน ปริมาณตัวอย่างที่ใช้ทดสอบเท่ากับ 58 g ทดสอบ ณ อุณหภูมิคงที่ 185 °C และความเร็วรอบ 50 รอบ/นาที



รูปที่ 4.13: เครื่อง Brabender

#### 4.3.4 การศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาค (Microscope observation)

ศึกษาการกระจายตัวของผงยางนาโน NBR และ SBR ใน PVC เมทริกซ์ กระทำโดยใช้ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM: Hitachi, model S-4700) แสดงดังรูปที่ 4.13 โดยนำตัวอย่างไปแช่ไนโตรเจนเหลว 10 นาที แล้วทำขึ้นตัวอย่างทดสอบให้แตก จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างที่ได้มาทำการเคลือบด้วยทองคำ โดยใช้กระแสไฟฟ้า 10 mA นาน 35 วินาที จากนั้นจึงนำชิ้นตัวอย่างที่เคลือบทองคำแล้ววางในห้องวางตัวอย่างของเครื่อง SEM ที่ตั้งระดับอัตราเร่งของอิเล็กตรอน (Electron concentration) ที่ 1 kV.



รูปที่ 4.14: Scanning electron microscope (SEM)

## บทที่ 5

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

งานวิจัยนี้มุ่งลดปริมาณ DOP ในผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ขึ้นรูปจาก PVC โดยใช้ยางอนุภาคขนาดนาโน NBR และ SBR ทดแทนปริมาณ DOP ที่ลดลง โดยศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงกายภาพ และสมบัติเชิงความร้อนของ PVC/DOP/ยางนาโน เปรียบเทียบกับ PVC/DOP เพื่อหาปริมาณยางนาโนที่เหมาะสมในการใช้ร่วมกับ DOP ผลการทดสอบมีดังนี้

#### 5.1 สมบัติเชิงกล (Mechanical characteristic)

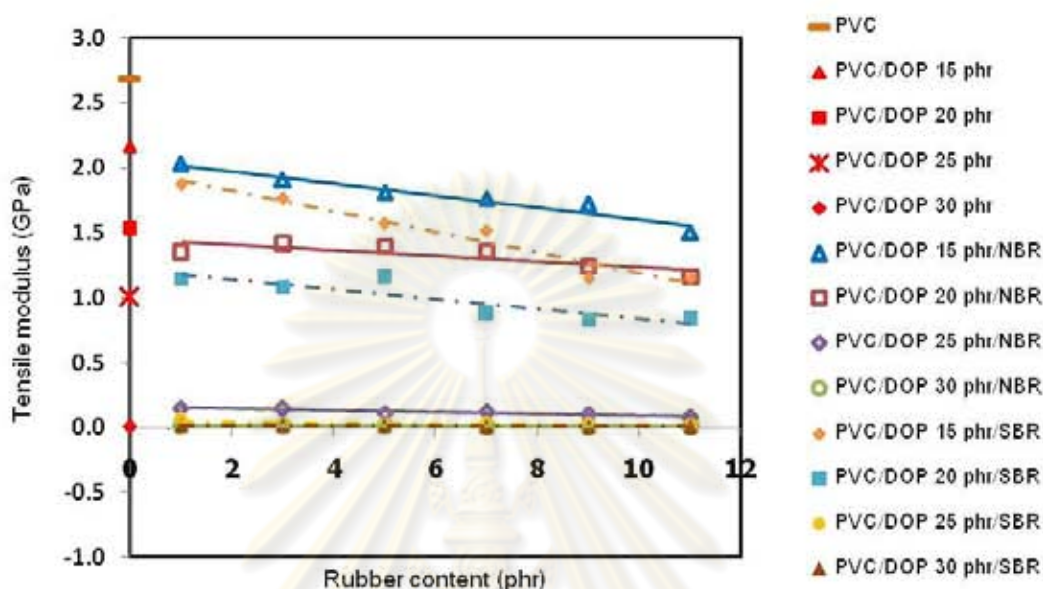
##### 5.1.1 การทนต่อแรงดึง (Tensile properties)

รูปที่ 5.1 แสดงมอดูลัสของแรงดึง (Tensile modulus) ของ PVC/DOP เปรียบเทียบกับ PVC/DOP/NBR และ PVC/DOP/SBR ที่ปริมาณ DOP เดียวกันคือ 15, 20, 25 และ 30 phr ขณะที่ยางนาโน NBR และ SBR แปรปริมาณ 1-11 phr พบว่า PVC คอมพาวนด์ (PVC compound) มีลักษณะแข็ง เปราะ และมีค่ามอดูลัสของแรงดึงเท่ากับ 2.7 GPa เมื่อเติม DOP ลงใน PVC มอดูลัสของแรงดึงมีค่าลดลง และจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ DOP ลดลง PVC เปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของการทนต่อแรงดึงจากแข็ง เปราะเป็นวัสดุที่มีความเหนียว (Toughness) เมื่อเติมยางนาโน NBR และ SBR มอดูลัสของแรงดึงของ PVC/DOP/NBR และ PVC/DOP/SBR มีระดับลดลงจาก PVC/DOP โดยเฉพาะที่ปริมาณ DOP ต่ำๆ เนื่องจาก DOP มีอิทธิพลต่อ PVC ค่อนข้างมาก การเติมยางนาโน NBR และ SBR ใน PVC ที่มีปริมาณ DOP สูงๆ จึงไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่ามอดูลัสของแรงดึง

เมื่อเติมยางนาโน NBR หรือ SBR ลงไปร่วมกับ DOP เพื่อเสริมสภาพพลาสติกให้กับ PVC พบว่าค่ามอดูลัสแรงดึงยึดของ PVC/DOP/ยางนาโน ลดลง เมื่อใส่ปริมาณยางนาโน NBR 11 phr ร่วมกับ DOP 15 phr ค่ามอดูลัสแรงดึงค่อนข้างใกล้เคียงกับ PVC/DOP ที่ปริมาณ DOP 20 phr คือ 1.5 GPa ขณะที่ใช้ยางนาโน SBR เพียง 5 phr และ PVC/DOP/SBR ที่ปริมาณ DOP 20 phr



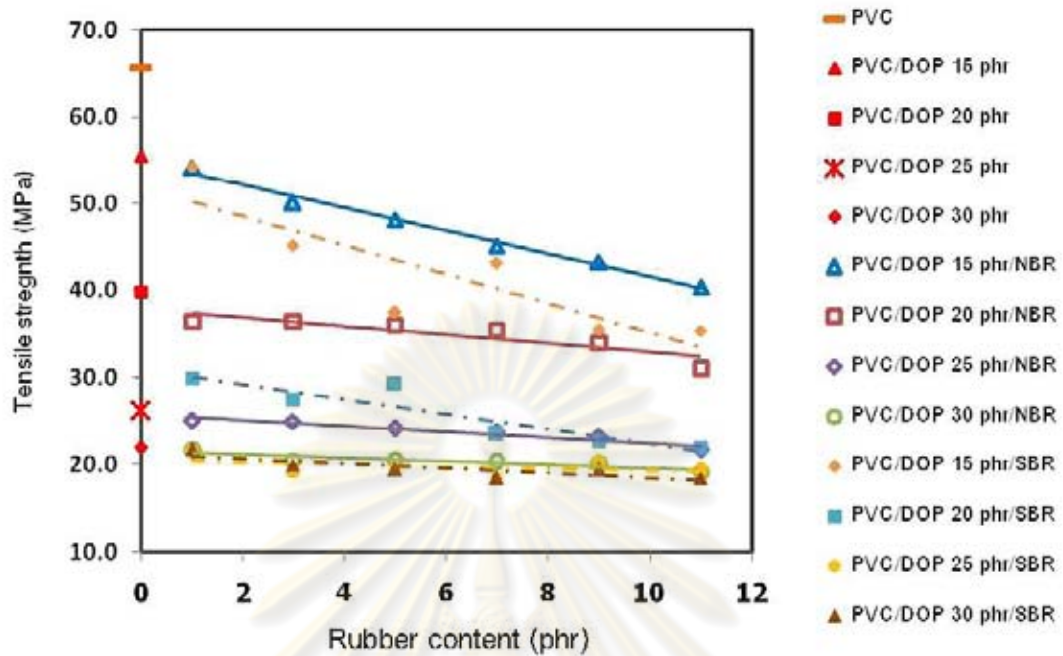
ร่วมกับ SBR 3 phr มีค่ามอดูลัสของแรงดึงระดับเดียวกับ PVC/DOP ที่ปริมาณ DOP 25 phr คือ 1.1 GPa



รูปที่ 5.1: Tensile modulus ของ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน

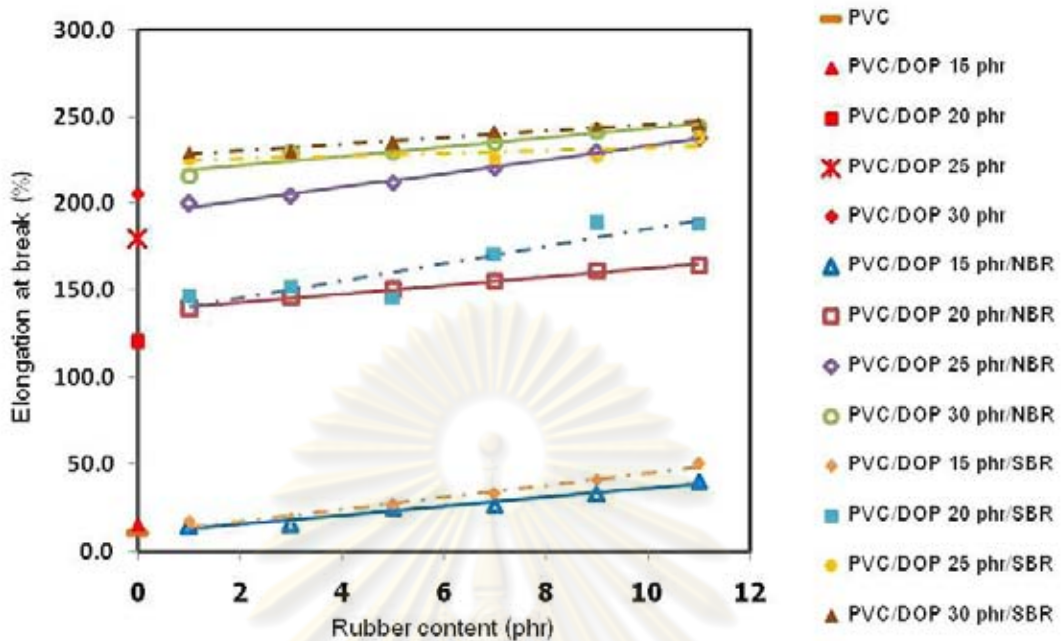
PVC คอมพาวนด์ ทนค่าแรงดึง (Tensile strength) ได้ 65.5 MPa แต่เมื่อใส่ DOP ปริมาณ 15, 20, 25 และ 30 phr ทำให้ PVC/DOP ทนต่อแรงดึงลดลงเหลือ 55.5, 39.8, 26.1 และ 21.9 MPa ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 5.2 เมื่อใส่ยางนาโน NBR และ SBR ปริมาณ 1-11 phr ลงไปใน PVC ทำให้ PVC/DOP/ยางนาโน ทนต่อแรงดึงต่ำกว่า PVC คอมพาวนด์ และ PVC/DOP ที่ปริมาณ DOP เดียวกัน และค่าแรงดึงลดลง เมื่อปริมาณยางเพิ่มมากขึ้น แสดงว่า PVC/DOP/ยางนาโน สามารถยืดตัวออกได้ง่าย ภายใต้แรงดึงยึดต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ปริมาณ DOP 15 phr และ 20 phr

เมื่อทดแทนปริมาณ DOP ใน PVC ด้วยการใส่ยางนาโน NBR และ SBR พบว่า ยางนาโน มีอิทธิพลต่อการทนแรงดึงของ PVC อีกทั้ง PVC/DOP/NBR ใช้ปริมาณ DOP ลดลงจาก 20 phr เป็น 15 phr เมื่อเติมยางนาโน NBR 11 phr ขณะที่ใส่ยางนาโน SBR 5 phr และ DOP 15 phr ค่าแรงดึงเท่ากับ 37.4 MPa สามารถทดแทนการเติม DOP 20 phr ใน PVC/DOP และแรงดึงของ PVC/DOP ที่ปริมาณ DOP 25 phr มีค่าใกล้เคียงกับของ PVC /DOP/SBR ที่เติม DOP 20 phr และยางนาโน SBR 3 phr



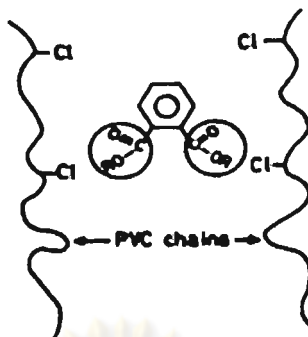
รูปที่ 5.2: Tensile strength ของ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน

รูปที่ 5.3 แสดงระยะยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) ของ PVC เสริมสภาพพลาสติกด้วย DOP (PVC/DOP) และ PVC/DOP/ยางนาโน พบว่า PVC คอมพาวนด์มีลักษณะแข็ง เปราะ และแตกหักได้ง่ายจึง มีระยะยืด ณ จุดขาดค่อนข้างต่ำราว 10.1 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อเติม DOP ใน PVC ระยะยืด ณ จุดขาดของ PVC/DOP เพิ่มขึ้น และระยะยืด ณ จุดขาดลดลง เมื่อปริมาณ DOP ลดลง ขณะที่การใส่ยางนาโน NBR และ SBR เสริมสภาพพลาสติกทดแทนปริมาณ DOP ทำให้ PVC/DOP/ยางนาโน มีค่าระยะยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น เนื่องจากยางนาโน NBR และ SBR มีผลทำให้ค่ามอดูลัสการยืดหยุ่นของ PVC/DOP/ยางนาโน ลดลง เมื่อปริมาณยางนาโนทั้ง 2 ชนิด เพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.3: Elongation at break ของ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน

PVC คอมพาวนด์มีความเปราะ เนื่องจากโมเลกุลของ PVC ประกอบด้วยคลอรีน (-Cl) อะตอม ซึ่งคลอรีนเป็นโมเลกุลที่มีความเป็นขั้วสูง [4] ส่งผลให้สายโซ่ PVC เคลื่อนขยับยากและมีความยืดหยุ่นน้อย PVC จึงแตกหักได้ง่ายภายใต้แรงดึง แต่เมื่อเติม DOP ลงไปใน PVC พบว่า PVC/DOP สามารถทนต่อแรงดึงได้เพิ่มขึ้น และ PVC ที่ได้รับการปรับปรุงมีค่ามอดูลัสและค่าความแข็งแรงลดลง เมื่ออยู่ภายใต้แรงดึงยืด เนื่องจาก DOP เป็นโมเลกุลประกอบด้วย 2 ส่วน คือส่วนที่มีขั้ว (Di-polar) และส่วนที่ไม่มีขั้ว (Non-polar) ส่วนที่มีขั้วของ DOP คือหมู่เอสเทอร์ จะเข้าไปยึดติดกับคลอรีนอะตอมใน PVC โดยอาศัยแรงดึงดูดระหว่างขั้วทั้งสอง ขณะที่ส่วนที่ไม่มีขั้วของ DOP คือห่วงวงแหวนอะโรมาติก เป็นตัวกับังให้คลอรีน (-Cl) อะตอมในสายโซ่ PVC ให้ห่างออกจากกัน [4, 52] แสดงดังรูปที่ 5.4 และการเติม DOP ลงไปยังเข้าไปเพิ่มพื้นที่ในการเคลื่อนขยับของสายโซ่ PVC ให้เพิ่มมากขึ้น และเมื่อได้รับแรงดึงสายโซ่ PVC สามารถเคลื่อนขยับได้ง่ายขึ้น อีกทั้ง DOP ทำให้สายโซ่ PVC มีความพันกัน (Entanglement) เพิ่มมากขึ้นอีกด้วย [53] ทำให้ PVC สามารถย่นตัวและยืดตัวได้เพิ่มมากขึ้นภายใต้แรงดึง



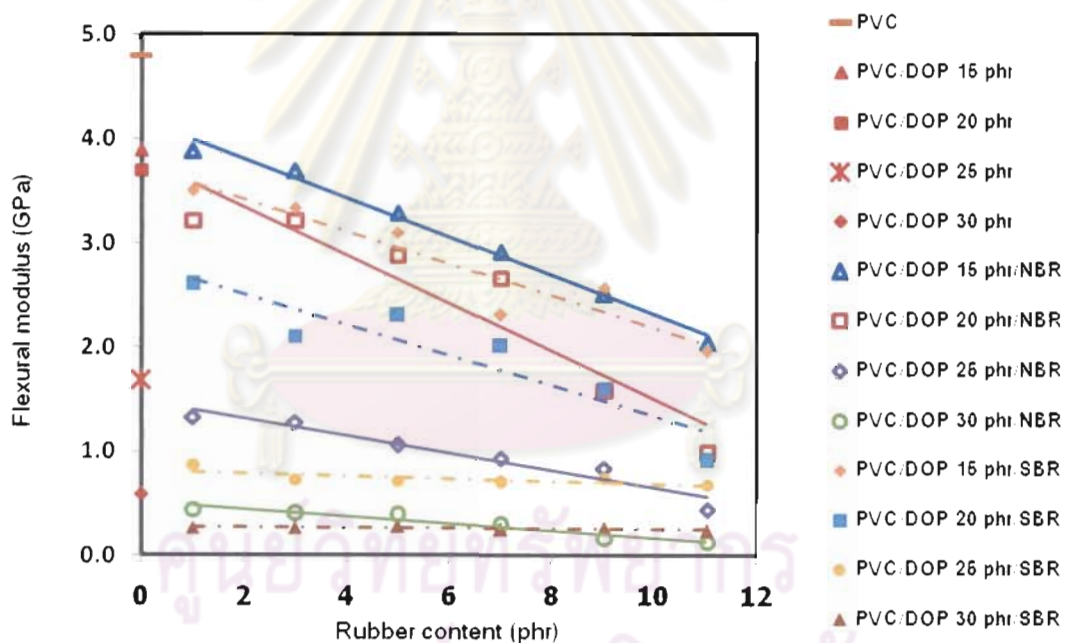
รูปที่ 5.4: การยึดติดกันระหว่างส่วนที่มีขั้วของ DOP กับ Cl ของ PVC [4]

เมื่อนำยางนาโน NBR และ SBR มาใช้ทดแทนเพื่อลดปริมาณการใช้ DOP พบว่า PVC/DOP/ยางนาโน มีแรงดึงลดลงและสามารถยืดตัวได้มากขึ้น ทั้งนี้เพราะยางนาโน NBR ประกอบด้วย อะคริโลไนไตรล์มอนอเมอร์ (Acrylonitrile monomer, -CN) ซึ่งเป็นส่วนที่แสดงความเป็นขั้วสูงของยางนาโน NBR และน่าจะเป็นส่วนที่เข้าไปยึดติดกับคลอรีน (-Cl) อะตอมของ PVC ส่วนบิวทาไดเอิน (Butadiene) ในยาง NBR จะช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นและความเหนียวให้กับ PVC เมทริกซ์ ส่วนยางนาโน SBR ประกอบด้วยสไตรีน (Styrene) ซึ่งมีขนาดใหญ่เป็นวงแหวนอะโรมาติก ที่ทำให้สายโซ่ PVC มีพื้นที่ในการเคลื่อนขยับเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้สายโซ่ PVC เคลื่อนขยับได้ง่ายขึ้น อีกทั้ง SBR ยังประกอบด้วยบิวทาไดเอินมอนอเมอร์ ซึ่งเป็นส่วนที่มีความยืดหยุ่นสูง ที่ช่วยให้ PVC เมทริกซ์มีความเหนียวเพิ่มมากขึ้นเมื่อได้รับแรงดึง

### 5.1.2 การทนต่อแรงดัดโค้ง (Flexural properties)

รูปที่ 5.5 แสดงมอดูลัสของแรงดัดโค้ง (Flexural modulus) ของ PVC คอมพาวนด์ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน PVC คอมพาวนด์ มีลักษณะแข็งและเปราะ มีค่ามอดูลัส 4.8 GPa เมื่อใส่ DOP ซึ่งเป็นสารเสริมสภาพพลาสติก ช่วยทำให้ PVC นุ่ม มีความอ่อนตัวและยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น เนื่องจาก DOP มีอิทธิพลต่อการอ่อนตัว และการยืดหยุ่นของ PVC ค่อนข้างมาก ดังกล่าวแล้วใน 5.1.1 เนื่องจาก DOP เข้าไปลดแรงเสียดทานระหว่างโมเลกุล PVC ทำให้สายโซ่ PVC เคลื่อนขยับได้ง่ายขึ้น อีกทั้งเมื่อเติมอนุภาคยางนาโน NBR และ SBR ซึ่งเป็นยางที่มีความอ่อนตัวและความยืดหยุ่นสูง จึงทำให้ PVC/DOP/ยางนาโน มีค่ามอดูลัสของแรงดัดโค้งลดลงไปอีก เมื่อเทียบกับ PVC/DOP

PVC/DOP ที่เติม DOP ปริมาณ 15, 20, 25 และ 30 phr มีมอดูลัสของแรงดัดโค้งเท่ากับ 3.9, 3.7, 1.7 และ 0.6 GPa ตามลำดับ จะเห็นว่าเมื่อปริมาณ DOP ลดลงค่ามอดูลัสของแรงดัดโค้งมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเติมยางนาโน NBR และ SBR ปริมาณ 1, 3, 5, 7, 9 และ 11 phr ทำให้ค่ามอดูลัสของแรงดัดโค้งมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่าง PVC/DOP กับ PVC/DOP/ยางนาโน ที่ปริมาณ DOP เดียวกัน ยางนาโน NBR และ SBR สามารถลดปริมาณ DOP เพียงอย่างเดียวในการเสริมสภาพพลาสติก PVC ที่ปริมาณยางนาโน NBR 3 phr สามารถลดปริมาณ DOP จาก 20 phr เป็น 15 phr และปริมาณยางนาโน NBR 9 phr ลดปริมาณการใช้ DOP จาก 25 phr เป็น 20 phr สำหรับยางนาโน SBR ลดปริมาณการใช้ DOP จาก 20 phr เป็น 15 phr ที่ปริมาณยางนาโน SBR 1 phr และยางนาโนทั้ง 2 ชนิด ที่ปริมาณ 9 phr สามารถลดปริมาณ DOP ใน PVC/DOP จาก 25 phr เป็น 20 phr

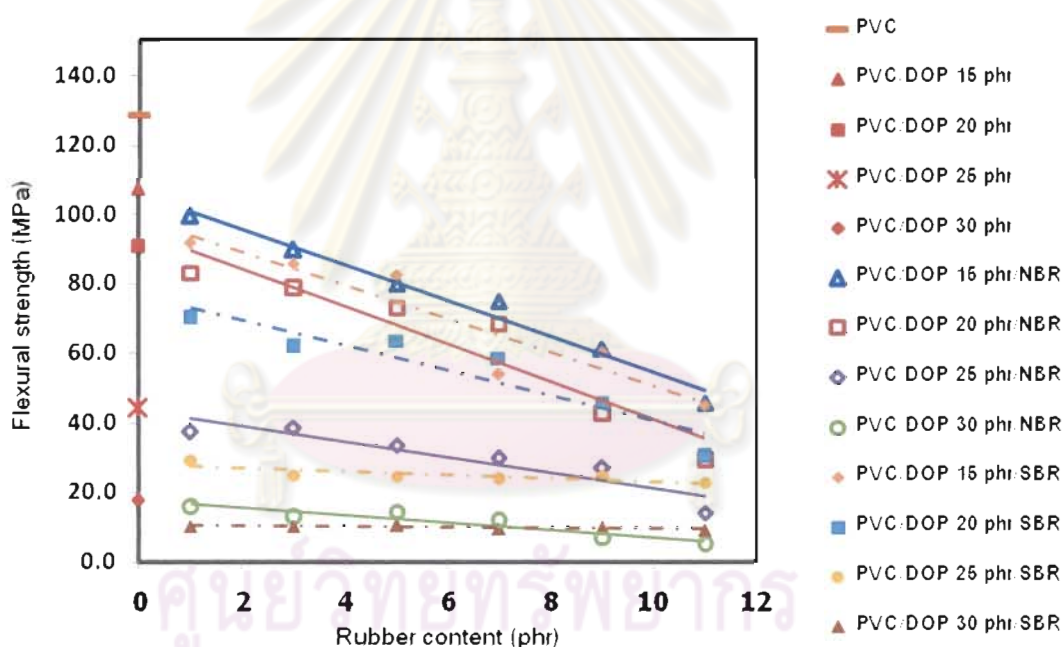


รูปที่ 5.5: Flexural modulus ของ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน

รูปที่ 5.6 แสดงแรงดัดโค้ง (Flexural strength) ของ PVC คอมพาวนด์ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน PVC คอมพาวนด์มีแรงดัดโค้ง 128.3 MPa เมื่อเติม DOP ใน PVC แรงดัดโค้งมีค่าลดลง โดยเมื่อเติม DOP 15, 20, 25 และ 30 phr ให้ค่าของแรงดัดโค้งดังนี้ 107.4, 90.7, 44.1 และ 18.2 MPa ตามลำดับ จะเห็นว่าเมื่อปริมาณ DOP ลดลง PVC มีค่าแรงดัดโค้งเพิ่มมาก

ขึ้น PVC มีลักษณะความแข็ง และเปราะ ซึ่งการเติมยางนาโน NBR และ SBR ทำให้ PVC/DOP/ยางนาโน ที่ปริมาณเติม DOP น้อยๆ มีค่าแรงดัดโค้งลดลง

การนำยางนาโน NBR และ SBR ที่ปริมาณ 1-11 phr มาทดแทนการใช้ DOP ในการเสริมสภาพพลาสติกให้กับ PVC พบว่า ณ ทุกความเข้มข้นของ DOP เมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้น (แรงดัดโค้งมีค่าลดลง) และการลดนี้มากที่สุด ณ ปริมาณยาง NBR และ SBR 11 phr แสดงให้เห็นว่า PVC/DOP/ยางนาโน มีความอ่อนตัวและความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น และยางนาโน NBR และ SBR สามารถนำมาทดแทนปริมาณการใช้ DOP โดยเฉพาะอย่างยิ่งยางนาโน SBR สามารถลดปริมาณการใช้ DOP จาก 20 phr เป็น 15 phr เมื่อปริมาณยาง SBR ร่วมอยู่ด้วยเพียง 1 phr และสามารถลดการใช้ DOP จาก 25 phr เป็น 20 phr เมื่อเติมยาง SBR 9 phr



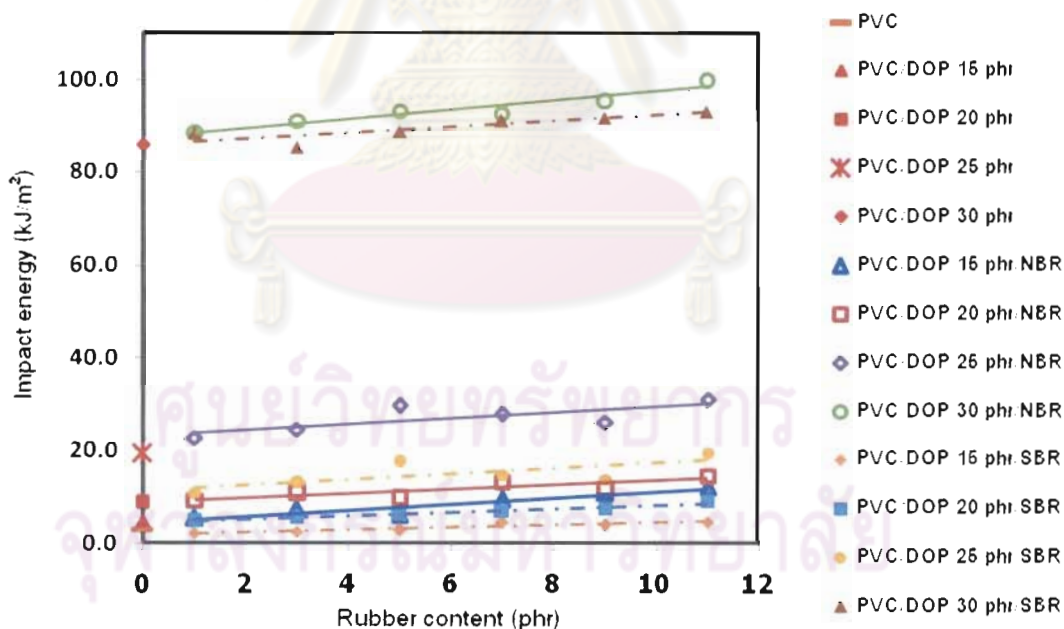
รูปที่ 5.6: Flexural strength ของ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน

### 5.1.3 การทนต่อแรงกระแทก (Impact property)

รูปที่ 5.7 แสดงค่าการดูดซับพลังงานกระแทก (Impact energy) ของ PVC คอมพาวนด์ PVC/DOP และ PVC เสริมสภาพพลาสติกด้วย DOP และยางนาโน 2 ชนิด คือ NBR และ SBR พบว่า PVC คอมพาวนด์ มีความแข็งและเปราะ จึงดูดซับพลังงานกระแทกน้อย การเติม DOP ใน

PVC ช่วยให้การดูดซับพลังงานกระแทกของ PVC มีค่าเพิ่มมากขึ้น และการใส่ยางนาโนทั้ง NBR และ SBR ร่วมกับ DOP ทำให้ PVC ยิ่งสามารถดูดซับพลังงานได้เพิ่มขึ้นอีกด้วย

PVC คอมพาวนด์ มีค่าการดูดซับพลังงานกระแทก  $3.0 \text{ kJ/m}^2$  ขณะที่ PVC/DOP เท่ากับ 4.8, 8.6, 19.2 และ  $85.9 \text{ kJ/m}^2$  ที่ปริมาณ DOP 15, 20, 25 และ 30 phr ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณ DOP ลดลงทำให้ค่าการดูดซับพลังงานกระแทกของ PVC/DOP มีค่าลดลงด้วย เนื่องจาก DOP มีผลต่อ PVC ค่อนข้างมาก โดย DOP จะเข้าไปลดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล PVC ทำให้การเคลื่อนที่ของโมเลกุล PVC ง่ายขึ้น ทำให้ PVC เปลี่ยนลักษณะจากแข็งเปราะเป็นเหนียวและอ่อนตัวสูง จึงดูดซับพลังงานกระแทกได้มากขึ้น ขณะที่เติมยางนาโน NBR และ SBR ลงไป พบว่ายางนาโน NBR ช่วยให้การดูดซับพลังงานกระแทกดีกว่ายางนาโน SBR เพราะยางนาโน NBR สามารถยึดเกาะกับ PVC ได้ดีกว่ายางนาโน SBR เนื่องจาก NBR ประกอบด้วยส่วนที่มีขั้วคือ อะคริโรไนไตรล์มอนอเมอร์ จึงทำให้ยางนาโน NBR ยึดติดได้ดีกับ PVC เมทริกซ์ [54] และการเติมยางนาโน NBR 7 phr สามารถลดปริมาณ DOP จาก 15 phr เป็น 20 phr



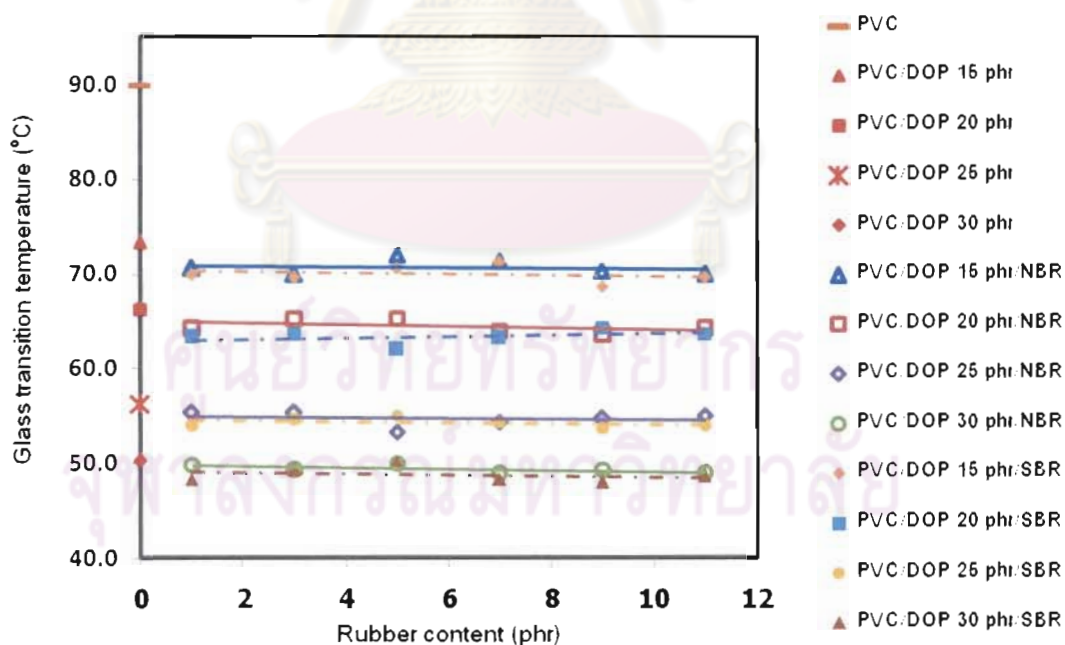
รูปที่ 5.7: Impact energy ของ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน

## 5.2 สมบัติเชิงความร้อน (Thermal characteristic)

### 5.2.1 อุณหภูมิแปรสภาพแก้ว (Glass transition temperature, $T_g$ )

รูปที่ 5.8 แสดงอุณหภูมิแปรสภาพแก้วของ PVC คอมพาวนด์ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน ซึ่ง PVC คอมพาวนด์ มีอุณหภูมิแปรสภาพแก้ว  $89.9^{\circ}\text{C}$  ดังนั้น PVC จึงมีสถานะเป็นของแข็งเปราะ และแตกหักได้ง่าย ณ อุณหภูมิห้อง แต่เมื่อเติม DOP ที่ปริมาณ 15, 20, 25 และ 30 phr ทำให้ค่าอุณหภูมิแปรสภาพแก้วของ PVC ลดลงมากเป็น 70.9, 64.9, 55.5 และ  $49.6^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ อุณหภูมิแปรสภาพแก้วมีค่าลดลงเมื่อปริมาณ DOP เพิ่มขึ้น การลดลงของอุณหภูมิแปรสภาพแก้วส่งผลให้ PVC สามารถอ่อนตัวและยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น ณ อุณหภูมิห้อง เนื่องจาก DOP จะเข้าไปลดแรงดึงดูดระหว่างสายโซ่ของ PVC ทำให้สายโซ่ PVC คลายตัวและเคลื่อนขยับได้ง่ายขึ้น [55]

เมื่อเติมยางนาโน NBR และ SBR ใน PVC/DOP/ยางนาโน พบว่า ยางนาโน NBR และ SBR ทำให้อุณหภูมิแปรสภาพแก้วลดลงเช่นเดียวกัน แต่ปริมาณการลดถือน้อยมากเมื่อเทียบกับ PVC/DOP เนื่องจาก DOP มีผลอย่างมากต่อ PVC โดยเฉพาะยังปริมาณ DOP สูงทำให้ DOP ยังลดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล PVC ได้มากยิ่งขึ้น และเมื่อปริมาณ DOP ลดลงอุณหภูมิแปรสภาพแก้วจึงลดลง



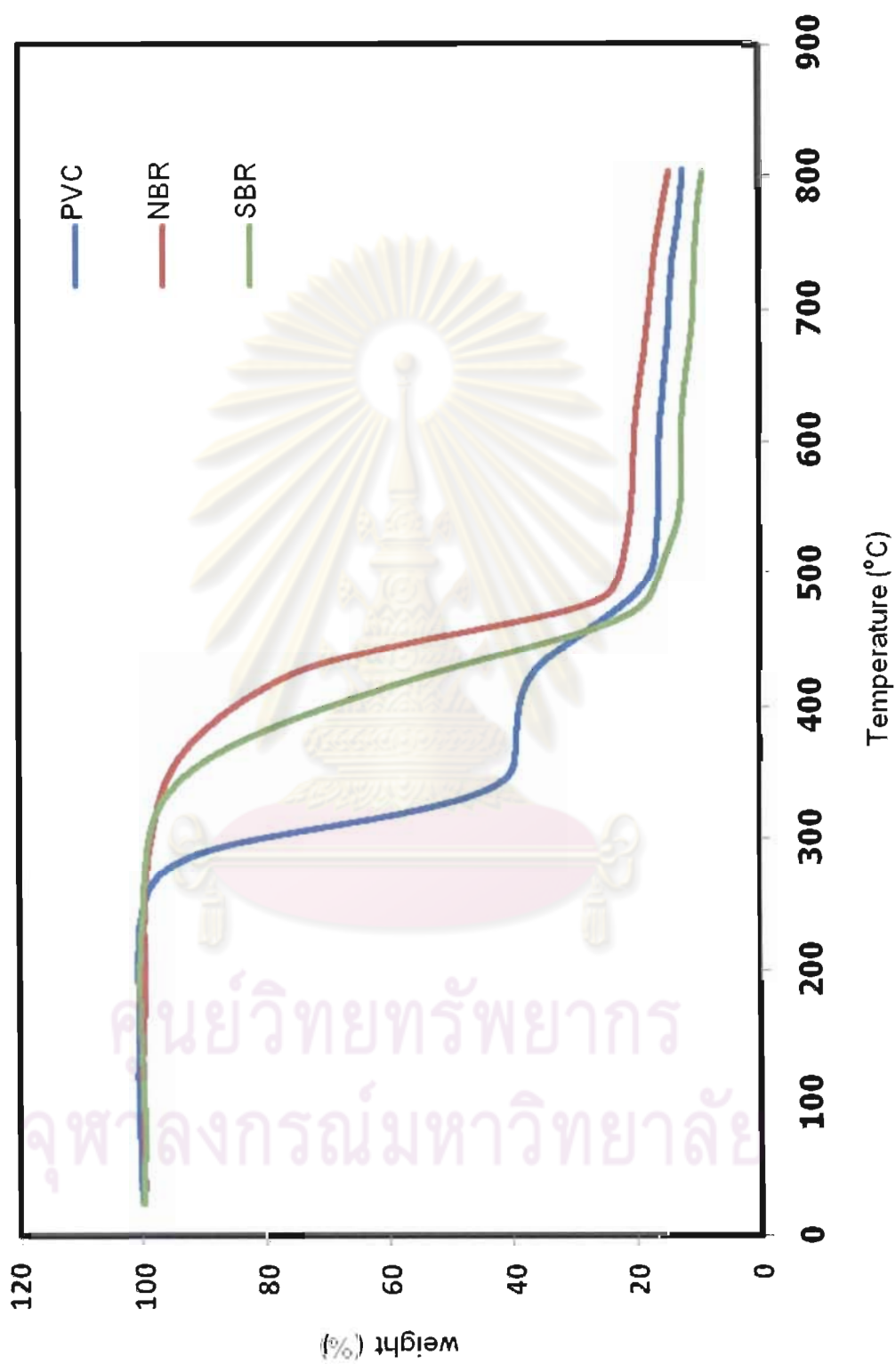
รูปที่ 5.8: Glass transition temperature ของ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน



### 5.2.2 อุณหภูมิการเสื่อมสลาย (Degradation temperature)

ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิการเสื่อมสลายของ PVC คอมพาวนด์ และยางนาโนทั้ง 2 ชนิด คือ NBR และ SBR โดยเทคนิค Thermogravimetric (TGA) แสดงดังรูปที่ 5.9 PVC คอมพาวนด์ แสดงลักษณะการเสื่อมสลายขององค์ประกอบ แบ่งออกเป็น 3 ช่วง ดังนี้ ช่วงที่ 1 เป็นการระเหยออกไฮโดรเจนคลอไรด์ (Hydrogen chloride, HCl) ในช่วงอุณหภูมิ 200-320 °C โดยมีน้ำหนักที่สูญหายไป 52 เปอร์เซ็นต์ ช่วงที่ 2 PVC คอมพาวนด์ น้ำหนักสูญหายไป 17 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงอุณหภูมิ 370-510 °C เป็นช่วงของการสลายตัวของสารเติมแต่งต่างๆ ที่ใส่ใน PVC เช่น สารเพิ่มความเสถียร สารหล่อลื่น สารช่วยในการขึ้นรูป เพื่อช่วยปรับคุณสมบัติด้านการขึ้นรูป รวมไปถึงเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของ PVC ช่วงที่ 3 เป็นน้ำหนักของซี้เก่าที่เหลือราว 15 เปอร์เซ็นต์ ณ ช่วงอุณหภูมิ 510-800 °C สำหรับยางนาโน NBR และ SBR เมื่อให้ความร้อนไปเรื่อยๆ จนถึง 280 °C พบว่ายางนาโนทั้ง 2 ชนิด เริ่มมีน้ำหนักสูญหาย 2-3 เปอร์เซ็นต์ เป็นช่วงการสลายของสารเติมแต่งที่เติมในยางนาโน ช่วงอุณหภูมิ 290 °C ถึง 480 °C ยางนาโน SBR สูญเสียน้ำหนักไป 79 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ยางนาโน NBR สูญเสียน้ำหนักไป 71 เปอร์เซ็นต์ ณ ช่วงอุณหภูมิ 300 °C ถึง 500 °C เป็นช่วงของการเสื่อมสลายของสารอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบของยาง NBR และ SBR ยาง SBR และ NBR มีซี้เก่าเหลืออยู่ 18 และ 24 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

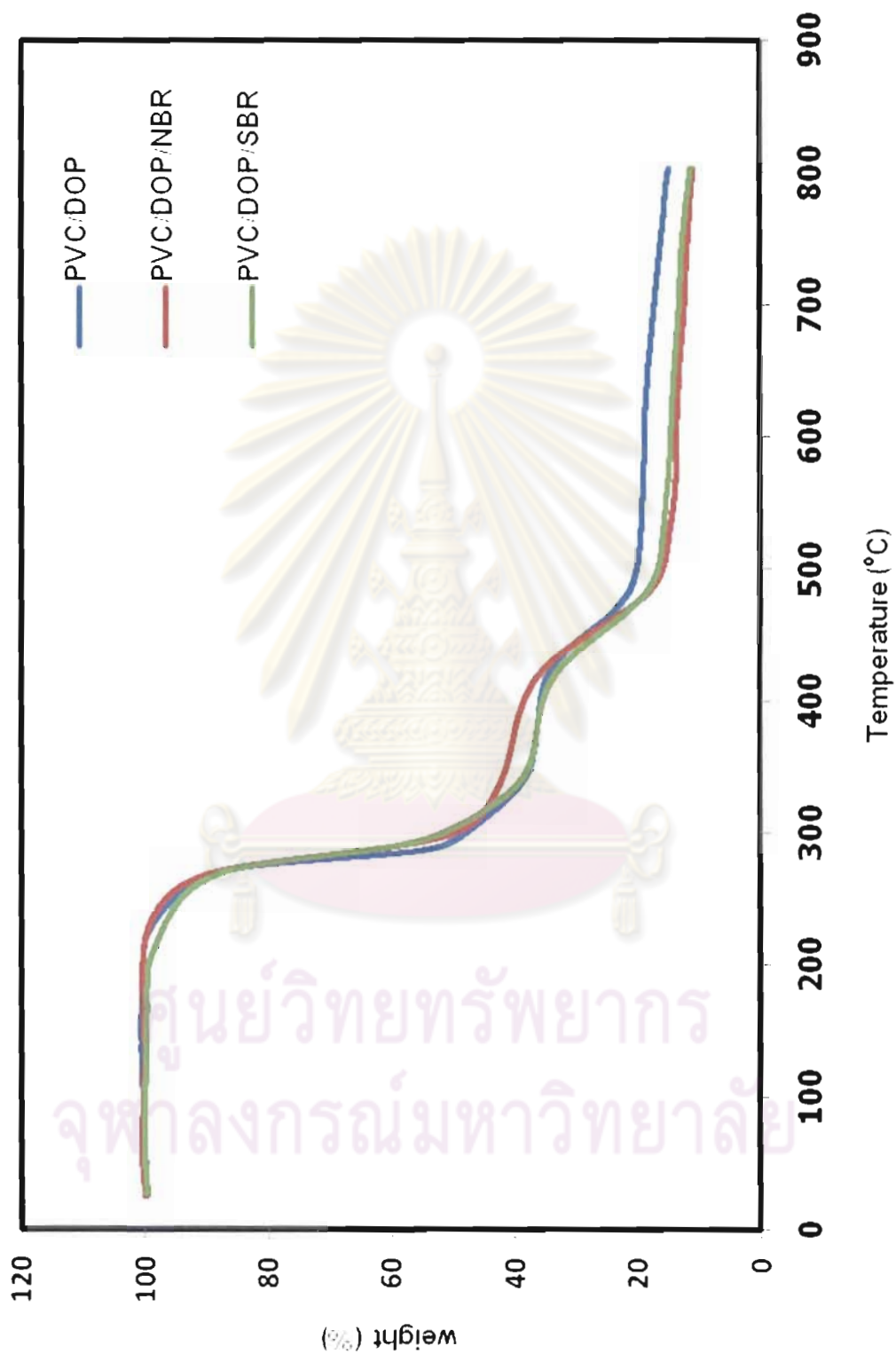


รูปที่ 5.9: การเสื่อมสลายของ PVC คอมพาวนด์ ยางนาโน NBR และ SBR

ผลการทดลอง TGA ของ PVC/DOP PVC/DOP/NBR และ PVC/DOP/SBR ที่ปริมาณ DOP เดียวกันคือ 15 phr และปริมาณยางนาโน NBR และ SBR 11 phr แสดงดังรูปที่ 5.10 พบว่าการเสื่อมสลายของ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน แบ่งออกเป็น 3 ช่วง เช่นเดียวกับ PVC คอมพาวนด์ สำหรับ ช่วงที่ 1 ตั้งแต่อุณหภูมิ 220 °C ถึง 370 °C เป็นช่วงการระเหยออกของ HCl ซึ่งเป็นจุดเริ่มการเสื่อมสภาพของ PVC ช่วงที่ 2 ตั้งแต่ 370 °C ถึง 510 °C เป็นการเสื่อมสลายของสารเติมแต่งใน PVC โดยเฉพาะ DOP มีอุณหภูมิการเสื่อมสลายที่อุณหภูมิ 389.6 °C [56] ช่วงที่ 3 เป็นซีเถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้ของ PVC/DOP เท่ากับ 17 เปอร์เซ็นต์ สำหรับ PVC/DOP/NBR และ PVC/DOP/SBR มีเศษซีเถ้าเหลืออยู่เท่ากับ 10 และ 12 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

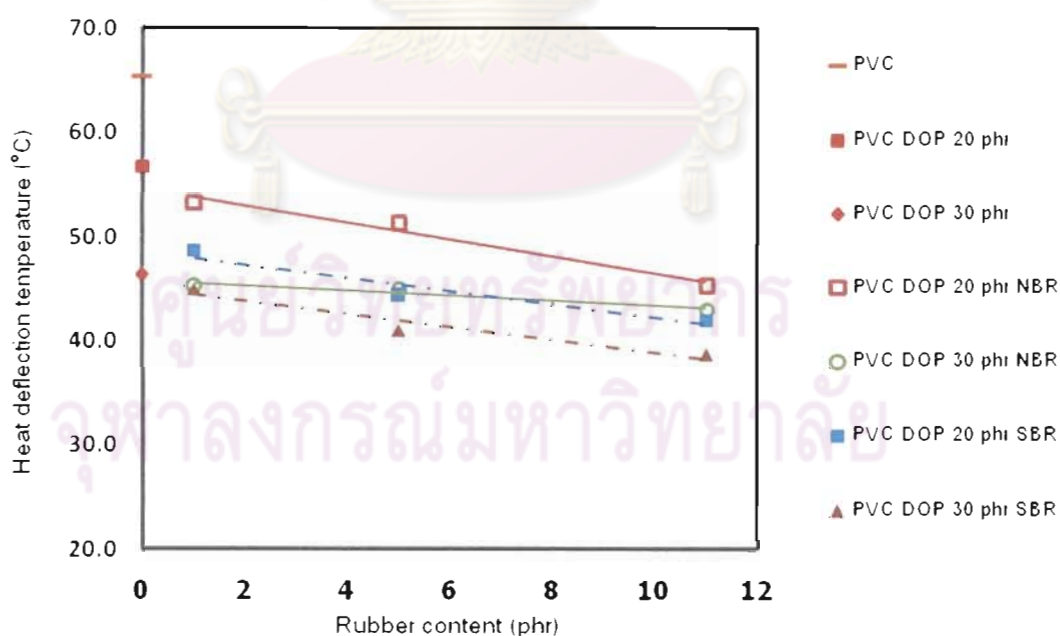


รูปที่ 5.10: การเสื่อมสลายของ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน ที่ปริมาณ DOP 15 phr โดยของปริมาณยางนาโน NBR และ SBR เท่ากับ 11 phr

### 5.2.3 อุณหภูมิการโค้งงอโดยความร้อน (Heat deflection temperature)

รูปที่ 5.11 แสดงอุณหภูมิการโค้งงอโดยความร้อนของ PVC คอมพาวนด์ เท่ากับ 65.3 °C PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน เมื่อใส่ DOP ปริมาณ 20 phr อุณหภูมิการโค้งงอโดยความร้อนลดลงเป็น 56.9 °C ขณะที่ปริมาณการเติม DOP 30 phr อุณหภูมิการโค้งงอโดยความร้อน เท่ากับ 46.3 °C เนื่องจากลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของ PVC เป็นโครงสร้างอสัณฐาน (Amorphous) จึงทำให้ PVC ทนต่อความร้อนได้น้อย [57] เมื่อเติม DOP ใน PVC ยิ่งทำให้สายโซ่ของ PVC มีความยุ่งเหยิงและเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้ PVC มีความอ่อนตัว PVC จึงทนต่อความร้อนได้น้อยลงเมื่อปริมาณ DOP เพิ่มขึ้น

เมื่อเติมยางนาโน NBR และ SBR ใน PVC/DOP/ยางนาโน พบว่าอุณหภูมิการโค้งงอโดยความร้อนมีระดับลดลง เมื่อปริมาณยางเพิ่มมากขึ้นเปรียบเทียบกับ PVC/DOP ที่ปริมาณ DOP เดียวกัน คือ 20 phr และ 30 phr เนื่องจากยางนาโน NBR และ SBR เป็นยางที่มีความยืดหยุ่นสูงและอ่อนตัวได้ง่าย เมื่อได้รับความร้อนและแรงกด



รูปที่ 5.11: Heat deflection temperature ของ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน

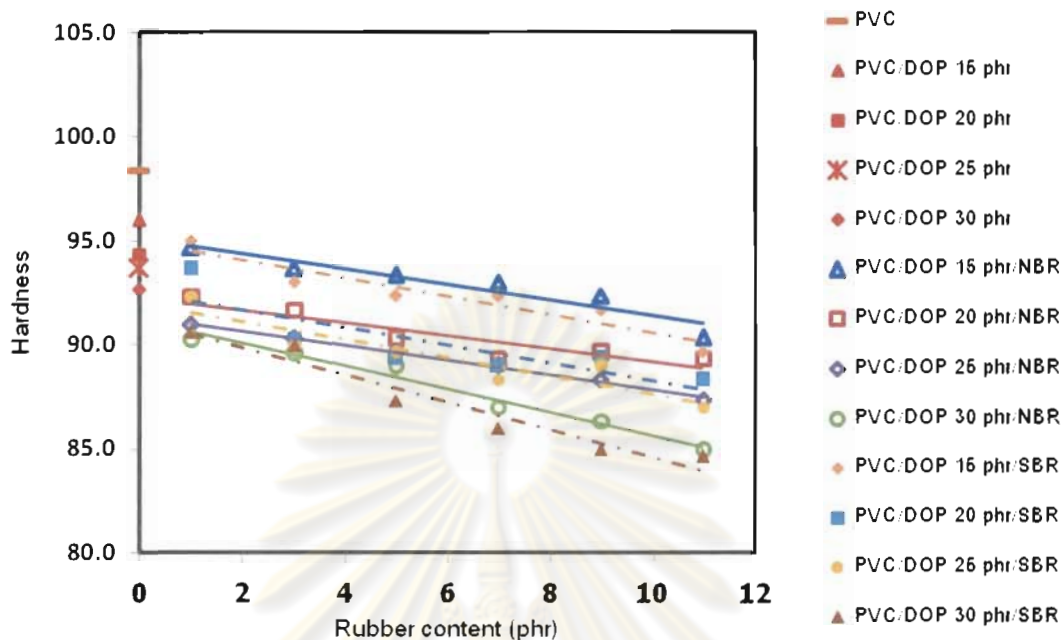
### 5.3 สมบัติเชิงกายภาพ (Physical characteristic)

#### 5.3.1 ความแข็ง (Hardness)

ความแข็งของ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน แสดงดังรูปที่ 5.12 พบว่า PVC/DOP ที่ปริมาณ DOP 15, 20, 25 และ 30 phr มีค่าความแข็งเท่ากับ 96, 94, 93 และ 92 ตามลำดับ PVC/DOP มีความแข็งลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ PVC คอมพาวนด์ ซึ่งมีค่าความแข็งเท่ากับ 98 เนื่องจาก DOP เข้าไปเพิ่มความอ่อนตัวแก่ PVC โดย DOP เข้าไปช่วยทำให้สายโซ่ PVC เคลื่อน ขยับได้ง่ายขึ้น เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างสายโซ่ PVC ลดลง และผลการทดสอบชี้วัดว่าเมื่อ ปริมาณ DOP ลดลง PVC มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น

เมื่อเติมยางนาโน NBR และ SBR ใน PVC ที่มี DOP 15 phr และ 20 phr พบว่า PVC มีความแข็งลดลง เทียบได้เท่ากับการใช้ DOP แบบเดี่ยวๆ ปริมาณ 30 phr ในการเสริมสภาพ PVC โดยยางนาโนทั้ง 2 ชนิด สามารถลดปริมาณการใช้ DOP จาก 30 phr เป็น 15 phr หากใช้ยางนาโน NBR 9 phr ซดเซยปริมาณ DOP ที่ลดลงระดับความแข็งเท่ากัน และยางนาโน NBR 1 phr ร่วมกับ DOP 20 phr สามารถทำให้ PVC ที่มีความแข็งใกล้เคียงกับ PVC/DOP ที่ปริมาณ DOP 30 phr ขณะที่ปริมาณยางนาโน SBR 5 phr สามารถช่วยลดการใช้ปริมาณ DOP จาก 30 phr เหลือ 15 phr และสามารถลดปริมาณ DOP จาก 30 phr เป็น 20 phr เมื่อเติมยางนาโน SBR 1 phr จะเห็นได้ว่ายางนาโน ช่วยทำให้ PVC มีความแข็งลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากยางนาโน NBR และ SBR เองเป็นยางสังเคราะห์ที่มีความอ่อนตัวและยืดหยุ่นสูง จึงทำให้ PVC มีความแข็งลดลง

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

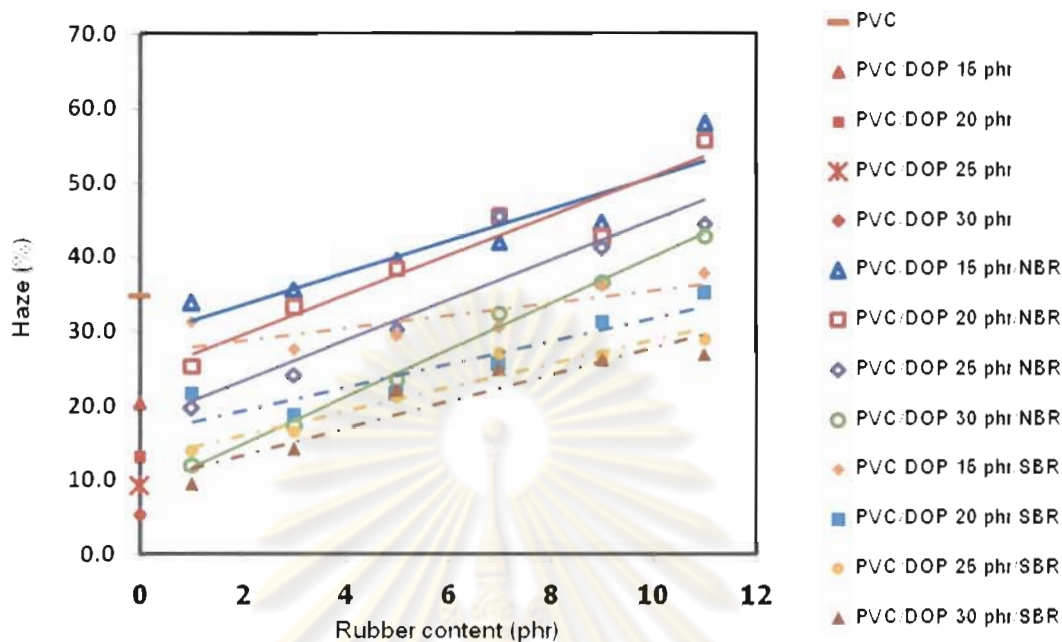


รูปที่ 5.12: Hardness ของ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน

### 5.3.2 ความใส/ทึบ (Transparency)

รูปที่ 5.13 แสดงความใส/ทึบของ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน โดยวัดจากค่าความเป็นหมอก (Haze) พบว่าการเติม DOP 15, 20, 25 และ 30 phr ทำให้ PVC มีค่า Haze ลดลงเป็น 20.3, 13.1, 9.2 และ 5.3 ตามลำดับ เพราะ DOP ขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่ PVC ทำให้แสงส่องผ่านได้ง่าย และเมื่อ DOP ลดลงค่า Haze จึงมีระดับเพิ่มขึ้น

ขณะที่การเติมยางนาโน NBR และ SBR ใน PVC/DOP/ยางนาโน ปริมาณ 1-11 phr เมื่อเปรียบเทียบกับ PVC/DOP ที่ปริมาณ DOP เดียวกัน พบว่าเมื่อปริมาณยางนาโนมากขึ้น ทำให้ค่า Haze เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน เนื่องจากแสงที่ส่องไปกระทบกับอนุภาคยางนาโนที่กระจายตัวอยู่ใน PVC ทำให้แสงเกิดการสะท้อนกลับ ซึ่งแสดงถึงความเป็นหมอกของ PVC/DOP/ยางนาโน อีกทั้งยางนาโนยังขัดขวางการทะลุผ่านของแสง ขณะที่ PVC/DOP/NBR มีค่า Haze มากกว่า PVC/DOP/SBR เนื่องจากลักษณะเฉพาะตัวของยางนาโน SBR มีความขรุขระกว่ายางนาโน NBR



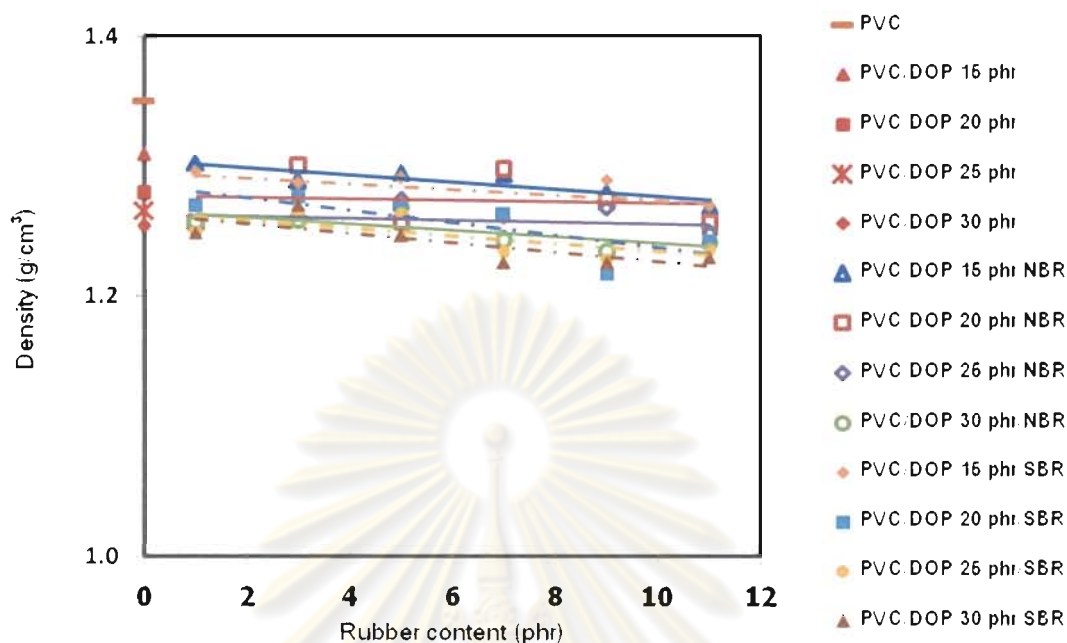
รูปที่ 5.13: Haze ของ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน

### 5.3.3 ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่นของ DOP เท่ากับ  $0.98 \text{ g/cm}^3$  ในขณะที่ความหนาแน่นของ PVC คอมพาวนด์ คือ  $1.35 \text{ g/cm}^3$  เมื่อใส่ DOP ลงใน PVC ปริมาณ 15, 20, 25 และ 30 phr ทำให้ความหนาแน่นของ PVC/DOP ลดลงเหลือ 1.31, 1.28, 1.27 และ  $1.26 \text{ g/cm}^3$  ตามลำดับ เมื่อเทียบกับ PVC คอมพาวนด์ ที่มีค่าความหนาแน่น  $1.35 \text{ g/cm}^3$  แสดงดังรูปที่ 5.14 DOP มีความหนาแน่นน้อยกว่า PVC คอมพาวนด์ จึงทำให้ความหนาแน่นของ PVC/DOP มีค่าลดลง เมื่อปริมาณ DOP เพิ่มมากขึ้น

เมื่อเติมยางนาโน NBR และ SBR ซึ่งมีความหนาแน่น  $0.4$  และ  $0.3 \text{ g/cm}^3$  [58] ร่วมกับ DOP ที่ปริมาณต่างๆ พบว่า PVC/DOP/ยางนาโน ให้ค่าความหนาแน่นเท่ากันกับการใส่สารเสริมสภาพพลาสติก DOP เพียงอย่างเดียวใน PVC โดยยางนาโน SBR 11 phr สามารถลดปริมาณ DOP จาก 30 phr เหลือ 15 phr ขณะที่ยางนาโน NBR 11 phr ลดปริมาณ DOP จาก 30 phr เป็น 20 phr





รูปที่ 5.14: Density ของ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน

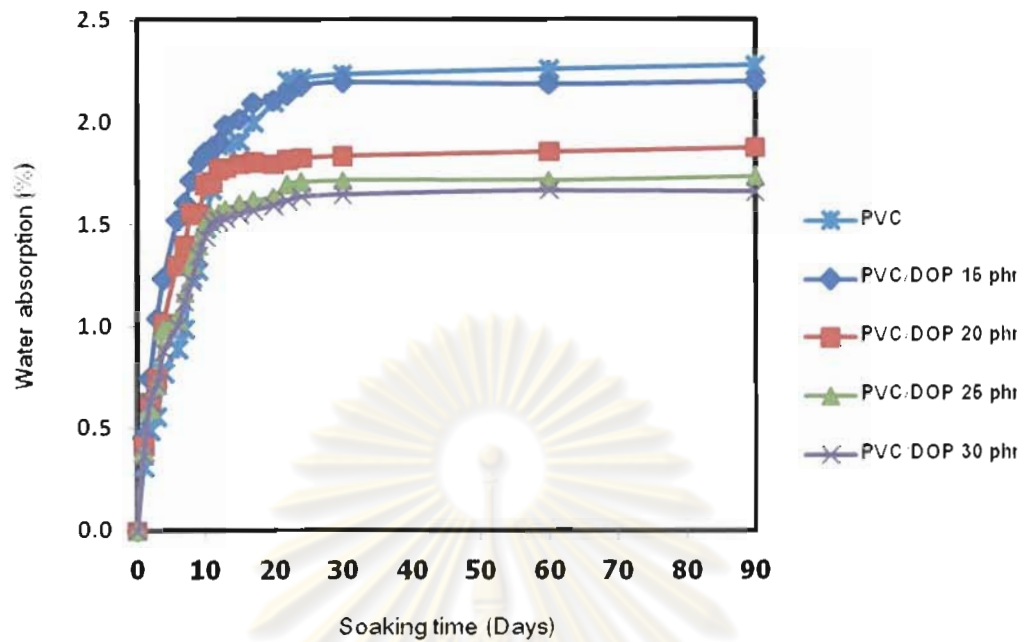
### 5.3.4 การดูดซึมน้ำ (Water absorption)

พฤติกรรมดูดซึมน้ำของ PVC ที่เติม DOP ปริมาณ 15, 20, 25 และ 30 phr แสดงดังรูปที่ 5.14 เมื่อปริมาณ DOP เพิ่มขึ้นการดูดซึมน้ำของ PVC/DOP ลดลง และ PVC มีความทนน้ำมากขึ้น เนื่องจาก DOP เป็นโมเลกุลที่ไม่ชอบน้ำมีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ (3 µg/l) [7] ขณะที่ PVC คอมพาวนด์สามารถดูดซึมน้ำได้ดีกว่า PVC/DOP เนื่องจากน้ำเป็นโมเลกุลมีขั้ว และ PVC มีสภาพขั้วเหมือนกับน้ำ จึงทำให้ PVC ดูดซึมน้ำได้ รูปที่ 5.15-5.19 แสดงพฤติกรรมดูดซึมน้ำของ PVC/DOP/NBR ที่ปริมาณ DOP เดียวกันกับ PVC/DOP พบว่า PVC/DOP/NBR ดูดซึมน้ำได้มากขึ้น เมื่อปริมาณยางนาโน NBR เพิ่มขึ้น เนื่องจากยางนาโน NBR ประกอบด้วย กลุ่มอะคริโลไนไตรล์ (Acrylonitrile) ซึ่งมีความเป็นขั้วสูง ทำให้ PVC/DOP/NBR ดูดซึมน้ำได้ดี ขณะที่การดูดซึมน้ำของ PVC/DOP/SBR แสดงดังรูปที่ 5.19-5.22 พบว่า PVC/DOP/SBR ดูดซึมน้ำได้ค่อนข้างน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับยางนาโน NBR เนื่องจากยางนาโน SBR เป็นยางไม่มีขั้ว

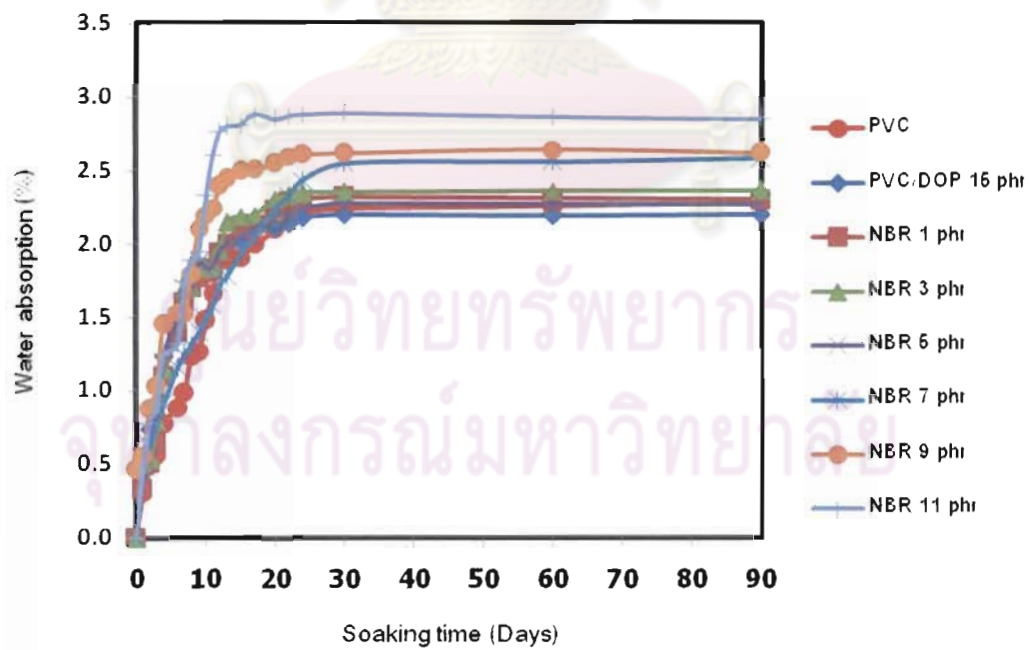
จากรูปที่ 5.15-5.23 จะเห็นได้ว่าอัตราการดูดซึมน้ำของ PVC คอมพาวนด์และ PVC/DOP/ยางนาโน เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 7-10 วันแรก หลังจากนั้นแม้จะมีการดูดซึมน้ำแต่ อัตราการดูดซึมน้ำลดลงอย่างชัดเจน และเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 30 วัน อัตราการดูดซึมน้ำเริ่มคงที่ สะท้อนให้เห็นว่าทั้ง PVC PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน ต่างได้ดูดน้ำจนอิ่มตัว โดยการดูดซึมน้ำของ PVC/DOP ที่ปริมาณ DOP 15 phr สามารถดูดซึมน้ำได้มากที่สุดคิดเป็น 2.2 เปอร์เซ็นต์ และการเติม DOP 30 phr เพียงอย่างเดียวใน PVC สามารถดูดซึมน้ำได้น้อยที่สุด 1.6 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีความสอดคล้องกับความสามารถในการละลายน้ำของสารเสริมสภาพพลาสติก DOP ขณะที่การเติมยางนาโน NBR และ SBR ร่วมกับ DOP ลงใน PVC พบว่า PVC/DOP/NBR สามารถดูดซึมน้ำได้มากกว่า PVC/DOP/SBR โดย PVC/DOP/NBR สามารถดูดซึมน้ำได้มากที่สุด 2.8 เปอร์เซ็นต์ ที่ปริมาณ DOP 15 phr ร่วมกับยางนาโน NBR 11 phr



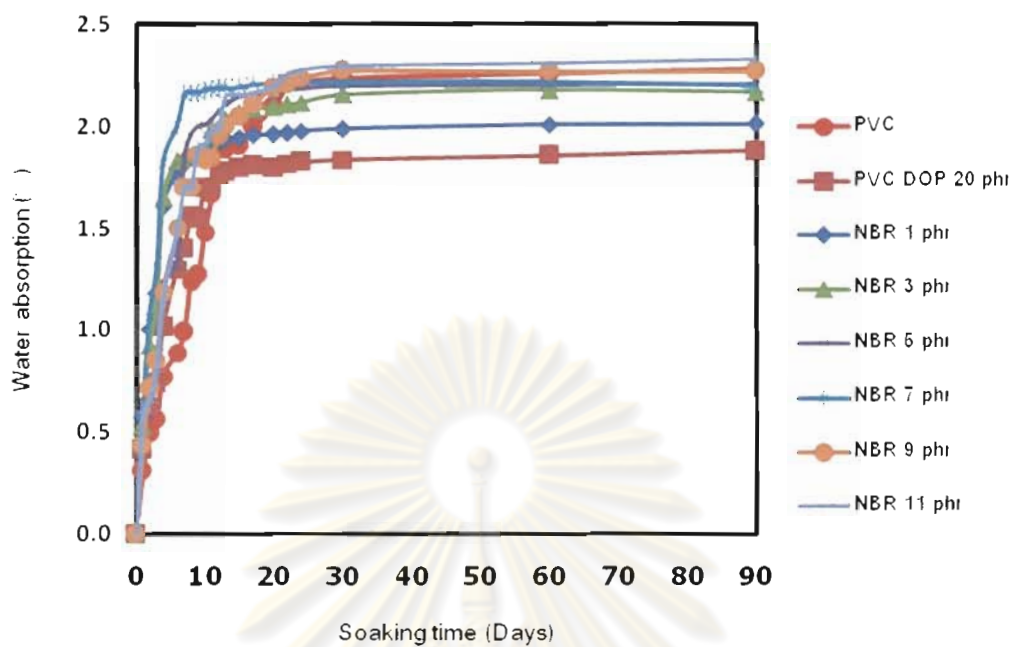
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



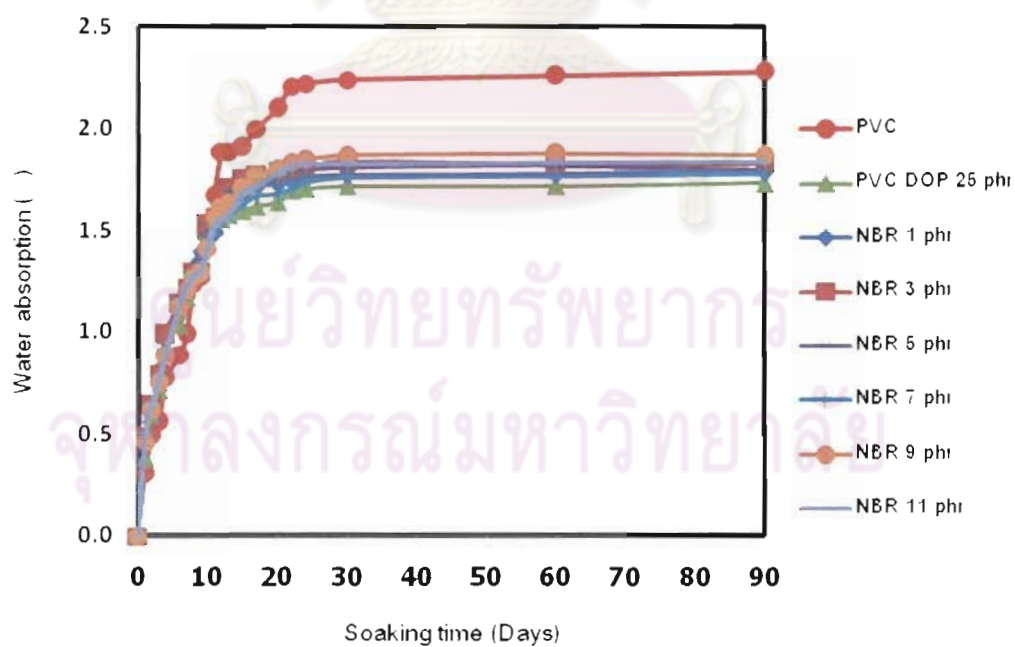
รูปที่ 5.15: Water absorption ของ PVC และ PVC/DOP



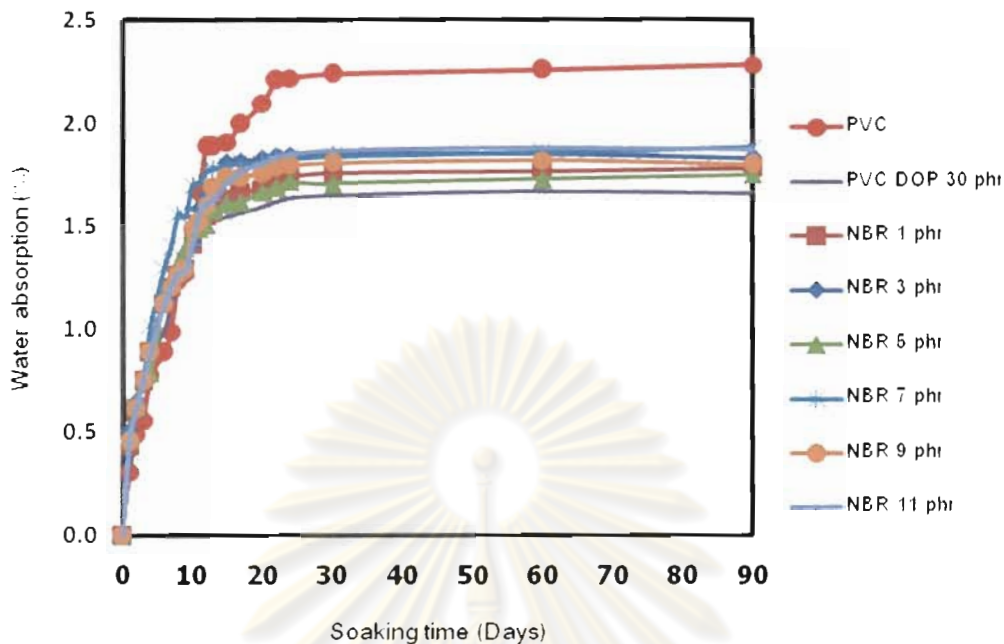
รูปที่ 5.16: Water absorption ของ PVC/DOP และ PVC/DOP/NBR ที่ปริมาณ DOP 15 phr



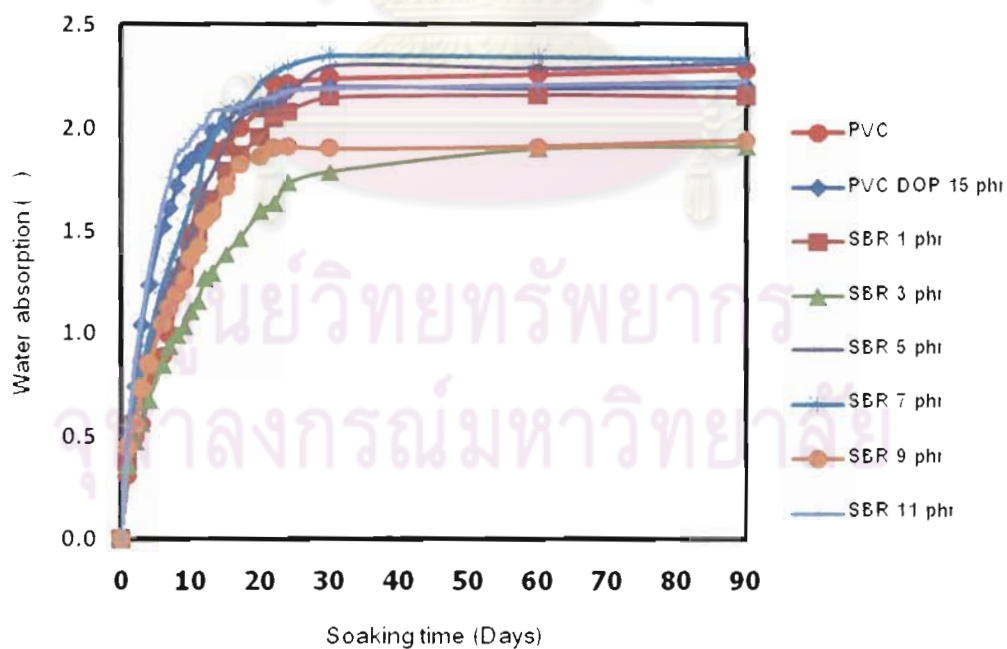
รูปที่ 5.17: Water absorption ของ PVC/DOP และ PVC/DOP/NBR ที่ปริมาณ DOP 20 phr



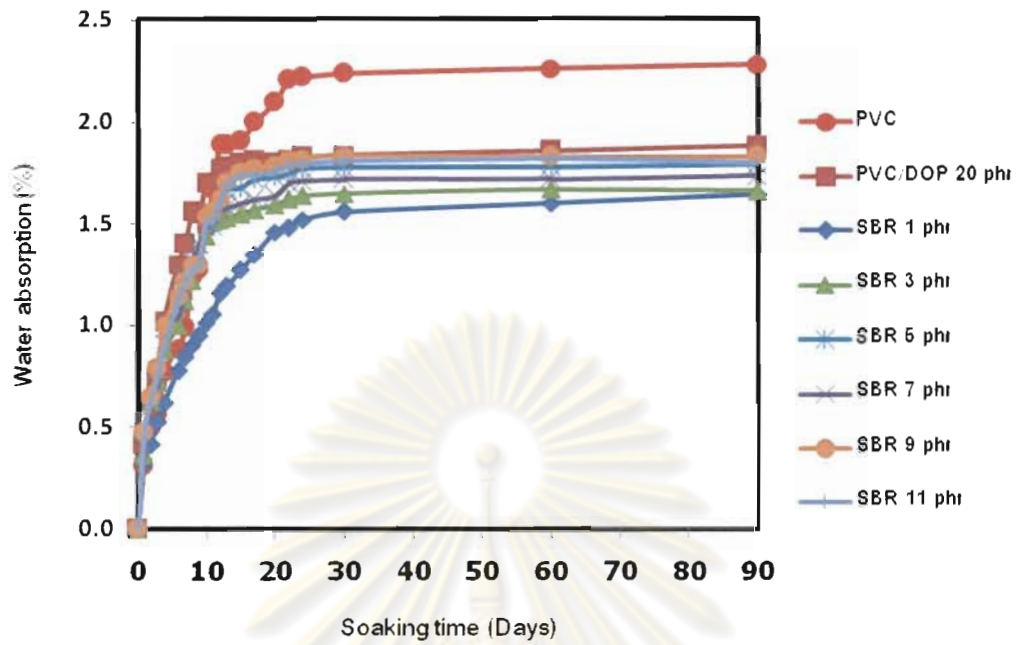
รูปที่ 5.18: Water absorption ของ PVC/DOP และ PVC/DOP/NBR ที่ปริมาณ DOP 25 phr



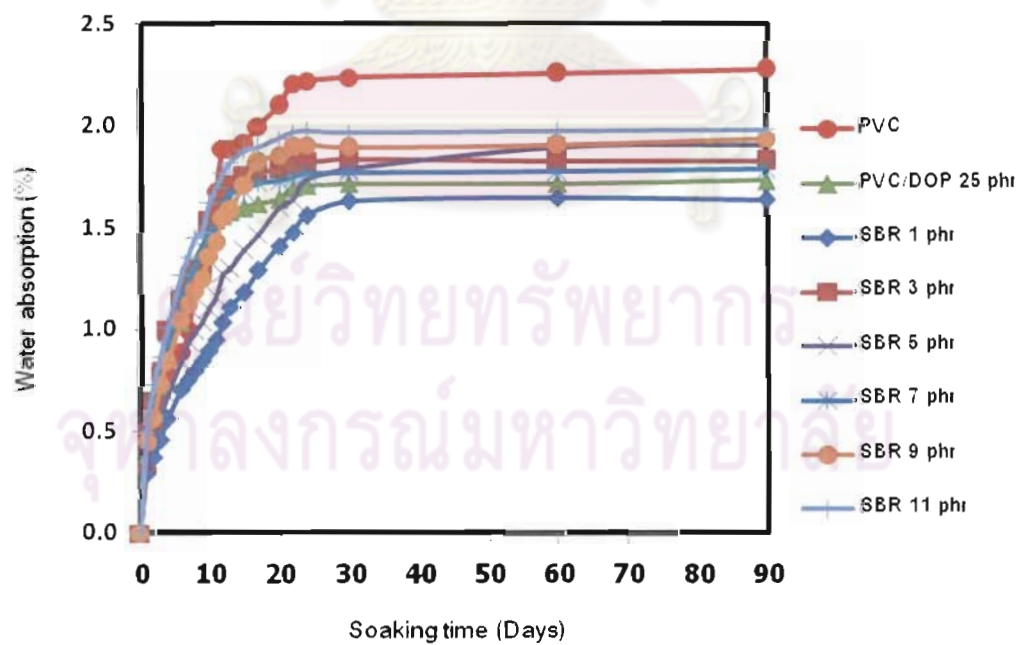
รูปที่ 5.19: Water absorption ของ PVC/DOP และ PVC/DOP/NBR ที่ปริมาณ DOP 30 phr



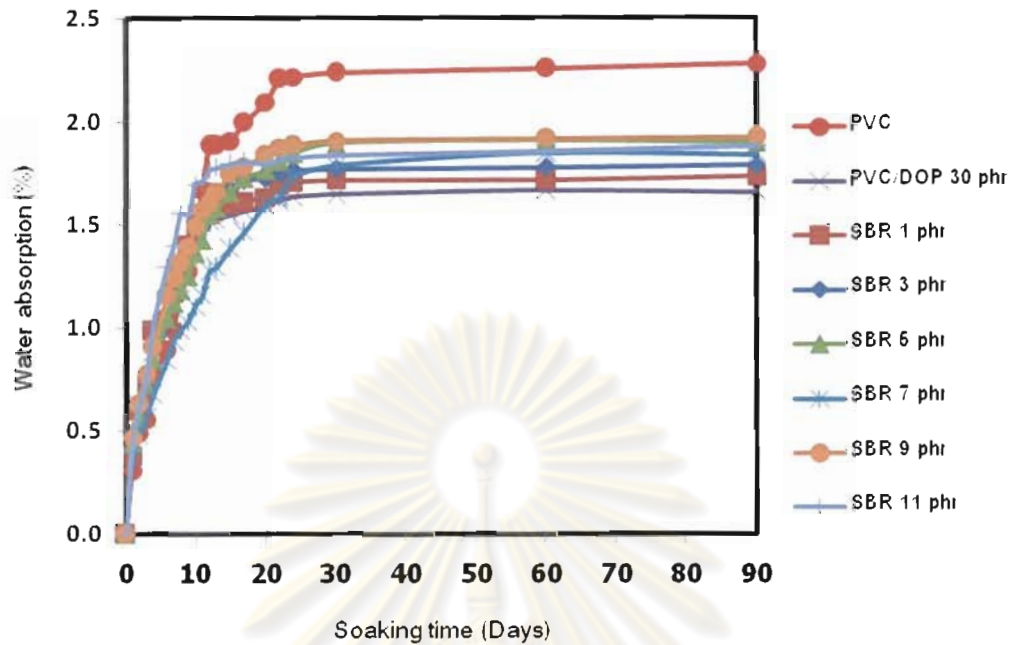
รูปที่ 5.20: Water absorption ของ PVC/DOP และ PVC/DOP/SBR ที่ปริมาณ DOP 15 phr



รูปที่ 5.21: Water absorption ของ PVC/DOP และ PVC/DOP/SBR ที่ปริมาณ DOP 20 phr



รูปที่ 5.22: Water absorption ของ PVC/DOP และ PVC/DOP/SBR ที่ปริมาณ DOP 25 phr



รูปที่ 5.23: Water absorption ของ PVC/DOP และ PVC/DOP/SBR ที่ปริมาณ DOP 30 phr

### 5.3.5 กระแสวิทยา (Rheology)

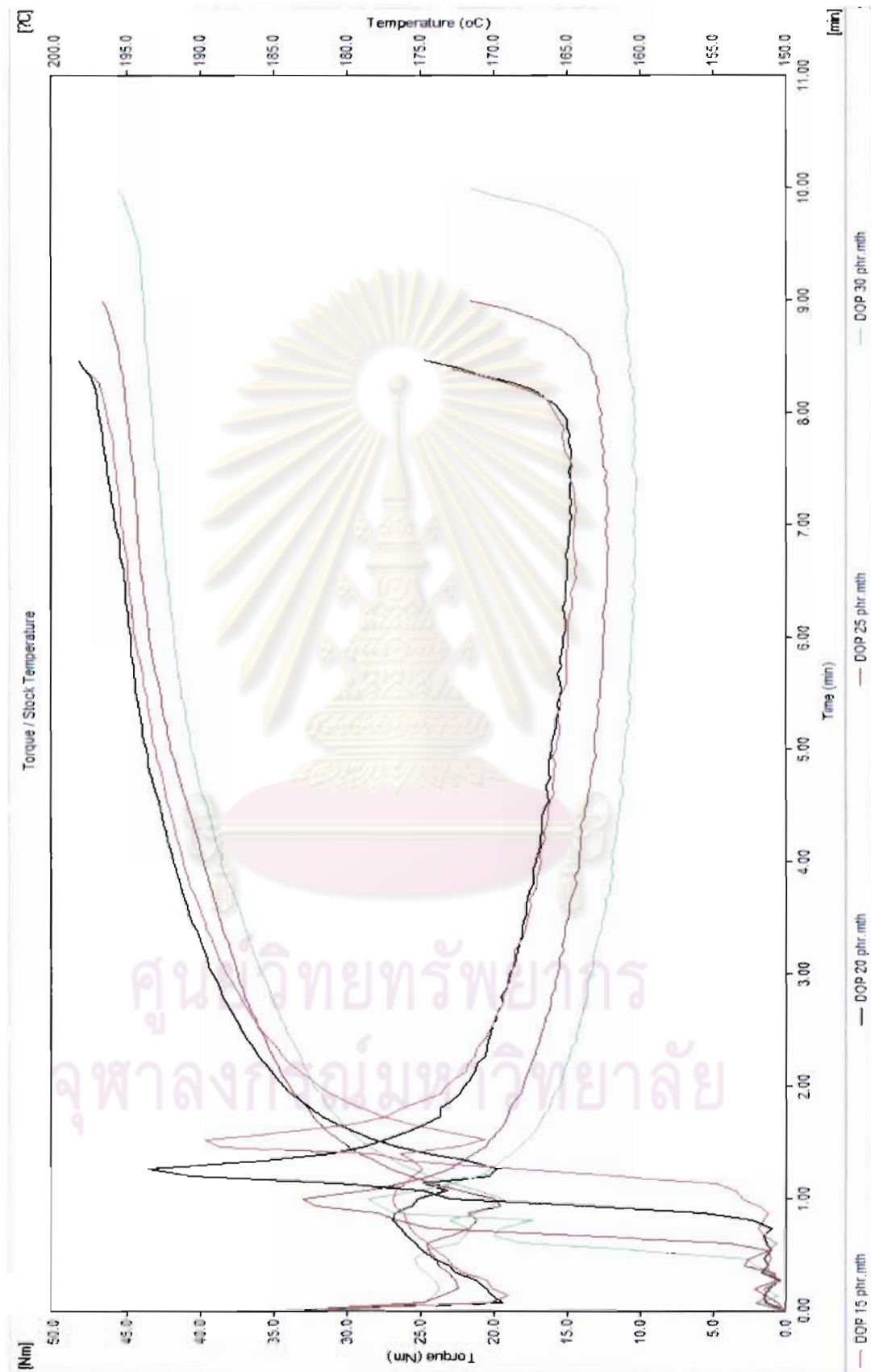
การไหลของ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน ที่ปริมาณ DOP 15-30 phr ยางนาโน NBR และ SBR 1-11 phr ศึกษาด้วยเครื่องทอร์กกรีโอมิเตอร์ (Torque Rheometer) แสดงผลดังรูปที่ 5.23-5.32 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างเวลา อุณหภูมิ และทอร์ก ณ จุดหลอมตัว (Fusion stage) และจุดเสื่อมสภาพ (Decomposition stage) ของ PVC/DOP และ PVC ที่เสริมสภาพพลาสติกด้วย DOP และยางนาโนทั้ง 2 ชนิด คือ NBR และ SBR กลุ่มกราฟที่อยู่ตอนบนเป็นกราฟแสดงอุณหภูมิ และกลุ่มที่อยู่ตอนล่างแสดงถึงทอร์ก ซึ่งอ้างอิงกับเวลาในแกนนอน ความสัมพันธ์ของตัวแปรเหล่านี้มีความสำคัญ เพราะช่วยหาสภาวะที่เหมาะสมแก่กระบวนการผลิต จากเส้นกราฟจุดสูงสุดของเส้นกราฟกลุ่มล่างคือค่าทอร์กสูงสุด (Maximum torque) ในการหลอมเหลว PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน ได้หมด ขณะเดียวกันยังแสดงค่าของอุณหภูมิ และเวลา จากนั้นเส้นกราฟของ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนถึงจุดที่ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน ถูกเผาไหม้เป็นขี้เถ้าทั้งหมด ซึ่งเป็นจุดเสื่อมสภาพ ค่าที่ได้แสดงดังตารางที่ 5.1

เมื่อเติม DOP ใน PVC เพิ่มมากขึ้น ณ จุด Fusion ซึ่งสะท้อนค่าทอร์ก คุณหมุมิ และเวลาที่ใช้ในการหลอมเหลว PVC/DOP ลดลง เนื่องจาก DOP ลดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล PVC เมื่อได้รับความร้อน ทำให้สายโซ่ PVC สามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น อีกทั้งเมื่อเติมยางนาโน NBR และ SBR 1-11 phr ร่วมกับ DOP ลงใน PVC สามารถช่วยปรับปรุงพฤติกรรมกาวไหลของ PVC ได้ขึ้น

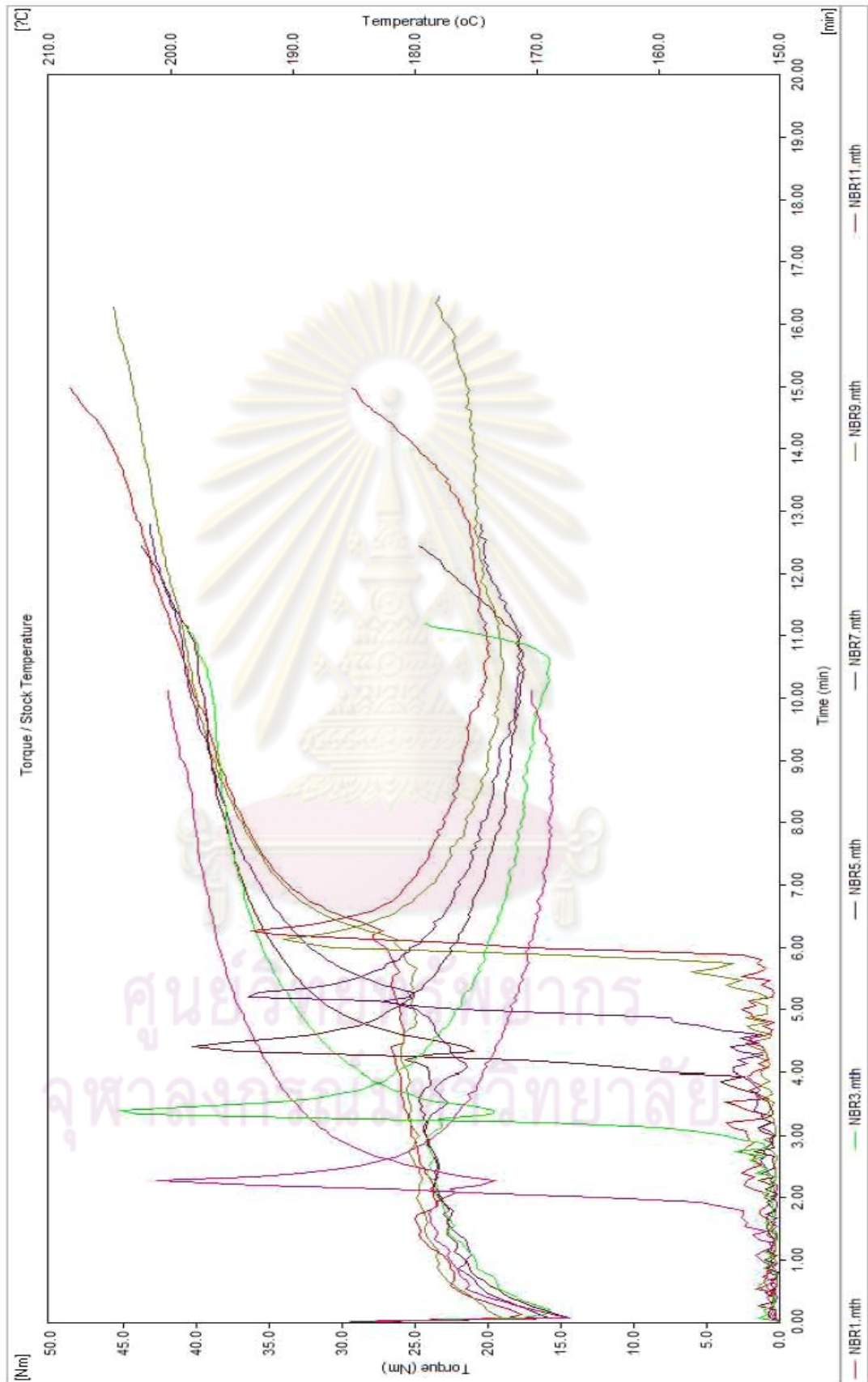


ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

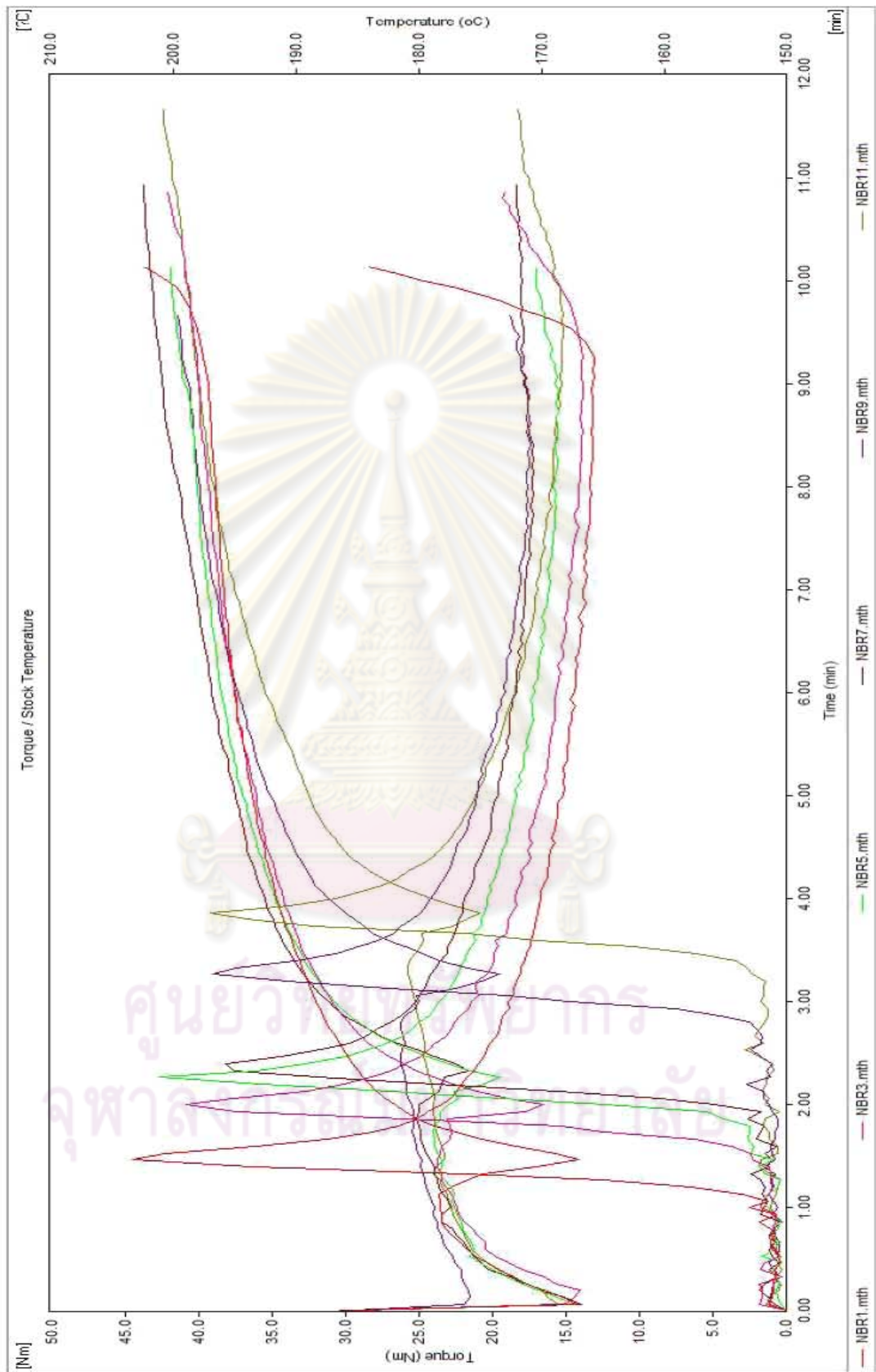




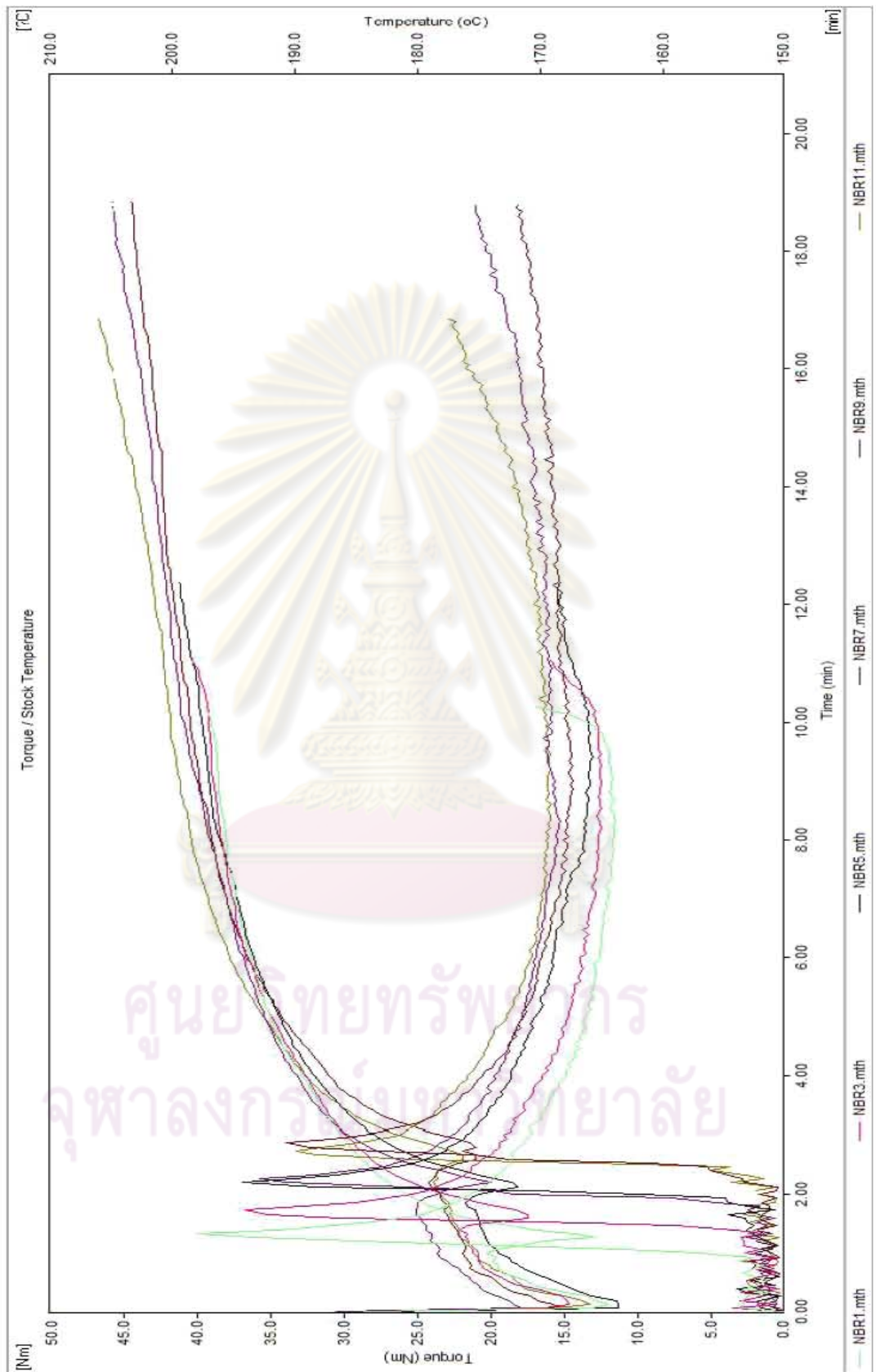
รูปที่ 5.24: สมบัติ Rheology ของ PVC/DOP ที่ปริมาณ DOP 15, 20, 25 และ 30 phr



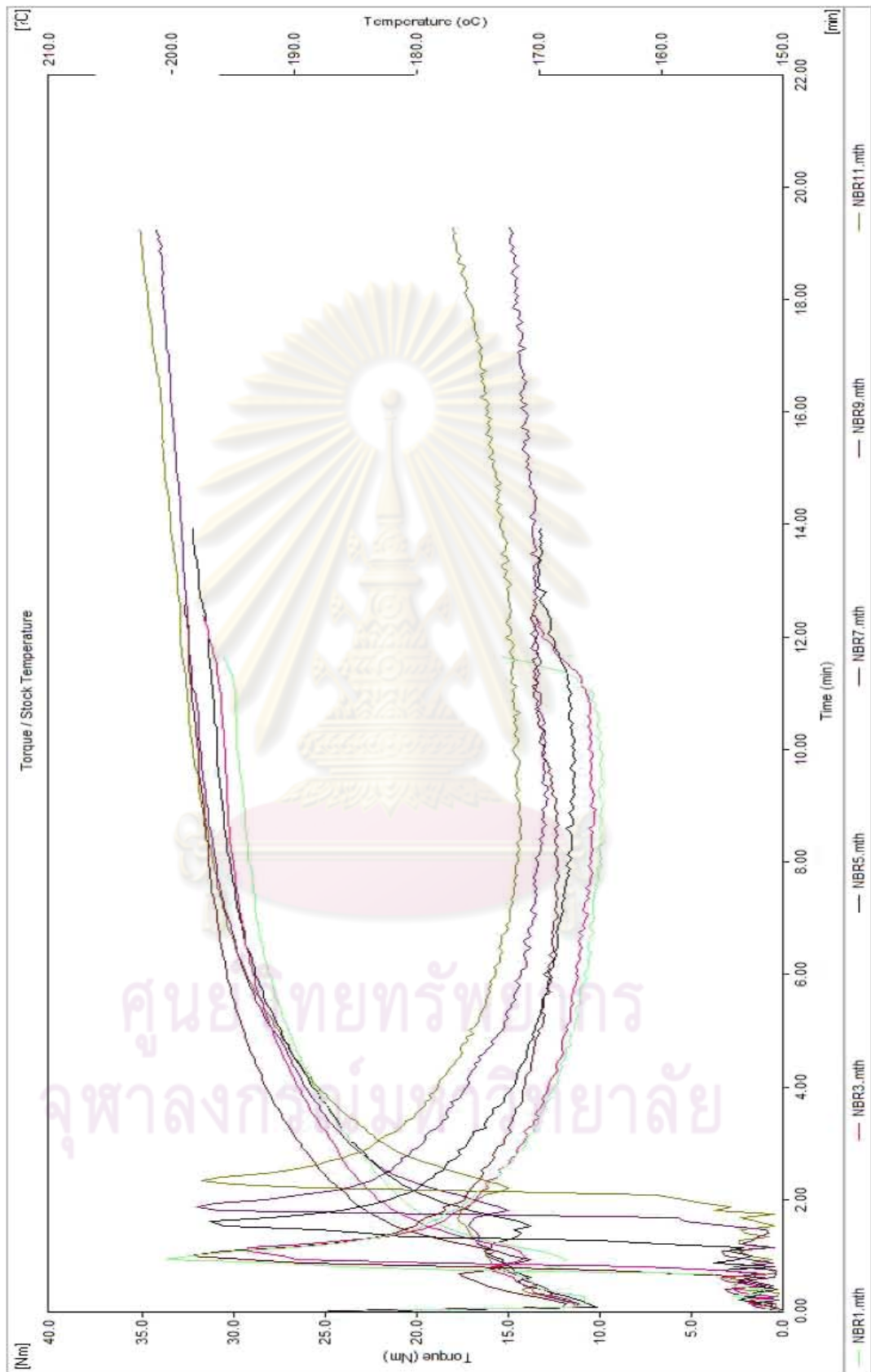
รูปที่ 5.25: กระแสวิทยาของ PVC/DOP/NBR ที่ปริมาณ DOP 15 phr



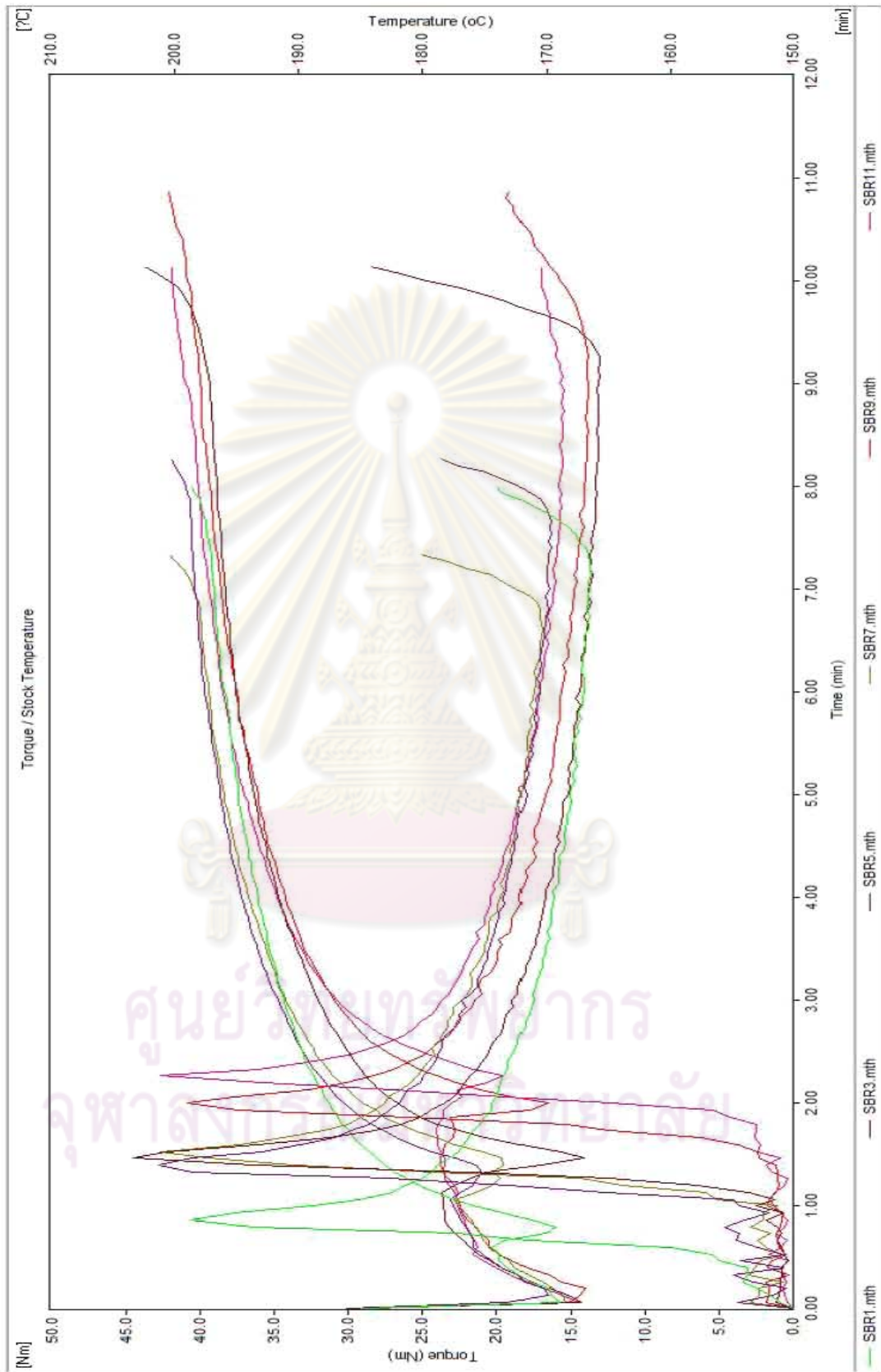
รูปที่ 5.26: กระแสวิทยาของ PVC/DOP/NBR ที่ปริมาณ DOP 20 phr



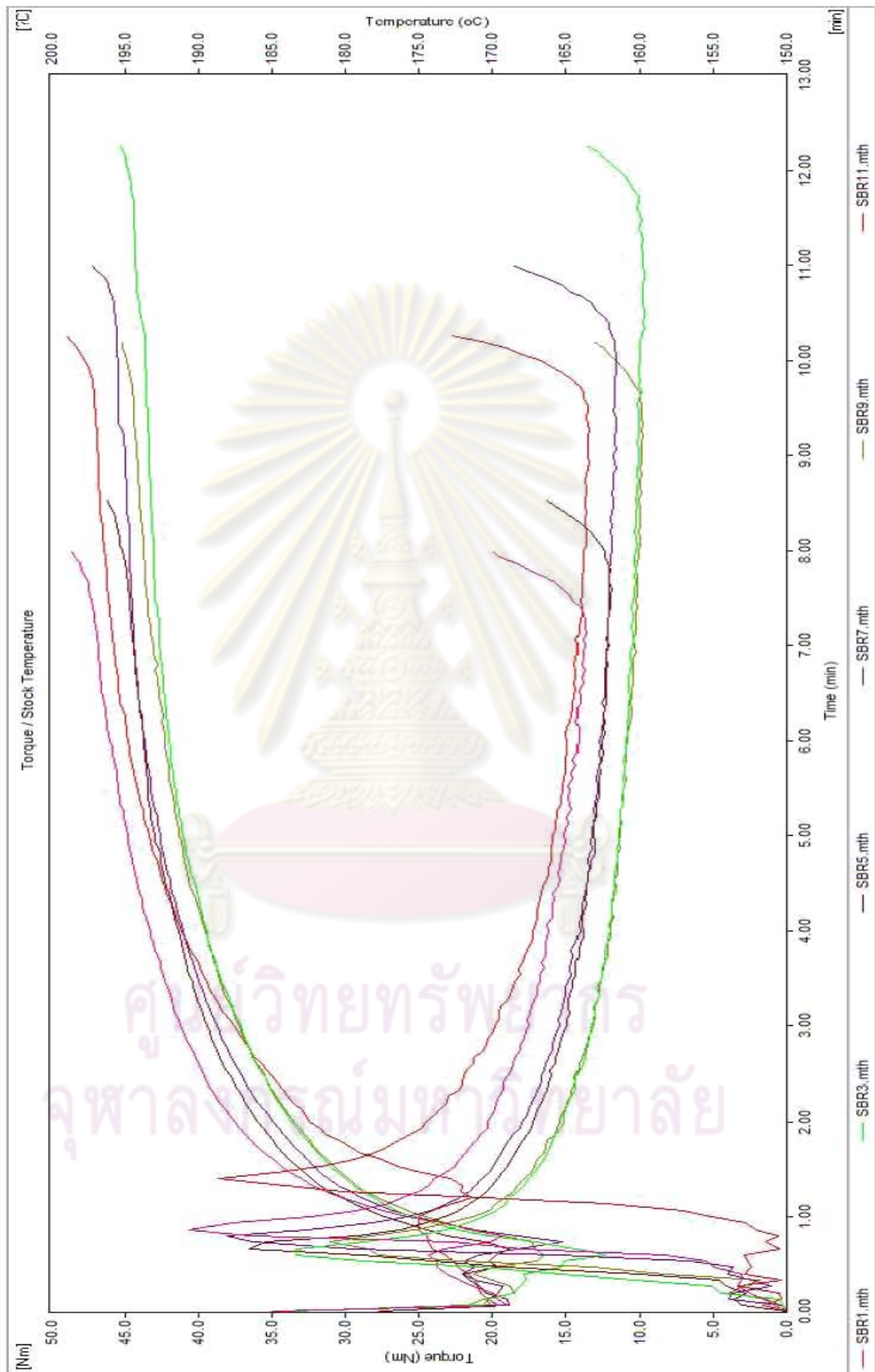
รูปที่ 5.27: กระแสวิทยาของ PVC/DOP/NBR ที่ปริมาณ DOP 25 phr



รูปที่ 5.28: กระแสวิทยาของ PVC/DOP/NBR ที่ปริมาณ DOP 30 phr



รูปที่ 5.29: กระแสไฟฟ้าของ PVC/DOP/SBR ที่ปริมาณ DOP 15 phr



รูปที่ 5.30: กระแสวิทยาของ PVC/DOP/SBR ที่ปริมาณ DOP 20 phr



รูปที่ 5.31: กระแสความร้อนของ PVC/DOP/SBR ที่ปริมาณ DOP 25 phr





รูปที่ 5.32: กระแสไฟฟ้าของ PVC/DOP/SBR ที่ปริมาณ DOP 30 phr

ตารางที่ 5.1 กระแสวิทยาของ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน

สูตร	จุด Fusion			จุด Decomposition		
	เวลา (min)	ทอร์ก (Nm)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (min)	ทอร์ก (Nm)	อุณหภูมิ (°C)
PVC/DOP 15 phr	1.5	39.5	172.4	7.9	16.2	197.1
PVC/DOP 20 phr	1.3	43.1	170.0	8.2	15.0	198.2
PVC/DOP 25 phr	1.2	33.2	169.6	8.8	13.4	195.3
PVC/DOP 30 phr	1.0	28.1	168.2	9.7	12.1	193.8
PVC/DOP 15 phr/NBR 1 phr	2.2	42.6	172.6	9.5	15.2	199.4
PVC/DOP 15 phr/NBR 3 phr	3.2	44.5	173.2	10.3	15.8	197.2
PVC/DOP 15 phr/NBR 5 phr	4.4	39.2	174.6	11.0	17.6	198.1
PVC/DOP 15 phr/NBR 7 phr	5.2	35.8	180.5	11.1	17.9	200.3
PVC/DOP 15 phr/NBR 9 phr	6.1	33.7	182.1	12.1	20.3	201.4
PVC/DOP 15 phr/NBR 11 phr	6.3	35.0	183.0	12.5	21.2	203.3
PVC/DOP 20 phr/NBR 1 phr	1.6	44.3	168.4	9.3	13.9	197.4
PVC/DOP 20 phr/NBR 3 phr	1.9	39.5	169.5	9.8	14.7	199.2
PVC/DOP 20 phr/NBR 5 phr	2.1	42.1	172.1	9.8	17.1	201.7
PVC/DOP 20 phr/NBR 7 phr	2.3	37.7	177.2	10.2	18.0	202.3
PVC/DOP 20 phr/NBR 9 phr	3.2	38.4	174.6	9.5	18.5	200.0
PVC/DOP 20 phr/NBR 11 phr	4.0	38.7	173.4	10.5	17.6	201.6
PVC/DOP 25 phr/NBR 1 phr	1.6	40.1	167.8	9.7	12.8	197.5
PVC/DOP 25 phr/NBR 3 phr	1.9	37.6	172.3	10.0	13.5	198.2
PVC/DOP 25 phr/NBR 5 phr	2.4	37.2	173.4	11.3	14.8	199.4
PVC/DOP 25 phr/NBR 7 phr	3.0	34.1	175.6	13.8	21.1	201.3
PVC/DOP 25 phr/NBR 9 phr	2.2	35.0	173.7	14.3	20.0	203.4
PVC/DOP 25 phr/NBR 11 phr	2.4	33.2	174.5	14.8	22.4	205.2
PVC/DOP 30 phr/NBR 1 phr	1.5	34.0	168.7	10.7	11.2	195.7

สูตร	จุด Fusion			จุด Decomposition		
	เวลา (min)	ทอร์ก (Nm)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (min)	ทอร์ก (Nm)	อุณหภูมิ (°C)
PVC/DOP 30 phr/NBR 3 phr	1.6	32.1	172.2	11.5	12.1	197.5
PVC/DOP 30 phr/NBR 5 phr	1.8	31.3	171.8	11.8	13.2	198.2
PVC/DOP 30 phr/NBR 7 phr	1.5	33.1	172.0	11.0	13.9	199.5
PVC/DOP 30 phr/NBR 9 phr	1.9	31.6	172.5	14.4	15.0	200.0
PVC/DOP 30 phr/NBR 11 phr	2.5	30.5	174.0	15.0	15.5	202.6
PVC/DOP 15 phr/SBR 1 phr	0.9	40.2	168.3	7.3	16.2	198.1
PVC/DOP 15 phr/SBR 3 phr	1.5	44.0	169.2	9.2	14.4	198.0
PVC/DOP 15 phr/SBR 5 phr	1.3	43.6	175.0	7.8	21.0	198.2
PVC/DOP 15 phr/SBR 7 phr	1.7	43.0	171.5	6.9	19.7	199.5
PVC/DOP 15 phr/SBR 9 phr	2.0	40.3	169.3	9.3	17.0	199.0
PVC/DOP 15 phr/SBR 11 phr	2.4	42.6	172.7	9.7	18.8	201.0
PVC/DOP 20 phr/SBR 1 phr	0.9	40.8	169.3	7.3	13.9	197.0
PVC/DOP 20 phr/SBR 3 phr	0.6	33.1	162.1	11.7	10.0	194.1
PVC/DOP 20 phr/SBR 5 phr	0.7	36.2	169.0	8.0	12.4	195.1
PVC/DOP 20 phr/SBR 7 phr	0.8	38.0	165.2	10.5	12.9	195.5
PVC/DOP 20 phr/SBR 9 phr	0.7	31.0	167.0	9.7	9.9	194.8
PVC/DOP 20 phr/SBR 11 phr	1.4	38.3	172.0	9.8	14.0	197.0
PVC/DOP 25 phr/SBR 1 phr	0.5	25.2	164.0	15.4	6.3	193.0
PVC/DOP 25 phr/SBR 3 phr	0.6	25.0	166.0	14.9	6.8	194.7
PVC/DOP 25 phr/SBR 5 phr	0.8	25.2	160.0	15.0	7.0	193.6
PVC/DOP 25 phr/SBR 7 phr	0.7	27.0	165.0	13.5	8.5	194.1
PVC/DOP 25 phr/SBR 9 phr	0.9	28.8	167.1	14.1	9.0	194.9
PVC/DOP 25 phr/SBR 11 phr	0.9	28.3	167.5	14.6	9.9	196.1
PVC/DOP 30 phr/SBR 1 phr	0.5	28.0	160.0	16.2	6.4	191.0

สูตร	จุด Fusion			จุด Decomposition		
	เวลา (min)	ทอร์ก (Nm)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (min)	ทอร์ก (Nm)	อุณหภูมิ (°C)
PVC/DOP 30 phr/SBR 3 phr	0.7	24.3	164.0	17.0	6.5	192.3
PVC/DOP 30 phr/SBR 5 phr	0.8	24.9	165.2	16.8	6.7	192.9
PVC/DOP 30 phr/SBR 7 phr	0.9	25.3	161.0	16.4	7.5	193.8
PVC/DOP 30 phr/SBR 9 phr	0.8	26.0	166.0	14.3	8.1	194.2
PVC/DOP 30 phr/SBR 11 phr	1.0	24.1	165.1	17.3	8.8	195.7



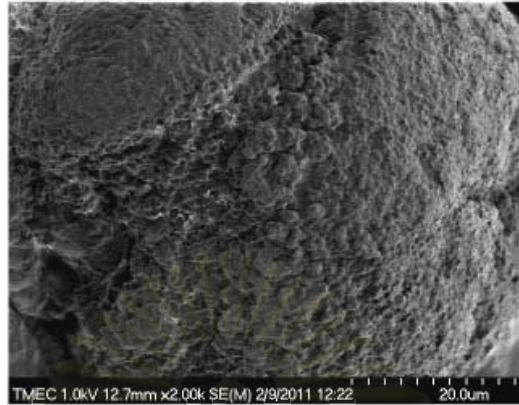
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 5.4 การศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาค (Microscopic observation)

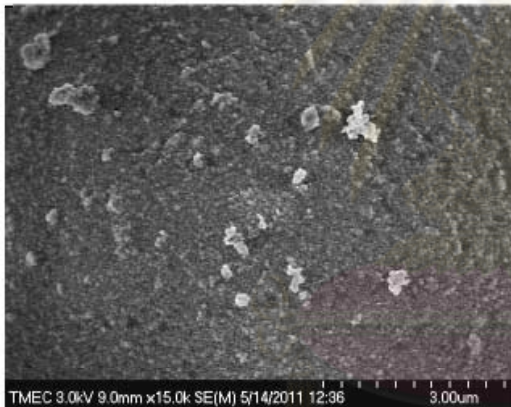
ศึกษาลักษณะขององค์ประกอบแต่ละชนิดของ PVC ยางนาโน NBR และ SBR แสดงดังรูป 5.33(ก)-(ค) และการกระจายตัวของยางนาโน NBR และ SBR ที่ปริมาณ 11 phr ใน PVC ที่เติม DOP 15, 20, 25 และ 30 phr แสดงดังรูป 5.34 และ 5.35(ก)-(ง) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) ด้วยกำลังขยาย 15,000 เท่า พบว่ายางนาโน NBR และ SBR สามารถกระจายตัวได้อย่างทั่วถึงใน PVC เมทริกซ์ แต่ยางนาโน NBR จับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนใหญ่กว่ายางนาโน SBR การกระจายตัวของยางนาโน SBR ดีกว่ายางนาโน NBR เนื่องจากยางนาโน NBR มีสภาพขั้วที่เหมือนกับ PVC



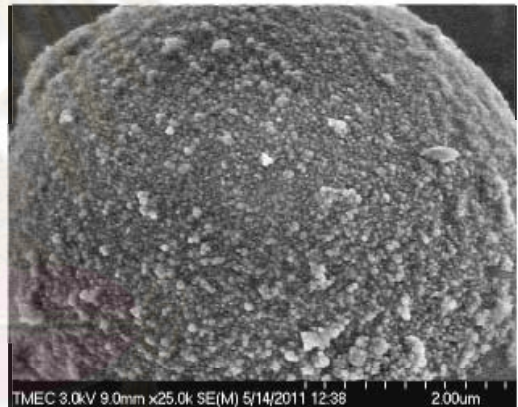
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก) PVC คอมพาวนด์



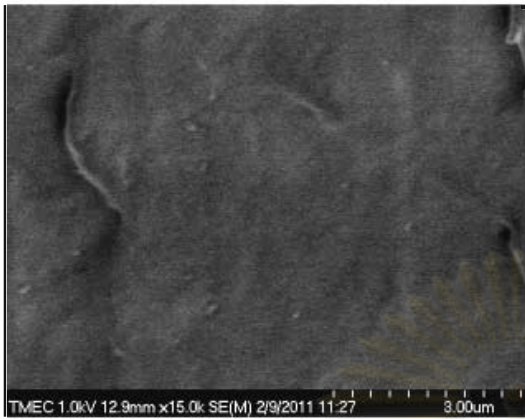
(ข) ผงยางนาโน NBR



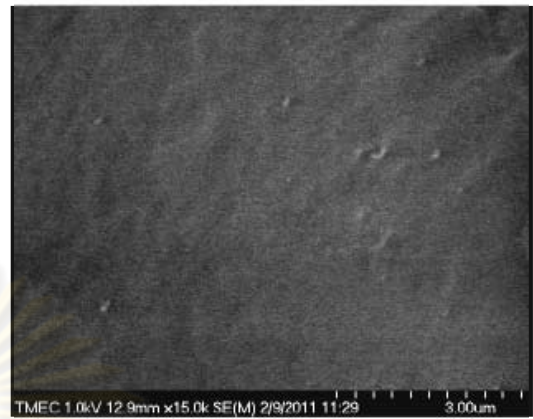
(ค) ผงยางนาโน

SBR

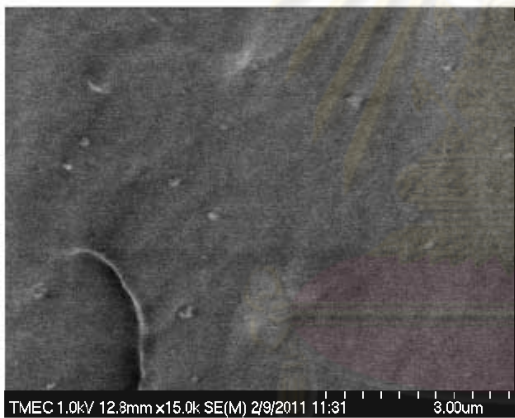
**รูปที่ 5.33:** แสดงลักษณะขององค์ประกอบแต่ละชนิด : (ก) PVC คอมพาวนด์, (ข) ผงยางนาโน NBR และ (ค) ผงยางนาโน SBR



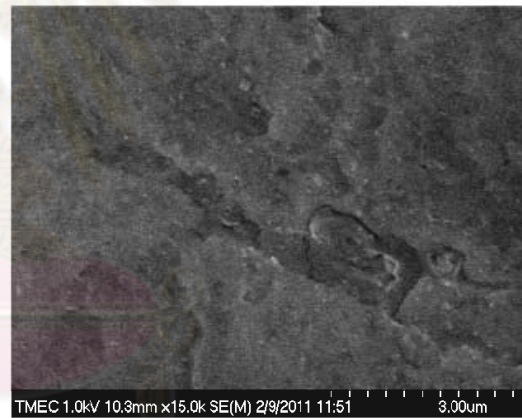
(ก) DOP 15 phr/NBR 11 phr



(ข) DOP 20 phr/NBR 11 phr

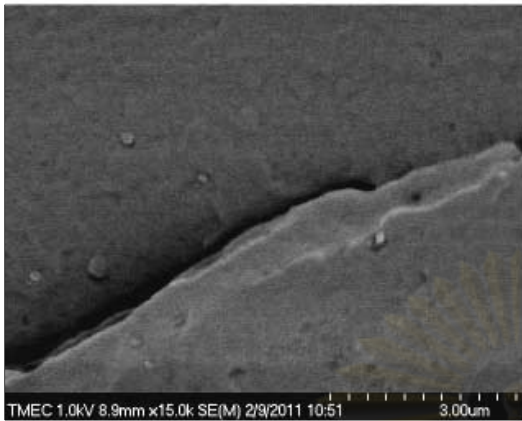


(ค) DOP 25 phr/NBR 11 phr

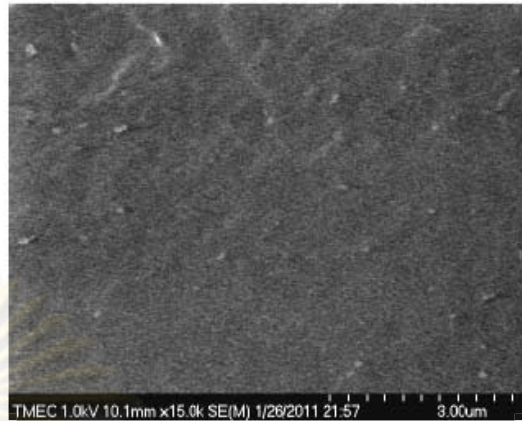


(ง) DOP 30 phr/NBR 11 phr

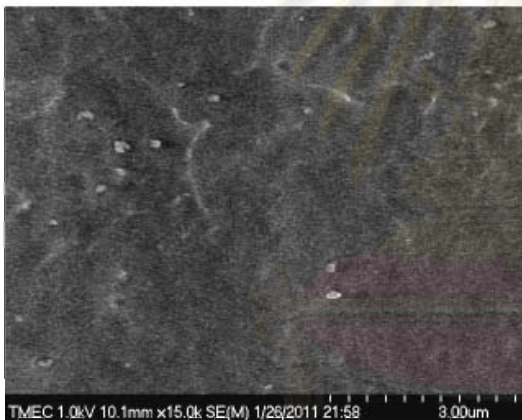
รูปที่ 5.34: การกระจายตัวของผงยางนาโน NBR 11 phr: (ก) DOP 15 phr, (ข) DOP 20 phr, (ค) DOP 25 phr และ (ง) DOP 30 phr



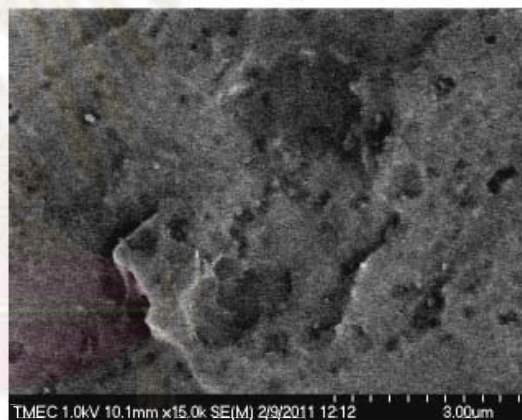
(ก) DOP 15 phr/SBR 11 phr



(ข) DOP 20 phr/SBR 11 phr



(ค) DOP 25 phr/SBR 11 phr



(ง) DOP 30 phr/SBR 11 phr

รูปที่ 5.35: การกระจายตัวของผงยางนาโน SBR 11 phr: (ก) DOP 15 phr, (ข) DOP 20 phr, (ค) DOP 25 phr และ (ง) DOP 30 phr



## 5.5 ราคาต้นทุน

ราคาวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิต PVC DOP และยางนาโนทั้ง 2 ชนิด แสดงดังตารางที่ 5.2 ซึ่งนำมาใช้ในการคำนวณหาราคาต้นทุนของ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน และจากการคำนวณราคาต้นทุนของ PVC/DOP PVC/DOP/NBR และ PVC/DOP/SBR แสดงดังตารางที่ 5.2 พบว่าราคาต้นทุนของ PVC/DOP ลดลง เมื่อปริมาณ DOP ลดลง และเมื่อเติมยางนาโน NBR หรือ SBR ลงไปพร้อมกับ DOP ทำให้ราคาต้นทุนสูงขึ้น เนื่องจากยางนาโน NBR และ SBR มีราคาต้นทุนที่ค่อนข้างสูง

ตารางที่ 5.2 ราคาวัตถุดิบ [59, 60]

วัตถุดิบ	ราคา (บาท/กิโลกรัม)
PVC compound	34.75
NBR	150
SBR	150
DOP	65

ตารางที่ 5.3 ราคาต้นทุนของ PVC/DOP และ PVC/DOP/NBR

วัสดุ	ราคา (บาท/กิโลกรัม)						
	ปริมาณยางนาโน NBR (phr)						
	0 phr	1 phr	3 phr	5 phr	7 phr	9 phr	11 phr
PVC/DOP 15 phr	38.58	39.51	41.38	43.16	44.79	46.46	48.30
PVC/DOP 20 phr	39.68	40.56	42.29	43.98	45.59	47.29	49.02
PVC/DOP 25 phr	40.67	41.59	43.27	44.89	46.47	48.00	49.70
PVC/DOP 30 phr	41.61	42.48	44.08	45.63	47.14	48.61	50.25

ตารางที่ 5.4 ราคาต้นทุนของ PVC/DOP และ PVC/DOP/SBR

วัสดุ	ราคา (บาท/กิโลกรัม)						
	ปริมาณยางนาโน SBR (phr)						
	0 phr	1 phr	3 phr	5 phr	7 phr	9 phr	11 phr
PVC/DOP 15 phr	38.58	39.51	41.38	43.16	44.79	46.46	48.30
PVC/DOP 20 phr	39.68	40.56	42.29	43.98	45.59	47.29	49.02
PVC/DOP 25 phr	40.67	41.59	43.27	44.89	46.47	48.00	49.70
PVC/DOP 30 phr	41.61	42.48	44.08	45.63	47.14	48.61	50.25

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 6

### สรุป

#### 6.1 สรุป

ก) ยางนาโน NBR และ SBR สามารถนำมาใช้ร่วมและลดปริมาณการใช้ DOP ในการเสริมสภาพพลาสติก PVC ได้เป็นอย่างดี

ข) การทนต่อแรงดึง : สามารถลดปริมาณการใช้ DOP จาก 20 phr เป็น 15 phr ที่ยางนาโน NBR 11 phr สามารถลดปริมาณการใช้ DOP 25 phr เหลือ 20 phr เมื่อใส่ยางนาโน SBR 3 phr การเพิ่มปริมาณยางนาโน NBR และ SBR มีผลเพิ่ม ระยะยืด ณ จุดขาดของ PVC มีค่าเพิ่มขึ้น

ค) การทนต่อแรงดัดโค้ง : สามารถใช้ยางนาโน NBR 3 phr ลดปริมาณการใช้ DOP จาก 20 phr เหลือ 15 phr และลดปริมาณ DOP จาก 25 phr เหลือ 20 phr ที่ปริมาณ NBR 9 phr หรือใช้ยางนาโน SBR เพียง 1 phr สามารถลดปริมาณ DOP จาก 20 เป็น 15 phr

ง) การทนต่อแรงกระแทก : การเติมยางนาโน NBR ให้สมบัติการทนต่อแรงกระแทกดีกว่ายางนาโน SBR และยางนาโน NBR 7 phr สามารถลดปริมาณ DOP จาก 15 phr เป็น 20 phr

จ) อุณหภูมิแปรสภาพแก้วของ PVC/DOP เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ DOP ลดลง และเมื่อเติมยางนาโน NBR และ SBR ร่วมกับ DOP ทำให้อุณหภูมิแปรสภาพแก้วมีค่าลดลง

ฉ) PVC/DOP ทนต่อการโค้งงอโดยความร้อนได้มากขึ้นเมื่อปริมาณ DOP ลดลง แต่เมื่อเติมยางนาโนทั้ง 2 ชนิด ความสามารถทนต่อการโค้งงอโดยความร้อนลดลง

ช) เมื่อปริมาณ DOP ลดลง ความแข็งของ PVC/DOP เพิ่มขึ้น ในเชิงความแข็งเมื่อใช้ยางนาโน NBR 9 phr สามารถลดปริมาณการใช้ DOP จาก 30 phr เหลือ 15 phr เมื่อเติมยางนาโน SBR 5 phr สามารถลดปริมาณ DOP จาก 30 phr เป็น 15 phr

ข) ความใสของ PVC/DOP ลดลงเมื่อปริมาณ DOP ลดลง การใส่ยางนาโน NBR และ SBR ลงใน PVC ร่วมกับสารเสริมสภาพพลาสติก DOP เมื่อปริมาณยางนาโนทั้ง 2 ชนิดเพิ่มขึ้น ความเป็นหมอกยิ่งเพิ่มขึ้น

ฅ) เมื่อปริมาณ DOP ลดลง ความหนาแน่นของ PVC/DOP มีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อใส่ยางนาโน NBR และ SBR ลงใน PVC ร่วมกับ DOP ทำให้ความหนาแน่นของ PVC ลดลง และลดปริมาณการใช้ DOP จาก 30 phr เหลือ 15 phr โดยมียางนาโน SBR 11 phr ขณะที่ยางนาโน NBR 11 phr สามารถลดปริมาณ DOP จาก 30 phr เหลือ 20 phr

ฉ) PVC/DOP ดูดซึมน้ำได้มากขึ้นเมื่อปริมาณ DOP ลดลง ขณะที่ PVC/DOP/NBR ดูดซึมน้ำมากขึ้น เมื่อปริมาณยาง NBR มากขึ้น เนื่องจากยางนาโน NBR มีอะคริไลไนไตรล์เป็นองค์ประกอบซึ่งเป็นส่วนที่มีความเป็นขั้วสูง จึงดูดซึมน้ำได้มาก

ค) ยางนาโน SBR ช่วยปรับปรุงพฤติกรรมกรไหลของ PVC ได้ดีกว่ายางนาโน NBR เนื่องจากยางนาโน SBR ทำให้ PVC หลอมได้เร็วขึ้น และใช้ทอร์กล้นน้อยกว่า PVC/DOP/NBR

ฅ) การกระจายตัวของยางนาโน SBR เกิดขึ้นได้ดีกว่ายางนาโน NBR เนื่องจากยางนาโน NBR มีการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน เนื่องจาก NBR มีสภาพขั้วเหมือนกับ PVC

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

ก) ศึกษา การใช้ DOP ร่วมกับ สารเสริมสภาพพลาสติกชนิด อื่นเช่น Polyhedral oligomeric silsesquioxane (POSS) เนื่องจาก POSS เป็นพลาสติกไฮเซอรเป็นพลาสติกไฮเซอรที่มี การระเหยต่ำกว่า DOP เพราะ DOP มีพฤติกรรมกรระเหยและซึมออกมานอกผิว PVC

ข) ศึกษาโดยใช้ยาง NBR และ SBR ขนาดอนุภาคไมโครเมตรเปรียบเทียบกับยาง NBR และ SBR ขนาดอนุภาคนาโนเมตรร่วมกับ DOP

## รายการอ้างอิง

- [1] Buekens, A. Reporting on the activities of the year 2007. Vinyl 2010 Progress Report 2008 (January 2008): 8.
- [2] ปาริชาติ ศิริ. Thailand Polymer Consumption by Type of Polymer. สถานการณ์และแนวโน้มอุตสาหกรรมพลาสติกไทย (พฤษภาคม 2552): 18.
- [3] Rahman, M., Brazel, C.S. The plasticizer market: an assessment of traditional plasticizers and research trends to meet new challenges. Progress in polymer science 29 (2004): 1223-1248.
- [4] Wilkes, C. E., Summers, J. W., and Daniels, C. A. PVC Handbook. USA: Hanser Gardner, 2005.
- [5] Vinythai. Plasticizer. Variety of PVC Products: PVC and Additives (2547): 1-6.
- [6] Schettler, T. Human exposure to phthalates via consumer products. International Journal of andrology 29 (2006): 134-139.
- [7] Pakalin, S., Aschberger, K., Cosgrove, O., Lund, B., Paya-Perez, A. and Vegro, S. Bis (2-ethylhexyl) phthalate (DEHP). European Union Risk Assessment Report 80 (2008): 3-8.
- [8] สุภาณี หิรัญธนกิจจากุล. ความรู้เกี่ยวกับสิ่งเป็นพิษ ตอนที่ 10. กลุ่มงานพิษวิทยา และสิ่งแวดล้อม สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์สาธารณสุข กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข, 2538.
- [9] เจริญ นาคเสถียร. กระบวนการแปรรูปพลาสติก (Plastic processing). พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์โพธิ์โพช, 2547.
- [10] อรุษา สรวารี. สารเติมแต่งพอลิเมอร์. เล่มที่ 1. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
- [11] Lakshmi, S., and Jayakrishan, A. The Economic Benefits of Polyvinyl Chloride in the United States and Canada. Chlorine Chemistry Division of the American Chemistry Council and the Vinyl Institute (December 2008): 3-22.
- [12] นิตศ จิระอรุณ. วัสดุพอลิเมอร์. เชียงใหม่: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2543.

- [13] Eden, P. PVC (Polyvinyl Chloride). Plastics International Distributor to the World (January 2007): 14.
- [14] Troitskii, B., et al. Investigation of Autocatalytic Thermal Degradation of Poly(vinyl chloride) by ESR Spectroscopy. Polymer degradation and stability 58 (1997): 83-89.
- [15] Patrick. T. Modern Plastics Encyclopedia Handbook. USA: McGraw-Hill. 1994.
- [16] Edenbaum., J. Plastic Additives and Modifiers Handbook. USA: Van Nostrand Reinhold, 1992.
- [17] Thavornsetawat, T. Synthesis of Flame Retardant Plasticizers for PVC from Terephthalic Acid Based on Chemical Recycling of Waste PET Bottles. Master' Thesis, Department of Material Science Faculty of Science Chulalongkorn University, 2000.
- [18] Leonard, K. Monomers for Polyvinyl Chloride (Phthalate, Adipates and Trimellitates). Plasticizer (1992): 359-377.
- [19] เตือนเพ็ญ วณิชพิมลอนันต์. ปัจจัยที่มีผลต่อค่าอุณหภูมิแปรผ่านสภาพแก้ว ( $T_g$ ) ในพอลิเมอร์. พอลิเมอร์ (Polymer) (2547): 1-4.
- [20] Hevin, M. Dynamic Mechanical Analysis. Second Edition. USA: CRC Press, 2008.
- [21] Puttitwong, E. Modification of Poly(vinyl chloride)/Nitrile Rubber Blend Using Natural Rubber, Styrene-Butadiene Rubber and Polybutadiene Rubber. Master's Thesis, Faculty of Science Chulalongkorn University, 2000.
- [22] พงษ์ธร แซ่อู๋, ชาศริต สิริสิงห. ยาง: กระบวนการผลิตและการทดสอบ. พิมพ์ครั้งที่ 1 ปทุมธานี: ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุ (เอ็มเทค), 2550.
- [23] Molding Processes [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://alexpb.com/notes/articles/2007/11/13/molding/> [2554, 16 มกราคม].
- [24] มณฑล ชาญอรุณ. คุณสมบัติทางกลและการทดสอบวัสดุ. เอกสารประกอบการเรียนวิชา InE191 Engineering Material (2000): 3-4.
- [25] Flexural test [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http://www.instron.us/wa/applications/test\\_types/flexure/default.aspx](http://www.instron.us/wa/applications/test_types/flexure/default.aspx) [2553, 20 ตุลาคม].

- [26] ASTM D 790-03 Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, 2003.
- [27] ASTM D 256-06 Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics, 2006.
- [28] Izod Impact Strength Testing of Plastics [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.matweb.com/reference/izod-impact.aspx> [2553, 15 ตุลาคม].
- [29] Sujan, E., and Wadud, B. Improvements in DMA Measurements Using Low-Friction 3-Point Bending Clamps. *TA Instruments* (2000): 1-5.
- [30] Dynamic Mechanical Analysis [ออนไลน์]: แหล่งที่มา: <http://www.npl.co.uk/advanced-materials/measurement-techniques/thermal-analysis/dynamic-mechanical-analysis> [2553, 14 กรกฎาคม].
- [31] Preformulation Thermal Capabilities [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http://www.xcelience.com/info/qwerty\\_thermal.htm](http://www.xcelience.com/info/qwerty_thermal.htm) [2553, 7 สิงหาคม].
- [32] Jones, M. *Polymer processing*. New York: Chapman and Hall, 1987.
- [33] Scanning Electron Microscope (SEM) [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.atom.rmutphysics.com/charud/scibook/nanotech/Page/Unit4-5.html> [2553, 16 กันยายน].
- [34] Mrklic, Z., and Kovacic, T. Thermogravimetric investigation of volatility of Dioctyl phthalate from plasticized poly(vinyl chloride). *Thermochemica Acta* 322 (1998): 129-135.
- [35] Yan, L., Changming, W., Guojian, W., and Zehua, Q. Application of the Long-Chain Linear Polyester in Plastification of PVC. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater* 23 (2008): 100-104.
- [36] Pita, V., Sampaio, E., and Monteiro, E. Mechanical properties evaluation of PVC/plasticizers and PVC/thermoplastic polyurethane blends from extrusion processing. *Polymer testing* 21 (2002): 545-550.
- [37] Soong, Y., Cohen, R., and Boyce, M. Polyhedral oligomeric silsesquioxane as a novel plasticizer for poly(vinyl chloride). *Polymer* 48 (2007): 1410-1418.

- [38] Yu, S., Hu, H., Ma, J., and Yin, J. Tribological properties of epoxy/rubber nanocomposites. Tribology International 41 (2008): 1205-1211.
- [39] Daishuang, L., Xia, H., Peng, J., Zhai, M., Wei J. Li, G., Qiao, and J. Radiation preparation of nano-powdered styrene-butadiene rubber (SBR) and its toughening effect for polystyrene and high-impact polystyrene. Radiation Physics and Chemistry 76 (2007): 1732-1735.
- [40] Wang, Q., Zhang, X., Dong, W., Gui, H., Gao, J., Lai, J., Liu, Y., Huang, F., Song, Z., and Qiao, J. Novel rigid poly(vinyl chloride) ternary nanocomposites containing ultrafine full-vulcanized powdered rubber and untreated nano-size calcium carbonate. Materials Letters 61 (2007): 1174-1177.
- [41] Liu, Y., Fan, Z., Ma, H., Tan, Y., and Qiao, J. Application of nano powdered rubber in friction materials. Wear 261 (2006): 225-229.
- [42] Wang, Q., Zhang, X., Liu, S., Gui, H., Lai, J., Liu, Y., Gao, J., Huang, F., Song, Z., Tan, B., and Qiao, J. Ultrafine full-vulcanized powdered rubbers/PVC compounds with higher toughness and higher heat resistance. Polymer 46 (2005): 10614-10617.
- [43] Mousa, A. Studies on rheological behavior of the thermoplastic elastomer derived from PVC and NBR using torque rheometry. Iranian Polymer Journal 6 (2004): 455-461.
- [44] Zhang, M., Liu, Y., Zhang, X., Gao, J., Huang, F., Song, Z., Wei, G., and Qiao, J. The effect of elastomeric nano-particles on the mechanical properties and crystallization behavior of polypropylene. Polymer 43 (2002): 5133-5138.
- [45] ASTM D638–03 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, 2002.
- [46] ASTM D790–03 Standard Test Method for Flexural Properties of Plastics, 2002.
- [47] ASTM D 256-06 Standard Test Method for Impact Properties of Plastics, 2002.



- [48] ASTM E1640-94 Standard Test Method for Assignment of the Glass Transition Temperature By Dynamic Mechanical Analysis, 2002.
- [49] ASTM D648-06 Standard Test Method for Deflection Temperature of Plastics, 2004.
- [50] ASTM D2240 -00 Standard Test Method for Durometer Hardness Properties of Plastics, 2002.
- [51] ASTM D1003-00 Standard Test Method for Haze of Transparent Plastics, 2000.
- [52] Howick, C. The bonding between PVC and phthalate esters. *Polymer* (1993): 1-4.
- [53] Ahmed, S., Mehmood, M., and Iqbal, R. Influence of dioctyl phthalate (DOP) on the mechanical, optical and thermal properties of formulations for the industrial manufacture of radiation sterilizable medical disposables. *Radiation Physics and Chemistry* 79 (2010): 339-342.
- [54] Liu, Z., Zhang, X., Zhu, X., Qi, Z., Wang, F., Li, R., and Choy, C. The influence of rubber particle spatial distribution on the fracture behavior of poly(vinyl chloride)/nitrile rubber blends. *Polymer* 39 (1998): 5027-5033.
- [55] Roudaut, G., Simatos, D., Champion, D., Contreras-Lopez, E., and Meste, M. Molecular mobility around the glass transition temperature. *Innovative Food Science and Engineering Technologies* 5 (2004): 127-134.
- [56] Ito, M., and Nagai, K. Analysis of degradation mechanism of plasticized PVC under artificial aging conditions. *Polymer Degradation and Stability* 92 (2007): 260-270.
- [57] Ramesh, S., Liew, C., Morris, E., and Durairaj, R. Effect of PVC on ionic conductivity, crystallographic structural, morphological and thermal characterizations in PMMA-PVC blend-based polymer electrolytes. *Thermochimica Acta* 511 (2010): 140-146.
- [58] Petchwattana, N. Toughening of Poly(lactic acid) by Using Elastomeric Particles And Biodegradable Copolyesters. Degree of Doctor of Engineering Program

Department of Chemical engineering Faculty of Engineering Chulalongkorn University, 2010.

[59] Price of Plasticizer [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:

[http://www.eastman.com/Company/News\\_Center/2010/Pages/Eastman\\_Increases\\_PLASTICIZERS\\_Prices\\_on\\_May\\_1.aspx](http://www.eastman.com/Company/News_Center/2010/Pages/Eastman_Increases_PLASTICIZERS_Prices_on_May_1.aspx) [2554, 24 มีนาคม].

[60] ราคาเม็ดพลาสติกในประเทศไทย [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:

<http://www.plastic.oie.go.th/PlasticPriceThai.aspx> [2554, 24 มีนาคม].



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

การทนต่อแรงดึง (Tensile properties)

ภาคผนวก ก. 1: ค่ามอดูลัสของแรงดึง (Tensile modulus) ของ PVC/DOP และ PVC/DOP/ ยางนาโน

ปริมาณ DOP (phr)	ปริมาณ ยางนาโน (phr)	ค่ามอดูลัสของแรงดึง (GPa)	
		ยางนาโน NBR	ยางนาโน SBR
15	0	2.16±0.05	
	1	2.03±0.05	1.87±0.03
	3	1.90±0.02	1.76±0.02
	5	1.81±0.05	1.57±0.02
	7	1.76±0.08	1.52±0.02
	9	1.72±0.02	1.15±0.07
	11	1.50±0.02	1.15±0.07
	20	0	1.53±0.05
1		1.35±0.02	1.15±0.07
3		1.42±0.03	1.08±0.01
5		1.39±0.05	1.15±0.06
7		1.35±0.01	0.87±0.03
9		1.24±0.09	0.83±0.02
11		1.16±0.08	0.83±0.01

ปริมาณ DOP (phr)	ปริมาณ ยางนาโน (phr)	ค่ามอดูลัสของแรงดึง (GPa)	
		ยางนาโน NBR	ยางนาโน SBR
25	0	1.00±0.07	
	1	0.15±0.02	0.069±0.004
	3	0.14±0.02	0.024±0.002
	5	0.11±0.02	0.019±0.001
	7	0.11±0.04	0.037±0.006
	9	0.09±0.02	0.030±0.005
	11	0.08±0.03	0.017±0.002
30	0	0.002±0.003	
	1	0.013±0.002	0.015±0.001
	3	0.012±0.003	0.014±0.002
	5	0.012±0.003	0.011±0.002
	7	0.009±0.001	0.009±0.003
	9	0.008±0.002	0.008±0.002
	11	0.007±0.001	0.007±0.001

PVC คอมพาวนด์ เท่ากับ 2.69±0.06 GPa.

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.2: ค่าแรงดึง (Tensile strength) ของ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน

ปริมาณ DOP (phr)	ปริมาณ ยางนาโน (phr)	ค่าแรงดึง (MPa)	
		ยางนาโน NBR	ยางนาโน SBR
15	0	55.54±0.08	
	1	54.16±0.05	54.17±0.06
	3	50.02±0.04	45.14±0.02
	5	48.09±0.10	37.44±0.18
	7	45.06±0.08	43.11±0.02
	9	43.17±0.05	35.51±0.02
	11	40.36±0.27	35.53±0.01
20	0	39.84±0.05	
	1	36.46±0.08	29.92±0.08
	3	36.41±0.12	27.44±0.16
	5	36.03±0.08	29.35±0.07
	7	35.41±0.11	23.52±0.08
	9	34.03±0.05	22.70±0.06
	11	31.04±0.05	22.03±0.04

ศูนย์วิจัยและพัฒนาวัสดุ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปริมาณ DOP (phr)	ปริมาณ ยางนาโน (phr)	ค่าแรงดึง (MPa)	
		ยางนาโน NBR	ยางนาโน SBR
25	0	26.09±0.07	
	1	25.02±0.04	21.63±0.02
	3	24.96±0.05	19.15±0.08
	5	24.16±0.11	19.54±0.05
	7	23.70±0.06	18.57±0.05
	9	23.16±0.05	20.40±0.13
	11	21.67±0.08	19.57±0.05
30	0	21.96±0.07	
	1	21.71±0.07	21.81±0.08
	3	20.50±0.06	19.94±0.05
	5	20.57±0.05	19.48±0.06
	7	20.43±0.08	18.44±0.05
	9	20.14±0.05	19.48±0.06
	11	19.17±0.05	18.44±0.05

PVC คอมพาวนด์ เท่ากับ 65.50±0.08 MPa

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.3: ค่าระยะยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) ของ PVC/DOP และ PVC/DOP/  
ยางนาโน

ปริมาณ DOP (phr)	ปริมาณ ยางนาโน (phr)	ระยะยืด ณ จุดขาด (%)	
		ยางนาโน NBR	ยางนาโน SBR
15	0	15.03±0.14	
	1	14.45±0.29	17.30±0.26
	3	15.27±0.23	18.51±0.32
	5	25.14±0.07	26.47±0.05
	7	26.49±0.11	33.01±0.34
	9	32.93±0.07	41.23±0.14
	11	40.01±0.25	50.27±0.13
20	0	119.90±0.06	
	1	139.92±0.47	145.94±0.06
	3	145.88±0.24	152.08±0.31
	5	150.62±0.27	145.70±0.18
	7	155.43±0.18	170.87±0.38
	9	160.97±0.05	188.23±0.27
	11	164.29±0.32	188.18±0.06



ปริมาณ DOP (phr)	ปริมาณ ยางนาโน (phr)	ระยะยืด ณ จุดขาด (%)	
		ยางนาโน NBR	ยางนาโน SBR
25	0	179.07±0.05	
	1	199.61±0.17	226.06±0.11
	3	203.98±0.04	227.21±0.36
	5	211.77±0.15	231.00±0.48
	7	220.76±0.28	226.06±0.11
	9	229.86±0.15	224.16±0.39
	11	240.04±0.45	238.04±0.05
30	0	205.00±0.05	
	1	216.06±0.11	231.80±0.27
	3	229.81±0.06	232.11±0.05
	5	230.06±0.18	236.04±0.16
	7	235.03±0.35	245.72±0.07
	9	242.01±0.27	245.29±0.11
	11	244.20±0.15	246.07±0.08

PVC คอมพาวนด์ เท่ากับ 10.08±0.24 %

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

การทนต่อแรงดัดโค้ง (Flexural properties)

ภาคผนวก ข.1: ค่ามอดูลัสของแรงดัดโค้ง (Flexural modulus) ของ PVC/DOP และ PVC/DOP/ ยางนาโน

ปริมาณ DOP (phr)	ปริมาณ ยางนาโน (phr)	ค่ามอดูลัสของแรงดัดโค้ง (GPa)	
		ยางนาโน NBR	ยางนาโน SBR
15	0	3.89±0.04	
	1	3.88±0.03	3.55±0.04
	3	3.69±0.05	3.34±0.01
	5	3.28±0.06	3.10±0.03
	7	2.89±0.07	2.30±0.02
	9	2.50±0.02	2.55±0.06
	11	2.03±0.03	1.95±0.04
20	0	3.69±0.07	
	1	3.21±0.02	2.61±0.05
	3	3.19±0.04	2.10±0.07
	5	2.87±0.03	2.35±0.04
	7	2.64±0.02	2.11±0.03
	9	1.57±0.07	1.62±0.05
	11	0.98±0.06	0.91±0.01

ปริมาณ DOP (phr)	ปริมาณ ยางนาโน (phr)	ค่ามอดูลัสของแรงดัดโค้ง (GPa)	
		ยางนาโน NBR	ยางนาโน SBR
25	0	1.67±0.06	
	1	1.34±0.03	0.87±0.04
	3	1.28±0.05	0.73±0.02
	5	1.06±0.02	0.72±0.03
	7	0.93±0.06	0.71±0.07
	9	0.84±0.03	0.74±0.05
	11	0.44±0.07	0.68±0.04
30	0	0.59±0.03	
	1	0.44±0.03	0.25±0.03
	3	0.41±0.05	0.27±0.05
	5	0.40±0.03	0.28±0.02
	7	0.30±0.02	0.25±0.07
	9	0.16±0.02	0.27±0.02
	11	0.12±0.08	0.24±0.11

PVC คอมพาวนด์ เท่ากับ 4.85±0.02 GPa.

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข.2: ค่าแรงดัดโค้ง (Flexural strength) ของ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน

ปริมาณ DOP (phr)	ปริมาณ ยางนาโน (phr)	ค่าแรงดัดโค้ง (MPa)	
		ยางนาโน NBR	ยางนาโน SBR
15	0	107.37±0.02	
	1	99.45±0.04	96.59±0.04
	3	89.63±0.06	86.83±0.03
	5	79.87±0.05	82.44±0.05
	7	74.82±0.06	53.84±0.07
	9	61.04±0.03	60.12±0.06
	11	45.62±0.02	45.15±0.04
20	0	90.56±0.07	
	1	83.03±0.05	70.12±0.02
	3	78.95±0.03	61.80±0.04
	5	73.03±0.02	63.51±0.03
	7	68.23±0.05	58.32±0.05
	9	42.98±0.06	45.75±0.07
	11	29.55±0.04	30.51±0.02

ศูนย์วิจัยพลาสติก  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปริมาณ DOP (phr)	ปริมาณ ยางนาโน (phr)	ค่าแรงดัดโค้ง (GPa)	
		ยางนาโน NBR	ยางนาโน SBR
25	0	44.12±0.04	
	1	37.53±0.03	29.37±0.05
	3	38.88±0.05	25.05±0.03
	5	33.79±0.04	24.97±0.02
	7	29.97±0.05	24.29±0.06
	9	27.09±0.04	24.68±0.04
	11	14.26±0.06	23.06±0.03
30	0	18.2±0.06	
	1	16.36±0.03	10.55±0.04
	3	13.49±0.04	10.49±0.07
	5	14.65±0.07	10.72±0.09
	7	12.38±0.05	9.87±0.06
	9	7.19±0.02	10.08±0.07
	11	5.49±0.06	9.49±0.02

PVC คอมพาวนด์ เท่ากับ 128.30±0.11 MPa

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

การทนต่อแรงกระแทก (Impact properties)

ภาคผนวก ค. 1: ค่าการดูดซับพลังงานกระแทก (Impact energy) ของ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน

ปริมาณ DOP (phr)	ปริมาณ ยางนาโน (phr)	ค่าการดูดซับพลังงาน (kJ/m <sup>2</sup> )	
		ยางนาโน NBR	ยางนาโน SBR
15	0	4.84±0.16	
	1	5.39±0.12	2.25±0.14
	3	7.31±0.37	2.45±0.35
	5	6.01±0.26	2.83±0.26
	7	9.30±0.18	4.40±0.15
	9	10.79±0.15	3.90±0.24
	11	11.91±0.37	4.63±0.26
	20	0	8.64±0.20
1		9.11±0.17	5.17±0.06
3		10.95±0.26	5.61±0.25
5		9.8±0.35	6.20±0.12
7		13.1±0.04	6.91±0.25
9		11.9±0.18	7.49±0.33
11		14.43±0.26	9.04±0.32

ปริมาณ DOP (phr)	ปริมาณ ยางนาโน (phr)	ค่าการดูดซับพลังงาน (kJ/m <sup>2</sup> )	
		ยางนาโน NBR	ยางนาโน SBR
25	0	19.17±0.14	
	1	22.65±0.14	10.83±0.13
	3	24.41±0.25	13.25±0.15
	5	29.61±0.12	17.76±0.25
	7	27.81±0.38	14.75±0.24
	9	26.10±0.33	13.72±0.23
	11	31.12±0.26	19.43±0.16
30	0	85.95±0.21	
	1	88.45±0.33	88.45±0.22
	3	90.94±0.15	85.31±0.15
	5	93.15±0.23	88.77±0.23
	7	92.50±0.02	90.94±0.17
	9	92.52±0.12	91.65±0.10
	11	99.81±0.28	93.06±0.15

PVC คอมพาวนด์ เท่ากับ 3.03±0.25 kJ/m<sup>2</sup>

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

อุณหภูมิแปรสภาพแก้ว (Glass transition temperature)

ภาคผนวก ง.1: อุณหภูมิแปรสภาพแก้ว (Glass transition temperature) ของ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน

ปริมาณ DOP (phr)	ปริมาณ ยางนาโน (phr)	อุณหภูมิ (°C)	
		ยางนาโน NBR	ยางนาโน SBR
15	0	73.33±0.57	
	1	70.70±1.52	70.00±1.00
	3	70.00±1.00	69.70±0.32
	5	72.00±1.00	70.70±1.15
	7	71.30±1.52	71.30±0.58
	9	70.33±0.15	68.70±0.56
	11	70.00±1.00	69.70±0.25
20	0	66.27±0.76	
	1	64.32±1.53	63.30±1.53
	3	65.34±0.58	63.70±0.58
	5	65.32±0.58	62.20±1.73
	7	64.00±1.00	63.20±0.29
	9	63.70±0.58	64.30±0.58
	11	64.30±0.44	63.72±2.01



ปริมาณ DOP (phr)	ปริมาณ ยางนาโน (phr)	อุณหภูมิ (°C)	
		ยางนาโน NBR	ยางนาโน SBR
25	0	56.30±0.62	
	1	55.30±0.29	54.00±1.00
	3	55.34±0.58	54.70±0.58
	5	53.33±1.16	55.00±1.00
	7	54.30±0.58	54.31±0.48
	9	54.72±0.36	53.72±1.15
	11	55.11±1.00	54.50±1.00
30	0	50.27±0.40	
	1	49.80±0.29	48.30±0.58
	3	49.20±0.40	49.30±0.25
	5	50.00±1.00	50.00±1.00
	7	49.00±1.00	48.30±0.43
	9	49.31±1.53	48.00±1.00
	11	49.00±1.00	48.70±0.58

PVC คอมพาวนด์ เท่ากับ 89.90±0.10 °C

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ

อุณหภูมิการโค้งงอด้วยความร้อน (Heat deflection temperature)

ภาคผนวก จ. 1: อุณหภูมิการโค้งงอด้วยความร้อน ( Heat deflection temperature) ของ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน

ปริมาณ DOP (phr)	ปริมาณ ยางนาโน (phr)	อุณหภูมิ (°C)	
		ยางนาโน NBR	ยางนาโน SBR
20	0	56.87±0.23	
	1	53.33±0.58	48.67±0.47
	5	51.24±0.40	44.53±0.35
	11	45.43±0.28	42.00±0.15
30	0	46.33±0.41	
	1	45.33±0.18	45.00±0.22
	5	45.00±0.25	41.00±1.00
	11	43.00±0.35	38.67±0.24

PVC คอมพาวนด์ เท่ากับ 65.33±0.58 °C

ภาคผนวก จ

ความแข็ง (Hardness)

ภาคผนวก จ.1: ความแข็ง (Hardness) ของ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน

ปริมาณ DOP (phr)	ปริมาณ ยางนาโน (phr)	ความแข็ง	
		ยางนาโน NBR	ยางนาโน SBR
15	0	96.00±1.00	
	1	94.47±0.38	95.00±1.00
	3	93.47±0.58	93.00±0.00
	5	93.33±0.23	92.30±0.58
	7	93.00±1.00	91.30±1.15
	9	92.33±0.58	91.70±0.56
	11	90.33±1.53	89.70±0.57
20	0	94.33±1.00	
	1	92.33±2.08	93.70±0.53
	3	91.67±2.88	90.30±0.58
	5	90.33±0.57	89.30±1.15
	7	89.33±1.15	89.00±1.00
	9	89.67±0.57	89.30±1.15
	11	89.33±0.58	88.30±0.58

ปริมาณ DOP (phr)	ปริมาณ ยางนาโน (phr)	ความแข็ง	
		ยางนาโน NBR	ยางนาโน SBR
25	0	93.67±1.15	
	1	91.00±1.00	92.30±1.10
	3	90.33±0.58	90.00±1.00
	5	89.67±0.57	89.70±0.58
	7	89.00±1.00	88.30±0.42
	9	88.33±0.45	89.00±1.15
	11	87.33±1.13	87.00±0.28
30	0	93.33±0.57	
	1	90.33±0.57	90.70±0.58
	3	89.67±0.33	90.00±1.73
	5	89.00±1.00	87.30±1.00
	7	87.00±0.27	86.00±0.00
	9	86.33±1.51	85.00±0.00
	11	85.00±1.13	84.70±0.57

PVC คอมพาวนด์ เท่ากับ 98.33±0.58

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ความใส/ทึบ (Transparency)

ภาคผนวก ข.1: ความใส/ทึบ (Transparency) ของ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน

ปริมาณ DOP (phr)	ปริมาณ ยางนาโน (phr)	Haze (%)	
		ยางนาโน NBR	ยางนาโน SBR
15	0	20.33±0.76	
	1	33.77±0.06	31.26±0.05
	3	35.56±0.05	27.47±0.15
	5	39.58±0.52	29.33±1.00
	7	41.89±1.02	30.50±0.78
	9	44.56±0.51	36.03±0.06
	11	57.98±0.55	37.73±0.75
20	0	13.08±0.30	
	1	25.34±0.65	21.70±0.36
	3	33.26±0.25	18.63±0.06
	5	38.43±0.05	21.43±0.51
	7	45.56±0.51	25.47±0.11
	9	42.66±0.31	31.23±0.06
	11	55.67±0.28	35.03±0.50

ปริมาณ DOP (phr)	ปริมาณ ยางนาโน (phr)	Haze (%)	
		ยางนาโน NBR	ยางนาโน SBR
25	0	9.20±0.17	
	1	19.70±0.62	14.03±0.33
	3	24.16±0.15	16.60±0.10
	5	30.16±0.15	21.23±0.15
	7	45.34±0.31	27.07±0.06
	9	41.23±0.20	26.77±0.30
	11	44.44±0.05	28.93±0.21
30	0	5.32±0.24	
	1	12.10±0.45	9.55±0.13
	3	17.40±0.36	14.24±0.05
	5	23.46±0.05	22.03±0.06
	7	32.38±0.07	24.90±0.10
	9	36.53±0.11	26.13±0.15
	11	42.73±0.25	26.90±0.17

PVC คอมพาวนด์ เท่ากับ 34.83±0.15

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ช

ความหนาแน่น (Density)

ภาคผนวก ช.1: ความหนาแน่น (Density) ของ PVC/DOP และ PVC/DOP/ยางนาโน

ปริมาณ DOP (phr)	ปริมาณ ยางนาโน (phr)	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	
		ยางนาโน NBR	ยางนาโน SBR
15	0	1.31±0.02	
	1	1.30±0.01	1.30±0.01
	3	1.29±0.03	1.29±0.01
	5	1.30±0.01	1.29±0.01
	7	1.29±0.03	1.26±0.02
	9	1.28±0.02	1.29±0.01
	11	1.27±0.01	1.27±0.02
20	0	1.28±0.02	
	1	1.26±0.02	1.27±0.01
	3	1.30±0.01	1.28±0.01
	5	1.26±0.02	1.27±0.02
	7	1.30±0.02	1.26±0.01
	9	1.27±0.03	1.22±0.05
	11	1.26±0.04	1.24±0.03

ปริมาณ DOP (phr)	ปริมาณ ยางนาโน (phr)	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	
		ยางนาโน NBR	ยางนาโน SBR
25	0	1.27±0.01	
	1	1.26±0.04	1.25±0.04
	3	1.26±0.01	1.27±0.02
	5	1.27±0.05	1.26±0.01
	7	1.25±0.04	1.24±0.04
	9	1.27±0.01	1.23±0.03
	11	1.25±0.04	1.24±0.04
30	0	1.26±0.02	
	1	1.26±0.04	1.25±0.04
	3	1.26±0.02	1.27±0.01
	5	1.27±0.01	1.25±0.03
	7	1.24±0.01	1.23±0.01
	9	1.24±0.02	1.23±0.02
	11	1.24±0.02	1.23±0.02

PVC คอมพาวนด์ เท่ากับ 1.35±0.01 g/cm<sup>3</sup>

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวัฒนศิษย์ ผดุงเศรษฐกิจ เกิดเมื่อวันที่ 23 กันยายน พ.ศ. 2529 ที่จังหวัด ตัง เข้าศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาที่โรงเรียน สภาราชนิ จ.ตัง สำเร็จการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี ในปีการศึกษา 2551 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย