

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสร้างเครื่องมือ "C₁" เพื่อใช้ตรวจสอบ modulus ของยาง
โดยการ stress-strain



ร/พ.
ก323ก
2537

นายกวิล ชูวิเชียร
นายชนบดี ธนพัชรศิริ

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....
วัน,เดือน,ปี.....

.b1253254x

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2537

CONSTRUCTION OF THE "C₁" APPARATUS FOR MODULUS
TESTING VIA STRESS-STRAIN MEASUREMENT

MR. KAVIN CHOOVICHIAN
MR. CHANABORDEE TANAPATCHARASIRI

A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of
Bachelor of Science
Department of industrial chemistry
Faculty of Science
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

หัวข้อโครงการพิเศษ

การสร้างเครื่องมือ “ C_1 ” เพื่อใช้ตรวจสอบ modulus ของยาง
โดยการ stress-strain

โดย

นายกวีล ชูวิเชียร
นายชนบดี ธนพัชรศิริ

ภาควิชา

เคมีอุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.ประเสริฐ คุณคำชู

ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์

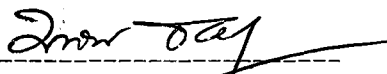
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

อนุมัติให้นับโครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

หัวหน้าภาค

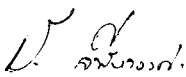
(ผศ.ดร.เผชญชัย ไชยสิทธิ์)

คณะกรรมการโครงการพิเศษ



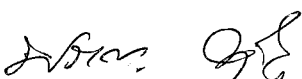
(ผศ.ดร.มาลินี ชัยคุกกิจสินธ์)

ประธานกรรมการ



(อ.ปัทมา ลิฬหาวงศ์)

กรรมการ



(ดร.ประเสริฐ คุณคำชู)

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การสร้างเครื่องมือ “ C_1 ” เพื่อใช้ตรวจสอบ modulus ของยาง
	โดยการ stress-strain
โดย	นายกวีล ชูวิเชียร
	นายชนบท ชนพัชรศิริ
ภาควิชา	เคมีอุตสาหกรรม
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ประเสริฐ คุณคำชู
ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม	คณะวิทยาศาสตร์
ปีการศึกษา	2537

บทคัดย่อ

เป็นที่ทราบกันดีว่า ปริมาณการเชื่อมโยงมีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์อย่างมาก เช่น สมบัติเชิงกล และความหนาแน่น เป็นต้น ดังนั้นการศึกษาปริมาณการเชื่อมโยงและอิทธิพลของการเชื่อมโยงจึงเป็นที่สนใจ โดย Flory และ Rehner ได้เสนอสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการบวมตัวและปริมาณการเชื่อมโยง สมการนี้จะเกี่ยวข้องกับค่า polymer-solvent interaction parameter ถ้าเลือกใช้ค่าผิดแล้ว ค่าที่คำนวณได้โดยสมการนี้จะผิดด้วยเช่นกัน ต่อมา Mooney ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการยืดหยุ่นและปริมาณการเชื่อมโยง Mooney ได้เสนอความสัมพันธ์นี้ในรูปสมการของ Mooney ซึ่งเกี่ยวข้องกับค่า C_1 โดยค่านี้เกี่ยวข้องโดยตรงกับปริมาณการเชื่อมโยงของพอลิเมอร์

ในโครงการพิเศษได้สร้างเครื่องมือตามทฤษฎีของ Mooney เพื่อทำการหาปริมาณการเชื่อมโยง โดยเปรียบเทียบค่าที่หาได้กับค่าที่ได้จากการหาตามสมการของ Flory-Rhener จากการทดลองพบว่า ค่าที่ได้จากการหาโดยเครื่องมือ “ C_1 ” มีความสอดคล้องกับค่าที่ได้จากสมการของ Flory-Rhener ในขณะที่ค่า C_2 ตามสมการของ Mooney ไม่ขึ้นกับชนิดของพอลิเมอร์และปริมาณการเชื่อมโยง และเมื่อปริมาณการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นแล้ว เวลาที่ใช้ในการวัดจะเพิ่มขึ้น

กิติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จลงได้ด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลหลายฝ่าย ผู้จัดทำโครงการพิเศษจึงใคร่ขอขอบพระคุณทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ

ขอขอบพระคุณ ดร.ประเสริฐ คุณคำชู ที่กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำ ตลอดจนให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงานโครงการพิเศษนี้มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษ ที่ช่วยตรวจสอบและแก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้ให้ถูกต้องยิ่งขึ้น

นอกเหนือจากบุคคลที่ได้กล่าวไปแล้วยังมีบุคคลอีกหลายท่านที่ให้ความช่วยเหลือจนโครงการพิเศษนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ทางผู้จัดทำใคร่ขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

นายกวีล ชูวิเชียร

นายชนบดี ธนพัชรศิริ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อปัญหาพิเศษภาษาไทย	ก
บทคัดย่อปัญหาพิเศษภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญตาราง	จ
สารบัญรูป	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตการวิจัย	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	2
บทที่ 3 การทดลองและการดำเนินการ	8
3.1 การออกแบบและสร้างเครื่องมือ "C ₁ "	8
3.1.1 หลักการทำงานของเครื่องมือ "C ₁ "	14
3.1.2 เปรียบเทียบการทำงานของเครื่อง "C ₁ " เดิมของ Mooney กับเครื่องมือที่ออกแบบขึ้นใหม่	14
3.2 ส่วนของการทดสอบเครื่องมือ	15
3.2.1 สารเคมีที่ใช้	15
3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้	15
3.2.3 การเตรียมชิ้นงาน	16
3.2.4 การทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากวิธี stress-strain กับ วิธี swelling	17
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์	22
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	66
ภาคผนวก	ผ1
บรรณานุกรม	

สารบัญตาราง

	หน้า
สำหรับชิ้นงานที่เตรียมจากยางธรรมชาติใช้ปริมาณซัลเฟอร์ 0.5 phr	
ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดและพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างที่เตรียม	
ในการทดสอบแบบ stress-strain	23
ตารางที่ 4.2 แสดงการหา $1/\lambda$ และ $F/\{2(\lambda-(1/\lambda^2))\}$	23
ตารางที่ 4.3 แสดงการหา volume fraction ในวิธี swelling	25
ตารางที่ 4.4 แสดงการหา crosslink density	25
สำหรับชิ้นงานที่เตรียมจากยางธรรมชาติใช้ปริมาณซัลเฟอร์ 1.0 phr	
ตารางที่ 4.5 แสดงขนาดและพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างที่เตรียม	
ในการทดสอบแบบ stress-strain	26
ตารางที่ 4.6 แสดงการหา $1/\lambda$ และ $F/\{2(\lambda-(1/\lambda^2))\}$	26
ตารางที่ 4.7 แสดงการหา volume fraction ในวิธี swelling	28
ตารางที่ 4.8 แสดงการหา crosslink density	28
สำหรับชิ้นงานที่เตรียมจากยางธรรมชาติใช้ปริมาณซัลเฟอร์ 2.0 phr	
ตารางที่ 4.9 แสดงขนาดและพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างที่เตรียม	
ในการทดสอบแบบ stress-strain	29
ตารางที่ 4.10 แสดงการหา $1/\lambda$ และ $F/\{2(\lambda-(1/\lambda^2))\}$	29
ตารางที่ 4.11 แสดงการหา volume fraction ในวิธี swelling	31
ตารางที่ 4.12 แสดงการหา crosslink density	31
สำหรับชิ้นงานที่เตรียมจากยางธรรมชาติปริมาณ DCP 0.5 phr	
ตารางที่ 4.13 แสดงขนาดและพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างที่เตรียม	
ในการทดสอบแบบ stress-strain	32
ตารางที่ 4.14 แสดงการหา $1/\lambda$ และ $F/\{2(\lambda-(1/\lambda^2))\}$	32
ตารางที่ 4.15 แสดงการหา volume fraction ในวิธี swelling	34
ตารางที่ 4.16 แสดงการหา crosslink density	34
สำหรับชิ้นงานที่เตรียมจากยางธรรมชาติใช้ปริมาณ DCP 1.0 phr	
ตารางที่ 4.17 แสดงขนาดและพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างที่เตรียม	
ในการทดสอบแบบ stress-strain	35
ตารางที่ 4.18 แสดงการหา $1/\lambda$ และ $F/\{2(\lambda-(1/\lambda^2))\}$	35
ตารางที่ 4.19 แสดงการหา volume fraction ในวิธี swelling	37

สารบัญตาราง(ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 4.20 แสดงการหา crosslink density	37
สำหรับชิ้นงานที่เตรียมจากยางธรรมชาติใช้ปริมาณ DCP 1.5 phr	
ตารางที่ 4.21 แสดงขนาดและพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างที่เตรียม	
ในการทดสอบแบบ stress-strain	38
ตารางที่ 4.22 แสดงการหา $1/\lambda$ และ $F/\{2(\lambda-(1/\lambda^2))\}$	38
ตารางที่ 4.23 แสดงการหา volume fraction ในวิธี swelling	40
ตารางที่ 4.24 แสดงการหา crosslink density	40
สำหรับชิ้นงานที่เตรียมจากยาง SBR 1502 ใช้ปริมาณซัลเฟอร์ 0.5 phr	
ตารางที่ 4.25 แสดงขนาดและพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างที่เตรียม	
ในการทดสอบแบบ stress-strain	41
ตารางที่ 4.26 แสดงการหา $1/\lambda$ และ $F/\{2(\lambda-(1/\lambda^2))\}$	41
ตารางที่ 4.27 แสดงการหา volume fraction ในวิธี swelling	43
ตารางที่ 4.28 แสดงการหา crosslink density	43
สำหรับชิ้นงานที่เตรียมจากยาง SBR 1502 ใช้ปริมาณซัลเฟอร์ 1.0 phr	
ตารางที่ 4.29 แสดงขนาดและพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างที่เตรียม	
ในการทดสอบแบบ stress-strain	44
ตารางที่ 4.30 แสดงการหา $1/\lambda$ และ $F/\{2(\lambda-(1/\lambda^2))\}$	44
ตารางที่ 4.31 แสดงการหา volume fraction ในวิธี swelling	46
ตารางที่ 4.32 แสดงการหา crosslink density	46
สำหรับชิ้นงานที่เตรียมจากยาง SBR 1502 ใช้ปริมาณซัลเฟอร์ 2.0 phr	
ตารางที่ 4.33 แสดงขนาดและพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างที่เตรียม	
ในการทดสอบแบบ stress-strain	47
ตารางที่ 4.34 แสดงการหา $1/\lambda$ และ $F/\{2(\lambda-(1/\lambda^2))\}$	47
ตารางที่ 4.35 แสดงการหา volume fraction ในวิธี swelling	49
ตารางที่ 4.36 แสดงการหา crosslink density	49
สำหรับชิ้นงานที่เตรียมจากยาง SBR 1502 ใช้ปริมาณ DCP 0.5 phr	
ตารางที่ 4.37 แสดงขนาดและพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างที่เตรียม	
ในการทดสอบแบบ stress-strain	50
ตารางที่ 4.38 แสดงการหา $1/\lambda$ และ $F/\{2(\lambda-(1/\lambda^2))\}$	50
ตารางที่ 4.39 แสดงการหา volume fraction ในวิธี swelling	52
ตารางที่ 4.40 แสดงการหา crosslink density	52

สารบัญตาราง(ต่อ)

	หน้า
สำหรับชิ้นงานที่เตรียมจากยาง SBR 1502 ใช้ปริมาณ DCP 1.0 phr	
ตารางที่ 4.41 แสดงขนาดและพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างที่เตรียม ในการทดสอบแบบ stress-strain	53
ตารางที่ 4.42 แสดงการหา $1/\lambda$ และ $F/[2(\lambda - (1/\lambda^2))]$	53
ตารางที่ 4.43 แสดงการหา volume fraction ในวิธี swelling	55
ตารางที่ 4.44 แสดงการหา crosslink density	55
สำหรับชิ้นงานที่เตรียมจากยาง SBR 1502 ใช้ปริมาณ DCP 1.5 phr	
ตารางที่ 4.45 แสดงขนาดและพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างที่เตรียม ในการทดสอบแบบ stress-strain	56
ตารางที่ 4.46 แสดงการหา $1/\lambda$ และ $F/[2(\lambda - (1/\lambda^2))]$	56
ตารางที่ 4.47 แสดงการหา volume fraction ในวิธี swelling	58
ตารางที่ 4.48 แสดงการหา crosslink density	58
ตารางในส่วนของภาคผนวก	
สำหรับชิ้นงานที่เตรียมจากยางธรรมชาติใช้ปริมาณซิลเฟอร์ 0.5 phr	
ตาราง ก1 แสดงแรงที่ใช้ในการดึงชิ้นงานตัวอย่างที่เวลาต่าง ๆ จนน้ำหนักคงที่	ผ1
ตาราง ก2 แสดงน้ำหนักของตัวอย่างก่อนแช่ใน toluene	ผ2
ตาราง ก3 แสดงน้ำหนักหลังการแช่ใน toluene	ผ2
สำหรับชิ้นงานที่เตรียมจากยางธรรมชาติใช้ปริมาณซิลเฟอร์ 1.0 phr	
ตาราง ข1 แสดงแรงที่ใช้ในการดึงชิ้นงานตัวอย่างที่เวลาต่าง ๆ จนน้ำหนักคงที่	ผ3
ตาราง ข2 แสดงน้ำหนักของตัวอย่างก่อนแช่ใน toluene	ผ4
ตาราง ข3 แสดงน้ำหนักหลังการแช่ใน toluene	ผ4
สำหรับชิ้นงานที่เตรียมจากยางธรรมชาติใช้ปริมาณซิลเฟอร์ 2.0 phr	
ตาราง ค1 แสดงแรงที่ใช้ในการดึงชิ้นงานตัวอย่างที่เวลาต่าง ๆ จนน้ำหนักคงที่	ผ5
ตาราง ค2 แสดงน้ำหนักของตัวอย่างก่อนแช่ใน toluene	ผ6
ตาราง ค3 แสดงน้ำหนักหลังการแช่ใน toluene	ผ6
สำหรับชิ้นงานที่เตรียมจากยางธรรมชาติใช้ปริมาณ DCP 0.5 phr	
ตาราง ง1 แสดงแรงที่ใช้ในการดึงชิ้นงานตัวอย่างที่เวลาต่าง ๆ จนน้ำหนักคงที่	ผ7
ตาราง ง2 แสดงน้ำหนักของตัวอย่างก่อนแช่ใน toluene	ผ8
ตาราง ง3 แสดงน้ำหนักหลังการแช่ใน toluene	ผ8

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและแรงกดอัดกับ λ	5
รูปที่ 2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ $F/[2(\lambda - (1/\lambda^3))]$ กับ $1/\lambda$	7
รูปที่ 3.1 เครื่องมือ “C ₁ ” ที่สร้างขึ้นโดย Mooney	8
รูปที่ 3.2 เครื่องมือ “C ₁ ” ที่ได้รับการออกแบบขึ้นใหม่	9
รูปที่ 3.3 แกนหลักและฐานรองเครื่องชั่ง digital	10
รูปที่ 3.4 แกนรอง	11
รูปที่ 3.5 หัวจับชิ้นงานชนิดที่เคลื่อนที่ได้	12
รูปที่ 3.6 หัวจับชิ้นงานชนิดที่อยู่กับที่	13
รูปที่ 3.7 เครื่องชั่ง digital	13
รูปที่ 3.8 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบด้วยวิธี stress-strain	17
รูปที่ 3.9 die cutter และชิ้นงานรูป dumbbell	20
รูปที่ 3.10 รูปแสดงการทดลองโดยเครื่องมือ “C ₁ ”	20
รูปที่ 3.11 รูปแสดงการจับชิ้นงานด้วยหัวจับทั้งสอง	21
รูปที่ 3.12 รูปแสดงการกำหนดสเกลเริ่มต้น	21
สำหรับชิ้นงานที่เตรียมจากยางธรรมชาติใช้ปริมาณซัลเฟอร์ 0.5 phr	
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงน้ำหนักที่ใช้ในการดึงชิ้นงานที่เวลาต่าง ๆ	23
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ใช้ในการดึงกับเวลา	24
สำหรับชิ้นงานที่เตรียมจากยางธรรมชาติใช้ปริมาณซัลเฟอร์ 1.0 phr	
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงน้ำหนักที่ใช้ในการดึงชิ้นงานที่เวลาต่าง ๆ	26
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ใช้ในการดึงกับเวลา	27
สำหรับชิ้นงานที่เตรียมจากยางธรรมชาติใช้ปริมาณซัลเฟอร์ 2.0 phr	
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงน้ำหนักที่ใช้ในการดึงชิ้นงานที่เวลาต่าง ๆ	29
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ใช้ในการดึงกับเวลา	30
สำหรับชิ้นงานที่เตรียมจากยางธรรมชาติใช้ปริมาณ DCP 0.5 phr	
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงน้ำหนักที่ใช้ในการดึงชิ้นงานที่เวลาต่าง ๆ	32
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ใช้ในการดึงกับเวลา	33
สำหรับชิ้นงานที่เตรียมจากยางธรรมชาติใช้ปริมาณ DCP 1.0 phr	
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงน้ำหนักที่ใช้ในการดึงชิ้นงานที่เวลาต่าง ๆ	35
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ใช้ในการดึงกับเวลา	36

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
สำหรับชั้นงานที่เตรียมจากยางธรรมชาติใช้ปริมาณ DCP 1.5 phr	
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงน้ำหนักที่ใช้ในการดึงชั้นงานที่เวลาต่าง ๆ	38
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ใช้ในการดึงกับเวลา	39
สำหรับชั้นงานที่เตรียมจากยาง SBR 1502 ใช้ปริมาณซัลเฟอร์ 0.5 phr	
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงน้ำหนักที่ใช้ในการดึงชั้นงานที่เวลาต่าง ๆ	41
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ใช้ในการดึงกับเวลา	42
สำหรับชั้นงานที่เตรียมจากยาง SBR 1502 ใช้ปริมาณซัลเฟอร์ 1.0 phr	
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงน้ำหนักที่ใช้ในการดึงชั้นงานที่เวลาต่าง ๆ	44
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ใช้ในการดึงกับเวลา	45
สำหรับชั้นงานที่เตรียมจากยาง SBR 1502 ใช้ปริมาณซัลเฟอร์ 2.0 phr	
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงน้ำหนักที่ใช้ในการดึงชั้นงานที่เวลาต่าง ๆ	47
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ใช้ในการดึงกับเวลา	48
สำหรับชั้นงานที่เตรียมจากยาง SBR 1502 ใช้ปริมาณ DCP 0.5 phr	
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงน้ำหนักที่ใช้ในการดึงชั้นงานที่เวลาต่าง ๆ	50
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ใช้ในการดึงกับเวลา	51
สำหรับชั้นงานที่เตรียมจากยาง SBR 1502 ใช้ปริมาณ DCP 1.0 phr	
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงน้ำหนักที่ใช้ในการดึงชั้นงานที่เวลาต่าง ๆ	53
รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ใช้ในการดึงกับเวลา	54
สำหรับชั้นงานที่เตรียมจากยาง SBR 1502 ใช้ปริมาณ DCP 1.5 phr	
รูปที่ 4.23 กราฟแสดงน้ำหนักที่ใช้ในการดึงชั้นงานที่เวลาต่าง ๆ	56
รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ใช้ในการดึงกับเวลา	57
รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ crosslinking agent กับ crosslink density	59
รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการดึงรวม 4 ระยะ	61
รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง crosslink density กับ ปริมาณของซัลเฟอร์	62
รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง crosslink density กับ ปริมาณของ DCP	63
รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $1/\lambda$ กับ $F/\{2(\lambda-(1/\lambda^2))\}$ (สำหรับยางที่เตรียมแบบ s-cure)	64

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $1/\lambda$ กับ $F/\{2(\lambda-(1/\lambda^2))\}$ (สำหรับยางที่เตรียมแบบ peroxide-cure)	65
รูปในส่วนของภาคผนวก	
สำหรับชิ้นงานที่เตรียมจากยางธรรมชาติใช้ปริมาณซัลเฟอร์ 0.5 phr	
รูป ก กราฟแสดงน้ำหนักที่วัดได้หลังจากแช่ toluene	ผ2
สำหรับชิ้นงานที่เตรียมจากยางธรรมชาติใช้ปริมาณซัลเฟอร์ 1.0 phr	
รูป ข กราฟแสดงน้ำหนักที่วัดได้หลังจากแช่ toluene	ผ4
สำหรับชิ้นงานที่เตรียมจากยางธรรมชาติใช้ปริมาณซัลเฟอร์ 2.0 phr	
รูป ค กราฟแสดงน้ำหนักที่วัดได้หลังจากแช่ toluene	ผ6
สำหรับชิ้นงานที่เตรียมจากยางธรรมชาติใช้ปริมาณ DCP 0.5 phr	
รูป ง กราฟแสดงน้ำหนักที่วัดได้หลังจากแช่ toluene	ผ8
สำหรับชิ้นงานที่เตรียมจากยางธรรมชาติใช้ปริมาณ DCP 1.0 phr	
รูป จ กราฟแสดงน้ำหนักที่วัดได้หลังจากแช่ toluene	ผ10
สำหรับชิ้นงานที่เตรียมจากยางธรรมชาติใช้ปริมาณ DCP 1.5 phr	
รูป ฉ กราฟแสดงน้ำหนักที่วัดได้หลังจากแช่ toluene	ผ12
สำหรับชิ้นงานที่เตรียมจากยาง SBR 1502 ใช้ปริมาณซัลเฟอร์ 0.5 phr	
รูป ช กราฟแสดงน้ำหนักที่วัดได้หลังจากแช่ toluene	ผ14
สำหรับชิ้นงานที่เตรียมจากยาง SBR 1502 ใช้ปริมาณซัลเฟอร์ 1.0 phr	
รูป ซ กราฟแสดงน้ำหนักที่วัดได้หลังจากแช่ toluene	ผ16
สำหรับชิ้นงานที่เตรียมจากยาง SBR 1502 ใช้ปริมาณซัลเฟอร์ 2.0 phr	
รูป ฌ กราฟแสดงน้ำหนักที่วัดได้หลังจากแช่ toluene	ผ18
สำหรับชิ้นงานที่เตรียมจากยาง SBR 1502 ใช้ปริมาณ DCP 0.5 phr	
รูป ฎ กราฟแสดงน้ำหนักที่วัดได้หลังจากแช่ toluene	ผ20
สำหรับชิ้นงานที่เตรียมจากยาง SBR 1502 ใช้ปริมาณ DCP 1.0 phr	
รูป ฏ กราฟแสดงน้ำหนักที่วัดได้หลังจากแช่ toluene	ผ22
สำหรับชิ้นงานที่เตรียมจากยาง SBR 1502 ใช้ปริมาณ DCP 1.5 phr	
รูป ฎ กราฟแสดงน้ำหนักที่วัดได้หลังจากแช่ toluene	ผ24
รูป ฌ รูปกำหนดขนาดของแกนหลัก	ผ29
รูป ฌ รูปกำหนดขนาดของแกนรอง	ผ30
รูป ด รูปกำหนดขนาดของหัวจับชิ้นงานชนิดที่อยู่กับที่	ผ31

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูป ต รูปกำหนดขนาดของหัวจับชิ้นงานชนิดที่เคลื่อนที่ได้	ผ๓๒
รูป ถ รูปกำหนดขนาดของส่วนหมุดสปริงของหัวจับชิ้นงานชนิดที่เคลื่อนที่ได้	ผ๓๓

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการพิเศษ

ปริมาณการเกิดสายโซ่เชื่อมโยงจะมีความสัมพันธ์กับสมบัติของพอลิเมอร์ เช่น สมบัติเชิงกลต่างๆ, ความหนาแน่น หรือความสามารถในการละลาย เป็นต้น ในงานอุตสาหกรรมมีความจำเป็นที่จะต้องควบคุมสมบัติของพอลิเมอร์ให้เหมาะสมกับการใช้งาน เช่น งานที่ต้องทนต่อแรงกระทำมากๆ หรือต้องทนต่อการบิดงอและการเสีรูปร่าง พอลิเมอร์ควรมีปริมาณการเชื่อมโยง (crosslink density) มาก ดังนั้นการวัดปริมาณการเชื่อมโยงจึงมีความสำคัญมาก เพื่อใช้ในการบอกหรือกำหนดสมบัติของวัสดุ

วิธีการหาปริมาณการเชื่อมโยง (crosslink density) มีหลายวิธี วิธี swelling เป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถวัดปริมาณการเชื่อมโยงได้ง่ายและประหยัด แต่มีข้อเสียคือ ต้องใช้เวลาในการวัดนาน และต้องเลือกสารละลายที่เหมาะสมกับชนิดของพอลิเมอร์ นอกจากนี้ค่าที่วัดได้ยังขึ้นกับค่า polymer-solvent interaction constant นั้นแสดงว่าค่าที่วัดได้จะขึ้นกับชนิดของสารละลาย

การวัดปริมาณการเชื่อมโยงโดยการทดสอบมอดูลัส (modulus) ของพอลิเมอร์ด้วยวิธี stress-strain โดยเครื่องมือ C_1 ซึ่งจะอาศัยหลักการของทฤษฎีเชิงสถิติ (statistical theory) และสมการของ Mooney วิธีการทดสอบนี้จะง่ายและสะดวกกว่าวิธีอื่น จึงเหมาะที่จะนำไปใช้ในห้องปฏิบัติการทดสอบสมบัติพื้นฐานของยาง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาปริมาณการเชื่อมโยง ซึ่งเป็นสมบัติที่สำคัญในการบ่งบอกมอดูลัส (modulus) ของ elastomer และพอลิเมอร์ทั่วไป

2. ออกแบบ และสร้างเครื่องมือ C_1 ซึ่งเป็นเครื่องมืออย่างง่ายในการตรวจสอบปริมาณการเชื่อมโยง

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ออกแบบ และสร้างเครื่องมือ C_1 ซึ่งเป็นเครื่องมืออย่างง่ายในการศึกษาปริมาณการเชื่อมโยง

2. ทดสอบการหาปริมาณการเชื่อมโยงด้วยเครื่องมือ C_1 และเปรียบเทียบกับค่าปริมาณการเชื่อมโยงที่หาได้จากวิธี swelling

3. ทดลองหาค่าปริมาณการเชื่อมโยงของยางชนิดต่างๆ ว่าสามารถวัดโดยเครื่องมือ C_1 ได้หรือไม่

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

ปริมาณการเชื่อมโยง (crosslink density)

ปริมาณการเชื่อมโยงมีความสำคัญมากสำหรับพอลิเมอร์ เนื่องจากสมบัติต่าง ๆ หลายประการจะขึ้นอยู่กับปริมาณการเชื่อมโยง เช่น ความหนาแน่น, การละลาย, สมบัติเชิงกล เป็นต้น ปริมาณการเชื่อมโยงจะสามารถใช้ในการทำนาย และเปรียบเทียบสมบัติของวัสดุพอลิเมอร์ได้

การวัดหาปริมาณการเชื่อมโยงสามารถทำได้หลายวิธี วิธี swelling เป็นวิธีการหนึ่งซึ่งอาศัยสมบัติการบวมตัวของพอลิเมอร์ในสารละลาย ส่วนวิธีการวัดมอดูลัส โดยวิธี stress-strain ด้วยเครื่อง 'C₁' ก็เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่สามารถทำได้รวดเร็ว

วิธี swelling

การวัดหาปริมาณการเชื่อมโยงโดยวิธีการ swelling อาศัยการบวมตัวของพอลิเมอร์ในสารละลาย พอลิเมอร์ที่มีปริมาณการเชื่อมโยงมากจะมีการบวมตัวได้น้อยกว่าพอลิเมอร์ที่มีปริมาณการเชื่อมโยงน้อย เนื่องจากโครงร่างตาข่ายจะยึดสายโซ่หลักของพอลิเมอร์แต่ละสายโซ่เข้าไว้ด้วยกัน ทำให้การเคลื่อนที่ของสายโซ่หลักของพอลิเมอร์มีน้อยลงและการกระจายตัวของสารละลายแทรกเข้าในส่วน amorphous ของพอลิเมอร์เป็นไปได้ยาก การละลายและการบวมตัวของพอลิเมอร์ในสารละลายก็จะลดลง

Flory และ Rehner ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณการเชื่อมโยง (crosslink density) และปริมาณการบวมตัวของพอลิเมอร์ไว้ดังสมการ

$$-[\ln(1-V_r) + V_r - \chi V_r^2] = \delta V_0 M_c^{-1} V_r^{1/3} \quad (2.1)$$

เมื่อ χ เป็น ค่า polymer-solvent interaction constant

δ เป็น ความหนาแน่นของพอลิเมอร์

V_0 เป็น molar volume ของสารละลาย

V_r เป็น volume fraction ของพอลิเมอร์ที่เกิดการบวมตัว

M_c เป็น มวลโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่อยู่ระหว่างพันธะเชื่อมโยง

volume fraction ของพอลิเมอร์สามารถหาได้จากน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของพอลิเมอร์หลังจากเกิดการบวมตัว และความหนาแน่นของสารละลาย และพอลิเมอร์

จากสมการ (2.1) จะเห็นได้ว่าปริมาณการเชื่อมโยงจะขึ้นกับค่า polymer-solvent interaction constant (χ) ด้วย ค่า χ เป็นค่าที่ขึ้นกับชนิดของสารละลาย ถ้าการทดสอบหาปริมาณการเชื่อมโยงทำในสารละลายต่างชนิดกันค่า χ ที่ใช้ก็จะต่างกัน ทำให้ค่าปริมาณการเชื่อมโยงของพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันจะมีความแตกต่างกันด้วย ค่า χ นี้เป็นค่าหาได้จากคู่มือ ถ้าเลือกใช้ค่าผิดจะทำให้การคำนวณค่าผิดพลาดด้วย นอกจากนี้การเปรียบเทียบค่าก็ทำได้ยากเนื่องจากจะต้องเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการวัดในสารละลายชนิดเดียวกันเท่านั้น การเลือกใช้สารละลายที่ใช้ในการทดสอบจะต้องเลือกให้เหมาะสมด้วย ถ้าเลือกชนิดของสารละลายไม่เหมาะสมจะทำให้การบวมตัวของพอลิเมอร์ไม่สมบูรณ์ การทดสอบโดยวิธีนี้จึงมีความยุ่งยากในการเลือกชนิดสารละลาย และค่า χ

การวัดปริมาณการเชื่อมโยงด้วยวิธี swelling แม้ว่าจะง่าย สะดวก และประหยัด แต่ว่ามีข้อเสียคือ ต้องเสียเวลานานในการทดสอบ และค่าที่ได้ขึ้นกับชนิดของสารละลาย การวัดโดยวิธี stress-strain เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถวัดปริมาณการเชื่อมโยงได้สะดวก และมีความถูกต้องในระดับที่ใกล้เคียงกับวิธี swelling ได้

วิธี stress-strain โดยอาศัยเครื่องมือ "C₁"

การปรับปรุงและพัฒนาการวัดปริมาณการเชื่อมโยงโดยอาศัยเครื่องมือ "C₁" อาศัยทฤษฎีเชิงสถิติ (statistical theory) และสมการของ Mooney (6) วิธีนี้จะเป็นการวัดค่ามอดูลัสของพอลิเมอร์ที่มีการเชื่อมโยง โดยมอดูลัสของพอลิเมอร์จะเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากปริมาณการเชื่อมโยง ถ้าพอลิเมอร์นั้นมีปริมาณการเชื่อมโยงมากค่ามอดูลัสก็จะมีค่ามากเช่นกัน ในทางตรงข้ามถ้าพอลิเมอร์นั้นมีปริมาณการเชื่อมโยงน้อยค่ามอดูลัสก็จะมีค่าน้อย สมการที่เสนอโดย Mooney แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำต่อชิ้นงานต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่กับการยืดของพอลิเมอร์ ความสัมพันธ์นี้ขึ้นกับค่าในสมการ 2 ค่าคือ C₁ และ C₂ ซึ่งเป็นค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง โดยค่า C₁ นั้นจะขึ้นกับปริมาณการเชื่อมโยงตามทฤษฎีเชิงสถิติ ดังนั้นเมื่ออาศัยความสัมพันธ์ของ stress-strain ตามสมการของ Mooney และทฤษฎีเชิงสถิติจะสามารถหา ปริมาณการเชื่อมโยงได้

statistical theory

ทฤษฎีนี้เสนอโดย Mayer และผู้ร่วมงาน Mayer (6) ได้หาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติ elasticity ของยางกับสมบัติที่ได้จากการคำนวณทางสถิติจากโครงสร้างของโมเลกุลภายใต้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ โครงสร้างโมเลกุลของยางวัลคาไนซ์จะเป็นสายโซ่ยาวที่ถูกเชื่อมโยงกันด้วยโครงสร้างทางเคมีเป็นโครงร่างตาข่าย (network) ในสามมิติ จากโครงสร้างที่ทำให้อยู่ในรูปร่างง่ายที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้จะนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่าง stress strain ในแบบต่างๆ

ในปี ค.ศ. 1942 Wall ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่าง stress และ extension ratio ดังสมการต่อไปนี้

$$F = NkT (\lambda - 1/\lambda^2) \quad (2.2)$$

- เมื่อ F คือ แรงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่
 N คือ จำนวนสายโซ่ (ในโครงร่างตาข่าย) ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร
 k คือ ค่าคงที่ของ Boltzmann
 T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์
 λ คือ extension ratio

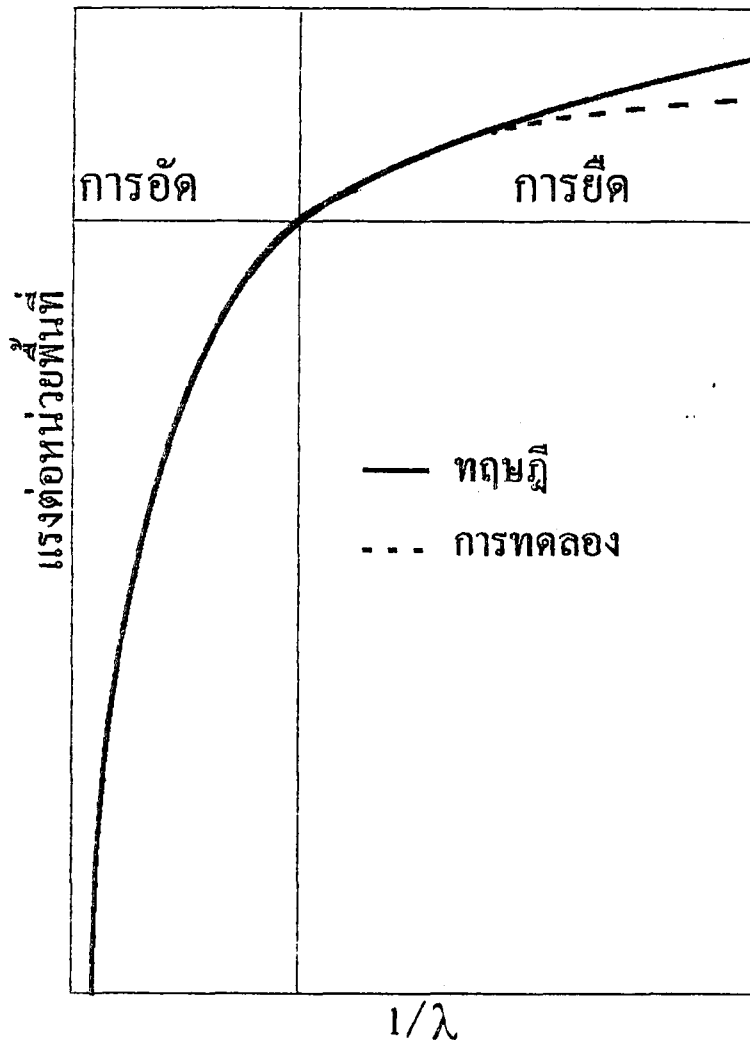
นอกจาก stress จะขึ้นกับ strain แล้วยังมีผลจากอุณหภูมิด้วย โดย stress จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิสัมบูรณ์

ค่า N คือ จำนวนสายโซ่โครงร่างตาข่ายต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรจะขึ้นกับปริมาณการเชื่อมโยง ดังนั้นจะเห็นได้ว่ามอดูลัสของยางจะขึ้นกับปริมาณการเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นในยาง โดยจะไม่ขึ้นกับชนิดหรือองค์ประกอบทางเคมีของสาร แสดงว่ายางทุกชนิดจะพฤติกรรมของ stress-strain เหมือนกันเมื่อมีปริมาณการเชื่อมโยงเท่ากัน

ค่า NkT สามารถแสดงอยู่ในรูปของค่ามวลโมเลกุลเฉลี่ยของสายโซ่ระหว่างพันธะเชื่อมโยง ดังสมการ

$$NkT = \rho RT/M_c = G \quad (2.3)$$

- เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของยาง
 R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ
 M_c คือ มวลโมเลกุลเฉลี่ยของสายโซ่ระหว่างพันธะเชื่อมโยง
 G คือ มอดูลัส



รูปที่ 2.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและแรงกดอัดกับ $1/\lambda$

จากการทดลองโดยการทำนายค่าจากทฤษฎีแล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองพบว่า พฤติกรรมของการกดอัด (compression) จะเป็นไปตามทฤษฎี แต่ค่าเมื่อมีการดึงให้ยืดออกมากๆ พบว่าจะมีการเบี่ยงเบนออกจากค่าทางทฤษฎี เช่น ที่ extension ratio มีค่าเป็น 2 ค่าจากการทดลองจะมีค่าน้อยกว่าค่าทางทฤษฎีถึง 25 % แสดงให้เห็นว่าค่าจากการทดลองจะมีการเบี่ยงเบนออกจากค่าทางทฤษฎีอย่างชัดเจน

สมการ Mooney

Mooney ได้แสดงสมการเพื่ออธิบายปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนออกจากทฤษฎีเชิงสถิติ (statistical theory) ของการยืดในแกนเดียว โดยอาศัยกฎของ Hooke เป็นพื้นฐานในการอธิบาย และด้วยเหตุผลทางคณิตศาสตร์ก็สามารถนำมาประยุกต์กับ strain ในแบบอื่นได้ การยืดในแกนเดียวสามารถแสดงได้ดังสมการนี้

$$F = 2C_1(\lambda - 1/\lambda^2) + 2C_2(1 - 1/\lambda^3) \quad (2.4)$$

เมื่อค่า C_1 และ C_2 เป็นค่าคงที่ที่สามารถหาได้จากการทดลอง จากสมการจะเห็นได้ว่ามีค่าคงที่ 2 ค่า ค่า C_1 เป็นค่าที่มาจากทฤษฎีเชิงสถิติโดยเป็นดังสมการ

$$2C_1 = NkT \quad (2.5)$$

ซึ่งจากทฤษฎีเชิงสถิติกล่าวว่า

$$M_c = \rho RT / NkT \quad (2.6)$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$M_c = \rho RT / 2C_1 \quad (2.7)$$

ค่า crosslink density สามารถหาได้จาก

$$\text{crosslink density} = 1 / 2M_c \quad (2.8)$$

ส่วนค่า C_2 จะแสดงการเบี่ยงเบนออกจากทฤษฎี โดยสมการนี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปที่สามารถนำไปใช้งานได้สะดวกคือ

$$F/2(\lambda - 1/\lambda^2) = C_1 + C_2/\lambda$$

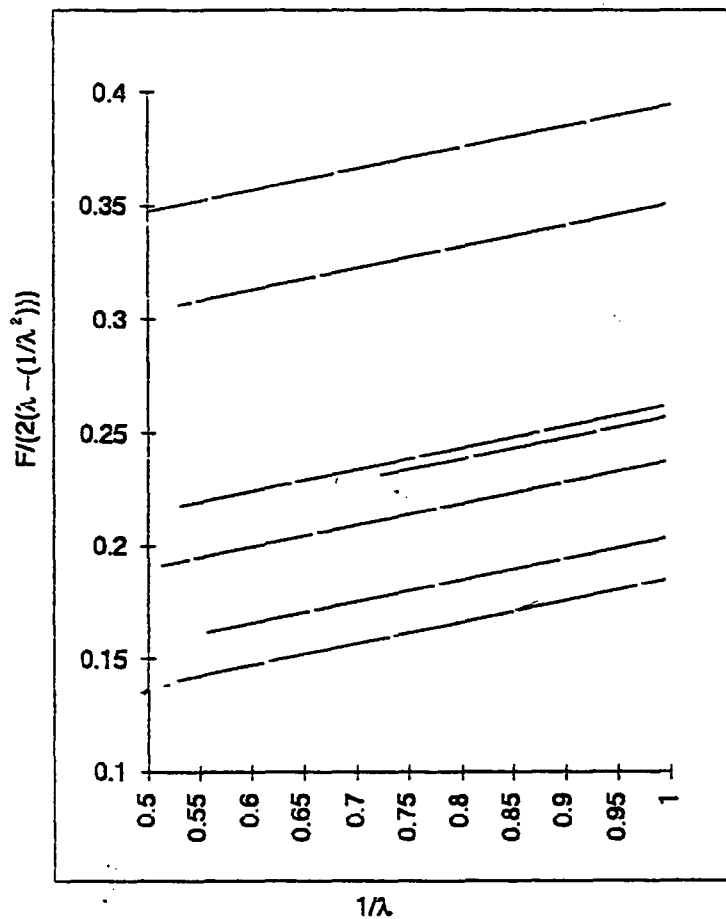
เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $F/2(\lambda - 1/\lambda^2)$ กับ $1/\lambda$ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 จะได้ค่า C_2 เป็นค่าความชันของกราฟ และ ค่า $C_1 + C_2$ เป็นค่าจุดตัดแกน Y ที่ $1/\lambda = 1$ จากกราฟเมื่อเปลี่ยนชนิดของสารแสดงให้เห็นว่า ค่า C_1 เป็นค่าที่ขึ้นกับ crosslink density โดยจะขึ้นกับชนิดของสารที่ใช้ในการทดลอง แต่ค่า C_2 นั้นจะไม่ขึ้นกับชนิดของสาร เส้นกราฟของสารทุกชนิดจะมีค่าความชัน (ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงค่า C_2) เท่ากัน

สมการนี้จะใช้ได้กับการยืดในแกนเดียว แต่สำหรับการกดอัด (compression) สมการนี้จะใช้ได้เมื่อค่า $C_2 = 0$ เท่านั้น สมการนี้ยังนำไปประยุกต์ใช้กับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆได้อีกด้วย

ค่า C_1 ที่หาได้จากกราฟจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณการเชื่อมโยง (crosslink density) อย่างมาก การหาค่า C_1 สามารถหาได้โดยอาศัยเครื่อง "C₁" ซึ่งเป็นเครื่องมือในการวัด stress-strain ของพอลิเมอร์ โดยวัดแรงที่ใช้ในการดึงชิ้นงานเป็นระยะทางค่าหนึ่ง จากนั้นจึงนำค่าที่ได้มาเขียนกราฟระหว่าง $F/2(\lambda - 1/\lambda^2)$ กับ $1/\lambda$ ดังที่กล่าวมาแล้ว

ค่า C_2 เป็นส่วนที่แสดงการเกิดการเบี่ยงเบนออกจากทฤษฎีเชิงสถิติ โดยค่า C_2 จะขึ้นกับองค์ประกอบหลายอย่าง ได้แก่ non-Gaussian statistic, พลังงานภายใน, hysteresis, entanglement และ non-random packing สมบัติของค่า C_2 สามารถแสดงได้ดังนี้

1. ค่า C_2 ไม่มีขึ้นอยู่กัขนิดของสาร
2. ค่า C_2 จะไม่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากปริมาณการ crosslink
3. ค่า C_2 มีแนวโน้มจะเท่ากับ 0 เมื่อมีการบวมตัวมาก (highly swollen) คือไม่เบี่ยงเบนจากทฤษฎี



รูปที่ 2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $F/2(\lambda - 1/\lambda^2)$ กับ $1/\lambda$ จากกราฟรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการบวมตัวมาก (มีค่า volume fraction ต่ำ) จะมีค่า C_2 ซึ่งคือค่าความชันต่ำด้วย ในทางตรงข้ามถ้ามีการบวมตัวน้อยก็จะมีค่าความชันมาก แสดงว่าค่า C_2 จะมีผลมาก

4. ค่า C_2 มีแนวโน้มจะเท่ากับ 0 เมื่อทำการการวัดเมื่อปล่อยให้พอลิเมอร์เข้าสู่สมดุล (equilibrium) แต่ความเห็นนี้ยังไม่เป็นที่ยอมรับนัก

5. ค่า C_2 จะมีความสำคัญเมื่อทำการวัดแบบ tensile

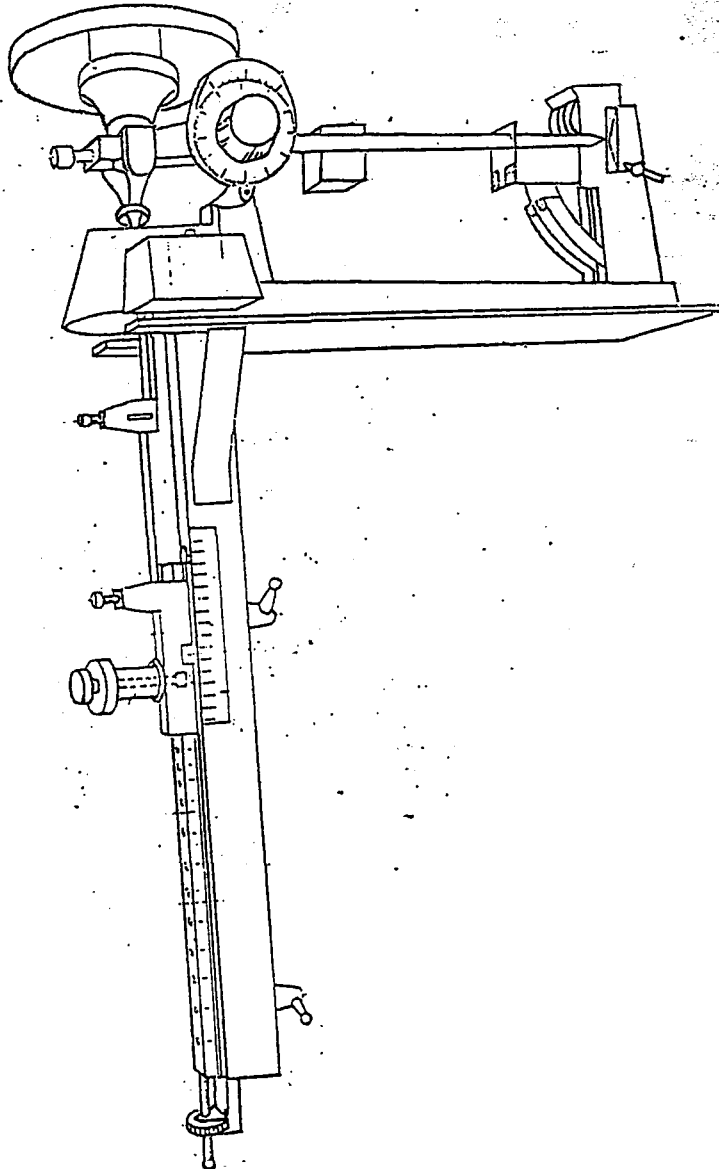
บทที่ 3

การทดลองและการดำเนินการ

การดำเนินการแยกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของการออกแบบและสร้างเครื่องมือ "C₁" และส่วนของการทดสอบเครื่องมือ

3.1 การออกแบบและสร้างเครื่องมือ "C₁"

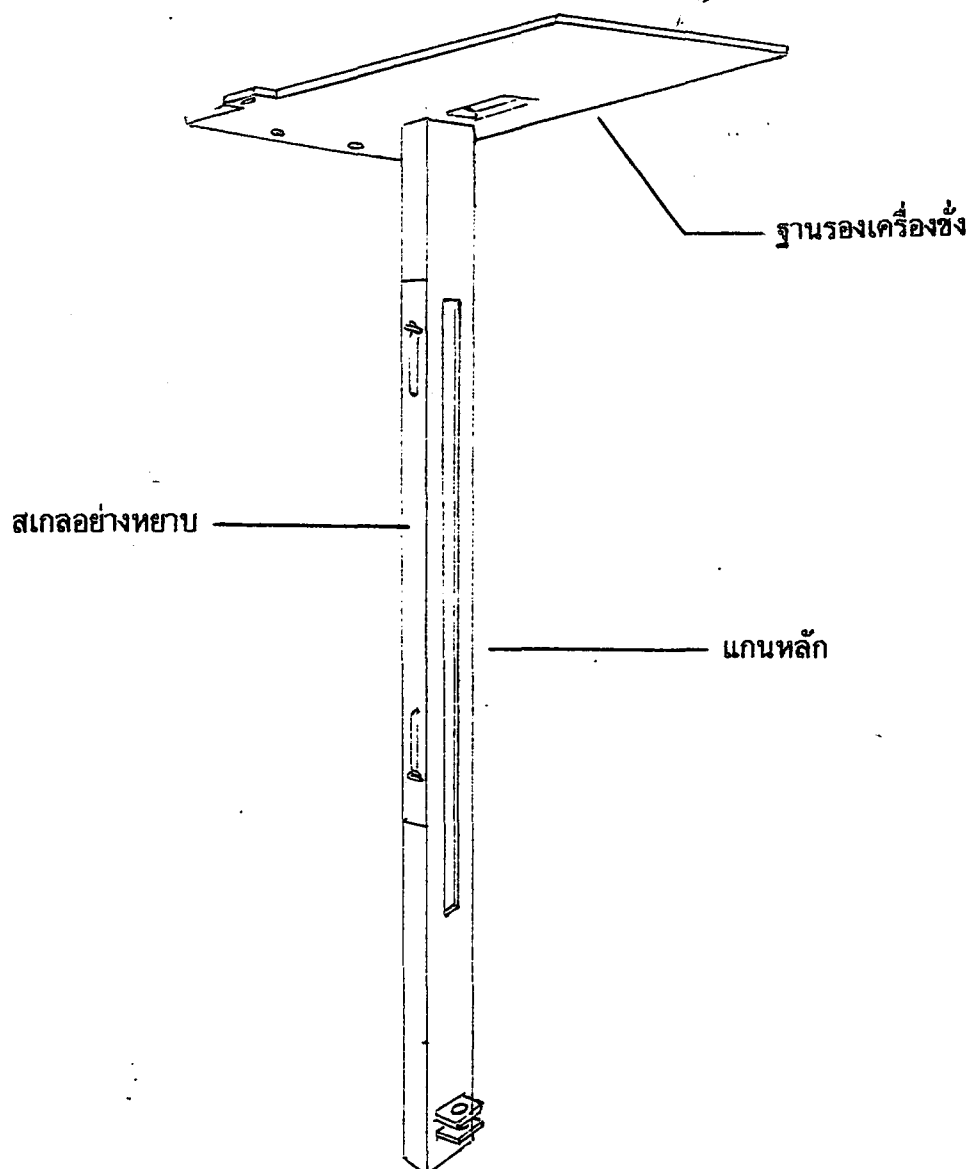
การออกแบบเครื่องมือนี้อาศัยแบบเครื่องมือ "C₁" เดิมของ Mooney โดยศึกษาถึงหลักการทำงานของเครื่องและการนำไปใช้งาน และยังได้ปรับปรุงเพิ่มเติมเพื่อให้สามารถใช้งานได้สะดวกขึ้น รูปทรงของเครื่องมือ "C₁" ที่ Mooney สร้างขึ้นมีลักษณะดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เครื่องมือ "C₁" ที่สร้างขึ้นโดย Mooney

ชิ้นส่วนของเครื่องมือ "C₁" แต่ละส่วนมีหน้าที่แตกต่างกัน ซึ่งจากแบบของเครื่องมือ "C₁" ของ Mooney และแบบของเครื่องมือที่ออกแบบขึ้นใหม่ เราสามารถแบ่งชิ้นส่วนต่าง ๆ และหน้าที่ของเครื่องมือ "C₁" ของแต่ละชิ้นออกได้ดังนี้

- แกนหลักและฐานรองเครื่องชั่ง digital

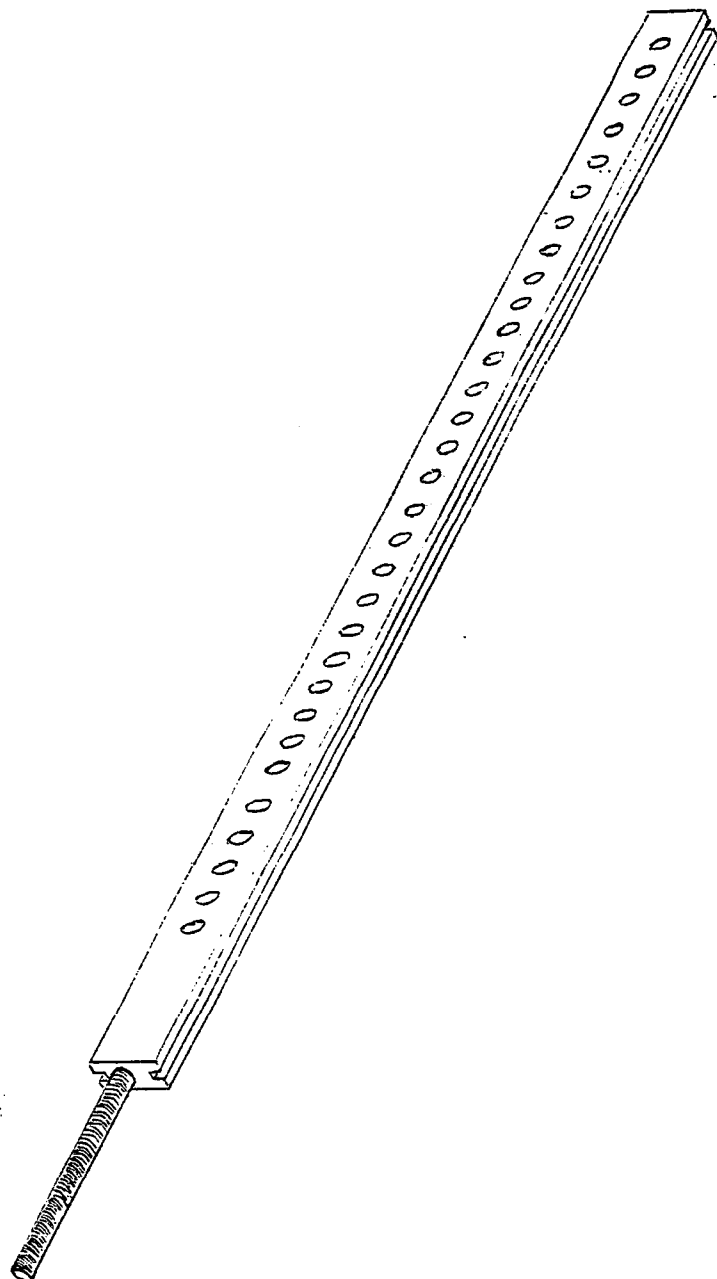


รูปที่ 3.3 แกนหลักและฐานรองเครื่องชั่ง digital

หน้าที่ แกนหลักและฐานรองเครื่องชั่งจะมีขนาดตั้งฉากกัน เพื่อให้ทิศทางการ ตั้ง ชิ้นงานเป็นไปในแนวตั้ง และเครื่องชั่งสามารถวางให้ไต่ระดับ ไม่เอียงไปด้านใดด้านหนึ่ง เพื่อ

ป้องกันความผิดพลาดจากการอ่านค่าของเครื่องชั่ง ตัวแกนหลักเป็นแกนสำหรับให้แกนรอง ยึดไว้และมีสเกลอย่างหยาบอยู่ด้านข้างของแกนหลัก สามารถปรับเคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวตั้งได้ เพื่อความสะดวกในการตั้งความยาวเริ่มต้นของชิ้นงาน

- แกนรอง

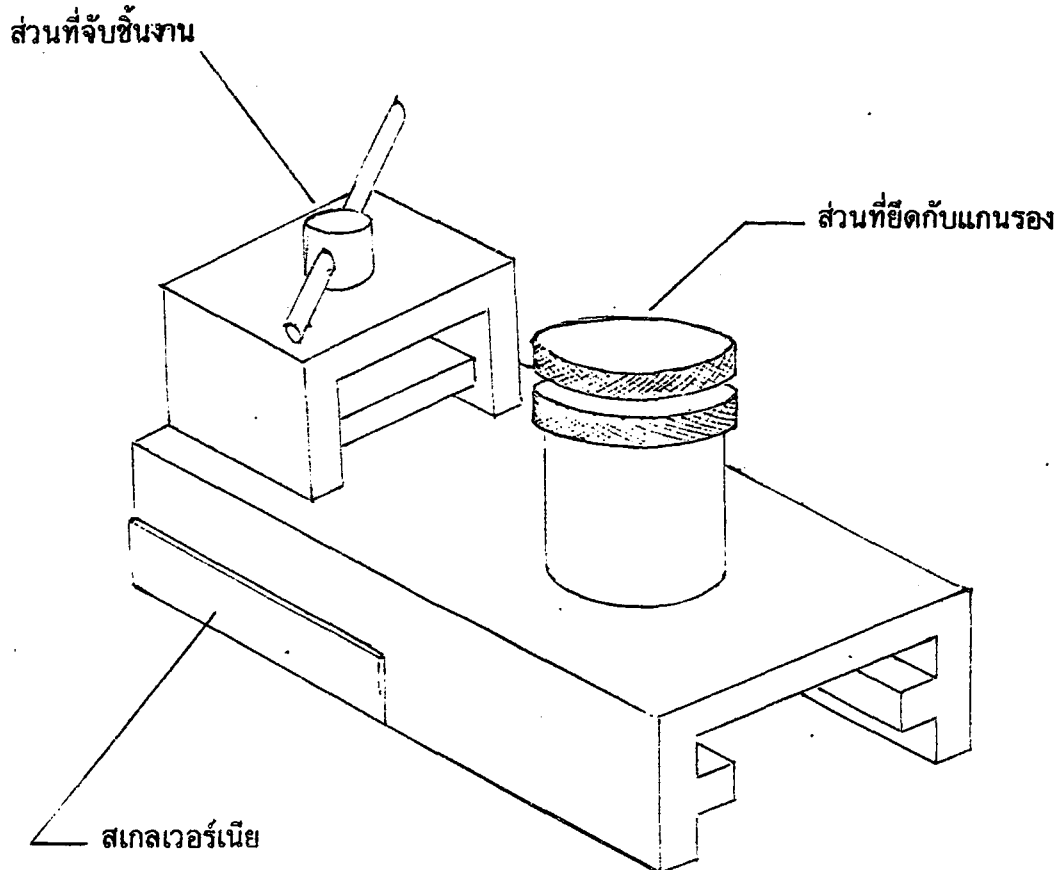


รูปที่ 3.4 แกนรอง

หน้าที่ แกนรองจะยึดอยู่กับแกนหลัก แต่สามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวตั้งได้ โดยสามารถปรับให้เคลื่อนที่ในระยะสั้น ๆ ใช้สำหรับปรับระยะยึดของชิ้นงานอย่างละเอียด ตัว

ปรับระยะจะอยู่ที่ส่วนท้ายของแกน มีลักษณะเป็นแกนเกลียวที่มีความละเอียด บนตัวแกน ร่องจะมีร่องขนาดเท่า ๆ กัน ระยะห่างของแต่ละร่องประมาณ 1 เซนติเมตร มีไว้สำหรับให้หัว จับชิ้นงานชนิดที่เคลื่อนที่ได้ส่วนที่เป็นหมุดสปริงยึดไว้

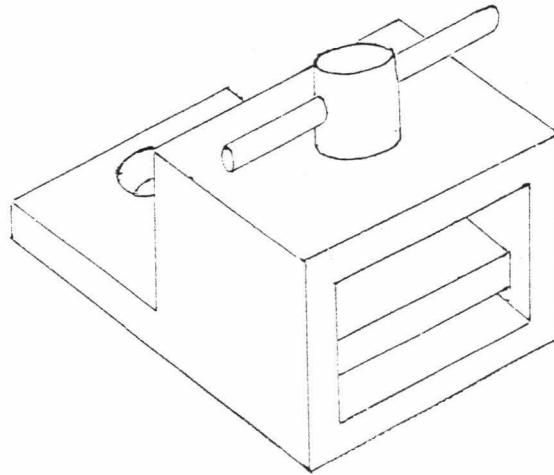
- หัวจับชิ้นงานชนิดที่เคลื่อนที่ได้



รูปที่ 3.5 หัวจับชิ้นงานชนิดที่เคลื่อนที่ได้

หน้าที่ หัวจับชิ้นงานชนิดนี้จะมี 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นหัวจับชิ้นงาน และส่วนที่ยึดกับแกนรอง ซึ่งส่วนที่ยึดกับแกนรองนี้จะเป็นหมุดสปริง ซึ่งสามารถปรับเลื่อนตำแหน่งที่ยึดกับแกนรองได้ โดยเลื่อนตามร่องต่าง ๆ บนแกนรอง เป็นการปรับระยะที่ยึดออกของชิ้นงานอย่างหยาบ ส่วนผิวหน้าของตัวยึดชิ้นงานจะถูกทำให้มีความขรุขระเพื่อเพิ่มความสามารถในการยึดจับชิ้นงาน และด้านข้างของหัวจับนี้จะมีสเกลเวอร์เนียไว้สำหรับวัดระยะอย่างละเอียด โดยเทียบกับสเกลหยาบบนแกนหลัก

- หัวจับชิ้นงานชนิดที่อยู่กับที่



รูปที่ 3.6 หัวจับชิ้นงานชนิดที่อยู่กับที่

หน้าที่ หัวจับส่วนนี้จะมีหน้าที่วัดน้ำหนักที่ใช้ในการดึงชิ้นงาน โดยจะมีตะขอเกี่ยวระหว่างหัวจับนี้กับเครื่องชั่ง เมื่อดึงชิ้นงานให้ยืดออกแรงในการดึง ก็จะถูกส่งผ่านไปยังเครื่องชั่งและอ่านค่าออกมาเป็นน้ำหนักได้ทันที

- เครื่องชั่ง digital



รูปที่ 3.7 เครื่องชั่ง digital

หน้าที่ รับแรงดึงของชิ้นงานจากหัวจับชิ้นงานชนิดที่อยู่กับที่แล้วอ่านค่าแรงดึงนั้นเป็นน้ำหนัก ซึ่งสามารถอ่านค่าได้ทันที

3.1.1 หลักการทำงานของเครื่องมือ "C₁"

เนื่องจากเครื่องมือนี้มีการทำงานแบบเชิงกล จึงมีการใช้งานที่ง่ายและสะดวก หลักการทำงานนั้นสามารถอธิบายได้จากรูปที่ 3.2 ดังนี้คือ เมื่อนำชิ้นงานมาจับที่หัวจับของเครื่องมือแล้วก็ดึงชิ้นงานให้ยืดออกให้ได้ความยาวที่ต้องการโดยการปรับที่หัวจับชนิดที่เคลื่อนที่ได้ด้วยการเลื่อนหมุดสปริง เป็นการปรับระยะยืดอย่างหยาบ และปรับความยาวอย่างละเอียดอีกครั้งหนึ่งโดยการหมุนชั้นเกลียวของแกนรอง เมื่อได้ความยาวที่ต้องการแล้วก็ให้ดึงค้างไว้ที่ความยาวนั้นในชั่วระยะเวลาหนึ่งเพื่อให้ส่วนที่เป็นอสัณฐาน (amorphous) ในยางจะเกิดการคลายตัวสมบูรณ์ ทำให้เหลือแรงดึงที่เกิดจากพันธะเชื่อมโยงเท่านั้น ดังนั้นก็สามารถหาค่าแรงที่กระทำต่อชิ้นงานได้ โดยค่าแรงนี้จะเป็นแรงที่กระทำส่วนของพันธะเชื่อมโยง

3.1.3 เปรียบเทียบการทำงานของเครื่องมือ "C₁" เดิมของ Mooney และเครื่องมือที่ออกแบบขึ้นใหม่

เครื่องมือ "C ₁ " เดิมของ Mooney	เครื่องมือ "C ₁ " ที่ออกแบบขึ้นใหม่
1. หัวจับชิ้นงานจะใช้งานวิธีเกี่ยวกับชิ้นงาน ดังนั้นชิ้นงานจึงต้องเจาะรูเพื่อใช้เกี่ยว 2. เครื่องชั่งที่ใช้อ่านค่าแรงที่กระทำต่อชิ้นงานเป็นแบบสามแขน (triple beam) ทำให้ต้องปรับสเกลที่เครื่องชั่งตลอดเวลาในการวัด 3. สเกลที่แกนหลักไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ ทำให้การอ่านค่าความยาวของชิ้นงานคลาดเคลื่อนได้	1. หัวจับชิ้นงานเป็นชนิดชั้นเกลียว จึงไม่ต้องเจาะรูที่ชิ้นงาน 2. เครื่องชั่งที่ใช้เป็นแบบ digital ทำให้สามารถอ่านค่าได้สะดวกขึ้นและไม่ต้องปรับค่าบ่อย 3. สเกลที่แกนหลักสามารถเคลื่อนที่ได้ ทำให้การอ่านค่าความยาวของชิ้นงานมีความแน่นอนมากขึ้น

3.2 การทดสอบเครื่องมือ

การทดสอบเครื่องมือเป็นขั้นตอนการทดสอบเครื่องมือที่สร้างขึ้นเทียบกับวิธี swelling เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้ของทั้งสองวิธี ซึ่งจะบอกถึงประสิทธิภาพของเครื่องมือที่สร้างขึ้นได้

3.2.1 สารเคมีที่ใช้

1. ยางธรรมชาติเกรดยางแผ่นรมควัน
2. ยาง SBR 1502
3. ซิงค์ออกไซด์ (ZnO)
4. กรดสเตียริก (Stearic Acid)
5. ตัวเร่ง CBS
6. ตัวเร่ง MBTS
7. Struktol WB 120
8. Frectol H
9. สารตัวหน่วง PVI
10. ซัลเฟอร์ (S₈)
11. ไดคิวมีลเปอร์ออกไซด์ (Dicumylperoxide)
12. โทลูอีน (Toluene)

3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้

1. เครื่องผสมแบบ 2 ลูกกลิ้ง (Two-rolls mill)
2. เครื่องอัดร้อน (Hot press)
3. เครื่อง cure elastomer
4. เครื่องมือ "C₁" ที่สร้างขึ้น
5. เครื่องชั่ง digital
6. นาฬิกาจับเวลา
7. มีดกรีดยาง
8. แม่แบบ ขนาด 110*110*2 มิลลิเมตร
9. ขวดขนาด 4 ออนซ์ มีฝาปิด
10. แผ่นเทฟลอน

3.2.3 การเตรียมชิ้นงาน

3.2.3.1 สูตรผสมยาง S-cure

	สูตร 1 (phr)	สูตร 2 (phr)
1. ยางธรรมชาติเกรดยางแผ่นรมควัน	100	-
2. ยาง SBR 1502	-	100
3. ซิงออกไซด์ (ZnO)	5	5
4. กรดสเตียริก (Stearic Acid)	1	1
5. ตัวเร่ง CBS	1.5	1.5
6. ตัวเร่ง MBTS	1	1
7. Struktol WB 120	-	1
8. Frectol H	1	-
9. สารตัวหน่วง PVI	-	0.3
10. ซัลเฟอร์ (S ₈)	*	*

* แต่ละสูตรใช้ปริมาณซัลเฟอร์ 0.5, 1.0, 2.0 phr

หมายเหตุ การใช้สารตัวเร่ง 2 ชนิดนั้นเพราะว่าถ้าใช้สารตัวเร่งเพียงตัวใดตัวหนึ่งเพียงตัวเดียว จะใช้เวลาในการขึ้นรูปนาน บางชิ้นงานอาจจะต้องใช้เวลาในการขึ้นรูปนานถึงครึ่งชั่วโมง ดังนั้นจึงต้องใช้สารตัวเร่ง 2 ตัว ซึ่งการใช้ตัวเร่ง 2 ตัวจะช่วยการทำงานให้ตัวเร่งมีประสิทธิภาพมากขึ้น ทำให้เวลาในการขึ้นรูปน้อยลง และนอกจากนี้ยังลดปริมาณของสารตัวหน่วงลงหรือไม่ใช้เลยเพื่อลดเวลาเริ่มของการเกิดพันธะเชื่อมโยงให้น้อยลงด้วย ทำให้เวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปลดลงเหลือเพียงไม่เกิน 15 นาที

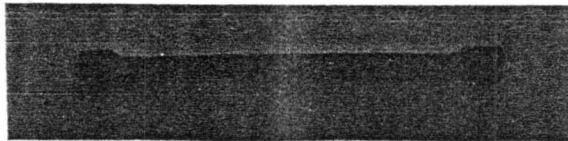
3.2.3.2 สูตรผสมยาง Peroxide-cure

	สูตร 1 (phr)	สูตร 2 (phr)
1. ยางธรรมชาติเกรดยางแผ่นรมควัน	100	-
2. ยาง SBR 1502	-	100
3. Struktol WB 120	1	1
4. ไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ (DCP)	*	*

* โดยแต่ละสูตรใช้ปริมาณ DCP 0.5, 1.0, 1.5 phr

3.2.3.3 วิธีการผสมในการเตรียมชิ้นงาน

1. ชั่งยางมา 200 กรัม บดบนเครื่องผสมแบบ 2 ลูกกลิ้ง โดยบดให้ยางพันติดลูกกลิ้ง ใช้เวลาประมาณ 2 นาที
2. เมื่อยางพันลูกกลิ้งแล้ว ให้เติมสารลงไปทุกตัวยกเว้นซิลิเฟอร์ บดให้ยางและสารรวมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน เพื่อการผสมเข้ากันได้เร็วขึ้น เราจึงต้องช่วยในการผสมโดยกรีดยางด้วยมีดกรีดยางแล้วพลิกยางกลับไปกลับมา ใช้เวลาในการผสมยางประมาณ 2 นาที
3. เมื่อครบเวลาแล้ว ให้เติมซิลิเฟอร์ลงในยางแล้วบดต่อ โดยช่วยในการผสมของซิลิเฟอร์ด้วยเช่นกัน ใช้เวลาในการผสมประมาณ 6 นาที
4. เมื่อผสมยางได้แล้ว ก็นำยางที่ได้มาหาเวลาที่ใช้ในการทำให้ยางสุก โดยใช้เครื่อง cure elastomer อุณหภูมิที่ใช้ในการทำให้ยางสุก คือ 170 องศาเซลเซียส เมื่อได้เวลาที่เหมาะสมแล้ว ก็นำยางไปขึ้นรูปโดยใช้เครื่องอัดร้อน (Hot press)
5. การเตรียมยางสูตรอื่น ๆ ของ s-cure จะใช้วิธีการผสมเช่นเดียวกับวิธีข้างต้น
6. การผสมสูตรยาง peroxide-cure ก็ใช้วิธีการผสมเช่นเดียวกับการผสมสูตรของยาง s-cure โดยจะใส่สาร peroxide ในขั้นสุดท้ายแทนซิลิเฟอร์
7. สำหรับชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองวิธี stress-strain โดยใช้เครื่อง "C₁" ต้องตัดชิ้นงานเป็นรูป dumbbell ดังรูป



รูปที่ 3.8 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบวิธี stress-strain

8. สำหรับชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบวิธี swelling เตรียมโดยตัดชิ้นงานขนาด 2*2*2 มิลลิเมตร

3.2.4 การทดลอง

3.2.4.1 การทดลองวิธี stress-strain โดยใช้เครื่องมือ "C₁"

1. นำชิ้นงานรูป dumbbell ที่ตัดมาวัดขนาดความกว้างและความหนาของส่วนที่แคบ โดยวัดอย่างละ 3 ช่วง

2. กำหนดความยาวของส่วนที่จะถูกดึงขนาด 10 เซนติเมตร แล้วทำเครื่องหมายไว้ หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปยึดที่หัวจับชิ้นงานของเครื่อง "C₁" โดยให้ตำแหน่งของเครื่องหมายอยู่ติดกับหัวจับชิ้นงานพอดี ทั้ง 2 หัว

3. ปรับระยะเริ่มต้นเพื่อให้ชิ้นงานมีความตึงพอดีและยังไม่ยืดออก โดยการปรับระยะอย่างหยาบที่หัวจับชิ้นงานที่เคลื่อนที่ได้ และปรับระยะอย่างละเอียดที่แกนรอง

4. ปรับสเกลที่อยู่บนแกนหลักให้มีสเกลเริ่มต้นตรงกับสเกลเริ่มต้นของสเกลเวอร์เนียบนหัวจับชิ้นงานชนิดเคลื่อนที่ได้ แล้วกดปุ่มปรับศูนย์ที่เครื่องชั่ง

5. ดึงชิ้นงานให้ยืดออก 5% ของระยะเริ่มต้น โดยปรับที่ตัวปรับระยะอย่างละเอียด แล้วอ่านค่าน้ำหนักที่ใช้ในการดึงชิ้นงานเมื่อเวลาผ่านไป 5, 10, 15, 20 และหลังจากนี้ทุก ๆ 10 นาที จนค่าน้ำหนักที่อ่านได้คงที่จากอ่านค่า 2 ครั้งติดต่อกัน

6. เมื่อเสร็จในช่วงแรกแล้ว ให้ดึงชิ้นงานให้ยืดเพิ่มขึ้นเป็น 10%, 15% และ 20% ของระยะเริ่มต้น และทำการบันทึกผลด้วยวิธีเดียวกัน

7. นำค่าที่อ่านได้และระยะที่ยืดมาใช้คำนวณ และเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $F/(2(\lambda - 1/\lambda^2))$ กับ $1/\lambda$ ซึ่งจากสมการ (2.9) ดังนี้

$$F/(2(\lambda - 1/\lambda^2)) = C_1 + C_2/\lambda$$

F = แรงดึงต่อ 1 หน่วยพื้นที่ มีหน่วยเป็น N/m^2

λ = extension ratio = ความยาวหลังยืดต่อความยาวก่อนยืด

จากกราฟ สามารถหาค่า C_1 ได้และนำไปหาค่า Mc ได้จากสมการ (2.7) และ (2.8) ดังนี้

$$Mc = \frac{\rho RT}{2C_1}$$

$$\text{crosslink density} = \frac{1}{2Mc}$$

3.2.4.2 การทดลองวิธี swelling

1. นำชิ้นงานขนาดประมาณ 2×2 มิลลิเมตร มาชั่งน้ำหนัก 3 ครั้ง ด้วยเครื่องชั่งอย่างละเอียด (เทคนิค 4 ตำแหน่ง) และหาค่าเฉลี่ย จำนวนชิ้นงานใช้อย่างน้อย 3 ชิ้น

2. นำชิ้นงานที่ชั่งน้ำหนักเรียบร้อยแล้วไปแช่ใน toluene ประมาณ 30 ml เป็นเวลา 12 ชั่วโมง (toluene ที่ใช้แช่ชิ้นงานแล้ว ไม่สามารถนำมาใช้ได้อีก)

3. หลังจากแช่ครบเวลาแล้ว นำชิ้นงานขึ้นมาแล้วซับให้พอหมาดๆ ซึ่งน้ำหนักอย่างละเอียดและบันทึกค่าน้ำหนักทุก 10 วินาที จนครบ 6 ค่า (เริ่มจับเวลาตั้งแต่นำชิ้นงานขึ้นจาก toluene) นำค่ามาเขียนกราฟระหว่างเวลากับน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักที่เวลา t_0

4. นำค่าที่ได้มาคำนวณตามสมการ (2.1) ดังนี้

$$-\left[\ln(1 - v_r) + v_r + \chi v_r^2\right] = \delta V_0 M c^{-1} v_r^{1/3}$$

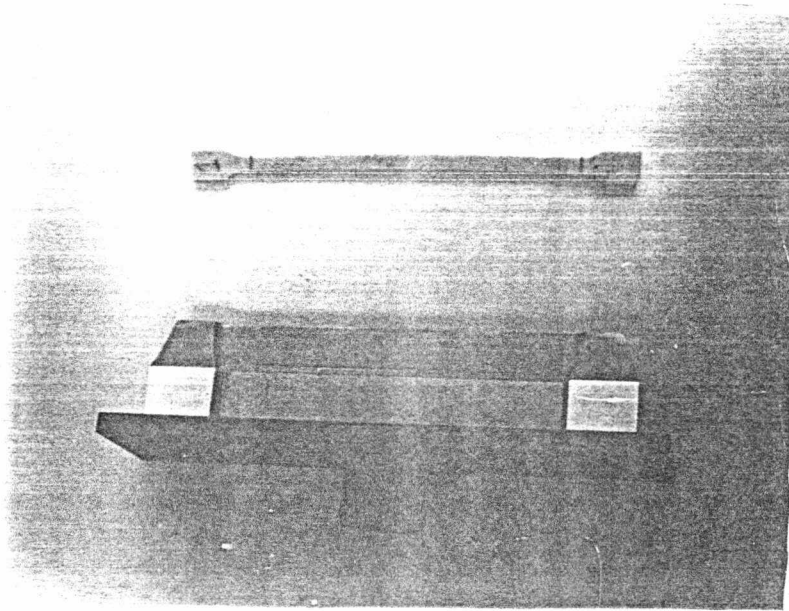
เมื่อ χ เป็น ค่า polymer-solvent interaction constant

δ เป็น ความหนาแน่นของยาง

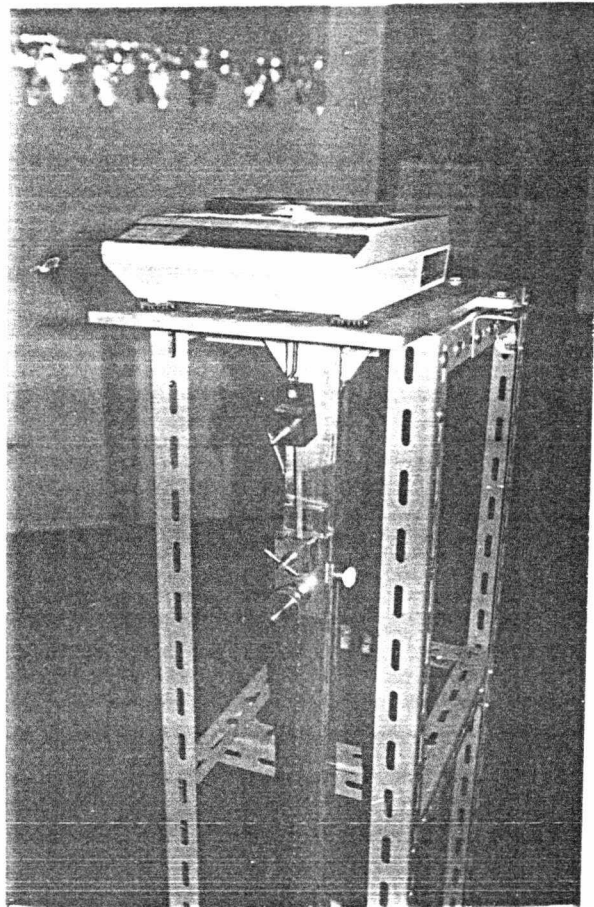
V_0 เป็น molar volume ของสารละลาย

v_r เป็น volume fraction ของยางที่เกิดการบวมตัว ซึ่งหาได้จาก

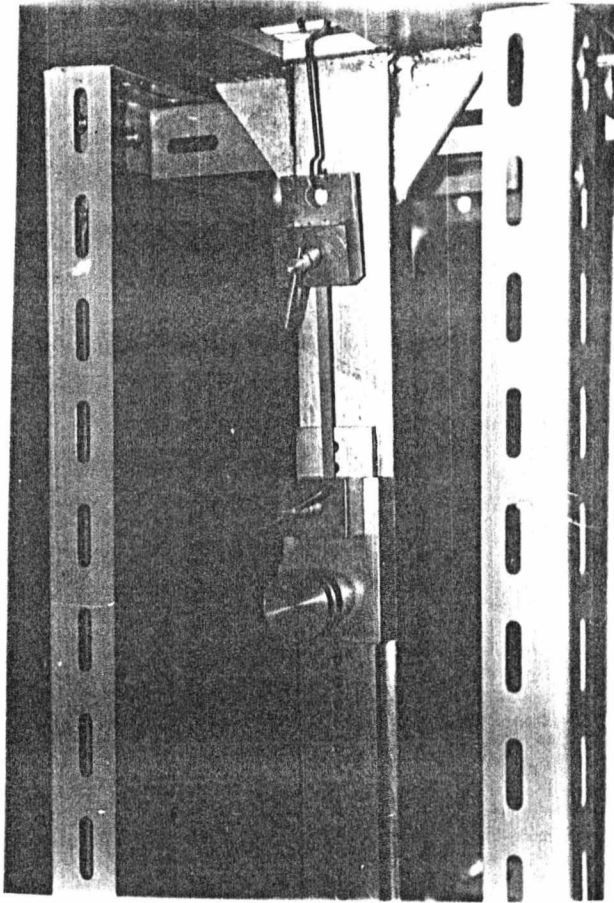
อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของยางก่อนบวมตัวกับปริมาตรหลังการบวมตัว



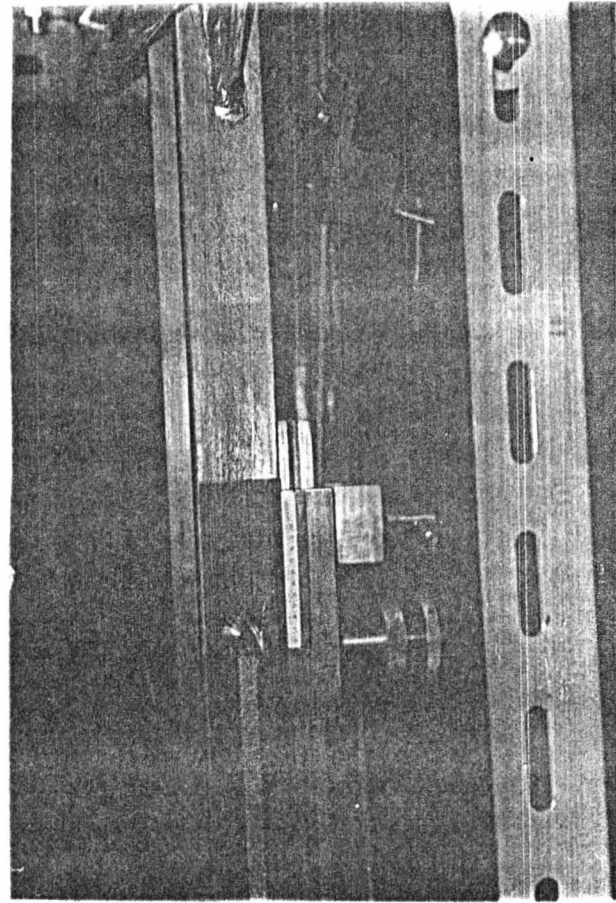
รูปที่ 8.9 die cutter และชิ้นงานรูป dumbbell



รูปที่ 9.11 อุปกรณ์ทดสอบการเชื่อมต่อสาย "01"



รูปที่ 3.11 รูปแสดงการจับชิ้นงานด้วยหัวจับทั้งสอง



รูปที่ 3.12 รูปแสดงการกำหนดสเกลเริ่มต้น

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

ยางธรรมชาติ

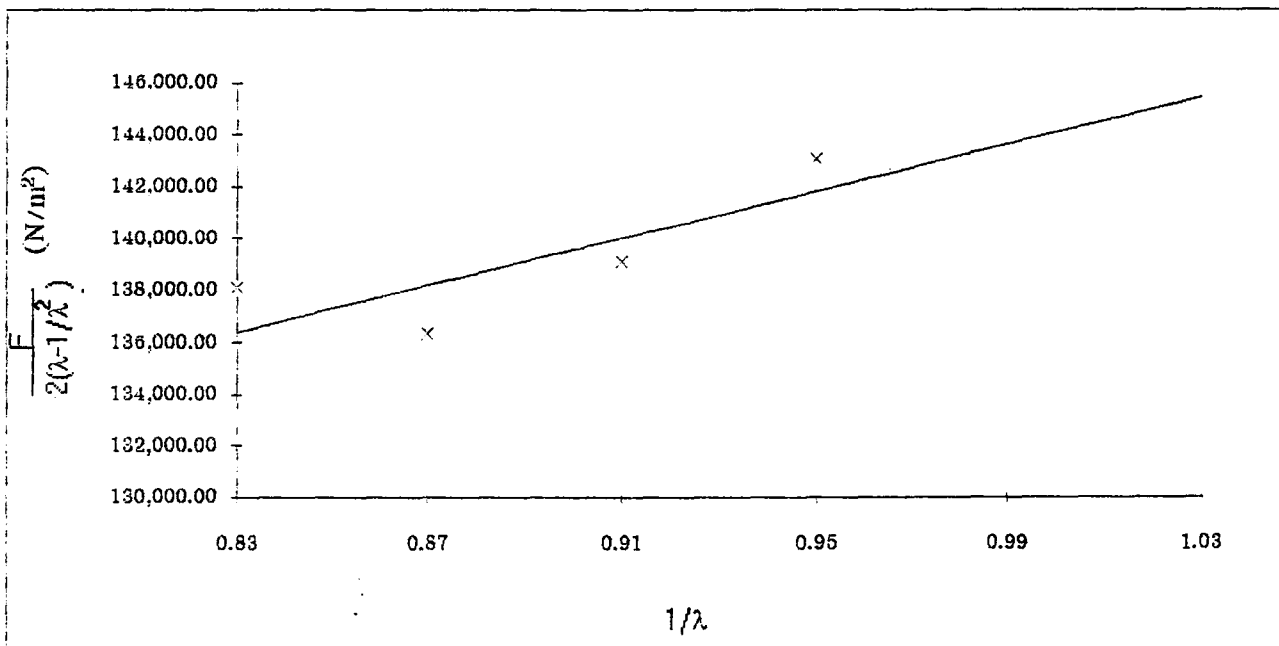
สารเชื่อมโยง : sulphur 0.5 phr

ตารางที่ 4.1 แสดงขนาด และพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างในการทดสอบแบบ stress-strain

ตัวอย่างที่	กว้าง (มม.)			หนา (มม.)			พื้นที่หน้าตัดเฉลี่ย
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่1	
1.00	5.15	4.95	5.10	2.10	2.05	1.95	10.30

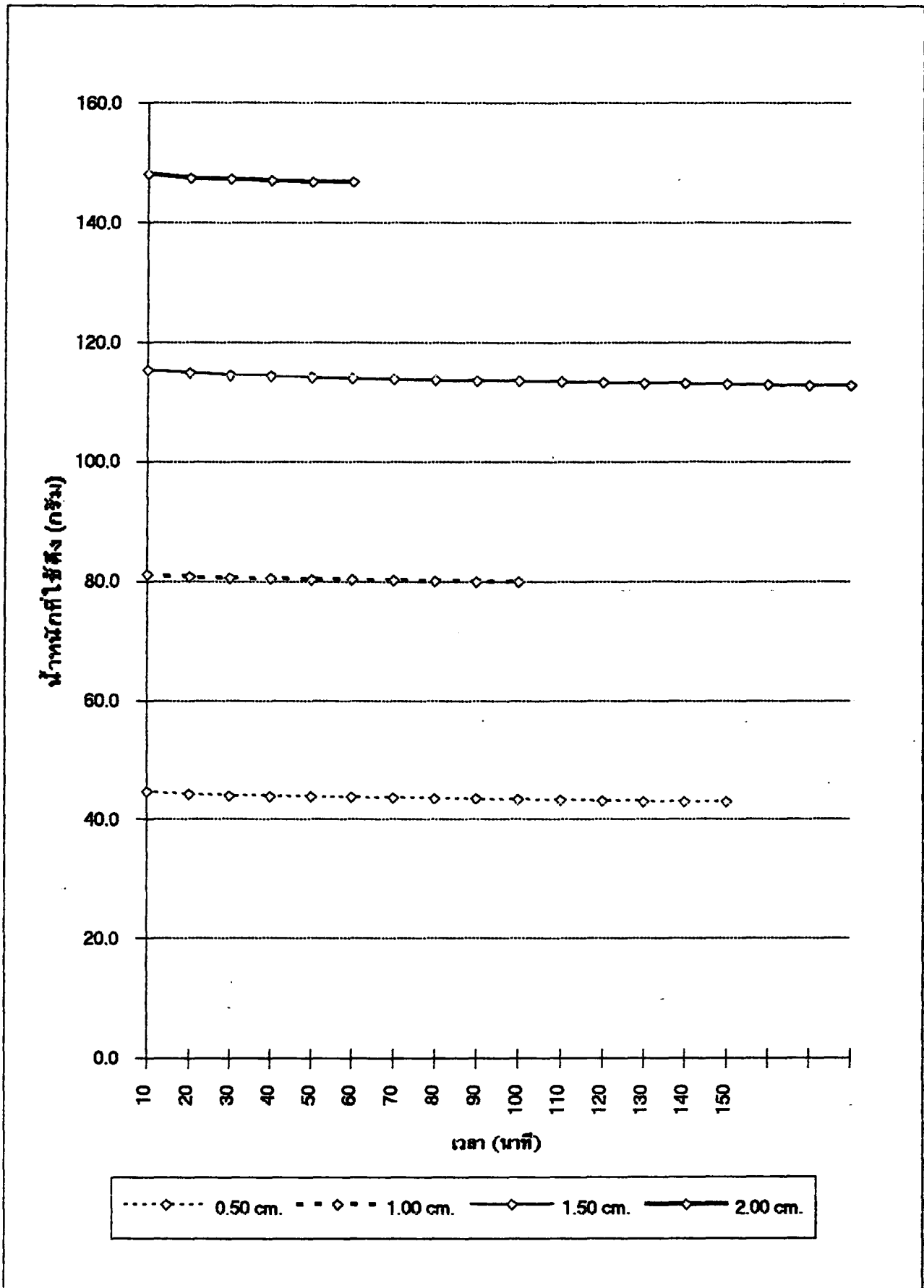
ตารางที่ 4.2 แสดงการหา $1/\lambda$ และ $F/[2(\lambda - (1/\lambda^2))]$

ระยะยืด (มม.)	λ	$1/\lambda$	แรงดึง, f (N)	พื้นที่, A (mm ²)	f/A, F (N/m ²)	$\frac{F}{2(\lambda - 1/\lambda)}$
5.00	1.05	0.95	0.4	10.30	40,903.8	143,049.8
10.00	1.10	0.91	0.8	10.30	76,100.1	139,095.3
15.00	1.15	0.87	1.1	10.30	107,396.2	136,339.4
20.00	1.20	0.83	1.4	10.30	139,643.7	138,109.1



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงน้ำหนักที่ใช้ในการดึงชิ้นงานที่เวลาต่างๆ

จุดตัดแกน x = $1(C_1 - C_2)$	= 144,105.4 N/m ²	ค่า n ของก๊าซ (R)	= 8,314 kJ/K mol
ความชัน (C_2)	= 45,515.6 N/m ²	อุณหภูมิ	= 303 K
C_1	= 98,589.8 N/m ²	ความหนาแน่นของยาง	= 970 kg/m ³
M_c	= 12,393.2 g/mol		
crosslink density	= 4.0×10^{-5} mol/g		



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ใช้ในการกับเวลา

วิธี swelling

ตารางที่ 4.3 แสดงการทำ volume fraction

ตัวอย่าง	น้ำหนัก (กรัม)		ปริมาตร (ลบ.ซม.)	
	ก่อน swell	หลัง swell	ก่อน swell	V_r
1	0.0108	0.0626	0.0111	0.1571
2	0.0082	0.0456	0.0084	0.1632
3	0.0100	0.0612	0.0103	0.1487

ตารางที่ 4.4 แสดงการทำ crosslink density

ตัวอย่าง	V_r	$V_r^{1/3}$	$\ln(1 - V_r)$	V_r^2	M_c
1	0.1571	0.5396	-0.1709	0.0247	11,302.8429
2	0.1632	0.5464	-0.1781	0.0266	10,473.9604
3	0.1487	0.5298	-0.1610	0.0221	12,611.8495
เฉลี่ย					11,462.8842

ความหนาแน่นของ toluene = 0.8669 g/cm³ $V_0 = 106.2929 \text{ cm}^3/\text{mol}$ ความหนาแน่นของ ซาง = 0.97 g/cm³

polymer-solvent parameter = 0.36

crosslink density = #####

ยางธรรมชาติ

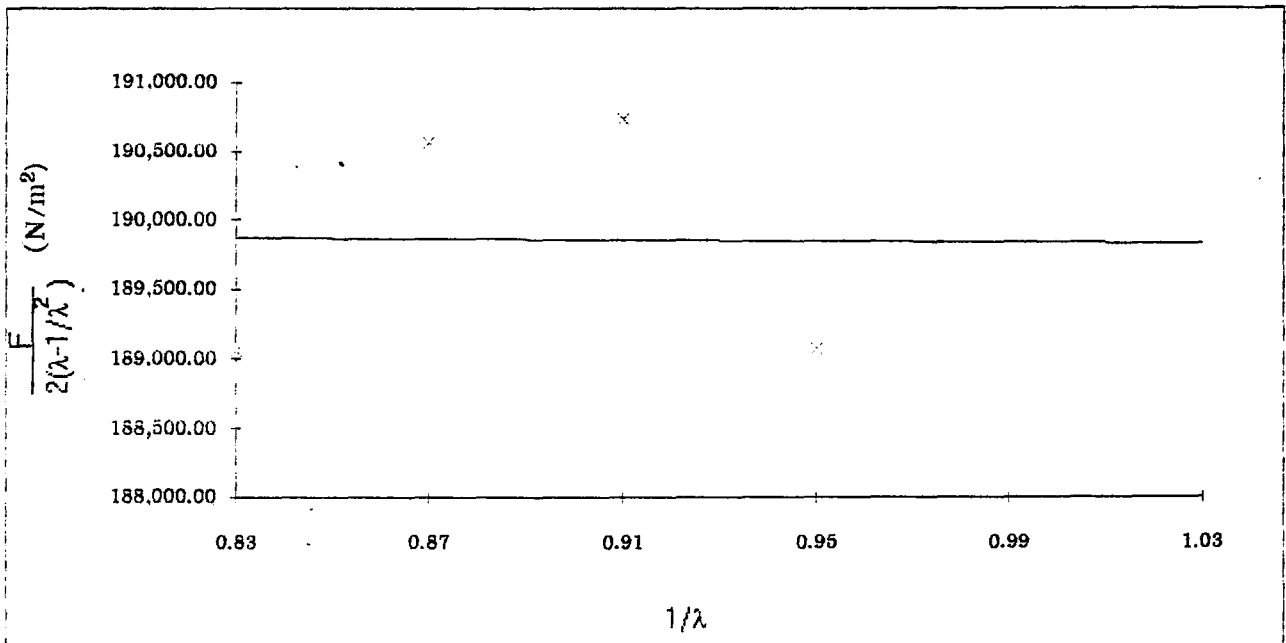
สารเชื่อมโยง : sulphur 1.0 phr

ตารางที่ 4.5 แสดงขนาด และพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างในการทดสอบแบบ stress- strain

ตัวอย่างที่	กว้าง (มม.)			หนา (มม.)			พื้นที่หน้าตัดเฉลี่ย
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่1	
1.00	5.05	5.10	5.05	2.10	2.05	2.00	10.39

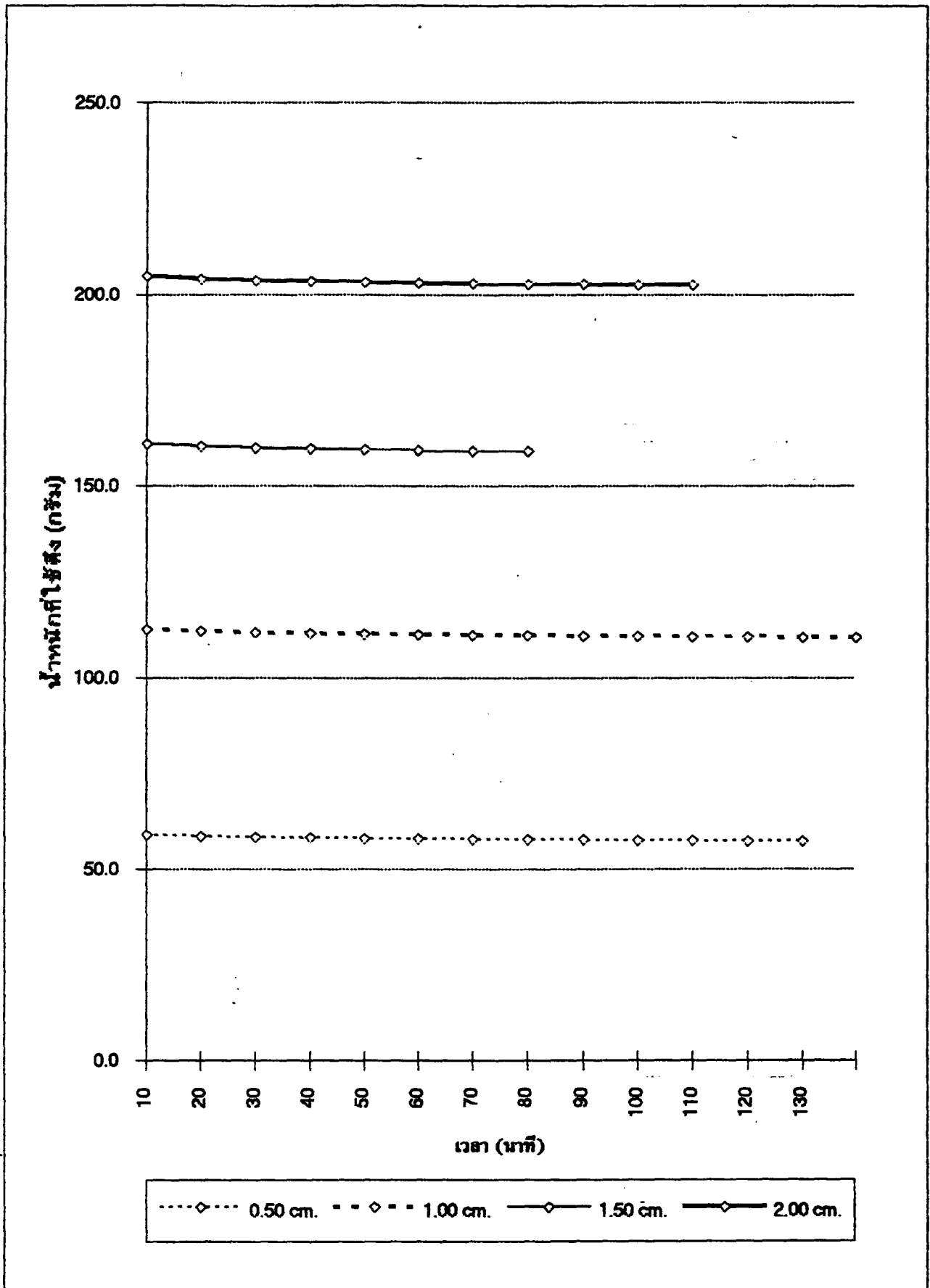
ตารางที่ 4.6 แสดงการหา $1/\lambda$ และ $F/[2(\lambda - 1/\lambda^2)]$

ระยะยืด (มม.)	λ	$1/\lambda$	แรงดึง, f (N)	พื้นที่, A (mm ²)	f/A, F (N/m ²)	$\frac{F}{2(\lambda - 1/\lambda^2)}$
5.00	1.05	0.95	0.6	10.39	54,063.5	189,072.3
10.00	1.10	0.91	1.1	10.39	104,353.0	190,735.9
15.00	1.15	0.87	1.6	10.39	150,113.6	190,569.0
20.00	1.20	0.83	2.0	10.39	191,156.6	189,056.0



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงน้ำหนักที่ใช้ในการดึงชิ้นงานที่เวลาต่าง ๆ

จุดตัดแกน x = $1(C_1 + C_2)$	= 189.839.9 N/m ²	ค่า n ของก๊าซ (R)	= 8,314 kJ/K mol
ความชัน (C_2)	= -169.2 N/m ²	อุณหภูมิ	= 303 K
C_1	= 190,009.1 N/m ²	ความหนาแน่นของยาง	= 970 kg/m ³
Mc	= 6,430.5 g/mol		
crosslink density	= 7.8×10^{-5} mol/g		



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรที่ใช้ในการกับเวลา

วิธี swelling

ตารางที่ 4.7 แสดงการหา volume fraction

ตัวอย่าง	น้ำหนัก (กรัม)		ปริมาตร (ลบ.ซม.)	
	ก่อน swell	หลัง swell	ก่อน swell	V_r
1	0.0101	0.0503	0.0104	0.1838
2	0.0081	0.0402	0.0083	0.1834
3	0.0087	0.0428	0.0090	0.1864

ตารางที่ 4.8 แสดงการหา crosslink density

ตัวอย่าง	V_r	$V_r^{1/3}$	$\ln(1-V_r)$	V_r^2	M_c
1	0.1838	0.5686	-0.2031	0.0338	8,216.0373
2	0.1834	0.5682	-0.2026	0.0336	8,254.0595
3	0.1864	0.5712	-0.2063	0.0347	7,982.0899
เฉลี่ย					8,150.7289

ความหนาแน่นของ toluene = 0.8669 g/cm³

$V_0 = 106.2929 \text{ cm}^3/\text{mol}$

ความหนาแน่นของ ยาง = 0.97 g/cm³

polymer-solvent parameter = 0.36

crosslink density = 6.1344 E-05

ยางธรรมชาติ

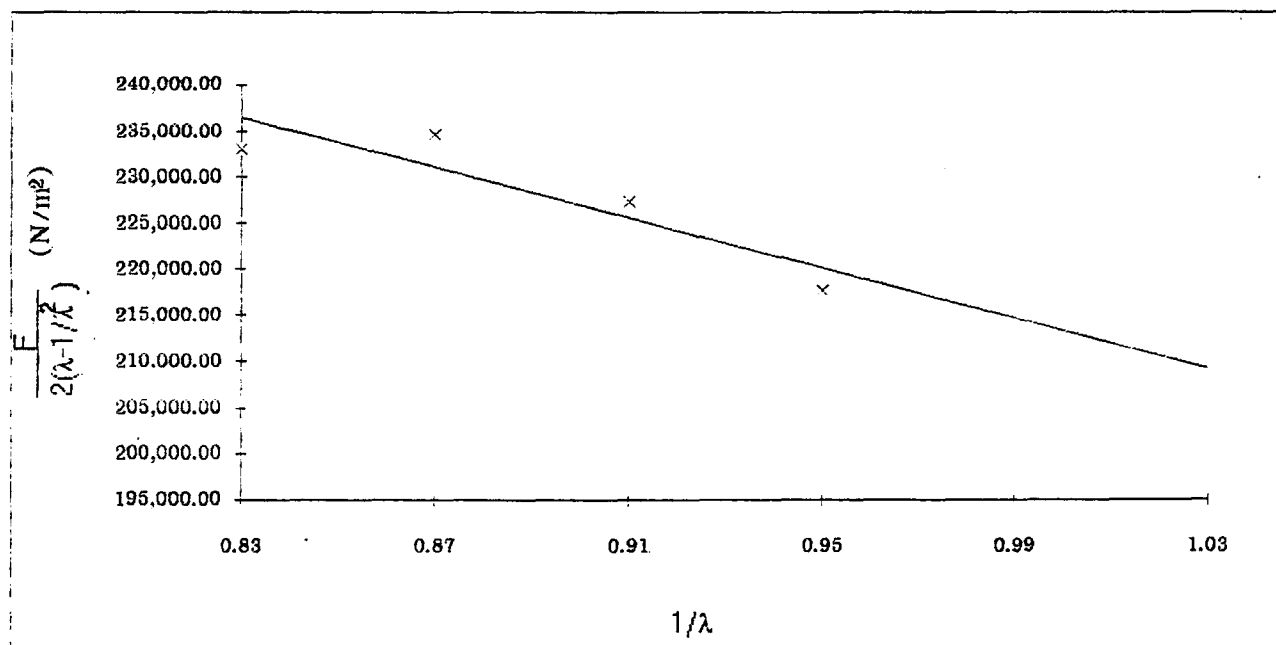
สารเชื่อมโยง : sulphur 2.0 phr

ตารางที่ 4.9 แสดงขนาด และพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างในการทดสอบแบบ stress- strain

ตัวอย่างที่	กว้าง (มม.)			หนา (มม.)			พื้นที่หน้าตัดเฉลี่ย
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่1	
1.00	4.90	4.80	4.75	2.10	2.05	1.90	9.71

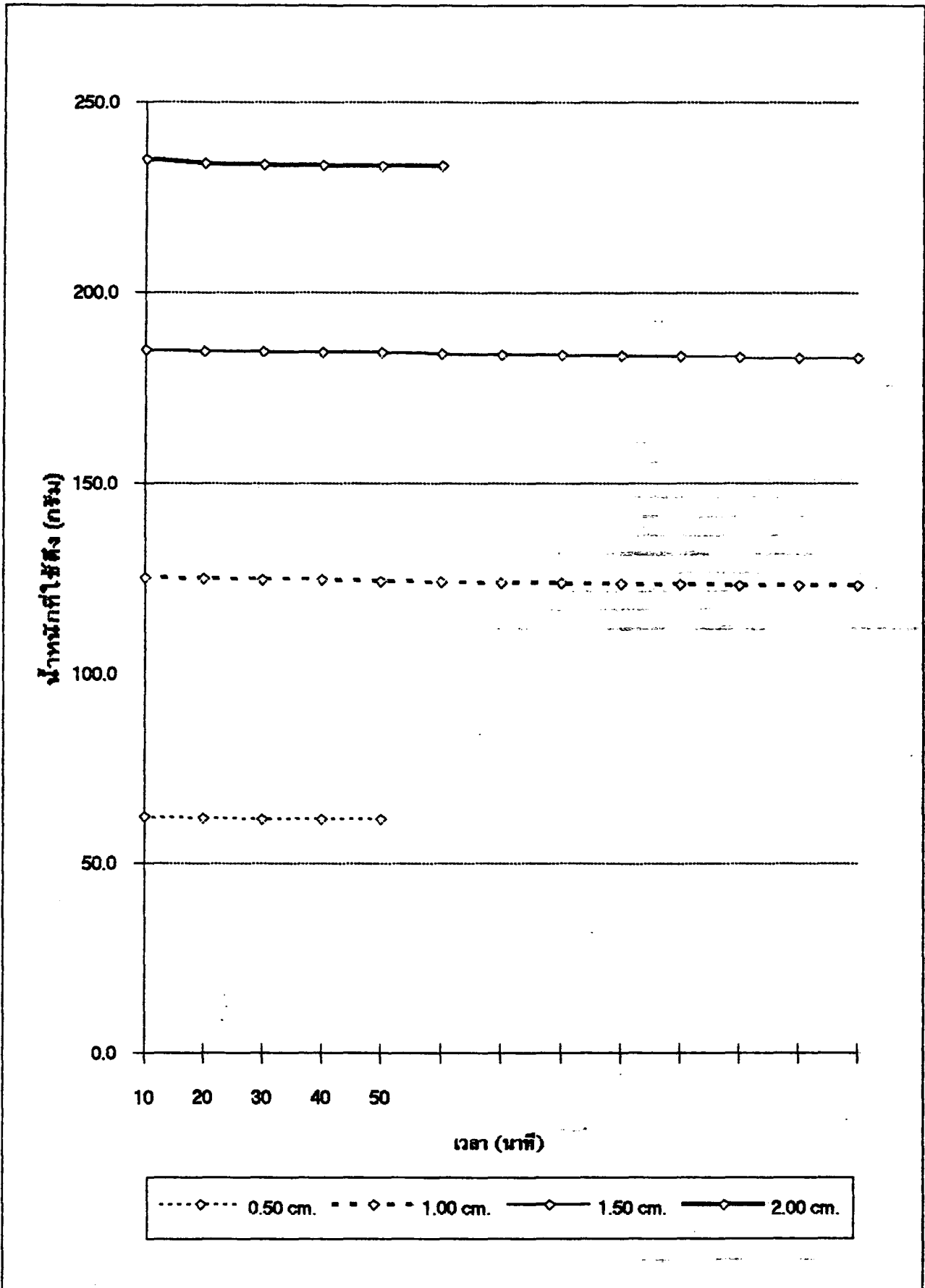
ตารางที่ 4.10 แสดงการหา $1/\lambda$ และ $F/[2(\lambda - (1/\lambda^2))]$

ระยะยืด (มม.)	λ	$1/\lambda$	แรงดึง, f (N)	พื้นที่, A (mm ²)	f/A, F (N/m ²)	$\frac{F}{2(\lambda - 1/\lambda)}$
5.00	1.05	0.95	0.6	9.71	62,248.7	217,897.8
10.00	1.10	0.91	1.2	9.71	124,396.6	227,371.4
15.00	1.15	0.87	1.8	9.71	184,829.3	234,640.5
20.00	1.20	0.83	2.3	9.71	235,576.7	232,987.9



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงน้ำหนักที่ใช้ในการดึงชิ้นงานที่เวลาต่างๆ

จุดตัดแกน x = $1(C_1 + C_2)$	= 213,333.7 N/m ²	ค่า n ของก๊าซ (R)	= 8,314 kJ/K mol
ความชัน (C_2)	= -136,269.3 N/m ²	อุณหภูมิ	= 303 K
C_1	= 349,602.9 N/m ²	ความหนาแน่นของยาง	= 970 kg/m ³
M_c	= 3,494.9 g/mol		
crosslink density	= 14.0×10^{-5} mol/g		



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ไ้สูญในการกับเวลา

วิธี swelling

ตารางที่ 4.11 แสดงการหา volume fraction

ตัวอย่าง	น้ำหนัก (กรัม)		ปริมาตร (ลบ.ซม.)	
	ก่อน swell	หลัง swell	ก่อน swell	V_r
1	0.0083	0.0356	0.0086	0.2136
2	0.0094	0.0418	0.0097	0.2052
3	0.0109	0.0489	0.0113	0.2048

ตารางที่ 4.12 แสดงการหา crosslink density

ตัวอย่าง	V_r	$V_r^{1/3}$	$\ln(1 - V_r)$	V_r^2	M_c
1	0.2136	0.5977	-0.2403	0.0456	6,005.6149
2	0.2052	0.5898	-0.2296	0.0421	6,537.9683
3	0.2048	0.5894	-0.2292	0.0419	6,561.6061
เฉลี่ย					6,368.3964

ความหนาแน่นของ toluene = 0.8669 g/cm³

$V_0 = 106.2929$ cm³/mol

ความหนาแน่นของ ยาง = 0.97 g/cm³

polymer-solvent parameter = 0.36

crosslink density = 7.8513 E-05

ยางธรรมชาติ

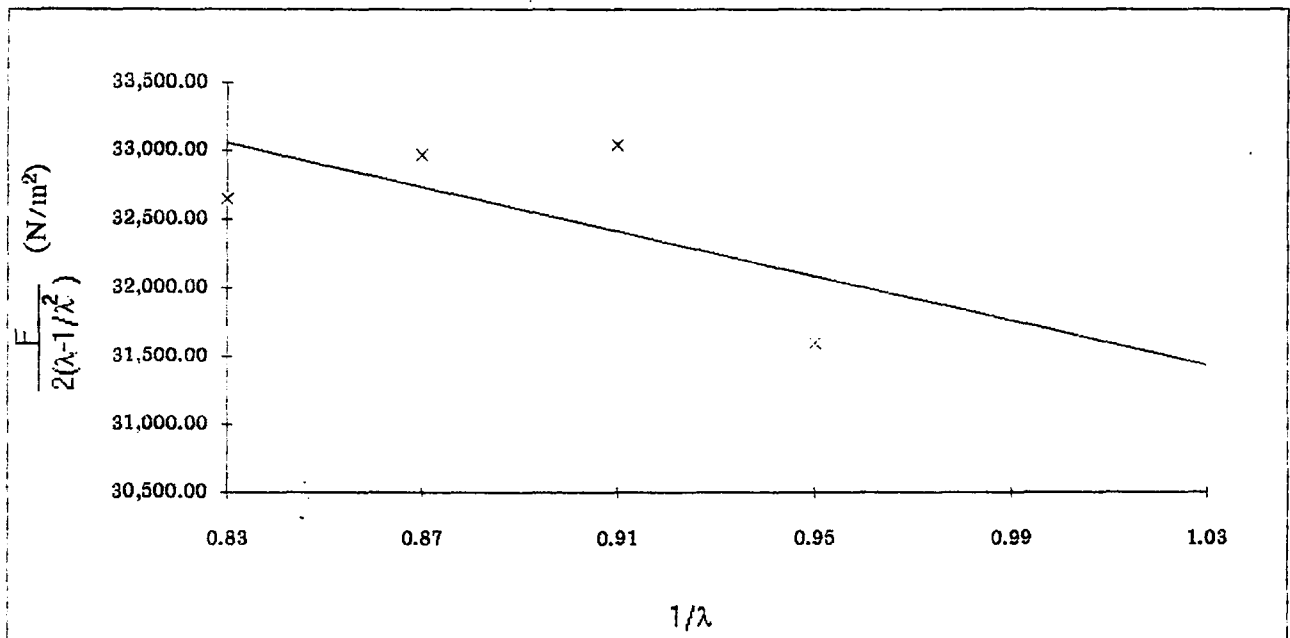
ตัวริเริ่ม : dicumyl peroxide 0.5 phr

ตารางที่ 4.13 แสดงขนาด และพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างในการทดสอบแบบ stress- strain

ตัวอย่างที่	กว้าง (มม.)			หนา (มม.)			พื้นที่หน้าตัดเฉลี่ย
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่1	
1.00	5.15	4.90	5.15	2.00	2.05	2.05	10.30

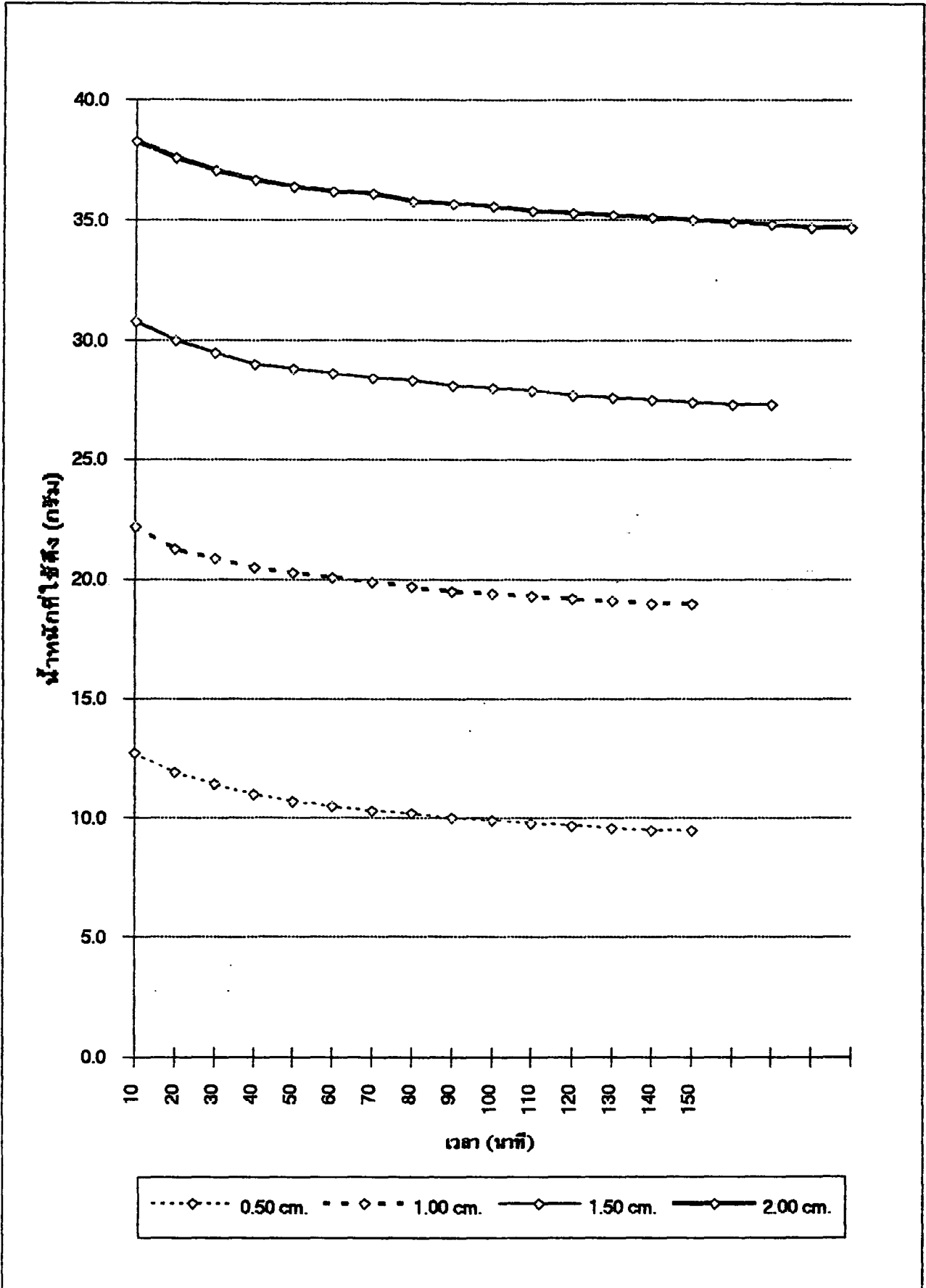
ตารางที่ 4.14 แสดงการหา $1/\lambda$ และ $F/\{2(\lambda - 1/\lambda^2)\}$

ระยะขีด (มม.)	λ	$1/\lambda$	แรงดึง, f (N)	พื้นที่, A (mm ²)	f/A, F (N/m ²)	$\frac{F}{2(\lambda - 1/\lambda^2)}$
5.00	1.05	0.95	0.1	10.30	9,036.9	31,604.0
10.00	1.10	0.91	0.2	10.30	18,073.8	33,035.1
15.00	1.15	0.87	0.3	10.30	25,969.2	32,967.8
20.00	1.20	0.83	0.3	10.30	33,008.4	32,645.7



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงน้ำหนักที่ใช้ในการดึงชิ้นงานที่เวลาต่าง ๆ

จุดตัดแกน x = $1(C_1 - C_2)$	= 31,681.8 N/m ²	ค่านิจของก๊าซ (R)	= 8,314 kJ/K mol
ความชัน (C_2)	= -8,092.5 N/m ²	อุณหภูมิ	= 303 K
C_1	= 39,774.3 N/m ²	ความหนาแน่นของยาง	= 970 kg/m ³
M_c	= 30,719.4 g/mol		
crosslink density	= 1.6×10^{-5} mol/g		



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำที่ uptake ได้ในแก้วกับเวลา

วิธี swelling

ตารางที่ 4.15 แสดงการทำ volume fraction

ตัวอย่าง	น้ำหนัก (กรัม)		ปริมาตร (ลบ.ซม.)	
	ก่อน swell	หลัง swell	ก่อน swell	V_r
1	0.0102	0.1372	0.0105	0.0670
2	0.0079	0.1242	0.0081	0.0572
3	0.0059	0.0798	0.0061	0.0670

ตารางที่ 4.16 แสดงการทำ crosslink density

ตัวอย่าง	V_r	$V_r^{1/3}$	$\ln(1-V_r)$	V_r^2	M_c
1	0.0670	0.4061	-0.0693	0.0045	57,113.9095
2	0.0572	0.3854	-0.0589	0.0033	75,842.8663
3	0.0670	0.4062	-0.0694	0.0045	57,046.6243
เฉลี่ย					63,334.4667

ความหนาแน่นของ toluene = 0.8669 g/cm³

$V_0 = 106.2929$ cm³/mol

ความหนาแน่นของ ยาง = 0.97 g/cm³

polymer-solvent parameter = 0.36

crosslink density = 7.8946 E-06

ยางธรรมชาติ

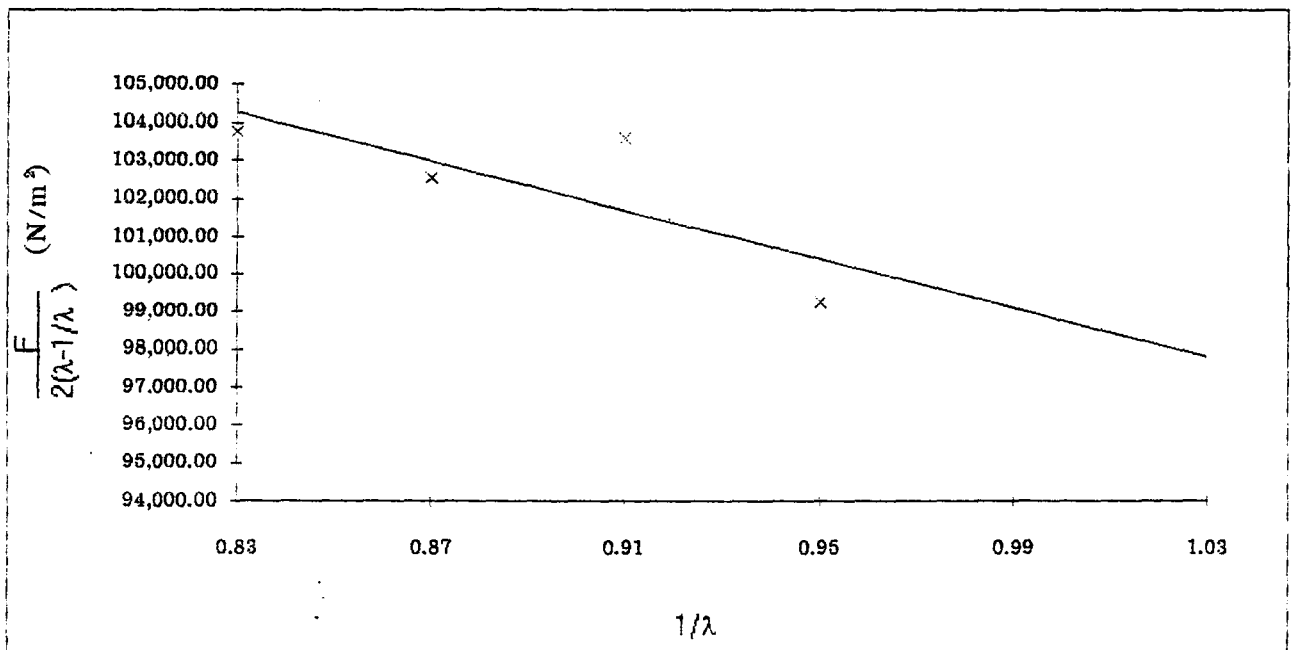
ตัวริเริ่ม : dicumyl peroxide 1.0 phr

ตารางที่ 4.17 แสดงขนาด และพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างในการทดสอบแบบ stress-strain

ตัวอย่างที่	กว้าง (มม.)			หนา (มม.)			พื้นที่หน้าตัดเฉลี่ย
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่1	
1.00	4.95	4.90	5.00	2.15	2.15	2.00	10.40

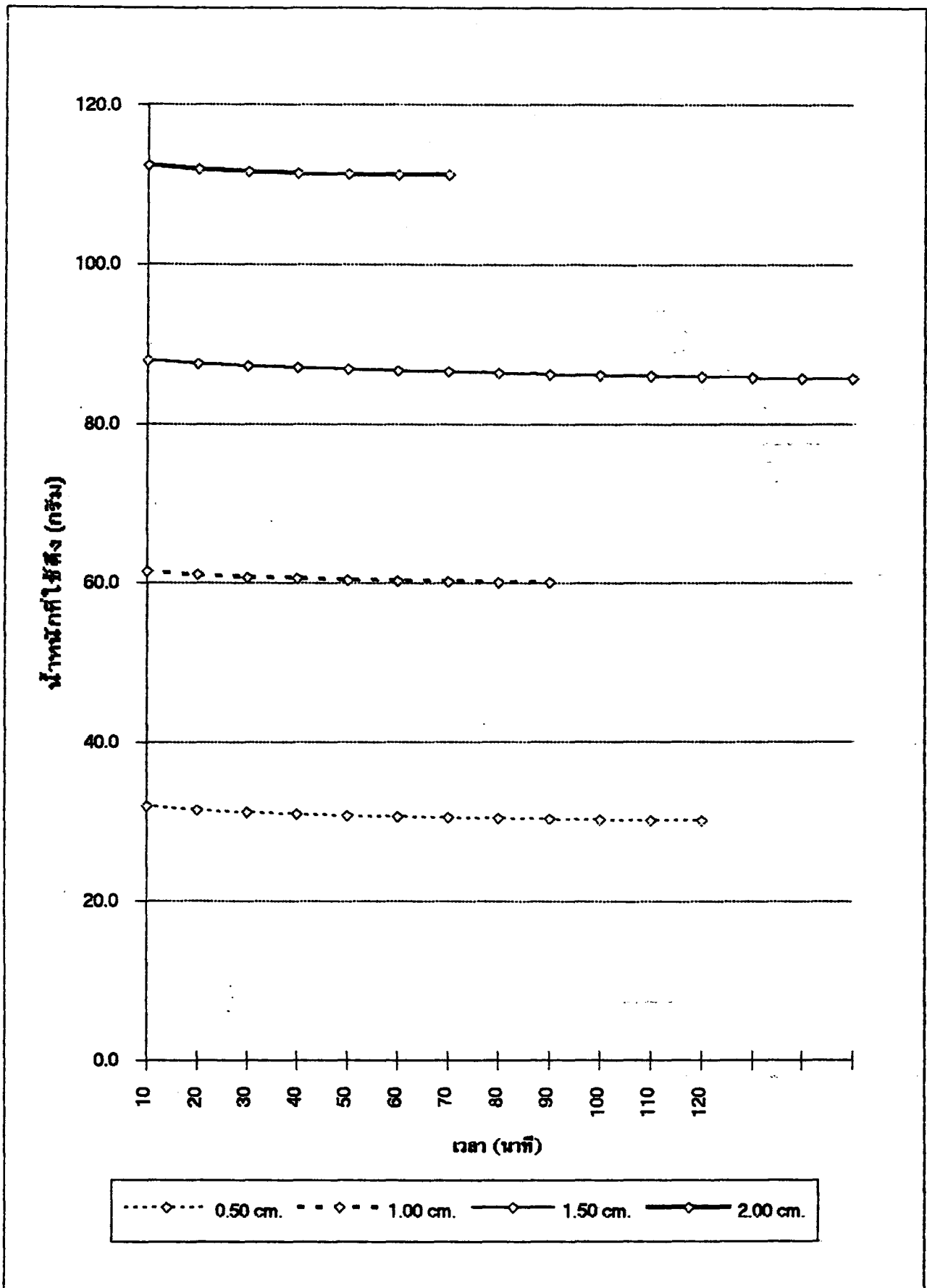
ตารางที่ 4.18 แสดงการทำ $1/\lambda$ และ $F/(2(\lambda - (1/\lambda^2)))$

ระยะขีด (มม.)	λ	$1/\lambda$	แรงดึง, f (N)	พื้นที่, A (mm ²)	f/A, F (N/m ²)	$\frac{F}{2(\lambda - 1/\lambda^2)}$
5.00	1.05	0.95	0.3	10.40	28,377.1	99,241.1
10.00	1.10	0.91	0.6	10.40	56,659.9	103,562.7
15.00	1.15	0.87	0.8	10.40	80,794.6	102,568.6
20.00	1.20	0.83	1.1	10.40	104,929.3	103,776.2



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงน้ำหนักที่ใช้ในการดึงชิ้นงานที่เวลาต่างๆ

จุดตัดแกน x = $1(C + C_2)$	= 98,751.8 N/m ²	ค่า n ของก๊าซ (R)	= 8.314 kJ/K mol
ความชัน (C)	= -32,462.5 N/m ²	อุณหภูมิ	= 303 K
C_2	= 131,214.2 N/m ²	ความหนาแน่นของยาง	= 970 kg/m ³
Mc	= 9,311.6 g/mol		
crosslink density	= 5.4×10^{-5} mol/g		



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ใช้ในการกับเวลา

วิธี swelling

ตารางที่ 4.19 แสดงการทำ volume fraction

ตัวอย่าง	น้ำหนัก (กรัม)		ปริมาตร (ลบ.ซม.)	
	ก่อน swell	หลัง swell	ก่อน swell	V_r
1	0.0089	0.0496	0.0092	0.1642
2	0.0083	0.0478	0.0086	0.1579
3	0.0072	0.0466	0.0074	0.1404

ตารางที่ 4.20 แสดงการทำ crosslink density

ตัวอย่าง	V_r	$V_r^{1/3}$	$\ln(1 - V_r)$	V_r^2	M_c
1	0.1642	0.5476	-0.1793	0.0270	10,344.3956
2	0.1579	0.5405	-0.1719	0.0249	11,181.9869
3	0.1404	0.5197	-0.1513	0.0197	14,138.8563
เฉลี่ย					11,888.4129

ความหนาแน่นของ toluene = 0.8669 g/cm^3

$V_0 = 106.2929 \text{ cm}^3/\text{mol}$

ความหนาแน่นของ ยาง = 0.97 g/cm^3

polymer-solvent parameter = 0.36

crosslink density = 4.2058 E-05

ยางธรรมชาติ

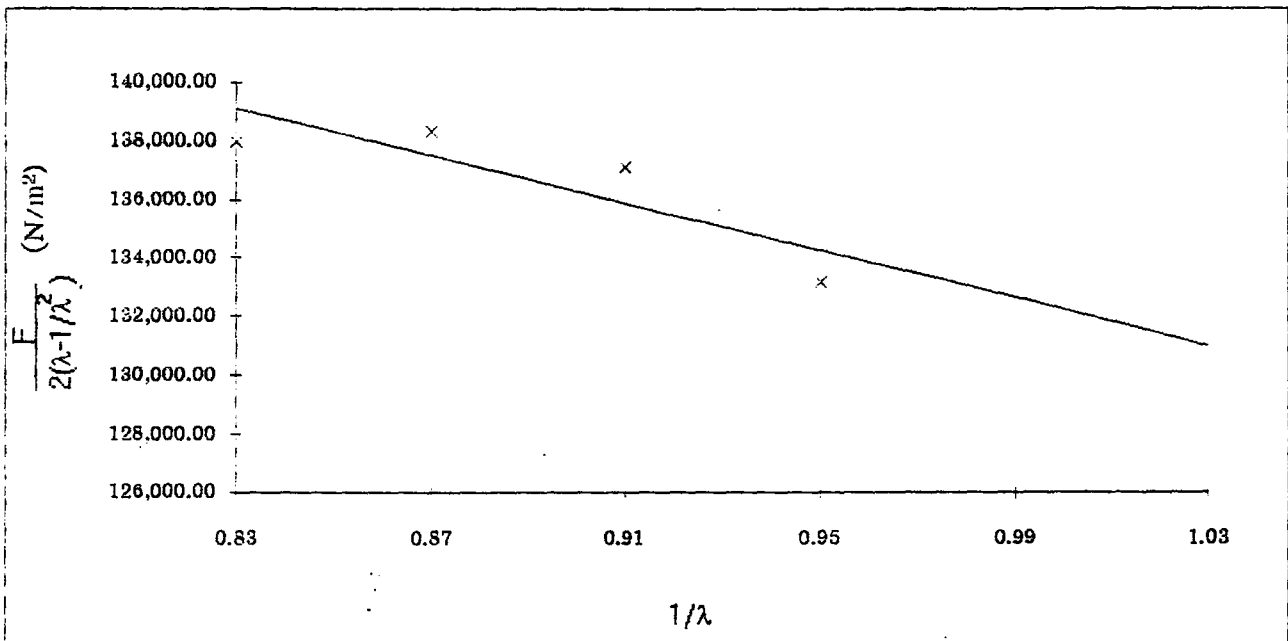
ตัวริเริ่ม : dicumyl peroxide 1.5 phr

ตารางที่ 4.21 แสดงขนาด และพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างในการทดสอบแบบ stress-strain

ตัวอย่างที่	กว้าง (มม.)			หนา (มม.)			พื้นที่หน้าตัดเฉลี่ย
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่1	
1.00	5.15	5.00	4.90	2.05	2.10	2.10	10.45

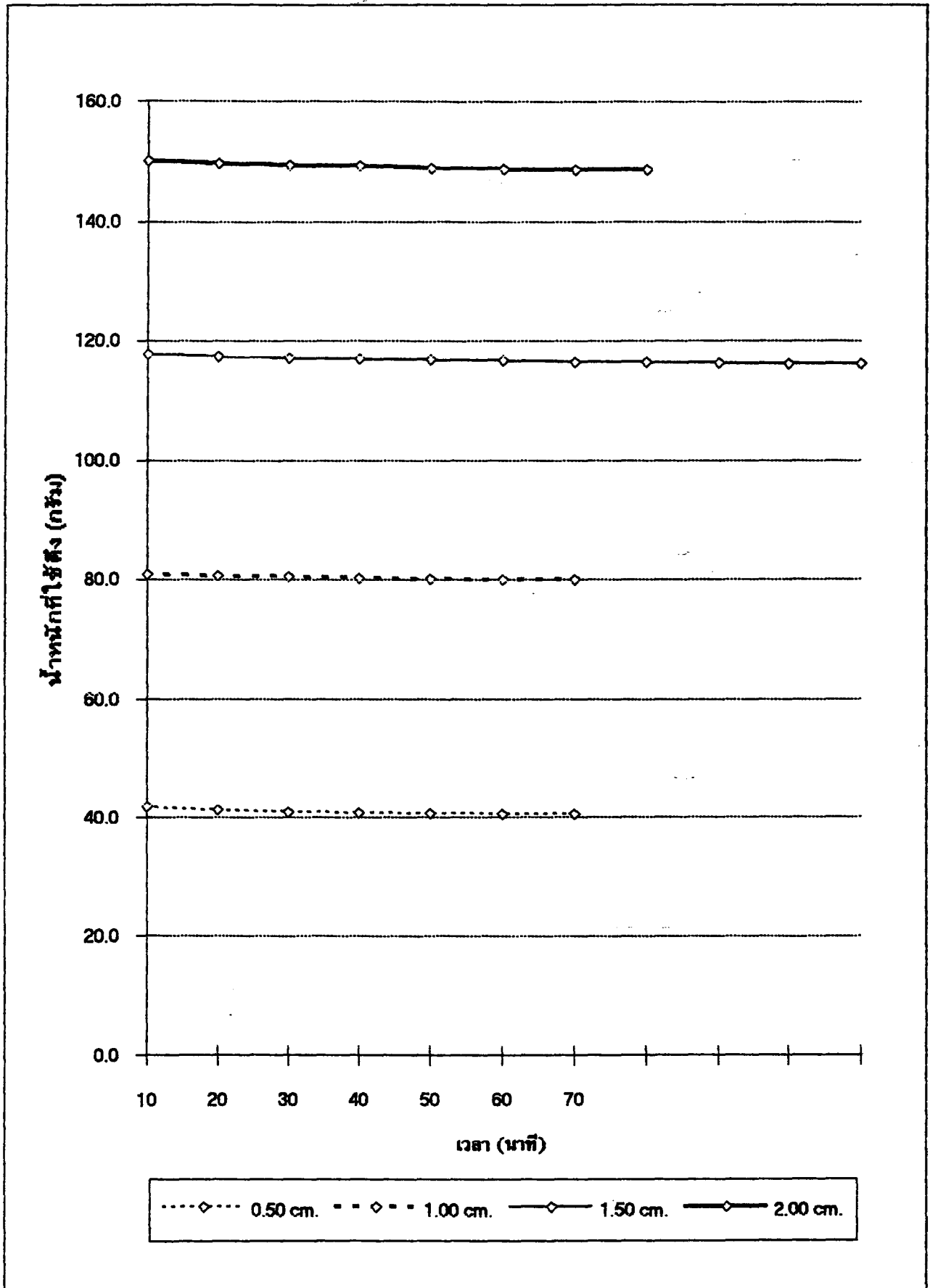
ตารางที่ 4.22 แสดงการหา $1/\lambda$ และ $F/[2(\lambda - 1/\lambda^2)]$

ระยะขีด (มม.)	λ	$1/\lambda$	แรงดึง, f (N)	พื้นที่, A (mm ²)	f/A, F (N/m ²)	$\frac{F}{2(\lambda - 1/\lambda^2)}$
5.00	1.05	0.95	0.4	10.45	38,069.6	133,137.9
10.00	1.10	0.91	0.8	10.45	75,014.0	137,110.1
15.00	1.15	0.87	1.1	10.45	108,957.8	138,321.7
20.00	1.20	0.83	1.5	10.45	139,526.0	137,992.7



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงน้ำหนักที่ใช้ในการดึงชิ้นงานที่เวลาต่าง ๆ

จุดตัดแกน $x = 1(C_1 + C_2)$	= 132,210.7 N/m ²	ค่าคงของก๊าซ (R)	= 8.314 kJ/K mol
ความชัน (C_2)	= -40,675.4 N/m ²	อุณหภูมิ	= 303 K
C_1	= 172,886.2 N/m ²	ความหนาแน่นของยาง	= 970 kg/m ³
Mc	= 7,067.3 g/mol		
crosslink density	= 7.1×10^{-5} mol/g		



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ใช้ในกรากับเวลา

วิธี swelling

ตารางที่ 4.23 แสดงการทำ volume fraction

ตัวอย่าง	น้ำหนัก (กรัม)		ปริมาตร (ลบ.ซม.)	
	ก่อน swell	หลัง swell	ก่อน swell	V_r
1	0.0104	0.0614	0.0107	0.1538
2	0.0114	0.0662	0.0117	0.1563
3	0.0103	0.0669	0.0106	0.1398

ตารางที่ 4.24 แสดงการทำ crosslink density

ตัวอย่าง	V_r	$V_r^{1/3}$	$\ln(1 - V_r)$	V_r^2	M_c
1	0.1538	0.5357	-0.1669	0.0236	11,801.0582
2	0.1563	0.5387	-0.1700	0.0244	11,416.2265
3	0.1398	0.5190	-0.1506	0.0195	14,252.3481
เฉลี่ย					12,489.8776

ความหนาแน่นของ toluene = 0.8669 g/cm³

$V_0 = 106.2929$ cm³/mol

ความหนาแน่นของ ขาง = 0.97 g/cm³

polymer-solvent parameter = 0

crosslink density = 4.0032 E-05

SBR

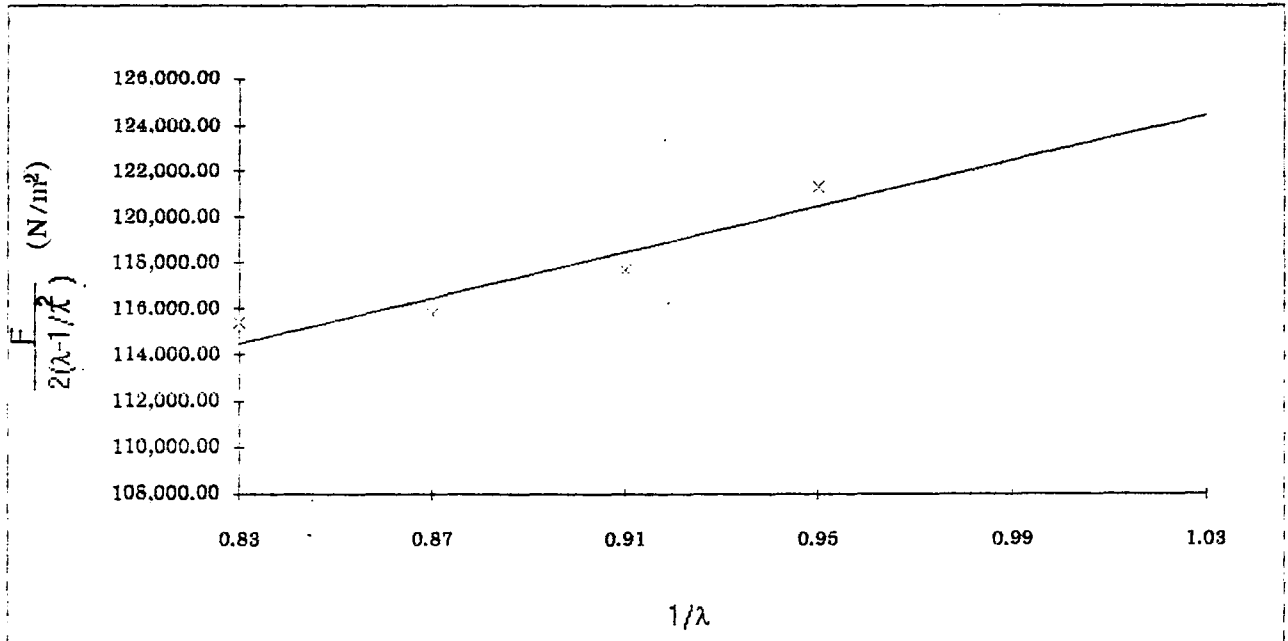
สารเชื่อมโยง : sulphur 0.5 phr

ตารางที่ 4.25 แสดงขนาด และพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างในการทดสอบแบบ stress-strain

ตัวอย่างที่	กว้าง (มม.)			หนา (มม.)			พื้นที่หน้าตัดเฉลี่ย
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่1	
1.00	5.15	5.00	5.15	2.05	2.10	2.00	10.46

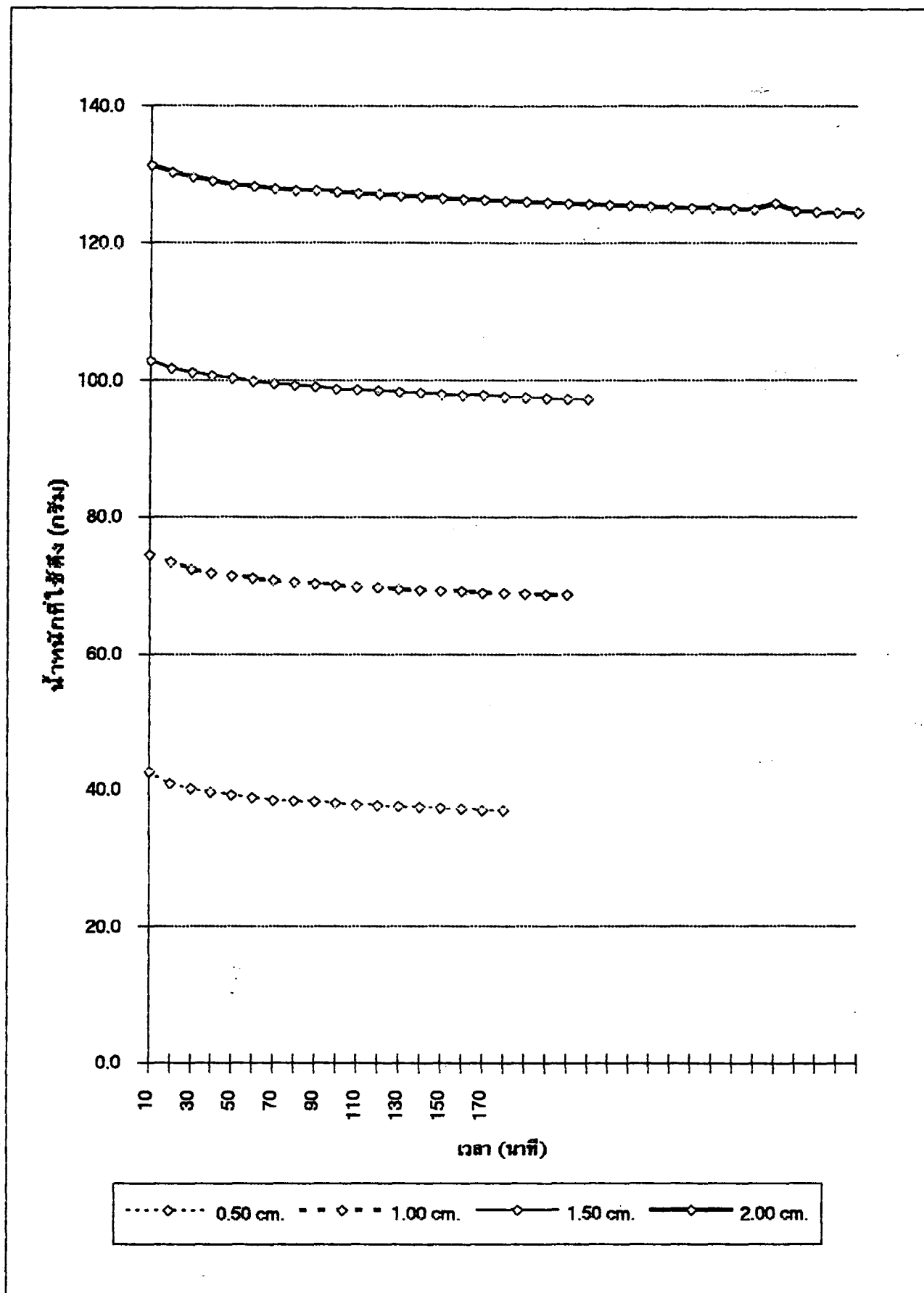
ตารางที่ 4.26 แสดงการหา $1/\lambda$ และ $F/(2(\lambda - (1/\lambda^2)))$

ระยะขีด (มม.)	λ	$1/\lambda$	แรงดึง, f (N)	พื้นที่, A (mm ²)	f/A, F (N/m ²)	$\frac{F}{2(\lambda - 1/\lambda)}$
5.00	1.05	0.95	0.4	10.46	34,682.0	121,290.6
10.00	1.10	0.91	0.7	10.46	64,396.0	117,702.6
15.00	1.15	0.87	1.0	10.46	91,204.2	115,783.6
20.00	1.20	0.83	1.2	10.46	116,700.1	115,417.7



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงน้ำหนักที่ใช้ในการดึงชิ้นงานที่เวลาต่างๆ

จุดตัดแกน $x = 1(C_1 + C_2)$	= 122,983.0 N/m ²	ค่า n ของก๊าซ (R)	= 8,314 kJ/K mol
ความชัน (C_2)	= 49,898.6 N/m ²	อุณหภูมิ	= 303 K
C_1	= 73,084.4 N/m ²	ความหนาแน่นของยาง	= 970 kg/m ³
M_c	= 16,890.6 g/mol		
crosslink density	= 3.0×10^{-5} mol/g		



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ใช้ในการกับเวลา

วิธี swelling

ตารางที่ 4.27 แสดงการทำ volume fraction

ตัวอย่าง	น้ำหนัก (กรัม)		ปริมาตร (ลบ.ซม.)	
	ก่อน swell	หลัง swell	ก่อน swell	V_r
1	0.0089	0.0683	0.0092	0.1186
2	0.0089	0.0713	0.0092	0.1135
3	0.0114	0.0880	0.0117	0.1170

ตารางที่ 4.28 แสดงการทำ crosslink density

ตัวอย่าง	V_r	$V_r^{1/3}$	$\ln(1-V_r)$	V_r^2	M_c
1	0.1186	0.4913	-0.1263	0.0141	19,630.7726
2	0.1135	0.4842	-0.1205	0.0129	21,350.4098
3	0.1170	0.4891	-0.1244	0.0137	20,154.8480
เฉลี่ย					20,378.6768

ความหนาแน่นของ toluene = 0.8669 g/cm³

$V_0 = 106.2929$ cm³/mol

ความหนาแน่นของ ยาง = 0.97 g/cm³

polymer-solvent parameter = 0.36

crosslink density = 2.4535 E-05

SBR

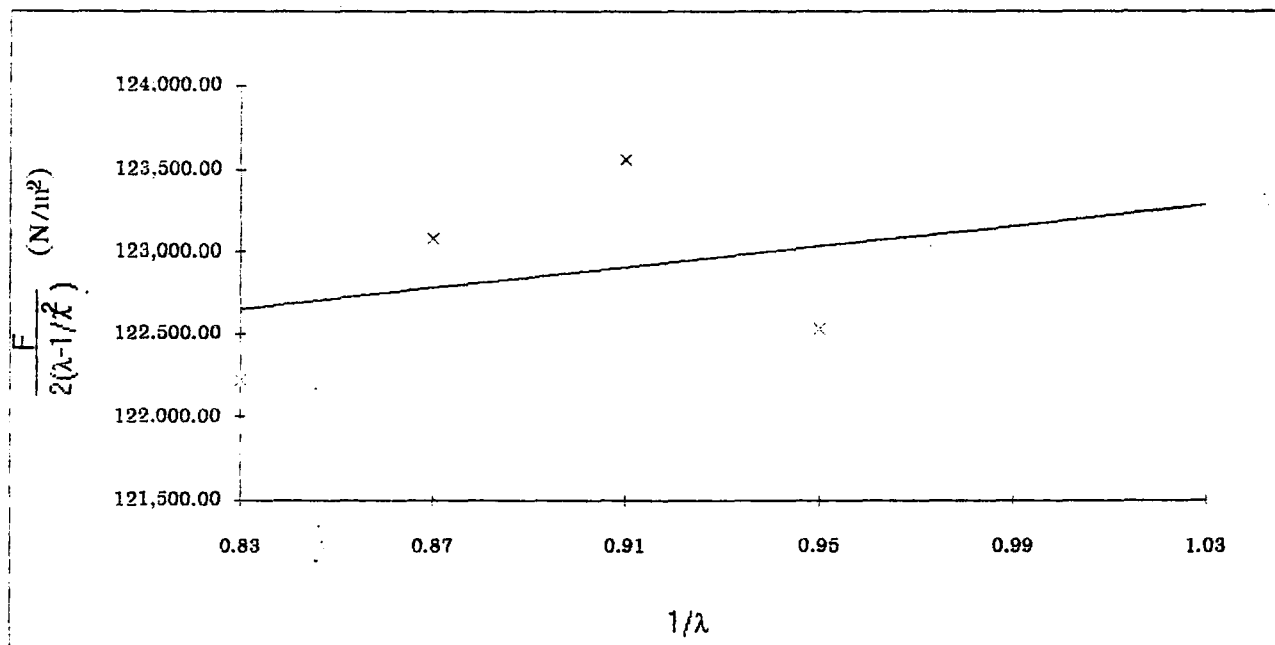
สารเชื่อมโยง : sulphur 1.0 phr

ตารางที่ 4.29 แสดงขนาด และพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างในการทดสอบแบบ stress-strain

ตัวอย่างที่	กว้าง (มม.)			หนา (มม.)			พื้นที่หน้าตัดเฉลี่ย
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่1	
1.00	5.35	5.35	5.15	2.25	2.30	2.20	11.89

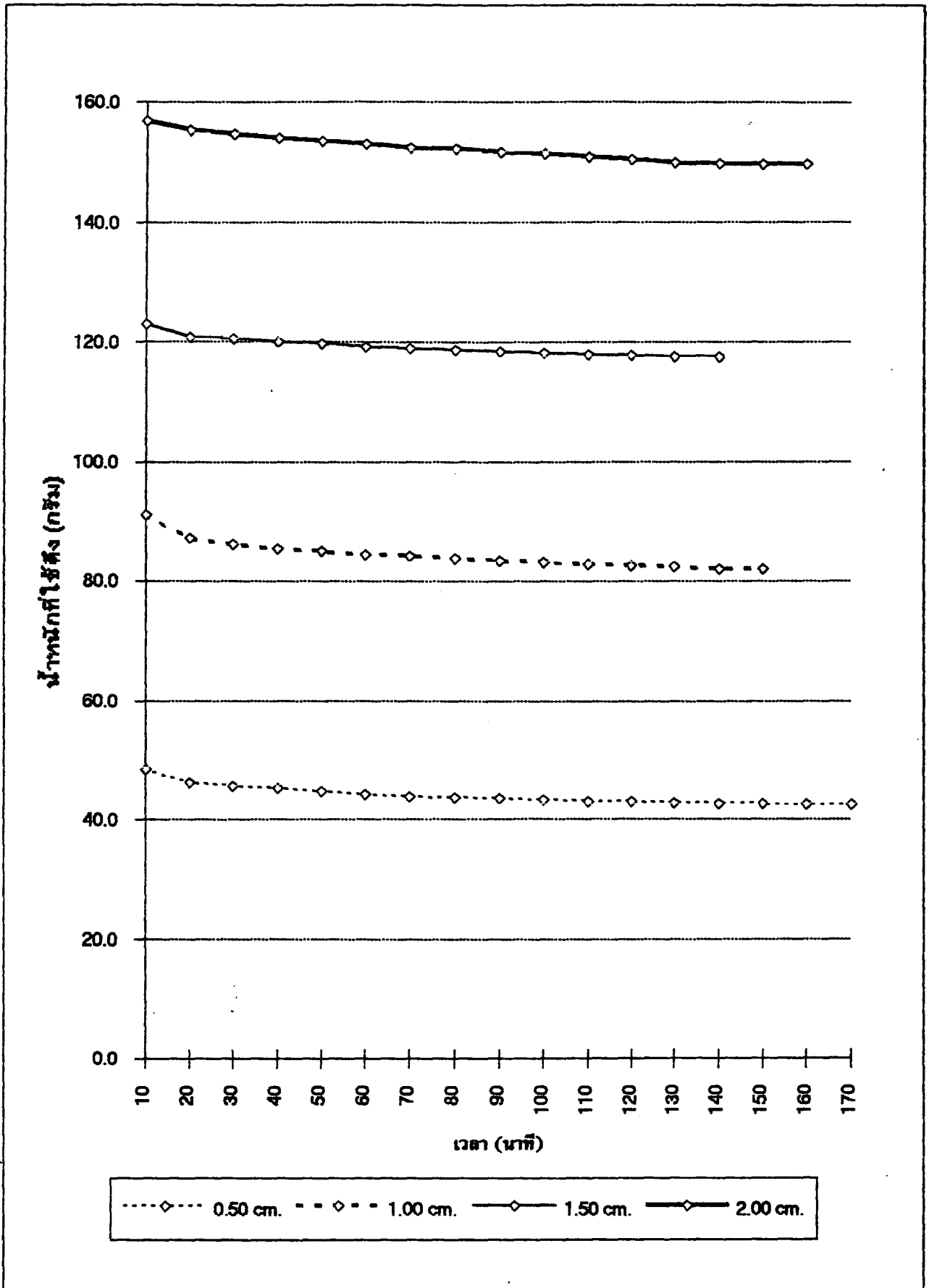
ตารางที่ 4.30 แสดงการหา $1/\lambda$ และ $F/(2(\lambda - (1/\lambda^2)))$

ระยะขีด (มม.)	λ	$1/\lambda$	แรงดึง, f (N)	พื้นที่, A (mm ²)	f/A, F (N/m ²)	$\frac{F}{2(\lambda - 1/\lambda)}$
5.00	1.05	0.95	0.4	11.89	35,036.8	122,531.6
10.00	1.10	0.91	0.8	11.89	67,600.4	123,559.7
15.00	1.15	0.87	1.2	11.89	96,948.9	123,076.5
20.00	1.20	0.83	1.5	11.89	123,576.9	122,218.9



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงน้ำหนักที่ใช้ในการดึงชิ้นงานที่เวลาต่างๆ

จุดตัดแกน x = $1(C_1 + C_2)$	= 123,189.9 N/m ²	ค่า n ของก๊าซ (R)	= 8,314 kJ/K mol
ความชัน (C_2)	= 3,151.7 N/m ²	อุณหภูมิ	= 303 K
C_1	= 120,038.2 N/m ²	ความหนาแน่นของยาง	= 970 kg/m ³
Mc	= 10,283.7 g/mol		
crosslink density	= 4.9×10^{-5} mol/g		



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ใช้ในการกับเวลา

วิธี swelling

ตารางที่ 4.31 แสดงการทำ volume fraction

ตัวอย่าง	น้ำหนัก (กรัม)		ปริมาตร (ลบ.ซม.)	
	ก่อน swell	หลัง swell	ก่อน swell	V_r
1	0.0101	0.0503	0.0104	0.1838
2	0.0081	0.0402	0.0083	0.1834
3	0.0087	0.0428	0.0090	0.1864

ตารางที่ 4.32 แสดงการทำ crosslink density

ตัวอย่าง	V_r	$V_r^{1/3}$	$\ln(1 - V_r)$	V_r^2	M_c
1	0.1838	0.5686	-0.2031	0.0338	8,216.0373
2	0.1834	0.5682	-0.2026	0.0336	8,254.0595
3	0.1864	0.5712	-0.2063	0.0347	7,982.0899
เฉลี่ย					8,150.7289

ความหนาแน่นของ toluene = 0.8669 g/cm³

$V_0 = 106.2929$ cm³/mol

ความหนาแน่นของ ยาง = 0.97 g/cm³

polymer-solvent parameter = 0.36

crosslink density = 6.1344 E-05

SBR

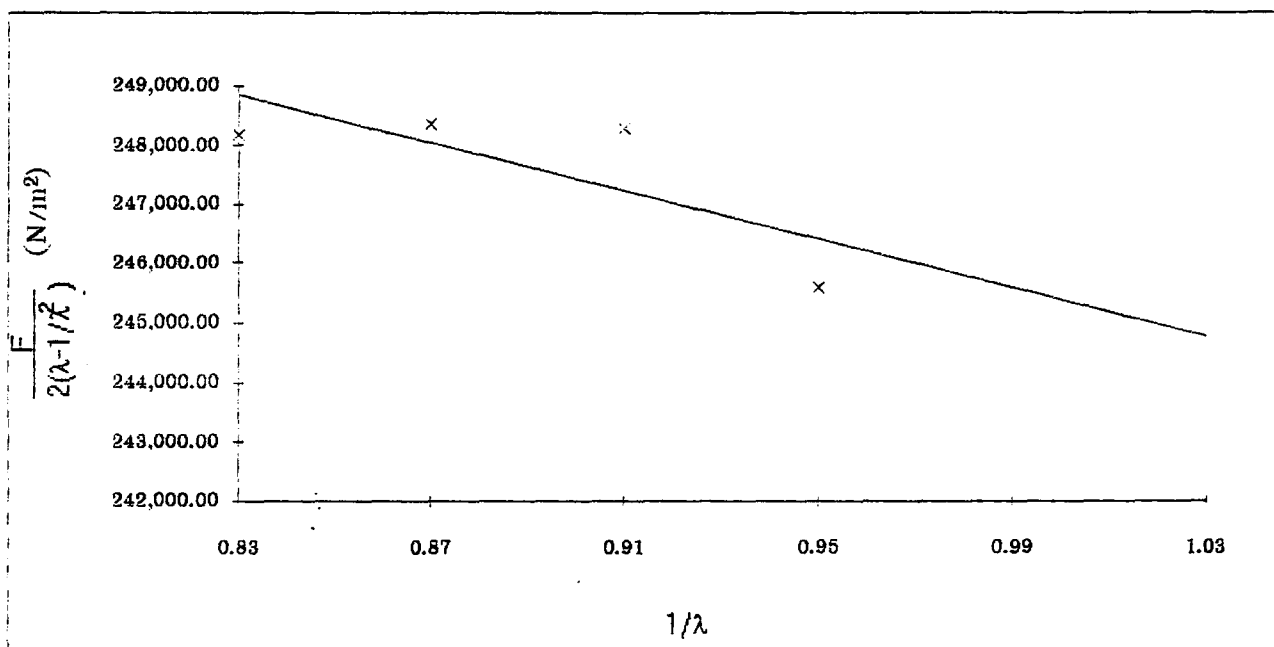
สารเชื่อมโยง : sulphur 2.0 phr

ตารางที่ 4.33 แสดงขนาด และพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างในการทดสอบแบบ stress- strain

ตัวอย่างที่	กว้าง (มม.)			หนา (มม.)			พื้นที่หน้าตัดเฉลี่ย
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่1	
1.00	5.10	5.05	4.90	1.95	1.95	1.95	9.78

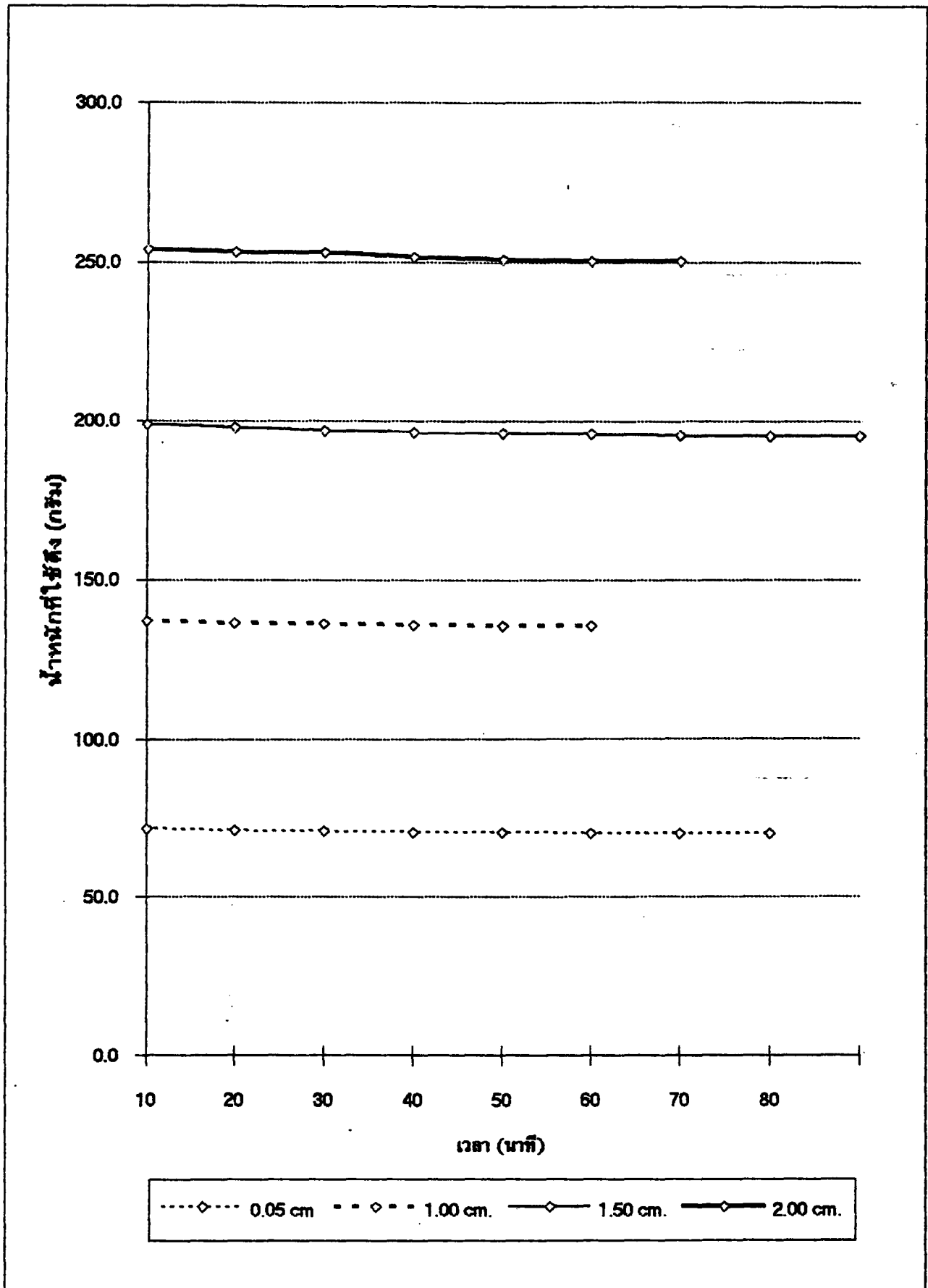
ตารางที่ 4.34 แสดงการหา $1/\lambda$ และ $F/(2(\lambda - (1/\lambda^2)))$

ระยะขีด (มม.)	λ	$1/\lambda$	แรงดึง, f (N)	พื้นที่, A (mm ²)	f/A, F (N/m ²)	$\frac{F}{2(\lambda - 1/\lambda)}$
5.00	1.05	0.95	0.7	9.78	70,225.4	245,594.0
10.00	1.10	0.91	1.3	9.78	135,842.6	248,292.3
15.00	1.15	0.87	1.9	9.78	195,649.4	248,376.6
20.00	1.20	0.83	2.5	9.78	250,948.1	248,190.4



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงน้ำหนักที่ใช้ในการดึงชิ้นงานที่เวลาต่างๆ

จุดตัดแกน x = $1(C_1 + C_2)$	= 245,383.9 N/m ²	ค่า n ของก๊าซ (R)	= 8.314 kJ/K mol
ความชัน (C_2)	= -20,470.9 N/m ²	อุณหภูมิ	= 303 K
C_1	= 265,854.8 N/m ²	ความหนาแน่นของยาง	= 970 kg/m ³
M_c	= 4,643.3 g/mol		
crosslink density	= 11.0×10^{-5} mol/g		



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ใช้ในการกับเวลา

วิธี swelling

ตารางที่ 4.35 แสดงการหา volume fraction

ตัวอย่าง	น้ำหนัก (กรัม)		ปริมาตร (ลบ.ซม.)	
	ก่อน swell	หลัง swell	ก่อน swell	V_r
1	0.0136	0.0670	0.0141	0.1857
2	0.0099	0.0493	0.0102	0.1834
3	0.0123	0.0600	0.0126	0.1867

ตารางที่ 4.36 แสดงการหา crosslink density

ตัวอย่าง	V_r	$V_r^{1/3}$	$\ln(1 - V_r)$	V_r^2	M_c
1	0.1857	0.5706	-0.2055	0.0345	12,003.1243
2	0.1834	0.5682	-0.2026	0.0336	12,346.7724
3	0.1867	0.5716	-0.2067	0.0349	11,863.1765
เฉลี่ย					12,071.0244

ความหนาแน่นของ toluene = 0.8669 g/cm³

$V_0 = 106.2929$ cm³/mol

ความหนาแน่นของ ยาง = 0.97 g/cm³

polymer-solvent parameter = 0.43

crosslink density = 4.1422 E-05

SBR

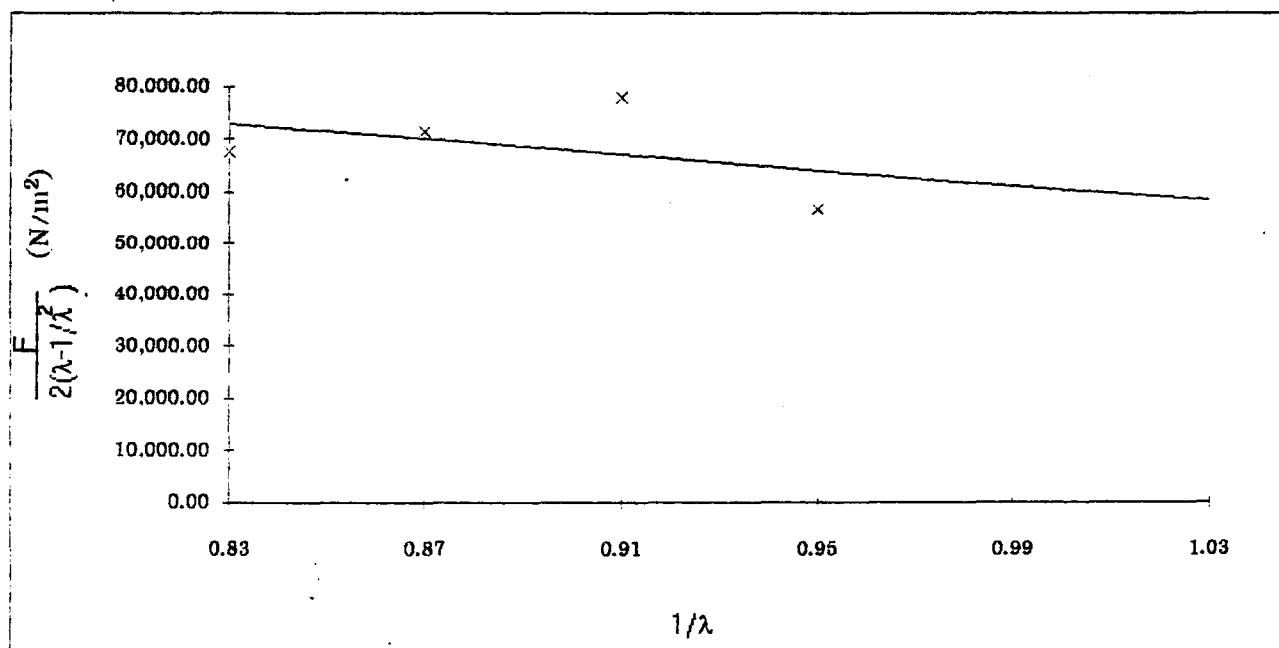
ตัวริเริ่ม : dicumylperoxide 0.5 phr

ตารางที่ 4.37 แสดงขนาด และพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างในการทดสอบแบบ stress- strain

ตัวอย่างที่	กว้าง (มม.)			หนา (มม.)			พื้นที่หน้าตัดเฉลี่ย
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่1	
1.00	4.80	5.10	5.00	2.25	2.50	2.20	11.51

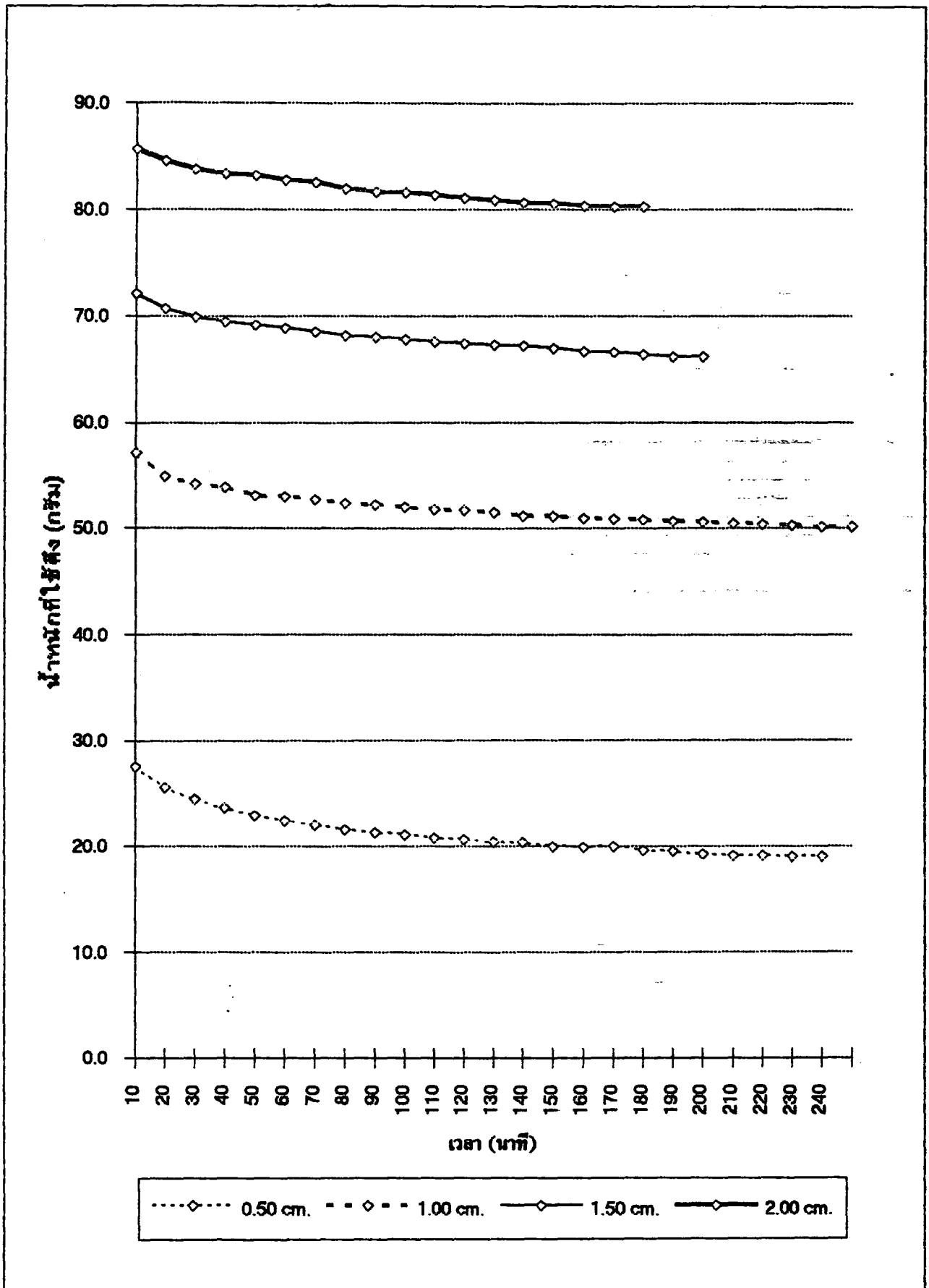
ตารางที่ 4.38 แสดงการหา $1/\lambda$ และ $F/[2(\lambda - (1/\lambda^2))]$

ระยะขีด (มม.)	λ	$1/\lambda$	แรงดึง, f (N)	พื้นที่, A (mm ²)	f/A, F (N/m ²)	$\frac{F}{2(\lambda - 1/\lambda)}$
5.00	1.05	0.95	0.2	11.51	16,182.7	56,594.6
10.00	1.10	0.91	0.5	11.51	42,756.4	78,149.9
15.00	1.15	0.87	0.6	11.51	56,384.0	71,579.3
20.00	1.20	0.83	0.8	11.51	68,393.2	67,641.6



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงน้ำหนักที่ใช้ในการดึงชิ้นงานที่เวลาต่าง ๆ

จุดตัดแกน x = $1(C_1 + C_2)$	= 60,576.1 N/m ²	ค่าคงของก๊าซ (R)	= 8,314 kJ/K mol
ความชัน (C_2)	= -72,679.2 N/m ²	อุณหภูมิ	= 303 K
C_1	= 133,255.3 N/m ²	ความหนาแน่นของยาง	= 970 kg/m ³
M_c	= 9,263.7 g/mol		
crosslink density	= 5.4×10^{-5} mol/g		



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ไอน้ำกับเวลา

วิธี swelling

ตารางที่ 4.39 แสดงการทำ volume fraction

ตัวอย่าง	น้ำหนัก (กรัม)		ปริมาตร (ลบ.ซม.)	
	ก่อน swell	หลัง swell	ก่อน swell	V_r
1	0.0124	0.1573	0.0128	0.0712
2	0.0134	0.1578	0.0138	0.0766
3	0.0123	0.1485	0.0126	0.0745

ตารางที่ 4.40 แสดงการทำ crosslink density

ตัวอย่าง	V_r	$V_r^{1/3}$	$\ln(1 - V_r)$	V_r^2	M_c
1	0.0712	0.4145	-0.0739	0.0051	88,602.3121
2	0.0766	0.4246	-0.0797	0.0059	76,911.2231
3	0.0745	0.4207	-0.0774	0.0055	81,193.9459
เฉลี่ย					82,235.8270

ความหนาแน่นของ toluene = 0.8669 g/cm³

$V_0 = 106.2929$ cm³/mol

ความหนาแน่นของ ยาง = 0.97 g/cm³

polymer-solvent parameter = 0.43

crosslink density = 6.0801 E-06

SBR

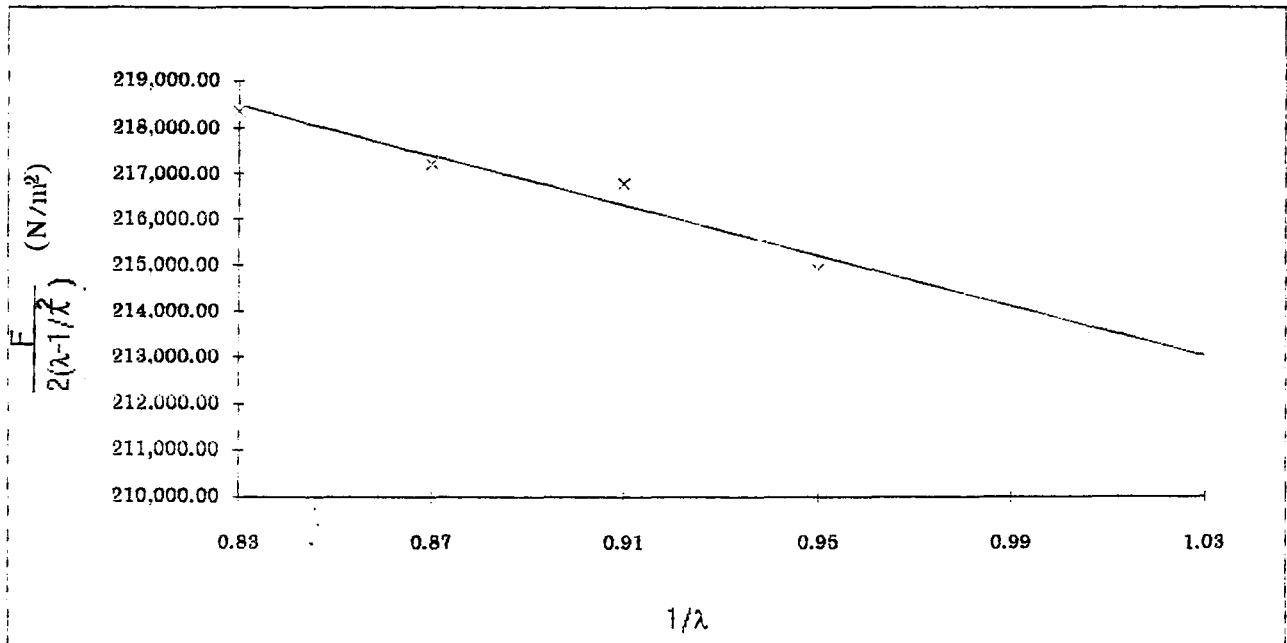
ตัวริเริ่ม : dicumylperoxide 1.0 phr

ตารางที่ 4.41 แสดงขนาด และพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างในการทดสอบแบบ stress-strain

ตัวอย่างที่	กว้าง (มม.)			หนา (มม.)			พื้นที่หน้าตัดเฉลี่ย
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่1	
1.00	5.20	5.15	5.15	2.50	2.25	2.50	12.49

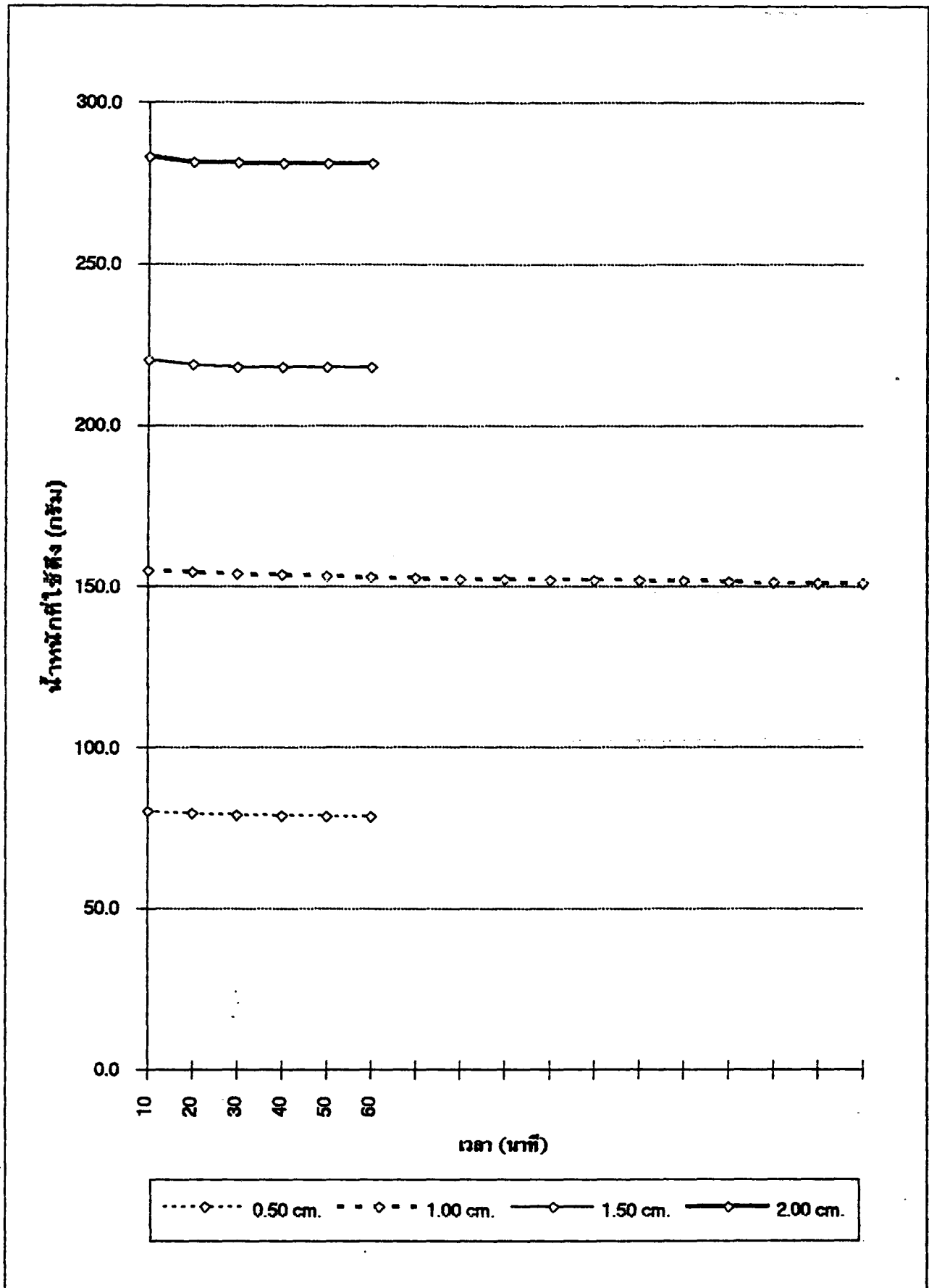
ตารางที่ 4.42 แสดงกราฟหา $1/\lambda$ และ $F/(2(\lambda - (1/\lambda^2)))$

ระยะยืด (มม.)	λ	$1/\lambda$	แรงดึง, f (N)	พื้นที่, A (mm ²)	f/A, F (N/m ²)	$\frac{F}{2(\lambda - 1/\lambda)}$
5.00	1.05	0.95	0.8	12.49	61,455.5	214,923.6
10.00	1.10	0.91	1.5	12.49	118,594.2	216,765.8
15.00	1.15	0.87	2.1	12.49	171,102.1	217,213.9
20.00	1.20	0.83	2.8	12.49	220,784.5	218,358.3



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงน้ำหนักที่ใช้ในการดึงชิ้นงานที่เวลาต่าง ๆ

จุดตัดแกน x = $1(C_1 + C_2)$	= 213,850.3 N/m ²	ค่า n ของก๊าซ (R)	= 8,314 kJ/K mol
ความชัน (C_2)	= -27,225.8 N/m ²	อุณหภูมิ	= 303 K
C_1	= 241,076.1 N/m ²	ความหนาแน่นของยาง	= 970 kg/m ³
M_c	= 5,120.5 g/mol		
crosslink density	= 9.8×10^{-6} mol/g		



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรู้ใช้สิ่งในกรรกับเวลา

วิธี swelling

ตารางที่ 4.43 แสดงการหา volume fraction

ตัวอย่าง	น้ำหนัก (กรัม)		ปริมาตร (ลบ.ซม.)	
	ก่อน swell	หลัง swell	ก่อน swell	V_r
1	0.0115	0.0561	0.0119	0.1877
2	0.0081	0.0411	0.0084	0.1808
3	0.0081	0.0397	0.0084	0.1862

ตารางที่ 4.44 แสดงการหา crosslink density

ตัวอย่าง	V_r	$V_r^{1/3}$	$\ln(1-V_r)$	V_r^2	M_c
1	0.1877	0.5726	-0.2079	0.0352	11,718.6041
2	0.1808	0.5655	-0.1995	0.0327	12,748.8530
3	0.1862	0.5710	-0.2060	0.0347	11,937.4426
เฉลี่ย					12,134.9666

ความหนาแน่นของ toluene = 0.8669 g/cm³

$V_0 = 106.2929$ cm³/mol

ความหนาแน่นของ ยาง = 0.97 g/cm³

polymer-solvent parameter = 0.43

crosslink density = 4.1203 E-05

SBR

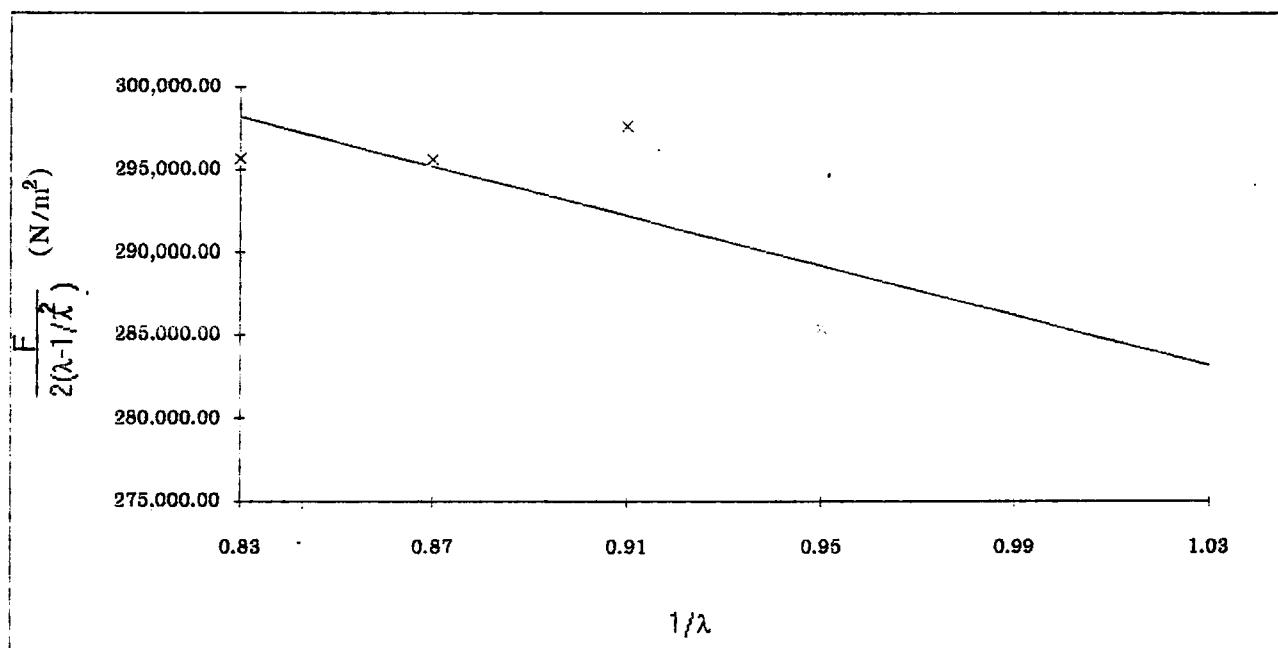
ตัวริเริ่ม : dicumyl peroxide 1.5 phr

ตารางที่ 4.45 แสดงขนาด และพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างในการทดสอบแบบ stress- strain

ตัวอย่างที่	กว้าง (มม.)			หนา (มม.)			พื้นที่หน้าตัดเฉลี่ย
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่1	
1.00	5.15	5.05	5.20	2.45	2.55	2.60	13.00

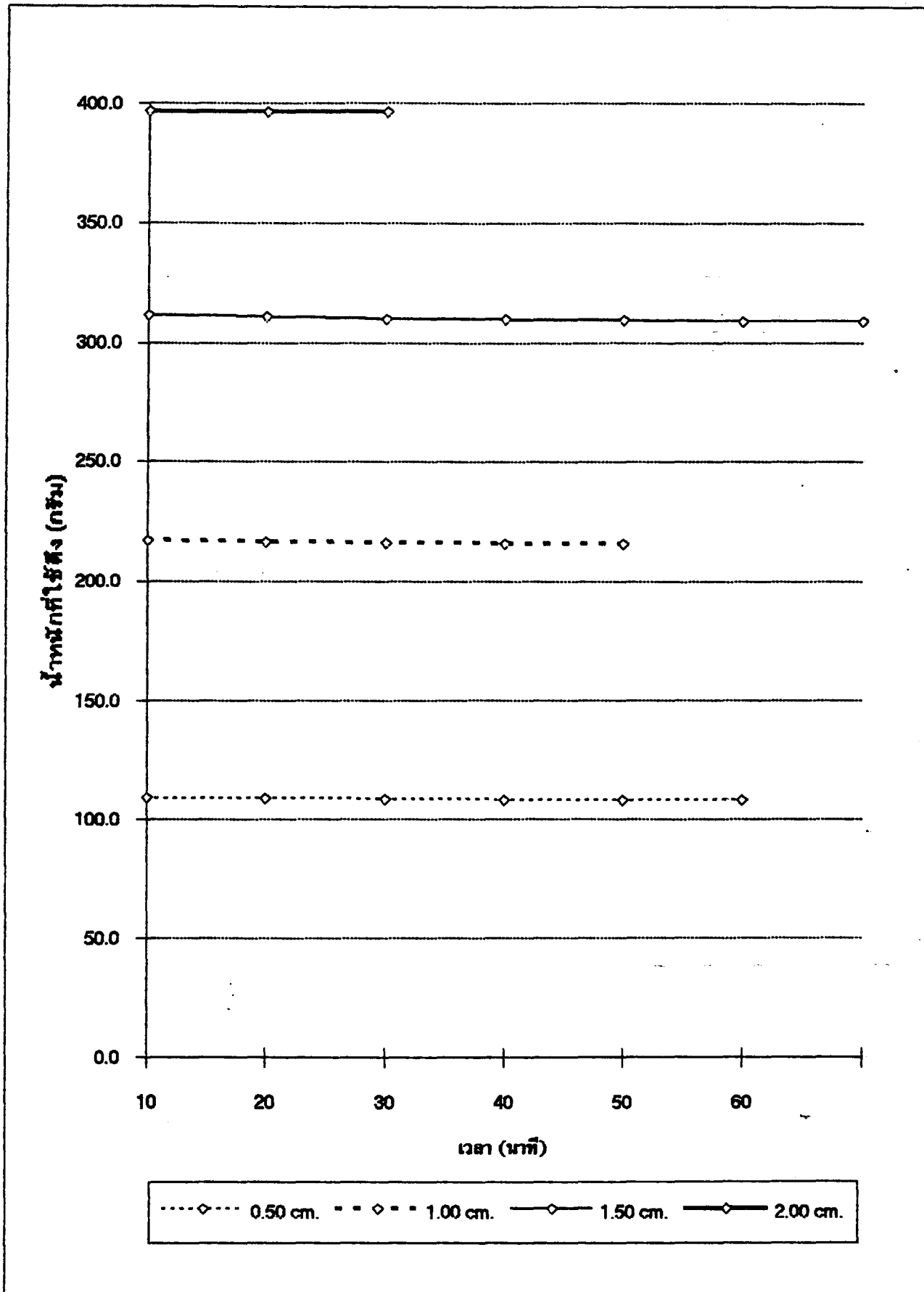
ตารางที่ 4.46 แสดงการหา $1/\lambda$ และ $F/[2(\lambda - (1/\lambda^2))]$

ระยะยืด (มม.)	λ	$1/\lambda$	แรงดึง, f (N)	พื้นที่, A (mm ²)	f/A, F (N/m ²)	$\frac{F}{2(\lambda - 1/\lambda)}$
5.00	1.05	0.95	1.1	13.00	81,613.6	285,421.2
10.00	1.10	0.91	2.1	13.00	162,850.5	297,657.2
15.00	1.15	0.87	3.0	13.00	232,858.9	295,613.9
20.00	1.20	0.83	3.9	13.00	298,948.6	295,663.4



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงน้ำหนักที่ใช้ในการดึงชิ้นงานที่เวลาต่าง ๆ

จุดตัดแกน x = $1(C_1 + C_2)$	= 285,423.7 N/m ²	ค่าคงของก๊าซ (R)	= 8.314 kJ/K mol
ความชัน (C_2)	= -74,974.1 N/m ²	อุณหภูมิ	= 303 K
C_1	= 360,397.8 N/m ²	ความหนาแน่นของยาง	= 970 kg/m ³
M_c	= 3.425.2 g/mol		
crosslink density	= 15.0×10^{-5} mol/g		



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ใช้ในการกับเวลา

วิธี swelling

ตารางที่ 4.47 แสดงการหา volume fraction

ตัวอย่าง	น้ำหนัก (กรัม)		ปริมาตร (ลบ.ซม.)	
	ก่อน swell	หลัง swell	ก่อน swell	V _r
1	0.0104	0.0421	0.0108	0.2275
2	0.0164	0.0711	0.0169	0.2114
3	0.0090	0.0389	0.0093	0.2121

ตารางที่ 4.48 แสดงการหา crosslink density

ตัวอย่าง	V _r	V _r ^{1/3}	ln (1 - V _r)	V _r ²	M _c
1	0.2275	0.6105	-0.2581	0.0518	7,520.7678
2	0.2114	0.5957	-0.2375	0.0447	8,929.4973
3	0.2121	0.5963	-0.2383	0.0450	8,863.9949
เฉลี่ย					8,438.0867

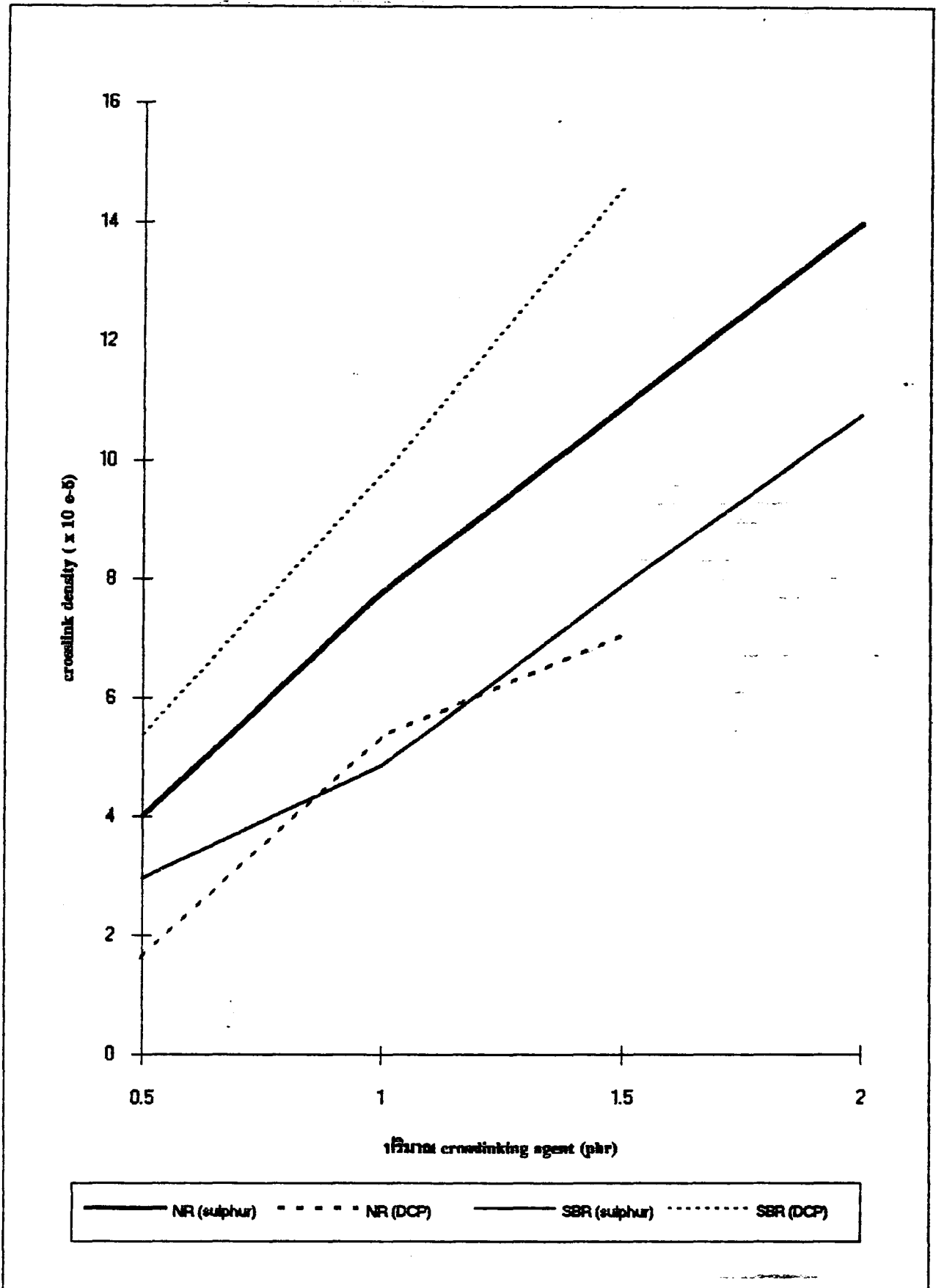
ความหนาแน่นของ toluene = 0.8669 g/cm³

V₀ = 106.2929 cm³/mol

ความหนาแน่นของ ยาง = 0.97 g/cm³

polymer-solvent parameter = 0.43

crosslink density = 5.9255 E-05

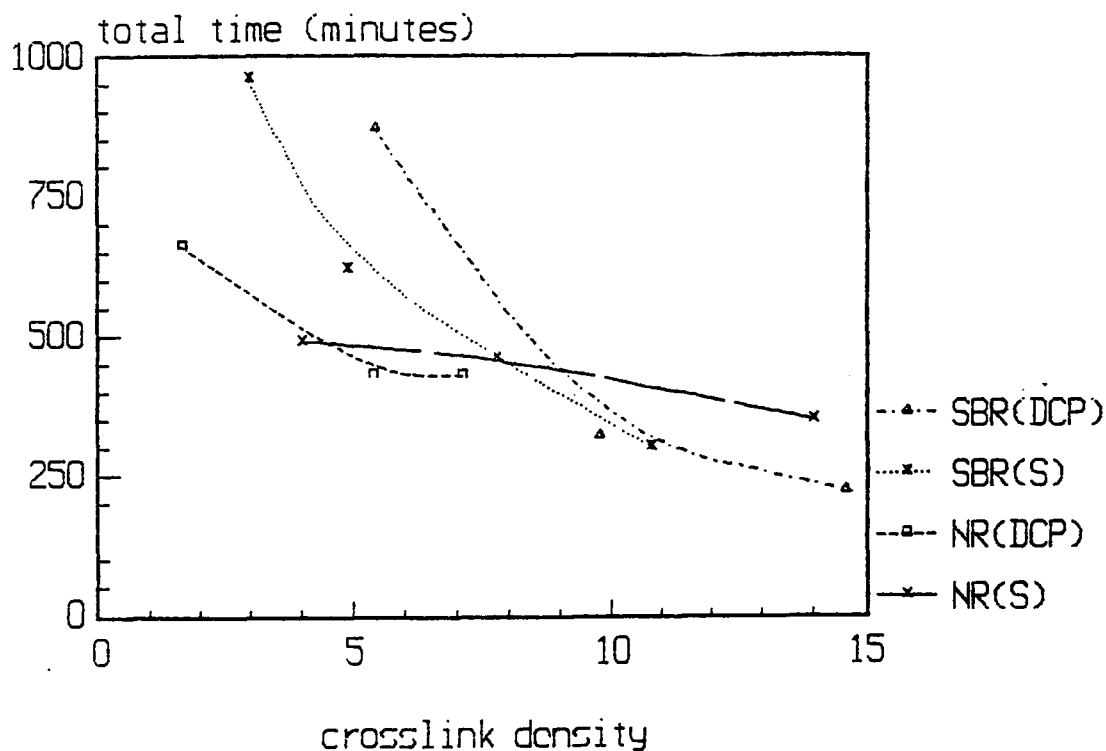


รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณ crosslinking agent กับ crosslink density

ปริมาณการเชื่อมโยงของยางจะขึ้นกับปริมาณของสารเชื่อมโยง (crosslinking agent) หรือ ตัวริเริ่มปฏิกิริยา (initiator) เมื่อปริมาณสารเชื่อมโยง หรือ ตัวริเริ่มปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ปริมาณการเชื่อมโยงก็จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น จากการทดลองวัด ปริมาณการเชื่อมโยงด้วยเครื่อง "C₁" พบว่าค่าที่ได้มีแนวโน้มเช่นเดียวกัน นั่นคือทั้งยางธรรมชาติและยาง SBR มีปริมาณการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.25

เป็นที่น่าสังเกตว่า ปริมาณการเชื่อมโยงในยางธรรมชาติเมื่อใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่ก่อให้เกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุลโดย dicumyl peroxide (DCP) และ ซัลเฟอร์ ปริมาณการเชื่อมโยงของโมเลกุลเมื่อใช้ซัลเฟอร์จะสูงกว่าเมื่อใช้ DCP ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ปฏิกิริยาเชื่อมโยงที่มี DCP ในสูตรผสมนั้นจะเกิดปฏิกิริยาได้ดีและมีประสิทธิภาพต่อเมื่อปฏิกิริยานั้นสามารถเกิดผ่านกลไกที่จะช่วยเพิ่มความเสถียรของอนุมูลอิสระได้ ซึ่งในกรณีนี้ยางธรรมชาติจะเกิดได้ยาก

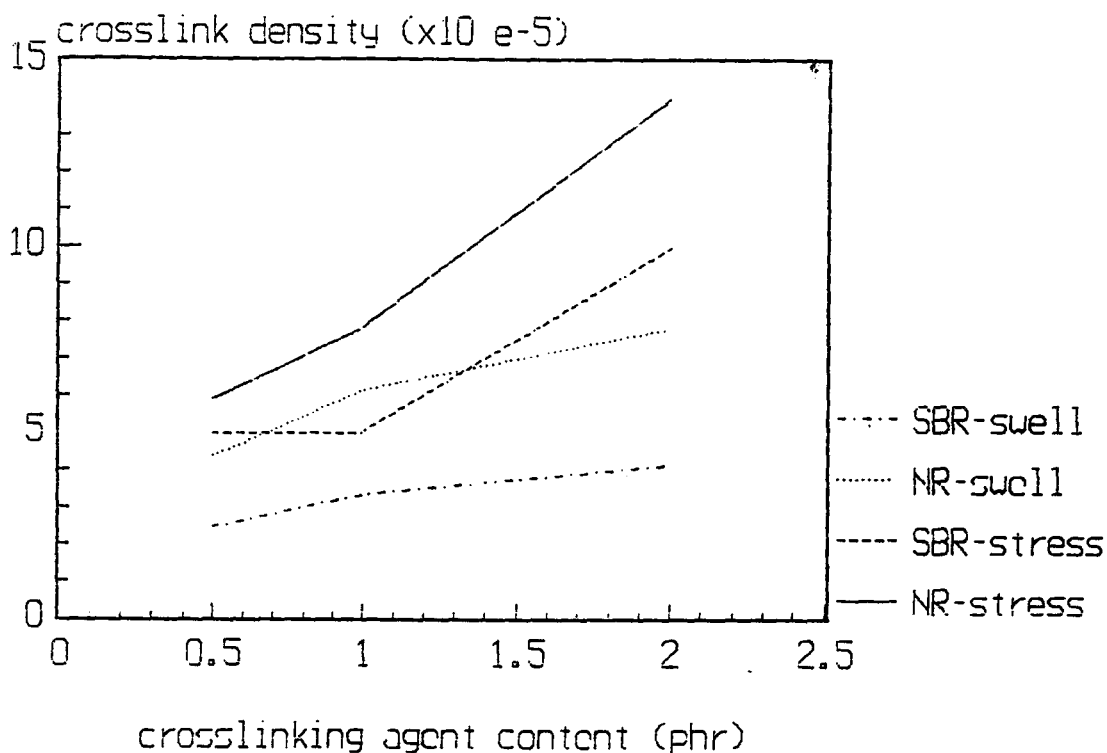
ในทางตรงกันข้าม พบว่า ปริมาณการเชื่อมโยงในโมเลกุลยาง SBR โดยใช้ DCP จะมากกว่าเมื่อใช้ซัลเฟอร์ ซึ่งจะสามารถอธิบายได้โดยอาศัยหลักการเดียวกับที่กล่าวไว้ข้างต้น แต่ SBR มีหมู่ phenyl ในสายโซ่ซึ่งจะสามารถช่วยเพิ่มเสถียรภาพของอนุมูลอิสระได้ดี



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการตั้งรวม 4 ระยะ กับปริมาณการเชื่อมโยง

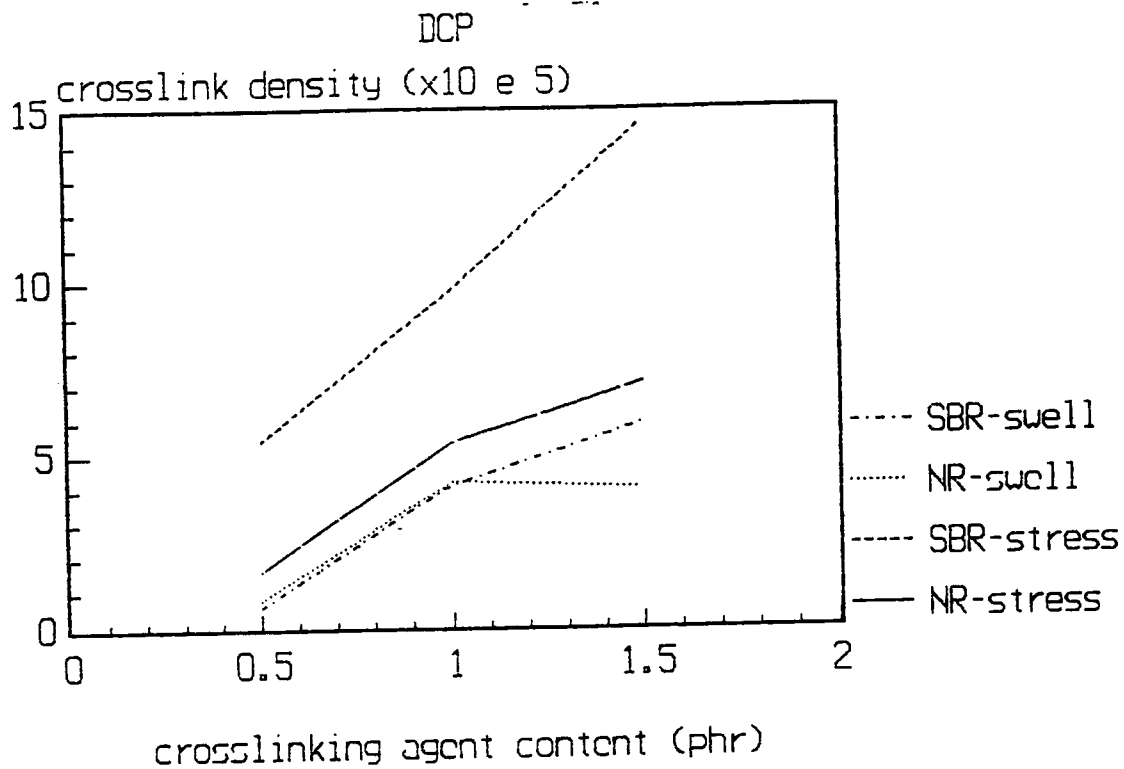
เมื่อนำเวลาที่ใช้ในการวัดแรงดึงชิ้นงานจนกระทั่งน้ำหนักคงที่โดยวัดรวมทั้ง 4 ระยะ กับปริมาณการเชื่อมโยงมาเขียนกราฟ(ดังรูปที่ 4.26) พบว่า เมื่อมีปริมาณการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น เวลาที่ใช้ในการวัดจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยและเข้าสู่สมดุลได้เร็ว ซึ่งพบทั้งในยางธรรมชาติและยาง SBR และเมื่อมีปริมาณการเชื่อมโยงต่ำ ๆ จะต้องใช้เวลาในการปล่อยให้ชิ้นงานเข้าสู่สมดุล เนื่องจากพันธะเชื่อมโยงเป็นตัวตั้งรังไม่ให้โมเลกุลมีการเคลื่อนที่ ทำให้ชิ้นงานที่มีปริมาณพันธะเชื่อมโยงน้อยมีการเคลื่อนที่ของโมเลกุลมาก และเข้าสู่สมดุลได้ช้า ดังนั้นเครื่องมือนี้จึงไม่เหมาะกับการใช้วัดกับชิ้นงานที่มีปริมาณการเชื่อมโยงต่ำ ๆ เช่น จากการทดลองเมื่อทำการวัดชิ้นงาน SBR ที่ใช้ DCP เป็นสารตัวริเริ่มปฏิกิริยา เวลารวมทั้งใช้ในการตั้งทั้ง 4 ระยะและเวลาที่แต่ละระยะเข้าสู่สมดุลใช้เวลา 960 นาที

เมื่อเปรียบเทียบยางธรรมชาติและยาง SBR จะพบว่ายาง SBR ใช้เวลาในการวัดเพิ่มขึ้นมากกว่ายางธรรมชาติเมื่อปริมาณการเชื่อมโยงลดลง เนื่องจากโมเลกุลของยาง SBR มีความเกะกะของหมู่ phenyl ทำให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ต่ำ ดังนั้นชิ้นงานที่มีปริมาณการเชื่อมโยงต่ำ ๆ จึงต้องใช้เวลาในการคลายตัวมากกว่า



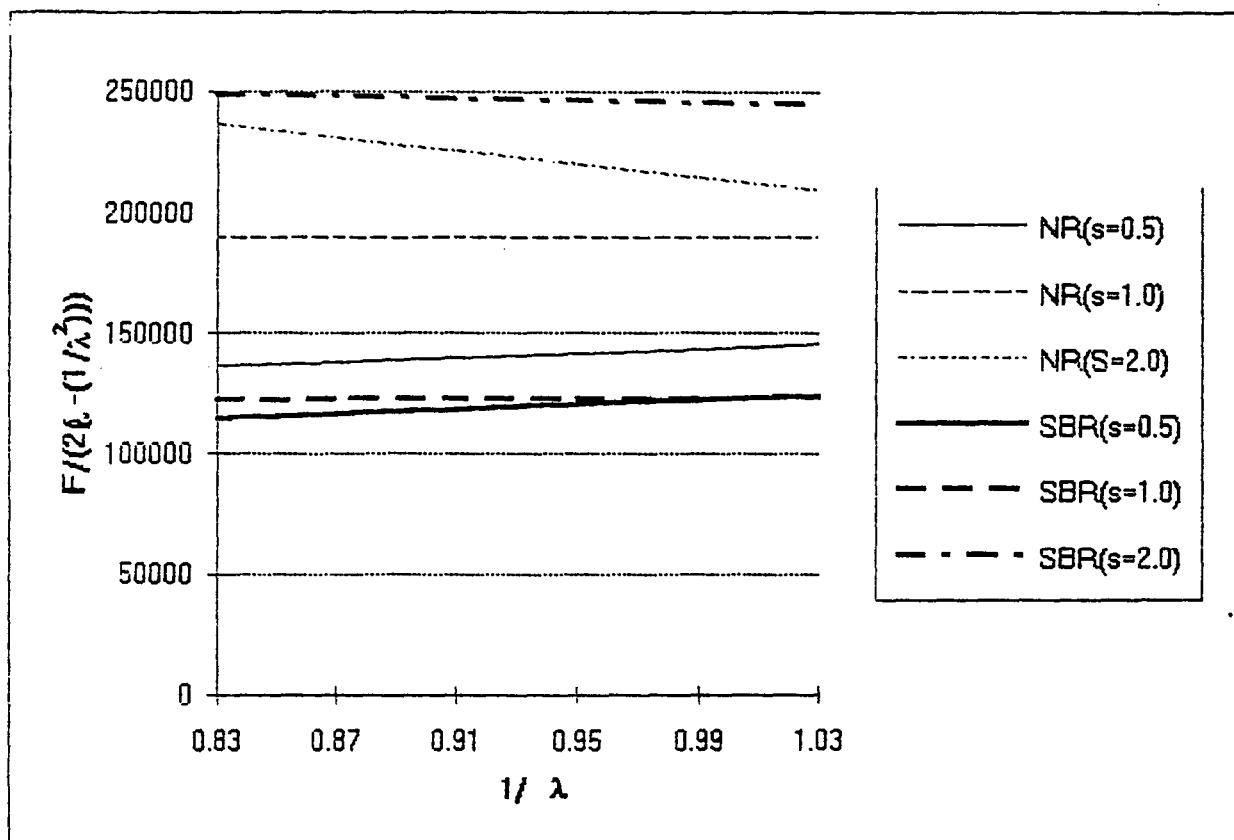
รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง crosslink density กับ ปริมาณของซัลเฟอร์

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณการเชื่อมโยงที่คำนวณโดยการทดลองด้วยวิธี stress-strain และวิธี swelling โดยใช้ซัลเฟอร์เป็นสารเชื่อมโยงพบว่า ค่าที่ได้มีความสอดคล้องกัน นั่นคือ ค่าที่คำนวณได้อยู่ในอันดับ (order) เดียวกัน แต่อย่างไรก็ดีที่ปริมาณสารเชื่อมโยงเท่ากัน ค่าที่หาได้โดยวิธี stress-strain จะมากกว่าค่าที่คำนวณได้โดยวิธี swelling เนื่องจากค่าน้ำหนักที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อน เพราะชิ้นงานยังไม่เข้าสู่สมดุลที่แท้จริง ทำให้น้ำหนักที่วัดได้มากกว่าความเป็นจริง เมื่อนำมาคำนวณปริมาณการเชื่อมโยงค่าที่ได้จึงมากกว่าปกติ



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง crosslink density ที่วัดโดยวิธี swelling และ วิธี stress-strain กับ ปริมาณของตัวริเริ่มปฏิกิริยา (DCP)

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างสารเชื่อมโยงกับปริมาณการเชื่อมโยง ยางที่ใช้ DCP เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับระบบที่ใช้ซัลเฟอร์เป็นสารเชื่อมโยง นั่นคือค่าที่คำนวณได้โดยวิธี stress-strain จะใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณจากวิธี swelling คืออยู่ในอันดับ (order) เดียวกัน และพบว่าค่าที่วัดโดยวิธี stress-strain มากกว่าวิธี swelling เล็กน้อย

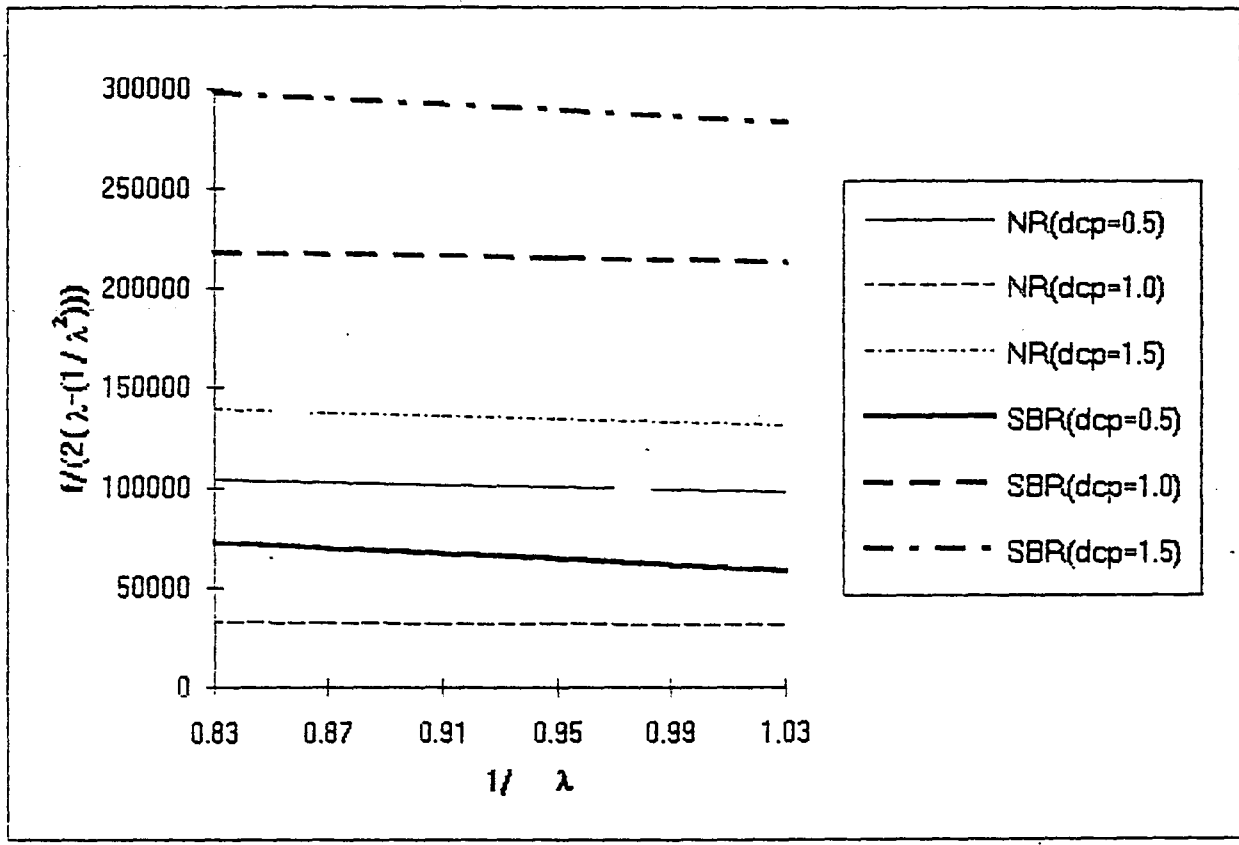


รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $1/\lambda$ กับ $F/(2(\lambda - (1/\lambda^2)))$

จากการทดลอง เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $F / 2(\lambda - 1/\lambda^2)$ กับ $1/\lambda$ ของยางที่ทำ การเชื่อมโยงสายโซ่ด้วยซัลเฟอร์พบว่าค่าความชันซึ่งเท่ากับ C_2 ของยางทุกชนิดใกล้เคียงกัน ยกเว้นยางธรรมชาติที่ใช้ซัลเฟอร์ 2.0 phr เป็นสารเชื่อมโยง และ ยาง SBR ที่ใช้ DCP เป็น ตัวริเริ่มปฏิกิริยา จึงสามารถสรุปได้ว่า ค่า C_2 ที่หาได้จากเครื่อง C_1 ของยางชนิดต่าง ๆ จะมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎี

นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อปริมาณการเชื่อมโยงมีค่าต่าง ๆ กัน ค่าความชันของกราฟก็ ใกล้เคียงกันด้วย ยกเว้นยางธรรมชาติที่ใช้ซัลเฟอร์ 2.0 phr เป็นสารเชื่อมโยง และ ยาง SBR ที่ใช้ DCP เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา แสดงว่าค่า C_2 ที่หาได้จากเครื่องมือนี้ ไม่ขึ้นกับปริมาณ การเชื่อมโยงซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีที่กล่าวว่า ค่า C_2 ไม่ขึ้นกับปริมาณการเชื่อมโยง

การที่กราฟของยางธรรมชาติที่ใช้ซัลเฟอร์ 2.0 phr เป็นสารเชื่อมโยงมีการเบี่ยงเบน เนื่องมาจากการมีอำนาจน้ำหนักร่อนขึ้นงานเข้าสู่สภาวะสมดุล ส่วน ยาง SBR ที่ใช้ DCP เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา มีการเบี่ยงเบนเนื่องจากการคำนวณที่มีการเลือกค่ามาคำนวณโดยไม่ ได้ตัดค่าที่มีการเบี่ยงเบนออก



รูปที่ 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $1/\lambda$ กับ $F/2(\lambda - (1/\lambda^2))$

จากการทดลอง เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $F / 2(\lambda - 1/\lambda^2)$ กับ $1/\lambda$ ของยางที่ทำการเชื่อมโยงสายโซ่ด้วย dicumyl peroxide พบว่ามีแนวโน้มเดียวกับการใช้ซิลเฟอร์เป็นสารเชื่อมโยง นั่นคือ ค่า C_2 ที่หาได้จากเครื่อง 'C₁' ของยางชนิดต่าง ๆ จะมีค่าใกล้เคียงกัน และ ไม่ขึ้นกับปริมาณการเชื่อมโยง ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีที่กล่าวว่า ค่า C_2 ไม่ขึ้นกับชนิดของยาง และ ปริมาณการเชื่อมโยง

บทที่ 5

บทสรุปและข้อแนะนำ

สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลอง เมื่อพิจารณาปริมาณการเชื่อมโยงที่หาได้จากการวัดแบบ stress-strain โดยใช้เครื่องมือ C_1 ที่สร้างขึ้นเทียบกับวิธี swelling ในประเด็นต่าง ๆ พบว่าค่าที่ได้มีความสอดคล้องกับทฤษฎีของ Mooney โดยมีข้อสังเกตดังนี้

1. เมื่อพิจารณาปริมาณการเชื่อมโยงเมื่อใช้ปริมาณสารเชื่อมโยง (crosslinking agent) หรือ ตัวริเริ่มปฏิกิริยา (initiator) ในปริมาณต่าง ๆ กัน จะพบว่าเมื่อใช้ปริมาณสารเชื่อมโยง หรือ ตัวริเริ่มปฏิกิริยา เพิ่มขึ้นปริมาณการเชื่อมโยงที่คำนวณได้โดยวิธี stress-strain และวิธี swelling จะเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีนั้นคือ จากสมการของ Mooney เมื่อปริมาณการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นจะต้องใช้แรงในการดึงที่ระยะยืดที่เท่ากันมากขึ้น ดังนั้นค่า C_1 จึงมากขึ้นด้วยเช่นกัน ค่า M_c จะมีค่าน้อยลงตามสมการ

$$F = 2C_1(\lambda - 1/\lambda^2) + 2C_2(1 - 1/\lambda^3)$$

ถ้าปริมาณการเชื่อมโยงหาได้จาก

$$M_c = \rho RT/2C_1$$

ดังนั้น เมื่อค่า C_1 เพิ่มขึ้นปริมาณการเชื่อมโยงก็จะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

จากการทดลองพบว่า เมื่อปริมาณสารเชื่อมโยง หรือ ตัวริเริ่มปฏิกิริยามากขึ้นแล้วปริมาณการเชื่อมโยงที่คำนวณได้มีค่าเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.25

2. เมื่อเปรียบเทียบค่าที่คำนวณได้จากวิธี stress-strain กับวิธี swelling พบว่าค่าที่ได้ใกล้เคียงกัน แต่โดยส่วนมากค่าที่ได้จากวิธี stress-strain จะมีค่ามากกว่า วิธี swelling อันเนื่องมาจากการที่ยางยังไม่เข้าสู่ภาวะสมดุล ดังนั้นค่าที่คำนวณได้จะมีค่ามากกว่าปกติ เพราะแรงที่ใช้ดึงชิ้นงานจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณการเชื่อมโยง นอกจากนี้ค่าที่คำนวณได้จากวิธี stress-strain มีแนวโน้มที่จะเบี่ยงเบนจากค่าที่วัดโดยวิธี swelling มากขึ้น

3. เมื่อพิจารณาการใช้สารเชื่อมโยง หรือ ตัวริเริ่มปฏิกิริยาชนิดเดียวกัน จะเห็นได้ว่าความชันของกราฟระหว่าง $F/2(\lambda - 1/\lambda^2)$ กับ $1/\lambda$ มีค่าใกล้เคียงกัน สังเกตได้จากค่าแนวโน้มของความชันจากรูปที่ 4.29 และ 4.30 พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนต่างชนิดกันก็จะให้แนวโน้มเดียวกัน ซึ่งเป็นการสนับสนุนทฤษฎีที่ว่าค่า C_2 ไม่ขึ้นกับชนิดของยางและพบว่าค่า C_2 ไม่ขึ้นกับปริมาณการเชื่อมโยงด้วย

4. เวลาที่ใช้ในการวัดน้ำหนักที่ใช้ในการตั้งชิ้นงานจนกระทั่งมีค่าคงที่จะสัมพันธ์ กับ ปริมาณสารเชื่อมโยง หรือตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่ใช้ ถ้าใช้ในปริมาณน้อยจะใช้เวลาในการตั้งชิ้นงานมาก และเวลาที่ใช้ในการตั้งจะลดลงเมื่อปริมาณสารเชื่อมโยง หรือ ตัวริเริ่มปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.26 โดยในกรณีนี้พบทั้งในยางธรรมชาติ และยาง SBR เนื่องจากที่ปริมาณการเชื่อมโยงต่ำ ๆ โมเลกุลจะมีการเคลื่อนไหวและคลายตัวได้มากกว่า ดังนั้นจึงใช้เวลานานในการเข้าสู่สภาวะสมดุล ส่วนยางที่มีปริมาณการเชื่อมโยงมาก สายโซ่โมเลกุลจะยึดเหนี่ยวโมเลกุลไว้ทำให้การเคลื่อนที่ของโมเลกุลลดลง จึงใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลน้อย ดังนั้นการวัดยางที่มีปริมาณการเชื่อมโยงต่ำโดยวิธีนี้จะเสียเวลานานมาก วิธีนี้จึงไม่เหมาะสมกับการวัดยางที่มีปริมาณการเชื่อมโยงต่ำ ๆ

จากข้อสังเกตดังกล่าวจึงสรุปได้ว่า เครื่องมือ 'C₁' ที่สร้างขึ้นสามารถหาปริมาณการเชื่อมโยงได้ และค่าที่ได้มีความสอดคล้องกับทฤษฎีของ Mooney

ข้อเสนอแนะ

ค่างไรก็ตามในการทดลองยังมีข้อผิดพลาดคล้อยหลายจุดที่ควรทำการแก้ไขและปรับปรุง เพื่อให้ค่าที่ได้จากการทดลองมีความถูกต้องมากขึ้น และสามารถใช้อุปกรณ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1. การวัดระยะ การวัดระยะจะเกิดความคลาดเคลื่อนได้จากการอ่านค่าของผู้สังเกต เนื่องจากรอยขีดที่บอกระยะมีความกว้าง ดังนั้นผู้ทำการทดลองควรจะต้องยึดถือระยะที่กึ่งกลางขีดเป็นสำคัญ และใช้ความระมัดระวังในการอ่านค่า

2. การจับชิ้นงาน จะทำให้เกิดการคลาดเคลื่อนได้ถ้าการใส่ชิ้นงานไม่มีความระมัดระวัง เนื่องจากระยะที่ใช้ในการยึดมีระยะสั้นมาก ดังนั้นถ้ามีความคลาดเคลื่อนไปเพียงเล็กน้อยจะทำให้การอ่านค่าระยะทาง และน้ำหนักผิดพลาดได้

3. การอ่านค่าน้ำหนัก การอ่านค่าน้ำหนักเมื่อชิ้นงานยังไม่เข้าสู่สมดุล จะทำให้ค่าที่อ่านได้มากกว่าที่ควรจะเป็น โดยเฉพาะการวัดยางที่มีโครงสร้างที่มีหมู่เกาะ หรือ ยางที่มีปริมาณการเชื่อมโยงสูง ๆ หรือยางที่มีอุณหภูมิในการมีสถานะคล้ายแก้ว (T_g) สูง เพราะยางดังกล่าวจะมีความสามารถในการเคลื่อนไหว (mobility) ต่ำ ดังนั้นถ้าช่วงเวลาในการวัดค่าแต่ละครั้งสั้นเกินไปอาจทำให้ผู้ทดลองเข้าใจว่า ยางเข้าสู่สภาวะสมดุลแล้ว

การตั้งเครื่องให้อ่านน้ำหนักเป็นศูนย์ (set zero) อาจจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้เนื่องจากการปรับจุดเริ่มในการยึดชิ้นงาน ดังนั้นจึงควรระมัดระวังในการตั้งจุดเริ่มให้แน่ใจได้ว่าเป็นจุดที่มีระยะยึดเป็นศูนย์จริง

การใช้เครื่องซึ่งที่มีความละเอียด หรือ ความไวต่ำเกินไป จะทำให้การอ่านค่ามีความผิดพลาดได้ เนื่องจากจะทำให้ผู้สังเกตคิดว่าน้ำหนักคงที่แล้ว

การอ่านน้ำหนักสามารถต่อเข้ากับเครื่องซึ่งได้ ทำให้มีความสะดวกในการจดบันทึกค่า และมีความถูกต้องแน่นอนก่อน โดยจะต้องทำการต่อสายนำข้อมูลระหว่างเครื่องซึ่ง

และคอมพิวเตอร์ เพื่อใช้ในการเก็บค่า และประมวลผล โดยโปรแกรมสามารถเขียนได้ตามที่
คู่มือในการใช้เครื่องชี้แนะ

4. อุณหภูมิขณะการทดลอง อุณหภูมิจะมีผลต่อการคำนวณค่าถ้าอุณหภูมิในระหว่าง
การทดลองมีการเปลี่ยนแปลงมากจะทำให้ค่าในการคำนวณผิดพลาดด้วย

5. ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการคำนวณ การปรับเฉลี่ยเส้นกราฟให้เป็นเส้นตรง
(linear regression) โดยการเลือกค่าที่มีการเบี่ยงเบนมากมาคำนวณ จะทำให้ค่าที่คำนวณได้มี
ความผิดพลาดได้

6. ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการผสมยาง เนื่องจากเครื่องผสมแบบลูก 2 กลิ้งที่นำ
มาใช้ไม่มีระบบระบายความร้อน จึงไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิในการผสมยางได้แน่นอน ทำ
ให้อย่างที่ได้ อาจจะมีการเปลี่ยนคุณสมบัติไปก่อน

การเกิด strain เนื่องจากการแกะชิ้นงานจากแม่พิมพ์ จะทำให้การจัดเรียงตัวของ
โมเลกุลเปลี่ยนแปลงไปได้ ซึ่งสามารถป้องกันได้โดยการประกบชิ้นงานก่อนเข้าแม่พิมพ์ด้วย
แผ่น teflon เพื่อป้องกันไม่ให้ชิ้นงานติดกันแม่พิมพ์

7. จำนวนชิ้นงานที่ทำการทดลอง จำนวนชิ้นงานที่ทำการทดลองใช้จำนวนน้อยมาก
เนื่องจากการวัดชิ้นงานแต่ละชิ้นใช้เวลานานมาก จึงไม่สามารถทำได้หลายชิ้น ดังนั้นค่าที่ได้
อาจจะยังไม่สามารถให้ความมั่นใจได้เท่าที่ควร

ภาคผนวก

1. ผลการทดลอง

NR (sulphur 0.5 phr)

ตาราง ก1แสดงแรงที่ใช้ในการดึงชิ้นงานตัวอย่างที่เวลาต่าง ๆจนน้ำหนักคงที่

เวลา (นาที)	น้ำหนักที่ใช้ดึง (กรัม)			
	0.50 cm.	1.00 cm.	1.50 cm.	2.00 cm.
5	45.2	81.7	116.8	148.5
10	44.7	81.1	115.4	148.1
15	44.5	80.9	115.1	147.6
20	44.3	80.7	114.9	147.5
30	44.1	80.6	114.6	147.3
40	44.0	80.5	114.4	147.0
50	43.9	80.4	114.1	146.8
60	43.8	80.3	114.0	146.8
70	43.7	80.2	113.9	-
80	43.6	80.1	113.8	-
90	43.5	80.0	113.7	-
100	43.4	80.0	113.6	-
110	43.3	-	113.5	-
120	43.2	-	113.4	-
130	43.1	-	113.3	-
140	43.0	-	113.2	-
150	43.0	-	113.1	-
160	-	-	113.0	-
170	-	-	112.9	-
180	-	-	112.9	-
190	-	-	-	-
200	-	-	-	-
210	-	-	-	-
220	-	-	-	-
230	-	-	-	-
240	-	-	-	-
250	-	-	-	-
260	-	-	-	-
270	-	-	-	-
280	-	-	-	-
290	-	-	-	-
300	-	-	-	-
310	-	-	-	-
320	-	-	-	-

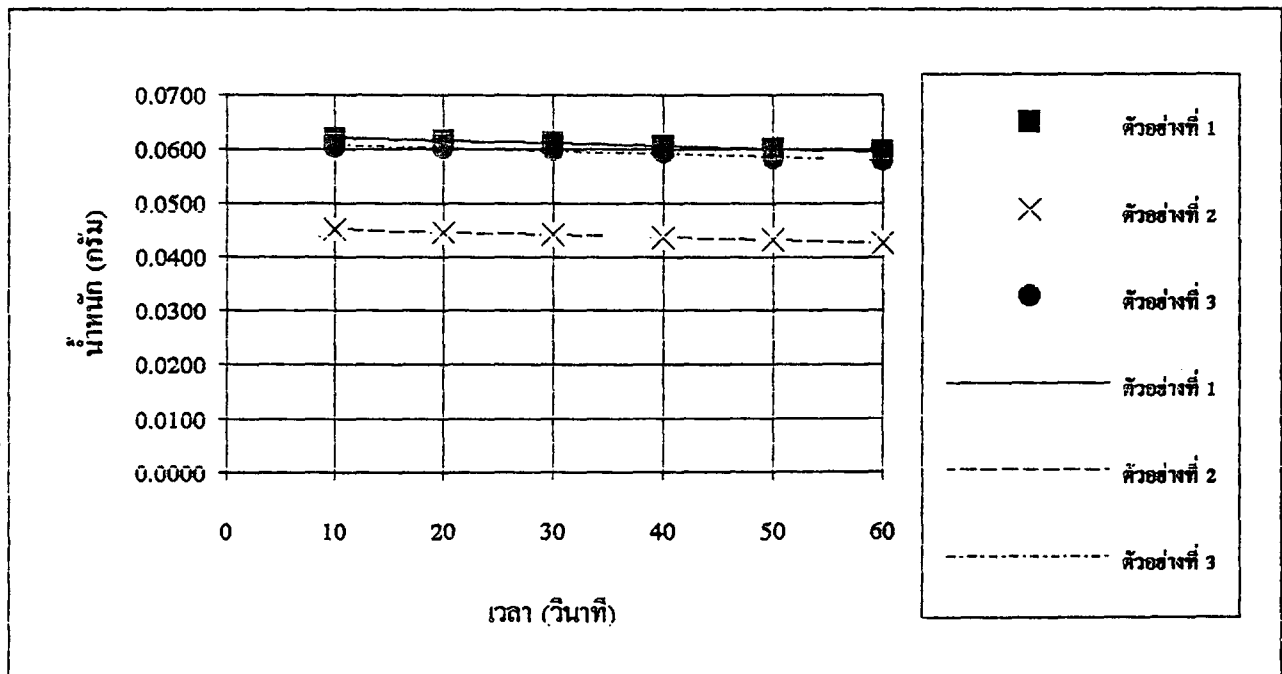
วิธี swelling

ตาราง ก2 แสดงน้ำหนักของตัวอย่างก่อนแช่ใน toluene

ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (กรัม)			
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	น้ำหนักเฉลี่ย
1	0.0108	0.0108	0.0108	0.0108
2	0.0082	0.0081	0.0082	0.0082
3	0.0110	0.0100	0.0090	0.0100

ตาราง ก3 แสดงน้ำหนักหลังการแช่ใน toluene

เวลา (วินาที)	น้ำหนักที่วัดได้เมื่อเวลาต่างๆ (กรัม)		
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3
10	0.0620	0.0452	0.0604
20	0.0616	0.0445	0.0602
30	0.0611	0.0441	0.0597
40	0.0605	0.0435	0.0593
50	0.0599	0.0432	0.0583
60	0.0595	0.0426	0.0579
70	0.0588	0.0000	0.0000



รูป ก กราฟแสดงน้ำหนักที่วัดได้หลังจากแช่ toluene

NR (sulphur 1.0 phr)

ตาราง ข1 แสดงแรงที่ใช้ในการดึงชิ้นงานตัวอย่างที่เวลาต่าง ๆจนน้ำหนักคงที่

เวลา (นาที)	น้ำหนักที่ใช้ดึง (กรัม)			
	0.50 cm.	1.00 cm.	1.50 cm.	2.00 cm.
5	59.1	113.3	161.5	205.7
10	58.9	112.7	160.9	204.9
15	58.7	112.4	160.5	204.5
20	58.5	112.2	160.2	204.2
30	58.3	111.9	159.9	203.7
40	58.1	111.7	159.6	203.5
50	58.0	111.5	159.4	203.3
60	57.9	111.3	159.2	203.1
70	57.8	111.2	159.1	202.9
80	57.7	111.1	159.1	202.8
90	57.6	111.0	-	202.7
100	57.5	110.9	-	202.6
110	57.4	110.8	-	202.6
120	57.3	110.7	-	-
130	57.3	110.6	-	-
140	-	110.6	-	-
150	-	-	-	-
160	-	-	-	-
170	-	-	-	-
180	-	-	-	-
190	-	-	-	-
200	-	-	-	-
210	-	-	-	-
220	-	-	-	-
230	-	-	-	-
240	-	-	-	-
250	-	-	-	-
260	-	-	-	-
270	-	-	-	-
280	-	-	-	-
290	-	-	-	-
300	-	-	-	-
310	-	-	-	-
320	-	-	-	-

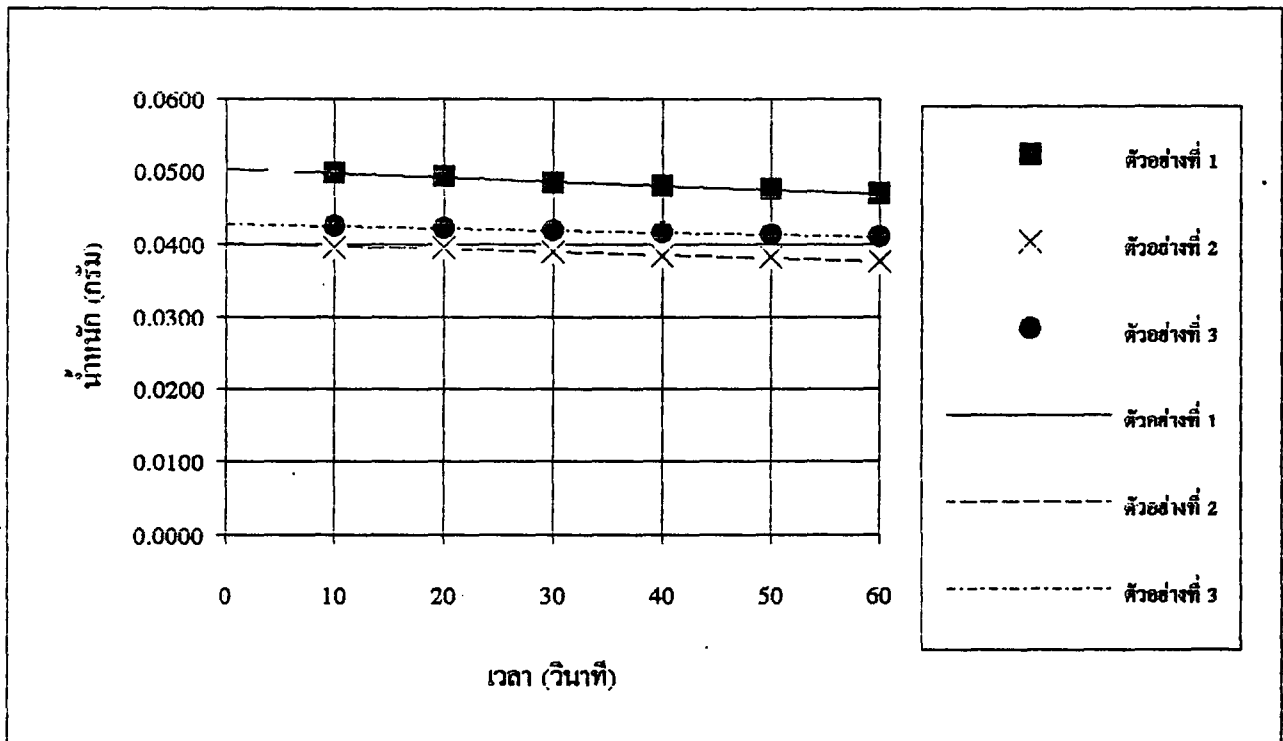
วิธี swelling

ตาราง ข2 แสดงน้ำหนักของตัวอย่างก่อนแช่ใน toluene

ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (กรัม)			
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	น้ำหนักเฉลี่ย
1	0.0101	0.0102	0.0101	0.0101
2	0.0081	0.0080	0.0081	0.0081
3	0.0088	0.0087	0.0087	0.0087

ตาราง ข3 แสดงน้ำหนักหลังการแช่ใน toluene

เวลา (วินาที)	น้ำหนักที่วัดได้เมื่อเวลาต่าง ๆ (กรัม)		
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3
10	0.0498	0.0396	0.0425
20	0.0493	0.0395	0.0422
30	0.0484	0.0390	0.0419
40	0.0480	0.0384	0.0416
50	0.0475	0.0382	0.0413
60	0.0469	0.0376	0.0410



รูป ข กราฟแสดงน้ำหนักที่วัดได้หลังจากแช่ toluene

NR (sulphur 2.0 phr)

ตาราง ค1 แสดงแรงที่ใช้ในการดึงชิ้นงานตัวอย่างที่เวลาต่าง ๆจนน้ำหนักคงที่

เวลา (นาที)	น้ำหนักที่ใช้ดึง (กรัม)			
	0.50 cm.	1.00 cm.	1.50 cm.	2.00 cm.
5	62.5	125.6	185.7	237.3
10	62.3	125.3	185.2	235.2
15	62.1	125.1	185.0	234.6
20	61.9	125.0	184.8	234.1
30	61.8	124.8	184.7	233.9
40	61.7	124.7	184.6	233.8
50	61.7	124.4	184.5	233.5
60	-	124.2	184.2	233.5
70	-	124.0	184.0	-
80	-	123.9	183.9	-
90	-	123.7	183.8	-
100	-	123.6	183.6	-
110	-	123.4	183.4	-
120	-	123.3	183.2	-
130	-	123.3	183.2	-
140	-	-	-	-
150	-	-	-	-
160	-	-	-	-
170	-	-	-	-
180	-	-	-	-
190	-	-	-	-
200	-	-	-	-
210	-	-	-	-
220	-	-	-	-
230	-	-	-	-
240	-	-	-	-
250	-	-	-	-
260	-	-	-	-
270	-	-	-	-
280	-	-	-	-
290	-	-	-	-
300	-	-	-	-
310	-	-	-	-
320	-	-	-	-

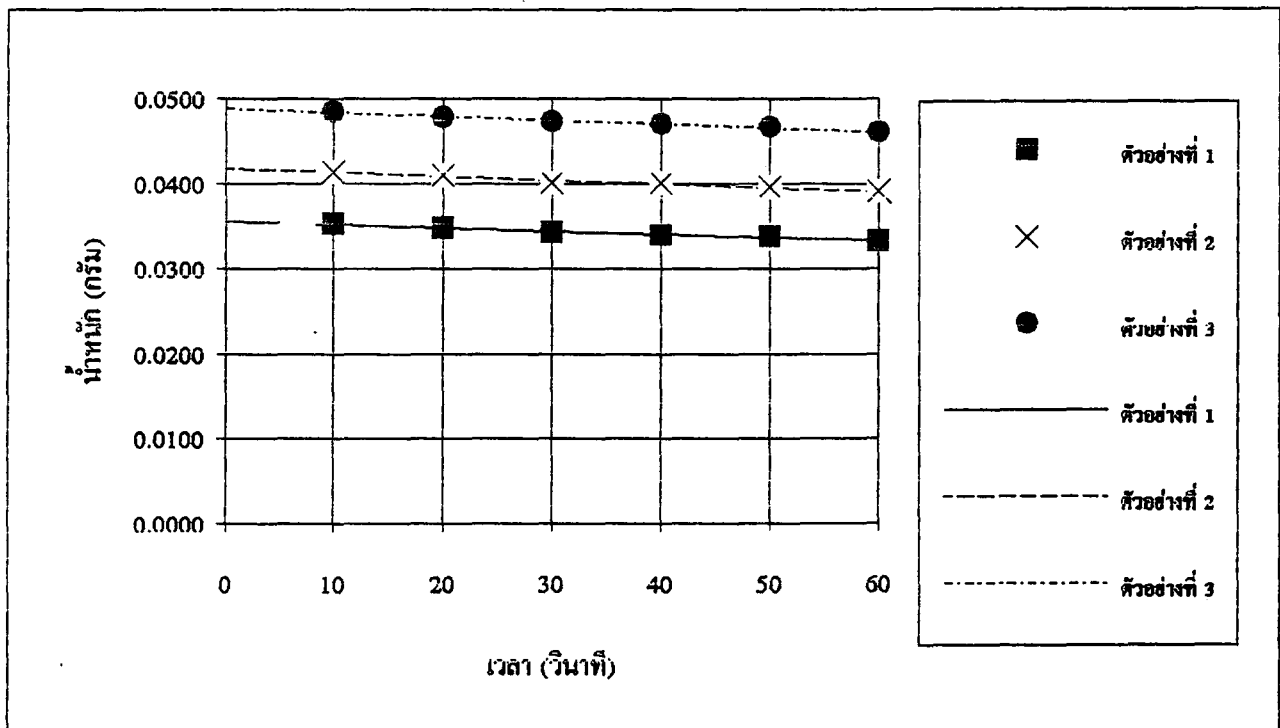
วิธี swelling

ตาราง ค2 แสดงน้ำหนักของตัวอย่างก่อนแช่ใน toluene

ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (กรัม)			
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	น้ำหนักเฉลี่ย
1	0.0083	0.0082	0.0084	0.0083
2	0.0093	0.0094	0.0094	0.0094
3	0.0110	0.0109	0.0109	0.0109

ตาราง ค3 แสดงน้ำหนักหลังการแช่ใน toluene

เวลา (วินาที)	น้ำหนักที่วัดได้เมื่อเวลาต่างๆ (กรัม)		
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3
10	0.0353	0.0414	0.0485
20	0.0349	0.0410	0.0479
30	0.0344	0.0402	0.0474
40	0.0341	0.0401	0.0471
50	0.0339	0.0397	0.0467
60	0.0334	0.0391	0.0461



รูป ค กราฟแสดงน้ำหนักที่วัดได้หลังจากแช่ toluene

NR (dicumyl peroxide 0.5 phr)

ตาราง ๗1 แสดงแรงที่ใช้ในการดึงชิ้นงานตัวอย่างที่เวลาต่างๆจนน้ำหนักคงที่

เวลา (นาที)	น้ำหนักที่ใช้ดึง (กรัม)			
	0.50 cm.	1.00 cm.	1.50 cm.	2.00 cm.
5	13.4	23.1	31.6	39.1
10	12.7	22.2	30.8	38.3
15	12.2	21.7	30.3	37.7
20	11.9	21.3	30.0	37.6
30	11.4	20.9	29.5	37.1
40	11.0	20.5	29.0	36.7
50	10.7	20.3	28.8	36.4
60	10.5	20.1	28.6	36.2
70	10.3	19.9	28.4	36.1
80	10.2	19.7	28.3	35.8
90	10.0	19.5	28.1	35.7
100	9.9	19.4	28.0	35.6
110	9.8	19.3	27.9	35.4
120	9.7	19.2	27.7	35.3
130	9.6	19.1	27.6	35.2
140	9.5	19.0	27.5	35.1
150	9.5	19.0	27.4	35.0
160	-	-	27.3	34.9
170	-	-	27.3	34.8
180	-	-	-	34.7
190	-	-	-	34.7
200	-	-	-	-
210	-	-	-	-
220	-	-	-	-
230	-	-	-	-
240	-	-	-	-
250	-	-	-	-
260	-	-	-	-
270	-	-	-	-
280	-	-	-	-
290	-	-	-	-
300	-	-	-	-
310	-	-	-	-
320	-	-	-	-

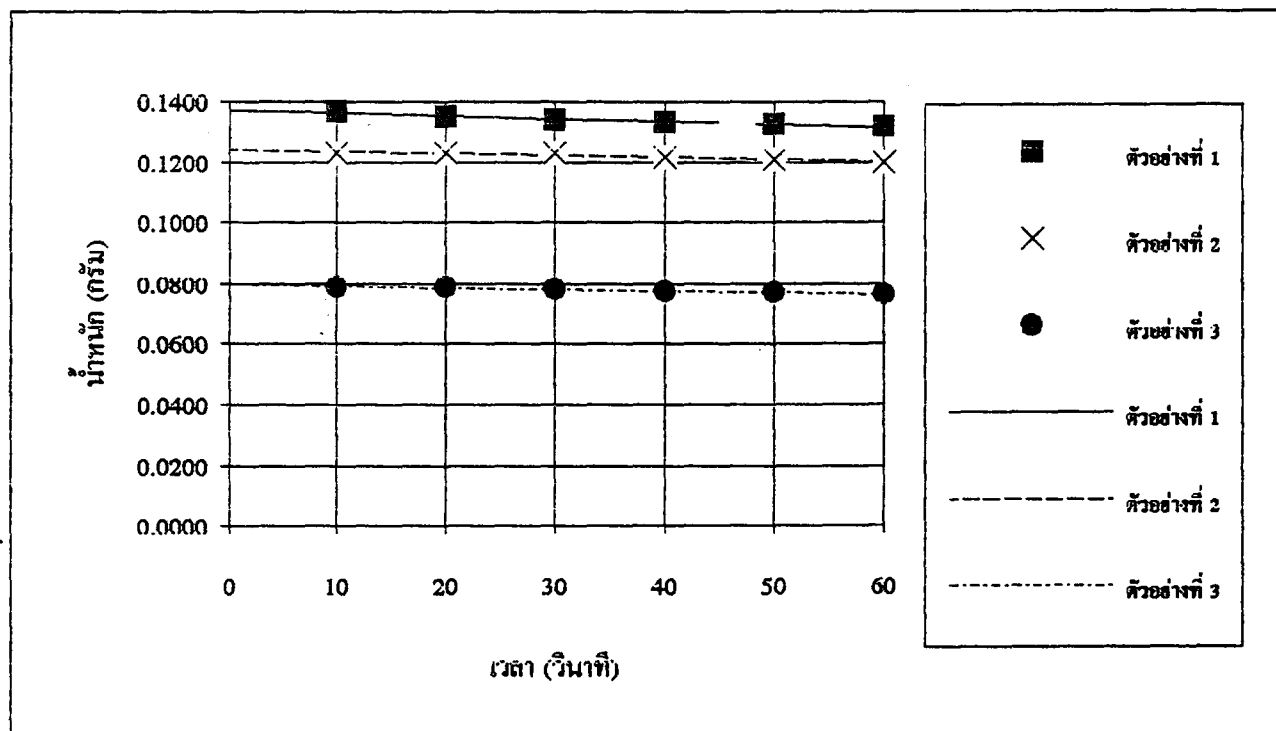
วิธี swelling

ตาราง ง2 แสดงน้ำหนักของตัวอย่างก่อนแช่ใน toluene

ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (กรัม)			
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	น้ำหนักเฉลี่ย
1	0.0101	0.0103	0.0102	0.0102
2	0.0079	0.0079	0.0079	0.0079
3	0.0059	0.0060	0.0059	0.0059

ตาราง ง3 แสดงน้ำหนักหลังการแช่ใน toluene

เวลา (วินาที)	น้ำหนักที่วัดได้เมื่อเวลาต่าง ๆ (กรัม)		
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3
10	0.1368	0.1230	0.0790
20	0.1351	0.1229	0.0788
30	0.1341	0.1230	0.0783
40	0.1333	0.1218	0.0775
50	0.1325	0.1208	0.0771
60	0.1320	0.1199	0.0763



รูป ง กราฟแสดงน้ำหนักที่วัดได้หลังจากแช่ toluene

NR (dicumyl peroxide 1.0 phr)

ตาราง ๑1 แสดงแรงที่ใช้ในการดึงชิ้นงานตัวอย่างที่เวลาต่าง ๆ จนน้ำหนักคงที่

เวลา (นาที)	น้ำหนักที่ใช้ดึง (กรัม)			
	0.50 cm.	1.00 cm.	1.50 cm.	2.00 cm.
5	32.6	62.0	88.4	112.8
10	31.9	61.4	88.0	112.4
15	31.6	61.2	87.7	112.1
20	31.4	61.0	87.6	112.0
30	31.1	60.7	87.3	111.7
40	30.9	60.6	87.1	111.5
50	30.7	60.4	86.9	111.4
60	30.6	60.3	86.7	111.3
70	30.5	60.2	86.6	111.3
80	30.4	60.1	86.4	-
90	30.3	60.1	86.2	-
100	30.2	-	86.1	-
110	30.1	-	86.0	-
120	30.1	-	85.9	-
130	-	-	85.8	-
140	-	-	85.7	-
150	-	-	85.7	-
160	-	-	-	-
170	-	-	-	-
180	-	-	-	-
190	-	-	-	-
200	-	-	-	-
210	-	-	-	-
220	-	-	-	-
230	-	-	-	-
240	-	-	-	-
250	-	-	-	-
260	-	-	-	-
270	-	-	-	-
280	-	-	-	-
290	-	-	-	-
300	-	-	-	-
310	-	-	-	-
320	-	-	-	-

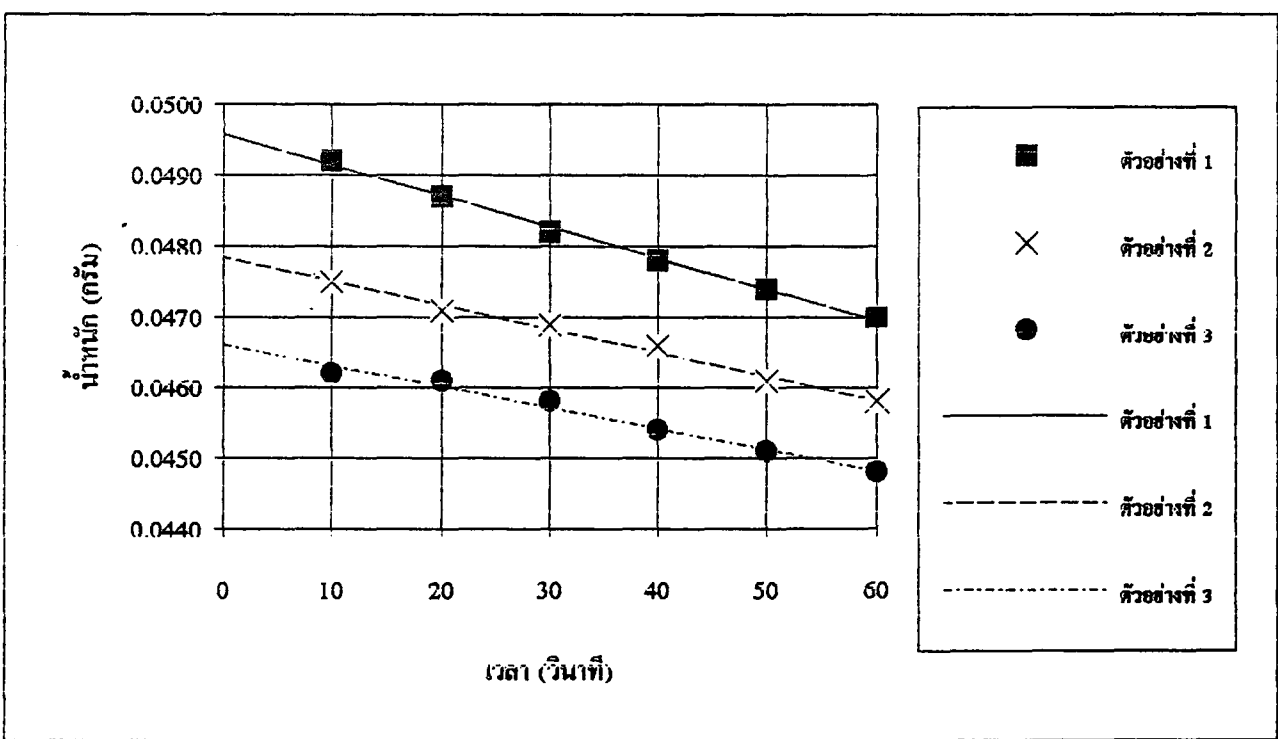
วิธี swelling

ตาราง จ2 แสดงน้ำหนักของตัวอย่างก่อนแช่ใน toluene

ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (กรัม)			
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	น้ำหนักเฉลี่ย
1	0.0089	0.0090	0.0089	0.0089
2	0.0083	0.0083	0.0083	0.0083
3	0.0072	0.0072	0.0072	0.0072

ตาราง จ3 แสดงน้ำหนักหลังการแช่ใน toluene

เวลา (วินาที)	น้ำหนักที่วัดได้เมื่อเวลาต่าง ๆ (กรัม)		
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3
10	0.0492	0.0475	0.0462
20	0.0487	0.0471	0.0461
30	0.0482	0.0469	0.0458
40	0.0478	0.0466	0.0454
50	0.0474	0.0461	0.0451
60	0.0470	0.0458	0.0448



รูป จ กราฟแสดงน้ำหนักที่วัดได้หลังจากแช่ toluene

NR (dicumyl peroxide 1.5 phr)

ตาราง ๑1 แสดงแรงที่ใช้ในการดึงชิ้นงานตัวอย่างที่เวลาต่าง ๆ จนน้ำหนักคงที่

เวลา (นาที)	น้ำหนักที่ใช้ดึง (กรัม)			
	0.50 cm.	1.00 cm.	1.50 cm.	2.00 cm.
5	42.3	81.2	118.3	150.6
10	41.8	80.9	117.8	150.2
15	41.5	80.7	117.6	150.0
20	41.3	80.6	117.4	149.8
30	41.0	80.5	117.1	149.5
40	40.8	80.3	116.9	149.3
50	40.7	80.1	116.8	149.0
60	40.6	80.0	116.7	148.8
70	40.6	80.0	116.5	148.7
80	-	-	116.4	148.7
90	-	-	116.3	-
100	-	-	116.2	-
110	-	-	116.2	-
120	-	-	-	-
130	-	-	-	-
140	-	-	-	-
150	-	-	-	-
160	-	-	-	-
170	-	-	-	-
180	-	-	-	-
190	-	-	-	-
200	-	-	-	-
210	-	-	-	-
220	-	-	-	-
230	-	-	-	-
240	-	-	-	-
250	-	-	-	-
260	-	-	-	-
270	-	-	-	-
280	-	-	-	-
290	-	-	-	-
300	-	-	-	-
310	-	-	-	-
320	-	-	-	-

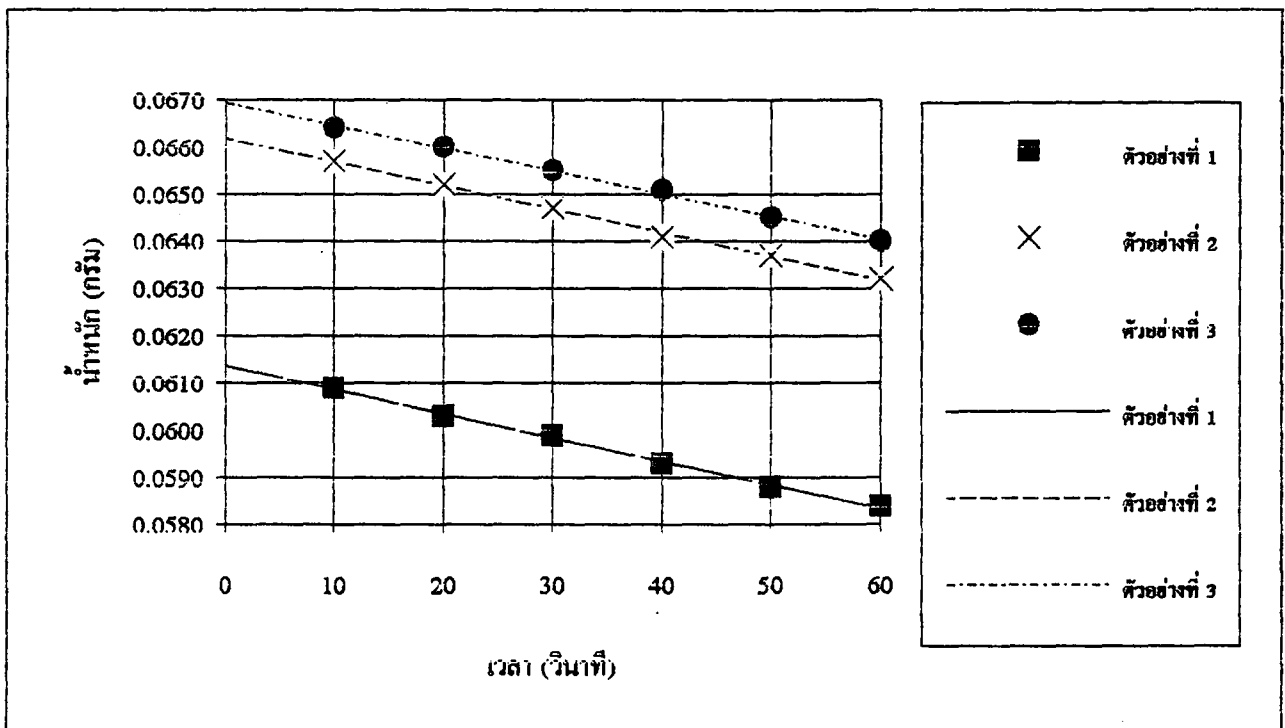
วิธี swelling

ตาราง จ2 แสดงน้ำหนักของตัวอย่างก่อนแช่ใน toluene

ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (กรัม)			
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	น้ำหนักเฉลี่ย
1	0.0104	0.0103	0.0104	0.0104
2	0.0113	0.0114	0.0114	0.0114
3	0.0103	0.0103	0.0103	0.0103

ตาราง จ3 แสดงน้ำหนักหลังการแช่ใน toluene

เวลา (วินาที)	น้ำหนักที่วัดได้เมื่อเวลาต่าง ๆ (กรัม)		
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3
10	0.0609	0.0657	0.0664
20	0.0603	0.0652	0.0660
30	0.0599	0.0647	0.0655
40	0.0593	0.0641	0.0651
50	0.0588	0.0637	0.0645
60	0.0584	0.0632	0.0640



รูป จ กราฟแสดงน้ำหนักที่วัดได้หลังจากแช่ toluene

SBR (sulphur 0.5 phr)

ตาราง ข1 แสดงแรงที่ใช้ในการดึงชิ้นงานตัวอย่างที่เวลาต่าง ๆ จนน้ำหนักคงที่

เวลา (นาที)	น้ำหนักที่ใช้ดึง (กรัม)			
	0.50 cm.	1.00 cm.	1.50 cm.	2.00 cm.
5	44.1	75.6	104.4	132.4
10	42.5	74.4	102.9	131.3
15	41.3	73.8	102.3	130.7
20	40.9	73.4	101.7	130.3
30	40.2	72.4	101.1	129.6
40	39.6	71.8	100.7	129.0
50	39.2	71.5	100.3	128.5
60	38.8	71.1	99.9	128.2
70	38.5	70.8	99.6	127.9
80	38.3	70.5	99.3	127.7
90	38.2	70.3	99.1	127.6
100	38.0	70.1	98.8	127.4
110	37.8	69.9	98.6	127.2
120	37.7	69.7	98.5	127.1
130	37.5	69.5	98.3	126.9
140	37.4	69.4	98.2	126.7
150	37.3	69.3	98.0	126.5
160	37.2	69.2	97.9	126.4
170	37.0	69.0	97.8	126.3
180	37.0	68.9	97.6	126.2
190	-	68.8	97.5	126.1
200	-	68.7	97.4	125.9
210	-	68.7	97.3	125.8
220	-	-	97.3	125.7
230	-	-	-	125.6
240	-	-	-	125.5
250	-	-	-	125.4
260	-	-	-	125.3
270	-	-	-	125.2
280	-	-	-	125.1
290	-	-	-	125.0
300	-	-	-	124.9
310	-	-	-	124.8
320	-	-	-	124.7

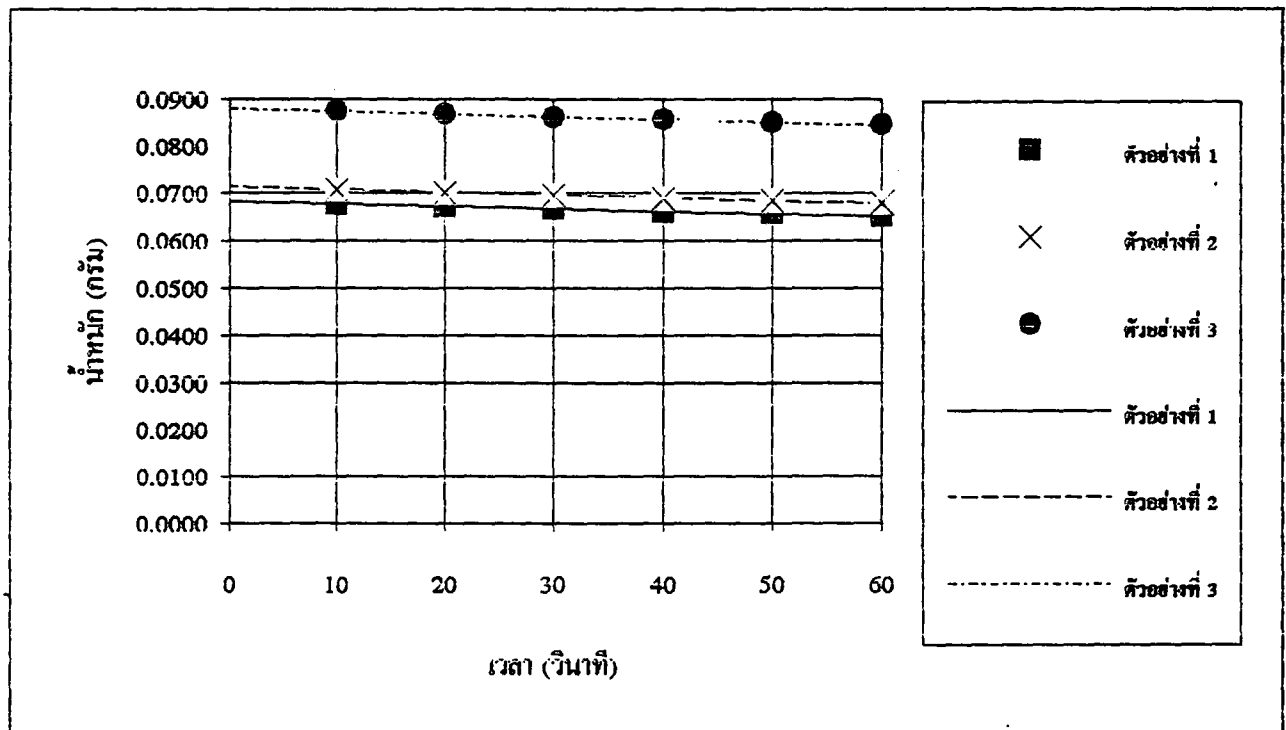
วิธี swelling

ตาราง ซ2 แสดงน้ำหนักของตัวอย่างก่อนแช่ใน toluene

ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (กรัม)			
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	น้ำหนักเฉลี่ย
1	0.0089	0.0090	0.0089	0.0089
2	0.0090	0.0089	0.0089	0.0089
3	0.0114	0.0113	0.0114	0.0114

ตาราง ซ3 แสดงน้ำหนักหลังการแช่ใน toluene

เวลา (วินาที)	น้ำหนักที่วัดได้เมื่อเวลาต่าง ๆ (กรัม)		
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3
10	0.0678	0.0708	0.0875
20	0.0672	0.0701	0.0868
30	0.0668	0.0696	0.0862
40	0.0662	0.0689	0.0856
50	0.0657	0.0685	0.0850
60	0.0653	0.0680	0.0845



รูป ซ กราฟแสดงน้ำหนักที่วัดได้หลังจากแช่ toluene

ตาราง ข1 แสดงแรงที่ใช้ในการดึงชิ้นงานตัวอย่างที่เวลาต่าง ๆ จนน้ำหนักคงที่ (ต่อ)

เวลา (นาที)	น้ำหนักที่ใช้ดึง (กรัม)			
	0.50 cm.	1.00 cm.	1.50 cm.	2.00 cm.
330	-	-	-	124.0
340	-	-	-	124.5
350	-	-	-	124.5

SBR (sulphur 1.0 phr)

ตาราง ข1 แสดงแรงที่ใช้ในการดึงชิ้นงานตัวอย่างที่เวลาต่าง ๆ จนน้ำหนักคงที่

เวลา (นาที)	น้ำหนักที่ใช้ดึง (กรัม)			
	0.50 cm.	1.00 cm.	1.50 cm.	2.00 cm.
5	49.2	93.0	124.2	153.2
10	48.5	91.1	123.0	154.8
15	47.4	88.2	121.2	155.9
20	46.3	87.2	120.8	155.4
30	45.6	86.2	120.5	154.7
40	45.2	85.4	120.0	154.1
50	44.7	85.0	119.7	153.6
60	44.2	84.4	119.3	153.1
70	43.8	84.1	119.0	152.4
80	43.7	83.7	118.7	152.3
90	43.5	83.3	118.5	151.8
100	43.3	83.1	118.2	151.5
110	43.1	82.8	118.0	151.0
120	43.0	82.6	117.8	150.6
130	42.8	82.4	117.6	150.1
140	42.7	82.0	117.6	149.9
150	42.6	82.0	-	149.8
160	42.5	-	-	149.8
170	42.5	-	-	-
180	-	-	-	-
190	-	-	-	-
200	-	-	-	-
210	-	-	-	-
220	-	-	-	-
230	-	-	-	-
240	-	-	-	-
250	-	-	-	-

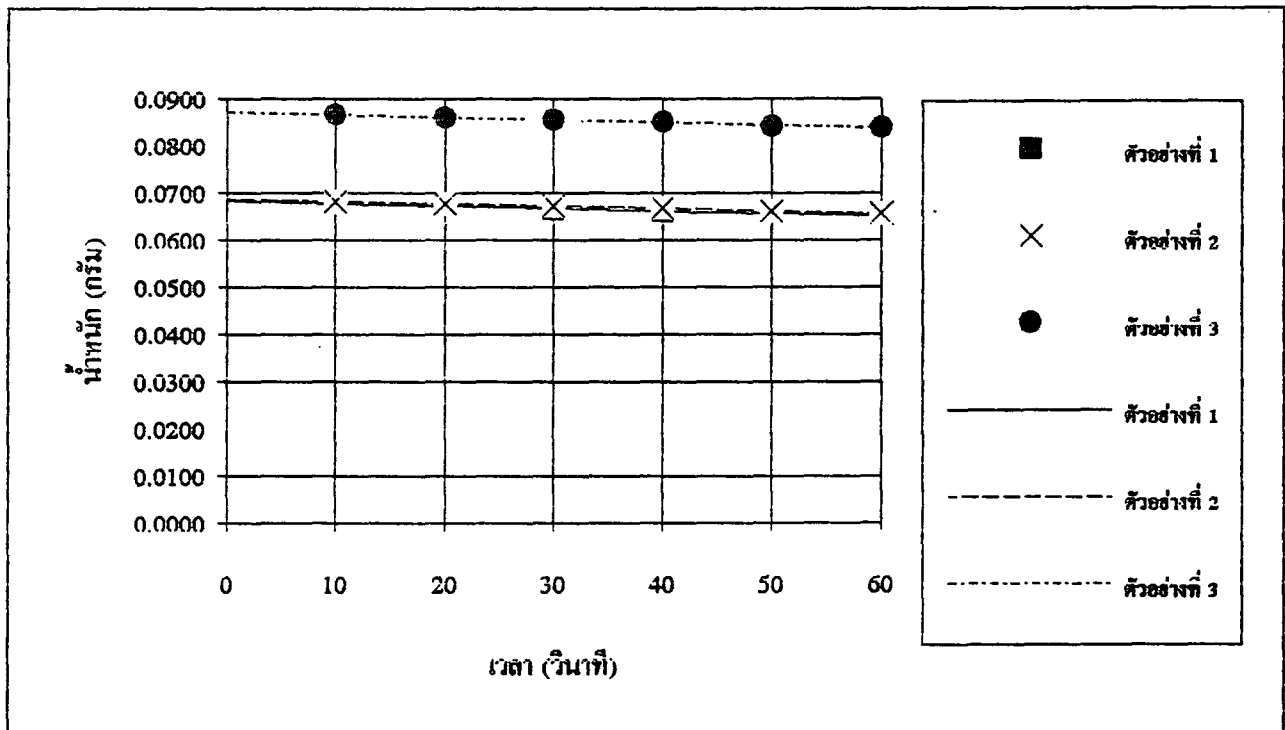
วิธี swelling

ตาราง ซ2 แสดงน้ำหนักของตัวอย่างก่อนแช่ใน toluene

ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (กรัม)			
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	น้ำหนักเฉลี่ย
1	0.0132	0.0132	0.0132	0.0132
2	0.0101	0.0101	0.0102	0.0101
3	0.0113	0.0111	0.0109	0.0111

ตาราง ซ3 แสดงน้ำหนักหลังการแช่ใน toluene

เวลา (วินาที)	น้ำหนักที่วัดได้เมื่อเวลาต่าง ๆ (กรัม)		
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3
10	0.0679	0.0681	0.0866
20	0.0674	0.0678	0.0860
30	0.0666	0.0673	0.0854
40	0.0662	0.0668	0.0850
50	0.0657	0.0661	0.0842
60	0.0653	0.0658	0.0839



รูป ซ กราฟแสดงน้ำหนักที่วัดได้หลังจากแช่ toluene

SBR (sulphur 2.0 phr)

ตาราง ๑1 แสดงแรงที่ใช้ในการดึงชิ้นงานตัวอย่างที่เวลาต่าง ๆ จนน้ำหนักคงที่

เวลา (นาที)	น้ำหนักที่ใช้ดึง (กรัม)			
	0.50 cm.	1.00 cm.	1.50 cm.	2.00 cm.
5	72.7	138.0	199.0	254.7
10	71.7	137.3	198.9	254.1
15	71.3	136.8	198.3	253.6
20	71.1	136.5	198.0	253.4
30	70.8	136.2	197.0	253.0
40	70.5	135.8	196.6	251.8
50	70.4	135.6	196.4	250.9
60	70.2	135.6	196.0	250.5
70	70.1	-	195.5	250.5
80	70.1	-	195.3	-
90	-	-	195.3	-
100	-	-	-	-
110	-	-	-	-
120	-	-	-	-
130	-	-	-	-
140	-	-	-	-
150	-	-	-	-
160	-	-	-	-
170	-	-	-	-
180	-	-	-	-
190	-	-	-	-
200	-	-	-	-
210	-	-	-	-
220	-	-	-	-
230	-	-	-	-
240	-	-	-	-
250	-	-	-	-
260	-	-	-	-
270	-	-	-	-
280	-	-	-	-
290	-	-	-	-
300	-	-	-	-
310	-	-	-	-
320	-	-	-	-

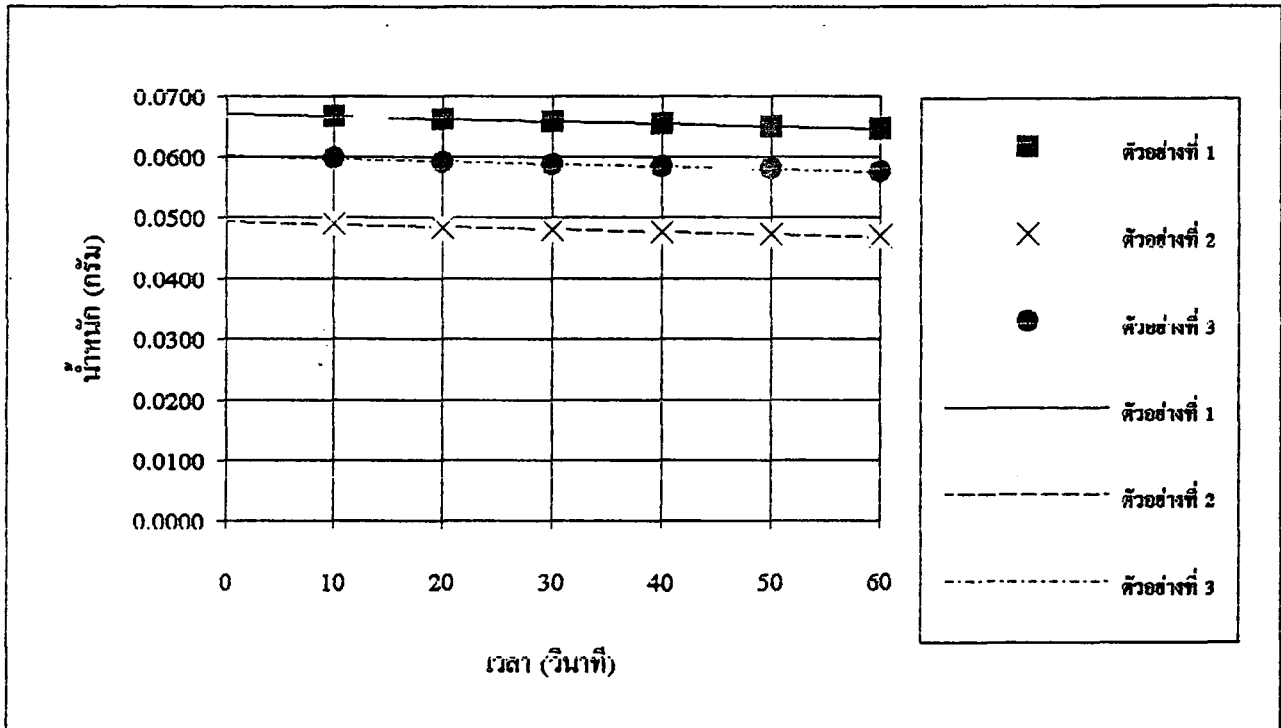
วิธี swelling

ตาราง ฅ2 แสดงน้ำหนักของตัวอย่างก่อนแช่ใน toluene

ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (กรัม)			
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	น้ำหนักเฉลี่ย
1	0.0137	0.0136	0.0136	0.0136
2	0.0099	0.0099	0.0099	0.0099
3	0.0123	0.0123	0.0122	0.0123

ตาราง ฅ3 แสดงน้ำหนักหลังการแช่ใน toluene

เวลา (วินาที)	น้ำหนักที่วัดได้เมื่อเวลาต่างๆ (กรัม)		
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3
10	0.0666	0.0490	0.0597
20	0.0662	0.0483	0.0590
30	0.0658	0.0480	0.0587
40	0.0654	0.0476	0.0583
50	0.0649	0.0472	0.0579
60	0.0645	0.0468	0.0574



รูป ฅ3 กราฟแสดงน้ำหนักที่วัดได้หลังจากแช่ toluene

SBR (dicumyl peroxide 0.5 phr)

ตาราง ฎ1 แสดงแรงที่ใช้ในการดึงชิ้นงานตัวอย่างที่เวลาต่างๆจนน้ำหนักคงที่

เวลา (นาที)	น้ำหนักที่ใช้ดึง (กรัม)			
	0.50 cm.	1.00 cm.	1.50 cm.	2.00 cm.
5	29.5	59.0	73.6	87.1
10	27.5	57.1	72.1	85.7
15	26.3	55.6	71.2	85.1
20	25.5	54.9	70.7	84.6
30	24.4	54.2	69.9	83.8
40	23.6	53.9	69.5	83.4
50	22.9	53.1	69.2	83.2
60	22.4	53.0	68.9	82.8
70	22.0	52.7	68.5	82.6
80	21.6	52.4	68.2	82.0
90	21.3	52.2	68.0	81.7
100	21.1	52.0	67.8	81.6
110	20.8	51.8	67.6	81.4
120	20.6	51.7	67.4	81.1
130	20.4	51.5	67.3	80.9
140	20.3	51.2	67.2	80.7
150	20.0	51.1	67.0	80.6
160	19.9	51.0	66.7	80.4
170	20.0	50.9	66.6	80.3
180	19.6	50.8	66.4	80.3
190	19.5	50.7	66.2	-
200	19.2	50.6	66.2	-
210	19.1	50.5	-	-
220	19.1	50.4	-	-
230	19.0	50.3	-	-
240	19.0	50.2	-	-
250	-	50.2	-	-
260				
270	-	-	-	-
280	-	-	-	-
290	-	-	-	-
300	-	-	-	-
310	-	-	-	-
320	-	-	-	-

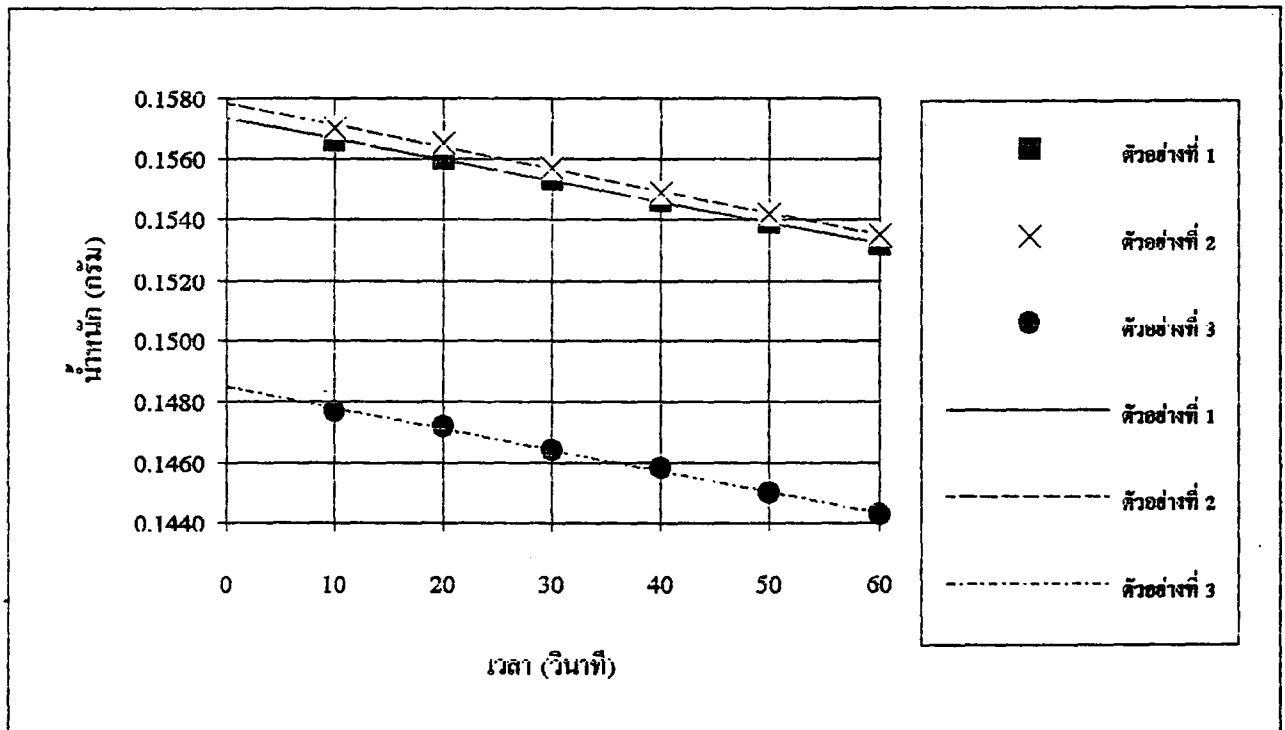
วิธี swelling

ตาราง ๓ แสดงน้ำหนักของตัวอย่างก่อนแช่ใน toluene

ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (กรัม)			
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	น้ำหนักเฉลี่ย
1	0.0125	0.0124	0.0124	0.0124
2	0.0134	0.0134	0.0134	0.0134
3	0.0123	0.0123	0.0122	0.0123

ตาราง ๓ แสดงน้ำหนักหลังการแช่ใน toluene

เวลา (วินาที)	น้ำหนักที่วัดได้เมื่อเวลาต่าง ๆ (กรัม)		
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3
10	0.1566	0.1570	0.1477
20	0.1560	0.1565	0.1472
30	0.1553	0.1557	0.1464
40	0.1546	0.1549	0.1458
50	0.1539	0.1542	0.1450
60	0.1532	0.1535	0.1443



รูป ๓ กราฟแสดงน้ำหนักที่วัดได้หลังจากแช่ toluene

SBR (dicumyl peroxide 1.0 phr)

ตาราง ก1 แสดงแรงที่ใช้ในการดึงชิ้นงานตัวอย่างที่เวลาต่าง ๆ จนน้ำหนักคงที่

เวลา (นาที)	น้ำหนักที่ใช้ดึง (กรัม)			
	0.50 cm.	1.00 cm.	1.50 cm.	2.00 cm.
5	81.2	155.9	220.8	285.0
10	80.1	155.0	220.2	283.2
15	79.6	154.7	219.7	282.3
20	79.3	154.4	218.7	281.6
30	79.0	153.9	218.2	281.5
40	78.7	153.6	218.1	281.4
50	78.5	153.2	218.0	281.3
60	78.4	152.9	218.0	281.3
70	78.3	152.7	-	-
80	78.3	152.3	-	-
90	-	152.2	-	-
100	-	152.1	-	-
110	-	152.0	-	-
120	-	151.9	-	-
130	-	151.8	-	-
140	-	151.6	-	-
150	-	151.2	-	-
160	-	151.1	-	-
170	-	151.1	-	-
180	-	-	-	-
190	-	-	-	-
200	-	-	-	-
210	-	-	-	-
220	-	-	-	-
230	-	-	-	-
240	-	-	-	-
250	-	-	-	-
260	-	-	-	-
270	-	-	-	-
280	-	-	-	-
290	-	-	-	-
300	-	-	-	-
310	-	-	-	-
320	-	-	-	-

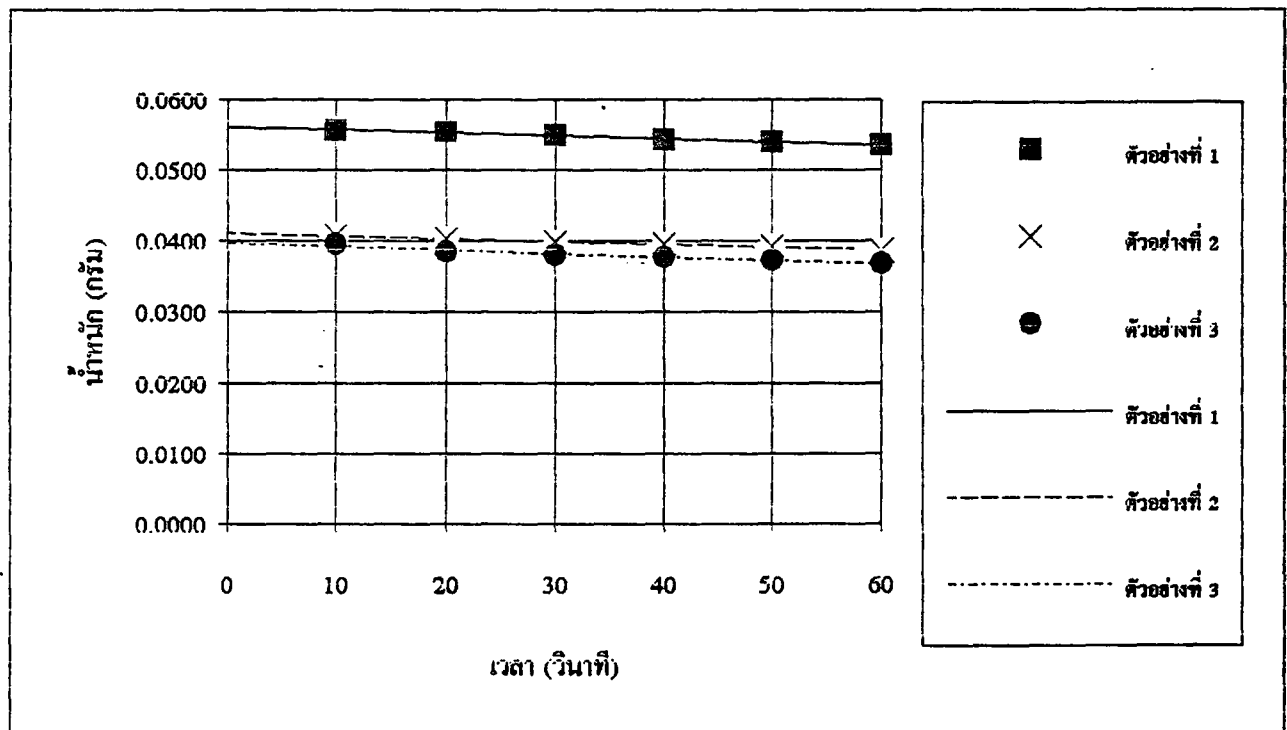
วิธี swelling

ตาราง ก2 แสดงน้ำหนักของตัวอย่างก่อนแช่ใน toluene

ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (กรัม)			
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	น้ำหนักเฉลี่ย
1	0.0116	0.0115	0.0115	0.0115
2	0.0082	0.0081	0.0081	0.0081
3	0.0081	0.0081	0.0081	0.0081

ตาราง ก3 แสดงน้ำหนักหลังการแช่ใน toluene

เวลา (วินาที)	น้ำหนักที่วัดได้เมื่อเวลาต่างๆ (กรัม)		
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3
10	0.0556	0.0407	0.0396
20	0.0554	0.0403	0.0385
30	0.0548	0.0398	0.0380
40	0.0543	0.0395	0.0377
50	0.0539	0.0392	0.0373
60	0.0535	0.0387	0.0369



รูป ก กราฟแสดงน้ำหนักที่วัดได้หลังจากแช่ toluene

SBR (dicumyl peroxide 1.5 phr)

ตาราง ฎ1 แสดงแรงที่ใช้ในการดึงชิ้นงานตัวอย่างที่เวลาต่าง ๆ จนน้ำหนักคงที่

เวลา (นาที)	น้ำหนักที่ใช้ดึง (กรัม)			
	0.50 cm.	1.00 cm.	1.50 cm.	2.00 cm.
5	109.5	218.2	312.2	399.6
10	109.1	217.3	311.7	396.9
15	109.0	216.9	311.5	396.8
20	108.8	216.7	310.9	396.7
30	108.7	216.4	310.2	396.7
40	108.4	216.1	309.9	-
50	108.3	216.1	309.6	-
60	108.3	-	309.0	-
70	-	-	309.0	-
80	-	-	-	-
90	-	-	-	-
100	-	-	-	-
110	-	-	-	-
120	-	-	-	-
130	-	-	-	-
140	-	-	-	-
150	-	-	-	-
160	-	-	-	-
170	-	-	-	-
180	-	-	-	-
190	-	-	-	-
200	-	-	-	-
210	-	-	-	-
220	-	-	-	-
230	-	-	-	-
240	-	-	-	-
250	-	-	-	-
260	-	-	-	-
270	-	-	-	-
280	-	-	-	-
290	-	-	-	-
300	-	-	-	-
310	-	-	-	-
320	-	-	-	-

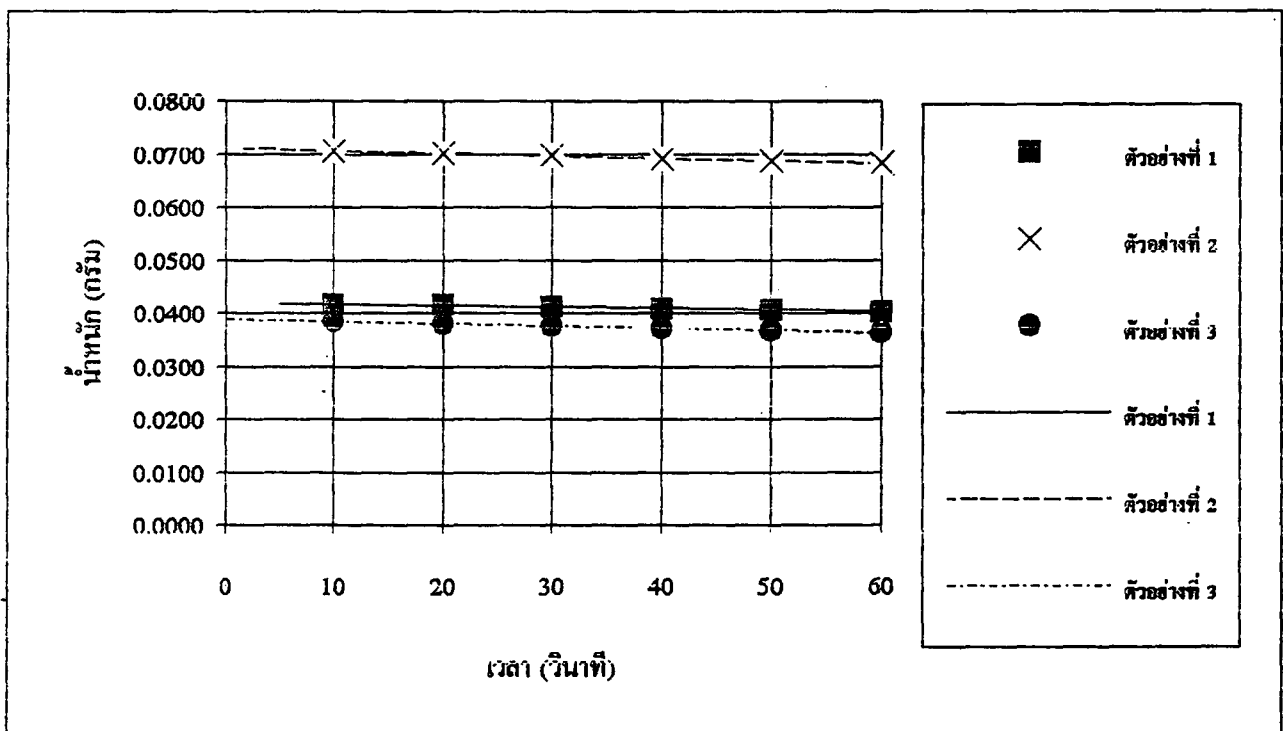
วิธี swelling

ตาราง ก2 แสดงน้ำหนักของตัวอย่างก่อนแช่ใน toluene

ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (กรัม)			
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	น้ำหนักเฉลี่ย
1	0.0104	0.0104	0.0105	0.0104
2	0.0164	0.0164	0.0164	0.0164
3	0.0090	0.0090	0.0090	0.0090

ตาราง ก3 แสดงน้ำหนักหลังการแช่ใน toluene

เวลา (วินาที)	น้ำหนักที่วัดได้เมื่อเวลาต่าง ๆ (กรัม)		
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3
10	0.0417	0.0706	0.0385
20	0.0416	0.0701	0.0380
30	0.0413	0.0697	0.0377
40	0.0409	0.0691	0.0371
50	0.0407	0.0687	0.0368
60	0.0403	0.0682	0.0364



รูป ก กราฟแสดงน้ำหนักที่วัดได้หลังจากแช่ toluene

2 ตัวอย่างการคำนวณ

วิธี stress-strain

ในการคำนวณจะอาศัยสมการของ Mooney ดังนี้

$$F/(2(\lambda - (1/\lambda^2))) = C_1(\lambda - 1/\lambda^2) + C_2$$

ตัวอย่าง หาค่า crosslink density ของ ยางธรรมชาติที่มี DCP 0.5 phr ที่ระยะยืด 0.5 mm

พื้นที่หน้าตัด - ความกว้างเฉลี่ย x ความยาวเฉลี่ย

$$= [(5.15+4.95+5.10)/3] \times [(2.10+2.05+1.95)/3]$$

$$= 10.30 \text{ mm}^2$$

น้ำหนักที่จุดสมดุล = 43.0 g

$$F = \text{แรง} / \text{พื้นที่หน้าตัด}$$

$$= (43.0 \times 9.8 / 1000) / 10.30$$

$$= 0.4 \text{ N/mm}^2$$

จะได้ $F/(2(\lambda - (1/\lambda^2))) = 143,049.8 \text{ N/mm}^2$

ค่า C_1 และ C_2 ได้จากการเขียนกราฟระหว่าง $F/(\lambda - 1/\lambda^2)$ กับ $1/\lambda$ โดยจุดตัดแกน X=1 มีค่าเท่ากับ $C_1 + C_2$ และค่า C_2 คือค่าความชันของกราฟ ค่าทั้งหมดนี้หาได้จากการทำ linear regression

ดังนั้น $C_1 = \text{จุดตัดแกน X=1} - \text{ความชัน}$

จะได้ $M_c = \rho RT / 2C_1$

และ crosslink density = $1 / 2M_c =$

จากการ regression จะได้

จุดตัดแกน X=1 = 98,751.7

ความชัน = -32,462.48

จะได้ $C_1 = 98,751.7 + 32,462.48$

$$= 131,214.25 \text{ N/mm}^2$$

$R = 8314.41 \text{ KJ} / \text{K mol}$

$T = 303 \text{ K}$

$\rho = 970 \text{ Kg/m}^3$

ดังนั้นจะได้

$$M_c = (970 \times 8314.41 \times 303) / (2 \times 131,214.25)$$

$$= 12,393.2$$

crosslink density = $1 / 2(12,393.2)$

$$= 4.0 \times 10^{-5}$$

วิธี swelling

crosslink density หาได้จากสมการ

$$-\left[\ln(1-\nu_r) + \nu_r + \chi\nu_r^2 \right] = \delta V_0 M_c^{-1} \nu_r^{1/3}$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} V_0 &= Mw/\rho \\ &= \{(8 \times 1.0018) + (7 \times 12.)\} / 0.8869 \\ &= 106.2929 \end{aligned}$$

และ ν_r = ปริมาตรของสารละลาย / (ปริมาตรของยาง+ปริมาตรของสารละลาย)

เนื่องจาก ปริมาตร = มวล / ความหนาแน่น

$$\begin{aligned} \text{จะได้ ปริมาตรของยาง} &= 0.0108 / 0.970 \\ &= 0.0111 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรของสารละลาย} &= (\text{มวลหลัง swell} - \text{มวลก่อน swell}) / \text{ความหนาแน่น} \\ &= (0.626 - 0.0108) / 0.08869 \\ &= 0.1571 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} \nu_r &= 0.0111 / (0.1465 + 0.0111) \\ &= 0.1571 \end{aligned}$$

จากสมการของ flory-Rhmc จะได้

$$\begin{aligned} M_c &= \delta V_0 \nu_r^{1/3} / \left\{ \left[\ln(1-\nu_r) + \nu_r + \chi\nu_r^2 \right] \right\} \\ &= 11,302.8429 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{crosslink density} &= 1 / M_c \\ &= 1 / 11,302.8429 \\ &= 4.3619 \times 10^{-5} \end{aligned}$$

3 LINEAR REGRESSION

เป็นการปรับเส้นกราฟให้เป็นเส้นตรงโดยการคำนวณทางคณิตศาสตร์ และสามารถหาจุดตัดแกน y และความชันของเส้นกราฟ

ให้ $S_1 = N$

$$S_2 = \sum X_i$$

$$S_3 = \sum Y_i$$

$$S_4 = \sum X_i^2$$

$$S_5 = \sum X_i Y_i$$

โดยหาจุดตัดแกน y ได้จาก

$$\text{intercept, } A = (S_3 S_4 - S_2 S_5) / (S_1 S_4 - S_2 S_2)$$

และความชันได้จาก

$$\text{slope, } B = (S_1 S_5 - S_2 S_3) / (S_1 S_4 - S_2 S_2)$$

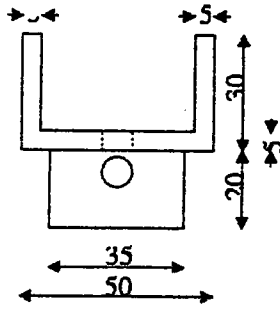
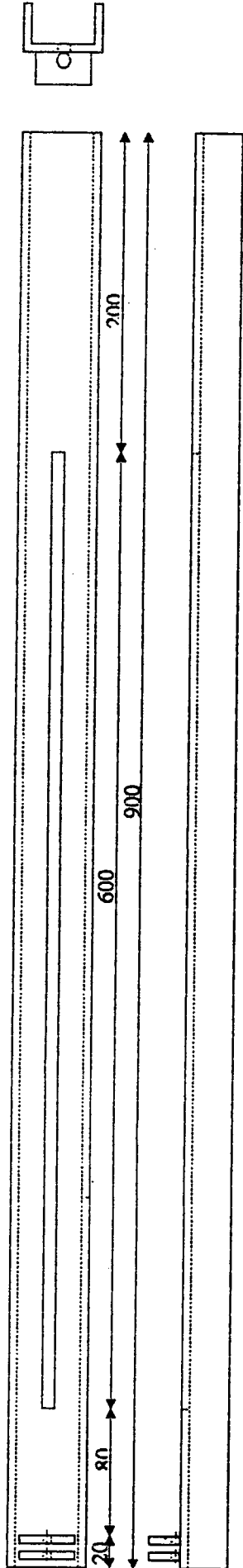
จะได้สมการเส้นตรง

$$y = Bx + A$$

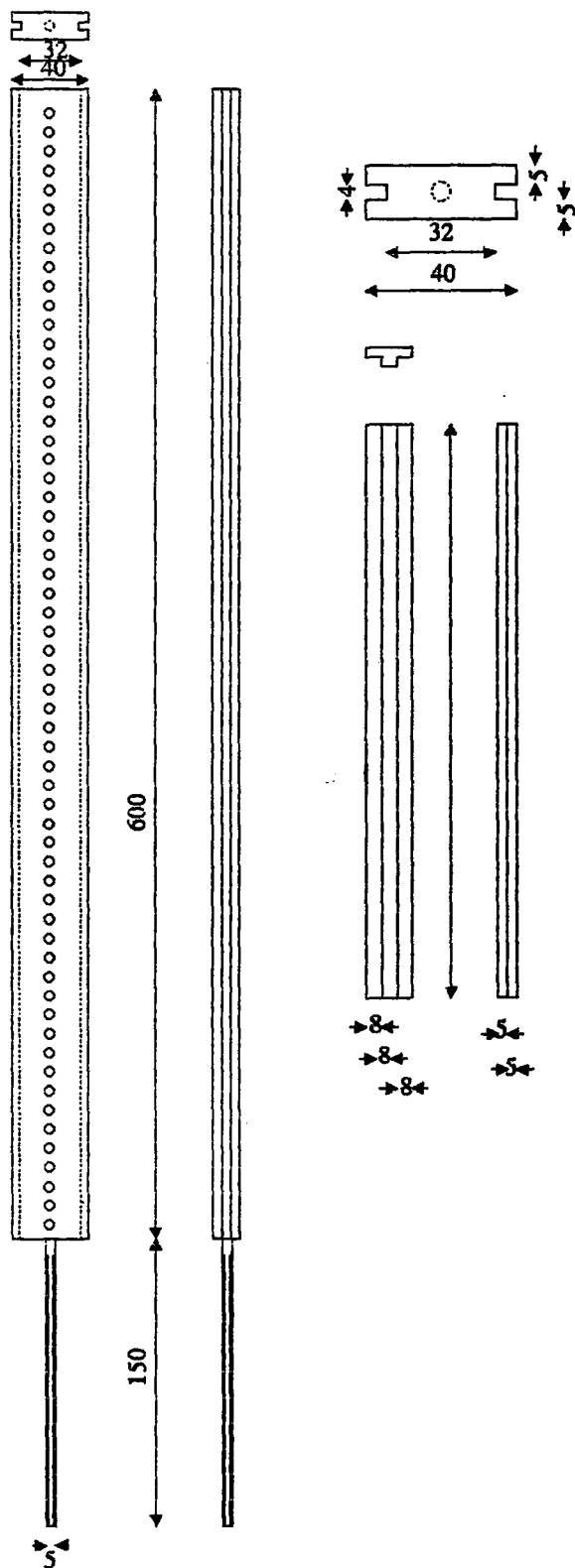
เอกสารอ้างอิง

1. Bryson, J.A. in Rubber Chemistry, pp.44-52, Applied Science Publishers Ltd., Essex, 1978.
2. BS 903 : Pt A5 : 1974.
3. Flory, P.J., Rabjohn, N. ,and Shaffer, M.C. "Dependence of Elastic Properties of Vulcaniized Rubber on the Degree of Crosslinkink" Journal of Polymer Science 4.(1949) : 225-245.
4. Mooney, M. "A Theory of Large Elastic Deformation" Journal of Applied Physics 11. (1904) : 582-592.
5. Payne, A.R. in Filler-Loaded Rubber (Kraus K.ed.) pp.104-109 , Rubber and Plastic Reserch Asociation of Great Britain, Shopshire.
6. Treloar, L.R.G. "The Theory of Rubber Elasticity" Plastics and Rubber 1(5).(1976), 209-211.
7. Treloar, L.R.G. in The Physics of Rubber Elasticity, pp.114-128, (1954).
8. Welding, G.N.,and Pysden, M.A. Rubber and Plastic Testing pp.86-96 Chapman & Hall Ltd., London, 1963.

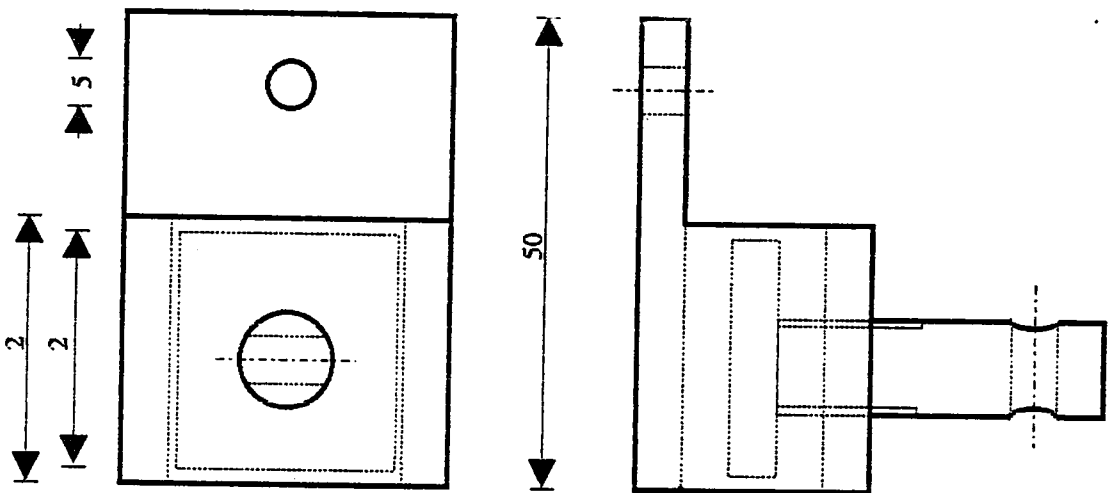
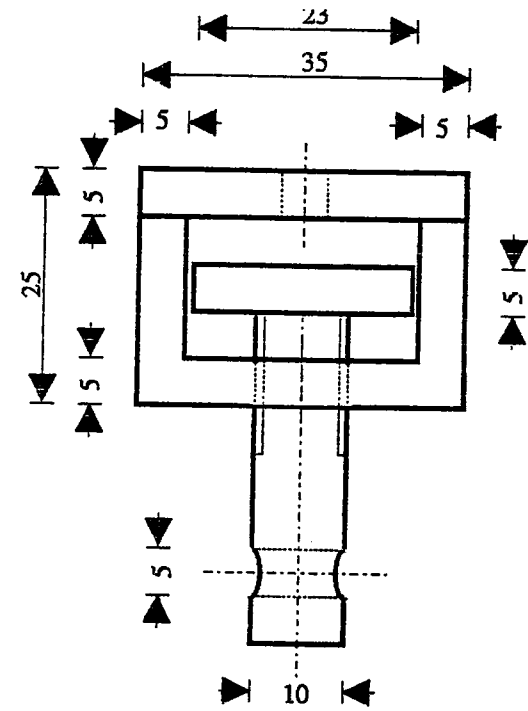
แบบแปลนเครื่องมือ “ C₁ ”



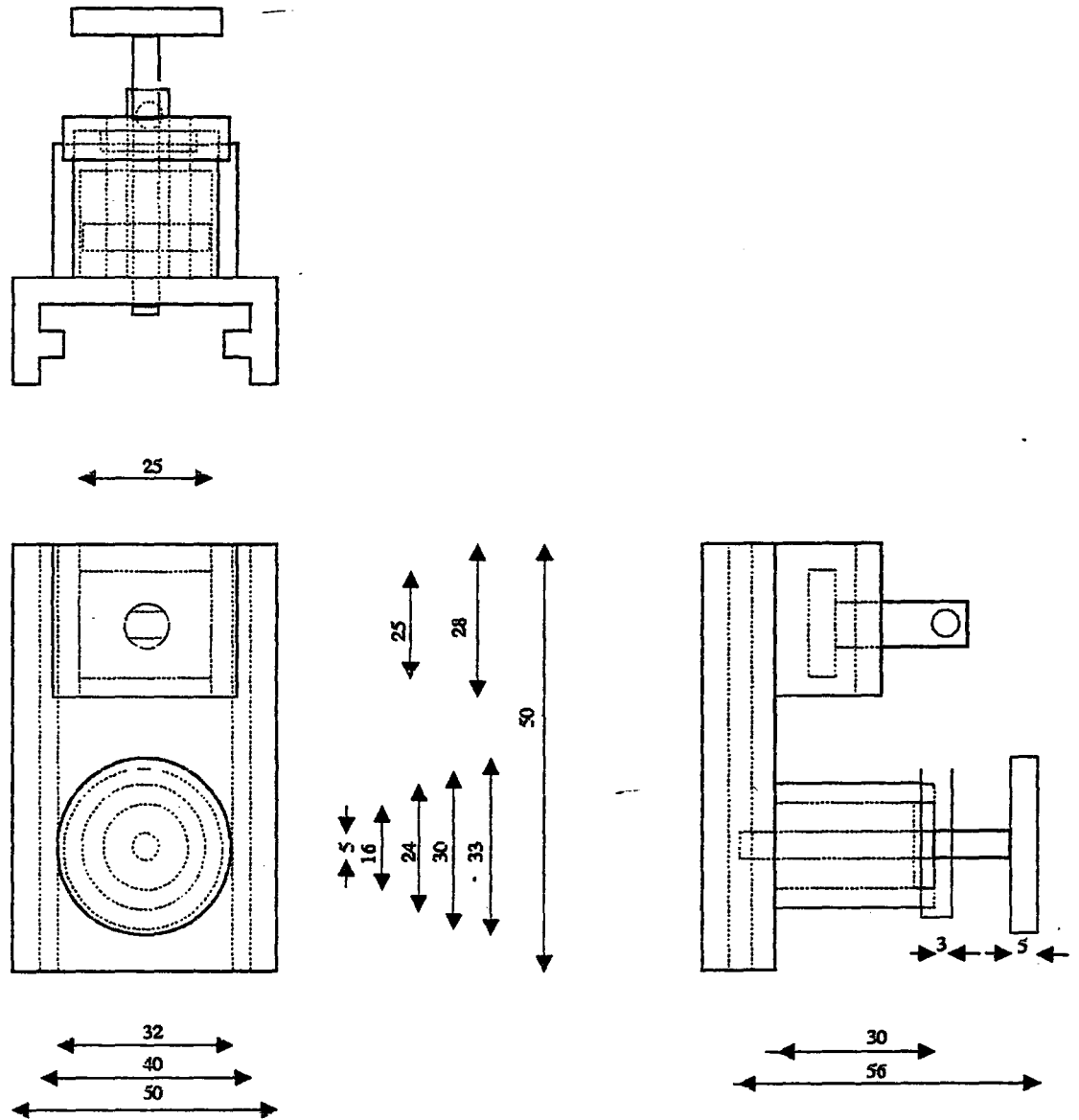
รูป ๓ รูปกำหนดขนาดของแกนหลัก



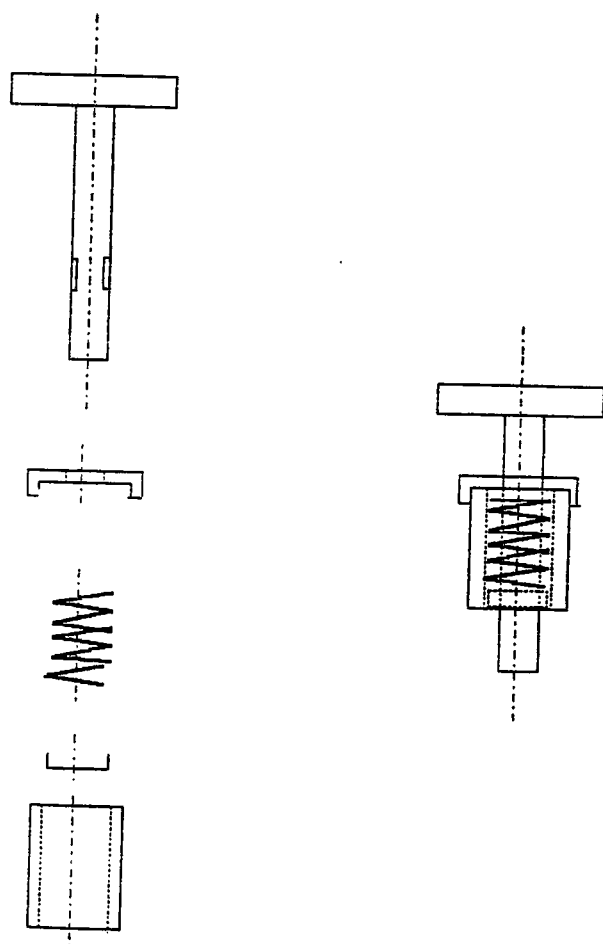
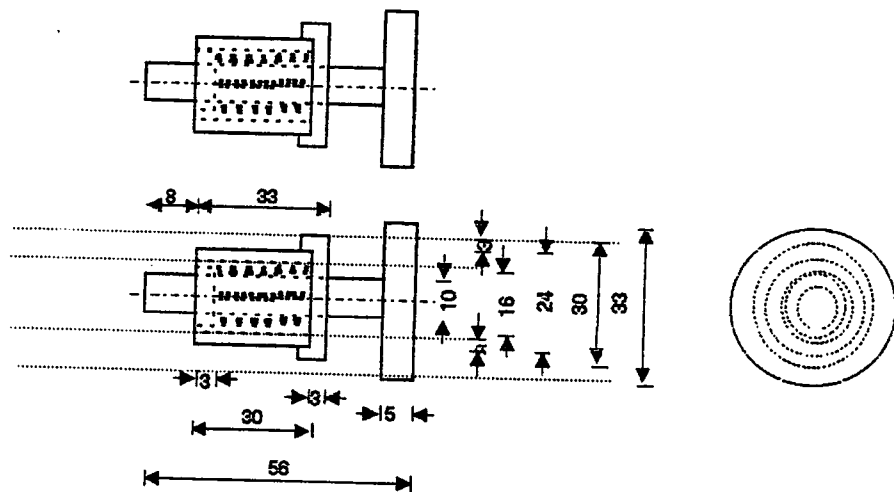
รูป ณ รูปกำหนดขนาดของแกนรอง



รูป ต รูปกำหนดขนาดของหัวจับชิ้นงานชนิดที่อยู่กับที่



รูป ต รูปกำหนดขนาดของหัวจับชิ้นงานชนิดที่เคลื่อนที่ได้



รูป ๓ รูปกำหนดขนาดของส่วนหมุดสปริงของหัวจับชั้นงานชนิดที่เคลื่อนที่ได้