

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการถ่ายโอนสารอินทรีย์เข้าไปในแผ่นยางธรรมชาติ โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์สถานะเหนือจุดวิกฤต ผลการทดลองมีดังนี้

#### 4.1 น้ำหนักโมเลกุลและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติพันธุ์ต่างๆ

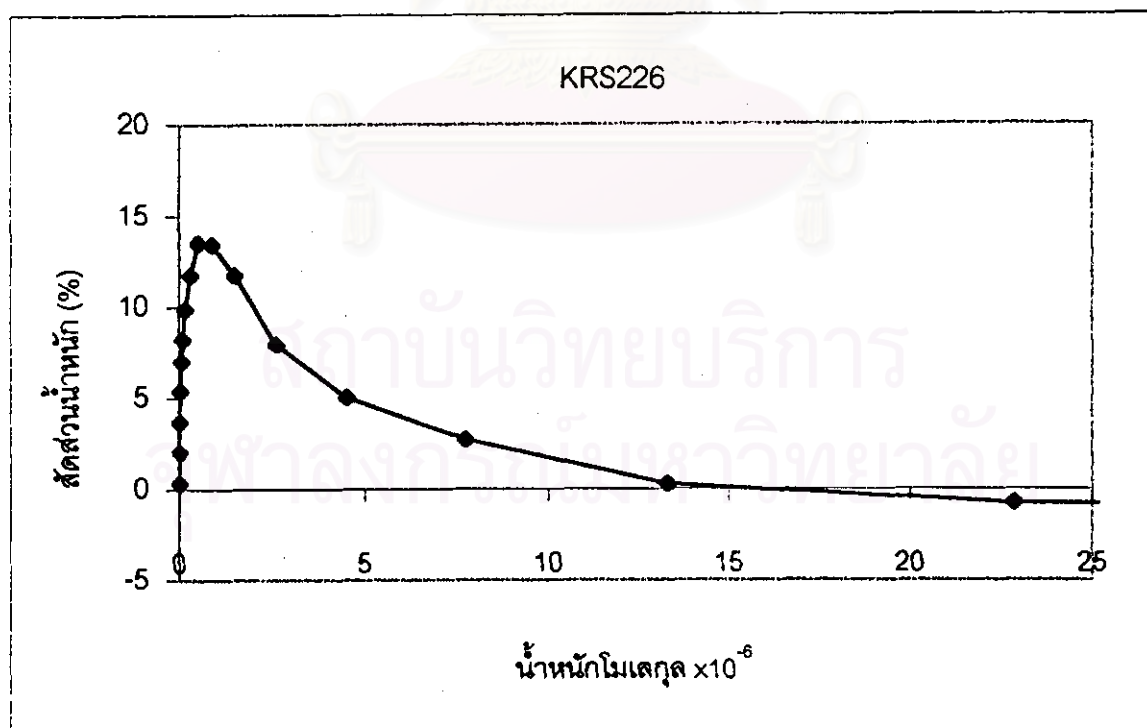
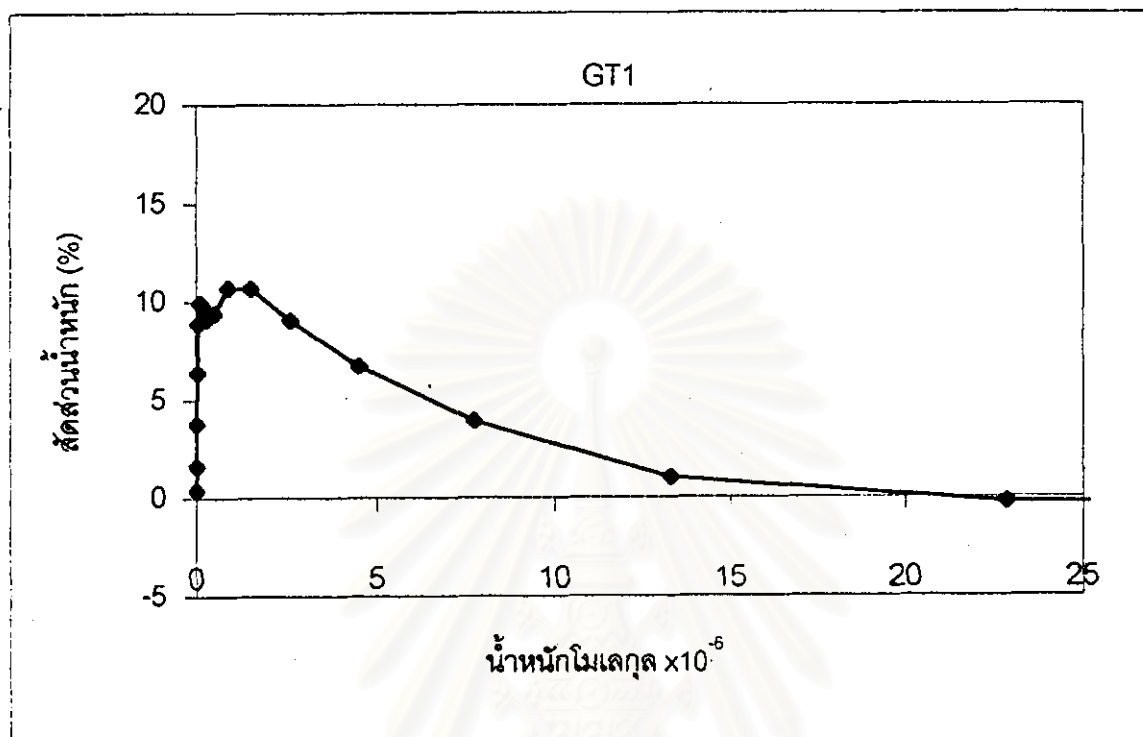
ยางธรรมชาติที่นำมาทดลองเป็นยางแผ่นผึ่งแห้ง (air dried sheet, ADS) พันธุ์ BPM24, RRIM600, RRIC110, PB235, PB310, KRS156, KRS226 และ GT1 เมื่อนำไปวัดน้ำหนักโมเลกุลและการกระจายน้ำหนักโมเลกุล ผลการทดลองแสดงในตาราง 4.1

ตาราง 4.1 แสดงน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของยางพันธุ์ต่างๆ

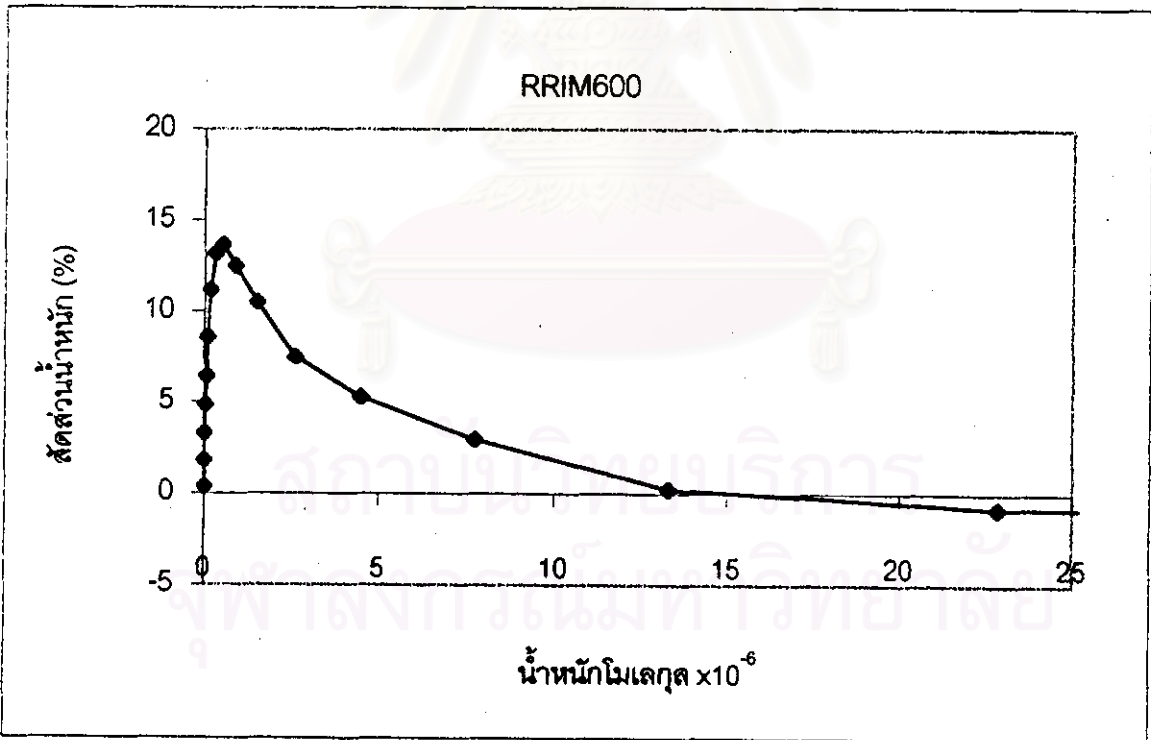
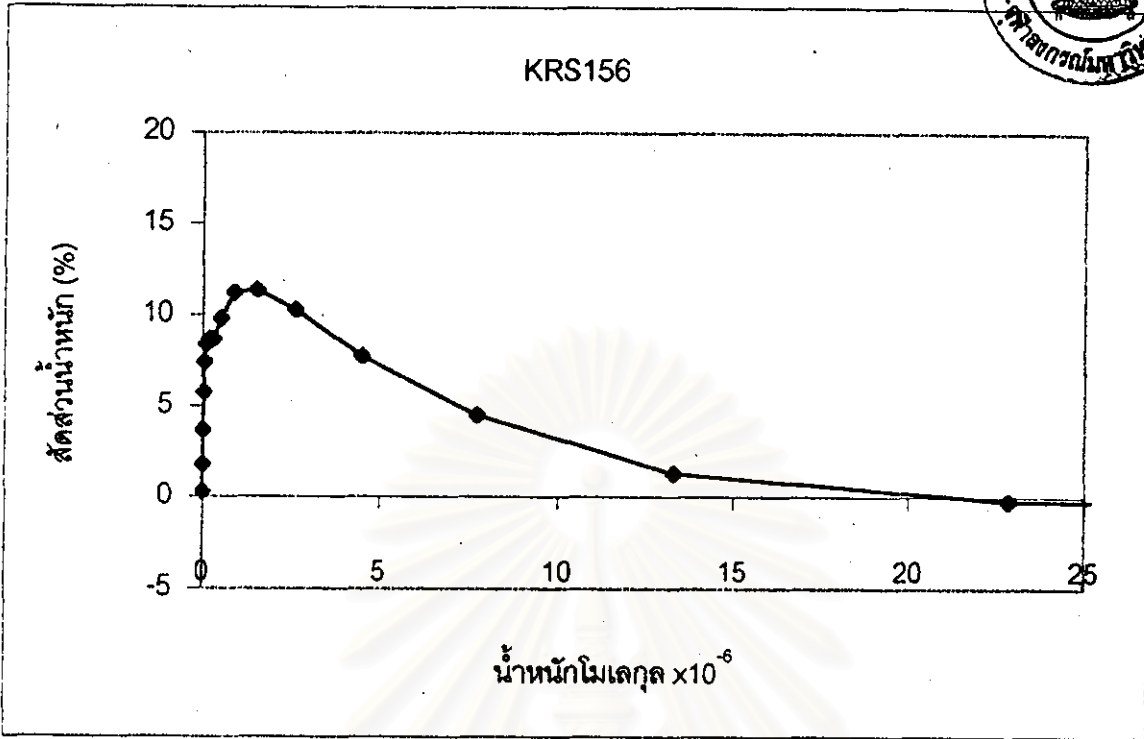
พันธุ์ยาง	Mw $\times 10^{-6}$	Mw/Mn
BPM24	1.28	5.81
RRIM600	1.01	7.87
RRIC110	1.27	8.02
PB235	1.28	7.80
PB310	1.13	7.80
KRS156	1.29	10.51
KRS226	1.02	8.21
GT1	1.16	10.06

จะเห็นว่า polydispersity ซึ่งแสดงอัตราส่วน Mw/Mn ของยางทุกพันธุ์อยู่ในช่วง 5-10 โดยพันธุ์ BPM24 มีการกระจายโมเลกุลน้อยทำให้ค่า Mw/Mn ต่ำ แต่ละโมเลกุลมีน้ำหนักใกล้เคียงกันมากกว่ายางพันธุ์อื่น

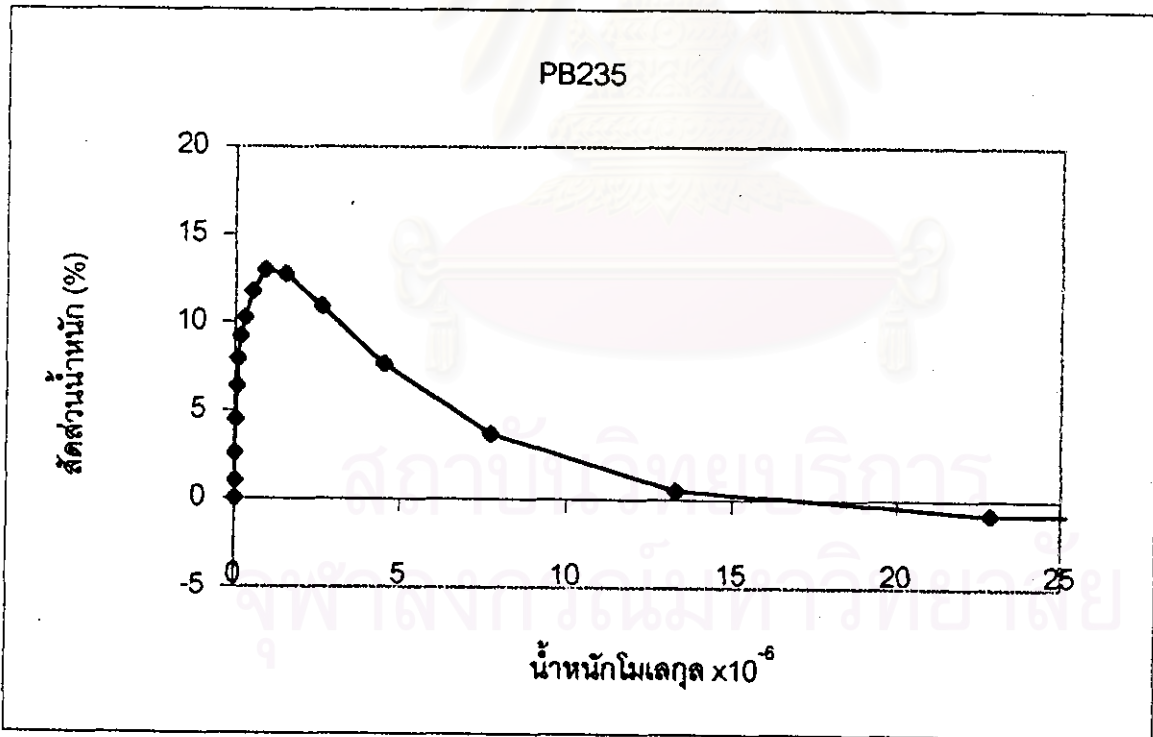
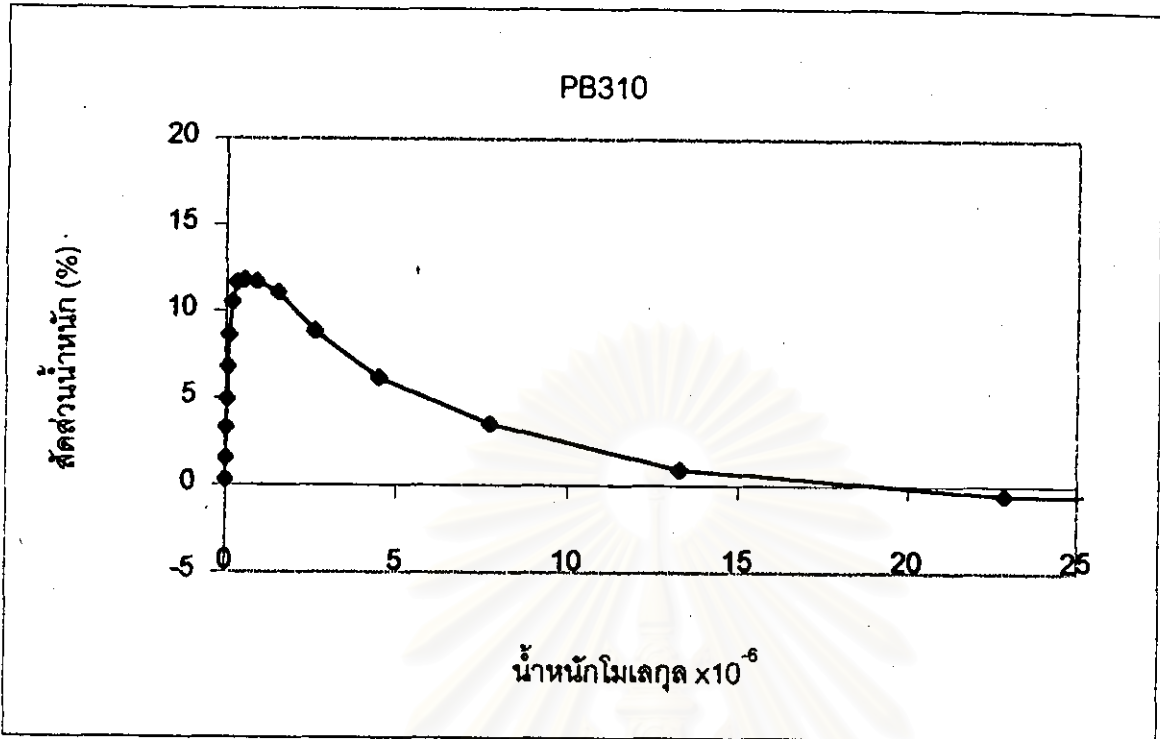
กราฟการกระจายน้ำหนักโมเลกุลในรูป 4.1 แสดงว่าอย่างทุกพันธุ์มีลักษณะการกระจายโมเลกุลเป็นแบบ unimodal เป็นกลุ่มอย่างที่มีความหนืดมูนนี้สูง



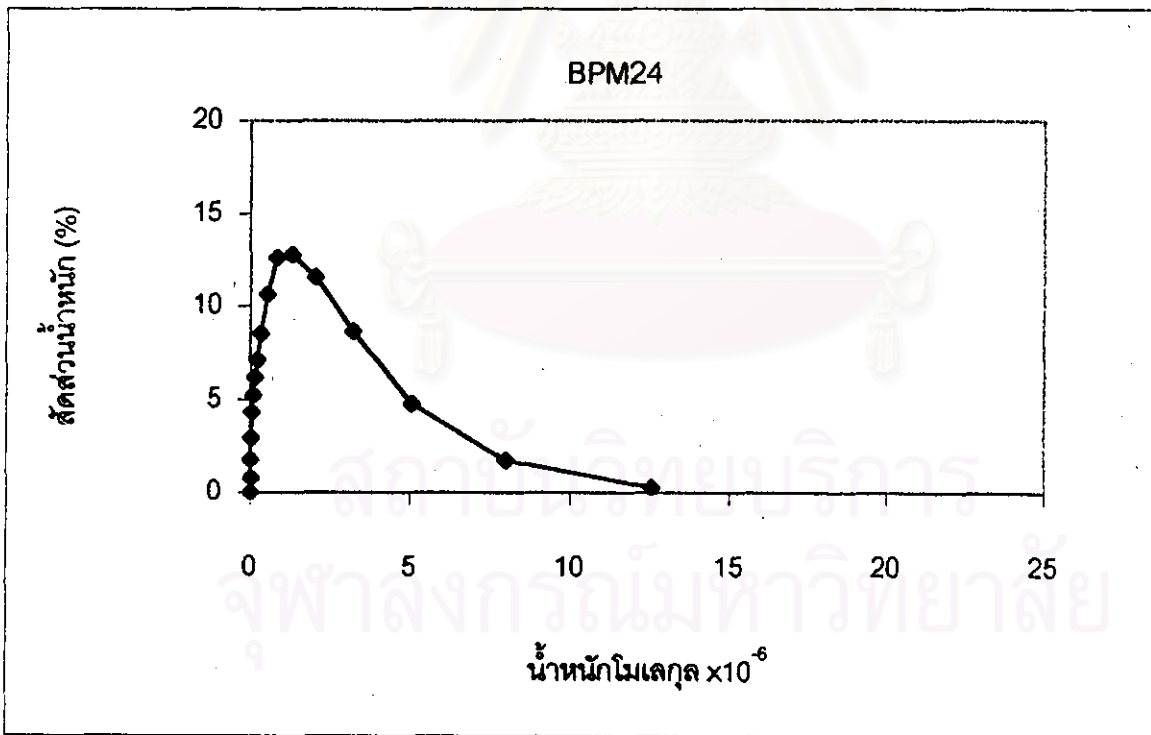
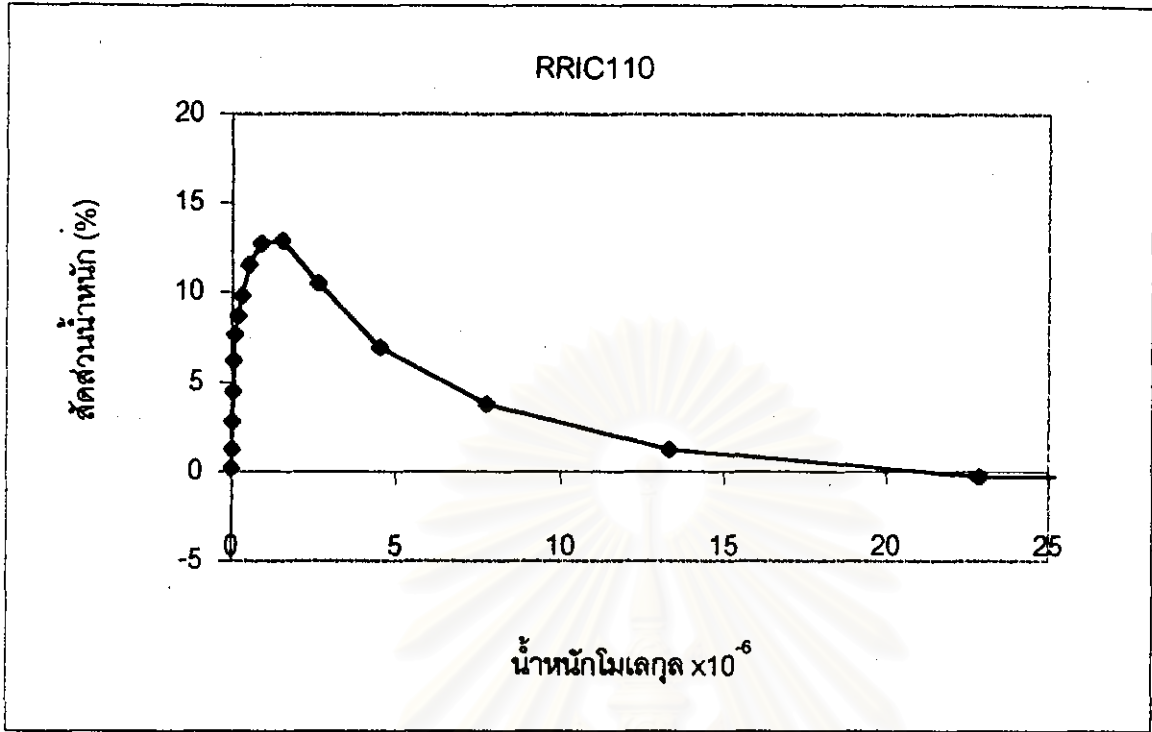
รูป 4.1 การกระจายน้ำหนักโมเลกุลของยางพันธุ์ต่างๆ



รูป 4.1 การกระจายน้ำหนักไอน้ำของยางพันธุ์ต่างๆ (ต่อ)



รูป 4.1 การกระจายน้ำหนักโมเลกุลของยางพันธุ์ต่างๆ (ต่อ)



รูป 4.1 การกระจายน้ำหนักโมเลกุลของยางพันธุ์ต่างๆ (ต่อ)

## 4.2 ผลของความดันและอุณหภูมิต่อสัดส่วนน้ำนักคาร์บอนไดออกไซด์ต่อน้ำนักยางทั้งหมด

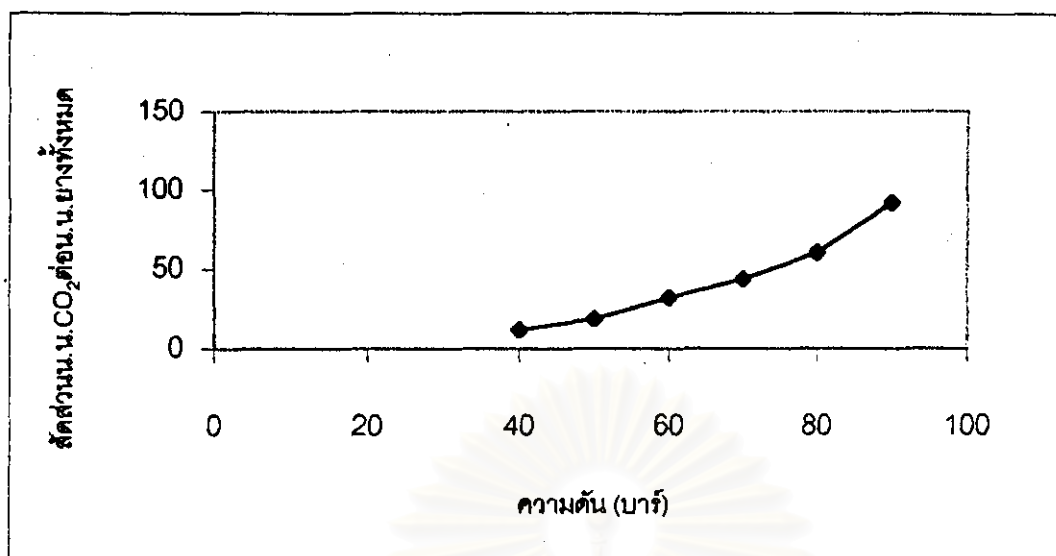
### 1. ผลของความดันต่อสัดส่วนน้ำนักคาร์บอนไดออกไซด์ต่อน้ำนักยางทั้งหมด

จากการทดลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันต่างๆคือ 40, 50, 60, 70, 80 และ 90 บาร์ อุณหภูมิ 57 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที ผลการทดลองแสดงดังรูป 4.2 จะเห็นว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้น สัดส่วนน้ำนักคาร์บอนไดออกไซด์ต่อน้ำนักยางทั้งหมดจะเพิ่มขึ้น เช่นที่ความดัน 40 บาร์ สัดส่วนนี้มีค่าเท่ากับ 12.15 และที่ความดันสูง 80 บาร์ สัดส่วนนี้มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 60.42 นั้นแสดงว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้น ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์จะแทรกซึมเข้าไปในเนื้อยางได้มากกว่าที่ความดันต่ำ จะทำให้ยางมีลักษณะบวมและพองมากขึ้น เกิดช่องว่างระหว่างสายไอโซพรีนแต่ละสาย เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปล้อมรอบสายไอโซพรีนไว้

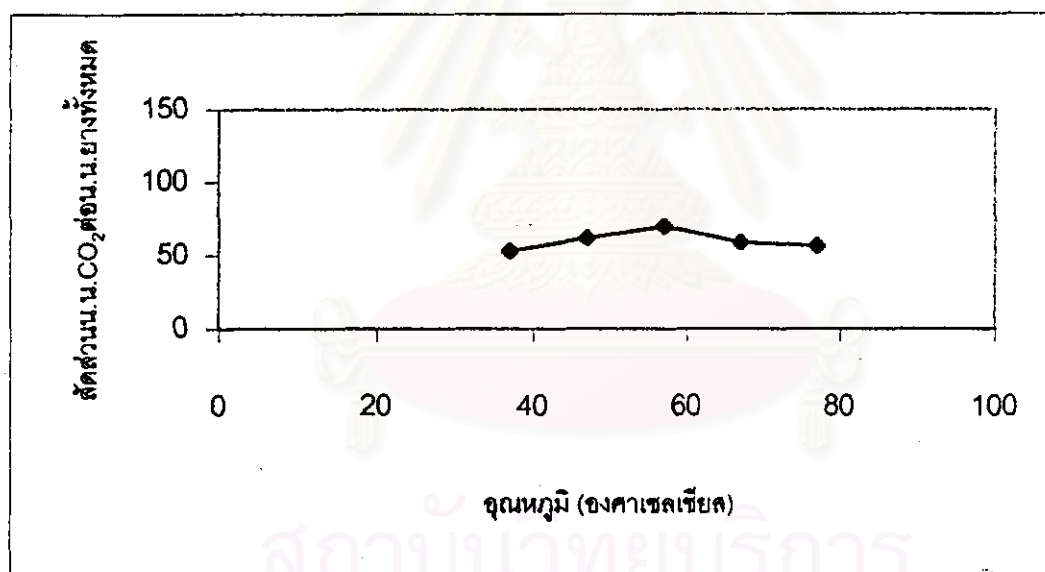
### 2. ผลของอุณหภูมิต่อสัดส่วนน้ำนักคาร์บอนไดออกไซด์ต่อน้ำนักยางทั้งหมด

จากการทดลองดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆคือ 37, 47, 57, 67 และ 77 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 80 บาร์ เวลา 60 นาที ผลการทดลองแสดงดังรูป 4.3 จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ในช่วงแรกสัดส่วนน้ำนักคาร์บอนไดออกไซด์ต่อน้ำนักยางทั้งหมดจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอีก สัดส่วนนี้จะลดลงเนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์จะลดลง (จากรูป 2.4) จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิมิมีผลต่อสัดส่วนน้ำนักคาร์บอนไดออกไซด์ต่อน้ำนักยางทั้งหมด ไม่มากนัก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูป 4.2 ผลของความดันต่อสัดส่วนน้ำหนักคาร์บอนไดออกไซด์ต่อน้ำหนักยางทั้งหมด ที่อุณหภูมิ 57 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที



รูป 4.3 ผลของอุณหภูมิต่อสัดส่วนน้ำหนักคาร์บอนไดออกไซด์ต่อน้ำหนักยางทั้งหมด ที่ความดัน 80 บาร์ เวลา 60 นาที

### 4.3 ผลการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมเลกุลของยางธรรมชาติ

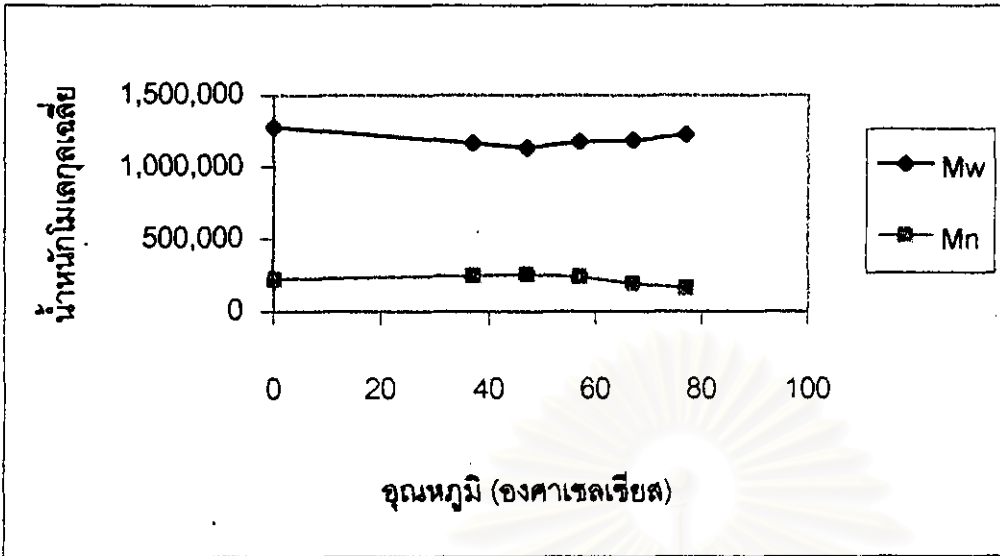
นำยางดิบมาทดลองดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ความดัน 80 บาร์ อุณหภูมิต่างๆ กันคือ 37, 47, 57, 67 และ 77 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 60 นาที และนำไปวัดน้ำหนักโมเลกุลและการกระจายน้ำหนักโมเลกุล ผลการวัดเปรียบเทียบกับยางดิบ แสดงดังรูป 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ

กราฟรูป 4.4 แสดงน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของยางธรรมชาติ ที่ดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ เปรียบเทียบกับยางดิบ พบว่า ยางที่ดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยเปลี่ยนแปลงไปน้อยมาก คือที่อุณหภูมิ 37-77 องศาเซลเซียส น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย (Mw) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $1.18 \times 10^6$  มีความเบี่ยงเบนเท่ากับ  $0.04 \times 10^6$  การกระจายน้ำหนักโมเลกุลแสดงดังรูป 4.5 ก็เปลี่ยนแปลงน้อยเช่นกัน นั่นคือการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิในช่วง 37-77 องศาเซลเซียส ไม่มีผลต่อน้ำหนักโมเลกุล และการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติ คาร์บอนไดออกไซด์แทรกซึมเข้าไปในเนื้อยาง ทำให้เกิดการพองตัวขึ้น เกิดระยะห่างระหว่างสายโมเลกุลมากขึ้น แต่เมื่อลดความดันลง คาร์บอนไดออกไซด์จะแยกออกไป โดยไม่ทำให้เกิดการขาดหรือการทำลายสายโมเลกุลอย่างให้สั้นลง ดังจะเห็นได้ว่าค่า Mw/Mn เฉลี่ยเท่ากับ 5.56 และมีความเบี่ยงเบนเท่ากับ 1.34

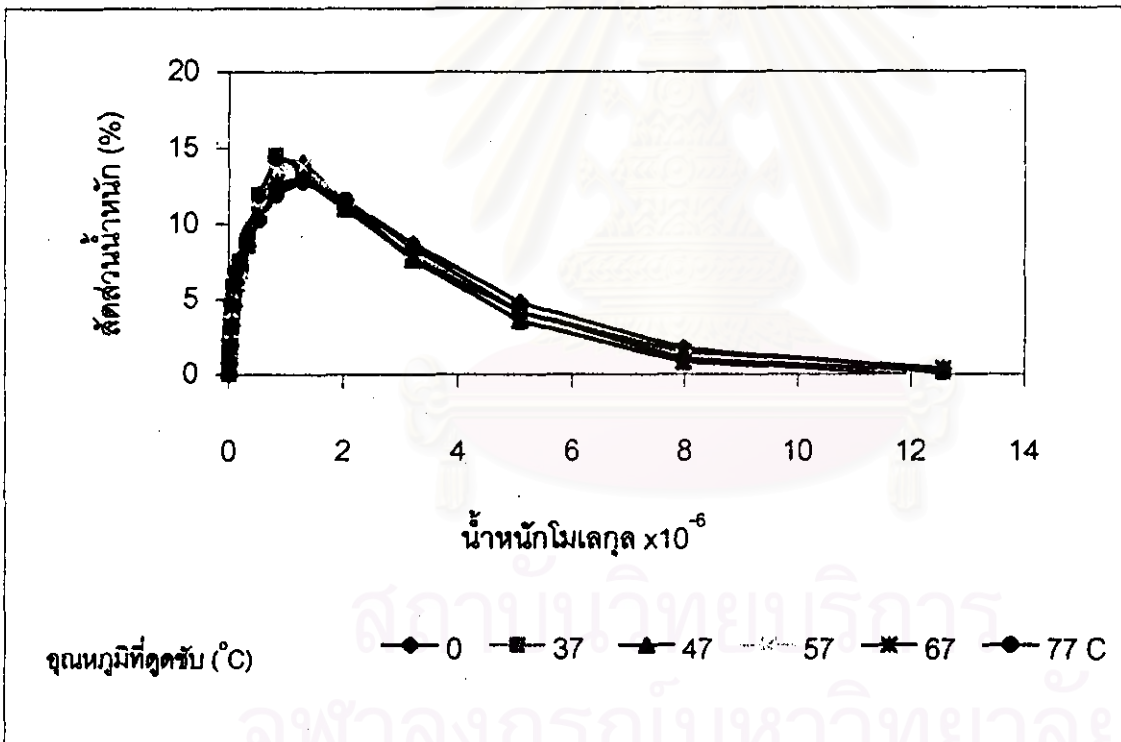
ตาราง 4.2 แสดงน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของยางที่ดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

อุณหภูมิที่ดูดซับ (องศาเซลเซียส)	Mw $\times 10^6$	Mw/Mn
37	1.17	4.69
47	1.13	4.43
57	1.18	4.88
67	1.19	6.19
77	1.23	7.62





รูป 4.4 ผลของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ต่อน้ำหนักโมเลกุลของยางพันธุ์ BPM24



รูป 4.5 ลักษณะการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของยางพันธุ์ BPM24 ที่ผ่านการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

#### 4.4 การบดขย้างด้วยเครื่องบดผสมยาง

เมื่อนำยางธรรมชาติไปบดด้วยเครื่องบดผสมยางเป็นเวลา 15, 30 และ 60 นาที และนำไปวัดน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยและความหนืดมูนี้ ผลการทดลองแสดงดังตาราง 4.3

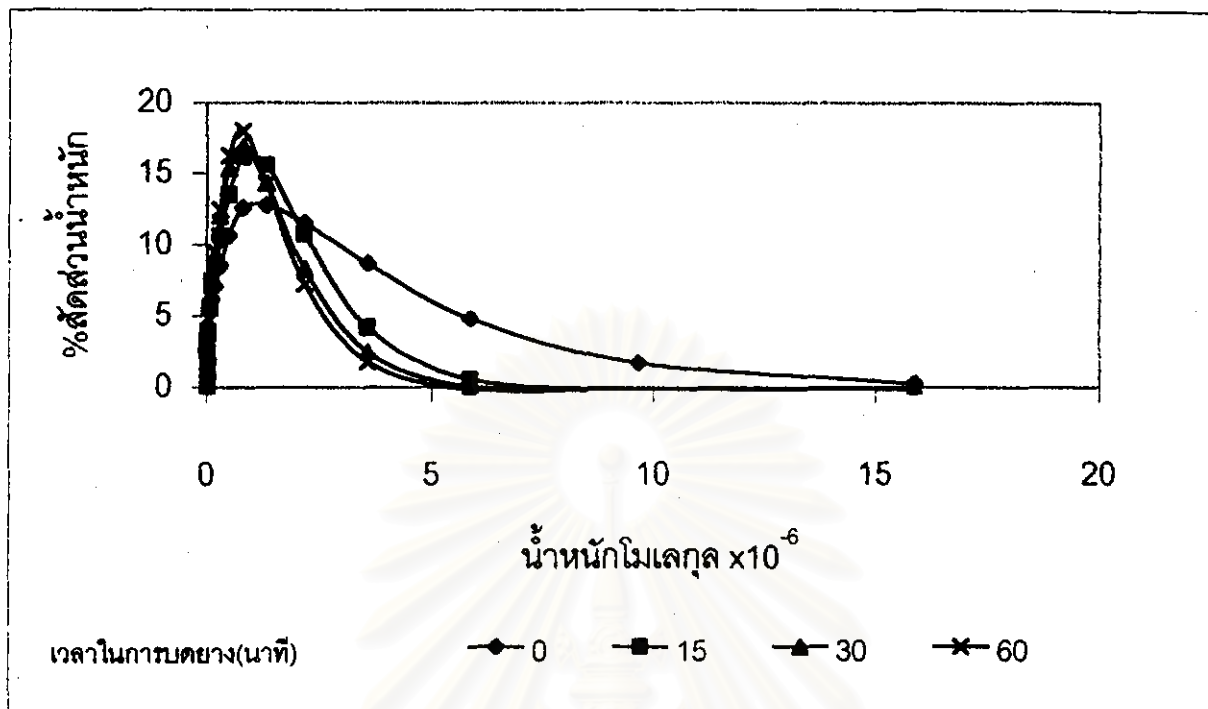
ตาราง 4.3 แสดงค่าความหนืดมูนี้และน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของยางเมื่อบดที่เวลาต่างๆ

เวลาในการบดขย้าง (นาที)	ความหนืดมูนี้ (ML 1+4 100°C)	Mw $\times 10^{-6}$	Mw/Mn
0	70	1.28	5.81
15	56	0.87	4.76
30	41	0.73	4.24
60	40	0.69	3.97

จากตาราง 4.3 จะเห็นว่า หลังจากบดขย้างแล้ว 15 นาที ความหนืดมูนี้ลดลงจาก 70 เหลือ 56 ทันทหรือคิดเป็นร้อยละ 20 ของค่าเริ่มต้น น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยก็ลดลงคือลดจาก  $1.28 \times 10^6$  เหลือ  $0.87 \times 10^6$  หรือคิดเป็นร้อยละ 32 ของค่าเริ่มต้น และเมื่อบดขย้างนานมากขึ้นเป็น 30 และ 60 นาที ความหนืดมูนี้ก็ลดลงมากขึ้นอีกคิดเป็นร้อยละ 41 และ 43 ของค่าเริ่มต้นตามลำดับ เช่นเดียวกันน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยลดลงคิดเป็นร้อยละ 43 และ 46 ของค่าเริ่มต้นตามลำดับ

จะเห็นว่าเมื่อบดขย้างนานขึ้น อัตราที่ความหนืดมูนี้และน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยจะลดลงนั้น น้อยกว่าการบดในช่วง 15 นาทีแรก การบดขย้างด้วยเครื่องบดผสมยางเป็นการตัดสายโมเลกุลยางให้สั้นลงโดยวิธีกล ทำให้ความหนืดมูนี้ของยางน้อยลงตามไปด้วย

จากรูป 4.6 ซึ่งแสดงการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของยางบดที่เวลาต่างๆ พบว่าสัดส่วนของยางที่น้ำหนักโมเลกุลสูงจะลดลง ในขณะที่สัดส่วนของยางที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลลดลง อัตราส่วน Mw/Mn ลดลงด้วย จากตาราง 4.3 จะเห็นว่า การบดขย้าง 15 นาที มีอัตราส่วน Mw/Mn เท่ากับ 4.76 ลดลงคิดเป็นร้อยละ 18 ของค่าเริ่มต้น และเมื่อบดขย้างนานขึ้นเป็น 30 และ 60 นาที อัตราส่วน Mw/Mn ลดลงคิดเป็นร้อยละ 27 และ 32 ของค่าเริ่มต้นตามลำดับ แสดงว่าการบดขย้างด้วยวิธีกลในช่วงเวลาต่างๆ ทำให้ขนาดโมเลกุลของยางเล็กลงและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของยางลดลงไปด้วย นั่นคือโมเลกุลมีขนาดใกล้เคียงกันมากขึ้น



รูป 4.6 ผลของเวลาที่ใช้บดขยงต่อการกระจายน้ำหนักไอน้ำหนักของยางพันธุ์ BPM24

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.5 การถ่ายโอนสารอินทรีย์เข้าไปในยางธรรมชาติ ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะเหนือจุดวิกฤต

ทดสอบการแทรกซึมสารอินทรีย์เข้าไปในยางธรรมชาติ โดยมีคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวพาที่ความดัน 80 บาร์ อุณหภูมิ 59 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที วัดปริมาณการแทรกซึมของสารอินทรีย์ได้ดังแสดงในรูป 4.7

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าสารอินทรีย์ประเภทแอลกอฮอล์ซึ่งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล 1 หมู่ ที่ใช้ในการทดลองได้แก่ ethanol, n-propanol, n-butanol, n-octanol และ cetostearyl alcohol เมื่อทดลองแทรกซึมเข้าไปในยางธรรมชาติแล้ว พบว่าปริมาณการแทรกซึมแตกต่างกันคือกลุ่มแรกเป็นพวก ethanol, n-propanol และ n-butanol เป็นแอลกอฮอล์โมเลกุลเล็กและมีขั้ว เมื่อแทรกซึมเข้าไปในยางโดยมีคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวพา จะเข้าไปล้อมรอบสายไอโซพรีนของยางในส่วนที่มีขั้ว เมื่อลดความดันลงและปล่อยให้คาร์บอนไดออกไซด์ไหลแยกออกจากเนื้อยาง สารดังกล่าวจะไหลออกมาพร้อมกับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย ดังนั้นปริมาณการแทรกซึมที่วัดได้จึงมีค่าน้อยมาก แต่อีกกลุ่มหนึ่งคือ n-octanol และ cetostearyl alcohol เป็นสารอินทรีย์ที่ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล 1 หมู่เช่นกัน มีโมเลกุลใหญ่กว่าและโครงสร้างเป็นไฮโดรคาร์บอนมากกว่า เมื่อแทรกซึมเข้าไปในเนื้อยางจึงไปล้อมรอบสายไอโซพรีน ส่วนของไฮโดรคาร์บอนของสารจะติดกับส่วนที่เป็นไฮโดรคาร์บอนของสายไอโซพรีนเช่นเดียวกัน เมื่อความดันลดลงคาร์บอนไดออกไซด์ไหลออกมา ทำให้สารดังกล่าวไหลออกมาเพียงเล็กน้อยดังนั้นปริมาณการแทรกซึมที่วัดได้จึงมีค่ามากกว่า

ตาราง 4.4 น้ำหนักโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง

	สูตรโมเลกุล	น้ำหนักโมเลกุล
Ethanol	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$	46.07
n-propanol	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$	60.1
Ethanolamine	$\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$	61.08
n-butanol	$\text{C}_2\text{H}_5\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$	74.12
Propylene glycol	$\text{CH}_3\text{CHOHCH}_2\text{OH}$	76.1
n-octanol	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_6\text{CH}_2\text{OH}$	130.23
Cetostearyl alcohol	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{CH}_2\text{OH}$	242.45
Paraffin wax	$\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$	360-420

สำหรับสารอินทรีย์ประเภท ethanolamine และโพพิลีนไกลคอล มีโครงสร้างต่างจากสารประเภทแอลกอฮอล์คือ ethanolamine มีหมู่ไฮดรอกซิล 1 หมู่และ  $\text{NH}_2$  1 หมู่ ส่วนโพพิลีนไกลคอลมีหมู่ไฮดรอกซิล 2 หมู่ ผลการทดลองมีลักษณะใกล้เคียงกับประเภทแอลกอฮอล์โมเลกุลเล็กคือปริมาณการแทรกซึมที่วัดได้มีค่าน้อยมาก

glyceryl monostearate เป็นสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ซึ่งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล 3 หมู่ สามารถแทรกซึมเข้าไปในยางธรรมชาติได้น้อยเมื่อเทียบกับไซพาราฟิน ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลใกล้เคียงกัน เพราะไซพาราฟินประกอบด้วยโครงสร้างไฮโดรคาร์บอนเพียงอย่างเดียว จึงแทรกซึมเข้าไปล้อมรอบโมเลกุลยางได้มาก

จากรูป 4.7 พบว่าไซพาราฟินสามารถแทรกซึมเข้าไปในเนื้อยางและ ล้อมรอบสายไอโซพรีนของยางได้มากที่สุดคิดเป็นสัดส่วน 47 phr (part per hundred rubber) ในขณะที่โพพิลีนไกลคอลนั้น วัดปริมาณการแทรกซึมได้เพียง 1 phr ที่ภาวะเดียวกัน

หลังจากทดลองการถ่ายโอนและหาปริมาณการแทรกซึมของสารอินทรีย์แล้ว นำไปวัดความต้านทานแรงดึงและการยืดออกเมื่อขาด ผลการทดลองแสดงดังตาราง 4.5 ข้อมูลในตารางแสดงค่าเป็นร้อยละเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ

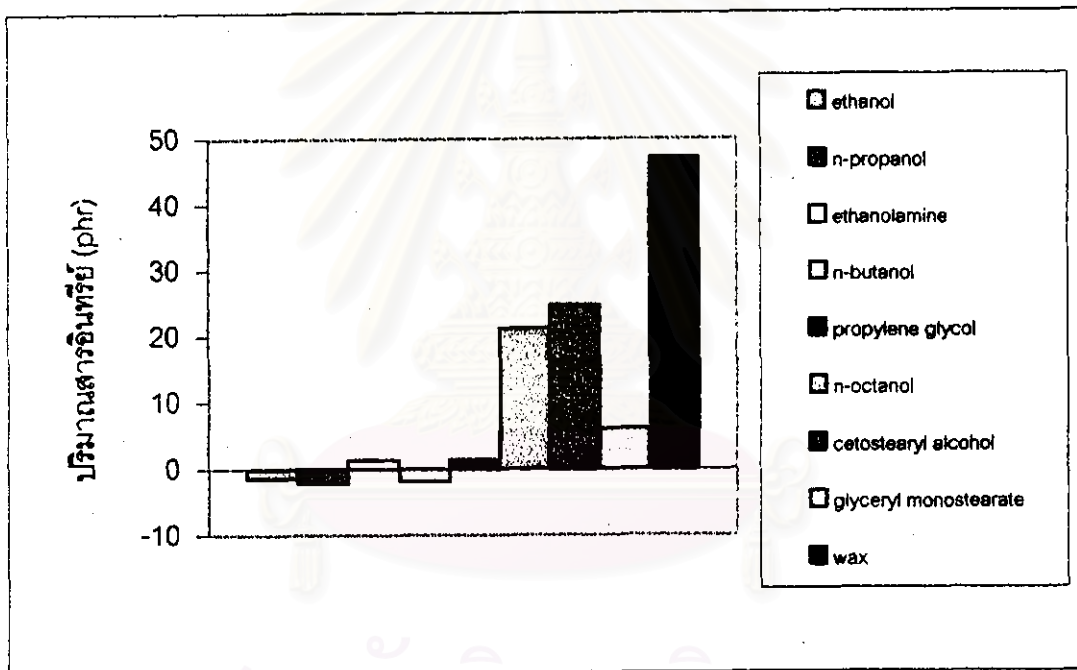
ตาราง 4.5 แสดงความต้านทานแรงดึงและการยืดออกเมื่อขาดของยางเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติ

	ความต้านทานแรงดึง (ร้อยละ)	การยืดออกเมื่อขาด (ร้อยละ)
Ethanol	-43	57
n-propanol	-61	-19
n-butanol	-49	-60
n-octanol	-75	-91
Propylene glycol	7	60
Ethanolamine	-5	27
Paraffin wax	89	-82
Glyceryl monostearate	62	-25
Cetostearyl alcohol	50	-72

ผลการทดลองในตาราง 4.5 พบว่าการแทรกซึมไซพาราฟินเข้าไปในยางธรรมชาติ จะทำให้ยางมีความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 89 ของค่าเริ่มต้น ในขณะที่เดียวกันทำให้ยางมีการยืดออกเมื่อขาดลดลงร้อยละ 82 ของค่าเริ่มต้น เนื่องจากเมื่อไซพาราฟินแทรกซึมเข้าไปแล้วจะไป

ล้อมรอบโมเลกุลสายไอโซพรีนของยางธรรมชาติและเกิดการเสริมความต้านทานแรงดึงให้กับยาง ทำให้ยางมีความต้านทานแรงดึงสูงขึ้น ในขณะที่เดียวกันก็มีการยืดออกเมื่อขาดลดลงเพราะสายไอโซพรีนของยางมีไรพาราฟินล้อมรอบอยู่

ส่วนโพรพิลีนไกลคอลนั้น จากตาราง 4.5 พบว่าสามารถแทรกซึมเข้าไปได้เพียงเล็กน้อย ทำให้ความต้านทานแรงดึงของยางไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก แต่ด้วยโครงสร้างของโพรพิลีนไกลคอลที่ไม่เหมือนกับไรพาราฟิน เพราะมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ 2 หมู่ โพรพิลีนไกลคอลจะไปล้อมรอบบริเวณมีขั้วที่ปลายสายไอโซพรีนของยาง ช่วยให้มีการยืดออกได้มากขึ้นก่อนขาด ดังนั้นค่าการยืดออกเมื่อขาดของยางจึงสูงขึ้น



รูป 4.7 การเปรียบเทียบปริมาณการแทรกซึมสารอินทรีย์เข้าไปในยางธรรมชาติ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.6 ผลของความหนืดมูนนี้ต่อปริมาณการแทรกซึมไฮพาราฟินและไพโรฟิลินไกลคอล

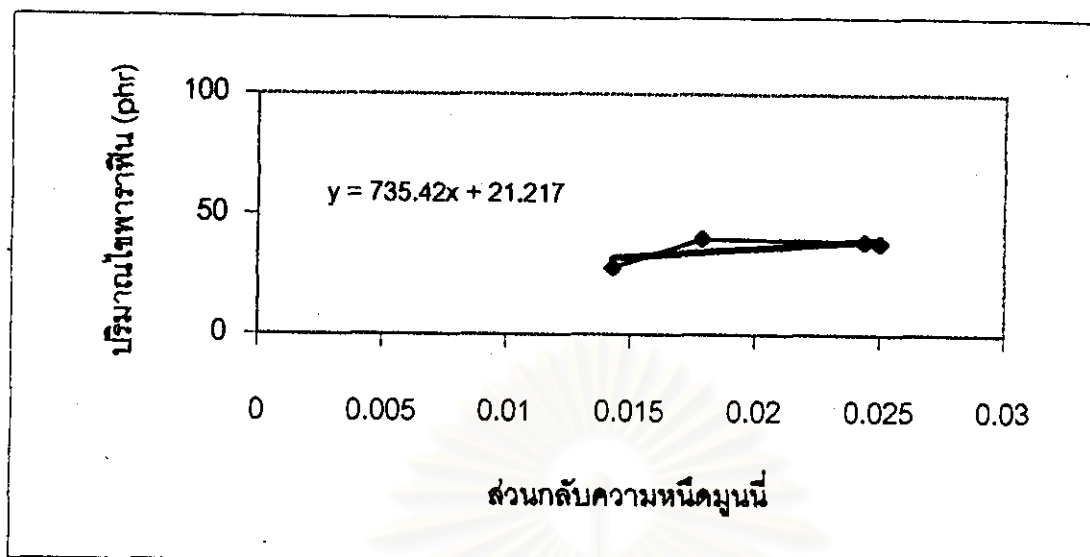
จากผลการทดลองข้อ 4.4 พบว่าเมื่อบดขย้างเป็นเวลานานมากขึ้นน้ำหนักโมเลกุลและความหนืดมูนนี้ของยางจะลดลง ดังนั้นจึงแบ่งยางที่บดแล้วมาทดลองการถ่ายโอนไฮพาราฟินและไพโรฟิลินไกลคอลโดยไม่มีคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวพา ที่อุณหภูมิ 59 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ความดันบรรยากาศ ผลการทดลองแสดงดังรูป 4.8 และ 4.9 จะเห็นว่าเมื่อยางมีความหนืดมูนนี้ลดลง ปริมาณการแทรกซึมเข้าไปในยางมีมากขึ้น นั้นแสดงว่าการตัดหรือการทำให้โมเลกุลยางสั้นลงจะช่วยให้สารแทรกซึมเข้าไปในเนื้อยางง่ายขึ้น ดังนั้นปริมาณการแทรกซึมของไฮพาราฟินและไพโรฟิลินไกลคอลเข้าไปในยางจึงมากขึ้น จากรูป 4.8 และ 4.9 จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดมูนนี้กับปริมาณการแทรกซึมของสารคือ

$$W_w = 735/\eta + 21 \quad (4.1)$$

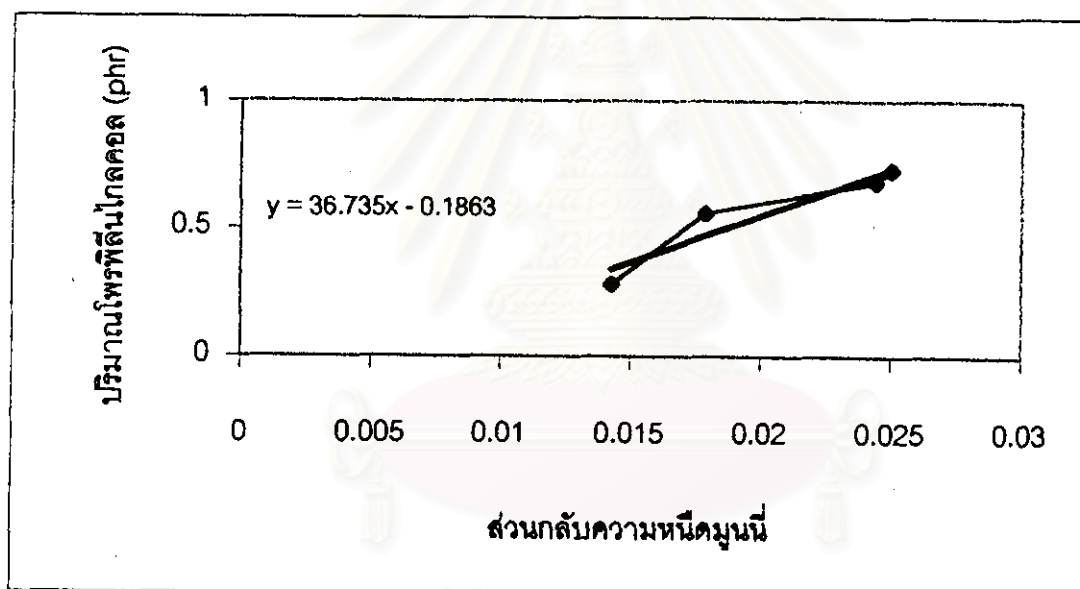
$$W_p = 37/\eta - 0.2 \quad (4.2)$$

เมื่อ  $W_w, W_p$  คือปริมาณการแทรกซึมของไฮพาราฟินและไพโรฟิลินไกลคอล (phr) ตามลำดับและ  $\eta$  คือความหนืดมูนนี้ (ML 1+4 100°C) ของยาง





รูป 4.8 ผลของความหนืดมูลนี้ต่อปริมาณการตรกซึมไนโตรเจน



รูป 4.9 ผลของความหนืดมูลนี้ต่อปริมาณการตรกซึมโพสฟอรัส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## 4.7 ไชพาราฟิน

### 1. ผลของความดันต่อปริมาณการแทรกซึมไชพาราฟิน

การทดลองการแทรกซึมไชพาราฟินเข้าไปในยางธรรมชาติโดยมีคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวพา ที่ความดัน 0, 40, 50, 60, 70, 80 และ 90 บาร์ อุณหภูมิ 59 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที ผลการทดลองแสดงดังรูป 4.10

จากผลการทดลองในข้อ 4.2 พบว่าเมื่อความดันสูงขึ้น สัดส่วนน้ำหนักคาร์บอนไดออกไซด์ต่อน้ำหนักยางทั้งหมดจะเพิ่มขึ้น นั่นแสดงว่าคาร์บอนไดออกไซด์สามารถแทรกซึมเข้าไปในเนื้อยางได้มากขึ้น แต่จากการทดลองการแทรกซึมไชพาราฟินพบว่า ความดันสูงขึ้นไม่มีผลต่อปริมาณไชพาราฟินที่แทรกซึมเข้าไป เพราะเมื่อความดันสูงขึ้น ปริมาณไชพาราฟินที่แทรกซึมเข้าไปค่อนข้างคงที่ คือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 51 phr มีความเบี่ยงเบนเท่ากับ 4 phr เมื่อทดลองที่ความดันบรรยากาศคือไม่มีคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวพา ที่อุณหภูมิและเวลาเดียวกัน พบว่าปริมาณไชพาราฟินที่แทรกซึมเข้าไปในยางได้ 50 phr ซึ่งใกล้เคียงกับปริมาณไชพาราฟินเมื่อใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันต่างๆมาก

เนื่องจากทำการทดลองที่เวลานาน 60 นาที ไชพาราฟินแทรกซึมเข้าไปในยางได้ จนเข้าสู่สมดุลแล้ว ผลการแทรกซึมจึงไม่แตกต่างกัน จากผลการทดลองเปรียบเทียบที่ความดันบรรยากาศและความดันต่างๆ พบว่าไชพาราฟินสามารถแทรกซึมเข้าไปในยางได้โดยไม่จำเป็นต้องใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวพา

จากนั้นนำไปวัดความต้านทานแรงดึงและการยืดออกเมื่อขาด ผลการทดลองแสดงดังรูป 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ พบว่าที่ความดันเพิ่มขึ้น ยางมีความต้านทานแรงดึงค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.543 MPa และมีความเบี่ยงเบนเท่ากับ 0.041 MPa นั่นคือความต้านทานแรงดึงแปรผันตามปริมาณไชพาราฟินที่แทรกซึมเข้าไปในยาง โดยไม่ขึ้นกับความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ และสำหรับการยืดออกเมื่อขาดก็ให้ผลเช่นเดียวกัน ที่ความดันต่างๆ การยืดออกเมื่อขาดของยางค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 143 และมีความเบี่ยงเบนเท่ากับร้อยละ 3 และจะน้อยกว่าการยืดออกเมื่อขาดของยางธรรมชาติ นั่นคือการยืดออกเมื่อขาดแปรผันกับปริมาณไชพาราฟินที่แทรกซึมเข้าไปในยางเท่านั้น ไม่ขึ้นกับความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ เพราะการแทรกซึมของคาร์บอนไดออกไซด์เข้าหรือออกมาจากยางไม่ได้ทำให้โมเลกุลของยางเปลี่ยนแปลงดังกล่าวไว้ในข้อ 4.3

## 2. ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณการแทรกซึมไซพาราฟิน

การทดลองการถ่ายโอนไซพาราฟินเข้าไปในยางธรรมชาติโดยมีคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวพา ที่ความดัน 80 บาร์ อุณหภูมิ 59, 69 และ 79 องศาเซลเซียส เวลา 5, 10, 30, 60 และ 120 นาที แสดงผลการทดลองดังรูป 4.13

จากรูป 4.13 การถ่ายโอนที่เวลามากขึ้น ปริมาณการแทรกซึมไซพาราฟินเข้าไปในยางเพิ่มขึ้น โดยอัตราการถ่ายโอนสูงในช่วงเวลา 30 นาทีแรก แต่เมื่อเวลามากกว่า 30 นาทีขึ้นไป อัตราการถ่ายโอนจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและเริ่มคงที่

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่อุณหภูมิต่างๆ จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณการแทรกซึมไซพาราฟินเข้าไปในยางธรรมชาติจะเพิ่มขึ้นแต่ไม่มากนัก เมื่อเวลานานขึ้นปริมาณการแทรกซึมจะเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น สัดส่วนน้ำหนักคาร์บอนไดออกไซด์ต่อน้ำหนักยางทั้งหมดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย คาร์บอนไดออกไซด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคาร์บอนไดออกไซด์ ช่วยการแทรกซึมของไซพาราฟินเล็กน้อยเพราะ ไซพาราฟินสามารถแทรกซึมเข้าไปได้มากอยู่แล้วเนื่องจากโครงสร้างไฮโดรคาร์บอนที่คล้ายคลึงกัน ดังนั้นอุณหภูมิจึงมีผลต่อการแทรกซึมของไซพาราฟินเพียงเล็กน้อย

เปรียบเทียบผลการทดลองที่ความดัน 0 และ 80 บาร์ เมื่ออุณหภูมิตั้งที่ 59 องศาเซลเซียส พบว่าในช่วงเวลา 30 นาทีแรก การแทรกซึมของไซพาราฟินที่ความดัน 0 บาร์ จะน้อยกว่าที่ความดัน 80 บาร์ แสดงว่าคาร์บอนไดออกไซด์ช่วยพาไซพาราฟินแทรกซึมเข้าไปในยางได้ดีในช่วงเวลา 30 นาทีแรก เมื่อเวลามากกว่า 30 นาทีขึ้นไป ปริมาณการแทรกซึมที่ความดันทั้งสองค่อนข้างใกล้เคียงกัน

อุณหภูมิมิมีผลต่อปริมาณการแทรกซึมไซพาราฟินเข้าไปในยางเล็กน้อย เพราะเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นมีผลต่อสัดส่วนน้ำหนักคาร์บอนไดออกไซด์ต่อน้ำหนักยางทั้งหมด ไม่มากนัก นั่นคือในช่วง 30 นาทีแรก เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น คาร์บอนไดออกไซด์สามารถแทรกซึมเข้าไปในยางได้มากขึ้นเล็กน้อย จึงพาไซพาราฟินแทรกซึมเข้าไปเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่เมื่อเวลานานมากกว่า 30 นาทีขึ้นไป ระบบเริ่มเข้าสู่สมดุล ปริมาณไซพาราฟินที่แทรกซึมเข้าไปจะเริ่มคงที่ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณไซพาราฟินที่แทรกซึมเข้าไปค่อนข้างคงที่

การถ่ายโอนไซพาราฟินเข้าไปในยางธรรมชาติ สามารถอธิบายได้โดยใช้สมมติฐานการถ่ายเทมวลในตัวกลางกึ่งอนันต์ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ไซพาราฟินสามารถแทรกซึมเข้าไปในยางธรรมชาติได้มากขึ้น จากสมการ (2.13) จะได้

$$C_t = C_\infty \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{\sqrt{4\alpha t}} \right) \right] \quad (4.3)$$

- เมื่อ  $C_t$  = ปริมาณการแทรกซึมเฉลี่ยที่เวลาใดๆ (phr)  
 $C_\infty$  = ปริมาณการแทรกซึมที่ระยะอนันต์ (phr)  
 $\alpha$  = ค่าคงที่การแทรกซึม (ซม.<sup>2</sup>/วินาที)  
 $x$  = ระยะทางการแทรกซึม (เซนติเมตร)  
 $t$  = เวลาที่เกิดการแทรกซึม (วินาที)

จากตาราง ค.8 ในภาคผนวก ค เป็นข้อมูลการทดลองผลของอุณหภูมิต่อปริมาณการแทรกซึมไฮดรอฟินเข้าไปในยางที่ความดัน 80 บาร์

ที่อุณหภูมิ 59 องศาเซลเซียส ปริมาณการแทรกซึมที่เวลานานพอ ( $t_\infty$ ) มีค่าเท่ากับ 69 phr คำนวณค่าคงที่  $1/\sqrt{4t}$  และ  $x/\sqrt{4\alpha t}$  แสดงในตาราง 4.6 ข้อมูลการทดลองที่อุณหภูมิ 69 และ 79 องศาเซลเซียสก็คำนวณเช่นเดียวกัน และนำไปเขียนกราฟแสดงดังรูป 4.14. ค่าคงที่จากกราฟ ( $x/\sqrt{\alpha}$ ) ที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงในตาราง 4.7

จากตาราง 4.7 พบว่าที่อุณหภูมิต่างๆ ค่า  $x/\sqrt{\alpha}$  ที่  $t_\infty$  ค่อนข้างคงที่ โดย  $x/\sqrt{4\alpha}$  มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 13.9 แทนในสมการ (4.3) จะได้

$$C = C_\infty \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{13.9}{\sqrt{t}} \right) \right] \quad (4.4)$$

จากตาราง ค.8 จะเห็นว่าปริมาณการแทรกซึมเฉลี่ยที่เวลา  $t_\infty$  เปลี่ยนไปเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แสดงดังตาราง 4.8 และนำมาเขียนกราฟจะได้ความสัมพันธ์แสดงดังรูป 4.15

สมการความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและปริมาณการแทรกซึมของไฮดรอฟินเฉลี่ยที่เวลา  $t_\infty$  เป็นดังนี้

$$C_\infty = 0.5T - 107 \quad (4.5)$$

แทนลงในสมการ (4.4) จะได้

$$C = (0.5T - 107) \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{13.9}{\sqrt{t}} \right) \right]$$

หรือ

$$C_w = (0.5T - 107) \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{13.9}{\sqrt{t}} \right) \right] \quad (4.6)$$

เมื่อ  $C_w$  = ปริมาณการแทรกซึมของไซพาราฟินเข้าไปในยางธรรมชาติที่เวลาใดๆ (phr)  
 $T$  = อุณหภูมิที่เกิดการแทรกซึม (เคลวิน)  
 $t$  = เวลาในการแทรกซึม (วินาที)

จากผลการคำนวณปริมาณการแทรกซึมเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้ แสดงในตาราง ค.19 ในภาคผนวก ค จะได้ว่า R-squared value เฉลี่ยเท่ากับ 0.89

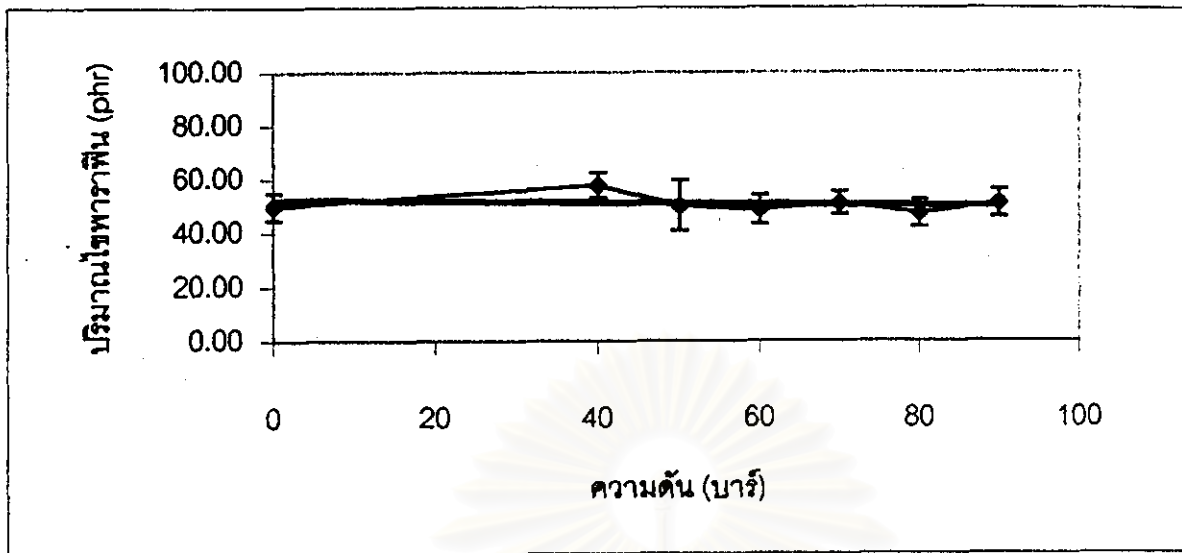
### 3. ผลของปริมาณไซพาราฟินต่อความต้านทานแรงดึงและการยืดออกเมื่อขาด

เมื่อนำไปวัดความต้านทานแรงดึงและการยืดออกเมื่อขาด แสดงผลการทดลองดังรูป

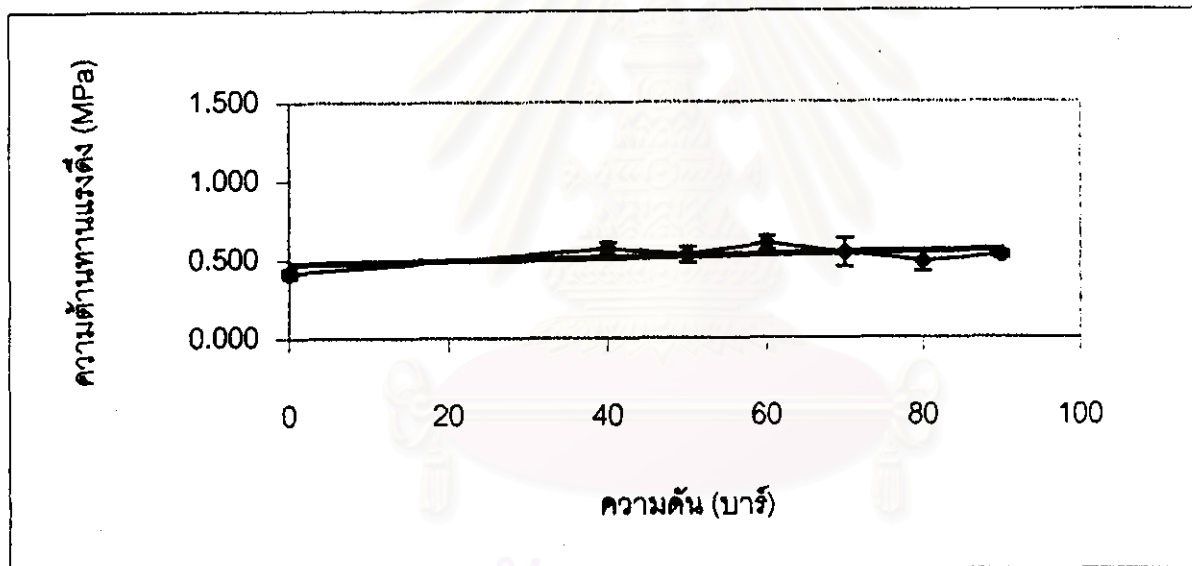
4.16 และ 4.17 ตามลำดับ

จากรูป 4.16 ที่ความดัน 80 บาร์และอุณหภูมิคงที่ พบว่าความต้านทานแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการแทรกซึมไซพาราฟินเข้าไปในยางธรรมชาติมากขึ้น และการทดลองที่อุณหภูมิสูงขึ้นผลการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกันมาก มีแนวโน้มเช่นเดียวกัน เพราะเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น มีผลให้สัดส่วนน้ำหนักคาร์บอนไดออกไซด์ต่อน้ำหนักยางทั้งหมด เพิ่มขึ้นไม่มากนัก ปริมาณการแทรกซึมไซพาราฟินเข้าไปในยางเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังนั้นความต้านทานแรงดึงของยางจึงเปลี่ยนแปลงไปไม่มาก จากผลการทดลองเมื่อปริมาณไซพาราฟินที่แทรกซึมเข้าไปเท่ากันแต่ยางมีค่าความต้านทานแรงดึงต่างกันเพราะเนื่องจากเนื้อยางเป็น non-homogeneous เมื่อไซพาราฟินแทรกซึมเข้าไปในเนื้อยาง จะไปล้อมรอบสายไอโซพรีน การแทรกซึมของไซพาราฟินเข้าไปในเนื้อยางแต่ละส่วนไม่เท่ากัน ดังนั้นเมื่อนำไปทดสอบความต้านทานแรงดึง ผลออกมาจึงมีค่าต่างกัน แต่ก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกันคือ เมื่อปริมาณไซพาราฟินแทรกซึมเข้าไปในยางได้มากขึ้น ความต้านทานแรงดึงของยางก็มากขึ้น

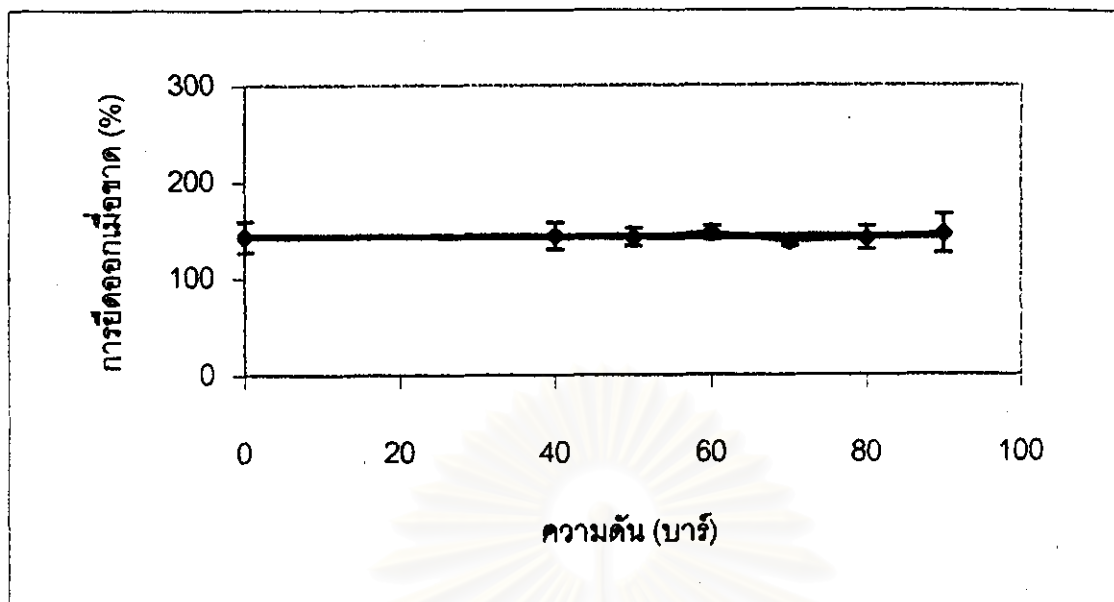
จากรูป 4.17 ที่ความดัน 80 บาร์และอุณหภูมิคงที่ พบว่าการยืดออกเมื่อขาดของยางมีค่าลดลงเมื่อปริมาณการแทรกซึมของไซพาราฟินเข้าไปในยางธรรมชาติมากขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นพบว่าผลการทดลองมีลักษณะเดียวกัน แสดงว่าความต้านทานแรงดึงและการยืดออกเมื่อขาดของยางขึ้นกับปริมาณการแทรกซึมของไซพาราฟินที่แทรกซึมเข้าไปในยางนั้น



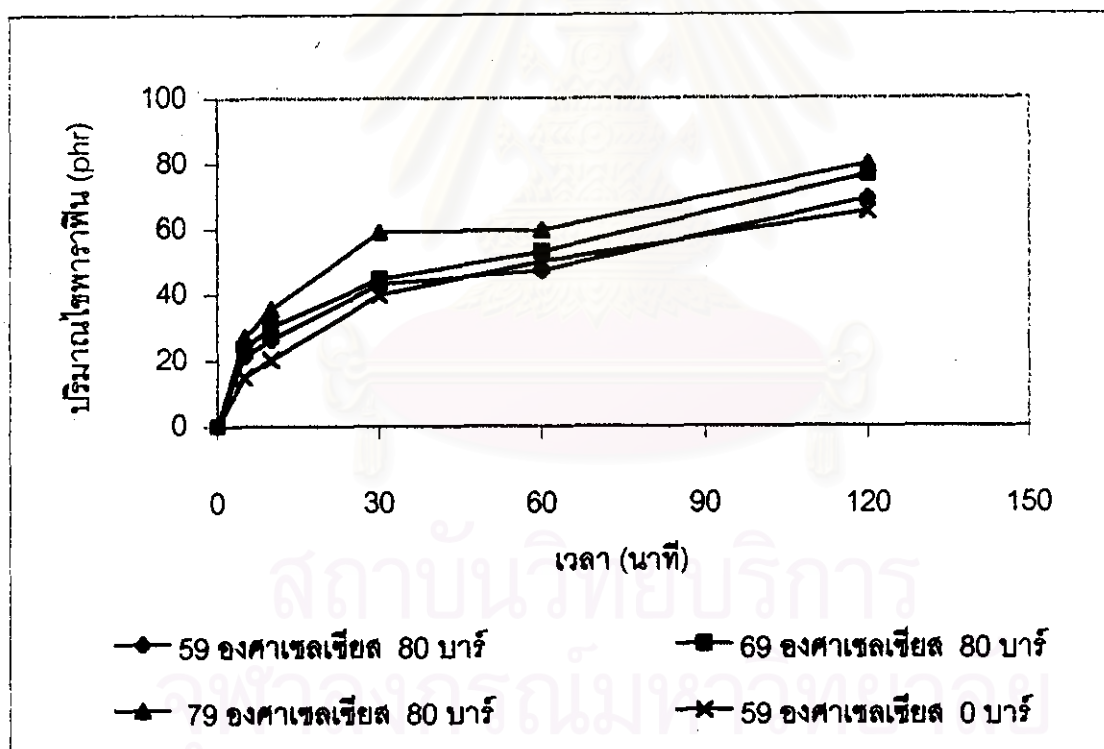
รูป 4.10 ผลของความดันต่อปริมาณการแทรกซึมไซพาราฟีน



รูป 4.11 ผลของความดันต่อความต้านทานแรงดึงของยางที่มีไซพาราฟีนแทรกซึมอยู่



รูป 4.12 ผลของความดันต่อการยืดออกเมื่อขาดของยางที่มีไซพาราฟินแทรกซึมอยู่



รูป 4.13 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณการแทรกซึมไซพาราฟิน



ตาราง 4.6 ผลการคำนวณค่าคงที่ของการแทรกซึมไซพาราฟินเข้าไปในยางธรรมชาติ

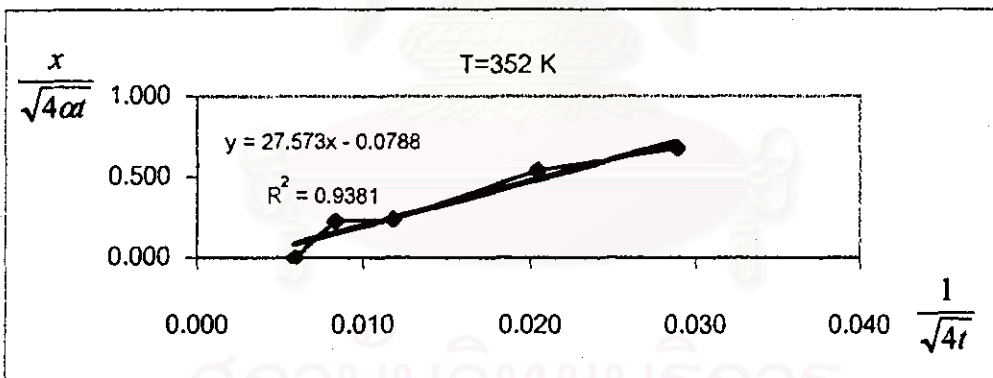
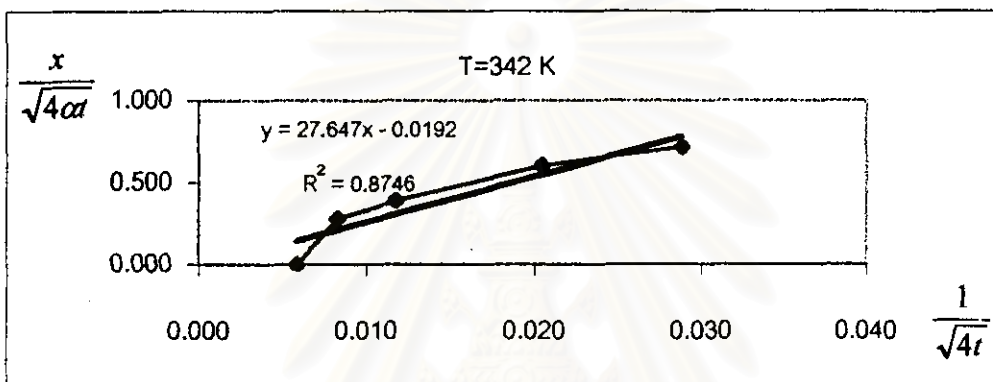
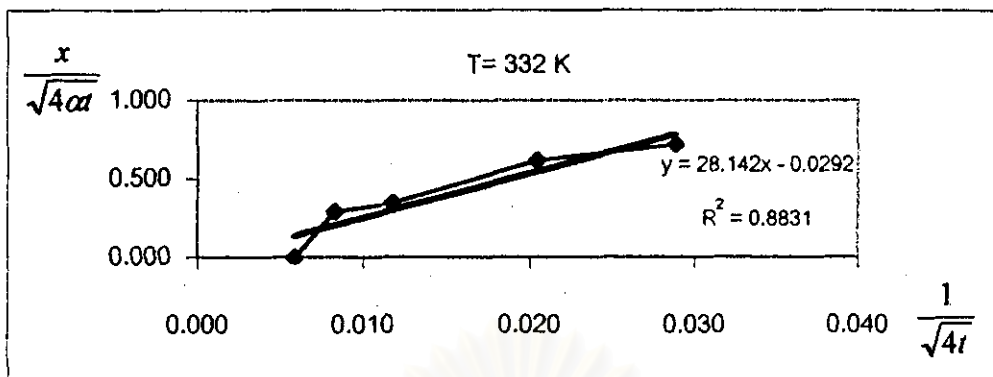
อุณหภูมิ (เคลวิน)		332		342		352	
เวลา (วินาที)	$1/(4t)^{0.5}$	$C/C_\alpha$	$x/(4\alpha t)^{0.5}$	$C/C_\alpha$	$x/(4\alpha t)^{0.5}$	$C/C_\alpha$	$x/(4\alpha t)^{0.5}$
300	0.029	0.31	0.717	0.31	0.715	0.34	0.676
600	0.020	0.38	0.617	0.40	0.600	0.45	0.539
1800	0.012	0.62	0.348	0.58	0.389	0.74	0.237
3600	0.008	0.68	0.291	0.69	0.280	0.75	0.230
7200	0.006	1.00	0.000	1.00	0.000	1.00	0.000

ตาราง 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่า  $x/(\alpha)^{0.5}$  ของการแทรกซึมไซพาราฟิน

อุณหภูมิ (เคลวิน)	$x/(\alpha)^{0.5}$
332	28.142
342	27.647
352	27.573

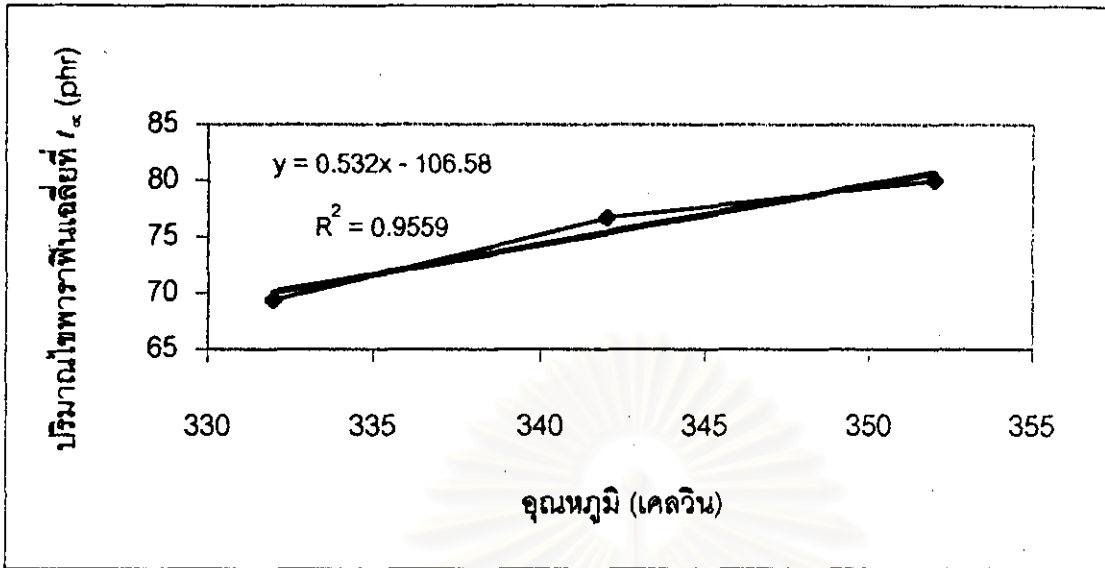
ตาราง 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและปริมาณการแทรกซึมของไซพาราฟินเฉลี่ยที่  $t_\infty$ 

อุณหภูมิ (เคลวิน)	ปริมาณการแทรกซึมของไซพาราฟินเฉลี่ยที่ $t_\infty$ (phr)
332	69
342	77
352	80



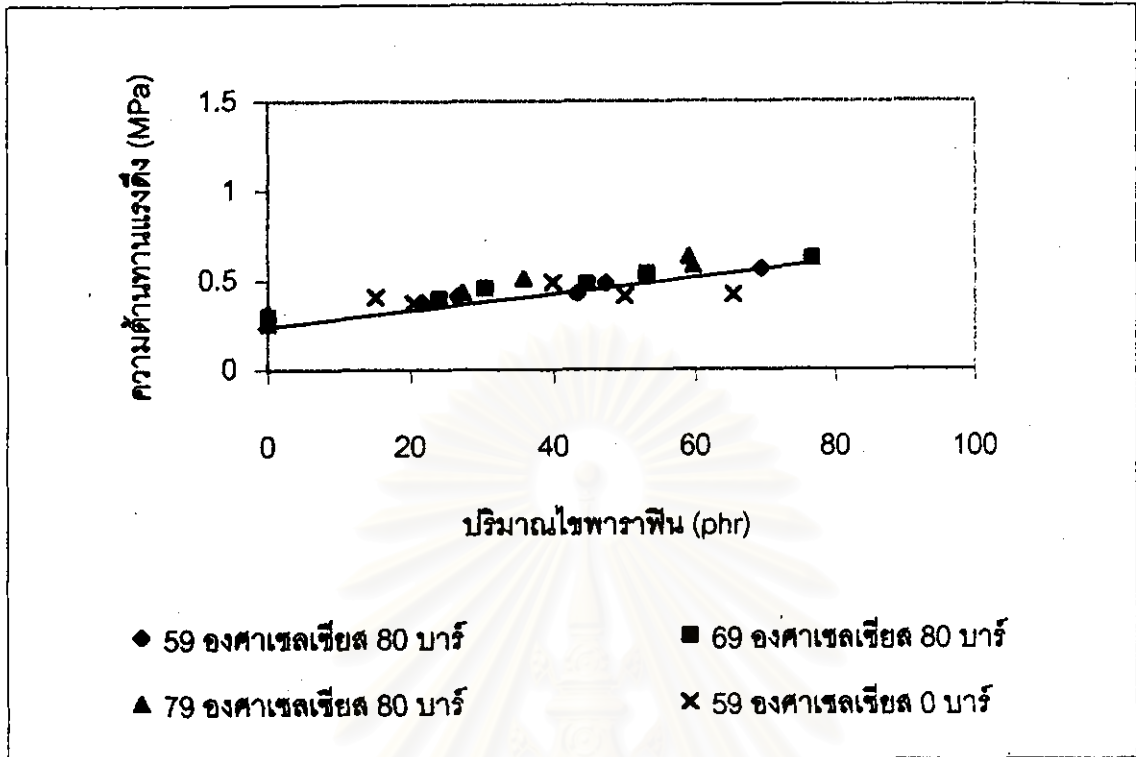
รูป 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{1}{\sqrt{4t}}$  และ  $\frac{x}{\sqrt{4\alpha t}}$  ที่อุณหภูมิต่างๆ  
ของการแทรกซึมไฮโดรเจน



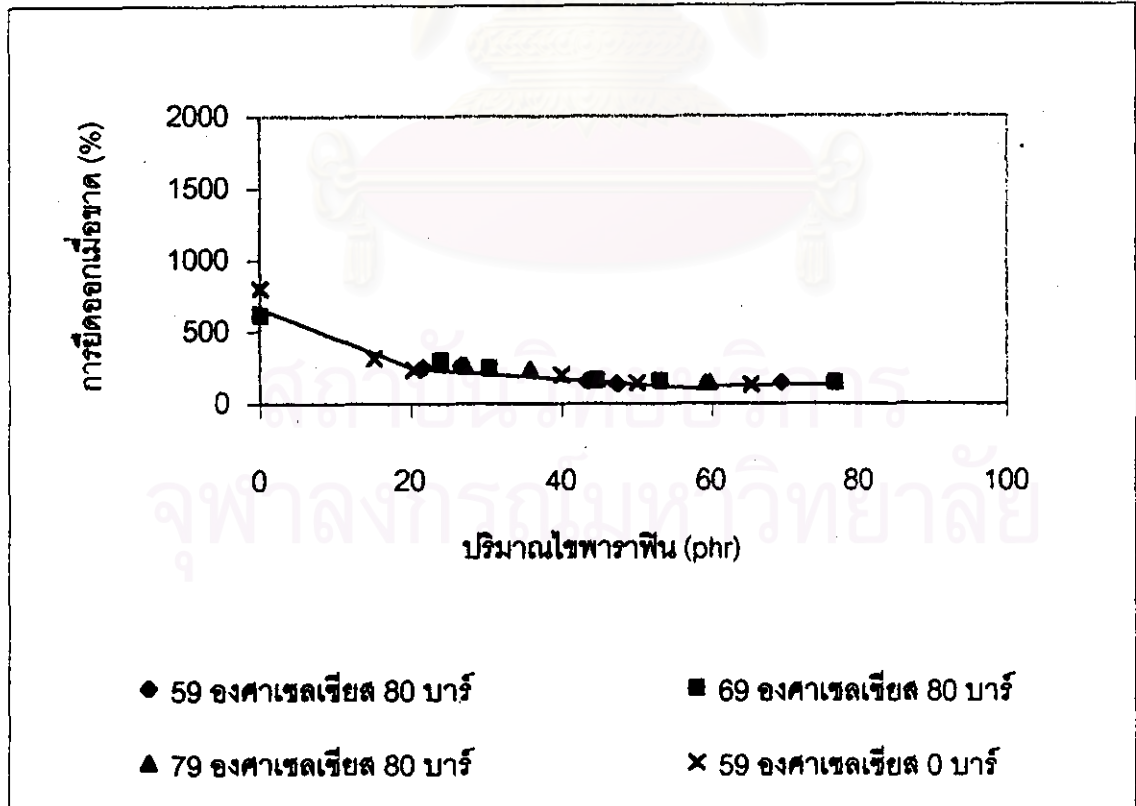


รูป 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและปริมาณการระเหยของไอน้ำที่ปล่อย

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูป 4.16 ผลของปริมาณไซพาราฟีนต่อความต้านทานแรงดึง



รูป 4.17 ผลของปริมาณไซพาราฟีนต่อการยืดออกเมื่อขาด

## 4.8 โพรพิลีนไกลคอล

### 1. ผลของความดันต่อปริมาณการแทรกซึมโพรพิลีนไกลคอล

การทดลองการถ่ายโอนโพรพิลีนไกลคอลเข้าไปในยางธรรมชาติโดยมีคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวพา ที่ความดัน 0, 40, 60, 80 และ 90 บาร์ อุณหภูมิ 59 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที แสดงผลการทดลองดังรูป 4.18

จากรูป 4.18 จะเห็นว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้น ปริมาณการแทรกซึมโพรพิลีนไกลคอลเข้าไปในยางธรรมชาติก็เพิ่มขึ้น เพราะเมื่อความดันเพิ่มขึ้นมีผลให้สัดส่วนน้ำหนักคาร์บอนไดออกไซด์ต่อน้ำหนักยางทั้งหมด มากขึ้นด้วย คาร์บอนไดออกไซด์จะทำให้โพรพิลีนไกลคอลแทรกซึมเข้าไปในยางได้เพิ่มขึ้น

จากนั้นเมื่อนำไปวัดความต้านทานแรงดึงและการยืดออกเมื่อขาด แสดงผลการทดลองดังรูป 4.19 และ 4.20 ตามลำดับ พบว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้น ความต้านทานแรงดึงของยางค่อนข้างใกล้เคียงกัน คือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.286 MPa และมีความเบี่ยงเบนเท่ากับ 0.019 MPa เพราะเมื่อโพรพิลีนไกลคอลแทรกซึมเข้าไปในยาง จะไปล้อมรอบปลายสายไอโซพรีนบริเวณที่มีขั้ว เหมือนกัน แต่โพรพิลีนไกลคอลไม่ได้ไปเสริมความต้านทานแรงดึง ดังนั้นเมื่อปริมาณโพรพิลีนไกลคอลที่แทรกซึมเข้าไปได้มากขึ้น จึงไม่มีผลต่อความต้านทานแรงดึงของยาง ค่าความต้านทานแรงดึงของยางจึงไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อปริมาณโพรพิลีนไกลคอลแทรกซึมเข้าไปได้เพิ่มขึ้น สำหรับการยืดออกเมื่อขาดจะให้ผลการทดลองคือ เมื่อความดันเพิ่มขึ้น การยืดออกเมื่อขาดเพิ่มขึ้นเพราะเมื่อความดันสูงขึ้นมีผลให้สัดส่วนน้ำหนักคาร์บอนไดออกไซด์ต่อน้ำหนักยางทั้งหมด มีมากขึ้น โพรพิลีนไกลคอลจะแทรกซึมเข้าไปในยางได้มากขึ้น แต่โพรพิลีนไกลคอลที่แทรกซึมเข้าไปนั้นจะช่วยให้ปลายสายไอโซพรีนของยางบริเวณที่มีขั้ว มีการยืดออกได้มากขึ้นก่อนขาด ดังนั้นยางจึงมีการยืดออกเมื่อขาดเพิ่มขึ้นเมื่อความดันสูงขึ้น

### 2. ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณการแทรกซึมโพรพิลีนไกลคอล

ทดลองการถ่ายโอนโพรพิลีนไกลคอลเข้าไปในยางธรรมชาติโดยมีคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวพา ที่ความดัน 80 บาร์ อุณหภูมิ 59, 69 และ 79 องศาเซลเซียส เวลา 5, 10, 30, 60 และ 90 นาที แสดงผลการทดลองดังรูป 4.21

จากรูป 4.21 เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณโพรพิลีนไกลคอลที่แทรกซึมเข้าไปในยางก็เพิ่มขึ้น จากผลการทดลองข้อ 4.2 อุณหภูมิไม่มีผลให้สัดส่วนน้ำหนักคาร์บอนไดออกไซด์ต่อน้ำหนักยางทั้งหมด เพิ่มมากนัก แต่เนื่องจากที่

อุณหภูมิสูงขึ้น คาร์บอนไดออกไซด์จะมีความหนืดลดลง ทำให้ความสามารถในการแพร่กระจายมีมากขึ้น คาร์บอนไดออกไซด์จึงพาโพธิ์ลินไกลคอลแทรกซึมเข้าไปในยางได้ง่ายขึ้น ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปริมาณการแทรกซึมโพธิ์ลินไกลคอลเข้าไปในยางจึงเพิ่มขึ้น

และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่ความดัน 0 และ 80 บาร์ เมื่ออุณหภูมิคงที่ 59 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณการแทรกซึมโพธิ์ลินไกลคอลแตกต่างกันคือที่ความดัน 0 บาร์หรือการทดลองที่ไม่มีคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวพา ปริมาณการแทรกซึมโพธิ์ลินไกลคอลเข้าไปในยางน้อยกว่าที่ความดัน 80 บาร์ แสดงว่าคาร์บอนไดออกไซด์สถานะเหนือจุดวิกฤตช่วยให้โพธิ์ลินไกลคอลแทรกซึมเข้าไปในยางได้มากขึ้น

จากตาราง ค.12 ในภาคผนวก ค เป็นข้อมูลการทดลองผลของอุณหภูมิต่อปริมาณการแทรกซึมโพธิ์ลินไกลคอลเข้าไปในยางที่ความดัน 80 บาร์

ที่อุณหภูมิ 59 องศาเซลเซียส ปริมาณการแทรกซึมที่เวลา  $t_{\infty}$  มีค่าเท่ากับ 1 phr คำนวณค่าคงที่  $1/\sqrt{4t}$  และ  $x/\sqrt{4\alpha t}$  แสดงในตาราง 4.9 ข้อมูลการทดลองที่อุณหภูมิ 69 และ 79 องศาเซลเซียสก็คำนวณเช่นเดียวกัน และนำไปเขียนกราฟแสดงดังรูป 4.22 ค่าคงที่จากกราฟ ( $x/\sqrt{\alpha}$ ) ที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงในตาราง 4.10

จากตาราง 4.10 พบว่าที่อุณหภูมิต่างๆ ค่า  $x/\sqrt{\alpha}$  ที่  $t_{\infty}$  ค่อนข้างคงที่ โดย  $x/\sqrt{4\alpha}$  มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 12.7 แทนในสมการ (4.3) จะได้

$$C = C_{\infty} \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{12.7}{\sqrt{t}} \right) \right] \quad (4.7)$$

จากตาราง ค.12 จะเห็นว่าปริมาณการแทรกซึมเฉลี่ยที่เวลา  $t_{\infty}$  เปลี่ยนไปเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แสดงดังตาราง 4.11 และนำมาเขียนกราฟจะได้ความสัมพันธ์แสดงดังรูป 4.23

สมการความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและปริมาณการแทรกซึมของโพธิ์ลินไกลคอลเฉลี่ยที่เวลา  $t_{\infty}$  เป็นดังนี้

$$C_{\infty} = 0.1T - 21 \quad (4.8)$$

แทนลงในสมการ (4.7) จะได้

$$C = (0.1T - 21) \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{12.7}{\sqrt{t}} \right) \right]$$

หรือ

$$C_p = (0.1T - 21) \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{12.7}{\sqrt{t}} \right) \right] \quad (4.9)$$

เมื่อ  $C_p$  = ปริมาณการแทรกซึมของโพธิ์ลิ้นไกลคอลลเข้าไปในยางธรรมชาติที่เวลาใดๆ (phr)

$T$  = อุณหภูมิที่เกิดการแทรกซึม (เคลวิน)

$t$  = เวลาที่แทรกซึม (วินาที)

จากผลการคำนวณปริมาณการแทรกซึมเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้ แสดงในตาราง ค.20 ในภาคผนวก ค จะได้ค่า R-squared value เจริญเท่ากับ 0.83

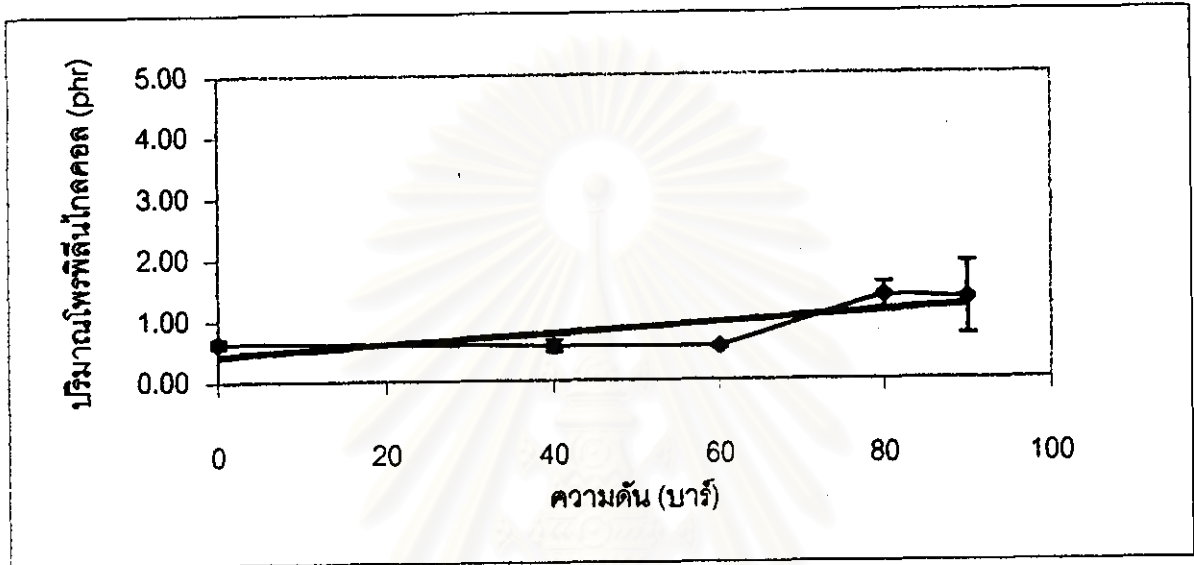
### 3. ผลของปริมาณโพธิ์ลิ้นไกลคอลลต่อความต้านทานแรงดึงและการยืดออกเมื่อขาด

เมื่อนำไปวัดความต้านทานแรงดึงและการยืดออกเมื่อขาด แสดงผลการทดลองดังรูป 4.24 และ 4.25 ตามลำดับ

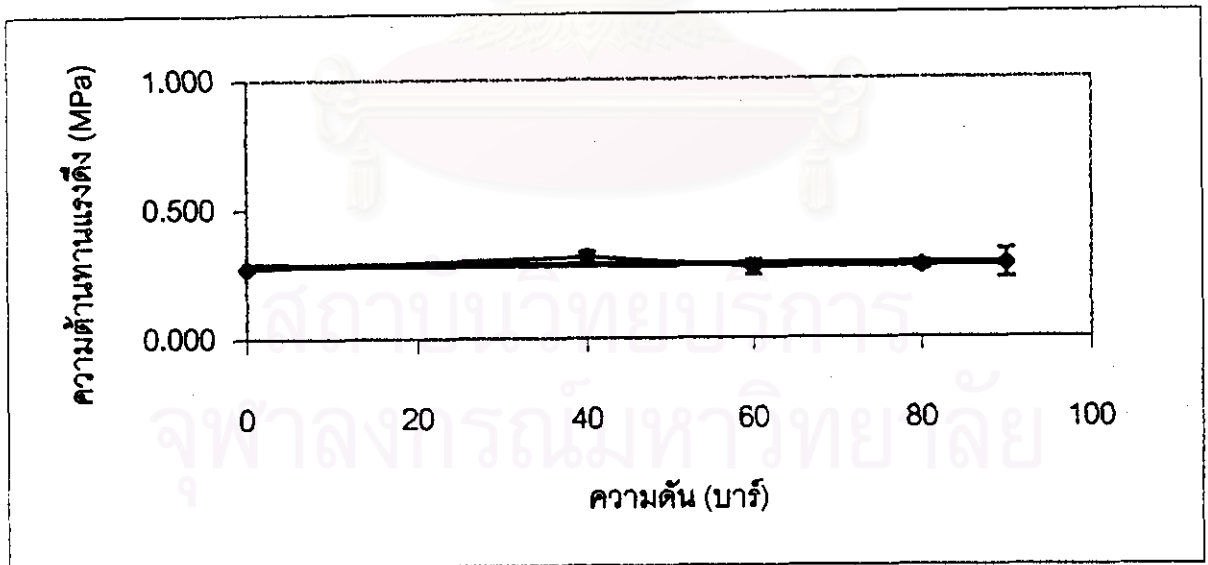
จากรูป 4.24 ที่ความดัน 80 บาร์และอุณหภูมิคงที่ พบว่าเมื่อปริมาณการแทรกซึมของโพธิ์ลิ้นไกลคอลลเข้าไปในยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น ความต้านทานแรงดึงของยางจะคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงมากนักโดยมีค่าประมาณอยู่ในช่วง 0.3 MPa และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น มีผลให้ปริมาณการแทรกซึมโพธิ์ลิ้นไกลคอลลเข้าไปในยางมีมากขึ้น แต่ยางมีความต้านทานแรงดึงค่อนข้างคงที่ เปรียบเทียบผลการทดลองที่ความดัน 0 บาร์และ 80 บาร์ อุณหภูมิ 59 องศาเซลเซียส ปริมาณการแทรกซึมโพธิ์ลิ้นไกลคอลลที่ความดัน 80 บาร์ จะมากกว่าที่ความดัน 0 บาร์และความต้านทานแรงดึงของยางทั้งยางทั้งสองภาวะ มีค่าใกล้เคียงกันแสดงว่าปริมาณการแทรกซึมโพธิ์ลิ้นไกลคอลลเข้าไปในยาง ไม่มีผลต่อความต้านทานแรงดึงของยาง

จากการทดลองในข้อ 4.8 ที่ผ่านมา พบว่าความดันและอุณหภูมิมีผลต่อปริมาณการแทรกซึมโพธิ์ลิ้นไกลคอลลเข้าไปในยางโดยเมื่อความดันและอุณหภูมิสูงขึ้น มีผลให้โพธิ์ลิ้นไกลคอลลแทรกซึมเข้าไปในยางได้มากขึ้น จากรูป 4.25 จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ยางมีการยืดออกเมื่อขาดมากขึ้นเพราะเนื่องจากโพธิ์ลิ้นไกลคอลลแทรกซึมเข้าไปในยางได้มากขึ้น แต่ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 79 องศาเซลเซียส จะแตกต่างไปเพราะว่าเมื่อปริมาณการแทรกซึมโพธิ์ลิ้นไกลคอลลเข้าไปในยางเพิ่มขึ้น ยางมีการยืดออกเมื่อขาดค่อนข้างคงที่ เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงขึ้น ลัดส่วนน้ำหนักคาร์บอนไดออกไซด์ต่อน้ำหนักยางทั้งหมด มีมากขึ้น คาร์บอนไดออกไซด์แทรกซึมเข้าไปในเนื้อยางได้มาก พาให้โพธิ์ลิ้นไกลคอลลแทรกซึมเข้าไปและจะไปล้อมรอบปลดปล่อยไอโซพรีนของยาง

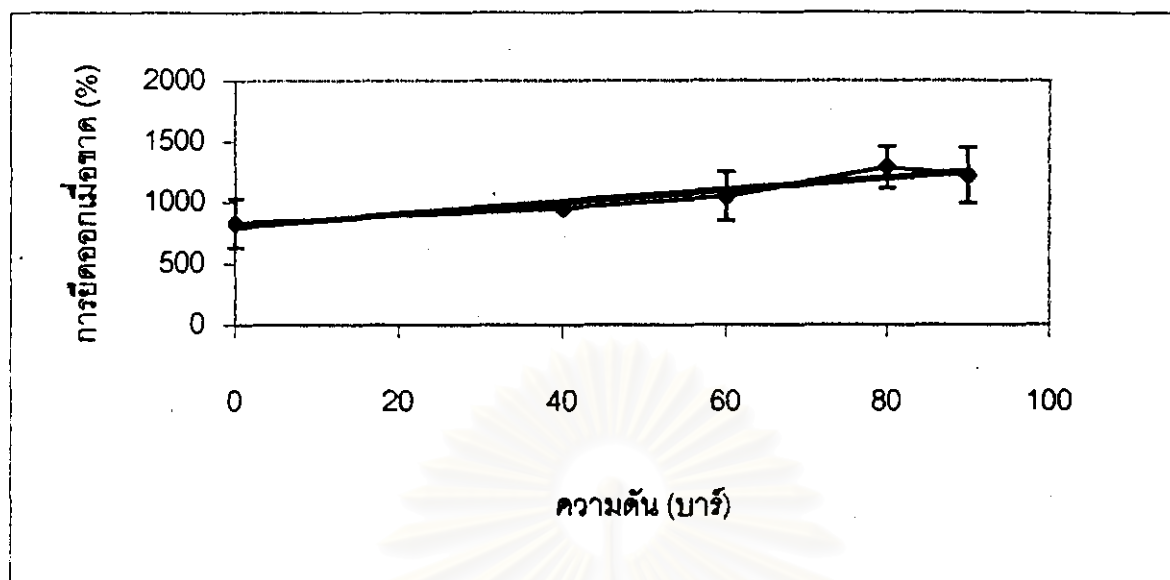
ในส่วนที่มีชีวิต มีผลให้การยืดออกเมื่อขาดของยางเพิ่มขึ้น แสดงว่าที่อุณหภูมิ 79 องศาเซลเซียส คาร์บอนไดออกไซด์ที่แทรกซึมอยู่ในเนื้อยางมีความหนาแน่นลดลงจนทำให้โพรพิลีนไกลคอลที่อยู่ล้อมรอบปลายสายไอโซพรีนด้านที่มีชีวิตเปลี่ยนแปลงไป ปริมาณการแทรกซึมโพรพิลีนไกลคอลที่เพิ่มขึ้นจึงไม่มีผลต่อการยืดออกเมื่อขาดของยาง



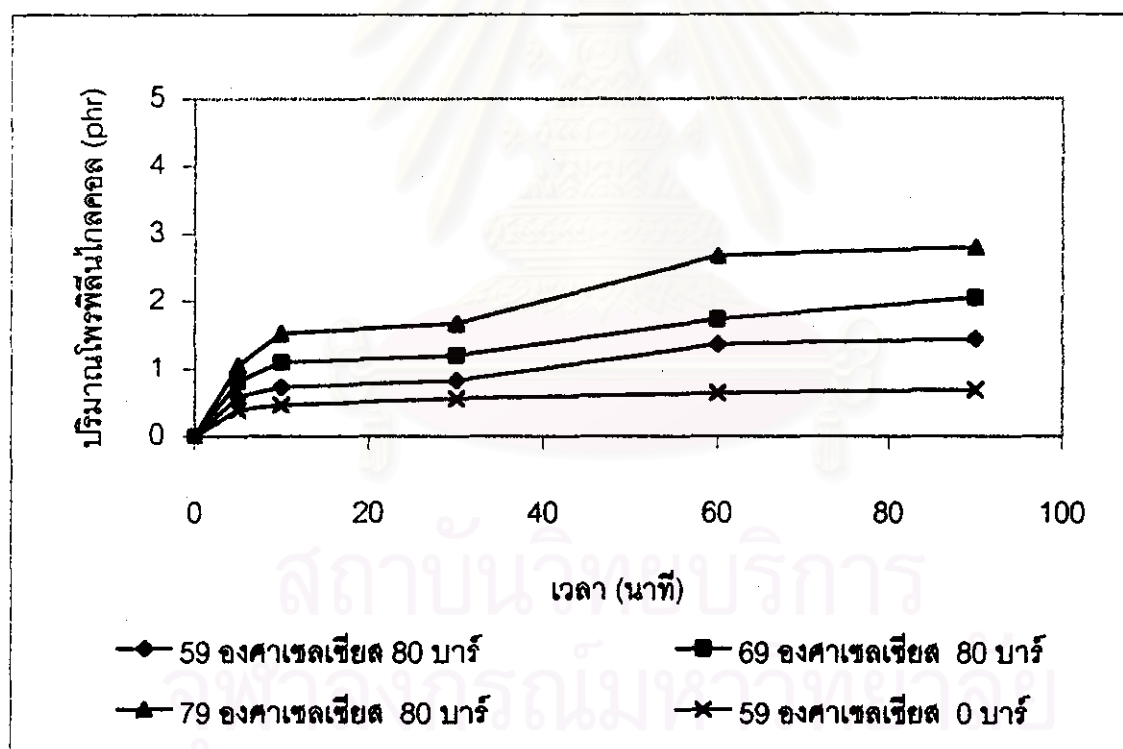
รูป 4.18 ผลของความดันต่อปริมาณการแทรกซึมโพรพิลีนไกลคอล



รูป 4.19 ผลของความดันต่อความต้านทานแรงดึงของยางที่มีโพรพิลีนไกลคอลแทรกซึมอยู่



รูป 4.20 ผลของความดันต่อการสกัดโปรตีนของยางที่มีโพลีฟีนอลสกัดแทรกซึมอยู่



รูป 4.21 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณการแทรกซึมโพลีฟีนอล



ตาราง 4.9 ผลการคำนวณค่าคงที่ของการแทรกซึมโพรพิลีนไกลคอลเข้าไปในยางธรรมชาติ

อุณหภูมิ (เคลวิน)		332		342		352	
เวลา (วินาที)	$1/(4t)^{0.5}$	$C/C_\alpha$	$x/(4\alpha t)^{0.5}$	$C/C_\alpha$	$x/(4\alpha t)^{0.5}$	$C/C_\alpha$	$x/(4\alpha t)^{0.5}$
300	0.029	0.41	0.583	0.40	0.601	0.38	0.628
600	0.020	0.51	0.470	0.54	0.437	0.55	0.427
1800	0.012	0.58	0.395	0.59	0.386	0.60	0.375
3600	0.008	0.95	0.043	0.85	0.135	0.96	0.038
5400	0.007	1.00	0.000	1.00	0.000	1.00	0.000

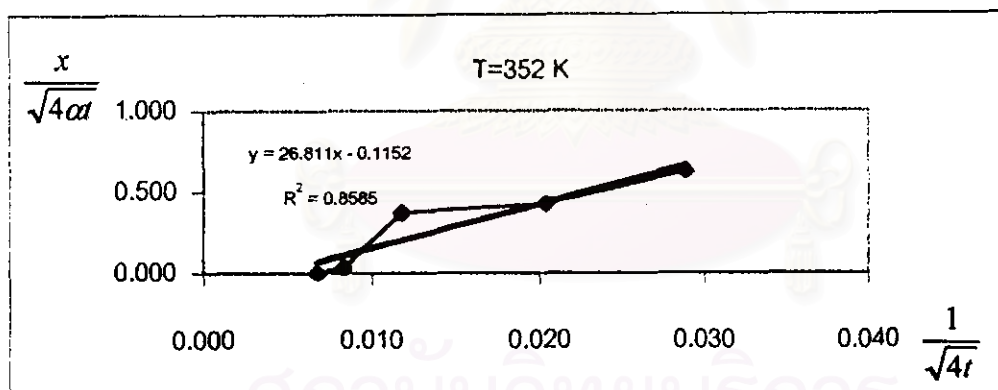
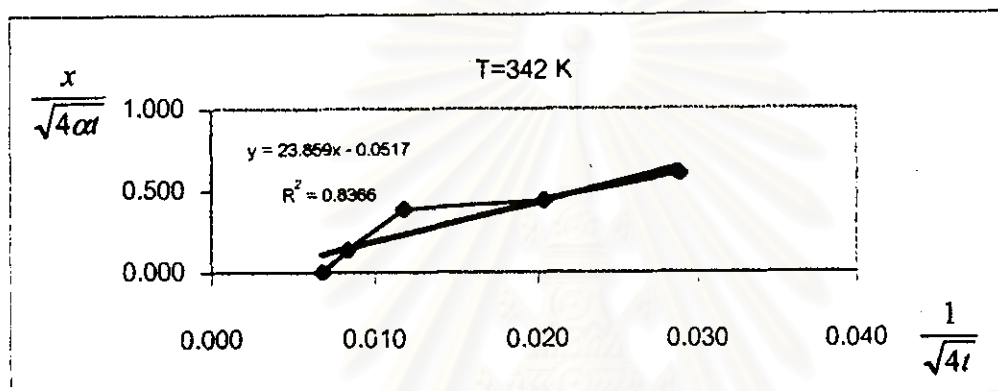
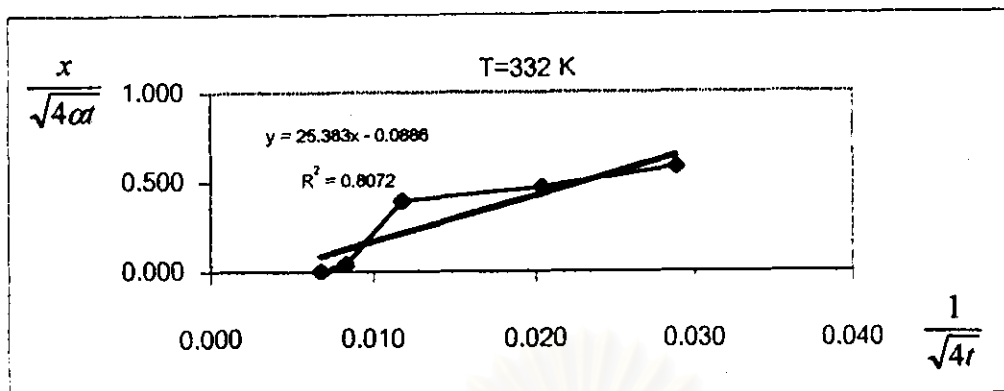
ตาราง 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่า  $x/(\alpha t)^{0.5}$  ของการแทรกซึมโพรพิลีนไกลคอล

อุณหภูมิ (เคลวิน)	$x/(\alpha t)^{0.5}$
332	25.383
342	23.859
352	26.811

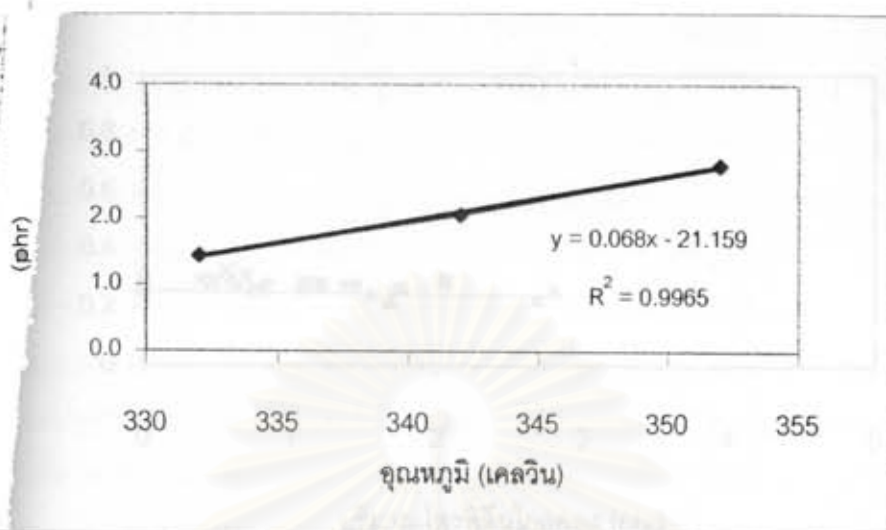
ตาราง 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและปริมาณการแทรกซึมของโพรพิลีนไกลคอลเฉลี่ยที่  $t_\infty$

อุณหภูมิ (เคลวิน)	ปริมาณการแทรกซึมของโพรพิลีนไกลคอลเฉลี่ยที่ $t_\infty$ (phr)
332	1.4
342	2.1
352	2.8





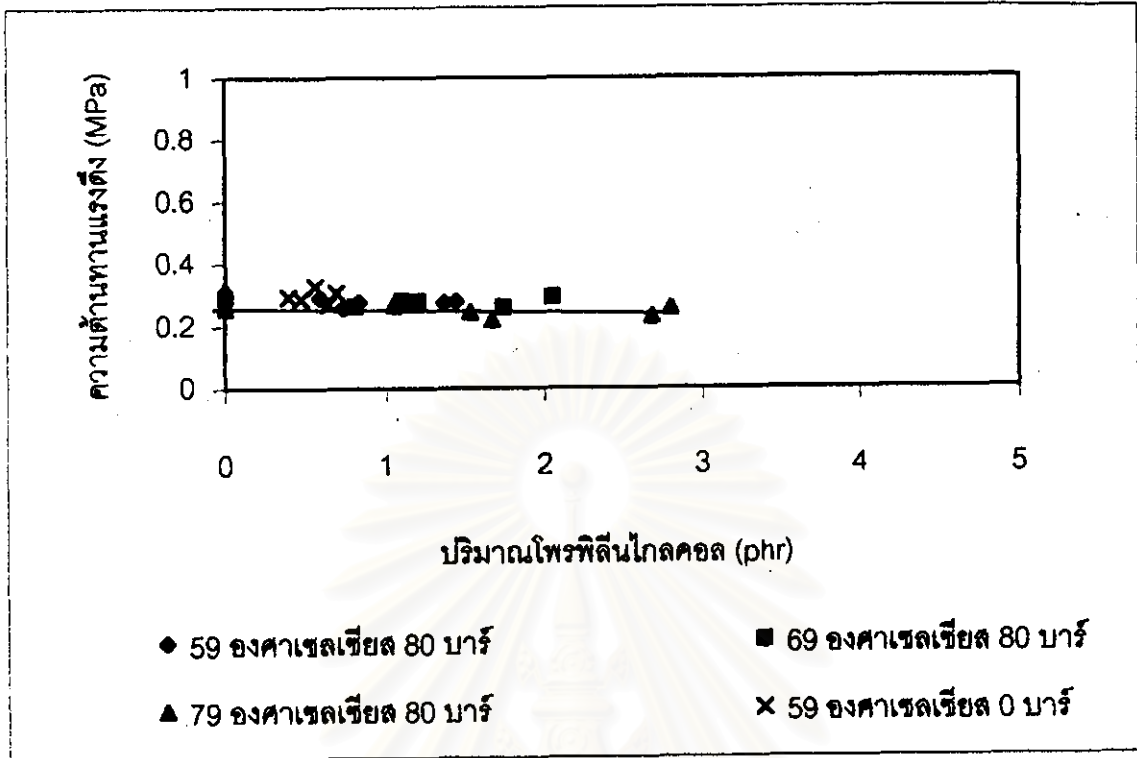
รูป 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{1}{\sqrt{4t}}$  และ  $\frac{x}{\sqrt{4\alpha t}}$  ที่อุณหภูมิต่างๆ  
ของสารแทรกซึมโพรพิลีนไกลคอล



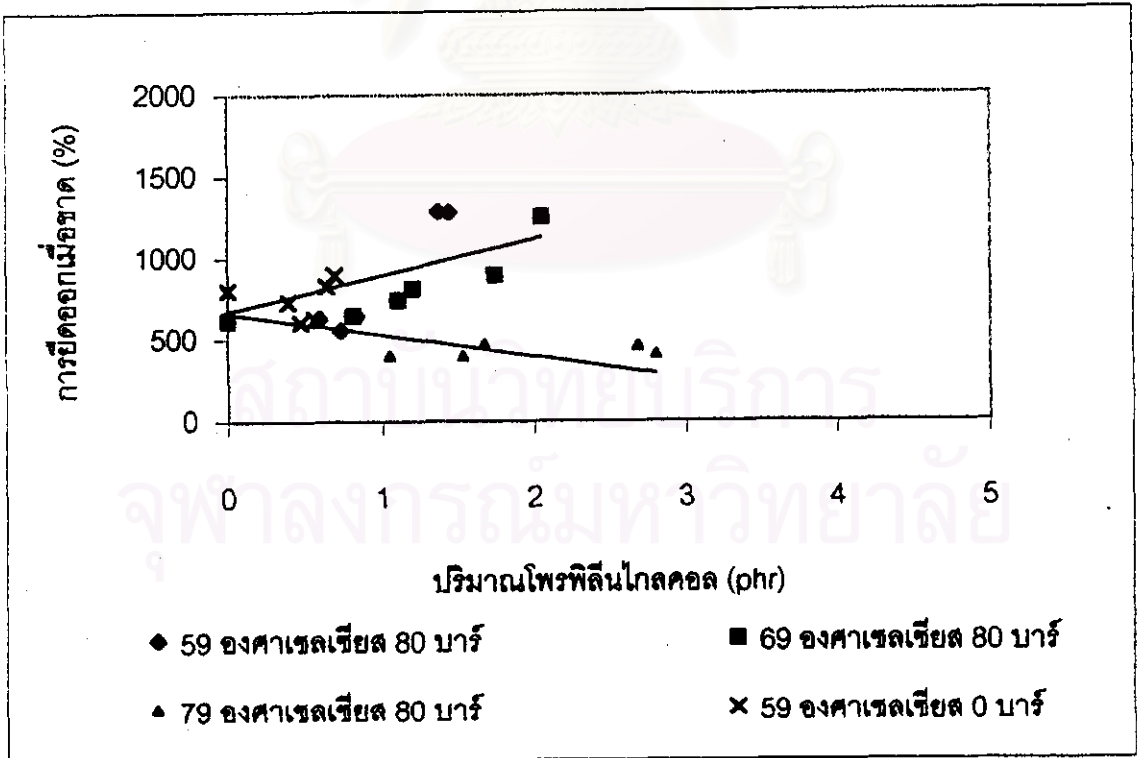
รูป 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและปริมาณการแทรกซึมของโพธิ์สึนไกลคอด  
เฉลี่ยที่  $r_x$



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



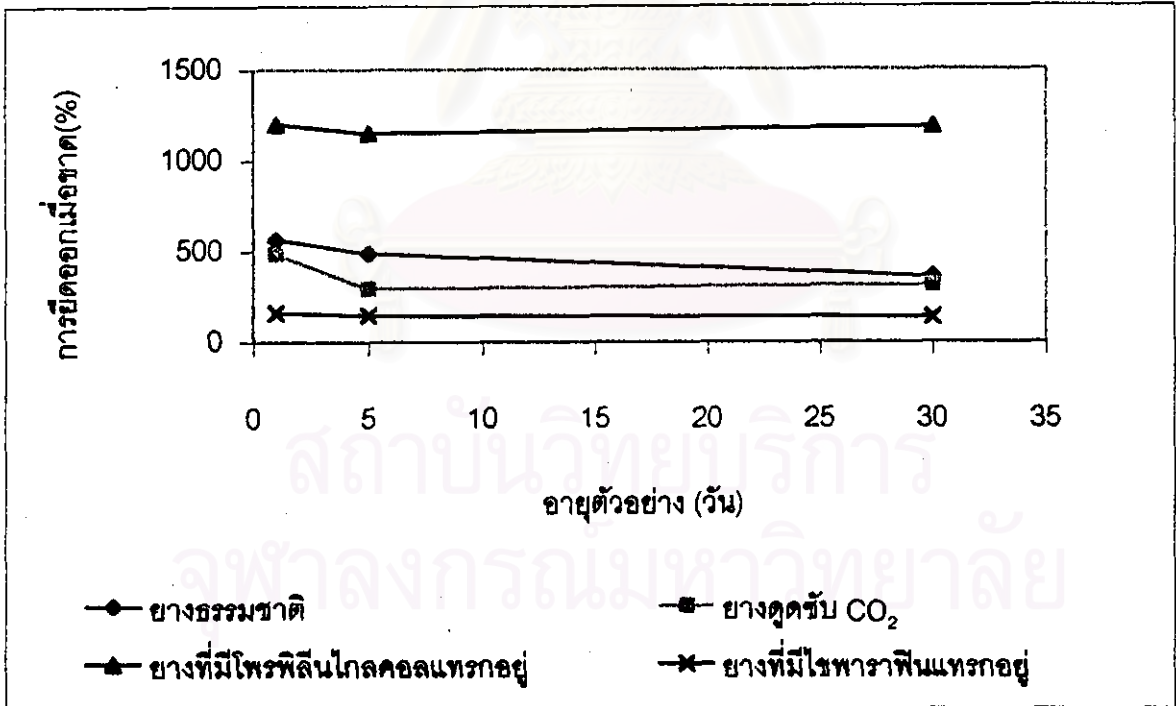
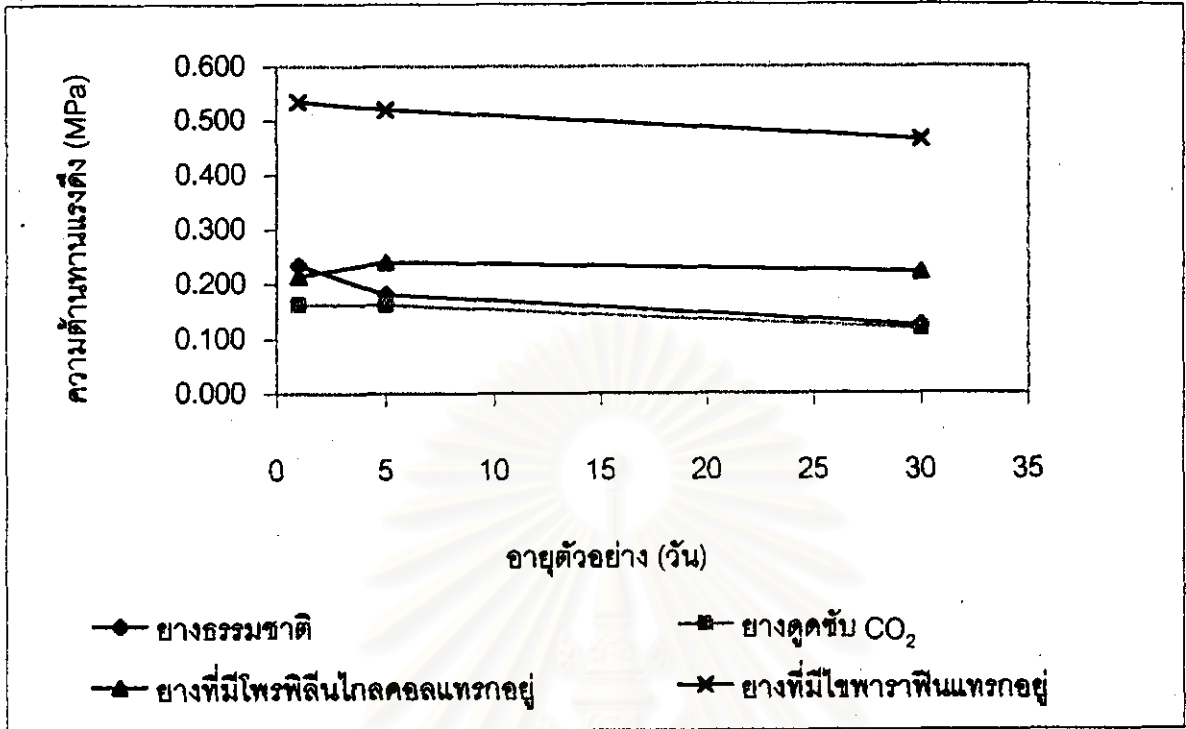
รูป 4.24 ผลของปริมาณโพรฟิตินไกลคอดต่อความต้านทานแรงดึง



รูป 4.25 ผลของปริมาณโพรฟิตินไกลคอดต่อการยืดออกเมื่ออบ

#### 4.9 ผลของอายุตัวอย่างต่อความต้านทานแรงดึงและการยืดออกเมื่อขาด

เมื่อทดลองการถ่ายโอนโชนโซพาราฟินและโพรพิลีนไกลคอลเข้าไปในยางธรรมชาติโดยมีคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวพา ที่ความดัน 80 บาร์ อุณหภูมิ 59 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 60 นาทีแล้ว จะเก็บตัวอย่างยางไว้เป็นเวลานาน 1, 5 และ 30 วัน ก่อนจะนำไปวัดความต้านทานแรงดึงและการยืดออกเมื่อขาด ผลการทดลองแสดงดังรูป 4.26 พบว่าเมื่อเก็บตัวอย่างไว้นานมากขึ้น ความต้านทานแรงดึงของยางที่มีโซพาราฟินแทรกซึมอยู่ลดลงเล็กน้อย และเมื่อนำไปทดสอบการยืดออกเมื่อขาด พบว่ายางมีการยืดออกเมื่อขาดลดลงเพียงเล็กน้อยเช่นเดียวกัน ส่วนยางที่มีโพรพิลีนไกลคอลแทรกซึมเข้าไปในยาง เมื่อเก็บตัวอย่างไว้นานมากขึ้น ความต้านทานแรงดึงของยางค่อนข้างคงที่ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.226 MPa มีความเบี่ยงเบนเท่ากับ 0.013 MPa ส่วนการยืดออกเมื่อขาดของยางจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 1178 มีความเบี่ยงเบนเท่ากับร้อยละ 26 แสดงว่าอายุตัวอย่างเพียง 30 วัน ไม่มีผลต่อความต้านทานแรงดึงและการยืดออกเมื่อขาดของยางที่มีโซพาราฟินและโพรพิลีนไกลคอลแทรกซึมอยู่



รูป 4.26 ผลของอายุตัวอย่างต่อความต้านทานแรงดึงและการยัดออกเมื่อขาดของข้าง

#### 4.10 การทำยางให้เป็นเม็ด

เมื่อทดลองการถ่ายโอนโซพาราฟีนและโพรพิลีนไกลคอลเรียบร้อยแล้ว นำยางที่ได้มาทดลองตัดเป็นเม็ด พบว่ายางที่มีโซพาราฟีนแทรกซึมอยู่สามารถตัดเป็นเม็ดได้ง่าย เม็ดยางแต่ละเม็ดติดกันเล็กน้อย จึงเติม zinc stearate เพื่อป้องกันไม่ให้อย่างติดกัน ส่วนยางธรรมชาติและยางที่มีโพรพิลีนไกลคอลแทรกซึมอยู่ตัดเป็นเม็ดได้ยากกว่า เพราะยางมีความอ่อนนิ่มมากจะติดอยู่ในเครื่องตัด และเมื่อได้เม็ดยางแล้วพบว่าเม็ดยางติดกันมากกว่าเม็ดยางที่ได้จากยางที่มีโซพาราฟีนแทรกซึมอยู่

สำหรับยางที่มีโซพาราฟีนแทรกซึมอยู่ เมื่อตัดเป็นเม็ดแล้วจะมีขนาดเม็ดยางส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 1.8-7.5 มิลลิเมตร แสดงดังรูป 4.27



รูป 4.27 เม็ดยางจากตัวอย่างยางที่มีโซพาราฟีนแทรกซึมอยู่