บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงกรรมวิธีการเตรียมน้ำยางวัลคาไนซ์อิสระโดยการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของอนุภาคยางของน้ำยางลาเท็กซ์ให้เกิดการคงรูปอิสระ เพื่อใช้สำหรับผลิตฟิล์มยาง โดยทำการศึกษาสูตรผสมน้ำยางข้นกับสารเคมีต่างๆ และภาวะที่เหมาะสมในการผลิต แล้วทดสอบสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของฟิล์มยางที่ได้ รวมทั้งศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อค่าแรงยึดเกาะระหว่างพื้นผิวต่างๆ ได้แก่ พื้นยางมะตอย พื้นคอนกรีต พื้นอิฐบล็อก พื้นอิฐมอญ และไม้อัด ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นสารยึดติดกับวัสดุต่างๆ โดยเฉพาะทางด้านการโยธา

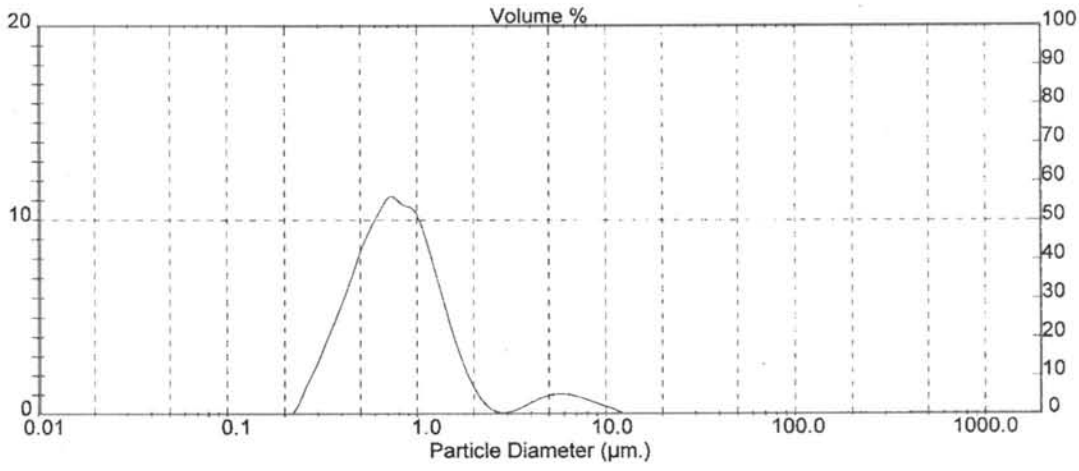
4.1 ศึกษาสมบัติของวัตถุดิบ

ศึกษาขนาดอนุภาคของน้ำยางข้น 60 % DRC และสารที่ใช้ในระบบวัลคาไนซ์ ที่ใช้ในการผสมน้ำยางวัลคาไนซ์อิสระ เพื่อใช้เตรียมฟิล์มยาง ทำการวิเคราะห์ขนาดอนุภาค 3 ครั้ง ด้วยเครื่อง Laser Particle Size Distribution Analyzer แสดงผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.1 – 4.4 และรูปที่ 4.1 – 4.4

ตารางที่ 4.1 ขนาดอนุภาคของน้ำยางข้น 60% DRC

ผลการวิเคราะห์ครั้งที่	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (μm)	ขนาดอนุภาคที่เปอร์เซ็นต์ไทล์ (μm)		
		10	50	90
1	1.15	0.40	0.78	1.63
2	1.12	0.40	0.78	1.61
3	1.11	0.39	0.77	1.59
ค่าเฉลี่ย	1.13	0.40	0.78	1.61
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.02	0.01	0.01	0.02

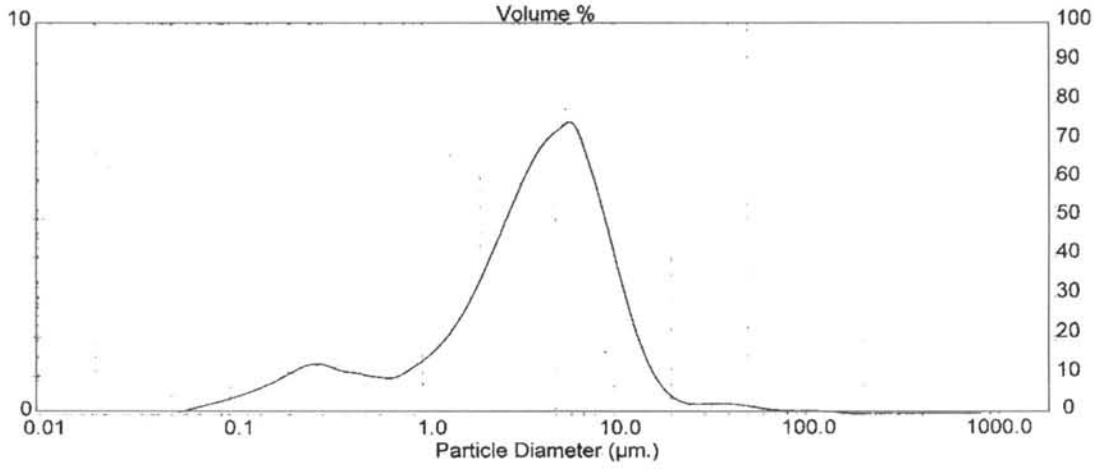
จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 พบว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยของน้ำยางข้น 60 % DRC ที่ใช้ในการทดลองมีค่าเท่ากับ 1.13 ไมโครเมตร



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงขนาดอนุภาคของน้ำยางข้น 60% DRC

ตารางที่ 4.2 ขนาดอนุภาคของซัลเฟอร์ดิสเพอร์ชัน

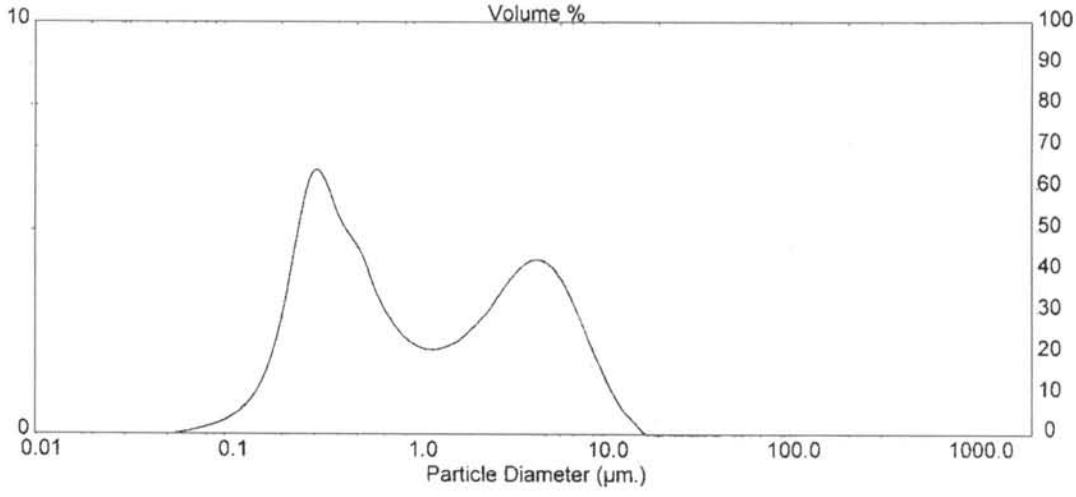
ผลการวิเคราะห์ครั้งที่	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (µm)	ขนาดอนุภาคที่เปอร์เซ็นต์ไทล์ (µm)		
		10	50	90
1	5.77	0.41	4.06	10.46
2	5.25	0.43	4.04	10.21
3	6.08	0.40	4.07	10.67
ค่าเฉลี่ย	5.70	0.41	4.06	10.45
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.42	0.02	0.02	0.23



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงขนาดอนุภาคของซัลเฟอร์ดิสเพอร์ชัน

ตารางที่ 4.3 ขนาดอนุภาคของซิงค์ไดเอทิลไดไทโอคาร์บาเมต (ZDEC) ดิสเพอร์ชัน

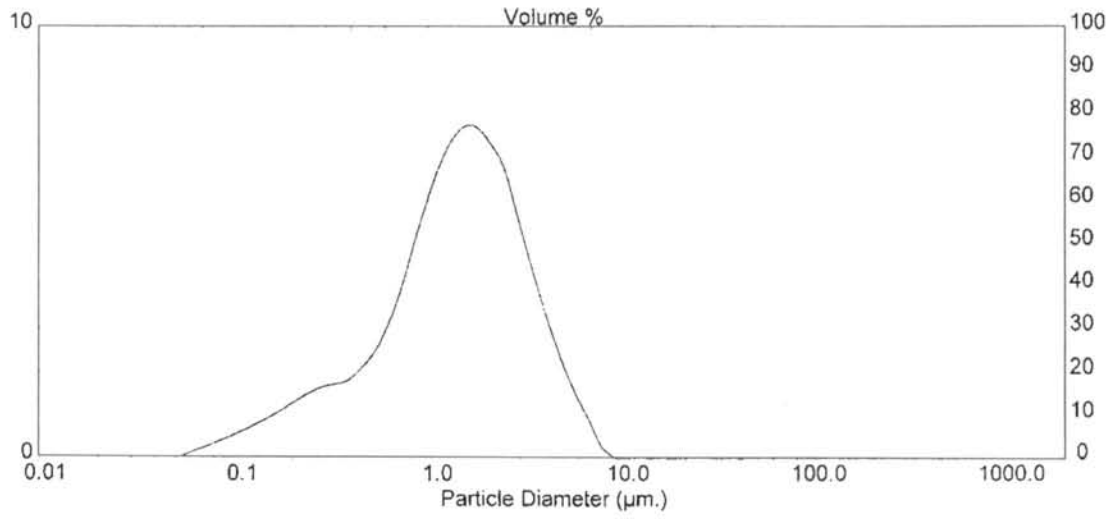
ผลการวิเคราะห์ครั้งที่	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (μm)	ขนาดอนุภาคที่เปอร์เซ็นต์ไทล์ (μm)		
		10	50	90
1	2.33	0.24	0.87	6.38
2	2.33	0.24	0.88	6.39
3	2.42	0.25	0.88	6.48
ค่าเฉลี่ย	2.36	0.24	0.88	6.42
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.05	0.01	0.01	0.06



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงขนาดอนุภาคของซิงค์ไดเอทิลไดไทโอคาร์บาเมต (ZDEC) ดิสเพอร์ชัน

ตารางที่ 4.4 ขนาดอนุภาคของซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ดิสเพอร์ชัน

ผลการวิเคราะห์ครั้งที่	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (μm)	ขนาดอนุภาคที่เปอร์เซ็นต์ไทล์ (μm)		
		10	50	90
1	1.77	0.32	1.44	3.63
2	2.01	0.32	1.45	4.07
3	1.86	0.32	1.47	3.82
ค่าเฉลี่ย	1.88	0.32	1.45	3.84
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.12	0	0.02	0.22



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงขนาดอนุภาคของซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ดิสเพอร์ชัน

จากตารางที่ 4.2 – 4.4 และรูปที่ 4.2 – 4.4 แสดงขนาดอนุภาคของสารในระบบวัลคาไนซ์ที่ใช้ในการทดลองและอยู่ในรูปดิสเพอร์ชันของซัลเฟอร์ ซิงค์ไดเอทิลไดไทโอคาร์บาเมต (ZDEC) และซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 5.70, 2.36 และ1.88 ไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งมีขนาดของดิสเพอร์ชันใหญ่กว่าอนุภาคของน้ำยางข้นอยู่มาก หากต้องการให้ดิสเพอร์ชันมีขนาดเล็กกว่านี้ต้องใช้พลังงานในการบดมากขึ้นทำให้สิ้นเปลืองมาก เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ ชมพูนุช สัญจร [18] ที่ศึกษาผลของขนาดอนุภาคดิสเพอร์ชันที่มีต่อกระบวนการผลิตและคุณภาพของถุงมือทางการแพทย์ที่ผลิตจากน้ำยางธรรมชาติ พบว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยของซัลเฟอร์ดิสเพอร์ชัน ZDEC ดิสเพอร์ชัน และซิงค์ออกไซด์ดิสเพอร์ชัน ที่ให้สมบัติด้านความต้านทานแรงดึงอยู่ในเกณฑ์ข้อกำหนดของ มอก.1056-2540 มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 3.78, 3.30 และ 1.25 ไมโครเมตร ตามลำดับ

4.2 ศึกษาระบบการเชื่อมขวางโมเลกุลโดยใช้ซัลเฟอร์

น้ำยางสามารถเพิ่มความแข็งแรงได้โดยวัลคาไนเซชัน โดยการใช้ซัลเฟอร์และสารในระบบการวัลคาไนซ์ เพื่อทำให้เกิดการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลของยาง ซึ่งสมบัติหนึ่งที่ใช้วัดความแข็งแรงของยาง คือ การวัดค่าความต้านทานดึง และค่าความยืดเมื่อขาด เปรียบเทียบกับค่าตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก.1056-2548) ดังตารางที่ 4.5 ซึ่งเป็นถุงมือสำหรับการตรวจโรคชนิดใช้ครั้งเดียว ประเภท 1 ทำจากน้ำยางธรรมชาติ (natural rubber latex) ลักษณะผิวไม่เรียบบางส่วนหรือทั้งหมด ผิวมีแป้งมัน

ตารางที่ 4.5 ค่าความต้านทานแรงดึงและความยืดเมื่อขาดตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ถุงมือสำหรับการตรวจโรคชนิดใช้ครั้งเดียว (มอก.1056-2548)

คุณลักษณะ	หน่วย	ค่ามาตรฐาน
ความต้านทานแรงดึง ต่ำสุด	MPa	10.6
ความยืดเมื่อขาด ต่ำสุด	%	650

4.2.1 ศึกษาผลการออกแบบการทดลองปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง

ทำการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล เพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของฟิล์มยางวัลคาไนซ์อิสระของระบบการเชื่อมขวางโมเลกุลโดยใช้ซัลเฟอร์ ซึ่งตัวแปรที่ทำการศึกษา 3 ตัว คือ ปริมาณของซัลเฟอร์ อุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ และเวลาในการทำปฏิกิริยา ตัวแปรแต่ละตัวมี 2 ระดับ แสดงดังตารางที่ 4.6 เพื่อหาส่วนผสมและภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตน้ำยางวัลคาไนซ์อิสระ ให้ได้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงที่สุด และนำค่าที่ได้ไปใช้เป็นแนวทางในการศึกษา และพัฒนากระบวนการผลิตต่อไป

โดยออกแบบจำนวนการทดลองแบบ 2^3 การทดลอง และสามารถเขียนลำดับมาตรฐานของการทดลองร่วมปัจจัยที่เกิดขึ้นทั้งหมดได้เป็น [1], a, b, ab, c, ac, bc และ abc ภาวะและผลของการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.7

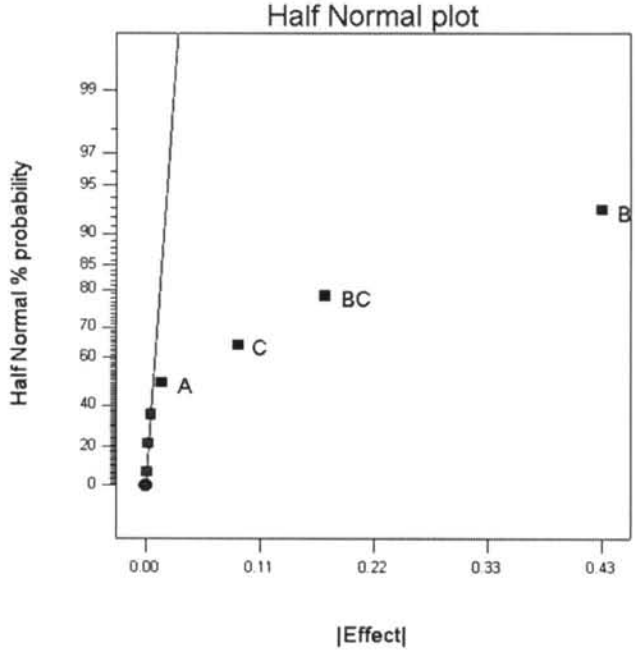
ตารางที่ 4.6 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษา

สัญลักษณ์	ตัวแปร	หน่วย	ระดับต่ำ (-)	ระดับสูง (+)
A	ปริมาณของซัลเฟอร์	phr	1.0	3.0
B	อุณหภูมิในการวัลคาไนซ์	องศาเซลเซียส	30	70
C	เวลาในการทำปฏิกิริยา	ชั่วโมง	1	5

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองจากภาวะการทดลองเชิงแฟกทอเรียล

การทดลอง	ตัวแปร			ความต้านทานแรงดึง (MPa)
	A	B	C	
[1]	-	-	-	1.476
a	+	-	-	1.420
b	-	+	-	0.651
ab	+	+	-	0.633
c	-	-	+	4.646
ac	+	-	+	4.035
bc	-	+	+	0.513
abc	+	+	+	0.486

ทำการวิเคราะห์หาตัวแปรที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของฟิล์มยางวัลคาไนซ์อิสระของระบบการเชื่อมขวางโมเลกุลโดยใช้ซัลเฟอร์ ที่ถูกแปลงด้วยวิธีฟังก์ชันผกผัน (Inverse) โดยการสร้างกราฟ Normal Probability ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 กราฟ Normal Probability plot กับค่า Effect estimate ของค่าความต้านทานแรงดึงของระบบการเชื่อมขวางโมเลกุลโดยใช้ซัลเฟอร์ ที่ถูกแปลงด้วยวิธีฟังก์ชันผกผัน (inverse)

เมื่อพิจารณาจาก Normal Probability Plot ของตัวแปรที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของฟิล์มยางวัลคาไนซ์อิสระ (รูปที่4.5) จะพบว่าตัวแปรที่คาดว่ามีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง คือ อุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ (B) อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิในการวัลคาไนซ์กับเวลาในการทำปฏิกิริยา (BC) เวลาในการทำปฏิกิริยา (C) และปริมาณของซัลเฟอร์ (A) เนื่องจากค่าการประมาณของตัวแปร (Estimate Effect) ได้เบี่ยงเบนออกจากเส้นปกติอย่างเห็นได้ชัด เมื่อนำตัวแปรที่เบี่ยงเบนออกจากเส้นปกติมาวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ตามตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรต่อค่าความต้านทานแรงดึงของระบบการเชื่อมขวางโมเลกุลโดยใช้ซัลเฟอร์ ที่ถูกแปลง

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F	
Model	0.45	4	0.11	5467.00	< 0.0001	significant
A	4.789E-004	1	4.789E-004	23.31	0.0169	significant
B	0.38	1	0.38	18281.09	< 0.0001	significant
C	0.015	1	0.015	752.68	0.0001	significant
BC	0.058	1	0.058	2810.90	< 0.0001	significant
Error	6.163E-005	3	2.054E-005			
Total	0.45	7				

ในการตรวจสอบสมมติฐานของงานวิจัยนี้จะใช้ช่วงแห่งความเชื่อมั่นอยู่ที่ 95 เปอร์เซ็นต์ ค่า F วิกฤตที่ $F_{0.05,1,3}$ มีค่าเท่ากับ 0.837 จากการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis of variance) ของตัวแปร พบว่า F_0 ของอุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ (B) อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิในการวัลคาไนซ์กับเวลาในการทำปฏิกิริยา (BC) เวลาในการทำปฏิกิริยา (C) และปริมาณของซัลเฟอร์ (A) มีค่ามากกว่า F วิกฤต จึงกล่าวได้ว่าปริมาณของซัลเฟอร์ อุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ เวลาในการทำปฏิกิริยา และอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิในการวัลคาไนซ์กับเวลาในการทำปฏิกิริยา มีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของฟิล์มยางวัลคาไนซ์อิสระ

เมื่อนำค่าตอบสนองมาสร้างเป็นสมการถดถอยเพื่อใช้ในการทำนายค่าความต้านทานแรงดึงของฟิล์มยางวัลไนซ์อิสระของระบบการเชื่อมขวางโมเลกุลโดยใช้ซัลเฟอร์ ได้สมการดังนี้

$$\frac{1}{\hat{Y}+0.75} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_A A + \hat{\beta}_B B - \hat{\beta}_C C + \hat{\beta}_{BC} BC \qquad (4.1)$$

เมื่อแทนค่าลงในสมการจะได้เป็น

$$\frac{1}{\hat{Y}+0.75} = 0.54 + 7.737x10^{-3} A + 0.22B - 0.044C + 0.085BC \qquad (4.2)$$

โดย $\hat{Y}$ คือ ค่าความต้านทานแรงดึงของฟิล์มยางวัลคาไนซ์อิสระของระบบการเชื่อมขวางโมเลกุลโดยใช้ซัลเฟอร์

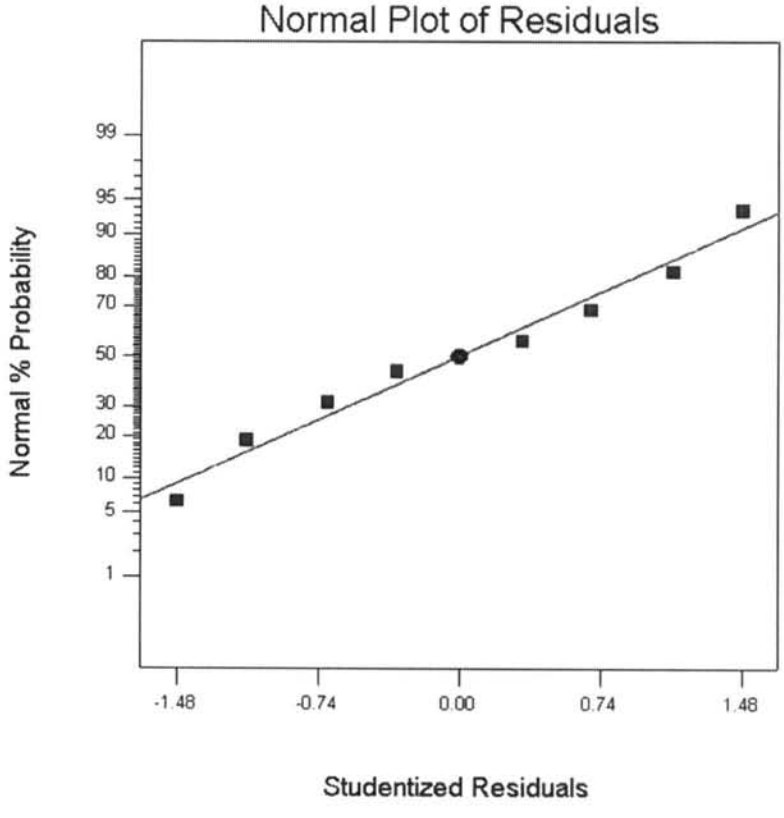
$\hat{\beta}_0$ คือ ค่าของผลตอบสนอง เนื่องจากตัวแปรที่ไม่ได้ทำการทดลอง ซึ่งสามารถคำนวณมาจากค่าเฉลี่ยผลตอบสนองของข้อมูลทั้งหมด

$\hat{\beta}_i$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรที่มีผลในการทดลอง ซึ่งสามารถคำนวณมาจากค่าเฉลี่ยผลตอบสนองของตัวแปรนั้น ๆ

A คือ ตัวแปรที่ถูกเข้ารหัสของปริมาณซัลเฟอร์

B คือ ตัวแปรที่ถูกเข้ารหัสของอุณหภูมิในการวัลคาไนซ์

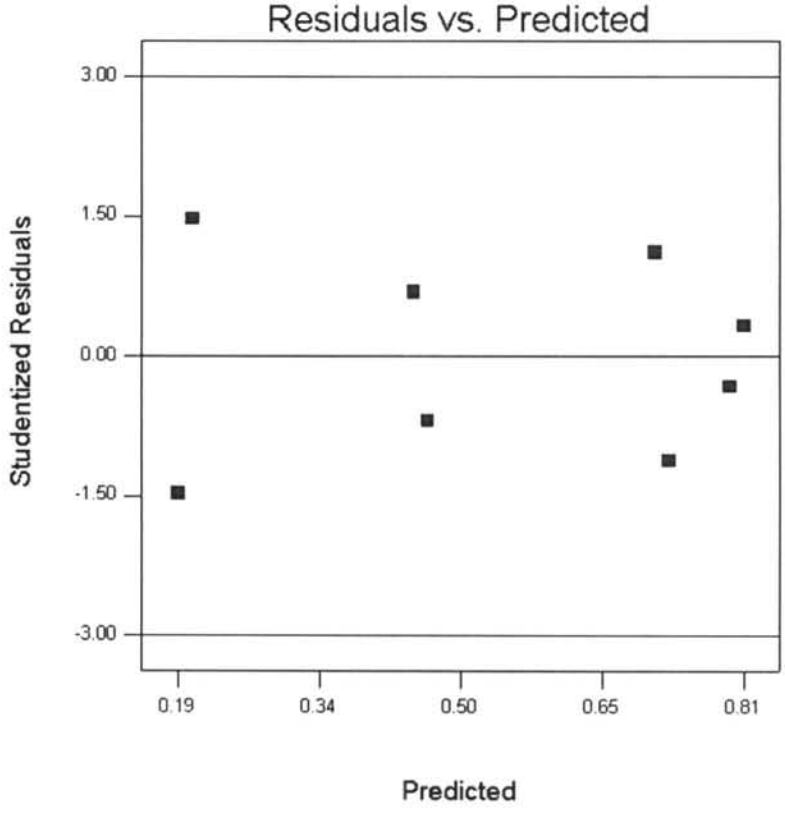
C คือ ตัวแปรที่ถูกเข้ารหัสของเวลาในการทำปฏิกิริยา



รูปที่ 4.6 กราฟ normal probability plot ของค่าความต้านทานแรงดึงของระบบการเชื่อมขวางโมเลกุลโดยใช้ซัลเฟอร์ ที่ถูกแปลงด้วยวิธีฟังก์ชันผกผัน (inverse)

จากสมการเชิงคณิตศาสตร์ที่ได้ ผลดังกล่าวนำไปสร้างกราฟความน่าจะเป็นของส่วนตกค้าง (Normal probability plot of residual) และกราฟระหว่างส่วนตกค้างกับค่าการทำนาย ดังรูปที่ 4.6 และ รูปที่ 4.7 ตามลำดับ

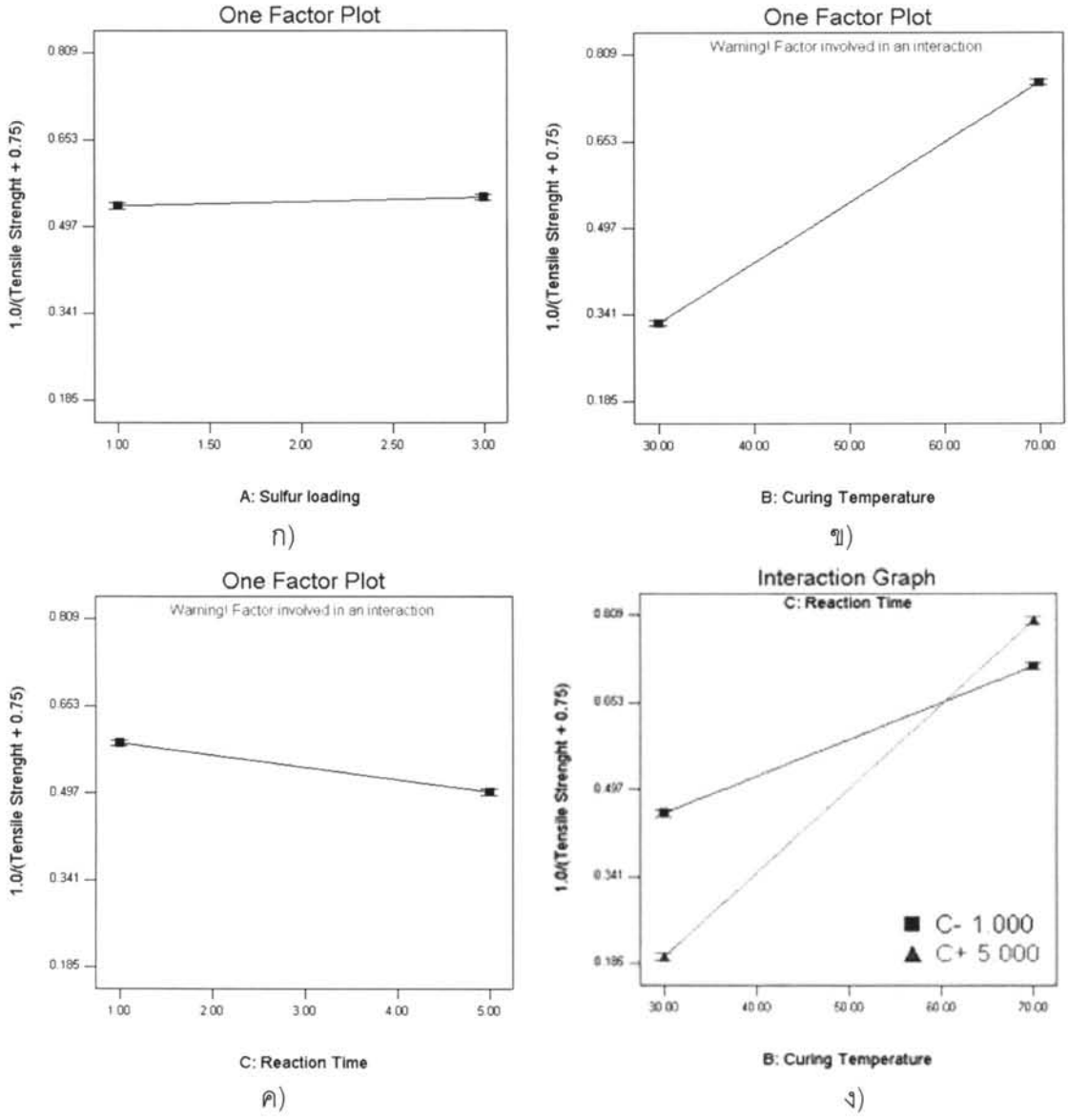
จากรูปที่ 4.6 จะพบว่าแนวโน้มการกระจายตัวของค่าความผิดพลาดกับค่า normal %Probability มีแนวโน้มเป็นเส้นตรง จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีการกระจายตัวอิสระ ความแปรปรวนคงที่ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลความแปรปรวนมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดและค่าที่ทำนายได้ตามรูปที่ 4.7 พบว่าการกระจายตัวของค่าความผิดพลาดนั้นมีความสัมพันธ์แบบไม่มีรูปแบบ



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ทำนายได้จากสมการถดถอย

ข้อสรุปที่ว่า A, B, C และ BC เป็นปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญกับค่าความต้านทานแรงดึงของระบบการเชื่อมขวางโมเลกุลโดยใช้ซัลเฟอร์ ส่วนตกค้างกับค่าการทำนาย ไม่พบสิ่งผิดปกติแสดงให้เห็นว่าไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าการทำนาย และค่าความแปรปรวนของข้อมูลมีค่าคงที่ สรุปได้ว่าสมการถดถอยที่สมมติขึ้นสามารถเป็นตัวแทนของข้อมูลได้อย่างถูกต้อง

รูปที่ 4.8 เป็นกราฟแสดงถึงปัจจัยสูงต่ำของตัวแปรที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง รูปที่ ก) กราฟมีความชันเกือบเท่ากับศูนย์ ดังนั้นปริมาณซัลเฟอร์มีผลต่อความต้านทานแรงดึงน้อยมาก สามารถสรุปได้ว่าภาวะของตัวแปรที่มีผลทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด คือ ที่อุณหภูมิการวัลคาไนซ์ต่ำประมาณ 30-40 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 5 ชั่วโมง ดังนั้นภาวะนี้เหมาะสำหรับการผลิตน้ำยางวัลคาไนซ์อิสระ ของระบบการเชื่อมขวางโมเลกุลโดยใช้ซัลเฟอร์



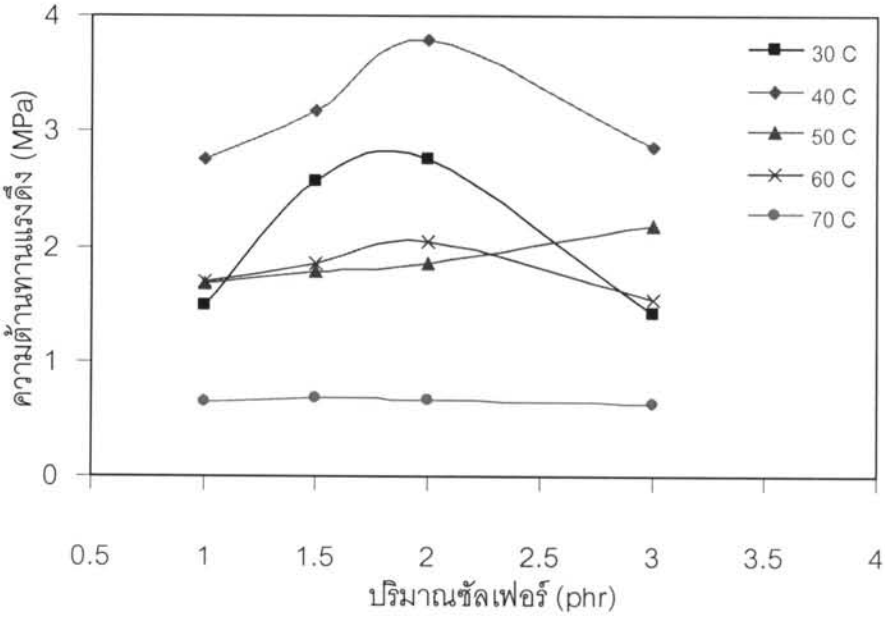
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงถึงปัจจัยระดับสูงต่ำที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของระบบการเชื่อมขวางโมเลกุลโดยใช้ซัลเฟอร์

ก) ปริมาณของซัลเฟอร์ ข) อุณหภูมิการวัลคาไนซ์ ค) เวลาในการทำปฏิกิริยา ง) อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิการวัลคาไนซ์กับเวลาในการทำปฏิกิริยา

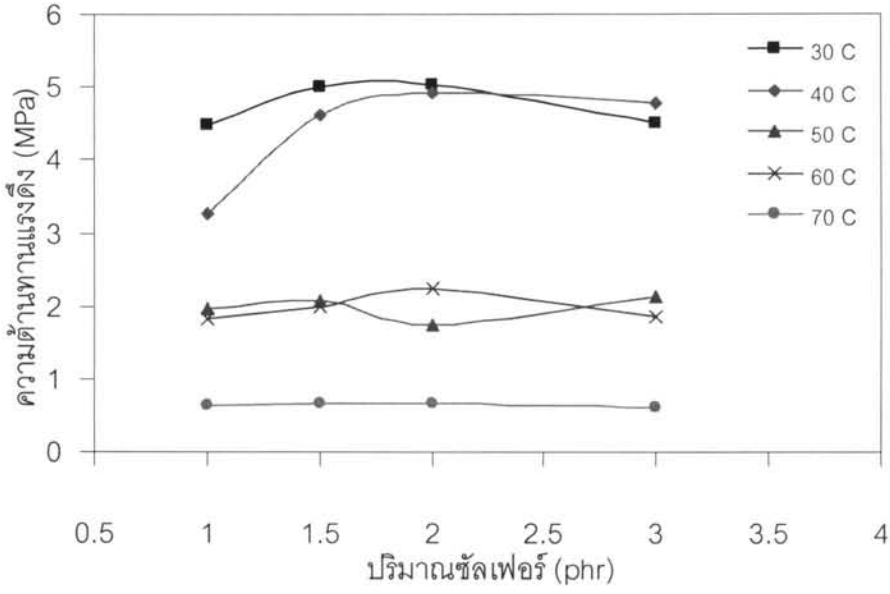
4.2.2 ศึกษาผลของปริมาณซัลเฟอร์ต่อค่าความต้านทานแรงดึง

ความต้านทานแรงดึงของฟิล์มยางที่ได้จากน้ำยางวัลคาไนซ์อิสระที่ปริมาณซัลเฟอร์ต่างๆ กัน จากรูปที่ 4.9 พบว่าที่ปริมาณซัลเฟอร์เพิ่มจาก 1.0 phr เป็น 1.5 และ 2.0 phr ค่าความต้านทานแรงดึงมีค่าเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด จากนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณซัลเฟอร์มากขึ้น พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงมีค่าลดลง เนื่องจากปริมาณซัลเฟอร์เพิ่มมากขึ้น โมเลกุลของซัลเฟอร์จะเกาะกันเองเป็นสายโซ่ยาวซึ่งไม่ได้เกิดการเชื่อมขวางที่ดี ทำให้ขาดความแข็งแรงจึงเป็นสาเหตุให้ความต้านทานแรงดึงลดลง และเป็นไปในแนวทางเดียวทั้งในเวลาในการทำปฏิกิริยา 1, 3 และ 5 ชั่วโมง ดังรูปที่ 4.9 ก), ข) และ ค) ตามลำดับ

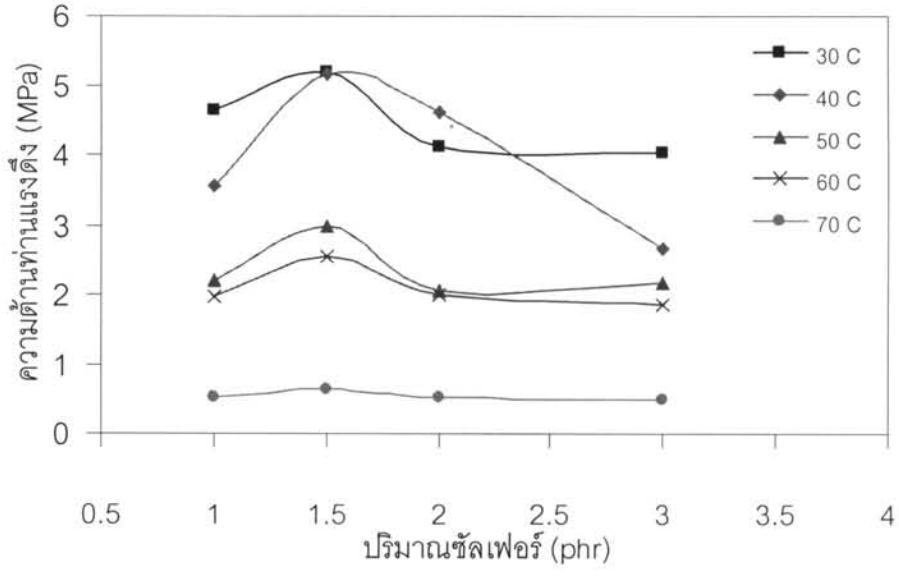
ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง (รูปที่ 4.9 ก) ค่าความต้านทานแรงดึงมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ 40 องศาเซลเซียส ปริมาณซัลเฟอร์ 2.0 phr มีค่า 3.8 เมกะพาสคัล, เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง (รูปที่ 4.9 ข) ค่าความต้านทานแรงดึงมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ 30 องศาเซลเซียส ปริมาณซัลเฟอร์ 2.0 phr มีค่า 5.0 เมกะพาสคัล และที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 ชั่วโมง (รูปที่ 4.9 ค) ค่าความต้านทานแรงดึงมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ 30 องศาเซลเซียส ปริมาณซัลเฟอร์ 1.5 phr มีค่า 5.2 เมกะพาสคัล



ก)



ข)

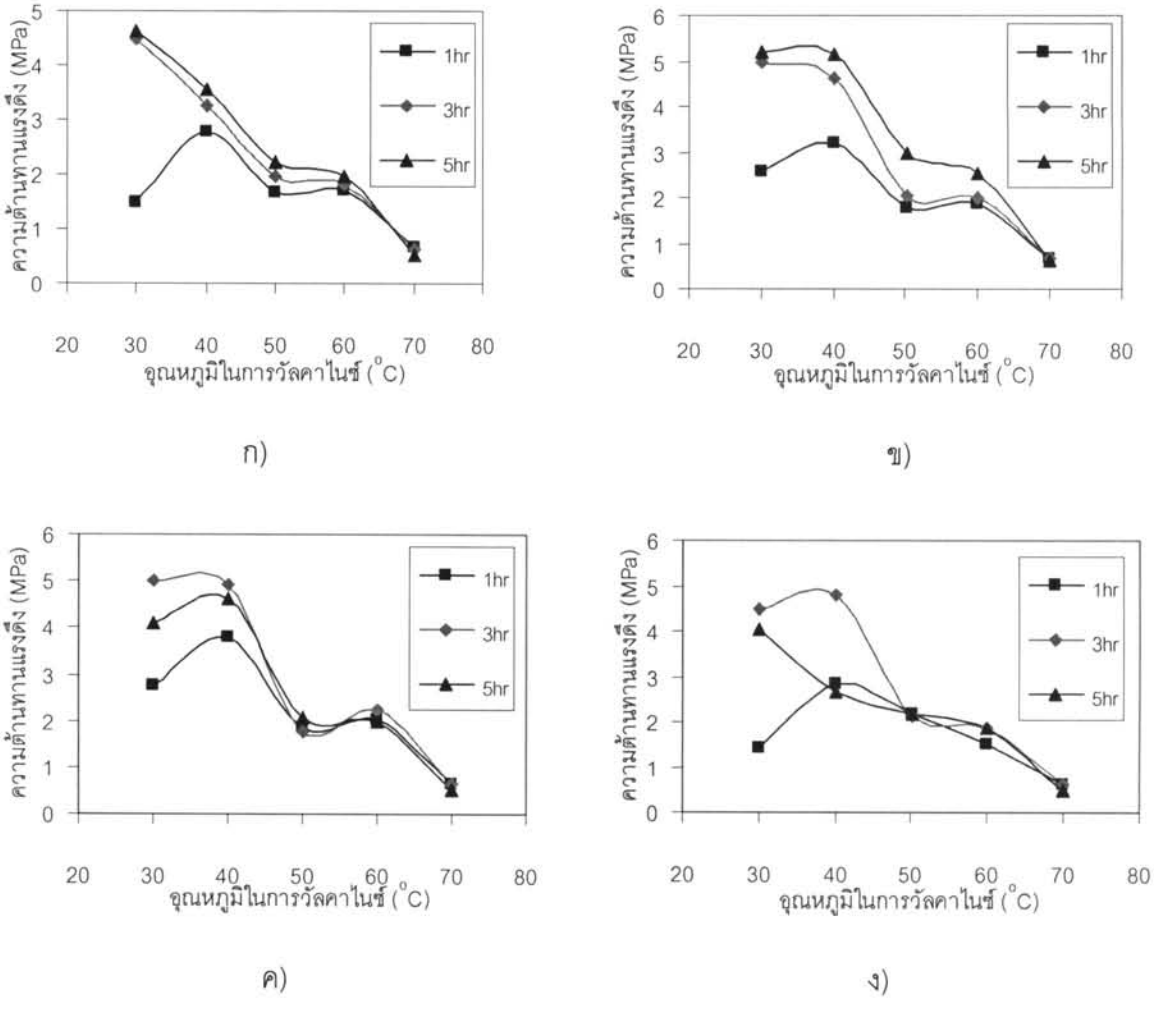


ค)

รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงกับปริมาณซัลเฟอร์ ที่อุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ 30, 40, 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส ของระบบการเชื่อมขวางโมเลกุลโดยใช้ซัลเฟอร์ ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา ก) 1 ชั่วโมง ข) 3 ชั่วโมง ค) 5 ชั่วโมง

4.2.3 ศึกษาผลของอุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ต่อค่าความต้านทานแรงดึง

อุณหภูมิในการวัลคาไนซ์เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างมาก นอกเหนือจากสารในระบบการวัลคาไนซ์ ในการเพิ่มความแข็งแรงให้กับยาง โดยการให้ความร้อนทำให้ซัลเฟอร์เกิดการเชื่อมขวางกันระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ของยาง



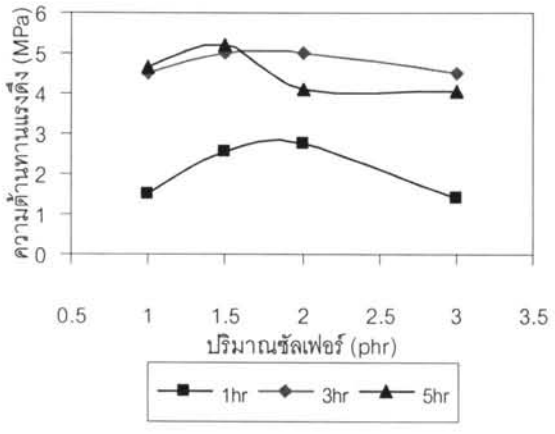
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงกับอุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 1, 3 และ 5 ชั่วโมง ของระบบการเชื่อมขวางโมเลกุลโดยใช้ซัลเฟอร์ ที่ปริมาณซัลเฟอร์ ก) 1.0 phr ข) 1.5 phr ค) 2.0 phr ง) 3.0 phr

จากรูปที่ 4.10 พบว่าอุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ที่ให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดในระบบการเชื่อมขวางโมเลกุลที่ใช้ซัลเฟอร์ มีค่า 30 และ 40 องศาเซลเซียส เนื่องจากว่าที่อุณหภูมินี้เป็นช่วงที่เหมาะสมที่ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาทำปฏิกิริยาได้ดี ในกระบวนการผลิตน้ำยางวัลคาไนซ์อิสระจึงทำให้ความต้านทานแรงดึงของฟิล์มยางมีค่าสูงในช่วงอุณหภูมินี้ แต่เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิใน

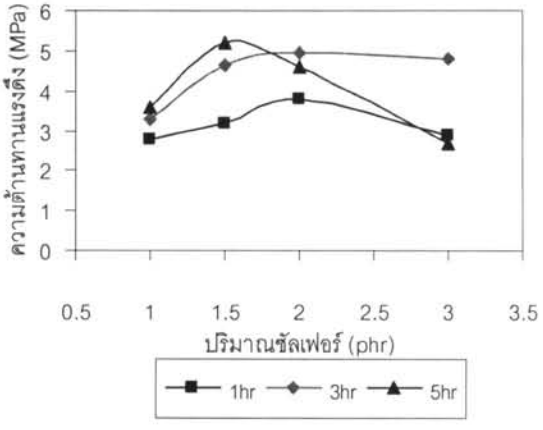
การวัลคาไนซ์สูงขึ้นเป็น 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานแรงดึงมีค่าลดลงตามลำดับ และมีค่าความต้านทานแรงดึงต่ำมากที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เนื่องจากว่าที่อุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ที่สูงนี้ทำให้แอมโมเนียเกิดการระเหยมากขึ้น เป็นสาเหตุให้น้ำยางเกิดการเสียเสถียรภาพความแข็งแรงของยางจึงลดลง

4.2.4 ศึกษาผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อค่าความต้านทานแรงดึง

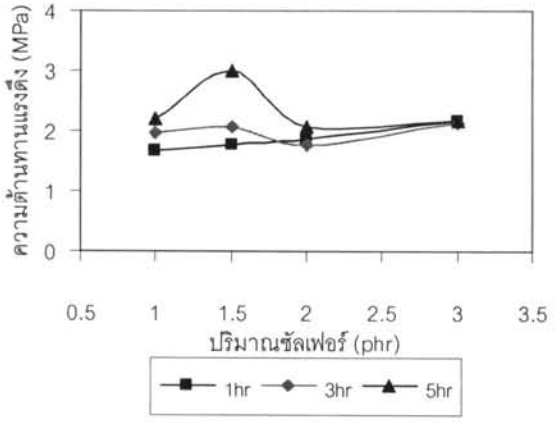
เพื่อให้เกิดการเชื่อมขวางโมเลกุลที่ดีขึ้นจึงได้ทำการศึกษาผลของเวลาในการทำปฏิกิริยา คาดว่าเวลาในการทำปฏิกิริยาที่นานขึ้น อาจจะทำให้ฟิล์มยางมีความแข็งแรงมากขึ้น เนื่องจากมีเวลาให้ซัลเฟอร์ทำปฏิกิริยาแล้วเกิดการสร้างพันธะเคมีของซัลเฟอร์กับโมเลกุลของยางมากขึ้น



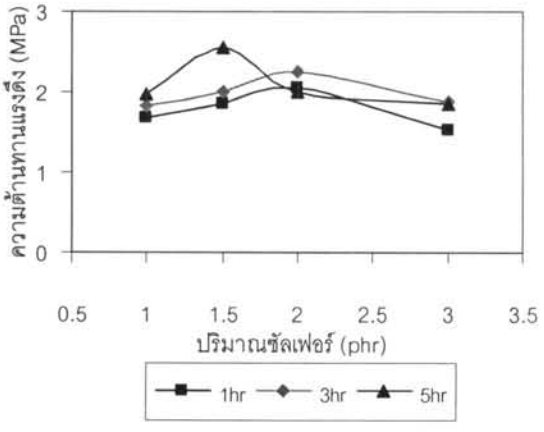
ก)



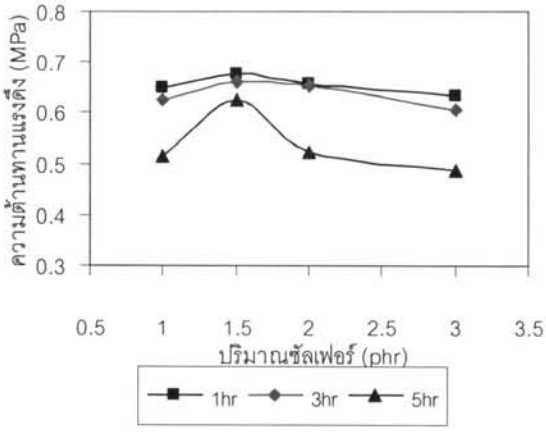
ข)



ค)



ง)



จ)

รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงกับปริมาณซัลเฟอร์ ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 1, 3 และ 5 ชั่วโมง ของระบบการเชื่อมขวางโมเลกุลโดยใช้ซัลเฟอร์ ที่อุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ ก) 30 องศาเซลเซียส ข) 40 องศาเซลเซียส ค) 50 องศาเซลเซียส ง) 60 องศาเซลเซียส จ) 70 องศาเซลเซียส

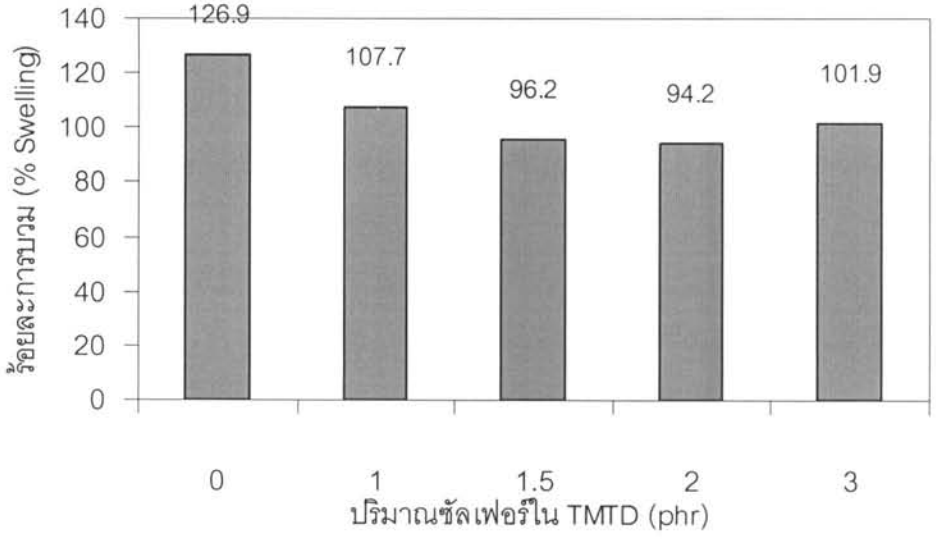
จากรูปที่ 4.11 พบว่าที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 ชั่วโมง ให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงที่สุด รูปที่ 4.11 ก) และ ข) ที่อุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ 30 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เห็นได้ว่าเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง ให้ค่าความต้านทานแรงดึงต่ำกว่าที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 และ 5 ชั่วโมงมาก เนื่องจากว่าที่ 1 ชั่วโมงมีเวลาไม่เพียงพอที่ทำให้เกิดการเชื่อมขวางโมเลกุล จึงเป็นสาเหตุให้ความต้านทานแรงดึงต่ำกว่าที่เวลาในการทำปฏิกิริยาที่นานขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการวัลคาไนซ์สูงขึ้นเป็น 50 และ 60 องศาเซลเซียส ตามรูปที่ 4.11 ค) และ ง) ตามลำดับ พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 1, 3 และ 5 ชั่วโมง มีค่าใกล้เคียงกัน เพราะว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นนั้น น้ำยางวัลคาไนซ์อิสระเกิดการสร้างพันธะซัลเฟอร์กับสายโซ่พอลิเมอร์ของยางได้อย่างรวดเร็ว ในปริมาณเท่าๆ กัน จึงทำให้ความต้านทานแรงดึงไม่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องใช้เวลานานในการเกิดปฏิกิริยาเพราะจะเป็นการสิ้นเปลือง ส่วนที่อุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ 70 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.11 จ) ค่าความต้านทานแรงดึงมีค่าต่ำมาก เนื่องมาจากที่อุณหภูมิในการวัลคาไนซ์สูงๆ น้ำยางวัลคาไนซ์อิสระเกิดการเสียเสถียรภาพจากการที่แอมโมเนียระเหยออกไปมากและน้ำยางบางส่วนเกิดการโคแอกูเลชันหรือการจับตัวกันเป็นก้อน จึงทำให้น้ำยางวัลคาไนซ์อิสระนี้ขาดความแข็งแรง และเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้นที่ 5 ชั่วโมง แอมโมเนียก็เกิดการระเหยออกไปมากขึ้นดังนั้นค่าความต้านทานแรงดึงจึงต่ำมาก

จะเห็นว่าระบบการเชื่อมขวางโมเลกุลโดยใช้ซัลเฟอร์มีค่าความต้านทานแรงดึงมากสุดมีค่า 5.2 เมกะพาสคัล ซึ่งไม่ผ่านไปตามมาตรฐาน มอก. 1056-2548 ของกระทรวงอุตสาหกรรม โดยมีค่าความต้านทานแรงดึงต่ำสุด 10.6 เมกะพาสคัล (ตารางที่ 4.5) เนื่องมาจากซัลเฟอร์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าขนาอนุภาคของยางมาก จึงเป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้การเชื่อมขวางโมเลกุลได้ไม่สมบูรณ์

4.3 ศึกษาระบบการเชื่อมขวางโมเลกุลโดยใช้เตตระเมทิลไทยูแรมไดซัลไฟด์ (TMTD) ดิสเพอร์ชัน

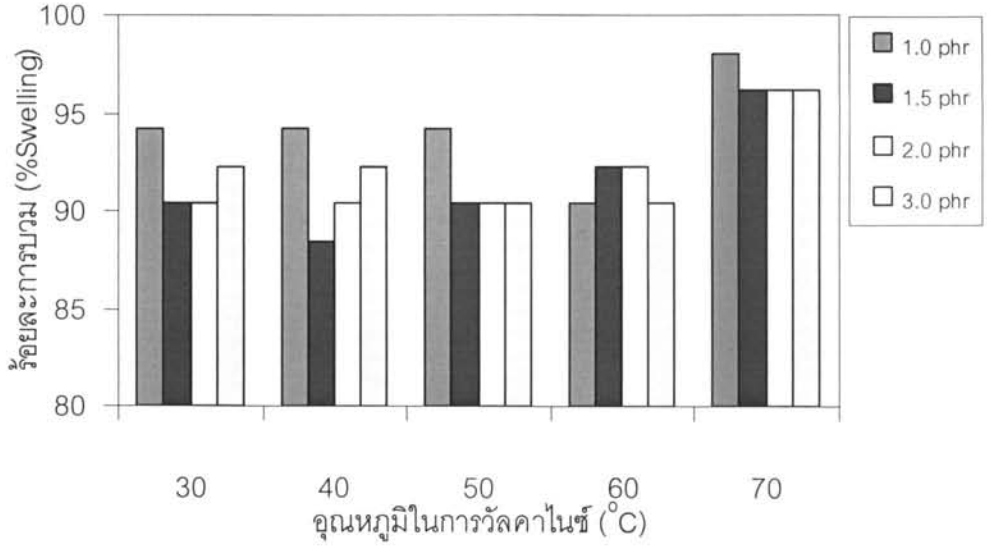
4.3.1 ศึกษาผลของร้อยละการบวม (% Swelling)

น้ำยางโดยปกติแล้วไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้งานเลย เนื่องจากโมเลกุลของน้ำยางจะมีลักษณะเป็นสายตรงยาวไม่มีกิ่ง มีสมบัติเปลี่ยนแปลงง่ายเมื่อกระทบอุณหภูมิและแรงกระทำ จึงได้เติมสารในระบบวัลคาไนซ์เข้าไปทำปฏิกิริยาวัลคาไนเซชัน เชื่อมขวางโมเลกุลของน้ำยางเข้าด้วยกัน ลักษณะที่น้ำยางกับซัลเฟอร์เชื่อมขวางติดกันเป็นร่างแห ทำให้น้ำยางมีสมบัติทนต่อการยืดได้หดได้ ลักษณะเช่นนี้เรียกว่าน้ำยางเกิดการคงรูป และสามารถทดสอบองศาการคงรูป (Degree of vulcanization) ของน้ำยางได้โดยใช้วิธีการวัดค่าร้อยละการบวม (%Swelling)



รูปที่ 4.12 ค่าร้อยละการบวม (%Swelling) ของน้ำยางพรีวัลคาไนซ์

ค่าร้อยละการบวมของน้ำยางพรีวัลไนซ์ ดังรูปที่ 4.12 ที่ปริมาณซัลเฟอร์ใน TMTD 0 phr (น้ำยางข้นที่ยังไม่ได้วัลคาไนซ์) มีค่าร้อยละการบวมเท่ากับ 126 เปอร์เซ็นต์ คือน้ำยางยังไม่เกิดการเชื่อมขวางโมเลกุลหรือน้ำยางยังไม่เกิดการคงรูป ส่วนน้ำยางวัลคาไนซ์อิสระที่ปริมาณซัลเฟอร์ใน TMTD 1, 1.5, 2, 3 phr ซึ่งมีค่า 107.7, 96.2, 94.2, 101.9 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในช่วง 90 - 110 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าน้ำยางคงรูปเล็กน้อย

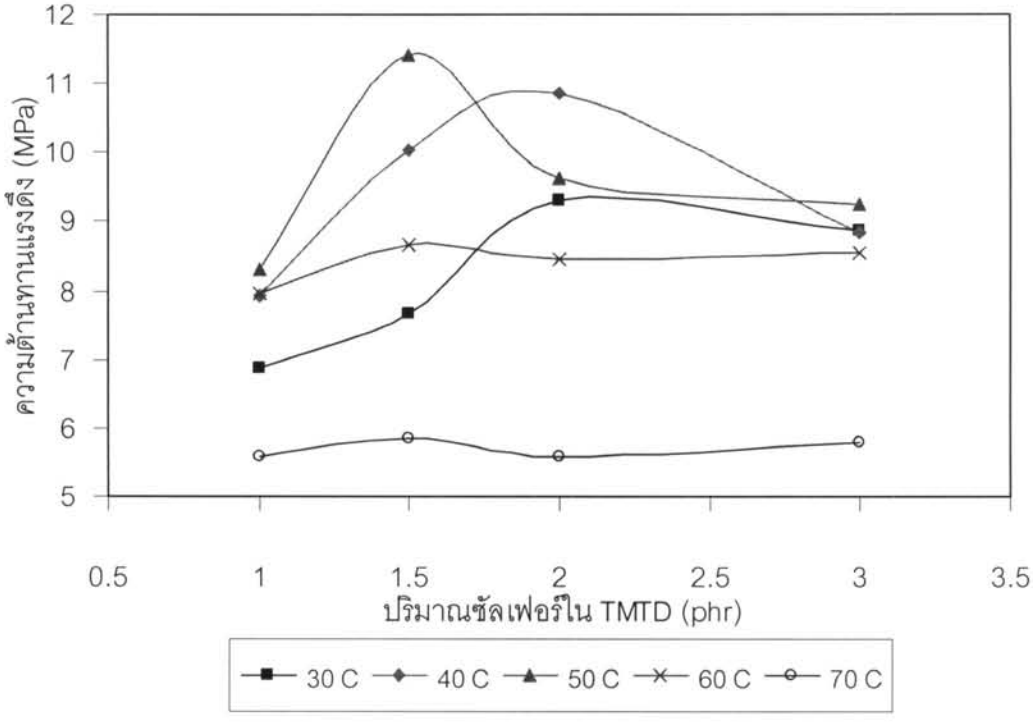


รูปที่ 4.13 ค่าร้อยละการบวมของน้ำยางวัลคาไนซ์อิสระ ที่อุณหภูมิการวัลคาไนซ์ต่างๆ ของระบบการเชื่อมขวางโมเลกุลโดยใช้ TMTD ดิสเพอร์ชัน

จากรูปที่ 4.13 พบว่าร้อยละการบวมของน้ำยางวัลคาไนซ์อิสระ ที่อุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ 30, 40, 50, 60 องศาเซลเซียส มีค่าอยู่ระหว่าง 85 – 95 เปอร์เซ็นต์ (ซึ่งอยู่ในช่วง 80 - 90 เปอร์เซ็นต์) แสดงว่าน้ำยางเกิดการคงรูปได้ปานกลาง ส่วนที่อุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ 70 องศาเซลเซียส ร้อยละการบวมมีค่า 98.1, 96.2, 96.2, 96.2 เปอร์เซ็นต์ ที่ปริมาณซัลเฟอร์ใน TMTD 1, 1.5, 2, 3 phr ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในช่วง 90 - 110 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าน้ำยางคงรูปเล็กน้อย เนื่องจากว่าที่อุณหภูมิสูงน้ำยางเกิดการเสียเสถียรภาพเพราะแอมโมเนียระเหยออกไปมาก ทำให้ไม่เกิดการเชื่อมขวางโมเลกุล เป็นเหตุให้ค่าร้อยละการบวมสูงขึ้น

4.3.2 ศึกษาผลของปริมาณซัลเฟอร์ในเตตระเมทิลไทยูแรมไดซัลไฟด์ดิสเพอร์ชันต่อค่าความต้านทานแรงดึง

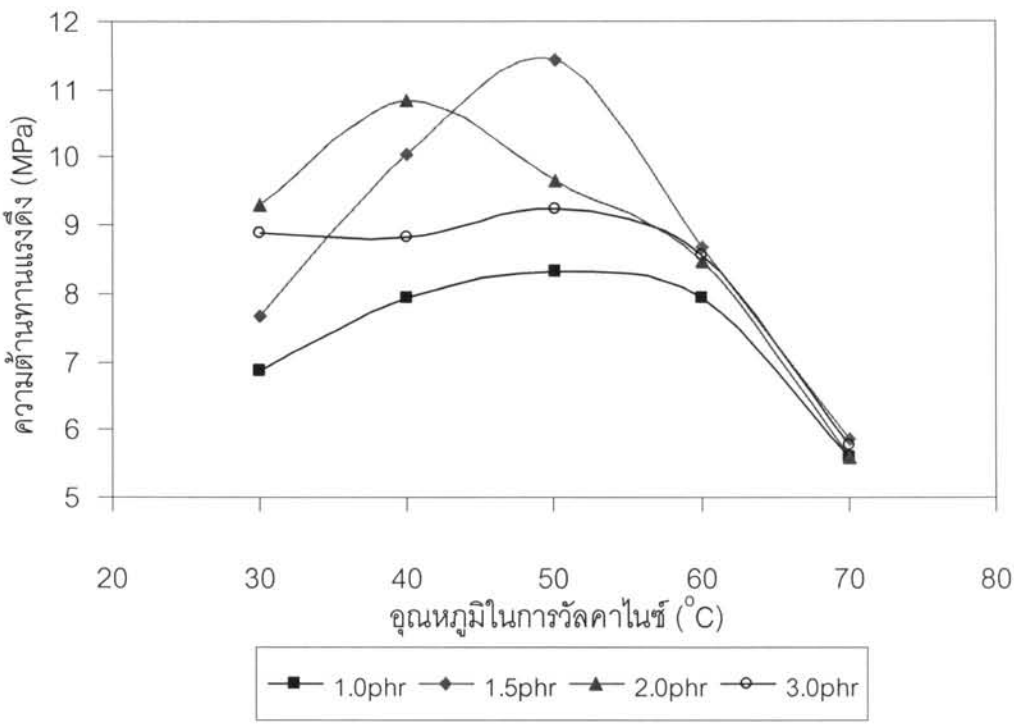
ความต้านทานแรงดึงของฟิล์มยางที่ได้จากน้ำยางวัลคาไนซ์อิสระ ที่ปริมาณซัลเฟอร์ในเตตระเมทิลไทยูแรมไดซัลไฟด์ต่างๆ กัน จากรูปที่ 4.14 พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงมีค่าสูงที่ปริมาณซัลเฟอร์ในเตตระเมทิลไทยูแรมไดซัลไฟด์ 1.5 phr และ 2.0 phr ของอุณหภูมิในการ วัลคาไนซ์แต่ละค่า เนื่องจากว่าที่ปริมาณซัลเฟอร์ในเตตระเมทิลไทยูแรมไดซัลไฟด์ 1 phr ยังเกิดการวัลคาไนซ์ไม่เพียงพอความต้านทานแรงดึงจึงต่ำกว่าที่ปริมาณซัลเฟอร์ในเตตระเมทิลไทยูแรมไดซัลไฟด์ 1.5 และ 2.0 phr แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเป็น 3.0 phr ค่าความต้านทานแรงดึงลดลง เนื่องจากปริมาณซัลเฟอร์เพิ่มมากขึ้น โมเลกุลของซัลเฟอร์จะเกาะกันเองไม่ได้เกิดการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุล ทำให้ความแข็งแรงลดลงจึงเป็นสาเหตุให้ความต้านทานแรงดึงลดลง ซึ่งจากการทดลองค่าความต้านทานแรงดึงมีค่าสูงที่สุดที่ปริมาณซัลเฟอร์ในเตตระเมทิลไทยูแรมไดซัลไฟด์ 1.5 phr และอุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ 50 องศาเซลเซียส มีค่า 11.4 เมกะพาสคัล



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงกับปริมาณซัลเฟอร์ใน TMTD ที่อุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ 30, 40, 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส ของระบบการเชื่อมขวางโมเลกุลโดยใช้ TMTD ดิสเพอร์ชัน

4.3.3 ศึกษาผลของอุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ต่อค่าความต้านทานแรงดึง

อุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ก็มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง เพราะการให้ความร้อนกับน้ำยางผสมสารเคมีเป็นการทำให้น้ำยางเกิดวัลคาไนเซชันหรือเกิดการเชื่อมขวางโมเลกุล ทำให้ยางมีความแข็งแรงมากขึ้น



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงกับอุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ ที่ปริมาณซัลเฟอร์ใน TMTD 1.0, 1.5, 2.0 และ 3.0 phr ของระบบการเชื่อมขวางโมเลกุลโดยใช้ TMTD ดิสเพอร์ชัน

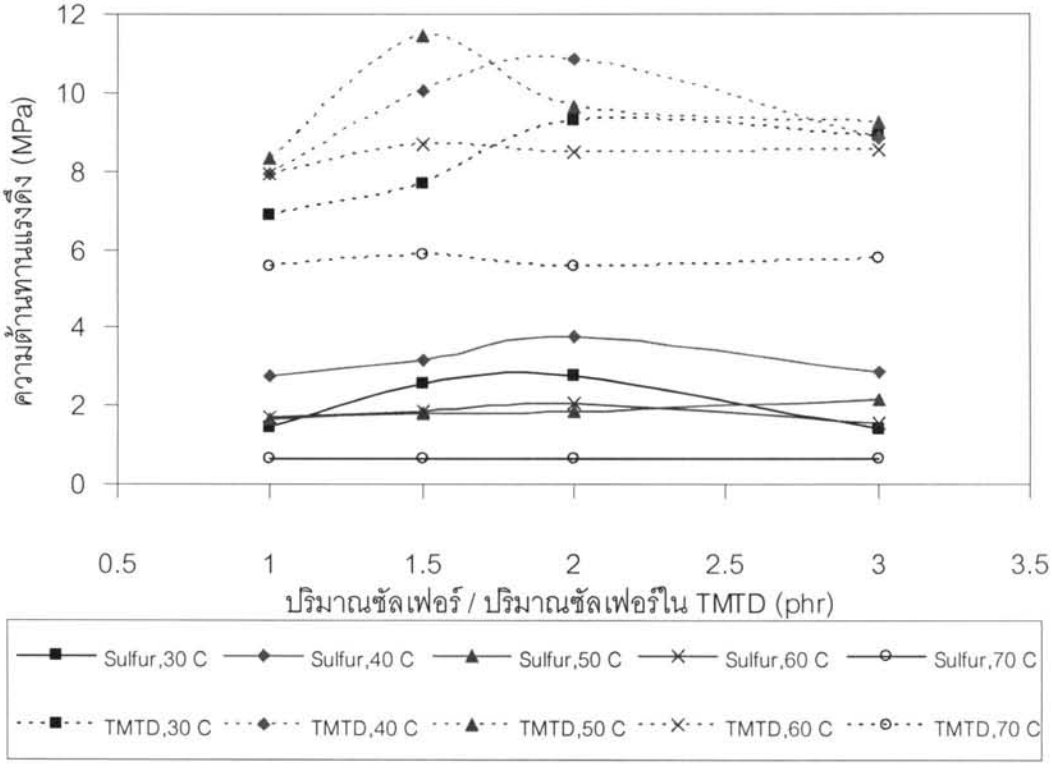
จากรูปที่ 4.15 พบว่าที่ปริมาณซัลเฟอร์ในเตตระเมทิลไทยูแรมไดซัลไฟด์ 1.0 phr, 1.5 phr, 2.0 phr และ 3.0 phr ให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดที่อุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ 50, 50, 40 และ 50 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยให้ค่าความต้านทานแรงดึง 8.3, 11.4, 10.8 และ 9.3 เมกะพาสคัล ตามลำดับ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าที่อุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ 50 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสม ในการวัลคาไนซ์ของน้ำยางวัลคาไนซ์อิสระในระบบการเชื่อมขวางโมเลกุลโดยใช้เตตระเมทิลไทยูแรมไดซัลไฟด์ดิสเพอร์ชัน

จะเห็นว่าระบบการเชื่อมขวางโมเลกุลโดยใช้เตตระเมทิลไทยูแรมไดซัลไฟด์ดิสเพอร์ชัน มีค่าความต้านทานแรงดึงที่ผ่านไปตามมาตรฐาน มอก. 1056-2548 ของกระทรวงอุตสาหกรรม

(ตารางที่ 4.5) มีค่า 10.8 และ 11.4 เมกะพาสคัล ที่อุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ 40 และ 50 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

4.4 ศึกษาผลของระบบการเชื่อมขวางโมเลกุลโดยใช้ซัลเฟอร์เปรียบเทียบกับระบบการเชื่อมขวางโมเลกุลโดยใช้เตตระเมทิลไทยูแรมไดซัลไฟด์ (TMTD) ดิสเพอร์ชัน

4.4.1 ศึกษาผลของค่าความต้านทานแรงดึง



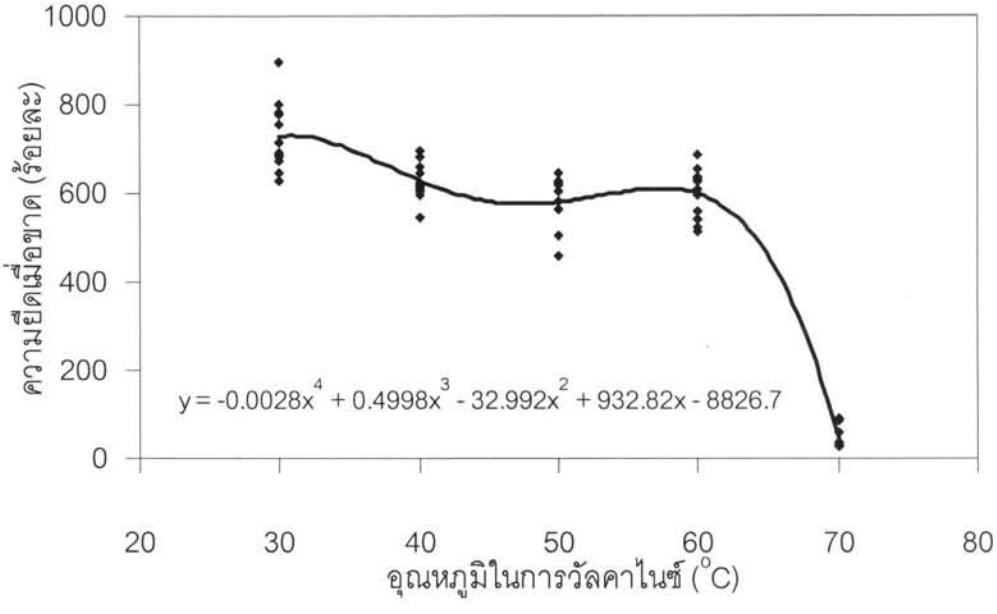
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงกับปริมาณซัลเฟอร์ (เส้นทึบ) หรือปริมาณซัลเฟอร์ใน TMTD (เส้นประ) ที่อุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ 30, 40, 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง

จะเห็นว่า ระบบการเชื่อมขวางโมเลกุลโดยใช้เตตระเมทิลไทยูแรมไดซัลไฟด์ดิสเพอร์ชันให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงกว่าระบบการเชื่อมขวางโมเลกุลโดยใช้ซัลเฟอร์มากที่ทุกภาวะ ดังรูปที่ 4.16 เพราะว่าซัลเฟอร์ในเตตระเมทิลไทยูแรมไดซัลไฟด์นี้มีประสิทธิภาพในการเชื่อมขวางมาก เนื่องจากว่าสารที่ใช้จะสลายตัวให้อนุมูลเสรี และรวมตัวกับโมเลกุลของยางทำให้เกิดการเชื่อมขวางโมเลกุลขึ้น ถึงแม้สารเคมีเหล่านี้จะให้ซัลเฟอร์ออกมาไม่มาก แต่ซัลเฟอร์ที่ออกมามีความสามารถในการเชื่อมขวางมาก โดยซัลเฟอร์ต่อกันเพียง 1 หรือ 2 อะตอม (mono หรือ

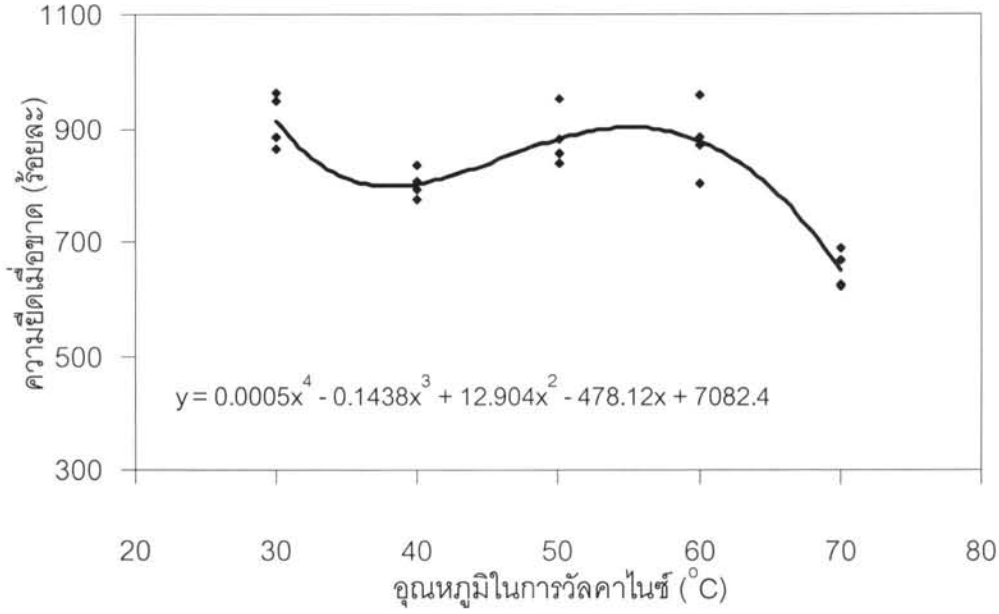
disulfidic crosslink) และไม่มีซัลเฟอร์มาต่อกันเป็นวง จึงทำให้ฟิล์มยางที่ได้มีความต้านทานแรงดึงและความร้อนดีกว่ายางที่มีการวัลคาไนซ์แบบหลายๆ อะตอม (polysulfidic crosslink) ในระบบการวัลคาไนซ์ปกติที่ใช้ระบบการเชื่อมขวางโมเลกุลโดยใช้ซัลเฟอร์ นอกจากนั้นสารที่เหลือหลังจากให้ซัลเฟอร์ออกมาแล้ว อาจทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่ง หรือสารกระตุ้นการวัลคาไนซ์ได้อีกด้วย

4.4.2 ศึกษาผลของความยืดเมื่อขาด

ค่าความยืดเมื่อขาดเป็นสมบัติหนึ่งของยางธรรมชาติ ซึ่งตามมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรมของถุงมือยางทางการแพทย์ มอก.1056-2548 (ตารางที่ 4.5) ได้กำหนดว่าความยืดเมื่อขาดต่ำสุดควรมีค่าสูงกว่า 650 เปอร์เซ็นต์ จากรูปที่ 4.17 ค่าความยืดเมื่อขาดของระบบการเชื่อมขวางโมเลกุลโดยใช้ซัลเฟอร์มีค่าอยู่ในช่วง 550 – 800 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ 30 – 60 องศาเซลเซียส แต่ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีค่าความยืดเมื่อขาดต่ำมากประมาณ 30 – 90 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากว่าน้ำยางวัลคาไนซ์อิสระเกิดการเสียเสถียรภาพอย่างมากที่อุณหภูมินี้



รูปที่ 4.17 ค่าความยืดเมื่อขาดของระบบการเชื่อมขวางโมเลกุลโดยใช้ซัลเฟอร์



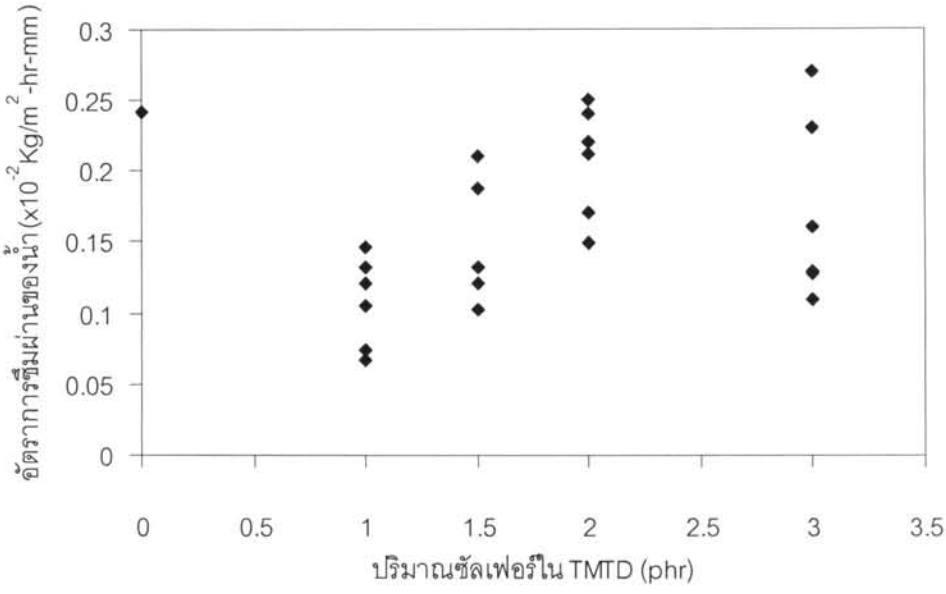
รูปที่ 4.18 ค่าความยืดเมื่อขาดของระบบการเชื่อมขวางโมเลกุลโดยใช้ TMTD ดิสเพอร์ชัน

จากรูปที่ 4.18 พบว่าความยืดเมื่อขาดของระบบการเชื่อมขวางโมเลกุลโดยใช้เตตระเมทิลไทยูแรมไดซัลไฟด์ดิสเพอร์ชัน มีค่าอยู่ในช่วง 600 – 900 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผ่านตามมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรมของถุงมือยาง

4.5 ศึกษาสภาพการซึมผ่านได้ของน้ำผ่านฟิล์มยางจากน้ำยางวัลคาไนซ์อิสระ

เพื่อเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการนำน้ำยางวัลคาไนซ์อิสระไปประยุกต์ใช้เพิ่มเติม จึงได้ทดสอบสมบัติเพิ่มอีก โดยได้ทำการศึกษาสภาพการซึมผ่านของน้ำ (Vapour Permeability)

จากรูปที่ 4.19 พบว่าอัตราการซึมผ่านได้ของน้ำผ่านฟิล์มยางวัลคาไนซ์อิสระมีค่าประมาณ $(0.05 – 0.27) \times 10^{-2}$ กิโลกรัม/(ตารางเมตร–ชั่วโมง–มิลลิเมตร) ซึ่งสามารถกั้นความชื้นจากไอน้ำได้ดีมาก จึงเหมาะที่จะพัฒนาทำเป็นบรรจุภัณฑ์จากธรรมชาติเก็บผักสด ผลไม้หรือผลิตภัณฑ์ที่ป้องกันความชื้น โดยไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 4.19 ค่าอัตราการซึมผ่านได้ของน้ำผ่านฟิล์มยางวัลคาไนซ์อิสระ ของระบบการเชื่องขวางโมเลกุลโดยใช้ TMTD ดิสเพอร์ชัน

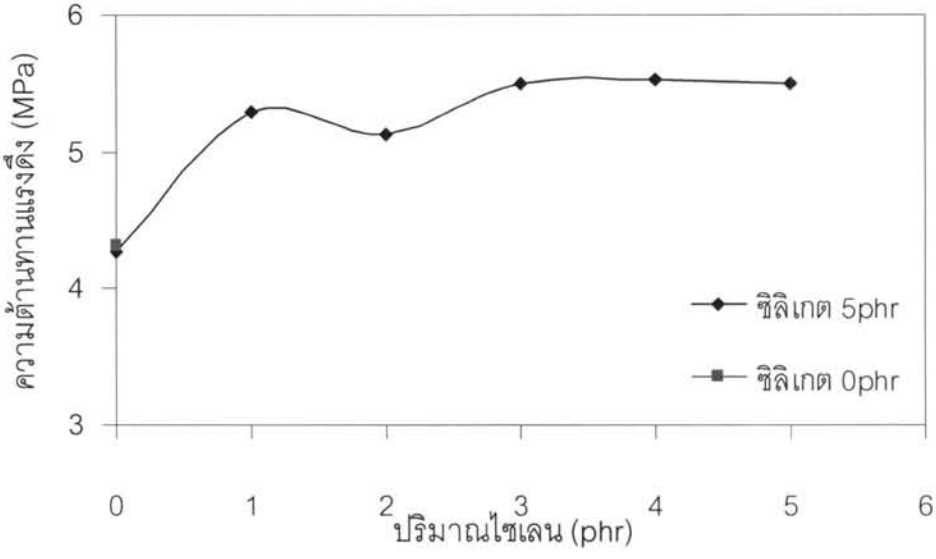
4.6 ศึกษาสมบัติเชิงกลของไซเลนและโซเดียมซิลิเกต

เตรียมน้ำยางวัลคาไนซ์อิสระที่ระบบการเชื่อมขวางโมเลกุลโดยใช้เตตระเมทิลไทยูแรมไดซัลไฟด์ดิสเพอร์ชัน โดยใช้ปริมาณซัลเฟอร์ใน TMTD 1.5 phr อุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ 50 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง เนื่องจากที่สูตรและภาวะนี้เป็นภาวะที่ดีที่สุดในการเตรียมน้ำยางวัลคาไนซ์อิสระของงานวิจัยนี้ เพราะให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงที่สุด

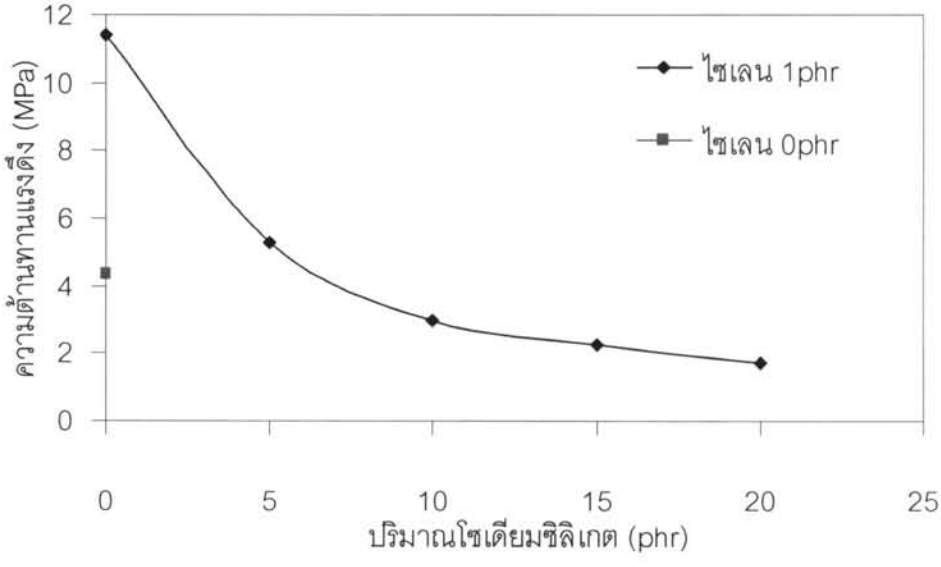
4.6.1 ศึกษาผลของความต้านทานแรงดึง

จากรูปที่ 4.20 พบว่าที่ปริมาณไซเลน 0 phr ค่าความต้านทานแรงดึงมีค่า 4.3 เมกะพาสคัล เมื่อเพิ่มปริมาณไซเลนเป็น 1 phr ค่าความต้านทานแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 5.3 เมกะพาสคัล แต่เมื่อเพิ่มปริมาณไซเลนมากขึ้นอีกค่าความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มคงที่ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 5.1 – 5.5 เมกะพาสคัล เนื่องไซเลนเป็นสารประสานคู่ควบไม่ได้สร้างพันธะกับโมเลกุลของยาง จึงไม่ได้ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง จึงทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงไม่แตกต่างกันมากเมื่อเพิ่มปริมาณไซเลนมากขึ้น

จากรูปที่ 4.21 ค่าความต้านทานแรงดึงที่ 0 phr ของปริมาณซิลิเกต มีค่าเท่ากับ 11.4 เมกะพาสคัล เมื่อเพิ่มปริมาณของซิลิเกตเป็น 5, 10, 15 และ 20 phr ค่าความต้านทานแรงดึงมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด คือ 5.3, 2.97, 2.3 และ 1.7 เมกะพาสคัล ตามลำดับ เนื่องจากอนุภาคซิลิเกตมีขนาดใหญ่ เมื่อปริมาณซิลิเกตมากขึ้น จึงทำให้เกิดการเข้าไปแทรกในโครงสร้าง ค่าความต้านทานแรงดึงจึงมีค่าลดลงตามปริมาณซิลิเกตที่เพิ่มขึ้น



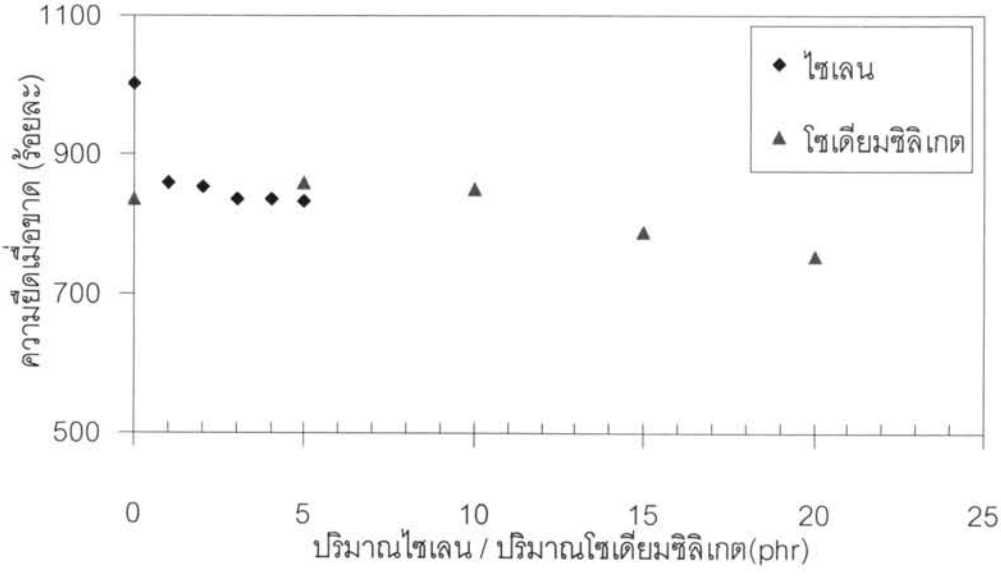
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงกับปริมาณไซเลน ที่ปริมาณซัลเฟอร์ใน TMTD 1.5 phr อุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ 50 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงกับปริมาณโซเดียมซิลิเกต ที่ปริมาณซัลเฟอร์ใน TMTD 1.5 phr อุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ 50 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง

4.6.2 ศึกษาผลของความยืดเมื่อขาด

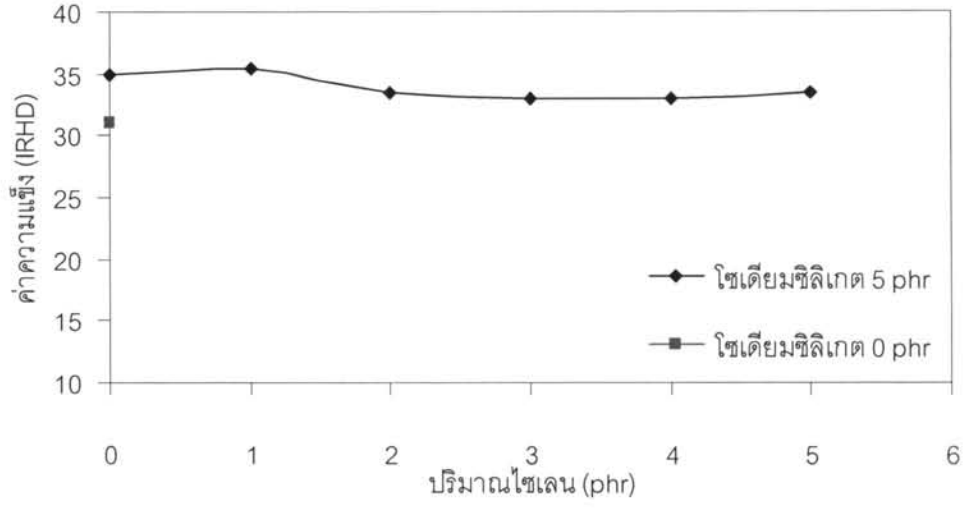
จากรูปที่ 4.22 พบว่าการเพิ่มปริมาณของทั้งไซเลนและโซเดียมซิลิเกตไม่ได้มีผลต่อค่าความยืดเมื่อขาด โดยมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 800 – 900 เปอร์เซ็นต์



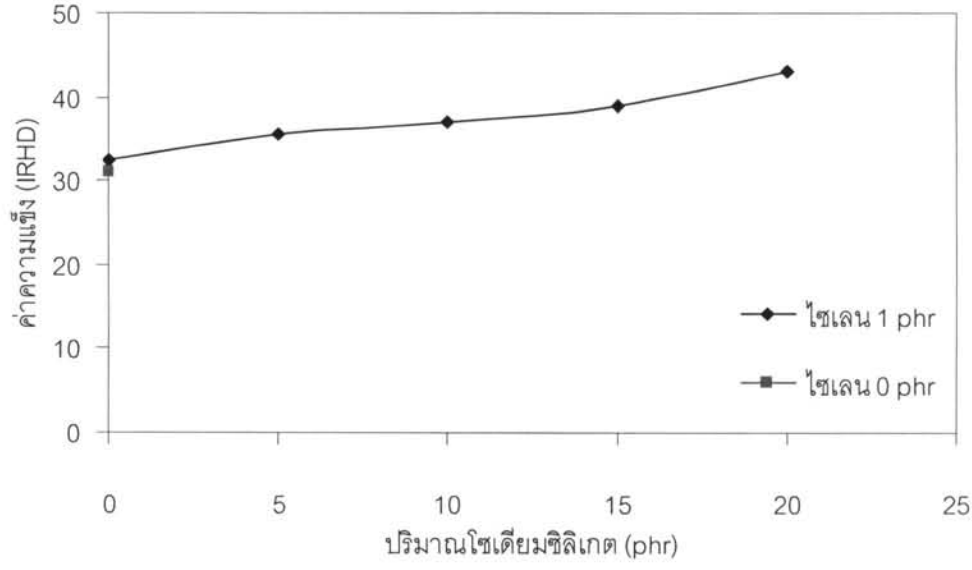
รูปที่ 4.22 ค่าความยืดเมื่อขาดของระบบการเชื่อมขวางโมเลกุลโดยใช้ TMTD ดิสเพอร์ชัน ที่ปริมาณไซเลนต่างๆ (โซเดียมซิลิเกต 5 phr) และที่ปริมาณโซเดียมซิลิเกตต่างๆ (ไซเลน 1 phr) โดยเตรียมที่ปริมาณซัลเฟอร์ใน TMTD 1.5 phr อุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ 50 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง

4.6.3 ศึกษาผลของค่าความแข็ง

จากรูปที่ 4.23 พบว่าปริมาณของไซเลนเพิ่มมากขึ้นค่าความแข็งมีค่าคงที่ โดยมีค่าความแข็งเฉลี่ยอยู่ที่ 34 IRHD เนื่องจากไซเลนเป็นสารประสานคู่ควบ ที่ทำหน้าที่ในการช่วยให้อนุภาคซิลิเกตสามารถจับกับอนุภาคยางได้ดียิ่งขึ้น แต่เนื่องจากปริมาณอนุภาคซิลิเกตคงที่ที่ 5 phr ดังนั้นปริมาณไซเลนจึงไม่ส่งผลต่อค่าความแข็ง จึงทำให้ค่าความแข็งเมื่อปริมาณของไซเลนเพิ่มมากขึ้นมีค่าไม่แตกต่างกัน เมื่อไม่ได้เติมโซเดียมซิลิเกต (0 phr) ค่าความแข็งมีค่า 31 IRHD จะเห็นว่ามีค่าต่ำลงเนื่องจากไม่มีสารตัวเติมทั้งโซเดียมซิลิเกตและไซเลนที่เข้าไปจับกับยางเพื่อเพิ่มความแข็งแรง จึงทำให้ค่าความแข็งมีค่าต่ำลง



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับปริมาณไซเลน ที่ปริมาณซัลเฟอร์ใน TMTD 1.5 phr อุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ 50 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับปริมาณโซเดียมซิลิเกต ที่ปริมาณซัลเฟอร์ใน TMTD 1.5 phr อุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ 50 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง

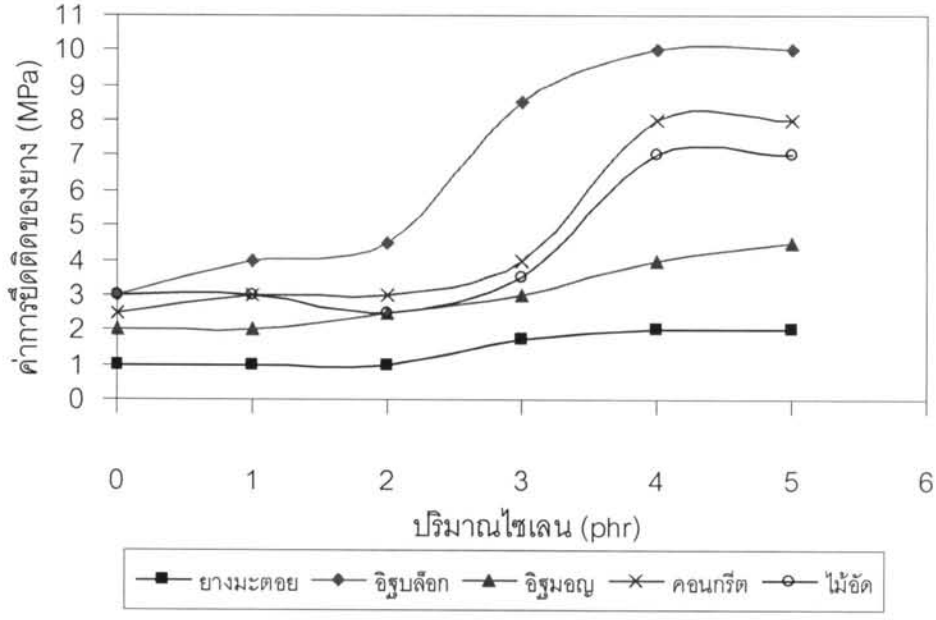
ผลของปริมาณโซเดียมซิลิเกตต่อค่าความแข็ง แสดงในรูปที่ 4.24 พบว่าปริมาณโซเดียมซิลิเกตเพิ่มมากขึ้นค่าความแข็งมีค่าสูงขึ้น ที่ปริมาณไซเลนคงที่ 1 phr โดยที่ปริมาณโซเดียมซิลิเกต 20 phr ค่าความแข็งมีค่ามากที่สุด ซึ่งมีค่า 43 IRHD ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากโซเดียมซิลิเกตเป็นสารช่วยในการเสริมแรง ส่งผลให้ค่าความแข็งมีค่าสูงขึ้น

4.7 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่าการยึดติดระหว่างพื้นผิวกับฟิล์มยาง

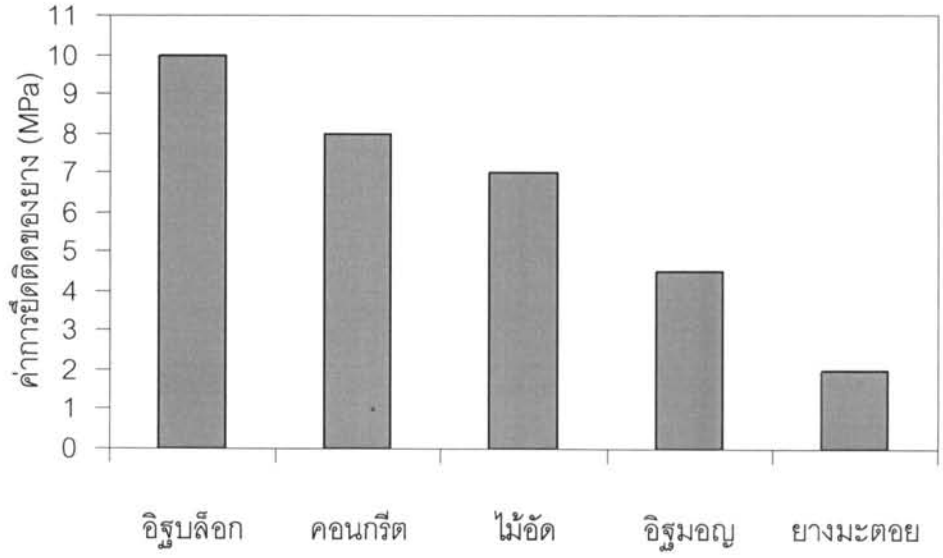
4.7.1 ศึกษาผลของปริมาณไซเลน

ไซเลนเป็นสารประกอบที่มีหน้าที่เป็นตัวประสานระหว่างวัสดุที่เป็นสารอินทรีย์ โดยใช้ปฏิกิริยาสร้างพันธะโควาเลนต์ในอินเตอร์เฟส ซึ่งเมื่อนำมาผสมกับน้ำยางเพื่อใช้เป็นสารยึดติดกับพื้นผิวจะให้ค่าการติดติดดีขึ้นได้

จากรูปที่ 4.25 เมื่อเพิ่มปริมาณไซเลนขึ้น ในช่วงแรกจาก 0 – 2 phr พบว่าค่าการยึดติด (Adhesion Strength) ระหว่างยางกับพื้นผิวต่างๆ มีค่าค่อนข้างคงที่ แสดงว่าปริมาณไซเลนน้อยๆ ไม่มีผลต่อค่าการยึดติด เพราะไซเลนที่เติมลงไปจะไปยึดติดระหว่างโครงสร้างของซิลิเกตกับโมเลกุลยางจนหมด ทำให้ค่าการยึดติดกับพื้นผิวต่างๆ มีค่าน้อยและไม่เปลี่ยนแปลงจากที่ไม่ได้เติมไซเลน แต่เมื่อปริมาณไซเลนเพิ่มเป็น 3 phr ค่าการยึดติดของฟิล์มยางกับพื้นผิวมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เพราะว่ายังมีไซเลนที่เหลืออยู่บางส่วนเข้าไปยึดติดกับกับพื้นผิวต่างๆ ทำให้ค่าการยึดติดมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มไซเลนขึ้นไปอีกเป็น 4 - 5 phr ค่าการยึดติดมีค่าเพิ่มขึ้นอีกเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยึดติดของยางกับปริมาณไซเลน ที่พื้นผิวต่างๆ โดยปริมาณซิลิเกต 5 phr ปริมาณซัลเฟอร์ใน TMTD 1.5 phr อุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ 50 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง

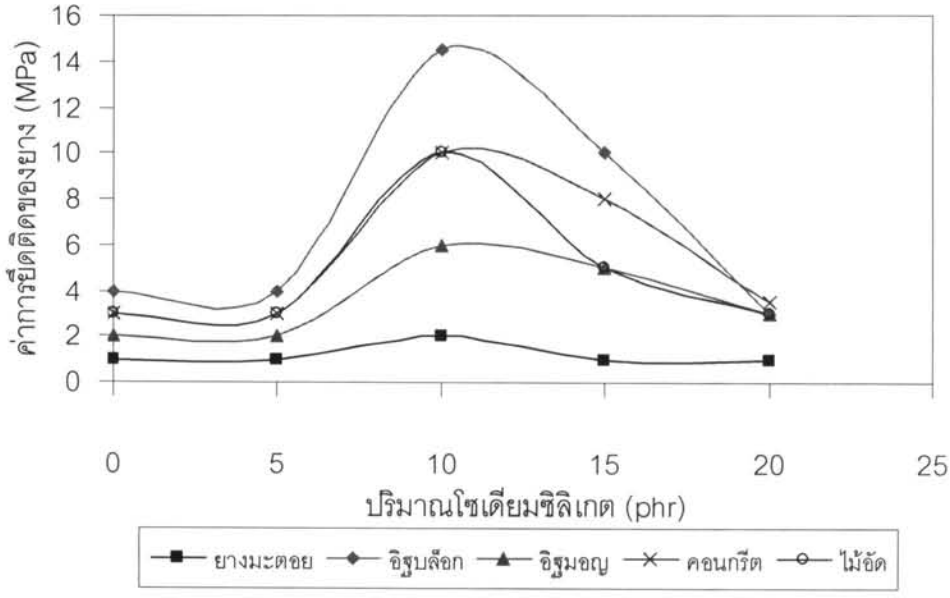


รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยึดติดของยางกับพื้นผิวต่างๆ ที่ปริมาณไซเลน 5 phr ปริมาณโซเดียมซิลิเกต 5 phr ปริมาณซัลเฟอร์ใน TMTD 1.5 phr อุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ 50 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง

ค่าการยึดติดระหว่างฟิล์มยางกับพื้นผิวต่างๆ ที่ปริมาณไซเลน 5 phr ดังรูปที่ 4.26 พบว่าพื้นผิวอิฐบล็อกและคอนกรีตให้ค่าการยึดติดของยางสูงที่สุด ซึ่งมีค่า 10 และ 8 เมกะพาสคัล ตามลำดับ เนื่องจากพื้นผิวทั้งสองมีส่วนประกอบของซิลิกาแล้วถูกไฮโดรไลซ์เป็นหมู่ไซเลนอล (- SiOH) ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับไซเลน โดยโมเลกุลซัลเฟอร์ในไซเลนจะทำการสร้างพันธะกับสายโซ่ยางที่ตำแหน่งพันธะคู่ ส่วนไม้อัดมีค่าการยึดติดกับยางเท่ากับ 7 เมกะพาสคัล เนื่องจากไม้มีส่วนประกอบของเซลลูโลส ซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซี (-OH) แล้วทำปฏิกิริยากับหมู่ไซเลนอลของ ไซเลน จึงทำให้พื้นไม้อัดมีค่าการยึดเกาะกับยางได้ดีพอๆ กับพื้นปูนซีเมนต์ ค่าการยึดติดกับยางจึงดีกว่าพื้นผิวอิฐมอญ และยางมะตอย ซึ่งมีค่าการยึดติดกับยางเท่ากับ 4.5 และ 2 เมกะพาสคัล ตามลำดับ

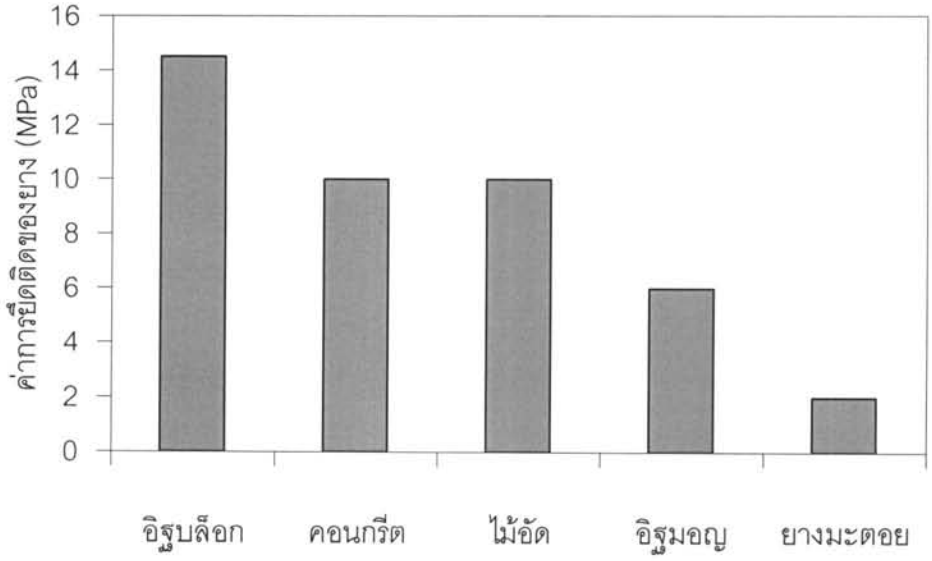
4.7.2 ศึกษาผลของปริมาณโซเดียมซิลิเกต

โซเดียมซิลิเกต หรือกาวแก้วเป็นสารตัวเติม ในการทดลองนี้ได้ทำการเติมโซเดียมซิลิเกตเพื่อช่วยในการยึดติดกับพื้นผิว



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยึดติดของยางกับปริมาณโซเดียมซิลิเกต ที่พื้นผิวต่างๆ โดยปริมาณไซเลน 1 phr ปริมาณซัลเฟอร์ไน TMTD 1.5 phr อุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ 50 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.27 พบว่าปริมาณโซเดียมซิลิเกตจาก 0 เป็น 5 phr ค่าการยึดติดของพื้นผิวต่างๆ มีค่าเท่ากัน เนื่องจากว่าโซเดียมซิลิเกตที่เติมลงไปนั้นเกิดการทำปฏิกิริยาเข้าไปยึดติดกับไซเลนที่มีอยู่ 1 phr ทำให้ค่าการยึดติดของยางกับพื้นผิวต่ำซึ่งมีค่า 1, 2, 3, 3 และ 4 เมกะพาสคัล สำหรับพื้นผิวยางมะตอย อิฐมอญ ไม้อัด คอนกรีต และอิฐบล็อก ตามลำดับ เมื่อปริมาณโซเดียมซิลิเกตเพิ่มขึ้นเป็น 10 phr ค่าการยึดติดของแต่ละพื้นผิวมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและมีค่าสูงที่สุด แต่เมื่อเพิ่มปริมาณโซเดียมซิลิเกตเพิ่มขึ้นอีกเป็น 15 และ 20 phr ค่าการยึดติดมีค่าลดลงตามลำดับ เนื่องจากที่ปริมาณโซเดียมซิลิเกตมากขึ้นทำให้อนุภาคซิลิเกตมีขนาดใหญ่ขึ้นและเกิดการกระจายตัวไม่ดี โดยอนุภาคของซิลิเกตจะเกิดการเกาะกลุ่มกันเอง เป็นสาเหตุให้การยึดติดกับพื้นผิวต่างๆ ไม่ดี



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยึดติดของยางกับพื้นผิวต่างๆ ที่ปริมาณโซเดียมซิลิเกต 10 phr ปริมาณไซเลน 1 phr ปริมาณซัลเฟอร์ใน TMTD 1.5 phr อุณหภูมิในการวัลคาไนซ์ 50 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง

เมื่อทำการเปรียบเทียบพื้นผิวต่างๆ กับค่าการยึดติดของยางที่ปริมาณโซเดียมซิลิเกต 10 phr ซึ่งให้ค่าการยึดติดที่สูงสุด ดังรูปที่ 4.28 พบว่าพื้นอิฐบล็อกมีค่าการยึดติดสูงสุด 14.5 เมกะพาสคัล เนื่องจากว่าที่พื้นผิวของอิฐบล็อกมีลักษณะขรุขระมาก น้ำยางผสมนี้สามารถแทรกลงไปตามช่องว่างของพื้นผิว ทำให้มีพื้นที่ผิวในการสัมผัสกับอนุภาคซิลิเกตได้มาก เป็นสาเหตุให้เกิดการยึดเกาะที่แข็งแรงกว่าพื้นผิวคอนกรีต ไม้อัด อิฐมอญ และยางมะตอย ตามลำดับ โดยให้ค่าการยึดติดกับยางเท่ากับ 10, 10, 6, 2 เมกะพาสคัล ตามลำดับ