

การดูฉบับแก้ไขเพื่อเพลิงบนพื้นผิววางธรรมชาติ



นางสาว ภัทริกา อรัญนารถ

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-17-5417-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ADSORPTION OF GASEOUS FUEL ON NATURAL RUBBER SURFACE

Miss Pattarika Arunyanad



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

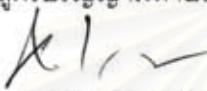
Chulalongkorn University

Academic Year 2005


ISBN 974-17-5417-5


หัวข้อวิทยานิพนธ์ การดูดซับแก๊สเชื้อเพลิงบนพื้นผิวยางธรรมชาติ
โดย นางสาว ภัทริกา อรัญนารถ
สาขาวิชา เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร. เพียรพรรค ทศคร

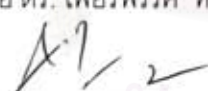
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


..... รักษาราชการแทนคณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิฑิตคานต์)
รองคณบดีฝ่ายบริหาร

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร. เพียรพรรค ทศคร)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิฑิตคานต์)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์)

ภัทริกา อรัญนารต : การดูดซับแก๊สเชื้อเพลิงบนพื้นผิวยางธรรมชาติ (ADSORPTION OF GASEOUS FUEL ON NATURAL RUBBER SURFACE) อ. ที่ปรึกษา : อ.ดร. เพ็ญพรรณ ทศกร, 110 หน้า. ISBN 974-17-5417-5.

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาการดูดซับแก๊สเชื้อเพลิงในยางพารา โดยผลิตยางพาราด้วยเทคนิคการปล่อยให้น้ำแข็งละลายออกจากน้ำยางแช่แข็ง จะเหลือช่องว่างอากาศทิ้งไว้เป็นรูพรุน เดิมโซเดียมซิลิเกตกับอะลูมิเนียมซิลิเกต เกิดเป็นผลึกของแข็งอะลูมิเนียมซิลิเกต เพื่อค้ำจุนรูพรุนนั้น และเติมสารช่วยการดูดซับคือ ไซพาราฟีนสำหรับการดูดซับแก๊สไฮโดรคาร์บอน (แก๊สแอลพีจี และแก๊สมีเทน) และผงคาร์บอนสำหรับการดูดซับแก๊สไฮโดรเจน ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ปริมาณสารช่วยการดูดซับที่ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 phr และอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ -10, 0, 10, 20 และ 30 องศาเซลเซียส

จากการทดลองพบว่า การเพิ่มปริมาณสารช่วยการดูดซับจะสามารถดูดซับแก๊สได้มากขึ้น และถ้าลดอุณหภูมิให้ต่ำจะดูดซับแก๊สได้มากขึ้นเช่นกัน ผลการทดลองที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส ยางที่ผสมไซพาราฟีน 100 phr สามารถดูดซับแก๊สแอลพีจีได้ 6,120 โมลแก๊ส/โมลยาง (1.47×10^{-1} กิโลกรัมแก๊ส/กิโลกรัมยาง) ใช้เวลาดูดซับ 0.23 ชั่วโมง และสามารถดูดซับแก๊สมีเทนได้ 7,055 โมลแก๊ส/โมลยาง (5.64×10^{-2} กิโลกรัมแก๊ส/กิโลกรัมยาง) ใช้เวลาดูดซับ 0.17 ชั่วโมง และยางที่ผสมคาร์บอน 100 phr สามารถดูดซับแก๊สไฮโดรเจนได้ 1,681 โมลแก๊ส/โมลยาง (1.68×10^{-3} กิโลกรัมแก๊ส/กิโลกรัมยาง) ใช้เวลาดูดซับ 0.08 ชั่วโมง จากนั้นศึกษาสมการการดูดซับแก๊สเชื้อเพลิง ได้สมการอยู่ในรูปแบบเบ็องตันโดยปริมาณการดูดซับแก๊สขึ้นอยู่กับปริมาณสารช่วยการดูดซับ อุณหภูมิ และเวลา เมื่อศึกษาการคายพบว่า การเพิ่มปริมาณสารช่วยการดูดซับจะสามารถคายแก๊สได้ช้า และถ้าลดอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับให้ต่ำจะคายแก๊สได้ช้าเช่นกัน

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค.....
สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค.....
ปีการศึกษา.....2548.....

ลายมือชื่อนิสิต.....ภัทริกา อรัญนารต.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....เพ็ญพรรณ ทศกร.....

4672363323 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORD: GAS ADSORPTION / NATURAL RUBBER /

PATTARIKA ARUNYANAD : ADSORPTION OF GASEOUS FUEL ON NATURAL RUBBER SURFACE. THESIS ADVISOR : PROF. PIENPAK TASKORN, Ph.D., 110 pp. ISBN 974-17-5417-5.

The main objective of this research was to study the adsorption of gaseous fuel in porous rubber. The porous rubber was produced by using defrost technique from freezing latex which prepared rubber remain porous. Aluminium silicate crystal formed by reaction between sodium silicate and aluminium sulfate, were acted as stabilizer. This study used the paraffin wax and carbon powder as the enhancement adsorption agent of hydrocarbon gas (LPG and methane) and hydrogen gas, respectively. The amount of enhancement adsorption agent was varied from 0, 20, 40, 60, 80 and 100 phr and the temperature was varied from -10 , 0, 10, 20 and 30 °C

The results represented that adsorbed gas increased with the increasing of enhancement adsorption agent and the decreasing of temperature. The potential porous rubber was prepared by mixing of 100 phr paraffin wax and adsorption was -10 °C. The maximum LPG adsorption was 6,120 mole LPG/mole rubber (1.47×10^{-1} kg LPG/kg rubber) at 0.23 h. duration. For methane, the maximum adsorption was 7,055 mole methane/mole rubber (5.64×10^{-2} kg methane/kg rubber) at 0.17 h. duration. For hydrogen adsorption, the potential porous rubber was mixed with 100 phr carbon. The maximum adsorption was 1,681 mole hydrogen/mole rubber (1.68×10^{-3} kg hydrogen/kg rubber) at 0.08 h. duration. From the study, it was concluded that the adsorption of LPG, methane and hydrogen depended on amount of adsorption agent, temperature and duration time. For the desorption of gaseous fuel, it was found that time of desorbed gas decrease when increasing amount of enhancement adsorption agent and decreasing of adsorbed temperature.

Department.....Chemical Technology.....

Field of study.....Chemical Technology.....

Academic year.....2005.....

Student's signature.....*Pattarika Arunyanad*.....

Advisor's signature.....*P. Taskorn*.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.เพียรพรรค ทศคร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางการทำวิจัย และให้ความเห็นเพื่อปรับปรุงแก้ไขการทำวิจัยให้มีความสมบูรณ์สำเร็จลุล่วงไปด้วยดียิ่ง รวมทั้งศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์ และรองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสุสัทธี กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำ และข้อเสนอแนะต่างๆ

ขอกราบขอบพระคุณ โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านเชื้อเพลิงภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ศูนย์ปิโตรเลียมและเทคโนโลยีปิโตรเคมี รวมถึงทุนบัณฑิตวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนทุนในการทำวิจัยจนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบคุณบุคลากรภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการและให้คำแนะนำต่าง ๆ ขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ นิสิตในภาควิชาเคมีเทคนิค ที่ช่วยเหลือตั้งแต่เริ่มดำเนินการวิจัยและเป็นกำลังใจให้จนกระทั่งทำวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วง

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง และผู้อยู่เบื้องหลังที่ได้ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา ให้ความช่วยเหลือ และให้การสนับสนุนเสมอมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์ และคำย่อ.....	ฏ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.4 ขอบเขตและวิธีดำเนินการวิจัย.....	3
2 วารสารปริทัศน์.....	4
2.1 แนวโน้มการใช้พลังงานโลก.....	4
2.2 แก๊สเชื้อเพลิง.....	4
2.3 การดูดซับ.....	5
2.4 น้ำยางธรรมชาติ.....	13
2.5 น้ำยางข้น.....	18
2.6 การวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติ.....	20
2.7 น้ำยางวัลคาไนซ์.....	21
2.8 สารตัวเติม.....	25
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
2.10 สมมติฐานงานวิจัย.....	29

3	เครื่องมือและวิธีการดำเนินการวิจัย	30
3.1	เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง	30
3.2	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	33
3.3	การดำเนินงานวิจัย	34
3.4	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	38
4	ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	42
4.1	ศึกษาสมบัติกายภาพของแผ่นยาง	42
4.2	ศึกษาการดูดซับ LPG ในยางธรรมชาติ	48
4.3	ศึกษาสูตรผสมน้ำยางชั้น	49
4.4	ผลการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล	50
4.5	ศึกษาผลของตัวแปรที่มีผลต่อการดูดซับ LPG	57
4.6	ศึกษาผลของตัวแปรที่มีผลต่อการดูดซับแก๊สมีเทน	63
4.7	ศึกษาผลของตัวแปรที่มีผลต่อการดูดซับแก๊สไฮโดรเจน	69
4.8	ศึกษาเปรียบเทียบการดูดซับ LPG แก๊สมีเทน และแก๊สไฮโดรเจน	75
4.9	ศึกษาการคายของแก๊สไฮโดรคาร์บอน	80
5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	84
5.1	สรุปผลการทดลอง	84
5.2	ข้อเสนอแนะ	87
	รายการอ้างอิง	88
	ภาคผนวก	90
	ภาคผนวก ก	91
	ภาคผนวก ข	93
	ภาคผนวก ค	99
	ภาคผนวก ง	109
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	110

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 แสดงส่วนประกอบของน้ำยางธรรมชาติ	14
3.1 แสดงวัตถุดิบ และสารเคมี	33
3.2 แสดงสูตรผสมน้ำยางพรีวัลคาไนซ์	35
3.3 แสดงสูตรการเตรียมสารวัลคาไนซ์ให้อยู่ในรูปสารแขวนลอย	35
3.4 แสดงสูตรการเตรียมไซพาราฟินให้อยู่ในรูปอิมัลชัน	36
3.5 แสดงสูตรการเตรียมผงคาร์บอนให้อยู่ในรูปสารแขวนลอย	36
3.6 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษา	37
3.7 ภาวะการทดลองทั้งหมดที่ต้องทำการทดลอง	37
4.1 แสดงค่าความหนาแน่นของยางสูตรต่าง ๆ	43
4.2 ขนาดอนุภาคของผงคาร์บอน	47
4.3 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษา	50
4.4 ผลการทดลองจากภาวะการทดลองเชิงแฟกทอเรียลทอเรียล	50
4.5 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปร สำหรับปริมาณการดูดซับ	52
4.6 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปร สำหรับอัตราการดูดซับเริ่มต้น	52
4.7 อัตราการดูดซับเริ่มต้นที่เวลา 1 นาที ปริมาณการดูดซับ และเวลาที่ใช้ในการดูดซับ LPG ของยางธรรมชาติผสมอะลูมิเนียมซิลิเกตที่ปริมาณไซพาราฟิน 0 - 100 phr ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส	58
4.8 อัตราการดูดซับเริ่มต้นที่เวลา 1 นาที ปริมาณการดูดซับ และเวลาที่เข้าสู่สมดุลการดูดซับ LPG ของยางธรรมชาติผสมอะลูมิเนียมซิลิเกตและปริมาณไซพาราฟิน 100 phr ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	61
4.9 อัตราการดูดซับเริ่มต้นที่เวลา 1 นาที ปริมาณการดูดซับ และเวลาที่ใช้ในการดูดซับแก๊ส มีเทนของยางธรรมชาติผสมอะลูมิเนียมซิลิเกตที่ปริมาณไซพาราฟิน 0 - 100 phr ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส	64
4.10 อัตราการดูดซับเริ่มต้นที่เวลา 1 นาที ปริมาณการดูดซับ และเวลาที่เข้าสู่สมดุลการดูดซับ แก๊สมีเทนของยางธรรมชาติผสมอะลูมิเนียมซิลิเกตและปริมาณไซพาราฟิน 100 phr ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	67

ตาราง	หน้า
4.11 อัตราการดูดซับเริ่มต้นที่เวลา 1 นาที ปริมาณการดูดซับ และเวลาที่ใช้ในการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนของยางธรรมชาติที่ปริมาณคาร์บอน 20 - 100 phr ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส	70
4.12 อัตราการดูดซับเริ่มต้นที่เวลา 1 นาที ปริมาณการดูดซับ และเวลาที่เข้าสู่สมดุลการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนของยางธรรมชาติผสมคาร์บอนปริมาณ 100 phr ที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	73
ก. สมบัติของน้ำยางธรรมชาติเข้มข้นชนิดแอมโมเนียต่ำ.....	91
ข.1 แสดงการคำนวณค่าความหนาแน่นของยางสูตรต่าง ๆ.....	94
ข.2 แสดงตัวอย่างการคำนวณปริมาณการดูดซับ LPG ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส ปริมาณไซพาราฟิน 100 phr.....	96
ข.3 แสดงตัวอย่างการคำนวณค่า k ของการดูดซับ LPG ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส ปริมาณไซพาราฟิน 100 phr.....	98
ค.1 แสดงค่าความดันที่เวลาต่าง ๆ ของการดูดซับแก๊ส LPG ในยางที่ผสมไซพาราฟินปริมาณ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 phr ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส	99
ค.2 แสดงค่าความดันที่เวลาต่าง ๆ ของการดูดซับแก๊ส LPG ในยางที่ผสมไซพาราฟินปริมาณ 100 phr ที่อุณหภูมิ -10, 0, 10, 20 และ 30 องศาเซลเซียส	101
ค.3 แสดงค่าความดันที่เวลาต่าง ๆ ของการดูดซับแก๊สมีเทนในยางที่ผสมไซพาราฟินปริมาณ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 phr ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส	103
ค.4 แสดงค่าความดันที่เวลาต่าง ๆ ของการดูดซับแก๊สมีเทนในยางที่ผสมไซพาราฟินปริมาณ 100 phr ที่อุณหภูมิ -10, 0, 10, 20 และ 30 องศาเซลเซียส	105
ค.5 แสดงค่าความดันที่เวลาต่าง ๆ ของการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนในยางที่ผสมคาร์บอนปริมาณ 20, 40, 60, 80 และ 100 phr ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส	107
ค.6 แสดงค่าความดันที่เวลาต่าง ๆ ของการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนในยางที่ผสมไซพาราฟินปริมาณ 100 phr ที่อุณหภูมิ -10, 0, 10, 20 และ 30 องศาเซลเซียส.....	108

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
1.1 รูปแบบการเก็บแก๊สเชื้อเพลิงในยางธรรมชาติ.....	2
2.1 ลักษณะเส้นสมดุผลการดูดซับ 5 แบบ.....	8
2.2 อนุภาคยางธรรมชาติ	15
2.3 ภาพหน้าตัดตามยาวของเครื่องหมุนเหวี่ยงน้ำยางขึ้น	19
2.4 การเชื่อมขวางโมเลกุลของยางด้วยกำมะถัน.....	20
3.1 แม่แบบ (Mould).....	31
3.2 เครื่องปฏิกรณ์	31
3.3 แผนผังชุดอุปกรณ์การทดลองดูดซับแก๊สเชื้อเพลิง	32
3.4 ชุดอุปกรณ์การทดลองดูดซับแก๊สเชื้อเพลิง	32
3.5 ขั้นตอนการผสมน้ำยางผสมไซพาราฟิน.....	38
3.6 ขั้นตอนการผสมน้ำยางผสมคาร์บอน	39
3.7 แสดงขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างฟิล์มยางพูน	40
4.1 แสดงลักษณะพื้นผิวภายในของ NR.....	44
4.2 แสดงลักษณะพื้นผิวภายในของ NR(vul).....	44
4.3 แสดงลักษณะพื้นผิวภายในของ NR(vul) + AISi	44
4.4 แสดงลักษณะพื้นผิวภายในของ NR(vul) + AISi + wax 10 phr	45
4.5 แสดงลักษณะพื้นผิวภายในของ NR(vul) + AISi + wax 100 phr	45
4.6 แสดงลักษณะพื้นผิวภายในด้านบนของ NR(vul) + carbon 100 phr	45
4.7 แสดงลักษณะพื้นผิวภายในด้านล่างของ NR(vul) + carbon 100 phr	45
4.8 กราฟแสดงขนาดอนุภาคของผงคาร์บอน.....	47
4.9 การดูดซับ LPG ในยางธรรมชาติ	48
4.10 การดูดซับ LPG ของยางธรรมชาติ ยางผสมอะลูมิเนียมซิลิเกต และยางผสมอะลูมิเนียมซิลิเกตกับไซพาราฟิน 50 phr.....	49
4.11 Normal probability plot กับค่า Effect estimate ของปริมาณการดูดซับ	51
4.12 Normal probability plot กับค่า Effect estimate ของอัตราการดูดซับ	51
4.13 ผลการคำนวณปริมาณการดูดซับ ก) กราฟความน่าจะเป็นของส่วนตกค้าง ข) กราฟระหว่างส่วนตกค้างกับค่าการทำนาย	54

ภาพประกอบ	หน้า
4.14 ผลการคำนวณอัตราการดูดซับเริ่มต้น ก) กราฟความน่าจะเป็นของส่วนตกค้าง ข) กราฟระหว่างส่วนตกค้างกับค่าการทํานาย	54
4.15 กราฟแสดงถึงปัจจัยระดับสูงต่ำที่มีผลต่อปริมาณการดูดซับ ก) ปริมาณไซพาราฟิน ข) อุณหภูมิ	55
4.16 กราฟแสดงถึงปัจจัยระดับสูงต่ำที่มีผลต่ออัตราการดูดซับเริ่มต้น ก) ปริมาณไซพาราฟิน ข) อุณหภูมิ	55
4.17 กราฟแสดงถึงปัจจัยระดับสูงต่ำของปริมาณไซพาราฟิน และอุณหภูมิ ที่มีผลต่อปริมาณการดูดซับ	56
4.18 กราฟแสดงถึงปัจจัยระดับสูงต่ำของปริมาณไซพาราฟิน และอุณหภูมิ ที่มีผลต่ออัตราการดูดซับเริ่มต้น	56
4.19 ปริมาณการดูดซับ LPG กับเวลา ที่ปริมาณไซพาราฟิน 0-100 phr	57
4.20 แสดงค่า k ของ LPG ที่ปริมาณไซพาราฟิน 0-100 phr	59
4.21 ปริมาณการดูดซับ LPG กับเวลา ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	60
4.22 กราฟแสดงค่า $\ln(k')$ กับ $1/T$ ของ LPG	62
4.23 ปริมาณการดูดซับแก๊สมีเทนกับเวลา ที่ปริมาณปริมาณไซพาราฟิน 0-100 phr	63
4.24 แสดงค่า k ของแก๊สมีเทน ที่ปริมาณไซพาราฟิน 0-100 phr.....	65
4.25 ปริมาณการดูดซับแก๊สมีเทนกับเวลา ที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	66
4.26 กราฟแสดงค่า $\ln(k')$ กับ $1/T$ ของแก๊สมีเทน.....	68
4.27 ปริมาณการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนกับเวลา ที่ปริมาณคาร์บอน 20-100 phr	69
4.28 แสดงค่า k ของแก๊สไฮโดรเจน ที่ปริมาณคาร์บอน 20-100 phr	71
4.29 ปริมาณการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนกับเวลา ที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	72
4.30 กราฟแสดงค่า $\ln(k')$ กับ $1/T$ ของแก๊สไฮโดรเจน.....	74
4.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $C_{As,R} / k$ กับ t_R ของ LPG	75
4.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $C_{As,R} / k$ กับ t_R ของแก๊สมีเทน	76
4.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $C_{As,R} / k$ กับ t_R ของแก๊สไฮโดรเจน	77
4.34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(1 - (C_{As,R}/k'))$ กับ t_R ของแก๊สไฮโดรเจน.....	78
4.35 กราฟเปรียบเทียบการดูดซับของ LPG มีเทน และไฮโดรเจน.....	79
4.36 การคายของ LPG ที่ปริมาณไซพาราฟิน 0 – 10 phr.....	80
4.37 การคาย LPG ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	81

ภาพประกอบ	หน้า
4.38 การคายของแก๊สมีเทน ที่ปริมาณไฮพาราฟิน 0 – 10 phr	82
4.39 การคายแก๊สมีเทน ที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	82
ง.1 ยางธรรมชาติผสมไฮพาราฟิน.....	109
ง.2 ยางธรรมชาติผสมผงคาร์บอน	109



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำอธิบายสัญลักษณ์ และคำย่อ

สัญลักษณ์

C_{As}	=	ความเข้มข้นของแก๊สในยางพรม
$C_{As,E}$	=	ค่าความเข้มข้นของแก๊สในยางพรมที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 2 %
$C_{As,R}$	=	ค่าความเข้มข้นของแก๊สในยางพรมที่ลดลง = $C_{As} / C_{As,E}$
C_{Ag}	=	ความเข้มข้นของแก๊สภายนอกยางในเครื่องปฏิกรณ์
C_{A0}	=	ความเข้มข้นของแก๊สในยางพรมเริ่มต้น
L	=	ความหนาของแผ่นยางพรม
R	=	รัศมีของแผ่นยางพรมวงนอก
r	=	รัศมีของแผ่นยางพรมวงใน
k	=	ค่าคงที่ของการดูดซับแก๊ส
k'	=	ค่าคงที่ของการดูดซับแก๊สที่ขึ้นกับอุณหภูมิ
k_0	=	ค่าคงที่ของการดูดซับแก๊สที่ขึ้นกับปริมาณสารช่วยการดูดซับ
t	=	เวลา
t_E	=	เวลาที่ความเข้มข้นของแก๊สในยางพรมที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 2 %
t_R	=	เวลาที่ลดลง = t / t_E
β	=	โมลของแก๊สเชื้อเพลิง
ϕ	=	ปริมาณสารช่วยในการดูดซับ
P	=	ความดัน
V	=	ปริมาตรของแก๊ส
n	=	จำนวนโมลของแก๊ส
R	=	ค่าคงที่ของแก๊ส
T	=	อุณหภูมิ
a, b, c, d	=	ค่าคงที่ ที่ได้จากการทดลอง

คำย่อ

NR	=	ยางธรรมชาติ
NR + AISi	=	ยางธรรมชาติผสมอะลูมิเนียมซิลิเกต
NR + AISi + wax(10)	=	ยางธรรมชาติผสมอะลูมิเนียมซิลิเกต และไขพาราฟิน 10 phr
NR + carbon(10)	=	ยางธรรมชาติผสมคาร์บอน 10 phr

* โดยค่าในวงเล็บแสดงปริมาณของสารในหน่วย phr เช่น wax(10) คือปริมาณไขพาราฟิน 10 phr



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

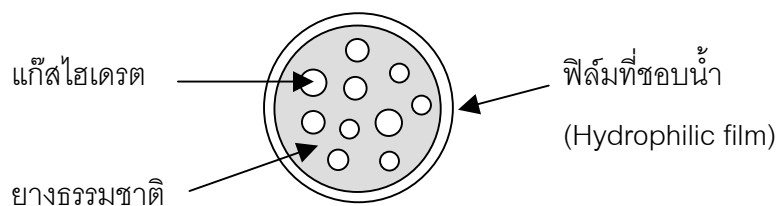
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

การขนส่งแก๊สเชื้อเพลิงจะขนส่งทางท่อในรูปแบบแก๊สภายใต้ความดันสูง โดยท่อที่ใช้ต้องทนความดันสูงและไม่สามารถขนส่งในระยะทางที่ไกลได้ ปัจจุบันมีการขนส่งแก๊สเชื้อเพลิงในรูปแบบของเหลว โดยการทำให้แก๊สให้เย็นลง จะได้ของเหลวที่เรียกว่า Liquefied Natural Gas (LNG) และบรรจุใส่ถังที่ทนความดัน ซึ่งอาจขนส่งทางเรือไปที่ไกล ๆ ได้ เมื่อไปถึงปลายทางก่อนใช้ก็จะทำกลับให้เป็นแก๊สใหม่ ดังนั้นค่าใช้จ่ายในการเก็บและขนส่งจึงสูง และต้องมีความระมัดระวังเป็นอย่างมาก เพราะถ้ารั่วจะเกิดอันตรายได้

ปัจจุบันได้ค้นพบเทคนิคการเก็บแก๊สธรรมชาติรูปแบบใหม่ในรูปแบบของแข็ง เรียกว่าไฮเดรต (Hydrate) ซึ่งแก๊สธรรมชาติไฮเดรต (Natural Gas Hydrate, HNG) เกิดจากแก๊สธรรมชาติถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลน้ำที่เป็นผลึก โมเลกุลน้ำส่วนใหญ่เชื่อมกันด้วยพันธะไฮโดรเจน มีรูปร่างคล้ายก้อนน้ำแข็ง มีเสถียรภาพมากที่อุณหภูมิต่ำ ความดันบรรยากาศ โดยมีการพบมีเทนไฮเดรตจำนวนมากในภาคตะวันตกเฉียงเหนือของประเทศแคนาดา และในส่วนของมหาสมุทรและพื้นผิวบริเวณทวีปอาร์ติก ด้วยเหตุนี้จึงมีผู้วิจัยทำการศึกษากาการเกิดและการสลายตัวของมีเทนไฮเดรตเพื่อหาทางนำแก๊สมีเทนจากธรรมชาตินี้มาใช้ และเป็นเทคนิคใหม่ในการเก็บแก๊ส เพราะการเก็บแก๊สเชื้อเพลิงในรูปแบบไฮเดรต จะสามารถเก็บแก๊สได้มากตามที่ต้องการ และเก็บภายใต้อุณหภูมิต่ำประมาณ -10 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศ โดยแก๊สจะไม่สลายตัวออกมา ซึ่งมีความปลอดภัย และประหยัดค่าใช้จ่ายในด้านการควบคุมความดัน มากกว่าการเก็บและขนส่งแบบเดิม และเมื่อต้องการนำแก๊สออกมาใช้ ก็ทำการสลายไฮเดรตโดยการเพิ่มอุณหภูมิให้น้ำแข็งละลายหรือไม่ก็เพิ่มความดัน [1,2,3]

ด้วยเทคนิคการเก็บแก๊สเชื้อเพลิงในรูปแบบไฮเดรต จึงขอเสนอแนวความคิดใหม่ เป็นการเก็บแก๊สเชื้อเพลิงไฮเดรตภายในยางธรรมชาติ เพื่อช่วยให้การขนส่งให้สะดวกยิ่งขึ้น แนวความคิดที่ว่านี้ คือการดูดซับแก๊สเชื้อเพลิงไฮเดรตภายในยางที่มีพื้นที่ผิวมาก (มีความพรุนสูง) และหุ้มยางที่ดูดซับแก๊สแล้วด้วยฟิล์มยางที่มีลักษณะชอบน้ำ (Hydrophilic Film) เพื่อป้องกันการสลายตัวของแก๊สไฮเดรต และขนส่งโดยบรรจุในภาชนะที่รักษาความเย็น แนวความคิดนี้มีลักษณะดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 รูปแบบการเก็บแก๊สเชื้อเพลิงในยางธรรมชาติ

แนวความคิดใหม่นี้จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อ ยางธรรมชาติต้องสามารถดูดซับแก๊สเชื้อเพลิงที่มีสภาพเป็นแก๊สได้เสียก่อน จากนั้นจึงเติมน้ำ และลดอุณหภูมิ เพื่อให้แก๊สอยู่ในสภาพเป็นของแข็งไฮโดรเจน แล้วจึงหุ้มด้วยฟิล์มยางที่ชอบน้ำ โดยในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการดูดซับแก๊สเชื้อเพลิงภายในพื้นผิวยางธรรมชาติ

เนื่องจากยางธรรมชาติมีองค์ประกอบหลักเป็นไฮโดรคาร์บอน ดังนั้นจึงสามารถดูดซับไฮโดรคาร์บอนได้ดี เช่น น้ำมัน ซึ่งมีผู้ศึกษามาแล้ว อย่างไรก็ตามการดูดซับสารไฮโดรคาร์บอนที่มีสภาพเป็นแก๊สในภาวะปกติรวมทั้งไฮโดรเจนยังไม่มีการศึกษา ดังนั้นหากสามารถใช้อยางธรรมชาติดูดซับแก๊สดังกล่าวได้มาก ก็สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการเก็บแก๊สเชื้อเพลิงต่อไปได้

มีการศึกษาการเก็บแก๊สไฮโดรเจนในคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นท่อขนาดนาโน (Carbon nanotube) ในช่วง 10 ปีที่ผ่านมาโดยสามารถเก็บไฮโดรเจนได้ตั้งแต่ 0.1 wt% - 67 wt% โดย Baker และคณะ [4] ศึกษาการเก็บไฮโดรเจนได้ปริมาณสูงสุดถึง 67 wt% ใน carbon nanofibers ที่ภาวะ 110 atm อุณหภูมิห้อง และ Ye และคณะ [5] พบว่าการดูดซับไฮโดรเจนในผลึก carbon single-walled nanotube (SWNT) ได้มากกว่า 8 wt% ที่ 40 บาร์ อุณหภูมิคงที่ 80 องศาเซลเซียส ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงผสมผงคาร์บอนในยางเพื่อช่วยในการดูดซับแก๊สไฮโดรเจน

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาการดูดซับแก๊สหุงต้ม (LPG) แก๊สมีเทน และแก๊สไฮโดรเจน ซึ่งต้องอาศัยพื้นที่ผิวของแข็งมาก ฉะนั้นจะใช้อยางธรรมชาติในรูปแบบแผ่นดูดซับแก๊ส โดยทำให้มีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น นั่นคือสร้างรูพรุนในเนื้อยาง โดยใช้วิธีการแยกน้ำออกจากอนุภาคน้ำยางในสภาพแช่แข็ง จะทิ้งช่องว่างเป็นรูพรุนอยู่ทั่วไป คือจะทำการเติมสารในน้ำยางขึ้นเพื่อให้กระจายตัวอยู่ในอนุภาคน้ำยาง แล้วนำไปแช่เยือกแข็ง และนำมาตั้งทิ้งไว้หรือนำไปอบเพื่อให้ไอน้ำและสารที่เติมเข้าไปให้ระเหยออก จึงจะได้แผ่นยางที่มีรูพรุน และศึกษาปริมาณการดูดซับแก๊สดูว่าสารใดเติมแล้วทำให้ยางมีความพรุนสูง และดูดซับแก๊สได้ดี แล้วทำการศึกษาสมการการดูดซับต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาปริมาณการดูดซับแก๊สเชื้อเพลิงในยางธรรมชาติ
- 1.2.2 ศึกษาอิทธิพลของพื้นผิวต่ออัตราการดูดซับ โดยการทำให้ยางพูน

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.3.1 ได้วิธีเตรียมยางธรรมชาติให้มีความพูนสูง และมีพื้นที่ผิวมาก
- 1.3.2 มีวิธีใหม่ในการเก็บแก๊สเชื้อเพลิง

1.4 ขอบเขตและวิธีดำเนินงานวิจัย

- 1.4.1 ค้นคว้าทฤษฎี และงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.2 ออกแบบการทดลอง จัดเตรียมอุปกรณ์ และสารเคมี
- 1.4.3 ศึกษาสูตรน้ำยางที่ใช้ในการผลิตแผ่นยางพูน
- 1.4.4 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับแก๊สเชื้อเพลิงในแผ่นยางพูน ซึ่งได้แก่
 - ปริมาณสารช่วยในการดูดซับ (ไซพาราฟิน และผงคาร์บอน)
 - อุณหภูมิในการดูดซับ
- 1.4.5 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของแผ่นยางพูน ได้แก่
 - ความหนาแน่น
 - ลักษณะความพูน
- 1.4.6 หาสมการความสัมพันธ์ของการดูดซับแก๊สเชื้อเพลิง
- 1.4.7 วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผลการทดลอง และเขียนวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 แนวโน้มการใช้พลังงานโลก

150 ปีที่ผ่านมา มนุษย์ได้มีการปรับเปลี่ยนการใช้เชื้อเพลิงมาตลอด โดยเริ่มแรกเชื้อเพลิงจะประกอบด้วยไม้และฟางเป็นส่วนใหญ่ สัดส่วนของสิ่งเหล่านี้ก็ลดลงเมื่อมีการใช้ถ่านหินแทน และหลังจากการพบน้ำมันปิโตรเลียมและแก๊สธรรมชาติ การใช้เชื้อเพลิงแข็งก็ลดลง ในปัจจุบันเชื้อเพลิงเหลวหรือน้ำมันเป็นเชื้อเพลิงที่แพร่หลายที่สุด คาดกันว่าในอนาคตแก๊สธรรมชาติและเชื้อเพลิงที่เป็นแก๊สจะถูกนำมาใช้มากขึ้นทุกที แทนที่น้ำมันและถ่านหิน แต่แก๊สธรรมชาติก็ยังมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบอยู่ เมื่อเผาไหม้ก็ให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา ถ้าจะไม่ให้คาร์บอนอยู่ในเชื้อเพลิงเลยก็ต้องใช้ไฮโดรเจน ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่สะอาดที่สุด ไม่ให้ไอเสีย เผาแล้วได้น้ำออกมา ดังนั้นแก๊สธรรมชาติ และแก๊สไฮโดรเจน จึงเป็นเชื้อเพลิงที่ในอนาคตอันใกล้ต้องใช้กันมากขึ้น

2.2 แก๊สเชื้อเพลิง (Fuel gas) [6]

แก๊สเชื้อเพลิง คือ ผลิตภัณฑ์จากปิโตรเลียม ประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนที่มีภาวะเป็นแก๊สที่อุณหภูมิห้องภายใต้ความดัน 1 บรรยากาศ อันได้แก่ มีเทน อีเทน โพรเพน และบิวเทน แม้ว่าแก๊สเหล่านี้จะผลิตได้ในโรงกลั่นจากกระบวนการต่าง ๆ แต่ส่วนใหญ่จะได้มาจากโรงแยกแก๊สธรรมชาติ

2.2.1 แก๊สธรรมชาติ (Natural Gas) ได้แก่ แก๊สที่ผลิตได้จากแหล่งแก๊สใต้พื้นพิภพโดยตรง (Non-Associated Gas) และแก๊สที่ติดมากับน้ำมันดิบจากหลุมน้ำมันดิบ (Associated Gas) ส่วนผสมจึงขึ้นอยู่กับแหล่งผลิต องค์ประกอบส่วนใหญ่จะเป็น “แก๊สมีเทน” และมีไฮโดรคาร์บอนเบา ๆ ตัวอื่น ๆ ติดมาด้วยเช่น อีเทน โพรเพน บิวเทน และเพนเทน ฯลฯ ไฮโดรคาร์บอนที่ติดมาเหล่านี้รวม ๆ เรียกว่า Natural Gas Liquid (NGL) เพราะอาจแยกออกมาในรูปของเหลวในโรงแยกแก๊ส และไปใช้เป็นสารป้อนโรงงานปิโตรเคมีหรือนำมากลั่นต่อได้เป็น อีเทน โพรเพน และบิวเทนกับ LPG อาจยอมให้มีอีเทน และโพรเพนติดอยู่ในแก๊สธรรมชาติได้บ้าง แต่ตัวอื่นที่หนักกว่าต้องแยกออกเพื่อป้องกันปัญหาในการใช้และการขนส่ง นอกจากนี้ยังอาจมี แก๊สไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ น้ำ และอื่น ๆ ติดมากับแก๊สธรรมชาติซึ่งถ้ามีมากเกินไปก็

ต้องกำจัดออกก่อนส่งไปขาย แก๊สธรรมชาติจะถูกขนส่งตามท่อในรูปของแก๊สภายใต้ความดันสูง จึงไม่เหมาะสำหรับการส่งไกล ๆ ปัจจุบันมีการส่งแก๊สธรรมชาติในรูปของเหลวโดยการทำแก๊สให้เย็นลงถึง -160 องศาเซลเซียส จะได้ของเหลวที่เรียกว่า Liquefied Natural Gas (LNG) ซึ่งอาจขนส่งทางเรือไปที่ไกล ๆ ได้ เมื่อไปถึงปลายทางก่อนใช้ก็จะทำกลับให้เป็นแก๊สใหม่ ในบางประเทศได้นำแก๊สธรรมชาติไปขับเคลื่อนเครื่องยนต์แทนน้ำมัน ในการนี้ต้องอัดแก๊สใส่ถังภายใต้ความดันสูงเพื่อนำติดไปกับรถซึ่งเราเรียกว่า Compressed Natural Gas (CNG) การใช้ CNG ได้การเผาไหม้ที่สะอาดเป็นการลดมลพิษในอากาศ ข้อเสียคือถังแก๊สต้องทนความดันสูงจึงหนัก จุได้ไม่มากนัก จึงวิ่งไปได้ไม่ไกล สถานีเติมแก๊สก็แพง

2.2.2 แก๊สหุงต้ม หรือ แก๊สปิโตรเลียมเหลว Liquefied Petroleum Gas (LPG) เป็นชื่อทั่วไปสำหรับใช้กับโพรเพน บิวเทน และของผสมของแก๊สทั้งสองนี้เป็นแก๊สเหลวภายใต้ความดัน แก๊สหุงต้มประกอบด้วยโพรเพน และบิวเทนผสมกันอยู่ในอัตราส่วนที่พอเหมาะ ผลิตได้จากการกลั่นแยกแก๊สธรรมชาติในโรงแยกแก๊สหรือผลิตจากกระบวนการกลั่นน้ำมันในโรงกลั่น ส่วนผสมระหว่างโพรเพนกับบิวเทน แตกต่างกันไปแล้วแต่การผลิต ซึ่งจะมีผลให้ค่าความดันไอต่าง ๆ กันออกไป LPG ส่วนใหญ่จะใช้ทั้งในครัวเรือน และในอุตสาหกรรม โดยบรรจุเป็นของเหลวใส่ถังที่ทนความดันเพื่อขนถ่ายง่าย การเปลี่ยนจากแก๊สมาเป็นของเหลวทำให้ปริมาตรลดลงอย่างมาก (240 เท่าสำหรับบิวเทน และ 270 เท่าสำหรับโพรเพน) ถึงจึงบรรจุแก๊สเหลวไว้ได้มากใช้ได้นานพอสมควร นอกจากนี้ยังนิยมใช้แทนน้ำมันเบนซินในรถยนต์เพราะราคาถูก มีค่าออกเทนสูงไม่มีสารตะกั่วจึงทำให้การเผาไหม้สะอาด

2.3 การดูดซับ (Adsorption) [6, 7]

การดูดซับ (Adsorption) คือ กระบวนการที่โมเลกุลของแก๊สไปเกาะติดบนพื้นผิวของของแข็ง และปลดปล่อยพลังงานออกมา สารที่ไปเกาะติดบนพื้นผิวหน้าเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนสารที่ตัวถูกดูดซับไปเกาะเรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent) ซึ่งการเกาะติดบนพื้นผิวดังกล่าวสามารถจำแนกได้ เป็นการเกาะติดด้วยแรงกายภาพ หรือด้วยพันธะเคมี ขึ้นอยู่กับสมบัติของแก๊สที่ถูกดูดซับ และสมบัติของพื้นผิวตัวดูดซับ แรงกายภาพได้แก่แรงดึงดูดระหว่างมวลหรือระหว่างโมเลกุล และแรงดึงดูดระหว่างขั้วสำหรับกรณีที่มีโมเลกุลแก๊สที่ถูกดูดซับและพื้นผิวตัวดูดซับมีความเป็นขั้ว โดยทั่วไปการดูดซับด้วยแรงทางกายภาพเรียกว่า “การดูดซับเชิงกายภาพ (physisorption)” ซึ่งความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่ออุณหภูมิของระบบเพิ่มขึ้น ในกรณีที่การดูดซับเนื่องจากพันธะเคมี ซึ่งเป็นการใช้ไอเล็กตรอนร่วมกันเรียกว่า “การดูดซับเชิงเคมี

(chemisorption)” อย่างไรก็ตามการดูดซับแก๊สเชื้อเพลิงโดยยางธรรมชาติไม่เกิดปฏิกิริยาเคมี จึงพิจารณาให้เป็นเพียงการดูดซับเชิงกายภาพเท่านั้น

การดูดซับแก๊ส มักอธิบายกันในรูปของพลังงานพื้นผิว (Surface Energy) ต่อหน่วยพื้นที่ของของแข็ง โดยปกติอะตอมและโมเลกุลของของแข็งจะยึดกันอยู่ด้วยแรงทางกายภาพอย่างเหนียวแน่นด้วยพันธะทางเคมี Valence (Chemical) Bond และแรง Van Der Waals โมเลกุลภายในของของแข็งแต่ละตัวจะถูกดึงดูดจากโมเลกุลอื่นที่อยู่รอบๆ จึงเกิดการสมดุล แต่โมเลกุลที่ผิวของของแข็งจะไม่สมดุลเนื่องจากมีโมเลกุลอยู่ไม่รอบ จึงเหลือแรงลัพธ์ ซึ่งเป็นแรงดึงดูดโมเลกุลสารอื่นที่เข้ามาใกล้ แรงดังกล่าวทำให้เกิดพลังงานที่ผิวของโมเลกุลเรียกว่า Surface Energy เมื่อ Surface Energy ของของแข็งมีค่าสูงกว่าพลังงานจลน์ของโมเลกุลของแก๊สที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นผิวของของแข็งนั้นๆ โมเลกุลของแก๊สจึงถูกดูดซับไว้ที่ผิวของของแข็ง ตัวอย่างการดูดซับที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ เช่น เสื้อผ้าที่ดูดโมเลกุลของควีนนบุรี ทำให้เสื้อผ้ามักกลิ่นบุรีเป็นต้น

2.3.1 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ (Kinetics Adsorption)

ลักษณะการดูดซับ หรือการส่งถ่ายมวลสารที่อยู่ภายในแก๊สไปยังพื้นผิวของของแข็งมีหลายขั้นตอน คือ

1. การถ่ายโอนมวลสารของสารที่ถูกดูดซับ จากบริเวณหนึ่งสู่บริเวณรอบนอกที่ใกล้กับพื้นผิวของสารดูดซับ (External Diffusion)
2. การถ่ายโอนมวลของสารที่ถูกดูดซับจากรอบนอกที่ใกล้กับพื้นผิวของสารดูดซับ เข้าสู่พื้นผิวภายในรูพรุน (Pore) ของสารดูดซับ (Internal Diffusion)
3. การดูดซับ คือ การที่โมเลกุลที่อยู่ภายในรูพรุนถูกดูดซับจากแก๊สไปยังวัฏภาคของแข็ง ซึ่งเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อเทียบกับสองขั้นตอนที่ผ่านมา ดังนั้น จึงสมมติว่า ภาวะสมดุลเกิดขึ้นระหว่าง วัฏภาคทั้งสองนี้

สมบัติที่สำคัญของตัวดูดซับ ได้แก่ ความพรุน เพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสภายใน นอกจากนี้สมบัติอื่น ๆ ของรูพรุนเช่น โครงสร้าง การจัดเรียงตัว ขนาด และความสม่ำเสมอล้วนมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ

2.3.2 ปัจจัยที่มีผลกับความสามารถในการดูดซับแก๊ส มีดังต่อไปนี้

1. ตัวดูดซับ : ชนิด ลักษณะทางกายภาพและทางเคมี เช่น พื้นที่ผิวสัมผัส ขนาดรูพรุน องค์ประกอบทางเคมี
2. ตัวถูกดูดซับ : ชนิด ลักษณะทางกายภาพและทางเคมี เช่น ขนาดของโมเลกุล ความมีขั้วของโมเลกุล องค์ประกอบทางเคมี
3. ความดันหรือความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับ
4. ความเข้มข้นและสมบัติของแก๊สปนเปื้อนรอบๆ ตัวดูดซับ
5. ประสิทธิภาพของการดูดซับที่ต้องการ (Removal Efficiency Required)
6. อุณหภูมิ และความชื้นของอากาศที่มีแก๊สปนเปื้อนเจือปนอยู่
7. เวลาที่อยู่ในระบบ

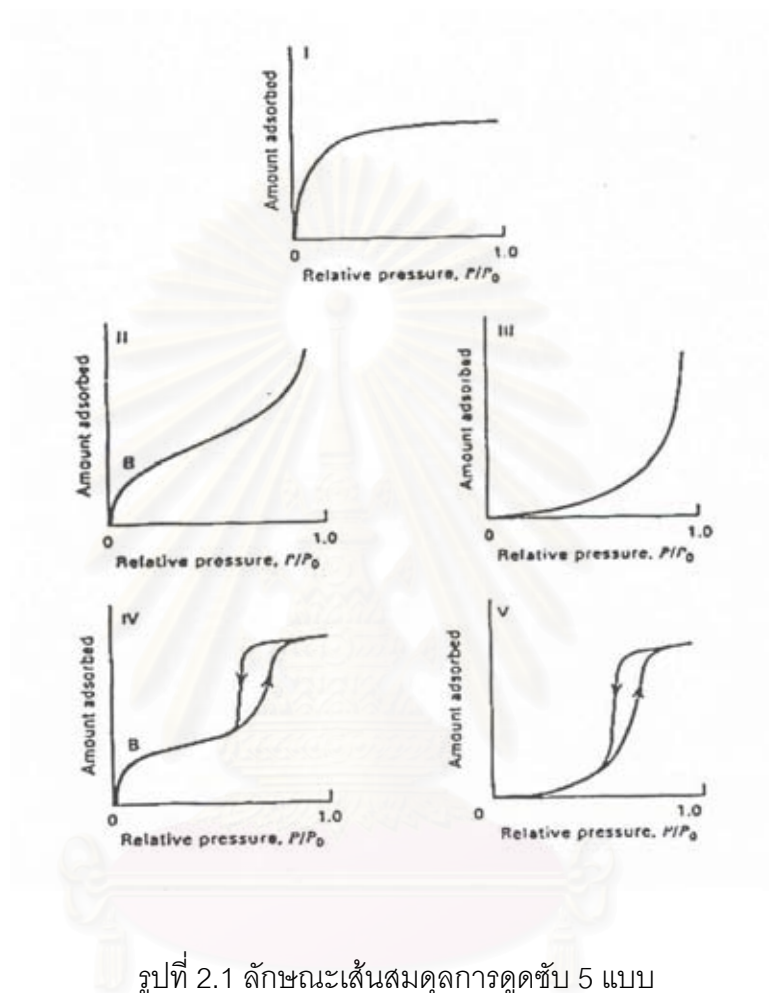
ปัจจัยต่างๆ ที่กล่าวมานั้นสามารถควบคุมได้ ยกเว้นอุณหภูมิ และความชื้น เพราะอากาศแต่ละวันจะมีค่าอุณหภูมิ และความชื้นแตกต่างกันไป

การดูดซับแก๊สที่ดีจะอยู่ในภาวะอุณหภูมิต่ำ และความชื้นต่ำ เนื่องจากอุณหภูมิต่ำจะทำให้พลังงานจลน์ (Kinetic energy) ของตัวถูกดูดซับ และพลังงานที่จะใช้ในกระบวนการดูดซับจะต่ำลง และเมื่อความชื้นต่ำจะมีน้ำในอากาศที่จะเกาะตัวดูดซับน้อยลง ปริมาณน้ำที่เกาะตัวดูดซับทำให้พื้นที่สัมผัสแก๊สน้อยลง

2.3.3 สมดุลของการดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ นอกจากจะขึ้นอยู่กับสมบัติของตัวดูดซับเอง เช่น จำนวนช่องว่าง หรือผิวที่ใช้ในการดูดซับแล้ว ยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และความดันที่ใช้ในการดูดซับ ซึ่งสภาพของสมดุลหาได้จากการทดลอง โดยนิยามที่จะนำมาแสดงในลักษณะของ ไอโซเทอม (Isotherm) โดยเป็นเส้นแสดงปริมาณการดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ แต่ความดันเปลี่ยนไป การดูดซับจะทำได้มากขึ้นถ้าความดันสูง และจะลดลงเมื่อความดันต่ำลง ข้อมูลอีกประเภทหนึ่งคือ ไอโซบาร์ (Isobar) ซึ่งจะแสดงปริมาณการดูดซับเมื่อความดันคงที่ แต่อุณหภูมิเปลี่ยนไป การดูดซับทำได้มากเมื่ออุณหภูมิต่ำ และจะน้อยเมื่ออุณหภูมิสูง

สมดุผลการดูดซับแก๊สแต่ละชนิด ณ อุณหภูมิต่าง ๆ มักถูกเลือกใช้เป็นเกณฑ์ข้อหนึ่ง สำหรับการเลือกชนิดตัวดูดซับที่สามารถดูดซับแก๊สได้ในอัตราที่ใกล้เคียงกัน ลักษณะสมดุผลการดูดซับแก๊สจึงแบ่งออกเป็น 5 แบบดังแสดงในรูปที่ 2.1



2.3.4 การวัดสมดุผลการดูดซับ [8]

ภายใต้ภาวะสมดุลของระบบการดูดซับ ปริมาณของสารถูกดูดซับที่ถูกดูดซับไว้ จะสมดุลกับปริมาณสารถูกดูดซับนั้นที่อยู่ในวัฏภาคแก๊ส ซึ่งสามารถวัดได้โดยตรงด้วยวิธีเชิงปริมาตร (Volumetric Method) หรือวิธีชั่งน้ำหนัก (Gravimetric Method) หรืออาจวัดได้โดยทางอ้อมด้วยวิธีโครมาโทกราฟี (Chromatography) ซึ่งเหมาะสำหรับสารถูกดูดซับที่มีความเข้มข้นต่ำ หรือด้วยวิธีเชิงไดนามิก เรียกว่า วิธีไหลผ่านทะลุ (Breakthrough Method)

1. วิธีเชิงปริมาตร (Volumetric Method)

การวัดสมมูลการดูดซับ สามารถทำได้โดยการป้อนสารถูกดูดซับเข้าสู่ระบบการดูดซับที่เป็นระบบปิด ซึ่งทราบปริมาตรที่แน่นอน และสามารถควบคุมอุณหภูมิของระบบได้ โดยระบบมีภาวะเริ่มต้นใกล้เคียง ๆ สูญญากาศสัมบูรณ์ และบรรจุตัวดูดซับสำหรับวัดสมมูล ซึ่งผ่านการคืนสภาพแล้ว (Regenerate) ปริมาณการดูดซับสามารถคำนวณได้จากผลต่างของปริมาณแก๊สที่ถูกดูดซับที่ป้อนเข้า และเหลืออยู่ในระบบหลังการดูดซับเข้าสู่สมมูล ซึ่งพิจารณาได้จาก ความดัน ปริมาตร และอุณหภูมิของระบบ

2. วิธีชั่งน้ำหนัก (Gravimetric Method)

การวัดสมมูลการดูดซับ ทำได้เช่นเดียวกับวิธีเชิงปริมาตร แตกต่างกันที่ ปริมาณการดูดซับสามารถวัดได้โดยการชั่งน้ำหนักตัวดูดซับที่เปลี่ยนไป ณ ภาวะสมดุลในระบบปิด ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ ภายใต้ภาวะเริ่มต้นที่ใกล้เคียง ๆ สูญญากาศสัมบูรณ์ โดยเครื่องชั่งที่ใช้มีความแม่นยำสูง

3. วิธีโครมาโทกราฟี (Chromatography)

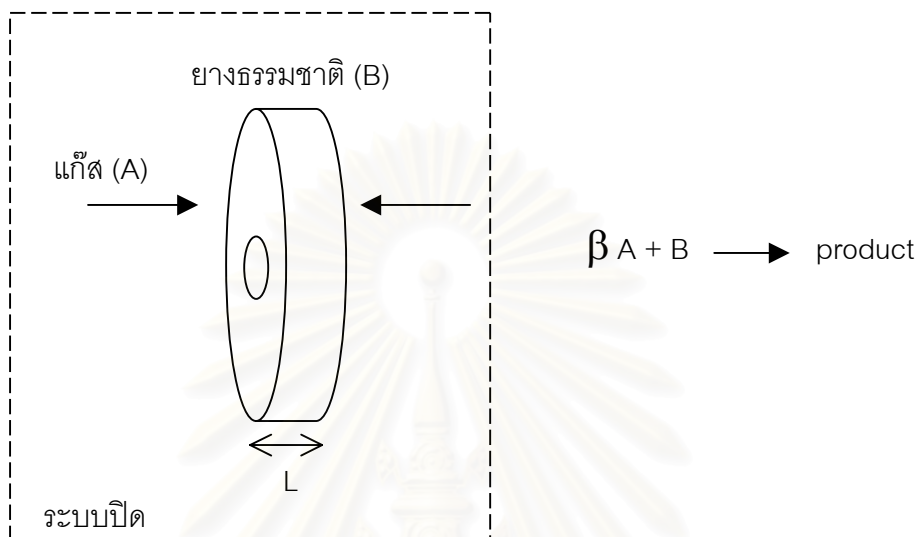
ณ ภาวะความดันปกติ แก๊สถูกดูดซับปริมาณเพียงเล็กน้อย ถูกป้อนเข้าสู่หลอดดูดซับที่มีแก๊สพาไหลผ่านในช่วงเวลาสั้น ๆ (Pulse Injection) ซึ่งโครมาโทแกรมที่ได้จากการป้อนแก๊สถูกดูดซับเข้าสู่หลอดดูดซับ สามารถนำมาวิเคราะห์เวลาเฉลี่ยของตัวถูกดูดซับในหลอดดูดซับแบบถ่วงน้ำหนัก เพื่อคำนวณหาค่าคงที่สมมูลการดูดซับ ซึ่งสอดคล้องกับไอโซเทิร์มเชิงเส้น

4. วิธีไหลผ่านทะลุ (Breakthrough Method)

ข้อมูลสมมูลการดูดซับ สามารถวัดได้โดยอาศัยเทคนิคการไหลผ่านทะลุหลอดดูดซับของแก๊สถูกดูดซับความเข้มข้นต่าง ๆ ภายใต้ภาวะอุณหภูมิที่กำหนด ณ ภาวะความดันคงที่ ซึ่งแก๊สถูกดูดซับจะถูกป้อนแบบต่อเนื่องเข้าผสมกับแก๊สพา เพื่อให้ได้ความเข้มข้นที่กำหนด ก่อนไหลผ่านหลอดดูดซับที่บรรจุตัวดูดซับไว้ ข้อมูลของสมมูล สามารถแสดงได้ด้วยเส้นโค้งไหลผ่านทะลุ โดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ กับเวลา ณ ตำแหน่งทางออกของหลอดดูดซับ

2.3.5 การหาสมการความสัมพันธ์ของการดูดซับแก๊สเชื้อเพลิง

จากความเข้มข้นของแก๊สที่อยู่รอบ ๆ แผ่นยางธรรมชาติ (C_{Ag}) จะถูกดูดซับเข้าไปในยางธรรมชาติ ทำให้ความเข้มข้นของแก๊สในยางธรรมชาติ (C_{As}) เพิ่มขึ้น สามารถถดถอยได้ด้วยดังนี้



จลนพลศาสตร์ (Kinetics)

สมมติให้การดูดซับเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (First order) และแผ่นยางธรรมชาติไม่เกิดการขยายตัว เขียนอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์ดังนี้

อัตราการดูดซับแก๊สเข้าไปในยาง (dN_{As}/dt) ต่อพื้นที่ผิวยาง (s) เท่ากับอัตราการลดลงของความเข้มข้นแก๊สที่อยู่รอบ ๆ แผ่นยาง ($k C_{Ag}$)

$$\frac{1}{s} \frac{dN_{As}}{dt} = -k C_{Ag} \quad (2.1)$$

จากโมลแก๊ส $N_{As} = V \cdot (C_{As}) = \pi (R^2 - r^2) L \cdot (\beta C_{As})$

$$\frac{1}{2\pi (R^2 - r^2)} \pi (R^2 - r^2) L \frac{\beta dC_{As}}{dt} = -k C_{Ag}$$

$$\frac{\beta L}{2} \frac{dC_{As}}{dt} = -k C_{Ag}$$

รวมค่าคงที่ทั้งหมดในค่าคงที่การดูดซับ (k)

$$\frac{d C_{As}}{dt} = -k C_{Ag}$$

อินทิกรัล

$$\int dC_{As} = -k \int_0^t C_{Ag} dt$$

$$(C_{As} - C_{A0}) = -k \int_0^t C_{Ag} dt$$

เมื่อเวลาเริ่มต้น ($t = 0$) ความเข้มข้นของแก๊สในยางเท่ากับศูนย์ ($C_{A0} = 0$) และเครื่องหมายลบรวมอยู่ในค่าอินทิกรัล C_{Ag} ดังนั้น

$$C_{As} = k \int_0^t C_{Ag} dt \quad (2.2)$$

ค่าคงที่การดูดซับ (k) ขึ้นอยู่กับปัจจัยที่ทำการศึกษานในงานวิจัยนี้ โดยปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ อุณหภูมิในการดูดซับ (T) ปริมาณสารช่วยการดูดซับ (ϕ) และเวลา (t)

ค่า k ที่ขึ้นกับอุณหภูมิในการดูดซับ (T) เขียนอยู่ในรูป k' สมมติให้เป็นสมการอาร์เรเนียส ดังนี้

$$k' = f_1(T) \quad k' = k_0 e^{c/T} \quad (2.3)$$

$$\ln(k') = \ln(k_0) + c/T \quad (2.4)$$

ดังนั้นค่าคงที่ c ที่ได้จากการทดลอง หาจากการเขียนกราฟระหว่าง $\ln(k')$ กับ $(1/T)$ โดยค่า c ได้จากความชันของกราฟ และ k_0 เป็นค่าคงที่ในการดูดซับที่ขึ้นกับปริมาณสารช่วยการดูดซับ

ค่า k ที่ขึ้นกับปริมาณสารช่วยการดูดซับ (ϕ) เขียนอยู่ในรูป k_0 สมมติให้เป็นสมการเชิงเส้น ดังนี้

$$k_0 = f_2(\phi) \quad k_0 = a + b\phi \quad (2.5)$$

ดังนั้นค่าคงที่ a และ b ที่ได้จากการทดลอง หากจากการเขียนกราฟระหว่าง k_0 กับ ϕ โดยค่า a ได้จากจุดตัดแกน y และค่า b ได้จากความชันของกราฟ

ดังนั้นค่า k ที่ขึ้นกับปริมาณสารช่วยการดูดซับ (ϕ) และอุณหภูมิ (T) เขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} k' &= f_2(\phi) * f_1(T) \\ k' &= (a + b \phi) (e^{c/T}) \end{aligned} \quad (2.6)$$

เมื่อแทนค่า k ในสมการ 2.2 จะได้

$$C_{As} = (a + b \phi) e^{c/T} \int_0^t C_{Ag} dt \quad (2.7)$$

ค่า C_{As} ขึ้นกับเวลา โดยจากสมการ (2.2)

$$C_{As} / k' = \int_0^t C_{Ag} dt \quad (2.8)$$

การหาความสัมพันธ์ของ C_{As} / k' กับเวลา (t) จะหาความสัมพันธ์ในรูป $C_{As,R}$ กับ t_R เพื่อให้ค่าอยู่ในขอบเขตระหว่าง 0 ถึง 1

$$\begin{aligned} \frac{C_{As,R}}{t_R} &= \frac{C_{As}}{t} \\ &= \frac{C_{As}}{C_{As,E}} \\ &= \frac{t}{t_E} \end{aligned}$$

โดย t_E คือเวลาที่ปริมาณการดูดซับมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ของการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดตั้งแต่เริ่มต้น และ $C_{As,R}$ คือปริมาณการดูดซับที่เวลา t_E

ค่า $C_{As,R}$ ที่ขึ้นกับเวลา (t_R) สมมติให้เป็นสมการเอ็กซ์โพเนนเชียล โดยมีขอบเขต 0 - 1 ดังนั้นสมการจะอยู่ในรูป

$$C_{As,R} / k' = 1 - e^{-dt_R} \quad (2.9)$$

$$1 - (C_{As,R} / k') = e^{-dt_R}$$

$$\ln (1 - (C_{As,R} / k')) = -dt_R \quad (2.10)$$

ดังนั้นค่าคงที่ d ที่ได้จากการทดลอง หากจากการเขียนกราฟระหว่าง $\ln (1 - (C_{As,R} / k'))$ กับ t_R โดยค่า c ได้จากความชันของกราฟ

จากสมการ (2.8) จะได้ความสัมพันธ์ $C_{As,R}$ ที่ขึ้นกับเวลา (t_R) ดังนี้

$$C_{As,R} = k' (1 - e^{-kt_R}) \quad (2.11)$$

และเมื่อแทนค่า k' จากสมการ (2.6) ในสมการ (2.10) สุดท้ายสมการการดูดซับที่ได้จะอยู่ในรูป สมการเอมพิริคัล

เอมพิริคัล (Empirical Formula)

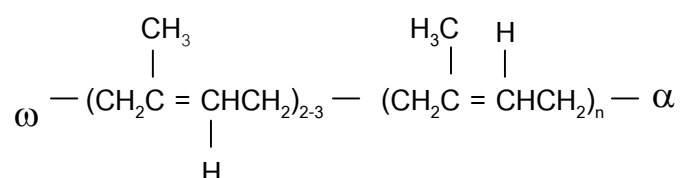
$$C_{As,R} = (a + b \phi) e^{c/T} (1 - e^{-kt_R}) \quad (2.12)$$

2.4 น้ำยางธรรมชาติ (Natural Rubber Latex) [9,10]

น้ำยางธรรมชาติ ได้มาจากต้นยางพารา ซึ่งมีชื่อเรียกทางพฤกษศาสตร์ว่า “*Hevea brasiliensis*” มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวเหมือนน้ำมัน มีกลิ่นหอมเล็กน้อย เรียกว่า น้ำยางสด (Rubber Latex) สภาพเป็นคอลลอยด์ ประกอบด้วยอนุภาคยางเล็ก ๆ แขนงลอยอยู่ในน้ำ ในลักษณะอิมัลชัน (Emulsion)

2.4.1 องค์ประกอบทางเคมีของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติ เป็นสารประกอบจำพวกไฮโดรคาร์บอน ในกลุ่มพอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ประกอบด้วยหน่วยย่อยชนิดเดียวที่ซ้ำ ๆ กันเป็นจำนวนมาก มีสมบัติที่สำคัญคือความยืดหยุ่น โครงสร้างทางเคมีของหน่วยย่อยของยางธรรมชาติประกอบด้วยคาร์บอน 5 อะตอม และไฮโดรเจน 8 อะตอม คือ C_5H_8 มีชื่อทางเคมีว่าไอโซพรีน (isoprene) หน่วยย่อยดังกล่าวเมื่อเกิดการเชื่อมโยงเป็นโมเลกุลจะเรียงตัวกันในแบบ Cis-configuration เรียกชื่อโมเลกุลยางว่า cis-1,4-polyisoprene โดยจะแสดงโครงสร้างดังนี้



โดย ω และ α เป็นหมู่ฟังก์ชันที่ปลายโมเลกุล ที่สมมติฐานว่าเป็นโปรตีนและกรดไขมันตามลำดับ

2.4.2 สมบัติ และส่วนประกอบของน้ำยางธรรมชาติ

น้ำยางธรรมชาติ มีเนื้อยางแห้งอยู่ระหว่างร้อยละ 25 - 40 มีความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 0.975 - 0.980 กรัมต่อมิลลิลิตร มีความเป็นกรด-เบส (pH) ประมาณ 6.5 - 7.0 มีความหนืดน้ำยางประมาณ 12 - 15 เซนติพอยส์ (น้ำบริสุทธิ์มีความหนืด 1 เซนติพอยส์) แต่จะมีค่าไม่แน่นอนขึ้นกับส่วนประกอบในน้ำยาง นอกจากนั้นยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น ๆ อีกเช่น พันธุ์ยาง อนุภาคยาง อายุยาง และฤดูกาลกรีดยาง เป็นต้น มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 2,000,000 โดยปกติอนุภาคยางจะแขวนลอยอยู่ในตัวกลางที่เป็นน้ำ อาจเรียกตัวกลางที่เป็นน้ำว่า ซีรัม (Serum) อนุภาคเหล่านี้มีประจุลบผลักกันอยู่ตลอดเวลาจึงทำให้สามารถแขวนลอย และคงสภาพเป็นยางเหลวอยู่ได้นานจนกว่าจะมีภาวะแวดล้อม และปัจจัยต่าง ๆ มารบกวนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง

เนื้อยางแห้งในน้ำยาง (Dry rubber content, DRC) มีอยู่ประมาณร้อยละ 20 - 45 โดยน้ำหนัก ประกอบด้วยสารรับเบอร์ไฮโดรคาร์บอน (Rubber Hydrocarbon) ประมาณร้อยละ 92 ที่เหลือเป็นสารอื่นที่ไม่ใช่ยางปนอยู่ ได้แก่ โปรตีน ไกลโคไซด์ ไขมัน เกลือแร่ และเอนไซม์ สารที่ไม่ใช่ยางเหล่านี้แม้มีเพียงเล็กน้อย จะมีผลต่อการวัลคาไนซ์ และสมบัติของยางเป็นอย่างมาก ส่วนประกอบของน้ำยางธรรมชาติแสดงดังตารางที่ 2.1

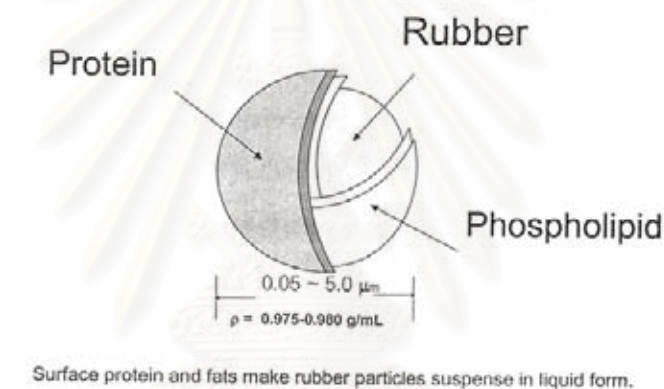
ตารางที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบของน้ำยางธรรมชาติ [9]

ส่วนประกอบ	เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก)
ของแข็งทั้งหมด (Total Solid Content, TSC)	36
เนื้อยางแห้ง (Dry Rubber Content, DRC)	33
สารพวกโปรตีน	1 - 1.5
เถ้า	สูงถึง 1
น้ำตาล	1
น้ำในปริมาณที่รวมกับสารอื่น ๆ แล้วเป็น	100

เมื่อพิจารณาจากส่วนประกอบของน้ำยาง อาจแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ

(1) ส่วนที่เป็นเนื้อยาง (Dry Rubber Content, DRC)

เนื้อยางเป็นอนุภาคยางที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ อนุภาคของเนื้อยางมีทั้งรูปทรงกลมและรูปทรงรีคล้ายลูกแพร์ ขนาดอนุภาคแตกต่างกันมาก คือ อยู่ระหว่าง $0.01 \mu\text{m}$ จนถึง $1 \mu\text{m}$ ($10^0 - 10,000 \text{ \AA}$) มีประจุสุทธิเป็นประจุลบ ถูกห่อหุ้มด้วยชั้นของสารจำพวกไขมันและสารจำพวกโปรตีนดังรูปที่ 2.2 นอกจากสารดังกล่าวแล้วยังมีโลหะบางชนิดเช่น แมกนีเซียม โปแตสเซียมและทองแดง ปนอยู่ในส่วนของยางประมาณ 0.05% น้ำยางมีลักษณะก้ำกึ่งระหว่างสารที่ชอบน้ำ (hydrophilic) และสารที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) แต่ลักษณะที่ไม่ชอบน้ำจะเด่นกว่า



รูปที่ 2.2 อนุภาคยางธรรมชาติ

(2) ส่วนที่ไม่ใช่ยาง (Non Rubber Content, NRC)

ก. น้ำ หรือซีรัม (Serum) ของน้ำยาง มีความหนาแน่นประมาณ 1.02 กรัมต่อมิลลิลิตร ประกอบด้วยสารต่าง ๆ ดังนี้ คาร์โบไฮเดรต โปรตีนและกรดอะมิโน

ข. ลูทอยด์ และอนุภาคเพรย์-วิสลิง

2.4.3 การเก็บรักษาสภาพน้ำยาง [11]

น้ำยางสดที่ได้หลังการกรีดจากต้นยาง จะคงสภาพความเป็นน้ำยางอยู่ได้ช่วงเวลาหนึ่งไม่เกิน 6 ชั่วโมง ต่อจากนั้นน้ำยางจะเริ่มจับตัวเป็นเม็ดเล็ก ๆ คล้ายเม็ดพริก แล้วค่อย ๆ หนืดขึ้น อนุภาคยางจะเริ่มจับตัวเป็นก้อนใหญ่ขึ้น จนกระทั่งน้ำยางเกิดการสูญเสียสภาพ โดยน้ำยางจะถูกแยกออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นเนื้อยาง และส่วนที่เป็นซีรัม ในเวลาต่อมาน้ำยางจะเริ่มเกิดการบูดเน่า และมีกลิ่นเหม็น

2.4.3.1 ปัจจัยที่มีผลต่อความคงสถานะของน้ำยาง

1. โปรตีน ส่วนหนึ่งของโปรตีนจะดูดซับอยู่รอบผิวของอนุภาคยาง หรือฟอรั่มชั้นห่อหุ้ม (Hydrated Protein Envelope) อนุภาคยางไว้ ชั้นห่อหุ้มนี้มีความสำคัญต่อสถานะความคงตัวของเหลวของน้ำยาง เพราะชั้นโปรตีนนี้จะป้องกันไม่ให้แต่ละอนุภาคยางรวมตัวกัน อื่นเมื่อมีการสูญเสียน้ำ (Dehydrated) ในชั้นโปรตีนที่ห่อหุ้มอนุภาคยางอยู่ซึ่งอาจเกิดขึ้นโดยการเติมแอลกอฮอล์ หรือสารบางอย่างลงในน้ำยาง น้ำยางจะสูญเสียความคงตัว และเกิดการรวมของอนุภาคยางจับตัวเป็นก้อนโคแอกกูลัม (Coagulum)

2. ประจุไฟฟ้าลบบรรอบ ๆ อนุภาคยาง ซึ่งก่อให้เกิดแรงผลักระหว่างอนุภาคช่วยรักษาสถานะการกระจายของอนุภาคยาง (Dispersion) ทำให้น้ำยางเป็นของเหลวอยู่ได้ ถ้าหากเกิดผลกระทบที่ทำให้ประจุไฟฟ้าลบบดลง อนุภาคยางก็จะรวมตัวกันทำให้มีอนุภาคยางใหญ่ขึ้น การเคลื่อนย้ายการกระจายของอนุภาคก็ค่อย ๆ ลดลงจนในที่สุดจะเกิดเป็นก้อนโคแอกกูลัมในทางตรงกันข้ามถ้าประจุลบที่อนุภาคยางเพิ่มขึ้น ความเสถียรของน้ำยางก็จะเพิ่มขึ้น

2.4.3.2 สาเหตุที่ทำให้น้ำยางเกิดการเสถียรภาพ มี 2 สาเหตุใหญ่ ๆ คือ

1. ผลทางกายภาพ ซึ่งเนื่องมาจาก

(1) สภาพอากาศ

- ความเย็น ปกติความเย็นจะไม่มีผลต่อเสถียรภาพของน้ำยางจนกระทั่งถึงจุดเยือกแข็งของน้ำ เช่น ในกรณีอากาศเย็นมาก ๆ (สาเหตุนี้ในเมืองไทยไม่มี) อย่างในเขตอบอุ่น เมื่อน้ำยางถูกเก็บไว้ในอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำจะทำให้น้ำจับตัวเป็นน้ำแข็ง

แยกตัวออกจากอนุภาคของยาง ทำให้อนุภาคยางถูกผลักดันให้รวมตัวกระจายอยู่ในปริมาณของน้ำที่น้อยลงจะทำให้การกระทบกันของอนุภาคยางมีมากขึ้นเป็นผลให้ยางรวมตัวเป็นก้อนได้

- ความร้อน ความร้อนทำให้คุณสมบัติของยางสูงขึ้นซึ่งคุณสมบัติของยางสูงขึ้นไม่เป็นผลต่อเสถียรภาพของน้ำยาง จนกระทั่งถึงจุดเดือดของน้ำ หรือในกรณีที่มีสารพวก Non-ionic stabilizer ซึ่งเมื่ออุณหภูมิถึงจุด cloud point จะทำให้น้ำยางเสียเสถียรภาพได้

(2) ผลจากการกระทบกันทางกล การเกิดแรงเฉือน (Shear stress) รวมทั้งการปั่นป่วน เป็นผลทำให้เกิดการกระทบกันของอนุภาคยาง เมื่อบ่อย ๆ เข้าจะทำให้แรงในการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นในอนุภาคยางเรื่อย ๆ จนทำให้เกิดเสียเสถียรภาพขึ้น

(3) การระเหยของน้ำ การระเหยน้ำออกไม่ได้เป็นผลทำให้อนุภาคยางเสียเสถียรภาพโดยตรง แต่การระเหยน้ำออกมากจนทำให้อนุภาคยางถูกอัดอยู่ในน้ำที่มีปริมาณน้อย ระยะห่างระหว่างอนุภาคของยางมีน้อยมากจนทำให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคยางขึ้น แยกแผ่นหรือชั้นของยางออกจากน้ำ

(4) อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าหรือประจุไฟฟ้าจากขั้วไฟฟ้า เนื่องจากอนุภาคยางมีประจุลบอยู่รอบตัวของมัน ถ้าเอาขั้วบวกเข้าไปใส่น้ำยาง อนุภาคยางจะวิ่งเข้าไปหาขั้วไฟฟ้าบวก ถ่ายประจุให้แล้วตัวเองเป็นกลางทำให้เกิดการรวมตัวของน้ำยางขึ้น

2. สาเหตุจากสารเคมี สารเคมีที่ทำให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคยางแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดใหญ่ ๆ คือ

(1) สารเคมีที่ทำให้น้ำยางจับตัวอย่างรวดเร็ว ซึ่งเกิดจากสารเคมีทำปฏิกิริยาโดยตรงกับอเล็กตรอนที่อยู่รอบ ๆ อนุภาคยาง ได้แก่ กรดแก่ และอนุมูลอิสระ

(2) สารเคมีที่ทำให้น้ำยางจับตัวเมื่อถูกความร้อน

(3) สารเคมีที่ทำให้น้ำยางจับตัวอย่างช้า ๆ ได้แก่ เกลือของกรดไฮโดรฟลูออโรไซลิกแอซิด เกลือของกรดฟลูออโรอื่น ๆ และสารอื่นๆ ที่เกิดปฏิกิริยาช้า ๆ ได้

2.5 น้ำยางข้น (Concentrated Latex) [10]

น้ำยางข้น หมายถึง น้ำยางที่ผ่านการไล่น้ำออกไปบางส่วน เพื่อให้มีเนื้อยางแห้งเพิ่มเป็นร้อยละ 60 ของน้ำหนักยางทั้งหมด ปัจจุบันความต้องการน้ำยางข้นเพิ่มมากขึ้น จึงได้ปรับปรุงวิธีการผลิตน้ำยางข้นให้มีสมบัติที่ดีขึ้น ผลิตภัณฑ์ซึ่งใช้น้ำยางข้นเป็นวัตถุดิบได้แก่ ผลิตภัณฑ์แบบจุ่ม (Dipping) แบบหล่อ (Casting) แบบพ่น (Spraying) แบบใช้แม่แบบ (Molding) และแบบทา (Spreading) เป็นต้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากน้ำยางข้นได้แก่ ตุ๊กตาที่กรวง กาว สีทา ถูมือ ลูกโป่ง ยางฟองน้ำ (Latex Foam Rubber) และที่นอน เป็นต้น ดังนั้นการปรับปรุงสมบัติของน้ำยางจึงมีความสำคัญมาก

2.5.1 การผลิตน้ำยางข้น

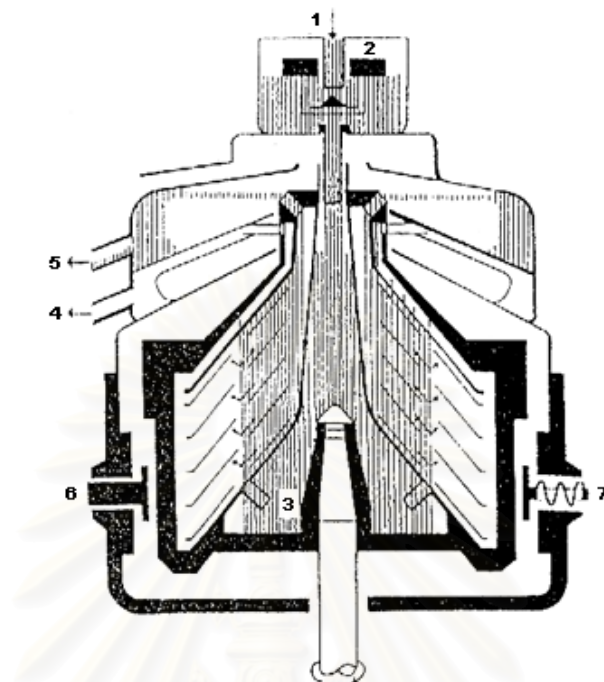
วิธีการผลิตน้ำยางข้นในเชิงการค้ามี 3 วิธีคือ วิธีการระเหยน้ำ วิธีทำให้เกิดครีม วิธีการหมუნเหวียง และอีกวิธีหนึ่ง ซึ่งไม่สามารถทำเป็นการค้าได้เพราะไม่สะดวก และลงทุนสูง คือการใช้กระแสไฟฟ้าแยก สำหรับในประเทศไทยปัจจุบันผลิตน้ำยางข้นโดยวิธีการปั่นเพียงอย่างเดียว จะขอกกล่าวเพียงวิธีการเดียว ซึ่งเป็นวิธีในการผลิตน้ำยางข้นสำหรับใช้ในการทดลองนี้ คือวิธีการปั่น

วิธีการหมუნเหวียง เนื่องจากน้ำยางธรรมชาติเป็นสารละลายที่จัดอยู่ในระบบคอลลอยด์ ที่ประกอบด้วยส่วนของอนุภาคยาง แขนงลอยกระจัดกระจายอยู่ในซีรัม อนุภาคยางเหล่านี้เคลื่อนไหวแบบไร้ทิศทาง (Brownian movement) และเนื่องจากอนุภาคยางมีความหนาแน่นน้อยกว่าซีรัม ดังนั้นอนุภาคยางจึงมีแนวโน้มที่จะลอยตัวสู่มิวน้ำของน้ำยาง อัตราการเคลื่อนของอนุภาคยางขึ้นอยู่กับแรงดึงดูดของโลก ซึ่งสามารถเพิ่มแรงดึงดูดได้เป็น 2000 ถึง 3000 เท่าของแรงดึงดูดของโลก จึงสามารถเร่งการเคลื่อนที่ของอนุภาคยางได้ จากหลักการนี้จึงถูกนำมาพิจารณาสร้างเครื่องหมუნเหวียงน้ำยางเพื่อการผลิตน้ำยางข้น

เครื่องผลิตน้ำยางข้น รูปที่ 2.3 แสดงถึงลักษณะหน้าตัดภายในของถังหมუნเหวียงแบบ Alfa-Laval

น้ำยางจะไหลเข้าทาง (1) ซึ่งอยู่ส่วนบนสุดของตัวเครื่อง ระดับของน้ำยางจะปรับให้คงที่โดย (2) น้ำยางไหลโดยแรงโน้มถ่วง ไปที่จุดกลางของถังหมუნเหวียง และแรงหมუნเหวียงของเครื่องจะหมუნเหวียงให้น้ำยางไหลไปตามรูของชุดจานแยก (3) จากนั้นน้ำยางจะถูกแยกออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่มีน้ำหนัก (heavy phase) คือหางน้ำยาง (skim) ไหลออกสู่รอบนอกของถังปั่นและ

ไปตามทางด้านบนของถังผ่านสกรู ปรับสู่ที่เก็บแยกหาน้ำยาง (4) ส่วนของน้ำยาง ซึ่งเป็นส่วนที่มีเนื้อยางจะไหลเข้าสู่กลางถังปั่นไปยังด้านบนถึงเข้าสู่ที่เก็บ (5)



รูปที่ 2.3 ภาพหน้าตัดตามยาวของเครื่องหมუნเหยียงน้ำยางชั้น

ปกติน้ำยางชั้นที่ได้จากเครื่องหมუნเหยียงจะมีความเข้มข้นประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง เครื่องหมუნเหยียงน้ำยางขนาดเล็กสามารถแยกน้ำยางสดได้ประมาณ 15 ลิตร/ชั่วโมง และเครื่องขนาดใหญ่แยกน้ำยางสดได้ 400 - 600 ลิตร/ชั่วโมง และปกติการเดินเครื่องหมუნเหยียงจะสามารถเดินติดต่อกันได้อย่างมากครั้งละไม่เกิน 3 ชั่วโมง เพราะต้องหยุดเครื่องเพื่อทำความสะอาดล้างพวกตม (Sludge) ที่ติดอยู่ในเครื่อง

2.5.2 การรักษาสภาพน้ำยางชั้น

น้ำยางชั้นที่ผลิตได้ต้องเติม หรือปรับแอมโมเนียรักษาสภาพน้ำยาง ปกติมี 2 วิธี

1. รักษาด้วยปริมาณแอมโมเนียมาก ประมาณ 0.7 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักยาง เรียกน้ำยางชนิดนี้ว่า HA (high ammonia)
2. รักษาด้วยปริมาณแอมโมเนียต่ำ ประมาณ 0.2 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักยาง และมีสารบางชนิด TMTD/ZnO ในอัตราส่วน 0.025% หรือ ZDEC 0.01% จะเรียกน้ำยางชนิดนี้ว่า LA (Low ammonia)

2.6 การวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติ [10]

“วัลคาไนเซชัน” คือ กระบวนการเปลี่ยนแปลงซึ่งมีสภาพไม่คงตัวให้เป็นยางที่มีสภาพคงตัว โดยใช้ “สารวัลคาไนซ์” (vulcanizing agent) ในการทำให้เกิดการเชื่อมขวาง (crosslink) ระหว่างโมเลกุลของยาง ตรงตำแหน่งที่มีความว่องไวต่อปฏิกิริยา สารวัลคาไนซ์ที่สำคัญของยางธรรมชาติ คือ กำมะถัน ลักษณะการเชื่อมขวางโมเลกุลของยาง ด้วยพันธะเคมีระหว่าง C – S หรือ C – S – C ก็ได้ขึ้นอยู่กับสารเคมีที่ใช้ และอาจจะเชื่อมโยงกันระหว่างโมเลกุล หรือภายในโมเลกุลเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การเชื่อมขวางโมเลกุลของยางด้วยกำมะถัน

กระบวนการวัลคาไนเซชันที่ใช้กำมะถันและความร้อนเท่านั้น ปฏิกิริยาจะเกิดช้ามาก ต้องใช้เวลาหลายชั่วโมง ยิ่งไปกว่านั้นยังต้องใช้กำมะถันเป็นจำนวนมากเกินความจำเป็น ซึ่งส่วนใหญ่จะสูญเปล่าไปโดยกำมะถันจะมาเชื่อมต่อกันเองเป็นสายยาว หรือออกมาในรูปของกำมะถันเสรี (Free sulphur) อยู่ในเนื้อยาง หรือซึมมาอยู่บนผิวของผลิตภัณฑ์ ดังนั้น เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาเหล่านี้จึงต้องใช้ “สารเร่งวัลคาไนซ์” (accelerator) ร่วมกับสารวัลคาไนซ์ เพื่อลดเวลาที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ (ทำให้อัตราเร็วของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น) นอกจากนี้ยังลดอุณหภูมิที่ใช้ลง รวมทั้งใช้กำมะถันน้อยลง ทำให้ลดการซึมของกำมะถันบนผิวของผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ ยังต้องเติม “สารกระตุ้นวัลคาไนซ์” (activator) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสารเร่งวัลคาไนซ์อีกด้วย

การเชื่อมขวางของโมเลกุลจะทำให้โมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้น ดังนั้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้ภายหลังการวัลคาไนซ์จะมีสมบัติเปลี่ยนไป เช่น ไม่หลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อน และไม่แข็งตัวเมื่อได้รับความเย็น ความสามารถในหารละลายลดลง อาจมีการบวมตัว (Swell) เท่านั้น ความทนแรงดึง (Tensile strength) ความแข็งแรง (Hardness) ความต้านทานการขัดถู (Abrasion resistance) ความต้านทานการสึกกร่อน (Wear resistance) และการหักงอที่อุณหภูมิต่ำ ๆ (Low temperature Flexibility) เพิ่มขึ้น แก๊สซึมผ่านยางได้น้อยลง และช่วงอุณหภูมิการใช้งานกว้างขึ้น

2.7 น้ำยางวัลคาไนซ์ (Prevulcanized Latex) [12]

น้ำยางคงรูป หรือ น้ำยางวัลคาไนซ์ หรือ น้ำยางพรีวัลคาไนซ์ หมายถึง น้ำยางที่โมเลกุลยางได้เกิดพันธะเชื่อมขวาง (Chemical crosslink) อันเนื่องมาจากการให้ความร้อนกับน้ำยางที่ได้ผสมสารเคมีที่จำเป็นแล้ว

น้ำยางผสมสารเคมี (Compounded latex) หมายถึง น้ำยางที่ได้ผสมสารเคมีต่าง ๆ แล้ว และส่วนใหญ่จะใช้สารเคมีช่วยเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ (Accelerator) พวก dithiocarbamate อยู่ด้วย โดยปกติ จะทำการผสมสารเคมีกับน้ำยางแล้วบ่มหรือเก็บไว้ (Maturation) ก่อนการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ เนื่องด้วยน้ำยางผสมสารเคมีส่วนใหญ่จะผสมสารช่วยเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ (เช่น S+ZDEC+ZnO) ไว้แล้ว ดังนั้นขณะการบ่ม หรือเก็บน้ำยางจึงอาจเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ โมเลกุลยางเกิดพันธะเชื่อมขวางขึ้นได้ ซึ่งการเกิดยางคงรูปจะมาน้อยเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับภาวะการเก็บน้ำยาง และความว่องไวของสารช่วยเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ สำหรับการทำน้ำยางวัลคาไนซ์ อาจพิจารณาว่าเป็นวิธีการพิเศษวิธีหนึ่งของการบ่มน้ำยางผสมสารเคมี

2.7.1 การผลิตน้ำยางวัลคาไนซ์

วิธีการผลิตน้ำยางวัลคาไนซ์มีหลักการที่สำคัญ คือผสมสารเคมีที่จำเป็นในการวัลคาไนซ์ซึ่งได้แก่สารในระบบวัลคาไนซ์ (Vulcanising System = Sulphur + Accelerator + Activator) กับน้ำยางที่ได้ผ่านการเติมสารช่วยความคงตัวที่เป็นของเหลว แล้วให้ความร้อนประมาณ 50 - 70 องศาเซลเซียส หรืออาจเตรียมน้ำยางวัลคาไนซ์โดยไม่ใช้กำมะถัน คือ ระบบ "Sulphurless" หรืออาจเตรียมน้ำยางวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 28 - 30 องศาเซลเซียส โดยใช้สารเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ที่ว่องไวมากเช่น Sodium or Zinc Salt of Dibutyldithiocarbamates นอกจากนี้ น้ำยางวัลคาไนซ์ยังอาจทำได้โดยให้ความร้อนกับน้ำยางที่ได้ผสมสารอินทรีย์เพอร์ออกไซด์ และไฮโดรเพอร์ออกไซด์ เช่น คิวมิวไฮโดรเพอร์ออกไซด์

2.7.2 วัตถุประสงค์และสารเคมีสำหรับการเตรียมน้ำยางวัลคาไนซ์

วิธีการเตรียมน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ ประกอบไปด้วยการนำน้ำยางขึ้นมาผสมกับสารเคมีในระบบวัลคาไนซ์ (Vulcanizing agent) ซึ่งประกอบไปด้วยซิงค์ออกไซด์ สารเร่งปฏิกิริยา เช่น Zinc diethyl dithiocarbamate (ZDEC) และกำมะถัน พร้อมทั้งสารระบบช่วยความคงตัว

1. น้ำยางข้น (Concentration Latex) นิยมใช้น้ำยางข้น 60%DRC (dry rubber content) ที่ผลิตโดยการหมუნเหวียง ซึ่งอาจจะมีการรักษาสภาพด้วยแอมโมเนียแบบต่ำ (LA-TZ, low ammonia-tetramethyl thiuram disulphide/zinc oxide) หรือ แบบรักษาสภาพด้วยแอมโมเนียแบบสูง (HA) ก็ได้

2. สารเพิ่มความคงตัว (stabilizer) โดยทั่วไปเป็นด่างและสบู่ของกรดไขมัน ต่างที่ใช้จะใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มากกว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์เพราะอนุมูลของโพแทสเซียมมีผลต่อการลดความคงตัวของน้ำยางน้อยกว่าอนุมูลของโซเดียมปริมาณการใช้ต่างจะอยู่ระหว่าง 0.2 - 0.5 ส่วนต่อเนื้อยาง 100 ส่วน โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะทำหน้าที่เพิ่มความคงตัวให้น้ำยางโดยการช่วยรักษาความเป็นด่างของน้ำยางเพราะแอมโมเนียอาจจะหายไปบ้าง นอกจากนี้ยังช่วยลดการเกิดคริมที่ผิวน้ำยางอีกด้วย ส่วนสารพวกสบู่ของกรดไขมันจะใช้ชนิดที่โมเลกุลประกอบไปด้วยคาร์บอน 8 - 12 อะตอม เช่น โพแทสเซียมแคปรีเลต (potassium caprylate, $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_6\text{COOK}$) และโพแทสเซียมลอเรต (potassium laurate, $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{COOK}$) สบู่ของกรดไขมันจะช่วยให้ยางมีความคงตัวต่อเครื่องมือกล (mechanical stability) ดีขึ้น แต่ไม่ควรใส่สารนี้มากเกินไปเพราะจะทำให้เกิดฟองได้ โดยทั่วไปจะใช้ประมาณ 0.2 - 0.4 ส่วนต่อเนื้อยาง 100 ส่วน

3. สารในระบบวัลคาไนซ์ (Vulcanizing system) มีดังนี้

(1) สารที่ทำให้ยางวัลคาไนซ์ (Vulcanizing Agent) ที่นิยมใช้ คือ

- กำมะถัน (Sulphur) เป็นสารวัลคาไนซ์ที่ใช้กันทั่วไปทั้งกับยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ และต้องเป็นชนิดคุณภาพดี เนื้อละเอียด ขนาดอนุภาคเล็ก ปริมาณการใช้ 0.5 - 2 ส่วน ต่อเนื้อยาง 100 ส่วน โดยเตรียมให้อยู่ในรูปดิสเพอร์ชัน

(2) สารกระตุ้นปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ (Activator)

สำหรับน้ำยางจะใช้ ZnO เติมลงไปเป็นน้ำยางเป็นขั้นตอนสุดท้ายของการผสมสารเคมีต่าง ๆ หรือบางครั้งอาจเติมในขณะที่จะเริ่มการแปรรูปเป็นวัตถุสำเร็จรูป ทั้งนี้เนื่องจากการเติม ZnO ในน้ำยางจะทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น แล้วเกิดเป็นคริมแข็ง ปริมาณการใช้ จะใช้ อยู่ในช่วงระหว่าง 0.2 - 2.0 ส่วนต่อเนื้อยางแห้ง 100 ส่วน การเพิ่มปริมาณ ZnO ในช่วง 0.1 - 2.0 ส่วนต่อเนื้อยางแห้ง 100 ส่วน จะทำให้ยางมีโมดูลัสสูงขึ้น ถ้าต้องการให้ยางมีความโปร่งแสง จะต้องใช้ปริมาณ ZnO ต่ำประมาณ 0.25 ส่วนต่อเนื้อยางแห้ง 100 ส่วน

(3) สารเร่งปฏิกิริยาคัลคาไนซ์ (Accelerator) แบ่งออกเป็นกลุ่ม ดังนี้

- กลุ่มไดไทโอคาร์บาเมท (Dithiocarbamate) ที่นิยมใช้กันมากที่สุด ได้แก่ ซิงค์ไดเอทิล ไดไทโอคาร์บาเมท (Zinc Diethyl Dithiocarbamate, ZDEC) เป็นสารสีขาว ไม่มีกลิ่น ไม่ละลายน้ำปริมาณการใช้อยู่ระหว่าง 0.3 - 1.5 ส่วนต่อเนื้อยางแห้ง 100 ส่วน ZDEC จะเพิ่มอัตราเร็วของการคงรูปขึ้นอย่างชัดเจนในอุณหภูมิที่สูงกว่า 70 องศาเซลเซียส โดยที่ ZDEC จะไม่ทำให้น้ำยางเกิดการวัลคาไนซ์ขึ้นก่อน (Pre-Vulcanization) เมื่อเก็บน้ำยางที่ผสม ZDEC ไว้ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส หรือต่ำกว่า ดังนั้นทำให้สามารถใช้น้ำยางที่ผสม ZDEC ในกระบวนการผลิตที่แตกต่างกันได้ ข้อเสียของสารในกลุ่มนี้ คือ มีความไวต่อปฏิกิริยาต่อสารทองแดง ทำให้เมื่อผลิตภัณฑ์ยางสัมผัสสารที่มีทองแดงเป็นองค์ประกอบจะเปลี่ยนสีเป็นสีน้ำตาล

4. สารป้องกันยางเสื่อมสภาพ (Antioxidant) สารที่ใช้ป้องกันยางเสื่อมสภาพเพื่อยืดอายุการใช้งานหรือการเก็บรักษามี 2 กลุ่มคือ

- (1) เอมีน/อนุพันธ์ของเอมีน (amine/amine derivative)
- (2) ฟีนอลและอนุพันธ์ของฟีนอล (Phenol/ phenol derivative)

กลุ่มแรกมีข้อเสียคือทำให้น้ำยางเปลี่ยนสี (Staining) ส่วนกลุ่มที่สองจะไม่ทำให้น้ำยางเปลี่ยน (Non-staining) สีแต่มีประสิทธิภาพด้อยกว่ากลุ่มแรก ความนิยมในการผลิตถุงมือยางนิยมใช้สารกลุ่มอนุพันธ์ของฟีนอลมากกว่าปริมาณการใช้ประมาณ 1 ส่วนต่อเนื้อยาง 100 ส่วน

สารทุกกลุ่มดังกล่าวข้างต้นเมื่อจะใช้ผสมกับน้ำยางจะต้องเตรียมให้อยู่ในสถานะของเหลว เช่น สารละลาย สารแขวนลอยหรืออิมัลชันเสียก่อน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสมบัติของสารที่จะใช้ว่าสามารถเตรียมให้อยู่สถานะใดได้

2.7.3 การผสมสารเคมีกับน้ำยาง

ข้อที่ควรนำมาพิจารณาในการผสมสารเคมีต่างๆ กับน้ำยางคือ ควรตรวจสอบสถานะของน้ำยางและสารเคมีก่อนการผสมและหลังผสมเสร็จแล้ว (Latex compounded) นอกจากนี้ยังจำเป็นต้องเรียงลำดับการผสมสารกลุ่มต่างๆ ได้อย่างถูกต้องอีกด้วย ข้อมูลเหล่านี้จะเป็นประโยชน์มากในการควบคุมกระบวนการผลิตตลอดจนคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้รับ

สารเคมีที่ได้เตรียมให้อยู่ในสถานะต่าง ๆ คือสารละลาย สารแขวนลอย หรืออิมัลชัน แล้วนั้น ควรต้องมีความตรวจสอบความเข้มข้น คือ ตรวจสอบว่ามีปริมาณของเนื้อสารเคมีถูกต้องหรือไม่ และขนาดของอนุภาคมีความละเอียดพอเพียงหรือไม่ (ปกติควรมีความละเอียดต่ำกว่าขนาดเฉลี่ยของอนุภาคยาง คือต่ำกว่า 5 ไมโครเมตร ตลอดจนถึงต้องตรวจสอบความเป็นกรดต่างของสารเหล่านั้น เพื่อจะช่วยให้ควบคุมเกี่ยวกับสถานะความคงตัวของน้ำยางเสียคือจับตัวง่าย และ สถานะเป็นต่างมากเกินไปน้ำยางมีความคงตัวมากไปก็จะมีปัญหา คือน้ำยางไม่ยอมฟอร์มยางเกาะแบบพิมพ์ ในขณะที่ถึงขั้นตอนที่ต้องการให้น้ำยางจับพิมพ์เป็นต้น

ลำดับการเติมสารเคมีผสมกับน้ำยาง

1. เติมน้ำลงในน้ำยางเพื่อให้ได้ความเข้มข้นของเนื้อยางที่ต้องการ
2. เติมสารกลุ่มช่วยให้ยางคงตัว (stabilizer)
3. เติมสารกลุ่มทำหน้าที่ให้ยางคงรูป (Vulcanizing system)*
4. เติมสารป้องกันยางเสื่อม
5. เติมสารสี (pigment) (ถ้าต้องการ)

*ควรเติม ZnO หลังสุดเพื่อกันน้ำยางหนืด (zinc oxide thickening)

แต่ละกลุ่ม หรือแต่ละอย่างของสารที่เติมลงไปในน้ำยาง จะต้องผสมเข้ากับน้ำยางเป็นอย่างดีเสียก่อนจึงเติมสารตัวต่อไปลงไป ในการกวนผสมน้ำยางจะใช้เครื่องกวนตีไปกวนไปใหญ่ ความเร็วของการกวนประมาณ 5 - 60 รอบ/นาที

2.7.4 ภาชนะบรรจุน้ำยางผสม

ภาชนะที่จะใช้บรรจุน้ำยางผสมควรทำมาจากสแตนเลส หรือ Epoxy-lined mild steel หรือ glass-fiber reinforce plastics เป็นต้น ไม่แนะนำให้ใช้ภาชนะที่ทำด้วยอะลูมิเนียมและไม่ควรใช้ทองเหลืองในส่วนใด ๆ ของภาชนะ

ขนาดของภาชนะขึ้นอยู่กับขนาดการผลิตและความถี่ของการผสมน้ำยาง รูปร่างของภาชนะควรเป็นทรงกระบอกอ้วน คือ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับหรือมากกว่าความลึก ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการล้างทำความสะอาดและมีฝาปิดได้สนิท

2.7.5 การกววนและระยะเวลาการกวนน้ำอย่างผสม

ภาชนะบรรจุน้ำอย่างควรมีอุปกรณ์ที่ใช้กวนน้ำอย่างซึ่งควบคุมความเร็วการกววน ภาชนะได้ในช่วง 5 - 60 รอบต่อนาที ไบวอนควรมีขนาดใหญ่ (เช่น 3/4 ของเส้นผ่าศูนย์กลางของ ภาชนะ) เพื่อให้ได้การกววนในช่วงความเร็วต่ำอย่างมีประสิทธิภาพ แกนของไบพัดควรเป็นส่วนที่จะต้องสัมผัสกับน้ำอย่าง ต้องทำจากสแตนเลส ถ้าหากภาชนะมีความลึก ควรมีไบพัดกววนมากกว่า 1 ชุดเพื่อให้กวนได้อย่างสม่ำเสมอ

ระยะเวลาที่จะกวนน้ำอย่างผสมกับสารเคมีขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของระบบกวน และปริมาณของน้ำอย่างผสม อย่างไรก็ตามการกวนน้ำอย่างให้น้อยที่สุด แต่ขณะเดียวกันการกวน ต้องพอเพียงพอเพราะจะทำให้น้ำอย่างมีความสม่ำเสมออย่างทั่วถึง ระยะเวลาการผสมอาจประมาณ 30 - 60 นาที ถ้าจะเก็บน้ำอย่างผสมไว้เพื่อการบ่ม หรือเพื่อการทำให้เกิดพรีวัลคาไนซ์ก็ควรกวนน้ำ อย่างไม่ต่อเนื่องอย่างต่อเนืองด้วยความเร็วต่ำ (5 - 10 รอบต่อนาที) หรือกวนเป็นครั้งคราว ด้วยความเร็วสูงเล็กน้อย (20 - 30 รอบต่อนาที) ทั้งนี้เพื่อป้องกันสารเคมีต่างๆ ตกตะกอนลงกัน ภาชนะ จุดประสงค์ของการกวนน้ำอย่างด้วยความเร็วต่ำและจำกัดระยะเวลาก็เพื่อป้องกันปัญหา การเกิดน้ำอย่างผสมเสียความคงตัว

2.8 สารตัวเติม (Filler)

สารตัวเติม หมายถึง สารที่ใช้เสริมแรง หรือช่วยลดต้นทุนในการผลิต หรือปรับปรุงสมบัติ ทางกายภาพของยางให้ดีขึ้น เช่น เชม่าดำ แคลเซียมคาร์บอเนต และซิลิกา เป็นต้น

สารตัวเติมที่ใส่ลงไปนยาง เพื่อวัตถุประสงค์ต่างๆ ดังนี้

- เพื่อลดต้นทุน โดยจะต้องมีราคาถูกกว่ายาง
- เพื่อปรับปรุงเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของยาง โดยทำให้ยางมีความ แข็งเพิ่มขึ้น และมอดูลัสสูงขึ้น ส่วนสมบัติอื่น ๆ เช่น ความทนแรงดึง ความต้านทานการขาดุดู จะ เพิ่มขึ้นหรือลดลง ขึ้นกับชนิดของยาง และชนิดของสารตัวเติม
- เพื่อช่วยลดปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต เช่น ทำให้ง่ายที่ผ่านการอัดรด มีผิวเรียบ หรือช่วยควบคุมความหนาในการทำยางแผ่น
- เพื่อช่วยลดการพองตัวหรือบวมตัวของยางในน้ำมัน
- เพื่อเพิ่มหรือยืดอายุการใช้งานของยาง เช่น ป้องกันแสงไม่ส่องผ่านเข้าไปใน ยางได้

2.8.1 การแบ่งชนิดของสารตัวเติม

สามารถแบ่งตามการผลิตและตามลักษณะ คือ

1. สารตัวเติมที่มีตามธรรมชาติ หรือจากผลพลอยได้จากธรรมชาติ แล้วนำมาบดให้ละเอียด เช่น
 - แคลเซียมคาร์บอเนตจากหินปูน เปลือกหอย และชอล์ค
 - แคลเซียมและแมกนีเซียมซิลิเกตจากแป้งทัลคัม
 - ซิลิกาอสัณฐาน (Amorphous Silica)
2. สารตัวเติมตามธรรมชาติที่ร่อนแยกความละเอียด เช่น คาโอลิน เป็นต้น
3. สารตัวเติมที่ได้จากวิธีการตกตะกอน เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ไฮเดรตซิลิกา โซเดียมอะลูมิเนียมซิลิเกต แคลเซียมซิลิเกต และไฮเดรตอะลูมิเนียมออกไซด์ เป็นต้น
4. สารตัวเติมที่อยู่ในรูปของเขม่า หรือผงฝุ่น เช่น เขม่าดำ ซิงค์ออกไซด์ และแมกนีเซียมออกไซด์
5. สารตัวเติมประเภทที่ทำปฏิกิริยาที่ผิว (Surface Modified Products) เป็นผลิตภัณฑ์ที่นำสารตัวเติมมาทำปฏิกิริยาที่ผิว เพื่อให้สารตัวเติมนั้นเกาะติดแน่นกับยาง ซึ่งทำให้ยางมีสมบัติทางกายภาพดีขึ้น เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต แป้งทัลคัม เป็นต้น

ก. สารละลายโซเดียมซิลิเกต หรือกาวแก้ว

เป็นสารตัวเติมที่อยู่ในรูปคอลลอยด์ โดยมีส่วนประกอบดังนี้ คือ $\text{Na}_2\text{O} : \text{SiO}_2$ ในสัดส่วนต่าง ๆ กันขึ้นอยู่กับชนิดของโซเดียมซิลิเกต เวลาใช้งานต้องตกตะกอนโซเดียมซิลิเกตด้วยกรดซัลฟูริก เพื่อให้ได้ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ตามสมการ



จากนั้นนำโซเดียมซิลิเกตที่ได้ผ่านกระบวนการ Washing และบดให้ละเอียด ก่อนนำมาใช้งาน

ข. ซิลิกา (Silica)

ซิลิกามีชื่อทางเคมีว่า ซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon Dioxide, SiO_2) และอาจมีนำในผลึกอยู่ด้วย ซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่ไม่ใช่สีดำ (Nonblack Filler) ที่ดีที่สุด และนิยมใช้กันมาก เพราะเป็นสารตัวเติมที่เสริมความแข็งแรงให้กับยาง มักใช้กับผลิตภัณฑ์ยางพวกที่มีสีขาว หรือสีต่าง ๆ สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

(1) ซิลิกาบด เป็นแร่ซิลิกาบด หรือทรายบดละเอียด มีอนุภาคต่ำกว่า 200 เมช (75,000 °A) ซึ่งเป็นขนาดที่หยาบ ไม่ช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับยาง แต่มีราคาถูกจึงนิยมใช้เป็นสารตัวเติมในยางทนความร้อน

(2) ซิลิกาที่ได้จากการตกตะกอน โดยการนำทรายมาละลายในด่างให้กลายเป็นสารประกอบซิลิกา จากนั้นจึงตกตะกอนเอาซิลิกาออกมาล้าง และทำให้แห้งจะได้ซิลิกาผง ซึ่งมีน้ำอยู่ในอนุภาคซิลิกาที่ได้มีขนาดตั้งแต่ 100 - 400 °A

(3) ซิลิกาที่เตรียมได้จากการเผาไหม้ ได้จากปฏิกิริยาระหว่าง SiCl_4 กับไอน้ำในเปลวไฟของไฮโดรเจน และออกซิเจนที่อุณหภูมิสูงประมาณ 14000 องศาเซลเซียส จะเกิดการสลายตัวให้ซิลิกาออกมา มีขนาดอนุภาคเล็กมาก จึงเสริมความแข็งแรง

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Hisashi O. Kono et al. [1] ศึกษาการสังเคราะห์แก๊สมีเทนไฮเดรต (MGH) ในห้องทดลองที่อุณหภูมิ 273.5 K และที่ความดัน 6.8 – 13.6 MPa โดยของแข็ง MGH กระจายอยู่ในตะกอนที่มีรูพรุนชนิดต่าง ๆ การสังเคราะห์ MGH นี้เหมือน MGH ที่พบในธรรมชาติในชั้นแก๊สธรรมชาติไฮเดรต (NGH) อัตราการสลายตัวของ MGH ถูกวัดโดยวิธีการลดความดัน ผลที่ได้จากการทดลองคือ สมการการสลายตัวทางจลนพลศาสตร์ พบว่าค่าคงที่การสลายตัวขึ้นอยู่กับสมบัติของตะกอน และภาวะการทดลอง ในส่วนปฏิกิริยาการเกิด MGH สมการการเกิด MGH พบว่าค่าคงที่การเกิดขึ้นอยู่กับพื้นผิวของตะกอน และภาวะการทดลอง

W. Lin et al. [2] ศึกษาผลของสารลดแรงตึงผิวไอออนลบ sodium dodecyl sulfate (SDS) บนพฤติกรรมจลนพลศาสตร์การเกิด/การสลายตัวของมีเทนไฮเดรต ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง ผลการทดลองการเกิดไฮเดรตพบว่าสามารถเร่งอัตราการเกิดมีเทนไฮเดรตโดยการเติม SDS ความเข้มข้น 650 ppm ในน้ำ ได้ปริมาณการเก็บสูงสุด 170 V/V การทดลองการสลายตัวมี 2 วิธี คือ ทดลองที่ความดันบรรยากาศ อัตราการสลายตัวหาโดยการวัดปริมาตรสะสมของแก๊สที่สลายตัวออกมา และทดลองในระบบปิด อัตราการสลายตัวหาโดยการวัดความดันระบบที่เพิ่มขึ้น สำหรับการเปรียบเทียบการทดสอบการสลายตัวใน 2 กรณีนี้โดยเติม และไม่เติม SDS ผลจากการทดสอบในวิธีแรกพบว่าการเติม SDS อัตราการสลายตัวมีเทนไฮเดรตเพิ่มขึ้นในทุกช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง สำหรับวิธีที่สองค่อนข้างแตกต่าง พบว่าการเติม SDS อัตราการสลายตัวมีเทนไฮเดรตเพิ่มขึ้น และความดันระบบคงที่ในช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 269.4 K แต่เมื่ออุณหภูมิเท่ากับ

หรือสูงกว่า 269.4 K SDS จะเร่งกระบวนการสลายตัวเพียงในระยะเวลาเริ่มต้น แล้วจะกลับมาระงับการสลายตัวมีเทนไฮเดรตหลายชั่วโมงหลังจากนั้น

บุรินทร์ ชุณหพาณิชย์ [13] ศึกษาผลของขนาดอนุภาคอะลูมิเนียมซิลิเกตที่มีผลต่อความแข็งแรงของยางวัลคาไนซ์ที่ผลิตจากน้ำยางข้น เพื่อทราบขนาดที่เหมาะสมในการนำไปใช้เตรียมน้ำยางข้นผสมโซเดียมซิลิเกตที่ใช้ผลิตยางรถยนต์ที่มีความหนาแน่นน้อย แต่มีความแข็งแรงเพียงพอที่นำไปใช้งาน โดยโซเดียมซิลิเกตที่ใช้ในการทดลองมีอัตราส่วนระหว่าง Na_2O ต่อ SiO_2 คือ 1 ต่อ 3 เพื่อให้ได้ปริมาณอะลูมิเนียมซิลิเกตค่อนข้างสูง เมื่อทำปฏิกิริยากับสารส้ม พบว่าที่ความเข้มข้นของโซเดียมซิลิเกตต่ำ และความเป็นกรดของสารส้มสูง ขนาดอนุภาคของอะลูมิเนียมซิลิเกตค่อนข้างเล็ก โดยที่ภาวะ 10% ของโซเดียมซิลิเกต 50 phr และ pH 2.98 ของสารส้ม มีขนาดอนุภาคเล็ก 50 - 75 nm โดยที่ขนาดอนุภาคมีขนาดเล็กกว่า 200 nm พบว่าค่าความแข็งแรงสูงขึ้น และขนาดอนุภาคเล็กกว่า 250 nm ความต้านทานแรงดึงจะสูงขึ้น และจากการศึกษาของยางรถยนต์ ค่าความแข็งแรงที่ค่อนข้างต่ำที่ความหนาแน่นน้อย แต่เมื่อเติมพอลิเมอร์ลงในช่องว่างของยางรถยนต์ ค่าความแข็งแรงสูงถึง 67 IRHD

อัศนี ชลมาตร์ [14] ศึกษาอัตราการซึมผ่านได้ของน้ำผ่านเยื่อแผ่นยางธรรมชาติที่มีรูพรุน แผ่นฟิล์มยางที่มีรูพรุนเตรียมโดย ผสมสารแขวนลอยของ O-xylene กับสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ลงในน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ และขึ้นรูปยางโดยเทคนิคการจุ่ม หยดของ O-xylene ถูกระเหยออกระหว่างกระบวนการวัลคาไนซ์ ทำให้ได้ฟิล์มที่มีรูพรุน จากการทดสอบอัตราการซึมผ่านของน้ำพบว่า มีค่าลดลงเมื่อความเร็วรอบในการกวนสูงขึ้น เนื่องจากความเร็วรอบสูงทำให้ขนาดรูพรุนในยางเล็กลง การเพิ่มความหนาฟิล์มทำให้อัตราการซึมผ่านของน้ำลดลงด้วย นอกจากนี้ อัตราการซึมผ่านของน้ำเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและสัดส่วนเฟสเพิ่มขึ้น

ยงยุทธ แสนสุพรรณ [16] ศึกษาไอโซเทอริมการดูดซับของแก๊สมีเทน อีเทน และโพรเพนบนซีโอไลต์ชนิด NaA, NaX และ NaY ที่อุณหภูมิ 35 - 100 องศาเซลเซียส วัดได้ด้วยการไหลผ่านทะลุหอดูดซับของแก๊สแต่ละชนิด แต่ละไอโซเทอริมสอดคล้องกับแบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ และฟรอยดลิตซ์ ในช่วงความดันย่อย 20 - 160 กิโลปาสคาล อย่างไรก็ตามไอโซเทอริมมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น สำหรับค่าคงที่การดูดซับของแลงเมียร์ซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิสอดคล้องกับสมการของแวนต์ฮอฟฟ์ (van't Hoff) แก๊สโพรเพนถูกดูดซับได้ดีกว่าแก๊สอีเทน และมีเทนตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณการดูดซับสูงสุดสำหรับการดูดซับแก๊สมีเทน มากกว่าการดูดซับแก๊สอีเทน และโพรเพน ตามลำดับ แม้ซีโอไลต์ชนิด NaY มีพื้นที่การดูดซับมากกว่าซีโอไลต์ชนิด

NaX และ NaA ตามลำดับ แต่พื้นที่การดูดซับของซีโอไลต์ชนิด NaA ถูกใช้ประโยชน์ได้มากกว่าพื้นที่การดูดซับของซีโอไลต์ชนิด NaX และ NaY ตามลำดับ ผลของการดูดซับเพียงชั้นเดียว คุณณหภูมิต่ำ สามารถแสดงด้วยภาพการดูดซับบนตำแหน่งไอออนบวก ของภาพจำลองการจัดเรียงอะตอมของผลึกซีโอไลต์เป็นระนาบแบบสม่ำเสมอ เฉพาะปริมาณความร้อนของการดูดซับแก๊สมีเทนบนซีโอไลต์ชนิด NaA และ NaX น้อยกว่าความร้อนของการควบแน่น ณ จุดเดือดปกติ

2.10 สมมุติฐานงานวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการดูดซับแก๊สเชื้อเพลิง โดยมีสมมุติฐานสองข้อคือ

2.10.1 สมมุติฐานการดูดซับแก๊สเชื้อเพลิงในยางธรรมชาติ

ด้วยสมมุติฐานที่ว่า ไฮโดรคาร์บอนสามารถดูดซับไฮโดรคาร์บอนด้วยกันได้ดี ยางธรรมชาติมีองค์ประกอบหลักเป็นไฮโดรคาร์บอน ดังนั้นจึงสามารถดูดซับแก๊สเชื้อเพลิงได้ดี เพราะแก๊สเชื้อเพลิง ประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนเช่นเดียวกัน

2.10.2 สมมุติฐานการผลิตยางรูปฟรอน

น้ำยางธรรมชาติ ประกอบด้วยอนุภาคยางแขวนลอยอยู่ในน้ำ เมื่อนำน้ำยางไปแช่เย็น จนอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ จะทำให้น้ำจับตัวเป็นน้ำแข็ง แยกตัวออกจากอนุภาคของยาง ทำให้อนุภาคยางถูกผลักดันให้รวมตัวกระจายอยู่ในปริมาณของน้ำที่น้อยลงจะทำให้การกระทบกันของอนุภาคยางมีมากขึ้นเป็นผลให้ยางรวมตัว และเมื่อนำมาตั้งให้น้ำแข็งละลาย จะทิ้งช่องว่างไว้ได้เป็นยางที่มีรูปฟรอน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

เครื่องมือ และวิธีการทดลอง

การทดลองการดูดซับแก๊ส จำเป็นจะต้องทำตัวดูดซับซึ่งประกอบด้วย ยางพาราและสารที่ช่วยในการดูดซับแก๊สแต่ละชนิด เช่น ไซพาราฟีนสำหรับดูดซับแก๊สไฮโดรคาร์บอน และผงคาร์บอนสำหรับดูดซับแก๊สไฮโดรเจน การทำตัวดูดซับจะเป็นแผ่นกลม โดยการหล่อน้ำยางผสมและแช่แข็ง เพื่อให้เกิดรูพรุนข้างในจะทำการละลายน้ำออก และการนี้จะมีอะลูมิเนียมซิลิเกต ซึ่งเกิดจากการผสมโซเดียมซิลิเกตกับอะลูมิเนียมซัลเฟต อะลูมิเนียมซิลิเกตนี้เป็นผลึกของแข็งที่จะช่วยให้โพรงอากาศในยางคงรูปอยู่ได้

การดูดซับแก๊สแต่ละชนิดจะอัดแก๊สที่ความดันที่กำหนดเข้าไป และอุณหภูมิที่ควบคุมไว้ หลังจากนั้นจะวัดความดันที่ตกลง อันเนื่องมาจากแก๊สที่ปล่อยเข้าไปนั้นจะถูกดูดซับเข้าไปในเนื้อแผ่นยาง และเข้าไปอยู่ในรูพรุนของแผ่นยาง ทั้งนี้ถือว่าปริมาณแก๊สที่ถูกดูดเข้าไปนี้ จะเป็นปริมาณแก๊สที่บรรจุได้ในแผ่นยาง อันเป็นแนวทางในการใช้ประโยชน์ต่อไป

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำผลิตภัณฑ์

1. แม่แบบ (Mould) ใช้สำหรับหล่อแบบตัวอย่างแผ่นยาง ลักษณะทรงกระบอกกลวง ทำจากอะลูมิเนียม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงใน 2 ซม. วงนอก 8 ซม. และสูง 2 ซม.
2. เครื่องปั่นผสม (Stirrer) จากบริษัท Jika ประกอบด้วยมอเตอร์ที่สามารถปรับความเร็วรอบ และความสูงของใบกวนได้ตามต้องการยี่ห้อ IKA LABORTECHNIK RW 20 U และใบกวนทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม
3. ตู้แช่ ยี่ห้อ Astina AF-184(GY)
4. เตาอบ (Oven) ยี่ห้อ WTB Binder Model ED-115i
5. โถดูดความชื้น (Desiccator)

3.1.2 อุปกรณ์บดสารเคมี (Ball Mill) ที่ใช้ในการทำดิสเพอร์ชัน

1. หม้อบดสแตนเลสทรงกระบอกสูง 20 ซม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม.
2. ลูกหินบดซึ่งทำจากกระเบื้อง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ 0.5 - 3.0 ซม.
3. รางวางหม้อบดซึ่งต่อกับมอเตอร์ สำหรับหมุนหม้อบดโดยมีความเร็วในการหมุน 53 รอบ/นาที

3.1.3 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบการดูดซับแก๊ส

1. เครื่องปฏิกรณ์ ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม ทรงกระบอก ปริมาตร 400 ลบ.ซม.
2. อ่างหล่อเย็น (Cooling Bath) ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้
3. เครื่องปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pump) ยี่ห้อ Duo Seal 1402 (S/N: 26313)
4. เครื่องวัดความดัน (Pressure Gauge)
5. แก๊สเชื้อเพลิงได้แก่ LPG แก๊สมีเทน และแก๊สไฮโดรเจน

3.1.4 เครื่องวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ

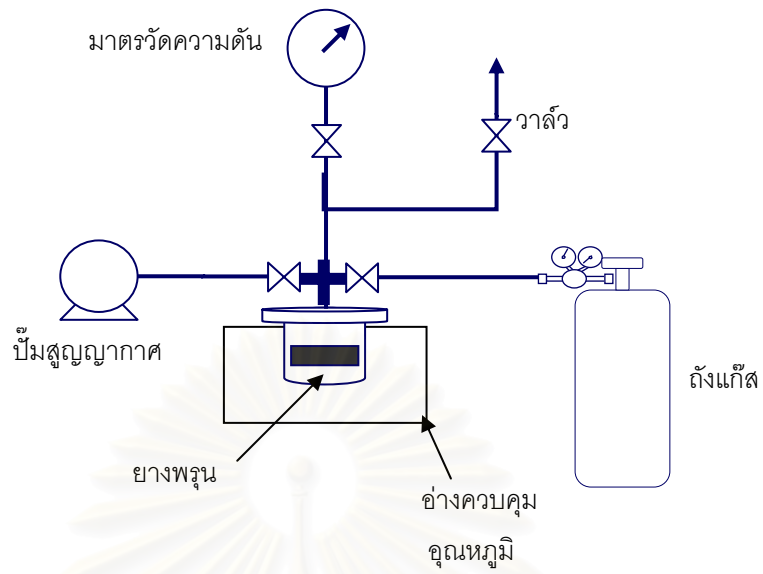
1. ชุดอุปกรณ์ซึ่งน้ำหนักได้น้ำ ประกอบด้วย เครื่องชั่งน้ำหนัก ภาชนะบรรจุน้ำ และตะแกรงวางตัวอย่างแผ่นยางสำหรับชั่งน้ำหนักได้น้ำ สำหรับหาความหนาแน่นแผ่นยาง
2. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ของ JEOL รุ่น JSM-5800LV สำหรับศึกษาลักษณะความพูนภายในแผ่นยาง
3. Laser Particle Size Distribution Analyzer รุ่น Mastersizer-S สำหรับหาขนาดของผงคาร์บอน



รูปที่ 3.1 แม่แบบ (Mould)



รูปที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์



รูปที่ 3.3 แผนผังชุดอุปกรณ์การทดลองดูดซับแก๊สเชื้อเพลิง



รูปที่ 3.4 ชุดอุปกรณ์การทดลองดูดซับแก๊สเชื้อเพลิง

3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.1 แสดงวัตถุดิบ และสารเคมี

สารเคมี	สมบัติ	หน้าที่	ที่มา
1. นํ้ายางธรรมชาติ เข้มข้นชนิดแอมโมเนีย ต่ำ	มีเนื้อยางแห้ง 60%	วัตถุดิบหลักใน งานวิจัย	บริษัท ไทยรับเบอร์แอนด์เล เทคส์ จำกัด (องค์ประกอบ แสดงในภาคผนวก ก)
2. กำมะถัน (Sulphur)	ผงสีเหลือง	สารวัลคาไนซ์	บริษัท เบนไมเยอร์ เคมีคอล (ที) จำกัด
3. ซิงค์ไดเอทิลไดไทโอ คาร์บาเมต (ZDEC)	ผงสีขาว	ตัวเร่งปฏิกิริยา วัลคาไนซ์	บริษัท เบนไมเยอร์ เคมีคอล (ที) จำกัด
4. ซิงค์ออกไซด์ (ZnO)	ผงสีขาว	ตัวกระตุ้นปฏิกิริยา วัลคาไนซ์	บริษัท เบนไมเยอร์ เคมีคอล (ที) จำกัด
5. ซอฟเท็กซ์เอ (Softex A)	เกล็ดสีเหลือง	ช่วยกระจายตัว	บริษัท กิมฮวด จำกัด
6. เบนโตไนต์ เคลย์ (Bentonite Clay)	ผงสีน้ำตาล	ช่วยกระจายตัว	บริษัท เบนไมเยอร์ เคมีคอล (ที) จำกัด
7. โซเดียมซิลิเกต	ความเข้มข้น 40.0% $\text{Na}_2\text{O} : \text{Si}_2\text{O}_3, (1 : 3)$	ช่วยเพิ่มความ คงรูปยาง	บริษัท ไล้อ่อน จำกัด
8. อะลูมิเนียมซัลเฟต (สารส้ม)	ผลึกใส	ทำปฏิกิริยา	บริษัท กิมฮวด จำกัด
8. ไชพาราฟิน (Paraffin wax)	ไขสีขาวขุ่น	สารช่วยการดูดซับ	บริษัท กิมฮวด จำกัด
9. น้ำมันพาราฟิน (Paraffin oil)	ของเหลวใส	สารช่วยการละลาย ไชพาราฟิน	บริษัท กิมฮวด จำกัด
10. เลนเนตโอ (Lannet "O")	เม็ดสีขาว	สารช่วยทำอิมัลชัน ของไชพาราฟิน	บริษัท กิมฮวด จำกัด
11. NP.9	ของเหลวใส	สารลดแรงตึงผิว	บริษัท กิมฮวด จำกัด
12. ผงถ่าน (Carbon)	ผงสีดำ	สารช่วยการดูดซับ	บริษัท กิมฮวด จำกัด

สารเคมี	สมบัติ	หน้าที่	ที่มา
13. แอซีโตน (Acetone)	ของเหลวไม่มีสี	สารช่วยให้ผงคาร์บอนเปียกน้ำ	บริษัท กิมฮวด จำกัด
14. เอลพีจี (LPG)	$C_3H_8 : C_4H_{10}$ 70% : 30%	แก๊สเชื้อเพลิงสำหรับการดูดซับ	บริษัท เวิลด์แก๊ส จำกัด
15. ไฮโดรเจน	ความเข้มข้น 99.99%	แก๊สเชื้อเพลิงสำหรับการดูดซับ	บริษัท แพรกซ์แอร์ (ประเทศไทย) จำกัด
16. มีเทน	ความเข้มข้น 99.995%	แก๊สเชื้อเพลิงสำหรับการดูดซับ	บริษัท แพรกซ์แอร์ (ประเทศไทย) จำกัด
17. คาร์บอนไดออกไซด์	ความเข้มข้น 99.99%	แก๊สสำหรับการดูดซับ	บริษัท แพรกซ์แอร์ (ประเทศไทย) จำกัด

3.3 การดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการดูดซับแก๊สเชื้อเพลิงในยางธรรมชาติ และยางที่ผสมสารช่วยการดูดซับ แก๊สเชื้อเพลิงที่ศึกษาได้แก่ LPG แก๊สมีเทน และแก๊สไฮโดรเจน โดยจะทำการปรับปรุงสูตรผสมน้ำยางขึ้นเพื่อให้เหมาะสำหรับดูดซับแก๊สต่าง ๆ ตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ ปริมาณสารช่วยในการดูดซับ และอุณหภูมิในการดูดซับ ที่มีผลต่อปริมาณการดูดซับแก๊ส (Adsorption Capacity) และอัตราการดูดซับเริ่มต้นที่ 1 นาที (Initial rate at 1 min)

3.3.1 การศึกษาสูตรผสมน้ำยางขึ้น

ศึกษาสูตรผสมน้ำยางขึ้นที่ใช้ในการผลิตยางพาราเพื่อดูดซับแก๊สเชื้อเพลิง ด้วยการปรับปรุงสูตรจากสูตรผสมน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ โดยการผสมไซเดียมซิลิเกต และอะลูมิเนียมซัลเฟต ในน้ำยางพรีวัลคาไนซ์เพื่อให้เกิดอนุภาคอะลูมิเนียมซิลิเกตในแผ่นยาง จากนั้นทำการผสมไซพาราฟิน สำหรับการดูดซับ LPG และแก๊สมีเทน และผสมผงคาร์บอนสำหรับการดูดซับแก๊สไฮโดรเจน โดยสูตรผสมน้ำยางพรีวัลคาไนซ์แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงสูตรผสมน้ำยางพรีวัลคาไนซ์

สาร	phr
น้ำยางข้น	100
กำมะถัน	2.8
ZDEC	3.2
โซเดียมซัลไฟเกต	50
ซิงค์ออกไซด์	2.8

phr คือ ส่วนต่อเนื้อยาง 100 ส่วน

กำมะถัน, ZDEC และซิงค์ออกไซด์ เป็นของแข็งจึงไม่เหมาะในการผสมกับน้ำยาง ดังนั้น ต้องเตรียมให้อยู่ในรูปสารแขวนลอยก่อนนำไปผสม สูตรการเตรียมแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แสดงสูตรการเตรียมสารวัลคาไนซ์ให้อยู่ในรูปสารแขวนลอย

สาร	% โดยน้ำหนัก
กำมะถัน	50
เบนโตไนต์ เคลย์	1
ซอพเท็กซ์เอ	1
น้ำ	48
รวม	100

สำหรับ ZDEC และซิงค์ออกไซด์ จะใช้สูตรการเตรียมเช่นเดียวกับกำมะถัน และในการผสมไซพาราฟินสำหรับการดูดซับ LPG ต้องเตรียมให้อยู่ในรูปอิมัลชันก่อน สูตรการเตรียมแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 แสดงสูตรการเตรียมไซพาราฟินให้อยู่ในรูปอิมัลชัน

สาร	% โดยน้ำหนัก
ไซพาราฟิน	30
น้ำมันพาราฟิน	10
เลนเนตไอ	10
สารลดแรงตึงผิว (NP.9)	1
น้ำ	49
รวม	100

ในการผสมผงคาร์บอนสำหรับการดูดซับแก๊สไฮโดรเจน ผงคาร์บอนเป็นของแข็งจึงต้องเตรียมให้อยู่ในรูปสารแขวนลอยก่อน สูตรการเตรียมแสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 แสดงสูตรการเตรียมผงคาร์บอนให้อยู่ในรูปสารแขวนลอย

สาร	% โดยน้ำหนัก
ผงคาร์บอน	30
อะซิโตน	20
น้ำ	50
รวม	100

3.3.2 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติ

ศึกษาความหนาแน่น และลักษณะความพรุนของแผ่นยางพรุนแต่ละสูตร และหาขนาดอนุภาคของผงคาร์บอน

3.3.3 การศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการทดลอง

เพื่อหาภาวะของตัวแปรที่เหมาะสม ที่มีผลต่อปริมาณการดูดซับแก๊สเชื้อเพลิง และอัตราการดูดซับเริ่มต้น จึงออกแบบการทดลองเป็นแบบแฟกทอเรียล แก๊สเชื้อเพลิงที่ใช้คือ LPG ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ปริมาณไฮพาราฟิน และอุณหภูมิ โดยค่าแต่ละตัวแปรมี 2 ระดับ และทำการทดลองครบทุกการทดลอง ตามตารางที่ 3.6 จำนวนการทดลองคือ 2^2 การทดลอง ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง จึงรวมเป็น 8 การทดลอง โดยภาวะที่ต้องทำการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.6 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษา

ตัวแปร	ระดับต่ำ(-)	ระดับสูง(+)
ปริมาณไฮพาราฟิน (phr)	10	100
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	-10	30

ตารางที่ 3.7 ภาวะการทดลองทั้งหมดที่ต้องทำการทดลอง

การทดลองที่	ปริมาณไฮพาราฟิน (phr)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
1	10	-10
2	100	-10
3	10	30
4	100	30

3.3.4 ศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ

ตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่ ปริมาณสารช่วยในการดูดซับ คือ ไฮพาราฟิน และคาร์บอน (20 ถึง 100 phr) และอุณหภูมิในการดูดซับ (-10 ถึง 30 องศาเซลเซียส) และศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรกับปริมาณการดูดซับแก๊สเชื้อเพลิงในยางธรรมชาติ ออกมาในรูปของสมการการดูดซับ

3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.4.1 การเตรียมสารวัลคาไนซ์

1. ชั่งสารตามอัตราส่วนผสมในตารางที่ 3.3 ใส่ในหม้ออบ แล้วใส่ลูกหินบด
2. ปิดฝาหม้ออบ และนำไปวางบนรางหมุน เปิดสวิตซ์ให้รางหมุนทำงาน โดยกำหนดใช้เวลาดนนาน 72 ชั่วโมง ส่วนซิงค์ไดออกไซด์ไทโอคาร์บาเมต (ZDEC) และซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ใช้เวลาดนนาน 48 ชั่วโมง

3.4.2 การเตรียมไซพาราฟิน

1. ชั่งไซพาราฟิน น้ำมันพาราฟิน และเลนเนตไอ ตามอัตราส่วนในตารางที่ 3.4 ใส่รวมกันในบีกเกอร์ และนำไปอบที่อุณหภูมิ 50 – 60 องศาเซลเซียส จนละลายเป็นเนื้อเดียวกัน
2. ปั่นผสมสารลดแรงตึงผิว (NP.9) ในน้ำที่อุณหภูมิ 50 – 60 องศาเซลเซียส
3. เทสารข้อที่ 1. ลงในสารข้อที่ 2. ขณะร้อน
4. ปั่นผสมจนเกิดเป็นครีมอิมัลชัน

3.4.3 การผสมสูตรน้ำยางชั้นผสมไซพาราฟิน



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการผสมน้ำยางผสมไซพาราฟิน

การบั่นผสมสารเคมีจะเติมสารทีละตัว แล้วบั่นต่อเนื่องเป็นเวลา 10 นาที แล้วจึงเติมสารตัวถัดไปตามลำดับ และหลังจากเติมซิงค์ออกไซด์ จะบั่นต่อเนื่องเป็นเวลา 60 นาที จากนั้นเก็บในภาชนะที่มีฝาปิดเป็นเวลา 48 ชั่วโมง และเมื่อนำมาขึ้นรูปต้องบั่นเป็นเวลา 10 นาทีก่อน

3.4.4 การเตรียมคาร์บอน

1. ชั่งผงคาร์บอนตามอัตราส่วนผสมในตารางที่ 3.5 ใส่ในบีกเกอร์
2. เติมแอซิโตนในผงคาร์บอน คนผสมจนผงคาร์บอนมีลักษณะเปียก (เติมแอซิโตนเพื่อให้ผิวของผงคาร์บอนเปียกน้ำได้ง่าย และเมื่อเติมโซเดียมซัลไฟเกตลงไปจะได้ล้อมผงคาร์บอนได้ดี)
3. เติมน้ำ แล้วบั่นผสมประมาณ 10 นาที
4. เติมโซเดียมซัลไฟเกต และบั่นผสมต่อเนื่องเป็นเวลา 10 นาที

3.4.5 การผสมสูตรน้ำยางชั้นผสมผงคาร์บอน



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการผสมน้ำยางผสมคาร์บอน

การบั่นผสมสารเคมีเริ่มด้วย เติมกำมะถันบั่นเป็นเวลา 10 นาที แล้วจึงเติม ZDEC บั่นต่อเนื่องเป็นเวลา 10 นาที และเก็บในภาชนะที่มีฝาปิดเป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นนำน้ำยางที่บ่มไว้มาบั่นเป็นเวลา 10 นาทีก่อน จึงเติมซิงค์ออกไซด์ จะบั่นต่อเนื่องเป็นเวลา 60 นาที แล้วจึงเทลงในคาร์บอนที่เตรียมไว้ และบั่นเป็นเวลา 10 นาที จะได้น้ำยางผสมคาร์บอนที่พร้อมสำหรับการขึ้นรูป

3.4.6 การเตรียมตัวอย่างแผ่นยางพรม (การขึ้นรูป)



รูปที่ 3.7 แสดงขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างแผ่นยางพรม

หลังจากขึ้นรูปแล้ว แผ่นยางพรมต้องเก็บใน Desiccator เพื่อควบคุมความชื้น

3.4.7 การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของแผ่นยางพรม

1. หาค่าความหนาแน่นของแผ่นยางพรม ด้วยวิธีแทนที่น้ำ โดยการชั่งน้ำหนักแผ่นยางพรมได้น้ำ (น้ำหนักเปียก) และในบรรยากาศ (น้ำหนักแห้ง) จากนั้นนำมาคำนวณความหนาแน่นดังนี้

$$\text{ความหนาแน่น} = \frac{\text{น้ำหนักแห้ง}}{\text{น้ำหนักแห้ง} - \text{น้ำหนักเปียก}}$$

2. วิเคราะห์ลักษณะความพูนของแผ่นยาง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

3.4.8 การดูดซับแก๊สเชื้อเพลิง

1. นำแผ่นยางใส่ในเครื่องปฏิกรณ์จำนวน 3 ชิ้น
2. เปิดเครื่องปั๊มสุญญากาศ จนภายในเครื่องปฏิกรณ์มีภาวะเป็นสุญญากาศ
3. เปิดวาล์วปล่อยแก๊สที่จะทดสอบเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ จนมีความดัน 1 บาร์ จากนั้นเปิดวาล์วปล่อยแก๊สออก (เพื่อให้แน่ใจว่าภายในเครื่องปฏิกรณ์ไม่มีแก๊สอื่นเหลืออยู่)
4. เปิดเครื่องปั๊มสุญญากาศอีกครั้ง จนมีภาวะเป็นสุญญากาศสมบูรณ์
5. เปิดวาล์วปล่อยแก๊สเชื้อเพลิงเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ จนมีความดันที่ต้องการ (เป็นความดันสูงสุดที่สามารถทำการทดลองได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของแก๊ส) จึงปิดวาล์วทันที พร้อมกับเริ่มจับเวลา
6. บันทึกค่าความดันที่ลดลงทุก ๆ 1 นาที จนความดันมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ของความดันที่เปลี่ยนแปลงทั้งหมด

LPG ใช้ความดันเริ่มต้น 2 บาร์ ส่วนแก๊สมีเทน และแก๊สไฮโดรเจนใช้ความดันเริ่มต้น 10 บาร์ (ความดันเริ่มต้นนี้ขึ้นอยู่กับขนาด และความดันภายในถังแก๊ส)

3.4.9 การคายแก๊สเชื้อเพลิง

1. นำแผ่นยางที่ดูดซับแก๊สแล้วจากหัวข้อ 3.4.8 มาชั่งน้ำหนักทันทีที่อุณหภูมิห้อง
2. บันทึกค่าน้ำหนักที่ลดลงทุก ๆ 1 นาที จนน้ำหนักแผ่นยางมีค่าเท่ากับน้ำหนักแผ่นยางก่อนการดูดซับ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการดูดซับแก๊สเชื้อเพลิงในยางธรรมชาติ และยางที่ผสมสารช่วยการดูดซับ โดยทำการศึกษาสูตรผสมน้ำยางชั้น เพื่อใช้ขึ้นรูปเป็นแผ่นยางรูปวง และศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่ออัตราการดูดซับเริ่มต้น และปริมาณการดูดซับแก๊สเชื้อเพลิง แก๊สเชื้อเพลิงที่ทำการศึกษาได้แก่ LPG มีเทน และไฮโดรเจน โดยตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ปริมาณสารช่วยการดูดซับ (ไซพาราฟิน และผงคาร์บอน) และอุณหภูมิในการดูดซับ

4.1 ศึกษาสมบัติทางกายภาพของแผ่นยาง

สมบัติทางกายภาพของแผ่นยางพูนที่สนใจ ได้แก่ ความหนาแน่น และลักษณะความพูนภายในแผ่นยาง แผ่นยางพูนเตรียมโดยวิธีแยกน้ำออกจากน้ำยางในสภาพแช่แข็ง จะเหลือช่องว่างทิ้งไว้เป็นโพรงอากาศ ซึ่งก็คือรูพูนในแผ่นยางนั่นเอง

4.1.1 ศึกษาความหนาแน่นของแผ่นยางพูน

แผ่นยางพูนที่ได้จากการแยกน้ำออกจากน้ำยางแช่แข็ง จะมีอะลูมิเนียมซิลิเกต ซึ่งเกิดจากการผสมโซเดียมซิลิเกตกับอะลูมิเนียมซัลเฟต อะลูมิเนียมซิลิเกตนี้เป็นผลึกของแข็งที่จะช่วยให้โพรงอากาศในยางคงรูปอยู่ได้ และเติมสารช่วยการดูดซับ ได้แก่ ไซพาราฟินสำหรับดูดซับแก๊สไฮโดรคาร์บอน (LPG และมีเทน) และผงคาร์บอนสำหรับดูดซับแก๊สไฮโดรเจน ศึกษาหาความหนาแน่นจากอุปกรณ์ชั่งน้ำหนักได้นำ โดยชั่งน้ำหนักยางพูนในบรรยากาศ และชั่งน้ำหนักยางพูนได้นำ และคำนวณหาความหนาแน่น (ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข) ซึ่งแผ่นยางที่มีความหนาแน่นน้อย จะมีช่องว่างอากาศภายในสูง คือมีความพูนสูง ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความหนาแน่นของ แผ่นยางที่ไม่มีรูพูน แผ่นยางที่ผสมอะลูมิเนียมซิลิเกต แผ่นยางที่ผสมอะลูมิเนียมซิลิเกตและไซพาราฟินในปริมาณต่าง ๆ และ แผ่นยางที่ผสมคาร์บอนในปริมาณต่าง ๆ

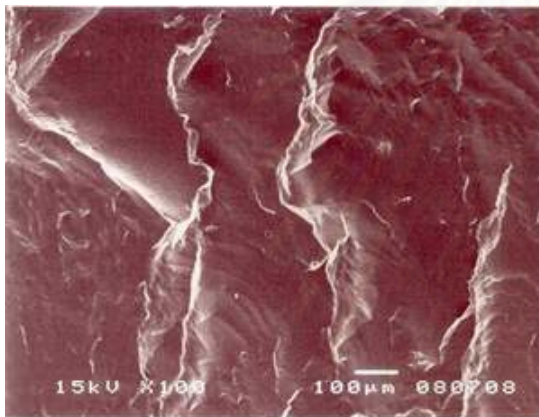
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความหนาแน่นของยางสูตรต่าง ๆ

	ความหนาแน่น (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)
แผ่นยางที่ไม่มีรูพรุน (NR)	0.91
NR + AISi	0.48
NR + AISi + wax (20)	0.44
NR + AISi + wax (40)	0.46
NR + AISi + wax (60)	0.47
NR + AISi + wax (80)	0.49
NR + AISi + wax (100)	0.52
NR + carbon (20)	0.71
NR + carbon (40)	0.69
NR + carbon (60)	0.67
NR + carbon (80)	0.68
NR + carbon (100)	0.74

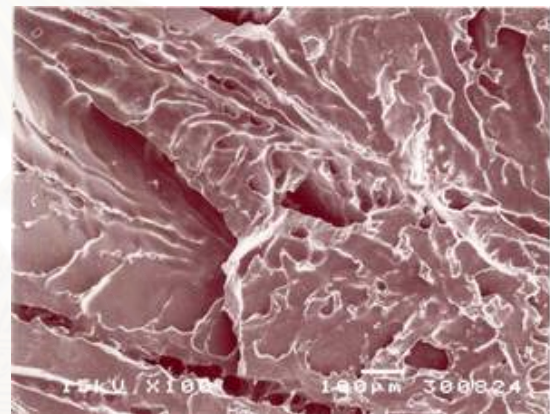
จากตารางที่ 4.1 พบว่าแผ่นยางที่ผสมอะลูมิเนียมซิลิเกต และแผ่นยางที่ผสมอะลูมิเนียมซิลิเกตและไซพาราฟินในปริมาณตั้งแต่ 20 – 100 phr มีความหนาแน่นใกล้เคียงกันประมาณ 0.40 – 0.50 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ซึ่งมีความหนาแน่นน้อยมาก เมื่อเทียบกับแผ่นยางที่ไม่มีรูพรุน (ขึ้นรูปโดยไม่ผ่านการแช่แข็ง) ที่มีความหนาแน่น 0.91 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร จึงสรุปได้ว่าแผ่นยางพรุนที่ผสมอะลูมิเนียมซิลิเกตและไซพาราฟินนั้นมีความพรุนสูง ส่วนแผ่นยางที่ผสมคาร์บอนในปริมาณตั้งแต่ 20 – 100 phr มีความหนาแน่นใกล้เคียงกันประมาณ 0.60 – 0.75 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ซึ่งสูงกว่ายางที่ผสมไซพาราฟิน เพราะในส่วนผสมของยางผสมคาร์บอนจะมีน้ำอยู่ปริมาณน้อยกว่าจึงมีผลึกน้ำแข็งน้อย เมื่อแยกน้ำออกจะเหลือช่องว่างอากาศหรือรูพรุนอยู่น้อย ความหนาแน่นจึงสูงกว่า แต่จะมีความหนาแน่นต่ำกว่าเมื่อเทียบกับยางที่ไม่มีรูพรุน จึงสรุปได้ว่าแผ่นยางผสมคาร์บอนมีความพรุน แต่พรุนน้อยกว่าแผ่นยางผสมไซพาราฟิน

4.1.2 ศึกษาลักษณะพื้นผิวภายในของยางพรม

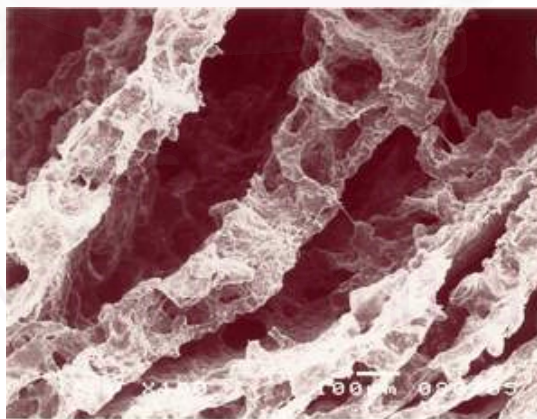
ศึกษาลักษณะพื้นผิวภายในของแผ่นยางสูตรต่าง ๆ อันมีผลต่อการดูดซับแก๊ส ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope, SEM) โดยการนำแผ่นยางไปแช่ในไนโตรเจนเหลว แล้วหักตามขวาง และดูภาพตามขวางของแผ่นยาง รูปที่ 4.1 ถึงรูปที่ 4.7 แสดงลักษณะพื้นผิวภายในของแผ่นยางพรมสูตรต่าง ๆ ซึ่งได้แก่ น้ำยางที่ไม่ใส่สารเคมีใด ๆ (รูปที่ 4.1) น้ำยางพรีวัลคาไนซ์ (รูปที่ 4.2) น้ำยางพรีวัลคาไนซ์ผสมอะลูมิเนียมซิลิเกต (รูปที่ 4.3) น้ำยางพรีวัลคาไนซ์ผสมอะลูมิเนียมซิลิเกตและไซพาราฟิน 10 และ 100 phr (รูปที่ 4.4 และ 4.5) และน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ผสมคาร์บอน (รูปที่ 4.6 และ 4.7)



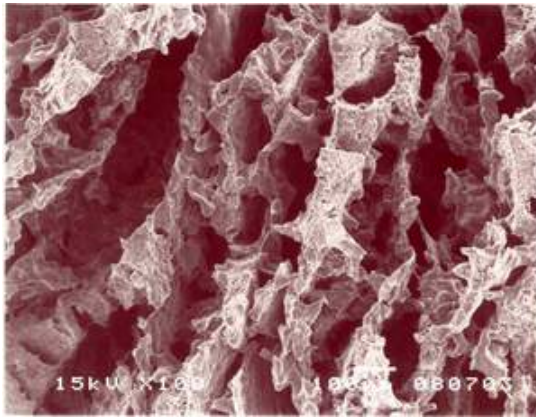
รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะพื้นผิวภายในของ NR



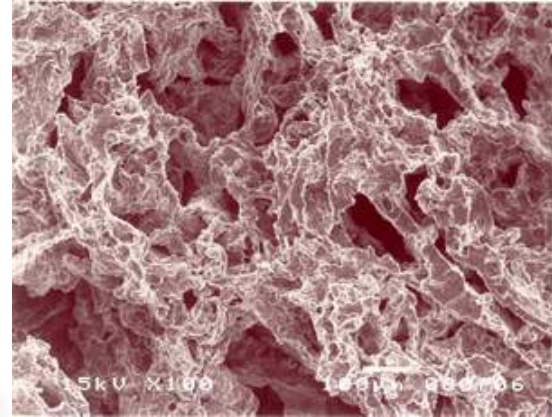
รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะพื้นผิวภายในของ NR(vul)



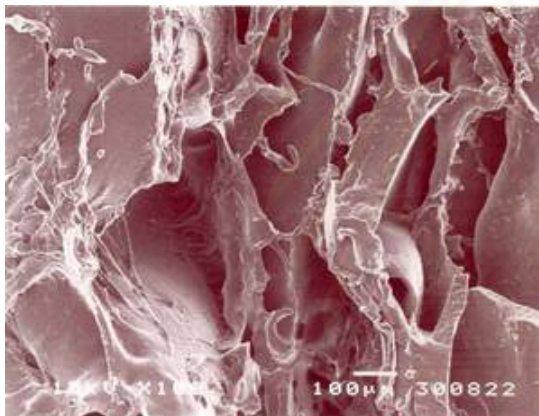
รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะพื้นผิวภายในของ NR(vul) + AISi



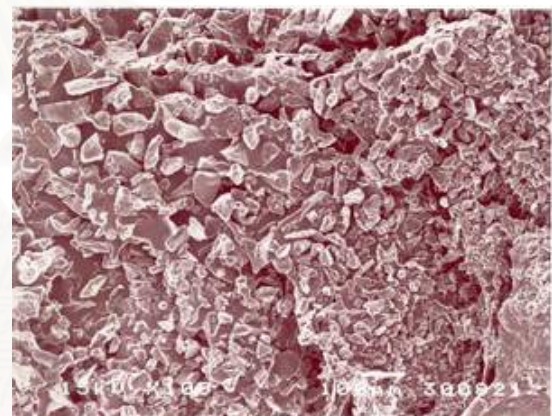
รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะพื้นผิวภายในของ
NR(vul) + AISi + wax 10 phr



รูปที่ 4.5 แสดงลักษณะพื้นผิวภายในของ
NR(vul) + AISi + wax 100 phr



รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะพื้นผิวภายในด้านบน
ของ NR(vul) + carbon 100 phr



รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะพื้นผิวภายในด้านล่าง
ของ NR(vul) + carbon 100 phr

จากการศึกษาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของยางพรม โดยใช้กำลังขยาย 100 เท่า รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะพื้นผิวภายในยางธรรมชาติที่ไม่ผสมสารเคมีใด ๆ พบว่ามีลักษณะพื้นผิวภายในเรียบ มีความพรุนน้อยมาก เป็นเพราะไม่มีสารเคมีช่วยคงรูปพรม เมื่อละลายน้ำแข็งออก ยางจะยุบตัวที่พรมพ่น แผ่นยางจึงมีความพรุนน้อย ส่วนรูปที่ 4.2 แสดงลักษณะพื้นผิวภายในยางวัลคาไนซ์ พบว่าพื้นผิวภายในมีช่องว่างพรมเพิ่มขึ้น เพราะสารวัลคาไนซ์ช่วยคงรูปยางทำให้พรมคงรูปอยู่ได้ ส่วนรูปที่ 4.3 แสดงลักษณะพื้นผิวภายในยางวัลคาไนซ์ที่ผสมอะลูมิเนียมซิลิเกต พบว่ามีโครงสร้างภายในเป็นโพรงกว้าง เป็นเพราะผลึกอะลูมิเนียมซิลิเกตจะแทรกอยู่ในพื้นผิวยางคอยค้ำ จุนโพรงพรมไว้ และในขณะเดียวกันก็ปิดบังพื้นผิวยางที่ใช้ในการดูดซับแก๊สเช่นกัน ส่วนในรูปที่ 4.4 แสดงลักษณะพื้นผิวภายในยางวัลคาไนซ์ที่ผสมอะลูมิเนียมซิลิเกตและไขพาราฟิน 10

phr พบว่ามีขนาดโพรงที่เล็กลง เป็นเพราะไซพาราฟินไปปกคลุมบนผิวของยางและอะลูมิเนียมซิลิเกต ทำให้พื้นที่ในการดูดซับเพิ่มขึ้น เพราะแก๊สไฮโดรคาร์บอนสามารถละลายในไซพาราฟินได้ จึงทำให้ถ้าเพิ่มไซพาราฟิน พื้นที่ในการดูดซับแก๊สก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.5 มีปริมาณไซพาราฟิน 100 phr พบว่ามีพื้นที่ในการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างมาก และสุดท้ายในรูปที่ 4.6 และ 4.7 แสดงลักษณะพื้นผิวภายในยางวัลคาไนซ์ที่ผสมคาร์บอนสำหรับดูดซับแก๊สไฮโดรเจน โดยรูปที่ 4.6 เป็นส่วนด้านบน พบว่ามีลักษณะคล้ายยางวัลคาไนซ์ในรูปที่ 4.2 แต่มีโพรงรูพรุนมากกว่า เพราะในส่วนผสมของยางวัลคาไนซ์ผสมคาร์บอนมีน้ำเป็นองค์ประกอบมากกว่า จึงมีผลึกน้ำแข็งมากกว่าเมื่อละลายจึงเกิดโพรงรูพรุนมากกว่า และในรูปที่ 4.7 พบว่ามีอนุภาคคาร์บอนหนาแน่น มีช่องว่างรูพรุนน้อย การเกิดลักษณะพื้นผิวภายในที่ต่างกันนี้ในยางวัลคาไนซ์ผสมคาร์บอน เป็นเพราะอนุภาคคาร์บอนมีขนาดใหญ่ประมาณ 100 μm ซึ่งอนุภาคยางมีขนาดเพียง 0.01 μm ถึง 1 μm ดังนั้นเมื่อเทน้ำยางผสมใส่แม่แบบอนุภาคคาร์บอนจึงตกลงก้นแบบ ทำให้ด้านล่างของแผ่นยางหนาแน่นไปด้วยคาร์บอน และด้านบนเป็นยางวัลคาไนซ์ที่มีอนุภาคคาร์บอนปะปนอยู่บางส่วน

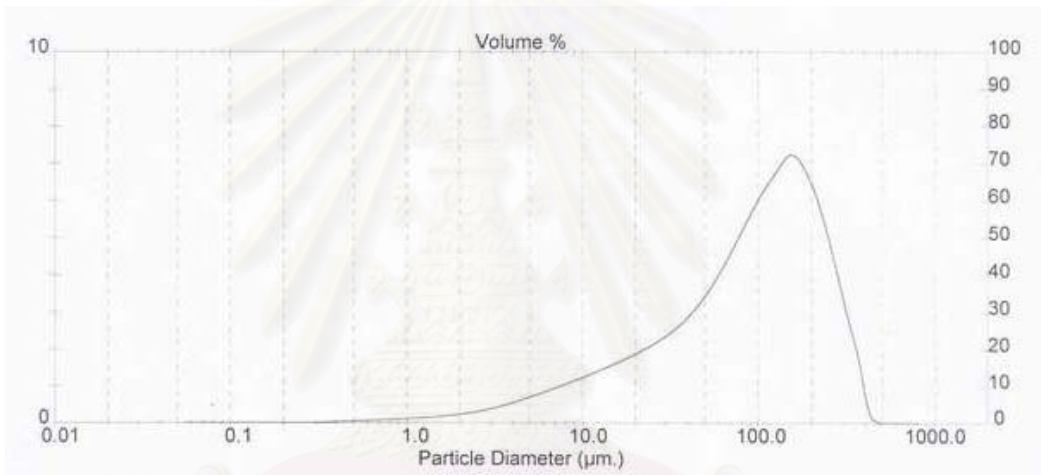
ทดสอบการดูดซับแก๊สในยางธรรมชาติ โดยแก๊สที่ทดสอบได้แก่ LPG มีเทน ไฮโดรเจน และ คาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าแผ่นยางธรรมชาติสามารถดูดซับ LPG และมีเทนได้ เพราะเป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้วเหมือนกัน แต่ดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้น้อยมากจนไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงในการทดลอง เพราะแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีขั้ว จึงได้ทดลองการดูดซับแต่เพียง LPG และมีเทน ส่วนแก๊สไฮโดรเจนสามารถดูดซับในคาร์บอนได้ จึงผสมยางกับคาร์บอนและศึกษาการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนต่อไป

4.1.3 ศึกษาขนาดอนุภาคของผงคาร์บอน

ศึกษาขนาดอนุภาคของผงคาร์บอนที่ใช้ในการผสมน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ เพื่อใช้เตรียมแผ่นยางสำหรับดูดซับแก๊สไฮโดรเจน ทำการวิเคราะห์ขนาดอนุภาค 3 ครั้ง ด้วยเครื่อง Laser Particle Size Distribution Analyzer แสดงผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.8

ตารางที่ 4.2 ขนาดอนุภาคของผงคาร์บอน

ผลการวิเคราะห์ครั้งที่	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (μm)	ขนาดอนุภาคที่เปอร์เซ็นต์ไทล์ (μm)		
		10	50	90
1	111.84	11.97	93.94	240.65
2	110.67	11.96	94.01	236.00
3	114.96	12.37	96.85	246.25
ค่าเฉลี่ย	112.49	12.10	94.93	240.97
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	2.22	0.23	1.66	5.13

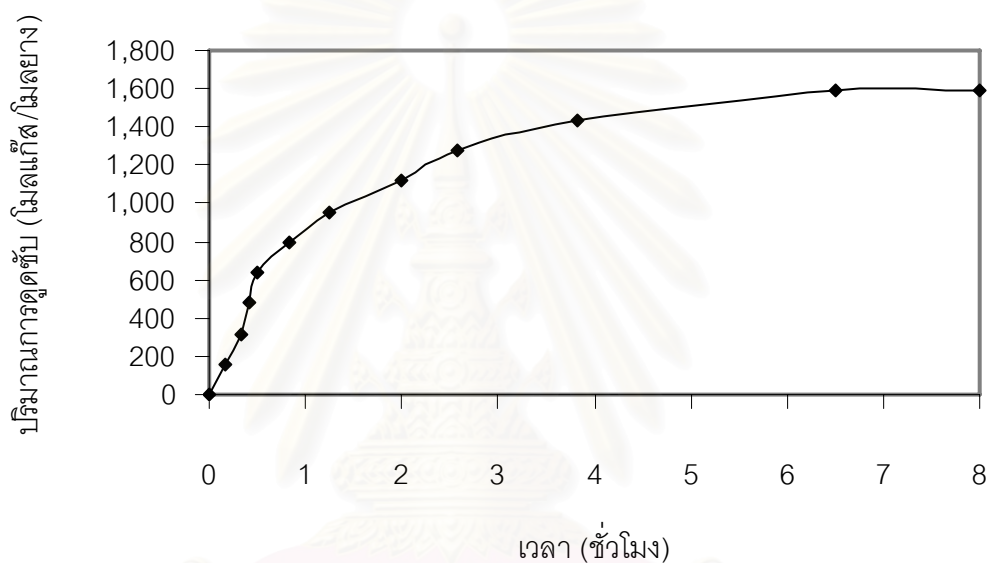


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงขนาดอนุภาคของผงคาร์บอน

จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.8 พบว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงคาร์บอนที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 112.49 μm ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าประมาณ 100,000 เท่าเมื่อเทียบกับ Carbon nanotube ที่ใช้ในการเก็บแก๊สไฮโดรเจน ซึ่ง Carbon nanotube สามารถเก็บแก๊สไฮโดรเจนได้ในปริมาณมาก [20]

4.2 ศึกษาการดูดซับ LPG ในยางธรรมชาติ

LPG คือ แก๊สเชื้อเพลิงที่ประกอบด้วย โพรเพน 70% และบิวเทน 30% บรรจุในถังที่มีความดัน 5 บาร์ ศึกษาการดูดซับ LPG ในแผ่นยางธรรมชาติพุนที่ไม่ได้ผสมสารเคมีใด ๆ พบว่าเมื่ออัดความดันเริ่มต้น 2 บาร์ แล้วความดันลดลงเรื่อย ๆ จนความดันที่วัดได้เปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ของค่าความดันที่เปลี่ยนแปลงก่อนหน้านี้ ใช้เวลาถึง 6 ชั่วโมงครึ่ง นำค่าความดันที่วัดได้ไปคำนวณหาปริมาณการดูดซับ (ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข) ปริมาณการดูดซับแสดงดังรูปที่ 4.9

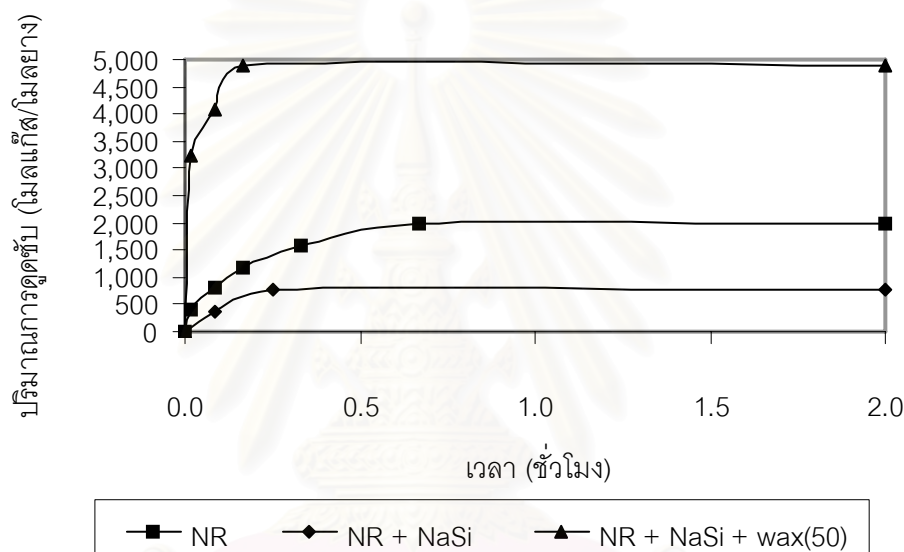


รูปที่ 4.9 การดูดซับ LPG ในยางธรรมชาติ

จากรูปที่ 4.9 พบว่าแผ่นยางธรรมชาติที่ไม่ผสมสารเคมีใด ๆ สามารถดูดซับ LPG ได้ปริมาณ 1,593 โมลแก๊ส/โมลยาง เพราะยางธรรมชาติ และ LPG มีองค์ประกอบเป็นไฮโดรคาร์บอนเหมือนกัน จึงดูดซับกันได้ แต่ที่ใช้เวลานานกว่าการเปลี่ยนแปลงความดันจะน้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ เป็นเพราะโมเลกุลยางธรรมชาติมีขนาดใหญ่ แต่โมเลกุลแก๊สมีขนาดเล็ก โมเลกุลแก๊สจึงแทรกซึมเข้าไปในยางได้ช้า อีกทั้งยางธรรมชาติมีโพรงรูพุนน้อย โมเลกุลแก๊สจึงแทรกซึมเข้าไปได้ช้า

4.3 ศึกษาสูตรผสมน้ำยางข้น

ศึกษาสูตรผสมน้ำยางข้นสำหรับขึ้นรูปแผ่นยางพรม ที่ทำให้แผ่นยางสามารถดูดซับ LPG ได้ดีขึ้น โดยเติมสารวัลคาไนซ์เพื่อช่วยในการคงรูปร่าง ทำให้ยางคงรูปไม่ยุบตัวลงมาทับรูปพรม และเติมสารตัวเติมเพื่อให้เกิดผลึกของแข็งช่วยค้ำจุนรูปพรมในยาง สารตัวเติมที่ใช้นี้คืออะลูมิเนียมซิลิเกต ซึ่งเกิดจากการผสมไฮเดียมซิลิเกตกับอะลูมิเนียมซิลเฟต (สารส้ม) และเติมสารช่วยการดูดซับ LPG คือโซพาราฟิน เปรียบเทียบการดูดซับแก๊สแต่ละสูตร แสดงผลดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 การดูดซับ LPG ของยางธรรมชาติ ยางผสมอะลูมิเนียมซิลิเกต และยางผสมอะลูมิเนียมซิลิเกตกับโซพาราฟิน 50 phr

จากรูปที่ 4.10 พบว่า ยางที่ผสมอะลูมิเนียมซิลิเกตดูดซับแก๊สได้ปริมาณน้อยมาก 770 มิลลิลิตร/มิลลิกรัม น้อยกว่ายางวัลคาไนซ์ซึ่งดูดซับแก๊สได้ 1,985 มิลลิลิตร/มิลลิกรัม เป็นเพราะการเติมอะลูมิเนียมซิลิเกตจะไปค้ำจุนรูปพรมภายในยาง ทำให้ยางมีรูปพรมมากก็จริง แต่ขณะเดียวกันก็ไปปิดบังพื้นผิวภายในยางที่ใช้ในการดูดซับแก๊สด้วย ส่วนยางที่ผสมอะลูมิเนียมซิลิเกตและโซพาราฟินนั้นดูดซับแก๊สได้มาก 4,877 มิลลิลิตร/มิลลิกรัม และในช่วงเวลา 1 นาทีแรกจะสามารถดูดซับได้เร็วมาก นั่นเป็นเพราะโซพาราฟินที่เติมเข้าไปจะไปเกาะบนอนุภาคของอะลูมิเนียมซิลิเกตและบนผิวยาง โดยโซพาราฟินเป็นสารไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวมีสมบัติในการละลายไฮโดรคาร์บอนได้ดี LPG จึงละลายในโซพาราฟินได้ดี และโซพาราฟินมีขนาดโมเลกุลที่เล็กกว่ายาง จึงทำให้สามารถดูดซับแก๊สได้เร็วกว่า ดังนั้นโซพาราฟินจึงมีผลต่อการดูดซับแก๊ส

4.4 ผลการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล

เพื่อหาภาวะของตัวแปรที่เหมาะสมต่อการดูดซับแก๊สเชื้อเพลิง จึงทำการทดลองเบื้องต้นด้วยวิธีแฟกทอเรียล โดยศึกษาปริมาณการดูดซับแก๊ส และอัตราการดูดซับเริ่มต้น ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ปริมาณไฮพาราฟิน (A) และอุณหภูมิ (B) ตัวแปรแต่ละตัวมี 2 ระดับ แสดงดังตารางที่ 4.3 โดยออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^2 และทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง รวมการทดลองทั้งหมด 8 การทดลอง และสามารถเขียนลำดับมาตรฐานของการทดลองร่วมปัจจัยที่เกิดขึ้นทั้งหมดได้เป็น [1], a, b และ ab ภาวะและผลของการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.4

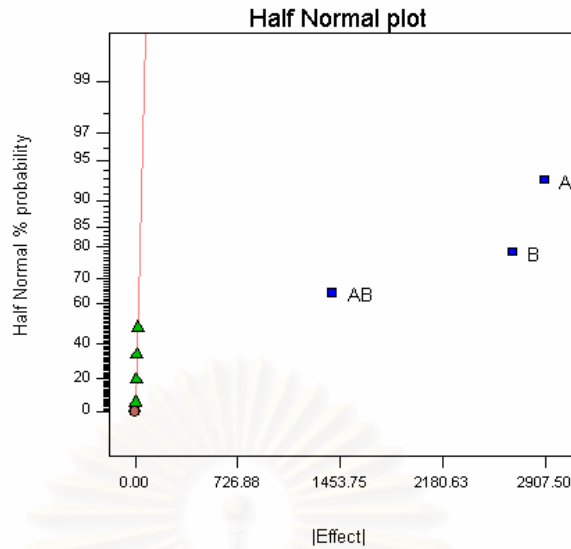
ตารางที่ 4.3 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษา

ตัวแปร	สัญลักษณ์	ระดับต่ำ(-)	ระดับสูง(+)
ปริมาณไฮพาราฟิน (phr)	A	10	100
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	B	-10	30

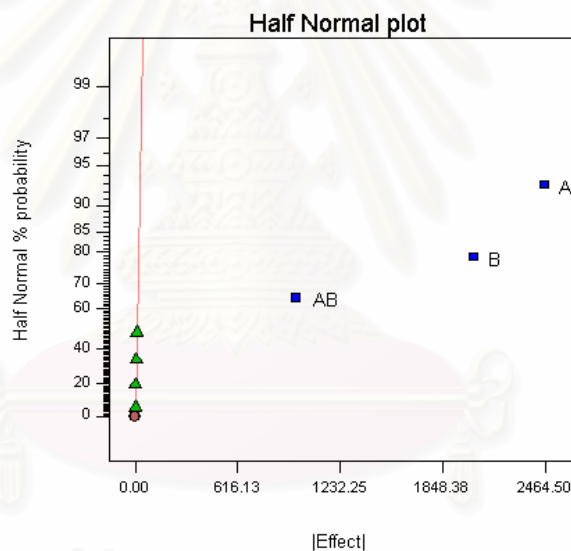
ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองจากภาวะการทดลองเชิงแฟกทอเรียลทอเรียล

การทดลอง	ตัวแปร		ปริมาณการดูดซับ (โมลแก๊ส/โมลยาง)	อัตราการดูดซับเริ่มต้น (โมลแก๊ส/โมลยาง/เวลา)
	A	B		
[1]	-1	-1	4173 4241	2504 2544
a	1	-1	8491 8532	5944 5973
b	-1	1	2898 2947	1449 1472
ab	1	1	4422 4444	2948 2962

ทำการวิเคราะห์หาตัวแปรที่มีผลต่อปริมาณการดูดซับ และอัตราการดูดซับเริ่มต้น ด้วยการสร้างกราฟ Normal Probability ดังรูปที่ 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ



รูปที่ 4.11 Normal probability plot กับค่า Effect estimate ของปริมาณการดูดซับ



รูปที่ 4.12 Normal probability plot กับค่า Effect estimate ของอัตราการดูดซับ

เมื่อพิจารณา Normal probability plot ของตัวแปรที่มีผลต่อปริมาณการดูดซับ (รูปที่ 4.11) และมีผลต่ออัตราการดูดซับเริ่มต้น (รูปที่ 4.12) พบว่าผลเหมือนกัน ตัวแปรที่คาดว่าจะมีผลคือ อุณหภูมิ (B) ปริมาณไซพาราฟิน (A) และอันตรกิริยาระหว่างปริมาณไซพาราฟินกับอุณหภูมิ (AB) เนื่องจากค่า Effect estimate ของตัวแปรได้เบี่ยงเบนออกจากแนวเส้นตรงอย่างเห็นได้ชัด จากนั้นทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อตรวจสอบผลของตัวแปร ด้วยค่า F-test ได้ดังตารางที่ 4.5 และตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.5 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปร สำหรับปริมาณการดูดซับ
(ANOVA Table)

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F_0
A	16,910,000	1	16,910,000	14717.83
B	14,380,000	1	14,380,000	12518.72
AB	3,903,000	1	3,903,000	3397.80
Error	4,595	4	1148.75	
Total	35,200,000	7		

ตารางที่ 4.6 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปร สำหรับอัตราการดูดซับเริ่มต้น
(ANOVA Table)

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F_0
A	12150000	1	12150000	30694.93
B	8270000	1	8270000	20897.65
AB	1882000	1	1882000	4755.02
Error	1583.00	4	395.75	
Total	22300000	7		

ในการทดสอบสมมติฐานโดยค่า F-test ใช้ช่วงความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์ ค่า Fวิกฤตที่ $F_{0.05,1,4}$ มีค่าเท่ากับ 7.71 จากความแปรปรวนของตัวแปรที่มีผลต่อปริมาณการดูดซับ และอัตราการดูดซับ พบว่าค่า F_0 ของปริมาณไซพาราฟิน (A) อุณหภูมิ (B) และอันตรกิริยาระหว่างปริมาณไซพาราฟินกับอุณหภูมิ (AB) มีค่ามากกว่าค่า F วิกฤต จึงกล่าวได้ว่าปริมาณไซพาราฟิน อุณหภูมิ และอันตรกิริยาระหว่างไซพาราฟินกับอุณหภูมิ เป็นตัวแปรที่มีผลต่อค่าปริมาณการดูดซับของ LPG

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (The Regression Model) ของปริมาณการดูดซับ โดยนำมาจัดในเทอมของสมการเชิงคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$Y_{Est} = \beta_0 + \beta_A A + \beta_B B + \beta_{AB} AB \quad (4.1)$$

$$Y_{Est} = 3485.21 + 40.07 A - 24.35 B - 0.78 AB \quad (4.2)$$

Y_{Est} คือปริมาณการดูดซับLPG

β_0 คือค่าของผลตอบสนอง เนื่องจากตัวแปรที่ไม่ได้ทำการทดลอง ซึ่งสามารถคำนวณมาจากค่าเฉลี่ยผลตอบสนองของข้อมูลทั้งหมด

β_i คือค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรที่มีผลในการทดลอง ซึ่งสามารถคำนวณมาจากค่าเฉลี่ยผลตอบสนองของตัวแปรนั้น ๆ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (The Regression Model) ของอัตราการดูดซับเริ่มต้น โดยนำมาจัดในเทอมของสมการเชิงคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$Y_{Est} = \beta_0 + \beta_A A + \beta_B B + \beta_{AB} AB \quad (4.3)$$

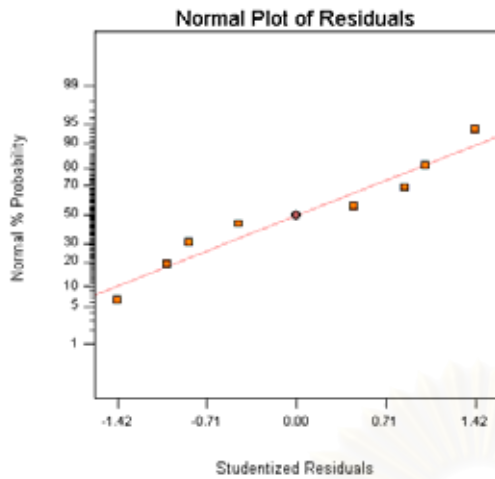
$$Y_{Est} = 1930.40 + 32.77 A - 21.19 B - 0.54 AB \quad (4.4)$$

Y_{Est} คืออัตราการดูดซับLPGเริ่มต้น

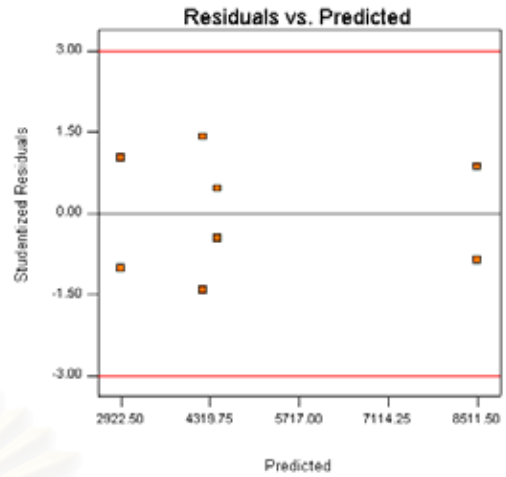
β_0 คือค่าของผลตอบสนอง เนื่องจากตัวแปรที่ไม่ได้ทำการทดลอง ซึ่งสามารถคำนวณมาจากค่าเฉลี่ยผลตอบสนองของข้อมูลทั้งหมด

β_i คือค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรที่มีผลในการทดลอง ซึ่งสามารถคำนวณมาจากค่าเฉลี่ยผลตอบสนองของตัวแปรนั้น ๆ

จากสมการเชิงคณิตศาสตร์ที่ได้ ผลดังกล่าวนำไปสร้างกราฟความน่าจะเป็นของส่วนตกค้าง (Normal probability plot of residual) และกราฟระหว่างส่วนตกค้างกับค่าการทำนาย แสดงดังรูปที่ 4.13 สำหรับปริมาณการดูดซับ และรูปที่ 4.14 สำหรับอัตราการดูดซับเริ่มต้น

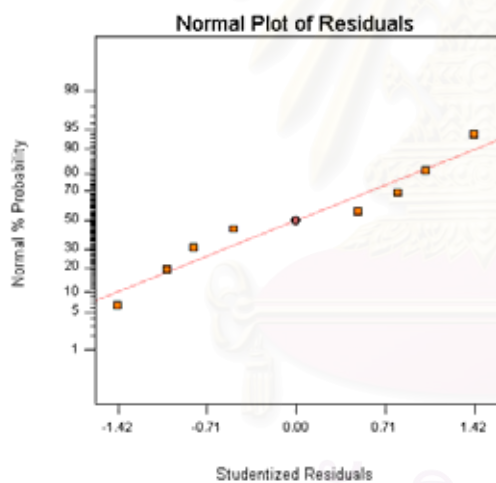


ก)

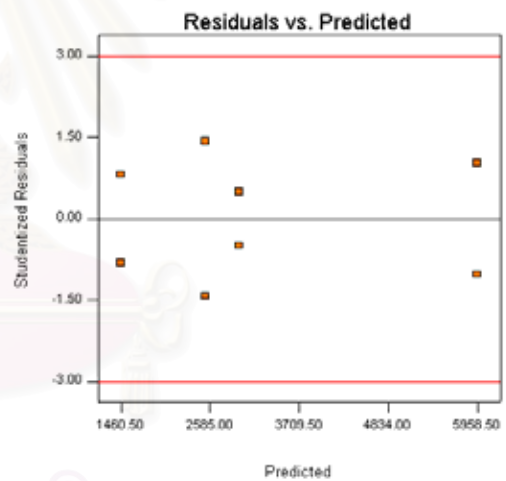


ข)

รูปที่ 4.13 ผลการคำนวณปริมาณการดูดซับ ก) กราฟความน่าจะเป็นของส่วนตกค้าง
ข) กราฟระหว่างส่วนตกค้างกับค่าการทำนาย



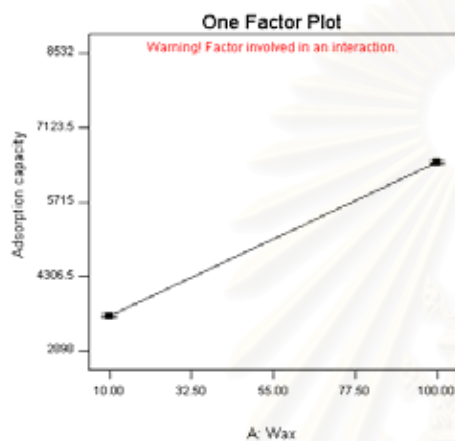
ก)



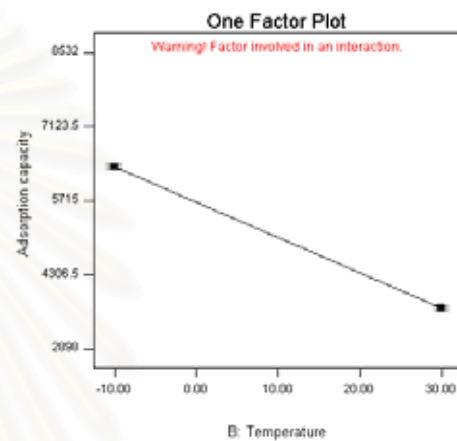
ข)

รูปที่ 4.14 ผลการคำนวณอัตราการดูดซับเริ่มต้น ก) กราฟความน่าจะเป็นของส่วนตกค้าง
ข) กราฟระหว่างส่วนตกค้างกับค่าการทำนาย

จากรูปที่ 4.13 ก) และ รูปที่ 4.14 ก) พบว่ากราฟความน่าจะเป็นของส่วนตักค้างมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง ซึ่งสนับสนุนข้อสรุปที่ว่า A, B และ AB เป็นปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญกับปริมาณการดูดซับ และอัตราการดูดซับเริ่มต้น จากรูปที่ 4.13 ข) และรูปที่ 4.14 ข) เป็นกราฟของส่วนตักค้างกับค่าการทำนาย ไม่พบสิ่งผิดปกติแสดงให้เห็นว่าไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตักค้างกับค่าการทำนาย และค่าความแปรปรวนของข้อมูลมีค่าคงที่ สรุปได้ว่าสมการถดถอยที่สมมติขึ้นสามารถเป็นตัวแทนของข้อมูลได้อย่างถูกต้อง

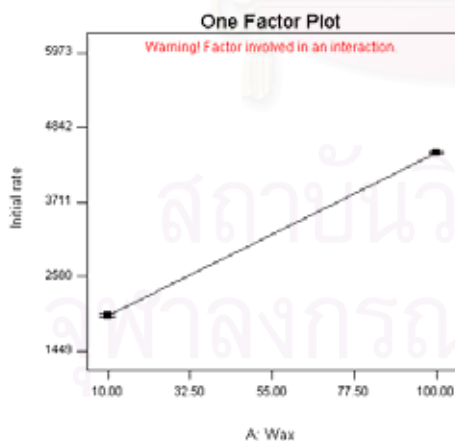


ก)

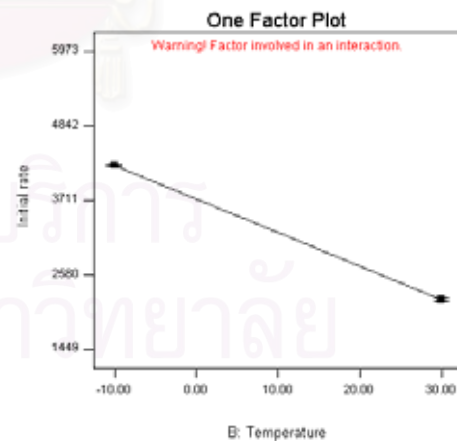


ข)

รูปที่ 4.15 กราฟแสดงถึงปัจจัยระดับสูงต่ำที่มีผลต่อปริมาณการดูดซับ ก) ปริมาณไซพาราฟิน
ข) อุณหภูมิ

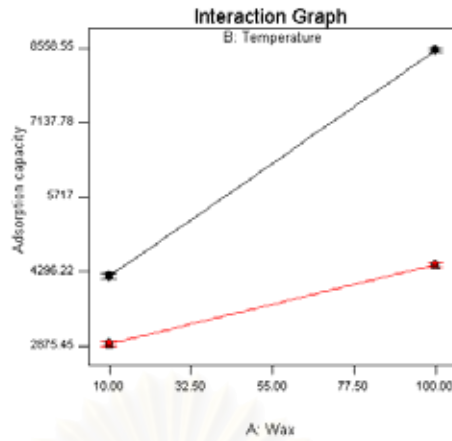


ก)

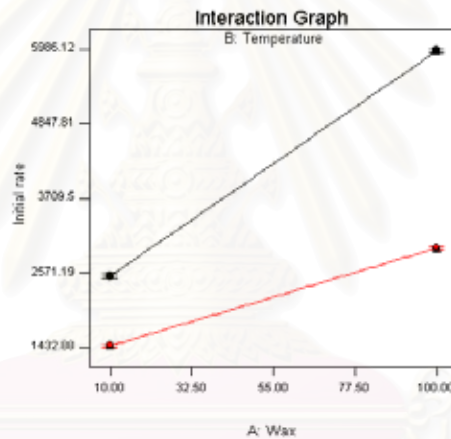


ข)

รูปที่ 4.16 กราฟแสดงถึงปัจจัยระดับสูงต่ำที่มีผลต่ออัตราการดูดซับเริ่มต้น ก) ปริมาณไซพาราฟิน
ข) อุณหภูมิ



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงถึงปัจจัยระดับสูงต่ำของปริมาณไซพาราฟิน และอุณหภูมิ ที่มีผลต่อปริมาณการดูดซับ



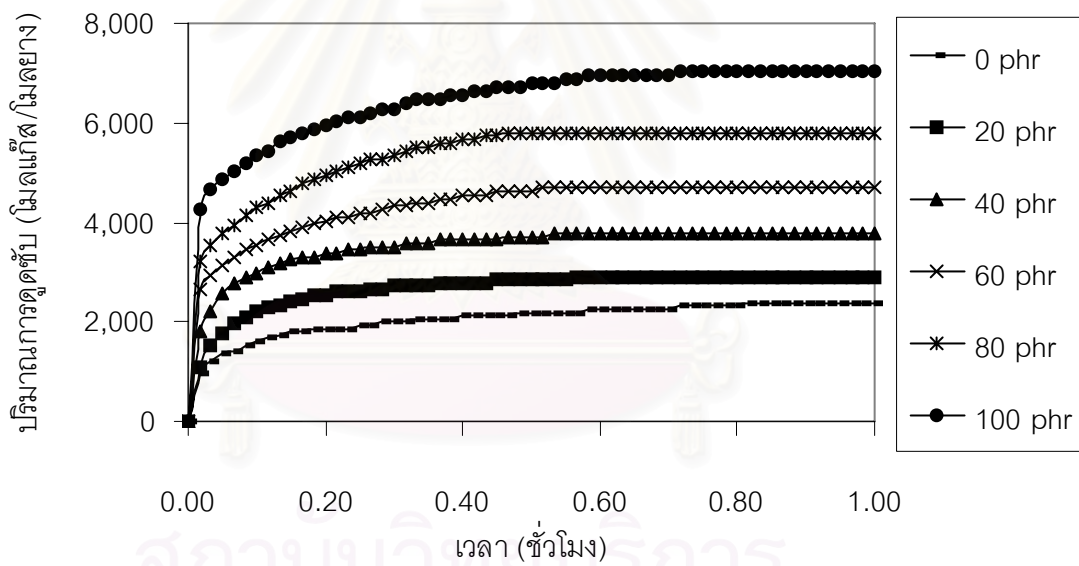
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงถึงปัจจัยระดับสูงต่ำของปริมาณไซพาราฟิน และอุณหภูมิ ที่มีผลต่ออัตราการดูดซับเริ่มต้น

จากรูปที่ 4.15 ถึง 4.18 เป็นกราฟแสดงถึงปัจจัยระดับสูงต่ำของตัวแปรที่มีผลต่อปริมาณการดูดซับ และอัตราการดูดซับเริ่มต้น สามารถสรุปได้ว่าภาวะของตัวแปรที่มีผลทำให้ปริมาณการดูดซับสูงสุด และอัตราการดูดซับเริ่มต้นเร็วที่สุด คือปริมาณสารช่วยการดูดซับ (ไซพาราฟิน) 100 phr และ อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส ดังนั้นภาวะการทดลองนี้เหมาะสมสำหรับการดูดซับแก๊สเชื้อเพลิง และจะทำการขยายผลเพื่อศึกษาผลของปริมาณสารช่วยการดูดซับ และ อุณหภูมิ ต่อไป

4.5 ศึกษาผลของตัวแปรที่มีต่อการดูดซับ LPG

4.5.1 ศึกษาผลของปริมาณไซพาราฟินต่อการดูดซับ LPG

ศึกษาการดูดซับ LPG ในแผ่นยางผสมไซพาราฟิน โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส อัตราความดันเริ่มต้น 2 บาร์ จากนั้นบันทึกค่าความดันที่ลดลง จนความดันที่วัดได้เปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ของค่าความดันที่เปลี่ยนแปลงก่อนหน้านี้ทั้งหมด โดยทำการทดลองที่ปริมาณไซพาราฟิน 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 phr จากนั้นนำค่าความดันที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณการดูดซับแก๊สในยาง (ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข) ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.19 และศึกษาอัตราการดูดซับเริ่มต้น โดยคำนวณจากความชันของกราฟปริมาณการดูดซับ (รูปที่ 4.19) ตั้งแต่เวลาเริ่มต้นจนถึง 1 นาที ตารางที่ 4.7 แสดงอัตราการดูดซับเริ่มต้น ปริมาณการดูดซับสุดท้าย และเวลาที่ใช้ในการดูดซับแก๊ส



รูปที่ 4.19 ปริมาณการดูดซับ LPG กับเวลา ที่ปริมาณไซพาราฟิน 0 - 100 phr

ตารางที่ 4.7 อัตราการดูดซับเริ่มต้นที่เวลา 1 นาที ปริมาณการดูดซับ และเวลาที่ใช้ในการดูดซับ LPG ของยางธรรมชาติผสมอะลูมิเนียมซิลิเกตที่ปริมาณไซพาราฟิน 0 - 100 phr ที่ อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส

ปริมาณไซพาราฟิน (phr)	อัตราการดูดซับเริ่มต้น (โมลแก๊ส/โมลยาง/ชั่วโมง)	ปริมาณการดูดซับ : C_{As} (โมลแก๊ส/โมลยาง)	เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (ชั่วโมง)
0	0.58×10^5	1,802	0.15
20	0.65×10^5	2,532	0.18
40	1.10×10^5	3,311	0.17
60	1.58×10^5	4,107	0.22
80	1.93×10^5	5,259	0.27
100	2.55×10^5	6,120	0.23

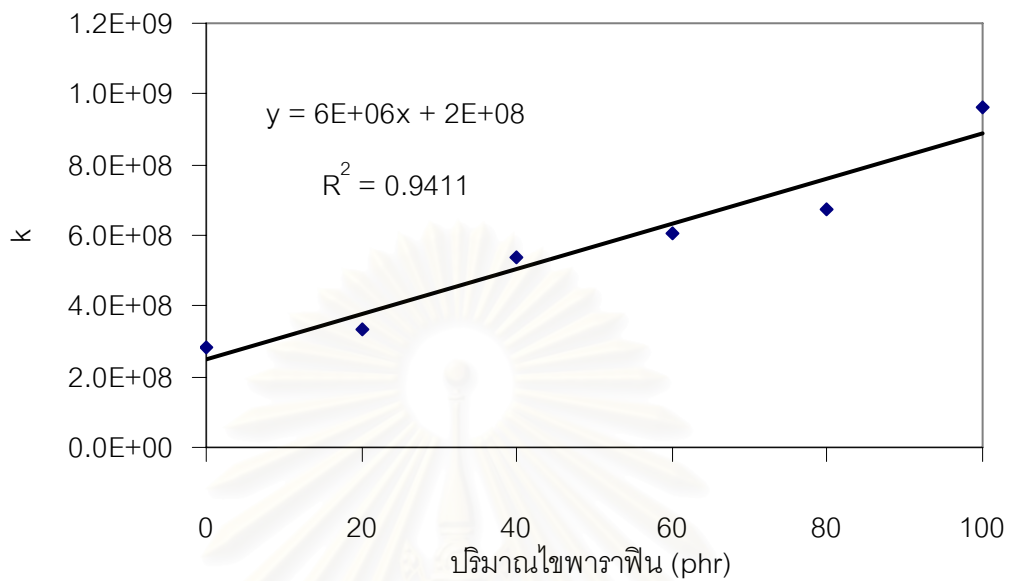
จากรูปที่ 4.19 แสดงผลของปริมาณไซพาราฟินที่มีต่อการดูดซับ LPG พบว่าปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้นตามปริมาณไซพาราฟิน และที่ปริมาณไซพาราฟิน 100 phr สามารถดูดซับแก๊สได้ปริมาณมากที่สุด 6,120 โมลแก๊ส/โมลยาง ใช้เวลาในการดูดซับ 0.23 ชั่วโมง และจากตารางที่ 4.7 อัตราการดูดซับแก๊สเริ่มต้นเพิ่มขึ้นตามปริมาณไซพาราฟินเช่นกัน และที่ปริมาณไซพาราฟิน 100 phr อัตราการดูดซับเริ่มต้นสูงสุด 2.55×10^5 โมลแก๊ส/โมลยางชั่วโมง เป็นเพราะ LPG สามารถละลายในไซพาราฟินได้ เนื่องจากเป็นไฮโดรคาร์บอนเหมือนกัน และโมเลกุลของไซพาราฟินมีขนาดเล็ก LPG จึงสามารถแทรกซึมเข้าไปในไซพาราฟินได้ง่ายและเร็ว เมื่อใส่ไซพาราฟินมาก ๆ ก็ทำให้สามารถดูดซับแก๊สได้มากและเร็วขึ้น

จากนั้นทำการศึกษาหาความสัมพันธ์ของปริมาณไซพาราฟิน (ϕ) มีหน่วยเป็น phr ที่มีผลต่อปริมาณการดูดซับ (C_{As}) จากสมการ (2.2) ในหัวข้อ 2.3.5

$$C_{As} = k \int_0^t C_{Ag} dt$$

ค่า k หาในรูปความสัมพันธ์กับปริมาณไซพาราฟิน (ϕ) โดยที่ปริมาณไซพาราฟินหนึ่ง ๆ จะมีค่า k ค่าหนึ่ง ซึ่งค่า k ค่านี้ได้จากการเฉลี่ยค่า k ที่เวลาเริ่มต้นจนถึงสมดุล ค่า k ที่เวลาต่าง ๆ คำนวณจากสมการที่ (2.2) โดยการหาพื้นที่ใต้กราฟระหว่างความเข้มข้นของแก๊สภายนอกยาง (C_{Ag}) กับเวลา (t) และค่าปริมาณการดูดซับ (C_{As}) ได้จากรูปที่ 4.19 (ตัวอย่างการคำนวณแสดงใน

ภาคผนวก ข) จากนั้นเขียนกราฟระหว่างค่า k กับปริมาณไฮพาราฟินเพื่อหาความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 แสดงค่า k ของ LPG ที่ปริมาณไฮพาราฟิน 0 - 100 phr

จากรูปที่ 4.20 ได้ความสัมพันธ์ของค่า k กับปริมาณไฮพาราฟิน (ϕ) ดังนี้

$$k_0 = 6 \times 10^6 \phi + 2 \times 10^8$$

จากสมการ (2.5) $k_0 = a + b \phi$

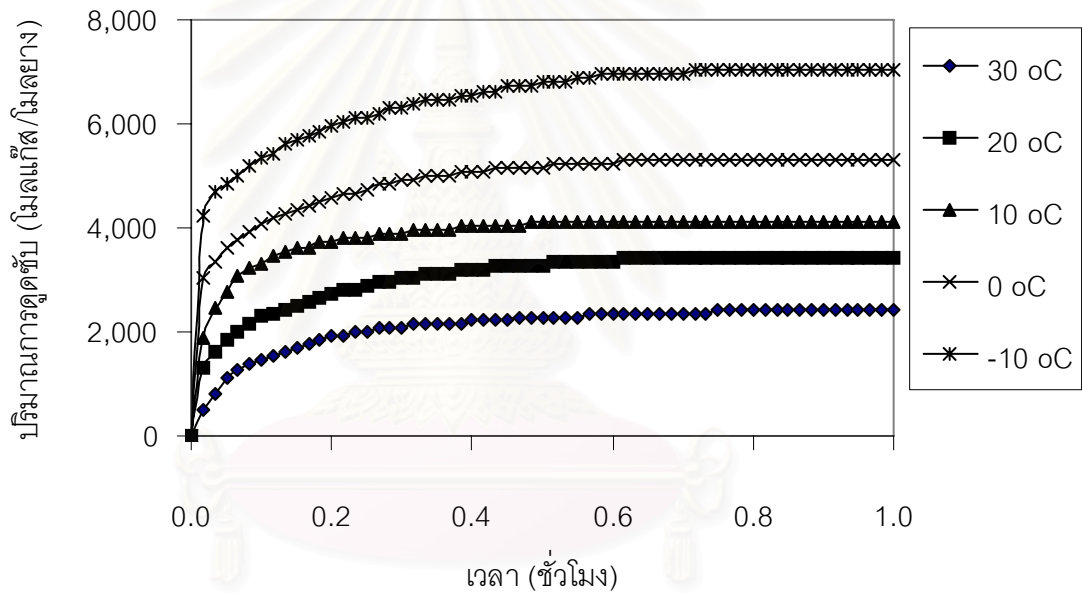
ดังนั้น $a = 2 \times 10^8$ โมลแก๊ส/โมลยาง และ $b = 6 \times 10^6$ โมลแก๊ส/โมลยาง/phr

จากนั้นแทนค่า a และ b ในสมการ (2.6) ได้

$$k' = (2 \times 10^8 + 6 \times 10^6 \phi) e^{c/T} \quad (4.1)$$

4.5.2 ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับ LPG

ศึกษาการดูดซับ LPG ของแผ่นยางผสมไซพาราฟิน โดยทำการทดลองที่ปริมาณไซพาราฟิน 100 phr อัตราความดันเริ่มต้น 2 บาร์ จากนั้นบันทึกค่าความดันที่ลดลง จนความดันที่วัดได้เปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ของค่าความดันที่เปลี่ยนแปลงก่อนหน้านี้ทั้งหมด โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ -10, 0, 10, 20 และ 30 องศาเซลเซียส จากนั้นนำค่าความดันที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณการดูดซับแก๊สในยาง (ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข) ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.21 และศึกษาอัตราการดูดซับเริ่มต้น โดยคำนวณจากความชันของกราฟปริมาณการดูดซับ (รูปที่ 4.21) ตั้งแต่เวลาเริ่มต้นจนถึง 1 นาที ตารางที่ 4.8 แสดงอัตราการดูดซับเริ่มต้น ปริมาณการดูดซับสุดท้าย และเวลาที่ใช้ในการดูดซับแก๊ส



รูปที่ 4.21 ปริมาณการดูดซับ LPG กับเวลา ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ตารางที่ 4.8 อัตราการดูดซับเริ่มต้นที่เวลา 1 นาที ปริมาณการดูดซับ และเวลาที่เข้าสู่สมดุลการดูดซับ LPG ของยางธรรมชาติผสมอะลูมิเนียมซิลิเกตและปริมาณไซพาราฟิน 100 phr ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการดูดซับเริ่มต้น (โมลแก๊ส/โมลยาง/ชั่วโมง)	ปริมาณการดูดซับ : C_{As} (โมลแก๊ส/โมลยาง)	เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (ชั่วโมง)
-10	2.55×10^5	6,120	0.23
0	1.82×10^5	4,667	0.22
10	1.14×10^5	3,634	0.15
20	0.78×10^5	2,823	0.22
30	0.31×10^5	1,918	0.20

รูปที่ 4.21 แสดงผลของอุณหภูมิต่ออัตราการดูดซับ LPG พบว่าปริมาณการดูดซับแปรผกผันกับอุณหภูมิ คือที่อุณหภูมิต่ำปริมาณการดูดซับสูง และที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียสสามารถดูดซับแก๊สได้ปริมาณมากที่สุด 6,120 โมลแก๊ส/โมลยาง ใช้เวลาในการดูดซับ 0.23 ชั่วโมง และจากตารางที่ 4.8 พบว่า อัตราการดูดซับแก๊สเริ่มต้นแปรผกผันกับอุณหภูมิ คือที่อุณหภูมิต่ำอัตราการดูดซับเริ่มต้นสูง และที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส อัตราการดูดซับแก๊สเริ่มต้นสูงสุด 2.55×10^5 โมลแก๊ส/โมลยาง/ชั่วโมง เป็นเพราะที่อุณหภูมิต่ำทำให้พลังงานจลน์ของแก๊สลดลงเมื่อพลังงานจลน์ของแก๊สต่ำกว่าพลังงานที่ผิวของยาง โมเลกุลแก๊สจึงถูกดูดซับไว้ที่ผิวของยางได้เมื่อลดอุณหภูมิมาก ๆ ก็จะทำให้ดูดซับแก๊สได้มาก และเร็วขึ้น

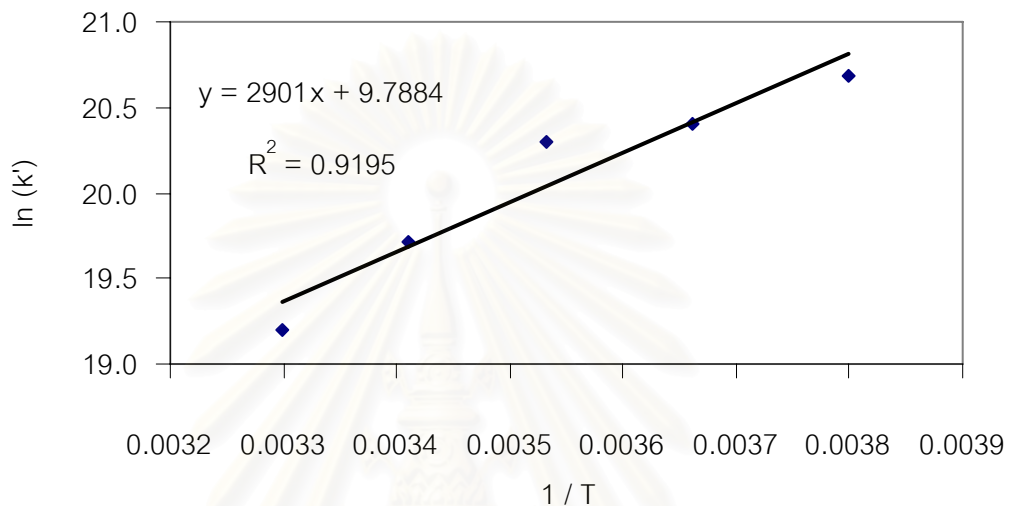
จากนั้นทำการศึกษาหาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ (T) ในหน่วยองศาเคลวินที่มีผลต่อปริมาณการดูดซับ (C_{As}) จากสมการ (2.2) ในหัวข้อ 2.3.5

$$C_{As} = k \int_0^t C_{Ag} dt$$

หาค่า k ในรูปความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ (T) โดยที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ จะมีค่า k ค่าหนึ่ง ซึ่งค่า k ค่านี้ได้จากการเฉลี่ยค่า k ที่เวลาเริ่มต้นจนถึงเวลาที่ความดันเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ ค่า k ที่เวลาต่าง ๆ คำนวณจากสมการที่ (2.2) โดยการหาพื้นที่ใต้กราฟระหว่างความเข้มข้นของ

แก๊สภายนอกยาง (C_{Ag}) กับเวลา (t) และค่าปริมาณการดูดซับ (C_{As}) ได้จากรูปที่ 4.21 (ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข)

จากสมการ (2.4) ในหัวข้อ 2.3.5 ทำการเขียนกราฟระหว่างค่า $\ln(k')$ กับส่วนกลับอุณหภูมิ ($1/T$) เพื่อหาค่าคงที่ c จากความชันของกราฟ ดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงค่า $\ln(k')$ กับ $1/T$ ของ LPG

จากรูปที่ 4.22 ได้ความสัมพันธ์ของค่า k' กับอุณหภูมิ (T) ดังนี้

$$\ln(k') = 2.90 \times 10^3 / T + 9.79$$

จากสมการ (2.4) $\ln(k') = \ln(k_0) + c/T$

ดังนั้น $c = 2.90 \times 10^3$ องศาเคลวิน

จากนั้นแทนค่า c ในสมการ (4.1) ได้

$$k' = (2 \times 10^8 + 6 \times 10^6 \phi) e^{(2.90 \times 10^3) / T} \quad (4.2)$$

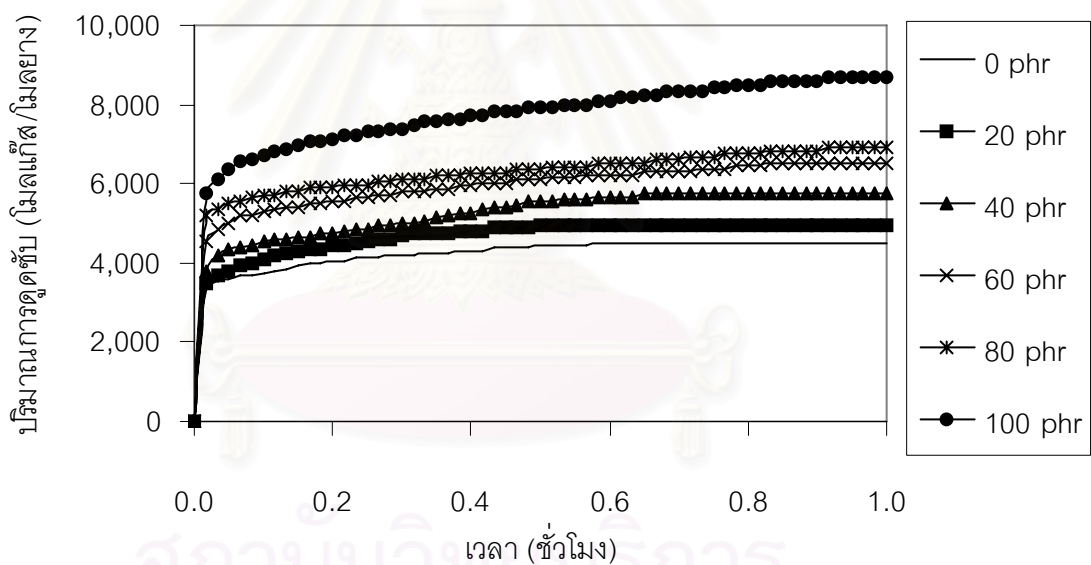
ดังนั้น แทนค่า ในสมการ (2.7) จะได้สมการการดูดซับของ LPG ดังนี้

$$C_{As} = (2 \times 10^8 + 6 \times 10^6 \phi) e^{(2.90 \times 10^3) / T} \int_0^t C_{Ag} dt \quad (4.3)$$

4.6 ศึกษาผลของตัวแปรที่มีต่อการดูดซับแก๊สมีเทน

4.6.1 ศึกษาผลของปริมาณไซพาราฟินต่อการดูดซับแก๊สมีเทน

ศึกษาการดูดซับแก๊สมีเทนในแผ่นยางผสมไซพาราฟิน โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส อัดความดันเริ่มต้น 10 บาร์ จากนั้นบันทึกค่าความดันที่ลดลง จนความดันที่วัดได้เปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ของค่าความดันที่เปลี่ยนแปลงก่อนหน้านี้ทั้งหมด โดยทำการทดลองที่ปริมาณไซพาราฟิน 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 phr จากนั้นนำค่าความดันที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณการดูดซับแก๊สในยาง (ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข) ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.23 และศึกษาอัตราการดูดซับเริ่มต้น โดยคำนวณจากความชันของกราฟปริมาณการดูดซับ (รูปที่ 4.23) ตั้งแต่เวลาเริ่มต้นจนถึง 1 นาที ตารางที่ 4.9 แสดงอัตราการดูดซับเริ่มต้น ปริมาณการดูดซับสุดท้าย และเวลาที่ใช้ในการดูดซับแก๊ส



รูปที่ 4.23 ปริมาณการดูดซับแก๊สมีเทนกับเวลา ที่ปริมาณไซพาราฟิน 0 - 100 phr

ตารางที่ 4.9 อัตราการดูดซับเริ่มต้นที่เวลา 1 นาที ปริมาณการดูดซับ และเวลาที่ใช้ในการดูดซับ แก๊สมีเทนของยางธรรมชาติผสมอะลูมิเนียมซิลิเกตที่ปริมาณไซพาราฟิน 0 - 100 phr ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส

ปริมาณไซพาราฟิน (phr)	อัตราการดูดซับเริ่มต้น (โมลแก๊ส/โมลยาง/ชั่วโมง)	ปริมาณการดูดซับ : C_{As} (โมลแก๊ส/โมลยาง)	เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (ชั่วโมง)
0	2.01×10^5	3,990	0.17
20	2.09×10^5	4,367	0.17
40	2.27×10^5	3,594	0.12
60	2.73×10^5	5,427	0.13
80	3.11×10^5	5,808	0.13
100	3.47×10^5	7,055	0.17

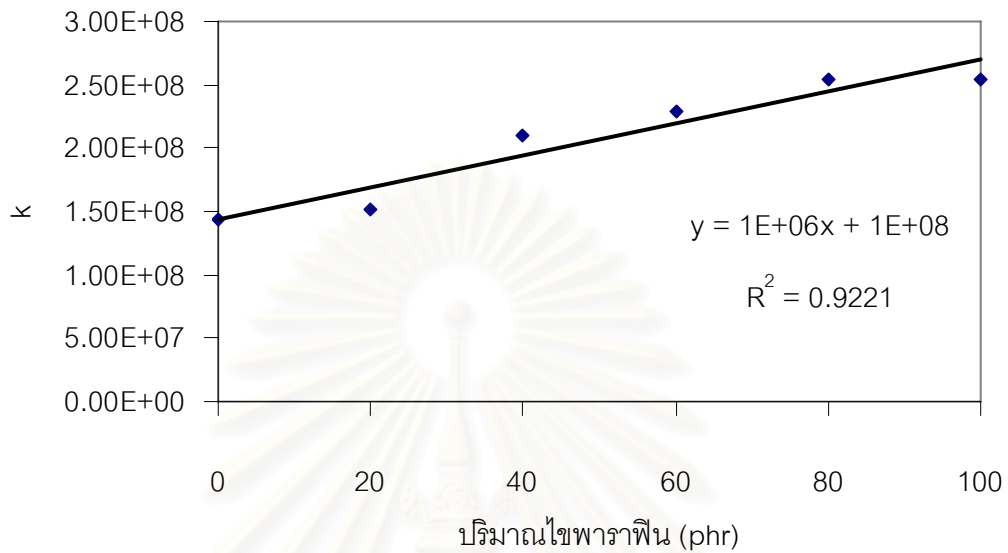
จากรูปที่ 4.23 แสดงผลของปริมาณไซพาราฟินที่มีต่อการดูดซับแก๊สมีเทน พบว่าปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้นตามปริมาณไซพาราฟิน และที่ปริมาณไซพาราฟิน 100 phr สามารถดูดซับแก๊สได้ปริมาณมากที่สุด 7,055 โมลแก๊ส/โมลยาง ใช้เวลาในการดูดซับ 0.17 ชั่วโมง และจากตารางที่ 4.9 พบว่า อัตราการดูดซับแก๊สเริ่มต้นเพิ่มขึ้นตามปริมาณไซพาราฟิน และที่ปริมาณไซพาราฟิน 100 phr อัตราการดูดซับเริ่มต้นสูงสุด 3.47×10^5 โมลแก๊ส/โมลยาง/ชั่วโมง เป็นเพราะแก๊สมีเทนสามารถละลายในไซพาราฟินได้ เนื่องจากเป็นไฮโดรคาร์บอนเหมือนกัน และโมเลกุลของไซพาราฟินมีขนาดเล็ก แก๊สมีเทนจึงสามารถแทรกซึมเข้าไปในไซพาราฟินได้ง่ายและเร็ว เมื่อใส่ไซพาราฟินมาก ๆ ก็ทำให้สามารถดูดซับแก๊สได้มาก และเร็วขึ้น

จากนั้นทำการศึกษาหาความสัมพันธ์ของปริมาณไซพาราฟิน (ϕ) มีหน่วยเป็น phr ที่มีผลต่อปริมาณการดูดซับ (C_{As}) จากสมการ (2.2) ในหัวข้อ 2.3.5

$$C_{As} = k \int_0^t C_{Ag} dt$$

ค่า k หาในรูปความสัมพันธ์กับปริมาณไซพาราฟิน (ϕ) โดยที่ปริมาณไซพาราฟินหนึ่ง ๆ จะมีค่า k ค่าหนึ่ง ซึ่งค่า k ค่านี้ได้จากการเฉลี่ยค่า k ที่เวลาเริ่มต้นจนถึงสมดุล ค่า k ที่เวลาต่าง ๆ คำนวณจากสมการที่ (2.2) โดยการหาพื้นที่ใต้กราฟระหว่างความเข้มข้นของแก๊สภายนอกยาง (C_{Ag}) กับเวลา (t) และค่าปริมาณการดูดซับ (C_{As}) ได้จากรูปที่ 4.23 (ตัวอย่างการคำนวณแสดงใน

ภาคผนวก ข) จากนั้น plot กราฟระหว่างค่า k กับปริมาณไฮพาราฟินเพื่อหาความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 แสดงค่า k ของแก๊สมีเทนที่ปริมาณไฮพาราฟิน 0 - 100 phr

จากรูปที่ 4.24 ได้ความสัมพันธ์ของค่า k กับปริมาณไฮพาราฟิน (ϕ) ดังนี้

$$k_0 = 1 \times 10^6 \phi + 1 \times 10^8$$

จากสมการ (2.5) $k_0 = a + b \phi$

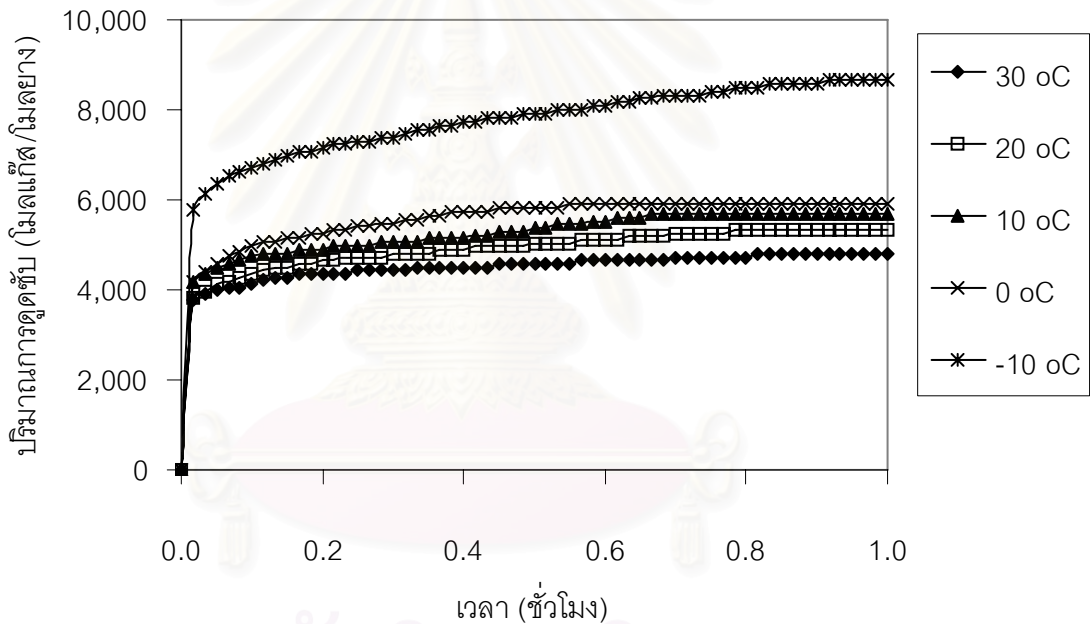
ดังนั้น $a = 1 \times 10^8$ โมลแก๊ส/โมลยาง และ $b = 1 \times 10^6$ โมลแก๊ส/โมลยาง/phr

จากนั้นแทนค่า a และ b ในสมการ (2.6) ได้

$$k' = (1 \times 10^8 + 1 \times 10^6 \phi) e^{c/T} \quad (4.4)$$

4.6.2 ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับแก๊สมีเทน

ศึกษาการดูดซับแก๊สมีเทนของแผ่นยางผสมไขพาราฟิน โดยทำการทดลองที่ปริมาณไขพาราฟิน 100 phr อัตราความดันเริ่มต้น 10 บาร์ จากนั้นบันทึกค่าความดันที่ลดลง จนความดันที่วัดได้เปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ของค่าความดันที่เปลี่ยนแปลงก่อนหน้านี้ทั้งหมด โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ -10, 0, 10, 20 และ 30 องศาเซลเซียส จากนั้นนำค่าความดันที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณการดูดซับแก๊สในยาง (ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข) ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.25 และศึกษาอัตราการดูดซับเริ่มต้น โดยคำนวณจากความชันของกราฟปริมาณการดูดซับ (รูปที่ 4.25) ตั้งแต่เวลาเริ่มต้นจนถึง 1 นาที ตารางที่ 4.10 แสดงอัตราการดูดซับเริ่มต้น ปริมาณการดูดซับสุดท้าย และเวลาที่ใช้ในการดูดซับแก๊ส



รูปที่ 4.25 ปริมาณการดูดซับแก๊สมีเทนกับเวลา ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.10 อัตราการดูดซับเริ่มต้นที่เวลา 1 นาที ปริมาณการดูดซับ และเวลาที่เข้าสู่สมดุลการดูดซับแก๊สมีเทนของยางธรรมชาติผสมอะลูมิเนียมซิลิเกตและปริมาณไซพาราฟิน 100 phr ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการดูดซับเริ่มต้น (โมลแก๊ส/โมลยาง/ชั่วโมง)	ปริมาณการดูดซับ : C_{As} (โมลแก๊ส/โมลยาง)	เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (ชั่วโมง)
-10	3.47×10^5	7,055	0.17
0	2.51×10^5	5,077	0.12
10	2.51×10^5	4,819	0.13
20	2.29×10^5	4,502	0.13
30	2.26×10^5	4,279	0.13

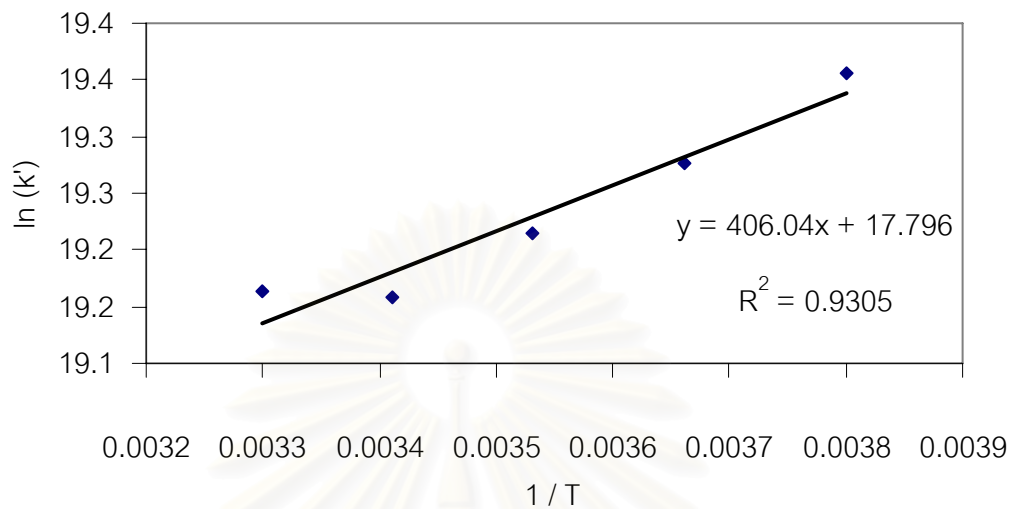
รูปที่ 4.25 แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับแก๊สมีเทนพบว่าปริมาณการดูดซับแปรผกผันกับอุณหภูมิ คือที่อุณหภูมิต่ำปริมาณการดูดซับสูง และที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียสสามารถดูดซับแก๊สได้ปริมาณมากที่สุด 7,055 โมลแก๊ส/โมลยาง ใช้เวลาในการดูดซับ 0.17 ชั่วโมง และจากตารางที่ 4.10 พบว่า อัตราการดูดซับแก๊สเริ่มต้นแปรผกผันกับอุณหภูมิ คือที่อุณหภูมิต่ำอัตราการดูดซับเริ่มต้นสูง และที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส อัตราการดูดซับแก๊สเริ่มต้นสูงสุด 3.47×10^5 โมลแก๊ส/โมลยาง/ชั่วโมง เป็นเพราะที่อุณหภูมิต่ำทำให้พลังงานจลน์ของแก๊สต่ำลง โมเลกุลของแก๊สจึงถูกดูดซับไว้ที่ผิวของยางได้ง่าย และเร็วขึ้น เมื่อลดอุณหภูมิมาก ๆ ก็จะทำให้ดูดซับแก๊สได้มาก และเร็วยิ่งขึ้น

จากนั้นทำการศึกษาหาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ (T) ในหน่วยองศาเคลวินที่มีผลต่อปริมาณการดูดซับ (C_{As}) จากสมการ (2.2) ในหัวข้อ 2.3.5

$$C_{As} = k \int_0^t C_{Ag} dt$$

หาค่า k ในรูปความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ (T) โดยที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ จะมีค่า k ค่าหนึ่ง ซึ่งค่า k ค่านี้ได้จากการเฉลี่ยค่า k ที่เวลาเริ่มต้นจนถึงสมดุล ค่า k ที่เวลาต่าง ๆ คำนวณจากสมการที่ (2.2) โดยการหาพื้นที่ใต้กราฟระหว่างความเข้มข้นของแก๊สภายนอกยาง (C_{Ag}) กับเวลา (t) และค่าปริมาณการดูดซับ (C_{As}) ได้จากรูปที่ 4.25 (ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข) จากสมการ

(2.4) ในหัวข้อ 2.3.5 ทำการเขียนกราฟระหว่างค่า $\ln(k')$ กับส่วนกลับอุณหภูมิ ($1/T$) เพื่อหาค่าคงที่ c จากความชันของกราฟ ดังรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงค่า $\ln(k')$ กับ $1/T$ ของแก๊สมีเทน

จากรูปที่ 4.26 ได้ความสัมพันธ์ของค่า k' กับอุณหภูมิ (T) ดังนี้

$$\ln(k') = 4.06 \times 10^2 / T + 17.80$$

จากสมการ (2.4) $\ln(k') = \ln(k_0) + c/T$

ดังนั้น $c = 4.06 \times 10^2$ องศาเซลเซียส

จากนั้นแทนค่า c ในสมการ (4.4) ได้

$$k' = (1 \times 10^8 + 1 \times 10^6 \phi) e^{(4.06 \times 10^2) / T} \quad (4.5)$$

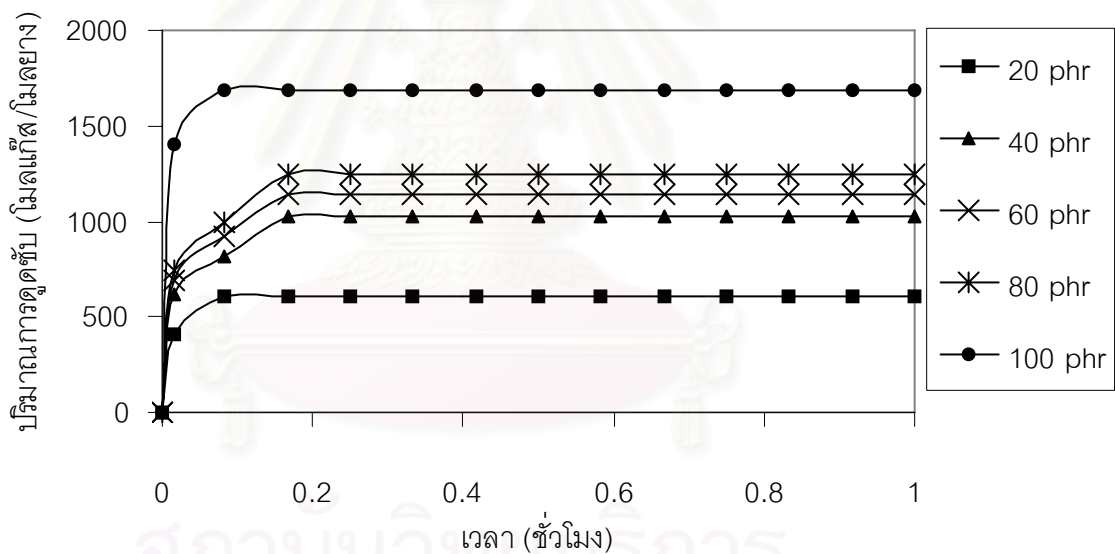
ดังนั้น แทนค่า ในสมการ (2.7) จะได้สมการการดูดซับของแก๊สมีเทนดังนี้

$$C_{As} = (1 \times 10^8 + 1 \times 10^6 \phi) e^{(4.06 \times 10^2) / T} \int_0^t C_{Ag} dt \quad (4.6)$$

4.7 ศึกษาผลของตัวแปรที่มีต่อการดูดซับแก๊สไฮโดรเจน

4.7.1 ศึกษาผลของปริมาณคาร์บอนต่อการดูดซับแก๊สไฮโดรเจน

ศึกษาการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนในแผ่นยางผสมคาร์บอน โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส อัดความดันเริ่มต้น 10 บาร์ จากนั้นบันทึกค่าความดันที่ลดลง จนความดันที่วัดได้เปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ของค่าความดันที่เปลี่ยนแปลงก่อนหน้าทั้งหมด โดยทำการทดลองที่ปริมาณไซพาราฟิน 20, 40, 60, 80 และ 100 phr จากนั้นนำค่าความดันที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณการดูดซับแก๊สในยาง (ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข) ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.27 และศึกษาอัตราการดูดซับเริ่มต้น โดยคำนวณจากความชันของกราฟปริมาณการดูดซับ (รูปที่ 4.27) ตั้งแต่เวลาเริ่มต้นจนถึง 1 นาที ตารางที่ 4.11 แสดงอัตราการดูดซับเริ่มต้น ปริมาณการดูดซับสุดท้าย และเวลาที่ใช้ในการดูดซับแก๊ส



รูปที่ 4.27 ปริมาณการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนกับเวลา ที่ปริมาณคาร์บอน 20 - 100 phr

ตารางที่ 4.11 อัตราการดูดซับเริ่มต้นที่เวลา 1 นาที ปริมาณการดูดซับ และเวลาที่ใช้ในการดูดซับ แก๊สไฮโดรเจนของยางธรรมชาติที่ปริมาณคาร์บอน 20 - 100 phr ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส

ปริมาณไซพาราฟิน (phr)	อัตราการดูดซับเริ่มต้น (โมลแก๊ส/โมลยาง/ชั่วโมง)	ปริมาณการดูดซับ : C_{As} (โมลแก๊ส/โมลยาง)	เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (ชั่วโมง)
20	2.42×10^4	606	0.08
40	3.68×10^4	1,024	0.17
60	4.12×10^4	1,146	0.17
80	4.47×10^4	1,243	0.17
100	8.41×10^4	1,681	0.08

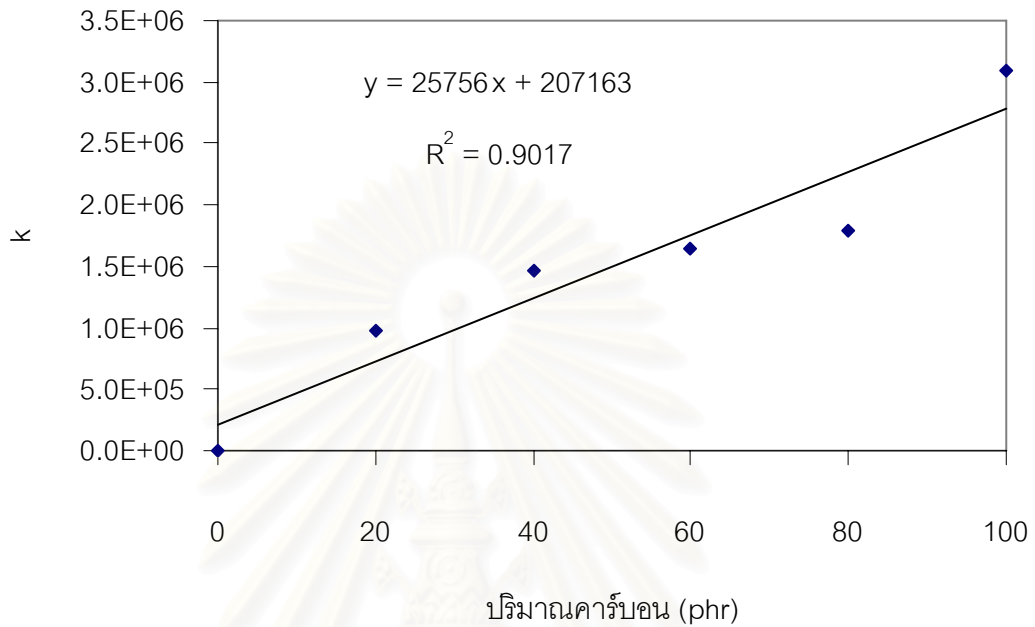
จากรูปที่ 4.27 แสดงผลของปริมาณคาร์บอนที่มีต่อการดูดซับแก๊สไฮโดรเจน พบว่า ปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้นตามปริมาณคาร์บอน และที่ปริมาณคาร์บอน 100 phr สามารถดูดซับแก๊สได้ปริมาณมากที่สุด 1,681 โมลแก๊ส/โมลยาง ใช้เวลาในการดูดซับ 0.08 ชั่วโมง และจากตารางที่ 4.11 พบว่า อัตราการดูดซับแก๊สเริ่มต้นเพิ่มขึ้นตามปริมาณคาร์บอน และที่ปริมาณคาร์บอน 100 phr อัตราการดูดซับเริ่มต้นสูงสุด 8.41×10^4 โมลแก๊ส/โมลยาง/ชั่วโมง เป็นเพราะแก๊สไฮโดรเจนสามารถถูกดูดซับในคาร์บอนได้ เนื่องจากคาร์บอนมีพื้นที่ผิวมาก และมีสมบัติดูดซับแก๊สต่าง ๆ ได้ดี ดังนั้นเมื่อเพิ่มคาร์บอนมาก ทำให้มีพื้นที่ผิวสำหรับการดูดซับมาก จึงดูดซับแก๊สไฮโดรเจนได้มาก และเร็ว

จากนั้นทำการศึกษาหาความสัมพันธ์ของปริมาณคาร์บอน (ϕ) มีหน่วยเป็น phr ที่มีผลต่อปริมาณการดูดซับ (C_{As}) จากสมการ (2.2) ในหัวข้อ 2.3.5

$$C_{As} = k \int_0^t C_{Ag} dt$$

ค่า k หาในรูปความสัมพันธ์กับปริมาณคาร์บอน (ϕ) โดยที่ปริมาณคาร์บอนหนึ่ง ๆ จะมีค่า k ค่าหนึ่ง ซึ่งค่า k ค่านี้ได้จากการเฉลี่ยค่า k ที่เวลาเริ่มต้นจนถึงสมดุล ค่า k ที่เวลาต่าง ๆ คำนวณจากสมการที่ (2.2) โดยการหาพื้นที่ใต้กราฟระหว่างความเข้มข้นของแก๊สภายนอกยาง (C_{Ag}) กับเวลา (t) และค่าปริมาณการดูดซับ (C_{As}) ได้จากรูปที่ 4.27 (การคำนวณแสดงใน

ภาคผนวก ข) จากนั้น plot กราฟระหว่างค่า k กับปริมาณคาร์บอนเพื่อหาความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 แสดงค่า k ของแก๊สไฮโดรเจนที่ปริมาณคาร์บอน 0 - 100 phr

จากรูปที่ 4.28 ได้ความสัมพันธ์ของค่า k กับปริมาณคาร์บอน (ϕ) ดังนี้

$$k_0 = 2.57 \times 10^4 \phi + 2.07 \times 10^5$$

จากสมการ (2.5) $k_0 = a + b \phi$

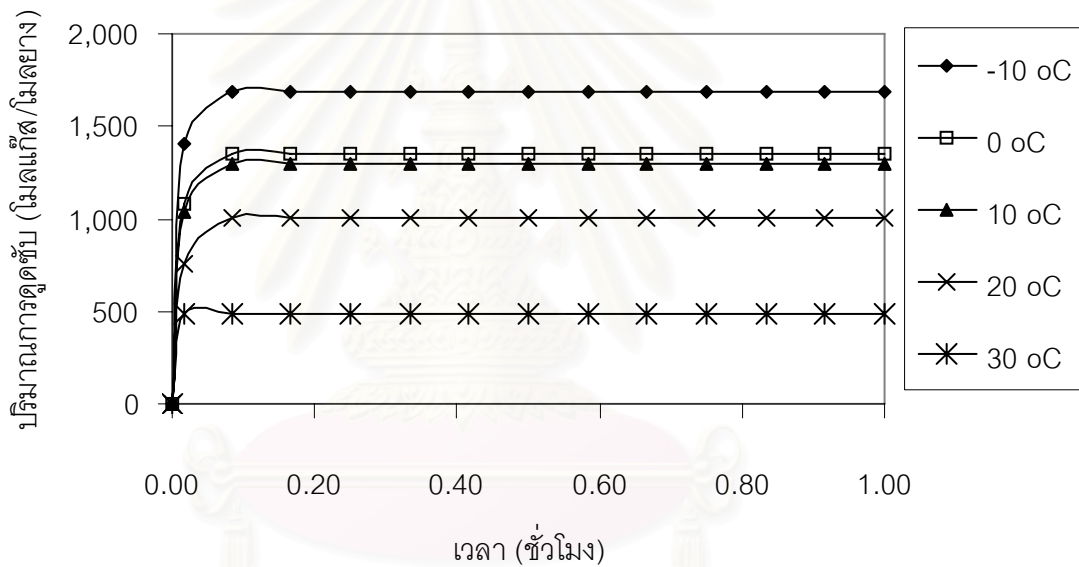
ดังนั้น $a = 2.07 \times 10^5$ โมลแก๊ส/โมลยาง และ $b = 2.57 \times 10^4$ โมลแก๊ส/โมลยาง/phr

จากนั้นแทนค่า a และ b ในสมการ (2.6) ได้

$$k' = (2.07 \times 10^5 + 2.57 \times 10^4 \phi) e^{c/T} \quad (4.7)$$

4.7.2 ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับแก๊สไฮโดรเจน

ศึกษาการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนของแผ่นยางผสมคาร์บอน โดยทำการทดลองที่ปริมาณคาร์บอน 100 phr อัตราความดันเริ่มต้น 10 บาร์ จากนั้นบันทึกค่าความดันที่ลดลง จนความดันที่วัดได้เปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ของค่าความดันที่เปลี่ยนแปลงก่อนหน้านี้ทั้งหมด โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ -10, 0, 10, 20 และ 30 องศาเซลเซียส จากนั้นนำค่าความดันที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณการดูดซับแก๊สในยาง (การคำนวณแสดงในภาคผนวก ข) ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.29 และศึกษาอัตราการดูดซับเริ่มต้น โดยคำนวณจากความชันของกราฟปริมาณการดูดซับ (รูปที่ 4.29) ตั้งแต่เวลาเริ่มต้นจนถึง 1 นาที ตารางที่ 4.12 แสดงอัตราการดูดซับเริ่มต้น ปริมาณการดูดซับสุดท้าย และเวลาที่ใช้ในการดูดซับแก๊ส



รูปที่ 4.29 ปริมาณการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนกับเวลา ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ตารางที่ 4.12 อัตราการดูดซับเริ่มต้นที่เวลา 1 นาที ปริมาณการดูดซับ และเวลาที่เข้าสู่สมดุลการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนของยางธรรมชาติผสมคาร์บอนปริมาณ 100 phr ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการดูดซับเริ่มต้น (โมลแก๊ส/โมลยาง/เวลา)	ปริมาณการดูดซับ : C_{As} (โมลแก๊ส/โมลยาง)	เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (ชั่วโมง)
-10	8.41×10^4	1,682	0.08
0	6.48×10^4	1,350	0.08
10	6.25×10^4	1,302	0.08
20	4.53×10^4	1,006	0.08
30	2.92×10^4	487	0.02

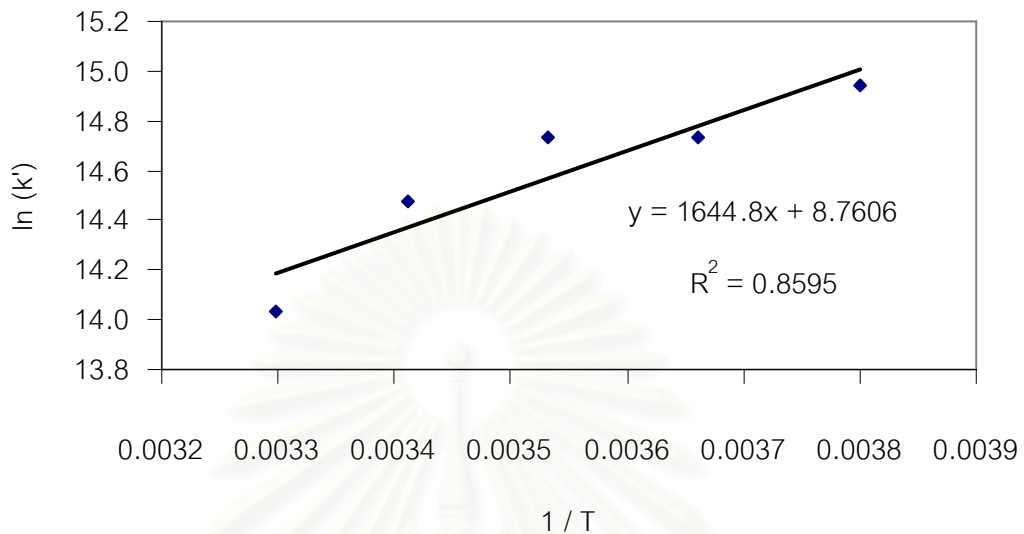
รูปที่ 4.29 แสดงผลของอุณหภูมิต่ออัตราการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนพบว่าปริมาณการดูดซับแปรผกผันกับอุณหภูมิ คือที่อุณหภูมิต่ำปริมาณการดูดซับสูง และที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียสสามารถดูดซับแก๊สได้ปริมาณมากที่สุด 1,681 โมลแก๊ส/โมลยาง ใช้เวลาในการดูดซับ 0.08 ชั่วโมง และจากตารางที่ 4.12 พบว่า อัตราการดูดซับแก๊สเริ่มต้นแปรผกผันกับอุณหภูมิ คือที่อุณหภูมิต่ำอัตราการดูดซับเริ่มต้นสูง และที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส อัตราการดูดซับแก๊สเริ่มต้นสูงสุด 8.41×10^4 โมลแก๊ส/โมลยาง/ชั่วโมง เป็นเพราะที่อุณหภูมิต่ำทำให้พลังงานจลน์ของแก๊สต่ำลง โมเลกุลของแก๊สจึงถูกดูดซับไว้ที่ผิวของคาร์บอนได้ง่าย และเร็วขึ้น เมื่อลดอุณหภูมิต่ำ ๆ ก็จะทำให้ดูดซับแก๊สได้มาก และเร็วยิ่งขึ้น

จากนั้นทำการศึกษาหาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ (T) ในหน่วยองศาเคลวินที่มีผลต่อปริมาณการดูดซับ (C_{As}) จากสมการ (2.2) ในหัวข้อ 2.3.5

$$C_{As} = k \int_0^t C_{Ag} dt$$

หาค่า k ในรูปความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ (T) โดยที่อุณหภูมิต่าง ๆ จะมีค่า k ค่าหนึ่ง ซึ่งค่า k ค่านี้ได้จากการเฉลี่ยค่า k ที่เวลาเริ่มต้นจนถึงสมดุล ค่า k ที่เวลาต่าง ๆ คำนวณจากสมการที่ (2.2) โดยการหาพื้นที่ใต้กราฟระหว่างความเข้มข้นของแก๊สภายนอกยาง (C_{Ag}) กับเวลา (t) และค่าปริมาณการดูดซับ (C_{As}) ได้จากรูปที่ 4.29 (การคำนวณแสดงในภาคผนวก ข) จากสมการ (2.4)

ในหัวข้อ 2.3.5 ทำการเขียนกราฟระหว่างค่า $\ln(k')$ กับส่วนกลับอุณหภูมิ ($1/T$) เพื่อหาค่าคงที่ c จากความชันของกราฟ ดังรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.30 กราฟแสดงค่า $\ln(k')$ กับ $1/T$ ของแก๊สไฮโดรเจน

จากรูปที่ 4.30 ได้ความสัมพันธ์ของค่า k' กับอุณหภูมิ (T) ดังนี้

$$\ln(k') = 1.64 \times 10^3 / T + 8.76$$

จากสมการ (2.4) $\ln(k') = \ln(k_0) + c / T$

ดังนั้น $c = 1.64 \times 10^3$ องศาเคลวิน

จากนั้น แทนค่า c ในสมการ (4.7) ได้

$$k' = (2.07 \times 10^5 + 2.57 \times 10^4 \phi) e^{(1.64 \times 10^3) / T} \quad (4.8)$$

ดังนั้น แทนค่า ในสมการ (2.7) จะได้สมการการดูดซับของแก๊สไฮโดรเจนดังนี้

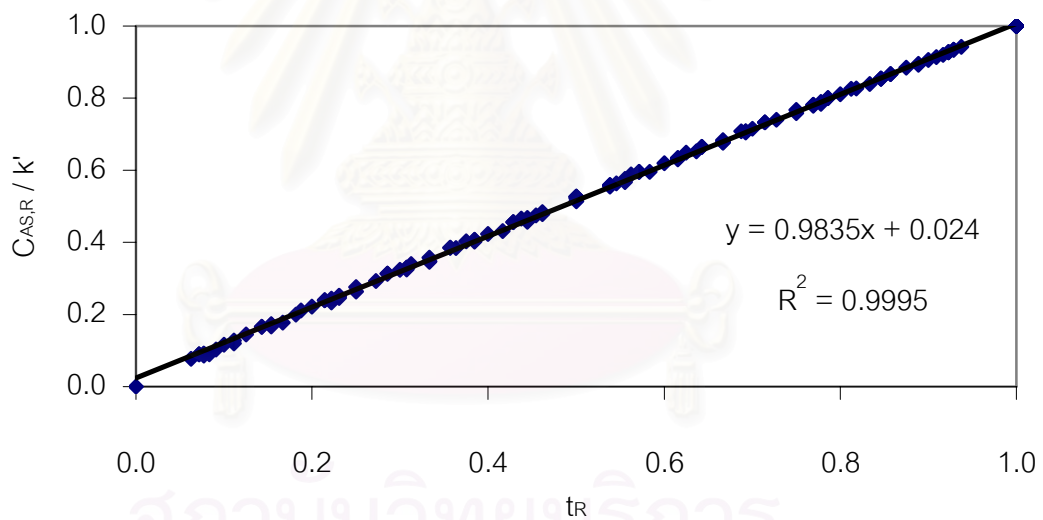
$$C_{As} = (2.07 \times 10^5 + 2.57 \times 10^4 \phi) e^{(1.64 \times 10^3) / T} \int_0^t C_{Ag} dt \quad (4.9)$$

4.8 ศึกษาเปรียบเทียบการดูดซับ LPG แก๊สมีเทน และแก๊สไฮโดรเจน

ศึกษาเปรียบเทียบการดูดซับของ LPG แก๊สมีเทน และแก๊สไฮโดรเจน โดยจะทำการเปรียบเทียบ ปริมาณการดูดซับ (C_{As}) อัตราการดูดซับเริ่มต้น และเวลาสุดท้ายที่ปริมาณการดูดซับเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ของค่าปริมาณการดูดซับที่เปลี่ยนแปลงก่อนหน้าทั้งหมด โดยศึกษาจากสมการความสัมพันธ์ของปริมาณการดูดซับ (C_{As}) กับเวลา ในรูปสมการ (2.9) จากหัวข้อ 2.3.5 และเขียนกราฟเปรียบเทียบการดูดซับแก๊สทั้งสาม

4.8.1 หาสมการการดูดซับของ LPG

ศึกษาความสัมพันธ์ของปริมาณการดูดซับ ($C_{As,R}$) ในรูปเวลา โดยการเขียนกราฟระหว่าง $C_{As,R} / k'$ กับ t_R จากสมการ (2.8) ในหัวข้อ 2.3.5 แสดงดังรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $C_{As,R} / k'$ กับ t_R ของ LPG

ดังนั้นจากรูป 4.31 พบว่า $C_{As,R} / k'$ กับ t_R มีความสัมพันธ์เป็นสมการเส้นตรง จึงเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$C_{As,R} / k' = 2.4 \times 10^{-2} + 9.84 \times 10^{-1} t_R \quad (4.10)$$

ดังนั้นจากสมการ (4.3) และ (4.10) ได้สมการการดูดซับ LPG ดังนี้

$$C_{As} = (2 \times 10^8 + 6 \times 10^6 \phi) e^{(2.90 \times 10^3)/T} (2.4 \times 10^{-2} + 9.84 \times 10^{-1} t_R)$$

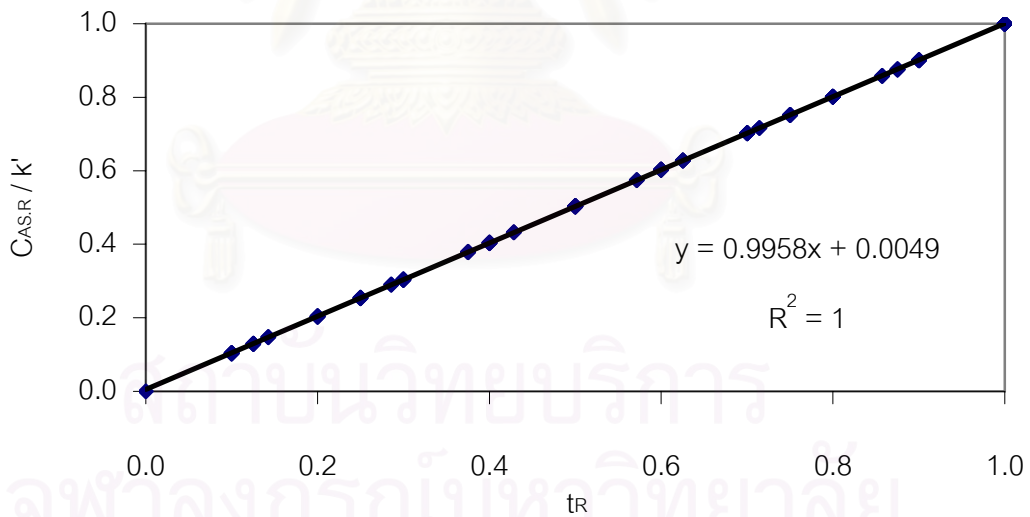
ค่าคงที่ในพจน์ $t_R = 2.4 \times 10^{-2}$ มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่า a ซึ่งเท่ากับ 2×10^8 ดังนั้นจึงตัดทิ้ง

ดังนั้นสมการการดูดซับ LPG คือ

$$C_{As} = (2 \times 10^8 + 6 \times 10^6 \phi) e^{(2.90 \times 10^3)/T} (9.84 \times 10^{-1} t_R) \quad (4.11)$$

4.8.2 หาสมการการดูดซับของมีเทน

ศึกษาความสัมพันธ์ของปริมาณการดูดซับ ($C_{As,R}$) ในรูปเวลา โดยการเขียนกราฟระหว่าง $C_{As,R} / k'$ กับ t_R จากสมการ (2.8) ในหัวข้อ 2.3.5 แสดงดังรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $C_{As,R} / k'$ กับ t_R ของแก๊สมีเทน

ดังนั้นจากรูป 4.32 พบว่า $C_{As,R} / k'$ กับ t_R มีความสัมพันธ์เป็นสมการเส้นตรง จึงเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$C_{As,R} / k' = 4.9 \times 10^{-3} + 9.96 \times 10^{-1} t_R \quad (4.12)$$

ดังนั้นจากสมการ (4.6) และ (4.12) ได้สมการการดูดซับแก๊สมีเทน ดังนี้

$$C_{As} = (1 \times 10^8 + 1 \times 10^6 \phi) e^{(4.06 \times 10^2)/T} (4.9 \times 10^{-3} + 9.96 \times 10^{-1} t_R)$$

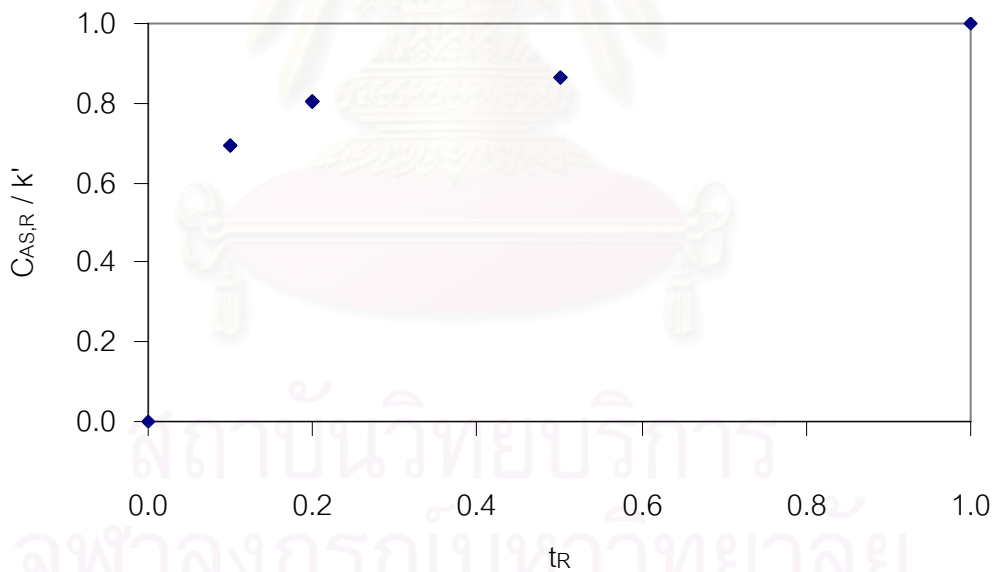
ค่าคงที่ในพจน์ $t_R = 4.9 \times 10^{-3}$ มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่า a ซึ่งเท่ากับ 1×10^8 ดังนั้นจึงตัดทิ้ง

ดังนั้นสมการการดูดซับแก๊สมีเทน คือ

$$C_{As} = (1 \times 10^8 + 1 \times 10^6 \phi) e^{(4.06 \times 10^2)/T} (9.96 \times 10^{-1} t_R) \quad (4.13)$$

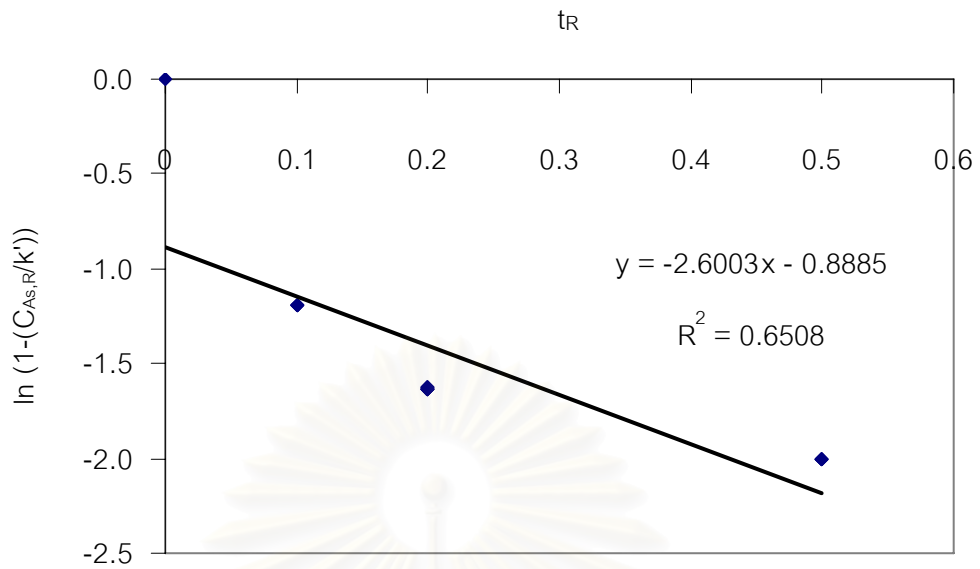
4.8.3 หาสมการการดูดซับของไฮโดรเจน

ศึกษาความสัมพันธ์ของปริมาณการดูดซับ ($C_{As,R}$) ในรูปเวลา โดยการเขียนกราฟระหว่าง $C_{As,R} / k'$ กับ t_R จากสมการ (2.8) ในหัวข้อ 2.3.5 แสดงดังรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $C_{As,R} / k'$ กับ t_R ของแก๊สไฮโดรเจน

จากนั้นหาความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการ (2.9) และ (2.10) ในหัวข้อ 2.3.5 จึงเขียนกราฟระหว่าง $\ln(1 - (C_{As,R}/k'))$ กับ t_R เพื่อหาค่าคงที่ d ซึ่งได้จากความชันของกราฟ



รูปที่ 4.34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(1 - (C_{As,R}/k'))$ กับ t_R ของแก๊สไฮโดรเจน

จากกราฟจะได้ค่า $d = -2.60$ ดังนั้นแทนค่าในสมการ (2.9) จะได้

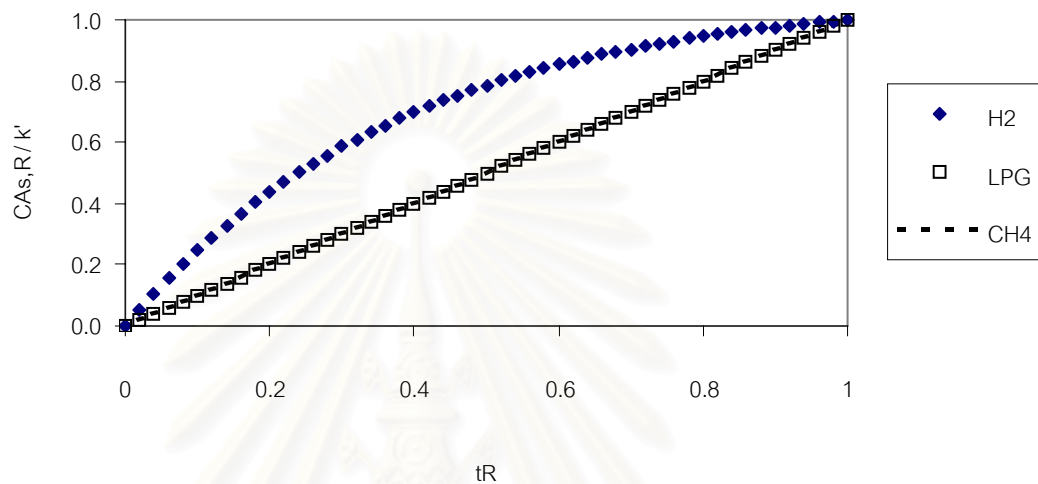
$$C_{As,R} / k' = 1 - e^{-2.60t_R} \quad (4.14)$$

ดังนั้นจากสมการ (4.9) และ (4.14) ได้สมการการดูดซับมีเทอดังนี้

$$C_{As,R} = (2.07 \times 10^5 + 2.57 \times 10^4 \phi) e^{(1.64 \times 10^3)/T} (1 - e^{-2.60t_R}) \quad (4.15)$$

4.8.4 เปรียบเทียบการดูดซับของแก๊สทั้ง 3 ชนิด

เปรียบเทียบการดูดซับของ LPG มีเทนและไฮโดรเจน โดยการเขียนกราฟปริมาณการดูดซับ ($C_{As,R}$) ที่ปรับค่าแล้วโดยการหารค่าคงที่การดูดซับ (k') กับเวลา t_R โดยการเขียนสมการ (4.10) ของ LPG สมการ (4.12) ของมีเทน และสมการ (4.14) สำหรับไฮโดรเจน ได้ดังรูปที่ 4.35



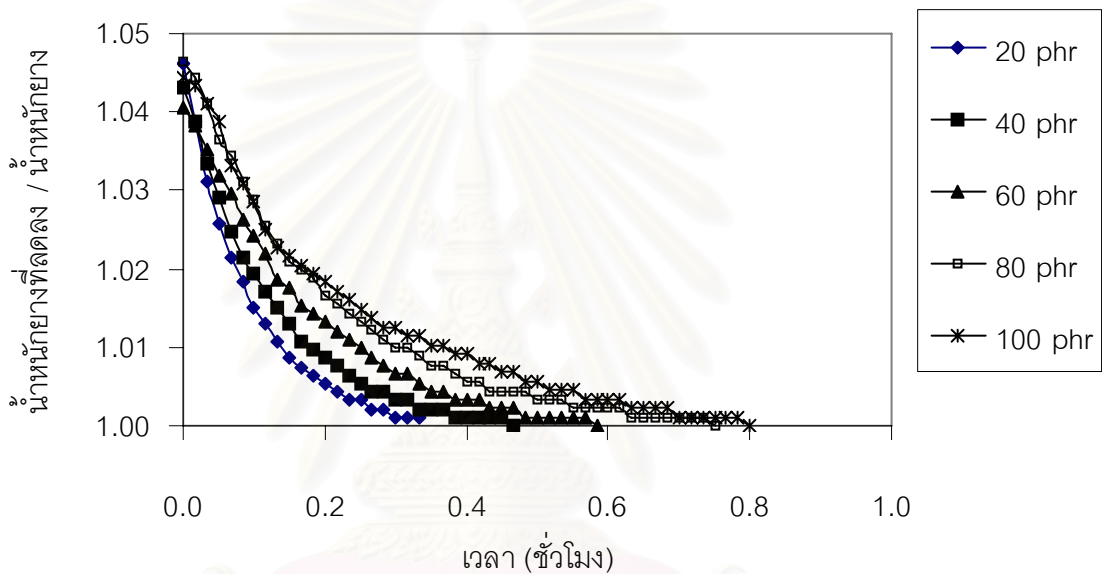
รูปที่ 4.35 กราฟเปรียบเทียบการดูดซับของ LPG มีเทน และไฮโดรเจน

จากรูปที่ 4.35 พบว่ากราฟการดูดซับของ LPG และมีเทน อยู่บนเส้นตรงเดียวกัน แสดงถึงกลไกการดูดซับที่เหมือนกัน คือ การดูดซับค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างคงที่ สังเกตจากกราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรง แต่การดูดซับไฮโดรเจนต่างจาก LPG และมีเทน คือการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกแล้วค่อย ๆ คงที่ นั่นอาจเป็นเพราะตัวดูดซับของไฮโดรเจน ต่างจาก LPG และมีเทน คือแผ่นยางที่ผสมคาร์บอนสำหรับดูดซับไฮโดรเจนมีความหนาแน่นมากกว่าแผ่นยางที่ผสมไฮพาราฟิน และคาร์บอนมีพื้นที่ผิวมาก การดูดซับในช่วงแรกจึงเกิดขึ้นเร็วแล้วค่อย ๆ ช้าลง ที่ช้าลงเพราะแก๊สผ่านเข้าไปในแผ่นยางได้ยาก แผ่นยางที่ผสมคาร์บอนยังมีความหนาแน่นสูงอยู่ และมีโพรงรูพรุนน้อย

4.9 ศึกษาการคายของแก๊สไฮโดรคาร์บอน

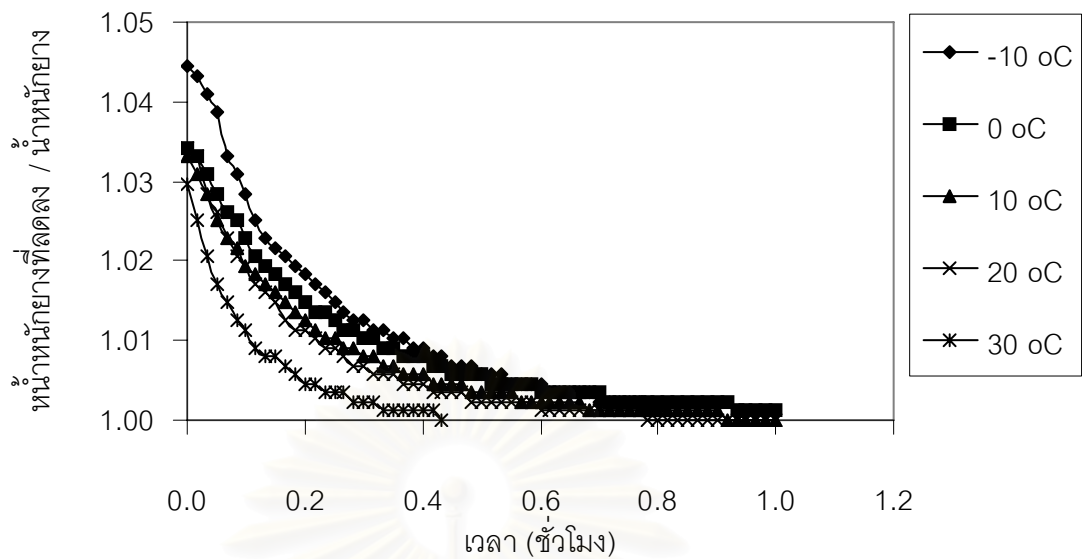
4.9.1 การคายของ LPG

ศึกษาการคายของ LPG จากแผ่นยางผสมไซพาราฟิน โดยนำแผ่นยางที่ผ่านการดูดซับแล้ว มาชั่งน้ำหนักทันทีที่อุณหภูมิห้อง ความดันบรรยากาศ และบันทึกน้ำหนักที่ลดลงทุก ๆ 1 นาที จากนั้นนำค่าน้ำหนักที่ลดลงไปหารค่าน้ำหนักของแผ่นยางก่อนการดูดซับ เพื่อเปรียบเทียบแผ่นยางที่ผสมไซพาราฟินปริมาณ 20, 40, 60, 80 และ 100 phr ผลการทดลองได้ดังรูปที่ 4.36



รูปที่ 4.36 การคายของ LPG ที่ปริมาณไซพาราฟิน 0 – 10 phr

จากรูปที่ 4.36 พบว่ายางที่ผสมไซพาราฟินปริมาณมาก จะดูดซับ LPG ได้ปริมาณมาก สังเกตจากที่เวลาเริ่มต้น น้ำหนักยางที่ดูดซับแก๊ส / น้ำหนักยางก่อนดูดซับ มีค่ามากเมื่อเทียบกับแผ่นยางที่ผสมไซพาราฟินน้อย ส่วนระยะเวลาในการคาย LPG พบว่าแผ่นยางที่ผสมไซพาราฟินน้อยจะใช้เวลาในการคายน้อย นั่นเป็นเพราะแผ่นยางที่ผสมไซพาราฟินน้อย จะมีโพรงภายในแผ่นยางกว้าง ดังนั้น LPG จึงคายออกมาได้ง่าย เมื่อศึกษาการคาย LPG ที่ดูดซับที่อุณหภูมิ -10, 0, 10, 20 และ 30 องศาเซลเซียส ผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 4.37

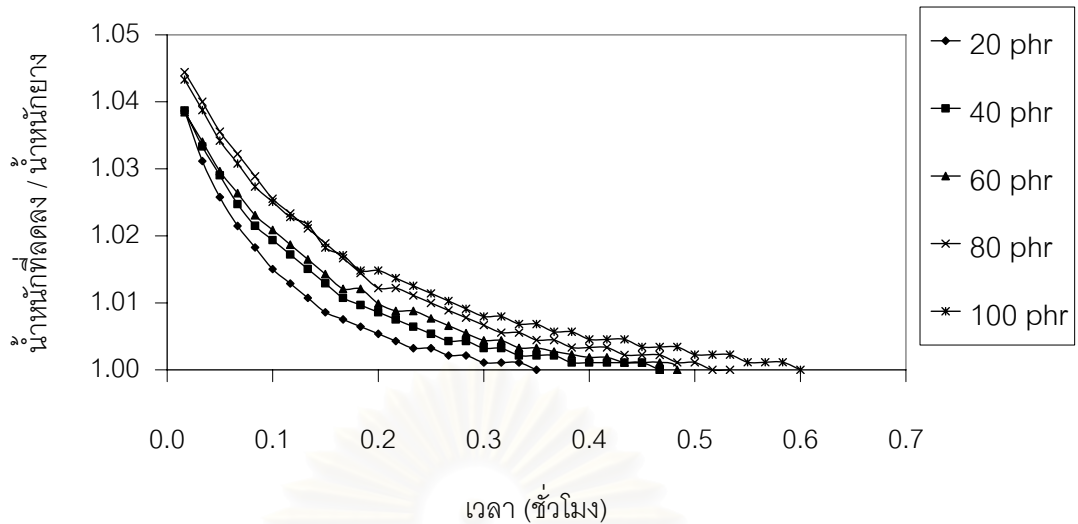


รูปที่ 4.37 การคาย LPG ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

รูปที่ 4.37 พบว่าที่อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับต่ำจะดูดซับ LPG ได้ปริมาณมาก สังเกตจากที่เวลาเริ่มต้น น้ำหนักยางที่ดูดซับแก๊ส / น้ำหนักยางก่อนดูดซับ มีค่ามากเมื่อเทียบกับอุณหภูมิสูง ส่วนระยะเวลาในการคาย LPG พบว่าที่อุณหภูมิต่ำจะใช้เวลาในการคายนานนั้นเป็นเพราะที่อุณหภูมิต่ำพลังงานจลน์ของแก๊สจะต่ำ ทำให้แก๊สหลุดออกจากแผ่นยางได้ยาก ทำให้ใช้เวลาในการคายนาน และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นพลังงานจลน์ของแก๊สสูงขึ้น แก๊สจึงหลุดคายออกจากยางได้เร็วขึ้น

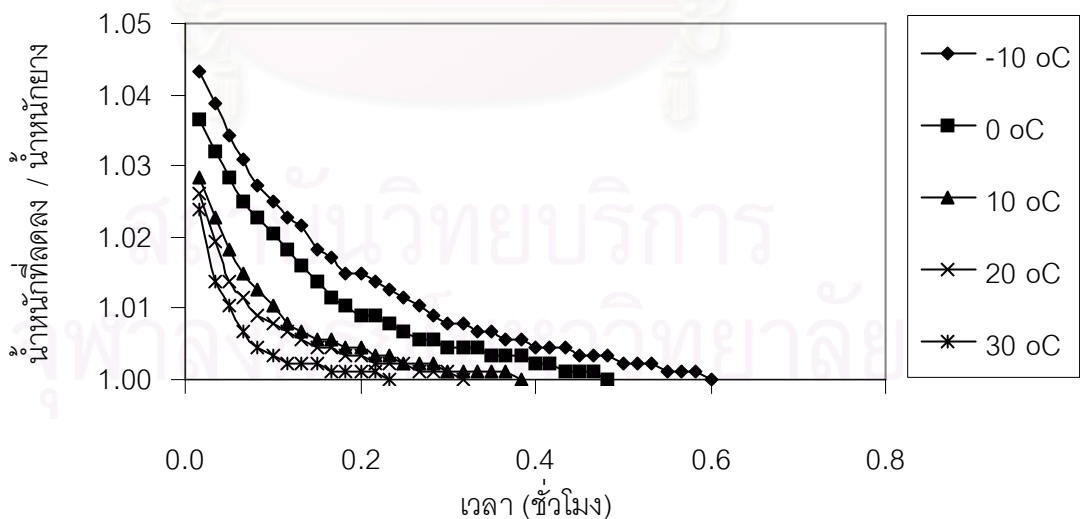
4.9.2 การคายของแก๊สมีเทน

ศึกษาการคายของแก๊สมีเทน จากแผ่นยางผสมไซพาราฟิน โดยนำแผ่นยางที่ผ่านการดูดซับแล้ว มาชั่งน้ำหนัก และบันทึกน้ำหนักที่ลดลงทุก ๆ 1 นาที จากนั้นนำค่าน้ำหนักที่ลดลงไปหารค่าน้ำหนักของแผ่นยางก่อนการดูดซับ เพื่อเปรียบเทียบแผ่นยางที่ผสมไซพาราฟินปริมาณ 20, 40, 60, 80 และ 100 phr ผลการทดลองได้ดังรูปที่ 4.38



รูปที่ 4.38 การคายของแก๊สมีเทน ที่ปริมาณไซพาราฟิน 0 – 10 phr

จากรูปที่ 4.38 พบว่ายางที่ผสมไซพาราฟินปริมาณมาก จะดูดซับแก๊สมีเทน ได้ปริมาณมากสังเกตจากที่เวลาเริ่มต้น น้ำหนักยางที่ดูดซับแก๊ส / น้ำหนักยางก่อนดูดซับ มีค่ามากเมื่อเทียบกับแผ่นยางที่ผสมไซพาราฟินน้อย ส่วนระยะเวลาในการคายแก๊สมีเทน พบว่าแผ่นยางที่ผสมไซพาราฟินน้อยจะใช้เวลาในการคายน้อย นั้นเป็นเพราะแผ่นยางที่ผสมไซพาราฟินน้อย จะมีโพรงภายในแผ่นยางกว้าง ดังนั้นแก๊สมีเทน จึงคายออกมาได้ง่าย เมื่อศึกษาการคายแก๊สมีเทน ที่ดูดซับที่อุณหภูมิ -10, 0, 10, 20 และ 30 องศาเซลเซียส ผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 4.39



รูปที่ 4.39 การคายแก๊สมีเทน ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

รูปที่ 4.39 พบว่าที่อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับต่ำจะดูดซับแก๊สมีเทนได้ปริมาณมาก สังเกตจากที่เวลาเริ่มต้น น้ำหนักยางที่ดูดซับแก๊ส / น้ำหนักยางก่อนดูดซับ มีค่ามากเมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิสูง ส่วนระยะเวลาในการคายแก๊สมีเทน พบว่าที่อุณหภูมิต่ำจะใช้เวลาในการคายนานนั้น เป็นเพราะที่อุณหภูมิต่ำพลังงานจลน์ของแก๊สจะต่ำ ทำให้แก๊สหลุดออกจากแผ่นยางได้ยาก ทำให้ใช้เวลาในการคายนาน และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นพลังงานจลน์ของแก๊สก็สูงขึ้น แก๊สจึงหลุดคายออกจากยางได้เร็วขึ้น



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับแก๊สเชื้อเพลิงในแผ่นยางพูน โดยศึกษาปริมาณสารช่วยการดูดซับ (ไซพาราฟินสำหรับช่วยดูดซับแก๊สไฮโดรคาร์บอน และคาร์บอนสำหรับช่วยดูดซับแก๊สไฮโดรเจน) และอุณหภูมิในการดูดซับ จากนั้นศึกษาสมการความสัมพันธ์ของการดูดซับแก๊สเชื้อเพลิงต่าง ๆ

5.1.1 สมบัติทางกายภาพของแผ่นยางพูน

แผ่นยางที่ผสมอะลูมิเนียมซิลิเกตและไซพาราฟินมีความหนาแน่นน้อยประมาณ 0.40 – 0.50 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ซึ่งน้อยกว่าแผ่นยางที่ไม่มีพูนที่มีความหนาแน่น 0.91 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร จึงสรุปได้ว่าแผ่นยางผสมอะลูมิเนียมซิลิเกตและไซพาราฟินมีความพูนสูง ส่วนแผ่นยางที่ผสมคาร์บอนมีความหนาแน่นประมาณ 0.60 – 0.75 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ซึ่งมากกว่าแผ่นยางที่ผสมอะลูมิเนียมซิลิเกตและไซพาราฟิน แต่น้อยกว่าแผ่นยางที่ไม่มีพูน จึงสรุปได้ว่า แผ่นยางที่ผสมคาร์บอนมีความพูน แต่พูนน้อยกว่ายางที่ผสมไซพาราฟิน

ศึกษาลักษณะความพูน พบว่ายางที่ผสมอะลูมิเนียมซิลิเกต และไซพาราฟิน มีลักษณะความพูนสูง สืบเนื่องจากภาพตัดขวางภายในแผ่นยางมีลักษณะพื้นผิวขรุขระ และเต็มไปด้วยอนุภาคไซพาราฟิน ส่วนแผ่นยางที่ผสมคาร์บอนมีอนุภาคคาร์บอนหนาแน่น มีความพูนน้อย

5.1.2 การดูดซับ LPG ในยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติที่ไม่ผสมสารเคมีใด ๆ สามารถดูดซับ LPG ได้ แต่ดูดซับได้น้อยปริมาณ 1,593 โมลแก๊ส/โมลยาง และใช้เวลานานกว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณการดูดซับจะน้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ของการเปลี่ยนแปลงก่อนหน้า เพราะยางธรรมชาติที่ไม่ผสมสารเคมีใด ๆ มีความหนาแน่นมาก มีความพูนน้อย โมเลกุลแก๊สเล็กกว่าโมเลกุลยางจึงแทรกซึมเข้าไปได้

5.1.3 สูตรน้ำยาที่ใช้ในการผลิตยาง

ยางธรรมชาติที่ผสมอะลูมิเนียมซิลิเกตและไซพาราฟิน สามารถดูดซับ LPG ได้มาก 4,877 โมลแก๊ส/โมลยาง เพราะไซพาราฟินจะเข้าไปเกาะบนอะลูมิเนียมซิลิเกตและยาง ทำให้พื้นที่สัมผัสที่ใช้ในการดูดซับสูงขึ้น และไซพาราฟินเป็นไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว สามารถละลาย LPG ได้ดี อีกทั้งไซพาราฟินมีขนาดโมเลกุลที่เล็กกว่ายาง LPG จึงแทรกซึมในไซพาราฟินได้มาก ทำให้ยางที่ผสมไซพาราฟินสามารถดูดซับ LPG ได้ดี

5.1.4 ผลการออกแบบการทดลองเชิงแพททอเรียล

พบว่าภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการดูดซับแก๊ส ที่ทำให้ปริมาณการดูดซับมากที่สุด และอัตราการดูดซับเริ่มต้นสูงที่สุด คือ ปริมาณสารช่วยในการดูดซับ (ไซพาราฟิน และ คาร์บอน) 100 phr และอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ -10 องศาเซลเซียส

5.1.5 ผลของตัวแปรที่มีต่อการดูดซับแก๊ส

พบว่าที่ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับแก๊ส คือ อุณหภูมิที่ -10 องศาเซลเซียส ยางที่ผสมไซพาราฟิน 100 phr สามารถดูดซับ LPG ได้ $6,120$ โมลแก๊ส/โมลยาง (1.47×10^{-1} กิโลกรัมแก๊ส/กิโลกรัมยาง) ใช้เวลาดูดซับ 0.23 ชั่วโมง และสามารถดูดซับแก๊สมีเทนได้ $7,055$ โมลแก๊ส/โมลยาง (5.64×10^{-2} กิโลกรัมแก๊ส/กิโลกรัมยาง) ใช้เวลาดูดซับ 0.17 ชั่วโมง ส่วนยางที่ผสมคาร์บอน 100 phr สามารถดูดซับแก๊สไฮโดรเจนได้ $1,681$ โมลแก๊ส/โมลยาง (1.68×10^{-3} กิโลกรัมแก๊ส/กิโลกรัมยาง) ใช้เวลาดูดซับ 0.08 ชั่วโมง

5.1.6 ศึกษาสมการการดูดซับ

สมการการดูดซับที่ได้จากการศึกษาสำหรับแก๊สไฮโดรคาร์บอนอยู่ในรูป

$$\text{เอมพิริคัล} \quad C_{As,R} = (a + b \phi) e^{c/T} (d t_R)$$

โดย a, b, c และ d เป็นค่าคงที่ จากการทดลองได้ค่าดังนี้

แก๊สหุงต้ม (LPG)	$a = 2.00 \times 10^8$ โมลแก๊ส/โมลยาง	$b = 6.00 \times 10^6$ โมลแก๊ส/โมลยาง/phr
	$c = 2.90 \times 10^3$ องศาเซลวิน	$d = 9.84 \times 10^{-1}$ ชั่วโมง ⁻¹
แก๊สมีเทน	$a = 1.00 \times 10^8$ โมลแก๊ส/โมลยาง	$b = 1.00 \times 10^6$ โมลแก๊ส/โมลยาง/phr
	$c = 4.06 \times 10^2$ องศาเซลวิน	$d = 9.96 \times 10^{-1}$ ชั่วโมง ⁻¹

สมการการดูดซับที่ได้จากการศึกษาสำหรับแก๊สไฮโดรเจนอยู่ในรูป

$$\text{เอมพีริคัล} \quad C_{As,R} = (a + b \phi) e^{c/T} (1 - e^{dt_r})$$

โดย a, b, c และ d เป็นค่าคงที่ จากการทดลองได้ค่าดังนี้

$$\begin{aligned} \text{แก๊สไฮโดรเจน} \quad a &= 2.07 \times 10^5 \text{ โมลแก๊ส/โมลยาง} & b &= 2.57 \times 10^4 \text{ โมลแก๊ส/โมลยาง/phr} \\ c &= 1.64 \times 10^3 \text{ องศาเซลวิน} & d &= -2.60 \times 10^3 \text{ ชั่วโมง}^{-1} \end{aligned}$$

5.1.7 เปรียบเทียบการดูดซับแก๊สของ LPG มีเทน และไฮโดรเจน

พบว่า การดูดซับของแก๊สทั้ง 3 สามารถแสดงได้ด้วยสมการเบื้องต้น โดยแก๊สไฮโดรคาร์บอนสามารถแสดงได้ด้วยสมการแบบเดียวกัน ซึ่งให้เห็นว่ากลไกการดูดซับของ LPG และแก๊สมีเทน มีลักษณะคล้ายกัน ส่วนการดูดซับของแก๊สไฮโดรเจนแสดงด้วยสมการอีกแบบหนึ่งสรุปได้ว่ากลไกการดูดซับของแก๊สไฮโดรคาร์บอนกับแก๊สไฮโดรเจนแตกต่างกัน โดยการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกแล้วค่อย ๆ คงที่ ส่วนการดูดซับแก๊สไฮโดรคาร์บอนจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างคงที่

5.1.8 ศึกษาการคายของแก๊สไฮโดรคาร์บอน

พบว่าทั้ง LPG และแก๊สมีเทน จะคายจากแผ่นยางที่ผสมไซพาราฟินปริมาณมากได้ช้ากว่ายางที่ผสมไซพาราฟินปริมาณน้อย เพราะยางที่ผสมไซพาราฟินปริมาณมาก จะมีโพรงรูพรุนภายในแผ่นยางแคบกว่า และหนาแน่นไปด้วยไซพาราฟิน ทำให้แก๊สหลุดคายออกมาได้ยาก จึงคายออกมาช้า ส่วนอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับต่ำ แก๊สจะคายจากแผ่นยางได้ช้ากว่าที่อุณหภูมิสูง เพราะที่อุณหภูมิต่ำ แก๊สจะมีพลังงานจลน์ต่ำ ทำให้หลุดคายออกมาได้ยาก เมื่ออุณหภูมิต่ำ ๆ เพิ่มขึ้นถึงอุณหภูมิห้องแก๊สจะค่อย ๆ คายออกมา

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การเติมสารส้มในน้ำยาง ควรค่อย ๆ เติม และควรเติมในรูปของสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำ เพราะสารส้มเป็นกรด ซึ่งมีผลทำให้ยางเกิดการเสียดสีสภาพ รวมตัวเป็นก้อน

5.2.2 สารเคมีต่าง ๆ ที่เติมในน้ำยาง ควรอยู่ในรูปสารละลาย หรือดีสเพอร์ชันเท่านั้น

5.2.3 ควรใช้เครื่องวัดความดัน ที่มีความละเอียดสูง เพื่อความแม่นยำในการวัด ควรใช้เป็นระบบดิจิทัล

5.2.4 ผงคาร์บอนที่ใช้สำหรับดูดซับแก๊สไฮโดรเจน ควรมีขนาดเล็กถึง nano size



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. Kono, H.O., Narasimhan, S., Song, F., Smith, D.H., Synthesis of methane gas hydrate in porous sediments and its dissociation by depressurizing. Powder Technology. 122 (2002), 239-246
2. Lin, W., Chen, G.J., Sun, C.Y., Guo, X.Q., Wu, Z.K., Liang, M.Y., Chen, L.T., Yang, L.Y., Effect of surfactant on the formation and dissociation kinetic behavior of methane hydrate. Chemical Engineering Science. 59 (2004), 4447-4453
3. Sun, Z-g., Wang, R., Ma, R., Guo, K., Fan, S., Natural gas storage in hydrates with the presence of promoters. Energy Conversion and Management. 44 (2003), 2733-2742
4. Baker, R. T. K., et al. Hydrogen Storage in Graphite Nanofibers. Phys. Chem. B. 102 (1998), 4253.
5. Ye, Y., et al. Hydrogen adsorption and cohesive energy of single-walled carbon nanotubes. Appl. Phys. Lett. 74 (16) (1999), 2307.
6. ปราโมทย์ ไชยเวช และ นุรักษ์ กฤษดาบุรุษ. ปิโตรเลียมเทคโนโลยี. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
7. Rouquerol F., Rouquerol J., Sing K., Adsorption by power & porous solid. San Diego, Calif : Academic Press, 1999.
8. Yang, R.T. Gas Separation by Adsorption Processes. London : Butter Worths., 1987
9. เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังษี. ยางธรรมชาติเบื้องต้น. ปัตตานี : คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภาควิชาเทคโนโลยียางและโพลีเมอร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2541.
10. เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร. เทคโนโลยีของยาง. กรุงเทพมหานคร : ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์จุฬาลงกรณ์, 2539.
11. เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังษี. การผลิตยางธรรมชาติ. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภาควิชาเทคโนโลยียางและโพลีเมอร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2541.
12. พรพรรณ นิธิอุทัย. สารเคมีสำหรับยาง. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี, (ม.ป.ป.).
13. ปุรินทร์ ชุณหพาณิชย์. ผลของขนาดอนุภาคซิลิกาต่อยางธรรมชาติวัลคาไนซ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.

14. อัศนี ชลมาตร. สภาพให้น้ำซึมได้ของเยื่อแผ่นยางธรรมชาติ. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
15. คัทลียา ชะโรจน์บวร. การถ่ายโอนสารอินทรีย์เข้าไปในยางธรรมชาติโดยใช้ คาร์บอนไดออกไซด์ช่วย. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
16. ยงยุทธ แสนสุพรรณ. ไอโซเทอร์มการดูดซับของแก๊สไฮโดรคาร์บอนเข้มข้นด้วยซีโอไลต์. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
17. ปฐมาภรณ์ เสวตจินดากร. การเตรียมถ่านดูดซับจากเปลือกของยางพาราโดยต้มใน สารละลายกรดซัลฟิวริกสำหรับดูดซับออกซิเจนและไนโตรเจน. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2545.
18. ชลธิณี ตั้งตรีรัตน์. ออกซิเดชันของยางเม็ดและยางเส้นจากน้ำยางธรรมชาติ. วิทยานิพนธ์ ปริญญา มหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย, 2547.
19. กัญญา บุญเกียรติ. การคำนวณขั้นต้นในวิชาวิศวกรรมเคมี. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
20. แม้น อมรสิทธิ์, อมร เพชรสม. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย : โรงพิมพ์ชวนพิมพ์, 2539.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

สมบัติของสารที่ใช้ในการทดลอง

น้ำยางธรรมชาติเข้มข้นชนิดแอมโมเนียต่ำ

น้ำยางธรรมชาติเข้มข้นชนิดแอมโมเนียต่ำ ที่ใช้ในการทดลองได้มาจาก บริษัท ไทยรับเบอร์แอนด์เลเท็กซ์ จำกัด มีสมบัติดังนี้

ตารางที่ ก. สมบัติของน้ำยางธรรมชาติเข้มข้นชนิดแอมโมเนียต่ำ

Properties	Test Results
Total Solid Content, %	61.78
Dry Rubber Content, %	60.09
Non Rubber Solids, %	1.69
Ammonia Content (on Total Weight), %	0.27
Ammonia Content (on Water Weight), %	0.71
PH Value	10.19
KOH Number	0.7443
Volatile Fatty Acid Number (V.F.A.)	0.0462
Mechanical Stability Time @ 55% TS., sec.	960 on (17-05-2003)
Specific Gravity at 25°C	0.946
Magnesium Content (on Solids), ppm.	33
Chemical Stability Test (CST), mi.	2.0
Coagulum Content, (80 mesh), ppm.	18
Viscosity (60%TS, Spindle no.1, 60 rpm.), cps.	97.9

Remark : Free from pentachlorophenol

สารส้ม

Ammonium Alum และ Potassium Alum คือ เกลือเชิงซ้อนของสารประกอบที่มี ธาตุอะลูมิเนียม และซัลเฟต เป็นส่วนประกอบหลัก หรือรู้จักกันในนามว่าสารส้ม (Alum) หรือ ผลึกเกลือ มีสูตรทางเคมีทั่วไปคือ $[M(I)M,(III)(SO_4)_2 \cdot 12H_2O]$ ดังนั้นสารใดที่มีโครงสร้างของสูตรทางเคมีที่กล่าวมา ก็คือสารส้มที่เรารู้จักและคุ้นเคยนั่นเอง

ประเภทของสารส้ม

สารส้ม (Alum) มีรากศัพท์มาจากคำในภาษาละตินว่า Alumen แปลว่าสารทำให้หดตัว (Astringent) แต่ในปัจจุบันสารส้ม หมายถึงเกลือเชิงซ้อน (ผลึกเกลือ) ของสารประกอบที่มีธาตุอะลูมิเนียม และซัลเฟต เป็นส่วนประกอบหลัก แบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

1. เกลือซัลเฟตของอะลูมิเนียมหรืออะลูมิเนียมซัลเฟต $[Al_2(SO_4)_3 \cdot XH_2O]$ ลักษณะ เป็นก้อนผงสีขาว
2. เกลือเชิงซ้อนของโพแทสเซียมหรือโพแทสเซียมอะลูมิเนียม $[Al_2(SO_4)_3 \cdot K_2SO_4 \cdot 24H_2O]$ ลักษณะเป็นผลึกใสไม่มีสี
3. เกลือเชิงซ้อนของแอมโมเนียมหรือแอมโมเนียมอะลูมิเนียม $[Al_2(SO_4)_3 \cdot (NH_4)_2SO_4 \cdot 24H_2O]$ ลักษณะเป็นผลึกใสไม่มีสี อย่างไรก็ตามสารส้ม (Alum) ทั้ง 3 ประเภทดังกล่าว นำไปใช้ประโยชน์อย่างเดียวกัน การเติม Ammonium และ Potassium ลงไปก็เพื่อความประสงค์อื่น คือ ต้องการให้เป็นก้อนผลึกใสและบริสุทธิ์ ยิ่งขึ้นเนื่องจากอุตสาหกรรมหลายชนิด เช่น การผลิตกระดาษคุณภาพสูง และผสมทำผงฟู เป็นต้น ต้องการสารส้มที่มีความบริสุทธิ์มาก ๆ

ไขพาราฟิน (Paraffin)

เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว ซึ่งประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนสาขาตรง (Straight chain hydrocarbon) เป็นส่วนใหญ่ มีพันธะเดี่ยวระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอน สูตรทั่วไปคือ C_nH_{2n+2} เมื่อ n เป็นตัวเลขใด ๆ หรือเป็นจำนวนอะตอมของคาร์บอน น้ำหนักโมเลกุลมีค่าอยู่ในช่วง 360 – 420 เมื่อแทรกซึมเข้าไปในยาง ไขพาราฟินจะเข้าไปล้อมรอบโมเลกุลยาง ในส่วนที่มีโครงสร้างเป็นไฮโดรคาร์บอนเหมือนกัน

ภาคผนวก ข

การคำนวณ

วิธีการคำนวณหาค่าความหนาแน่น

การคำนวณความหนาแน่น โดยการชั่งน้ำหนักแผ่นยางในบรรยากาศ (น้ำหนักแห้ง) และชั่งน้ำหนักแผ่นยางใต้น้ำ (น้ำหนักเปียก) จากนั้นคำนวณค่าความหนาแน่นจากสูตร

$$\text{ความหนาแน่น} = \frac{\text{น้ำหนักแห้ง}}{\text{น้ำหนักแห้ง} - \text{น้ำหนักเปียก}}$$

แต่ยางพุนั้นลอยน้ำจึงใช้กระจกที่มีน้ำหนัก 17.83 กรัมวางทับไว้ เพราะฉะนั้นน้ำหนักเปียกที่ชั่งได้ต้องหัก 17.83 กรัมออกก่อน

ตัวอย่าง การคำนวณความหนาแน่นของแผ่นยางที่ไม่มีรูพุน

$$\text{น้ำหนักแห้ง} = 10.49 \text{ กรัม}$$

$$\text{น้ำหนักเปียก} = 16.83 \text{ กรัม}$$

$$\text{ความหนาแน่น} = \frac{10.49}{10.49 - (16.83 - 17.83)}$$

$$\text{ความหนาแน่น} = 0.91 \text{ กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร}$$

หมายเหตุ : ค่าจากการคำนวณเป็นค่าความถ่วงจำเพาะ (ความหนาแน่นยางต่อความหนาแน่นน้ำ) เพราะฉะนั้นเมื่อคูณด้วยความหนาแน่นน้ำ 1 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร จึงได้เป็นค่าความหนาแน่นของยาง ดังนั้นหน่วยความหนาแน่นจึงเป็น กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

ตารางที่ ข.1 แสดงการคำนวณค่าความหนาแน่นของยางสูตรต่าง ๆ

ยาง	น้ำหนักแห้ง (กรัม)	น้ำหนักเปียก (กรัม)	ความหนาแน่น (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)	ความหนาแน่น เฉลี่ย
แผ่นยางที่ไม่มีรีพอร์น (NR)	10.49	16.83	0.91	0.91
	10.51	16.84	0.91	
NR + AlSi	2.59	15.01	0.48	0.48
	2.49	15.23	0.49	
NR + AlSi + wax (20)	2.72	14.42	0.44	0.44
	2.53	14.63	0.44	
NR + AlSi + wax (40)	2.46	14.84	0.45	0.46
	3.09	14.19	0.46	
NR + AlSi + wax (60)	2.54	15.07	0.48	0.47
	3.02	14.18	0.45	
NR + AlSi + wax (80)	2.68	15.33	0.52	0.49
	3.01	14.20	0.45	
NR + AlSi + wax (100)	2.92	15.51	0.56	0.52
	2.85	14.83	0.49	
NR + carbon (20)	9.47	13.66	0.69	0.71
	9.59	14.13	0.72	
NR + carbon (40)	9.89	13.36	0.69	0.69
	9.89	13.58	0.70	
NR + carbon (60)	9.46	12.99	0.66	0.67
	9.50	13.49	0.69	
NR + carbon (0)	9.26	13.31	0.67	0.68
	9.26	13.63	0.69	
NR + carbon (100)	9.02	15.00	0.76	0.74
	9.02	14.45	0.73	

วิธีการคำนวณหาปริมาณการดูดซับ

นำค่าความดันที่เวลาหนึ่ง มาคำนวณหาโมลแก๊สที่ไม่ได้ถูกดูดซับ (C_{Ag}) ที่เวลานั้น โดยใช้สมมติฐานแก๊สอุดมคติ (Ideal gas) และนำโมลแก๊สที่ไม่ถูกดูดซับเริ่มต้น ($t = 0$) ลบกับโมลแก๊สที่ไม่ถูกดูดซับที่เวลานั้น ได้เป็นโมลแก๊สที่ถูกดูดซับสะสมที่เวลานั้น ๆ

จากแก๊สอุดมคติ

$$PV = nRT$$

ตัวอย่าง

ความดันเริ่มต้น (P_0)

ความดันที่อ่านได้แต่ละครั้ง (P_t)

ดังนั้น ปริมาณโมลของแก๊สที่ถูกดูดซับสะสมที่เวลาต่าง ๆ (n_t)

$$\begin{aligned} n_t &= n_0 - n_t \\ &= (P_0 - P_t) (V/RT) \end{aligned}$$

โดย V คือ ปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ที่หักลบปริมาตรข้างภายในเครื่องปฏิกรณ์ออก

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส = $82.06 \text{ cm}^3 (\text{atm}) / \text{gmole} (\text{K})$

T คือ อุณหภูมิ

ปริมาณการดูดซับคำนวณในรูป (โมลแก๊ส/โมลยาง) เพราะฉะนั้นนำปริมาณโมลแก๊สที่ถูกดูดซับหารด้วยโมลยาง คือ น้ำหนักยาง/มวลโมเลกุลยาง โดยมวลโมเลกุลยางเท่ากับ 2,000,000

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.2 แสดงตัวอย่างการคำนวณปริมาณการดูดซับ LPG

ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส ปริมาณไซพาราฟิน 100 phr

เวลา (นาทีก)	ความดัน (บาร์)	โมลแก๊สที่ไม่ถูกดูดซับ (โมลแก๊ส)	ปริมาณการดูดซับ, C_{As} (โมลแก๊ส/โมลยาง)
0	2.0	0.0390	0
1	1.3	0.0254	6064
5	1.2	0.0234	6930
10	1.1	0.0215	7796
15	1.1	0.0205	8230
20	1.0	0.0195	8663
25	1.0	0.0195	8663
30	1.0	0.0195	8663
35	1.0	0.0195	8663
40	1.0	0.0195	8663
45	1.0	0.0195	8663
50	1.0	0.0195	8663
55	1.0	0.0195	8663
60	1.0	0.0195	8663

$$V = 427 \text{ cm}^3$$

$$R = 82.06 \text{ cm}^3 (\text{atm}) / \text{gmole} (\text{K})$$

$$T = 263.15 \text{ K}$$

$$\text{น้ำหนักยาง} = 6.0608 \text{ กรัม (MW ยาง} = 2,000,000)$$

$$\text{โมลยาง} = 6.0608 / 2,000,000$$

วิธีการคำนวณหาค่า k

ค่า k จะขึ้นอยู่กับปริมาณสารช่วยดูดซับ และอุณหภูมิในการดูดซับ โดยคำนวณจากสมการ (2.2) ในหัวข้อ 2.2.6

$$C_{As} = k \int_0^t C_{Ag} dt$$

เพราะฉะนั้น

$$k = C_{As} / \int_0^t C_{Ag} dt$$

ค่า k เท่ากับปริมาณการดูดซับ (C_{As}) หารด้วยพื้นที่ใต้กราฟระหว่าง ปริมาณแก๊สที่ไม่ถูกดูดซับ (C_{Ag}) กับเวลา

โดยค่า C_{As} คำนวณจากตัวอย่างการคำนวณที่ผ่านมา

ส่วน $C_{Ag} =$ โมลแก๊สที่ไม่ถูกดูดซับ / ปริมาณเครื่องปฏิกรณ์ที่หักลบปริมาตรภายในเครื่องปฏิกรณ์ออก

และพื้นที่ใต้กราฟหาจากกฎสี่เหลี่ยมคางหมู (The Trapezoidal Rule)

$$I = \int_{x_1}^{x_2} C_{Ag} dt = (x_2 - x_1) \frac{f(x_2) + f(x_1)}{2}$$

ตัวอย่างการคำนวณพื้นที่ใต้กราฟ

เวลาเริ่มต้น ($t = 0$) $C_{Ag} = 0.0390 / 427 = 9.13 \times 10^{-5}$ โมลแก๊สต่อปริมาตร

เวลา ($t = 1$) $C_{Ag} = 0.0254 / 427 = 5.95 \times 10^{-5}$ โมลแก๊สต่อปริมาตร

ดังนั้น พื้นที่ใต้กราฟ เท่ากับ

$$\begin{aligned} \int_0^1 C_{Ag} dt &= (1 - 0) \frac{(9.13 + 5.95) \times 10^{-5}}{2} \\ &= 7.54 \times 10^{-5} \end{aligned}$$

ตารางที่ ข.3 แสดงตัวอย่างการคำนวณค่า k ของการดูดซับ LPG

ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส ปริมาณไพบาราคีน 100 phr

เวลา (นาทีก)	โมลแก๊ส ที่ไม่ถูกดูดซับ (โมลแก๊ส)	C_{Ag} (โมลแก๊ส/ ปริมาตร)	ปริมาณการดูดซับ, C_{As} (โมลแก๊ส/โมลยาง)	พื้นที่ใต้กราฟ $\int_{t_1}^{t_2} C_{Ag} dt$	พื้นที่ใต้กราฟ $\int_0^t C_{Ag} dt$	k
0	0.0390	9.14E-05	0	0	0	0
1	0.0254	5.94E-05	6064	7.54E-05	7.54E-05	8.04E+07
5	0.0234	5.48E-05	6930	1.43E-05	8.97E-05	7.73E+07
10	0.0215	5.03E-05	7796	1.05E-05	1.00E-04	7.78E+07
15	0.0205	4.80E-05	8230	9.83E-06	1.10E-04	7.48E+07
20	0.0195	4.57E-05	8663	9.37E-06	1.19E-04	7.26E+07
25	0.0195		8663		ค่า k เฉลี่ย	7.66E+07
30	0.0195		8663			
35	0.0195		8663			
40	0.0195		8663			
45	0.0195		8663			
50	0.0195		8663			
55	0.0195		8663			
60	0.0195		8663			

ภาคผนวก ค

ข้อมูลการทดลอง

ตารางที่ ค.1 แสดงค่าความดันที่เวลาต่าง ๆ ของการดูดซับแก๊ส LPG ในยางที่ผสมไซพาราฟิน ปริมาณ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 phr ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส

เวลา (ชั่วโมง)	ความดัน (บาร์)					
	0 phr	20 phr	40 phr	60 phr	80 phr	100 phr
0.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
0.02	1.85	1.83	1.73	1.64	1.59	1.50
0.03	1.81	1.76	1.67	1.60	1.55	1.45
0.05	1.79	1.72	1.62	1.57	1.52	1.43
0.07	1.78	1.69	1.59	1.55	1.50	1.41
0.08	1.76	1.67	1.57	1.53	1.47	1.39
0.10	1.75	1.65	1.56	1.52	1.45	1.37
0.12	1.74	1.64	1.54	1.50	1.44	1.36
0.13	1.73	1.63	1.53	1.49	1.42	1.34
0.15	1.72	1.62	1.52	1.48	1.41	1.33
0.17	1.72	1.61	1.51	1.47	1.39	1.32
0.18	1.71	1.60	1.51	1.46	1.38	1.31
0.20	1.71	1.60	1.50	1.45	1.37	1.30
0.22	1.71	1.59	1.50	1.44	1.36	1.29
0.23	1.71	1.59	1.49	1.44	1.35	1.28
0.25	1.70	1.59	1.49	1.43	1.34	1.28
0.27	1.70	1.58	1.48	1.43	1.33	1.27
0.28	1.69	1.58	1.48	1.42	1.33	1.26
0.30	1.69	1.57	1.48	1.41	1.32	1.26
0.32	1.69	1.57	1.47	1.41	1.31	1.25
0.33	1.68	1.57	1.47	1.40	1.30	1.24
0.35	1.68	1.57	1.47	1.40	1.30	1.24
0.37	1.68	1.56	1.46	1.39	1.29	1.24
0.38	1.68	1.56	1.46	1.39	1.29	1.23
0.40	1.67	1.56	1.46	1.38	1.28	1.23
0.42	1.67	1.56	1.46	1.38	1.28	1.22

เวลา (ชั่วโมง)	ความดัน (บาร์)					
	0 phr	20 phr	40 phr	60 phr	80 phr	100 phr
0.43	1.67	1.56	1.46	1.38	1.27	1.22
0.45	1.67	1.55	1.46	1.37	1.27	1.21
0.47	1.67	1.55	1.45	1.37	1.26	1.21
0.48	1.66	1.55	1.45	1.37	1.26	1.21
0.50	1.66	1.55	1.45	1.37	1.26	1.20
0.52	1.66	1.55	1.45	1.36	1.26	1.20
0.53	1.66	1.55	1.44	1.36	1.26	1.20
0.55	1.66	1.55	1.44	1.36	1.26	1.19
0.57	1.66	1.54	1.44	1.36	1.26	1.19
0.58	1.65	1.54	1.44	1.36	1.26	1.18
0.60	1.65	1.54	1.44	1.36	1.26	1.18
0.62	1.65	1.54	1.44	1.36	1.26	1.18
0.63	1.65	1.54	1.44	1.36	1.26	1.18
0.65	1.65	1.54	1.44	1.36	1.26	1.18
0.67	1.65	1.54	1.44	1.36	1.26	1.18
0.68	1.65	1.54	1.44	1.36	1.26	1.18
0.70	1.65	1.54	1.44	1.36	1.26	1.18
0.72	1.64	1.54	1.44	1.36	1.26	1.17
0.73	1.64	1.54	1.44	1.36	1.26	1.17
0.75	1.64	1.54	1.44	1.36	1.26	1.17
0.77	1.64	1.54	1.44	1.36	1.26	1.17
0.78	1.64	1.54	1.44	1.36	1.26	1.17
0.80	1.64	1.54	1.44	1.36	1.26	1.17
0.82	1.63	1.54	1.44	1.36	1.26	1.17
0.83	1.63	1.54	1.44	1.36	1.26	1.17
0.85	1.63	1.54	1.44	1.36	1.26	1.17
0.87	1.63	1.54	1.44	1.36	1.26	1.17
0.88	1.63	1.54	1.44	1.36	1.26	1.17
0.90	1.63	1.54	1.44	1.36	1.26	1.17
0.92	1.63	1.54	1.44	1.36	1.26	1.17
0.93	1.63	1.54	1.44	1.36	1.26	1.17
0.95	1.63	1.54	1.44	1.36	1.26	1.17
0.97	1.63	1.54	1.44	1.36	1.26	1.17
0.98	1.63	1.54	1.44	1.36	1.26	1.17
1.00	1.63	1.54	1.44	1.36	1.26	1.17

ตารางที่ ค.2 แสดงค่าความดันที่เวลาต่าง ๆ ของการดูดซับแก๊ส LPG ในยางที่ผสมโซลารวาฟิน ปริมาณ 100 phr ที่อุณหภูมิ -10, 0, 10, 20 และ 30 องศาเซลเซียส

เวลา (ชั่วโมง)	ความดัน (บาร์)				
	-10 °C	0 °C	10 °C	20 °C	30 °C
0.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
0.02	1.50	1.63	1.76	1.83	1.93
0.03	1.45	1.59	1.69	1.79	1.89
0.05	1.43	1.56	1.65	1.76	1.85
0.07	1.41	1.54	1.61	1.74	1.83
0.08	1.39	1.52	1.59	1.72	1.81
0.10	1.37	1.50	1.58	1.70	1.80
0.12	1.36	1.49	1.56	1.69	1.79
0.13	1.34	1.48	1.55	1.68	1.78
0.15	1.33	1.47	1.54	1.67	1.77
0.17	1.32	1.46	1.54	1.66	1.76
0.18	1.31	1.45	1.53	1.65	1.75
0.20	1.30	1.44	1.53	1.64	1.74
0.22	1.29	1.43	1.52	1.63	1.74
0.23	1.28	1.43	1.52	1.63	1.73
0.25	1.28	1.42	1.52	1.62	1.73
0.27	1.27	1.41	1.51	1.61	1.72
0.28	1.26	1.41	1.51	1.61	1.72
0.30	1.26	1.40	1.51	1.60	1.72
0.32	1.25	1.40	1.50	1.60	1.71
0.33	1.24	1.39	1.50	1.59	1.71
0.35	1.24	1.39	1.50	1.59	1.71
0.37	1.24	1.39	1.50	1.59	1.71
0.38	1.23	1.38	1.49	1.58	1.71
0.40	1.23	1.38	1.49	1.58	1.70
0.42	1.22	1.38	1.49	1.58	1.70
0.43	1.22	1.37	1.49	1.57	1.70
0.45	1.21	1.37	1.49	1.57	1.70
0.47	1.21	1.37	1.49	1.57	1.69
0.48	1.21	1.37	1.48	1.57	1.69
0.50	1.20	1.37	1.48	1.57	1.69

เวลา (ชั่วโมง)	ความดัน (บาร์)				
	-10 °C	0 °C	10 °C	20 °C	30 °C
0.52	1.20	1.36	1.48	1.56	1.69
0.53	1.20	1.36	1.48	1.56	1.69
0.55	1.19	1.36	1.48	1.56	1.69
0.57	1.19	1.36	1.48	1.56	1.68
0.58	1.18	1.36	1.48	1.56	1.68
0.60	1.18	1.36	1.48	1.56	1.68
0.62	1.18	1.35	1.48	1.55	1.68
0.63	1.18	1.35	1.48	1.55	1.68
0.65	1.18	1.35	1.48	1.55	1.68
0.67	1.18	1.35	1.48	1.55	1.68
0.68	1.18	1.35	1.48	1.55	1.68
0.70	1.18	1.35	1.48	1.55	1.68
0.72	1.17	1.35	1.48	1.55	1.68
0.73	1.17	1.35	1.48	1.55	1.68
0.75	1.17	1.35	1.48	1.55	1.67
0.77	1.17	1.35	1.48	1.55	1.67
0.78	1.17	1.35	1.48	1.55	1.67
0.80	1.17	1.35	1.48	1.55	1.67
0.82	1.17	1.35	1.48	1.55	1.67
0.83	1.17	1.35	1.48	1.55	1.67
0.85	1.17	1.35	1.48	1.55	1.67
0.87	1.17	1.35	1.48	1.55	1.67
0.88	1.17	1.35	1.48	1.55	1.67
0.90	1.17	1.35	1.48	1.55	1.67
0.92	1.17	1.35	1.48	1.55	1.67
0.93	1.17	1.35	1.48	1.55	1.67
0.95	1.17	1.35	1.48	1.55	1.67
0.97	1.17	1.35	1.48	1.55	1.67
0.98	1.17	1.35	1.48	1.55	1.67
1.00	1.17	1.35	1.48	1.55	1.67

ตารางที่ ค.3 แสดงค่าความดันที่เวลาต่าง ๆ ของการดูดซับแก๊สมีเทนในยางที่ผสมไซพาราฟิน ปริมาณ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 phr ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส

เวลา (ชั่วโมง)	ความดัน (บาร์)					
	0 phr	20 phr	40 phr	60 phr	80 phr	100 phr
0.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
0.02	9.48	9.45	9.44	9.38	9.34	9.32
0.03	9.45	9.42	9.38	9.34	9.32	9.28
0.05	9.44	9.40	9.36	9.32	9.30	9.25
0.07	9.43	9.38	9.35	9.29	9.29	9.23
0.08	9.44	9.37	9.34	9.29	9.28	9.22
0.10	9.42	9.35	9.33	9.28	9.27	9.21
0.12	9.41	9.34	9.32	9.27	9.27	9.20
0.13	9.40	9.33	9.32	9.26	9.26	9.19
0.15	9.39	9.32	9.31	9.26	9.26	9.18
0.17	9.38	9.31	9.31	9.25	9.25	9.17
0.18	9.38	9.31	9.30	9.25	9.25	9.17
0.20	9.37	9.30	9.30	9.24	9.25	9.16
0.22	9.37	9.30	9.29	9.24	9.24	9.15
0.23	9.36	9.29	9.28	9.23	9.24	9.15
0.25	9.36	9.28	9.28	9.23	9.24	9.14
0.27	9.36	9.27	9.27	9.22	9.23	9.14
0.28	9.35	9.27	9.27	9.22	9.23	9.13
0.30	9.35	9.26	9.26	9.21	9.22	9.13
0.32	9.35	9.25	9.26	9.21	9.22	9.12
0.33	9.34	9.25	9.25	9.21	9.22	9.11
0.35	9.34	9.25	9.24	9.20	9.21	9.11
0.37	9.34	9.25	9.23	9.20	9.21	9.10
0.38	9.33	9.24	9.22	9.19	9.21	9.10
0.40	9.33	9.24	9.22	9.19	9.20	9.09
0.42	9.33	9.24	9.21	9.18	9.20	9.09
0.43	9.32	9.24	9.20	9.18	9.20	9.08
0.45	9.32	9.23	9.20	9.18	9.20	9.08
0.47	9.32	9.23	9.19	9.17	9.19	9.08
0.48	9.32	9.23	9.18	9.17	9.19	9.07
0.50	9.31	9.23	9.18	9.17	9.19	9.07

เวลา (ชั่วโมง)	ความดัน (บาร์)					
	0 phr	20 phr	40 phr	60 phr	80 phr	100 phr
0.52	9.31	9.22	9.18	9.16	9.18	9.07
0.53	9.31	9.22	9.17	9.16	9.18	9.06
0.55	9.31	9.22	9.17	9.16	9.18	9.06
0.57	9.31	9.22	9.17	9.15	9.18	9.06
0.58	9.30	9.22	9.16	9.15	9.17	9.05
0.60	9.30	9.22	9.16	9.15	9.17	9.05
0.62	9.30	9.22	9.16	9.15	9.17	9.04
0.63	9.30	9.22	9.16	9.15	9.17	9.04
0.65	9.30	9.22	9.15	9.14	9.17	9.03
0.67	9.30	9.22	9.15	9.14	9.16	9.03
0.68	9.30	9.22	9.15	9.14	9.16	9.02
0.70	9.30	9.22	9.15	9.14	9.16	9.02
0.72	9.30	9.22	9.15	9.14	9.15	9.02
0.73	9.30	9.22	9.15	9.13	9.15	9.02
0.75	9.30	9.22	9.15	9.13	9.15	9.01
0.77	9.30	9.22	9.15	9.13	9.14	9.01
0.78	9.30	9.22	9.15	9.12	9.14	9.00
0.80	9.30	9.22	9.15	9.12	9.14	9.00
0.82	9.30	9.22	9.15	9.12	9.14	9.00
0.83	9.30	9.22	9.15	9.11	9.13	8.99
0.85	9.30	9.22	9.15	9.11	9.13	8.99
0.87	9.30	9.22	9.15	9.11	9.13	8.99
0.88	9.30	9.22	9.15	9.11	9.13	8.99
0.90	9.30	9.22	9.15	9.11	9.13	8.99
0.92	9.30	9.22	9.15	9.11	9.12	8.98
0.93	9.30	9.22	9.15	9.11	9.12	8.98
0.95	9.30	9.22	9.15	9.11	9.12	8.98
0.97	9.30	9.22	9.15	9.11	9.12	8.98
0.98	9.30	9.22	9.15	9.11	9.12	8.98
1.00	9.30	9.22	9.15	9.11	9.12	8.98

ตารางที่ ค.4 แสดงค่าความดันที่เวลาต่าง ๆ ของการดูดซับแก๊สมีเทนในยางที่ผสมไซพาราฟิน ปริมาณ 100 phr ที่อุณหภูมิ -10, 0, 10, 20 และ 30 องศาเซลเซียส

เวลา (ชั่วโมง)	ความดัน (บาร์)				
	-10 °C	0 °C	10 °C	20 °C	30 °C
0.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
0.02	9.32	9.49	9.47	9.50	9.49
0.03	9.28	9.46	9.45	9.48	9.47
0.05	9.25	9.44	9.43	9.46	9.46
0.07	9.23	9.42	9.42	9.45	9.45
0.08	9.22	9.41	9.41	9.44	9.45
0.10	9.21	9.39	9.40	9.43	9.44
0.12	9.20	9.38	9.39	9.42	9.43
0.13	9.19	9.38	9.39	9.41	9.42
0.15	9.18	9.37	9.39	9.41	9.42
0.17	9.17	9.37	9.38	9.40	9.41
0.18	9.17	9.36	9.38	9.40	9.41
0.20	9.16	9.36	9.38	9.39	9.41
0.22	9.15	9.35	9.37	9.39	9.41
0.23	9.15	9.35	9.37	9.38	9.41
0.25	9.14	9.34	9.37	9.38	9.40
0.27	9.14	9.34	9.37	9.38	9.40
0.28	9.13	9.33	9.36	9.38	9.40
0.30	9.13	9.33	9.36	9.37	9.40
0.32	9.12	9.32	9.36	9.37	9.40
0.33	9.11	9.32	9.36	9.37	9.39
0.35	9.11	9.31	9.35	9.37	9.39
0.37	9.10	9.31	9.35	9.36	9.39
0.38	9.10	9.30	9.35	9.36	9.39
0.40	9.09	9.30	9.35	9.36	9.39
0.42	9.09	9.30	9.34	9.35	9.39
0.43	9.08	9.30	9.34	9.35	9.39
0.45	9.08	9.29	9.33	9.35	9.38
0.47	9.08	9.29	9.33	9.35	9.38
0.48	9.07	9.29	9.33	9.35	9.38
0.50	9.07	9.29	9.32	9.34	9.38

เวลา (ชั่วโมง)	ความดัน (บาร์)				
	-10 °C	0 °C	10 °C	20 °C	30 °C
0.52	9.07	9.29	9.32	9.34	9.38
0.53	9.06	9.29	9.31	9.34	9.38
0.55	9.06	9.28	9.31	9.34	9.38
0.57	9.06	9.28	9.31	9.33	9.37
0.58	9.05	9.28	9.30	9.33	9.37
0.60	9.05	9.28	9.30	9.33	9.37
0.62	9.04	9.28	9.29	9.33	9.37
0.63	9.04	9.28	9.29	9.32	9.37
0.65	9.03	9.28	9.29	9.32	9.37
0.67	9.03	9.28	9.28	9.32	9.37
0.68	9.02	9.28	9.28	9.32	9.37
0.70	9.02	9.28	9.28	9.31	9.36
0.72	9.02	9.28	9.28	9.31	9.36
0.73	9.02	9.28	9.28	9.31	9.36
0.75	9.01	9.28	9.28	9.31	9.36
0.77	9.01	9.28	9.28	9.31	9.36
0.78	9.00	9.28	9.28	9.30	9.36
0.80	9.00	9.28	9.28	9.30	9.36
0.82	9.00	9.28	9.28	9.30	9.35
0.83	8.99	9.28	9.28	9.30	9.35
0.85	8.99	9.28	9.28	9.30	9.35
0.87	8.99	9.28	9.28	9.30	9.35
0.88	8.99	9.28	9.28	9.30	9.35
0.90	8.99	9.28	9.28	9.30	9.35
0.92	8.98	9.28	9.28	9.30	9.35
0.93	8.98	9.28	9.28	9.30	9.35
0.95	8.98	9.28	9.28	9.30	9.35
0.97	8.98	9.28	9.28	9.30	9.35
0.98	8.98	9.28	9.28	9.30	9.35
1.00	8.98	9.28	9.28	9.30	9.35

ตารางที่ ค.5 แสดงค่าความดันที่เวลาต่าง ๆ ของการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนในยางที่ผสมคาร์บอน ปริมาณ 20, 40, 60, 80 และ 100 phr ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส

เวลา (ชั่วโมง)	ความดัน (บาร์)				
	20 phr	40 phr	60 phr	80 phr	100 phr
0.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
0.02	9.80	9.70	9.70	9.70	9.50
0.08	9.70	9.60	9.60	9.60	9.40
0.17	9.70	9.50	9.50	9.50	9.40
0.25	9.70	9.50	9.50	9.50	9.40
0.33	9.70	9.50	9.50	9.50	9.40
0.42	9.70	9.50	9.50	9.50	9.40
0.50	9.70	9.50	9.50	9.50	9.40
0.58	9.70	9.50	9.50	9.50	9.40
0.67	9.70	9.50	9.50	9.50	9.40
0.75	9.70	9.50	9.50	9.50	9.40
0.83	9.70	9.50	9.50	9.50	9.40
0.92	9.70	9.50	9.50	9.50	9.40
1.00	9.70	9.50	9.50	9.50	9.40

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.6 แสดงค่าความดันที่เวลาต่าง ๆ ของการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนในยางที่ผสมไซพาราฟิน ปริมาณ 100 phr ที่อุณหภูมิ -10, 0, 10, 20 และ 30 องศาเซลเซียส

เวลา (ชั่วโมง)	ความดัน (บาร์)				
	-10 °C	0 °C	10 °C	20 °C	30 °C
0.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
0.02	9.50	9.60	9.60	9.70	9.80
0.08	9.40	9.50	9.50	9.60	9.80
0.17	9.40	9.50	9.50	9.60	9.80
0.25	9.40	9.50	9.50	9.60	9.80
0.33	9.40	9.50	9.50	9.60	9.80
0.42	9.40	9.50	9.50	9.60	9.80
0.50	9.40	9.50	9.50	9.60	9.80
0.58	9.40	9.50	9.50	9.60	9.80
0.67	9.40	9.50	9.50	9.60	9.80
0.75	9.40	9.50	9.50	9.60	9.80
0.83	9.40	9.50	9.50	9.60	9.80
0.92	9.40	9.50	9.50	9.60	9.80
1.00	9.40	9.50	9.50	9.60	9.80

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

รูปตัวอย่างยางพารุน



รูปที่ ง.1 ยางธรรมชาติผสมไซพาราฟิน



สถาบันวิชาการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ง.2 ยางธรรมชาติผสมผงคาร์บอน

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวภัทริกา อรัญนารถ เกิดเมื่อวันที่ 11 มีนาคม 2525 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีวิศวกรรม ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2545 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2546



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย