

การกำจัดฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ผงยาง และท่อน้ำซึม
จากผงยางรถยนต์

REMOVAL OF PHENOL FROM SYNTHETIC WASTEWATER USING
GROUND RUBBER TIRE AND ITS POROUS PIPE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของเอกสารตีพิมพ์ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2548

ISBN 974-15-1654-1

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การกำจัดฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ผงยาง และท่อน้ำซึม
จากผงยางรถยนต์

REMOVAL OF PHENOL FROM SYNTHETIC WASTEWATER USING
GROUND RUBBER TIRE AND ITS POROUS PIPE



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

60945

- 7 ก.ค. 2549

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2548
ISBN 974-15-1654-1

b.....
i.....

**REMOVAL OF PHENOL FROM SYNTHETIC WASTEWATER USING
GROUND RUBBER TIRE AND ITS POROUS PIPE**

YUPIN SINGTEARNTRAKUL



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN ENVIRONMENTAL CHEMISTRY
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2005

ISBN 974-15-1654-1



COPYRIGHT 2005

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การกำจัดฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ผงยางและท่อน้ำซึมจากผงยางรถยนต์
นักศึกษา	นางสาวยุพิน ชิ่งเถียรตระกูล
รหัสประจำตัว	45064500
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เคมีสิ่งแวดล้อม
พ.ศ.	2548
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ดร.สุวรรณี จรรยาพูน
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาการกำจัดฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยการดูดซับด้วยผงยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว และท่อน้ำซึมจากผงยางรถยนต์ซึ่งเป็นการใช้ประโยชน์วัสดุเหลือทิ้งจากยางรถยนต์ที่ใช้แล้วมาใช้ประโยชน์อย่างมีประสิทธิภาพ และเป็นกระบวนการกำจัดของเสียที่มีต้นทุนต่ำ งานวิจัยนี้ศึกษาสภาวะเหมาะสมในการกำจัดฟีนอลในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยผงยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว โดยการทดลองทั้งแบบครั้ง และแบบคอลัมน์ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือใช้ผงยางขนาด 30-40 เมช พีเอช 5-9 ความเร็วรอบในการเขย่า 250 รอบต่อนาที ระยะเวลาสัมผัส 3 ชั่วโมง สัดส่วนน้ำหนักของผงยางต่อปริมาตรของสารละลายฟีนอลร้อยละ 25 (น้ำหนักต่อปริมาตร) โดยมีความสามารถในการกำจัดฟีนอลได้ 0.13 มิลลิกรัมฟีนอลต่อกรัมของผงยางที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นทั้งแบบแลงเมียร์ ไอโซเทอร์ม และแบบฟรุนดลิช-ไอโซเทอร์ม จลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาเป็นอันดับสอง นอกจากนี้ยังทำการปรับปรุงพื้นที่ผิวของผงยางโดยใช้กรดไฮโดรคลอริก กรดไนตริก กรดซัลฟูริก และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับของผงยางและผงยางที่ผ่านการปรับปรุงมีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับการทดลองแบบคอลัมน์ที่ความเข้มข้นของฟีนอล 20 มิลลิกรัมต่อลิตรอัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาที สามารถกำจัดฟีนอลได้ไม่คืบเนื่องจากเกิดการไหลเป็นช่องของสารละลาย ศึกษาการกำจัดฟีนอลโดยท่อน้ำซึมจากผงยางรถยนต์พบว่าสามารถกำจัดฟีนอลได้ 0.005 มิลลิกรัมฟีนอลต่อกรัมของท่อน้ำซึมต่อความยาวของท่อ ที่ความดัน 2.5 psi

คำสำคัญ: ผงยางรถยนต์, ท่อน้ำซึม, สารละลายฟีนอล, น้ำเสีย

Thesis Title	Removal of Phenol from Synthetic Wastewater using Ground Rubber Tire and Its Porous Pipe
Student	Ms.Yupin Singteantrakul
Student ID.	45064500
Degree	Master of Science
Program	Environmental Chemistry
Year	2005
Thesis Advisor	Dr.Suwannee Junyapoon
Thesis Coadvisor	Assoc.Prof.Dr. Ittipol Jangchud

ABSTRACT

This thesis studied on removal of phenol from synthetic wastewater using ground rubber tire (GRT) and its porous pipe. This technique used scrap tires as adsorbent which is low cost. Removal of phenol in synthetic wastewater was studied in both batch and column experiments. In batch experiments, adsorption efficiency of the GRT was investigated. Optimum conditions for removing phenol by GRT were: GRT size of 30-40 mesh, pH of 5-7, agitating rate of 250 rpm, contact time of 3 hr, ratio of GRT wastewater 25 %(wt./vol.). At phenol concentration of 50 mg/l, the removal efficiency was 0.13 mg/g of GRT. The adsorption isotherm fitted well with langmuir and freundlich isotherms. The adsorption kinetic was second order rate law. In this work, modified surfaces of GRT particles by soaking with hydrochloric acid, nitric acid, sulfuric acid and hydrogen peroxide did not improve the adsorption efficiency. For column experiment, at flow rate of 1 ml/min and phenol concentration of 20 mg/l, the removal efficiency was low because of channeling flow. Porous pipe made from GRT and reclaimed rubber was formed by extrusion process for convenient treatment. It was found that the porous pipe could remove phenol 0.005 mg/cm of pipe at pressure 2.5 psi.

Key words : ground rubber tire (GRT), porous pipe, phenol solution, wastewater

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลผู้มีพระคุณหลาย ๆ ท่าน ดังนี้

ดร.สุวรรณณี จรรยาพูน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ดูแลเอาใจใส่ให้คำแนะนำ เสนอแนะแนวคิดในการแก้ปัญหา เป็นกำลังใจ รวมทั้งตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์นี้จนสำเร็จลุล่วง และมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มจักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับ พงษยางรถยนต์ เสนอแนะแนวคิด และมุมมองใหม่ ๆ ในการทดลอง

ผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์ และ ดร.เสาวภาค สุขตระกูลเวศ กรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ที่แนะนำในเรื่องความถูกต้องของวิทยานิพนธ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่สนับสนุน ทุนวิจัยงบประมาณแผ่นดินปี 2548

บริษัทแสวงไทยผลิตยางจำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์พวงยางรถยนต์ (GRT) ยางรีเคลม สถาบันวิจัยยาง ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือในการผลิตท่อน้ำซึม และพีทมูนา แจ่มเหมือน ที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับท่อน้ำซึม

วศิน จิรไพศาลกุล วัณรา ทรัพย์สุภาพ และอ้ออำไพ ใจบุญ ที่ช่วยทำท่อน้ำซึมจากพวงยางรถยนต์และให้ข้อมูลคุณสมบัติและวิธีการทำท่อน้ำซึม

ขอบคุณบุคคลในครอบครัว ที่สละเวลา สละทุนทรัพย์ และให้กำลังใจ และขอบคุณ เพื่อน ๆ สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม ที่ช่วยให้คำปรึกษา เป็นกำลังใจตลอดมา ทำให้วิทยานิพนธ์นี้ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

นางสาวยุพิน ชิ่งเถียรตระกูล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	X
สารบัญรูป.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตการศึกษางานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ฟีนอล.....	4
2.1.1 การบ่งลักษณะ.....	4
2.1.2 คุณสมบัติทางเคมี และกายภาพของฟีนอล.....	4
2.1.3 ผลของพีเอช ต่อการเปลี่ยนแปลงของฟีนอล.....	5
2.1.4 การนำไปใช้ประโยชน์.....	5
2.1.5 การปนเปื้อนฟีนอลในสิ่งแวดล้อม.....	6
2.1.6 การย่อยสลายของฟีนอลในสิ่งแวดล้อม.....	7
2.1.7 ผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม.....	7
2.1.8 การกำจัดฟีนอล.....	8
2.1.8.1 การกำจัดโดยใช้ถ่านกัมมันต์.....	8
2.1.8.2 การกำจัดโดยออกซิเดชัน และรีเวอร์สออกซิเดชัน.....	9
2.1.8.3 การกำจัดโดยใช้จุลินทรีย์.....	9
2.1.9 มาตรฐานและข้อกำหนดของฟีนอลที่ปนเปื้อนในน้ำ.....	10
2.2 ขากรดยนต์.....	11

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.1 หน้ายาง.....	11
2.2.2 ยางด้านข้างหรือแก้มยาง.....	11
2.2.3 พลายหรือชั้นผ้าใบ.....	11
2.2.4 เบลท์หรือเข็มขัดยาง.....	11
2.2.5 บีดหรือขอบยาง.....	11
2.2.6 ยางชั้นใน.....	11
2.3 พยางรถยนต์จากยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว.....	12
2.3.1 องค์ประกอบของพยางรถยนต์.....	12
2.3.1.1 ยางเอสปีอาร์.....	13
2.3.1.2 ยางธรรมชาติ.....	13
2.3.1.3 เชม่าดำ.....	14
2.3.1.4 น้ำมัน.....	14
2.3.1.5 สารกระตุ้นปฏิกิริยาการเชื่อมโยง.....	15
2.3.1.6 กำมะถัน.....	15
2.3.1.7 สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง.....	16
2.3.2 การเสื่อมสภาพของพยาง.....	17
2.3.2.1 การเสื่อมสภาพแบบเชื่อมโยง.....	17
2.3.2.2 การเสื่อมสภาพแบบสายโซ่ขาด.....	17
2.3.3 การใช้ประโยชน์จากยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว.....	17
2.3.4 การผลิตพยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว.....	18
2.3.4.1 การบดที่อุณหภูมิต่ำ.....	18
2.3.4.2 การบดที่อุณหภูมิห้อง.....	19
2.3.5 การประยุกต์ใช้พยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว โดยทำเป็นท่อน้ำซึม.....	20
2.4 กระบวนการดูคضب.....	22
2.4.1 ลักษณะการดูคضب.....	22
2.4.1.1 การดูคضبทางกายภาพ.....	22
2.4.1.2 การดูคضبทางเคมี.....	22
2.4.2 กลไกการดูคضب.....	23

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....	24
2.4.3.1 ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ.....	24
2.4.3.2 ลักษณะของตัวถูกดูดซับ.....	24
2.4.3.3 เวลาในการสัมผัส.....	24
2.4.3.4 ความปั่นป่วน.....	24
2.4.3.5 ค่าพีเอช.....	24
2.4.3.6 อุณหภูมิ.....	25
2.4.4 สมดุลของการดูดซับ.....	25
2.4.5 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ.....	25
2.4.5.1 แลงเมียร์ไอโซเทอร์ม.....	25
2.4.5.2 ฟรูนดิชไอโซเทอร์ม.....	26
2.4.6 แบบจำลองในการศึกษาอัตราการดูดซับ.....	28
2.4.6.1 การเกิดปฏิกิริยาอันดับศูนย์.....	29
2.4.6.2 การเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง.....	30
2.4.6.3 การเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง.....	31
2.4.7 ศึกษาอายุการใช้งานของตัวดูดซับ.....	32
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	33
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	36
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	36
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	37
3.3 การดำเนินงานวิจัย.....	38
3.3.1 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของผงยางรถยนต์.....	38
3.3.2 การเตรียมผงยางรถยนต์ ท่อน้ำซึม และสารเคมี.....	38
3.3.2.1 ผงยางรถยนต์.....	38
3.3.2.2 ผงยางรถยนต์ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารเคมีชนิดต่าง ๆ.....	38
3.3.2.3 ท่อน้ำซึม.....	39

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.2.4 การเตรียมสารละลายมาตรฐานฟีนอลความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	39
3.3.2.5 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ฟีนอลความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	39
3.3.3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับฟีนอลด้วยผงยางรถยนต์.....	37
3.3.3.1 ศึกษาผลของขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์.....	39
3.3.3.2 ศึกษาผลของพีเอชของสารละลายฟีนอล.....	40
3.3.3.3 ศึกษาผลของความเร็วรอบในการเขย่า.....	40
3.3.3.4 ศึกษาผลของระยะเวลาในการเขย่า.....	41
3.3.3.5 ศึกษาผลของปริมาณของผงยางรถยนต์.....	41
3.3.3.6 ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายฟีนอล ไอโซเทอร์ม และจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ.....	41
3.3.4 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลด้วยผงยางรถยนต์ที่ผ่านการปรับปรุง.....	42
3.3.5 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลด้วยผงยางรถยนต์โดยบรรจุผงยางรถยนต์ในคอลัมน์.....	42
3.3.6 ศึกษาความสามารถในการดูดซับฟีนอลของท่อน้ำซึมที่ทำด้วยผงยางรถยนต์.....	42
3.3.6.1 ศึกษาความดันที่เหมาะสมในการกำจัดฟีนอล.....	42
3.3.6.2 ศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการทำการรีเจนเนอเรชันสำหรับนำท่อน้ำซึมไปใช้ใหม่.....	43
3.3.6.3 ศึกษาความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ของท่อน้ำซึม.....	44
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	45
4.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของผงยางรถยนต์.....	45
4.1.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของผงยางรถยนต์.....	45
4.1.2 ผลการศึกษาองค์ประกอบของผงยางรถยนต์.....	47
4.1.3 ผลจากการศึกษาโลหะหนักโดยวิธี Leachate Extraction Procedure.....	48

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดฟีนอลด้วยผงยางรถยนต์.....	48
4.2.1 ผลการศึกษาขนาดของผงยางรถยนต์.....	48
4.2.2 ผลการศึกษาพีเอชของสารละลายฟีนอล.....	50
4.2.3 ผลการศึกษาความเร็วรอบในการเขย่า.....	51
4.2.4 ผลการศึกษาระยะเวลาในการเขย่า.....	52
4.2.5 ผลการศึกษาปริมาณผงยางรถยนต์.....	53
4.2.6 ผลการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายฟีนอล ไอโซเทอร์ม และ จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ.....	54
4.2.6.1 ผลการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟีนอล.....	54
4.2.6.2 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ.....	55
4.2.9 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์.....	56
4.3 ผลการศึกษากการผงยางรถยนต์ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารเคมีชนิดต่าง ๆ.....	59
4.4 ผลการศึกษาศามารถในการกำจัดฟีนอลโดยบรรจุผงยางในคอลัมน์.....	60
4.5 ผลการศึกษาศามารถในการดูดซับฟีนอลของท่อน้ำซึมที่ทำด้วยผงยาง รถยนต์.....	61
4.5.1 ผลการศึกษาศามารถที่เหมาะสมในการกำจัดฟีนอล.....	61
4.3.2 ผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการรีเจเนอเรชันท่อน้ำซึมสำหรับ นำกลับมาใช้ใหม่.....	63
4.3.3 ผลการศึกษาศามารถในการนำท่อน้ำซึมกลับมาใช้ใหม่.....	63
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	66
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	66
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	68
เอกสารอ้างอิง.....	69
ภาคผนวก.....	73
ภาคผนวก ก วิธีการชะละลายผงยางรถยนต์.....	74

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ข การหาพื้นที่ผิวโดยวิธีเมทรีนบลู.....	76
ภาคผนวก ค วิธีการวิเคราะห์หาปริมาณฟินอล วิธีมาตรฐาน ASTM.....	78
ภาคผนวก ง คุณสมบัติทั่วไปของท่อน้ำซีเมนต์และการวิเคราะห์องค์ประกอบของผงยาง รถยนต์.....	80
ภาคผนวก จ ผลการทดลองสภาวะที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการกำจัดฟินอล.....	87
ประวัติผู้เขียน.....	104



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของฟีนอล.....	4
2.2 ความเข้มข้น และสารเคมีชนิดต่าง ๆ ในน้ำทิ้งจากโรงกลั่นน้ำมัน และค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง.....	6
2.3 กฎหมายและข้อกำหนดบางประเภทที่ใช้ควบคุมฟีนอลในประเทศไทย และประเทศต่าง ๆ.....	10
2.4 องค์ประกอบของผงยางรถยนต์.....	12
2.5 การนำยางรถยนต์ที่ใช้แล้วไปใช้ประโยชน์ในประเทศสหรัฐอเมริกา.....	18
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของผงยางรถยนต์.....	38
4.1 ผลของพื้นที่ผิวที่ได้จากการทดลองและเปรียบเทียบกับพื้นที่ผิวของผงยาง.....	46
4.2 องค์ประกอบทางเคมีของผงยางรถยนต์ที่วัดด้วยเครื่องเอนเนอร์จิสเพอร์ซิฟสเปกโตรมิเตอร์ (EDS).....	47
4.3 ปริมาณของโลหะหนักที่ถูกชะละลายออกจากยางรถยนต์ แผ่นยาง และท่อน้ำซึมที่ทำจากผงยาง รถยนต์.....	48
4.4 ค่าคงที่ต่าง ๆ ของปฏิกิริยาอันดับสอง.....	58
ตารางผนวก ง-1 สมบัติบางประการของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber: GRT:DNT:C-black (50:50:3:20) ที่เวลาการเชื่อมโยง 20 นาที.....	81
ตารางผนวก จ-1 ขนาดต่างๆ ของผงยางรถยนต์ ต่อความเข้มข้นที่เหลืออยู่และค่าความสามารถในการกำจัด (%) ฟีนอล.....	88
ตารางผนวก จ-2 ขนาดต่าง ๆ ของผงยางรถยนต์ ต่อความเข้มข้นที่เหลืออยู่และค่าความสามารถในการกำจัด (%) ฟีนอล.....	88
ตารางผนวก จ-3 ขนาดต่าง ๆ ของผงยางรถยนต์ ต่อความเข้มข้นที่เหลืออยู่และค่าความสามารถในการกำจัด (%) ฟีนอล.....	89
ตารางผนวก จ-4 ค่าพีเอชต่าง ๆ ของสารละลายฟีนอล ต่อความเข้มข้นที่เหลืออยู่ และความสามารถในการกำจัด (%) ฟีนอล.....	89
ตารางผนวก จ-5 ความเร็วรอบในการเขย่าต่าง ๆ ต่อความเข้มข้นที่เหลืออยู่ และความสามารถในการกำจัด (%) ฟีนอล.....	90
ตารางผนวก จ-6 ระยะเวลาในการเขย่าต่าง ๆ ต่อความเข้มข้นที่เหลืออยู่ และความสามารถในการกำจัด (%) ฟีนอล.....	91

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ตารางผนวก จ-7 การศึกษาสัดส่วนของผงยางรถยนต์ต่อปริมาณของสารละลายฟีนอล (%wt/vol) กับความเข้มข้นที่เหลืออยู่ และความสามารถในการกำจัดฟีนอล.....	92
ตารางผนวก จ-8 ศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล ต่อความเข้มข้นที่เหลืออยู่ และประสิทธิภาพการกำจัดฟีนอล.....	93
ตารางผนวก จ-9 ผลจากการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม.....	94
ตารางผนวก จ-10 ผลจากการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดิชไอโซเทอร์ม.....	94
ตารางผนวก จ-11 ผลจากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (นาที) กับปริมาณฟีนอลที่ถูกกำจัด (มิลลิกรัมต่อกรัม).....	94
ตารางผนวก จ-12 ผลจากการศึกษาความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาอันดับสอง.....	95
ตารางผนวก จ-13 ระยะเวลาที่ใช้บำบัดน้ำขี้ม และผลต่างของน้ำหนักก่อนและหลังอบของท่อน้ำขี้ม.....	95
ตารางผนวก จ-14 ความสามารถในการกำจัดฟีนอล (%) เมื่อปรับปรุงผงยางด้วยกรดชนิดต่าง ๆ.....	96
ตารางผนวก จ-15 ความสามารถในการกำจัดฟีนอล (%) ที่ระยะเวลาต่าง ๆ โดยบรรจุผงยางรถยนต์ในคอลัมน์.....	97
ตารางผนวก จ-16 ความสามารถในการกำจัดฟีนอล (%) ที่ระยะเวลาต่าง ๆ เมื่อใช้ความดัน 1.25 psi.....	98
ตารางผนวก จ-17 ความสามารถในการกำจัดฟีนอล (%) ที่ระยะเวลาต่าง ๆ เมื่อใช้ความดัน 2.5 psi.....	99
ตารางผนวก จ-18 ความสามารถในการกำจัดฟีนอล (%) ที่ระยะเวลาต่าง ๆ เมื่อใช้ความดัน 5.0 psi.....	100
ตารางผนวก จ-19 ความสามารถในการกำจัดฟีนอล (%) ที่ระยะเวลาต่าง ๆ เมื่อใช้ความดัน 1.25 psi หลังจากทำการรีเจนเนอเรชัน.....	101
ตารางผนวก จ-20 ความสามารถในการกำจัดฟีนอล (%) ที่ระยะเวลาต่าง ๆ เมื่อใช้ความดัน 2.5 psi หลังจากทำการรีเจนเนอเรชัน.....	102
ตารางผนวก จ-21 ความสามารถในการกำจัดฟีนอล (%) ที่ระยะเวลาต่าง ๆ เมื่อใช้ความดัน 5.0 psi หลังจากทำการรีเจนเนอเรชัน.....	103

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ขยายรถยนต์ที่ไม่ใช่แล้ว.....	2
2.1 กราฟแสดงสปีชีส์ของฟีนอล.....	5
2.2 กระบวนการย่อยสลายฟีนอลแบบใช้ออกซิเจนโดยจุลินทรีย์.....	7
2.3 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของขยายรถยนต์.....	12
2.4 โครงสร้างโมเลกุลของขยายเอสปีอาร์.....	13
2.5 โครงสร้างทางเคมีของขยายธรรมชาติ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน.....	13
2.6 โครงสร้างของขยายเมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน.....	16
2.7 ตัวอย่างกลไกการเสื่อมสภาพแบบเชื่อมโยง เปลี่ยนพันธะเชื่อมโยงพอลิซัลฟิดิกเป็น โมโนซัลฟิดิก.....	17
2.8 อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตตัวอย่าง.....	20
2.9 องค์ประกอบของเครื่องอัดรีด (Extruder).....	20
2.10 ภาพวาดลักษณะท่อน้ำซึมและการไหลของน้ำ.....	22
2.11 ขั้นตอนการเคลื่อนตัวของตัวดูดซับในกระบวนการ adsorption.....	23
2.12 แสดงไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบแลงเมียร์.....	26
2.13 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช.....	28
2.14 แสดงปฏิกิริยาอันดับศูนย์.....	29
2.15 แสดงปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง.....	30
2.16 แสดงปฏิกิริยาอันดับสอง.....	31
2.17 การเคลื่อนตัวของ Adsorption zone สำหรับสารดูดซับที่อยู่กับที่ตามทิศทางการไหล ของน้ำเสีย.....	32
3.1 ศึกษาอัตราการไหลที่เหมาะสมในการกำจัดฟีนอลโดยใช้ถังความดัน.....	43
4.1 ลักษณะพื้นผิวของผงขยายรถยนต์ขนาดต่าง ๆ ที่กำลังขยาย 200 เท่า.....	45
4.2 ลักษณะพื้นผิวของผงขยายรถยนต์ขนาด 30-40 เมชที่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารเคมี ชนิดต่าง ๆ ที่กำลังขยาย 2000 เท่า.....	46
4.3 ประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอล (%) โดยใช้ผงขยายรถยนต์ขนาดต่าง ๆ.....	49
4.4 เปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดฟีนอล (%) โดยใช้อะซิโตน เอทานอล และน้ำ กลั่นล้างผงขยายรถยนต์.....	50

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 ประสิทธิภาพการกำจัดฟีนอล (%) โดยใช้ผงยางรถยนต์ที่พีเอชต่าง ๆ.....	51
4.6 ประสิทธิภาพการกำจัดฟีนอล (%) โดยใช้ผงยางรถยนต์ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ.....	52
4.7 ประสิทธิภาพการกำจัดฟีนอล (%) โดยใช้ผงยางรถยนต์ที่ระยะเวลาสัมผัสต่าง ๆ.....	52
4.8 ประสิทธิภาพการกำจัดฟีนอล (%) โดยใช้ผงยางรถยนต์ที่สัดส่วนของผงยางต่าง ๆ.....	53
4.9 ประสิทธิภาพการกำจัดฟีนอล (%) โดยใช้ผงยางรถยนต์ที่ความเข้มข้นของฟีนอล ต่าง ๆ.....	54
4.10 ปริมาณของฟีนอลต่อน้ำหนักของผงยางรถยนต์.....	55
4.11 กราฟแลงเมียร์ไอโซเทอร์มของการดูดซับฟีนอล โดยผงยางรถยนต์.....	55
4.12 กราฟฟรุนดิช ไอโซเทอร์มของการดูดซับฟีนอล โดยผงยางรถยนต์.....	56
4.13 ความสัมพันธ์ของปฏิริยาอันดับศูนย์.....	57
4.14 ความสัมพันธ์ของปฏิริยาอันดับหนึ่ง.....	57
4.15 ความสัมพันธ์ของปฏิริยาอันดับสอง.....	58
4.16 ประสิทธิภาพการกำจัดฟีนอล (%) โดยใช้ผงยางรถยนต์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว โดยใช้กรดต่าง ๆ.....	60
4.17 ประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอล (%) โดยใช้ผงยางรถยนต์ขนาด 30-40 เมช โดยทำ การทดลองแบบคอลัมน์.....	61
4.18 ความสามารถในการกำจัดฟีนอล (%) ที่ระยะเวลาต่าง ๆ เมื่อใช้ความดัน 1.25, 2.5 และ 5.0 psi.....	62
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของฟีนอลที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของท่อน้ำซึม และความยาวท่อ เมื่อใช้ความดัน 1.25, 2.5 และ 5.0 psi.....	62
4.20 ระยะเวลาที่ใช้ของท่อน้ำซึม และผลต่างของน้ำหนักก่อนและหลังอบท่อน้ำซึม.....	63
4.21 ความสามารถในการกำจัดฟีนอล (%) ที่ระยะเวลาต่าง ๆ โดยท่อน้ำซึมที่ผ่านการรีเจน เนอรชัน และใช้ความดัน 1.25, 2.5 และ 5.0 psi.....	64
รูปผนวก ง-1 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบของผงยางรถยนต์เมื่อล้างด้วย น้ำกลั่น.....	82
รูปผนวก ง-2 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบของผงยางรถยนต์เมื่อล้างด้วย กรดซัลฟูริก.....	83

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปผนวก ง-3 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของผงขางรถยนต์เมื่อล้างด้วย กรดไนตริก.....	84
รูปผนวก ง-4 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของผงขางรถยนต์เมื่อล้างด้วย กรดไฮโดรคลอริก.....	85
รูปผนวก ง-5 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของผงขางรถยนต์เมื่อล้างด้วย ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	86



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

การเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของอุตสาหกรรมในปัจจุบันทำให้ปริมาณของเสียจากกระบวนการผลิตมีปริมาณเพิ่มขึ้น ของเสียอุตสาหกรรมเหล่านี้สามารถแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมได้ทั้งทางอากาศ น้ำ และดิน และอาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งปัญหานี้นับวันยิ่งทวีความรุนแรงมากขึ้น

ฟินอลเป็นวัตถุอันตรายในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น ปิโตรเคมี เกษษกรรม พลาสติก เป็นต้น ในปี ค.ศ. 2001 มีการใช้ฟินอลทั่วโลกมากถึง 7.8 ล้านตัน [1] สำหรับประเทศไทยมีการนำเข้าฟินอลจากต่างประเทศรวม 4.89 ล้านกิโลกรัมในปี พ.ศ. 2541 [2] ฟินอลเป็นสารที่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตอย่างมากแม้ในปริมาณความเข้มข้นเพียงเล็กน้อย และยังจัดเป็นสารก่อมะเร็ง ดังนั้นน้ำเสียจากอุตสาหกรรมที่มีสารนี้ปนเปื้อนจึงต้องผ่านการบำบัดก่อนทิ้งออกสู่สิ่งแวดล้อม U.S. EPA. (U.S. Environmental Protection Agency) กำหนดให้สารประกอบฟินอลในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติต้องมีปริมาณน้อยกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร [3]

การกำจัดฟินอลทำได้หลายวิธี ได้แก่ การทำปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยสารเคมี หรือด้วยแสง (Chemical/ Photochemical oxidation) การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) การใช้รีเวอร์สออสโมซิส (Reverse osmosis) เป็นต้น แต่วิธีการเหล่านี้มีต้นทุนค่อนข้างสูง ทั้งนี้เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน สิ้นเปลืองสารเคมี และใช้พลังงานสูง

ยางรถยนต์ที่ใส่แล้ว (Scrap tires) เป็นวัสดุเหลือทิ้งที่มีจำนวนเพิ่มขึ้นตามปริมาณการใช้รถยนต์ ในประเทศไทยในปี พ.ศ. 2543 มียางรถยนต์ที่ใส่แล้วทั้งหมด 330,000 ตัน มีการนำกลับมาใช้ใหม่เพียง 15% ของปริมาณของยางรถยนต์ที่ถูกทิ้งทั้งหมด โดยเป็นการนำกลับมาแปรรูปใช้ใหม่หรือรีไซเคิลในรูปการหล่อดอกยางใหม่ และการผลิตยางรีเคลม (Reclaimed rubbers) มากที่สุด รองลงมาเป็นการนำมาใช้ซ้ำ (Reuse) และใช้เป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมซีเมนต์ [4] ยางที่ใส่แล้วส่วนใหญ่ยังคงถูกกำจัดโดยวิธีฝังกลบ และกองทิ้งไว้อย่างผิดกฎหมาย ถึงแม้ว่าการกำจัดยางรถยนต์ใส่แล้วโดยวิธีฝังกลบจะมีค่าใช้จ่ายต่ำ อย่างไรก็ตาม วิธีนี้ ต้องใช้พื้นที่จำนวนมาก และอาจก่อให้เกิดไฟไหม้ในหลุมฝังกลบ ซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายแก่แผ่นวัสดุกันซึม (Liner) ของหลุมฝังกลบได้ ดังนั้นกลุ่มประเทศในแถบยุโรป (European countries) ในทวีปยุโรปได้ร่วมกันกำหนด The EC Landfill Directive 1999/31/EC โดยห้ามฝังกลบยางรถยนต์ที่ใส่แล้วทั้งเส้น (Whole tires) ใน

หลุมฝังกลบภายในปี ค.ศ. 2003 และห้ามฝังกลบเศษชิ้นส่วนยางรถยนต์ (Shredded tires) ภายในปี ค.ศ. 2006 [5] นอกจากนี้ การกองยางรถยนต์ที่ใช้แล้วทิ้งไว้ในที่โล่งแจ้งยังเป็นแหล่งท่วมขังของน้ำ ทำให้เกิดแหล่งเพาะพันธุ์ของยุง ดังรูปที่ 1.1 ดังนั้น จึงจำเป็นต้องหาวิธีกำจัดที่เหมาะสมมาจัดแทน ปัจจุบันการเผายางรถยนต์เพื่อใช้เป็นพลังงานได้รับความนิยมเพิ่มขึ้น แต่วิธีนี้ต้องใช้พลังงานมากและก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศค่อนข้างสูง ได้แก่ PAHs, Dioxins, CO, SO₂ [6] ดังนั้น จึงจำเป็นต้องใช้เตาเผาที่มีประสิทธิภาพสูง และมีระบบบำบัดอากาศเสียที่มีคุณภาพ



รูปที่ 1.1 ยางรถยนต์ที่ไม่ใช้แล้ว [7]

การนำเอายางรถยนต์ที่ใช้แล้วมาดัดเป็นผงเพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับสารอินทรีย์ที่ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds, VOCs) และสารประกอบอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Aromatic hydrocarbons) จึงเป็นวิธีที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นการใช้ประโยชน์จากของเหลือทิ้ง ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการซื้อวัสดุดูดซับที่มีราคาแพงและต้องนำเข้าจากต่างประเทศ นอกจากนี้การบดขยัก่อนนำมาใช้งาน ยังสามารถแยกโลหะต่าง ๆ ที่เป็นส่วนประกอบในยางรถยนต์ออกมาใช้ประโยชน์ต่อไป นับว่าเป็นการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าและไม่ก่อให้เกิดปัญหามลพิษ อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพการดูดซับสารอินทรีย์ที่ระเหยง่ายของยางรถยนต์ยังไม่ดีนัก

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการนำเอาผงยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว (Scrap tires หรือ Ground Rubber Tire, GRT) มาบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีฟีนอลปนเปื้อน โดยศึกษาประสิทธิภาพการ

กำจัดฟีนอลของผงยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว ผงยางรถยนต์ที่ปรับปรุง และท่อน้ำซึมที่ทำจากผงยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว เพื่อให้สะดวกในการใช้งาน

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการกำจัดฟีนอลในน้ำทิ้งด้วยผงยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว
2. ศึกษาไอโซเทอร์มและจลนพลศาสตร์ของการดูดซับฟีนอลด้วยผงยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว
3. ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอลในน้ำทิ้งด้วยผงยางรถยนต์ที่ผ่านการปรับปรุง
4. ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดฟีนอลโดยใช้ท่อน้ำซึมที่ทำจากผงยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของผงยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว และผงยางรถยนต์ที่ผ่านการปรับปรุง ได้แก่ ลักษณะของพื้นผิวโดยใช้เครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (Scanning Electron Microscope; SEM)
2. ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการกำจัดฟีนอลด้วยผงยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว ได้แก่ ขนาดของผงยางรถยนต์ พีเอช ความเร็วรอบในการเขย่า ระยะเวลาสัมผัส ปริมาณของผงยางรถยนต์ ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล และจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ด้วยการทดลองแบบครั้ง (Batch test)
3. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลของผงยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว กับผงยางที่ผ่านการปรับปรุงโดยใช้กรดซัลฟูริก กรดไฮโดรคลอริก กรดไนตริก และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
4. ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการกำจัดฟีนอลด้วยผงยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว โดยการทดลองแบบต่อเนื่องโดยใช้คอลัมน์ (Column test) ภายใต้สภาวะเหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบครั้ง
5. ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอลโดยใช้ท่อน้ำซึมที่ทำจากผงยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว ในสัดส่วนปริมาณผงยางรถยนต์ต่าง ๆ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นการนำเอายางรถยนต์ที่ใช้แล้วซึ่งเป็นของเหลือทิ้งมาใช้ในการบำบัดน้ำทิ้ง
2. ลดค่าใช้จ่าย และลดการขาดดุลทางการค้าจากการนำเข้าสารดูดซับจากต่างประเทศ
3. เป็นการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า
4. สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งที่มีฟีนอลปนเปื้อน

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ฟีนอล [8]

2.1.1 การบ่งลักษณะ (Identification)

ชื่อสามัญ : phenol

CASRN (Chemical Abstracts Service Registry Number) : 108-95-2

ชื่อทางเคมี : phenol

สูตรโมเลกุล : C_6H_6O [C 76.57%, H 6.43%, O 17.00%]

สูตรโครงสร้าง :



2.1.2 คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของฟีนอล

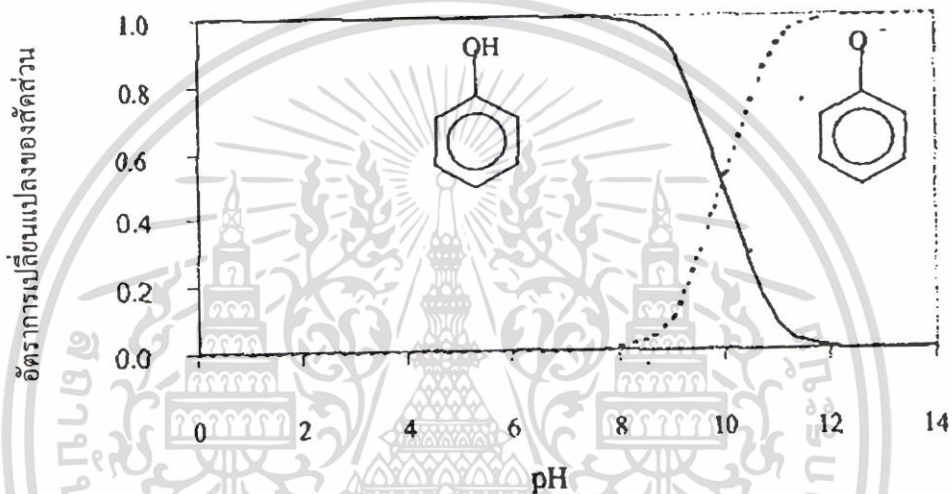
ฟีนอลเป็นผลึก ไม่มีสีหรือสีขาว ถ้าไม่บริสุทธิ์จะมีสีชมพูอ่อน ๆ มีกลิ่นฉุนเฉพาะตัว ดูดความชื้น ละลายน้ำได้ดี สารละลายที่ได้มีฤทธิ์เป็นกรดอ่อน จึงมีชื่อเรียกที่รู้จักกันทั่วไปว่า กรดคาร์บอลิก (Carbolic acid) คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของฟีนอลแสดงได้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของฟีนอล [8]

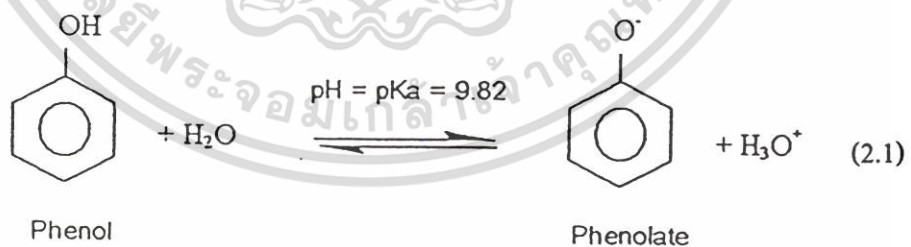
คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ	
น้ำหนักโมเลกุล	94.11
จุดหลอมเหลว	40.85°C
จุดเดือด	182°C
จุดวาบไฟ	85°C (open cup) 79°C (closed cup)
อุณหภูมิติดไฟได้เอง	715°C
ช่วงความเข้มข้นติดไฟได้	3-10% (ในอากาศ)
ความดันไอ	0.3513 มม.ปรอท (ที่ 25°C)
การละลายน้ำ	93 กรัม/ลิตร (ที่ 16°C)
ความหนาแน่นไอ	3.24 (อากาศ = 1)
ความถ่วงจำเพาะ	1.071
ดัชนีหักเหแสง	1.5408 (ที่ 41°C)

2.1.3 ผลของพีเอชต่อการเปลี่ยนแปลงของฟีนอล [9]

พีเอชมีความสำคัญในการเปลี่ยนรูปของฟีนอลในสิ่งแวดล้อม จากรูปที่ 2.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงสปีชีส์ของฟีนอลที่พีเอชต่าง ๆ เนื่องจากค่า pK_a ของฟีนอลเท่ากับ 9.82 เมื่อค่าพีเอชมากกว่า pK_a ของฟีนอล ในสารละลายจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของฟีนอเลต ($C_6H_5O^-$) และที่พีเอชน้อยกว่า pK_a ของฟีนอล ในสารละลายจะอยู่ในรูปฟีนอล (C_6H_5O) เมื่อฟีนอลเปลี่ยนไปอยู่ในรูปฟีนอเลต ความมีขี้จะเพิ่มมากขึ้นความสามารถในการละลายน้ำจะสูงขึ้น การแตกตัวของของฟีนอลในน้ำแสดงดังสมการ 2.1 [9]



รูปที่ 2.1 กราฟแสดงสปีชีส์ของฟีนอล



2.1.4 การนำไปใช้ประโยชน์

โรงงานอุตสาหกรรมมีการใช้ฟีนอลทั่วโลกในปี ค.ศ. 2001 มากถึง 7.8 ล้านตัน [1] ซึ่งในโรงงานส่วนใหญ่ใช้ฟีนอลในการผลิตฟีนอลเรซินบิสฟีนอล A คาโปแลกทัม และผลิตภัณฑ์ตัวอื่น ๆ เช่น อัลคิลฟีนอล สีย้อม อินดิเคเตอร์ ในห้องปฏิบัติการจะใช้ฟีนอลเป็นสารรีเอเจนต์และใช้เป็นยาฆ่าเชื้อ (Disinfectant) เป็นสารละลายเดี่ยวหรือสารละลายผสมกับยาฆ่าเชื้อตัวอื่น ฟีนอลมีฤทธิ์

ยับยั้งแบคทีเรีย (Bacteriostatic) ที่ความเข้มข้น 0.2% มีฤทธิ์ฆ่าแบคทีเรีย (Bactericide) ที่เข้มข้นมากกว่า 1% และมีฤทธิ์ฆ่าเชื้อราได้ที่ความเข้มข้นมากกว่า 1.3% นอกจากนี้ ยังอาจใช้ในการผลิตสารเคมีอันตรายหลายชนิด เช่น ครีซอล ไซลีนอล เป็นต้น

มีการใช้ฟีนอลอย่างกว้างขวางเพื่อเป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ และยังใช้เป็นตัวทำละลายเพื่อสกัดสารประกอบอะโรมาติก น้ำทิ้งจากโรงกลั่นน้ำมันที่มีฟีนอลปนเปื้อนอยู่ในน้ำทิ้งที่เกิดจากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบในส่วนต่าง ๆ ได้แก่ กระบวนการกำจัดเกลือ (Crude desalting) การกลั่นลำดับส่วน (Crude oil fractionation) การคั่งธาตคาร์บอนออก (Carbon rejection) การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของน้ำมัน (Isomerization unit) เป็นต้น ปริมาณความเข้มข้นของน้ำเสียจากโรงกลั่นน้ำมัน และค่ามาตรฐานน้ำทิ้งแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ความเข้มข้น และสารเคมีชนิดต่าง ๆ ในน้ำทิ้งจากโรงกลั่นน้ำมัน และค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ความเข้มข้นเฉลี่ย [10]	ค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง [3]
บีโอดี (BOD)	150-250 mg / l	20 mg/l
ซีโอดี (COD)	300-600 mg / l	120 mg/l
ฟีนอล (phenol)	20-200 mg / l	1 mg/l
Oil (desalter water)	100-300 mg / l	5 mg/l
Oil (intank bottom)	5,000 mg / l	5 mg/l
Benzene	1-100 mg / l	-
โลหะหนัก (heavy metals)	0.1-100 mg / l	0.005-5 mg/l

2.1.5 การปนเปื้อนฟีนอลในสิ่งแวดล้อม

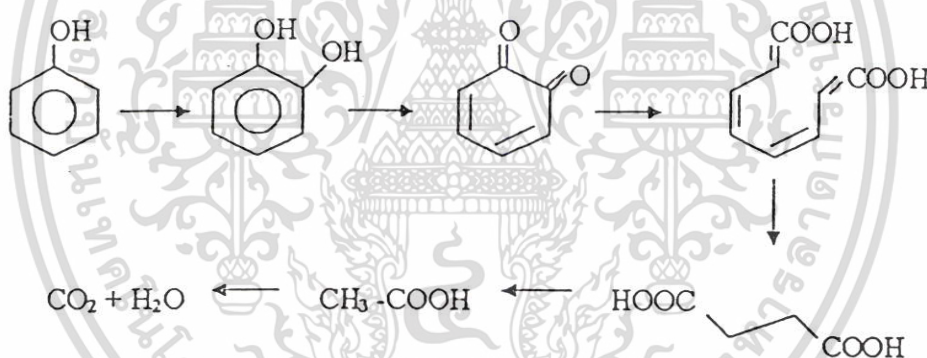
ฟีนอลจะปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมจากแหล่งต่าง ๆ ดังนี้ [8]

1. อุตสาหกรรม จากกระบวนการผลิตและการใช้ฟีนอลในการผลิตสารเคมีชนิดต่าง ๆ
2. บ้านเรือนและห้องปฏิบัติการ จากการใช้ฟีนอลเป็นสารฆ่าเชื้อ
3. ไอเสียรถยนต์ซึ่งมีฟีนอลผสมอยู่เล็กน้อยที่ความเข้มข้น 1.2-7.7 มิลลิเมตรต่อลูกบาศก์เมตร
4. การย่อยสลายของเบนซิน โดยทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลในอากาศ

2.1.6 การย่อยสลายของฟีนอลในสิ่งแวดล้อม

ฟีนอลในสิ่งแวดล้อมสลายตัวได้อย่างรวดเร็วทั้งในอากาศ น้ำ และดิน การสลายตัวของฟีนอลในอากาศเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว การสลายตัวของฟีนอลในน้ำผิวดิน น้ำใต้ดินและดินเกิดได้ภายใต้สภาวะที่ใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจน การกลายเป็นไอของฟีนอลจากแหล่งน้ำธรรมชาติหรือปนเปื้อนในดินเกิดขึ้นได้เพียงเล็กน้อย โดยพิจารณาจากค่า Henry's law constant ที่มีค่าเท่ากับ $1.62 \times 10^{-5} \text{ atm}\cdot\text{m}^3/\text{mol}$ [8]

การย่อยสลายทางชีวภาพของฟีนอลในแหล่งน้ำธรรมชาติ ขึ้นอยู่กับแหล่งน้ำนั้นมีการปนเปื้อนฟีนอลมาก่อนหรือไม่ ถ้าแหล่งน้ำนั้นเคยมีการปนเปื้อนของสารฟีนอลอยู่ก่อน จุลินทรีย์ในแหล่งน้ำจะปรับตัวจนสามารถใช้สารฟีนอลเป็นพลังงานได้ กระบวนการย่อยสลายฟีนอลแบบใช้ออกซิเจนแสดงดังรูปที่ 2.2 อย่างไรก็ตาม ถ้ามีปริมาณความเข้มข้นของฟีนอลสูงมากกว่า 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถทำลายเชื้อแบคทีเรียและราได้ตามลำดับ [11] ดังนั้นจึงต้องใช้วิธีทางกายภาพหรือเคมีในการกำจัด



รูปที่ 2.2 กระบวนการย่อยสลายฟีนอลแบบใช้ออกซิเจน โดยจุลินทรีย์ [12]

2.1.7 ผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม

พิษเฉียบพลันของฟีนอลก่อให้เกิดพิษต่อร่างกายไม่ว่าจะได้รับสาร โดยการรับประทาน การสูดดม หรือการสัมผัสทางผิวหนัง เนื่องจากฟีนอลมีฤทธิ์กัดกร่อนเนื้อเยื่ออย่างรุนแรง ทำให้เกิดเป็นแผลไฟไหม้ในบริเวณที่ได้รับสัมผัส โดยตรง เช่น ช่องปาก หลอดอาหาร กระเพาะอาหาร ตา และผิวหนัง หากเข้าตาอาจทำให้มีอาการตาบอดได้ (Photophobia) กระจกตาเป็นแผล หรืออาจถึงกับตาบอดได้ ฟีนอลถูกดูดซึมผ่านผิวหนังได้อย่างรวดเร็ว และอาจทำให้เสียชีวิตภายในเวลา 10 นาที การสัมผัสกับฟีนอลก่อให้เกิดการระคายเคืองและกัดผิวหนัง โดยทำให้ผิวหนังมีสีซีดขาวแต่ไม่เจ็บปวดในระยะแรกเพราะปลายประสาทตาย แต่ต่อมาก็มีการเจ็บปวดมาก และอาจทำให้ผิวหนัง

ตาย (Gangrene) หากได้รับสัมผัสเป็นบริเวณกว้างมากกว่า 60 ตารางนิ้วโดยประมาณ จะเสี่ยงต่อการเป็นพิษเรื้อรัง และเสียชีวิต นอกจากนี้ การใช้ฟีนอลอย่างแพร่หลายในการรักษาโรคและการผ่าตัด ถ้าได้รับฟีนอลเข้าสู่ร่างกายซ้ำหลายครั้งในปริมาณมากพบว่าทำให้อาเจียน กลืนอาหารลำบาก น้ำลายไหล ท้องเสีย เบื่ออาหาร และน้ำหนักตัวลด ปวดศีรษะ ตับ และไตถูกทำลาย มีรายงานในคนที่สัมผัสฟีนอล 8.5% จากการทำงานพบว่ามีความผิดปกติของผิวหนัง (Leukoderma) นอกจากนี้การใช้สเปรย์ หรือยาอมที่มีส่วนผสมของฟีนอล อาจทำให้มีอาการเจ็บคอบ่อย ๆ [13]

พหุคูณของฟีนอลต่อสัตว์น้ำชนิดต่าง ๆ พบว่า LC_{50} ในปลาต่าง ๆ มีค่า 5.2-49.86 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนคุณภาพน้ำที่อยู่ในชั้นวิกฤต (Water quality criteria) ของฟีนอลในแหล่งน้ำจืดตามธรรมชาติที่ปลอดภัยสำหรับสิ่งมีชีวิตในน้ำมีค่าเท่ากับ 2,560 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยคิดค่าเฉลี่ยในระยะเวลา 24 ชั่วโมง (Fresh chronic criteria) และไม่ควรมีความเข้มข้นเกิน 10,200 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่เวลาใด ๆ (Fresh acute criteria) สำหรับน้ำทะเล (Marine acute criteria) ความเข้มข้นของฟีนอลไม่ควรเกิน 5,800 ไมโครกรัมต่อลิตร [14]

2.1.8 การกำจัดฟีนอล

วิธีการกำจัดฟีนอลที่ใช้โดยทั่วไปในปัจจุบัน (Conventional methods) [15] ได้แก่

2.1.8.1 การกำจัดโดยใช้ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่สังเคราะห์ขึ้นเป็นพิเศษ พบว่าถ่านกัมมันต์สามารถกำจัดฟีนอลได้ 161 มิลลิกรัมต่อกรัมถ่านกัมมันต์ ที่ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือประมาณร้อยละ 81 มีข้อดีและข้อเสีย ดังนี้

ข้อดีของถ่านกัมมันต์ คือ

- 1) มีพื้นที่ผิวในการดูดซับได้สูงมาก
- 2) มีความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ เกือบไอออนต่าง ๆ โลหะหนัก และก๊าซได้
- 3) สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยการทำรีเจนเนอเรชัน (Regeneration)
- 4) การดูดซับฟีนอลเกิดขึ้นได้เร็ว

ข้อเสียของการใช้ถ่านกัมมันต์ คือ

- 1) มีราคาแพง
- 2) การทำรีเจนเนอเรชัน เป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน และอาจลดประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอล

2.1.8.2 การกำจัดโดยออสโมซิส (Osmosis) และรีเวอร์สออสโมซิส

(Reverse osmosis)

เป็นกระบวนการที่ใช้เยื่อเมมเบรนในการคัดแยกสารต่าง ๆ กับน้ำ และต้องใช้แรงดันในการแยกสารออสโมซิส เป็นการเคลื่อนที่ซึ่งเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติของน้ำผ่านเยื่อเมมเบรนบาง ๆ จากสารละลายเจือจางไปยังสารละลายเข้มข้น ส่วนรีเวอร์สออสโมซิส เป็นการเคลื่อนที่ของสารจากสารละลายที่เข้มข้นไปยังสารละลายที่เจือจาง ซึ่งจะต้องอาศัยแรงดันในการผลักดันน้ำผ่านเยื่อเมมเบรน

ข้อดีของกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสคือ

- 1) มีความสามารถในการกำจัด หรือลดจุลินทรีย์ต่าง ๆ ได้
- 2) สามารถแยกเกลือแร่ กรด ค่าง สารอินทรีย์ต่าง ๆ ออกจากน้ำได้
- 3) น้ำที่ได้เป็นน้ำที่ใสมาก
- 4) สามารถทำการรีเจนเนอเรชันได้

ข้อเสียของกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิสคือ

- 1) เมมเบรนมีราคาแพง
- 2) ต้องใช้แรงดันที่เหมาะสมในการผลักดันน้ำให้ผ่านเยื่อเมมเบรน
- 3) ในการทำการรีเจนเนอเรชัน ต้องใช้สารเคมีในการล้าง หรือต้องใช้แรงดันเพื่อกำจัดสารที่อุดตันเมมเบรน
- 4) ต้องมีการกำหนด อุณหภูมิ พีเอช ความเข้มข้นของสารต่าง ๆ ของน้ำก่อนเข้าสู่ระบบ และต้องกำหนดความดัน อัตราการไหลของน้ำภายในระบบ ซึ่งค่อนข้างยุ่งยาก

2.1.8.3 การกำจัดโดยใช้จุลินทรีย์

ฟีนอลสามารถย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์ทั้งในสภาวะที่มีออกซิเจน (Aerobic) และไม่มีออกซิเจน (Anaerobic) ซึ่งมีจุลินทรีย์หลายชนิดที่สามารถย่อยสลายฟีนอลได้

ข้อดีของกระบวนการกำจัดโดยใช้จุลินทรีย์

- 1) สามารถย่อยสลายฟีนอลได้หมด
- 2) ประหยัด ไม่ต้องใช้พลังงานสูง

ข้อเสียของกระบวนการกำจัดโดยใช้จุลินทรีย์

- 1) ใช้ระยะเวลาในการย่อยสลายค่อนข้างนาน โดยการย่อยสลายฟีนอลแบบใช้ออกซิเจนการย่อยสลายจะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ภายใน 2 สัปดาห์
- 2) ฟีนอลเป็นสารที่มีฤทธิ์ในการฆ่าเชื้อ ดังนั้นในระยะเริ่มต้นของการกำจัดฟีนอล จุลินทรีย์จะต้องปรับตัวซึ่งใช้เวลานาน

2.1.9 มาตรฐานและข้อกำหนดของฟีนอลที่ปนเปื้อนในน้ำ [8]

มาตรฐาน และข้อกำหนดของฟีนอลในประเทศไทย และต่างประเทศ แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 กฎหมายและข้อกำหนดบางประเภทที่ใช้ควบคุมฟีนอลในประเทศไทย และประเทศต่าง ๆ

ประเทศ	มาตรฐาน
ไทย	<ul style="list-style-type: none"> o กระทรวงอุตสาหกรรมออกพระราชบัญญัติโรงงาน ให้น้ำทิ้งจากโรงงานมีสารประกอบฟีนอล (phenols compound) ไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งตรงกับพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อม ที่ออกโดยกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม o นอกจากนี้ยังมีการกำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำทะเลชายฝั่งตามพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อม กำหนดให้มีฟีนอลไม่เกิน 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร และคุณภาพน้ำตามแหล่งน้ำผิวดิน o ตามพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อม กำหนดคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 2 เพื่อการอนุรักษ์สัตว์น้ำ เพื่อการประมง กิจกรรมและกีฬาทางน้ำ ต้องมีฟีนอลไม่เกิน 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร
ประชาคมยุโรป (EEC)	<ul style="list-style-type: none"> o กฎหมายกำหนดให้น้ำที่ใช้ชำระร่างกายต้องมีฟีนอลเท่ากับ หรือน้อยกว่า 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร
ญี่ปุ่น	<ul style="list-style-type: none"> o มีกฎหมายกำหนดให้ความเข้มข้นของน้ำดื่มต้องไม่เกิน 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร และน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดมลพิษมีสารประกอบฟีนอลได้สูงสุด 5 มิลลิกรัมต่อลิตร
เม็กซิโก	<ul style="list-style-type: none"> o กฎหมายกำหนดความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอลในน้ำทะเลชายฝั่งและบริเวณปากแม่น้ำเท่ากับ 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร o กฎหมายกำหนดให้ความเข้มข้นสูงสุดของสารประกอบฟีนอล ในแหล่งน้ำที่ใช้สำหรับผลิตน้ำดื่มเท่ากับ 0.001 มิลลิกรัมต่อลิตร o แหล่งน้ำสำหรับพักผ่อน แหล่งน้ำสงวนสำหรับสัตว์และพืชน้ำเท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.2 ยางรถยนต์ (Tires)

ยางรถยนต์ เป็นผลิตภัณฑ์แปรรูปของยางที่สำคัญ ส่วนประกอบของยางรถยนต์ แต่ละส่วน จะผลิตจากยางหลายชนิด ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของยาง ส่วนประกอบต่าง ๆ ของยางรถยนต์แสดงดัง รูป 2.3

ส่วนประกอบของยางรถยนต์ สามารถแบ่งได้ดังนี้ [16]

2.2.1 หน้ายาง (Tread) เป็นยางที่มีความทนทานต่อการขัดสี (Wear resistance) มีความร้อนที่เกิดจากการได้รับแรงอย่างต่อเนื่อง (Heat buildup) ต่ำ นิยมใช้ยางผสมระหว่างยางเอสบีอาร์ (Styrene-Butadiene Rubber, SBR) ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR) และยางบิวอาร์ (Polybutadiene Rubber, BR) เป็นองค์ประกอบ ส่วนของหน้ายางมีประมาณ 31% โดยน้ำหนัก [17]

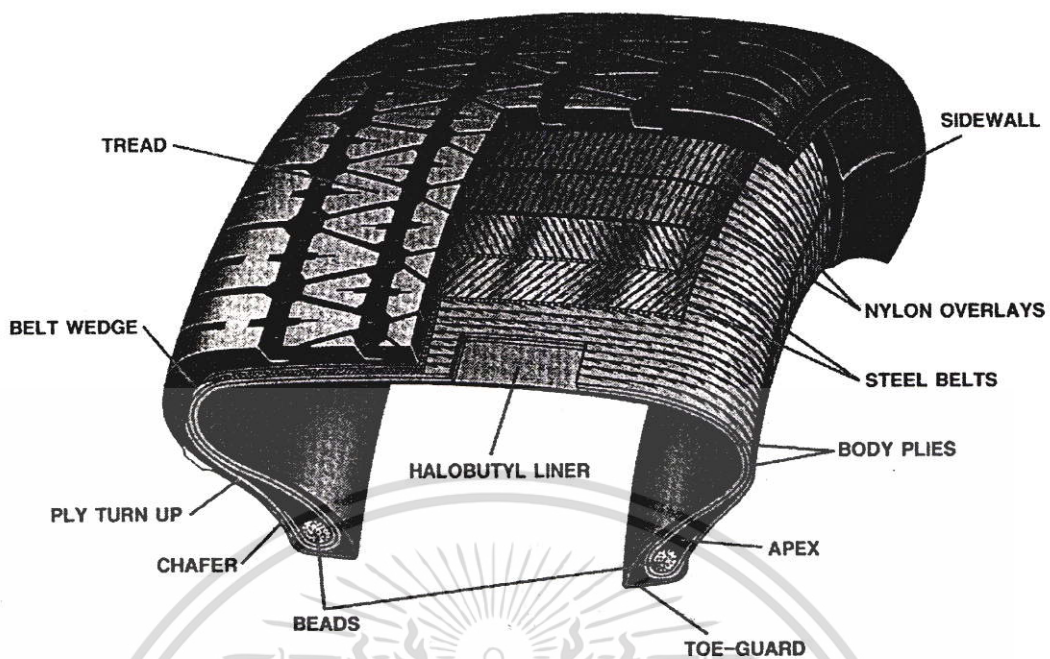
2.2.2 ยางด้านข้างหรือแก้มยาง (Sidewall) เป็นยางที่มีความสามารถในการรับแรงกระแทกได้ดี (Flex resistance) มีความยืดหยุ่นสูง และเกิดความร้อนสะสมน้อย นิยมใช้ยางผสมบิวอาร์ (BR) กับยางธรรมชาติ (NR)

2.2.3 พลายหรือชั้นผ้าใบ (Ply) เป็นชั้นผ้าใบหรือเส้นใยทอเป็นเส้นฉาบด้วยยางผสม ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักที่ให้ความแข็งแรงเป็นรูปร่าง โครงยางรถยนต์ และยึดส่วนต่าง ๆ ของยางรถยนต์ไว้ด้วยกัน นิยมใช้เส้นใยสังเคราะห์ เช่น เส้นใยไนลอน-6 (Nylon-6) และเส้นใยพอลิเอสเตอร์ (Polyester)

2.2.4 เบลท์หรือเข็มขัดยางรถยนต์ (Belt) อาจเรียกว่า แผ่นรองรับ หรือเส้นใยเหล็ก เป็น ลวดโลหะ หรือเส้นใยสังเคราะห์อยู่บริเวณใต้หน้ายาง เช่น เส้นลวดเหล็ก ทองเหลือง เส้นใยเรยอน ทำหน้าที่เพิ่มความแข็งแรงให้กับหน้ายางและป้องกันอันตรายบนพื้นถนน

2.2.5 บีดหรือขอบยาง (Beads) เป็นลวดโลหะแข็งแรงม้วนพันเป็นวงแล้วฉาบด้วยยางผสม อยู่บริเวณริมขอบยางรถยนต์ติดกับกระทะล้อ ทำหน้าที่ยึดยางรถยนต์ให้ติดแน่นอยู่ในขอบกระทะล้อรถยนต์ และยึดโครงสร้างชั้นผ้าใบพลาย

2.2.6 ยางชั้นใน (Inner liner) เป็นยางที่มีการซึมผ่านของก๊าซได้ต่ำ ได้แก่ ยางบิวทิล (Butyl Rubber, IIR) หรือฮาโลบิวทิล (Halobutyl Rubber, CIIR หรือ BIIR)



รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบต่างๆ ของยางรถยนต์ [16]

2.3 พยางรถยนต์จากยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว

2.3.1 องค์ประกอบของพยางรถยนต์

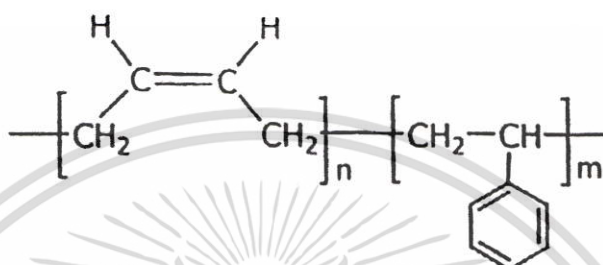
พยางรถยนต์จากยางรถยนต์ที่ใช้แล้วหรือเสื่อมสภาพ ส่วนใหญ่ได้จากการบดส่วนของหน้ายางให้มีขนาดเล็กลง นิยมใช้ผลิตยางรีเคลม (Reclaimed rubber) องค์ประกอบของพยางรถยนต์แสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบของพยางรถยนต์ [18]

องค์ประกอบ	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (%by weigh)
ยาง SBR หรือยาง NR	62.0
เขม่าดำ	31.2
Extender oil	1.9
Zinc oxide	1.9
Stearic acid	1.2
Sulfur	1.1
Accelerator	0.7

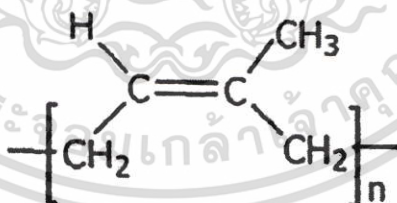
2.3.1.1 ยางเอสบีอาร์ (Styrene-Butadiene Rubber, SBR)

ยางเอสบีอาร์เป็นยางสังเคราะห์ที่นิยมใช้มาก เนื่องจากยางเอสบีอาร์มีสมบัติทนทานต่อการขีดถูเสียดสี โครงสร้างโมเลกุลของยางเอสบีอาร์แสดงดังรูปที่ 2.4 มีพันธะคู่อยู่ในโครงสร้าง ดังนั้นในการสังเคราะห์จะเกิดยางเอสบีอาร์ได้สามโครงสร้างคือ cis-1,4 trans-1,4 และ vinyl-1,2 [16]



รูปที่ 2.4 โครงสร้างโมเลกุลของยางเอสบีอาร์ (styrene-butadiene rubber, SBR)

2.3.1.2 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR) เป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติคือ ต้นยางพารา (*Hevea brasiliensis*) บางครั้งเรียกว่ายางธรรมชาติว่า “ยางพารา” ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมีคือ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (cis-1,4-Polyisoprene, PI) เป็นพอลิเมอร์สายโซ่ตรง ที่มีหน่วยไอโซพรีน (C_5H_8) ซ้ำ ๆ ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน

ยางเป็นวัสดุที่สามารถยืดตัวออกหรือเปลี่ยนขนาดได้หลายเท่า (อย่างน้อยสองเท่า) เมื่อมีการให้แรง และสามารถหดกลับคืนใกล้เคียงขนาดและรูปร่างเดิมอย่างรวดเร็วเมื่อปล่อยแรง ในการใช้ประโยชน์จากยางต้องนำยางมาทำการเชื่อมโยงหรือวัลคาไนเซชัน (Crosslinking หรือ Vulcanization) ซึ่งเป็นกระบวนการทางเคมีที่เปลี่ยนโครงสร้างของยางจากสายโซ่ตรงเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติหรือเทอร์โมเซต ยางจะมีสมบัติที่ดีคือ สามารถเปลี่ยนจากวัสดุที่อ่อน นิ่ม

ยืดหยุ่นต่ำ ไม่แข็งแรง เหนียวติด และไม่มีเสถียรภาพของรูปร่าง ไหลได้เมื่อทิ้งไว้นาน กลายเป็นวัสดุที่แข็งแรง ยืดหยุ่นสูง มีเสถียรภาพของรูปร่าง และทนอุณหภูมิสูง

2.3.1.3 เขม่าดำ (Carbon black)

เขม่าดำเป็นสารตัวเติมที่นิยมใช้มากที่สุดเนื่องจากมีราคาถูก สามารถใส่เขม่าดำในยางได้ในปริมาณมากกว่า 50 ส่วนในร้อยส่วนของยาง (Part per hundred of rubber, phr) และที่สำคัญคือสามารถช่วยเสริมแรงให้กับยาง นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูป (Processibility) ของยางให้ง่ายขึ้นด้วย เช่น ลดความยืดหยุ่นของของไหล (Melt elasticity) ลดการหดตัว (Shrinkage) และการบิดเบี้ยว (Distortion) ของผลิตภัณฑ์ยางหลังการขึ้นรูป เป็นต้น

ปัจจัยของเขม่าดำที่มีผลต่อสมบัติการเสริมแรง [19] ได้แก่

1) ขนาด หรือพื้นที่ผิว (Size or surface area) ขนาดอนุภาคของเขม่าดำจะแปรผกผันกับพื้นที่ผิว สารตัวเติมยังมีขนาดเล็ก ประสิทธิภาพการเสริมแรงยิ่งสูงขึ้น ทำให้ยางมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ความทนทานต่อการสึกหรอสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม เขม่าดำขนาดเล็ก การผสมเขม่าดำเข้ากับยางยังทำได้ยากขึ้น

2) โครงสร้าง (Structure) ผลของโครงสร้างของเขม่าดำที่มีต่อยางส่วนใหญ่จะมีผลทางด้าน การแปรรูป เขม่าดำที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่จะผสมกระจายในยางได้ดี ทำให้ยางที่ผ่านการอัดรีด (Extrusion) มีผิวเรียบ ส่วนเขม่าดำที่มีขนาดเล็กจะผสมในยางได้ปริมาณมากกว่า

3) เคมีของพื้นผิว (Surface chemistry) เขม่าดำประกอบด้วย คาร์บอนประมาณร้อยละ 90-99 ที่เหลือเป็นไฮโดรเจนและออกซิเจน นอกจากนี้ยังมีกำมะถันปริมาณน้อยปนอยู่ด้วย สารเหล่านี้จะให้ความเป็นกรด-ด่างของเขม่าดำต่างกัน ซึ่งมีผลต่ออัตราการเชื่อม โยง เขม่าดำที่มีความเป็นด่าง จะเกิดการเชื่อม โยงเร็วกว่าเขม่าดำที่มีความเป็นกรด

4) ความเป็นรูพรุนในเขม่าดำ (Porosity) จะมีผลต่ออัตราการเชื่อม โยง เพราะรูพรุนนี้จะดูดสารเร่งเข้าไปทำให้การเชื่อม โยงช้าลง

2.3.1.4 น้ำมัน

เป็นสารป้องกัน โอโซน (Antiozonant) ที่ป้องกันการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโอโซนกับยาง ซึ่งทำให้เกิดรอยแตกที่เนื้อยางในแนวตั้งฉากกับทิศทางที่ดึงยาง เมื่อนำยางไปยืดไว้ในบรรยากาศแล้วตั้งทิ้งไว้ระยะหนึ่ง ยางชนิดไม่อิ่มตัว เช่น ยางธรรมชาติ จะเกิดการแตกของยางเนื่องจากโอโซนมากกว่ายางชนิดอิ่มตัวเช่นยางบิวทิล (BR) หรือยางอีพียาร์ (EPR) สารป้องกันโอโซนที่ดีคือ p-Phenylene diamine (PPD) นอกจากนี้ยังพบว่าขี้ผึ้งปิโตรเลียม (Petroleum wax) ยังเป็นสารที่ใช้ป้องกัน โอโซนได้ด้วย โดยปริมาณขี้ผึ้งที่ใช้ต้องมากกว่าที่จะซึมออกมาที่ผิว ซึ่งขี้ผึ้งที่ซึมออกมานี้จะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้โอโซนทำปฏิกิริยากับผิวยาง ทำให้ยางมีความทนทานต่อ

โอโซน นอกจากนี้ Extender oil ยังเป็นสารที่ช่วยหล่อลื่นหรือลดแรงเสียดทานระหว่างวัสดุ หรือหล่อลื่นระหว่างเครื่องผสมกับวัสดุ ช่วยขบวนการผลิต ทำให้ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้ง่ายขึ้น

2.3.1.5 สารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Activator)

สารกระตุ้นปฏิกิริยาการเชื่อมโยงเป็นสารที่ทำหน้าที่กระตุ้นหรือเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงอีกทีหนึ่ง สารกระตุ้นที่นิยมใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรมยางในปัจจุบัน ได้แก่ ไซซิงค์ออกไซด์ร่วมกับกรดสเตียริก เนื่องจากมีราคาไม่แพงและมีประสิทธิภาพสูงในการทำงาน สามารถใช้ได้กับยางทั่วไป ไซซิงค์ออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับกรดสเตียริกเกิดเป็นซิงค์สเตียเรต ซึ่งสามารถละลายในยางได้และช่วยเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง เนื่องจากเป็นซิงค์ไอออนที่อยู่ในรูปที่ละลายได้ในยาง

1) ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO)

ซิงค์ออกไซด์เป็นสารกระตุ้นที่เป็นสารอนินทรีย์ที่สำคัญและนิยมใช้ เมื่อปริมาณซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้น มอดูลัสจะเพิ่มขึ้นและปริมาณของซิงค์ออกไซด์ที่ให้มอดูลัสสูงสุดคือมากกว่า 3 ส่วนในร้อยส่วนของยาง โดยทั่วไปจะใช้ปริมาณ 3-5 ส่วนในร้อยส่วนของยาง แต่ถ้าซิงค์ออกไซด์มีขนาดอนุภาคเล็ก สามารถใช้ในปริมาณ 1 ส่วนในร้อยส่วนของยาง ซึ่งจะทำให้ได้ยางที่มีมอดูลัสสูงและมีสีใส

2) กรดไขมัน

กรดไขมันเป็นสารกระตุ้นอนินทรีย์ที่สำคัญ สำหรับสารเร่งการเชื่อมโยงบางตัว เช่น กรดสเตียริก กรดปาล์มมิก กรดลอริก เป็นต้น กรดไขมันที่ใช้ส่วนมากเป็นของผสมของกรดอะดิพาทิกอิมิตัวที่มีคาร์บอน 12 ถึง 18 อะตอม ปริมาณการใช้กรดไขมันในยางขึ้นกับชนิดของยาง ถ้ายางชนิดใดมีกรดไขมันอยู่แล้วไม่จำเป็นต้องใส่หรือใส่ปริมาณน้อย สำหรับยางธรรมชาติมีกรดไขมันอยู่ปริมาณเล็กน้อยซึ่งอยู่ในรูปกรดสเตียริก แต่กรดไขมันที่มีอยู่ในยางธรรมชาติมีปริมาณต่างกันมาก ซึ่งทำให้เวลาในการเชื่อมโยงต่างกัน ดังนั้นโดยทั่วไปปริมาณของกรดสเตียริกที่ใช้ในยางธรรมชาติจะใช้ประมาณ 1-4 ส่วนในร้อยส่วนของยาง เพื่อลดเวลาการเชื่อมโยง (Cure time) ที่ต่างกัน

2.3.1.6 กำมะถัน (Sulfur)

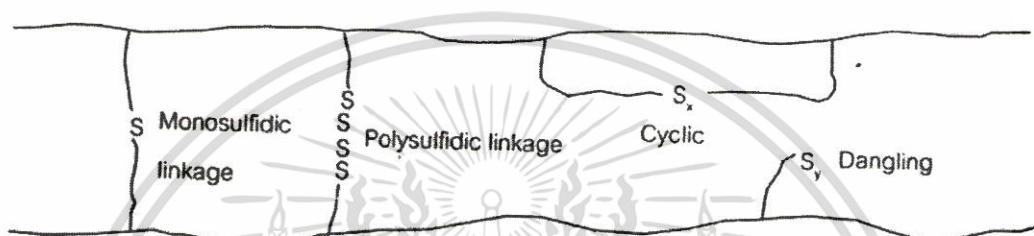
เป็นสารเชื่อมโยง (Vulcanizing agent) ทำหน้าที่เปลี่ยนโครงสร้างของยางจากสายโซ่ตรงเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ โดยทำให้เกิดพันธะเคมีเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยาง ทำให้ยางซึ่งเป็นวัสดุที่อ่อน นิ่ม ยืดหยุ่นต่ำ ไม่แข็งแรง เหนียวติด และไม่มีเสถียรภาพของรูปร่าง กลายเป็นวัสดุที่แข็งแรง ยืดหยุ่นสูง มีเสถียรภาพของรูปร่าง และทนอุณหภูมิสูง

สารเชื่อมโยงแบ่งออกเป็น 5 ชนิด คือ

- 1) กำมะถัน
- 2) สารที่ให้กำมะถัน (Sulfur donor)

- 3) สารเปอร์ออกไซด์ (Peroxide) 4) ซีลีเนียม (Selenium) และเทลลูเรียม (Tellurium)
 5) สารอื่น ๆ เช่น โลหะออกไซด์ ฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resins) เป็นต้น

การเชื่อมโยงด้วยกำมะถันเป็นวิธีที่นิยมที่สุด เนื่องจากกำมะถันมีราคาถูก ละลายได้ดีในยาง ที่สำคัญคือ ยางส่วนมากที่นิยมใช้เป็ยยางที่ไม่อิมตัว มีพันธะคู่จำนวนมาก เช่น ยางธรรมชาติ (NR) ยางสไตรีนบิวตะไดอิน (SBR) และยางบิวตะไดอิน (BR) ฯลฯ จึงว่องไวต่อการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน โดยใช้ร่วมกับสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Accelerators) และสารกระตุ้น (Activators) โครงสร้างของยางที่ทำการเชื่อมโยงด้วยกำมะถันแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของยางเมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน แสดงพันธะการเชื่อมโยงมอนอซัลไฟด์ (Monosulfidic linkage, -S-) พอลิซัลไฟด์ (Polysulfidic linkage, -S_y- เมื่อ y มีค่า 3-8) โครงสร้างเป็นวง (Cyclic) และโครงสร้างห้อย (Dangling) ไม่เกิดการเชื่อมโยง

2.3.1.7 สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Accelerator)

สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงคือ สารเคมีที่ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Crosslinking rate) เร็วขึ้น ทำให้เวลาการเชื่อมโยงเร็วขึ้น การเชื่อมโยงมีประสิทธิภาพมากขึ้น และใช้กำมะถันปริมาณน้อยลง

สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงสามารถแบ่งตามมาตรฐาน ASTM เป็น 6 กลุ่ม [19]

- 1) ซัลเฟนามิด (Sulfenamide)
- 2) ไทเอโซล (Thiazoles)
- 3) กัวนิดีน (Guanidines)
- 4) ไดไทโอคาร์บาเมต (Dithiocarbamates)
- 5) ไทยูเรมไดซัลไฟด์ (Thiuram disulfides)
- 6) ไทยูเรมชนิดอื่นที่ไม่ใช่ไดซัลไฟด์ (Thiuram other than disulfides)

ในการใช้งานสารเร่งในอุตสาหกรรมยาง อาจใช้สารเร่งมากกว่าหนึ่งชนิดร่วมกัน สารเร่งที่ใช้ปริมาณมากกว่าจะเป็นสารเร่งหลักหรือสารเร่งปฐมภูมิ (Primary accelerator) ส่วนสาร

เร่งที่ใช้บ่อยกว่าจะเรียกว่าเป็นสารเร่งทุติยภูมิ (Secondary accelerator) สารเร่งทั้งสองอาจเกิดปฏิกิริยาเสริมกัน ทำให้ได้อัตราการเชื่อมโยงที่มากกว่าสารเร่งแต่ละชนิดรวมกัน

2.3.2 การเสื่อมสภาพของพยาง [16]

การเสื่อมสภาพของยาง เกิดการเปลี่ยนแปลง 2 แบบ คือ

2.3.2.1. การเสื่อมสภาพแบบเชื่อมโยง (Crosslinking) เป็นการเสื่อมสภาพที่ทำให้เกิดอนุมูลอิสระ (Free radicals) บนสายโซ่ แล้วเกิดการเชื่อมโยงต่อเป็นพันธะที่มากขึ้น นอกจากนี้ยังเกิดการแตกออกของพันธะเชื่อมโยงแบบพอลิซัลฟิดิก (Polysulfidic crosslinks) แล้วเชื่อมโยงใหม่เป็นพันธะเชื่อมโยงเดี่ยวโมโนซัลฟิดิก (Monosulfidic crosslinks) หลาย ๆ พันธะเป็นผลให้ยางมีความแข็ง (Hardness) เกิดขึ้นความทนทานต่อการฉีก (Fatigue resistance) ลดลง เพราะ หักง่ายขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างกลไกการเสื่อมสภาพแบบเชื่อมโยง เปลี่ยนพันธะเชื่อมโยงพอลิซัลฟิดิกเป็นโมโนซัลฟิดิก

2.3.2.2 การเสื่อมสภาพแบบสายโซ่ขาด (Chain scission) สายโซ่พอลิเมอร์ขาดออกจากกัน เป็นผลให้ยางนิ่มขึ้น มีความแข็งลดลง ความต้านทานการเสียดสีขัดถู (Abrasion resistance) ลดลง ความหนืดลดลง เนื่องจากความยาวของสายโซ่โมเลกุลสั้นลง ถ้าเสื่อมสภาพมากอาจเหลวเหนียวติดนิ้วคู้ข้างเคียง

2.3.3 การใช้ประโยชน์จากยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว

ในสหรัฐอเมริกาพบว่า มียางรถยนต์ที่ใช้แล้วมากกว่า 242 ล้านเส้นต่อปี [20] และในปี ค.ศ.1996 มียางรถยนต์ที่ใช้แล้วมากกว่า 266 ล้านเส้น [17] ซึ่งในจำนวนนี้ได้มีการนำไปใช้งานต่าง ๆ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 การนำยางรถยนต์ที่ใช่แล้วไปใช้ประโยชน์ในประเทศสหรัฐอเมริกา

ปี ค.ศ.1991 [20]		ปี ค.ศ.1996 [17]	
นำกลับ ไปใช้เป็นผลิตภัณฑ์ใหม่	7%	นำกลับ ไปใช้เป็นผลิตภัณฑ์ใหม่	10%
ใช้เป็นแหล่งกำเนิดพลังงาน	11%	ใช้เป็นแหล่งกำเนิดพลังงาน	57%
ส่งออก	4%	ส่งออก	6%
ใช้ในงานวิศวกรรมก่อสร้าง	--	ใช้ในงานวิศวกรรมก่อสร้าง	4%
นำไปทิ้งใน landfill เก็บไว้ในคลังสินค้า และทิ้งอย่างผิดกฎหมาย	78%	นำไปทิ้งใน landfill เก็บไว้ในคลังสินค้า และทิ้งอย่างผิดกฎหมาย	24%

จากตาราง 2.5 จะเห็นได้ว่ามีแนวโน้มในการนำยางมาใช้ทำเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานมากขึ้น ส่วนใหญ่ยางรถยนต์ที่ใช่แล้วถูกนำมาเป็นเชื้อเพลิง โดยในเดคาเฟาซีเมนต์ (29.8%) รองลงมาเป็นการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานกระดาษ (23%) [18]

ส่วนในประเทศไทยในปี พ.ศ. 2543 มียางรถยนต์ใช่แล้วทั้งหมด 330,000 ตัน มีการนำไปใช้ใหม่ในรูปแบบต่าง ๆ รวมประมาณ 49,000 ตัน คิดเป็น 15% ของปริมาณของเสียประเภทยางรถยนต์ที่ใช่แล้วทั้งหมด จำแนกเป็นการนำมาแปรรูปใช้ใหม่หรือรีไซเคิลในรูปการหล่อคอกยางใหม่และการผลิตยางรีเคลมมากที่สุด รองลงมาเป็นการนำมาใช้ซ้ำ และใช้เป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมซีเมนต์ โดยปริมาณดังกล่าวเพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ. 2542 ประมาณ 10,000 ตัน [4] ดังนั้นจึงมียางรถยนต์ใช่แล้วเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก

2.3.4 การผลิตผงยางรถยนต์ที่ใช่แล้ว

ผงยางรถยนต์ที่ใช่แล้ว โดยทั่วไปสามารถผลิตได้ 2 วิธี [21]

2.3.4.1 การบดที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic grinding)

เทคนิคนี้เป็นการทำให้ยางมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) โดยแช่ยางที่เชื่อมโยงแล้วในไนโตรเจนเหลว จากนั้นบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดแบบลูกกลมโลหะ (Ball mill) จะได้ผงยางที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 30-100 เมช (Mesh) ขนาดอนุภาคผงยางที่ได้ ขึ้นกับเวลาที่แช่ในไนโตรเจนเหลว และขนาดของตะแกรงร่อน (Screen) ที่อยู่ในเครื่องบด โดยทั่วไปราคาของผงยางจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคเล็กลง มีรายงานว่ามีการใช้ผงยางประมาณ 5-10 ส่วนในร้อยส่วนของยาง ในการผลิตยางล้อรถโดยสารและรถบรรทุก

ผงยางชนิดนี้เหมาะสมกับการใช้งานชนิดพิเศษ ซึ่งสามารถแปรรูปได้หลายลักษณะ ดังนี้

- การอัดรีด (Extrusion) การใช้ผงยางขนาด 80-100 เมช สามารถแก้ปัญหาเรื่องรอยแตกและผิวขรุขระ ส่วนขนาดอนุภาค 50-60 เมช ก็สามารถใช้ได้ขึ้นกับความต้องการความเรียบของผิวผลิตภัณฑ์ ปริมาณสูงสุดที่ใช้ประมาณ 5%

- การรีดแผ่น (Calendering) การใช้ผงยางขนาด 80-100 เมช จะทำให้ผลิตภัณฑ์ขนาด 0.06 นิ้ว หรือน้อยกว่า มีผิวเรียบสูงสุด ถ้าไม่ต้องการความเรียบของผิวสามารถใช้ขนาด 30-60 เมช ปริมาณสูงสุดที่ใช้ประมาณ 10%

- การอัดขึ้นรูป (Molding) สามารถใช้ผงยางได้ทุกขนาด เนื่องจากช่วยในการไล่อากาศที่ขังในยางขณะขึ้นรูป

- การไหลขณะขึ้นรูป (Mold flow) โดยทั่วไปผงยางจะช่วยปรับปรุงการไหล ขณะอัดขึ้นรูปเกิดการหดตัว (Shrinkage) น้อย การหดตัวลดลงเมื่อปริมาณผงยางเพิ่มขึ้น

เครื่องมือในการผลิตผงยางชนิดนี้มีราคาถูก ค่าใช้จ่ายในการผลิตต่ำ ผลผลิตเพิ่มขึ้น และมีพฤติกรรมกรไหลดีกว่าผงยางที่บดที่อุณหภูมิห้อง (Ambient grinding) สัณฐานวิทยาพื้นผิวของผงยางทำให้สามารถกำจัดอากาศที่ขังอยู่ในยางที่ยังไม่เกิดการเชื่อม โยงออกไปได้ง่าย โดยเฉพาะยางล้อรถ ซึ่งมีแนวโน้มลดลงของการพองหลังจากเกิดการเชื่อม โยง และผงยางจะถูกออกซิเดชันที่ผิวลดลงเนื่องจากมีพื้นที่ผวน้อย

2.3.4.2 การบดที่อุณหภูมิห้อง (Ambient grinding)

สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. การบดที่อุณหภูมิแบบแห้ง (Dry ambient grinding) การผลิตจะทำโดยนำยางที่เกิดการเชื่อม โยงแล้ว บดด้วยเครื่องบดฟันปลา (Serrated grinder) ได้ผงยางที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ ประมาณ 10-30 เมช และเกิดกึ่ง (Pendant) ขึ้นที่ผิวจำนวนหนึ่ง ทำให้เกิดการเกี่ยวพันกับยางดิบได้ดี ส่วนใหญ่ใช้ในยางล้อและผลิตภัณฑ์ทางวิศวกรรม โดยทั่วไปจะใช้ประมาณ 5-20 ส่วนในร้อยส่วนของยาง เมื่อขนาดอนุภาคยางเพิ่มขึ้น ความเรียบของผิวผลิตภัณฑ์จะลดลง ถึงแม้จะมีชื่อตามวิธีการผลิตว่า “การบดที่อุณหภูมิห้อง” แต่ในทางปฏิบัติจะให้ความร้อนในระหว่างการผลิต การให้ความร้อนสูงจะทำให้สายโซ่โมเลกุลยางเกิดการสลายตัว

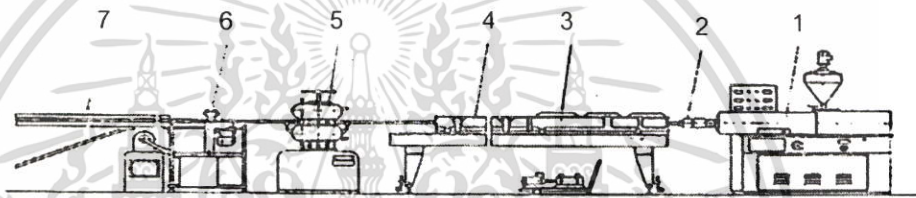
2. การบดที่อุณหภูมิห้องแบบเปียก (Wet ambient grinding) เป็นวิธีที่ปรับปรุงการบดที่อุณหภูมิห้องแบบแห้ง ซึ่งลดขนาดของอนุภาคผงยาง โดยการบดในน้ำ ขนาดอนุภาคขึ้นอยู่กับเวลาที่ใช้ในการบด อนุภาคผงยางที่ได้มีขนาด 400-500 เมช ข้อดีของขนาดอนุภาคเล็ก คือทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปโดยวิธีการอัดรีดและการรีดแผ่นมีผิวเรียบ

2.3.5 การประยุกต์ใช้ผงยางรถยนต์ที่ใช้แล้วโดยทำเป็นท่อน้ำซีม [22]

ท่อน้ำซีมที่ผลิตจากผงยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ที่ระเหยง่ายปนเปื้อนอยู่ เพื่อความสะดวกในการใช้งาน

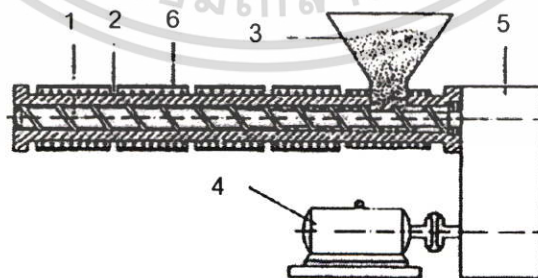
1) การผลิตท่อน้ำซีมสามารถผลิตได้โดยกระบวนการอัดรีด โดยใช้เครื่องอัดรีด (Extruder) ซึ่งอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการผลิตท่อน้ำซีม แสดงดังรูปที่ 2.8

กระบวนการผลิตจะใช้เครื่องอัดรีดซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.9 เป็นตัวผสมให้เข้ากันของพลาสติกโดยอาศัยความแตกต่างของความเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างผิวของเกลียวหนอน และกระบอกที่ใส่ ทำให้เกิดแรงเฉือนช่วยในการผสมและการหลอมเหลวพลาสติก หลังจากนั้นจะกลายเป็นของเหลวหนืดแล้วขึ้นรูปโดยผ่านหัวฉีดท่อหรือคาย (Die) ให้มีลักษณะตามต้องการ



รูปที่ 2.8 อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตท่อน้ำซีม

- | | | |
|--------------------|-------------------------|-----------------------|
| 1) เครื่องอัดรีด | 2) หัวฉีดท่อหรือคาย | 3) เครื่องมือปรับขนาด |
| 4) อ่างน้ำหล่อเย็น | 5) เครื่องดึงแบบดินตะขำ | 6) เลื่อยตัด |
| 7) รางกระดก | | |



รูปที่ 2.9 องค์ประกอบของเครื่องอัดรีด (Extruder)

- | | | | |
|---------------|-------------------|---------------------|------------|
| 1) เกลียวหนอน | 2) ตัวเรือน | 3) อุปกรณ์ป้อนวัสดุ | 4) มอเตอร์ |
| 5) เฟืองทด | 6) ตัวให้ความร้อน | | |

หลังจากที่ขึ้นรูปเป็นชิ้นงานแล้วจะมีอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการปรับแต่งชิ้นงานให้มีความยาวของท่อตามต้องการ หลังจากการขึ้นรูปชิ้นงานผ่านหัวฉีดท่อแล้ว ชิ้นงานยังมีลักษณะไม่แข็งตัว และเสียรูปทรงได้ง่าย ดังนั้นจึงต้องมีอุปกรณ์ปรับขนาดเพื่อให้ขนาดพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานคงที่จนกว่าชิ้นงานจะแข็งตัว ซึ่งการปรับขนาดจะใช้ลมอัดและจุกปิด ท่อขนาดใหญ่จะใช้แรงดันของลมต้านกับท่อปรับขนาดที่ทำการหล่อเย็น ในขณะที่หล่อเย็นจะต้องมีอุปกรณ์ดึงชิ้นงานให้วางไปข้างหน้าโดยจับชิ้นงานและดึงเลื่อนไปด้วยความเร็วคงที่เท่ากับความเร็วของเครื่องอัดรีด และจะได้ชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 2.10

2) สารที่ใช้ในการผลิตท่ออย่าง มีดังนี้

2.1 พอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ เช่น เม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีน

2.2 พวยยางรถยนต์

2.3 สารให้ฟอง (Blowing agent) คือ สารที่ใส่เข้าไปในยางเมื่อให้ความร้อนแก่ยาง ในขณะทำการเชื่อมโอง โมเลกุลของสารให้ฟองจะสลายตัวให้ก๊าซออกมา ซึ่งทำให้ยางเกิดรูพรุนในรูปของฟองน้ำ (Sponge) หรือ ยางรูพรุนขนาดเล็ก (Microcellular rubber)

2.4 คิกเกอร์ (Kicker) หรือสารกระตุ้นปฏิกิริยา เป็นสารที่ทำหน้าที่กระตุ้นปฏิกิริยาของสารให้ฟอง สามารถใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิการสลายตัวที่กว้าง และสามารถใช้งานได้กับสารให้ฟองหลายชนิด โดยช่วยลดช่วงอุณหภูมิการทำงานของสารให้ฟอง ทำให้ง่ายต่อการควบคุมอุณหภูมิการสลายตัวของสารให้ฟอง คิกเกอร์มีหลายชนิด การเลือกใช้คิกเกอร์ให้เหมาะสมกับการใช้งานนั้นมีความสำคัญมาก ปัจจัยที่ต้องพิจารณาในการเลือก ได้แก่ ชนิดของสารให้ฟอง สภาพะของการใช้งาน ความสามารถในการผสมเป็นเนื้อเดียวกับพอลิเมอร์ หรือความเข้ากันได้ (Compatibility) ไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับพอลิเมอร์และสารตัวเติมต่าง ๆ เป็นต้น

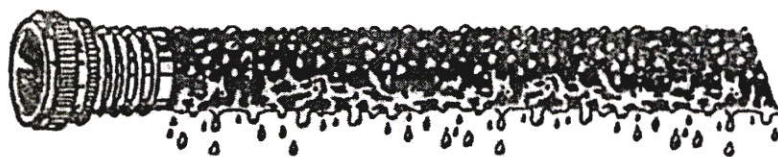
2.5 สารช่วยผสม คือสารเคมีที่ผสมในยางเพื่อช่วยให้กระบวนการผลิตง่ายขึ้น มีประสิทธิภาพมากขึ้น ทำให้ใช้เวลาในการผลิตน้อยลง นอกจากนี้ยังช่วยในการกระจายตัวของสารเติมแต่งต่าง ๆ ในยางเพิ่มความสม่ำเสมอหรือเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้มีอัตราเร็วในการผลิตสูงขึ้น ปกติใช้ในปริมาณน้อยไม่เกิน 5 ส่วนในร้อยส่วนของยาง

3) ขั้นตอนในการทำท่ออย่าง

3.1 นำเม็ดพลาสติกมาผสมกับพวยยางรถยนต์ และสารเติมแต่งอื่น ๆ ตามอัตราส่วนสูตรต่าง ๆ ผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single screw extruder) ที่อุณหภูมิในการผสมต่าง ๆ ความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที

3.2 นำของผสมที่ได้มาบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดเม็ด (Grinder)

3.3 นำของผสมที่บดละเอียดแล้วมาขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single screw extruder) ที่อุณหภูมิในการผสมต่าง ๆ ความเร็วรอบ 5 รอบต่อนาที



รูปที่ 2.10 ภาพวาดลักษณะท่อน้ำซึมและการไหลของน้ำ [23]

2.4 กระบวนการดูดซับ (Adsorption process)

เป็นวิธีการหนึ่งที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสีย เกิดขึ้นโดยสารชนิดหนึ่งที่มีความสามารถในการดึงดูดสารชนิดอื่น ๆ ให้มาเกาะติดอยู่กับตัวมัน ได้เรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) และสารที่ถูกดึงดูดหรือเกาะติดกับตัวดูดซับ เรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นสารที่เราต้องการกำจัดออก อาจอยู่ในรูปของของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซก็ได้ ส่วนตัวดูดซับนั้นส่วนใหญ่จะเป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวสูง ความสามารถในการดูดซับนี้ อาจเกิดขึ้นจากแรงทางกายภาพ หรือด้วยแรงดึงดูดทางเคมี หรือเกิดร่วมกันระหว่างแรงทั้งสองประเภท ซึ่งการบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการดูดซับนี้ ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถกำจัดสิ่งปนเปื้อนซึ่งมีขนาดเล็กมากจนถึงระดับโมเลกุลได้ โดยอาศัยความสามารถเฉพาะตัวของตัวดูดซับ

2.4.1 ลักษณะการดูดซับ

สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท [24] คือ

2.4.1.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

เป็นการดูดติดกันของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ ซึ่งยึดติดกันด้วยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ค่อนข้างอ่อน ได้แก่ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waal) ดังนั้นการที่ตัวถูกดูดซับจะเกาะติดกับตัวดูดซับได้ดี จำเป็นที่ตัวดูดซับจะต้องมีพื้นที่ผิวสัมผัสสูง หรือมีความเป็นรูพรุนสูง แต่การดูดซับประเภทนี้ยึดติดกันด้วยแรงที่อ่อน จึงทำให้เกิดการผันกลับของการดูดซับได้ ซึ่งทำให้ตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่ออกจากตัวดูดซับได้

2.4.1.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

เป็นการดูดติดกันของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับในลักษณะที่มีการทำปฏิกิริยาระหว่างกัน ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีของตัวถูกดูดซับ การดูดซับแบบนี้จึงเกิดการผันกลับของการดูดซับไม่ได้ โดยแรงที่ตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับยึดติดกันด้วยพันธะทางเคมีนี้ ยังมี

การถ่ายเทอิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับด้วย ซึ่งเป็นแรงที่มากกว่าแรงดูดซับทางกายภาพ นอกจากนี้การดูดซับจะเกิดขึ้นกับบริเวณที่เฉพาะเจาะจงเท่านั้น

2.4.2 กลไกในการดูดซับ

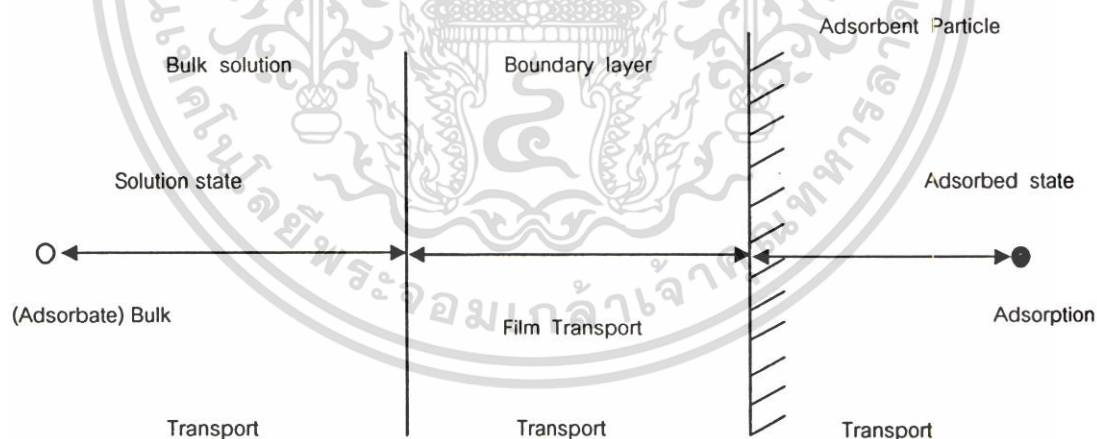
เป็นการเคลื่อนย้ายสาร (Mass transfer) จากวัฏภาคหนึ่งไปยังอีกวัฏภาคหนึ่ง และยังเป็น การกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับอีกด้วย ขั้นตอนที่เกิดขึ้นในระหว่างการดูดซับมีขั้นตอนต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.11

ขั้นตอนที่ 1 (Bulk transport) เป็นการเคลื่อนที่ของโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้าหาตัวดูดซับ การเคลื่อนที่นี้เกิดขึ้นจากการปั่นป่วน ทำให้ตัวถูกดูดซับมีโอกาสเข้าไปยังผิวของฟิล์มน้ำที่ล้อมรอบตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 2 (Film transport) เมื่อตัวถูกดูดซับเข้ามาถึงตัวดูดซับ โดยผ่านฟิล์มน้ำที่ห่อหุ้มผิวของตัวดูดซับแล้วเข้ามาจนถึงผิวของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 3 (Intraparticle transport หรือ Pore transport) เป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับเข้าไปยังรูพรุนหรือช่องว่างภายในของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 4 เป็นการดูดซับระหว่างตัวถูกดูดซับกับ Active site บนตัวดูดซับ ซึ่งอาจเกิดจากแรงดึงดูดทางกายภาพ หรือแรงดึงดูดทางเคมี หรือแรงดึงดูดทั้งสองประเภทร่วมกัน



รูปที่ 2.11 ขั้นตอนการเคลื่อนตัวของตัวดูดซับ ในกระบวนการ Adsorption

2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ [15]

2.4.3.1 ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ (Size and surface area of adsorbent)

เป็นคุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของตัวดูดซับ โดยขนาดจะมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับอัตราเร็วในการดูดซับ คือเมื่อตัวดูดซับมีขนาดเล็กอัตราเร็วในการดูดซับจะเกิดได้เร็วขึ้น ส่วนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ คือตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากจะมีรูพรุนมาก ทำให้มีการดูดซับได้มาก ซึ่งส่วนใหญ่นิยมวัดพื้นที่ผิวเทียบกับน้ำหนักของตัวดูดซับ

2.4.3.2 ลักษณะของตัวถูกดูดซับ (Characteristics of adsorbate)

ได้แก่ ความสามารถในการละลายได้ และขนาดของตัวถูกดูดซับ โดยทั่วไปสารที่มีความสามารถในการละลายได้ดี จะมีความสามารถในการดูดซับได้น้อย เนื่องจากตัวถูกดูดซับมีแรงยึดเหนี่ยวกับโมเลกุลของตัวทำละลายอย่างเหนียวแน่น นอกจากนี้ขนาดและน้ำหนักโมเลกุลยังมีผลต่อความสามารถในการดูดซับ กล่าวคือถ้าขนาดและน้ำหนักโมเลกุลมาก จะมีความสามารถในการดูดซับได้น้อย นอกจากนี้ขนาดและน้ำหนักโมเลกุลยังมีความสัมพันธ์กับความสามารถในการละลายอีกด้วย

2.4.3.3 เวลาสัมผัส (Contact time)

ระยะเวลาในการสัมผัสจะต้องมีความเหมาะสม จึงจะทำให้ความสามารถในการดูดซับมีประสิทธิภาพสูงสุด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสารที่ถูกดูดซับด้วย

2.4.3.4 ความปั่นป่วน (Turbulence)

ความปั่นป่วนถือเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ เพราะหากความปั่นป่วนต่ำฟิล์มน้ำที่ล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนามาก ทำให้ตัวถูกดูดซับไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าไปในตัวดูดซับได้ ชั้นฟิล์ม (Film transport) จึงเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับ หากความปั่นป่วนสูงขึ้นจะทำให้ชั้นฟิล์มที่ล้อมรอบอยู่นั้น มีความหนาลดลง ทำให้โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่เข้าไปในโพรงตัวดูดซับได้ดี (Pore transport) ดังนั้น ถ้าความปั่นป่วนสูง ตัวกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับ จะเป็นการดูดซับเข้าไปภายในโพรง แต่หากความปั่นป่วนมากเกินไป อาจทำให้ตัวถูกดูดซับที่ติดอยู่ที่ผิวกลับออกไปอยู่ในสารละลายได้อีก

2.4.3.5 ค่าพีเอช (pH)

ค่าพีเอชของสารละลายเป็นปัจจัยสำคัญต่อการดูดซับ เนื่องจากไฮโดรเจนและไฮดรอกไซด์ไอออนสามารถดูดซับได้ดี ค่าพีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวของไอออนและการละลายของสารต่าง ๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อผลการดูดซับ

2.4.3.6 อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิมีผลต่ออัตราเร็วของการดูดซับ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ จะทำให้การแพร่ผ่านของตัวถูกดูดซับไปยังรูพรุนของตัวดูดซับเร็วขึ้น แต่จะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับลดลง

2.4.4 สมดุลของการดูดซับ (Adsorption equilibrium)

สมดุลการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ ก็ต่อเมื่อปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ (Adsorption) และปริมาณตัวถูกละลายที่หลุดออกจากพื้นผิวของตัวดูดซับ (Desorption) มีจำนวนเท่ากัน ดังนั้นอัตราการดูดซับและอัตราการหลุดออกจากพื้นผิวเข้าสู่สภาวะสมดุล (Equilibrium state) ซึ่งที่จุดนี้เรียกว่า จุดสมดุลการดูดซับ โดยที่จุดสมดุลการดูดซับจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนพื้นผิวของตัวดูดซับ สมดุลนี้เป็นลักษณะเฉพาะของระบบทั้งหมด การแสดงปริมาณตัวถูกละลายต่อน้ำหนักของสารดูดซับ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นที่จะสมดุลในสารละลายที่อุณหภูมิคงที่เรียกว่า ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption isotherm)

2.4.5 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ไอโซเทอร์มของการดูดซับสามารถอธิบายได้หลายรูปแบบ ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมีอยู่ 2 รูปแบบ [25]

2.4.5.1 Langmuir Isotherm

ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบ Langmuir เป็นพื้นฐานไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบอื่น ๆ ไอโซเทอร์มแบบนี้ใช้อธิบายสมดุลการดูดซับภายใต้สมมติฐานว่า

- 1) การดูดซับสูงสุดสัมพันธ์กับโมเลกุลตัวถูกละลายที่จัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับ
- 2) พื้นที่ทั้งหมดของตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับ (affinity) ของตัวถูกดูดซับเท่ากัน
- 3) พลังงานของการดูดซับมีค่าเท่ากันทุกบริเวณ
- 4) ไม่มีการเคลื่อนที่ของโมเลกุลตัวถูกดูดซับในแนวระนาบบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับ

Langmuir Isotherm สามารถเขียนอธิบายได้ด้วยสมการ 2.2

$$Q = \frac{X}{M} = \frac{Q_m K C_e}{1 + K C_e} \quad (2.2)$$

เมื่อ Q = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ (mg/g)

X = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับ (mg)

M = ปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ (g)

Q_m = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่จัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียว บนพื้นที่ผิวดูดซับ (mg/g)

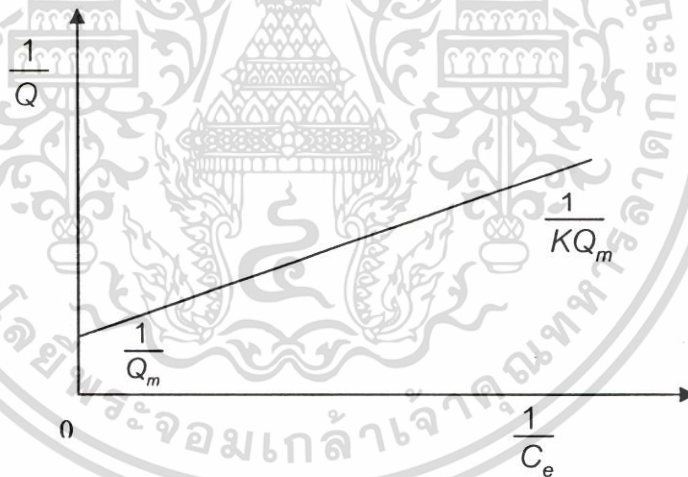
C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่จุดสมดุล (mg/l, M)

K = ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับ

สามารถเขียนเป็นสมการเส้นตรงจะได้ดังสมการ 2.3

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_m} + \frac{1}{KQ_m} \left(\frac{1}{C_e} \right) \quad (2.3)$$

ถ้าพลอตกราฟระหว่าง $1/Q$ กับ $1/C_e$ ได้สมการเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $1/KQ_m$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/Q_m$ ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 กราฟไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์

2.4.5.2 Freundlich Isotherm

ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Freundlich นี้ใช้ธิบายการดูดซับที่ตัวถูกดูดซับเรียงซ้อนกันหลายชั้นด้วยพันธะอ่อน ๆ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการ 2.4

$$Q = \frac{X}{M} = KC_e^{1/n} \quad (2.4)$$

เมื่อ Q = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ (mg/g)

X = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับ (mg)

M = ปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ (g)

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่จุดสมดุล (mg/l, M)

K = ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับ (น้ำหนักของตัวถูกดูดซับ/น้ำหนักของตัวดูดซับ), (mg/g)

$1/n$ = ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลาย (Concentration dependence) เป็นค่าที่บอกการเปลี่ยนความสามารถในการดูดซับของตัวถูกดูดซับ เมื่อความเข้มข้นของสารดูดซับเปลี่ยน

ถ้า $n = 1$ = พื้นที่ผิวทั้งหมดของตัวดูดซับจะมีความสามารถในการดูดซับกับตัวถูกดูดซับเท่ากัน

$n > 1$ > ความสามารถในการดูดซับลดลงเมื่อเพิ่ม Adsorption density

$n < 1$ < ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่ม Adsorption density

สมการ Freundlich เมื่อเขียนกราฟค่า X/M และ C จากการทดลองลงบนกราฟ log

จะได้ดังสมการ 2.5

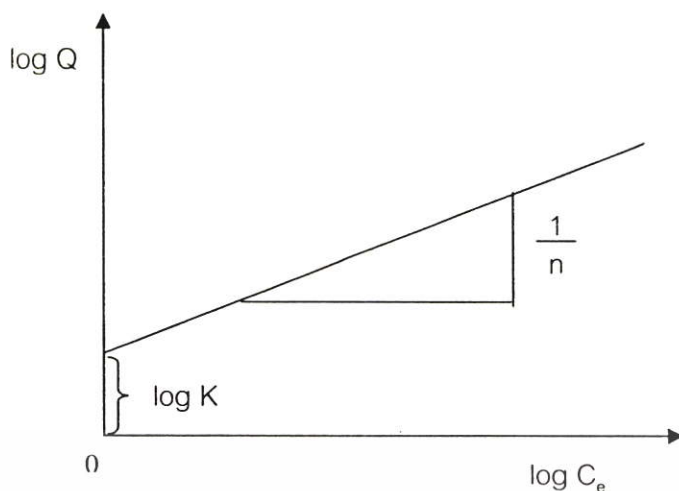
$$\log Q = \log \frac{X}{M} = \log K + \frac{1}{n} \log C_e \quad (2.5)$$

สามารถหาค่า K และ $1/n$ ได้ โดยที่

$1/n$ = ความชันของกราฟ

$\log K$ = จุดตัดแกน y

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log Q$ กับ $\log C$ จะได้เส้นตรงซึ่งมีความชันเท่ากับ $1/n$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\log K$ ดังรูปที่ 2.13 หากค่า K และ $1/n$ มีค่าต่ำ ความสามารถในการดูดซับจะต่ำในทุกค่าความเข้มข้น แต่ถ้า $1/n$ สูง แสดงว่าความสามารถในการดูดซับนี้จะขึ้นกับความเข้มข้น เช่น หากความเข้มข้นต่ำ ความสามารถในการดูดซับจะลดลงอย่างรวดเร็ว และในทางตรงข้ามเมื่อความเข้มข้นสูง ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก



รูปที่ 2.13 กราฟไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช

2.4.6 แบบจำลองในการศึกษาอัตราการดูดซับ (Adsorption Kinetic)

จลนพลศาสตร์เป็นการบอกอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาหนึ่ง ๆ แสดงดังสมการ 2.6



เมื่อ

A, B = สารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยา

C, D = ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยา

R_f = อัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้า

R_r = อัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ

โดย R_f และ R_r แสดงดังสมการ 2.7 และ 2.8 ตามลำดับ

$$R_f = K_f [A]^w [B]^x \quad (2.7)$$

$$R_r = K_r [C]^y [D]^z \quad (2.8)$$

เมื่อ w, x, y, z = ตัวเลขยกกำลัง

K_f, K_r = ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้า และย้อนกลับ

อันดับปฏิกิริยา (Order reaction) คือ ผลรวมของเลขยกกำลังของความเข้มข้น โดยทั่วไปแบ่งได้ 3 แบบ

2.4.6.1 การเกิดปฏิกิริยาอันดับศูนย์ (Zero order)

สมการแบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาอันดับศูนย์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้น แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเท่ากับค่าคงที่ค่าหนึ่ง แสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยาดังสมการ 2.9

$$R = \frac{dC_A}{dt} \text{ (หรือ } \frac{dC_B}{dt} \text{)} = -k \quad (2.9)$$

ทำการอินทิเกรตจาก $t = 0$ ไป $t = t$

จะได้ดังสมการ 2.10 และสมการ 2.11

$$C_{A_t} - C_{A_0} = -kt \quad (2.10)$$

หรือ

$$C_0 - C_t = kt \quad (2.11)$$

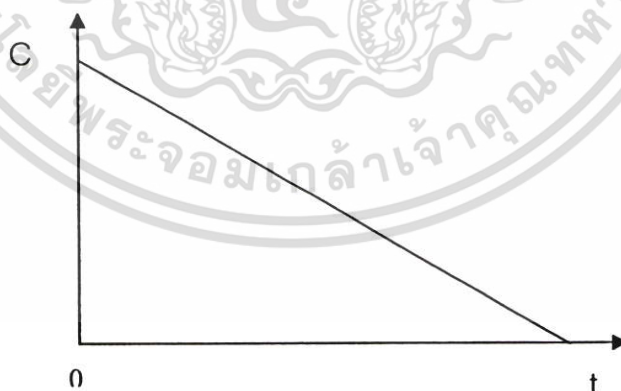
เมื่อ C_0 = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตั้งต้นปฏิกิริยา (mg/L)

C_t = ความเข้มข้นของสารตั้งต้นปฏิกิริยาที่ระยะเวลาต่าง ๆ (mg/L)

k = ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา (mg/L. min⁻¹)

t = เวลา (min)

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง C กับ t จะได้เส้นตรงดังแสดงรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 กราฟปฏิกิริยาอันดับศูนย์

2.4.6.2 การเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (First order)

สมการแบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งคือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้นเพียงตัวใดตัวหนึ่ง ซึ่งมีผลรวมของเลขยกกำลังเท่ากับหนึ่ง สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.12

$$\frac{dC_A}{dt} = -k_1 C_A \quad (2.12)$$

ทำการอินทิเกรตจาก $t = 0$ ไป $t = t$

และ $C_t = 0$ ไป $C_t = C_t$

โดยสามารถเขียนในรูป ln ดังสมการที่ 2.13

$$\ln \frac{C_{At}}{C_{A0}} = -k_1 t \quad (2.13)$$

เมื่อ

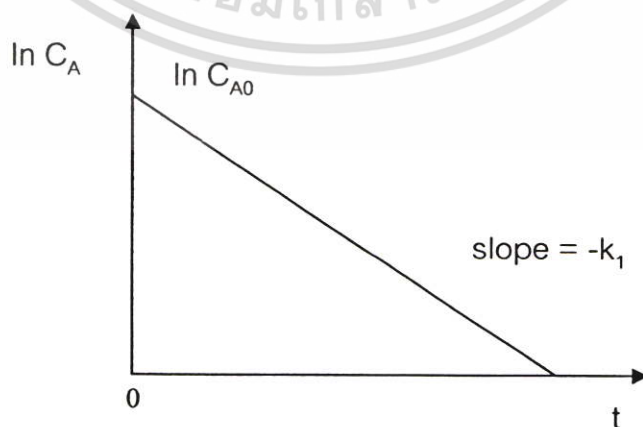
C_{A0} = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่สภาวะอิ่มตัว (mg/g)

C_{At} = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่เวลาต่าง ๆ (mg/g)

k_1 = ค่าคงที่อัตราการดูดซับสำหรับแบบจำลองอันดับหนึ่ง (min^{-1})

t = เวลา (min)

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\ln C_A$ กับ t จะได้เส้นตรง ซึ่งสามารถหาค่า k_1 ได้ จากความชัน และจุดตัดแกน y คือ $\ln C_{A0}$ ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 กราฟปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

2.4.6.3 การเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Second order)

สมการแบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองคือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้นเพียงตัวใดตัวหนึ่ง หรือทั้งสองตัวรวมกัน ซึ่งมีผลรวมของเลขยกกำลังเท่ากับสอง สามารถเขียนได้ ดังสมการที่ 2.14

$$\frac{Dq_t}{dt} = k_2(q_{e2} - q_t)^2 \quad (2.14)$$

ทำการอินทิเกรตจาก $t = 0$ ไป $t = t$

และ $q_t = 0$ ไป $q_t = q_t$

โดยสามารถเขียนในรูปส่วนกลับได้ ดังสมการที่ 2.15 และสมการที่ 2.16

$$\frac{1}{(q_{e2} - q_t)} = \frac{1}{q_{e2}} + k_2 t \quad (2.15)$$

$$\frac{t}{q_t} = \left\{ \frac{1}{k_2 q_{e2}^2} \right\} + \left(\frac{1}{q_{e2}} \right) t \quad (2.16)$$

เมื่อ

q_{e2} = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่สภาวะอิ่มตัว (mg/g)

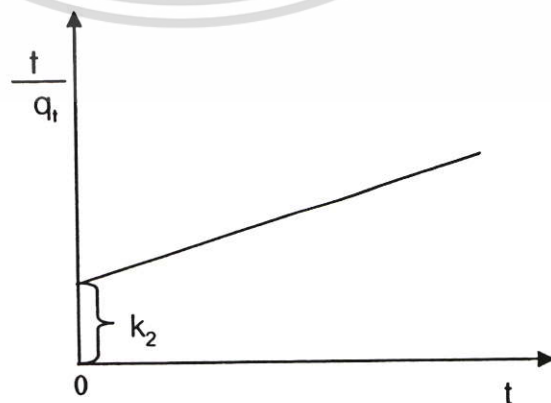
q_t = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่เวลาต่าง ๆ (mg/g)

k_2 = ค่าคงที่อัตราการดูดซับสำหรับแบบจำลองอันดับสอง (mg/g min)

t = เวลา (min)

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง t/q_t กับ t จะได้เส้นตรง ซึ่งสามารถหาค่า k_2 ได้จากจุดตัด

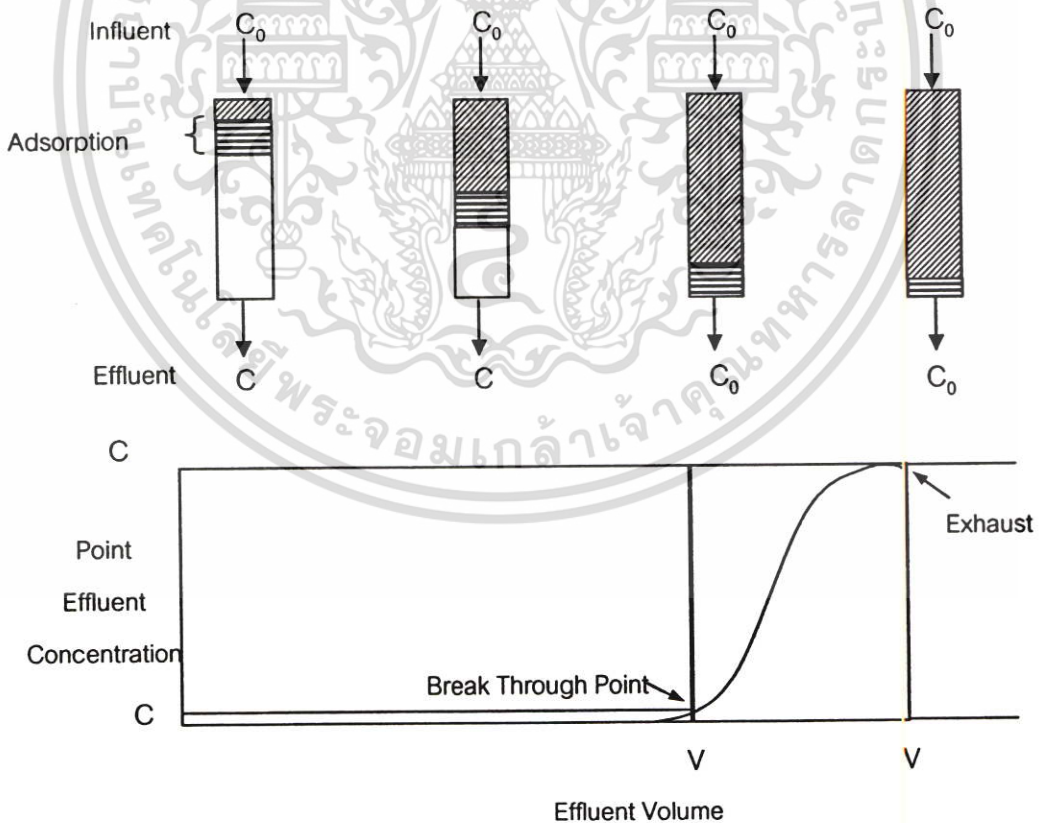
แกน y ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 กราฟปฏิกิริยาอันดับสอง

2.4.7 ศึกษาอายุการใช้งานของตัวดูดซับ

การศึกษาอายุการใช้งานของตัวดูดซับทำโดยการผ่านน้ำที่ปนเปื้อนเข้าสู่คอลัมน์ซึ่งบรรจุตัวดูดซับอย่างต่อเนื่อง เมื่อน้ำไหลผ่านชั้นตัวดูดซับเป็นระยะเวลาหนึ่ง จะมีสารปนเปื้อนเกาะติดที่ผิวตัวดูดซับ ทำให้ตัวดูดซับค่อย ๆ หมดประสิทธิภาพตามปริมาณน้ำที่ค่อย ๆ ไหลผ่านชั้นตัวดูดซับ ดังนั้นความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในน้ำที่ผ่านการดูดซับ จึงเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ แสดงดังรูป 2.17 สารดูดซับชั้นบนจะหมดประสิทธิภาพก่อน และชั้นของสารดูดซับที่หมดประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามเวลาใช้งานและปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน ดังนั้นความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในน้ำที่ทิ้งที่ผ่านการดูดซับแล้ว จะเพิ่มขึ้นตามเวลา จนในที่สุดความเข้มข้น จะถึงค่าสูงสุดที่ยอมรับได้จุดนี้เรียกว่า จุดเบรคทรู (Breakthrough point) เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นของปริมาณน้ำที่ปนเปื้อนที่ผ่านชั้นตัวดูดซับแล้วต่อความเข้มข้นเริ่มต้นเทียบกับปริมาตรที่ใช้ เรียกว่า เส้นโค้งเบรคทรู (Breakthrough curve) โดยเวลาที่นับจากการเริ่มต้นการดูดซับจนถึงจุดเบรคทรู เรียกว่า เวลาการใช้งาน (Service time) และเมื่อสารดูดซับไม่สามารถที่จะดูดซับได้อีก เรียกว่า จุดที่สารดูดซับหมดประสิทธิภาพ (Exhaust point) ซึ่งที่จุดนี้ความเข้มข้นของน้ำเสียที่ออกจากระบบจะมีค่าเท่ากับความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้าระบบ



รูปที่ 2.17 การเคลื่อนตัวของ Adsorption zone สำหรับชั้นสารดูดซับที่อยู่กับที่ตามทิศทางการไหลของน้ำเสีย [26]

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kim และคณะ [27] ศึกษาความสามารถในการดูดซับของผงยางรถยนต์ในการดูดซับสารอินทรีย์ที่ระเหยได้ง่าย (Volatile organic compounds, VOCs) ในสถานะไอระเหย โดยทำการทดลองแบบครึ่ง ซึ่งเป็นการแยกออกมาจากสถานะของเหลวโดยจำแนกตาม Partition coefficient พบว่า VOCs ที่ถูกดูดซับในผงยางรถยนต์มี VOCs อยู่หลายชนิด ซึ่งสารประกอบที่มีขั้ว เช่น Methylene chloride จะถูกดูดซับได้น้อยกว่าสารประกอบที่ไม่มีขั้ว และค่าคงที่ Partition coefficient ของ VOCs พบว่ามีความสัมพันธ์แบบ Logarithmic กับ Saturation vapor concentration

Kershaw และ Pamukcu [28] ศึกษาความสามารถของการดูดซับ Benzene และ o-xylene ที่ปนเปื้อนในน้ำใต้ดินโดยใช้ผงยาง โดยการทดลองแบบครึ่งและการทดลองแบบคอลัมน์ โดยศึกษาปริมาณการดูดซับของ Benzene และ o-xylene เวลาสมมูลของการดูดซับ และประสิทธิภาพการไหลผ่านผงยางในระยะเวลาต่าง ๆ ผลการทดลองแบบครึ่งพบว่า ผงยางสามารถดูดซับ Benzene และ o-xylene ได้ 1.3 มิลลิกรัมต่อกรัมของผงยาง และ 8.2 มิลลิกรัมต่อกรัมของผงยาง ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นของสารละลายเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในผลการทดลองแบบคอลัมน์แสดงว่า ผงยางมีค่าเฉลี่ยของอัตราการใช้ประโยชน์ 40% เมื่อน้ำเสียไหลผ่านเป็นเวลา 15 นาที ดังนั้นมีความเป็นไปได้ที่จะใช้ผงยางเป็นวัสดุดูดซับไปบำบัดร่วมกับวิธี Pump-and-treat หรือเป็นวัสดุดูดซับสำหรับการบำบัดแบบ In-situ reactive

Meng และคณะ [29] ศึกษาการกำจัด Mercury (II) ที่ปนเปื้อนในดินโดยใช้ผงยางรถยนต์ โดยทำการทดลองแบบครึ่ง ทำการทดลองโดยชะล้างด้วยน้ำฝน มีการเปรียบเทียบการปนเปื้อนโดยใช้ Clay-loam ที่ถูก Spike ด้วยปรอทออกไซด์ หรือปรอทคลอไรด์ โดยมี Hg(II) 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน เมื่อดินที่ปนเปื้อนถูกบำบัดด้วยผงยางรถยนต์ 4% พบว่าความเข้มข้นของ Hg(II) ใน Acetic acid leachate ลดลงจาก 3,500 ppb เหลือ 34 ppb ส่วนความเข้มข้นของ Hg(II) เริ่มต้นในน้ำฝน Leachate ลดลงจาก 84 ppb เหลือ 1.2 ppb และหลังจากนั้น 8 เดือนน้ำฝนซึมผ่านใน Field Hg(II) มีความเข้มข้นลดลงเหลือน้อยกว่า 0.2 ppb การบำบัดด้วยผงยางจะยับยั้งการกลายเป็นโลหะปรอท (Hg^0) ในดินตัวอย่าง โดยจะยับยั้งการ reduction จาก Hg(II) ไปเป็น Hg^0 และผลของการดูดซับแสดงว่า ผงยางมีความสามารถในการดูดซับ Hg(II) ได้ดีที่สุดในช่วง pH 2-8

Al-Tabbaa และ Aravinthan [30] ศึกษาการใช้ Clay ธรรมชาติผสมกับหินยางรถยนต์ทำเป็น Landfill barrier material ผสมเศษยางขนาด 1-4 และ 4-8 มิลลิเมตร ระหว่าง 6 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ และทดลองใช้เป็นส่วนประกอบใน Landfill liner การทดสอบการอัดแน่นไม่จำกัดแรงดัน ความเค้น ความเครียด การซึมผ่านได้ของน้ำและ Paraffin ความสามารถในการถูกชะล้างได้ การบวมอย่างอิสระ และการบวมด้วยความดัน พบว่าผลิตภัณฑ์ที่

ได้มีความสามารถในการซึมผ่านได้ของ paraffin เพื่อการบำบัดมากกว่าน้ำ 50 ครั้ง นอกจากนี้ Paraffin ยังเป็นสาเหตุให้เกิดการบวมอย่างมากของยางรถยนต์ที่ผสมกับ Clay เมื่อเทียบกับ Clay เพียงอย่างเดียว

Gunasekara และคณะ [31] ศึกษาการดูดซับสารละลาย Naphthalene, Toluene และ Mercury ion (Hg^{2+}) โดยใช้ผงยางรถยนต์ ลักษณะของการดูดซับ และ Kinetic ของการดูดซับ ทำการทดลองโดยใช้เทคนิคแบบครั้งที่ $20^{\circ}C$ ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Naphthalene และ Toluene เป็นเส้นตรง มีค่าคงที่ของการดูดซับ 1,340 และ 255 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ การดูดซับสารอินทรีย์โดยใช้ผงยางรถยนต์เกิดขึ้นค่อนข้างเร็ว (ประมาณ 30 นาที) อย่างไรก็ตาม ไอโซเทอร์มการดูดซับของปรอทไอออนไม่เป็นเส้นตรงและการดูดซับจะเกิดช้ากว่าการดูดซับสารอินทรีย์ จากผลการทดลองพบว่าอนุภาคของผงยางสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์และปรอทไอออนจากน้ำเสียที่การปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นประโยชน์และไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

Smith และคณะ [32] ศึกษาการนำเศษยางรถยนต์มาผสมกับกรวดเพื่อทำ Passive treatment walls ในหลุมฝังกลบ (Landfill) การทดลองนี้ต้องการหาลักษณะการดูดซับและกลไกของปฏิกิริยา และศึกษาการดูดซับและการคายซับจากพื้นผิวของผงยาง โดยตัวถูกดูดซับที่ใช้ทดลองคือผลิตภัณฑ์จากปิโตรเคมี พาราฟิน และครีซอล ซึ่งทำการทดสอบโดยการอัดแน่น และความสามารถในการบีบอัดที่เหมาะสมของชั้นยางรถยนต์ ระดับการผสมที่เหมาะสมสำหรับการบีบอัด จากผลการทดลอง พบว่าชั้นยางรถยนต์มีลักษณะร่วมกันของการดูดซับและการซึมผ่านได้ของผนังกันการผสมที่เหมาะสมคือ การใช้เศษยางรถยนต์ขนาด 2-6 มิลลิเมตร และใช้กรวดขนาด 20 มิลลิเมตร และมีปริมาณเศษยางรถยนต์ผสมอยู่ 10%

Vizuetz และคณะ [33] ศึกษาการเพิ่มพื้นที่ผิวของยางที่ได้จากยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว (RR) เพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับ ทำการปรับปรุงยาง RR โดยให้ความร้อน สารเคมี และการใช้สารเคมีร่วมกับการให้ความร้อน การทดลองให้ความร้อน ทำโดยนำยาง RR ที่ $200-900^{\circ}C$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ภายใต้ก๊าซไนโตรเจน ส่วนการทดลองปรับปรุงโดยใช้สารเคมี ทำโดยนำยาง RR ไปจุ่มในสารละลาย H_2SO_4 , HNO_3 และสารผสมระหว่าง H_2SO_4 กับ HNO_3 ในสัดส่วนต่าง ๆ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และการทดลองใช้สารเคมีร่วมกับการให้ความร้อน โดยให้ความร้อนกับยาง RR ในตอนแรกที่ $400^{\circ}C$ ระยะเวลา 2 ชั่วโมง ภายใต้ก๊าซไนโตรเจน จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปแช่ในสารเคมี H_2SO_4/HNO_3 เวลา 24 ชั่วโมง นำยาง RR และผลิตภัณฑ์ที่กล่าวมาทดสอบหาพื้นที่ผิวโดยใช้เครื่อง Autosorb ผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าการใช้กรดไนตริกมีสำคัญมากในการปรับปรุงยาง RR คือทำให้มีรูพรุนขนาดใหญ่

เบญจวรรณ และคณะ [34] ได้ศึกษาการทำท่อน้ำซึมจากผงยางรถยนต์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของท่อน้ำซึม ได้แก่ อัตราส่วนของผง

ยางรถยนต์ต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (GRT:LDPE) ที่เหมาะสม และปริมาณสารให้ฟองชนิดเอโซไดคาร์โบนาไมด์ (AZ) ซึ่งสูตรที่เหมาะสมในการทำท่อซีเมนน้ำ คือ GRT:LDPE: AZ เท่ากับ 60:40:3

ยุทธพงษ์ และอลงกรณ์ [35] ศึกษาการปรับปรุงสมบัติท่อน้ำซีเมนต์ที่ทำจากผงยางรถยนต์ (GRT) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) โดยใช้เอโซไดคาร์โบนาไมด์ (AZ) เป็นสารให้ฟอง โดยศึกษาปัจจัยที่มีต่อสมบัติของท่อน้ำซีเมนต์ ได้แก่ ขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ ปริมาณสารเชื่อมโยง (DCP) และปริมาณสารช่วยผสม (Polyethylene graft maleic anhydride, PE-gMA) ทำการศึกษาโดยใช้อัตราส่วน GRT:LDPE: AZ เท่ากับ 60:40:3 โดยน้ำหนัก พบว่าขนาดอนุภาคที่เหมาะสมคือขนาด 30-40 เมช จะทำให้สมบัติเชิงกล เช่น ความแข็งแรงต่อแรงดึง มอดูลัสเปอร์เซ็นต์การยืด ๓ จุดขาด และค่าพลังงานในการแตกหักดีขึ้น



บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer) รุ่น 6405 บริษัท Jenway
2. เครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (Scanning Electron Microscope, SEM) รุ่น 1455 VP บริษัท Leo
3. เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชัน (Atomic Absorption Spectrophotometer) รุ่น AA680 บริษัท Bruker A.G.
4. เครื่องเขย่าสาร (Shaker) รุ่น SGM 300 บริษัท Gallenkamp
5. เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง (Single pan balance) รุ่น TC-254 บริษัท Denver-Instrument Company
6. เครื่องวัดค่าพีเอช (pH meter) รุ่น 215 บริษัท Denver Instrument Company
7. คอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตรและยาว 25 เซนติเมตร
8. ถังความดันขนาด 10 ลิตร
9. เครื่องคัดขนาด (Sieve) บริษัท Laboratory Test Sieve
10. ตู้ควบคุมอุณหภูมิ (High Performance Lab Oven) รุ่น ISOTEMP บริษัท Fisher Scientific
11. เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) รุ่น LRM 200 บริษัท Lab Technology Engineering จำกัด
12. เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single-screw extruder) บริษัท Extruder Farrel
13. เครื่องอบความร้อน (Hot air oven) รุ่น F 400 บริษัท Binder
14. เครื่องอัดแบบขึ้นรูป (Compression molding machine) รุ่น G15H-15-X บริษัท Wabash MPI

3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. สารประกอบฟีนอล (C_6H_6O) (เกรดวิเคราะห์) ยี่ห้อ Carlo Erba
2. ผงยางรถยนต์ชนิดบดที่อุณหภูมิห้อง จากบริษัท Saeng Thai Rubber Factory
3. ยางรีเคลม (Reclaimed rubber) เกรด UCD-103 บริษัท Union Commercial Development
4. สารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต [$K_3Fe(CN)_6$] (เกรดวิเคราะห์) ยี่ห้อ Carlo Erba
5. สารละลาย 4-อะมิโนแอนติไพรีน (เกรดวิเคราะห์) ยี่ห้อ Fluka
6. สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.5 นอร์มอล [NH_4OH 0.5 N] (เกรดวิเคราะห์) ยี่ห้อ Fisher Scientific
7. ไดโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต [K_2HPO_4] (เกรดวิเคราะห์) ยี่ห้อ Carlo Erba
8. โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต [KH_2PO_4] (เกรดวิเคราะห์) ยี่ห้อ Carlo Erba
9. โซเดียมฟอสเฟต ($Na_3PO_4 \cdot 10H_2O$) (เกรดวิเคราะห์ 98%) ยี่ห้อ Carlo Erba
10. กรดบอริก (H_3BO_3) (เกรดวิเคราะห์ 97%) ยี่ห้อ Carlo Erba
11. กรดซิตริก ($H_3C_6H_5O_7 \cdot H_2O$) (เกรดวิเคราะห์ 99.5%) ยี่ห้อ Carlo Erba
12. กรดไนตริก (HNO_3) (เกรดวิเคราะห์ 97%) ยี่ห้อ Merck
13. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) (เกรดวิเคราะห์ 37%) ยี่ห้อ Fisher Scientific
14. กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) (เกรดวิเคราะห์ 98%) ยี่ห้อ Fisher Scientific
15. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) (เกรดวิเคราะห์ 37%) ยี่ห้อ Carlo Erba
16. อะซิโตน CH_3COCH_3 (เกรดวิเคราะห์ 99.8 %) ยี่ห้อ Fisher Scientific
17. เอทานอล C_2H_6O (เกรดวิเคราะห์ 99.8%) ยี่ห้อ Fisher Scientific

3.3 การดำเนินงานวิจัย

3.3.1 ศึกษาคุณสมบัติของผงยางรถยนต์

คุณสมบัติของผงยางรถยนต์ศึกษาโดยใช้เครื่องมือต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของผงยางรถยนต์

สมบัติของผงยางที่ศึกษา	เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์
1. ลักษณะโครงสร้าง	Scanning Electron Microscope (SEM)
2. องค์ประกอบของผงยางรถยนต์	Energy Dispersive Spectrometer (EDS)
3. พื้นที่ผิว (ภาคผนวก ก)	การดูดซับโดยใช้ methylene blue
4. โลหะหนักที่ถูกชะละลาย (ภาคผนวก ข)	Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

3.3.2. การเตรียมผงยางรถยนต์ ท่อน้ำซึม และสารเคมี

3.3.2.1 ผงยางรถยนต์

- นำยางรถยนต์ที่ใช้แล้วส่วนที่เป็นหน้ายางมาบดด้วยเครื่องบดที่อุณหภูมิห้องแบบแห้ง
- คัดแยกขนาดผงยางรถยนต์ โดยใช้ตะแกรงที่มีขนาด 10-20, 20-30, 30-40 และขนาดมากกว่า 40 เมช
- ชั่งผงยางรถยนต์แต่ละขนาด ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร และล้างด้วยน้ำกลั่น โดยมีสัดส่วนของผงยางรถยนต์ 1 กรัมต่อน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร
- เขย่าเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที
- กรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1
- ทำให้แห้งโดยอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ด้วยเตาอบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- เก็บผงยางรถยนต์ที่ล้างและอบแห้งแล้วไว้ในขวดพลาสติกเพื่อนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

3.3.2.2 ผงยางรถยนต์ที่ผ่านการปรับปรุงโดยใช้สารเคมีชนิดต่าง ๆ

- นำผงยางรถยนต์โดยใช้ขนาดที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองมาแช่ในกรดไนตริก 97% กรดไฮโดรคลอริก 37% กรดซัลฟริก 98% และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 37% ในสัดส่วนผงยางรถยนต์ 1 กรัมต่อสารละลาย 10 มิลลิลิตร โดยแช่เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง
- ล้างผงยางรถยนต์ด้วยน้ำกลั่นจนน้ำกลั่นที่ล้างมีพีเอชเท่ากับ 7

3. กรองผงยางด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1
4. อบผงยางรถยนต์ให้แห้งด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.3.2.3 ท่อน้ำซึม [36]

1. นำยางรีเคลม 100 ส่วนในร้อยส่วนของยาง (phr) ผงยางรถยนต์ขนาด 30-40 เมช 100 ส่วนในร้อยส่วนของยาง สารให้ฟอง (N,N'-Dinitrosopenta methylene tetramine, DNPT) 6 ส่วนในร้อยส่วนของยาง ยูเรีย 6 ส่วนในร้อยส่วนของยาง เขม่าดำ 20 ส่วนในร้อยส่วนของยาง และสารเติมแต่งอื่น ๆ ผสมกันด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิห้องจนยางมีผิวเรียบสม่ำเสมอ
2. ขึ้นรูปยางเป็นท่อด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว อุณหภูมิของหัวคายประมาณ 80-90 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบของสกรูเท่ากับ 30 รอบต่อนาที
3. เชื่อม โยงท่อน้ำซึมด้วยเครื่องอบความร้อน

3.3.2.4 การเตรียมสารละลายมาตรฐานฟินอลความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (Phenol stock solution)

1. ชั่งสารประกอบฟินอล 1.0000 กรัม (ใช้เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง)
2. นำไปละลายในน้ำกลั่นแล้วใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรให้ได้ 1,000 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน
3. เก็บไว้ในขวดสีชาและเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

3.3.2.5 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ฟินอลเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

เปิดสารละลายมาตรฐานฟินอลเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นแล้วเขย่าให้เข้ากัน แล้ววัดค่าพีเอช

3.3.3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับฟินอลด้วยผงยางรถยนต์

3.3.3.1 ศึกษาผลของขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์

1. ชั่งผงยางรถยนต์ขนาด 10-20, 20-30, 30-40 และขนาดมากกว่า 40 เมช จำนวน 5 กรัม ลงในขวดไวแอลสีชา (vial) ขนาด 40 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำเสียสังเคราะห์ฟินอลความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 39 มิลลิลิตร ลงในขวดไวแอลสีชา ปิดฝาให้แน่น (ใช้ปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ 39 มิลลิลิตร ในขวดไวแอล 40 มิลลิลิตร เพื่อให้ช่องว่างของอากาศภายในขวดไวแอลเหลือน้อย เพื่อลดการเปลี่ยนแปลงสถานะของฟินอลที่ละลายอยู่ในน้ำ ไปอยู่ในสถานะก๊าซ)

3. เขย่าโดยใช้เครื่องเขย่าสาร (Shaker) ที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
4. กรองสารละลายที่ได้ด้วยเครื่องกรองสุญญากาศโดยใช้กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1
5. นำสารละลายที่ได้ไปหาความเข้มข้นของฟีนอลที่เหลือ ตามวิธีมาตรฐาน ASTM (ภาคผนวก ก)
6. ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง
7. ทำแบลนด์ โดยชั่งยางรถยนต์แต่ละขนาด จำนวน 5 กรัม ในขวดไวแอลลีซ่า แต่ใส่น้ำกลั่นปริมาตร 39 มิลลิลิตรแทนน้ำเสียสังเคราะห์ และทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3-6
8. ทำชุดควบคุม โดยใส่น้ำเสียสังเคราะห์ฟีนอลความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 39 มิลลิลิตร แต่ไม่ใส่ผงยาง และทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3-6
9. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-8 แต่ล้างผงยางรถยนต์ขนาดที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองด้วยอะซิโตน (99.8%) และเอทานอล (99.8%) โดยมีสัดส่วนของผงยางรถยนต์ 1 กรัมต่ออะซิโตน และ เอทานอล 10 มิลลิลิตร แช่ทิ้งไว้ 12 ชั่วโมง กรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 ทำให้แห้งโดยอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ด้วยเตาอบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดคราบน้ำมันบนพื้นผิวยางรถยนต์

3.3.3.2 ศึกษาผลของพีเอชของสารละลายฟีนอล

1. น้ำเสียสังเคราะห์ฟีนอลเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ไปปรับพีเอช 3, 5, 7, 9 และ 12 โดยใช้สารละลายบัฟเฟอร์ที่เตรียมจากสารละลายกรดบอริก 0.2 โมลต่อลิตร กับสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.05 โมลต่อลิตร และสารละลายโซเดียมฟอสเฟต 0.1 โมลต่อลิตร [37]
2. ชั่งผงยางรถยนต์โดยใช้ขนาดที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.3.3.1 จำนวน 5 กรัมลงในขวดไวแอลลีซ่าขนาด 40 มิลลิลิตร
3. เติมน้ำเสียสังเคราะห์ฟีนอลที่พีเอชต่าง ๆ ที่เตรียมในข้อ 1 ลงในขวดไวแอลลีซ่า ที่มีผงยางรถยนต์ จำนวน 5 กรัมบรรจุอยู่ ปิดฝาให้แน่น
4. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 4-8 ในหัวข้อ 3.3.3.1

3.3.3.3 ศึกษาผลของความเร็วรอบในการเขย่า

1. ชั่งผงยางรถยนต์โดยใช้ขนาดที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.3.3.1 จำนวน 5 กรัม ลงในขวดไวแอลลีซ่าขนาด 40 มิลลิลิตร

2. เติมน้ำเสียสังเคราะห์ฟีนอลเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีค่าพีเอชที่เหมาะสม ที่ได้จากการทดลองข้อ 3.3.3.2 ลงในขวดไวแอลลีซาที่มีผงยางรถยนต์บรรจุอยู่ ปิดฝาให้แน่น
3. เขย่าที่ความเร็วรอบ 100, 150, 200, 250 และ 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
4. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 4-8 ในหัวข้อ 3.3.3.1

3.3.3.4 ศึกษาผลของระยะเวลาในการเขย่า

1. ชั่งผงยางรถยนต์โดยใช้ขนาดที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.3.3.1 จำนวน 5 กรัม ลงในขวดไวแอลลีซาขนาด 40 มิลลิตร
2. เติมน้ำเสียสังเคราะห์เข้มข้นฟีนอล 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีค่าพีเอชที่เหมาะสม ซึ่งได้จากการทดลองข้อ 3.3.3.2 ลงในขวดไวแอลลีซาที่มีผงยางรถยนต์บรรจุอยู่ ปิดฝาให้แน่น
3. เขย่าที่ความเร็วรอบที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.3.3.3 เป็นเวลา 1, 3, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง
4. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 4-8 ในหัวข้อ 3.3.3.1

3.3.3.5 ศึกษาผลของปริมาณของผงยางรถยนต์

1. ชั่งผงยางรถยนต์โดยใช้ขนาดที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.3.3.1 จำนวน 1, 3, 5, 7 และ 10 กรัม ลงในขวดไวแอลลีซาขนาด 40 มิลลิตร
2. เติมน้ำเสียสังเคราะห์ฟีนอลเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีค่าพีเอชที่เหมาะสม ที่ได้จากการทดลองข้อ 3.3.3.2 ลงในขวดลีซาที่มีผงยางรถยนต์บรรจุอยู่
3. เขย่าที่ความเร็วรอบที่ได้จากการทดลองในหัวข้อ 3.3.3.3 และระยะเวลาที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองข้อ 3.3.3.4
4. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 4-8 ในหัวข้อ 3.3.3.1

3.3.3.6 ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายฟีนอล ไอโซเทอร์มและ

จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

1. ชั่งผงยางรถยนต์โดยใช้ขนาดที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.3.3.1 และ ปริมาณที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.3.3.5 ลงในขวดไวแอลลีซาขนาด 40 มิลลิตร
2. เติมน้ำเสียสังเคราะห์ฟีนอลที่ความเข้มข้น 2, 4, 6, 8, 10, 20, 40, 50, 60, 80, 100, 150, 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีค่าพีเอชที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.3.3.2 ลงในขวดไวแอลลีซาที่มีผงยางรถยนต์บรรจุอยู่ ปิดฝาให้แน่น

3. เช่าที่ความเร็วรอบ ที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองข้อ 3.3.3.3 และระยะเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.3.3.4
4. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 4-8 ในหัวข้อ 3.3.3.1

3.3.4 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลด้วยผงยางรถยนต์ที่ผ่านการปรับปรุง

1. นำผงยางขนาดที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.3.3.1 ไปผ่านการปรับปรุงตามข้อ 3.3.2.2
2. นำสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองแบบครั้งที่ได้จากการศึกษา 3.3.3 มาศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลโดยใช้ผงยางที่ผ่านการปรับปรุง
3. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 4-8 ในหัวข้อ 3.3.3.1

3.3.5 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลด้วยผงยางรถยนต์โดยบรรจุผงยางรถยนต์ในคอลัมน์

1. นำผงยางขนาดที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.3.3.1 มา 15 กรัมบรรจุในคอลัมน์
2. ให้น้ำเสียสังเคราะห์ฟีนอลเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตรไหลผ่านคอลัมน์ในอัตรา 1 มิลลิตรต่อนาที
3. เก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ไหลซึมออกจากท่อน้ำซึมที่เวลา 5, 10, 15, 30, 45, 60, 120, 150 และ 180 นาที
4. นำน้ำเสียไปหาความเข้มข้นของฟีนอลตามวิธีมาตรฐาน ASTM (ภาคผนวก ค)

3.3.6 ศึกษาความสามารถในการดูดซับฟีนอลของท่อน้ำซึมที่ทำด้วยผงยางรถยนต์

ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดฟีนอลโดยใช้ท่อน้ำซึมที่ทำด้วยผงยางรถยนต์ โดยใช้ท่อน้ำซึมที่ผลิตโดย วศินและคณะ [36] วิธีการผลิตและคุณสมบัติของท่อน้ำซึมที่ใช้ในการศึกษาแสดงในภาคผนวก ง ซึ่งท่อน้ำซึมที่ใช้ตลอดการทดลองจะผลิตในเบ้าที่เดียวกัน ดังนั้นจึงมีลักษณะใกล้เคียงกัน

3.3.6.1 ศึกษาอัตราการไหลที่เหมาะสมในการกำจัดฟีนอล

1. นำท่อน้ำซึมที่ทำด้วยผงยางรถยนต์บรรจุในคอลัมน์
2. ผ่านน้ำเสียสังเคราะห์ฟีนอลความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร เข้าท่อน้ำซึมที่ความดัน 1.25 , 2.5 และ 5.0 psi โดยปรับความดันโดยถึงความดันก๊าซในโตรเจนที่ระยะเวลาต่าง ๆ 5, 10, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150, 165 และ 180 นาที แสดงดังรูปที่ 3.1

3. หาค่าอัตราการซึมของผนังท่อน้ำซึม โดยวัดปริมาณสารละลายที่ไหลออกมาที่ระยะเวลาต่าง ๆ แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยของอัตราการไหลเป็นมิลลิเมตรต่อนาที
4. เก็บตัวอย่างน้ำเสียดังเคราะห์ไหลซึมออกจากท่อน้ำซึมที่เวลาต่าง ๆ วิเคราะห์ความเข้มข้นของฟีนอลที่เหลือตามวิธีมาตรฐาน ASTM (ภาคผนวก ก)



รูปที่ 3.1 ศึกษาอัตราการไหลที่เหมาะสมในการกำจัดฟีนอลโดยใช้ถังความดัน

3.3.6.2 ศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการทำรีเจนเนอเรชันสำหรับน้ำท่อน้ำซึมไปใช้ใหม่

1. นำท่อน้ำซึมขนาดความยาว 8 เซนติเมตรมาล้างน้ำหนัก จากนั้นนำมาแช่ในสารละลายฟีนอลเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อให้ท่อน้ำซึมอิ่มตัว
2. นำท่อน้ำซึมที่ผ่านการดูดซับฟีนอลแล้วจากข้อ 1 มาทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง
3. อบที่อุณหภูมิ 182 องศาเซลเซียส (จุดเดือดของฟีนอล 182 องศาเซลเซียส) ที่ระยะเวลาต่าง ๆ ได้แก่ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15 และ 20 นาที เพื่อกำจัดฟีนอล
4. ตั้งทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง เพื่อให้ท่อน้ำซึมเย็น จากนั้นชั่งน้ำหนักของท่อน้ำซึมอีกครั้ง เพื่อหาค่าผลต่างของน้ำหนักของท่อน้ำซึมก่อนและหลังอบ

5. เลือกเวลาที่เหมาะสมในการอบจากผลต่างของน้ำหนักท่อน้ำซึมนก่อนอบและหลังอบที่มีค่าเท่ากับศูนย์หรือเข้าใกล้ศูนย์
6. นำท่อน้ำซึมนที่ผ่านการดูดซับฟินอลแล้วจากข้อ 3.3.6.1 มาอบที่อุณหภูมิ 182 องศาเซลเซียส เวลาที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในข้อ 5

3.3.6.3 ศึกษาความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ของท่อน้ำซึมน

1. นำท่อน้ำซึมนซึ่งผ่านการรีเจนเนอเรชันจากการทดลองที่ 3.3.6.2 ไปหาความสามารถในการกำจัดฟินอลโดยใช้สภาวะที่ได้จากข้อ 3.3.6.1 และหาค่าอัตราการซึมของผนังท่อน้ำซึมน
2. เก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไหลซึมออกจากท่อน้ำซึมนแล้วนำไปหาความเข้มข้นของฟินอลที่เหลืออยู่ตามวิธีมาตรฐาน ASTM



บทที่ 4

ผลการทดลอง

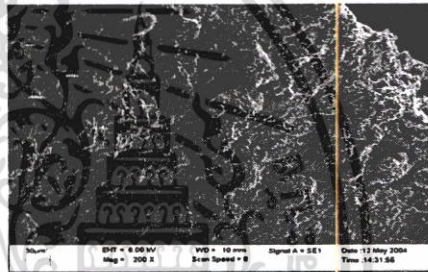
4.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติของผงยางรถยนต์

4.1.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของผงยางรถยนต์

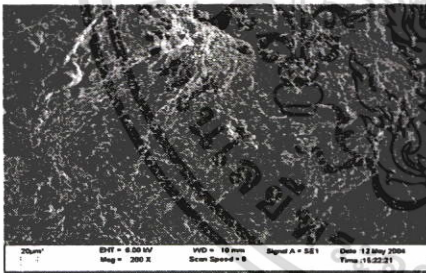
จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของผงยางรถยนต์ขนาดต่าง ๆ โดยเครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (SEM) ที่กำลังขยาย 200 เท่า พบว่าลักษณะของผงยางรถยนต์ที่ขนาด 30-40 เมช และขนาดมากกว่า 40 เมช มีผิวขรุขระกว่าผงยางขนาด 6-7 เมช, 10-20 เมช, 20-30 เมช ดังแสดงในรูปที่ 4.1



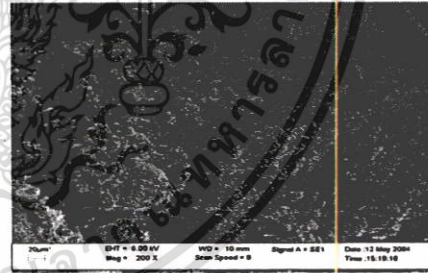
ก) ผงยางขนาด 6-7 เมช



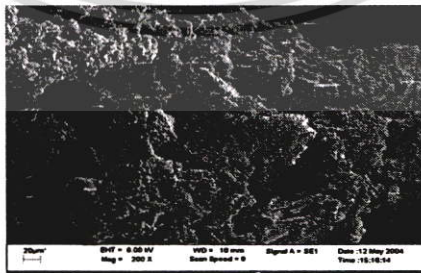
ข) ผงยางขนาด 10-20 เมช



ค) ผงยางขนาด 20-30 เมช

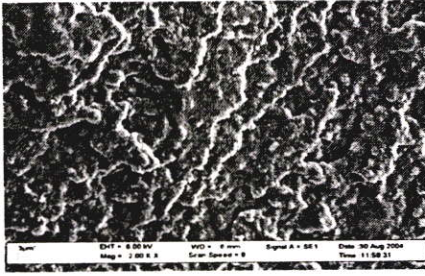
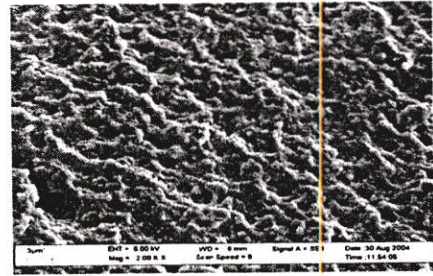


ง) ผงยางขนาด 30-40 เมช

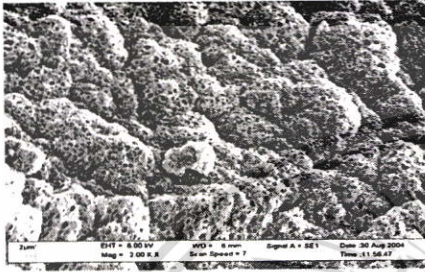
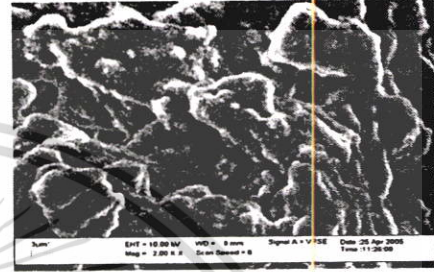
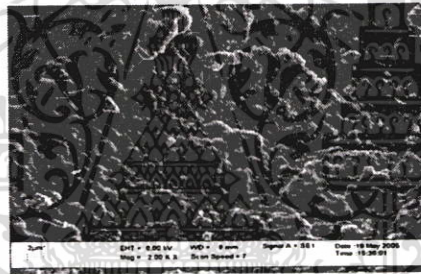


จ) ผงยางขนาดมากกว่า 40 เมช

รูปที่ 4.1 ลักษณะพื้นผิวของผงยางรถยนต์ขนาดต่าง ๆ วิเคราะห์โดยใช้เครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 200 เท่า

ก) พงยางที่ผ่านการปรับปรุงด้วย H_2SO_4 98%

ข) พงยางที่ผ่านการปรับปรุงด้วย HCl 37%

ค) พงยางที่ผ่านการปรับปรุงด้วย HNO_3 97%ง) พงยางที่ผ่านการปรับปรุงด้วย H_2O_2 37%

จ) พงยางรถยนต์ที่ล้างด้วยน้ำกลั่น

รูปที่ 4.2 ลักษณะพื้นผิวของพยางรถยนต์ขนาด 30-40 เมช ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกรด ชนิดต่าง ๆ วิเคราะห์โดยใช้เครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า

ตารางที่ 4.1 ผลของพื้นที่ผิวที่ได้จากการทดลองและเปรียบเทียบกับพื้นที่ผิวของพยาง

สารที่ใช้ในการปรับปรุง	พื้นที่ผิวที่ได้จากการทดลอง (ตารางเมตรต่อกรัม)
H_2O_2	6.13
HNO_3	7.24
ขนาด 30-40 เมช	1.96

จากรูปที่ 4.2 แสดงลักษณะทางกายภาพของพยางรถยนต์ขนาด 30-40 เมช ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกรดซัลฟริก 98% กรดไฮโดรคลอริก 37% กรดไนตริก 97% และไฮโดรเจนเปอร์-

ออกไซด์ 37% พบว่าพื้นที่ผิวของผงยางรถยนต์มีความขรุขระและเป็นรูพรุนมากขึ้น โดยผงยางที่ปรับปรุงด้วยกรดไนตริก 97% จะมีความพรุนสูงกว่าการปรับปรุงโดยกรดซัลฟูริก กรดไฮโดรคลอริก และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จากการวัดพื้นที่ผิวโดยการดูดซับโดยใช้เมทิลีนบลู พบว่าการปรับปรุงด้วยกรดไนตริกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น (ดังตารางที่ 4.1) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Vizuet และคณะ [33] ทั้งนี้เนื่องจากกรดไนตริกเป็นสารที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์ (Oxidizing agent) [33] ทำให้ยางที่เสื่อมสภาพถูก NO_2 ออกซิไดซ์ ทำให้พื้นที่ผิวของยางเกิดรูพรุนขนาดเล็กขึ้น อย่างไรก็ตามสารละลายกรดเข้มข้นไปทำลายโครงสร้างร่างแหสามมิติของยางรถยนต์ ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพแบบเชื่อมโยง (Crosslinking) ทำให้พื้นที่ผิวยางมีลักษณะแข็ง

4.1.2 ผลการศึกษาองค์ประกอบของผงยางรถยนต์

องค์ประกอบของผงยาง ขนาด 30-40 เมช วิเคราะห์โดยใช้เครื่องเอนเนอร์จีดีสเพอร์ซีฟสเปกโตรมิเตอร์ (EDS) ดังแสดงในตารางที่ 4.2 (ภาคผนวก ง)

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบของผงยางรถยนต์ขนาด 30-40 เมช ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่องเอนเนอร์จีดีสเพอร์ซีฟสเปกโตรมิเตอร์ (EDS)

ชนิดตัวอย่างของผงยางรถยนต์	ปริมาณของธาตุชนิดต่าง ๆ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)				
	คาร์บอน	ออกซิเจน	โซเดียม	ซัลเฟอร์	อื่น ๆ
ล้างด้วยน้ำกลั่น	89.7	6.1	2.1	2.1	0.0
ปรับปรุงด้วย H_2SO_4 (98%)	57.0	24.6	0.3	16.5	1.6 (Al)
ปรับปรุงด้วย HCl (37%)	86.4	6.2	1.0	2.3	4.1 (Cl)
ปรับปรุงด้วย HNO_3 (97%)	80.3	11.3	0.0	0.4	8.0 (N)
ปรับปรุงด้วย H_2O_2 (37%)	90.0	7.1	1.7	1.2	0.0

จากผลการทดลองจะเห็นว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่คือ คาร์บอน ยางรถยนต์ที่ล้างด้วยน้ำกลั่นและปรับปรุงด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะมีปริมาณคาร์บอนใกล้เคียงกัน ส่วนผงยางรถยนต์ที่ปรับปรุงด้วยกรด จะมีสัดส่วนคาร์บอนน้อยลง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของออกซิเจน และสารที่เป็นองค์ประกอบของกรคนั้น ๆ ซึ่งสารเหล่านี้จะเข้าไปดูดซับบนพื้นที่ผิวของผงยางรถยนต์ ดังตารางที่ 4.2 การปรับปรุงโดยใช้กรดซัลฟูริกทำให้มีออกซิเจน และซัลเฟอร์เพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการดูดซับสารนี้บนผงยาง ส่วนธาตุโซเดียม และธาตุอะลูมิเนียมอาจมาจากซิลิกาซึ่งใช้เป็นสารตัวเติมในยางรถยนต์

4.1.3 ผลการศึกษาโลหะหนัก โดยวิธี Leachate Extraction Procedure

จากการศึกษาปริมาณโลหะหนัก โดยการชะละลายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (ภาคผนวก ก) ของผงด่างรถยนต์ขนาด 30-40 เมช ขางแผ่นที่ทำจากผงด่างรถยนต์ และท่อน้ำซึมที่ทำจากผงด่างรถยนต์ โดยทำการวิเคราะห์โลหะหนักชนิดที่เป็นองค์ประกอบในผงด่างได้แก่ เหล็ก สังกะสี ทองแดง ตะกั่ว และโครเมียม ซึ่งผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ปริมาณของโลหะหนักที่ถูกชะละลายออกจากผงด่างรถยนต์ขนาด 30-40 เมช แผ่นยางที่ทำจากผงด่างรถยนต์ และท่อน้ำซึมที่ทำจากผงด่างรถยนต์

ชนิดของโลหะหนัก	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)		
	ผงด่างรถยนต์ขนาด 30-40 เมช	แผ่นยางที่ทำจาก ผงด่างรถยนต์	ท่อน้ำซึมที่ทำจาก ผงด่างรถยนต์
เหล็ก	0.0058	nd	nd
สังกะสี	1.0676	0.3906	0.1744
ทองแดง	nd	nd	nd
ตะกั่ว	nd	nd	nd
โครเมียม	nd	nd	nd

หมายเหตุ nd คือไม่สามารถตรวจวัดได้

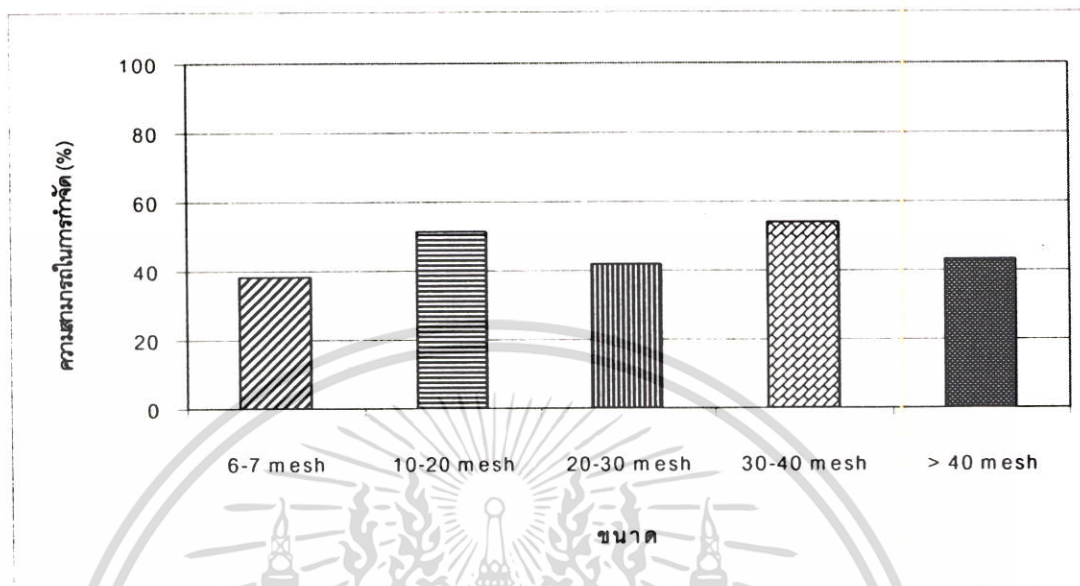
จากการทดสอบการชะละลายโลหะหนักออกจากผงด่างรถยนต์ โดยวิธี Leachate Extraction Procedure พบว่าสังกะสีเป็นโลหะที่ถูกชะออกมามากที่สุด (ตารางที่ 4.3) เนื่องจากสังกะสีเป็นองค์ประกอบของยางรถยนต์ซึ่งอยู่ในรูปสังกะสีออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) ใช้เป็นสารเคมีสำคัญชนิดหนึ่งที่จำเป็นในยางผสมสูตรเกือบทุกชนิด ทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Activator) ซึ่งมีอยู่ประมาณร้อยละ 1.9 โดยน้ำหนัก ปริมาณสังกะสีที่พบมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม พบเหล็กถูกชะออกมาเพียงเล็กน้อย ผลจากการทดลองไม่พบโลหะหนักอื่นที่เป็นองค์ประกอบของยางรถยนต์ถูกชะออกมา

4.2 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดฟีนอลด้วยผงด่างรถยนต์

4.2.1 ผลการศึกษาขนาดของผงด่างรถยนต์

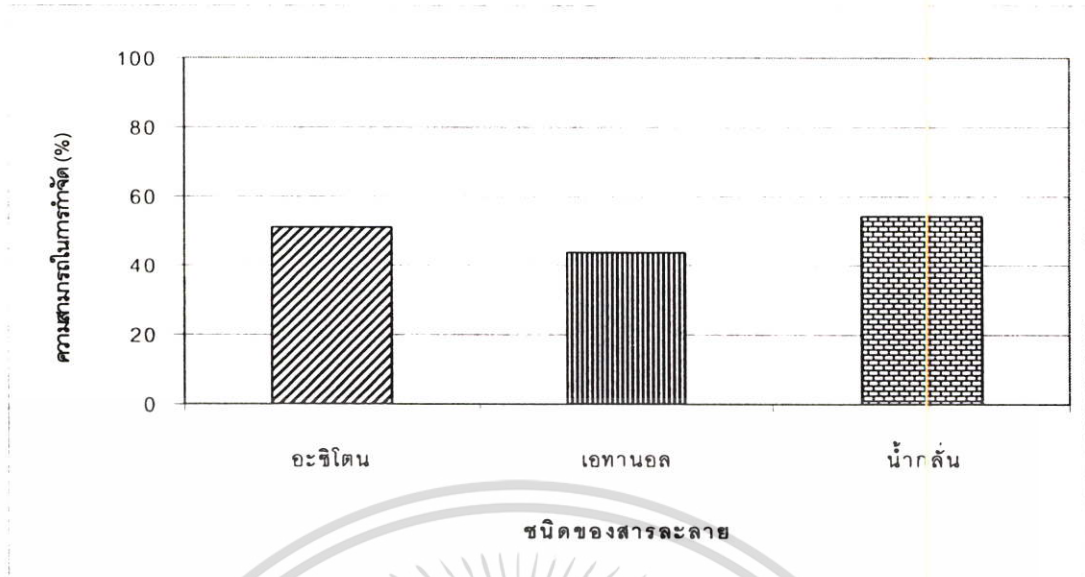
ผลการศึกษาขนาดของผงด่างรถยนต์ขนาดต่าง ๆ คือ ขนาด 6-7 เมช 10-20 เมช 20-30 เมช 30-40 เมช และขนาดมากกว่า 40 เมช แสดงในรูปที่ 4.4 (ตารางผนวก จ-1 ภาคผนวก จ) โดยใช้

ความเข้มข้นของฟีนอลที่ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ยางหนัก 5 กรัม เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อ นาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอล (%) โดยใช้ผงยางขนาดต่าง ๆ

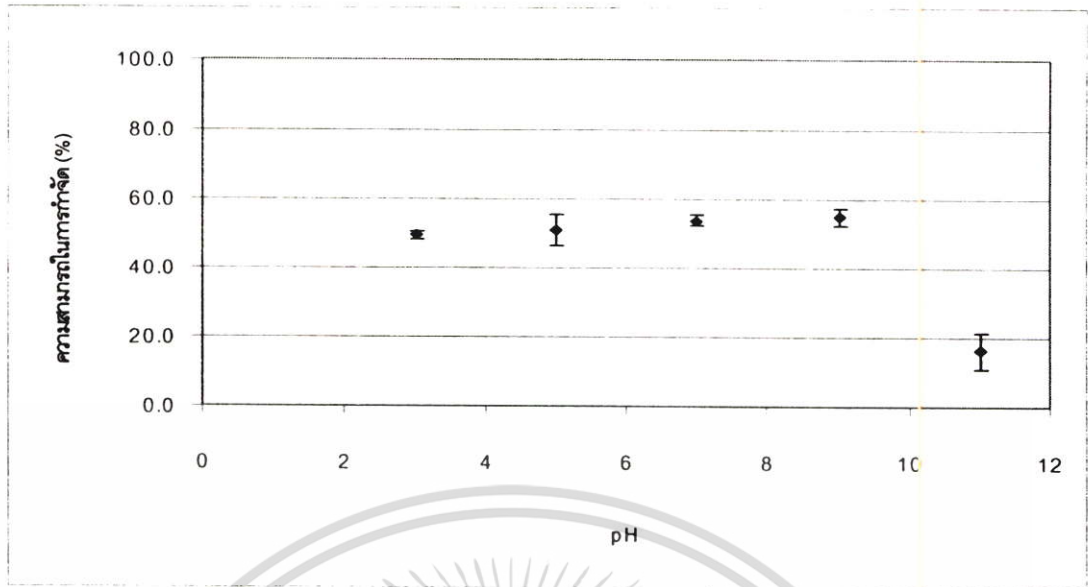
จากรูปที่ 4.3 พบว่าผงยางรถยนต์ขนาดเล็กมีความสามารถในการดูดซับได้ดีกว่าผงยางขนาดใหญ่ (ตารางผนวก จ-1 ภาคผนวก จ) ผงยางรถยนต์ขนาด 30-40 เมช มีความสามารถในการกำจัดฟีนอลได้ดีที่สุดคือร้อยละ $53.93 (\pm 1.61)$ และกำจัดได้มากกว่าขนาดมากกว่า 40 เมช ทั้งนี้อาจเป็นเพราะผงยางขนาดมากกว่า 40 เมช มีขนาดเล็ก และลอยตัวอยู่บนผิวของสารละลายเป็นส่วนใหญ่ อาจเป็นเพราะผงยางรถยนต์มีอนุภาคขนาดเล็กจึงจับตัวเป็นกลุ่มก้อน และองค์ประกอบหลักเป็นยางธรรมชาติ (NR) ซึ่งมีโครงสร้างเป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้น ความสามารถในการเปียก (Wettability) ด้วยตัวทำละลายที่มีขั้ว เช่น น้ำ จึงเกิดได้ไม่ดี ทำให้พื้นผิวบางส่วนไม่เปียก เกิดเป็นฟองอากาศขนาดเล็กแทรกอยู่ระหว่างอนุภาคของผงยาง จึงทำให้ผงยางลอยตัวไม่จมน้ำ จากการลอยตัวของยางขนาด 30-40 เมช อาจทำให้การดูดซับมีประสิทธิภาพลดลง ดังนั้นจึงล้างผิวของผงยางรถยนต์ด้วยอะซิโตน และเอทานอล เพื่อกำจัดคราบน้ำมันที่เคลือบอยู่บนผิวของรถยนต์ และอากาศที่แทรกอยู่ในพื้นผิวของผงยางออกไป พบว่าผงยางจมตัวอยู่ในสารละลายฟีนอล ความสามารถในการกำจัดฟีนอลของผงยางที่ผ่านการล้างด้วยอะซิโตน และเอทานอล สามารถกำจัดฟีนอลได้ร้อยละ $50.86 (\pm 1.84)$ และ $43.52 (\pm 2.08)$ ตามลำดับ ซึ่งประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลมีค่าน้อยกว่าการดูดซับด้วยผงยางที่ล้างด้วยน้ำกลั่น ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ตารางผนวกที่ จ-2 และตารางผนวกที่ จ-3 ภาคผนวก จ) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะอะซิโตน และเอทานอลไปจับบนพื้นผิวของผงยาง ทำให้ความสามารถในการกำจัดฟีนอลลดลง



รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดฟินอล (%) โดยใช้อะซิโตน เอทานอล และน้ำกลั่น
ล้างผงยางรถยนต์

4.2.2 ผลการศึกษาฟีนอลของสารละลายฟินอล

จากการศึกษาผลฟีนอลของสารละลายต่อการกำจัดฟินอล โดยใช้ผงยางรถยนต์ ใช้สารละลายบัฟเฟอร์ปรับพีเอชที่ 3, 5, 7, 9 และ 11 โดยใช้ความเข้มข้นของฟินอล 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ผงยางรถยนต์ขนาด 30-40 เมช ปริมาณ 5 กรัม เขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าสามารถกำจัดฟินอลได้ใกล้เคียงกันประมาณร้อยละ 53 ในช่วงพีเอช 5 ถึง 9 และมีประสิทธิภาพการกำจัดลดลงที่พีเอช 11 (ร้อยละ 16.16) แสดงดังรูปที่ 4.5 (ตารางผนวก จ-4 ภาคผนวก จ)



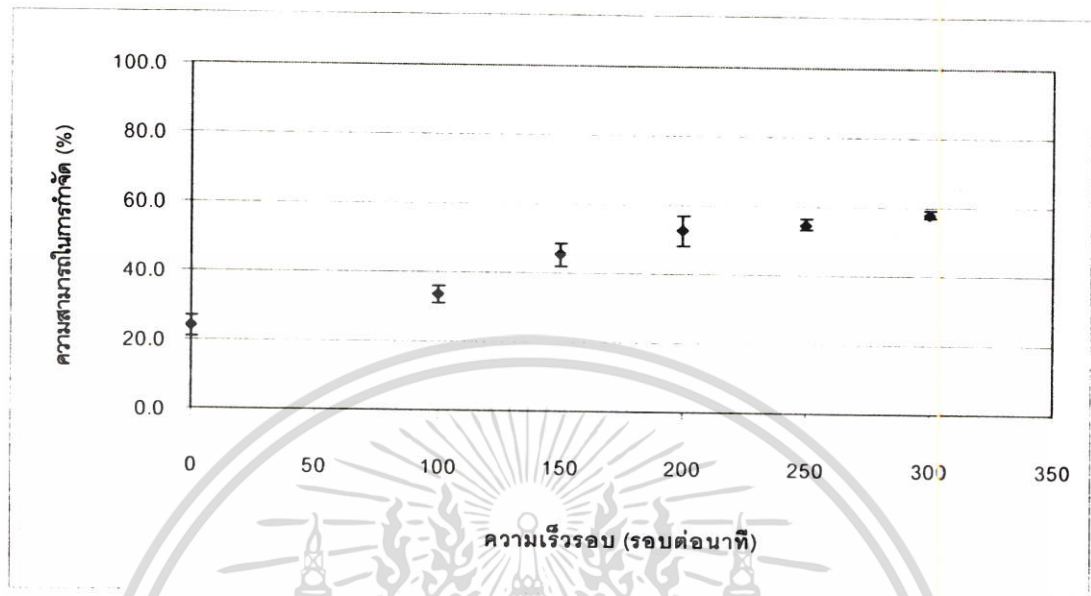
รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพการกำจัดฟีนอล (%) โดยใช้ผงยางรถยนต์ ที่พีเอชต่าง ๆ

ที่พีเอช 3 ผงยางรถยนต์มีความสามารถในการกำจัดฟีนอลได้ร้อยละ 49.34 (± 1.31) ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะกรดไปทำลายพันธะการเชื่อมโยงของยางและเกิดการเชื่อมโยงใหม่แบบคลอสลิงคิง ทำให้ผงยางมีลักษณะแข็ง ทำให้ทำให้มีปริมาณช่องว่างที่อยู่ภายในโครงสร้างสามมิติของยางลดลง ส่วนที่พีเอชเท่ากับ 5 มีความสามารถในการกำจัดฟีนอลได้ร้อยละ 50.91 (± 4.61) และที่พีเอช 7 และพีเอช 9 พบว่ามีค่าความสามารถในการกำจัดฟีนอลใกล้เคียงกันคือร้อยละ 53.72 (± 1.66) และ 54.94 (± 2.54) ตามลำดับ ซึ่งค่าพีเอชในน้ำทิ้งจากโรงงานปิโตรเคมีอยู่ในช่วงพีเอช 5 ถึง 9 ดังนั้น จึงไม่จำเป็นต้องปรับพีเอชของสารละลายก่อนกำจัด ส่วนที่พีเอช 11 ความสามารถกำจัดฟีนอลของผงยางรถยนต์เท่ากับร้อยละ 16.16 (± 5.21) เนื่องจากฟีนอลเปลี่ยนรูปเป็นฟีนอลที่พีเอชมีค่ามากกว่า 9.82 [9] ดังแสดงในสมการ 2.1 จากการทำฟีนอล (C_6H_5O) มีความเป็นขั้วจึงถูกดูดซับโดยผงยางรถยนต์ ซึ่งไม่มีขั้วได้ไม่ดี

4.2.3 ผลการศึกษาความเร็วรอบในการเขย่า

จากผลการศึกษาความเร็วรอบในการเขย่า ทำโดยใช้สารละลายฟีนอลที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 39 มิลลิลิตร และมีค่าพีเอชเท่ากับ 7 ใช้ผงยางรถยนต์ขนาด 30-40 เมช ปริมาณ 5 กรัม เขย่าที่ความเร็วรอบ 0, 100, 150, 200, 250 และ 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผลจากการทดลองพบว่า ถ้าความเร็วรอบในการเขย่ามากขึ้น ความสามารถในการกำจัดฟีนอลจะมีเพิ่มมากขึ้นด้วย ทั้งนี้เนื่องจากค่าความเร็วรอบในการเขย่าที่เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการกระจายตัวของผงยางรถยนต์ในสารละลายฟีนอลเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ ยังทำให้ชั้นฟิล์มน้ำที่ล้อมรอบผงยางรถยนต์อยู่มีความหนาลดลง ทำให้ฟีนอลสามารถแทรกเข้าไปสู่โพรงภายในผงยางรถยนต์ได้มากและเร็วขึ้นจนถึงความเร็วรอบหนึ่งค่าความสามารถในการกำจัดฟีนอลจะเริ่มคงที่

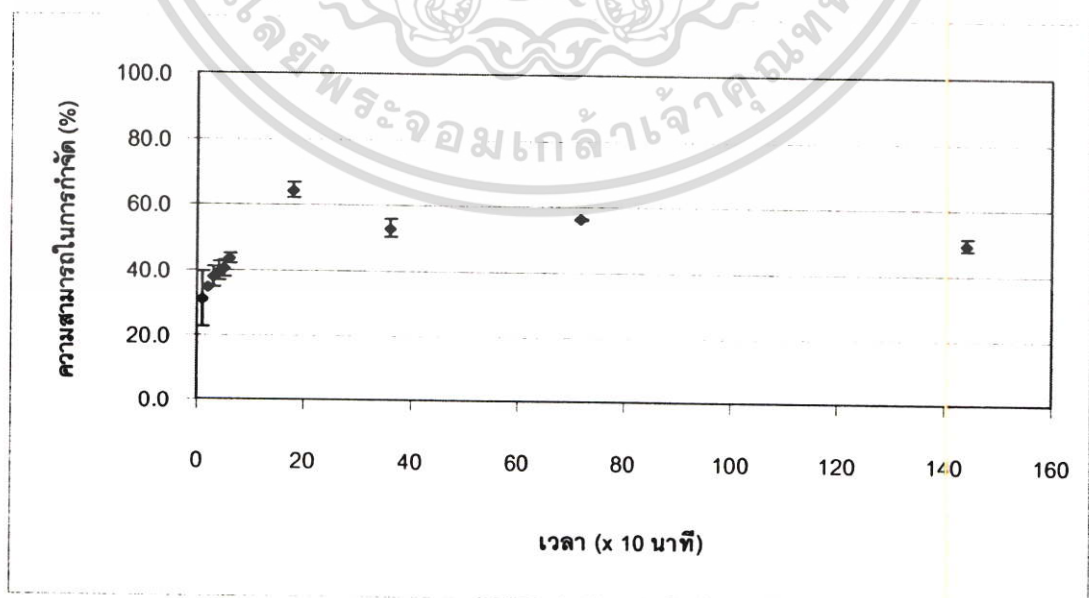
ซึ่งความเร็วรอบที่เหมาะสมคือ 250 รอบต่อนาที ซึ่งมีประสิทธิภาพกำจัดฟีนอลได้ร้อยละ 54.77 (± 1.37) ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ตารางผนวก จ-5 ภาคผนวก จ)



รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพการกำจัดฟีนอล (%) โดยใช้ผงยางรถยนต์ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ

4.2.4 ผลการศึกษาระยะเวลาในการเขย่า

ผลการกำจัดฟีนอลที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 39 มิลลิลิตร มีค่าพีเอชเท่ากับ 7 โดยใช้ผงยางรถยนต์ขนาด 30-40 เมช ปริมาณ 5 กรัม เขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที ระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดฟีนอล แสดงดังรูปที่ 4.7 (ตารางผนวก จ-6 ภาคผนวก จ)



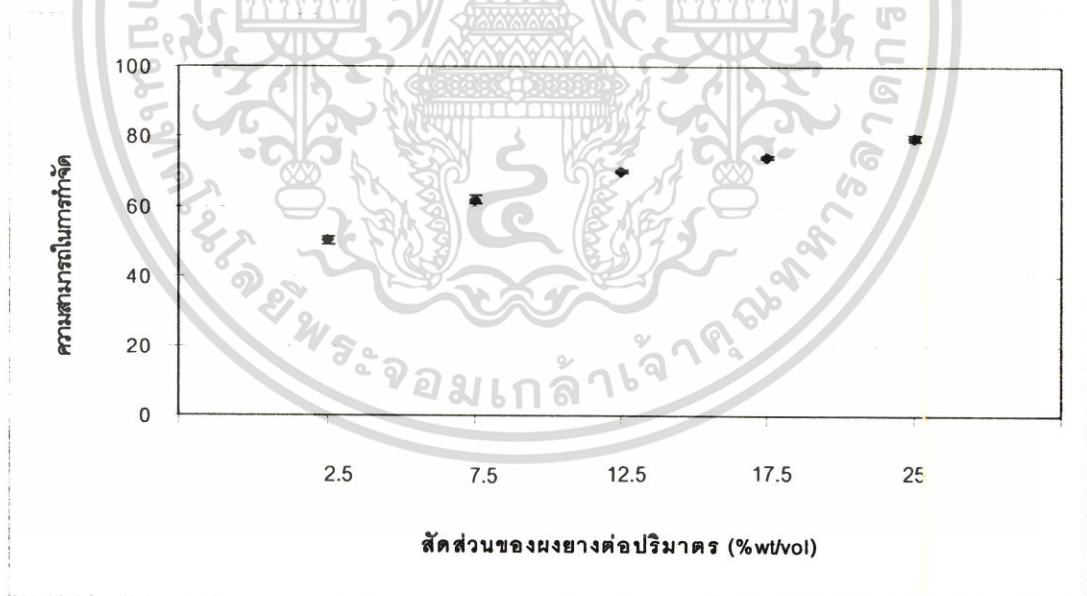
รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพการกำจัดฟีนอล (%) โดยใช้ผงยางรถยนต์ที่ระยะเวลาสั้มผัสต่าง ๆ

จากผลการทดลองพบว่า ความสามารถในการกำจัดฟีนอลเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น และเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 3 ชั่วโมง ระยะเวลาในการเขย่าที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองคือที่เวลา 3 ชั่วโมง ซึ่งสามารถกำจัดฟีนอลได้เฉลี่ยคือ ร้อยละ 64.61 (± 2.34)

4.2.5 ผลการศึกษาปริมาณของผงยางรถยนต์

จากการศึกษาปริมาณผงยางรถยนต์ในการดูดซับฟีนอล มีสัดส่วนของผงยางรถยนต์ต่อปริมาตรของสารละลายฟีนอล 2.5, 7.5, 12.5, 17.5 และ 25.0 เปอร์เซ็นต์กรัมต่อปริมาตร (% wt/vol) (ใช้ผงยางรถยนต์ 1, 3, 5, 7 และ 10 กรัม ตามลำดับ ต่อสารละลายฟีนอลประมาณ 40 มิลลิลิตร) โดยใช้ฟีนอลที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 39 มิลลิลิตร สารละลายฟีนอลพีเอชเท่ากับ 7 ความเร็วรอบในการเขย่า 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.8 (ตารางผนวก จ-7 ภาคผนวก จ)

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อปริมาณของผงยางรถยนต์เพิ่มมากขึ้น ความสามารถในการกำจัดฟีนอลจะเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณของตัวดูดซับมีมากขึ้นนั่นเอง พบว่าความสามารถในการกำจัดฟีนอลได้ดีคือ สัดส่วนน้ำหนักของผงยางต่อปริมาตรของฟีนอลเท่ากับร้อยละ 25 น้ำหนักต่อปริมาตร มีความสามารถในการกำจัดฟีนอลได้ร้อยละ 79.53 (± 0.78)



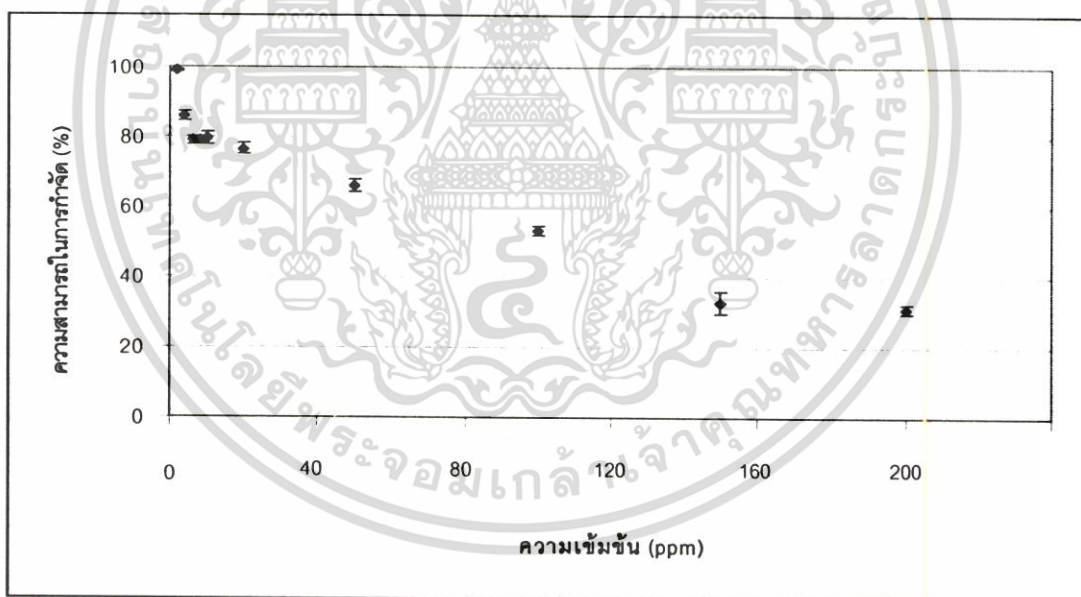
รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอล (%) โดยใช้ผงยางรถยนต์ที่สัดส่วนของผงยางรถยนต์ต่าง ๆ

4.2.6 ผลการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายฟีนอล ไอโซเทอร์ม และจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

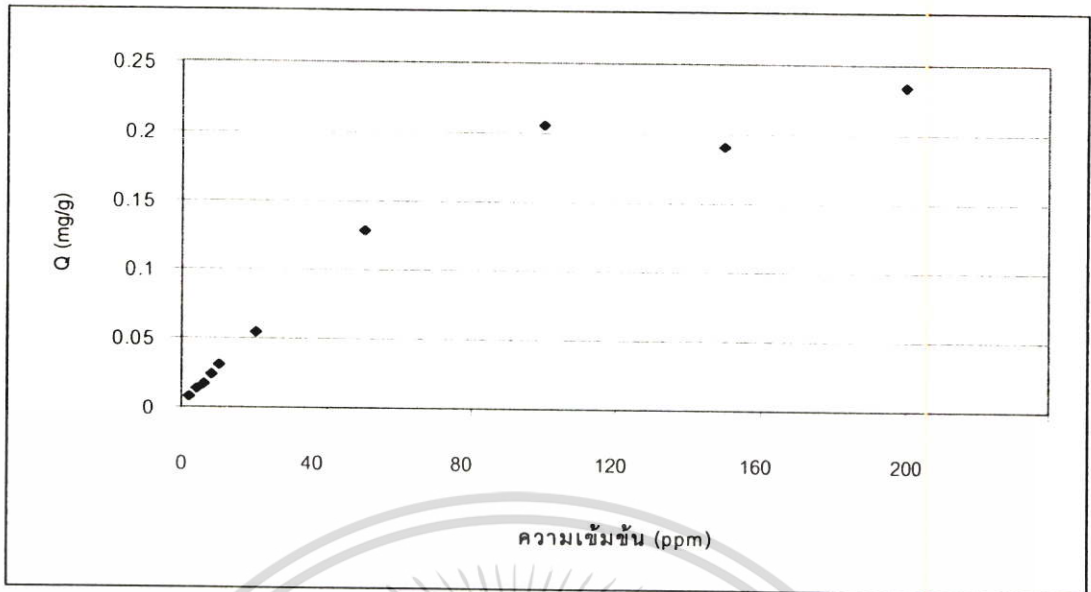
4.2.6.1 ผลการศึกษาความเข้มข้นของฟีนอล

จากการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลที่ความเข้มข้น 2, 4, 6, 8, 10, 20, 50, 100, 150 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 7 (ใช้สัดส่วนผงยางรถยนต์ต่อปริมาตรสารละลายฟีนอลร้อยละ 25 น้ำหนักต่อปริมาตร) ความเร็วรอบในการเขย่า 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.9 (ตารางผนวก จ-8 ภาคผนวก จ)

จากผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดฟีนอลจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และจะเริ่มคงที่เมื่อความเข้มข้นของฟีนอลเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และเริ่มลดลงอีกจนกระทั่งที่ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตรมีความสามารถในการกำจัดเพียงร้อยละ 30.99 (± 1.328) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลสูงขึ้นทำให้ผงยางดูดซับฟีนอลไว้นิ่มตัวแล้วจึงดูดซับฟีนอลได้ลดลง ในรูปที่ 4.10 แสดงปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักของผงยางรถยนต์



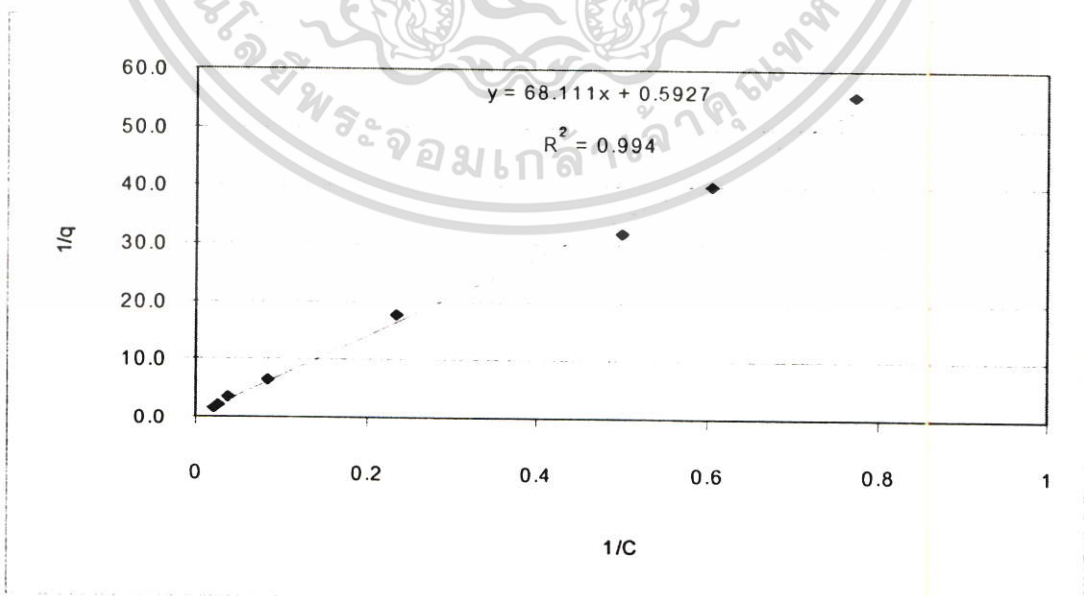
รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพการกำจัดฟีนอล (%) โดยผงยางรถยนต์ที่ความเข้มข้นของฟีนอลต่าง ๆ



รูปที่ 4.10 ปริมาณของฟินอลต่อน้ำหนักของผงยางรถยนต์

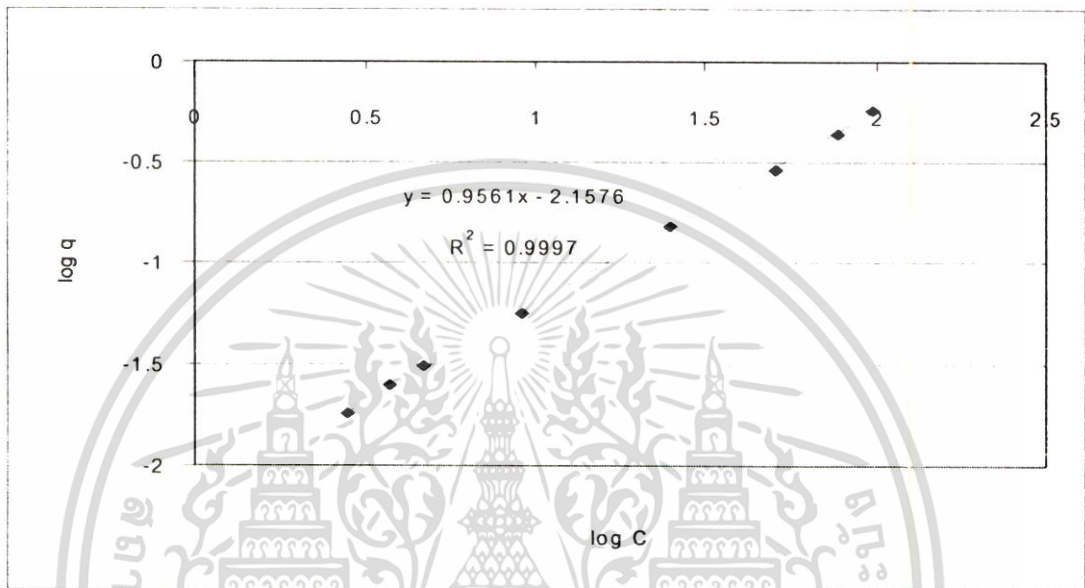
4.2.6.2 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ

จากการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของฟินอล โดยแปรค่าความเข้มข้นของฟินอล ตั้งแต่ 6, 8, 10, 20, 50, 100, 150 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 39 มิลลิลิตร พีเอชเท่ากับ 7 ความเร็วรอบของการเขย่า 250 รอบต่อนาที นาน 3 ชั่วโมง ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองที่ได้นำมาทดสอบไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm) และแบบฟรุนดลิช (Freundlich Isotherm) แสดงดังรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12 ตามลำดับ (ตารางผนวก จ-9 และตารางผนวก จ-10 ภาคผนวก จ)



รูปที่ 4.11 กราฟแลงเมียร์ไอโซเทอร์มของการดูดซับฟินอลโดยผงยางรถยนต์

จากรูปที่ 4.11 กราฟไอโซเทอร์มแลงเมียร์ สามารถหาค่าคงที่ q_m และ K ได้จากจุดตัดแกน y และค่าความชันของกราฟสมการเส้นตรงตามลำดับ ซึ่งสมการแลงเมียร์ไอโซเทอร์มของการดูดซับฟีนอลโดยใช้ผงยางรถยนต์ขนาด 30-40 เมช คือ $y = 68.111X + 0.5927$ มีค่า R^2 เท่ากับ 0.994 ค่าปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่สภาวะอิ่มตัว (q_m) เท่ากับ 1.69 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีค่าคงที่สมดุลในการดูดซับ (K) เท่ากับ 0.009



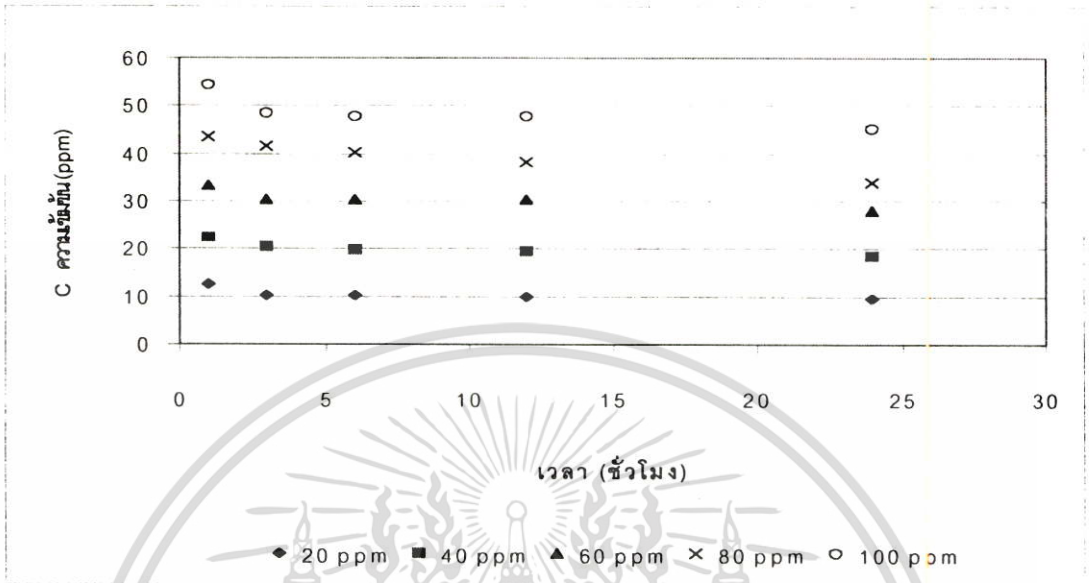
รูปที่ 4.12 กราฟฟรุนดิชไอโซเทอร์มของการดูดซับ โดยผงยางรถยนต์

จากรูปที่ 4.12 กราฟไอโซเทอร์มฟรุนดิช สามารถหาค่าคงที่ $1/n$ และ K ได้จากจุดตัดแกน y และค่าความชันของกราฟสมการเส้นตรง ตามลำดับ ซึ่งสมการฟรุนดิชไอโซเทอร์มของการดูดซับฟีนอลโดยใช้ผงยางรถยนต์ขนาด 30-40 เมช คือ $y = 0.9561X - 2.1576$ มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9997 ค่าคงที่สมดุลในการดูดซับ (K) เท่ากับ 0.007 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลาย ($1/n$) เท่ากับ 0.956 จากการทดลองพบว่าไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นทั้งแบบแลงเมียร์และแบบฟรุนดิช นั่นคือสารละลายฟีนอลจะถูกดูดซับบนผิวยางรถยนต์โดยเรียงตัวชั้นเดียว และพื้นผิวบางส่วนจะมีความสามารถในการดูดซับฟีนอลได้เท่ากัน และพื้นผิวบางส่วนจะมีความสามารถในการดูดซับฟีนอลไม่เท่ากัน ทั้งนี้เพราะพื้นผิวเป็น Heterogeneous surface ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบต่าง ๆ กันดังแสดงในตารางที่ 2.4 (บทที่ 2)

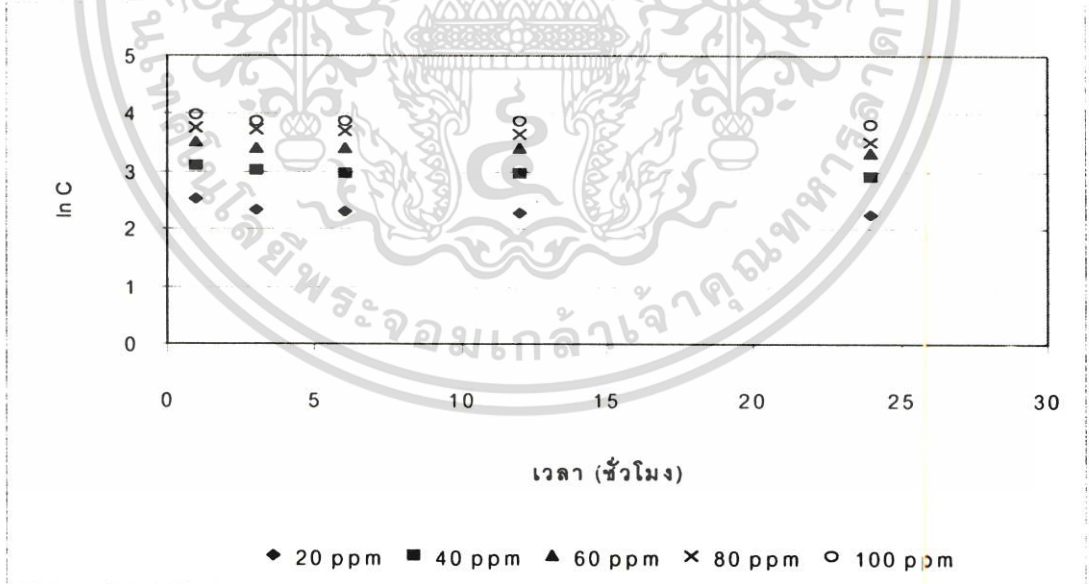
4.2.6.3 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์

จากการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับของฟีนอล โดยแปรค่าความเข้มข้นของฟีนอล ตั้งแต่ 20, 40, 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 39 มิลลิลิตร พีเอชเท่ากับ 7 ความเร็วรอบ

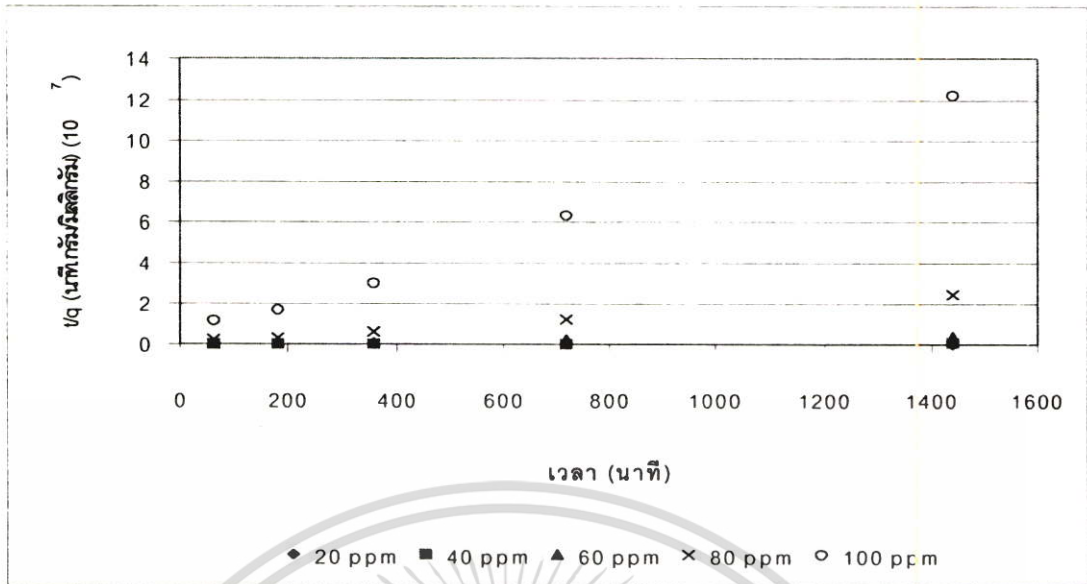
ของการเขย่า 250 รอบต่อนาที นาน 1, 3, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง ผลที่ได้จากการทดลองนำมาศึกษา
 อันดับของปฏิกิริยาในการกำจัดฟีนอลดังรูปที่ 4.13 ถึง 4.15 (ตารางผนวก จ-11 ภาคผนวก จ)



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาอันดับศูนย์



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาอันดับสอง

จากการศึกษาอันดับปฏิกิริยา พบว่าอันดับของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาอันดับสองดังรูปที่ 4.15 แสดงว่าความสามารถในการดูดซับจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของฟินอล โดยที่ความเข้มข้นของฟินอลเพิ่มมากขึ้น จะทำให้เกิดปฏิกิริยาการดูดซับได้เร็วขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะขบวนการบวมตัวของฟินอลและสารอนุพันธ์ฟินอลสามารถเชื่อมโยงโครงสร้างของยางทำให้เปลี่ยนโครงสร้างแบบสายโซ่ตรงเป็นโครงสร้างแบบร่างแหสามมิติได้ทำให้สามารถดูดซับได้เพิ่มขึ้น ค่าคงที่ต่าง ๆ ของปฏิกิริยาอันดับสองได้จากสมการ 2.16 โดยค่า q_c คือจุดตัดแกน y และค่า K_2 สามารถหาได้จากความชันของกราฟเส้นตรง ดังแสดงในตารางที่ 4.4

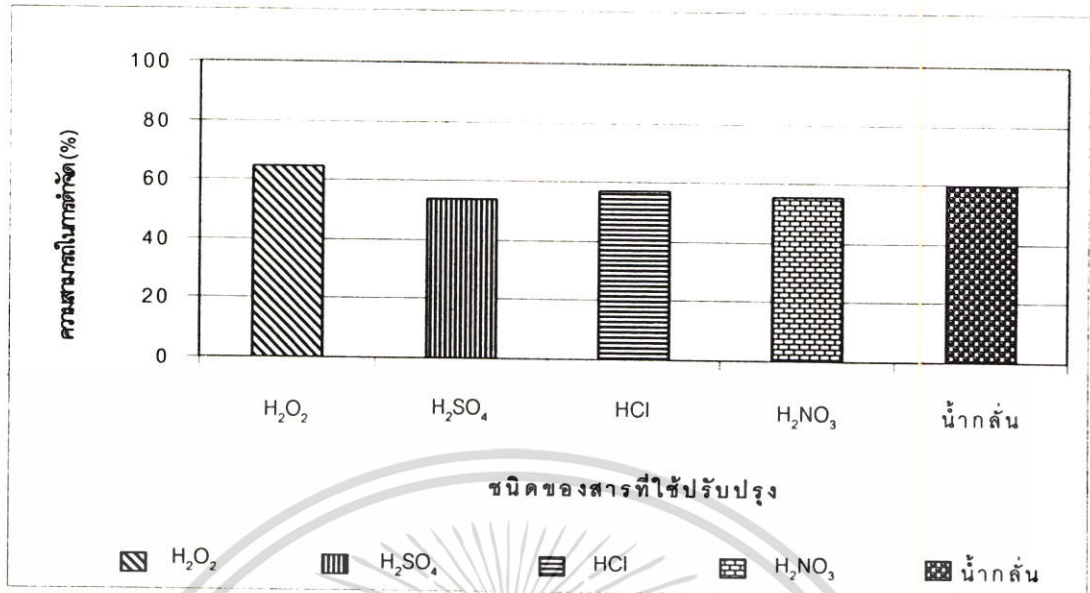
ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่ต่าง ๆ ของปฏิกิริยาอันดับสอง

ความเข้มข้น (ppm)	R^2	q_c	K_2
20	0.9996	62.212	24.811
40	0.9990	2255.4	307.89
60	0.9975	15747	26715
80	0.9981	422299	16542
100	0.9975	3000000	82063

4.3 ผลการศึกษาผองยางรถยนต์ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารเคมีชนิดต่าง ๆ

ผลการศึกษากำจัดฟีนอลโดยใช้ผองยางรถยนต์ปรับปรุงพื้นผิวโดยการแช่ใน H_2O_2 , H_2SO_4 , HCl , HNO_3 และน้ำกลั่น แช่เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นทุกวันจนอยู่ในสภาวะเป็นกลาง (ประมาณ 2 สัปดาห์) และอบแห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ใช้ผองยางที่ปรับปรุงพื้นผิวดูดซับ ปริมาณ 5 กรัม ฟีนอลที่มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 39 มิลลิลิตร สารละลายฟีนอลพีเอชเท่ากับ 7 ความเร็วรอบในการเขย่า 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.16 (ตารางผนวก จ-14 ภาคผนวก จ)

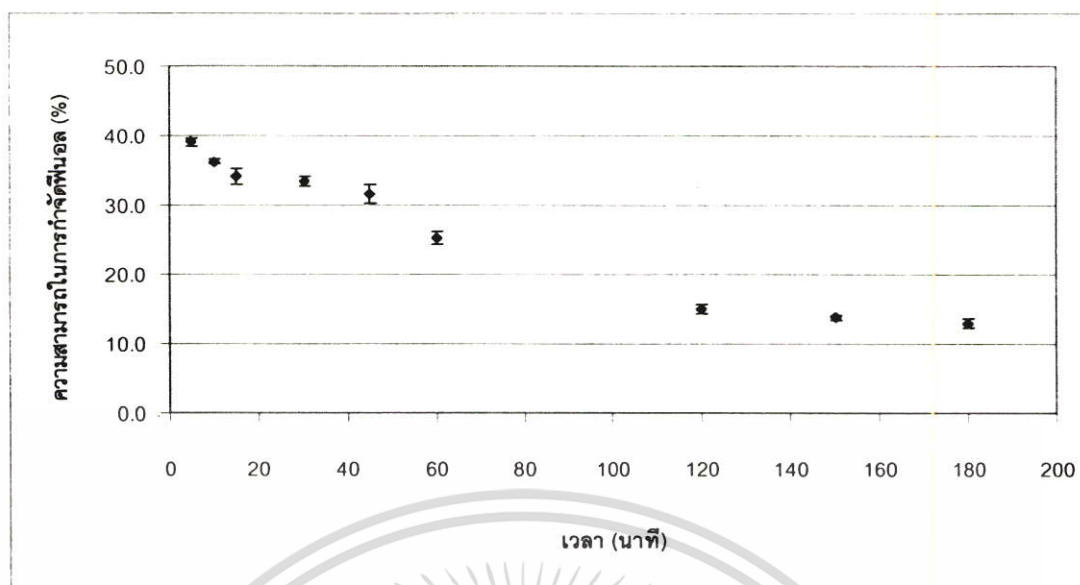
จากผลการทดลองจะเห็นว่าผองยางที่ผ่านการปรับปรุงด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะมีความสามารถในการกำจัดฟีนอลได้ดีกว่าไม่ปรับปรุงเล็กน้อยคือกำจัดฟีนอลได้ร้อยละ 64.52 (± 0.59) ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์องค์ประกอบของผองยางรถยนต์จากเครื่องเอนเนอร์จีดีสเพอร์ซีฟสเปกโตรมิเตอร์ (ตารางที่ 4.2) ที่พบว่าการปรับปรุงด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบสูงกว่าผองยางที่ล้างด้วยน้ำกลั่นเพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงผองยางด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทำให้พื้นที่เพิ่มขึ้นกว่าเดิมมาก แต่การออกซิไดซ์โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จะไปทำลายโครงสร้างของผองยางทำให้การดูดซับฟีนอลไม่เพิ่มขึ้นตามพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้น การปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดซัลฟูริก กรดไฮโดรคลอริก และกรดไนตริก จะมีความสามารถในการกำจัดฟีนอลใกล้เคียงกันกับการล้างพื้นผิวด้วยน้ำกลั่น (รูปที่ 4.16) ถึงแม้ว่าพื้นผิวสัมผัสของผองยางที่ปรับปรุงสภาพด้วยกรดไนตริกจะเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 4.1) แต่โครงสร้างของยางถูกทำลายโดยการเกิดการเสื่อมสภาพแบบเชื่อมโยงทำให้โครงสร้างยึดจับกันแน่นขึ้น ผิวยางแข็ง และเปราะ ทำให้สารละลายฟีนอลไม่สามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างระหว่างโครงสร้างของผองยางได้ทำให้ความสามารถในการดูดซับฟีนอลไม่เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงเลือกยางที่ล้างด้วยน้ำกลั่นเพราะไม่เปลืองสารเคมี และไม่เกิดของเสียจากการปรับปรุง



รูปที่ 4.16 ประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอล (%) โดยใช้ผงยางรถยนต์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว โดยใช้กรดต่าง ๆ

4.4 ผลจากการศึกษาความสามารถในการกำจัดฟีนอลโดยบรรจุผงยางรถยนต์ในคอลัมน์

ผลจากการศึกษาความสามารถในการกำจัดฟีนอลโดยบรรจุผงยางรถยนต์ในคอลัมน์ โดยใช้ฟีนอลที่มีความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร (เนื่องจากผลการทดลองแบบครึ่งพบว่ายังสามารถกำจัดฟีนอล ได้คงที่ ช่วง 10-200 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของน้ำเสียจากโรงงานปิโตรเคมี มีความเข้มข้นของฟีนอล 20-200 มิลลิกรัมต่อลิตร) โดยคอลัมน์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร และยาว 25 เซนติเมตร บรรจุผงยางรถยนต์ปริมาณ 15 กรัม มีอัตราการไหลเท่ากับ 1 มิลลิลิตรต่อนาที เนื่องจากส่วนใหญ่เศษชิ้นส่วนของยางรถยนต์จะถูกนำไปใช้ในการทำเป็น Passive treatment walls ในหลุมฝังกลบ (Landfill) ผลจากการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.17 (ตารางผนวก จ-15 ภาคผนวก จ)



รูปที่ 4.17 ประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอล (%) โดยใช้ผงยางรถยนต์ขนาด 30-40 เมช โดยทำการทดลองแบบคอลัมน์

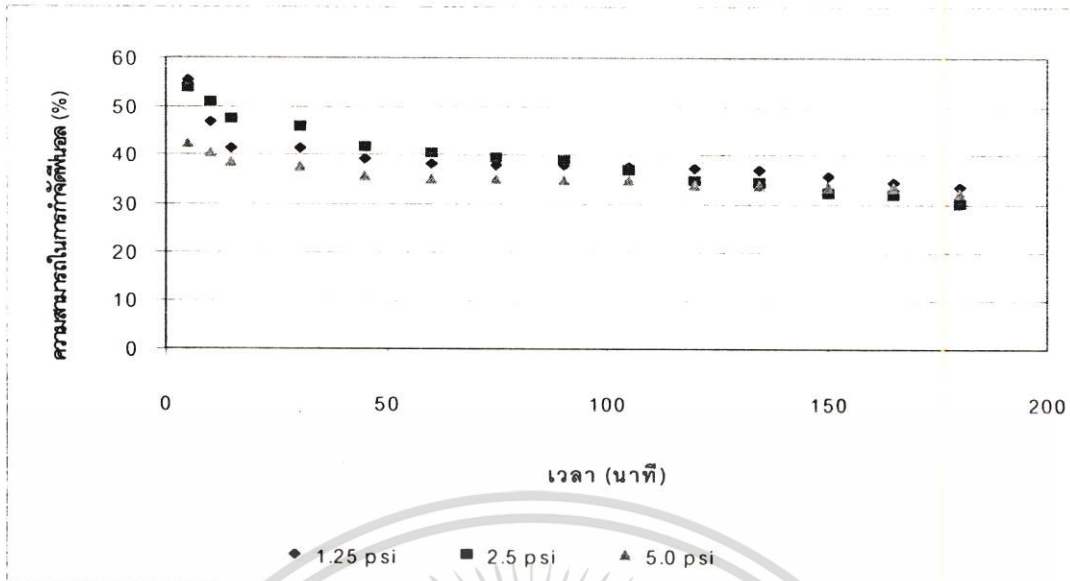
จากรูปที่ 4.17 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดฟีนอลได้ประมาณร้อยละ 39.03 ใน 5 นาทีแรก และจะลดลงและเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 120 นาที โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 14.93 ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์ผ่านคอลัมน์เกิดการไหลผ่านเป็นช่อง ทำให้กำจัดฟีนอลได้ไม่ดี เนื่องจากสารละลายฟีนอลสัมผัสกับผงยางรถยนต์เพียงบางส่วนในคอลัมน์และระยะเวลาสัมผัสในการดูดซับลดลง การไหลเป็นช่องนั้นอาจเป็นเพราะผงยางมีรูปร่างต่าง ๆ กันของผงยางทำให้ไม่สามารถจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบในการเพ็คคอลัมน์

4.5 ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับฟีนอลโดยใช้ท่อน้ำซิมที่ทำจากผงยางรถยนต์

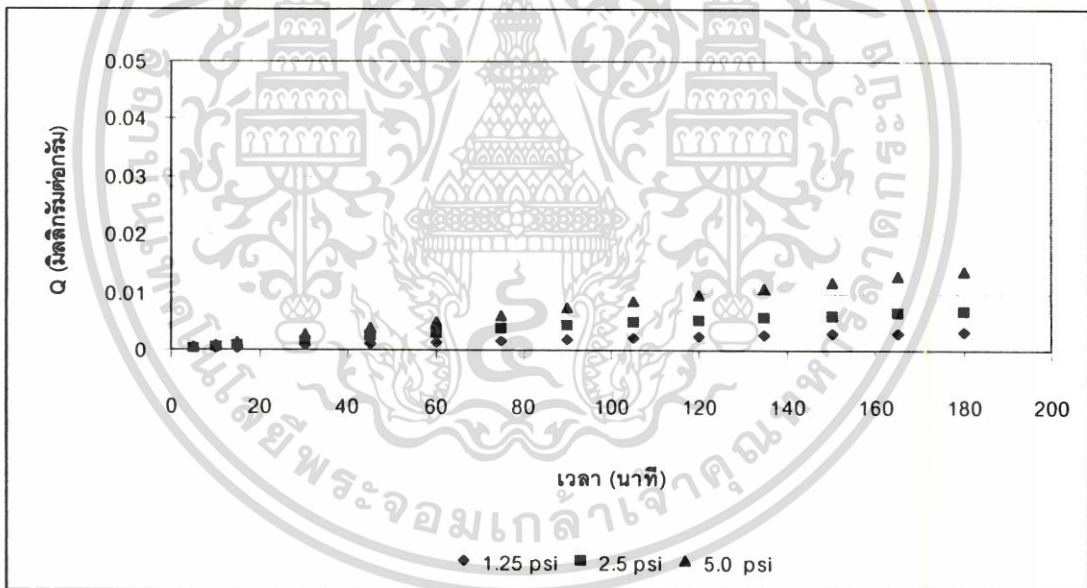
เนื่องจากการลอบตัวของผงยางรถยนต์ทำให้สามารถกำจัดฟีนอลได้น้อย นอกจากนี้ยังหลุดติดออกไปกับน้ำเสียสังเคราะห์บางส่วน ดังนั้นเพื่อสะดวกในการใช้งานจึงได้คิดปรับปรุงทำท่อน้ำซิมเพื่อใช้ในการดูดซับฟีนอล

4.5.1 ผลการศึกษาความดันที่เหมาะสมในการกำจัดฟีนอล

จากการศึกษานำท่อน้ำซิมที่ทำจากผงยางรถยนต์มากำจัดฟีนอล โดยใช้ความดันที่ได้จากการปรับความดันในถังก๊าซไนโตรเจน ที่ความดัน 1.25, 2.5 และ 5.0 psi ที่ระยะเวลาต่าง ๆ ได้แก่ 5, 10, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150, 165 และ 180 นาทีซึ่งผลที่ได้จากการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.18 (ตารางผนวก จ-16 ถึงตารางผนวก จ-18 ภาคผนวก จ)



รูปที่ 4.18 ความสามารถในการกำจัดฟีนอล (%) ที่ระยะเวลาต่าง ๆ เมื่อใช้ความดัน 1.25, 2.5 และ 5.0 psi



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของฟีนอลที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของท่อน้ำซึมและความยาวท่อ เมื่อใช้ความดัน 1.25, 2.5 และ 5.0 psi

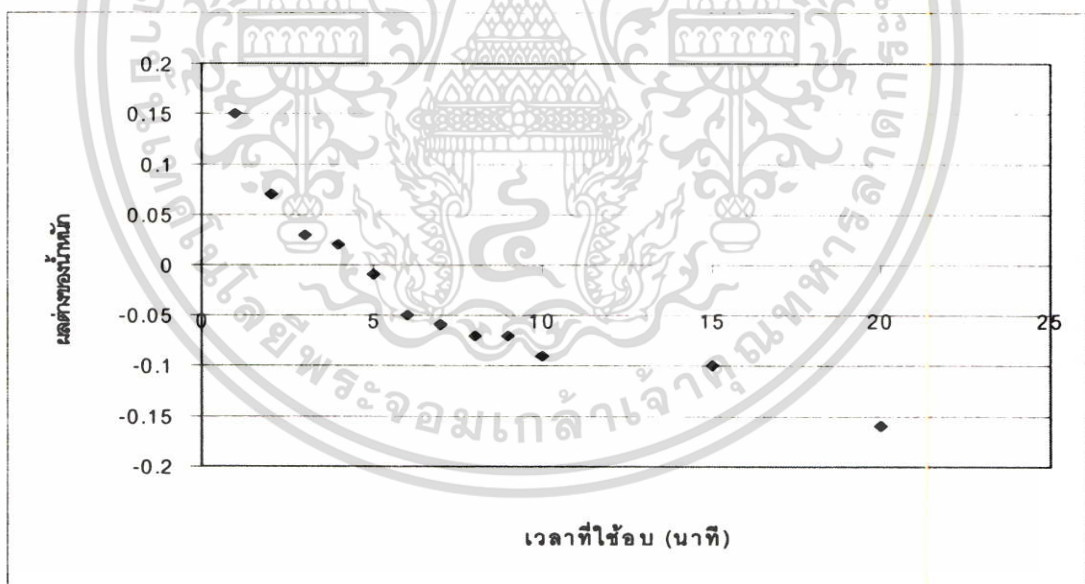
จากรูปที่ 4.18 และรูปที่ 4.19 พบว่าความสามารถในการกำจัดฟีนอล (%) ที่ความดัน 1.25 psi มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอลได้น้อยกว่าที่ความดัน 2.5 psi ในระยะแรกเมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที ความสามารถในการกำจัดฟีนอลที่ความดัน 1.25 psi จะดีกว่าที่ 2.5 psi ทั้งนี้ที่ความดัน 1.25 psi น้ำซึมผ่านออกจากท่อน้ำซึมได้บริเวณปลายท่อเท่านั้น ส่วนที่ความดัน 2.5 psi น้ำสามารถไหลผ่านได้ตลอดแนวท่อ ทำให้พื้นผิวสัมผัสมากจึงกำจัดฟีนอลได้ดีกว่า ส่วนที่ความดัน 5.0 psi มี

ประสิทธิภาพการกำจัดได้น้อยกว่าที่ 1.25 และ 2.5 psi ในระยะแรกทั้งนี้เป็เพราะน้ำมีอัตราการซึมผ่านเร็วทำให้มีเวลาในการสัมผัสน้อย อย่างไรก็ตามเมื่อเวลาผ่านไป 60 นาที ความสามารถในการกำจัดฟีนอลที่ระดับความดันทั้งสามจะคงที่และมีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เพราะท่อน้ำซึมเริ่มหมดประสิทธิภาพ

4.5.2 ผลการศึกษาระยะเวลาในการรีเจเนอเรชันท่อน้ำซึม

เนื่องจากฟีนอลเป็นสารอินทรีย์ที่ระเหยง่ายและถูกดูดซับอยู่ในท่อน้ำซึม ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่จะทำรีเจเนอเรชันท่อน้ำซึมเพื่อความคุ้มค่า และเป็นการใช้ประโยชน์จากท่อน้ำซึมสูงสุด ทั้งนี้อุณหภูมิที่ใช้ในการรีเจเนอเรชันอยู่ในช่วง 182 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นจุดเดือดของฟีนอลคาดว่าไม่น่าจะทำให้คุณสมบัติของท่อน้ำซึมเสียไป

ผลจากการศึกษาการรีเจเนอเรชันโดยการนำท่อน้ำซึมที่ยังไม่ได้ใช้งานไปซังน้ำหนัก จากนั้นนำไปแช่ในสารละลายฟีนอลความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยอบที่อุณหภูมิ 182 องศาเซลเซียสที่ระยะเวลาต่าง ๆ ได้แก่ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15 และ 20 นาที เพื่อให้ฟีนอลระเหยออกไปจากนั้นนำไปซังน้ำหนักหลังอบ และหาค่าผลต่างของน้ำหนักก่อนและหลังอบดังรูปที่ 4.20 (ตารางผนวก จ-13 ภาคผนวก จ)

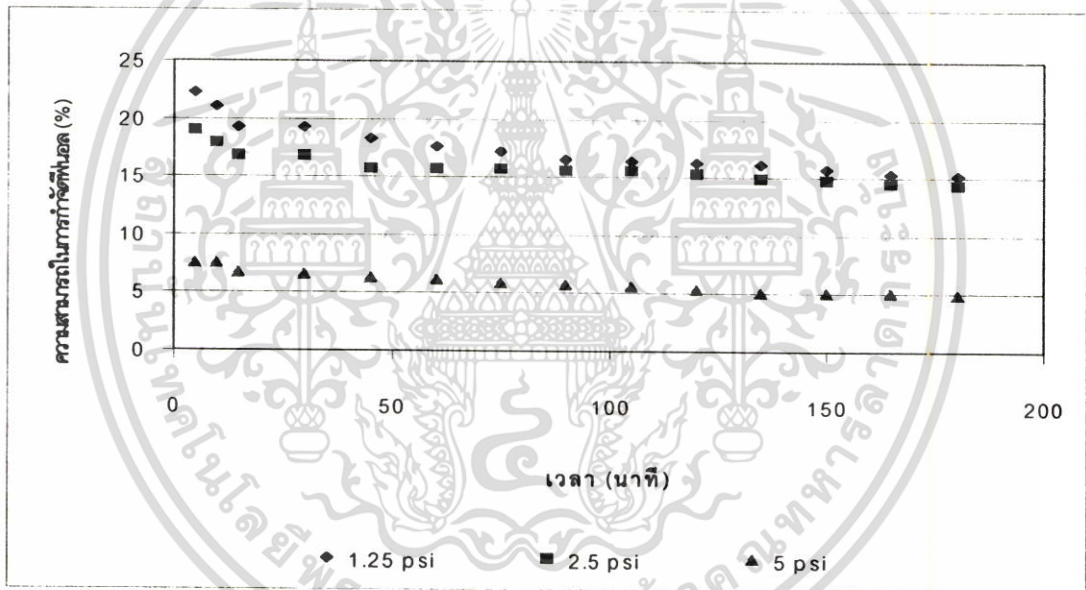


รูปที่ 4.20 ระยะเวลาที่ใช้อบท่อน้ำซึม และผลต่างของน้ำหนักก่อนและหลังอบของท่อน้ำซึม

จากรูปจะเห็นว่าที่ระยะเวลา 4 และ 5 นาที ผลต่างของน้ำหนักของท่อน้ำซึมจะมีค่าเท่ากับ +0.02 และ -0.01 กรัม ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับศูนย์แสดงว่าสารละลายฟีนอลระเหยออกไปจากท่อน้ำซึมได้เกือบหมดหรือทั้งหมด ดังนั้น ในการรีเจนเนอเรชันท่อน้ำซึม จึงใช้ระยะเวลาในการอบ 5 นาที ซึ่งมีผลต่างของน้ำหนักท่อน้ำซึมก่อนและหลังอบใกล้เคียงกับศูนย์มากที่สุด

4.5.3 ผลการศึกษาความสามารถในการนำท่อน้ำซึมกลับมาใช้ใหม่

จากการศึกษาความสามารถในการกำจัดฟีนอลโดยใช้ท่อน้ำซึมที่หมดประสิทธิภาพไปผ่านการรีเจนเนอเรชัน โดยการอบท่อน้ำซึมที่ 182 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาทีและนำไปกำจัดฟีนอลที่มีความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ความดันจากการปรับความดันในถังก๊าซไนโตรเจน ที่ความดัน 1.25, 2.5 และ 5.0 psi ที่ระยะเวลาต่าง ๆ ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.21 (ตารางผนวก จ-19 ถึงตารางผนวก จ-21 ภาคผนวก จ)



รูปที่ 4.21 ความสามารถในการกำจัดฟีนอล (%) ที่ระยะเวลาต่าง ๆ โดยท่อน้ำซึมที่ใช้ผ่านการรีเจนเนอเรชัน และใช้ความดัน 1.25, 2.5 และ 5.0 psi

จากรูปจะเห็นว่าความสามารถในการกำจัดฟีนอลที่ความดัน 1.25 และ 2.5 psi มีความสามารถในการกำจัดฟีนอลได้ลดลงคือสามารถกำจัดได้สูงสุดร้อยละ 22.30 (± 1.00) และ 18.98 (± 1.13) ตามลำดับ เมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที จากนั้นความสามารถในการกำจัดก็จะลดลงจนความสามารถในการกำจัดเริ่มคงที่ และเมื่อเวลา 180 นาที ความสามารถในการกำจัดลดลงเหลือร้อยละ 15.22 (± 1.46) และ 14.39 (± 0.00) ตามลำดับ

ส่วนที่ความ 5.0 psi มีความสามารถในการกำจัดได้ต่ำสุดคือ เมื่อเวลา 5 นาที มีความสามารถในการกำจัดได้ร้อยละ 7.57 (± 1.10) จนถึงระยะเวลาหนึ่งความสามารถในการกำจัด

เริ่มคงที่ เมื่อเวลาผ่านไป 180 นาที คือมีความสามารถในการกำจัดได้เพียงร้อยละ $4.92 (\pm 1.69)$ ทั้งนี้เนื่องจากความร้อนที่ใช้ในการกำจัดฟีนอลในการทำรีเจนเนอเรชันทำให้ผงยางเสื่อมสภาพ จึงอาจทำให้เกิดช่องว่างระหว่างผงยางกว้างขึ้น ซึ่งเห็นได้จากอัตราการซึมผ่านผนังท่อของสารละลายฟีนอลที่เพิ่มขึ้นหลังการรีเจนเนอเรชันมีอัตราการซึมผ่านผนังท่อน้ำซึมเพิ่มขึ้น นั่นคืออัตราการซึมผ่านผนังท่อน้ำซึมของสารละลายฟีนอลที่ความดัน 1.25 psi มีอัตราการไหลซึมเฉลี่ยเท่ากับ 10.5 มิลลิลิตรต่อนาที ที่ความดัน 2.5 psi มีอัตราการไหลซึมเฉลี่ยเท่ากับ 20 มิลลิลิตรต่อนาที และที่ความดัน 5.0 psi มีอัตราการไหลซึมเฉลี่ยเท่ากับ 58 มิลลิลิตรต่อนาที จึงทำให้ความสามารถในการกำจัดฟีนอลลดลง



บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ผลการทดลองการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ของฟีนอล โดยทำการทดลองแบบครั้ง และแบบ คอลัมน์ สามารถสรุปผลต่าง ๆ ได้ดังนี้

-ขนาดของผงบายรยชนิดที่เหมาะสมในการกำจัดฟีนอลพบว่าผงบายรยชนิดขนาด 30-40 เมช มีความสามารถในการกำจัดฟีนอลเฉลี่ยได้ร้อยละ 53.56 (± 1.61)

-ผลพีเอชของสารละลายฟีนอลที่เหมาะสม โดยพีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 5-9 ที่พีเอช 5 มีค่าความสามารถในการกำจัดฟีนอลเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 50.91 (± 4.61) พีเอช 7 มีความสามารถในการกำจัดฟีนอลเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 53.72 (± 1.66) และพีเอช 9 มีค่าความสามารถในการกำจัดฟีนอลเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 54.94 (± 2.54) ซึ่งพีเอชในช่วงดังกล่าวมีค่าพีเอชเท่ากับค่าพีเอชในน้ำทิ้งจากโรงงานปิโตรเคมี ดังนั้น จึงไม่จำเป็นต้องปรับพีเอชของสารละลาย การศึกษาผลของความเร็รรอบในการเขย่า พบว่าความเร็รรอบในการเขย่าที่เหมาะสมในการกำจัดฟีนอลคือที่ความเร็รรอบ 250 รอบต่อนาที โดยความสามารถในการกำจัดฟีนอลเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 54.77 (± 1.37) การศึกษาระยะเวลาในการเขย่า โดยหาระยะเวลาที่เหมาะสมต่อความสามารถในการกำจัดฟีนอล พบว่าระยะเวลาที่เหมาะสมในการเขย่าคือ 3 ชั่วโมง ซึ่งมีความสามารถในการกำจัดฟีนอลได้สูงสุดคือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 64.61 (± 2.34) การศึกษาสัดส่วนของผงบายรยชนิดต่อปริมาตรของสารละลายฟีนอล พบว่าเมื่อปริมาณของผงบายรยชนิดเพิ่มมากขึ้น ความสามารถในการกำจัดฟีนอลจะเพิ่มมากขึ้น ซึ่งพบว่าสัดส่วนน้ำหนักของผงบายรยต่อปริมาตรของฟีนอลเท่ากับ 25 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักต่อปริมาตร มีความสามารถในการกำจัดฟีนอลเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 79.53 (± 0.78) การศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลต่อความสามารถในการกำจัดฟีนอล พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้น ความสามารถในการกำจัดฟีนอลจะเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะผงบายรยเกิดการบวมตัว

-ไอโซเทอร์มการดูดซับของฟีนอลเป็นแบบแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม และแบบฟรุนดลิช ไอโซเทอร์ม โดยค่าคงที่ต่าง ๆ จากแบบจำลองของแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม มีสมการคือ $y = 68.111X + 0.5927$ มีค่า R^2 เท่ากับ 0.994 มีค่าปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่สภาวะอิ่มตัว (q_m) เท่ากับ 1.69 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีค่าคงที่สมดุลในการดูดซับ (K) เท่ากับ 0.009 ส่วนแบบจำลองของฟรุนดลิชไอโซเทอร์มมีสมการคือ $y = 0.9561X - 2.1576$ มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9997 ค่าคงที่สมดุลในการดูดซับ (K) เท่ากับ 0.007 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลาย ($1/n$) เท่ากับ 0.956

-จลนพลศาสตร์การดูดซับของฟีนอลเป็นปฏิกิริยาอันดับสอง โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเร็วขึ้นเมื่อความเข้มข้นของฟีนอลเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะยางเกิดการบวมตัวของยางรถยนต์

-ความสามารถในการกำจัดฟีนอลของผงยางรถยนต์ที่ผ่านการปรับปรุง โดยใช้สารใน H_2O_2 37%, H_2SO_4 98%, HCl 37%, HNO_3 97% และน้ำกลั่น พบว่าผงยางรถยนต์ที่ผ่านการปรับปรุง และไม่มีกรปรับปรุง มีความสามารถในการกำจัดฟีนอลได้ใกล้เคียงกัน ดังนั้น จึงไม่จำเป็นต้องปรับปรุงพื้นผิวของยาง

-ความสามารถในการกำจัดฟีนอลโดยบรรจุผงยางรถยนต์ในคอลัมน์ พบว่าความสามารถในการกำจัดฟีนอลเฉลี่ยมีค่าเท่ากับร้อยละ 39.02 (± 1.38) ที่เวลาผ่านไป 5 นาที จากนั้นความสามารถในการกำจัดฟีนอลจะเริ่มลดลง ทั้งนี้เพราะเกิดการไหลแบบช่องผ่านคอลัมน์เนื่องจากผงยางมีรูปร่างที่แตกต่างกัน

-ความสามารถในการกำจัดฟีนอลโดยใช้ท่อน้ำซึมที่ทำจากผงยางรถยนต์ที่ความดัน 1.25, 2.5 และ 5.0 psi พบว่าที่ความดัน 1.25 และ 2.5 psi ท่อน้ำซึมที่ทำจากผงยางรถยนต์มีความสามารถในการกำจัดฟีนอลได้ใกล้เคียงกันคือร้อยละ 55.36 (± 0.85) และ 53.75 (± 0.87) ในช่วงเวลา 5 นาทีแรก แต่หลังจากนั้นความสามารถในการกำจัดฟีนอลจะลดลง โดยเมื่อเวลาผ่านไป 180 นาที (3 ชั่วโมง) ความสามารถในการกำจัดฟีนอลของท่อน้ำซึมที่ความดันต่าง ๆ จะใกล้เคียงกันคือสามารถกำจัดฟีนอลได้เพียงร้อยละ 33.5 ถึง 30 เท่านั้น เนื่องจากมีปริมาณฟีนอลที่ถูกดูดซับภายในท่อน้ำซึมเริ่มอิ่มตัว นอกจากนี้ พบว่าเมื่อความดันต่ำจะทำให้อัตราการซึมออกจากท่อน้ำซึมช้า ดังนั้น สารละลายฟีนอลจึงมีการสัมผัสกับท่อน้ำซึมได้มากกว่า จึงทำให้ความสามารถในการกำจัดฟีนอลได้สูงกว่า

-ระยะเวลาในการรีเจนเนอเรชันท่อน้ำซึม ใช้ระยะเวลาในการอบ 5 นาที ที่อุณหภูมิ 182 องศาเซลเซียส พบว่าผลต่างของน้ำหนักท่อน้ำซึมก่อนและหลังอบใกล้เคียงกับศูนย์ นั่นคือสามารถกำจัดฟีนอลได้เกือบหมด เมื่อนำสภาวะที่ได้นี้ไปทำการรีเจนเนอเรตท่อน้ำซึมพบว่า ความสามารถในการกำจัดฟีนอลโดยใช้ท่อน้ำซึมที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันที่ความดัน 1.25 และ 2.5 psi พบว่ามีความสามารถในการกำจัดฟีนอลได้ลดลงคือสามารถกำจัดได้สูงสุดร้อยละ 22.30 (± 1.00) และ

18.98 (± 1.13) ตามลำดับ เมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที จากนั้นความสามารถในการกำจัดก็จะลดลงจนความสามารถในการกำจัดเริ่มคงที่ และเมื่อเวลา 180 นาที ความสามารถในการกำจัดลดลงเหลือร้อยละ 15.22 (± 1.46) และ 14.39 (± 0.00) ตามลำดับ นั่นคือการรีเจนเนอเรตได้ทำลายประสิทธิภาพการดูดซับของท่อน้ำซึม

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรนำผงยางรถยนต์ไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ชนิดอื่น ๆ โดยเฉพาะสารอินทรีย์ที่ไม่มีขั้ว ได้แก่ เบนซีน โทลูอิน เอธิลเบนซีน และไซลีน ทั้งนี้เพราะยางรถยนต์มีคุณสมบัติไม่มีขั้วจึงดูดซับสารละลายไม่มีขั้วได้ดีกว่า อีกทั้งสารอินทรีย์ที่ระเหยง่ายเหล่านี้มีจุดเดือดต่ำกว่าฟีนอล ดังนั้นอาจสามารถรีเจนเนอเรชันผงยางรถยนต์กลับมาใช้ใหม่ได้
2. การทดลองแบบคอลัมน์ควรเพิ่มความยาวของคอลัมน์ และลดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของคอลัมน์ เพื่อเพิ่มระยะเวลาที่สารละลายจะอยู่ในคอลัมน์ (Retention time) เพิ่มจาก 6 นาที เป็น 30 นาที ให้สอดคล้องกับการทดลองแบบครั้ง
3. การศึกษาปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอล โดยใช้ท่อน้ำซึม เช่น ความยาวของท่อ ความหนาของท่อ อัตราส่วนของวัสดุคิบที่ใช้ผลิตท่อ รวมทั้งมีการพัฒนาออกแบบระบบการบำบัดน้ำเสียโดยท่อน้ำซึมแบบต่อเนื่อง หรือหมุนวน
4. ศึกษาวิธีที่เหมาะสมในการรีเจนเนอเรชันท่อน้ำซึมเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่
5. นำท่อน้ำซึมไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานปิโตรเคมี

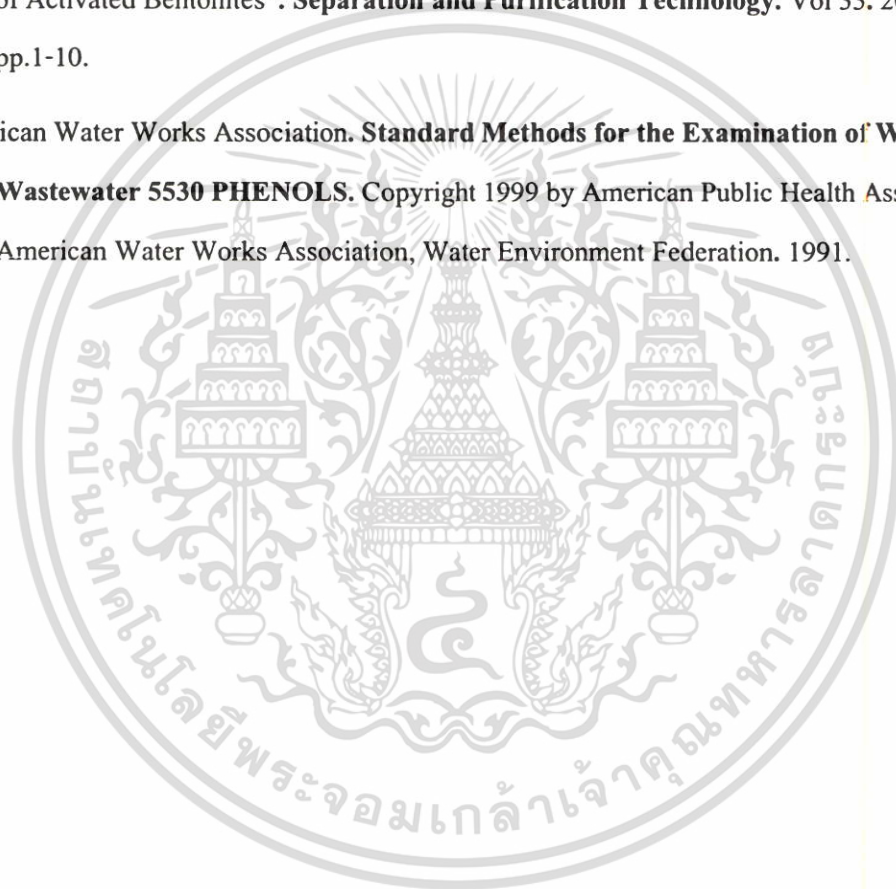
เอกสารอ้างอิง

- [1] Kujawski W., Warszawski A., Ratajczak W., Porcbski T., Capala W. and Ostrowska I..
“Application of Pervaporation and Adsorption to the Phenol Removal from Wastewater”.
Separation Purification Technology. 2004.
- [2] กรมศุลกากร กระทรวงการคลัง. ข้อมูลสถิติการค้าระหว่างประเทศของไทย (2536-2541).
กรุงเทพฯ ๑. 2542.
- [3] กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 3. 2539
- [4] กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม. สถานการณ์มลพิษในรอบ
ทศวรรษ (2532-2542). กรุงเทพฯ ๑. 2543.
- [5] Official Journal of the European. Communities; Council Directive 1999/31/EC on the Landfill
Waste. 1999.
- [6] Ko D.C.C., Mui E.L.K., Lau K.S.T. and McKay G.. “Production of Activated Carbons from
Waste Tire-Process Design and Economical Analysis”. **Waste Management**. 2004.
- [7] [www.http://leeric.lsu.edu](http://leeric.lsu.edu)
- [8] กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม. ฟีนอล. กรุงเทพฯ ๑. บริษัทศรี
เมืองการพิมพ์ จำกัด. 2542.
- [9] Schwarzenbach R.P., Gschwend P.M. and Imboden D.M.. **Environmental Organic Chemistry**.
New York USA.. John Wiley & Sons, inc..1993.
- [10] Lenntech Petrochemical Company //” Kinds of Wastes Generated by Petroleum Refineries”//
[Online] // [www.http://www.lenntech.com](http://www.lenntech.com) // Inter Net.// 2003.
- [11] Hammairni A., Gonzalez F., Ballester A., Blazquez M.L. and Munoz J.A.. “Simultaneous Uptake
of Metals by Activated Sludge.”. **Minerals engineering**. Vol 16. 2003.
pp. 723-729.
- [12] Verschuere K. . **Handbook of Environmental Data on Organic Chemicals**. 3rd Edition.
USA. : Van Nostrand Reinhold. 1996.

- [13] Clayton G.D. and Clayton F.E.. **Patty's Industrial Hygiene and Toxicology, Vol.2B, Toxicology** 3 rd ed.. John Wiley & Sons. New York. 1994.
- [14] U.S.EPA.. **Quality Criteria for Water**. Office of water Regulations and Standards. Washington DC. . 1986.
- [15] มั่นสิน ตัณฑุลเวศน์. **วิศวกรรมประปา เล่ม 2**. กรุงเทพฯ ฯ สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2538.
- [16] อธิธิพล แจ่มชัด. **เอกสารประกอบการสอนวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการยาง**. คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545.
- [17] Amari T., Themelis N.J. and Wernick I.K.. “Resource Recovery from used Rubber Tires”. **Resources Policy**. Vol 25. 1999. pp.179-188.
- [18] สุมนา แจ่มเหมือน. “การผลิตท่อน้ำซึมจากยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์”. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.
- [19] U.S.EPA.. **Markets for Scrap Tires**. Rep. No. EPA/530-SW-90074A. Washington DC. . 1991.
- [20] Scrap Tire Management Council (STMC). **Scrap Tire Use/Disposal Study 1996 Update**. STMC Washington DC. . 1997.
- [21] Marakov V.M. and Drozdovski V.F.. “Reprocessing of Tyres and Rubber Waste Recycling from the Rubber Products Industry”. **Ellis Hor Wood**. 1991.
- [22] คณัมพร สวัสดิ์ชุมพล, จงจิตร ลากนิกรชัย และ ฉัตรมณี ขันทอง. “การปรับปรุงสมบัติของท่อน้ำซึมจากผงยางรถยนต์ และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น”. โครงการพิเศษ วิทยาศาสตร์บัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.
- [23] John S.. **Polymer Recycling : Science. Technology and Application**. Chichester, Inc.. 1998.
- [24] Metcalf and Eddy. **Wastewater Engineering Treatment Disposal Reuse**. 3 rd ed.. McGraw-Hill Inc.. New York, U.S.A.. 1991.
- [25] Cooney D.O.. **Adsorption Design for Wastewater Treatment**. Lewis Publishers, U.S.A..1998.

- [26] ต่อพงษ์ กรีธาชาติ. “การลดสีจากน้ำทิ้งที่บำบัดแล้วของโรงงานเยื่อกระดาษโดยกระบวนการดูดซับด้วยแอกติเวตคาร์บอน”. ปรินูญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2544.
- [27] Kim J.Y., Park J.K., Edid T.B. and Jhung J.K.. “Sorption Capacity of Ground Tires for Vapor-Phase Volatile Organic Compounds”. **Volatile Organic Compounds in the Environment**. ASTM STP 1261. W. Wang. J. Schnoor and J. Doi, Eds. American Society for Testing and Materials. 1996. pp.237-244.
- [28] Kershaw D.S. and Pamukcu S.. “Ground rubber : Sorption Media for Ground Water Containing Benzene and O-xylene”. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. 1997. pp.324-334.
- [29] Meng X, Hua Z., Dermatas D., Wang W. and Kua H.Y.. “Immobilization of Mercury (II) in Contaminated Soil with used Tire Rubber”. **Journal of Hazardous Materials**. Vol 57. 1998. pp.231-241.
- [30] Al-Tabbaa A. and Arvinthan T.. “Natural Clay-Shredded Tire Mixtures as Landfill Barrier Materials”. **Waste Management**. Vol 18. 1998. pp. 9-16.
- [31] Gunasekara A.S. ,Donovan J.A. and Xing B.. “Ground Discarded tires Remove Naphthalene, Toluene and Mercury from Water”. **Chemosphere**. Vol.41. 2000. pp.1155-1160.
- [32] Smith C.C., Anderson W.F. and Freewood R.J.. “Evaluation of Shredded Tyre Chips as Sorption Media for Passive Treatment Walls”. **Engineering Geology**. Vol 60. 2001. pp.253-261.
- [33] Vizuet E.M., Garcia A.M., Gisbert A. N., Gonzalez C.F. and Serrano V. G.. “Preparation of Mesoporous and Macroporous Materials from Rubber of Tyre Waste”. **Microporous and Mesoporous Materials**. Vol 67. 2004. pp. 35-41.
- [34] เบญจวรรณ ชนะวรัญวิทย์, พรวิ สุมิตร และอมรวดี ขวโกศล. “การศึกษาท่อน้ำซึมจากผองขางรถยนต์ และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ”. โครงการพิเศษ วิทยาศาสตร์บัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2542.
- [35] ยุทธพงษ์ แซ่ตั้ง และอลงกรณ์ ศิลปชำนาญ. “การปรับปรุงสมบัติของท่อน้ำซึมจากผองขางรถยนต์ และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ”. โครงการพิเศษ วิทยาศาสตร์บัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2543.

- [36] วศิน จิรไพศาลกุล, วัณรา ทรัพย์สุภาพ และอ้ออำไพ ใจบุญ. “การศึกษาท่อน้ำซึมจากขางรีเคลมและผองยางรถยนต์”. โครงการพิเศษ วิทยาศาสตร์บัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2548.
- [37] ประเสริฐ ศรีไพโรจน์. เทคนิคทางเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ. สำนักพิมพ์ประกายพฤษ. 2539.
- [38] อุตารัตน์ ภักดีสุสุข . เอกสารประกอบการสอนวิชา เคมีสิ่งแวดล้อม. คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2546.
- [39] Sameer Al-Asheh, Fawzi Banat, Leena Abu-Aitah. “Adsorption of Phenol using Different Types of Activated Bentonites”. **Separation and Purification Technology**. Vol 33. 2003. pp.1-10.
- [40] American Water Works Association. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 5530 PHENOLS**. Copyright 1999 by American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. 1991.





ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

วิธีการชะละลายผงยางรถยนต์



วิธีการทดสอบการชะละลายแบบ Leachate Extraction Procedure ประกาศกระทรวง
อุตสาหกรรม ฉบับที่ 6

1. การเตรียมน้ำชะละลาย โดยใช้สารละลายกำมะถันและกรดไนตริก ในสัดส่วน 80:20 โดยน้ำหนัก จนค่าพีเอชของส่วนผสมมีค่าเท่ากับ 5 แล้วจึงปรับปริมาตรของของผสมให้อัตราส่วนปริมาตรของน้ำสกัดเป็น 20 เท่า (มิลลิลิตร) ของน้ำหนัก (กรัม) ของตัวอย่าง
2. นำตัวอย่างของยาง (ผวยางขนาด 30-40 เมช, ท่อน้ำซึมที่ทำจากผวยางรถยนต์ และแผ่นยางที่ทำจากผวยางรถยนต์) ปริมาณ 100 กรัม
3. เขย่าบนเครื่องกวนแบบหมุน (Rotary agitator) มีอัตราการหมุน 30 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง
4. กรองสารละลายจากการสกัดด้วยกระดาษกรองที่เส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.6-0.8 ไมครอน
5. นำของเหลวที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์ปชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์



ภาคผนวก ข

การหาพื้นที่ผิวโดยวิธีเมทธีอินบดู



การหาพื้นที่ผิวโดยการดูดซับเมทริลินบลู

1. เตรียมเมทริลินบลูความเข้มข้นต่าง ๆ
2. ชั่งน้ำหนักของผงขางและผงขางที่ผ่านการปรับปรุงและบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน ประมาณ 0.5 กรัม
3. นำสารละลายเมทริลินบลู 100 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่มีผงขางที่ชั่งน้ำหนักแล้ว เขย่าเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่ความเร็วรอบที่เหมาะสม (250 รอบต่อนาที) จากนั้นทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง
4. นำไปกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1
5. วัดด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร
6. นำค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ไปทำกราฟระหว่าง $1/C$ เป็นแกน x และ $1/Q$ เป็นแกน y นำค่าจุดตัดแกน y โดยค่า $C =$ ความเข้มข้นของเมทริลินบลูที่วัดได้ (มิลลิกรัมต่อลิตร) และ $Q =$ ปริมาณเมทริลินบลูที่ถูกดูดซับ (โมลต่อกรัม)

ไปเข้าสมการ

$$S = YNA$$

โดย $S =$ พื้นที่ผิว (ตารางเมตรต่อกรัม)

$$Y = 1/ \text{จุดตัดแกน } y \text{ ของกราฟ } 1/C \text{ และ } 1/Q$$

$$N = \text{ค่าคงที่ } (6.023 \times 10^{23})$$

$$A = \text{ค่าคงที่ } (1.2 \times 10^{-18})$$

ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์พินอลวิธีมาตรฐาน ASTM



การวิเคราะห์ฟีนอลด้วยเครื่อง Spectrophotometer วิธีมาตรฐาน ASTM [40]

การเตรียมสารเคมีที่ต้องวิเคราะห์

1. Ammonium hydroxide NH_4OH เข้มข้น 0.5 นอร์มอล เตรียมโดย dilute NH_4OH เข้มข้นจำนวน 35 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรให้ได้ 1,000 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น
2. สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (phosphate buffer) โดยละลาย ไดโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (K_2HPO_4) 104.5 กรัม และ โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) 72.3 กรัม ในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรให้ได้ 1 ลิตร และมี pH 6.8
3. สารละลาย 4-aminoantipyrine เตรียมโดยละลาย 4-aminoantipyrine 2.0 กรัม ในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิลิตรในขวดวัดปริมาตร (เตรียมวันต่อวัน)
4. สารละลาย Potassium ferricyanide โดยละลาย $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ 8.0 กรัมในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิลิตรในขวดวัดปริมาตร (เตรียมสัปดาห์ต่อสัปดาห์)

ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Spectrophotometer

1. ทำการเจือจางสารละลายฟีนอลที่ได้จากการทดลอง 10 เท่า ในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร (เนื่องจากวิธีวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Spectrophotometer จะวัดความเข้มข้นของฟีนอลได้ในช่วง 1-5 มิลลิกรัมต่อลิตร)
2. เติม NH_4OH เข้มข้น 0.5 นอร์มอล 2.5 มิลลิลิตร
3. ปรับ pH ให้ได้ 7.9 ± 0.1 ด้วย phosphate buffer
4. เติมสารละลาย 4-aminoantipyrine 1 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน
5. เติม $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ 1 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน
6. ปรับปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ 15 นาที นำสารละลายที่ได้ไปวัดด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ค่าความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร

ภาคผนวก ง

คุณสมบัติทั่วไปของท่อน้ำซึมและการวิเคราะห์องค์ประกอบของผงยางรถยนต์



ตารางผนวก ง-1 สมบัติบางประการของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT:DNT:C-black (50:50:3:20) ที่เวลาการเชื่อมโยง 20 นาที [36]

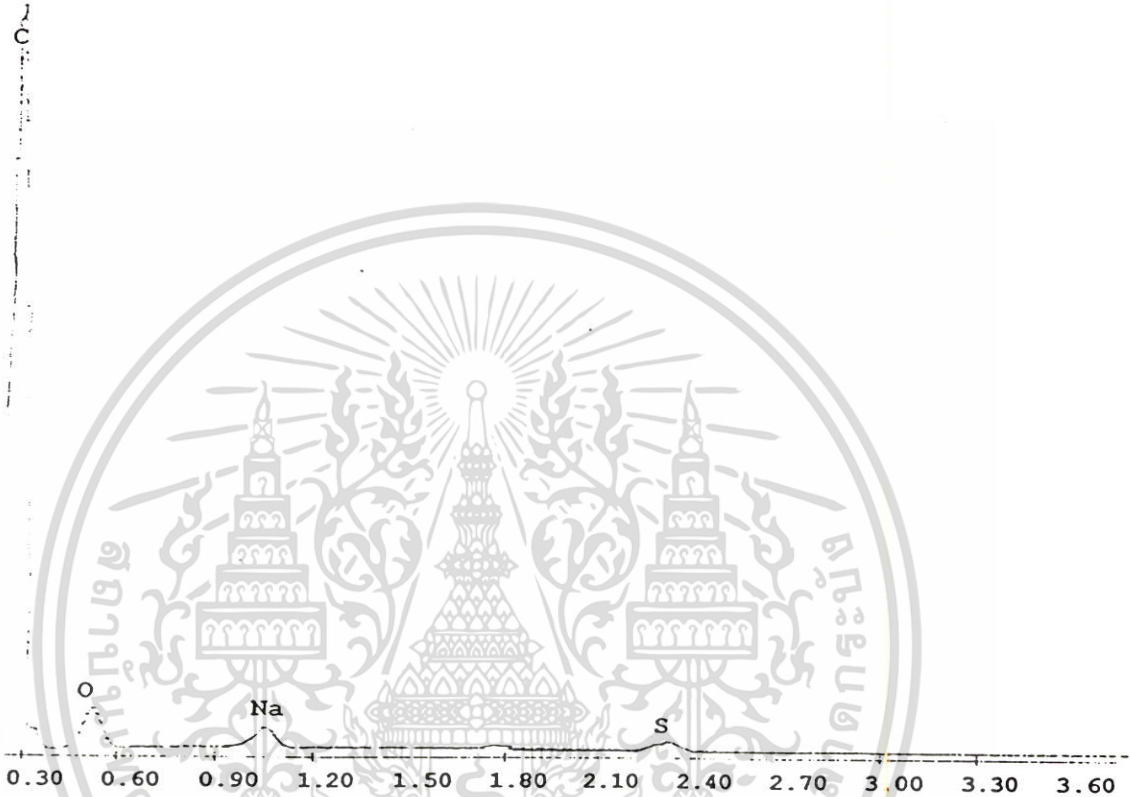
สมบัติของท่อน้ำซึม	ผลที่ได้
ความแข็งแรงดึง (MPa)	1.44
ร้อยละการยืด ณ จุดขาด	169.78
มอดุลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์ (MPa)	1.01
ความแข็งแรงฉีกขาด (kN/m)	10.58
ความแข็งกด (Shore A)	44.68
การเปลี่ยนแปลงเนื่องจากแรงอัด (psi)	129.53
ความหนาแน่น (g/cm ³)	0.99
ความต้านทานต่อไฮโดรไลซิสที่ 25 pphm, 40°C, 20%, 72 h	เกิดรอยแตกนับไม่ถ้วน ความยาวรอยแตกมากกว่า 3 มิลลิเมตร
อัตราการซึมผ่านของน้ำที่ความดันต่าง ๆ	
-0.2 บาร์	44.1
-0.4 บาร์	120.8

Label:H20

kV:7.5 Tilt:0.0 Take-off:30.0 Det Type:SUTW+ Res:132 Tc:35

FS : 5693 Lsec : 20

30-Oct-2004 13:52:18



EDAX ZAF Quantification (Standardless)

Element Normalized

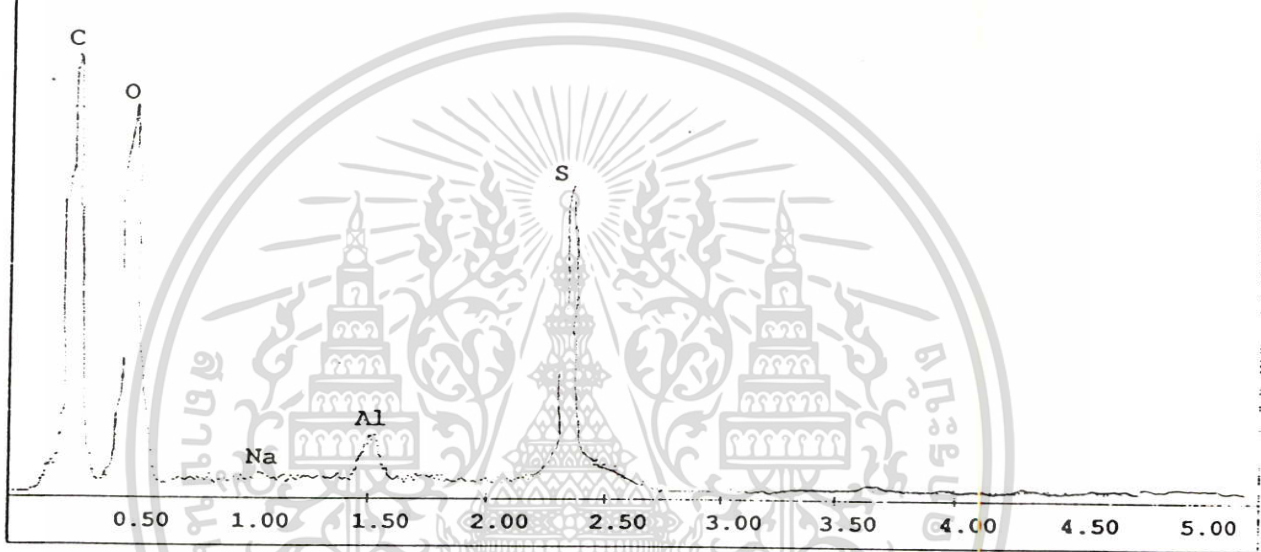
SEC Table : Default

Element	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
C K	89.68	93.28	0.7675	1.0056	0.8510	1.0000
O K	6.06	4.73	0.0250	0.9806	0.4213	1.0000
NaK	2.13	1.16	0.0166	0.9018	0.8644	1.0001
S K	2.13	0.83	0.0192	0.8980	1.0033	1.0000
Total	100.00	100.00				

Element	Net Inte.	Bkgd Inte.	Inte. Error	P/B
C K	1192.55	3.90	0.65	305.78
O K	67.80	5.70	2.94	11.89
NaK	42.60	11.60	4.26	3.67
S K	23.30	6.30	5.75	3.70

รูปผนวก ง-1 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของผงขางรถยนต์เมื่อล้างด้วยน้ำกลั่น

kV:10.0 Tilt:0.0 Take-off:30.0 Det Type:SUTW+ Res:132 Tc:35
 FS : 2628 Lsec : 20 25-Apr-2005 11:33:13



EDAX ZAF Quantification (Standardless)
 Element Normalized
 SEC Table : Default

Element	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
C K	57.01	69.07	0.1898	1.0219	0.3257	1.0001
O K	24.64	22.41	0.0850	0.9991	0.3454	1.0001
NaK	0.29	0.19	0.0020	0.9254	0.7303	1.0009
AlK	1.60	0.86	0.0134	0.9141	0.9136	1.0036
S K	16.45	7.46	0.1515	0.9266	0.9941	1.0000
Total	100.00	100.00				

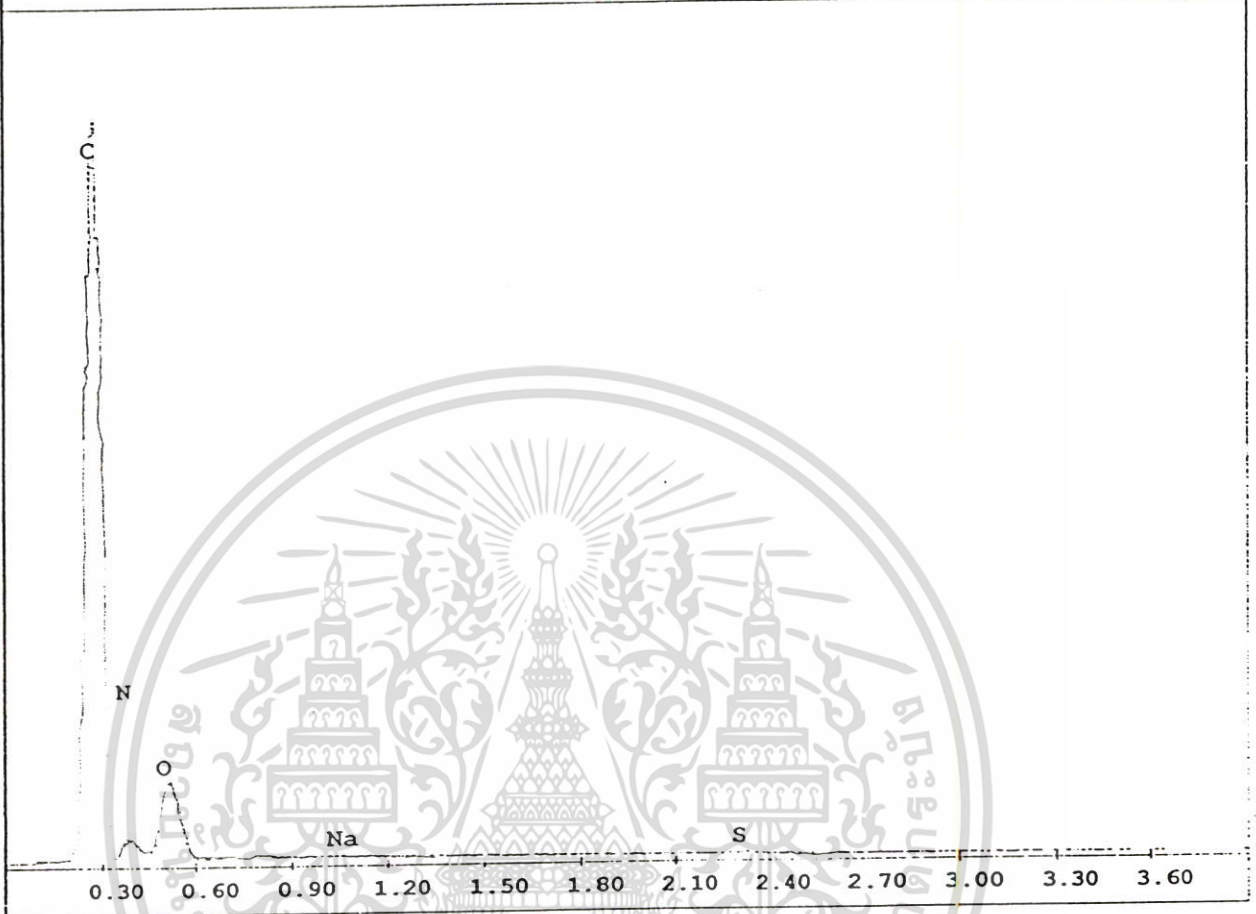
Element	Net Inte.	Bkgd Inte.	Inte. Error	P/B
C K	375.00	4.60	1.17	81.52
O K	323.45	6.90	1.27	46.88
NaK	8.00	16.15	17.74	0.50
AlK	47.05	17.20	4.29	2.74
S K	349.40	14.55	1.25	24.01

รูปผนวก ง-2 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของผงขางรถยนต์เมื่อด่างด้วย H₂SO₄

kV:7.5 Tilt:0.0 Take-off:30.0 Det Type:SUTW+ Res:132 Tc:35

FS : 4034 Lsec : 20

30-Oct-2004 13:57:53

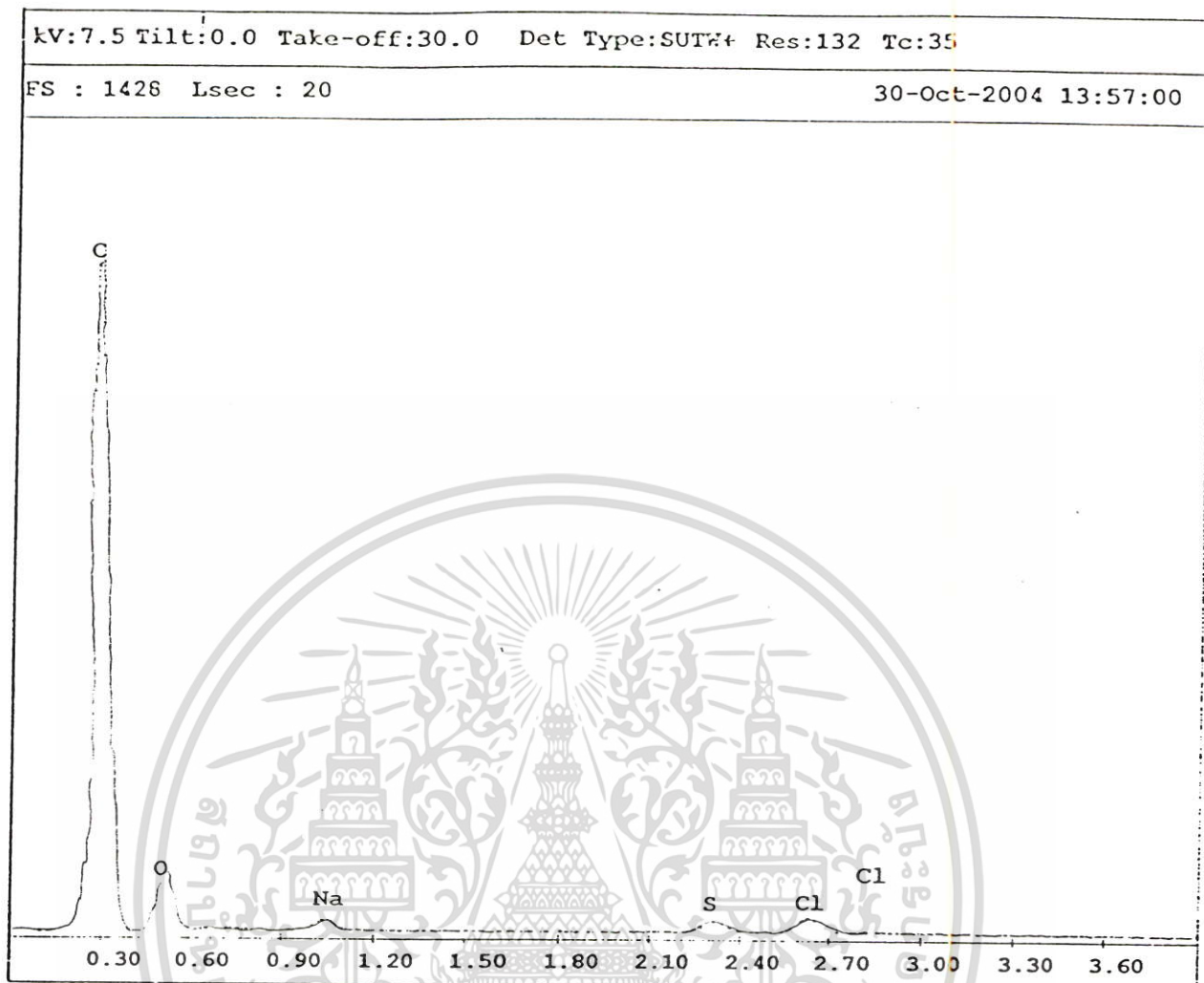


EDAX ZAF Quantification (Standardless)
Element Normalized
SEC Table : Default

Element	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
C K	80.27	83.79	0.7452	1.0042	0.9244	1.0001
N K	8.03	7.19	0.0207	0.9912	0.2597	1.0001
O K	11.33	8.88	0.0467	0.9792	0.4210	1.0000
NaK	0.00	0.00	0.0000	0.9005	0.8459	1.0000
S K	0.37	0.15	0.0033	0.8967	1.0029	1.0000
Total	100.00	100.00				

Element	Net Inte.	Bkgd Inte.	Inte. Error	P/B
C K	841.55	2.70	0.77	311.69
N K	23.60	2.85	5.13	8.28
O K	91.90	3.55	2.42	25.89
NaK	0.00	8.05	0.00	0.00
S K	2.95	3.60	24.15	0.82

รูปผนวก ง-3 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของผงยางรถยนต์เมื่อล้างด้วย HNO₃



EDAX ZAF Quantification (Standardless)

Element Normalized

SEC Table : Default

Element	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
C K	86.37	92.08	0.6031	1.0104	0.6911	1.0000
O K	6.17	4.94	0.0253	0.9852	0.4159	1.0000
NaK	1.03	0.58	0.0081	0.9065	0.8604	1.0002
S K	2.30	0.92	0.0210	0.9025	1.0037	1.0053
ClK	4.13	1.49	0.0356	0.8592	1.0031	1.0000
Total	100.00	100.00				

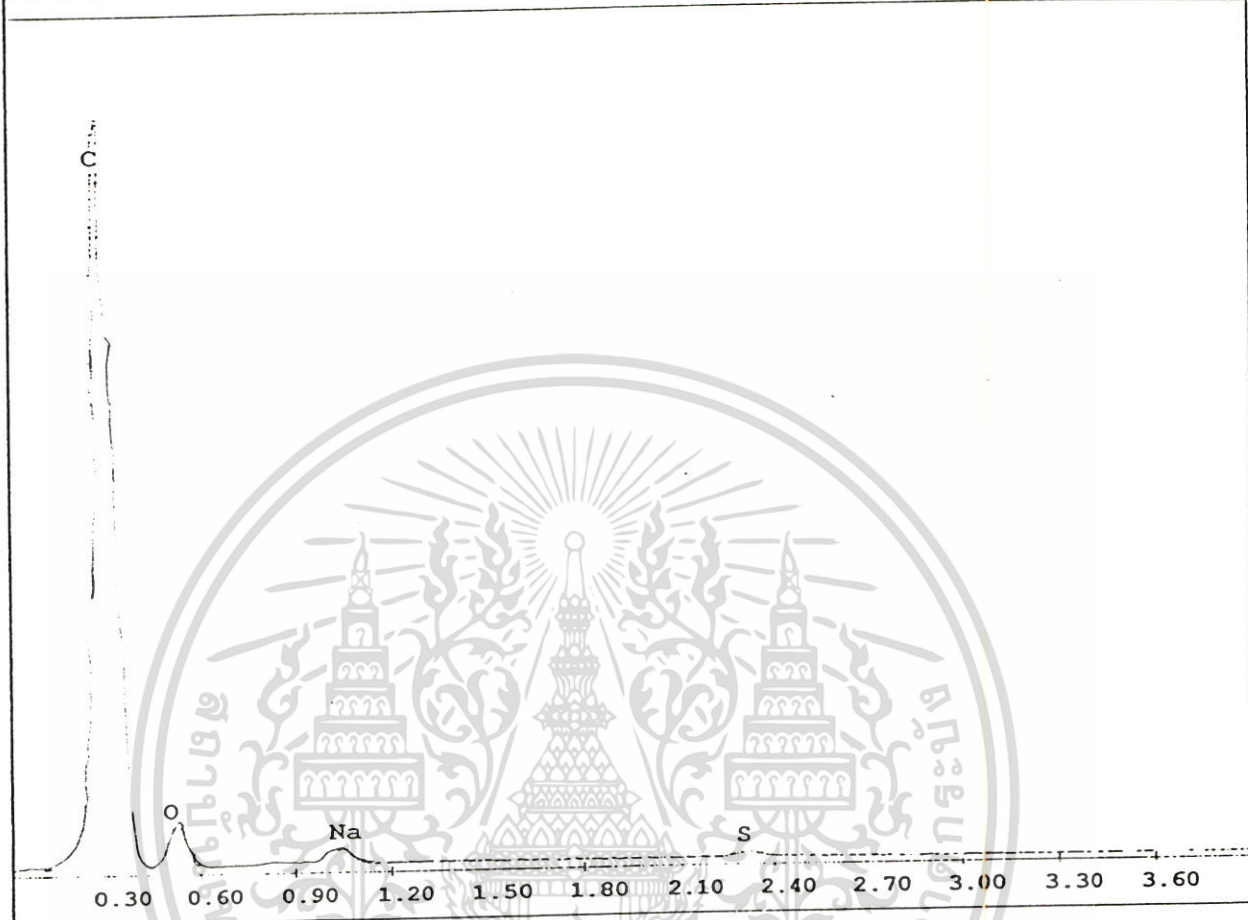
Element	Net Inte.	Bkgd Inte.	Inte. Error	P/B
C K	286.55	1.20	1.33	239.04
O K	20.95	1.95	5.32	10.74
NaK	6.35	2.80	12.17	2.27
S K	7.30	2.50	10.26	3.12
ClK	17.90	2.50	8.18	4.36

รูปผนวก ง-4 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของผงยางรถยนต์เมื่อล้างด้วย HCl

kV:7.5 Tilt:0.0 Take-off:30.0 Det Type:SUTW+ Res:132 Tc:35

FS : 5791 Lsec : 20

30-Oct-2004 13:53:00



EDAX ZAF Quantification (Standardless)

Element Normalized
SEC Table : Default

Element	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
C K	90.01	93.11	0.8071	1.0046	0.8926	1.0000
O K	7.07	5.49	0.0294	0.9795	0.4237	1.0000
NaK	1.74	0.94	0.0135	0.9008	0.8623	1.0000
S K	1.18	0.46	0.0106	0.8970	1.0034	1.0000
Total	100.00	100.00				

Element	Net Inte.	Bkgd Inte.	Inte. Error	P/B
C K	1225.00	2.95	0.64	415.25
O K	77.65	3.30	2.64	23.53
NaK	33.30	8.75	4.73	3.87
S K	12.60	8.55	9.67	1.47

รูปผนวก ง-5 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของผงยางรถยนต์เมื่อล้างด้วย H_2O_2

ภาคผนวก จ

ผลการทดลองสภาวะที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการกำจัดฟีนอล



ตารางผนวก จ-1 ขนาดต่าง ๆ ของผงยางรถยนต์ ต่อความเข้มข้นที่เหลืออยู่และค่าความสามารถในการกำจัด (%) ฟีนอล โดยความเข้มข้นของฟีนอล 50 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) ใช้ยางหนัก 5 กรัมที่ล้างด้วยน้ำกลั่น เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที (rpm) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ขนาดของ ผงยาง (เมช)	ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ (มิลลิกรัมต่อลิตร)				SD	%RSD	ความสามารถในการกำจัด (%)				SD	%RSD
	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	เฉลี่ย			ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	เฉลี่ย		
	6-7	28.944	29.083	30.148			29.392	0.659	2.241	38.945		
10-20	23.083	23.129	22.805	23.006	0.175	0.762	51.307	51.209	51.893	51.470	0.370	0.719
20-30	27.508	27.693	28.527	27.909	0.543	1.945	41.974	41.583	39.824	41.779	1.145	2.741
30-40	21.369	22.133	22.018	21.840	0.412	1.886	54.923	53.311	53.555	53.930	0.869	1.611
>40	26.952	27.230	26.882	27.021	0.184	0.681	43.147	42.560	43.293	43.000	0.388	0.902

ตารางผนวก จ-2 ขนาดต่าง ๆ ของผงยางรถยนต์ ต่อความเข้มข้นที่เหลืออยู่และค่าความสามารถในการกำจัด (%) ฟีนอล โดยความเข้มข้นของฟีนอล 50 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) ใช้ยางหนัก 5 กรัมที่ล้างด้วยอะซิโตน เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที (rpm) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ขนาดของ ผงยาง (เมช)	ความเข้มข้นที่เหลืออยู่				SD	%RSD	ความสามารถในการกำจัด (%)				SD	%RSD
	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	เฉลี่ย			ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	เฉลี่ย		
6-7	24.73	24.466	24.308	24.502	0.213	0.869	51.310	51.829	52.140	51.760	0.419	0.810
10-20	26.074	25.362	25.784	25.74	0.358	1.390	48.664	50.065	49.235	49.321	0.704	1.428
20-30	26.311	26.917	26.601	26.61	0.303	1.139	48.197	47.004	47.626	47.609	0.597	1.253
30-40	24.493	24.941	25.441	24.958	0.475	1.901	51.777	50.895	49.909	50.860	0.934	1.837
> 40	30.395	30.553	30.264	30.404	0.145	0.477	40.156	39.844	40.415	40.138	0.286	0.712

ตารางผนวก จ-3 ขนาดต่างๆ ของผงยางรถยนต์ ต่อความเข้มข้นที่เหลืออยู่และค่าความสามารถในการกำจัด (%) ฟีนอล โดยความเข้มข้นของฟีนอล 50 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) ใช้ยางหนัก 5 กรัมที่ล้างด้วยเอทานอล เข้าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที (rpm) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ขนาดของผงยาง (เมช)	ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ (ppm)				SD	%RSD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)				SD	%RSD
	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	เฉลี่ย			ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	เฉลี่ย		
6-7	25.524	25.067	24.356	24.983	0.588	2.356	46.333	47.294	48.788	47.472	1.237	2.606
10-20	22.909	23.392	23.493	23.265	0.312	1.341	51.831	50.817	50.603	51.084	0.656	1.284
20-30	23.036	22.782	22.833	22.884	0.134	0.587	51.564	52.098	51.991	51.884	0.283	0.545
30-40	26.387	27.225	26.971	26.861	0.430	1.599	44.518	42.756	43.29	43.521	0.903	2.076
> 40	25.321	25.524	25.423	25.423	0.102	0.399	46.760	46.333	46.546	46.546	0.214	0.459

ตารางผนวก จ-4 ค่าพีเอชต่าง ๆ ของสารละลายฟีนอล ต่อความเข้มข้นที่เหลืออยู่และความสามารถในการกำจัด (%) ฟีนอล โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล 50 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) สารละลายฟีนอลมีค่าพีเอช 7 ปริมาตรของสารละลายฟีนอล 39 มิลลิลิตร ใช้ผงยางรถยนต์ขนาด 30-40 เมช ใช้ยางหนัก 5 กรัม เข้าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที (rpm) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

pH	ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ (ppm)				SD	%RSD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)				SD	%RSD
	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	เฉลี่ย			ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	เฉลี่ย		
3	23.972	24.577	24.165	24.238	0.309	1.275	49.899	48.635	49.494	49.343	0.645	1.308
5	23.27	22.569	24.77	23.536	1.124	4.777	51.46	52.926	48.335	50.908	2.345	4.607
7	22.593	21.94	21.795	22.109	0.425	1.923	52.709	54.076	54.380	53.722	0.890	1.657
9	22.279	20.972	21.892	21.714	0.671	3.092	53.765	56.476	54.568	54.936	1.392	2.535
11	44.34	42.066	43.493	43.300	1.149	2.654	15.217	16.428	16.836	16.161	0.842	5.210

ตารางผนวก จ-5 ความเร็วรอบในการเขย่าต่าง ๆ ต่อความเข้มข้นที่เหลืออยู่และความสามารถในการกำจัด (%) ฟีนอล โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล 50 มิลลิกรัม ต่อลิตร (ppm) สารละลายฟีนอลมีค่าพีเอช 7 ปริมาตรของสารละลายฟีนอล 39 มิลลิลิตร ใช้ผงยางรถยนต์ขนาด 30-40 เมช ยางหนัก 5 กรัม เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ความเร็วรอบ (rpm)	ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ (ppm)				SD	%RSD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)				SD	%RSD
	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	เฉลี่ย			ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	เฉลี่ย		
0	34.710	35.983	36.643	35.77867	0.982566	2.746235	24.033	24.674	23.293	24.000	0.691	2.880
100	31.669	30.09	32.494	31.41767	1.221548	3.888094	34.321	33.343	32.610	33.425	0.858	2.568
150	24.690	25.435	26.227	25.45067	0.76862	3.020038	46.787	45.439	43.741	45.322	1.526	3.368
200	21.040	21.952	23.121	22.03767	1.043142	4.733448	54.748	52.788	50.274	52.603	2.243	4.263
250	21.318	22.017	21.528	21.621	0.35866	1.65885	55.404	53.942	54.965	54.770	0.750	1.370
300	20.552	20.094	19.925	20.19033	0.324411	1.606763	57.183	58.137	58.489	57.936	0.676	1.166

ตารางผนวก จ-6 ระยะเวลาในการเขย่าต่าง ๆ ต่อความเข้มข้นที่เหลืออยู่ และความสามารถในการกำจัด (%) ฟีนอล โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล 50 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) สารละลายฟีนอลมีค่าพีเอช 7 ปริมาตรของสารละลายฟีนอล 39 มิลลิลิตร ใช้ผงยางรถยนต์ขนาด 30-40 เมช ยางหนัก 5 กรัม ที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที

เวลา	ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ (ppm)				SD	%RSD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)				SD	%RSD
	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	C0			ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	เฉลี่ย		
10 นาที	31.93	31.953	34.076	47.169	1.232408	3.774	32.308	32.258	27.757	30.77433	2.613	8.492
20 นาที	31.647	31.647	31.765	48.537	0.068127	0.215	34.799	34.799	34.556	34.718	0.140	0.404
30 นาที	30.932	31.593	30.419	49.557	0.588553	1.900	37.582	36.249	38.619	37.48333	1.188	3.170
40 นาที	29.457	28.41	28.933	47.719	0.5235	1.809	38.301	40.495	39.398	39.398	1.097	2.784
50 นาที	29.267	28.29	28.529	48.171	0.509296	1.775	39.244	41.271	40.776	40.43033	1.057	2.614
60 นาที	28.081	27.443	27.979	49.239	0.34272	1.231	42.971	44.267	43.178	43.472	0.696	1.602
3 ชม.	23.017	23.334	21.941	48.536	0.73015	3.207	66.224	63.23	64.378	64.61067	1.510	2.338
6 ชม.	24.566	25.129	24.754	47.218	0.286629	1.155	52.577	51.924	54.795	53.09867	1.505	2.834
12 ชม.	18.928	22.051	21.202	49.41279	1.614776	7.791	56.392	56.419	56.2939	56.3683	0.066	0.117
24 ชม.	23.146	23.965	23.544	46.41386	0.409554	1.739	50.131	48.366	49.274	49.257	0.883	1.792

ตารางผนวก จ-7 การศึกษาสัดส่วนของผงขางรถยนต์ต่อปริมาตรของสารละลายฟีนอล (%w/vol) กับความเข้มข้นที่เหลืออยู่ และความสามารถในการกำจัดฟีนอลโดยความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล 50 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) สารละลายฟีนอลมีค่าพีเอช 7 ปริมาตรของสารละลายฟีนอล 39 มิลลิตรใช้ผงขางรถยนต์ขนาด 30-40 เมช ความเร็วรอบในการเขย่า 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

% w/vol	ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ (ppm)				SD	%RSD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)				SD	%RSD
	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	เฉลี่ย			ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	เฉลี่ย		
2.5	28.586	29.044	28.688	28.773	0.240	0.836	34.683	33.637	34.451	50.369	0.549	1.091
7.5	19.840	19.713	20.272	19.942	0.293	1.469	54.668	54.958	53.680	61.698	0.670	1.086
12.5	16.738	16.585	16.967	16.763	0.192	1.147	61.756	62.104	61.233	69.986	0.438	0.626
17.5	13.712	14.017	13.890	13.873	0.153	1.104	68.669	67.972	68.262	74.101	0.350	0.473
25	8.958	8.474	8.932	8.788	0.272	3.098	79.533	80.637	79.591	79.533	0.621	0.781

ตารางผนวก จ-8 ศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล ต่อความเข้มข้นที่เหลืออยู่ และประสิทธิภาพการกำจัดฟีนอล

ความเข้มข้นเริ่มต้น	ความเข้มข้นที่เหลืออยู่					SD	%RSD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)				SD	%RSD
	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	C0	เฉลี่ย			ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	เฉลี่ย		
2 ppm	0.013	0.026	0.025	1.987	0.021	0.007	33.910	99.369	98.715	98.728	98.937	0.374	0.378
4 ppm	0.514	0.586	0.620	4.059	0.573	0.054	9.440	87.328	85.565	84.732	85.875	1.325	1.543
6 ppm	1.337	1.240	1.313	5.784	1.297	0.051	3.896	78.322	79.890	78.714	78.975	0.816	1.033
8 ppm	1.653	1.588	1.718	7.876	1.653	0.065	3.932	79.012	79.834	78.190	79.012	0.822	1.040
10 ppm	1.896	2.151	1.988	9.834	2.012	0.129	6.419	80.719	78.131	79.788	79.546	1.311	1.648
20 ppm	4.030	4.409	4.488	18.359	4.309	0.245	5.682	78.046	75.987	75.552	76.528	1.332	1.741
50 ppm	16.514	17.113	17.711	17.113	50.115	0.599	3.497	67.048	65.853	64.658	65.853	1.195	1.815
100 ppm	47.143	46.045	45.945	46.378	99.231	0.665	1.433	52.492	53.598	53.699	53.263	0.670	1.257
150 ppm	98.807	101.950	100.079	100.279	149.296	1.581	1.577	33.818	31.713	32.966	32.832	1.059	3.225
200 ppm	134.658	133.061	133.859	133.859	193.972	0.799	0.597	30.579	31.402	30.990	30.990	0.412	1.328

ตารางผนวก จ-9 ผลจากการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม

ความเข้มข้น	C0-C	q	1/C	1/Q
6 ppm	1.295416	0.017949	0.771953	55.71854
8 ppm	1.651299	0.024892	0.605584	40.17647
10 ppm	2.006006	0.03129	0.498503	31.96469
20 ppm	4.275989	0.056281	0.233864	17.77254
50 ppm	12.07759	0.152069	0.082798	6.57708
100 ppm	26.49989	0.290881	0.037736	3.438026
150 ppm	40.53999	0.434862	0.024667	2.299909
200 ppm	50.47446	0.57395	0.019812	1.742355

ตารางผนวก จ-10 ผลจากการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิชไอโซเทอร์ม

ความเข้มข้น	C	Q	logC	log Q
6 ppm	2.779111	0.017949	-0.443906	-1.74596
8 ppm	3.727333	0.024892	0.571398	-1.60394
10 ppm	4.657444	0.03129	0.668148	-1.50459
20 ppm	9.085333	0.056281	0.958341	-1.24964
50 ppm	24.972	0.152069	1.397453	-0.81796
100 ppm	50.49856	0.290881	1.703279	-0.53628
150 ppm	77.31011	0.434862	1.888236	-0.36165
200 ppm	98.02544	0.57395	1.991339	-0.24113

ตารางผนวก จ-11 ผลจากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (นาที) กับปริมาณฟีนอลที่ถูกกำจัด (มิลลิกรัมต่อกรัม)

เวลา	Q				
	20 ppm	40 ppm	60 ppm	80 ppm	100 ppm
1 ชม.	0.030792	0.069432	0.103288	0.13968	0.172768
3 ชม.	0.040252	0.080256	0.113936	0.14936	0.19418
6 ชม.	0.041388	0.082256	0.121828	0.152592	0.194752
12 ชม.	0.040664	0.078928	0.116036	0.156104	0.19542
24 ชม.	0.04004	0.08042	0.114964	0.15974	0.199916

ตารางผนวก จ-12 ผลจากการศึกษาความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาอันดับสอง

เวลา	t/q				
	20 ppm	40 ppm	60 ppm	80 ppm	100 ppm
1 ชม.	1959.558	28064.27	271708.9	1945224	11259167
3 ชม.	4471.827	55719.54	489042.5	3274253	16861949
6 ชม.	8698.173	105745.2	867987.3	5811377	29839884
12 ชม.	17706.08	224332	1933297	12384672	63374641
24 ชม.	35964.04	447202.6	3889936	2451673	122000000

ตารางผนวก จ-13 ระยะเวลาที่ใช้อบที่อุณหภูมิ และผลต่างของน้ำหนักก่อนและหลังอบของ
ท่อน้ำซึม

เวลา	น้ำหนักก่อนอบ	น้ำหนักหลังอบ	ผลต่าง
1	9.04	9.19	0.15
2	8.88	8.95	0.07
3	8.78	8.81	0.03
4	8.67	8.69	0.02
5	8.44	8.43	-0.01
6	8.63	8.58	-0.05
7	8.46	8.40	-0.06
8	8.36	8.29	-0.07
9	9.25	9.18	-0.07
10	8.32	8.14	-0.09
15	8.67	8.57	-0.10
20	8.88	8.72	-0.16

ตารางผนวก จ-14 ความสามารถในการกำจัดฟีนอล (%) เมื่อปรับปรุงผงยางด้วยกรดชนิดต่าง ๆ

สารที่ใช้ในการ ปรับปรุง	ความเข้มข้นเดิม					SD	%RDS	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)				SD	%RDS
	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	C0	เฉลี่ย			ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	เฉลี่ย		
H ₂ O ₂	17.466	17.756	17.818	49.838	17.680	0.188	1.063	64.954	64.372	64.247	64.524	0.377	0.585
H ₂ SO ₄	23.326	22.822	23.012	49.838	23.053	0.255	1.104	53.197	54.207	53.826	53.743	0.510	0.949
HCl	21.493	21.493	21.500	49.838	21.495	0.004	0.019	56.874	56.860	57.017	56.917	0.087	0.153
HNO ₃	22.364	21.999	22.482	49.838	22.282	0.252	1.130	55.127	55.860	54.891	55.293	0.505	0.914
น้ำกลั่น	20.420	19.974	19.896	49.838	20.097	0.283	1.407	59.027	59.922	60.079	59.676	0.568	0.951

ตารางผนวก จ-15 ความสามารถในการกำจัดฟีนอล (%) ที่ระยะเวลาต่าง ๆ โดยบรรจุผงยางรถยนต์ในคอลัมน์

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น					SD	% RSD	ความสามารถในการกำจัด				SD	% RSD
	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	C0	เฉลี่ย			ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	เฉลี่ย		
5	12.002	12.206	12.159	19.879	12.12	0.107	0.883	39.626	38.598	38.835	39.020	0.538	1.380
10	12.762	12.608	12.649	19.879	12.673	0.08	0.629	35.803	36.578	36.368	36.250	0.401	1.106
15	12.857	13.306	13.17	19.879	13.111	0.23	1.754	35.323	33.751	33.751	34.047	1.157	3.398
30	13.064	13.353	13.29	19.879	13.236	0.152	1.146	34.280	32.829	33.145	33.418	0.763	2.283
45	13.492	13.38	13.908	19.879	13.594	0.278	2.047	32.130	32.691	30.035	31.619	1.400	4.427
60	14.802	15.061	14.749	19.879	14.87	0.167	1.123	25.541	24.238	25.808	25.196	0.840	3.334
120	16.917	17.041	16.773	19.879	16.91	0.134	0.793	14.899	14.278	15.625	14.934	0.675	4.518
150	17.079	17.23	17.103	19.879	17.137	0.081	0.473	14.080	13.325	13.963	13.791	0.408	2.960
180	17.429	17.369	17.32	19.879	17.32	0.14	0.809	12.325	12.627	13.668	12.873	0.705	5.473

ตารางผนวก จ-16 ความสามารถในการกำจัดฟีนอล (%) ที่ระยะเวลาต่าง ๆ เมื่อใช้ความดัน 1.25 psi

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นเดิม (mg/L)				ความสามารถในการกำจัด (%)				SD	% RSD
	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	เฉลี่ย	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	เฉลี่ย		
5	8.296	8.146	8.146	8.196	54.817	55.632	55.632	55.360	0.470	0.849
10	9.641	9.791	9.791	9.741	47.491	46.676	46.676	46.948	0.470	1.001
15	10.688	10.837	10.688	10.737	41.792	40.978	41.792	41.521	0.470	1.132
30	10.688	10.837	10.688	10.737	41.792	40.978	41.792	41.521	0.470	1.132
45	11.286	11.136	11.136	11.186	38.535	39.350	39.350	39.078	0.470	1.203
60	11.286	11.286	11.435	11.335	38.535	38.535	37.721	38.264	0.470	1.228
75	11.435	11.286	11.435	11.385	37.721	38.535	37.721	37.993	0.470	1.237
90	11.435	11.584	11.435	11.485	37.721	36.907	37.721	37.450	0.470	1.255
105	11.435	11.435	11.435	11.435	37.721	37.721	37.721	37.721	0.000	0.000
120	11.584	11.435	11.584	11.535	36.907	37.721	36.907	37.179	0.470	1.264
135	11.584	11.584	11.584	11.584	36.907	36.907	36.907	36.907	0.000	0.000
150	11.734	11.883	11.883	11.834	36.093	35.279	35.279	35.550	0.470	1.322
165	12.033	12.182	12.033	12.083	34.465	33.651	34.465	34.194	0.470	1.375
180	12.182	12.182	12.332	12.232	33.651	33.651	32.837	33.380	0.470	1.408

ตารางผนวก จ-17 ความสามารถในการกำจัดฟีนอล (%) ที่ระยะเวลาต่าง ๆ เมื่อใช้ความดัน 2.5 psi

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นเดิม				ความสามารถในการกำจัด				SD	%RSD
	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	เฉลี่ย	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	เฉลี่ย		
5	8.595	8.445	8.595	8.545	53.483	54.292	53.483	53.753	0.467	0.869
10	9.043	9.043	9.043	9.043	51.056	51.056	51.056	51.056	0.000	0.000
15	9.641	9.791	9.641	9.691	47.820	47.011	47.820	47.551	0.467	0.982
30	10.090	9.940	9.940	9.990	45.393	46.202	46.202	45.933	0.467	1.017
45	10.688	10.837	10.837	10.787	42.157	41.348	41.348	41.618	0.467	1.122
60	10.987	11.136	10.987	11.036	40.539	39.730	40.539	40.270	0.467	1.160
75	11.286	11.136	11.136	11.186	38.921	39.730	39.730	39.461	0.467	1.184
90	11.286	11.286	11.286	11.286	38.921	38.921	38.921	38.921	0.000	0.000
105	11.734	11.584	11.584	11.634	36.494	37.303	37.303	37.034	0.467	1.261
120	12.033	12.033	12.182	12.083	34.876	34.876	34.067	34.607	0.467	1.350
135	12.182	12.033	12.182	12.133	34.067	34.876	34.067	34.337	0.467	1.360
150	12.481	12.631	12.481	12.531	32.449	31.640	32.449	32.180	0.467	1.451
165	12.631	12.481	12.631	12.581	31.640	32.449	31.640	31.910	0.467	1.464
180	12.930	13.079	12.930	12.980	30.022	29.213	30.022	29.753	0.467	1.570

ตารางผนวก จ-18 ความสามารถในการกำจัดฟีนอล (%) ที่ระยะเวลาต่าง ๆ เมื่อใช้ความดัน 5.0 psi

เวลา (นาท)	ความเข้มข้นเดิม				ความสามารถในการกำจัด				SD	%RSD
	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	เฉลี่ย	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	เฉลี่ย		
5	10.688	10.538	10.688	10.638	42.157	42.966	42.157	42.427	0.467	1.101
10	10.987	10.987	11.136	11.036	40.539	40.539	39.730	40.270	0.467	1.160
15	11.286	11.435	11.435	11.385	38.921	38.112	38.112	38.382	0.467	1.217
30	11.435	11.584	11.584	11.535	38.112	37.303	37.303	37.573	0.467	1.243
45	11.883	11.883	11.883	11.883	35.685	35.685	35.685	35.685	0.000	0.000
60	12.033	12.033	12.033	12.033	34.876	34.876	34.876	34.876	0.000	0.000
75	12.033	12.033	12.033	12.033	34.876	34.876	34.876	34.876	0.000	0.000
90	12.033	12.182	12.033	12.083	34.876	34.067	34.876	34.607	0.467	1.350
105	12.033	12.182	12.033	12.083	34.876	34.067	34.876	34.607	0.467	1.350
120	12.182	12.182	12.332	12.232	34.067	34.067	33.258	33.798	0.467	1.382
135	12.182	12.332	12.182	12.232	34.067	33.258	34.067	33.798	0.467	1.382
150	12.332	12.182	12.332	12.282	33.258	34.067	33.258	33.528	0.467	1.393
165	12.332	12.332	12.332	12.332	33.258	33.258	33.258	33.258	0.000	0.000
180	12.481	12.481	12.631	12.531	32.449	32.449	31.640	32.180	0.467	1.451

ตารางผนวก จ-19 ความสามารถในการกำจัดฟีนอล (%) ที่ระยะเวลาต่าง ๆ เมื่อใช้ความดัน 1.25 psi หลังจากทำการรีเจนเนอเรชัน

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นเดิม				ความสามารถในการกำจัด				SD	%RSD
	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	เฉลี่ย	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	เฉลี่ย		
5	14.357	14.429	14.357	14.381	22.427	22.041	22.427	22.299	0.223	0.999
10	14.643	14.571	14.643	14.619	20.884	21.270	20.884	21.012	0.223	1.060
15	14.929	14.929	15.000	14.952	19.340	19.340	18.954	19.211	0.223	1.160
30	14.929	15.000	14.929	14.952	19.340	18.954	19.340	19.211	0.223	1.160
45	15.143	15.143	15.071	15.119	18.182	18.182	18.568	18.311	0.223	1.217
60	15.286	15.214	15.214	15.238	17.410	17.796	17.796	17.668	0.223	1.261
75	15.286	15.357	15.357	15.333	17.410	17.024	17.024	17.153	0.223	1.299
90	15.429	15.500	15.429	15.452	16.638	16.252	16.638	16.510	0.223	1.350
105	15.500	15.429	15.500	15.476	16.252	16.638	16.252	16.381	0.223	1.360
120	15.500	15.500	15.500	15.500	16.252	16.252	16.252	16.252	0.000	0.000
135	15.500	15.571	15.500	15.524	16.252	15.866	16.252	16.124	0.223	1.382
150	15.571	15.643	15.571	15.595	15.866	15.481	15.866	15.738	0.223	1.416
165	15.714	15.643	15.643	15.667	15.095	15.481	15.481	15.352	0.223	1.451
180	15.714	15.643	15.714	15.690	15.095	15.481	15.095	15.223	0.223	1.464

ตารางผนวก จ-20 ความสามารถในการกำจัดฟีนอล (%) ที่ระยะเวลาต่าง ๆ เมื่อใช้ความดัน 2.5 psi หลังจากทำการรีเจนเนอเรชัน

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นเดิม				ความสามารถในการกำจัด				SD	%RSD
	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	เฉลี่ย	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	เฉลี่ย		
5	15.571	15.571	15.500	15.548	18.857	18.857	19.229	18.981	0.215	1.132
10	15.786	15.714	15.786	15.762	17.740	18.112	17.740	17.864	0.215	1.203
15	16.000	15.929	16.000	15.976	16.623	16.995	16.623	16.747	0.215	1.283
30	16.000	15.929	16.000	15.976	16.623	16.995	16.623	16.747	0.215	1.283
45	16.143	16.214	16.143	16.167	15.579	15.507	15.879	15.755	0.215	1.364
60	16.214	16.143	16.143	16.167	15.879	15.879	15.879	15.755	0.215	1.364
75	16.214	16.143	16.143	16.167	15.879	15.879	15.879	15.755	0.215	1.364
90	16.214	16.214	16.143	16.190	15.507	15.507	15.879	15.631	0.215	1.375
105	16.143	16.214	16.214	16.190	15.507	15.507	15.507	15.631	0.215	1.375
120	16.214	16.286	16.286	16.262	15.134	15.134	15.134	15.258	0.215	1.408
135	16.357	16.357	16.286	16.333	14.762	14.762	15.134	14.886	0.215	1.444
150	16.357	16.357	16.357	16.357	14.762	14.762	14.762	14.762	0.000	0.000
165	16.429	16.429	16.357	16.357	14.390	14.390	14.762	14.514	0.215	1.481
180	16.429	16.429	16.429	16.429	14.390	14.390	14.390	14.390	0.000	0.000

ตารางผนวก จ-21 ความสามารถในการกำจัดฟีนอล (%) ที่ระยะเวลาต่าง ๆ เมื่อใช้ความดัน 5.0 psi หลังจากทำการรีเจนเนอเรชัน

เวลา	ความเข้มข้นเดิม				ความสามารถในการกำจัด				SD	%RSD
	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	เฉลี่ย	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	เฉลี่ย		
5	19.762	19.762	19.793	19.772	7.619	7.619	7.475	7.571	0.083	1.101
10	19.793	19.762	19.793	19.783	7.475	7.619	7.475	7.523	0.083	1.108
15	19.947	19.947	19.978	19.958	6.753	6.753	6.608	6.704	0.083	1.243
30	19.978	20.009	19.978	19.989	6.608	6.464	6.608	6.560	0.083	1.271
45	20.071	20.040	20.071	20.061	6.175	6.319	6.175	6.223	0.083	1.340
60	20.071	20.071	20.071	20.071	6.175	6.175	6.175	6.175	0.000	0.000
75	20.133	20.164	20.133	20.143	5.886	5.742	5.886	5.838	0.083	1.428
90	20.164	20.164	20.195	20.174	5.742	5.742	5.597	5.694	0.083	1.464
105	20.195	20.225	20.195	20.205	5.597	5.453	5.597	5.549	0.083	1.502
120	20.256	20.256	20.287	20.267	5.309	5.309	5.164	5.261	0.083	1.585
135	20.287	20.318	20.318	20.308	5.164	5.020	5.020	5.068	0.083	1.645
150	20.318	20.318	20.318	20.318	5.020	5.020	5.020	5.020	0.000	0.000
165	20.318	20.318	20.318	20.318	5.020	5.020	5.020	5.020	0.000	0.000
180	20.349	20.349	20.318	20.339	4.875	4.875	5.020	4.924	0.083	1.693

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นางสาวพิน ชิ่งเถียรตระกูล

วัน เดือน ปีเกิด 21 กันยายน พ.ศ. 2520 ที่จังหวัดนครนายก

ที่อยู่ ข/3 003/16 ถ.พานิชเจริญ ต.นครนายก อ.เมือง จ.นครนายก 26000

ประวัติการศึกษา 2542 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต
(วิทยาศาสตร์ทั่วไป) จากคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประสบการณ์การทำงาน และผลงานวิจัย

พ.ศ. 2543-2544 ผู้ช่วยสอนวิชาคณิตศาสตร์และคอมพิวเตอร์ในชีวิตประจำวัน
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2544-2545 ผู้ช่วยนักวิจัย สถาบันกัญชาและพัฒนาาระบบเกษตรในเขตวิกฤต