



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาประสิทธิภาพของการกำจัดโพแทสเซียมไอออนจากไบโอดีเซลดิบ
ด้วยเรซินและซิลิกาจากเถ้าแกลบ

The Study of Potassium Ion Removal Efficiency from Crude Biodiesel by Using
Resin and Silica from Rice Husk Ash

นามผู้วิจัย นายธีระวัฒน์ อัจฉฤกษ์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์คณิตา ตั้งคนานุรักษ์, วท.ม.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์ศิริพร ลาภเกียรติถาวร, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์นิพนธ์ ตั้งคนานุรักษ์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรัตน์ บัวเลิศ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญจนา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สิงห์สีจี้ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาประสิทธิภาพของการกำจัดโพแทสเซียมไอออนจากไบโอดีเซลดิบ
ด้วยเรซินและซิลิกาจากเถ้าแกลบ

The Study of Potassium Ion Removal Efficiency from Crude Biodiesel by Using
Resin and Silica from Rice Husk Ash

โดย

นายธีระวัฒน์ อัจฉฤกษ์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2556

ธีระวัฒน์ อัจฉฤกษ์ 2556: การศึกษาประสิทธิภาพของการกำจัดโพแทสเซียมไอออน
จากไบโอดีเซลดิบด้วยเรซินและซิลิกาจากเถ้าแกลบ ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
(วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์คนिता ตั้งคณานุรักษ์,
วท.ม. 114 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาประสิทธิภาพการลดปริมาณโพแทสเซียมไอออนใน
ไบโอดีเซลดิบซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน ปริมาณโพแทสเซียมไอออนที่ตกค้าง
ในปริมาณสูงนี้จะถูกลดโดยใช้เรซินชนิดแลกเปลี่ยนแคตไอออนและซิลิกาจากเถ้าแกลบ ซึ่งเป็น
วิธีที่ง่ายและสะดวกกว่าวิธีล้างด้วยน้ำที่ก่อให้เกิดน้ำเสียปริมาณมาก ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสม
ด้วยวิธีการทดลองแบบเบดซ์ ได้แก่ ความเร็วรอบการเขย่า (0-150 รอบ/นาที) ระยะเวลาเขย่า
(0-120 นาที) ระยะเวลาสัมผัส (0-120 นาที) และปริมาณสาร (1-5 กรัม) ผลการศึกษา พบว่า เรซิน
3 กรัม และซิลิกาจากเถ้าแกลบ 4 กรัม เป็นปริมาณที่เหมาะสมในการกำจัดโพแทสเซียมไอออนใน
น้ำมันไบโอดีเซล 25 และ 50 มิลลิลิตร ที่ความเร็วรอบการเขย่า 100 รอบ/นาที ระยะเวลาเขย่า 90 นาที
และระยะเวลาสัมผัส 60 นาที ให้ประสิทธิภาพการกำจัดโพแทสเซียมไอออนที่ร้อยละ 91.00 และ
85.73 ตามลำดับ รูปแบบของการดูดซับโพแทสเซียมไอออนด้วยซิลิกาจากเถ้าแกลบในการทดลอง
แบบเบดซ์สอดคล้องกับไอโซเทอร์มฟรุนดลิช การทดลองด้วยวิธีการไหลแบบต่อเนื่อง พบว่า
ที่อัตราการไหล 13.88 มิลลิลิตร/นาที เรซิน 150 กรัม สามารถกำจัดโพแทสเซียมไอออนในน้ำมัน
ไบโอดีเซล 50 มิลลิลิตร ได้ร้อยละ 85.04 เมื่อใช้เรซินที่ผ่านการฟื้นฟูด้วยกรดไฮโดรคลอริก ได้
ประสิทธิภาพการกำจัดโพแทสเซียมไอออนสูงสุดที่ร้อยละ 62.91 นอกจากนั้นทำการวิเคราะห์ปริมาณ
โพแทสเซียมไอออนที่ถูกกำจัดด้วยเรซินและซิลิกาจากเถ้าแกลบจากการทดลองแบบเบดซ์ด้วย
เครื่อง ICP-OES (Inductively Coupled Plasma – Optical Emission Spectrometer) พบว่า ประสิทธิภาพ
การกำจัดโพแทสเซียมไอออนเท่ากับร้อยละ 99.34 และ 99.39 ตามลำดับ ส่วนการทดลองแบบการ
ไหลต่อเนื่อง พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดโพแทสเซียมไอออนในไบโอดีเซล 1000 มิลลิลิตร ที่
ไหลผ่านคอลัมน์ที่บรรจุเรซินอยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 99

Theerawat Autcharerk 2013: The Study of Potassium Ion Removal Efficiency from Crude Biodiesel by Using Resin and Silica from Rice Husk Ash. Master of Science (Environmental Science), Major Field: Environmental Science, Department of Environmental Science. Thesis Advisor: Associate Professor Kanita Tungkananuruk, M.Sc. 114 pages.

The aims of this research was to study the reduction conditions of potassium ion in crude biodiesel which was obtained from transesterification reaction. High amount of potassium ion residue will be reduced by cation resin exchanger and silica from rice husk ash. This method is easier and more convenient than using rinse water that will generate large amount of wastewater. Batch experiment were conducted to find optimum conditions such as mixing speed (0-150 rpm), mixing time (0-120 min), contact time (0-120 min) and dosage (1-5 g). The results were found that resin 3 g, silica from rice husk ash 4 g were suitable to remove potassium ion from 25 and 50 mL of biodiesel at mixing speed 100 rpm, mixing time 90 min and contact time 60 min. The removal efficiency of 91.00 % and 85.73 % were achieved respectively. Also, adsorption model of silica from rice husk ash was confirmed to Freundlich isotherm. By continuous flow experiments, it was found that 85.04 % of potassium ion was removed by 150 g of resin from 50 mL biodiesel at flow rate of 13.88 mL/min. After the regeneration of resin using hydrochloric acid, the maximum removal efficiency of potassium ion was found at 62.91 %. In addition, analysis of potassium ion using ICP-OES (Inductively Coupled Plasma - Optical Emission Spectrometer), it was found that removal efficiency of potassium ion by resin and silica from rice husk ash in the batch process were achieved at 99.34 % and 99.39 % respectively. In continuous experiment, potassium ion in 1000 mL of biodiesel can be removed by resin with efficiency range of 95 to 99 %.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือของบุคคลต่างๆ หลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณต่อผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ คณิดา ตังคณานุรักษ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ ที่ได้ช่วยเหลือในการวางแผนงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนการให้ความรู้ คำปรึกษา แนะนำ และแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ขอกราบขอบพระคุณ ดร. ศิริพร ลาภเกียรติถาวร และรองศาสตราจารย์ นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์ กรรมการที่ปรึกษาร่วม ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ สถานที่ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ในการศึกษาวิจัยทดลอง ขอขอบคุณสถาบันวิจัย วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ที่ได้ให้การสนับสนุนด้านทุนการวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณ น้องน้ำ ผู้ช่วยนักวิจัยที่ได้คอยให้คำแนะนำ ช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวก ในการทำวิจัยทดลอง

ขอขอบคุณ ก๊ิบจัง เอ้ รุ่ง พิม อุ่ม เพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ทุกคนในวิทยาลัยสิ่งแวดล้อมที่ให้ คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลือในทุกๆ เรื่องตลอดการทำวิทยานิพนธ์นี้

ท้ายที่สุดนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวอัจฉฤกษ์ อย่างสุดซึ้งที่ให้ กำเนิด คอยเป็นกำลังใจในการศึกษาเล่าเรียน รวมทั้งได้เมตตา อบรม สั่งสอน และคอยให้ความรู้ ตลอดจนสนับสนุนทุนการศึกษาจนสำเร็จการศึกษา ขอขอบคุณญาติ พี่ น้อง ทุกคนที่ให้ความ ช่วยเหลือและเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมาเช่นกัน จนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ธีระวัฒน์ อัจฉฤกษ์

กุมภาพันธ์ 2556

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(6)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(9)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	46
อุปกรณ์	46
วิธีการ	48
ผลและวิจารณ์	54
สรุปและข้อเสนอแนะ	77
สรุป	77
ข้อเสนอแนะ	80
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	81
ภาคผนวก	85
ภาคผนวก ก การเตรียมอนุภาคซิลิกาจากถั่วแกลบ	
สมบัติของเรซินและซิลิกาจากถั่วแกลบ	86
ภาคผนวก ข ลักษณะและคุณภาพของน้ำมันไบโอดีเซล	90
ภาคผนวก ค การหาความเป็นกรด กรดไขมันอิสระ	
และการคำนวณประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนไอออน	93
ภาคผนวก ง เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	98
ภาคผนวก จ ผลการวิเคราะห์หาปริมาณโพแทสเซียมไอออน	104
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	114

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ลำดับความชอบไอออนของเรซินในน้ำที่มีสารละลายโลหะหนักในน้ำ 1,000 มก./ล.	37
2	องค์ประกอบทางเคมีของเก้าอี้เคลือบวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray fluorescent	39
3	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนด้วยเรซิน และซิลิกาจากเก้าอี้เคลือบกับปริมาณสารเริ่มต้น	55
4	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนด้วยเรซิน และซิลิกาจากเก้าอี้เคลือบกับความเร็วรอบในการเขย่า	57
5	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนด้วยเรซิน และซิลิกาจากเก้าอี้เคลือบกับระยะเวลาเขย่า	58
6	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนด้วยเรซิน และซิลิกาจากเก้าอี้เคลือบกับระยะเวลาเวลาสัมผัส	60
7	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนของซิลิกา จากเก้าอี้เคลือบกับปริมาณน้ำมันไบโอดีเซล	61
8	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนด้วยเรซิน และซิลิกาจากเก้าอี้เคลือบกับปริมาณสารกำจัดไอออน	63
9	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนของเรซิน ร้อยละโพแทสเซียมไอออนที่เหลือ และปริมาตรน้ำมันไบโอดีเซลที่ ไหลผ่านคอลัมน์	68
10	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนของเรซิน ที่ผ่านการใช้งานแล้วนำกลับมาฟื้นฟูสภาพใหม่ ร้อยละโพแทสเซียม ไอออนที่เหลือ และปริมาตรน้ำมันไบโอดีเซลที่ไหลผ่านคอลัมน์	72
11	ประสิทธิภาพการกำจัดโพแทสเซียมไอออนในน้ำมันไบโอดีเซลดิบ ด้วยเรซินและซิลิกาจากเก้าอี้เคลือบ	73
12	ประสิทธิภาพการกำจัดโพแทสเซียมไอออนในน้ำมันไบโอดีเซลดิบ ด้วยเรซินและซิลิกาจากเก้าอี้เคลือบ	74

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
13	ค่าความเข้มข้นโพแทสเซียมไอออนในน้ำมันไบโอดีเซลมาตรฐาน น้ำมันไบโอดีเซลล้างด้วยน้ำ และน้ำมันไบโอดีเซลที่กำจัดโพแทสเซียม ด้วยเรซินและซิลิกาจากถ้ำเกลบด้วยวิธีการทดลองแบบเบตซ์	75
14	ค่าความเข้มข้นโพแทสเซียมไอออนในน้ำมันไบโอดีเซลมาตรฐาน น้ำมันไบโอดีเซลล้างด้วยน้ำ และน้ำมันไบโอดีเซลที่กำจัดโพแทสเซียม ของเรซินด้วยวิธีการไหลแบบต่อเนื่อง	75
ตารางผนวกที่		
ก1	ลักษณะทั่วไปของเรซิน	89
ก2	ลักษณะทางกายภาพและเคมีของเรซิน	89
ก3	Surface area data	89
ก4	Pore size data	89
ข1	กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ ของกรดไขมัน พ.ศ.2548 ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน	91
ค1	ปริมาณตัวอย่างน้ำมัน/ไขมันที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด	95
ง1	การเตรียม Standard and Sample	103
ง2	สารตัวอย่าง (Dilute 5X)	103
จ1	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนกับค่าปริมาณ เรซินเริ่มต้น	105
จ2	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนกับค่าปริมาณ ซิลิกาจากถ้ำเกลบเริ่มต้น	105
จ3	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนของเรซินกับ ความเร็วรอบในการเขย่า	106
จ4	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนของซิลิกาจาก ถ้ำเกลบกับความเร็วรอบในการเขย่า	106

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
จ5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนของเรซินกับ ระยะเวลาเขย่า	106
จ6 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนของซิลิกาจาก ถ้ำเกลบกับระยะเวลาเขย่า	107
จ7 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนของเรซินกับ ระยะเวลาสัมผัส	107
จ8 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนของซิลิกาจาก ถ้ำเกลบกับระยะเวลาสัมผัส	108
จ9 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนของซิลิกาจาก ถ้ำเกลบกับปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลดิบ	108
จ10 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนกับปริมาณ ของเรซิน	109
จ11 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนกับปริมาณ ของซิลิกาจากถ้ำเกลบ	109
จ12 ไอโซเทอร์มการกำจัดโพแทสเซียมไอออนของซิลิกาจากถ้ำเกลบ	110
จ13 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนของเรซิน ร้อยละโพแทสเซียมไอออนที่เหลือ และปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลที่ ไหลผ่านคอลัมน์	111
จ14 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนของเรซิน ที่ผ่านการใช้งานแล้วนำกลับมาฟื้นฟูสภาพใหม่ ร้อยละโพแทสเซียม ไอออนที่เหลือ และ ปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลที่ไหลผ่านคอลัมน์	112
จ15 ค่ามาตรฐานน้ำมันไบโอดีเซลและน้ำมันไบโอดีเซลล้างด้วยน้ำโดย การตรวจวัดด้วยเครื่อง ICP-OES	112
จ16 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนของเรซิน และซิลิกาจากถ้ำเกลบผ่านกระบวนการแบบเบดซ์โดยการตรวจวัด ด้วยเครื่อง ICP-OES	112

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่

หน้า

จ17	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนของเรซินผ่าน กระบวนการแบบคอลัมน์โดยการตรวจวัดด้วยเครื่อง ICP-OES	113
-----	---	-----



สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของกลีเซอรีนกับแอลกอฮอล์	7
2	ขั้นตอนในการเกิดปฏิกิริยาผ่าน ไตรโคและมอนอกลิเซอรีน	8
3	กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบส	9
4	ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซล	11
5	ขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน	14
6	ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ	17
7	แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้ว ที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว	18
8	แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลไม่มีขั้วที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว	19
9	แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้ว	19
10	การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่ชั้น	21
11	การยึดเหนี่ยวด้วยแรงกายภาพ	21
12	การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ	24
13	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน	27
14	กราฟความชันระหว่าง $\log q$ และ $\log C$	28
15	ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรันทิช	29
16	แบบจำลองพื้นผิวตัวดูดซับของสมการแลงเมียร์ กลไกการดูดซับ ของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว	30
17	การดูดซับของแลงเมียร์เมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว	30
18	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์	31
19	ไฮโดรคาร์บอนที่เป็นต้นกำเนิด คือ Styrene	35
20	พันธะ Silanol (-Si-O-H-) ในออสซิลานซิลิกา	42
21	โครงสร้างของซิลิกาเจล	43
22	ลักษณะคอลัมน์ที่ใช้ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโพแทสเซียมไอออน ในน้ำมันไบโอดีเซลด้วยเรซินแลกเปลี่ยนแคตไอออน	51

สารบัญภาพ (ต่อ)

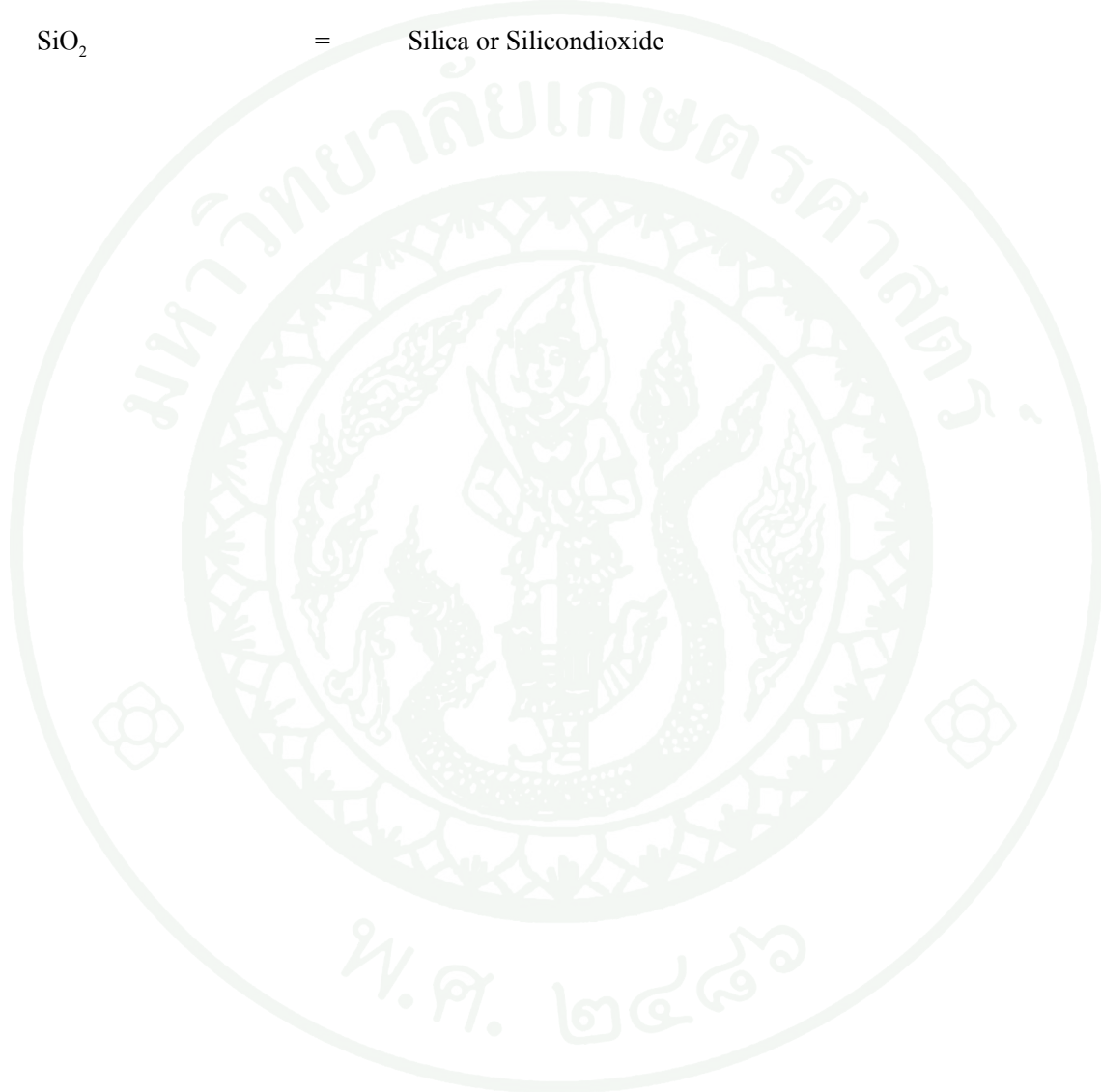
ภาพที่		หน้า
23	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนด้วยเรซิน และซิลิกาจากถ้ำเกลกับปริมาณสารแลกเปลี่ยนไอออนเริ่มต้น	55
24	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนด้วยเรซิน และซิลิกาจากถ้ำเกลกับความเร็วรอบในการเขย่า	56
25	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนด้วยเรซิน และซิลิกาจากถ้ำเกลกับระยะเวลาเขย่า	58
26	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนด้วยเรซิน และซิลิกาจากถ้ำเกลกับระยะเวลาเวลาสัมผัส	59
27	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนด้วยซิลิกา จากถ้ำเกลกับปริมาณน้ำมันไบโอดีเซล	61
28	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนด้วยเรซิน และซิลิกาจากถ้ำเกลกับปริมาณสารกำจัดไอออน	62
29	ไอโซเทอร์มการดูดซับโพแทสเซียมไอออนของแลงเมียร์ด้วยซิลิกา จากถ้ำเกล	63
30	ไอโซเทอร์มการดูดซับโพแทสเซียมไอออนของฟรันทิชด้วยซิลิกา จากถ้ำเกล	64
31	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนของเรซิน กับปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลดิบที่ไหลผ่านคอลัมน์	67
32	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละโพแทสเซียมไอออนที่เหลือของเรซิน กับปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลดิบที่ไหลผ่านคอลัมน์	67
33	Breakthrough curves ของเรซินกับปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลดิบ ที่ไหลผ่านคอลัมน์	68
34	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออน ของเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วนำกลับมาฟื้นฟูสภาพใหม่ กับปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลดิบที่ไหลผ่านคอลัมน์	70

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
35	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละโพแทสเซียมไอออนที่เหลือ ของเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วนำกลับมาฟื้นฟูสภาพใหม่ กับปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลดิบที่ไหลผ่านคอลัมน์	71
36	Breakthrough curves ของเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วนำกลับมา ฟื้นฟูสภาพใหม่กับปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลดิบที่ไหลผ่านคอลัมน์	71
37	เปรียบเทียบลักษณะกายภาพของน้ำมันไบโอดีเซลก่อน(ซ้าย) และหลัง(ขวา)การกำจัดโพแทสเซียมไอออน	76
ภาพผนวกที่		
ง1	อุปกรณ์ในโพแทสเซียมมิเตอร์	98
ง2	ภาพตัดขวางของคอป (Torch) และขดลวดทองแดง (Load coil) สำหรับการเหนี่ยวนำให้เกิดพลาสมา จาก A ไป E	99
ง3	การจำลองการคายพลังงานของอะตอมหรือไอออนของธาตุ จากสถานะกระตุ้นสู่สถานะพื้น	100
ง4	ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอะตอมและไอออน	100
ง5	ICP-OES รุ่น Optima 8000 บริษัท PerkinElmer	100

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

AV	=	Acid Value
FFA	=	Free Fatty Acids
ICP-OES	=	Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer
SiO ₂	=	Silica or Silicon dioxide



การศึกษาประสิทธิภาพของการกำจัดโพแทสเซียมไอออนจากไบโอดีเซลดิบ
ด้วยเรซินและซิลิกาจากเถ้าแกลบ

The Study of Potassium Ion Removal Efficiency from Crude Biodiesel
by Using Resin and Silica from Rice Husk Ash

คำนำ

ประเทศไทยมีความต้องการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นประกอบกับสถานการณ์ราคาน้ำมันเชื้อเพลิงที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ไม่ว่าจะเป็นการใช้กับการคมนาคมขนส่งส่วนบุคคลหรือมวลชน การขนส่งอุตสาหกรรม การเกษตรกรรม น้ำมันดิบยังคงเป็นปัจจัยหลักในการใช้เชื้อเพลิง การพัฒนาพลังงานเชื้อเพลิงหรือพลังงานทางเลือกอื่นๆ จึงมีความจำเป็นด้วยปัจจัยทางด้านการประหยัดพลังงาน การลดมลพิษ ปัจจัยทางสิ่งแวดล้อม เช่น การเดิมเอทานอลผสม เชื้อเพลิงชีวภาพ ไบโอดีเซล เป็นต้น

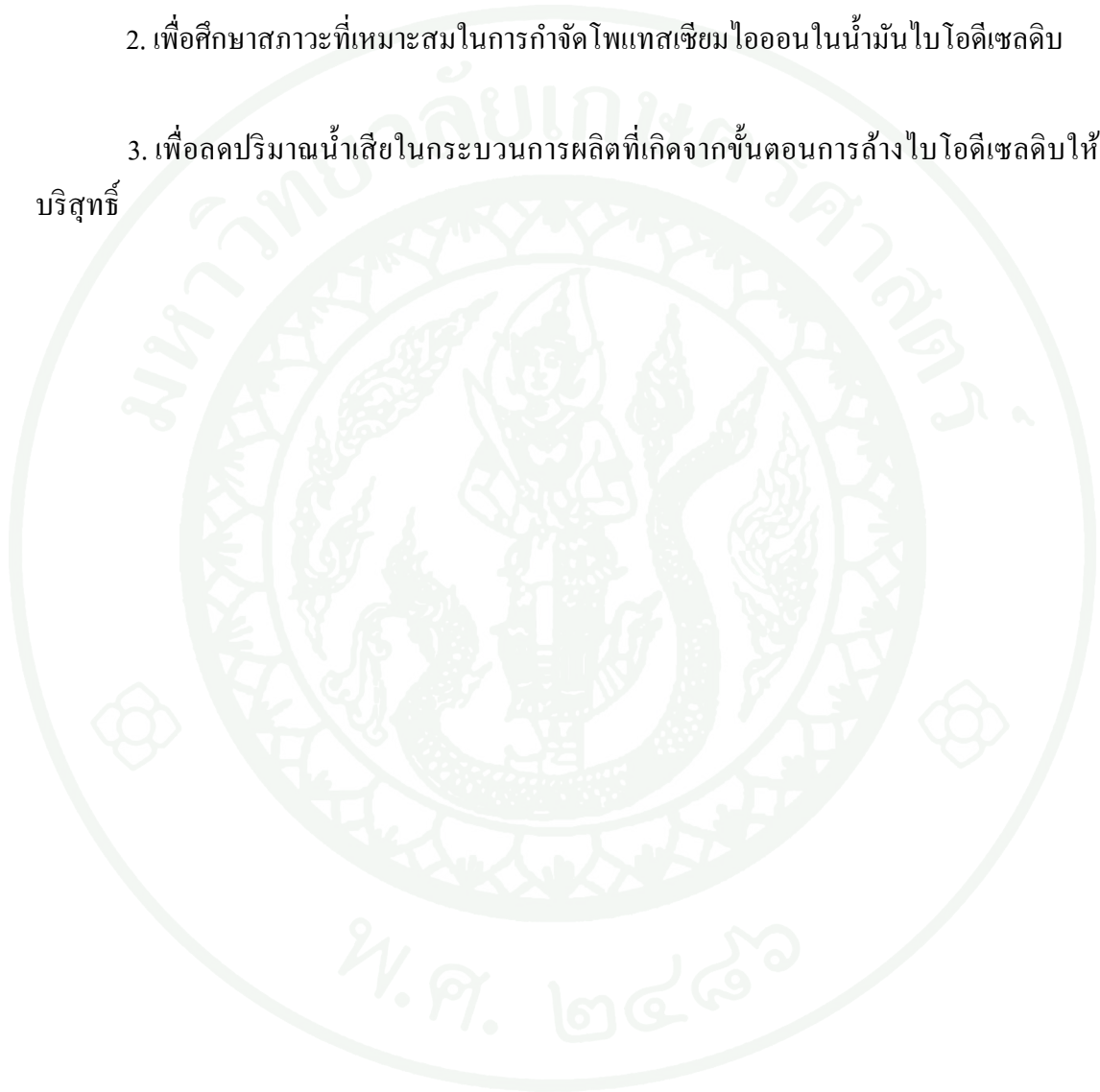
ไบโอดีเซล หมายถึง เชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันพืช หรือไขมันสัตว์ โดยผ่านกระบวนการทางเคมี เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างไขมันให้เป็นเอสเทอร์ของกรดไขมัน วัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิตไบโอดีเซลมีทั้งการนำน้ำมันบริโภคน้ำมันที่ใช้แล้วและพืชผลทางการเกษตรมาเป็นวัตถุดิบ การผลิตทำได้โดยนำน้ำมันหรือไขมันมาทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ (alcohol) เช่น เมทานอล (methanol) หรือเอทานอล (ethanol) และมีตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เพื่อเปลี่ยนน้ำมันหรือไขมันให้เป็นเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันหรือเอทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ซึ่งเอสเทอร์ที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับประเภทของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการผลิต

ในขั้นตอนการผลิตมีขั้นตอนหนึ่งที่ก่อให้เกิดปัญหาทางสิ่งแวดล้อม คือ ขั้นตอนการใช้น้ำล้างไบโอดีเซลดิบที่ผลิตได้ให้บริสุทธิ์ที่ต้องใช้น้ำปริมาณมากและล้างหลายรอบ น้ำเสียที่ได้จากขั้นตอนดังกล่าวมีสารอินทรีย์ปนเปื้อน ทั้งไขมัน กรดไขมันอิสระ กลีเซอรอลและโพแทสเซียม ไอออนจากการเติมสารเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ก่อให้เกิดน้ำเสียเป็นปริมาณมากต้องมีกระบวนการบำบัดที่ยั่งยืนซึ่งทำให้เสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นและยังเป็นการเพิ่มต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซล

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยมีวัตถุประสงค์ที่จะนำเรซินชนิดแลกเปลี่ยนแคทไอออนและซิลิกาจากถ้ำเกลือมากำจัดโพแทสเซียมไอออนในไบโอดีเซลดิบเพื่อให้ไบโอดีเซลดิบบริสุทธิ์โดยอาศัยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนสำหรับเรซินและซิลิกาจากถ้ำเกลืออาศัยการดูดซับในการกำจัดโพแทสเซียมไอออนที่มากเกินไปออกจากน้ำมันไบโอดีเซลที่เตรียมขึ้นมาได้ซึ่งง่ายและสะดวกกว่าวิธีล้างด้วยน้ำ โดยทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการลดปริมาณโพแทสเซียมไอออนในระดับห้องปฏิบัติการด้วยวิธีแบบแบตช์และวิธีการแบบไหลต่อเนื่อง จะนำมาแทนวิธีการทำให้ไบโอดีเซลดิบบริสุทธิ์ที่ยุ่งยาก ช่วยลดปัญหาการใช้น้ำและเกิดน้ำเสียต่อสิ่งแวดล้อม ลดต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซลและเป็นการเพิ่มมูลค่าการใช้ประโยชน์ของเกลือขำอีกด้วย

วัตถุประสงค์

1. เพื่อรู้ถึงประสิทธิภาพของเรซินและซิลิกาจากถ้ำเกลบในการกำจัดโพแทสเซียมไอออนเพื่อให้ไบโอดีเซลดิบบริสุทธิ์
2. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโพแทสเซียมไอออนในน้ำมันไบโอดีเซลดิบ
3. เพื่อลดปริมาณน้ำเสียในกระบวนการผลิตที่เกิดจากขั้นตอนการล้างไบโอดีเซลดิบให้บริสุทธิ์



การตรวจเอกสาร

1. ไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลเป็นที่รู้จักมานานแล้วในสมัยสงครามโลกครั้งที่ 2 แอฟริกาได้นำน้ำมันพืชมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงเครื่องบินในขณะนั้นน้ำมันปิโตรเลียมยังหาได้ง่ายและราคาถูก จึงไม่ได้รับความสนใจจนในปี 2513 เกิดวิกฤตการณ์น้ำมัน หน่วยงานในภาครัฐรวมทั้งสถาบันต่างๆของกลุ่มประเทศผู้ใช้น้ำมันจึงได้ทำการวิจัยและพัฒนาเชื้อเพลิงชนิดนี้ จนกระทั่งผลิตในเชิงพาณิชย์ได้

ไบโอดีเซล คือ เชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันพืช หรือไขมันสัตว์ โดยผ่านกระบวนการทางเคมีเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างไขมันให้เป็นเอสเทอร์ของกรดไขมัน มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลได้โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องยนต์ (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย [วว.], 2550)

ไบโอดีเซลเป็นพลังงานทดแทนจากน้ำมันพืชเพื่อใช้ทดแทนน้ำมันดีเซล มีชื่อทางเคมีคือ เอสเทอร์ เป็นกระบวนการทางเคมีเพื่อเปลี่ยนให้มีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล กล่าวคือ ปฏิกริยาทรานเอสเทอริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์ที่มีอยู่ในน้ำมันพืชและไขมันสัตว์กับเอทานอลหรือเมทานอล โดยกรดหรือเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้อุณหภูมิสูง เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างของไตรกลีเซอไรด์ให้อยู่ในรูปของเอทิลเอสเทอร์หรือเมทิลเอสเทอร์การเรียกชื่อ ขึ้นกับชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เช่น เมทิลเอสเทอร์ เป็นเอสเทอร์ที่ได้จากการใช้เมทานอลเป็นสารในการทำปฏิกิริยา หรือ เอทิลเอสเทอร์ เป็นเอสเทอร์ที่ได้จากการใช้เอทานอล เป็นสารในการทำปฏิกิริยา เป็นต้น (สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน [สวพ.] และ สำนักนโยบายและแผนยุทธศาสตร์ [สนพ.], ม.ป.ป.)

ไบโอดีเซลโดยทั่วไปหมายถึงไบโอดีเซลบริสุทธิ์ จะใช้สัญลักษณ์ B100 หมายถึง น้ำมันเชื้อเพลิงที่มีไบโอดีเซลอย่างเดียวก แต่ถ้าเป็นไบโอดีเซลผสมจะใช้สัญลักษณ์ BXX หมายถึงเชื้อเพลิงที่ประกอบด้วยไบโอดีเซลร้อยละ XX และดีเซลร้อยละ 100-XX เช่น B20 หมายถึงน้ำมันเชื้อเพลิงที่ประกอบด้วยไบโอดีเซลร้อยละ 20 ผสมกับน้ำมันดีเซลร้อยละ 80 (สวพ. และ สนพ., ม.ป.ป.)

1.1 วัตถุดิบที่ใช้ผลิตไบโอดีเซล

วัตถุดิบที่สำคัญในการผลิตไบโอดีเซลคือ น้ำมันพืช ซึ่งน้ำมันพืชทุกชนิดสามารถนำมาผลิตไบโอดีเซลได้ และสามารถจำแนกวัตถุดิบที่นำมาผลิตไบโอดีเซลได้ออกเป็นดังนี้ (วว., 2550)

1.1.1 ปาล์มน้ำมัน (Palm) ไทยมีการผลิตปาล์มเพื่อเป็นพืชน้ำมันสำหรับการบริโภคมากเป็นอันดับหนึ่งของประเทศ โดยมีการนำเข้าและส่งออกน้ำมันปาล์ม ทั้งในรูปของน้ำมันปาล์มดิบ สกัดผ่านกรรมวิธี และชนิดเคมิไฮโดรเจน การผลิตไบโอดีเซลสามารถใช้น้ำมันทุกส่วนที่ได้จากปาล์มน้ำมันมาเป็นวัตถุดิบ เช่น น้ำมันปาล์มดิบ น้ำมันปาล์ม โอเลิน ไคสเดียร์น กรดไขมันปาล์มกลั่น และน้ำมันเมล็ดในปาล์ม

1.1.2 ถั่วเหลือง (Soybean) ประเทศไทยเริ่มทำการปลูกถั่วเหลืองตั้งแต่ปี พ.ศ. 2526 โดยมีการปลูกมากที่สุดในภาคเหนือ รองลงมา ได้แก่ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคกลาง แต่เนื่องจากภูมิอากาศของประเทศไทยไม่เหมาะสม จึงทำให้ผลผลิตต่อไร่ต่ำ

1.1.3 ทานตะวัน (Sunflower) มีชื่อทางพฤกษศาสตร์ว่า *Helianthus annuus* ประเทศไทยมีการปลูกทานตะวันมากที่จังหวัดลพบุรีและสระบุรี มีผลผลิตประมาณ 49 พันตัน ปัจจุบันในการส่งเสริมการเพาะปลูกทานตะวันในประเทศไทยใช้เมล็ดพันธุ์ลูกผสมแปซิฟิก 33 ที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ

1.1.4 น้ำมันพืชและสัตว์ใช้แล้ว (Waste cooking oils) น้ำมันบริโภคที่ผ่านการใช้แล้วเป็นแหล่งวัตถุดิบอีกแหล่งหนึ่งในการผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากน้ำมันบริโภคที่ใช้ทอดซ้ำหลายครั้งจะเกิดมีสารที่ก่อให้เกิดการกลายพันธุ์ และก่อมะเร็งระบบฮอร์โมน ทำให้เกิดผลกระทบและเป็นอันตรายต่อสุขภาพ ดังนั้นในต่างประเทศจึงมีการออกกฎหมายมิให้นำน้ำมันบริโภคที่ผ่านการทอดแล้วกลับมาใช้ในการบริโภคอีก

1.1.5 มะพร้าว (Coconut) ประเทศไทยมีพื้นที่เพาะปลูกมะพร้าวประมาณ 2 ล้านไร่ มีผลผลิตประมาณ 1.3 – 1.4 ล้านตันต่อปี โดยทั่วไปมีการใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นน้ำมันเพื่อการบริโภคและอุตสาหกรรม

1.1.6 สนุ่นคำ

สนุ่นคำมีชื่อภาษาอังกฤษว่า Physic nut หรือ Purging nut และชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Jatropha curcas* L. อยู่วงศ์เดียวกับยางพารา ละหุ่ง มันสำปะหลัง โป๊ยเซียน หนุมานนั่งแท่น เป็นไม้ยืนต้นขนาดกลางสูงประมาณ 2-7 เมตรอายุยืนไม่น้อยกว่า 20 ปี (ระพีพันธุ์ และคณะ, 2525)

สายพันธุ์สนุ่นคำที่พบในประเทศไทย สามารถจำแนกตามลักษณะทางกายภาพได้ 3 สายพันธุ์ (จเร, 2527) คือ

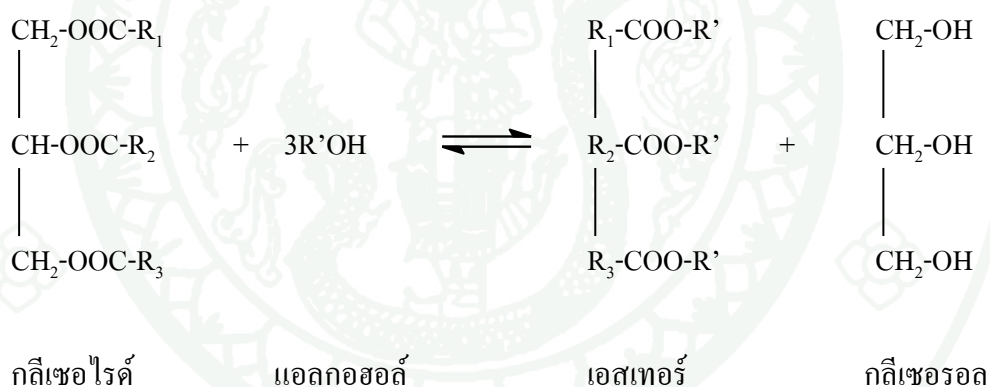
- 1) สายพันธุ์ที่มีผลทรงกลม ขนาดปานกลาง มีเปลือกหนาปานกลาง พบปลูกกันทางภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคใต้
- 2) สายพันธุ์ที่มีผลทรงกลมยาวกว่าสายพันธุ์แรก แต่ยาวกว่าเล็กน้อย ขนาดผลเท่ากัน ปลูกทางภาคเหนือ
- 3) สายพันธุ์นี้มีผลทรงกลม แต่ขนาดเล็กกว่าสองสายพันธุ์แรก ปลูกทางภาคเหนือ และภาคใต้บางจังหวัด

กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันสนุ่นคำกับน้ำมันปาล์ม รวมถึงน้ำมันพืชชนิดอื่นๆ มีลักษณะที่เหมือนกัน ความแตกต่างกันของน้ำมันสนุ่นคำกับน้ำมันปาล์มคือ น้ำมันปาล์มจะมีปริมาณของกรดไขมันอิ่มตัวมากกว่าน้ำมันสนุ่นคำ ซึ่งทำให้น้ำมันปาล์มดิบไม่สามารถเก็บไว้ได้นานเท่ากับน้ำมันสนุ่นคำ เพราะจะทำให้เกิดค่าความเป็นกรดที่สูง ซึ่งจะส่งผลต่อกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีการใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันกับเบส โดยทำให้เกิดสบู่มากขึ้นตามไปด้วย ทำให้ต้องทำปฏิกิริยากับกรดหนึ่งขั้นตอนก่อนจะนำไปทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันกับเบส หรือวิธีการอื่นๆ

สำหรับไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มจะมีค่าจุดไหลเท และจุดหมอกควันสูงเกินมาตรฐานกำหนดของกรมธุรกิจพลังงาน ขณะที่ไบโอดีเซลจากน้ำมันสนุ่นคำไม่มีปัญหานี้ อย่างไรก็ตามไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากน้ำมันทั้งสองชนิดนี้ควรมีการเติมสาร Anti-oxidant ลงไปเพื่อชะลอการเสื่อมสภาพและเป็นการเพิ่มค่าความเสถียร (Stability) ของน้ำมันที่ไม่ได้ใช้งานทันทีหลังจากผลิต

1.2 การสังเคราะห์ไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน

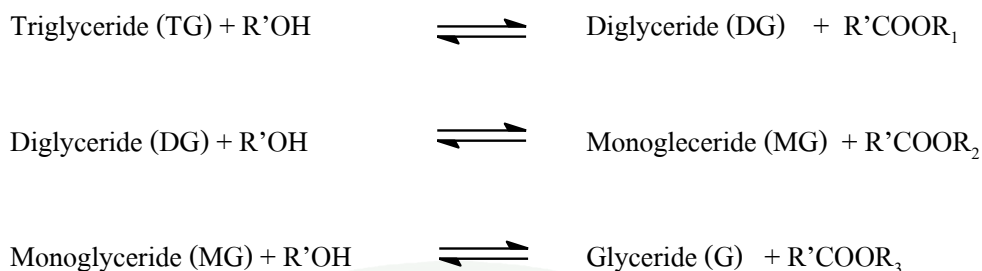
การสังเคราะห์ไบโอดีเซลด้วยวิธีทรานเอสเทอร์ฟิเคชันเป็นที่นิยมและยอมรับอย่างกว้างขวาง เพราะสามารถทำได้ที่อุณหภูมิไม่สูงมากและได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความจำเพาะเจาะจงกว่าการสลายโมเลกุลด้วยความร้อนให้ผลิตภัณฑ์ที่มากกว่าและยังมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลปิโตรเลียม (Demirbas, 2009; Sharma and Singh, 2009) การทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันเป็นการเปลี่ยนน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ซึ่งเป็นสารประเภทไตรกลีเซอไรด์ให้เป็นสารประกอบเอสเทอร์ โดยทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ได้แก่ เมทานอลหรือเอทานอล เรียกว่าปฏิกิริยาแอลกอฮอล์ไลซิส (alcoholysis) และมีผลิตภัณฑ์อื่น คือ กลีเซอรอล (glycerol) เป็นผลพลอยได้จากการผลิต ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านอื่นๆ ได้อีก (Tippayawong *et al.*, 2005) ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันแสดงได้ดังภาพที่ 1 เป็นปฏิกิริยาแบบย้อนกลับได้ จึงต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าช่วยให้เกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้า



ภาพที่ 1 ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์

ที่มา: นคร (2552)

ปฏิกิริยาเกิดผ่านตามลำดับจากไตรกลีเซอไรด์ไปเป็นไดกลีเซอไรด์ และมอนอกลิเซอไรด์ ดังแสดงในภาพที่ 2 ซึ่งในแต่ละขั้นตอน จะเกิดแอลคิลเอสเทอร์ 1 โมเลกุล และสุดท้ายได้แอลคิลเอสเทอร์ 3 โมเลกุลและกลีเซอรอล 1 โมเลกุล เมื่อทำปฏิกิริยาแล้ว กลีเซอรอลจะแยกอยู่ชั้นล่าง ส่วนเอสเทอร์ ไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และมอนอกลิเซอไรด์ จะรวมกันอยู่ชั้นบน



ภาพที่ 2 ขั้นตอนในการเกิดปฏิกิริยาผ่าน ไตร, ไดและมอนอกลิเซอไรด์

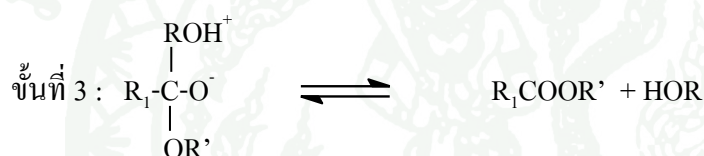
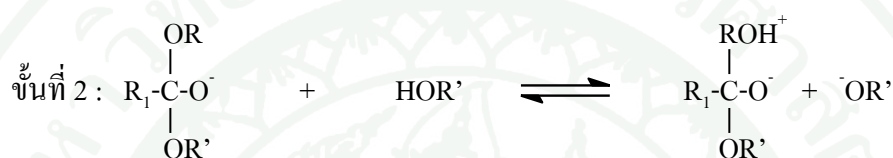
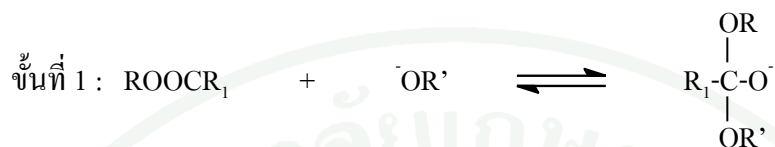
ที่มา: นคร (2552)

โดยทั่วไปสามารถแยกสารเหล่านี้ได้ด้วยการใช้กรวยแยก กระบวนการผลิตในระดับอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะเป็นป้อนวัตถุดิบแบบต่อเนื่อง หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการทรานเอสเทอริฟิเคชันแล้วผลิตภัณฑ์ทั้งสองจะถูกแยกออกจากกัน และเข้าสู่กระบวนการทำให้บริสุทธิ์ต่อไป เมทานอลที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาและปนอยู่กับผลิตภัณฑ์จะถูกแยกออกและนำกลับมาใช้ต่อ มีข้อดีคือ ไม่มีการปล่อยของเสียทิ้ง

ปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์สามารถจำแนกประเภทได้ตามการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดังนี้ (Fukuda *et al*, 2001; Drapcho *et al.*, 2008)

1.2.1 การใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้กัน เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โซเดียมเมทอกไซด์ (NaOCH₃) โซเดียมเอไมด์ โซเดียมไฮไดรด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โพแทสเซียมเมทอกไซด์ (KOCH₃) เป็นต้น ในการทำปฏิกิริยาจึงจำเป็นต้องทำให้เป็นแอลคอกไซด์ไอออน (OC_nH_{2n}⁻) ก่อน โดยกวนตัวเร่งปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ให้เป็นสารมัธยันต์ (intermediates) แอลคอกไซด์ไอออน จากนั้นจึงทำปฏิกิริยากับน้ำมันดังภาพที่ 3 จะใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุลประมาณ 1-8 ชั่วโมง

ปัญหาที่พบในการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพวกโซเดียมหรือโพแทสเซียม คือ การเกิดสบู่จากส่วนประกอบ ของกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ภายในน้ำมันหากมีน้ำรวมอยู่ด้วย ปฏิกิริยาการเกิดสบู่จะเกิดได้ง่ายและเร็ว มีชื่อเรียกว่า สaponification (saponification)



ภาพที่ 3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันโดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบส

ที่มา: นคร (2552)

1.2.2 การใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ ได้แก่ กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาและผลผลิตน้อยกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบส และใช้เวลานานในการทำปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุล คือ ประมาณ 5-20 ชั่วโมง

1.2.3 การใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เอนไซม์ไลเปสสามารถเร่งปฏิกิริยาการย่อยไขมันให้ได้เป็นกรดไขมันและกลีเซอรอล และเร่งปฏิกิริยาย้อนกลับคือ สร้างกลีเซอไรด์จากกลีเซอรอลและกรดไขมัน แหล่งที่มาของเอนไซม์ไลเปสมีทั้งจากพืช สัตว์และจุลินทรีย์หลายชนิด ซึ่งในปัจจุบัน การผลิตกรดไขมันและกลีเซอไรด์ต่างๆ ส่วนใหญ่ได้จากการย่อยสลายไขมันที่ความร้อนและความดันสูง

1.2.4 การทำปฏิกิริยาที่สภาวะเหนือวิกฤตโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถทำได้โดยใช้สภาวะที่รุนแรง เช่น ใช้สภาวะเหนือวิกฤต (supercritical condition) ของแอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ โดยทั่วไปแล้วยิ่งความเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัวเพิ่มขึ้น อัตราการเอสเทอร์ฟิเคชันก็เร็วขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้การทำปฏิกิริยาระหว่างกรดไขมันและแอลกอฮอล์สามารถทำได้โดยการสังเคราะห์ด้วยเอนไซม์ในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะวิกฤต (Knez, 2009)

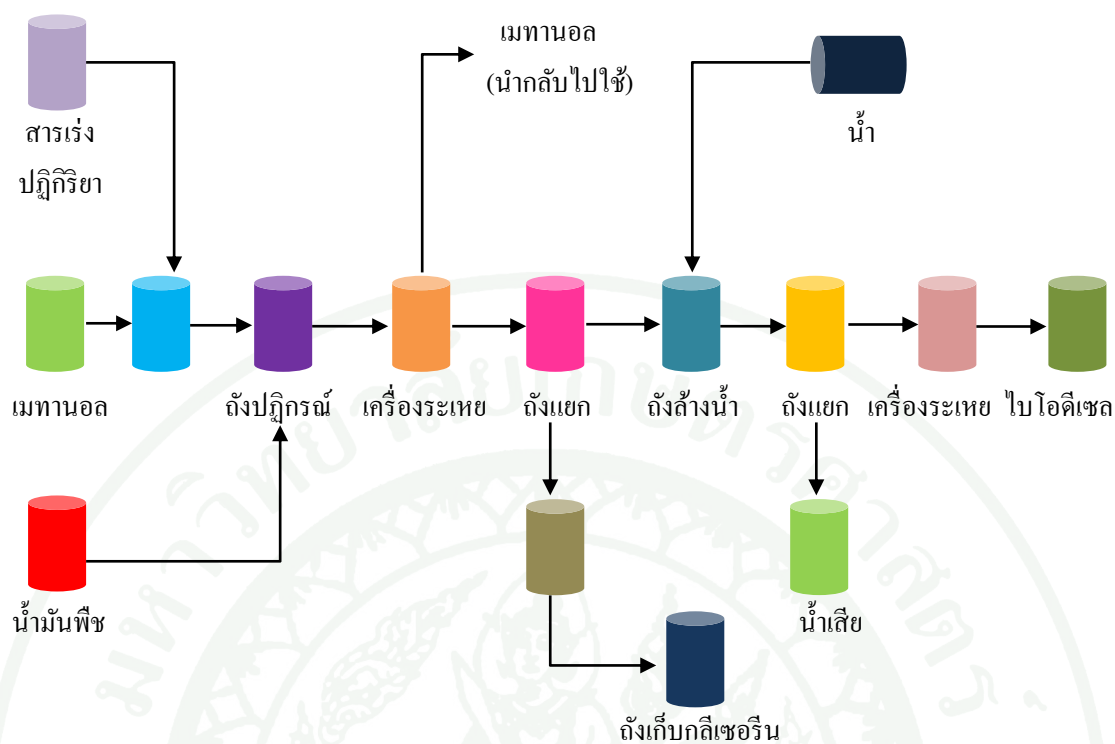
ข้อดีของการสังเคราะห์แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานี้คือ ขั้นตอนท้ายไม่มีสารเจือปนจากตัวเร่งปฏิกิริยา ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยกว่า และไม่เกิดปฏิกิริยาเป็นสบู่อะดองเช่นการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเบส แต่มีข้อเสีย คือ การใช้สภาวะที่รุนแรงต้องมีอุปกรณ์เครื่องมือที่อยู่ยาก ใช้พลังงานมากค่าใช้จ่ายสูง (Demirbas, 2003)

1.3 ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซล

โดยทั่วไป กระบวนการทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน ประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังแผนผังการผลิตไบโอดีเซล ดังแสดงในภาพที่ 4 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ (ว., 2550)

ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมวัตถุดิบน้ำมันพืชก่อนทำการป้อนน้ำมันพืชเข้าสู่ระบบการผลิต ต้องทำการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด และปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันพืช น้ำมันพืชทั้งน้ำมันใหม่ หรือน้ำมันที่ผ่านการทอดแล้ว จะมีค่าความเป็นกรดในปริมาณที่แตกต่างกัน การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดก่อนทำปฏิกิริยา จะทำให้ทราบถึงปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาที่ต้องใช้ในการทำปฏิกิริยา ซึ่งจะส่งผลให้ได้ผลผลิตสูง เกิดปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์ และลดสูญเสียน้ำมัน จากนั้นจึงป้อนน้ำมันเข้าสู่ถังเตรียมวัตถุดิบ และควบคุมอุณหภูมิไว้ตามที่กำหนดไว้ โดยทั่วไปจะใช้อุณหภูมิการผลิตที่ 60-70 องศาเซลเซียส

ขั้นตอนที่ 2 การเตรียมสารเร่งปฏิกิริยาเตรียมสารเร่งปฏิกิริยา โดยผสมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เป็นสารเร่งปฏิกิริยากับเมทานอลในสัดส่วนที่กำหนดและเหมาะสมให้เข้ากันดีของผสมที่ได้เรียกว่า โพแทสเซียมเมทอกไซด์ ในการผสมต้องระมัดระวังไม่ให้มีน้ำปะปนลงไป จากนั้นจึงป้อนโพแทสเซียมเมทอกไซด์เข้าถังพัก เตรียมพร้อมในการป้อนโพแทสเซียมเมทอกไซด์เข้าทำปฏิกิริยากับน้ำมันพืชต่อไป



ภาพที่ 4 ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซล

ที่มา: วว. (2550)

2. เทคนิคในการกำจัดไอออน

ระบบการแลกเปลี่ยนไอออนหรือการกำจัดไอออนสามารถแบ่งกระบวนการทำงานได้ 2 เทคนิค คือ เทคนิคแบบแบตช์ (Batch technique) และเทคนิคแบบคอลัมน์ (Column technique)

2.1 เทคนิคแบบแบตช์ (Batch technique)

เทคนิคแบบแบตช์เป็นกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนที่ง่ายที่สุด วิธีการนี้สามารถทำได้โดยใส่เรซินลงในสารละลายที่ต้องการแยก คนหรือเขย่าจนแน่ใจว่าเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนจนถึงสมดุล จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เฟสทั้งสองแยกออกจากกัน จะได้ไอออนที่ต้องการแยกถูกแยกไปอยู่ในเฟสของสารแลกเปลี่ยนไอออน ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของวิธีนี้จะขึ้นอยู่กับค่าคงที่สมดุล (Equilibrium Constant) ของระบบการแลกเปลี่ยนไอออน

2.2 กระบวนการทำงานแบบคอลัมน์ (Column Process)

เทคนิคของการทำไอออนเอ็กซ์เชนจ์แบบคอลัมน์ ช่วยทำให้การแลกเปลี่ยนไอออนเกิดได้สมบูรณ์ขึ้น เพราะเมื่อเริ่มใส่สารตัวอย่างลงบนคอลัมน์ จะเกิดสมดุลของการแลกเปลี่ยนขึ้น คือ



H^+ ที่ถูกแลกเปลี่ยนออกมากจะถูกพาให้เคลื่อนที่ลงในคอลัมน์ด้วยตัวพา ทำให้ไม่มี H^+ สำหรับเกิดปฏิกิริยากลับมาทางซ้ายมือ หรือถ้ามีบางส่วนเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับมาทางซ้ายมือได้ M^+ กลับคืนมา M^+ ก็จะถูกพาให้เคลื่อนที่ลงในคอลัมน์พบกับ H^+R^- ส่วนใหม่ที่สามารถแลกเปลี่ยนกันได้ อีก ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ไอออนที่อยู่ในสารละลายทั้งหมดถูกดูดซับไว้หรือยึดไว้ในคอลัมน์ได้อย่างสมบูรณ์

ถ้าสารผสมของแคทไอออน 2 ตัว คือ A^+ และ B^+ หรือมากกว่าถูกนำมาผ่านลงในคอลัมน์ ที่บรรจุแคทไอออนเอ็กซ์เชนจ์ที่มีปริมาณมากพอ ไอออนทุกตัวจะถูกดูดซับไว้ในคอลัมน์ โดยมีแรงยึดไว้ต่างกัน ถ้าแคทไอออน A^+ ถูกยึดไว้ได้เหนียวแน่นกว่า B^+ เมื่อใช้ตัวอีลูทที่เหมาะสมพบว่า B^+ จะถูกอีลูทออกจากคอลัมน์ได้ก่อน A^+ ทำให้เกิดการแยกเป็นส่วนๆ ขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะของการโครมาโตกราฟี จึงเรียกเทคนิคของการทำไอออนเอ็กซ์เชนจ์แบบคอลัมน์นี้ว่า ไอออนเอ็กซ์เชนจ์โครมาโตกราฟี (Ion exchange chromatography) สามารถใช้ในการแยกไอออนที่มีค่าอัตราส่วนของการกระจายต่างกันไม่มากนักได้ ในขณะที่วิธีการแบบแบทช์ทำไม่ได้ในการทำไอออนเอ็กซ์เชนจ์แบบคอลัมน์จำเป็นต้องทราบความหมายของคำที่ต้องใช้ดังนี้ คือ

Influent หมายถึง สารละลายที่นำมาใส่ในคอลัมน์ ถ้าสารละลายนี้ถูกใช้ทำให้ไอออนที่ถูกดูดซับไว้ในคอลัมน์เคลื่อนที่ออกจากคอลัมน์ได้จะเรียกว่า eluent กระบวนการที่เกิดขึ้นเรียกว่า Elution

Affluent หมายถึง สารละลายที่ออกมาจากคอลัมน์ ถ้าสารละลายนี้มีสารที่ถูกดูดซับไว้เคลื่อนที่ออกมาด้วยจะเรียกว่า eluate

2.2.1 จิตความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange Capacity)

ในการออกแบบระบบแลกเปลี่ยนไอออน หรือคัดเลือกชนิดของเรซินให้เหมาะสมกับงาน สิ่งที่ต้องพิจารณาคือ จิตความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน ทั้งนี้เพราะพารามิเตอร์นี้มีบทบาทอย่างสำคัญต่อประสิทธิภาพ และราคาของเรซินชนิดมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน

จิตความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน หมายถึง ปริมาณไอออนที่เรซินสามารถแยกออกมาจากน้ำ (มักมีหน่วยสมมูลย์ หรือวัดในหน่วยกิโลเกรนของหินปูน) ต่อหน่วยน้ำหนัก หรือหน่วยปริมาตรของเรซิน หน่วยแสดงจิตความสามารถของเรซินจึงอาจเป็นได้หลายแบบ ดังนี้

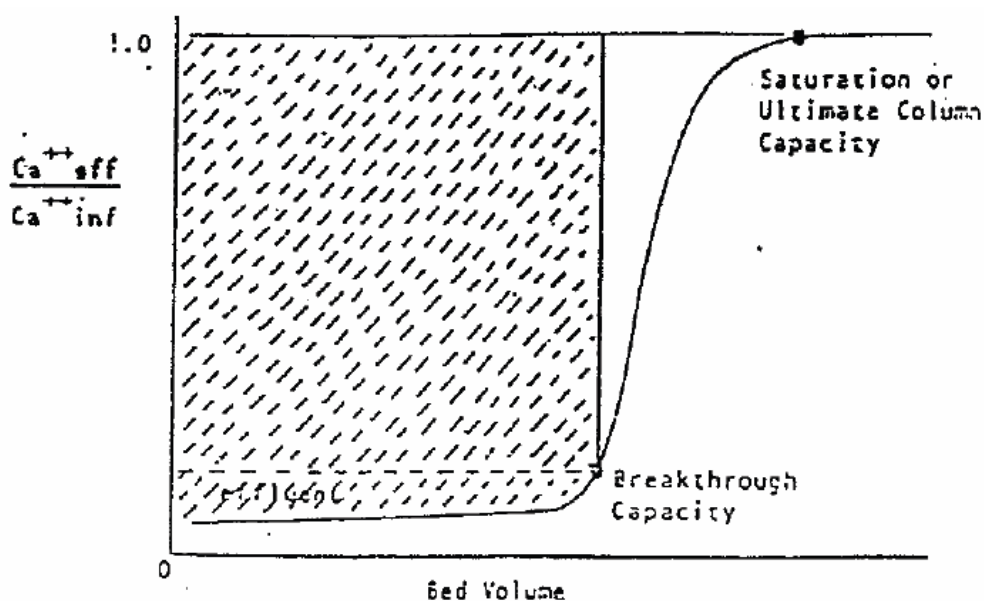
- 1) หน่วยสมมูลย์ต่อปริมาตรของเรซิน เช่น meq/mL, eq/L
- 2) หน่วยสมมูลย์ต่อน้ำหนักของเรซิน เช่น meq/g
- 3) หน่วยน้ำหนัก ในเทอมหินปูนต่อปริมาตรของเรซิน เช่น กิโลกรัมต่อลิตรหรือ กิโลกรัมต่อลบ.ฟุต

จิตความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน แบ่งออกเป็นจิตความสามารถสูงสุด และจิตความสามารถใช้งาน

จิตความสามารถสูงสุด หมายถึง ความสามารถทั้งหมดในการแลกเปลี่ยนไอออน โดยพิจารณาจากจำนวนทั้งหมดของส่วนที่มีไว้สำหรับแลกเปลี่ยนไอออน ในโครงร่างตาข่ายโมเลกุลของเรซิน โดยการนำเรซินมาพ่นกำลังด้วยสารเคมีเพื่อเปลี่ยนรูปให้อยู่ในไอออนที่มีประจุก่อนแล้วแยกเอาไอออนที่มีออกมาจากเรซิน แล้วนำไปหาปริมาณด้วยการวิเคราะห์ปริมาณทางเคมี ปริมาณของไอออนทั้งหมดที่สามารถแลกเปลี่ยนโดยเรซินมีค่าเท่ากับจำนวนหมู่ไอออน ที่จับอยู่กับโครงร่างของเรซิน เช่น นำเรซินที่ใช้แลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุบวกให้อยู่ในรูปของไฮโดรเจนด้วยกรด แล้วแยกเอาไฮโดรเจนไอออนออกมาโดยใช้สารละลายเกลือแอมโมเนียม และเก็บรวบรวมไฮโดรเจนไอออนที่แยกออกมาจากทุกส่วนให้หมดแล้วนำไปไตเตรตหาปริมาณไฮโดรเจน ไอออนด้วยการใช้สารละลายด่างมาตรฐานที่รู้ความเข้มข้นแน่นอน

ค่าความจุ (Capacity) ส่วนมากมักเรียกเป็นมิลลิสมมูลย์/กรัมของเรซิน หมายถึง จำนวนไอออนที่แลกเปลี่ยนได้เป็นมิลลิสมมูลย์ของสารเรซินในสภาพแห้ง 1 กรัม ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนจะแปรผันตามปริมาณ Crosslinking เรซินมักสามารถแสดงอำนาจการแลกเปลี่ยนไอออนได้น้อยกว่าค่าสูงสุด เนื่องจากสภาวะแวดล้อมที่ใช้งานมักไม่เอื้ออำนวยให้

ขีดความสามารถใช้งาน หมายถึง ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนที่ใช้ประโยชน์จริง และเกิดจริงในการใช้งาน โดยบรรจุเรซินไว้ในคอลัมน์ แล้วทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนจนกระทั่งถึงจุดยุติที่กำหนด หรือเมื่อเริ่มปรากฏไอออนที่ไม่ต้องการในน้ำที่ออก ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนนี้แปรผันตามอัตราการไหล ความสูงของชั้นเรซิน ขนาดของเม็ดเรซิน ระดับรีเจนเนอเรชัน อุณหภูมิ ความเข้มข้น และชนิดของไอออนในน้ำที่ต้องการกำจัดออกและลักษณะสมบัติที่ต้องการของน้ำออก ขีดความสามารถนี้ใช้ตรวจสอบประสิทธิภาพการทำงานและสภาพของเรซิน



ภาพที่ 5 ขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน

ที่มา: เกศสุชา (2537)

3. กระบวนการดูดซับ

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญของกระบวนการทางกายภาพ ชีวภาพ และเคมี การดูดซับได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสีย การดูดซับเป็นความสามารถของสารในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในแก๊สหรือของเหลวให้มาเกาะจับและติดบนผิว ซึ่งเป็นปรากฏการณ์เคลื่อนย้ายจากของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็งที่เป็นส่วนสำคัญของกระบวนการนี้ โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของตัวถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของตัวดูดซับคือ ความพรุน เพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสภายใน นอกจากนี้คุณสมบัติอื่นๆ ของตัวดูดซับ เช่น โครงสร้าง การจัดเรียงตัว ขนาด และความสม่ำเสมอ ล้วนมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ การเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสมทำให้สามารถแยกโมเลกุลที่เราต้องการออกมา โดยให้ตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับนั้นถูกดูดซับจนอิ่มตัวแล้ว จากนั้นนำมาไล่เอาโมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้ ออก โดยการเปลี่ยนสภาพสมดุล เช่น การเปลี่ยนอุณหภูมิ หรือเปลี่ยนความดัน ทำให้ตัวดูดซับกลับสู่สภาพเดิมและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก

การดูดซับจึงเป็นกระบวนการเคลื่อนย้ายของตัวถูกดูดซับจากตัวกลางหนึ่งไปสะสมที่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีการสัมผัสกันของพื้นผิวระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ โดยที่ตัวถูกดูดซับจะไปเกาะที่ผิวของตัวดูดซับ เช่น พื้นผิวระหว่างของเหลวกับของแข็ง พื้นผิวระหว่างของแข็งกับแก๊ส พื้นผิวระหว่างของแข็งกับของแข็ง และพื้นผิวระหว่างของเหลวกับของเหลว กระบวนการดูดซับเหล่านี้สามารถเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น สารอินทรีย์หรือโลหะถูกดูดซับในดินหรือตะกอนดินในทะเล มหาสมุทร และแม่น้ำ กระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นโดยมนุษย์ เช่น การใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนจากอากาศและน้ำ กระบวนการดูดซับน้ำมีการนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมหลายด้านด้วยกัน เช่น การใช้ดินเหนียวดูดซับยาฆ่าแมลงในดิน หรือดูดซับโลหะหนักจากแหล่งฝังกลบ (landfill) เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารพิษที่จะลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน

การดูดซับมีบทบาทที่สำคัญต่อการเคลื่อนย้าย การเปลี่ยนรูปของสารเคมีในสิ่งแวดล้อม โดยที่โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะถูกจำกัดความอิสระในการเคลื่อนย้าย (จะตกตะกอนไปพร้อมกับตัวดูดซับ) เทียบกับโมเลกุลอิสระส่วนที่ไม่ถูกดูดซับ และโมเลกุลที่ไม่ถูกดูดซับจะเกิดกระบวนการเปลี่ยนรูปของสารเคมี การย่อยสลายด้วยแสงหรือการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ สามารถเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าโมเลกุลชนิดเดียวกัน แต่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ (นิพนธ์ และ คณิตา, 2550)

3.1 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

3.1.1 การแพร่ภายนอก (external diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกละลายเข้าถึงตัวดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีของเหลวห่อหุ้มโดยโมเลกุลแทรกผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าของตัวดูดซับ

3.1.2 การแพร่ผ่านภายใน (internal diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลายแทรกตัวเข้าถึงช่องว่างตัวดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ

3.1.3 ปฏิกิริยาพื้นผิว (surface reaction) ปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลายติดที่ผิวของตัวดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นควรคำนึงถึงการต้านทานจากปฏิกิริยาพื้นผิวด้วย

3.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกละลาย

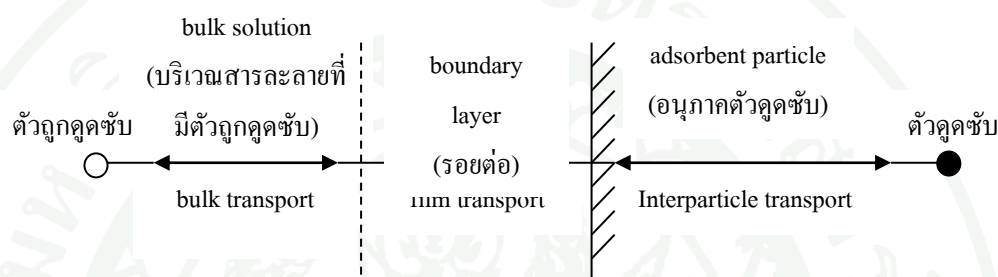
อัตราการดูดซับมีความสำคัญมาก อัตราการดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลได้เร็ว อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีการต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุลซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนย่อย ดังนี้

3.2.1 การขนส่งอนุภาค (bulk transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกละลายในของเหลวจะถูกส่งไปยังที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ หรือผิวสัมผัสน้ำที่ห่อหุ้มตัวดูดซับ

3.2.2 การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลผิวหน้าชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ตัวถูกละลายแพร่ผ่านฟิล์มน้ำไปยังผิวของตัวดูดซับ จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับขั้นตอนหนึ่ง

3.2.3 การขนส่งภายในอนุภาค (Interparticle transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ (Pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายในขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกัน

การยึดติดของตัวดูดซับบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะมีแรงยึดเหนี่ยวเกิดขึ้น ซึ่งอาจเป็นแรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพหรือทางเคมีหรือทั้งสองแบบ



ภาพที่ 6 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

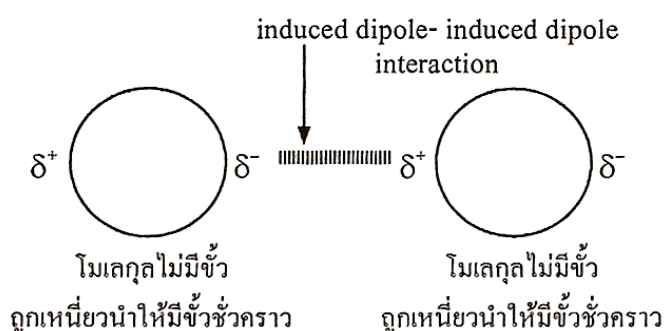
3.3 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล (intermolecular force)

แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับนั้น อาจเป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางกายภาพ (physical force) หรือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางเคมี (chemical force) หรือในบางกรณีอาจเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลทั้งสองแบบ

3.3.1 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางกายภาพที่เกี่ยวกับตัวดูดซับ ได้แก่ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) คือ แรงที่ยึดเหนี่ยวโมเลกุล (โควาเลนต์) ให้อยู่ด้วยกัน โดยโมเลกุล (โควาเลนต์) ทุกชนิดทั้งโมเลกุลมีขั้ว และโมเลกุลไม่มีขั้ว ต่างมีแรงแวนเดอร์วาลส์ยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลกับโมเลกุล เมื่อมวลโมเลกุลเพิ่มขึ้นแรงแวนเดอร์วาลส์จะเพิ่มขึ้น แรงแวนเดอร์วาลส์มี 3 ประเภท ดังนี้

1) แรงแวนเดอร์วาลส์ ระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้วซึ่งเรียกว่าแรงลอนดอน (London force) หรือแรงแผ่กระจาย (Dispersion force) เกิดขึ้นได้เนื่องจากอิเล็กตรอนในโมเลกุลเคลื่อนที่ตลอดเวลาในขณะใดขณะหนึ่ง กลุ่มหมอกอิเล็กตรอนในโมเลกุลไม่ได้กระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอในลักษณะที่สมมาตร แต่จะเคลื่อนที่ไปหนาแน่นด้านใดด้านหนึ่ง ทำให้ด้านนั้นมีขั้วไฟฟ้าลบมากขึ้นกว่าปกติ อีกด้านก็จะแสดงอำนาจขั้วไฟฟ้าบวก หรือกล่าวได้ว่า ทำให้โมเลกุลนั้นกลายเป็นโมเลกุลมีขั้วชั่วคราว (Induce Dipole) ขึ้น ขั้วของโมเลกุลที่เกิดขึ้นนี้ จะไปเหนี่ยวนำโมเลกุลข้างเคียงมีขั้วขึ้นมา ถ้าโมเลกุลมีขั้วหันขั้วบวกไปทางโมเลกุลใดก็จะเหนี่ยวนำให้โมเลกุลนั้นเกิดขั้วลบขึ้นทางด้านที่ติดกัน โดยวิธีนี้โมเลกุลจะเกิดการเหนี่ยวนำกันต่อไปจนเกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ (Induced Dipole-Induced Dipole Attraction)

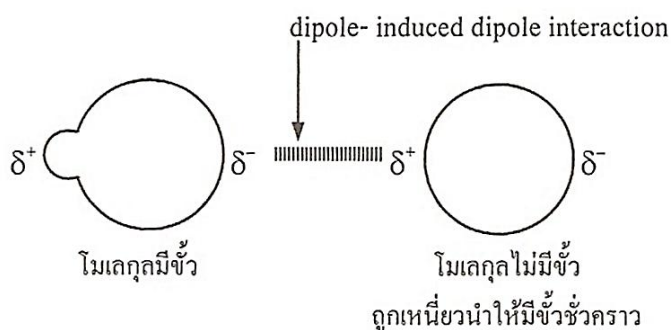
แรงแวนเดอร์วาลส์มีค่าเพิ่มขึ้นตามมวลโมเลกุล เพราะเมื่อโมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้น จำนวนอิเล็กตรอนย่อมเพิ่มขึ้นด้วย เมื่ออิเล็กตรอนจำนวนมากไปอยู่หนาแน่นทางด้านใดด้านหนึ่งจะแสดงอำนาจไฟฟ้าลบมาก และด้านตรงข้ามก็จะมีอำนาจขั้วไฟฟ้าบวกมากด้วย แรงดึงดูดระหว่างขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำจึงมีความแข็งแรงมากขึ้นตามไปด้วย นอกจากจำนวนอิเล็กตรอนในโมเลกุลแล้วรูปร่างของโมเลกุลก็มีส่วนที่จะทำให้แรงแวนเดอร์วาลส์มีความแข็งแรงมากหรือน้อย เป็นต้นว่า ถ้าโมเลกุลไม่ซับซ้อน อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปอยู่หนาแน่นทางด้านใดด้านหนึ่งได้ง่าย การเหนี่ยวนำให้เกิดขั้วของโมเลกุลจึงเป็นไปได้ง่าย แต่ถ้าโมเลกุลมีรูปร่างซับซ้อน อิเล็กตรอนที่ถูกเหนี่ยวนำจะเกิดการบดบังกัน สภาพขั้วจึงน้อย ทำให้แรงดึงดูดน้อยตามไปด้วย



ภาพที่ 7 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้วที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

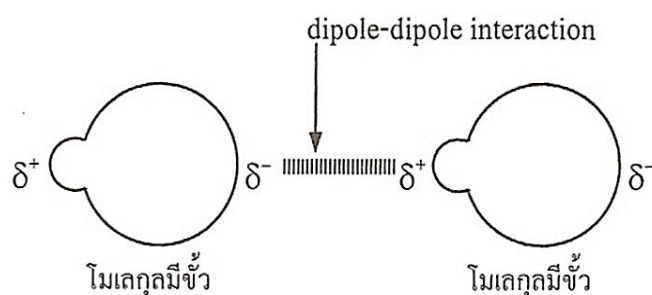
2) แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลไม่มีขั้ว กรณีเช่นนี้เกิดจากโมเลกุลมีขั้วเข้าใกล้โมเลกุลไม่มีขั้ว จะเกิดการเหนี่ยวนำทำให้โมเลกุลที่ถูกเหนี่ยวนำกลายเป็นโมเลกุลมีขั้วตามไปด้วย จึงเกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้วกับขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ (Dipole-Induced Dipole Attraction)



ภาพที่ 8 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลไม่มีขั้วที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

3) แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลมีขั้ว ด้านหนึ่งของโมเลกุลจะแสดงอำนาจไฟฟ้าบวกและอีกด้านหนึ่งแสดงอำนาจไฟฟ้าลบ ขั้วไฟฟ้าบวกกับขั้วไฟฟ้าลบ จึงดึงดูดกัน เรียกว่า แรงไดโพล-ไดโพล (Dipole-Dipole attraction)



ภาพที่ 9 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้ว

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

ในกรณีที่โมเลกุลประกอบด้วยอะตอมของไฮโดรเจนกับอะตอมของธาตุอื่นที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูง ได้แก่ ธาตุฟลูออรีน ออกซิเจน และไนโตรเจน ทำให้เกิดพันธะสภาพมีขั้วสูง โดยด้านไฮโดรเจนอะตอมมีสภาพขั้วบวกจึงเกิดแรงดึงดูดกับอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวของอะตอมที่มีอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูงในโมเลกุลที่อยู่ข้างเคียง แรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นในลักษณะเช่นนี้เรียกว่า พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond)

แรงแวนเดอร์วาลส์ เป็นแรงที่ไม่แข็งแรงนักเมื่อเทียบกับแรงยึดเหนี่ยวชนิดอื่นๆ เช่น การทำลายแรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลของคลอรีน (Cl_2) 1 โมล ใช้พลังงาน 25 กิโลจูล แต่พลังงานที่ต้องใช้เพื่อทำลายพันธะ Cl-Cl ในโมเลกุลคลอรีนมีค่าถึง 244 กิโลจูลต่อโมล ความแข็งแรงของแรงแวนเดอร์วาลส์มีค่าระหว่าง 0.01-0.1 ของพันธะโควาเลนต์ ดังนั้นการดูดซับทางกายภาพสามารถผันกลับคือ เกิดการคายหรือเกิดการคายสารออก (Desorption) อันเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยว (แรงแวนเดอร์วาลส์) ที่ไม่แข็งแรงระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ

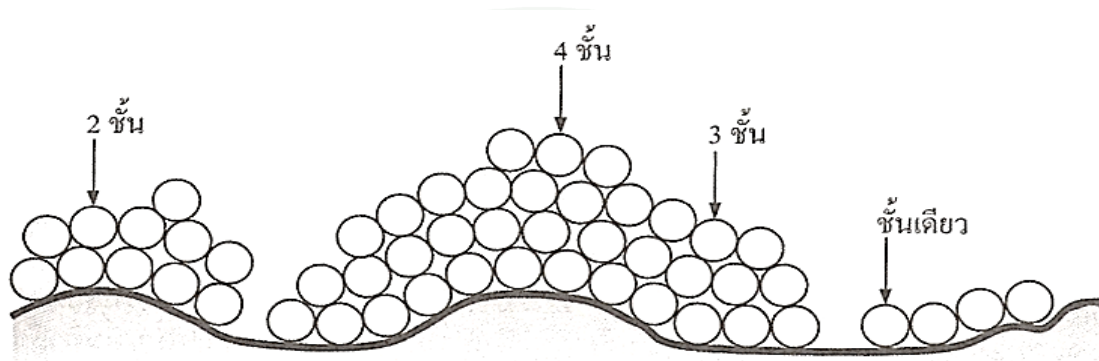
3.3.2 แรงยึดเหนี่ยวทางเคมี คือ การสร้างพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ซึ่งอาจเป็นพันธะไอออนิก (แรงดึงดูดระหว่างไอออนบวกกับไอออนลบ) หรือพันธะโควาเลนต์ การใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน โดยเกิดสมมูลทั้งแรงดูด (อิเล็กตรอนกับโปรตอน) และแรงผลัก (อิเล็กตรอนกับอิเล็กตรอน และโปรตอนกับโปรตอน) การเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ มีผลทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ขึ้น และการดูดซับจะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayered) ทำให้ไม่สามารถผันกลับได้ (Irreversible process) จึงไม่เกิดการคาย

3.4 รูปแบบของการดูดซับ

สำหรับรูปแบบของการดูดซับนั้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

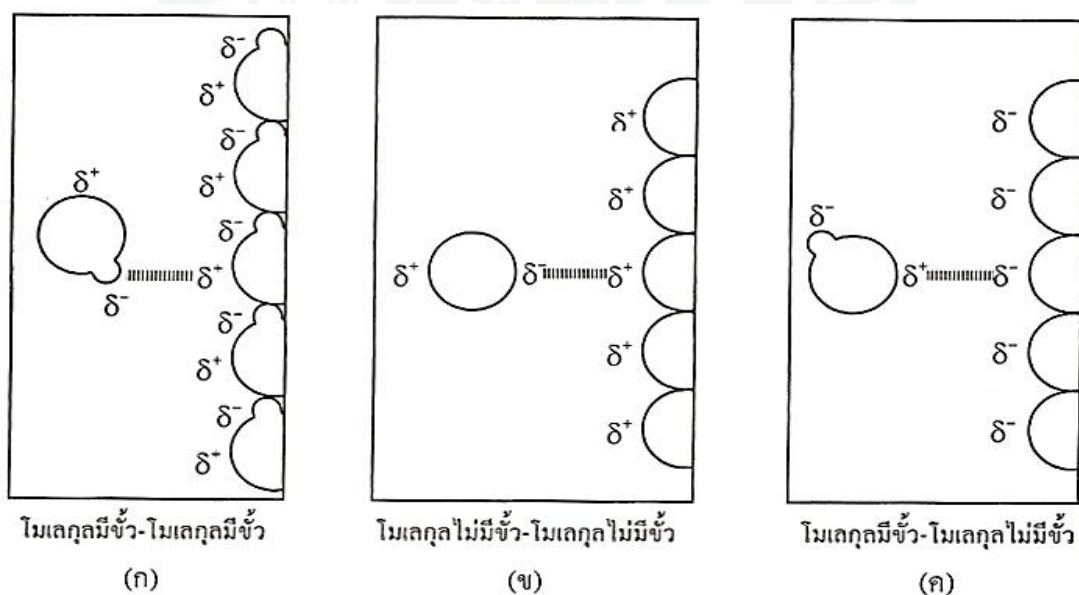
3.4.1 การดูดซับทางกายภาพ (physisorption หรือ physical adsorption หรือ van der waals adsorption) เป็นแรงที่ทำให้เกิดการเกาะ หรือยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับโมเลกุลที่พื้นผิวหน้าของตัวดูดซับ จัดเป็นแรงดูดค่อนข้างอ่อน เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ แรงไดโพล-ไดโพล และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีทั้งของตัวถูกดูดซับ และตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเกาะอยู่ บนผิวตัวดูดซับในลักษณะที่ซ้อนกันเป็นหลายชั้น (multilayered) โดยแต่ละชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกดูดซับบนชั้นโมเลกุลที่ถูกซับก่อนหน้านี และ

จำนวนชั้นของโมเลกุลตัวถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับ และระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวถูกดูดซับด้วยในระหว่างชั้น อาจเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์อย่างใดอย่างหนึ่ง การดูดซับทางกายภาพโดยทั่วไปจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้พลังงานของระบบลดลงเป็นการทำให้ระบบมีความเสถียรมากขึ้นดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่ชั้น

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)



ภาพที่ 11 การยึดเหนี่ยวด้วยแรงกายภาพ

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)

จากภาพที่ 11 ลักษณะการยืดเหนียวด้วยแรงกายภาพ มีดังนี้

(ก) ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของตัวถูกละลายและตัวดูดซับต่างก็เป็นโมเลกุลมีขั้วทั้งคู่

(ข) ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลของตัวถูกละลายและตัวดูดซับต่างก็เป็นโมเลกุลไม่มีขั้วทั้งคู่

(ค) ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลตัวถูกละลายเป็นโมเลกุลมีขั้ว และโมเลกุลตัวดูดซับเป็นโมเลกุลไม่มีขั้ว

3.4.2 การดูดซับทางเคมี จะมีลักษณะเหมือนกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี กล่าวคือ จะต้องมีการสร้างพันธะเคมีของตัวถูกละลายกับพื้นผิวของตัวดูดซับ การดูดซับมีการถ่ายโอนอิเล็กตรอน (สร้างพันธะไอออนิก) หรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน (สร้างพันธะโควาเลนต์) ทำแรงยึดเหนี่ยวค่อนข้างสูงกว่าแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นในการดูดซับทางกายภาพ มีผลทำให้การดูดซับทางเคมีโดยส่วนใหญ่จะผันกลับไม่ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับทางกายภาพที่สามารถจะเกิดการผันกลับได้ภายใต้สภาวะเดียวกัน การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นในบริเวณจำเพาะเจาะจงเท่านั้น และโมเลกุลตัวถูกละลายเกาะอยู่บริเวณดังกล่าว จะเป็นแบบชั้นเดียว และเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง แต่การดูดซับทางกายภาพเกิดได้ทั่วไปบนพื้นผิวตัวดูดซับ

การดูดซับทางกายภาพจะให้พลังงานต่ำ ประมาณ 10 หรือน้อยกว่า 10 กิโลแคลอรีต่อโมลของตัวถูกละลาย ส่วนการดูดซับทางเคมีจะให้พลังงานสูงโดยประมาณ 20-100 กิโลแคลอรีต่อโมลของตัวถูกละลาย (นิพนธ์ และ คณิตา, 2550)

3.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

3.5.1 ความดันป่วน อัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับ film diffusion หรือ pore diffusion ซึ่งแล้วแต่ความดันป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความดันป่วนต่ำ ฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนามากและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของตัวถูกละลายเข้าไปหาตัวดูดซับ ดังนั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้า

ความปั่นป่วนสูงจะเกิดฟิล์มบาง ทำให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าหาตัวดูดซับได้รวดเร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุน ในการนี้การแพร่ผ่านรูพรุนจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับ

3.5.2 ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ความสามารถในการดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ นั่นคือ ตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากจะดูดโมเลกุลของตัวถูกละลายได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย และอัตราการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดตัวดูดซับ เช่น คาร์บอนผง (Powder Activated Carbon, PAC) มีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าคาร์บอนแบบเกร็ด (Granular Activated Carbon, GAC)

3.5.3 ขนาดและลักษณะของตัวถูกละลาย ขนาดของสารหรือโมเลกุลมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ ซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นในโพรงของตัวดูดซับ เช่น คาร์บอน การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อสารมีขนาดเล็กกว่าช่องว่างภายในพอลิ (พอลิเข้าไปในช่องว่างได้) ทั้งนี้เพราะว่าแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกละลายและตัวดูดซับจะมีค่ามากที่สุด โมเลกุลขนาดเล็กจะถูกดูดเข้าไปในช่องว่างภายในก่อน จากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่กว่าจึงถูกดูดเข้าไปบ้าง อาจกล่าวได้ว่าความสามารถในการดูดซับจะแปรผกผันกับขนาดโมเลกุลของตัวถูกละลาย นั่นคือ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับจะลดลง

3.5.4 ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลาย ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายเป็นปัจจัยสำคัญในการดูดซับ การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายในตัวทำละลายลดลง เนื่องจากในการดูดซับตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย ในที่นี้คือ น้ำ ดังนั้นสารที่ไม่ละลายน้ำ หรือละลายได้น้อยจะสามารถถูกดูดซับได้ดี

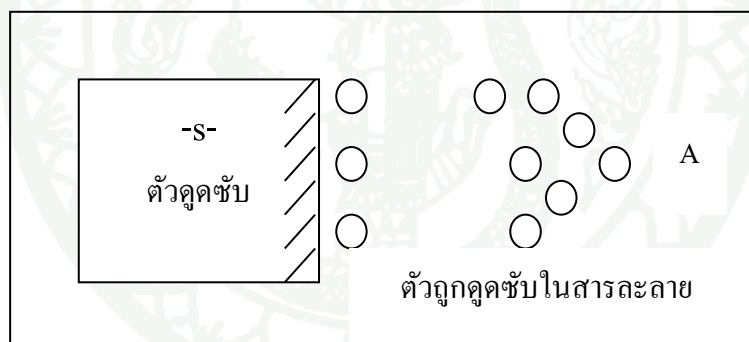
3.5.5 pH มีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ ดังนั้น จึงมีผลกระทบต่อการดูดซับด้วย นอกจากนี้ไฮโดรเจนไอออนเองก็เป็นไอออนที่สามารถเกาะติดผิวของตัวดูดซับได้ดี

3.5.6 อุณหภูมิ มีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับ กล่าวคือ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้การแพร่ผ่านของสารที่ถูกดูดซับลงไปยังรูพรุนของตัวดูดซับได้เร็วขึ้น แต่จะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับลดลง

3.5.7 เวลาสัมผัส เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดติดผิว และอายุการใช้งานของตัวดูดซับ โดยที่เวลาสัมผัสมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการดูดซับเพียงช่วงหนึ่งเท่านั้น ซึ่งถ้าเวลาสัมผัสเลยจากช่วงนี้แล้ว ก็จะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดติดผิวเลย

3.6 สมดุลการดูดซับ (adsorption equilibrium)

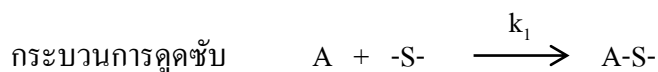
เมื่อเติมตัวดูดซับปริมาณหนึ่งลงไปในสารละลายที่มีโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้มข้น ในช่วงเริ่มต้นโมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับ เมื่อเวลาผ่านไปจะมีจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น ในขณะเดียวกันโมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนที่เกาะติดกับพื้นผิวจะคายออกมา พบว่าอัตราการคายจะเกิดน้อยกว่าอัตราการดูดซับ เมื่อปล่อยให้กระบวนการดูดซับดำเนินไปจนกระทั่งอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคาย สภาวะสมดุลของการดูดซับ จะได้ว่าจำนวนโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่คายออกมามีปริมาณคงที่ดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)

- ให้ A เป็นโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น C_0 โมล/ลิตร
 ในสารละลาย
 -S- เป็นโมเลกุลของตัวดูดซับ
 q เป็นสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ
 (1 - q) เป็นสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับ



r_1 แทนอัตราการดูดซับ ซึ่งจะแปรตามความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลาย หรือความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายให้เท่ากับ C และยังแปรตามสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

k_1 แทนค่าคงที่อัตราการดูดซับ

$$r_1 = k_1[C](1-q)$$



r_2 แทนอัตราการคาย ซึ่งจะแปรตามสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเท่านั้น

k_2 แทนค่าคงที่อัตราการคาย

$$r_2 = k_2(q)$$

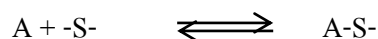
ณ สภาวะสมดุล $r_1 = r_2$

$$k_1[C](1-q) = k_2(q)$$

$$\frac{q}{(1-q)} = \frac{k_1}{k_2}[C] = K[C]$$

$$q = \frac{K[C]}{1+K[C]} \quad \dots\dots\dots(1)$$

เมื่อ K เป็นค่าคงที่สมดุลการดูดซับ



$$\text{ณ สภาวะสมดุล} \quad K = \frac{q}{C} \quad \dots\dots\dots(2)$$

ณ สภาวะสมดุลของการดูดซับ จะได้ว่า

$$\frac{\text{ปริมาณตัวถูกดูดซับ}}{\text{บนพื้นผิวของตัวดูดซับ}} = \frac{\text{ปริมาณตัวถูกดูดซับ}}{\text{ที่หลุดออกมาจากตัวดูดซับ}}$$

$$qW = V(C_0 - C) \quad \dots\dots\dots(3)$$

เมื่อ q เป็นปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับต่อมวลตัวดูดซับหน่วยเป็นปริมาณตัวถูกดูดซับต่อมวลตัวดูดซับ เช่น mol/kg, mol/g และ mg/kg

W เป็นมวลของตัวดูดซับ หน่วยเป็นน้ำหนัก เช่น มิลลิกรัม (mg) กรัม (g) หรือ กิโลกรัม (kg)

V เป็นปริมาตรของสารละลายที่มีตัวถูกดูดซับละลายอยู่ หน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตร (cm^3) หรือลิตร (l)

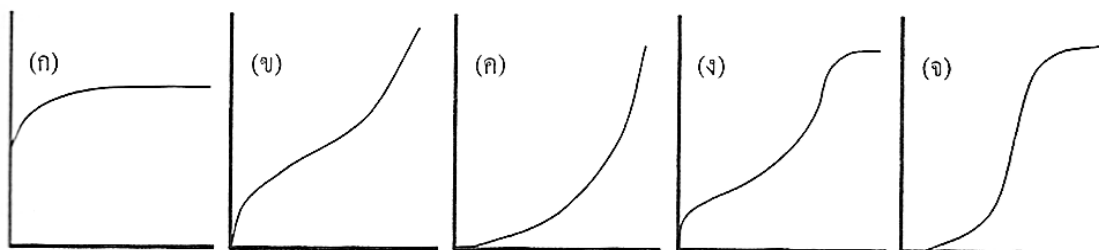
C_0 เป็นความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับก่อนการดูดซับที่อยู่ในสารละลายหน่วยเป็นความเข้มข้นเป็น โมลต่อลิตร (mol/l)

C เป็นความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายหน่วยเป็นความเข้มข้นเป็น โมลต่อลิตร (mol/l)

3.7 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ไอโซเทอร์มของการดูดซับ เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (q) กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย (C) ที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่

ถ้าเขียนกราฟระหว่างค่า q ในแกนตั้ง และค่า C ในแกนนอนจะให้รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอร์มของการดูดซับ 5 แบบ ดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน

ที่มา: Maron and Prutton (1961)

จากภาพที่ 13 ภาพ (ก) จัดเป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นแบบชั้นเดียว ส่วนภาพ (ข) ถึง (จ) เป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นแบบหลายชั้น

สมการไอโซเทอร์มของการดูดซับจะอาศัยแบบจำลองการดูดซับทางคณิตศาสตร์ ในที่นี้จะกล่าวถึง 2 สมการที่นิยมใช้กัน ดังนี้

3.7.1 สมการการดูดซับของฟรุนดิช (Freundlich Adsorption Isotherm) ใช้อธิบายไอโซเทอร์มของการดูดซับภายใต้สมมติฐานที่ว่าพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous Adsorption Surface) พื้นที่ผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด) มีรูปแบบของสมการเป็นดังนี้

$$q = KC^{1/n} \dots\dots\dots(4)$$

K และ n เป็นค่าคงที่ของฟรุนดิช (Freundlich Constant) ของแต่ละระบบที่กำลังศึกษาหรือทดลอง และ n ใช้อธิบายลักษณะเส้นกราฟไอโซเทอร์มของการดูดซับ โดยทั่วไป $1/n$ จะมีความมากกว่าหนึ่ง

เมื่อจัดรูปสมการที่ (4) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง โดยใส่ลอการิทึมทั้งสองข้างของสมการจะได้

$$\log q = \log K + \frac{1}{n} \log C \quad \dots\dots\dots(5)$$

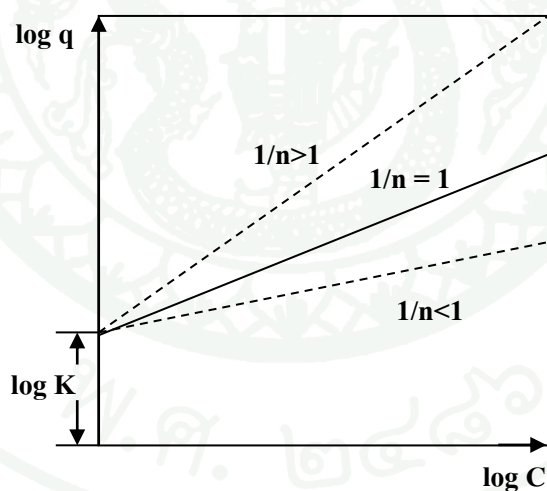
เมื่อ q คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (ความสามารถการดูดซับ) (มิลลิกรัม/กรัม)

K คือ ค่าคงที่การดูดซับ

$\frac{1}{n}$ คือ ความชันของกราฟ

C คือ ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร)

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log q$ กับ $\log C$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $\frac{1}{n}$ และมีจุดตัดเท่ากับ $\log K$



ภาพที่ 14 กราฟความชันระหว่าง $\log q$ และ $\log C$

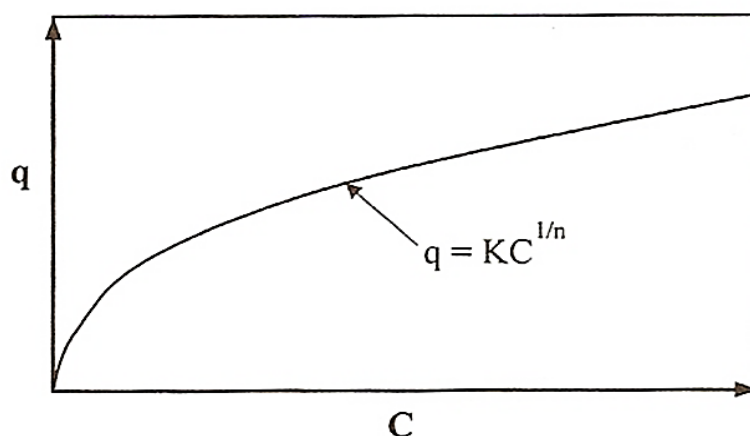
ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

ถ้า $\frac{1}{n} = 1$ ไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง

ถ้า $\frac{1}{n} < 1$ บอกถึงความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับจะต่ำในทุกค่าของความเข้มข้น C หรือกล่าวว่ามีปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับในปริมาณจำกัดในการดูดซับ

ถ้า $\frac{1}{n} > 1$ บอกถึงความสามารถของการดูดซับของตัวดูดซับจะดูดซับได้มาก หรือกล่าวว่ามีบริเวณพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากในการดูดซับ

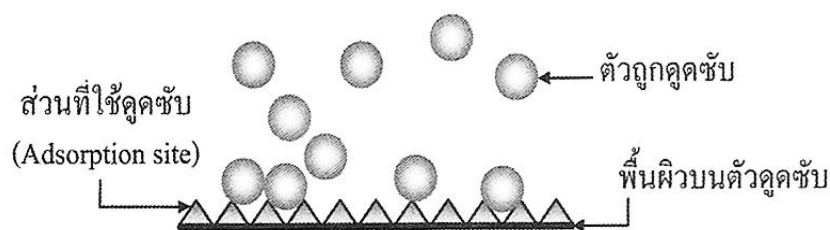
เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า q และ C จากสมการที่ (4) ได้ดังภาพที่ 15 จะไม่สามารถบอกถึงปริมาณของตัวถูกดูดซับถูกดูดซับได้มากที่สุด เนื่องจากตัวถูกดูดซับสามารถจะเกิดการซ้อนทับกันได้



ภาพที่ 15 ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรอนดิช

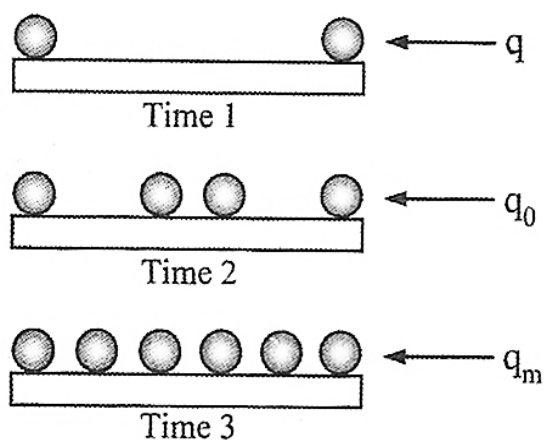
ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

3.7.2 สมการการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm) มีข้อกำหนดว่าพื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (Monogeneous Adsorption Surface) มีกลไกการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัด และเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะไม่มีการเคลื่อนที่ (เคลื่อนย้าย) หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว (ถูกดูดซับได้มากที่สุด) ดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 แบบจำลองพื้นผิวตัวดูดซับของสมการแลงเมียร์ กลไกการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)



ภาพที่ 17 การดูดซับของแลงเมียร์เมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)

จากความรู้เรื่องสมดุลการดูดซับ และจากสมการที่ (1) ถือว่าการดูดซับได้มากที่สุดเท่ากับหนึ่งรูปแบบของสมการแลงเมียร์ จะใช้สมการที่ (1) เพียงต้องคูณปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับได้มากที่สุดต่อปริมาณตัวดูดซับ แทนด้วย q_m ซึ่งจะได้สมการดังนี้

$$q = \frac{q_m KC}{1 + KC} \quad \dots\dots\dots(6)$$

เมื่อจัดรูปสมการที่ (6) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง จะได้

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{K q_m C} \quad \dots\dots\dots(7)$$

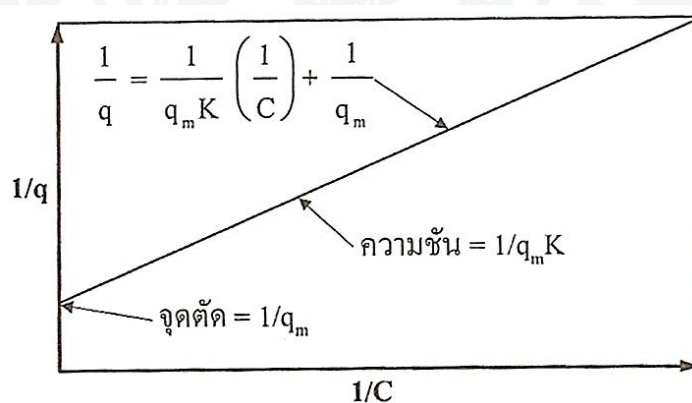
เมื่อ q คือ ปริมาณตัวถูกละลายบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (ความสามารถการดูดซับ) (มิลลิกรัม/กรัม)

q_m คือ ความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)

K คือ ค่าคงที่การดูดซับ

C คือ ความเข้มข้นที่สถานะสมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร)

เขียนกราฟระหว่าง $\frac{1}{q}$ และ $\frac{1}{C}$ จะได้กราฟเส้นตรงมีค่าความชันเท่ากับ $\frac{1}{Kq_m}$ และจุดตัดเท่ากับ $\frac{1}{q_m}$



ภาพที่ 18 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

3.8 สารที่มีความสามารถในการดูดซับ อาจแบ่งได้ 5 ประเภท

3.8.1 ประเภทสารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ และแอคติเวเตดซีลิกา (zeolite) สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวประมาณ 50-200 ตารางเมตร/กรัม แต่สารสังเคราะห์อาจมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก อย่างไรก็ตามมีข้อเสีย คือ จับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากตัวดูดซับประเภทสารอนินทรีย์มีขีดจำกัดมาก

3.8.2 ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 500-1,400 ตารางเมตร/กรัม เป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพ และมีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางในด้านต่างๆ เช่น ฟอกสี ใช้ในการกำจัดกลิ่นและรส ใช้ในการกำจัดตะกอนในโรงเบียร์ เป็นต้น

3.8.3 ประเภทสารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนไอออน (เรซิน, resin) ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะโดยประมาณ 300-500 ตารางเมตร/กรัม

3.8.4 วัสดุชีวภาพ (biomaterials) ส่วนใหญ่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น จีเลื้อย ไคโตซาน (chitosan) กาแฟที่ใช้แล้ว ชา และชาเขียวที่ใช้แล้ว ฟางข้าว (rice straw) เปลือกไม้ (bark) ถั่วแกลบดำ เป็นต้น

3.8.5 สารดูดซับชีวภาพ (biosorbent) ได้แก่ เซลล์จุลินทรีย์ เช่น เซลล์ของแบคทีเรีย ยีสต์ หรือราสายพันธุ์ต่างๆ และสาหร่าย

4. เรซิน

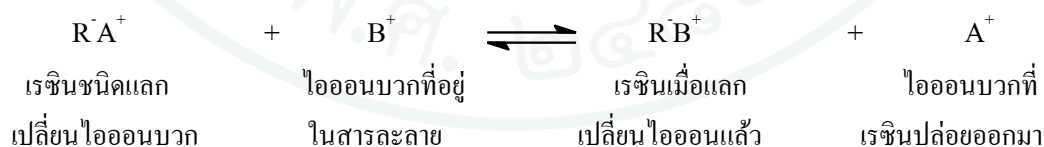
เรซิน หมายถึง สารโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จากการทำโพลิเมอร์ไรซ์สารอินทรีย์ดังนี้ คือ Styrene + divinylbenzene, Polymethacrylate, Methacrylic acid + divinylbenzene และ Acrylic acid + divinylbenzene การโพลิเมอร์ไรซ์สามารถทำให้โมเลกุลของสารอินทรีย์เชื่อมโยงกันได้หลายแบบ (cross-linking) ทำให้ได้เรซินที่มีคุณสมบัติต่างๆ กัน เรซินที่นิยมใช้กันทั่วไป คือ เรซินที่เตรียมจากการโพลิเมอร์ไรซ์สารสไตรีนกับไดไวนิลเบนซีน (ธวัชชัย, 2551)

เรซิน หมายถึง สารพอลิเมอร์ ซึ่งมีโครงสร้างแบบเชื่อมขวาง (cross-linked) หรือเป็นแบบร่างแห (Three-dimension network) ดังนั้น จึงไม่ละลายในตัวทำละลายต่างๆ ไป (พอดา, 2547)

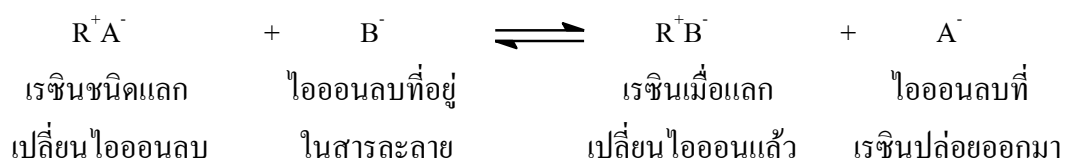
4.1 การแบ่งประเภทของเรซิน

เรซินที่เตรียมได้จะแสดงคุณสมบัติอย่างไรขึ้นอยู่กับหมู่ธาตุ (functional group) ที่นำเข้าไปในอะโรมาติกนิวเคลียส ดังนั้น เรซินที่ใช้ในการทำไอออนเอ็กซ์เชนจ์ สามารถแบ่งตามคุณสมบัติของหมู่ธาตุที่ใส่เข้าไปได้ 2 ชนิด คือ (พอดา, 2547)

4.1.1 เรซินชนิดแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation – exchange resin) คือ เรซินที่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชัน (functional group) เช่น $-OH$, $-COOH$, $-PO(OH)_2$, $-SO_3H$ เป็นต้น ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับไอออนบวก (cation) จากสารละลายที่อยู่ใกล้เคียงได้ ซึ่งอาจจะเขียนปฏิกิริยาทั่วไปได้ดังนี้



4.1.2 เรซินชนิดแลกเปลี่ยนไอออนลบ (Anion – exchange resin) คือ เรซินที่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชัน เช่น หมู่อะมิโน ($-NH_2$) ทั้งไพรมารี (1°) เซเคดารี (2°) และเทอร์เชียรี (3°) และหมู่ควอเตอร์นารีแอมโมเนียม (Quaternary ammonium group) ซึ่งสามารถจะทำปฏิกิริยากับไอออนลบจากสารละลายที่อยู่ใกล้เคียงได้ ซึ่งอาจจะเขียนปฏิกิริยาทั่วไปได้ ดังนี้

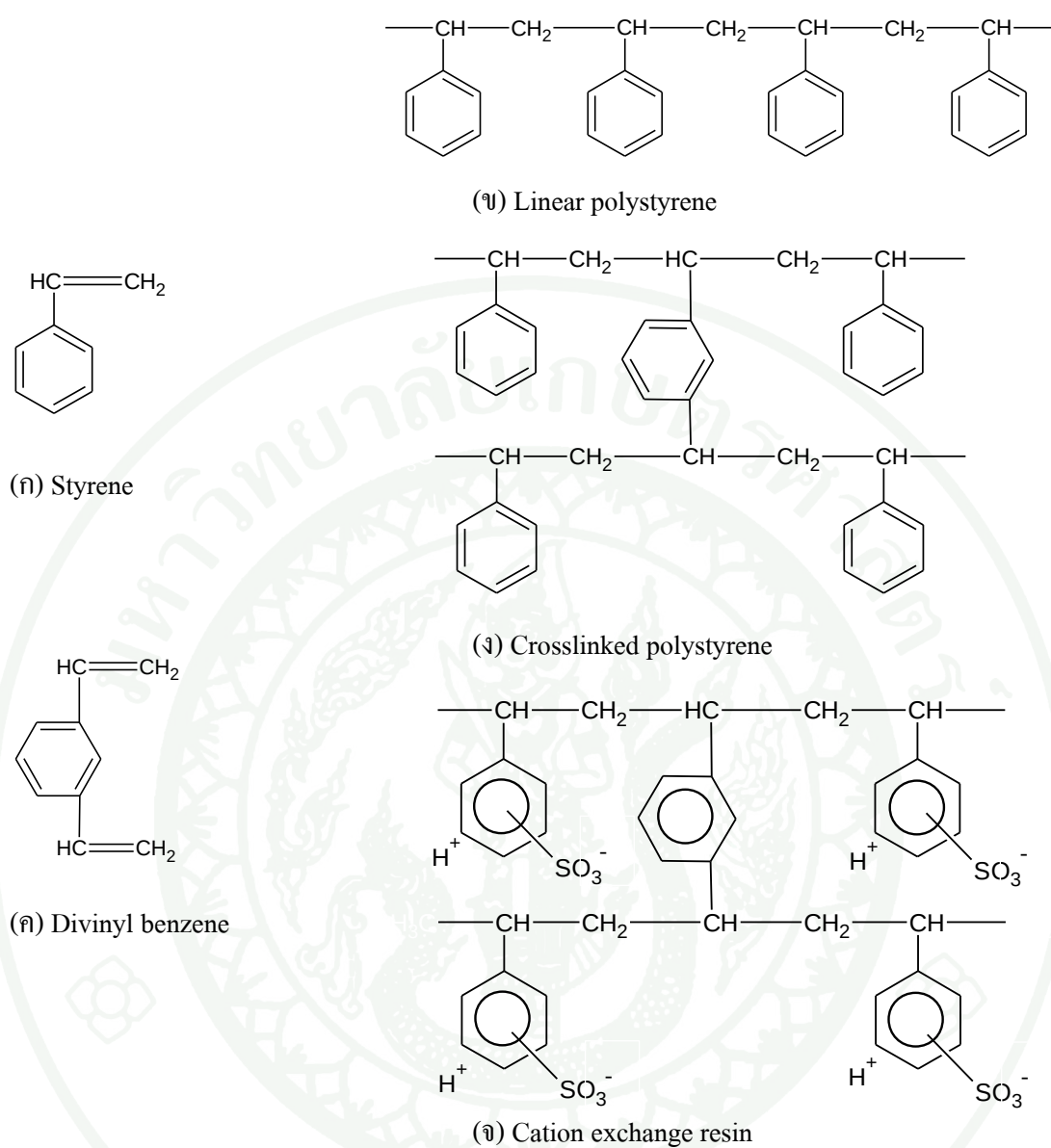


4.2 โครงสร้างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

โครงสร้างของเรซินมีความสำคัญต่อการกำหนดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน เรซินจะมีโครงร่างคล้ายตาข่ายสามมิติโดยมีกลุ่มไอออนที่มีประจุอยู่ตามตำแหน่งต่างๆ บนตาข่ายเรียกว่า เมทริกซ์ (Matrix) ส่วนหมู่ไอออนที่มีประจุไฟฟ้าที่อยู่บนตำแหน่งต่างๆ ของตาข่ายเรียกว่า หมู่ฟังก์ชัน (Functional Group) ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดพฤติกรรมต่างๆ ของเรซิน โครงร่างของเรซินเป็นส่วนที่ทำให้มันมีรูปร่างเป็นอย่างไรที่ปรากฏ และรูปร่างอยู่ได้โดยไม่ละลายน้ำ และไม่แตกหักโดยง่าย โครงร่างนี้สร้างขึ้นจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำนวนมาก และชนิดเดียวกัน ซึ่งต่อกันเป็นสายยาว และมีไฮโดรคาร์บอนอีกชนิดหนึ่งมาทำหน้าที่เชื่อมขวางเพื่อให้เกิดเป็นรูปสามมิติที่มีความโปร่งหรือความพรุนดังภาพที่ 19 ความโปร่งหรือความพรุนของเรซินขึ้นอยู่กับระดับของการเชื่อมขวาง (Degree of Crosslinkage) ซึ่งวัดได้จากปริมาณของสารเชื่อมขวางที่ใช้ ถ้าปริมาณของสารเชื่อมขวางมาก โครงร่างของเรซินจะแข็งและทึบ แต่ถ้าปริมาณของสารเชื่อมขวางน้อย โครงร่างของเรซินจะอ่อนและโปร่ง (พอลดา, 2547)

หมู่ฟังก์ชัน (Functional Group) ของเรซินเป็นตัวกำหนดพฤติกรรมต่างๆ ของเรซิน เช่น ความสามารถหรืออำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออน เป็นต้น ถ้าส่วนโครงสร้างของเมทริกซ์มีประจุลบ ประจุตัวหมู่ฟังก์ชันจะมีประจุบวกและเรียกว่าเป็น สารแลกเปลี่ยนแคตไอออน (Cation Exchanger) ถ้าโครงสร้างเมทริกซ์ มีประจุบวกประจุตัวหมู่ฟังก์ชันจะมีประจุลบ ดังนั้นจึงเป็นสารแลกเปลี่ยนแอนไอออน (Anion Exchanger)

เรซินที่สังเคราะห์โดยกระบวนการทางเคมีที่นิยมใช้กันแพร่หลายในปัจจุบัน จะมีโครงร่างเป็นสารพอลิเมอร์ Polystyrene ที่เชื่อมขวางด้วย Divinylbenzene โดยหมู่ฟังก์ชันสารแลกเปลี่ยนแคตไอออนจะเป็นพวก Sulfonic, Carboxylic หรือ Phosphonic ส่วนเรซินที่นำไปใช้เป็นสารแลกเปลี่ยนแอนไอออน (Anion Exchange) จะเป็นพวกที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นพวก Quaternary Ammonium, Primary Amine, Secondary Amine, Tertiary Amine



ภาพที่ 19 โครงสร้างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

- (ก) ไฮโดรคาร์บอนที่เป็นต้นกำเนิด คือ Styrene
- (ข) เมื่อมีหลายโมเลกุลมาต่อกันจะเป็นพอลิเมอร์ประเภทโซ่ตรง
- (ค) การต่อกันเป็นสามมิติเกิดขึ้นได้เมื่อมีสารเชื่อมขวาง คือ Divinylbenzene
- (ง) ทำให้ได้เรซินแบบโครงร่างแห
- (จ) การเติมหมู่ไอออน เช่น $\text{-SO}_3\text{H}$ ทำให้เรซินมีความสามารถแลกเปลี่ยนแคตไอออนได้อย่างสมบูรณ์

ที่มา: เกศสุชา (2537)

4.3 ลำดับความชอบในการเลือกจับไอออนของเรซิน (Selectivity)

เรซินทั้งแบบกรด และด่าง มีความชอบไม่เท่ากันในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน พบว่า เรซินมีระดับของความชอบทำปฏิกิริยาหรือเลือกทำปฏิกิริยากับไอออนบางชนิดมากกว่าชนิดอื่นๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนประจุ น้ำหนักโมเลกุล ขนาด และยังขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นของไอออนนั้นๆ ในสารละลาย นอกจากนี้การแลกเปลี่ยนไอออนยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเรซิน เช่น ระดับการเชื่อมขวางของเรซิน (degree of cross-linking) ชนิดของ Functional Group และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาความสัมพันธ์ระหว่างไอออนกับการเลือกจับไอออนของเรซิน (พอตา, 2547)

4.3.1 ในสารละลายของน้ำที่มีความเข้มข้นของไอออนต่ำ ๆ ไอออนที่มีประจุสูงกว่าจะแลกเปลี่ยนไอออนกับเรซินได้ดีกว่า ดังนั้น ไอออนที่มีประจุเป็นไตรวาเลนต์สามารถแลกเปลี่ยนตัวอย่างความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเรียงลำดับจากน้อยไปหามากได้ดังนี้ $\text{Na}^+ < \text{Ca}^{2+} < \text{La}^{3+} < \text{Th}^{4+}$ (ธวัชชัย, 2551)

4.3.2 สำหรับไอออนที่มีประจุเท่ากัน ในสารละลายของน้ำที่มีความเข้มข้นต่ำ ไอออนที่ถูกโมเลกุลของน้ำเข้าไปไฮเดรตได้น้อยกว่าจะแลกเปลี่ยนไอออนกับเรซินได้ดีกว่า ตามตารางธาตุพบว่าไอออนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะถูกไฮเดรตได้ดีกว่า ดังนั้น ไอออนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่าจะแลกเปลี่ยนไอออนกับเรซินได้ดีกว่า เช่น $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Be}^{2+}$ หรือ $\text{K}^+ > \text{Li}^+ > \text{Na}^+$ (ธวัชชัย, 2551)

4.3.3 เรซินที่มีองศาการเชื่อมโยง (degree of cross-linking) ต่าง ๆ กัน จะทำให้เกิดการเลือกได้ เรซินที่มี cross-linkage สูง จะมีการพองตัวน้อย มีรูขนาดเล็ก โดยทั่วไปเรซินที่มีรูขนาดเล็กจะใช้กับไอออนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และเรซินที่มีรูขนาดใหญ่จะใช้กับไอออนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง

4.3.4 ไอออนของสารอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงๆ หรือสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะต่างๆ ที่เป็นแอนไอออนสามารถเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนกับเรซินได้ดี ทั้งนี้เนื่องจากเกิดแรงelectrostatic force และ Van der Waals force

4.3.5 ที่อุณหภูมิสูงๆ ในสารละลายที่ไม่ใช้น้ำหรือสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงๆ การแลกเปลี่ยนของไอออนที่มีประจุเหมือนกันไม่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอะตอมมิกนัมเบอร์

ตารางที่ 1 ลำดับความชอบไอออนของเรซินในน้ำที่มีสารละลายโลหะหนักในน้ำ 1,000 มก./ล.

ไอออนบวก	ไอออนลบ	ลำดับความชอบ
		มากที่สุด
Fe^{3+}	CO_3^{2-}	
Al^{3+}	SO_4^{2-}	
Pb^{2+}	SO_3^{2-}	
Ba^{2+}	HPO_4^{2-}	
Sr^{2+}	CNS^-	
Cd^{2+}	CNO^-	
Zn^{2+}	NO_3^-	
Cu^{2+}	Br^-	
Fe^{2+}	Cl^-	
Mn^{2+}	CN^-	
Ca^{2+}	HCO_3^-	
Mg^{2+}	HSiO_3^-	
K^+	OH^-	
NH_4^+	F^-	
Ba^+		
H^+		
Li^+		
		น้อยที่สุด

ที่มา: เกศสุชา (2537)

5. ซิลิกาจากเถ้าแกลบ

5.1 แกลบ (Rice husk)

แกลบ คือ ส่วนเปลือกของเมล็ดข้าวที่ได้หลังจากการสีข้าว จัดเป็นของเหลือทิ้งทางการเกษตร แกลบส่วนใหญ่มีสีน้ำตาลอ่อน ลักษณะรูปทรงกระบอก หัวท้ายปิดเป็นรูปทรงแท่งที่มีแกนตามยาวเป็นแนวสมมาตร มีความยาวอยู่ในช่วง 6-10 มิลลิเมตร ความหนาของผนังเซลล์ประมาณ 0.1 มิลลิเมตร และมีความหนาแน่น (bulk density) โดยประมาณ 0.148 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร เนื่องจากที่ผิวด้านนอกของแกลบมีซิลิกามาสะสมอยู่เป็นปริมาณสูงทำให้แกลบมีคุณสมบัติแตกหักง่าย ซิลิกาในแกลบเมื่อเทียบความแข็งตามโมห์สเกล (Mohs Scale) เท่ากับ 5.5 ถึง 6.5 (อัจฉริยา, 2538) ผิวนอกของแกลบมีลักษณะเป็นเซลล์ที่เป็นรูปเหลี่ยม ซึ่งมีความเข้มข้นของซิลิกาสูงและถูกปิดทับด้วยคิวติเคิล (cuticle) หนาและมีขนสั้นๆอยู่บนผิว โครงสร้างภายในประกอบด้วยเส้นใยต่างๆ ส่วนชั้นกลางมีปริมาณซิลิกาอยู่ต่ำกว่าชั้นนอก

5.2 เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash)

เถ้าคือสารอนินทรีย์ที่มีในแกลบ ซึ่งจะมีปริมาณแตกต่างกันไปตามแหล่งเพาะปลูกจากผลการวิเคราะห์เถ้าของพืชชนิดต่างๆจำนวน 24 ตัวอย่าง พบว่าแกลบมีปริมาณของซิลิกาอยู่ในเถ้าสูงที่สุด คือ 82.92 % ซึ่งคิดเป็นปริมาณที่สูงกว่าในพืชใบเลี้ยงเดี่ยวชนิดอื่นๆ รองลงมาคือส่วนใบของต้นข้าว (ฟาง) ที่มีปริมาณซิลิกา 53.08 % (เสริมศักดิ์, 2538) ส่วนที่เหลือจะเป็นสิ่งปนเปื้อน โดยสิ่งปนเปื้อนเหล่านี้แตกต่างกันไปขึ้นกับแหล่งที่ปลูกและปุ๋ยที่ใช้ โดยปกติแล้วจะพบโพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม และแมงกานีส เป็นส่วนใหญ่ ส่วนอลูมิเนียม เหล็ก และโซเดียม จะมีอยู่รองลงมา

เมื่อนำแกลบมาเผาจะได้เถ้าแกลบซึ่งมีประมาณ 16.4-18.3 % โดยน้ำหนัก โดยองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบดังแสดงไว้ในตารางที่ 2 จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีพบว่า เถ้าแกลบประกอบด้วยซิลิกาสูง โดยมีค่าประมาณอยู่ในช่วง 86.9-97.3 % ซึ่งคุณสมบัติของเถ้าแกลบ นั้นมีลักษณะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและช่วงเวลาในการเผา เถ้าแกลบที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิต่ำจะมีสารอนินทรีย์ที่ยังเผาไหม้ไม่หมดหลงเหลืออยู่มาก แต่ถ้าวเถ้าแกลบที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานเพียงพอจะได้ซิลิกาในรูปของผลึก (crystalline silica)

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray fluorescent

องค์ประกอบทางเคมี	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
SiO ₂	86.9-97.3
K ₂ O	0.58-2.50
Na ₂ O	0.00-1.75
CaO	0.20-1.50
MgO	0.12-0.96
Fe ₂ O ₃	0.00-0.54
P ₂ O ₅	0.20-2.85
SO ₃	0.10-1.13
Cl ₂ O	0.00-0.24

ที่มา: ก้องเกียรติ (2540)

โดยทั่วไปเถ้าแกลบที่ได้จากการเผา แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

- 1) เถ้าแกลบดำ เกิดจากการเผาเถ้าแกลบที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้มีปริมาณคาร์บอนเหลืออยู่มาก (5-30%) เถ้าแกลบลักษณะนี้มักนำไปทำสารดูดสี และคาร์บอนกัมมันต์ (activated carbon)
- 2) เถ้าแกลบขาว เกิดจากการเผาเถ้าแกลบในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 600-800 °C และมีอากาศเพียงพอ เถ้าแกลบชนิดนี้ใช้ประโยชน์ในการทำวัสดุทนไฟ ซึ่งทนได้ถึง 1,400 °C ใช้หลอมทำแก้วแทนทรายขาว หรือใช้เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมสารประกอบซิลิกาอื่นๆ

5.3 การใช้ประโยชน์จากเถ้าแกลบ

5.3.1 ใช้เป็นเชื้อเพลิง ซึ่งการใช้เถ้าแกลบเป็นเชื้อเพลิงเป็นที่รู้จักกันมาตั้งแต่โบราณกาล เช่น ใช้ในการหุงต้ม หรือใช้ในการเผาอิฐ ปัจจุบันได้มีการดัดแปลงเตาหุงต้มให้มีความเหมาะสมมากขึ้น เพื่อเป็นการใช้เถ้าแกลบเป็นเชื้อเพลิงแทนการใช้ฟืนหรือถ่าน โดยเถ้าแกลบจะให้พลังงานความร้อนประมาณ 3,800 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ซึ่งใกล้เคียงกับถ่านไม้ที่ให้พลังงานความร้อน 4,500-

5,000 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม และมีค่าความร้อนสูงพอที่จะใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ดี ในการใช้เกลบเป็นเชื้อเพลิงมีข้อเสียเพียงเล็กน้อย เช่น เมื่อนำไปเผาไหม้หมดแล้ว เกลบจะให้ปริมาณเถ้าสูงถึงร้อยละ 16-20 % แต่เถ้าจากเกลบสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เช่น ผลิตวัสดุก่อสร้าง หรือใช้เป็นผงขัด เป็นต้น

5.3.2 ใช้ผสมกับดินเหนียวทำอิฐ ซึ่งทำให้อิฐที่ได้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

5.3.3 ใช้ในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ เช่น ไก่ และ สุกร

5.3.4 ใช้เป็นแหล่งธาตุอาหารของพืช โดยใช้ผสมกับปุ๋ยแอมโมเนีย ช่วยให้ผลผลิตข้าวเพิ่มขึ้นจากการใช้ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียวถึง 5-24 %

5.3.5 ใช้เป็นฉนวนความร้อน เช่น คลุมน้ำแข็งไม่ให้ละลาย

5.3.6 ใช้ผสมกับดิน ทำให้ร่วนซุยไม่แน่นทึบ และช่วยให้ดินอุ้มน้ำได้ดีขึ้น

5.4 ซิลิกา

ซิลิกาหรือซิลิคอนไดออกไซด์ (silicondioxide: SiO_2) เป็นสารประกอบของธาตุซิลิคอนและออกซิเจนซึ่งมีสูตรอย่างง่ายคือ SiO_2 หรือซิลิกาที่อยู่ในรูปไฮเดรตคือ $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ซิลิกาจัดเป็นแร่ธาตุที่สำคัญในดินและเป็นธาตุที่มีมากเป็นอันดับ 2 บนเปลือกโลกรองจากออกซิเจน (อัญริยา, 2538) ซิลิคอน (Si) เป็นธาตุที่ก่อให้เกิดซิลิเกตชนิดต่างๆ โดยการรวมตัวกับออกซิเจน และธาตุอื่นเช่นซิลิเกตที่ได้จากการรวมตัวระหว่าง Si กับ O_2 แบ่งออกได้เป็นหลายชนิด (อายุวัฒน์, 2543)

ซิลิกามีลักษณะเป็นของแข็งที่ไม่มีสี มีจุดหลอมเหลวสูงประมาณ $1,500-1,700^\circ\text{C}$ มีทั้งเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและจากการสังเคราะห์ นอกจากนี้ซิลิกายังสามารถปรากฏอยู่ใน 2 รูปแบบ โดยแบบแรกเป็นรูปผลึกมีขนาดแตกต่างกันไป ตั้งแต่หินเขี้ยวหนุมาน (quartz) ไปจนถึงขนาดเล็กๆ เช่น ทราช ส่วนอีกแบบหนึ่งคือซิลิกาที่เกิดจากสิ่งมีชีวิต (biogenic silica) จัดเป็นเป็นซิลิกาอสัณฐาน เช่น ซิลิกาที่มีอยู่ในพวกสาหร่ายเปลือกแข็ง (Kieselguhr) หรือไดอะตอม ซึ่งจะประกอบด้วยซิลิกาที่มีความเป็นรูพรุนสูงอยู่ภายใน แม้ว่าซิลิกาผลึกและซิลิกาอสัณฐานจะมีสูตรเคมีที่เหมือนกัน แต่มี

คุณสมบัติหลายประการที่ต่างกัน เช่น ความหนาแน่น ความแข็ง และความว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี ความแตกต่างดังกล่าวมีสาเหตุเนื่องจากซิลิกาทั้ง 2 รูปแบบ มีลักษณะทางโครงสร้างและพื้นที่ผิวจำเพาะที่ต่างกัน กล่าวคือซิลิกาอสัณฐานที่เกิดจากสิ่งมีชีวิตจะมีขนาดเล็กกว่าซิลิกาในรูปผลึกมาก ทำให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่า

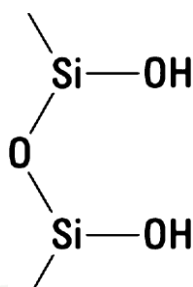
5.5 ชนิดของซิลิกา

5.5.1 ซิลิกาผลึก (Crystalline silica)

ผลึก หมายถึง ของแข็งที่มีการจัดเรียงอะตอมภายในโครงสร้างอย่างมีระเบียบและต่อเนื่อง มีรูปร่างสมมาตรเป็นระบบผลึกที่แน่นอน รูปผลึกของซิลิกาภายใต้ความดันปกติแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ ควอตซ์ (quartz) ไทรดิไมท์ (tridymite) และคริสโตบาไลต์ (cristobalite) ซึ่งซิลิกา ในรูปผลึกควอตซ์จะพบมากมายในธรรมชาติ แสดงให้เห็นรูปผลึกอย่างสมบูรณ์และมีความบริสุทธิ์สูง โดยทั้งสามรูปผลึกนี้สามารถจะเปลี่ยนไปมาระหว่างกันได้โดยใช้ความร้อนเป็นตัวกระตุ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลง (Inversion) นี้มี 2 รูปแบบ คือ แบบที่หนึ่งจะมีการจัดเรียงอะตอมภายในโครงสร้างใหม่ ส่วนแบบที่สองเป็นการเปลี่ยนแปลงแบบรวดเร็วโดยมีการกระทบกระเทือนพันธะเพียงเล็กน้อย และสามารถกลับคืนสภาพเดิมได้ง่าย

5.5.2 ซิลิกาอสัณฐาน (Amorphous silica)

ของแข็งที่มีรูปอสัณฐานหมายถึงของแข็งที่ไม่สามารถจัดเรียงอะตอมภายในโครงสร้างให้เป็นระเบียบอย่างต่อเนื่องได้ ซึ่งอสัณฐานซิลิกาก็คือโครงสร้างที่ไม่เป็นผลึก อาจอยู่ในรูปของไฮเดรต (Hydrate) หรือ แอนไฮเดรต (Anhydrate) พันธะเคมีในอสัณฐานซิลิกามีอยู่หลายชนิด ได้แก่ siloxane ($-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-$), silanol ($-\text{Si}-\text{O}-\text{H}-$) และ อยู่ทีผิวเป็น silane ($-\text{Si}-\text{H}$) หรือ Organic silicon ($-\text{Si}-\text{O}-\text{R}$ หรือ $-\text{Si}-\text{C}-\text{R}$) ซึ่งพันธะเคมีดังกล่าวแสดงดังภาพที่ 20



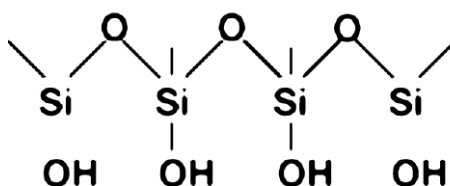
ภาพที่ 20 พันธะ Silanol (-Si-O-H-) ในออสซิลิกา

ที่มา: เจษฎาภรณ์ (2549)

ซิลิกาชนิดอสซิลิกาสามารถแบ่งออกอย่างกว้างๆ ได้ 3 ประเภท ได้แก่

- 1) วิเทรียซิลิกา (vitreous silica) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ซิลิกาแก้ว (silica glass) มีลักษณะแข็ง ไม่มีรูพรุนเกิดขึ้นจากการแข็งตัวจากการหลอมเหลวของผลึกซิลิกา หรือการหลอมผงซิลิกาอสซิลิกา และค่าการขยายตัวทางความร้อนต่ำมากอยู่ในช่วง $0.5\text{--}0.8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
- 2) ซิลิกาเจล (silica gel) มีลักษณะแข็ง มีรูพรุนสูง มีโครงสร้างรูพรุนแบบเปิด และมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง แบ่งออกเป็น 4 ชนิดคือ

- (1) อะควาเจล (aquagel) เกิดจากสารละลาย
- (2) อัลโคเจล (alcogel) เกิดจากสารประกอบอัลคอกซิ-ไฮเดรต
- (3) ซีโรเจล (xerogel) มีลักษณะแห้ง โครงสร้างเดิมจะเปลี่ยนแปลงไปขึ้นอยู่กับกระบวนการทำแห้ง
- (4) แอโรเจล (aerogel) มีลักษณะแห้ง เกิดจากกระบวนการทำแห้งที่เหนือจุดวิกฤต เพื่อป้องกันการเสียรูปร่างของเจลเนื่องจาก เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงเฟส



ภาพที่ 20 โครงสร้างของซิลิกาเจล

ที่มา: Hunt *et al.* (1984)

3) ซิลิกาผง (powder silica) มีการฟุ้งกระจายของอนุภาคสูง โครงสร้างมีขนาดเล็กมากหรือไม่มีโครงสร้าง และมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง แบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ

(1) อะควาจีนิก (aquagenic) เกิดจากการตกตะกอนของสารละลายโดยตรง หรือจากอะควาเจล

(2) ไพโรจีนิก (pyrogenic) เกิดจากการระเหยของซิลิกาโดยใช้เปลวไฟหรือการอาร์ค (arc) ในสถานะที่ไม่มีก๊าซออกซิเจน และเกิดการรวมตัวกันทางกายภาพ หรือเกิดจากการรวมตัวกันทางเคมีของไอสารประกอบซิลิกอนจากเปลวไฟของไฮโดรเจนกับออกซิเจน

(3) ไบโอจีนิก (biogenic) เป็นประเภทของอะควาจีนิกชนิดพิเศษประเภทหนึ่งที่พบในพืช และไดอะตอม

ในทางการค้านั้นมีการสังเคราะห์อสังฐานซิลิกาขึ้น เพื่อให้ได้คุณสมบัติเฉพาะที่สำคัญเพื่อใช้ในทางอุตสาหกรรม ซึ่งไม่สามารถพบได้ในซิลิกาที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น ต้องการความบริสุทธิ์สูงและมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงในเวลาเดียวกัน ดังนั้นการสังเคราะห์เพื่อให้ได้ อสังฐานซิลิกาด้วยกระบวนการที่แตกต่างกันจะทำให้ได้สารที่มีสมบัติเพื่อการใช้งานต่างกันออกไป

5.6 การใช้ประโยชน์จากซิลิกา

การนำซิลิกาชนิดอสังฐานมาใช้งานอุตสาหกรรม เพื่อประโยชน์ในด้านต่างๆ ดังนี้

1) เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงและเพิ่มความหนาแน่นแก่สารอื่น เช่น ยาง พลาสติกและโพลีเมอร์ (polymer)

2) เป็นสารเพิ่มแรงยึดในกาวบางชนิด

3) เป็นสารลดแรงยึดระหว่างผิวของแข็งในของเหลวที่มีของแข็งผสมอยู่

4) เป็นสารเพิ่มความหนืด และปรับคุณสมบัติของการไหล (thixotropy) ในของเหลว เช่น จารบี สี หมึก ยา และเครื่องสำอาง

5) เป็นสารช่วยปรับคุณสมบัติของพื้นผิวต่างๆ เช่น เกิดการผสมของน้ำกับน้ำมันเป็นอย่างดี ป้องกันการเกิดโฟม และปรับสภาพพื้นผิวของสารให้มีคุณสมบัติชอบน้ำเป็นต้น

6) เป็นสารเพิ่มความเงา

7) เป็นสารดูดความชื้น

6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กิตติพันธ์ (2550) การเตรียม PAMAM dendrimer บนผิวของ silica gel นำไปทดสอบการดูดซับไอออนของโลหะหนัก Cu^{2+} , Ni^{2+} และ Cd^{2+} ที่มีความเข้มข้น 100 ppm ปริมาตร 10 ml และมีค่า pH 4 ที่อุณหภูมิ 25 °C เวลาการดูดซับ 60 นาที พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับมีค่า 78.9 %, 50.0 % และ 80.4 % ตามลำดับ

Berker and Guner (1999) ได้ทำการสังเคราะห์เรซินที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) จาก Hydroxyethyl Cellulose เพื่อใช้กำจัดไอออนของโลหะหนักจำพวก เหล็ก โคบอลต์ ทองแดง และสังกะสีออกจากสารละลาย โดยทดลองการแลกเปลี่ยนไอออนทั้งแบบคอลัมน์ (Column) และแบบแบตช์ (Batch) ปรากฏว่าเรซินชนิดนี้มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูง และมีความเสถียรต่อสารเคมีต่างๆด้วย

El-Naggar and Abou-Mesalam (2007) ได้ทำการสังเคราะห์สารแลกเปลี่ยนไอออน magnesio-silicate และ magnesium alumino-silicate และทำไปทดลองกำจัดไอออนของโลหะหนักซีเซียม (Cs^+) โคบอลต์ (Co^{2+}) แคดเมียม (Cd^{2+}) สังกะสี (Zn^{2+}) และทองแดง (Cu^{2+}) พบว่า magnesium alumino-silicate มีความสามารถกำจัดโลหะหนักได้ดีกว่า magnesio-silicate

Krishanaro and Mahajan (1995) ได้กล่าวว่าองค์ประกอบหลักที่พบในแกลบ ได้แก่ สารอินทรีย์ และซิลิกา ซึ่งสารอินทรีย์นั้น ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน จากการทดลองถึงปัจจัยของความเข้มข้นกรดที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของซิลิกา พบว่าแกลบที่ผ่านการต้มด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 5 N นาน 1 ชั่วโมง จะมีปริมาณของสารอินทรีย์ (organic material) ลดลงเป็น 74.67 % และมีปริมาณของซิลิกาเพิ่มขึ้นเป็น 25.36 % เมื่อเทียบจากแกลบเริ่มต้นซึ่งมีปริมาณสารอินทรีย์ถึง 81.52 % และปริมาณของซิลิกาเพียง 18.48 % ตามลำดับนอกจากนี้การต้มแกลบด้วยสารละลายกรดยังช่วยลดปริมาณของสิ่งเจือปนในแกลบ (metallic impurity) ซึ่งเป็นโลหะขี้ขาว ทำให้ถูกสารละลายกรดที่มีขี้ขาวละลายออกไป โดยเฉพาะโพแทสเซียม (K) จะถูกกำจัดออกไปคิดเป็นปริมาณสูงที่สุด ซึ่งธาตุชนิดดังกล่าวถือเป็นสาเหตุสำคัญให้เกิดการหลอมเหลวของผิวซิลิกา และเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดซิลิกาในรูปผลึก

Lehrfeld (1996) สามารถเตรียมเรซินที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกจากวัสดุเหลือทิ้งทางเกษตร โดยมี binding site เป็นพวก carboxylate, phosphate และ sulfate จากการทดลองความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนแคลเซียมของสารเหล่านี้ในช่วง 559-3466 $\mu\text{equiv/g}$

อุปกรณ์ละวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์และเครื่องมือ

1.1 เครื่องชั่งน้ำหนักชนิดละเอียด 4 ตำแหน่ง อ่านค่าละเอียด 0.0001 กรัม รุ่น WB-0250003 บริษัท KERN & Sohn GmbH

1.2 เครื่องชั่งน้ำหนักชนิดละเอียด 2 ตำแหน่ง อ่านค่าละเอียด 2 ละเอียด รุ่น PB-1501 บริษัท Mettler Toledo

1.3 เครื่องโพเทนชิออมิเตอร์พร้อมด้วยขั้วเลือกจำเพาะโพแทสเซียมไอออน (Potassium Ion-Selective Electrode) รุ่น F-53 บริษัท Horiba

1.4 เครื่องวิเคราะห์โพแทสเซียมชนิดอินดักทีฟลิคพลาสมาออฟติคอลลิมิสชันสเปกโตรเมเตอร์ (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer, ICP-OES) รุ่น Optima 8000 บริษัท PerkinElmer

1.5 เครื่องวัดพีเอช รุ่น 410 บริษัท Thermo Orion Co.,Ltd.

1.6 ตู้อบ (Oven) รุ่น OF-11E บริษัท JEIO TECH KOREA

1.7 เครื่องเขย่า (shaker) Orbit shaker รุ่น OM-S4050 บริษัท UMAC Scientific Co., Ltd.

1.8 กระดาษกรอง GF/C ขนาด 0.45 ไมครอน ของ whatman

1.9 เดสสิเคเตอร์ (Desicetor)

1.10 คอลัมน์แก้วขนาด 4.5×42 เซนติเมตร

1.13 เครื่องแก้วต่างๆ ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

2 สารเคมี

2.1 เรซินแลกเปลี่ยนแคตไอออน (cation exchange resin) ชนิด strongly acidic รหัส Lewatit® GF 202 บริษัท LANXESS จำกัด

2.2 ซิลิกาเตรียมได้จากขี้เถ้าแกลบ

2.3 น้ำมันไบโอดีเซลดิบซึ่งได้จากปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันจากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ที่ผ่านการล้างน้ำ 1 ครั้ง ใช้ในการทดลองแบบเบดซ์ และผ่านการล้างน้ำ 2 ครั้ง ใช้ในการทดลองแบบคอลัมน์

2.4 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassiumhydroxide, KOH)

2.5 ไอโซโพรพานอล (iso-propanol, $(\text{CH}_3)_2\text{CHOH}$)

2.6 โทลูอิน (Toluene, $(\text{C}_6\text{H}_5)\text{CH}_3$)

2.7 ฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์ (phenolphthalein indicator)

วิธีการ

1. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดโพแทสเซียมไอออนในน้ำมันไบโอดีเซลดิบด้วยเรซินแลกเปลี่ยนแคโทดไอออนและซิลิกาจากแกลบข้าว โดยทำการทดลองแบบเบตซ์

1.1 ศึกษาปริมาณเรซินแลกเปลี่ยนแคโทดไอออนและซิลิกาจากแกลบเบื้องต้น

ทำการทดลองโดยซึ่งเรซินแลกเปลี่ยนแคโทดไอออนปริมาณ 0.5, 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม ตามลำดับ ใส่ขวดรูปชมพู่ เติมน้ำมันไบโอดีเซลดิบ 25 มิลลิลิตร แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 30 นาที ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที กรองด้วยกระดาษกรองเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน นำน้ำมันไบโอดีเซลดิบที่ผ่านการกรองแล้วมาสกัดด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้ง ครั้งละ 25 ml เพื่อแยกโพแทสเซียมไอออนที่ตกค้างในน้ำมันไบโอดีเซลดิบจากนั้นนำชั้นน้ำที่สกัดได้มาตรวจวัดค่าพีเอชและวิเคราะห์ปริมาณโพแทสเซียมไอออนด้วยเครื่องโพเทนชิออมิเตอร์ พร้อมด้วยขั้วเลือกจำเพาะโพแทสเซียมไอออน พร้อมกับนำน้ำมันไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการกำจัดโพแทสเซียมไอออนด้วยเรซินมาตรวจวัดค่าความเป็นกรด (ดังแสดงในภาคผนวก ก)

นำซิลิกาจากแกลบมาทำการทดลองเช่นเดียวกับเรซินแลกเปลี่ยนแคโทดไอออน

1.2 ศึกษาอิทธิพลความเร็วรอบของการเขย่า

ทำการทดลองโดยซึ่งเรซินแลกเปลี่ยนแคโทดไอออนเท่ากับปริมาณที่ศึกษาได้จากข้อ 1.1 ใส่ขวดรูปชมพู่ เติมน้ำมันไบโอดีเซลดิบ 25 มิลลิลิตร แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 50, 100, และ 150 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 30 นาที ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที ทำการทดลองต่อเช่นเดียวกับข้อ 1.1

นำซิลิกาจากแกลบทำการทดลองเช่นเดียวกับเรซินแลกเปลี่ยนแคโทดไอออน โดยใช้ปริมาณซิลิกาจากแกลบเท่ากับปริมาณที่ศึกษาได้จากข้อ 1.1

1.3 ศึกษาระยะเวลาเขย่า

ทำการทดลองโดยชั่งเรซินแลกเปลี่ยนแคทไอออนเท่ากับปริมาณที่ศึกษาได้จากข้อ 1.1 ใส่ขวดรูปชมพู่ เติมน้ำมันไบโอดีเซลดิบ 25 มิลลิลิตร แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบที่ศึกษาได้จากข้อที่ 1.2 เป็นระยะเวลา 30, 60, 90 และ 120 นาที ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที ทำการทดลองต่อเช่นเดียวกับข้อ 1.1

นำซิลิกาจากถ้ำเกลบทำการทดลองเช่นเดียวกับเรซินแลกเปลี่ยนแคทไอออน โดยใช้ปริมาณซิลิกาเท่ากับปริมาณที่ศึกษาได้จากข้อ 1.1

1.4 ศึกษาระยะเวลาสัมผัส

ชั่งเรซินแลกเปลี่ยนแคทไอออนเท่ากับปริมาณที่ศึกษาได้จากข้อ 1.1 ใส่ขวดรูปชมพู่ เติมน้ำมันไบโอดีเซลดิบ 25 มิลลิลิตร แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบที่ศึกษาได้จากข้อที่ 1.2 เป็นระยะเวลานานเท่ากับที่ศึกษาได้จากข้อ 1.3 ระยะเวลาสัมผัส 30, 60, 90 และ 120 นาที ทำการทดลองต่อเช่นเดียวกับข้อ 1.1

นำซิลิกาจากถ้ำเกลบทำการทดลองเช่นเดียวกับเรซินแลกเปลี่ยนแคทไอออน โดยใช้ปริมาณซิลิกาจากถ้ำเกลบเท่ากับปริมาณที่ศึกษาได้จากข้อ 1.1

1.5 ศึกษาอิทธิพลของปริมาตรน้ำมันไบโอดีเซลดิบต่อซิลิกาจากถ้ำเกลบด้วยวิธีแบบเบตซ์

ชั่งซิลิกาจากถ้ำเกลบเท่ากับปริมาณที่ศึกษาได้จากข้อ 1.1 ใส่ขวดรูปชมพู่แต่ละขวด เติมน้ำมันไบโอดีเซลดิบปริมาตร 25, 50, 75 และ 100 มิลลิลิตร แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบเท่ากับที่ศึกษาได้จากข้อ 1.2 เป็นระยะเวลานานเท่ากับที่ศึกษาได้จากข้อ 1.3 และ ระยะเวลาสัมผัสเท่ากับที่ศึกษาได้จากข้อ 1.4 ทำการทดลองต่อเช่นเดียวกับข้อ 1.1

1.6 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณเรซินแลกเปลี่ยนแคทไอออน

ชั่งเรซินแลกเปลี่ยนแคทไอออนเท่ากับ 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่แต่ละขวด เติมน้ำมันไบโอดีเซลดิบ 25 มิลลิลิตร แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบที่ศึกษาได้จากข้อที่ 1.2 เป็นระยะเวลานานเท่ากับที่ศึกษาได้จากข้อ 1.3 และระยะเวลาสัมผัสเท่ากับที่ศึกษาได้จากข้อ 1.4 ทำการทดลองต่อเช่นเดียวกับข้อ 1.1

1.7 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณซิลิกาจากถ้ำเกลบและไอโซเทอร์มการดูดซับ โพรแทสเซียมไอออน

ชั่งซิลิกาจากถ้ำเกลบเท่ากับ 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่แต่ละขวด เติมน้ำมันไบโอดีเซลดิบปริมาตรเท่ากับที่ศึกษาได้จากข้อ 1.5 แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบที่ศึกษาได้จากข้อที่ 1.2 เป็นระยะเวลานานเท่ากับที่ศึกษาได้จากข้อ 1.3 และระยะเวลาสัมผัสเท่ากับที่ศึกษาได้จากข้อ 1.4 ทำการทดลองต่อเช่นเดียวกับข้อ 1.1

1.8 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณเรซินแลกเปลี่ยนแคทไอออนและซิลิกาจากถ้ำเกลบโดยวิเคราะห์ปริมาณโพแทสเซียมไอออนด้วยเครื่อง ICP-OES

นำน้ำมันไบโอดีเซลดิบที่ผ่านกระบวนการกำจัดโพแทสเซียมไอออนด้วยเรซินและซิลิกาจากถ้ำเกลบที่ศึกษาได้จากข้อ 1.6 และ 1.7 นำไปวิเคราะห์ปริมาณโพแทสเซียมไอออนด้วยเครื่อง ICP-OES ดังภาคผนวก ง

2. ศึกษาการทำให้ไบโอดีเซลดิบให้บริสุทธิ์ด้วยเรซินแลกเปลี่ยนแคทไอออนด้วยวิธีการไหลแบบต่อเนื่อง

นำคอลัมน์แก้วขนาด 4.5×42 เซนติเมตร บรรจุเรซินปริมาณ 150 กรัม ค่อยๆ เทน้ำมันไบโอดีเซลดิบ 1250 มิลลิลิตร (เป็นปริมาตรที่คำนวณได้จากการศึกษาแบบแบตช์เมื่อใช้เรซิน 150 กรัม) ดังแสดงในภาพที่ 22 แซ่ทิ้งไว้ 20 นาที เพื่อรอให้เรซินบวมตัว ปล่อยให้ น้ำมันไหลออกจากคอลัมน์ด้วยอัตราการไหล 13.88 มิลลิลิตร/นาที เก็บน้ำมันไบโอดีเซลที่ไหลออกมาครั้งละ 50 มิลลิลิตร นำน้ำมันที่เก็บได้นำมาสกัดด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้ง ครั้งละ 25 ml เพื่อแยกโพแทสเซียม

ไอออนที่ตกค้างในน้ำมันไบโอดีเซลดิบ จากนั้นนำชั้นน้ำที่สกัดได้มาตรวจวัดค่าพีเอชและวิเคราะห์ปริมาณโพแทสเซียมไอออนด้วยเครื่องโพเทนชิโอเมตอร์พร้อมด้วยขั้วเลือกจำเพาะโพแทสเซียมไอออน และนำน้ำมันไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการกำจัดโพแทสเซียมไอออนด้วยเรซินมาวิเคราะห์หาค่าความเป็นกรดดังภาคผนวก ค



ภาพที่ 22 ลักษณะคอลัมน์ที่ใช้ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโพแทสเซียมไอออนในน้ำมันไบโอดีเซลดิบด้วยเรซินแลกเปลี่ยนแคตไอออน

3. ศึกษาการทำให้ไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยเรซินแลกเปลี่ยนแคตไอออนที่ผ่านการรีเจนเนอเรตแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ด้วยวิธีการไหลแบบต่อเนื่อง

3.1 นำเรซินแลกเปลี่ยนแคตไอออนที่ผ่านการใช้งานแล้วในข้อที่ 2 มาล้างด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้น 0.1 M ปริมาตร 3 ลิตร กวนเป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 30 องศาเซลเซียส) จากนั้นนำของผสมมากรองสารละลายออก ล้างด้วยกรดผ่านกรวยกรองอีกครั้ง แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นเพื่อล้างสารละลายกรดออกบางส่วน นำเรซินแลกเปลี่ยนแคตไอออนที่ได้จากการกรองมาล้างด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 0.01 M โดย

ล้าง 1-2 ครั้งจนได้สารละลายมีค่า pH ประมาณ 6.5-7.5 จากนั้นนำมากรองและล้างด้วยน้ำกลั่นผ่านกรวยกรองจนน้ำล้างมีค่า pH ประมาณ 6.5-7.5 ล้างตามด้วยเมทานอลอีกครั้งแล้วจึงนำไปอบในเครื่องอบสูญญากาศที่อุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.3 นำเรซินแลกเปลี่ยนแคทไอออนที่ผ่านการรีเจนเนอเรตแล้วข้างต้นมาทำการทดลองต่อเช่นเดียวกันกับข้อ 2

4. ศึกษาการทำให้ไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยเรซินแลกเปลี่ยนแคทไอออนและเรซินแลกเปลี่ยนแคทไอออนที่ผ่านการรีเจนเนอเรต แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ด้วยวิธีการไหลแบบต่อเนื่องโดยวิเคราะห์ปริมาณโพแทสเซียมไอออนด้วยเครื่อง ICP-OES

นำน้ำมันไบโอดีเซลดิบที่ผ่านกระบวนการกำจัดโพแทสเซียมไอออนด้วยเรซินที่ศึกษาได้จากข้อ 2 และ 3 นำไปวิเคราะห์ปริมาณโพแทสเซียมไอออนด้วยเครื่อง ICP-OES

5. การวิเคราะห์ข้อมูล

5.1 วิเคราะห์ประสิทธิภาพการให้น้ำมันไบโอดีเซลดิบบริสุทธิ์ของเรซินและซิลิกาจากเถ้าแกลบด้วยการคำนวณร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนที่วัดได้จากเทคนิคโพเทนชิอเมตริแบบขั้วเลือกจำเพาะโพแทสเซียมไอออนและ ICP-OES จากการทดลองแบบเบตซ์

5.2 วิเคราะห์หาไอโซเทอร์มของการดูดซับโพแทสเซียมไอออนของซิลิกาจากเถ้าแกลบจากการทดลองแบบเบตซ์

5.3 วิเคราะห์ประสิทธิภาพการให้น้ำมันไบโอดีเซลดิบบริสุทธิ์ของเรซินด้วยการคำนวณร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนที่วัดได้จากเทคนิคโพเทนชิอเมตริแบบขั้วเลือกจำเพาะโพแทสเซียมไอออนและ ICP-OES จากการทดลองแบบวิธีการไหลต่อเนื่อง

6. สถานที่ทำการทดลอง

ทำการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)

7. ระยะเวลาในการทดลอง

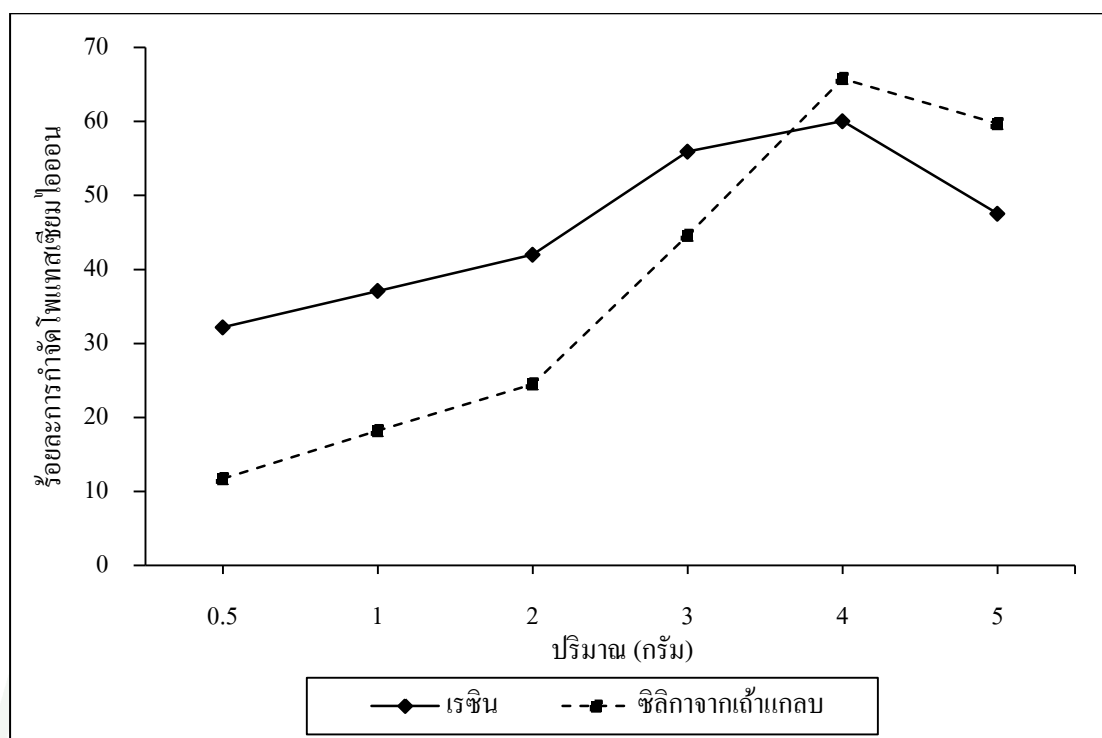
ระยะเวลาที่ทำการศึกษาทดลองโดยประมาณ 12 เดือน ตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2554 ถึงเดือนตุลาคม พ.ศ. 2555

ผลและวิจารณ์

ในการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโพแทสเซียมไอออนในน้ำมันไบโอดีเซลดิบให้บริสุทธิ์ด้วยเรซินและซิลิกาจากถั่วแกลบ โดยทำการทดลองแบบเบ็ดเสร็จเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ ความเร็วรอบการเขย่า (mixing speed) ระยะเวลาเขย่า (mixing time) ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล หรือระยะเวลาสัมผัส (contact time) ปริมาณสารกำจัด (dosage) และการวิเคราะห์หาไอโซเทอร์ม การดูดซับโดยใช้สมการของแลงเมียร์และฟรุนดลิชของซิลิกาจากถั่วแกลบ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมหรือประสิทธิภาพที่เหมาะสมในการทดลองและนำผลการทดลองที่ได้จากการกำจัดโพแทสเซียมไอออนในน้ำมันไบโอดีเซลดิบแบบเบ็ดเสร็จมาทดลองหาประสิทธิภาพด้วยวิธีการไหลแบบต่อเนื่อง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดโพแทสเซียมไอออนในน้ำมันไบโอดีเซลดิบให้บริสุทธิ์ด้วยเรซินแลกเปลี่ยนแคตไอออนและซิลิกาจากถั่วแกลบ โดยทำการทดลองแบบเบ็ดเสร็จ

จากการทดลองในข้อที่ 1.1 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดโพแทสเซียมไอออนในน้ำมันไบโอดีเซลดิบจะเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณสารกำจัดไอออนเพิ่มขึ้น โดยพบว่าที่ปริมาณเรซิน 4 กรัม สามารถกำจัดโพแทสเซียมไอออนได้สูงสุดที่ร้อยละ 60.04 และซิลิกาจากถั่วแกลบ 4 กรัม สามารถดูดซับได้ร้อยละ 65.78 ซึ่งปริมาณเรซินที่ 0.5, 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม มีประสิทธิภาพในการกำจัดโพแทสเซียมไอออนเท่ากับร้อยละ 32.17, 37.09, 42.00, 55.94, 60.04 และ 47.54 ตามลำดับ ขณะที่ปริมาณซิลิกาจากถั่วแกลบที่ 0.5, 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม มีประสิทธิภาพในการกำจัดโพแทสเซียมไอออนเท่ากับ ร้อยละ 11.70, 18.21, 24.50, 44.59, 65.78 และ 59.71 ตามลำดับ ดังภาพที่ 23 และตารางที่ 3



ภาพที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนด้วยเรซินและซัลฟิคาจากเถ้าแกลบกับปริมาณสารแลกเปลี่ยนไอออนเริ่มต้น

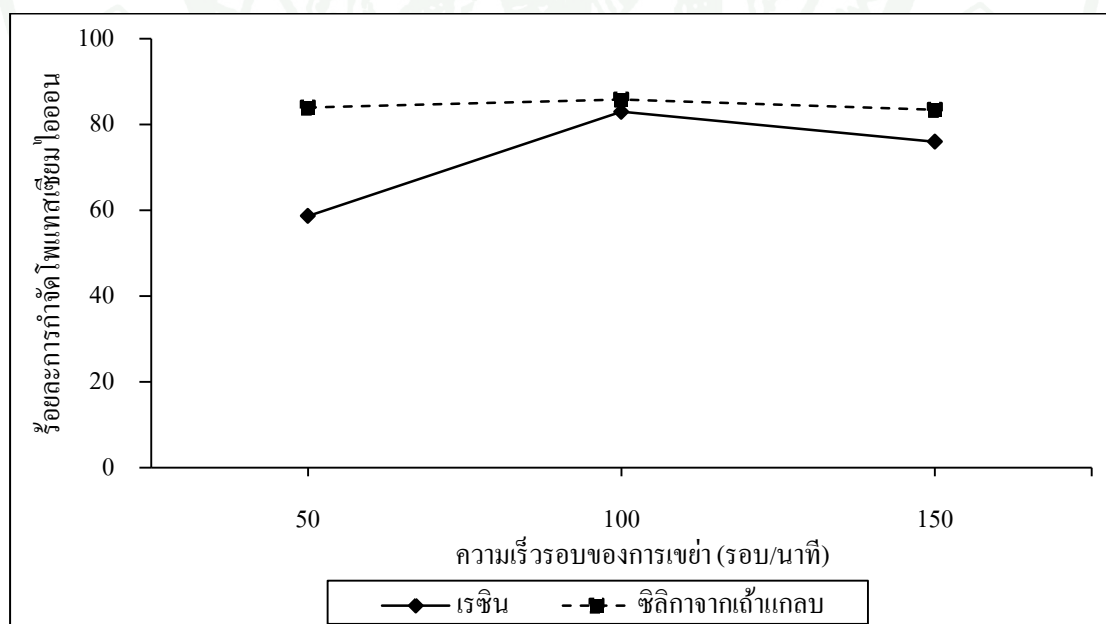
ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนด้วยเรซินและซัลฟิคาจากเถ้าแกลบกับปริมาณสารเริ่มต้น

ปริมาณสาร (กรัม)	ร้อยละการกำจัด ด้วยเรซิน	ร้อยละการกำจัด ด้วยซัลฟิคาจากเถ้าแกลบ
0.5	32.17	11.70
1	37.09	18.21
2	42.00	24.50
3	55.94	44.59
4	60.04	65.78
5	47.54	59.71

จากผลการทดลอง พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเรซินและซิลิกาจากเถ้าแกลบทำให้ร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนเพิ่มขึ้น อธิบายได้ว่าเนื่องจากการเพิ่มปริมาณเรซินนั้นจะเป็นการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันที่มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนและซิลิกาจากเถ้าแกลบเท่ากับเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับไอออนจึงทำให้ร้อยละการกำจัดเพิ่มขึ้น (นิพนธ์ และ คณิตา, 2550)

1.1 ผลการศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบในการเขย่า

จากการทดลองในข้อที่ 1.2 พบว่า เรซินสามารถแลกเปลี่ยนโพแทสเซียมไอออนได้สูงสุดที่ความเร็วรอบในการเขย่า 100 รอบ/นาที โดยกำจัดโพแทสเซียมไอออนได้ร้อยละ 82.95 จากนั้นประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนโพแทสเซียมไอออนจะลดลง และซิลิกาจากเถ้าแกลบสามารถกำจัดโพแทสเซียมไอออนได้สูงสุดที่ความเร็วรอบในการเขย่า 100 รอบ/นาที โดยกำจัดโพแทสเซียมได้ร้อยละ 85.80 จากนั้นประสิทธิภาพในการกำจัดโพแทสเซียมไอออนจะลดลง เช่นเดียวกัน ซึ่งความเร็วรอบในการเขย่าที่ 50, 100 และ 150 รอบ/นาที เรซินมีประสิทธิภาพในการกำจัดโพแทสเซียมไอออนเท่ากับร้อยละ 58.66, 82.95, และ 75.98 ตามลำดับ ขณะที่ความเร็วรอบในการเขย่าที่ 50, 100 และ 150 รอบ/นาที ซิลิกาจากเถ้าแกลบมีประสิทธิภาพในการกำจัดโพแทสเซียมไอออนเท่ากับ ร้อยละ 83.93, 85.80 และ 83.39 ตามลำดับ ดังภาพที่ 24 และตารางที่ 4



ภาพที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนด้วยเรซินและซิลิกาจากเถ้าแกลบกับความเร็วรอบในการเขย่า

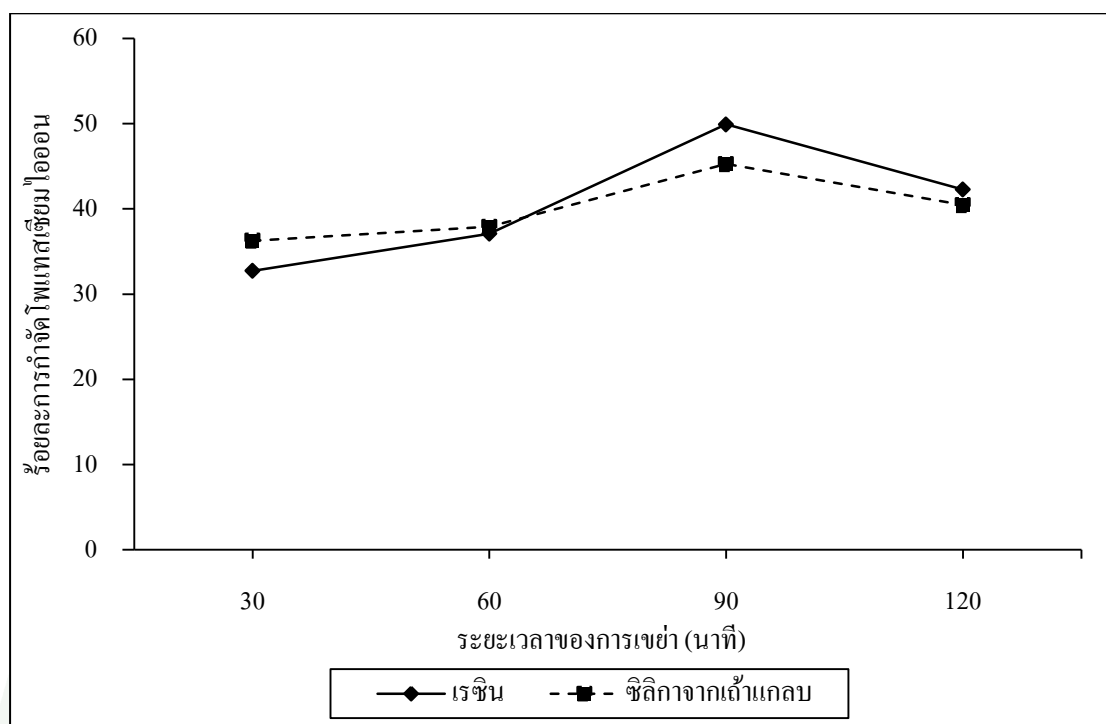
ตารางที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนด้วยเรซินและซิลิกาจากถ้ำ
 แกลบกับความเร็วยรอบในการเขย่า

ความเร็วยรอบในการเขย่า (รอบต่อนาที)	ร้อยละการกำจัด ด้วยเรซิน	ร้อยละการกำจัด ด้วยซิลิกาจากถ้ำแกลบ
50	58.66	83.93
100	82.95	85.80
150	75.98	83.39

อธิบายได้ว่าเมื่อเพิ่มความเร็วยรอบของการเขย่า มีผลให้ร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนด้วยเรซินและซิลิกาจากถ้ำแกลบเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความเร็วยรอบของการเขย่า ทำให้โมเลกุลของโพแทสเซียมไอออนเคลื่อนที่ได้มากขึ้น และมีโอกาสเคลื่อนที่เข้าหาสารแลกเปลี่ยนไอออนได้รวดเร็วส่งผลให้เกิดการกำจัดได้มากขึ้น ขณะที่พื้นที่ผิวหรือหมู่ของสารแลกเปลี่ยนไอออนมีจำนวนจำกัด โพแทสเซียมไอออนไม่สามารถดูดซับไว้ที่พื้นผิวหรือหมู่ที่ใช้แลกเปลี่ยนไอออนได้ จึงทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดลดลง เมื่อความเร็วยรอบเขย่ามากกว่าความเร็วยรอบเขย่าที่ให้ร้อยละการกำจัดที่ดีที่สุด (นิพนธ์ และ คณิตา, 2550)

1.2 ผลการศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาเขย่า

จากการทดลองในข้อที่ 1.3 พบว่า เรซินที่ระยะเวลาเขย่า 90 นาที สามารถกำจัดโพแทสเซียมไอออนได้สูงสุด โดยกำจัดโพแทสเซียมได้ร้อยละ 49.91 จากนั้นประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนโพแทสเซียมไอออนจะลดลง และซิลิกาจากถ้ำแกลบที่ระยะเวลาเขย่า 90 นาที สามารถกำจัดโพแทสเซียมไอออนได้สูงสุด โดยกำจัดโพแทสเซียมได้ร้อยละ 45.27 จากนั้นประสิทธิภาพในการกำจัดโพแทสเซียมไอออนจะลดลง เช่นเดียวกัน ซึ่งระยะเวลาเขย่าที่ 30, 60, 90 และ 120 นาที เรซินมีประสิทธิภาพในการกำจัดโพแทสเซียมไอออนเท่ากับร้อยละ 32.73, 37.09, 49.91 และ 45.27 ตามลำดับ ขณะที่ซิลิกาจากถ้ำแกลบมีประสิทธิภาพในการกำจัดโพแทสเซียมไอออนเท่ากับร้อยละ 36.27, 37.91, 45.27 และ 40.45 ตามลำดับ ดังภาพที่ 25 และตารางที่ 5



ภาพที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนด้วยเรซินและซิลิกาจากถ้ำเกลบกับระยะเวลาเขย่า

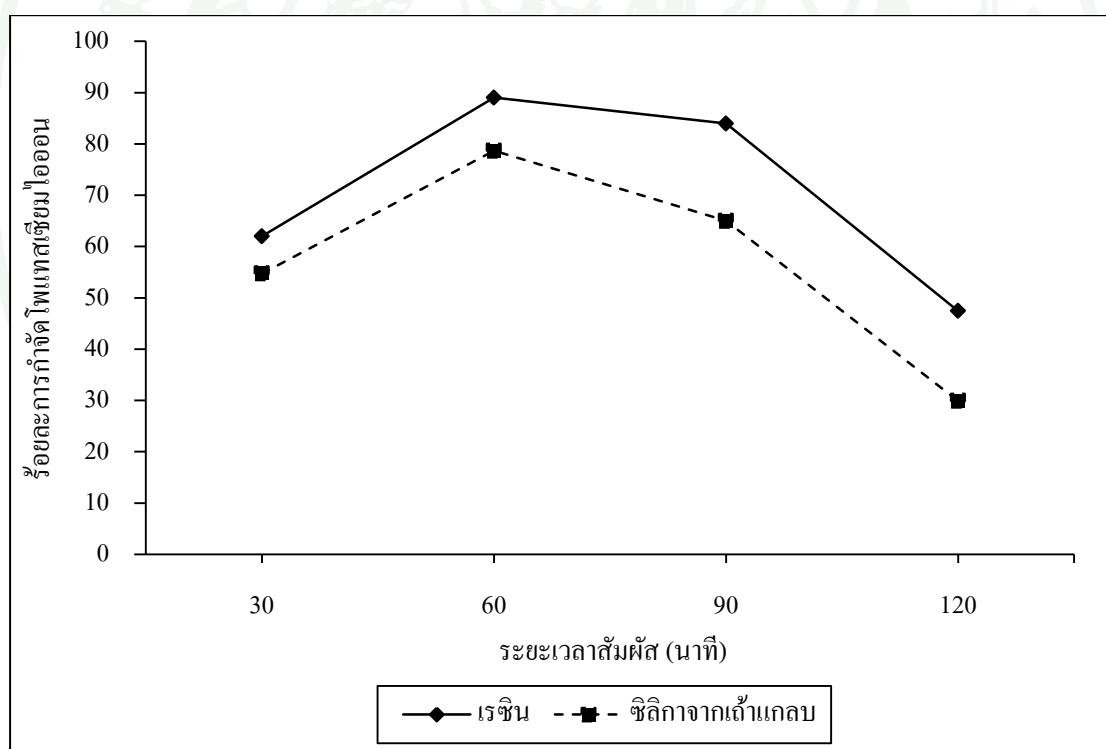
ตารางที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนด้วยเรซินและซิลิกาจากถ้ำเกลบกับระยะเวลาเขย่า

ระยะเวลาเขย่า (นาที)	ร้อยละการกำจัด ด้วยเรซิน	ร้อยละการกำจัด ด้วยซิลิกาจากถ้ำเกลบ
30	32.73	36.27
60	37.09	37.91
90	49.91	45.27
120	42.27	40.45

อธิบายได้ว่าในระยะเวลาเริ่มต้นนี้สารแลกเปลี่ยนไอออนมีหมู่ฟังก์ชันหรือพื้นที่ผิวถูกจับมากทำให้มีอัตราการแลกเปลี่ยนไอออนมากขึ้น จนถึงระยะเวลาหนึ่งหมู่ในการแลกเปลี่ยนไอออนถูกปกคลุมไปด้วยตัวโพแทสเซียมไอออนและจะเข้าสู่ภาวะสมดุล ทำให้อัตราการแลกเปลี่ยนคงที่หรือลดลง (นิพนธ์ และ คณิตา, 2550)

1.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาสัมพัทธ์

จากการทดลองในข้อที่ 1.4 พบว่า เรซินที่ระยะเวลาสัมพัทธ์ 60 นาที สามารถกำจัดโพแทสเซียมไอออนได้สูงสุด โดยกำจัดโพแทสเซียมได้ร้อยละ 89.01 จากนั้นประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนโพแทสเซียมไอออนจะค่อยๆ ลดลง และซิลิกาจากเถ้าแกลบที่ระยะเวลาสัมพัทธ์ 60 นาที สามารถกำจัดโพแทสเซียมไอออนได้สูงสุด โดยกำจัดโพแทสเซียมได้ร้อยละ 78.67 จากนั้นประสิทธิภาพในการกำจัดโพแทสเซียมไอออนจะค่อยๆ ลดลง เช่นเดียวกัน ซึ่งระยะเวลาสัมพัทธ์ที่ 30, 60, 90 และ 120 นาที เรซินมีประสิทธิภาพในการกำจัดโพแทสเซียมไอออนเท่ากับร้อยละ 62.01, 89.01, 83.98 และ 47.45 ตามลำดับ ขณะที่ซิลิกาจากเถ้าแกลบมีประสิทธิภาพในการกำจัดโพแทสเซียมไอออนเท่ากับร้อยละ 54.73, 78.67, 64.99 และ 29.91 ตามลำดับ ดังภาพที่ 26 และตารางที่ 6



ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนด้วยเรซินและซิลิกาจากเถ้าแกลบกับระยะเวลาเวลาสัมพัทธ์

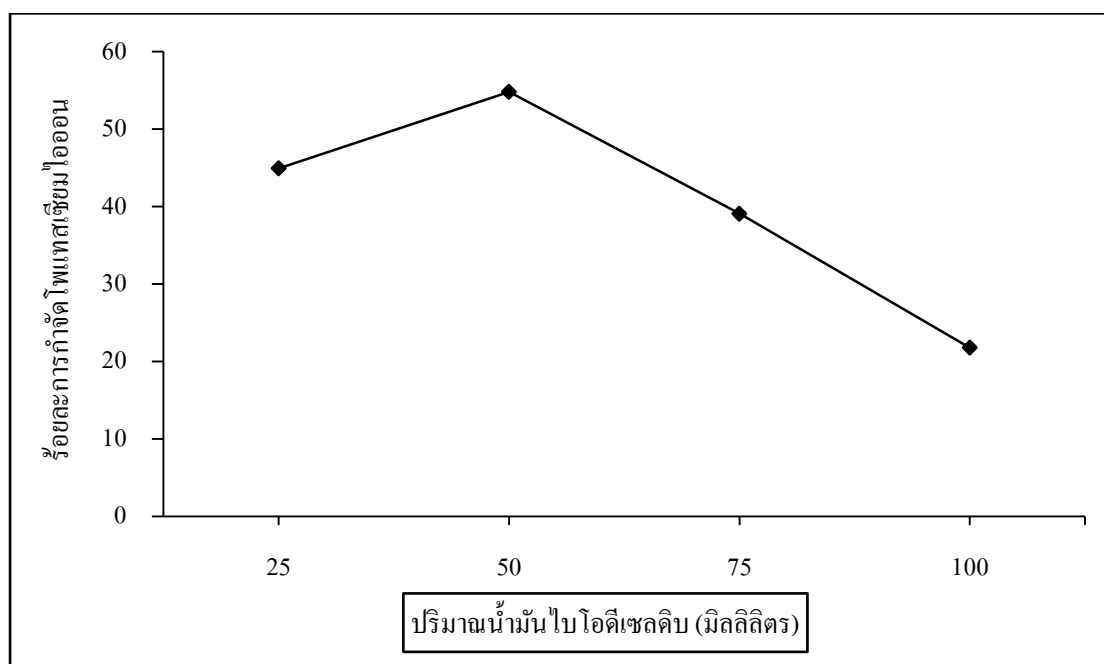
ตารางที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนด้วยเรซินและซิลิกาจาก
ถ้ำเกลือกับระยะเวลาเวลาสัมผัส

ระยะเวลาสัมผัส (นาทีก)	ร้อยละการกำจัด ด้วยเรซิน	ร้อยละการกำจัด ด้วยซิลิกาจากถ้ำเกลือ
30	62.01	54.73
60	89.01	78.67
90	83.98	64.99
120	47.45	29.91

อธิบายได้ว่า เมื่อระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารแลกเปลี่ยนมีระยะเวลาในการแลกเปลี่ยนไอออนกับหมู่ฟังก์ชันหรือพื้นที่ผิวดูดซับ หลังจากนั้นเมื่อถึงระยะเวลานึ่งประสิทธิภาพในการกำจัดก็จะคงที่และเริ่มลดลง เนื่องจากการกำจัดจะเริ่มเข้าสู่สมดุล ทำให้สารแลกเปลี่ยนไอออนและการดูดซับเกิดการอิ่มตัวและเริ่มหมดสภาพมีผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับคงที่หรือลดลง (นิพนธ์ และ คณิตา, 2550)

1.4 ผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลต่อซิลิกาจากถ้ำเกลือ

จากการทดลองในข้อที่ 1.5 พบว่า ซิลิกาจากถ้ำเกลือที่ปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลดิบ 50 มิลลิลิตร สามารถกำจัดโพแทสเซียมไอออนได้สูงสุด โดยกำจัดโพแทสเซียมได้ร้อยละ 54.83 จากนั้นประสิทธิภาพในการกำจัดโพแทสเซียมไอออนจะค่อยๆ ลดลง ซึ่งน้ำมันไบโอดีเซลดิบ ปริมาตรที่ 25, 50, 75 และ 100 มิลลิลิตร ซิลิกาจากถ้ำเกลือมีประสิทธิภาพในการกำจัดโพแทสเซียมไอออนเท่ากับร้อยละ 44.94, 54.83, 39.10 และ 21.80 ตามลำดับ ดังภาพที่ 27 และ ตารางที่ 7



ภาพที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ด้วยซิลิกาจากเถ้าแกลบกับ ปริมาณน้ำมันไบโอดีเซล

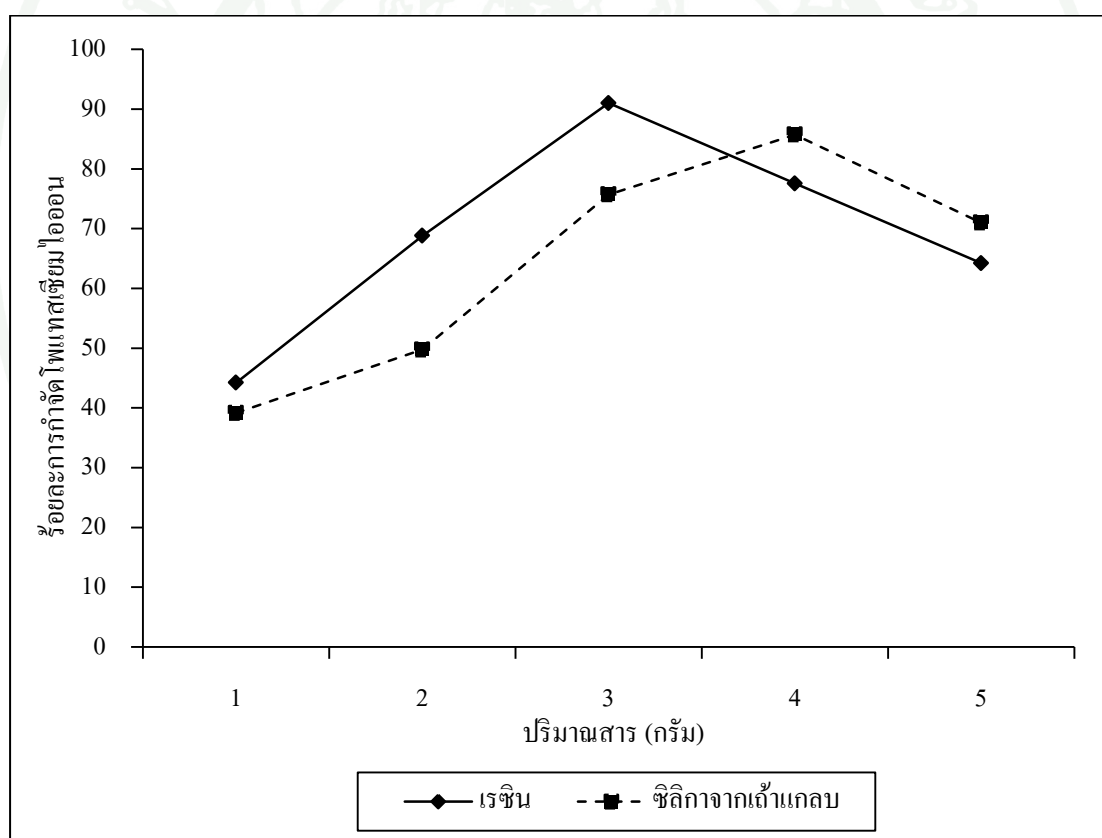
ตารางที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ของซิลิกาจากเถ้าแกลบกับ ปริมาณน้ำมันไบโอดีเซล

ปริมาตร (มิลลิลิตร)	ร้อยละการกำจัด ด้วยซิลิกาจากเถ้าแกลบ
25	44.94
50	54.83
75	39.10
120	21.80

อธิบายได้ว่า เนื่องจากพื้นที่ผิวที่ใช้ดูดซับของซิลิกาจากเถ้าแกลบได้ดูดซับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เต็มที่แล้วจะไม่สามารถดูดซับได้อีก จากผลการทดลองที่มีปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลดิบที่มากขึ้นนั้นหมายความว่าความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มากขึ้นด้วย ร้อยละการดูดซับจะเริ่มลดลง ในขณะที่ปริมาณซิลิกาจากเถ้าแกลบที่ใช้เท่ากันทุกปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลดิบ (นิพนธ์ และ คณิตา, 2550)

1.6 ผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณเรซินแลกเปลี่ยนแคตไอออนและซิลิกาจากเถ้าแกลบที่เหมาะสม

จากการทดลองในข้อที่ 1.5 และ 1.6 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดโพแทสเซียมไอออนในน้ำมันไบโอดีเซลดิบด้วยเรซินและซิลิกาจากเถ้าแกลบที่น้ำหนัก 3 และ 4 กรัม ตามลำดับ เป็นน้ำหนักที่สามารถกำจัดโพแทสเซียมได้สูงสุดที่ร้อยละ 91.00 และ 85.73 ตามลำดับ ซึ่งปริมาณเรซินที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม มีประสิทธิภาพในการกำจัดโพแทสเซียมไอออนเท่ากับร้อยละ 44.22, 42.00, 55.94, 60.04 และ 47.54 ตามลำดับ ขณะที่ปริมาณซิลิกาจากเถ้าแกลบที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม มีประสิทธิภาพในการกำจัดโพแทสเซียมไอออนเท่ากับ ร้อยละ 18.21, 24.50, 44.59, 65.78 และ 59.71 ตามลำดับ ดังภาพที่ 28 และตารางที่ 8



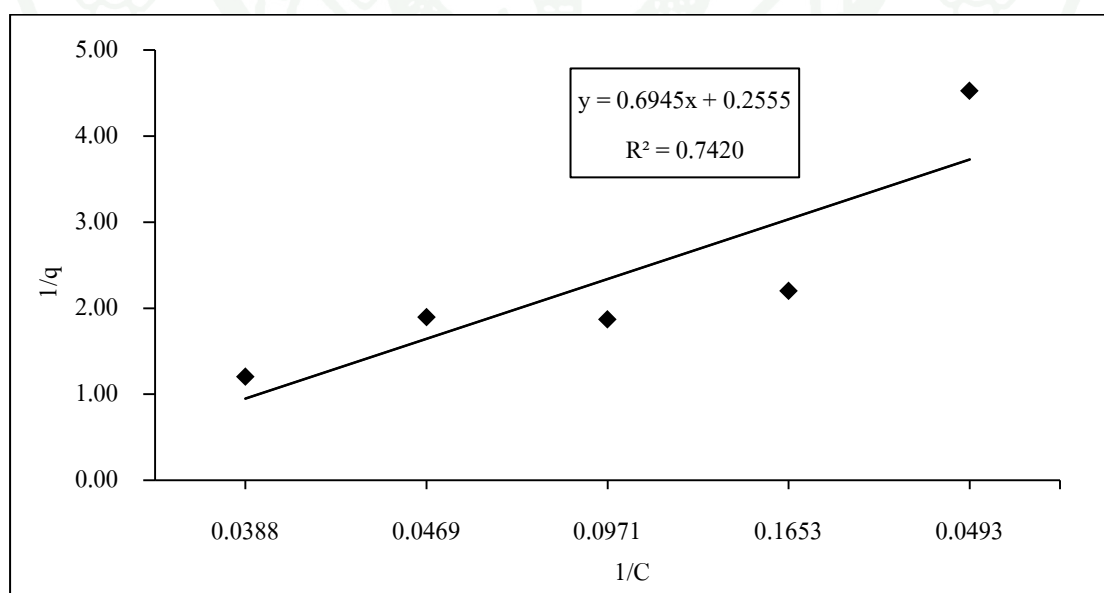
ภาพที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนด้วยเรซินและซิลิกาจากเถ้าแกลบกับปริมาณสารกำจัดไอออน

ตารางที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนด้วยเรซินและซิลิกาจาก
 ถ้ำเกลือกับปริมาณสารกำจัดไอออน

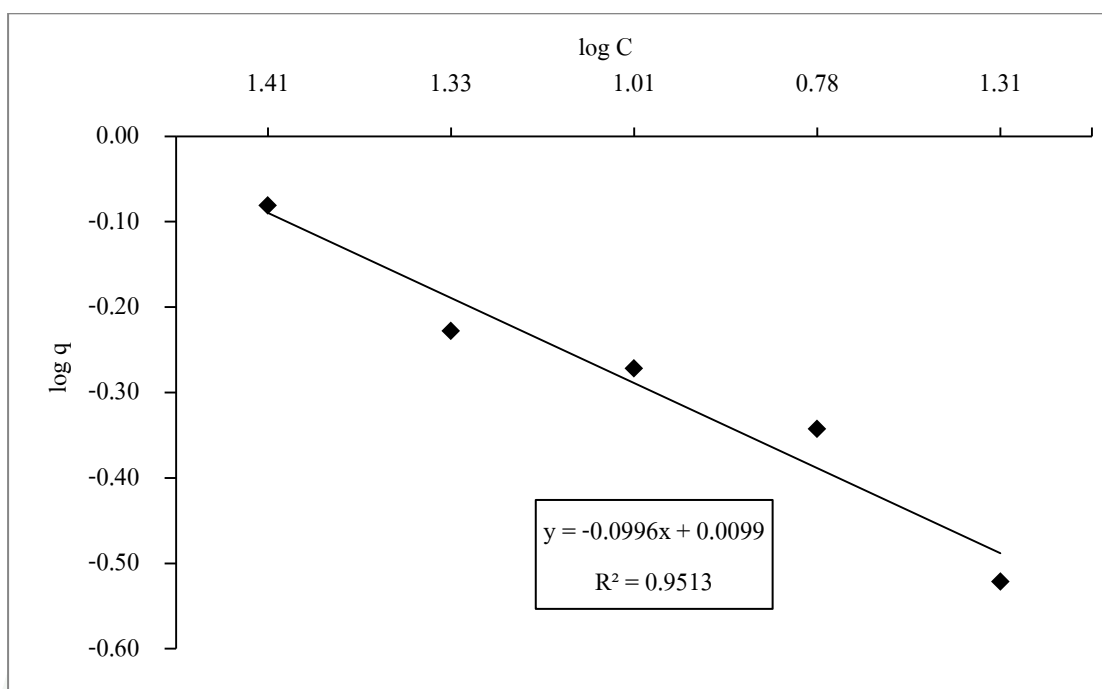
ปริมาณสาร (กรัม)	ร้อยละการกำจัด ด้วยเรซิน	ร้อยละการกำจัด ด้วยซิลิกาจากถ้ำเกลือ
1	22.00	39.15
2	68.80	52.12
3	91.00	75.70
4	66.53	85.73
5	39.67	49.76

1.7 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มในการดูดซับโพแทสเซียมในน้ำมันไบโอดีเซลดิบของซิลิกา
 จากถ้ำเกลือ

จากผลการทดลองในข้อ 1.6 สามารถนำมาเขียนไอโซเทอร์มในการดูดซับโพแทสเซียม
 ในน้ำมันไบโอดีเซลดิบของซิลิกาจากถ้ำเกลือเมื่อนำมาเขียนกราฟไอโซเทอร์มของแลงเมียร์และ
 ฟรุนดลิช จะได้ผลการทดลองดังภาพที่ 29 และภาพที่ 30



ภาพที่ 29 ไอโซเทอร์มการดูดซับโพแทสเซียมไอออนของแลงเมียร์ด้วยซิลิกาจากถ้ำเกลือ



ภาพที่ 30 ไอโซเทอร์มการดูดซับโพแทสเซียมไอออนของฟรอนด์ด้วยซิลิกาจากถ้ำเกลบ

จากผลการทดลอง พบว่า ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และฟรอนด์ มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R-square) ในการดูดซับโพแทสเซียมไอออนในน้ำมันไบโอดีเซลดิบ เท่ากับ 0.7420 และ 0.9513 ตามลำดับ ซึ่งค่าไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรอนด์อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (0.9700-1.2000) โดยกลไกการดูดซับของฟรอนด์ พื้นผิวบนตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด การดูดซับไม่สามารถบอกปริมาณของตัวถูกดูดซับ เนื่องจากตัวถูกดูดซับสามารถเกิดการซ้อนทับกันได้ เมื่อตัวดูดซับถูกดูดซับไว้แล้ว จะเคลื่อนที่หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับได้ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับอิ่มตัว

สมการไอโซเทอร์มการดูดซับแอมโมเนียของแลงเมียร์ โดยทั่วไป คือ $q = \frac{q_m KC}{1 + KC}$

นำมาเขียนใหม่ในรูปของสามการเส้นตรงได้ดังสมการที่ 8

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m K} \left(\frac{1}{C} \right) + \frac{1}{q_m} \quad \dots\dots\dots(8)$$

แทนค่าสมการที่ได้จากกราฟจะได้

$$\frac{1}{q} = 0.6945 \frac{1}{C} + 0.2555 \dots\dots\dots(9)$$

จากสมการที่ (9) เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/q$ กับ $1/C$ จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 0.6945 และจุดตัดบนแกนตั้ง เท่ากับ 0.2555 นั่นคือ

$$\frac{1}{q_m K} = 0.6945$$

$$\frac{1}{q_m} = 0.2555$$

ดังนั้น $K = 0.3679$

จากไอโซเทอร์มสมการการดูดซับของแลงเมียร์ พบว่า ค่า K มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่า ปริมาณตัวถูกดูดซับ ถูกดูดซับไว้ได้น้อยบนพื้นผิวตัวดูดซับของซิลิกาจากถ้ำเกลบ

สำหรับสมการไอโซเทอร์มการดูดซับแอมโมเนียของฟรุนดิช โดยทั่วไปคือ $q = KC^{1/n}$ นำมาเขียนใหม่ในรูปของลอการิทึม ได้ดังสมการที่ 10

$$\log q = \log K + \frac{1}{n} \log C \dots\dots\dots(10)$$

แทนค่าสมการที่ได้จากกราฟจะได้

$$\log q = 0.0099 - 0.0996 \log C \dots\dots\dots(11)$$

จากสมการที่ (11) เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log q$ กับ $\log C$ จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ -0.0996 และจุดตัดบนแกนตั้ง เท่ากับ 0.0099 นั่นคือ

$$\log K = 0.0099$$

$$1/n = -0.0996$$

$$n = -10.04$$

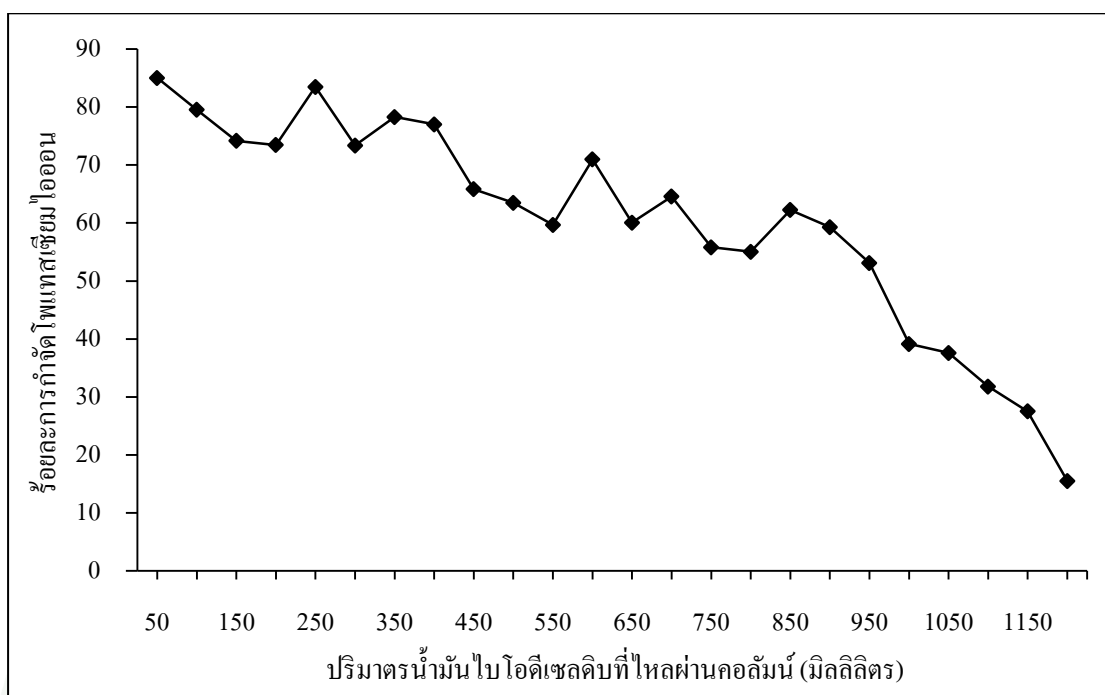
ไอโซเทอร์มจากการดูดซับของฟรุณดิช พบว่า ค่า $1/n$ มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงถึงมีความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับต่ำ มีปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับปริมาณจำกัดในการดูดซับ

จากการทดลองศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดโพแทสเซียมด้วยเรซินและซิลิกาจากถ้ำเกลือ โดยการทำการทดลองแบบแบตช์ พบว่า เรซินและซิลิกาจากถ้ำเกลือ จะมีสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดที่ปริมาณ 3 และ 4 กรัม ความเร็วรอบการเขย่า 100 รอบ/นาที ระยะเวลาเขย่าเท่ากับ 90 นาที ระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 60 นาที ตามลำดับ โดยด้วยเรซินและซิลิกาจากถ้ำเกลือมีประสิทธิภาพในการกำจัดโพแทสเซียมไอออนได้ร้อยละ 91.00 และ 85.73 ตามลำดับ

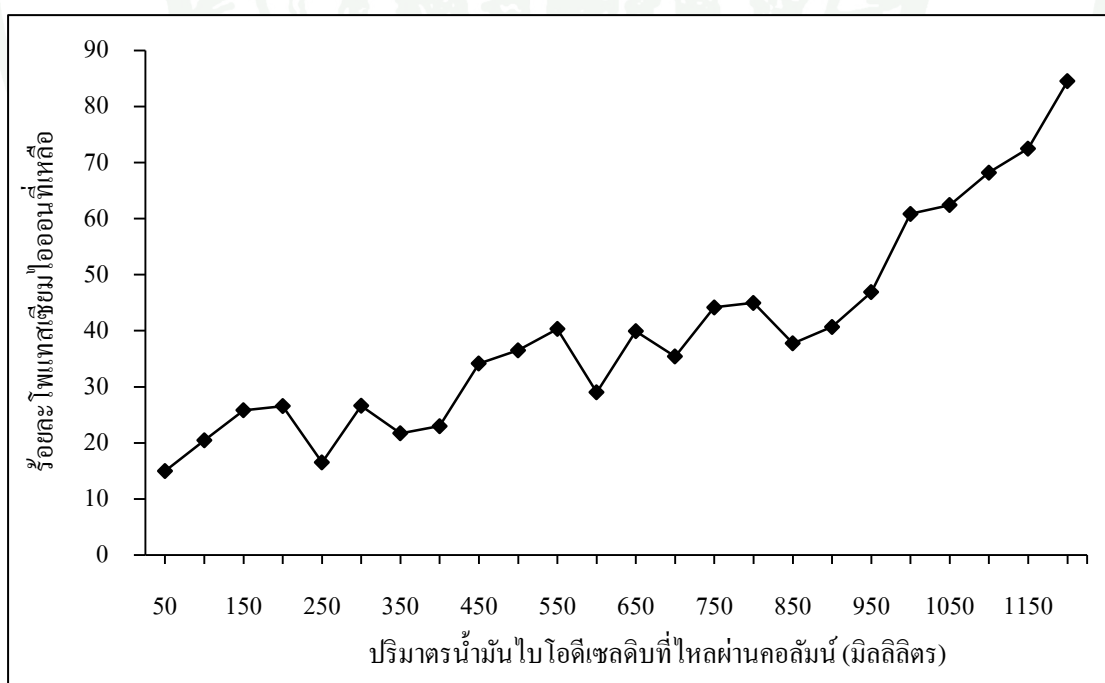
1.8 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโพแทสเซียมไอออนด้วยเรซินแลกเปลี่ยนแคทไอออนในน้ำมันไบโอดีเซลด้วยวิธีการไหลแบบต่อเนื่อง

การทดลองนี้ได้ใช้เรซินเพียงชนิดเดียวเนื่องจากพบว่า ซิลิกาจากถ้ำเกลือด้วยคุณสมบัติทางกายภาพของตัวสารแล้วที่มีลักษณะเป็นผงละเอียดทำให้น้ำมันไบโอดีเซลไม่สามารถไหลผ่านไปได้ โดยการทดลองได้บรรจุเรซิน 150 กรัม ลงในคอลัมน์ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางเซนติเมตร อัตราการไหลอยู่ที่ 13.88 มิลลิลิตร/นาที แล้วเก็บน้ำมันไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการคอลัมน์ทุกๆ 50 มิลลิลิตร จนครบปริมาตร 1250 มิลลิลิตร และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโพแทสเซียมไอออนด้วยเครื่องโพแทสเซียมมิเตอร์พร้อมด้วยขั้วเลือกจำเพาะโพแทสเซียมไอออนซึ่งมีผลการทดลองเป็นดังนี้

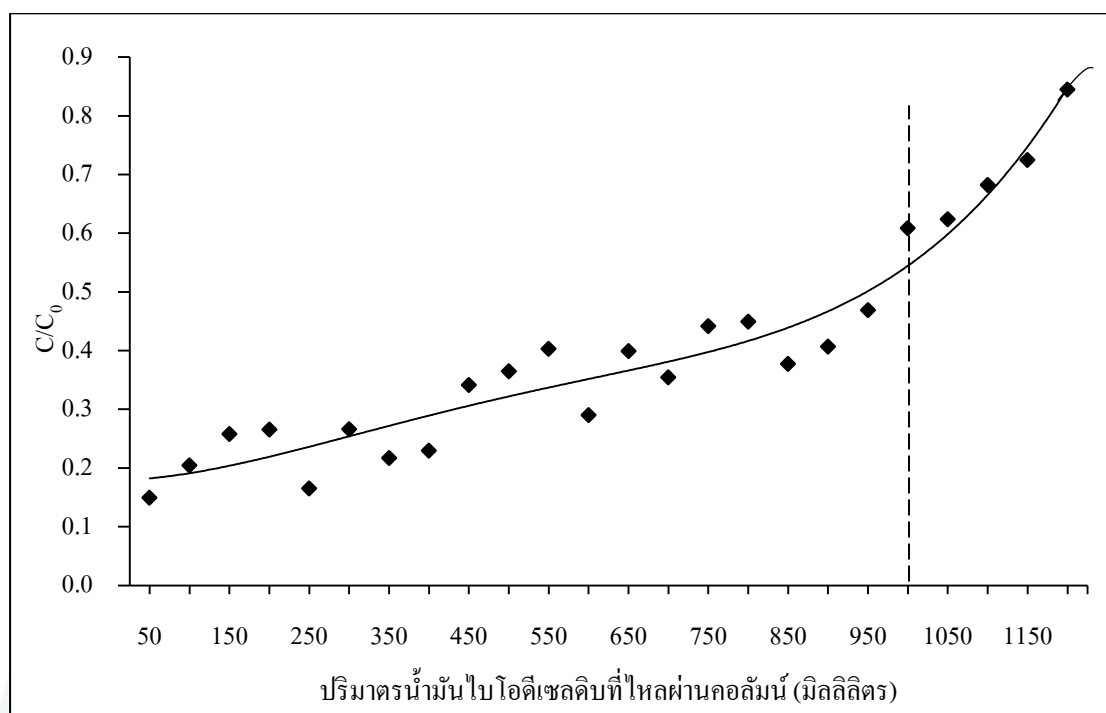
จากการทดลองพบว่า ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไอออนที่เหลืออยู่ที่ไหลออกจากคอลัมน์ในช่วงแรก ประสิทธิภาพในการกำจัดโพแทสเซียมไอออนในน้ำมันไบโอดีเซลจะมีค่าสูง มีค่าเท่ากับร้อยละ 85.04 ซึ่งเห็นได้จากความเข้มข้นที่เหลืออยู่จะน้อย มีค่าเท่ากับร้อยละ 14.96 ที่เก็บที่ปริมาตร 50 มิลลิลิตร และเมื่อระยะเวลาการปล่อยน้ำมันไบโอดีเซลผ่านคอลัมน์มากขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดโพแทสเซียมไอออนของเรซินจะมีค่าลดลงและคงที่ ดังภาพที่ 31 ภาพที่ 32 และตารางที่ 9 เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นเริ่มต้นกับความเข้มข้นสุดท้าย C/C_0 ที่ปริมาตรเวลาต่างๆ จะเห็นว่าค่า C/C_0 ที่ได้จากการทดลองมากกว่า 0.5 จะเป็นจุดเริ่มอิ่มตัวของเรซินเริ่มเห็นได้จากปริมาตรที่ 1000 มิลลิลิตรขึ้นไปนั่นคือจุดเริ่มหมดสภาพหรือจุด breakthrough ดังภาพที่ 33 ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณพื้นผิวหรือหมู่ที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนโพแทสเซียมไอออนมีการดูดจับโพแทสเซียมไอออนเอาไว้



ภาพที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนของเรซินกับปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลดิบที่ไหลผ่านคอลัมน์



ภาพที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละโพแทสเซียมไอออนที่เหลือของเรซินกับปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลดิบที่ไหลผ่านคอลัมน์



ภาพที่ 33 Breakthrough curves ของเรซินกับปริมาตรน้ำมันไบโอดีเซลดิบที่ไหลผ่านคอลัมน์

ตารางที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนของเรซิน ร้อยละโพแทสเซียมไอออนที่เหลือ และปริมาตรน้ำมันไบโอดีเซลที่ไหลผ่านคอลัมน์

ปริมาตรน้ำมันไบโอดีเซลที่ ไหลผ่านคอลัมน์ (มิลลิลิตร)	ร้อยละโพแทสเซียมไอออน ที่เหลือ	ร้อยละการกำจัดโพแทสเซียม ไอออน
50	14.96	85.04
100	20.47	79.53
150	25.81	74.19
200	26.55	73.45
250	16.51	83.49
300	26.63	73.37
350	21.71	78.29
400	22.98	77.02
450	34.15	65.85
500	36.51	63.49

ตารางที่ 9 (ต่อ)

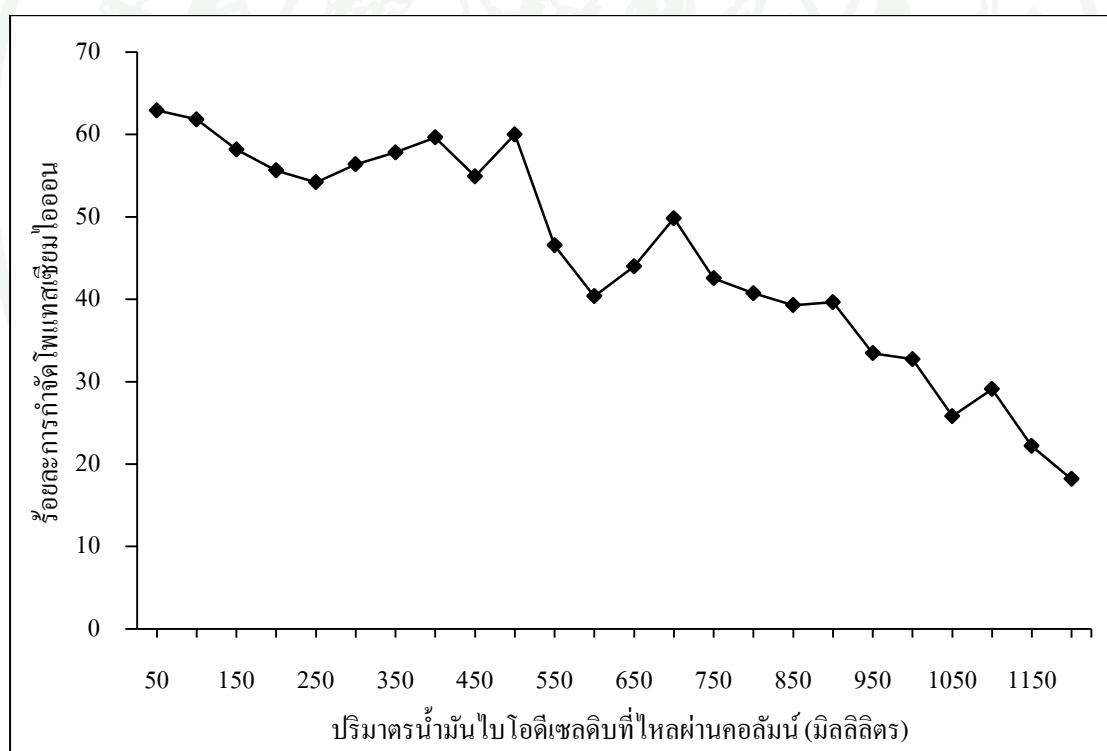
ปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลที่ ไหลผ่านคอลัมน์ (มิลลิลิตร)	ร้อยละโพแทสเซียมไอออน ที่เหลือ	ร้อยละการกำจัดโพแทสเซียม ไอออน
550	40.31	59.69
600	29.03	70.97
650	39.92	60.08
700	35.43	64.57
750	44.19	55.81
800	44.96	55.04
850	37.75	62.25
900	40.70	59.30
950	46.90	53.10
1000	60.85	39.15
1050	62.40	37.60
1100	68.22	31.78
1150	72.48	27.52
1200	83.50	15.50

1.9 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วนำกลับมาฟื้นฟูสภาพการใ้
งานใหม่ (regenerate)

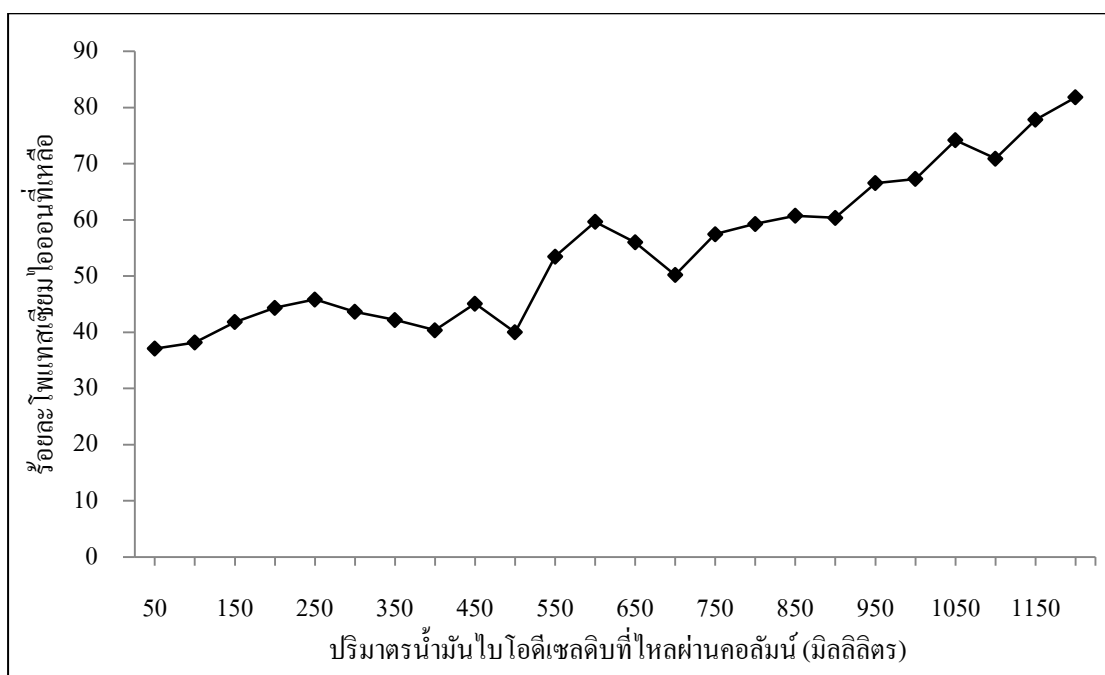
การทดลองนี้ได้ใช้เรซินที่ผ่านการใช้งานจากคอลัมน์และนำมาฟื้นฟูสภาพ ให้นำมาใ้
งานได้อีกเสมอ สามารถนำไปใช้งานได้หลายครั้ง โดยบรรจุเรซินที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพแล้ว 150 กรัม
ลงในคอลัมน์ อัตราการไหลอยู่ที่ 13.88 มิลลิลิตร/นาทื แล้วเก็บน้ำมันไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการ
คอลัมน์ทุกๆ 50 มิลลิลิตร จนครบปริมาตร 1250 มิลลิลิตร และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณความ
เข้มข้นของโพแทสเซียมไอออน ซึ่งมีผลการทดลองเป็นดังนี้

จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดโพแทสเซียมไอออนจะลดลงเมื่อมีการ
ฟื้นฟูสภาพ แต่ยังมีประสิทธิภาพในการกำจัดโพแทสเซียมไอออนได้ โดยความเข้มข้นของ

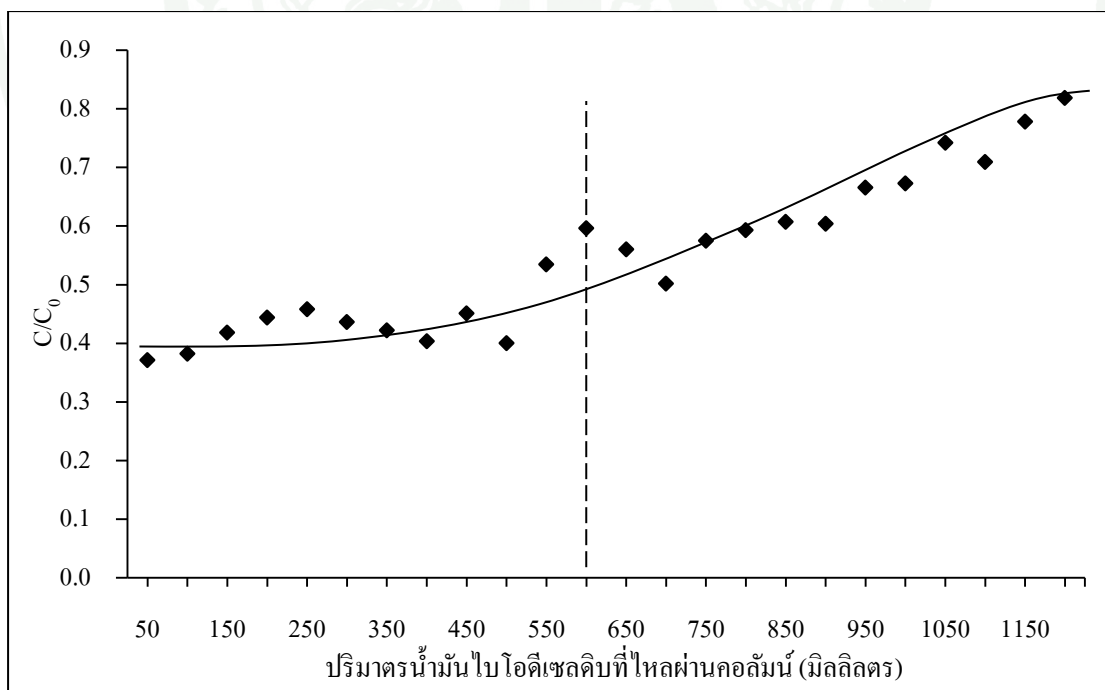
โพแทสเซียมไอออนที่เหลืออยู่ที่ไหลออกจากคอลัมน์ในช่วงแรก ประสิทธิภาพในการกำจัดโพแทสเซียมไอออนในน้ำมันไบโอดีเซลดิบจะมีค่าสูง มีค่าเท่ากับร้อยละ 62.91 ซึ่งเห็นได้จากปริมาณความเข้มข้นที่เหลืออยู่จะน้อย มีค่าเท่ากับร้อยละ 37.09 และเมื่อระยะเวลาการปล่อยน้ำมันไบโอดีเซลดิบผ่านคอลัมน์มากขึ้นประสิทธิภาพการกำจัดโพแทสเซียมไอออนของเรซินจะมีค่าลดลง ดังภาพที่ 34 ภาพที่ 35 และตารางที่ 10 เมื่อทำการเปรียบเทียบค่า C/C_0 ที่ปริมาตรเวลาต่างๆ จะเห็นว่าค่า C/C_0 ที่ได้จากการทดลองมากกว่า 0.5 จะเป็นจุดเริ่มอิ่มตัวของเรซินเริ่มเห็นได้จากปริมาตรที่ 600 มิลลิลิตรขึ้นไป นั่นคือจุดเริ่มหมดสภาพหรือจุด breakthrough เมื่อเปรียบเทียบกับเรซินในผลการศึกษาข้อที่ 1.8 ยังพบว่า มีประสิทธิภาพลดลงหรือน้อยกว่าประมาณ 1.6 เท่า ดังภาพที่ 36 ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณพื้นผิวหรือหมู่ฟังก์ชันที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนโพแทสเซียมไอออนมีการดูดจับโพแทสเซียมไอออนเอาไว้ การรีเจนเนอเรตจึงอาจส่งผลกระทบต่อจำนวนและประสิทธิภาพของหมู่ฟังก์ชัน ส่งผลให้การกำจัดโพแทสเซียมลดน้อยลง



ภาพที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนของเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วนำกลับมาฟื้นฟูสภาพใหม่กับปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลดิบที่ไหลผ่านคอลัมน์



ภาพที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละโพแทสเซียมไอออนที่เหลือของเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้ว นำกลับมาฟื้นฟูสภาพใหม่กับปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลดิบที่ไหลผ่านคอลัมน์



ภาพที่ 36 Breakthrough curves ของเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้ว นำกลับมาฟื้นฟูสภาพใหม่กับ ปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลดิบที่ไหลผ่านคอลัมน์

ตารางที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนของเรซินที่ผ่านการ
ใช้งานแล้วนำกลับมาฟื้นฟูสภาพใหม่ ร้อยละโพแทสเซียมไอออนที่เหลือ และ
ปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลที่ไหลผ่านคอลัมน์

ปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลที่ ไหลผ่านคอลัมน์ (มิลลิลิตร)	ร้อยละโพแทสเซียมไอออน ที่เหลือ	ร้อยละการกำจัดโพแทสเซียม ไอออน
50	37.09	62.91
100	38.18	61.82
150	41.82	58.18
200	44.36	55.64
250	45.82	54.18
300	43.64	56.36
350	42.18	57.82
400	40.36	59.64
450	45.09	54.91
500	40.00	60.00
550	53.45	46.55
600	59.64	40.36
650	56.00	44.00
700	50.18	49.82
750	57.45	42.55
800	59.27	40.73
850	60.73	39.27
900	60.36	39.64
950	66.55	33.45
1000	67.27	32.73
1050	74.18	25.82
1100	70.91	29.09
1150	77.82	22.18
1200	81.82	18.18

2. ผลของประสิทธิภาพการกำจัดโพแทสเซียมไอออนในน้ำมันไบโอดีเซลดิบผ่านกระบวนการแบบเบตซ์และแบบคอลัมน์โดยการตรวจวัดด้วยเครื่อง ICP-OES

2.1 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดโพแทสเซียมไอออนในน้ำมันไบโอดีเซลดิบผ่านกระบวนการแบบเบตซ์

การทดลองนี้ได้นำผลของประสิทธิภาพการกำจัดโพแทสเซียมไอออนที่สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบเบตซ์ คือ เรซินปริมาณ 3 กรัม และซิลิกาจากถั่วแกลบ 4 กรัม ต่อปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลดิบ 25 และ 50 มิลลิลิตร คิดเป็นร้อยละ 12 และ 8 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ตามลำดับ เข้าด้วยความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที เวลา 90 นาที ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที นำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการกำจัดโพแทสเซียมไอออนโดยการวัดหาความเข้มข้นของโพแทสเซียมไอออนด้วยเครื่อง ICP-OES ที่มีความละเอียดสูง ซึ่งมีผลการทดลองเป็นดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ประสิทธิภาพการกำจัดโพแทสเซียมไอออนด้วยเรซินและซิลิกาจากถั่วแกลบ

ชนิดสาร	โพแทสเซียมไอออน (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)			ประสิทธิภาพ	
	ก่อนการ กำจัด	หลังการ กำจัด	ร้อยละการ กำจัด	mg.M ⁺ / g.resin	mmol.M ⁺ / g.resin
เรซิน	26.24	0.172	99.34	0.217	0.0056
ซิลิกาจากถั่วแกลบ	26.24	0.161	99.39	-	-

2.2 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดโพแทสเซียมไอออนในน้ำมันไบโอดีเซลดิบผ่านกระบวนการทดลองด้วยวิธีการไหลต่อเนื่อง

การทดลองนี้ได้นำผลของประสิทธิภาพการกำจัดโพแทสเซียมไอออนที่สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในข้อที่ 1.7 โดยนำน้ำมันไบโอดีเซลที่ผ่านคอลัมน์ทุกๆ 50 มิลลิลิตร จนครบปริมาตร 1250 มิลลิลิตร คือที่ปริมาตรที่ 50, 500 และ 1000 มิลลิลิตร และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการกำจัดโพแทสเซียมไอออนโดยการตรวจวัดหาความเข้มข้นของโพแทสเซียมไอออนด้วยเครื่อง ICP-OES ที่มีความละเอียดสูง ซึ่งมีผลการทดลองเป็นดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ประสิทธิภาพการกำจัดโพแทสเซียมไอออนด้วยเรซิน

ปริมาตร (มิลลิลิตร)	โพแทสเซียมไอออน (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)		ประสิทธิภาพ		
	ก่อนการกำจัด	หลังการกำจัด	ร้อยละ การกำจัด	mg.M ⁺ / g.resin	mmol.M ⁺ / g.resin
50	26.24	0.243	99.07	0.217	0.0056
500	26.24	0.456	98.87	0.215	0.0055
1000	26.24	1.140	95.66	0.209	0.0053

2.3 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดโพแทสเซียมไอออนในน้ำมันไบโอดีเซลดิบที่ผ่านการทดลองทั้งแบบแบตช์และวิธีการไหลต่อเนื่องเปรียบเทียบกับไบโอดีเซลที่ผ่านการล้างด้วยน้ำ

จากการทดลองหาประสิทธิภาพการกำจัดโพแทสเซียมไอออนในน้ำมันไบโอดีเซลดิบที่ผ่านการทดลองทั้งแบบแบตช์และวิธีการไหลต่อเนื่องที่ได้จากผลการทดลองในข้อ 2.1 และ 2.2 นำมาเปรียบเทียบกับน้ำมันไบโอดีเซลที่ใช้วิธีการผลิตด้วยการล้างน้ำหลายครั้งจากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ซึ่งมีผลการทดลองเป็นดังตารางที่ 13 และตารางที่ 14 และลักษณะทางกายภาพที่สังเกตเห็นได้ชัดเจนคือ สีของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการกำจัดโพแทสเซียมไอออนที่มีความใสกว่าน้ำมันไบโอดีเซลที่ยังไม่ได้ผ่านการกำจัดโพแทสเซียมไอออนดังภาพที่ 37

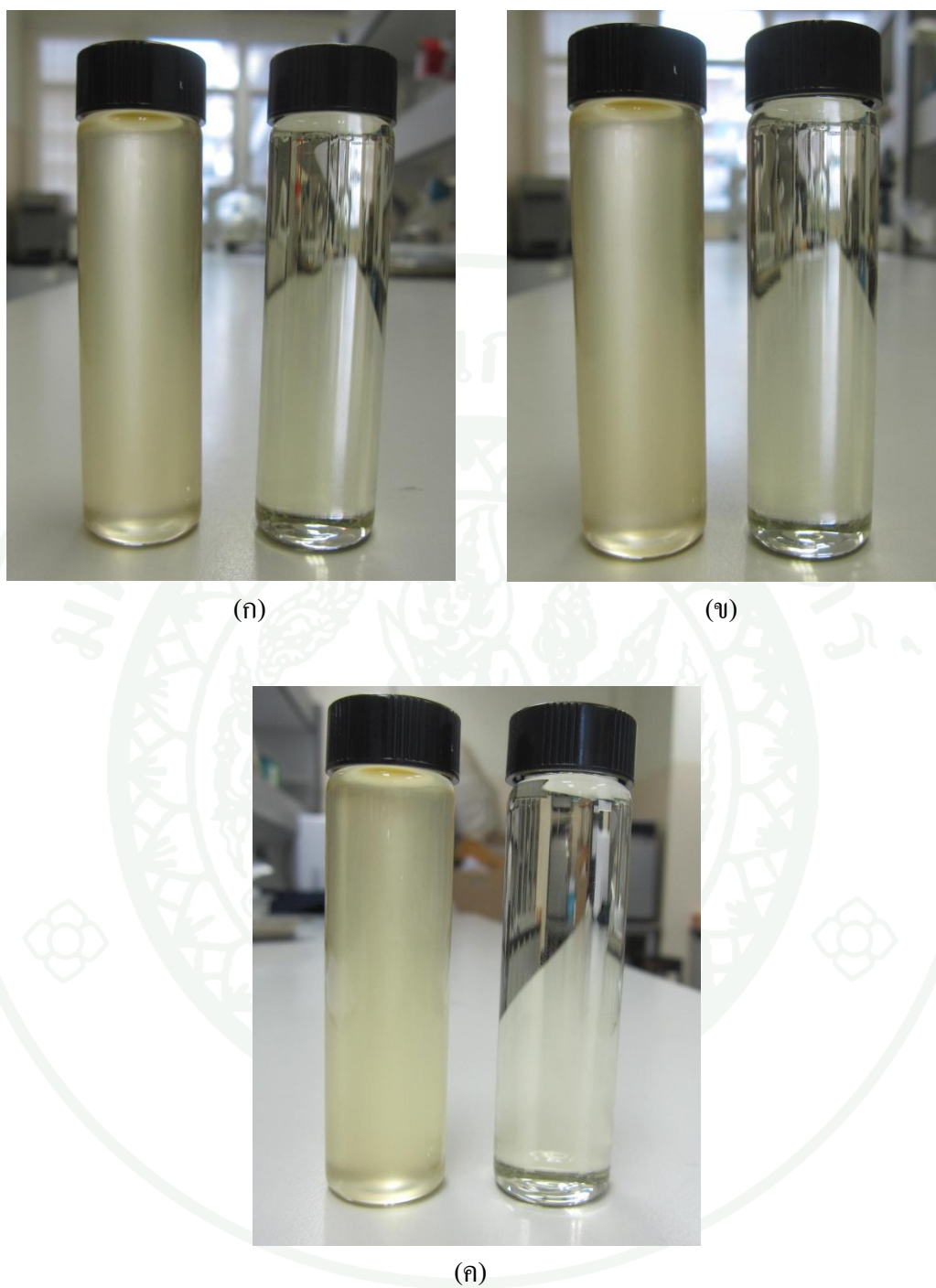
ประสิทธิภาพการกำจัดโพแทสเซียมไอออนในน้ำมันไบโอดีเซลดิบให้บริสุทธิ์ด้วยเรซินและซีกาจากถั่วเหลืองทั้งแบบแบตช์และแบบคอลัมน์ ค่าความเข้มข้นของโพแทสเซียมไอออนอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานค่าน้ำมันไบโอดีเซลดิบที่กำหนดไว้ว่าไม่ให้มีค่าโพแทสเซียมไอออนเกิน 5 มิลลิกรัม/กิโลกรัม และยังมีค่าน้อยกว่าไบโอดีเซลที่ผ่านขั้นตอนการล้างด้วยน้ำหลายครั้ง โดยที่ความเข้มข้นโพแทสเซียมไอออนของเรซินและซีกาจากถั่วเหลืองแบบแบตช์อยู่ที่ 0.172 และ 0.161 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ ความเข้มข้นโพแทสเซียมไอออนของเรซินแบบคอลัมน์ที่ 50, 500 และ 1000 มิลลิลิตร อยู่ที่ 0.243, 0.456 และ 1.140 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ ความเข้มข้นโพแทสเซียมไอออนด้วยวิธีการล้างด้วยน้ำอยู่ที่ 1.118 มิลลิกรัม/กิโลกรัม

ตารางที่ 13 ค่าความเข้มข้นโพแทสเซียมไอออนในน้ำมันไบโอดีเซลมาตรฐาน น้ำมันไบโอดีเซล
ล้างด้วยน้ำ และน้ำมันไบโอดีเซลที่กำจัดโพแทสเซียมด้วยเรซินและซิลิกาจากถั่วแกลบ
ด้วยวิธีการทดลองแบบเบตซ์

ชนิด	โพแทสเซียมไอออน (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)
ค่ามาตรฐานน้ำมันไบโอดีเซล	5.000
น้ำมันไบโอดีเซลที่ผ่านการล้างด้วยน้ำ	1.118
เรซินที่ปริมาณ 3 กรัม	0.172
ซิลิกาจากถั่วแกลบที่ปริมาณ 4 กรัม	0.161

ตารางที่ 14 ค่าความเข้มข้นโพแทสเซียมไอออนในน้ำมันไบโอดีเซลมาตรฐาน น้ำมันไบโอดีเซล
ล้างด้วยน้ำ และน้ำมันไบโอดีเซลที่กำจัดโพแทสเซียมของเรซินด้วยวิธีการไหล
ต่อเนื่อง

ชนิด	โพแทสเซียมไอออน (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)
ค่ามาตรฐานน้ำมันไบโอดีเซล	5.000
น้ำมันไบโอดีเซลที่ผ่านการล้างด้วยน้ำ	1.118
น้ำมันไบโอดีเซลเก็บที่ปริมาตร 50 มิลลิลิตร	0.243
น้ำมันไบโอดีเซลเก็บที่ปริมาตร 500 มิลลิลิตร	0.456
น้ำมันไบโอดีเซลเก็บที่ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร	1.140



ภาพที่ 37 เปรียบเทียบลักษณะกายภาพของน้ำมันปาล์มก่อน(ซ้าย) และหลัง(ขวา) การกำจัดโพแทสเซียมไอออน

(ก) เรซินที่ปริมาณ 3 กรัม ด้วยวิธีแบบเบดซ์

(ข) ซิลิกาจากถ่านแกลบที่ปริมาณ 4 กรัม ด้วยวิธีแบบเบดซ์

(ค) เรซินเก็บที่ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ด้วยวิธีการไหลแบบต่อเนื่อง

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโพแทสเซียมไอออนในน้ำมันไบโอดีเซลดิบให้บริสุทธิ์ด้วยเรซินโดยทำการทดลองด้วยแบบเบตซ์และวิธีการไหลแบบต่อเนื่อง และซิลิกาจากถ้ำกลบโดยทำการทดลองแบบเบตซ์ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. ผลของปริมาณเรซินและซิลิกาจากถ้ำกลบเบื้องต้น พบว่าปริมาณที่เหมาะสมในการกำจัดโพแทสเซียมไอออนในน้ำมันไบโอดีเซลดิบให้บริสุทธิ์ คือ ที่ปริมาณ 4 กรัมเท่ากัน เรซินและซิลิกาจากถ้ำกลบสามารถกำจัดโพแทสเซียมไอออนในน้ำมันไบโอดีเซลดิบได้ร้อยละ 60.04 และ 65.78 ตามลำดับ

2. ผลของความเร็วรอบของการเขย่า พบว่าความเร็วรอบของการเขย่าที่เหมาะสมในการกำจัดโพแทสเซียมไอออนในน้ำมันไบโอดีเซลดิบให้บริสุทธิ์ของเรซิน คือ 100 รอบ/นาที สามารถกำจัดโพแทสเซียมไอออนในน้ำมันไบโอดีเซลดิบได้ร้อยละ 82.95 สำหรับซิลิกาจากถ้ำกลบความเร็วรอบของการเขย่าที่เหมาะสมคือ 100 รอบ/นาที เช่นเดียวกัน ซึ่งสามารถกำจัดโพแทสเซียมไอออนในน้ำมันไบโอดีเซลดิบได้ร้อยละ 85.80 โดยปริมาณเรซินและซิลิกาจากถ้ำกลบที่ใช้ในการทดลองใช้ปริมาณ 4 กรัมเท่ากัน

3. ผลของระยะเวลาเขย่า พบว่าระยะเวลาเขย่าที่เหมาะสมในการกำจัดโพแทสเซียมไอออนในน้ำมันไบโอดีเซลดิบให้บริสุทธิ์ของเรซิน คือ 90 นาที สามารถกำจัดโพแทสเซียมไอออนในน้ำมันไบโอดีเซลดิบได้ร้อยละ 49.91 สำหรับซิลิกาจากถ้ำกลบระยะเวลาเขย่าที่เหมาะสมคือ 90 นาที เช่นเดียวกัน ซึ่งสามารถกำจัดโพแทสเซียมไอออนในน้ำมันไบโอดีเซลดิบได้ร้อยละ 45.27 โดยปริมาณเรซินและซิลิกาจากถ้ำกลบที่ใช้ในการทดลองใช้ปริมาณ 4 กรัม และความเร็วรอบของการเขย่าที่ 100 รอบ/นาที เท่ากัน

4. ผลของระยะเวลาสัมผัส พบว่าระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดโพแทสเซียมไอออนในน้ำมันไบโอดีเซลดิบให้บริสุทธิ์ของเรซิน คือ 60 นาที สามารถกำจัดโพแทสเซียมไอออนในน้ำมันไบโอดีเซลดิบได้ร้อยละ 89.01 สำหรับซิลิกาจากถ้ำเกลบระยะเวลาเขย่าที่เหมาะสมคือ 60 นาที เช่นเดียวกัน ซึ่งสามารถกำจัดโพแทสเซียมไอออนในน้ำมันไบโอดีเซลดิบได้ร้อยละ 78.67 โดยปริมาณเรซินและซิลิกาจากถ้ำเกลบที่ใช้ในการทดลองใช้ปริมาณ 4 กรัม ความเร็วรอบของการเขย่าที่ 100 รอบ/นาที และระยะเวลาเขย่าที่เหมาะสมคือ 90 นาที เท่ากัน

5. ผลของปริมาณสารแลกเปลี่ยนไอออนที่ใช้ในการทดลอง พบว่า ปริมาณเรซินที่เหมาะสมในการกำจัดโพแทสเซียมไอออนในน้ำมันไบโอดีเซลดิบให้บริสุทธิ์ของเรซินคือ 3 กรัม สามารถกำจัดโพแทสเซียมไอออนในน้ำมันไบโอดีเซลดิบได้ร้อยละ 91.00 สำหรับซิลิกาจากถ้ำปริมาณที่เหมาะสมคือ 4 กรัม ซึ่งสามารถกำจัดโพแทสเซียมไอออนในน้ำมันไบโอดีเซลดิบได้ร้อยละ 85.73 โดยความเร็วรอบของการเขย่าที่ 100 รอบ/นาที ระยะเวลาเขย่าที่เหมาะสมคือ 90 นาที และระยะเวลาเขย่าที่เหมาะสมคือ 60 นาที เท่ากัน

6. ผลของปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลดิบต่อซิลิกาจากถ้ำเกลบ พบว่า ปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลดิบต่อซิลิกาจากถ้ำเกลบที่เหมาะสม คือ 50 มิลลิลิตร สามารถกำจัดโพแทสเซียมไอออนในน้ำมันไบโอดีเซลดิบได้ร้อยละ 54.83 โดยปริมาณซิลิกาจากถ้ำเกลบที่ใช้ในการทดลองปริมาณ 4 กรัม ความเร็วรอบของการเขย่าที่ 100 รอบ/นาที ระยะเวลาเขย่าที่เหมาะสมคือ 90 นาที และระยะเวลาเขย่าที่เหมาะสมคือ 60 นาที เท่ากัน

7. ผลของประสิทธิภาพการกำจัดโพแทสเซียมไอออนในน้ำมันไบโอดีเซลดิบให้บริสุทธิ์ของเรซินโดยทำการทดลองด้วยวิธีการไหลแบบต่อเนื่อง พบว่า ที่ปริมาตรน้ำมันไบโอดีเซลดิบไหลผ่านคอลัมน์ 50 มิลลิลิตร สามารถกำจัดโพแทสเซียมไอออนในน้ำมันไบโอดีเซลดิบได้ร้อยละ 85.04 ความเข้มข้นที่เหลืออยู่จะน้อยมีค่าเท่ากับร้อยละ 14.96 และเมื่อระยะเวลาการปล่อยน้ำมันไบโอดีเซลดิบผ่านคอลัมน์มากขึ้นประสิทธิภาพการกำจัดโพแทสเซียมไอออนของเรซินจะมีค่าลดลง และหากมีการนำน้ำมันไบโอดีเซลดิบผ่านกระบวนการแบบคอลัมน์ต่อไปอีก เรซินจะเริ่มอิ่มตัวและหมดสภาพในการกำจัดโพแทสเซียมไอออนไปในที่สุด

8. ผลของการศึกษาการฟื้นฟูสภาพของเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ในการกำจัดโพแทสเซียมไอออนในน้ำมันไบโอดีเซลดิบให้บริสุทธิ์โดยทำการทดลองด้วยวิธีการไหลแบบต่อเนื่อง พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดโพแทสเซียมไอออนจะลดลงเมื่อมีการฟื้นฟูสภาพ ที่ปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลดิบไหลผ่านคอลัมน์ 50 มิลลิลิตร สามารถกำจัดโพแทสเซียมไอออนในน้ำมันไบโอดีเซลดิบได้ร้อยละ 62.91 ความเข้มข้นที่เหลืออยู่จะน้อยมีค่าเท่ากับร้อยละ 37.09 และเมื่อระยะเวลาการปล่อยน้ำมันไบโอดีเซลดิบผ่านคอลัมน์มากขึ้นประสิทธิภาพการกำจัดโพแทสเซียมไอออนของเรซินจะมีค่าลดลง และหากมีการนำน้ำมันไบโอดีเซลดิบผ่านกระบวนการแบบคอลัมน์ต่อไปอีกเรซิน จะเริ่มอิ่มตัวและหมดสภาพในการกำจัดโพแทสเซียมไอออนไปในที่สุด

9. ผลของการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโพแทสเซียมไอออนในน้ำมันไบโอดีเซลดิบให้บริสุทธิ์ด้วยเรซินและซิลิกาจากเถ้าแกลบทั้งแบบเบดซ์และการไหลแบบต่อเนื่อง นำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการกำจัดโพแทสเซียมไอออนโดยการตรวจวัดหาความเข้มข้นของโพแทสเซียมไอออนด้วยเครื่อง ICP-OES พบว่า ค่าความเข้มข้นของโพแทสเซียมไอออนทุกค่าทั้งแบบเบดซ์และแบบไหลต่อเนื่องอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานค่าน้ำมันไบโอดีเซลดิบที่กำหนดไว้ว่าไม่ให้มีค่าโพแทสเซียมไอออนเกิน 5 มิลลิกรัม/กิโลกรัม และยังมีค่าน้อยกว่าหรือใกล้เคียงไบโอดีเซลที่ผ่านขั้นตอนการล้างด้วยน้ำ โดยที่ความเข้มข้นโพแทสเซียมไอออนของเรซินและซิลิกาจากเถ้าแกลบแบบเบดซ์อยู่ที่ 0.172 และ 0.161 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ ความเข้มข้นโพแทสเซียมไอออนของเรซินแบบการไหลต่อเนื่องหรือคอลัมน์ที่ 50, 500 และ 1000 มิลลิลิตร อยู่ที่ 0.243, 0.456 และ 1.140 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ ความเข้มข้นโพแทสเซียมไอออนด้วยวิธีการล้างด้วยน้ำอยู่ที่ 1.118 มิลลิกรัม/กิโลกรัม

ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองที่ผ่านมาในครั้งนี้ พบทั้งปัญหาและอุปสรรค เพื่อนำไปปรับปรุงแก้ไขงานทดลองครั้งต่อไป จึงเสนอแนะไว้ดังนี้เพื่อเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจต่อไปดังนี้

1. ควรมีการศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของเรซินและซิลิกาจากเถาเถาเกลบก่อนการใช้งานและหลังผ่านการใช้งานแล้ว
2. ควรมีการศึกษาประสิทธิภาพของเรซินและซิลิกาจากเถาเถาเกลบในการกำจัดสารชนิดอื่นด้วย เช่น โซเดียม ฟอสฟอรัส เป็นต้น เพื่อสามารถใช้เรซินและซิลิกาจากเถาเถาเกลบได้ประสิทธิภาพสูงสุด
3. ควรใช้น้ำมันไบโอดีเซลดิบที่เตรียมได้และผ่านการล้างน้ำที่จำนวนครั้งเท่ากันตลอดการทดลองเพื่อประสิทธิภาพสูงสุด ทั้งนี้ใช้น้ำมัน 2 ชุดตามวิธีการทดลอง เนื่องจากการทดลองมีระยะเวลายาวนาน น้ำมันไบโอดีเซลดิบเสื่อมสภาพและมีจำนวนไม่เพียงพอ จำเป็นที่จะต้องนำน้ำมันชุดใหม่มาใช้ในการทดลองเพื่อประสิทธิภาพสูงสุด
4. ควรมีการศึกษารายละเอียดการจัดอื่นที่สามารถกำจัดโพแทสเซียมไอออนหรือไอออนอื่นๆในน้ำมันไบโอดีเซลดิบได้เพื่อจะได้เป็นวัสดุทดแทนและลดต้นทุน
5. ควรมีการทดลองหาวิธีการที่ทำให้ซิลิกาจากเถาเถาเกลบสามารถทดลองแบบไหลต่อเนื่องหรือแบบคอลัมน์ได้ เนื่องจากลักษณะที่เป็นผงละเอียดไม่ยอมให้น้ำมันไบโอดีเซลไหลผ่านไปได้
6. ควรศึกษาจุดคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์ เนื่องจากซิลิกาจากเถาเถาเกลบมีราคาถูก และเพื่อเป็นแนวทางในการประโยชน์ต่อไป
7. ควรมีการศึกษาคูสมบัติหรือมาตรฐานของน้ำมันไบโอดีเซลในด้านอื่นเพื่อประสิทธิภาพสูงสุด

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กิตติพัฒน์ เล่งเจริญ. 2550. การกำจัดโลหะหนักจากสารละลายโดยใช้ PAMAM dendrimer-like ซึ่งตรึงอยู่บนผิว silica. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- ก้องเกียรติ ภู่เกิด. 2540. การเตรียมซิลิคอนคาร์ไบด์จากแกลบข้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- เกศสุชา พูลคำ. 2537. การกำจัดโลหะหนักโดยการใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากขานอ้อยและผักตบชวา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จรูญ อดากร. 2527. สบู่ดำพืชศักยภาพสูงเพื่อพลังงานทดแทนของประเทศไทย. วารสารวิชาการเกษตร. 2:67-72.
- เจษฎาภรณ์ เรืองมะเริง. 2549. การพัฒนาผลิตภัณฑ์ครีมขัดผิวที่มีส่วนผสมของซิลิกาจากแกลบข้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ธวัชชัย ศรีวิบูลย์. 2551. เทคนิคการแยก. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง, กรุงเทพฯ.
- นกร ทิพย์วงศ์. 2553. เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล. พิมพ์ครั้งที่ 1 สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ.
- นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์ และ คณิดา ตั้งคณานุรักษ์. 2550. หลักการการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 1 สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- พอดา ประสานนาม. 2547. การกำจัดโลหะหนักออกจากสารละลายโดยใช้สารแลกเปลี่ยนไอออนที่ผลิตจาก HYDROXYETHYL CELLULOSE. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยศิลปากร.

ระพีพันธุ์ พาสบุตร, สุขสันต์ สุทธิผลไพบุลย์, ไพจิตร จันทรวงศ์, วีระศักดิ์ อนันบุตร,
มาลี ประภาวัต, วิไล กาญจนภูมิ และ อรพรรณ หวังดีธรรม. 2525. **การใช้น้ำมันสุปุดำเดิน
เครื่องยนต์ดีเซล**. กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพฯ.

สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และ สำนักนโยบายและแผนยุทธศาสตร์
สำนักปลัดกระทรวงพลังงาน กระทรวงพลังงาน. ม.ป.ป. **ไบโอดีเซล
(Biodiesel) โครงการการจัดทำระบบฐานข้อมูลพลังงานเพื่อการวิเคราะห์และวางแผน
ยุทธศาสตร์พลังงานของประเทศ**. แหล่งที่มา: [www.thaienergydata.in.th/econtent/
upload_pic/1190645300.pdf](http://www.thaienergydata.in.th/econtent/upload_pic/1190645300.pdf), 20 กุมภาพันธ์ 2555.

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.
2550. **การผลิตและการตรวจสอบ มาตรฐานไบโอดีเซลเบื้องต้น**. แหล่งที่มา:
<http://www.tistr.or.th/tistr/source/techno/bio200712.pdf>, 1 มีนาคม 2555.

เสริมศักดิ์ นาคบัว. 2538. **เคลือบซีเมนต์ฟิช**. บริษัท เจ.ฟิล์มโปรเซส จำกัด, กรุงเทพฯ.

อดุลย์ ศรีพิลา. 2543. **การศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมการดูดซับฟลูออไรด์บนถ่านกัมมันต์และ
ถ่านกระดูก**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

อจรรย์ยา อจรรย์ยเพ็ชร. 2538. **การผลิตไฟฟ้าชนิดิกจากกลบในขนาดขยายส่วน**. วิทยานิพนธ์
ปริญญาเอก, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อายุวัฒน์ สว่างผล. 2543. **วัตถุดิบที่ใช้แพร่หลายในงานเซรามิกส์**. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์,
กรุงเทพฯ.

Berker, U.G. and F.S. Guner. 1999. Heavy metal Removal by Ion Exchanger Based on
Hydroxyethyl Cellulose. **Journal Appl Polym Sci** 74: 3501-3506.

- Demirbas, A. 2003. Biodiesel fuels from vegetable oils via catalytic and non-catalytic supercritical alcohol tranesterifications and other method: a review. **Energy Conversion and Management** 44: 2093-2109.
- _____. 2009. Progress and recent trends in biodiesel fuels. **Energy Conversion and Management** 50: 14-34.
- Drapcho, C.M., N.P. Nhuan and T.H. Walker. 2008. **Biofuel Engineering Process Technology**. McGraw-Hill, New York.
- El-Naggar, I.M. and M.M. Abou-Mesalam. 2007. Novel inorganic ion exchange materials based on silicates; synthesis structure and analytical applications of magnesio-silicate and magnesium alumino-silicate sorbents. **Journal of Hazardous Materials** 149: 686-692.
- Fukuda, H., A. Kondo and H. Noda. 2001. Biodiesel fuel production by transesterification of oils. **Journal of Bioscience and Bioengineering** 92: 405-416.
- Hunt, L.P., J.P. Dismukes and J.A. Amick. 1984. Rice hull as a raw material for producing silicon. **Journal of Electrochem Society** 131: 83-86.
- Knez, Z. 2009. Enzymatic reaction in dense gases. **Journal of Supercritical Fluids** 47: 357-372.
- Krishnarao, R.V and Y.R. Mahajan. 1995. Effect of Acid Treatment on the Formation of SiC Whiskers from Raw Rice Husks. **Journal of the European Ceramic Society** 19: 150-159.
- Lehrfeld, J. 1997. Cation Exchange Resins Prepared from Phytic acid. **Journal Appl Polym Sci** 66: 491-497.

Maron, S.H. and C.F. Prutton. 1961. **Principles of Physical Chemistry**. 3rd ed. Macmillan, New York.

Sharma, Y.C. and B. Singh. 2009. Development of biodiesel: current scenario. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 13: 1646-1651.

Tippayawong, N., E. Kongjareon and W. Jompakdee. 2005. Ethanolysis of soybean oil into biodiesel: process optimization via central composite design. **Journal of Mechanical Science and Technology** 19: 1902-1909.



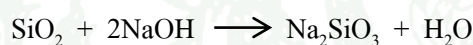


การเตรียมอนุภาคซิลิกาจากเถ้าแกลบ

1. วิธีการเตรียมสารละลายโซเดียมเมทาซิลิเกตจากเถ้าแกลบข้าว

นำเถ้าแกลบไปเผาที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 1.00 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาบดให้ละเอียดแล้วร่อนผ่านตะแกรกร่อนขนาด 35 แมช (mesh) และล้างเถ้าที่ร่อนได้ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.10 M โดยการแช่และคนด้วยเครื่องกวนและแท่งแม่เหล็กช่วยกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปกรองด้วยกรวยกรองบุชเนอร์ ล้างด้วยน้ำกลั่นจนน้ำล้างที่ได้เป็นกลาง นำเถ้าแกลบไปอบที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

ชั่งเถ้าแกลบแล้วจذبบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน นำไปต้มกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10.0% (w/v) ที่อุณหภูมิ 80-85 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยปริมาตรของสารละลายที่ใช้คำนวณจากความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10.0 % (w/v)



$$\text{NaOH}(\text{required}) = \left[\frac{X \times (-)}{MW_{\text{SiO}_2}} \right] \times 2(MW_{\text{NaOH}})$$

กำหนดให้	X	คือ น้ำหนักของเถ้าแกลบ (กรัม)
	Y	คือ ร้อยละของซิลิกาที่มีอยู่ในเถ้าแกลบ
	MW_{SiO_2}	คือ น้ำหนักโมเลกุลของซิลิคอนไดออกไซด์
	MW_{NaOH}	คือ น้ำหนักของโมเลกุลโซเดียมไฮดรอกไซด์

ทั้งสารละลายสีน้ำตาลอ่อนที่ได้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องและทำการกรองสารละลายด้วยกรวยกรองบุชเนอร์ จะได้สารละลายโซเดียมเมทาซิลิเกต 10.0 % (w/v)

2. วิธีการเตรียมอนุภาคซิลิกาจากสารละลายโซเดียมเมทาซิลิเกต

ปรับ pH ของสารละลายโซเดียมเมทาซิลิเกตด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 15.0 % (v/v) ให้เป็น 10 จะได้เจลเกิดขึ้น แล้วปรับ pH ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 15.0 % (v/v) ให้ลดลงเป็น 1 เพื่อให้เจลเกิดการกระจาย เก็บสารละลายทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ปรับ pH ด้วยสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 15% (v/v) ให้เป็น 7 นำไปอบที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

นำอนุภาคซิลิกาที่ได้มาล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นโดยการแช่และคนด้วยแท่งแม่เหล็กและเครื่องช่วยกวนเป็นเวลา 20 นาที กรองด้วยกรวยกรองบุชเนอร์ ล้างด้วยน้ำกลั่นจนพีเอชเป็นกลางอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นทำการบดและคัดขนาดอนุภาคซิลิกาโดยการร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 170 และ 230 เมช

สมบัติของเรซิน

ตารางผนวกที่ ก1 ลักษณะทั่วไปของเรซิน

General Description	
Ionic form as shipped	Neutral
Functional group	acidic
Structure	macroporous
Appearance	opaque

ตารางผนวกที่ ก2 ลักษณะทางกายภาพและเคมีของเรซิน

metric units		
Mean bead size	mm	(0.65 +/- 0.05)
Bulk density (+/- 5 %)	g/l	740
Density approx.	g/ml	1.24
Water retention	wt. %	52 - 57
Storability of the product max.	years	2
Storability temperature range	°C	-20 - +40
Operating temperature	°C	rec. 30 - 50

สมบัติของซิลิกาจากเถ้าแกลบ

ซิลิกาที่เตรียมได้จากเถ้าแกลบนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET Surface area

ตารางผนวกที่ ก1 Surface area data

mode	ขนาดพื้นที่ผิว (m ² /g)
Multipoint BET	54.27

ตารางผนวกที่ ก2 Pore size data

mode	ขนาดรูพรุน (Å ⁰)
Micro Pore Width	133.6



ตารางผนวกที่ ข1 กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรด
ไขมัน พ.ศ.2548 ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน*

คุณสมบัติน้ำมันเชื้อเพลิง	หน่วย	วิธีทดสอบ	เกณฑ์ ต่ำสุด	เกณฑ์สูงสุด
เมทิลเอสเทอร์	ร้อยละโดยน้ำหนัก	EN 14103	96.5	-
ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 °C	กิโลกรัม/ลูกบาศก์ เมตร	ASTM D 1298	860	900
ค่าความหนืดที่ 40 °C	เซนติสโตกส์	ASTM D 445	3.5	5.0
จุดวาบไฟ	องศาเซลเซียส	ASTM D 93	120	-
ปริมาณกำมะถัน	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ASTM D 2622	-	0.0010
กาก (ร้อยละ 10 ของกาก ที่เหลือจากการกลั่น)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ASTM D 4530	-	0.30
ค่าซีเทน		ASTM D 613	51	-
เถ้าซัลเฟต	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ASTM D 874	-	0.020
น้ำ	ร้อยละโดยปริมาตร	EN ISO 12937	-	0.050
สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด	ร้อยละโดยน้ำหนัก	EN 12662		0.0024
การกัดกร่อนแผ่น ทองแดง		ASTM D 130	-	หมายเลข1
เสถียรภาพต่อการ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 °C	ชั่วโมง	EN 14112	6	-
ค่าความเป็นกรด	มิลลิกรัมโพแทสเซียม ไฮดรอกไซด์/ กรัม	ASTM D 664	-	0.50
ค่าไอโอดีน	กรัมไอโอดีน/100 กรัม	EN 14111	-	120
กรดลิโนเลนิก	เมทิล ร้อยละโดยน้ำหนัก	EN 14103	-	12
เอสเทอร์				
เมทานอล	ร้อยละโดยน้ำหนัก	EN 14110	-	0.20

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

คุณสมบัติน้ำมัน เชื้อเพลิง	หน่วย	วิธีทดสอบ	เกณฑ์ ต่ำสุด	เกณฑ์ สูงสุด
โมนอกลิเซอไรด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก	EN 14105	-	0.80
ไดกลีเซอไรด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก	EN 14105	-	0.20
ไตรกลีเซอไรด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก	EN 14105	-	0.20
กลีเซอรินอิสระ	ร้อยละโดยน้ำหนัก	EN 14105	-	0.02
กลีเซอรินทั้งหมด	ร้อยละโดยน้ำหนัก	EN 14105	-	0.25
โลหะกลุ่ม 1 (โซเดียมและ โพแทสเซียม)	มิลลิกรัม/กิโลกรัม	EN 14108และ EN 14109	-	5.0
โลหะกลุ่ม 2 (แคลเซียม และแมกนีเซียม)	มิลลิกรัม/กิโลกรัม	pr EN14538	-	5.0
ฟอสฟอรัส	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ASTM D 4951	-	0.0010
สารเติมแต่ง(ถ้ามี)		ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบจาก อธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน		

หมายเหตุ: * ราชกิจจานุเบกษา หน้า 12 เล่ม 122 ตอนพิเศษ 70ง. วันที่ 24 สิงหาคม 2548



ภาคผนวก ค
การหาความเป็นกรด กรดไขมันอิสระ
และการคำนวณประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนไอออน

1. การวัดค่าความเป็นกรด ตามมาตรฐาน ASTM D664

ค่าของกรดคือจำนวนมิลลิกรัมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเป็นกลางกับกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในน้ำมันจำนวน 1 กรัม ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณภาพน้ำมัน โดยที่น้ำมันคุณภาพดีจะมีค่าความเป็นกรดต่ำ หากน้ำมันมีกรดไขมันอิสระสูงจะมีค่าความเป็นกรดสูง

1.1 อุปกรณ์การทดลอง

- 1.1.1 ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มล.
- 1.1.2 ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มล.
- 1.1.3 บิวเรต
- 1.1.4 เครื่องชั่งทศนิยม 1 ตำแหน่ง
- 1.1.5 หลอดหยด

1.2 สารละลายที่ใช้และวิธีเตรียม

1.2.1 สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในน้ำกลั่น ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล โดยชั่งโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 5.61 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น 1 ลิตร

1.2.2 สารผสมโพรพานอลกับโทลูอินในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยปริมาตร และทำให้เป็นกลางต่อฟีนอล์ฟทาไลน์ด้วยสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

1.2.3 สารละลายฟีนอล์ฟทาไลน์อินดิเคเตอร์ ละลายฟีนอล์ฟทาไลน์ 1 กรัม ในโพรพานอล ทำให้เป็น 100 มิลลิลิตร

1.3 วิธีวิเคราะห์

1.3.1 ชั่งน้ำมันพืชที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียว ปริมาณดังแสดงในตารางผนวกที่ ค1 ให้ได้น้ำมันที่แน่นอน ใส่ในขวดรูปชมพู่ พร้อมทั้งบันทึกน้ำหนักน้ำมันพืช

ตารางผนวกที่ ค1 ปริมาณตัวอย่างน้ำมัน/ไขมันที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด

ค่าของกรด	น้ำหนักน้ำมัน ($\pm 10\%$) กรัม	ความละเอียดในการชั่ง $\pm$ กรัม
0-1	20	0.05
1-4	10	0.02
4-15	2.5	0.01
15-75	0.5	0.001
>75	0.1	0.0002

1.3.2 เติมสารผสมโพพานอลกับโทลูอิน (1.2.2) ปริมาณ 125 มิลลิลิตร โดยใช้กระบอกล้างขวดให้น้ำมันพืชละลาย อาจใช้ความร้อนในกรณีที่น้ำมันไม่ละลายในสารละลาย

1.3.3 เติมสารละลายฟีนอลฟทาไลน์อินดิเคเตอร์ ปริมาณ 2 มิลลิลิตร

1.3.4 ตีเตรตด้วย สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (1.2.1) จนสารละลายเริ่มเปลี่ยนสี เป็นสีชมพูอ่อน และคงตัวอยู่ 30 วินาที บันทึกปริมาตรของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้

1.4 วิธีคำนวณ

1.4.1 ค่าของกรด

$$AV = \frac{56.1 \times N \times V}{m}$$

- เมื่อ
- AV = ค่าความเป็นกรด, มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัมไขมัน
 - N = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ม นอร์มัล
 - V = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไตเตรต, มิลลิลิตร
 - M = น้ำหนักน้ำมันพืช, กรัม

1.4.2 ปริมาณกรดไขมันอิสระ (FFA = ปริมาณกรดไขมันอิสระ, ร้อยละโดยน้ำหนัก)

$$\% \text{FFA (as palmitic acid)}^* = \frac{AV}{2.19}$$

* ปริมาณกรดไขมันอิสระในรูปเปอร์เซ็นต์กรดไขมันปาล์มมิก ใช้สำหรับน้ำมันพืชที่มีกรดปาล์มมิกเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง เช่น น้ำมันปาล์มดิบ, น้ำมันปาล์มโกลีน, ปาล์มสเตียรีน

$$\% \text{FFA (as lauric acid)}^{**} = \frac{AV}{2.81}$$

** ปริมาณกรดไขมันอิสระในรูปเปอร์เซ็นต์กรดลอริก ใช้สำหรับน้ำมันพืชที่มีกรดลอริกเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง เช่น น้ำมันมะพร้าว, น้ำมันเมล็ดในปาล์ม

1.5 ตัวอย่างการคำนวณค่าของกรดและปริมาณกรดไขมันอิสระ

ชั่งน้ำมันปาล์มดิบปริมาณ 2.50 กรัม ละลายในสารผสมโพรพานอลกับโทลูอิน ปริมาณ 125 มิลลิลิตร เติมสารละลายฟีนอล์ฟทาไลน์อินดิเคเตอร์ ปริมาณ 2 มิลลิลิตร นำไปไตเตรตด้วยสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัลปริมาณที่ใช้ไป 4.5 มิลลิลิตร ต้องการทราบว่า น้ำมันปาล์มดิบ มีค่าของกรด และปริมาณกรดไขมันอิสระเท่าไร

การคำนวณค่าของกรด

$$AV = \frac{56.1 \times N \times V}{m} = \frac{56.1 \times 0.1 \times 4.5}{2.50} = 10.10$$

ดังนั้น น้ำมันปาล์มดิบมีค่าความเป็นกรดเท่ากับ 10.10 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัมไขมัน

การคำนวณปริมาณกรดไขมันอิสระในรูปเปอร์เซ็นต์ปาล์มมิก

$$\% \text{FFA (as palmitic acid)}^* = \frac{AV}{2.19} = \frac{10.10}{2.19} = 4.61$$

ดังนั้น น้ำมันปาล์มดิบมีปริมาณกรดไขมันอิสระ (ในรูปกรดปาล์มมิก) เท่ากับร้อยละ 4.61 โดยน้ำหนัก

2. การคำนวณหาประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน

$$\text{ร้อยละการกำจัดไอออน(\%)} = \left(\frac{C_0 - C_1}{C_0} \right) \times 100$$

$$\text{ปริมาณการกำจัด (mg.M}^{n+}\text{/g.resin)} = \left(\frac{C_0 - C_1}{C_0} \right) \times 100$$

$$\text{ปริมาณการกำจัด(mmol.Mn}^{+}\text{/g.resin)} = \left(\frac{C_0 - C_1}{C_0} \right) \times 100$$

เมื่อ	C_0	=	ความเข้มข้นไอออนเริ่มต้น (ppm)
	C_1	=	ความเข้มข้นไอออนสุดท้าย (ppm)
	V	=	ปริมาตรสารละลายไอออน (น้ำมันไบโอดีเซล,ml)
	W	=	น้ำหนักของเรซิน (g)
	M	=	น้ำหนักอะตอมของ M^{n+}



ภาคผนวก ง
เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. เทคนิคการวิเคราะห์แบบโพเทนชิโอเมตริก (Potentiometric Methods)

เทคนิคการวัดแบบโพเทนชิโอเมตริก (Potentiometric Methods) คือ วิธีวิเคราะห์หาปริมาณสารตัวอย่างจากการวัดค่าความต่างศักย์ของเซลล์ไฟฟ้าเคมี ที่ประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้าสองขั้วจุ่มอยู่ในสารละลายตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ ณ สภาวะสมดุลของการดำเนินปฏิกิริยาเคมีแบบผันกลับของสารละลายตัวอย่างนั้น ซึ่งเป็นสภาวะที่แทบไม่มีการไหลของกระแสเกิดขึ้นภายในวงจร ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ในการทำโพเทนชิโอเมตริกเป็นผลต่างของศักย์จากขั้วไฟฟ้าทั้งสองที่คำนวณได้จากสมการเนินสต์ รวมกับค่าศักย์ไฟฟ้ารอยต่อสารละลาย (Liquid-junction potentials) ดังแสดงในสมการข้างล่าง

$$E_{\text{measured}} = (E_{\text{ind}} - E_{\text{ref}}) + E_{\text{junction}}$$

1.1 อุปกรณ์ในการวัดโพเทนชิโอเมตริก

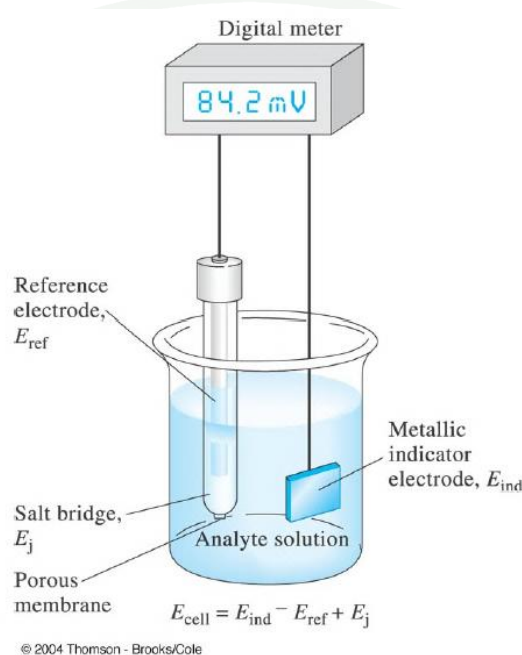
1) ส่วนของเซลล์เคมีไฟฟ้า ประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้าอ้างอิงและขั้วไฟฟ้าชี้บอก จุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของสารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์

ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) ศักย์ไฟฟ้าของครึ่งเซลล์ชนิดนี้จะเป็นค่าที่ทราบแน่นอน และมีค่าคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้นของสารใดๆในสารละลายที่ทำการวิเคราะห์ (analyte solution) สำหรับการวัดแบบโพเทนชิโอเมตริก ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงมักจะเขียนไว้ด้านซ้ายของแผนภาพเซลล์ไฟฟ้าเคมี (line diagram)

ขั้วไฟฟ้าชี้บอก (Indicator electrode) ขั้วไฟฟ้าชนิดนี้จุ่มอยู่ในสารละลายตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ ศักย์ไฟฟ้าของครึ่งเซลล์ชนิดนี้จะแปรผันไปตามความเข้มข้นของไอออน (analyte concentration) ที่เปลี่ยนแปลงไป สำหรับการวัดแบบโพเทนชิโอเมตริก ขั้วไฟฟ้าชี้บอกมักจะเขียนไว้ด้านขวาของแผนภาพเซลล์ไฟฟ้าเคมี (line diagram)

2) ส่วนของเครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าความต่างศักย์ของเซลล์ ซึ่งเรียกว่า โพเทนชิโอมิเตอร์ หรือ พีเอชมิเตอร์

3) สะพานเกลือ (Salt bridge) ทำหน้าที่ ป้องกัน ไม่ให้สารละลายที่ทำกรวิเคราะห์ ผสมปนกับสารละลายที่บรรจุอยู่ในขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (reference electrode) มีผลทำให้ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากรอยต่อระหว่างสารละลายทั้งสอง (liquid-junction potential) ลดลงเป็นตัวทำให้เกิดการดุลของประจุในสารละลายของครึ่งเซลล์ทั้งสอง



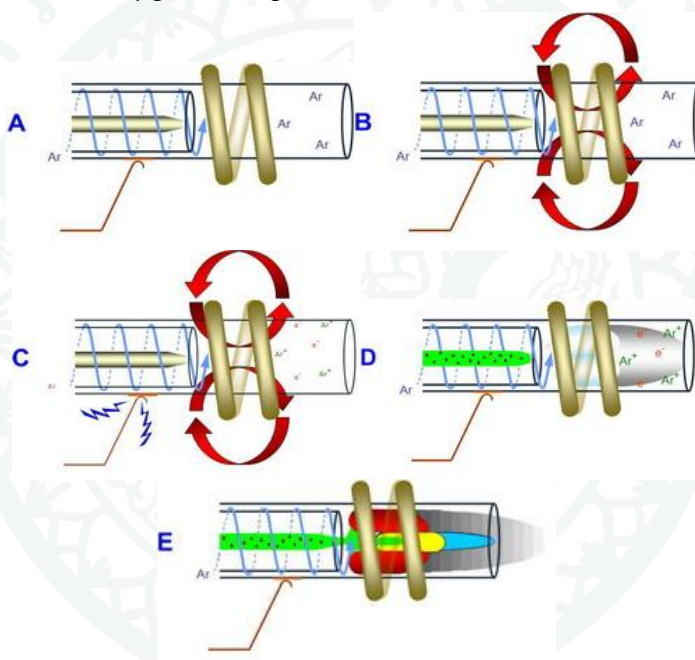
ภาพผนวกที่ 1 อุปกรณ์ในโพเทนชิโอเมเตอร์

2. เทคนิคการวิเคราะห์แบบ Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES หรือ ICP)

ICP-OES เป็นเทคนิคสำหรับการวิเคราะห์ธาตุ (Elemental analysis) ที่จัดอยู่กลุ่ม Atomic Spectroscopy โดยใช้พลาสมาที่มีแหล่งกำเนิดเป็นเปลวความร้อนสูง (6000 – 10000 K) การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ICP-OES ใช้หลักการให้ความร้อนแก่สารตัวอย่างให้แตกตัวเป็นอะตอมหรือไอออนด้วยพลาสมาอะตอมหรือไอออนที่เกิดขึ้นจะถูกกระตุ้นให้คายแสงออกมาที่ความยาวคลื่นต่างๆ แสงที่ได้จะเป็นแสงที่มีหลายความยาวคลื่น (Polychromatic light) ซึ่งจะถูกแยกด้วย Diffractive optics ให้เป็นแสงความยาวคลื่นเดี่ยว (Monochromatic light) และถูกตรวจวัดด้วยดีเทคเตอร์ (Detector) ต่อไป แสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ เป็นสมบัติเฉพาะตัวของอะตอมหรือไอออนของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์โดยความเข้มแสง (intensity) จะแปรผันตรงกับปริมาณธาตุ เมื่อให้ความร้อนด้วย

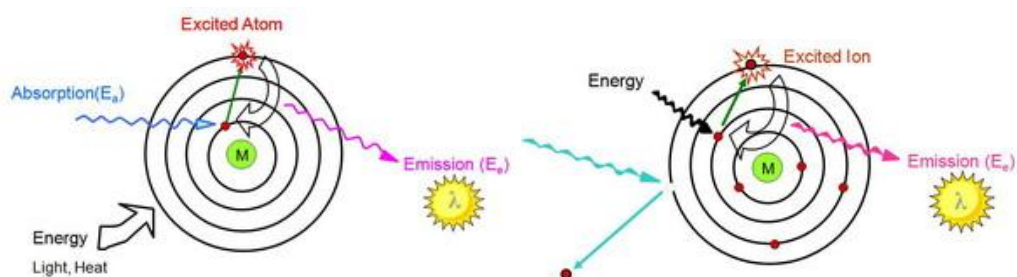
พลาสมา ธาตุทุกธาตุที่ต้องการวิเคราะห์จะถูกกระตุ้นให้คายแสงพร้อมกันและทุกความยาวคลื่นจะถูกวิเคราะห์ได้พร้อมกัน ทำให้สามารถวิเคราะห์ธาตุในตัวอย่างได้มากกว่า 1 ธาตุในการวิเคราะห์แต่ละครั้ง (Multi element analysis)

การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ (Quantitative analysis) ด้วย ICP-OES จำเป็นต้องใช้สารมาตรฐานที่มีความเข้มข้นที่แน่นอน (Standard solution) และตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ส่วนมากจะอยู่ในรูปของเหลว เทคนิค ICP-OES มีช่วงความเข้มข้นของการสร้าง Calibration curve กว้างมาก (Linear dynamic range สูง) ขึ้นกับธาตุและความยาวคลื่นที่ต้องการวิเคราะห์ โดยสามารถวิเคราะห์ความเข้มข้นได้ในช่วงต่ำกว่า $\mu\text{g/L}$ จนถึง g/L

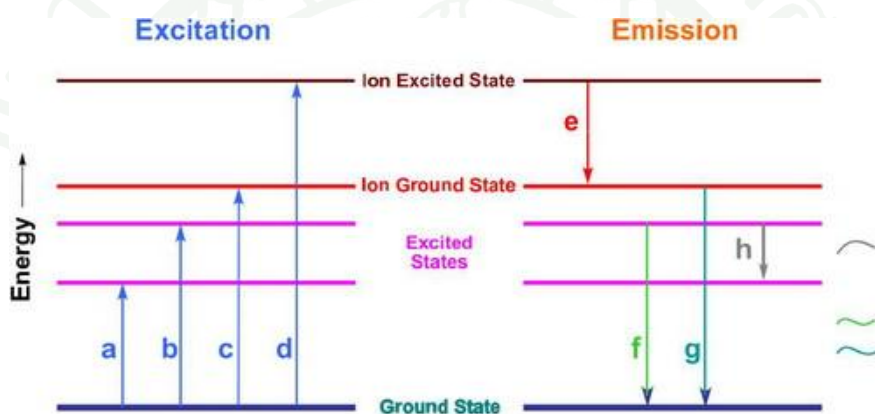


ภาพผนวกที่ ๓๒ ภาพตัดขวางของคบ (Torch) และขดลวดทองแดง (Load coil) สำหรับการเหนี่ยวนำให้เกิดพลาสมา จาก A ไป E

- A: แก๊สอาร์กอนที่ผ่านเข้าไปจะหมุนไปรอบๆ Torch
- B: เมื่อส่งความถี่ในช่วงคลื่นวิทยุ (Radio frequency, RF) เข้าไปใน Load coil
- C: การสปาร์กหรือปล่อยประจุจากเทสลา (Tesla discharge) เพื่อทำให้แก๊สอาร์กอนเกิดไอออไนส์ได้อิเล็กตรอนเกิดขึ้น (Ignition)
- D: อิเล็กตรอนถูกเร่งให้เคลื่อนที่เร็วขึ้นด้วยสนามแม่เหล็ก
- E: สารละลายของตัวอย่างที่เป็นละอองฝอยถูกแก๊สอาร์กอนพาเข้าไปในพลาสมาตรงกลางทำให้เกิดเป็นช่องขึ้น



ภาพผนวกที่ 3 การจำลองการคายพลังงานของอะตอมหรือไอออนของธาตุจากสภาวะกระตุ้นสู่สภาวะพื้น



ภาพผนวกที่ 4 ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอะตอมและไอออน



ภาพผนวกที่ 5 ICP-OES รุ่น Optima 8000 บริษัท PerkinElmer

2.1 การเตรียมน้ำมันไบโอดีเซลเพื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ICP-OES

สารเคมีที่ใช้

2.1 V-Solv solvent (N9308265)

2.2 Biodiesel Blank 500 mL (N9308287)

2.3 Metal in Biodiesel Ca, K, Mg, P 20 $\mu\text{g/g}$ (N9308289)

2.4 Co internal Std 5000 $\mu\text{g/g}$ (N9308258)

2.5 V-solv + Co internal Std (1 ppm) (weight 0.1g of Co internal Std 5000 $\mu\text{g/g}$ dilute with V-Solv to 500 g)

ตารางผนวกที่ 1 การเตรียม Standard and Sample (Weight all standards and samples accurately (eg. 1.00XX g))

Standard	Blank (0 ppm)	1 ppm	2 ppm	4 ppm
Stock std (20 $\mu\text{g/g}$)	0 g	0.5 g	1 g	2 g
Biodiesel Blank	2 g	1.5 g	1 g	0 g
V-Solv + Co Internal Std	8 g	8 g	8 g	8 g
Total	10 g	10 g	10 g	10 g

ตารางผนวกที่ 2 สารตัวอย่าง (Dilute 5X)

สาร	น้ำหนักที่ชั่ง (g)
Sample	2
V-Solv + Co Internal Std	8
Total	10



ตารางผนวกที่ จ1 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนกับค่าปริมาณ
เรซินเริ่มต้น

ปริมาณ (กรัม)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)	พีเอช	ค่าความ เป็นกรด	ปริมาณกรด ไขมันอิสระ	ร้อยละ การกำจัด
control	48.8	7.5	1.1220	0.5123	-
0.5	33.1	7.4	0.8415	0.3842	32.17
1	30.7	7.3	0.8415	0.3842	37.09
2	28.7	7.2	0.8415	0.3842	42.00
3	21.5	7.0	0.8415	0.3842	55.94
4	19.5	7.0	0.8415	0.3842	60.04
5	25.6	7.0	0.8415	0.3842	47.54

ตารางผนวกที่ จ2 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนกับค่าปริมาณซิลิกา
จากถ้ำเกลบเริ่มต้น

ปริมาณ (กรัม)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)	พีเอช	ค่าความ เป็นกรด	ปริมาณกรด ไขมันอิสระ	ร้อยละ การกำจัด
control	90.6	7.2	1.1220	0.5123	-
0.5	80.0	7.0	0.8415	0.3842	11.70
1	74.1	7.0	0.8415	0.3842	18.21
2	68.4	7.0	0.8415	0.3842	24.50
3	50.2	7.0	0.8415	0.3842	44.59
4	31.0	7.0	0.8415	0.3842	65.78
5	36.5	7.0	0.8415	0.3842	59.71

ตารางผนวกที่ จ3 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนของเรซินกับ
ความเร็วรอบในการเขย่า

ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)	พีเอช	ค่าความ เป็นกรด	ปริมาณกรด ไนมันอิสระ	ร้อยละ การกำจัด
control	112.0	7.8	1.1220	0.5123	-
50	46.3	7.6	0.5610	0.2562	58.66
100	19.1	7.6	0.8415	0.3842	82.95
150	26.9	7.6	0.8415	0.3842	75.98

ตารางผนวกที่ จ4 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนของซิลิกาจาก
ถ้ำเกลบกับความเร็วรอบในการเขย่า

ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)	พีเอช	ค่าความ เป็นกรด	ปริมาณกรด ไนมันอิสระ	ร้อยละของ การกำจัด
control	112.0	7.8	1.1220	0.5123	-
50	18.0	7.9	0.5610	0.2562	83.93
100	15.9	7.8	0.8415	0.3842	85.80
150	18.6	7.8	0.5610	0.2562	83.39

ตารางผนวกที่ จ5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนของเรซินกับ
ระยะเวลาเขย่า

ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)	พีเอช	ค่าความ เป็นกรด	ปริมาณกรด ไนมันอิสระ	ร้อยละ การกำจัด
control	110.1	7.1	1.1220	0.5123	-
30	74.0	7.0	0.6732	0.3074	32.73
60	69.2	6.9	0.6732	0.3074	37.09
90	55.1	7.0	0.5610	0.2562	49.91
120	63.5	7.0	0.8415	0.3842	42.27

ตารางผนวกที่ จ6 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนของซิลิกาจาก
ถ้ำกลับกับระยะเวลาเขย่า

ระยะเวลาเขย่า (นาทิจ)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)	พีเอช	ค่าความ เป็นกรด	ปริมาณกรด ไขมันอิสระ	ร้อยละ การกำจัด
control	110.1	7.1	1.1220	0.5123	-
30	70.1	7.2	0.8415	0.3842	36.27
60	68.3	7.2	0.5610	0.2562	37.91
90	60.2	7.1	0.5610	0.2562	45.27
120	65.5	7.1	1.0010	0.4571	40.45

ตารางผนวกที่ จ7 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนของเรซินกับ
ระยะเวลาสัมผัส

ระยะเวลา สัมผัส (นาทิจ)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)	พีเอช	ค่าความ เป็นกรด	ปริมาณกรด ไขมันอิสระ	ร้อยละ การกำจัด
control	137.4	7.8	1.1220	0.5123	-
30	52.2	7.7	0.8415	0.3842	62.01
60	15.1	7.5	0.5610	0.2562	89.01
90	22.0	7.6	0.6732	0.3074	83.98
120	72.2	7.5	1.0010	0.4571	47.45

ตารางผนวกที่ จ8 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนของซิลิกาจาก
ถ้ำแลกเปลี่ยนระยะเวลาสัมผัส

ระยะเวลา สัมผัส (นาทีก)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)	พีเอช	ค่าความ เป็นกรด	ปริมาณกรด ไขมันอิสระ	ร้อยละ การกำจัด
control	137.4	7.8	1.1220	0.5123	-
30	70.1	7.2	0.8415	0.3842	54.73
60	68.3	7.2	0.5610	0.2562	78.67
90	60.2	7.1	0.5610	0.2562	64.99
120	65.5	7.1	1.0010	0.4571	29.91

ตารางผนวกที่ จ9 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนของซิลิกาจากถ้ำ
แลกเปลี่ยนปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลดิบ

ปริมาตร (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)	พีเอช	ค่าความ เป็นกรด	ปริมาณกรด ไขมันอิสระ	ร้อยละ การกำจัด
control	44.5	7.7	1.1220	0.5123	-
25	24.5	7.7	0.5610	0.2562	44.94
50	20.1	7.7	0.5610	0.2562	54.83
75	27.1	7.7	0.8415	0.3074	39.10
100	34.8	7.7	0.8415	0.3074	21.80

ตารางผนวกที่ ๑๑๐ ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนกับปริมาณของเรซิน

ปริมาณ (กรัม)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)	พีเอช	ค่าความ เป็นกรด	ปริมาณกรด ไขมันอิสระ	ร้อยละ การกำจัด
control	45.0	7.5	1.1220	0.5123	-
1	35.1	7.5	0.8415	0.3074	22.00
2	14.0	7.5	0.8415	0.3074	68.80
3	4.1	7.4	0.8415	0.3074	91.00
4	15.1	7.4	0.8415	0.3074	66.53
5	26.1	7.6	0.8415	0.3074	39.67

ตารางผนวกที่ ๑๑๑ ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนกับปริมาณของซิลิกาจากเถ้าแกลบ

ปริมาณ (กรัม)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)	พีเอช	ค่าความ เป็นกรด	ปริมาณกรด ไขมันอิสระ	ร้อยละ การกำจัด
control	46.9	7.3	1.1220	0.5123	-
1	25.8	7.2	0.8415	0.3074	39.15
2	21.3	7.1	0.8415	0.3074	49.76
3	10.3	7.1	0.8415	0.3074	75.70
4	6.05	7.2	0.8415	0.3074	85.73
5	12.3	7.2	0.8415	0.3074	70.99

ตารางผนวกที่ จ12 ไอโซเทอร์มการกำจัดโพแทสเซียมไอออนของซิลิกาจากแก้วเคลือบ

ปริมาณ (กรัม)	C_0	C	V (ลิตร)	q	1/q	1/C	log q	log C
1	42.4	25.80	0.05	0.83	1.2048	1.4116	-0.0809	1.4116
2	42.4	21.30	0.05	0.53	1.8957	1.3284	-0.2278	1.3284
3	42.4	10.30	0.05	0.54	1.8692	1.0128	-0.2716	1.3075
4	42.4	6.05	0.05	0.45	2.2008	0.7818	-0.3426	1.2148
5	42.4	12.30	0.05	0.30	3.3223	1.3075	-0.5214	1.3692

ตารางผนวกที่ จ13 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนของเรซิน ร้อยละโพแทสเซียมไอออนที่เหลือ และปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลที่ไหลผ่านคอลัมน์

ปริมาตร (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)	พีเอช	ค่าความ เป็นกรด	ปริมาณกรด ไขมันอิสระ	ร้อยละ ที่เหลือ	ร้อยละ การกำจัด
control	25.8	7.9	1.1220	0.5123	-	-
50	3.86	7.9	0.5610	0.2562	14.96	85.04
100	5.28	7.8	0.8415	0.3842	20.47	79.53
150	6.66	7.8	0.8415	0.3842	25.81	74.19
200	6.85	7.8	0.5610	0.2562	26.55	73.45
250	4.26	7.8	0.5610	0.2562	16.51	83.49
300	6.87	7.8	0.5610	0.2562	26.63	73.37
350	5.60	7.8	0.5610	0.2562	21.71	78.29
400	5.93	7.8	0.8415	0.3842	22.98	77.02
450	8.81	7.7	0.8415	0.3842	34.15	65.85
500	9.42	7.7	0.8415	0.3842	36.51	63.49
550	10.40	7.8	0.8415	0.3842	40.31	59.69
600	7.49	7.8	0.8415	0.3842	29.03	70.97
650	10.30	7.8	0.8415	0.3842	39.92	60.08
700	9.14	7.8	0.8415	0.3842	35.43	64.57

ตารางผนวกที่ จ13 (ต่อ)

ปริมาตร (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)	พีเอช	ค่าความ เป็นกรด	ปริมาณกรด ไขมันอิสระ	ร้อยละ ที่เหลือ	ร้อยละ การกำจัด
750	11.40	7.8	0.8415	0.3842	44.19	55.81
800	11.60	7.8	0.8415	0.3842	44.96	55.04
850	9.74	7.8	0.8415	0.3842	37.75	62.25
900	10.50	7.7	0.8415	0.3842	40.70	59.30
950	12.10	7.7	0.8415	0.3842	46.90	53.10
1000	15.70	7.6	0.8415	0.3842	60.85	39.15
1050	16.10	7.5	0.8415	0.3842	62.40	37.60
1100	17.60	7.5	0.8415	0.3842	68.22	31.78
1150	18.70	7.4	0.8415	0.3842	72.48	27.52
1200	21.80	7.4	0.8415	0.3842	84.50	15.50

ตารางผนวกที่ จ14 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนของเรซินที่ผ่านการ
ใช้งานแล้วนำกลับมาฟื้นฟูสภาพใหม่ ร้อยละโพแทสเซียมไอออนที่เหลือ และ
ปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลที่ไหลผ่านคอลัมน์

ปริมาตร (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)	พีเอช	ค่าความ เป็นกรด	ปริมาณกรด ไขมันอิสระ	ร้อยละ ที่เหลือ	ร้อยละ การกำจัด
control	27.5	8.0	1.1220	0.5123	-	-
50	10.20	7.8	0.8415	0.3842	37.09	62.91
100	10.50	7.8	0.8415	0.3842	38.18	61.82
150	11.50	7.8	0.8415	0.3842	41.82	58.18
200	12.20	7.9	0.8415	0.3842	44.36	55.64
250	12.60	7.7	0.8415	0.3842	45.82	54.18
300	12.00	7.8	0.8415	0.3842	43.64	56.36
350	11.60	7.8	0.8415	0.3842	42.18	57.82
400	11.10	7.7	0.8415	0.3842	40.36	59.64

ตารางผนวกที่ จ14 (ต่อ)

ปริมาตร (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร)	พีเอช	ค่าความ เป็นกรด	ปริมาณกรด ไขมันอิสระ	ร้อยละ ที่เหลือ	ร้อยละ การกำจัด
450	12.40	7.8	0.8415	0.3842	45.09	54.91
500	11.00	7.7	0.8415	0.3842	40.00	60.00
550	14.70	7.7	0.8415	0.3842	53.45	46.55
600	16.40	7.7	0.8415	0.3842	59.64	40.36
650	15.40	7.5	0.8415	0.3842	56.00	44.00
700	13.80	7.5	0.8415	0.3842	50.18	49.82
750	15.80	7.6	0.8415	0.3842	57.45	42.55
800	16.30	7.6	0.8415	0.3842	59.27	40.73
850	16.70	7.5	0.8415	0.3842	60.73	39.27
900	16.60	7.5	0.8415	0.3842	60.36	39.64
950	18.30	7.3	0.8415	0.3842	66.55	33.45
1000	18.50	7.3	0.8415	0.3842	67.27	32.73
1050	20.40	7.2	0.8415	0.3842	74.18	25.82
1100	19.50	7.2	0.8415	0.3842	70.91	29.09
1150	21.40	7.0	0.8415	0.3842	77.82	22.18
1200	22.50	6.8	0.8415	0.3842	81.82	18.18

ตารางผนวกที่ จ15 ค่ามาตรฐานน้ำมันไบโอดีเซลและน้ำมันไบโอดีเซลคืบล้างด้วยน้ำโดยการ
ตรวจวัดด้วยเครื่อง ICP-OES

ชนิด	ปริมาณโพแทสเซียมไอออน (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)
ค่ามาตรฐานน้ำมันไบโอดีเซล	5.000
น้ำมันไบโอดีเซลล้างด้วยน้ำ	1.118

ตารางผนวกที่ จ16 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนของเรซินและซิลิกาจากถ้ำเกลือผ่านกระบวนการแบบเบตซ์โดยการตรวจวัดด้วยเครื่อง ICP-OES

ชนิดสาร	ปริมาณโพแทสเซียมไอออน (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)		ร้อยละการกำจัด
	ก่อนการกำจัด	หลังการกำจัด	
เรซิน	26.24	0.172	99.34
ซิลิกาจากถ้ำเกลือ	26.24	0.161	99.39

ตารางผนวกที่ จ17 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดโพแทสเซียมไอออนของเรซินผ่านกระบวนการแบบคอลัมน์โดยการตรวจวัดด้วยเครื่อง ICP-OES

ชนิด	ปริมาณโพแทสเซียมไอออน (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)		ร้อยละการกำจัด
	ก่อนการกำจัด	หลังการกำจัด	
50	26.24	0.243	99.07
500	26.24	0.456	98.87
1000	26.24	1.140	95.66

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายธีระวัฒน์ อัจฉฤกษ์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 28 มีนาคม 2531
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลราษฎร์ไศล อำเภอรามัน จังหวัดศรีสะเกษ
ประวัติการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมี) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)