



จ.จ.

โครงการวิจัยที่ ภ. 45-02 / ย. 5 / รายงานฉบับสมบูรณ์

การพัฒนากระบวนการผลิตเอทานอลไร้น้ำ โดยใช้ Membrane หรือ Molecular Sieve



สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

โครงการวิจัยที่ ภ. 45-02

การพัฒนาระบบการผลิตเอทานอลไร้น้ำโดยใช้ Membrane
หรือ Molecular Sieve

โครงการย่อยที่ 5

การพัฒนาระบบการผลิตเอทานอลไร้น้ำโดยใช้ Membrane
หรือ Molecular Sieve

รายงานฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาระบบการผลิตเอทานอลไร้น้ำโดยใช้ Membrane
หรือ Molecular Sieve

โดย

ธีรภัทร ศรีนรคุตร

สุภาพ อัจฉริยศรีพงศ์	วิษณุ ปั้นพันธุ์
พงศ์นรินทร์ จำรัส	อรรถศักดิ์ จารีย์
เทพฤทธิ์ กัณหานนท์	ยุทธศักดิ์ รัตนสงฆ์
เลิศลักษณ์ แก้ววิมล	วรรณลักษณ์ บัวบาน

บรรณาธิการ

ลิขิต หาญางสิทธิ์

บุญเรียม น้อยชุมแพ

พิสุทธิ์ พลัสสาวาท

วว., กรุงเทพฯ 2555

สงวนลิขสิทธิ์

รายงานฉบับนี้ได้รับการอนุมัติให้พิมพ์โดย
ผู้ว่าการสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย



(นายขงวุฒิ เสาวพฤกษ์)
ผู้ว่าการ

กิตติกรรมประกาศ

คณะทำงานโครงการ ขอขอบคุณนายณรงค์ จิตรน้อมรัตน์ ผู้ช่วยกรรมการผู้จัดการใหญ่-
สายผลิต บริษัทน้ำตาลขอนแก่น จำกัด (มหาชน) ที่ได้ให้โอกาสคณะทำงานเข้าเยี่ยมชมโรงงาน
ซึ่งส่งผลให้ฝ่ายเทคโนโลยีชีวภาพ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)
ทำการศึกษาวิจัยในครั้งนี้บรรลุตามวัตถุประสงค์ทุกประการ.

คณะทำงานโครงการ

ที่ปรึกษาโครงการ

ดร.นงลักษณ์ ปานเกิดดี
นางสาวพิศมัย เจนวนิชปัญจกุล
ดร.สุภาพ อัจฉริยศรีพงศ์

หัวหน้าโครงการ

ดร.ธีรภัทร ศรีนรคุตร

ผู้ร่วมโครงการวิจัย

ฝ่ายผลิต

นายวิษณุ ปั้นพันธุ์
นายพงษ์นรินทร์ จำรัส
ผศ. ดร.อรรถศักดิ์ จารีย์
นายเทพฤทธิ์ ถิ่นหานนท์
นายยุทธศักดิ์ รัตนสงฆ์

วิเคราะห์/ควบคุมคุณภาพ

นางสาวเลิศลักษณ์ แก้ววิมล

ธุรการโครงการ

นางวรรณลักษณ์ บัวบาน

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ	ก
คณะทำงานโครงการ	ข
สารบัญตาราง	ง
สารบัญรูป	ฉ
ABSTRACT	1
บทคัดย่อ	2
1. บทนำ	3
2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	6
3. ขอบเขตของงานวิจัย	7
4. การตรวจเอกสาร	9
5. อุปกรณ์และวิธีการ	36
6. ผลการทดลองและวิจารณ์	62
7. สรุปผลการวิจัย	88
8. เอกสารอ้างอิง	89
ภาคผนวก ก	92
ภาคผนวก ข	99
ภาคผนวก ค	116
ภาคผนวก ง	120
ภาคผนวก จ	123
ภาคผนวก ฉ	126
ภาคผนวก ช	133

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1. โครงสร้างของซีโอไลต์โดยใช้พื้นฐานของหน่วยเอสบียู	14
ตารางที่ 2. คำมิติของโครงสร้างซีโอไลต์ที่พบโดยทั่วไป	16
ตารางที่ 3. องค์ประกอบทางเคมีของฮอร์นี และเฟลารีเอน โดสเปอร์ม (โดยน้ำหนักแห้ง)	25
ตารางที่ 4. การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อสมดุลการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่	60
ตารางที่ 5. การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อเส้นโค้งการดูดซับ	61
ตารางที่ 6. การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อเส้นโค้งการคายซับ	61
ตารางที่ 7. ค่าพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนของวัสดุต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบ	69
ตารางที่ 8. เปรียบเทียบค่าคงที่ของสมดุลการดูดซับไอน้ำที่อุณหภูมิคงที่	80
ตารางที่ 9. เปรียบเทียบสถานะที่ใช้ในการทดลองหาเส้นโค้งการดูดซับซึ่งทำให้ ได้ความเข้มข้นเอทานอลที่ออกจากเบตมากกว่า 99.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก	82
ตารางที่ 10. เปรียบเทียบค่าต่างๆ ที่ได้จากการทดลองหาเส้นโค้งการคายซับไอน้ำ ออกจากสารดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟ 3A เมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีก และวัสดุผสมถ้ำลอยถ่านหินกับปูนซีเมนต์อัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดย ปริมาตร	83

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1. โครงสร้างแบบทรงสี่หน้าของสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต	11
รูปที่ 2. โครงสร้างโดยหน่วยเอสบียู ชื่อย่อของแต่ละโครงสร้าง	13
รูปที่ 3. ซีโอไลต์ A ที่เป็นกรงโซคาไลต์	15
รูปที่ 4. โครงสร้างของซีโอไลต์ X	16
รูปที่ 5. ลักษณะของดินขาวที่มีสารประกอบของอะลูมิเนียมซิลิเกต	18
รูปที่ 6. ลักษณะของดินขาวที่มีสารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต	19
รูปที่ 7. ส่วนประกอบต่างๆ ของเมล็ดข้าวโพด	24
รูปที่ 8. Scanning electron microscope (SEM) รูปบนเป็นรูปขยายของ พื้นผิวซอร์นีเอนโดสเปอร์ม รูปล่างเป็นรูปขยายของพื้นผิวเฟลารีเอน- โดสเปอร์ม	26
รูปที่ 9. พันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของน้ำและหมู่ไฮดรอกซิลของ โมเลกุลแป้ง	27
รูปที่ 10. รูปแบบของสมดุลระหว่างวิภาคของการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่	28
รูปที่ 11. เครื่องดูดซับไอน้ำออกจากไอผสมเอทานอลเบนดิงแบบเปลี่ยนแปลง ความดัน	36
รูปที่ 12. แบบของเครื่องดูดซับเบนดิงแบบเปลี่ยนแปลงความดัน	37
รูปที่ 13. เครื่องระเหยเอทานอลเหลว	38
รูปที่ 14. แบบของเครื่องระเหยเอทานอลเหลว	39
รูปที่ 15. เครื่องสร้างไอเอทานอลร้อนยวดยิ่ง	39
รูปที่ 16. เครื่องหล่อเย็นเอทานอล	40
รูปที่ 17. แบบของเครื่องหล่อเย็นเอทานอล	40
รูปที่ 18. ปุ่มป้อนเอทานอลที่ใช้ในการวิจัย	41
รูปที่ 19. ขวดป้อนเอทานอลไร้ฝ้า ขวดป้อนเอทานอล 95.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเครื่องรักษาแรงดันในขวดป้อนเอทานอล	42
รูปที่ 20. กระเปาะแรงดันสุญญากาศ	43
รูปที่ 21. ปุ่มสร้างแรงดันสุญญากาศ	43

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 22. เครื่องผลิตน้ำมันร้อนและปั้มน้ำมันร้อน	44
รูปที่ 23. เครื่องผลิตน้ำหล่อเย็น	44
รูปที่ 24. เครื่องวัดอุณหภูมิแบบ 12 ช่อง	45
รูปที่ 25. เครื่องวัดความหนาแน่นของสาร	46
รูปที่ 26. เตาเผาไฟฟ้า	47
รูปที่ 27. ตู้อบลมร้อน	48
รูปที่ 28. เครื่อง Gas Sorption Analyzer รุ่น Autosorp	48
รูปที่ 29. โมเลกุลาร์ซีฟ 3A ของบริษัท ZEOCHEM	49
รูปที่ 30. ถ้ำลอยถ่านหิน	50
รูปที่ 31. ดินขาว	50
รูปที่ 32. เมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียว	51
รูปที่ 33. ดินขาวขึ้นรูป	52
รูปที่ 34. ถ้ำลอยถ่านหินผสมปูนซีเมนต์	52
รูปที่ 35. เมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีก	53
รูปที่ 36. ฟางข้าว	53
รูปที่ 37. ชานอ้อย	54
รูปที่ 38. ชุดทดสอบสารดูดซับในกระบวนการผลิตเอทานอลไร้น้ำ	55
รูปที่ 39. แผนภาพแสดงอุปกรณ์ของชุดทดสอบสารดูดซับในกระบวนการผลิตเอทานอลไร้น้ำที่ใช้ในงานวิจัย	55
รูปที่ 40. สมดุลการดูดซับไอน้ำที่อุณหภูมิ 110 และ 130 องศาเซลเซียส ของโมเลกุลาร์ซีฟ 3A	62
รูปที่ 41. เส้นโค้งการดูดซับไอน้ำจากไอผสมของเอทานอลและน้ำเข้าสู่โมเลกุลาร์ซีฟ 3A ที่อุณหภูมิ 110 และ 130 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนเอทานอลเข้มข้น 95.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 5.90, 7.86, และ 9.83 มิลลิลิตรต่อนาที	63

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 42. เส้นโค้งการคายซึบไอน้ำจากโมเลกุลาร์ซีฟ 3A เข้าสู่ไอของเอทานอลไรรู้ น้ำที่ป้อนเข้า ในสภาวะสุญญากาศที่ความดัน -0.4 ถึง -0.3 บาร์ อุณหภูมิ 110 และ 130 องศาเซลเซียส โดยป้อนเอทานอลไรรู้ที่อัตราการป้อน 0.98, 1.97, และ 2.95 มิลลิลิตรต่อนาที	65
รูปที่ 43. การเปรียบเทียบเส้นโค้งการดูดซึบไอน้ำจากไอผสมของเอทานอลและ น้ำของโมเลกุลาร์ซีฟ 3A กับวัสดุจากท้องถิ่นที่ได้จากการเกษตรประเภท เมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียว ฟางข้าว และชานอ้อย ที่อัตราการป้อน 5.90 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส	66
รูปที่ 44. การเปรียบเทียบเส้นโค้งการดูดซึบไอน้ำจากไอผสมของเอทานอลและน้ำ ของโมเลกุลาร์ซีฟ 3A กับวัสดุจากท้องถิ่นประเภท ปูนซีเมนต์ ถั่วลย ถ่านหิน และดินขาว ที่อัตราการป้อน 5.90 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส	67
รูปที่ 45. ขนาดรูพรุนของโมเลกุลาร์ซีฟ 3A	69
รูปที่ 46. ขนาดรูพรุนของเมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีก	70
รูปที่ 47. ขนาดรูพรุนของวัสดุผสมถั่วลยถ่านหินกับปูนซีเมนต์อัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร	70
รูปที่ 48. ขนาดรูพรุนของดินขาวอบแห้ง	71
รูปที่ 49. ขนาดรูพรุนของดินขาวเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส	71
รูปที่ 50. ขนาดรูพรุนของดินขาวเผาที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส	72
รูปที่ 51. สมดุลการดูดซึบไอน้ำที่อุณหภูมิ 110 และ 130 องศาเซลเซียส ของเมล็ด ข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีก และวัสดุผสมถั่วลยถ่านหินกับปูนซีเมนต์ อัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร เปรียบเทียบกับโมเลกุลาร์ซีฟ 3A	74

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

- รูปที่ 52. เส้นโค้งการดูดซับไอน้ำของเมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีก ที่อุณหภูมิ 110 และ 130 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนเอทานอล 95.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 3.94, 5.90, และ 7.86 มิลลิลิตรต่อนาที เปรียบเทียบกับโมเลกุลาร์ซีฟ 3A ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส อัตราการป้อน 5.90 มิลลิลิตรต่อ นาที 75
- รูปที่ 53. เส้นโค้งการดูดซับไอน้ำของวัสดุผสมถั่วลอยถ่านหินกับปูนซีเมนต์ อัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 110 และ 130 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนเอทานอล 95.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 5.90, 7.86, และ 9.83 มิลลิลิตรต่อนาที เปรียบเทียบกับโมเลกุลาร์ซีฟ 3A ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส อัตราการป้อน 5.90 มิลลิลิตรต่อ นาที 77
- รูปที่ 54. เส้นโค้งการคายซ้บของเมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีก ที่ความดันสุญญากาศ -0.4 ถึง -0.3 บาร์ อุณหภูมิ 110 และ 130 องศาเซลเซียส โดยป้อนเอทานอลไรรน้ำที่อัตราการป้อน 0.98, 1.97, และ 2.95 มิลลิลิตรต่อ นาที 78
- รูปที่ 55. เส้นโค้งการคายซ้บของวัสดุผสมถั่วลอยถ่านหินกับปูนซีเมนต์อัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร ที่ความดันสุญญากาศ -0.4 ถึง -0.3 บาร์ อุณหภูมิ 110 และ 130 องศาเซลเซียส โดยป้อนเอทานอลไรรน้ำที่อัตราการป้อน 0.98, 1.97, และ 2.95 มิลลิลิตรต่อ นาที 79
- รูปที่ 56. การเปรียบเทียบค่าคงที่ของสมการดูดซับไอน้ำ 81
- รูปที่ 57. ความสัมพันธ์ของอัตราการป้อนเอทานอลไรรน้ำที่มีต่ออัตราการลดลงของความเข้มข้นเอทานอลจนถึงจุดต่ำสุด เวลาที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจนถึง 98 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และปริมาตรของเอทานอลไรรน้ำที่ใช้ในการป้อนขณะเวลาที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจนถึง 98 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพื่อทำการคายซ้บไอน้ำออกจาก โมเลกุลาร์ซีฟ 3A ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ความดันสุญญากาศ -4 ถึง -3 บาร์ 84

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

- รูปที่ 58. ความสัมพันธ์ของอัตราการป้อนเอทานอลไร้น้ำที่มีต่ออัตราการลดลงของความเข้มข้นเอทานอลจนถึงจุดต่ำสุด เวลาที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจนถึง 98 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และปริมาตรของเอทานอลไร้น้ำที่ใช้ในการป้อนขณะเวลาที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจนถึง 98 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพื่อทำการคายซับ ใช้น้ำออกจากโมเลกุลาร์ซีฟ 3A ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ความดันสุญญากาศ -4 ถึง -3 บาร์ 84
- รูปที่ 59. ความสัมพันธ์ของอัตราการป้อนเอทานอลไร้น้ำที่มีต่ออัตราการลดลงของความเข้มข้นเอทานอลจนถึงจุดต่ำสุด เวลาที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจนถึง 98 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และปริมาตรของเอทานอลไร้น้ำที่ใช้ในการป้อนขณะเวลาที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจนถึง 98 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพื่อทำการคายซับ ใช้น้ำออกจากเมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีก ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ความดันสุญญากาศ -4 ถึง -3 บาร์ 85
- รูปที่ 60. ความสัมพันธ์ของอัตราการป้อนเอทานอลไร้น้ำที่มีต่ออัตราการลดลงของความเข้มข้นเอทานอลจนถึงจุดต่ำสุด เวลาที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจนถึง 98 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และปริมาตรของเอทานอลไร้น้ำที่ใช้ในการป้อนขณะเวลาที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจนถึง 98 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพื่อทำการคายซับ ใช้น้ำออกจากเมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีก ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ความดันสุญญากาศ -4 ถึง -3 บาร์ 85
- รูปที่ 61. ความสัมพันธ์ของอัตราการป้อนเอทานอลไร้น้ำที่มีต่ออัตราการลดลงของความเข้มข้นเอทานอลจนถึงจุดต่ำสุด เวลาที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจนถึง 98 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และปริมาตรของเอทานอลไร้น้ำที่ใช้ในการป้อนขณะเวลาที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจนถึง 98 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพื่อทำการคายซับ ใช้น้ำออกจากวัสดุผสมเถ้านหินกับปูนซีเมนต์ อัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ความดันสุญญากาศ -4 ถึง -3 บาร์ 86

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

- รูปที่ 62. ความสัมพันธ์ของอัตราการป้อนเอทานอลใรน้ำที่มีต่ออัตราการลดลงของความเข้มข้นเอทานอลจนถึงจุดต่ำสุด เวลาที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจนถึง 98 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และปริมาตรของเอทานอลใรน้ำที่ใช้ในการป้อนขณะเวลาที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจนถึง 98 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพื่อทำการคายซับ ใอน้ำออกจากวัสดุผสมเถ้าถ่านหินกับปูนซีเมนต์ อัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ความดันสุญญากาศ -4 ถึง -3 บาร์

DEVELOPMENT OF ANHYDROUS ETHANOL PROCESS BY USING MEMBRANE OR MOLECULAR SIEVE

**Teerapatr Srinorakutara, Suparp Artjariyasripong, Visanu Panphan,
Pongnarin Jamrak, Attasak Jaree, Thapparait Kunhanont, Yoothasak
Ratanasong, Lerdluk Kawvimol, and Wannaluk Baoban**

ABSTRACT

This research objective was comparing water vapor adsorption and desorption abilities of industrial anhydrous-ethanol adsorbent: molecular sieve 3A with local materials by using pressure swing fixed bed adsorber. In case of water vapor adsorption, adsorption isotherms (at 110 and 130 °C) and adsorptive breakthrough curves with the feed rate of ethanol (95.5 wt%) at 5.90, 7.86, and 9.83 ml/min were investigated. For water vapor desorption, desorptive breakthrough curves under vacuum of -0.4 to -0.3 bar with feed flow rate of anhydrous ethanol at 0.98, 1.97, and 2.95 ml/min at 110 and 130 °C were investigated. Different kinds of local material were tested primarily in order to determine their adsorptive breakthrough curves and to compare with the adsorptive breakthrough curve of molecular sieve 3A. The results showed that half grain glutinous corn and mixed fly ash and cement could adsorb water vapor from mixed vapor of ethanol and water. Consequently, they were used for water vapor adsorption and desorption ability testing under the same operating conditions as used for testing the molecular sieve 3A.

The results showed that water vapor adsorptive capacity of molecular sieve 3A was 2.9 times higher than that of half grain glutinous corn and 7.4 times higher than that of mixed fly ash and cement with the ratio of 3:1 by volume. These three kinds of adsorbent could produce 99.5 wt% ethanol and anhydrous ethanol could also be used for water vapor desorption from these adsorbents.

การพัฒนากระบวนการผลิตเอทานอลไร้น้ำโดยใช้ Membrane หรือ Molecular Sieve

ธีรภัทร ศรีนรบุตร¹, สุภาพ อัจฉริยศรีพงศ์¹, วิษณุ บัณฑิต¹, พงศนรินทร์ จำรัมย์¹, อรรถศักดิ์ จารีย์²,
เทพฤทธิ์ กัณหาหนที¹, ยุทธศักดิ์ รัตนสงฆ์¹, เฉลิมลักษณ์ แก้ววิมล¹ และวรรณลักษณ์ บัวบาน¹

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับและคายซับไอน้ำระหว่างสารดูดซับที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตเอทานอลไร้น้ำชนิดโมเลกุลาร์ซีฟ 3A กับวัสดุจากท้องถิ่นชนิดต่างๆ โดยทดสอบในเครื่องดูดซับแบบนิ่งแบบเปลี่ยนแปลงความดัน การทดสอบความสามารถในการดูดซับไอน้ำได้ทำการทดสอบหาสมมูลการดูดซับที่อุณหภูมิ 110 และ 130 องศาเซลเซียส กับเส้นโค้งการดูดซับโดยป้อนเอทานอลเข้มข้น 95.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วยอัตราการป้อน 5.90, 7.86, และ 9.83 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 110 และ 130 องศาเซลเซียส ส่วนการทดสอบความสามารถในการคายซับไอน้ำ ได้ทำการทดสอบหาเส้นโค้งการคายซับในสถานะสูญญากาศ -0.4 ถึง -0.3 บาร์ โดยป้อนเอทานอลไร้น้ำ ด้วยอัตราการป้อน 0.98, 1.97 และ 2.95 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 110 และ 130 องศาเซลเซียส วิธีการวิจัยได้มีการนำวัสดุจากท้องถิ่นชนิดต่างๆ มาทำการทดสอบเบื้องต้นโดยทดลองหาเส้นโค้งการดูดซับไอน้ำเปรียบเทียบกับเส้นโค้งการดูดซับไอน้ำของโมเลกุลาร์ซีฟ 3A พบว่า เมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีก และวัสดุผสมถั่วลอถอย ถ่านหินกับปูนซีเมนต์ มีความสามารถในการดูดซับไอน้ำจากไอผสมเอทานอลและน้ำ จึงได้นำมาทำการทดสอบหาความสามารถในการดูดซับและคายซับไอน้ำที่สภาวะต่างๆ เช่นเดียวกันกับการทดสอบโมเลกุลาร์ซีฟ 3A.

จากผลการทดสอบพบว่า ความจุในการดูดซับไอน้ำของโมเลกุลาร์ซีฟ 3A จะมากกว่าเมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีก 2.9 เท่า และมากกว่าวัสดุผสมถั่วลอถอยถ่านหินกับปูนซีเมนต์อัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร 7.4 เท่า สารดูดซับทั้งสามชนิดนี้สามารถทำให้เอทานอลเข้มข้นได้ถึง 99.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและสามารถใช้เอทานอลไร้น้ำป้อนเข้าเพื่อทำการคายซับไอน้ำได้เช่นเดียวกัน.

¹ ฝ่ายเทคโนโลยีชีวภาพ, สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)

² ภาควิชาวิศวกรรมเคมี, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1. บทนำ

ปัจจุบันปัญหาน้ำมันเชื้อเพลิงจากฟอสซิลที่กำลังจะหมดลงมีราคาแพงขึ้นมาก ทำให้มีความจำเป็นในการหาแหล่งพลังงานอื่นๆ มาทดแทนเชื้อเพลิงชนิดนี้ เอทานอลเป็นอีกทางเลือกหนึ่งซึ่งเป็นเชื้อเพลิงจากชีวภาพสามารถแปรรูปได้จากผลผลิตทางการเกษตร โดยใช้กระบวนการหมักผลิตผลจากพืชที่อุดมไปด้วยน้ำตาลหรือแป้งได้แก่ อ้อย, มันสำปะหลัง, ข้าวโพด เป็นต้น, ซึ่งประเทศไทยมีศักยภาพสูงเนื่องจากมีแหล่งวัตถุดิบทางการเกษตรที่อุดมสมบูรณ์. ปัจจุบันได้มีการนำเอทานอลไร้น้ำ (ความเข้มข้นสูงกว่า 99.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) มาผสมกับน้ำมันเบนซินด้วยสัดส่วนผสมต่างๆ ซึ่งเรียกว่าแก๊สโซฮอล์มาใช้งานกันอย่างแพร่หลายและมีแนวโน้มจะเพิ่มสัดส่วนของเอทานอลในน้ำมันผสมให้มากขึ้นอีกในอนาคต (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค), 2547).

ในการผลิตเอทานอลไร้น้ำเริ่มจากการหมักจนได้เอทานอลความเข้มข้น 8 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์, โดยถูกจำกัดจากการหยุดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในน้ำหมัก. จากนั้นจะผ่านเข้าสู่กระบวนการกลั่นจนได้เอทานอลความเข้มข้น 95.5 เปอร์เซ็นต์, โดยถูกจำกัดจากความเข้มข้นคงจุดเดือด (azeotropic concentration) ของสารละลายเอทานอลและน้ำ. สำหรับการผลิตเอทานอลไร้น้ำจากเอทานอล 95.5 เปอร์เซ็นต์ ที่ใช้กันอยู่ ปัจจุบันมีกระบวนการให้เลือกใช้ 3 รูปแบบ. รูปแบบแรกเป็นกระบวนการกลั่นโดยใช้สารชนิดที่สาม ซึ่งสารชนิดที่สามที่เคยนิยมใช้ในอุตสาหกรรมก็คือเบนซิน แต่เบนซินมีความเป็นพิษสูงอีกทั้งเป็นสารก่อมะเร็ง ปัจจุบันจึงเปลี่ยนมาใช้ไซโคลเฮกเซนซึ่งมีความปลอดภัยกว่า (ศรีนรคุตร, 2547). ส่วนสารประเภทเกลือของสารประกอบ เช่นเกลือโพแทสเซียมแอสซิเตดก็มีงานวิจัยที่นำมาใช้ในการผลิตเอทานอลไร้น้ำได้เช่นกัน (Ligero and Ravagnani, 2003). รูปแบบที่สองเป็นการใช้เมมเบรน ดังเช่นการทดลองโรงงานต้นแบบผลิตเอทานอลไร้น้ำที่ทำการทดลองโดยใช้เมมเบรนชนิด hollow-fiber ทดลองหาอัตราการกรองซึ่งสัมพันธ์กับจำนวนหน่วยกรอง, อุณหภูมิ และความดันที่ใช้, พบว่าสามารถใช้แทนกระบวนการกลั่นแบบเดิมขณะที่ค่าใช้จ่ายต่ำกว่า (Tsuyumoto *et al.*, 1997). ส่วนรูปแบบที่สามเป็นกระบวนการดูดซับโดยใช้สารดูดซับ โมเลกุลาร์ซีฟ 3A ซึ่งเป็นสารซีโอไลต์สังเคราะห์ (synthetic zeolite). สำหรับการนำโมเลกุลาร์ซีฟ 3A หรือ 4A มาใช้เป็นสารดูดซับไอน้ำออกจากไอผสมเอทานอลและน้ำที่สภาวะสมดุลนั้น พบว่า ทำให้ได้เอทานอลความเข้มข้นสูงกว่าความเข้มข้นคงจุดเดือด โดยการใชโมเลกุลาร์ซีฟ 3A มีแนวโน้มที่จะทำให้เอทานอลมีความเข้มข้นสูงกว่าการใช้โมเลกุลาร์ซีฟ 4A (Banat *et al.*, 2000). นอกจากนี้ได้มีการทดสอบเปรียบเทียบการดูด

ซัพของซีโอไลต์ประเภทต่างๆ โดยทำการวัดพารามิเตอร์ในการดูดซับไอของสารโทลูอินและเมทิลไซโคลเฮกเซนที่สภาวะสมดุล ช่วงอุณหภูมิ 400 ถึง 700 เคลวิน โดยใช้ซีโอไลต์ A, X และ Y รวมทั้งดินขาว, พบว่าซีโอไลต์ทุกประเภทจะมีการดูดซับที่ดีที่อุณหภูมิสูงก็ต่อเมื่อ ใช้ก๊าซตัวพาในโตรเจนด้วยอัตราการไหลที่สูง (Alpay *et al.*, 1996). และได้มีการทำการทดลองดูดซับไอน้ำจากไอผสมของเอทานอลและน้ำโดยป้อนเอทานอลที่ความเข้มข้นคงจุดเดือด โดยใช้ซีโอไลต์ชนิด A ประเภทต่างๆ เป็นสารดูดซับ, พบว่า ซีโอไลต์ 4A จะมีความจุไอน้ำที่สูงกว่า ซีโอไลต์ 3A ส่วนซีโอไลต์ 5A และ 10A ไม่มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงนั้น ส่งผลให้มีการเพิ่มการดูดซับเอทานอล และเอทานอลจะทำปฏิกิริยาเกิดผลผลิตข้างเคียงซึ่งไม่เป็นที่ต้องการ (Sowerby *et al.*, 1998). อีกทั้งมีการศึกษาการดูดซับไอน้ำในเครื่องดูดซับเบดนิ่งแบบเปลี่ยนแปลงความดันโดยใช้สารดูดซับโมเลกูลาร์ 3A, พบว่า สามารถนำมาใช้ผลิตเอทานอลไร้น้ำได้เมื่อใช้สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ (Carmo *et al.*, 2002). ส่วนแบบจำลองในการดูดซับไอน้ำจากไอผสมเอทานอลและน้ำของซีโอไลต์และคาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon nanotube, CNT) ได้ถูกเสนอขึ้นซึ่งพบว่า ภายใต้อุณหภูมิ และความดันบรรยากาศ ซีโอไลต์ประเภท MFI, MOR, CFI, และ DON สามารถดูดซับไอน้ำออกจากไอผสมของเอทานอล แต่ไอน้ำไม่สามารถถูกดูดซับโดย CNT ประเภทต่างๆ ยกเว้น CNT55 (Lu *et al.*, 2007). สารดูดซับประเภทถ่านกัมมันต์ (activated carbon) มีความสามารถแยกไอผสมระหว่างเอทานอลและน้ำ, โดยใช้คุณสมบัติไฮโดรโฟบิกของพื้นผิวดูดซับซึ่งทำให้ไอน้ำมีการคายซับออกจากรูพรุนของถ่านกัมมันต์ได้ดีกว่าไอของเอทานอล (Naono *et al.*, 1996). ในงานวิจัยเพื่อสังเคราะห์ซีโอไลต์ใช้เป็นสารดูดซับหรือใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้มีความพยายามที่จะใช้วัสดุจากท้องถิ่นจำพวกเถ้าลอยถ่านหิน (fly ash) ที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า และดินขาว (china clay), โดยเป็นวัสดุที่มีสารซิลิกาและอะลูมินาซึ่งเป็นวัตถุดิบสำคัญในการสังเคราะห์ซีโอไลต์เป็นองค์ประกอบในปริมาณที่สูง, จากนั้นได้ทำการหาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดผลึกซีโอไลต์เช่น อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินา, การใช้สารโครงสร้าง, อุณหภูมิ, ความดัน และระยะเวลาในการตกผลึก, ซึ่งพบว่าสามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ประเภท ZSM-5 และอื่นๆได้แต่ก็ยังมีประสิทธิภาพที่ยังต่ำ และเมื่อนำไปทดสอบใช้งานจริงก็ยังมีประสิทธิภาพที่ต่ำ เนื่องจากสารเจือปนบางชนิดเช่น ออกไซด์ของเหล็ก จากวัตถุดิบที่ยังปะปนอยู่ในโครงสร้างของซีโอไลต์ (ธีระพงษ์, 2542; นิรุติ, 2546; Sarbak *et al.*, 2004; Steenbruggen *et al.*, 1998).

สำหรับการใช้วัสดุดูดซับสังเคราะห์ เช่น ซีโอไลต์ ในอุตสาหกรรมนั้นก่อให้เกิดปัญหาในการกำจัดหลังจากหมดอายุใช้งานซึ่งจะต้องใช้วิธีการฝังกลบในดิน, ฉะนั้นวัสดุดูดซับทาง

การเกษตรจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจที่จะนำมาใช้ทดแทน เนื่องจากสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ และมีราคาต่ำกว่าวัสดุดูดซับที่ได้จากการสังเคราะห์, วัสดุทางการเกษตรหลายชนิดเช่น ฟางข้าว, ชานอ้อย, แปะงในเมล็ดข้าวโพด เป็นต้น มีความสามารถในการดูดซับไอน้ำออกจากไอของสารอินทรีย์ชนิดต่างๆ รวมทั้งไอของเอทานอลซึ่งทำให้ไอของเอทานอลมีความเข้มข้นสูงขึ้นมาสูงกว่าความเข้มข้นที่จุดควบจุดเดือด (Rahshit *et al.*, 1993; Ladisch, 1997). วัสดุดูดซับประเภท แปะงในเมล็ดข้าวโพดก็เป็นวัสดุดูดซับอีกประเภทหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ทดแทนซีโอไลต์ได้, เมื่อนำเมล็ดข้าวโพดมาใช้เป็นสารดูดความชื้นจากอากาศ โดยใช้เครื่องดูดซับเบดนิ่งแบบเปลี่ยนความดัน, พบว่าสามารถทำให้อากาศมีจุดน้ำค้างลดลงจนถึง -42 และ -69 องศาเซลเซียส เมื่อใช้เมล็ดข้าวโพดบดขนาด 2.16 และ 0.978 มิลลิเมตร ตามลำดับ และเมื่อนำเมล็ดข้าวโพดไปผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพโดยทำปฏิกิริยากับเอ็นไซม์อะไมเลส, พบว่าเมื่อใช้ดูดซับความชื้นจากอากาศ ทำให้อากาศมีจุดน้ำค้างลดต่ำลงอีกถึง -56 และ -80 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (Beery *et al.*, 1998). การทดลองดูดซับไอลผสมของเอทานอลและน้ำโดยใช้สารดูดซับเป็นเมล็ดข้าวโพดแห้งบดในเครื่องดูดซับเบดนิ่ง เพื่อหาเส้นโค้งการดูดซับไอน้ำที่ความสูงเบด และความเร็วไอลผสมเอทานอลและน้ำ ที่ใช้ป้อนเข้าที่ค่าต่างๆ, แล้วใช้ผลที่ได้นี้มาหาค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของคลินเคนเบอร์ก ซึ่งพบว่าสามารถนำมาใช้ในการทำนายความเข้มข้นเอทานอลที่ออกจากเบดที่เวลาต่างๆ ได้ (Chang *et al.*, 2006).

ในงานวิจัยนี้ ทำการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับและคายซับไอน้ำระหว่างสารดูดซับที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตเอทานอลไร้น้ำชนิดโมเลกุลาร์ซีฟ 3A กับวัสดุจากท้องถิ่นชนิดต่างๆ 10 ชนิด คือ ดินขาวอบแห้ง, ดินขาวเผาที่อุณหภูมิ 500 และ 1,200 องศาเซลเซียส, ปูนซีเมนต์ ถ้าวาลอยถ่านหินผสมปูนซีเมนต์ ด้วยอัตราส่วน 1 ต่อ 1 และ 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร, เมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวเต็มเมล็ด, เมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีก, ฟางข้าว และชานอ้อย. โดยใช้เครื่องดูดซับเบดนิ่งแบบเปลี่ยนแปลงความดัน (pressure swing fixed bed adsorber) ซึ่งสารดูดซับแต่ละชนิดนั้นมีความสามารถในการดูดซับและการคายซับแตกต่างกันไป. ในกรณีที่สารดูดซับจากวัสดุท้องถิ่นสามารถนำมาใช้ทดแทนสารดูดซับสังเคราะห์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมได้ จะทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการซื้อสารดูดซับสังเคราะห์ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศซึ่งมีราคาแพงกว่ามากได้.

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ทดสอบหาสมมูลการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่, เส้นโค้งการดูดซับ และเส้นโค้งการคายซับ ไออน้ำ, ที่สภาวะต่างๆ ของสารดูดซับที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเอทานอลไร้น้ำชนิดโมเลกุลาร์ซีฟ 3A ในเครื่องดูดซับเบดนิ่งแบบเปลี่ยนแปลงความดัน.

2. ทดสอบเส้นโค้งการดูดซับ ไออน้ำจากไอผสมเอทานอลและน้ำของวัสดุจากท้องถิ่นชนิดต่างๆ เปรียบเทียบกับ โมเลกุลาร์ซีฟ 3A.

3. ทดสอบหาสมมูลการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่, เส้นโค้งการดูดซับ และเส้นโค้งการคายซับ ไออน้ำของสารดูดซับจากวัสดุท้องถิ่นที่มีศักยภาพในการผลิตเอทานอลไร้น้ำ, โดยใช้สภาวะต่างๆ เช่นเดียวกับการทดสอบ โมเลกุลาร์ซีฟ 3A ในเครื่องดูดซับเบดนิ่งแบบเปลี่ยนแปลงความดัน.

4. เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับและคายซับ ไออน้ำ ของสารดูดซับ โมเลกุลาร์ซีฟ 3A กับวัสดุจากท้องถิ่นที่มีศักยภาพใช้เป็นสารดูดซับในการผลิตเอทานอลไร้น้ำ.

3. ขอบเขตของงานวิจัย

1. จัดสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบสารดูดซับในกระบวนการผลิตเอทานอลไร้น้ำ
2. ทดสอบหาสมมูลการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่, เส้นโค้งการดูดซับ และเส้นโค้งการคายซับ ใอน้ำของสารดูดซับที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเอทานอลไร้น้ำชนิดโมเลกุลาร์ซีฟ 3A, โดยใช้สภาวะต่างๆ ดังนี้คือ:-

การทดสอบสมมูลการดูดซับ

- อัตราการป้อนเอทานอล 4.91 มิลลิลิตรต่อนาที
- อุณหภูมิ 110 และ 130 องศาเซลเซียส
- ความเข้มข้นของเอทานอลที่สภาวะสมมูล 95 ถึง 99 เปอร์เซ็นต์

การทดสอบหาเส้นโค้งการดูดซับ

- ความเข้มข้นของเอทานอลที่ป้อน 95.5 เปอร์เซ็นต์
- อัตราการป้อน 5.90, 7.86 และ 9.83 มิลลิลิตรต่อนาที
- อุณหภูมิ 110 และ 130 องศาเซลเซียส

การทดสอบหาเส้นโค้งการคายซับ

- ป้อนเอทานอลไร้น้ำซึ่งมีความเข้มข้น 99.9 เปอร์เซ็นต์
- อัตราการป้อน 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ของอัตราการป้อนสูงสุด (9.83 มิลลิลิตรต่อนาที)
- อุณหภูมิ 110 และ 130 องศาเซลเซียส
- ความคุมความดันสูญญากาศในช่วง -0.4 ถึง-0.3 บาร์

3. ทดสอบหาเส้นโค้งการดูดซับของสารดูดซับจากวัสดุท้องถิ่นประเภทต่างๆ คือ ดินขาวอบแห้ง, ดินขาวเผาที่อุณหภูมิ 500 และ 1,200 องศาเซลเซียส; ปูนซีเมนต์, ถ้ำลอยถ่านหินผสมปูนซีเมนต์ ด้วยอัตราส่วน 1 ต่อ 1 และ 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร; เมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวเต็มเมล็ด; เมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีก; ฟางข้าว และชานอ้อย. โดยใช้สภาวะในการทดสอบเหมือนกับสภาวะที่ให้ความเข้มข้นเอทานอลสูงสุดเมื่อใช้โมเลกุลาร์ซีฟ 3A เป็นสารดูดซับ.

4. ทดสอบหาสมมูลการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่, เส้นโค้งการดูดซับ และเส้นโค้งการคายซับ
ไอน้ำของสารดูดซับจากวัสดุท้องถิ่นที่มีศักยภาพในการผลิตเอทานอลไร้น้ำ, โดยใช้สภาวะต่างๆ
เช่นเดียวกับการทดสอบโมเลกุลาร์ซีฟ 3A.

4. การตรวจเอกสาร

ความหมายของการดูดซับ

เมื่อโมเลกุลหรืออะตอมของสารที่เป็นแก๊ส (หรือของเหลว) เกิดการสัมผัสแล้วถูกดูดซับโดยสารที่เป็นของแข็ง, เราเรียกโมเลกุลหรืออะตอมของสารที่เป็นแก๊สนี้ว่า สารถูกดูดซับ (adsorbate), ส่วนสารที่เป็นของแข็งจะเรียกว่า สารดูดซับ (adsorbent). ถ้าสารถูกดูดซับไม่ได้หยุดนิ่งอยู่ที่พื้นผิวสัมผัสเท่านั้นแต่มีการแพร่เข้าสู่ภายในของสารดูดซับแล้ว จะเรียกปรากฏการณ์เช่นนี้ว่าการดูดซึม (absorption). ถ้าปรากฏการณ์การดูดซับและการดูดซึมเกิดขึ้นพร้อมกันจะเรียกว่า sorption หรือ uptake.

ผู้ค้นพบปรากฏการณ์การดูดซับเป็นคนแรก คือ Scheele ในปี พ.ศ. 2316 ที่ได้เขียนบันทึกปรากฏการณ์การดูดซับของแก๊สบนถ่านไม้ลงในจดหมายที่ส่งให้เพื่อน และในปี พ.ศ. 2425 ได้เริ่มมีการเขียนคำศัพท์ “การดูดซับ (adsorption)” กับ “การควบแน่น (condensation)” แยกแยะ.

ปริมาณการดูดซับ หมายถึงจำนวนโมเลกุล (หรืออะตอม) หรือปริมาตรที่สภาวะมาตรฐาน หรือน้ำหนัก หรือมวลของสารถูกดูดซับต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวหรือหนึ่งหน่วยมวลของสารดูดซับ. ส่วนปริมาณการดูดซับที่สภาวะอิ่มตัว หมายถึง ปริมาณของสารถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวทั้งหมดของของแข็ง. สำหรับสัดส่วนของการดูดซับ (coverage) หมายถึง สัดส่วนของปริมาณของสารถูกดูดซับที่ถูกดูดซับจริงต่อปริมาณของสารถูกดูดซับที่สภาวะอิ่มตัว (อักษรทิวา 2546)

สารดูดซับในอุตสาหกรรม

สารดูดซับหลายชนิดในอุตสาหกรรมถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในกระบวนการแยกต่างๆ กัน. โดยทั่วไปจะเป็นเม็ดเล็กๆ มีรูพรุนกลม, ทรงกระบอก หรือเป็นเกล็ด มีขนาดอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 12 มิลลิเมตร, สารดูดซับที่มีขนาดใหญ่มักจะถูกใช้ในเครื่องดูดซับเบดนิ่ง. สารดูดซับเป็นสารที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนและขนาดของรูพรุนเล็กมากๆ มีปริมาตรของช่องว่างมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรรวม, การดูดซับมักจะเกิดอยู่บนพื้นผิวชั้นแรกถึงแม้ว่าอาจจะเกิดกับชั้นลำดับต่อไปบ้าง. การดูดซับเชิงกายภาพหรือการดูดซับแวนเดอร์วาลส์ มักจะเกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับกับพื้นผิวภายในของสารดูดซับที่เป็นของแข็ง ซึ่งจะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบอ่อนๆ ง่ายในการที่จะคายซับออกมาในสภาวะที่เหมาะสม. การดูดซับทั้งกระบวนการประกอบไปด้วย

ขั้นตอนย่อยๆ หลายขั้นตอนเกิดขึ้นเป็นลำดับต่อเนื่องกัน. เมื่อของผสมไหลผ่านเบดของสารดูดซับ สารถูกดูดซับในของผสมจะแพร่เข้าสู่ผิวชั้นนอกของสารดูดซับ แล้วแพร่ต่อไปเข้าสู่ในรูพรุนไปยังพื้นผิวดูดซับภายในของสารดูดซับ แล้วจึงถูกดูดซับไว้ที่พื้นผิวดูดซับภายในรูพรุนนี้.

สารดูดซับที่ใช้ในอุตสาหกรรมจะมีพื้นที่ผิวในการดูดซับอยู่ระหว่าง 100 - มากกว่า 2,000 ตารางเมตรต่อกรัม มีประเภทต่างๆ คือ:-

1. ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) เป็นวัสดุที่มีโครงสร้างผลึกเล็กระดับไมครอน สังเคราะห์ได้จากไม้ชนิดต่างๆ, ถ่านหิน และอื่นๆ โดยใช้กระบวนการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากการให้ความร้อน. จะมีพื้นที่ผิวอยู่ในช่วง 300 ถึง 1,200 ตารางเมตรต่อกรัม, เส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงช่องว่างโดยเฉลี่ย 10 ถึง 60 อังสตรอม มักจะใช้ในการดูดซับไอระเหยของสารอินทรีย์.

2. ซิลิกาเจล (silica gel) ถูกสังเคราะห์ขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตกับกรด แล้วนำไปอบแห้ง, จะมีพื้นที่ผิวอยู่ในช่วง 600 ถึง 800 ตารางเมตรต่อกรัม, เส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงช่องว่างโดยเฉลี่ย 20 ถึง 50 อังสตรอม, มักจะใช้ในการดูดซับความชื้นจากอากาศและไอของสารไฮโดรคาร์บอนชนิดต่างๆ.

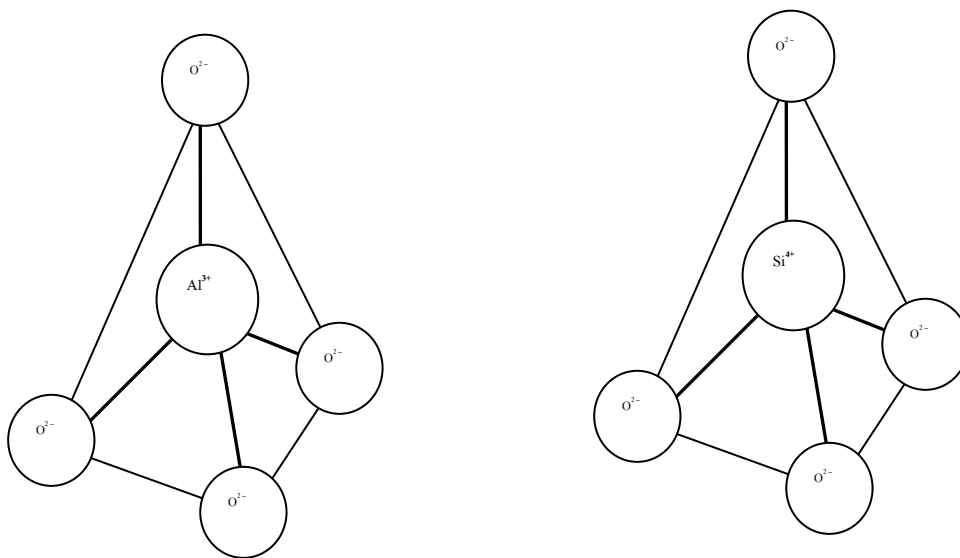
3. อะลูมินากัมมันต์ (activated alumina) เป็นวัสดุที่เตรียมขึ้นจากการกระตุ้น hydrated aluminum oxide โดยให้ความร้อนในการกำจัดน้ำออกจากโมเลกุล จะมีพื้นที่ผิวอยู่ในช่วง 200 ถึง 500 ตารางเมตรต่อกรัม, เส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงช่องว่างโดยเฉลี่ย 20 ถึง 140 อังสตรอม. มักจะใช้ในการดูดซับความชื้นจากไอและของเหลวของสารไฮโดรคาร์บอนชนิดต่างๆ.

4. พอลิเมอร์หรือเรซินสังเคราะห์ (synthetic polymer or resin) ถูกสังเคราะห์ขึ้นจากกระบวนการพอลิเมอไรส์ของโมโนเมอร์ตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปซึ่งมักจะเป็นสารแอมโรแมติก, เช่น เรซินจาก styrene และ divinylbenzene ถูกใช้ในการดูดซับไอของสารอินทรีย์ที่ไม่มีขั้วจากสารละลายอินทรีย์. เรซินจาก acrylic esters ถูกใช้ในการดูดซับไอของสารอินทรีย์ที่มีขั้วสูงจากสารละลายอินทรีย์.

5. ซีโอไลต์โมเลกุลาร์ซีฟ (molecular sieve zeolite) ซีโอไลต์เป็นสารดูดซับที่มีโพรงช่องว่างอันเกิดจากโครงสร้างผลึกของอะลูมิโนซิลิเกต. โพรงช่องว่างเหล่านี้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางค่อนข้างจะสม่ำเสมอ จึงทำให้เกิดความแตกต่างอย่างชัดเจนจากสารดูดซับประเภทอื่นๆ ที่มีช่วงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกันมาก. ซีโอไลต์ประเภทต่างๆ จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโพรงช่องว่างประมาณ 3 ถึง 10 อังสตรอม จึงถูกนำไปประยุกต์ใช้งานในกระบวนการแยกหลายกระบวนการ, รวมทั้งใช้ทำตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีต่างๆ ด้วย (Geankoplis, 2003).

ซีโอไลต์ (Zeolite)

ซีโอไลต์เป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตที่มีรูปผลึกหลายแบบ, มีทั้งเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและเกิดจากการสังเคราะห์ขึ้น. ซีโอไลต์ประกอบด้วยโครงสร้างอะลูมินา $[AlO_4]^-$ และซิลิเกต $[SiO_4]^+$ ซึ่งรวมตัวกันเรียกว่า สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตหรืออะลูมินาซิลิกา. โครงสร้างอะลูมินาและซิลิเกตเป็นแบบทรงสี่หน้า (tetrahedron), ดังแสดงในรูปที่ 1.



(ก) โครงสร้างของอะลูมินา

(ข) โครงสร้างของซิลิเกต

รูปที่ 1. โครงสร้างแบบทรงสี่หน้าของสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต.

โครงสร้างของอะลูมินาและซิลิเกตถูกเชื่อมโยงเข้าด้วยกันโดยใช้ออกซิเจน, ซึ่งเป็นอะตอมอยู่ตรงมุมของโครงสร้างทรงสี่หน้า ทำให้เกิดเป็นซีโอไลต์ที่มีลักษณะเป็นโพรง, ซึ่งโพรงดังกล่าวเป็นส่วนที่ทำให้โมเลกุลของน้ำ และสารประกอบหลายชนิดสามารถเข้าไปเกาะติดบนพื้นผิวของโพรง. ความสามารถของซีโอไลต์ในการดูดซับโมเลกุลของน้ำ ทำให้ซีโอไลต์ถูกนำไปใช้เป็นสารดูดความชื้น (desiccating agent).

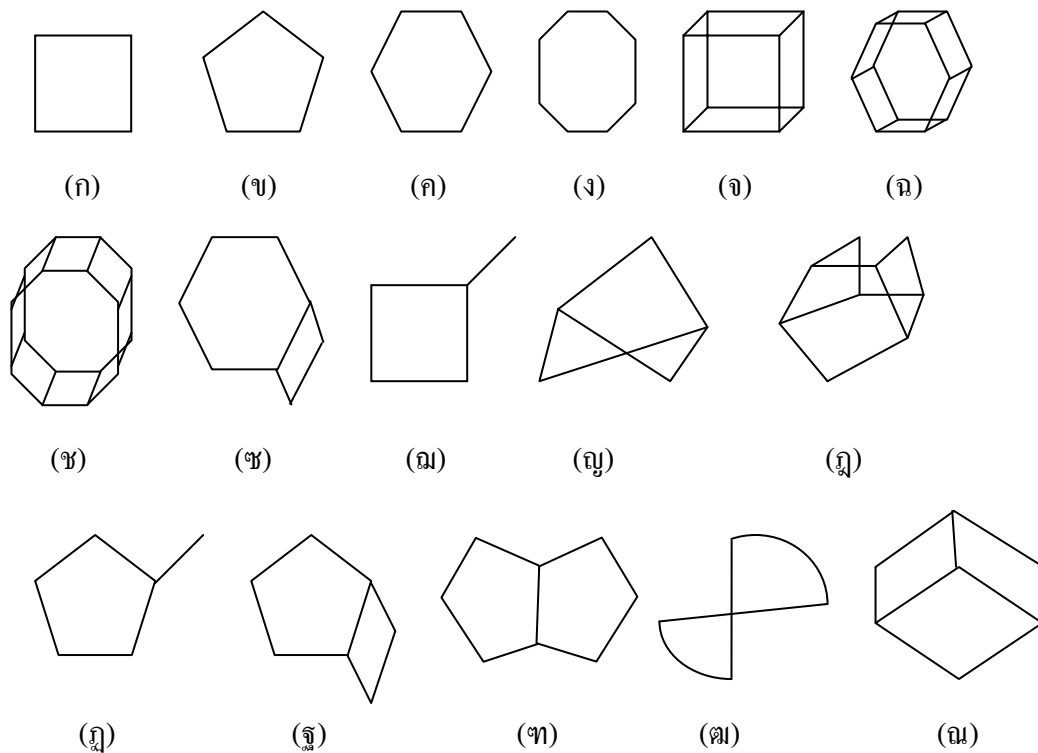
ซีโอไลต์เป็นชื่อที่มาจากรากศัพท์ภาษากรีก ซึ่งแปลว่าหินเดือด (boiling stone) หรือมาจากคำว่า Zeo (to boil) รวมกับคำว่า lithose (stone). สาเหตุเนื่องจากหากนำเอาซีโอไลต์ที่เกิดในธรรมชาติ และมีความชื้นสูงๆ นำมาเผาด้วยความร้อน, พบว่า ซีโอไลต์สามารถเดือดได้ ซึ่งเป็นการเดือดของน้ำที่ถูกดูดซับอยู่บนผิวของซีโอไลต์ จึงเสมือนว่าซีโอไลต์เป็นของแข็งที่สามารถเดือด

ได้. ดังนั้น ในสมัยก่อนจึงเรียกหินเดือดว่า “ซีโอไลต์”. อย่างไรก็ตาม การให้ความร้อนแก่ซีโอไลต์ที่ดูดซับน้ำไว้ในโพรงเป็นการไล่น้ำออกที่สามารถทำได้ง่าย. ส่วนซีโอไลต์ที่เกิดจากการสังเคราะห์มีด้วยกันมากมายหลายชนิด ซึ่งขึ้นอยู่กับผลึกของอะลูมิโนซิลิเกตมีไอออนประกอบ (counter part) เป็นชนิดใด. สำหรับซีโอไลต์สังเคราะห์ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีได้แก่ ซีโอไลต์ A ซึ่งมีประโยชน์โดยการนำไปใช้เป็นตัวกรองระดับโมเลกุลหรือโมเลกุลาร์ซีฟ (molecular sieve), โดยการคัดเลือกขนาดของโพรงที่ใกล้เคียงกันของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ขึ้น โดยมีชื่อว่า ซีโอไลต์ 3A, 4A และ 5A ซึ่งมีขนาดเฉลี่ยของโพรงในซีโอไลต์ A ที่แตกต่างกัน.

โครงสร้างของซีโอไลต์

เท่าที่มีการสำรวจค้นคว้าพบโครงสร้างของซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติจำนวน 39 ชนิด, ซีโอไลต์ที่ได้จากการสังเคราะห์ขึ้นอีกกว่า 100 ชนิด ซึ่งไม่รวมถึงซีโอไลต์ที่ยังไม่ทราบโครงสร้างที่แน่นอนอีกเป็นจำนวนมาก. อย่างไรก็ตาม ในทางอุตสาหกรรมนิยมใช้ซีโอไลต์ที่ได้จากการสังเคราะห์มากกว่าซีโอไลต์จากธรรมชาติ.

การเกิดโครงสร้างของสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต เป็นการต่อกันของโครงสร้างแบบทรงสี่หน้า ซึ่งสามารถต่อให้เป็นแบบโครงสร้างพื้นฐานแบบต่างๆ ได้ 16 แบบ, ซึ่งเรียกว่าหน่วยประกอบลำดับที่สอง (secondary building unit : sbu) หรือเรียกว่า เอสบียู (sbu), ดังแสดงในรูปที่ 2.



รูปที่ 2. โครงสร้างโดยหน่วยเอสปียู และชื่อย่อของแต่ละโครงสร้าง (ก) single four ring, S4R.

- (ข) single five ring, S5R (ค) single six ring, S6R (ง) single eight ring, S8R
 (จ) double four ring, D4R (ฉ) double six ring, D6R (ช) double eight ring, D8R
 (ซ) โครงสร้างเชิงซ้อน 6-2 (ฅ) โครงสร้างเชิงซ้อน 4-1 (ญ) โครงสร้างเชิงซ้อน 4=1
 (ฎ) โครงสร้างเชิงซ้อน 4-4=1 (ฏ) โครงสร้างเชิงซ้อน 5-1 (ฐ) โครงสร้างเชิงซ้อน 5-2
 (ฑ) โครงสร้างเชิงซ้อน 5-3 (ฒ) โครงสร้างสไปโร 5 (ณ) โครงสร้างเชิงซ้อน 6=1

ที่มา: เรื่องพรวิสุทธิ์ (2547)

การจำแนกประเภทของซีโอไลต์โดยหน่วยเอสปียู

โครงสร้างของซีโอไลต์อาจแบ่งได้หลายลักษณะตามพื้นฐานของหน่วยเอสปียู ได้แก่ (1) ชนิดหน่วยเอสปียู; (2) ชนิดโครงสร้างตามแบบของ IUPAC; (3) โดยชื่อนำหน้าของซีโอไลต์ (4); ชนิดของยูนิตเซลล์. การแบ่งประเภทของซีโอไลต์ตามลักษณะโครงสร้างโดยใช้พื้นฐานชนิดวงแหวนเดี่ยว, วงแหวนคู่ และโครงสร้างเชิงซ้อนได้แสดงในตารางที่ 1.

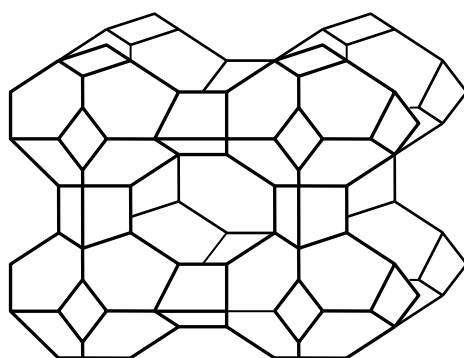
ตารางที่ 1. โครงสร้างของซีโอไลต์โดยใช้พื้นฐานของหน่วยเอสบียู

ชนิดหน่วยเอสบียู	ชนิดโครงสร้าง	ชื่อซีโอไลต์	สูตรยูนิตเซลล์
ชนิดวงแหวนเดี่ยว			
S4A	ANA	Analcime	$\text{Na}_{16}\text{Al}_{16}\text{Si}_{32}\text{O}_{96}\cdot 10\text{H}_2\text{O}$
	ANA	Wairakite	$\text{Ca}_8\text{Al}_{16}\text{Si}_{32}\text{O}_{96}\cdot 16\text{H}_2\text{O}$
	GIS	Amicite	$\text{K}_4\text{Na}_4\text{Al}_8\text{Si}_8\text{O}_{32}\cdot 10\text{H}_2\text{O}$
	GIS	Zeolite NaP-1	$\text{Na}_6\text{Al}_6\text{Si}_{10}\text{O}_{32}\cdot 12\text{H}_2\text{O}$
S6R	CAN	Cancrinite	$\text{Na}_6\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}\cdot 8\text{H}_2\text{O}$
	SOD	Sodalite	$\text{Na}_6\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}\cdot 8\text{H}_2\text{O}$
ชนิดวงแหวนคู่			
D4R	LTA	Zeolite A	$\text{Na}_{12}\text{Al}_{12}\text{Si}_{12}\text{O}_{48}\cdot 27\text{H}_2\text{O}$
D6R	FAU	Faujasite	$\text{Na}_{12}\text{Ca}_{12}\text{Mg}_{11}\text{Al}_{58}\text{Si}_{134}\text{O}_{384}\cdot 235\text{H}_2\text{O}$
	FAU	Zeolite X	$\text{Na}_{88}\text{Al}_{88}\text{Si}_{104}\text{O}_{384}\cdot 220\text{H}_2\text{O}$
ชนิดโครงสร้างเชิงซ้อน			
4-1	NAT	Mesolite	$\text{Na}_{16}\text{Ca}_{16}\text{Al}_{48}\text{Si}_{72}\text{O}_{240}\cdot 64\text{H}_2\text{O}$
	THO	Thomsonite	$\text{Na}_4\text{Ca}_8\text{Al}_{20}\text{Si}_{20}\text{O}_{80}\cdot 24\text{H}_2\text{O}$
5-1	MFI	Zeolite ZSM-5	$\text{Na}_n\text{Al}_n\text{Si}_{96-n}\text{O}_{192}\cdot 16\text{H}_2\text{O}$ (n=3)
	MOR	Mordenite	$\text{Na}_8\text{Al}_8\text{Si}_{40}\text{O}_{96}\cdot 24\text{H}_2\text{O}$
4-1-1	BRE	Brewsterite	$\text{Sr}_2\text{Al}_4\text{Si}_{12}\text{O}_{32}\cdot 10\text{H}_2\text{O}$
	STI	Stellerite	$\text{Ca}_4\text{Al}_8\text{Si}_{28}\text{O}_{72}\cdot 28\text{H}_2\text{O}$

ที่มา: เรื่องพรวิสุทธิ (2547)

รูปทรงทางเรขาคณิตของซีโอไลต์ A

ซีโอไลต์ A ประกอบด้วยหน่วยโซดาไลต์ ซึ่งหน่วยโซดาไลต์นี้จะประกอบเป็นโครงสร้างรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่เรียกว่าคิวโบออกตะฮีดรอน ดังแสดงในรูปที่ 3.

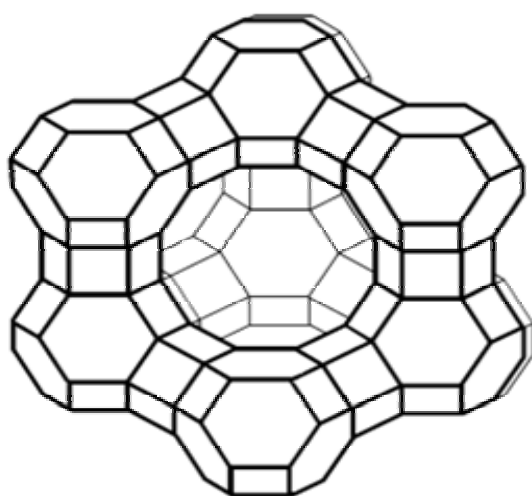


รูปที่ 3. ซีโอไลต์ A ที่มีโครงสร้างเป็นกรงโซดาไลต์.

ที่มา: เรื่องพรวิสุทธิ (2547)

รูปทรงทางเรขาคณิตของซีโอไลต์ X และ Y

ซีโอไลต์สังเคราะห์ประเภท ซีโอไลต์ X และ Y เป็นโครงสร้างที่เหมือนกับโครงสร้างที่มีในธรรมชาติซึ่งเรียกว่า โฟเยไซต์ (faujasite). ดังนั้นการสังเคราะห์ซีโอไลต์ X และ Y จึงถูกกำหนดให้เป็นโครงสร้างแบบโฟเยไซต์ ดังแสดงในรูปที่ 4. โดยโพรงซีโอไลต์ X และ Y มีลักษณะเป็นวงแหวน 12 เหลี่ยม, มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 11.8 อังสตรอม.



รูปที่ 4. โครงสร้างของซีโอไลต์ X.

ที่มา: เรื่องพรวิสุทธิ (2547)

ขนาดที่เป็นมิติของ โครงสร้างซีโอไลต์ที่พบโดยทั่วไปนั้นมามีค่าต่างๆ กัน, ดังแสดงเป็น ตัวอย่างในตารางที่ 2.

ตารางที่ 2. ค่ามิติของโครงสร้างซีโอไลต์ที่พบโดยทั่วไป

ซีโอไลต์	จำนวนช่อง	ขนาดของช่อง (Å)	ปริมาตร (มล./ก.)	แบบ	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (Å ^o)
Zeolite A	6	2.3	0.47	ทรงบิดา	6.6
	8	4.5	-	ทรงอัลฟา	11.4
Zeolite X	6	2.3	0.53	ทรงอัลฟา	11.8
	12	7.8	-	-	
Zeolite L	12	7.1	0.28	-	
Mordenite	12	6.7 x 7.0	0.26	-	
	8	2.8 x 5.7	-	-	
ZSM-5	10	5.6 x 5.4	0.32	-	

ที่มา: เรื่องพรวิสุทธิ (2547)

วัสดุจากท้องถิ่นที่สามารถนำมาใช้เป็นสารดูดซับ

ดินขาว

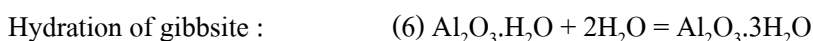
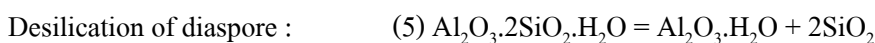
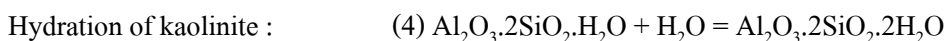
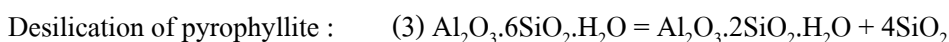
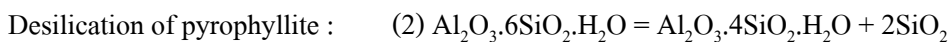
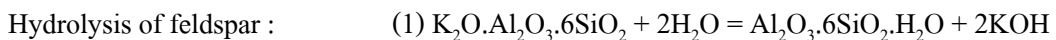
ดินขาว (Kaolin) ซึ่งมีรากศัพท์มาจากภาษาจีนว่า เกาเลียง (Kao Liang), เป็นชื่อของภูเขาที่มียอดแหลม (high ridge) บางครั้งนิยมเรียกว่า China-Clay เพื่อเป็นเกียรติแก่ประเทศจีน ซึ่งเป็นผู้นำดินขาวมาใช้เป็นประเทศแรก.

ดินขาว เป็นดินที่เกิดจากแร่อะลูมิเนียมซิลิเกต (aluminosilicate) ที่เป็นโครงสร้างของหินชนิดต่างๆ เช่น หินฟันม้า (feldspar), ไมกา (mica), หินควอตซ์ (quartz), หินปูน (lime stone) เป็นต้น ดินขาวมักจะเกิดบนที่ราบสูงทั่วไป บางแห่งอาจพบใกล้แหล่งน้ำในที่ราบลุ่ม. เนื่องจากการพัดพาของกระแสน้ำ ทำให้มีสีขาวหม่นค่อนข้างเป็นสีเทาบ้าง, สีเหลืองอ่อนบ้าง. สิ่งปนเปื้อนต่างๆ ในดินขาวได้แก่ แคลเซียม (calcium), แมกนีเซียม (magnesium), โซเดียม (sodium) และโพแทสเซียม (potassium), ทำให้ความบริสุทธิ์ของดินขาวน้อยลง. การใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายสูงหรือเครื่องวิเคราะห์เอกซเรย์ จะพบว่าเม็ดดินขาวมีลักษณะเป็นผลึกแผ่นสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนหรือแท่งหกเหลี่ยม.

ดินขาวที่พบในประเทศไทยมี 2 ชนิด ซึ่งจำแนกความแตกต่างตามสารประกอบทางเคมีที่มีองค์ประกอบหลักดังนี้:

1. ดินขาวที่มีองค์ประกอบของสารอะลูมิเนียมซิลิเกต

ดินขาวชนิดนี้ เกิดจากการแปรสภาพของหินแกรนิตที่ผุพังโดยบรรยากาศและสภาพแวดล้อมอื่นๆ จนกลายเป็นดินขาวอยู่ในแหล่งเดิม. กระบวนการเกิดดินขาวชนิดนี้ มีขั้นตอนของปฏิกิริยาต่างๆ ดังนี้:



จากกระบวนการข้างต้น ทำให้ดินขาวชนิดนี้ มีสารประกอบที่เจือปนหลายชนิด ได้แก่ alumina, silica, iron oxide, calcium oxide, magnesium oxide, sodium oxide และ potassium oxide ที่ยังไม่เปลี่ยนแปลงสภาพโดยสมบูรณ์. เมื่อนำมาล้าง จึงปรากฏสิ่งตกค้างบนตะแกรงที่มีเม็ดหยาบ, บางแห่งจะพบว่าเป็นเม็ดหินหรือเม็ดทรายอย่างชัดเจน.

ดินขาวที่มีสารประกอบของอะลูมิเนียมซิลิเกต ดังแสดงในรูปที่ 5, เมื่อนำมาผสมกับน้ำ จะมีความเหนียวสามารถขึ้นรูปทรงได้. เมื่อนำมาเผาถึงอุณหภูมิตั้งแต่ 800 องศาเซลเซียสขึ้นไป จะแข็งตัวคงรูปอยู่ได้, ไม่แตกยุ่ย, สามารถนำมาผสมกับวัตถุดิบอื่นๆ เพื่อเป็นเนื้อดินปั้น (bodies) หรือผสมน้ำเคลือบได้ดี. ส่วนการตรวจสอบดินขาวที่มีสารประกอบของอะลูมิเนียมซิลิเกต โดยใส่หลอดทดลองแล้วเติมโคบอลต์ไนเตรด (CoNO_3) ลงไปเล็กน้อย เพื่อให้เกิดความชื้น, แล้วนำไปเผาด้วยตะเกียงแอลกอฮอล์จะปรากฏสีน้ำเงินขึ้น.

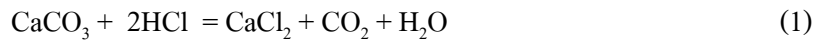


รูปที่ 5. ลักษณะของดินขาวที่มีสารประกอบของอะลูมิเนียมซิลิเกต.

2. ดินขาวที่มีสารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต

ดินขาวที่มีสารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต เกิดจากการแปรสภาพของหินปูนที่ผุพัง โดยบรรยากาศ และสภาวะแวดล้อมอื่นๆ จนกลายเป็นดินขาว. ดินขาวชนิดนี้สามารถนำมาทำแป้ง ผัดหน้า ที่เรียกว่า “ดินสอพอง (marl)”, ทำปุ๋ยใส่ต้นไม้ จากการที่มีธาตุโพแทสเซียมและโซเดียมเจือปน. ลักษณะของดินขาวที่มีสารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต ดังแสดงในรูปที่ 6. การตรวจสอบดินขาวที่มีสารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต, ทำโดยการหยดกรดเกลือเข้มข้นลงไป

จะเกิดฟองก๊าซอย่างรุนแรงเนื่องจากกรดเข้าไปทำปฏิกิริยากับแคลเซียมคาร์บอเนต ทำให้เกิดเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, ดังปฏิกิริยาที่ได้แสดงในสมการที่ (1);-



รูปที่ 6. ลักษณะของดินขาวที่มีสารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต.

แหล่งดินขาวในประเทศ

แหล่งดินขาวที่มีสารประกอบของอะลูมิเนียมซิลิเกต ที่พบเป็นแหล่งใหญ่ ได้แก่

1. แหล่งดินขาวอำเภอแจ้ห่ม จังหวัดลำปาง

ดินขาวแหล่งนี้พบที่เขাপางค่า หรือเรียกชื่อตามพื้นบ้านว่า “ม่อนดินขาว” หรือ “ม่อนดี หิน”. ที่เรียกเช่นนี้ เนื่องจากเป็นแหล่งที่มีดินขาวเกิดปะปนอยู่กับหินที่ผุพัง และมีหินดินดานค่อนข้างแข็งแแรง, ชาวบ้านแถบนั้นนำหินดินดานมาใช้ทำหินลับมีด. ดินขาวแหล่งนี้เกิดจากการผุพัง, การสลายตัวของหินฟันม้า ที่แปรสภาพมาจากหิน liperite, จึงทำให้มีปริมาณของหินแข็งปะปนอยู่มาก. ดินขาวที่เกิดในแหล่งนี้จะเกิดการสะสมตัวอยู่บนไหล่เขาตอนบน, ความหนาไม่เกิน 5 เมตร และมีพืดดินปกปิดตอนบนหนาประมาณ 0.5 เมตร. ดินขาวนี้มีสีและลักษณะที่แตกต่างกัน คุณลักษณะของดินขาวแหล่งนี้มีลักษณะเป็นก้อนแข็ง, เวลาล้างจมตัวดี, เนื้อดินที่ล้างได้ประมาณ 34-68 เปอร์เซ็นต์. สีของดินมีสีขาวเหลืองถึงสีเทาอ่อน. ในช่วงอุณหภูมิ 800-1,300 องศาเซลเซียส มีการหดตัว 3.4-12.0 เปอร์เซ็นต์ และการดูดซึมน้ำ 7.8-22.9 เปอร์เซ็นต์. ขนาดของเม็ดดิน 3-20 ไมครอน, ความทนไฟ 1,621 องศาเซลเซียส, ความแข็งแรง 136 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว, เมื่อแขวนลอยในน้ำมีค่าพีเอชเท่ากับ 8.3.

2. แหล่งดินขาว ตำบลหาดส้มแป้น จังหวัดระนอง

ดินขาวแหล่งนี้พบอยู่ในบริเวณเหมืองแร่ดีบุก ตำบลหาดส้มแป้น, ตำบลบางรีน อำเภอเมือง จังหวัดระนอง. เป็นดินขาวที่เกิดจากการแปรสภาพของหินแกรนิตที่ปะปนอยู่กับหินควอตซ์และแร่ดีบุก. ดินขาวแหล่งนี้เป็นดินขาวชนิดดีที่พบเป็นแหล่งแรกในประเทศ, มีปริมาณของอะลูมินาสูง และมีปริมาณสิ่งเจือปนน้อย, จึงเหมาะที่จะนำมาใช้ประโยชน์ในหลายๆ ด้านคุณลักษณะของดินขาวแหล่งนี้ ดินร่วน, เวลาล้างจมตัวดีมาก, เนื้อดินที่ล้างได้ประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์, สีของดินมีสีขาว. ในช่วงอุณหภูมิ 800-1,300 องศาเซลเซียส มีการหดตัว 3.9-7.8 เปอร์เซ็นต์ และการดูดซึมน้ำ 30.0-40.5 เปอร์เซ็นต์. ขนาดของเม็ดดิน 5-30 ไมครอน, ความทนไฟ 1,785 องศาเซลเซียส, ความแข็งแรง 102 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว, เมื่อแขวนลอยในน้ำมีค่าพีเอชเท่ากับ 8.5.

3. แหล่งดินขาว อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี

ดินขาวแหล่งนี้ พบที่หมู่บ้านวังยางและวังงาม, อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี, ส่วนใหญ่เป็นแร่ illite เกิดจากการผุพังของหิน rhyolite. จากคุณลักษณะของดินขาวแหล่งนี้ ดินร่วน, มีความเหนียวน้อย, เนื้อดินที่ล้างได้ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์, สีของดินมีสีขาว. ในช่วงอุณหภูมิ 800-1,250 องศาเซลเซียส มีการหดตัว 4.2-11.4 เปอร์เซ็นต์ และการดูดซึมน้ำ 2.1-20.8 เปอร์เซ็นต์. ขนาดของเม็ดดิน 3-20 ไมครอน, ความทนไฟ 1,300 องศาเซลเซียส, ความแข็งแรง 94 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว, เมื่อแขวนลอยในน้ำมีค่าพีเอชเท่ากับ 8.0.

คุณสมบัติทางกายและทางเคมีของดินขาว

1. ขนาดของเม็ดดิน (particle size) เกี่ยวข้องกับความเหนียว (plasticity) และการหดตัวของดินเมื่อแห้ง (dried shrinkage), ซึ่งโดยเฉลี่ยขนาดของเม็ดดินที่นำมาใช้ ควรมีขนาดประมาณ 0.05-10 ไมครอน, ในปัจจุบันที่ใช้กันในโรงงานอุตสาหกรรม จะมีขนาดเม็ดดินประมาณ 0.05 ไมครอน.

2. ความแข็งแรงเมื่อแห้ง (green strength) เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์ดิบ (green ware) มาก เนื่องจากดินขาวที่มีความเหนียวน้อย เมื่อขึ้นรูปแล้วจะเปราะง่าย, โดยเฉลี่ยความแข็งแรงของดินขาวควรอยู่ระหว่าง 40-120 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว.

3. การหดตัวหลังจากการเผา (fired shrinkage) เกี่ยวข้องกับขนาดรูปทรงของผลิตภัณฑ์, โดยทั่วไปแล้วดินขาวจะหดตัวหลังการเผาเฉลี่ยประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์. ดินขาวมีสารประกอบทางเคมีเป็น $(OH)_4 Al_2Si_2O_5$ หรือ $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ ซึ่งองค์ประกอบหลักดังนี้ คือ SiO_2 , Al_2O_3 และ H_2O เท่ากับ 46.3, 39.8 และ 13.9 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ. องค์ประกอบทางเคมีข้างต้น ถือเป็นหลักสากลในการวิเคราะห์ทางเคมี, ซึ่งอาจเปลี่ยนแปลงไปบ้าง เนื่องจากเหตุ 2 ประการ คือ:-

1. โครงสร้างของหินขาวที่แทนที่ด้วยโลหะที่มีประจุบวก
2. สารประกอบอื่นๆ เจือปน ได้แก่ Quartz, Feldspar, Rutile, Pyrite, Tourmaline, Zircon, Hematite, Magnetite, Fluoride, และ Muscovite เป็นต้น.

ปัจจุบันได้มีงานวิจัยหลายๆ งาน ได้นำเอาหินขาวที่มีองค์ประกอบของสารอะลูมิโนซิลิเกตไปใช้เป็นวัสดุฉนวนในการสังเคราะห์ซีโอไลต์, ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูงใช้ในการดูดซับแก๊ส และใช้ทำเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น (วานิชกิจ, 2546).

ถ่านหิน

ถ่านหินเป็นหินตะกอนชนิดหนึ่ง สามารถติดไฟได้จึงนิยมนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง, มีส่วนประกอบที่เป็นสารคาร์บอนไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก. ถ่านหินเกิดจากการเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติของซากพืชสะสมตัวอยู่ในพื้นที่ที่เป็นแอ่งขนาดใหญ่, เมื่อเวลาผ่านไปหลายสิบล้านปี เกิดการเปลี่ยนแปลงของผิวโลก เช่น การเกิดแผ่นดินไหว, ภูเขาไฟระเบิด, การพังทลายของชั้นหิน ดิน ทลาย, เกิดการทับถมของตะกอนมากขึ้น, ได้รับความร้อนและความกดดันมากขึ้น จนในที่สุดเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นถ่านหินประเภทต่างๆ.

ประเภทของถ่านหิน

1. แอนทราไซต์ (anthracite) เป็นถ่านหินที่มีลักษณะดำเป็นเงามัน, มีความวาวสูง, มีปริมาณคาร์บอนสูงถึง 86 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป, มีปริมาณความชื้นต่ำ, มีค่าความร้อนสูงแต่จุดไฟติดยาก.
2. บิทูมินัส (bituminous) เป็นถ่านหินเนื้อแน่น, มีลักษณะแข็งและมักจะประกอบขึ้นด้วยชั้นถ่านหินสีดำสนิทที่มีลักษณะมันวาว, มีปริมาณคาร์บอน 69-86 เปอร์เซ็นต์, และมีความชื้น 1.5-7 เปอร์เซ็นต์, ใช้เป็นถ่านหินเพื่อถลุงโลหะได้.
3. ซับบิทูมินัส (sub-bituminous) มีลักษณะสีดำคล้ายขี้ผึ้ง, มีปริมาณความชื้นประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์, เป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพมากในการผลิตไฟฟ้า.
4. ลิกไนต์ (lignite) เป็นถ่านหินที่มีเกรดต่ำสุด, มีปริมาณออกซิเจนค่อนข้างสูงและมีปริมาณความชื้นสูงถึง 30-70 เปอร์เซ็นต์, เป็นถ่านหินที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง.

ถ้ำลอยถ่านหิน

ถ้ำลอยถ่านหิน เป็นอนุภาคของของแข็งขนาดเล็กที่ลอยอยู่ในก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหิน แล้วลอยออกมาจากหม้อต้มไอน้ำพร้อมกับก๊าซชนิดอื่นๆ. โดยทั่วไปมีปริมาณ 10-85 เปอร์เซ็นต์ของถ้ำทั้งหมดที่เกิดขึ้น ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของถ่านหิน. ถ้ำลอยมีลักษณะรูปร่างเป็นทรงกลม, มีขนาดเล็กมาก, มีสีเทาอ่อนจนถึงดำขึ้นอยู่กับระดับของปริมาณคาร์บอนในถ่านหิน.

สิ่งที่น่าสนใจของถ้ำลอย คือมีองค์ประกอบของอนุภาคที่เบา เรียกว่า cenosphere, จะมีปริมาณอยู่ประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไปของถ้ำลอย. อนุภาคเหล่านี้มีลักษณะเป็นทรงกลมมีส่วนประกอบของซิลิกา, ไนโตรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์, โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 20-200 ไมโครเมตร. ถ้ำเหล่านี้มีลักษณะลอยตัวทำให้เกิดปัญหาในการกำจัด ส่วนองค์ประกอบทางเคมีของ cenosphere จะคล้ายกับถ้ำลอยนั่นเอง.

จากมาตรฐาน ASTM C618-85 ได้แบ่งประเภทของถ้ำลอยตามปริมาณรวมของซิลิกา, อะลูมินา และเฟอริกออกไซด์ที่มีอยู่ในถ้ำลอย, ซึ่งสามารถแบ่งได้ดังนี้:-

1. ถ้ำลอยกลุ่ม C จะมีส่วนประกอบของซิลิกา, อะลูมินา และเฟอริกออกไซด์อยู่รวมกันไม่ต่ำกว่า 50 เปอร์เซ็นต์.
2. ถ้ำลอยกลุ่ม F จะมีส่วนประกอบของซิลิกา, อะลูมินา และเฟอริกออกไซด์อยู่รวมกันไม่ต่ำกว่า 70 เปอร์เซ็นต์.

ปัจจุบัน ได้มีการนำถ้ำลอยถ่านหินไปใช้เป็นวัสดุฉนวนในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูงและมีประโยชน์ในอุตสาหกรรมเคมีเช่น ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange), การดูดซับแก๊ส, สารอาหาร, น้ำ, ตลอดจนโมเลกุลของสารอินทรีย์, และใช้ทำเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา, เป็นต้น (นามโท, 2542).

ข้าวโพด

ข้าวโพดเป็นธัญพืชที่สำคัญมากชนิดหนึ่งของโลก ผลผลิตประมาณครึ่งหนึ่งใช้เป็นอาหารมนุษย์, นอกจากนั้นใช้เป็นอาหารเลี้ยงสัตว์และอื่นๆ. ข้าวโพดมีถิ่นกำเนิดแถบบริเวณประเทศอเมริกากลาง และเป็นถิ่นนิยมบริโภคกันแถบประเทศทวีปอเมริกากลางและใต้. สำหรับประเทศไทย ข้าวโพดเป็นที่รู้จักและนิยมบริโภคในรูปแบบอาหารว่าง ระหว่างมื้ออาหารมาช้านานแล้ว. ยังมีการปลูก

ข้าวโพดเพื่อการเลี้ยงสัตว์กันมาก, จนถึงปัจจุบันข้าวโพดนับเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศ อีกด้วย.

การจำแนกชนิดข้าวโพด

1. ข้าวโพดไร่หรือข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ เป็นชนิดที่ปลูกเพื่อการส่งออกเป็นอาหารเลี้ยงสัตว์
2. ข้าวโพดรับประทานฝักสด

2.1 ข้าวโพดเทียน มีขนาดต้นเล็ก, ฝักเล็กเรียว, เมล็ดกลมมน, สีเหลืองอ่อน, มีรสชาติ นุ่มนวลหวานอร่อย.

2.2 ข้าวโพดข้าวเหนียว (glutinous corn) จะมีฝักและเมล็ดใหญ่กว่าข้าวโพดเทียน, เมล็ดสีขาว, ฝักสด, เมื่อต้มรับประทานจะมีลักษณะเหนียวมัน คล้ายข้าวเหนียวเพราะมีแอมิโล-เพกทินมาก (อยู่ในรูปของแป้ง), เมื่อเมล็ดข้าวโพดแก่และแห้งแล้วนิยมนำไปบริโภคในรูปข้าวโพด คั่ว.

2.3 ข้าวโพดหวาน (sweet corn) ข้าวโพดชนิดนี้, เมื่อสดจะมีรสหวานอร่อยเนื่องจากมี น้ำตาลกลูโคสมาก (อยู่ในรูปของแป้ง) เมื่อแก่ฝักจะแห้งและเมล็ดเหี่ยวขุ่น.

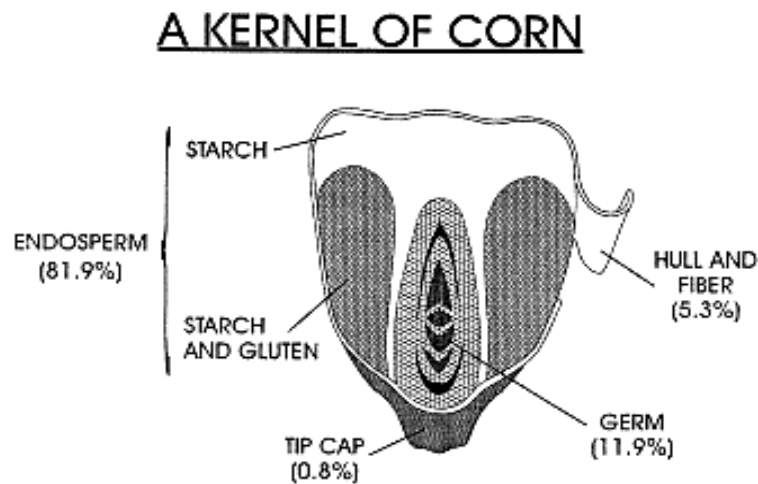
3. ข้าวโพดฝักอ่อน (baby corn) เป็นพืชที่มีอายุการเก็บเกี่ยวสั้น, นับตั้งแต่ปลูกจนถึงเก็บเกี่ยวฝักอ่อน ใช้เวลาเพียง 60-75 วัน เท่านั้น, สามารถปลูกได้ตลอดปี, นิยมนำมาบรรจุกระป๋องหรือขายเป็นฝักสด.

4. ปอปคอร์น (pop corn) ข้าวโพดชนิดนี้มีคุณสมบัติแตกฟูได้ดี เมื่อถูกความร้อน เนื่องจาก เอนโดสเปิร์มหรือส่วนเนื้อในของเมล็ดไม่มีเยื่อหุ้มเมล็ด (seed coat). นิยมบริโภคในรูปข้าวโพดคั่ว โดยนำเมล็ดที่แก่แห้งแล้วมาคั่วให้แตก, ข้าวโพดชนิดนี้ส่วนใหญ่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ.

ข้าวโพดข้าวเหนียว

ข้าวโพดข้าวเหนียวมีปริมาณแอมิโลเพกทิน ซึ่งเป็นแป้งที่มีโมเลกุลใหญ่และมีกิ่งก้านของ โมเลกุลสูง แทนที่แอมิโลสในเอนโดสเปิร์ม. มีการแสดงออกของคุณสมบัติทางเคมีและทาง กายภาพของเอนโดสเปิร์ม ทำให้เมล็ดมีสีขุ่น, ทึบแสง. แป้งในเมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวจัดเป็นแป้ง อ่อน (soft starch) มีเนื้อแป้งนุ่ม เหนียวนุ่มเหมือนข้าวเหนียว เนื่องจากมีปริมาณแอมิโลเพกทินสูง. นอกจากนี้ ยังทำให้มีพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายน้ำได้ปริมาณมาก เช่น พวkdextrin ที่เหนียวเป็น เมือก. ถึงแม้จะไม่หวานเหมือนกับข้าวโพดหวานก็ตาม, แต่มี waxy มีผลทำให้เกิด reducing sugar เพิ่มขึ้นจากข้าวโพดธรรมดาเล็กน้อย. อย่างไรก็ตาม ข้าวโพดข้าวเหนียวแต่ละพันธุ์มีปริมาณแอมิ-โลเพกทิน แตกต่างกันไป (แสงเกตุ, 2546).

ส่วนประกอบของเมล็ดข้าวโพด



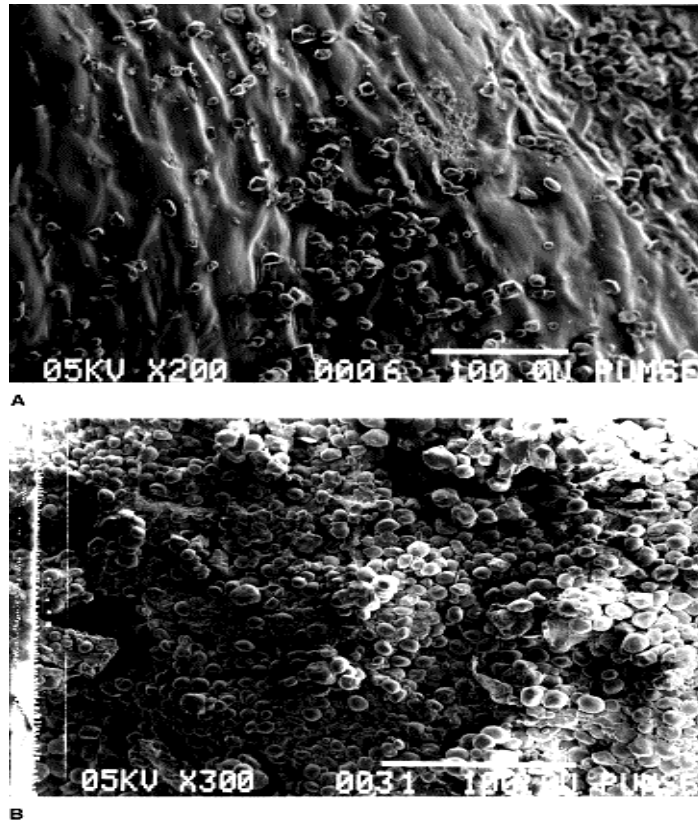
รูปที่ 7. ส่วนประกอบต่างๆ ของเมล็ดข้าวโพด.

ส่วนใหญ่ของน้ำหนักแห้งจะอยู่ในส่วนของเอนโดสเปิร์ม ซึ่งมีถึงประมาณ 82 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเมล็ดข้าวโพดแห้ง. เอนโดสเปิร์มประกอบไปด้วยส่วนประกอบใหญ่ 4 ส่วนคือ 1. แป้ง (starch), 2. แป้งและยางแป้ง (starch and gluten), 3. เจริ่ม (germ), 4. เปลือกหุ้มเมล็ดและเส้นใย (hull and fiber), และส่วนอื่นๆ เช่น เปลือกหุ้มขี้ (tip cap) ดังแสดงในรูปที่ 7. เซลล์ต่างๆ ในเอนโดสเปิร์มบรรจุด้วยเมล็ดแป้งล้อมรอบไปด้วยโปรตีน. เอนโดสเปิร์ม แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ ฮอร์นนี่เอนโดสเปิร์ม (horny endosperm) มีลักษณะแข็งและโปร่งแสง, อีกประเภทหนึ่งคือ เฟลารีเอนโดสเปิร์ม (floury endosperm) มีลักษณะอ่อนนุ่มและทึบแสง. ในเมล็ดข้าวโพดแห้งน้ำหนักของฮอร์นนี่เอนโดสเปิร์มจะมีมากกว่าเฟลารีเอนโดสเปิร์มประมาณสองเท่า, โดยมีองค์ประกอบทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 3.

ตารางที่ 3. องค์ประกอบทางเคมีของฮอร์นี และเฟลารีเอนโดสเปิร์ม (โดยน้ำหนักแห้ง)

องค์ประกอบทางเคมี	ฮอร์นีเอนโดสเปิร์ม	เฟลารีเอนโดสเปิร์ม
แป้ง	80.4	85.6
โปรตีน	13.3	7.7
น้ำตาล	0.4	0.5
น้ำมัน	0.7	0.3
เถ้า	0.3	0.4
อื่นๆ	4.9	5.5

ภาพขยายจาก Scanning electron microscope (SEM) ของพื้นผิวฮอร์นีและเฟลารีเอนโดสเปิร์มในรูปที่ 8, แสดงให้เห็นว่า การที่ฮอร์นีเอนโดสเปิร์มมีองค์ประกอบของโปรตีนมากทำให้มีพื้นผิวที่ราบเรียบ และมีเม็ดแป้งอิสระน้อย (ภาพบน), ส่วนเฟลารีเอนโดสเปิร์มซึ่งมีองค์ประกอบของโปรตีนน้อยกว่าเม็ดแป้งจะไม่ถูกจับยึดกันแน่น และเห็นเม็ดแป้งปกคลุมพื้นผิวได้อย่างชัดเจน (ภาพล่าง).

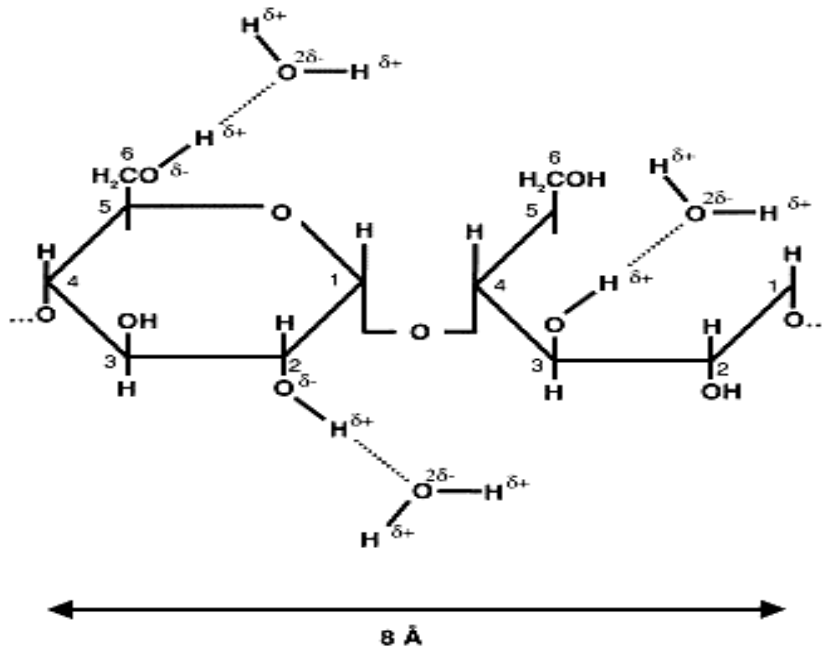


รูปที่ 8. ภาพจาก Scanning electron microscope (SEM) ภาพบนเป็นภาพขยายของพื้นผิว
 สอร์นีเอนโดสเปิร์ม ภาพล่างเป็นภาพขยายของพื้นผิวเฟลารีเอนโดสเปิร์ม.

กลไกการดูดซึมน้ำของแป้ง

ความสามารถในการดูดซึมน้ำของแป้ง เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของ
 โมเลกุลแป้งกับโมเลกุลของน้ำซึ่งเป็นพันธะไฮโดรเจน ดังแสดงในรูปที่ 9. หลังจากหมู่ไฮดรอกซิล
 หนึ่งหมู่ดูดซึมน้ำไว้ได้หนึ่งโมเลกุล สภาพของพันธะไฮโดรเจนจะหมดไป, ดังนั้น หมู่ไฮดรอกซิล
 หนึ่งหมู่จะดูดซึมน้ำไว้ได้หนึ่งโมเลกุลเท่านั้น.

เมื่อแป้งสัมผัสกับไอผสมของสารอินทรีย์และน้ำ พบว่า แป้งสามารถดูดซึมน้ำได้
 มากกว่าไอของสารอินทรีย์ ดังเช่นสามารถใช้แป้งดูดซึมน้ำออกจากระบบของอากาศ-น้ำ,
 แอลกอฮอล์-น้ำ, แอลดีไฮด์-น้ำ, กรดอินทรีย์-น้ำ, อีเทอร์-น้ำ, และคีโตน-น้ำ.



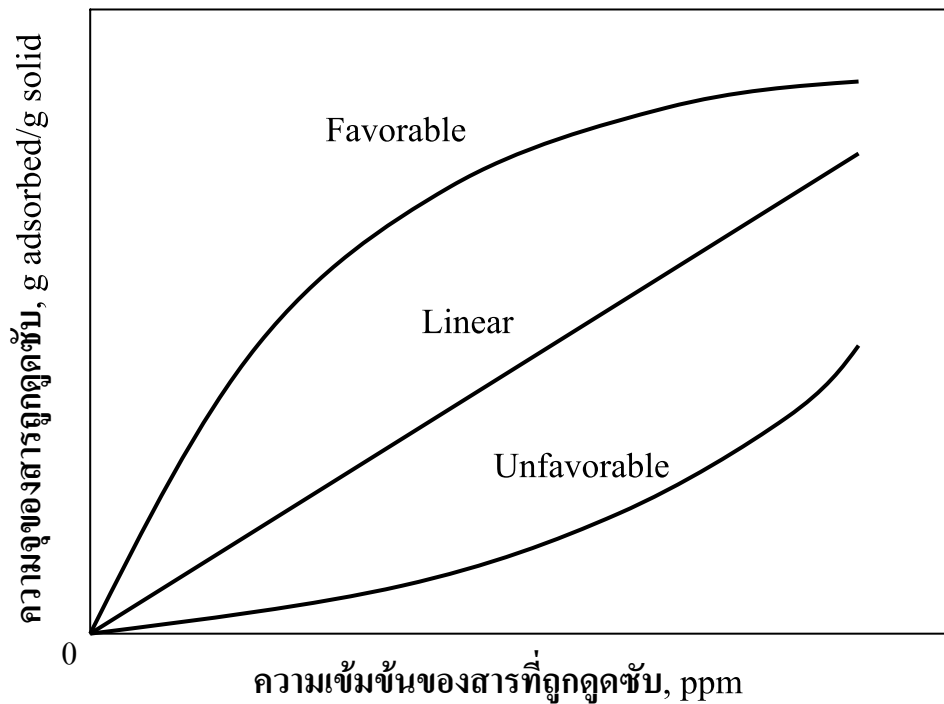
รูปที่ 9. พันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของน้ำและหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้ง.

ที่มา: Beery and Ladish (2001)

สมดุลระหว่างวิภาคของการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่

สมดุลระหว่างวิภาคของการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ (isothermal adsorption equilibrium) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับในสารดูดซับกับความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในวิภาคของไหลในสภาวะที่อุณหภูมิคงที่.

เส้นกราฟแสดงรูปแบบของสมดุลระหว่างวิภาคของการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่มี 3 ลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 10. ลักษณะแรก กราฟเส้นตรงลากผ่านจุดกำเนิด (linear isotherm), ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับในสารดูดซับมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในของไหล. ลักษณะที่สอง กราฟที่เป็นเส้นโค้งนูนจะเป็นแบบที่ต้องการ (favorable isotherm) เนื่องจากสารดูดซับสามารถที่จะดูดซับได้มากที่ความเข้มข้นในของไหลต่ำ. ในทางกลับกันในลักษณะที่สาม กราฟที่เป็นเส้นโค้งเว้าจะเป็นแบบที่ไม่ต้องการ (unfavorable) เนื่องจากสารดูดซับดูดซับได้น้อยที่ความเข้มข้นในของไหลต่ำ แต่จะดูดซับได้มากขึ้นที่ความเข้มข้นในของไหลสูง.



รูปที่ 10. สมดุลระหว่างวัฏภาคของการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่.

สมดุลของการดูดซับในสภาวะที่อุณหภูมิคงที่ กรณีที่มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงจะแสดงได้ด้วยสมการจากกฎของเฮนรี (Henry's Law) ซึ่งเป็นรูปแบบความสัมพันธ์ ดังแสดงในสมการที่ (2).

$$q = Kc \quad (2)$$

โดยที่

q คือความจุของสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของสารดูดซับ,

K คือค่าคงที่ของสมดุลการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่,

c คือความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในของไหลรอบๆ สารดูดซับ

(McCabe *et al.*, 2005).

ในกรณีที่ความสัมพันธ์ไม่เป็นเส้นตรง สมการที่นิยมนำมาใช้อีกสมการหนึ่ง คือ สมการของแลงมัวร์ ดังแสดงในสมการที่ (3), ซึ่งมาจากสมมติฐานว่า โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะถูกดูดซับที่ตำแหน่งบนพื้นผิวของสารดูดซับ โดยแต่ละตำแหน่งจะดูดซับเพียงหนึ่งโมเลกุล, โดยที่พื้นผิวการดูดซับมีความสามารถในการดูดซับเหมือนกัน.

$$q = \frac{q^s Kc}{1 + Kc} \quad (3)$$

โดยที่ q^s คือความจุของโมเลกุลชั้นเดียว

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จากการใช้สมการของแลงมัวร์สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของ $1/q$ กับ $1/c$ ซึ่งเป็นกราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $1/q^s K$ และจุดตัดแกน y คือ $1/q^s$ (Perry *et al.* 1997).

เส้นโค้งการดูดซับสำหรับการดูดซับในเบดนิ่ง

เป็นเส้นโค้งของความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของของไหลที่ตำแหน่งต่างๆ ในเบดนิ่งของสารดูดซับกับเวลาที่ผ่านไป. จากการทำสมดุลมวลของสารถูกดูดซับในส่วนย่อยของเบดนิ่ง จะได้ความสัมพันธ์ในรูปสมการดิฟเฟอเรนเชียลย่อย ดังแสดงในสมการที่ (4):-

$$-D_L \frac{\partial^2 c}{\partial Z^2} + \frac{\partial(uc)}{\partial Z} + \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{(1-\varepsilon_b)}{\varepsilon_b} \frac{\partial \bar{q}}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

โดยที่

$-D_L \frac{\partial^2 c}{\partial Z^2}$ = เป็นการแพร่ของสารถูกดูดซับตามแนวแกนของเครื่องดูดซับเบดนิ่งมี D_L เป็นสัมประสิทธิ์การแพร่,

$\frac{\partial(uc)}{\partial Z}$ = เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลของสารถูกดูดซับเทียบกับความสูงเบดซึ่งเกิดจากการพา,

$\frac{\partial c}{\partial t}$ = เป็นอัตราการสะสมของมวลสารถูกดูดซับในของไหล,

$$\frac{(1-\varepsilon_b)}{\varepsilon_b} \frac{\partial \bar{q}}{\partial t} = \text{เป็นอัตราการสะสมของมวลสารถูกดูดซับในสารดูดซับ.}$$

จากสมการนี้ จะเห็นว่าความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในของไหลมีความสัมพันธ์กับเวลาและตำแหน่งในเบดนิ่ง.

อัตราการสะสมของมวลสารถูกดูดซับในสารดูดซับเกิดจากแรงขับ ซึ่งเกิดจากความแตกต่างระหว่างความจุของสารถูกดูดซับที่สภาวะสมดุลกับสภาวะใดๆ หรือเกิดจากความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในของไหลที่สภาวะใดๆ กับสภาวะสมดุล, ดังแสดงในสมการที่ (5).

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} = k(q^* - \bar{q}) = kK(c - c^*) \quad (5)$$

โดยที่

q^* คือความจุของสารถูกดูดซับต่อสารดูดซับที่สภาวะสมดุลซึ่งสมดุลกับ c คือความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในของไหล,

c^* คือความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในของไหลที่สภาวะสมดุลซึ่งสมดุลกับ \bar{q} คือความจุของสารถูกดูดซับต่อสารดูดซับโดยเฉลี่ยที่สภาวะใดๆ,

k คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมมีหน่วยต่อวินาที.

ความสัมพันธ์ที่ใช้ในการคำนวณค่าแฟกเตอร์ kK แสดงในสมการที่ (6)

$$\frac{1}{kK} = \frac{R_p}{3k_c} + \frac{R_p^2}{15D_e} \quad (6)$$

โดยที่

k_c คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลภายนอกมีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที,

D_e คือสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลมีหน่วยเป็นตารางเมตรต่อวินาที,

R_p คือรัศมีอนุภาคของสารดูดซับมีหน่วยเป็นเมตร.

เทอมแรก $\frac{1}{kK}$ ในสมการที่ (6) คือความต้านทานของการถ่ายเทมวลรวม, เทอมที่สอง

$\frac{R_p}{3k_c}$ คือความต้านทานของการถ่ายเทมวลภายนอก และเทอมที่สาม $\frac{R_p^2}{15D_e}$ คือความต้านทานของ

การถ่ายเทมวลภายในตามลำดับ.

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลภายนอกของสารดูดซับในเบดนิ่ง โดยใช้ความสัมพันธ์ ดังแสดงในสมการที่ (7)

$$Sh = 2 + 1.1Re^{0.6} Sc_i^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

โดยที่

Sh คือตัวแปรไร้มิติหน่วยของเชอร์วูด $= k_c \frac{D_p}{D_i}$

D_p คือเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคสารดูดซับมีหน่วยเป็นเมตร,

D_i คือสัมประสิทธิ์การแพร่เชิงโมเลกุลมีหน่วยเป็นตารางเมตรต่อวินาที,

Re คือตัวแปรไร้มิติหน่วยของเรย์โนลด์ $= \frac{D_p G}{\mu}$

G คือความเร็วเชิงมวลของไอผสมมีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที,

μ คือความหนืดของไอผสมมีหน่วยเป็นพาสคัลวินาที,

Sc_i คือตัวแปรไร้มิติหน่วยของชมิดท์ $= \frac{\mu}{\rho D_i}$

ρ คือความหนาแน่นของไอผสมมีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

จากสมการที่ (7) สามารถที่จะใช้คำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลภายนอกได้จากตัวแปรไร้มิติหน่วยของเชอร์วูด.

การวิเคราะห์หาผลเฉลยของสมการดิฟเฟอเรนเชียลย่อย (4) มีหลายวิธีซึ่งมีวิธีการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน. ในที่นี้ขอยกตัวอย่างการหาผลเฉลยโดยใช้สมการของคลินเคนเบอร์กซึ่งใช้สมมติฐานต่างๆ ได้แก่ ไม่คำนึงถึงการถ่ายเทมวลโดยการแพร่ตามแนวแกน, ความเร็วของของไหลมีค่าคงที่, สมดุลระหว่างวัฏภาคของการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงผ่านจุดกำเนิด. ทำให้ได้ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของของไหลกับตำแหน่งต่างๆ ภายในเบดที่เวลาใดๆ ดังแสดงในสมการที่ (8):-

$$\frac{c}{c_F} \approx \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\sqrt{\tau} - \sqrt{\xi} + \frac{1}{8\sqrt{\tau}} + \frac{1}{8\sqrt{\xi}} \right) \right] \quad (8)$$

โดยที่

c คือความเข้มข้นของสารถูกดูดซับมีหน่วยเป็นโมลต่อลูกบาศก์เมตร,

c_F คือความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในของไหลที่ป้อนเข้ามีหน่วยเป็นโมลต่อลูกบาศก์เมตร,

$\operatorname{erf}(x)$ คือฟังก์ชันความคลาดเคลื่อนนิยามโดย $\operatorname{erf}(-x) = -\operatorname{erf}(x)$ และ

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\eta^2} d\eta$$

ξ คือตัวแปรไร้หน่วยของระยะทางในเบดโดย $\xi = \left(\frac{kKZ}{u} \right) \left(\frac{1 - \varepsilon_b}{\varepsilon_b} \right)$

Z คือระยะทางในเบดมีหน่วยเป็นเมตร,

ε_b คือสัดส่วนช่องว่างของเบด,

τ คือตัวแปรไร้หน่วยของเวลาโดย $\tau = k \left(t - \left(\frac{Z}{u} \right) \right)$.

(Seader and Henley., 2002)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sowerby and Crittenden (1988) ได้ทำการทดสอบโมเลกุลาร์ซีฟชนิด A ในกระบวนการดูดซับไอพสมของเอทานอลและน้ำที่องค์ประกอบคงจุดเดือด เพื่อให้ได้เอทานอลไร้ น้ำ, โดยใช้เครื่องดูดซับเบดนิ่ง ในสภาวะการดูดซับและคายซับเดียวกัน, พบว่า โมเลกุลาร์ซีฟชนิด 4A ใช้งานได้ดีกว่าชนิด 3A. เนื่องจากมีความจุในการดูดซับสูงกว่า, ความกว้างของบริเวณการถ่ายเทมวลน้อยกว่า, และมีอัตราการคายซับที่สูงกว่า ที่ความเข้มข้นของน้ำต่ำมากๆ (น้อยกว่า 0.05 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก). สามารถทำให้ได้เอทานอลไร้ น้ำโดยที่อุณหภูมิเริ่มต้นของเบดและปริมาณน้ำเริ่มต้นในสารละลายที่ป้อนไม่สูงมากนัก. ส่วนโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 5A และ 10A ไม่เหมาะสมที่จะใช้ในกระบวนการแยกชนิดนี้ เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจะไปเพิ่มการดูดซับทั้งเอทานอลและน้ำ และเป็นสาเหตุให้เอทานอลทำปฏิกิริยาเกิดเป็นผลผลิตพลอยได้ที่ไม่ต้องการขึ้น.

Rakshit *et al.* (1993) ทำการทดสอบการดูดซับไอน้ำจากไอพสมเอทานอลและน้ำจากวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรจำพวกลิกโนเซลลูโลส (lignocellulose) เพื่อผลิตเอทานอลไร้ น้ำโดยใช้ฟางข้าว, microcrystalline cellulose powder (MCCP) และชานอ้อย. โดยเริ่มจากเอทานอลความเข้มข้น 80-90 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะได้ความเข้มข้นสุดท้ายมากกว่าความเข้มข้นคงจุดเดือด. อีกทั้งยังมีการวิเคราะห์ทางด้านการใช้พลังงานของกระบวนการ เพื่ออธิบายความเป็นไปได้ในการใช้วัสดุดูดซับประเภทต่างๆ เหล่านี้.

Naono *et al.* (1996) ได้ทำการดูดซับสารละลายของน้ำและเอทานอลซึ่งมีส่วนน้ำต่อเอทานอล 3:1 เข้าไปในรูพรุนของถ่านกัมมันต์ประเภท hydrophobic micropores. จากนั้นได้ทำการคายซับที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เพื่อถ่ายโอนองค์ประกอบออกจากรูพรุนของถ่านกัมมันต์. จากการใช้วิธีการรวมเชิงปริมาตรและเชิงน้ำหนัก, พบว่า ถ่านกัมมันต์มีค่าการเลือกที่จะคายซับน้ำได้ดีกว่าเอทานอล. ดังนั้น จึงสามารถใช้ถ่านกัมมันต์ประเภท hydrophobic micropores ในการแยกน้ำออกจากเอทานอล. ค่าการเลือกในการคายซับน้ำมีความสัมพันธ์กับแรงดึงดูดระหว่างน้ำกับพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าแรงดึงดูดระหว่างเอทานอลกับพื้นผิวของถ่านกัมมันต์. โดยที่น้ำมีพลังงานการดูดซับกับผิวดูดซับ 17-32 กิโลจูลต่อโมล น้อยกว่าเอทานอลซึ่งมีค่า 43-52 กิโลจูลต่อโมล, จึงมีความเป็นไปได้ที่จะผลิตเอทานอลบริสุทธิ์จากสารละลายเอทานอลเจือจางที่ได้จากกระบวนการหมักจากข้อมูลที่ได้ข้างต้น.

Beery *et al.* (1998) ได้นำ corn grit มาทำการทดสอบเป็นสารดูดความชื้นในเครื่องดูดซับเบคกิงแบบเปลี่ยนแปลงความดัน ซึ่งใช้ในการผลิตอากาศแห้ง. corn grit ที่ยังไม่ได้มีการปรับปรุงคุณสมบัติสองขนาดคือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.16 และ 0.978 มิลลิเมตร สามารถทำให้อากาศแห้งได้จนถึงจุดน้ำค้าง -42 และ -69 องศาเซลเซียส, ตามลำดับ. เทคโนโลยีการปรับปรุงคุณสมบัติของ corn grit โดยใช้เอนไซม์แอลฟาเอมิเลสทำให้เพิ่มความจุในการดูดซับ, ซึ่งทำให้สามารถดูดซับความชื้นในปริมาณที่มากขึ้นจากอากาศ จนใกล้เคียงกับการใช้โมเลกุลาร์ซีฟที่สถานะเดียวกัน. หลังจากที่มีการปรับปรุงคุณภาพของ corn grit ขนาด 2.16 และ 0.978 มิลลิเมตร สามารถทำให้อากาศแห้งได้จนถึงจุดน้ำค้าง -56 และ -80 องศาเซลเซียส, ตามลำดับ. การปรับปรุงคุณสมบัติของ corn grit โดยการเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับ จะทำให้มีการเพิ่มกลุ่มไฮดรอกซิลซึ่งจะใช้ในการดูดซับน้ำ. การประยุกต์ในการใช้งานคือ ใช้ในเครื่องดูดซับเบคกิงแบบเปลี่ยนแปลงความดันที่ใช้ทำอากาศแห้งในเครื่องปรับอากาศและอุปกรณ์ ในอุตสาหกรรมที่ทำให้ไอระเหยของสารชนิดต่างๆ แห้ง.

Banat *et al.* (2000) ได้ทำการศึกษาถึงผลของการมีโมเลกุลาร์ซีฟ 3A และ 4A ในระบบของสมดุลไอและของเหลวของสารละลายเอทานอลและน้ำ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ headspace gas chromatography (HSGC), พบว่า การมีโมเลกุลาร์ซีฟทำให้ความเข้มข้นที่สมดุลมีค่าเพิ่มขึ้นสูงกว่าความเข้มข้นคงจุดเดือด. โดยทำการทดลองป้อนเอทานอลเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์, ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส, พบว่า น้ำหนักและขนาดของรูพรุนของโมเลกุลาร์ซีฟมีผลต่อความเข้มข้นของเอทานอลที่เพิ่มขึ้น. โดยที่เมื่อน้ำหนักของโมเลกุลาร์ซีฟ 3A และ 4A เพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของไอผสมเอทานอลจะเพิ่มขึ้นด้วยจนถึงน้ำหนัก 6.5 กรัม ความเข้มข้นจะคงที่ ส่วนขนาดของรูพรุนของโมเลกุลาร์ซีฟ 3A จะทำให้ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นมากกว่าโมเลกุลาร์ซีฟ 4A.

Beery and Ladisch (2001) รายงานว่า สารดูดความชื้นที่ใช้ในอุตสาหกรรมในปัจจุบัน เช่น โมเลกุลาร์ซีฟ, ลิเทียมคลอไรด์, ซิลิกาเจล และ corn grit, มีเพียง corn grit ที่สามารถย่อยสลายและใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนได้ องค์ประกอบที่สำคัญของ corn grit คือแป้งซึ่งประกอบไปด้วยสารแอมิโลสและแอมิโลเพกทินซึ่งเป็นวัสดุดูดซับ. โมเลกุลของน้ำจะถูกดูดซับโดยพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลบน โมเลกุลของแป้ง. ส่วนองค์ประกอบอื่นๆ ของ corn grit คือ พอลิแซ็กคาไรด์, เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส, มีคุณสมบัติในการดูดซับเช่นกัน. การใช้เอนไซม์แอลฟาเอมิเลสในการปรับปรุงคุณสมบัติเพิ่มความพรุนและพื้นที่ผิวของแป้ง เป็นผลให้มีการเพิ่มคุณสมบัติในการดูดซับเมื่อเทียบกับวัสดุเดิม.

Carmo and Gubulin (2002) ทำการทดลองแยกเอทานอล-น้ำโดยใช้วัฏจักรการดูดซับแบบเปลี่ยนแปลงความดันเป็นระบบของคาร์ลและใช้สารดูดซับซีโอไลต์ 3A. วัฏจักรการทำงานถูกควบคุมให้อยู่ภายใต้สภาวะดังนี้ ป้อนเอทานอลที่ความเข้มข้นคงจุดเดือด 95 เปอร์เซ็นต์ ด้วยอัตราการป้อน 2, 4, 6, และ 8 ลิตรต่อชั่วโมง, อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส, ความดัน 2, 4, และ 6 บาร์, คายซับที่ความดันสูญญากาศ 0.2 บาร์. ผลจากตัวแปรต่างๆ เหล่านี้ที่มีต่อความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์, เปอร์เซ็นต์การป้อนกลับของผลิตภัณฑ์ และต่อเวลารวมของวัฏจักรการทำงาน ได้ถูกทำการศึกษาโดยใช้ความดันในการดูดซับเป็นพารามิเตอร์. จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าตัวแปรต่างๆ เหล่านี้ส่งผลกระทบต่อค่าต่างๆ ที่สนใจ. การเพิ่มขึ้นของอัตราการป้อนทำให้ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ลดลง, ในขณะที่จะไปเพิ่มเปอร์เซ็นต์การป้อนกลับของผลิตภัณฑ์. ในทางตรงกันข้าม การเพิ่มความดันทำให้ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น, ในขณะที่จะไปลดเปอร์เซ็นต์การป้อนกลับของผลิตภัณฑ์. การนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับสมการเอมพิริคัลจะได้ผลที่สอดคล้องน่าพอใจ และจากการใช้วิธีการวิเคราะห์ของริดจ์สามารถที่จะใช้หาสภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรต่างๆ ที่ใช้งานได้.

5. อุปกรณ์และวิธีการ

5.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

5.1.1 เครื่องดูดซับเบดนิ่งแบบเปลี่ยนแปลงความดัน (Pressure swing fixed bed adsorber) การสร้างเครื่องดูดซับเบดนิ่งที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เลือกลดัดส่วนมาจากเครื่องดูดซับเบดนิ่งซึ่งใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตเอทานอลไร้น้ำจากโรงงานขอนแก่นแอลกอฮอล์ จังหวัดขอนแก่น, ซึ่งมีกำลังการผลิต 108,000 ลิตรต่อวัน, โดยใช้เครื่องดูดซับเบดนิ่งรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตร, สูง 4.5 เมตร. จากการคำนวณจะได้ค่าเวลาที่ใช้ในการดูดซับ = 0.051 นาที, นำมาใช้ในการลดสัดส่วนเพื่อสร้างเครื่องดูดซับที่ใช้ในการทดลอง. (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก)

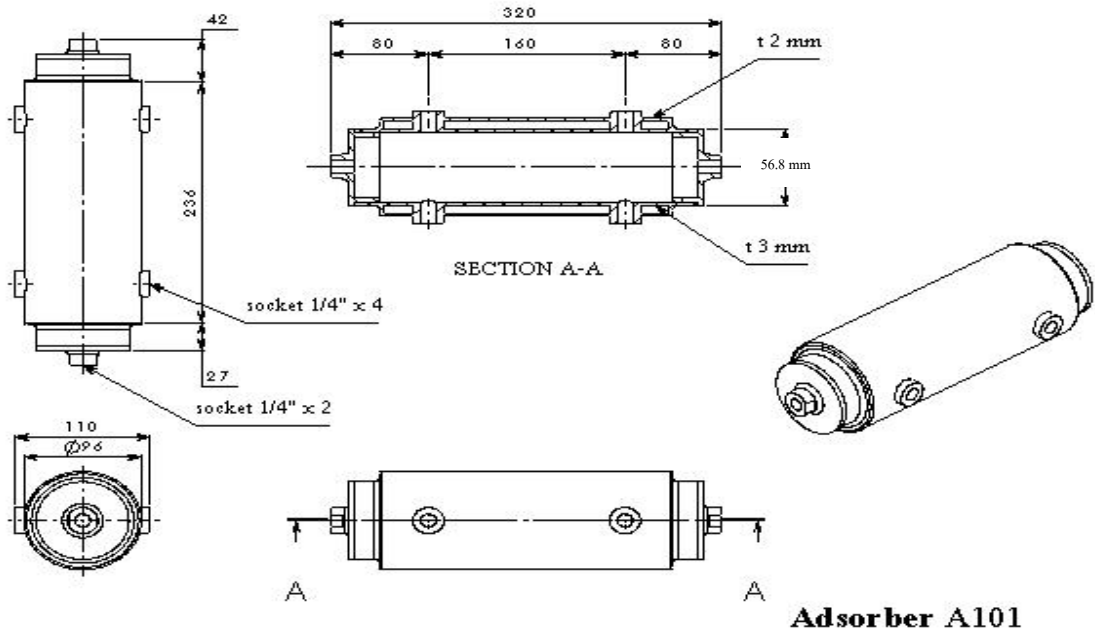


รูปที่ 11. เครื่องดูดซับเบดนิ่งแบบเปลี่ยนแปลงความดัน.

เครื่องดูดซับเบดนิ่งแบบเปลี่ยนแปลงความดันเป็นอุปกรณ์หลักในการทำงาน ทำหน้าที่เป็นทั้งเครื่องดูดซับและเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแจ็กเกต สร้างด้วยเหล็กกล้าไม่เป็นสนิม รูปทรงกระบอก, เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 50.8 มิลลิเมตร, เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 56.8 มิลลิเมตร, ยาว 228.6 มิลลิเมตร. ภายนอกถูกหุ้มด้วยแจ็กเกตเหล็กกล้าไม่เป็นสนิมกว้าง 17.6 มิลลิเมตร, ดังแสดงในรูปที่ 11 และ 12 ซึ่งด้านบนและด้านล่างเป็นหน้าแปลนยึดด้วยเกลียวเพื่อให้

ถอดประกอบได้, เพื่อใช้ในการบรรจุเข้าหรือเทสารดูดซับออกเมื่อต้องการบรรจุสารดูดซับใหม่ หรือเปลี่ยนประเภทของสารดูดซับ.

เครื่องมือวัดสภาวะของเครื่องดูดซับ ประกอบไปด้วยเกจวัดความดัน 2 ตัวคือ PG1 และ PG2 ซึ่งสามารถวัดความดันได้ทั้งความดันมากกว่าบรรยากาศ 2 บาร์ และความดันสุญญากาศ -1 บาร์ (dual band pressure gauge). การวัดความดันมากกว่าบรรยากาศใช้ในขั้นตอนของการดูดซับ, ส่วนการวัดความดันสุญญากาศใช้ในขั้นตอนการคายซับ, อีกทั้งเราจะสามารถทราบค่าความดันตกคร่อมเบดได้จากค่าความแตกต่างของความดันคร่อมเบดทั้งสองตำแหน่ง. ส่วนการวัดอุณหภูมิในเครื่องดูดซับ ประกอบไปด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิ (thermocouple) ชนิด K ติดตั้งไว้ 4 ตำแหน่ง คือ TT2 และ TT3 ติดตั้งไว้ด้านบนของเครื่องดูดซับ ต่ำลงมาจากเบด 10 มิลลิเมตรเท่ากันแต่อยู่คนละด้านของเครื่องดูดซับ, ส่วน TT4 และ TT5 ติดตั้งไว้ด้านล่างของเครื่องดูดซับ สูงขึ้นมาจากเบด 10 มิลลิเมตรเท่ากันแต่อยู่คนละด้าน.



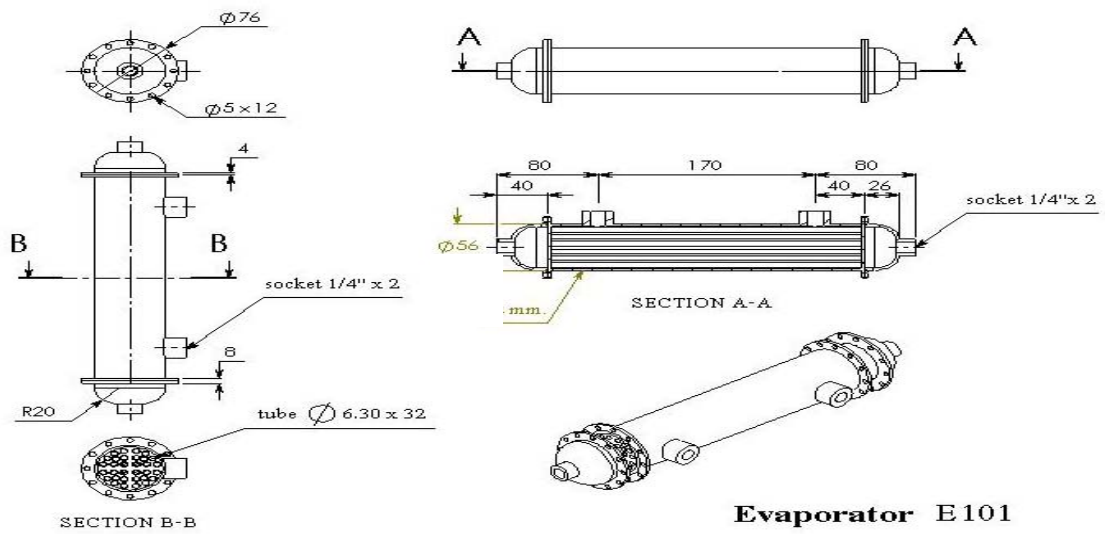
รูปที่ 12. แบบของเครื่องดูดซับเบดนิ่งแบบเปลี่ยนแปลงความดัน.

5.1.2 เครื่องระเหยเอทานอลเหลว (Ethanol vaporizer) เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเซลล์ และท่อ จัดวางในแนวตั้ง ทำด้วยเหล็กกล้าไม่เป็นสนิม, ใช้สำหรับระเหยเอทานอลเหลว. ทางด้าน เซลล์จะเป็นด้านให้ความร้อนด้วยน้ำมันร้อนอุณหภูมิ 150-185 องศาเซลเซียส ไหลในทิศทาง เดียวกันกับเอทานอลในท่อ, มีแผ่นบัพเฟอร์ 5 แผ่นวางสลับกันเพื่อบังคับทิศทางการไหลของน้ำมัน ร้อน, เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อน.

ส่วนทางด้านท่อประกอบด้วยกลุ่มท่อเหล็กกล้าไม่เป็นสนิมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ $\frac{1}{4}$ นิ้ว ยาว 250 มิลลิเมตร จำนวน 28 ท่อ, มีพื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อน 0.139 ตารางเมตร, ดังแสดง ในรูปที่ 13 และ 14.



รูปที่ 13. เครื่องระเหยเอทานอลเหลว.



รูปที่ 14. แบบของเครื่องระเหยเอทานอลเหลว.

5.1.3 เครื่องสร้างไอเอทานอลร้อนยวดยิ่ง (Ethanol vapor superheater) เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเซลล์และท่อวางในแนวตั้ง ทำด้วยเหล็กกล้าไม่เป็นสนิม, สำหรับทำให้อิของเอทานอลเป็นไอร้อนยวดยิ่ง เพื่อป้องกันการควบแน่นกลับเป็นของเหลวภายในเครื่องดูดซับ, ดังแสดงในรูปที่ 15. ลักษณะของแบบและการทำงานเหมือนกับเครื่องระเหยเอทานอลเหลว ต่างกันที่มีจำนวนท่อ 20 ท่อ, มีพื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อน 0.108 ตารางเมตร.

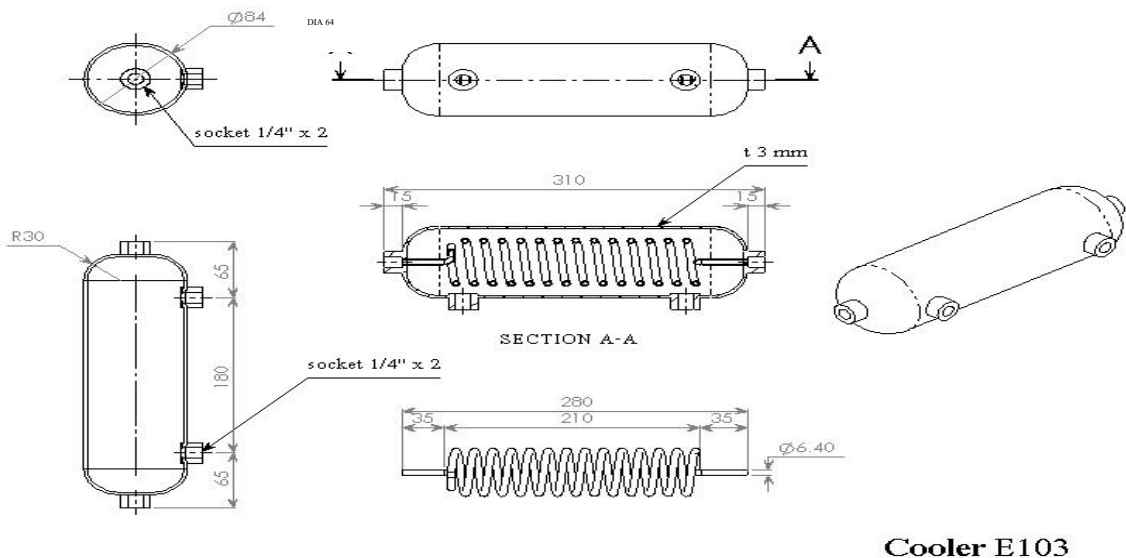


รูปที่ 15. เครื่องสร้างไอเอทานอลร้อนยวดยิ่ง.

5.1.4 เครื่องหล่อเย็นเอทานอล (Ethanol cooler) เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแจ็กเกต และคอยล์ทำด้วยเหล็กกล้าไม่เป็นสนิม, วางในแนวตั้ง, ทำหน้าที่ควบแน่นไอของเอทานอลให้กลับเป็นของเหลว. ทางด้านแจ็กเกตจะมีน้ำหล่อเย็นอุณหภูมิ 0-5 องศาเซลเซียส ไหลสวนทางกับทิศทางการไหลของเอทานอลในคอยล์ด้วยอัตราการไหล 5 ลิตรต่ออนาที. ตัวเครื่อง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว สูง 32 เซนติเมตร, ส่วนคอยล์เป็นท่อเหล็กกล้าไม่เป็นสนิมขนาด 1/4 นิ้ว, ยาว 1 เมตร, ม้วนเป็นเกลียวซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 นิ้ว, มีพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน 0.02 ตารางเมตร, ดังแสดงในรูปที่ 16 และ 17.

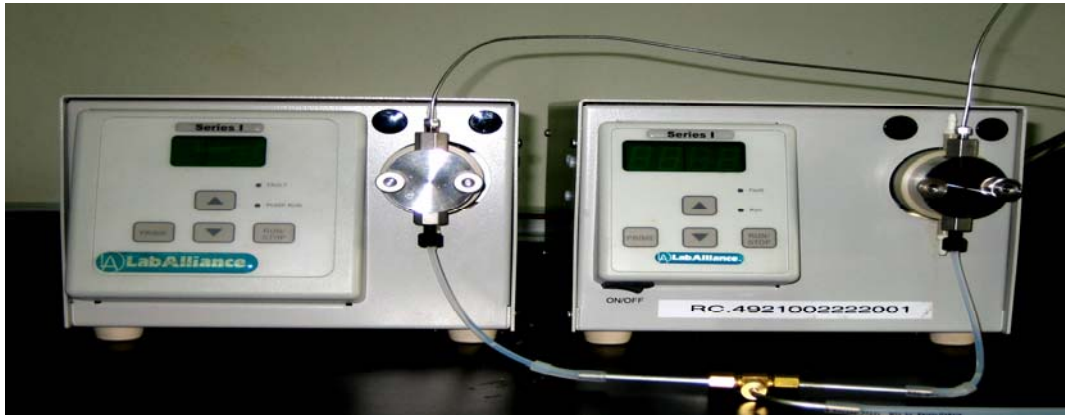


รูปที่ 16. เครื่องหล่อเย็นเอทานอล.



รูปที่ 17. แบบของเครื่องหล่อเย็นเอทานอล.

5.1.5 ปั๊มป้อนเอทานอล



รูปที่ 18. ปั๊มป้อนเอทานอลที่ใช้ในการวิจัย.

ปั๊มป้อนเอทานอล (ดังแสดงในรูปที่ 18) มีรายละเอียดต่างๆ ดังนี้

Specification for the Series I pump model of Lab Alliance

Flow rates	0.01 to 10.00 ml./min
Flow accuracy	3%
Flow precision	0.5% RSD
Pressure	0 to 2,500 psi for 10 ml. Stainless Steel or Bioclean head
Dimensions	6 ¼" high, 7 ¾" wide, 14" deep
Weight	15 lb
Power	100-240 VAC, 50-60 Hz (1 Amp)
Features	Autoprime™ purging Autoflush™ piston wash
Remote inputs	RS-232

5.1.6 ขวดป้อนเอทานอลไร้น้ำ (Anhydrous ethanol feed bottle) ขวดป้อนเอทานอล 95.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (95.5 wt% ethanol feed bottle) และขวดรักษาแรงดันในขวดป้อนเอทานอล (pressure accumulator).



รูปที่ 19. ขวดป้อนเอทานอลไร้ น้ำ ขวดป้อนเอทานอล 95.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และขวดรักษาแรงดันในขวดป้อนเอทานอล.

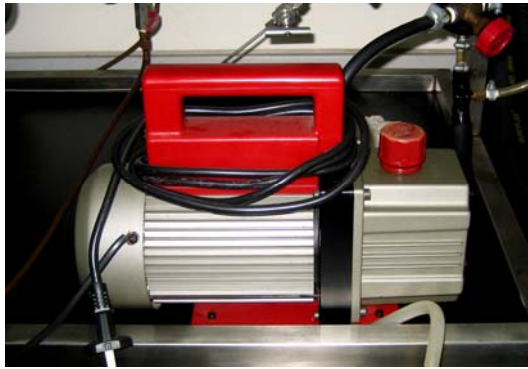
ขวดป้อนเอทานอลเป็นขวดแก้วฝาปิด มีปริมาตร 900 มิลลิลิตร, ใช้เป็นขวดป้อนเอทานอล 95.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อัตราการป้อนสูงสุด 9.83 มิลลิลิตรต่อนาที ใช้เวลาในการป้อนได้นาน 90 นาที. ส่วนขวดป้อนเอทานอลไร้ น้ำ ที่อัตราการป้อนสูงสุด 2.95 มิลลิลิตรต่อนาที จะใช้เวลาในการป้อนได้นาน 5 ชั่วโมง, และมีการรักษาแรงดันเหนือผิวเอทานอลเหลวในขวดป้อนด้วยก๊าซไนโตรเจนความดัน 0.1-0.2 บาร์, ดังแสดงในรูปที่ 19.

5.1.7 กระเปาะแรงดันสุญญากาศ (Vacuum drum) ทำจากเหล็กกล้าไม่เป็นสนิมรูปทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว, สูง 12 เซนติเมตร, ดังแสดงในรูปที่ 20. สร้างขึ้นเพื่อใช้รักษาแรงดันสุญญากาศของเครื่องดูดซับขณะอยู่ในขั้นตอนของการคายซับ และยังเป็นจุดเก็บตัวอย่างเอทานอลเพื่อนำมาวิเคราะห์ผลด้วย.



รูปที่ 20. กระจเปาะแรงดันสุญญากาศ.

5.1.8 ปั้มสร้างแรงดันสุญญากาศ (Vacuum pump)



รูปที่ 21. ปั้มสร้างแรงดันสุญญากาศ.

ปั้มสร้างแรงดันสุญญากาศ (ดังแสดงในรูปที่ 21) มีรายละเอียดต่างๆ ดังนี้:-

Trademark	MIZU
Pump kind	1 stage vacuum pump
Model	FY-1C
Free air displacement	42 l/min
Ultimate vacuum	5 Pa
Voltage	220V / 50Hz
Power	1/4 HP

Oil capacity

280 ml

5.1.9 เครื่องผลิตน้ำมันร้อนและปั้มน้ำมันร้อน (ดังแสดงในรูปที่ 22)



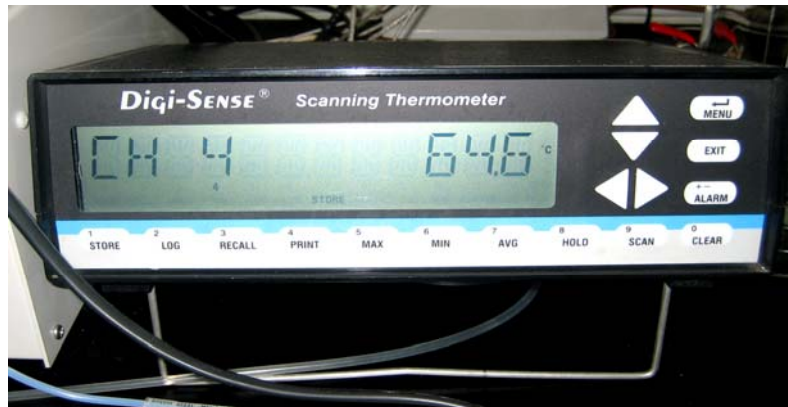
รูปที่ 22. เครื่องผลิตน้ำมันร้อนและปั้มน้ำมันร้อน.

5.1.10 เครื่องผลิตน้ำหล่อเย็น(Cooling water generator) ดังแสดงในรูปที่ 23



รูปที่ 23. เครื่องผลิตน้ำหล่อเย็นของ Neocool.

5.1.11 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบ 12 ช่อง (12 channel scanning thermocouple thermometer)



รูปที่ 24. เครื่องวัดอุณหภูมิแบบ 12 ช่องของ Digi-Sense.

เครื่องวัดอุณหภูมิแบบ 12 ช่อง ดังแสดงในรูปที่ 24 มีรายละเอียดต่างๆ ดังนี้:

สัญญาณเข้า

- สามารถต่อโพรบได้ 12 ช่องสัญญาณซึ่งแต่ละช่องจะมีการทำงานที่แยกออกจากกัน
- สามารถใช้กับเทอร์มोकัปเปิลได้หลายแบบ
- สามารถใช้โพรบเทอร์มोकัปเปิลชนิดต่างๆ ได้ดังนี้ B, E, J, K, N, R, S หรือ T
- สามารถสั่งงานให้แต่ละช่องทำงานหรือไม่ทำงานได้

การแสดงผล

- ข้อมูลที่แสดงได้แก่หมายเลขช่อง และอุณหภูมิที่วัดได้ขณะนั้น
- สามารถตั้งเวลาในการเก็บข้อมูลแบบอัตโนมัติได้ตั้งแต่ 4 วินาที ถึง 1 ชั่วโมง
- สามารถเลือกหน่วยในการวัดอุณหภูมิได้คือ °C, °F, K หรือ °R
- แสดงค่าความละเอียดในการวัดอุณหภูมิได้ถึง 0.1°
- สามารถแสดงอุณหภูมิที่กำลังวัดอยู่ อุณหภูมิต่ำสุด อุณหภูมิสูงสุด หรืออุณหภูมิเฉลี่ย

5.1.12 เครื่องวัดความหนาแน่นของของเหลวชนิดควบคุมอุณหภูมิ (Density meter)



รูปที่ 25. เครื่องวัดความหนาแน่นของของเหลว.

เครื่องวัดความหนาแน่นของของเหลว ดังแสดงในรูปที่ 25 มีรายละเอียดต่างๆ ดังนี้:

- รุ่น DE40 (Density meter, 4 place precision with built-in temperature control and viscosity correction) ยี่ห้อ METTLER TOLEDO.

- เป็นเครื่องวัดความหนาแน่นของของเหลวอัตโนมัติ โดยอาศัยหลักการวัดค่า Resonance frequency ของของเหลวภายในหลอดแก้ว, โดยส่วนที่ใช้วัดค่าความหนาแน่นซึ่งตั้งอยู่บนส่วนบนของตัวเครื่อง ทำให้สะดวกต่อการใส่ / ถอดสารตัวอย่าง.

- ใช้วัดความหนาแน่นในช่วง 0-3 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร, มีค่าความถูกต้อง (Accuracy) 0.0001 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร, ใช้ปริมาตรตัวอย่าง 1.2 มิลลิลิตร.

- ใช้ตั้งอุณหภูมิการวัดได้ในช่วง 4 – 90 องศาเซลเซียส อ่านค่าทศนิยมได้ละเอียด 1 ตำแหน่ง (0.1 องศาเซลเซียส).

- ภายในตัวเครื่องประกอบไปด้วยตัวควบคุมอุณหภูมิอิเล็กทรอนิกส์ (Built-in Thermostat : Peltier) เพื่อการควบคุมอุณหภูมิในขณะวัดได้อย่างถูกต้อง, โดยไม่ต้องต่ออุปกรณ์เพิ่ม พร้อมมีโปรแกรม Temperature compensation ช่วยในการทำงาน.

- ใช้เก็บวิธีการวัดได้ 10 วิธี และถ้าใช้ memory card (อุปกรณ์ประกอบเพิ่ม) สามารถเก็บได้ถึง 100 วิธี.

- ใช้ป้อนข้อมูลตารางความเข้มข้นของสารต่างๆ เก็บในหน่วยความจำเพื่อใช้ในการหาค่าความเข้มข้นได้โดยอัตโนมัติโดยไม่ต้องใช้อุปกรณ์อื่น.
- ใช้คำนวณความเข้มข้นหน่วยพิเศษต่างๆ คือ Brix, Alcohol, API เมื่อมี Application memory card (เป็นอุปกรณ์ประกอบเพิ่ม) โดยการป้อนข้อมูลตารางความเข้มข้นดังกล่าวในหน่วยความจำ.
- หน้าจอแสดงผลเป็นแบบ LCD high contrast สามารถป้อนข้อมูลได้ทั้งตัวเลขและตัวอักษร ให้ข้อมูลที่ชัดเจน และเป็นไปตาม GLP (Good Laboratory Practise)

5.1.13 เตาเผาไฟฟ้า (Electrical furnace) ดังแสดงในรูปที่ 26



รูปที่ 26. เตาเผาไฟฟ้าของ Thermolyne Type 1500 Furnace.

5.1.14 ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ดังแสดงในรูปที่ 27



รูปที่ 27. ตู้อบลมร้อนของ Memmert.

5.1.15 เครื่อง Gas Sorption Analyzer ดังแสดงในรูปที่ 28



รูปที่ 28. เครื่อง Gas Sorption Analyzer รุ่น Autosorp I ของบริษัท Quantachrome.

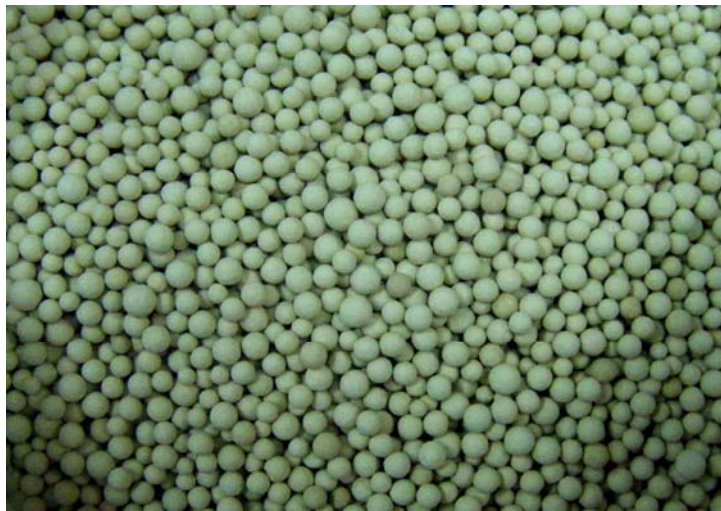
5.2 สารเคมีและวัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัย

5.2.1 เอทานอลไร้น้ำ (anhydrous ethanol, C_2H_5OH) AR grade ของบริษัท MERCK จำกัด.

5.2.2 น้ำปราศจากไอออน (deionised water) ใช้สำหรับเตรียมสารละลายเอทานอล.

5.2.3 ก๊าซไนโตรเจน (nitrogen, N_2) Industrial grade ของบริษัท Thai Industrial Gas (TIG).

5.2.4 โมเลกุลาร์ซีฟ 3A (molecular sieve 3A) ดังแสดงในรูปที่ 29 ของบริษัท จำกัด (มหาชน) ZEOCHEM จำกัด ชนิด Z3-03 ethanol dehydration grade, รูปทรงกลมขนาด 2.5-5 มิลลิเมตร (4x8 mesh) เป็นสารแอลคาไลอะลูมิโน-ซิลิเกตประเภทโพแทสเซียมของโครงสร้างผลึกชนิด A. สารดูดซับชนิดนี้จะมีค่า effective pore opening ประมาณ 3 อังสตรอม (0.3 นาโนเมตร), มีสูตรทางเคมีโดยทั่วไปว่า $0.45 K_2O \cdot 0.55 Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 2 SiO_2 \cdot nH_2O$.



รูปที่ 29. โมเลกุลาร์ซีฟ 3A ของบริษัท ZEOCHEM จำกัด.

5.2.5 เถ้าลอยถ่านหิน (fly ash) ดังแสดงในรูปที่ 30 จากโรงไฟฟ้า บริษัท โกลว์พลังงาน จำกัด (มหาชน) นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง.



รูปที่ 30. เถ้าลอยถ่านหิน.

5.2.6 ปูนซีเมนต์ (cement) ตราเสือเขียว จากบริษัทปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน).

5.2.7 ดินขาว (China clay) ดังแสดงในรูปที่ 31 จากจังหวัดลำปาง.



รูปที่ 31. ดินขาว.

5.2.8 เมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียว (glutinous corn) ดังแสดงในรูปที่ 32.



รูปที่ 32. เมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียว.

5.2.9 ฟางข้าว (rice straw).

5.2.10 ชานอ้อย (bagasse).

5.3 วิธีการวิจัย

5.3.1 การเตรียมสารดูดซับ

สารดูดซับที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 11 ชนิดได้แก่

5.3.1.1 สารดูดซับที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตเอทานอลไร้น้ำ 1 ชนิด คือโมเลกุลาร์ซีฟ 3A ของบริษัท Zeochem จำกัด.

5.3.1.2 ดินขาว นำมาขึ้นรูปเป็นทรงกระบอกซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงอยู่ในช่วง 3-5 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 33. จากนั้นนำมาผ่านกระบวนการต่างๆ เพื่อทำสารดูดซับ 3 ชนิด, คือ ชนิดแรกนำมาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส 48 ชั่วโมง, ชนิดที่สองนำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง, และชนิดที่สามนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง.



รูปที่ 33. ดินขาวขึ้นรูป.

5.3.1.3 ปูนซีเมนต์และเถ้าลอยถ่านหิน นำมาผสมน้ำแล้วปล่อยให้แข็งตัว จากนั้นนำมาบดย่อยแล้วคัดขนาดโดยตะแกรงในช่วง 8 ถึง 12 เมช ดังแสดงในรูปที่ 34. โดยมีการใช้ส่วนผสม 3 ชนิด คือ ชนิดแรกใช้เฉพาะปูนซีเมนต์, ส่วนชนิดที่สองและสามผสมเถ้าลอยถ่านหินกับปูนซีเมนต์ด้วยอัตราส่วน 1:1 และ 3:1 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ.



รูปที่ 34. เถ้าลอยถ่านหินผสมปูนซีเมนต์.

5.3.1.4 เมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียว นำมาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส 48 ชั่วโมง, มี 2 ชนิด ได้แก่ ชนิดแรกใช้เมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวเต็มเมล็ด, ชนิดที่สองใช้เมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีก ดังแสดงในรูปที่ 35.



รูปที่ 35. เมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีก.

5.3.1.5 ฟางข้าว นำมาหั่นเป็นท่อนๆ ยาว 3-5 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 36, แล้วนำมาอบด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส 48 ชั่วโมง.



รูปที่ 36. ฟางข้าว.

5.3.1.6 ชานอ้อย นำมาหั่นเป็นท่อนๆ ยาว 3-5 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 37, แล้วนำมาอบ
ลมร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส 48 ชั่วโมง.



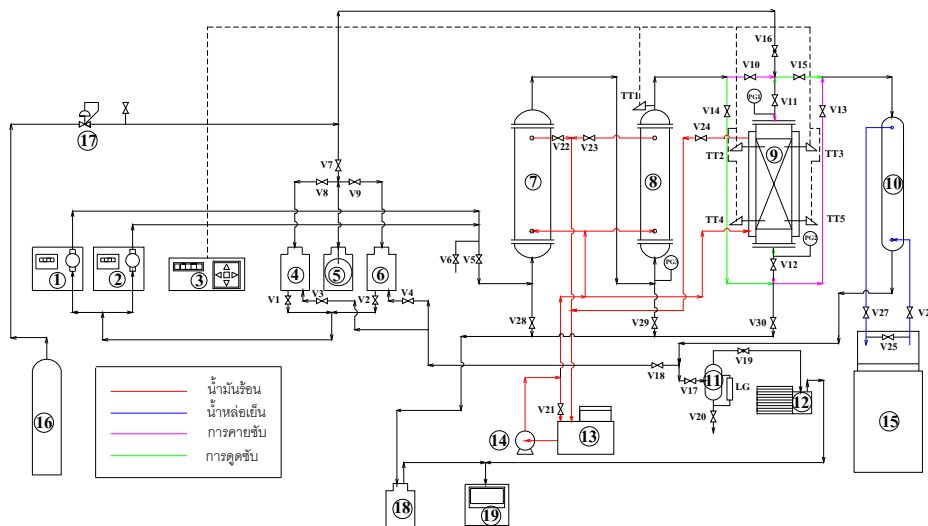
รูปที่ 37. ชานอ้อย.

5.3.2 การทดลองโดยใช้ชุดทดสอบสารดูดซับ

ชุดทดสอบสารดูดซับที่ใช้ในการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 38.



รูปที่ 38. ชุดทดสอบสารดูดซับในกระบวนการผลิตเอทานอลไร้น้ำ.



รูปที่ 39. แผนภาพแสดงอุปกรณ์ของชุดทดสอบสารดูดซับในกระบวนการผลิตเอทานอลไร้น้ำที่ใช้ในงานวิจัย.

ชุดทดสอบสารดูดซับในกระบวนการผลิตเอทานอลไร้น้ำที่ใช้ในงานวิจัย ดังแสดงในรูปที่ 39 ประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ คือ (1) บั้มป้อนเอทานอลตัวที่ 1; (2) บั้มป้อนเอทานอลตัวที่ 2; (3) เครื่องวัดอุณหภูมิ; (4) ขวดป้อนเอทานอลไร้น้ำ; (5) ขวดรักษาแรงดันในขวดป้อนเอทานอล; (6) ขวดป้อนเอทานอล 95.5 เปอร์เซ็นต์; (7) เครื่องระเหยเอทานอลเหลว; (8) เครื่องสร้างไอเอทานอลร้อนขวดยี่ง; (9) เครื่องดูดซับเบดนิ่งแบบเปลี่ยนแปลงความดัน; (10) เครื่องหล่อเย็นเอทานอล; (11) กระจาเปาะแรงดันสุญญากาศ; (12) บั้มสร้างแรงดันสุญญากาศ; (13) เครื่องผลิตน้ำมันร้อน; (14) บั้มน้ำมันร้อน; (15) เครื่องผลิตน้ำหล่อเย็น; (16) ถังบรรจุก๊าซไนโตรเจน; (17) เครื่องปรับแรงดันก๊าซไนโตรเจน; (18) ขวดเก็บเอทานอลที่ถูกปล่อยจากระบบ; (19) ตู้ดูดควัน; V คือ วาล์ว; TT คือ เทอร์มอคัปเปิล; PG คือ เครื่องแสดงความดัน; LG คือ เครื่องแสดงระดับของเหลว.

5.3.2.1 การทดลองหาสมคูลของการดูดซับไอน้ำจากไอผสมของเอทานอลและน้ำของสารดูดซับในสภาวะอุณหภูมิคงที่

เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความจุของไอน้ำที่ถูกดูดซับในสารดูดซับกับความเข้มข้นของไอผสมเอทานอลและน้ำ ในสภาวะสมคูลที่อุณหภูมิคงที่, โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้คือ:-

ก-1 ขั้นตอนการคายซับน้ำออกจากสารดูดซับโดยใช้ก๊าซไนโตรเจนร้อน

ก-1-1 ตรวจสอบและปล่อยเอทานอลเหลวที่ค้างในเครื่องระเหยเอทานอลเหลวและเครื่องสร้างไอเอทานอลร้อนขวดยี่ง โดยเปิดวาล์ว v10, v28 และ v29 ปิดวาล์ว v5, v11, v14, และ v15. ตั้งเครื่องปรับแรงดันก๊าซไนโตรเจนไว้ที่ 0.5 บาร์, แล้วเปิดวาล์ว v16 เล็กน้อยเพื่อช่วยในการปล่อยเอทานอลเหลวที่ค้างในเครื่องระเหยเอทานอลเหลว และเครื่องสร้างไอเอทานอลร้อนขวดยี่ง ลงสู่ขวดเก็บเอทานอลจนหมดแล้วจึงปิดวาล์ว v10, v16, v28 และ v29.

ก-1-2 เตรียมสารละลายเอทานอลกับน้ำที่มีความเข้มข้น 90 ถึง 99 เปอร์เซ็นต์ ในขวดป้อนเอทานอล ให้ได้ปริมาตร 600 มิลลิลิตร, เก็บตัวอย่างนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้น, บันทึกความเข้มข้นที่ได้เตรียมไว้.

ก-1-3 เตรียมระบบเครื่องดูดซับเบดนิ่งเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับสารดูดซับภายในเครื่องดูดซับ, โดยปิดวาล์ว v10, v13, v14 และ v15, แล้วเปิดวาล์ว v11, v12 และ v30.

ก-1-4 เปิดเครื่องทำน้ำมันร้อน ปิดวาล์ว v24 แล้วปิดวาล์ว v21, v22 และ v23, จากนั้นเดินบั้มน้ำมันร้อน เพิ่มอุณหภูมิของน้ำมันร้อนขึ้นไปจนถึง 150 องศาเซลเซียสด้วยอัตรา 50-70 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง.

ก-1-5 เฝ้าติดตามอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในเบด เมื่อเพิ่มขึ้นจนคงที่ จึงเปิด v16 ปรับความดันก๊าซในโตรเจนที่ตำแหน่ง PG1 ให้ได้ 0.2 บาร์, ปล่อยก๊าซในโตรเจนเข้าไปทำการคายซับน้ำออกจากเบด แล้วไหลออกสู่ตู้ดูดควัน.

ก-1-6 ทำการคายซับ 5 ชั่วโมง ซึ่งในระหว่างที่ระบบอยู่ในสภาวะคงตัว บันทึกข้อมูลความดันคร่อมเบด PG1, PG2, อุณหภูมิของน้ำมันร้อน, และอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในเบดนิ่ง.

ก-1-7 หลังจากคายซับน้ำออกจากสารดูดซับครบ 5 ชั่วโมงแล้ว, ปิดวาล์ว v16 และ v30.

ก-2 ขั้นตอนการปรับระบบเข้าสู่สมดุลของการดูดซับในสภาวะอุณหภูมิคงที่

ก-2-1 เดินระบบน้ำหล่อเย็น โดยเปิดวาล์ว v25, v26 และ v27 เดินปั๊มน้ำหล่อเย็น, และเดินระบบหล่อเย็น โดยปรับอุณหภูมิไว้ที่ 0 องศาเซลเซียส, จนกระทั่งอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นลดลงจนถึง 0 องศาเซลเซียส.

ก-2-2 เปิดวาล์ว v22 และ v23 ปล่อยน้ำมันร้อนไหลเวียนเข้าสู่เครื่องระเหยเอทานอลเหลวและเครื่องสร้างไอเอทานอลร้อนยวดยิ่ง, อุณหภูมิของน้ำมันร้อนจะลดลงเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนให้เครื่องระเหยเอทานอลเหลวและเครื่องสร้างไอเอทานอลร้อนยวดยิ่ง, รอจนอุณหภูมิของน้ำมันร้อนปรับเพิ่มกลับมากังที่ๆ 150 องศาเซลเซียส.

ก-2-3 เตรียมระบบเพื่อป้อนเอทานอลจากขวดป้อนเข้าไปหมุนเวียนในระบบ โดยเปิดวาล์ว v2, v4, v5, v11, v12, v14, v15 และ v18 แล้วปิดวาล์ว v1, v3, v6, v28, v29, v10, v13, v16 และ v17. จากนั้นเดินปั๊มป้อนเอทานอล โดยตั้งค่าอัตราการไหลจริงไว้ที่ 4.91 มิลลิลิตรต่อนาที เพื่อป้อนเอทานอลเข้าระบบ (รายละเอียดการสอบเทียบหาอัตราการไหลจริงของปั๊มป้อนเอทานอลแสดงในภาคผนวก จ).

ก-2-4 เฝ้าติดตามอุณหภูมิที่ตำแหน่ง TT1, TT2, TT3, TT4 และ TT5 ซึ่งจะลดลงเมื่อเริ่มป้อนเอทานอลเข้าสู่ระบบ หลังจากนั้นอุณหภูมิจะปรับตัวเพิ่มขึ้นจนคงที่ แล้วให้จับเวลาต่อไปอีก 2 ชั่วโมง. ในระหว่างที่ระบบอยู่ในสภาวะคงตัว บันทึกข้อมูลปริมาตรในขวดป้อน, ความดันคร่อมเบด PG1, PG2, อุณหภูมิของน้ำมันร้อน, อุณหภูมิบนเครื่องสร้างไอเอทานอลร้อนยวดยิ่ง, อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ของเบด และอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น.

ก-2-5 เก็บตัวอย่างนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้น, บันทึกความเข้มข้นที่ได้เป็นระยะๆ ทุกๆ 15 นาที, จนกระทั่งความเข้มข้นมีค่าคงที่.

ก-2-6 นำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาความจุไอน้ำของสารดูดซับ ในสภาวะสมดุลของการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ (ตัวอย่างการคำนวณหาความจุไอน้ำของสารดูดซับ แสดงในท้ายของภาคผนวก ก).

ก-2-7 ต่อไป เริ่มต้นการทดลองใหม่จากขั้นตอนที่ (ก-1-1), การคายซับน้ำออกจากสารดูดซับโดยใช้ก๊าซไนโตรเจนร้อน แต่ทำการเตรียมสารละลายเอทานอลกับน้ำเช่นเดียวกับขั้นตอนที่ (ก-1-2) ด้วยความเข้มข้นอื่นๆ.

ก-2-8 การปรับระบบเข้าสู่สมดุลของการดูดซับในสภาวะอุณหภูมิคงที่ เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิน้ำมันร้อน 150 องศาเซลเซียส, เสร็จแล้วให้เพิ่มอุณหภูมิน้ำมันร้อนไปที่ 175 องศาเซลเซียส แล้วทำการทดลองด้วยขั้นตอนเช่นเดียวกัน.

5.3.2.2 การทดลองหาเส้นโค้งการดูดซับไอน้ำจากไอผสมของเอทานอลและน้ำเข้าสู่สารดูดซับ และการทดลองหาเส้นโค้งการคายซับไอน้ำจากสารดูดซับออกสู่อไอผสมของเอทานอลและน้ำ

เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลที่ไหลออกจากเบดกับเวลาที่ผ่านไป ขณะเกิดการดูดซับและคายซับไอน้ำ, โดยมีอัตราการป้อนและอุณหภูมิของเครื่องดูดซับเป็นตัวแปร. มีขั้นตอนทำการทดลองดังนี้คือ:-

ข-1 ขั้นตอนการหาเส้นโค้งการดูดซับไอน้ำจากไอผสมของเอทานอลและน้ำเข้าสู่สารดูดซับ (ป้อนเข้าทางด้านล่างของเครื่องดูดซับ)

ข-1-1 ตรวจสอบและปล่อยเอทานอลเหลวที่ค้างในเครื่องระเหยเอทานอลเหลวและเครื่องสร้างไอเอทานอลร้อนขวดยี่ง (ดูขั้นตอนการคายซับน้ำออกจากสารดูดซับโดยใช้ก๊าซไนโตรเจนร้อน ข้อ ก-1-1).

ข-1-2 เปิดเครื่องทำน้ำมันร้อน เปิดวาล์ว v22, v23 และ v24, แล้วปิดวาล์ว v21 จากนั้นจึงเดินปั๊มน้ำมันร้อน เพิ่มอุณหภูมิของน้ำมันร้อนขึ้นไปจนถึง 150 องศาเซลเซียสด้วยอัตรา 50-70 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง. ฝ้าติดตามดูอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ บนเครื่องสร้างไอเอทานอลร้อนขวดยี่ง และภายในเบดของเครื่องดูดซับเบดนิ่ง ที่เพิ่มขึ้นจนได้อุณหภูมิกงที่.

ข-1-3 เดินระบบน้ำหล่อเย็น โดยเปิดวาล์ว v25, v26 และ v27. เดินปั๊มน้ำหล่อเย็นแล้วเดินระบบหล่อเย็นโดยปรับอุณหภูมิไว้ที่ 0 องศาเซลเซียส, จนกระทั่งอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นลดลงจนถึง 0 องศาเซลเซียส.

ข-1-4 เตรียมสารละลายเอทานอล 95.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักใส่ลงในขวดป้อน.

ข-1-5 เตรียมระบบก่อนป้อนสารละลายเอทานอลเข้าโดยเปิดวาล์ว v2, v5, v11, v12, v14, v15, v17, แล้วปิดวาล์ว v1, v3, v4, v6, v28, v29, v30, v10, v13, v16, v18, v19, v20.

ข-1-6 เดินปั๊มป้อนสารละลายเอทานอล 95.5 เปอร์เซ็นต์เข้าระบบ (ด้วยอัตราการไหล 5.90 หรือ 7.86 หรือ 9.83 มิลลิลิตรต่อนาที) เฝ้าติดตามคุณสมบัติของเบดที่ตำแหน่ง TT4 และ TT5 โดยเริ่มจับเวลาเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง.

ข-1-7 เฝ้าติดตามเครื่องวัดระดับ LG ของกระเปาะแรงดันสุญญากาศ ถ้าเริ่มวัดระดับได้ให้เก็บตัวอย่างโดยเปิดวาล์ว v20, แล้วใช้หลอดฉีดยาคูดตัวอย่างออกมา, บันทึกเวลาขณะเก็บตัวอย่าง.

ข-1-8 นำตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้น เก็บตัวอย่างเป็นระยะๆ จนความเข้มข้นที่ออกจากเครื่องดูดซับมีค่าใกล้เคียงกับความเข้มข้นที่ป้อนเข้า, นำผลที่ได้ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลที่ไหลออกจากเบดกับเวลาต่อไป.

ข-1-9 ขณะทำการทดลองเมื่อความดันและอุณหภูมิของระบบคงที่ ทำการบันทึกความดัน PG1, PG2 และอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ.

หมายเหตุ: เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิน้ำมันร้อน 150 องศาเซลเซียส เสร็จแล้ว ให้ทำการทดลองโดยเพิ่มอุณหภูมิน้ำมันร้อนเป็น 175 องศาเซลเซียส.

ข-2 ขั้นตอนการหาเส้นโค้งการคายซับไอน้ำจากสารดูดซับออกสู่ไอผสมของเอทานอลและน้ำ (ป้อนเข้าทางด้านบนของเครื่องดูดซับ)

ข-2-1 ทำตามขั้นตอน ข้อ ข-1-1 ถึง ข-1-3 (อุณหภูมิของน้ำมันร้อน 160 องศาเซลเซียส).

ข-2-2 เติมเอทานอลใรร้านลงในขวดป้อน.

ข-2-3 เตรียมระบบก่อนป้อนเอทานอลใรร้านเข้าโดยเปิดวาล์ว v1, v5, v10, v11, v12, v13, v17, แล้วปิดวาล์ว v2, v3, v4, v6, v28, v29, v30, v14, v15, v16, v18, v19, v20.

ข-2-4 เปิดปั๊มสร้างแรงดันสุญญากาศ, ใช้วาล์ว v19 ปรับให้ระบบเครื่องดูดซับอยู่ในสภาวะแรงดันสุญญากาศในช่วง -0.4 ถึง -0.3 บาร์ โดยดูจาก PG1 และ PG2.

ข-2-5 เปิดปั๊มป้อนเอทานอลใรร้านเข้าระบบ (ด้วยอัตราการไหล 0.98 หรือ 1.97 หรือ 2.95 มิลลิลิตรต่อนาที) เฝ้าติดตามคุณสมบัติของเบดที่ตำแหน่ง TT2 และ TT3 เริ่มจับเวลาเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง.

ข-2-6 เฝ้าติดตามเครื่องวัดระดับ LG ของกระเปาะแรงดันสุญญากาศถ้าเริ่มวัดระดับได้ให้ทำการเก็บตัวอย่างโดยเปิดวาล์ว v20, แล้วใช้หลอดฉีดยาคูดตัวอย่างออกมา บันทึกเวลาขณะเก็บตัวอย่าง.

ข-2-7 นำตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้น จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างเป็นระยะ จนความเข้มข้นที่ออกจากเครื่องดูดซับมีค่าใกล้เคียงกับความเข้มข้นที่ป้อนเข้า นำผลที่ได้ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลที่ไหลออกจากเบดกับเวลาต่อไป.

ข-2-8 ขณะทำการทดลองเมื่ออุณหภูมิของระบบคงที่ บันทึกอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ.

หมายเหตุ: เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิน้ำมันร้อน 160 องศาเซลเซียส เสร็จแล้ว ให้ทำการทดลองโดยเพิ่มอุณหภูมิน้ำมันร้อนเป็น 185 องศาเซลเซียส.

5.3.3 การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อสมมูลการดูดซับที่อุณหภูมิกงที่ เส้นโค้งการดูดซับ และเส้นโค้งการคายซับของสารดูดซับที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 4. การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อสมมูลการดูดซับที่อุณหภูมิกงที่

การทดลอง	อุณหภูมิน้ำมัน (องศาเซลเซียส)	ความเข้มข้นที่ป้อน (wt%)	อัตราป้อน (มล.ต่อนาที)	ผลที่สภาวะสมดุล
1	150	ความเข้มข้น 1	4.91(50%)	1.ความเข้มข้นที่สมดุล
2	150	ความเข้มข้น 2	4.91(50%)	2.อุณหภูมิของเบด
3	150	ความเข้มข้น 3	4.91(50%)	3.ความดันของเบด
4	150	ความเข้มข้น 4	4.91(50%)	
5	175	ความเข้มข้น 1	4.91(50%)	
6	175	ความเข้มข้น 2	4.91(50%)	
7	175	ความเข้มข้น 3	4.91(50%)	
8	175	ความเข้มข้น 4	4.91(50%)	

ตารางที่ 5. การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อเส้นโค้งการดูดซับ

การทดลอง	อุณหภูมิน้ำมัน (องศาเซลเซียส)	ความเข้มข้นที่ป้อน (wt%)	อัตราป้อน (มล.ต่อนาที)	ผลที่ต้องการศึกษา
1	150	95.5	5.90 (60%)	1.ความเข้มข้นขาออก
2	150	95.5	7.86 (80%)	ที่เวลาผ่านไป
3	150	95.5	9.83 (100%)	2.อุณหภูมิของเบดที่
4	175	95.5	5.90 (60%)	สภาวะคงตัว
5	175	95.5	7.86 (80%)	3.ความดันของเบดที่
6	175	95.5	9.83 (100%)	สภาวะคงตัว

ตารางที่ 6. การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อเส้นโค้งการคายซับ

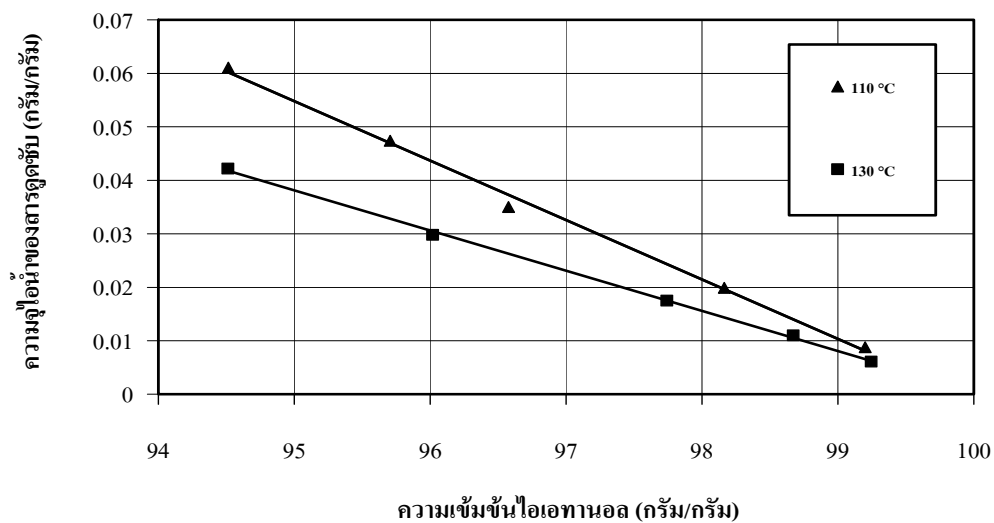
การทดลอง	อุณหภูมิน้ำมัน (องศาเซลเซียส)	ความเข้มข้นที่ป้อน (wt%)	อัตราป้อน (มล.ต่อนาที)	ความดัน (บาร์)	ผลที่ศึกษา
1	160	99.9	0.98 (10%)	-0.4 ~ -0.3	1.ความเข้มข้น
2	160	99.9	1.97 (20%)	-0.4 ~ -0.3	ขาออกที่เวลาต่างๆ
3	160	99.9	2.95 (30%)	-0.4 ~ -0.3	2.อุณหภูมิเบดที่
4	185	99.9	0.98 (10%)	-0.4 ~ -0.3	สภาวะคงตัว
5	185	99.9	1.97 (20%)	-0.4 ~ -0.3	
6	185	99.9	2.95 (30%)	-0.4 ~ -0.3	

หมายเหตุ: ตัวเลขในวงเล็บของช่องอัตราป้อนคือเปอร์เซ็นต์ของอัตราป้อน โดยอัตราป้อนสูงสุดคือ 9.83 มิลลิลิตรต่อนาที (การคำนวณหาอัตราการป้อนสูงสุดของเครื่องดูดซับเบดนิ่งที่ใช้ในการทดลอง แสดงในภาคผนวก ง)

6. ผลการทดลองและวิจารณ์

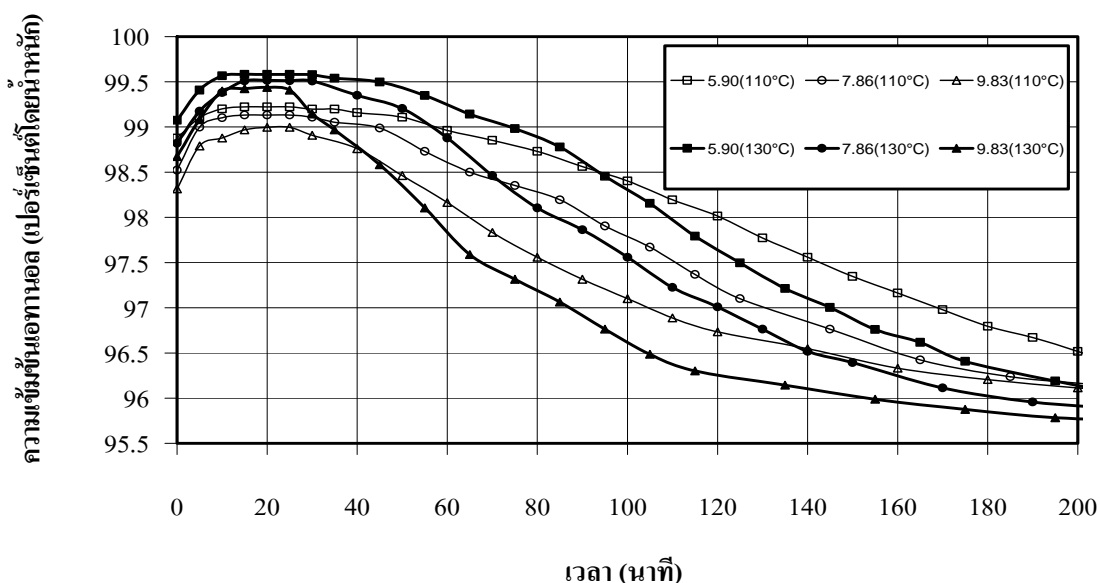
งานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน, ส่วนแรกเป็นการทดสอบหาสมดุลการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่, เส้นโค้งการดูดซับ และเส้นโค้งการคายซับไอน้ำของโมเลกุลาร์ซีฟ 3A. ส่วนที่สองเป็นการทดสอบหาเส้นโค้งการดูดซับไอน้ำโดยใช้วัสดุจากท้องถิ่นประเภทต่างๆ และส่วนที่สามเป็นการทดสอบหาสมดุลการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่, เส้นโค้งการดูดซับ และเส้นโค้งการคายซับไอน้ำของเมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีกและวัสดุผสมถั่วลอยถ่านหินกับปูนซีเมนต์อัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร. โดยท้ายสุดจะเป็นส่วนของการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับและคายซับไอน้ำของสารดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟ 3A กับวัสดุจากท้องถิ่นประเภทเมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีก และวัสดุผสมถั่วลอยถ่านหินกับปูนซีเมนต์อัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร.

6.1 การทดสอบหาสมดุลการดูดซับไอน้ำที่อุณหภูมิคงที่ เส้นโค้งการดูดซับ และเส้นโค้งการคายซับไอน้ำของโมเลกุลาร์ซีฟ 3A



รูปที่ 40. สมดุลการดูดซับไอน้ำที่อุณหภูมิ 110 และ 130 องศาเซลเซียส ของโมเลกุลาร์ซีฟ 3A.

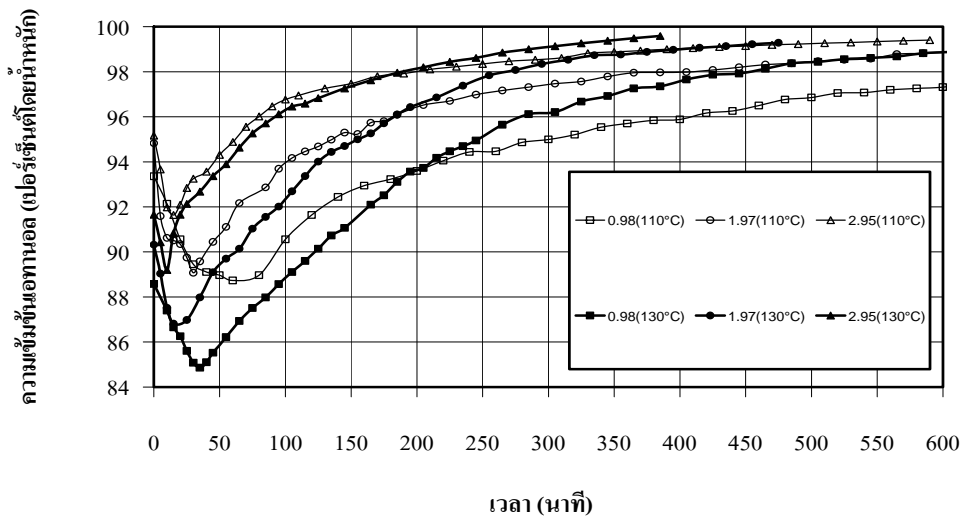
จากรูปที่ 40, เมื่อสารดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟ 3A กับไอผสมของเอทานอลและน้ำเข้าสู่สภาวะสมดุลที่อุณหภูมิคงที่ 110 และ 130 องศาเซลเซียส, พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างความจุไอน้ำของสารดูดซับกับความเข้มข้นของไอเอทานอล เป็นเส้นตรงมีแนวโน้มผ่านจุด (100, 0) ดังสมการที่ (2) จากกฎของเฮนรี $q = Kc$ ซึ่งมีความชันหรือค่าคงที่ของสมดุลการดูดซับที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เท่ากับ 0.01112 มากกว่าที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.00756 (ข้อมูลการทดลอง ข้อมูลการคำนวณจากตารางผนวกที่ ก1 และตัวอย่างการคำนวณจากด้านท้ายของภาคผนวก ก).



รูปที่ 41. เส้นโค้งการดูดซับไอน้ำจากไอผสมของเอทานอลและน้ำเข้าสู่โมเลกุลาร์ซีฟ 3A ที่อุณหภูมิ 110 และ 130 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนเอทานอลเข้มข้น 95.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก 5.90, 7.86, และ 9.83 มิลลิลิตรต่อนาที.

จากรูปที่ 41 การใช้โมเลกุลาร์ซีฟ 3A เป็นสารดูดซับ แนวโน้มเส้นกราฟแต่ละสภาวะจะเป็นเส้นโค้งรูปตัว S กลับด้าน. โดยในช่วงเวลาเริ่มต้นจะมีความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบดเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุดเนื่องจากเบดว่างจากไอน้ำทำให้ความต้านทานรวมในการถ่ายเทมวลต่ำ, จึงมีการดูดซับไอน้ำได้มาก. เมื่ออุณหภูมิคงที่ที่ 110 หรือ 130 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนที่ต่ำลง ความเข้มข้นเอทานอลที่ออกจากเบดจะสูงขึ้น, และจะรักษาระดับความเข้มข้นที่ค่าสูงสุดนี้ไว้ได้เป็นเวลานานกว่าในกรณีของอัตราการป้อนที่สูงขึ้น, ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Carmo and Gubulin (2002). เนื่องจากอัตราการป้อนที่ต่ำลงนั้น ทำให้ไอผสมของเอทานอลและน้ำมีเวลาที่

ใช้ในการดูดซับในเครื่องดูดซับเบคกิงที่นานกว่า. ส่วนผลของอุณหภูมิจะเห็นได้ว่า ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียสจะทำให้ได้ความเข้มข้นในช่วงต้นสูงกว่าที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสที่อัตราการป้อนเดียวกัน, ซึ่งแสดงถึงว่าการใช้โมเลกุลาร์ซีฟ 3A เป็นสารดูดซับไอน้ำจากไอผสมเอทานอลที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ความต้านทานรวมในการถ่ายเทมวลจะน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส, และหลังจากที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุดแล้ว จะเริ่มลดลงจนใกล้เคียงค่าของความเข้มข้นเอทานอลที่ป้อนเข้าเมื่อเวลาผ่านไปเนื่องจากโมเลกุลาร์ซีฟจะดูดซับไอน้ำจนอิ่มตัว. โดยจากแนวโน้มของกราฟที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส มีอัตราการลดลงของความเข้มข้นน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส, ทำให้ใช้เวลาที่มากกว่าในการทำให้ความเข้มข้นเอทานอลลดลงจนเท่ากับความเข้มข้นของเอทานอลที่ป้อนเข้าคือ 95.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก. เนื่องจากการผลิตเอทานอลไร้น้ำนั้นต้องการเอทานอลที่มีความเข้มข้นมากกว่า 99.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิง. ในด้านความเข้มข้นสูงสุดจะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส อัตราการป้อน 5.90 มิลลิลิตรต่อนาที ให้ความเข้มข้นของเอทานอลสูงสุดถึง 99.58 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก, โดยในช่วงนาที่ที่ 10 ถึง 35 จะได้ความเข้มข้นเอทานอลสูงกว่า 99.54 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก. ถ้าเพิ่มอัตราการป้อนเป็น 7.86 มิลลิลิตรต่อนาที จะให้ความเข้มข้นสูงสุด 99.51 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก, ซึ่งน้อยกว่ากรณีของการใช้อัตราป้อน 5.90 มิลลิลิตรต่อนาที, โดยในช่วงนาที่ที่ 15 ถึง 30 จะให้ความเข้มข้นสูงกว่า 99.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก. ส่วนสถานะอื่นๆที่ทำการทดสอบไม่มีสถานะใดที่ทำให้ได้ความเข้มข้นสูงกว่า 99.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจากตารางผนวกที่ ข1.1).

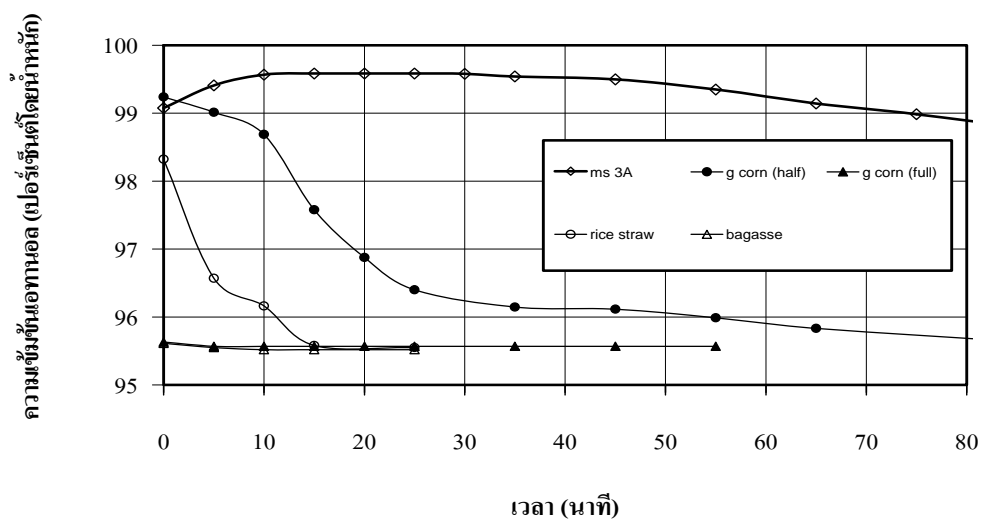


รูปที่ 42. เส้นโค้งการคายซับไอน้ำออกจากโมเลกุลาร์ซีฟ 3A เข้าสู่ไอของเอทานอลไรรู้ที่ป้อนเข้า ในสภาวะความดันสูญญากาศ -0.4 ถึง -0.3 บาร์ อุณหภูมิ 110 และ 130 องศาเซลเซียส โดยป้อนเอทานอลไรรู้ที่อัตราการป้อน 0.98, 1.97, และ 2.95 มิลลิลิตรต่อนาที.

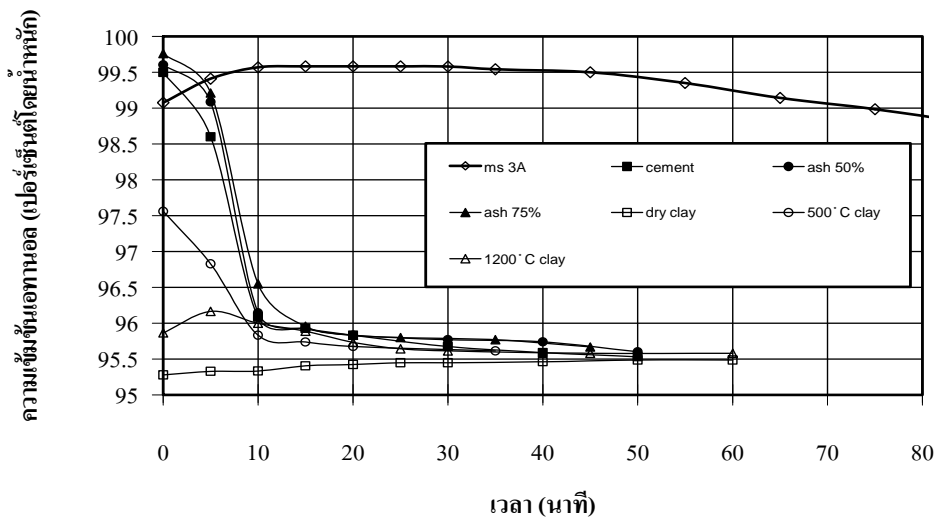
จากรูปที่ 42, แสดงให้เห็นว่าโมเลกุลาร์ซีฟ 3A สามารถฟื้นฟูสภาพกลับ (regenerate) โดยใช้วิธีการคายซับด้วยการป้อนเอทานอลไรรู้ ซึ่งแนวโน้มของกราฟแต่ละเส้นจะเป็นเส้นโค้งรูปตัว S. โดยในช่วงเวลาเริ่มต้น ความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบดจะลดลงจนถึงค่าต่ำสุด เนื่องจากไอน้ำคายซับออกจากโมเลกุลาร์ซีฟเข้าสู่ไอของเอทานอลไรรู้ ซึ่งที่อัตราการป้อนที่ต่ำจะทำให้ความเข้มข้นต่ำสุดมีค่าน้อยกว่ากรณีการใช้อัตราการป้อนสูง. ผลของอุณหภูมิต่อความเข้มข้นต่ำสุด, จะเห็นได้ว่า ที่อัตราการป้อนเท่ากันที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ให้ความเข้มข้นของเอทานอลที่จุดต่ำสุดมีค่าน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส. แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส มีการคายซับไอน้ำออกจากโมเลกุลาร์ซีฟ 3A ได้มากกว่าที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส. หลังจากความเข้มข้นถึงค่าต่ำสุดแล้ว ที่เวลาผ่านไปความเข้มข้นจะเพิ่มขึ้นจนใกล้กับค่าของความเข้มข้นเอทานอลไรรู้ที่ป้อนเข้า. โดยจากแนวโน้มของกราฟที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส จะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส, ซึ่งจะทำให้ใช้เวลาที่มากกว่าในการทำให้ความเข้มข้นเอทานอลเพิ่มขึ้นจนเท่ากับค่าความเข้มข้นของเอทานอลไรรู้ (ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจากตารางผนวกที่ ข1.2) แต่อย่างไรก็ตาม, การที่อุณหภูมิหนึ่งๆ ที่อัตราการป้อนต่ำลง ทำให้

ได้เอทานอลความเข้มข้นต่ำสุดน้อยกว่ากรณีของอัตราการป้อนสูงกวานั้นไม่ได้หมายความว่า อัตราการป้อนที่ต่ำลงนั้นจะทำให้มีการคายซับไอน้ำที่มากขึ้น. ดังเช่น ถ้าไอน้ำที่คายซับออกมาด้วยปริมาณเท่ากัน เมื่อใช้อัตราการป้อนที่ต่ำกว่าย่อมได้ความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบดมีค่าน้อยกว่า.

6.2 การทดสอบการดูดซับไอน้ำจากไอผสมของเอทานอลและน้ำโดยใช้วัสดุจากท้องถิ่นชนิดต่างๆ เปรียบเทียบกับสารดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟ 3A



รูปที่ 43. การเปรียบเทียบเส้นโค้งการดูดซับไอน้ำจากไอผสมของเอทานอลและน้ำของโมเลกุลาร์ซีฟ 3A กับวัสดุจากท้องถิ่นที่ได้จากการเกษตรประเภทเมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียว ฟางข้าว และชานอ้อย ที่อัตราการป้อน 5.90 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส.



รูปที่ 44. การเปรียบเทียบเส้นโค้งการดูดซับไอน้ำจากไอผสมของเอทานอลและน้ำของ โมเลกุลาร์ซีฟ 3A กับวัสดุจากท้องถิ่นประเภท ปูนซีเมนต์ เถ้าลอยถ่านหิน และดินขาว ที่อัตราการป้อน 5.90 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส.

จากการทดสอบหาเส้นโค้งการดูดซับโดยใช้โมเลกุลาร์ซีฟ 3A, พบว่า ที่อัตราการป้อน 5.90 มิลลิลิตรต่อนาที, อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส, จะให้ความเข้มข้นของเอทานอลสูงกว่าสภาวะอื่นๆ. ดังนั้นสภาวะนี้จึงได้ถูกนำมาใช้ในการทดสอบเส้นโค้งการดูดซับ โดยใช้วัสดุจากท้องถิ่นประเภทต่างๆ ทั้งที่ได้จากการเกษตร ได้แก่ เมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวเต็มเมล็ด, เมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีก, ฟางข้าว, ชานอ้อย และวัสดุอื่นๆ ได้แก่ ดินขาวอบแห้ง, ดินขาวเผาที่อุณหภูมิ 500 และ 1,200 องศาเซลเซียส, ปูนซีเมนต์, เถ้าลอยถ่านหินผสมปูนซีเมนต์ด้วยอัตราส่วน 1 ต่อ 1 และ 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร. ผลการทดสอบหาเส้นโค้งการดูดซับไอน้ำจากไอผสมของเอทานอลและน้ำ แสดงในรูปที่ 43 และ รูปที่ 44 (ข้อมูลที่ได้จากการทดลองในภาคผนวก ค), พบว่า ในบรรดาวัสดุจากท้องถิ่น เมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีกมีพื้นที่ได้เส้นโค้งการดูดซับที่มากกว่าวัสดุอื่นๆ, ซึ่งแสดงถึงการมีความจุไอน้ำที่สูงมากกว่า, อีกทั้งช่วงเวลาที่ 0 ถึง 5 ได้เอทานอลที่ออกจากเบดความเข้มข้น 99.24 ถึง 99.01 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อเทียบกับเมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวเต็มเมล็ดแล้ว, พบว่า เมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวเต็มเมล็ดไม่สามารถที่จะดูดซับไอน้ำออกจากไอผสมของเอทานอลและน้ำได้ เนื่องจากความเข้มข้นเอทานอลที่ออกจากเบดมีค่าเท่ากับความเข้มข้นเอทานอลที่ป้อนเข้า คือ 95.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก. ทั้งนี้จากกลไกการดูดซับไอน้ำของเมล็ดข้าวโพดอยู่ที่

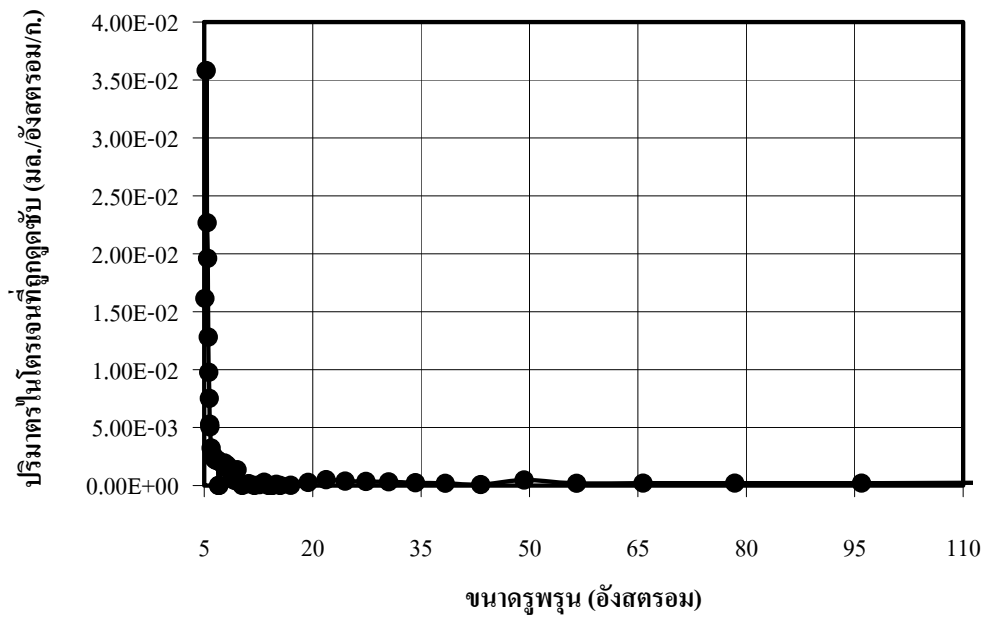
ส่วนของแป้งที่อยู่ภายในเมล็ดข้าวโพด โดยความสามารถในการดูดซับไอน้ำของแป้ง เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งกับโมเลกุลของน้ำซึ่งเป็นพันธะไฮโดรเจน (Beery and Ladish 2001). ดังนั้น เมล็ดข้าวโพดเต็มเมล็ดที่มีเปลือกหุ้มส่วนของแป้งอยู่จึงไม่สามารถดูดซับไอน้ำได้, ซึ่งแสดงว่า ไอน้ำสามารถแพร่ผ่านผิวของเปลือกหุ้มเมล็ดข้าวโพดได้ยาก. ส่วนปูนซีเมนต์ที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยถ่านหินมากขึ้น ทำให้ได้ความเข้มข้นเอทานอลที่ออกจากเบดในช่วงต้นเพิ่มขึ้น, แต่มีพื้นที่ได้เส้นโค้งการดูดซับไอน้ำที่น้อยกว่าการใช้เมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีก. อย่างไรก็ตาม เถ้าลอยถ่านหินผสมปูนซีเมนต์ ด้วยอัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร ในช่วงเวลาที่ 0 ถึง 5 ให้ความเข้มข้นเอทานอลได้สูงถึง 99.76 ถึง 99.21 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.

วัสดุประเภทอื่นๆ ที่สามารถดูดซับไอน้ำจากไอผสมของเอทานอลและน้ำ แล้วทำให้ได้ความเข้มข้นเอทานอลสูงขึ้น, ได้แก่ ฟางข้าว ซึ่งความเข้มข้นเอทานอลในช่วงเวลาที่ 0 ถึง 5 มีค่า 98.32 ถึง 96.57 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดินขาวเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ทำให้ได้ความเข้มข้น 97.56 ถึง 96.82 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก, แต่ความเข้มข้นเอทานอลที่ได้ยังไม่สูงมากพอที่จะนำมาใช้ในการผลิตเอทานอลไร้น้ำ. ส่วนวัสดุพวกเมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวเต็มเมล็ด, ชานอ้อย, ดินขาวอบแห้ง และดินขาวเผาที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส แทบจะไม่ทำให้ความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบดแตกต่างจากความเข้มข้นของเอทานอลที่ป้อนเข้า. ดังนั้น วัสดุเหล่านี้จึงไม่สามารถใช้ดูดซับไอน้ำออกจากไอผสมของเอทานอลและน้ำได้.

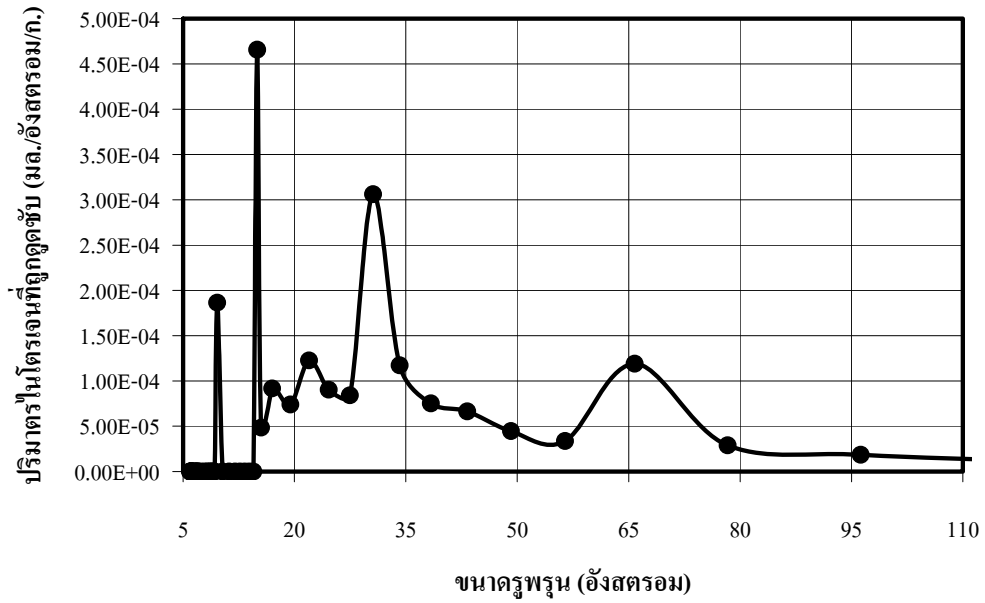
จากการนำวัสดุต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองดังกล่าวแล้วมาทดสอบหาพื้นที่ผิว, ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุน โดยใช้เครื่อง Gas Sorption Analyzer (Autosorp I) ได้ผลดังตารางที่ 7, และรูปที่ 45 ถึง 50.

ตารางที่ 7. ค่าพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนของวัสดุต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบ

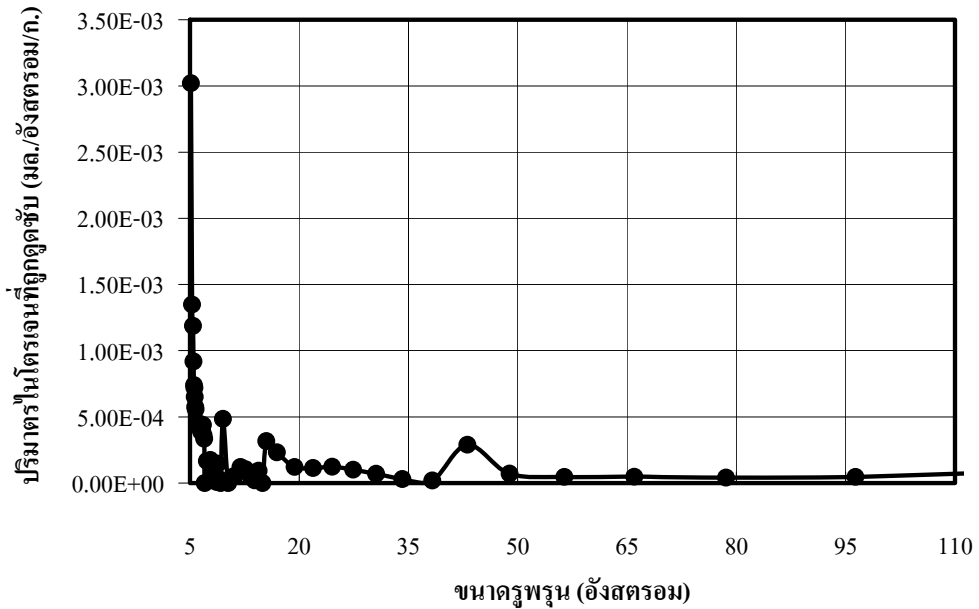
ประเภทของสารดูดซับ	พื้นที่ผิว(BET Surface Area) (ตารางเมตร/กรัม)	ปริมาตรรูพรุน(Pore Volume) (มิลลิลิตร/กรัม)
โมเลกุลาร์ซีฟ 3A	29.82	0.161
เมสึคข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีก	8.36	0.0065
ถ้ำลอยถ่านหินผสมปูนซีเมนต์	9.76	0.071
อัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร		
ดินขาวอบแห้ง	8.37	0.113
ดินขาวเผาที่ 500 °ซ	38.04	0.495
ดินขาวเผาที่ 1,200 °ซ	11.81	0.142



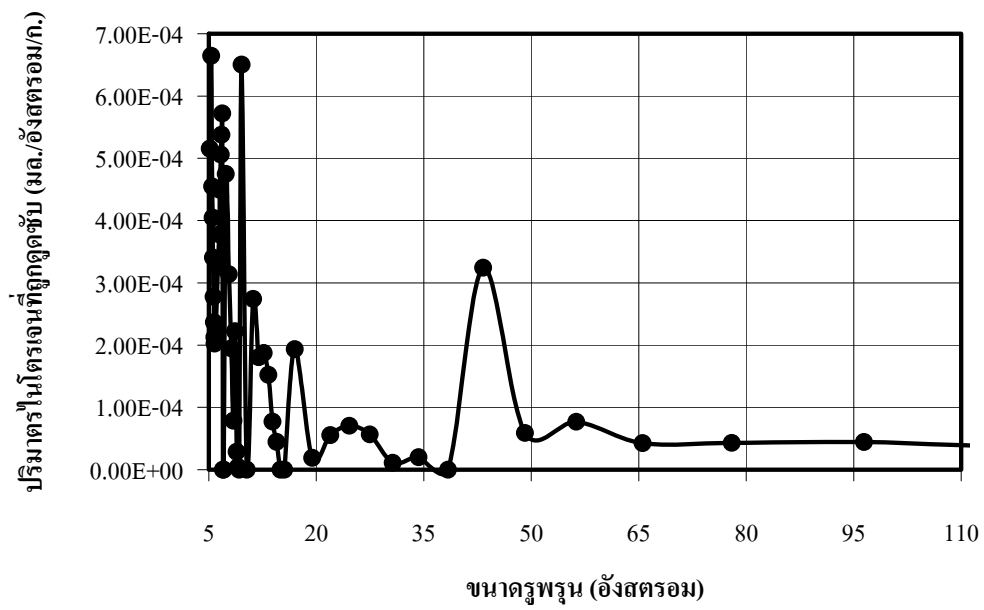
รูปที่ 45. ขนาดรูพรุนของโมเลกุลาร์ซีฟ 3A.



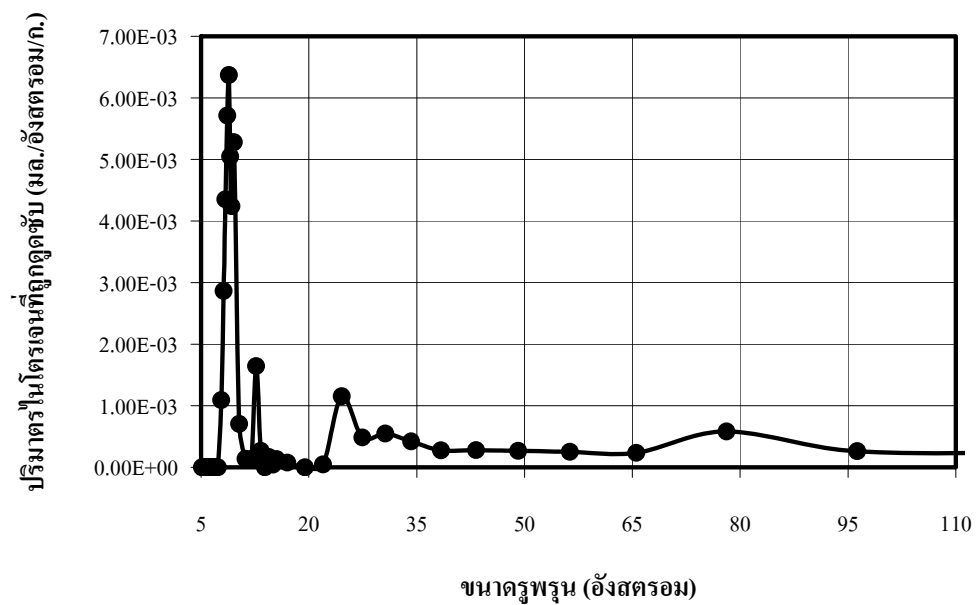
รูปที่ 46. ขนาดรูพรุนของเมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีก.



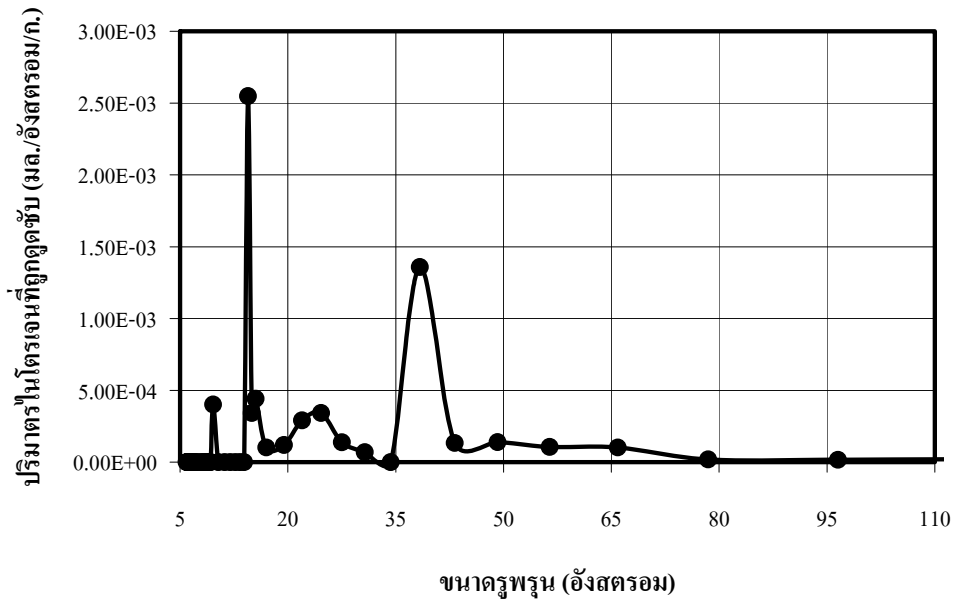
รูปที่ 47. ขนาดรูพรุนของวัสดุผสมถั่วลอยถ่านหินกับปูนซีเมนต์อัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร.



รูปที่ 48. ขนาดรพูนของดินขาวอบแห้ง.



รูปที่ 49. ขนาดรพูนของดินขาวเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส.



รูปที่ 50. ขนาดรูพรุนของดินขาวเผาที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส.

จากรูปที่ 45 และรูปที่ 47, พบว่า กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักสารดูดซับ กับขนาดรูพรุนของโมเลกุลาร์ซีฟ 3A มีลักษณะที่ใกล้เคียงกับวัสดุผสมแก้วลอยถ่านหินกับปูนซีเมนต์ด้วยอัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร, คือมีการดูดซับสูงในช่วงขนาดของรูพรุน 5 ถึง 6 อังสตรอม (เครื่อง Gas Sorption Analyzer (Autosorp I) ที่ใช้ในการทดลองมีขอบเขตการวัดขนาดรูพรุนต่ำสุด 5 อังสตรอม). ดังนั้นกลไกในการดูดซับจึงน่าจะเป็นเช่นเดียวกันคือโมเลกุลที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดของรูพรุนสามารถแพร่เข้าไปในรูพรุนได้และถูกดูดซับบนพื้นผิวด้วยแรงแวนเดอร์วาล, แต่โมเลกุลาร์ซีฟ 3A มีการดูดซับปริมาตรของก๊าซไนโตรเจนที่สูงกว่ามากเนื่องจากโมเลกุลาร์ซีฟ 3A มีพื้นที่ผิวมากกว่า 3 เท่า, มีปริมาตรรูพรุนมากกว่า 2.2 เท่า, เมื่อเทียบกับวัสดุผสมแก้วลอยถ่านหินกับปูนซีเมนต์ด้วยอัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร ดังตารางที่ 7.

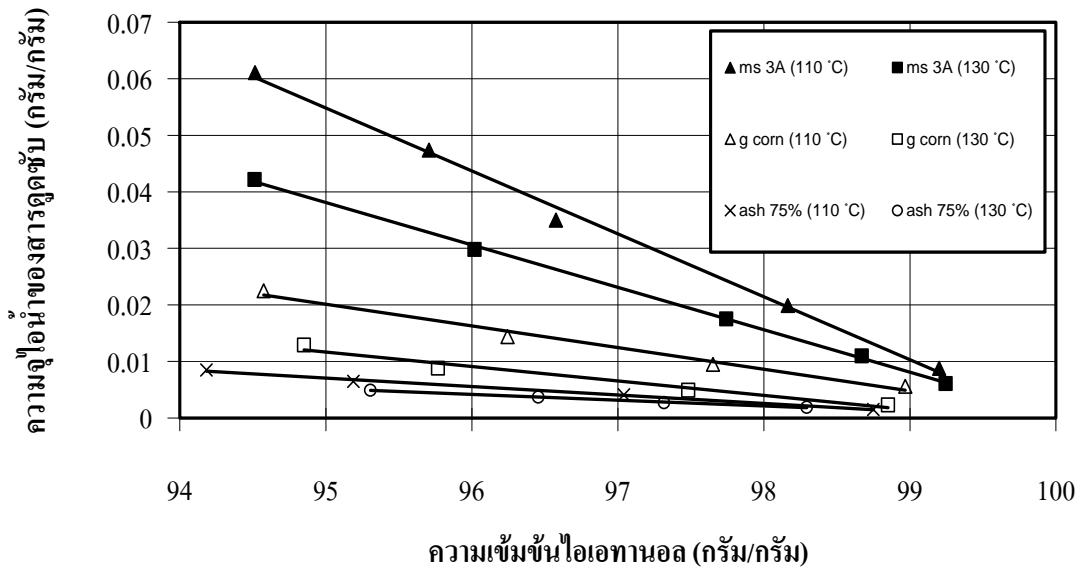
จากรูปที่ 46, ขนาดรูพรุนของเมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีกมีการกระจายตัวที่กว้างในช่วงประมาณ 15 ถึง 100 อังสตรอม, มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนที่ต่ำมากเมื่อเทียบกับโมเลกุลาร์ซีฟ 3A. อย่างไรก็ตาม, กลไกการดูดซับของเมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวนั้นเกิดจากแรงดึงดูด

ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งกับโมเลกุลของน้ำซึ่งเป็นพันธะไฮโดรเจน ซึ่งมีความแตกต่างกันกับกลไกการดูดซับไอน้ำของโมเลกุลาร์ซีฟ 3A.

จากตารางที่ 7, พบว่า การเผาดินขาวที่อุณหภูมิ 500 และ 1,200 องศาเซลเซียส มีผลต่อพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุน. โดยดินขาวเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นอุณหภูมิแคลไซน์ของดินขาว, จะทำให้ดินขาวมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น 4.5 เท่า, และมีปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้น 4.4 เท่าเนื่องจากสารอินทรีย์ในดินขาวจะถูกเผาระเหยไปจนหมด ทำให้รูพรุนเกิดเพิ่มขึ้นจากปริมาตรของสารอินทรีย์ที่ระเหยไป เมื่อเทียบกับดินขาวอบแห้ง. แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาเป็น 1,200 องศาเซลเซียส, พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนจะลดลงมาใกล้เคียงกับดินขาวอบแห้ง เนื่องมาจากการเผาที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียสนั้นทำให้สารอินทรีย์ในดินขาวหลอมละลายและอุดลงในช่องว่างของรูพรุน. จากรูปที่ 48, 49 และ 50, พบว่า ดินขาวอบแห้งมีการกระจายขนาดรูพรุนในช่วงกว้างคือระหว่าง 5 ถึง 20 อังสตรอม. เมื่อนำมาเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส, รูพรุนจะมีการกระจายขนาดในช่วงที่แคบลงคือมีค่าในช่วง 7 ถึง 10 อังสตรอม. แต่เมื่อนำมาเผาที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส พบว่า รูพรุนในช่วงกว้างระหว่าง 7 ถึง 10 อังสตรอม นั้นหายไป เนื่องมาจากการเผาที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียสนั้น ทำให้สารอินทรีย์ในดินขาวหลอมละลายและอุดลงในช่องว่างของรูพรุนในช่วงดังกล่าว.

จากผลการทดลองในหัวข้อนี้ จึงเลือกวัสดุประเภทเมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีกและวัสดุผสมถั่วลอยถ่านหินกับปูนซีเมนต์อัตราส่วน 3 ต่อ 1 หรือ 75 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มาทำการทดสอบคุณสมบัติอื่นๆ คือ สมดุลการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่, เส้นโค้งการดูดซับและเส้นโค้งการคายซับไอน้ำ, เพื่อใช้เปรียบเทียบคุณสมบัติเหล่านี้กับของโมเลกุลาร์ซีฟ 3A ต่อไป.

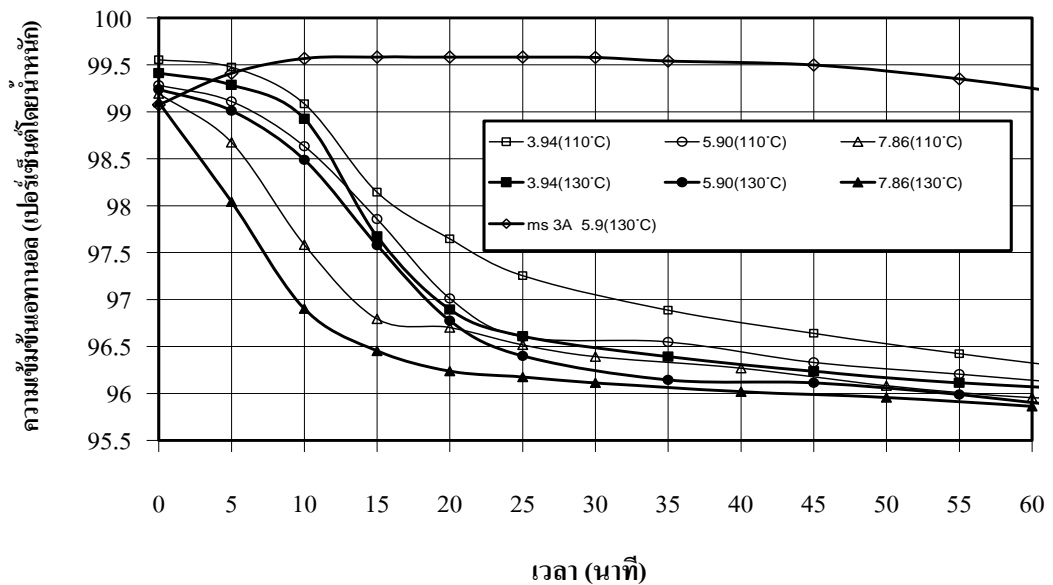
6.3 การทดสอบหาสมการดูดซับไอน้ำที่อุณหภูมิคงที่ เส้นโค้งการดูดซับ และเส้นโค้งการคายซับ
 ไอน้ำของเมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีกและวัสดุผสมถั่วลอยถ่านหินกับปูนซีเมนต์อัตราส่วน 3
 ต่อ 1 โดยปริมาตร



รูปที่ 51. สมการการดูดซับไอน้ำที่อุณหภูมิ 110 และ 130 องศาเซลเซียส ของเมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีก และวัสดุผสมถั่วลอยถ่านหินกับปูนซีเมนต์อัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร เปรียบเทียบกับโมเดลการ์ซีฟ 3A.

จากรูปที่ 51, เมื่อเมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีกหรือวัสดุผสมถั่วลอยถ่านหินกับปูนซีเมนต์อัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร, กับไอผสมของเอทานอลและน้ำเข้าสู่สถานะสมดุลที่อุณหภูมิคงที่ 110 และ 130 องศาเซลเซียส, พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างความจุไอน้ำของสารดูดซับกับความเข้มข้นของไอเอทานอลเป็นเส้นตรงมีแนวโน้มผ่านจุด (100, 0) เช่นเดียวกับการใช้โมเดลการ์ซีฟ 3A เป็นสารดูดซับ ซึ่งความชันของเส้นตรงคือค่าคงที่ของสมการการดูดซับ ดังสมการ(2). สำหรับสมการการดูดซับไอน้ำของเมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีกมีความชัน หรือค่าคงที่ของสมการการดูดซับที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เท่ากับ 0.00384 มากกว่าที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.00256, (ข้อมูลการทดลอง ข้อมูลการคำนวณจากตารางผนวกที่ ก2) ซึ่งแนวโน้มของกราฟสอดคล้องกับผลการทดลองของ Chang *et al.* (2006) ที่ใช้สารดูดซับเป็น เมล็ดข้าวโพดแห้งบดโดยหาค่าคงที่ของสมการการดูดซับไอน้ำที่อุณหภูมิ 82, 91, และ 100 องศาเซลเซียส, ตามลำดับ. เมื่อเทียบอัตราส่วนแล้วค่าคงที่สมการการดูดซับของเมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีกมีค่าน้อยกว่า

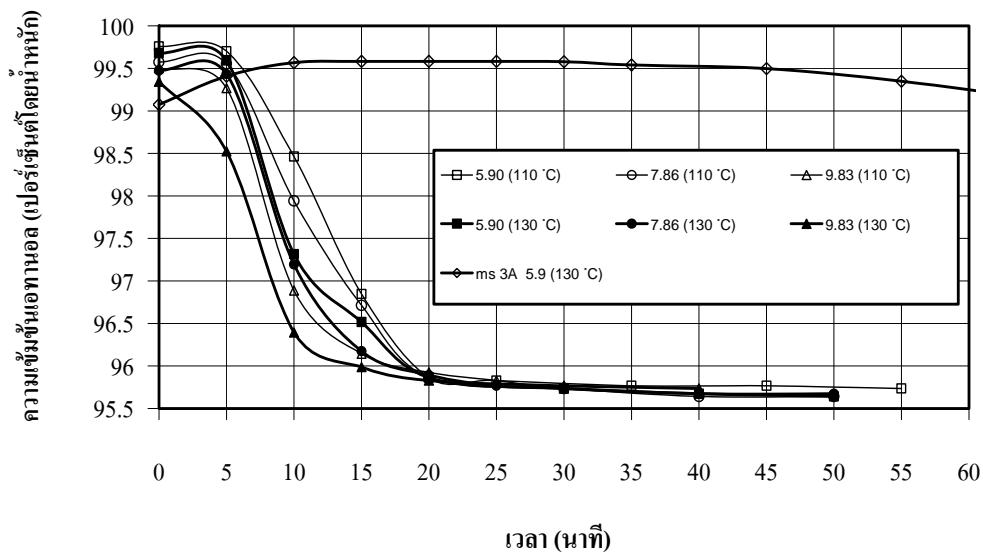
โมเลกุลาร์ซีฟ 3A อยู่ 2.9 เท่า. ส่วนสมมูลการดูดซับไอน้ำของวัสดุผสมแก้วลอยถ่านหินกับปูนซีเมนต์อัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร มีความชื้นหรือค่าคงที่ของสมมูลการดูดซับที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เท่ากับ 0.00149 มากกว่าที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.00102 (ข้อมูลการทดลอง ข้อมูลการคำนวณจากตารางผนวกที่ ก3) เทียบอัตราส่วนแล้ว ค่าคงที่สมมูลการดูดซับของวัสดุผสมแก้วลอยถ่านหินกับปูนซีเมนต์อัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร มีค่าน้อยกว่าโมเลกุลาร์ซีฟ 3A อยู่ 7.4 เท่า.



รูปที่ 52. เส้นโค้งการดูดซับไอน้ำจากไอผสมของเอทานอลและน้ำเข้าสู่เมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีก ที่อุณหภูมิ 110 และ 130 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนเอทานอลเข้มข้น 95.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 3.94, 5.90, และ 7.86 มิลลิลิตรต่ออนาที เปรียบเทียบกับโมเลกุลาร์ซีฟ 3A ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส อัตราการป้อน 5.90 มิลลิลิตรต่ออนาที.

จากรูปที่ 52 การใช้เมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีกเป็นสารดูดซับ, แนวโน้มเส้นกราฟแต่ละสภาวะจะเป็นเส้นโค้งรูปตัว S กลับด้านเหมือนกับการใช้โมเลกุลาร์ซีฟ 3A แต่แตกต่างกันที่ เมื่อเวลาเริ่มต้นความเข้มข้นเอทานอลจะมีค่าสูงสุด. ส่วนผลของอุณหภูมิที่อัตราการป้อนเดียวกันพบว่าที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นเอทานอลในช่วงต้นจะมีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส. เนื่องจากความต้านทานรวมของการถ่ายเทมวลในช่วงต้นที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสมีค่าน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส, ซึ่งความต้านทานรวมนั้นเป็นผลรวมของความต้านทานภายในและความต้านทานภายนอก, ความต้านทานของการถ่ายเทมวลภายในเกิดจากการแพร่ของ

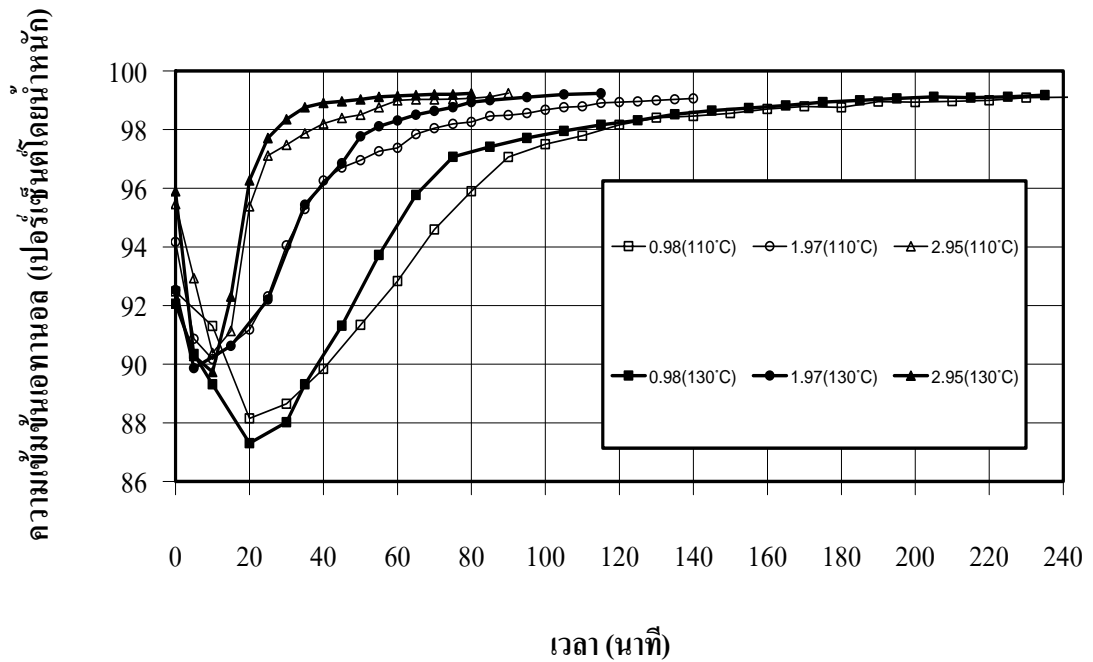
โมเลกุลไอน้ำในช่องรูปพุน ดังนั้นอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้ความต้านทานภายในลดลง. ส่วนความต้านทานของการถ่ายเทมวลภายนอกเกิดจากการพาไอน้ำซึ่งอยู่ในวัฏภาคก๊าซ, เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความหนืดของก๊าซจะเพิ่มขึ้นทำให้ความต้านทานภายนอกมากขึ้น. ดังนั้นการทดลองใช้สารดูดซับเมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีก ความต้านทานการถ่ายเทมวลรวมจะมีแนวโน้มเป็นไปตามความต้านทานภายนอกมากกว่า. การผลิตเอทานอลไร้น้ำนั้นต้องการผลิตเอทานอลที่มีความเข้มข้นมากกว่า 99.5 เปอร์เซ็นต์, แต่จากการใช้เมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีกเป็นสารดูดซับแล้วที่อัตราการป้อน 5.90 และ 7.86 มิลลิลิตรต่อนาทีไม่สามารถทำให้ความเข้มข้นของเอทานอลในช่วงต้นเพิ่มขึ้นจนถึง 99.5 เปอร์เซ็นต์ได้ จากแนวโน้มของกราฟที่เมื่ออัตราการป้อนลดลงจะทำให้ความเข้มข้นเอทานอลสูงขึ้น จึงทำการทดลองโดยใช้อัตราการป้อนที่ 3.94 มิลลิลิตรต่อนาที หรือคิดเป็น 40 เปอร์เซ็นต์ของอัตราการป้อนสูงสุด แทนอัตราการป้อนที่ 9.83 มิลลิลิตรต่อนาที. ผลการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส, ที่อัตราการป้อน 3.94 มิลลิลิตรต่อนาที, ในช่วงเวลาที่ 0 ถึง 5, จะได้ความเข้มข้น 99.55 ถึง 99.47 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก. ส่วนสถานะอื่นๆ ที่ทำการทดสอบพบว่า ไม่มีสถานะใดที่ทำให้ได้ความเข้มข้นสูงกว่า 99.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจากตารางผนวกที่ ข2.1). จากผลการเปรียบเทียบกับการใช้โมเลกุลาร์ซีฟ 3A เป็นสารดูดซับที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส, ที่อัตราการป้อน 5.90 มิลลิลิตรต่อนาที, ซึ่งเป็นสถานะที่ให้ความเข้มข้นของเอทานอลในช่วงต้นสูงที่สุดในการทดสอบ, จะเห็นได้ว่า ถึงแม้ว่าการใช้เมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวเป็นสารดูดซับจะทำให้ได้เอทานอลเข้มข้นสูงกว่า 99.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่ทำได้เพียงในสถานะที่อัตราการป้อนที่ต่ำกว่าและในช่วงระยะเวลาที่สั้นกว่าการใช้โมเลกุลาร์ซีฟ 3A.



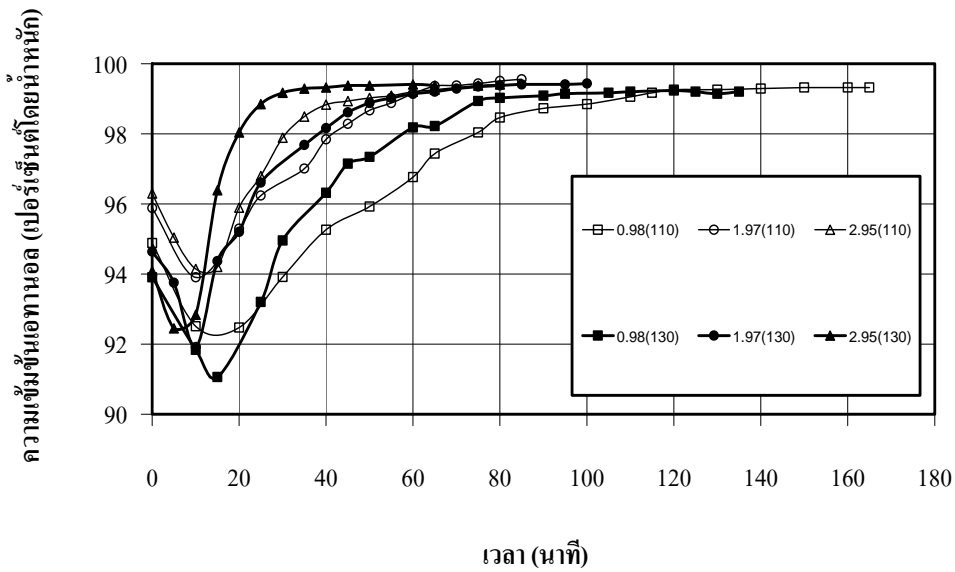
รูปที่ 53. เส้นโค้งการดูดซับไอน้ำจากไอผสมของเอทานอลและน้ำเข้าสู่วัสดุผสมถั่วลอยถ่านหินกับปูนซีเมนต์อัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 110 และ 130 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนเอทานอลเข้มข้น 95.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 5.90, 7.86, และ 9.83 มิลลิลิตรต่อนาที เปรียบเทียบกับโมเลกุลาร์ซีฟ 3A ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส อัตราการป้อน 5.90 มิลลิลิตรต่อนาที.

จากรูปที่ 53, การใช้วัสดุผสมถั่วลอยถ่านหินกับปูนซีเมนต์อัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร เป็นสารดูดซับ, แนวโน้มเส้นกราฟแต่ละสภาวะเป็นเส้นโค้งรูปตัว S กลับด้าน มีลักษณะต่างๆ เหมือนกับการใช้เมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีกเป็นสารดูดซับ. นั่นคือ ขณะเวลาเริ่มต้น, ความเข้มข้นของเอทานอลจะมีค่าสูงสุด. ผลของอุณหภูมิที่อัตราการป้อนเดียวกันจะเห็นได้ว่า ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของเอทานอลจะมีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส. ส่วนสภาวะที่ความเข้มข้นของเอทานอลมีค่ามากกว่า 99.5 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงเวลาที่ 0 ถึง 5 มี 3 สภาวะ, คือที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส อัตราการป้อน 5.90 มิลลิลิตรต่อนาที ได้ความเข้มข้น 99.76-99.70 เปอร์เซ็นต์, ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส อัตราการป้อน 7.86 มิลลิลิตรต่อนาที ได้ความเข้มข้น 99.57-99.55 เปอร์เซ็นต์, และที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส อัตราการป้อน 5.90 มิลลิลิตรต่อนาที ได้ความเข้มข้น 99.68-99.59 เปอร์เซ็นต์ (ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจากตารางผนวกที่ ข3.1). จากการเปรียบเทียบกับการใช้โมเลกุลาร์ซีฟ 3A เป็นสารดูดซับ ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ที่อัตรา

การป้อน 5.90 มิลลิลิตรต่อนาที, จะเห็นได้ว่า แม้ว่าจะสามารถใช้วัสดุผสมแก้ลดย่านหินกับปูนซี-
 เมนซ์เป็นสารดูดซับแล้วทำให้ได้เอทานอลเข้มข้นสูงกว่า 99.5 เปอร์เซ็นต์ ถึง 3 สภาวะ แต่ว่ามี
 ช่วงเวลาการดูดซับที่สั้นกว่า. หลังจากนาที่ที่ 5 ความเข้มข้นของเอทานอลจะลดลงอย่างรวดเร็วกว่า
 ทั้งการใช้โมเลกุลาร์ซีฟ 3A และเมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีกเป็นสารดูดซับ ซึ่งก็สอดคล้องกับผล
 การทดลองหาสมมูลในการดูดซับตามรูปที่ 51 โดยเนื่องมาจากการมีความจุไอน้ำที่น้อยกว่า.



รูปที่ 54. เส้นโค้งการคายซับไอน้ำออกจากเมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีก เข้าสู่ไอของเอทานอล
 ใรน้ำที่ป้อนเข้า ในสภาวะความดันสูญญากาศ -0.4 ถึง -0.3 บาร์ อุณหภูมิ 110 และ
 130 องศาเซลเซียส โดยป้อนเอทานอลใรน้ำที่อัตราการป้อน 0.98, 1.97, และ 2.95
 มิลลิลิตรต่อนาที.



รูปที่ 55. เส้นโค้งการคายซับไอน้ำออกจากวัสดุผสมถ้ำลอยถ่านหินกับปูนซีเมนต์อัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร เข้าสู่ไอของเอทานอลไรรู้ที่ป้อนเข้า ในสภาวะความดันสูญญากาศ -0.4 ถึง -0.3 บาร์ อุณหภูมิ 110 และ 130 องศาเซลเซียส โดยป้อนเอทานอลไรรู้ที่อัตราการป้อน 0.98, 1.97, และ 2.95 มิลลิตรต่อนาที.

จากรูปที่ 54 และ 55, แสดงให้เห็นว่า สารดูดซับทั้ง 2 ประเภท ได้แก่ เมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีกและวัสดุผสมถ้ำลอยถ่านหินกับปูนซีเมนต์อัตราส่วน 3 ต่อ 1 สามารถฟื้นฟูสภาพกลับ (regenerate) โดยใช้วิธีการคายซับด้วยการป้อนเอทานอลไรรู้. แนวโน้มของกราฟจะคล้ายคลึงกับ โมเลกุลาร์ซีฟ 3A, โดยเส้นกราฟแต่ละเส้นจะเป็นเส้นโค้งรูปตัว S. ในช่วงเวลาเริ่มต้นความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบดจะลดลงจนถึงค่าต่ำสุด เนื่องจากมีไอน้ำที่คายซับออกจากเบดที่อิ่มตัวด้วยไอน้ำในปริมาณมาก ซึ่งอัตราการป้อนที่ต่ำจะทำให้ความเข้มข้นต่ำสุดของเอทานอลมีค่าน้อยกว่าที่อัตราการป้อนที่สูง. ส่วนผลของอุณหภูมิต่อความเข้มข้นต่ำสุด, จะเห็นได้ว่าที่อัตราป้อนเท่ากันที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ให้ความเข้มข้นของเอทานอลที่จุดต่ำสุดมีค่าน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส. แสดงให้เห็นว่า ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส มีการคายซับไอน้ำออกจากสารดูดซับทั้ง 2 ชนิดนี้ได้มากกว่าที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส. หลังจากความเข้มข้นถึงค่าต่ำสุดแล้ว ที่เวลาผ่านไปความเข้มข้นของเอทานอลจะเพิ่มขึ้น จนใกล้กับค่าของความเข้มข้นเอทานอลไรรู้ที่ป้อนเข้าเนื่องจากเบดมีสถานะเข้าใกล้สภาวะที่ปราศจากไอน้ำ (ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจากตารางผนวกที่ ข2.2 และ ข3.2).

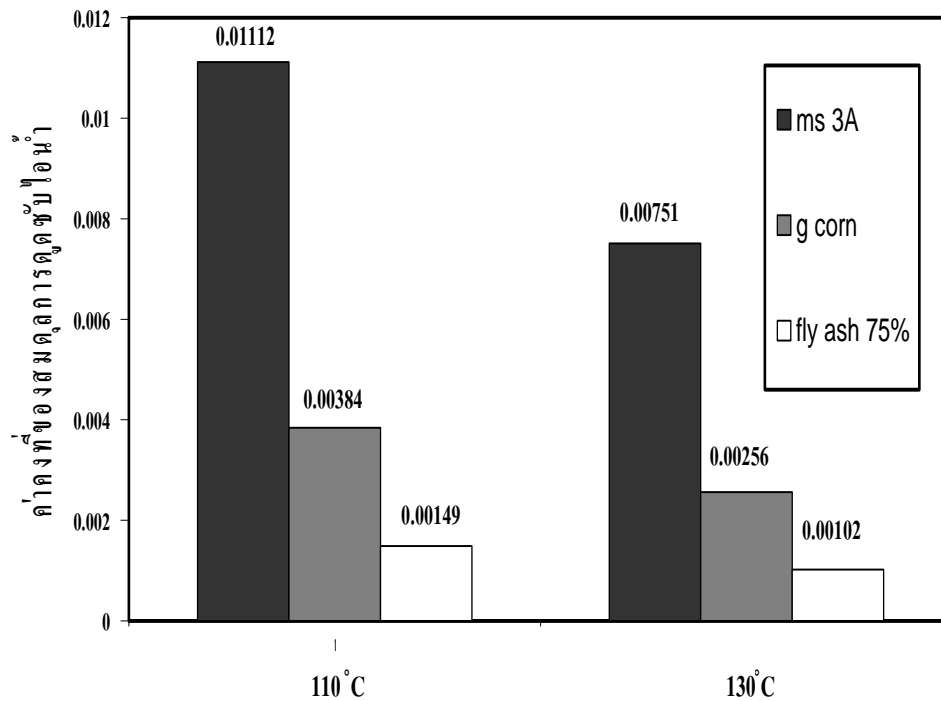
6.4 การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับและคายซับไอน้ำของสารดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟ 3A กับวัสดุจากท้องถิ่นประเภทเมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีก และวัสดุผสมถ้ำลอยถ่านหินกับปูนซีเมนต์อัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร

6.4.1 การเปรียบเทียบค่าคงที่ของสมดุลการดูดซับไอน้ำที่อุณหภูมิคงที่

ในหัวข้อนี้จะทำการเปรียบเทียบ โดยพิจารณาค่าคงที่ของสมดุลการดูดซับไอน้ำที่อุณหภูมิคงที่ ซึ่งได้จากค่าความชันของความสัมพันธ์ระหว่างความจุของไอน้ำของสารดูดซับกับความเข้มข้นไอผสมของเอทานอลและน้ำรอบๆ สารดูดซับ, และอัตราส่วนค่าคงที่สมดุลของโมเลกุลาร์ซีฟ 3A ต่อค่าคงที่สมดุลของสารดูดซับเมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีก, และวัสดุผสมถ้ำลอยถ่านหินกับปูนซีเมนต์อัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร ซึ่งใช้เปรียบเทียบความจุไอน้ำของสารดูดซับกับ โมเลกุลาร์ซีฟ 3A, ดังแสดงในตารางที่ 8 และรูปที่ 56.

ตารางที่ 8. ค่าคงที่ของสมดุลการดูดซับไอน้ำของสารดูดซับที่อุณหภูมิคงที่

	ค่าคงที่สมดุล		อัตราส่วนค่าคงที่สมดุล	
	110 °ซ.	130 °ซ.	110 °ซ.	130 °ซ.
ชนิดของสารดูดซับ	110 °ซ.	130 °ซ.	110 °ซ.	130 °ซ.
1. โมเลกุลาร์ซีฟ 3A	0.01112	0.00751	1	1
2. เมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีก	0.00384	0.00256	2.898	2.932
3. วัสดุผสมถ้ำลอยถ่านหินกับ ปูนซีเมนต์อัตราส่วน 3 ต่อ 1	0.00149	0.00102	7.448	7.377
โดยปริมาตร				



รูปที่ 56. แท่งเปรียบเทียบค่าคงที่ของสมมูลการดูดซับไอน้ำ.

หมายเหตุ: ms 3A คือ โมเลกุลาร์ซีฟ 3A, g corn คือ เมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีก, fly ash 75% คือ วัสดุผสมเถ้าลอยถ่านหินกับปูนซีเมนต์อัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร

6.4.2 การเปรียบเทียบสภาวะที่ใช้ในการทดลองหาเส้นโค้งการดูดซับซึ่งทำให้ได้ความเข้มข้นเอทานอลที่ออกจากเบตมากกว่า 99.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

เนื่องจากในการผลิตเอทานอลไร้น้ำ มีความต้องการผลิตเอทานอลที่มีความเข้มข้นมากกว่า 99.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์, จึงทำการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับไอน้ำของสารดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟ 3A กับวัสดุจากท้องถิ่นประเภทเมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีก และวัสดุผสมเถ้าลอยถ่านหินกับปูนซีเมนต์อัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร. โดยพิจารณาในด้านของสภาวะที่ใช้ในการทดลองคือ อัตราการป้อน, อุณหภูมิ และเวลาที่เอทานอลที่ออกจากเบตมีความเข้มข้นสูงกว่า 99.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก, ดังแสดงในตารางที่ 9.

ตารางที่ 9. สภาพะที่ใช้ในการทดลองหาเส้นโค้งการดูดซับซึ่งทำให้ได้ความเข้มข้นเอทานอลที่ออก
จากเบตมากกว่า 99.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

	ชนิดของสารดูดซับ		
	โมเลกุลาร์ซีฟ 3A	เมล็ดข้าวโพดข้าว เหนียวผ่าซีก	ถ้ำลอยถ่านหินกับปูนซี เมนต์อัตราส่วน 3 ต่อ 1
อัตราการป้อน (มล./นาที)	5.9	3.94	5.9
อุณหภูมิ (°ซ.)	129.6	108.4	108.9
ช่วงเวลา (นาที)	10 – 35	0 - 5	0 - 5
ความเข้มข้น (wt%)	99.57 - 99.54	99.55 - 99.47	99.76 - 99.70
อัตราการป้อน (มล./นาที)	7.86		7.86
อุณหภูมิ (°ซ.)	130.5		109.1
ช่วงเวลา (นาที)	15 – 30		0 - 5
ความเข้มข้น (wt%)	99.51 - 99.51		99.57 - 99.55
อัตราการป้อน (มล./นาที)			5.9
อุณหภูมิ (°ซ.)			128.5
ช่วงเวลา (นาที)			0 - 5
ความเข้มข้น (wt%)			99.68 - 99.59

6.4.3 การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองหาเส้นโค้งการคายซับไอน้ำออกจากสารดูดซับ

การเปรียบเทียบความสามารถในการคายซับไอน้ำออกจากสารดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟ 3A กับ
วัสดุจากท้องถิ่นประเภทเมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีก และวัสดุผสมถ้ำลอยถ่านหินกับปูนซีเมนต์
อัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร, โดยพิจารณาเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองหาเส้นโค้งการคาย
ซับ 3 ค่า, คือ:-

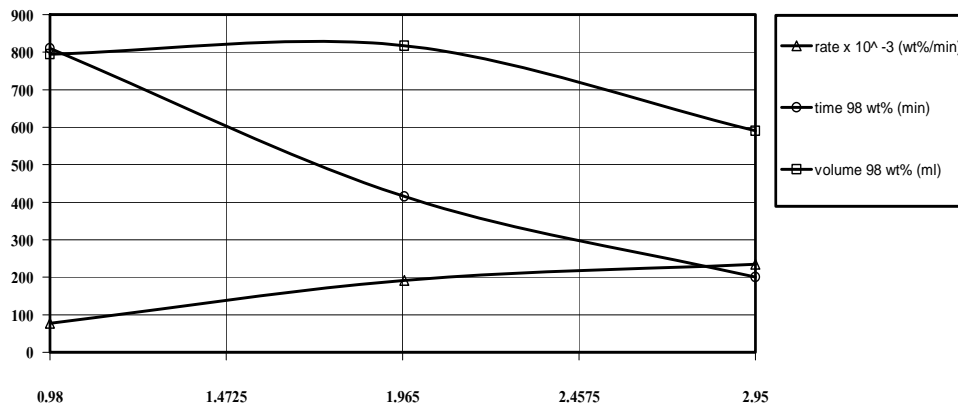
1. อัตราการลดลงของความเข้มข้นเอทานอลที่ออกจากเบต ตั้งแต่เวลาเริ่มต้นจนถึงเวลาที่
ความเข้มข้นลดลงจนถึงจุดต่ำสุด.

2. เวลาที่ใช้เมื่อความเข้มข้นเอทานอลที่ออกจากเบดเพิ่มขึ้นจนถึง 98 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

3. ปริมาตรของเอทานอลใรน้ำที่ใช้ป้อน เมื่อความเข้มข้นเอทานอลที่ออกจากเบดเพิ่มขึ้นจนถึง 98 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก, ดังแสดงในตารางที่ 10.

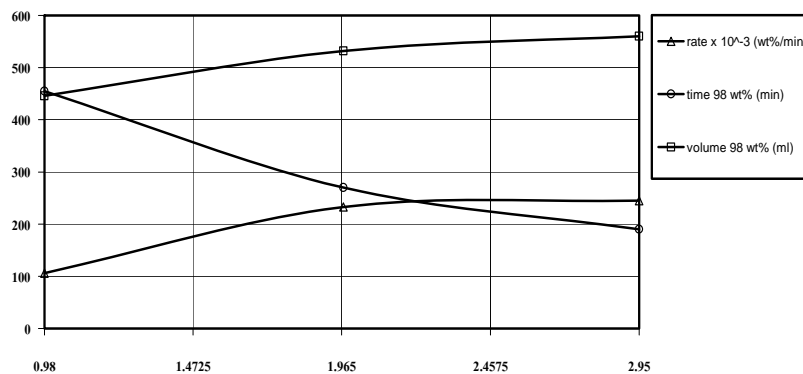
ตารางที่ 10. เปรียบเทียบค่าต่างๆ ที่ได้จากการทดลองหาเส้นโค้งการคายซับไอน้ำออกจากสารดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟ 3A เมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีก และวัสดุผสมถ้ำลอยถ่านหินกับปูนซีเมนต์อัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร

		อุณหภูมิ 110 °ซ.			อุณหภูมิ 130 °ซ.		
		อัตราป้อน (มล./นาที่)			อัตราป้อน (มล./นาที่)		
		0.98	1.97	2.95	0.98	1.97	2.95
โมเลกุลาร์ซีฟ 3A	อัตราการของความเข้มข้นจนถึงจุดต่ำสุด (wt%/นาที่)	0.077	0.192	0.235	0.106	0.233	0.245
	เวลาขณะความเข้มข้นเพิ่ม 98 wt% (นาที่)	810	415	200	455	270	190
	ปริมาตรที่ป้อนที่เวลาขณะความเข้มข้น 98 wt% (มล.)	794	817	590	446	532	560
เมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีก	อัตราการของความเข้มข้นจนถึงจุดต่ำสุด (wt%/นาที่)	0.216	0.4	0.507	0.237	0.532	0.616
	เวลาขณะความเข้มข้นเพิ่ม 98 wt% (นาที่)	115	70	37	105	53	27
	ปริมาตรที่ป้อนที่เวลาขณะความเข้มข้น 98 wt% (มล.)	113	138	109	103	104	79
วัสดุผสมถ้ำลอยถ่านหินกับปูนซีเมนต์อัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร	อัตราการของความเข้มข้นจนถึงจุดต่ำสุด (wt%/นาที่)	0.12	0.198	0.215	0.189	0.272	0.328
	เวลาขณะความเข้มข้นเพิ่ม 98 wt% (นาที่)	75	43	31	59	39	20
	ปริมาตรที่ป้อนที่เวลาขณะความเข้มข้น 98 wt% (มล.)	73	85	91	58	77	59



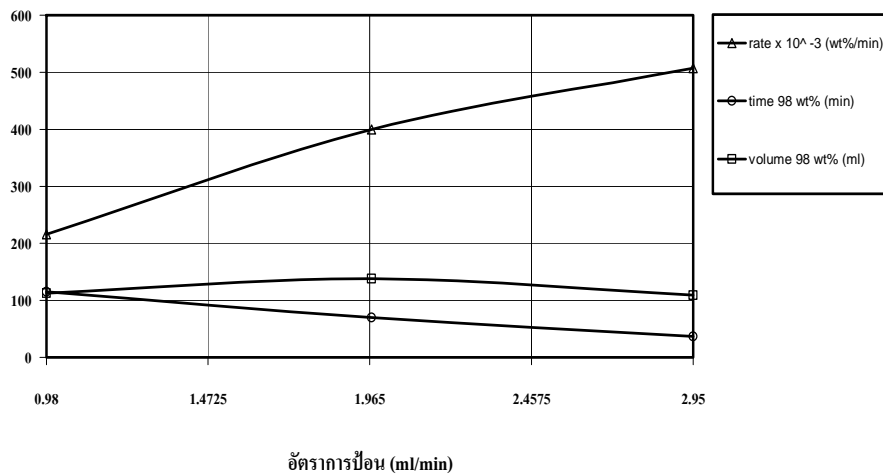
อัตราการป้อน (ml/min)

รูปที่ 57. ความสัมพันธ์ของอัตราการป้อนเอทานอลไร้น้ำที่มีต่ออัตราการลดลงของความเข้มข้นเอทานอลจนถึงจุดต่ำสุด เวลาที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจนถึง 98 เปอร์เซ็นต์ และปริมาตรของเอทานอลไร้น้ำที่ใช้ในการป้อนขณะเวลาที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจนถึง 98 เปอร์เซ็นต์ เพื่อทำการคายซับไอน้ำออกจากโมเลกุลาร์ซีฟ 3A ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ความดันสุญญากาศ -0.4 ถึง -0.3 บาร์.

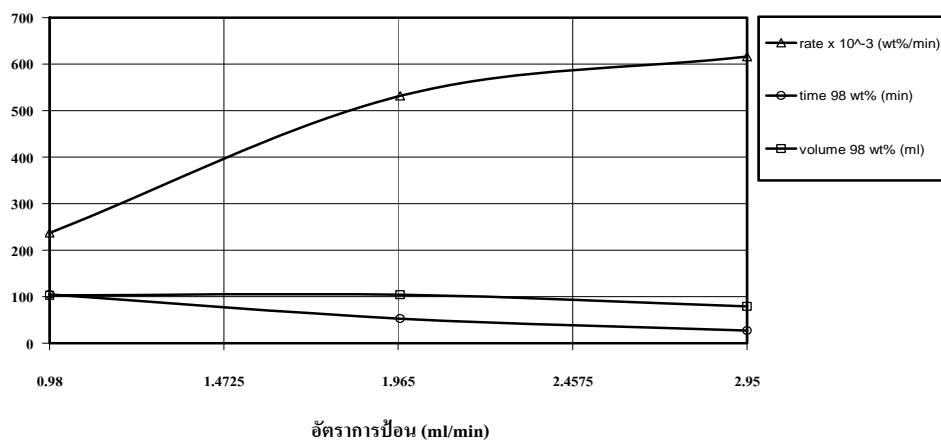


อัตราการป้อน (ml/min)

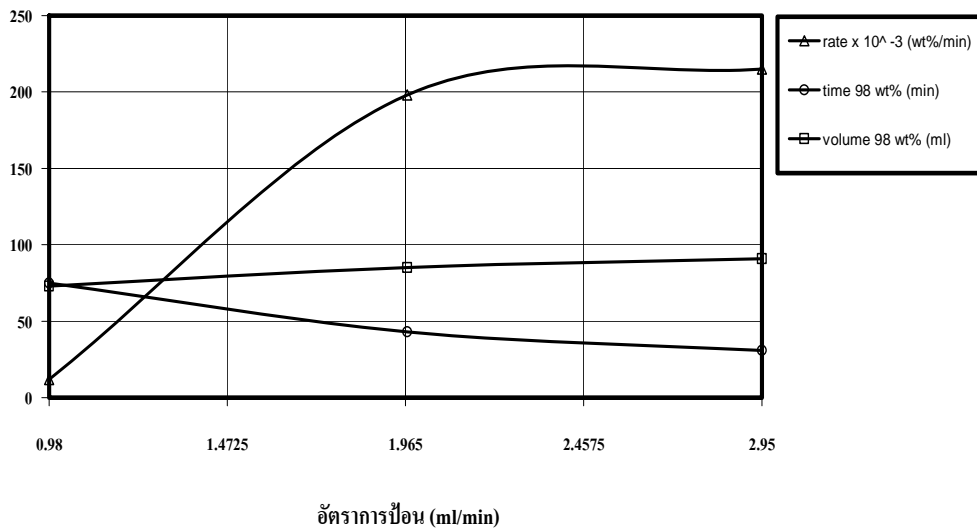
รูปที่ 58. ความสัมพันธ์ของอัตราการป้อนเอทานอลไร้น้ำที่มีต่อ อัตราการลดลงของความเข้มข้นเอทานอลจนถึงจุดต่ำสุด เวลาที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจนถึง 98 เปอร์เซ็นต์ และปริมาตรของเอทานอลไร้น้ำที่ใช้ในการป้อนขณะเวลาที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจนถึง 98 เปอร์เซ็นต์ เพื่อทำการคายซับไอน้ำออกจากโมเลกุลาร์ซีฟ 3A ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ความดันสุญญากาศ -0.4 ถึง -0.3 บาร์.



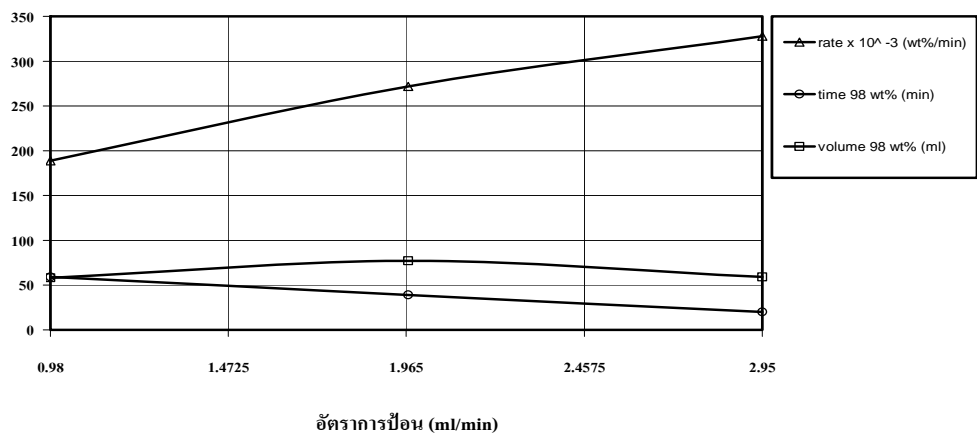
รูปที่ 59. ความสัมพันธ์ของอัตราการป้อนเอทานอลไร้น้ำที่มีต่อ อัตราการลดลงของความเข้มข้นเอทานอลจนถึงจุดต่ำสุด เวลาที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจนถึง 98 เปอร์เซ็นต์ และปริมาตรของเอทานอลไร้น้ำที่ใช้ในการป้อนขณะเวลาที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจนถึง 98 เปอร์เซ็นต์ เพื่อทำการคายซับไอน้ำออกจากเมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีก ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ความดันสุญญากาศ -0.4 ถึง -0.3 บาร์.



รูปที่ 60. ความสัมพันธ์ของอัตราการป้อนเอทานอลไร้น้ำที่มีต่อ อัตราการลดลงของความเข้มข้นเอทานอลจนถึงจุดต่ำสุด เวลาที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจนถึง 98 เปอร์เซ็นต์ และปริมาตรของเอทานอลไร้น้ำที่ใช้ในการป้อนขณะเวลาที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจนถึง 98 เปอร์เซ็นต์ เพื่อทำการคายซับไอน้ำออกจากเมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีก ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ความดันสุญญากาศ -0.4 ถึง -0.3 บาร์.



รูปที่ 61. ความสัมพันธ์ของอัตราการป้อนเอทานอลไร้น้ำที่มีต่อ อัตราการลดลงของความเข้มข้นเอทานอลจนถึงจุดต่ำสุด เวลาที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจนถึง 98 เปอร์เซ็นต์ และปริมาตรของเอทานอลไร้น้ำที่ใช้ในการป้อนขณะเวลาที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจนถึง 98 เปอร์เซ็นต์ เพื่อทำการคายซับไอน้ำออกจากวัสดุผสมเถ้านหินกับปูนซีเมนต์อัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ความดันสุญญากาศ -0.4 ถึง -0.3 บาร์.



รูปที่ 62. ความสัมพันธ์ของอัตราการป้อนเอทานอลไร้น้ำที่มีต่อ อัตราการลดลงของความเข้มข้นเอทานอลจนถึงจุดต่ำสุด เวลาที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจนถึง 98 เปอร์เซ็นต์ และปริมาตรของเอทานอลไร้น้ำที่ใช้ในการป้อนขณะเวลาที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจนถึง 98 เปอร์เซ็นต์ เพื่อทำการคายซับไอน้ำออกจากวัสดุผสมเถ้านหินกับปูนซีเมนต์อัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ความดันสุญญากาศ -0.4 ถึง -0.3 บาร์.

จากรูปที่ 57, 59, 60, และ 62 ควรที่จะใช้อัตราการป้อนเอทานอลไร้น้ำด้วยอัตราการป้อน 2.95 มิลลิลิตรต่อนาที, หรือ 30 เปอร์เซ็นต์ของอัตราการป้อนสูงสุด, เนื่องจากจะทำให้อัตราการลดลงของความเข้มข้นมีค่าสูงสุดในขณะที่ใช้เวลาและปริมาตรในการป้อนเอทานอลไร้น้ำน้อยที่สุด.

จากรูปที่ 58 และ 61 ควรที่จะใช้อัตราการป้อนเอทานอลไร้น้ำด้วยอัตราการป้อน 1.97 มิลลิลิตรต่อนาที, หรือ 20 เปอร์เซ็นต์ของอัตราการป้อนสูงสุด, เนื่องจากมีอัตราการลดลงของความเข้มข้นที่สูงใกล้เคียงกับอัตราการป้อน 2.95 มิลลิลิตรต่อนาที, อีกทั้งใช้เวลาพอประมาณในขณะที่ปริมาตรในการป้อนไม่สูงเกินไป.

7. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับและการคายซับไอน้ำของสารดูดซับที่ใช้ในอุตสาหกรรมกับวัสดุจากท้องถิ่น โดยใช้เครื่องดูดซับเบดนิ่งแบบเปลี่ยนแปลงความดันในกระบวนการผลิตเอทานอลไร้น้ำ, สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้:-

1. ค่าคงที่สมดุลการดูดซับไอน้ำที่อุณหภูมิ 110 และ 130 องศาเซลเซียสของโมเลกุลาร์ซีฟ 3A มีค่าสูงกว่าเมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีก 2.9 เท่า และสูงกว่าวัสดุผสมถั่วลอ่ยถ่านหินกับปูนซีเมนต์อัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร 7.4 เท่า.

2. จากเส้นโค้งการดูดซับไอน้ำของโมเลกุลาร์ซีฟ 3A ที่อุณหภูมิต่างๆ, อัตราการป้อนที่ลดลงจะทำให้ความเข้มข้นเอทานอลที่ออกจากเบดในช่วงต้นสูงขึ้น ส่วนที่อัตราการป้อนคงที่, อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียสจะทำให้ได้ความเข้มข้นเอทานอลที่ออกจากเบดในช่วงต้นสูงขึ้นกว่าที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส. ส่วนเส้นโค้งการดูดซับของเมล็ดข้าวโพด, ข้าวเหนียวผ่าซีกและวัสดุผสมถั่วลอ่ย, ถ่านหินกับปูนซีเมนต์ อัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิต่างๆ, อัตราการป้อนที่ลดลงจะทำให้ความเข้มข้นเอทานอลที่ออกจากเบดในช่วงต้นสูงขึ้นเช่นเดียวกัน. แต่ที่อัตราป้อนคงที่, อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสจะทำให้ได้ความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบดในช่วงต้นสูงขึ้นกว่าที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส.

3. จากเส้นโค้งการคายซับไอน้ำในสภาวะความดันสูญญากาศ -0.4 ถึง -0.3 บาร์ พบว่า วัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิดสามารถฟื้นฟูสภาพกลับได้โดยการป้อนเอทานอลไร้น้ำ, และมีการคายซับไอน้ำที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียสได้ดีกว่าที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส.

8. เอกสารอ้างอิง

- นามโท ชีระพงษ์. 2542. การผลิตซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 จากเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 83 หน้า.
- ศรินรคุตร ชีรภัทร. 2547. การศึกษาผลของสายพันธุ์และอายุมันสำปะหลังที่มีต่อการผลิตเอทานอลในระดับโรงงานต้นแบบ, ฝ่ายเทคโนโลยีชีวภาพ กรุงเทพฯ: สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.
- วานิชกิจ นิรุติ. 2546. การสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 จากดินขาว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 97 หน้า.
- แสงเกตุ มัชฌิมา. 2546. การใช้เชื้อพันธุกรรมจากข้าวโพดต่างประเทศเพื่อปรับปรุงสายพันธุ์อินเบรดและลูกผสมของข้าวโพดข้าวเหนียว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (เกษตรศาสตร์) บัณฑิตวิทยาลัย กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 78 หน้า.
- เรืองพรวิสุทธิ วิทยา. 2547. ปฏิกริยาเร่ง เคมีเกี่ยวกับผิวและปิโตรเคมี. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ ส.ส.ท., 144 หน้า.
- ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค). 2547. สถานภาพปัจจุบันและข้อเสนอสู่ออนาคตด้านเชื้อเพลิงและเทคโนโลยีเชื้อเพลิงของประเทศไทย ปทุมธานี: สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.), 113 หน้า.
- อัครทิวา สมชัย. 2546. ความรู้พื้นฐานทางวิศวกรรมของปฏิกริยาเชิงเร่ง, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ ท้อป, 213 หน้า.
- Alpay E., Hag N., Kershenbaum L.S. and Kirkby N.F., 1996. Adsorption parameters for strongly adsorbed hydrocarbon vapours on some commercial adsorbents. *Gas Separation & Purification*, **10**(1), pp: 25-33.
- Banat F.A., Al-Rub F.A.A. and Simandl J., 2000. Analysis of vapor-liquid equilibrium of ethanol-water system via headspace gas chromatography: effect of molecular sieves. *Separation and Purification Technology*, **18**, pp: 111-118.
- Beery K.E., Gulati M., Kvam E.P. and Ladisch M.R., 1998. Effect of enzyme modification of corn grits on their properties as an adsorbent in a skarstrom pressure swing cycle dryer. *Adsorption*, **4**, pp: 321-335.

- Beery K.E. and Ladish M.R., 2001. Chemistry and properties of starch based desiccants. *Enzyme and Microbial Technology*, **28**, pp: 573-581.
- Carmo M.J. and Gubulin J.C., 2002. Ethanol-water separation in the PSA process. *Adsorption*, **8**, pp: 235-248.
- Chang H., Yuan X.G., Tian H. and Zeng A.W., 2006. Experiment and prediction of breakthrough curves for packed bed adsorption of water vapor on cornmeal. *Chemical Engineering and Processing*, **45**, pp: 747-754.
- Geankoplis C.J., 2003. Transport Processes and Separation Process Principles (Includes Unit Operations) 4th Ed., New Jersey, Prentice Hall.
- Ladish M.R., 1997. Biobased adsorbents for drying of gases. *Enzyme and Microbial Technology*, **20**, pp: 162-164.
- Ligero E.L. and Ravagnani T.M.K. 2003. Dehydration of ethanol with salt extractive distillation – a comparative analysis between process with salt recovery. *Chemical Engineering and Processing*, **42**, pp: 543-552.
- Lu L., Shao Q., Huang L. and Lu X. 2007. Simulation of adsorption and separation of ethanol-water mixture with zeolite and carbon nanotube. *Fluid Phase Equilibria*, **261**, pp: 191-198.
- McCabe W.L., Smith J.C. and Harriott P., 2005. Unit operations of Chemical Engineering Seventh edition, Toronto, McGraw-Hill.
- Naono H., Hakuman M., Shimoda M., Nakai K. and Kondo S., 1996. Separation of water and ethanol by the adsorption technique: selective desorption of water from micropores of active carbon. *Journal of Colloid and Interface Science*, **182**, pp: 230-238.
- Perry R.H., Green D.W. and Maloney J.O., 1997. Perry's Chemical Engineers' Handbook Seventh edition, New York, McGraw-Hill.
- Rakshit S.K., Ghosh P. and Bisaria V.S., 1993. Ethanol separation by selective adsorption of water. *Bioprocess Engineering*, **8**, pp: 279-282.
- Sarbak Z., Stanczyk A. and Kramer-Wachowiak M., 2004. Characterisation of surface properties of various fly ashes. *Powder Technology*, **145**, pp: 82-87.
- Seader J.D. and Henley E.J., 2002. Separation Process Principles, New York, John Wiley & Sons.
- Sowerby B. and Crittenden B.D., 1988. An experimental comparison of type A molecular sieves for drying the ethanol-water azeotrope. *Gas Separation & Purification*, **2**, pp: 77-83.

Steenbruggen G. and Hollman G.G., 1998. The synthesis of zeolites from fly ash and the properties of the zeolites from fly ash and the properties of the zeolite products. *Geochemical Exploration*, **62**, pp: 305-309.

Tsuyumoto M., Teramoto A. and Meares P., 1997. Dehydration of ethanol on a pilot-plant scale, using a new type of hollow-fiber membrane. *Journal of Membrane Science*, **133**, pp: 83-94.

ภาคผนวก ก

ผลการทดลองและการคำนวณหาสมมูลของการดูดซับไอน้ำจากไอผสมของเอทานอลและน้ำของ
สารดูดซับในสภาวะอุณหภูมิคงที่

ตารางที่ ก1. ผลการทดลองและการคำนวณหาสมมูลการดูดซับโดยใช้สารดูดซับในอุตสาหกรรม
ชนิดโมเลกุลาร์ซีฟ 3A

ข้อมูลชุดที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ข้อมูลการคายซับด้วยก๊าซไนโตรเจนร้อน										
อุณหภูมิน้ำมันร้อน (°ซ.)	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
อุณหภูมิ TT2 (°ซ.)	119.8	120.2	119.9	119.3	118.3	120.5	118.9	120.6	124.3	119.8
อุณหภูมิ TT3 (°ซ.)	123	123.8	123.2	122.9	122.1	123.8	122.2	123.7	127.2	123
อุณหภูมิ TT4 (°ซ.)	136.8	137.2	136.2	136.5	136.5	137.8	136.6	137	139.6	137.5
อุณหภูมิ TT5 (°ซ.)	132.5	133.5	132	132.5	132.4	133.7	132.5	133.3	136.4	133
อุณหภูมิเฉลี่ยเบด (°ซ.)	128.0	128.7	127.8	127.8	127.3	128.9	127.5	128.6	131.9	128.3
ความดัน PG1 (บาร์)	0.2	0.22	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
ความดัน PG2 (บาร์)	0.08	0.1	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
ความดันคร่อมเบด (บาร์)	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
อัตราไหล N ₂ (l/นาท)	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
ข้อมูลของขั้นตอนสมดุลการดูดซับ										
ความเข้มข้นเริ่มต้น (wt%)	89.2	91.5	93.4	96.3	98.4	90.8	93.3	96.1	97.6	98.7
อัตราการป้อน (มล./นาท)	4.91	4.91	4.91	4.91	4.91	4.91	4.91	4.91	4.91	4.91
ปริมาตรเริ่มต้น (มล.)	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600
อุณหภูมิน้ำมันร้อน (°ซ.)	150	150	150	150	150	175	175	175	175	175
อุณหภูมิ TT1 (°ซ.)	106.5	107.1	107.5	106.8	106.6	135.5	137.3	134	136.3	135.8
อุณหภูมิ TT2 (°ซ.)	110	115	113.7	111.7	115.2	136.2	134.8	133.2	134.2	132.8
อุณหภูมิ TT3 (°ซ.)	116.8	111.2	113	115.2	111.2	131.1	131.8	140	143	139.2
อุณหภูมิ TT4 (°ซ.)	106.3	107.3	107.5	106.5	106.5	124.8	124.4	122.7	122.2	122.4
อุณหภูมิ TT5 (°ซ.)	107.8	109	105.3	108	109	126.5	125.1	125.2	125.5	124.6
อุณหภูมิเฉลี่ยเบด (°ซ.)	110.2	110.6	111.6	110.3	110.5	129.6	129.0	130.3	131.2	129.7

ตารางที่ ก1. (ต่อ)

ความดัน PG1 (บาร์)	0.16	0.19	0.17	0.15	0.12	0.15	0.18	0.16	0.14	0.17
ความดัน PG2 (บาร์)	0.2	0.23	0.2	0.19	0.17	0.2	0.25	0.2	0.2	0.21
ข้อมูลของขั้นตอนสมดุลการดูดซับ										
ความดันคร่อมเบด (บาร์)	0.04	0.04	0.03	0.04	0.05	0.05	0.07	0.04	0.06	0.04
ความเข้มข้นสมดุล (wt%)	94.5	95.7	96.6	98.1	99.2	94.5	96.0	97.7	98.6	99.2
ค่าที่คำนวณจากการทดลอง (บรรจุสารดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟ 3A จำนวน 429.97 กรัม)										
น้ำหนักน้ำเริ่มต้น (g)	50.5	39.4	30.3	16.8	7.4	42.7	30.7	17.7	10.7	6.0
น้ำหนักน้ำที่สมดุล (g)	24.2	19.1	15.3	8.2	3.6	24.5	17.9	10.2	6.0	3.4
น้ำหนักน้ำที่ดูดซับไว้ (g)	26.3	20.4	15.0	8.5	3.8	18.1	12.8	7.5	4.7	2.6
ความจุไอน้ำ	0.06	0.04	0.03	0.02	0.008	0.042	0.029	0.017	0.011	0.006

ตารางที่ ก2. ผลการทดลองและการคำนวณหาสมมูลการดูดซับโดยใช้สารดูดซับจากวัสดุท้องถิ่นชนิดเมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีก

ข้อมูลชุดที่	1	2	3	4	5	6	7	8
ข้อมูลการคายซับด้วยก๊าซไนโตรเจนร้อน								
อุณหภูมิของน้ำมันร้อน (°ซ.)	150	150	150	150	150	150	150	150
อุณหภูมิที่ตำแหน่ง TT2 (°ซ.)	120.5	122.5	125.2	125.2	125.6	127	126.9	127.1
อุณหภูมิที่ตำแหน่ง TT3 (°ซ.)	125.6	126	127.8	127.6	128.2	129.5	128.8	129.5
อุณหภูมิที่ตำแหน่ง TT4 (°ซ.)	135.8	137.6	138.7	139.2	139	140.5	139.5	139.8
อุณหภูมิที่ตำแหน่ง TT5 (°ซ.)	130.8	132	133.4	134.2	134	135.3	134.4	134.6
อุณหภูมิเฉลี่ยของเบด (°ซ.)	128.18	129.53	131.28	131.55	131.7	133.08	132.4	132.75
ความดันตำแหน่ง PG1(บาร์)	0.2	0.22	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
ความดันตำแหน่ง PG2(บาร์)	0.1	0.1	0.1	0.09	0.1	0.1	0.1	0.08
ความดันคร่อมเบด (บาร์)	0.1	0.12	0.1	0.11	0.1	0.1	0.1	0.12
อัตราไหลไนโตรเจน (l/นาท)	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
ข้อมูลของขั้นตอนสมมูลการดูดซับ								
ความเข้มข้นเริ่มต้น (wt%)	93.463	95.517	97.163	98.672	94.209	95.327	97.231	98.73
อัตราการป้อน (มล./นาท)	4.91	4.91	4.91	4.91	4.91	4.91	4.91	4.91
ปริมาตรเริ่มต้น (มล.)	600	600	600	600	600	600	600	600
อุณหภูมิของน้ำมันร้อน (°ซ.)	150	150	150	150	175	175	175	175
อุณหภูมิที่ตำแหน่ง TT1 (°ซ.)	119.5	118.4	106	106.3	124.4	135.3	133.8	133.6
อุณหภูมิที่ตำแหน่ง TT2 (°ซ.)	126.2	125	121.7	123.6	148.4	143	145.5	145.3
อุณหภูมิที่ตำแหน่ง TT3 (°ซ.)	125.7	124.5	122.5	122.8	149.4	142.8	144.9	145.8
อุณหภูมิที่ตำแหน่ง TT4 (°ซ.)	91.8	92.8	96.9	94.2	109.3	117.2	112.6	111.9
อุณหภูมิที่ตำแหน่ง TT5 (°ซ.)	92.5	94.7	95.8	95.6	109.1	114.2	113.5	113.5
อุณหภูมิเฉลี่ยของเบด (°ซ.)	109.05	109.25	109.23	109.05	129.05	129.3	129.13	129.13
ความดันตำแหน่ง PG1(บาร์)	0.2	0.22	0.2	0.2	0.22	0.22	0.22	0.2
ความดันตำแหน่ง PG2(บาร์)	0.3	0.32	0.3	0.3	0.35	0.32	0.32	0.32
ความดันคร่อมเบด (บาร์)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.13	0.1	0.1	0.12
ความเข้มข้นที่สมดุล (wt%)	94.574	96.244	97.651	98.968	94.851	95.768	97.482	98.85
ค่าที่คำนวณจากการทดลอง (บรรจุสารดูดซับเมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีก จำนวน 241.62 กรัม)								
น้ำหนักน้ำเริ่มต้น (g)	30.21	20.607	12.984	6.0537	26.71	21.491	12.671	5.7884

ตารางที่ ก2. (ต่อ)

น้ำหนักน้ำที่สภาวะสมดุล (g)	24.781	17.135	10.697	4.6903	23.589	19.373	11.493	5.2351
น้ำหนักน้ำที่ถูกดูดซับไว้ (g)	5.429	3.4722	2.2872	1.3634	3.1219	2.1177	1.1782	0.5533
ความจุไอน้ำ	0.0225	0.0144	0.0095	0.0056	0.0129	0.0088	0.0049	0.0023

ตารางที่ ก3. ผลการทดลองและการคำนวณหาสมดุลการดูดซับโดยใช้สารดูดซับจากวัสดุท้องถิ่น ชนิดวัสดุผสมถ้ำลอยถ่านหินกับปูนซีเมนต์อัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร

ข้อมูลชุดที่	1	2	3	4	5	6	7	8
ข้อมูลการคายซับด้วยก๊าซในโตรเจนร้อน								
อุณหภูมิของน้ำมันร้อน (°ซ.)	150	150	150	150	150	150	150	150
อุณหภูมิที่ตำแหน่ง TT2 (°ซ.)	125.6	124.6	125.7	126.1	125	125.8	126.5	126.6
อุณหภูมิที่ตำแหน่ง TT3 (°ซ.)	127.2	125.9	126.8	127.1	126.3	127.1	127.7	127.9
อุณหภูมิที่ตำแหน่ง TT4 (°ซ.)	137.4	137.3	138.6	138.1	137.8	138	139	139.3
อุณหภูมิที่ตำแหน่ง TT5 (°ซ.)	130.7	130.7	132	131.6	131.5	131.6	132.4	132.8
อุณหภูมิเฉลี่ยของเบด (°ซ.)	130.23	129.63	130.78	130.73	130.15	130.63	131.4	131.65
ความดันตำแหน่ง PG1(บาร์)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
ความดันตำแหน่ง PG2(บาร์)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
ความดันคร่อมเบด (บาร์)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
อัตราไหลในโตรเจน (l/นาท)	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
ข้อมูลของขั้นตอนสมดุลการดูดซับ								
ความเข้มข้นเริ่มต้น (wt%)	93.626	94.755	96.764	98.642	94.978	96.206	97.133	98.164
อัตราการป้อน (มล./นาท)	4.91	4.91	4.91	4.91	4.91	4.91	4.91	4.91
ปริมาตรเริ่มต้น (มล.)	600	600	600	600	600	600	600	600
อุณหภูมิของน้ำมันร้อน (°ซ.)	150	150	150	150	175	175	175	175
อุณหภูมิที่ตำแหน่ง TT1 (°ซ.)	116.2	118.5	119.3	117.2	133.1	133.1	134.7	134.4
อุณหภูมิที่ตำแหน่ง TT2 (°ซ.)	123.8	123.7	123.2	124.7	144.4	144.5	145.1	145.5
อุณหภูมิที่ตำแหน่ง TT3 (°ซ.)	123.9	123.1	125.3	123.1	142.6	144.6	145.8	145.5
อุณหภูมิที่ตำแหน่ง TT4 (°ซ.)	95.4	95.7	94.6	94.7	115.6	117.6	113	115.4
อุณหภูมิที่ตำแหน่ง TT5 (°ซ.)	95.6	94.6	94.6	95.6	115.5	117.3	113.6	115.1
อุณหภูมิเฉลี่ยของเบด (°ซ.)	109.68	109.28	109.43	109.53	129.53	131	129.38	130.38

ตารางที่ ก3. (ต่อ)

ความดันตำแหน่ง PG1(บาร์)	0.15	0.15	0.15	0.15	0.2	0.18	0.18	0.2
ความดันตำแหน่ง PG2(บาร์)	0.22	0.22	0.22	0.22	0.3	0.28	0.28	0.28
ความดันคร่อมเบด (บาร์)	0.07	0.07	0.07	0.07	0.1	0.1	0.1	0.08
ความเข้มข้นที่สมดุล (wt%)	94.182	95.189	97.041	98.75	95.305	96.455	97.316	98.294
ค่าที่คำนวณจากการทดลอง (บรรจุสารดูดซับวัสดุผสมแล้วลอยถ่านหิน และปูนซีเมนต์อัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร จำนวน 321.80 กรัม)								
น้ำหนักน้ำเริ่มต้น (g)	29.444	24.157	14.826	6.191	23.117	17.408	13.123	8.3807
น้ำหนักน้ำที่สภาวะสมดุล (g)	26.717	22.058	13.518	5.6924	21.538	16.224	12.262	7.777
ค่าที่คำนวณจากการทดลอง (บรรจุสารดูดซับวัสดุผสมแล้วลอยถ่านหิน และปูนซีเมนต์อัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร จำนวน 321.80 กรัม)								
น้ำหนักน้ำที่ถูกดูดซับไว้ (g)	2.7271	2.1	1.308	0.4986	1.5794	1.1845	0.8607	0.6037
ความจุไอน้ำ	0.0085	0.0065	0.0041	0.0015	0.0049	0.0037	0.0027	0.0019

ตัวอย่างการคำนวณหาความจุไอน้ำของสารดูดซับในการทดลองหาสมดุลการดูดซับไอน้ำที่อุณหภูมิคงที่ของโมเลกุลาร์ซีฟ 3A ชุดการทดลองที่ 10

สมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณ

1. ระบบประกอบด้วยเอทานอล น้ำ และสารดูดซับ
2. มวลของระบบไม่มีการสูญเสีย
3. ระบบมีปริมาตรสารละลายเอทานอลเริ่มต้น 600 มิลลิลิตร
4. สารดูดซับดูดซับเฉพาะน้ำ ไม่มีการดูดซับเอทานอล
5. ที่สมดุลการดูดซับไอน้ำ ระบบมีอุณหภูมิคงที่

สัญลักษณ์ที่ใช้

$$w_a = \text{น้ำหนักสารดูดซับ}$$

$$w_e = \text{น้ำหนักเอทานอลไอน้ำ}$$

$$w_{w1} = \text{น้ำหนักน้ำในสารละลายเอทานอล}$$

$$w_{w2} = \text{น้ำหนักน้ำในสารดูดซับ}$$

$$w_s = \text{น้ำหนักสารละลายเอทานอลเริ่มต้น} = w_e + w_{w1} + w_{w2}$$

$$w_w = \text{น้ำหนักน้ำ} = w_{w1} + w_{w2}$$

$$c_i = \text{ความเข้มข้นสารละลายเอทานอลเริ่มต้น}$$

$$c_{eq} = \text{ความเข้มข้นสารละลายเอทานอลที่สมดุลการดูดซับไอน้ำ}$$

ตัวอย่างการคำนวณ

- บรรจุเอทานอลไร้ น้ำในขวดป้อนเอทานอลปริมาตร 600 มิลลิลิตรซึ่งน้ำหนักได้ 454.25 กรัม
- บรรจุเอทานอล 85 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในขวดป้อนเอทานอลปริมาตร 600 มิลลิลิตรซึ่งน้ำหนักได้ 472.36 กรัม
- ความเข้มข้นเอทานอลต่างกัน 100-85 = 15 %w/w น้ำหนักจะต่างกัน 454.25-472.36 = -18.11 g

$$(454.25 - \text{น้ำหนักของสารละลายเอทานอลในขวดป้อน}) / (100 - \text{ความเข้มข้นของเอทานอล})$$

$$= -18.11/15$$

$$= -1.2073$$

หรือ

$$\text{น้ำหนักของสารละลายเอทานอลในขวดป้อน} = 454.25 + 1.2073(100 - \text{ความเข้มข้นของเอทานอล})$$

$$c_i = 98.672 \%wt$$

$$c_{eq} = 99.245 \%wt$$

$$w_s = 454.25 + 1.2073(100 - c_i) = 454.25 + 1.2073(100 - 98.672)$$

$$= 455.853 \text{ กรัม}$$

$$w_w = w_s(100 - c_i) / 100 = w_s(100 - 98.672) / 100$$

$$= 6.054 \text{ กรัม}$$

$$w_e = w_s - w_w = 455.853 - 6.054$$

$$= 449.799 \text{ กรัม}$$

ที่สภาวะสมดุลการดูดซับ ในสารละลาย (ไม่รวมในสารดูดซับ)

$$c_{eq} = \frac{100w_e}{w_e + w_{w1}} \quad \text{หรือ} \quad w_{w1} = \frac{100w_e}{c_{eq}} - w_e$$

$$\begin{aligned} w_{w1} &= \frac{100(449.799)}{99.245} - 449.799 \\ &= 3.422 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} w_{w2} &= w_w - w_{w1} = 6.054 - 3.422 \\ &= 2.632 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

ดังนั้นความจุของไอน้ำที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของสารดูดซับ

$$= \frac{w_{w2}}{w_a} = \frac{2.632}{429.97} = 0.00612$$

ภาคผนวก ข

ผลการทดลองหาเส้นโค้งการดูดซับ และเส้นโค้งการคายซับไอน้ำของสารดูดซับที่ใช้ในการทดลอง

ข 1 โม่เลกุลาร์ซีฟ 3A

ตารางที่ ข1. ผลการทดลองหาเส้นโค้งการดูดซับของโม่เลกุลาร์ซีฟ 3A

ข้อมูลชุดที่	1	2	3	4	5	6	
อัตราป้อน (มล./นาทึ)	5.9 (60)	7.86 (80)	9.83 (100)	5.9 (60)	7.86 (80)	9.83 (100)	
ความเข้มข้นป้อน (wt%)	95.5	95.5	95.5	95.5	95.5	95.5	
อุณหภูมิน้ำมันร้อน (°ซ.)	150	150	150	175	175	175	
อุณหภูมิ TT1 (°ซ.)	107.5	109.2	119	138.6	139.5	142.6	
อุณหภูมิ TT2 (°ซ.)	112.7	111.6	114.7	138.8	141.9	139.5	
อุณหภูมิ TT3 (°ซ.)	111.3	113.1	112.4	140.5	138.2	141.3	
อุณหภูมิ TT4 (°ซ.)	104.6	104.9	102.3	118.8	118.9	118.5	
อุณหภูมิ TT5 (°ซ.)	108.6	106.7	105.3	120.3	123	120.5	
อุณหภูมิเฉลี่ย (°ซ.)	109.3	109.075	108.675	129.6	130.5	129.95	
ความดัน PG1 (บาร์)	0.15	0.1	0.25	0.15	0.15	0.3	
ความดัน PG2 (บาร์)	0.38	0.45	0.7	0.4	0.55	0.8	
ความดันตก (บาร์)	0.23	0.35	0.45	0.25	0.4	0.5	
ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบดกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 1							
เวลา (นาทึ)	ความเข้มข้น	เวลา (นาทึ)	ความเข้มข้น	เวลา (นาทึ)	ความเข้มข้น	เวลา (นาทึ)	ความเข้มข้น
0	98.879	80	98.731	200	96.517	380	95.911
5	99.102	90	98.562	210	96.362	400	95.878
10	99.201	100	98.403	220	96.269	420	95.861

ตารางที่ ข1. (ต่อ)

15	99.223	110	98.194	230	96.225	440	95.843
20	99.223	120	98.014	240	96.195	460	95.818
ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบคกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 1							
เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น
25	99.223	130	97.772	250	96.132	480	95.796
30	99.198	140	97.56	260	96.102	500	95.776
35	99.198	150	97.347	280	96.038	520	95.758
40	99.158	160	97.163	300	96.015	540	95.742
50	99.108	170	96.979	320	95.978	560	95.724
60	98.963	180	96.795	340	95.948	580	95.704
70	98.852	190	96.672	360	95.933		
ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบคกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 2							
เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น
0	98.523	55	98.731	165	96.424	345	95.853
5	98.998	65	98.501	185	96.237	365	95.832
10	99.102	75	98.352	205	96.144	385	95.815
15	99.132	85	98.194	225	96.05	405	95.789
20	99.132	95	97.904	245	95.988	425	95.765
25	99.132	105	97.672	265	95.951	445	95.738
30	99.109	115	97.369	285	95.925		
35	99.052	125	97.102	305	95.908		
45	98.989	145	96.764	325	95.878		

ตารางที่ ข1. (ต่อ)

ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบคกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 3							
เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น
0	98.314	50	98.463	140	96.548	300	95.898
5	98.79	60	98.164	160	96.331	320	95.866
10	98.879	70	97.832	180	96.206	340	95.841
15	98.968	80	97.56	200	96.113	360	95.827
20	98.997	90	97.316	220	96.05	380	95.801
ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบคกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 3							
เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น
25	98.997	100	97.102	240	95.988		
30	98.909	110	96.887	260	95.948		
40	98.761	120	96.733	280	95.913		
ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบคกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 4							
เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น
0	99.075	45	99.498	125	97.498	235	95.978
5	99.409	55	99.349	135	97.213	255	95.91
10	99.567	65	99.142	145	97.004	275	95.871
15	99.583	75	98.983	155	96.759	295	95.831
20	99.583	85	98.779	165	96.617	315	95.778
25	99.583	95	98.455	175	96.407	335	95.749
30	99.579	105	98.154	195	96.189	355	95.735
35	99.541	115	97.792	215	96.013		
ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบคกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 5							
เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น
0	98.82	40	99.351	110	97.225	210	95.88

ตารางที่ ข1. (ต่อ)

5	99.174	50	99.204	120	97.01	230	95.789
10	99.381	60	98.879	130	96.764	250	95.758
15	99.511	70	98.463	140	96.517	270	95.708
20	99.516	80	98.104	150	96.393	290	95.695
25	99.513	90	97.863	170	96.113		
30	99.509	100	97.56	190	95.957		
ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบคกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 6							
เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น
0	98.672	30	99.145	85	97.063	175	95.875
5	99.086	35	98.968	95	96.764	195	95.783
10	99.398	45	98.582	105	96.486	215	95.751
15	99.424	55	98.104	115	96.301	235	95.711
20	99.438	65	97.59	135	96.144		
25	99.408	75	97.316	155	95.988		

ตารางที่ ข2. ผลการทดลองหาเส้นโค้งการคายซับของโม่เลกุลาร์ซีฟ 3A

ข้อมูลชุดที่	1	2	3	4	5	6	
อัตราป้อน (มล./นาท)	0.98 (10)	1.97 (20)	2.95 (30)	0.98 (10)	1.97 (20)	2.95 (30)	
ความเข้มข้นป้อน (wt%)	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9	
อุณหภูมิน้ำมันร้อน (°ซ.)	160	160	160	185	185	185	
อุณหภูมิ TT1 (°ซ.)	103.5	97.3	103.6	125.8	115.5	128.2	
อุณหภูมิ TT2 (°ซ.)	97.6	95.6	95.7	125.1	118.8	111.7	
อุณหภูมิ TT3 (°ซ.)	100.1	99.1	96.7	127.1	123.6	113.9	
อุณหภูมิ TT4 (°ซ.)	121.2	120.9	121.6	145.3	145.6	145.1	
อุณหภูมิ TT5 (°ซ.)	121.8	121.6	122.2	145.7	145.9	145.5	
อุณหภูมิเฉลี่ย (°ซ.)	110.175	109.3	109.05	135.8	133.475	129.05	
ความดัน PG1 (บาร์)	-0.4 ~ -0.3	-0.4 ~ -0.3	-0.4 ~ -0.3	-0.4 ~ -0.3	-0.4 ~ -0.3	-0.4 ~ -0.3	
ความดัน PG2 (บาร์)	-0.4 ~ -0.3	-0.4 ~ -0.3	-0.4 ~ -0.3	-0.4 ~ -0.3	-0.4 ~ -0.3	-0.4 ~ -0.3	
ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบดกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 1							
เวลา (นาท)	ความเข้มข้น	เวลา (นาท)	ความเข้มข้น	เวลา (นาท)	ความเข้มข้น	เวลา (นาท)	ความเข้มข้น
0	93.358	260	94.467	580	97.256	900	98.239
10	92.134	280	94.859	600	97.31	920	98.288
20	90.555	300	94.996	620	97.463	940	98.335
30	89.452	320	95.205	640	97.499	960	98.379
40	89.103	340	95.539	660	97.529	980	98.433
50	88.964	360	95.697	680	97.499	1000	98.463
60	88.734	380	95.837	700	97.62	1020	98.495
80	88.964	400	95.881	720	97.698	1040	98.544
100	90.555	420	96.167	740	97.732	1060	98.582
120	91.64	440	96.258	760	97.798	1080	98.618
140	92.442	460	96.495	780	97.893	1100	98.653

ตารางที่ ข2. (ต่อ)

160	92.938	480	96.764	800	97.983	1120	98.687
ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบคกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 1							
เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น
180	93.234	500	96.856	820	98.013	1140	98.72
200	93.593	520	97.051	840	98.074		
220	94.048	540	97.071	860	98.133		
240	94.434	560	97.195	880	98.187		
ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบคกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 2							
เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น
0	94.826	115	94.455	325	97.56	605	98.869
5	91.586	125	94.673	345	97.789	625	98.919
10	90.621	135	94.978	365	97.953	645	98.977
15	90.508	145	95.296	385	97.969	665	99.031
20	90.343	155	95.232	405	97.983	685	99.087
25	89.747	165	95.737	425	98.074	705	99.135
30	89.068	175	95.806	445	98.194	725	99.178
35	89.578	185	96.102	465	98.314	745	99.215
45	90.447	205	96.517	485	98.374	765	99.245
55	91.109	225	96.702	505	98.463	785	99.278
65	92.166	245	96.979	525	98.523	805	99.318
85	92.865	265	97.163	545	98.578	825	99.349
95	93.691	285	97.316	565	98.781	835	99.371
105	94.17	305	97.469	585	98.815		

ตารางที่ ข2. (ต่อ)

ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบคกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 3							
เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้น	เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้น	เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้น	เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้น
0	95.163	70	95.548	230	98.224	430	99.098
5	93.658	80	96.019	250	98.344	450	99.142
ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบคกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 3							
เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้น	เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้น	เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้น	เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้น
10	91.975	90	96.459	270	98.463	470	99.186
15	91.636	100	96.764	290	98.523	490	99.224
20	92.098	110	96.949	310	98.612	510	99.264
25	92.839	130	97.255	330	98.82	530	99.298
30	93.255	150	97.469	350	98.879	550	99.337
40	93.561	170	97.802	370	98.938	570	99.369
50	94.306	190	97.923	390	98.996	590	99.401
60	94.883	210	98.104	410	99.048		
ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบคกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 4							
เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้น	เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้น	เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้น	เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้น
0	88.578	105	89.103	245	94.946	525	98.553
10	87.389	115	89.597	265	95.643	545	98.612
15	86.652	125	90.143	285	96.113	565	98.672
20	86.253	135	90.726	305	96.206	585	98.82
25	85.608	145	91.066	325	96.672	605	98.879
30	85.081	155	91.643	345	96.918	625	98.934
35	84.863	165	92.098	365	97.255	645	98.984

ตารางที่ ข2. (ต่อ)

40	85.101	175	92.508	385	97.347	665	99.031
45	85.525	185	93.102	405	97.651	685	99.074
55	86.217	195	93.561	425	97.863	705	99.115
65	86.934	205	93.723	445	97.923	725	99.152
75	87.512	215	94.177	465	98.134		
85	87.977	225	94.467	485	98.374		
95	88.569	235	94.691	505	98.433		
ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบคกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 5							
เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น
0	90.315	75	91.032	165	95.263	315	98.523
5	89.034	85	91.552	175	95.706	335	98.731
10	87.522	95	92.008	185	96.083	355	98.761
15	86.813	105	92.685	195	96.424	375	98.876
25	86.976	115	93.365	215	96.856	395	98.971
35	87.977	125	94.009	235	97.377	415	99.059
45	89.098	135	94.434	255	97.832	435	99.134
55	89.697	145	94.696	275	98.074	455	99.215
65	90.143	155	94.996	295	98.344	475	99.283
ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบคกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 6							
เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น
0	91.652	55	93.893	145	97.255	305	99.135
5	90.432	65	94.627	165	97.62	325	99.263
10	89.198	75	95.264	185	97.953	345	99.375
15	90.831	85	95.706	205	98.194	365	99.486

ตารางที่ ข2. (ต่อ)

20	91.652	95	96.113	225	98.433	385	99.584
25	92.132	105	96.455	245	98.612		
35	92.674	115	96.579	265	98.85		
45	93.365	125	96.826	285	98.998		

ข 2. เมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีก

ตารางที่ ข3. ผลการทดลองหาเส้นโค้งการดูดซับของเมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีก

ข้อมูลชุดที่	1	2	3	4	5	6	
อัตราป้อน (มล./นาถึ)	3.94 (40)	5.9 (60)	7.86 (80)	3.94 (40)	5.9 (60)	7.86 (80)	
ความเข้มข้นป้อน (wt%)	95.5	95.5	95.5	95.5	95.5	95.5	
อุณหภูมิน้ำมันร้อน (°ซ.)	150	150	150	175	175	175	
อุณหภูมิ TT1 (°ซ.)	98.1	105.8	107.3	110.9	130.2	134.6	
อุณหภูมิ TT2 (°ซ.)	126.3	127.2	126.8	140.3	141.8	143.3	
อุณหภูมิ TT3 (°ซ.)	125.3	125.8	125.8	139.4	140.8	142.1	
อุณหภูมิ TT4 (°ซ.)	91.1	91.6	94.8	112.2	113.7	114	
อุณหภูมิ TT5 (°ซ.)	90.9	91.8	94.8	114.6	113.4	117.7	
อุณหภูมิเฉลี่ย (°ซ.)	108.4	109.1	110.6	126.6	127.4	129.3	
ความดัน PG1 (บาร์)	0.08	0.2	0.3	0.08	0.2	0.32	
ความดัน PG2 (บาร์)	0.12	0.3	0.5	0.15	0.34	0.56	
ความดันตก (บาร์)	0.04	0.1	0.2	0.07	0.14	0.24	
ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบดกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 1							
เวลา (นาถึ)	ความเข้มข้น	เวลา (นาถึ)	ความเข้มข้น	เวลา (นาถึ)	ความเข้มข้น	เวลา (นาถึ)	ความเข้มข้น
0	99.554	20	97.648	55	96.424	95	95.956
5	99.474	25	97.255	65	96.238		

ตารางที่ ข3. (ต่อ)

10	99.085	35	96.887	75	96.113		
15	98.144	45	96.641	85	95.988		
ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบคกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 2							
เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น
0	99.282	15	97.856	35	96.548	65	96.082
5	99.109	20	97.013	45	96.331	75	96.019
10	98.632	25	96.602	55	96.206	85	95.988
ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบคกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 3							
เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น
0	99.193	15	96.795	30	96.393	60	95.956
5	98.674	20	96.702	40	96.269	70	95.925
10	97.583	25	96.517	50	96.082		
ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบคกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 4							
เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น
0	99.412	15	97.672	35	96.393	75	95.957
5	99.286	20	96.895	45	96.237	95	95.925
10	98.924	25	96.61	55	96.113		
ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบคกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 5							
เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น
0	99.238	15	97.579	35	96.144	65	95.831
5	99.012	20	96.775	45	96.113	85	95.637
10	98.487	25	96.4	55	95.988		
ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบคกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 6							
เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น
0	99.101	15	96.455	30	96.113	60	95.863
5	98.041	20	96.238	40	96.019		
10	96.902	25	96.175	50	95.957		

ตารางที่ ข4. ผลการทดลองหาเส้นโค้งการคายซับของเมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีก

ข้อมูลชุดที่	1	2	3	4	5	6	
อัตราป้อน (มล./นาถิ)	0.98 (10)	1.97 (20)	2.95 (30)	0.98 (10)	1.97 (20)	2.95 (30)	
ความเข้มข้นป้อน (wt%)	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9	
อุณหภูมิน้ำมันร้อน (°ซ.)	160	160	160	185	185	185	
อุณหภูมิ TT1 (°ซ.)	97.3	102.8	104	112.8	115.5	128.2	
อุณหภูมิ TT2 (°ซ.)	98.1	93	88.2	119.9	115.2	108.6	
อุณหภูมิ TT3 (°ซ.)	101.4	96.8	90.9	121.2	112.9	102.7	
อุณหภูมิ TT4 (°ซ.)	122	121.8	123.1	137.5	138.2	137.5	
อุณหภูมิ TT5 (°ซ.)	122.6	122.5	122.7	138.2	138.1	137.8	
อุณหภูมิเฉลี่ย (°ซ.)	111.025	108.525	106.225	129.2	126.1	121.65	
ความดัน PG1 (บาร์)	-0.4 ~ -0.3	-0.4 ~ -0.3	-0.4 ~ -0.3	-0.4 ~ -0.3	-0.4 ~ -0.3	-0.4 ~ -0.3	
ความดัน PG2 (บาร์)	-0.4 ~ -0.3	-0.4 ~ -0.3	-0.4 ~ -0.3	-0.4 ~ -0.3	-0.4 ~ -0.3	-0.4 ~ -0.3	
ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบคกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 1							
เวลา (นาถิ)	ความเข้มข้น	เวลา (นาถิ)	ความเข้มข้น	เวลา (นาถิ)	ความเข้มข้น	เวลา (นาถิ)	ความเข้มข้น
0	92.475	70	94.591	140	98.463	210	98.968
10	91.303	80	95.894	150	98.553	220	98.997
20	88.154	90	97.063	160	98.701	230	99.086
30	88.648	100	97.499	170	98.79	250	99.116
40	89.833	110	97.793	180	98.75		
50	91.336	120	98.164	190	98.95		
60	92.835	130	98.403	200	98.938		
ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบคกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 2							
เวลา (นาถิ)	ความเข้มข้น	เวลา (นาถิ)	ความเข้มข้น	เวลา (นาถิ)	ความเข้มข้น	เวลา (นาถิ)	ความเข้มข้น
0	94.169	40	96.259	75	98.194	110	98.79
5	90.862	45	96.702	80	98.254	115	98.909
10	90.168	50	96.949	85	98.463	120	98.938
20	91.178	55	97.255	90	98.493	125	98.958

ตารางที่ ข4. (ต่อ)

25	92.309	60	97.377	95	98.553	130	98.997
ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบคกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 2							
เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น
30	94.048	65	97.842	100	98.672	135	99.027
35	95.286	70	98.043	105	98.761	140	99.056
ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบคกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 3							
เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น
0	95.454	25	97.111	50	98.503	75	99.037
5	92.938	30	97.477	55	98.761	80	99.067
10	90.384	35	97.872	60	98.997	85	99.115
15	91.135	40	98.204	65	99.027	90	99.245
20	95.386	45	98.394	70	99.027		
ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบคกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 4							
เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น
0	92.056	55	93.723	125	98.314	195	99.056
5	90.345	65	95.769	135	98.523	205	99.115
10	89.313	75	97.072	145	98.642	215	99.086
20	87.303	85	97.408	155	98.731	225	99.115
30	88.022	95	97.711	165	98.82	235	99.175
35	89.308	105	97.953	175	98.938		
45	91.306	115	98.164	185	98.997		
ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบคกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 5							
เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น
0	92.528	45	96.853	70	98.634	105	99.198
5	89.868	50	97.772	75	98.761	115	99.233
15	90.623	55	98.115	80	98.938		
25	92.201	60	98.305	85	98.998		

ตารางที่ ข4. (ต่อ)

35	95.432	65	98.503	95	99.102		
ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบคกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 6							
เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น
0	95.896	25	97.711	50	99.027	75	99.204
5	90.281	30	98.354	55	99.115	80	99.233
10	89.735	35	98.761	60	99.145		
15	92.307	40	98.909	65	99.174		
20	96.269	45	98.968	70	99.204		

ข 3 วัสดุผสมเถ้าลอยถ่านหินกับปูนซีเมนต์อัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร

ตารางที่ ข5. ผลการทดลองหาเส้นโค้งการดูดซับของวัสดุผสมเถ้าลอยถ่านหินกับปูนซีเมนต์
อัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร

ข้อมูลชุดที่	1	2	3	4	5	6	
อัตราป้อน (มล./นาที)	5.9 (60)	7.86 (80)	9.83 (100)	5.9 (60)	7.86 (80)	9.83 (100)	
ความเข้มข้นป้อน (wt%)	95.5	95.5	95.5	95.5	95.5	95.5	
อุณหภูมิน้ำมันร้อน (°ซ.)	150	150	150	175	175	175	
อุณหภูมิ TT1 (°ซ.)	118.7	119.4	121.8	121.5	132.3	134.3	
อุณหภูมิ TT2 (°ซ.)	122.5	120.3	121.5	145.3	146.3	147.5	
อุณหภูมิ TT3 (°ซ.)	122.8	121.3	121.3	145.1	146.3	146.9	
อุณหภูมิ TT4 (°ซ.)	95.1	97.5	99.3	112.9	115.8	116.8	
อุณหภูมิ TT5 (°ซ.)	95.1	97.3	99.5	110.6	115.4	115.9	
อุณหภูมิเฉลี่ย (°ซ.)	108.9	109.1	110.4	128.5	131.0	131.8	
ความดัน PG1 (บาร์)	0.14	0.3	0.26	0.1	0.25	0.35	
ความดัน PG2 (บาร์)	0.25	0.48	0.52	0.25	0.5	0.65	
ความดันตก (บาร์)	0.11	0.18	0.26	0.15	0.25	0.3	
ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบคกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 1							
เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น
0	99.759	15	96.848	35	95.768		
5	99.701	20	95.863	45	95.768		
10	98.463	25	95.831	55	95.737		
ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบคกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 2							
เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น
0	99.574	10	97.941	20	95.863	40	95.643
5	99.555	15	96.713	30	95.737	50	95.643

ตารางที่ ข5. (ต่อ)

ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบคกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 3							
เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น
0	99.504	10	96.887	20	95.925	30	95.737
5	99.268	15	96.144	25	95.831	40	95.674
ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบคกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 4							
เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น
0	99.68	10	97.316	25	95.863	45	95.674
5	99.592	20	96.517	35	95.737	55	95.643
ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบคกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 5							
เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น
0	99.474	15	96.175	30	95.737		
5	99.433	20	95.894	50	95.674		
10	97.194	25	95.768	60	95.674		
ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบคกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 6							
เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น
0	99.345	10	96.393	20	95.831	40	95.737
5	98.524	15	95.988	30	95.768		

ตารางที่ ข6. ผลการทดลองหาเส้นโค้งการคายซัพของวัสดุผสมเถ้าลอยถ่านหินกับปูนซีเมนต์
อัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร

ข้อมูลชุดที่	1	2	3	4	5	6	
อัตราป้อน (มล./นาท)	0.98 (10)	1.97 (20)	2.95 (30)	0.98 (10)	1.97 (20)	2.95 (30)	
ความเข้มข้นป้อน (wt%)	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9	
อุณหภูมิน้ำมันร้อน (°ซ.)	160	160	160	185	185	185	
อุณหภูมิ TT1 (°ซ.)	89.3	91.6	99.5	90.7	100.7	110.5	
อุณหภูมิ TT2 (°ซ.)	89.7	87	87.3	112.5	111.8	110.1	
อุณหภูมิ TT3 (°ซ.)	87.3	90.3	89.6	115	114.5	114.2	
อุณหภูมิ TT4 (°ซ.)	128.5	126.3	126.1	145	143	144	
อุณหภูมิ TT5 (°ซ.)	129	127.5	127	146.5	145.8	139.8	
อุณหภูมิเฉลี่ย (°ซ.)	108.625	107.775	107.5	129.75	128.775	127.025	
ความดัน PG1 (บาร์)	-0.4 ~ -0.3	-0.4 ~ -0.3	-0.4 ~ -0.3	-0.4 ~ -0.3	-0.4 ~ -0.3	-0.4 ~ -0.3	
ความดัน PG2 (บาร์)	-0.4 ~ -0.3	-0.4 ~ -0.3	-0.4 ~ -0.3	-0.4 ~ -0.3	-0.4 ~ -0.3	-0.4 ~ -0.3	
ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบคกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 1							
เวลา (นาท)	ความเข้มข้น	เวลา (นาท)	ความเข้มข้น	เวลา (นาท)	ความเข้มข้น	เวลา (นาท)	ความเข้มข้น
0	94.883	50	95.925	90	98.731	130	99.263
10	92.508	60	96.764	100	98.85	140	99.292
20	92.475	65	97.438	110	99.056	150	99.321
30	93.918	75	98.043	115	99.174	160	99.321
40	95.264	80	98.463	120	99.263	165	99.321
ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบคกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 2							
เวลา (นาท)	ความเข้มข้น	เวลา (นาท)	ความเข้มข้น	เวลา (นาท)	ความเข้มข้น	เวลา (นาท)	ความเข้มข้น
0	95.885	35	97.01	55	98.879	75	99.438
10	93.908	40	97.843	60	99.144	80	99.511
20	95.296	45	98.284	65	99.365	85	99.555
25	96.237	50	98.672	70	99.38		

ตารางที่ ข6. (ต่อ)

ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบคกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 3							
เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น
0	96.3	20	95.894	40	98.831	60	99.204
5	95.042	25	96.795	45	98.938	65	99.263
10	94.144	30	97.892	50	99.027	75	99.38
15	94.202	35	98.493	55	99.086	80	99.409
ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบคกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 4							
เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น
0	93.906	40	96.316	75	98.938	110	99.204
10	91.841	45	97.153	80	99.027	120	99.233
15	91.065	50	97.344	90	99.086	125	99.204
25	93.201	60	98.182	95	99.145	130	99.145
30	94.957	65	98.226	105	99.174	135	99.204
ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบคกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 5							
เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น
0	94.643	25	96.61	55	99.027	80	99.38
5	93.755	35	97.681	60	99.145	85	99.409
10	91.918	40	98.164	65	99.204	95	99.409
15	94.37	45	98.612	70	99.292	100	99.438
20	95.201	50	98.879	75	99.351		
ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบคกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 6							
เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น
0	94.091	20	98.043	40	99.321	65	99.38
5	92.452	25	98.85	45	99.38		
10	92.839	30	99.174	50	99.38		
15	96.393	35	99.292	60	99.409		

ภาคผนวก ก

ผลการทดลองการดูดซับไอน้ำจากไอผสมของเอทานอลและน้ำโดยใช้วัสดุจากท้องถิ่นชนิดต่างๆ
เปรียบเทียบกับสารดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟ 3A ที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเอทานอลไร้น้ำ

จากการทดสอบเส้นโค้งการดูดซับโดยใช้โมเลกุลาร์ซีฟ 3A พบว่า ที่อัตราการป้อน 5.90 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส จะให้ความเข้มข้นของเอทานอลสูงกว่าสภาวะอื่นๆ ดังนั้นสภาวะนี้จึงได้ถูกนำมาใช้ในการทดสอบการดูดซับโดยใช้วัสดุจากท้องถิ่นชนิดต่างๆ ซึ่งมีข้อมูลการทดลอง 11 ชุด ดังนี้

- | | |
|-----------------|--|
| ข้อมูลชุดที่ 1 | โมเลกุลาร์ซีฟ 3A |
| ข้อมูลชุดที่ 2 | ปูนซีเมนต์ |
| ข้อมูลชุดที่ 3 | ถ้ำลอยถ่านหินผสมปูนซีเมนต์ด้วยอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยปริมาตร |
| ข้อมูลชุดที่ 4 | ถ้ำลอยถ่านหินผสมปูนซีเมนต์ด้วยอัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร |
| ข้อมูลชุดที่ 5 | ดินขาวอบแห้ง |
| ข้อมูลชุดที่ 6 | ดินขาวเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส |
| ข้อมูลชุดที่ 7 | ดินขาวเผาที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส |
| ข้อมูลชุดที่ 8 | เมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีก |
| ข้อมูลชุดที่ 9 | เมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวเต็มเมล็ด |
| ข้อมูลชุดที่ 10 | ฟางข้าว |
| ข้อมูลชุดที่ 11 | ชานอ้อย |

ตารางที่ ๑1. สภาวะที่ใช้ทำการทดลองการดูดซับไอน้ำจากไอผสมของเอทานอลและน้ำ จากการทดลองชุดต่างๆ

ข้อมูลชุดที่	1	2	3	4	5	6
อัตราป้อน (มล./นาที)	5.9 (60)	5.9 (60)	5.9 (60)	5.9 (60)	5.9 (60)	5.9 (60)
ความเข้มข้นป้อน (wt%)	95.5	95.5	95.5	95.5	95.5	95.5
อุณหภูมิน้ำมันร้อน (°ซ.)	175	175	175	175	175	175
อุณหภูมิ TT1 (°ซ.)	138.6	130.6	131.5	131.8	132.3	128.3
อุณหภูมิ TT2 (°ซ.)	138.8	141.9	143.7	140.7	142.2	142.6
อุณหภูมิ TT3 (°ซ.)	140.5	140.2	142.6	140.5	141.2	141.3
อุณหภูมิ TT4 (°ซ.)	118.8	117.4	113.4	112.8	114.9	116.3
อุณหภูมิ TT5 (°ซ.)	120.3	120.7	119.6	118	120.9	119.5
อุณหภูมิเฉลี่ย (°ซ.)	129.6	130.05	129.825	128	129.8	129.925
ความดัน PG1 (บาร์)	0.15	0.15	0.15	0.14	0.1	0.15
ความดัน PG2 (บาร์)	0.4	0.28	0.25	0.28	0.25	0.28
ความดันตก (บาร์)	0.25	0.13	0.1	0.14	0.15	0.15

ข้อมูลชุดที่	7	8	9	10	11
อัตราป้อน (มล./นาที)	5.9 (60)	5.9 (60)	5.9 (60)	5.9 (60)	5.9 (60)
ความเข้มข้นป้อน (wt%)	95.5	95.5	95.5	95.5	95.5
อุณหภูมิน้ำมันร้อน (°ซ.)	175	175	175	175	175
อุณหภูมิ TT1 (°ซ.)	135.5	132.2	133.1	129.1	130.5
อุณหภูมิ TT2 (°ซ.)	143.1	143.8	142.1	140.5	141.5
อุณหภูมิ TT3 (°ซ.)	141.9	141.8	141.1	140	140.5
อุณหภูมิ TT4 (°ซ.)	118.2	115.7	118.2	110.6	110.3
อุณหภูมิ TT5 (°ซ.)	119.5	118.4	120.8	116.3	115.5
อุณหภูมิเฉลี่ย (°ซ.)	130.675	129.925	130.55	126.85	126.95
ความดัน PG1 (บาร์)	0.1	0.2	0.2	0.22	0.15
ความดัน PG2 (บาร์)	0.25	0.35	0.32	0.38	0.35
ความดันตก (บาร์)	0.15	0.15	0.12	0.16	0.2

ตารางที่ ค2. ผลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบด จาการทดลองชุดต่างๆ

ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบดกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 1 (โมเลกุลาร์ซีฟ 3A)							
เวลา (นาท)	ความเข้มข้น	เวลา (นาท)	ความเข้มข้น	เวลา (นาท)	ความเข้มข้น	เวลา (นาท)	ความเข้มข้น
0	99.075	45	99.498	125	97.498	235	95.978
5	99.409	55	99.349	135	97.213	255	95.91
10	99.567	65	99.142	145	97.004	275	95.871
15	99.583	75	98.983	155	96.759	295	95.831
20	99.583	85	98.779	165	96.617	315	95.778
25	99.583	95	98.455	175	96.407	335	95.749
30	99.579	105	98.154	195	96.189	355	95.735
35	99.541	115	97.792	215	96.013		
ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบดกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 2 (ปูนซีเมนต์)							
เวลา (นาท)	ความเข้มข้น	เวลา (นาท)	ความเข้มข้น	เวลา (นาท)	ความเข้มข้น	เวลา (นาท)	ความเข้มข้น
0	99.497	10	96.082	20	95.831	40	95.588
5	98.598	15	95.925	30	95.674	50	95.531
ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบดกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 3 (ถ้ำลอยถ่านหินผสมปูนซีเมนต์ 1 ต่อ 1)							
เวลา (นาท)	ความเข้มข้น	เวลา (นาท)	ความเข้มข้น	เวลา (นาท)	ความเข้มข้น	เวลา (นาท)	ความเข้มข้น
0	99.602	10	96.144	20	95.831	40	95.738
5	99.086	15	95.925	30	95.768	50	95.6
ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบดกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 4 (ถ้ำลอยถ่านหินผสมปูนซีเมนต์ 3 ต่อ 1)							
เวลา (นาท)	ความเข้มข้น	เวลา (นาท)	ความเข้มข้น	เวลา (นาท)	ความเข้มข้น	เวลา (นาท)	ความเข้มข้น
0	99.759	10	96.548	20	95.831	35	95.768
5	99.211	15	95.957	25	95.8	45	95.668
ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบดกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 5 (ดินขาวอบแห้ง)							
เวลา (นาท)	ความเข้มข้น	เวลา (นาท)	ความเข้มข้น	เวลา (นาท)	ความเข้มข้น	เวลา (นาท)	ความเข้มข้น
0	95.278	15	95.405	30	95.448	60	95.485
5	95.327	20	95.422	40	95.463		
10	95.333	25	95.448	50	95.485		

ตารางที่ ค2. (ต่อ)

ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบคกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 6 (ดินขาวเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส)							
เวลา (นาท)	ความเข้มข้น	เวลา (นาท)	ความเข้มข้น	เวลา (นาท)	ความเข้มข้น	เวลา (นาท)	ความเข้มข้น
0	97.56	10	95.831	20	95.674		
5	96.826	15	95.737	35	95.611		
ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบคกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 7 (ดินขาวเผาที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส)							
เวลา (นาท)	ความเข้มข้น	เวลา (นาท)	ความเข้มข้น	เวลา (นาท)	ความเข้มข้น	เวลา (นาท)	ความเข้มข้น
0	95.863	15	95.887	30	95.611		
5	96.163	20	95.732	45	95.58		
10	95.998	25	95.643	60	95.58		
ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบคกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 8 (เมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีก)							
เวลา (นาท)	ความเข้มข้น	เวลา (นาท)	ความเข้มข้น	เวลา (นาท)	ความเข้มข้น	เวลา (นาท)	ความเข้มข้น
0	99.238	15	97.579	35	96.144	65	95.831
5	99.012	20	96.875	45	96.113	85	95.637
10	98.687	25	96.4	55	95.988		
ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบคกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 9 (เมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวเต็มเมล็ด)							
เวลา (นาท)	ความเข้มข้น	เวลา (นาท)	ความเข้มข้น	เวลา (นาท)	ความเข้มข้น	เวลา (นาท)	ความเข้มข้น
0	95.631	15	95.568	35	95.568		
5	95.568	20	95.568	45	95.568		
10	95.568	25	95.568	55	95.568		
ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบคกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 10 (ฟางข้าว)							
เวลา (นาท)	ความเข้มข้น	เวลา (นาท)	ความเข้มข้น	เวลา (นาท)	ความเข้มข้น	เวลา (นาท)	ความเข้มข้น
0	98.323	10	96.163	25	95.548		
5	96.569	15	95.58				
ข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบคกับเวลา ของข้อมูลชุดที่ 11 (ชานอ้อย)							
เวลา (นาท)	ความเข้มข้น	เวลา (นาท)	ความเข้มข้น	เวลา (นาท)	ความเข้มข้น	เวลา (นาท)	ความเข้มข้น
0	95.611	10	95.517	25	95.517		
5	95.548	15	95.517				

ภาคผนวก ง

การคำนวณหาอัตราการป้อนของเครื่องดูดซับเบตนิ่งที่ใช้ในการทดลอง

การคำนวณหาอัตราการป้อนเอทานอลเข้าสู่เครื่องดูดซับเบตนิ่งที่ใช้ในการทดลอง คำนวณจากข้อมูลที่ได้จากโรงงานผลิตเอทานอลไร้น้ำของบริษัทยอนแก่นแอคกอสอล์ อำเภอ น้ำพอง จังหวัดขอนแก่น

ง1 การคำนวณหาปริมาตรของเครื่องดูดซับเบตนิ่ง

$$\begin{aligned} \text{สัดส่วนระหว่างความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง} \left(\frac{h}{d} \right) &= 4.5/1 \\ \text{ความสูงของเครื่องดูดซับ} (h) &= 4.5 \quad \text{เมตร} \\ \text{เส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องดูดซับ} (d) &= 1 \quad \text{เมตร} \\ \text{ปริมาตรของเครื่องดูดซับ} &= V = \frac{\pi}{4} d^2 h = \frac{\pi}{4} (1^2) (4.5) \\ &= 3.5343 \quad \text{ลูกบาศก์เมตร} \\ &= 3,534,300 \quad \text{มิลลิลิตร} \end{aligned}$$

ง2 คุณสมบัติของเอทานอลและสภาวะในการผลิตของเครื่องดูดซับเบตนิ่ง

$$\begin{aligned} \text{ความหนาแน่นของเอทานอลเหลวที่ 20 องศาเซลเซียส} (\rho) &= 0.79 \quad \text{กรัมต่อมิลลิลิตร} \\ \text{น้ำหนักโมเลกุลของเอทานอล} (M) &= 46 \quad \text{กรัมต่อโมล} \\ \text{อัตราการป้อนเอทานอล} (F) &= 108,000 \quad \text{ลิตรต่อวัน} \\ &= 75,000 \quad \text{มิลลิลิตรต่อนาที} \\ \text{อัตราการป้อนเชิงมวลที่ 20 องศาเซลเซียส} &= \dot{m} = F\rho \\ &= 75,000 \times 0.79 \\ &= 59,250 \quad \text{กรัมต่อนาที} \\ \text{อัตราการป้อนเชิงโมล} &= \dot{M} = \frac{\dot{m}}{M} \\ &= 59,250 / 46 \end{aligned}$$

	= 1,288	โมลต่อนาที
ความดันสัมบูรณ์ของเครื่องดูดซับ (p)	= 1.5	บาร์
อุณหภูมิภายในเบด(113-118 องศาเซลเซียส)เฉลี่ย(T)	= 115	องศาเซลเซียส
	= 388.15	เคลวิน

ง3 การคำนวณหาอัตราการป้อนเอทานอลในสภาวะไอ

ค่าคงที่ของก๊าซ(R)	= 83.14	(มิลลิลิตร)(บาร์)/(โมล)
(เคลวิน)อัตราการป้อนเอทานอล	$F = \dot{M} \left(\frac{RT}{p} \right)$	
	= 1,288 x (83.14 x 388.15 / 1.5)	
	= 27,710,788	มิลลิลิตรต่อนาที

ง4 การคำนวณหาเวลาที่ใช้ในการดูดซับ

สัดส่วนช่องว่างของเบด(ε)	= 0.4	
ปริมาตรช่องว่างภายในเบด	$V_{void} = \varepsilon V$	
	= 0.4 x 3,534,300	
	= 1,413,720	มิลลิลิตร
เวลาที่ใช้ในการดูดซับ	$t = \frac{V_{void}}{F}$	
	= 1,413,720/27,710,788	
	= 0.051	นาที

ง5 การคำนวณหาปริมาตรของเครื่องดูดซับเบดนิ่งที่ใช้ในการทดลอง

ใช้สัดส่วนระหว่างความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเช่นเดียวกับเครื่องดูดซับเบดนิ่งของ

บริษัทขอนแก่นแอลกอฮอล์ $\left(\frac{h}{d} \right)$	= 4.5/1	
ความสูงของเครื่องดูดซับ (h)	= 22.86	เซนติเมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องดูดซับ (d)	= 5.08	เซนติเมตร

ปริมาตรของเครื่องดูดซับ

$$V = \frac{\pi}{4} d^2 h = \frac{\pi}{4} (5.08^2) (22.86)$$

$$= 463.33 \quad \text{มิลลิลิตร}$$

ปริมาตรช่องว่างภายในเบด

$$V_{void} = \epsilon V$$

$$= 0.4 \times 463.33$$

$$= 185.332 \quad \text{มิลลิลิตร}$$

ง6 การคำนวณหาอัตราการป้อนเอทานอลในสถานะของเหลว

อัตราการป้อนเอทานอลในสถานะไอ

$$F = \frac{V_{void}}{t}$$

$$= 185.332 / 0.051$$

$$= 3,632.78 \quad \text{มิลลิลิตรต่อนาที}$$

อัตราการป้อนเชิงโมล

$$\dot{M} = \frac{Fp}{RT}$$

$$= (3,632.78 \times 1.5) / (83.14 \times 388.15)$$

$$= 0.1688 \quad \text{โมลต่อนาที}$$

อัตราการป้อนเชิงมวล

$$\dot{m} = \dot{M} M$$

$$= 0.1688 \times 46$$

$$= 7.7674 \quad \text{กรัมต่อนาที}$$

อัตราการป้อนเอทานอลในสถานะของเหลว

$$F = \frac{m}{\rho}$$

$$= 7.7674 / 0.79$$

$$= 9.8322 \quad \text{มิลลิลิตรต่อนาที}$$

ดังนั้นจากการคำนวณข้างต้นทำให้ได้อัตราการป้อนสูงสุด (100 เปอร์เซ็นต์) ของเครื่องดูดซับ เบนดิงที่ใช้ในการทดลองมีค่าเท่ากับ 9.8322 มิลลิลิตรต่อนาที

ภาคผนวก จ

การสอบเทียบหาอัตราการไหลจริงของปั๊มป้อนเอทานอล

เนื่องจากการวิจัยการดูดซับไอน้ำจากไอผสมของเอทานอลและน้ำ ของสารดูดซับที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเอทานอลไร้น้ำชนิดโมเลกุลาร์ซีฟ 3A เปรียบเทียบกับวัสดุดูดซับจากท้องถิ่นในเครื่องดูดซับเบดนิ่งแบบเปลี่ยนแปลงความดันครั้งนี้ อัตราการไหลของปั๊มป้อนเอทานอลเป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อความถูกต้องของข้อมูลเส้นโค้งการดูดซับและคายซับ จึงต้องมีการสอบเทียบหาอัตราการไหลจริงของปั๊มเปรียบเทียบกับอัตราการไหลที่ปั๊มแสดง เพื่อให้ได้ข้อมูลอัตราการไหลที่มีความเที่ยงตรงไว้ใช้งานต่อไป

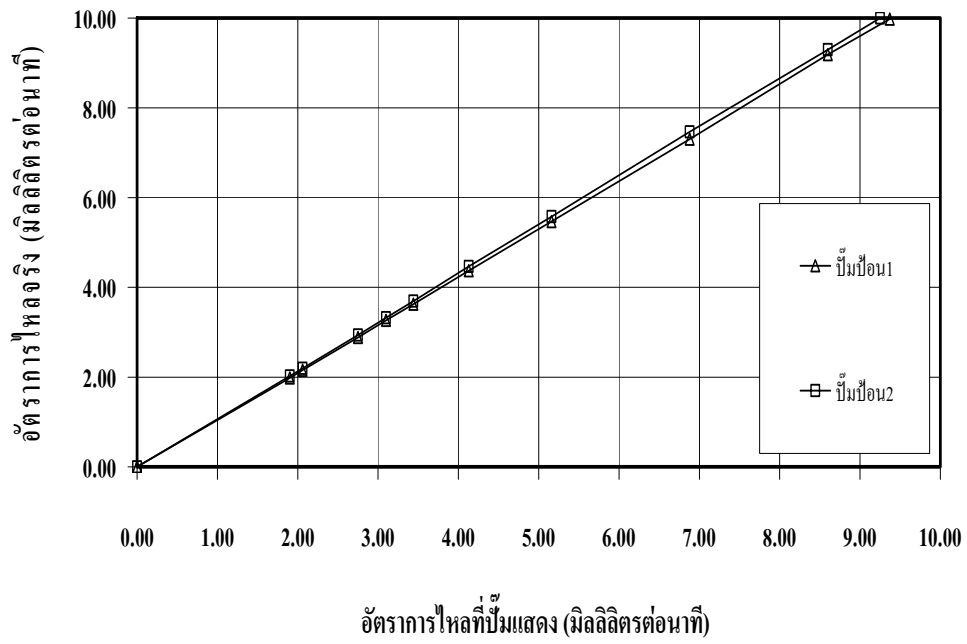
ตารางที่ จ1. ผลจากการสอบเทียบหาอัตราการไหลจริงของปั๊มป้อนเอทานอลเครื่องที่ 1

อัตราไหลตั้งค่า (มิลลิลิตร/นาท)	เวลาที่ใช้ครั้งที่1		เวลาที่ใช้ครั้งที่2		เวลาที่ใช้ครั้งที่3		เฉลี่ย (นาท)	อัตราไหลจริง (มิลลิลิตร/นาท)
	หน่วย (นาท:วินาที)	หน่วย (นาท)	หน่วย (นาท:วินาที)	หน่วย (นาท)	หน่วย (นาท:วินาที)	หน่วย (นาท)		
0.00	0:00	0.00	0:00	0.00	0:00	0.00	0.00	0.00
1.90	12:34	12.57	12:37	12.62	12:38	12.63	12.61	1.98
2.06	11:35	11.58	11:36	11.60	11:37	11.62	11.60	2.16
2.75	8:40	8.67	8:40	8.67	8:40	8.67	8.67	2.88
3.10	7:40	7.67	7:39	7.65	7:40	7.67	7.66	3.26
3.44	6:55	6.92	6:54	6.90	6:53	6.88	6.90	3.62
4.13	5:45	5.75	5:42	5.70	5:43	5.72	5.72	4.37
5.16	4:35	4.58	4:33	4.55	4:35	4.58	4.57	5.47
6.88	3:25	3.42	3:24	3.40	3:27	3.45	3.42	7.31
8.60	2:43	2.72	2:43	2.72	2:44	2.73	2.72	9.18
9.37	2:30	2.50	2:30	2.50	2:30	2.50	2.50	9.98

ตารางที่ จ2. ผลจากการสอบเทียบหาอัตราการไหลจริงของปั๊มเป็อนเอทานอลเครื่องที่ 2

อัตราไหลตั้งค่า (มิลลิลิตร/นาที)	เวลาที่ใช้ครั้งที่1		เวลาที่ใช้ครั้งที่2		เวลาที่ใช้ครั้งที่3		เฉลี่ย (นาที)	อัตราไหลจริง (มิลลิลิตร/นาที)
	หน่วย (นาที:วินาที)	หน่วย (นาที)	หน่วย (นาที:วินาที)	หน่วย (นาที)	หน่วย (นาที:วินาที)	หน่วย (นาที)		
0.00	0:00	0.00	0:00	0.00	0:00	0.00	0.00	0.00
1.90	12:20	12.33	12:23	12.38	12:23	12.38	12.37	2.02
2.06	11:21	11.35	11:24	11.40	11:23	11.38	11.38	2.20
2.75	8:29	8.48	8:32	8.53	8:31	8.52	8.51	2.94
3.10	7:30	7.50	7:32	7.53	7:32	7.53	7.52	3.32
3.44	6:44	6.73	6:47	6.78	6:47	6.78	6.77	3.69
4.13	5:35	5.58	5:37	5.62	5:36	5.60	5.60	4.46
5.16	4:28	4.47	4:29	4.48	4:3	4.50	4.48	5.58
6.88	3:20	3.33	3:21	3.35	3:22	3.37	3.35	7.46
8.60	2:42	2.70	2:41	2.68	2:41	2.68	2.69	9.30
9.25	2:30	2.50	2:30	2.50	2:30	2.50	2.50	10.00

หมายเหตุ: ในการคำนวณหาอัตราการไหลใช้การวัดปริมาตรจากขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร



รูปที่ ๑1. การสอบเทียบหาอัตราการไหลจริงของปั๊มเอทานอลเครื่องที่ 1 และ 2.

ภาคผนวก ฉ

การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการหักเหของแสงกับความเข้มข้นของสารละลายเอทานอล

เนื่องจากการวิจัยการดูดซับไอน้ำจากไอผสมของเอทานอลและน้ำ ของสารดูดซับที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเอทานอลไร้น้ำชนิดโมเลกุลาร์ซีฟ 3A เปรียบเทียบกับวัสดุดูดซับจากท้องถิ่นในเครื่องดูดซับเบดนิ่งแบบเปลี่ยนความดันนี้ คุณสมบัติสำคัญที่ต้องมีการวิเคราะห์ก็คือความเข้มข้นของสารละลายเอทานอล โดยตัวอย่างที่ใช้ทำการวิเคราะห์นั้นมีปริมาณที่น้อย ทำให้มีการคิดหาวิธีที่จะวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลที่มีการใช้ตัวอย่างในการวิเคราะห์ในปริมาณน้อยๆ ได้

การวิเคราะห์ดัชนีหักเหของแสงโดยใช้เครื่องวัดดัชนีหักเหของของเหลว (Refractometer) เป็นวิธีวิเคราะห์อีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้กันมากเนื่องจากวัดค่าได้ง่ายรวดเร็ว และใช้ตัวอย่างในการวิเคราะห์น้อย ในการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมเพื่อหาองค์ประกอบก็ใช้วิธีนี้เช่นกัน ดังที่กล่าวข้างต้นจึงทำการทดลองวัดค่าดัชนีหักเหของแสงของสารละลายเอทานอลกับน้ำที่ได้เตรียมไว้ที่ความเข้มข้นต่างๆ เพื่อสร้างความสัมพันธ์ที่จะใช้ในการสอบเทียบระหว่างค่าดัชนีหักเหของแสงของสารละลายเอทานอลกับความเข้มข้นของสารละลายเอทานอล ซึ่งอาจจะสามารถใช้วิเคราะห์ค่าในงานวิจัยนี้ได้ต่อไป

ฉ1 วัสดุประสงค์

เพื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าดัชนีการหักเหของแสงของสารละลายเอทานอลกับความเข้มข้นของสารละลายเอทานอล เพื่อใช้ในการสอบเทียบหาความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลเมื่อสามารถวัดค่าดัชนีหักเหของแสงของสารละลายเอทานอลได้

ฉ2 อุปกรณ์ที่ใช้

1. ขวดแก้วใสพร้อมฝาจุกขนาด 50 มล.	20	ขวด
2. บิวเรตพร้อมชุดขาตั้งขนาด 50 มล.	1	ชุด
3. เครื่องเขย่าสาร(Vortex Mixer CTL 107)	1	เครื่อง

4. เครื่องวัดดัชนีหักเหของสาร(Refractometer)	1	เครื่อง
5. หลอดหยดสาร	1	หลอด

ฉ3 สารเคมีที่ใช้

1. เอทานอลไร้น้ำ 99.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจากบริษัท Merck
2. น้ำกลั่นบริสุทธิ์ (Deionized Water)

ฉ4 วิธีการทดลอง

1.เตรียมสารละลายเอทานอลที่สัดส่วนโดยปริมาตรดังตารางผนวก ฉ1 ลงในขวดแก้วใส ขนาด 50 มิลลิลิตร 20 ขวด โดยมีสัดส่วนของเอทานอลไร้น้ำและน้ำกลั่นบริสุทธิ์เป็นดังนี้

ตารางที่ ฉ1. การเตรียมสารละลายเอทานอลที่ความเข้มข้นโดยปริมาตรค่าต่างๆ

ขวดที่	ปริมาตรรวม (มิลลิลิตร)	ปริมาตรน้ำกลั่น (มิลลิลิตร)	ปริมาตรเอทานอล (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นโดยปริมาตร (เปอร์เซ็นต์)
1	50	50	0	0
2	50	45	5	10
3	50	40	10	20
4	50	35	15	30
5	50	30	20	40
6	50	25	25	50
7	50	20	30	60
8	50	15	35	70
9	50	10	40	80
10	50	5	45	90
11	50	4.5	45.5	91
12	50	4	46	92
13	50	3.5	46.5	93

ตารางที่ ๑1. (ต่อ)

ขวดที่	ปริมาตรรวม (มิลลิลิตร)	ปริมาตรน้ำกลั่น (มิลลิลิตร)	ปริมาตรเอทานอล (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นโดยปริมาตร (เปอร์เซ็นต์)
14	50	3	47	94
15	50	2.5	47.5	95
16	50	2	48	96
17	50	1.5	48.5	97
18	50	1	49	98
19	50	0.5	49.5	99
20	50	0	50	100

2. นำสารละลายเอทานอลที่เตรียมไว้ไปวิเคราะห์หาค่าดัชนีหักเหของแสง โดยใช้เครื่องวัดค่าดัชนีหักเหของแสง (Refractometer)



รูปที่ ๑1. เครื่องวัดค่าดัชนีหักเหของแสงของของเหลว (Refractometer).

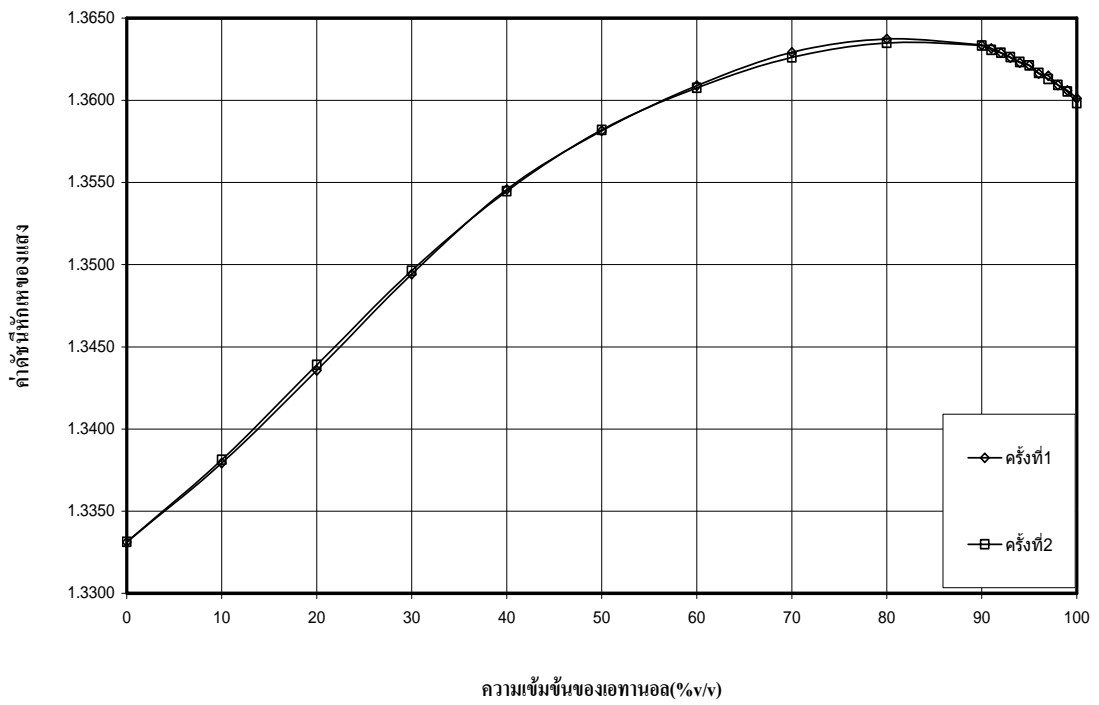
น5 ผลการทดลอง

ตารางที่ น2. ค่าดัชนีหักเหของแสงของสารละลายเอทานอลความเข้มข้นต่างๆ ที่ 25 องศาเซลเซียส
ในการทดลองครั้งที่ 1

ค่าดัชนีหักเหของแสงของสารละลายเอทานอลที่ 25 องศาเซลเซียส							
ความเข้มข้น(%v/v)	1	2	3	4	5	6	ค่าเฉลี่ย
0	1.3331	1.3331	1.3332	1.3331	1.3331	1.3331	1.3331
10	1.3380	1.3379	1.3379	1.3379	1.3380	1.3379	1.3379
20	1.3436	1.3436	1.3432	1.3436	1.3436	1.3438	1.3436
30	1.3494	1.3496	1.3494	1.3492	1.3495	1.3494	1.3494
40	1.3546	1.3546	1.3544	1.3546	1.3547	1.3546	1.3546
50	1.3580	1.3582	1.3582	1.3581	1.3582	1.3582	1.3582
60	1.3609	1.3609	1.3611	1.3609	1.3609	1.3607	1.3609
70	1.3629	1.3629	1.3629	1.3630	1.3629	1.3629	1.3629
80	1.3637	1.3640	1.3637	1.3634	1.3639	1.3637	1.3637
90	1.3633	1.3634	1.3634	1.3633	1.3634	1.3634	1.3634
91	1.3632	1.3631	1.3632	1.3632	1.3631	1.3632	1.3632
92	1.3629	1.3629	1.3628	1.3629	1.3629	1.3630	1.3629
93	1.3626	1.3628	1.3626	1.3626	1.3624	1.3626	1.3626
94	1.3625	1.3623	1.3623	1.3623	1.3623	1.3621	1.3623
95	1.3621	1.3622	1.3621	1.3621	1.3622	1.3621	1.3621
96	1.3616	1.3616	1.3617	1.3617	1.3616	1.3616	1.3616
97	1.3616	1.3614	1.3615	1.3615	1.3615	1.3615	1.3615
98	1.3609	1.3610	1.3610	1.3609	1.3609	1.3609	1.3609
99	1.3606	1.3606	1.3606	1.3606	1.3606	1.3606	1.3606
100	1.3601	1.3601	1.3602	1.3601	1.3601	1.3601	1.3601

ตารางที่ ๓. ค่าดัชนีหักเหของแสงของสารละลายเอทานอลความเข้มข้นต่างๆ ที่ 25 องศาเซลเซียส
ในการทดลองครั้งที่ 2

ค่าดัชนีหักเหของแสงของสารละลายเอทานอลที่ 25 องศาเซลเซียส							
ความเข้มข้น(%v/v)	1	2	3	4	5	6	ค่าเฉลี่ย
0	1.3331	1.3332	1.3331	1.3331	1.3331	1.3332	1.3331
10	1.3382	1.3382	1.3381	1.3381	1.3381	1.3381	1.3381
20	1.3439	1.3439	1.3439	1.3439	1.3438	1.3440	1.3439
30	1.3497	1.3497	1.3496	1.3496	1.3496	1.3496	1.3496
40	1.3545	1.3545	1.3544	1.3544	1.3545	1.3545	1.3545
50	1.3582	1.3582	1.3582	1.3583	1.3582	1.3581	1.3582
60	1.3607	1.3607	1.3608	1.3608	1.3608	1.3608	1.3608
70	1.3626	1.3626	1.3626	1.3626	1.3627	1.3626	1.3626
80	1.3635	1.3635	1.3635	1.3635	1.3635	1.3635	1.3635
90	1.3634	1.3634	1.3633	1.3633	1.3633	1.3633	1.3633
91	1.3631	1.3631	1.3630	1.3630	1.3631	1.3631	1.3631
92	1.3629	1.3629	1.3629	1.3628	1.3629	1.3630	1.3629
93	1.3626	1.3626	1.3626	1.3626	1.3627	1.3627	1.3626
94	1.3624	1.3624	1.3623	1.3623	1.3623	1.3623	1.3623
95	1.3621	1.3621	1.3623	1.3621	1.3621	1.3620	1.3621
96	1.3617	1.3617	1.3617	1.3617	1.3616	1.3616	1.3617
97	1.3613	1.3613	1.3613	1.3613	1.3613	1.3613	1.3613
98	1.3609	1.3609	1.3610	1.3610	1.3609	1.3609	1.3609
99	1.3606	1.3606	1.3605	1.3605	1.3605	1.3605	1.3605
100	1.3598	1.3600	1.3598	1.3598	1.3598	1.3598	1.3598



รูปที่ ๑๒. ความสัมพันธ์ของค่าดัชนีหักเหของแสงกับความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.

ฉ6 สรุปผลการทดลอง

1. สามารถใช้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหของแสงกับความเข้มข้นของละลายเอทานอลได้ในช่วงดัชนีหักเหของแสงอยู่ระหว่าง 1.3331 ถึง 1.3590 หรือความเข้มข้นระหว่าง 0 ถึง 55 เปอร์เซ็นต์ซึ่งความสัมพันธ์จะยังคงเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้น.

2. ในช่วงความเข้มข้นของสารละลายเอทานอล 55 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหของแสงกับความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งจะเป็นเส้นโค้งวกกลับทำให้ค่าดัชนีหักเหของแสงของสารละลายเอทานอลหนึ่งค่าจะสัมพันธ์กับค่าความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลสองค่า ทำให้ไม่สามารถบ่งชี้ค่าที่แน่นอนได้.

3. สำหรับในงานวิจัยการดูดซับไอน้ำจากไอผสมของเอทานอลและน้ำของสารดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟ 3A เทียบกับวัสดุดูดซับจากท้องถิ่นในเครื่องดูดซับเบดนิ่งแบบเปลี่ยนความดัน จะทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของเอทานอลในช่วงความเข้มข้น 95.5 ถึง 99.5 เปอร์เซ็นต์ซึ่งอยู่ในช่วงความสัมพันธ์เชิงเส้น แต่ถึงอย่างไรก็ตามในช่วงนี้เสถียรของเครื่องวัดค่าดัชนีหักเหของแสงค่อนข้างหยابคืออยู่ในช่วง 1.3603 ถึง 1.3619 จึงยังไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยครั้งนี้.

ภาคผนวก ข

ข้อมูลทางด้านความปลอดภัยในการทำงานเกี่ยวกับเอทานอล

ข1 ข้อควรระวังทั่วไปจากอันตรายที่สามารถเกิดขึ้นได้

ข1.1 การเกิดไฟไหม้และการระเบิด

เอทานอลทั้งในสถานะของก๊าซและของเหลวสามารถติดไฟได้ จึงสามารถเป็นสาเหตุให้เกิดไฟไหม้หรือการระเบิดได้ถ้าองค์ประกอบของสารเชื้อเพลิง ออกซิเจน และประกายไฟหรือความร้อนอยู่ในสภาวะที่เหมาะสม ดังนั้นจึงไม่ควรอนุญาตให้มีประกายไฟ เช่นการสูบบุหรี่ในบริเวณรอบๆ สารเอทานอล และยังคงจัดให้มีถังดับเพลิงอยู่ใกล้ๆ และตรวจสอบให้อยู่ในสภาพพร้อมใช้งานอยู่เสมอ

ข1.2 อาการผิดปกติเนื่องจากการสูดดมไอเอทานอลเข้าไป

เมื่อมีการสูดดมไอของเอทานอลเข้าไปมากเกินไปจะทำให้เกิดอาการเวียนศีรษะ อาเจียน หรืออาจจะถึงกับทำให้หมดสติได้ ดังนั้นเมื่อต้องทำงานในสภาวะที่มีกลิ่นไอของเอทานอลควรทำในสถานที่ ๆ มีการระบายอากาศที่ดี และถ้าพบผู้ที่เกิดอาการเวียนศีรษะ อาเจียน หรือหมดสติในสภาวะที่มีไอของเอทานอลควรรีบนำผู้ป่วยออกไปในสถานที่ที่มีอากาศบริสุทธิ์ ถ้าอาการไม่ดีขึ้นให้รีบนำไปพบแพทย์ต่อไป

ข2 MSDS(Material Safety Data Sheet)

ข2.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์

- | | | |
|----------------------------------|------|-----|
| - จุดเดือดที่ความดันบรรยากาศ: | 79 | °ซ. |
| - จุดหลอมเหลวที่ความดันบรรยากาศ: | -117 | °ซ. |

- ความถ่วงจำเพาะในสถานะของเหลว (น้ำ = 1):	0.8
- ความสามารถในการละลายในน้ำ:	สามารถละลายน้ำได้
- ความดันไอที่อุณหภูมิ 20 °ซ.:	5.8 kPa
- ความถ่วงจำเพาะในสถานะก๊าซ (อากาศ = 1):	1.6
- สัดส่วนความถ่วงจำเพาะระหว่างไอของเอทานอลกับของผสมระหว่างอากาศกับเอทานอลที่อุณหภูมิ 20 °ซ. (อากาศ = 1):	1.03
- จุดวาบไฟ:	13 °ซ.
- อุณหภูมิจุดระเบิดอัตโนมัติ:	363 °ซ.
- Explosive limits, vol% in air:	3.3-19
- Octanol/water partition coefficient as log Pow:	-0.32
- ลักษณะปรากฏ:	เป็นของเหลวใสไม่มีสี