สารบัญ

หน้า

สารบัญ (1)

สารบัญตาราง (2)

สารบัญภาพ (4)

คำนำ 1

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 4

การตรวจเอกสาร 6

อุปกรณ์และวิธีการวิจัย 34

- อุปกรณ์ 34
- วิธีการวิจัย 48

ผลการทดลองและวิจารณ์ 60

สรุปผลการวิจัย 84

ข้อเสนอแนะและแนวทางในการวิจัยในอนาคต 85

เอกสารและสิ่งอ้างอิง 86

ภาคผนวก 89

- ภาคผนวก ก ผลการทดลองและการคำนวณหาสมดุลของการดูดซับไอน้ำจากไอผสมของเอทานอลและน้ำของสารดูดซับในสภาวะอุณหภูมิคงที่ 90
- ภาคผนวก ข ผลการทดลองหาเส้นโค้งการดูดซับและเส้นโค้งการคายซับไอน้ำของสารดูดซับที่ใช้ในการทดลอง 97
- ภาคผนวก ค ผลการทดลองการดูดซับไอน้ำจากไอผสมของเอทานอลและน้ำโดยใช้วัสดุจากท้องถิ่นชนิดต่างๆ เปรียบเทียบกับสารดูดซับโมเลกุลาร์ซีพ 3A ที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเอทานอลไร้น้ำ 113
- ภาคผนวก ง การคำนวณหาอัตราการป้อนของเครื่องดูดซับเบดนิ่งที่ใช้ในการทดลอง 117
- ภาคผนวก จ การสอบเทียบหาอัตราการไหลจริงของปั๊มป้อนเอทานอล 120
- ภาคผนวก ฉ การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการหักเหของแสงกับความเข้มข้นของสารละลายเอทานอล 123
- ภาคผนวก ช ข้อมูลทางด้านความปลอดภัยในการทำงานเกี่ยวกับเอทานอล 129

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	โครงสร้างของซีโอไลต์โดยใช้พื้นฐานของหน่วยเอสบียู	11
2	ค่ามิติของโครงสร้างซีโอไลต์ที่พบโดยทั่วไป	13
3	องค์ประกอบทางเคมีของฮอร์นีและเฟลารีเอ็นโดเสปอร์ม(โดยน้ำหนักแห้ง)	23
4	การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อสมดุลการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่	58
5	การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อเส้นโค้งการดูดซับ	59
6	การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อเส้นโค้งการคายซับ	59
7	แสดงค่าพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนของวัสดุต่างๆที่ใช้ในการทดสอบ	65
8	เปรียบเทียบค่าคงที่ของสมดุลการดูดซับไอน้ำของสารดูดซับที่อุณหภูมิคงที่	76
9	เปรียบเทียบสภาวะที่ใช้ในการทดลองหาเส้นโค้งการดูดซับซึ่งทำให้ได้ความเข้มข้นเอทานอลที่ออกจากเบดมากกว่า 99.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	78
10	เปรียบเทียบค่าต่างๆ ที่ได้จากการทดลองหาเส้นโค้งการคายซับไอน้ำออกจากสารดูดซับโมเลกุลาร์ซีพ 3A เมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีกและวัสดุผสมเถ้าลอยถ่านหินกับปูนซีเมนต์อัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร	79

ตารางผนวกที่

ก1	ผลการทดลองและการคำนวณหาสมดุลการดูดซับโดยใช้สารดูดซับในอุตสาหกรรมชนิดโมเลกุลาร์ซีพ 3A	90
ก2	ผลการทดลองและการคำนวณหาสมดุลการดูดซับโดยใช้สารดูดซับจากวัสดุท้องถิ่นชนิดเมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีก	92

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ก3	ผลการทดลองและการคำนวณหาสมดุลการดูดซับโดยใช้สารดูดซับจากวัสดุท้องถิ่นชนิดวัสดุผสมเถ้าลอยถ่านหินกับปูนซีเมนต์อัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร	93
ข1	ผลการทดลองหาเส้นโค้งการดูดซับของโมเลกุลาร์ซีพ 3A	97
ข2	ผลการทดลองหาเส้นโค้งการคายซับของโมเลกุลาร์ซีพ 3A	101
ข3	ผลการทดลองหาเส้นโค้งการดูดซับของเมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีก	105
ข4	ผลการทดลองหาเส้นโค้งการคายซับของเมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีก	107
ข5	ผลการทดลองหาเส้นโค้งการดูดซับของวัสดุผสมเถ้าลอยถ่านหินกับปูนซีเมนต์อัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร	109
ข6	ผลการทดลองหาเส้นโค้งการคายซับของวัสดุผสมเถ้าลอยถ่านหินกับปูนซีเมนต์อัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร	111
ค1	สภาวะที่ใช้ทำการทดลองการดูดซับไอน้ำจากไอผสมของเอทานอลและน้ำ จากการทดลองชุดต่างๆ	114
ค2	ผลความเข้มข้นของเอทานอลที่ออกจากเบด จากการทดลองชุดต่างๆ	115
จ1	ผลจากการสอบเทียบหาอัตราการไหลจริงของปั๊มป้อนเอทานอลเครื่องที่ 1	120
จ2	ผลจากการสอบเทียบหาอัตราการไหลจริงของปั๊มป้อนเอทานอลเครื่องที่ 2	121
ฉ1	การเตรียมสารละลายเอทานอลที่ความเข้มข้นโดยปริมาตรค่าต่างๆ	124
ฉ2	ค่าดัชนีหักเหของแสงของสารละลายเอทานอลความเข้มข้นต่างๆ ที่ 25 องศาเซลเซียส ในการทดลองครั้งที่ 1	126
ฉ3	ค่าดัชนีหักเหของแสงของสารละลายเอทานอลความเข้มข้นต่างๆ ที่ 25 องศาเซลเซียส ในการทดลองครั้งที่ 2	127

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	โครงสร้างแบบเตตระฮีดรอนของสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต	8
2	โครงสร้างโดยหน่วยเอสบียู และชื่อย่อของแต่ละโครงสร้าง	10
3	ซีโอไลต์ A ที่มีโครงสร้างเป็นกรงโซดาไลต์	12
4	โครงสร้างของซีโอไลต์ X	12
5	ลักษณะของดินขาวที่มีสารประกอบของอะลูมิโนซิลิเกต	15
6	ลักษณะของดินขาวที่มีสารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต	15
7	ส่วนประกอบต่างๆ ของเมล็ดข้าวโพด	22
8	ภาพจาก Scanning electron microscope (SEM) ภาพบนเป็นภาพขยายของพื้นผิวฮอร์นีเอ็นโดเสปอร์ม ภาพล่างเป็นภาพขยายของพื้นผิวเฟลารีเอ็นโดเสปอร์ม	24
9	พันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของน้ำและหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้ง	25
10	รูปแบบของสมดุลระหว่างวัฏภาคของการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่	26
11	เครื่องดูดซับไอน้ำออกจากไอผสมเอทานอลเบดนิ่งแบบเปลี่ยนแปลงความดัน	34
12	แบบของเครื่องดูดซับเบดนิ่งแบบเปลี่ยนแปลงความดัน	35
13	เครื่องระเหยเอทานอลเหลว	36
14	แบบของเครื่องระเหยเอทานอลเหลว	36
15	เครื่องสร้างไอเอทานอลร้อนยวดยิ่ง	37
16	เครื่องหล่อเย็นเอทานอล	37
17	แบบของเครื่องหล่อเย็นเอทานอล	38
18	ปั๊มป้อนเอทานอลที่ใช้ในการวิจัย	38
19	ขวดป้อนเอทานอลไร้น้ำ ขวดป้อนเอทานอล 95.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเครื่องรักษาแรงดันในขวดป้อนเอทานอล	39
20	กระเปาะแรงดันสุญญากาศ	40
21	ปั๊มสร้างแรงดันสุญญากาศ	40
22	เครื่องผลิตน้ำมันร้อนและปั๊มน้ำมันร้อน	41

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
23	เครื่องผลิตน้ำหล่อเย็น	41
24	เครื่องวัดอุณหภูมิแบบ 12 ช่อง	42
25	เครื่องวัดความหนาแน่นของของเหลว	43
26	เตาเผาไฟฟ้า	44
27	ตู้อบลมร้อน	44
28	เครื่อง Gas Sorption Analyzer รุ่น Autosorp I ของบริษัท Quantachrome	45
29	โมเลกุลาร์ซีพ 3A ของบริษัท ZEOCHEM	46
30	เถ้าลอยถ่านหิน	46
31	ดินขาว	47
32	เมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียว	47
33	ดินขาวขึ้นรูป	48
34	เถ้าลอยถ่านหินผสมปูนซีเมนต์	49
35	เมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีก	49
36	ฟางข้าว	50
37	ชานอ้อย	50
38	ชุดทดสอบสารดูดซับในกระบวนการผลิตเอทานอลไร้น้ำ	51
39	แผนภาพแสดงอุปกรณ์ของชุดทดสอบสารดูดซับในกระบวนการผลิตเอทานอลไร้น้ำที่ใช้ในงานวิจัย	52
40	สมดุลการดูดซับไอน้ำที่อุณหภูมิ 110 และ 130 องศาเซลเซียส ของโมเลกุลาร์ซีพ 3A	60
41	เส้นโค้งการดูดซับไอน้ำจากไอผสมของเอทานอลและน้ำเข้าสู่โมเลกุลาร์ซีพ 3A ที่อุณหภูมิ 110 และ130 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนเอทานอลเข้มข้น 95.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 5.90, 7.86, และ 9.83 มิลลิลิตรต่อนาที	61

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
42	เส้นโค้งการคายซับไอน้ำออกจากโมเลกุลาร์ซีพ 3A เข้าสู่ไอของเอทานอลไร้น้ำที่ป้อนเข้า ในสภาวะความดันสุญญากาศ -0.4 ถึง -0.3 บาร์ อุณหภูมิ 110 และ 130 องศาเซลเซียส โดยป้อนเอทานอลไร้น้ำที่อัตราการป้อน 0.98, 1.97, และ 2.95 มิลลิลิตรต่อนาที	62
43	การเปรียบเทียบเส้นโค้งการดูดซับไอน้ำจากไอผสมของเอทานอลและน้ำของโมเลกุลาร์ซีพ 3A กับวัสดุจากท้องถิ่นที่ได้จากการเกษตรประเภทเมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียว ฟางข้าว และชานอ้อย ที่อัตราการป้อน 5.90 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส	63
44	การเปรียบเทียบเส้นโค้งการดูดซับไอน้ำจากไอผสมของเอทานอลและน้ำของโมเลกุลาร์ซีพ 3A กับวัสดุจากท้องถิ่นประเภท ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย ถ่านหิน และดินขาว ที่อัตราการป้อน 5.90 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส	64
45	ขนาดรูพรุนของโมเลกุลาร์ซีพ 3A	66
46	ขนาดรูพรุนของเมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีก	66
47	ขนาดรูพรุนของวัสดุผสมเถ้าลอยถ่านหินกับปูนซีเมนต์อัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร	67
48	ขนาดรูพรุนของดินขาวอบแห้ง	67
49	ขนาดรูพรุนของดินขาวเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส	68
50	ขนาดรูพรุนของดินขาวเผาที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส	68
51	สมดุลการดูดซับไอน้ำที่อุณหภูมิ 110 และ 130 องศาเซลเซียส ของเมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีกและวัสดุผสมเถ้าลอยถ่านหินกับปูนซีเมนต์อัตราส่วน 3 ต่อ 1 เปรียบเทียบกับโมเลกุลาร์ซีพ 3A	70
52	เส้นโค้งการดูดซับไอน้ำจากไอผสมของเอทานอลและน้ำเข้าสู่เมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีก ที่อุณหภูมิ 110 และ130 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนเอทานอลเข้มข้น 95.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 3.94, 5.90, และ 7.86 มิลลิลิตรต่อนาที เปรียบเทียบกับโมเลกุลาร์ซีพ 3A ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส อัตราการป้อน 5.90 มิลลิลิตรต่อนาที	71

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
53	เส้นโค้งการดูดซับไอน้ำจากไอผสมของเอทานอลและน้ำเข้าสู่วัสดุผสมเถ้าลอยถ่านหินกับปูนซีเมนต์อัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 110 และ130 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนเอทานอลเข้มข้น 95.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 5.90, 7.86, และ 9.83 มิลลิลิตรต่อนาที เปรียบเทียบกับโมเลกุลาร์ซีพ 3A ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส อัตราการป้อน 5.90 มิลลิลิตรต่อนาที	73
54	เส้นโค้งการคายซับไอน้ำออกจากเมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีก เข้าสู่ไอของเอทานอลไร้น้ำที่ป้อนเข้า ในสภาวะความดันสุญญากาศ -0.4 ถึง -0.3 บาร์ อุณหภูมิ 110 และ 130 องศาเซลเซียส โดยป้อนเอทานอลไร้น้ำที่อัตราการป้อน 0.98, 1.97, และ 2.95 มิลลิลิตรต่อนาที	74
55	เส้นโค้งการคายซับไอน้ำออกจากวัสดุผสมเถ้าลอยถ่านหินกับปูนซีเมนต์อัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร เข้าสู่ไอของเอทานอลไร้น้ำที่ป้อนเข้าในสภาวะความดันสุญญากาศ -0.4 ถึง -0.3 บาร์ อุณหภูมิ 110 และ 130 องศาเซลเซียส โดยป้อนเอทานอลไร้น้ำที่อัตราการป้อน 0.98, 1.97, และ 2.95 มิลลิลิตรต่อนาที	75
56	กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าคงที่ของสมดุลการดูดซับไอน้ำ	77
57	ความสัมพันธ์ของอัตราการป้อนเอทานอลไร้น้ำที่มีต่อ อัตราการลดลงของความเข้มข้นเอทานอลจนถึงจุดต่ำสุด เวลาที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจนถึง 98 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และปริมาตรของเอทานอลไร้น้ำที่ใช้ในการป้อนขณะเวลาที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจนถึง 98 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพื่อทำการคายซับไอน้ำออกจากโมเลกุลาร์ซีพ 3A ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ความดันสุญญากาศ -0.4 ถึง -0.3 บาร์	80

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
58	ความสัมพันธ์ของอัตราการป้อนเอทานอลไร้น้ำที่มีต่อ อัตราการลดลงของความเข้มข้นเอทานอลจนถึงจุดต่ำสุด เวลาที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจนถึง 98 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และปริมาตรของเอทานอลไร้น้ำที่ใช้ในการป้อนขณะเวลาที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจนถึง 98 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพื่อทำการคายซับไอน้ำออกจากโมเลกุลาร์ซีพ 3A ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ความดันสุญญากาศ -0.4 ถึง -0.3 บาร์	80
59	ความสัมพันธ์ของอัตราการป้อนเอทานอลไร้น้ำที่มีต่อ อัตราการลดลงของความเข้มข้นเอทานอลจนถึงจุดต่ำสุด เวลาที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจนถึง 98 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และปริมาตรของเอทานอลไร้น้ำที่ใช้ในการป้อนขณะเวลาที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจนถึง 98 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพื่อทำการคายซับไอน้ำออกจากเมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีกที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสความดันสุญญากาศ -0.4 ถึง -0.3 บาร์	81
60	ความสัมพันธ์ของอัตราการป้อนเอทานอลไร้น้ำ ที่มีต่อ อัตราการลดลงของความเข้มข้นเอทานอลจนถึงจุดต่ำสุด เวลาที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจนถึง 98 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และปริมาตรของเอทานอลไร้น้ำที่ใช้ในการป้อนขณะเวลาที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจนถึง98 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพื่อทำการคายซับไอน้ำออกจากเมล็ดข้าวโพดข้าวเหนียวผ่าซีกที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ความดันสุญญากาศ -0.4 ถึง -0.3 บาร์	81
61	ความสัมพันธ์ของอัตราการป้อนเอทานอลไร้น้ำ ที่มีต่อ อัตราการลดลงของความเข้มข้นเอทานอลจนถึงจุดต่ำสุด เวลาที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจนถึง 98 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และปริมาตรของเอทานอลไร้น้ำที่ใช้ในการป้อนขณะเวลาที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจนถึง 98 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพื่อทำการคายซับไอน้ำออกจากวัสดุผสมเถ้าถ่านหินกับปูนซีเมนต์อัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ความดันสุญญากาศ -0.4 ถึง -0.3 บาร์	82

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
62	ความสัมพันธ์ของอัตราการป้อนเอทานอลไร้น้ำที่มีต่อ อัตราการลดลงของความเข้มข้นเอทานอลจนถึงจุดต่ำสุด เวลาที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจนถึง 98 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และปริมาตรของเอทานอลไร้น้ำที่ใช้ในการป้อนขณะเวลาที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจนถึง 98 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพื่อทำการคายซับไอน้ำออกจากวัสดุผสมเถ้าถ่านหินกับปูนซีเมนต์อัตราส่วน 3 ต่อ 1 โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ความดันสุญญากาศ -0.4 ถึง -0.3 บาร์	82
ภาพผนวกที่		
จ1	กราฟแสดงการสอบเทียบหาอัตราการไหลจริงของปั๊มป้อนเอทานอล เครื่องที่ 1 และ 2	122
ฉ1	เครื่องวัดค่าดัชนีหักเหของแสงของของเหลว (Refractometer)	125
ฉ2	ความสัมพันธ์ของค่าดัชนีหักเหของแสงกับความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	128