



รายงานการวิจัย

การพัฒนาเครื่องต้นแบบของกระบวนการดูดซับด้วยวิธีสลับความดัน
ที่ใช้ตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง สำหรับแยกน้ำออกจากไอเอทานอล
(Pressure swing adsorption prototype with cassava-based adsorbent for
dehydration of ethanol vapor)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พนรัตน์ รัตนพานี

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

นางสาวชลธิรา บุญฟูง

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก

กองทุนนวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

2555



ศูนย์บรรณสารและสื่อการศึกษา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัย “การพัฒนาเครื่องต้นแบบของกระบวนการดูดซับด้วยวิธีสลับความดันที่ใช้ตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง สำหรับแยกน้ำออกจากไอเอทานอล” นี้ ได้รับการสนับสนุนงบประมาณโครงการวิจัยจากกองทุนนวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และดำเนินโครงการวิจัยตลอดโครงการที่ห้องปฏิบัติการวิจัยสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี อาคารศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้วิจัยขอขอบคุณกองทุนนวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีสำหรับงบประมาณโครงการวิจัย ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสำหรับความเอื้อเฟื้อในสถานที่และอุปกรณ์ในการทำวิจัย และบุคลากรในสาขาวิชาวิศวกรรมเคมีทุกท่านสำหรับความช่วยเหลือในการดำเนินโครงการวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถในการแยกน้ำออกจากไอผสมเอทานอลด้วยตัวดูดซับจากมันสำปะหลังในระบบดูดซับแบบเบคกิง จัดสร้างเครื่องต้นแบบของการดูดซับแบบสลับความดันและศึกษาผลของปัจจัยต่อปริมาณการผลิตเอทานอลบริสุทธิ์ ได้แก่ ความดันของคอลัมน์ดูดซับ อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ และอัตราการไหลของสารป้อน ตัวดูดซับจากมันสำปะหลังสามารถเตรียมได้จากแป้งมันสำปะหลังและกากมันสำปะหลัง ซึ่งเป็นวัสดุพลที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ

การทดลองแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ การทดลองในระบบการดูดซับแบบเบคกิง และระบบดูดซับแบบสลับความดันโดยผลการทดลองในการดูดซับแบบเบคกิงแสดงให้เห็นว่า ตัวดูดซับจากมันสำปะหลังสามารถแยกน้ำออกจากไอผสมเอทานอลได้ สามารถเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์ได้มากกว่าร้อยละ 99.5 โดยน้ำหนัก และความสามารถในการดูดซับน้ำของตัวดูดซับจากมันสำปะหลังจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของเอทานอลในสารป้อนมีค่าเพิ่มขึ้น และรูปแบบการดูดซับมีลักษณะคล้ายไอโซเทิร์มการดูดซับแบบแลงมัวร์

สำหรับระบบดูดซับแบบสลับความดันโดยใช้ตัวดูดซับจากมันสำปะหลังในการแยกน้ำออกจากไอผสมเอทานอลใช้ออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3 สำหรับวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัย 3 ปัจจัย ที่มีผลต่ออัตราการผลิตเอทานอล ได้แก่ ความดันของคอลัมน์ดูดซับ อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ และอัตราการไหลของสารป้อน พบว่าทุกปัจจัยมีผลต่ออัตราการผลิตเอทานอล โดยความดันของคอลัมน์ดูดซับเป็นปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการผลิตเอทานอลมากที่สุด สภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือ ความดันของคอลัมน์ดูดซับ 3 บาร์ อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ 130 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของสารป้อน 600 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งมีอัตราการผลิตเอทานอล 714 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ระบบดูดซับแบบสลับความดันที่ใช้ตัวดูดซับจากมันสำปะหลังจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับการผลิตเอทานอลบริสุทธิ์

Abstract

This research aimed to study the suitability of using cassava-based adsorbent in fixed bed and pressure swing adsorption (PSA) systems for water separation from ethanol vapor. A prototype PSA system has been developed for dehydration of ethanol-water vapor mixture. In addition, the effect several variables on the quantity of ethanol production rate was studied, including adsorption pressure, adsorption temperature and feed flow rate. The cassava-based adsorbent prepared from mixtures of cassava starch and cassava pulp which are material which can decompose naturally.

The study consisted of two parts, fixed-bed and pressure swing adsorption experiments. For fixed-bed adsorption results, the cassava-based adsorbent can removed water from ethanol vapor which increased the ethanol concentration to more than 99.5 wt%. The capability of water adsorption decreased when the ethanol concentration in the feed was increased. The water adsorption of cassava-based adsorbents can be modeled by the Langmiur adsorption isotherm.

The pressure swing adsorption study was designed as a 2^3 factorial for analysis with three factors that affecting the ethanol productivity which are adsorption pressure (P) adsorption temperature (T) and feed flow rate (V). The results showed that all three factors had an effected on ethanol productivity. The adsorption pressure was the most significant factor which had an affected on ethanol productivity. The optimal operating condition for this system was found to be at 3 bars for the adsorption pressure, 120°C for the adsorption temperature and 600 ml/min for the feed flow rate with an ethanol production rate of 714 ml/hr. The PSA with cassava-based adsorbent reported in this study could be an alternative method for production of nearly anhydrous ethanol.

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างโมเลกุลของอะไมโดส.....	6
2.2 โครงสร้างโมเลกุลของอะไมโดเพคติน.....	7
2.3 การเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของน้ำกับหมู่ไฮดรอกซิลของกลูโคส (Beery, 2001).....	7
2.4 ไอโซเทิร์มของตัวดูดซับจากข้าวโพดบดละเอียดที่ความดันบรรยากาศ (Ladisch et al., 1984).....	11
2.5 ไอโซเทิร์มการดูดซับของน้ำโดยใช้ตัวดูดซับจากแป้งข้าวโพด (Chang et al., 2006).....	12
2.6 เส้นโค้งเบรคทรูที่เบคความสูงต่าง ๆ ที่อุณหภูมิของเบค 91 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของน้ำเริ่มต้นร้อยละ 6.2 โดยน้ำหนัก (Chang et al., 2006).....	13
2.7 รูปแบบไอโซเทิร์มการดูดซับของระบบดูดซับก๊าซ (Rouquerol et al., 1999).....	20
2.8 ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบแลงมัวร์ในรูปแบบของกราฟเส้นตรง.....	22
2.9 ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบฟรุนคลิชในรูปแบบของกราฟเส้นตรง.....	23
2.10 หลักการทำงานเบื้องต้นของระบบดูดซับแบบสลับความดัน (Douglas et al., 1994).....	25
2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนการติดตั้งและกำลังการผลิตของระบบดูดซับแบบ สลับความดันและการกลั่น (Douglas et al., 1994).....	27
2.12 วัฏจักรของกระบวนการดูดซับแบบสลับความดัน (Seader, 2006).....	29
2.13 วัฏจักรสการ์สตรอม Skarstrom Cycle (Seader, 2006).....	29
3.1 ชุดทดลองสำหรับระบบดูดซับแบบเบคนี้้ง.....	39
3.2 แผนภาพแสดงองค์ประกอบเครื่องต้นแบบของระบบดูดซับแบบสลับความดัน.....	40
3.3 ขั้นตอนการเตรียมตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง.....	41
3.4 ขั้นตอนการทดลองหาความสามารถในการแยกน้ำออกจากไอผสมเอทานอล ของระบบดูดซับแบบเบคนี้้ง.....	42

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 การเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์กับเวลาในระบบ ดูดซับที่ใช้สารป้อนซึ่งมีความเข้มข้นของเอทานอลร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก.....	47
4.2 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำขาออกจากระบบดูดซับแบบเบดนิ่ง โดยใช้ตัวดูดซับ 10 กรัม.....	48
4.3 ผลของความเข้มข้นของสารป้อนที่มีต่อการดูดซับน้ำ.....	50
4.4 ผลของปริมาณตัวดูดซับที่มีต่อความสามารถในการดูดซับน้ำของระบบดูดซับ แบบเบดนิ่งที่ใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของเอทานอลในสารป้อน ร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 300 มิลลิลิตร.....	51
4.5 ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบแลงมัวร์ในรูปแบบของกราฟเส้นตรงจาก ข้อมูลการดูดซับน้ำของตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง.....	53
4.6 ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิชในรูปแบบของกราฟเส้นตรงจาก ข้อมูลการดูดซับน้ำของตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง.....	53
4.7 ผลของปริมาณตัวดูดซับที่มีต่อความสามารถในการดูดซับน้ำที่ความเข้มข้น เริ่มต้นของเอทานอลในสารป้อนร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 300 มิลลิลิตร.....	54
4.8 ความชื้นของตัวดูดซับจากมันสำปะหลังที่เวลาต่าง ๆ เมื่อคายซับด้วยระบบสุญญากาศ.....	55
4.9 ผลของเวลาของครึ่งวัฏจักรต่อความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์ ที่ได้จากระบบดูดซับแบบสลับความดัน โดยใช้ซีโอไลต์ 3 เอ ที่ความดันของคอลัมน์ดูดซับ 2 บาร์เกจ อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ 130 องศาเซลเซียส.....	57
4.10 ผลของอุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับต่อความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์ ที่ได้จากระบบดูดซับแบบสลับความดัน ที่ความดันของคอลัมน์ดูดซับ 3 บาร์.....	59
4.11 ผลของความดันดูดซับต่อความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์จากระบบ ดูดซับแบบสลับความดัน โดยใช้ซีโอไลต์ 3 เอ อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ 130 องศาเซลเซียส.....	61

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์จากระบบดูดซับแบบสลับความดัน โดยใช้ตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ 120 องศาเซลเซียส และเปิดวาล์วหม้อต้มระเหยร้อยละ 25 ที่ความดันของคอลัมน์ดูดซับต่างกัน.....	64
4.13 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์จากระบบดูดซับแบบสลับความดัน โดยใช้ตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ 120 องศาเซลเซียส และเปิดวาล์วหม้อต้มระเหยร้อยละ 75 ที่ความดันของคอลัมน์ดูดซับต่างกัน.....	65
4.14 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์จากระบบดูดซับแบบสลับความดัน โดยใช้ตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ 130 องศาเซลเซียส และเปิดวาล์วหม้อต้มระเหยร้อยละ 25 ที่ความดันของคอลัมน์ดูดซับต่างกัน.....	66
4.15 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์จากระบบดูดซับแบบสลับความดัน โดยใช้ตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ 130 องศาเซลเซียส และเปิดวาล์วหม้อต้มระเหยร้อยละ 75 ที่ความดันของคอลัมน์ดูดซับต่างกัน.....	66
4.16 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์จากระบบดูดซับแบบสลับความดัน โดยใช้ตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง ความดันของคอลัมน์ดูดซับ 2 บาร์ เปิดวาล์วหม้อต้มระเหยร้อยละ 25 อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับต่างกัน.....	68
4.17 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์จากระบบดูดซับแบบสลับความดัน โดยใช้ตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง ความดันของคอลัมน์ดูดซับ 3 บาร์ เปิดวาล์วหม้อต้มระเหยร้อยละ 25 อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับต่างกัน.....	68

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

4.18	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์จากระบบดูดซับแบบสลับความดันโดยใช้ตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง ความดันของคอลัมน์ดูดซับ 2 บาร์ เปิดวาล์วหม้อต้มระเหยร้อยละ 75 อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับต่างกัน.....	69
4.19	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์จากระบบดูดซับแบบสลับความดันโดยใช้ตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง ความดันของคอลัมน์ดูดซับ 3 บาร์ เปิดวาล์วหม้อต้มระเหยร้อยละ 75 อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับต่างกัน.....	69
4.20	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์จากระบบดูดซับแบบสลับความดันโดยใช้ตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ 120 องศาเซลเซียส ความดันของคอลัมน์ดูดซับ 2 บาร์ เปิดวาล์วหม้อต้มระเหยต่างกัน.....	71
4.21	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์จากระบบดูดซับแบบสลับความดันโดยใช้ตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ 130 องศาเซลเซียส ความดันของคอลัมน์ดูดซับ 2 บาร์ เปิดวาล์วหม้อต้มระเหยต่างกัน.....	71
4.22	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์จากระบบดูดซับแบบสลับความดันโดยใช้ตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ 120 องศาเซลเซียส ความดันของคอลัมน์ดูดซับ 3 บาร์ เปิดวาล์วหม้อต้มระเหยต่างกัน.....	72
4.23	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์จากระบบดูดซับแบบสลับความดันโดยใช้ตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ 130 องศาเซลเซียส ความดันของคอลัมน์ดูดซับ 3 บาร์ เปิดวาล์วหม้อต้มระเหยต่างกัน.....	72

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.24	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์จากระบบดูดซับแบบสลับความดันโดยใช้ตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ 130 องศาเซลเซียส ความดันของคอลัมน์ดูดซับ 3 บาร์ เปิดวาล์วหม้อต้มระเหยร้อยละ 25 เวลาของเครื่องจักรต่างกัน74
4.25	ปริมาตรของเอทานอลผลิตภัณฑ์จากระบบดูดซับแบบสลับความดันโดยใช้ตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ 130 องศาเซลเซียส เปิดวาล์วหม้อต้มระเหยร้อยละ 25 ความดันของคอลัมน์ดูดซับ 3 บาร์ เวลาของเครื่องจักรต่างกัน74
ก.1	แป้งมันสำปะหลัง.....85
ก.2	กากมันสำปะหลังบดละเอียด.....85
ก.3	ตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง.....86
ก.4	เครื่องให้ความร้อน.....86
ก.5	ชุดการทดลองของระบบดูดซับแบบเบดนิ่ง.....87
ก.6	เครื่องดันแบบของระบบดูดซับแบบสลับความดัน.....88
ก.7	แผนภาพแสดงองค์ประกอบของระบบดูดซับแบบสลับความดันสำหรับตำแหน่งการอ่านค่าความดันและอุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ.....89

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

β	=	สัมประสิทธิ์ของปัจจัย
b	=	ค่าคงที่การดูดซับ (Adsorption binding constant)
$^{\circ}\text{C}$	=	องศาเซลเซียส
C	=	ความเข้มข้น
C_0	=	ความเข้มข้นเริ่มต้น
C_e	=	ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)
EtOH	=	เอทานอล
g	=	กรัม
K_f	=	แฟกเตอร์ความจุฟรุนดลิช (Freundlich capacity factor)
min	=	นาที
ml	=	มิลลิลิตร
$\frac{1}{n}$	=	พารามิเตอร์ความเข้มฟรุนดลิช (Freundlich intensity parameter)
PSA	=	การดูดซับแบบสลับความดัน (Pressure Swing Adsorption)
q	=	ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ)
q_m	=	ปริมาณสูงสุดของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ)
T	=	อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ (องศาเซลเซียส)
%wt	=	ร้อยละโดยน้ำหนัก

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

วิกฤตการณ์ราคาน้ำมันโลกพุ่งสูงที่ขึ้นอย่างเฉียบพลันในปี ค.ศ. 1971 ส่งผลให้เกิดความตื่นตัวและความกังวลเกี่ยวกับภาวะการณ์ขาดแคลนพลังงานขึ้นในเกือบทุกประเทศทั่วโลก ผลจากวิกฤตการณ์ครั้งนั้นทำให้ประเทศไทยซึ่งพึ่งพาพลังงานจากการนำเข้าในปริมาณค่อนข้างมากต้องประสบกับความเสียเปรียบทางเศรษฐกิจ เนื่องจากราคาเชื้อเพลิงถိုင်ต้นทุนสำคัญอย่างหนึ่งของกระบวนการผลิตทั้งในภาคเกษตรกรรม ภาคอุตสาหกรรม และภาคการขนส่ง ภาวะดังกล่าวทำให้รัฐบาลไทยมีนโยบายที่จะพัฒนาแหล่งพลังงานทดแทนอื่นขึ้น เพื่อลดความเสียเปรียบและสร้างความมั่นคงทางเศรษฐกิจ อีกทั้งเพื่อสร้างเสถียรภาพด้านพลังงานให้แก่ประเทศ

ความตระหนักถึงปริมาณสำรองที่จำกัดของน้ำมันดิบ ประกอบกับความตื่นตัวในปัญหาเรื่องมลภาวะที่เกิดขึ้นต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากการใช้น้ำมันดิบเป็นเชื้อเพลิง ทำให้พลังงานทดแทนซึ่งเป็นเชื้อเพลิงสะอาดและเป็นมิตรกับธรรมชาติเริ่มกลายเป็นที่สนใจมากขึ้น เอทานอลเป็นพลังงานทดแทนอีกชนิดหนึ่งที่ได้รับการสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นเชื้อเพลิงที่ไร้มลพิษ เช่น ซัลเฟอร์ และมีโมเลกุลของออกซิเจนเป็นส่วนประกอบถึงร้อยละ 35 โดยน้ำหนัก และเอทานอลจะมีค่าออกเทน (Octane) สูง สามารถใช้เพื่อเพิ่มค่าออกเทนให้กับน้ำมันเบนซิน โดยไม่ต้องเติมสารประกอบของตะกั่ว ทำให้เกิดมลภาวะน้อย และเมื่อนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในรถยนต์จึงเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่าเชื้อเพลิงทั่วไป ช่วยลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ (บุญชร เจริญเวทย์, 2550) จึงส่งผลให้เอทานอลเป็นพลังงานทดแทนชนิดหนึ่งที่จะมีอิทธิพลต่อโลกในอนาคต

เอทานอลเป็นแอลกอฮอล์ชนิดหนึ่งที่มีลักษณะเป็นของเหลวใสไม่มีสี คัดไฟง่าย สามารถละลายได้ในน้ำและสารละลายอินทรีย์อื่น ๆ และเอทานอลบริสุทธิ์สูงจะมีค่าออกเทนสูงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มาก ได้แก่ ใช้ในกระบวนการผลิตอาหาร และเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ รวมถึงใช้เป็นตัวทำละลายในอุตสาหกรรม และที่สำคัญคือ ใช้เป็นเชื้อเพลิง เป็นต้น เอทานอลสามารถผลิตได้ทั้งจากกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมีโดยใช้เอทิลีนเป็นวัตถุดิบ และในกระบวนการชีวเคมีที่ใช้พืชผลหรือวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรโดยใช้แป้งและน้ำตาลสูงเป็นวัตถุดิบ ซึ่งเป็นกระบวนการที่นิยมมากในปัจจุบัน ประโยชน์ของเอทานอลในแง่ของเชื้อเพลิง ได้แก่ การนำเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 99.5 โดยน้ำหนัก ไปผสมกับน้ำมันเบนซินในอัตราส่วน 90:10 เป็นเชื้อเพลิงที่เรียกว่าแก๊สโซฮอล์ (Gasohol) ซึ่งสามารถใช้กับเครื่องยนต์เบนซินในปัจจุบันได้โดยไม่จำเป็นต้อง

ดัดแปลงเครื่องยนต์ หรือการใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรงทดแทนน้ำมันเบนซิน ในรถยนต์ที่มีการปรับแต่งเครื่องยนต์เพื่อรองรับเอทานอลแล้ว

ประเทศไทยจัดว่าเป็นประเทศหนึ่งที่มีศักยภาพในการผลิตเอทานอลค่อนข้างสูง เนื่องจากมีวัตถุดิบทางการเกษตรที่มีแป้งและน้ำตาลสูงหลายชนิด ได้แก่ มันสำปะหลัง ข้าวโพด อ้อย และกากน้ำตาล เป็นต้น การผลิตเอทานอลจากวัตถุดิบทางการเกษตรจะใช้กระบวนการหมักด้วยยีสต์ เพื่อเปลี่ยนน้ำตาลให้เป็นเอทานอล เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการหมักจะได้น้ำหมักที่มีเอทานอลอยู่ประมาณร้อยละ 5-12 โดยน้ำหนัก ซึ่งจะถูกส่งผ่านเข้าสู่กระบวนการกลั่นเพื่อทำให้เอทานอลมีความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้น

ข้อจำกัดของการเพิ่มความบริสุทธิ์ของเอทานอลด้วยกระบวนการกลั่น คือ การใช้พลังงานปริมาณมหาศาลในการแยกน้ำออกจากไอผสมเอทานอล โดยมีงานวิจัยแสดงให้เห็นว่ากระบวนการดังกล่าวใช้พลังงานมากกว่าร้อยละ 50-80 ของพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิตเอทานอลทั้งหมด (Lee et al., 1985) อีกทั้งยังเป็นวิธีการแยกสารผสมที่อาศัยการระเหยขององค์ประกอบที่มีจุดเดือดต่างกัน ซึ่งเมื่อกลั่นมาถึงสัดส่วนองค์ประกอบในไอผสมมีค่าเท่ากับสัดส่วนองค์ประกอบในสารละลาย เรียกจุดนี้ว่า จุดอะซีโอโทรป (Azeotrope) ทำให้ไม่สามารถแยกองค์ประกอบของสารผสมออกจากกันได้ สำหรับสารละลายของเอทานอลกับน้ำที่จุดอะซีโอโทรปมีความเข้มข้นของเอทานอลร้อยละ 95.6 โดยน้ำหนัก และมีจุดเดือดคงที่ (Constant boiling point) ที่ 78.2 องศาเซลเซียส การกลั่นแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอลเพื่อให้ได้เอทานอลบริสุทธิ์ ทำได้โดยการเติมสารบางชนิดเพื่อสลายอะซีโอโทรปขณะทำการกลั่น เรียกกระบวนการนี้ว่า การกลั่นอะซีโอโทรป (Azeotrope distillation)

ข้อด้อยของกระบวนการกลั่นดังกล่าวกระตุ้นให้เกิดการวิจัยและพัฒนากระบวนการสำหรับการทำเอทานอลบริสุทธิ์ที่มีปริมาณการใช้พลังงานน้อยกว่ากระบวนการดั้งเดิม หนึ่งในกระบวนการที่มีการเสนอไว้คือการรวมเอากระบวนการดูดซับ (Adsorption) เข้ากับกระบวนการกลั่นเพื่อแยกน้ำออกจากไอผสมของเอทานอล โดยนำน้ำหมักจากขั้นตอนการผลิตเอทานอลมากลั่นลำดับส่วนจนกระทั่งได้ความเข้มข้นของเอทานอลประมาณร้อยละ 75-90 โดยน้ำหนัก จากนั้นผ่านสารละลายที่ได้จากการกลั่นไปบนตัวดูดซับที่สามารถดูดซับน้ำได้ เช่น ซิลิกาเจล (Silica gel) แบเรียมออกไซด์ (Barium oxide) ซีโอไลต์ (Zeolite) หรือวัสดุชีวมวล เช่น แป้งข้าวโพด ข้าวโพดบดหยาบ หรือเซลลูโลส (Cellulose) เพื่อให้ได้เอทานอลที่มีความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก กระบวนการกลั่นตามด้วยการดูดซับนี้ใช้พลังงานประมาณ 4 เมกะจูลต่อ 1 กิโลกรัมของเอทานอลที่ผลิตได้ ซึ่งน้อยกว่ากระบวนการกลั่นอะซีโอโทรปใช้พลังงานประมาณ 6-9 เมกะจูลต่อ 1 กิโลกรัมของเอทานอล (Ladisch and Dyck, 1979)

นอกจากแป้งข้าวโพดและข้าวโพดบดหยาบแล้ววัสดุชีวมวลอื่นที่มีการศึกษาพบว่าสามารถดูดซับน้ำได้ อาทิ ข้าวโพดบดละเอียด (Ladich et al., 1984) ชังข้าวโพด แป้งสาลี ฟางข้าวสาลี (Vareli et al., 2000) ไซแลน (Xylan) และเศษไม้ (Ladisch, 1997)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถของตัวดูดซับชีวมวลที่เตรียมขึ้นจากแป้งมันสำปะหลังและกากมันสำปะหลัง ซึ่งกากมันสำปะหลังนั้นเป็นวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังและมีราคาถูก และจัดสร้างเครื่องต้นแบบของระบบดูดซับแบบสลับความดันโดยใช้ตัวดูดซับจากมันสำปะหลังสำหรับแยกน้ำออกจากไอผสมเอทานอล เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์และเชิงสาธารณะประโยชน์ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาความสามารถในการแยกน้ำออกจากไอผสมเอทานอลของตัวดูดซับที่เตรียมขึ้นจากแป้งมันสำปะหลังและกากมันสำปะหลัง โดยที่วัตถุประสงค์ย่อยดังนี้

1.2.1 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการแยกน้ำออกจากไอผสมเอทานอลของระบบดูดซับแบบเบดนิ่ง (Fixed bed adsorption) ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลเริ่มต้นและปริมาณตัวดูดซับ

1.2.2 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการแยกน้ำออกจากไอผสมเอทานอลของระบบดูดซับแบบสลับความดัน (Pressure swing adsorption) ได้แก่ เวลาของครึ่งวัฏจักร อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ ความดันของคอลัมน์ดูดซับ และอัตราการไหลของสารป้อน

1.2.3 ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการแยกน้ำออกจากไอผสมเอทานอลของระบบดูดซับแบบสลับความดันที่ใช้ตัวดูดซับจากมันสำปะหลังเปรียบเทียบกับการใช้ซีโอไลต์ 3 เอ (Zeolite 3A)

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาความสามารถในการแยกน้ำออกจากไอผสมเอทานอลโดยใช้ตัวดูดซับจากมันสำปะหลังและศึกษาระบบดูดซับแบบสลับความดัน โดยมีขอบเขตของงานวิจัยดังต่อไปนี้

1.3.1 ศึกษาความเป็นไปได้ในการแยกน้ำออกจากไอผสมเอทานอลของระบบดูดซับแบบเบดนิ่ง โดยใช้ตัวดูดซับจากมันสำปะหลังที่มีขนาดระหว่าง 0.425-0.600 มิลลิเมตร

1.3.2 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการแยกน้ำออกจากไอผสมเอทานอลของระบบดูดซับแบบเบดนิ่ง ดังต่อไปนี้

- 1) ความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลเริ่มต้นระหว่างร้อยละ 60-95 โดยน้ำหนัก
- 2) ปริมาณตัวดูดซับระหว่าง 10-60 กรัม เมื่อใช้ปริมาตรสารละลายเอทานอลเริ่มต้น 300 มิลลิลิตร

1.3.3 จัดสร้างเครื่องต้นแบบของระบบดูดซับแบบสลับความดัน

1.3.4 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการแยกน้ำออกจากไฮดรอกซีเมทานอลของระบบ
ดูดซับแบบสลับความดัน ดังต่อไปนี้

- 1) เวลาของเครื่องวัฏจักร ที่เวลา 4/1 3/2 และ 1/4 นาที
- 2) อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ ที่อุณหภูมิ 120 และ 130 องศาเซลเซียส
- 3) ความดันของคอลัมน์ดูดซับ ที่ความดัน 2 และ 3 บาร์
- 4) อัตราการไหลของสารป้อนโดยพิจารณาการอัตราการเปิดวาล์วหมีมือคัมระเหย
ร้อยละ 25 และ 75

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้กระบวนการที่สามารถใช้เป็นทางเลือกสำหรับการผลิตเอทานอลบริสุทธิ์โดยใช้
ตัวดูดซับจากวัสดุชีวมวลซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีในประเทศ

1.4.2 ได้องค์ความรู้อันจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาและการขยายขนาด (Scale up) ของ
กระบวนการดูดซับด้วยตัวดูดซับจากวัสดุชีวมวล เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์
และเชิงสาธารณะประโยชน์

บทที่ 2

ปรีทศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แป้ง

แป้งเป็นพอลิเมอร์น้ำตาลของกลูโคสที่มีกลูโคสจำนวนหลายพันโมเลกุลมาต่อกัน มีสูตรทางเคมีทั่วไปคือ $(C_5H_{10}O_5)_n$ และเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) ชนิดหนึ่งที่พบมากในพืชที่การสังเคราะห์แสงพืชเก็บสะสมแป้งไว้ตามส่วนต่าง ๆ เช่น หัว ราก เมล็ด ลำต้น และผล โดยรวมตัวอยู่เป็นเม็ดแป้ง (starch granule) แป้งส่วนใหญ่ได้มาจากเมล็ดของพืช เช่น ข้าวเจ้า ข้าวโพด ข้าวสาลี ข้าวฟ่าง และบางส่วนได้มาจากหัวและรากของพืช เช่น มันเทศ มันสำปะหลัง และมันฝรั่ง เป็นต้น

แป้งประกอบด้วยพอลิเมอร์ 2 ชนิด คือ อะไมโลส (Amylose) และอะไมโลเพกติน (Amylopectin) โดยแป้งส่วนใหญ่จะมีอะไมโลสเป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 20-30 โดยน้ำหนัก และอะไมโลเพกตินประมาณร้อยละ 70-80 โดยน้ำหนัก แต่แป้งจากถั่วและข้าวโพดบางสายพันธุ์มีปริมาณของอะไมโลสสูงถึงร้อยละ 50-80 โดยน้ำหนัก และแป้งจากข้าวโพดบางสายพันธุ์ประกอบด้วยอะไมโลเพกตินเพียงอย่างเดียว

2.1.1 อะไมโลส

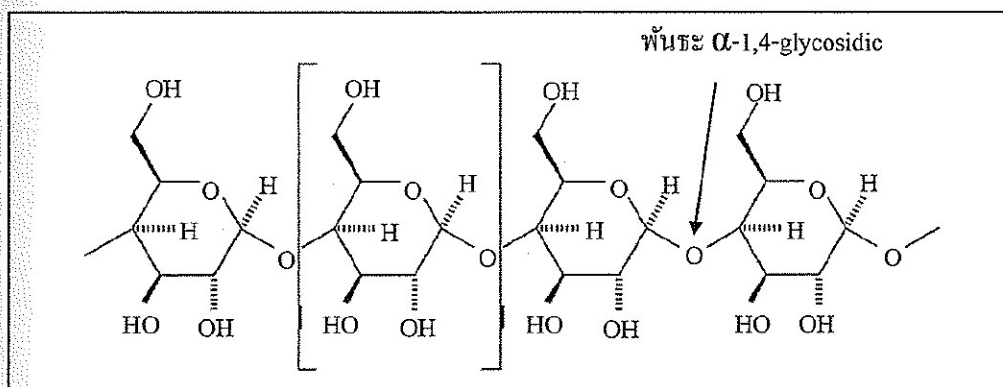
อะไมโลสเป็นพอลิเมอร์สายโซ่ตรงของกลูโคสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4-glycosidic ดังแสดงในรูปที่ 2.1 มีมวลโมเลกุลเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 10^6 กรัมต่อโมล โดยทั่วไปแป้งจากธัญพืช เช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลี แป้งข้าวฟ่าง จะมีปริมาณของอะไมโลสประมาณร้อยละ 22-30 โดยน้ำหนัก ส่วนแป้งที่ได้จากรากและหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง แป้งสาเกจะมีปริมาณอะไมโลสประมาณร้อยละ 18-24 โดยน้ำหนัก

2.1.2 อะไมโลเพกติน

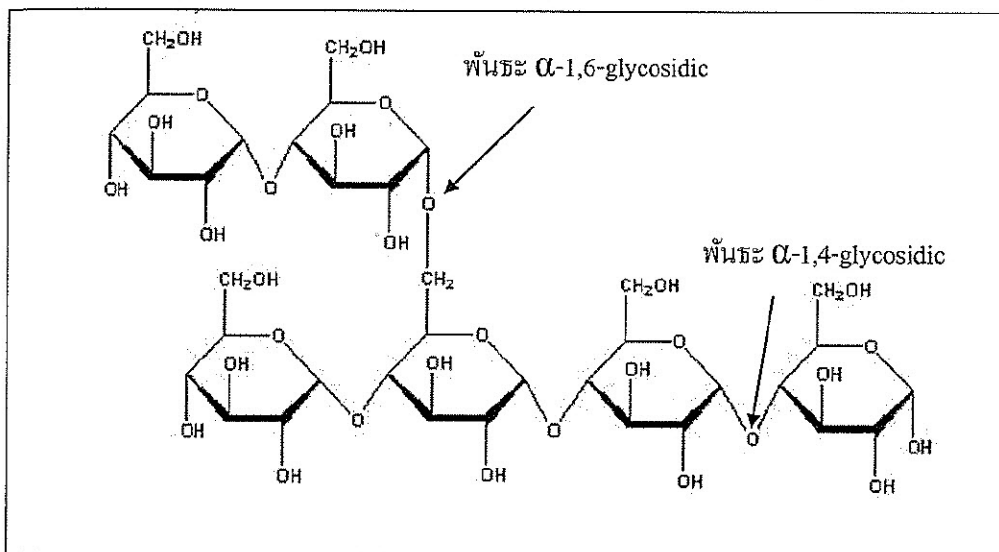
อะไมโลเพกตินคือพอลิแซ็กคาไรด์ที่เป็นองค์ประกอบหลักมีอยู่ในแป้งประมาณร้อยละ 70-100 โดยน้ำหนัก โครงสร้างของโมเลกุลเป็นพอลิเมอร์ของโมเลกุลกลูโคสที่มีสายแขนงแยกออกมา แต่ละแขนงมีโมเลกุลของกลูโคสประมาณ 20-30 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,6-glycosidic ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ในโครงสร้างโมเลกุลของอะไมโลเพกตินจึงมีทั้งพันธะ α -1,4-glycosidic และ α -1,6-glycosidic อะไมโลเพกตินมีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าอะไมโลส และมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000 เท่าของอะไมโลส คือ มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 10^7 - 10^9 กรัมต่อโมล

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน

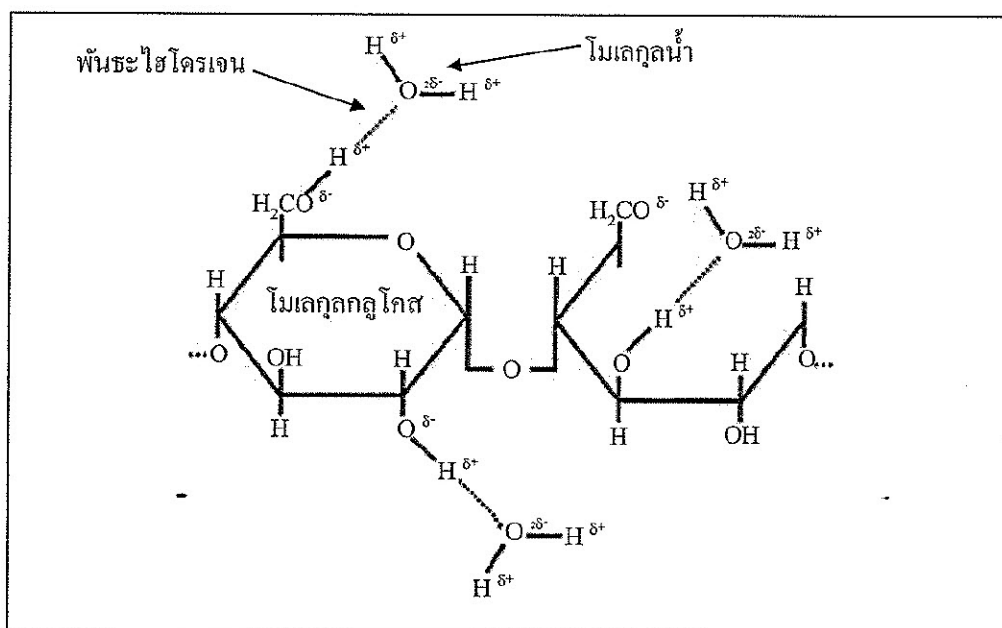
อะไมโลส (Amylose)	อะไมโลเพคติน (Amylopectin)
1. โครงสร้างเป็นโมเลกุลกลูโคสที่ต่อกันเป็นเส้นตรงด้วยพันธะ α -1,4-glycosidic	1. โครงสร้างเป็นโมเลกุลกลูโคสที่ต่อกันด้วยพันธะ α -1,4- glycosidic และมีการแตกกิ่งด้วยพันธะ α -1,6-glycosidic
2. ประกอบด้วยกลูโคส 200-6000 หน่วย	2. แต่ละกิ่งมีกลูโคส 20-25 หน่วย
3. ละลายน้ำได้น้อย	3. ละลายน้ำได้ดี
4. ให้สีน้ำเงินกับสารละลายไอโอดีน	4. ให้สีม่วงแดงหรือสีน้ำตาลกับสารละลายไอโอดีน
5. เมื่อต้มในน้ำจะมีความข้นหนืดน้อย	5. เมื่อต้มในน้ำจะมีความข้นหนืดมากและใส
6. ต้มแล้วทิ้งไว้จะจับตัวเป็นวุ้นและเป็นแผ่นแข็ง	6. ต้มแล้วทิ้งไว้จะไม่จับตัวเป็นวุ้นและไม่เป็นแผ่นแข็ง



รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของอะไมโลส(<http://www.science.marshall.edu/murraye/images/amylose.JPG>)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างโมเลกุลของอะไมโลเพคติน (http://www.cbu.edu/~seiscn/OrganicChemistry_files/image003.jpg)



รูปที่ 2.3 การเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของน้ำกับหมู่ไฮดรอกซิลของกลูโคส (Beery and Ladisch, 2001)

แป้งสามารถดูดซับน้ำได้เนื่องจากเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างน้ำกับหมู่ไฮดรอกซิลอิสระบนโมเลกุลของกลูโคส ดังแสดงในรูปที่ 2.3 จากโครงสร้างที่เป็นกิ่งก้านสาขาและจำนวนโมเลกุลของกลูโคสที่มากกว่าของอะไมโลเพคติน จึงมีการสันนิษฐานว่าอะไมโลเพคตินสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับน้ำและดูดซับน้ำได้มากกว่าอะไมโลส (Beery and Ladisch, 2001)

Lee et al. (1991) ทำการศึกษาปรากฏการณ์ดูดซับของน้ำและเอทานอลของแป้ง และพบว่าทั้งโมเลกุลของน้ำและเอทานอลมีความสามารถที่จะสร้างพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลอิสระบนโมเลกุลของกลูโคสได้ แต่น้ำเกิดการดูดซับได้มากกว่าและเร็วกว่าเมื่อเทียบกับเอทานอล ดังนั้นในการแยกน้ำออกจากเอทานอลจึงพิจารณาเฉพาะการดูดซับของโมเลกุลน้ำในแป้งเท่านั้น

2.2 มันสำปะหลัง

มันสำปะหลังมีชื่อภาษาอังกฤษว่า Cassava หรือ Tapioca ลำต้นมีลักษณะคล้ายข้อเนื่องจาก การร่วงหล่นของก้านใบแก่ ลำต้นบริเวณใกล้ยอดจะมีสีเขียว ส่วนที่ต่ำลงมาจะมีสีแตกต่างกันไปตามสายพันธุ์ มีก้านใบยาวติดกับลำต้น แผ่นใบเว้าเป็นแฉกมี 3-5 แฉก มันสำปะหลังเป็นพืชที่มีการสร้างอาหารจากใบและส่วนที่เป็นสีเขียว แล้วจะเก็บสะสมอาหารในรูปของคาร์โบไฮเดรตหรือแป้งไว้ในราก โดยทั่วไปหัวมันที่มีอายุ 12 เดือนที่ได้รับปริมาณน้ำฝนเพียงพอและไม่มีฝนตกชุกขณะเก็บเกี่ยวจะประกอบด้วยแป้งสูงถึงร้อยละ 70-85 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในตารางที่ 2.2

มันสำปะหลังเป็นพืชที่ปลูกอยู่ในเขตร้อน เหมาะกับดินร่วนปนทราย แต่เป็นพืชทนแล้งจึงสามารถเพาะปลูกได้ในดินทุกชนิด แม้แต่ดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ โดยมันสำปะหลังที่ปลูกกันทั่วโลกมีหลายสายพันธุ์ แต่มันสำปะหลังที่ปลูกเพื่อการค้ามีเพียงสายพันธุ์ *Manihot esculenta* Crantz (ชื่อเดิมคือ *Manihot utilissima* Pohl) เท่านั้น มันสำปะหลังที่ปลูกแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ มันสำปะหลังชนิดหวาน (Sweet type) และมันสำปะหลังชนิดขม (Bitter type) ซึ่งเป็นมันสำปะหลังชนิดที่ให้ปริมาณแป้งสูง จึงนิยมใช้ในอุตสาหกรรมการแปรรูปต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมมันเส้นและมันอัดเม็ด และอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง เป็นต้น

ประเทศไทยสามารถปลูกมันสำปะหลังได้ทุกภาคและปลูกได้ตลอดปี แต่เกษตรกรส่วนใหญ่จะปลูกมันสำปะหลังในช่วงต้นฤดูฝน (เดือนพฤษภาคมถึงเดือนมิถุนายน) และช่วงปลายฤดูฝน (เดือนตุลาคมถึงเดือนพฤศจิกายน) เนื่องจากเป็นช่วงที่ให้ผลผลิตหัวสดสูงกว่าในช่วงเดือนอื่น หัวมันสำปะหลังที่ผลิตได้ในประเทศไทยส่วนใหญ่จะใช้เป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการผลิตแป้ง

แป้งมันสำปะหลัง

การผลิตแป้งมันสำปะหลังสามารถทำได้โดยการสกัดแป้งออกจากหัวมันสำปะหลังสดและ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแป้ง แป้งมันสำปะหลังที่ผลิตได้จะมีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว และ มีความบริสุทธิ์สูง มีปริมาณแป้งอยู่มากถึงร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณโปรตีนและไขมัน รวมถึงฟอสฟอรัสค่อนข้างต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งชนิดอื่น ๆ มีอะไมโลเพกตินอยู่สูงถึงร้อยละ 80 ของปริมาณแป้งทั้งหมด ดังแสดงในตารางที่ 2.3 และเมื่อได้รับความร้อนจะมีความหนืดสูง ทำให้ได้แป้งเปียกที่ใส ไม่ทึบแสง และมีอัตราการกินตัวต่ำ

กากมันสำปะหลัง

กากมันสำปะหลังเป็นวัสดุเหลือใช้จากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง มีลักษณะเป็นเนื้อละเอียด สีขาว มีความชื้นสูงประมาณร้อยละ 80 ถึงแม้ว่ากากมันสำปะหลังจะมีระดับเยื่อใย (Fiber) สูง แต่ ยังคงมีปริมาณแป้งเหลืออยู่ค่อนข้างมาก ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของมันสำปะหลังแห้ง

(มูลนิธิสถาบันพัฒนามันสำปะหลังแห่งประเทศไทย)

องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
แป้ง	71.9-85.0
โปรตีน	1.57-5.78
เยื่อใย	1.77-3.98
เถ้า	1.20-2.80
ไขมัน	0.06-0.43
คาร์โบไฮเดรตที่ไม่ใช่แป้ง	3.59-8.66

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง

(Kiatpongkarn, 2007)

องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
อะไมโลส (Amylose)	17.25
อะไมโลเพกติน (Amylopectin)	82.75

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีของกากมันสำปะหลัง
(สุนีย์ ไชยทินนาท, 2539)

องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
คาร์โบไฮเดรต	66.22
เส้นใย	15.26
โปรตีน	3.39
ไขมัน	0.24
เถ้า	2.65

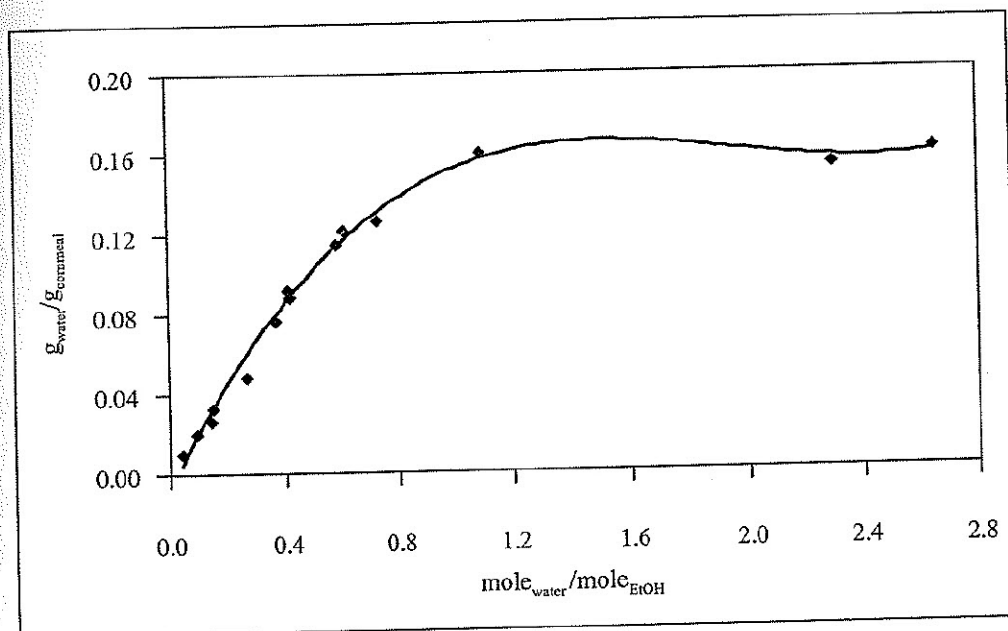
ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบทางเคมีของข้าวโพด
(Anderson et al., 1996)

องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
แป้ง	78
- อะไมโลส	(25)
- อะไมโลเพคติน	(75)
โปรตีน	7.5
เถ้า	0.3
ไขมัน	0.7
ความชื้น	11.5
อื่นๆ	2.3

ผลงานวิจัยหลายชิ้นแสดงให้เห็นว่าวัสดุชีวมวลที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบสามารถดูดซับน้ำ ดังต่อไปนี้ Ladisch et al. (1984) ศึกษาการแยกน้ำออกจากไอของสารละลายเอทานอลโดยใช้ ข้าวโพดบดละเอียดเป็นตัวดูดซับในระบบดูดซับแบบเบดนิ่ง ผลการทดลองพบว่าข้าวโพดบดละเอียดสามารถแยกน้ำออกจากไอเอทานอลได้ จากการศึกษารูปแบบ การกระจายความเข้มข้น (Concentration profile) ใช้ข้าวโพดบดละเอียด 156 กรัม เป็นผลการทดลอง ในระดับห้องปฏิบัติการ พบว่าเวลาเบรคทูร์ (Breakthrough time) เท่ากับ 20 นาที ค่าของเวลาเบรคทูร์

ขึ้นอยู่กับปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ และเมื่อพิจารณากระบวนการดูดซับในระดับโรงงานต้นแบบที่ใช้ปริมาณของข้าวโพดบดละเอียดจำนวน 4.54 กิโลกรัม จะมีค่าเวลาเบรคทูปประมาณ 9 ชั่วโมง โดยสามารถเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลสูงกว่าร้อยละ 99.6 โดยน้ำหนัก ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ (Water loading) มีค่าสูงสุดอยู่ที่ 0.160 กรัม น้ำต่อกรัม ตัวดูดซับ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 นอกจากนี้ผลการศึกษายังพบว่าตัวดูดซับจากข้าวโพดบดละเอียดสามารถดูดซับแยกน้ำออกจากสารผสมอินทรีย์อื่น และสามารถนำตัวดูดซับจากข้าวโพดบดละเอียดกลับมาใช้ใหม่ได้

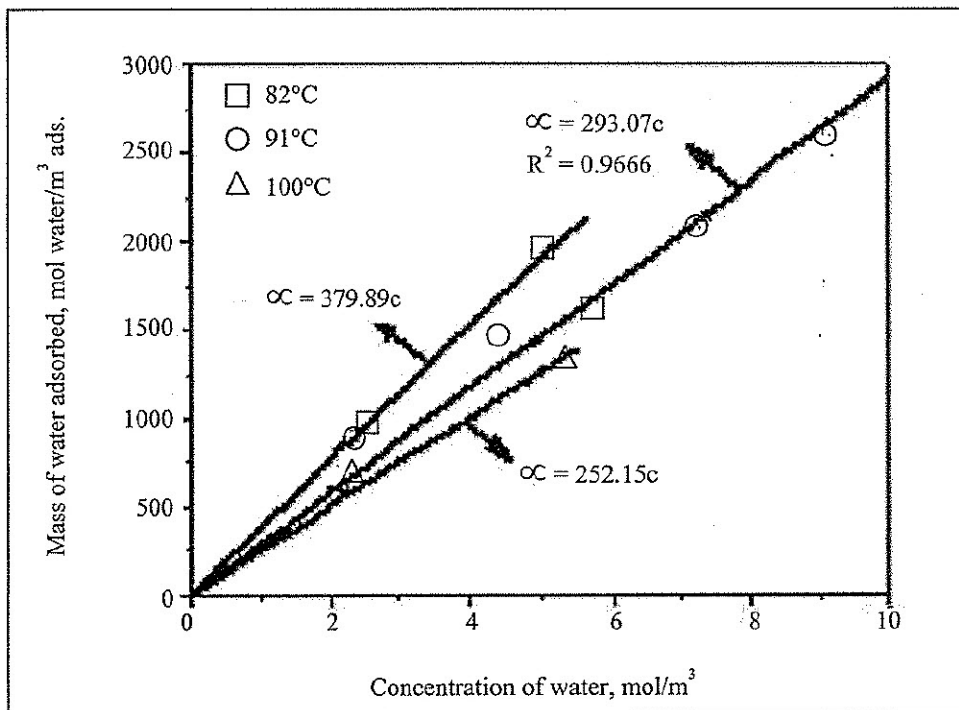
สำหรับพลังงานรวมที่ต้องใช้ในโรงงานต้นแบบที่ใช้ข้าวโพดบดละเอียดเป็นตัวดูดซับ เมื่อป้อนสารละลายเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 92 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิห้อง คือ 1,760 กิโลจูลต่อกิโลกรัมของสารผลิตภัณฑ์ ซึ่งพลังงานดังกล่าวได้รวมพลังงานในการเพิ่มอุณหภูมิเพื่อเปลี่ยนสารละลายเอทานอลให้กลายเป็นไอเอทานอล



รูปที่ 2.4 ไอโซเทิร์มของตัวดูดซับจากข้าวโพดบดละเอียดที่ความดันบรรยากาศ

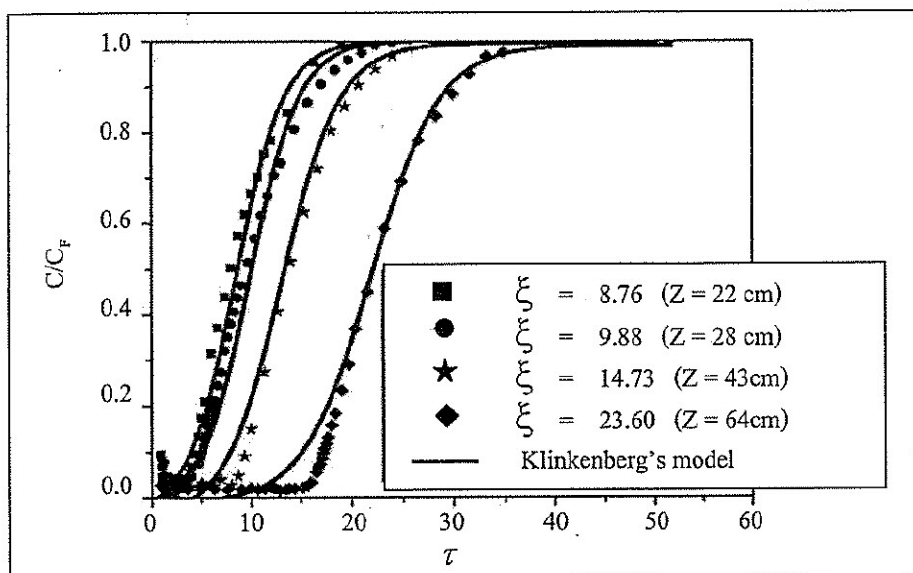
(Ladisich et al., 1984)

Chang et al. (2006) ศึกษาการดูดซับแยกไอน้ำออกจากไอผสมของเอทานอลโดยใช้ข้าวโพด ในระบบดูดซับแบบเบดนิ่งที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์ดูดซับ 2.5 เซนติเมตร และสูง 90 เซนติเมตร เพื่อศึกษาไอโซเทิร์มการดูดซับของน้ำในช่วงอุณหภูมิของการดูดซับ 82-100 องศาเซลเซียส และทำนายเส้นโค้งเบรคทูร (Breakthrough curve) โดยการเปรียบเทียบกับแบบจำลองของ Klinkenberg ผลการทดลองพบว่าไอโซเทิร์มของการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยความชันของเส้นกราฟมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิของการดูดซับสูงขึ้น และเส้นโค้งเบรคทูรสามารถใช้ได้กับแบบจำลองของ Klinkenberg ที่มีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม (Overall mass transfer coefficient) เท่ากับ 2.78×10^{-3} ต่อวินาที (ดังแสดงในรูปที่ 2.6)



รูปที่ 2.5 ไอโซเทิร์มการดูดซับของน้ำโดยใช้ตัวดูดซับจากแป้งข้าวโพด

(Chang et al., 2006)



รูปที่ 2.6 เส้นโค้งเบรคทรูที่เบคความสูงต่าง ๆ ที่อุณหภูมิของเบด 91 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของน้ำเริ่มต้นร้อยละ 6.2 โดยน้ำหนัก (Chang et al., 2006)

Westgate and Ladisch (1993) ศึกษาการใช้ข้าวโพดคั่วแห้งเป็นตัวดูดความชื้นสำหรับกระบวนการทำอากาศแห้ง โดยอากาศอัดตัวภายใต้สภาวะความดัน 300 กิโลปาสกาล และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส พบว่าที่สภาวะสมดุล 1 กรัมของตัวดูดซับสามารถดูดซับน้ำไว้ได้ 196 มิลลิกรัม (Equilibrium loading = 196 mg/g) และตัวดูดซับจากข้าวโพดคั่วแห้งสามารถดูดความชื้นออกจากอากาศได้เช่นเดียวกันกับซีโอไลต์ในเครื่องทำแห้งแบบสลับความดัน

เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของมันสำปะหลัง (ตารางที่ 2.2) จะเห็นว่ามีแป้งเป็นองค์ประกอบอยู่มาก จึงเกิดความสนใจที่จะศึกษาความสามารถของตัวดูดซับที่เตรียมขึ้นจากแป้งและกากมันสำปะหลังสำหรับการดูดซับน้ำในกระบวนการแยกน้ำออกจากไอผสมของเอทานอล



2.3 เอทานอล (Ethanol)

เอทานอลหรือเอทิลแอลกอฮอล์ เป็นสารอินทรีย์ที่หมักได้จากพืชในกลุ่มแป้งหรือน้ำตาล เอทานอลมีผลอยู่ในสุราหรือเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ที่ใช้บริโภค และเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ต่ออยู่กับสายโซ่ของไฮโดรคาร์บอน มีสูตรทางเคมี คือ C_2H_5OH เป็นของเหลวใสไม่มีสี มีความหนาแน่น 0.789 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส มีจุดเดือด 78.32 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 760 มิลลิเมตรปรอท สามารถละลายได้ทั้งในน้ำและอีเทอร์ มีค่าความร้อนจำเพาะ 2.43 จูลต่อกรัม และค่าความร้อนแฝง 920.3 จูลต่อกรัมที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เอทานอลถูกใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมหลัก 3 กลุ่ม คือ กลุ่มเครื่องดื่ม กลุ่มอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง ยาและสี และกลุ่มวัสดุเชื้อเพลิง

2.3.1 การใช้ประโยชน์จากเอทานอลในกลุ่มเชื้อเพลิง

เอทานอลที่มีความบริสุทธิ์แตกต่างกันสามารถนำมาใช้ทำเป็นเชื้อเพลิงได้ 3 รูปแบบ ได้แก่

1) เป็นเชื้อเพลิงโดยตรงเพื่อทดแทนน้ำมันเบนซินหรือดีเซล โดยใช้เอทานอลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 99.5 โดยน้ำหนัก ใช้กับเครื่องยนต์ที่มีอัตราส่วนการอัดสูง

2) เอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 99.5-99.6 โดยน้ำหนัก สามารถนำไปผสมกับน้ำมันเบนซินได้ในหลายอัตราส่วนและมีชื่อเรียกที่ต่างกัันดังนี้ เมื่อผสมกับน้ำมันเบนซินจะเรียกกันว่า แก๊สโซฮอล์หรือ E10 หมายถึงการผสมน้ำมันเบนซินกับเอทานอลในสัดส่วน 90:10 โดยที่ยังรักษาค่าออกเทนไว้ได้ในระดับเดิม E20 หมายถึงการผสมน้ำมันเบนซินกับเอทานอลในสัดส่วน 80:20 และในหลายประเทศ E85 เป็นชื่อที่เรียกเชื้อเพลิงที่ได้จากการผสมน้ำมันเบนซินกับเอทานอลโดยมีสัดส่วนของเอทานอลสูงถึง 85 ส่วน และมีค่าออกเทนสูง มีใช้กันในประเทศในแถบอเมริกา และยุโรป รวมทั้งประเทศไทย

3) เป็นสารเคมีที่ช่วยเพิ่มค่าออกเทนในน้ำมันเบนซินโดยการเปลี่ยนรูปเอทานอลเป็น ETBE (Ethyl Tertiary Butyl Ether) สามารถใช้ทดแทนสาร MTBE (Methyl Tertiary Butyl Ether) ซึ่งเป็นสารเติมแต่งในน้ำมันเบนซิน และมีหลายประเทศประกาศห้ามใช้เนื่องจากก่อให้เกิดมลภาวะในอากาศที่สูงกว่าสารเติมแต่งอื่น ๆ

2.3.2 กระบวนการผลิตเอทานอลบริสุทธิ์

การผลิตเอทานอลนั้นสามารถผลิตได้ทั้งจากกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมีโดยใช้เอทิลีนเป็นสารตั้งต้นหรือกระบวนการทางชีวภาพโดยการหมักพืชที่มีน้ำตาล เช่น อ้อย บีทรูท หรือกากน้ำตาล หรือชนิดที่ประกอบด้วยแป้ง เช่น มันสำปะหลัง ข้าว ข้าวสาลี ข้าวบาร์เลย์ ข้าวฟ่าง โดยเอนไซม์จากจุลินทรีย์จะย่อยแป้งในวัสดุชีวมวลให้เป็นน้ำตาล หมักน้ำตาลด้วยเชื้อยีสต์เพื่อเปลี่ยน

ให้เป็นเอทานอลจะได้ความเข้มข้นของเอทานอลประมาณร้อยละ 5-12 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำไปทำการกลั่นเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอล ซึ่งกระบวนการกลั่นลำดับส่วนสามารถเตรียมเอทานอลที่มีความเข้มข้นสูงสุดได้เพียงร้อยละ 95.5 โดยน้ำหนักเท่านั้น ในกรณีที่ต้องนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงที่จะใช้ในรถยนต์ในรูปแบบแก๊สโซฮอล์และดีโซฮอล์ จะต้องแยกส่วนน้ำออกจากเอทานอลให้ได้ความบริสุทธิ์มากกว่าร้อยละ 99.5 โดยน้ำหนัก กรรมวิธีหรือเทคโนโลยีในการแยกน้ำเพื่อผลิตเอทานอลบริสุทธิ์ที่นิยมมี 3 วิธี คือ

1) การกลั่นอะซีโอโทรป (Azeotrope distillation) เป็นกระบวนการผลิตเอทานอลบริสุทธิ์หลังที่ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก ดังนี้ (Pinto et al., 2000)

- การกลั่นลำดับส่วน (Fraction distillation) เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอล โดยความเข้มข้นสูงสุดของเอทานอลที่ได้ประมาณร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่จุดอะซีโอโทรป (Azeotrope) ของสารละลายเอทานอลในน้ำ

- การกลั่นอะซีโอโทรป เป็นการกลั่นเอทานอลโดยเติมสารประกอบที่ผสมลงไปในการละลายอะซีโอโทรปของเอทานอลในน้ำ เพื่อสลายอะซีโอโทรปและทำให้สามารถกลั่นแยกน้ำออกจากเอทานอลได้ สารประกอบที่ผสมที่เติมนี้นี้เรียกว่า เอนเทรนเนอร์ (Entrainer) ตัวอย่างของเอนเทรนเนอร์ที่ใช้ได้แก่ ไซโคลเฮกเซน (Cyclohexane) เบนซีน (Benzene) โทลูอิน (Toluene) อีเทอร์ (Ether) หรือคีโตน (Ketone) โดยสารผสมที่ประกอบด้วยน้ำ เอนเทรนเนอร์ และเอทานอลบางส่วนจะระเหยขึ้นไปทางด้านบนของหอกลั่น ส่วนด้านล่างของหอกลั่นจะเป็นเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์เพิ่มมากขึ้น

- การกลั่นลำดับส่วนเพื่อแยกองค์ประกอบในสารผสมที่ระเหยออกจากด้านบนของหอกลั่นอะซีโอโทรปออกจากกัน ขั้นตอนนี้มีจุดประสงค์เพื่อกลั่นแยกเอทานอลที่ติดไปกับสารผสมดังกล่าว และแยกเอนเทรนเนอร์เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่

กระบวนการกลั่นนี้เป็นวิธีการดั้งเดิมที่นิยมใช้เป็นอย่างมากในการผลิตเอทานอลบริสุทธิ์ แต่มีข้อด้อยคือใช้พลังงานมากและเอนเทรนเนอร์เกือบทุกชนิดเป็นสารอินทรีย์มีพิษ และบางชนิดเป็นสารก่อมะเร็ง

2) การดูดซับด้วยซีโอไลต์ (Zeolite separation) หลักการของกระบวนการนี้ คือ ซีโอไลต์จะยอมให้โมเลกุลน้ำผ่านเข้าไปในรูพรุน ขณะที่โมเลกุลของเอทานอลที่มีขนาดใหญ่กว่าจะผ่านไปได้ กระบวนการนี้เริ่มด้วยการผ่านสารละลายเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 92-96 โดยน้ำหนัก ไปยังคอลัมน์ดูดซับที่บรรจุซีโอไลต์ไว้ภายในเป็นชั้น ประมาณ 2-3 ชั้นในแนวนาน โมเลกุลน้ำจะถูกจับไว้ในขณะที่เอทานอลบริสุทธิ์ถึงร้อยละ 99.8-99.9 โดยน้ำหนัก จะผ่านลงมาและถูกนำไปยังถังเก็บหลังจากเสร็จสิ้นจากกระบวนการแยกน้ำซึ่งซีโอไลต์แต่ละชั้นจะชุ่มไปด้วยน้ำ และ

สามารถทำให้แห้งได้โดยผ่านไอน้ำเพื่อไอน้ำที่ถูกดูดซับในซีโอไลต์ออก ข้อดีของกระบวนการนี้คือ เป็นเทคโนโลยีที่ง่าย ใช้พลังงานต่ำเมื่อเทียบกับวิธีการกลั่นอะซีโอโทรมและไม่ต้องมีการเติมเอนโทรปีเพื่อช่วยในการแยกน้ำออกจากไอผสมของเอทานอล แต่มีข้อเสียคืออัตราการสึกกร่อนของซีโอไลต์มีค่อนข้างสูง เมื่อมีการใช้งานมากกว่า 5 ปี จำเป็นต้องเปลี่ยนตัวดูดซับใหม่ (ฉัตรนุช วรรณเชิดชู และ สุจิตรา วงศ์เกษมจิตต์, 2546)

Carmo and Gubulin (2002) การศึกษาการแยกน้ำออกจากไอผสมของเอทานอลในกระบวนการดูดซับแบบสลับความดันชนิดคอลัมน์ดูดซับเดี่ยวและใช้ซีโอไลต์ 3 เอ (Zeolite 3A) โดยออกแบบการทดลองด้วยวิธีออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 3 ระดับ เพื่อศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ อัตราการไหลของสารป้อน 2-8 ลิตรต่อชั่วโมง อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ 150-250 องศาเซลเซียส ความดันของคอลัมน์ดูดซับ 2-6 บาร์ และความดันในการคายซับ 0.2-0.8 บาร์ วิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลด้วยเครื่องวัดดัชนีการหักเหของแสง (Reichert-Jung Auto Abbe refractometer) และหาสถานะที่เหมาะสมของกระบวนการด้วยโปรแกรม MATLAB พบว่าสภาวะที่ให้ค่าเหมาะสมที่สุดคือ ความดันของคอลัมน์ดูดซับ 3.397 บาร์ อัตราการไหลของสารป้อน 5.52 ลิตรต่อชั่วโมง และอุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ 250 องศาเซลเซียส ได้ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์เอทานอลสูงสุดร้อยละ 99.683 โดยน้ำหนัก สัดส่วนกู้คืน (Recovery) คือ สัดส่วนของสารป้อนต่อความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์เท่ากับร้อยละ 89.693 ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเอทานอล 7.462 กรัมเอทานอลต่อกรัมตัวดูดซับ และเวลาของวัฏจักร 28.98 วินาที

ธีรพัฒน์ มัชฌิมภิโร และ สรญา หนูเกื้อ (2004) ศึกษาการแยกน้ำออกจากไอผสมเอทานอลในกระบวนการดูดซับแบบสลับความดันโดยใช้ซีโอไลต์ชนิด 3 เอ โดยใช้สารละลายเอทานอลเริ่มต้นเข้มข้นร้อยละ 94-95 โดยน้ำหนัก ความดันในการดูดซับ 2-4 บาร์ ความดันในการคายซับ 0.2 บาร์ เวลาของครึ่งวัฏจักร 3 และ 4 นาที และอุณหภูมิดูดซับและคายซับ 150-200 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อใช้ความดันในการดูดซับ 3 บาร์ และเวลาของครึ่งวัฏจักร 3 นาที สามารถเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลสูงถึงร้อยละ 99.71 โดยน้ำหนัก

3) กระบวนการแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน (Membrane separation) กระบวนการนี้นอกจากจะเป็นเทคโนโลยีล่าสุด ที่ใช้พลังงานน้อยในการแยกสารละลายผสมผ่านเยื่อเลือกผ่านโดยใช้กลไกการซึมผ่านของสารละลาย (Permeation) ผ่านแผ่นเยื่อเลือกผ่านออกมาจะอยู่ในสถานะไอ (Evaporation) เนื่องจากความดันขาออกมีค่าต่ำกว่าความดันขาเข้า วิธีการนี้เรียกว่า Pervaporation สิ่งสำคัญในวิธีนี้คือต้องเลือกเยื่อเลือกผ่านให้เหมาะสม สำหรับการแยกน้ำออกจากเอทานอลจะใช้เยื่อเลือกผ่านชนิดชอบน้ำ (Hydrophilic membrane) วิธีการนี้มีความสะดวก ใช้พลังงานน้อยและได้ผลิตภัณฑ์เอทานอลที่บริสุทธิ์เช่นเดียวกับกระบวนการอื่น การแยกน้ำด้วยกระบวนการนี้จะไม่ขึ้นอยู่กับสมดุลของ

เทอร์โมไดนามิกส์ของสารละลาย แต่กระบวนการนี้ขยายขนาดได้ค่อนข้างยากจึงเหมาะสำหรับการแยกสารผสมในปริมาณน้อยเท่านั้น (รัตนา จิระรัตนานนท์, 2543)

2.4 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับ คือ การแยกสารผสมโดยสารที่ต้องการแยกเป็นตัวยึดเกาะอยู่ในวัฏภาคของเหลว (Liquid phase) หรือวัฏภาคก๊าซ (Fluid phase) เมื่อให้สารละลายหรือก๊าซผสมไหลสัมผัสกับตัวดูดซับ สารที่ต้องการแยกจะสร้างพันธะหรือยึดเกาะบนผิวตัวดูดซับด้วยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน วัสดุที่เป็นตัวดูดซับต้องมีพื้นที่ผิวมากเมื่อเทียบกับหนึ่งหน่วยน้ำหนักและมีรูพรุนมาก

2.4.1 ลักษณะกลไกการดูดซับ มี 2 ลักษณะ คือ

1) การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับกับโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ ซึ่งมีค่ามากกว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับในสารละลาย โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจึงเกาะบนผิวตัวดูดซับ แรงยึดเหนี่ยวเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Force) ที่มีค่าความร้อนของการดูดซับประมาณ 20 กิโลจูลต่อโมลหรือน้อยกว่าและไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของตัวดูดซับระหว่างที่เกิดการดูดซับ การดูดซับทางกายภาพสามารถเกิดการผันกลับได้อย่างสมบูรณ์ จึงสามารถทำการศึกษาได้ทั้งกระบวนการดูดซับและคายซับ (Desorption) นอกจากนี้สารที่ถูกดูดซับสามารถเกาะบนผิวของตัวดูดซับได้ทั้งแบบชั้นเดียว (Monolayer) และหลายชั้น (Multilayer)

2) การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

เป็นการเกิดพันธะทางเคมีหรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ เกิดในลักษณะคล้ายกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี การดูดซับนี้จึงต้องการพลังงานกระตุ้น เช่นเดียวกับการเกิดปฏิกิริยาทั่วไป ดังนั้นการดูดซับทางเคมีจึงเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูง และมีค่าความร้อนของการดูดซับสูงประมาณ 50-400 กิโลจูลต่อโมล การดูดซับประเภทนี้จะเกิดการดูดซับของตัวถูกดูดซับแบบชั้นเดียวเท่านั้น

ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพแสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ความแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี

ตัวแปร	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
1. ค่าความร้อนของการดูดซับ (กิโลจูลต่อโมล)	≤ 20	50 - 400
2. อุณหภูมิที่เกิดการดูดซับ	ต่ำ	สูง
3. แรงดึงดูดระหว่าง โมเลกุล	แรงแวนเดอร์วาลส์	พันธะเคมี
4. การผันกลับของปฏิกิริยา	ผันกลับได้	ส่วนใหญ่ไม่ผันกลับ
5. รูปแบบชั้นของการดูดซับ	ชั้นเดียวและหลายชั้น	ชั้นเดียว

2.4.2 ไอโซเทิร์มการดูดซับ (Adsorption isotherm)

ไอโซเทิร์มการดูดซับเป็นข้อมูลของความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น หรือความหนาแน่นของตัวถูกดูดซับในวัฏภาคก๊าซหรือวัฏภาคของเหลวกับปริมาณของตัวถูกดูดซับ และไอโซเทิร์มการดูดซับแบ่งออกเป็น 6 รูปแบบ (Rouqurol et al., 1999) ดังแสดงในรูปที่ 2.7

1) แบบที่ 1 (Type I) เป็นการดูดซับที่พบมากที่สุด คือการดูดซับโดยมีชั้นของตัวถูกดูดซับคลุมบนผิวของสารดูดซับเพียงชั้นเดียว พบทั้งในการดูดซับทางกายภาพและทางการดูดซับทางเคมี เป็นลักษณะการดูดซับของวัสดุที่ไม่มีรูพรุน (Non-Porous) หรือพบในตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (น้อยกว่า 2 นาโนเมตร) อยู่เป็นจำนวนมาก เช่น ถ่านกัมมันต์ จากรูปที่ 2.7 จะเห็นว่าการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำๆ และที่ความดันสัมพัทธ์ เข้าใกล้ 1 จะเกิดการดูดซับเพียงเล็กน้อย

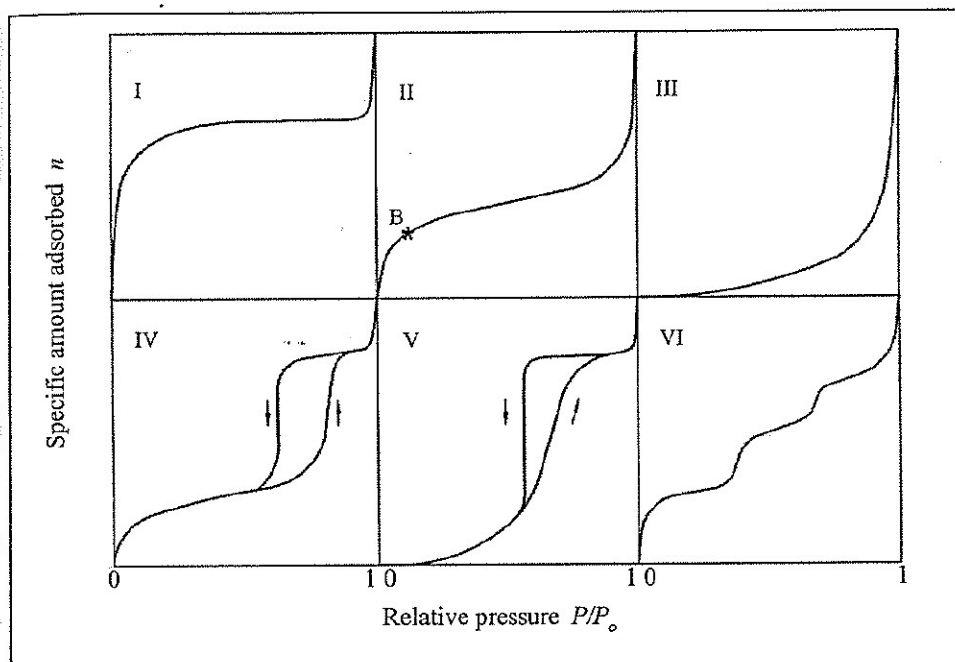
2) แบบที่ 2 (Type II) เป็นการดูดซับของโมเลกุลมากกว่าหนึ่งชั้นโดยชั้นของตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับหนาขึ้นเรื่อย ๆ (ปริมาณที่ถูกดูดซับเข้าสู่ค่าอนันต์) การดูดซับแบบนี้มักพบในตัวดูดซับที่ไม่มีรูพรุน หรือรูพรุนส่วนใหญ่มีขนาดกลาง (2-50 นาโนเมตร) และขนาดใหญ่ (มากกว่า 50 นาโนเมตร) ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบนี้จะมีจุดเปลี่ยนกราฟ (จุด B) ซึ่งเป็นสภาวะที่ผิวหน้าของตัวดูดซับถูกปกคลุมด้วยโมเลกุลของตัวถูกดูดซับแบบชั้นเดียวอย่างสมบูรณ์ เมื่อเพิ่มความดันสัมพัทธ์ตัวดูดซับจะเกิดการดูดซับเพิ่มขึ้นเป็นชั้น ๆ และเมื่อความดันสัมพัทธ์เข้าใกล้ 1 ตัวถูกดูดซับที่เป็นก๊าซจะควบแน่นเป็นของเหลว

3) แบบที่ 3 (Type III) เป็นไอโซเทิร์มที่มีลักษณะคล้ายกระจกวันและไม่มีจุดเปลี่ยนกราฟ เป็นลักษณะการดูดซับที่แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีค่ามากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและผิวหน้าของตัวดูดซับ ทำให้เกิดการดูดซับได้น้อยที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำแต่การดูดซับจะเกิดมากเมื่อความดันสัมพัทธ์สูงขึ้น เนื่องจากเกิดการดูดซับแบบหลายชั้นซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับด้วยกันเอง

4) แบบที่ 4 (Type IV) ลักษณะของไอโซเทิร์มการดูดซับคล้ายกับแบบที่ 2 ในช่วงเพิ่มความดัน (Adsorption Branch) แต่ไอโซเทิร์มในช่วงลดความดัน (Desorption Branch) จากค่าความดันสัมพัทธ์เข้าใกล้ 1 ลงมา จะไม่ย้อนทับกับเส้นไอโซเทิร์มในช่วงขาขึ้น ทำให้เกิดบริเวณที่เรียกว่า Hysteresis Loop ซึ่งจะเกิดปรากฏการณ์ Capillary Condensation โดยเมื่อค่าความดันสัมพัทธ์เข้าใกล้ 1 (ความดันย่อยของตัวถูกดูดซับมีค่าเข้าใกล้กับค่าความดันไออิ่มตัว) ตัวถูกดูดซับจะอยู่ในสภาวะคล้ายของเหลวที่บรรจุอยู่ในหลอดหรือช่องของรูพรุน ซึ่งจะมีผลของแรงดึงดูดระหว่างของเหลวกับผนังของรูพรุนที่ของเหลวสัมผัสอยู่เข้ามาเกี่ยวข้อง การจะไล่ตัวถูกดูดซับออกจากรูพรุนจึงต้องลดความดันให้มีค่าน้อยกว่าค่าความดันในช่วงเพิ่มความดัน เพื่อเอาชนะแรงดึงดูดดังกล่าวเป็นสาเหตุให้เห็นไอโซเทิร์มการดูดซับในช่วงเพิ่มความดันและลดความดันไม่ซ้อนทับกัน ไอโซเทิร์มการดูดซับลักษณะนี้มักพบในตัวดูดซับที่มีช่วงรูพรุนขนาดกลาง และพื้นที่ของ Hysteresis Loop จะแปรผันตามสัดส่วนของปริมาตรรูพรุนขนาดกลางเมื่อเทียบกับปริมาตรรูพรุนทั้งหมดของตัวดูดซับ

5) แบบที่ 5 (Type V) ลักษณะของไอโซเทิร์มคล้ายกับแบบที่ 3 แต่จะมีจุดเปลี่ยนกราฟและ Hysteresis Loop เหมือนกับไอโซเทิร์มแบบที่ 4 ไอโซเทิร์มแบบที่ 5 นี้ เกิดกับระบบดูดซับที่แรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมีค่าน้อย

6) แบบที่ 6 (Type VI) เป็นไอโซเทิร์มแบบขั้นบันได (Stepped Isotherm) เกิดกับตัวดูดซับที่ไม่มีรูพรุนและมีลักษณะพื้นที่ผิวสม่ำเสมอ ทำให้เกิดการดูดซับเป็นช่วง ๆ ตามความดันที่เพิ่มขึ้น โดยลักษณะรูปร่างของขั้นบันไดจะขึ้นอยู่กับระบบและอุณหภูมิของระบบ



รูปที่ 2.7 รูปแบบไอโซเทิร์มการดูดซับของระบบดูดซับก๊าซ (Rouquerol et al., 1999)

2.4.3 สมการไอโซเทิร์มการดูดซับ (Adsorption isotherm equations)

สมการไอโซเทิร์มการดูดซับ คือ สมการที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับกับความเข้มข้นของสารที่สภาวะสมดุลที่อุณหภูมิใด ๆ สมการไอโซเทิร์มการดูดซับมีหลายแบบ เช่น สมการไอโซเทิร์มการดูดซับแบบแลงมัวร์ (Langmuir Isotherm) สมการไอโซเทิร์มการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich Isotherm) และสมการไอโซเทิร์มการดูดซับแบบ BET (Brunauer-Emmett-Teller) แต่สมการที่นิยมใช้โดยทั่วไป ได้แก่ สมการไอโซเทิร์มการดูดซับแบบแลงมัวร์ และสมการไอโซเทิร์มการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช

1) สมการไอโซเทิร์มการดูดซับแบบแลงมัวร์

เป็นสมการไอโซเทิร์มแบบง่ายที่สุดสำหรับการดูดซับชั้นเดียว ซึ่ง Irving Langmuir เป็นผู้เสนอ โดยมีสมมติฐานว่า บนตัวดูดซับนั้นตำแหน่งของการดูดซับและโมเลกุลที่ถูกดูดซับมีค่าแน่นอน โดยในแต่ละตำแหน่งของการดูดซับจะสามารถบรรจุโมเลกุลที่ถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น ซึ่งค่าความร้อนของการดูดซับในแต่ละตำแหน่งมีค่าเท่ากันและคงที่และไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับอยู่ใกล้กันความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับกับตัวความเข้มข้นของสารที่สภาวะสมดุลตามสมการไอโซเทิร์มการดูดซับแบบแลงมัวร์ แสดงดังสมการ (2.1)

$$\frac{q}{q_m} = \frac{bC_e}{1+bC_e} \quad (2.1)$$

- เมื่อ
- q คือ ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ (กรัมต่อกรัมตัวดูดซับ)
 - q_m คือ ปริมาณสูงสุดของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ (กรัมต่อกรัมตัวดูดซับ)
 - C_e คือ ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล (กรัมต่อมิลลิลิตร)
 - b คือ ค่าคงที่การดูดซับ (Adsorption binding constant)

q_m ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการดูดซับสารของตัวดูดซับ และค่าคงที่ b ในสมการ (2.1)

นั้นหาได้จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{1}{q}$ กับ $\frac{1}{C_e}$ สมการ (2.2)

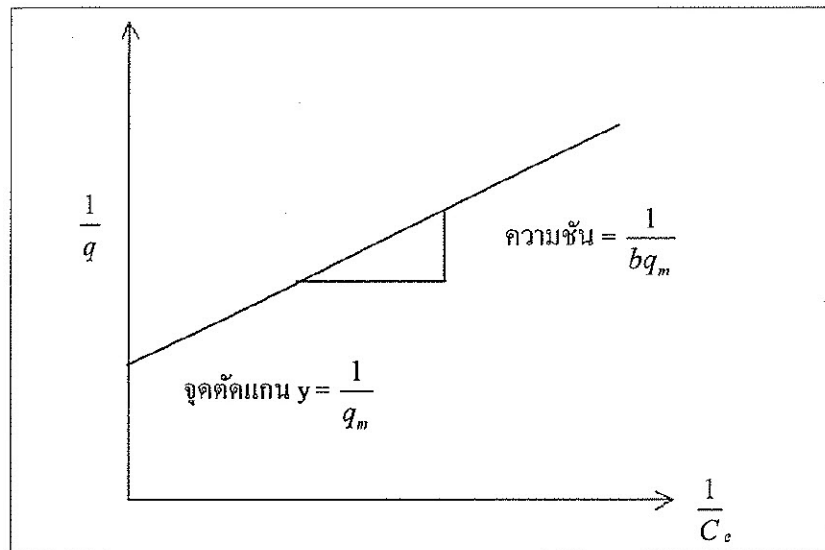
$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m C_e b} + \frac{1}{q_m} \quad (2.2)$$

ซึ่งจะได้กราฟเส้นตรงที่มีค่าความชันกับ $\frac{1}{bq_m}$ และจุดตัดแกน y ที่ $\frac{1}{q_m}$ ดังแสดงในรูปที่ 2.8

จากรูปที่ 2.8 สามารถคำนวณหาค่า q_m ได้จากจุดตัดแกน y และค่า b ได้จากค่าความชันของกราฟเส้นตรง ดังสมการ (2.3) และ (2.4)

$$q_m = 1/(\text{จุดตัดแกน } y) \quad (2.3)$$

$$b = 1/(q_m \times \text{ความชันของกราฟเส้นตรง}) \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.8 ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบแลงมัวร์ในรูปแบบของกราฟเส้นตรง

2) สมการไอโซเทิร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช

สมการไอโซเทิร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิชเป็นสมการที่พัฒนามาจากสมการไอโซเทิร์มการดูดซับแบบแลงมัวร์โดยสมมุติว่าเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น เนื่องจากโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันสูง สมการที่ได้จากการสังเกตและทดลองการดูดซับตามข้อสมมุตินี้แสดงได้ตามสมการ (2.5)

$$q = K_f C_e^{1/n} \quad (2.5)$$

- เมื่อ K_f คือ แฟกเตอร์ความจุฟรุนดลิช (Freundlich capacity factor)
- $\frac{1}{n}$ คือ พารามิเตอร์ความเข้มฟรุนดลิช (Freundlich intensity parameter)
- q คือ ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ (กรัมต่อกรัมตัวดูดซับ)
- C_e คือ ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในสภาวะสมดุล (กรัมต่อมิลลิลิตร)

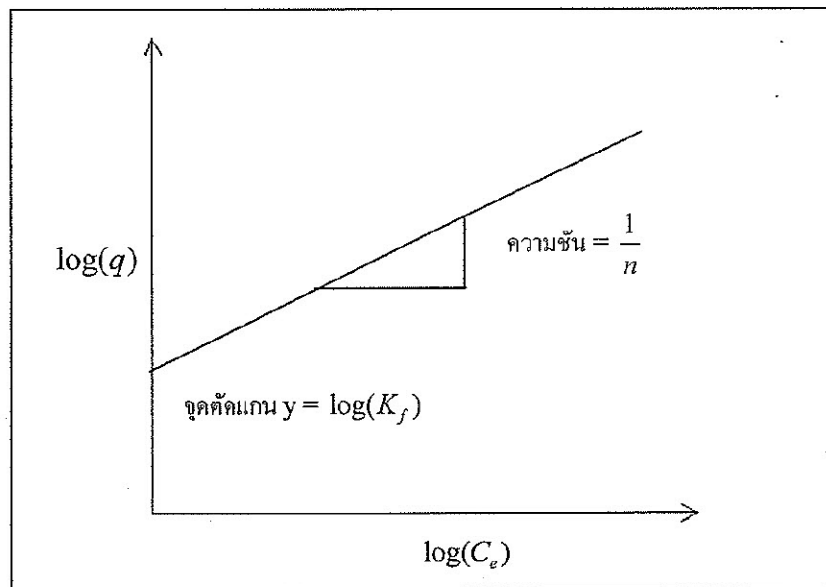
สามารถจัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\log(q) = \log(K_f) + \frac{1}{n} \log(C_e) \quad (2.6)$$

หาค่าคงที่ในสมการไอโซเทอรั่มการดูดซับแบบฟรุนดลิชได้โดยการสร้างกราฟของความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(q)$ กับ $\log(C_e)$ ในสมการ (2.6) ได้ตามรูปที่ 2.9 สามารถคำนวณหาค่า K_f ได้จากจุดตัดแกน y และค่า $\frac{1}{n}$ ได้จากความชันของกราฟเส้นตรง ดังสมการ (2.7) และ (2.8)

$$K_f = 10^{(\text{จุดตัดแกน } y)} \quad (2.7)$$

$$\frac{1}{n} = \text{ความชันของกราฟเส้นตรง} \quad (2.8)$$



รูปที่ 2.9 ไอโซเทอรั่มการดูดซับแบบฟรุนดลิชในรูปแบบของกราฟเส้นตรง

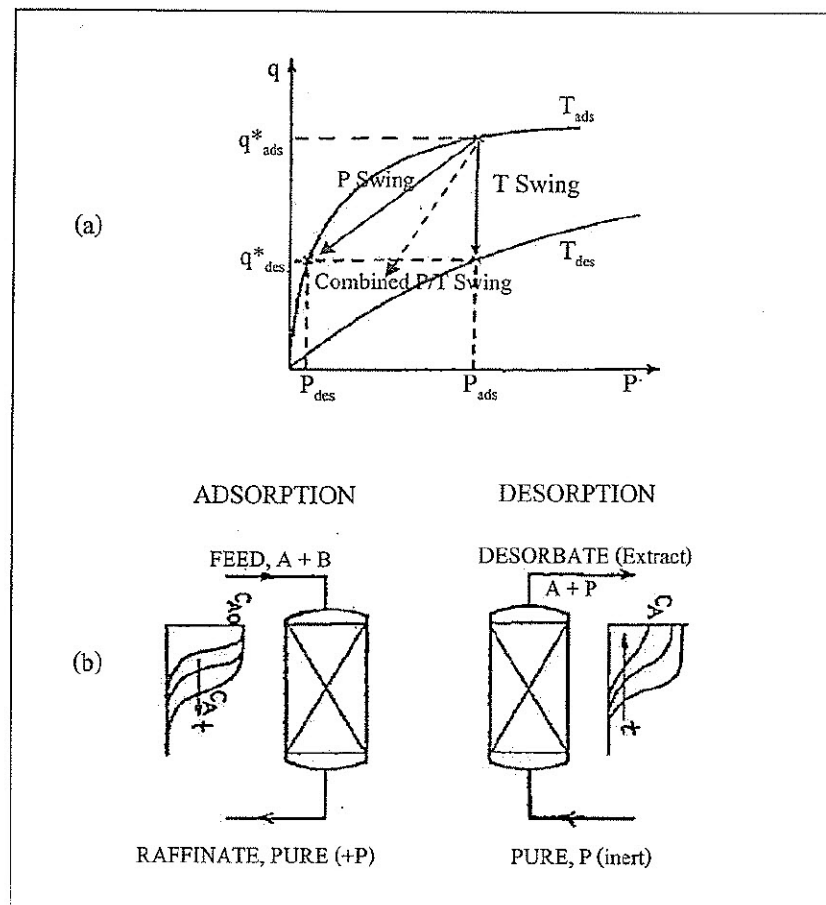
2.5 ระบบดูดซับแบบสลับความดัน (Pressure Swing Adsorption: PSA)

ระบบดูดซับแบบสลับความดันเป็นกระบวนการแยกสารที่มีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ที่ให้ความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์สูง หลักการทำงานของกระบวนการดูดซับนี้จะประกอบด้วยสองขั้นตอนหลัก คือ ขั้นตอนการดูดซับภายใต้สภาวะความดันสูงและขั้นตอนการคายซับหรือการคืนสภาพของตัวดูดซับ (Regeneration) ภายใต้สภาวะความดันต่ำโดยสารที่ถูกดูดซับจะคายซับออกจากตัวดูดซับโดยการลดความดัน โดยทั้งสองขั้นตอนนี้จะทำงานสลับกัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนการดูดซับจะมีความบริสุทธิ์สูง เรียกว่า ราฟฟินเนต (Raffinate) ส่วนสารที่คายออกมาจากตัวดูดซับเรียกว่า เอกซ์แทรค (Extract) ซึ่งตามปกติกระบวนการดูดซับแบบสลับความดันจะประกอบด้วยคอลัมน์ดูดซับอย่างน้อยสองคอลัมน์ (รูปที่ 2.10) ซึ่งควบคุมให้มีสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับและการคายซับ ระบบดูดซับแบบสลับความดันจะเหมาะกับการดูดซับในสถานะแก๊ส เนื่องจากความดันมีผลต่อสภาวะสมดุลในการดูดซับสารที่เป็นของเหลวน้อยมาก ตารางที่ 2.7 แสดงตัวอย่างการนำกระบวนการดูดซับแบบสลับความดันไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ สำหรับข้อได้เปรียบของการดูดซับด้วยระบบนี้ คือ ใช้กับสารป้อนที่มีความเข้มข้นของสารที่ต้องการดูดซับสูง

ตารางที่ 2.7 ตัวอย่างการใช้งานของระบบดูดซับแบบสลับความดันในอุตสาหกรรมต่าง ๆ

(Douglas et al., 1994)

การใช้งาน	ผลิตภัณฑ์	ตัวดูดซับ	ชนิดของการดูดซับ
การแยกไฮโดรเจนออกจากก๊าซเชื้อเพลิง	ไฮโดรเจนที่มีความบริสุทธิ์สูง	ถ่านกัมมันต์ หรือ ซีโอไลต์ (Zeolite)	กระบวนการดูดซับแบบหลายคอลัมน์
การอบแห้งแบบไม่ใช้ความร้อน (Heatless drier)	อากาศแห้งสำหรับอุปกรณ์ควบคุม	Activated Al_2O_3	ระบบดูดซับแบบสเกลาร์สตรอมแบบสองคอลัมน์หรือระบบดูดซับแบบสลับสุญญากาศ
การแยกอากาศ	ออกซิเจน (O_2) และ อาร์กอน (Ar)	ซีโอไลต์ 5 เอ	ระบบดูดซับแบบสเกลาร์สตรอมแบบสองคอลัมน์
การแยกอากาศ	ไนโตรเจน (N_2) และ อาร์กอน (Ar)	คาร์บอนโมโนคลูไธฟ (CMS)	ระบบดูดซับแบบสองคอลัมน์
การแยกอากาศ	ไนโตรเจน และ ออกซิเจน	ซีโอไลต์ 5 เอ หรือ แคลเซียมเอ็กซ์ (CaX)	ระบบดูดซับแบบสลับสุญญากาศ
ไอโซซีฟ	ไฮโดรคาร์บอนแบบเส้นหรือกิ่ง	ซีโอไลต์ 5 เอ	ระบบดูดซับแบบสลับสุญญากาศ
การแยกก๊าซเชื้อเพลิง	คาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทน	คาร์บอนโมโนคลูไธฟ (CMS)	ระบบดูดซับแบบสลับสุญญากาศ



2.10 หลักการทำงานเบื้องต้นของระบบดูดซับแบบสลับความดัน (a) การเปลี่ยนแปลงความสามารถในการดูดซับที่ความดันต่าง ๆ (b) ลักษณะการกระจายความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับภายในคอลัมน์ (Douglas et al., 1994)

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ข
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ณ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฑ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 แป้ง.....	5
2.1.1 อะไมโลส.....	5
2.1.2 อะไมโลเพคติน.....	5
2.2 มันสำปะหลัง.....	8
2.3 เอทานอล.....	14
2.3.1 การใช้ประโยชน์จากเอทานอลในกลุ่มเชื้อเพลิง.....	14
2.3.2 กระบวนการผลิตเอทานอลบริสุทธิ์.....	14
2.4 การดูดซับ.....	17
2.4.1 ลักษณะกลไกการดูดซับ.....	17
2.4.2 ไอโซเทิร์มการดูดซับ.....	18

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.3	สมการไอโซเทิร์มการดูดซับ.....	20
2.5	ระบบดูดซับแบบสลับความดัน.....	24
2.5.1	ลักษณะทั่วไปของระบบดูดซับแบบสลับความดัน.....	26
2.5.2	หลักการดำเนินงานพื้นฐานของระบบดูดซับแบบสลับความดัน.....	28
2.5.3	วัฏจักรสการ์สตรอม.....	28
2.6	การศึกษาวิจัยสำคัญของตัวแปรด้วยการออกแบบการทดลอง เชิงแฟกทอเรียล.....	31
2.6.1	แบบจำลองทางสถิติแสดงการออกแบบการทดลอง เชิงแฟกทอเรียล.....	32
2.6.2	สมมติฐานทางสถิติ.....	33
2.6.3	การคำนวณค่าทางสถิติ.....	33
3	วิธีดำเนินงานวิจัย.....	36
3.1	รูปแบบการวิจัยและสถานที่ทำวิจัย.....	36
3.2	ประชากรศึกษาและขนาดตัวอย่าง.....	36
3.3	ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง.....	36
3.3.1	ตัวแปรสำหรับระบบดูดซับแบบเบดนิ่ง.....	36
3.3.2	ตัวแปรสำหรับระบบดูดซับแบบสลับความดัน.....	37
3.4	เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	37
3.4.1	เครื่องมือสำหรับระบบดูดซับแบบเบดนิ่ง.....	37
3.4.2	เครื่องมือสำหรับระบบดูดซับแบบสลับความดัน.....	38
3.4.3	วัสดุและสารเคมี.....	38
3.5	วิธีการทดลอง.....	41
3.5.1	การเตรียมตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง.....	41
3.5.2	การศึกษาความสามารถในการแยกน้ำออกจากไอผสมเอทานอล สำหรับระบบดูดซับแบบเบดนิ่ง.....	42
3.5.3	การทดสอบการนำกลับมาใช้ใหม่ของตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง.....	43

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5.4 การศึกษาการคายซับของตัวดูดซับจากมันสำปะหลังด้วยสูญญากาศ.....	43
3.5.5 การศึกษาการแยกน้ำออกจากไอผสมเอทานอลของ ระบบดูดซับแบบสลับความดันโดยใช้ซีโอไลต์ 3 เอ.....	43
3.5.6 การศึกษานัยสำคัญของตัวแปรด้วยการออกแบบการทดลอง เชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 ³	44
3.5.7 การศึกษาการแยกน้ำออกจากไอผสมเอทานอลของ ระบบดูดซับแบบสลับความดันโดยใช้ตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง.....	45
4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	46
4.1 ความเป็นไปได้ในการดูดซับน้ำของตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง.....	46
4.2 การดูดซับน้ำของตัวดูดซับจากมันสำปะหลังในระบบดูดซับแบบเบดนิ่ง.....	47
4.2.1 ผลของความเข้มข้นของสารป้อนต่อประสิทธิภาพการดูดซับน้ำ.....	47
4.2.2 ผลของปริมาณตัวดูดซับต่อประสิทธิภาพการดูดซับน้ำใน ระบบดูดซับแบบเบดนิ่ง.....	50
4.3 ไอโซเทิร์มที่สถานะสมดุลของตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง.....	52
4.4 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการนำกลับมาใช้ใหม่ของ ตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง.....	54
4.5 ผลการคายซับของตัวดูดซับจากมันสำปะหลังด้วยระบบสูญญากาศ.....	55
4.6 ความสามารถในการแยกน้ำจากไอผสมเอทานอลของระบบดูดซับ แบบสลับความดันโดยใช้ซีโอไลต์ 3 เอ.....	56
4.6.1 ผลของระยะเวลาของวัฏจักรการดูดซับต่อความสามารถ ในการแยกน้ำออกจากไอผสมเอทานอลด้วยซีโอไลต์ 3 เอ.....	56
4.6.2 ผลของอุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับต่อความสามารถในการแยกน้ำ ออกจากไอผสมเอทานอลด้วยซีโอไลต์ 3 เอ.....	57
4.6.3 ผลของความดันของคอลัมน์ดูดซับต่อความสามารถในการแยกน้ำ ออกจากไอผสมเอทานอลด้วยซีโอไลต์ 3 เอ.....	59

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.7 ความสามารถในการแยกน้ำจากไอผสมเอทานอลของระบบดูดซับ	
แบบสลับความดันที่ใช้ตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง.....	61
4.7.1 ผลของความดันของคอลัมน์ดูดซับต่อความสามารถใน	
การแยกน้ำออกจากไอผสมเอทานอลด้วยตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง.....	62
4.7.2 ผลของอุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับต่อความสามารถใน	
การแยกน้ำออกจากไอผสมเอทานอลด้วยตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง.....	67
4.7.3 ผลของอัตราการไหลของสารป้อนต่อความสามารถใน	
การแยกน้ำออกจากไอผสมเอทานอลด้วยตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง.....	70
4.7.4 ผลของระยะเวลาของครั้งวัฏจักรการดูดซับต่อความสามารถใน	
การแยกน้ำออกจากไอผสมเอทานอลด้วยตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง.....	73
4.8 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรจากการออกแบบการทดลอง	
เชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3	75
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	77
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	77
5.1.1 ความสามารถในการดูดซับน้ำของตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง	
และอิทธิพลของปัจจัยในระบบการดูดซับแบบบดนี้.....	77
5.1.2 สมการไอโซเทิร์มที่สภาวะสมดุลของตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง.....	77
5.1.3 ผลของตัวแปรต่อความสามารถในการแยกน้ำออกจาก	
ไอผสมเอทานอลโดยใช้ตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง	
ของระบบดูดซับแบบสลับความดัน.....	78
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	79
บรรณานุกรม.....	80
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	84
ภาคผนวก ข. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	90

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน.....	6
2.2 องค์ประกอบทางเคมีของมันสำปะหลังแห้ง (มูลนิธิสถาบันพัฒนามันสำปะหลังแห่งประเทศไทย).....	9
2.3 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง (Kiatponglaarp, 2007).....	9
2.4 องค์ประกอบทางเคมีของกากมันสำปะหลัง สุณีย์ โชติณีนาท), 2539).....	10
2.5 องค์ประกอบทางเคมีของข้าวโพด (Anderson et al., 1996).....	10
2.6 ความแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี.....	18
2.7 ตัวอย่างการใช้งานของระบบดูดซับแบบสลับความดันในอุตสาหกรรมต่าง ๆ (Douglas et al., 1994).....	24
2.8 สมการการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3	32
2.9 วิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3	35
3.1 สมการการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3	44
3.2 อัตราการไหลของสารป้อนเทียบกับร้อยละการเปิดวาล์วหม้อต้มระเหย.....	45
4.1 ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับเมื่อใช้ตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง 10 กรัม ในระบบดูดซับแบบเบดนิ่งที่ความเข้มข้นของเอทานอลในสารป้อนต่างๆ.....	49
4.2 ปริมาณของตัวดูดซับและระยะเวลาเบรคทูลในระบบดูดซับแบบเบดนิ่งที่ใช้ นสารป้อนร้อยละความเข้มข้นของเอทานอล 90 โดยน้ำหนัก.....	51
4.3 ค่าคงที่และความสามารถในการดูดซับน้ำของตัวดูดซับจากมันสำปะหลังจาก สมการไอโซเทิร์มของแลงมัวร์และฟรุนดลิช.....	52
4.4 อัตราการผลิตเอทานอลที่มีความเข้มข้นสูงกว่าร้อยละ 99.5 โดยน้ำหนัก ของระบบดูดซับแบบสลับความดันโดยใช้ซีโอไลต์ 3 เอ ที่อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับต่าง ๆ.....	58

2.5.1 ลักษณะทั่วไปของระบบดูดซับแบบสลับความดัน

1) ความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์

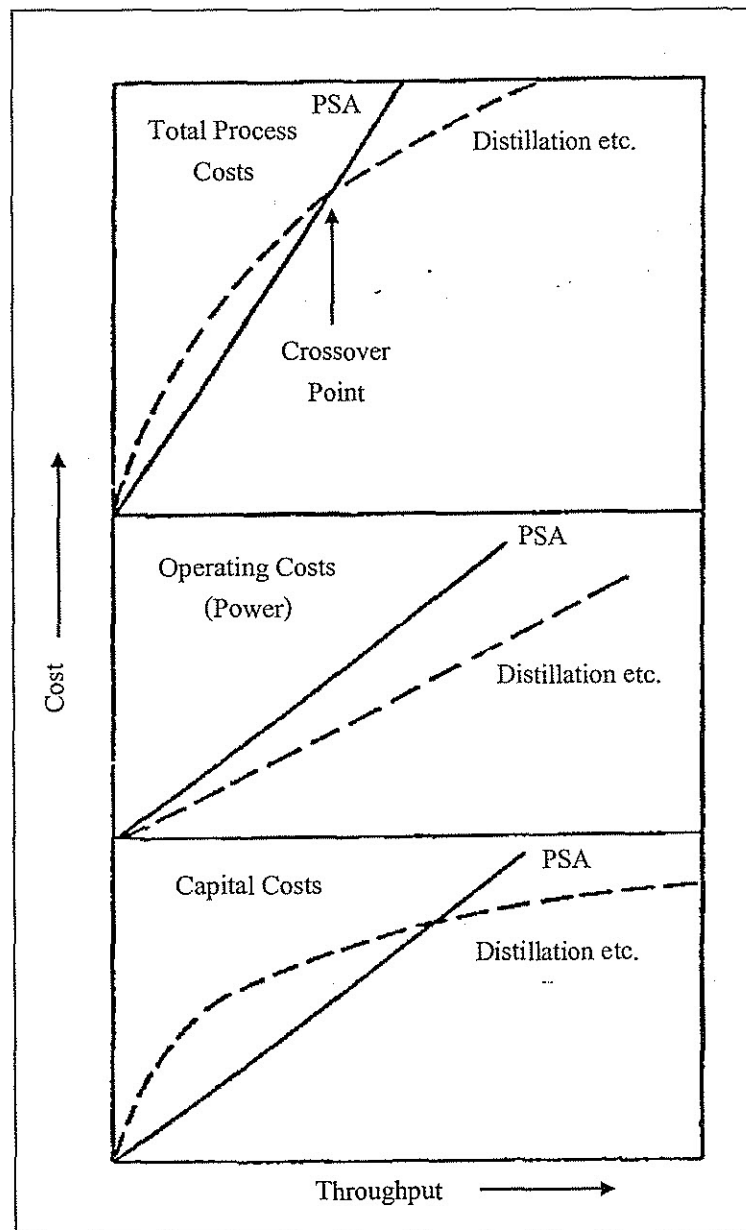
ผลิตภัณฑ์ในราฟฟิเนตได้จากการดูดซับจะมีความบริสุทธิ์สูง แต่จะไม่สามารถทำให้ผลิตภัณฑ์เอ็กซ์แทรกจากการคายซับให้มีความบริสุทธิ์สูงได้ ต้องมีการปรับปรุงวิธีการซึ่งส่งผลให้กระบวนการมีความซับซ้อนมากขึ้น ทำให้วิธีการดูดซับเหมาะสำหรับการผลิตราฟฟิเนตมากกว่า

2) ผลได้ (Yield)

การดูดซับแบบสลับความดันโดยทั่วไปจะให้ผลได้มีค่าต่ำกว่าการแยกสารแบบอื่น เช่น การกลั่น การดูดซึมหรือการสกัด จะเพิ่มผลได้โดยเพิ่มคอลัมน์ดูดซับเข้าไปในวัฏจักรดำเนินการ และเพิ่มปริมาณของวัสดุดูดซับ แต่ทั้งสองอย่างนี้จะทำให้ค่าติดตั้งเพิ่มขึ้น ดังนั้นระบบดูดซับแบบสลับความดันจึงเหมาะสำหรับกระบวนการที่สารป้อนมีราคาถูก

3) ต้นทุนการติดตั้งและต้นทุนการดำเนินงาน

ส่วนใหญ่แล้วต้นทุนการติดตั้งและต้นทุนการดำเนินงานแปรผันตรงกับกำลังการผลิตของกระบวนการ (รูปที่ 2.11) เมื่อพิจารณาต้นทุนการดำเนินงานของระบบดูดซับแบบสลับความดันจะพบว่ามีราคาสูงกว่าการกลั่น เนื่องจากการดูดซับแบบสลับความดันนี้ใช้พลังงานกลซึ่งมีราคาสูงกว่าพลังงานความร้อน และเมื่อพิจารณาในส่วนของต้นทุนการติดตั้งการกลั่นจะมีราคาสูงกว่าระบบดูดซับแบบสลับความดันในช่วงกำลังการผลิตต่ำ และเริ่มคงที่เมื่อกำลังการผลิตเพิ่มขึ้น ดังนั้น เมื่อพิจารณาในเชิงเศรษฐศาสตร์ระบบดูดซับแบบสลับความดันเหมาะสำหรับกระบวนการที่มีกำลังการผลิตไม่สูงมากนัก



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนการติดตั้งและกำลังการผลิตของระบบดูดซับแบบ
สลับความดันและการกลั่น (Douglas et al., 1994)

2.5.2 หลักการทำงานพื้นฐานของระบบดูดซับแบบสลับความดัน

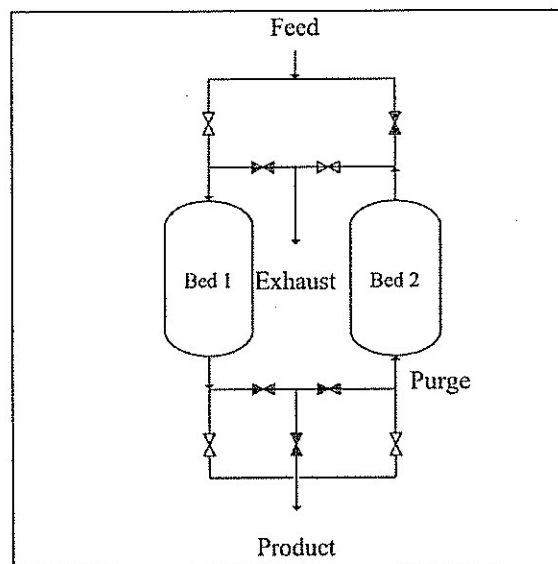
ขั้นตอนการทำงานของระบบดูดซับแบบสลับความดันเป็นดังนี้

- 1) การเพิ่มความดันด้วยสารป้อน (Feed pressurization) คือการเพิ่มความดันในคอลัมน์ดูดซับด้วยไอของสารป้อนหรือผลิตภัณฑ์ร่าฟิเนตเพื่อปรับสภาวะของระบบ
- 2) การดูดซับที่ความดันสูง (High pressure adsorption) เป็นขั้นตอนที่ความดันในคอลัมน์ดูดซับมีค่าสูงและตัวดูดซับสามารถดูดซับสารได้มากที่สุด
- 3) การลดความดันเป่าไล่ (Low pressure purge) คือ การไล่สารออกจากคอลัมน์โดยเป่าแบบไหลทิศทางเดียวหรือสวนทางกับสารป้อน
- 4) การคายซับที่ความดันต่ำกว่าความดันดำเนินการ ซึ่งสามารถทำได้โดยการลดความดันให้เป็นสูญญากาศ
- 5) การปรับความดันโดยการปล่อยความดันจากคอลัมน์ที่มีความดันสูงไปยังคอลัมน์ที่มีความดันต่ำกว่า
- 6) การเพิ่มความดันด้วยก๊าซผลิตภัณฑ์เพื่อปรับสภาวะความดันของระบบ

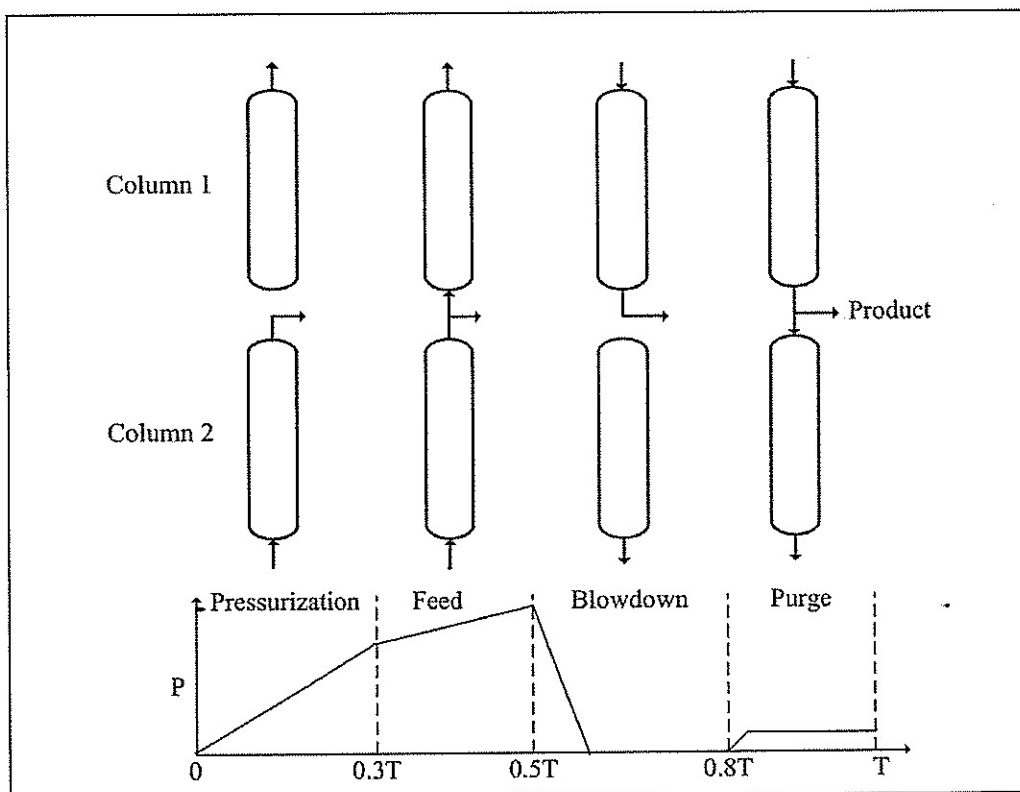
2.5.3 วัฏจักรสการ์สตรอม (Skarstrom Cycle)

วัฏจักรสการ์สตรอม เป็นหลักการเบื้องต้นสำหรับกระบวนการดูดซับแบบสลับความดันชนิด 2 คอลัมน์ (รูปที่ 2.12) มีการทำงาน 4 ขั้นตอน คือ การเพิ่มความดันการ (Pressurization) การป้อนสาร (Feed) การเป่าสวนทาง (Blowdown) และการเป่าไล่ (Purge) แสดงดังรูปที่ 2.13 ในขั้นตอนการเพิ่มความดัน คอลัมน์ 2 จะถูกเพิ่มความดันด้วยสารป้อนไปที่ความดันดูดซับ ในขณะที่คอลัมน์ 1 จะปล่อยทิ้งในทิศทางสวนทางกับการป้อนสารเพื่อลดความดัน ในขั้นตอนการป้อนสารใช้สารป้อนที่มีความดันสูงให้ไหลผ่านคอลัมน์ 2 โดยสารที่ถูกดูดซับจะอยู่ในคอลัมน์ ส่วนผลิตภัณฑ์จะออกที่ปลายคอลัมน์ และผลิตภัณฑ์บางส่วนจะใช้เป็นตัวเป่าไล่ในคอลัมน์ 1 โดยมีทิศสวนทางกับการป้อนสาร และในขั้นตอนการเป่าสวนทางและการเป่าไล่มีลักษณะการทำงานเช่นเดียวกับการเพิ่มความดันและการป้อนสารเพียงแต่สลับคอลัมน์กัน

วัฏจักรสการ์สตรอมเดิมใช้ในกระบวนการทำอากาศแห้งโดยใช้ซิลิกาเจล ซึ่งสามารถแยกน้ำจาก 3800 ppm ให้เหลือเพียง 1 ppm และมีสัดส่วนผู้คืนร้อยละ 73 วัฏจักรสการ์สตรอมมักใช้ในการแยกสารที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำและมีค่าการเลือก (Selectivity) ของตัวดูดซับสูง



รูปที่ 2.12 วัฏจักรของระบบดูดซับแบบสลับความดัน (Seader, 2006)



รูปที่ 2.13 วัฏจักรสการ์สตรอม Skarstrom Cycle (Seader, 2006)

Cruz et al. (2003) ศึกษาแบบจำลองกระบวนการดูดซับแบบสลับความดันด้วยวัฏจักรสการ์สตรอม สำหรับการผลิตออกซิเจนบริสุทธิ์จากอากาศ เพื่อหาความเสถียรของระบบและสภาวะที่เหมาะสม โดยใช้แบบจำลองในรูปเทอมไร้หน่วยและแก้สมการด้วยวิธี Adaptive Multiresolution Approach ผลการศึกษาพบว่าในกรณีที่สมการไอโซเทอร์มการดูดซับเป็นแบบแลงเมียร์ เมื่อเพิ่มกระแสเป่าไล่ จะทำให้ความบริสุทธิ์ของออกซิเจนเพิ่มขึ้นแต่สัดส่วนก๊าซไนโตรเจนจะลดลง และเมื่อเพิ่มความดันดูดซับจะทำให้ผลิตภัณฑ์ออกซิเจนที่ได้มีความบริสุทธิ์สูงขึ้น ขณะที่สัดส่วนก๊าซไนโตรเจนมีค่าเท่าเดิม แต่ค่าการเลือกของตัวดูดซับมีค่าลดลง

Guan and Hu (2003) ศึกษาแบบจำลองและวิเคราะห์ผลการแยกน้ำออกจากเอทานอลด้วยการดูดซับแบบสลับความดันแบบคอลัมน์เดียวโดยใช้ซีโอไลต์ 3 เอ คอลัมน์ดูดซับมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร สูง 1.21 เมตร ใช้สารป้อนที่มีความเข้มข้นของเอทานอลร้อยละ 93.54 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ 120-150 องศาเซลเซียส และความดันของคอลัมน์ดูดซับ 2-5 บาร์ ผลการศึกษา พบว่าการเพิ่มความดันอาจทำให้สัดส่วนก๊าซไนโตรเจนและความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มอุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับในช่วงอุณหภูมิที่ทำการศึกษา มีผลต่ออัตราการแยกกลับและความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์น้อยมาก

Pruksathorn and Vittidsant (2009) ศึกษาการผลิตเอทานอลบริสุทธิ์จากสารละลายเอทานอลที่มีความเข้มข้นใกล้เคียงกับจุดอะซีโอโทรป สำหรับระบบการดูดซับแบบสลับความดันแบบ 2 คอลัมน์ที่ใช้ตัวดูดซับเป็นซีโอไลต์ 3 เอ บรรจุคอลัมน์ละ 15 กิโลกรัม ทำการทดลองที่อัตราการไหลของสารป้อน 50-100 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ 120 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของเอทานอลเริ่มต้นร้อยละ 92 และ 95 โดยปริมาตร ความดันของคอลัมน์ดูดซับ 2-2.4 บาร์ และเวลาของวัฏจักร 10 และ 15 นาที วิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีทางสถิติ ANOVA ได้สมการแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ต่อสัดส่วนก๊าซไนโตรเจน (ร้อยละ) และความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์ (ร้อยละโดยปริมาตร) ตามลำดับดังนี้

$$\text{สัดส่วนก๊าซไนโตรเจน (Recovery)} = 226.46 + 0.23(\text{FR}) - 1.89(\text{FC}) + 0.74(\text{CT}) \quad (2.9)$$

$$\text{ความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์} = 101.38 - 0.019(\text{FC}) \quad (2.10)$$

- เมื่อ FR คือ อัตราการไหลของสารป้อน (มิลลิลิตรต่อนาที)
 FC คือ ความเข้มข้นของสารป้อน (ร้อยละโดยปริมาตร)
 CT คือ เวลาในการดำเนินวัฏจักร (นาที)

สมการ (2.9) และ (2.10) แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของสารป้อนและเวลาของวัฏจักรจะทำให้สัดส่วนก๊าซมีค่าสูงขึ้น แต่ตัวแปรทั้งสองไม่มีนัยสำคัญต่อความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์เอทานอลที่ได้จากกระบวนการ และที่ความดันของคอลัมน์ดูดซับ 2.4 บาร์ อัตราการไหลของสารป้อน 100 มิลลิลิตร ต่อนาที ความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลเริ่มต้นร้อยละ 92 โดยปริมาตร เวลาของวัฏจักร 15 นาที และอุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ 120 องศาเซลเซียส จะได้ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์เอทานอลสูงสุด ร้อยละ 99.66 โดยปริมาตร

2.6 การศึกษานัยสำคัญของตัวแปรด้วยการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial experimental designs)

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล (Factorial design) เป็นวิธีการออกแบบการทดลองที่มีประสิทธิภาพโดยเฉพาะในการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล คือการออกแบบการทดลองที่พิจารณาถึงอิทธิพลที่เกิดจากผลร่วมของระดับ (Level) ของตัวแปรหรือปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น ตัวอย่างเช่น เมื่อทำการศึกษาอิทธิพลของปัจจัย 3 ปัจจัย คือ A B และ C โดยปัจจัย A มี a ระดับ ปัจจัย B มี b ระดับ และปัจจัย C มี c ระดับ จำนวนการทดลองที่ต้องทำทั้งหมดจะเป็น $a \times b \times c$ การทดลอง เมื่อจัดปัจจัยที่มีผลต่อการทดลองทั้งหมดตามวิธีนี้จะทำให้เกิดการไขว้ของปัจจัย (Cross) ซึ่งผลการทดลองที่ได้จึงแสดงทั้งอิทธิพลของปัจจัยที่ทำการศึกษาและผลร่วมของปัจจัยเหล่านั้น

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลที่มีความสำคัญอีกแบบคือ กรณีที่มีปัจจัย k ปัจจัย แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ข้อมูลของระดับเหล่านั้นอาจเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน หรือเวลา เป็นต้น หรืออาจเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพก็ได้ เช่น เครื่องจักร หรือ คนงาน ซึ่งในระดับ 2 ระดับดังกล่าวจะแทนด้วย บวก (+) และ ลบ (-) สามารถหาจำนวนข้อมูลการทดลองทั้งหมด 2^k ข้อมูล สมมติว่ามีปัจจัยทั้งหมด 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ การทดลองนี้จะต้องมีจำนวนของการทดลองเท่ากับ $2^3 = 8$ การทดลอง (ตารางที่ 2.8)

ตารางที่ 2.8 สภาวะการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3

การทดลอง	A	B	C
1	-	-	+
2	-	-	+
3	-	+	-
4	-	+	-
5	+	-	+
6	+	-	+
7	+	+	-
8	+	+	-

2.6.1 แบบจำลองทางสถิติแสดงการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล

แบบจำลองทางสถิติสำหรับการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 3 ปัจจัย เขียนเป็นสัญลักษณ์ได้ดังนี้

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl} \quad (2.11)$$

เมื่อ	i	คือ $1, 2, \dots, a$; $j = 1, 2, \dots, b$; $k = 1, 2, \dots, c$; $l = 1, 2, \dots, n$
	y_{ijk}	คือ ค่าที่สังเกตได้
	μ	คือ ค่าเฉลี่ยทั้งหมด
	α_i	คือ อิทธิพลของปัจจัย A
	β_j	คือ อิทธิพลของปัจจัย B
	γ_k	คือ อิทธิพลของปัจจัย C
	$(\alpha\beta)_{ij}$	คือ ผลรวมของปัจจัย A และปัจจัย B
	$(\alpha\gamma)_{ik}$	คือ ผลรวมของปัจจัย A และปัจจัย C
	$(\beta\gamma)_{jk}$	คือ ผลรวมของปัจจัย B และปัจจัย C
	$(\alpha\beta\gamma)_{ijk}$	คือ ผลรวมของปัจจัย A ปัจจัย B และปัจจัย C
	ε_{ijkl}	คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของการทดลอง

2.6.2 สมมติฐานทางสถิติ

สมมติฐานทางสถิติที่ต้องการทดสอบ คือ

1) การทดสอบอิทธิพลของปัจจัยหลัก

$$H_0: \alpha_i = 0 \quad \text{และ} \quad H_1: \alpha_i \neq 0 \quad \text{อย่างน้อย 1 ค่า}$$

$$H_0: \beta_j = 0 \quad \text{และ} \quad H_1: \beta_j \neq 0 \quad \text{อย่างน้อย 1 ค่า}$$

$$H_0: \gamma_k = 0 \quad \text{และ} \quad H_1: \gamma_k \neq 0 \quad \text{อย่างน้อย 1 ค่า}$$

2) การทดสอบผลรวมของปัจจัยหลัก

$$H_0: (\alpha\beta)_{ij} = 0 \quad \text{และ} \quad H_1: (\alpha\beta)_{ij} \neq 0 \quad \text{อย่างน้อย 1 ค่า}$$

$$H_0: (\alpha\gamma)_{ik} = 0 \quad \text{และ} \quad H_1: (\alpha\gamma)_{ik} \neq 0 \quad \text{อย่างน้อย 1 ค่า}$$

$$H_0: (\beta\gamma)_{jk} = 0 \quad \text{และ} \quad H_1: (\beta\gamma)_{jk} \neq 0 \quad \text{อย่างน้อย 1 ค่า}$$

$$H_0: (\alpha\beta\gamma)_{ijk} = 0 \quad \text{และ} \quad H_1: (\alpha\beta\gamma)_{ijk} \neq 0 \quad \text{อย่างน้อย 1 ค่า}$$

2.6.3 การคำนวณค่าทางสถิติ

การประมาณค่าผลของปัจจัยด้วยการคำนวณค่าของผลรวมของกำลังสอง (SS) ได้โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$SS_{Tr} = SS_A + SS_B + SS_C + SS_{AB} + SS_{AC} + SS_{BC} + SS_{ABC} \quad (2.12)$$

โดยที่

$$SS_T = \sum_i^a \sum_j^b \sum_k^c \sum_l^n y_{ijkl}^2 - CT \quad (2.13)$$

$$SS_A = \frac{1}{bcn} \sum_i^a y_i^2 - CT \quad (2.14)$$

$$SS_B = \frac{1}{acn} \sum_j^b y_j^2 - CT \quad (2.15)$$

$$SS_C = \frac{1}{abn} \sum_k^c y_k^2 - CT \quad (2.16)$$

$$SS_{AB} = \frac{1}{cn} \sum_i^a \sum_j^b y_{ij}^2 - CT - SS_A - SS_B \quad (2.17)$$

$$SS_{AC} = \frac{1}{bn} \sum_i^a \sum_k^c y_{ik}^2 - CT - SS_A - SS_C \quad (2.18)$$

$$SS_{BC} = \frac{1}{an} \sum_j^b \sum_k^c y_{jk}^2 - CT - SS_B - SS_C \quad (2.19)$$

$$SS_{ABC} = \frac{1}{n} \sum_i^a \sum_j^b \sum_k^c y_{ijk}^2 - CT - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} \quad (2.20)$$

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC} - SS_{ABC} \quad (2.21)$$

$$CT = \frac{\sum y_{ijk}}{abcn} \quad (2.22)$$

ค่าต่าง ๆ สรุปในตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 วิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 3 ปัจจัย

Source of Variation	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean Square	F_c
ทรีทเมนต์	SS_{Tr}	$abc - 1$		
A	SS_A	$a - 1$	MS_A	MS_A/MS_E
B	SS_B	$b - 1$	MS_B	MS_B/MS_E
C	SS_C	$c - 1$	MS_C	MS_C/MS_E
AB	SS_{AB}	$(a - 1)(b - 1)$	MS_{AB}	MS_{AB}/MS_E
AC	SS_{AC}	$(a - 1)(c - 1)$	MS_{AC}	MS_{AC}/MS_E
BC	SS_{BC}	$(b - 1)(c - 1)$	MS_{BC}	MS_{BC}/MS_E
ABC	SS_{ABC}	$(a - 1)(b - 1)(c - 1)$	MS_{ABC}	MS_{ABC}/MS_E
Error	SS_E	$abc(n - 1)$	MS_E	
Total	SS_T	$abcn - 1$		

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลมีประโยชน์หลายประการและเป็นการออกแบบที่มีประสิทธิภาพมากกว่าการทดลองแบบทีละปัจจัย และเป็นสิ่งที่จำเป็นเมื่อผลรวมของปัจจัยเกิดขึ้น ทำให้สามารถหลีกเลี่ยงข้อสรุปที่ผิดพลาดได้ นอกจากนั้นการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลยังสามารถประมาณผลของปัจจัยหลักที่ระดับต่าง ๆ ของปัจจัยอื่นได้ และสามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลตลอดเงื่อนไขของการทดลอง

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 รูปแบบการวิจัยและสถานที่ทำการวิจัย

การวิจัยนี้ศึกษาความสามารถในการดูดซับน้ำของตัวดูดซับที่เตรียมขึ้นจากแป้งและกากมันสำปะหลัง และศึกษาระบบดูดซับด้วยวิธีสลับความดันซึ่งใช้ตัวดูดซับดังกล่าวสำหรับแยกน้ำออกจากไอผสมเอทานอล รูปแบบของการวิจัยเป็นเชิงทดลอง (Experimental research) ที่มุ่งศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อความสามารถในการแยกน้ำออกจากไอผสมเอทานอลของตัวดูดซับ รวมถึงการทดสอบและปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องต้นแบบ เพื่อเป็นแนวทางในการขยายขนาดของกระบวนการสำหรับการใช้งานจริงต่อไป สถานที่ทำการทดลองและเก็บข้อมูลในการวิจัยคือห้องปฏิบัติการวิศวกรรมเคมี อาคารศูนย์เครื่องมือ 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา

3.2 ประชากรศึกษาและขนาดตัวอย่าง

การวิจัยนี้ใช้ตัวดูดซับที่เตรียมขึ้นจากการทำเจลาติไนซ์ (Gelatinization) ของผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลัง กากมันสำปะหลัง และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) ก่อนนำของผสมที่ได้ไปอบแห้ง และนำมาบดร่อนแยกขนาดด้วยตะแกรงมาตรฐาน (Standard mesh) ขนาด 30 และ 40 เพื่อให้ได้ตัวดูดซับที่มีขนาดของอนุภาคอยู่ระหว่าง 0.425-0.600 มิลลิเมตร โดยทำการทดลองในคอลัมน์ดูดซับแบบเบดนิ่ง และในเครื่องต้นแบบของการดูดซับด้วยวิธีสลับความดันที่จัดสร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ โดยเปรียบเทียบความสามารถของตัวดูดซับจากมันสำปะหลังกับซีโอไลต์ 3 เอ เมื่อใช้สารละลายเอทานอลที่เตรียมขึ้นจากเอทานอลเกรดความเข้มข้นร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก เป็นสารป้อน

3.3 ตัวแปรในการทดลอง

3.3.1 ตัวแปรสำหรับระบบดูดซับแบบเบดนิ่ง

1) ตัวแปรอิสระ

- ความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลเริ่มต้น
- ปริมาณของตัวดูดซับจากมันสำปะหลังที่บรรจุในคอลัมน์ดูดซับ

2) ตัวแปรควบคุม

- แหล่งที่มาของกากมันสำปะหลังและแป้งมันสำปะหลัง
- วิธีการเตรียมตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง

3) ตัวแปรตาม

- ความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลหลังผ่านกระบวนการดูดซับ

3.3.2 ตัวแปรสำหรับระบบดูดซับแบบสลับความดัน

1) ตัวแปรอิสระ

- เวลาของครึ่งวัฏจักร (Half cycle time)
- อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ
- ความดันของคอลัมน์ดูดซับ
- อัตราการไหลของไอสารป้อน

2) ตัวแปรควบคุม

- แหล่งที่มาของกากมันสำปะหลังและแป้งมันสำปะหลัง
- วิธีการเตรียมตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง

3) ตัวแปรตาม

- ความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลหลังผ่านกระบวนการดูดซับ

3.4 เครื่องมือและสารเคมีในการทดลอง

3.4.1 เครื่องมือสำหรับระบบดูดซับแบบเบคกิง

1) ชุดทดลองประกอบด้วยคอลัมน์ดูดซับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.54 เซนติเมตร ความสูง 18 เซนติเมตร เตาไฟฟ้าสำหรับให้ความร้อน หม้อต้มระเหย แหล่งจ่ายน้ำร้อน และชุดอุปกรณ์ควบแน่น การประกอบชุดการทดลองเป็นดังแสดงในรูปที่ 3.1

2) เครื่องชั่งไฟฟ้าความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง (AC211S Sartorius)

3) หลอดเก็บสารละลายตัวอย่าง

4) เครื่องวัดครรชนีการหักเหแสง (ATAGO 2T)

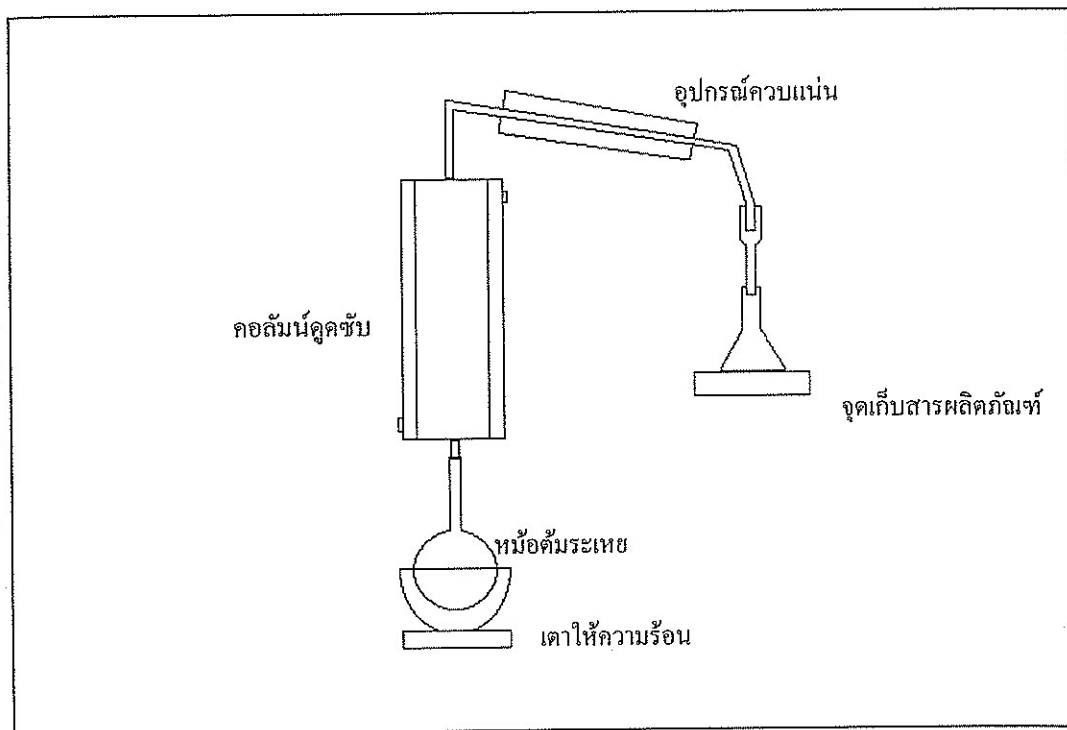
3.4.2 เครื่องมือสำหรับระบบดูดซับแบบสลับความดัน

1) เครื่องดันแบบของระบบดูดซับแบบสลับความดันลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.2 ประกอบด้วย คอลัมน์ดูดซับทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5 เซนติเมตร ความสูง 30 เซนติเมตร จำนวน 2 คอลัมน์ ควบคุมอุณหภูมิภายในคอลัมน์ด้วยอุปกรณ์ให้ความร้อนแบบเส้น (Cable heater)

- 2) หม้อต้มระเหยขนาด 10 ลิตร (20 × 60 เซนติเมตร)
- 3) ปั๊มสุญญากาศ ขนาด 1/4 แรงม้า (model VP-35L DAIKAWA)
- 4) ปั๊มน้ำ 1/8 แรงม้า (Coolant pump 50/60)
- 5) อุปกรณ์ควบแน่น
- 6) เครื่องชั่งไฟฟ้าความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง (AC211S Sartorius)
- 7) เครื่องวัดครรชนิกการหักเหแสง (ATAGO 2T)

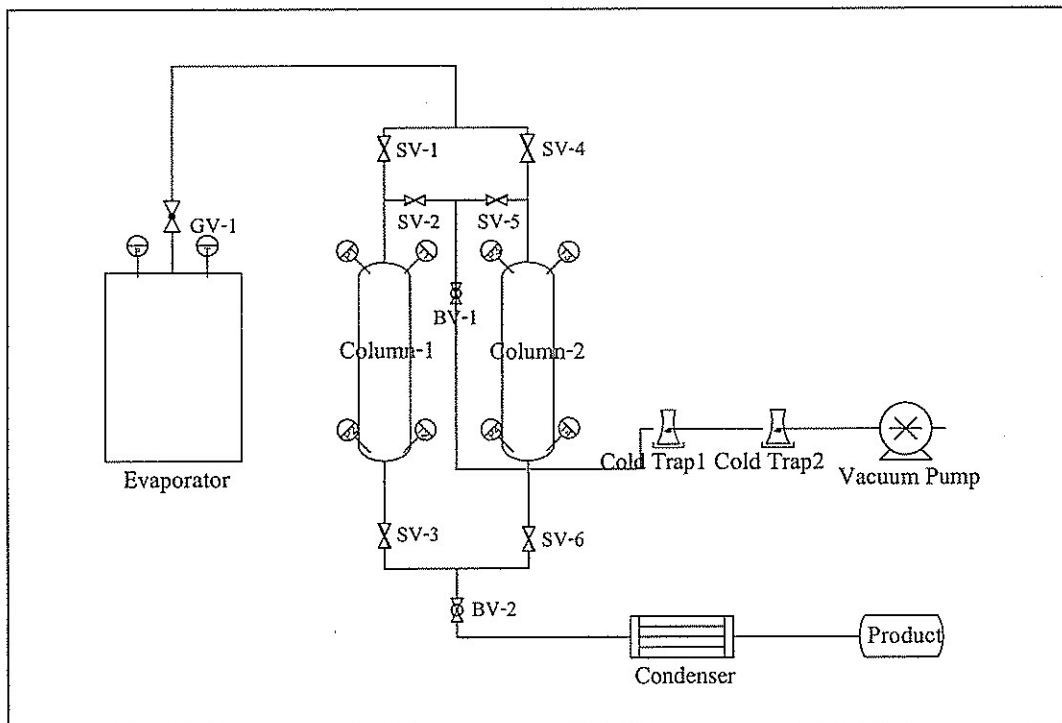
3.4.3 วัสดุและสารเคมี

- 1) แป้งมันสำปะหลัง
- 2) กากมันสำปะหลังบดละเอียด
- 3) โซเดียมไฮดรอกไซด์ ชนิดเม็ด
- 4) เอทานอลบริสุทธิ์ ความเข้มข้นร้อยละ 99.9 โดยน้ำหนัก
- 5) เอทานอลเกรดเอ ความเข้มข้นร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก
- 6) น้ำดีไอ (Deionized water)
- 7) ซีโอไลต์ 3 เอ (Zeolite 3A)



รูปที่ 3.1 ชุดทดลองสำหรับระบบดูดซับแบบเบดนิ่ง

การทดลองโดยใช้ระบบดูดซับแบบเบดนิ่ง (รูปที่ 3.1) เริ่มต้นด้วยการให้ความร้อนหม้อต้มระเหยที่บรรจุสารละลายเอทานอล 300 มิลลิลิตร โดยไอผสมของเอทานอลและน้ำจากสารละลายที่เดือดจะผ่านเข้าสู่คอลัมน์ดูดซับขนาด 2.54×18 เซนติเมตร ซึ่งจะเกิดการดูดซับน้ำออกจากเอทานอล ไอผสมเอทานอลที่ออกจากคอลัมน์ดูดซับจะผ่านเข้าสู่ส่วนควบแน่นของเหลวที่ได้จากการควบแน่นจะเข้าสู่จุดเก็บสารผลิตภัณฑ์ วิเคราะห์หาความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์จะใช้วิธีการวัดดัชนีการหักเหแสง



รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงองค์ประกอบเครื่องต้นแบบของระบบดูดซับแบบสลับความดัน

การทำงานของเครื่องต้นแบบของระบบดูดซับแบบสลับความดันจากรูปที่ 3.2 ดังนี้

1) ให้ความร้อนหม้อต้มระเหยจนกระทั่งความดันของหม้อต้มระเหยมีค่าเท่ากับความดันของคอลัมน์ดูดซับที่ต้องการทำการทดลอง จากนั้นเปิดวาล์วหม้อต้มระเหย GV-1 เพื่อให้ไอผสมเอทานอลไหลเข้าสู่คอลัมน์ดูดซับ

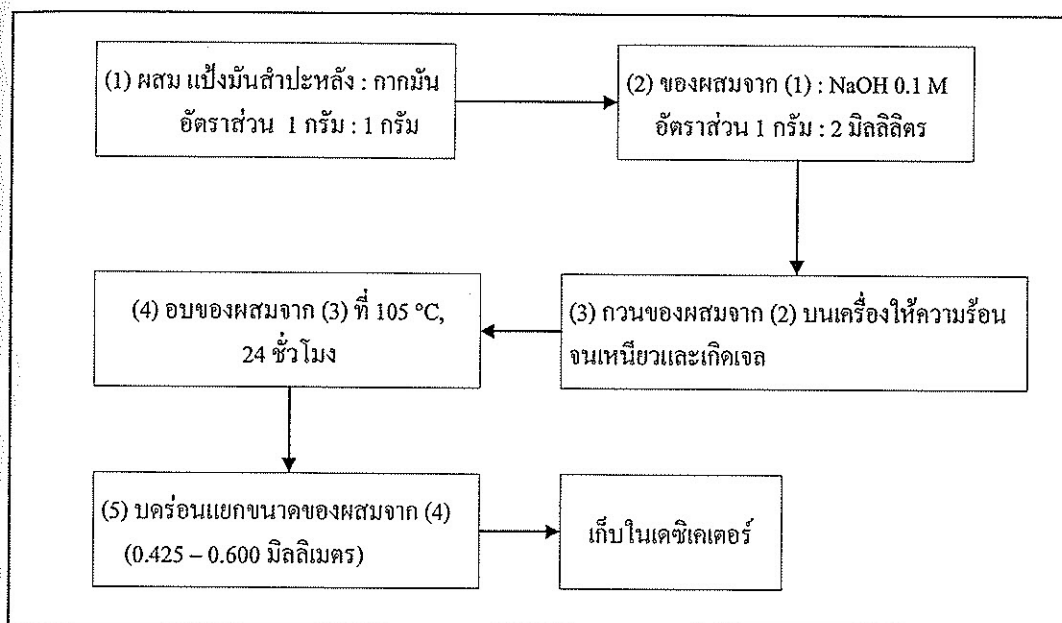
2) ทำการทดลองที่เวลาของครึ่งวัฏจักร 4/1 นาที โดยเปิดวาล์ว SV-1 SV-5 และ BV-1 เป็นเวลา 4 นาที และปิดวาล์ว SV-2 SV-3 SV-4 และ SV-6 เพื่อให้ไอผสมเอทานอลไหลเข้าสู่คอลัมน์ 1 เกิดการเพิ่มความดัน และคอลัมน์ 2 จะทำการคายซับ จากนั้น วาล์ว SV-3 จะเปิดนาน 1 นาที เพื่อทำการเก็บเอทานอลผลิตภัณฑ์

3) สลับการทำงานของคอลัมน์จะสลับกันโดยเปิดวาล์ว SV-4 SV-2 และ BV-1 เป็นเวลา 4 นาที และปิดวาล์ว SV-1 SV-3 SV-5 และ SV-6 เพื่อให้ความดันในคอลัมน์ 2 เพิ่มขึ้นและเกิดการดูดซับ ส่วนความดันในคอลัมน์ 1 ลดลง เกิดการคายซับของน้ำออกจากตัวดูดซับ จากนั้นเปิดวาล์ว SV-6 นาน 1 นาที เพื่อเก็บผลิตภัณฑ์เอทานอลที่ได้จากระบบ

4) เก็บผลิตภัณฑ์เอทานอลทุก 10 นาที โดยเก็บผลิตภัณฑ์ที่ได้จากทั้งสองคอลัมน์รวมกัน วิเคราะห์หาความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์ที่ได้ด้วยเครื่องวัดดัชนีการหักเหแสง

3.5 วิธีการทดลอง

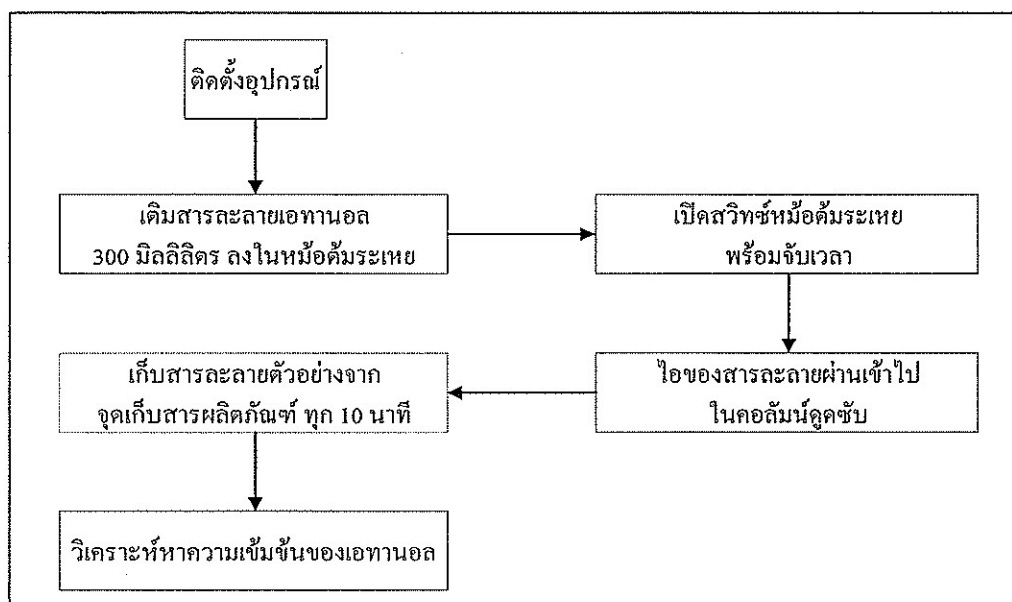
3.5.1 การเตรียมตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการเตรียมตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง

ขั้นตอนการเตรียมตัวดูดซับจากมันสำปะหลังเป็นดังแสดงในรูปที่ 3.3 ขั้นตอนแรก คือ การผสมแป้งมันสำปะหลังและกากมันสำปะหลังบดละเอียดในอัตราส่วน 1:1 กรัม จากนั้นเติม สารละลาย NaOH เข้มข้น 0.1 M ในอัตราส่วนของผสม 1 กรัมต่อสารละลาย 2 มิลลิตร กวนส่วนผสม ให้เข้ากันบนเตาให้ความร้อน (Hot plate) จนของผสมเหนียวเป็นเจล แผ่นเจลที่ได้ลงบนภาชนะความร้อน และนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง บดของแข็งที่ได้จากการอบแห้งก่อนร่อน ถัดขนาดอนุภาคที่ได้ด้วยตะแกรงมาตรฐานขนาด 0.425-0.600 มิลลิเมตร

3.5.2 การศึกษาความสามารถในการแยกน้ำออกจากไอผสมเอทานอล ของระบบดูดซับแบบเบดนิ่ง



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการทดลองหาความสามารถในการแยกน้ำออกจากไอผสมเอทานอล
ของระบบดูดซับแบบเบดนิ่ง

การทดลองหาความสามารถในการแยกน้ำออกจากไอผสมเอทานอลของระบบดูดซับแบบเบดนิ่ง เริ่มด้วยการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับระบบดูดซับดังรูปที่ 3.1 โดยไม่บรรจุตัวดูดซับลงในคอลัมน์ จากนั้นเติมสารละลายเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 300 มิลลิลิตรในหม้อต้มระเหย เปิดสวิตช์เตาให้ความร้อนพร้อมจับเวลา เก็บสารละลายตัวอย่างจากจุดเก็บสารผลิตภัณฑ์ โดยเก็บแบบปริมาตรสะสมทุก 10 นาที และเมื่อเริ่มเก็บสารละลายตัวอย่างให้เติมสารละลายเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก (ความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลเริ่มต้น) ใส่ในหม้อต้มปริมาตร 5 มิลลิลิตร ทุก 5 นาที บันทึกปริมาตรของสารผลิตภัณฑ์ที่ได้และปริมาตรสารละลายที่เติมในหม้อต้ม วิเคราะห์หาความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์ที่ได้ด้วยเรื่องวัดครชนิการหักเหแสง ทำการทดลองจนกระทั่งความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์มีค่าคงที่

จากนั้นศึกษาความสามารถของตัวดูดซับโดยทำการทดลองเช่นเดียวกันนี้ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเอทานอลร้อยละ 75 80 85 90 และ 95 โดยน้ำหนัก และปริมาณตัวดูดซับ 10 0 30 40 และ 60 กรัม ตามลำดับ

3.5.3 การทดสอบการนำกลับมาใช้ใหม่ของตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง

การทดลองเพื่อทดสอบการนำตัวดูดซับจากมันสำปะหลังกลับมาใช้ใหม่ มีขั้นตอนการทดลองเช่นเดียวกับในหัวข้อ (3.5.2) โดยการทดลองนี้ใช้สารละลายเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก เป็นสารป้อน และใช้ปริมาณตัวดูดซับ 60 กรัม เมื่อทำการทดลองเสร็จแล้วนำตัวดูดซับออกจากคอลัมน์ดูดซับไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำมาบรรจุลงในคอลัมน์ดูดซับเช่นเดิม ทำการทดลองซ้ำจนกว่าตัวดูดซับจากมันสำปะหลังจะเสื่อมประสิทธิภาพ โดยพิจารณาจากความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์ที่มีค่าลดลงใกล้เคียงกับกรณีไม่ใช้ตัวดูดซับ

3.5.4 การศึกษาการคายซับของตัวดูดซับจากมันสำปะหลังด้วยสุญญากาศ

การทดลองเพื่อศึกษาการคายซับของตัวดูดซับจากมันสำปะหลังด้วยสุญญากาศ มีขั้นตอนการทดลองเช่นเดียวกับหัวข้อ (3.5.2) โดยการทดลองนี้ใช้สารละลายเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก เป็นสารป้อน และใช้ปริมาณตัวดูดซับ 50 กรัม และเมื่อทำการทดลองเสร็จแล้วนำตัวดูดซับจากมันสำปะหลังที่ผ่านการดูดซับ บรรจุในกล่องคายซับเพื่อทำการคายซับด้วยสุญญากาศ เก็บตัวอย่างของตัวดูดซับทุก 5 นาที จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่าปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในตัวดูดซับ และบันทึกผลการทดลอง

3.5.5 การศึกษาการแยกน้ำออกจากไอผสมเอทานอลของระบบดูดซับแบบสลับความดัน

โดยใช้ซีโอไลต์ 3 เอ

การทดลองเพื่อศึกษาการแยกน้ำออกจากไอผสมเอทานอลของระบบดูดซับแบบสลับความดันโดยใช้ซีโอไลต์ 3 เอ เริ่มต้นด้วยเติมสารละลายเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 10 ลิตร ในหม้อต้มระเหยโดยเปิดวาล์วหม้อต้มระเหยร้อยละ 50 และบรรจุซีโอไลต์ 3 เอ คอลัมน์ละ 400 กรัม จากนั้นเปิดสวิตช์อุปกรณ์ต่อไปนี้ (รูปที่ 3.2) เครื่องทำความเย็น ตั้งค่าอุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับที่ 130 องศาเซลเซียส และควบคุมความดันของหม้อต้มระเหยผ่านการควบคุมอุณหภูมิของหม้อต้มระเหยให้อยู่ในค่าความดันที่ 2 บาร์ เปิดปั๊มสุญญากาศและปั๊มน้ำหล่อเย็น และตั้งเวลาของเครื่องวัดจักร 5 นาที (4/1 นาที คือ เพิ่มความดัน 4 นาที และดูดซับ 1 นาที) โดยเก็บข้อมูลความดันหม้อต้มระเหย ความดันของคอลัมน์ดูดซับ อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ ปริมาตรของผลิตภัณฑ์และในเครื่องดักจับไอระเหย (Cold trap) นำสารละลายที่ได้จากจุดเก็บสารผลิตภัณฑ์และเครื่องดักจับไอระเหยไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของเอทานอลด้วยเครื่องวัดดัชนีการหักเหแสง

จากนั้นทำการทดลองเช่นเดียวกันที่เวลาการดำเนินการครึ่งวัฏจักร 3/2 นาที (เพิ่มความดัน 3 นาที และดูดซับ 2 นาที) และ 1/4 นาที (เพิ่มความดัน 1 นาที และดูดซับ 4 นาที) ความดันของหม้อต้มระเหย 3 บาร์ และอุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ 120 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

3.5.6 การศึกษานัยสำคัญของตัวแปรด้วยการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3

สำหรับการศึกษาอิทธิพลตัวแปรต่าง ๆ ต่ออัตราการผลิตเอทานอล (กรัมเอทานอล ต่อกรัมตัวดูดซับต่อชั่วโมง) ในเครื่องต้นแบบของการดูดซับด้วยวิธีการสลับความดันโดยใช้ตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง โดยศึกษา 3 ตัวแปร คือ ความดันของคอลัมน์ดูดซับ อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ และอัตราการไหลของสารป้อนควบคุมด้วยอัตราการเปิดวาล์วหม้อต้ม ในการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3 จะกำหนดค่าสูงสุดและต่ำสุดของแต่ละตัวแปร แสดงดังตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2 แสดงอัตราการไหลของสารป้อนเทียบกับร้อยละการเปิดวาล์วของหม้อต้มระเหย

ตารางที่ 3.1 สภาวะการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3

การทดลอง	ความดันของคอลัมน์ดูดซับ (บาร์)	อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ (°C)	การเปิดวาล์วของ หม้อต้มระเหย (ร้อยละ)
1	2	120	25
2	3	120	25
3	2	120	75
4	3	120	75
5	2	130	25
6	3	130	25
7	2	130	75
8	3	130	75

ตารางที่ 3.2 อัตราการไหลของสารป้อนเทียบกับร้อยละการเปิดวาล์วหม้อต้มระเหย

ความดันของหม้อต้มระเหย (บาร์)	การเปิดวาล์ว (ร้อยละ)	อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)
2	25	342
	50	380
	75	459
3	25	600
	50	695
	75	795

3.5.7 การศึกษาการแยกน้ำออกจากไอผสมเอทานอลของระบบดูดซับแบบสลับความดัน

โดยใช้ตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง

การทดลองเพื่อศึกษาการแยกน้ำออกจากไอผสมเอทานอลของระบบดูดซับแบบสลับความดันโดยใช้ตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง มีขั้นตอนเช่นเดียวกับหัวข้อ (3.5.5) โดยเติมสารละลายเอทานอลความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก ในหม้อต้มระเหยโดยเปิดวาล์วหม้อต้มระเหยร้อยละ 25 บรรจุก้อนดูดซับจากมันสำปะหลัง คอลัมน์ละ 300 กรัม จากนั้นเมื่อทำการทดลองเสร็จเปลี่ยนเวลาการดำเนินการครึ่งวัฏจักร 3/2 นาที (เพิ่มความดัน 3 นาที และดูดซับ 2 นาที) และ 1/4 นาที (เพิ่มความดัน 1 นาที และดูดซับ 4 นาที) ความดันหม้อต้มระเหย 3 บาร์ อุณหภูมิคอลัมน์ 120 องศาเซลเซียส และเปิดวาล์วหม้อต้มระเหยร้อยละ 75 ตามลำดับ

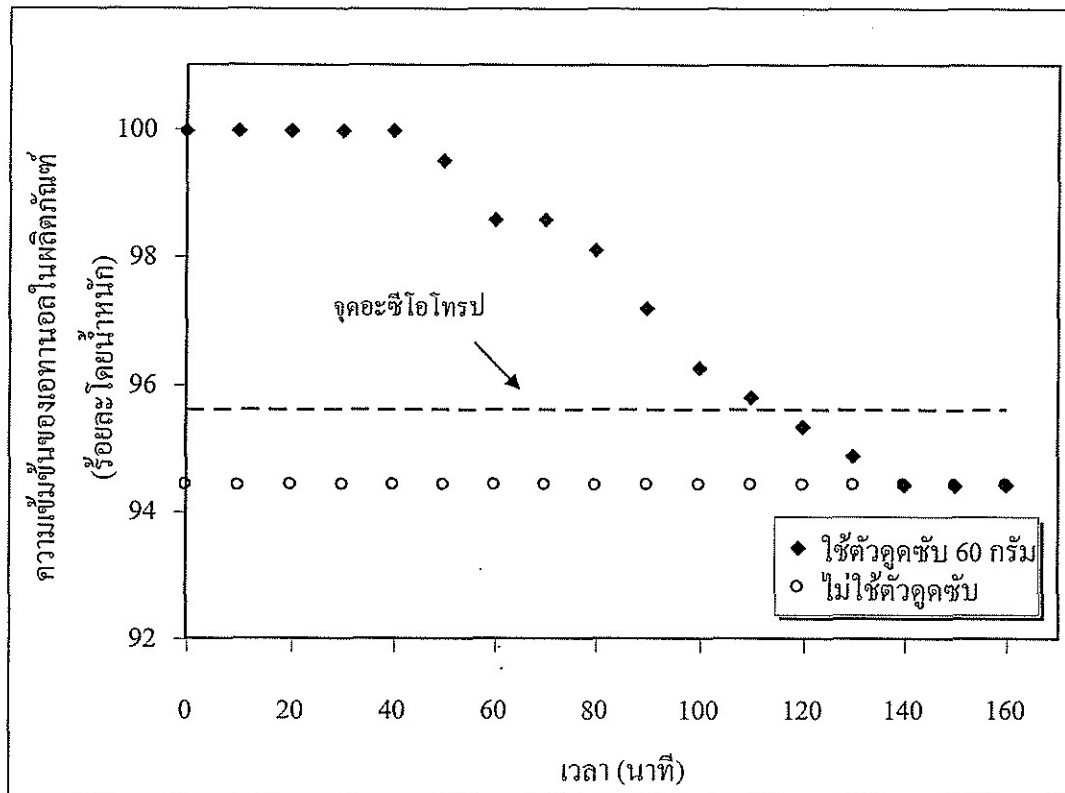
บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

บทนี้นำเสนอผลการศึกษาความสามารถในการแยกน้ำแยกจากไอผสมเอทานอลของตัวดูดซับที่เตรียมขึ้นจากแป้งและกากมันสำปะหลังในระบบดูดซับแบบเบดนิ่ง ที่ความเข้มข้นของสารป้อนและปริมาณของตัวดูดซับต่าง ๆ เมื่อกำหนดคุณสมบัติของคอลัมน์ดูดซับ 90 องศาเซลเซียส และทำการทดลองที่ความดันบรรยากาศ นำผลการทดลองที่ได้ไปหาไอโซเทิร์มการดูดซับน้ำของตัวดูดซับจากมันสำปะหลังที่สภาวะสมดุล จากนั้นศึกษาความสามารถการดูดซับน้ำของตัวดูดซับดังกล่าวในเครื่องต้นแบบของระบบดูดซับแบบสลับความดันที่ได้จัดสร้างขึ้น โดยทำการทดลองตามวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการแยกน้ำออกจากไอผสมเอทานอลในระบบดูดซับแบบสลับความดัน

4.1 ความสามารถในการดูดซับน้ำของตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง

การศึกษาความสามารถในการดูดซับน้ำของตัวดูดซับจากมันสำปะหลังสำหรับแยกน้ำออกจากไอผสมเอทานอลในระบบดูดซับแบบเบดนิ่ง โดยการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากระบบการดูดซับแบบเบดนิ่งเปรียบเทียบระหว่างการใช้และไม่ใช้ตัวดูดซับ เมื่อใช้ความเข้มข้นของเอทานอลในสารป้อนร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก รูปที่ 4.1 แสดงผลเปรียบเทียบความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์เอทานอลระหว่างกรณีที่ไม่มีตัวดูดซับและใช้ตัวดูดซับ พบว่าเมื่อใช้ ตัวดูดซับ จะทำให้ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์เอทานอลมีค่ามากกว่ากรณีที่ไม่มีตัวดูดซับ โดยน้ำจะถูกแยกออกจากไอผสมเอทานอลด้วยการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของน้ำกับหมู่ไฮดรอกซิลอิสระบนกลูโคส ซึ่งกลูโคสจะอยู่ในโครงสร้างของทั้งอะไมโลสและอะไมโลเพกตินที่พบในแป้ง (Beery and Ladisch, 2001) เช่นเดียวกับผลการศึกษาวิจัยของ Ladisch et al. (1984) ดังได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.2 แสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับที่เตรียมจากมันสำปะหลังมีความสามารถในการแยกน้ำออกจากไอผสมเอทานอล ทำให้ความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าสูงถึงร้อยละ 99.96 โดยน้ำหนัก ซึ่งสูงกว่าจุดอะซีโอโทรปของสารละลายเอทานอลในน้ำ ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับจากมันสำปะหลังสามารถดูดซับเพื่อแยกน้ำออกจากไอผสมเอทานอลได้

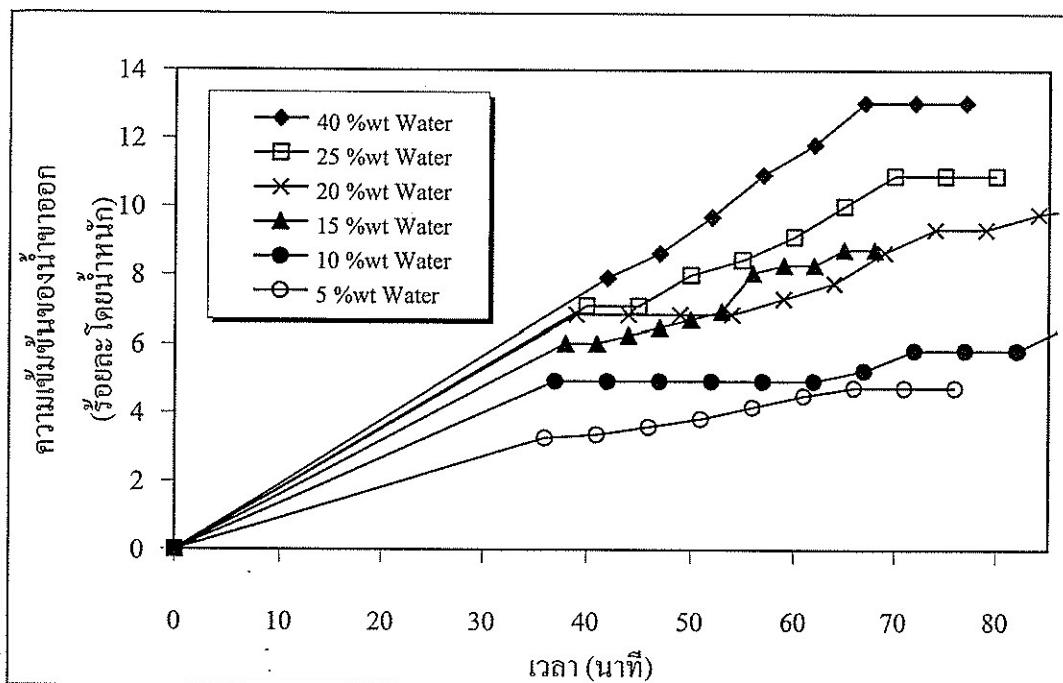


รูปที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์กับเวลาในระบบดูดซับที่ใช้สารป้อนซึ่งมีความเข้มข้นของเอทานอลร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก

4.2 การดูดซับน้ำของตัวดูดซับจากมันสำปะหลังในระบบดูดซับแบบเบดนิ่ง

4.2.1 ผลของความเข้มข้นของสารป้อนต่อประสิทธิภาพการดูดซับน้ำ

การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารป้อนที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับน้ำของตัวดูดซับจากมันสำปะหลังในระบบดูดซับแบบเบดนิ่ง ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเอทานอลร้อยละ 60-95 โดยน้ำหนัก ปริมาตรเริ่มต้นของสารป้อนเท่ากับ 300 มิลลิลิตร และใช้ปริมาณของตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง 10 กรัม โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำในผลิตภัณฑ์กับเวลา (รูปที่ 4.2) แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีปริมาณน้ำเข้ามามากตัวดูดซับจะสามารถซับน้ำไว้ได้มากจึงมีความต่างของความเข้มข้นของน้ำในผลิตภัณฑ์ที่เวลาเริ่มต้นกับที่เวลาใด ๆ และความชันของเส้นกราฟโดยความเข้มข้นของน้ำในสารป้อนร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก จะมีความแตกต่างมากที่สุด ตามด้วยร้อยละ 25 20 15 และ 10 โดยน้ำหนัก ลดลงตามลำดับ



รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำออกจากระบบดูดซับแบบเบดนิ่ง โดยใช้ตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง 10 กรัม

จากรูปที่ 4.2 นำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ เพื่อใช้ในการพิจารณารูปแบบไอโซเทิร์มของตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง โดยการคำนวณหาปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ แสดงดังนี้

$$q_w = (g_{H_2O,in} - g_{H_2O,out}) / g_{adsorbent} \quad (4.1)$$

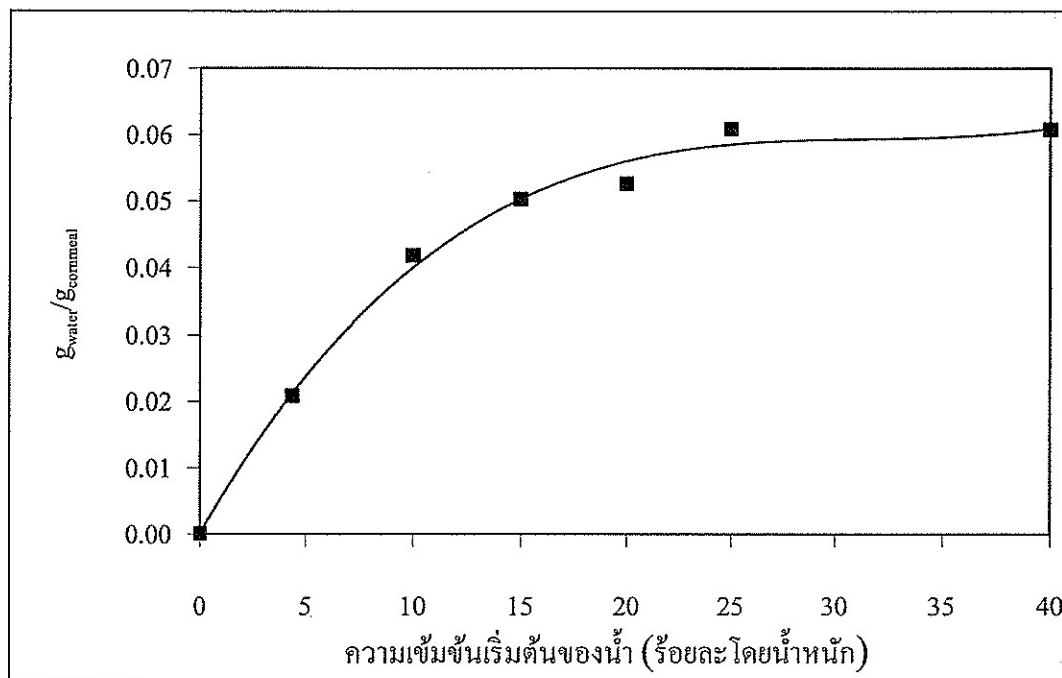
เมื่อ

q_w	คือ	ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ (กรัม ต่อ กรัมตัวดูดซับ)
$g_{H_2O,in}$	คือ	ปริมาณน้ำในสารป้อน (กรัม)
$g_{H_2O,out}$	คือ	ปริมาณน้ำในสารผลิตภัณฑ์ (กรัม)
$g_{adsorbent}$	คือ	ปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ (กรัม)

ผลการคำนวณปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับแสดงดังตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความเข้มข้นของเอทานอลในสารป้อนเพิ่มขึ้นจะทำให้ความสามารถในการดูดซับน้ำลดลง และนำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับและความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำในสารป้อน แสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่าความสามารถในการดูดซับน้ำของตัวดูดซับจากมันสำปะหลังจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของน้ำในสารป้อน โดยปริมาณการดูดซับน้ำจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงความเข้มข้นของน้ำในช่วง ร้อยละ 0-15 โดยน้ำหนักและจะมีค่าคงที่เมื่อความเข้มข้นของน้ำเพิ่มเนื่องจากที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำค่าจะมีจำนวนโมเลกุลของน้ำต่อปริมาณของหมู่ไฮดรอกซิลอิสระในตัวดูดซับจากมันสำปะหลังมาก แต่เมื่อความเข้มข้นของน้ำในสารป้อนเพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราส่วนระหว่างจำนวนหมู่ไฮดรอกซิลอิสระต่อโมเลกุลน้ำที่จะเกิดพันธะไฮโดรเจนมีค่าน้อย ส่งผลให้ปริมาณการดูดซับน้ำของตัวดูดซับลดลง

ตารางที่ 4.1 ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับเมื่อใช้ตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง 10 กรัม ในระบบดูดซับแบบเบดนิ่งที่ความเข้มข้นของเอทานอลในสารป้อนต่าง ๆ

ความเข้มข้นของน้ำในสารป้อน (%wt)	ปริมาณของน้ำที่ถูกดูดซับ ($g_{\text{water}}/g_{\text{adsorbent}}$)
40	0.061
25	0.061
20	0.053
15	0.050
10	0.042
5	0.021



รูปที่ 4.3 ผลของความเข้มข้นของสารป้อนที่มีต่อการดูดซับน้ำ

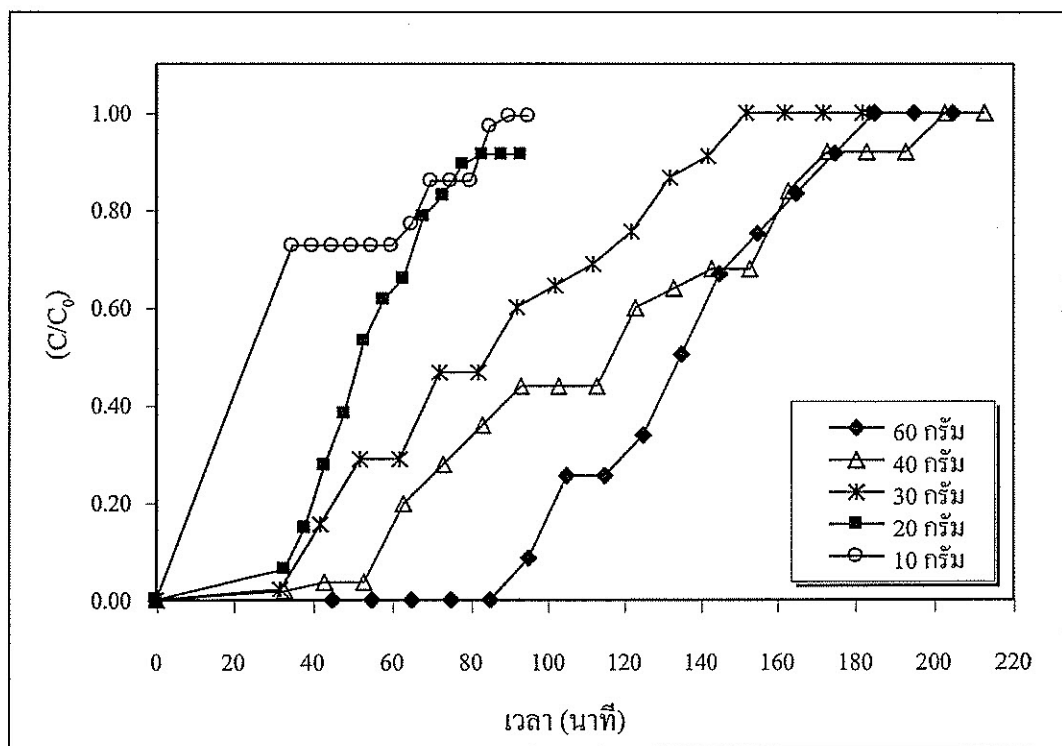
4.2.2 ผลของปริมาณตัวดูดซับต่อประสิทธิภาพการดูดซับน้ำในระบบดูดซับแบบเบดนิ่ง

การศึกษาผลของปริมาณตัวดูดซับต่อประสิทธิภาพการดูดซับน้ำในระบบดูดซับแบบเบดนิ่งโดยใช้ตัวดูดซับปริมาณระหว่าง 10-60 กรัม ที่ความเข้มข้นของเอทานอลในสารป้อนร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 300 มิลลิลิตร รูปที่ 4.4 แสดงผลของปริมาณตัวดูดซับที่มีต่อความสามารถในการดูดซับน้ำ C/C_0 คือ อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของน้ำขาออกต่อความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำ ค่า C/C_0 ค่าแสดงว่าการดูดซับน้ำเกิดในปริมาณมากและการแยกน้ำออกจากไอผสมเอทานอลมีประสิทธิภาพดี ซึ่งจะเห็นว่า C/C_0 ลดลงตามปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณของตัวดูดซับและระยะเวลาเบรคทรู (Breakthrough time) ในระบบดูดซับแบบเบดนิ่ง ซึ่งเวลาเบรคทรู คือเวลาที่ตัวดูดซับเริ่มอิ่มตัว จากตารางที่ 4.3 เวลาเบรคทรูจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ เนื่องจากการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับจะเป็นการเพิ่มหมู่ไฮดรอกซิลอิสระในระบบซึ่งส่งผลให้เกิดการดูดซับมากขึ้น สำหรับการดูดซับที่ใช้ปริมาณตัวดูดซับ 10 และ 20 กรัม นั้น C/C_0 มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้ไม่สามารถหาค่าเวลาเบรคทรูได้ แสดงให้เห็นว่าความสามารถในการดูดซับน้ำออกจากเอทานอลเพิ่มขึ้นตามปริมาณตัวดูดซับที่ใช้

ตารางที่ 4.2 ปริมาณของตัวดูดซับและระยะเวลาเบรคทรรุในระบบดูดซับแบบเบคหนึ่งที่ใช้
ความเข้มข้นของเอทานอลในสารป้อนร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก

ปริมาณของตัวดูดซับ (กรัม)	เวลาเบรคทรรุ (นาที)
10	-
20	-
30	30
40	40
60	85



รูปที่ 4.4 ผลของปริมาณตัวดูดซับที่มีต่อความสามารถในการดูดซับน้ำของระบบดูดซับแบบเบคหนึ่ง
ที่ใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของเอทานอลในสารป้อนร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก
ปริมาตร 300 มิลลิลิตร

4.3 ไอโซเทิร์มที่สภาวะสมดุลของตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับกับความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำในสารป้อน (ตารางที่ 4.1) นำมาทดสอบหาไอโซเทิร์มการดูดซับที่สภาวะสมดุลโดยใช้สมการไอโซเทิร์มการดูดซับแบบแลงมัวร์ (สมการ 2.2) และสมการไอโซเทิร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช (สมการ 2.6)

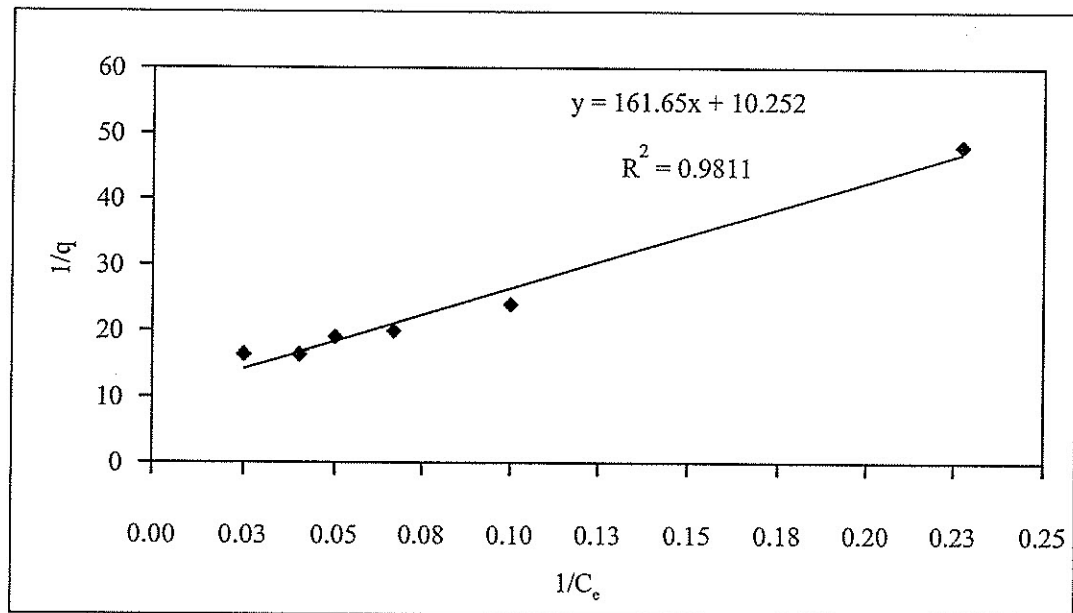
เมื่อพิจารณาให้ระบบการดูดซับมีสมการสมดุลไอโซเทิร์มการดูดซับแบบแลงมัวร์ สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{1}{q}$ กับ $\frac{1}{C_e}$ ตามสมการที่ 2.2 จะได้กราฟเส้นตรงของไอโซเทิร์มการดูดซับน้ำของตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง ดังแสดงในรูปที่ 4.5 เส้นกราฟมีค่าความชันเท่ากับ 161.65 และค่าจุดตัดบนแกน y เท่ากับ 10.252 จากการคำนวณพบว่า q_m มีค่า 0.0976 กรัม/น้ำต่อกรัมตัวดูดซับ และ b มีค่า 15.77 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.9811

พิจารณาสมการไอโซเทิร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(q)$ กับ $\log(C_e)$ ตามสมการที่ 2.6 ได้กราฟเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 4.6 และสามารถหาค่าคงที่ n และ K_f ได้จากค่าชันและจุดตัดแกน y เท่ากับ 0.495 และ 0.012 ตามลำดับ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.8877 ค่าของตัวแปรที่คำนวณได้จากสมการของแลงมัวร์และ ฟรุนดลิช แสดงดังตารางที่ 4.3

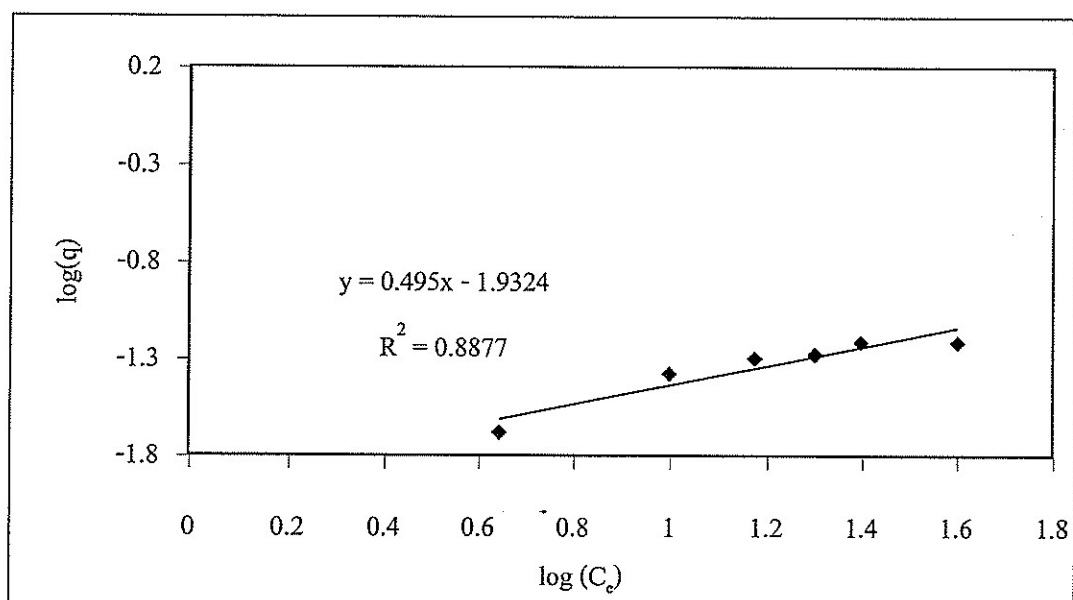
เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ได้มาจากการสร้างกราฟตามสมการไอโซเทิร์มการดูดซับทั้ง 2 แบบ จะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจจากสมการไอโซเทิร์มการดูดซับแบบแลงมัวร์มีค่ามากกว่าจากสมการไอโซเทิร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช และเมื่อพิจารณาแนวโน้มการดูดซับน้ำของตัวดูดซับจากมันสำปะหลังในรูปที่ 4.2 พบว่ามีลักษณะคล้ายไอโซเทิร์มการดูดซับแบบแลงมัวร์ คือ ช่วงเริ่มต้นปริมาณของน้ำที่ถูกดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้นและหลังจากนั้นปริมาณการดูดซับน้ำจะมีค่าคงที่ และจากกลไกการดูดซับโมเลกุลน้ำด้วยพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียวจะไม่เกิดการดูดซับบนชั้นของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับที่สะสมบนผิวตัวดูดซับ ดังนั้นจึงเห็นควรนำเอาสมการไอโซเทิร์มของแลงมัวร์มาใช้อธิบายการดูดซับน้ำของตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง

ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่และความสามารถในการดูดซับน้ำของตัวดูดซับจากมันสำปะหลังจากสมการไอโซเทิร์มของแลงมัวร์และฟรุนดลิช

ไอโซเทิร์มของแลงมัวร์			ไอโซเทิร์มของฟรุนดลิช		
q_m (g/g)	b	R^2	n	K_f	R^2
0.0976	15.77	0.9811	0.495	0.012	0.8877



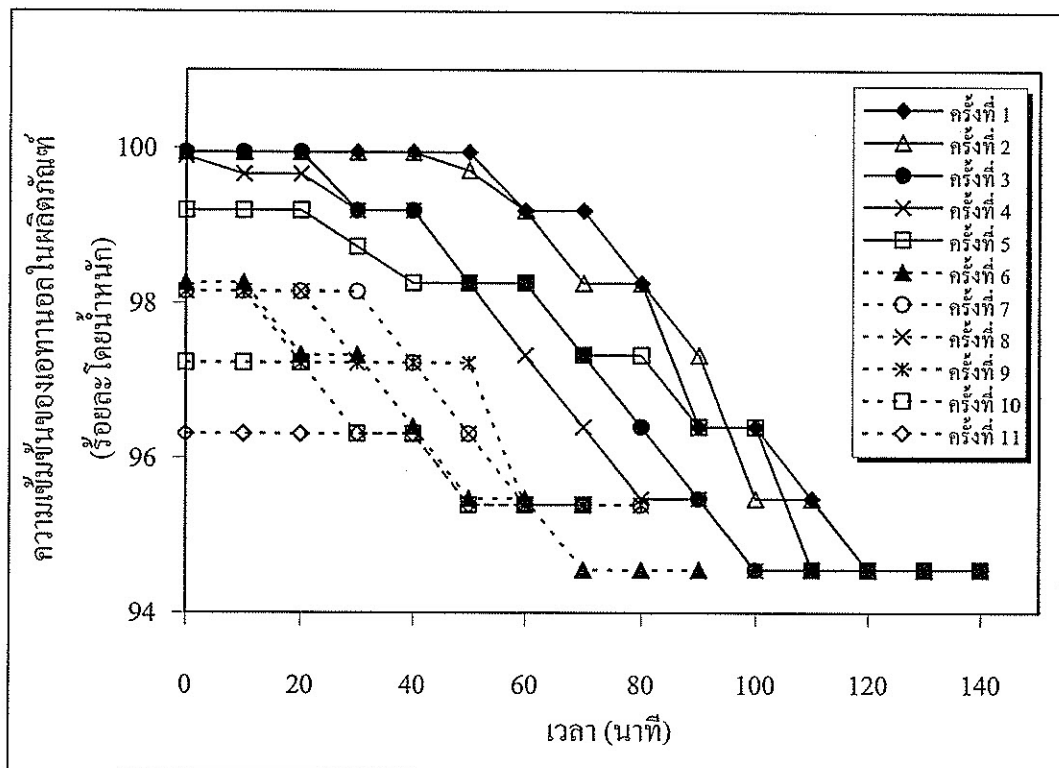
รูปที่ 4.5 ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบแลงมัวร์ในรูปแบบของกราฟเส้นตรงจากข้อมูลการดูดซับน้ำของตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง



รูปที่ 4.6 ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิชในรูปแบบของกราฟเส้นตรงจากข้อมูลการดูดซับน้ำของตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง

4.4 การทดสอบความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ของตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง

การศึกษานำกลับมาใช้ใหม่ของตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง ทำการโดยทดลองในระบบดูดซับแบบเบดนิ่ง ดังอธิบายไว้ในหัวข้อ (3.5.3) ผลการทดลองแสดงดัง รูปที่ 4.7 พบว่าความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์และระยะเวลาเบรคทรมีค่าใกล้เคียงกันในการใช้ตัวดูดซับซ้ำครั้งที่ 1 และ 2 เมื่อใช้ตัวดูดซับซ้ำในครั้งต่อ ๆ ไปความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์จะมีค่าลดลงตามลำดับ และยังสามารถให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเข้มข้นของเอทานอลสูงกว่าร้อยละ 95.6 โดยน้ำหนักด้วยตัวดูดซับจากมันสำปะหลังที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว 11 ครั้ง

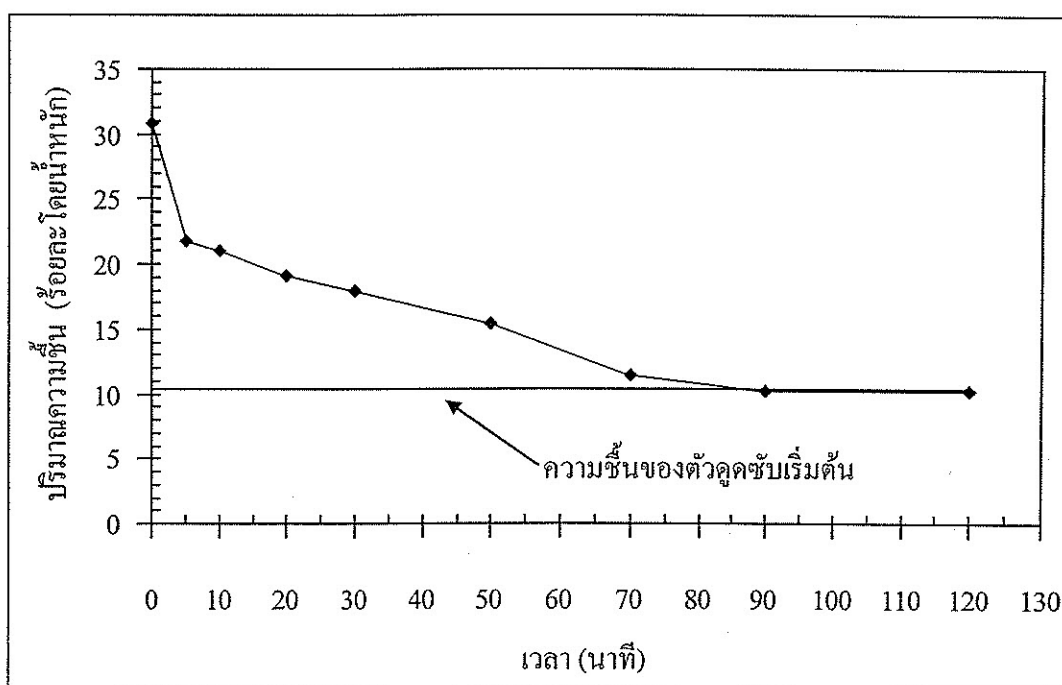


รูปที่ 4.7 ผลของปริมาณตัวดูดซับที่มีต่อความสามารถในการดูดซับน้ำที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของเอทานอลในสารป้อนร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 300 มิลลิลิตร

4.5 การคายช้บน้ำจากตัวดูดซับจากมันสำปะหลังด้วยระบบสุญญากาศ

การศึกษากการคายช้ของตัวดูดซับจากมันสำปะหลังด้วยสุญญากาศที่อุณหภูมิห้อง ทำโดยการวัดปริมาณความชื้นที่อยู่ในตัวดูดซับก่อนและหลังการดูดซับดังอธิบายไว้ในหัวข้อ (3.5.4) ผลการทดลองดังรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าสามารถคายน้ำและลดความชื้นของตัวดูดซับได้ด้วยสุญญากาศ ในช่วงระยะเวลา 5 นาทีแรกของการคายช้ ความชื้นในตัวดูดซับจะลดลงอย่างรวดเร็วจากร้อยละ 30.85 เป็นร้อยละ 10.39 โดยน้ำหนัก และใช้เวลาทั้งหมด 90 นาที สำหรับการคายช้ด้วยสุญญากาศเพื่อลดความชื้นของตัวดูดซับจากมันสำปะหลังปริมาณ 50 กรัม ให้มีค่าเท่ากับความชื้นก่อนการดูดซับ

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับจากมันสำปะหลังมีคุณสมบัติในการคายช้ด้วยระบบสุญญากาศได้ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง



รูปที่ 4.8 ความชื้นของตัวดูดซับจากมันสำปะหลังที่เวลาต่าง ๆ เมื่อคายช้ด้วยระบบสุญญากาศ

4.6 ความสามารถในการแยกน้ำออกจากไอผสมเอทานอลของระบบดูดซับแบบความดันโดยใช้ซีโอไลต์ 3 เอ

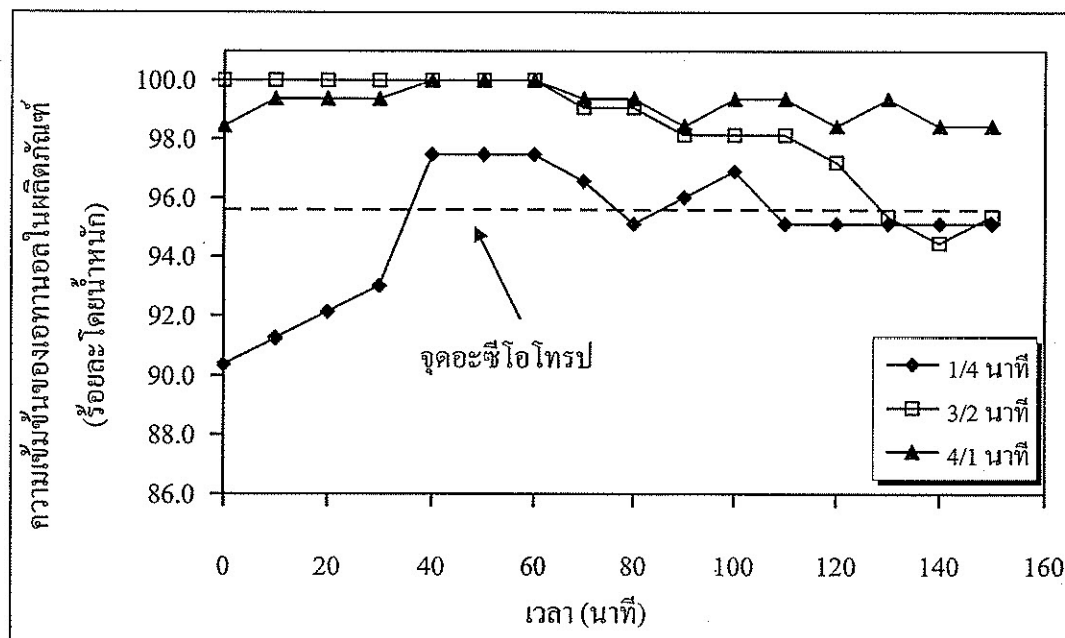
การทดลองในส่วนนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องต้นแบบของระบบดูดซับแบบสลับความดันที่จัดสร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการและผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อความสามารถในการแยกน้ำออกจากไอผสมเอทานอลสำหรับเครื่องต้นแบบนี้โดยใช้ซีโอไลต์ 3 เอ ในปริมาณ 400 กรัม ต่อคอลัมน์ดูดซับ และความเข้มข้นของเอทานอลในสารป้อนร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก ผลการศึกษาที่ได้จะใช้เป็นแนวทางในการศึกษาทดลองในส่วนของการใช้ตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง และเป็นการศึกษาทดสอบการทำงานเบื้องต้นของเครื่องต้นแบบด้วย

4.6.1 ผลของระยะเวลาของครั้งวัฏจักรการดูดซับต่อความสามารถในการแยกน้ำ

ออกจากไอผสมเอทานอลด้วยซีโอไลต์ 3 เอ

การศึกษาผลของระยะเวลาของครั้งวัฏจักรการดูดซับต่อความสามารถในการดูดซับน้ำที่ความดันของคอลัมน์ดูดซับ 3 บาร์ อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ 130 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของเอทานอลในสารป้อนร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก ควบคุมอัตราการไหลของไอผสมเอทานอลด้วยการเปิดวาล์วมือตัมร้อยละ 50 โดยตัวแปรอิสระในการศึกษา คือ เวลาของครั้งวัฏจักรของการดูดซับ ได้ทำการศึกษาเวลาของครั้งวัฏจักรที่แตกต่างกัน 3 ค่า คือ 4/1 นาที 3/2 นาที และ 1/4 นาที ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.9 พบว่าในช่วง 40 นาทีแรก ที่เวลาของครั้งวัฏจักร 3/2 นาที จะให้ค่าความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์มีค่าสูงสุดแต่หลังจากนั้นความเข้มข้นจะเริ่มลดลงอาจเป็นผลมาจากการคายซับของเวลาของครั้งวัฏจักรนี้สั้นจึงทำให้ตัวดูดซับอิ่มตัวเร็ว และเมื่อพิจารณาความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์ตลอดทั้งการทดลอง จะพบว่าเวลาของครั้งวัฏจักร 4/1 นาที จะเป็นเวลาของครั้งวัฏจักรที่ดีที่สุด ดังนั้นระยะเวลาที่ใช้ในการเพิ่มความดันขึ้นจะทำให้ความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์มีค่าสูงขึ้น ระหว่างที่เพิ่มความดันทำให้เกิดการสัมผัสระหว่างไอผสมเอทานอลกับตัวดูดซับภายในคอลัมน์และเกิดการดูดซับน้ำขึ้น เมื่อระยะเวลาในการเพิ่มความดันมีค่ามากจะทำให้เกิดการดูดซับน้ำและทำให้ประสิทธิภาพการแยกน้ำออกจากไอเอทานอลสูงขึ้นตามไปด้วย จึงกำหนดให้เวลาของครั้งวัฏจักร 4/1 นาที เป็นเวลาที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของเครื่องต้นแบบนี้ และใช้เวลาของครั้งวัฏจักรนี้ในการศึกษาการทำงานของเครื่องต้นแบบในส่วนอื่น ๆ ต่อไป

อย่างไรก็ตามในงานวิจัยของ Pruksathorn and Vitidsant (2009) พบว่าระยะเวลาของวัฏจักรไม่มีนัยสำคัญต่อความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์ แต่จะมีผลต่อสัดส่วนพื้นที่ของระบบซึ่งจะส่งผลต่อปริมาตรของผลิตภัณฑ์เอทานอลที่ผลิตได้



รูปที่ 4.9 ผลของเวลาของเครื่องปฏิกรณ์ต่อความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากระบบดูดซับแบบสลับความดันโดยใช้ซีโอไลต์ 3 เอ ที่ความดันของคอลัมน์ดูดซับ 3 บาร์ อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ 130 องศาเซลเซียส

4.6.2 ผลของอุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับต่อความสามารถในการแยกน้ำออกจากไอผสมเอทานอลด้วยซีโอไลต์ 3 เอ

ผลการศึกษาอุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับต่อการดูดซับน้ำโดยใช้ซีโอไลต์ 3 เอ ความดันของคอลัมน์ดูดซับ 3 บาร์ และควบคุมอัตราการไหลของไอเอทานอลด้วยการเปิดวาล์วหม้อต้มร้อยละ 50 ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 120 และ 130 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.10 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากอุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับทั้ง 2 ค่ามีค่าสูงกว่าร้อยละ 95.6 โดยน้ำหนัก (จุดอะซีโอโทรป) เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียสพบว่าความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์มีค่าสูงกว่าจุดอะซีโอโทรปตลอดทั้ง 150 นาที โดยมีความเข้มข้นของเอทานอลสูงสุดร้อยละ 99.9 โดยน้ำหนัก ในช่วง 100 นาทีแรก จากนั้นความเข้มข้นของเอทานอลจะลดลงและคงที่ที่ร้อยละ 97.5 โดยน้ำหนัก จนถึงสิ้นสุดการทำงานของกระบวนการ ส่วนที่อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ 120 องศาเซลเซียส จะผลิตเอทานอลได้ความเข้มข้นสูงสุดร้อยละ 96 โดยน้ำหนัก ในช่วง 60 นาทีแรกของการดำเนินงาน จากนั้นความเข้มข้นของเอทานอลจะลดลงต่ำ

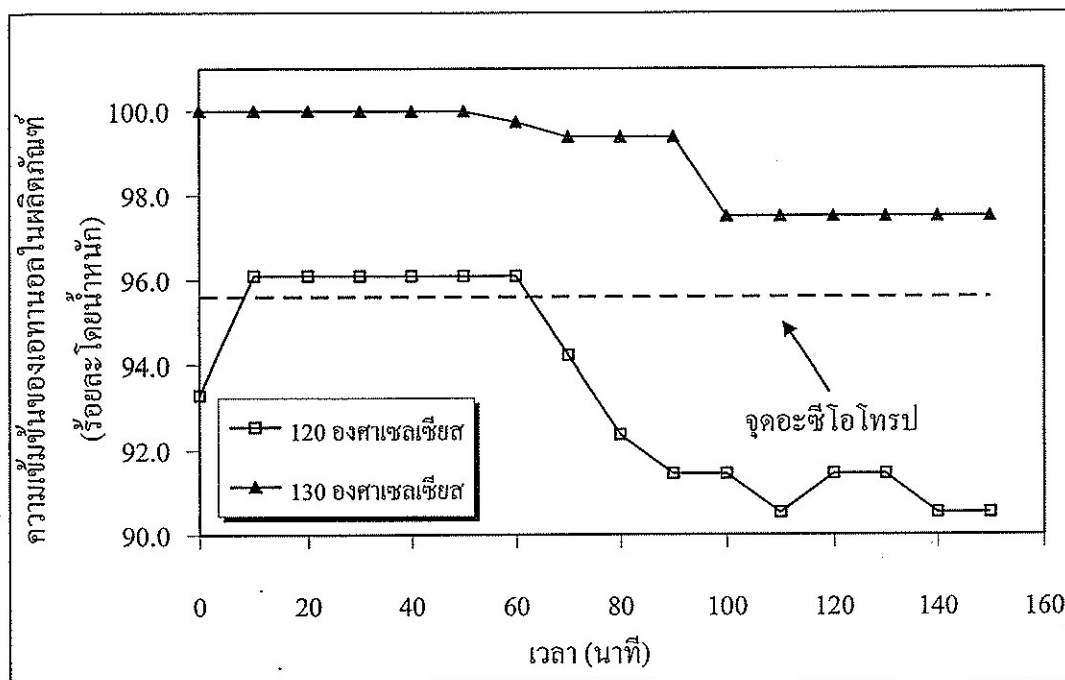
กว่าจุดอะซีโอโทรป เมื่อคำนวณหาอัตราการผลิตเอทานอล (Ethanol production rate) คือ ปริมาณเอทานอลที่มีความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 99.5 โดยน้ำหนัก ที่ผลิตได้ต่อปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ต่อชั่วโมง (ตารางที่ 4.4) พบว่าที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ระบบมีอัตราการผลิตเอทานอล 0.804 กรัมต่อกรัมตัวดูดซับต่อชั่วโมง ส่วนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ไม่สามารถหาค่าได้เนื่องจากมีความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์มีค่าต่ำกว่าร้อยละ 99.5 โดยน้ำหนัก

สำหรับสภาวะการทำงานของการดูดซับแบบสลับความดันโดยใช้ซีโอไลต์จากหลายงานวิจัย ที่อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ 120 องศาเซลเซียส จะใช้ความดันดูดซับน้อยกว่า 3 บาร์ อย่างเช่นในงานวิจัยของ Pruksathorn and Vittidsant (2009) กำหนดอุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ 120 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันดูดซับ 2-2.4 บาร์ และในงานวิจัยของ ชีรพัฒน์ มัชฌิมากิโร และ สุนธยา หนูเกื้อ (2004) ทำการทดลองแยกน้ำออกจากเอทานอลในการดูดซับแบบสลับความดันในช่วงอุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ 150-200 องศาเซลเซียส ที่ความดันดูดซับ 2-4 บาร์ และจากผลการทดลอง (ตารางที่ 4.5) สำหรับอุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ 3 บาร์ เหมาะกับอุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส มากกว่าอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส

สำหรับร้อยละสูญหาย คือ ปริมาณของสารละลายเอทานอลที่สูญหายไปจากระบบต่อปริมาณสารป้อน จากตารางที่ 4.5 พบว่าที่อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับทั้ง 2 ค่า มีค่าร้อยละสูญหายใกล้เคียงกัน ที่ความดันดูดซับ 3 บาร์

ตารางที่ 4.4 อัตราการผลิตเอทานอลที่มีความเข้มข้นสูงกว่าร้อยละ 99.5 โดยน้ำหนัก ของระบบดูดซับแบบสลับความดันโดยใช้ซีโอไลต์ 3 เอ ที่อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับต่าง ๆ

อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ (°C)	ความดันของคอลัมน์ดูดซับ (บาร์)	เปิดวาล์วหม้อต้มระเหย (ร้อยละ)	อัตราการผลิตเอทานอล		สูญหาย (ร้อยละ)
			$\frac{g_{EtOH}}{hr \cdot g_{adsorbent}}$	$\frac{ml_{EtOH}}{hr}$	
120	3	50	-	-	21.57
130	3	50	0.804	815	20.29



รูปที่ 4.10 ผลของอุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับต่อความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากระบบดูดซับแบบสลับความดัน ที่ความดันของคอลัมน์ดูดซับ 3 บาร์

4.6.3 ผลของความดันของคอลัมน์ดูดซับต่อความสามารถในการแยกน้ำออกจาก

ไอผสมเอทานอลด้วยซีโอไลต์ 3 เอ

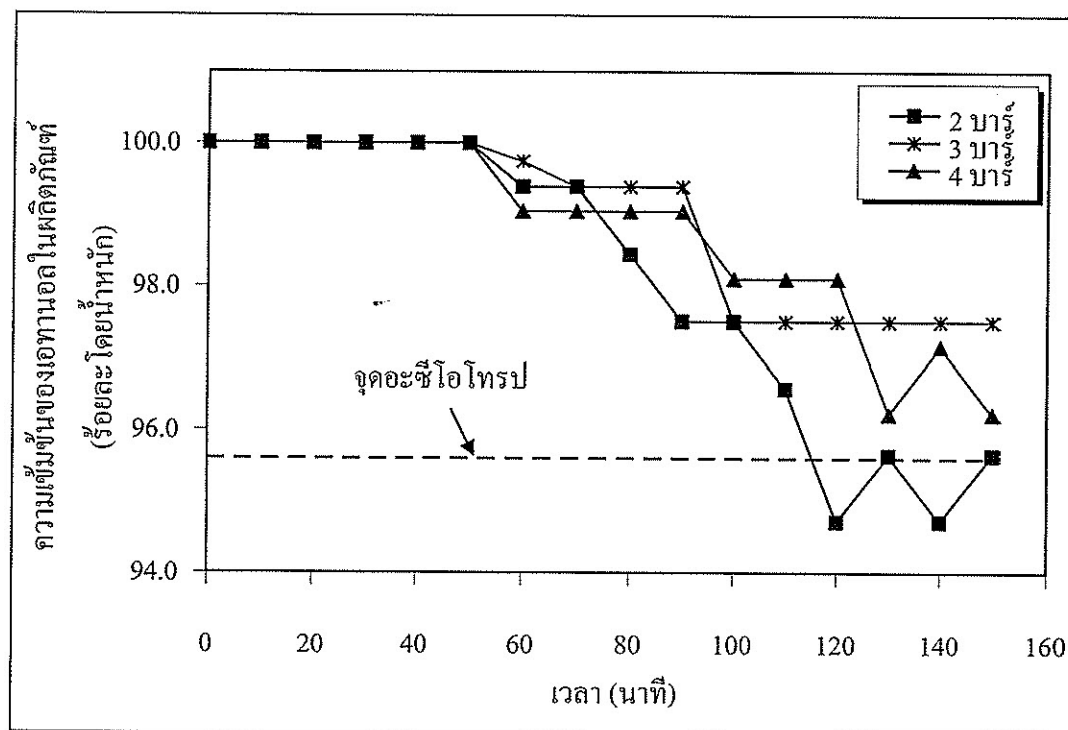
การศึกษาผลของความดันของคอลัมน์ดูดซับต่อประสิทธิภาพการดูดซับน้ำ ทำโดยทดลองที่ความดันของคอลัมน์ดูดซับ 2-4 บาร์ ที่อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ 130 องศาเซลเซียส และควบคุมอัตราการไหลของไอผสมเอทานอลด้วยการเปิดวาล์วหม้อต้มระเหยร้อยละ 50 ผลการทดลอง (รูปที่ 4.11) พบว่าเมื่อความดันของคอลัมน์ดูดซับมีค่าสูงขึ้นความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยในช่วง 50 นาทีแรก ความเข้มข้นของเอทานอลที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 สถานะความดันจะมีค่าใกล้เคียงกันที่ร้อยละ 99.9 โดยน้ำหนัก จากนั้นความเข้มข้นของเอทานอลจะลดลงโดยที่ความดันดูดซับทุกค่าให้ความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์สูงกว่าจุดอะซีโอโทรป แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากระบบที่ความดันของคอลัมน์ดูดซับ 4 บาร์ จะมีความเข้มข้นของเอทานอลสูงที่สุดในช่วง 50-90 นาที และหลังจากนั้นความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์จะมีค่าลดลงโดยที่ความดันดูดซับ 3 และ 4 บาร์ ยังสามารถให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเข้มข้นของเอทานอลสูงกว่าจุดอะซีโอโทรป แต่เมื่อใช้ความดันของคอลัมน์ดูดซับ 2 บาร์ ความเข้มข้นของเอทานอลที่ผลิตออกมาได้จะต่ำกว่าจุดอะซีโอโทรป ผลการศึกษาแสดงว่าการเพิ่มความดันของคอลัมน์

ดูดซับจะทำให้ความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการดูดซับด้วยซีโอไลต์มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jain et al. (2003); Guan and Hu (2003) หาแบบจำลองและวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ สำหรับการผลิตเอทานอลในระบบดูดซับแบบสลับความดันแบบคอลัมน์เดี่ยว ซึ่งความดันนั้นจะมีส่วนในการเพิ่มความบริสุทธิ์ของเอทานอลในผลิตภัณฑ์และเอทานอลที่ผลิตได้

ตารางที่ 4.5 แสดงอัตราการผลิตเอทานอลที่ความดันดูดซับค่าต่าง ๆ จะเห็นได้ว่า อัตราการผลิตเอทานอลมีค่าเพิ่มขึ้นตามความดันของคอลัมน์ดูดซับแต่ร้อยละสูญเสียน้ำของสารละลายเอทานอลจากระบบก็สูงตามไปด้วย ซึ่งความดันของคอลัมน์ดูดซับสูงจะทำให้ไอของสารละลายที่ออกมาจากคอลัมน์ดูดซับมีความดันและอัตราการไหลสูงอาจมีการรั่วซึมตามข้อต่อและวาล์ว

ตารางที่ 4.5 อัตราการผลิตเอทานอลที่มีความเข้มข้นสูงกว่าร้อยละ 99.5 โดยน้ำหนัก ของระบบดูดซับแบบสลับความดันโดยใช้ซีโอไลต์ 3 เอ ที่ความดันของคอลัมน์ดูดซับต่าง ๆ

ความดันของ คอลัมน์ดูดซับ (บาร์)	อุณหภูมิของ คอลัมน์ดูดซับ (องศาเซลเซียส)	เปิดวาล์วหม้อ ต้มระเหย (ร้อยละ)	อัตราการผลิตเอทานอล		สูญหาย (ร้อยละ)
			$\frac{g_{EtOH}}{hr \cdot g_{adsorbent}}$	$\frac{ml_{EtOH}}{hr}$	
2	130	50	0.628	637	9.97
3	130	50	0.804	815	20.29
4	130	50	0.924	937	25.46



รูปที่ 4.11 ผลของความดันดูดซับต่อความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์จากระบบดูดซับแบบสลับความดันโดยใช้ซีโอไลต์ 3 เอ อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ 130 องศาเซลเซียส:

4.7 ความสามารถในการแยกน้ำออกจากไอผสมเอทานอลของระบบดูดซับ

แบบสลับความดันที่ใช้ตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง

การทดลองในส่วนนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องต้นแบบของระบบดูดซับแบบสลับความดันที่ใช้ตัวดูดซับจากมันสำปะหลังในการแยกน้ำออกจากไอผสมเอทานอล โดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3 ซึ่งทำการศึกษาผลของตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปร ได้แก่ ความดันของคอลัมน์ดูดซับ อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ และอัตราการไหลของสารป้อนซึ่งควบคุมด้วยร้อยละการเปิดวาล์วของหม้อต้มระเหย โดยใช้ความเข้มข้นของเอทานอลในสารป้อนร้อยละ 90-92 โดยน้ำหนัก และบรรจุตัวดูดซับจากมันสำปะหลังคอลัมน์ละ 300 กรัม ทำการทดลองที่ความดันดูดซับ 2 และ 3 บาร์ อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ 120 และ 130 องศาเซลเซียส และควบคุมอัตราการไหลของไอผสมเอทานอลด้วยการเปิดวาล์วหม้อต้มร้อยละ 25 และ 75 ผลการทดลอง (ตารางที่ 4.6)

4.7.1 ผลของความดันของคอลัมน์ดูดซับต่อความสามารถในการแยกน้ำออกจาก

ไอผสมเอทานอลด้วยตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง

การศึกษาผลของความดันของคอลัมน์ดูดซับต่อความสามารถในการดูดซับน้ำของตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง การทดลองเปรียบเทียบที่ความดันดูดซับ 2 และ 3 บาร์ โดยตารางที่ 4.6 แสดงผลของความดันของคอลัมน์ดูดซับที่มีต่อปริมาณการผลิตเอทานอลที่มีความเข้มข้นสูงกว่าร้อยละ 99.5 โดยน้ำหนักต่อปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ เมื่อพิจารณาการทดลองที่ 1 และ 2 พบว่าที่อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ 120 องศาเซลเซียส และการเปิดวาล์วหม้อต้มระเหยร้อยละ 25 อัตราการผลิตเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์สูงกว่าร้อยละ 99.5 โดยน้ำหนัก จะเพิ่มขึ้นตามความดันของคอลัมน์ดูดซับเช่นเดียวกับการทดลองที่ 5 และ 6 ที่อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ 130 องศาเซลเซียส และการเปิดวาล์วหม้อต้มระเหยร้อยละ 25 ซึ่งการเพิ่มความดันของคอลัมน์ดูดซับทำให้ปริมาณการผลิตเอทานอลเพิ่มขึ้นเช่นกัน และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Guan and Hu (2003); Jain et al. (2003) โดย Guan and Hu (2003) ศึกษาแบบจำลองของการดูดซับแบบสลับความดันแบบคอลัมน์เดียวสำหรับแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 93.54 โดยน้ำหนัก ด้วยซีโอไลต์ที่ความดัน 2-5 บาร์ และอุณหภูมิ 120-150 องศาเซลเซียส ซึ่งพบว่าการเพิ่มความดันจะช่วยเพิ่มปริมาณการผลิตเอทานอลที่มีความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 99.5 โดยน้ำหนัก ต่อปริมาณตัวดูดซับ และงานวิจัยของ Jain et al. (2003) ทำการจำลองระบบดูดซับแบบสลับความดันโดยใช้แบบจำลองที่ไม่ซับซ้อนเพื่อเป็นแนวทางเบื้องต้นในการออกแบบระบบดูดซับแบบสลับความดันโดยมีสมมุติฐาน คือ (1) อุณหภูมิคงที่ (2) ไม่พิจารณาการเกิดความดันลด (3) สมดุลการดูดซับเป็นไปตามไอโซเทิร์มการดูดซับแบบแลงมัวร์ (4) พฤติกรรมของก๊าซเป็นแบบอุดมคติ พบว่าระบบที่ใช้ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบแลงมัวร์ความดันดูดซับที่ใช้ควรจะสูงเท่าที่ระบบจะทำได้ เนื่องจากความดันดูดซับจะทำให้ความบริสุทธิ์ของสารผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นซึ่งเป็นไปตามลักษณะสมดุลการดูดซับ

พิจารณาการทดลองที่ 3 และ 4 อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับเท่ากับ 120 องศาเซลเซียส และการเปิดวาล์วหม้อต้มระเหยร้อยละ 75 พบว่าผลการทดลองที่ได้แตกต่าง คือ เมื่อความดันดูดซับเพิ่มขึ้นแต่อัตราการผลิตเอทานอลลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งอาจเป็นผลมาจากเมื่อมีการเปิดวาล์วหม้อต้มมากจะทำให้อัตราการไหลของไอเอทานอลสูง ทำให้มีปริมาณของน้ำที่เข้าสู่คอลัมน์ดูดซับมีจำนวนมากจึงเกิดการสะสมของน้ำบนตัวดูดซับมากขึ้น และเมื่อมีการเพิ่มความดันของคอลัมน์ที่สภาวะอุณหภูมิเดิม ซึ่งสภาวะดังกล่าวอาจใกล้เคียงกับจุดที่ทำให้ไอของสารละลายเอทานอลเกิดการควบแน่นและเมื่อระบบทำการดูดซับสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีความเข้มข้นลดลง ส่วนการทดลองที่ 7 และ 8 อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับเท่ากับ 130 องศาเซลเซียส และการเปิดวาล์วหม้อต้มระเหยร้อยละ 75 ค่าปริมาณการผลิตเอทานอลที่ได้ของทั้ง 2 สภาวะมีค่าใกล้เคียงกัน อาจจะเป็นผลมาจากมีปริมาณของ

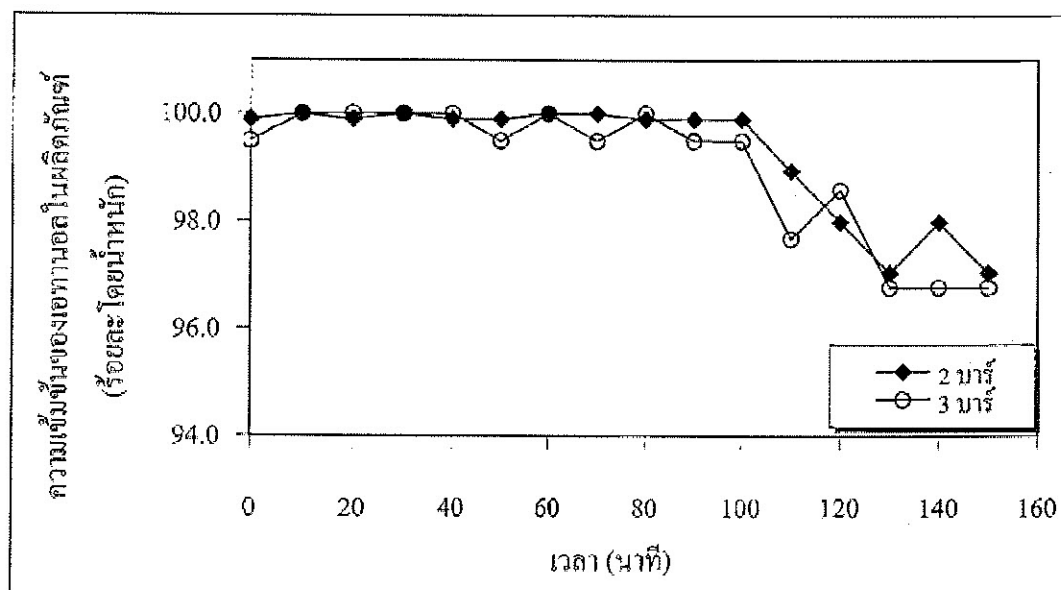
ไอผสมเอทานอลเข้าสู่คอลัมน์ดูดซับสูงเช่นเดียวกับการทดลองที่ 3 และ 4 แต่อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับมีค่าสูงกว่าสภาวะดังกล่าว จึงอาจไม่มีผลกระทบของการควบแน่นของเอทานอลเมื่อเพิ่มความดันของคอลัมน์ดูดซับ

ผลการทดลองในตารางที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าการสูญหายของสารละลายเอทานอลในระบบจะเพิ่มขึ้นเมื่อความดันของคอลัมน์ดูดซับสูง เนื่องจากความดันของคอลัมน์ดูดซับสูงอาจทำให้ไอผสมเอทานอลรั่วซึมออกตามข้อต่อและวาล์วจึงเป็นสาเหตุให้มีการสูญหายของสารละลายเอทานอล ยกเว้นการทดลองที่ 3 และ 4 เมื่อความดันของคอลัมน์ดูดซับเพิ่มขึ้นแต่ร้อยละสูญหายของสารละลายเอทานอลน้อยลง อาจมีสาเหตุมาจากไอผสมเอทานอลควบแน่นเมื่อเพิ่มความดันของคอลัมน์ดูดซับเป็น 3 บาร์ ที่อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ 120 องศาเซลเซียส การสูญหายของสารละลายเอทานอลจึงลดลง

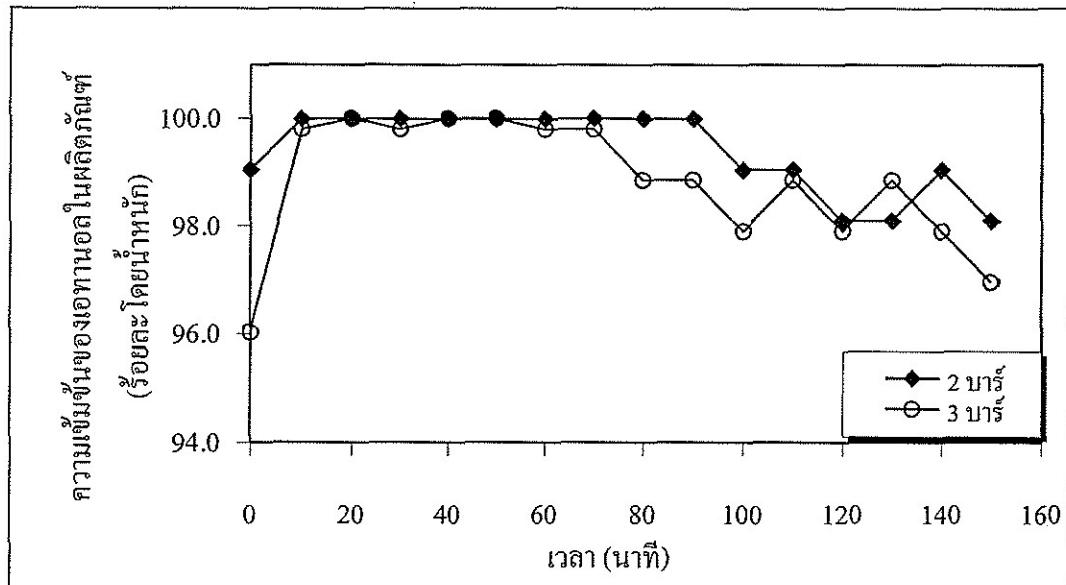
ตารางที่ 4.6 อัตราการผลิตเอทานอลที่มีความเข้มข้นของเอทานอลสูงกว่าร้อยละ 99.5 โดยน้ำหนักของระบบดูดซับแบบสลับความดัน เวลาของครึ่งวัฏจักร 4/1 นาที

การทดลอง	ความดันของคอลัมน์ดูดซับ (บาร์)	อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ (องศาเซลเซียส)	การเปิดวาล์วหม้อต้มระเหย (ร้อยละ)	อัตราการผลิตเอทานอล		สูญหาย (ร้อยละ)
				$\frac{g_{EtOH}}{hr \cdot g_{adsorbent}}$	$\frac{ml_{EtOH}}{hr}$	
1	2	120	25	0.784	596	11.43
2	3	120	25	0.800	608	14.20
3	2	120	75	0.790	601	23.25
4	3	120	75	0.716	544	12.42
5	2	130	25	0.935	711	13.79
6	3	130	25	0.939	714	16.37
7	2	130	75	0.925	703	22.4
8	3	130	75	0.913	694	26.65

รูปที่ 4.12 และ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากระบบดูดซับแบบสลับความดันและเวลาในการทำงานของเครื่อง ที่อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ 120 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าที่ความดันของคอลัมน์ดูดซับ 3 บาร์ จะมีค่าความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์เอทานอลต่ำกว่าที่ความดันของคอลัมน์ดูดซับ 2 บาร์ เนื่องจากที่อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ 120 องศาเซลเซียส มีค่าใกล้เคียงกับจุดเดือดของเอทานอลที่ 3 บาร์ (110 องศาเซลเซียส) แต่ที่สภาวะดังกล่าวก็สามารถให้ผลผลิตเป็นเอทานอลมีความเข้มข้นสูงกว่าร้อยละ 99.5 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นค่าความเข้มข้นของเอทานอลจะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเชื้อเพลิงได้

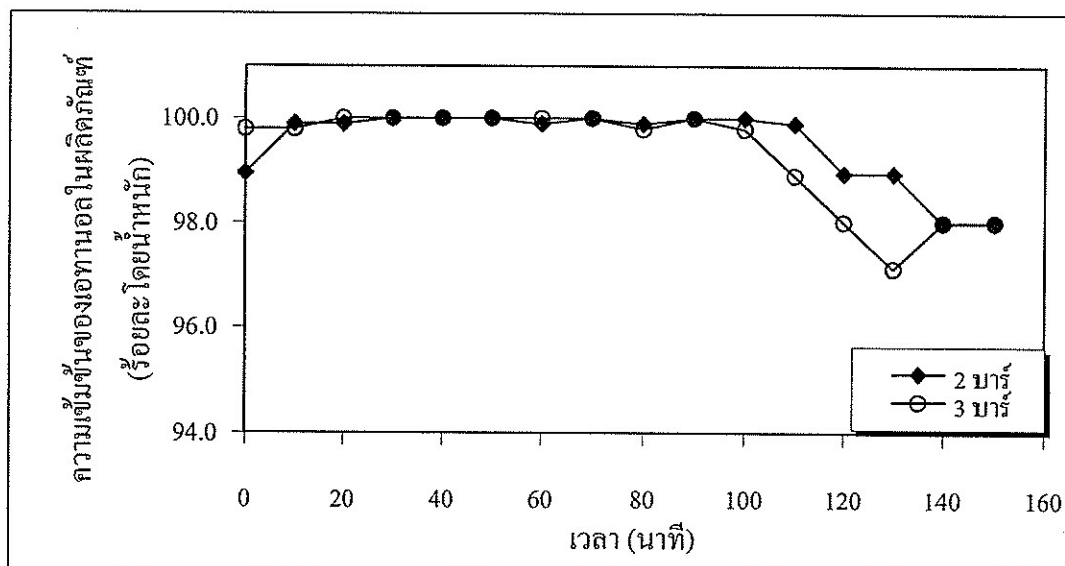


รูปที่ 4.12 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์จากระบบดูดซับแบบสลับความดัน โดยใช้ตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ 120 องศาเซลเซียส และเปิดวาล์วหม้อต้มระเหยร้อยละ 25 ที่ความดันของคอลัมน์ดูดซับต่างกัน

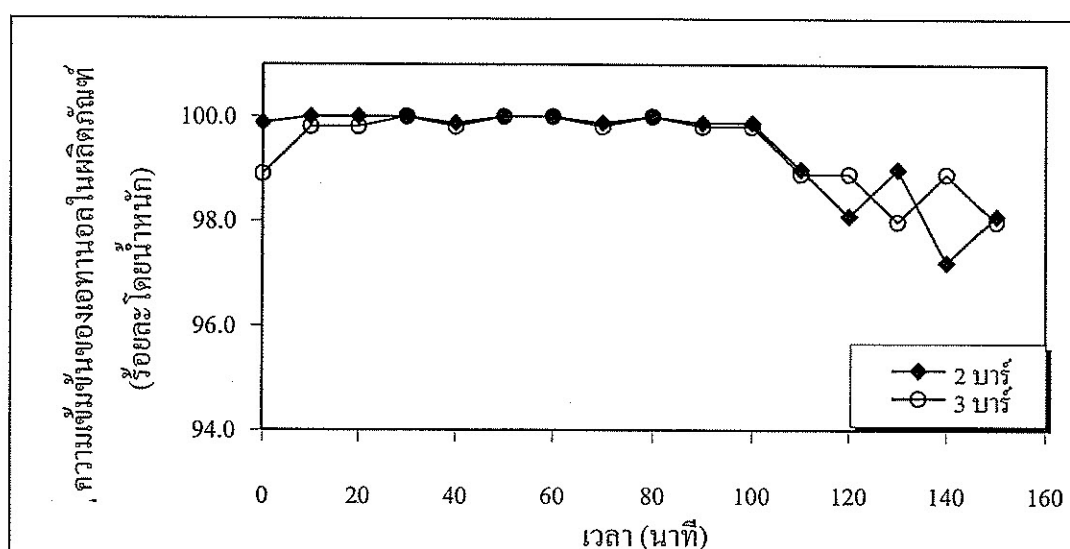


รูปที่ 4.13 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์จากระบบดูดซับแบบสลับความดัน โดยใช้ตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ 120 องศาเซลเซียส และเปิดวาล์วหม้อต้มระเหยร้อยละ 75 ที่ความดันของคอลัมน์ดูดซับต่างกัน

รูปที่ 4.14 และ 4.15 แสดงความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากระบบดูดซับแบบสลับความดัน ที่อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ 130 องศาเซลเซียส และความดันของคอลัมน์ดูดซับ 2 และ 3 บาร์ ตามลำดับ จะเห็นว่าความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากทั้ง 2 สภาวะมีค่าใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์เอทานอลที่ระยะเวลาต่างๆ คล้ายกัน ซึ่งที่อุณหภูมิของคอลัมน์เท่ากับ 130 องศาเซลเซียส ความดันของคอลัมน์ดูดซับไม่มีผลต่อความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์อย่างชัดเจน เช่นเดียวกับผลของอัตราการผลิตเอทานอล (ตารางที่ 4.7)



รูปที่ 4.14 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์จากระบบดูดซับแบบสลับความดัน โดยใช้ตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ 130 องศาเซลเซียส และเปิดวาล์วหม้อต้มระเหยร้อยละ 25 ที่ความดันของคอลัมน์ดูดซับต่างกัน

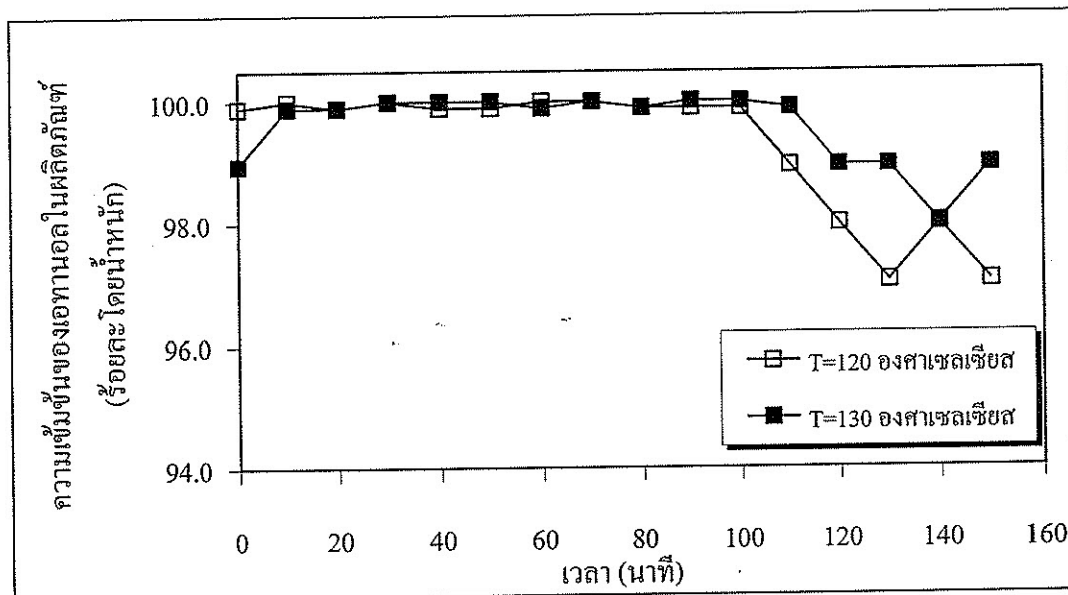


รูปที่ 4.15 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์จากระบบดูดซับแบบสลับความดัน โดยใช้ตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ 130 องศาเซลเซียส และเปิดวาล์วหม้อต้มระเหยร้อยละ 75 ที่ความดันของคอลัมน์ดูดซับต่างกัน

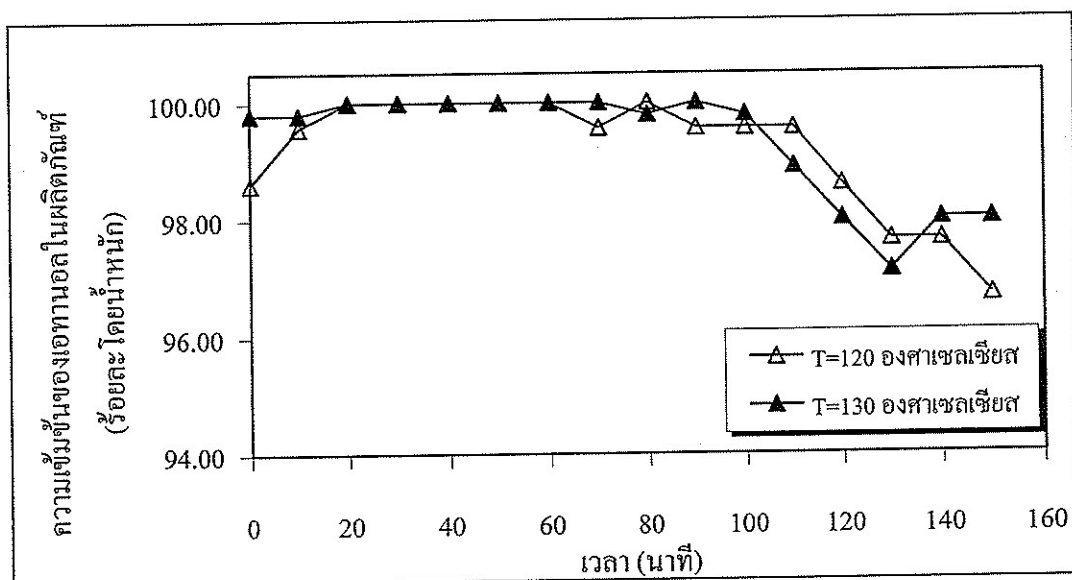
4.7.2 ผลของอุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับต่อความสามารถในการแยกน้ำออกจาก

ไอผสมเอทานอลด้วยตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง

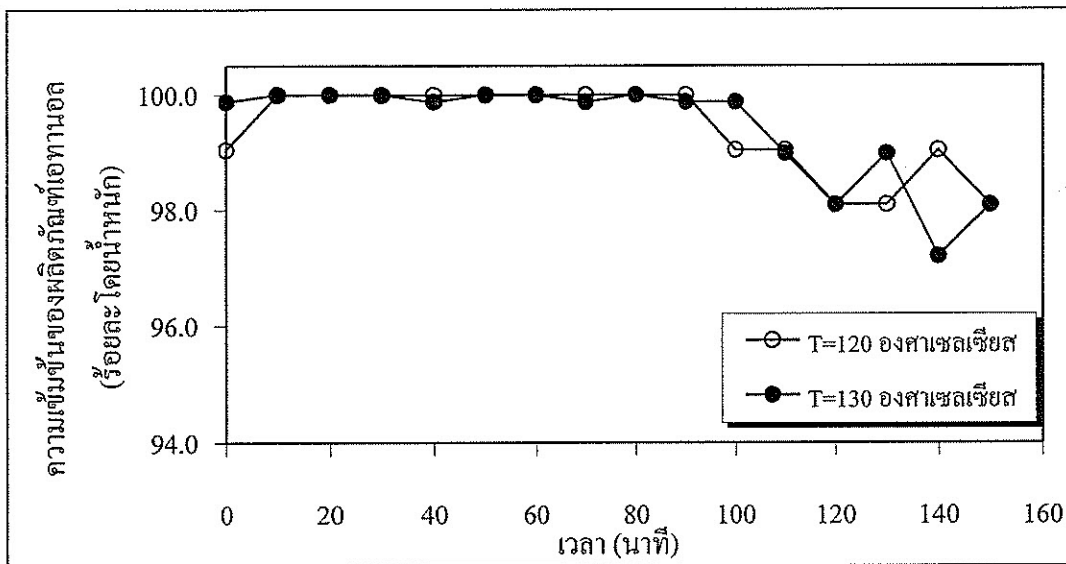
การศึกษาผลของอุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับต่อความสามารถในการแยกน้ำออกจากไอผสมเอทานอล ทำโดยการทดลองที่อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ 120 และ 130 องศาเซลเซียส ความดันของคอลัมน์ดูดซับ 2 และ 3 บาร์ การเปิดวาล์วหม้อต้มร้อยละ 25 และ 75 และเวลาในการดำเนินครั้งวัฏจักรการดูดซับแบบ 4/1 นาที ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.16-4.19 จะพบว่าที่อุณหภูมิ 120 และ 130 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์เป็นไปในลักษณะเดียวกัน กล่าวคือที่ความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าไม่ต่างกันมากนักในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการโดยจะได้ผลิตภัณฑ์เอทานอลที่มีความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 99.5 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นความเข้มข้นของเอทานอลที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิง แต่เมื่อเวลาผ่านไปโดยเฉลี่ย 100 นาที ความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการที่ทั้งสองอุณหภูมิจะมีค่าลดลง ซึ่งแสดงว่าตัวดูดซับจากมันสำปะหลังเริ่มอิ่มตัวจากการดูดซับน้ำ ผลการทดลองโดยภาพรวมที่ได้จากการดำเนินกระบวนการที่ทุกสภาวะ พบว่าความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการที่อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ 130 องศาเซลเซียส จะสูงกว่ากระบวนการที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส แต่ความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์ที่ได้ตลอดทั้งการทดลองในทั้งสองกระบวนการล้วนมีค่าสูงกว่าจุดอะซีโอโทรป เมื่อพิจารณาอัตราการผลิตเอทานอล (ผลิตภัณฑ์ที่มีความเข้มข้นของเอทานอลสูงกว่าร้อยละ 99.5 โดยน้ำหนัก ที่ได้ต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับที่ใช้ต่อเวลา แสดงในตารางที่ 4.6) พบว่าที่อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ 120 องศาเซลเซียส (การทดลองที่ 1-4) จะได้อัตราการผลิตเอทานอลเท่ากับ 0.716-0.800 กรัมต่อกรัมตัวดูดซับต่อชั่วโมง ส่วนที่อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ 130 องศาเซลเซียส (การทดลองที่ 5-8) ได้อัตราการผลิตเอทานอลเท่ากับ 0.913-0.939 กรัมต่อกรัมตัวดูดซับต่อชั่วโมง ซึ่งมากกว่ากระบวนการที่ 120 องศาเซลเซียส อย่างเห็นได้ชัด ข้อมูลที่ได้แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับเท่ากับ 130 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเอทานอลบริสุทธิ์ด้วยเครื่องต้นแบบของระบบดูดซับแบบสลับความดันที่ใช้ตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง



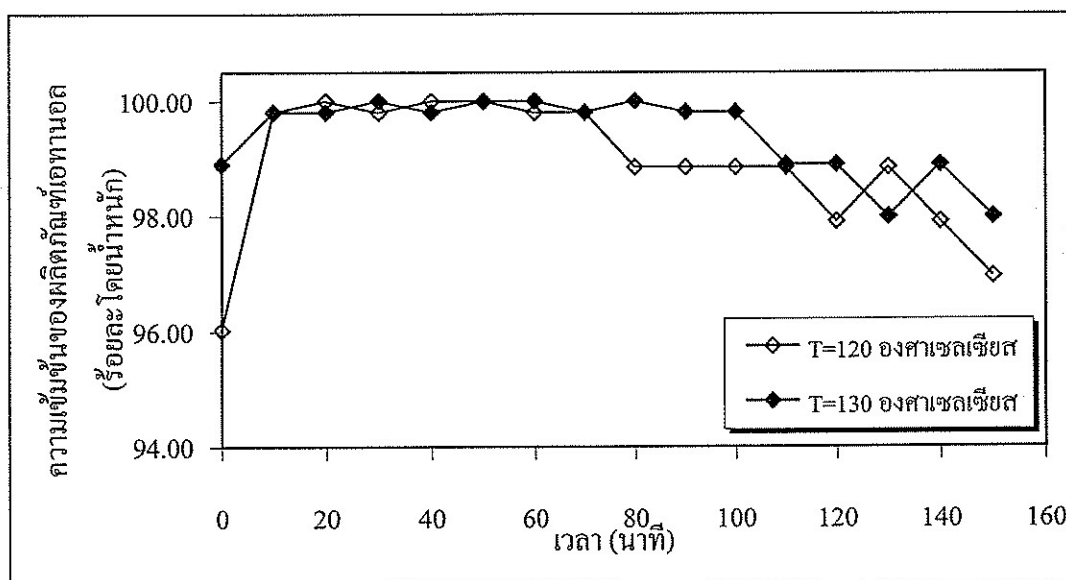
รูปที่ 4.16 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์จากระบบดูดซับแบบสลับความดัน โดยใช้ตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง ความดันของคอลัมน์ดูดซับ 2 บาร์ เป็ดวาล์วหม้อต้มระเหยร้อยละ 25 อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับต่างกัน



รูปที่ 4.17 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์จากระบบดูดซับแบบสลับความดัน โดยใช้ตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง ความดันของคอลัมน์ดูดซับ 3 บาร์ เป็ดวาล์วหม้อต้มระเหยร้อยละ 25 อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับต่างกัน



รูปที่ 4.18 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์จากระบบดูดซับแบบสลับความดัน โดยใช้ตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง ความดันของคอลัมน์ดูดซับ 2 บาร์ เป็ดวาล์วหม้อต้มระเหยร้อยละ 75 อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับต่างกัน



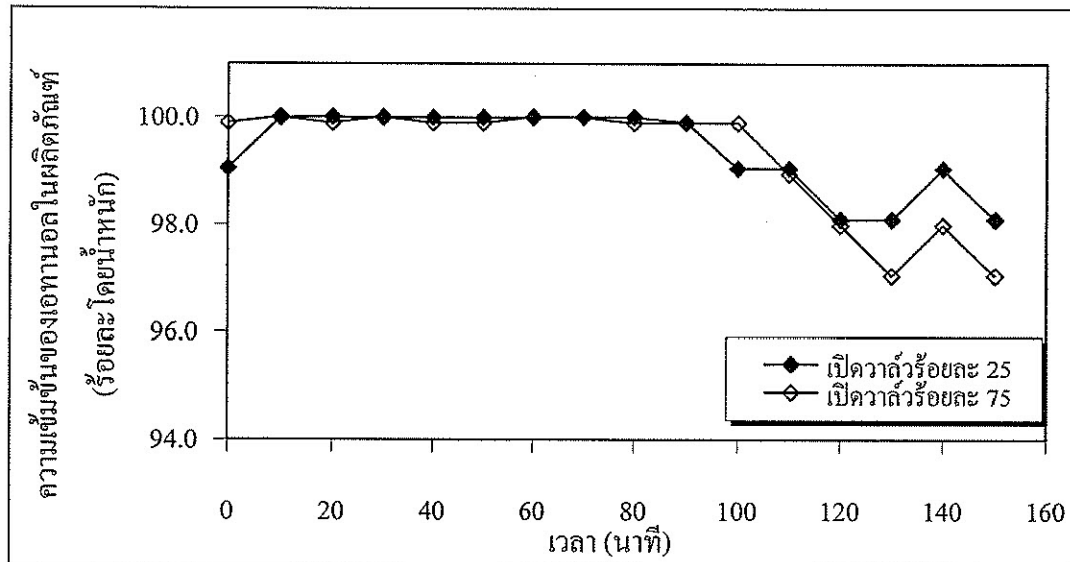
รูปที่ 4.19 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์จากระบบดูดซับแบบสลับความดัน โดยใช้ตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง ความดันของคอลัมน์ดูดซับ 3 บาร์ เป็ดวาล์วหม้อต้มระเหยร้อยละ 75 อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับต่างกัน

4.7.3 ผลของอัตราการไหลของสารป้อนต่อความสามารถในการแยกน้ำออกจาก

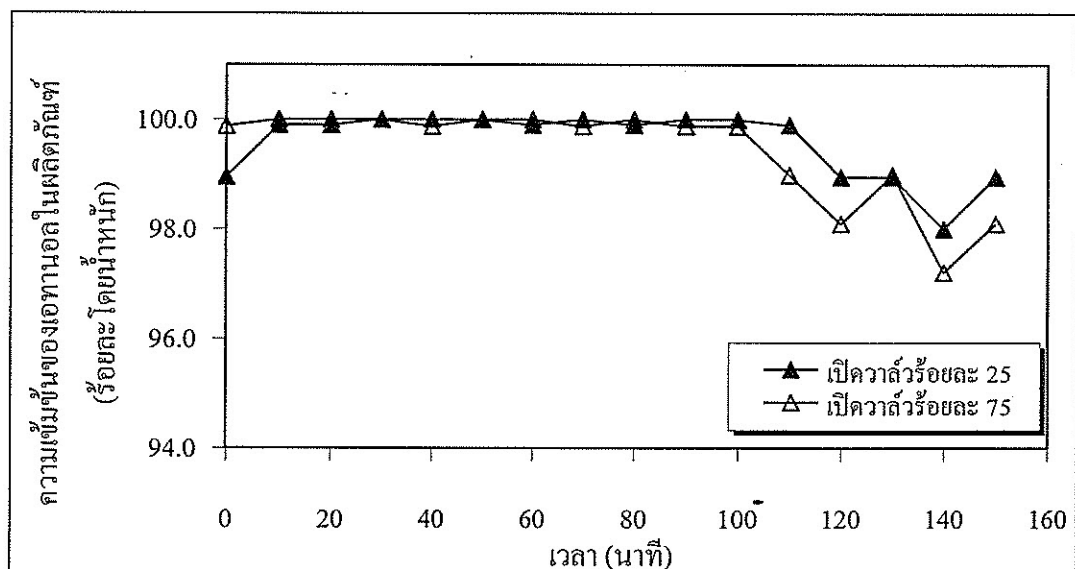
ไอผสมเอทานอลด้วยตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง

ผลของอัตราการไหลของสารป้อนต่อความสามารถในการดูดซับน้ำของตัวดูดซับจากมันสำปะหลังในเครื่องค้นแบบของระบบดูดซับแบบสลับความดัน ที่ระยะเวลาของครึ่งวัฏจักร 4/1 นาที และเปิดวาล์วหม้อต้มระเหยของสารป้อนร้อยละ 25 และ 75 แสดงดังรูปที่ 4.20-4.23 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของสารป้อนโดยเปิดวาล์วหม้อต้มมากขึ้น จะทำให้ความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการดูดซับมีค่าลดลง ทั้งนี้การเพิ่มอัตราการไหลของสารป้อนจะทำให้ระยะเวลาที่ไอผสมเอทานอลจะสัมผัสกับตัวดูดซับและเกิดการดูดซับน้ำได้น้อยลง ดังได้กล่าวไว้ในงานวิจัยของ Carmo and Gubulin (2002) และเมื่อเปิดวาล์วหม้อต้มระเหยร้อยละ 25 จะทำให้มีระยะเบรคทรีที่สูงกว่าการเปิดวาล์วหม้อต้มระเหยร้อยละ 75 เนื่องจากการเปิดวาล์วหม้อต้มระเหยให้มากขึ้นจะทำให้ไอของสารป้อนและปริมาณน้ำที่เข้าสู่คอลัมน์ดูดซับเพิ่มมากขึ้น ทำให้สัดส่วนระหว่างโมเลกุลของน้ำกับพื้นที่ว่างของหมู่ไฮดรอกซิลมีค่าเพิ่มขึ้น จำนวนพื้นที่ว่างของหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่ในโมเลกุลของกลูโคสจะมีค่าลดลงทำให้ตัวดูดซับจึงอิ่มตัวเร็วขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับน้ำลดลง และที่อัตราการไหลของไอของสารป้อนมีค่าต่ำ (เปิดวาล์วหม้อต้มระเหยร้อยละ 25) จะทำให้มีระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างไอผสมเอทานอลและตัวดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถในการแยกน้ำออกจากเอทานอลเพิ่มขึ้นและความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์เอทานอลมีค่าสูงขึ้นด้วย

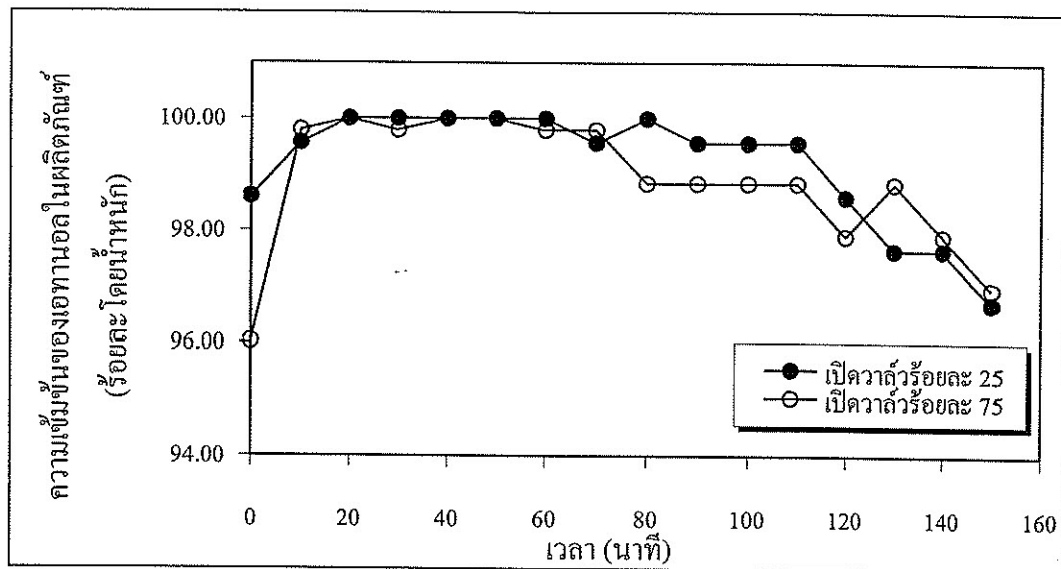
ตารางที่ 4.6 แสดงอัตราการผลิตเอทานอลที่มีความเข้มข้นของเอทานอลสูงกว่าร้อยละ 99.5 โดยน้ำหนัก เมื่อพิจารณากระบวนการที่ใช้ความดันของคอลัมน์ดูดซับและอุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับเดียวกันแต่มีอัตราการไหลของสารป้อนต่างกัน พบว่าเมื่อเปิดวาล์วหม้อต้มมากขึ้นหรืออัตราการไหลของสารป้อนมีค่าสูงขึ้น อัตราการผลิตเอทานอลที่เตรียมได้จะมีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่แสดงถึงประสิทธิภาพของสารผลิตภัณฑ์ดังได้กล่าวไปแล้ว และนอกจากนั้นเมื่อเปิดวาล์วของหม้อต้มในร้อยละที่สูงขึ้นจะทำให้สารป้อนที่เข้าสู่คอลัมน์ดูดซับมีปริมาณมาก และอัตราการไหลของสารป้อนที่สูงอาจมีการรั่วซึมออกตามข้อต่อและวาล์วจึงทำให้ค่าการสูญหายของสารละลายเอทานอลมีค่าสูง



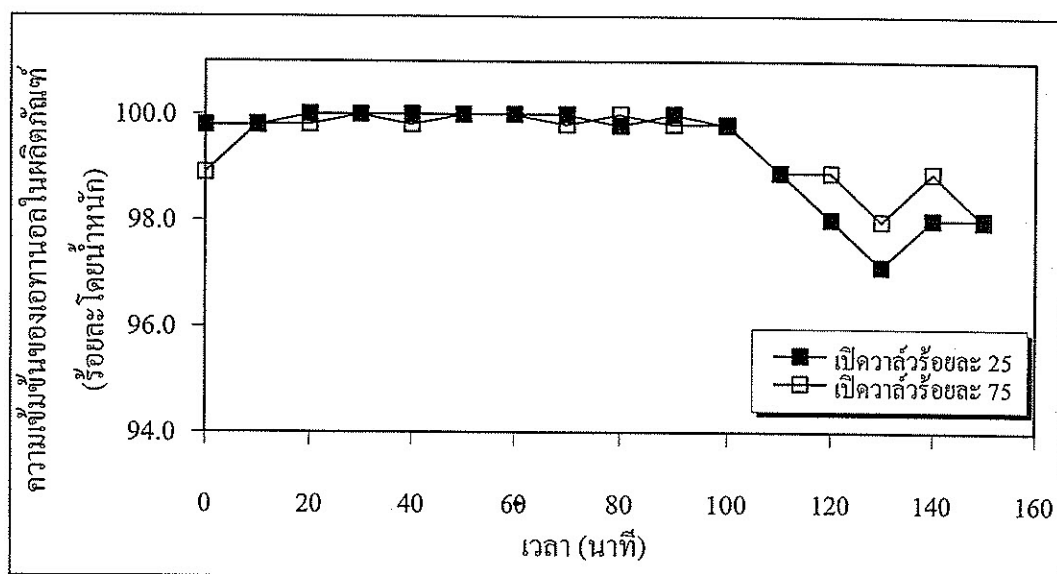
รูปที่ 4.20 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์จากระบบดูดซับแบบสลับความดัน โดยใช้ตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ 120 องศาเซลเซียส ความดันของคอลัมน์ดูดซับ 2 บาร์ เปิดวาล์วหม้อต้มระเหยต่างกัน



รูปที่ 4.21 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์จากระบบดูดซับแบบสลับความดัน โดยใช้ตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ 130 องศาเซลเซียส ความดันของคอลัมน์ดูดซับ 2 บาร์ เปิดวาล์วหม้อต้มระเหยต่างกัน



รูปที่ 4.22 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์จากระบบดูดซับแบบสลับความดัน โดยใช้ตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ 120 องศาเซลเซียส ความดันของคอลัมน์ดูดซับ 3 บาร์ เปิดวาล์วหม้อต้มระเหยต่างกัน



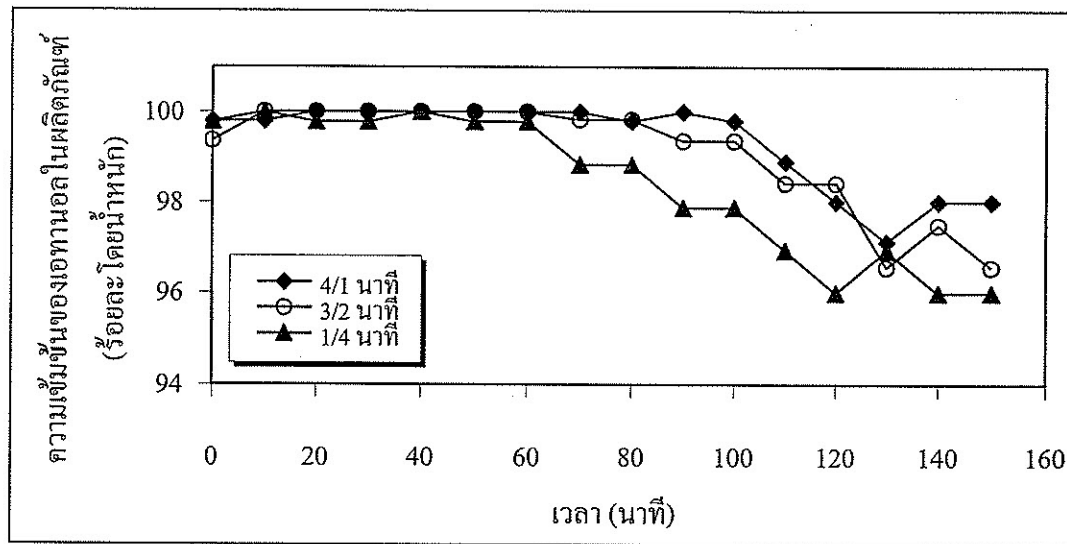
รูปที่ 4.23 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์จากระบบดูดซับแบบสลับความดัน โดยใช้ตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ 130 องศาเซลเซียส ความดันของคอลัมน์ดูดซับ 3 บาร์ เปิดวาล์วหม้อต้มระเหยต่างกัน

4.7.4 ผลของระยะเวลาของเครื่องจักรการดูดซับต่อความสามารถในการแยกน้ำ

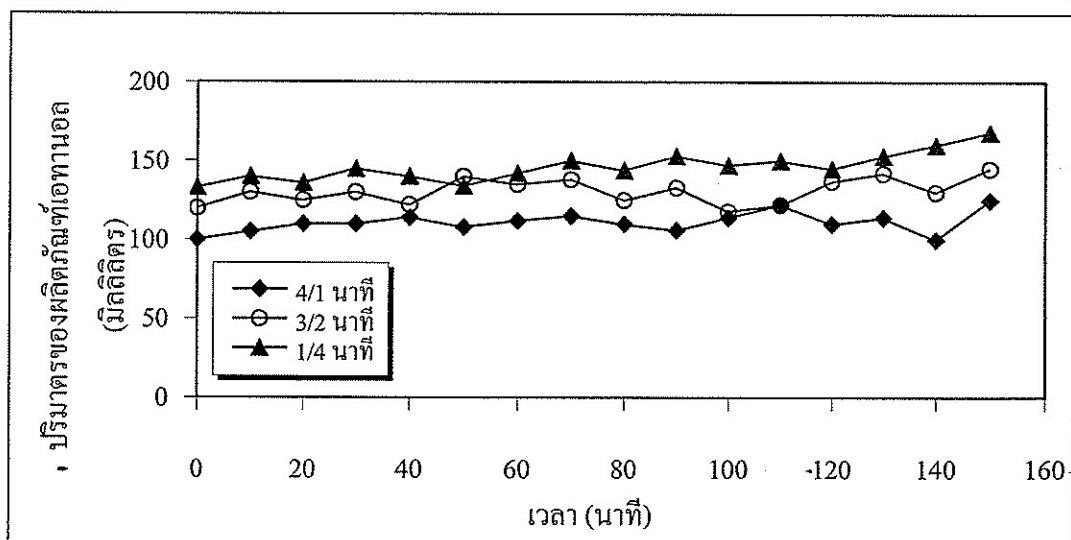
ออกจากไอผสมเอทานอลด้วยตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง

การศึกษาผลของระยะเวลาของเครื่องจักรการดูดซับ ทำได้โดยการทดลองการดูดซับ ที่ความดันของคอลัมน์ดูดซับ 3 บาร์ อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ 130 องศาเซลเซียส และเปิดวาล์ว หม้อต้มระเหยร้อยละ 25 ซึ่งเป็นสภาวะที่อัตราการผลิตเอทานอลมีค่าสูงที่สุด โดยเปรียบเทียบผลที่ได้เมื่อใช้ระยะเวลาการดำเนินเครื่องจักรการดูดซับที่แตกต่างกัน เมื่อระยะเวลาของเครื่องจักร แบบ 4/1 นาที อีก 2 แบบ คือ แบบ 3/2 นาที (เพิ่มความดัน 3 นาที และ ดูดซับ 2 นาที) และแบบ 1/4 นาที (เพิ่มความดัน 1 นาที และ ดูดซับ 4 นาที) ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.24 โดยพบว่าการเพิ่มระยะเวลาในการเพิ่มความดันของระบบจะส่งผลให้ความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากขณะที่ระบบทำการเพิ่มความดันอาจมีไอผสมเอทานอลบางส่วนสัมผัสกับ ตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง ซึ่งมีส่วนในการเพิ่มระยะเวลาสัมผัสระหว่างไอผสมเอทานอลกับตัวดูดซับ ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับน้ำของตัวดูดซับจากมันสำปะหลังสูงและความบริสุทธิ์ของเอทานอลในผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าสูงขึ้น

รูปที่ 4.25 แสดงปริมาตรของผลิตภัณฑ์เอทานอลที่เตรียมได้จากการดูดซับแบบสลับ ความดันที่ระยะเวลาการดำเนินวัฏจักรแบบต่าง ๆ พบว่าปริมาณของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นตามระยะเวลา การดูดซับของวัฏจักร ดังนั้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการดูดซับให้มีค่ามากจึงทำให้ปริมาตรของ ผลิตภัณฑ์เอทานอลมีค่าสูงขึ้นด้วย แต่จากผลการทดลองที่พิจารณาความเข้มข้นของเอทานอลใน ผลิตภัณฑ์ ที่ระยะเวลาของเครื่องจักรที่ให้ระยะเวลาการดูดซับมีค่ามากจะให้ความบริสุทธิ์ของเอทานอล ลดลง ผลการศึกษานี้จึงสรุปได้ว่าระยะเวลาการดำเนินเครื่องจักรที่เหมาะสมสำหรับเครื่องดันแบบ ของระบบดูดซับแบบสลับความดันที่ใช้ตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง คือ 4/1 นาที ซึ่งเป็นระยะเวลา ของเครื่องจักรแบบเดียวกับเมื่อใช้ซีโอไลต์ 3 เอ



รูปที่ 4.24 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทานอลในผลิตภัณฑ์จากระบบดูดซับแบบสลับความดัน โดยใช้ตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ 130 องศาเซลเซียส ความดันของคอลัมน์ดูดซับ 3 บาร์ เปิดวาล์วหม้อต้มระเหยร้อยละ 25 เวลาของครั้งวัฏจักรต่างกัน



รูปที่ 4.25 ปริมาณของเอทานอลผลิตภัณฑ์จากระบบดูดซับแบบสลับความดัน โดยใช้ตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ 130 องศาเซลเซียส เปิดวาล์วหม้อต้มระเหยร้อยละ 25 ความดันของคอลัมน์ดูดซับ 3 บาร์ เวลาของครั้งวัฏจักรต่างกัน

4.8 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการดูดซับด้วยการออกแบบการทดลอง

เชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3

การศึกษานี้จะนำข้อมูลที่ได้การทดลองไปทำการวิเคราะห์ผลตามการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3 เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรสำหรับเครื่องต้นแบบของระบบดูดซับแบบสลับความดัน คือ ความดันของคอลัมน์ดูดซับ (P) อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ (T) และอัตราการไหลของสารป้อน (V) ที่มีต่ออัตราการผลิตเอทานอลโดยผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม Minitab 15 พบว่าอัตราการผลิตเอทานอลมีความสัมพันธ์กับตัวแปรทั้ง 3 ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{อัตราการผลิตเอทานอล} = & 3.13877P + 0.06723T + 0.013077V \\ & - 0.02372PT - 0.00569PV - 1.00513 \times 10^{-4}TV \\ & + 4.34188 \times 10^{-5}PTV - 7.88431 \end{aligned} \quad (4.1)$$

เมื่อ อัตราการผลิตเอทานอล มีหน่วยเป็น $\frac{g_{EtOH}}{hr \cdot g_{adsorbent}}$

P คือ ความดันของคอลัมน์ดูดซับ (บาร์)

T คือ อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ (องศาเซลเซียส)

V คือ อัตราการไหลของสารป้อน (มิลลิลิตรต่อนาที)

เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์ของตัวแปรทุกตัวในสมการที่ได้ พบว่าทุกตัวแปรมีอิทธิพลต่ออัตราการผลิตเอทานอลทั้งสิ้นโดยตัวแปรที่มีอิทธิพลมากที่สุด คือ ความดันของคอลัมน์ดูดซับ รองลงมา คือ อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ และอัตราการไหลของสารป้อน ตามลำดับ เมื่อพิจารณาถึงผลรวมของ 2 ตัวแปร จะมีอิทธิพลให้อัตราการผลิตเอทานอลมีค่าลดลงโดยผลรวมระหว่างความดันของคอลัมน์ดูดซับกับอัตราการไหลจะมีอิทธิพลมากที่สุด รองลงมาคือผลรวมระหว่างความดันของคอลัมน์ดูดซับกับอุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ และผลรวมของอุณหภูมิกับอัตราการไหลจะมีอิทธิพลใกล้เคียงกับผลรวมของทั้ง 3 ตัวแปร ซึ่งมีอิทธิพลต่ออัตราการผลิตเอทานอลน้อยมาก

จากนั้นใช้สมการ (4.1) ไปหาสภาวะที่ทำให้อัตราการผลิตเอทานอลมีค่าสูงสุดของระบบดูดซับแบบสลับความดันโดยใช้โปรแกรม Minitab 15 ได้ดังนี้ ความดันของคอลัมน์ดูดซับ 3 บาร์ อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ 130 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของสารป้อน 342 มิลลิลิตรต่อ นาที จะสามารถผลิตเอทานอลได้ $0.973 \frac{g_{EtOH}}{hr \cdot g_{adsorbent}}$

ตารางที่ 4.7 ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดลองและจากสมการ

การทดลอง	ความดันของคอลัมน์ดูดซับ (บาร์)	อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ (°C)	อัตราการไหลของสารป้อน (ml/min)	อัตราการผลิตเอทานอล ($\text{g}_{\text{EtOH}} / \text{hr} \cdot \text{g}_{\text{adsorbent}}$)		ความคลาดเคลื่อน (ร้อยละ)
				การทดลอง	สมการ	
1	2	120	342	0.784	0.785	0.118
2	3	120	600	0.800	0.801	0.114
3	2	120	459	0.790	0.791	0.116
4	3	120	795	0.716	0.717	0.126
5	2	130	342	0.935	0.936	0.107
6	3	130	600	0.939	0.940	0.105
7	2	130	459	0.925	0.926	0.108
8	3	130	795	0.913	0.914	0.107
9	2	120	380	1.381	0.787	4.998
10	3	120	695	1.366	0.760	4.472
11	2	130	380	1.076	0.933	0.746
12	3	130	695	1.506	0.927	0.289

จากตารางที่ 4.7 เมื่อนำค่าที่คำนวณได้จากสมการการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2^3 เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองจะมีค่าความคลาดเคลื่อนไปจากสมการเล็กน้อย ซึ่งได้ทำการทดลองที่เปิดวาล์วหม้อต้มระเหยร้อยละ 50 สมการที่ 5.1 ก็สามารถใช้อธิบายได้และมีความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อย ดังนั้นสมการที่ได้จากการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2^3 สามารถใช้สำหรับอธิบายอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ต่ออัตราการผลิตเอทานอลที่ได้จากเครื่องต้นแบบของระบบดูดซับแบบสลับความดันในเบื้องต้นได้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับน้ำของตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง โดยทำการทดลองในระบบดูดซับแบบเบดนิ่งและหาไอโซเทิร์มการดูดซับน้ำของตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง รวมทั้งนำตัวดูดซับไปทดลองในเครื่องค้นแบบของกระบวนการดูดซับแบบสลับความดันเพื่อศึกษาอิทธิพลที่มีผลต่อความสามารถในน้ำของตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง โดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3 สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1.1 ความสามารถในการดูดซับน้ำของตัวดูดซับจากมันสำปะหลังและอิทธิพลของปัจจัยในระบบการดูดซับแบบเบดนิ่ง

ตัวดูดซับจากมันสำปะหลังสามารถใช้เป็นตัวดูดซับสำหรับการแยกน้ำออกจากไอผสมเอทานอลได้ โดยเพิ่มความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์เอทานอลมากกว่าร้อยละ 99.5 โดยน้ำหนัก ซึ่งความสามารถในการดูดซับน้ำของตัวดูดซับจากมันสำปะหลังจะขึ้นกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารป้อนและปริมาณของตัวดูดซับ เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของเอทานอลในสารป้อนเพิ่มขึ้นจะทำให้ความสามารถในการดูดซับน้ำลดลงเนื่องจากปริมาณน้ำในสารป้อนมีค่าน้อยลง การเพิ่มปริมาณตัวดูดซับจะมีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระทำให้มีพื้นที่ในการดูดซับน้ำมาก จึงเป็นส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น

5.1.2 สมการไอโซเทิร์มที่สภาวะสมดุลของตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง

สมการไอโซเทิร์มการดูดซับน้ำของตัวดูดซับจากมันสำปะหลังจะมีรูปแบบการดูดซับเป็นแบบไอโซเทิร์มของแลงมัวร์แสดงดังนี้

$$\frac{q}{0.0976} = \frac{15.77C_e}{1+15.77C_e}$$

เมื่อ q คือ ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ (กรัมต่อกรัมตัวดูดซับ)
 C_e คือ ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล (กรัมต่อมิลลิลิตร)

5.1.3 ผลของตัวแปรต่อความสามารถในการแยกน้ำออกจากไอผสมเอทานอลโดยใช้

ตัวดูดซับจากมันสำปะหลังในระบบดูดซับแบบสลับความดัน

การศึกษานี้ใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3 ในการศึกษาผลของปัจจัยต่อความสามารถในการดูดซับน้ำของตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง โดยศึกษา 3 ตัวแปร คือ ความดันของคอลัมน์ดูดซับ (P) อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ (T) และอัตราการไหลของสารป้อน (%V) เพื่อวิเคราะห์ผลของปัจจัยต่ออัตราการผลิตเอทานอลในหน่วยของ ($g_{EtOH}/hr \cdot g_{adsorbent}$) พิจารณาที่ความเข้มข้นของเอทานอลมากกว่าร้อยละ 99.5 โดยน้ำหนัก แสดงดังนี้

$$\begin{aligned} \text{อัตราการผลิตเอทานอล} = & 3.13877P + 0.06723T + 0.013077V \\ & - 0.02372PT - 0.00569PV - 1.00513 \times 10^{-4}TV \\ & + 4.34188 \times 10^{-5}PTV - 7.88431 \end{aligned}$$

เมื่อ P คือ ความดันของคอลัมน์ดูดซับ (บาร์)
T คือ อุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ (องศาเซลเซียส)
V คือ อัตราการไหลของสารป้อน (มิลลิลิตรต่อนาที)

จากสมการแสดงให้เห็นว่าทั้ง 3 ปัจจัยจะมีอิทธิพลต่อปริมาณของผลิตภัณฑ์เอทานอลทั้งหมด โดยความดันภายในคอลัมน์ดูดซับมีอิทธิพลมากที่สุดและอุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับมีอิทธิพลน้อยที่สุดสำหรับระบบการดูดซับด้วยวิธีการสลับความดัน ส่วนผลจากการทดลองพบว่าเมื่อความดันภายในคอลัมน์ดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้กระบวนการดูดซับเกิดได้ดีขึ้น และเมื่ออัตราการไหลของสารป้อนที่เข้าสู่คอลัมน์ดูดซับมีอัตราการไหลช้าลง จะส่งผลให้การดูดซับน้ำของตัวดูดซับจากมันสำปะหลังเกิดได้ดีขึ้น เนื่องจากมีระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างไอของสารละลายเอทานอลกับตัวดูดซับจากมันสำปะหลังนานขึ้น และอุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับจะมีอิทธิพลควบคู่กับความดันภายในคอลัมน์ดูดซับ

เมื่อเปรียบเทียบการนำตัวดูดซับไปใช้ในเครื่องดันแบบของระบบดูดซับแบบสลับความดันพบว่าตัวดูดซับจากมันสำปะหลังมีความสามารถในการแยกน้ำออกจากไอผสมเอทานอล ใกล้เคียงกับซีโอไลต์ 3 เอ

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ปรับปรุงและพัฒนาเครื่องต้นแบบของกระบวนการดูซับแบบสลับความดันเพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ได้มากขึ้น เช่น ปรับกล่องควบคุมระยะเวลาในการเปิด-ปิด วาล์วโซลินอยด์เพื่อรองรับช่วงระยะเวลาในการดำเนินครั้งวัฏจักรที่กว้างขึ้น

5.2.2 ศึกษาการจัดทำและติดตั้งอุปกรณ์ในเครื่องต้นแบบของกระบวนการดูซับด้วยวิธีสลับความดันให้สามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่อง

บรรณานุกรม

- กรมส่งเสริมการเกษตร. (2527). การปลูกมันสำปะหลัง. โรงพิมพ์กรมส่งเสริมการเกษตร. กรุงเทพมหานคร.
- ฐิติ เลิศวรศิริกุล ธารพจน์ วิทิตสานต์ และ วิชชากร จารุศิริ. (2551). การแยกแบบดูดซับของของผสมเอทานอล-น้ำโดยโมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3 A และ 4 A. วารสารพลังงาน ปีที่ 9 ฉบับปี 2551.
- ณิรนาถ ควรเชิดชู และ สุจิตรา วงศ์เกษมจิตต์. (ม.ป.ป.). แก๊สโซฮอลล์ : เทคโนโลยีสะอาดช่วยเสริมธุรกิจประเทศไทย [ออนไลน์]. ได้จาก : <http://www.vcharkarn.com/varticle/16376/1>
- เคชา นัตริศิริเวช. (2552). กระบวนการดูดซับ. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพมหานคร. 226 น.
- ธีรพัฒน์ มัชฌิมภาโร และ สนธยา หนูเกื้อ. (ม.ป.ป.). การศึกษาการแยกน้ำออกจากเอทานอลด้วยกระบวนการ Pressure Swing Adsorption [ออนไลน์]. ได้จาก : <http://Phoenix.eng.psu.ac.th/Chem/File/445/9.manuscript.pdf>
- นิธิยา รัตนปนนท์. (2545). เคมีอาหาร. โอเดียนสโตร์. กรุงเทพมหานคร. 504 น.
- ปัญญากร เจียรเวทย์. (2550). จัปตาข้าวอำนาจพลังงานยุคใหม่ที่ชื่อว่า เอทานอล วารสารเกียรติ. ปีที่ 3 ฉบับที่ 1 มกราคม 2550.
- พัศตร์ประไพ ประจำเมือง และ วิชัย ลีลาวัชรมาศ. (2546). เอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการย่อยแป้ง. วารสารศูนย์บริการวิชาการ. ปีที่ 11 ฉบับที่ 4 ตุลาคม-ธันวาคม 2546.
- ภัทรสินี ภัทรโกศล. (2550). สถิติเพื่อการวิจัยทางวิทยาศาสตร์. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพมหานคร. 436 น.
- มูลนิธิสถาบันพัฒนามันสำปะหลังแห่งประเทศไทย [ออนไลน์]. (ม.ป.ป.). ได้จาก : <http://www.tapiocathai.org>.
- รัตนา จิระรัตนานนท์. (2543). กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นสังเคราะห์. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. กรุงเทพมหานคร. 343 น.
- สุนีย์ โชตินิรนาท. (2539). การผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากกากมันสำปะหลังโดยใช้เอนไซม์และอัลตราฟิเทรชัน. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

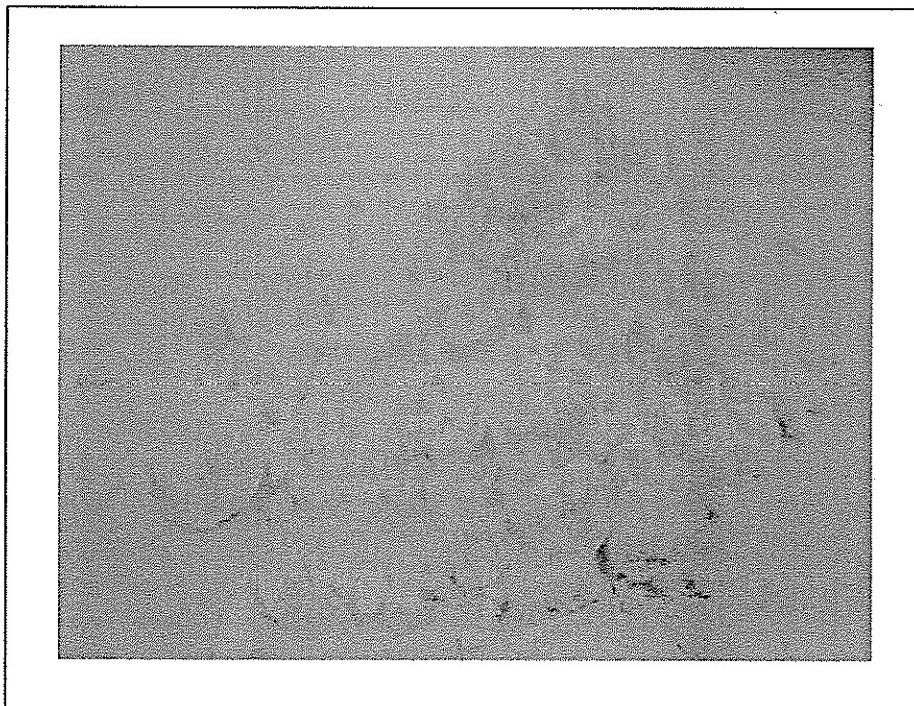
- Al-Asheh, S., Banat, F., and Al-Lagtah, N. (2004). **Separation of ethanol-water mixtures sing molecular sieves and biobased adsorbents**. Chemical Engineering Research and Design, Vol. 82, pp. 855-86.
- Anderson, L.E., Gulati, M., Westgate, P.J., Kvam, E.P., Bowman, K., and Ladisch, M.R. (2001). **Synthesis and optimization of a new starch-based adsorption for dehumidification of air in a pressure-swing dryer**. Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 35, pp. 1180-1187.
- Beery, K.E., and Ladisch, M.R. (2001). **Chemistry and Properties of starch based desiccants**. Enzyme. Microb. Technol., Vol. 28, pp. 573-581.
- Carmo, M.J., and Gubulin, J.C. (2002). **Ethanol-Water Separation in the PSA Process**. Kluwer Academic Publishers. Adsorption, Vol. 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, Vol. 45, pp. 747-754.
- Cruz, P., Santos, J.C., Magalhaes, F.D., and Mendes, A. (2003). **Cyclic adsorption separation processes: analysis strategy and optimization procedure**. Chemical Engineering Science, Vol. 58, pp. 3148-3158.
- Fawzi, A.B., Fahmi, A., and Simandl, J. (2000). **Analysis of vapor-liquid equilibrium of ethanol-water system via headspace gas chromatography : effect of molecular sieves**. Separation Purification Technology, Vol. 18, pp. 111-118.
- Guan, J., and Hu, X. (2003). **Simulation and analysis of pressure swing adsorption : ethanol drying process by the electrical analogue**. Separation Purification Technology, Vol. 31, pp. 31-35.
- Han, X., Ma, X., Liu, J., and Li. H. (2009). **Adsorption characterization of water and ethanol on wheat starch and wheat gluten using inverse gas chromatography**. Carbohydrate Polymers, Vol. 78, pp. 533-537.
- Jain, S., Moharir, A.S., Li, P., and Wozny, G. (2003). **Heuris design of pressure swing adsorption : a preliminary study**. Separation Purification Technology, Vol. 33, pp. 25-43.
- Jee, J.G., Kim, M.B., and Lee, C.H. (2005). **Pressure Swing Adsorption Processes to Purify Oxygen using a Carbon Molecular Sieve**. Chemical Engineering Science, Vol. 60, pp. 869-882.

- Kaminski, W., Marszałek, J., and Ciołkowska, A. (2008). **Renewable energy source-Dehydrated ethanol**. Chemical Engineering Journal, Vol. 135, pp. 95-102.
- Karimi, A., Vafajoo, L., Safecordi, A.A., and Kazemeini, M. (2010). **Experimental and theoretical studies of pressure swing adsorption process to remove H₂S from methane in a packed bed**. Scientific Research and Essays, Vol. 5, No. 17, pp. 2391-2399.
- Kiatponglaip, W. (2007). **Production of enzyme-resistant starch from cassava starch**. A Thesis for the Master of Science in Food Technology, Suranaree University of Technology.
- Ladisch, M.R. (1997). **Biobased adsorbent for drying of gases**. Enzyme and Micro Technology, Vol. 20, pp. 162-164.
- Ladisch, M.R., Voloch, M., Hong, J., Blenkowski, P., and Tsao, G.T. (1984). **Cornmeal Adsorber for Dehydrating Ethanol Vapors**. I&EC Process Design & Development, Vol. 23, pp. 437-444.
- Lee, F.M., and Pahl, R.H. (1985). **Solvent screening and conceptual extractive distillation process to produce anhydrous ethanol from fermentation broth**. Ind. Eng. Chem. Proc. Design. & Develop, Vol. 24, pp. 168-172.
- McCabe, W.L., Smith, J.C., and Harriott, P. (2001). **Unit Operations of Chemical Engineering**. McGraw-Hill.
- McMinn, W.A.M., Al-Muhtaseb, A.H., and Magee, T.R.A., (2005). **Enthalpy-entropy compensation in sorption phenomena of starch materials**. Food Research International, Vol. 38, pp. 505-510.
- Pruksathorn, P., and Vitidsant, T. (2009). **Production of pure ethanol from azeotropic solution by pressure swing adsorption**. Korean J. Chem. Eng., Vol. 26, No. 4, pp. 1106-1111.
- Pinto, R.T.P., Wolf-Maciel, M.R., and Lintomen, L. (2000). **Saline extractive distillation process for ethanol purification**. Computers & Chemical Engineering, Vol. 24, pp. 1689-1694.
- Rouquerol, F., Rouquerol, J., and Sing, K.S.W. (1999). **Adsorption by powder and porous solids**. California : Academic Press.

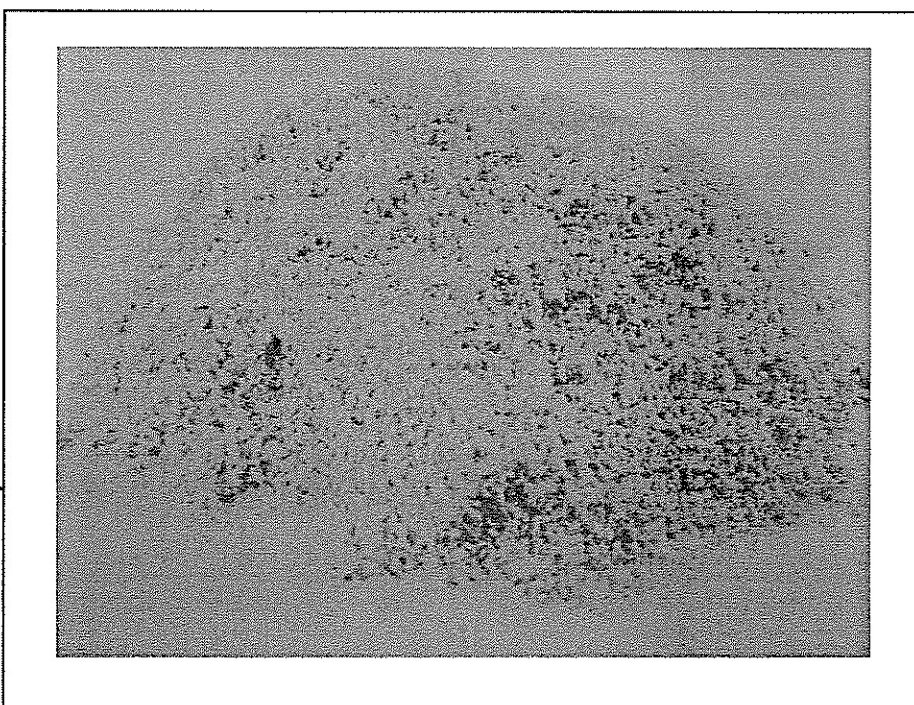
- Ruthven, D.M., Farooq, S., Knaebel, K.S. (1994). **Pressure Swing Adsorption Processes**. New York : John Wiley & Sons, Inc.
- Seader, J.D., and Henley Ernest, J. (2006). **Separation process principles**. Asia : John Wiley & Sons, Inc.
- Simo, M., Brown, C.J., and Hlavacek, V. (2008). **Simulation of pressure swing adsorption in fuel ethanol production process**. Computers & Chemical Engineering, Vol. 32, pp. 1635-1649.
- Vareli, G., Demertzis, P.G., and Akrida-Demertzi, K. (2000). **Effect of regeneration thermal threatment of cellulosic and starchy materials on their capacity to separate water and ethanol**. Journal of Cereal Science, Vol.31, pp. 147-154.
- Westgate, P.J., and Ladisch, M.R. (1993). **Air Drying Using Corn Grits as the Sorbent in a Pressure Swing Adsorber**. AIChE Journal, Vol. 39, No. 4, pp. 720-723.

ภาคผนวก ก

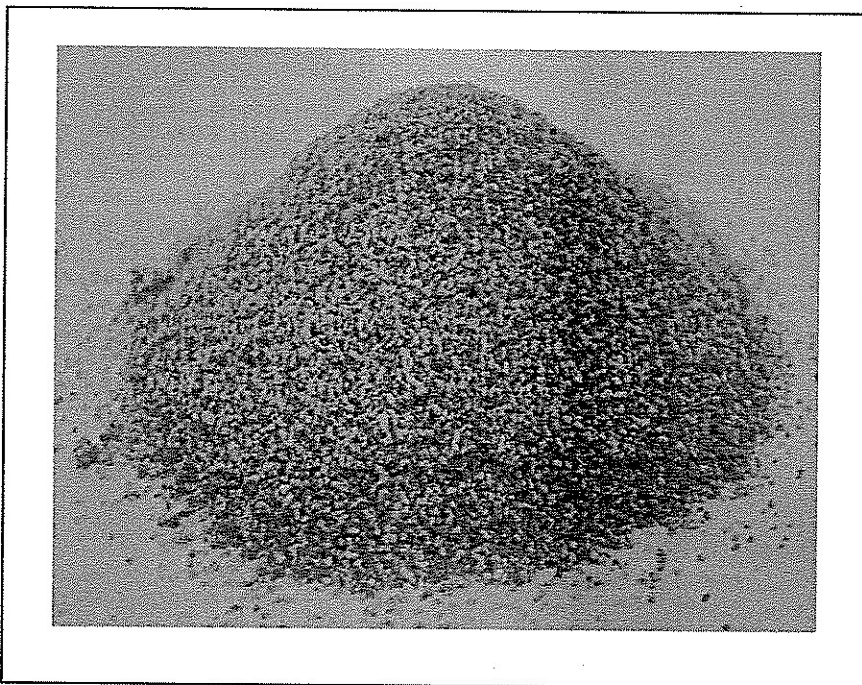
วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ ก.1 แป้งมันสำปะหลัง



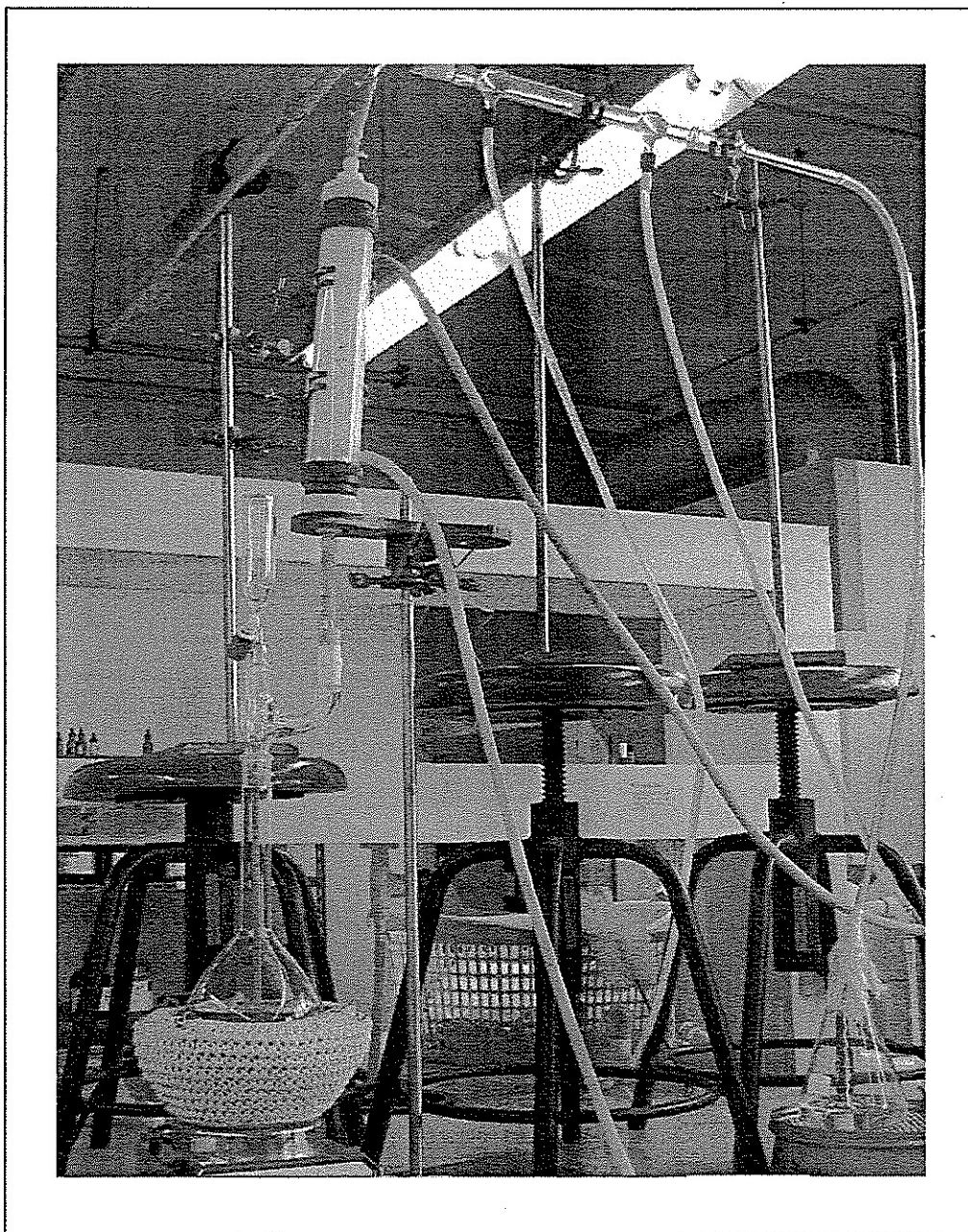
รูปที่ ก.2 กากมันสำปะหลังบดละเอียด



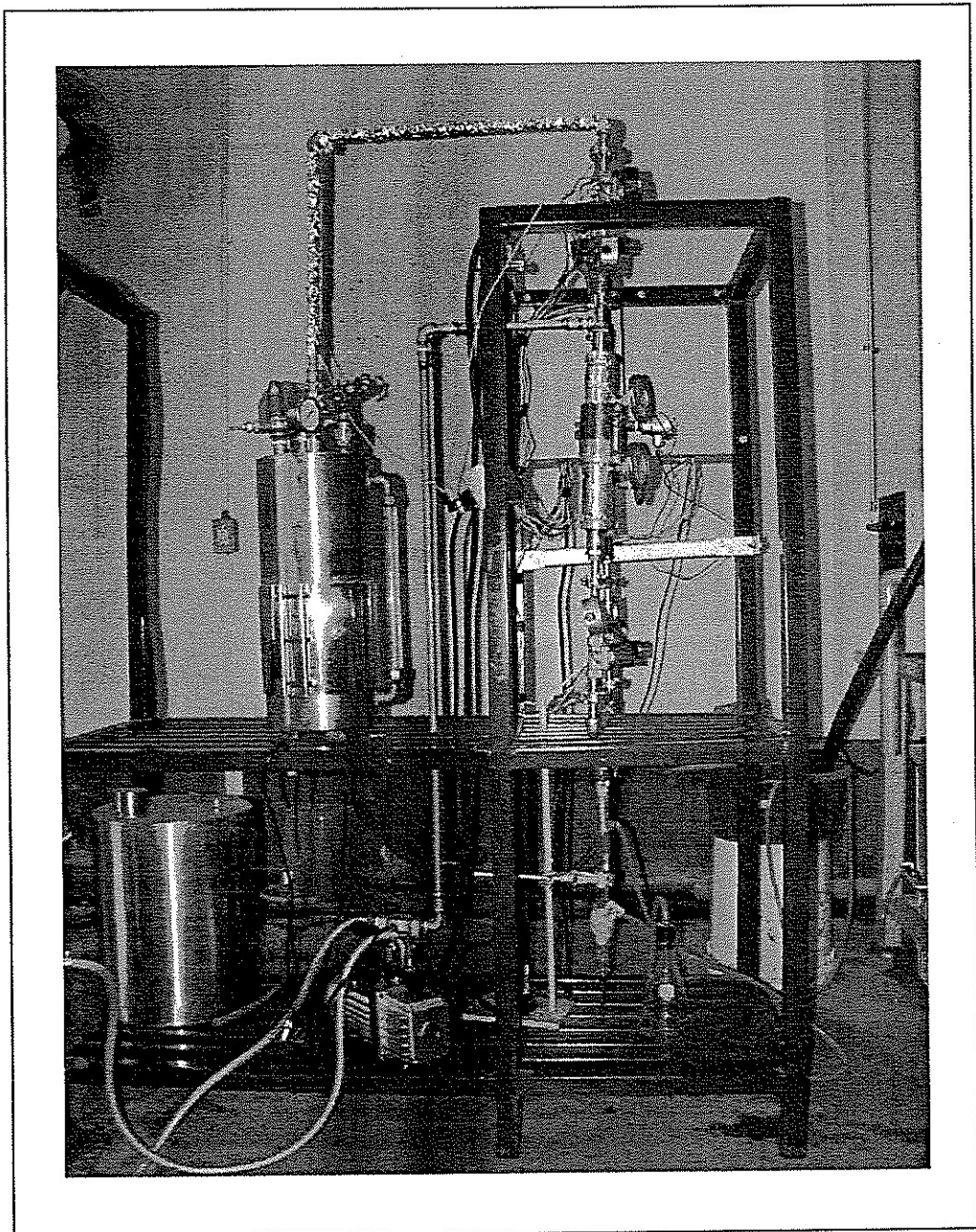
รูปที่ ก.3 ตัวดูดซับจากมันสำปะหลัง



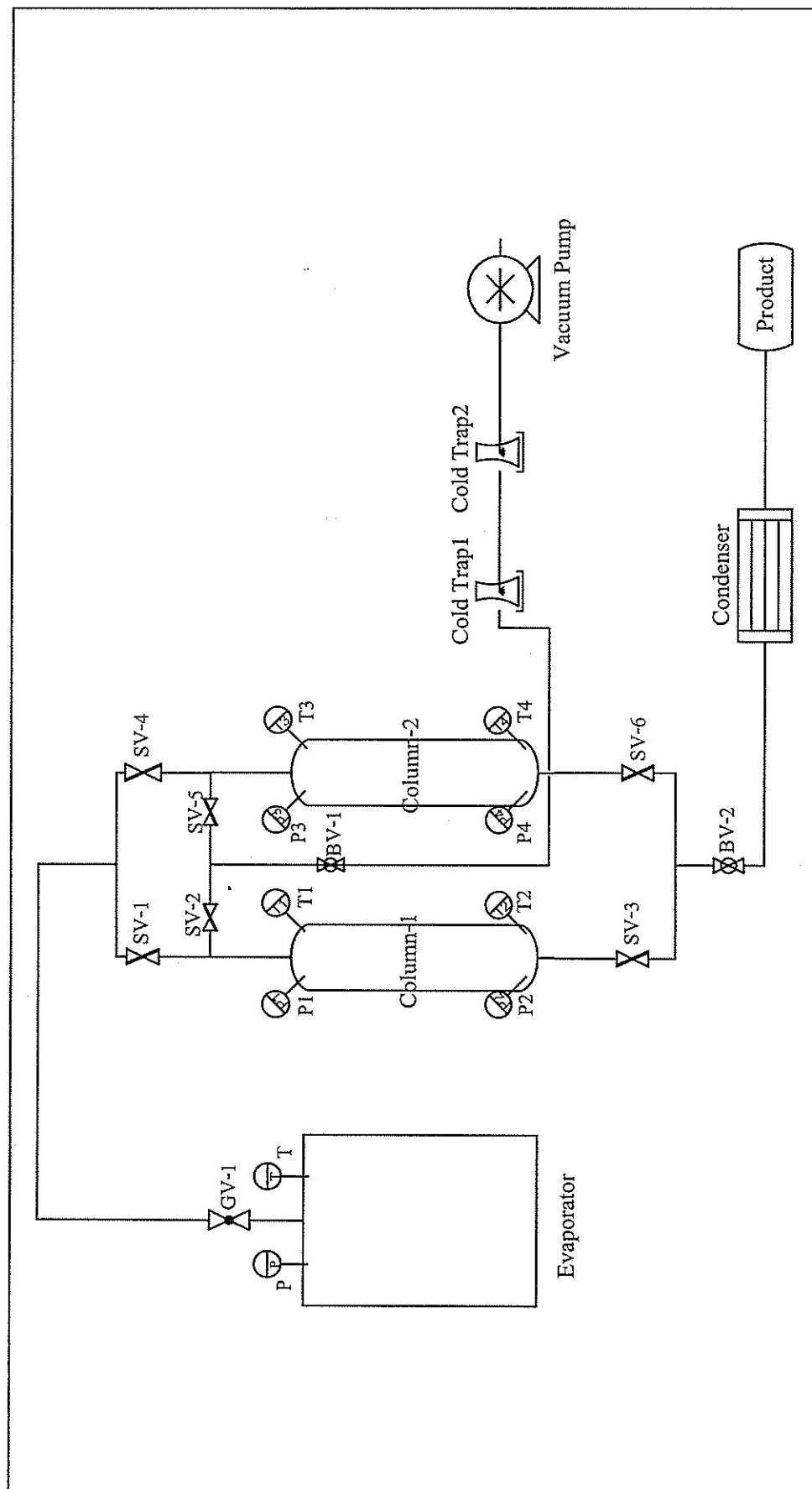
รูปที่ ก.4 เครื่องให้ความร้อน



รูปที่ ก.5 ชุดการทดลองของระบบดูดซับแบบเบดนิ่ง



รูปที่ ก.6 เครื่องต้นแบบของระบบดูดซับแบบสลับความดัน



รูปที่ ก.7 แผนภาพแสดงองค์ประกอบของระบบดูดซับแบบสลับความดัน สำหรับตำแหน่งการอ่านค่าความดันและอุณหภูมิของคอลัมน์ดูดซับ

ภาคผนวก ข

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิชาการระดับชาติ

Boonfung, C., and Rattanaphanee, P. (2010). **Cassava-based Adsorbent for Ethanol Dehydration**. The Journal of KMUTNB, Vol. 20, No. 2, pp. 196-203.

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ

Boonfung, C., and Rattanaphanee, P. (2010). **Pressure Swing Adsorption with Cassava Adsorbent for Dehydration of Ethanol Vapor**. International Journal of Chemical and Biologocal Engineering, Vol. 3, No. 4, pp. 206-209.



Cassava-based Adsorbent for Ethanol Dehydration

Chontira Boonfung¹ and Panarat Rattanaphanee^{2*}

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของตัวดูดซับซึ่งเตรียมขึ้นจากแป้งมันและกากมันสำปะหลังในการดูดซับเพื่อแยกน้ำออกจากไอเอทานอลในระบบดูดซับแบบอัดตัวแน่น โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ปริมาณตัวดูดซับและความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลเริ่มต้นที่มีผลต่อความเข้มข้นของเอทานอลที่ได้ ผลการศึกษาพบว่าไอโซเทอมการดูดซับน้ำของตัวดูดซับจากมันสำปะหลังมีลักษณะใกล้เคียงกับกับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับแบบอัดตัวแน่นซึ่งใช้ตัวดูดซับที่เตรียมขึ้นสามารถเตรียมเอทานอลที่มีความเข้มข้นสูงกว่าความเข้มข้นอะซีโอโทรปของเอทานอลในน้ำซึ่งไม่สามารถทำได้ด้วยกระบวนการกลั่นลำดับส่วนทั่วไป และสามารถเตรียมเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์สูงกว่าร้อยละ 99.5 โดยน้ำหนัก ได้ประมาณ 0.3 กรัมเอทานอลต่อกรัมของตัวดูดซับ

คำสำคัญ: การกำจัดน้ำออกจากเอทานอล ตัวดูดซับจากวัสดุชีวมวล มันสำปะหลัง

Abstract

This research investigated water adsorption efficiency of adsorbent prepared from cassava starch and cassava pulp in a bench-scale packed-bed adsorption system. Parameters of interest are effect of adsorbent quantity, and ethanol concentration of

starting solution on ethanol concentration in condensates leaving the adsorber. Water adsorption isotherm of the adsorbent appeared to fit a favorable Brunauer's Type I or Langmuir isotherm. The process could prepare ethanol solution with concentration higher than its aqueous azeotropic point, which could not be achieved in normal fractional distillation. The ethanol production obtained was in a vicinity of 0.3 gram ethanol per gram of adsorbent. In conclusion, adsorption using cassava-based adsorbent was able to dehydrate ethanol solution and could be an alternative technique for production of anhydrous ethanol.

Keyword: Ethanol Dehydration, Biomass-derived Adsorbent, Cassava

1. Introduction

Complication of a process for ethanol dehydration by fractional distillation arrives when the solution is in the vicinity of its azeotropic point (95.6 wt% ethanol), where both compounds are not separable by fractional distillation. Azeotropic distillation to bring ethanol concentration up to an anhydrous level is an energy-intensive and requires a use of toxic organic entrainers such as benzene. As a result, anhydrous ethanol is normally produced by

¹ Student, School of Chemical Engineering, Suranaree University of Technology.

² Lecturer, School of Chemical Engineering, Suranaree University of Technology.

* Corresponding Author, Tel.0-4422-4591, E-mail: panarat@sut.ac.th



distilling the solution until ethanol concentration of about 75-90 wt% is achieved, and other techniques are employed after that to remove water to a minuscule level.

One of the energy-efficient techniques widely used for dehydration of ethanol is adsorption, and starchy and cellulosic biomass are among several adsorbents that have been used. Examples of the biomass-derived adsorbents include cracked corns [1], corn meal [2]-[4], corn grits [5], [6], xylan and wood chips [7], [8], wheat constituents [9], [10], natural corncobs, natural and activated palm stone and oak [11].

It has been accepted that ethanol dehydration by adsorption requires far less energy than the conventional azeotropic distillation [12]. Adsorption with biomass-derived adsorbent is also less energy-consuming than adsorption using other adsorbents. For example, the total energy consumed in dehydration of ethanol using cellulose was reported to be 2,873 kJ/kg_{ethanol}, while the adsorption using calcium oxide (CaO) was 3,669 kJ/kg_{ethanol} [1]. In addition, biomass-derived adsorbents need less energy for regeneration than synthetic adsorbents [13].

Another attractive advantage of using biomass-derived adsorbent is that, when regeneration is not practical, the spent adsorbents could be used as a feedstock of fermentation, either for ethanol or biogas production. In addition, deposition of starchy and cellulosic adsorbents is unproblematic and environmental friendly due to their readily biodegradability. All these advantages lead to growing interest in using this type of materials as a potent desiccant for drying gaseous and organic compounds.

Ability of starch and cellulose to adsorb water is a result of interaction in form of hydrogen bonding between free hydroxyl groups (-OH) on their glucose

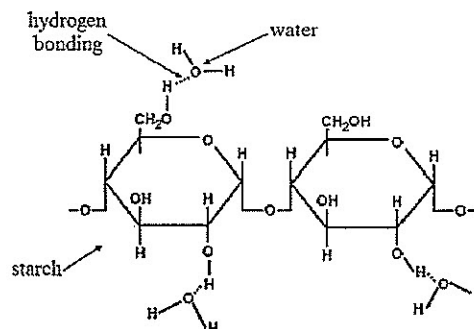


Figure 1 Hydrogen bonding between starch and water.

units and the water molecules [14] as depicted in Figure 1. Water is by nature more polar than organic compounds such as alcohols; therefore, it interacts with hydroxyl groups of the glucose-containing adsorbent with higher strength and faster rate. Consequently, aqueous alcohol solution passing through bed of starchy or cellulosic materials would come out with lower concentration of water in the solution.

Thailand ranks the third, following Nigeria and Brazil, of countries that produce cassava root with a total root production of 25-30 million tons annually, which sums up around 10% of the world production. This country, however, is the first in production and exportation of cassava-derived products [15]. Nakhorn Ratchasima is a province in northeast region of Thailand that has largest cassava planting area. As a result, there are many cassava starch production plants locating in this province.

Wet cassava pulp is created abundantly during the production of cassava starch. This material still contains sufficient amount of cellulose fiber and starch and usually sold very cheaply at 100-400 Baths/ton (about \$3-\$12/ton), to animal feed manufacturers. When the demand from animal feed industry is low, cassava pulp accumulates and rots,



causing an extremely unpleasant smell, which is an environmental problem commonly encountered in the area around cassava starch factories.

In present study, new adsorbent with a capability in removing water from ethanol vapor was developed using cassava pulp as one of the main ingredient. The water adsorption efficiency of the adsorbent was tested by monitoring the ethanol concentration in condensates leaving from a bench-scale packed-bed adsorption system. Parameters of interest were quantities of adsorbent and ethanol concentration of starting solution.

2. Materials and Method

2.1 Cassava Starch and Cassava Pulp

Native cassava starch and wet cassava pulp were provided from Sanguan Wongse Starch Industries (Nakhon Ratchasima, Thailand). Cassava pulp was sun-dried for 24 hr followed by drying in hot air oven at temperature of 110°C for another 12 hr. Moisture contents of the pulp were monitored by a moisture analyser (Precisa, XM60). Dried cassava pulp was ground and selectively screened. Pellets with sizes between 30-40 Mesh (0.420-0.595 mm) were used in adsorbent preparation.

2.2 Adsorbent Preparation

Cassava starch and dried ground cassava pulp were weighed and mixed with an addition of 0.1 M NaOH. The mixture was stirred while being heated at temperature about 65°C for 10 min. The mixture was then spread out on an aluminum pan and was dried for 12 h in the hot air oven at 110°C. The dried mixture was then ground and sieved, and pellets with size between 30-40 Mesh were used as the adsorbent in this study.

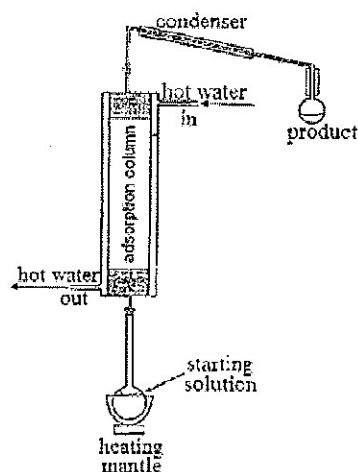


Figure 2 Bench-scale packed bed adsorption.

2.3 Characterization of the Adsorbent

Surface morphology of the adsorbent was visualized by scanning electron microscopy (SEM). Adsorbent pellets were fixed on a metal stubs and coated with gold. Images of the sample surface was scanned and photographed using a JEOL JSM-6400 scanning electron microscope operating at 20 kV.

Crystallinity of the adsorbents was investigated by X-ray diffraction (XRD) using a powder x-ray diffractometer (Model D5005, Bruker), with Ni-filtered Cu-K α radiation. All the spectra were recorded with 2 θ angle in the range of 5 to 75°, Cu target, 40 kV, 40 mA, a step size of 0.02° with a scan step of 0.4 second per step.

2.4 Ethanol Dehydration in Bench-scale Packed-bed Adsorption

A schematic of bench-scale packed bed adsorber for ethanol vapor dehydration is shown in Figure 2. The adsorbent was packed in a jacketed Chromaflex column (Kontes 420870-3010) with an

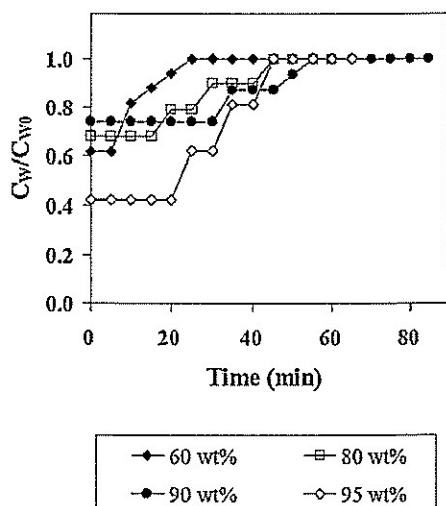


Figure 3 Breakthrough curves when using 10 g of adsorbent.

inside diameter of 2.5 cm and a length of 30 cm. Column wall temperature was maintained at 90°C by circulating hot water through the jacket.

Starting aqueous solution with known ethanol concentration was heated in a 500-ml round-bottom long-neck flask surrounded by an electric heating mantle. The vapor was passed through the column, and the exit stream was condensed using water as a cooling medium. The process was operated semi-batchwisely with periodically addition of ethanol solution into the flask in order to maintain the constant concentration of the starting solution.

Fractions of condensates were collected at regular time interval and were analyzed for ethanol concentration using Abbe refractometer. When the experiment is terminated, spent adsorbent was removed from the column and regenerated for reuse by drying in the hot air oven at 110°C for 12 hours.

3. Result and Discussion

Breakthrough curves of water adsorption on the prepared adsorbent when ethanol with different water contents were used as starting feed are illustrated in Figure 3. C_w is water concentration in the vapor mixture condensed from the adsorber at any time and C_{w0} is the concentration of water in the vapor at the starting (zero time) of the experiment. To ensure that adsorbent saturation and complete shape of the breakthrough curves were achieved, the column was packed with only 10 g of the adsorbent. Feed solution with ethanol concentration of 75 and 85 wt% were also studied (data not shown here). Water loading, W , which expressed as gram of water adsorbed (g_w) per gram of adsorbent used (g_{ads}), was calculated for each experiment and were plotted against the corresponding feed concentration.

The adsorption isotherm illustrated in Figure 4 shows that adsorption of water on cassava-based adsorbent resembles a favorable Brunauer's Type I or Langmuir isotherm, which follows the relation:

$$W = W_{\max} \left(\frac{Kc}{1 + Kc} \right) \quad (1)$$

Where W = water loading, g_w/g_{ads}

$W_{\max}$ = maximum water loading

c = water concentration in solution, g/L

K = adsorption constant, L/g

Parameter $W_{\max}$ and K , determined by a method of curve fitting from the isotherm data, were found to be 0.067 g_w/g_{ads} and 0.03 L/g, respectively. These values were verified by calculation of water loadings and plot the value obtained back into Figure 4. The R^2 of the plot is 0.95 indicating a

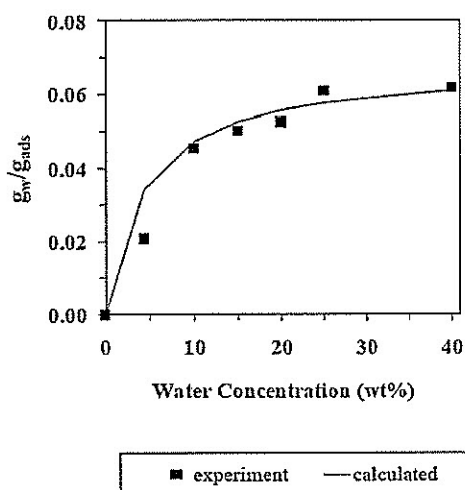


Figure 4 Adsorption isotherm when using 10 g of cellulosic adsorbents, $R^2 = 0.95$.

fairly good agreement between the calculated results and the experimental data.

Breakthrough curve of adsorption using different quantities of the adsorbent are summarized in Figure 5. The starting solution in every experiment was of 90 wt% ethanol concentration. Breakthrough data obtained from these experiments are displayed in Table 1. As seen, concentrations of water below the breakthrough point, $C_w/C_{w0} < 0.05$ or ethanol concentration of about 99.5 wt% in the collected condensate, were obtained when more than 20 g of adsorbent were packed in the column. Breakthrough time, as expected, increased with increasing adsorbent quantities.

Experiments with 60 g of adsorbent resulted in the longest breakthrough time of 52.4 min, which was considerably longer than a breakthrough time of 7.1 min when using 40 g of adsorbent. Water

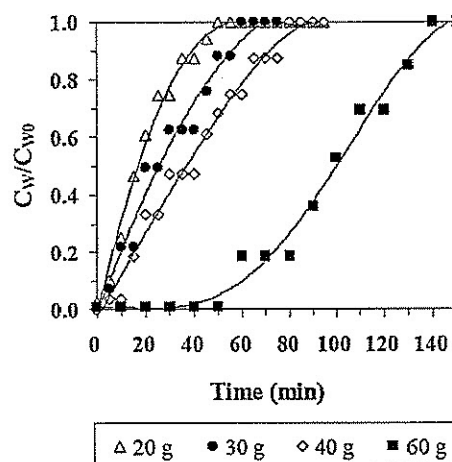


Figure 5 Breakthrough curves of different quantities of cassava-based adsorbents with feed concentration of 90 wt% ethanol.

loading for systems using 90 wt% ethanol as starting solution was found to be in vicinity of $0.045 \text{ g}_w/\text{g}_{\text{ads}}$ for all experiments except a considerably under-calculated value of $0.030 \text{ g}_w/\text{g}_{\text{ads}}$ obtained from experiments using 60 g of adsorbents. Reasons to this could be a particle arrangement and a packing characteristic inside the adsorption column when comparatively large amount of particles were packed inside the column causing dense section at the point where the feed entered, hence obstructing good vapor distribution and sufficient access to adsorbent surface. One of the evidence that could verify this hypothesis is the 0.60 ml/min condensate flow rate which is significantly lower than those around 1 ml/min in the system using 30 g and 40 g adsorbent. Water loading in this system could have been higher if the adsorbent distribution and access to the adsorbent surface in the column had been improved.



Table 1 Breakthrough data for water adsorption of 90.0 wt% ethanol using different adsorbents quantities

Adsorbents quantity (g)	Breakthrough Time ^a (min)	Average condensate flow rate (ml/min)	Water adsorbed (g _w)	Water loading (g _w /g _{ads})	Ethanol Production ^b (g _{ethanol} /g _{ads})
10	N/A	0.92	0.454	0.045	N/A
20	1.6	0.70	0.825	0.041	0.197
30	3.4	1.01	1.528	0.051	0.292
40	7.1	0.95	1.900	0.048	0.285
60	52.4	0.60	1.808	0.030	0.338

^a Evaluated at breakthrough concentration CW/CW0 = 0.05

^b Gram of ethanol with concentration ≥ 99.5 wt% produced per gram of adsorbent

Ethanol production, defined as gram of ethanol with concentration higher than 99.5 wt% that was produced per gram of the adsorbent, appeared to be approximately 0.3 g_{ethanol}/g_{ads} when more than 20 g of adsorbent was used for dehydration of 90 wt% ethanol solution. This value is close to that of 0.284 g_{ethanol}/g_{ads} in a study using corn grit as the adsorbent to dehydrate a solution of 17.5 mol% water in ethanol, which was equivalent to a 91.7 wt% ethanol solution [5]. With a comparable capacity to corn that costs around 7000-8000 Baths/ton, cassava-based adsorbent holds an advantage of cheap main ingredient that makes it an attractive choice for water adsorption using biomass-derived material.

SEM images show that the adsorbent pellets' shape and surfaces are not uniform (Figure 6a). In closer view (Figure 6b), it can be seen that significant portion of the adsorbent surface was covered by numerous sphere particles (most likely starch), with gel-like layers appeared to cover on some portion of the particle surface (Figure 6c). These layers, which could have been created by starch gelatinization when the mixtures were heated during adsorbent preparation, presumably acted as a

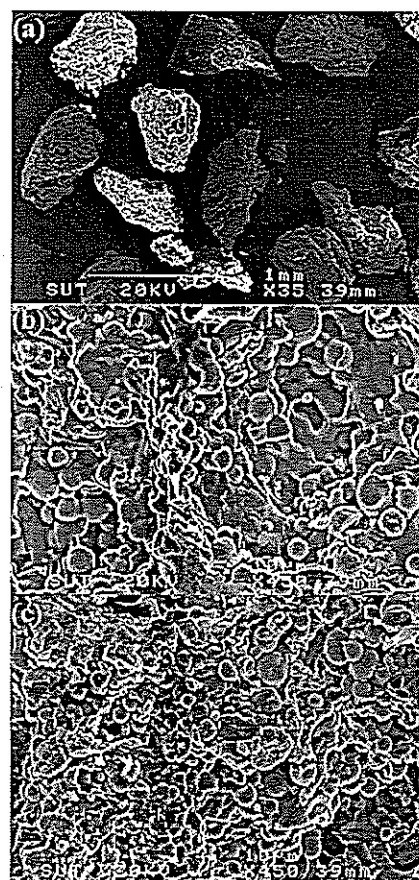


Figure 6 SEM images of (a) adsorbent particles; (b) and (c) adsorbent surface.

glue to hold all the components together and provide structural strength to the adsorbent.

Gelatinization could increase the adsorption capacity of the starch, because it causes crystalline structure to become amorphous, which is desirable for water adsorption. However, gelatinization may also leads to retrogradation of starch, which causes an increase in the crystallinity and also structural changing that can adversely affect the

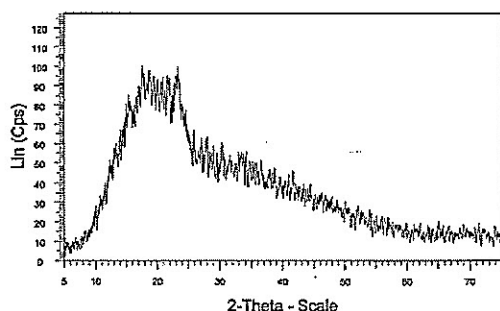


Figure 7 X-ray diffractograms of cassava adsorbent.

adsorption of water vapor, as crystallinity hinders the adsorption of water because the $-OH$ groups on adjacent glucose units form complexes with each other and cannot adsorb water unless this secondary hydrogen bonding dissociates [12].

For the case of the adsorbent utilized in this study, increase in crystallinity by retrogradation after gelatinization might be insignificant when consulting its X-ray powder diffractogram (Figure 7) as it depicts very low proportion of crystallinity. This could mean that the extent of gelatinization that took place during adsorbent preparation did not sufficiently lead to retrogradation of the starch, or it could mean that most of starch crystallinity was destroyed by the high temperature employed for heating the mixture in adsorbent preparation, since it has been reported that cassava (tapioca) starch crystallinity, molecular order and DSC enthalpy were completely lost at $\sim 69.5^{\circ}C$ upon heating in water [16]. More extensive studies are necessary to investigate whether the presence and extent of gelatinized layer formed during adsorbent preparation could have any effect on water adsorption properties of the adsorbent. At this point, the cassava-based adsorbent could be regarded as amorphous rather than crystalline materials.

4. Conclusion

Cellulose-based adsorbent prepared from cassava pulp as one of the main ingredient was proved to be capable of adsorbing water in vapor form. This ability is presumably due to interaction between water molecules and free hydroxyl groups on the glucose units of starch and cellulose, which has been reported for this type of materials. Breakthrough study of water adsorption on the adsorbent showed a favorable Brunauer's Type I or Langmuir isotherm. Results from fixed-bed adsorption showed that cassava based adsorbent was able to selectively adsorb water and, in consequence, dehydrate ethanol vapor, leading to ethanol solution with higher purity than that of the starting solution. This study elucidates that cassava pulp could be a raw material for preparation of adsorbent with target use of water adsorption. In conclusion, water adsorption with cellulose-based adsorbent could be an economical technique to produce anhydrous ethanol in country with large area of cassava plantation like Thailand.

5. Acknowledgement

The authors are grateful to Princess Maha Chakri Sirindhorn's Innovation and Invention Research Fund, Suranaree University of Technology, for financial support of this work.

References

- [1] M. Ladisch and K. Dyck, "Dehydration of Ethanol: New Approach Gives Positive Energy Balance," *Science*, vol. 205, pp. 898-900, 1979.
- [2] M. Ladisch, M. Voloch, J. Hong, P. Blenkowski, and G. Tsao, "Cornmeal Adsorber for Dehydrating Ethanol Vapors," *I&EC Proc.*



- Des. Develop.*, vol. 23, pp. 437-443, 1984.
- [3] H. Chang, X. Yuan, H. Tian, and A. Zeng, "Experiment and Prediction of Breakthrough Curves for Packed Bed Adsorption of Water Vapor on Cornmeal," *Chem. Eng. Process*, vol. 45, pp. 747-754, 2006.
- [4] J. Hong, M. Voloch, M. Ladisch, and G. Tsao, "Adsorption of Ethanol-Water Mixtures by Biomass Materials," *Biotech. Bioeng.*, vol. 24, pp. 725-730, 1982.
- [5] P. Bienkowski, A. Barthé, M. Voloch, R. Neuman, and M. Ladisch, "Breakthrough Behavior, of 17.5 mol% Water in Methanol, Ethanol, Isopropanol, and t-Butanol Vapors Passed over Corn Grits," *Biotech. Bioeng.*, vol. 28, pp. 960-964, 1986.
- [6] L. Anderson, M. Gulati, P. Westgate, E. Kvam, K. Bowman, and M. Ladisch, "Synthesis and Optimization of a New Starch-Based Adsorbent for Dehumidification of Air in a Pressure-Swing Dryer," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 35, pp. 1180-1187, 1996.
- [7] M. Ladisch, "Biobased Adsorbents for Drying of Gases," *Enzyme Microb. Tech.*, vol. 20, pp. 162-164, 1997.
- [8] T. Benson and C. George, "Cellulose Based Adsorbent Materials for the Dehydration of Ethanol Using Thermal Swing Adsorption," *Adsorption*, vol. 11, pp. 697-701, 2005.
- [9] G. Vareli, P. Demertzis, and K. Akrida-Demertzi, "Effect of Regeneration Thermal Treatment of Cellulosic and Starchy Materials on Their Capacity to Separate Water and Ethanol," *J. Cereal Sci.*, vol. 31, pp. 147-154, 2000.
- [10] X. Han, X. Ma, J. Liu, and H. Li, "Adsorption Characterisation of Water and Ethanol on Wheat Starch and Wheat Gluten Using inverse Gas Chromatography," *Carbohydrate. Polym.*, vol. 78, pp. 533-537, 2009.
- [11] A. Al-Asheh, F. Banat, and N. Al-Lagtah, "Separation of Ethanol-Water Mixtures Using Molecular Sieves and Biobased Adsorbents," *Trans IChemE, Part A, Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 82(A7), pp. 855-864, 2004.
- [12] G. Austin, *Shreve's Chemical Process Industries*, 5th ed., McGraw-Hill, Singapore, 1984.
- [13] K. Beery and M. Ladisch, "Chemistry and Properties of Starch Based Desiccants," *Enzyme Microb. Tech.*, vol. 28, pp. 573-581, 2001.
- [14] K. Beery and M. Ladisch, "Adsorption of Water from Liquid-Phase Ethanol-Water Mixtures at Room Temperature Using Starch-Based Adsorbents," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 40, pp. 2112-2115, 2001.
- [15] K. Siroth, "Current and Future Perspective of Thai Tapioca Starch Industry," in *World Tapioca Conference*, Thailand, January 15-16, 2009.
- [16] D. Cooke and M. Gridley, "Loss of Crystalline and Molecular Order during Starch Gelatinisation: Origin of the Enthalpic Transition1," *Carbohydrate Res.*, vol. 227, pp. 103-112, 1992.

Pressure Swing Adsorption with Cassava Adsorbent for Dehydration of Ethanol Vapor

Chontira Boonfung and Panarat Rattanaphanee

Abstract—Ethanol has become more attractive in fuel industry either as fuel itself or an additive that helps enhancing the octane number and combustibility of gasoline. This research studied a pressure swing adsorption using cassava-based adsorbent prepared from mixture of cassava starch and cassava pulp for dehydration of ethanol vapor. The apparatus used in the experiments consisted of double adsorption columns, an evaporator, and a vacuum pump. The feed solution contained 90-92 %wt of ethanol. Three process variables: adsorption temperatures (110, 120 and 130°C), adsorption pressures (1 and 2 bar gauge) and feed vapor flow rate (25, 50 and 75 % valve opening of the evaporator) were investigated. According to the experimental results, the optimal operating condition for this system was found to be at 2 bar gauge for adsorption pressure, 120°C for adsorption temperature and 25% valve opening of the evaporator. Production of 1.48 grams of ethanol with concentration higher than 99.5 wt% per gram of adsorbent was obtained. PSA with cassava-based adsorbent reported in this study could be an alternative method for production of nearly anhydrous ethanol. Dehydration of ethanol vapor achieved in this study is due to an interaction between free hydroxyl group on the glucose units of the starch and the water molecules.

Keywords—Adsorption, PSA, Ethanol, Dehydration, Cassava.

I. INTRODUCTION

WATER adsorption is one of energy-efficient techniques that are widely used for dehydration of ethanol, and starchy and cellulosic biomass are among several adsorbents that have been used for this purpose. Examples of the biomass-derived adsorbents include cracked corns [1], corn meal [2]-[4], corn grits [5], [6], xylan and wood chips [7], [8], wheat constituents [9], [10], natural comcobs, natural and activated palm stone and oak [11]. These materials offers several advantages that have led to growing interest in using them as potent desiccants for drying gaseous and organic compounds. For example, adsorption with biomass-derived adsorbent was reported to be less energy-consuming than adsorption using other adsorbents. The total energy consumed in dehydration of ethanol using cellulose was reported to be 2,873 kJ/kg_{ethanol}, while the adsorption using calcium oxide (CaO) was 3,669 kJ/kg_{ethanol} [1]. Also, biomass-derived adsorbents were found to need less energy for regeneration

than synthetic adsorbents [12]. Another advantage is that when regeneration is not practical for the spent adsorbents, they could be used as a feedstock of fermentation, either for ethanol or biogas production. In addition, deposition of starch and cellulose base adsorbent is unproblematic and environmental friendly due to their readily biodegradability.

Ability of starch and cellulose in selectively adsorption of water is a result of interaction in the form of hydrogen bonding between free hydroxyl groups (-OH) on their glucose units and the water molecules [13]. Water is by nature more polar than organic compounds such as alcohols; therefore, it interacts with hydroxyl groups of the glucose-containing adsorbent with higher strength and faster rate. Consequently, aqueous alcohol solution passing through bed of starchy or cellulosic materials would come out with lower concentration of water in the solution.

Wet cassava pulp is cellulosic material that is normally created abundantly during the production of cassava starch in Thailand. This material is usually sold very cheaply at 100-400 Baths/ton (about \$3-\$12/ton), to animal feed manufacturers. When the demand from animal feed industry is low, cassava pulp accumulates and rots, causing an extremely unpleasant smell, which is an environmental problem commonly encountered in the area around cassava starch factories.

Capability of biomass adsorbent prepared from cassava pulp, which still contains sufficient amount of starch, was used successfully in packed-bed adsorption system dehydration of ethanol vapor [14]. In this study, water adsorption capacity of the adsorbent is tested in pressure swing adsorption. Effect of operating variables including adsorption temperature and pressure as well as feed flow rate on ethanol concentration in the products and ethanol production rate was investigated.

II. MATERIALS AND METHODS

A. Cassava Starch and Cassava Pulp

Cassava starch and dried ground cassava pulp were weighed and mixed with an addition of 0.1 M NaOH. The mixture was stirred while being heated at temperature about 65°C for 10 min. The mixture was then spread out on an aluminum pan and was dried for 12 h in the hot air oven at 110°C. The dried mixture was then ground and sieved, and pellets with size between 30-40 Mesh were used as the adsorbent in this study.

C. Boonfung and is with School of Chemical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand 30000 (e-mail: chontira_b@hotmail.com).

P. Rattanaphanee is with School of Chemical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand 30000 (corresponding author to provide phone: +66-44-224591; fax: +66-44-224609; panarat@sut.ac.th).

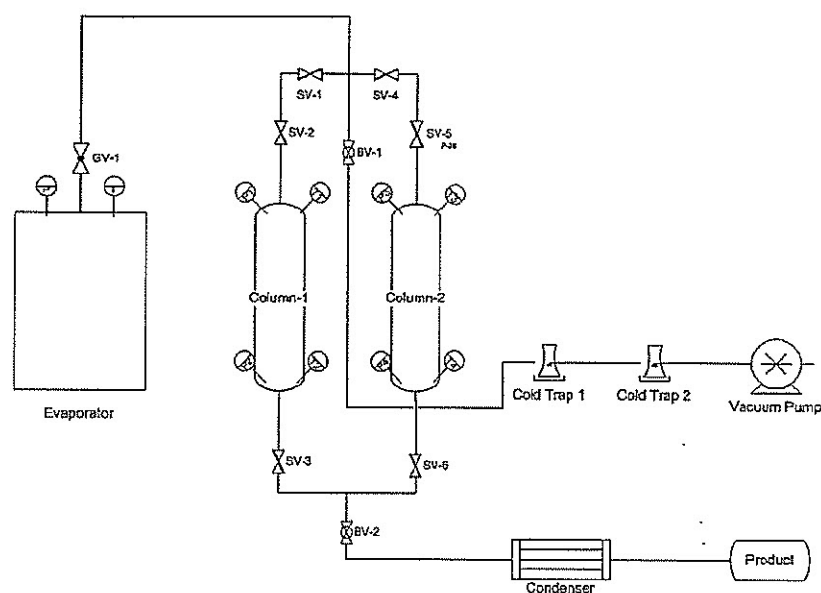


Fig. 1 Schematic diagram of PSA process

B. Adsorbent Preparation

Cassava starch and dried ground cassava pulp were weighed and mixed with an addition of 0.1 M NaOH. The mixture was stirred while being heated at temperature about 65°C for 10 min. The mixture was then spread out on an aluminum pan and was dried for 12 h in the hot air oven at 110°C. The dried mixture was then ground and sieved, and pellets with size between 30-40 Mesh were used as the adsorbent in this study.

C. Pressure Swing Adsorption

Double-column PSA apparatus used in this study was built in-house. The schematic diagram of the system is shown in Fig. 1. The adsorption columns were made of stainless steel columns with a length of 30 cm and an inner diameter of 5 cm.

At the beginning of the experiment, the evaporator was filled with an ethanol solution with 90-92 %wt of ethanol. The heater was turned on and the cycle time of the operation was set by timer controller. The optimal cycle time for the apparatus used in this study was found to be 4 min for adsorption and 1 min for desorption (Adsorption/Desorption: 4/1). When the pressure in the evaporator reached up to the desired adsorption pressure, valve GV-1 was opened. The ethanol vapor was passed through the top of column-1 where water adsorption was firstly taken place.

III. RESULTS AND DISCUSSION

Three operating variables of ethanol dehydration by PSA process were investigated in this study, i.e. adsorption temperature (T), adsorption pressure (P), and feed flow rate. The latter was controlled by adjusting the percent opening (v) of valve GV-1 at the evaporator. Values of the variables in each experiment are shown in Table I. The process outputs of interest were ethanol concentration in the product and ethanol production expressed in grams ethanol per gram adsorbent (ξ_{EtOH}/ξ_{ads}).

TABLE I
OPERATING VARIABLES OF PSA PROCESS

Run	T(°C)	P (bar)	v (% valve opening)
1	110	1	50
2	120	1	50
3	130	1	50
4	120	2	25
5	120	2	50
6	120	2	75

A. Effect of Adsorption Temperature

The effect of the adsorption temperature on capability of cassava-based adsorbent to remove water from ethanol was investigated. The results are shown in Fig. 2. It can be seen that the concentration of ethanol in the product at adsorption

temperature of 120 and 130°C were significantly higher than at 110°C. This could be due to some degree of vapor condensation when the temperature was not sufficiently high because the used adsorbent in experiment with adsorption temperature of 110°C appeared to be quite wet.

The used adsorbent was found to be partially burned in experiment with adsorption temperature of 130°C despite the high ethanol concentration obtained in the product. As a result, the optimum temperature was chosen to be at 120°C in this study.

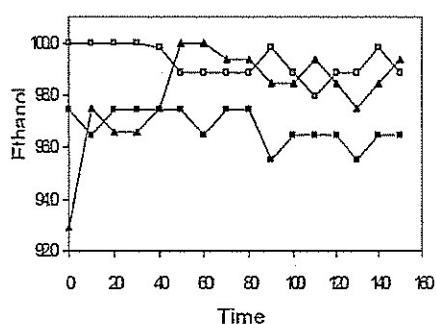


Fig. 2 Effect of adsorption temperature on concentration of ethanol product (%wt): ■ 110 °C; □ 120 °C; ▲ 130 °C

B. Effect of Adsorption Pressure

The effect of adsorption pressure was studied at 1 and 2 bar (2 and 3 bar absolute), and the ethanol concentration obtained from the process are shown in Fig. 3. It can be observed that the concentration of ethanol product was increased with adsorption pressure. The optimum adsorption pressure for the apparatus used in this study was therefore chosen to be at 2 bar.

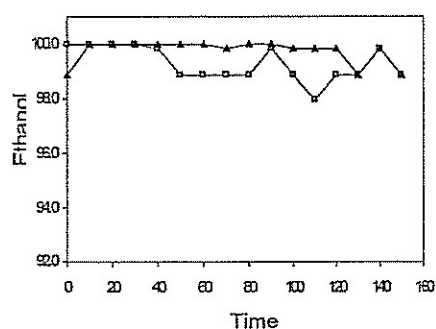


Fig. 3 Effect of adsorption pressure on concentration of ethanol product (%wt): □ 1 bar; ▲ 2 bar.

C. Effect of Feed Flow Rate

Effect of feed flow rate on ethanol concentration in the product is shown in Fig. 4, which indicates that decreasing feed flow rate by decreasing percent opening of valve GV-1 at the evaporator could improve the concentration of ethanol in the product. This was likely due to longer contact time between the vapor and the adsorbent at low feed flow rate.

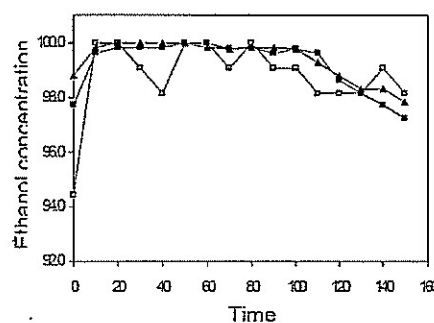


Fig. 4 Effect of feed flow rate on concentration of ethanol product (%wt): ■ 25 % valve opened; ▲ 50 %; □ 75 % valve opened

Ethanol production, g_{EtOH}/g_{ads} , obtained from experiments with different values of operating variables are shown in Table 2. As seen, the ethanol production was found to be highest at percent valve opening of 25%. This value was thus selected as the optimum point for feed flow rate controlling in this study.

T (°C)	P (bar)	v (% valve opening)	g_{EtOH}/g_{ads} (99.5%wt)
110	1	50	-
120	1	50	0.767
130	1	50	0.228
120	2	50	1.366
120	2	25	1.480
120	2	75	0.706

IV. CONCLUSIONS

Ethanol dehydration in PSA process using cassava adsorbent was tested in this study. Effect of three operating variables i.e. adsorption temperature, adsorption pressure and feed flow rate, on ethanol concentration in the product and ethanol production from the system were investigated in order to obtain the optimum operating conditions of the apparatus. Results from various experiments showed that increasing adsorption pressure and decreasing of the feed flow rate led to increased concentration of ethanol in the product. The

optimum conditions were found to be at 120°C for adsorption temperature, 2 bar for adsorption pressure, and 25% valve opening at the evaporator for feed flow rate controlling. This study elucidates that cassava pulp could be a raw material for preparation of adsorbent with target use of water adsorption. In conclusion, water adsorption with cellulose-based adsorbent could be an economical technique to produce anhydrous ethanol in country with large area of cassava plantation like Thailand.

ACKNOWLEDGMENT

The authors are grateful to Princess Maha Chakri Sirindhorn's Innovation and Invention Research Fund, Suranaree University of Technology, for financial support of this work.

REFERENCES

- [1] M. Ladisch and K. Dyck, "Dehydration of Ethanol: New Approach Gives Positive Energy Balance," *Science*, vol. 205, pp. 898-900, 1979.
- [2] M. Ladisch, M. Volech, T. Hong, P. Bienkowski and G. Tsao, "Communal Adsorbent for Dehydrating Ethanol Vapors," *J&EC Proc. Des. Develop.*, vol. 23, pp. 437-443, 1984.
- [3] H. Chang, X. Yuan, H. Tian and A. Zeng, "Experiment and Prediction of Breakthrough Curves for Packed Bed Adsorption of Water Vapor on Communal," *Chem. Eng. Process.*, vol. 45, pp. 747-754, 2006.
- [4] J. Hong, M. Volech, M. Ladisch and G. Tsao, "Adsorption of Ethanol-Water Mixtures by Biomass Materials," *Biotech. Bioeng.*, vol. 24, pp. 725-730, 1982.
- [5] P. Bienkowski, A. Bardé, M. Volech, R. Neuman and M. Ladisch, "Breakthrough Behavior of 17.5 mol% Water in Methanol, Ethanol, Isopropanol, and t-Butanol Vapors Passed over Corn Grits," *Biotech. Bioeng.*, vol. 28, pp. 959-964, 1986.
- [6] L. Andersen, M. Gulati, P. Westgate, E. Kvam, K. Bowman and M. Ladisch, "Synthesis and Optimization of a New Starch-Based Adsorbent for Dehumidification of Air in a Pressure-Swing Dryer," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 35, pp. 1180-1187, 1996.
- [7] M. Ladisch, "Biobased Adsorbents for Drying of Gases," *Enzyme Microb. Tech.*, vol. 20, pp. 162-164, (1997).
- [8] T. Benson and C. George, "Cellulose Based Adsorbent Materials for the Dehydration of Ethanol Using Thermal Swing Adsorption," *Adsorption*, vol. 11, pp. 697-701, 2005.
- [9] G. Varelis, P. Demetris and K. Akrida-Demertzi, "Effect of Regeneration Thermal Treatment of Cellulose and Starchy Materials on Their Capacity to Separate Water and Ethanol," *J. Cereal Sci.*, vol. 31, pp. 147-154, 2000.
- [10] X. Han, X. Ma, J. Liu and H. Li, "Adsorption Characterisation of Water and Ethanol on Wheat Starch and Wheat Gluten Using Inverse Gas Chromatography," *Carbohydrate. Polym.*, vol. 78, pp. 533-537, 2009.
- [11] A. Al-Asteh, F. Banat and N. Al-Lagish, "Separation of Ethanol-Water Mixtures Using Molecular Sieves and Biobased Adsorbents," *Trans IChemE, Part A, Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 82(A7), pp. 855-864, 2004.
- [12] K. Beery, and M. Ladisch, "Chemistry and Properties of Starch Based Desiccants," *Enzyme Microb. Tech.*, vol. 28, pp. 573-591, 2001.
- [13] K. Beery, and M. Ladisch, "Adsorption of Water from Liquid-Phase Ethanol-Water Mixtures at Room Temperature Using Starch-Based Adsorbents," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 40, pp. 2112-2115, 2001.
- [14] Chontira Boonlueang, Pannarat Rattanasaphanso, Cassava-based adsorbent for ethanol dehydration, *J. KMUTT*, vol. 20, No. 2, pp. 196-202, 2010.

