



รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการ “การผลิตซีโอไลต์จากเถ้าขานอ้อยเพื่อใช้เป็นอาหารเสริมและตัวดูดซับ
แอมโมเนียสำหรับการผลิตสัตว์”

โดย

ทศพร อินเจริญ และคณะ

พฤษภาคม 2561

สัญญาเลขที่ RDG60T0155

รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการ “การผลิตซีโอไลต์จากเถ้าขานอ้อยเพื่อใช้เป็นอาหารเสริมและตัวดูดซับ
แอมโมเนียสำหรับการผลิตสัตว์”

โดย

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทศพร อินเจริญ
2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิกร ปัญญาอินทร์
3. รองศาสตราจารย์ ดร. วันดี ทาตระกุล

พฤษภาคม 2561

บทสรุปผู้บริหาร

ปัญหาการจัดการแอมโมเนียในโรงเรือนและภายในฟาร์มเป็นสาเหตุหนึ่งที่บั่นทอนสุขภาพสัตว์เลี้ยงและผู้เลี้ยงสัตว์ ซีโอไลต์ (Zeolite) เป็นสารเสริมอีกชนิดหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจในการนำมาใช้ในการผลิตปศุสัตว์เพื่อใช้เป็นสารเสริมสุขภาพ เพราะซีโอไลต์มีคุณสมบัติในการดูดซับสารพิษที่ปนเปื้อนมากับอาหารสัตว์ เช่น อัลฟาโทกซิน สารเคมีตกค้างในวัตถุดิบ และเชื้อก่อโรคต่างๆ นอกจากนั้นแล้วยังพบว่าซีโอไลต์สามารถดูดซับแอมโมเนียทั้งภายในร่างกายและหลังจากขับถ่ายมูลออกมา แต่อย่างไรก็ดียังมีข้อจำกัดด้านต้นทุนราคา เพราะมีความจำเป็นต้องนำเข้าซีโอไลต์มาจากต่างประเทศ อนึ่งหากเราสามารถผลิตซีโอไลต์โดยใช้วัตถุดิบเหลือใช้ทางการเกษตรได้ อาจเป็นทางออกหนึ่งที่จะช่วยให้ราคาลดลงได้ และปริมาณการใช้ในการผลิตภาคปศุสัตว์อาจจะมีการขยายตัวเพิ่มมากขึ้น ถ้าหากอ้อยเป็นสิ่งเหลือจากโรงงานน้ำตาล และมีองค์ประกอบทางเคมีที่ใกล้เคียงกับซีโอไลต์ที่มีจำหน่ายทางการค้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งองค์ประกอบหลัก เช่น ซิลิกอนไดออกไซด์ และอลูมินา ซึ่งแนวคิดของโครงการวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Moisés et al. (2013) ที่ได้ทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากขานอ้อยสายพันธุ์บราซิล ภายใต้เทคนิคในห้องปฏิบัติการได้สำเร็จ และซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ มีคุณสมบัติเป็นตัวดูดซับและแลกเปลี่ยนไอออนได้ดี โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ศึกษาวิธีการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถาขานอ้อยที่เหมาะสม 2) ทดสอบประสิทธิภาพของซีโอไลต์จากเถาขานอ้อยในการดูดซับแอมโมเนียในหลอดทดลอง 3) เพื่อวิเคราะห์อันตรกิริยาระหว่างซีโอไลต์กับแอมโมเนียโดยวิธีทางเคมีค่านวน และ 4) ศึกษาผลของการเสริมซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากเถาขานอ้อยในอาหารไก่ไข่ต่อประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียในมูลและสมรรถภาพการผลิตไข่ โดยโครงการดังกล่าวประกอบด้วยทั้งหมด 3 การทดลอง ดังรายละเอียด ต่อไปนี้

การทดลองที่ 1 ศึกษาวิธีการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถาขานอ้อยที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นอาหารเสริมและตัวดูดซับแอมโมเนียสำหรับการผลิตสัตว์ การสังเคราะห์ซีโอไลต์ในการศึกษานี้ใช้สัดส่วนระหว่างเถาขานอ้อย : เถาแกลบข้าว ที่สัดส่วนแตกต่างกัน 4 ระดับ คือ 1:0, 1:1, 2:1, และ 3:1 โดยดัดแปลงวิธีการมาจาก Moisés et al. (2013) ซึ่งได้มีการปรับเปลี่ยน 2 ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการผลิตเพื่อให้ได้ซีโอไลต์ที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับแอมโมเนียสูงสุด คือ ก) อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแตกต่างกัน 4 ระดับ คือ 450, 550, 650, 750 องศาเซลเซียส นาน 40 นาที และ ข) ระยะเวลาในการตกผลึกที่อุณหภูมิ 80°C แตกต่างกัน 4 ระดับ คือ 72, 120, 144, 168 ชั่วโมง ผลการทดลอง พบว่าจากการสังเคราะห์จากเถาขานอ้อยต่อเถาแกลบข้าว ที่สัดส่วน 1:0, 1:1, 2:1, และ 3:1 มีค่าเฉลี่ยของซีโอไลต์ที่ได้หลังจากการสังเคราะห์ มีค่าเท่ากับ 78.0, 78.2, 74.3, 71.6 กรัม/ตัวอย่าง ตามลำดับ หลังจากนั้นซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ขึ้นมาจากเถาขานอ้อยต่อเถาแกลบข้าว ที่สัดส่วน 1:0, 1:1, 2:1, และ 3:1 จะถูกนำไปประเมินประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียในหลอดทดลอง และคัดเลือกตัวอย่างซีโอไลต์ที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับแอมโมเนียสูงสุดและต่ำสุด สัดส่วนละ 2 ตัวอย่าง รวมทั้งหมดเป็น 8 ตัวอย่าง ดังรายละเอียดต่อไปนี้ 1) สัดส่วนเถาขานอ้อย:เถาแกลบ 1:0 คัดเลือกซีโอไลต์เผาที่ 450 °C ตกผลึก 72 ชม. (Sample 1) และเผาที่ 550 °C ตกผลึก 144 ชม. (Sample 2) 2) สัดส่วนเถาขานอ้อย:เถาแกลบ 1:1 คัดเลือกซีโอไลต์เผาที่ 550 °C ตกผลึก 144 ชม. (Sample 3) และเผาที่ 450 °C ตกผลึก

72 ซม. (Sample 4) 3) สัดส่วนเถ้าขานอ้อย:เถ้ากลบ 2:1 คัดเลือกซีโอไลต์เผาที่ 550 °C ตกผลึก 72 ซม. (Sample 5) และเผาที่ 450 °C ตกผลึก 120 ซม. (Sample 6) และ 4) สัดส่วนเถ้าขานอ้อย:เถ้ากลบ 3:1 คัดเลือกซีโอไลต์เผาที่ 750 °C ตกผลึก 120 ซม. (Sample 7) และเผาที่ 450 °C ตกผลึก 72 ซม. (Sample 8) อย่างไรก็ตามตัวอย่างซีโอไรต์ Sample 1-8 มีประสิทธิภาพในการดูดซับแอมโมเนียคิดเป็นร้อยละ 32.33 ± 0.58 , 27.00 ± 1.73 , 40.00 ± 2.00 , 19.67 ± 1.15 , 39.33 ± 1.55 , 31.00 ± 4.00 , 40.00 ± 1.73 และ 33.33 ± 0.58 ตามลำดับ นอกจากนั้นแล้วยังได้นำซีโอไรต์ที่มีจำหน่ายทางการค้าจำนวน 1 ตัวอย่าง (Sample 9) มาเป็นตัวอย่างเปรียบเทียบกับ รวมทั้งหมดเป็น 9 ตัวอย่าง เพื่อนำตัวอย่างซีโอไรต์ทั้งหมดไปวิเคราะห์ด้วย BET, XRD, SEM และ EDS ต่อไป จากผลการวิเคราะห์ พบว่าพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ Sample 7 มีค่าสูงสุด คือ 424.44 ตร.ม./กรัม รองลงมา Sample 3 และ Sample 8 มีค่าเท่ากับ 337.28 และ 306.56 ตร.ม./กรัม ตามลำดับ เช่นเดียวกันกับปริมาตรรูของซีโอไลต์ Sample 7 คือ 0.22 ตร.ม./กรัม รองลงมา คือ Sample 3 และ 8 มีค่าเท่ากับ 0.18 และ 0.16 ตร.ม./กรัม ตามลำดับ ในขณะที่ขนาดรูของซีโอไลต์ Sample 7 มีขนาดเล็กที่สุด คือ 20.81 ตร.ม./กรัม รองลงมา Sample 8 และ 1 มีค่าเท่ากับ 20.82 และ 20.94 Å ตามลำดับ จากข้อมูลที่ได้ชี้ให้เห็นว่าประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวและปริมาตรรูที่เพิ่มขึ้นของซีโอไลต์ Sample 7 และขนาดรูที่เล็กยังส่งผลดีต่อการนำมาใช้เป็นสารเสริมในอาหารสัตว์ เนื่องจากซีโอไรต์ที่มีขนาดรูใหญ่จะไม่เพียงดูดซับเอาสารพิษออกมาพร้อมกับมูลเพียงอย่างเดียว แต่จะสามารถดูดซับเอาสารอาหารต่างๆ ออกมาด้วย ซึ่งจะกระทบต่อประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์จากโภชนะที่มีอยู่ในอาหาร การวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (Quantitative) ในตัวอย่างซีโอไรต์ พบว่า องค์ประกอบของธาตุแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันออกไปในแต่ละตัวอย่าง ซึ่งธาตุหลักๆ ที่เป็นองค์ประกอบของซีโอไรต์ คือ SiO_2 , Al_2O_3 และ Na_2O ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม สัดส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ของตัวอย่างซีโอไรต์ที่สังเคราะห์ขึ้นมาจากเถ้าขานอ้อยและเถ้ากลบข้าวมีค่าต่ำ ($P < 0.001$) เมื่อเปรียบเทียบกับซีโอไรต์ทางการค้า ซึ่งถือได้ว่าเป็นสัดส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่เป็นคุณสมบัติซีโอไรต์ที่ดี นอกจากนั้นแล้ว จากการวิเคราะห์ด้วย SEM พบว่า รูปร่างผลึกของตัวอย่างซีโอไรต์ที่สังเคราะห์ขึ้นมาเอง มีเกิดผลึกสม่ำเสมอ เมื่อเปรียบเทียบกับซีโอไรต์ทางการค้า ยิ่งไปกว่านั้นจะเห็นได้ว่า ซีโอไรต์ที่สังเคราะห์ขึ้นมาจากสัดส่วนเถ้าขานอ้อยต่อเถ้ากลบข้าว ที่ระดับ 3:1 ให้อนุภาคที่มีขนาดเล็ก และมีผลึกสม่ำเสมอมากกว่าสถานะอื่นๆ จากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ชี้ให้เห็นว่า ซีโอไรต์ที่สังเคราะห์ขึ้นมาจากสัดส่วนเถ้าขานอ้อยต่อเถ้ากลบข้าว ที่ระดับ 3:1 เผาที่อุณหภูมิ 450-750 องศาเซลเซียส และระยะเวลาตกผลึก 72-120 ชั่วโมง มีผลต่อรูปร่างผลึกที่สม่ำเสมอ เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว จากการเปรียบเทียบ XRD ของตัวอย่างซีโอไรต์ทางการค้า และซีโอไรต์ที่สังเคราะห์ขึ้นมาเอง พบว่า ตำแหน่งพีคของซีโอไรต์ที่ปรากฏในกราฟทั้ง 2 มีลักษณะตรงกับซีโอไรต์ทางการค้าซึ่งจะมีพีคขึ้นที่ 20 ถึง 40 องศา โดยจากการพบว่าตำแหน่งสูงสุดของซีโอไรต์ที่สังเคราะห์ขึ้นมาจากเถ้าขานอ้อยและเถ้ากลบในสถานะต่างๆ (Sample 1-8) มีค่าสูงกว่าซีโอไรต์ทางการค้า (Sample 1-8) แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างที่เป็นผลึกเพิ่มขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อเปรียบเทียบกราฟของซีโอไลต์ Sample 7 กับซีโอไรต์ทางการค้า (Sample 9) พบว่า ตำแหน่งสูงสุดของซีโอไรต์ Sample 7 กราฟมีค่าสูงเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ชี้ให้เห็นว่าโครงสร้างที่เป็นผลึกของ ซีโอไลต์ Sample 7 สูงกว่าซีโอไรต์ทางการค้า ซึ่งสอดคล้องกับการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูด

ซัปแอมโมเนียในหลอดทดลอง พื้นที่ผิว ปริมาตรรู และขนาดรู ของตัวอย่างซีโอไรต์ Sample 7 มีค่าดีกว่าซีโอไรต์ทางการค้า ด้วยเหตุนี้จึงคัดเลือก Sample 7 ไปศึกษาต่อในสัตว์ทดลองต่อไป

การทดลองที่ 2 ศึกษาการวิเคราะห์อันตรกิริยาระหว่างซีโอไลต์กับแอมโมเนียโดยวิธีทางเคมีคำนวณ โดยใช้ทฤษฎีฟังก์ชันความหนาแน่น(Density Functional Theory, DFT) ที่ระดับการคำนวณ B3LYP/6-31+G(d,p) เพื่อหาโครงสร้างที่เสถียรและค่าพลังงานของโมเลกุลเพื่อยืนยันว่าโครงสร้างที่คำนวณได้เป็นโครงสร้างที่เสถียรและอยู่บนจุดต่ำสุดของพื้นผิวพลังงานศักย์ โดยทำการคำนวณกับโมเลกุลซีโอไรต์หน่วยเล็กที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากแอมโมเนียเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะอยู่ในรูปของแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ที่ผิวของซีโอไรต์จะอยู่ในรูปของโปรตอนจับกับออกซิเจน โดยพบว่าโปรตอนที่จับกับออกซิเจนบริเวณผิวหน้าของซีโอไรต์เกิดอันตรกิริยาพันธะไฮโดรเจนกับออกซิเจนอีกตัวที่ผิวของซีโอไรต์เพื่อทำให้โครงสร้างของซีโอไรต์เสถียรและมีพลังงานต่ำสุด ซีโอไรต์เมื่อจับกับแอมโมเนียมพบว่าอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบพันธะไฮโดรเจน โดยเกิดพันธะไฮโดรเจนสองพันธะต่อหนึ่งหน่วยเล็กที่สุดของซีโอไรต์โดยอะตอมไฮโดรเจนสองอะตอมของแอมโมเนียมเกิดพันธะไฮโดรเจนกับออกซิเจนสองอะตอมของซีโอไรต์และโปรตอนที่เกาะกับออกซิเจนของซีโอไรต์ได้หมุนตัวไปยังทิศทางตรงข้ามจากเดิมเพื่อให้พันธะไฮโดรเจนเกิดขึ้นได้สองพันธะ จากการคำนวณหาพลังงาน Atomic unit แต่ละโมเลกุลของ Zeolite, Ammonium และ Zeolite-ammonium complex มีค่าเท่ากับ -1062.66594799, -56.9061273760 และ -1119.45272943 a.u ตามลำดับ และผลการคำนวณพบว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของซีโอไรต์กับแอมโมเนียม ที่ได้ มีค่าเท่ากับ 74.96 กิโลแคลอรีต่อโมล

การทดลองที่ 3 ศึกษาผลของการเสริมซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าขานอ้อยในอาหารไก่ไข่ต่อประสิทธิภาพการดูดซัปแอมโมเนียในมูลและสมรรถภาพการผลิตไข่ ใช้ไก่ไข่สายพันธุ์ Hy-Line Brown ที่อายุ 23 สัปดาห์ ไก่ที่มีเปอร์เซ็นต์ไข่ใกล้เคียงกัน จำนวน 150 ตัว จะถูกแบ่งออกเป็น 5 กลุ่มๆ ละ 10 ซ้ำๆ ละ 3 ตัว ประกอบด้วย กลุ่มที่ได้รับอาหารเสริมซีโอไลต์ที่ระดับ 0 (อาหารควบคุม) 1.0, 2.0, 3.0, และ 4.0 เปอร์เซ็นต์ ระยะเวลาการทดลองทั้งหมด 12 สัปดาห์ ตลอดการทดลองบันทึกปริมาณอาหารที่กิน จำนวนไข่ และน้ำหนักไข่ เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาสมรรถภาพการผลิตไข่ ในแต่ละสัปดาห์จะทำการสุ่มไข่จำนวน 20 ฟอง/กลุ่ม สัปดาห์ละ 2 ครั้ง เพื่อนำมาการวิเคราะห์คุณภาพไข่ ด้วยเครื่องวิเคราะห์ไข่อัตโนมัติ ทำการเก็บข้อมูลคุณภาพไข่ เช่น น้ำหนักไข่เฉลี่ย ดัชนีรูปทรงไข่ ไข่ขาวไข่แดง เปลือกไข่ สีไข่แดง และหน่วยฮอก (Haugh units) รวมทั้งความหนาของเปลือกไข่ โดยใช้ไมโครมิเตอร์วัดจากตำแหน่งเปลือกไข่ 3 ตำแหน่ง คือ ส่วนบน ส่วนกลาง และส่วนแหลม แล้วนำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ย นอกจากนั้นแล้วทำการสุ่มเก็บตัวอย่างมูลจากแต่ละกลุ่มๆ ละ 5 ตัวอย่าง เพื่อนำมาการวัดแอมโมเนียในมูล สัปดาห์ละ 1 ครั้ง โดยแต่ละตัวอย่างจะเก็บมูลจากไก่ 3 ตัว นำมาใส่ถุงพลาสติกและผสมคลุกเคล้ามูลไก่ที่เก็บมาให้เข้ากัน ก่อนเริ่มทำการวิเคราะห์ระดับก๊าซแอมโมเนียจะชั่งตัวอย่างมูลจำนวน 30 กรัม และนำไปใส่ในภาชนะพลาสติกที่สามารถเก็บกักก๊าซแอมโมเนียได้ แล้วจึงนำภาชนะที่บรรจุมูลอยู่ภายในไปบ่มที่ตู้ควบคุมอุณหภูมิ ที่ 37 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำออกมาทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้องอีก 30 นาที ทำการวัดแอมโมเนียด้วยเครื่องวัดแอมโมเนีย (Gasman NH3, Crowcon Detection Instruments Ltd,) พร้อมจดบันทึก เมื่อสิ้นสุดการทดลอง พบว่าเปอร์เซ็นต์ผลผลิตไข่ อัตราการกินอาหารต่อวัน มวลไข่ และค่า FCR มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติในทุก

กลุ่มการทดลอง ($P > 0.05$) เช่นเดียวกันกับ ความหนาเปลือกไข่ ความสูงไข่ขาว ค่าฮอก (Haugh Unit) และสีไข่แดง รวมทั้งสัดส่วนไข่แดง ไข่ขาว และเปลือกไข่ มีค่าใกล้เคียงกัน ($P > 0.05$) จากผลการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่า การเสริมซีโอไรต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าขานอ้อยและเถ้ากลบข้าวในอาหารไก่ไข่ ที่ระดับตั้งแต่ 1-4 เปอร์เซ็นต์ ไม่ส่งผลกระทบต่อสมรรถภาพการผลิตไข่ และคุณภาพไข่ ในขณะที่การเสริมซีโอไรต์ที่มีผลทำให้ระดับแอมโมเนียในมูลลดลงเล็กน้อย ($P > 0.05$) และมีค่าต่ำสุดในกลุ่มที่ได้รับอาหารเสริมซีโอไรต์ ที่ 4 เปอร์เซ็นต์

จากผลการทดลองทั้งหมด สามารถสรุปได้ว่า การสังเคราะห์ซีโอไรต์จากเถ้าขานอ้อยเพียงอย่างเดียว (1:0) มีผลทำให้ได้ซีโอไรต์ที่มีปริมาณสูง แต่ประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียในหลอดทดลองค่อนข้างต่ำ ในขณะที่ซีโอไรต์ที่สังเคราะห์มาจากเถ้าขานอ้อยต่อเถ้ากลบ 3:1 มีปริมาณการผลิตได้อยู่ในระดับดี แต่มีประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียในหลอดทดลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะเมื่อเผาเถ้าที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส และมีระยะเวลาตกผลึก 120 ชั่วโมง จะทำให้ได้ซีโอไรต์ (Sample 7) ที่มีประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียในหลอดทดลองสูงสุด ซึ่งเป็นผลมาจากพื้นที่ผิว (Surface area) และปริมาตรรู (Pore size) มีค่าสูงที่สุด และรูปร่างผลึกมีขนาดเล็กและมีความสม่ำเสมอสูงเมื่อเทียบกับซีโอไรต์ที่สังเคราะห์จากสภาวะอื่นๆ สอดคล้องกับผลของการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของซีโอไรต์ Sample 7 ด้วย XRD ที่มีตำแหน่งสูงสุดสูงกว่าซีโอไรต์ทางการค้า จากการคำนวณโดยใช้ทฤษฎีฟังก์ชันัลความหนาแน่น (Density Functional Theory, DFT) พบว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของซีโอไรต์กับแอมโมเนียมที่ได้ มีค่าเท่ากับ 74.96 กิโลแคลอรีต่อโมล อย่างไรก็ตามการเสริมซีโอไรต์ Sample 7 ที่ระดับ 1-4 เปอร์เซ็นต์ ในอาหารไก่ไข่ ไม่ส่งผลกระทบต่อสมรรถภาพการผลิตไข่และคุณภาพไข่โดยรวม แต่มีส่วนช่วยทำให้คุณภาพเปลือกไข่ดีขึ้น และอาจจะเป็นแนวทางในการช่วยลดการอัตราการสูญเสียอันเนื่องมาจากปัญหาเปลือกไข่แตกร้าวในอุตสาหกรรมการผลิตไข่ได้ ในขณะที่การเสริมซีโอไรต์มีผลทำให้ระดับแอมโมเนียในมูลมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม และมีระดับแอมโมเนียในมูลต่ำที่สุดในกลุ่มที่ได้รับอาหารเสริมซีโอไรต์ ที่ 4 เปอร์เซ็นต์

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ศึกษาวิธีการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าขานอ้อยที่เหมาะสม 2) ทดสอบประสิทธิภาพของซีโอไลต์จากเถ้าขานอ้อยในการดูดซับแอมโมเนียในหลอดทดลอง 3) เพื่อวิเคราะห์อันตรกิริยาระหว่างซีโอไลต์กับแอมโมเนียโดยวิธีทางเคมีคำนวณ และ 4) ศึกษาผลของการเสริมซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าขานอ้อยในอาหารไก่ไข่ต่อประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียในมูลและสมรรถภาพการผลิตไข่ โดยประกอบด้วย 3 การทดลอง สำหรับการทดลองที่ 1 ศึกษาวิธีการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าขานอ้อยที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นอาหารเสริมและตัวดูดซับแอมโมเนียสำหรับการผลิตสัตว์ การสังเคราะห์ซีโอไลต์ในการศึกษาครั้งนี้ ใช้สัดส่วนระหว่างเถ้าขานอ้อย : เถ้าแกลบข้าว ที่สัดส่วนแตกต่างกัน 4 ระดับ คือ 1:0, 1:1, 2:1, และ 3:1 ซึ่งจะมีการปรับเปลี่ยน 2 ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการผลิตเพื่อให้ได้ซีโอไลต์ที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับแอมโมเนียสูงสุด คือ ก) อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา แตกต่างกัน 4 ระดับ คือ 450, 550, 650, 750 องศาเซลเซียส นาน 40 นาที และ ข) ระยะเวลาในการตกผลึกที่อุณหภูมิ 80°C แตกต่างกัน 4 ระดับ คือ 72, 120, 144, 168 ชั่วโมง ผลการศึกษา พบว่า ซีโอไรต์ที่สังเคราะห์ขึ้นมาจากสัดส่วนเถ้าขานอ้อยต่อเถ้าแกลบข้าว ที่ระดับ 3:1 เเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส และระยะเวลาตกผลึก 120 ชั่วโมง ถูกคัดเลือกเพื่อนำไปทดสอบกับสัตว์ทดลองในการทดลองที่ 3 ด้วยเหตุผลต่อไปนี้ ปริมาณที่ผลิตได้สูงถึง 82 กรัม และมีประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียที่สูงถึง 40 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีความสัมพันธ์และสอดคล้องกับพื้นที่ผิวและปริมาตรรูเพิ่มสูงขึ้น รวมทั้งมีรูปร่างผลึกสม่ำเสมอ การทดลองที่ 2 ศึกษาการวิเคราะห์อันตรกิริยาระหว่างซีโอไลต์กับแอมโมเนียโดยวิธีทางเคมีคำนวณ จากการคำนวณโดยใช้ทฤษฎีฟังก์ชันัลความหนาแน่น (Density Functional Theory, DFT) ที่ระดับการคำนวณ B3LYP/6-31+G(d,p) เพื่อหาโครงสร้างที่เสถียรและความถี่การสั่นของโมเลกุลเพื่อยืนยันว่าโครงสร้างที่คำนวณได้เป็นโครงสร้างที่เสถียรและอยู่บนจุดต่ำสุดของพื้นผิวพลังงานศักย์ จากผลการคำนวณพบว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของซีโอไรต์กับแอมโมเนียม ที่ได้ มีค่าเท่ากับ 74.96 กิโลแคลอรีต่อโมล การทดลองที่ 3 ศึกษาผลของการเสริมซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าขานอ้อยในอาหารไก่ไข่ต่อประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียในมูลและสมรรถภาพการผลิตไข่ โดยใช้ไก่ไข่สายพันธุ์ Hy-Line Brown จำนวน 150 ตัว จะถูกแบ่งออกเป็น 5 กลุ่มๆ ละ 10 ตัวๆ ละ 3 ตัว ประกอบด้วย กลุ่มที่ได้รับอาหารเสริมซีโอไลต์ที่ระดับ 0 (อาหารควบคุม) 1.0, 2.0, 3.0, และ 4.0 เปอร์เซ็นต์ ระยะเวลาการทดลองทั้งหมด 12 สัปดาห์ จากการทดลอง พบว่า การเสริมซีโอไรต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าขานอ้อยและเถ้าแกลบข้าวในอาหารไก่ไข่ ที่ระดับตั้งแต่ 1-4 เปอร์เซ็นต์ ไม่ส่งผลกระทบต่อสมรรถภาพการผลิตไข่และคุณภาพไข่โดยรวม แต่มีส่วนช่วยทำให้คุณภาพเปลือกไข่ดีขึ้น และอาจจะเป็นแนวทางในการช่วยลดการอัตราการสูญเสียอันเนื่องมาจากปัญหาเปลือกไข่แตกร้าวในอุตสาหกรรมการผลิตไข่ได้ ในขณะที่การเสริมซีโอไลต์มีผลทำให้ระดับแอมโมเนียในมูลมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม และมีระดับแอมโมเนียในมูลต่ำที่สุดในกลุ่มที่ได้รับอาหารเสริมซีโอไลต์ ที่ 4 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ : ซีโอไลต์; เถ้าขานอ้อย; ประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนีย; การผลิตไข่

Abstract

The present research project had four objectives including 1) to study the synthesis method of zeolite from bagasse ash; 2) to determine the ammonia adsorption of synthesized zeolite; 3) to analysis the interaction of zeolite and ammonia using computational chemistry method and 4) investigate the effect of supplementation of synthesized zeolite from bagasse ash on egg performance and ammonia adsorption from chicken manures. In experiment 1, zeolite were synthesized from different ratio of bagasse and rice hull ash (1:0, 1:1, 2:1, and 3:1). Each ratio was subjected to different factors such as flame temperatures (450, 550, 650 and 750 °C) and crystallize time (72, 120, 144 and 168 hour). Our result showed that synthesized zeolite from ratio of bagasse and rice hull ash (3:1) with flame temperatures (750 °C) and crystallize time (120 hour) was selected for further study in experiment 3. Because this condition had a high yield production (82 g) and ammonia adsorption efficiency (40%) as well as increasing surface area and pore volume, and uniform crystal. In experiment 2, computational chemistry was carried out at B3LYP/6-31+G(d,p) using density functional theory. The results showed that binding energy of zeolite and ammonia was 74.96 kcal/mol. In experiment 3, 150 twenty three week old Hy-Line Brown laying hens were divided into 5 groups with 10 replication of 3 birds each. Birds were fed a diet supplemented with zeolite at 0 (control) 1.0, 2.0, 3.0, and 4.0%, respectively during 12 week of experimental period. The results showed that no adverse effect on overall egg performance and egg quality were observed in 1-4% of zeolite supplementation levels. However, egg shall quality tended to be improved in dietary zeolite groups. In addition, zeolite (1-4%) could slightly decrease ($P>0.05$) the ammonia in chicken manures, and 4% level showed the lowest value.

Keywords: Zeolite; Bagasse ash; Ammonia adsorption efficiency; Laying hen production

สารบัญ

	หน้า
บทสรุปผู้บริหาร	
บทคัดย่อ (ไทย-อังกฤษ)	
สารบัญ	ก
สารบัญตาราง	ข
สารบัญภาพ	ค
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4-11
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	12-21
บทที่ 4 ผลการศึกษาและอภิปรายผล	22-40
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	41-42
 เอกสารอ้างอิง	 อ-1
ภาคผนวก ก ภาพตัวอย่างซีไอไรต์ที่สังเคราะห์จากสัดส่วนเถาขนอ้อยต่อเถาเกลบ (1:0) เเผาที่ อุณหภูมิและระยะเวลาตกผลึกแตกต่างกัน	ก-1
ภาคผนวก ข ภาพตัวอย่างซีไอไรต์ที่สังเคราะห์จากสัดส่วนเถาขนอ้อยต่อเถาเกลบ (1:1) เเผาที่ อุณหภูมิและระยะเวลาตกผลึกแตกต่างกัน	ข-1
ภาคผนวก ค ภาพตัวอย่างซีไอไรต์ที่สังเคราะห์จากสัดส่วนเถาขนอ้อยต่อเถาเกลบ (2:1) เเผาที่ อุณหภูมิและระยะเวลาตกผลึกแตกต่างกัน	ค-1
ภาคผนวก ง ภาพตัวอย่างซีไอไรต์ที่สังเคราะห์จากสัดส่วนเถาขนอ้อยต่อเถาเกลบ (3:1) เเผาที่ อุณหภูมิและระยะเวลาตกผลึกแตกต่างกัน	ง-1

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	5
3.1	13
3.2	16
3.3	20
4.1	23
4.2	23
4.3	24
4.4	24
4.5	26
4.6	26
4.7	27
4.8	27
4.9	30
4.10	30
4.11	31
4.12	35
4.13	36
4.14	37
4.15	37
4.16	40

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า	
2.1	ชานอ้อยและเถาชานอ้อย	5
2.2	ขั้นตอนและกระบวนการผลิตซีโอไลต์	8
3.1	แผนภาพบล็อก (Block Diagrams) เพื่อแสดงขั้นตอนในการสังเคราะห์ซีโอไรต์	14
3.2	เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนของตัวอย่าง (BET)	17
3.3	เครื่องวิเคราะห์เอกลักษณ์ของการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึก (XRD)	18
3.4	เครื่อง Scanning electron microscope (SEM)	18
3.5	เครื่องมือที่ใช้สำหรับวัดแอมโมเนียในมูลไก่	21
4.1	เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระยะเวลาตกผลึกและอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาถั่วต่อปริมาณซีโอไรต์ที่ผลิตได้จากเถาชานอ้อย : เถาแกลบข้าว ที่สัดส่วนแตกต่างกัน 4 ระดับ คือ 1:0 (A), 1:1 (B), 2:1 (C), และ 3:1 (D)	29
4.2	แสดงรูปร่างผลึกของตัวอย่างซีโอไรต์	32
4.3	เปรียบเทียบ XRD ของตัวอย่างซีโอไรต์ทางการค้า (Sample 9) และซีโอไรต์ที่สังเคราะห์ขึ้นมาจากสภาวะแตกต่างกัน (Sample 1-8)	33
4.4	เปรียบเทียบ XRD ของตัวอย่างซีโอไรต์ทางการค้าและซีโอไรต์ที่สังเคราะห์จากเถาชานอ้อยต่อเถาแกลบข้าว ที่สัดส่วน 3 ต่อ 1 เผาด้วยอุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส และระยะเวลาตกผลึก 120 ชั่วโมง (Sample 7)	34
4.5	เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับแอมโมเนียในหลอดทดลอง พื้นที่ผิว ปริมาตรรู และขนาดรู ของตัวอย่างซีโอไรต์ทางการค้า และซีโอไรต์ที่สังเคราะห์จากเถาชานอ้อยต่อเถาแกลบข้าว ที่สัดส่วน 3 ต่อ 1 เผาด้วยอุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส และระยะเวลาตกผลึก 120 ชั่วโมง (Sample 7)	34
4.6	แสดงปริมาณแอมโมเนียในมูลของไก่ไข่ที่ได้รับอาหารเสริมซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากเถาชานอ้อยในระดับต่างๆ	39

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมปศุสัตว์ของไทย โดยเฉพาะการผลิตสัตว์ปีกและสุกรได้รับผลกระทบอย่างหนักจากมาตรการห้ามหรือการต่อต้านการใช้ยาปฏิชีวนะในการผลิตสัตว์ อันเนื่องมาจากสาเหตุหลักคือการเกิดโรคอุบัติใหม่จนทำให้การใช้ยาปฏิชีวนะในฟาร์มเริ่มไม่ค่อยได้ผล หรือถ้าได้ผลก็ต้องเพิ่มปริมาณการใช้หรือเปลี่ยนชนิดของยาตัวใหม่เรื่อยๆ ส่งผลโดยตรงต่อต้นทุนการผลิตและความปลอดภัยของผู้บริโภคในแง่ของการตกค้างของสารปฏิชีวนะในผลิตภัณฑ์จากสัตว์ การผลิตปศุสัตว์ยุคใหม่ในฐานะผู้ผลิตอาหารเลี้ยงประชากรโลกควรหันมาสนใจเรื่องการจัดการสัตว์ให้มีความแข็งแรงจากตัวสัตว์เองเป็นหลัก ซึ่งการใช้อาหารหรือสารเสริมในอาหารที่เหมาะสมสำหรับสัตว์เป็นทางเลือกที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง รวมทั้งเมื่อพิจารณาด้านกระแสของผู้บริโภคส่วนใหญ่ก็เริ่มหันมาให้ความสำคัญกับอาหารสุขภาพกันมากขึ้น โดยสังเกตได้จากทิศทางการตลาดสินค้าอินทรีย์ที่กำลังขยายตัวอย่างต่อเนื่อง ทั้งๆ ที่ราคาค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับสินค้าปกติทั่วไป จากสถานการณ์ดังกล่าวจะเห็นว่าบริษัทฯ และเวชภัณฑ์สำหรับสัตว์จะนำสารเสริมเพื่อสุขภาพสัตว์ออกมาจำหน่ายมากขึ้นและหลากหลายชนิด เช่น โปรไบโอติก 프리ไบโอติก ชินไบโอติก สมุนไพร กรดอินทรีย์ และซีโอไลต์ เป็นต้น นอกจากนี้ปัญหาที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้ว ยังประสบกับปัญหาด้านการจัดการกลิ่นแอมโมเนียจากมูลในโรงเรือนและภายในฟาร์มอีกด้วย เนื่องจากปัญหาแอมโมเนียส่งผลกระทบต่อสุขภาพของคนเลี้ยงและสัตว์เลี้ยงด้วย

อย่างไรก็ดีจะเห็นได้ว่า ซีโอไลต์ (Zeolite) เป็นสารเสริมอีกชนิดหนึ่งที่กำลังได้รับความนิยมและความสนใจในการนำมาใช้ในการผลิตปศุสัตว์ เพื่อใช้เป็นสารเสริมสุขภาพ อันเนื่องมาจากมีคุณสมบัติในการดูดซับสารพิษที่ปนเปื้อนเข้าไปในร่างกาย เช่น อัลฟาโทกซิน สารเคมีตกค้างในวัตถุดิบ และเชื้อก่อโรคต่างๆ นอกจากนั้นแล้วยังพบว่าซีโอไลต์สามารถลดการผลิตแอมโมเนียทั้งภายในร่างกายและหลังจากขับถ่ายมูลออกมา รวมทั้งยังมีส่วนช่วยในการปรับปรุงองค์ประกอบทางเคมีของเนื้อได้โดยสามารถเพิ่มระดับโอเมก้า 3 ในเนื้อได้ เมื่อพิจารณาโดยรวมแล้วจะเห็นได้ว่าซีโอไลต์มีบทบาทสำคัญที่ทำให้สุขภาพสัตว์แข็งแรงขึ้น จึงส่งผลให้สมรรถภาพการผลิตและผลผลิตจากสัตว์มีความปลอดภัยต่อผู้บริโภค แต่อย่างไรก็ดีหากผู้เลี้ยงสัตว์จะนำซีโอไลต์มาใช้ในฟาร์มของตนเองนั้น ยังมีข้อจำกัดด้านต้นทุนผลิต เนื่องจากจำเป็นต้องนำเข้าซีโอไลต์มาจากต่างประเทศ หากเอกชนในประเทศไทยสามารถผลิตได้ด้วยวัตถุดิบภายในประเทศ ก็อาจจะช่วยลดต้นทุนได้ และอาจจะมีการขายอัตรการใช้อย่างแพร่หลายมากขึ้น เพื่อให้ได้สัตว์เลี้ยงมีสุขภาพดี และผู้บริโภคได้บริโภคสินค้าคุณภาพดีตามไปด้วย

ซีโอไลต์ เป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (crystalline aluminosilicates) หน่วยย่อยของซีโอไลต์ประกอบด้วยอะตอมของซิลิคอน (หรืออะลูมิเนียม) หนึ่งอะตอม และออกซิเจนสี่อะตอม (SiO_4 หรือ AlO_4) สร้างพันธะกันเป็นรูปสามเหลี่ยมสี่หน้า (tetrahedron) มีไอออนบวกที่แลกเปลี่ยนประจุได้ (exchangeable cation) ซึ่งช่องว่างทุกโมเลกุลจะเป็นตัวช่วยในการดูดซับน้ำและสารพิษได้ โดย

Zeolite มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ประมาณ 70-80 % และอลูมินา 10-20 % โดยน้ำหนัก ในส่วนของกระบวนการผลิตน้ำตาลปริมาณอ้อย 1 ตัน สามารถจะผลิตเป็นน้ำตาลได้ ประมาณ 100-120 กิโลกรัม และกากของเหลือจากกระบวนการผลิต คือ ขานอ้อย ที่มีปริมาณสูงถึง 300 กิโลกรัม เมื่อคำนวณแล้วจะพบว่าปริมาณขานอ้อยสูงถึง 33 ล้านตันต่อปี ซึ่งโดยปกติแล้วขานอ้อยจากโรงงานผลิตน้ำตาลจะถูกนำไปใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงสำหรับผลิตไอน้ำหรือและกระแสไฟฟ้า เพื่อใช้สนับสนุนกระบวนการผลิตน้ำตาล และหลังจากกระบวนการเผาไหม้เสร็จสิ้นลงจะได้เถ้าขานอ้อยหลงเหลืออยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งมูลค่าน้อยมาก เนื่องจากแนวทางการนำเถ้าขานอ้อยไปใช้ประโยชน์ยังมีอยู่อย่างจำกัด เมื่อคำนวณโดยวิธี ของ Cordeiro และคณะ (2004) จะได้เถ้าขานอ้อยหลังจากการเผาเพื่อผลิตพลังงานประมาณ 0.76 ล้านตันต่อปี อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขานอ้อยแล้ว พบว่ามีองค์ประกอบทางเคมีที่ใกล้เคียงกับซีโอไลต์ที่มีจำหน่ายทางการค้าในปัจจุบันมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งองค์ประกอบหลัก เช่น ซิลิกอนไดออกไซด์ และอลูมินา ซึ่งแนวคิดของข้อเสนอโครงการนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Moisés et al. (2013) ที่ได้ทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากขานอ้อยสายพันธุ์บราซิลภายใต้เทคนิคในห้องปฏิบัติการได้สำเร็จ และซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จัดเป็น zeolite A structure มีคุณสมบัติเป็นตัวดูดซับและแลกเปลี่ยนไอออนได้ดี

หากประเทศไทยสามารถพัฒนาองค์ความรู้ในการผลิตซีโอไลต์จากเถ้าขานอ้อยได้สำเร็จจะสามารถสร้างมูลค่าเพิ่มให้แก่ผลพลอยได้สุดท้ายจากโรงงานน้ำตาลได้อย่างมหาศาล และยังช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมได้อีกทางหนึ่งด้วย เมื่อนำเอาปริมาณเถ้าขานอ้อยที่เหลือทั้งหมดมาผลิตเป็นซีโอไลต์โดยคำนวณจากวิธี ของ วันเพ็ญ และคณะ (ไม่ระบุปี) จะได้ซีโอไลต์ในปริมาณสูงถึง 250,000 ตัน ซึ่งซีโอไลต์สำหรับสัตว์ที่มีจำหน่ายทั่วไป มีช่วงราคาอยู่ระหว่าง 8-16 บาท/กิโลกรัม คิดเป็นมูลค่าสูงถึง 2-4 พันล้านบาท ดังนั้นโครงการวิจัยนี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าขานอ้อยและทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียในหลอดทดลอง (in vitro) ซึ่งกำหนดให้มีคุณสมบัติที่ติดเทียมกับผลิตภัณฑ์ที่มีจำหน่ายทางการค้า และหลังจากนั้นจะนำไปทดสอบประสิทธิภาพเบื้องต้นในตัวสัตว์ทดลอง (in vivo) โดยการนำซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ไปใช้เป็นสารเสริมในอาหารสำหรับการผลิตไข่ เพื่อทำให้ทราบผลเบื้องต้นของประสิทธิภาพในการดูดซับแอมโมเนียในมูล และสมรรถภาพในการผลิตไข่ ก่อนที่จะนำข้อมูลที่ได้ไปประยุกต์ใช้สำหรับการผลิตสัตว์ชนิดอื่นๆ ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1) เพื่อศึกษาวิธีการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าขานอ้อยที่เหมาะสม
- 1.2.2) เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของซีโอไลต์จากเถ้าขานอ้อยในการดูดซับแอมโมเนียในหลอดทดลอง
- 1.2.3) เพื่อวิเคราะห์อันตรกิริยาระหว่างซีโอไลต์กับแอมโมเนียโดยวิธีทางเคมีคำนวณ
- 1.2.4) เพื่อศึกษาผลของการเสริมซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าขานอ้อยในอาหารไก่ไข่ต่อประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียในมูลและสมรรถภาพการผลิตไข่

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1) เพื่อศึกษาวิธีการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าขานอ้อยที่เหมาะสม
- 1.3.2) เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของซีโอไลต์จากเถ้าขานอ้อยในการดูดซับแอมโมเนียในหลอดทดลอง
- 1.3.3) เพื่อวิเคราะห์อันตรกิริยาระหว่างซีโอไลต์กับแอมโมเนียโดยวิธีทางเคมีคำนวณ
- 1.3.4) เพื่อศึกษาผลของการเสริมซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าขานอ้อยในอาหารไก่ไข่ต่อประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียในมูลและสมรรถภาพการผลิตไข่

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1) องค์ความรู้และกระบวนการผลิตซีโอไลต์จากเถ้าขานอ้อยต้นแบบที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับแอมโมเนีย
- 1.4.2) ทราบถึงระดับที่เหมาะสมของการเสริมซีโอไลต์ในอาหารไก่ไข่ต่อการดูดซับก๊าซแอมโมเนียและสมรรถภาพการผลิตไข่
- 1.4.3) ผู้ประกอบการโรงงานน้ำตาลและเกษตรกรผู้เลี้ยงไก่ให้ความสนใจและสามารถนำไปต่อยอดงานวิจัยในเชิงการผลิตซีโอไลต์หรือเกษตรกรนำซีโอไลต์ไปทดลองประยุกต์ใช้จริง

บทที่ 2

ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันอุตสาหกรรมปศุสัตว์ของไทย โดยเฉพาะการผลิตสัตว์ปีกและสุกรได้รับผลกระทบอย่างหนักจากมาตรการห้ามหรือการต่อต้านการใช้ยาปฏิชีวนะในการผลิตสัตว์ อันเนื่องมาจากสาเหตุหลักคือการเกิดโรคอุบัติใหม่จนทำให้การใช้ยาปฏิชีวนะในฟาร์มเริ่มไม่ค่อยได้ผล หรือถ้าได้ผลก็ต้องเพิ่มปริมาณการใช้หรือเปลี่ยนชนิดของยาตัวใหม่เรื่อยๆ ส่งผลโดยตรงต่อต้นทุนการผลิตและความปลอดภัยของผู้บริโภคในแง่ของการตกค้างของสารปฏิชีวนะในผลิตภัณฑ์จากสัตว์ การผลิตปศุสัตว์ยุคใหม่ในฐานะผู้ผลิตอาหารเลี้ยงประชากรโลกควรหันมาสนใจเรื่องการจัดการสัตว์ให้มีความแข็งแรงจากตัวสัตว์เองเป็นหลัก ซึ่งการใช้อาหารหรือสารเสริมในอาหารที่เหมาะสมสำหรับสัตว์เป็นทางเลือกที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง รวมทั้งเมื่อพิจารณาด้านกระแสของผู้บริโภคส่วนใหญ่ก็เริ่มหันมาให้ความสำคัญกับอาหารสุขภาพกันมากขึ้น โดยสังเกตได้จากทิศทางการตลาดสินค้าอินทรีย์ที่กำลังขยายตัวอย่างต่อเนื่อง ทั้งๆ ที่ราคาค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับสินค้าปกติทั่วไป จากสถานการณ์ดังกล่าวจะเห็นว่าบริษัทยาและเวชภัณฑ์สำหรับสัตว์จะนำสารเสริมเพื่อสุขภาพสัตว์ออกมาจำหน่ายมากขึ้นและหลากหลายชนิด เช่น โปรไบโอติก พรีไบโอติก ซินไบโอติก สมุนไพร กรดอินทรีย์ และซีโอไลต์ เป็นต้น

ปัญหาแอมโมเนียภายในโรงเรือน เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่บั่นทอนสุขภาพ สวัสดิภาพและประสิทธิภาพการผลิตสัตว์ งานวิจัยหลายชิ้น ชี้ให้เห็นว่าไก่ที่สัตว์ที่เลี้ยงอยู่ในโรงเรือนที่มีแอมโมเนียต่ำกว่า 10 ppm จะมีตัวเลขการเจริญเติบโต การแลกเนื้อ และสุขภาพโดยรวมที่ดี ยังไม่รวมถึงปัญหาเรื่องกลิ่นที่กระทบต่อชุมชนที่น้อยลงด้วย ซึ่งแอมโมเนียเกิดจาก การเปลี่ยนสภาพของกรดยูริกที่ไก่สร้างขึ้น ขั้บมากับสิ่งคัดหลั่งและของเสียในร่างกาย แล้วถูกจุลินทรีย์เปลี่ยนสภาพเป็น แอมโมเนียม (NH_4) ก่อนที่จะเปลี่ยนสภาพอีกครั้งเมื่อได้รับความร้อน ความชื้น และค่า pH ที่เหมาะสม กลายเป็นแก๊สแอมโมเนีย (NH_3) ที่มีกลิ่นฉุน และทำลายเนื้อเยื่อ ส่งผลกระทบโดยตรงต่อสุขภาพ

2.1 เถ้าขานอ้อย

จากการพยากรณ์ปริมาณอ้อยส่งเข้าหีบในโรงงานน้ำตาลในปี 2558-2559 คาดว่าจะมีปริมาณสูงกว่า 111 ล้านตัน (สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย, 2558) ในส่วนของกระบวนการผลิตน้ำตาลปริมาณอ้อย 1 ตัน สามารถจะผลิตเป็นน้ำตาลได้ ประมาณ 100-120 กิโลกรัม และกากของเหลือจากกระบวนการผลิต คือ ขานอ้อย ที่มีปริมาณสูงถึง 300 กิโลกรัม เมื่อคำนวณแล้วจะพบว่าปริมาณขานอ้อยสูงกว่า 33 ล้านตันต่อปี ขานอ้อย (Bagasse) คือ ส่วนของลำต้นอ้อยที่หีบเอาน้ำอ้อยหรือน้ำตาลออกแล้ว (ภาพที่ 2.1) ปัจจุบันขานอ้อยสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายอย่างทั้งในภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมโดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำขานอ้อยมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าหรือหม้อต้มไอน้ำให้แก่โรงงานผลิตน้ำตาล หลังจากนั้นจะได้เถ้าขานอ้อย (Bagasse ash) ซึ่งเป็นของเหลือจากกระบวนการเผาไหม้ดังกล่าว (ภาพที่ 9.1) ในปัจจุบันเถ้าขานอ้อยดังกล่าวนำมาใช้ประโยชน์ในเชิงอุตสาหกรรมและเกษตรกรรมเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อเทียบกับปริมาณที่ได้ ดังนั้นจึงต้องใช้พื้นที่ในการจัดทิ้งเป็นบริเวณกว้างและรอบๆ บริเวณพื้นที่จัดทิ้งยังได้รับผลกระทบจากฝุ่นละอองของเถ้าขานอ้อยอีก

ด้วย ดังนั้นจึงมีนักวิจัยจำนวนมากจึงพยายามหาแนวทางในการใช้ประโยชน์จากเถ้าขานอ้อย เช่น การนำมาสกัดเซลล์ลูโลส และนำมาเป็นส่วนผสมคอนกรีต เป็นต้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขานอ้อย จะพบว่าอุดมไปด้วยแร่ธาตุชนิดต่างๆ เช่น SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O , Na_2O , CaO , TiO_2 , MgO , MnO , Fe_2O_3 เป็นต้น (ตารางที่ 2.1) ดังนั้นจะเห็นได้ว่าคุณสมบัติของเถ้าขานอ้อยจะประกอบไปด้วยซิลิกอนไดออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ในระดับสูงทำให้มีความเหมาะสมที่จะนำมาเป็นสารตั้งต้นเพื่อใช้สำหรับการสังเคราะห์ซีโอไลต์



ภาพที่ 2.1 ขานอ้อยและเถ้าขานอ้อย

ที่มา : <https://sites.google.com/a/email.nu.ac.th/bamboo-architecture/concrete>

ตารางที่ 2.1 การจำแนกชนิดของซีโอไลต์ตามขนาดรูพรุน

Small pore zeolites	Middle pore zeolites	Large pore zeolites
8-membered ring	10-membered ring	12-membered ring
3.0-4.5 Å	4.5-6.0 Å	6.0-8.0 Å
Zeolite A	Zeolite ZSM-5	Zeolite L
Erionite	ZSM-11	Faujasite (X, Y)
Chabazite	Ferriete	Mordenite
Gismonite	Stibite	ZSM-12
Phillipsite	ZSM-23	Zeolite Beta

ที่มา : Guisnet and Gilson (2002)

2.2 ซีโอไลต์ (Zeolite)

ซีโอไลต์ เป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (crystalline aluminosilicates) หน่วยย่อยของซีโอไลต์ประกอบด้วยอะตอมของซิลิกอน (หรืออะลูมิเนียม) หนึ่งอะตอม และออกซิเจนสี่อะตอม (SiO_4 หรือ AlO_4) สร้างพันธะกันเป็นรูปสามเหลี่ยมสี่หน้า (tetrahedron) มีไอออนบวกที่แลกเปลี่ยนประจุได้ (exchangeable cation) ซึ่งช่องว่างทุกโมเลกุลจะเป็นตัวช่วยในการดูดซับน้ำและสารบางชนิดได้ โดย Zeolite มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ประมาณ 70-80 % และอะลูมินา 10-20 % โดยน้ำหนัก ซีโอไลต์พบได้ทั้งในธรรมชาติและจากการสังเคราะห์ขึ้นมาจากสารวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร หลากหลายชนิด เช่น แกลบข้าว ฟางข้าว ชานอ้อย เป็นต้น ซึ่งซีโอไลต์ที่ได้จากสังเคราะห์จะสามารถควบคุมขนาดและโครงสร้างที่ต้องการได้โดยอาศัยการควบคุมกระบวนการสังเคราะห์ นอกจากนี้จะพบซีโอไลต์ในรูปของโครงผลึกอะลูมิโนซิลิเกตแล้ว ยังพบได้ในรูปอื่นๆ เช่น โครงสร้างอะลูมิโนฟอสเฟต (aluminophosphates) หรือเมทัลโลซิลิเกต (metallo-silicates) เป็นต้น ซีโอไลต์มีทั้งที่พบตามธรรมชาติซึ่งมีมากกว่า 35 ชนิด และที่สังเคราะห์ขึ้นมีเป็นร้อยชนิดซึ่งสามารถสังเคราะห์ขึ้นโดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มัล ซึ่งต้องใช้ระยะเวลา ความดัน และอุณหภูมิที่กำหนดภายใต้สภาพไอน้ำอิ่มตัว องค์ประกอบหลักในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ประกอบด้วย อะลูมิเนียม ซิลิกอน ไอออนบวก และสารเคมีอื่นๆ เช่น สารเคมีกำหนดโครงสร้างซึ่งจะทำให้ได้ซีโอไลต์ชนิดที่ต้องการได้ (Prasetyoko et al., 2006) ซึ่งซีโอไลต์แต่ละชนิดจะมีสมบัติที่แตกต่างกันตามลักษณะทางโครงสร้าง ส่งผลให้ซีโอไลต์ได้รับความสนใจนำมาใช้ประโยชน์อย่างหลากหลายในปัจจุบัน

ศิรินุช (2556) กล่าวว่า ด้วยคุณสมบัติเฉพาะของซีโอไลต์จึงถูกนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการที่สำคัญสำหรับอุตสาหกรรมมากมาย ได้แก่

- การดูดซับ (adsorption) โดยเริ่มจากการใช้ซีโอไลต์ A เป็นตัวดูดความชื้นในแก๊สทำความเย็น หรือแก๊สธรรมชาติ (ปี 1955) ต่อมาใช้ในการบวแยกสารประกอบ n-butane และ iso-butane (ปี 1959) การใช้ซีโอไลต์เป็นตัวดูดซับนั้น สามารถใช้ได้ทั้งในกระบวนการทำให้แห้ง การทำให้บริสุทธิ์ และการแยกสาร ซึ่งซีโอไลต์มีสมบัติในการเลือกทำปฏิกิริยาตามรูปร่าง อันเป็นหลักการพื้นฐานของกระบวนการดูดซับระดับโมเลกุล

- การเร่งปฏิกิริยา (catalysis) การใช้ซีโอไลต์ X และ Y ในการเร่งปฏิกิริยาไอโซเมโรเซชัน (isomerization) และปฏิกิริยาการแตกตัว (cracking) ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (ปี 1962) ประโยชน์ของซีโอไลต์ในการใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้นมีมูลค่ามหาศาล โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เช่น ในปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจน การเกิดอะโรมาติก การเปลี่ยนไอโซเมอร์ เป็นต้น ซึ่งในแต่ละปีประเทศไทยต้องนำเข้าตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมเคมี ปีละกว่าพันล้านบาท และกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ของตัวเร่งปฏิกิริยานี้ คือ ซีโอไลต์

- การแลกเปลี่ยนไอออน (ion-exchange) โครงสร้างของซีโอไลต์มีประจุบวกของโลหะเกาะอยู่อย่างหลวมๆ จึงมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุกับโลหะอื่นที่อยู่ในสารละลายได้ นิยมใช้ในสารซักล้าง โดยการเติมซีโอไลต์ A ลงไปในสารซักล้างแทนสารโพลีฟอสเฟต (polyphosphate) ซึ่งเป็นสารเคมีที่เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม (ปี 1974) นอกจากนี้ยังประยุกต์ใช้กับการลดความกระด้างของน้ำ

โดยโลหะอัลคาไลน์ เช่น โซเดียม หรือ โพแทสเซียมที่เกาะกับซีโอไลต์ จะแลกเปลี่ยนประจุกับแคลเซียมและแมกนีเซียม ซึ่งเป็นประจุของโลหะในน้ำที่เป็นสาเหตุทำให้น้ำกระด้าง

2.2.1) โครงสร้างรูพรุนของซีโอไลต์ (pore structure)

ศิรินุช (2556) รายงานว่า การประยุกต์ซีโอไลต์กับกระบวนการดูดซับหรือการเร่งปฏิกิริยา ต้องอาศัยหลักการแพร่ของโมเลกุลสารผ่านรูพรุนซีโอไลต์ซึ่งขนาดรูพรุนของซีโอไลต์จะหาได้จากการพิจารณาโพรงเปิด (aperture) ที่เกิดจากการเชื่อมต่อของโครงสร้างเทระฮีดรอล TO4 โดยขนาดโพรงเปิดที่เล็กที่สุดที่สารสามารถแพร่ผ่านได้ ต้องประกอบด้วย T 8 หน่วย (8T) หรือเรียกว่า 8-membered ring (8MR) โดยโครงสร้าง ซีโอไลต์สามารถจำแนกตามขนาดรูพรุน ได้เป็น 3 ชนิด ดังแสดงในตารางที่ 9.1 นอกจากนี้ ยังพบซีโอไลต์บางชนิดที่มีรูพรุน ขนาดใหญ่พิเศษ (ultralarge pore zeolites) ตัวอย่างเช่น Cloverite (20MR) ขนาดโพรงเปิด 0.60×1.32 นาโนเมตร VPI-5 (18MR) ขนาดโพรงเปิด 1.27 นาโนเมตร ALPO4-8 (14MR) ขนาดโพรงเปิด 0.79×0.87 นาโนเมตร นอกจากความสามารถในการแพร่ของโมเลกุลผ่านรูพรุนของซีโอไลต์จะขึ้นกับขนาดของรูพรุนแล้วยังขึ้นกับอุณหภูมิด้วย โดยอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นของโมเลกุลที่แพร่ผ่านและเปิดปากโพรงของซีโอไลต์ให้ง่ายต่อการแพร่

2.2.2) สมบัติของซีโอไลต์ (Hui and Chao, 2006) ประกอบไปด้วยคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- มีโครงสร้างผลึกและรูพรุนภายใน ช่วยทำให้พื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของสารมาก นอกจากนั้นรูพรุนขนาดเล็กยังทำหน้าที่คล้ายหม้อปฏิกรณ์ระดับโมเลกุล ซึ่งทำให้เกิดแรงกระทำที่รุนแรงกับโมเลกุลของสาร

- มีสมบัติในการเลือกสารเข้าออกเพื่อทำปฏิกิริยาเคมี ซีโอไลต์ที่มีรูพรุนขนาดหนึ่งจะสามารถเลือกทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของสารที่มีขนาดเหมาะสมเท่านั้น โมเลกุลที่มีขนาดไม่เหมาะสมจะไม่สามารถเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการได้ การที่ซีโอไลต์มีขนาดและรูปร่างของรูพรุนที่เป็นลักษณะเฉพาะตัวทำให้ซีโอไลต์มีสมบัติพิเศษในการเร่งปฏิกิริยาเคมี คือสามารถเลือกสารตั้งต้นให้เข้ามาทำปฏิกิริยาได้ ถ้าสารตั้งต้นมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนจะไม่สามารถจับพื้นที่ว่างไว้ได้ การเลือกโมเลกุลดังกล่าวสามารถเลือกได้ทั้งสารตั้งต้น สารมัธยันตร์ และผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น

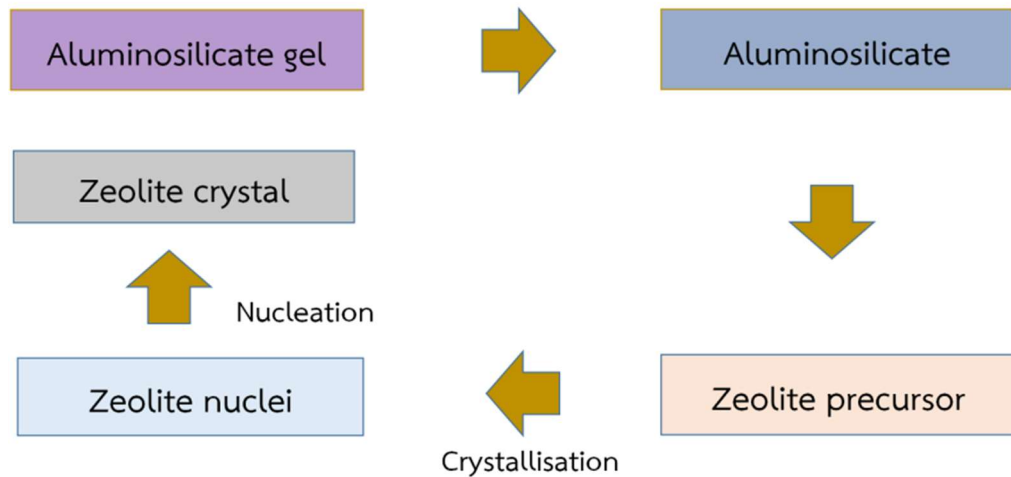
- ช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้เร็วขึ้น เนื่องจากซีโอไลต์ช่วยทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปในทิศทางที่มีพลังงานก่อกัมมันต์ลดลง ทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เร็วขึ้น

- สามารถปรับเปลี่ยนคุณสมบัติในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ เนื่องจากซีโอไลต์มีสมบัติต่างๆ ดังต่อไปนี้ จึงทำให้ซีโอไลต์มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาได้คือ 1) มีสมบัติเป็นกรด 2) มีสมบัติเป็นเบส และ 3) มีสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะทรานสิชันอยู่ภายใน

2.2.3) กระบวนการเกิดซีโอไลต์

การเกิดซีโอไลต์เกิดจากสารประกอบของซิลิกอนและอะลูมิเนียมที่อยู่ในสถานะของแข็ง ละลายกรดเป็นสารละลายหรือเจล การที่ซิลิกอนจะละลายออกมาเป็นสารละลายได้จะต้องใช้สภาวะที่มีค่าความเป็นเบสสูง จากนั้นซิลิกอนหรืออะลูมิเนียมที่เป็นสารละลายซึ่งมีความไม่เสถียร จะจับตัวเป็นโครงสร้างที่เสถียรที่สุดเท่าที่จะทำได้ ซึ่งเป็นสปี (precursor) ของซีโอไลต์ (Secondary building unit)

รูปร่างต่างๆ จากนั้นสื่อซีโอไลต์จะเกิดการรวมตัวเป็นนิวเคลียสของซีโอไลต์เล็กๆ ซึ่งมีโครงสร้างเดียวกัน ซีโอไลต์เหล่านี้จะประกอบไปด้วยเซลล์หน่วย (unit cell) ของซีโอไลต์ ซึ่งมีโครงสร้างเดียวกันกับซีโอไลต์ที่จะสังเคราะห์ จากนั้นจะเป็นช่วงที่เกิดการตกผลึก ทำให้ผลึกของซีโอไลต์มีขนาดใหญ่ขึ้น ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 ขั้นตอนและกระบวนการผลิตซีโอไลต์

2.2.4) ระยะเวลาที่ใช้สังเคราะห์ซีโอไลต์แบ่งได้เป็น 2 ช่วง คือ

- ช่วงเหนี่ยวนำ (Induction period) เป็นช่วงเวลาที่ทำให้ของผสมเกิดเป็นนิวเคลียสของผลึกหรือเกิดกระบวนการนิวเคลียส (Nucleation) ในช่วงเวลานี้เป็นตัวกำหนดโครงสร้างของซีโอไลต์โดยการเกิดนิวเคลียสจะมีการดึงเอาสื่อของซีโอไลต์ และ Secondary building unit จากสารละลายเข้ามารวมกันเป็นนิวเคลียส ถ้านิวเคลียสไม่มีความเสถียรจะละลายกลับไปเป็นสารละลายเช่นเดิม เจลที่ใช้สังเคราะห์มีอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาสูงจะมีช่วงเวลานี้นานกว่าเจลที่มีอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาต่ำ เนื่องจากมีอัตราการก่อตัวนิวเคลียสต่ำ การกวนของผสมไว้ที่อุณหภูมิห้องก่อนการสังเคราะห์เป็นการทำให้ได้อายุ (Aging) จะช่วยลดเวลาในการเหนี่ยวนำได้ ซึ่งจะช่วยลดระยะเวลาของการตกผลึกจากการศึกษาถึงอิทธิพลของการกวนของผสมก่อนทำการตกผลึกซีโอไลต์ NaA พบว่าที่ปริมาณผลึกขนาดเดียวกัน เจลที่ทำการกวนใช้เวลาในการสังเคราะห์เร็วขึ้น

- ช่วงก่อผลึก (Crystal growth) ช่วงเวลานี้เป็นช่วงที่เกิดต่อจากช่วงเหนี่ยวนำ โดยผลึกจะต้องมีขนาดวิกฤตจึงจะเกิดการก่อตัวของผลึกต่อไป ช่วงอุณหภูมิและความเป็นเบสที่สูงขึ้น จะทำให้อัตราการก่อผลึกเพิ่มขึ้น

2.2.5) ปัจจัยที่มีต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์

- อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินา มีผลต่อขนาดและโครงสร้างของซีโอไลต์ กล่าวคือ อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาเป็นตัวกำหนดโครงสร้างซีโอไลต์ คือ ถ้าปริมาณของอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาสูง

มากจะเป็นผลให้เกิดโครงสร้างที่เป็นช่อง (Channels structure) เช่น มอร์เตไนต์ แต่ถ้ามีปริมาณของอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาต่ำ มักจะเป็นผลให้เกิดโครงสร้างแบบโพรง (Cage structure) เช่น ซีโอไลต์ เอและซีโอไลต์เอ็กซ์เป็นต้น นอกจากนั้นอัตราการเกิดผลึกยังขึ้นกับอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาอีกด้วย กล่าวคือ ในการสังเคราะห์ ซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาของเจลต่ำ จะมีอัตราในการตกผลึกเร็วเนื่องจากอะลูมิเนียมในโครงสร้างเป็นทรงเหลี่ยมสี่หน้าจะแสดงประจุลบ จึงถูกเหนี่ยวนำโดยไอออนบวกที่ใช้สังเคราะห์ให้เกิดเป็นนิวเคลียสของ ซีโอไลต์ได้ง่ายกว่าเจลที่มีอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาสูง

-ความเป็นกรด-เบส โดยซิลิกอนสามารถละลายได้ดีที่ค่าความเป็นเบสของสารละลายสูงๆ ดังนั้นในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จึงต้องใช้สารละลายที่มีความเป็นพีเอชสูง เพราะจะทำให้ซิลิกอนละลายออกมาเป็นสารละลายที่มีค่าความเป็นสารละลายได้ดี เมื่อซิลิกอนละลายออกมาเป็นสารละลายก็จะเกิดการตกผลึกของซีโอไลต์ แต่สารละลายไม่ควรมีความเป็นเบสสูงเกินไป เพราะทำให้ซิลิกอนที่อยู่ในรูปสารละลายไม่สามารถตกผลึกเป็นซีโอไลต์ได้

- อุณหภูมิและความดัน เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์ โดยพบว่าที่อุณหภูมิและความดันต่างกันมีผลทำให้ผลึกซีโอไลต์ที่ได้ต่างกันดังรูปที่ 4 พบว่าที่องค์ประกอบเจล (Gel composition) เดียวกัน เมื่อทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่อุณหภูมิต่างกันจะทำให้ได้ซีโอไลต์ ที่ต่างชนิดกัน เช่น ที่องค์ประกอบของเจล n เท่ากับ 6 สามารถสังเคราะห์ Analcite ได้อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิสูงกว่า 350 องศาเซลเซียส จะได้ Albite

- ระยะเวลาของการตกผลึกของซีโอไลต์ต้องอยู่ในช่วงที่เหมาะสม โดยการสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่สถานะหนึ่งๆ ระยะเวลาจะเป็นตัวกำหนดปริมาณและชนิดของซีโอไลต์ที่เกิดขึ้น กล่าวคือ มีช่วงหนึ่งเท่านั้นที่เกิดเป็นผลึกที่ต้องการและได้ปริมาณผลึกสูงสุด ดังนั้นจึงต้องมีการกำหนดระยะเวลาในการสังเคราะห์ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ผลึกของซีโอไลต์ในปริมาณมาก โดยระยะเวลาในการตกผลึกมีผลทำให้ปริมาณของซิลิกาและอะลูมินาในเจลสารละลายและผลึกเปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้เมื่อใช้เวลาในการสังเคราะห์นานเกินไปจะเกิดซีโอไลต์ชนิดอื่นๆ ขึ้นดังรูปที่ 6 เช่น ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ NaY มีจุดเกิดผลึกที่มากที่สุดที่เวลา 18 ชั่วโมง จะทำให้เกิดซีโอไลต์อีกชนิดหนึ่ง คือ Gmelinite แล้วเกิดเป็นซีโอไลต์ P ตามลำดับ หรือ ถ้าเลือกระยะเวลาไม่เหมาะสมอาจเกิดของผสมของซีโอไลต์ทั้ง 3 ชนิด ซึ่งการเกิดซีโอไลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกันเราเรียกว่า Multiphase Crystallization

2.3 การประยุกต์ใช้ซีโอไลต์ในการผลิตสัตว์ปีก

ปัญหาที่กระทบต่ออุตสาหกรรมการผลิตสัตว์อย่างหนัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการผลิตสัตว์ปีก รองมาจาปัญหาด้านต้นทุนอาหารสัตว์ที่เพิ่มขึ้น คือ ปัญหาการจัดการสภาพแวดล้อมและสุขภาพสัตว์ อันเนื่องมาจากผู้เลี้ยงไม่สามารถควบคุมปริมาณสิ่งขับถ่ายจากสัตว์ได้ จึงส่งผลกระทบต่อคุณภาพของวัสดุรองพื้น รวมไปถึงกระบวนการกำจัดของเสียดังกล่าว (Francesch and Brufau, 2004; Kim et al., 2006) เช่น มูล อาหารหกหล่น ขน วัสดุรองนอน ทั้งหมดที่กล่าวมานี้ถือว่าเป็นปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของวัสดุรองพื้นสำหรับสัตว์ปีกทั้งสิ้น ปัญหาที่ตามมาคือความชื้นและปริมาณแอมโมเนียของวัสดุรองพื้นเพิ่มสูงขึ้น มีหลักฐานชัดเจนว่าสิ่งขับถ่ายและความชื้นของวัสดุรองพื้น ส่งผลกระทบโดยตรงต่อสุขภาพประสิทธิภาพการผลิต และสวัสดิภาพสัตว์ของทั้งไก่เนื้อและไข่ ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่กระทบต่อ

สภาพแวดล้อมและการจัดการปัญหาของอุตสาหกรรมสัตว์ปีก (Al-Homidan et al., 2003; Islam et al., 2003). ด้วยเหตุนี้ปัญหาดังกล่าวควรได้รับการแก้ไขอย่างเร่งด่วน นักวิจัยจำนวนหนึ่งได้ทำการศึกษาการประยุกต์ใช้ซีโอไลต์ในการผลิตสัตว์ปีก และในระยะหลังมานี้เริ่มมีผลงานวิจัยออกมาเผยแพร่ เช่นเดียวกับ Karamanlis et al. (2008) รายงานว่า การเสริมซีโอไซด์ตามธรรมชาติลงไปในการอาหารไก่เนื้อและวัสดุรองพื้นมีผลในทางบวกช่วยให้การเจริญเติบโตและคุณภาพวัสดุรองพื้นดีขึ้น

ในทำนองเดียวกัน หากเติมซีโอไลต์ในระดับแนะนำที่ 25% ลงไปในวัสดุรองพื้นที่เป็นขี้เลื่อยตามคำแนะนำของ Eleroglu and Yalcin (2005) จะช่วยให้สมรรถภาพการผลิต สภาพแวดล้อมภายในโรงเรือน และความชื้นของวัสดุรองพื้นดีขึ้น จากที่ได้ทำการเสริมซีโอไซด์ในอาหารไก่ไข่ที่ระดับ 2 เปอร์เซ็นต์ ช่วยให้คุณภาพของเปลือกไข่และวัตถุแห้งของมูลมีแนวโน้มที่ดีขึ้นในช่วงระยะเวลา 6 สัปดาห์ของการเลี้ยง (Gezen et al., 2009) สอดคล้องกับ Safaei et al. (2014) ที่กล่าวว่า การเติมซีโอไลต์ ดินขาว และเบนโทไนต์ ลงไปในอาหารไก่เนื้อมีผลในเชิงบวกต่อองค์ประกอบเคมีของเนื้อ ปริมาณกรดไขมันโอเมก้า 3 มีระดับเพิ่มขึ้นเมื่อไก่เนื้อได้รับอาหารเสริมซีโอไลต์ (Mallek et al., 2012) และการเสริมซีโอไลต์ทางการค้า ยี่ห้อ Anion ที่ระดับ 3 กรัมต่ออาหาร 1 กิโลกรัม พบว่า มีผลในเชิงบวกต่อการย่อยสลายอาหาร อัตราการเจริญเติบโต คุณภาพเนื้อ และช่วยลดกลิ่นภายในฟาร์มสุกร (Yan et al., 2010)

2.4 การประยุกต์ใช้ซีโอไลต์ในการผลิตสุกร

มีงานวิจัยที่พบว่าการเสริมสารกลุ่มสารสกัดจากธรรมชาติในกลุ่ม clay เช่น bentonites, zeolite หรือ kaolin นี้ในอาหารสุกรช่วยลดความรุนแรงของอาการท้องเสียในสุกร (Song et al., 2012; Trckova et al., 2009) จากพื้นที่ว่างระหว่างชั้นสามารถขยายออกได้ เมื่อมีโมเลกุลของน้ำหรือประจุบวก ดังนั้นจึงสามารถดูดซับน้ำได้ดี ทำให้มูลสุกรที่มีอาการท้องเสียมีความแน่นมากขึ้น ช่วยลดความรุนแรงของอาการได้ นอกจากนี้ยังเกี่ยวข้องกับประชากรจุลินทรีย์ในระบบทางเดินอาหาร Xia et al. (2004) พบว่าการเสริม montmorillonite 0.2 % ช่วยลดปริมาณ E.coli ในลำไส้เล็กส่วน jejunum ในสุกรหย่านม ต่อมาการทดลองของ Xia et al. (2005) พบว่าช่วยเพิ่ม Bifidobacteria และ Lactobacillus และช่วยลด Clostridium และ E. coli ในลำไส้เล็กเมื่อเสริม montmorillonite ในอาหาร 1.5 g/kg นอกจากนี้ Li and Kim (2013) รายงานการเสริม sericite 0.5 and 1.0 % ในอาหารช่วยลดปริมาณ E. coli ในมูลสุกรได้ 12.6 และ 11.6 % ตามลำดับ ในขณะที่ Wang et al. (2012) รายงานว่าเมื่อเสริม montmorillonite clay ในอาหารสุกร ทำให้เพิ่มปริมาณ Lactobacillus และลด E. coli ในมูลสุกร จากรายงานการวิจัยในลูกสุกรเกิดใหม่ พบรายงานการเสริมซีโอไลต์ ช่วยลดการเกิดท้องเสีย โดยผ่านการได้รับภูมิคุ้มกันจากนมแม่เหลือง เพราะมีการดูดซึม immunoglobulins ได้มากขึ้น (Stojic et al., 1998) ซึ่งมีรายงานสรุปไว้ว่าผลิตภัณฑ์ที่เป็นแร่ธาตุในกลุ่ม aluminosilicate (61.90% SiO₂, 23.19% Al₂O₃, 3.97% Fe₂O₃ และ 3.36% Na₂O) สามารถใช้เป็นทางเลือกในการเสริมแทนสารปฏิชีวนะในอาหารสุกรในระดับ 5 ถึง 20 g/kg (Chen et al. 2005a, b)

สำหรับในประเด็นของการเสริมสารกลุ่มซีโอไลต์ ช่วยในเรื่องของการปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิต อาจเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของพลังงานใช้ประโยชน์ได้สุทธิในอาหารที่เพิ่มขึ้น โดย Yan et al.

(2010) รายงานการย่อยได้ของวัตถุแห้ง ไนโตรเจน และพลังงาน เพิ่มขึ้นเป็นเส้นโค้งเมื่อเสริมสารกลุ่ม clay ในระดับ 0, 3 หรือ 6 g/kg ในอาหารสุกรรุ่น-ขุน Duan et al. (2013) ไม่พบว่าการเสริม montmorillonite ในระดับสูงถึง 5.0% จะส่งผลเป็นพิษต่อสุกรแต่อาจส่งผลถึงการสะสมแร่ธาตุในกระดูกสุกรได้ กลไกที่สามารถอธิบายถึงผลในการกระตุ้นการเจริญเติบโตหรือเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ประเด็นหนึ่งได้แก่การลดปริมาณจุลินทรีย์ที่สร้างแอมโมเนียในระบบทางเดินอาหาร (Shurson et al., 1986) ซึ่งทำให้ความต้องการสารอาหารที่จะใช้สำหรับการสร้างเซลล์ใหม่ในระบบทางเดินอาหารลดลง จึงมีสารอาหารเหลือไปใช้สำหรับการเจริญเติบโตมากขึ้น (Poulsen and Oksbjerg, 1995) นอกจากนี้ ยังพบว่าช่วยเพิ่มระดับ growth hormone ในอาหารสุกรที่เสริม montmorillonite 0.5 %. (Yu et al., 2005) ยืนยันได้จากผลการวิจัยของ Alexopoulos et al. (2007) พบว่าเมื่อเสริม clinopiolite 2 % ในอาหารตั้งแต่สุกรอายุ 25 วันจนกระทั่งส่งตลาดที่อายุ 161 วัน ช่วยเพิ่มน้ำหนักตัว 5.3 % และการตอบสนองในสุกรอายุน้อยดีกว่าในสุกรอายุมากเช่นเดียวกับรายงานก่อนหน้านี้ของ Pond et al. (1988) พบว่าการเสริม clinopiolite 2 % ในอาหารช่วยเพิ่มน้ำหนักตัวและการเปลี่ยนอาหารได้ 14.3 % และ 2.9 % ในสุกรระยะรุ่น สำหรับผลการวิจัยผลิตภัณฑ์ทางการค้าชื่อว่า Aniont (Eunjinbio system Choongnam Cheonan, Korea) ซึ่งประกอบด้วย 72.60% SiO₂, 8.18% Al₂O₃, 9.42% Fe₂O₃, 5.25% K₂O และ 1.41% Na₂O พบว่าการเสริม Aniont ในปริมาณ 3 g/kg ในอาหารสุกรหย่านม ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและการย่อยได้ของโภชนะ รวมทั้งลดการปลดปล่อยก๊าซที่เป็นอันตรายได้ (Yan et al., 2011)

สำหรับการลดผลกระทบต่องิ๊วแวดล้อมของการเลี้ยงสุกร ในประเด็นของการช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซ Shurson et al. (1984), Poulsen and Oksbjerg (1995), Chen et al. (2005) และ Bujnák et al., (2015) พบว่าปริมาณไนโตรเจนที่ปลดปล่อยออกมาในมูลมากกว่าในปัสสาวะเมื่อสุกรได้รับซีโอไลท์เสริมในอาหาร ซึ่งจะเป็นผลดีเพราะไนโตรเจนในปัสสาวะจะมีลักษณะระเหยง่าย ดังนั้นจึงช่วยลดปริมาณไนโตรเจนออกสู่สิ่งแวดล้อมได้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 การทดลองที่ 1: ศึกษาวิธีการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าขานอ้อยที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นอาหารเสริมและตัวดูดซับแอมโมเนียสำหรับการผลิตสัตว์

คณะผู้วิจัยได้รับความอนุเคราะห์เถ้าขานอ้อย จากโรงงานน้ำตาลพิษณุโลก จำกัด อำเภอบางกระทุ่ม จังหวัดพิษณุโลก และเถ้าแกลบข้าวได้รับการสนับสนุนจากโรงสีข้าวชุมชน ต.ท่าโพธิ์ อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก หลังจากนั้นนำเถ้าทั้ง 2 ชนิด ไปร่อนด้วยตะแกรงขนาด 0.5 ตารางเซนติเมตร เพื่อทำการคัดแยกสิ่งปนเปื้อน เช่น ดิน กรวด ซากอ้อย เป็นต้น นำเถ้าที่ร่อนเสร็จเรียบร้อยแล้ว ไปอบที่ตู้อบลมร้อนเพื่อไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ 1 คืน เมื่อตัวอย่างเย็นตัวลง เก็บไว้ในถุงพลาสติกพร้อมปิดปากถุงให้สนิท และเก็บไว้ในที่แห้ง

การสังเคราะห์ซีโอไลต์ในการศึกษาครั้งนี้ ใช้สัดส่วนระหว่างเถ้าขานอ้อย : เถ้าแกลบข้าว ที่สัดส่วนแตกต่างกัน 4 ระดับ คือ 1:0, 1:1, 2:1, และ 3:1 โดยดัดแปลงวิธีการมาจาก Moisés et al. (2013) ซึ่งจะมีการปรับเปลี่ยน 2 ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการผลิตเพื่อให้ได้ซีโอไลต์ที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับแอมโมเนียสูงสุด คือ

ก) อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา แตกต่างกัน 4 ระดับ คือ 450, 550, 650, 750 องศาเซลเซียส นาน 40 นาที

ข) ระยะเวลาในการตกผลึกที่อุณหภูมิ 80°C แตกต่างกัน 4 ระดับ คือ 72, 120, 144, 168 ชั่วโมง

3.1.1) ขั้นตอนในการสังเคราะห์ซีโอไรต์

การสังเคราะห์ซีโอไรต์ในการศึกษาครั้งนี้เป็นการผลิตในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab scale) ทุกขั้นตอนได้ดำเนินการตามข้อแนะนำของหลักการใช้ห้องปฏิบัติการเพื่อความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน โดยมีขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

ก) เผาเถ้าขานอ้อย และเถ้าแกลบข้าว ด้วยเตาเผาอุณหภูมิสูง (Furnace) โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแตกต่างกัน 4 ระดับ คือ 450, 550, 650 หรือ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที ทิ้งไว้ 1 คืน เมื่อตัวอย่างเย็นตัวลง นำมาบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดไฟฟ้า ร่อนด้วยตะแกรงขนาด 1 ตารางมิลลิเมตร แล้วเก็บไว้ในถุงพลาสติกพร้อมปิดปากถุงให้สนิท

ข) นำเถ้าขานอ้อย และเถ้าแกลบข้าวที่ผ่านการเผาแล้วที่อุณหภูมิต่างๆ มาผสมกันตามสัดส่วนที่ได้กำหนดไว้ คือ 1:0, 1:1, 2:1 หรือ 3:1 โดยชั่งน้ำหนักเถ้าขานอ้อย และเถ้าแกลบข้าวรวมกันให้ได้จำนวน 50 กรัม มีสัดส่วนของเถ้าขานอ้อย และเถ้าแกลบข้าว ดังตารางที่ 3.1

ค) นำส่วนผสมของเถ้าขานอ้อยและเถ้าเกลบข้าวตามสัดส่วนที่กำหนดไว้ไปผสมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จำนวน 75 กรัม และทำการผสมคลุกเคล้าให้เข้ากัน แล้วนำไปเข้าเตาเผาอุณหภูมิสูงที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส นาน 40 นาที เมื่อตัวอย่างเย็นตัวลง นำมาบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดไฟฟ้า

ฆ) เตรียมสารละลายโซเดียมอะลูมิเนต 0.48 mol L^{-1} โดยเทน้ำกลั่นลงในบีกเกอร์ 2 ลิตร แล้วเติมโซเดียมอะลูมิเนต 39 กรัม คนให้เข้ากันด้วยเครื่องกวนสารละลายอัตโนมัติ

ง) นำเถ้าที่ได้เตรียมไว้ (ข้อ 3.1.3) เเทลงไปในสารละลายโซเดียมอะลูมิเนตแล้ว คนให้เข้ากันด้วยเครื่องกวนสารละลายอัตโนมัติ แล้วทิ้งไว้ให้ตกผลึก ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ตามระยะเวลาการตกผลึกที่แตกต่างกัน 4 ระดับ คือ 72, 120, 144 หรือ 168 ชั่วโมง

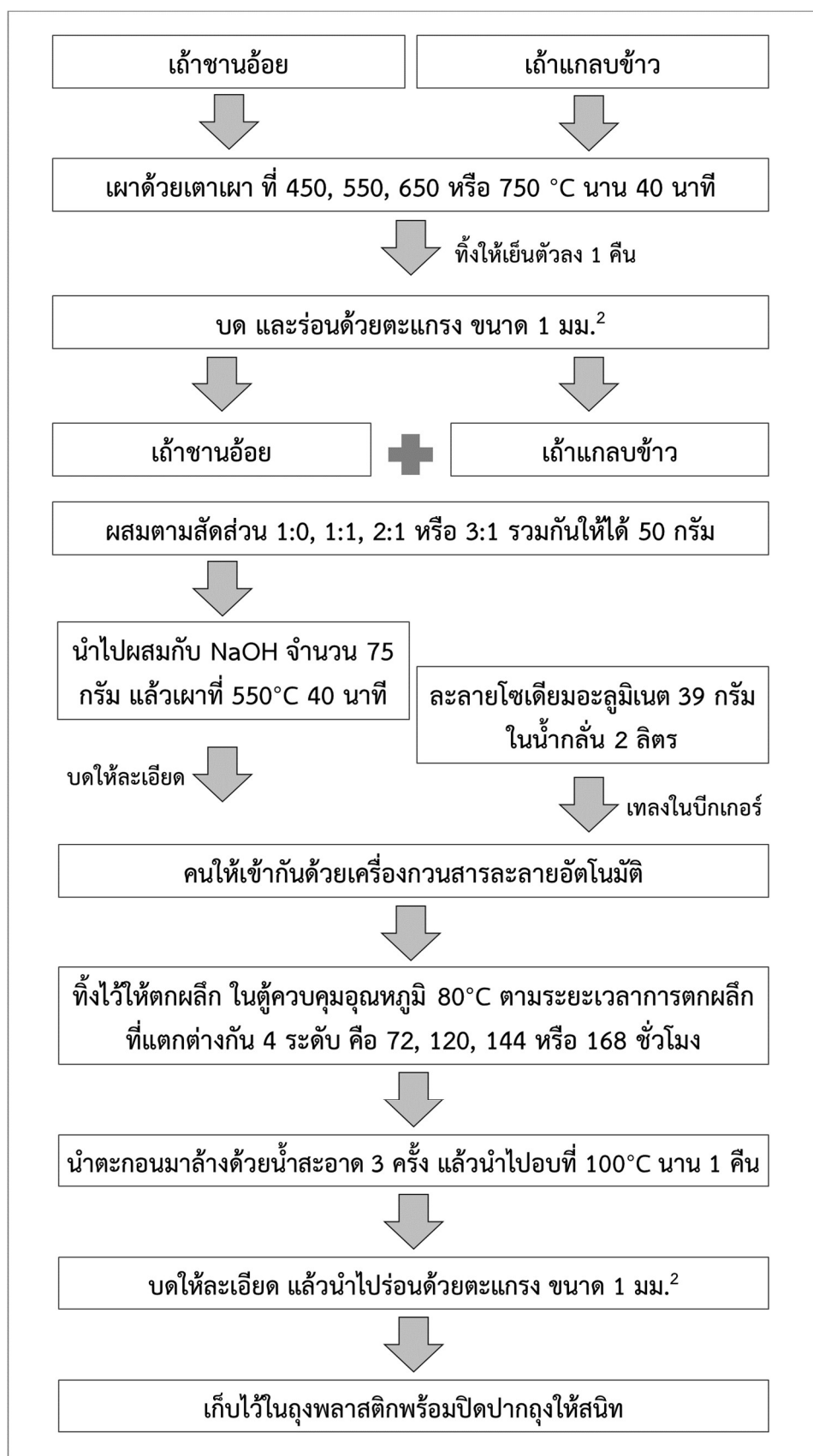
จ) เมื่อมีการตกผลึกเสร็จสิ้น เทสารละลายใสส่วนบนออก และนำส่วนที่ตกตะกอนอยู่ตรงกันบีกเกอร์มาล้างด้วยน้ำสะอาด ประมาณ 3 ครั้ง แล้วจึงนำตะกอนกึ่งเหลวไปเข้าเครื่องปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกเอาซีโอไลต์ออกมา ซึ่งซีโอไลต์ที่ได้จะมีลักษณะคล้ายดินเหนียว มีสีน้ำตาลอ่อน จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ 1 คืน

ฉ) นำซีโอไลต์ที่ได้มาบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดไฟฟ้า และนำไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 1 ตารางมิลลิเมตร แล้วเก็บไว้ในถุงพลาสติกพร้อมปิดปากถุงให้สนิท

โดยมีแผนภาพบล็อก (Block Diagrams) เพื่อแสดงขั้นตอนในการสังเคราะห์ซีโอไรต์ ดังแสดงในภาพที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนเถ้าขานอ้อยต่อเถ้าเกลบข้าวและปริมาณที่นำมาผสมกัน

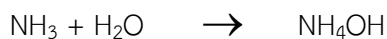
สัดส่วน	ปริมาณเถ้าขานอ้อย : เถ้าเกลบข้าว (กรัม)
1:0	50: 0
1:1	25: 25
2:1	33.3: 16.7
3:1	37.5: 12.5



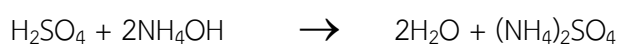
ภาพที่ 3.1 แผนภาพบล็อก (Block Diagrams) เพื่อแสดงขั้นตอนในการสังเคราะห์ซีโอไรต์

3.1.2) ขั้นตอนประเมินประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียของซีโอไรต์

โดยปกติแล้ว แอมโมเนียเมื่ออยู่ในน้ำจะอยู่ในรูปของแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ดังปฏิกิริยาเคมีที่แสดงด้านล่าง



เมื่อทำการเติมซีโอไรต์ลงในสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์แล้ว ซีโอไรต์จะสามารถดูดซับแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ได้บางส่วน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของซีโอไรต์ ส่งผลให้ความเข้มข้นของแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์มีค่าลดลง การหาความเข้มข้นที่เหลือของแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์สามารถทำได้โดยการไทเทรตกับสารละลายกรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid) ที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน โดยใช้ Methyl red เป็นอินดิเคเตอร์ (Indicator) ดังปฏิกิริยาเคมีที่แสดงด้านล่าง



ขั้นตอนประเมินประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียของซีโอไรต์ที่ผลิตได้ทั้งหมด จำนวน 64 ตัวอย่าง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

ก) ทำการชั่งตัวอย่างซีโอไรต์ จำนวน 4 กรัม ใส่ในกระดาชกรอง แล้วพับเพื่อบรรจุตัวอย่างให้อยู่ในกระดาชกรอง หลังจากนั้นมานำผูกด้วยเชือกที่เตรียมไว้ มีความยาวประมาณ 15 เซนติเมตร (เชือกที่ผูกไว้ไว้เพื่อให้สะดวกในกรณีที่ข้ายตัวอย่างไปแช่ลงในสารละลายแต่ละขวด)

ข) ก่อนอื่นนำตัวอย่างที่ห้อยอยู่ในกระดาชกรองไปแช่ในสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ขวดที่ 1 มีค่า pH เท่ากับ 6 เป็นเวลา 60 นาที

ค) นำตัวอย่างไปแช่ต่อในสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ขวดที่ 2 มีค่า pH เท่ากับ 4 เป็นเวลา 40 นาที

ง) นำตัวอย่างไปแช่ต่อในสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ขวดที่ 3 มีค่า pH เท่ากับ 6 เป็นเวลา 60 นาที

จ) นำเอาตัวอย่างซีโอไรต์ที่ถูกห้อยอยู่ในกระดาชกรองออกมาใส่ในขวดรูปชมพู่ที่มีสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.50 M จำนวน 200 มิลลิลิตร ทำการเขย่าต่อเนื่องในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath) ที่ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 นาที

ฉ) เมื่อครบตามเวลาที่ได้กำหนดไว้ นำสารละลายตั้งทิ้งไว้รอจนให้ตัวอย่างตกตะกอนเป็นเวลา 20 นาที จะได้สารละลายสีใส หลังจากนั้นทำการเปิดสารละลายมาจำนวน 10 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดทดลองเพื่อรอการไทเทรต

ณ) เทสารละลายลงในขวดรูปชมพู่ แล้วทำการเติม Methyl red ซึ่งใช้เป็นอินดิเคเตอร์ (Indicator) จำนวน 3 หยด

ข) นำสารละลายที่ได้ไปไทเทรตกับกรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid) ความเข้มข้น 0.50 M จนถึงจุดยุติ โดยสารละลายเปลี่ยนสีจากสีเหลือง เป็นสีแดง ทำการจดบันทึกปริมาตรที่ใช้ ทำซ้ำอีก 2 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยของกรดซัลฟิวริกที่ใช้ไป

ช) ทำการคำนวณความเข้มข้นของแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ที่เหลือจากการดูดซับโดยใช้สูตร $C_1V_1 = C_2V_2$

ฌ) คำนวณหาปริมาณการดูดซับแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ของซีโอไรต์ มีหน่วยเป็น โมลต่อกรัม (mol/g) ของซีโอไรต์ที่ได้ใช้ไป

ญ) คำนวณประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียของซีโอไลต์โดยใช้สมการ ดังนี้

$$\text{ประสิทธิภาพการดูดซับ (\%)} = (C_i - C_f) \times 100 / C_i$$

เมื่อ C_i = ความเข้มข้นของ NH_4OH เริ่มต้น

C_f = ความเข้มข้นของ NH_4OH สุดท้าย

หมายเหตุ: ข้อที่ 3.2.2 – 3.2.4 ได้อ้างอิงจากค่า pH และระยะเวลา จากรายงานของ Mabelebele et al. (2013) และ Nkukwana et al. (2015) ซึ่งเป็นการดัดแปลงเพื่อจำลองการไหลผ่านของอาหารตามส่วนต่างๆ ของอวัยวะย่อยอาหาร ตั้งแต่กระเพาะพัก กระเพาะแท้ กระเพาะบด ลำไส้เล็ก ตามลำดับ ดังรายละเอียดแสดงในตารางที่

ตารางที่ 3.2 การจำลองการไหลผ่านของอาหารตามส่วนต่างๆ ของอวัยวะย่อยอาหาร

จำลองอวัยวะทางเดินอาหารแต่ละส่วน	ระยะเวลา	ค่า pH
ขวดที่ 1 Crop	60 นาที	6.0
ขวดที่ 2 Proventriculus + Gizzard	40 นาที	4.0
ขวดที่ 3 Duodenum + Jejunum	60 นาที	6.0
ขวดทดสอบการดูดซับ	100 นาที	

3.1.3 การคัดเลือกซีโอไรต์เพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วย BET, XRD และ SEM

หลักที่ใช้ในการคัดเลือกซีโอไรต์ จำนวน 9 ตัวอย่าง แบ่งเป็นซีโอไรต์ทางการค้า 1 ตัวอย่าง และซีโอไรต์ที่ผลิตได้เองในห้องปฏิบัติการ 8 ตัวอย่าง โดยจะทำการคัดเลือกซีโอไรต์ที่ถูกผลิตขึ้นมาจาก ถ้ำซานอ้อย : ถ้ำกลบข้าว ทั้ง 4 สัดส่วน (1:0, 1:1, 2:1, และ 3:1) โดยคัดเลือกซีโอไรต์ที่มีปริมาณ

การผลิต ไม่ต่ำกว่า ค่าเฉลี่ยของซีโอไรต์ที่สามารถผลิตได้ในแต่ละสัปดาห์ เพื่อนำมาพิจารณาคัดเลือกตัวอย่างซีโอไรต์ที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับแอมโมเนียในหลอดทดลองได้สูงสุด 1 ตัวอย่าง และต่ำสุด 1 ตัวอย่าง จากปัจจัยร่วม 2 ปัจจัย คือ ระยะเวลาที่ตกผลึก และอุณหภูมิเผา โดยยึดความแตกต่างทางสถิติเป็นสำคัญ ดังนั้นจะทำให้ได้ตัวอย่างซีโอไรต์สัปดาห์ละ 2 ตัวอย่าง (ทั้งหมดมี 4 สัปดาห์) รวมทั้งหมดเป็น 8 ตัวอย่าง เพื่อนำตัวอย่างซีโอไรต์ไปวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ ดังนี้

ก) วิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET (Brunauer–Emmett–Teller) เป็นวิธีการวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนของตัวอย่าง Surface area and porosity analyzer โดยอาศัยเทคนิคการแทนที่พื้นที่ผิวหรือรูพรุนด้วยแก๊สไนโตรเจน โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ ยี่ห้อ Micromeritics รุ่น TriStar II 3020 ดังแสดงในภาพที่ 3.2

ข) วิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD (X-ray diffraction) เป็นเทคนิคที่วิเคราะห์เอกลักษณ์ของการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึก โดยการใช้การคำนวณจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray) เทคนิคดังกล่าวนี้สามารถตรวจหาเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก และหา Unit Cell Size ของสารตัวอย่าง ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer) ยี่ห้อ Panalytical รุ่น Expert 2Theta ดังแสดงในภาพที่ 3.3

ค) วิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM (Scanning electron microscope) เพื่อถ่ายภาพตัวอย่างซีโอไรต์กำลังขยายสูงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) ยี่ห้อ LEO รุ่น Leo1455VP ดังแสดงในภาพที่ 3.4

ง) วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS (Energy dispersive X-ray Spectrometer) เพื่อวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (Quantitative) ที่เป็นองค์ประกอบของตัวอย่างซีโอไรต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) ยี่ห้อ LEO รุ่น Leo1455VP พร้อมติดตั้งอุปกรณ์พิเศษ Energy-dispersive X-ray microanalyser ดังแสดงในภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.2 เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนของตัวอย่าง (BET)



ภาพที่ 3.3 เครื่องวิเคราะห์เอกลักษณ์ของการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึก (XRD)



ภาพที่ 3.4 เครื่อง Scanning electron microscope (SEM)

3.2 การทดลองที่ 2: ศึกษาการวิเคราะห์อันตรกิริยาระหว่างซีโอไลต์กับแอมโมเนียโดยวิธีทางเคมีคำนวณ

3.2.1) วิธีการคำนวณ (Method of calculations)

การคำนวณอันตรกิริยาระหว่างซีโอไลต์กับแอมโมเนียโดยวิธีทางเคมีคำนวณ (computational chemistry) ซึ่งการคำนวณทางเคมีทฤษฎีได้ถูกนำมาใช้ในการคำนวณหาอันตรกิริยาระหว่างซีโอไลต์กับแอมโมเนีย โดยได้มีการนำระเบียบวิธีฟังก์ชันความหนาแน่น (Density Functional Theory) มาใช้เป็นเครื่องมือในการคำนวณที่ระดับการคำนวณ B3LYP/6-31+G(d) โดยมีขั้นตอนการคำนวณดังต่อไปนี้

ก) สร้างโครงสร้างโมเลกุลเริ่มต้นที่จะศึกษา ได้แก่ ซีโอไลต์ และ แอมโมเนีย โดยโมเลกุลของ Zeolite ได้ทำการเลือกหน่วยที่เล็กที่สุดของ Zeolite เพื่อลดจำนวนพื้นที่การคำนวณและลดเวลาที่ใช้ในการคำนวณ โดยใช้โปรแกรม Gabedit software package ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จาก สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)

ข) หลังจากนั้นทำการคำนวณหาโครงสร้างที่เสถียร (Geometry optimizations) ของโมเลกุลทั้งสามด้วยระเบียบวิธี Density Functional Theory (DFT) ที่ระดับการคำนวณ B3LYP/6-31+G(d,p)

ค) เมื่อได้โครงสร้างที่เสถียรแล้วทำการคำนวณความถี่การสั่น (Frequency calculations) เพื่อยืนยันว่าโครงสร้างที่คำนวณได้เป็นโครงสร้างที่เสถียรที่แท้จริงและอยู่บน Local minima บน Potential energy surface โดยใช้ระเบียบวิธี Density Functional Theory (DFT) ที่ระดับการคำนวณ B3LYP/6-31+G(d,p) เช่นเดียวกับการคำนวณหาโครงสร้างที่เสถียรของโมเลกุล

จ) การคำนวณหาพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding energy calculations) ระหว่าง Zeolite กับ Ammonium สามารถคำนวณได้จากการนำเอาพลังงานของ Zeolite รวมกับพลังงานของ Ammonium แล้วลบด้วยพลังงานของ Zeolite-ammonium complex ดังแสดงในสมการ

$$\text{Binding energy (kJ/mol)} = [(E_{\text{Zeolite}} + E_{\text{Ammonium}}) - E_{\text{Zeolite-ammonium-Complex}}] \times 2625.5$$

3.3 การทดลองที่ 3: ศึกษาผลของการเสริมซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าขานอ้อยในอาหารไก่ไข่ต่อประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียในมูลและสมรรถภาพการผลิตไข่

3.3.1) การวางแผนการทดลองและการจัดการสัตว์ทดลอง

ใช้ไก่ไข่สายพันธุ์ Hy-Line Brown เลี้ยงบนกรงตับภายในโรงเรือนแบบระเหยไอน้ำ (Evaporative cooling system) ไก่ทุกตัวได้รับวัคซีนตามโปรแกรมที่แนะนำโดยกรมปศุสัตว์ การเลี้ยงดูปฏิบัติตามคำแนะนำของคู่มือการจัดการประจำพันธุ์ ก่อนเริ่มการทดลองจะทำการบันทึกข้อมูลผลผลิตไข่เป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์ เพื่อตรวจสอบเปอร์เซ็นต์ไข่สำหรับใช้เป็นเกณฑ์ในการจัดกลุ่มการทดลอง เมื่ออายุครบ 23 สัปดาห์ ไก่ที่มีเปอร์เซ็นต์ไข่ใกล้เคียงกัน จำนวน 150 ตัว จะถูกแบ่งออกเป็น 5

กลุ่มๆ ละ 10 ซ้ำๆ ละ 3 ตัว ประกอบด้วย กลุ่มที่ได้รับอาหารเสริมซีโอไลต์ที่ระดับ 0 (อาหารควบคุม) 1.0, 2.0, 3.0, และ 4.0 เปอร์เซ็นต์ ระยะเวลาการทดลองทั้งหมด 12 สัปดาห์ คำนวณและเตรียมอาหารทดลองให้มีคุณค่าโภชนะไม่ต่ำกว่าความต้องการตามที่ได้ระบุไว้ในคู่มือประจำพันธุ์ โดยปรับระดับโปรตีนหยาบ (18 เปอร์เซ็นต์) และค่า ME (2,850 kcal/kg) ให้เท่าเทียมกัน ดังตารางที่ 3.3 จัดเตรียมอาหารและน้ำให้ไก่กินอย่างเต็มที่ตลอดระยะเวลาการทดลอง 12 สัปดาห์ โดยมีโปรแกรมการให้อาหารจำนวน 2 ครั้งต่อวัน คือ เวลา 07.00 น. และ 16.00 น. และควบคุมการให้แสงสว่าง (Lighting program) วันละ 17 ชั่วโมง ทำการบันทึกปริมาณอาหารที่กิน จำนวนไข่ และน้ำหนักไข่ เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาสมรรถภาพการผลิตไข่

ตารางที่ 3.3 วัตถุดิบและองค์ประกอบทางเคมีของอาหารพื้นฐาน

Item	(%)
Ingredients	
Corn	45.0
Broken rice	5.6
Cassava meal	5.7
Palm oil	3.0
Soybean meal (45% CP)	22.9
Fish meal (57% CP)	8.0
Calcium Carbonate	8.3
Di-calcium Phosphate	1.0
Salt	0.05
Concentrate mixture ^{1/}	0.25
DL-methionine	0.20
Total	100.00
Chemical composition	
Crude protein	18.00
Crude fat	5.78
Crude fiber	2.86
Calcium	4.01
Phosphorus	0.68
ME (kcal/kg)	2,850

^{1/}Supplied per 100 kg of diet, vitamin A (15,000,000 IU); vitamin D3 (3,000,000 IU); vitamin E (2600 IU); vitamin K (35g); vitamin B1 (2.5g); vitamin B2 (6.5g); vitamin B6 (275.5g); vitamin B12 (26mg); pantothenic acid (11.04g); nicotinic acid (35g); biotin (15.1mg), choline chloride (250g); Copper (1.6g); Manganese (60.2g); Iron (1.6g); Zinc (45g); Iodine (400mg) and Selenium (160mg).

3.3.2) การวิเคราะห์คุณภาพไข่

ในแต่ละสัปดาห์จะทำการสุ่มไข่จำนวน 20 ฟอง/กลุ่ม สัปดาห์ละ 2 ครั้ง เพื่อนำมาการวิเคราะห์คุณภาพไข่ด้วยเครื่องวิเคราะห์ไข่อัตโนมัติ (EMT-7300, Robotmation Co. Ltd., Tokyo, Japan) เก็บข้อมูลคุณภาพไข่ เช่น น้ำหนักไข่เฉลี่ย ดัชนีรูปทรงไข่ ไข่ขาว ไข่แดง เปลือกไข่ สีไข่แดง และหน่วยฮอก (Haugh units) รวมทั้งความหนาของเปลือกไข่ โดยใช้ไมโครมิเตอร์วัดจากตำแหน่งเปลือกไข่ 3 ตำแหน่ง คือ ส่วนป้าน ส่วนกลาง และส่วนแหลม แล้วนำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ย

3.3.3) การวัดแอมโมเนียในมูล

สุ่มเก็บตัวอย่างมูลจากแต่ละกลุ่มๆ ละ 5 ตัวอย่าง เพื่อนำมาการวัดแอมโมเนียในมูล สัปดาห์ละ 1 ครั้ง โดยแต่ละตัวอย่างจะเก็บมูลจากไก่ 3 ตัว นำมาใส่ถุงพลาสติกและผสมคลุกเคล้ามูลไก่ที่เก็บมาให้เข้ากัน ก่อนเริ่มทำการวิเคราะห์ระดับก๊าซแอมโมเนียจะชั่งตัวอย่างมูลจำนวน 30 กรัม และนำไปใส่ในภาชนะพลาสติกที่สามารถเก็บกักก๊าซแอมโมเนียได้ แล้วจึงนำภาชนะที่บรรจุมูลอยู่ภายในไปบ่มที่ตู้ควบคุมอุณหภูมิ ที่ 37 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำออกมาทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้องอีก 30 นาที ทำการวัดแอมโมเนียด้วยเครื่องวัดแอมโมเนีย) ยี่ห้อ Crowcon รุ่น CDoC-15 (Gasman NH3, Crowcon Detection Instruments Ltd,) ดังแสดงในภาพที่ 3.5 พร้อมจดบันทึก โดยวิธีการวัดแอมโมเนียทั้งหมดดัดแปลงจาก Yamauchi et al. (2010)

3.3.4) การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

เมื่อรวบรวมข้อมูลสมรรถภาพการผลิตคุณภาพไข่ และปริมาณก๊าซแอมโมเนียทั้งหมดเสร็จสิ้น ข้อมูลดังกล่าวจะนำไปวิเคราะห์หาค่าความแปรปรวน (Analysis of Variances, ANOVA) ตามแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) และเปรียบเทียบค่าความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test



ภาพที่ 3.5 เครื่องมือที่ใช้สำหรับวัดแอมโมเนียในมูลไก่

บทที่ 4

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

4.1 การทดลองที่ 1 : ศึกษาวิธีการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าขานอ้อยที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นอาหารเสริมและตัวดูดซับแอมโมเนียสำหรับการผลิตสัตว์

ตารางที่ 4.1 แสดงปริมาณของซีโอไลต์ที่ได้หลังจากการสังเคราะห์จากเถ้าขานอ้อยต่อเถ้ากลบข้าว ที่สัดส่วน 1 ต่อ 0 พบว่า ค่าเฉลี่ยของปริมาณซีโอไลต์ที่ได้หลังจากการสังเคราะห์ มีค่าเท่ากับ 78 กรัม/ตัวอย่าง และมีซีโอไรต์ที่มีปริมาณการผลิตได้ไม่ต่ำกว่าค่าเฉลี่ย จำนวน 10 ตัวอย่าง คือ ตัวอย่างที่ 1, 3, 4, 5, 8, 10, 11, 12, 15 และ 16 โดยมีค่าเท่ากับ 80.8 ± 1.5 , 80.8 ± 2.2 , 81.0 ± 3.5 , 78.5 ± 1.3 , 83.5 ± 5.4 , 80.5 ± 2.9 , 86.5 ± 7.8 , 81.5 ± 6.4 , 79.8 ± 3.8 และ 78.8 ± 3.9 กรัม ตามลำดับ เพื่อนำไปพิจารณาคัดเลือกซีโอไรต์ที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับแอมโมเนียในหลอดทดลอง ตารางที่ 4.2 แสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าขานอ้อยต่อเถ้ากลบข้าว ที่สัดส่วน 1 ต่อ 0 พบว่า ซีโอไลต์ที่เผาด้วยอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ระยะเวลาตกผลึก 72 ชั่วโมง (Sample 1) มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียของซีโอไรต์สูงสุด ($P < 0.05$) แต่ในทางกลับกัน ซีโอไลต์ที่เผาด้วยอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ระยะเวลาตกผลึก 144 ชั่วโมง (Sample 2) มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียของซีโอไรต์ต่ำที่สุด ($P < 0.05$)

ตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณของซีโอไลต์ที่ได้หลังจากการสังเคราะห์จากเถ้าขานอ้อยต่อเถ้ากลบข้าว ที่สัดส่วน 1 ต่อ 1 พบว่า ค่าเฉลี่ยของซีโอไลต์ที่ได้หลังจากการสังเคราะห์ มีค่าเท่ากับ 78.2 กรัม/ตัวอย่าง และมีซีโอไรต์ที่มีปริมาณการผลิตได้ไม่ต่ำกว่าค่าเฉลี่ย จำนวน 10 ตัวอย่าง คือ ตัวอย่างที่ 1, 3, 4, 5, 8, 10, 11, 12, 15 และ 16 โดยมีค่าเท่ากับ 81.3 ± 3.0 , 80.8 ± 2.5 , 80.8 ± 3.5 , 79.0 ± 2.6 , 84.0 ± 4.2 , 81.0 ± 2.6 , 87.0 ± 4.3 , 82.0 ± 3.7 , 80.0 ± 3.7 และ 79.0 ± 3.4 กรัม ตามลำดับ เพื่อนำไปพิจารณาคัดเลือกซีโอไรต์ที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับแอมโมเนียในหลอดทดลอง ตารางที่ 4.4 แสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าขานอ้อยต่อเถ้ากลบข้าว ที่สัดส่วน 1 ต่อ 1 พบว่า อุณหภูมิที่ใช้เผาไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียของซีโอไรต์ ($P > 0.05$) ในขณะที่ซีโอไลต์ที่เผาด้วยอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ระยะเวลาตกผลึก 144 ชั่วโมง (Sample 3) มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียของซีโอไรต์สูงสุด ($P < 0.05$) แต่ในทางกลับกัน ซีโอไลต์ที่เผาด้วยอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ระยะเวลาตกผลึก 72 ชั่วโมง (Sample 4) มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียของซีโอไรต์ต่ำที่สุด ($P < 0.05$)

ตารางที่ 4.1 แสดงปริมาณของซีโอไลต์ที่ได้หลังจากการสังเคราะห์จากเถ้าชานอ้อยต่อเถ้ากลบข้าว ที่สัดส่วน 1 ต่อ 0 (mean±SD)

No.	ระยะเวลาการตกผลึก (ชั่วโมง)	อุณหภูมิเผา (°C)	ปริมาณของซีโอไลต์ที่ สังเคราะห์ได้ (กรัม)
1	72	450	80.8 ± 1.5 ^{abc}
2	72	550	72.0 ± 1.8 ^{fg}
3	72	650	80.8 ± 2.2 ^{abc}
4	72	750	81.0 ± 3.5 ^{abc}
5	120	450	78.5 ± 1.3 ^{bcde}
6	120	550	72.5 ± 2.6 ^{efg}
7	120	650	76.3 ± 3.1 ^{cdef}
8	120	750	83.5 ± 5.4 ^{ab}
9	144	450	68.0 ± 2.9 ^g
10	144	550	80.5 ± 2.9 ^{abcd}
11	144	650	86.5 ± 7.8 ^a
12	144	750	81.5 ± 6.4 ^{abc}
13	168	450	74.3 ± 3.3 ^{def}
14	168	550	73.3 ± 3.4 ^{efg}
15	168	650	79.8 ± 3.8 ^{bcd}
16	168	750	78.8 ± 3.9 ^{bcde}

^{a-g}ค่าเฉลี่ยในแถวตั้งเดียวกันที่มีอักษรแตกต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P< 0.001).

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าชานอ้อยต่อเถ้ากลบข้าว ที่สัดส่วน 1 ต่อ 0 (mean±SD)

ระยะเวลา ตกผลึก(hr.)	อุณหภูมิที่เผา (องศาเซลเซียส)				เฉลี่ย
	450	550	650	750	
72	32.33±0.58 ^{a,x}	30.33±1.53 ^{a,xy}	32.33±1.16 ^{a,x}	29.00±1.00 ^{a,y}	31.00±1.76 ^A
120	31.67±1.16 ^{ab,x}	27.00±2.65 ^{ab,xy}	29.00±2.65 ^{ab,x}	26.67±1.16 ^{ab,y}	28.58±2.71 ^{AB}
144	27.00±1.73 ^{c,x}	27.00±1.73 ^{c,xy}	20.67±3.05 ^{c,x}	26.67±5.77 ^{c,y}	25.33±4.10 ^C
168	29.00±4.36 ^{bc,x}	26.67±7.23 ^{bc,xy}	23.67±1.53 ^{bc,x}	27.00±1.00 ^{bc,y}	26.58±4.19 ^{BC}
เฉลี่ย	30.00±3.04 ^x	27.75±3.77 ^{xy}	26.42±5.11 ^y	27.33±2.77 ^y	27.87±3.90

^{a-c}ค่าเฉลี่ยในแถวตั้งเดียวกันที่มีอักษรแตกต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P< 0.05).

^{A-C}ค่าเฉลี่ยในแถวตั้งเดียวกันที่มีอักษรแตกต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P< 0.05).

^{x-z}ค่าเฉลี่ยในแถวอนเดียวกันที่มีอักษรแตกต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P< 0.05).

^{x-z}ค่าเฉลี่ยในแถวอนเดียวกันที่มีอักษรแตกต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P< 0.05).

ตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณของซีโอไลต์ที่ได้หลังจากการสังเคราะห์จากเถ้าชานอ้อยต่อเถ้ากลบข้าว ที่ สัดส่วน 1 ต่อ 1 (mean±SD)

No.	ระยะเวลาการตกผลึก (ชั่วโมง)	อุณหภูมิเผา (°C)	ปริมาณของซีโอไลต์ที่ สังเคราะห์ได้ (กรัม)
1	72	450	81.3 ± 3.0 ^{abc}
2	72	550	72.3 ± 5.2 ^{fg}
3	72	650	80.8 ± 2.5 ^{abc}
4	72	750	80.8 ± 3.5 ^{abc}
5	120	450	79.0 ± 2.6 ^{bcde}
6	120	550	73.3 ± 5.1 ^{efg}
7	120	650	75.8 ± 4.7 ^{cdef}
8	120	750	84.0 ± 4.2 ^{abc}
9	144	450	68.0 ± 2.2 ^g
10	144	550	81.0 ± 2.6 ^{abc}
11	144	650	87.0 ± 4.3 ^{abc}
12	144	750	82.0 ± 3.7 ^{abc}
13	168	450	74.0 ± 5.2 ^{defg}
14	168	550	73.0 ± 4.1 ^{efg}
15	168	650	80.0 ± 3.7 ^{bcd}
16	168	750	79.0 ± 3.4 ^{bcde}

^{a-g}ค่าเฉลี่ยในแถวตั้งเดียวกันที่มีอักษรแตกต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P< 0.001).

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จาก เถ้าชานอ้อยต่อเถ้ากลบข้าว ที่สัดส่วน 1 ต่อ 1 (mean±SD)

ระยะเวลา ตกผลึก(hr.)	อุณหภูมิที่เผา (องศาเซลเซียส)				เฉลี่ย
	450	550	650	750	
72	19.67±1.15 ^c	26.67±11.55 ^c	23.00±3.00 ^c	26.67±1.52 ^c	24.00±5.98 ^C
120	32.67±2.51 ^b	33.67±1.15 ^b	30.33±0.58 ^b	33.00±0.00 ^b	32.42±1.78 ^B
144	38.67±1.15 ^a	40.00±2.00 ^a	36.67±11.93 ^a	30.33±1.53 ^a	36.92±6.85 ^A
168	33.33±2.08 ^{ab}	37.00±2.65 ^{ab}	32.67±4.04 ^{ab}	40.33±5.13 ^{ab}	35.83±4.49 ^{AB}
เฉลี่ย ^{NS}	31.08±7.46	34.83±7.77	30.67±7.58	32.58±5.74	32.29±7.14

^{NS}ค่าเฉลี่ยที่อยู่ในแถวอนเดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05)

^{a-c}ค่าเฉลี่ยในแถวตั้งเดียวกันที่มีอักษรแตกต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P< 0.05).

^{A-C}ค่าเฉลี่ยในแถวตั้งเดียวกันที่มีอักษรแตกต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P< 0.05).

^{x-z}ค่าเฉลี่ยในแถวอนเดียวกันที่มีอักษรแตกต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P< 0.05).

^{x-z}ค่าเฉลี่ยในแถวอนเดียวกันที่มีอักษรแตกต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P< 0.05).

ตารางที่ 4.5 แสดงปริมาณของซีโอไลต์ที่ได้หลังจากการสังเคราะห์จากเถ้าชานอ้อยต่อเถ้า
 แกลบข้าว ที่สัดส่วน 2 ต่อ 1 พบว่า ค่าเฉลี่ยของซีโอไลต์ที่ได้หลังจากการสังเคราะห์ มีค่าเท่ากับ 74.3
 กรัม/ตัวอย่าง และมีซีโอไรต์ที่มีปริมาณการผลิตได้ไม่ต่ำกว่าค่าเฉลี่ย จำนวน 8 ตัวอย่าง คือ ตัวอย่างที่
 2, 5, 9, 10, 11, 12, 13 และ 16 โดยมีค่าเท่ากับ 75.0 ± 5.4 , 79.0 ± 4.5 , 81.1 ± 5.2 , 78.0 ± 4.1 ,
 75.2 ± 4.5 , 75.0 ± 5.9 , 74.4 ± 6.5 และ 76.1 ± 5.9 กรัม ตามลำดับ เพื่อนำไปพิจารณาคัดเลือกซีโอ
 ไรต์ที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับแอมโมเนียในหลอดทดลอง ตารางที่ 4.6 แสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์
 ประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าชานอ้อยต่อเถ้าแกลบข้าว ที่สัดส่วน
 2 ต่อ 1 พบว่า อุณหภูมิที่ใส่เถ้าไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียของซีโอไรต์ ($P>0.05$)
 ในขณะที่ซีโอไลต์ที่เผาด้วยอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ระยะเวลาตกผลึก 72 ชั่วโมง (Sample 5) มี
 ผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียของซีโอไรต์สูงสุด ($P<0.05$) แต่ในทางตรงกันข้าม ซีโอไลต์ที่
 เผาด้วยอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ระยะเวลาตกผลึก 120 ชั่วโมง (Sample 6) มีผลต่อประสิทธิภาพ
 การดูดซับแอมโมเนียของซีโอไรต์ต่ำที่สุด ($P<0.05$)

ตารางที่ 4.7 แสดงปริมาณของซีโอไลต์ที่ได้หลังจากการสังเคราะห์จากเถ้าชานอ้อยต่อเถ้า
 แกลบข้าว ที่สัดส่วน 3 ต่อ 1 พบว่า ค่าเฉลี่ยของซีโอไลต์ที่ได้หลังจากการสังเคราะห์ มีค่าเท่ากับ 71.6
 กรัม/ตัวอย่าง และมีซีโอไรต์ที่มีปริมาณการผลิตได้ไม่ต่ำกว่าค่าเฉลี่ย จำนวน 8 ตัวอย่าง คือ ตัวอย่างที่
 1, 3, 7, 8, 10, 11, 15 และ 16 โดยมีค่าเท่ากับ 73.3 ± 6.7 , 76.8 ± 6.3 , 76.8 ± 4.4 , 82.3 ± 3.9 ,
 75.8 ± 10.8 , 75.4 ± 9.0 , 74.0 ± 8.4 และ 78.0 ± 2.6 กรัม ตามลำดับ เพื่อนำไปพิจารณาคัดเลือกซี
 โอไรต์ที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับแอมโมเนียในหลอดทดลอง ตารางที่ 4.8 แสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์
 ประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าชานอ้อยต่อเถ้าแกลบข้าว ที่สัดส่วน
 3 ต่อ 1 พบว่า ซีโอไลต์ที่เผาด้วยอุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ระยะเวลาตกผลึก 120 ชั่วโมง (Sample
 7) มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียของซีโอไรต์สูงสุด ($P<0.05$) แต่ในทางกลับกัน ซีโอไลต์ที่
 เผาด้วยอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ระยะเวลาตกผลึก 72 ชั่วโมง (Sample 8) มีผลต่อประสิทธิภาพ
 การดูดซับแอมโมเนียของซีโอไรต์ต่ำที่สุด ($P<0.05$)

ตารางที่ 4.5 แสดงปริมาณของซีโอไลท์ที่ได้หลังจากการสังเคราะห์จากเถ้าชานอ้อยต่อเถ้ากลบข้าว ที่ สัดส่วน 2 ต่อ 1 (mean±SD)

No.	ระยะเวลาการตกผลึก (ชั่วโมง)	อุณหภูมิเผา (°C)	ปริมาณของซีโอไลท์ที่ สังเคราะห์ได้ (กรัม)
1	72	450	68.2 ± 5.7
2	72	550	75.0 ± 5.4
3	72	650	73.4 ± 4.2
4	72	750	72.1 ± 5.0
5	120	450	79.0 ± 4.5
6	120	550	73.2 ± 5.5
7	120	650	72.0 ± 5.4
8	120	750	71.0 ± 7.6
9	144	450	81.1 ± 5.2
10	144	550	78.0 ± 4.1
11	144	650	75.2 ± 4.5
12	144	750	75.0 ± 5.9
13	168	450	74.4 ± 6.5
14	168	550	73.0 ± 8.4
15	168	650	73.3 ± 2.9
16	168	750	76.1 ± 5.9

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียของซีโอไลท์ที่สังเคราะห์จาก เถ้าชานอ้อยต่อเถ้ากลบข้าว ที่สัดส่วน 2 ต่อ 1 (mean±SD)

ระยะเวลา ตกผลึก(hr.)	อุณหภูมิที่เผา (องศาเซลเซียส)				เฉลี่ย
	450	550	650	750	
72	32.67±0.58 ^{ab}	39.33±1.55 ^{ab}	34.33±2.08 ^{ab}	36.67±3.21 ^{ab}	35.75±3.14 ^{AB}
120	31.00±4.00 ^b	36.33±6.66 ^b	32.67±0.58 ^b	34.33±3.21 ^b	33.58±4.14 ^B
144	38.33±2.08 ^a	35.67±2.52 ^a	36.67±9.50 ^a	38.67±0.58 ^a	37.58±4.46 ^A
168	32.00±1.00 ^b	34.33±0.58 ^b	36.00±2.00 ^b	32.33±0.58 ^b	33.67±1.97 ^B
เฉลี่ย ^{NS}	33.50±3.58	36.42±3.63	35.17±4.67	35.50±3.18	35.14±3.83

^{NS}ค่าเฉลี่ยที่อยู่ในแถวเดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05)

^{a-c}ค่าเฉลี่ยในแถวเดียวกันที่มีอักษรแตกต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P< 0.05).

^{A-C}ค่าเฉลี่ยในแถวเดียวกันที่มีอักษรแตกต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P< 0.05).

ตารางที่ 4.7 แสดงปริมาณของซีโอไลท์ที่ได้หลังจากการสังเคราะห์จากเถ้าชานอ้อยต่อเถ้ากลบข้าว ที่ สัดส่วน 3 ต่อ 1 (mean±SD)

No.	ระยะเวลาการตกผลึก (ชั่วโมง)	อุณหภูมิเผา (°C)	ปริมาณของซีโอไลท์ที่ สังเคราะห์ได้ (กรัม)
1	72	450	73.3 ± 6.7 ^{abcde}
2	72	550	67.4 ± 6.8 ^{bcde}
3	72	650	76.8 ± 6.3 ^{ab}
4	72	750	70.5 ± 6.2 ^{bcde}
5	120	450	71.0 ± 8.0 ^{abcde}
6	120	550	70.0 ± 9.3 ^{b^{cde}}
7	120	650	76.8 ± 4.4 ^{ab}
8	120	750	82.3 ± 3.9 ^a
9	144	450	62.4 ± 5.7 ^e
10	144	550	75.8 ± 10.8 ^{ab}
11	144	650	75.4 ± 9.0 ^{abc}
12	144	750	64.0 ± 5.8 ^{de}
13	168	450	64.4 ± 4.9 ^{cde}
14	168	550	63.5 ± 5.3 ^{de}
15	168	650	74.0 ± 8.4 ^{abcd}
16	168	750	78.0 ± 2.6 ^{ab}

^{a-e}ค่าเฉลี่ยในแถวตั้งเดียวกันที่มีอักษรแตกต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P < 0.01).

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียของซีโอไลท์ที่สังเคราะห์จาก เถ้าชานอ้อยต่อเถ้ากลบข้าว ที่สัดส่วน 3 ต่อ 1 (mean±SD)

ระยะเวลา ตกผลึก(hr.)	อุณหภูมิที่เผา (องศาเซลเซียส)				เฉลี่ย
	450	550	650	750	
72	33.33±0.58 ^{b,y}	34.33±0.58 ^{b,x}	35.33±2.08 ^{b,xy}	34.00±1.00 ^{b,x}	34.25±1.29 ^B
120	36.67±2.52 ^{a,y}	39.00±1.73 ^{a,x}	36.00±1.00 ^{a,xy}	40.00±1.73 ^{a,x}	37.92±2.31 ^A
144	35.33±0.58 ^{a,y}	36.33±1.15 ^{a,x}	35.33±2.08 ^{a,xy}	40.00±2.64 ^{a,x}	36.75±2.60 ^A
168	34.00±1.00 ^{b,y}	36.00±1.00 ^{b,x}	35.67±2.30 ^{b,xy}	33.00±2.64 ^{b,x}	34.67±2.06 ^B
เฉลี่ย	34.83±1.80 ^Y	36.42±2.02 ^X	35.58±1.78 ^{XY}	36.75±3.86 ^X	35.89±2.55

^{NS}ค่าเฉลี่ยที่อยู่ในแถวอนเดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05)

^{a-c}ค่าเฉลี่ยในแถวตั้งเดียวกันที่มีอักษรแตกต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P < 0.05).

^{A-C}ค่าเฉลี่ยในแถวตั้งเดียวกันที่มีอักษรแตกต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P < 0.05).

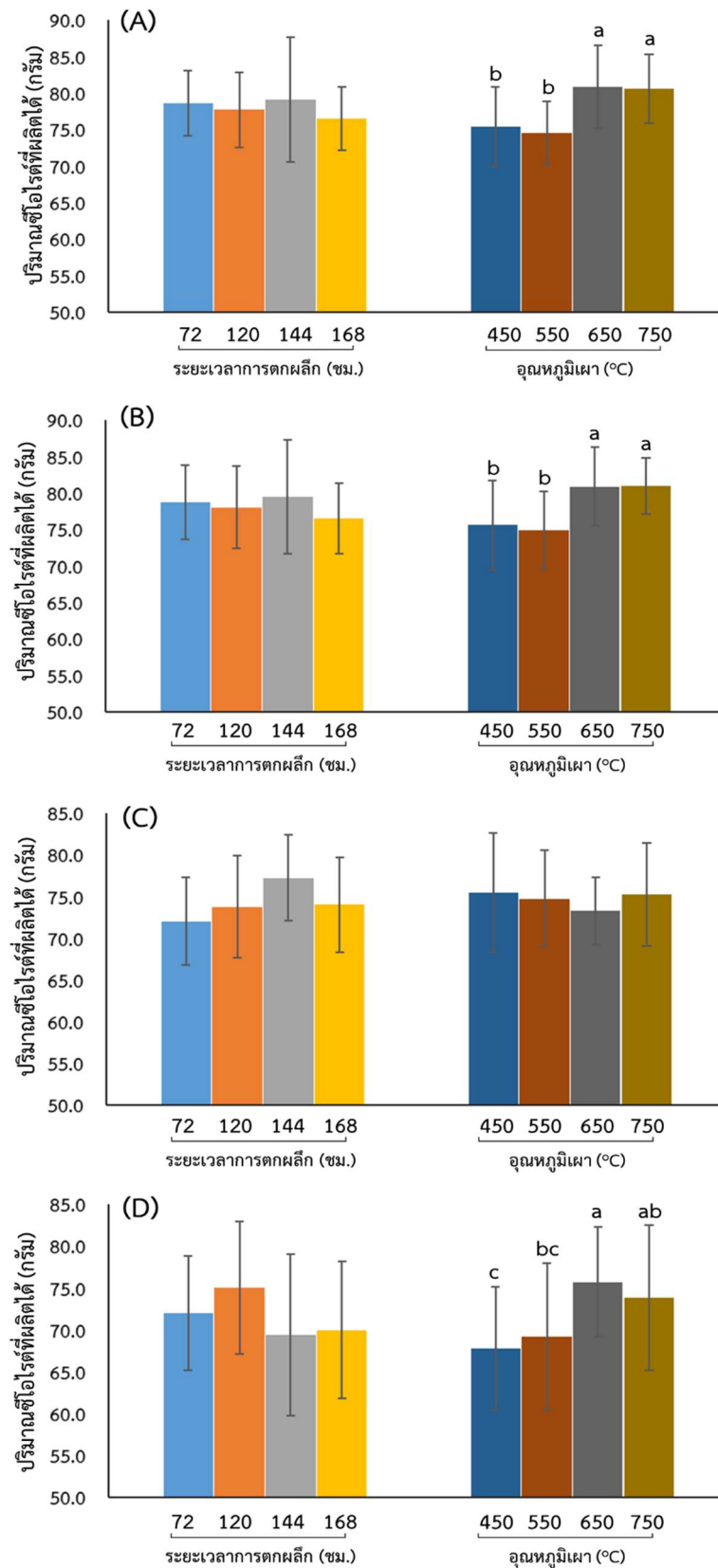
^{x-z}ค่าเฉลี่ยในแถวอนเดียวกันที่มีอักษรแตกต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P < 0.05).

^{X-Z}ค่าเฉลี่ยในแถวอนเดียวกันที่มีอักษรแตกต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P < 0.05).

ภาพที่ 4.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระยะเวลาตกผลึกและอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาเถ้าต่อปริมาณซีโอไรต์ที่ผลิตได้จากเถ้าขาน้อย : เถ้ากลบข้าว ที่สัดส่วนแตกต่างกัน 4 ระดับ คือ 1:0 (A), 1:1 (B), 2:1 (C), และ 3:1 (D) จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าระยะเวลาในการตกผลึกระหว่าง 72 ถึง 168 ชั่วโมง สามารถผลิตซีโอไรต์ได้ในปริมาณที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากอุณหภูมิที่ใช้ให้การตกผลึกมีค่าเท่ากันคือ 80 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ ฌีรณูช และคณะ (2556) ที่กล่าวว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการตกผลึกที่ 80 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการตกผลึกเพียง 24 ชั่วโมง ก็สามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิดโซเดียมเอได้แล้ว ด้วยเหตุนี้จึงเห็นได้ว่าระยะเวลาในการตกผลึกที่กำหนดไว้ในงานวิจัยนี้ยาวนานกว่า 24 ชั่วโมง ดังนั้นระยะเวลาดังกล่าวจึงไม่มีผลต่อการสร้างผลึกของซีโอไรต์ และอาจไม่มีผลต่อปริมาณซีโอไรต์ที่สังเคราะห์ได้ แต่อย่างไรก็ดีจะพบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาเถ้าที่ 650-750 องศาเซลเซียสจะสามารถสังเคราะห์ได้ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ($P<0.05$) ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการเพิ่มอุณหภูมิในการเผาเถ้าอาจส่งผลต่อปริมาณซิลิกาและอลูมินาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งธาตุทั้ง 2 ชนิดนี้ ถือได้ว่าเป็นองค์ประกอบหลักของเถ้าที่ใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตซีโอไรต์ และเมื่อนำเถ้าดังกล่าวไปทำปฏิกิริยาทางเคมี จึงทำให้สามารถสังเคราะห์ซีโอไรต์ได้ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น

หลังจากนั้นนักวิจัยได้คัดเลือกซีโอไรต์ จำนวน 8 ตัวอย่าง ดังรายละเอียดใน ตารางที่ 4.9 โดยได้คัดเลือกตัวอย่างซีโอไรต์ที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับแอมโมเนียในหลอดทดลองได้สูงสุดและต่ำสุด อย่างละ 1 ตัวอย่าง โดยพิจารณาจากผลของปัจจัยร่วม 2 ปัจจัย คือ ระยะเวลาที่ตกผลึก และอุณหภูมิเผา การคัดเลือกยึดค่าความแตกต่างทางทางสถิติ ที่ระดับ $P<0.05$ ทั้งนี้ นักวิจัยมีความจำเป็นที่จะต้องพิจารณาเลือกเพียงซีโอไรต์ที่มีประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียที่ระดับสูงสุดและต่ำสุดของซีโอไรต์ที่ผลิตได้ในแต่ละสัดส่วน เนื่องจากเพื่อใช้เปรียบเทียบคุณลักษณะเฉพาะของซีโอไรต์ เช่น ค่าพื้นที่ผิว ปริมาตรรู ขนาดรู ความสม่ำเสมอของผลึก และ ฯลฯ เพื่อนำข้อมูลดังกล่าวมาอธิบายผลของประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียที่เกิดขึ้น นอกจากนั้นแล้วได้นำซีโอไรต์ที่มีจำหน่ายทางการค้า จำนวน 1 ตัวอย่าง มาเป็นตัวอย่างเปรียบเทียบ รวมทั้งหมดเป็น 9 ตัวอย่าง เพื่อนำตัวอย่างซีโอไรต์ทั้งหมดไปวิเคราะห์ด้วย BET, XRD, SEM และ EDS

ตารางที่ 4.10 แสดงผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว (Surface area) ของตัวอย่างซีโอไรต์ด้วยเทคนิค BET พบว่า พื้นที่ผิวของซีโอไลต์ Sample 7 มีค่าสูงสุด คือ 424.44 ตร.ม./กรัม รองลงมา Sample 3 และ Sample 8 มีค่าเท่ากับ 337.28 และ 306.56 ตร.ม./กรัม ตามลำดับ เช่นเดียวกันกับปริมาตรรูของซีโอไลต์ Sample 7 คือ 0.22 ตร.ม./กรัม รองลงมา คือ Sample 3 และ 8 มีค่าเท่ากับ 0.18 และ 0.16 ตร.ม./กรัม ตามลำดับ ในขณะที่ขนาดรูของซีโอไลต์ Sample 7 มีขนาดเล็กที่สุด คือ 20.81 ตร.ม./กรัม รองลงมา Sample 8 และ 1 มีค่าเท่ากับ 20.82 และ 20.94 Å ตามลำดับ จากข้อมูลที่ได้ชี้ให้เห็นว่าประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวและปริมาตรรูที่เพิ่มขึ้นของซีโอไลต์ Sample 7 และขนาดรูที่เล็กยังส่งผลดีต่อการนำมาใช้เป็นสารเสริมในอาหารสัตว์ เนื่องจากซีโอไรต์ที่มีขนาดรูใหญ่จะไม่เพียงดูดซับเอาสารพิษออกมาพร้อมกับมูลเพียงอย่างเดียว แต่จะสามารถดูดซับเอาสารอาหารต่างๆ ออกมาด้วย ซึ่งจะกระทบต่อประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์จากโภชนาที่มีอยู่ในอาหาร



ภาพที่ 4.1 เปรียบเทียบอิทธิพลของระยะเวลาตากผลึกและอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาถั่วต่อปริมาณซีไอรต์ที่ผลิตได้จากถั่วขนอ้อย : ถั่วกลบข้าว ที่สัดส่วนแตกต่างกัน 4 ระดับ คือ 1:0 (A), 1:1 (B), 2:1 (C), และ 3:1 (D)

ตารางที่ 4.11 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเทคนิค EDS เพื่อวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (Quantitative) ในตัวอย่างซีโอไรต์ พบว่า องค์ประกอบของธาตุแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันออกไปในแต่ละตัวอย่าง ซึ่งธาตุหลักๆ ที่เป็นองค์ประกอบของซีโอไรต์ คือ SiO_2 , Al_2O_3 และ Na_2O ตามลำดับ อย่างไรก็ตามสัดส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ของตัวอย่างซีโอไรต์ที่สังเคราะห์ขึ้นมาจากเถ้าขานอ้อยและเถ้ากลบข้าวมีค่าต่ำ ($P < 0.001$) เมื่อเปรียบเทียบกับซีโอไรต์ทางการค้า ซึ่งถือได้ว่าเป็นสัดส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่ เป็นคุณสมบัติซีโอไรต์ที่ดี

ตารางที่ 4.9 แสดงรายละเอียดซีโอไรต์ที่ถูกคัดเลือกเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วย BET, XRD, SEM และ EDS

ซีโอไรต์	สัดส่วนเถ้าขานอ้อย:เถ้ากลบ	อุณหภูมิเผา ($^{\circ}\text{C}$)	เวลาดกผลึก (ชั่วโมง)
Sample 1	1:0	450	72
Sample 2	1:0	550	144
Sample 3	1:1	550	144
Sample 4	1:1	450	72
Sample 5	2:1	550	72
Sample 6	2:1	450	120
Sample 7	3:1	750	120
Sample 8	3:1	450	72
Sample 9	ตัวอย่างซีโอไรต์ที่มีจำหน่ายทางการค้า		

ตารางที่ 4.10 แสดงผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว (Surface area) ของตัวอย่างซีโอไรต์ด้วยเทคนิค BET

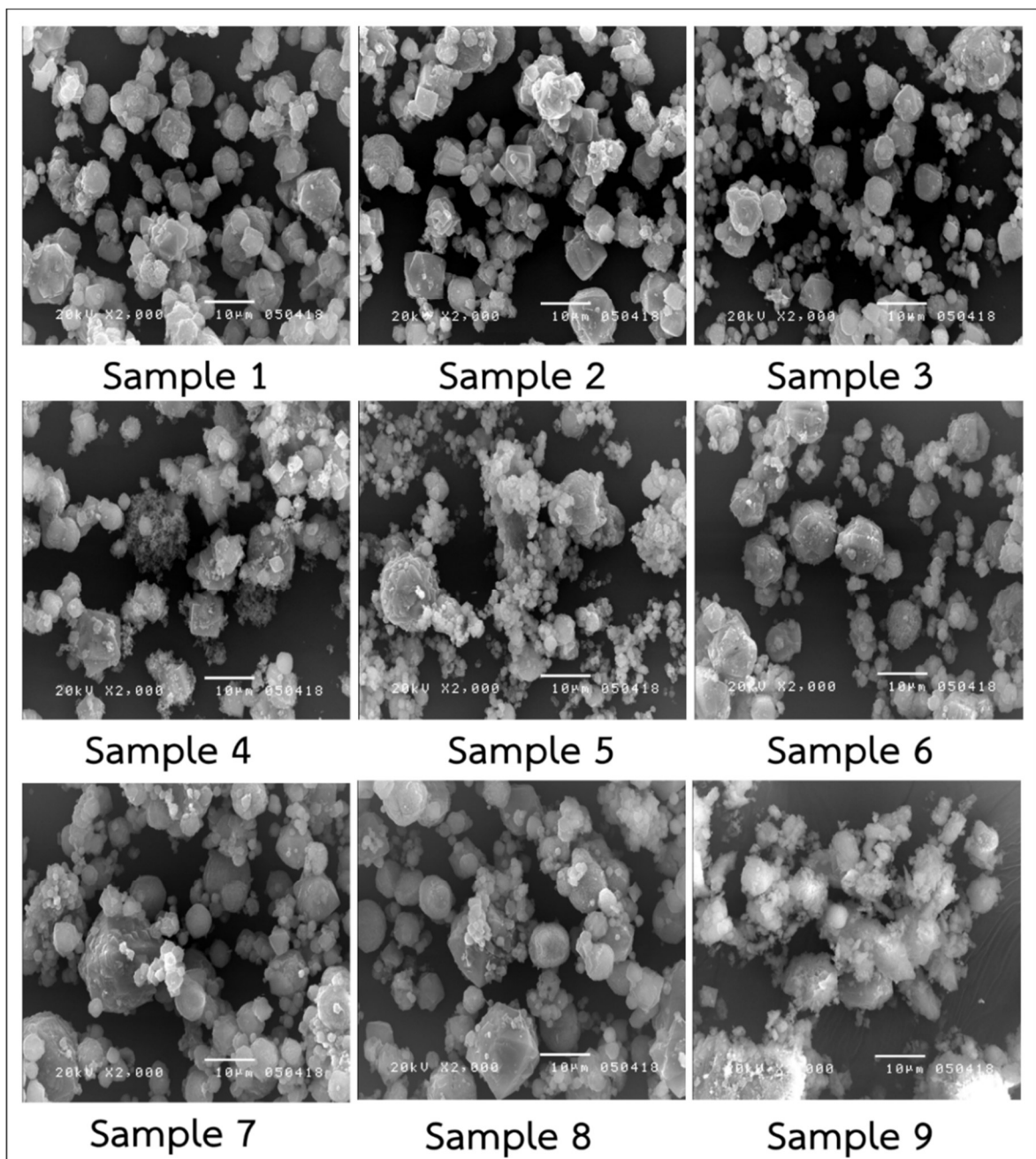
ซีโอไรต์	พื้นที่ผิว (ตร.ม./ก.)	ปริมาตรรู (ตร.ซม./ก.)	ขนาดรู ($\text{\AA}$)
Sample 1	90.91	0.05	20.94
Sample 2	218.93	0.11	22.75
Sample 3	337.28	0.18	21.66
Sample 4	92.52	0.06	25.87
Sample 5	254.38	0.15	23.92
Sample 6	11.27	0.03	100.29
Sample 7	424.44	0.22	20.81
Sample 8	306.56	0.16	20.82
Sample 9	18.23	0.06	120.53

ตารางที่ 4.11 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเทคนิค EDS เพื่อวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (Quantitative) ในตัวอย่างซีโอไรต์

ปริมาณธาตุ (%)	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Sample 6	Sample 7	Sample 8	Sample 9	SEM	P-value
Na ₂ O	13.98 ^b	13.18 ^{bcd}	13.66 ^{bc}	12.42 ^d	13.95 ^{bc}	15.24 ^a	13.30 ^{bcd}	12.77 ^{cd}	1.23 ^e	0.78	<0.001
MgO	0.41 ^{abc}	0.59 ^{ab}	0.00 ^c	0.13 ^{bc}	0.07 ^c	0.61 ^{ab}	0.00 ^c	0.00 ^c	0.85 ^a	0.07	<0.010
Al ₂ O ₃	31.42 ^{ab}	31.16 ^{ab}	31.37 ^{ab}	32.77 ^a	31.61 ^{ab}	30.50 ^b	32.87 ^a	32.72 ^a	12.81 ^c	1.19	<0.001
SiO ₂	49.97 ^{bc}	49.24 ^{cd}	51.30 ^b	50.46 ^{bc}	49.56 ^{cd}	48.09 ^d	51.34 ^b	50.70 ^{bc}	75.77 ^a	1.60	<0.001
SO ₃	0.00 ^b	0.00 ^b	0.11 ^b	0.00 ^b	0.52 ^a	0.00 ^b	0.00 ^b	0.12 ^b	0.00 ^b	0.03	<0.001
K ₂ O	0.79 ^{bc}	1.16 ^b	0.64 ^c	0.88 ^{bc}	0.58 ^c	0.66 ^c	0.85 ^{bc}	0.79 ^{bc}	2.60 ^a	0.12	<0.001
CaO	1.82	1.88	1.78	2.10	1.48	1.68	1.16	1.15	3.71	0.22	>0.050
TiO ₂	0.38 ^a	0.22 ^{ab}	0.09 ^b	0.11 ^b	0.09 ^b	0.25 ^{ab}	0.00 ^b	0.00 ^b	0.39 ^a	0.03	<0.050
MnO	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00	0.14	0.00	0.00	0.00	0.01	>0.050
Fe ₂ O ₃	1.76 ^{ab}	1.67 ^{ab}	1.05 ^b	1.13 ^b	2.12 ^{ab}	2.85 ^a	1.01 ^b	1.14 ^b	2.65 ^a	0.16	<0.050
O	1.48 ^{bc}	1.46 ^c	1.48 ^{bc}	1.49 ^b	1.47 ^{bc}	1.43 ^d	1.49 ^b	1.49 ^b	1.79 ^a	0.01	<0.001
SiO ₂ / Al ₂ O ₃	1.59 ^b	1.58 ^b	1.64 ^b	1.54 ^b	1.57 ^b	1.58 ^b	1.56 ^b	1.55 ^b	5.97 ^a	0.27	<0.001

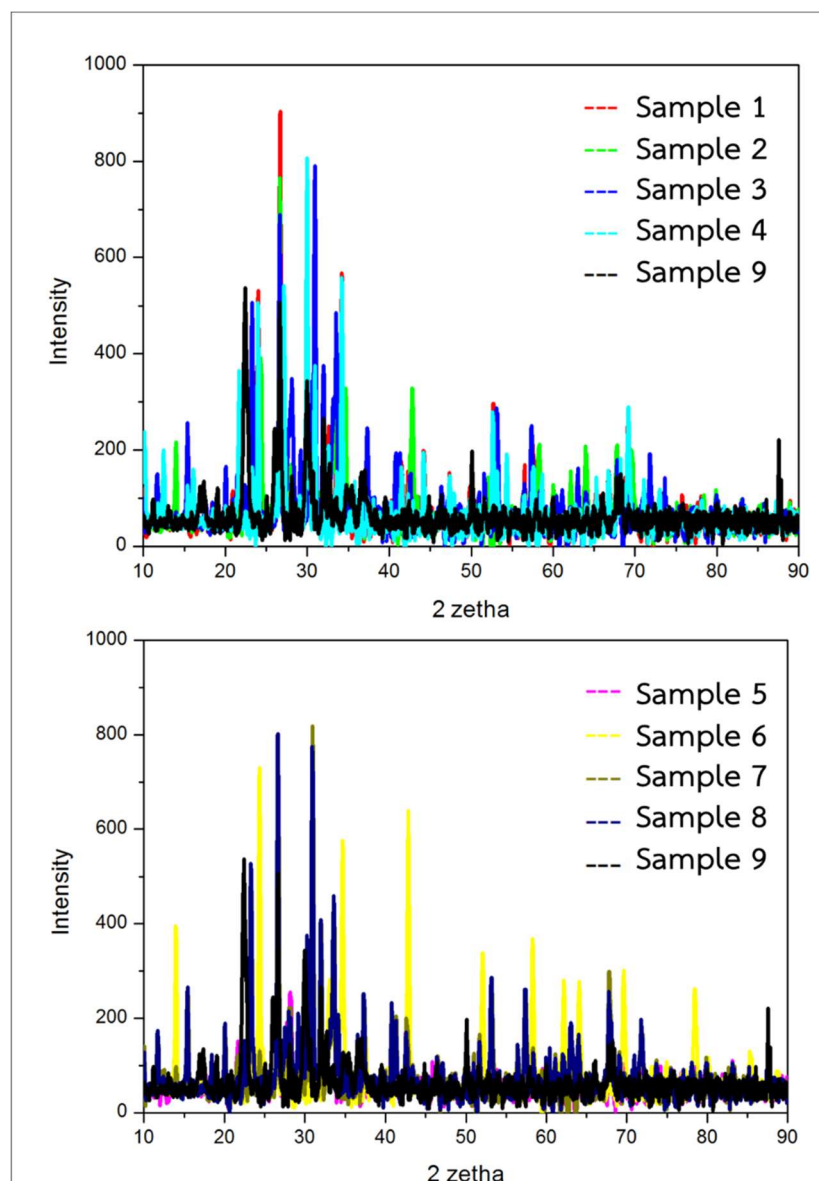
^{a-c}ค่าเฉลี่ยในแถวเดียวกันที่มีอักษรแตกต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ภาพที่ 4.2 แสดงรูปร่างผลึกของตัวอย่างซีโอไรต์ พบว่า แก้วซานอ้อยและแก้วกลบข้าวสามารถสังเคราะห์ซีโอไรต์ได้ และเกิดผลึกสม่ำเสมอ เมื่อเปรียบเทียบกับซีโอไรต์ทางการค้า นอกจากนั้นแล้วจะเห็นได้ว่า ซีโอไรต์ที่สังเคราะห์ขึ้นมาจากสัดส่วนแก้วซานอ้อยต่อแก้วกลบข้าว ที่ระดับ 3:1 ให้อนุภาคที่มีขนาดเล็ก และมีผลึกสม่ำเสมอมากกว่าสภาวะอื่นๆ จากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ชี้ให้เห็นว่า ซีโอไรต์ที่สังเคราะห์ขึ้นมาจากสัดส่วนแก้วซานอ้อยต่อแก้วกลบข้าว ที่ระดับ 3:1 เหนืออุณหภูมิ 450-750 องศาเซลเซียส และระยะเวลาตกผลึก 72-120 ชั่วโมง มีผลต่อรูปร่างผลึกที่สม่ำเสมอ เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว

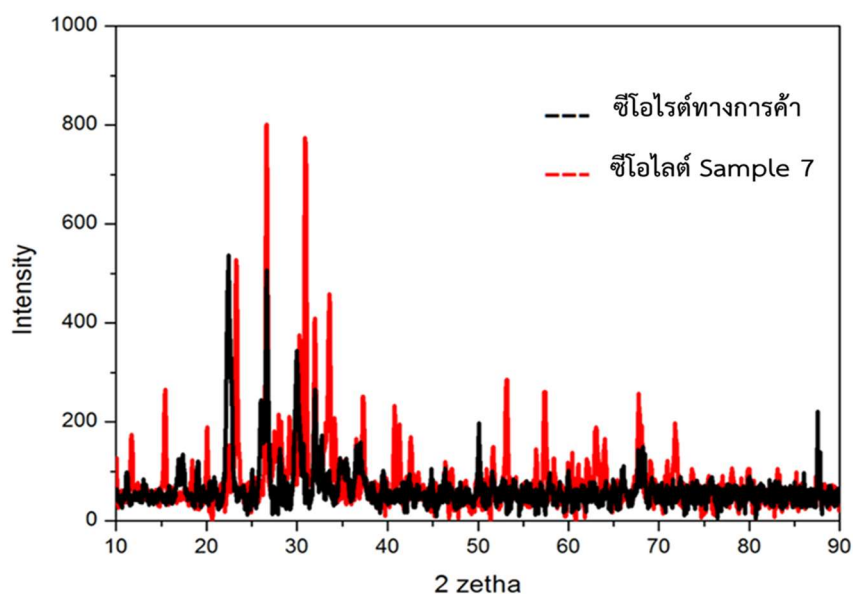


ภาพที่ 4.2 แสดงรูปร่างผลึกของตัวอย่างซีโอไรต์

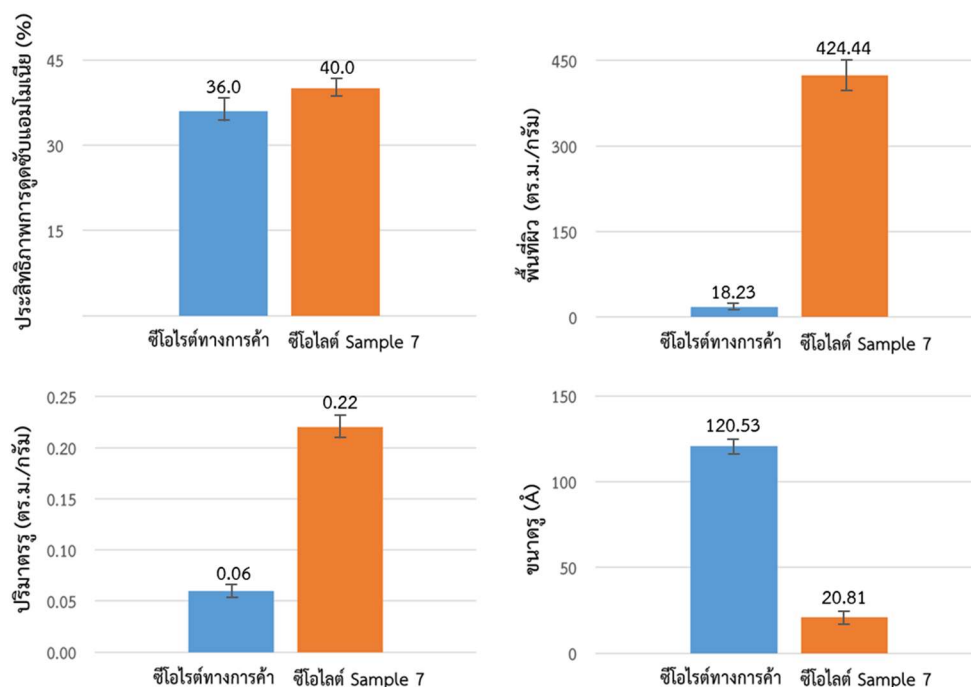
ภาพที่ 4.3 เปรียบเทียบ XRD ของตัวอย่างซีโอไรต์ทางการค้า และซีโอไรต์ที่สังเคราะห์ขึ้นมาเอง พบว่า ตำแหน่งพีคของซีโอไรต์ที่ปรากฏในกราฟทั้ง 2 มีลักษณะตรงกับซีโอไรต์ทางการค้าซึ่งจะมีพีคขึ้นที่ 20 ถึง 40 องศา โดยจากกราฟพบว่า ตำแหน่งสูงสุดของซีโอไรต์ที่สังเคราะห์ขึ้นมาจากเถ้าขานอ้อยและเถ้ากลบในสถานะต่างๆ (Sample 1-8) มีค่าสูงกว่าซีโอไรต์ทางการค้า (Sample 1-8) แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างที่เป็นผลึกเพิ่มขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อเปรียบเทียบกราฟของซีโอไรต์ Sample 7 กับซีโอไรต์ทางการค้า (Sample 9) ดังภาพที่ 4.4 พบว่า ตำแหน่งสูงสุดของซีโอไรต์ Sample 7 กราฟมีค่าสูงเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งให้เห็นว่าโครงสร้างที่เป็นผลึกของ ซีโอไรต์ Sample 7 สูงกว่าซีโอไรต์ทางการค้า ซึ่งสอดคล้องกับการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับแอมโมเนียในหลอดทดลอง พื้นที่ผิว ปริมาตรรู และขนาดรู ของตัวอย่างซีโอไรต์ Sample 7 มีค่าดีกว่าซีโอไรต์ทางการค้า (ภาพที่ 4.5) ด้วยเหตุนี้นักวิจัยจึงคัดเลือก Sample 7 ไปศึกษาต่อในสัปดาห์ทดลองต่อไป



ภาพที่ 4.3 เปรียบเทียบ XRD ของตัวอย่างซีโอไรต์ทางการค้า (Sample 9) และซีโอไรต์ที่สังเคราะห์ขึ้นมาจากสถานะแตกต่างกัน (Sample 1-8)



ภาพที่ 4.4 เปรียบเทียบ XRD ของตัวอย่างซีโอไรต์ทางการค้าและซีโอไรต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าขาน้อยต่อเถ้ากลบข้าว ที่สัดส่วน 3 ต่อ 1 เผาด้วยอุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส และระยะเวลาตกผลึก 120 ชั่วโมง (Sample 7)



ภาพที่ 4.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับแอมโมเนียในหลอดทดลอง พื้นที่ผิว ปริมาตรรู และขนาดรู ของตัวอย่างซีโอไรต์ทางการค้า และซีโอไรต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าขาน้อยต่อเถ้ากลบข้าว ที่สัดส่วน 3 ต่อ 1 เผาด้วยอุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส และระยะเวลาตกผลึก 120 ชั่วโมง (Sample 7)

ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบคุณสมบัติเฉพาะและต้นทุนราคาของซีโอไลต์ Sample 7 และซีโอไรต์ทางการค้า พบว่า ซีโอไลต์ Sample 7 มีประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียได้สูงกว่าซีโอไรต์ทางการค้า ยิ่งไปกว่านั้นแล้วพื้นที่ผิวสัมผัส และปริมาตรรู มีค่าสูงกว่าซีโอไรต์ทางการค้า ถึง 23, และ 3.6 เท่า ตามลำดับ นอกจากนั้นแล้วสัดส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ และขนาดรู ยังมีค่าที่อยู่ในเกณฑ์ที่ดีกว่าถึง 5.7 และ 3.8 เท่า ตามลำดับ ตารางที่ 4.13 แสดงราคาสารเคมีเกรดวิเคราะห์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ และต้นทุนสารเคมีในการผลิตซีโอไลต์ พบว่า ราคาสารเคมีเกรดวิเคราะห์ 2 ชนิดหลักที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไรต์ ได้แก่ Sodium Hydroxide และ Sodium aluminate มีราคาสูงถึง 360 และ 1,680 บาท/กิโลกรัม ตามลำดับ ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้ต้นทุนค่าสารเคมีที่ใช้ในการผลิตซีโอไลต์สูงถึง 1,128 บาท/กิโลกรัม ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบต้นทุนราคาของซีโอไลต์ Sample 7 และซีโอไรต์ทางการค้า จะพบว่ามี ต้นทุนราคาที่สูงกว่าถึง 22.5 เท่า แต่อย่างไรก็ดีหากพิจารณาต้นทุนราคาต่อพื้นที่ผิวในการดูดซับ (บาท/ตร.ม.) แล้วพบว่ามีค่าที่ไม่แตกต่างกัน (ตารางที่ 4.12) จากผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าคุณภาพของซีโอไรต์ที่สังเคราะห์ขึ้นมีคุณสมบัติเฉพาะตัวที่ดีกว่าซีโอไรต์ทางการค้าอย่างชัดเจน แต่ต้นทุนราคาต่างกันเป็นอย่างมาก ทั้งนี้เป็นผลมาจากโครงการวิจัยนี้ใช้สารเคมีเกรดวิเคราะห์เป็นสารตั้งต้นในการผลิตซีโอไรต์ ดังนั้นการหาแนวทางลดต้นทุนการผลิตจึงเป็นประเด็นที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาการใช้ประโยชน์จากเถ้าขานอ้อยสำหรับการผลิตซีโอไรต์ในอนาคต

ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบคุณสมบัติเฉพาะและต้นทุนราคาของซีโอไลต์ Sample 7 และซีโอไรต์ทางการค้า

หัวข้อ	ซีโอไลต์ Sample 7	ซีโอไรต์ทางการค้า ^{1/}
คุณสมบัติเฉพาะ		
ปริมาณที่ผลิตได้ (กรัม)	82	-
ประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนีย (%)	40	36.0
พื้นที่ผิวสัมผัส (ตร.ม./กรัม)	424.44	18.23
ปริมาตรรู (ตร.ม./กรัม)	0.22	0.06
ขนาดรู (Å)	20.81	120.53
สัดส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	1.56	5.97
ความสม่ำเสมอของผลึก	สม่ำเสมอสูง	ไม่สม่ำเสมอ
ต้นทุนราคา		
ต้นทุนราคาของซีโอไรต์ (บาท/กก.)	50	1,128
ต้นทุนราคาต่อพื้นที่ผิวในการดูดซับ (บาท/ตร.ม.)	0.0027	0.0027

^{1/}ชื่อผลิตภัณฑ์ Z-MIN นำเข้าจากประเทศรัสเซีย

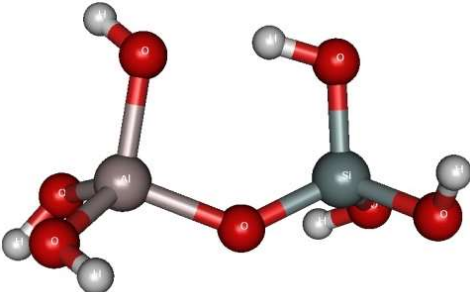
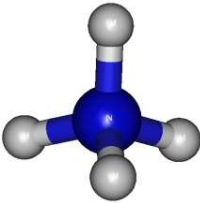
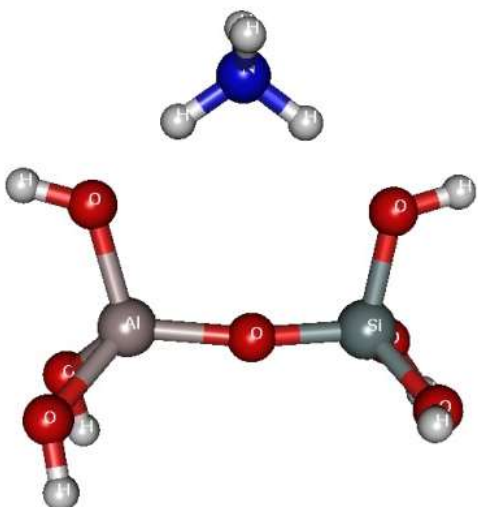
ตารางที่ 4.13 แสดงราคาสารเคมีเกรดวิเคราะห์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ (บาท/กก.) และการคำนวณต้นทุนสารเคมีในการผลิตซีโอไลต์ (บาท/100 กรัม)

หัวข้อ	Sodium Hydroxide	Sodium aluminate	รวมเป็น
ราคาสารเคมีเกรดวิเคราะห์ (บาท/กก.)	360	1,680	-
ต้นทุนสารเคมีในการผลิตซีโอไลต์ (บาท/กก.)	329	799	1,128

4.2 การทดลองที่ 2: ศึกษาการวิเคราะห์อันตรกิริยาระหว่างซีโอไลต์กับแอมโมเนียโดยวิธีทางเคมีคำนวณ

จากการคำนวณโดยใช้ทฤษฎีฟังก์ชันัลความหนาแน่น(Density Functional Theory, DFT) ที่ระดับการคำนวณ B3LYP/6-31+G(d,p) เพื่อหาโครงสร้างที่เสถียรและความถี่การสั่นของโมเลกุลเพื่อยืนยันว่าโครงสร้างที่คำนวณได้เป็นโครงสร้างที่เสถียรและอยู่บนจุดต่ำสุดของพื้นผิวพลังงานศักย์ โดยทำการคำนวณกับโมเลกุลซีโอไรต์หน่วยเล็กที่สุด โมเลกุลแอมโมเนียมและโมเลกุลซีโอไรต์จับกับแอมโมเนียมทั้งสามดังแสดงในตารางที่ 4.14 ทั้งนี้เนื่องจากแอมโมเนียเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะอยู่ในรูปของแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ที่ผิวของซีโอไรต์จะอยู่ในรูปของโปรตอนจับกับออกซิเจน โดยพบว่าโปรตอนที่จับกับออกซิเจนบริเวณผิวหน้าของซีโอไรต์เกิดอันตรกิริยาพันธะไฮโดรเจนกับออกซิเจนอีกตัวที่ผิวของซีโอไรต์เพื่อทำให้โครงสร้างของซีโอไรต์เสถียรและมีพลังงานต่ำสุด ดังแสดงในรูปที่ 4.14 จากภาพของซีโอไรต์เมื่อจับกับแอมโมเนียมพบว่าอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบพันธะไฮโดรเจน โดยเกิดพันธะไฮโดรเจนสองพันธะต่อหนึ่งหน่วยเล็กที่สุดของซีโอไรต์โดยอะตอมไฮโดรเจนสองอะตอมของแอมโมเนียมเกิดพันธะไฮโดรเจนกับออกซิเจนสองอะตอมของซีโอไรต์และโปรตอนที่เกาะกับออกซิเจนของซีโอไรต์ได้หมุนตัวไปยังทิศทางตรงข้ามจากเดิมเพื่อทำให้พันธะไฮโดรเจนเกิดขึ้นได้สองพันธะ จากการคำนวณหาพลังงานของแต่ละโมเลกุลแสดงดังตารางที่ 4.15 จากผลการคำนวณพบว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของซีโอไรต์กับแอมโมเนียม ที่ได้ มีค่าเท่ากับ 74.96 กิโลแคลอรีต่อโมล

ตารางที่ 4.14 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของซีโอไรต์หน่วยเล็กที่สุด โมเลกุลแอมโมเนียมและโมเลกุลซีโอไรต์จับกับแอมโมเนียมที่ระดับการคำนวณ B3LYP/6-31+G(d,p)

Compounds	Geometry
Zeolite	
Ammonium	
Zeolite-ammonium complex	

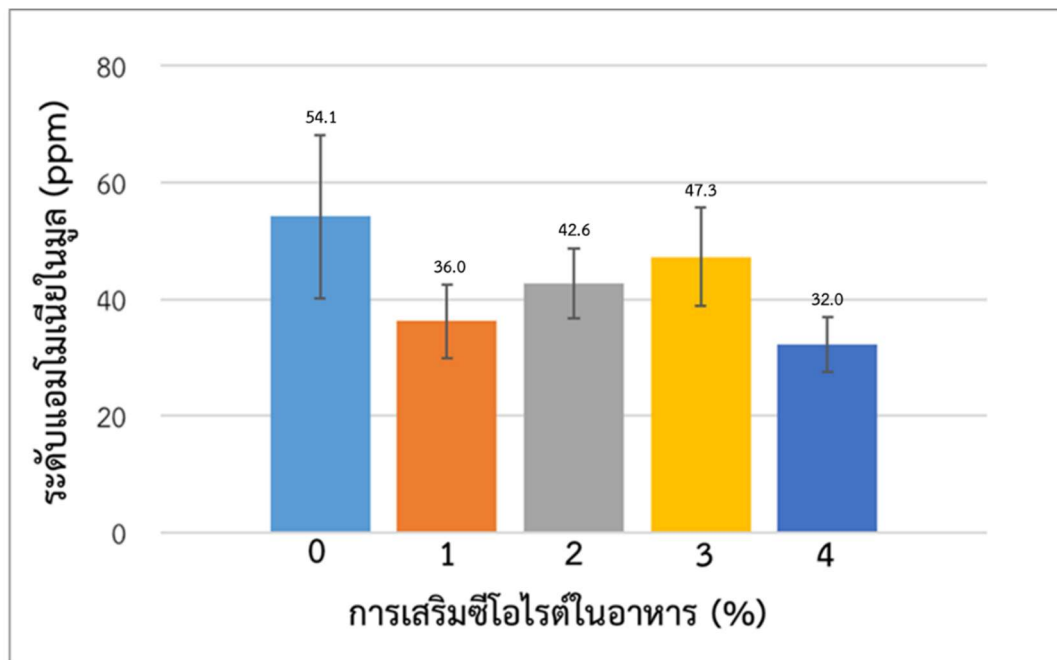
ตารางที่ 4.15 แสดงค่าพลังงานในหน่วย Atomic unit ของแต่ละโมเลกุลของซีโอไรต์หน่วยเล็กที่สุด โมเลกุลแอมโมเนียมและโมเลกุลซีโอไรต์จับกับแอมโมเนียมที่ระดับการคำนวณ B3LYP/6-31+G(d,p)

Compounds	Electronic energy (a.u)
Zeolite	-1062.66594799
Ammonium	-56.9061273760
Zeolite-ammonium complex	-1119.45272943

4.3 การทดลองที่ 3: ศึกษาผลของการเสริมซีโอไรต์ที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าขานอ้อยในอาหารไก่ไข่ต่อประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียในมูลและสมรรถภาพการผลิตไข่

ตารางที่ 4.16 แสดงผลของการเสริมซีโอไรต์ในอาหารต่อสมรรถภาพการผลิตไข่และคุณภาพไข่ของไก่ไข่ที่ อายุระหว่าง 23-35 สัปดาห์ พบว่า เปอร์เซ็นต์ผลผลิตไข่ อัตราการกินอาหารต่อวัน มวลไข่ และค่า FCR มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติในทุกกลุ่มการทดลอง ($P>0.05$) เช่นเดียวกันกับ ความสูงไข่ขาว ค่าฮอก (Haugh Unit) สีไข่แดง สัดส่วนไข่แดง และสัดส่วนไข่ขาว มีค่าใกล้เคียงกัน ($P>0.05$) อย่างไรก็ตาม ค่าความหนาเปลือกไข่ และสัดส่วนเปลือกไข่ของไก่ไข่กลุ่มที่ได้รับการเสริมซีโอไรต์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ และเพิ่มขึ้นสูงสุดในกลุ่มที่ได้รับอาหารเสริมซีโอไรต์ ที่ระดับ 4 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Incharoen et al. (2018) ที่รายงานว่า การเสริมซิลิกอนไดออกไซด์ที่สกัดจากเถ้าแกลบ (ความบริสุทธิ์ 95.50 เปอร์เซ็นต์) ในอาหารไก่ไข่ช่วยเพิ่มความหนาเปลือกไข่ ($P<0.05$) และสัดส่วนเปลือกไข่มีแนวโน้มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากซีโอไรต์ที่สังเคราะห์ขึ้นมาและใช้ในการทดลองครั้งนี้มีซิลิกอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบสูงถึง 51 เปอร์เซ็นต์ จากผลการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่า การเสริมซีโอไรต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าขานอ้อยและเถ้าแกลบข้าวในอาหารไก่ไข่ ที่ระดับตั้งแต่ 1-4 เปอร์เซ็นต์ ไม่ส่งผลกระทบต่อสมรรถภาพการผลิตไข่ และคุณภาพไข่โดยรวม แต่มีส่วนช่วยทำให้คุณภาพเปลือกไข่ดีขึ้น และอาจจะเป็นแนวทางในการช่วยลดการอัตราการสูญเสียอันเนื่องมาจากปัญหาเปลือกไข่แตกร้าวในอุตสาหกรรมการผลิตไข่ได้

ภาพที่ 4.6 แสดงปริมาณแอมโมเนียในมูลของไก่ไข่ที่ได้รับอาหารเสริมซีโอไรต์ที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าขานอ้อยในระดับต่างๆ พบว่า ระดับแอมโมเนียในมูลของไก่ไข่ที่ได้รับอาหารเสริมซีโอไรต์ที่มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ($P>0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม และมีระดับแอมโมเนียในมูลต่ำที่สุดในกลุ่มที่ได้รับอาหารเสริมซีโอไรต์ ที่ 4 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลการทดลองเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับ Karamanlis et al. (2008) ที่รายงานว่า การเสริมซีโอไรต์ในอาหารไก่เนื้อมีผลลดระดับแอมโมเนียในวัสดุรองพื้นคอกได้ แต่อย่างไรก็ตามผลที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ยังไม่มี ความแตกต่างทางสถิติ ทั้งนี้ อาจจะเป็นผลมาจากปริมาณอาหารที่กินต่อวันของไก่กลุ่มที่ได้รับอาหารเสริมซีโอไรต์มีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งปริมาณอาหารที่กินจะมีความสัมพันธ์กับระดับโปรตีนที่ได้รับเข้าไปในร่างกาย และจะส่งผลต่อปริมาณไนโตรเจนที่หลงเหลือเพิ่มขึ้น จึงมีผลทำให้ปริมาณแอมโมเนียมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย



ภาพที่ 4.6 แสดงปริมาณแอมโมเนียในกล้ามเนื้อของไก่ไข่ที่ได้รับอาหารเสริมซีโอไรต์ที่สังเคราะห์ได้จากถ้ำซานอ้อยในระดับต่างๆ

Table 4.16 สมรรถภาพการผลิตไข่และคุณภาพไข่ของไก่ไข่ที่ได้รับอาหารเสริมซีโอไรต์ที่ระดับแตกต่างกัน

Parameters	Control	Zeolite supplementation (%)				SEM	P-value
		1	2	3	4		
Egg performance							
Hen-day egg production, %	93.8	94.5	93.5	95.4	93.9	1.50	0.99
ADFI, g/(hen*day)	101.7	98.1	100.3	101.4	104.5	1.17	0.55
Egg mass	55.6	55.8	54.9	57.0	59.7	1.20	0.80
FCR	1.89	1.80	1.86	1.81	1.78	0.04	0.94
Egg quality							
Shell thickness, mm	0.31	0.31	0.32	0.33	0.34	0.01	0.22
Shell ratio, %	10.40	10.20	10.20	11.00	11.50	0.19	0.14
Yolk ratio, %	27.10	28.00	25.40	27.30	26.90	0.34	0.16
Albumen ratio, %	62.40	61.90	64.30	61.60	61.70	0.37	0.11
Albumen height, mm	6.77	6.74	6.78	6.99	6.34	0.14	0.68
Haugh units	82.20	81.43	82.76	81.48	81.10	0.93	0.98
Yolk color	9.20	9.20	9.30	9.40	9.20	0.11	0.97

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

การสังเคราะห์ซีโอไรต์จากเถ้าขานอ้อยเพียงอย่างเดียว (1:0) มีผลทำให้ได้ซีโอไรต์ที่มีปริมาณสูง แต่ประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียในหลอดทดลองค่อนข้างต่ำ ในขณะที่ซีโอไรต์ที่สังเคราะห์มาจากเถ้าขานอ้อยต่อเถ้ากลบ 3:1 มีปริมาณการผลิตได้อยู่ในระดับดี แต่มีประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียในหลอดทดลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะเมื่อเผาเถ้าที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส และมีระยะเวลาตกผลึก 120 ชั่วโมง จะทำให้ได้ซีโอไรต์ (Sample 7) ที่มีประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียในหลอดทดลองสูงสุด ซึ่งเป็นผลมาจากพื้นที่ผิว (Surface area) และปริมาตรรู (Pore size) มีค่าสูงที่สุด และรูปร่างผลึกมีขนาดเล็กและมีความสม่ำเสมอสูงเมื่อเทียบกับซีโอไรต์ที่สังเคราะห์จากสถานะอื่นๆ สอดคล้องกับผลของการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของซีโอไรต์ Sample 7 ด้วย XRD ที่มีตำแหน่งสูงสุดสูงกว่าซีโอไรต์ทางการค้า จากการคำนวณโดยใช้ทฤษฎีฟังก์ชันัลความหนาแน่น (Density Functional Theory, DFT) พบว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของซีโอไรต์กับแอมโมเนียมที่ได้ มีค่าเท่ากับ 74.96 กิโลแคลอรีต่อโมล อย่างไรก็ตามการเสริมซีโอไรต์ Sample 7 ที่ระดับ 1-4 เปอร์เซ็นต์ในอาหารไก่ไข่ ไม่ส่งผลกระทบต่อเชิงลบใดๆ ต่อสมรรถภาพการผลิตไข่และคุณภาพไข่โดยรวม แต่มีส่วนช่วยให้คุณภาพเปลือกไข่ดีขึ้น และอาจจะเป็นแนวทางในการช่วยลดการอัตราการสูญเสียอันเนื่องมาจากปัญหาเปลือกไข่แตกร้าวในอุตสาหกรรมการผลิตไข่ได้ ในขณะที่การเสริมซีโอไรต์มีผลทำให้ระดับแอมโมเนียในมูลมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม และมีระดับแอมโมเนียในมูลต่ำที่สุดในกลุ่มที่ได้รับอาหารเสริมซีโอไรต์ ที่ 4 เปอร์เซ็นต์

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1) การลดการปลดปล่อยก๊าซแอมโมเนียเป็นการจัดการสุขภาพสัตว์ที่ต้นเหตุ ส่งผลดีต่อสุขภาพและสวัสดิภาพสัตว์ ซึ่งผลสุดท้ายจะช่วยให้สมรรถภาพการผลิตดีขึ้น และเป็นแนวทางหนึ่งในการลดการใช้ยาหรือสารเคมีในการผลิตปศุสัตว์ ดังนั้นควรมีการทดลองในสัตว์ชนิดอื่นๆ เช่น สุกร ไก่เนื้อ และเป็ด เพื่อเป็นการหาแนวทางในการประยุกต์ใช้สำหรับการผลิตปศุสัตว์ต่อไป

5.2.2) ควรแนวทางในการเพิ่มคุณสมบัติด้านการดูดซับสารพิษอัลฟาตอกซิน เพราะจะสามารถเพิ่มมูลค่าให้ซีโอไรต์ได้ และเพิ่มปริมาณการใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ได้

5.2.3) ควรหาวิธีการลดการใช้โซเดียมอะลูมิเนต เพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิต โดยอาจจะหาเถ้าชนิดอื่นๆ หรือดินขาวที่มีองค์ประกอบของอะลูมินาในระดับสูงมาใช้ทดแทน ยกตัวอย่างเช่น ราคาดินขาว (แหล่งที่มา/ผลิตในพื้นที่จังหวัดลำปาง) มีราคาเพียง 3-4 บาท/กิโลกรัม เมื่อเปรียบเทียบกับโซเดียมอะลูมิเนต ที่มีราคาสูงขึ้น 1,680 บาท/กิโลกรัม

5.2.4) จากผลการทดลองนี้พบว่าระยะเวลาการตกผลึกตั้งแต่ 72-168 ชั่วโมง ไม่มีผลกระทบต่อปริมาณการสังเคราะห์ซีโอไรต์ ดังนั้นแนวทางที่จะลดต้นทุนซึ่งเวลาได้ โดยสามารถกำหนดระยะเวลาการตกผลึกไม่เกิน 72 ชั่วโมงได้

เอกสารอ้างอิง

- ณิรันดร์ วรรณเชิดชู, เอกชัย จารุपालี, และสุจิตรา วงศ์เกษมจิตต์. การสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิดโซเดียมเอ โดยใช้ดินดำสุราษฎร์เป็นแหล่งของซิลิกาและอลูมินาและใช้การเติบโตของผลึกแบบทุติยภูมิ. วารสารวิจัยรามคำแหง (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี). 16 (2): 1-17.
- วันเพ็ญ วิโรจนกุล, ศุภวรรณ ชันโททอง, มันทนา สามารถ, วิบูลสุข บัณฑิตย์, อรอนงค์ พัวรัตนอรุณกร, วิไลวรรณ มหาวีรวัฒน์, สมใจ ขจรชีพพันธุ์งาม, พรรชนก เมฆฉาย, อาทิตย์ เนรมิตตกพงศ์, ทินกร คำแสน, อลิศรา เรืองแสง, ศักดิ์ชาย เพ็ชรตรา, และ สุรีย์วัลย์ สิทธิจินดา. ไม่ระบุปี. รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการส่งเสริมและสนับสนุนการผลิตผลิตภัณฑ์ชีวเคมีที่ใช้ย่อยเป็น วัตถุดิบต้นน้ำ. ศูนย์วิจัยด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและสารอันตราย. ภาควิชาวิศวกรรม สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ศิรินุช. 2556. ซีโอไลต์และเทคโนโลยีซีโอไลต์. วารสารวิทยาศาสตร์ มข. 41: 56-66.
- สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย. 2558. รายงานผลการสำรวจพื้นที่ปลูกอ้อยประจำปีการ ผลิต 2557/58. 124 หน้า
- Alexopoulos, C., D.S. Papaioannou, P. Fortomaris, C.S. Kyriakis, A. Tserveni-Goussi, A. Yannakopoulos and S.C. Kyriakis. 2007. Experimental study of the effect of in-feed administration of a clinoptilolite-rich tuff on certain biochemical and hematological parameters of growing and fattening pigs. Livest Sci., 111: 230-241.
- Al-Homidan, A., J. F. Robertson and A. M. Petchey. 2003. Review of the effect of ammonia and dust concentration on broiler performance. Poult. Sci., 59:340-349.
- Bintaş, E. M. Bozkurt, K. Küçükyılmaz, R. Konak, M. Çınar, H. Akşit, K. Seyrek and A.U. Çatlı. 2014. Efficacy of supplemental natural zeolite in broiler chickens subjected to dietary calcium deficiency. Ital. J. Anim. Sci., 13: 275-283.
- Bujnák, L., L. Bindas, I. Maskalová, and V. Vajda. 2015. Effects of zeolite supplementation on some fermentation process characteristics of growing pigs. Acta Fytotechn. Zootechn., 18: 63-65.
- Castaldelli, V.N., J.L. Akasaki, J.L.P. Melges, M.M. Tashima, L. Soriano, M.V. Borrachero, J. Monzó and J. Payá. 2013. Use of slag/sugar cane bagasse ash (SCBA) blends in the production of alkali-activated materials. Materials, 6: 3108-3127.
- Chen, Y.J., O.S. Kwon, B.J. Min, K.S. Shon, J.H. Cho and I.H. Kim. 2005a. The effects of dietary biotite V supplementation on growth performance, nutrients digestibility

- and fecal noxious gas content in finishing pigs. *Asian-Australas J Anim Sci.*, 18(8): 1147-1152.
- Chen, Y.J., O.S. Kwon, B.J. Min, K.S. Son, J.H. Cho, J.W. Hong and I.H. Kim. 2005b. The effects of dietary biotite V supplementation as an alternative substance to antibiotics in growing pigs. *Asian-Australasian J. Anim. Sci.*, 18(10): 1642-1645.
- Cordeiro, G.C., R.D.T. Filijp, E.M.R. Fairbairt, M.M.T. Luis and C.H. Oliver. 2004. Influence of mechanical grind on the pozzolanic activity of residual sugarcane bagasse ash. *Proceedings of the international conference on use of recycled materials in building and structure, Barcelona*; pp. 731-740.
- Duan, Q.W., J.T. Li, L.M. Gong, H. Wu and L.Y. Zhang. 2013. Effects of Graded Levels of Montmorillonite on Performance, Hematological Parameters and Bone Mineralization in Weaned Pigs. *Asian-Aust J Anim Sci.*, 26: 1614-1621.
- Eleroğlu, H. and H. Yalçın. 2005. Use of natural zeolite-supplemented litter increased broiler production. *S. Afr. J. Anim. Sci.*, 35: 90-97.
- Eleroğlu, H., H. Yalçın and A. Yıldırım. 2005. Dietary effects of Ca-zeolite supplementation on some blood and tibial bone characteristics of broilers. *S. Afr. J. Anim. Sci.*, 41: 319-330.
- Francesch, M. and J. Brufa. 2004. Nutritional factors affecting excreta/litter moisture and quality. *World's Poult. Sci. J.*, 60:64-75.
- Ghauri, M., M. Tahir, T. Abbas, M.S. Khurram and K. Shehzad. 2012. Adsorption studies for the removal of ammonia by thermally activated carbon. *Sci.Int.(Lahore)*, 24(4): 411-414.
- Gezen, S.S., M. Eren, F. Balci, G. Deniz, H. Biricik and B. Bozan. 2009. The Effect of clinoptilolite in low calcium diets on performance and eggshell quality parameters of aged hens. *Asian-Aust. J. Anim. Sci.*, 22: 1296 - 1302.
- Guisnet, M and J.P. Gilson. 2002. Zeolites for cleaner technologies. In J.H. Graham (Ed), *Catalytic Science Series-Vol. 3*. London: Imperial College Press.
- Hui, K.S. and C.Y.H. Chao. 2006. Effect of step-change of synthesis temperature on synthesis of zeolite 4A from coal fly ash. *Microporous Mesoporous Mater.*, 26: 145-151.

- Incharoen, T., P. Wonnakom and A.A. Khaskheli. 2018. Performance and quality in old laying hens fed dietary silicon extracted from rice hull ash. *Asian J. Anim. Vet. Adv.*, 13 (2): 175-179.
- Islam, M. A., K. N. Monira, M. J. Alam and M. A. Wahid. 2003. Effect of litter materials on broiler performance and evaluation of manure value of used litter in late autumn. *Asian-Aust. J. Anim. Sci.*, 16:555-557.
- Karamanlis, X., P. Fortomaris, G. Arsenos, I. Dosis, D. Papaioannou, C. Batzios and A. Kamarianos. 2008. The Effect of a natural zeolite (clinoptilolite) on the performance of broiler chickens and the quality of their litter. *Asian-Aust. J. Anim. Sci.*, 21: 1642 - 1650.
- Kawade, U.R., V.R. Rathi and V.D. Girge. Effect of use of bagasse ash on strength of concrete. *Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol.*, 2: 2997-3000.
- Kim, W. K., C. A. Froelich, P. H. Patterson and S. C. Ricke. 2006. The potential to reduce poultry nitrogen emissions with dietary methionine or methionine analogues supplementation. *World's Poult. Sci. J.*, 62:338-353.
- Li, J., and I.H. Kim. 2013. Effects of dietary supplementation of sericite on growth performance, nutrient digestibility, blood profiles and fecal microflora shedding in growing pigs. *Anim. Feed. Sci. Technol.*, 184: 100–104.
- Mallek, Z., I. Fendri, L. Khannous, A.B. Hassena, A.I. Traore, M.A. Ayadi and R. Gdoura. 2012. Effect of zeolite (clinoptilolite) as feed additive in Tunisian broilers on the total flora, meat texture and the production of omega 3 polyunsaturated fatty acid. *Lipids Health Dis.*, 11: 35
- Moisés, M.P., C.T. Pereira da Silva, J.G. Meneguim, E.M. Giroto, E. Radovanovic. 2013. Synthesis of zeolite NaA from sugarcane bagasse ash. *Mater. Lett.*, 108: 243-246.
- Öztürk, E. G. Erener, M. Sarica. 1998. Influence of natural zeolite on performance of laying hens and egg quality. *Turk. J. Agric. For.*, 22: 623-628.
- Pond, W.G., J.T. Yen, V.H. Varel. 1998. Response of growing pigs to dietary copper and clinoptilolite supplementation. *Nutr. Rep.*, 37: 795–803.
- Poulsen, H.D. and N. Oksbjerg. 1995. Effect of dietary inclusion of a zeolite (Clinoptilolite) on performance and protein-metabolism of young growing pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 53: 297–303.

- Prasetyoko, D., Z. Ramli, S. Endud, H. Hamdan and B. Sulikowski. 2006. Conversion of rice husk ash to zeolite beta. *Waste Manag.*, 26: 1173-1179.
- Prvulović, D., A. Jovanović-Galović, B. Stanić, M. Popović and G. Grubor-Lajšić. 2007. Effects of a clinoptilolite supplement in pig diets on performance and serum parameters. *Czech J. Anim. Sci.*, 52: 159–164.
- Safaei, M., F. Boldaji, B. Dastar, S. Hassani, M.S.A. Mutalib and R. Rezaei. 2014. Effects of inclusion kaolin, bentonite and zeolite in dietary on chemical composition of broiler chickens meat. *Asian J. Anim. Vet. Adv.*, 9: 56-63.
- Shurson, G.C., P.K. Ku, E.R. Miller and M.T. Yokoyama. 1984. Effects of zeolite or clinoptilolite in diets of growing swine. *J. Anim. Sci.*, 59: 1536–1545.
- Song, M., Y. Liu, J.A. Soares, T.M. Che, O. Osuna, C.W. Maddox and J. E. Pettigrew. 2012. Dietary clays alleviate diarrhea of weaned pigs. *J. Anim. Sci.*, 90: 345–60.
- Stojic, V., M., Gagrčin, D. Kirovski and N. Fratrić. 1998. The effect of clinoptilolite based mineral adsorber on colostrum immunoglobulin G adsorption in newborn piglets. *Acta Vet.*, 48: 19–26.
- Trckova, M., H. Vondruskova, Z. Zraly, P. Alexa, J. Hamrik, V. Kummer, J. Maskova, V. Mrlik, K. Krizova, I. Slana, L. Leva and I. Pavlik. 2009. The effect of kaolin feeding on efficiency, health status and course of diarrhoeal infections caused by enterotoxigenic *Escherichia coli* strains in weaned piglets. *Vet. Med.*, 54: 47–63.
- Wang, J.P., F. Chi and I.H. Kim. 2012. Effects of montmorillonite clay on growth performance, nutrient digestibility, vulva size, faecal microflora, and oxidative stress in weaning gilts challenged with zearalenone. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 178: 158–66.
- Xia, M.S, C.H. Hu, Z.R. Xu, Y. Ye, Y.H. Zhou and L. Xiong. 2004. Effects of copper-bearing montmorillonite (Cu-MMT) on *Escherichia coli* and diarrhea on weanling pigs. *Asian-Aust. J. Anim. Sci.*, 17: 1712–1716.
- Xia, M.S., C.H. Hu and Z.R. Xu. 2005. Effects of copper bearing montmorillonite on the growth performance, intestinal microflora and morphology of weanling pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 118: 307–317.

- Yamauchi, K., J. Ruttanavut and S. Takenoyama. 2010. Effects of dietary bamboo charcoal powder including vinegar liquid on chicken performance and histological alterations of intestine. *J. Anim. Feed Sci.*, 19: 257–268.
- Yan L, D.L. Han, Q.W. Meng, J.H. Lee, C.J. Park and I.H. Kim. 2010. Effects of anion supplementation on growth performance, nutrient digestibility, meat quality and fecal noxious gas content in growing-finishing pigs. *Asian-Aust. J. Anim.*, 23: 1073–1079.
- Yan, L. , J. H. Lee, Q. W. Meng and I. H. Kim. 2011. Evaluation of the Anion® supplementation on growth performance, nutrient digestibility, blood characteristics and faecal noxious gas content in weaning pigs, *J. Appl. Anim. Res.*, 39: 36-40.
- Yu, D.Y., Z.R. Xu and X.G. Yang. 2005. Effects of lead and particulate montmorillonite on growth performance, hormone and organ weight in pigs. *Asian-Aust. J. Anim. Sci.* 18: 1775–1779.

ภาคผนวก ก

สัดส่วนเถ้าขานอ้อย : เถ้าแกลบ = 1:0



ภาพตัวอย่างซีโอไรต์ที่สังเคราะห์จากสัดส่วนเถ้าขานอ้อยต่อเถ้าแกลบ (1:0) เเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ระยะเวลาตกผลึกที่ 72, 120, 144 และ 168 ชั่วโมง ตามลำดับ

สัดส่วนเถ้าขานอ้อย : เถ้าแกลบ = 1:0



ภาพตัวอย่างซีโอไรต์ที่สังเคราะห์จากสัดส่วนเถ้าขานอ้อยต่อเถ้าแกลบ (1:0) เเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ระยะเวลาตกผลึกที่ 72, 120, 144 และ 168 ชั่วโมง ตามลำดับ

สัดส่วนเถ้าขานอ้อย : เถ้าแกลบ = 1:0



ภาพตัวอย่างซีโอไรต์ที่สังเคราะห์จากสัดส่วนเถ้าขานอ้อยต่อเถ้าแกลบ (1:0) เเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ระยะเวลาตกผลึกที่ 72, 120, 144 และ 168 ชั่วโมง ตามลำดับ

สัดส่วนเถ้าขานอ้อย : เถ้าแกลบ = 1:0



ภาพตัวอย่างซีโอไรต์ที่สังเคราะห์จากสัดส่วนเถ้าขานอ้อยต่อเถ้าแกลบ (1:0) เเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ระยะเวลาตกผลึกที่ 72, 120, 144 และ 168 ชั่วโมง ตามลำดับ

ภาคผนวก ข

สัดส่วนเถ้าขานอ้อย : เถ้าแกลบ = 1:1



ภาพตัวอย่างซีไอไรต์ที่สังเคราะห์จากสัดส่วนเถ้าขานอ้อยต่อเถ้าแกลบ (1:1) เเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ระยะเวลาตกผลึกที่ 72, 120, 144 และ 168 ชั่วโมง ตามลำดับ

สัดส่วนเถ้าขานอ้อย : เถ้าแกลบ = 1:1



ภาพตัวอย่างซีไอไรต์ที่สังเคราะห์จากสัดส่วนเถ้าขานอ้อยต่อเถ้าแกลบ (1:1) เเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ระยะเวลาตกผลึกที่ 72, 120, 144 และ 168 ชั่วโมง ตามลำดับ

สัดส่วนเถ้าขานอ้อย : เถ้าแกลบ = 1:1



ภาพตัวอย่างซีโอไรต์ที่สังเคราะห์จากสัดส่วนเถ้าขานอ้อยต่อเถ้าแกลบ (1:1) เเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ระยะเวลาตกผลึกที่ 72, 120, 144 และ 168 ชั่วโมง ตามลำดับ

สัดส่วนเถ้าขานอ้อย : เถ้าแกลบ = 1:1



ภาพตัวอย่างซีโอไรต์ที่สังเคราะห์จากสัดส่วนเถ้าขานอ้อยต่อเถ้าแกลบ (1:1) เเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ระยะเวลาตกผลึกที่ 72, 120, 144 และ 168 ชั่วโมง ตามลำดับ

ภาคผนวก ค

สัดส่วนเถ้าขานอ้อย : เถ้าแกลบ = 2:1



ภาพตัวอย่างซีโอไรต์ที่สังเคราะห์จากสัดส่วนเถ้าขานอ้อยต่อเถ้าแกลบ (2:1) เเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ระยะเวลาตกผลึกที่ 72, 120, 144 และ 168 ชั่วโมง ตามลำดับ

สัดส่วนเถ้าขานอ้อย : เถ้าแกลบ = 2:1



ภาพตัวอย่างซีโอไรต์ที่สังเคราะห์จากสัดส่วนเถ้าขานอ้อยต่อเถ้าแกลบ (2:1) เเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ระยะเวลาตกผลึกที่ 72, 120, 144 และ 168 ชั่วโมง ตามลำดับ

สัดส่วนเถ้าขานอ้อย : เถ้าแกลบ = 2:1



ภาพตัวอย่างซีโอไรต์ที่สังเคราะห์จากสัดส่วนเถ้าขานอ้อยต่อเถ้าแกลบ (2:1) เเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ระยะเวลาตกผลึกที่ 72, 120, 144 และ 168 ชั่วโมง ตามลำดับ

สัดส่วนเถ้าขานอ้อย : เถ้าแกลบ = 2:1



ภาพตัวอย่างซีโอไรต์ที่สังเคราะห์จากสัดส่วนเถ้าขานอ้อยต่อเถ้าแกลบ (2:1) เเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ระยะเวลาตกผลึกที่ 72, 120, 144 และ 168 ชั่วโมง ตามลำดับ

ภาคผนวก ง

สัดส่วนเถ้าขานอ้อย : เถ้าแกลบ = 3:1



ภาพตัวอย่างซีโอไรต์ที่สังเคราะห์จากสัดส่วนเถ้าขานอ้อยต่อเถ้าแกลบ (3:1) เเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ระยะเวลาตกผลึกที่ 72, 120, 144 และ 168 ชั่วโมง ตามลำดับ

สัดส่วนเถ้าขานอ้อย : เถ้าแกลบ = 3:1



ภาพตัวอย่างซีโอไรต์ที่สังเคราะห์จากสัดส่วนเถ้าขานอ้อยต่อเถ้าแกลบ (3:1) เเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ระยะเวลาตกผลึกที่ 72, 120, 144 และ 168 ชั่วโมง ตามลำดับ

สัดส่วนเถ้าขานอ้อย : เถ้าแกลบ = 3:1



ภาพตัวอย่างซีโอไรต์ที่สังเคราะห์จากสัดส่วนเถ้าขานอ้อยต่อเถ้าแกลบ (3:1) เเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ระยะเวลาตกผลึกที่ 72, 120, 144 และ 168 ชั่วโมง ตามลำดับ

สัดส่วนเถ้าขานอ้อย : เถ้าแกลบ = 3:1



ภาพตัวอย่างซีโอไรต์ที่สังเคราะห์จากสัดส่วนเถ้าขานอ้อยต่อเถ้าแกลบ (3:1) เเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ระยะเวลาตกผลึกที่ 72, 120, 144 และ 168 ชั่วโมง ตามลำดับ