

สรุปผลการวิจัย

สรุปผลการวิจัย เรื่อง “การศึกษาเพื่อพัฒนาเครื่องดันแบบการผลิตผงเอนไซม์ผสมจากต้นสดข้าวฟ่างหวานสำหรับอุตสาหกรรมเอทานอล” ดังรายละเอียดต่อไปนี้

5.1 คุณสมบัติของลำต้นสดข้าวฟ่างหวาน

ลำต้นสดข้าวฟ่างหวานประกอบด้วยเซลลูโลส ลิกนิน และเฮมิเซลลูโลสร้อยละประมาณ 69, 19 และ 16 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งนำมาใช้เป็นสับสเตรทหรือวัตถุดิบสำหรับการหมักแข็งและกึ่งเหลวโดยไม่ได้ทำการปรับสภาพเบื้องต้นเพื่อกำจัดลิกนินออกได้ จึงเป็นการลดการใช้พลังงานต่างๆ ได้แก่ สารเคมี น้ำ ไฟฟ้า เวลา และไม่เกิดน้ำเสียจึงไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการบำบัด งานวิจัยนี้อาจสรุปได้ว่าเป็นกระบวนการผลิตสีเขียวได้

5.2 ความชื้นของจุลินทรีย์ผสมสดและผงจุลินทรีย์ผสม

ลำต้นสดข้าวฟ่างหวานมีความชื้นประมาณร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก ในการผลิตผงจุลินทรีย์ผสมจึงใช้อัตราส่วนอาหารเหลวเพียง 60 มิลลิลิตรต่อ 100 กรัมข้าวฟ่างหวาน สำหรับผงจุลินทรีย์ผสมมีความชื้นประมาณร้อยละ 8-12 โดยน้ำหนัก จุลินทรีย์ผสมในรูปของผงแห้งสามารถเก็บรักษาง่าย และยืดอายุการใช้งานของจุลินทรีย์ผสมได้อีกด้วย

5.3 ขนาดอนุภาคของลำต้นข้าวฟ่างหวาน

ลำต้นสดข้าวฟ่างหวานที่ผ่านเครื่องย่อยลำต้นพืชมีขนาดประมาณ 1 ถึง 4.75 เซนติเมตร ซึ่งเป็นการย่อยอย่างหยาบและทำเพียงครั้งเดียวก่อนนำมาใช้ ถึงแม้ว่าขนาดของอนุภาคจะมีผลกระทบต่อการผลิตเอทานอลจากงานวิจัยของ Jianliang Yu และคณะ, 2008 [18]

5.4 สภาพที่เหมาะสมของการผลิตจุลินทรีย์ผสมสด

สภาพที่เหมาะสมของการหมักแข็งในซามแก้วขนาด 500 มิลลิลิตร คือ น้ำหนักลำต้นสดข้าวฟ่างหวานเท่ากับ 100 กรัม ปริมาตรหัวเชื้ออาหารเหลว พีเอช 5 (ไม่เติมน้ำตาล) ที่มีจุลินทรีย์ผสม TY จากงานเพาะเลี้ยงเท่ากับ 60 มิลลิลิตร (หัวเชื้อมีความเข้มข้นจุลินทรีย์ผสมประมาณ 1.00×10^6 เซลล์/มิลลิลิตร) และใช้ระยะเวลาการหมักนาน 7 วัน ที่อุณหภูมิ $24 \pm 2^\circ\text{C}$ ผลผลิตก้นที่สุดที่ได้มีความเข้มข้นของจุลินทรีย์ผสมสูงสุดประมาณ 2.00×10^8 เซลล์/มิลลิลิตร

5.5 การผลิตจุลินทรีย์ผสมสด

การผลิตจุลินทรีย์ผสมสดได้จากการหมักแข็งลำต้นสดข้าวฟ่างหวานด้วยหัวเชื้อจุลินทรีย์ผสมในอาหารเหลวที่สภาพเหมาะสม โดยขยายขนาดเพิ่มขึ้นเป็น 6 เท่าของระดับปฏิบัติการ ในถังพลาสติกขนาด 10 ลิตร จำนวน 8 กล้อง และนำไปปั่นในตู้ปั่นแบบที่อุณหภูมิ $24 \pm 2^\circ\text{C}$

5.6 การผลิตผงจุลินทรีย์ผสมด้วยเครื่องบดต้นแบบ

สภาวะของการอบแห้งจุลินทรีย์ผสมสดที่ได้จากการหมักแข็งลำต้นสดข้าวฟ่างหวานเพื่อทำเป็นผงสรุปได้ดังนี้ คือ

5.6.1 ทำการอบแห้งในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60°C นาน 18 ชั่วโมง เริ่มจากผลิตภัณฑ์สดหนัก 1,592 กรัม ได้ผลิตภัณฑ์แห้งหนัก 845 กรัม

5.6.2 บดผลิตภัณฑ์แห้งให้เป็นผงในเครื่องบดต้นแบบ ผงจุลินทรีย์ผสมที่ได้หนักประมาณ 776 กรัม คิดเป็นร้อยละการสูญเสียเท่ากับ 8 โดยน้ำหนัก

5.6.3 ผงจุลินทรีย์ผสมที่ได้มีความเข้มข้นจุลินทรีย์ผสมและเซลลูเลส แอคติวิตี ประมาณ 1.59×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร และ 46 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ

5.7 การหมักเอทานอลกึ่งเหลวแบบกะจากลำต้นสดข้าวฟ่างหวานด้วยผงจุลินทรีย์ผสมในระดับเขย่าขวด

จากการใช้วิธีการทดลองออร์โทโกนอนเพื่อหาสภาวะเหมาะสม สำหรับการออกแบบการทดลอง 3 ตัวแปร 4 ระดับ ทำการทดลอง 16 ชุด และการหมักเอทานอลที่สภาวะเหมาะสม ดังนี้

5.7.1 สภาวะที่เหมาะสมของการหมักเอทานอลกึ่งเหลวในระดับเขย่าขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร คือ ลำต้นสดข้าวฟ่างหวานหนัก 35 กรัม ผงจุลินทรีย์ผสมหนัก 4.5 กรัม ในอาหารเหลวปริมาตร 100 มิลลิลิตร พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5 และระยะเวลาที่ใช้หมักนาน 7 วัน

5.7.2 การหมักเอทานอลกึ่งเหลวแบบกะในระดับเขย่าขวดรูปชมพู่ขนาด 5 ลิตร ขยายขนาดเป็น 30 เท่าจากสภาวะเหมาะสมข้อที่ 5.7.1 คือ ลำต้นสดข้าวฟ่างหวานหนัก 1050 กรัม ผงจุลินทรีย์ผสมหนัก 135 กรัม ในอาหารเหลวปริมาตร 3 ลิตร พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5 และระยะเวลาที่ใช้หมักนาน 5 วัน เอทานอลที่ได้เข้มข้นประมาณ 39.59 กรัมต่อลิตร การใช้ขวดชมพู่จึงไม่เหมาะสม เพราะการเขย่าไม่สามารถทำให้ข้าวฟ่างผสมกับหัวเชื้อได้ดีเพียงพอ จึงเป็นข้อจำกัดของการถ่ายโอนมวลระหว่างอากาศและสารอาหารต่อจุลินทรีย์

5.8 การหมักเอทานอลกึ่งเหลวแบบกะจากลำต้นสดข้าวฟ่างหวานด้วยผงจุลินทรีย์ผสมในถังหมัก

จากการศึกษาปัจจัยต่างๆ ได้แก่ เวลาที่ใช้กวนผสม ความเร็วรอบของใบกวน ชนิดของใบกวนแบบ pitch blade และ paddle blade ที่มีผลต่อความเข้มข้นของเอทานอล น้ำตาลรีดิวซ์ เซลลูเลส แอคติวิตี และจุลินทรีย์ ในการหมักเอทานอลแบบกะในถังปฏิกรณ์ ขนาด 15 ลิตร ที่สภาวะเหมาะสม คือ ลำต้นสดข้าวฟ่างหวานหนัก 2100 กรัม ผงจุลินทรีย์ผสมหนัก 270 กรัม ในอาหารเหลวปริมาตร 6 ลิตร พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5 และระยะเวลาที่ใช้หมักนาน 12 วัน ทุกวันเก็บตัวอย่างของเหลวที่ระดับเดียวกันเพื่อนำไปวิเคราะห์เอทานอล หลังจากตั้งทิ้งไว้นาน 6 ชั่วโมงจึงเก็บตัวอย่างของเหลวที่กวนผสมให้เข้ากันประมาณ 15 นาทีเพื่อนำไปวิเคราะห์น้ำตาลรีดิวซ์ เซลลูเลส แอคติวิตี และจุลินทรีย์ มีผลสรุปได้ดังนี้

5.8.1 เวลาที่ใช้กวนผสม 3 ชั่วโมงต่อวัน ความเร็วมอเตอร์ประมาณ 200 รอบต่อนาที และใบกวนชนิด paddle blade ผลได้ของเอทานอลมีค่าประมาณร้อยละ 70 ส่วนความเข้มข้นของเซลลูโลส แอคติวิตี และจุลินทรีย์มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 59 และ 20 ตามลำดับ ที่ระยะเวลาหมักนาน 8 วัน แสดงว่าเกิดการย่อยสลายของจุลินทรีย์ได้ดีเป็นจากการถ่ายโอนมวลที่ดีกว่าการเขย่าขวดรูปชมพู่ ขนาด 5 ลิตร

5.8.2 การใช้ใบกวนชนิด pitch blade ที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที ไม่เหมาะสมเนื่องจากในช่วงแรกถึง 4 วัน เส้นใยติดใบกวนและแกนกลางใบพัด อย่างไรก็ตาม ในเวลาต่อมา เส้นใยยุ่ยแล้วจะไม่พบความแตกต่างของใบกวนทั้งสองชนิดที่มีผลต่อความเข้มข้นเอทานอล น้ำตาลรีดิวซ์ และเซลลูโลส แอคติวิตี

5.8.3 การใช้ความเร็ว 200 รอบต่อนาที สำหรับใบกวนชนิด paddle blade และเวลาที่ใช้ 3 ชั่วโมงต่อวัน ทำให้ความเข้มข้นเอทานอลและน้ำตาลรีดิวซ์มีค่ามากกว่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที ตั้งแต่เริ่มต้นและเร็วกว่า 1 วัน รวมทั้งจุลินทรีย์เติบโตดีกว่าเพราะได้รับสารอาหารจากการถ่ายโอนมวลที่ดี

5.9 การหมักเอทานอลแบบกึ่งกะจากลำต้นสดข้าวฟ่างหวานด้วยผงจุลินทรีย์ผสมในถังหมัก

กระบวนการหมักเอทานอลกึ่งกะจากลำต้นสดข้าวฟ่างหวานด้วยผงจุลินทรีย์ผสมในถังหมักและขยายขนาดเป็น 60 เท่าของระดับเขย่าขวด ใช้ต้นสดข้าวฟ่างหวานหนัก 2010 กรัม ผงจุลินทรีย์ผสม 270 กรัม อาหารเหลวไม่มีน้ำตาล 6 ลิตร ความเร็วผสม 200 รอบต่อนาที ด้วยใบกวนชนิด paddle blade ใช้เวลากวนผสม 3 ชั่วโมงต่อวัน จากนั้นเติมอาหารเหลวใหม่ (ไม่มีน้ำตาล) ทุกๆ 2 วัน นาน 12 วัน ผลสรุปดังนี้

5.9.1 เวลาที่จุลินทรีย์เติบโตเป็นสองเท่าจากการคำนวณ คือ 1.74 วัน อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้เลือกใช้ 2 วันในทางปฏิบัติ ดังนั้น จึงเติมอาหารใหม่ลงในถังหมักทุกๆ 2 วัน

5.9.2 ปริมาตรอาหารเหลวใหม่ที่เติมเท่ากับ 500 มิลลิลิตร และมีการปรับพีเอชของน้ำหมักทุกวันให้เท่ากับ 5 ผลได้ของเอทานอลเท่ากับ 2.4 ที่เวลาหมักนาน 9 วัน ผลได้ของเอทานอลมีค่ามากกว่า 1 เพราะว่าจุลินทรีย์ย่อยสลายได้น้ำตาลรีดิวซ์มากแต่ใช้น้ำตาลน้อยในการเปลี่ยนเป็นเอทานอล เมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นเอทานอลที่ได้ไปเป็นกรัมเอทานอล การเติมอาหารเหลวใหม่ 500 มิลลิลิตรมีค่ากรัมเอทานอลมากกว่าการเติมอาหารเหลว 300 มิลลิลิตรอย่างมีนัยสำคัญ

5.9.3 การปรับพีเอชของน้ำหมักให้เท่ากับ 5 ทุกวันมีผลต่อระบบการหมัก ถึงแม้ว่าแนวโน้มเป็นไปในทางเดียวกัน เพราะเป็นการป้องกันการปนเปื้อนของแบคทีเรีย

5.10 การหมักเอทานอลกึ่งกะร่วมกับการรีไซเคิลจุลินทรีย์

การประยุกต์ใช้กระบวนการกรองด้วยเยื่อแผ่นกับงานวิจัยนี้ เพื่อรีไซเคิลจุลินทรีย์และแยกเอทานอลซึ่งเป็นสารยับยั้งการเติบโตของจุลินทรีย์ได้ผลสรุป ดังนี้

5.10.1 กระบวนการหมักเอทานอลกึ่งกะสามารถดำเนินการทั้งสิ้น 54 วัน โดยเติมอาหารเหลวใหม่ทุกๆ 2 วัน ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ทั้งที่มีน้ำตาลและไม่มีน้ำตาล โดยรักษาความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ของน้ำหมัก

ให้มีค่าประมาณ 30-40 กรัมต่อลิตร ทำให้กรัมเอทานอลที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 495 กรัม หรือมีความเข้มข้นประมาณ 58 กรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาหมักนาน 51 วัน จากกรัมเอทานอลเริ่มต้นเท่ากับ 214 กรัม หรือมีความเข้มข้นประมาณ 36 กรัมต่อลิตร ทำให้ผลได้ของเอทานอลเท่ากับ 45 ซึ่งมีค่ามากกว่า 1 เนื่องจากจุลินทรีย์ย่อยสลายน้ำตาลและเปลี่ยนเป็นเอทานอลได้มากกว่าการใช้น้ำตาลของจุลินทรีย์ และอัตราการผลิตเอทานอลเท่ากับ 5.5 กรัมต่อวัน

5.10.2 การหมักเอทานอลถึงกะที่มีการรีไซเคิลจุลินทรีย์ในรีเทนเทดที่กรองได้เท่ากับ 300 มิลลิลิตร ร่วมกับอาหารเหลวเตรียมใหม่มีน้ำตาล 200 มิลลิลิตร ทุกๆ 4 วัน ทำให้ผลได้เอทานอลเพิ่มสูงขึ้นมาก ปริมาตรสุดท้ายของน้ำหมักในถังประมาณ 9 ลิตร (จากเริ่มต้น 6 ลิตร)

5.10.3 ความเร็วการป้อนน้ำหมักที่เหมาะสมเข้าเครื่องกรองเยื่อแผ่นของงานวิจัยนี้คือ 0.1 เมตรต่อวินาที หรือ 50 รอบต่อนาที เนื่องจากในเฟอมีเอท มีร้อยละการกักกันของเอทานอลคิดเป็นร้อยละ 17 มากที่สุด โดยที่ร้อยละการกักกันที่ความเร็วการป้อน 0.2 และ 0.3 เมตรต่อวินาทีคิดเป็น 5 และ 11 ตามลำดับ ขณะเดียวกันในรีเทนเทด ร้อยละการเพิ่มขึ้นของเอทานอลเท่ากับ -0.2 ซึ่งมีค่าน้อยที่สุด โดยที่ร้อยละการเพิ่มขึ้นที่ความเร็วการป้อน 0.2 และ 0.3 เมตรต่อวินาทีคิดเป็น 6 และ -0.5 ตามลำดับ

ความเร็วการป้อนน้ำหมัก 0.1 เมตรต่อวินาที ทำให้ความเข้มข้นจุลินทรีย์ในรีเทนเทดเพิ่มขึ้นมากที่สุด เท่ากับร้อยละ 56 (1.87×10^8 เซลล์/มล.) ส่วนในเฟอมีเอท ร้อยละการกักกันจุลินทรีย์น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับอีก 2 ความเร็วการป้อน

ความเร็วการป้อนเท่ากับ 0.1 เมตรต่อวินาทีเป็นการกักกันน้ำตาลรีดิคซ์และเซลลูเลส แอคทิวิตีในเฟอมีเอท มีค่าประมาณร้อยละ 23 และ -73 ซึ่งมีค่าน้อยที่สุด ในรีเทนเทดความเข้มข้นน้ำตาลรีดิคซ์และเซลลูเลส แอคทิวิตีถูกทำให้เพิ่มขึ้นน้อยกว่าที่ความเร็วการป้อน 0.2 เมตรต่อวินาที อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ต้องการให้แยกเอทานอลออกจากน้ำหมัก และต้องการให้จุลินทรีย์ยังคงอยู่ในน้ำหมักเพื่อรีไซเคิลคืนถังหมัก

พลั๊กความเร็วของการกรองน้ำหมักต่อปริมาตรของเฟอมีเอทที่ความเร็วการป้อน 0.1 เมตรต่อวินาทีมีค่าต่ำสุด สอดคล้องกับความเข้มข้นจุลินทรีย์ที่วัดได้จากน้ำล้างมีค่าน้อยที่สุดเช่นเดียวกัน

5.11 ผลที่ได้รับจากงานวิจัยนี้

การศึกษาวิจัยที่ผ่านมา ได้นำน้ำคั้นสดจากลำต้นข้าวฟ่างหวานผลิตเอทานอลจากการหมักเหลวด้วยยีสต์ สายพันธุ์แซคาโรมายซิส ซีรีวิซิอี ซึ่งยีสต์สามารถเปลี่ยนน้ำตาลเป็นเอทานอลได้ แต่น้ำหวานที่คั้นได้ต้องนำไปทำการหมักเอทานอลทันที เพราะจะเกิดการปนเปื้อนของแบคทีเรียในอากาศ หรือถ้าไม่สามารถทำการหมักได้ทันที ต้องมีการจัดเก็บรักษาน้ำหวานที่คั้นได้นี้ ซึ่งมีปริมาณมากไว้ในห้องเย็นที่อุณหภูมิประมาณ -4°C อย่างไรก็ตาม ผลที่ได้รับจากงานวิจัยนี้คือ

5.11.1 ลดพลังงานจากการใช้เครื่องคั้นน้ำหวาน การเก็บรักษา และการลดขนาด

5.11.2 ลดน้ำและสารเคมีในการปรับสภาพเบื้องต้นเพื่อแยกกลิ่นนิน จึงไม่เกิดน้ำเสีย

5.11.3 กระบวนการผลิตผงจุลินทรีย์ผสมอย่างง่าย โดยใช้จุลินทรีย์บริสุทธิ์ 2 สายพันธุ์คือ ไตรโคเดอร์มาโรสอี และแซคคาโรมายซิส สิริวิซอี โดยที่จุลินทรีย์ทั้งสองสายพันธุ์นี้ไม่เป็นปฏิปักษ์กัน จึงสามารถอยู่ร่วมกันได้เมื่อนำมาเพาะเลี้ยงผ่านกระบวนการหมักแข็ง การอบแห้งและการบด

5.11.4 กระบวนการหมักเอทานอลกึ่งกะจากลำต้นสาคูข้าวฟ่างหวานด้วยผงจุลินทรีย์ผสม

5.11.5 กระบวนการแยกจุลินทรีย์ออกจากน้ำหมักด้วยเยื่อแผ่นอัลตราและสามารถนำไปรีไซเคิลได้

5.11.6 เครื่องต้นแบบของการผลิตผงจุลินทรีย์ผสม ได้แก่ เครื่องบ่ม อบแห้ง และเครื่องบด