บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการผลิตเอทานอลจากข้าว โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองสามารถสรุปผลงานวิจัย, อภิปรายผลการทดลอง และข้อเสนอแนะได้ดังนี้

5.1 สรุปผลงานวิจัย

5.1.1 การวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง

พบว่าจากการวางแผนการดำเนินการทดลอง ในขั้นต้นเพื่อหาระดับของปัจจัยที่มีผลต่อการทดลองการหมักเอทานอลและนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ จนกระทั่งได้ปัจจัยที่มีผลต่อการหมักเอทานอลเพื่อให้ได้ความเข้มข้นของเอทานอลมากที่สุด ผลจากการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ พบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลในการทดลองมี 3 ปัจจัยคือ ชนิดของข้าว, วิธีย่อยแป้งให้เปลี่ยนเป็นน้ำตาล และเวลาที่ใช้ในการหมัก ระดับปัจจัยที่เหมาะสมของการผลิตเอทานอลจากข้าวคือ การนำข้าวเหนียวดำ/ดอยมาย่อยด้วยเชื้อรา *Aspergillus oryzae* และ *Aspergillus sake* เป็นเวลา 14 วัน

เมื่อวิเคราะห์ผลโดยใช้ฟังก์ชั่น Response Optimizer พบว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดของการผลิตเอทานอลจากข้าวเมื่อตั้งเป้าหมายให้สามารถผลิตเอทานอลได้มากที่สุด (Maximum) พบว่าใช้ข้าวเหนียวดำหรือดอย (Black Glutinous Rice) นำมาย่อย (Hydrolysis) ด้วยเชื้อรา *Aspergillus oryzae* และ *Aspergillus sake* อุณหภูมิที่ใช้ในการหมัก (Fermentation Temperature) 37 °C และเวลาที่ใช้ในการหมัก (Fermentation Time) 14 วัน ให้ผลลัพธ์ค่าความเข้มข้นของเอทานอลเท่ากับ 12.9667 โดยได้ค่าความพึงพอใจรวม (Composite Desirability) เท่ากับ 0.98788

จากนั้นทำการวิเคราะห์หาเวลาที่ใช้ในการหมักเมื่อกำหนดชนิดของข้าว, วิธีการย่อยแป้ง, อุณหภูมิในการหมักคงที่ คือ ข้าวเหนียวดำหรือดอย และวิธีย่อยแป้งให้เปลี่ยนเป็นน้ำตาล คือ เชื้อรา *Aspergillus oryzae* และ *Aspergillus sake* ทดลองหมักในสภาวะที่ 37 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยทดลอง 3 ซ้ำ พบว่า เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นความเข้มข้นของเอทานอลจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่ง จากนั้นความเข้มข้นของเอทานอลจะคงที่ ดังนั้นเวลาที่เหมาะสมในการหมักเอทานอลคือ 18 วัน ได้เอทานอลที่มีความเข้มข้นอยู่ระหว่าง 15-16 %

5.1.2 การวิเคราะห์ต้นทุน

ต้นทุนการผลิตเอทานอลจากข้าว โดยคิดจากเอทานอลเข้มข้น 95% จำนวน 10 ลิตร การคำนวณต้นทุนการผลิตเอทานอลจากข้าว สามารถคำนวนได้ดังนี้

1) คิดต้นทุนของเอทานอลที่ผลิตจากข้าวเหนียวสันป่าตอง และหมักด้วยเชื้อรา *Aspergillus oryzae* และ *Aspergillus sake* ราคา 2,089.87 บาทต่อเอทานอลเข้มข้น 95% จำนวน 10 ลิตร

2) คิดต้นทุนของเอทานอลที่ผลิตจากข้าวเหนียวสันป่าตอง และหมักด้วยหมักด้วยเอนไซม์ α-*Amylase* และ *Amyloglucosidase* ราคา 2,967.20 บาทต่อเอทานอลเข้มข้น 95% จำนวน 10 ลิตร

3) คิดต้นทุนของเอทานอลที่ผลิตจากข้าวเหนียวดำ/ดอย และหมักด้วยเชื้อรา *Aspergillus oryzae* และ *Aspergillus sake* ราคา 1,941.63 บาท ต่อเอทานอลเข้มข้น 95% จำนวน 10 ลิตร

4) คิดต้นทุนของเอทานอลที่ผลิตจากข้าวเหนียวดำ/ดอย และหมักด้วยเอนไซม์ α-*Amylase* และ *Amyloglucosidase* ราคา 2,747.32 บาทต่อเอทานอลเข้มข้น 95% จำนวน 10 ลิตร

จากการวิเคราะห์พบว่าต้นทุนของเอทานอลที่ผลิตจากข้าวเหนียวดำ/ดอย และหมักด้วยเชื้อรา *Aspergillus oryzae* และ *Aspergillus sake* มีต้นทุนน้อยที่สุดคือ 1,941.63 บาทต่อเอทานอลเข้มข้น 95% จำนวน 10 ลิตร

5.2 การอภิปรายผล

5.2.1 การดำเนินการทดลองเพื่อหาระดับของปัจจัยที่มีผลต่อการหมักเอทานอล

ในการดำเนินการทดลองทั้งหมด ยึดถือหลักการในเรื่องของการออกแบบการทดลอง เริ่มจากการกำหนดวิธีการทดลองโดยเลือกใช้หลักการของการออกแบบแฟคทอเรียลแบบ 2^k (2^k factorial design) ตามที่ได้กล่าวมาแล้วในขั้นต้น

การกำหนดปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการหมักเอทานอลนี้ กำหนดจากข้อมูลขั้นต้นที่มีผู้ศึกษามาก่อนหน้านี้ ไม่ว่าจะเป็นในเรื่องของปัจจัยที่ใช้ในการหมัก เช่น ระดับของอุณหภูมิที่ใช้ในการหมัก, ช่วงเวลาที่ใช้ในการหมัก, ชนิดของจุลินทรีย์ที่นำมาย่อยแป้งให้เปลี่ยนเป็นน้ำตาล ในส่วนของวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการหมักเอทานอล เช่น พันธุ์ข้าวที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการหมักซึ่งได้เลือกจากข้าวเหนียวพันธุ์พื้นเมืองที่มีปลูกในแถบภาคเหนือของประเทศไทยและข้อมูลที่นำมากำหนดนี้ ส่วนหนึ่งได้มาจากการศึกษาจากหนังสือ บทความทางวิชาการ เอกสารต่างๆ และสอบถามจากผู้เชี่ยวชาญโดยตรง ทำให้ข้อมูลต่างๆที่ได้รับมาในขั้นตอนนี้สามารถที่จะอ้างอิงถึง

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

ความเป็นจริงได้ จากการนำข้อมูลที่ได้รับจากการศึกษาในขั้นต้นมากำหนดปัจจัยที่มีผลต่อการหมักเอทานอลและกำหนดระดับของปัจจัยแต่ละตัวได้ดำเนินการตามขั้นตอนการศึกษาทุกประการ

ตาราง 5.1 เปรียบเทียบการผลิตเอทานอลที่ได้จากการศึกษาและการผลิตจริง

งานวิจัย	วัตถุดิบ	วิธีย่อยแป้ง (Hydrolysis)	การหมัก				ปริมาณเอทานอลที่ได้
			จุลินทรีย์	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (วัน)	pH	
Suresh (1998)	ข้าว	เชื้อรา (*Aspergillus niger*)	ยีสต์ *S. cerevisiae*	30	5	5	182 g/l
Verma (2000)	แป้ง	เอนไซม์ (*α-amylase*) และ *Amyloglucoamylase*	ยีสต์ *S. cerevisiae*	37	-	-	22 g/l
Wang (2007)	ข้าวสาลี	เชื้อรา *Aspergillus awamori*, *Aspergillus oryzae*	ยีสต์ *S. cerevisiae*	30	7	-	296.1 g/1kg
สัมพันธ์ (2009)	ข้าว	เอนไซม์ (*α-amylase*)	ยีสต์ *S. cerevisiae*	20 -35	7	-	7 % โดยปริมาตร
งานวิจัยที่ผลิตจริง	ข้าว	เอนไซม์ (*α-Amylase*) และ *Amyloglucosidase*	ยีสต์ *S. cerevisiae*	20-37	7-14	-	13.0% โดยปริมาตร
งานวิจัยที่ผลิตจริง	ข้าว	เชื้อรา *Aspergillus oryzae* และ *Aspergillus sake*	ยีสต์ *S. cerevisiae*	20-37	7-14	-	14.7% โดยปริมาตร

จากตารางที่ 5.1 เห็นได้ว่าการผลิตเอทานอลจากข้าวโดยใช้เอนไซม์ *α-amylase* และ *Amyloglucoamylase* ที่ทำการผลิตจริง ได้ค่าความเข้มข้นของเอทานอลเท่ากับ 13 % โดยปริมาตร ซึ่งมากกว่าค่าที่ได้จากการศึกษาของ สัมพันธ์ (2009) และการผลิตเอทานอลจากข้าวโดยใช้เชื้อรา *Aspergillus oryzae* และ *Aspergillus sake* ที่ทำการผลิตจริง ได้ค่าความเข้มข้นของเอทานอลเท่ากับ

14.7% โดยปริมาตร ซึ่งมีค่าน้อยกว่า ค่าที่ได้จากการศึกษาของ suresh (1998) เนื่องจาก มีการใช้ข้าว และสภาวะในการหมัก ที่แตกต่างกัน

การทดลองนี้แตกต่างจากงานวิจัยอื่น คือมีการใช้ข้าวเหนียวพันธุ์พื้นเมืองเช่นข้าวเหนียวดำ/ดอย และข้าวเหนียวสันป่าตอง มาใช้ในการผลิตเอทานอล ซึ่งข้าวเหนียวทั้งสองพันธุ์นี้นิยมปลูกมากในแถบภาคเหนือของประเทศไทย

5.2.2 <u>ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยและผลตอบที่ได้จากการหมักเอทานอล</u>

ปัจจัยที่ศึกษามี 4 ปัจจัย คือชนิดของข้าว, วิธีย่อยแป้งให้เปลี่ยนเป็นน้ำตาล, อุณหภูมิที่ใช้ในการหมัก และเวลาที่ใช้ในการหมัก ผลจากการศึกษาพบว่า มีเพียง 3 ปัจจัยที่มีผลต่อระดับความเข้มข้นของเอทานอลที่ได้ คือ ชนิดของข้าว, วิธีย่อยแป้งให้เปลี่ยนเป็นน้ำตาล และเวลาที่ใช้ในการหมัก ซึ่งเมื่อพิจารณาปัจจัยเวลาที่ใช้ในการหมักพบว่า เมื่อเวลามากขึ้น ความเข้มข้นของเอทานอลมีแนวโน้มสูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นจึงทำการศึกษาโดยกำหนดค่าปัจจัยอื่น(ชนิดของข้าว,วิธีการย่อยแป้งให้เปลี่ยนเป็นน้ำตาล และ อุณหภูมิที่ใช้ในการหมัก)คงที่ พบว่า เมื่อใช้ข้าวเหนียวดำ/ดอย ย่อยด้วยเชื้อรา *Aspergillus oryzae* และ *Aspergillus sake* หมักที่อุณหภูมิ 37 °C พบว่าเวลาที่ใช้ในการหมักมากขึ้น ความเข้มข้นของเอทานอลมากขึ้นจนถึงจุดๆหนึ่งจะคงที่ จากการทดลองพบว่าที่วันที่ 18 ของการหมัก ความเข้มข้นของเอทานอลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจนเกือบคงที่ ดังนั้นจึงวันที่ 18 จึงเป็นเวลาที่เหมาะสมในการหมักเอทานอลเพื่อให้ได้ความเข้มข้นของเอทานอลมากที่สุด เนื่องจากเวลาหมักนานเกินไปอาจจะทำให้มีจุลินทรีย์ชนิดอื่นที่ไม่ต้องการปนเปื้อนได้

ความเข้มข้นของเอทานอลจากข้าวจากการทดลองที่ผลิตได้มากที่สุดอยู่ระหว่าง 15-16% โดยปริมาตร ซึ่งมีค่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับ การผลิตเอทานอลจากข้าวต่างชนิดกัน พบว่าได้เอทานอลเข้มขันเพียง 7 % โดยปริมาตร (สัมพันธ์ ไชยเทพ และคณะ, 2551)

พิจารณาถึงปัจจัยอุณหภูมิที่ใช้ในการหมัก พบว่าไม่มีผลต่อระดับความเข้มข้นของเอทานอล ที่ได้เนื่องจากเชื้อราและเอนไซม์สามารถเจริญได้ที่อุณหภูมิ 20 และ 37 องศาเซลเซียสได้เหมือนกันหรือแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

เมื่อพิจารณาในส่วนของความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อระดับความเข้มข้นของเอทานอลนั้น ในการทดลองครั้งนี้พบว่าโดยรวมความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทั้งหมดไม่มีผลต่อระดับความเข้มข้นของเอทานอลที่ได้ ซึ่งแต่ละชุดปัจจัยก็มีระดับความสัมพันธ์ที่แตกต่างกันออกไป แต่ที่เห็นชัดเจนที่สุดคือ ความสัมพันธ์ระหว่างวิธีย่อยแป้งให้เปลี่ยนเป็นน้ำตาล, อุณหภูมิที่ใช้ในการหมัก และเวลาที่ใช้ในการหมัก ไม่มีความสัมพันธ์ต่อกันเลย (ค่าสัมประสิทธิ์เท่ากับ 0.01, p-value = 0.95)

5.2.3 การวิเคราะห์ต้นทุนในการผลิตเอทานอลจากข้าว

จากการศึกษาเรื่องต้นทุนในการผลิตเอทานอลจากข้าว พบว่า ราคาของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต (feedstock cost) เป็นอัตราส่วนที่มากที่สุดในการผลิตเอทานอลซึ่งราคาของวัตถุดิบที่นำมาผลิตเอทานอลมีค่าถึง 70-80% ของราคารวมการผลิต ในปัจจุบันมีการแข่งขันในการผลิตเอทานอลสูงขึ้น ดังนั้นราคาต้นทุนของวัตถุดิบที่นำมาผลิตจึงเป็นตัวแปรที่สำคัญในการเลือกวัตถุดิบที่นำมาผลิตเอทานอล จากการทดลองนี้เป็นการศึกษาภายในห้องทดลองเท่านั้นหากพัฒนาให้มีการผลิตในปริมาณมาก อาจทำให้ราคาของเอทานอลจากข้าวมีราคาลดลง

การนำข้าวคุณภาพต่ำมาใช้ในการผลิตเอทานอลเป็นอีกทางเลือกหนึ่งซึ่งอาจจะทำให้เอทานอลมีราคาต้นทุนที่ถูกลงเนื่องจากข้าวคุณภาพต่ำมีราคาที่ถูกกว่าข้าวคุณภาพสูงมาก และข้าวคุณภาพต่ำสามารถนำมาผลิตเอทานอลได้เช่นกัน แต่เมื่อต้องการผลิตเป็นจำนวนมาก (Mass Production) แล้วอาจทำให้ข้าวคุณภาพต่ำขาดตลาดหาซื้อได้ยากและมีราคาสูงขึ้น

5.2.3 การวิเคราะห์เมื่อนำพืชอาหารมาผลิตเป็นพลังงานทดแทน

วิกฤติพืชอาหารและพลังงานในปัจจุบัน นับเป็นปัญหาใหญ่ในหลาย ๆ ประเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงปีหลังมานี้ ประเทศผู้ผลิตข้าวซึ่งเป็นพืชอาหารที่สำคัญของโลก ได้แก่ อินเดีย อินโดนีเซีย เวียดนาม ฟิลิปปินส์ ประสบปัญหาภัยธรรมชาติ ทำให้ผลผลิตข้าวลดลง นอกจากนี้ยังมีการนำพืชอาหาร เช่น ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ อ้อย มันสำปะหลัง ไปผลิตเป็นพลังงานทดแทนมากขึ้น เนื่องจากปัจจุบัน ราคาน้ำมันอยู่ในระดับสูง และมีแนวโน้มว่าราคาจะสูงขึ้นไปอีก ทำให้มีการปรับพื้นที่ปลูกพืชเพื่อไปเป็นพลังงานทดแทนเป็นจำนวนมาก พื้นที่ในการปลูกพืชอาหารจึงมีจำนวนลดลง ทำให้ผลผลิตพืชอาหารลดน้อยลงตามไปด้วย ทำให้หลายฝ่ายเกิดความวิตกกังวลว่าอาหารจะขาดแคลนและราคาสูง

ปัญหาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นเมื่อนำพืชอาหารมาผลิตเป็นพลังงานทดแทน

1. จากสถานการณ์ราคาน้ำมันในตลาดโลกที่ปรับตัวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในปัจจุบัน เนื่องจากปริมาณความต้องการที่เพิ่มขึ้นมากกว่ากำลังการผลิต ส่งผลให้ประเทศที่พึ่งพาการนำเข้าน้ำมันจากต่างประเทศได้รับผลกระทบอย่าง หลีกเลี่ยงไม่ได้ หลายประเทศในโลกได้มีนโยบายส่งเสริมการประหยัดพลังงานโดยการใช้พืชพลังงานทด แทน เช่น มันสำปะหลัง อ้อยโรงงาน ข้าวโพด เลี้ยงสัตว์ และปาล์มน้ำมัน ทำให้มีการแย่งพื้นที่ปลูกพืชอาหารไปปลูกพืชพลังงาน

2. พืชอาหารสำคัญหลายชนิด ซึ่งเคยใช้เพื่อเป็นอาหาร หรือเป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตอาหารในอุตสาหกรรมต่อเนื่อง เช่น แป้งจากมันสำปะหลัง น้ำมันจากปาล์มน้ำมัน น้ำตาลจากอ้อยโรงงาน

เป็นต้น ได้ถูกนำบางส่วนไปใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตพลังงานทดแทน ทำให้เกิดภาวะอาหารขาดแคลนและมีราคาสูงขึ้น

3. จากการผลิตพืชพลังงานทดแทนเพิ่มมากขึ้น จนส่งผลกระทบต่อภาคการผลิตอาหารที่มีปริมาณผลผลิตลดน้อยลง ในขณะที่ความต้องการอาหารในตลาดโลกมีสูง ทำให้ราคาอาหารปรับตัวสูงขึ้น แม้ว่าประเทศไทยสามารถผลิตอาหารจากพืชและสัตว์เพียงพอกับความต้องการสำหรับ ประชากรภายในประเทศ และมีเหลือส่งออกเลี้ยงประชากรโลกได้ แต่หากมุ่งเน้นให้ความสำคัญกับการส่งออก โดยไม่พิจารณาสถานการณ์ในประเทศ ซึ่งในปัจจุบันราคาสินค้าเกษตรขยับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว รวมทั้งค่าครองชีพอื่นๆ ที่เพิ่มขึ้นตลอดเวลา อาจส่งผลให้เกิดปัญหาวิกฤตอาหารขาดแคลนในประเทศได้

4. จากการเปลี่ยนแปลงด้านกลไกตลาดและสภาวะโลกร้อน จะส่งผลให้ราคาข้าวอยู่ในระดับสูงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งแม้ว่าอาจจะส่งผลให้เกษตรกรมีรายได้เป็นตัวเงิน (Nominal income) เพิ่มขึ้น แต่ในขณะเดียวกันเมื่อราคาสินค้าอาหารพื้นฐานในประเทศสูงขึ้น ย่อมจะส่งผลให้เกิดภาวะเงินเฟ้อ (Inflation) ตามมา ซึ่งหากอัตราเงินเฟ้อที่เพิ่มขึ้นสูงกว่ารายได้ของเกษตรกรที่เพิ่มขึ้นจะส่ง ผลให้รายได้ที่แท้จริง (Real income) ของเกษตรกรลดลง

5.3 ข้อเสนอแนะ

ปัจจุบันความต้องการใช้ในด้านพลังงาน มีความตื่นตัวสูงขึ้น ซึ่งในการวิจัยครั้งต่อไป อาจนำข้อมูลในส่วนที่เกี่ยวข้องที่ได้จากการทดลองนี้ ไปประยุกต์เพิ่มเติมเพื่อใช้ในการหมักเอทานอล เช่น ใช้ข้าวชนิดอื่นในการหมักเอทานอล, ใช้จุลินทรีย์ต่างชนิดในการย่อยแป้งให้เปลี่ยนเป็นน้ำตาล หรือการพัฒนาเครื่องกลั่น เพื่อได้ปริมาณความเข้มข้นของเอทานอลมากขึ้น และใช้เป็นพลังงานทดแทน ซึ่งสามารถลดภาระการใช้น้ำมันปิโตรเลี่ยมได้ส่วนหนึ่ง ซึ่งในปัจจุบันมีหลายหน่วยงานได้ศึกษาการทดลองในด้านนี้