

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย

4.1 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีในน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวาน

ข้าวฟ่างหวานที่ใช้ในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ คือข้าวฟ่างหวานพันธุ์ มข.40 ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากภาควิชาพืชศาสตร์และทรัพยากรการเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น หลังจากเก็บเกี่ยวต้นข้าวฟ่างหวานที่มีอายุประมาณ 120 วัน แล้ว นำลำต้นข้าวฟ่างหวานไปหีบสกัดเอาเฉพาะส่วนน้ำหวานในลำต้นไปใช้ในการศึกษาวิจัย โดยนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมี อาทิเช่น ความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด น้ำตาลซูโครส น้ำตาลกลูโคส น้ำตาลฟรุกโตส รวมทั้งแร่ธาตุชนิดต่างๆ ได้ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.1 จากข้อมูลจะเห็นได้ว่าน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานมีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบในปริมาณที่สูง ในขณะที่เดียวกันยังมีแร่ธาตุต่างๆ ที่มีความจำเป็นสำหรับการเจริญ และกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ต่างๆ ของเซลล์ยีสต์ รวมทั้งค่าความเป็นกรด-ด่างยังอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของยีสต์ นั่นคือมีค่าอยู่ในช่วง 3.8 - 5.5 (วรารุณี ครุสง, 2529)

หากจะเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีระหว่างน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานและน้ำอ้อย พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำอ้อยมีค่าสูงกว่าน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานเล็กน้อย อย่างไรก็ตามปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด และปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่พบในน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกับที่พบในน้ำอ้อย จากข้อมูลนี้แสดงให้เห็นว่าน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานมีความเหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเอทานอลเช่นเดียวกับน้ำอ้อย

ตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีในน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวาน

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ	
	น้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวาน	น้ำอ้อย*
ค่าความเป็นกรด-ด่าง	4.98 – 5.10	5.45
ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (Total soluble solid) (องศาบริกซ์)	21.5	20 – 24
ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (กรัมต่อลิตร)	194.04	180 – 240
น้ำตาลซูโครส (กรัมต่อลิตร)	175.97	ND
น้ำตาลกลูโคส (กรัมต่อลิตร)	12.32	ND
น้ำตาลฟรุกโตส (กรัมต่อลิตร)	5.75	ND
ปริมาณของธาตุไนโตรเจน (N) (มิลลิกรัมต่อลิตร)	30.82	ND
ปริมาณของธาตุแมกนีเซียม (Mg) (มิลลิกรัมต่อลิตร)	231.72	ND
ปริมาณของธาตุเหล็ก (Fe) (มิลลิกรัมต่อลิตร)	2.39	4.2 – 7.1
ปริมาณของธาตุสังกะสี (Zn) (มิลลิกรัมต่อลิตร)	1.67	ND
ปริมาณของธาตุทองแดง (Cu) (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.36	ND
ปริมาณของธาตุแมงกานีส (Mn) (มิลลิกรัมต่อลิตร)	3.58	ND

หมายเหตุ ND หมายถึงไม่ได้วิเคราะห์ข้อมูล
ที่มา: Chauhan et al. (2002)

4.2 การศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดยยีสต์ทนร้อน *S. cerevisiae* ภายใต้สภาวะแวดล้อมต่างๆ

ในการศึกษาประสิทธิภาพของการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดยยีสต์ทนร้อน *S. cerevisiae* DBKKUY-53 นั้น ได้ดำเนินการทดลองโดยทำการแปรผันปัจจัยต่างๆ โดยมีรายละเอียดผลการวิจัยดังนี้

4.2.1 การศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดยยีสต์ทนร้อน *S. cerevisiae* ภายใต้สภาวะที่แปรผันระดับอุณหภูมิในการหมัก

ในการศึกษาประสิทธิภาพของการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดยยีสต์ทนร้อน *S. cerevisiae* DBKKUY-53 ได้ดำเนินการทดลองโดยเตรียมอาหารสูตรผลิตเอทานอลที่มีน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานเป็นแหล่งคาร์บอน (EP medium) โดยมีความเข้มข้นของน้ำตาลทั้งหมดเริ่มต้น 200



กรัมต่อลิตร จากนั้นบรรจุอาหารลงในฟลากส์ขนาด 500 มิลลิลิตร ในปริมาตร 400 มิลลิลิตร ปิดฟลากส์ด้วยจุกสำลีและปิดทับด้วยอลูมิเนียมฟลอยด์ นำไปนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 28 นาที ทิ้งให้เย็นในตู้ถ่ายเชื้อ จากนั้นเติมกลีเซอรีนร้อน *S. cerevisiae* DBKKUY-53 ลงไปโดยกำหนดให้มีจำนวนเซลล์เริ่มต้น 10^7 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ปิดฟลากส์ด้วย air lock ที่ผ่านการนึ่งฆ่าเชื้อและนำไปเพาะเลี้ยงภายใต้สภาวะนิ่งในตูบบ่มแบบควบคุมอุณหภูมิโดยมีการแปรผันระดับของอุณหภูมิในการเพาะเลี้ยงในช่วง 30-45 องศาเซลเซียส และในระหว่างการหมักทำการเก็บตัวอย่างน้ำหมักทุกๆ 3 ชั่วโมง เป็นเวลา 72 ชั่วโมง นำตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่าต่างๆ อาทิเช่น ความเข้มข้นของน้ำตาลทั้งหมด (Total Sugar) ด้วยวิธี Phenol - sulphuric วัดการเจริญของเซลล์ยีสต์ โดยการนับเซลล์ด้วย haemocytometer วัดค่าความเป็นกรด - ด่าง ด้วย pH meter และวัดปริมาณของเอทานอลด้วย Gas chromatography จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของการหมัก เช่น ความเข้มข้นของเอทานอล ผลได้เอทานอล (ethanol yield) อัตราการผลิตเอทานอล (ethanol productivity) ในแต่ละสภาวะของการเพาะเลี้ยง

ผลการทดลองพบว่ายีสต์ *S. cerevisiae* DBKKUY-53 สามารถผลิตเอทานอลได้สูงสุด (82.77 กรัมต่อลิตร) เมื่อทำการหมักที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และเมื่ออุณหภูมิในการหมักเพิ่มขึ้นเป็น 37 และ 40 องศาเซลเซียส *S. cerevisiae* DBKKUY-53 สามารถเจริญและผลิตเอทานอลให้ความเข้มข้นสูงถึง 71.73 และ 58.14 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยมีค่าต่ำกว่าความเข้มข้นของเอทานอลที่ผลิตได้ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ประมาณ 1.15 และ 1.42 เท่า ตามลำดับ เมื่ออุณหภูมิในการหมักเพิ่มขึ้นเป็น 42 และ 45 องศาเซลเซียส พบว่าความสามารถในการผลิตเอทานอลโดย *S. cerevisiae* DBKKUY-53 ลดลงอย่างมาก โดยสามารถผลิตเอทานอลได้สูงสุดเพียง 32.30 และ 9.08 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าความเข้มข้นของเอทานอลที่ผลิตได้ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ประมาณ 2.56 และ 9.12 เท่า ตามลำดับ (ตารางที่ 4.2)

ในส่วนของการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดยยีสต์ *S. cerevisiae* SC90 พบว่ายีสต์สายพันธุ์นี้สามารถผลิตเอทานอลได้สูงสุด (83.30 กรัมต่อลิตร) เมื่อทำการหมักที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิในการหมักเพิ่มขึ้นเป็น 37 และ 40 องศาเซลเซียส *S. cerevisiae* SC09 สามารถผลิตเอทานอลให้ความเข้มข้นสูงสุดเท่ากับ 63.22 และ 53.68 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าปริมาณของเอทานอลที่ผลิตได้โดยยีสต์ *S. cerevisiae* DBKKUY-53 ประมาณ 1.13 และ 1.08 เท่า ตามลำดับ และที่ระดับอุณหภูมิ 42 และ 45 องศาเซลเซียส พบว่าความสามารถในการผลิตเอทานอลโดย *S. cerevisiae* SC09 ลดลงเช่นเดียวกับยีสต์ *S. cerevisiae* DBKKUY-53 โดยสามารถผลิตเอทานอลได้

สูงสุดเท่ากับ 32.54 และ 17.69 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ (ตารางที่ 4.3) จากผลการทดลองที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิมีผลต่อการเจริญและความสามารถในการหมักเอทานอลโดยยีสต์ที่ร้อนที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Thomas et al. (1993) ที่กล่าวว่าหากอุณหภูมิในการหมักเพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลทำให้กระบวนการหมักหยุดชะงักลงหรือเกิด stuck fermentation รวมทั้งความสามารถในการทนเอทานอลของยีสต์จะลดลงด้วย

หากเปรียบเทียบอัตราการผลิตเอทานอลระหว่างยีสต์ที่ร้อน *S. cerevisiae* DBKKUY-53 และ *S. cerevisiae* SC90 พบว่าอัตราการผลิตเอทานอลโดย *S. cerevisiae* DBKKUY-53 มีค่าสูงกว่ายีสต์ *S. cerevisiae* SC90 โดยเฉพาะที่ระดับอุณหภูมิ 30-40 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าอัตราการใช้น้ำตาลและอัตราในการเปลี่ยนน้ำตาลไปเป็นเอทานอลโดยยีสต์ที่ร้อน *S. cerevisiae* DBKKUY-53 มีค่าสูงกว่ายีสต์ *S. cerevisiae* SC90

ตารางที่ 4.2 ผลผลิตของเอทานอลที่ได้จากการหมักน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดยยีสต์ที่ร้อน *S. cerevisiae* DBKKUY-53 ที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆ กัน

อุณหภูมิในการหมัก (องศาเซลเซียส)	ความเข้มข้นของ เอทานอล (กรัมต่อลิตร)	อัตราการผลิต (กรัมต่อลิตรต่อ ชั่วโมง)	ผลได้ของเอทา นอล (เปอร์เซ็นต์)	ระยะเวลาในการ หมัก (ชั่วโมง)
30	82.77 ± 1.99	2.30 ± 0.06	88.40 ± 0.59	48
37	71.73 ± 2.62	1.49 ± 0.05	87.76 ± 3.22	48
40	58.14 ± 7.71	1.61 ± 0.20	88.25 ± 2.73	36
42	32.30 ± 0.49	0.67 ± 0.01	88.20 ± 6.37	48
45	9.08 ± 4.02	0.19 ± 0.08	62.64 ± 5.60	48

ตารางที่ 4.3 ผลผลิตของเอทานอลที่ได้จากการหมักน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดยยีสต์ทนร้อน *S. cerevisiae* SC90 ที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆ กัน

อุณหภูมิในการหมัก (องศาเซลเซียส)	ความเข้มข้นของ เอทานอล (กรัมต่อลิตร)	อัตราการผลิต (กรัมต่อลิตรต่อ ชั่วโมง)	ผลได้ของเอทา นอล (เปอร์เซ็นต์)	ระยะเวลาในการ หมัก (ชั่วโมง)
30	83.30 ± 2.26	1.74 ± 0.05	96.47 ± 2.30	48
37	63.22 ± 2.42	1.32 ± 0.05	98.30 ± 0.46	48
40	53.68 ± 1.17	1.12 ± 0.02	94.04 ± 0.70	48
42	32.54 ± 1.56	0.68 ± 0.03	96.59 ± 0.97	48
45	17.69 ± 2.54	0.37 ± 0.05	98.07 ± 0.58	48

4.2.2 การศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดยยีสต์ทนร้อน *S. cerevisiae* ภายใต้สภาวะที่แปรผันความเป็นกรดต่างของอาหารเพาะเลี้ยง

ความเป็นกรดต่างหรือ pH เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อปริมาณผลผลิตของเอทานอล ซึ่งในกระบวนการผลิตเอทานอลโดยทั่วๆ ไป pH ของอาหารเพาะเลี้ยงจะอยู่ในช่วง 4.0 – 5.5 ซึ่ง pH ในช่วงนี้จะช่วยลดการปนเปื้อนของแบคทีเรียที่ไม่ต้องการได้ สำหรับในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบผลของความเป็นกรดต่างของอาหารเพาะเลี้ยงในช่วง 4.0 – 6.0 ต่อการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดยยีสต์ทนร้อน *S. cerevisiae* DBKKUY-53 และยีสต์ *S. cerevisiae* SC90 โดยทดสอบการหมักเอทานอลที่อุณหภูมิ 37 และ 40 องศาเซลเซียส ในฟลาสก์หมักขนาด 500 มิลลิลิตร และบรรจุอาหารสูตรผลิตเอทานอลที่มีน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานเป็นแหล่งคาร์บอนที่ปริมาตร 400 มิลลิลิตร ความเข้มข้นของน้ำตาลเริ่มต้นในอาหารคือ 200 กรัมต่อลิตร จากผลการศึกษาการหมักเอทานอลที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส พบว่า *S. cerevisiae* DBKKUY-53 สามารถผลิตเอทานอลได้สูงสุดเท่ากับ 74.23 กรัมต่อลิตร เมื่อทำการหมักในอาหารที่มี pH เริ่มต้น 5.5 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับความเข้มข้นของเอทานอลสูงสุดที่ผลิตได้จากยีสต์ *S. cerevisiae* SC90 คือ 75.19 กรัมต่อลิตร ที่ pH เริ่มต้น 5.5 เช่นกัน หากพิจารณาอัตราการผลิตเอทานอลระหว่างยีสต์ทั้งสองสายพันธุ์ พบว่า *S. cerevisiae* DBKKUY-53 มีอัตราการผลิตเอทานอลที่สูงกว่ายีสต์ *S. cerevisiae* SC90 อย่างไรก็ตามผลได้ของเอทานอลจากการใช้ยีสต์ *S. cerevisiae* SC90 มีค่าสูงกว่าผลได้ของเอทานอลจากการใช้ยีสต์ *S. cerevisiae* DBKKUY-53 (ตารางที่ 4.4)

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดยยีสต์ทนร้อน *S. cerevisiae* DBKKUY-53 และ *S. cerevisiae* SC90 ที่ pH ต่างๆ กัน เมื่อทำการหมักที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส

pH	ความเข้มข้นของเอทานอล (กรัมต่อลิตร)		อัตราการผลิต (กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง)		ผลได้ของเอทานอล (เปอร์เซ็นต์)		ระยะเวลาในการหมัก (ชั่วโมง)	
	DBKKUY-53	SC90	DBKKUY-53	SC90	DBKKUY-53	SC90	DBKKUY-53	SC90
4.0	68.21±3.74	72.90±2.31	1.42±0.08	1.22±0.04	87.47±3.61	96.21±2.71	48	60
4.5	67.80±1.46	70.70±2.55	1.41±0.03	1.18±0.04	91.27±3.80	97.15±0.52	48	60
5.0	71.73±2.62	63.22±2.42	1.49±0.05	1.32±0.05	87.76±3.22	98.30±0.46	48	48
5.5	74.23±3.62	75.19±2.40	1.55±0.08	1.25±0.04	92.06±5.70	95.08±2.92	48	60
6.0	72.14±1.23	72.41±1.75	1.50±0.03	1.51±0.04	91.81±0.66	75.99±0.05	48	48

สำหรับการศึกษาผลของ pH ต่อการหมักเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดยใช้ยีสต์ทนร้อน *S. cerevisiae* DBKKUY-53 และ *S. cerevisiae* SC90 ภายใต้การหมักที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส พบว่ายีสต์ทนร้อน *S. cerevisiae* DBKKUY-53 สามารถผลิตเอทานอลได้สูงสุดเท่ากับ 62.78 กรัมต่อลิตร เมื่อทำการหมักที่ pH เริ่มต้น 5.5 ซึ่งมีความเข้มข้นสูงกว่าปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้จากยีสต์ *S. cerevisiae* SC90 (เอทานอลที่ผลิตได้มีความเข้มข้นสูงสุดเท่ากับ 57.62 กรัมต่อลิตร ที่ pH เริ่มต้น 5.5) นอกจากนี้แล้วยีสต์ทนร้อน *S. cerevisiae* DBKKUY-53 ยังมีอัตราการผลิตเอทานอลที่สูงกว่ายีสต์ *S. cerevisiae* SC90 ถึงแม้ผลได้เอทานอลจะต่ำกว่า แต่ระยะเวลาในการหมักเอทานอลให้ได้ความเข้มข้นสูงสุดโดยใช้ยีสต์ *S. cerevisiae* DBKKUY-53 สั้นกว่ายีสต์ *S. cerevisiae* SC90 (ตารางที่ 4.5)

จากข้อมูลผลการศึกษา pH ต่อการหมักเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดยยีสต์ทนร้อน *S. cerevisiae* DBKKUY-53 และ *S. cerevisiae* SC90 พบว่า pH ที่เหมาะสมในการหมักเอทานอลโดยยีสต์ทั้งสองสายพันธุ์คือ pH 5.5 ซึ่งให้ผลที่ใกล้เคียงกับการศึกษาของ Liu and Shen (2008) ที่รายงานว่า pH ที่เหมาะสมในการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดย *S. cerevisiae* คือ 5.0 จากผลการทดลองนี้จึงเลือก pH 5.5 สำหรับใช้ในการศึกษาขั้นต่อไป

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดยยีสต์
 ร้อน *S. cerevisiae* DBKKUY-53 และ *S. cerevisiae* SC90 ที่ pH ต่างๆ กัน เมื่อทำการ
 หมักที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

pH	ความเข้มข้นของเอทานอล (กรัมต่อลิตร)		อัตราการผลิต (กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง)		ผลได้ของเอทานอล (เปอร์เซ็นต์)		ระยะเวลาในการหมัก (ชั่วโมง)	
	DBKKUY-53	SC90	DBKKUY-53	SC90	DBKKUY-53	SC90	DBKKUY-53	SC90
4.0	48.79±2.09	55.08±2.67	1.02±0.04	0.92±0.04	86.48±0.94	97.58±0.28	48	60
4.5	49.40±0.13	53.01±1.35	1.03±0.01	0.88±0.02	89.89±4.43	97.55±1.77	48	60
5.0	59.17±5.33	53.68±1.17	1.23±0.11	1.12±0.02	88.25±2.73	94.04±0.70	48	48
5.5	62.78±0.67	57.62±0.64	1.31±0.01	0.96±0.01	88.43±0.53	98.26±1.90	48	60
6.0	61.98±0.43	57.09±0.42	1.72±0.01	0.96±0.01	92.35±0.66	80.29±1.89	36	60

4.2.3 การศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดยยีสต์
 หนร้อน *S. cerevisiae* ภายใต้สภาวะที่แปรผันจำนวนเซลล์เริ่มต้นในการหมัก
 ปริมาณเซลล์ยีสต์เริ่มต้นมีผลต่ออัตราการหมักเอทานอล โดยทั่วไปพบว่าหากเซลล์ยีสต์
 เริ่มต้นมีปริมาณสูง อัตราการหมักจะเร็วกว่าสภาวะที่มีเซลล์ยีสต์เริ่มต้นต่ำ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบ
 ผลของจำนวนเซลล์ยีสต์เริ่มต้นที่ระดับ $10^6 - 10^8$ เซลล์ต่อมิลลิลิตร ต่อการหมักเอทานอลจากน้ำคั้นลำ
 ต้นข้าวฟ่างหวานโดยใช้ยีสต์ *S. cerevisiae* DBKKUY-53 และ *S. cerevisiae* SC90 โดยการทดลองใน
 ฟลาสก์ขนาด 500 มิลลิลิตร ที่บรรจุอาหารสูตรผลิตเอทานอลที่มีน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานเป็นแหล่ง
 คาร์บอนในปริมาตร 400 มิลลิลิตร โดยปรับความเข้มข้นของน้ำตาลทั้งหมดเริ่มต้นที่ 200 กรัมต่อลิตร
 จากการหมักเอทานอลที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส พบว่าความเข้มข้นของเอทานอลและอัตราการผลิต
 เอทานอลจะเพิ่มขึ้น เมื่อจำนวนเซลล์ยีสต์ที่ใช้ในการหมักเพิ่มขึ้น การหมักเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าว
 ฟ่างหวานโดยยีสต์หนร้อน *S. cerevisiae* DBKKUY-53 ให้ค่าความเข้มข้นของเอทานอลสูงสุดเท่ากับ
 88.17 กรัมต่อลิตร อัตราการผลิตเท่ากับ 2.94 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง เมื่อทำการหมักที่อุณหภูมิ 37 องศา
 เซลเซียส โดยใช้เซลล์ยีสต์เริ่มต้น 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ในขณะที่การหมักเอทานอลโดยใช้ยีสต์ *S.*
cerevisiae SC90 ให้ค่าความเข้มข้นของเอทานอลสูงสุดเท่ากับ 76.41 กรัมต่อลิตร อัตราการผลิตเอทา
 นอลที่ 2.55 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง เมื่อทำการหมักที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส โดยใช้เซลล์ยีสต์เริ่มต้น
 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร (ตารางที่ 4.6)

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดยยีสต์พันธุ์ *S. cerevisiae* DBKKUY-53 และ *S. cerevisiae* SC90 เมื่อทำการหมักที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ภายใต้การแปรผันจำนวนเซลล์ยีสต์เริ่มต้น

จำนวนเซลล์ (เซลล์/มล.)	ความเข้มข้นของเอทานอล (กรัมต่อลิตร)		อัตราการผลิต (กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง)		ผลได้ของเอทานอล (เปอร์เซ็นต์)		ระยะเวลาในการหมัก (ชั่วโมง)	
	DBKKUY-53	SC90	DBKKUY-53	SC90	DBKKUY-53	SC90	DBKKUY-53	SC90
1x10 ⁶	74.23±3.62	75.19±2.40	1.55±0.08	1.25±0.04	92.06±5.70	95.08±2.71	48	60
1x10 ⁷	84.06±1.11	75.16±0.06	1.75±0.02	1.57±0.01	87.72±0.53	90.50±1.06	48	48
1x10 ⁸	88.17±0.17	76.41±1.99	2.94±0.01	2.55±0.07	84.73±0.28	79.98±4.31	30	30

สำหรับผลการทดสอบการหมักเอทานอลที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ภายใต้การแปรผันจำนวนเซลล์ยีสต์เริ่มต้นที่ระดับ 10⁶ – 10⁸ เซลล์ต่อมิลลิลิตร พบว่าเมื่อจำนวนเซลล์ยีสต์ที่ใช้ในการหมักเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของเอทานอลและอัตราการผลิตเอทานอลโดยยีสต์ *S. cerevisiae* DBKKUY-53 และ *S. cerevisiae* SC90 มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน และหากเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการหมักเอทานอลระหว่างยีสต์ *S. cerevisiae* DBKKUY-53 และ *S. cerevisiae* SC90 พบว่ายีสต์ *S. cerevisiae* DBKKUY-53 มีประสิทธิภาพในการผลิตเอทานอลสูงกว่ายีสต์ *S. cerevisiae* SC90 โดยสามารถผลิตเอทานอลได้ในความเข้มข้นสูงสุดเท่ากับ 83.35 กรัมต่อลิตร อัตราการผลิต 3.47 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งมีค่าสูงกว่ายีสต์ *S. cerevisiae* SC90 ประมาณ 1.18 และ 1.17 เท่า ตามลำดับ (ตารางที่ 4.7)

จากผลการศึกษาข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าจำนวนเซลล์เริ่มต้นที่เหมาะสมในการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานคือ 10⁸ เซลล์ต่อมิลลิลิตร เนื่องจากให้ความเข้มข้นของเอทานอลและอัตราการผลิตเอทานอลสูงที่สุด ดังนั้นจึงเลือกใช้เซลล์ที่ความเข้มข้นดังกล่าวนี้สำหรับการศึกษาในขั้นตอนต่อไป

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดยยีสต์ทนร้อน *S. cerevisiae* DBKKUY-53 และ *S. cerevisiae* SC90 เมื่อทำการหมักที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ภายใต้การแปรผันจำนวนเซลล์ยีสต์เริ่มต้น

จำนวนเซลล์ (เซลล์/มล.)	ความเข้มข้นของเอทานอล (กรัมต่อลิตร)		อัตราการผลิต (กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง)		ผลได้ของเอทานอล (เปอร์เซ็นต์)		ระยะเวลาในการหมัก (ชั่วโมง)	
	DBKKUY-53	SC90	DBKKUY-53	SC90	DBKKUY-53	SC90	DBKKUY-53	SC90
1x10 ⁶	62.78±0.67	57.62±0.64	1.31±0.01	0.96±0.01	88.43±0.53	98.26±1.19	48	60
1x10 ⁷	77.14±1.58	67.37±0.62	2.14±0.04	1.40±0.01	87.78±1.37	81.27±1.06	36	48
1x10 ⁸	83.35±2.37	70.91±0.96	3.47±0.10	2.96±0.04	89.07±0.04	88.45±1.81	24	24

4.2.4 การศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดยยีสต์ทนร้อน *S. cerevisiae* ภายใต้สภาวะที่แปรผันความเข้มข้นของน้ำตาลเริ่มต้นในการหมัก

โดยปกติแล้วความเข้มข้นของน้ำตาลที่ใช้ในการหมักเอทานอลในระดับอุตสาหกรรมจะมีค่าประมาณ 200 กรัมต่อลิตร หากความเข้มข้นของน้ำตาลสูงกว่านี้พบว่าอัตราการผลิตเอทานอลโดยยีสต์จะลดลง (D’ Amore, 1992) ในงานวิจัยนี้ทางคณะผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษาถึงความเข้มข้นของน้ำตาลเริ่มต้นที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเอทานอลโดยยีสต์ทนร้อน *S. cerevisiae* DBKKUY-53 และ *S. cerevisiae* SC90 โดยแปรผันความเข้มข้นของน้ำตาลเริ่มต้นที่ระดับสูงกว่า 200 กรัมต่อลิตร ซึ่งทำการทดสอบการหมักเอทานอลในฟลาสก์ขนาด 500 มิลลิลิตร ที่บรรจุอาหารสูตรผลิตเอทานอลที่มีน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานเป็นแหล่งคาร์บอนในปริมาตร 400 มิลลิลิตร และแปรผันความเข้มข้นของน้ำตาลเริ่มต้นที่ 200, 250 และ 300 กรัมต่อลิตร จากการศึกษาการหมักที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส พบว่าความเข้มข้นของเอทานอลที่ผลิตได้จากยีสต์ทั้งสองสายพันธุ์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นเพิ่มขึ้น แต่หากความเข้มข้นของน้ำตาลเริ่มต้นสูงกว่า 250 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของเอทานอลที่ผลิตได้มีค่าลดลง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความเข้มข้นของน้ำตาลที่สูง ทำให้เกิด osmotic pressure มีผลไปยับยั้งการเจริญของยีสต์ ในขณะเดียวกันน้ำตาลที่สูงเกินไปยังส่งผลไปยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องในวิถีการสังเคราะห์เอทานอล หรือที่เรียกว่า substrate inhibition ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตเอทานอลโดยยีสต์ลดลง (Ingledew, 1999) สำหรับในการทดลองนี้ความเข้มข้นของเอทานอลสูงสุดที่ผลิตได้โดยใช้ยีสต์ทนร้อน *S. cerevisiae* DBKKUY-53 คือ 99.56 กรัมต่อลิตร คิดเป็นอัตราการผลิตเอทานอลเท่ากับ 4.15 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง ในขณะที่ความเข้มข้นของเอทานอลที่ผลิตได้โดยใช้ยีสต์ *S. cerevisiae* SC90 คือ 83.05 กรัมต่อลิตร หรือคิดเป็นอัตราการผลิตเอทานอลเท่ากับ 1.73 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งมีค่าต่ำ

กว่าอัตราการผลิตเอทานอลโดยใช้ยีสต์ทนร้อน *S. cerevisiae* DBKKUY-53 ประมาณ 2.40 เท่า (ตารางที่ 4.8)

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดยยีสต์ทนร้อน *S. cerevisiae* DBKKUY-53 และ *S. cerevisiae* SC90 เมื่อทำการหมักที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ภายใต้การแปรผันความเข้มข้นของน้ำตาลเริ่มต้นที่ระดับต่างๆ กัน

น้ำตาล (กรัมต่อ ลิตร)	ความเข้มข้นของเอทานอล (กรัมต่อลิตร)		อัตราการผลิต (กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง)		ผลได้ของเอทานอล (เปอร์เซ็นต์)		ระยะเวลาในการหมัก (ชั่วโมง)	
	DBKKUY-53	SC90	DBKKUY-53	SC90	DBKKUY-53	SC90	DBKKUY-53	SC90
200	88.17±0.17	76.41±1.99	2.94±0.01	2.55±0.07	90.42±0.28	79.98±4.31	30	30
250	99.56±0.88	83.05±0.02	4.15±0.04	1.73±0.01	98.44±0.53	93.79±2.20	24	48
300	92.69±0.25	78.98±0.78	3.86±0.01	2.19±0.02	98.89±0.08	94.79±0.65	24	36

สำหรับผลการทดสอบการหมักเอทานอลที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ภายใต้การแปรผันความเข้มข้นของน้ำตาลเริ่มต้นที่ 200, 250 และ 300 กรัมต่อลิตร นั้น พบว่ายีสต์ *S. cerevisiae* DBKKUY-53 สามารถผลิตเอทานอลได้ดีกว่ายีสต์ *S. cerevisiae* SC90 ความเข้มข้นของเอทานอลสูงสุดที่ผลิตได้โดยใช้ยีสต์ *S. cerevisiae* DBKKUY-53 มีค่าเท่ากับ 88.97 กรัมต่อลิตร เมื่อใช้น้ำตาลเริ่มต้น 250 กรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าสูงกว่าความเข้มข้นของเอทานอลที่ผลิตได้จากยีสต์ *S. cerevisiae* SC90 ประมาณ 1.22 เท่า นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการผลิตเอทานอลโดยยีสต์ *S. cerevisiae* DBKKUY-53 มีค่าสูงกว่าอัตราการผลิตเอทานอลโดยยีสต์ *S. cerevisiae* SC90 ประมาณ 1.82 เท่า (ตารางที่ 4.9)

จากข้อมูลผลการทดลองที่ได้จะเห็นว่ายีสต์ทนร้อน *S. cerevisiae* DBKKUY-53 สามารถเจริญและผลิตเอทานอลได้ดีในอาหารเพาะเลี้ยงที่มีความเข้มข้นของน้ำตาลเริ่มต้น 250 และ 300 กรัมต่อลิตร ถึงแม้ว่าความเข้มข้นของน้ำตาลเริ่มต้น 300 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของเอทานอลจะลดลงบ้าง แต่ก็ยังมีค่าใกล้เคียงกับความเข้มข้นของเอทานอลที่ผลิตได้ในอาหารที่มีน้ำตาลเริ่มต้น 200 กรัมต่อลิตร ดังนั้นในแง่ของการผลิตเอทานอลในระดับอุตสาหกรรม หากใช้น้ำตาลที่มีความเข้มข้นสูงๆ และได้ความเข้มข้นของเอทานอลที่สูงขึ้น ย่อมส่งผลดีต่อการผลิตเนื่องจากระยะเวลาในการกลั่นเอทานอลให้บริสุทธิ์จะสั้นลงเมื่อเทียบกับการกลั่นเอทานอลที่มีความเข้มข้นต่ำๆ ทำให้ต้นทุนในกระบวนการผลิตลดลง และเนื่องจาก *S. cerevisiae* DBKKUY-53 และ *S. cerevisiae* SC90 สามารถผลิตเอทานอลได้

สูงสุดในการหมักที่มีน้ำตาลเริ่มต้น 250 กรัมต่อลิตร ดังนั้นจึงเลือกใช้น้ำตาลที่มีความเข้มข้นดังกล่าวนี้
สำหรับการศึกษาในขั้นต่อไป

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดยยีสต์
รื้อน *S. cerevisiae* DBKKUY-53 และ *S. cerevisiae* SC90 เมื่อทำการหมักที่อุณหภูมิ
40 องศาเซลเซียส ภายใต้การแปรผันความเข้มข้นของน้ำตาลเริ่มต้นที่ระดับต่างๆ กัน

น้ำตาล (กรัมต่อ ลิตร)	ความเข้มข้นของเอทานอล (กรัมต่อลิตร)		อัตราการผลิต (กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง)		ผลได้ของเอทานอล (เปอร์เซ็นต์)		ระยะเวลาในการหมัก (ชั่วโมง)	
	DBKKUY-53	SC90	DBKKUY-53	SC90	DBKKUY-53	SC90	DBKKUY-53	SC90
200	83.35±2.37	70.91±0.96	3.47±0.10	2.96±0.04	89.07±0.04	88.45±1.81	24	24
250	88.97±1.23	73.00±0.28	3.71±0.05	2.03±0.01	96.53±2.55	94.34±0.21	24	36
300	83.25±0.43	71.66±0.96	3.47±0.02	1.99±0.03	97.40±1.11	90.93±1.15	24	36

4.2.5 การศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดยยีสต์
รื้อน *S. cerevisiae* ภายใต้สภาวะที่แปรผันชนิดและความเข้มข้นของแหล่ง
ไนโตรเจน

โดยทั่วไปเซลล์ยีสต์จะมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบภายในเซลล์ประมาณ 10% (w/v)
(Walker, 1994) ดังนั้นไนโตรเจนจึงเป็นองค์ประกอบสำคัญสำหรับการเจริญของยีสต์ มีสารหลายชนิดที่
สามารถใช้เป็นแหล่งไนโตรเจนสำหรับการเจริญของยีสต์ได้ แต่ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของแหล่ง
ไนโตรเจน 3 ชนิดคือ ยูเรีย แอมโมเนียมซัลเฟต และยีสต์สกัด ต่อการผลิตเอทานอลโดยยีสต์รื้อน *S.*
cerevisiae DBKKUY-53 และ *S. cerevisiae* SC90 โดยทดสอบการหมักเอทานอลในฟลาสก์ขนาด 500
มิลลิลิตร ที่บรรจุอาหารสูตรผลิตเอทานอลที่มีน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานเป็นแหล่งคาร์บอนในปริมาตร
400 มิลลิลิตร โดยมีความเข้มข้นของน้ำตาลเริ่มต้น 250 กรัมต่อลิตร และมียูเรียที่ความเข้มข้นในช่วง 0 –
1.0 กรัมต่อลิตร เป็นแหล่งไนโตรเจน จากการศึกษาการผลิตเอทานอลโดย *S. cerevisiae* DBKKUY-53
ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส พบว่าการเติมยูเรียในความเข้มข้น 0.75 กรัมต่อลิตร สามารถผลิตเอทา
นอลได้ความเข้มข้นสูงสุดเท่ากับ 105.17 กรัมต่อลิตร (อัตราการผลิตเอทานอลมีค่าเท่ากับ 2.19 กรัมต่อ
ลิตรต่อชั่วโมง) ซึ่งมีค่าสูงกว่าสภาวะการหมักเอทานอลที่ไม่มีการเติมยูเรียเป็นแหล่งไนโตรเจนประมาณ 5
กรัมต่อลิตร ในขณะที่การผลิตเอทานอลโดย *S. cerevisiae* SC90 ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ใน
สภาวะที่มียูเรียเป็นแหล่งไนโตรเจนนั้น พบว่าความเข้มข้นของเอทานอลสูงสุดที่ผลิตได้มีค่าเท่ากับ 92.68
กรัมต่อลิตร (อัตราการผลิตเอทานอลเท่ากับ 2.57 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง) ซึ่งมีค่าสูงกว่าชุดการทดลอง

ควบคุมที่ไม่มีการเติมยูเรียเป็นแหล่งไนโตรเจนประมาณ 9 กรัมต่อลิตร แต่อย่างไรก็ตามความเข้มข้นเอทานอลที่ผลิตได้นี้ยังมีค่าต่ำกว่าความเข้มข้นของเอทานอลที่ผลิตได้จากยีสต์พันธุ์ *S. cerevisiae* DBKKUY-53 ประมาณ 1.13 เท่า (ตารางที่ 4.10)

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดยยีสต์พันธุ์ *S. cerevisiae* DBKKUY-53 และ *S. cerevisiae* SC90 เมื่อทำการหมักที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ภายใต้การแปรผันยูเรียที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน

ยูเรีย (กรัมต่อ ลิตร)	ความเข้มข้นของเอทานอล (กรัมต่อลิตร)		อัตราการผลิต (กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง)		ผลได้ของเอทานอล (เปอร์เซ็นต์)		ระยะเวลาในการหมัก (ชั่วโมง)	
	DBKKUY-53	SC90	DBKKUY-53	SC90	DBKKUY-53	SC90	DBKKUY-53	SC90
0	99.56±0.88	83.05± 20.0	4.15 ± 0.04	1.73 ± 0.00	98.25 ± 0.53	93.79± 2.20	24	48
0.25	97.97±3.29	92.48 ± 0.87	2.72 ± 0.09	2.57 ± 0.02	86.47 ± 1.70	97.48 ± 0.95	36	36
0.50	102.72±1.94	92.68 ± 0.29	2.14 ± 0.04	2.57 ± 0.01	96.01 ± 1.16	98.03 ± 0.08	48	36
0.75	105.17±1.37	86.76 ± 3.35	2.19 ± 0.03	2.89 ± 0.11	94.31 ± 4.16	97.86 ± 0.11	48	30
1.00	99.90 ± 1.41	87.39 ± 0.39	2.78 ± 0.04	2.91 ± 0.01	85.65 ± 7.36	98.36 ± 0.84	36	30

สำหรับผลการทดสอบการหมักเอทานอลที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ภายใต้การแปรผันความเข้มข้นของยูเรียในช่วง 0-1.0 กรัมต่อลิตร นั้น พบว่าการเติมยูเรียที่ความเข้มข้นต่างๆ ไม่มีผลในการช่วยส่งเสริมการผลิตเอทานอลโดยยีสต์ทั้งสองสายพันธุ์ ทั้งนี้ยีสต์ *S. cerevisiae* DBKKUY-53 สามารถผลิตเอทานอลได้สูงกว่ายีสต์ *S. cerevisiae* SC90 ความเข้มข้นของเอทานอลสูงสุดที่ผลิตได้โดยยีสต์ *S. cerevisiae* DBKKUY-53 มีค่าเท่ากับ 91.18 กรัมต่อลิตร เมื่อใช้ยูเรียที่ความเข้มข้น 0.25 กรัมต่อลิตร เป็นแหล่งไนโตรเจน ในขณะที่ความเข้มข้นของเอทานอลสูงสุดที่ผลิตได้โดยยีสต์ *S. cerevisiae* SC90 มีค่าเท่ากับ 73.78 กรัมต่อลิตร เมื่อใช้ยูเรียที่ความเข้มข้น 1.00 กรัมต่อลิตร เป็นแหล่งไนโตรเจน ส่วนอัตราการผลิตเอทานอลโดยยีสต์ทั้งสองสายพันธุ์พบว่ามีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก (ตารางที่ 4.11)

ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดยยีสต์หน่อร้อน *S. cerevisiae* DBKKUY-53 และ *S. cerevisiae* SC90 เมื่อทำการหมักที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ภายใต้การแปรผันยูเรียที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน

ยูเรีย (กรัมต่อ ลิตร)	ความเข้มข้นของเอทานอล (กรัมต่อลิตร)		อัตราการผลิต (กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง)		ผลได้ของเอทานอล (เปอร์เซ็นต์)		ระยะเวลาในการหมัก (ชั่วโมง)	
	DBKKUY-53	SC90	DBKKUY-53	SC90	DBKKUY-53	SC90	DBKKUY-53	SC90
0	88.97 ± 1.23	73.00 ± 0.28	3.71 ± 0.05	2.03 ± 0.01	95.56 ± 1.83	94.34 ± 0.21	24	36
0.25	91.18 ± 2.70	72.87 ± 0.72	3.04 ± 0.09	3.04 ± 0.03	95.42 ± 3.93	87.17 ± 1.23	30	24
0.50	88.27 ± 0.36	72.20 ± 2.15	2.94 ± 0.01	3.01 ± 0.09	95.30 ± 3.66	91.91 ± 0.60	30	24
0.75	88.66 ± 0.59	69.90 ± 1.31	2.96 ± 0.02	2.91 ± 0.05	87.82 ± 0.26	94.36 ± 0.37	30	24
1.00	86.41 ± 2.43	73.78 ± 1.17	2.88 ± 0.08	2.05 ± 0.03	83.82 ± 2.15	91.65 ± 2.09	30	36

ตารางที่ 4.12 แสดงข้อมูลความเข้มข้นของเอทานอล อัตราการผลิตเอทานอล และผลได้ของเอทานอล ภายหลังจากการหมักน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดยใช้ยีสต์หน่อร้อน *S. cerevisiae* DBKKUY-53 และ *S. cerevisiae* SC90 ในสภาวะที่ใช้แอมโมเนียมซัลเฟตเป็นแหล่งไนโตรเจน และทำการหมักที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส จากข้อมูลจะเห็นว่ายีสต์หน่อร้อน *S. cerevisiae* DBKKUY-53 สามารถผลิตเอทานอลได้ในความเข้มข้นที่สูงกว่ายีสต์ *S. cerevisiae* SC90 ความเข้มข้นของเอทานอลสูงสุดที่ผลิตได้โดยยีสต์หน่อร้อน *S. cerevisiae* DBKKUY-53 คือ 99.81 กรัมต่อลิตร ในสภาวะที่เติมแอมโมเนียมซัลเฟตความเข้มข้น 1.0 กรัมต่อลิตร เป็นแหล่งไนโตรเจน ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับความเข้มข้นของเอทานอลที่ผลิตได้ในสภาวะที่ไม่มีการเติมแอมโมเนียมซัลเฟตเป็นแหล่งไนโตรเจน (99.56 กรัมต่อลิตร) ในขณะที่ความเข้มข้นของเอทานอลสูงสุดที่ผลิตได้โดยยีสต์ *S. cerevisiae* SC90 คือ 83.05 กรัมต่อลิตร ในสภาวะที่ไม่มีการเติมแอมโมเนียมซัลเฟตเป็นแหล่งไนโตรเจน จากข้อมูลนี้แสดงให้เห็นว่าแอมโมเนียมซัลเฟตไม่ได้ช่วยส่งเสริมให้การผลิตเอทานอลโดยยีสต์ทั้งสองสายพันธุ์เพิ่มสูงขึ้น แต่กลับมีแนวโน้มทำให้ความเข้มข้นของเอทานอลลดลงเมื่อเทียบกับชุดการทดลองควบคุมที่ไม่มีการเติมแอมโมเนียมซัลเฟตเป็นแหล่งไนโตรเจน (ตารางที่ 4.12)

ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดยยีสต์หน
 ร้อน *S. cerevisiae* DBKKUY-53 และ *S. cerevisiae* SC90 เมื่อทำการหมักที่อุณหภูมิ
 37 องศาเซลเซียส ภายใต้การแปรผันแอมโมเนียมซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน

แอมโม เนียมซัล เฟต (กรัม ต่อลิตร)	ความเข้มข้นของเอทานอล (กรัมต่อลิตร)		อัตราการผลิต (กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง)		ผลได้ของเอทานอล (เปอร์เซ็นต์)		ระยะเวลาในการ หมัก (ชั่วโมง)	
	DBKKUY-53	SC90	DBKKUY-53	SC90	DBKKUY-53	SC90	DBKKUY- 53	SC90
0	99.56 ± 0.88	83.05 ± 0.02	4.15 ± 0.04	1.73 ± 0.00	98.25 ± 0.53	93.79 ± 2.20	24	48
0.25	97.38 ± 0.23	57.57 ± 1.67	3.25 ± 0.01	1.20 ± 0.02	94.37 ± 2.64	91.90 ± 0.53	30	48
0.50	96.77 ± 2.41	71.85 ± 0.36	3.23 ± 0.08	1.00 ± 0.00	90.37 ± 5.24	91.77 ± 0.42	30	72
0.75	97.70 ± 0.06	66.54 ± 2.11	2.71 ± 0.00	1.39 ± 0.04	86.76 ± 6.82	97.53 ± 0.01	36	48
1.00	99.81 ± 1.44	72.10 ± 0.78	2.77 ± 0.04	1.50 ± 0.02	87.76 ± 6.82	94.84 ± 1.20	36	48

สำหรับผลการหมักน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานเพื่อผลิตเอทานอลที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส พบว่ายีสต์หนร้อน *S. cerevisiae* DBKKUY-53 สามารถผลิตเอทานอลได้ความเข้มข้นที่สูงกว่ายีสต์ *S. cerevisiae* SC90 โดยความเข้มข้นของเอทานอลสูงสุดที่ผลิตได้โดยยีสต์ *S. cerevisiae* DBKKUY-53 และ *S. cerevisiae* SC90 คือ 88.97 และ 73.00 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ในสภาวะที่ไม่มีการเติมแอมโมเนียมซัลเฟตเป็นแหล่งไนโตรเจน ในสภาวะที่มีการเติมแอมโมเนียมซัลเฟตเป็นแหล่งไนโตรเจนที่ความเข้มข้นต่างๆ พบว่าความเข้มข้นของเอทานอลมีค่าต่ำกว่าชุดการทดลองที่เติมแอมโมเนียมซัลเฟตเป็นแหล่งไนโตรเจน แสดงให้เห็นว่าแอมโมเนียมซัลเฟตไม่ได้ช่วยให้การผลิตเอทานอลที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เพิ่มสูงขึ้น (ตารางที่ 4.13) เช่นเดียวกับการผลิตเอทานอลที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับรายงานของ Khongsay et al. (2010) ที่รายงานว่าการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดย *S. cerevisiae* ในสภาวะที่เติมหรือไม่เติมแอมโมเนียมซัลเฟตเป็นแหล่งไนโตรเจน ให้ผลไม่แตกต่างกัน และการเติมแอมโมเนียมซัลเฟตที่ความเข้มข้นสูงๆ (0.5 กรัมต่อลิตร) มีผลทำให้การผลิตเอทานอลลดลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะในสภาวะที่มีการเติมแอมโมเนียมซัลเฟตเป็นแหล่งไนโตรเจน เซลล์มีการผลิตผลพลอยได้ (by product) ชนิดอื่นๆ ที่นอกเหนือจากเอทานอล เช่น กรดอะซิติก ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งอาจเป็นพิษต่อเซลล์

ตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดยยีสต์หน
 ร้อน *S. cerevisiae* DBKKUY-53 และ *S. cerevisiae* SC90 เมื่อทำการหมักที่อุณหภูมิ
 40 องศาเซลเซียส ภายใต้การแปรผันแอมโมเนียมซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน

แอมโม เนียมซัล เฟต (กรัม ต่อลิตร)	ความเข้มข้นของเอทานอล (กรัมต่อลิตร)		อัตราการผลิต (กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง)		ผลได้ของเอทานอล (เปอร์เซ็นต์)		ระยะเวลาในการ หมัก (ชั่วโมง)	
	DBKKUY-53	SC90	DBKKUY-53	SC90	DBKKUY-53	SC90	DBKKUY- 53	SC90
0	88.97 ± 1.23	73.00 ± 0.28	3.71 ± 0.05	2.03± 0.01	95.56 ± 1.83	94.34 ± 0.21	24	36
0.25	67.25 ± 1.60	54.03 ± 0.56	1.40 ± 0.02	1.13 ± 0.01	94.51 ± 2.69	92.66 ± 2.92	48	48
0.50	69.90 ± 1.02	57.82 ± 0.93	1.94 ± 0.01	1.20 ± 0.02	94.50 ± 1.04	92.23 ± 4.00	36	48
0.75	70.29 ± 0.59	56.65 ± 5.91	1.95 ± 0.01	1.18 ± 0.12	96.18 ± 1.51	86.90 ± 5.20	36	48
1.00	74.27 ± 1.14	59.81 ± 1.34	2.06 ± 0.02	1.25 ± 0.03	96.25 ± 0.48	97.68 ± 1.26	36	48

มีรายงานว่า การเติมยีสต์สกัดเป็นแหล่งไนโตรเจนในอาหารที่ใช้ในการผลิตเอทานอล
 ช่วยส่งเสริมให้การเจริญและการผลิตเอทานอลเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาผลของ
 การเติมยีสต์สกัดเป็นแหล่งไนโตรเจนสำหรับการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดยยีสต์หน
 ร้อน *S. cerevisiae* DBKKUY-53 และ *S. cerevisiae* SC90 จากการทดสอบการหมักน้ำคั้นลำต้นข้าว
 ฟ่างหวานเพื่อผลิตเอทานอลโดยเติมยีสต์สกัดที่ความเข้มข้น 0, 6, 9 และ 12 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 37
 องศาเซลเซียส พบว่าการเติมยีสต์สกัดเป็นแหล่งไนโตรเจนไม่ได้ช่วยส่งเสริมให้การผลิตเอทานอลโดยยีสต์
 หนร้อน *S. cerevisiae* DBKKUY-53 เพิ่มสูงขึ้นมากนักเมื่อเทียบกับชุดการทดลองควบคุมที่ไม่มีการเติม
 ไนโตรเจน แต่ในกรณีของยีสต์ *S. cerevisiae* SC90 พบว่าการเติมยีสต์สกัดเป็นแหล่งไนโตรเจนเสริม
 ช่วยให้การผลิตเอทานอลเพิ่มสูงขึ้น ความเข้มข้นของเอทานอลสูงสุดที่ผลิตได้โดยยีสต์หนร้อน *S.*
cerevisiae DBKKUY-53 และ *S. cerevisiae* SC90 คือ 101.30 และ 88.23 กรัมต่อลิตร ภายใต้สภาวะ
 ที่มีการเติมยีสต์สกัดความเข้มข้น 6 และ 9 กรัมต่อลิตร เป็นแหล่งไนโตรเจน ตามลำดับ (ตารางที่ 4.14)

ตารางที่ 4.14 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดยยีสต์ทนร้อน *S. cerevisiae* DBKKUY-53 และ *S. cerevisiae* SC90 เมื่อทำการหมักที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ภายใต้การแปรผันยีสต์สกัดที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน

ยีสต์สกัด (กรัมต่อ ลิตร)	ความเข้มข้นของเอทานอล (กรัมต่อลิตร)		อัตราการผลิต (กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง)		ผลได้ของเอทานอล (เปอร์เซ็นต์)		ระยะเวลาในการหมัก (ชั่วโมง)	
	DBKKUY-53	SC90	DBKKUY-53	SC90	DBKKUY-53	SC90	DBKKUY-53	SC90
0	99.56 ± 0.88	83.05 ± 0.02	4.15 ± 0.04	1.73 ± 0.00	98.44 ± 0.53	93.79 ± 2.20	24	48
6	101.30 ± 0.84	83.53 ± 0.55	3.38 ± 0.03	2.78 ± 0.02	93.43 ± 1.70	97.83 ± 0.52	30	30
9	100.35 ± 0.43	88.23 ± 1.71	3.35 ± 0.01	2.94 ± 0.06	92.39 ± 2.90	94.07 ± 0.58	30	30
12	97.05 ± 0.98	87.38 ± 0.96	3.23 ± 0.03	2.91 ± 0.03	88.20 ± 2.84	94.68 ± 2.3	30	30

สำหรับผลการทดสอบการหมักน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานเพื่อผลิตเอทานอลที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส พบว่าการเติมยีสต์สกัดเป็นแหล่งไนโตรเจน มีผลทำให้การผลิตเอทานอลโดยยีสต์ทั้งสองสายพันธุ์ลดลง โดยความเข้มข้นของเอทานอลสูงสุดที่ผลิตได้โดยยีสต์ทนร้อน *S. cerevisiae* DBKKUY-53 และ *S. cerevisiae* SC90 คือ 88.97 และ 73 กรัมต่อลิตร ภายใต้สภาวะการหมักที่ไม่มีการเติมยีสต์สกัดเป็นแหล่งไนโตรเจน (ตารางที่ 4.15) จากผลการทดลองที่ได้นี้ ชี้ให้เห็นว่ายีสต์สกัดไม่ได้ช่วยส่งเสริมให้ยีสต์ทั้งสองสายพันธุ์มีการผลิตเอทานอลเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากแหล่งไนโตรเจนที่อยู่ในน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวาน มีปริมาณเพียงพอสำหรับการเจริญและการผลิตเอทานอลโดยยีสต์ จึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องเพิ่มยีสต์สกัดเป็นแหล่งไนโตรเจนเสริม

ตารางที่ 4.15 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดยยีสต์ทนร้อน *S. cerevisiae* DBKKUY-53 และ *S. cerevisiae* SC90 เมื่อทำการหมักที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ภายใต้การแปรผันยีสต์สกัดที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน

ยีสต์สกัด (กรัมต่อ ลิตร)	ความเข้มข้นของเอทานอล (กรัมต่อลิตร)		อัตราการผลิต (กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง)		ผลได้ของเอทานอล (เปอร์เซ็นต์)		ระยะเวลาในการหมัก (ชั่วโมง)	
	DBKKUY-53	SC90	DBKKUY-53	SC90	DBKKUY-53	SC90	DBKKUY-53	SC90
0	88.97 ± 1.23	73.00 ± 0.28	3.71 ± 0.05	2.03± 0.01	95.56 ± 1.83	94.34 ± 0.21	24	36
6	79.19 ± 5.53	67.17 ± 2.78	3.30 ± 0.23	2.24 ± 0.09	91.78 ± 3.06	92.54 ± 4.06	24	30
9	76.81 ± 8.84	67.47 ± 1.81	3.20 ± 0.37	2.25 ± 0.06	94.98 ± 1.66	97.98 ± 0.50	24	30
12	83.76 ± 0.26	69.25 ± 1.16	3.49 ± 0.01	2.31 ± 0.04	96.01 ± 1.27	98.18 ± 1.50	24	30

จากผลการทดสอบแหล่งไนโตรเจนชนิดต่างๆ ต่อการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดยยีสต์หน่อร้อน *S. cerevisiae* DBKKUY-53 และ *S. cerevisiae* SC90 พบว่าความเข้มข้นของเอทานอล และอัตราการผลิตเอทานอล ในชุดการทดลองที่เติมหรือไม่เติมแหล่งไนโตรเจนเสริม มีค่าไม่แตกต่างกัน ดังนั้นในการทดสอบการผลิตเอทานอลในระดับถังหมักขนาด 2 ลิตร จึงใช้น้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานที่ไม่มีการเติมแหล่งไนโตรเจนเสริม เป็นวัตถุดิบสำหรับการทดลองต่อไป

4.3 การศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดยยีสต์หน่อร้อน *S. cerevisiae* DBKKUY-53 ในถังหมักขนาด 2 ลิตร

จากผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดยยีสต์หน่อร้อน *S. cerevisiae* DBKKUY-53 และ *S. cerevisiae* SC90 ในระดับฟลasks ในห้องปฏิบัติการ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเอทานอลคือ pH เริ่มต้น 5.5 ความเข้มข้นของน้ำตาลเริ่มต้น 250 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของเซลล์ยีสต์เริ่มต้น 1×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร โดยไม่จำเป็นต้องเติมแหล่งไนโตรเจนเสริมลงไปเป็นวัตถุดิบ ดังนั้นจึงใช้สภาวะดังกล่าวนี้สำหรับการทดสอบการผลิตเอทานอลในระดับขยายส่วน โดยทำการทดลองผลิตเอทานอลในถังหมักขนาด 2 ลิตร ใช้ปริมาตรในการหมักเริ่มต้น (working volume) 1.5 ลิตร ใช้อัตราการกวน 100 รอบต่อนาที ทำการเปรียบเทียบระหว่างการหมักที่อุณหภูมิ 37 และ 40 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาพบว่ายีสต์หน่อร้อน *S. cerevisiae* DBKKUY-53 สามารถผลิตเอทานอลได้สูงกว่ายีสต์ *S. cerevisiae* SC90 ทั้งที่อุณหภูมิ 37 และ 40 องศาเซลเซียส โดยความเข้มข้นสูงสุดของเอทานอลที่ผลิตได้โดยยีสต์หน่อร้อน *S. cerevisiae* DBKKUY-53 เมื่อทำการหมักที่อุณหภูมิ 37 และ 40 องศาเซลเซียส คือ 106.82 และ 91.59 กรัมต่อลิตร ซึ่งสูงกว่าความเข้มข้นของเอทานอลที่ผลิตได้จากยีสต์ *S. cerevisiae* SC90 ประมาณ 1.26 และ 1.16 เท่า ตามลำดับ (ตารางที่ 4.16) จากข้อมูลนี้พอที่จะสรุปได้ว่ายีสต์หน่อร้อน *S. cerevisiae* DBKKUY-53 มีศักยภาพในการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานได้สูงกว่ายีสต์ *S. cerevisiae* SC90

ตารางที่ 4.16 เปรียบเทียบการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานโดยยีสต์ *S. cerevisiae* DBKKUY-53 และ *S. cerevisiae* SC90 ในถังหมักขนาด 2 ลิตร ที่อุณหภูมิ 37 และ 40 องศาเซลเซียส

พารามิเตอร์	<i>S. cerevisiae</i> DBKKU Y-53		<i>S. cerevisiae</i> SC90	
	37°C	40°C	37°C	40°C
ปริมาณเอทานอล (กรัมต่อลิตร)	106.82 ± 0.00	85.01 ± 0.00	91.59 ± 0.00	78.69 ± 0.00
อัตราการผลิต (กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง)	2.23± 0.00	2.83 ± 0.00	3.82± 0.00	3.28 ± 0.00
เปอร์เซ็นต์ผลได้ของเอทานอล	88.42 ± 3.11	82.06 ± 0.00	91.52 ± 0.00	89.08 ± 0.00
ระยะเวลา (ชม.)	48	30	24	24

4.4 การวิเคราะห์ศักยภาพของข้าวฟ่างหวานในการใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเอทานอล

จากการศึกษาศักยภาพของข้าวฟ่างหวานเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเอทานอล ได้แบ่ง การศึกษาออกเป็น 3 ส่วนคือ 1) การประเมินผลผลิตของข้าวฟ่างหวานที่ปลูกในฤดูต่างๆ 2) การศึกษา ต้นทุนการผลิตข้าวฟ่างหวาน และ 3) การศึกษาต้นทุนการผลิตน้ำเชื่อมเข้มข้นจากข้าวฟ่างหวาน ได้ผล การศึกษา ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

4.4.1 การประเมินผลผลิตของข้าวฟ่างหวานที่ปลูกในฤดูต่างๆ

จากการทดสอบปลูกข้าวฟ่างหวานในแปลงทดสอบซึ่งประกอบด้วยแปลงทดสอบ ศูนย์วิจัยข้าวโพดและข้าวฟ่างแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา แปลงปลูก ของเกษตรกร ต. จระเข้สามพัน อ.อุทุมม อ.สุพรรณบุรี และแปลงปลูกของคณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น พบว่าข้าวฟ่างหวานที่ปลูกในช่วงกลางฤดูฝน (เดือนกรกฎาคม) ให้ผลผลิตสูงกว่า การปลูกในช่วงต้นฤดูฝน (เดือนพฤษภาคม) และปลายฤดูฝน (กันยายน) ทั้งนี้เพราะข้าวฟ่างหวานเป็นพืช วันสั้น การปลูกในช่วงต้นฤดูฝนจะออกดอกช้ากว่าการปลูกในช่วงปลายฤดูฝน และการเจริญเติบโตทางลำ ต้นไม่ค่อยสม่ำเสมอ เพราะประสิทธิภาพฝนทั้งช่วง ส่วนการปลูกในช่วงปลายฤดูฝน ข้าวฟ่างหวานจะออก ดอกเร็ว ทำให้การเจริญทางด้านลำต้นหยุดลง ส่งผลให้ต้นเตี้ย และผลผลิตต้นสดต่ำ การปลูกในช่วงกลาง ฤดูฝนให้ผลผลิตต้นสดสูงที่สุดประมาณ 7.15 ต้นต่อไร่ (ตารางที่ 4.17)

ตารางที่ 4.17 ผลผลิตและคุณลักษณะทางการเกษตรของข้าวฟ่างหวานที่ปลูกในช่วงต่างๆ

สถานที่ปลูก	อายุออกบาน 50% (วัน)	ความสูง (ซม.)	ขนาดลำต้น (ม.)	ความหวาน (องศาบริกซ์)	ผลผลิตเมล็ด (กก./ไร่)	ผลผลิตต้นสด (ตัน/ไร่)
1. ปลูกต้นฤดูฝน (พฤษภาคม)						
1.1 คณะเกษตรศาสตร์ มข.	70	287	1.86	17.9	111	7.85
1.2 ศูนย์วิจัยข้าวโพดข้าวฟ่างแห่งชาติ	69	295	1.90	18.5	149	6.57
1.3 ไร่เกษตรกร จ.สุพรรณบุรี	69	260	1.62	18.3	128	4.70
เฉลี่ย	69	281	1.79	18.2	129	6.37
2. ปลูกกลางฤดูฝน (กรกฎาคม)						
2.1 คณะเกษตรศาสตร์ มข.	69	265	1.51	18.0	152	6.72
2.2 ศูนย์วิจัยข้าวโพดข้าวฟ่างแห่งชาติ	68	295	1.65	19.1	165	8.19
2.3 ไร่เกษตรกร จ.สุพรรณบุรี	68	276	1.54	18.5	136	6.54
เฉลี่ย	68	279	1.57	18.5	151	7.15
3. ปลูกปลายฤดูฝน						
3.1 คณะเกษตรศาสตร์ มข.	63	172	1.18	20.2	184	4.75
3.2 ศูนย์วิจัยข้าวโพดข้าวฟ่างแห่งชาติ	65	204	1.39	20.5	158	5.02
3.3 ไร่เกษตรกร จ.สุพรรณบุรี	65	202	1.32	20.3	145	4.54
เฉลี่ย	64	199	1.30	20.3	162	4.77



4.4.2 การศึกษาด้านทุนการผลิตข้าวฟ่างหวานของเกษตรกร

จากการศึกษาด้านทุนการผลิตข้าวฟ่างหวานของเกษตรกร โดยการทดสอบปลูกข้าวฟ่างหวานในแปลงปลูกของเกษตรกรบ้านดงธาตุ ต.ดงธาตุ อ.กุดจับ จ.อุดรธานี และบ้านหนองกง ต.ขอนแก่น อ.กุดจับ จ.อุดรธานี ในพื้นที่รวม 200 ไร่ ทำการปลูกโดยใช้เครื่องปลูกโดยใช้ระยะห่าง 50x10 เซนติเมตร ทำการเตรียมดิน กำจัดวัชพืชและใส่ปุ๋ยเช่นเดียวกับการศึกษาผลผลิตของข้าวฟ่างหวานที่ปลูกในฤดูต่างๆ ผลการศึกษาพบว่าต้นทุนการผลิตส่วนใหญ่เป็นค่าขนส่งข้าวฟ่างหวานจากแปลงปลูกของเกษตรกรไปยังโรงงาน โดยมีต้นทุนเฉลี่ย 985.26 บาทต่อไร่ รองลงมาคือ ค่าจ้างไถเตรียมดิน 580 บาทต่อไร่ ค่าแรงงานในการเก็บเกี่ยว 494.74 บาทต่อไร่ และค่าแรงงานในการขนย้ายต้นข้าวฟ่างหวานขึ้นรถบรรทุก 402.63 บาทต่อไร่ และจากการปลูกพบว่าได้ผลผลิตต้นสด 5.13 ต้นต่อไร่ ดังนั้นต้นทุนการผลิตเฉลี่ย 656.10 บาทต่อต้น (ตารางที่ 4.18)

4.4.3 การศึกษาด้านทุนในการผลิตน้ำเชื่อมเข้มข้นของโรงงาน

จากการศึกษาด้านทุนในการผลิตน้ำเชื่อมเข้มข้นของข้าวฟ่างหวาน โดยวิเคราะห์จากค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่เกิดขึ้นตั้งแต่ค่าวัตถุดิบ ค่าขนส่ง การชั่งวัตถุดิบ การทึบน้ำหวาน การเคี่ยวน้ำหวานให้เข้มข้น (มีความหวาน 75 องศาบริกซ์) รวมทั้งค่าไฟฟ้า ค่าจ้างแรงงานและค่าเสื่อมอุปกรณ์ ผลการศึกษาพบว่าต้นทุนการผลิตน้ำเชื่อมข้าวฟ่างหวานส่วนใหญ่คือ ค่าวัตถุดิบคิดเป็นเงินทั้งสิ้น 3,280.50 บาท ค่าไฟฟ้า 1,200 บาท รองลงมาคือค่าขนย้าย 684 บาท ค่าเสื่อมราคาของอุปกรณ์ 456 บาท ค่าน้ำมันไฮโดรลิก 360 บาทและค่าจ้างแรงงาน 225 บาท รวมทั้งค่าใช้จ่ายอื่นๆ อีก 93.60 บาท ทำให้ต้นทุนการผลิตรวมคือ 6,299.10 บาท (ตารางที่ 4.19)

ตารางที่ 4.18 ต้นทุนในการปลูกข้าวฟ่างหวาน

รายการ	ต้นทุนการผลิต (บาท/ไร่)		รวม	ร้อยละ
	เงินสด	ไม่เป็นเงินสด		
1. ต้นทุนผันแปร				
1.1 ค่าแรงงาน				
1.1.1 ค่าแรงงานในการปลูก	50.88	3.44	54.32	1.61
1.1.2 ค่าแรงงานในการกำจัดวัชพืช	81.05	0	81.05	2.41
1.1.3 ค่าแรงงานในการเก็บเกี่ยว	344.74	150.00	494.74	14.70
1.1.4 ค่าขนส่ง	985.26	0	985.26	29.27
1.1.5 ค่าแรงงานขนย้าย	402.63	0	402.63	11.96
1.2 ค่าจ้างไถเตรียมดิน	580.00	0	580.00	17.23
1.3 ค่าวัสดุ	10.75	0	10.75	0.32
1.4 ค่าเมล็ดพันธุ์	66.25	0	66.25	1.97
1.5 ค่าปุ๋ย	264.97	0	264.97	7.87
1.6 ค่าสารฆ่าแมลง	0.43	0	0.43	0.01
1.7 ค่าสารกำจัดวัชพืช	54.05	0	54.05	1.61
1.8 ค่าซ่อมแซมอุปกรณ์	11.16	0	11.16	0.33
1.9 ค่าดอกเบี้ยเงินลงทุน	160.28	0	160.28	4.76
2. ต้นทุนคงที่				
2.1 ค่าภาษีที่ดิน	0	5.00	5.00	0.15
2.2 ค่าเช่าที่ดิน	0	178.00	178.00	5.29
2.3 ค่าเสื่อมอุปกรณ์การเกษตร	0	16.88	16.88	0.50
ต้นทุนรวมต่อไร่ (บาท)		3,365.79		
ต้นทุนรวมต่อตัน (บาท)		656.10		
ผลผลิตต่อไร่ (ตัน)		5.13		

ตารางที่ 4.19 ต้นทุนในการผลิตน้ำเชื่อมข้าวฟ่างหวาน

รายการ	ต้นทุนการผลิต (บาท/ไร่)		รวม	ร้อยละ
	เงินสด	ไม่เป็นเงินสด		
1. ต้นทุนผันแปร				
1.1 ค่าแรงงาน				
1.1.1 ค่าจ้างเหมาวิศวกรควบคุม	50.00	0	50.00	0.001
1.1.2 ค่าแรงงานกรรมกร	2,250.00	0	2,250.00	3.57
1.2 ค่าวัตถุดิบ (ต้นข้าวฟ่างหวาน) (ต้นละ 656.10 บาท)	32,805.00	0	32,805.00	52.07
1.3 ค่าน้ำมันไฮโดรลิก	3,600.00	0	3,600.00	5.71
1.4 ค่าน้ำมันรถแทรกเตอร์	840.00	0	840.00	1.33
1.5 ค่ารถขนย้ายวัตถุดิบป้อนเครื่องหีบ	6,840.00	0	6,840.00	10.86
1.6 ค่าไฟฟ้า	12,000.00	0	12,000.00	19.05
2. ต้นทุนคงที่				
2.1 ค่าเสื่อมราคาโรงงาน	0	4,560.00	4,560.00	7.24
2.2 ค่าเสื่อมราคารถแทรกเตอร์	0	46.00	46.00	0.001
ต้นทุนรวมในการผลิตน้ำเชื่อมรวม 10 ต้น		62,991.00		
ต้นทุนเฉลี่ยในการผลิตน้ำเชื่อม (บาท/ต้น)		6,299.10		

4.4.4 การประเมินต้นทุนการผลิตเอทานอลจากข้าวฟ่างหวาน

ในงานวิจัยนี้ประเมินต้นทุนการผลิตเอทานอลตามแหล่งของวัตถุดิบคือ น้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานสด (มีค่าความหวานเริ่มต้นประมาณ 21 องศาบริกซ์) และน้ำเชื่อมข้าวฟ่างหวาน โดยประเมินต้นทุนการผลิตเอทานอลจากค่าวัตถุดิบเท่านั้น ยังไม่รวมต้นทุนในขั้นตอนการหมักและกลั่น ซึ่งสามารถสรุปต้นทุนการผลิตเอทานอลโดยประมาณได้ดังนี้

4.4.4.1 การประเมินต้นทุนการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานสด

ข้าวฟ่างหวานสด 1 ต้น มีต้นทุนการผลิตประมาณ 656.10 บาท สามารถบีบสกัดน้ำหวานในลำต้นได้ 500 ลิตร (คิดประสิทธิภาพในการหีบน้ำหวาน 50%) เพราะฉะนั้น 1 ลิตรของน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวานมีต้นทุนในการผลิตประมาณ 1.312 บาท

น้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวาน 1 ลิตร สามารถผลิตเอทานอลได้ประมาณ 0.134 ลิตร (คำนวณโดยใช้ข้อมูลในงานวิจัยนี้) นั่นหมายความว่าเอทานอล 0.134 ลิตร มีต้นทุนในการผลิต (ประเมินจากค่าวัตถุดิบเท่านั้น) ประมาณ 1.312 บาท ดังนั้นหากทำการผลิตเอทานอลจำนวน 1 ลิตร จะมีต้นทุนในการผลิตประมาณ 9.79 บาท อย่างไรก็ตามหากคำนวณต้นทุนการผลิตเอทานอลโดยรวมทั้งค่าวัตถุดิบ

และค่าใช้จ่ายในขั้นตอนการหมักและกลั่น (โดยกำหนดให้ต้นทุนในขั้นตอนการหมักและกลั่นมีค่าประมาณ 6.125 บาทต่อเอทานอล 1 ลิตร ซึ่งอ้างอิงจากสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน) ต้นทุนรวมในการผลิตเอทานอลจะมีค่าประมาณ 15.915 บาทต่อลิตร

4.4.4.2 การประเมินต้นทุนการผลิตเอทานอลจากน้ำเชื่อมข้าวฟ่างหวาน

น้ำเชื่อมข้าวฟ่างหวาน 1 ตัน (1,000 ลิตร) มีต้นทุนในการผลิตเท่ากับ 6,299.10 บาท เพราะฉะนั้นน้ำเชื่อมข้าวฟ่างหวาน 1 ลิตร มีต้นทุนในการผลิตเอทานอลประมาณ 6.299 บาท

น้ำเชื่อมข้าวฟ่างหวาน 1 ลิตร สามารถผลิตเอทานอลได้ประมาณ 0.134 ลิตร นั่นคือเอทานอล 0.134 ลิตร มีต้นทุนในการผลิตประมาณ 6.299 บาท หากต้องการผลิตเอทานอล 1 ลิตร จะมีต้นทุนในการผลิตเอทานอลโดยประมาณ 47 บาท (ซึ่งคิดต้นทุนเฉพาะจากวัตถุดิบ) และหากคำนวณต้นทุนโดยรวมทั้งค่าวัตถุดิบและค่าใช้จ่ายในขั้นตอนการหมักและกลั่น (โดยกำหนดให้ต้นทุนในขั้นตอนการหมักและกลั่นมีค่าประมาณ 6.125 บาทต่อเอทานอล 1 ลิตร ซึ่งอ้างอิงจากสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน) ต้นทุนรวมในการผลิตเอทานอลจากน้ำเชื่อมข้าวฟ่างหวาน จะมีค่าประมาณ 53.125 บาทต่อลิตร