

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 องค์ประกอบหลักทางเคมีที่สำคัญในยีสต์เอ็กซ์แทรกท์ กากเซลล์ยีสต์แห้ง และรำข้าว

แหล่งไนโตรเจนที่ใช้ในการทดลองนี้คือ ยีสต์เอ็กซ์แทรกท์ กากเซลล์ยีสต์แห้ง และรำข้าว ซึ่งผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของแหล่งไนโตรเจนดังกล่าว แสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งพบว่า องค์ประกอบหลักของยีสต์เอ็กซ์แทรกท์คือโปรตีน ซึ่งมีถึง 75 เปอร์เซ็นต์ กากเซลล์ยีสต์แห้งประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตและโปรตีนในปริมาณใกล้เคียงกัน (ประมาณ 42 เปอร์เซ็นต์) ส่วนรำข้าวประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตเป็นหลัก โดยมีโปรตีนเพียง 12 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ในยีสต์เอ็กซ์แทรกท์ กากเซลล์ยีสต์แห้ง และรำข้าว ยังประกอบด้วยไขมัน เยื่อใย และเถ้าในปริมาณที่แตกต่างกัน

จากองค์ประกอบของไนโตรเจนในแต่ละแหล่งสามารถคำนวณปริมาณกากเซลล์ยีสต์แห้ง และปริมาณรำข้าวที่จะใช้ในการทดลองได้ คือใช้กากเซลล์ยีสต์แห้ง 10.5, 21 และ 31.5 กรัมต่อลิตร (มีปริมาณไนโตรเจนเท่ากับไนโตรเจนในยีสต์เอ็กซ์แทรกท์ 7, 14 และ 21 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ) และใช้รำข้าว 43.2, 86.4 และ 129.6 กรัมต่อลิตร (มีปริมาณไนโตรเจนเท่ากับไนโตรเจนในยีสต์เอ็กซ์แทรกท์ 7, 14 และ 21 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ)

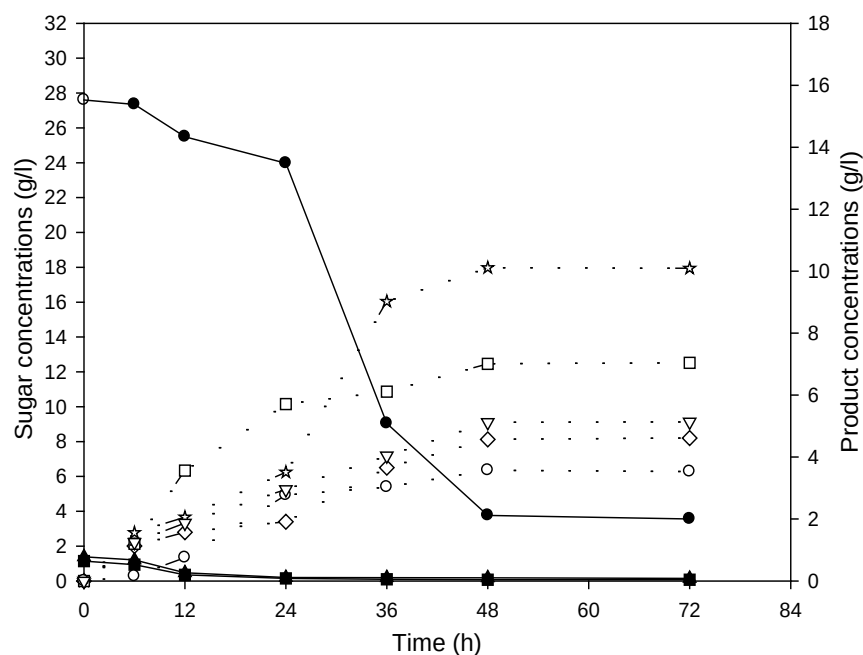
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบหลักของยีสต์เอ็กซ์แทรกท์ กากเซลล์ยีสต์แห้ง และรำข้าว

Composition (% w/w)	Yeast extract	กากเซลล์ยีสต์แห้ง	รำข้าว
Total carbohydrate	8.98	41.92	51.95
Protein	74.50	41.75	12.08
Total fat	0.07	2.95	10.44
Crude fiber	ND	0.16	8.21
Moisture	5.19	7.30	10.61
Ash	11.26	6.08	8.92

ND = NOT DETECTED

4.2 การหมักกรดแลคติกแบบกะจากไฮโดรไลเสทของข้าวฟ่างหวานที่ไม่เติมสารอาหารเสริม

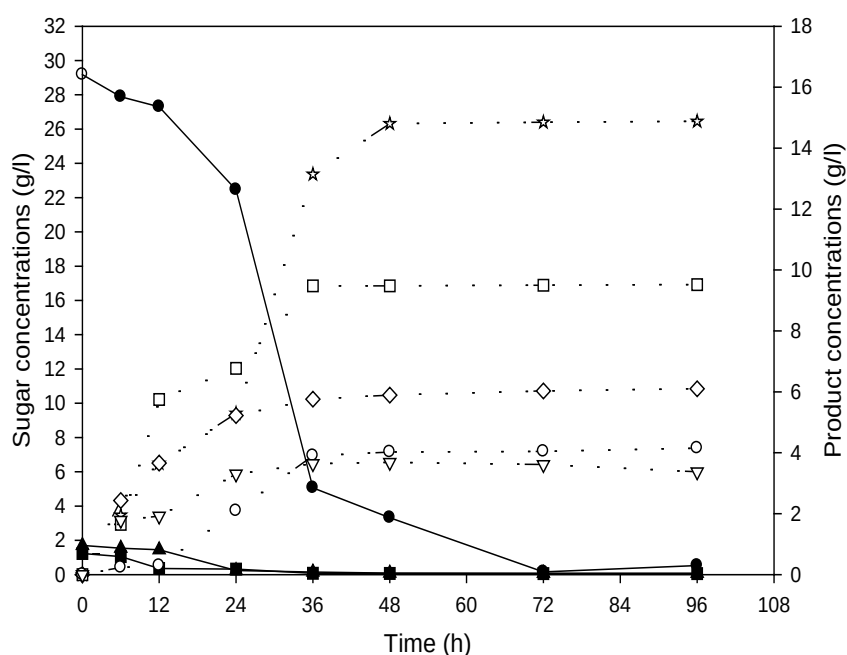
การศึกษาการผลิตกรดแลคติกจากไฮโดรไลเสทของข้าวฟ่างหวาน ที่ความเข้มข้นน้ำตาลไซโลส เริ่มต้นประมาณ 30 กรัมต่อลิตร และไม่เติมสารอาหารเสริม พบว่า *Lc. lactis* IO-1 สามารถใช้น้ำตาลกลูโคส และอะราบินโนสเกือบสมบูรณ์ภายใน 24 ชั่วโมงของการหมัก (รูปที่ 4.1) ในขณะที่น้ำตาลไซโลสถูกใช้ตลอดการหมัก และเมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมักมีน้ำตาลไซโลสเหลืออยู่ในน้ำหมัก 3.56 กรัมต่อลิตร โดย *Lc. lactis* IO-1 สามารถสร้างกรดแลคติกได้ 10.11 กรัมต่อลิตร คิดเป็นผลได้ (yield) ของกรดแลคติกเท่ากับ 0.39 ที่ระยะเวลาการหมักที่ 48 ชั่วโมง นอกจากกรดแลคติกแล้ว *Lc. lactis* IO-1 ยังสร้างผลพลอยได้ (by-products) อื่นๆ ได้แก่ กรดฟอร์มิก กรดอะซิติก เอทานอล และ 2,3-บิวเทนไดออล โดยพบว่า เมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมัก *Lc. lactis* IO-1 สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ดังกล่าวได้ 4.61, 7.04, 5.13 และ 3.53 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็นผลได้ของกรดฟอร์มิก กรดอะซิติก เอทานอล และ 2,3-บิวเทนไดออล เท่ากับ 0.18, 0.27, 0.20 และ 0.14 ตามลำดับ จากผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่า เอนไซม์ lactate dehydrogenase, pyruvate formate lyase, pyruvate dehydrogenase, aldehyde dehydrogenase, alcohol dehydrogenase, phosphotransferase, acetate kinase และ butanediol dehydrogenase ใน metabolic pathway ของ pyruvate ทำงาน จึงมีผลทำให้ได้ผลพลอยได้ดังกล่าว ซึ่งส่งผลให้ผลได้ของกรดแลคติกต่ำ



รูปที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงของน้ำตาล และผลิตภัณฑ์ในระหว่างการหมักกรดแลคติกแบบกะจากไฮโดรไลเสทของข้าวฟ่างหวานที่ไม่มีการเติมอาหารเสริมโดย *Lc. lactis* IO-1 (● = น้ำตาลไซโลส, ▲ = น้ำตาลกลูโคส, ■ = น้ำตาลอะราบินโนส, ☆ = กรดแลคติก, ◇ = กรดฟอร์มิก, □ = กรดอะซิติก, ▽ = เอทานอล และ ○ = 2,3- บิวเทนไดออล)

4.3 การหมักกรดแลคติกแบบกะจากไฮโดรไลเสทของข้าวฟ่างหวานที่เติมยีสต์เอ็กซ์แทรกท์เป็นแหล่งอาหารเสริม

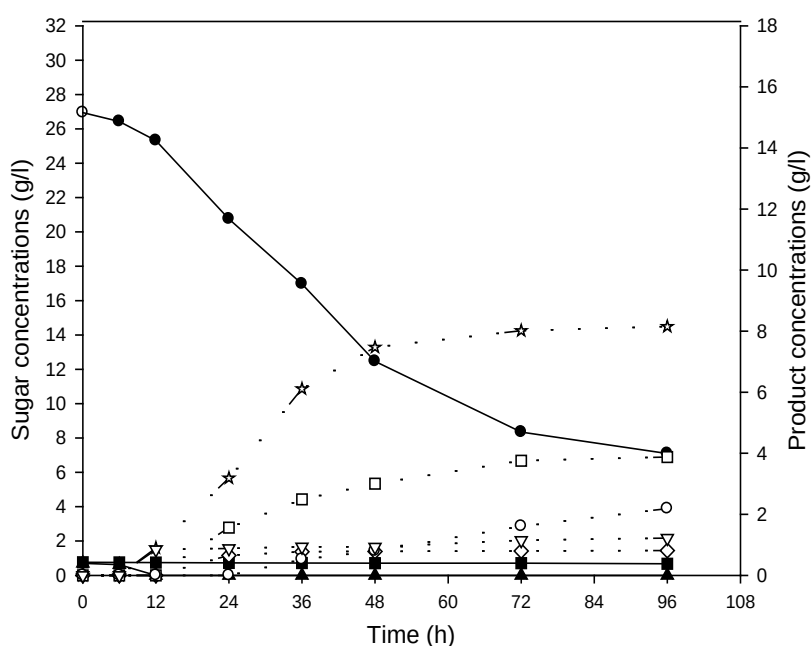
การศึกษาการผลิตกรดแลคติกจากไฮโดรไลเสทของข้าวฟ่างหวาน ที่ความเข้มข้นน้ำตาลไซโลสเริ่มต้นประมาณ 30 กรัมต่อลิตร และเติมยีสต์เอ็กซ์แทรกท์ 7 กรัมต่อลิตร พบว่า *Lc. lactis* IO-1 สามารถใช้น้ำตาลกลูโคส และอะราบินอสเกือบสมบูรณ์ภายใน 12 และ 24 ชั่วโมงของการหมัก ตามลำดับ ในขณะที่น้ำตาลไซโลสถูกใช้อย่างต่อเนื่องตลอดการหมัก และน้ำตาลไซโลสหมดภายในชั่วโมงที่ 72 ของการหมัก (รูปที่ 4.2) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การเติมยีสต์เอ็กซ์แทรกท์ซึ่งเป็นแหล่งสารอาหารเสริม มีความจำเป็นต่อ *Lc. lactis* IO-1 ในการผลิตกรดแลคติก โดยทำให้สามารถผลิตกรดแลคติกได้เพิ่มขึ้นเป็น 14.88 กรัมต่อลิตร คิดเป็นผลได้ 0.52 เมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมักที่ 72 ชั่วโมง พบกรดฟอร์มิก กรดอะซิติก เอทานอล และ 2,3-บิวเทนไดออล เท่ากับ 6.10, 9.52, 3.37 และ 4.15 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ และให้ผลได้ของผลพลอยได้เท่ากับ 0.21, 0.33, 0.13 และ 0.14 ตามลำดับ ผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่า การเติมยีสต์เอ็กซ์แทรกท์ทำให้อัตราของ pyruvate เปลี่ยนไป โดยเอนไซม์ lactate dehydrogenase ทำงานได้ดีขึ้น โดยผลได้ของกรดแลคติกเพิ่มขึ้นจาก 0.39 เป็น 0.52 หรือเพิ่มขึ้น 33% ของสถานะไม่มีการเติมอาหารเสริม



รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงของน้ำตาล และผลิตภัณฑ์ในระหว่างการหมักกรดแลคติกแบบกะจากไฮโดรไลเสทของข้าวฟ่างหวานที่เติมยีสต์เอ็กซ์แทรกท์ 7 กรัมต่อลิตร โดย *Lc. lactis* IO-1 (● = น้ำตาลไซโลส, ▲ = น้ำตาลกลูโคส, ■ = น้ำตาลอะราบินอส, ☆ = กรดแลคติก, ◇ = กรดฟอร์มิก, □ = กรดอะซิติก, ▽ = เอทานอล และ ○ = 2,3- บิวเทนไดออล)

4.4 การผลิตกรดแลคติกแบบกะจากไฮโดรไลเสทของซานข้าวฟ่างหวานที่เติมกากเซลล์ยีสต์แห้งเป็นแหล่งอาหารเสริม

การศึกษาการเติมกากเซลล์ยีสต์แห้งเป็นแหล่งอาหารเสริมที่มีราคาถูกในการหมักเพื่อผลิตกรดแลคติกจากไฮโดรไลเสทของซานข้าวฟ่างหวานที่มีความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้นประมาณ 30 กรัมต่อลิตร และแปรผันปริมาณของกากเซลล์ยีสต์แห้งที่เติมลงในไฮโดรไลเสทเท่ากับ 10.5, 21 และ 31.5 กรัมต่อลิตร ซึ่งมีปริมาณไนโตรเจนเท่ากับในยีสต์เอ็กซ์แทรกท์ 7, 14 และ 21 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.3-4.5 ซึ่งพบว่า การหมักกรดแลคติกโดยเติมกากเซลล์ยีสต์แห้ง 10.5 กรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.3) *Lc. lactis* IO-1 สามารถใช้น้ำตาลกลูโคสได้หมดภายในชั่วโมงที่ 6 ในขณะที่ปริมาณน้ำตาลไซโลสถูกใช้อย่างต่อเนื่อง และพบว่าที่ชั่วโมงที่ 96 มีน้ำตาลไซโลสเหลืออยู่ในน้ำหมัก 7.09 กรัมต่อลิตร ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ที่สภาวะนี้ *Lc. lactis* IO-1 ไม่สามารถใช้น้ำตาลได้หมด ซึ่งอาจเป็นเพราะมีสารอาหารเสริมที่จำเป็นสำหรับการเจริญและการผลิตกรดแลคติกไม่เพียงพอ ส่วนน้ำตาลอะราบินอสนั้น พบว่า *Lc. lactis* IO-1 ใช้ได้น้อยมาก ผลิตภัณฑ์ที่ *Lc. lactis* IO-1 สร้างขึ้น ได้แก่ กรดแลคติก กรดฟอร์มิก กรดอะซิติก เอทานอล และ 2,3-บิวเทนไดออล โดยพบว่า เมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมัก *Lc. lactis* IO-1 สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ดังกล่าวได้ 8.16, 0.81, 3.87, 1.22 และ 2.18 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ และภายใต้สภาวะนี้ ได้อัตราผลผลิตกรดแลคติก 0.09 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง

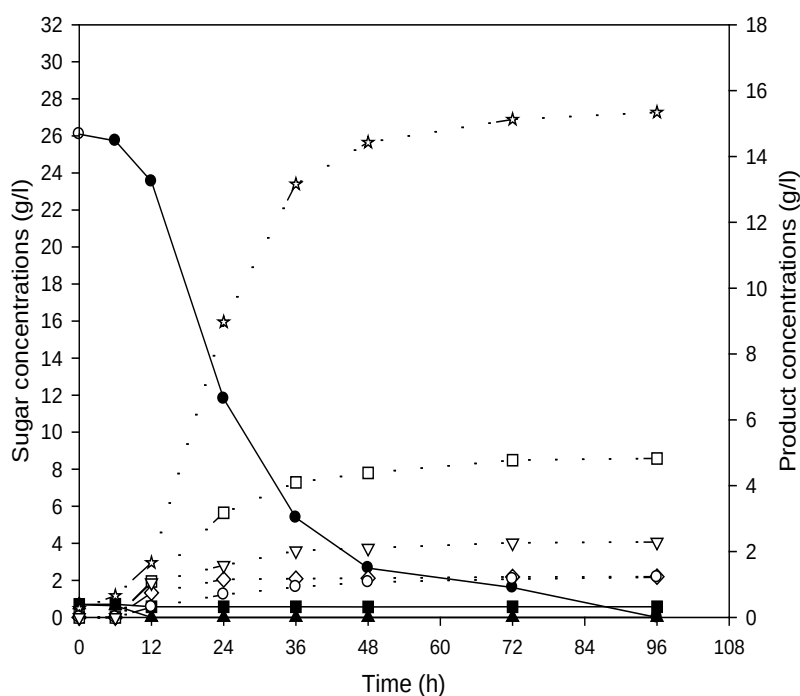


รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงของน้ำตาล และผลิตภัณฑ์ในระหว่างการหมักกรดแลคติกแบบกะจากไฮโดรไลเสทซานข้าวฟ่างหวานที่เติมกากเซลล์ยีสต์แห้ง 10.5 กรัมต่อลิตร โดย *Lc. lactis* IO-1 (● = น้ำตาลไซโลส, ▲ = น้ำตาลกลูโคส, ■ = น้ำตาลอะราบินอส, ☆ = กรดแลคติก, ◇ = กรดฟอร์มิก, □ = กรดอะซิติก, ▽ = เอทานอล และ ○ = 2,3- บิวเทนไดออล)

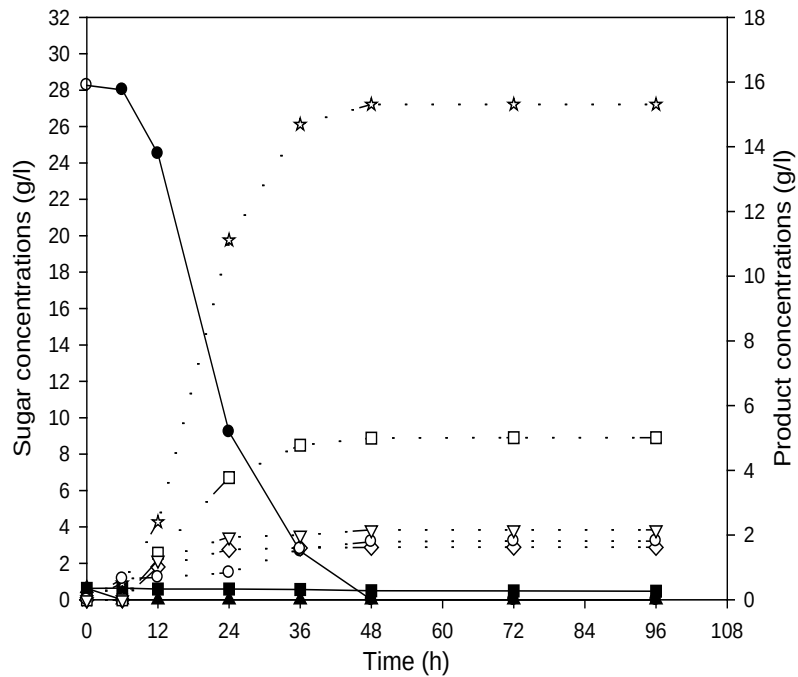
สำหรับการหมักกรดแลคติกที่เติมกากเซลล์ยีสต์แห้ง 21 กรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.4) พบว่า *Lc. lactis* IO-1 สามารถใช้น้ำตาลกลูโคสหมดภายใน 6 ชั่วโมง ในขณะที่น้ำตาลไซโลสถูกใช้ได้อย่างต่อเนื่อง เมื่อสิ้นสุด

กระบวนการหมัก ที่เวลา 96 ชั่วโมง ไม่พบน้ำตาลไซโลสเหลืออยู่ในน้ำหมัก แสดงให้เห็นว่า *Lc. lactis* IO-1 ได้สารอาหารที่จำเป็นเพียงพอจากกากเซลล์ยีสต์ 21 กรัมต่อลิตร ส่วนน้ำตาลอะราบินโนสนั้น *Lc. lactis* IO-1 สามารถใช้ได้เพียงเล็กน้อยเช่นเดียวกับการเติมกากเซลล์ยีสต์แห้ง 10.5 กรัมต่อลิตร แสดงให้เห็นว่าที่สภาวะนี้ *Lc. lactis* IO-1 ไม่มีเอนไซม์ในการย่อยน้ำตาลอะราบินโนสซึ่งเป็นน้ำตาล aldopentose ที่มีคาร์บอน 5 อะตอม ที่ประกอบด้วย aldehyde (CHO) functional group ซึ่งพบใน hemicellulose และ pectin เมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมักพบว่าได้ความเข้มข้นของกรดแลคติก กรดฟอร์มิก กรดอะซิติก เอทานอล และ 2,3- บิวเทนไดออล เท่ากับ 15.34, 1.23, 4.82, 2.28 และ 1.21 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ นอกจากนี้ พบว่าภายใต้สภาวะนี้ ได้อัตราผลผลิตกรดแลคติกเพิ่มเป็น 0.16 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง

สำหรับการหมักกรดแลคติกที่เติมกากเซลล์ยีสต์แห้ง 31.5 กรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.5) พบว่า *Lc. lactis* IO-1 สามารถใช้น้ำตาลกลูโคสหมดภายใน 6 ชั่วโมง ในขณะที่น้ำตาลไซโลสถูกใช้อย่างรวดเร็วและหมดภายใน 48 ชั่วโมงของการหมัก ส่วนน้ำตาลอะราบินโนสนั้น *Lc. lactis* IO-1 ใช้ได้น้อยมากเช่นเดียวกับการเติมกากเซลล์ยีสต์แห้ง 10.5 และ 21 กรัมต่อลิตร เมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมักพบกรดแลคติก กรดฟอร์มิก กรดอะซิติก เอทานอล และ 2,3- บิวเทนไดออล เท่ากับ 15.31, 1.62, 5.00, 2.16 และ 1.79 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การเติมกากเซลล์ยีสต์แห้งเพิ่มขึ้นเป็น 31.5 กรัมต่อลิตร สามารถลดระยะเวลาในการหมักและเพิ่มอัตราผลผลิตกรดแลคติกได้ โดยได้อัตราผลผลิตของกรดแลคติกเพิ่มขึ้นเป็น 0.32 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของกรดแลคติกที่ได้เมื่อใช้กากเซลล์ยีสต์ 21 และ 31.5 กรัมต่อลิตร มีค่าไม่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงของน้ำตาล และผลิตภัณฑ์ในระหว่างการหมักกรดแลคติกแบบกะจากไฮโดรไลเสทขานข้าวฟ่างหวานที่เติมกากเซลล์ยีสต์แห้ง 21 กรัมต่อลิตร โดย *Lc. lactis* IO-1 (● = น้ำตาลไซโลส, ▲ = น้ำตาลกลูโคส, ■ = น้ำตาลอะราบินโนส, ☆ = กรดแลคติก, ◇ = กรดฟอร์มิก, □ = กรดอะซิติก, ▽ = เอทานอล และ ○ = 2,3- บิวเทนไดออล)



รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงของน้ำตาล และผลิตภัณฑ์ในระหว่างการหมักกรดแลคติกแบบกะจากไฮโดรไลเสทของข้าวฟ่างหวานที่เติมกากเซลล์ยีสต์แห้ง 31.5 กรัมต่อลิตร โดย *Lc. lactis* IO-1 (● = น้ำตาลไซโลส, ▲ = น้ำตาลกลูโคส, ■ = น้ำตาลอะราบิโนส, ☆ = กรดแลคติก, ◇ = กรดฟอร์มิก, □ = กรดอะซิติก, ▽ = เอทานอล และ ○ = 2,3- บิวเทนไดออล)

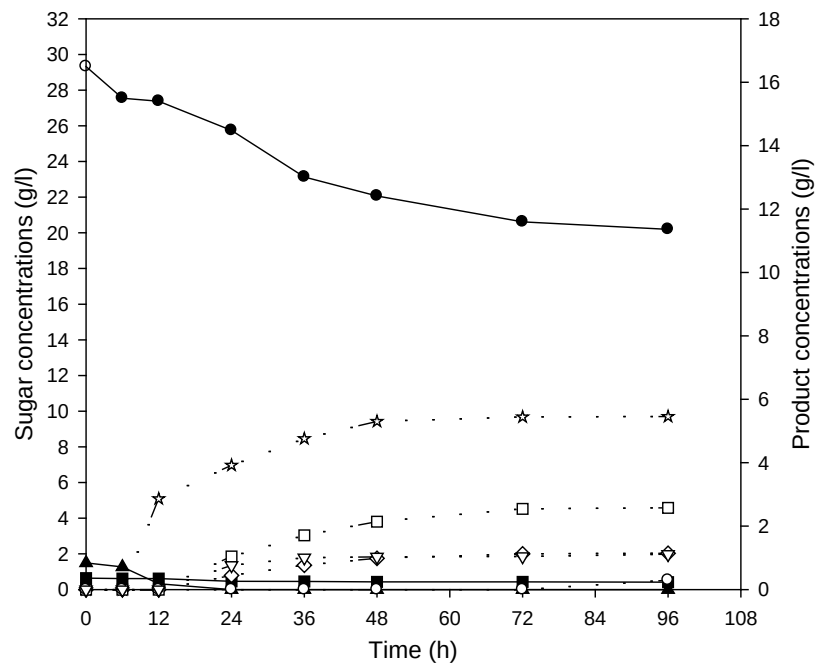
เมื่อเปรียบเทียบกับกรดแลคติกที่ *Lc. lactis* IO-1 สร้างขึ้นภายใต้สภาวะที่มีการเติมกากเซลล์ยีสต์ (รูปที่ 4.6) พบว่า การเติมกากเซลล์ยีสต์แห้ง 10.5 กรัมต่อลิตร ลงในไฮโดรไลเสทของข้าวฟ่างหวานนั้น ได้กรดแลคติก 8.16 กรัมต่อลิตร และมีอัตราผลผลิตกรดแลคติก 0.09 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง ในขณะที่เมื่อเติมกากเซลล์ยีสต์แห้ง 21 และ 31.5 กรัมต่อลิตร ลงในไฮโดรไลเสทของข้าวฟ่างหวาน *Lc. lactis* IO-1 สามารถผลิตกรดแลคติกได้เพิ่มขึ้นเป็น 15.34 และ 15.31 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ และมีอัตราผลผลิตกรดแลคติกเพิ่มเป็น 0.16 และ 0.32 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 ผลได้ของผลิตภัณฑ์จากการหมักไฮโดรไลเสทของชานข้าวฟ่างหวานที่เติมกากเซลล์ยีสต์แห้งที่ปริมาณต่างๆ โดย *Lc. lactis* IO-1

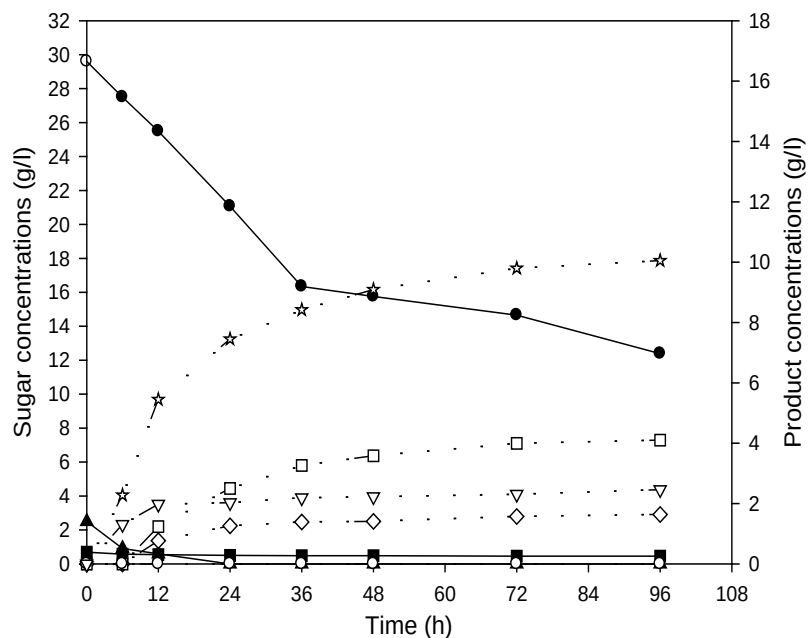
ผลได้ (กรัมต่อกรัม)	เมื่อเติมกากเซลล์ยีสต์แห้ง (กรัมต่อลิตร)		
	10.5	21	31.5
กรดแลกติก	0.41	0.58	0.54
กรดฟอร์มิก	0.04	0.04	0.05
กรดอะซิติก	0.19	0.18	0.17
เอทานอล	0.06	0.08	0.07
2,3- บิวเทนไดออล	0.10	0.04	0.06
ผลได้ทั้งหมด	0.80	0.92	0.89

4.5 การผลิตกรดแลกติกแบบกะจากไฮโดรไลเสทของชานข้าวฟ่างหวานที่เติมรำข้าวเป็นแหล่งอาหารเสริม

การศึกษาการเติมรำข้าวเป็นแหล่งอาหารเสริมในการหมักเพื่อผลิตกรดแลกติกจากไฮโดรไลเสทของชานข้าวฟ่างหวาน โดยใช้ความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้นประมาณ 30 กรัมต่อลิตร และแปรผันปริมาณของรำข้าวเป็น 43.2 และ 86.4 กรัมต่อลิตร ซึ่งมีปริมาณไนโตรเจนเท่ากับปริมาณไนโตรเจนในยีสต์เอ็กซ์แทรกท์ 7 และ 14 กรัมต่อลิตร ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 ซึ่งพบว่าเมื่อเติมรำข้าวเป็นแหล่งอาหารเสริม 43.2 กรัมต่อลิตร *Lc. lactis* IO-1 สามารถใช้น้ำตาลกลูโคสได้หมดภายในเวลา 24 ชั่วโมงของการหมัก ในขณะที่ยวกันน้ำตาลไซโลสถูกใช้อย่างต่อเนื่อง และพบว่าที่เวลา 72 ชั่วโมงของการหมัก มีน้ำตาลเหลือในน้ำหมัก 20.62 กรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.7) โดย *Lc. lactis* IO-1 สามารถผลิตกรดแลกติก กรดฟอร์มิก กรดอะซิติก และเอทานอล ได้ 5.44, 1.12, 2.54 และ 1.05 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ และตรวจไม่พบ 2,3- บิวเทนไดออลในน้ำหมัก เมื่อเติมรำข้าว 86.4 กรัมต่อลิตร พบว่ารูปแบบการใช้น้ำตาล และการสร้างผลิตภัณฑ์คล้ายกับเมื่อเติมรำข้าว 43.2 กรัมต่อลิตร โดยมีน้ำตาลคงเหลือในน้ำหมักเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 96 ชั่วโมง เท่ากับ 12.39 กรัมต่อลิตร และมี 20.62 กรัมต่อลิตร และมีกรดแลกติก กรดฟอร์มิก กรดอะซิติก และเอทานอล เท่ากับ 10.05, 1.64, 4.10 และ 2.46 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ และตรวจไม่พบ 2,3- บิวเทนไดออลเช่นกัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มปริมาณรำข้าวในไฮโดรไลเสท *Lc. lactis* IO-1 สามารถผลิตกรดแลกติกได้เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณรำข้าวสูงขึ้นมีผลทำให้ความหนืดของน้ำหมักเพิ่มสูงขึ้นด้วย ทำให้เกิดปัญหาการกวนและการผสมในระหว่างการหมัก ดังนั้นปริมาณของรำข้าวที่มีไนโตรเจนเท่ากับยีสต์เอ็กซ์แทรกท์ 21 กรัมต่อลิตร (ต้องใช้รำข้าว 129.2 กรัมต่อลิตร) จึงไม่ได้ทำการทดลองตามแผนที่วางไว้

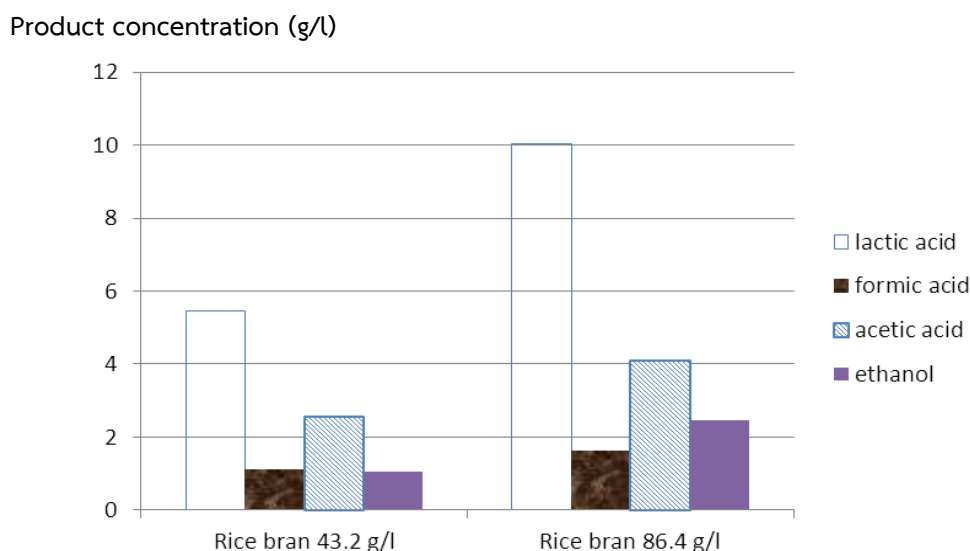


รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงของน้ำตาล และผลิตภัณฑ์ในระหว่างการหมักกรดแลคติกแบบกะจากไฮโดรไลเสท ขานข้าวฟ่างหวานที่เติมรำข้าว 43.2 กรัมต่อลิตร โดย *Lc. lactis* IO-1 (● = น้ำตาลไซโลส, ▲ = น้ำตาล กลูโคส, ■ = น้ำตาลอะราบิโนส, ☆ = กรดแลคติก, ◇ = กรดฟอร์มิก, □ = กรดอะซิติก, ▽ = เอทานอล, ○ = 2,3- บิวเทนไดออล)



รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงของน้ำตาล และผลิตภัณฑ์ในระหว่างการหมักกรดแลคติกแบบกะจากไฮโดรไลเสท ขานข้าวฟ่างหวานที่เติมรำข้าว 86.4 กรัมต่อลิตร โดย *Lc. lactis* IO-1 และ (● = น้ำตาลไซโลส, ▲ = น้ำตาล กลูโคส, ■ = น้ำตาลอะราบิโนส, ☆ = กรดแลคติก, ◇ = กรดฟอร์มิก, □ = กรดอะซิติก, ▽ = เอทานอล, ○ = 2,3- บิวเทนไดออล)

เมื่อเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ *Lc. lactis* IO-1 สร้างขึ้นภายใต้สภาวะการเติมรำข้าว (รูปที่ 4.9) พบว่า เมื่อเติมรำข้าว 86.4 กรัมต่อลิตร ลงในไฮโดรไลเสทของชานข้าวฟ่างหวาน *Lc. lactis* IO-1 สามารถผลิตกรดแลกติกได้มากกว่าการเติมรำข้าว 43.2 กรัมต่อลิตร ลงในไฮโดรไลเสทของชานข้าวฟ่างหวาน ประมาณ 84 เปอร์เซ็นต์ ส่วนอัตราผลผลิตพบว่า ที่ปริมาณรำข้าว 43.2 และ 86.4 กรัมต่อลิตร ได้อัตราผลผลิต 0.08 และ 0.10 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 การผลิตผลิตภัณฑ์ของ *Lc. lactis* IO-1 ภายใต้สภาวะการเติมรำข้าวที่ความเข้มข้นต่างๆ

เมื่อพิจารณาผลได้ของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ กรดแลกติก กรดฟอร์มิก กรดอะซิติก เอทานอล และ 2,3-บิวเทนไดออล (ตารางที่ 4.3) พบว่าเมื่อเติมรำข้าวที่ปริมาณต่างๆ ผลได้ของผลิตภัณฑ์แต่ละตัวมีค่าใกล้เคียงกัน โดยผลได้ของกรดแลกติกอยู่ในช่วง 0.51 – 0.53 ผลได้ของฟอร์มิก 0.08 – 0.11 ผลได้ของอะซิติก 0.20 – 0.25 และ ผลได้ของเอทานอล 0.10 – 0.12 โดยผลรวมของผลได้ของผลิตภัณฑ์ทั้งหมดมีค่าอยู่ในช่วง 0.91 – 0.98 แสดงว่า นอกเหนือจากผลิตภัณฑ์ที่วิเคราะห์แล้ว *Lc. lactis* IO-1 ยังสามารถผลิตผลพลอยได้อื่นๆ ดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น นอกจากนี้ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการหมักกรดแลกติกด้วยการเติมรำข้าวที่ความเข้มข้น 86.4 กรัมต่อลิตร *Lc. lactis* IO-1 สามารถเพิ่มความเข้มข้นและอัตราผลผลิตของกรดแลกติกได้

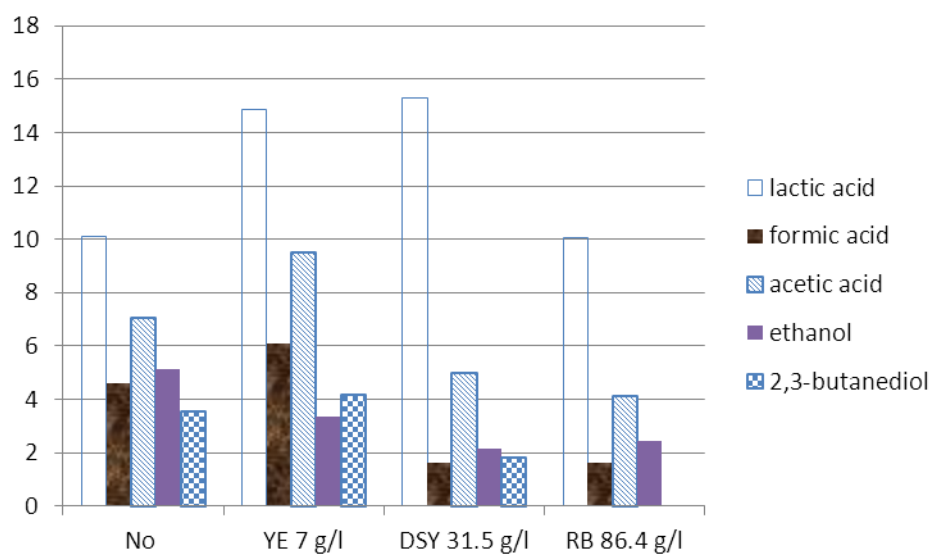
ตารางที่ 4.3 ผลได้ของผลิตภัณฑ์จากการหมักไฮโดรไลเสทของชานข้าวฟ่างหวานและเติมรำข้าวที่ความเข้มข้นต่างๆ โดย *Lc. lactis* IO-1

ผลได้ (กรัมต่อกรัม)	เมื่อเติมรำข้าว (กรัมต่อลิตร)	
	43.2	86.4
กรดแลกติก	0.53	0.51
กรดฟอร์มิก	0.11	0.08
กรดอะซิติก	0.25	0.20
เอทานอล	0.10	0.12
ผลได้ทั้งหมด	0.99	0.91

4.6 การเปรียบเทียบการหมักกรดแลคติกจากไฮโดรไลเสทของขานข้าวฟ่างหวานที่สภาวะต่างๆ

จากการศึกษาการผลิตกรดแลคติกจากไฮโดรไลเสทของขานข้าวฟ่างหวาน โดยเติมแหล่งไนโตรเจนที่แตกต่างกัน ได้แก่ ยีสต์เอ็กซ์แทรกท์ กากเซลล์ยีสต์แห้ง และรำข้าว และเปรียบเทียบกับ การหมักกรดแลคติกจากไฮโดรไลเสทของขานข้าวฟ่างหวานที่ไม่มีการเติมสารอาหาร พบว่า กากเซลล์ยีสต์แห้งสามารถใช้เป็นแหล่งไนโตรเจนราคาถูกแทนยีสต์เอ็กซ์แทรกท์ในการผลิตกรดแลคติกจากไฮโดรไลเสทของขานข้าวฟ่างหวานได้ โดยการเติมกากเซลล์ยีสต์แห้ง 31.5 กรัมต่อลิตร ลงในน้ำหมัก *Lc. lactis* IO-1 สามารถผลิตกรดแลคติกได้สูงสุด และมีผลพลอยได้หรือผลิตภัณฑ์อื่นๆ ต่ำสุด (รูปที่ 4.10) โดยที่สภาวะนี้ได้ความเข้มข้นกรดแลคติก 15.31 กรัมต่อลิตร คิดเป็นผลได้ และอัตราผลผลิตของกรดแลคติก 0.54 และ 0.32 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ ที่ระยะเวลาของการหมัก 48 ชั่วโมง ในขณะที่การเติมยีสต์เอ็กซ์แทรกท์ 7 กรัมต่อลิตร ได้ความเข้มข้นกรดแลคติก 14.88 กรัมต่อลิตร ได้ผลได้ และอัตราผลผลิตของกรดแลคติก 0.52 และ 0.30 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ ที่ระยะเวลาของการหมัก 48 ชั่วโมง ส่วนการเติมรำข้าว 86.4 กรัมต่อลิตร เป็นแหล่งไนโตรเจน ได้ความเข้มข้นกรดแลคติก 10.05 กรัมต่อลิตร ได้ผลได้ และอัตราผลผลิตของกรดแลคติกเท่ากับ 0.51 และ 0.10 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ ที่ระยะเวลาของการหมัก 96 ชั่วโมง ความเข้มข้นของกรดแลคติกในสภาวะที่เติมรำข้าว 86.4 กรัมต่อลิตร มีค่าใกล้เคียงกับเมื่อหมักกรดแลคติกจากไฮโดรไลเสทของขานของฟ่างหวานที่ไม่มีการเติมสารอาหารเสริม ซึ่งได้ความเข้มข้นกรดแลคติก 10.11 กรัมต่อลิตร แต่มีอัตราผลผลิตกรดแลคติกต่ำกว่าสภาวะที่ไม่เติมอาหารเสริม (สภาวะที่ไม่เติมอาหารเสริมได้อัตราผลผลิตของกรดแลคติกเท่ากับ 0.21 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง ที่ระยะเวลาของการหมัก 48 ชั่วโมง) แสดงให้เห็นว่า การเติมรำข้าวทำให้ประสิทธิภาพการผลิตกรดแลคติกของแบคทีเรียลดลง จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นแหล่งไนโตรเจน ผลการทดลองภายใต้ทุกสภาวะตรวจพบกรดฟอร์มิก แสดงว่าเอนไซม์ไพรูเวทฟอร์มเมทไลเอส (pyruvate formate lyase) ทำงาน และตรวจพบกรดอะซิติกในระหว่างการหมักด้วย แสดงว่า เอนไซม์ phosphotransferase และ acetate kinase เปลี่ยน acetyl CoA เป็น acetyl phosphate และกรดอะซิติก ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบ 2,3- บิวเทนไดออลในระหว่างการหมักด้วย ซึ่งแสดงให้เห็นว่า butanediol dehydrogenase ทำงาน โดยเปลี่ยน acetoin เป็น 2,3- บิวเทนไดออล (Laopaiboon, 2001)

Product concentration (g/l)



รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ *Lc. lactis* IO-1 สร้างระหว่างการหมักไฮโดรไลเสทของชานข้าวฟ่างหวานภายใต้สภาวะการเติมแหล่งไนโตรเจนต่างๆ (No = ไม่เติมสารอาหารเสริม, YE = ยีสต์เอ็กซ์แทรกต์, DSY = กากเซลล์ยีสต์แห้ง และ RB = รำข้าว)