บทที่ 4 ผลการทดลอง และวิจารณ์

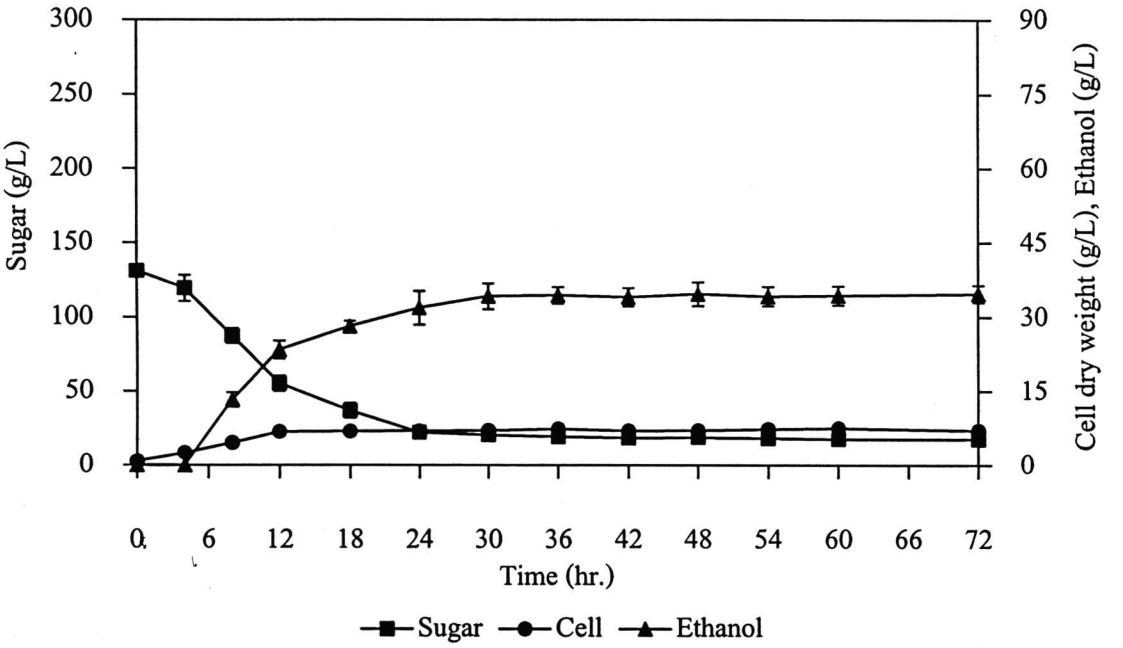
4.1 การผลิตเอทานอลโดยกระบวนการหมัก

การศึกษาจลนพลศาสตร์การผลิตเอทานอลเพื่อใช้ในการอธิบายกลไกการหมักเอทานอล ในการพัฒนากระบวนการผลิตเอทานอลให้มีประสิทธิภาพสูงสุดนั้นจำเป็นต้องควบคุมปัจจัยต่างๆ ให้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสม งานวิจัยนี้จะใช้ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตเอทานอลมากกว่าปัจจัยอื่นๆ เพื่อมุ่งเน้นศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้นต่อการหมักเอทานอล และนำข้อมูลมาใช้ในการศึกษาจลนพลศาสตร์เพื่อทำนายการผลิตเอทานอล

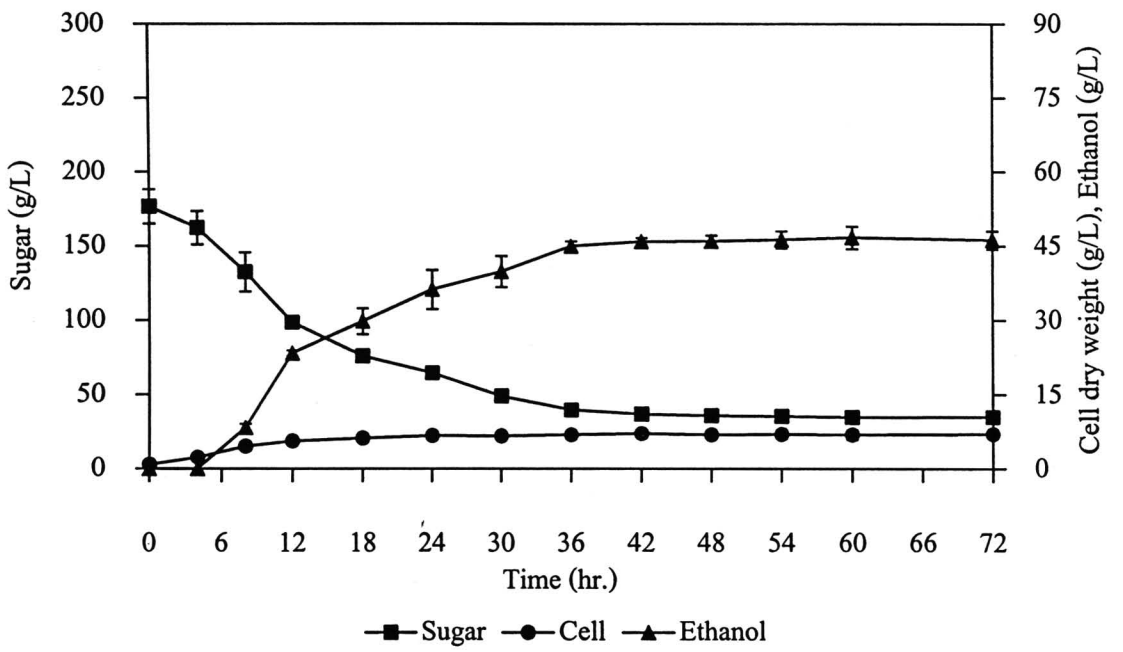
4.1.1 อิทธิพล์ของความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้นต่อการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาล

กากน้ำตาลเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้สุดท้ายจากกระบวนการแปรรูปน้ำตาลทรายจากอ้อย ซึ่งจะมีน้ำตาลรวมประมาณ 50-60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ซึ่ง 60 เปอร์เซ็นต์ของน้ำตาลรวมอยู่ในรูปของซูโครส เนื่องจากการหมักเอทานอลจะใช้ความเข้มข้นต่ำกว่านี้ ดังนั้นจึงต้องเจือจางให้มีความเข้มข้นที่เหมาะสมก่อนการนำไปใช้ งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นที่ 120, 170, 200, 230 และ 260 กรัมต่อลิตร หมักที่อุณหภูมิห้อง ค่าความเป็นกรดด่างเริ่มต้นเท่ากับ 4.5

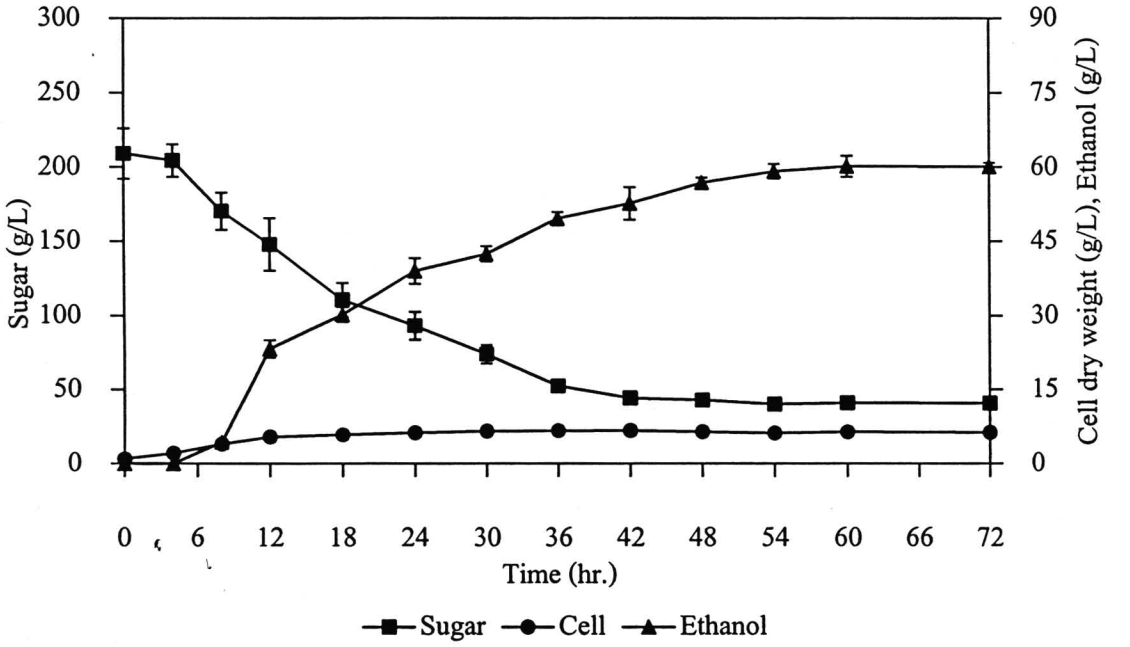
รูปที่ 4.1 แสดงผลของการหมักเอทานอลที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 120 กรัมต่อลิตร พบว่าปริมาณเอทานอลเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 0-24 ชั่วโมง และจะเพิ่มขึ้นในปริมาณน้อยหรือคงที่ตั้งแต่ 36-72 ชั่วโมง ได้ปริมาณเอทานอลสุดท้ายเท่ากับ 34.69 กรัมต่อลิตร (4.3 เปอร์เซ็นต์โดยต่อปริมาตร) ขณะที่ปริมาณน้ำตาลจะลดลงอย่างรวดเร็วในชั่วโมงการหมักที่ 0-24 และจะเริ่มคงที่ตั้งแต่ 30-72 ชั่วโมง มีปริมาณน้ำตาลที่เหลือเท่ากับ 17.59 กรัมต่อลิตร มีค่าน้ำหนักเซลล์แห้งสุดท้ายเท่ากับ 7.01 กรัมต่อลิตร เมื่อพิจารณาปริมาณน้ำตาลที่เหลือเพียง 17.59 กรัมต่อลิตร สรุปได้ว่าปริมาณน้ำตาลที่ 120 กรัมต่อลิตร มีปริมาณน้อยเกินไปสำหรับการผลิตเอทานอล จึงส่งผลให้ได้ปริมาณเอทานอลน้อยตามไปด้วย เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นเท่ากับ 170 กรัมต่อลิตรดังแสดงในรูปที่ 4.2 พบว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงของน้ำตาลนั้นมีแนวโน้มคล้ายกับการหมักเอทานอลที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 120 กรัมต่อลิตร คือ ปริมาณน้ำตาลลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 0-30 ชั่วโมง แต่จะค่อยๆ ลดลงอย่างช้าๆ ในช่วงชั่วโมงที่ 36-54 และจะคงที่ในช่วง 60-72 ชั่วโมงมีปริมาณน้ำตาลที่เหลือเท่ากับ 34.79 กรัมต่อลิตร มีค่าน้ำหนักเซลล์แห้งสุดท้ายเท่ากับ 7.00 กรัมต่อลิตร ได้ปริมาณเอทานอลสุดท้ายเท่ากับ 46.22 กรัมต่อลิตร (5.8 เปอร์เซ็นต์โดยต่อปริมาตร)



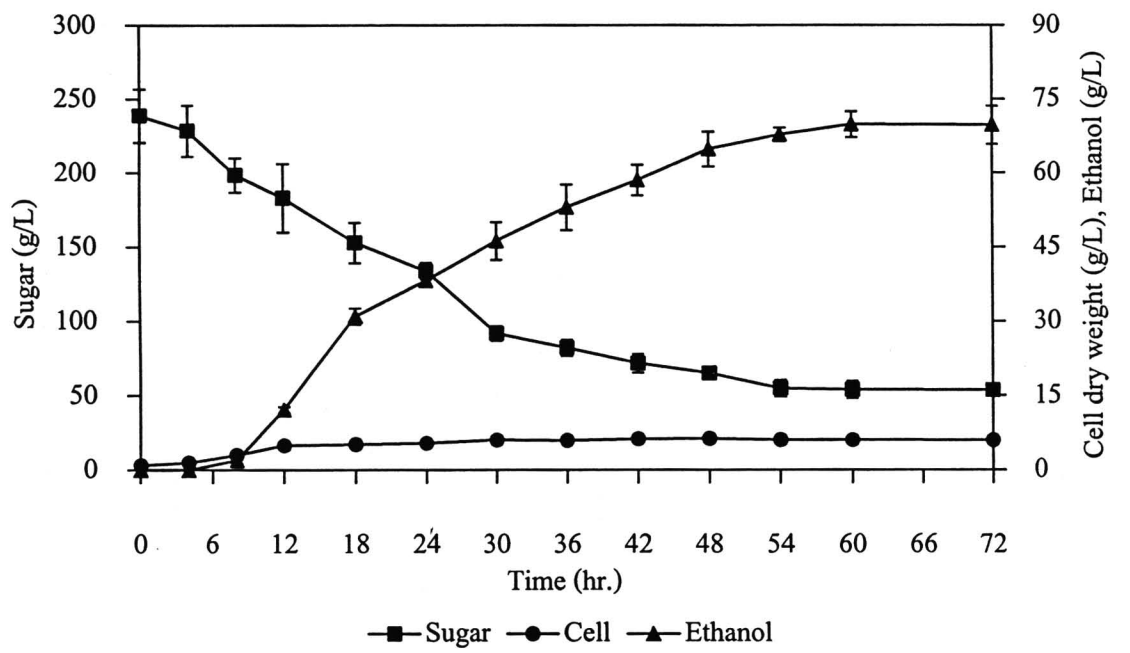
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำตาล ปริมาณเซลล์ยีสต์ และปริมาณเอทานอลที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาของการผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาลที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 120 กรัมต่อลิตร



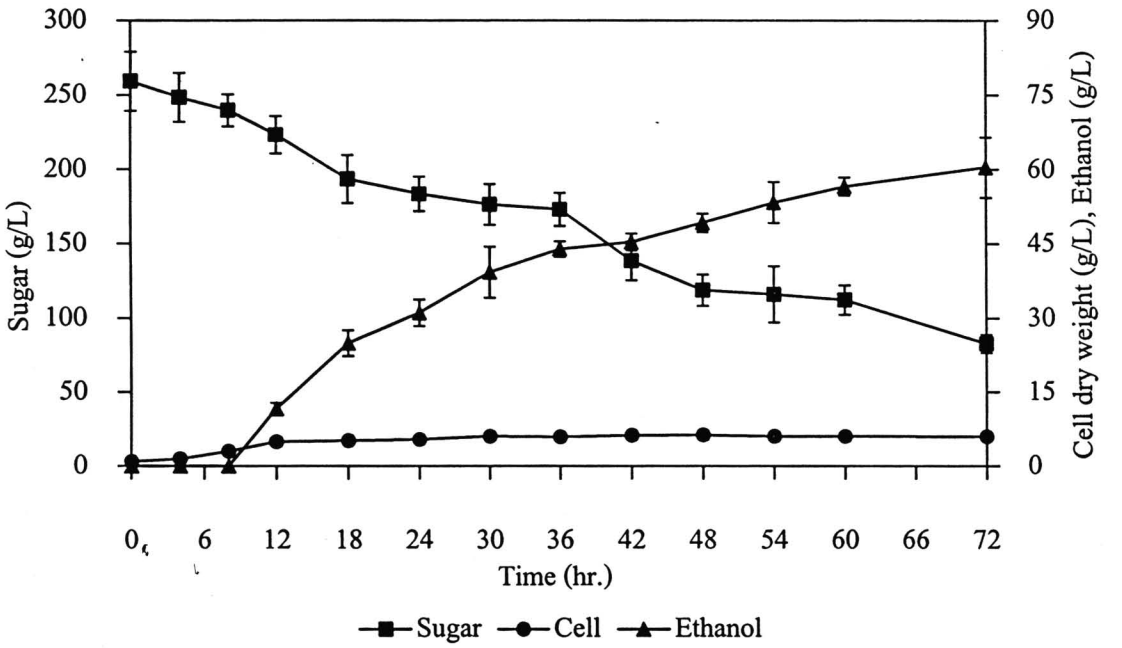
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำตาล ปริมาณเซลล์ยีสต์ และปริมาณเอทานอลที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาของการผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาลที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 170 กรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำตาล ปริมาณเซลล์ยีสต์ และปริมาณเอทานอลที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาของการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 200 กรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำตาล ปริมาณเซลล์ยีสต์ และปริมาณเอทานอลที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาของการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 230 กรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำตาล ปริมาณเซลล์ยีสต์ และปริมาณเอทานอลที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาของการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 260 กรัมต่อลิตร

หากพิจารณาปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้ ปริมาณเซลล์แห้ง และ ปริมาณน้ำตาลที่เหลือ ของการหมักเอทานอลที่น้ำตาลเริ่มต้น 120 และ 170 กรัมต่อลิตร สรุปได้ว่าที่น้ำตาลเริ่มต้น 120 และ 170 กรัมต่อลิตร มีปริมาณน้ำตาลน้อยเกินไปสำหรับใช้ในการผลิตเอทานอล จึงทำให้ปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้มีค่าน้อย ดังนั้นจึงเพิ่มปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นเป็น 200 กรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4.3 มีลักษณะการผลิตเอทานอลอย่างรวดเร็วในช่วง 4-54 ชั่วโมง จากนั้นจะเริ่มคงที่ในช่วง 60-72 ชั่วโมง สามารถหมักเอทานอลได้สูงกว่าเท่ากับ 60.06 กรัมต่อลิตร (7.6 เปอร์เซ็นต์โดยต่อปริมาตร) มีค่าน้ำหนักเซลล์แห้งสุดท้ายเท่ากับ 6.28 กรัมต่อลิตร มีปริมาณน้ำตาลที่เหลือเท่ากับ 40.68 กรัมต่อลิตร จากปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้เมื่อเปรียบเทียบที่น้ำตาลเริ่มต้น 120 และ 170 กรัมต่อลิตรพบว่ามีปริมาณเอทานอลสูงขึ้นจึงควรเพิ่มปริมาณน้ำตาลให้สูงขึ้นจาก 200 กรัมต่อลิตร

เมื่อพิจารณาผลการหมักเอทานอลที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นเท่ากับ 230 กรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4.4 มีลักษณะการผลิตเอทานอลคล้ายกับการหมักเอทานอลที่น้ำตาล 170 กรัมต่อลิตร คือ มีการผลิตเอทานอล อย่างต่อเนื่องตั้งแต่ช่วง 8-60 ชั่วโมง จึงเริ่มคงที่สามารถผลิตเอทานอลได้สุดท้ายเท่ากับ 69.72 กรัมต่อลิตร (8.8 เปอร์เซ็นต์โดยต่อปริมาตร) ได้น้ำหนักเซลล์แห้งสุดท้ายเท่ากับ 5.99 กรัมต่อลิตร เหลือปริมาณน้ำตาลสุดท้ายเท่ากับ 53.64 กรัมต่อลิตร จากผลการหมักเอทานอลทั้ง 4 ความเข้มข้นที่กล่าวมาข้างต้น (120 ถึง 200 กรัมต่อลิตร) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นจะสามารถ

ผลิตเอทานอลได้เพิ่มขึ้น เนื่องจากยีสต์ยังสามารถปรับสภาพให้เข้ากับอาหารที่มีปริมาณน้ำตาลสูงขึ้น ดังนั้นจึงเพิ่มความเข้มข้นของน้ำตาลเริ่มต้นของกากน้ำตาลเป็น 260 กรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4.5 พบว่าปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้มีค่าต่ำลง ซึ่งผลิตเอทานอลสุดท้ายได้เท่ากับ 60.45 กรัมต่อลิตร (7.6 เปอร์เซ็นต์โดยต่อปริมาตร) ได้น้ำหนักเซลล์แห้งสุดท้ายเท่ากับ 5.79 กรัมต่อลิตร เหลือปริมาณน้ำตาลเท่ากับ 82.72 กรัมต่อลิตร สาเหตุที่ปริมาณเอทานอลลดลงอาจมาจากผลของความเข้มข้นของน้ำตาลเริ่มต้น โดยจะส่งผลต่อการเจริญและการหมักเอทานอลของเซลล์ลดลง พบว่าที่น้ำตาลเริ่มต้น 260 กรัมต่อลิตรมีปริมาณเอทานอลที่เซลล์ผลิตขึ้นน้อยมาก เนื่องจากการเจริญเติบโตลดลงโดยสาเหตุดังกล่าวอาจเกิดจากเซลล์เกิดการพลาสโมไลซิสจากความเข้มข้นของน้ำตาลเริ่มต้นที่สูง [43, 44]

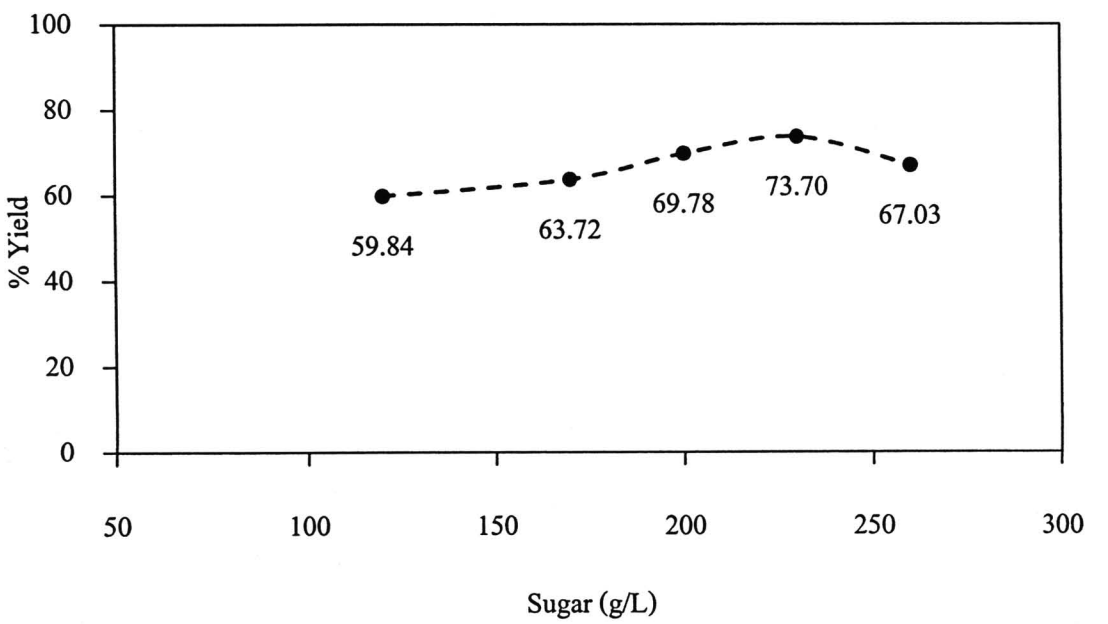
เมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นของกากน้ำตาลที่มีต่อการผลิตเอทานอล การเจริญเติบโตของเซลล์ และการใช้น้ำตาลของเซลล์ จึงนำค่าเอทานอลที่ผลิตได้ น้ำหนักเซลล์แห้ง และปริมาณน้ำตาลที่เหลือ มาพิจารณาดังผลการเปรียบเทียบในตารางที่ 4.1 พบว่าที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 230 กรัมต่อลิตรสามารถผลิตเอทานอลได้สูงกว่า เมื่อหมักที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 120, 170, 200 และ 260 กรัมต่อลิตร สาเหตุเกิดจากที่น้ำตาล 260 กรัมต่อลิตร มีผลยับยั้งของน้ำตาลต่อยีสต์ ในขณะที่น้ำหนักเซลล์แห้งสุดท้ายเมื่อหมักที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 120 และ 170 กรัมต่อลิตรมีค่ามากกว่า 200, 230 และ 260 กรัมต่อลิตร เนื่องมาจากที่ปริมาณน้ำตาลต่ำๆ มีสภาพเหมาะแก่การเจริญเติบโตของยีสต์ จึงทำให้มีปริมาณเซลล์สูง ส่วนปริมาณน้ำตาลที่เหลือเมื่อหมักกากน้ำตาลที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 260 กรัมต่อลิตรมีค่ามากกว่า 120, 170, 200 และ 230 กรัมต่อลิตร เนื่องจากกากน้ำตาลประกอบด้วยน้ำตาลหลายชนิด มีทั้งแบบที่ยีสต์สามารถใช้ได้และไม่ได้ ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำตาลสูงขึ้นจะส่งผลให้มีปริมาณน้ำตาลที่เหลือสูงตามไปด้วย

จากการคำนวณเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาลกับปริมาณความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้น ด้วยสมการที่ 4.1 ผลของประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลได้แสดงในรูปที่ 4.6 พบว่าประสิทธิภาพในการผลิตเอทานอลเมื่อหมักในกากน้ำตาลที่มีน้ำตาลเริ่มต้น 230 กรัมต่อลิตร ให้ประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลสูงสุดเท่ากับ 73.70 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากที่น้ำตาลค่าอื่นๆ ยีสต์ใช้น้ำตาลเพื่อการเจริญเติบโตจึงส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพมีค่าไม่สูง

$$\% \text{ Yield Theory} = \frac{\Delta P}{-\Delta S} \times \frac{100}{51.11} \qquad (4.1)$$

ารางที่ 4.1 ปริมาณเอทานอลที่หมักได้ น้ำหนักเซลล์แห้ง และปริมาณน้ำตาลที่เหลือของการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นต่างๆ

น้ำตาลเริ่มต้น (กรัมต่อลิตร)	เอทานอล (กรัมต่อลิตร)	น้ำหนักเซลล์แห้ง (กรัมต่อลิตร)	น้ำตาลที่เหลือ (กรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพการผลิตเอทานอล (เปอร์เซ็นต์)
120	34.69	7.01	17.59	59.84
170	46.22	7.00	34.79	63.72
200	60.06	6.28	40.68	69.78
230	69.72	5.99	53.64	73.70
260	60.45	5.79	82.72	67.03



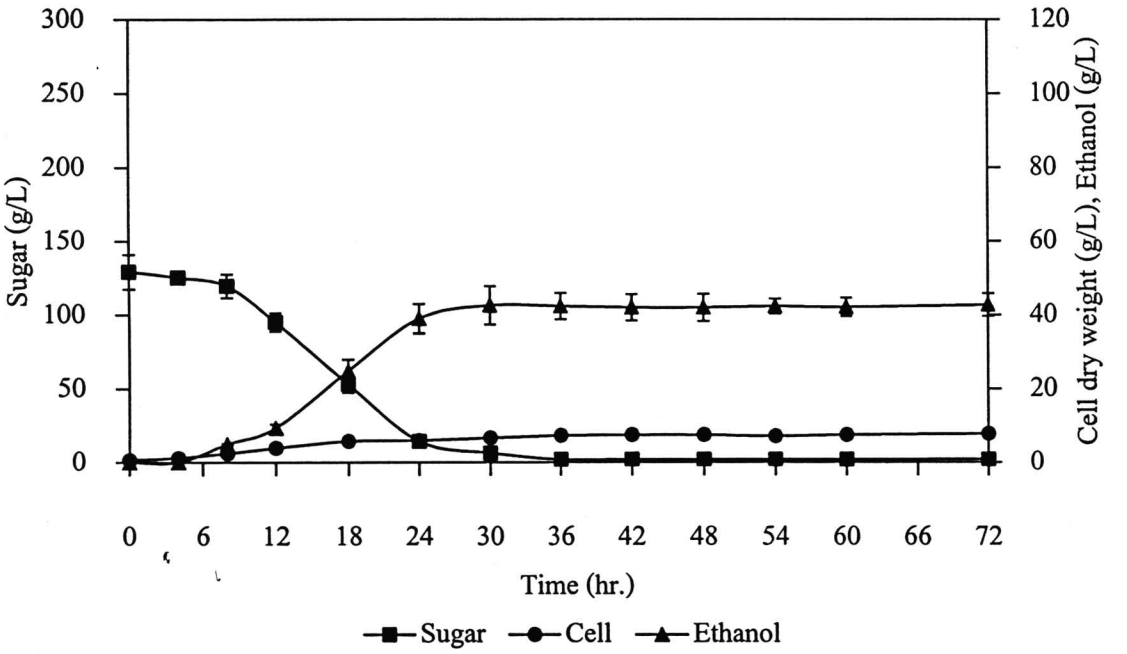
รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลกับ ความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้นที่ 120, 170, 200, 230 และ 260 กรัมต่อลิตร

4.1.2 อิทธิพลของความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้นที่มีผลต่อการผลิตเอทานอลจากน้ำอ้อย

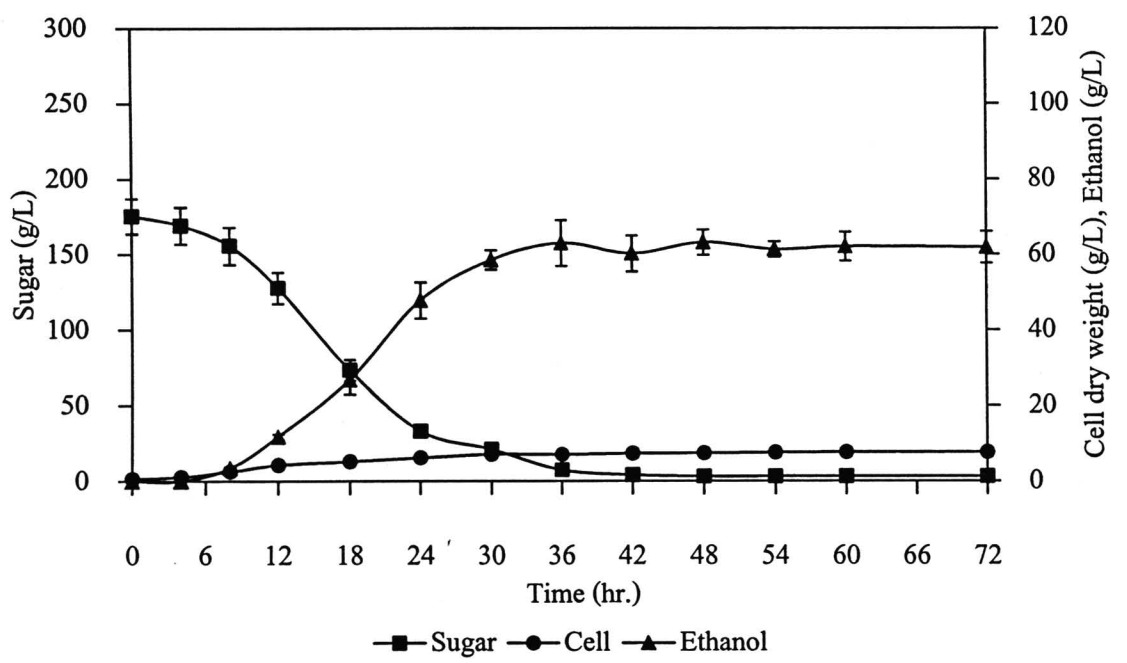
องค์ประกอบหลักของน้ำอ้อย ได้แก่ น้ำตาลซูโครส 70-88 เปอร์เซ็นต์ และน้ำ น้ำตาลชนิดนี้ยีสต์สามารถใช้เพื่อผลิตเอทานอลได้ ดังนั้นจึงสามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเอทานอล แต่ก่อนใช้งานจำเป็นต้องปรับความเข้มข้นที่เหมาะสมก่อนการนำไปใช้ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการหมักเอทานอลจากน้ำอ้อยที่ความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้นเท่ากับ 120, 170, 200, 230 และ 260 กรัมต่อลิตร พบว่าผลการหมักเอทานอลเมื่อใช้น้ำอ้อยที่มีปริมาณน้ำตาล 120 กรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่ามีการผลิตเอทานอลอย่างรวดเร็วในช่วง 8-24 ชั่วโมง และจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยระหว่างช่วงเวลา 30-72 ชั่วโมง มีปริมาณน้ำตาลที่เหลือเท่ากับ 2.09 กรัมต่อลิตร มีน้ำหนักเซลล์แห้งสุดท้ายเท่ากับ 7.80 กรัมต่อลิตร สามารถผลิตเอทานอลได้สุดท้ายเท่ากับ 42.80 กรัมต่อลิตร (5.4 เปอร์เซ็นต์โดยต่อปริมาตร) สาเหตุที่ได้ปริมาณเอทานอลต่ำ เนื่องมาจากปริมาณน้ำตาลมีน้อยเกินไป สามารถสังเกตได้จากปริมาณน้ำตาลหมดตั้งแต่ชั่วโมงที่ 36 ของการหมัก

เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของน้ำอ้อยให้มีปริมาณน้ำตาลเท่ากับ 170 กรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4.8 พบว่าอัตราการผลิตเอทานอลมีแนวโน้มคล้ายกับที่ปริมาณน้ำตาล 120 กรัมต่อลิตร คือ อัตราการผลิตเอทานอลมีการเพิ่มอย่างรวดเร็วในช่วง 8-30 ชั่วโมง หลังจากนั้นจะเพิ่มขึ้นน้อยมากหรือเกือบคงที่ในช่วง 36-72 ชั่วโมง สามารถผลิตเอทานอลได้เท่ากับ 61.94 กรัมต่อลิตร (7.8 เปอร์เซ็นต์โดยต่อปริมาตร) มีปริมาณน้ำตาลที่เหลือเท่ากับ 3.18 กรัมต่อลิตร มีน้ำหนักเซลล์แห้งสุดท้ายเท่ากับ 7.69 กรัมต่อลิตร และหากพิจารณาปริมาณน้ำตาลที่หมดตั้งแต่ชั่วโมงที่ 48 สามารถสรุปได้ว่าเพราะปริมาณน้ำตาลที่น้อยเกินไปจึงส่งผลให้ยีสต์ผลิตเอทานอลได้ปริมาณน้อย

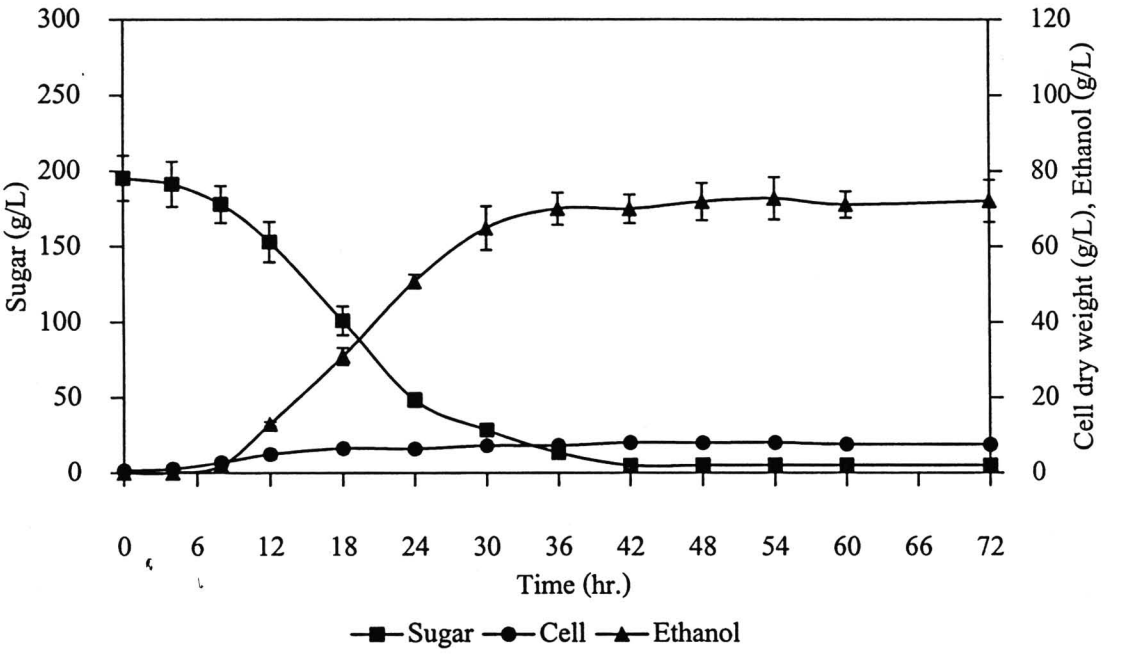
จากรูปที่ 4.9 แสดงผลการผลิตเอทานอลจากน้ำอ้อยที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 200 กรัมต่อลิตร มีแนวโน้มการลดลงของปริมาณน้ำตาลอย่างรวดเร็วในช่วง 0-36 ชั่วโมง หลังจากนั้นมีการลดลงอย่างน้อยมากในช่วง 42-72 ชั่วโมง ได้เอทานอลสูงสุดเท่ากับ 72.12 กรัมต่อลิตร (9.1 เปอร์เซ็นต์โดยต่อปริมาตร) มีน้ำหนักเซลล์แห้งสุดท้ายเท่ากับ 7.51 กรัมต่อลิตรมีปริมาณน้ำตาลที่เหลือเท่ากับ 5.07 กรัมต่อลิตร เมื่อพิจารณาปริมาณเอทานอลที่ต่ำ สาเหตุเนื่องมาจากปริมาณน้ำตาลที่ต่ำเกินไปเช่นเดียวกับที่น้ำตาล 120 และ 170 กรัมต่อลิตร ขณะที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 230 กรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4.10 มีการผลิตเอทานอลเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วง 8-54 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงเริ่มคงที่ในช่วง 54-72 ชั่วโมง ผลิตเอทานอลได้เท่ากับ 86.31 กรัมต่อลิตร (10.9 เปอร์เซ็นต์โดยต่อปริมาตร) มีปริมาณน้ำตาลที่เหลือเท่ากับ 10.28 กรัมต่อลิตร และมีน้ำหนักเซลล์แห้งสุดท้ายเท่ากับ 7.82 กรัมต่อลิตร หากพิจารณาร่วมกับที่น้ำตาลเริ่มต้น 120, 170 และ 200 กรัมต่อลิตร เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำตาลจะมีผลทำให้สามารถผลิตเอทานอลได้เพิ่มขึ้น



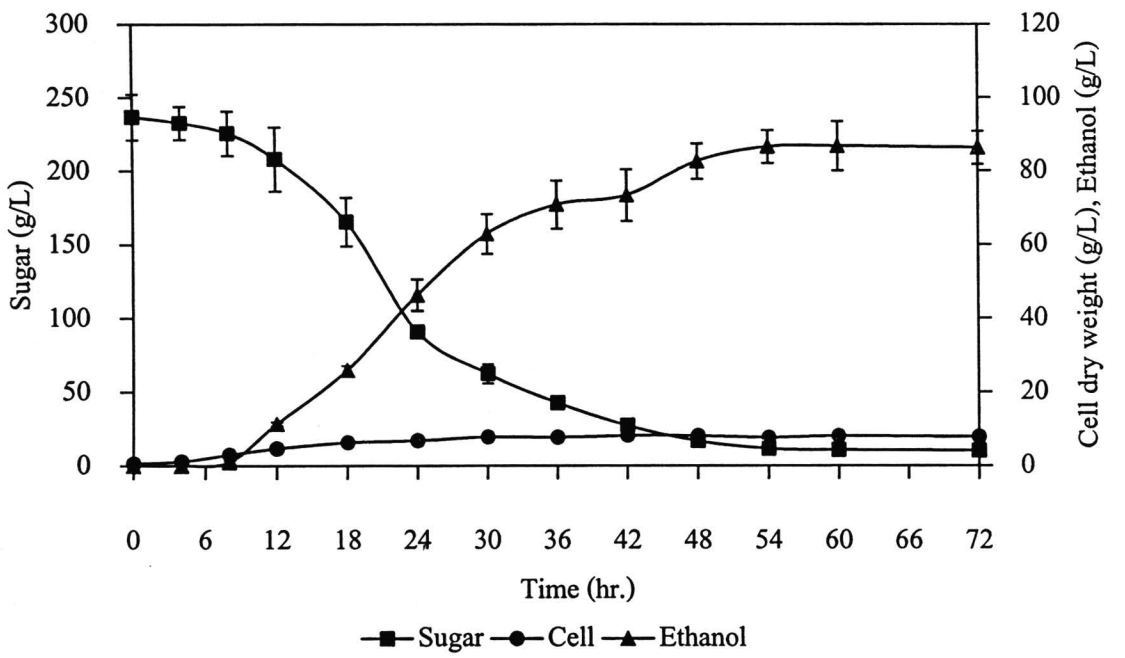
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำตาล ปริมาณเซลล์ยีสต์ และปริมาณเอทานอลที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาของการหมักเอทานอลจากน้ำอ้อยที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 120 กรัมต่อลิตร



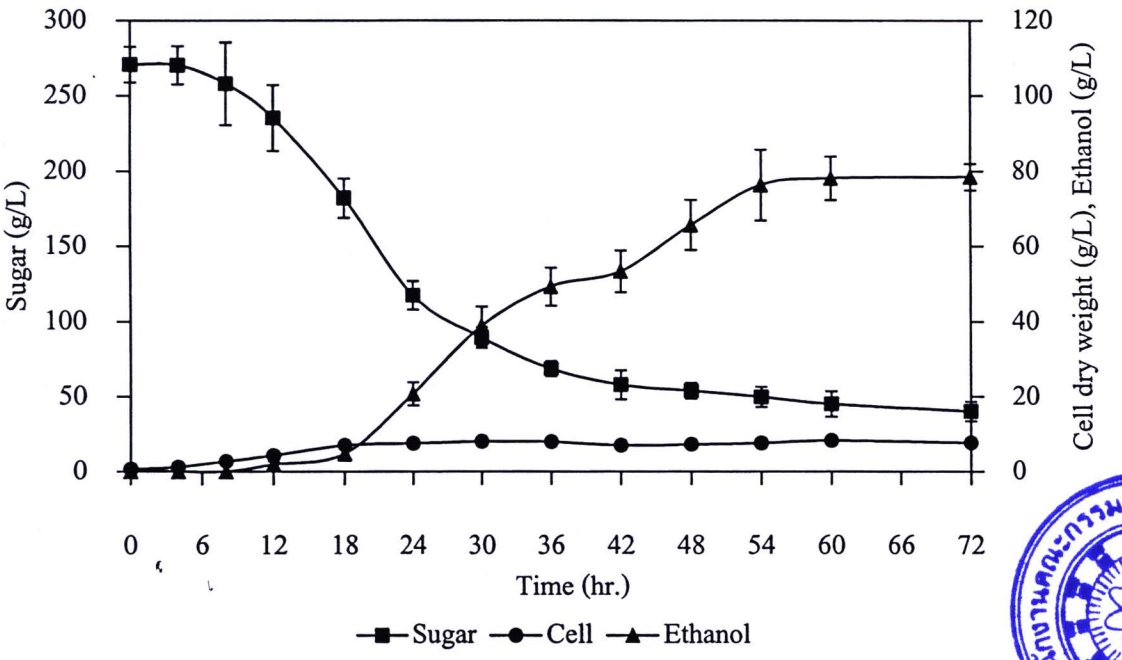
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำตาล ปริมาณเซลล์ยีสต์ และปริมาณเอทานอลที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาของการหมักเอทานอลจากน้ำอ้อยที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 170 กรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำตาล ปริมาณเซลล์ยีสต์ และปริมาณเอทานอลที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาของการหมักเอทานอลจากน้ำอ้อยที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 200 กรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำตาล ปริมาณเซลล์ยีสต์ และปริมาณเอทานอลที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาของการหมักเอทานอลจากน้ำอ้อยที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 230 กรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำตาล ปริมาณเซลล์ยีสต์ และปริมาณเอทานอลที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาของการหมักเอทานอลจากน้ำอ้อยที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 260 กรัมต่อลิตร

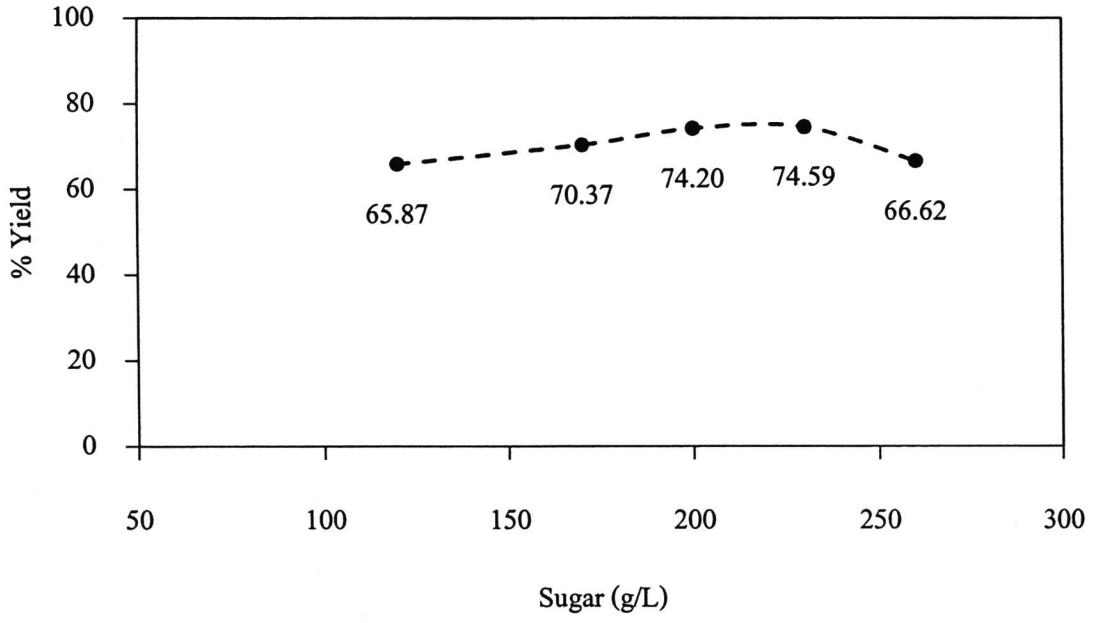
สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

แต่เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นเท่ากับ 260 กรัมต่อลิตร เมื่อสิ้นสุดการหมักที่ 72 ชั่วโมง สามารถผลิตเอทานอลได้ลดลงเท่ากับ 78.49 กรัมต่อลิตร (9.9 เปอร์เซ็นต์โดยต่อปริมาตร) มีน้ำตาลเหลืออยู่ในปริมาณมากเท่ากับ 40.22 กรัมต่อลิตร และมีน้ำหนักเซลล์แห้งสุดท้ายเท่ากับ 7.70 กรัมต่อลิตร สาเหตุที่มีปริมาณเอทานอลลดลง อาจเนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลสูงมีผลยับยั้งการเจริญของยีสต์ ส่งผลให้การผลิตเอทานอลลดลง [3] สำหรับปริมาณความเข้มข้นของน้ำตาลที่ยับยั้งการหมักขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะของสายพันธุ์ของยีสต์ โดยผลการยับยั้งเนื่องมาจากเอทานอลความเข้มข้นสูงมีมากกว่าผลจากความเข้มข้นน้ำตาลสูง และผลการยับยั้งจากน้ำตาลและเอทานอลที่ความเข้มข้นสูงเป็นปัจจัยร่วมที่ส่งเสริมให้เกิดการยับยั้งมากขึ้น [26]

จากผลการทดลองพบว่าอิทธิพลของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นของน้ำอ้อยมีผลต่อการผลิตเอทานอล การเจริญของเซลล์ และการใช้น้ำตาลของเซลล์ ดังนั้นจึงนำค่าเอทานอลที่ผลิตได้ น้ำหนักเซลล์แห้ง และปริมาณน้ำตาลที่เหลือ มาเปรียบเทียบดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 230 กรัมต่อลิตร สามารถผลิตเอทานอลได้มากกว่าเมื่อหมักในน้ำอ้อยที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 120, 170, 200 และ 260 กรัมต่อลิตร ในขณะที่น้ำหนักเซลล์แห้งสุดท้ายเมื่อหมักที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 120 และ 230 กรัมต่อลิตร มีค่ามากกว่า 170, 200 และ 260 กรัมต่อลิตร และปริมาณน้ำตาลที่เหลือเมื่อหมักกากน้ำตาลที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 260 กรัมต่อลิตร มีค่ามากกว่า 120, 170, 200 และ 230 กรัมต่อลิตร

ตารางที่ 4.2 ปริมาณเอทานอลสูงสุด น้ำหนักเซลล์แห้ง และปริมาณน้ำตาลที่เหลือของการหมักเอทานอลจากน้ำอ้อยที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นต่างๆ

น้ำตาลเริ่มต้น (กรัมต่อลิตร)	เอทานอล (กรัมต่อลิตร)	น้ำหนักเซลล์แห้ง (กรัมต่อลิตร)	น้ำตาลที่เหลือ (กรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพการผลิตเอทานอล (เปอร์เซ็นต์)
120	42.80	7.80	2.09	65.87
170	61.94	7.69	3.18	70.37
200	72.12	7.51	5.07	74.20
230	86.31	7.82	10.28	74.59
260	78.49	7.70	40.22	66.62

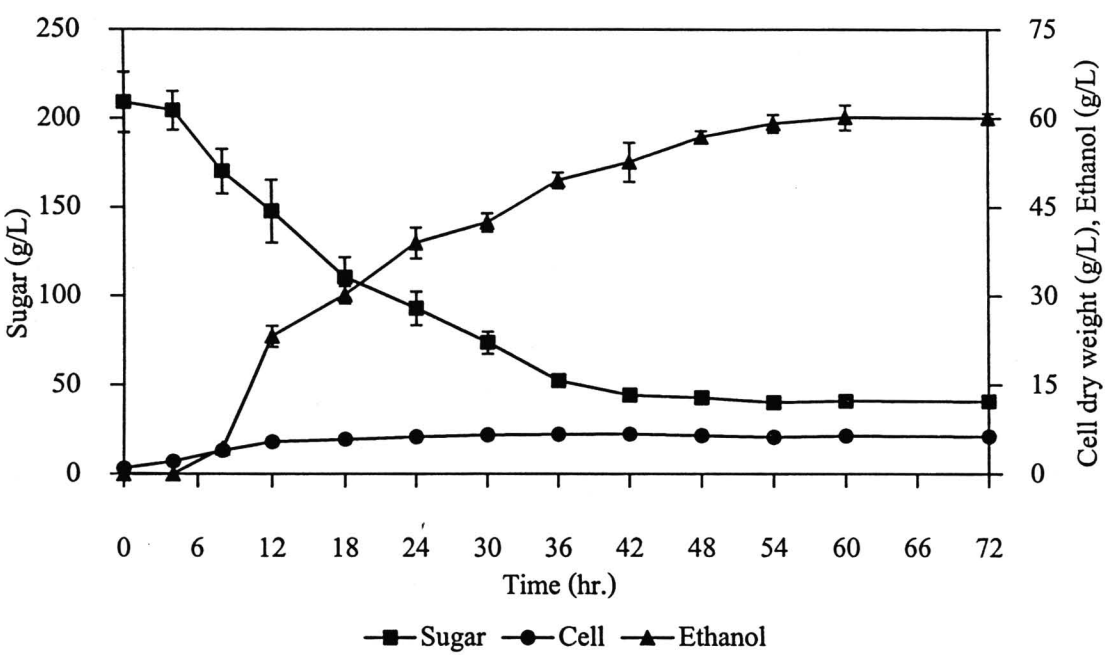


รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหมักเอทานอลจากน้ำอ้อยกับ ความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้นที่ 120, 170, 200, 230 และ 260 กรัมต่อลิตร

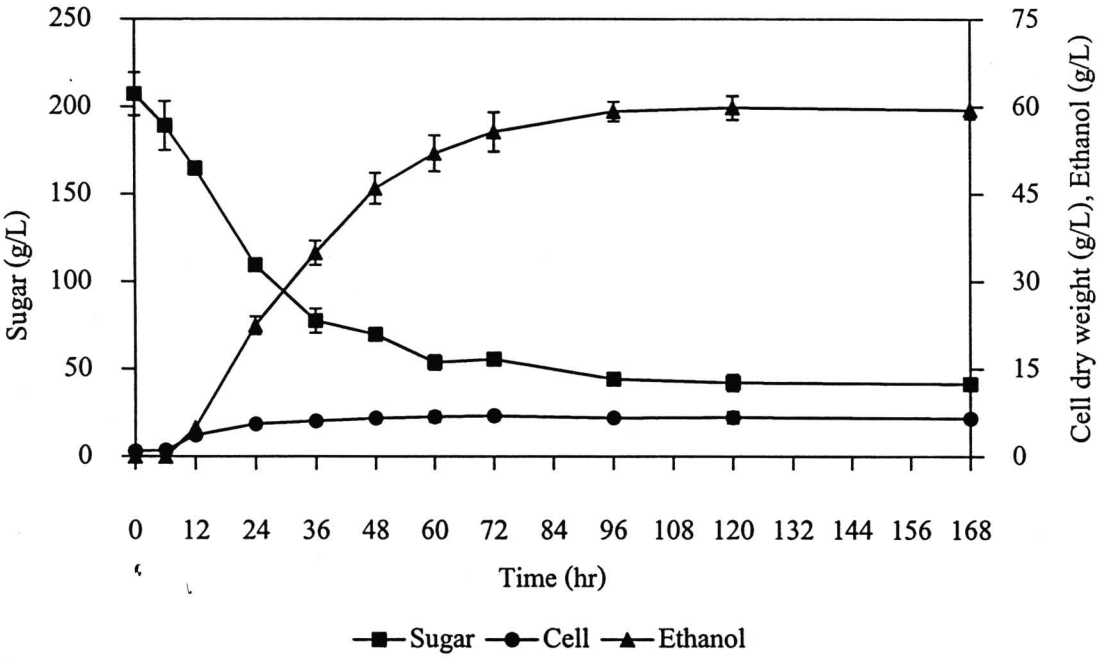
เมื่อคำนวณประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลจากน้ำอ้อยกับปริมาณความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้น ด้วยสมการที่ 4.1 พบว่าประสิทธิภาพในการผลิตเอทานอลเมื่อหมักในน้ำอ้อยที่มีน้ำตาลเริ่มต้น 230 กรัมต่อลิตร ให้ประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลเท่ากับ 74.59 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่ามากกว่าที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 120, 170, 200 และ 260 กรัมต่อลิตร ที่มีประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลเท่ากับ 65.87, 70.37, 74.20 และ 66.62 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.12 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างที่น้ำตาลเริ่มต้น 230 และ 260 กรัมต่อลิตร ค่าประสิทธิภาพมีค่าลดลง เพราะน้ำตาลถูกใช้ในการปรับตัวให้เข้ากับสภาวะที่มีน้ำตาลสูง จึงส่งผลให้มีค่าประสิทธิภาพในการผลิตเอทานอลลดลง

4.2 การหมักเอทานอลโดยการนำน้ำกากส่ามาเจือจางกากน้ำตาล

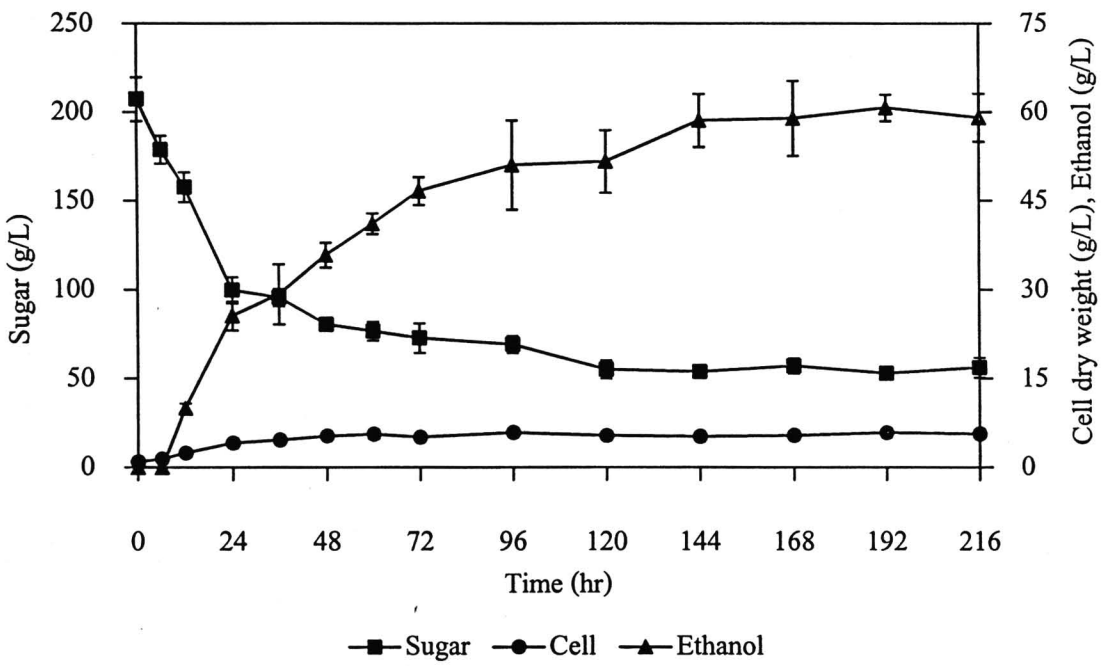
น้ำกากส่า (Slop) เป็นของเสียจากกระบวนการผลิตเอทานอลซึ่งได้มาจากการกลั่นเอทานอลออกไปแล้ว แต่น้ำกากส่ายังมีปริมาณน้ำตาลที่เหลืออยู่เป็นจำนวนหนึ่ง อีกทั้งยังมีสารอาหารจากการหมักของยีสต์ หากนำกลับมาใช้ใหม่จะเป็นการลดปริมาณเกลือแร่ และปริมาณน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการหมัก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาวิธีการนำน้ำกากส่ากลับมาใช้ใหม่ (น้ำกากส่าเป็นแบบที่แยกเอายีสต์ออกแล้ว) โดยนำมาใช้แทนน้ำที่จะนำไปเจือจางกากน้ำตาลในปริมาณ 0, 10, 30, 50, 70 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ใช้กระบวนการหมักแบบ batch ทำการหมักที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส มีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 200 กรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรดด่างเริ่มต้นเท่ากัน 4.5



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำตาล ปริมาณเซลล์ยีสต์ และปริมาณเอทานอลที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาของการหมักเอทานอลโดยใช้น้ำกากส่า 0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำตาล ปริมาณเซลล์ยีสต์ และปริมาณเอทานอลที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาของการหมักเอทานอลโดยใช้น้ำกากส่า 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร



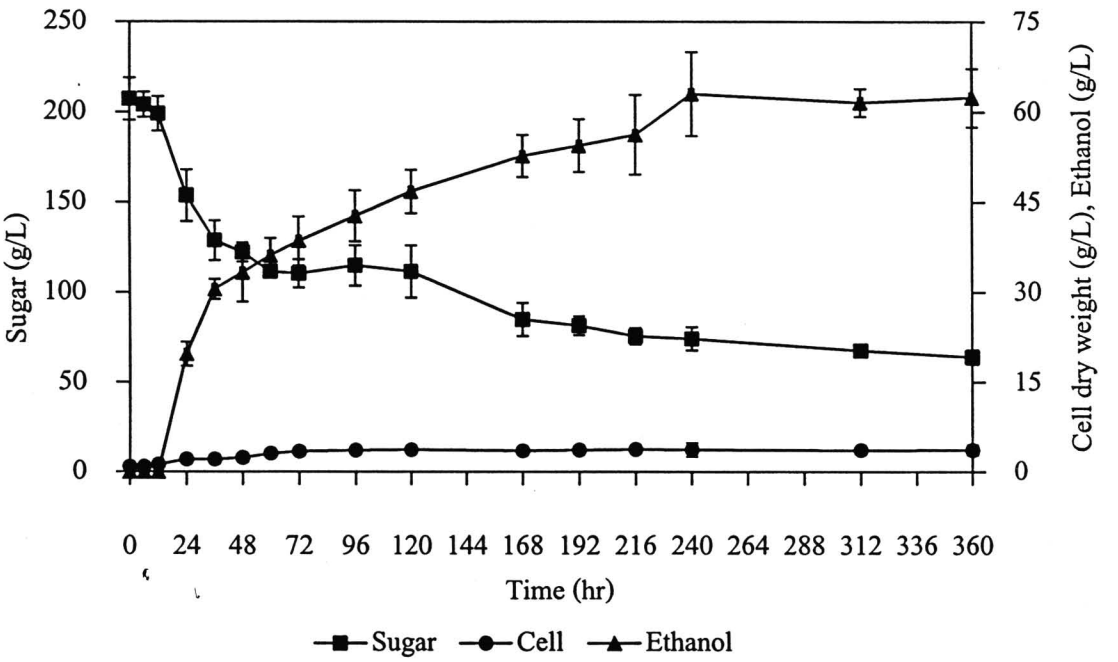
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำตาล ปริมาณเซลล์ยีสต์ และปริมาณเอทานอลที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาของการหมักเอทานอลโดยใช้น้ำกากส่า 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

จากรูปที่ 4.13 เป็นผลการทดลองการศึกษาการผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาลที่น้ำตาลเริ่มต้น 200 กรัมต่อลิตร ซึ่งถือเป็นการหมักเอทานอลที่มีการผสมน้ำกากส่าปริมาณ 0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรหรือไม่ได้ผสมน้ำกากส่าเลย ดังแสดงผลไว้ในหัวข้อ 4.1.1 การผลิตเอทานอลที่ผสมน้ำกากส่า 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่าเมื่อมีการผสมน้ำกากส่าทำให้อัตราการผลิตเอทานอลช้ากว่าที่ผสมน้ำกากส่า 0 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 คือ มีอัตราการผลิตเอทานอลอย่างต่อเนื่องในช่วง 12-96 ชั่วโมง หลังจากนั้นจะมีการผลิตเอทานอลเพียงเล็กน้อย หรือ คงที่ในช่วง 96-120 ชั่วโมง สามารถหมักเอทานอลได้ 59.44 กรัมต่อลิตร (7.5 เปอร์เซ็นต์โดยต่อปริมาตร) มีปริมาณน้ำหนักเซลล์แห้งสุดท้ายเท่ากับ 6.69 กรัมต่อลิตร มีปริมาณน้ำตาลที่เหลือเท่ากับ 41.44 กรัมต่อลิตร

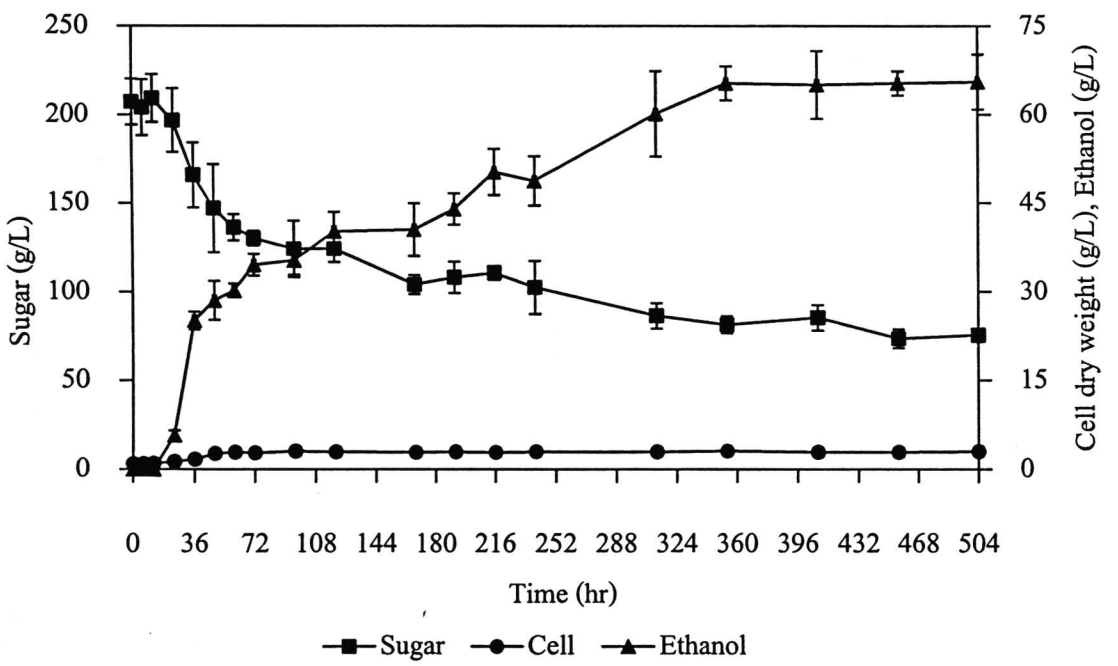
เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำกากส่าเป็น 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ดังแสดงในรูปที่ 4.15 มีการผลิตเอทานอลอย่างต่อเนื่องในช่วง 8-144 ชั่วโมง ได้เอทานอลสูงสุด 59.05 กรัมต่อลิตร (7.4 เปอร์เซ็นต์โดยต่อปริมาตร) มีปริมาณน้ำหนักเซลล์แห้งสุดท้ายเท่ากับ 5.62 กรัมต่อลิตร มีปริมาณน้ำตาลที่เหลือเท่ากับ 56.19 กรัมต่อลิตร จากผลการทดลองที่มีการผสมน้ำกากส่า 0-30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่าสามารถผลิตเอทานอลได้ปริมาณไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งสามารถประหยัดน้ำได้ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากการนำน้ำกากส่าเพื่อมาเจือจางกากน้ำตาล

เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำกากส่าเป็น 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่ามีอัตราการผลิตเอทานอลอย่างต่อเนื่องในช่วง 12-216 ชั่วโมง หลังจากนั้นจะมีการผลิตเอทานอลเพียงเล็กน้อย สามารถหมักเอทานอลได้เท่ากับ 62.40 กรัมต่อลิตร (7.9 เปอร์เซ็นต์โดยต่อปริมาตร) ดังแสดงในรูปที่ 4.16 มีปริมาณน้ำหนักเซลล์แห้งสุดท้ายเท่ากับ 3.67 กรัมต่อลิตร มีปริมาณน้ำตาลที่เหลือเท่ากับ 64.03 กรัมต่อลิตร หากพิจารณาปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้เทียบกับที่ปริมาณน้ำกากส่า 30 เปอร์เซ็นต์ สามารถผลิตเอทานอลได้เพิ่มขึ้น อีกทั้งยังเป็นการลดปริมาณน้ำเสียได้ถึง 50 เปอร์เซ็นต์

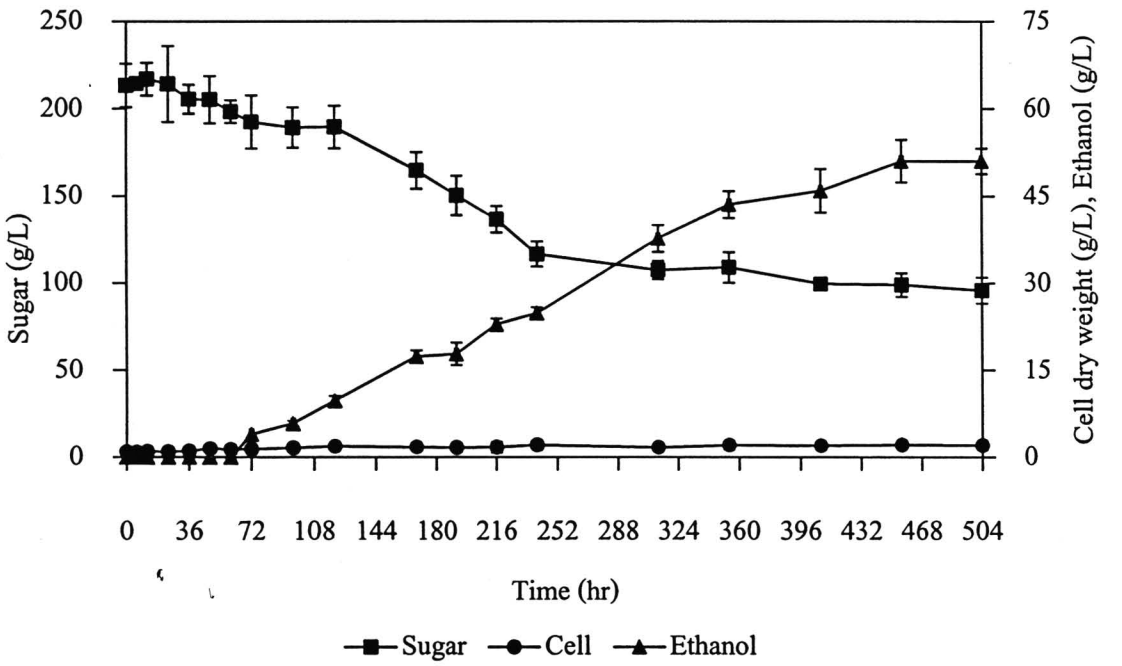
เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำกากส่าเป็น 70 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่ามีการเริ่มการผลิตเอทานอลช้ากว่าที่ปริมาณน้ำกากส่าเป็น 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร คือ มีอัตราการผลิตเอทานอลอย่างต่อเนื่องในช่วง 24-360 ชั่วโมง หลังจากนั้นจะมีการผลิตเอทานอลเพียงเล็กน้อย ดังผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.17 สามารถหมักเอทานอลได้เท่ากับ 65.53 กรัมต่อลิตร (8.3 เปอร์เซ็นต์โดยต่อปริมาตร) มีปริมาณน้ำหนักเซลล์แห้งสุดท้ายเท่ากับ 2.96 กรัมต่อลิตร มีปริมาณน้ำตาลที่เหลือเท่ากับ 75.57 กรัมต่อลิตร จากผลการทดลองที่น้ำกากส่า 70 เปอร์เซ็นต์ สามารถผลิตเอทานอลได้เพิ่มมากขึ้น แต่ใช้เวลาในการหมักมากขึ้น เนื่องมาจากในน้ำกากส่ามีสารเกลือแร่อื่นๆ ปะปนมาด้วยจึงทำให้ยีสต์ต้องการเวลาในการปรับตัวมากขึ้น



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำตาล ปริมาณเซลล์ยีสต์ และปริมาณเอทานอลที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาของการหมักเอทานอลโดยใช้น้ำกากส่า 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำตาล ปริมาณเซลล์ยีสต์ และปริมาณเอทานอลที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาของการหมักเอทานอลโดยใช้น้ำกากส่า 70 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร



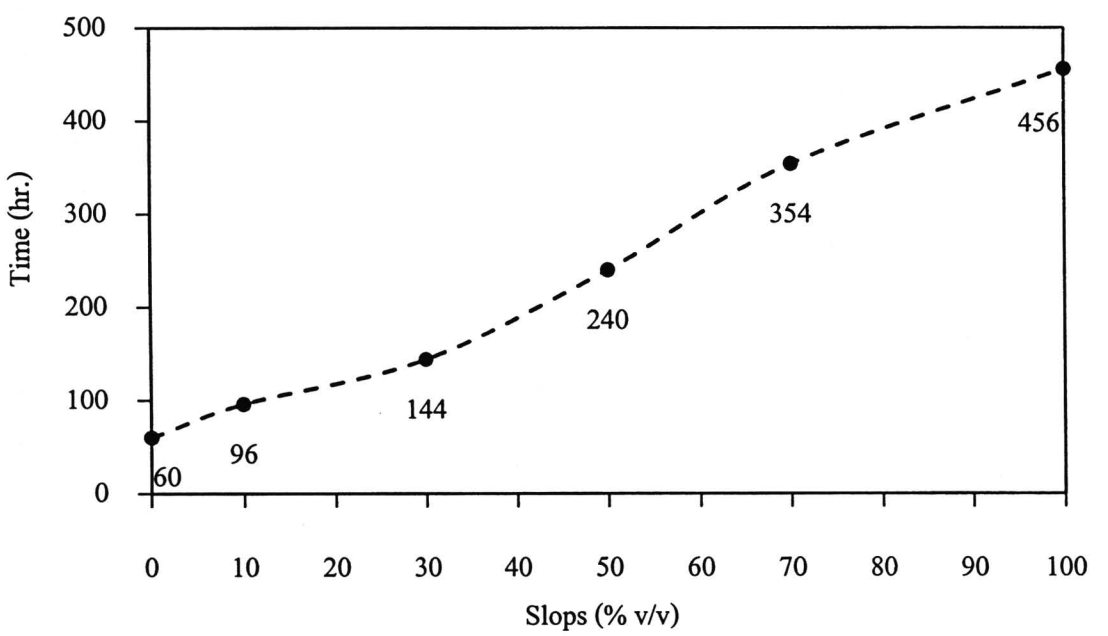
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำตาล ปริมาณเซลล์ยีสต์ และปริมาณเอทานอลที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาของการหมักเอทานอลโดยใช้น้ำกากส่า 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

จากผลการทดลองที่มีการผสมน้ำกากส่า 70 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ยังพบว่าสามารถผลิตเอทานอลได้มากกว่าที่มีการผสมน้ำกากส่า 0-50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จึงทำการเพิ่มปริมาณน้ำกากส่าเป็น 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ดังผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.18 พบว่ามีอัตราการใช้น้ำตาลช้ามาก หรือแทบคงที่ในช่วง 24 ชั่วโมงแรกของการหมักหลังจากนั้นจะมีการลดลงของน้ำตาลอย่างช้าๆ ในช่วง 24-456 ชั่วโมง และคงที่ในช่วง 456-504 ชั่วโมง เมื่อพิจารณาปริมาณการผลิตเอทานอลพบว่าไม่มีการผลิตเอทานอลเลยในช่วง 0-72 ชั่วโมง และจะเริ่มผลิตเอทานอลอย่างช้าๆในช่วง 72-456 ชั่วโมง และสิ้นสุดการหมักที่ 504 ชั่วโมง สามารถหมักเอทานอลได้เท่ากับ 51.05 กรัมต่อลิตร (6.4 เปอร์เซ็นต์โดยต่อปริมาตร) มีปริมาณน้ำหนักเซลล์แห้งสุดท้ายเท่ากับ 2.03 กรัมต่อลิตร มีปริมาณน้ำตาลที่เหลือเท่ากับ 96.01 กรัมต่อลิตร เมื่อพิจารณาปริมาณเซลล์มีน้อยมาก จึงเป็นผลให้ผลิตเอทานอลได้น้อย สาเหตุมาจากผลยับยั้งของสารผลพลอยได้ของยีสต์ที่ปนมากับน้ำกากส่า

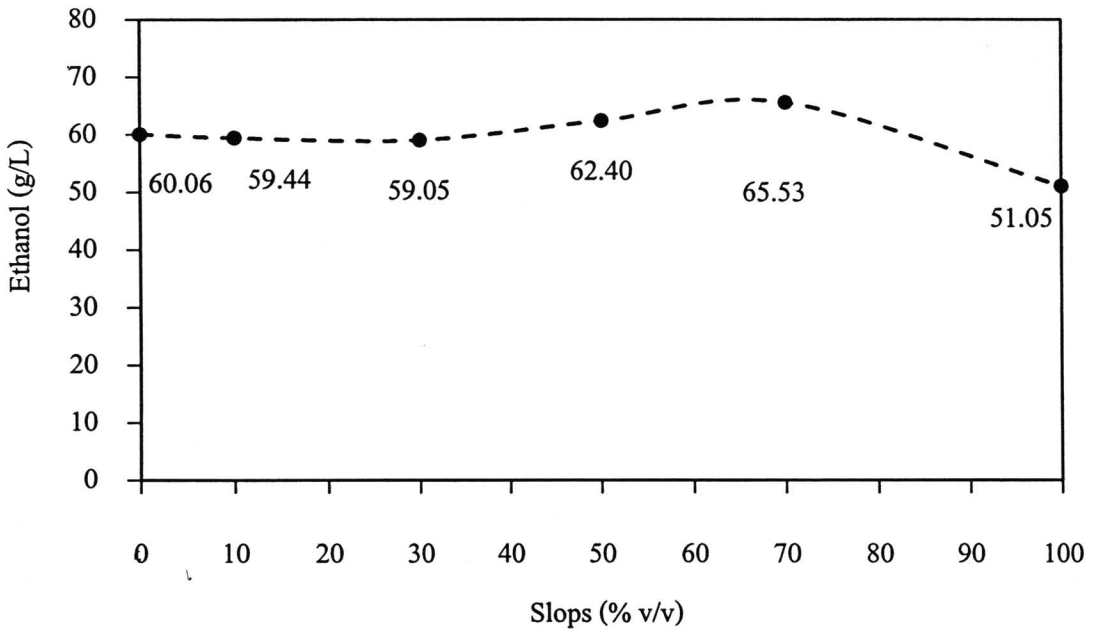
จากผลการทดลองพบว่าอิทธิพลของปริมาณน้ำกากส่ามีผลต่อการผลิตเอทานอล การเจริญเติบโตของยีสต์ และการใช้น้ำตาลของเซลล์ ดังนั้นจึงนำค่าเอทานอลที่ผลิตได้ น้ำหนักเซลล์แห้ง ระยะเวลาในการหมัก และปริมาณน้ำตาลที่เหลือ มาเปรียบเทียบรายละเอียดดังตารางที่ 4.3 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำกากส่า จะสามารถผลิตเอทานอลได้เพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากผลยับยั้งของสารผลพลอยได้ของยีสต์จึงส่งผลให้ใช้ระยะเวลาในการหมักมากขึ้นตามไปด้วย

ตารางที่ 4.3 ปริมาณเอทานอลสูงสุด น้ำหนักเซลล์แห้ง และปริมาณน้ำตาลที่เหลือของการหมักเอทานอลที่ผสมน้ำกากส่าในปริมาณต่างๆ

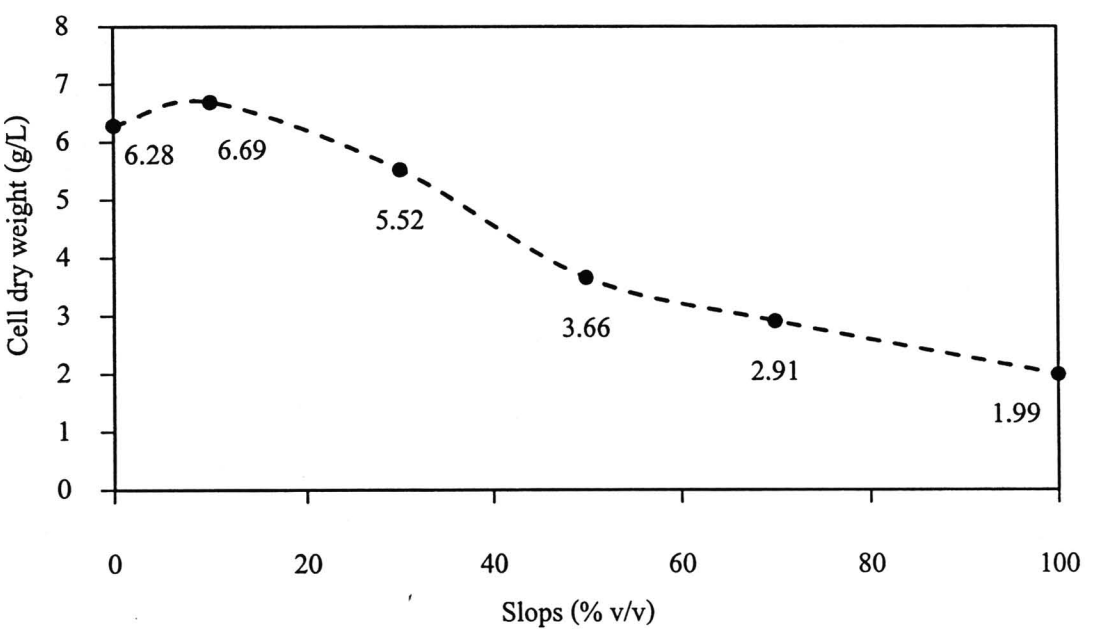
ปริมาณกากส่าเริ่มต้น (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร)	เอทานอล (กรัมต่อลิตร)	น้ำหนักเซลล์แห้ง (กรัมต่อลิตร)	น้ำตาลที่เหลือ (กรัมต่อลิตร)	ระยะเวลาการหมัก (ชั่วโมง)
0	60.06	6.28	40.68	60
10	59.44	6.49	41.44	96
30	59.05	5.62	56.19	144
50	62.40	3.67	64.03	240
70	65.53	2.96	75.57	354
100	51.05	2.03	96.01	456



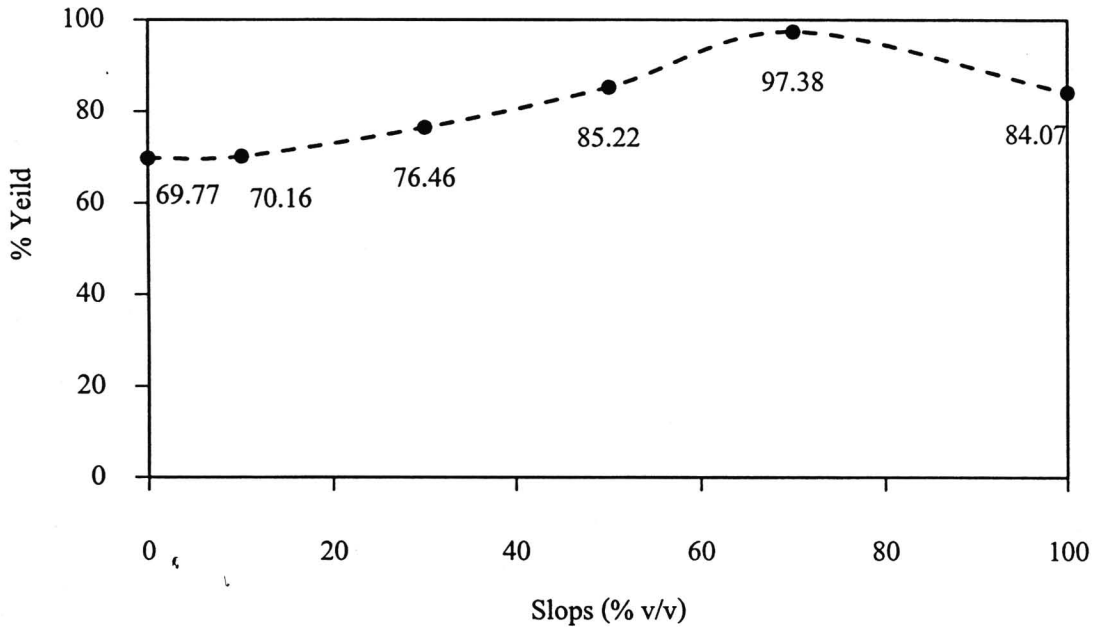
รูปที่ 4.19 การเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาล โดยใช้น้ำกากส่า 0, 10, 30, 50, 70 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร



รูปที่ 4.20 การเปรียบเทียบปริมาณการหมักเอทานอล โดยใช้น้ำกากส่า 0, 10, 30, 50, 70 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร



รูปที่ 4.21 การเปรียบเทียบปริมาณน้ำหนักเซลล์แห้งสุดท้าย โดยใช้น้ำกากส่า 0, 10, 30, 50, 70 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร



รูปที่ 4.22 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาล กับ ปริมาณน้ำกากส่าที่ 0, 10, 30, 50, 70 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

จากรูปที่ 4.19, 4.20, 4.21 และ 4.22 แสดงถึงเวลาที่ใช้ในการหมักเอทานอล ปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้ และน้ำหนักเซลล์แห้งสุดท้าย และประสิทธิภาพการผลิตเอทานอล (Yield) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำกากส่าจาก 10 ไปเป็น 70 เปอร์เซ็นต์ มีค่าประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลเพิ่มขึ้น 27.22 เปอร์เซ็นต์ สามารถผลิตเอทานอลได้เพิ่มขึ้น 6.09 กรัมต่อลิตร (0.77 เปอร์เซ็นต์โดยต่อปริมาตร) ใช้เวลาในการหมักเพิ่มขึ้น 258 ชั่วโมง ปริมาณน้ำหนักเซลล์แห้งลดลง 3.32 กรัมต่อลิตร สาเหตุที่การหมักมีระยะเวลานานขึ้นอาจมาจากสารประกอบประเภทคาร์โบไฮเดรตของกากน้ำตาลที่ยีสต์ไม่สามารถใช้ได้ และ ผลพลอยได้ของยีสต์ ที่เกิดขึ้นจากการผลิตเอทานอล เช่น glycerol, propanol และ lactic acid เป็นต้น ส่งผลการยับยั้งอัตราการเจริญเติบโตของยีสต์ในช่วงแรก [14] ซึ่งสังเกตได้จากการที่ปริมาณเซลล์ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำกากส่า สาเหตุการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลในขณะที่ปริมาณเซลล์ลดลงอาจจะเนื่องมาจากผลของผลพลอยได้ของยีสต์ที่กล่าวมานั้นช่วยสนับสนุนให้ยีสต์ใช้น้ำตาลที่เหลือเพื่อการผลิตเทานอล จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลมากขึ้น [46] อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าเวลาในช่วงการปรับตัวของยีสต์นาน ซึ่งไม่เหมาะสมกับการผลิตเชิงอุตสาหกรรม ความเป็นไปได้ในการนำงานวิจัยนี้ไปปฏิบัติงานจริงควรทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิต เอทานอลที่ปริมาณน้ำกากส่าต่างๆ ว่าประสิทธิภาพในการผลิตเอทานอลที่การผสมน้ำกากส่า 70 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ให้ประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลสูงสุดที่ 97.38 เปอร์เซ็นต์ แต่ใช้ระยะเวลานานถึง 354 ชั่วโมง หากพิจารณาในทางทฤษฎีอาจควรเลือกสภาวะที่ให้ค่าประสิทธิภาพการผลิตเอทานอล (Yield) สูงที่สุด แต่หากพิจารณาทางด้านวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์

สภาวะที่ให้ค่าประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลสูงที่สุดอาจไม่ใช้ทางเลือกที่เหมาะสมเพราะเอทานอลที่เพิ่มขึ้นมีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับเวลาที่ต้องการเพิ่มขึ้น ซึ่งจะต้องขยายขนาดหรือเพิ่มจำนวนถังหมัก หากนำไปใช้ในภาคอุตสาหกรรมอาจจะต้องคำนึงถึงจุดคุ้มทุนในการดำเนินการ

4.3 จลนพลศาสตร์ของการหมักเอทานอล

การพัฒนาแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์การหมักอาศัยปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการหมัก ได้แก่ ความเข้มข้นน้ำตาล ค่าความเป็นกรดด่าง อุณหภูมิ และ ปริมาณออกซิเจนที่ใช้ ซึ่งแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์การหมักนิยมใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโมนอด (Monod) [45] เพื่ออธิบายการเจริญเติบโตของเซลล์ แต่สมการนี้สามารถอธิบายการเจริญเติบโตของยีสต์ได้ไม่ดี ซึ่งจำต้องใช้สมการปรับปรุง เพื่อการอธิบายการเปลี่ยนแปลงต่างๆในระหว่างการหมักได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการใช้แบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ที่มีความซับซ้อนน้อยกว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Logistic model ที่สามารถอธิบายการเจริญเติบโตของเซลล์ได้ดีกว่า และน่าจะเหมาะเพื่ออธิบายจลนพลศาสตร์การหมักเอทานอล [11] สมการจลนพลศาสตร์ประกอบด้วยสมการอัตราการเจริญของเซลล์ สมการอัตราการผลิตเอทานอล และ สมการการใช้น้ำตาลของยีสต์ ดังสมการที่ 2.4, 2.6 และ 2.8 ตามลำดับดังนี้

สมการอัตราการเจริญของเซลล์

$$\frac{dX}{dt}=\mu_m X\left(1-\frac{X}{X_m}\right) \tag{2.4}$$

สมการอัตราการผลิตเอทานอล

$$\frac{dP}{dt}=Y_{p/x}\frac{dX}{d(t-\Delta t)} \tag{2.6}$$

สมการการใช้น้ำตาลของยีสต์

$$-\frac{dS}{dt}=\frac{1}{Y_{x/s}}\cdot\frac{dX}{dt}+m\cdot X \tag{2.8}$$

4.3.1 จลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการเจริญของเซลล์ในการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาล

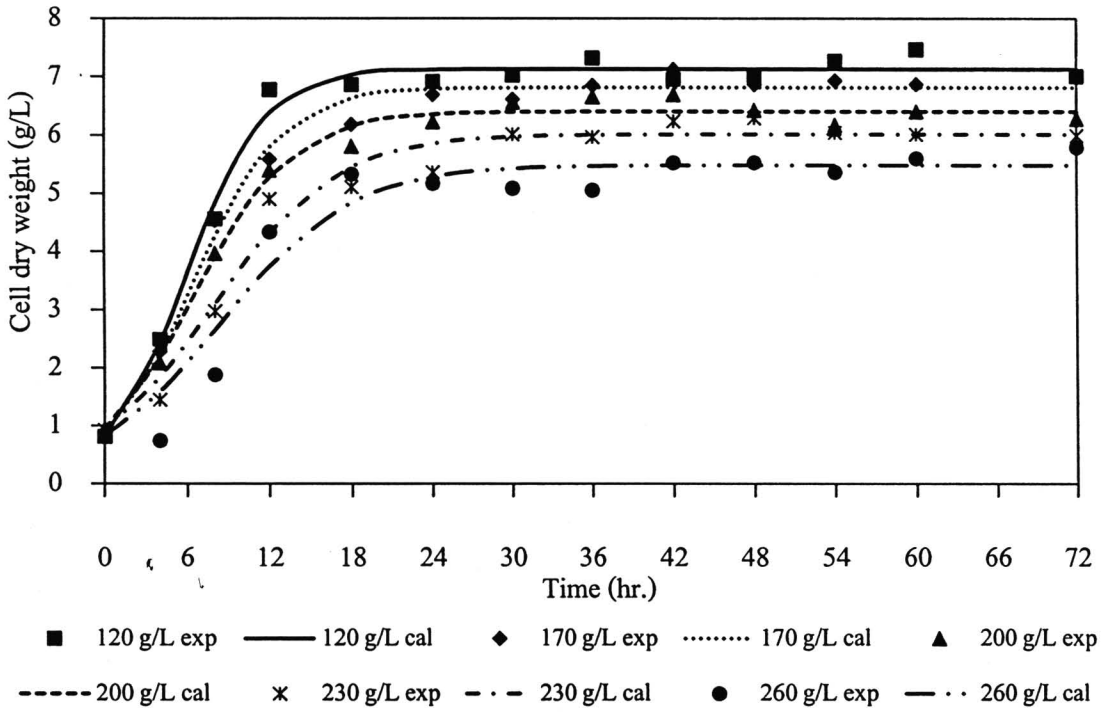
เมื่อนำข้อมูลการทดลองการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลโดยกระบวนการหมักที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นเท่ากับ 120, 170, 200, 230 และ 260 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ มาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของสมการได้แก่ ค่าอัตราจำเพาะสูงสุดของการเติบโต (μ_m) ค่าความเข้มข้นเซลล์ยีสต์สูงสุด (X_m) ในสมการอัตราการเจริญของเซลล์ เพื่อนำไปใช้ในแบบจำลองการเจริญเติบโตของยีสต์ในการหมักเอทานอล ดังแสดงผลตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการเจริญของเซลล์ในการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาล

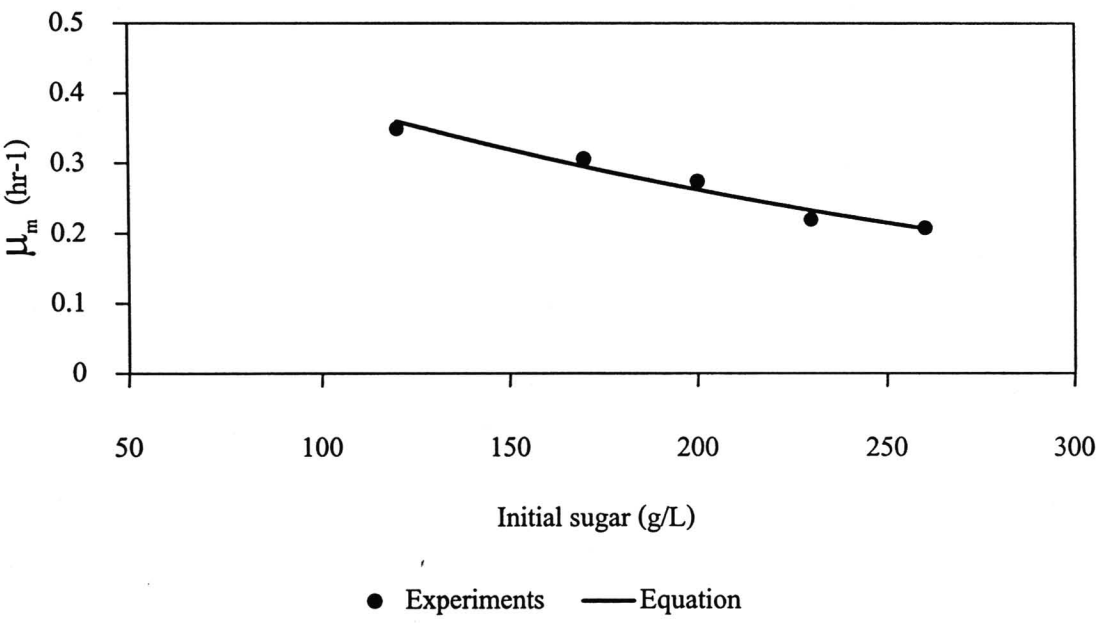
Kinetics Parameter	Sugar (g/L)				
	120	170	200	230	260
μ_m (hr^{-1})	0.349	0.306	0.274	0.220	0.208
X_m (g/L)	7.128	6.814	6.407	6.017	5.484
R^2	0.9898	0.9893	0.9903	0.9769	0.9532

พบว่าจากสมการที่ 2.4 สามารถใช้คำนวณค่าอัตราจำเพาะสูงสุดของการเติบโต (μ_m) สูงสุดเท่ากับ 0.349 ต่อชั่วโมง ที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นเท่ากับ 120 กรัมต่อลิตร เนื่องจากยีสต์สามารถเจริญเติบโตได้ดีในสภาวะที่น้ำตาลไม่สูงมากจึงส่งผลให้มีค่า μ_m สูงที่สุด และสามารถคำนวณค่าความเข้มข้นเซลล์ยีสต์สูงสุด (X_m) สูงสุดเท่ากับ 7.128 กรัมต่อลิตร เพราะค่า X_m มีความสัมพันธ์กับค่า μ_m จากที่กล่าวมาเมื่อค่าอัตราจำเพาะสูงสุดของการเติบโตมีค่าสูงจึงส่งผลให้ค่าความเข้มข้นเซลล์ยีสต์สูงสุดมีค่าสูงตามไปด้วย และจากผลการคำนวณพบว่าค่าพารามิเตอร์ทั้ง μ_m และ X_m มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นแบบเดียวกันคือ เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นจะส่งผลให้ค่า μ_m และ X_m มีค่าลดลง

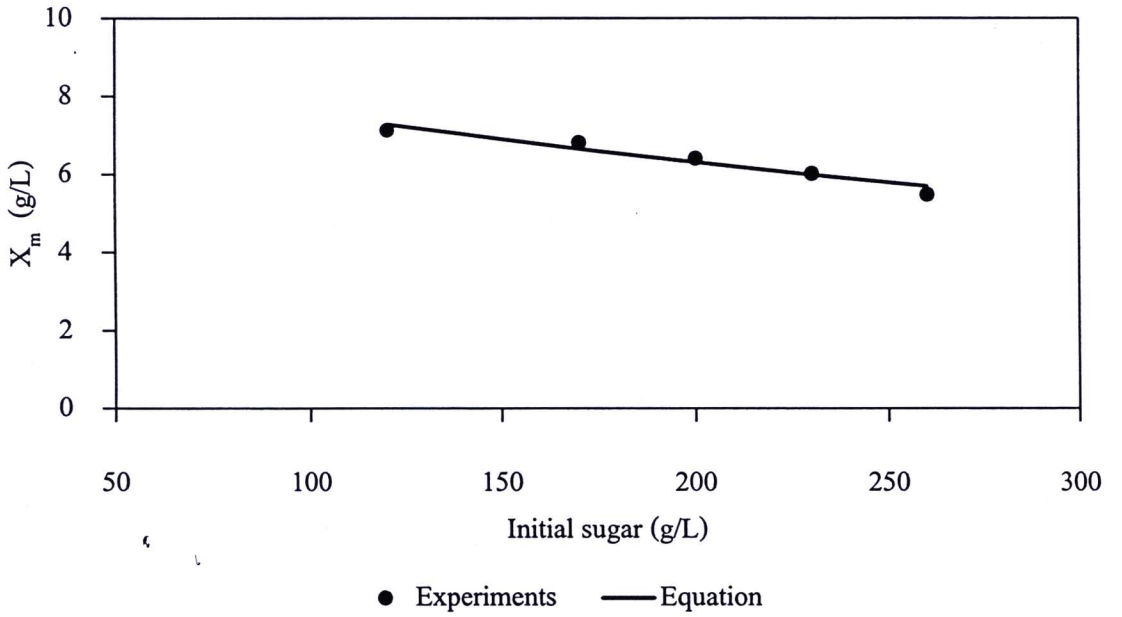
จากรูปที่ 4.23 พบว่าที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 120 ถึง 260 กรัมต่อลิตร สามารถทำนายการเจริญเติบโตของเซลล์ยีสต์ที่ได้ด้วยสมการ ให้ผลใกล้เคียงกับผลการทดลองตลอดระยะเวลาการหมักที่ R^2 ใกล้เคียง 1 จึงสรุปได้ว่าสมการอัตราการเจริญของเซลล์ สามารถใช้ทำนายความเข้มข้นของเซลล์ยีสต์ที่เวลาต่างๆได้



รูปที่ 4.23 การเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของเซลล์ยีสต์จากการทดลองกับผลการทำนายจากแบบจำลองจลนพลศาตร์ในการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาล



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราจำเพาะสูงสุดของการเติบโต (μ_m) กับความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นของกากน้ำตาล



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของเซลล์ยีสต์สูงสุด (X_m) กับความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นของกากน้ำตาล

รูปที่ 4.24 เป็นการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าอัตราจำเพาะสูงสุดของการเติบโต (μ_m) กับค่าความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้น สามารถแสดงได้ในรูปแบบของสมการ Exponential ดังสมการที่ 4.2 อาจเนื่องจากคุณลักษณะทางชีววิทยาของยีสต์ เพราะเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำตาลในอาหารสูงขึ้น ปริมาณน้ำตาลจะไปรบกวนระบบการเจริญเติบโตของยีสต์ จึงส่งผลให้ค่าอัตราจำเพาะสูงสุดของการเติบโต (μ_m) มีค่าลดลง

$$\mu_m = 0.5782\exp(-0.0040\ S_0) \qquad (4.2)$$

จากรูปที่ 4.25 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของเซลล์ยีสต์สูงสุด (X_m) กับค่าความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น ซึ่งสามารถอธิบายในรูปแบบของสมการ Exponential ดังสมการที่ 4.3 สาเหตุเนื่องมาจาก เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำตาลในอาหารให้มากขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราจำเพาะสูงสุดของการเติบโต (μ_m) มีค่าลดลง ทำให้ยีสต์สามารถผลิตเซลล์ยีสต์ได้ลดลงจนคงที่ที่ปริมาณน้ำตาลสูงระดับหนึ่งเซลล์ยีสต์จะไม่สามารถผลิตเซลล์ได้เลย เพราะเซลล์ยีสต์เกิดออสโมซิส

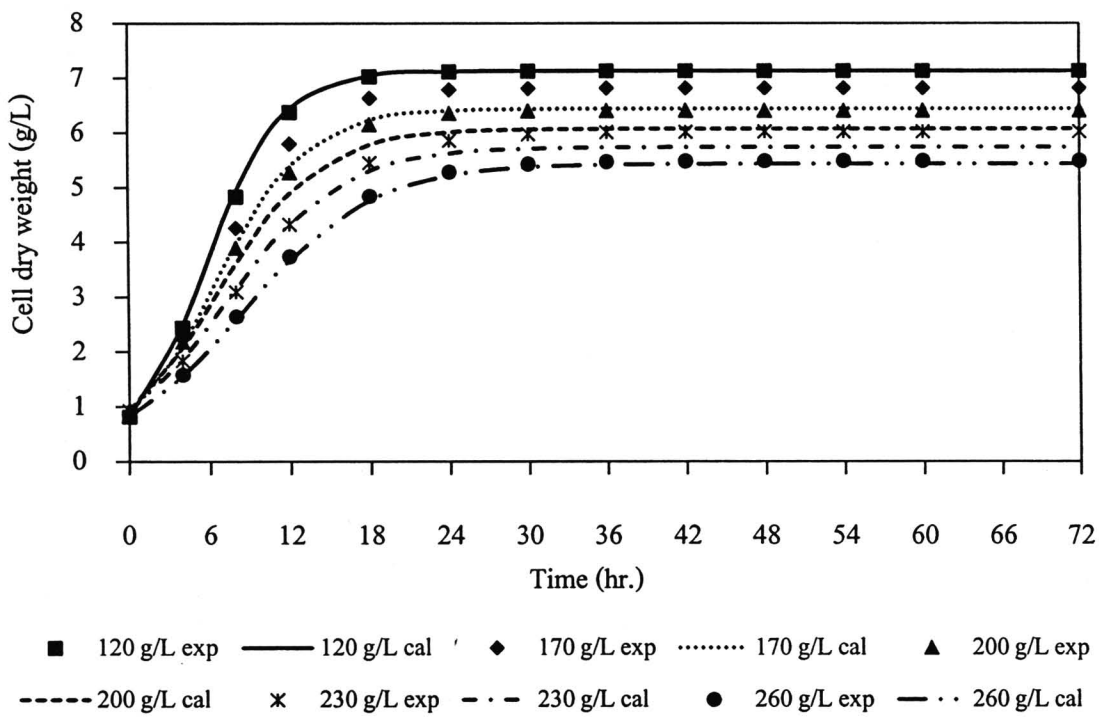
$$X_m = 2.1724 + 7.0168\exp(-0.0026\ S_0) \qquad (4.3)$$

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

เมื่อได้สมการของความสัมพันธ์ระหว่าง สมการ 4.2 และ 4.3 มาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการเจริญของเซลล์ที่ความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นต่างๆ สามารถคำนวณค่าอัตราจำเพาะสูงสุดของการเติบโต (μ_m) เท่ากับ 0.204 ถึง 0.358 ต่อชั่วโมง และคำนวณค่าความเข้มข้นเซลล์ยีสต์สูงสุด (X_m) เท่ากับ 5.430 ถึง 7.130 กรัมต่อลิตร ดังแสดงรายละเอียดไว้ในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการเจริญของเซลล์ที่คำนวณจากสมการ 4.2 และ 4.3 ที่ความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นต่างๆของกากน้ำตาล

Kinetics Parameter	Sugar (g/L)				
	120	170	200	230	260
μ_m (hr^{-1})	0.358	0.293	0.260	0.230	0.204
X_m (g/L)	7.130	6.440	6.072	5.737	5.430
R^2	0.9998	0.9997	0.9995	0.9986	0.9999



รูปที่ 4.26 การเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของเซลล์ยีสต์จากการทดลองกับผลการทำนายด้วยค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณจากสมการที่ 4.2 และ 4.3 ที่ความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นต่างๆของกากน้ำตาล

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการเจริญของเซลล์ยีสต์ ที่ได้จากสมการที่ 4.2 และ 4.3 ไปทำนายความเข้มข้นของเซลล์ยีสต์ โดยเปรียบเทียบกับผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.26 พบว่าจากการใช้ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณจากสมการที่ 4.2 และ 4.3 สามารถใช้ทำนายความเข้มข้นของเซลล์ยีสต์ที่เวลาต่างๆได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองตลอดระยะเวลาการหมักในทุกปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น โดยสามารถพิจารณาจากค่า R^2 ที่ใกล้เคียงกับ 1 จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการเจริญเติบโตของเซลล์ สรุปได้ว่า สมการที่ 4.2 และ 4.3 สามารถใช้คำนวณหาค่าพารามิเตอร์สมการอัตราการเจริญเติบโตของเซลล์ได้ในช่วงปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 120 ถึง 260 กรัมต่อลิตร เพราะผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์ได้ค่าใกล้เคียงกับค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลอง

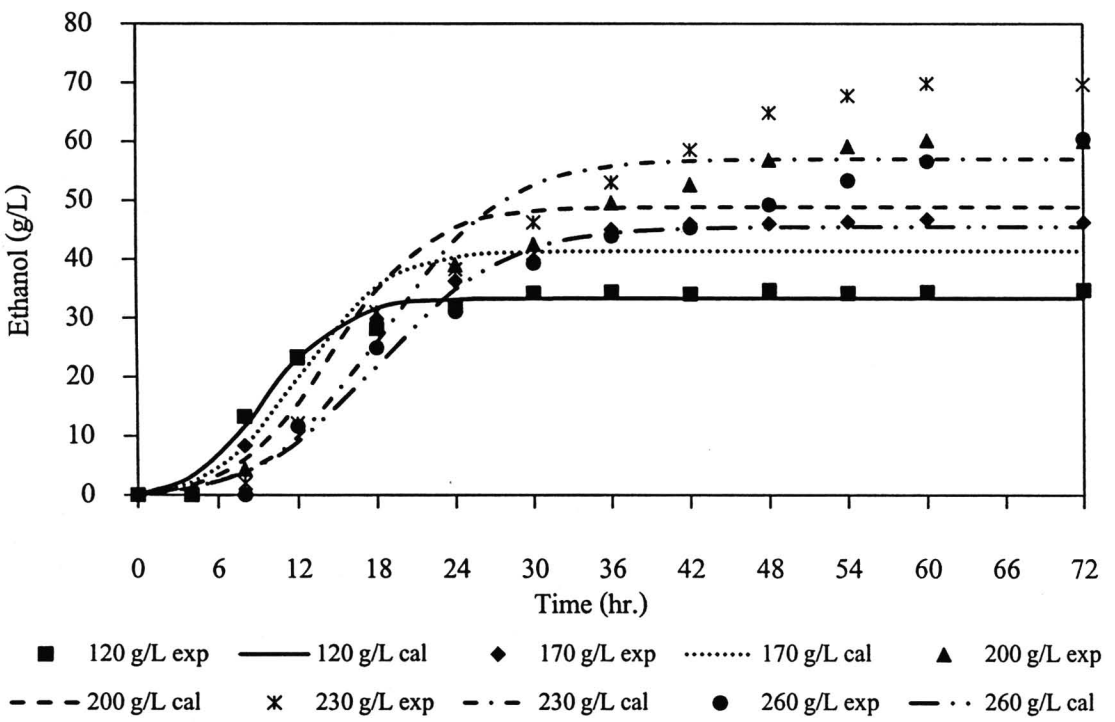
4.3.2 จลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการผลิตเอทานอลในการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาล

การหาค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการผลิตเอทานอล จำเป็นต้องใช้ค่าอัตราจำเพาะสูงสุดของการเติบโต (μ_m) และค่าความเข้มข้นเซลล์ยีสต์สูงสุด (X_m) มาใช้ในการคำนวณจึงจะทำให้สามารถคำนวณค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์จากเซลล์ยีสต์ ($Y_{p/x}$) ค่าระยะการปรับตัวของการผลิตเอทานอล (Δt) ดังแสดงในตารางที่ 4.6 ที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นเท่ากับ 230 กรัมต่อลิตร สามารถคำนวณค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์จากเซลล์ยีสต์ ($Y_{p/x}$) สูงสุดเท่ากับ 9.628 กรัมเอทานอลต่อกรัมน้ำตาล และค่าระยะการปรับตัวของการผลิตเอทานอล (Δt) สูงสุดเท่ากับ 10.936 ชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่าค่าพารามิเตอร์ทั้ง $Y_{p/x}$ และ Δt มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นแบบเดียวกัน คือ เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นจะส่งผลให้ค่า $Y_{p/x}$ และ Δt มีค่าเพิ่มขึ้น เพราะเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำตาลจะมีผลทำให้ปริมาณเซลล์ลดลงทำให้ต้องใช้ระยะเวลาในการปรับตัวมากขึ้นและยังส่งผลให้ผลได้ของเอทานอลต่อเซลล์สูงตามไปด้วย จากรูปที่ 4.27 พบว่าที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 120 ถึง 260 กรัมต่อลิตร การทำนายอัตราการผลิตเอทานอลที่ได้มีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลการทดลองตลอดระยะเวลาการหมัก ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากค่า R^2 ที่มีค่าใกล้เคียง 1 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าสมการอัตราการผลิตเอทานอลที่ได้ สามารถใช้ทำนายความเข้มข้นของเอทานอลที่เวลาต่างๆได้ จากรูปที่ 4.28 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์จากเซลล์ยีสต์ ($Y_{p/x}$) กับค่าความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้น ซึ่งเป็นรูปแบบของสมการ Polynomial ดังสมการที่ 4.4 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำตาลมากขึ้นค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์จากเซลล์มีค่ามากขึ้นเกิดจากเซลล์ยีสต์ไม่สามารถเพิ่มจำนวนเพื่อการเจริญเติบโตเนื่องมาจากผลยับยั้งของน้ำตาลเริ่มต้น จึงทำให้ยีสต์ใช้น้ำตาลเพื่อการผลิตเอทานอลมากขึ้น

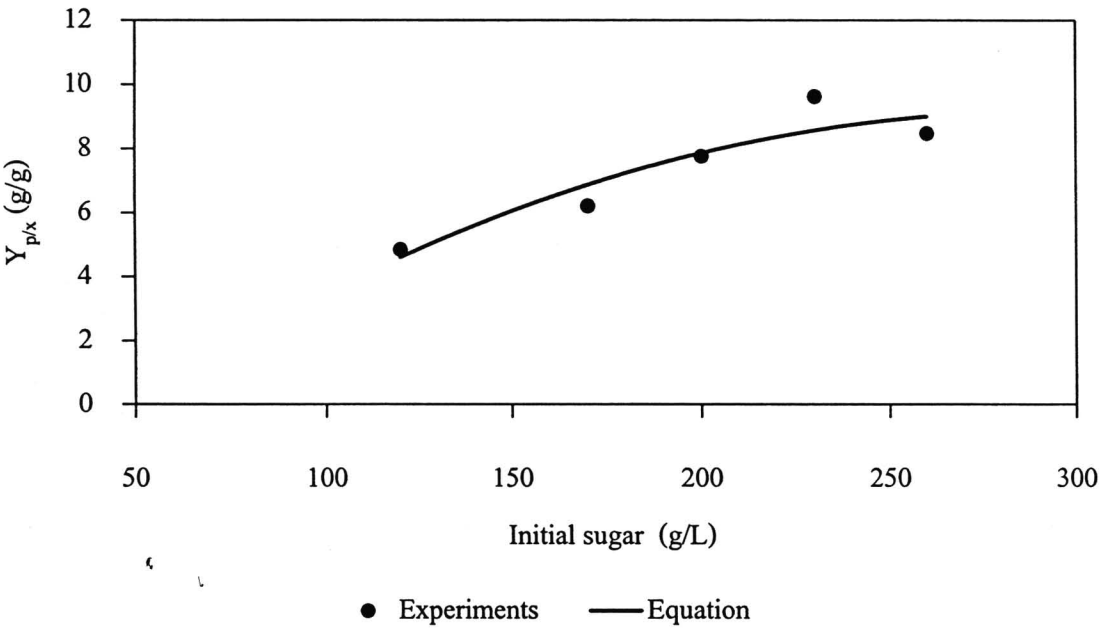
$$Y_{p/x} = -0.0001 (S_0)^2 + 0.0908(S_0) - 4.0515 \qquad (4.4)$$

ตารางที่ 4.6 ค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการผลิตเอทานอลในการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาล

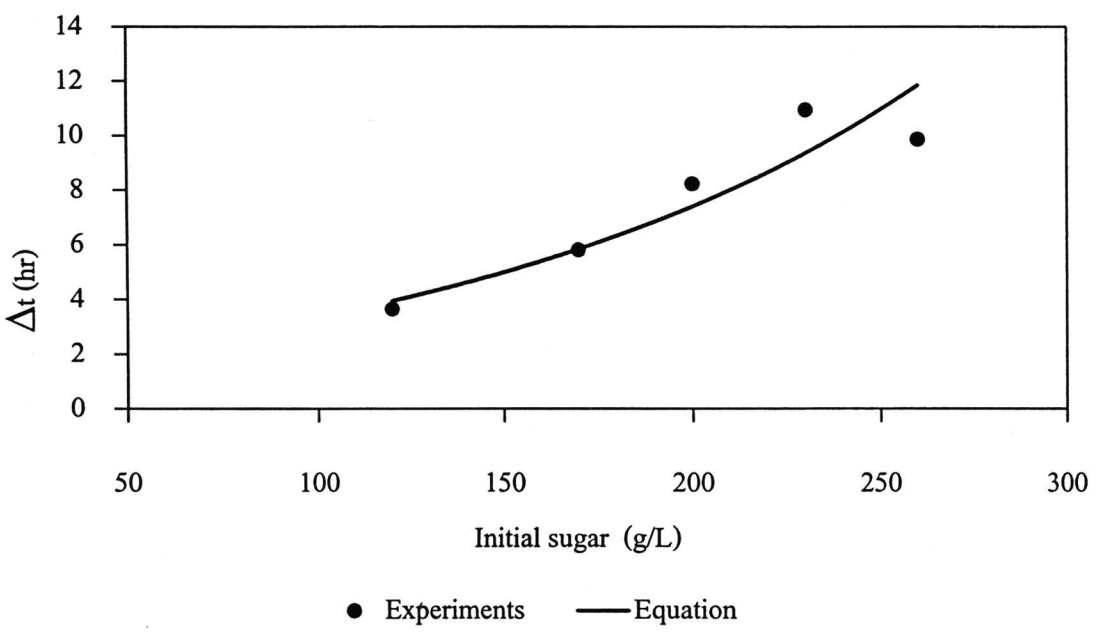
Kinetics Parameter	Sugar (g/L)				
	120	170	200	230	260
$Y_{p/x}$ (g/g)	4.840	6.213	7.765	9.628	8.479
Δt (hr)	3.646	5.810	8.222	10.936	9.857
R^2	0.9845	0.9611	0.9270	0.9520	0.9473



รูปที่ 4.27 การเปรียบเทียบการผลิตเอทานอลจากการทดลองกับผลการทำนายจากแบบจำลองจลนพลศาตร์ในการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาล



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์จากเซลล์ยีสต์ ($Y_{p/x}$) กับความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นของกากน้ำตาล



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะการปรับตัวของการผลิตเอทานอล (Δt) กับความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นของกากน้ำตาล

จากรูปที่ 4.29 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะการปรับตัวของการผลิตเอทานอล (Δt) กับค่าความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้น ซึ่งสามารถใช้รูปแบบของสมการ Exponential ดังสมการที่ 4.5 เพราะว่าค่าระยะการปรับตัวของการผลิตเอทานอล (Δt) จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณน้ำตาลในอาหารสูงขึ้น เป็นผลจากการที่ยีสต์ปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมที่มีปริมาณน้ำตาลสูงขึ้น ดังนั้นระยะเวลาปรับตัวจึงสูงตามปริมาณน้ำตาลที่เพิ่มมากขึ้น

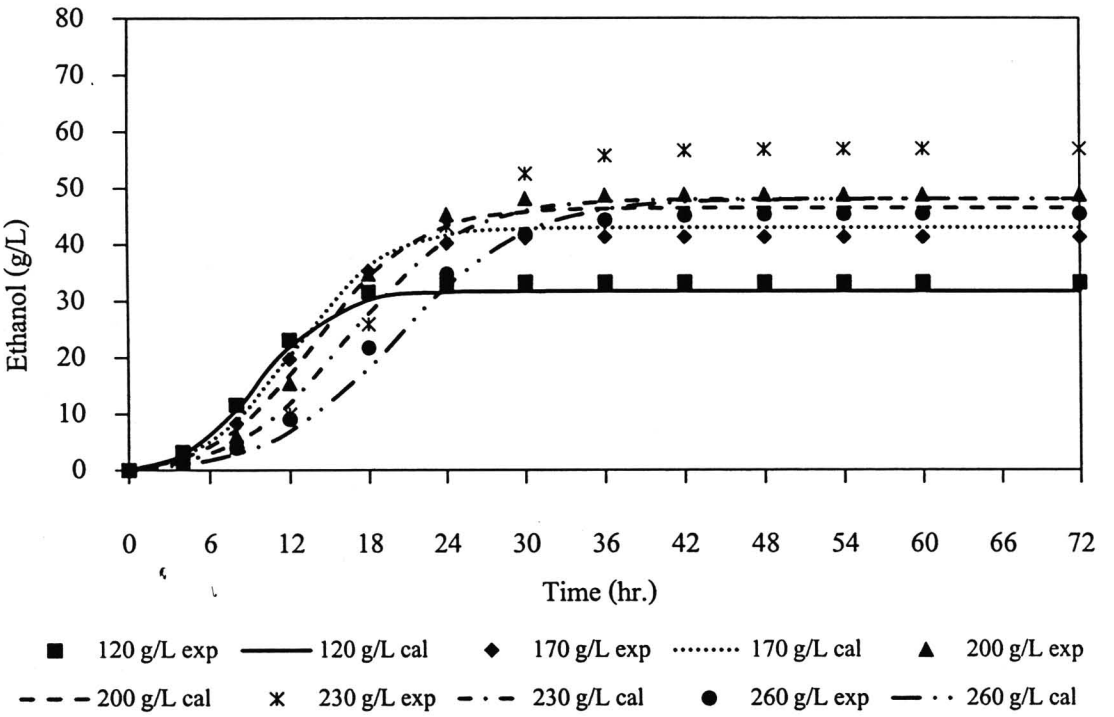
$$\Delta t = 1.5329\exp(0.0079\ S_0) \qquad (4.5)$$

จากสมการของความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์จากเซลล์ยีสต์ ($Y_{p/x}$) และค่าระยะการปรับตัวของการผลิตเอทานอล (Δt) กับค่าความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น และหากนำสมการที่ 4.4 และ 4.5 มาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการผลิตเอทานอล ที่ความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นต่างๆ สามารถคำนวณค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์จากเซลล์ยีสต์ ($Y_{p/x}$) เท่ากับ 4.595 ถึง 9.004 กรัมเอทานอลต่อกรัมเซลล์ยีสต์ และคำนวณค่าระยะการปรับตัวของการผลิตเอทานอล (Δt) เท่ากับ 3.937 ถึง 11.832 ชั่วโมง ดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการผลิตเอทานอลที่คำนวณจากสมการ 4.4 และ 4.5 ที่ความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นต่างๆของกากน้ำตาล

Kinetics Parameter	Sugar (g/L)				
	120	170	200	230	260
$Y_{p/x}$ (g/g)	4.595	6.871	7.863	8.574	9.004
Δt (hr)	3.937	5.832	7.383	9.346	11.832
R^2	0.9999	0.9999	0.9990	0.9915	0.9936

ค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการผลิตเอทานอลที่ได้จากสมการที่ 4.4 และ 4.5 สามารถทำนายปริมาณเอทานอลที่เวลาต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.30 พบว่าค่าที่ได้จากการใช้ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณจากสมการที่ 4.4 และ 4.5 สามารถใช้ทำนายอัตราการผลิตเอทานอลที่เวลาต่างๆได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองโดยให้ค่า R^2 ที่ใกล้เคียงกับ 1 จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการผลิตเอทานอล จึงสรุปได้ว่าสมการที่ 4.4 และ 4.5 สามารถใช้คำนวณหาค่าพารามิเตอร์สมการอัตราการผลิตเอทานอลได้ในช่วงปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 120 ถึง 260 กรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.30 การเปรียบเทียบการผลิตเอทานอลจากการทดลองกับผลการทำนายด้วยค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณจากสมการที่ 4.4 และ 4.5 ที่ความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นต่างๆของกากน้ำตาล

4.3.3 จลนพลศาสตร์ของสมการการใช้น้ำตาลของยีสต์ในการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาล

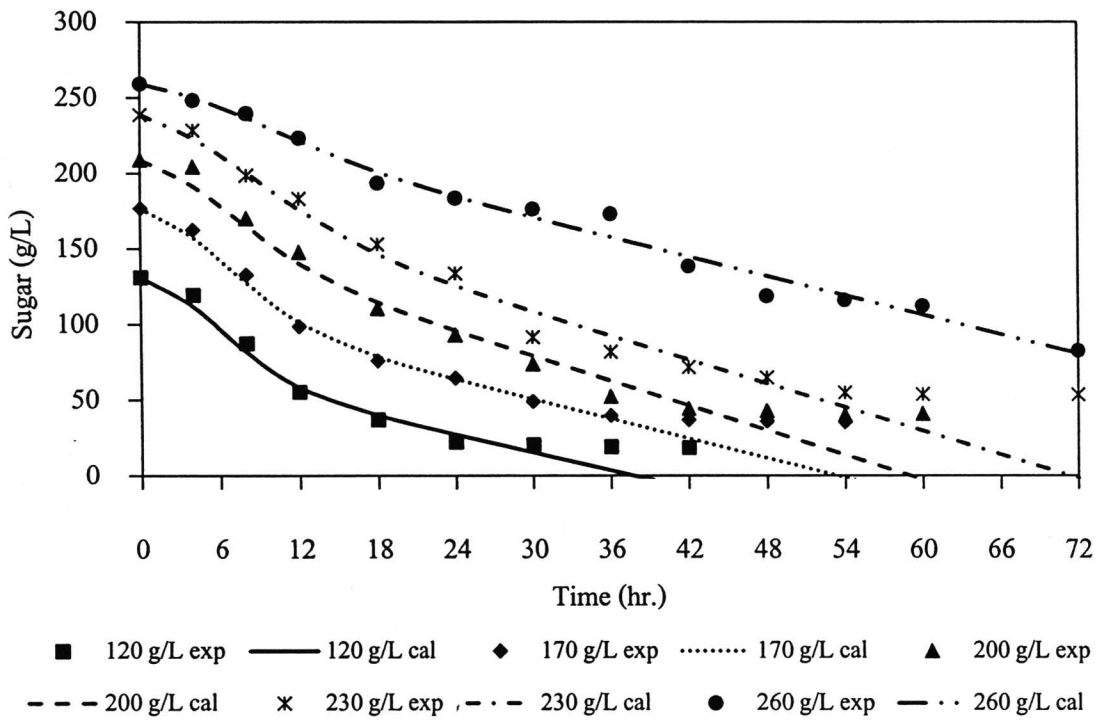
เมื่อนำข้อมูลการทดลองมาหาค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการการใช้น้ำตาลของยีสต์จำเป็นต้องใช้ค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์จากเซลล์ยีสต์ ($Y_{p/x}$) และค่าระยะการปรับตัวของการผลิตเอทานอล (Δt) มาร่วมคำนวณด้วยซึ่งจะทำให้สามารถคำนวณ ค่าผลได้ของเซลล์ยีสต์จากสารอาหาร ($Y_{x/s}$) ค่าคงที่บำรุงรักษาเซลล์ (m) ดังแสดงในตารางตารางที่ 4.8

จากผลการทดลองพบว่า สามารถคำนวณค่าผลได้ของเซลล์จากสารอาหาร ($Y_{x/s}$) เท่ากับ 0.068 ถึง 0.106 กรัมเซลล์ยีสต์ต่อกรัมน้ำตาล และคำนวณค่าคงที่บำรุงรักษาเซลล์ (m) เท่ากับ 0.277 ถึง 0.434 ต่อชั่วโมง เมื่อทำการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงน้ำตาลจากผลการทดลองกับแบบจำลองจลนพลศาตร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.31 พบว่าการทำนายการหมักในทุกค่าปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น สามารถให้ผลการทำนายที่มีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลการทดลอง เฉพาะช่วงเริ่มต้นการหมักหรือเริ่มมีการใช้น้ำตาลของเซลล์จนถึงช่วงที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มคงที่หรือใกล้หมด และจะให้ผลการทำนายคลาดเคลื่อน

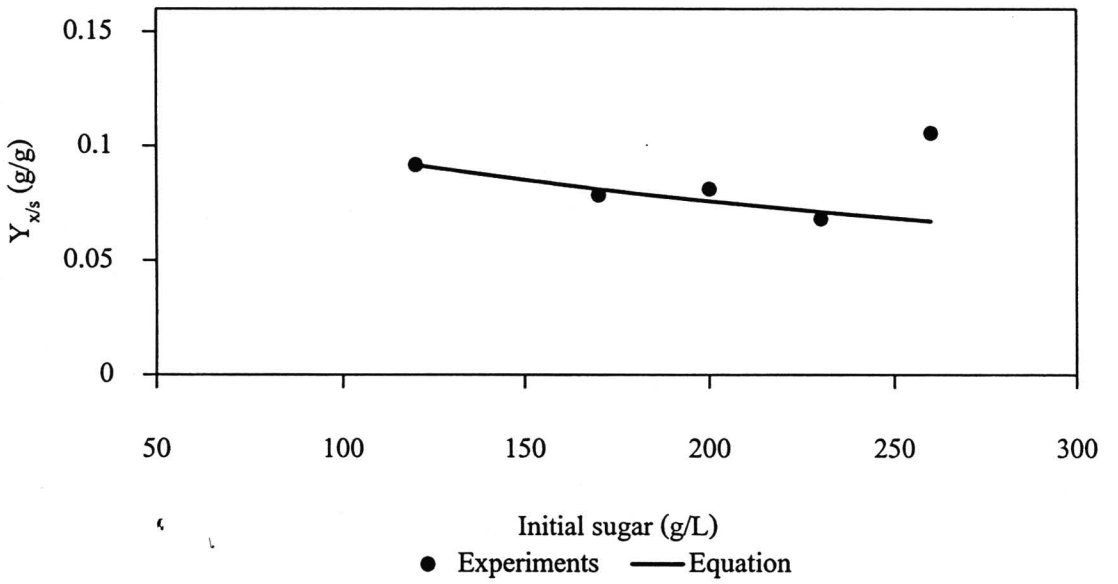
ในช่วงที่ปริมาณน้ำตาลหมดหรือเริ่มคงที่เพราะเป็นสมการทำนายได้เฉพาะช่วงการเจริญเติบโตของยีสต์เท่านั้น ซึ่งสรุปได้ว่าสมการการใช้น้ำตาลของยีสต์ สามารถใช้ทำนายความเข้มข้นของน้ำตาลที่เวลาต่างๆได้ดีในช่วงการเจริญเติบโตของยีสต์เท่านั้น

ตารางที่ 4.8 ค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการการใช้น้ำตาลของยีสต์ในการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาล

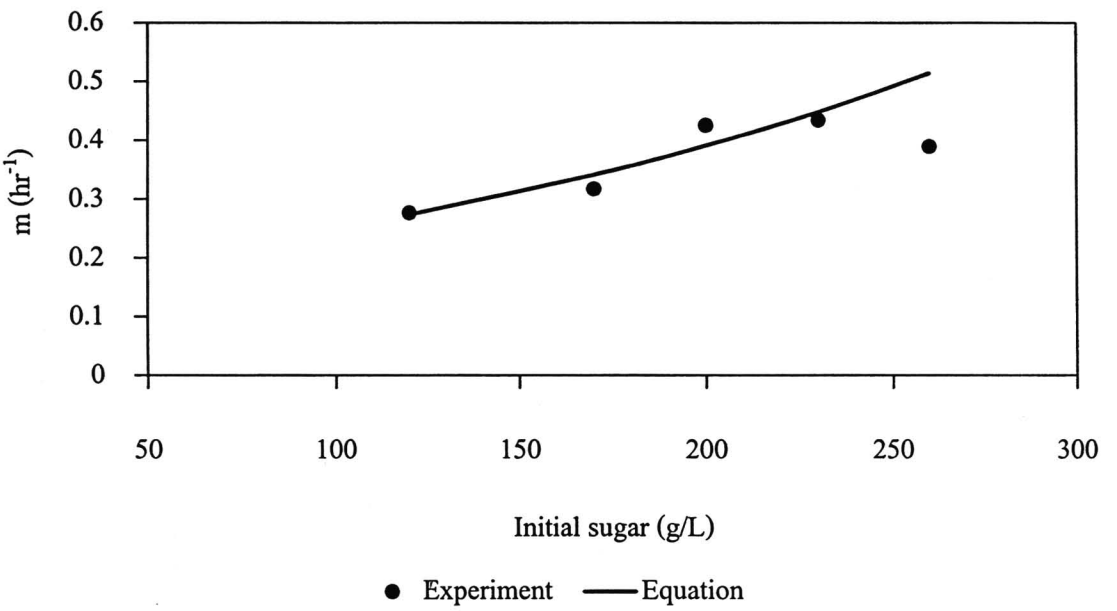
Kinetics Parameter	Sugar (g/L)				
	120	170	200	230	260
$Y_{x/s}$ (g/g)	0.092	0.078	0.081	0.068	0.106
m (hr^{-1})	0.277	0.317	0.425	0.434	0.389
R^2	0.9767	0.9803	0.9737	0.9774	0.9849



รูปที่ 4.31 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงน้ำตาลจากการทดลองกับผลการทำนายจากแบบจำลองจลนพลศาตร์ในการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาล



รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลได้ของเซลล์ยีสต์จากสารอาหาร ($Y_{x/s}$) กับความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นของกากน้ำตาล



รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าคงที่บำรุงรักษาเซลล์ (m) กับความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นของกากน้ำตาล

จากรูปที่ 4.32 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าผลได้ของเซลล์ยีสต์จากสารอาหาร ($Y_{x/s}$) กับค่าความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ในรูปแบบของสมการ Exponential ดังสมการที่ 4.6 เพราะเนื่องจากค่าผลได้ของเซลล์จากสารอาหาร ($Y_{x/s}$) มีความสัมพันธ์กับค่าความเข้มข้นเซลล์ยีสต์สูงสุด (X_m) ดังที่กล่าวมาข้างต้นเนื่องจากค่าความเข้มข้นเซลล์สูงสุดมีค่าลดลงเมื่อมีปริมาณน้ำตาลสูงขึ้น จึงส่งผลให้ค่าผลได้ของเซลล์ยีสต์จากสารอาหาร ($Y_{x/s}$) มีค่าลดลง

$$Y_{x/s} = 0.0387 + 0.0899\exp(-0.0044\ S_0) \qquad (4.6)$$

รูปที่ 4.33 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่บำรุงรักษาเซลล์ (m) กับค่าความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้น สามารถแสดงในรูปแบบของสมการ Exponential ดังสมการที่ 4.7 สาเหตุเพราะค่าคงที่บำรุงรักษาเซลล์ (m) มีค่ามากขึ้นเมื่อมีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลจากเซลล์ยีสต์ต้องใช้น้ำตาลเพื่อการบำรุงรักษาและซ่อมแซม เพื่อให้มีสภาพเหมาะสำหรับการผลิตเอทานอล จึงส่งผลให้ยีสต์ต้องการการบำรุงรักษาและซ่อมแซมมากขึ้น

$$m = 0.0247 + 0.1393\exp(0.0048\ S_0) \qquad (4.7)$$

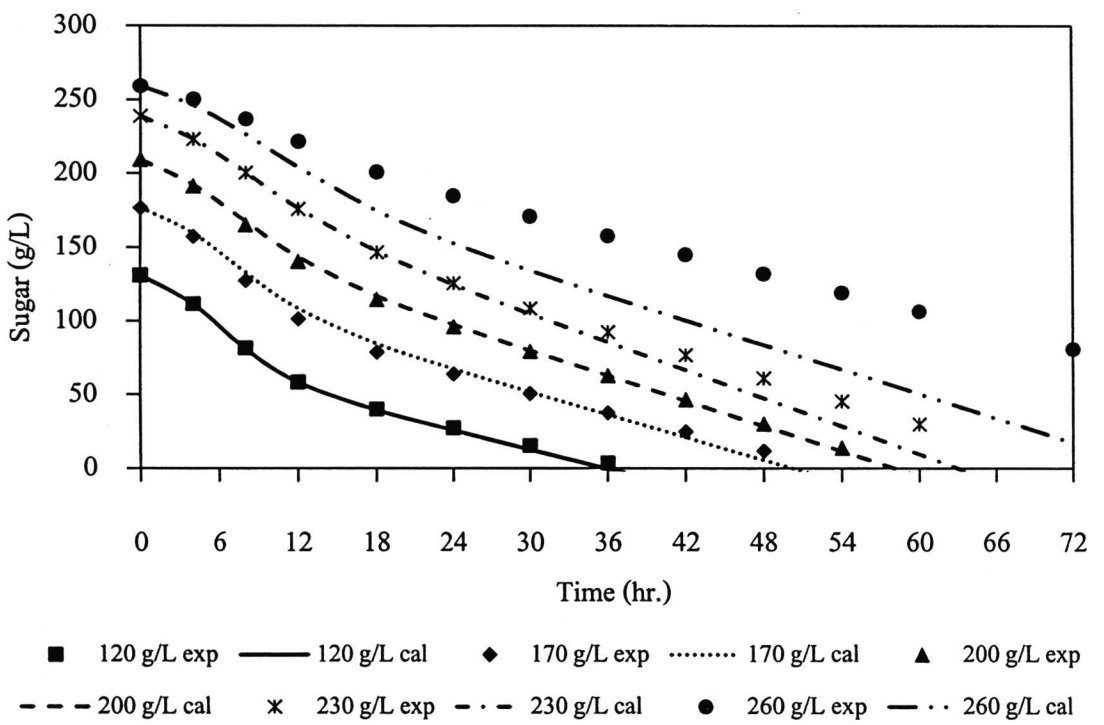
จากสมการของความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์จากเซลล์ยีสต์ ($Y_{p/x}$) และ ค่าคงที่บำรุงรักษาเซลล์ (m) กับค่าความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น เมื่อนำสมการที่ 4.6 และ 4.7 มาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการผลิตเอทานอล ที่ความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นต่างๆ สามารถแสดงผลดังตารางที่ 4.9

ค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการการใช้น้ำตาลของยีสต์ที่ได้จากสมการที่ 4.6 และ 4.7 สามารถนำไปทำนายความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาล ดังแสดงในรูปที่ 4.34 พบว่าจากการใช้ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณจากสมการที่ 4.6 และ 4.7 สามารถใช้ทำนายอัตราการใช้น้ำตาลของยีสต์ที่เวลาต่างๆได้ใกล้เคียงกับผลการทดลอง

จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการผลิตเอทานอล สรุปได้ว่า สมการที่ 4.6 และ 4.7 สามารถใช้คำนวณหาค่าพารามิเตอร์สมการการใช้น้ำตาลของยีสต์ได้ในช่วงปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 120 ถึง 230 กรัมต่อลิตร แต่ที่น้ำตาลเริ่มต้น 260 กรัมต่อลิตรให้การทำนายผลที่คลาดเคลื่อน สาเหตุเพราะการคำนวณค่าพารามิเตอร์ทั้ง $Y_{x/s}$ และ m จากสมการ (Equation) มีค่าแตกต่างจากการทดลอง

ตารางที่ 4.9 ค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการการใช้น้ำตาลของยีสต์ที่คำนวณจากสมการ 4.6 และ 4.7 ที่ความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นต่างๆของกากน้ำตาล

Kinetics Parameter	Sugar (g/L)				
	120	170	200	230	260
$Y_{x/s}$ (g/g)	0.095	0.085	0.079	0.075	0.071
m (hr^{-1})	0.304	0.398	0.468	0.553	0.653
R^2	0.9994	0.9962	0.9997	0.9976	0.9994



รูปที่ 4.34 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงน้ำตาลจากการทดลองกับผลการทำนายด้วยค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณจากสมการที่ 4.6 และ 4.7 ที่ความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นต่างๆของกากน้ำตาล

4.3.4 จลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการเจริญของเซลล์ในการหมักเอทานอลจากน้ำอ้อย

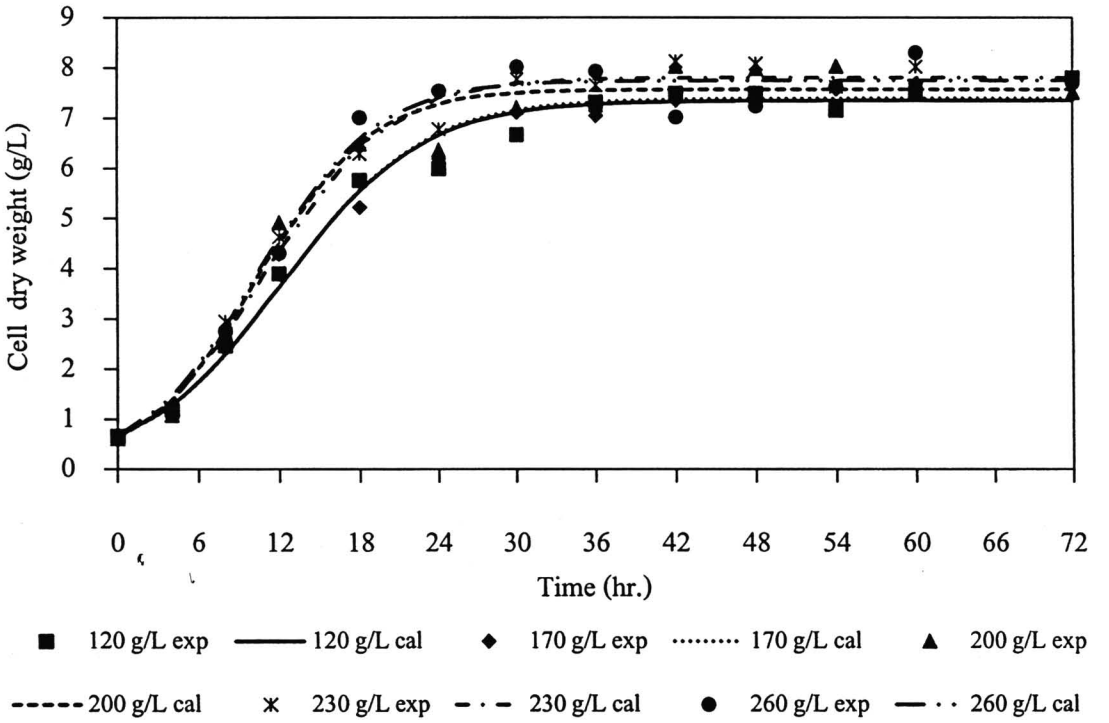
การศึกษาทดลองการหมักเอทานอลจากน้ำอ้อยโดยกระบวนการหมักแบบปกติที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นเท่ากับ 120, 170, 200, 230 และ 260 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อนำข้อมูลมาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ คือ ค่าอัตราจำเพาะสูงสุดของการเติบโต (μ_m) ค่าความเข้มข้นเซลล์ยีสต์สูงสุด (X_m)ในสมการอัตราการเจริญของเซลล์ เพื่อนำไปจำลองการเจริญเติบโตของยีสต์ในการหมักเอทานอล ได้ผลการคำนวณดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการเจริญของเซลล์ในการหมักเอทานอลจากน้ำอ้อย

Kinetics Parameter	Sugar (g/L)				
	120	170	200	230	260
μ_m (hr^{-1})	0.191	0.192	0.235	0.224	0.228
X_m (g/L)	7.349	7.398	7.567	7.806	7.748
R^2	0.9859	0.9855	0.9781	0.9898	0.9824

จากผลการทดลองพบว่าจากสมการที่ 2.4 สามารถคำนวณค่าอัตราจำเพาะสูงสุดของการเติบโต (μ_m) สูงสุดเท่ากับ 0.228 ต่อชั่วโมง ที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นเท่ากับ 260 กรัมต่อลิตร และ สามารถคำนวณค่าความเข้มข้นเซลล์ยีสต์สูงสุด (X_m) สูงสุดเท่ากับ 7.806 กรัมต่อลิตร ที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นเท่ากับ 230 กรัมต่อลิตร เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ทั้ง μ_m และ X_m มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นแบบเดียวกันคือ เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นจะส่งผลให้ค่า μ_m และ X_m มีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งแตกต่างจากกากน้ำตาลที่มีแนวโน้มลดลง เพราะน้ำอ้อยประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลใหญ่ จึงไม่มีผลของแรงดันออสโมติกต่อเซลล์ยีสต์ ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำตาลจะส่งผลให้ค่า μ_m และ X_m มีค่าเพิ่มขึ้น

รูปที่ 4.35 พบว่าที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 120 ถึง 260 กรัมต่อลิตร การทำนายการเจริญของเซลล์ที่ได้มีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลการทดลองตลอดระยะเวลาการหมัก ที่ค่า R^2 ใกล้เคียง 1 ซึ่งสรุปได้ว่าสมการอัตราการเจริญของเซลล์ สามารถใช้ทำนายความเข้มข้นของเซลล์ยีสต์ที่เวลาต่างๆได้ และจากรูปที่ 4.36 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าอัตราจำเพาะสูงสุดของการเติบโต (μ_m) กับค่าความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้นของน้ำอ้อย ซึ่งสามารถแสดงในรูปแบบของสมการ Exponential ดังสมการที่ 4.8



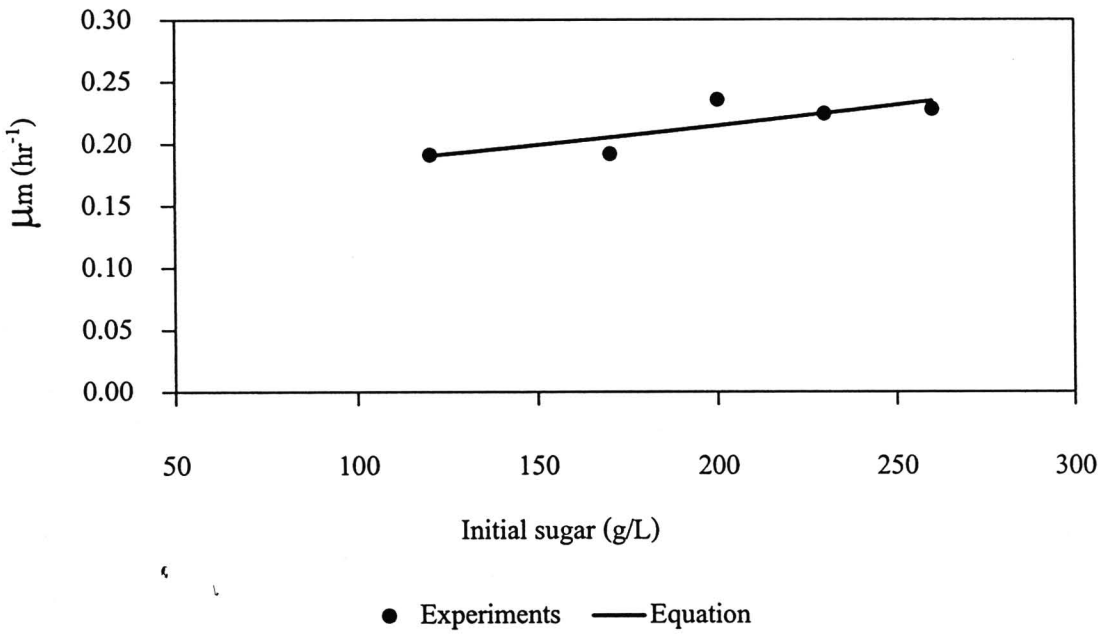
รูปที่ 4.35 การเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของเซลล์ยีสต์จากการทดลองกับผลการทำนายจากแบบจำลองจลนพลศาตร์ในการหมักเอทานอลจากน้ำอ้อย

จากสมการที่ 4.8 เนื่องจากชนิดของน้ำตาลในน้ำอ้อยไม่ได้เป็นน้ำตาลโมเลกุลใหญ่ เช่น น้ำตาลซูโครส จึงส่งผลให้การเจริญเติบโตของยีสต์ไม่เป็นไปตามคุณลักษณะทางชีววิทยาของยีสต์ คือเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำตาลในอาหารสูงขึ้น จะไม่ส่งผลรบกวนระบบการเจริญเติบโตของยีสต์ จึงส่งผลให้ค่าอัตราจำเพาะสูงสุดของการเติบโต (μ_m) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณน้ำตาลในอาหารสูงขึ้น

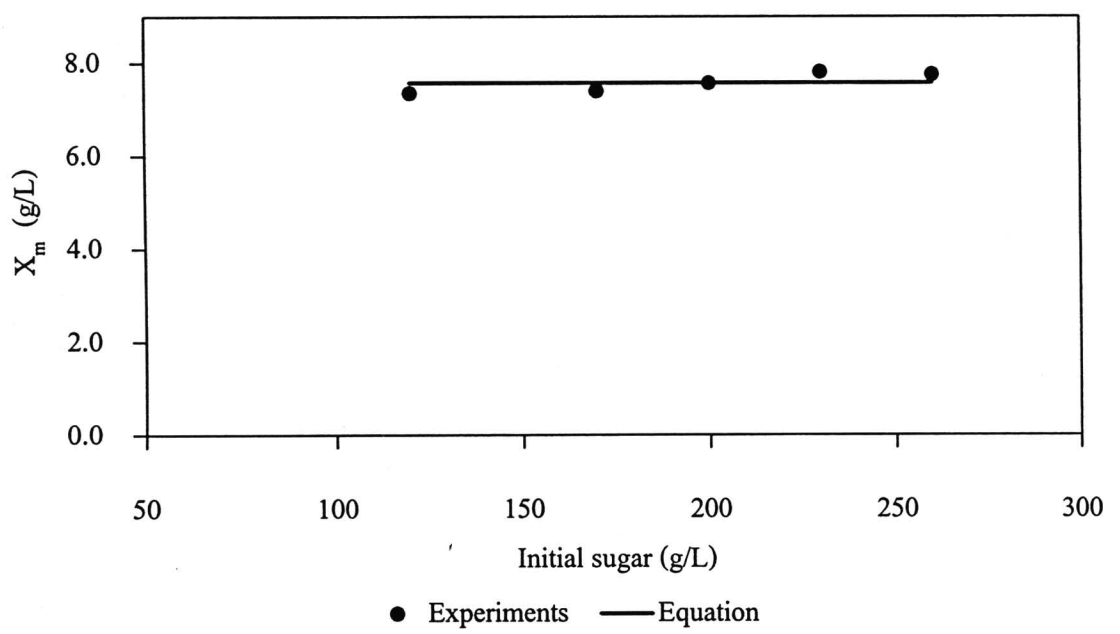
$$\mu_m = 0.1594\exp(0.0015\ S_0) \tag{4.8}$$

จากรูปที่ 4.37 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของเซลล์ยีสต์สูงสุด (X_m) กับค่าความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้นของน้ำอ้อย ในรูปแบบของสมการ Exponential ดังสมการที่ 4.9 สาเหตุเนื่องมาจากน้ำตาลในน้ำอ้อย ส่วนใหญ่เป็นน้ำตาลซูโครส ซึ่งจะไม่ส่งผลยับยั้งการเจริญเติบโตของเซลล์ ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำตาลในอาหารให้มากขึ้นจะส่งผลให้ค่าความเข้มข้นของเซลล์ยีสต์สูงสุด (X_m) มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำตาลที่มากขึ้น

$$X_m = 7.5735 + \exp(-7.6297\ S_0) \tag{4.9}$$



รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราจำเพาะสูงสุดของการเติบโต (μ_m) กับความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นของน้ำอ้อย

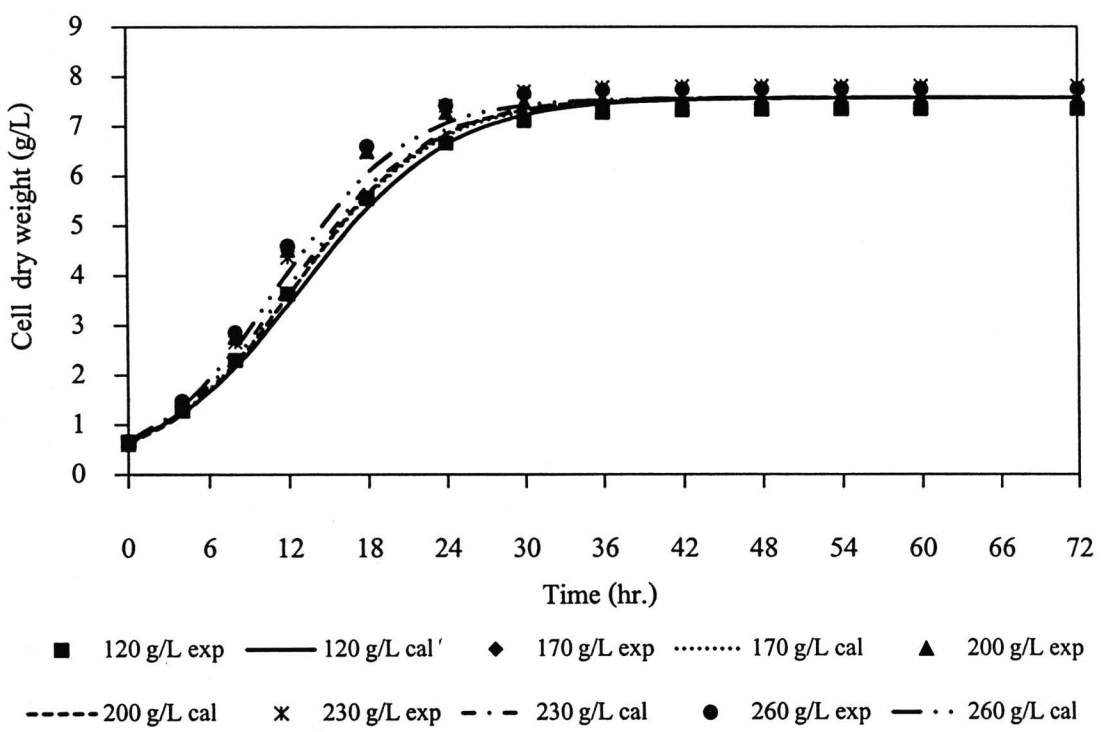


รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของเซลล์ยีสต์สูงสุด (X_m) กับความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นของน้ำอ้อย

เมื่อคำนวณได้สมการของความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเซลล์ยีสต์สูงสุด (X_m) และ อัตราจำเพาะสูงสุดของการเติบโต (μ_m) กับค่าความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น ด้วยสมการที่ 4.8 และ 4.9 มาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการเจริญของเซลล์ที่ความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการเจริญของเซลล์ที่คำนวณจากสมการ 4.8 และ 4.9 ที่ความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นต่างๆของน้ำอ้อย

Kinetics Parameter	Sugar (g/L)				
	120	170	200	230	260
μ_m (hr^{-1})	0.179	0.188	0.194	0.200	0.206
X_m (g/L)	7.574	7.574	7.574	7.574	7.574
R^2	0.9978	0.9997	0.9847	0.9955	0.9965



รูปที่ 4.38 การเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของเซลล์ยีสต์จากการทดลองกับผลการทำนายด้วยค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณจากสมการที่ 4.8 และ 4.9 ที่ความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นต่างๆของน้ำอ้อย

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการเจริญของเซลล์ ที่ได้จากสมการที่ 4.8 และ 4.9 สามารถนำไปทำนายความเข้มข้นของเซลล์ยีสต์ และเปรียบเทียบกับผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.38 พบว่าจากการใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณของสมการที่ 4.8 และ 4.9 สามารถใช้ทำนายความเข้มข้นของเซลล์ยีสต์ที่เวลาต่างๆได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองโดยให้ค่า R^2 ที่ใกล้เคียงกับ 1 จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการเจริญของเซลล์ จึงสรุปได้ว่า สมการที่ 4.8 และ 4.9 สามารถใช้คำนวณหาค่าพารามิเตอร์สมการอัตราการเจริญของเซลล์ ได้ในช่วงปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 120 ถึง 260 กรัมต่อลิตร

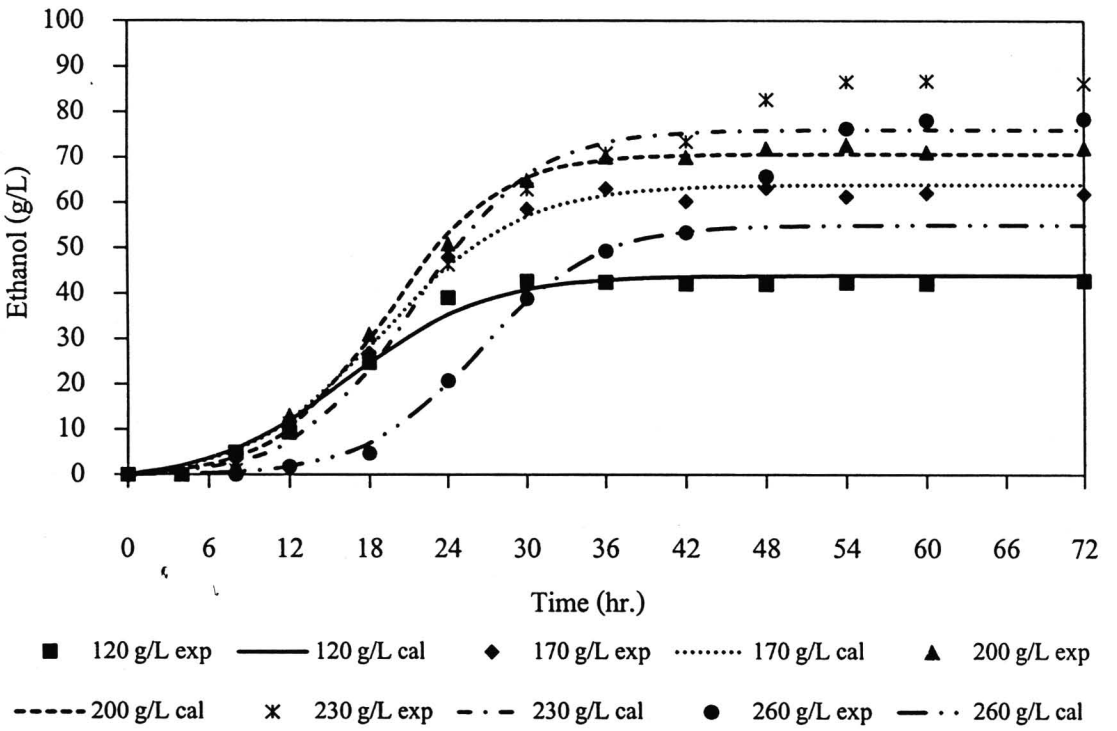
4.3.5 จลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการผลิตเอทานอลในการหมักเอทานอลจากน้ำอ้อย

การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการผลิตเอทานอล จำเป็นต้องใช้ค่าอัตราจำเพาะสูงสุดของการเติบโต (μ_m) และค่าความเข้มข้นเซลล์ยีสต์สูงสุด (X_m) มาเพื่อหาค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์จากเซลล์ยีสต์ ($Y_{p/x}$) ค่าระยะการปรับตัวของการผลิตเอทานอล (Δt) ดังแสดงในตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการผลิตเอทานอลในการหมักเอทานอลจากน้ำอ้อย

Kinetics Parameter	Sugar (g/L)				
	120	170	200	230	260
$Y_{p/x}$ (g/g)	6.244	8.877	9.443	9.826	7.125
Δt (hr)	4.225	6.753	8.880	10.626	16.049
R^2	0.9910	0.9963	0.9977	0.9819	0.9481

จากการคำนวณด้วยสมการที่ 2.6 พบว่า สามารถคำนวณค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์จากเซลล์ยีสต์ ($Y_{p/x}$) เท่ากับ 6.244 ถึง 9.826 กรัมเอทานอลต่อกรัมเซลล์ยีสต์ และคำนวณค่าระยะการปรับตัวของการผลิตเอทานอล (Δt) เท่ากับ 4.225 ถึง 16.049 ชั่วโมง ซึ่งค่าพารามิเตอร์ทั้ง $Y_{p/x}$ และ Δt มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นแบบเดียวกันคือ เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นจะส่งผลให้ค่า $Y_{p/x}$ และ Δt มีค่าเพิ่มขึ้น เพราะเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำตาลจะทำให้ต้องใช้ระยะเวลาในการปรับตัวมากขึ้นและยังส่งผลให้ผลได้ของเอทานอลต่อเซลล์สูงตามไปด้วย

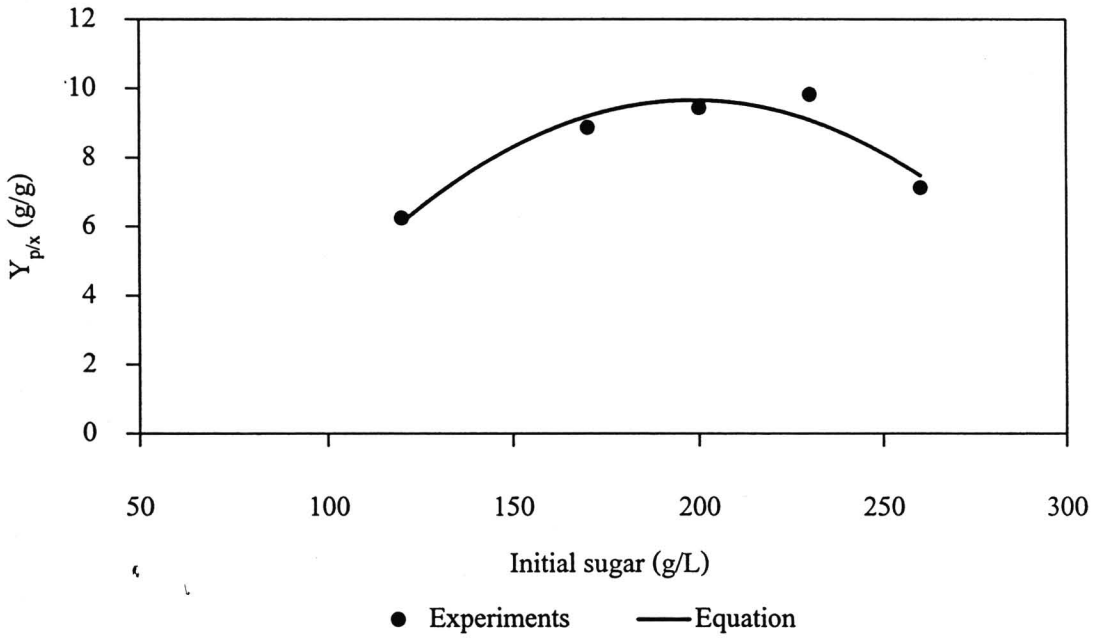


รูปที่ 4.39 การเปรียบเทียบการผลิตเอทานอลจากการทดลองกับผลการทำนายจากแบบจำลองจลนพลศาตร์ในการหมักเอทานอลจากน้ำอ้อย

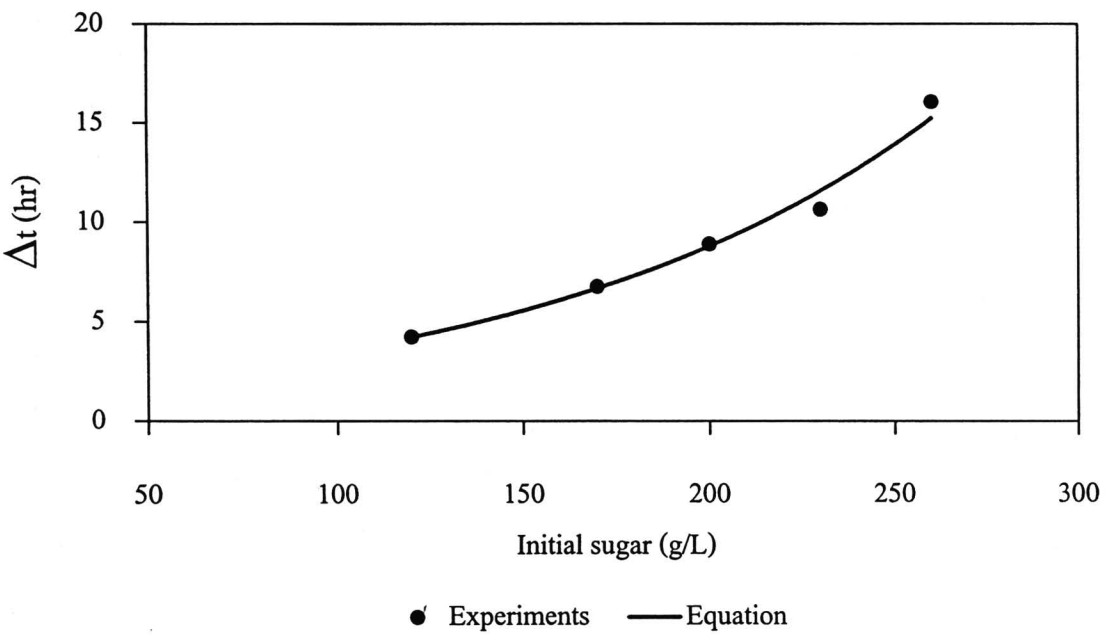
จากรูปที่ 4.39 พบว่าที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 120 ถึง 260 กรัมต่อลิตร ผลการทำนายอัตราการผลิตเอทานอลที่ได้มีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลการทดลองตลอดระยะเวลาการหมัก ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากค่า R^2 ที่มีค่าใกล้เคียง 1 ซึ่งสรุปได้ว่าสมการอัตราการผลิตเอทานอล สามารถใช้ทำนายความเข้มข้นของเอทานอลที่เวลาต่างๆได้

รูปที่ 4.40 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์จากเซลล์ ($Y_{p/x}$) กับค่าความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้นของน้ำอ้อย ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์เป็นสมการ Polynomial ดังสมการที่ 4.10 สาเหตุเนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำตาลมากขึ้นค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์จากเซลล์มีค่ามากขึ้นเกิดจากเซลล์ยีสต์ไม่สามารถเพิ่มจำนวนเพื่อการเจริญเติบโตเนื่องมาจากผลยับยั้งของน้ำตาลเริ่มต้นจึงทำให้ยีสต์ใช้น้ำตาลเพื่อการผลิตเอทานอลมากขึ้น เมื่อค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์จากเซลล์มีค่ามากขึ้นจนถึงค่าหนึ่งหลังจากนั้นจะเริ่มมีค่าลดลงเนื่องจากผลยับยั้งของเอทานอลที่มีผลต่อยีสต์จึงส่งผลให้ยีสต์สามารถผลิตเอทานอลได้น้อยลง

$$Y_{p/x} = -0.0006(S_0)^2 + 0.2290(S_0) - 13.0626 \qquad (4.10)$$



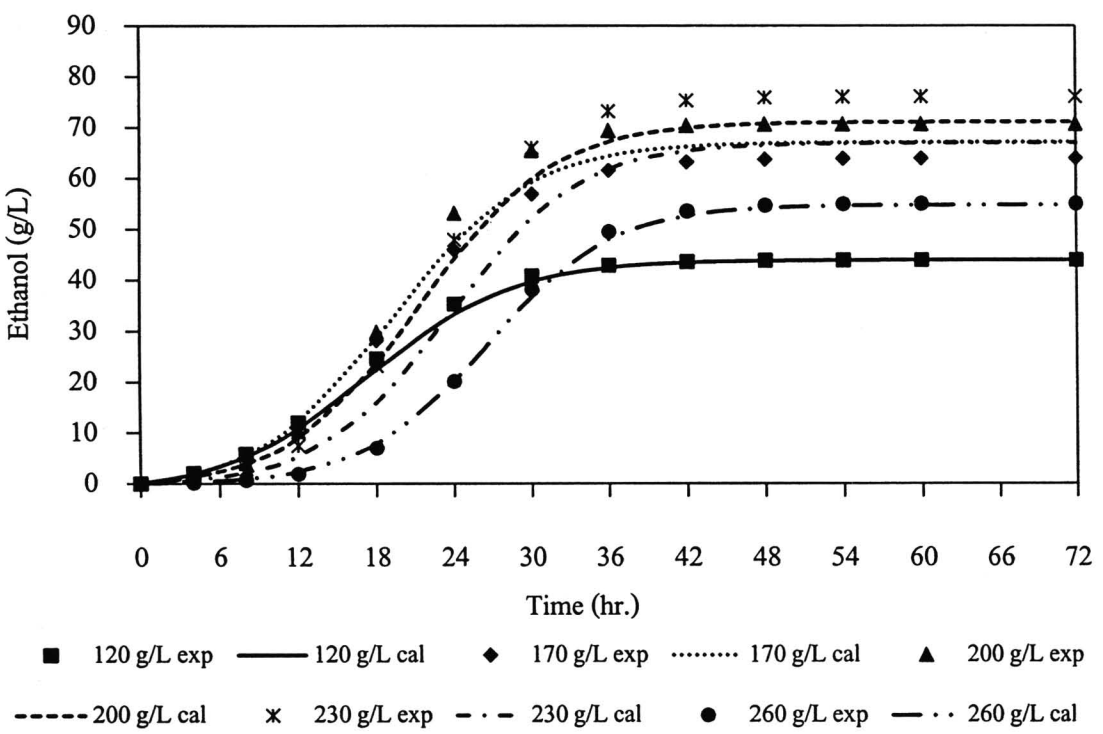
รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์จากเซลล์ ($Y_{p/x}$) กับความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นของน้ำอ้อย



รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะการปรับตัวของการผลิตเอทานอล (Δt) กับความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นของน้ำอ้อย

ตารางที่ 4.13 ค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการผลิตเอทานอลที่คำนวณจากสมการ 4.10 และ 4.11 ในการหมักเอทานอลจากน้ำอ้อย

Kinetics Parameter	Sugar (g/L)				
	120	170	200	230	260
$Y_{p/x}$ (g/g)	6.065	9.105	9.537	8.925	7.269
Δt (hr)	4.211	6.664	8.777	11.560	15.225
R^2	0.9982	0.9999	0.9900	0.9922	0.9995



รูปที่ 4.42 การเปรียบเทียบการผลิตเอทานอลจากการทดลองกับผลการทำนายด้วยค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณจากสมการที่ 4.10 และ 4.11 ที่ความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นต่างๆ ของน้ำอ้อย

รูปที่ 4.41 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะการปรับตัวของการผลิตเอทานอล (Δt) กับค่าความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้นของน้ำอ้อย ซึ่งสามารถอธิบายในรูปแบบของสมการ Exponential ดังสมการที่ 4.11 เนื่องจากค่าระยะการปรับตัวของการผลิตเอทานอล (Δt) จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณน้ำตาลในอาหารสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการที่ยีสต์ปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมที่มีปริมาณน้ำตาลสูง

$$\Delta t = 1.3995\exp(0.0092\ S_0) \qquad (4.11)$$

สมการของความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์จากเซลล์ ($Y_{p/x}$) และ ค่าระยะการปรับตัวของการผลิตเอทานอล (Δt) กับค่าความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นของน้ำอ้อย สามารถนำมาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการผลิตเอทานอล ที่ความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นต่างๆ สามารถคำนวณค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์จากเซลล์ ($Y_{p/x}$) เท่ากับ 6.065 ถึง 9.537 กรัมเอทานอลต่อกรัมเซลล์ และคำนวณค่าระยะการปรับตัวของการผลิตเอทานอล (Δt) เท่ากับ 4.211 ถึง 15.225 ชั่วโมง ดังแสดงในตารางที่ 4.13

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการผลิตเอทานอลที่ได้จากสมการที่ 4.10 และ 4.11 ไปทำนายความเข้มข้นของเอทานอล โดยเปรียบเทียบกับผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.42 พบว่าจากการใช้ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณจากสมการที่ 4.10 และ 4.11 สามารถใช้ทำนายอัตราการผลิตเอทานอลที่เวลาต่างๆได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองโดยให้ค่า R^2 ที่ใกล้เคียงกับ 1 จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการผลิตเอทานอล สรุปได้ว่า สมการที่ 4.10 และ 4.11 สามารถใช้คำนวณหาค่าพารามิเตอร์สมการอัตราการผลิตเอทานอลได้ในช่วงปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น 120 ถึง 260 กรัมต่อลิตร

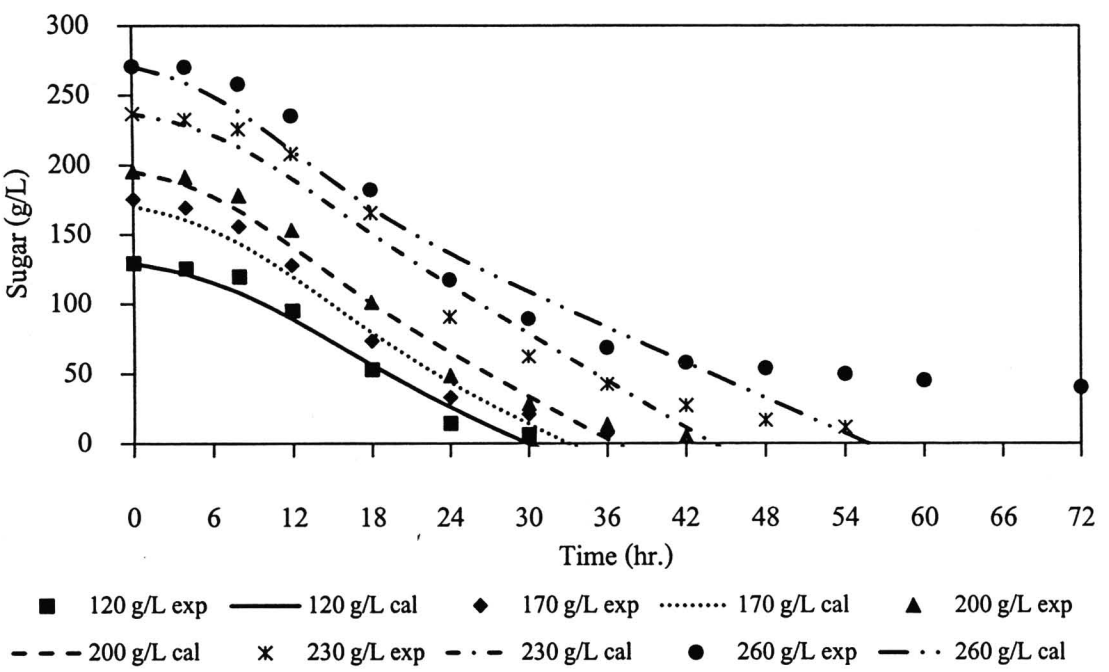
4.3.6 จลนพลศาสตร์ของสมการการใช้น้ำตาลของยีสต์ในการหมักเอทานอลจากน้ำอ้อย

เมื่อนำข้อมูลการทดลองมาหาค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการการใช้น้ำตาลของยีสต์จำเป็นต้องใช้ค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์จากเซลล์ ($Y_{p/x}$) และค่าระยะการปรับตัวของการผลิตเอทานอล (Δt) มาร่วมคำนวณด้วยซึ่งจะทำให้สามารถคำนวณ ค่าผลได้ของเซลล์จากสารอาหาร ($Y_{x/s}$) ค่าคงที่บำรุงรักษาเซลล์ (m) ดังตารางที่ 4.14 พบว่าจากสมการที่ 2.8 สามารถคำนวณค่าผลได้ของเซลล์จากสารอาหาร ($Y_{x/s}$) สูงสุดเท่ากับ 0.135 กรัมเซลล์ต่อกรัมน้ำตาล ที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นเท่ากับ 230 กรัมต่อลิตร และ สามารถคำนวณค่าคงที่บำรุงรักษาเซลล์ (m) สูงสุดเท่ากับ 0.718 ต่อชั่วโมง ที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นเท่ากับ 230 กรัมต่อลิตร เมื่อทำการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงน้ำตาลจากผลการทดลองกับแบบจำลองจลนพลศาตร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.43 พบว่าการทำนายการหมักในทุกค่าปริมาณ

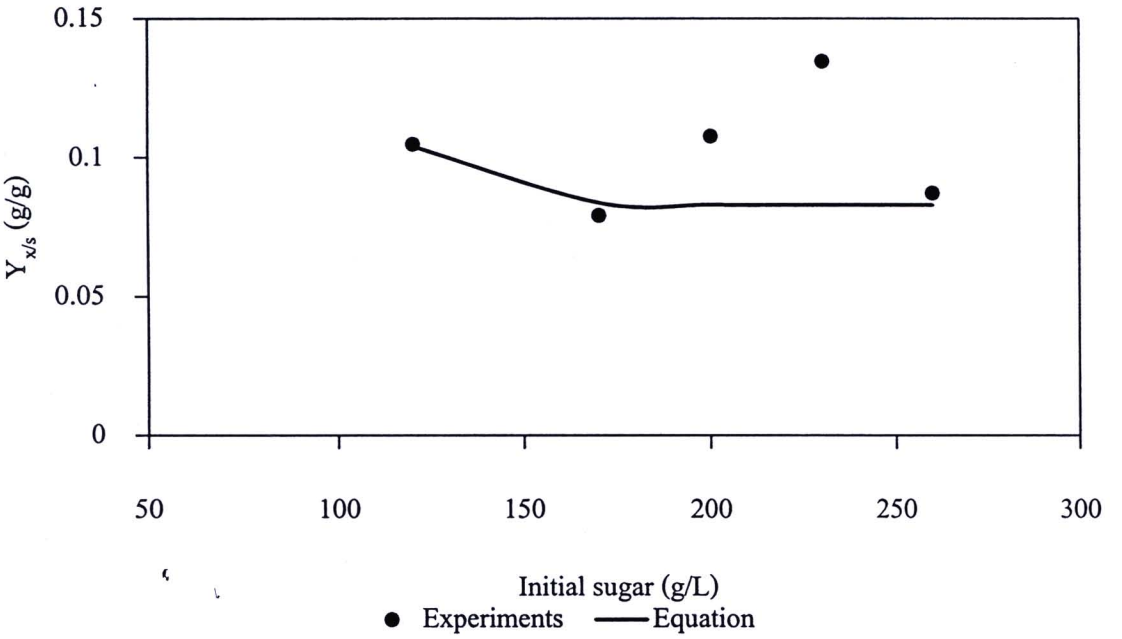
น้ำตาลเริ่มต้นให้ผลการทำนายที่มีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลการทดลอง เฉพาะช่วงเริ่มต้นการหมักหรือเริ่มมีการใช้น้ำตาลของเซลล์จนถึงช่วงที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มคงที่หรือใกล้หมด เนื่องจากสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ logistic model เหมาะสำหรับการทำนายการใช้น้ำตาลของยีสต์ในช่วง growth rate แต่หากพิจารณาจากค่า R^2 ที่มีค่าใกล้เคียง 1 อาจสรุปได้ว่าสมการ logistic model สามารถทำนายได้ดี

ตารางที่ 4.14 ค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการการใช้น้ำตาลของยีสต์ในการหมักเอทานอลจากน้ำอ้อย

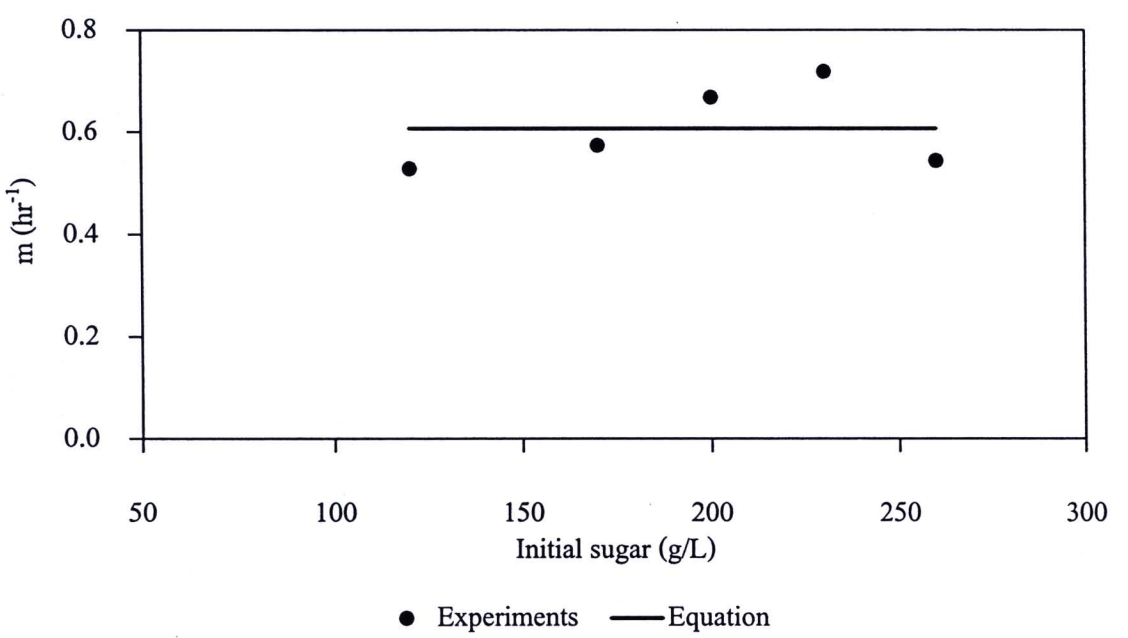
Kinetics Parameter	Sugar (g/L)				
	120	170	200	230	260
$Y_{x/s}$ (g/g)	0.105	0.079	0.108	0.135	0.087
m (hr^{-1})	0.528	0.573	0.668	0.718	0.544
R^2	0.9860	0.9877	0.9847	0.9734	0.9033



รูปที่ 4.43 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงน้ำตาลจากการทดลองกับผลการทำนายจากแบบจำลองจลนพลศาตร์ในการหมักเอทานอลจากน้ำอ้อย



รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลได้ของเซลล์จากสารอาหาร ($Y_{x/s}$) กับความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นของน้ำอ้อย



รูปที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าคงที่บำรุงรักษาเซลล์ (m) กับความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นของน้ำอ้อย

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

จากรูปที่ 4.44 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าผลได้ของเซลล์จากสารอาหาร ($Y_{x/s}$) กับค่าความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้นของน้ำอ้อย สามารถอธิบายในรูปแบบของสมการ Exponential ดังสมการที่ 4.12 เนื่องจากค่าผลได้ของเซลล์จากสารอาหาร ($Y_{x/s}$) มีความสัมพันธ์กับค่าความเข้มข้นเซลล์สูงสุด (X_m) ดังที่กล่าวมาข้างต้นเนื่องจากค่าความเข้มข้นเซลล์สูงสุดมีค่าลดลงเมื่อมีปริมาณน้ำตาลสูงขึ้น จึงส่งผลให้ค่าผลได้ของเซลล์จากสารอาหาร ($Y_{x/s}$) มีค่าลดลง

$$Y_{x/s} = 0.0829 + 44.1894\exp(-0.0639\ S_0) \qquad (4.12)$$

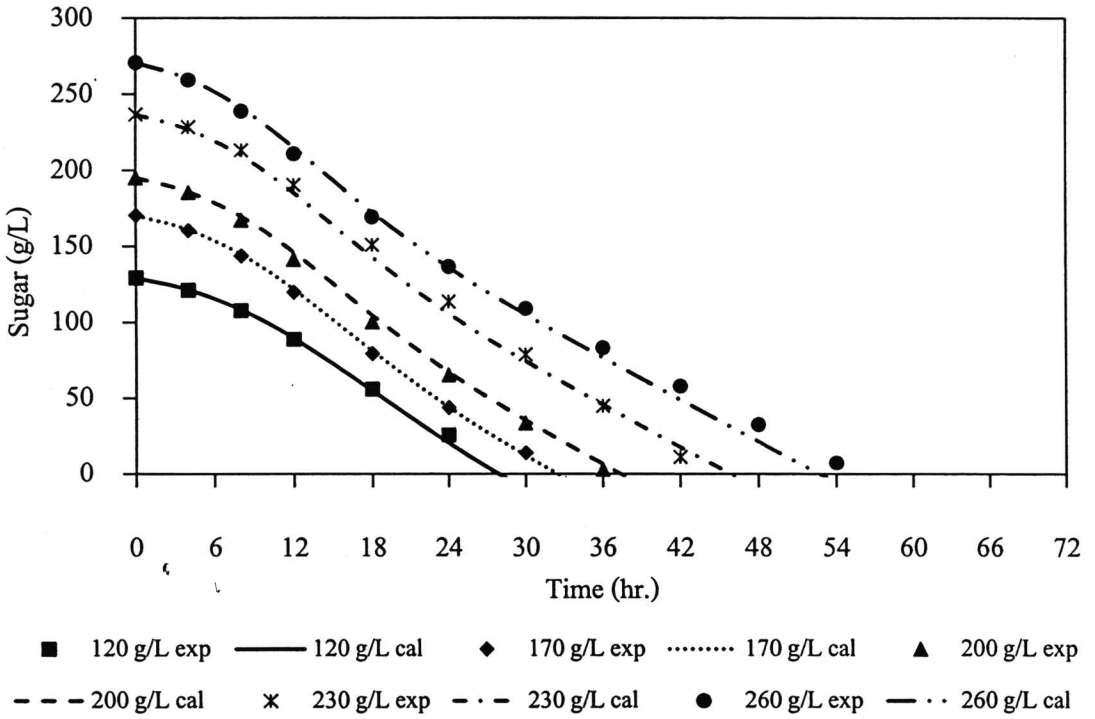
รูปที่ 4.45 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่บำรุงรักษาเซลล์ (m) กับค่าความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้นของน้ำอ้อย ซึ่งสามารถอธิบายในรูปแบบของสมการ Exponential ดังสมการที่ 4.13 สาเหตุเนื่องมาจากค่าคงที่บำรุงรักษาเซลล์ (m) มีค่ามากขึ้นเมื่อมีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลจากเซลล์ยีสต์ต้องใช้น้ำตาลเพื่อการบำรุงรักษาและซ่อมแซม เพื่อให้มีสภาพเหมาะสำหรับการผลิตเอทานอล และหากมีปริมาณน้ำตาลสูงทำให้ยีสต์มีจำนวนน้อยเพราะผลยับยั้งของปริมาณน้ำตาลทำให้เซลล์ยีสต์เพิ่มปริมาณได้น้อยลง

$$m = 0.6062 + \exp(-7.6297\ S_0) \qquad (4.13)$$

เมื่อได้สมการของความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลได้ของเซลล์จากสารอาหาร ($Y_{x/s}$) และ ค่าคงที่บำรุงรักษาเซลล์ (m) กับค่าความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น ดังนั้นการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการผลิตเอทานอล ที่ความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 ค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการการใช้น้ำตาลของยีสต์คำนวณจากสมการ 4.12 และ 4.13 ในการหมักเอทานอลจากน้ำอ้อย

Kinetics Parameter	Sugar (g/L)				
	120	170	200	230	260
$Y_{x/s}$ (g/g)	0.103	0.084	0.083	0.083	0.083
m (hr^{-1})	0.606	0.606	0.606	0.606	0.606
R^2	0.9991	0.9996	0.9995	0.9972	0.9994



รูปที่ 4.46 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงน้ำตาลจากการทดลองกับผลการทำนายด้วยค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณจากสมการที่ 4.12 และ 4.13 ที่ความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นต่างๆของกากน้ำตาล

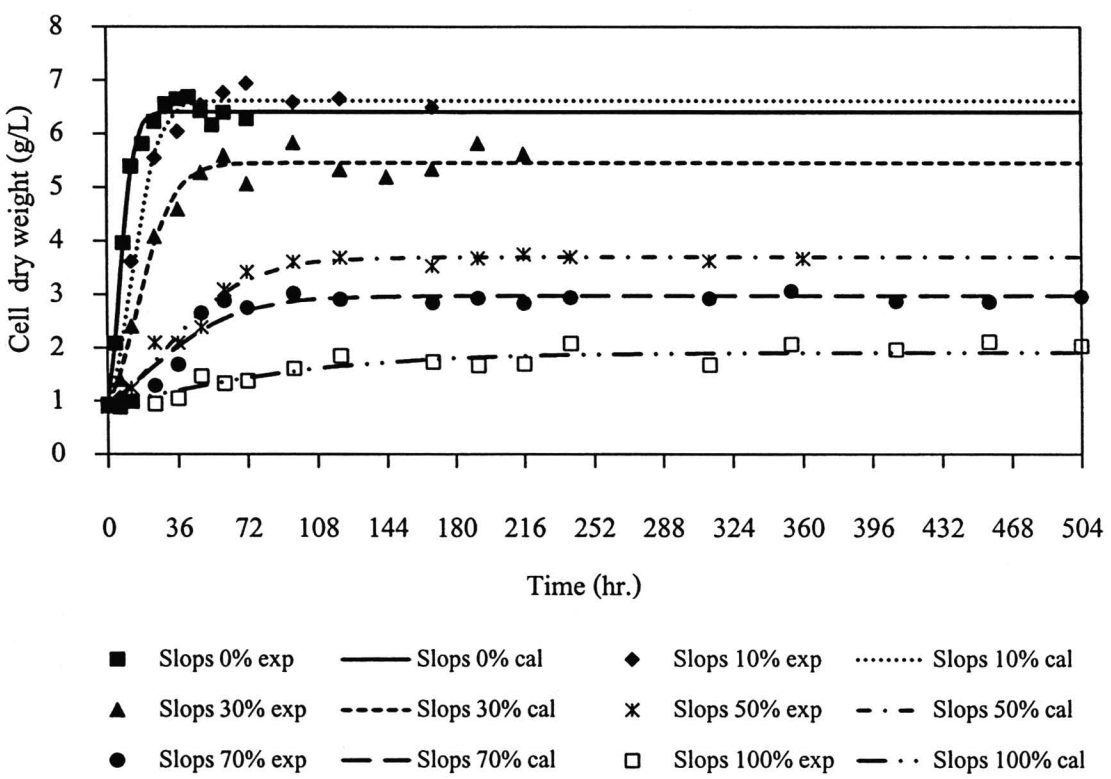
ค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการการใช้น้ำตาลของยีสต์ที่ได้จากสมการที่ 4.12 และ 4.13 สามารถนำไปทำนายความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาล โดยเปรียบเทียบกับผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.46 พบว่าจากการใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้ สามารถใช้ทำนายอัตราการใช้น้ำตาลของยีสต์ที่เวลาต่างๆได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองโดยให้ค่า R^2 ที่ใกล้เคียงกับ 1

4.3.7 จลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการเจริญของเซลล์ในการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลโดยการนำน้ำกากส่ามาเจือจางกากน้ำตาล

งานวิจัยนี้ได้ทำการนำน้ำกากส่ามาเจือจางกากน้ำตาลที่ปริมาณน้ำกากส่าเท่ากับ ปริมาณ 0, 10, 30, 50, 70 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร แล้วทำการหมักเพื่อหาจลนพลศาสตร์ของการหมัก ซึ่งจะคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ คือ ค่าอัตราจำเพาะสูงสุดของการเติบโต (μ_m) ค่าความเข้มข้นเซลล์สูงสุด (X_m) ในสมการอัตราการเจริญของเซลล์ เพื่อนำไปใช้ในแบบจำลองการเจริญเติบโตของยีสต์ในการหมักเอทานอล รายละเอียดดังตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 ค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการเจริญของเซลล์ในการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลโดยการนำน้ำกากส่ามาเจือจาง

Kinetics Parameter	Slops (% v/v)					
	0	10	30	50	70	100
μ_m (hr^{-1})	0.275	0.148	0.107	0.044	0.043	0.016
X_m (g/L)	6.407	6.990	5.669	3.952	2.994	1.923
R^2	0.9904	0.9812	0.9793	0.9813	0.9496	0.8977

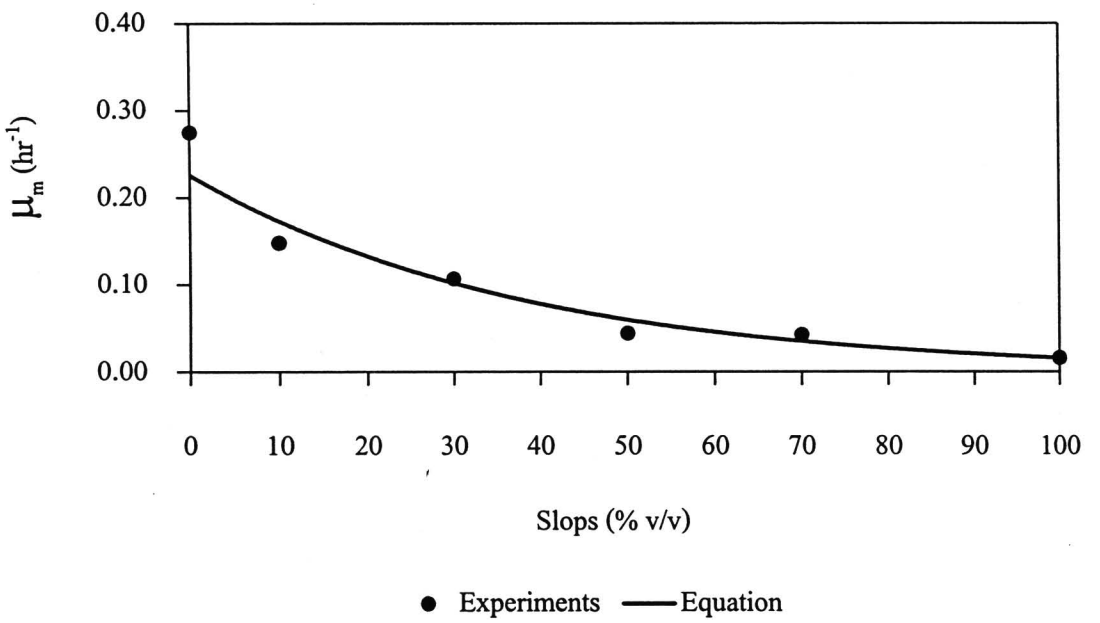


รูปที่ 4.47 การเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของเซลล์ยีสต์จากการทดลองกับผลการทำนายจากแบบจำลองจลนพลศาตร์ในการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลโดยการนำน้ำกากส่ามาเจือจาง

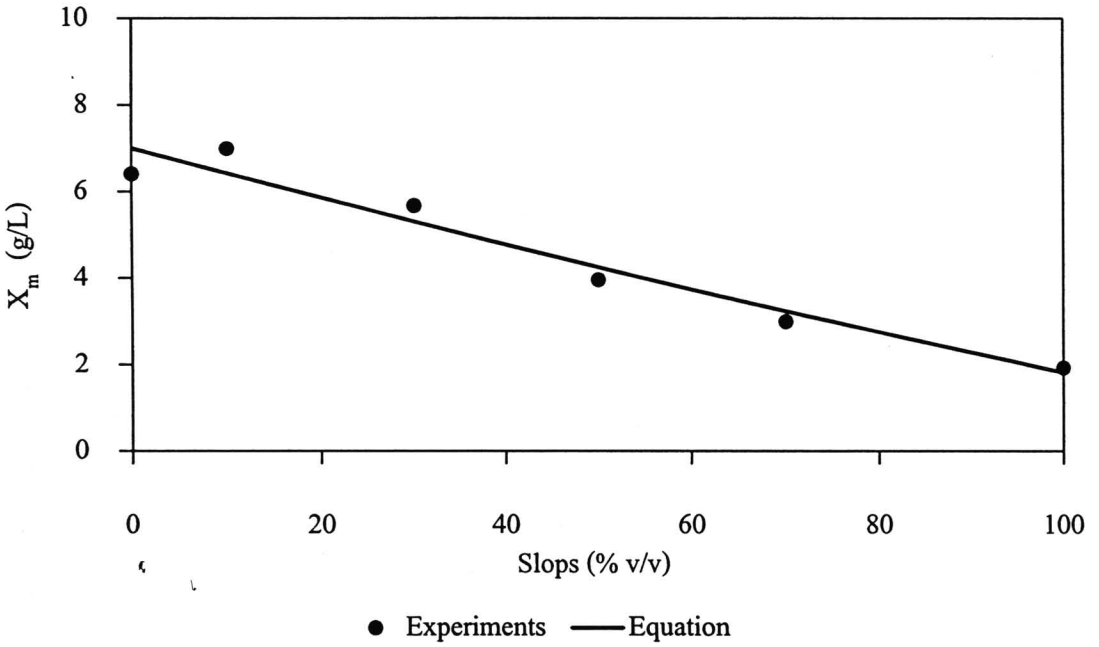
พบว่าจากการคำนวณที่ปริมาณน้ำกากส่าเท่ากับ 0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ได้ค่าอัตราจำเพาะสูงสุดของการเติบโต (μ_m) สูงสุดเท่ากับ 0.275 ต่อชั่วโมง และที่ปริมาณน้ำกากส่าเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร สามารถคำนวณค่าความเข้มข้นเซลล์สูงสุด (X_m) สูงสุดเท่ากับ 6.990 กรัมต่อลิตร ซึ่งค่าพารามิเตอร์ทั้ง μ_m และ X_m มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นแบบเดียวกันคือ เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำกากส่าจะส่งผลให้ค่า μ_m และ X_m มีค่าลดลง

จากรูปที่ 4.47 พบว่าที่ปริมาณน้ำกากส่าที่นำมาเจือจางกากน้ำตาลที่ 0 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ให้ผลการทำนายการเจริญของเซลล์ที่ได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองตลอดระยะเวลาการหมัก ที่ค่า R^2 ที่มีค่าใกล้เคียง 1 ซึ่งสรุปได้ว่าสมการอัตราการเจริญของเซลล์ สามารถใช้ทำนายความเข้มข้นของเซลล์ยีสต์ที่เวลาต่างๆ ได้ จากรูปที่ 4.48 เป็นการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าอัตราจำเพาะสูงสุดของการเติบโต (μ_m) กับปริมาณน้ำกากส่าที่เจือจางกากน้ำตาล สามารถอธิบายในรูปแบบของสมการ Exponential ดังสมการที่ 4.14 สาเหตุเนื่องจากสาร by-product ในน้ำกากส่า ซึ่งมีผลรบกวนระบบการเจริญเติบโตของยีสต์ จึงส่งผลให้ค่าอัตราจำเพาะสูงสุดของการเติบโต (μ_m) มีค่าลดลงเมื่อมีปริมาณน้ำกากส่ามากขึ้น

$$\mu_m = 0.2257\exp(-0.0266\ S_0) \qquad (4.14)$$



รูปที่ 4.48 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราจำเพาะสูงสุดของการเติบโต (μ_m) กับปริมาณน้ำกากส่าที่เจือจางกากน้ำตาล



รูปที่ 4.49 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของเซลล์ยีสต์สูงสุด (X_m) กับปริมาณน้ำกากส่าที่เจือจางกากน้ำตาล

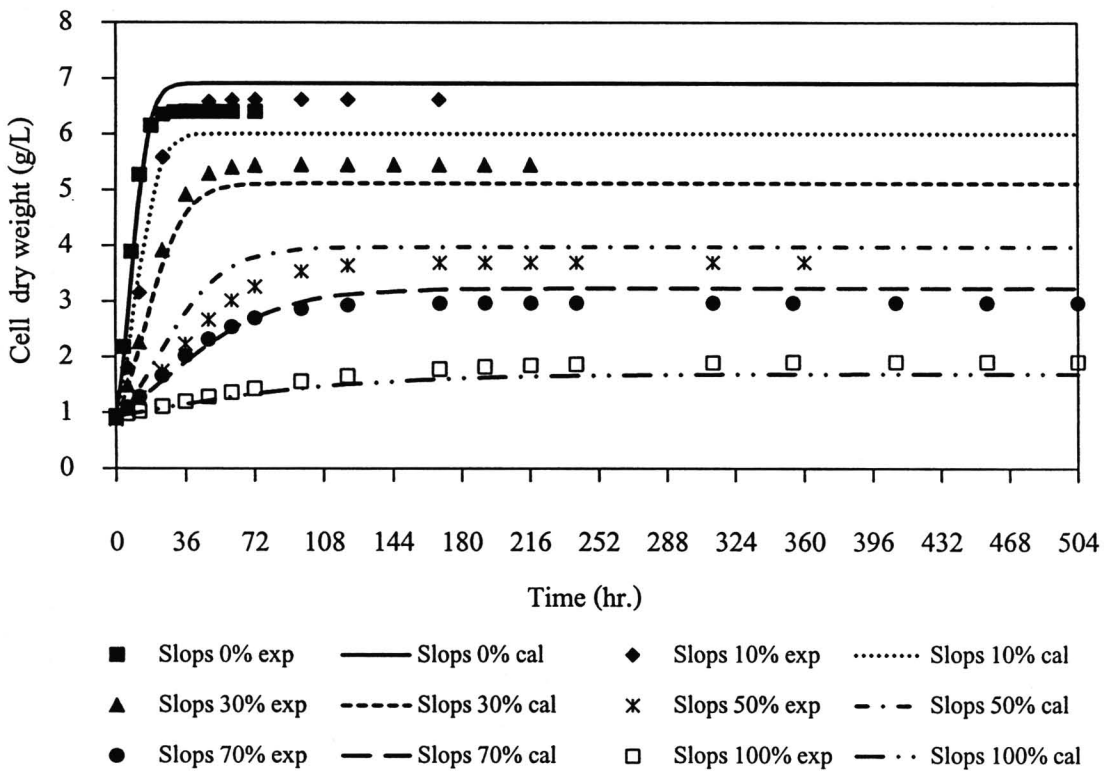
และจากรูปที่ 4.49 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของเซลล์ยีสต์สูงสุด (X_m) กับปริมาณน้ำกากส่าต่างๆ ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์แบบของสมการ Exponential ดังสมการที่ 4.15 สาเหตุเนื่องมาจาก เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำตาลในอาหารให้มากขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราจำเพาะสูงสุดของการเติบโต (μ_m) มีค่าลดลง ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ยีสต์สามารถผลิตเซลล์ยีสต์ได้ลดลงจนคงที่ที่ค่าปริมาณน้ำตาลค่าหนึ่งซึ่งเซลล์ยีสต์จะไม่สามารถผลิตเซลล์เพื่อการเจริญเติบโตได้เลย

$$X_m = -16.0233 + 23.0226\exp(-0.0026\ S_0) \qquad (4.15)$$

ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเซลล์ยีสต์สูงสุด (X_m) และ อัตราจำเพาะสูงสุดของการเติบโต (μ_m) จะขึ้นกับค่าความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลเริ่มต้น ดังสมการที่ 4.14 และ 4.15 เพื่อนำค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการเจริญของเซลล์ที่ปริมาณน้ำกากส่าต่างๆ ดังแสดงผลการคำนวณในตารางที่ 4.17 เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการเจริญของเซลล์ที่ได้ไปทำนายความเข้มข้นของเซลล์ยีสต์ โดยเปรียบเทียบกับผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.50 พบว่าจากการใช้ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณจากสมการที่ 4.14 และ 4.15 สามารถใช้ทำนายความเข้มข้นของเซลล์ยีสต์ที่เวลาต่างๆได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองโดยให้ค่า R^2 ที่ใกล้เคียงกับ 1

ตารางที่ 4.17 ค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการเจริญของเซลล์ที่คำนวณจากสมการ 4.14 และ 4.15 ในการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลโดยการนำน้ำกากส่ามาเจือจาง

Kinetics Parameter	Slops (% v/v)					
	0	10	30	50	70	100
μ_m (hr^{-1})	0.226	0.173	0.102	0.060	0.035	0.016
X_m (g/L)	6.910	6.390	5.349	4.309	3.268	1.708
R^2	0.9814	0.9907	0.9998	0.9784	0.9851	0.9995



รูปที่ 4.50 การเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของเซลล์ยีสต์จากการทดลองกับผลการทำนายด้วยค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณจากสมการที่ 4.14 และ 4.15 ในการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลโดยการนำน้ำกากส่ามาเจือจาง

4.3.8 จลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการผลิตเอทานอลในการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลโดยการนำน้ำกากส่ามาเจือจางกากน้ำตาล

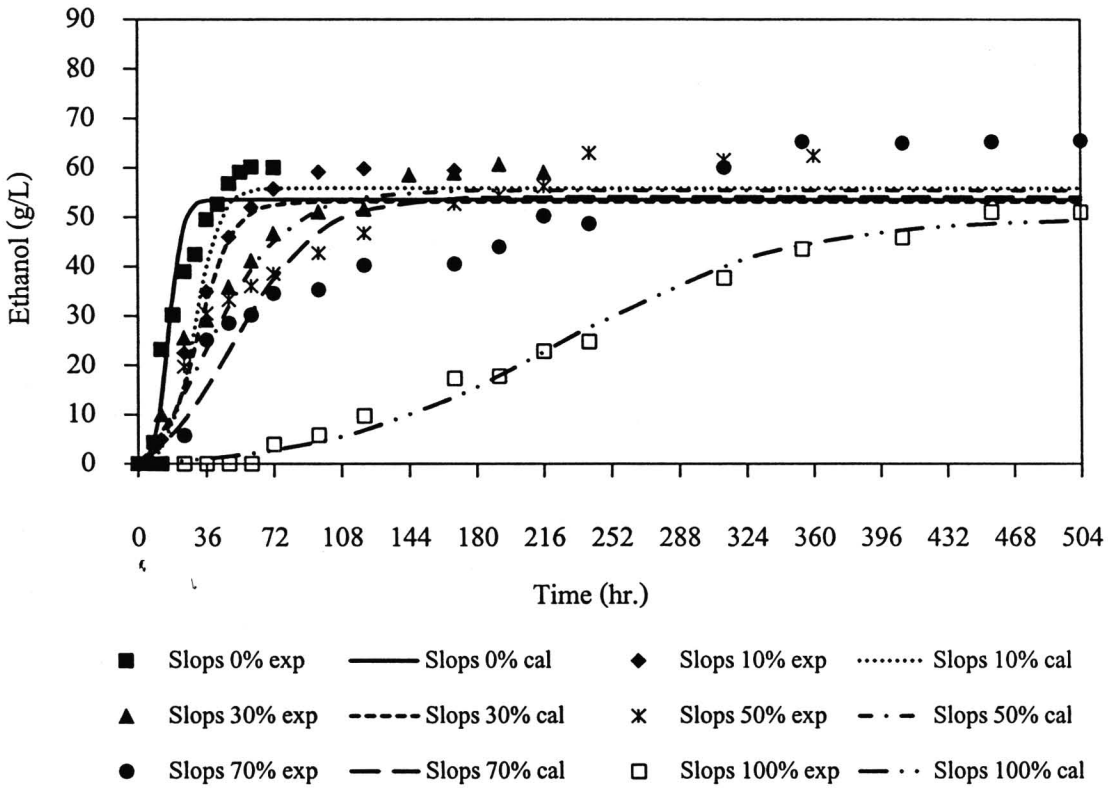
จากค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการผลิตเอทานอล ของค่าอัตราจำเพาะสูงสุดของการเติบโต (μ_m) และค่าความเข้มข้นเซลล์สูงสุด (X_m) สามารถนำไปคำนวณค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์จากเซลล์ ($Y_{p/x}$) ค่าระยะการปรับตัวของการผลิตเอทานอล (Δt) ซึ่งใช้ในสมการอัตราการผลิตเอทานอลในการหมักจากกากน้ำตาลในการนำน้ำกากส่ามาเจือจางดังแสดงในตารางที่ 4.18

พบว่าผลจากการคำนวณที่ปริมาณน้ำกากส่า 100 เปอร์เซ็นต์ ค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์จากเซลล์ ($Y_{p/x}$) สูงสุดเท่ากับ 26.866 กรัมเอทานอลต่อกรัมน้ำตาล และ สามารถคำนวณค่าระยะการปรับตัวของการผลิตเอทานอล (Δt) สูงสุดเท่ากับ 220.240 ชั่วโมง ซึ่งค่าพารามิเตอร์ทั้ง $Y_{p/x}$ และ Δt ที่พบมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นแบบเดียวกันคือ เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำกากส่าจะส่งผลให้ค่า $Y_{p/x}$ และ Δt มีค่าเพิ่มขึ้น

รูปที่ 4.51 แสดงการทำนายอัตราการผลิตเอทานอลที่ปริมาณน้ำกากส่า 0 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์มีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลการทดลองตลอดระยะเวลาการหมักที่ค่า R^2 ใกล้เคียง 1 ซึ่งสรุปได้ว่าสมการอัตราการผลิตเอทานอล สามารถใช้ทำนายความเข้มข้นของเอทานอลที่เวลาต่างๆ ได้

ตารางที่ 4.18 ค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการผลิตเอทานอลในการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลโดยการนำน้ำกากส่ามาเจือจาง

Kinetics Parameter	Slops (% v/v)					
	0	10	30	50	70	100
$Y_{p/x}$ (g/g)	8.456	8.547	10.080	18.290	20.418	26.866
Δt (hr)	9.637	17.238	15.988	7.329	31.106	220.240
R^2	0.9311	0.9750	0.9180	0.9376	0.8659	0.9914



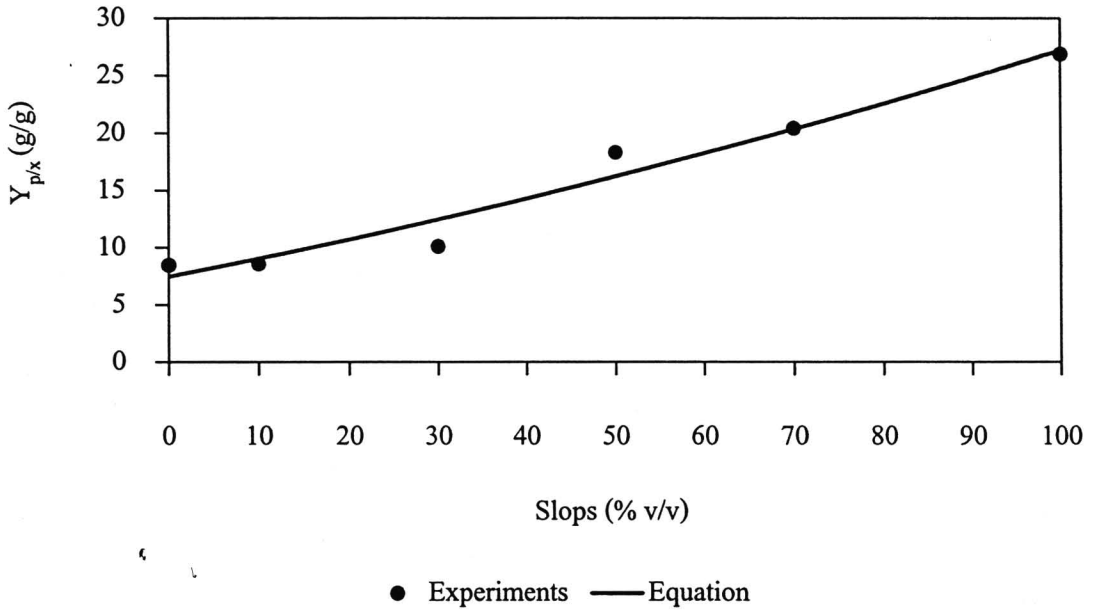
รูปที่ 4.51 การเปรียบเทียบการผลิตเอทานอลจากการทดลองกับผลการทำนายจากแบบจำลองจลนพลศาตร์ในการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลโดยการนำน้ำกากส่ามาเจือจาง

จากรูปที่ 4.52 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์จากเซลล์ ($Y_{p/x}$) กับปริมาณน้ำกากส่าต่างๆ สามารถอธิบายในรูปแบบของสมการ Polynomial ดังสมการที่ 4.16 เนื่องจากค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์จากเซลล์มีความสัมพันธ์กับค่า (X_m) เพราะเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำกากส่าทำให้มีปริมาณเซลล์สูงสุดลดลง จึงเป็นสาเหตุให้ค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์จากเซลล์มีค่าลดลง

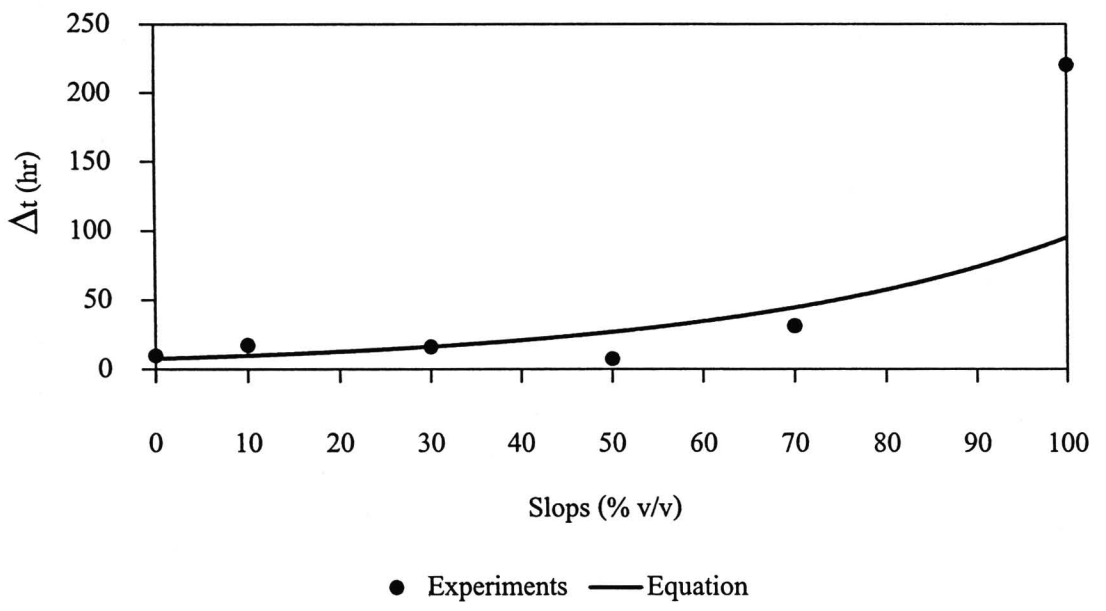
$$Y_{p/x} = -0.0004(S_0)^2 + 0.1528(S_0) + 7.4468 \qquad (4.16)$$

จากรูปที่ 4.53 เป็นการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะการปรับตัวของการผลิตเอทานอล (Δt) กับปริมาณน้ำกากส่าต่างๆ ซึ่งอธิบายในรูปแบบของสมการ Exponential ดังสมการที่ 4.17 สาเหตุเนื่องมาจากค่าระยะการปรับตัวของการผลิตเอทานอล (Δt) จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณน้ำกากส่าสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลจากสารจำพวก by-product ในน้ำกากส่าไปยับยั้งกลไกการเจริญเติบโตของยีสต์ ทำให้ยีสต์ปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมที่มี

$$\Delta t = 7.5454\exp(0.0253\ S_0) \qquad (4.17)$$



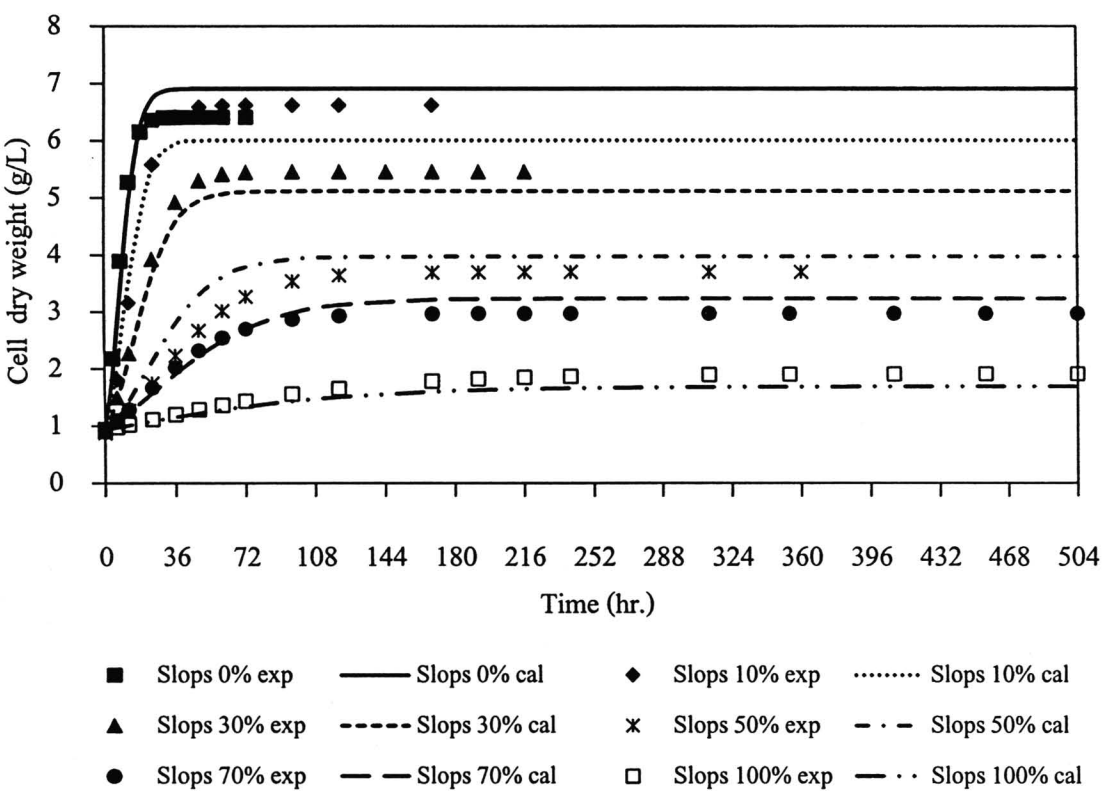
รูปที่ 4.52 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์จากเซลล์ ($Y_{p/x}$) กับปริมาณน้ำกากส่าที่เจือจางกากน้ำตาล



รูปที่ 4.53 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะการปรับตัวของการผลิตเอทานอล (Δt) กับปริมาณน้ำกากส่าที่เจือจางกากน้ำตาล

ตารางที่ 4.19 ค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการผลิตเอทานอลที่คำนวณจากสมการ 4.16 และ 4.17 ในการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลโดยการนำน้ำกากส่ามาเจือจาง

Kinetics Parameter	Slops (% v/v)					
	0	10	30	50	70	100
$Y_{p/x}$ (g/g)	7.447	9.020	12.437	16.213	20.350	27.230
Δt (hr)	7.545	9.720	16.128	26.761	44.404	94.911
R^2	0.9985	0.9261	0.9998	0.9899	0.9657	0.8283



รูปที่ 4.54 การเปรียบเทียบการผลิตเอทานอลจากการทดลองกับผลการทำนายด้วยค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณจากสมการที่ 4.16 และ 4.17 ในการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลโดยการนำน้ำกากส่ามาเจือจาง

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์จากเซลล์ ($Y_{p/x}$) และ ค่าระยะการปรับตัวของการผลิตเอทานอล (Δt) กับปริมาณน้ำกากส่าต่างๆ และเมื่อนำมาคำนวณด้วยสมการที่ 4.16 และ 4.17 เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการผลิตเอทานอล ที่ปริมาณน้ำกากส่าต่างๆ ดังแสดงผลการคำนวณในตารางที่ 4.19 ค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการผลิตเอทานอลที่ได้จากสมการที่ 4.16 และ 4.17 เพื่อไปทำนายความเข้มข้นของเซลล์ยีสต์ แล้วเปรียบเทียบกับผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.54 พบว่าจากการใช้ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณจากสมการที่ 4.16 และ 4.17 สามารถใช้ทำนายอัตราการผลิตเอทานอลที่เวลาต่างๆได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองโดยให้ค่า R^2 ที่ใกล้เคียงกับ 1

4.3.9 จลนพลศาสตร์ของสมการการใช้น้ำตาลของยีสต์ในการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลโดยการนำน้ำกากส่ามาเจือจางกากน้ำตาล

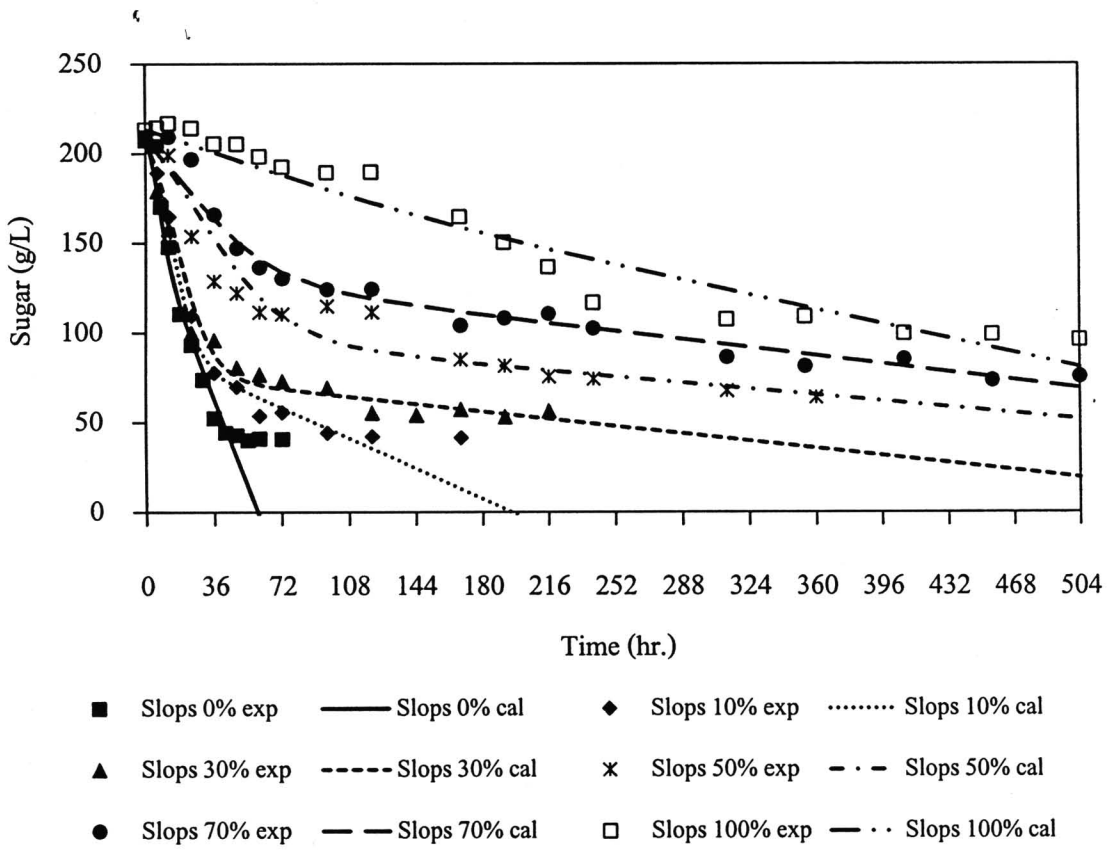
ทดลองเพื่อมาหาค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการการใช้น้ำตาลของยีสต์ซึ่งจะต้องหาค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์จากเซลล์ ($Y_{p/x}$) และค่าระยะการปรับตัวของการผลิตเอทานอล (Δt) มาร่วมในการคำนวณเพื่อหาแบบจำลองของการใช้น้ำตาลของยีสต์ ค่าผลได้ของเซลล์จากสารอาหาร ($Y_{x/s}$) ค่าคงที่บำรุงรักษาเซลล์ (m) ที่ได้จากการคำนวณแสดงในตารางที่ 4.20 ที่ปริมาณน้ำกากส่า 0 เปอร์เซ็นต์ สามารถคำนวณค่าผลได้ของเซลล์จากสารอาหาร ($Y_{x/s}$) สูงสุดเท่ากับ 0.081 กรัมเซลล์ต่อกรัมน้ำตาล และที่ปริมาณน้ำกากส่า 30 เปอร์เซ็นต์สามารถคำนวณค่าคงที่บำรุงรักษาเซลล์ (m) ต่ำสุดเท่ากับ 0.020 ต่อชั่วโมง เมื่อทำการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงน้ำตาลจากผลการทดลองกับแบบจำลองจลนพลศาตร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.55 พบว่าการทำนายการหมักในทุกค่าปริมาณน้ำกากส่าให้ผลการทำนายที่มีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลการทดลอง เฉพาะช่วงเริ่มต้นการหมักหรือเริ่มมีการใช้น้ำตาลของเซลล์จนถึงช่วงที่ปริมาณน้ำตาลเริ่มคงที่หรือใกล้หมด และจะให้ผลการทำนายคลาดเคลื่อนในช่วงที่ปริมาณน้ำตาลหมดหรือเริ่มคงที่ แต่หากพิจารณาจากค่า R^2 ที่มีค่าใกล้เคียง 1 ซึ่งสรุปได้ว่าสมการการใช้น้ำตาลของยีสต์ สามารถใช้ทำนายที่ปริมาณน้ำกากส่าต่างๆได้

รูปที่ 4.56 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าผลได้ของเซลล์จากสารอาหาร ($Y_{x/s}$) กับปริมาณน้ำกากส่าต่างๆ ซึ่งมีความสัมพันธ์ในรูปแบบของสมการ Exponential ดังสมการที่ 4.18 เนื่องจากค่าผลได้ของเซลล์จากสารอาหาร ($Y_{x/s}$) มีความสัมพันธ์กับค่าความเข้มข้นเซลล์สูงสุด (X_m) ดังที่กล่าวมาข้างต้นเนื่องจากค่าความเข้มข้นเซลล์สูงสุดมีค่าลดลงเมื่อมีปริมาณน้ำตาลสูงขึ้น จึงส่งผลให้ค่าผลได้ของเซลล์จากสารอาหาร ($Y_{x/s}$) มีค่าลดลง

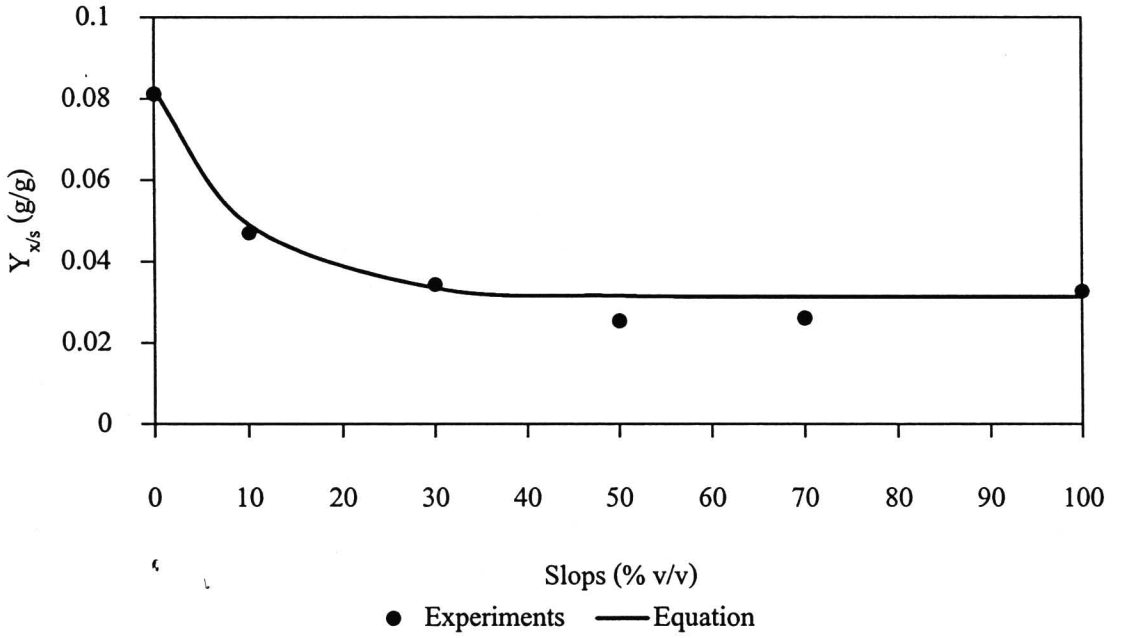
$$Y_{x/s} = 0.0313 + 0.0508\exp(-0.1054\ S_0) \qquad (4.18)$$

ตารางที่ 4.20 ค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการการใช้น้ำตาลของยีสต์ในการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลโดยการนำน้ำกากส่ามาเจือจาง

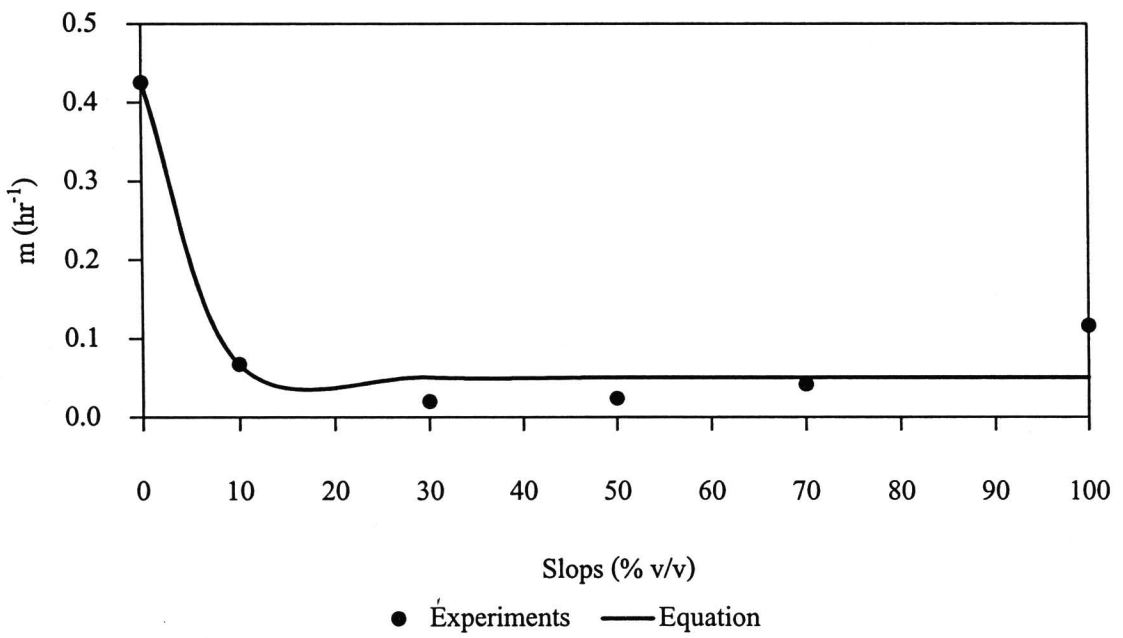
Kinetics Parameter	Slops (% v/v)					
	0	10	30	50	70	100
$Y_{x/s}$ (g/g)	0.081	0.047	0.034	0.025	0.026	0.033
m (hr^{-1})	0.425	0.067	0.020	0.024	0.042	0.116
R^2	0.9102	0.9764	0.9811	0.9453	0.9801	0.9538



รูปที่ 4.55 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงน้ำตาลจากการทดลองกับผลการทำนายจากแบบจำลองจลนพลศาสตร์ในการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลโดยการนำน้ำกากส่ามาเจือจาง



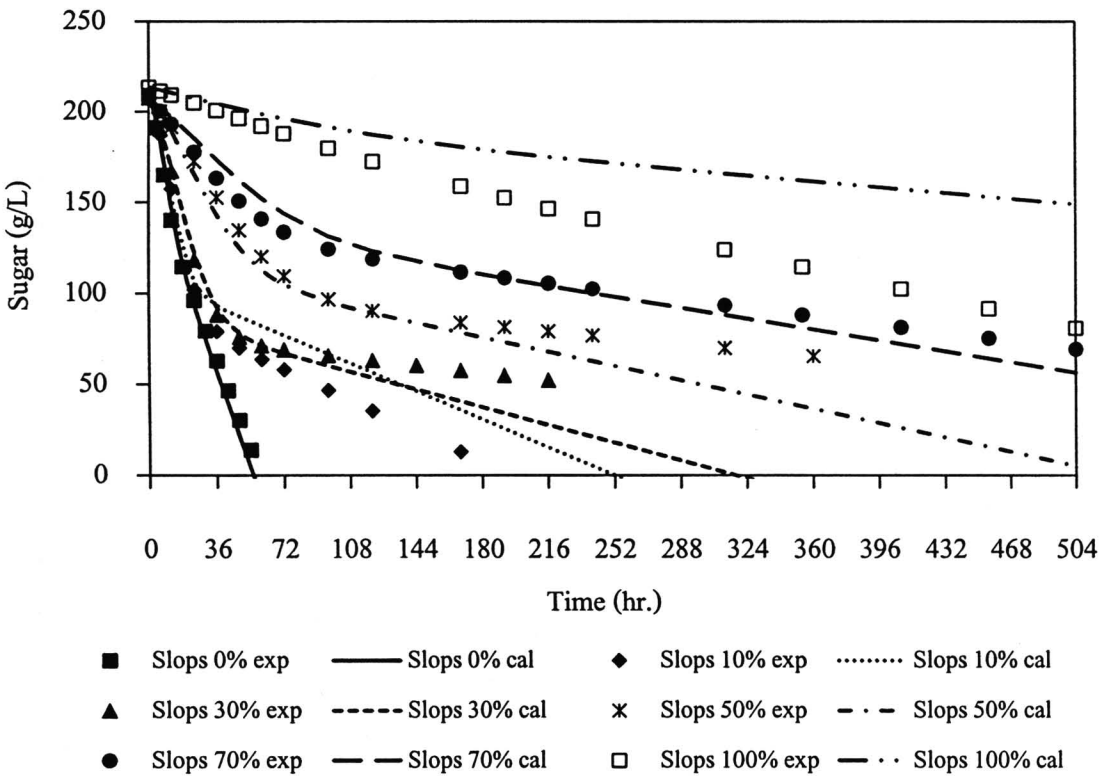
รูปที่ 4.56 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลได้ของเซลล์จากสารอาหาร ($Y_{x/s}$) กับปริมาณน้ำกากส่าที่เจือจางกากน้ำตาล



รูปที่ 4.57 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าคงที่บำรุงรักษาเซลล์ (m) กับปริมาณน้ำกากส่าที่เจือจางกากน้ำตาล

ตารางที่ 4.21 ค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการการใช้น้ำตาลของยีสต์ที่คำนวณจากสมการ 4.18 และ 4.19 ในการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลโดยการนำน้ำกากส่ามาเจือจาง

Kinetics Parameter	Slops (% v/v)					
	0	10	30	50	70	100
$Y_{x/s}$ (g/g)	0.082	0.049	0.033	0.032	0.031	0.031
m (hr^{-1})	0.425	0.067	0.051	0.051	0.051	0.051
R^2	0.9985	0.9962	0.9814	0.9856	0.9854	0.9886



รูปที่ 4.58 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงน้ำตาลจากการทดลองกับผลการทำนายด้วยค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณจากสมการที่ 4.18 และ 4.19 ในการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลโดยการนำน้ำกากส่ามาเจือจาง

จากรูปที่ 4.57 เป็นการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่บำรุงรักษาเซลล์ (m) กับปริมาณน้ำกากส่าต่างๆ มีความสัมพันธ์ในรูปแบบของสมการ Exponential ดังสมการที่ 4.19 สาเหตุเนื่องมาจากค่าคงที่บำรุงรักษาเซลล์ (m) มีความสัมพันธ์กับค่าความเข้มข้นเซลล์สูงสุด (X_m) ดังที่กล่าวมาข้างต้น เนื่องจากค่าความเข้มข้นเซลล์สูงสุดมีค่าลดลงเมื่อมีปริมาณน้ำกากส่าสูงขึ้น จึงส่งผลให้ค่าคงที่บำรุงรักษาเซลล์ (m) ลดลง

$$m = 0.0506 + 0.3747\exp(-0.3133\ S_0) \qquad (4.19)$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลได้ของเซลล์จากสารอาหาร ($Y_{x/s}$) และค่าคงที่บำรุงรักษาเซลล์ (m) กับปริมาณน้ำกากส่าต่างๆและนำสมการที่ 4.18 และ 4.19 มาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการผลิตเอทานอล ที่ความเข้มข้นของปริมาณน้ำกากส่าต่างๆ ดังผลการคำนวณแสดงในตารางที่ 4.21

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการการใช้น้ำตาลของยีสต์ที่ได้จากสมการที่ 4.18 และ 4.19 ไปทำนายความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาล โดยเปรียบเทียบกับผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.58 พบว่าจากการใช้ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณจากสมการที่ 4.18 และ 4.19 สามารถใช้ทำนายอัตราการใช้น้ำตาลของยีสต์ที่เวลาต่างๆได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองโดยให้ค่า R^2 ที่ใกล้เคียงกับ 1 จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ของสมการอัตราการผลิตเอทานอล สรุปได้ว่า สมการที่ 4.18 และ 4.19 สามารถใช้คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการการใช้น้ำตาลของยีสต์ได้ในช่วงปริมาณน้ำกากส่าต่างๆ