บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

จากงานวิจัยของประพนธ์ (2531) เป็นการหมักน้ำส้มสายชูแบบต่อเนื่องซึ่งมีข้อดีคือกำลังการผลิตสูงกว่าการหมักแบบกึ่งต่อเนื่อง และแบบเป็นครั้งเมื่อต้องการผลิตน้ำส้มสายชูเป็นปริมาณมาก (รายละเอียดเกี่ยวกับการเปรียบเทียบกำลังการผลิตของกระบวนการหมักน้ำส้มสายชูแบบเป็นครั้ง, แบบกึ่งต่อเนื่อง และแบบต่อเนื่องแสดงไว้ในภาคผนวก ง.) แต่งานวิจัยของประพนธ์นี้เป็นการศึกษาทดลองผลิตน้ำส้มสายชู โดยนำเอาไวน์ที่ได้จากการหมักเอธานอลไปเจือจางให้มีปริมาณอัลกอออล์ตามที่กำหนดคือ ประมาณร้อยละ 7 โดยปริมาตร แล้วนำไปพาสเจอไรซ์เพื่อฆ่าเชื้อ ก่อนนำไปหมักให้เป็นน้ำส้มสายชูที่มีปริมาณกรดอะซิติกประมาณร้อยละ 5 ซึ่งพบว่าได้ว่าต้องเสียเวลา และเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานไปกับการเจือจางและการพาสเจอไรซ์ไวน์ จึงทำให้เกิดความคิดที่จะทำการผลิตน้ำส้มสายชูจากน้ำสับปะรดโดยผ่านกระบวนการหมัก 2 ขั้นตอนต่อเนื่องกัน โดยการนำเอาเครื่องหมักที่ใช้ในการผลิตเอธานอลและเครื่องหมักที่ใช้ในการผลิตน้ำส้มสายชูมาต่ออนุกรมเข้าด้วยกัน และมีการเพิ่มหน่วยถังเก็บไวน์ขึ้นมา เพื่อใช้สำหรับเก็บสำรองไวน์ก่อนป้อนเข้าสู่เครื่องหมักน้ำส้มสายชู ทำให้สามารถป้อนไวน์ได้อย่างต่อเนื่องถ้าหากเครื่องหมักเอธานอลชำรุด หรือมีความจำเป็นต้องหยุดเดินเครื่องในการผลิตน้ำส้มสายชูจากน้ำสับปะรดดังกล่าว จำเป็นต้องมีการปรับความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลในน้ำสับปะรดให้อยู่ที่ประมาณ 14 บริกซ์ เพื่อว่าเมื่อเกิดการหมักเป็นเอธานอลแล้วจะได้ไวน์ที่มีปริมาณเอธานอลประมาณร้อยละ 7 พอดี ซึ่งสามารถนำไปใช้หมักให้เป็นน้ำส้มสายชูได้โดยไม่ต้องมีการเจือจางก่อน และไม่ต้องพาสเจอไรซ์อีกด้วย

สำหรับการทดลองหมักน้ำส้มสายชูนี้ ได้ใช้สภาวะที่เหมาะสมตามผลการทดลองของประพนธ์ (2531) และเครื่องหมักที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นอุปกรณ์เครื่องมือชุดเดียวกับที่ใช้ในการทดลองของประพนธ์ (2531) โดยวัสดุบรรจุในแต่ละคอลัมน์มีจำนวน 180 ลูก มีอัตราส่วนความสูงของวัสดุบรรจุต่อช่องว่างเหนือเบดเป็น 1:0.95 การไหลเวียนของน้ำหมักเป็นแบบกาลักน้ำในทุกเครื่องหมัก อัตราการไหลเวียนของน้ำหมักในเครื่องหมักแต่ละชุดเป็น 2.8 ลิตรต่อนาที และอัตราการให้อากาศในเครื่องหมักที่ 1, 2, 3 และ 4 เป็น 0.04, 0.04, 0.06 และ 0.06 ปปน. ตามลำดับ

สำหรับขั้นตอนแรกเป็นการผลิตไวน์จากน้ำสับปะรด โดยควบคุมอัตราการเจือจางของน้ำสับปะรดที่ป้อนเข้าสู่ระบบหมักเอธานอลอย่างต่อเนื่องให้คงที่เท่ากับ 0.1725 ชม.$^{-1}$ ไวน์ที่ได้มีความเข้มข้นของเอธานอลประมาณร้อยละ 10 หรือถ้าควบคุมให้อัตราการเจือจางของน้ำสับปะรดเป็น 0.0700 ชม.$^{-1}$ ได้ไวน์ที่มีความเข้มข้นของเอธานอลประมาณร้อยละ 7 เพื่อให้สามารถนำไวน์มาป้อนเข้าสู่ระบบการหมักน้ำส้มสายชูแบบต่อเนื่องได้ทันที ส่วนขั้นตอนที่ 2 เป็นการทดลองผลิตน้ำส้มสายชูจากไวน์ โดยใช้เครื่องหมักน้ำส้มสายชูแบบต่อเนื่องดังกล่าวมาแล้ว การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำส้มสายชู ข้อมูลการทดลองทั้งหมดแสดงในภาคผนวก ข. ได้แก่ ตารางที่ ข.1-ข.12

ได้นำข้อมูลจากตารางที่ ข.1-ข.12 ไปพลอตกราฟปริมาณเอธานอลและกรดอะซิติกของน้ำหมักในคอลัมน์ต่าง ๆ เทียบกับเวลา ดังแสดงในภาคผนวก ข. รูปที่ ข.1-ข.12 พบว่าจุดต่าง ๆ มีความเบี่ยงเบนมาก ซึ่งเนื่องมาจากตัวอย่างน้ำหมักที่เก็บมาทำการวิเคราะห์อาจไม่ได้ผสมเป็นเนื้อเดียวกันทั้งระบบ ทำให้ค่าที่ได้คลาดเคลื่อนไป ดังนั้นจึงได้นำข้อมูลดังกล่าวมาหาค่าเฉลี่ย ด้วยวิธีอินทิเกรตหาพื้นที่ใต้เส้นโค้งของกราฟปริมาณเอธานอลในช่วงเวลาหนึ่ง ๆ และกราฟปริมาณกรดอะซิติกในช่วงเวลาหนึ่ง ๆ โดยพิจารณาช่วงเวลาที่ทำการอินทิเกรตเท่ากับช่วงเวลาที่น้ำหมักดังกล่าวอยู่ในเครื่องหมัก 1 ชุด (retention time) แล้วนำข้อมูลที่ได้จากการเฉลี่ยมาพลอตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเอธานอล และปริมาณกรดอะซิติกกับเวลา ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.1-4.5 และ 4.7-4.13 โดยพบว่าค่าที่ได้มีความเบี่ยงเบนน้อยลง และได้เส้นกราฟที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตรวจสอบ (coefficient of determination, R^2) เข้าใกล้ 1 มากกว่าเดิม ดังนั้นจึงใช้กราฟในรูปที่ 4.1-4.5 และ 4.7-4.13 ในการสรุปและวิจารณ์ผลการทดลองของงานวิจัยนี้

4.1 สภาวะที่เหมาะสมของระบบหมักน้ำส้มสายชูแบบต่อเนื่องโดยไม่มีการนำผลิตภัณฑ์มาป้อนย้อนกลับ

ในการทดลองศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของระบบหมักน้ำส้มสายชูนี้ ได้ทำการทดลองที่อัตราการเจือจางต่าง ๆ ได้แก่ 0.0225, 0.0250 และ 0.0350 ชม.$^{-1}$ จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

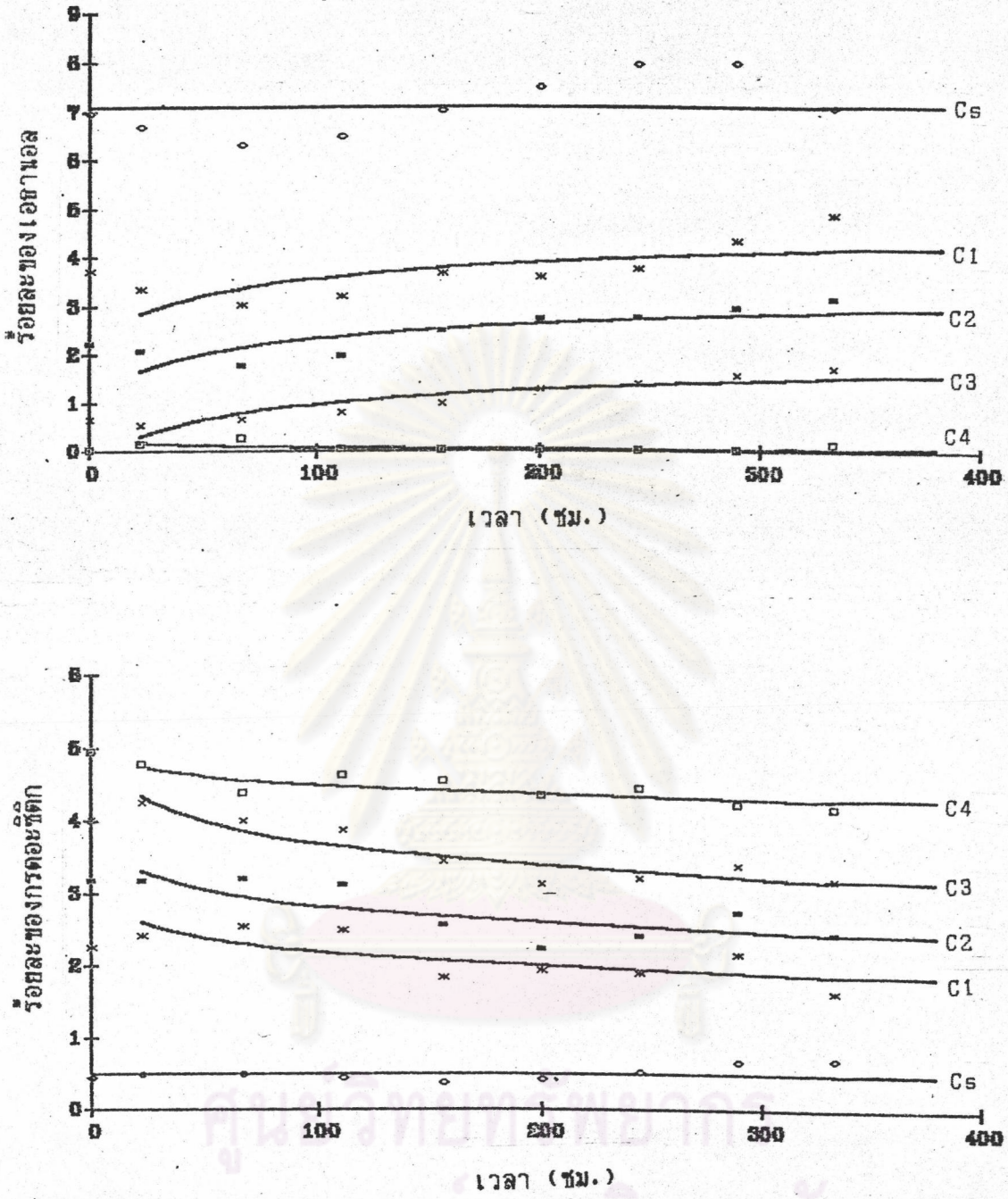
4.1.1 <u>ช่วงสภาวะไม่คงที่</u>

รูปที่ 4.1-4.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณเอธานอล และกรดอะซิติกต่อเวลา ที่อัตราการเจือจาง 0.0225, 0.0250 และ 0.0350 ชม.$^{-1}$ ตามลำดับ จะเห็นว่ากราฟทุกรูปแสดงแนวโน้มเดียวกันคือ ปริมาณเอธานอลในเครื่องหมักแต่ละเครื่องเพิ่มขึ้นตามเวลาในช่วงแรก แล้วปรับตัวคงที่ที่ค่าหนึ่งเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ ทำนองเดียวกันปริมาณกรดอะซิติกในเครื่องหมักแต่ละเครื่องลดลงตามเวลาในช่วงแรก แล้วปรับตัวมีค่าคงที่เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่

ที่อัตราการเจือจางต่าง ๆ กัน เมื่อพิจารณาปริมาณเอธานอลพบว่าระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 300 ชั่วโมงนับตั้งแต่เริ่มป้อนไวน์อย่างต่อเนื่อง และเมื่อพิจารณาปริมาณกรดอะซิติกพบว่าระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 250 ชั่วโมงนับตั้งแต่เริ่มป้อนไวน์อย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้เครื่องหมักแต่ละเครื่องจะเข้าสู่สภาวะคงที่ในเวลาใกล้เคียงกันด้วยในช่วงอัตราการเจือจางเท่ากับ 0.0225-0.0350 ชม.$^{-1}$ กล่าวคือระบบหมักน้ำส้มสายชูดังกล่าวใช้เวลาเข้าสู่สภาวะคงที่ใหม่ประมาณ 300 ชั่วโมง เมื่อมีการเปลี่ยนอัตราการเจือจางในช่วงที่ทำการศึกษา

4.1.2 <u>ช่วงสภาวะคงที่</u>

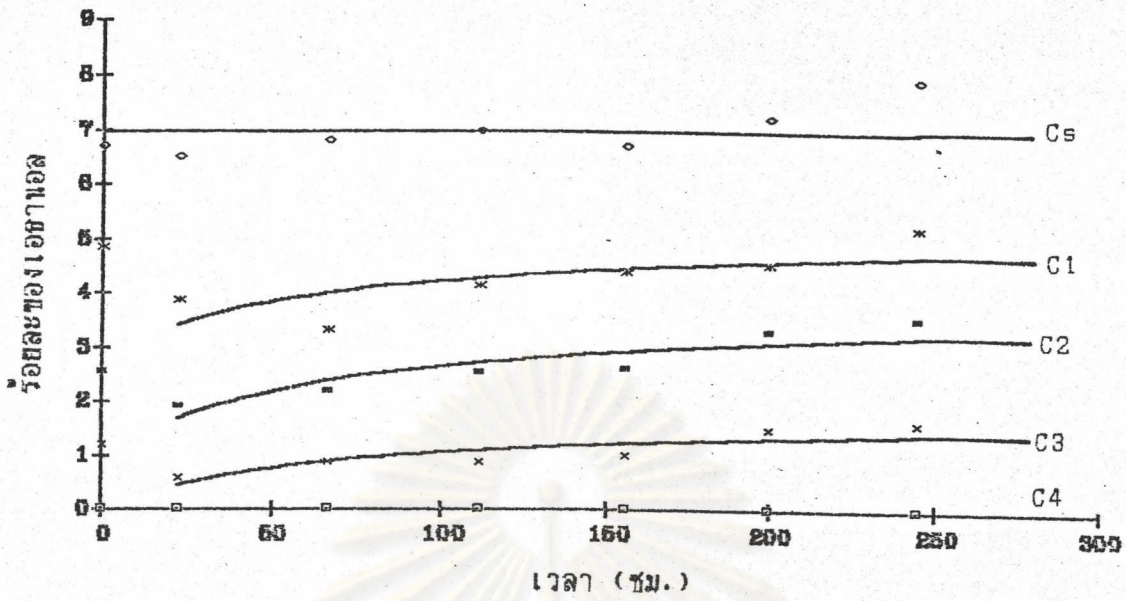
ในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาว่าระบบเข้าสู่สภาวะคงที่แล้ว โดยสังเกตจากปริมาณกรดอะซิติกในเครื่องหมักแต่ละเครื่องว่าไม่เปลี่ยนแปลงหรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ซึ่งบ่งบอกว่าระบบเข้าสู่สภาวะคงที่แล้ว ปริมาณกรดอะซิติกเป็นดรรชนีที่เหมาะสม เพราะวัดได้ง่ายและสามารถวัดได้ในเวลาอันรวดเร็วจึงสามารถเก็บข้อมูลได้บ่อยครั้ง นอกจากนี้การตรวจวัดปริมาณกรดอะซิติกยังมีความแม่นยำมากกว่าการตรวจวัดปริมาณเอธานอล โดยการวัดปริมาณเอธานอลในที่นี้ใช้วิธีต้มกลั่น ซึ่งใช้เวลานานและผิดพลาดได้ง่ายทั้งในช่วงของการต้มกลั่นและการวัดความถ่วงจำเพาะ ส่วนการตรวจหาปริมาณเชื้อนั้น ในที่นี้เป็นการวัดปริมาณเชื้อในน้ำหมักโดยนำสารตัวอย่างหยดลงบนเฮมาไซโตมิเตอร์ แล้วส่องนับด้วยกล้องจุลทรรศน์ วิธีนี้เป็นการนับจำนวนเซลทั้งหมด ทั้งที่มีชีวิตและที่ตายแล้ว นอกจากนี้จุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนเอธานอลให้เป็นกรดอะซิติก ส่วนใหญ่เกาะเป็นเมือกอยู่บนวัสดุบรรจุภายในคอลัมน์ มีเพียงส่วนน้อยที่แขวนลอยอยู่ในน้ำหมัก และเซลที่อยู่ในน้ำหมักมักเป็นเซลที่ไม่ว่องไว เนื่องจากเป็นเซลที่เสื่อมประสิทธิภาพแล้วจึงหลุดออกมาจากผิววัสดุบรรจุ

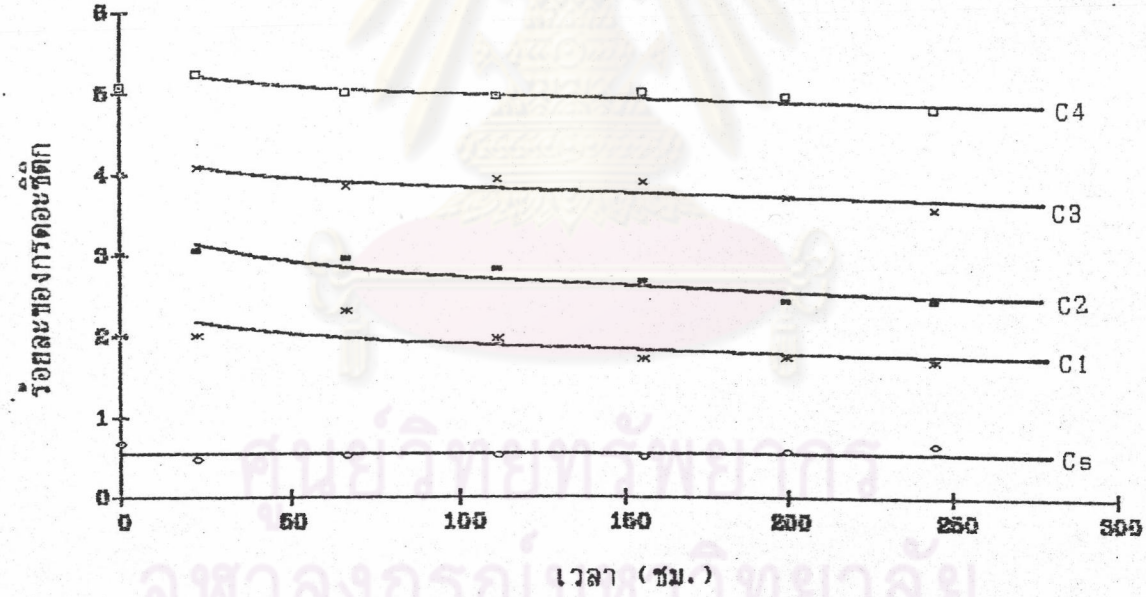


รูปที่ 4.1. แสดงปริมาณเอธานอลและกรดอะซิติกต่อเวลาของถังเก็บไวน์ และถังเก็บน้ำหมักที่ 1,2,3,4 ในการเดินเครื่องผลิตน้ำส้มสายชูอย่างต่อเนื่องโดยใช้อัตราการเจือจาง 0.0225 ชม.$^{-1}$

สัญลักษณ์ : Cs แทน ถังเก็บไวน์

C1,C2,C3,C4 แทน ถังเก็บน้ำหมักที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ

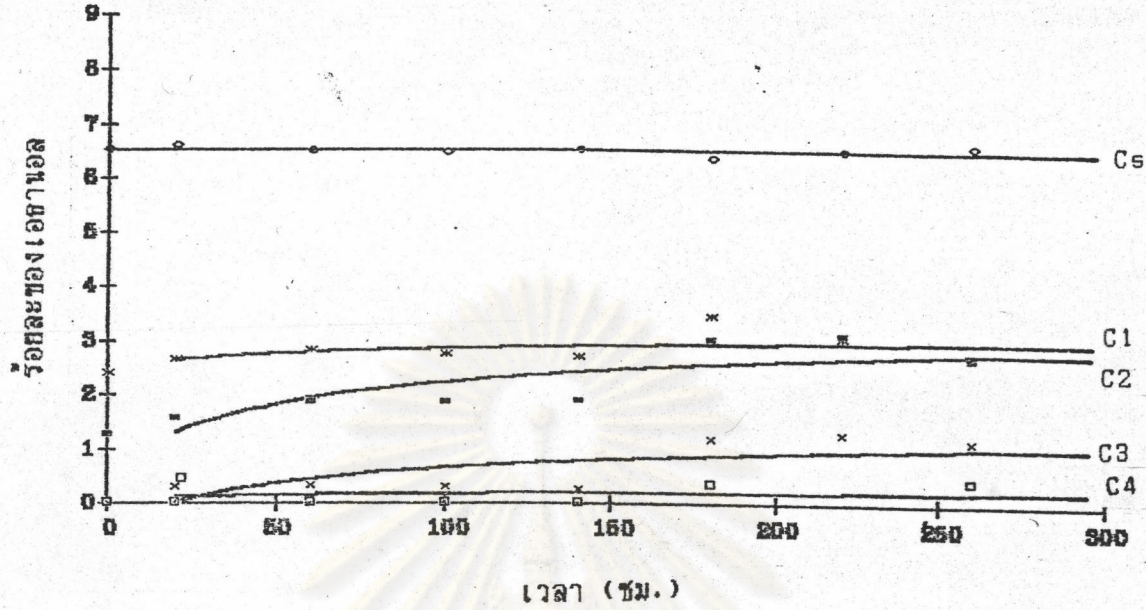


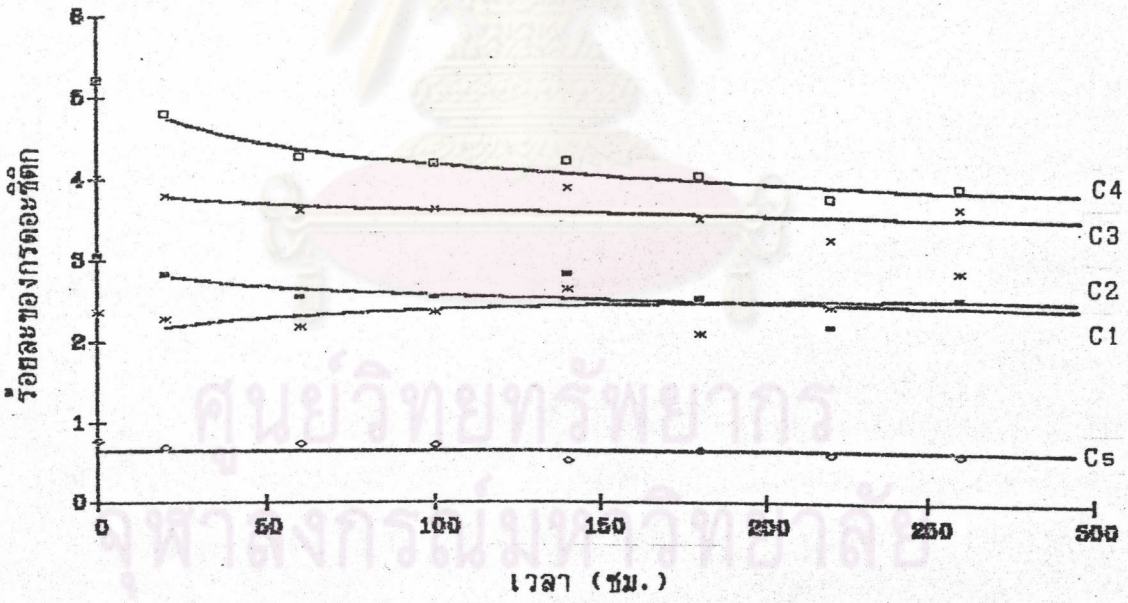


รูปที่ 4.2. แสดงปริมาณเอธานอลและกรดอะซิติกต่อเวลาของถังเก็บไวน์ และถังเก็บน้ำหมักที่ 1,2,3,4 ในการเดินเครื่องผลิตน้ำส้มสายชูอย่างต่อเนื่องโดยใช้อัตราการเจือจาง 0.0225 ชม. $^{-1}$ (ทำการทดลองซ้ำ)

สัญลักษณ์ : Cs แทน ถังเก็บไวน์

C1,C2,C3,C4 แทน ถังเก็บน้ำหมักที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ



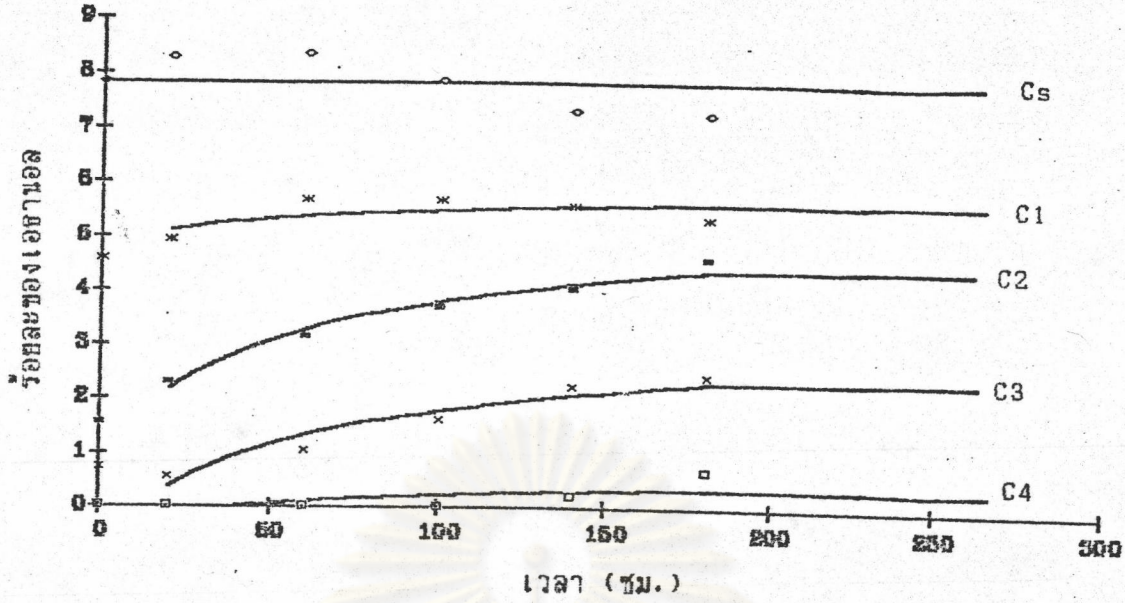


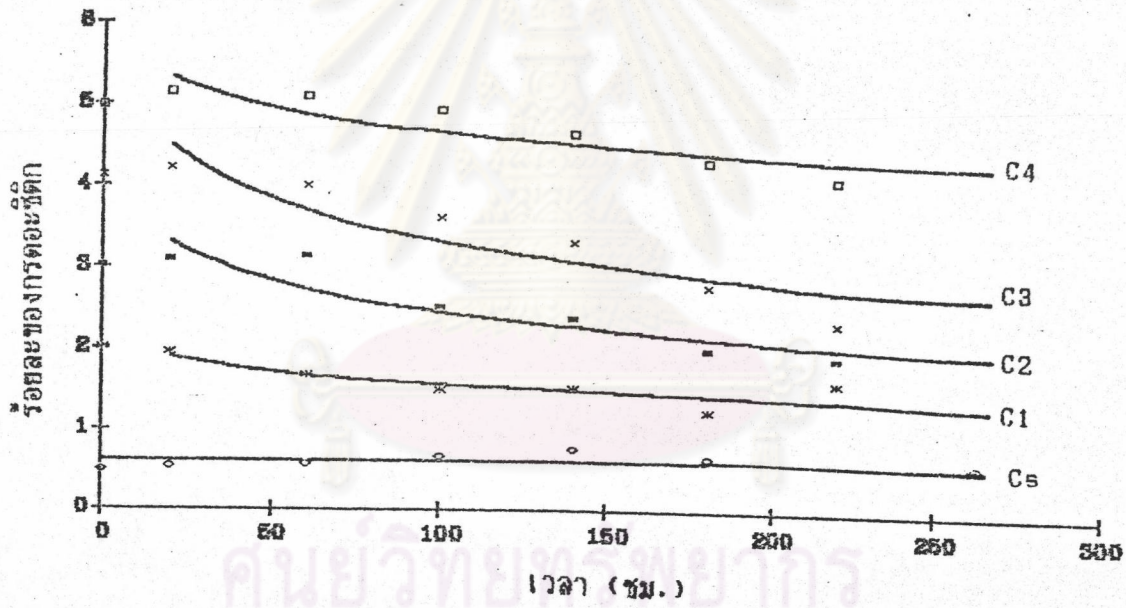
รูปที่ 4.3. แสดงปริมาณเอธานอลและกรดอะซิติกต่อเวลาของถังเก็บไวน์ และถังเก็บน้ำหมักที่ 1,2,3,4 ในการเดินเครื่องผลิตน้ำส้มสายชูอย่างต่อเนื่องโดยใช้อัตราการเจือจาง 0.0250 ชม.$^{-1}$

สัญลักษณ์ : Cs แทน ถังเก็บไวน์

C1,C2,C3,C4 แทน ถังเก็บน้ำหมักที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

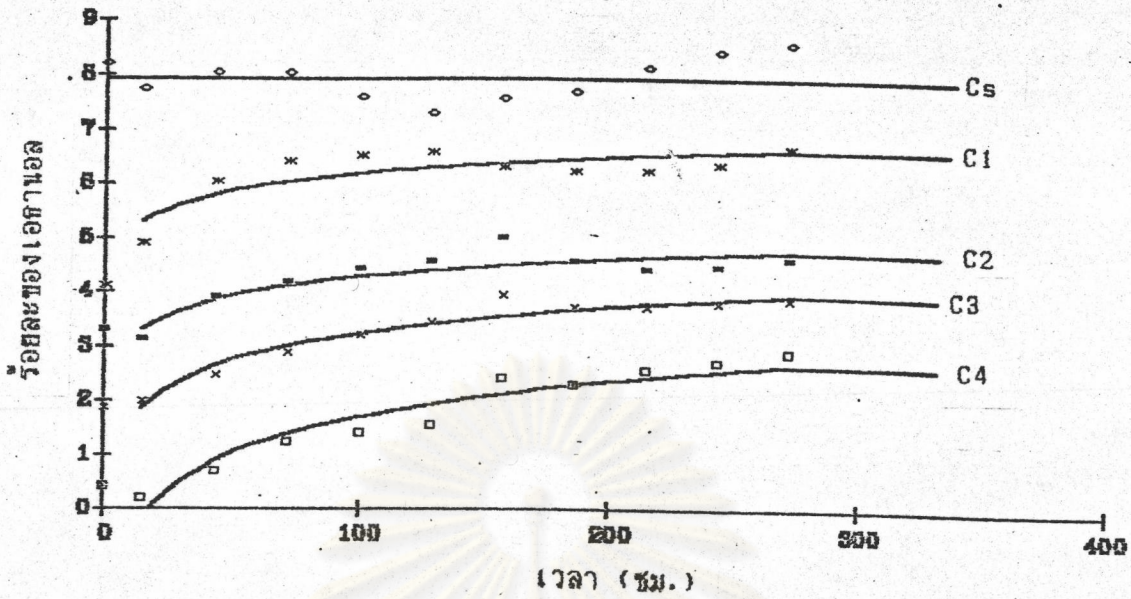


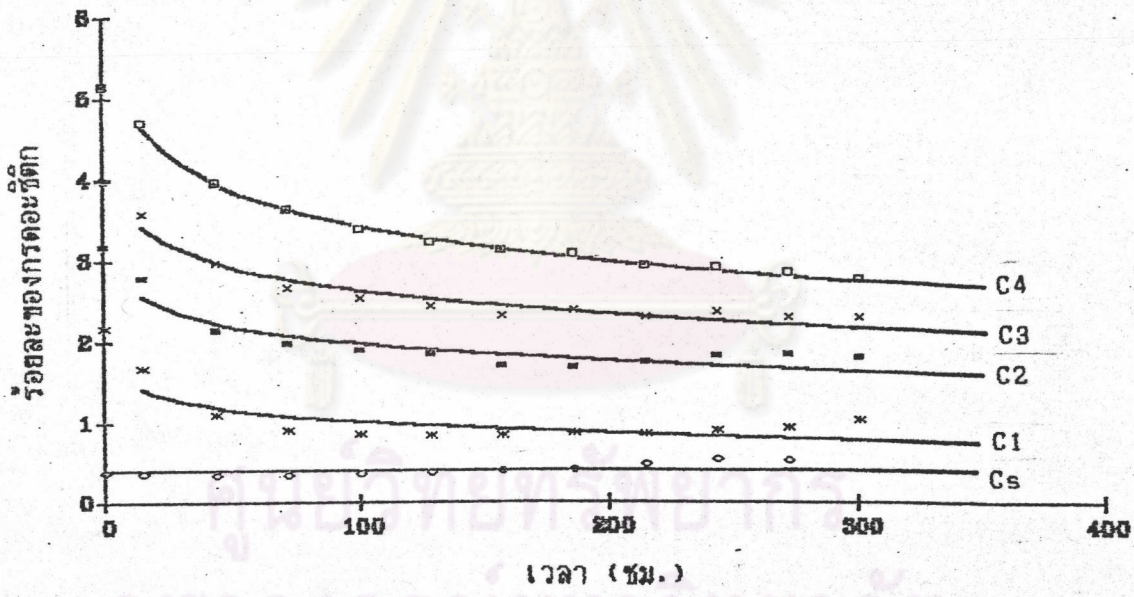


รูปที่ 4.4. แสดงปริมาณเอธานอลและกรดอะซิติกต่อเวลาของถังเก็บไวน์ และถังเก็บน้ำหมักที่ 1,2,3,4 ในการเดินเครื่องผลิตน้ำส้มสายชูอย่างต่อเนื่องโดยใช้อัตราการเจือจาง 0.0250 ชม. $^{-1}$ (ทำการทดลองซ้ำ)

สัญลักษณ์ : Cs แทน ถังเก็บไวน์

C1,C2,C3,C4 แทน ถังเก็บน้ำหมักที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ





รูปที่ 4.5. แสดงปริมาณเอธานอลและกรดอะซิติกต่อเวลาของถังเก็บไวน์ และถังเก็บน้ำหมักที่ 1,2,3,4 ในการเดินเครื่องผลิตน้ำส้มสายชูอย่างต่อเนื่องโดยใช้อัตราการเจือจาง 0.0350 ชม.$^{-1}$

สัญลักษณ์ : Cs แทน ถังเก็บไวน์

C1,C2,C3,C4 แทน ถังเก็บน้ำหมักที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ

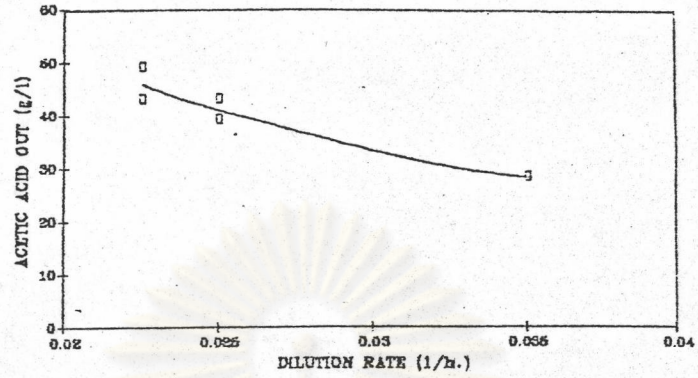
รูปที่ 4.6 แสดงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่แสดงประสิทธิภาพของระบบหมักน้ำส้มสายชูแบบต่อเนื่องที่อัตราการเจือจางต่าง ๆ ภายใต้สภาวะคงที่ ซึ่งจะเห็นว่าเมื่ออัตราการเจือจางเพิ่มขึ้น น้ำส้มสายชูที่ผลิตได้มีปริมาณกรดอะซิติกลดลง ปริมาณเอธานอลเหลือมากขึ้น เอธานอลถูกนำไปใช้ (ethanol uptake = ปริมาณเอธานอลที่ถูกใช้ไปต่อปริมาณเอธานอลเริ่มต้น) น้อยลง กำลังการผลิต (productivity = ผลิตภัณฑ์ที่ได้ x อัตราการเจือจาง) ลดลง และระบบจะมีประสิทธิภาพในการสร้างกรดอะซิติก (yield = ผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อสารตั้งต้นที่ใช้) ต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มอัตราการเจือจางเป็นการลดเวลาที่สารอาหารอยู่ในระบบ สารอาหารจึงถูกจุลินทรีย์นำไปใช้ได้น้อยลง

จากการวิเคราะห์ข้อมูลในตารางที่ 4.1 จะเห็นว่า อัตราการเจือจางที่เหมาะสมคือ 0.0250 ชม.$^{-1}$ เนื่องจากน้ำส้มสายชูที่ผลิตได้มีปริมาณกรดอะซิติกอยู่ในช่วงร้อยละ 3.9-4.3 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานน้ำส้มสายชูของประเทศไทย ที่กำหนดโดยกระทรวงสาธารณสุขไว้ว่า น้ำส้มสายชูจะต้องมีปริมาณกรดอะซิติกไม่ต่ำกว่าร้อยละ 4 นอกจากนี้น้ำส้มสายชูที่ผลิตได้ยังมีปริมาณเอธานอลเหลืออยู่ประมาณร้อยละ 0.2-0.3 ซึ่งจะช่วยป้องกันไม่ให้เกิดการออกซิเดชันมากเกินไป และยังช่วยปรับปรุงกลิ่นของน้ำส้มสายชูให้ดีขึ้นโดยเกิดสารพวกเอสเทอร์ในน้ำส้มสายชูเอง

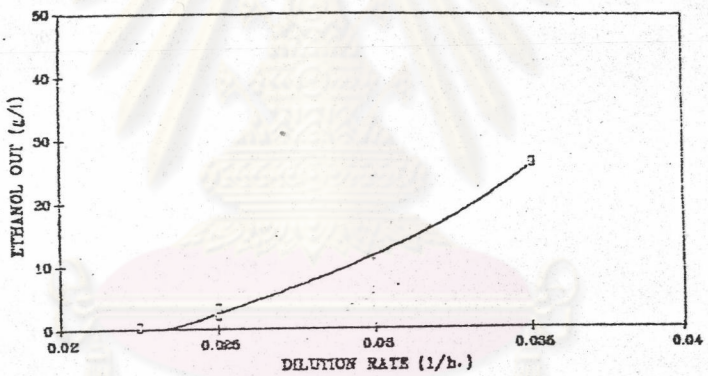
ที่อัตราการเจือจางที่เหมาะสมดังกล่าว คำนวณได้ว่ามีอัตราการป้อนเอธานอลต่อปริมาตรน้ำหมักในเครื่องเป็น 0.40-0.48 กรัมต่อลิตรต่อชม. หรือคิดเป็นอัตราการป้อนเอธานอลต่อพื้นที่ผิววัสดุบรรจุเท่ากับ 37.78-45.21 กรัมต่อตร.เมตรต่อชม. ซึ่งระบบสามารถนำเอาเอธานอลไปใช้สูงถึงร้อยละ 96.1-96.9 คิดเป็นประสิทธิภาพการสร้างกรดอะซิติกเท่ากับ 0.50-0.53 กรัมกรดอะซิติกต่อกรัมเอธานอลที่ถูกใช้ไป และได้กรดอะซิติกออกมา (productivity) เท่ากับ 0.82-0.92 กรัมต่อลิตรต่อชม. หรือกล่าวว่าได้น้ำส้มสายชูออกมาวันละ 7.20 ลิตร

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับที่มีผู้ทำการทดลองไว้แล้ว (ประพนธ์, 2531) ซึ่งทำการทดลองโดยใช้เครื่องมือชุดเดียวกันนี้ พบว่างานวิจัยเดิมนั้นได้รายงานอัตราการเจือจางที่เหมาะสมเป็น 0.0192 ชม.$^{-1}$ น้ำส้มสายชูที่ผลิตได้มีความเข้มข้นของกรดอะซิติกเท่ากับร้อยละ 5.5 สำหรับรายละเอียดอื่น ๆ แสดงเปรียบเทียบไว้ในตารางที่ 4.2

เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.1 พบว่าสภาวะที่อัตราการเจือจาง 0.0192 ชม.$^{-1}$ ให้น้ำส้มสายชูที่ผลิตได้มีความเข้มข้นของกรดอะซิติกสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับที่อัตราการเจือจางอื่น ๆ ในการทดลองนี้ เนื่องจากสภาวะดังกล่าวมีอัตราการเจือจางต่ำกว่า ทำให้สารอาหารอยู่ในระบบหมักได้ยาวนานที่สุด จุลินทรีย์มีโอกาสนำสารอาหารไปใช้ปริมาณมากที่สุด จึง



ก.



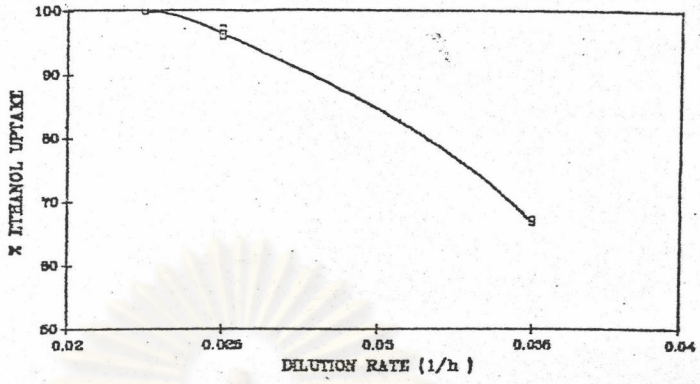
ข.

รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่แสดงประสิทธิภาพของระบบหมักน้ำส้มสายชูแบบต่อเนื่องที่อัตราการเจือจางต่าง ๆ ภายใต้สภาวะคงที่

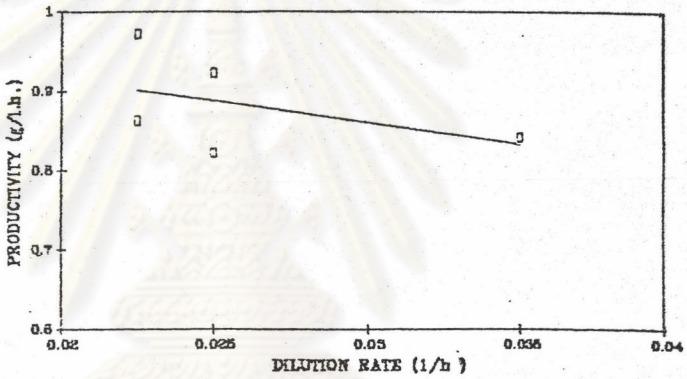
(ก) ปริมาณกรดอะซิติกที่ได้ (ข) ปริมาณเอธานอลที่เหลืออยู่

(ค) ปริมาณเอธานอลที่ถูกใช้ไป (ง) กำลังการผลิต

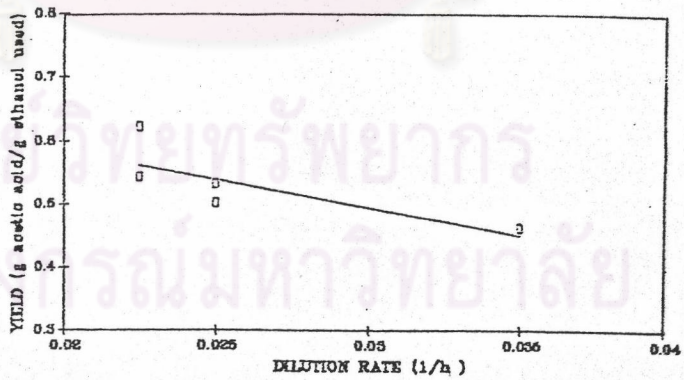
(จ) ประสิทธิภาพการสร้างกรด



ค.



ง.



จ.

รูปที่ 4.6 (ต่อ)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 สรุปค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลดิบสำหรับเมื่อสภาวะการทดลองต่าง ๆ กัน

FLOW RATE IN (ml/min)	DILUTION RATE (h^{-1})	RETENTION TIME (h)	FLOW RATE OUT (l/day)	RECYCLE FLOW RATE (ml/min)	RECYCLE RATIO	ETHANOL (% v/v)					ETHANOL (g/l)					ACETIC ACID (%w/v)					ACETIC ACID (g/l)				
						C5	C1	C2	C3	C4	C5	C1	C2	C3	C4	C5	C1	C2	C3	C4	C5	C1	C2	C3	C4
* 3.8	0.0192	52.1	5.53	-	-	7.2	7.2	5.1	3.2	1.1	71.0	71.0	50.2	31.8	11.0	1.0	2.1	3.3	4.5	5.5	10.0	21.0	33.0	45.0	55.0
4.5	0.0225	44.4	6.48	-	-	7.0	4.1	2.8	1.5	0.0	69.0	40.5	27.8	14.9	0.0	0.5	1.9	2.5	3.2	4.3	5.0	19.0	25.0	32.0	43.0
4.5	0.0225	44.4	6.48	-	-	7.1	4.7	3.1	1.4	0.0	70.0	46.4	30.7	13.9	0.0	0.5	1.8	2.5	3.7	4.9	6.0	18.0	25.0	37.0	49.0
5.0	0.0250	40.0	7.20	-	-	6.6	3.0	2.8	1.0	0.2	65.1	29.7	27.8	10.0	2.0	0.6	2.5	2.4	3.5	3.9	6.0	25.0	24.0	35.0	39.0
5.0	0.0250	40.0	7.20	-	-	7.7	5.6	4.3	2.2	0.3	75.8	55.2	42.4	21.8	3.0	0.6	1.4	2.0	2.8	4.3	6.0	14.0	20.0	28.0	43.0
7.0	0.0350	28.6	10.08	-	-	7.9	6.6	4.7	3.9	2.6	77.7	65.1	46.4	38.6	25.8	0.4	0.8	1.7	2.2	2.8	4.0	8.0	17.0	22.0	28.0
* 4.3	0.0216	46.3	6.22	0.9 (C4--C1)	0.20	7.0	7.0	5.1	3.1	1.0	69.0	69.0	50.2	30.8	10.0	1.0	2.1	3.1	4.1	5.1	10.0	21.0	31.0	41.0	51.0
5.0	0.0250	40.0	7.20	5.0 (C4--C1)	1.00	6.5	3.6	3.0	2.1	1.5	64.1	35.6	29.8	20.8	14.9	0.8	2.3	2.7	3.1	3.4	8.0	23.0	27.0	31.0	34.0
5.0	0.0250	40.0	7.20	5.0 (C3--C1)	1.00	6.6	4.1	3.7	2.2	1.4	65.1	40.5	36.6	21.8	13.9	0.9	2.0	2.2	2.9	3.4	9.0	20.0	22.0	29.0	34.0
7.0	0.0350	28.6	10.08	5.0 (C3--C1)	0.71	6.6	5.1	4.4	3.6	1.7	65.1	50.2	43.5	35.6	16.9	0.8	1.7	1.9	2.3	3.2	8.0	17.0	19.0	23.0	32.0
7.9	0.0395	25.3	11.38	4.3 (C3--C1)	0.54	7.9	6.2	5.4	4.5	2.4	77.7	61.1	53.2	44.5	23.8	0.5	1.2	1.5	1.8	2.7	5.0	12.0	15.0	18.0	27.0
6.2	0.0310	32.2	8.93	5.0 (C4--C1)	0.81	6.1	3.9	3.7	3.0	2.8	60.1	38.6	36.6	29.8	27.8	0.4	1.6	1.8	2.1	2.3	4.0	16.0	18.0	21.0	23.0

หมายเหตุ : * หมายถึง ข้อมูลที่ได้จากการวิจัยของประพนธ์ (2531)

ANOL. USED (g/l)			A.A FORMED (g/l)				% ETHANOL UPTAKE				PRODUCTIVITY(g/l.h.)				YIELD(g/g)				EtOH LOAD/VOL.(g/l.h.)				EtOH LOAD/AREA (g/m².h.)			
C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4
20.8	39.2	60.0	11.0	21.0	31.0	41.0	0.0	29.3	55.2	84.5	0.21	0.44	0.67	0.86	-	1.10	0.89	0.75	1.36	0.68	0.45	0.34	128.58	64.29	42.86	32.14
42.2	55.1	70.0	14.0	20.0	27.0	38.0	42.1	60.3	78.7	100.0	0.32	0.45	0.61	0.86	0.47	0.47	0.49	0.54	1.58	0.79	0.52	0.39	148.54	74.27	49.51	37.14
38.3	55.1	69.0	12.0	19.0	31.0	43.0	32.8	55.5	79.8	100.0	0.27	0.43	0.70	0.97	0.53	0.50	0.56	0.62	1.55	0.78	0.52	0.39	146.42	73.21	48.81	36.60
36.3	53.1	62.1	19.0	18.0	29.0	33.0	53.7	56.0	82.8	96.9	0.48	0.45	0.72	0.82	0.55	0.50	0.55	0.53	1.60	0.80	0.53	0.40	151.14	75.57	50.38	37.78
34.3	54.9	73.7	8.0	14.0	22.0	37.0	28.0	44.7	71.6	96.1	0.20	0.35	0.55	0.92	0.37	0.41	0.40	0.50	1.92	0.96	0.64	0.48	180.85	90.42	60.28	45.21
31.3	39.1	51.9	4.0	13.0	18.0	24.0	16.2	40.3	50.3	66.8	0.14	0.46	0.63	0.84	0.32	0.42	0.46	0.46	2.72	1.36	0.91	0.68	256.49	128.24	85.50	64.12
18.8	38.2	59.0	11.0	21.0	31.0	41.0	0.0	27.2	55.4	85.5	0.24	0.45	0.67	0.88	-	1.12	0.81	0.69	1.49	0.74	0.50	0.37	140.55	70.27	46.85	35.14
35.3	44.3	59.2	15.0	19.0	23.0	26.0	45.3	54.2	68.0	77.1	0.38	0.48	0.58	0.65	0.51	0.54	0.52	0.52	1.63	0.81	0.54	0.41	153.50	76.75	51.16	38.37
28.5	43.3	51.2	11.0	13.0	20.0	25.0	37.8	43.8	66.5	78.6	0.28	0.32	0.50	0.62	0.45	0.46	0.46	0.49	1.63	0.81	0.54	0.41	153.50	76.75	51.16	38.27
21.6	29.5	48.2	9.0	11.0	15.0	24.0	22.9	33.2	45.3	74.0	0.32	0.38	0.52	0.84	0.60	0.51	0.51	0.50	2.28	1.14	0.76	0.57	214.89	107.45	71.63	53.72
23.5	32.2	52.9	8.0	11.0	14.0	23.0	20.3	30.6	42.0	69.0	0.32	0.43	0.55	0.91	0.51	0.47	0.43	0.43	3.03	1.52	1.01	0.76	285.84	142.92	95.28	71.46
40.1	46.9	48.9	12.0	14.0	17.0	19.0	64.5	67.8	79.4	82.7	0.37	0.43	0.53	0.59	0.31	0.35	0.36	0.39	1.83	0.92	0.61	0.46	172.83	86.42	57.61	43.21

สัญลักษณ์ : Cs แทน ถังเก็บไวน์

C1,C2,C3,C4 แทน ถังเก็บน้ำหมักที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบสภาวะที่เหมาะสมสำหรับระบบหมักน้ำส้มสายชูแบบต่อเนื่องที่สภาวะคงที่ของประพนธ์และงานปัจจุบัน

	ประพนธ์	งานปัจจุบัน
- อัตราการเจือจาง (ชม.$^{-1}$)	0.0192	0.0250
- เวลาที่สารอาหารอยู่ในระบบหมัก (ชม.)	52.10	40.00
- ปริมาณเอธานอลที่ป้อนเข้ามาต่อปริมาตรน้ำหมักในเครื่องเมื่อใช้เครื่องหมัก 4 ชุดต่ออนุกรม (กรัมต่อลิตรต่อชม.)	0.34	0.40-0.48
- ปริมาณเอธานอลที่ป้อนเข้ามาต่อพื้นที่ผิววัสดุบรรจุ เมื่อใช้เครื่องหมัก 4 ชุดต่ออนุกรมกัน (กรัมต่อตร.เมตรต่อชม.)	32.14	37.78-45.21
- ปริมาณน้ำส้มสายชูที่ได้ (ลิตรต่อวัน)	5.53	7.20
- ร้อยละของกรดอะซิติกในน้ำส้มสายชู	5.5	3.9-4.3
- ร้อยละของเอธานอลในน้ำส้มสายชู	1.1	0.2-0.3
- ร้อยละของเอธานอลที่ถูกใช้ไป	63.4	96.1-96.9
- กำลังการผลิต (กรัมต่อลิตรต่อชม.)	0.86	0.82-0.92
- ประสิทธิภาพการสร้างกรดอะซิติก (กรัมกรดอะซิติกต่อกรัมเอธานอลที่ถูกใช้ไป)	0.75	0.53-0.50

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทำให้ได้น้ำส้มสายชูที่มีปริมาณกรดอะซิติกมากขึ้น กำลังการผลิต และประสิทธิภาพการสร้างกรดอะซิติกสูงขึ้น ซึ่งแนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดลองที่แสดงในกราฟรูปที่ 4.6 แต่สภาวะดังกล่าวมีปริมาณเอธานอลที่ถูกนำไปใช้น้อยกว่า จึงเหลือเอธานอลอยู่ในน้ำส้มสายชูในปริมาณมากกว่า อาจเป็นเพราะในช่วงที่ทำการทดลองที่สภาวะดังกล่าว ระบบมีแบคทีเรีย A. xylinum ปนเปื้อนอยู่น้อย เอธานอลจึงไม่ถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาข้างเคียงอื่น ๆ นอกจากเปลี่ยนเป็นกรดอะซิติก และใช้ในการเจริญของ A. aceti เอง อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาถึงกำลังการผลิตและปริมาณน้ำส้มสายชูที่ได้ พบว่าสภาวะที่อัตราการเจือจาง 0.0250 ชม.$^{-1}$ มีกำลังการผลิตใกล้เคียงกับที่สภาวะอัตราการเจือจาง 0.0192 ชม.$^{-1}$ และได้น้ำส้มสายชูในปริมาณที่มากกว่าถึงร้อยละ (7.20-5.53)x100/5.53 = 30 แม้ว่าน้ำส้มสายชูที่ผลิตได้ที่อัตราการเจือจาง 0.0250 ชม.$^{-1}$ นั้นจะมีความเข้มข้นของกรดอะซิติกต่ำกว่า แต่ก็ยังเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำส้มสายชูที่กำหนดโดยกระทรวงสาธารณสุข จึงสรุปได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับระบบหมักดังกล่าวคือ ที่อัตราการเจือจาง 0.0250 ชม.$^{-1}$

4.1.3 ปัญหาการปนเปื้อน

จากการทดลองผลิตน้ำส้มสายชูอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานานหลายเดือน โดยการป้อนไวน์ที่ไม่ผ่านการพาสเจอไรซ์เข้าสู่เครื่องหมักน้ำส้มสายชู แม้ว่าไวน์ที่ป้อนเข้ามายังไม่ผ่านการกรองเอาเซลยีสต์ออกก่อน โดยยีสต์บางส่วนตกตะกอนอยู่ที่ถังเก็บไวน์ มีเพียงบางส่วนปนไปกับไวน์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบการหมักน้ำส้มสายชู แต่ไม่ก่อให้เกิดปัญหาการปนเปื้อนในระบบการหมักน้ำส้มสายชู เนื่องจากในระบบการหมักน้ำส้มสายชูนั้นเป็นระบบที่มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างต่ำ คืออยู่ในช่วง 3-4 ซึ่งไม่เหมาะต่อการเจริญของยีสต์และจุลินทรีย์ชนิดอื่น จึงป้องกันปัญหาการปนเปื้อนจากจุลินทรีย์อื่นได้ แต่พบเชื้อ A. xylinum ซึ่งเป็น Acetobacter สายพันธุ์หนึ่งสามารถเจริญในระบบหมักได้ โดยมีลักษณะเป็นเมือกใส ๆ ขึ้นปกคลุมบริเวณหัวกระจายน้ำหมัก ซึ่งคาดว่าเมื่อระยะเวลายาวนานอาจเกิดเป็นเมือกหนาปริมาณมาก ซึ่งทำให้หัวกระจายน้ำหมักอุดตันได้ สายพันธุ์ A. xylinum นี้ใช้เอธานอลเป็นแหล่งคาร์บอน แต่จะผลิตกรดอะซิติกออกมาในปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับ A. aceti แต่โดยทั่วไปแล้ว A. xylinum สามารถผลิตสารเอสเทอร์ซึ่งทำให้น้ำส้มสายชูมีกลิ่นหอม ดังนั้นถ้ามีเชื้อ A. xylinum ในปริมาณน้อยจะเป็นผลดีแก่น้ำส้มสายชูที่ผลิตได้ แต่ถ้ามีเป็นปริมาณมากก็ทำให้เกิดปัญหาการอุดตันแก่ระบบและทำให้ประสิทธิภาพการสร้างกรดอะซิติกต่ำลงในที่สุด อนึ่งเมือกของ A. xylinum สามารถนำมาบริโภคได้ โดยทำเป็นของหวานที่เรียกว่า วุ้นสวรรค์

ปัญหาอื่นนอกเหนือไปจากการปนเปื้อน ก็คือปัญหาการอุดตันที่เกิดจาก A. aceti เอง เนื่องจากจุลินทรีย์สายพันธุ์ดังกล่าวเจริญมีลักษณะเป็นเมือกหนาอยู่บนผิววัสดุบรรจุภายในคอลัมน์ บริเวณผนังคอลัมน์ รวมไปถึงภายในถังเก็บน้ำหมักด้วย แต่ต้องใช้เวลายาวนานมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการเกิดเมือกจาก A. xylinum เนื่องจาก A. aceti ใช้เอธานอลในการผลิตกรดอะซิติกมากกว่านำไปสร้างเป็นเซล (เมือก) ซึ่งตรงกันข้ามกับสายพันธุ์ A. xylinum ถ้ามีเมือกเป็นปริมาณมากจะก่อปัญหาให้กับระบบการไหลเวียนของน้ำหมักได้ ต้องหยุดการเดินเครื่องแล้วล้างทำความสะอาดเครื่องมือใหม่ แต่มีผู้บันทึกไว้ว่าแม้จะมีเมือกเกิดขึ้นก็ยังสามารถเดินเครื่องต่อไปได้เป็นเวลากว่า 6 เดือน โดยไม่กระทบกระเทือนต่อประสิทธิภาพของเครื่องหมัก (Vaughn,1954) ตลอดช่วงที่ทำการทดลองพบว่าการเกิดเมือกหนาพบที่บริเวณหัวกระจายน้ำหมักเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งทำให้เกิดปัญหาหัวกระจายน้ำหมักอุดตันได้ ถ้าเดินเครื่องระบบหมักเป็นระยะเวลายาวนานมาก ในส่วนของคอลัมน์พบว่ามีเมือกเกิดขึ้นเล็กน้อยที่บริเวณผนังคอลัมน์ ซึ่งต้องใช้เวลานานเมือกดังกล่าวจึงหนามาก แล้วหลุดออกมา ในส่วนของวัสดุบรรจุเองพบว่าเกิดเมือกน้อยมาก คาดว่าจุลินทรีย์ที่เกาะอยู่บนผิววัสดุบรรจุส่วนใหญ่เป็น A. aceti ที่เจริญเติบโตขึ้นมาทดแทนกัน ดังนั้นปัญหาอุดตันในระบบส่วนใหญ่จึงเกิดจากเมือกที่บริเวณหัวกระจายน้ำหมักและผนังคอลัมน์มีปริมาณหนา ซึ่งได้หลุดลงมาค้างอยู่บนผิวหน้าของชั้นวัสดุบรรจุ และเนื่องจากคอลัมน์หมักมีพื้นที่หน้าตัดน้อยมากประมาณ 40 ตร.ซม. จึงทำให้เมือกดังกล่าวปกคลุมอยู่ทั่วผิวหน้าของชั้นวัสดุบรรจุ คาดว่าถ้าเดินเครื่องหมักเป็นระยะเวลายาวนานอาจทำให้ระบบการไหลเวียนของน้ำหมักภายในคอลัมน์ไม่ค่อยดี ควรล้างทำความสะอาดเครื่องหมักเสีย

อย่างไรก็ตาม ปัญหาการอุดตันดังกล่าวไม่ใช่ปัญหาที่รุนแรง แต่เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นได้ทั่วไปในโรงงานผลิตน้ำส้มสายชู เนื่องจาก A. xylinum มีประปนอยู่ในอากาศ ผู้ผลิตน้ำส้มสายชูส่วนใหญ่จึงไม่พยายามหาวิธีป้องกันการเกิดเมือก แต่หันมาเลือกใช้วัสดุบรรจุที่ไม่ถูกทำลายง่าย มีความทนทาน และราคาถูก เนื่องจากอาจเกิดการสูญหายในระหว่างล้างทำความสะอาด ดังนั้นเมื่อเครื่องหมักเกิดการอุดตันจนประสิทธิภาพของเครื่องหมักลดลงไม่คุ้มค่าที่จะเดินเครื่องต่อไปแล้ว ก็จะล้างทำความสะอาดเครื่องหมักและวัสดุบรรจุ (Vaughn, 1954) สำหรับในงานวิจัยนี้ใช้วัสดุบรรจุซึ่งทำจากไม้มะค่า วัสดุบรรจุดังกล่าวมีคุณสมบัติที่เหมาะสมมากต่อการหมักน้ำส้มสายชู เนื่องจากมีความทนทานไม่ผุกร่อนง่าย สามารถนำมาล้างหมุนเวียนใช้ได้หลายครั้ง, มีราคาถูก, มีน้ำหนักเบา, เป็นที่ยึดเกาะของจุลินทรีย์ได้เป็นอย่างดี เพราะผิววัสดุไม่ลื่นเป็นมัน, ไม่ก่อให้เกิดกลิ่นและรสที่ผิดปกติขึ้นในน้ำส้มสายชู เป็นต้น

4.1.4 เสถียรภาพการทำงานของระบบหมักในระยะยาว

ในงานวิจัยนี้ได้มีการทำการทดลองซ้ำเพื่อประเมินเสถียรภาพและประสิทธิภาพของระบบน้ำส้มสายชูแบบต่อเนื่องในระยะยาว โดยได้ทำการทดลองซ้ำที่อัตราการเจือจาง 0.0225 และ 0.0250 ชม.$^{-1}$ ผลการทดลองได้แสดงสรุปเป็นตารางที่ 4.3

กรณีอัตราการเจือจางเป็น 0.0225 ชม.$^{-1}$ พบว่าการทดลองครั้งที่ 2 ให้ผลดีกว่าการทดลองครั้งที่ 1 เมื่ออัตราการป้อนเอธานอลใกล้เคียงกัน โดยให้น้ำส้มสายชูที่มีปริมาณกรดอะซิติกสูงกว่า กำลังการผลิต และประสิทธิภาพการสร้างกรดอะซิติกสูงกว่าเดิม เนื่องจากการทดลองครั้งแรกนั้นทำในช่วง 21/8/33 - 5/9/33 ซึ่งเป็นการทดลองครั้งที่ 7 ตั้งแต่มีการล้างเครื่องหมัก ส่วนการทดลองซ้ำที่อัตราการเจือจางเดียวกันนั้นทำการทดลองในช่วง 1/10/33 - 13/10/33 ซึ่งเป็นการทดลองครั้งที่ 2 ตั้งแต่มีการล้างเครื่องหมัก

สำหรับกรณีอัตราการเจือจางเป็น 0.0250 ชม.$^{-1}$ พบว่าการทดลองครั้งที่ 2 ให้ผลการทดลองดีกว่าครั้งที่ 1 เช่นกัน แม้ว่าอัตราการป้อนเอธานอลในครั้งที่ 2 สูงกว่าในครั้งที่ 1 ก็ตาม เนื่องจากการทดลองครั้งที่ 1 นั้นทำการทดลองในช่วง 4/7/33 - 17/7/33 ซึ่งเป็นการทดลองครั้งที่ 5 ตั้งแต่มีการล้างเครื่องหมัก ส่วนการทดลองซ้ำที่อัตราการเจือจางเดิมนั้น ทำการทดลองในช่วง 17/10/33 - 28/10/33 ซึ่งเป็นการทดลองครั้งที่ 3 ตั้งแต่มีการล้างเครื่องหมัก

เมื่อพิจารณาผลการทดลองซ้ำของอัตราการเจือจางทั้ง 2 สรุปได้ว่าระบบหมักดังกล่าวไม่มีความเสถียรเมื่อเดินเครื่องหมักเป็นระยะเวลายาวนานมาก โดยพบว่าการเดินเครื่องหมักในช่วงแรก ๆ หลังการล้างทำความสะอาดทำให้ระบบหมักมีประสิทธิภาพสูงกว่าในช่วงหลังที่มีการเดินเครื่องมาเป็นเวลานาน เนื่องจากว่าหลังการล้างทำความสะอาดนั้น ได้มีการเติมเชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นใหม่เข้าไปในระบบในสภาพที่พยายามให้มีความปลอดเชื้อมากที่สุด ในระบบจึงมี A. aceti เป็นสายพันธุ์หลัก แต่เมื่อเดินเครื่องหมักไปเป็นระยะเวลานาน ๆ ได้เกิดปัญหาการสะสมของเมือกแบคทีเรีย A. xylinum ที่ปนเปื้อนเข้ามาในระบบ โดยเฉพาะที่หัวกระจายน้ำหมัก และภายในคอลัมน์หมักทำให้ประสิทธิภาพการไหลเวียนของน้ำหมักภายในคอลัมน์ลดลง และประสิทธิภาพการผลิตกรดอะซิติกลดต่ำลง

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบผลการทดลองที่มีการทำซ้ำ เมื่ออัตราการเจือจางเป็น 0.0225 และ 0.0250 ชม.$^{-1}$

ที่สภาวะคงที่	D = 0.0225 ชม.$^{-1}$		D = 0.0250 ชม.$^{-1}$	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
– อัตราการป้อนเอธานอลต่อปริมาตรน้ำหมักในเครื่อง (กรัมต่อลิตรต่อชม.)	0.39	0.39	0.40	0.48
– อัตราการป้อนเอธานอล/พื้นที่ผิววัสดุบรรจุ (กรัมต่อตร.เมตรต่อชม.)	37.14	36.60	37.78	45.21
– ร้อยละของกรดอะซิติกที่ได้	4.3	4.9	3.9	4.3
– ร้อยละของเอธานอลที่เหลืออยู่	0.0	0.0	0.2	0.3
– ร้อยละของเอธานอลที่ถูกใช้ไป	100.0	100.0	96.9	96.1
– กำลังการผลิต (กรัมต่อลิตรต่อชม.)	0.86	0.97	0.82	0.92
– ประสิทธิภาพการสร้างกรดอะซิติก (กรัมกรดอะซิติกต่อกรัมเอธานอลที่ถูกใช้ไป)	0.54	0.62	0.53	0.50

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1.5 ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำหมัก

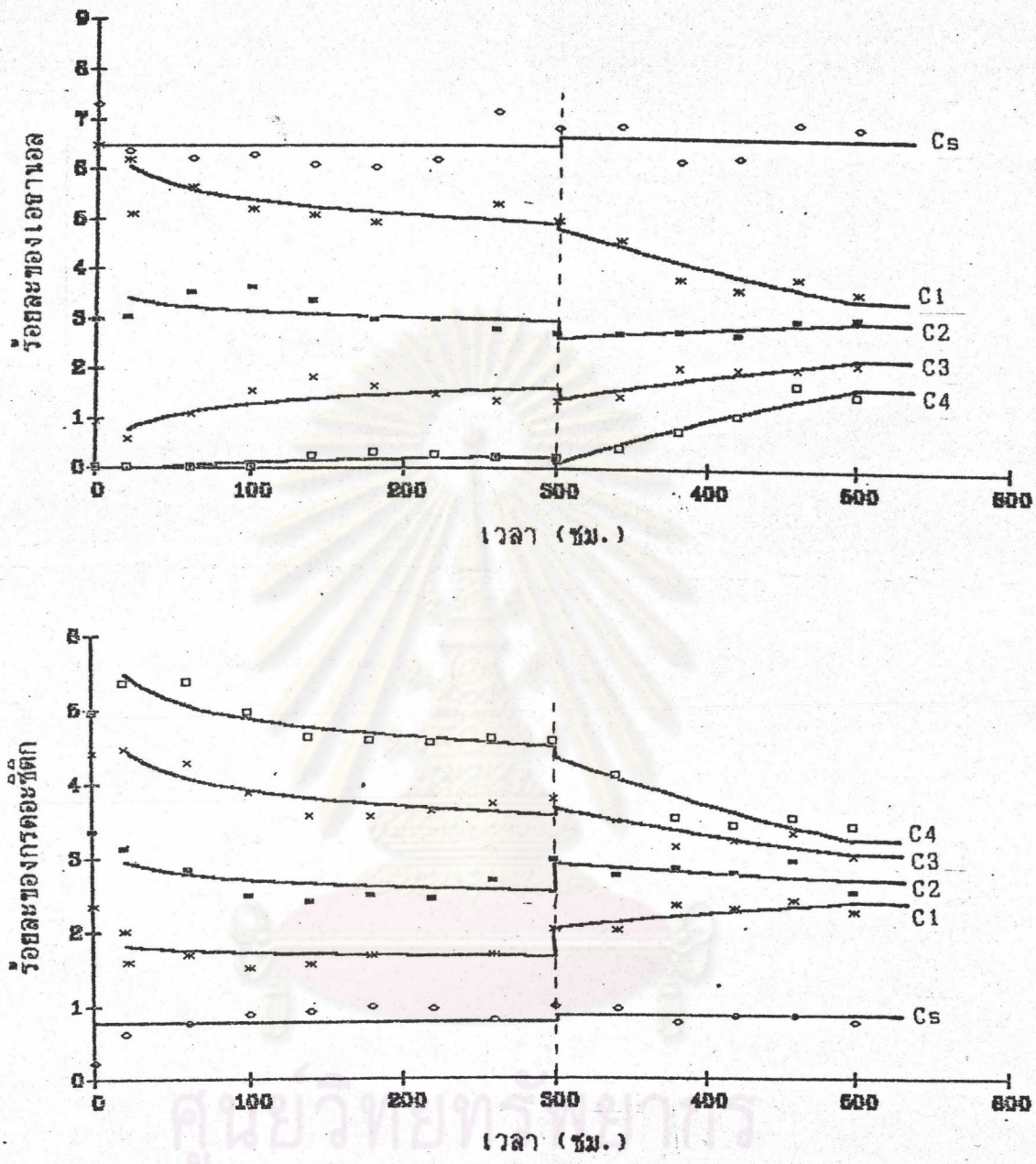
ได้มีการทดลองสุ่มวัดปริมาณออกซิเจนที่เหลืออยู่ในน้ำหมัก เพื่อประเมินว่าอัตราการให้อากาศในช่วง 0.04-0.06 ปปน.นั้น เพียงพอแก่ความต้องการของแบคทีเรียในแต่ละเครื่องหมักหรือไม่ โดยใช้อิเลคโทรดวัดปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำหมักของแต่ละถังเก็บน้ำหมัก พบว่าปริมาณออกซิเจนที่วัดได้อยู่ในช่วง 2-5 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงว่าการให้อากาศเพียงพอแก่ความต้องการของแบคทีเรีย เนื่องจากในระบบหมักแบบมีการให้อากาศนั้นถ้ามีปริมาณออกซิเจนละลายอยู่ในน้ำหมักในอัตรา 2 มิลลิกรัมต่อลิตรก็ถือมากเกินพอแล้ว

4.2 ผลการนำผลิตภัณฑ์บางส่วนมาป้อนย้อนกลับต่อประสิทธิภาพของระบบหมักน้ำส้มสายชูแบบต่อเนื่อง

ในปี พ.ศ. 2531 ประพนธ์ได้เสนอแนะว่าควรนำผลิตภัณฑ์จากถังเก็บน้ำหมักที่ 4 มาป้อนย้อนกลับสู่ถังเก็บน้ำหมักที่ 1 เพื่อช่วยรักษาสมดุลย์ของเชื้อในเครื่องหมักที่ 1 แต่รายละเอียดการทดลองยังไม่เพียงพอ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการทดลองอีกครั้งหนึ่งเพื่อประเมินผลของการป้อนย้อนกลับต่อระบบหมักน้ำส้มสายชูนี้

4.2.1 เปรียบเทียบผลของการนำผลิตภัณฑ์จากถังเก็บน้ำหมักที่ 4 และ 3 มาป้อนกลับสู่ถังเก็บน้ำหมักที่ 1

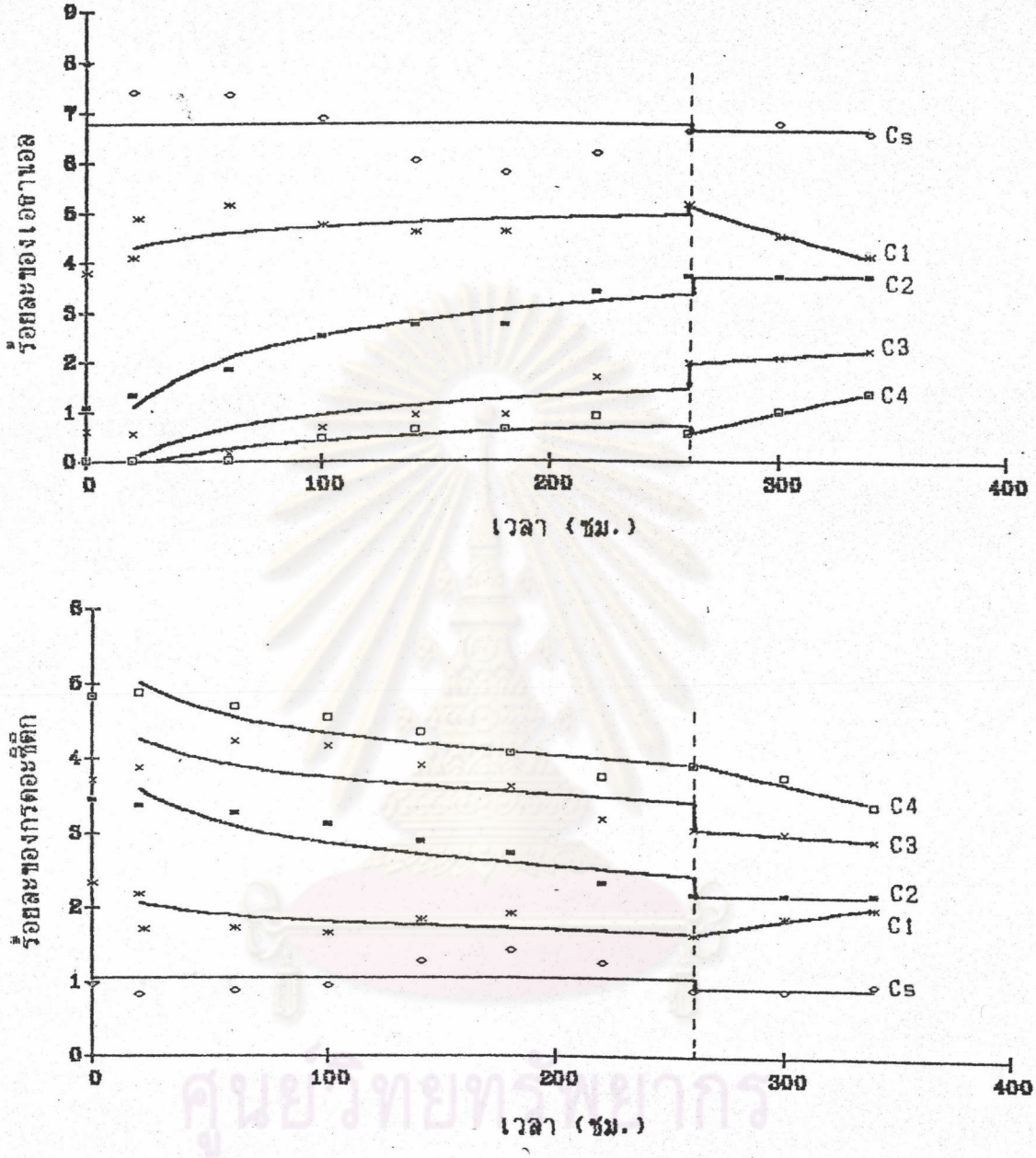
ในการทดลองนี้ได้เลือกใช้อัตราการเจือจาง 0.0250 ชม.$^{-1}$ เมื่อปริมาณกรดอะซิติกในถังเก็บน้ำหมักที่ 4 ลดลงจากร้อยละ 5 เหลือประมาณร้อยละ 4 ก็ทำการสูบน้ำหมักบางส่วนมาป้อนย้อนกลับ โดยกำหนดให้อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ (อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ต่ออัตราการไหลของไวน์) เป็น 1.00 กราฟในรูปที่ 4.7 แสดงผลการนำน้ำหมักจากถังเก็บน้ำหมักที่ 4 มาป้อนย้อนกลับสู่ถังเก็บน้ำหมักที่ 1 เมื่อเวลาผ่านไปได้ 343 ชั่วโมง ส่วนกราฟในรูปที่ 4.8 แสดงผลการนำน้ำหมักจากถังเก็บน้ำหมักที่ 3 มาป้อนย้อนกลับสู่ถังเก็บน้ำหมักที่ 1 เมื่อเวลาผ่านไปได้ 284 ชั่วโมง โดยควบคุมระบบหมักให้มีอัตราการเจือจางคงที่ 0.0250 ชม.$^{-1}$ ผลการทดลองทั้ง 2 สภาวะได้แสดงเปรียบเทียบในรูปที่ 4.7 และ 4.8 โดยพบว่าที่สภาวะคงที่ ปริมาณกรดอะซิติกในถังเก็บน้ำหมักที่ 4 มีค่าเป็นร้อยละ 3.4 เท่ากัน ประสิทธิภาพการสร้างกรดอะซิติกเป็น 0.52 และ 0.49 กรัมกรดอะซิติกต่อกรัมเอธานอลที่ถูกใช้ตามลำดับ (ดังแสดงในตารางที่ 4.1) ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการนำผลิตภัณฑ์จากถังเก็บน้ำหมักที่ 4 หรือ 3 มาป้อนย้อนกลับสู่ถังเก็บน้ำหมักที่ 1 ให้ผลไม่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.7 แสดงปริมาณเอธานอลและกรดอะซิติกต่อเวลาของถังเก็บไวน์ และถังเก็บน้ำหมักที่ 1,2,3,4 ในการเดินเครื่องผลิตน้ำส้มสายชูอย่างต่อเนื่องโดยในชั่วโมงที่ 0-343 ใช้อัตราการเจือจาง 0.0250 ชม.$^{-1}$ จากนั้นตั้งแต่ชั่วโมงที่ 343 เป็นต้นไปมีการนำผลิตภัณฑ์จากถังเก็บน้ำหมักที่ 4 มาป้อนกลับสู่ถังเก็บน้ำหมักที่ 1โดยใช้อัตราส่วนการป้อนกลับจากถังเก็บน้ำหมักที่ 4 สู่ถังเก็บน้ำหมักที่ 1 เป็น 1.00

สัญลักษณ์ : Cs แทน ถังเก็บไวน์

C1,C2,C3,C4 แทน ถังเก็บน้ำหมักที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ



รูปที่ 4.8 แสดงปริมาณเอธานอลและกรดอะซิติกต่อเวลาของถังเก็บไวน์ และถังเก็บน้ำหมักที่ 1,2,3,4 ในการเดินเครื่องผลิตน้ำส้มสายชูอย่างต่อเนื่องโดยในชั่วโมงที่ 0-284 ใช้อัตราการเจือจาง 0.0250 ชม.$^{-1}$ จากนั้นตั้งแต่ชั่วโมงที่ 284 เป็นต้นไปมีการนำผลิตภัณฑ์จากถังเก็บน้ำหมักที่ 3 มาป้อนกลับสู่ถังเก็บน้ำหมักที่ 1 โดยใช้อัตราส่วนการป้อนกลับจากถังเก็บน้ำหมักที่ 4 สู่ถังเก็บน้ำหมักที่ 1 เป็น 1.00

สัญลักษณ์ : Cs แทน ถังเก็บไวน์

C1,C2,C3,C4 แทน ถังเก็บน้ำหมักที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณากราฟในรูปที่ 4.7 จะเห็นว่าปริมาณความเข้มข้นของกรดอะซิติกในถังเก็บน้ำหมักที่ 1, 2 และ 3 มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนในถังเก็บน้ำหมักที่ 4 มีค่าลดลง และจากกราฟในรูปที่ 4.8 พบว่าปริมาณความเข้มข้นของกรดอะซิติกในถังเก็บน้ำหมักที่ 1 และ 2 มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนในถังเก็บน้ำหมักที่ 3 และ 4 มีค่าลดลง นั่นคือการนำผลิตภัณฑ์จากถังเก็บน้ำหมักที่ 4 และ 3 มาป้อนกลับสู่ถังเก็บน้ำหมักที่ 1 นั้น สามารถเพิ่มปริมาณกรดอะซิติกให้กับถังเก็บน้ำหมักแรก ๆ เท่านั้น แต่ในถังเก็บน้ำหมักชุดที่มีการดึงผลิตภัณฑ์ออกมานั้น ปริมาณกรดอะซิติกในน้ำหมักมีแนวโน้มต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากอิทธิพลค่าความเป็นกรดเป็นด่างที่ต่ำลงมีผลกระทบโดยตรงต่อการทำงานของแบคทีเรียนั่นเอง

4.2.2 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการป้อนกลับกับประสิทธิภาพของระบบหมักน้ำส้มสายชูแบบต่อเนื่อง

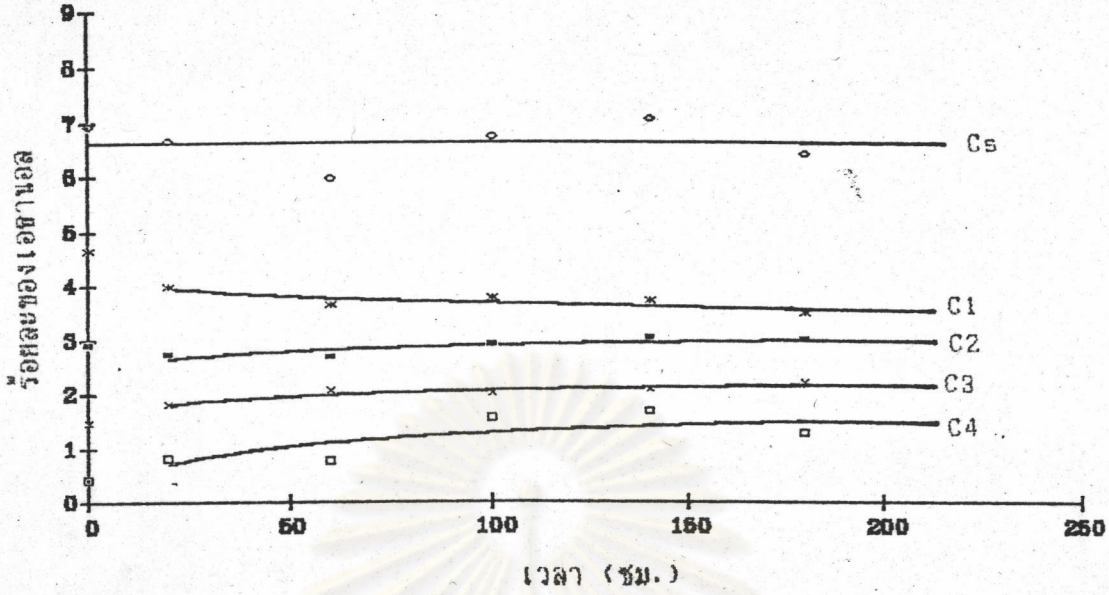
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองที่อัตราส่วนการป้อนกลับต่าง ๆ เพื่อประเมินผลของอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับที่มีต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบ

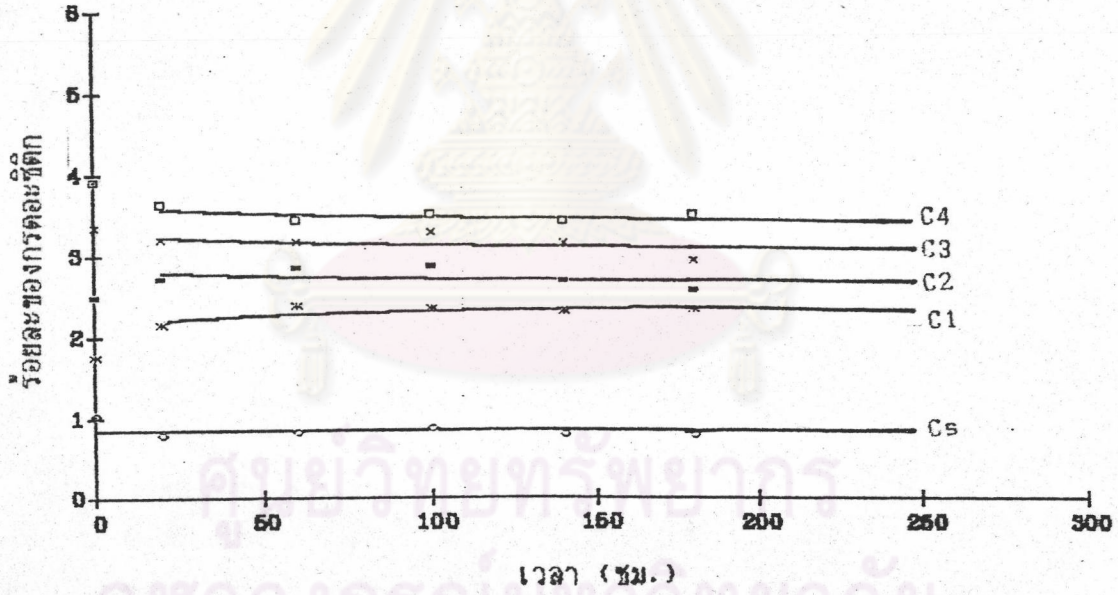
ก. กรณีการนำผลิตภัณฑ์จากถังเก็บน้ำหมักที่ 4 มาป้อนย้อนกลับสู่ถังเก็บน้ำหมักที่ 1

กราฟในรูปที่ 4.9 แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณเอธานอลและกรดอะซิติกที่เวลาต่าง ๆ ของระบบหมักที่อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับเป็น 1.00 และที่อัตราการเจือจาง 0.0250 ชม.$^{-1}$ ส่วนกราฟในรูปที่ 4.10 แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณเอธานอลและกรดอะซิติกที่เวลาต่าง ๆ ของระบบหมักที่อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับเป็น 0.81 และที่อัตราการเจือจาง 0.0310 ชม.$^{-1}$ ทั้ง 2 กรณีเป็นการพิจารณาให้จุดที่เริ่มป้อนย้อนกลับเป็นชั่วโมงที่ 0

ข. กรณีการนำผลิตภัณฑ์จากถังเก็บน้ำหมักที่ 3 มาป้อนย้อนกลับสู่ถังเก็บน้ำหมักที่ 1

จากกราฟรูปที่ 4.11 แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณเอธานอลและกรดอะซิติกที่เวลาต่าง ๆ ของระบบหมักที่อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับเป็น 1.00 และที่อัตราการเจือจาง 0.0250 ชม.$^{-1}$, กราฟรูปที่ 4.12 แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณเอธานอล และกรดอะซิติกที่เวลาต่าง ๆ ของระบบหมักที่อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับเป็น 0.71 และที่อัตราการเจือจาง 0.0350 ชม.$^{-1}$ ส่วนกราฟรูปที่ 4.13 แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณเอธานอลและกรดอะซิติกที่เวลาต่าง ๆ ของระบบหมักที่อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับเป็น 0.54 และที่อัตราการเจือจาง 0.0395 ชม.$^{-1}$ ทั้ง 3 กรณีเป็นการนิจารณาให้จุดที่เริ่มป้อนย้อนกลับเป็น



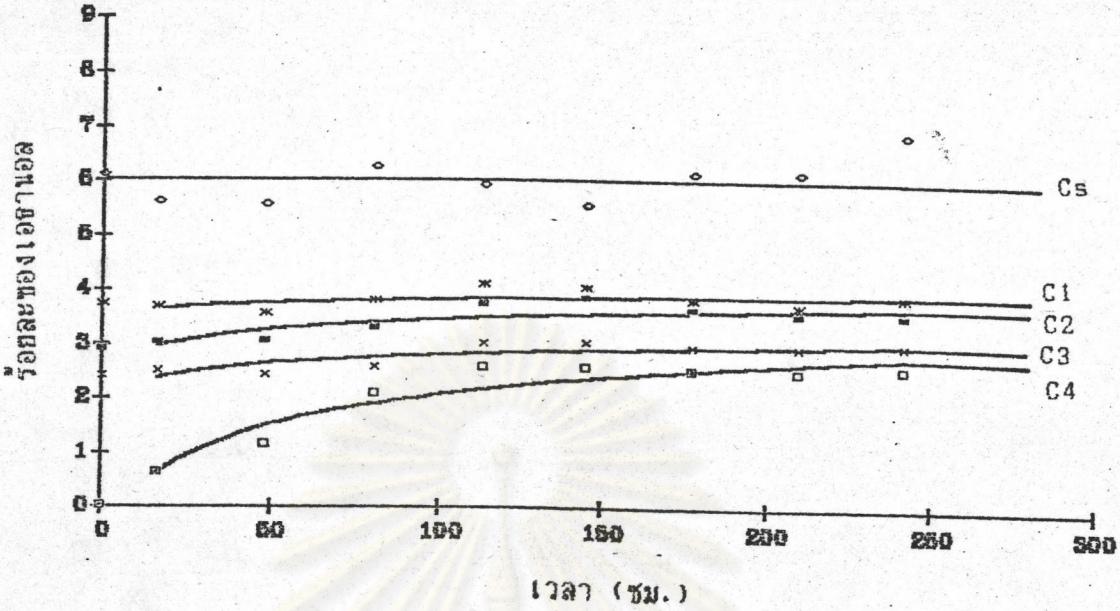


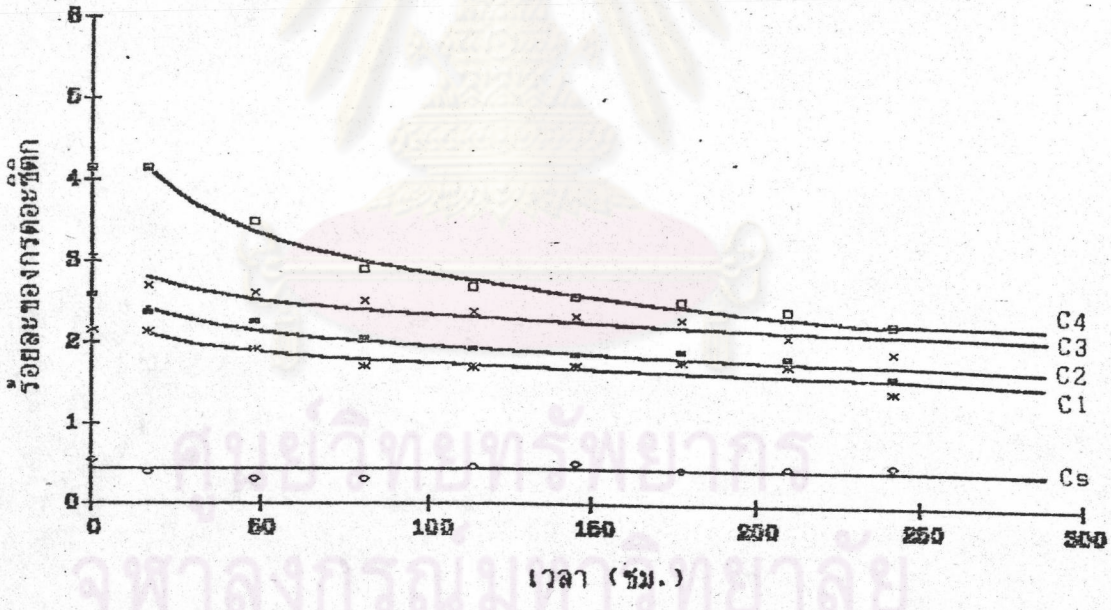
รูปที่ 4.9 แสดงปริมาณเอธานอลและกรดอะซิติกต่อเวลาของถังเก็บไวน์ และถังเก็บน้ำหมักที่ 1,2,3,4 ในการเดินเครื่องผลิตน้ำส้มสายชูอย่างต่อเนื่องโดยกำหนดให้จุดที่เริ่มทำการป้อนย้อนกลับเป็นชั่วโมงที่ 0 ใช้อัตราการเจือจาง 0.0250 ชม.$^{-1}$ อัตราส่วนการป้อนกลับจากถังเก็บน้ำหมักที่ 4 สู่ถังเก็บน้ำหมัก ที่ 1 เป็น 1.00

สัญลักษณ์ : Cs แทน ถังเก็บไวน์

C1,C2,C3,C4 แทน ถังเก็บน้ำหมักที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



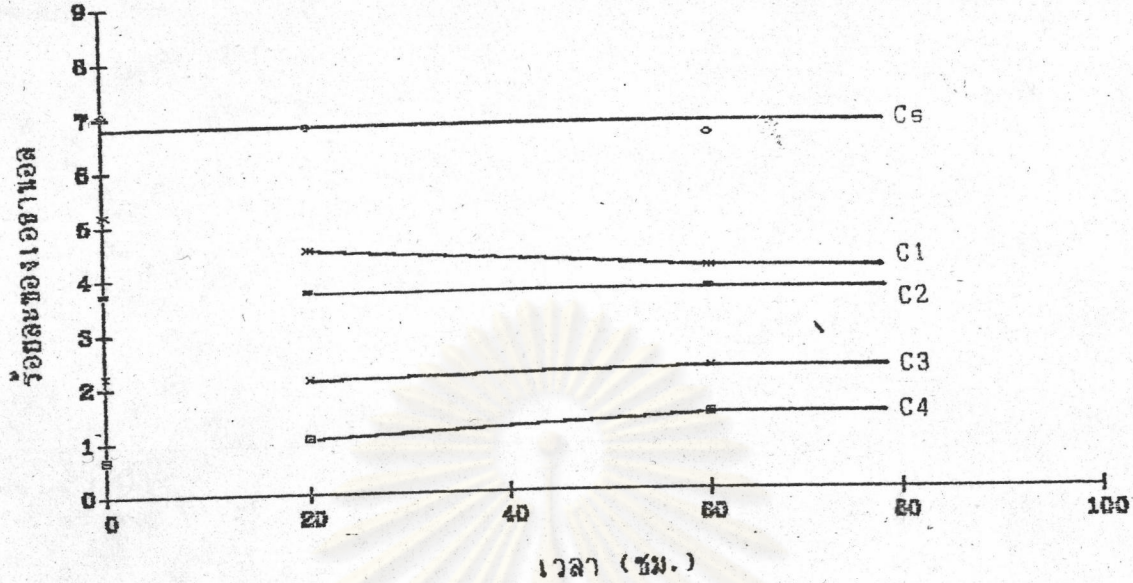


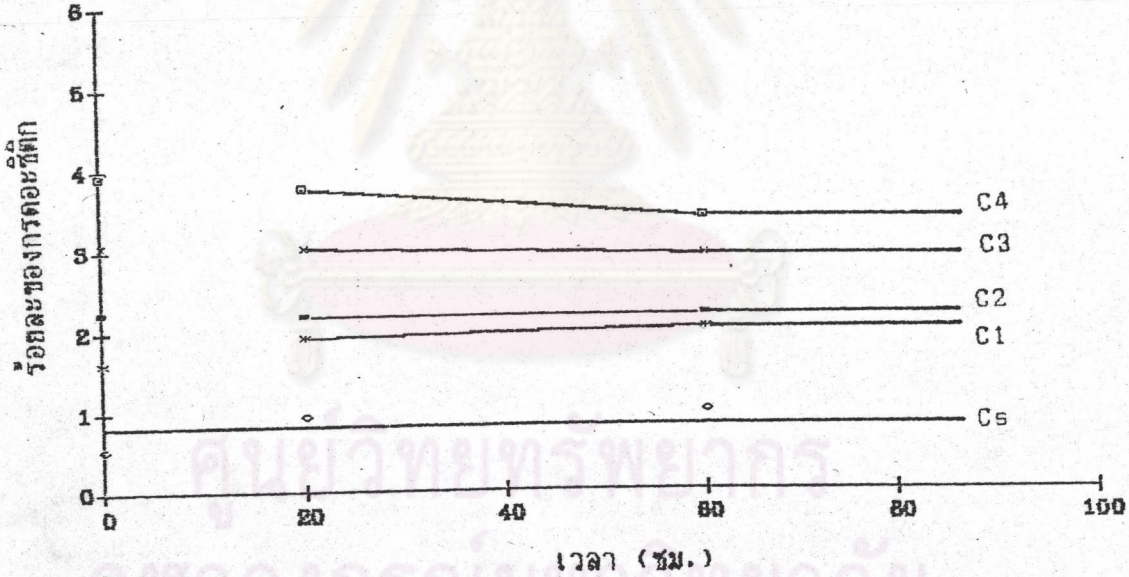
รูปที่ 4.10 แสดงปริมาณเอธานอลและกรดอะซิติกต่อเวลาของถังเก็บไวน์ และถังเก็บน้ำหมักที่ 1,2,3,4 ในการเดินเครื่องผลิตน้ำส้มสายชูอย่างต่อเนื่องโดยกำหนดให้จุดที่เริ่มทำการป้อนย้อนกลับเป็นชั่วโมงที่ 0 ใช้อัตราการเจือจาง 0.0310 ชม.$^{-1}$ อัตราส่วนการป้อนกลับจากถังเก็บน้ำหมักที่ 4 สู่ถังเก็บน้ำหมักที่ 1 เป็น 0.81

สัญลักษณ์ : Cs แทน ถังเก็บไวน์

C1,C2,C3,C4 แทน ถังเก็บน้ำหมักที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

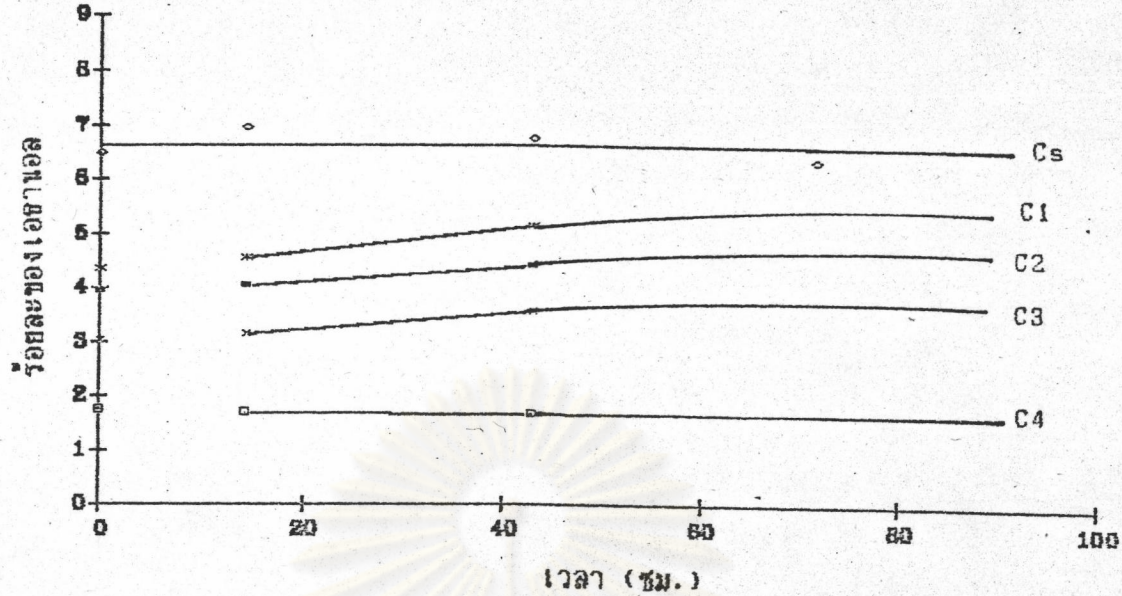


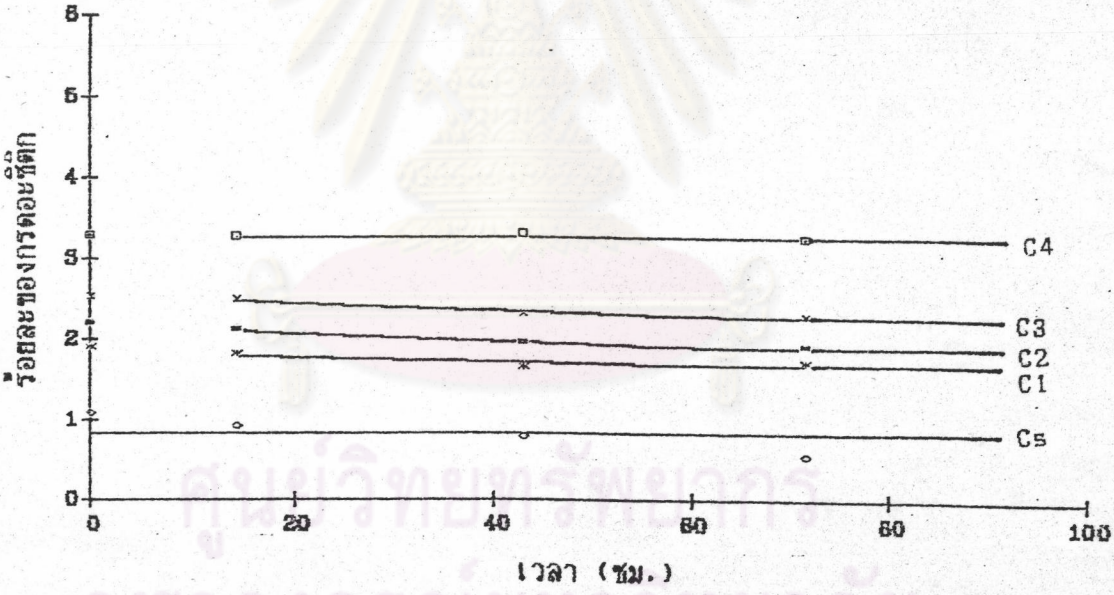


รูปที่ 4.11 แสดงปริมาณเอธานอลและกรดอะซิติกต่อเวลาของถังเก็บไวน์ และถังเก็บน้ำหมักที่ 1,2,3,4 ในการเดินเครื่องผลิตน้ำส้มสายชูอย่างต่อเนื่องโดยกำหนดให้จุดที่เริ่มทำการป้อนย้อนกลับเป็นชั่วโมงที่ 0 ใช้อัตราการเจือจาง 0.0250 ชม.$^{-1}$ อัตราส่วนการป้อนกลับจากถังเก็บน้ำหมักที่ 3 สู่ถังเก็บน้ำหมักที่ 1 เป็น 1.00

สัญลักษณ์ : Cs แทน ถังเก็บไวน์
C1,C2,C3,C4 แทน ถังเก็บน้ำหมักที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

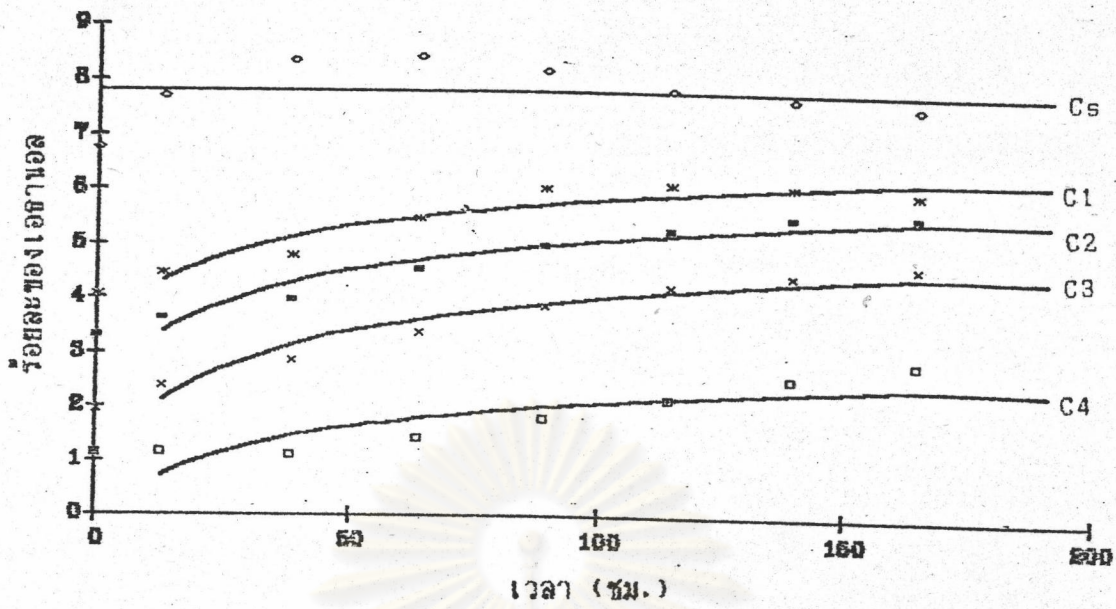


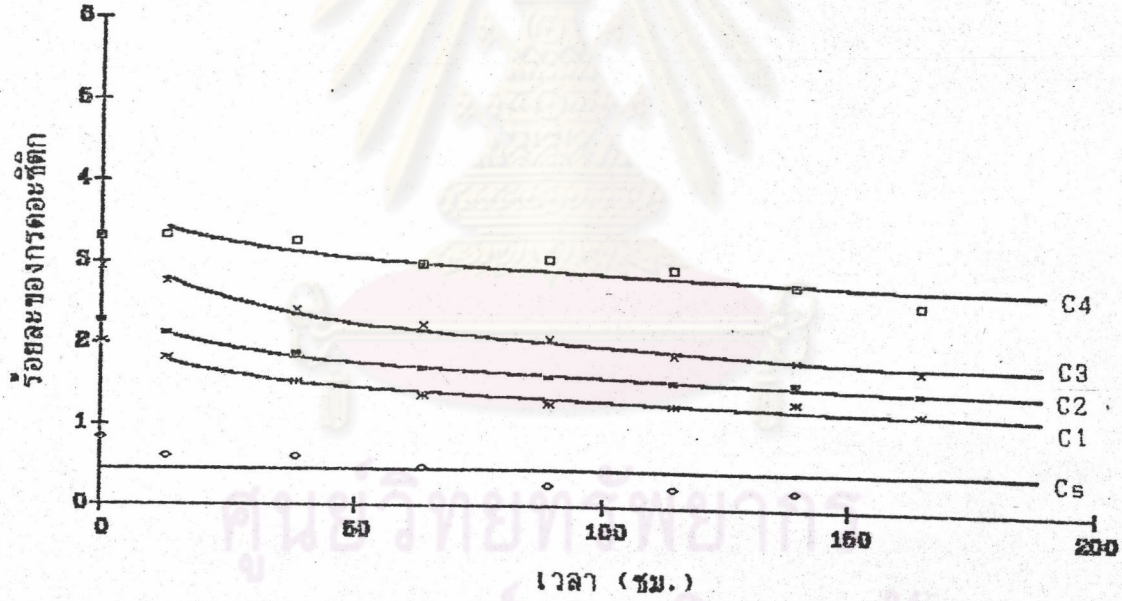


รูปที่ 4.12 แสดงปริมาณเอธานอลและกรดอะซิติกต่อเวลาของถังเก็บไวน์ และถังเก็บน้ำหมักที่ 1,2,3,4 ในการเดินเครื่องผลิตน้ำส้มสายชูอย่างต่อเนื่องโดยกำหนดให้จุดที่เริ่มทำการป้อนย้อนกลับเป็นชั่วโมงที่ 0 ใช้อัตราการเจือจาง 0.0350 ชม.$^{-1}$ อัตราส่วนการป้อนกลับจากถังเก็บน้ำหมักที่ 3 สู่ถังเก็บน้ำหมักที่ 1 เป็น 0.71

สัญลักษณ์ : Cs แทน ถังเก็บไวน์

C1,C2,C3,C4 แทน ถังเก็บน้ำหมักที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ

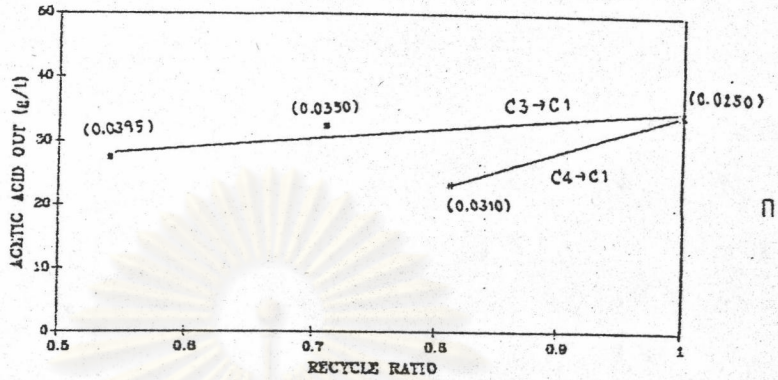




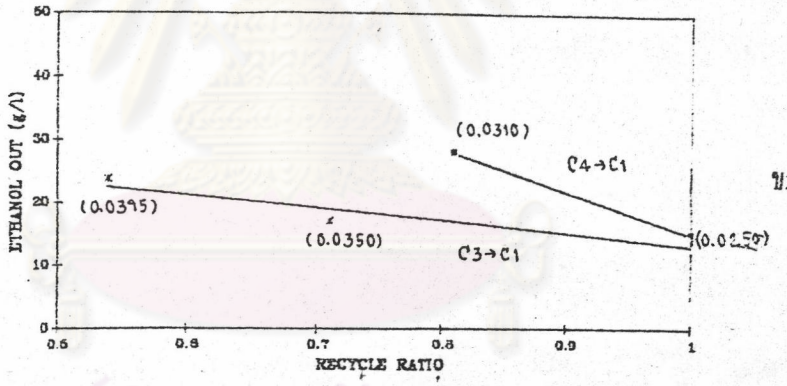
รูปที่ 4.13 แสดงปริมาณเอธานอลและกรดอะซิติกต่อเวลาของถังเก็บไวน์ และถังเก็บน้ำหมักที่ 1,2,3,4 ในการเดินเครื่องผลิตน้ำส้มสายชูอย่างต่อเนื่องโดยกำหนดให้จุดที่เริ่มทำการป้อนย้อนกลับเป็นชั่วโมงที่ 0 ใช้อัตราการเจือจาง 0.0395 ชม.$^{-1}$ อัตราส่วนการป้อนกลับจากถังเก็บน้ำหมักที่ 3 สู่ถังเก็บน้ำหมักที่ 1 เป็น 0.54

สัญลักษณ์ : Cs แทน ถังเก็บไวน์

C1,C2,C3,C4 แทน ถังเก็บน้ำหมักที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ



ก.



ข.

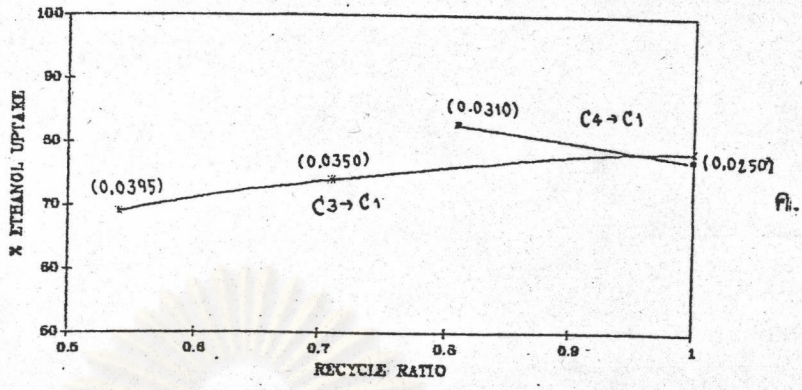
รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่แสดงประสิทธิภาพของระบบหมักน้ำส้มสายชูแบบต่อเนื่องที่อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับต่าง ๆ ภายใต้สภาวะคงที่

(ก) ปริมาณกรดอะซิติกที่ได้ (ข) ปริมาณเอธานอลที่เหลืออยู่

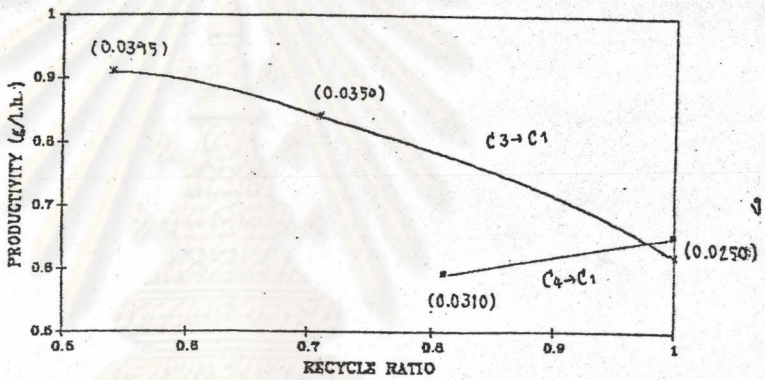
(ค) ปริมาณเอธานอลที่ถูกใช้ไป (ง) กำลังการผลิต

(จ) ประสิทธิภาพการสร้างกรด

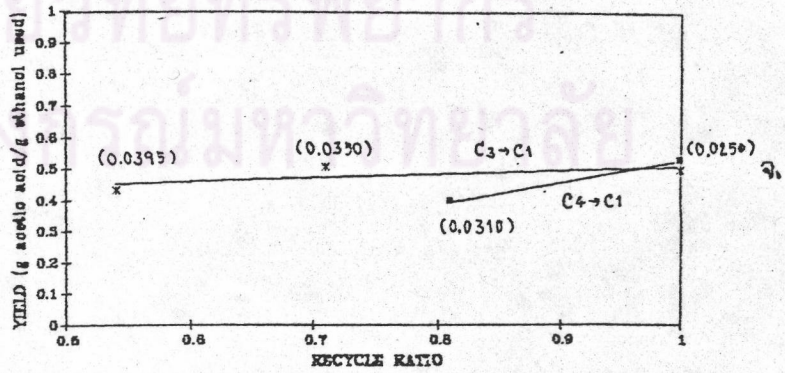
สัญลักษณ์ ( ) แทน อัตราการเจือจาง ($ชม.^{-1}$)



ก.



ข



ค.

รูปที่ 4.14 (ต่อ)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชั่วโมงที่ 0 จากผลการทดลองเปรียบเทียบดังแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.11-4.13 สรุปได้ว่า การลดอัตราส่วนการป้อนกลับทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเข้มข้นของกรดอะซิติกและประสิทธิภาพการสร้างกรดอะซิติกใกล้เคียงกัน หรือกล่าวได้ว่าอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับในช่วง 0.54-1.00 ไม่มีผลต่อการทำงานของระบบหมัก ดังแสดงในรูป 4.14

สำหรับผลการทดลองเดิม (ประพนธ์,2531) รายงานว่าอัตราการป้อนย้อนกลับที่เหมาะสมเป็น 0.20 ที่อัตราการเจือจาง 0.0216 ชม.$^{-1}$ ได้น้ำส้มสายชูวันละ 6.22 ลิตร มีความเข้มข้นของกรดอะซิติกประมาณร้อยละ 5.1

สำหรับในการทดลองนี้ไม่สามารถสรุปหาอัตราส่วนการป้อนกลับที่เหมาะสมได้ เนื่องจากน้ำส้มสายชูที่ได้มีความเข้มข้นของกรดอะซิติกต่ำกว่าร้อยละ 4

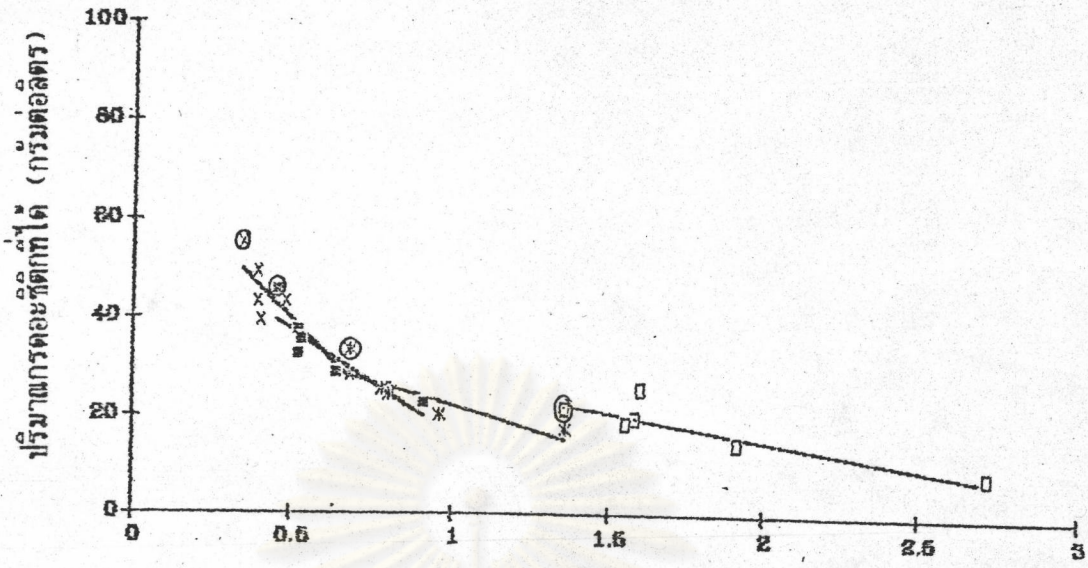
4.2.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบหมักน้ำส้มสายชูแบบต่อเนื่องเมื่อไม่มีการนำผลิตภัณฑ์มาป้อนย้อนกลับ และเมื่อมีการนำผลิตภัณฑ์บางส่วนมาป้อนย้อนกลับ

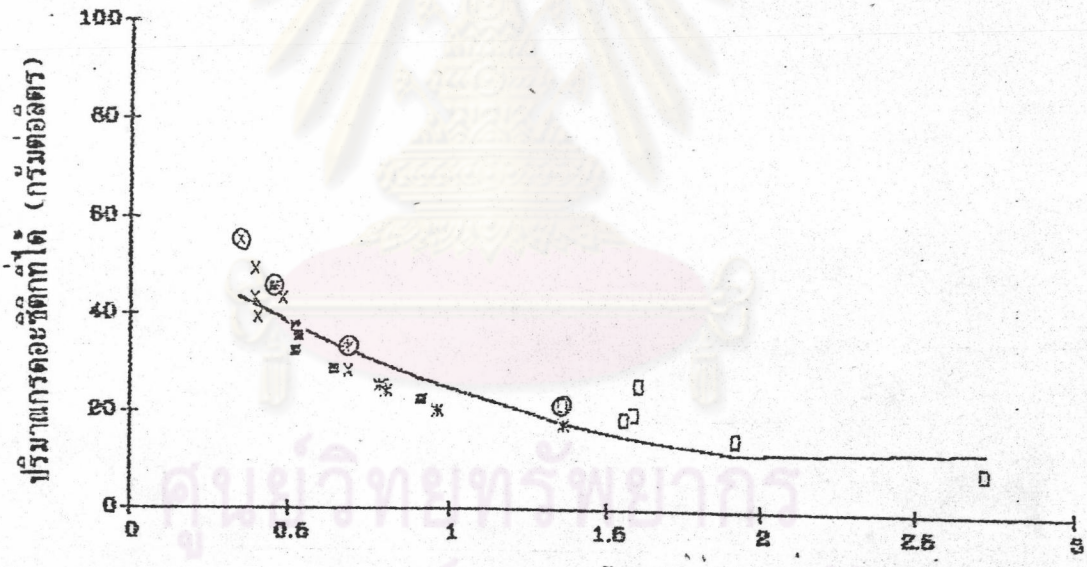
จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น จะเห็นได้ว่าการป้อนย้อนกลับไม่ได้ช่วยให้ประสิทธิภาพในการหมักดีขึ้น ดังแสดงเปรียบเทียบในกราฟรูปที่ 4.4 และ 4.7 ซึ่งใช้อัตราการเจือจางเท่ากันคือ 0.025 ชม.$^{-1}$ เนื่องจากปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนเอธานอลไปเป็นกรดอะซิติก คือ Acetobacter นั้นส่วนใหญ่เกาะเป็นฟิล์มอยู่บนผิววัสดุบรรจุภายในคอลัมน์ โดยมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่แขวนลอยอยู่ในน้ำหมัก นอกจากนี้จุลินทรีย์ที่อยู่ในน้ำหมักที่ป้อนย้อนกลับเป็นจุลินทรีย์ที่อ่อนแอ เนื่องจากอยู่ภายใต้สภาวะความเป็นกรดเป็นด่างต่ำ ถึงแม้จะทำการเพิ่มปริมาณสารอาหาร (เอธานอล) ด้วยการเพิ่มอัตราการเจือจาง แต่ก็ไม่ได้ช่วยให้ประสิทธิภาพการหมักดีขึ้น การนำผลิตภัณฑ์บางส่วนไปป้อนย้อนกลับจึงไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการสร้างกรดอะซิติก แต่อย่างไรก็ตามสามารถเพิ่มปริมาณกรดอะซิติกในถังเก็บน้ำหมักที่ 1 และ 2 ได้ ทั้งนี้เนื่องจากการป้อนย้อนกลับเป็นการนำกรดอะซิติกไปเพิ่มให้ถังเก็บน้ำหมักแรก ๆ นั่นเอง แต่ขณะเดียวกันการเพิ่มของกรดอะซิติกได้ทำให้ค่าความเป็นกรดเป็นด่างมีค่าต่ำลง จึงส่งผลกระทบต่อการทำงานในถังเก็บน้ำหมักที่ 3 และ 4

4.3 ผลของจำนวนชุดเครื่องหมักต่อประสิทธิภาพของระบบหมักน้ำส้มสายชูแบบต่อเนื่อง

ในการศึกษาว่าจำนวนชุดของเครื่องหมักที่ใช้ในการทดลองมีผลอย่างไรต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบหมักน้ำส้มสายชูอย่างต่อเนื่อง โดยได้นำเอาข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดอะซิติกที่ได้, ปริมาณเอธานอลที่ถูกนำไปใช้, กำลังการผลิต และ

ประสิทธิภาพการสร้างกรดอะซิติก ที่อัตราการป้อนเอธานอลต่อปริมาตรน้ำหมักในเครื่องและอัตราการป้อนเอธานอลต่อพื้นที่ผิวของวัสดุบรรจุต่าง ๆ ทั้งเมื่อไม่มีการนำผลิตภัณฑ์มาป้อนย้อนกลับ (ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.15 - 4.22) และเมื่อมีการนำเอาผลิตภัณฑ์มาป้อนย้อนกลับ (ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.23 - 4.30) โดยได้นำเอาข้อมูลจากงานวิจัยของประพนธ์ (2531) มาแสดงรวมไว้ด้วย จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการลากเส้นกราฟโดยแยกข้อมูลเป็นชุด ๆ คือเมื่อใช้เครื่องหมัก 1 ชุด, เมื่อใช้เครื่องหมัก 2 ชุดต่ออนุกรมกัน, เมื่อใช้เครื่องหมัก 3 ชุดต่ออนุกรมกัน และเมื่อใช้เครื่องหมัก 4 ชุดต่ออนุกรมกัน เส้นกราฟที่ได้มีแนวโน้มต่อเนื่องกันเป็นเส้นโค้งเดียวกัน ดังนั้นจึงได้ลากเส้นกราฟเป็นเส้นเดียว ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.15 ถึง 4.30 โดยกราฟทุกเส้นแสดงความสัมพันธ์คล้ายคลึงกันคือ เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนเอธานอล ปริมาณความเข้มข้นของกรดอะซิติก, อัตราการใช้เอธานอล และประสิทธิภาพการผลิตกรดอะซิติกลดลงในช่วงแรกเป็นเส้นตรง และมีค่าคงที่ที่อัตราการป้อนสารเอธานอลสูง ๆ จากผลการทดลองนี้สรุปได้ว่า จำนวนชุดของเครื่องหมักไม่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบหมักน้ำส้มสายชูแต่อย่างใด ทั้งนี้เนื่องจากเหตุผล 2 ประการคือ ประการแรกระบบหมักน้ำส้มสายชูถูกกำหนดให้มีปริมาณเอธานอลเริ่มต้นร้อยละ 6-8 และให้ได้น้ำส้มสายชูที่มีปริมาณกรดอะซิติกไม่ต่ำกว่าร้อยละ 4 ขณะเดียวกันให้มีเอธานอลเหลืออยู่เล็กน้อยด้วย ดังนั้นจึงไม่สามารถทดลองที่อัตราการป้อนสารเอธานอลสูงมาก ๆ หรือต่ำมาก ๆ ประการที่สองเมื่อเอธานอลถูกเปลี่ยนไปเป็นกรดอะซิติกมาก ๆ ซึ่งทำให้ค่าความเป็นกรดเป็นด่างมีค่าลดลง จึงทำให้เครื่องหมักชุดหลัง ๆ มีประสิทธิภาพต่ำลง ด้วยเหตุนี้จึงทำให้การเพิ่มจำนวนชุดเครื่องหมักไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบหมักน้ำส้มสายชูแบบต่อเนื่องนี้ได้ ดังนั้นเมื่อต้องการผลิตน้ำส้มสายชูให้มีความเข้มข้นตามที่กำหนด ก็สามารถผลิตได้โดยใช้เครื่องหมักชุดเดียว แต่เครื่องหมักดังกล่าวจะต้องมีขนาดใหญ่ หรือผลิตโดยใช้เครื่องหมักหลาย ๆ ชุด แล้วเครื่องหมักแต่ละชุดมีขนาดเล็ก อย่างไรก็ตามควรเลือกใช้เครื่องหมักชุดเดียว เพื่อเป็นการลดค่าอุปกรณ์ (equipment cost) นอกจากนี้ยังสามารถนำกราฟรูปที่ 4.15 - 4.30 ไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบเครื่องหมักให้มีขนาดตามต้องการได้อีกด้วย

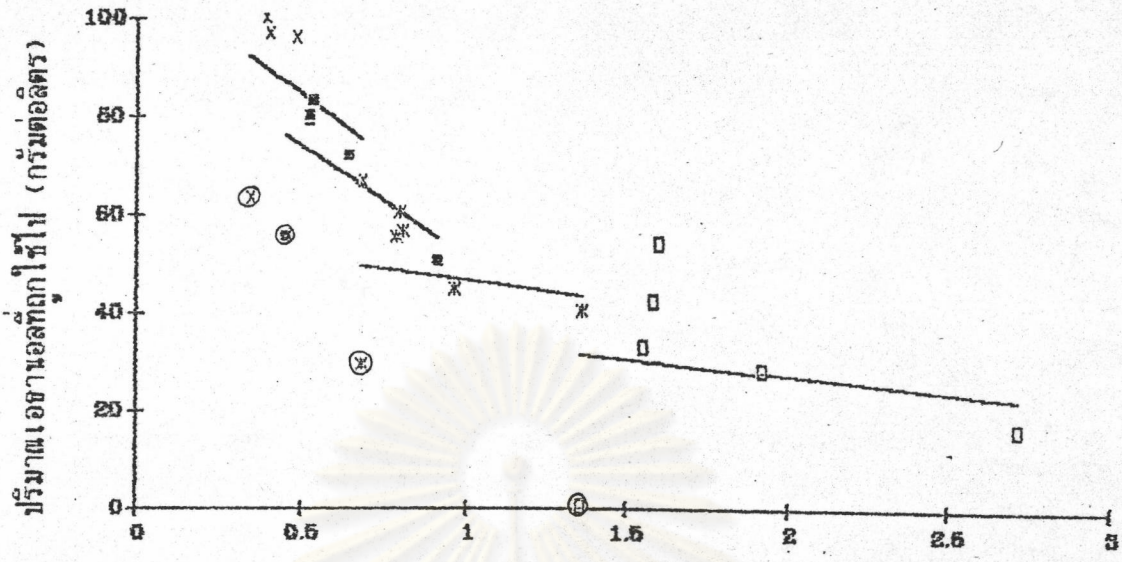


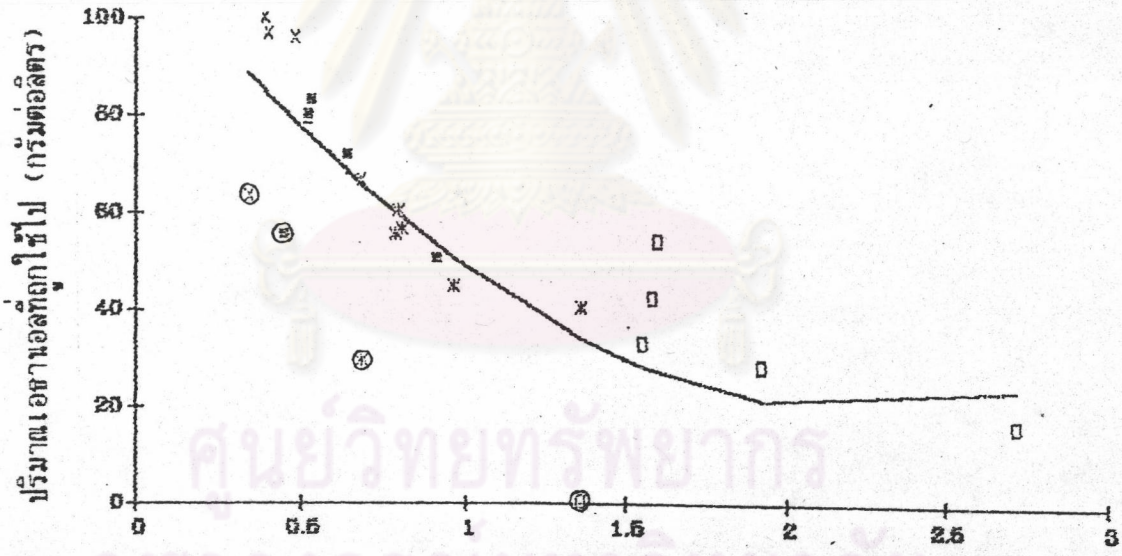


รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดอะซิติกที่ได้กับอัตราการป้อนเอธานอลต่อปริมาตรน้ำหมักในเครื่องหมัก เมื่อมีเครื่องหมักจำนวน 1, 2, 3 และ 4 ชุด ต่ออนุกรมกัน และไม่มีการนำผลิตภัณฑ์มาป้อนย้อนกลับ

สัญลักษณ์ : □ , ✳ , ▪ , × แทน เมื่อใช้เครื่องหมัก 1, 2, 3 และ 4 ชุด

⊙ , ⊗ , ⊛ , ⊗ แทน ข้อมูลของประพนธ์ (2531)



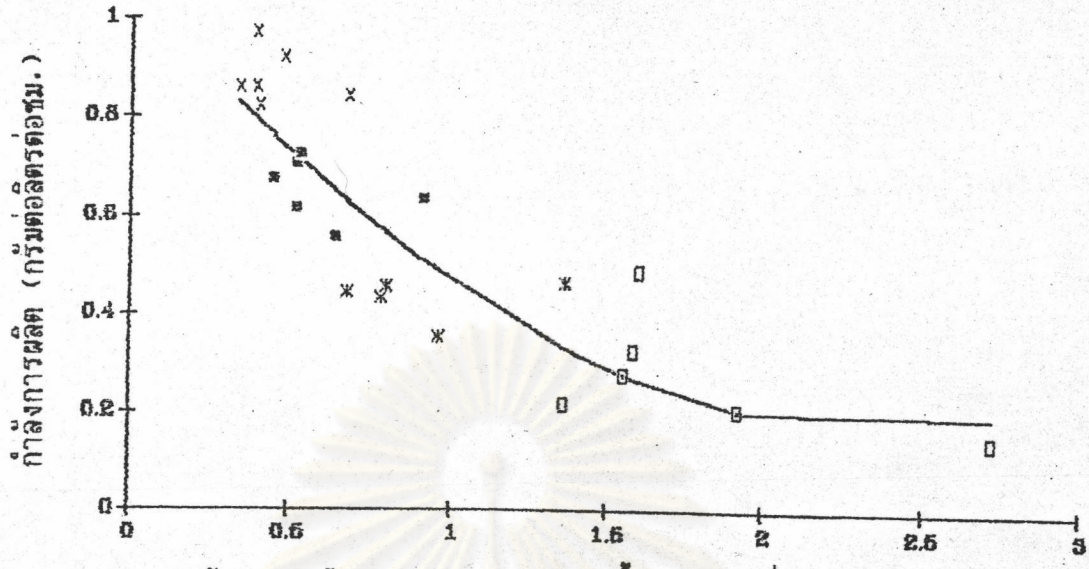


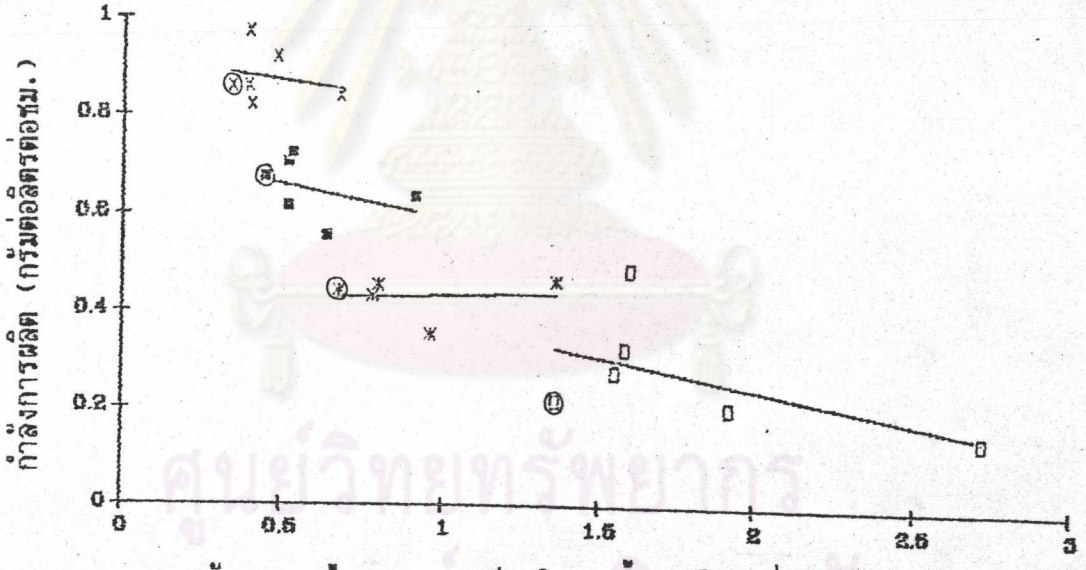
รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเอธานอลที่ถูกใช้ไปกับอัตราการป้อนเอธานอลต่อปริมาตรน้ำหมักในเครื่องหมัก เมื่อมีเครื่องหมักจำนวน 1, 2, 3 และ 4 ชุด ต่ออนุกรมกัน และไม่มีการนำผลิตภัณฑ์มาป้อนย้อนกลับ

สัญลักษณ์ : □, *, ■, × แทน เมื่อใช้เครื่องหมัก 1, 2, 3 และ 4 ชุด

◎, ⊛, ◉, ⊗ แทน ข้อมูลของประพนธ์ (2531)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



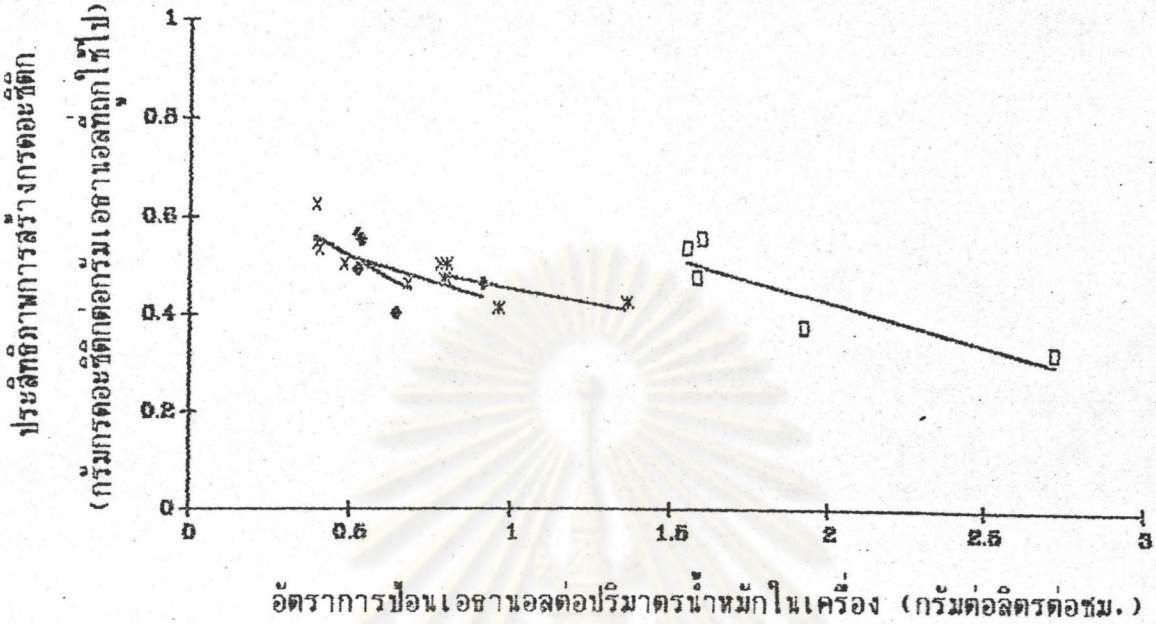


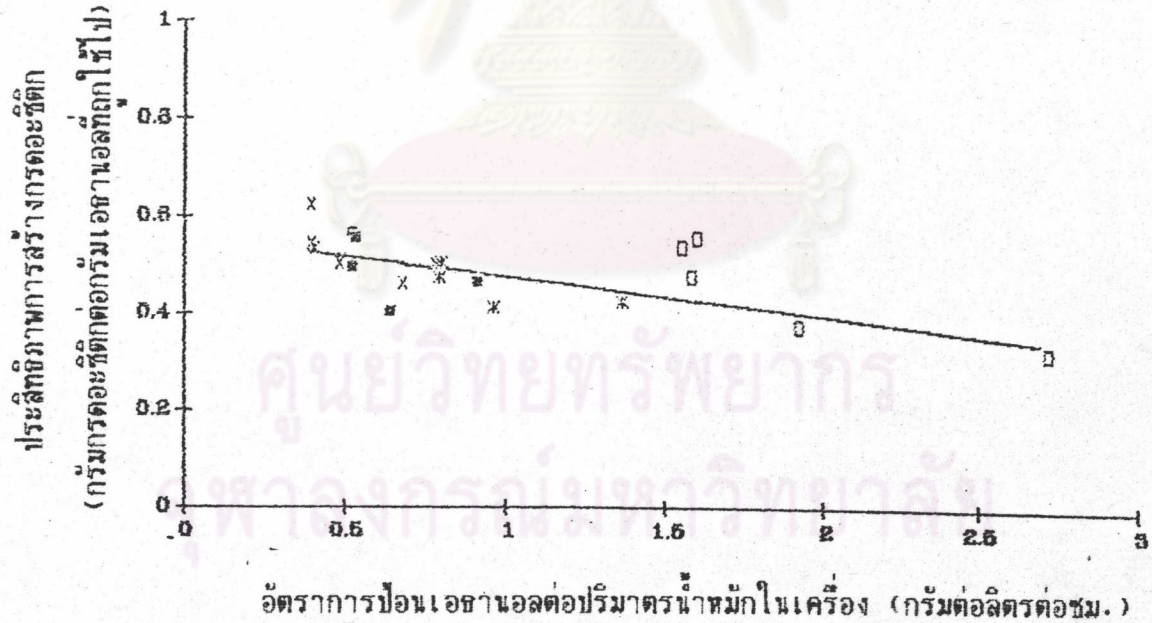
รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการผลิตกับอัตราการป้อนเอธานอลต่อปริมาตรน้ำหมักในเครื่องหมัก เมื่อมีเครื่องหมักจำนวน 1, 2, 3 และ 4 ชุดต่ออนุกรมกัน และไม่มีการนำผลิตภัณฑ์มาป้อนย้อนกลับ

สัญลักษณ์ : ▫, ✱, ▪, ✕ แทน เมื่อใช้เครื่องหมัก 1, 2, 3 และ 4 ชุด

ⓤ, ⊗, ⊛, ⊗ แทน ข้อมูลของประพนธ์ (2531)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



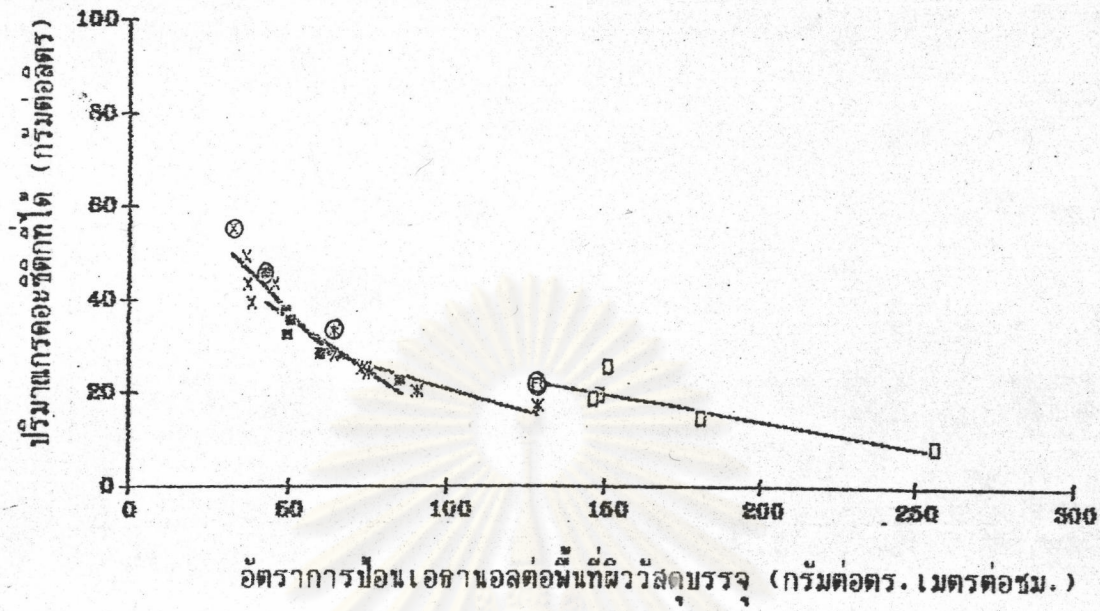


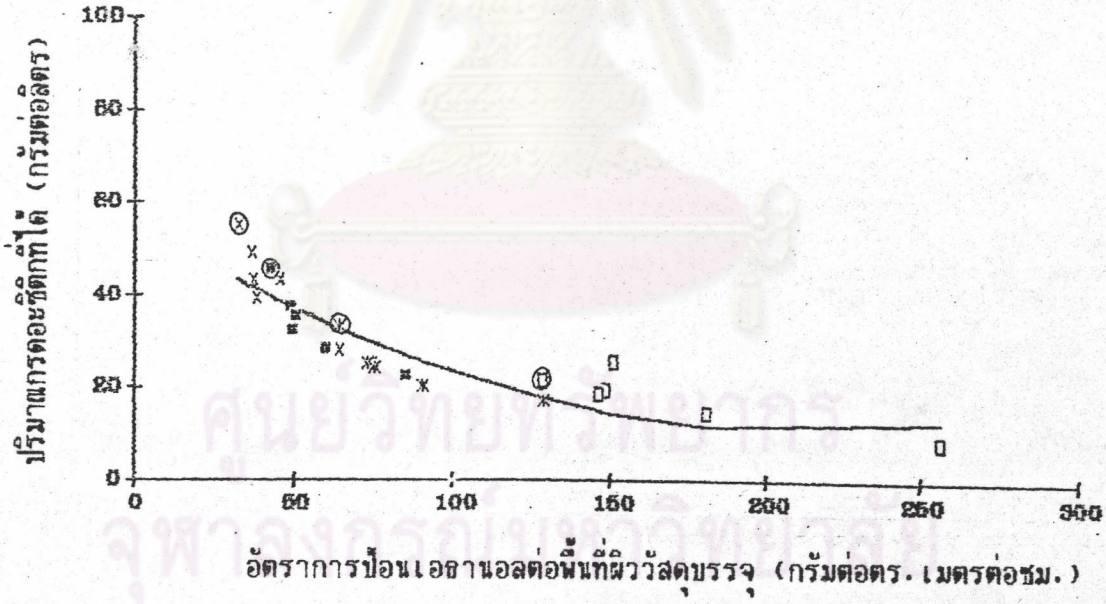
รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการสร้างกรดอะซิติกกับอัตราการป้อนเอธานอลต่อปริมาตรน้ำหมักในเครื่องหมัก เมื่อมีเครื่องหมักจำนวน 1, 2, 3 และ 4 ชุดต่ออนุกรมกัน และไม่มีการนำผลิตภัณฑ์มาป้อนย้อนกลับ

สัญลักษณ์ : ◻, ✳, ■, ✕ แทน เมื่อใช้เครื่องหมัก 1, 2, 3 และ 4 ชุด

◎, ⊛, ◉, ⊗ แทน ข้อมูลของประนนธ์ (2531)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

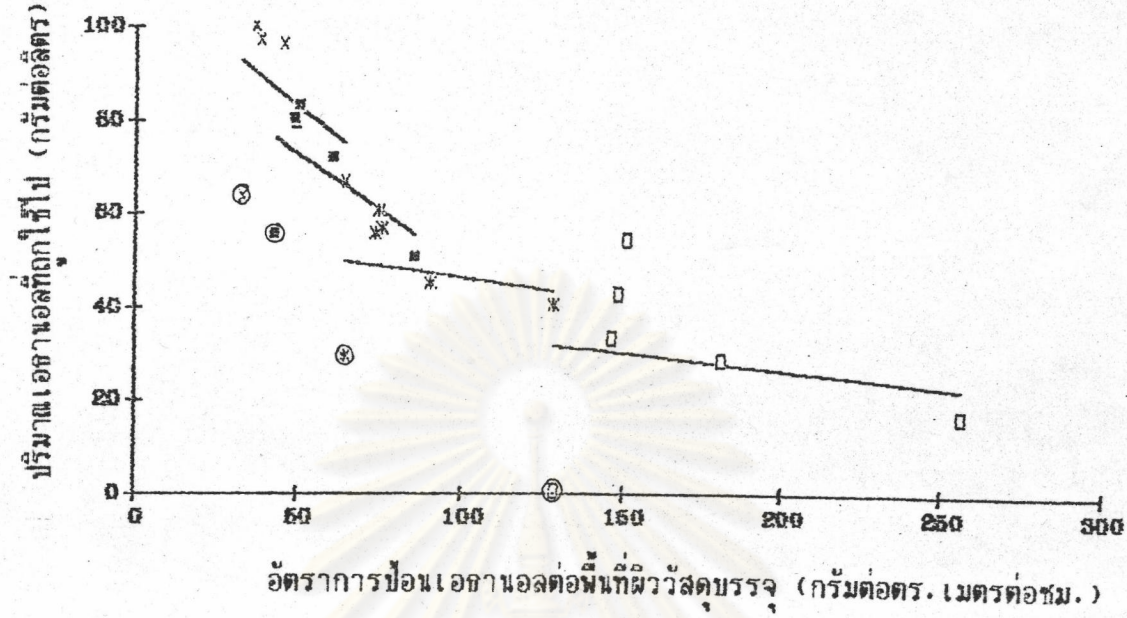


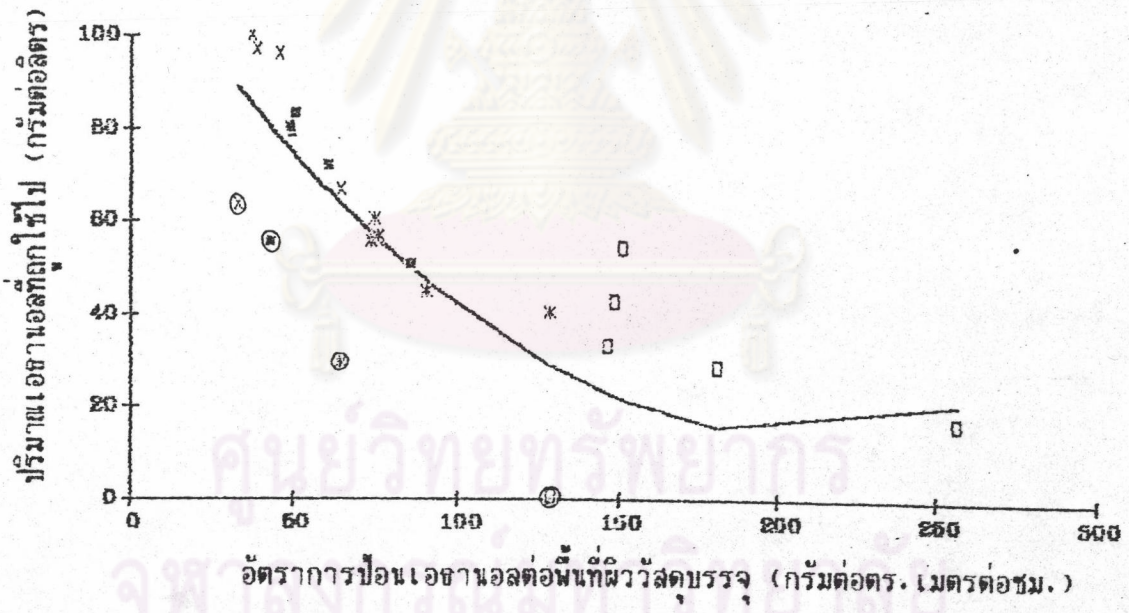


รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดอะซิติกที่ได้กับอัตราการป้อนเอธานอลต่อพื้นที่ผิวของวัสดุบรรจุ เมื่อมีเครื่องหมักจำนวน 1, 2, 3 และ 4 ชุดต่ออนุกรมกัน และไม่มีการนำผลิตภัณฑ์มาป้อนย้อนกลับ

สัญลักษณ์ : □, ✳, ■, × แทน เมื่อใช้เครื่องหมัก 1, 2, 3 และ 4 ชุด

ⓘ, ⊗, ⊛, ⊗ แทน ข้อมูลของประพนธ์ (2531)

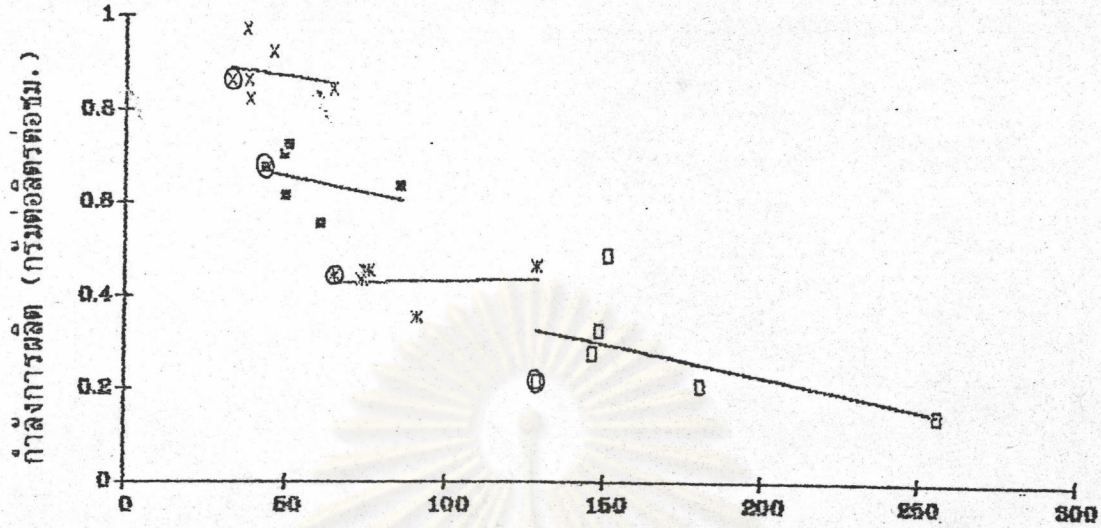


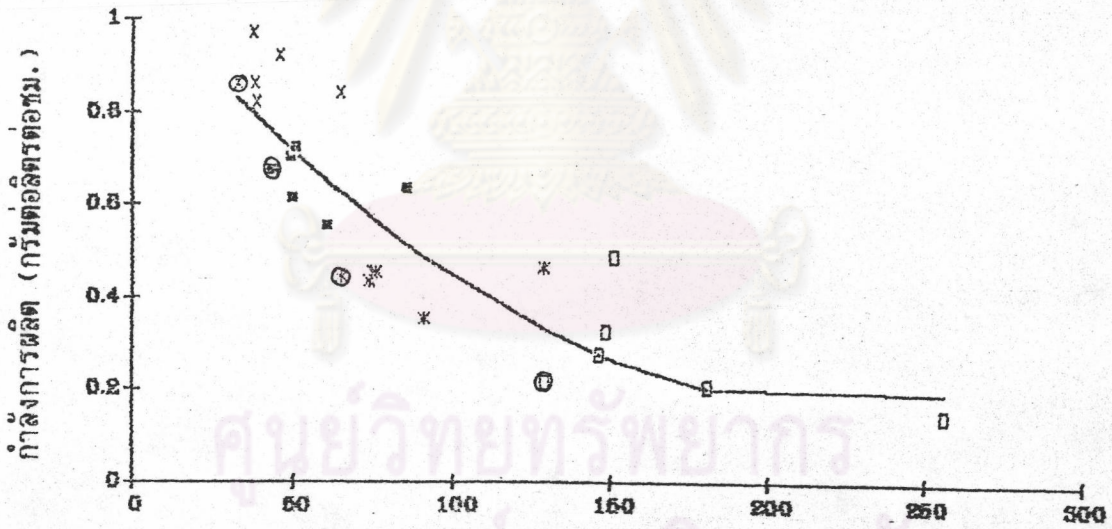


รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเอธานอลที่ถูกใช้ไปกับอัตราการป้อนเอธานอลต่อพื้นที่ผิวของวัสดุบรรจุ เมื่อมีเครื่องหมักจำนวน 1, 2, 3 และ 4 ชุดต่ออนุกรมกัน และไม่มีการนำผลิตภัณฑ์มาป้อนย้อนกลับ

สัญลักษณ์ : □, ×, ■, × แทน เมื่อใช้เครื่องหมัก 1, 2, 3 และ 4 ชุด

①, ②, ③, ④ แทน ข้อมูลของประพนธ์ (2531)

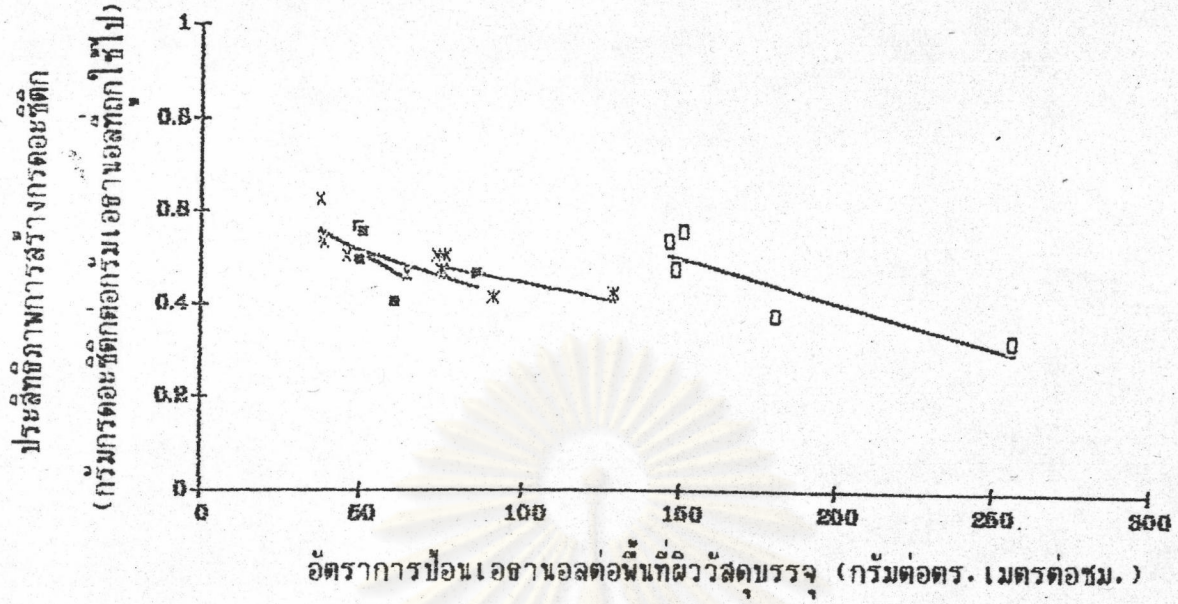


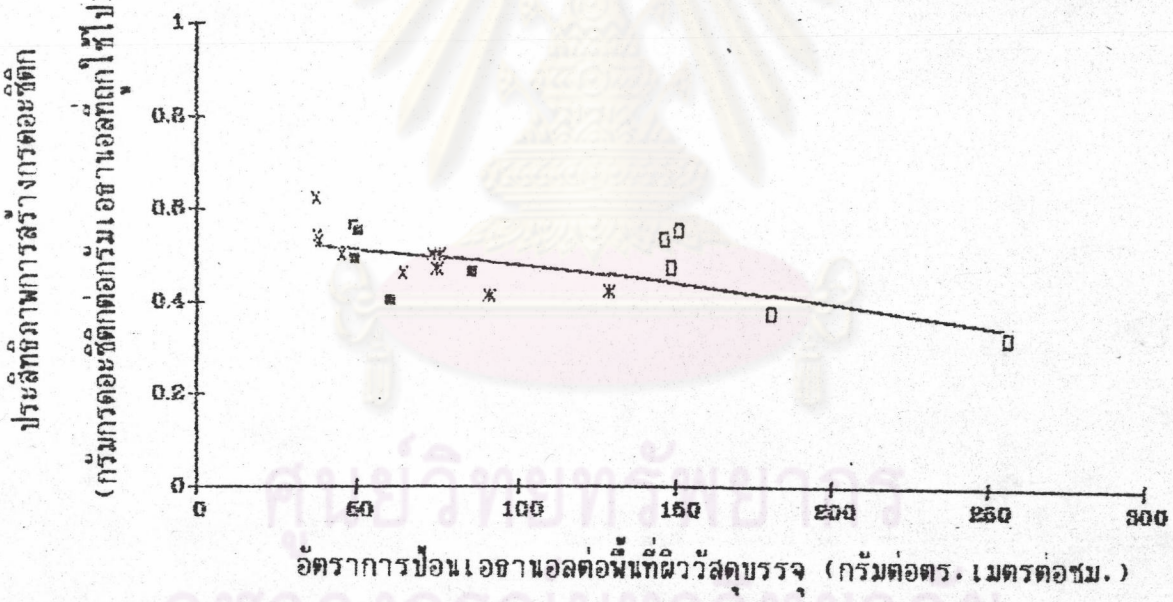


รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการผลิตกับอัตราการป้อนเอธานอลต่อพื้นที่ผิวของวัสดุบรรจุ เมื่อมีเครื่องหมักจำนวน 1, 2, 3 และ 4 ชุดต่ออนุกรมกัน และไม่มีการนำผลิตภัณฑ์มาป้อนย้อนกลับ

สัญลักษณ์ : ▫ , * , ▪ , × แทน เมื่อใช้เครื่องหมัก 1, 2, 3 และ 4 ชุด

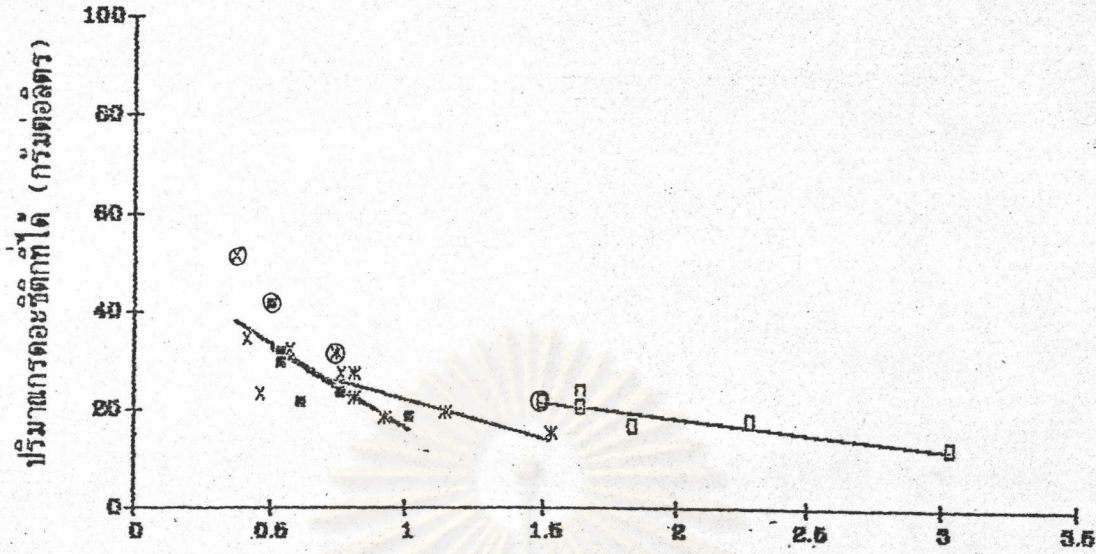
① , ② , ③ , ④ แทน ข้อมูลของประพนธ์ (2531)

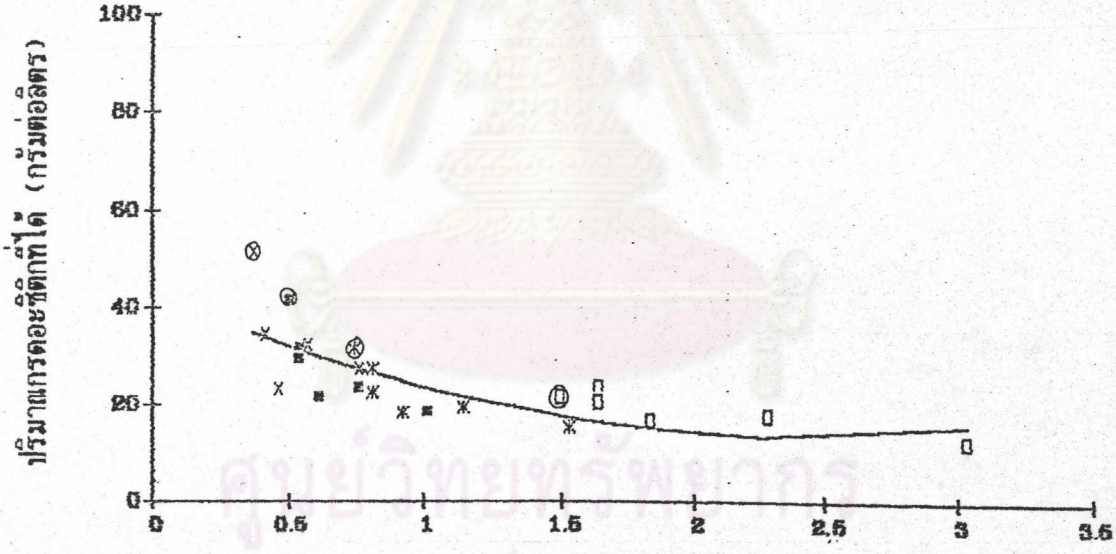




รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการสร้างกรดอะซิติกกับอัตราการป้อนเอธานอลต่อพื้นที่ผิวของวัสดุบรรจุ เมื่อมีเครื่องหมักจำนวน 1, 2, 3 และ 4 ชุดต่ออนุกรมกัน และไม่มีการนำผลิตภัณฑ์มาป้อนย้อนกลับ

สัญลักษณ์ : □, ✱, ■, × แทน เมื่อใช้เครื่องหมัก 1, 2, 3 และ 4 ชุด
ⓤ, ⊛, ⓑ, ⊗ แทน ข้อมูลของประพนธ์ (2531)

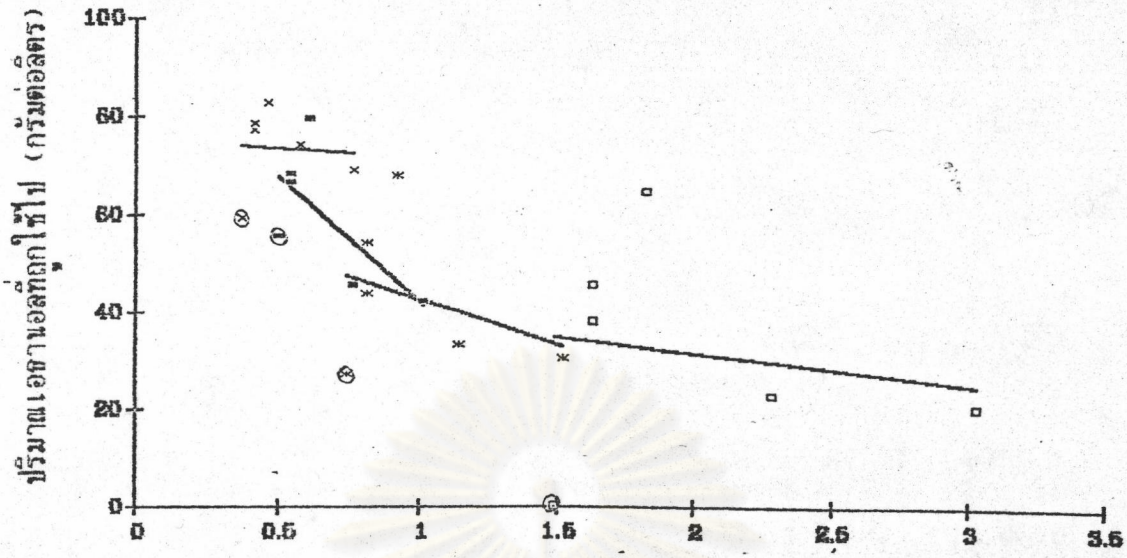


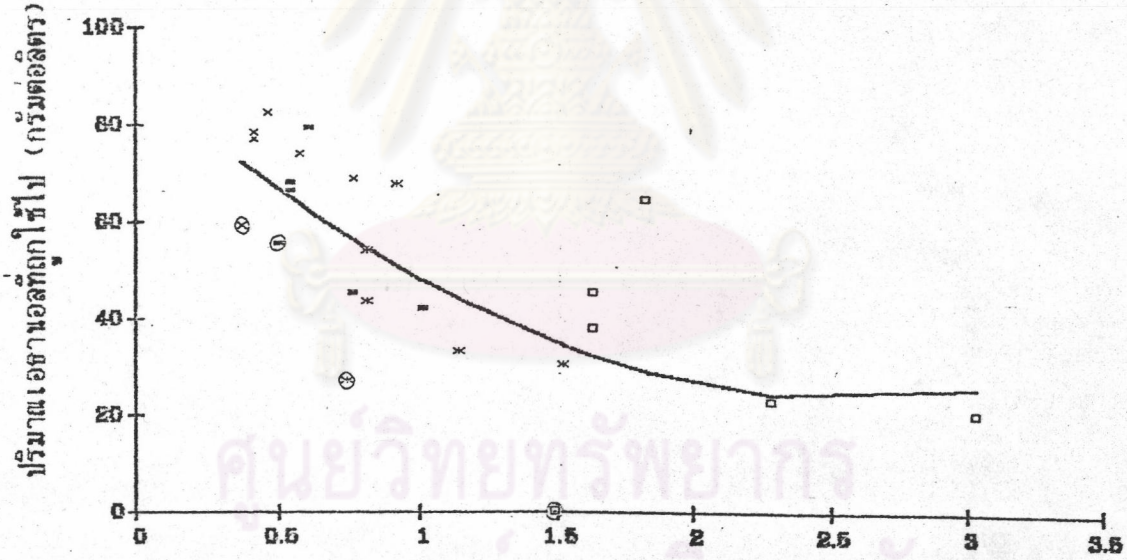


รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดอะซิติกที่ได้กับอัตราการป้อนเอธานอลต่อปริมาตรน้ำหมักในเครื่องหมัก เมื่อมีเครื่องหมักจำนวน 1, 2, 3 และ 4 ชุดต่ออนุกรมกัน และมีการนำผลิตภัณฑ์มาป้อนย้อนกลับ

สัญลักษณ์ : □, ×, ■, × แทน เมื่อใช้เครื่องหมัก 1, 2, 3 และ 4 ชุด

◎, ⊗, ●, ⊗ แทน ข้อมูลของประพนธ์ (2531)

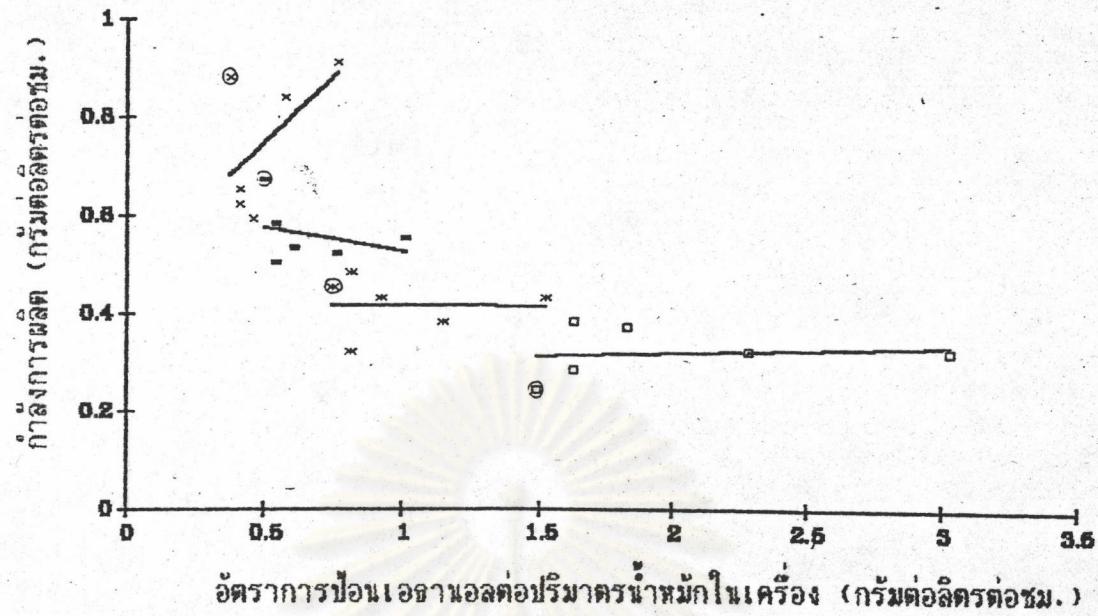


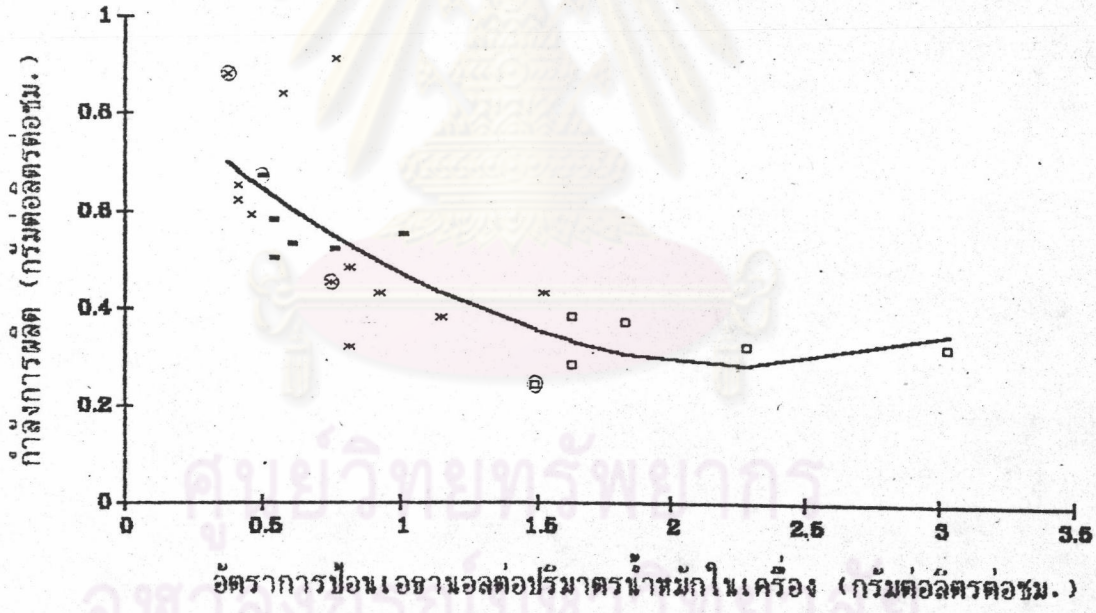


รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเอธานอลที่ถูกใช้ไปกับอัตราการป้อนเอธานอลต่อปริมาตรน้ำหมักในเครื่องหมัก เมื่อมีเครื่องหมักจำนวน 1, 2, 3 และ 4 ชุดต่ออนุกรมกัน และมีการนำผลิตภัณฑ์มาป้อนย้อนกลับ

สัญลักษณ์ : □ , * , ▪ , × แทน เมื่อใช้เครื่องหมัก 1, 2, 3 และ 4 ชุด

Ⓐ , Ⓑ , Ⓒ , Ⓓ แทน ข้อมูลของประพนธ์ (2531)

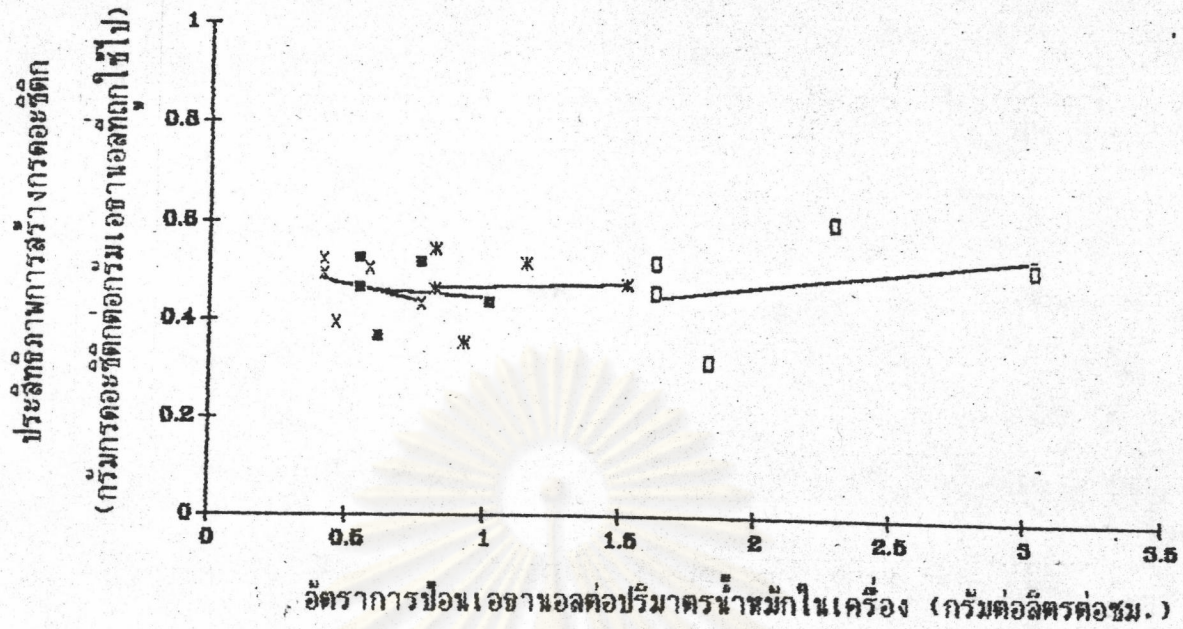


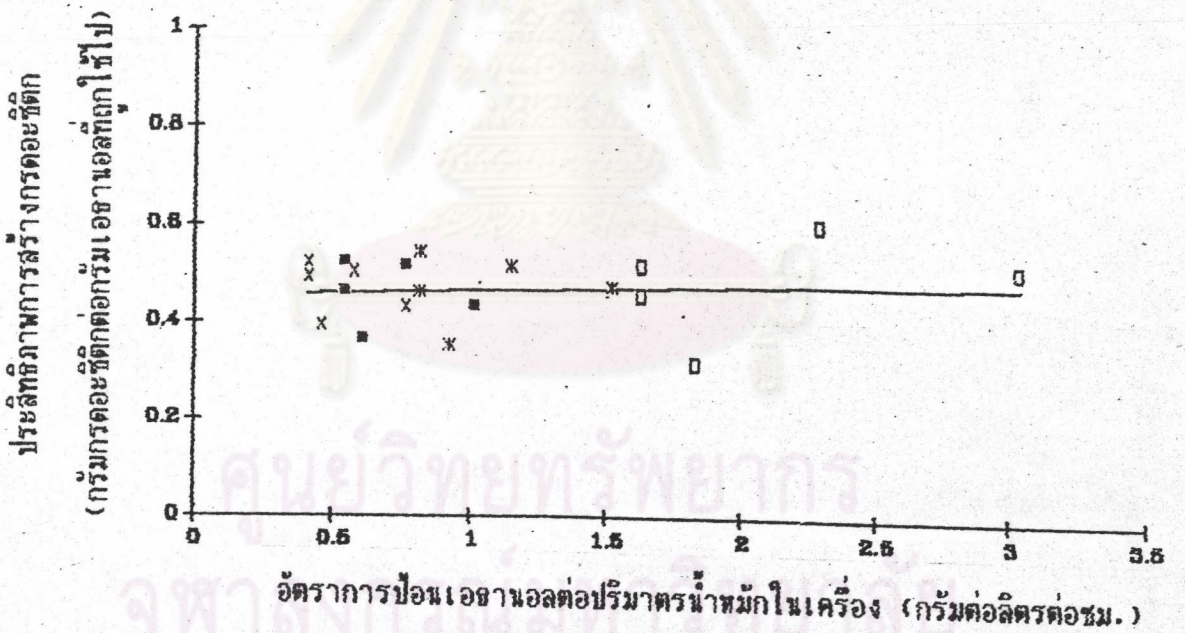


รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการผลิตกับอัตราการป้อนเอธานอลต่อปริมาตรน้ำหมักในเครื่องหมัก เมื่อมีเครื่องหมักจำนวน 1, 2, 3 และ 4 ชุดต่อขนานกัน และมีการนำผลิตภัณฑ์มาป้อนย้อนกลับ

สัญลักษณ์ : □, ×, ■, × แทน เมื่อใช้เครื่องหมัก 1, 2, 3 และ 4 ชุด

⊡, ⊗, ⊞, ⊗ แทน ข้อมูลของประพนธ์ (2531)

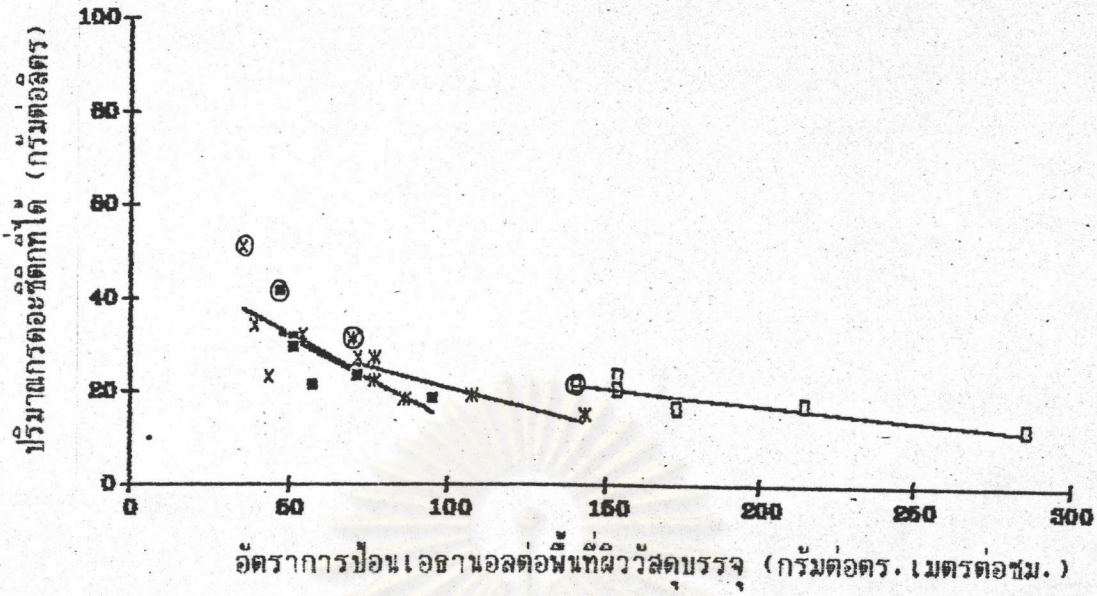


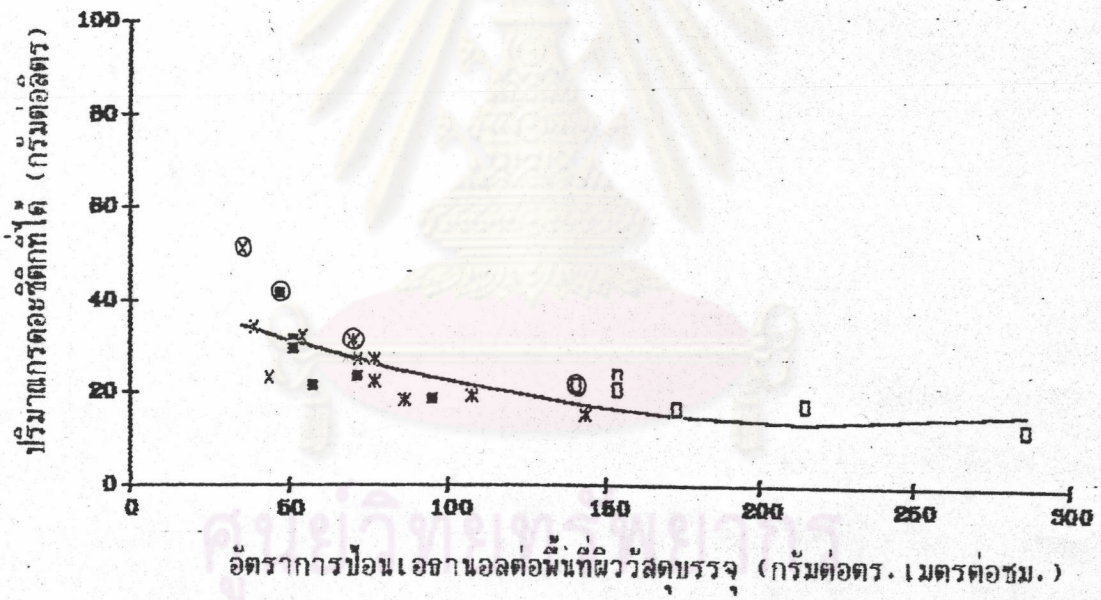


รูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการสร้างกรดอะซิติกกับอัตราการป้อนเอธานอลต่อปริมาตรน้ำหมักในเครื่องหมัก เมื่อมีเครื่องหมักจำนวน 1, 2, 3 และ 4 ชุดต่ออนุกรมกัน และมีการนำผลิตภัณฑ์มาป้อนย้อนกลับ

สัญลักษณ์ : □, ✳, ■, × แทน เมื่อใช้เครื่องหมัก 1, 2, 3 และ 4 ชุด

⊡, ⊛, ●, ⊗ แทน ข้อมูลของประพนธ์ (2531)

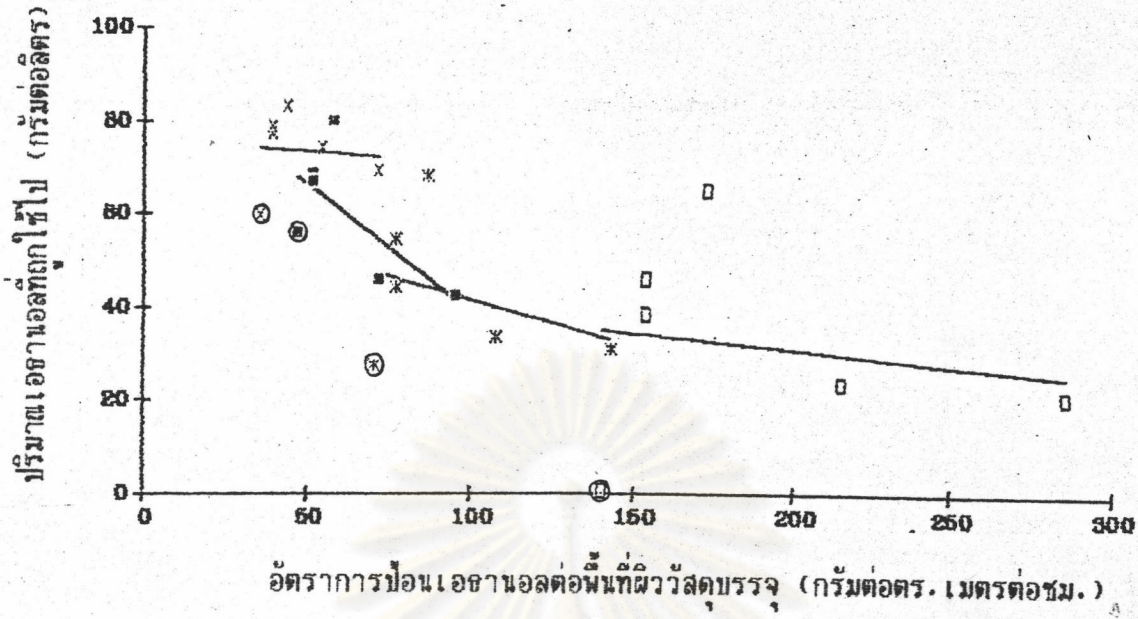


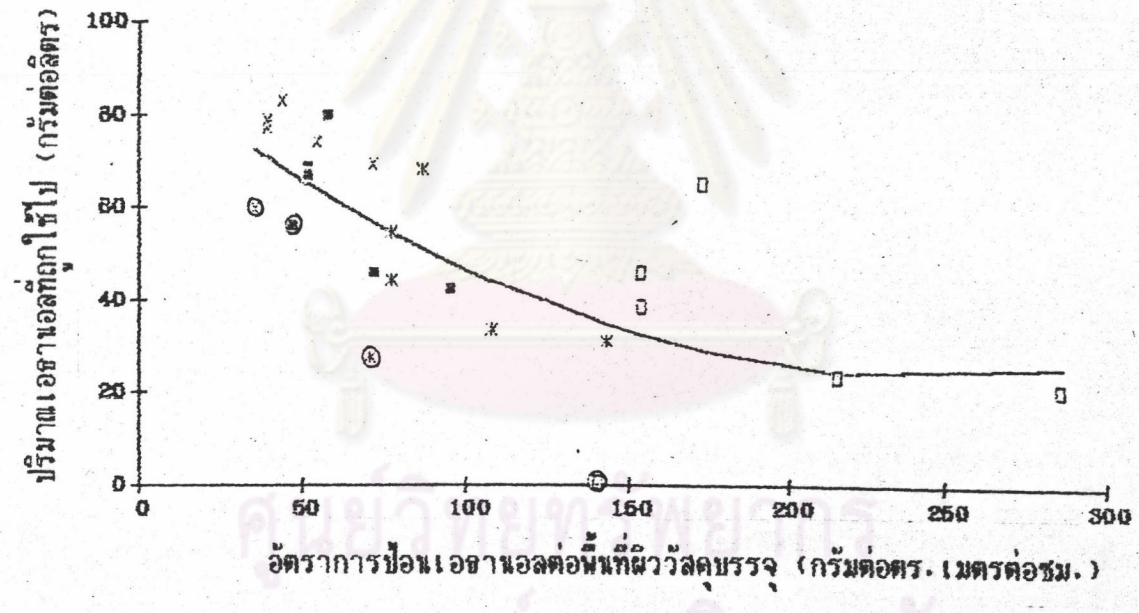


รูปที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดอะซิติกที่ได้กับอัตราการป้อนเอธานอลต่อพื้นที่ผิวของวัสดุบรรจุ เมื่อมีเครื่องหมักจำนวน 1, 2, 3 และ 4 ชุดต่ออนุกรมกัน และมีการนำผลิตภัณฑ์มาป้อนย้อนกลับ

สัญลักษณ์ : □, ✳, ■, × แทน เมื่อใช้เครื่องหมัก 1, 2, 3 และ 4 ชุด

ⓓ, ⊗, ◉, ⊗ แทน ข้อมูลของประพนธ์ (2531)

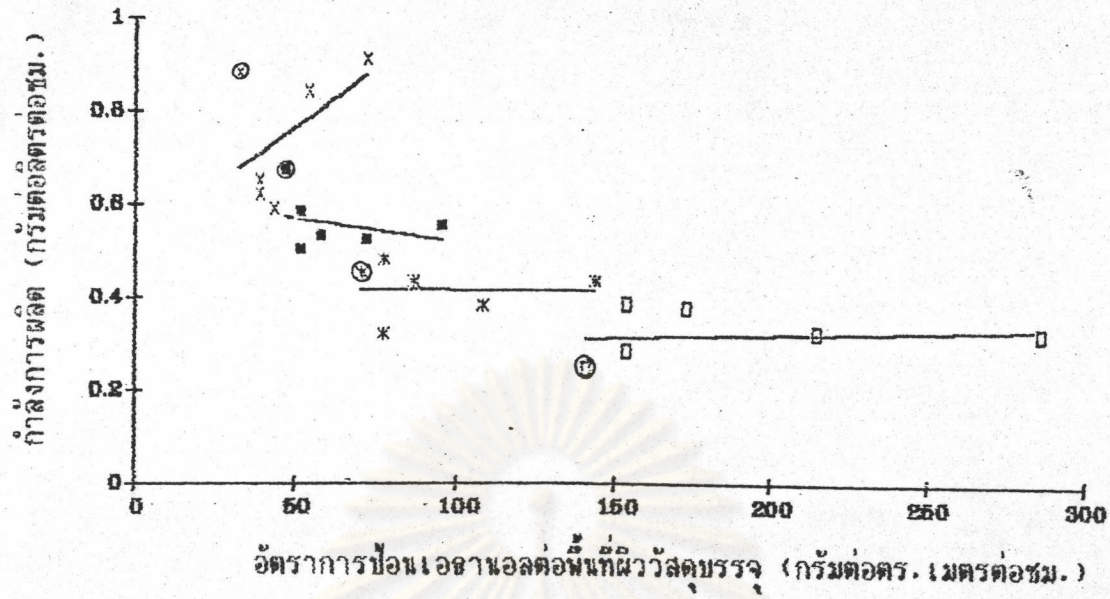


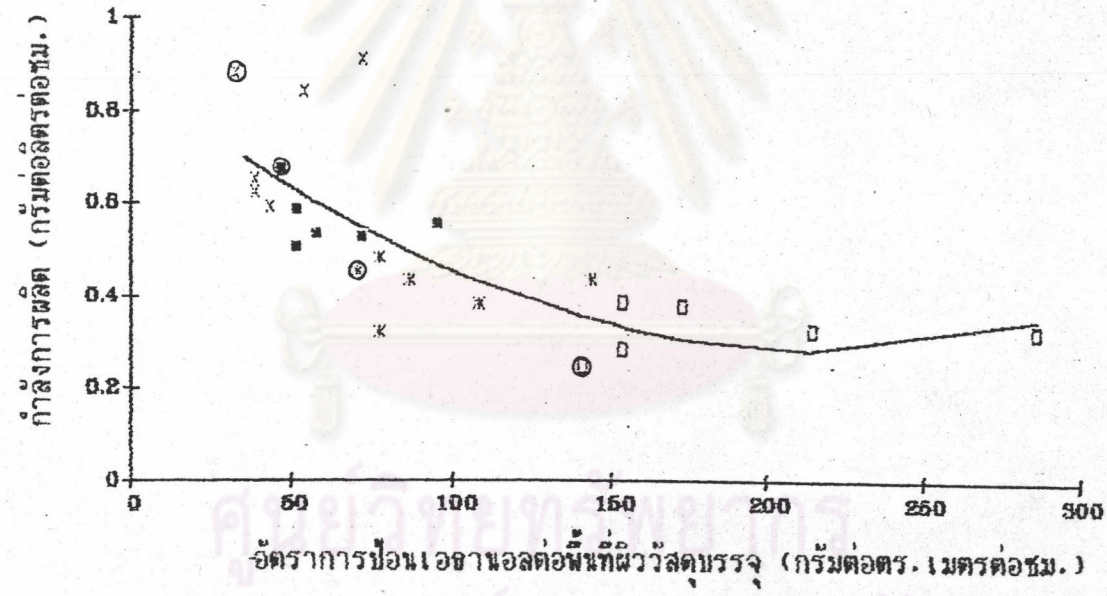


รูปที่ 4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเอธานอลที่ถูกใช้ไปกับอัตราการป้อนเอธานอลต่อพื้นที่ผิวของวัสดุบรรจุ เมื่อมีเครื่องหมักจำนวน 1, 2, 3 และ 4 ชุดต่ออนุกรมกัน และมีการนำผลิตภัณฑ์มาป้อนย้อนกลับ

สัญลักษณ์ : □, ✱, ■, ✕ แทน เมื่อใช้เครื่องหมัก 1, 2, 3 และ 4 ชุด

Ⓓ, ⊗, ◉, ⊛ แทน ข้อมูลของประพนธ์ (2531)

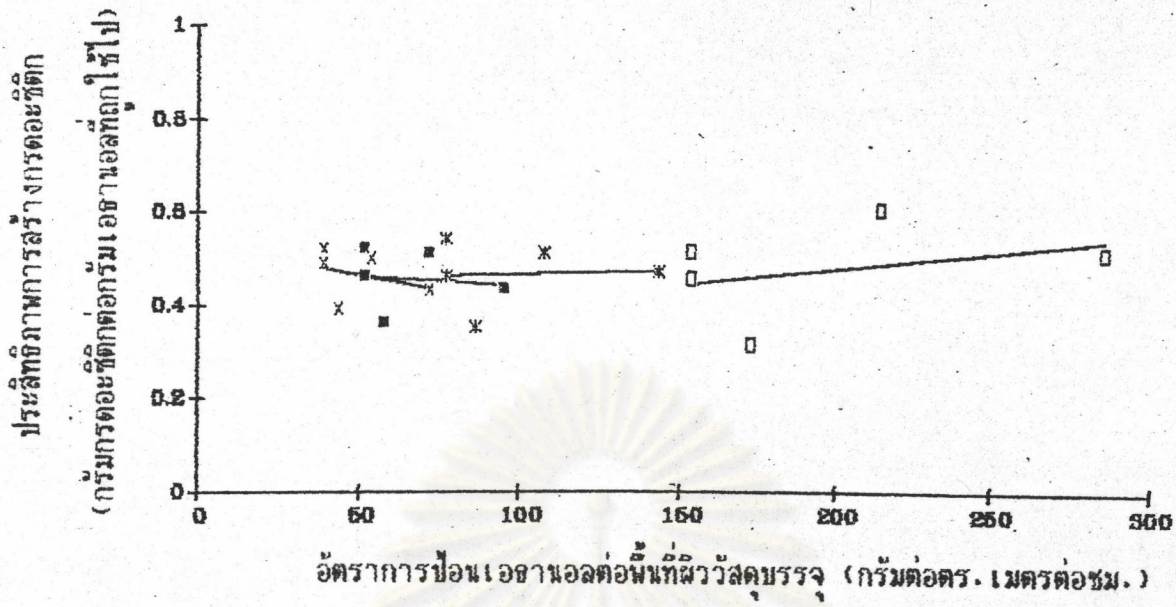


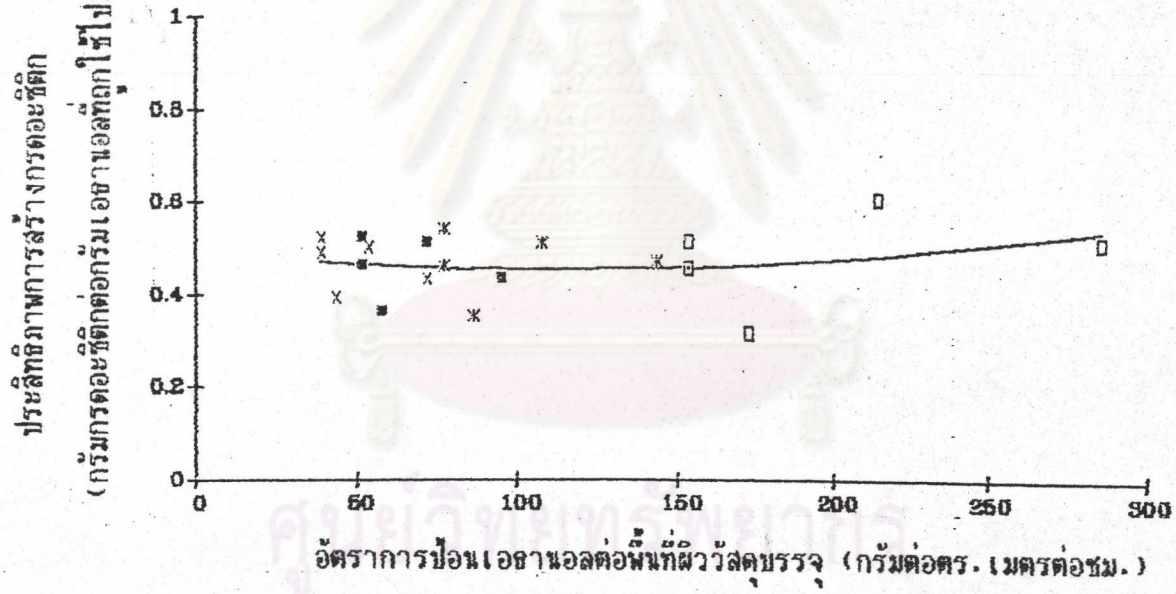


รูปที่ 4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการผลิตกับอัตราการป้อนเอธานอลต่อพื้นที่ผิวของวัสดุบรรจุ เมื่อมีเครื่องหมักจำนวน 1, 2, 3 และ 4 ชุดต่ออนุกรมกัน และมีการนำผลิตภัณฑ์มาป้อนย้อนกลับ

สัญลักษณ์ : □, ✳, ■, × แทน เมื่อใช้เครื่องหมัก 1, 2, 3 และ 4 ชุด

①,②, ③, ④ แทน ข้อมูลของประพนธ์ (2531)





รูปที่ 4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการสร้างกรดอะซิติกกับอัตราการป้อนเอธานอลต่อพื้นที่ผิวของวัสดุบรรจุ เมื่อมีเครื่องหมักจำนวน 1, 2, 3 และ 4 ชุดต่ออนุกรมกัน และมีการนำผลิตภัณฑ์มาป้อนย้อนกลับ

สัญลักษณ์ : ▫ , ✳ , ■ , ✕ แทน เมื่อใช้เครื่องหมัก 1, 2, 3 และ 4 ชุด

◎ , ⊛ , ● , ⊗ แทน ข้อมูลของประพนธ์ (2531)

4.4 ปริมาณจุลินทรีย์ในแต่ละคอลัมน์หมัก

การวิเคราะห์หาปริมาณจุลินทรีย์ในระบบหมักสามารถทำได้หลายวิธี สำหรับในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์หาปริมาณจุลินทรีย์ในแต่ละคอลัมน์หมัก โดยหาเป็นน้ำหนักเซลแห้งและเปียก รายละเอียดวิธีหาปริมาณจุลินทรีย์ได้แสดงไว้ในภาคผนวก จ. การหาปริมาณจุลินทรีย์ในแต่ละคอลัมน์หมักนี้เพื่อหาความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการทำงานของระบบหมัก การวิเคราะห์ปริมาณจุลินทรีย์ในแต่ละคอลัมน์หมักนั้นไม่สามารถกระทำได้บ่อยครั้ง เนื่องจากต้องหยุดเดินเครื่องใช้เวลาในการล้างทำความสะอาดเครื่องและเตรียมเครื่องหมักใหม่รวมทั้งสิ้นนานประมาณ 10 วันจึงสามารถเริ่มผลิตน้ำส้มสายชูแบบต่อเนื่องได้อีกครั้ง ในงานวิจัยนี้จึงทำการวิเคราะห์หาปริมาณจุลินทรีย์ในแต่ละคอลัมน์หมักได้เพียง 2 ครั้งเท่านั้นโดยมีรายละเอียด ดังนี้

<u>ครั้งที่ 1</u> เป็นการวิเคราะห์น้ำหนักเซลแห้งและเปียกของจุลินทรีย์ในแต่ละคอลัมน์หมัก โดยทำการวิเคราะห์หลังจากเสร็จสิ้นการทดลองหมักน้ำส้มสายชูแบบต่อเนื่อง ที่อัตราการเจือจาง 0.0250 ชม.$^{-1}$ และไม่มีการนำผลิตภัณฑ์มาป้อนย้อนกลับ ดังแสดงในตารางที่ 4.4 (รายละเอียดวิธีการคำนวณในตารางที่ 4.4 แสดงในภาคผนวก ฉ.) นอกจากนี้ยังเป็นการเก็บตัวอย่างวัสดุบรรจุ 18 ลูกมาชั่งน้ำหนักจากจำนวนวัสดุบรรจุทั้งหมด 180 ลูกต่อคอลัมน์หมักซึ่งเป็นสาเหตุให้ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่ได้น้อยกว่าความเป็นจริง เมื่อเปรียบเทียบปริมาณจุลินทรีย์ในแต่ละคอลัมน์หมัก พบว่าน้ำหนักเซลเปียกของจุลินทรีย์ในคอลัมน์หมักที่ 2>1>4>3 แต่อย่างไรก็ตามน้ำหนักเปียกที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันคืออยู่ในช่วง 0.10-0.14 กรัมต่อกรัมวัสดุบรรจุ และพบว่าน้ำหนักเซลแห้งของจุลินทรีย์ในคอลัมน์หมักที่ 3>1>4>2 และน้ำหนักแห้งที่ได้มีค่าอยู่ในช่วง 0.06-0.13 กรัมต่อกรัมวัสดุบรรจุ

<u>ครั้งที่ 2</u> เป็นการวิเคราะห์น้ำหนักเซลแห้งและเปียกของจุลินทรีย์ในแต่ละคอลัมน์หมัก โดยทำการวิเคราะห์หลังจากเสร็จสิ้นการทดลองหมักน้ำส้มสายชูแบบต่อเนื่อง ที่อัตราการเจือจาง 0.0310 ชม.$^{-1}$ อัตราส่วนการป้อนกลับจากถังหมักที่ 4 สู่ถังหมักที่ 1 มีค่าเป็น 0.81 ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และทำการชั่งน้ำหนักวัสดุบรรจุทั้งหมด 180 ลูกต่อคอลัมน์ เพื่อให้ได้ปริมาณจุลินทรีย์ที่ใกล้เคียงความเป็นจริงกว่าการทดลองในครั้งที่ 1 เมื่อเปรียบเทียบปริมาณจุลินทรีย์ในแต่ละคอลัมน์หมัก พบว่าน้ำหนักเซลเปียกของจุลินทรีย์ในคอลัมน์ที่ 2>4>1>3 และน้ำหนักที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันคืออยู่ในช่วง 1.09-1.80 กรัมต่อกรัมวัสดุบรรจุ ส่วนน้ำหนักเซลแห้งของจุลินทรีย์ในคอลัมน์หมักที่ 2>1>3>4 และน้ำหนักแห้งที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันมากคืออยู่ในช่วง 0.21-0.29 กรัมต่อกรัมวัสดุบรรจุ

ตารางที่ 4.4 แสดงน้ำหนักเซลเปียกและแห้งของจุลินทรีย์ในแต่ละคอลัมน์หมัก โดยครั้งที่ 1 ทำการวิเคราะห์หลังจากเสร็จสิ้นการทดลองหมักแบบต่อเรื่องและไม่มีการนำผลิตภัณฑ์มาป้อนย้อนกลับ
ส่วนครั้งที่ 2 ทำการวิเคราะห์หลังจากเสร็จสิ้นการทดลองนำผลิตภัณฑ์จากถังเก็บน้ำหมักที่ 4 มาป้อนกลับสู่ถังเก็บน้ำหมักที่ 1

	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
– น้ำหนักเซลเปียก (กรัมต่อกรัมวัสดุบรรจุ)		
คอลัมน์ที่ 1	0.140	1.230
คอลัมน์ที่ 2	0.145	1.800
คอลัมน์ที่ 3	0.110	1.088
คอลัมน์ที่ 4	0.118	1.284
– น้ำหนักเซลแห้ง (กรัมต่อกรัมวัสดุบรรจุ)		
คอลัมน์ที่ 1	0.079	0.274
คอลัมน์ที่ 2	0.057	0.288
คอลัมน์ที่ 3	0.134	0.249
คอลัมน์ที่ 4	0.070	0.209

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อนึ่ง ค่าน้ำหนักเซลแห้งที่ได้จากการทดลองมีความน่าเชื่อถือมากกว่าน้ำหนักเซลเปียก เนื่องจากน้ำหนักเซลเปียกนั้นแม้จะเป็นวิธีที่รวดเร็ว แต่เกิดข้อผิดพลาดได้มาก เพราะน้ำหนักเซลเปียกที่วัดได้ จะรวมน้ำหนักน้ำที่อยู่ภายนอกเซลเข้าไปด้วย ส่วนการวัดน้ำหนักเซลแห้งนั้นก็เกิดข้อผิดพลาด คืออาจมีการดูดความชื้นจากบรรยากาศในระหว่างที่ทิ้งไว้ให้เย็น ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยเก็บไว้ในเดสสิเคเตอร์ นอกจากนี้วิธีวัดน้ำหนักแห้งยังเป็นวิธีที่ช้า ต้องใช้เวลานาน (Cliffe, 1988) ดังนั้นในการวิเคราะห์ข้อมูลในการทดลองนี้จะยึดน้ำหนักแห้งเป็นเกณฑ์ในการอธิบายปริมาณจุลินทรีย์ในแต่ละคอลัมน์หมัก จากผลการทดลองที่ได้ในครั้งที่ 1 ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ในคอลัมน์หมักที่ 3>1>4>2 โดยคอลัมน์หมักที่ 3 มีปริมาณจุลินทรีย์มากที่สุด แต่อย่างไรก็ตาม การทดลองหาน้ำหนักจุลินทรีย์นี้นำวัสดุบรรจุมาเพียงร้อยละ 10 เท่านั้นเพื่อหาน้ำหนัก ดังนั้นอาจมีการผิดพลาดได้ จึงไม่นำมาพิจารณาในรายละเอียด ส่วนการทดลองในครั้งที่ 2 ซึ่งเป็นการนำวัสดุบรรจุทั้งหมดภายในคอลัมน์มาหาน้ำหนัก ดังนั้นผลที่ได้จึงน่าเชื่อถือ โดยพบว่าเชื้อจุลินทรีย์ในคอลัมน์หมักที่ 2>1>3>4 จะเห็นว่าปริมาณจุลินทรีย์ในคอลัมน์หมักที่ 3 และ 4 ต่ำกว่าคอลัมน์ที่ 2 และ 1 เนื่องจากอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ต่ำลง อันเนื่องจากค่าความเป็นกรดเป็นด่างต่ำเพราะมีการสะสมของกรดอะซิติก จึงทำให้แบคทีเรียผลิตกรดอะซิติกมีประสิทธิภาพต่ำลงไปด้วย

4.5 ศึกษาอัตราการระเหยของเอธานอล

ดังได้กล่าวมาแล้วว่า แบคทีเรียผลิตกรดอะซิติกใช้เอธานอลเป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงาน โดยใช้เอธานอลไปในการเจริญเติบโต, ซ่อมบำรุงรักษาเซล และสร้างเซลใหม่ การเปลี่ยนเอธานอลให้เป็นกรดอะซิติกในระบบหมักน้ำส้มสายชูซึ่งเป็นระบบที่มีการให้อากาศ จึงมีการระเหยของเอธานอลไปบางส่วน ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาอัตราการระเหยของเอธานอลเพื่อให้ทราบปริมาณเอธานอลที่สูญเสียไปโดยการพาของอากาศในระบบหมัก

ในการศึกษาดังกล่าวได้ทดลองเดินเครื่องหมักน้ำส้มสายชูจำนวน 1 ชุด ภายในคอลัมน์ไม่ได้บรรจุวัสดุบรรจุ และไม่มีการเติมเชื้อแบคทีเรีย นอกจากนี้ยังได้เติมสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตให้มีปริมาณความเข้มข้น 26 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้อากาศในอัตราเดียวกับที่ทำการทดลองคืออยู่ในช่วง 0.04-0.06 ปปน. ซึ่งตามทฤษฎีแล้วคอปเปอร์อิออนเพียง 1 มิลลิกรัมต่อลิตรก็ทำให้เกิดสภาพเป็นพิษ ไม่เหมาะแก่การเจริญของจุลินทรีย์ชนิดใด ๆ จากนั้นได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำหมักจากถังเก็บน้ำหมักเพื่อมาทำการวิเคราะห์ปริมาณกรด เพื่อให้แน่ใจได้ว่าระบบหมักดังกล่าวปราศจากจุลินทรีย์ที่ใช้เอธานอลเป็นแหล่งคาร์บอน ปริมาณเอธานอลที่สูญหาย

ไปจึงเกิดจากการพาของอากาศเท่านั้น

ตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.31 แสดงปริมาณเอธานอลที่เหลืออยู่ในน้ำหมักเมื่อเทียบกับเวลา โดยควบคุมให้อัตราการให้อากาศคงที่อยู่ในช่วง 0.04-0.06 ปปน. จะเห็นว่าในช่วงเริ่มต้น ซึ่งในน้ำหมักมีความเข้มข้นของเอธานอลเป็นปริมาณมากประมาณร้อยละ 10 โดยปริมาตร เอธานอลได้ระเหยไปเป็นปริมาณมากเมื่อเทียบกับเวลา แต่เมื่อเวลาผ่านไปน้ำหมักมีความเข้มข้นของเอธานอลลดลง ปริมาณเอธานอลระเหยก็น้อยลงไปด้วย จากกราฟในรูปที่ 4.31 ซึ่งเป็นการพลอตระหว่างปริมาณเอธานอลในน้ำหมักกับเวลา จะเห็นว่าเส้นกราฟที่ได้มีความชันมากในช่วงแรก ๆ และมีความชันน้อยลงเมื่อเวลาผ่านไป จนในที่สุดความชันมีค่าใกล้ 0 เมื่อความเข้มข้นของเอธานอลมีค่าประมาณร้อยละ 6

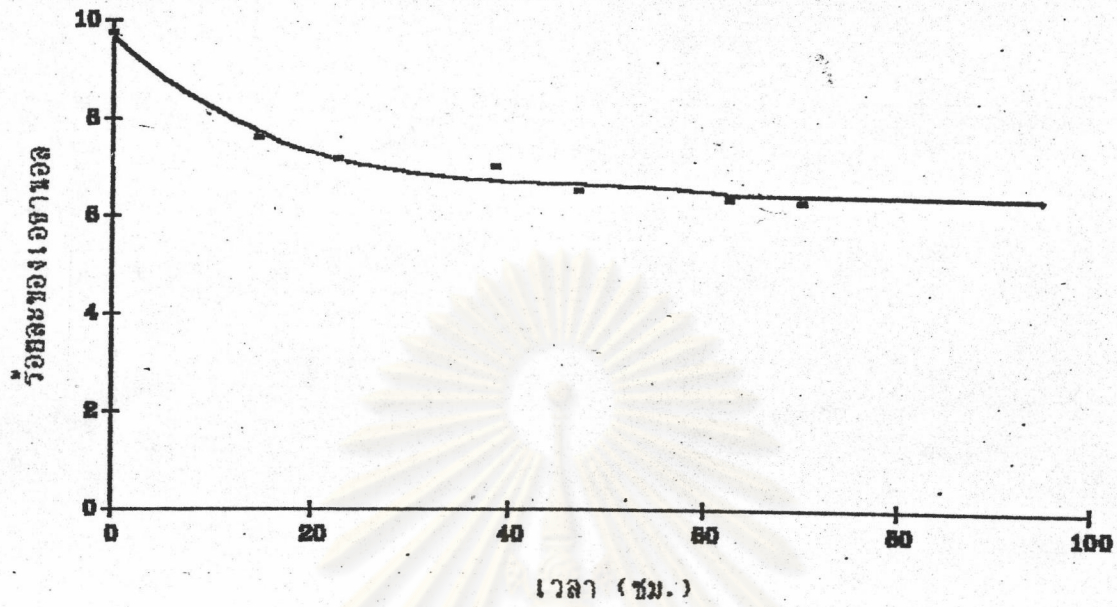
เมื่อพิจารณาจากข้อมูลที่ทำการทดลองในตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าปริมาณเอธานอลในน้ำหมักของถังเก็บน้ำหมักที่ 1 มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 3.0-6.6 โดยปริมาตร ส่วนในถังเก็บน้ำหมักอื่น ๆ มีปริมาณเอธานอลน้อยกว่าร้อยละ 6 ดังนั้นในเครื่องหมักที่ 1 เท่านั้นที่เกิดการระเหยของเอธานอลบ้าง ทั้งนี้เนื่องจากมีความเข้มข้นของเอธานอลสูงกว่าร้อยละ 6 ส่วนในเครื่องหมักชุดที่ 2, 3 และ 4 กล่าวได้ว่ามีการระเหยของเอธานอลน้อยมาก เพราะความเข้มข้นของเอธานอลในถังเก็บน้ำหมักดังกล่าวมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 6 จึงสรุปได้ว่าภายใต้สภาวะการทดลองการระเหยของเอธานอลโดยการเติมอากาศมีค่าน้อยมาก และสามารถกล่าวได้ว่าสารเอธานอลที่หายไปทั้งหมดถูกนำไปใช้โดยแบคทีเรียนั่นเอง

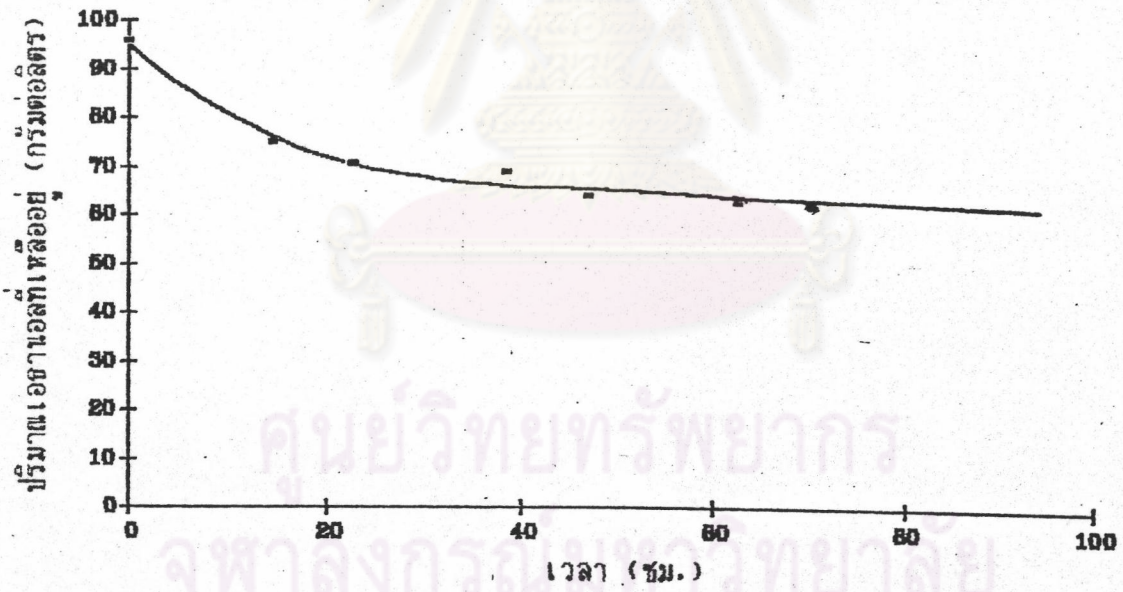
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.5 แสดงอุณหภูมิ ปริมาณกรดอะซิติก ปริมาณอัลกอฮอล์ที่เหลืออยู่ในน้ำหมัก เมื่อเทียบกับเวลา ทำการทดลองโดยการเดินเครื่องหมักผลิตน้ำส้มสายชูเนียง 1 ชุด ภายในคอลัมน์ไม่ได้บรรจุวัสดุบรรจุและแบคทีเรียที่ให้กรดอะซิติก มีการเติมสารละลายโลหะหนักคือ คอปเปอร์ซัลเฟตลงไปในอัตรา 26 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องให้เกิดสภาวะเป็นพิษ ไม่เหมาะแก่การเจริญของแบคทีเรียใด ๆ อัตราการให้อากาศ 0.05 ปปน.

เวลา (ชม.)	อุณหภูมิ (°C)	ร้อยละของกรดอะซิติก	ความเข้มข้นของเอธานอล	
			(ร้อยละ)	(กรัมต่อลิตร)
0.0	31.0	0.29	9.74	95.7
14.5	29.5	0.29	7.59	74.8
22.5	31.5	0.29	7.17	70.6
38.5	30.5	0.29	7.01	69.0
47.0	32.0	0.30	6.50	64.0
62.5	30.5	0.30	6.35	62.6
70.0	32.0	0.31	6.28	61.9

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเอธานอลที่เหลืออยู่ในน้ำหมักเมื่อเทียบกับเวลา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย