



การทดสอบโปรแกรมและวิเคราะห์

ได้ทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ โดยแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อด้วยกัน

- 1 การติดตามตัวแปรสถานะแบบออนไลน์
- 2 การทำนายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรสถานะจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
- 3 การประมาณค่าของตัวแปรสถานะที่วัดไม่ได้

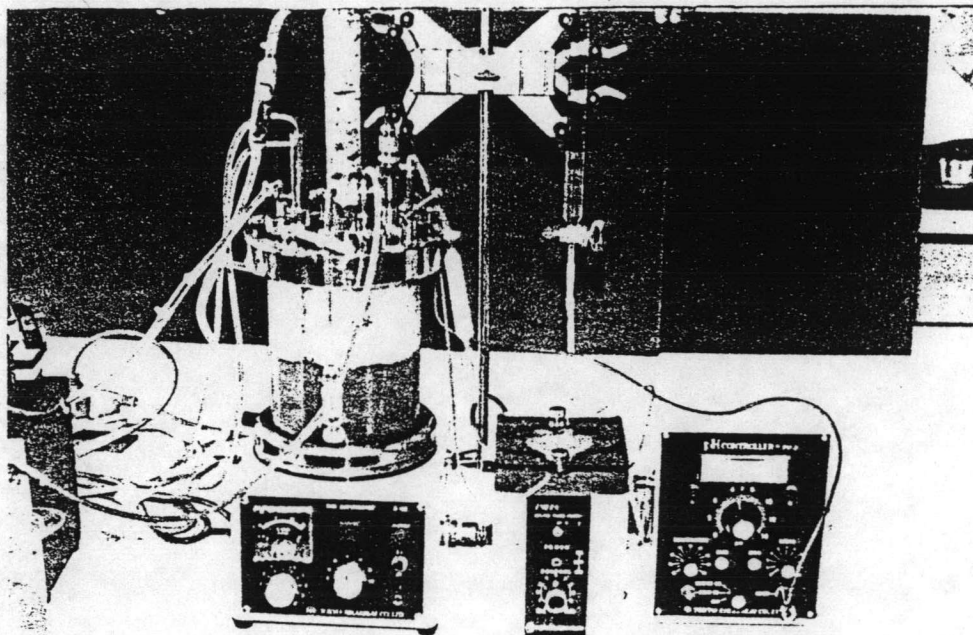
สำหรับการติดตามตัวแปรสถานะแบบออนไลน์ ได้ทดสอบกับผลการทดลองซึ่งได้ดำเนินการในงานวิจัยนี้ ส่วนการทำนายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรสถานะจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และการประมาณค่าของตัวแปรสถานะที่วัดไม่ได้ ได้ใช้ข้อมูลการทดลองของการหมักอะซีโตน-บิวทานอลจากเดคโตสของ จีรกานต์ เมืองนาโพธิ์ และคณะ (7) ดังที่แสดงไว้ในตาราง ง-1 มาเป็นข้อมูลสำหรับการทดสอบ สำหรับการทดลองของ จีรกานต์ และคณะ สามารถอธิบายพอสังเขปได้ดังนี้

จีรกานต์ และคณะ ทำการหมักเดคโตสโดยกระบวนการหมักแบบไม่ต่อเนื่อง โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเดคโตส 50 กรัม/ลิตร จำนวน 1.3 ลิตร ใส่ลงในถังหมักขนาด 2 ลิตร และมีภาวะ

กระบวนการหมักดังนี้ อุณหภูมิ 30° C ความเป็นกรด-ด่าง 5.5 (โดยใช้สารละลาย NH_4OH สำหรับปรับค่าความเป็นกรด-ด่างในระหว่างการหมัก) และความเร็วรอบของใบพัด 100 รอบ/นาที ทำการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณของผลิตภัณฑ์ต่างๆที่เกิดขึ้นในกระบวนการหมัก ณ จุดเริ่มต้น และจุดต่อไปทุกๆ 6 ชั่วโมง การวิเคราะห์หาปริมาณของผลิตภัณฑ์ประกอบด้วย การวิเคราะห์หาปริมาณตัวทำละลายและกรดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี การวิเคราะห์หาปริมาณเดคโตสที่เริ่มต้นและที่เหลือด้วยเครื่องวิเคราะห์กลูโคส (Glucose analyser) และนับจำนวนแบคทีเรียด้วยกล้องจุลทรรศน์และฮีโมไซโตมิเตอร์ (Hemocytometer) แล้วแปลงเป็นปริมาณความเข้มข้นของชีวมวล

สำหรับภาพกระบวนการหมักแบบไม่ต่อเนื่องของเดคโตสที่ จีรگانต์ และคณะ ใช้ในการทดลอง

แสดงได้ดังรูปที่ 19



รูปที่ 19 ภาพกระบวนการหมักแบบไม่ต่อเนื่องของเดคโตสที่ pH 5.5 (7)

ต่อจากนี้จะแสดงผลการทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่สร้างขึ้น ในแต่ละหัวข้อที่กล่าวไว้

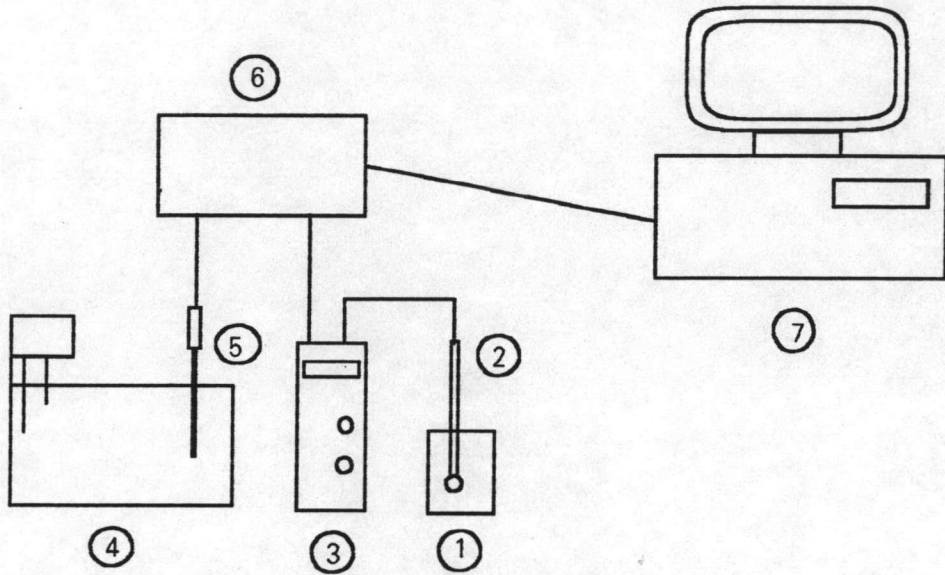
ในตอนต้นบท ได้ดังนี้

1 การติดตามตัวแปรสถานะแบบออนไลน์ การทดลองในส่วนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบ

ความถูกต้องของค่าความเป็นกรด-ด่างและค่าของอุณหภูมิที่ระบบออนไลน์อ่านได้ และแสดงผลผ่านโปรแกรม

ที่สร้างขึ้น เทียบกับค่าที่อ่านได้โดยตรงจากเครื่องมือวัดเครื่องอื่นๆ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 20



- 1 บีกเกอร์ใส่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
- 2 กลาสอิเล็กโตรด
- 3 เครื่องควบคุมความเป็นกรด-ด่าง
- 4 เครื่องปั้มน้ำ
- 5 เทอร์มอคัปเปิล
- 6 อุปกรณ์อินเทอร์เฟซ
- 7 คอมพิวเตอร์

รูปที่ 20 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองการติดตามตัวแปรสถานะแบบออนไลน์

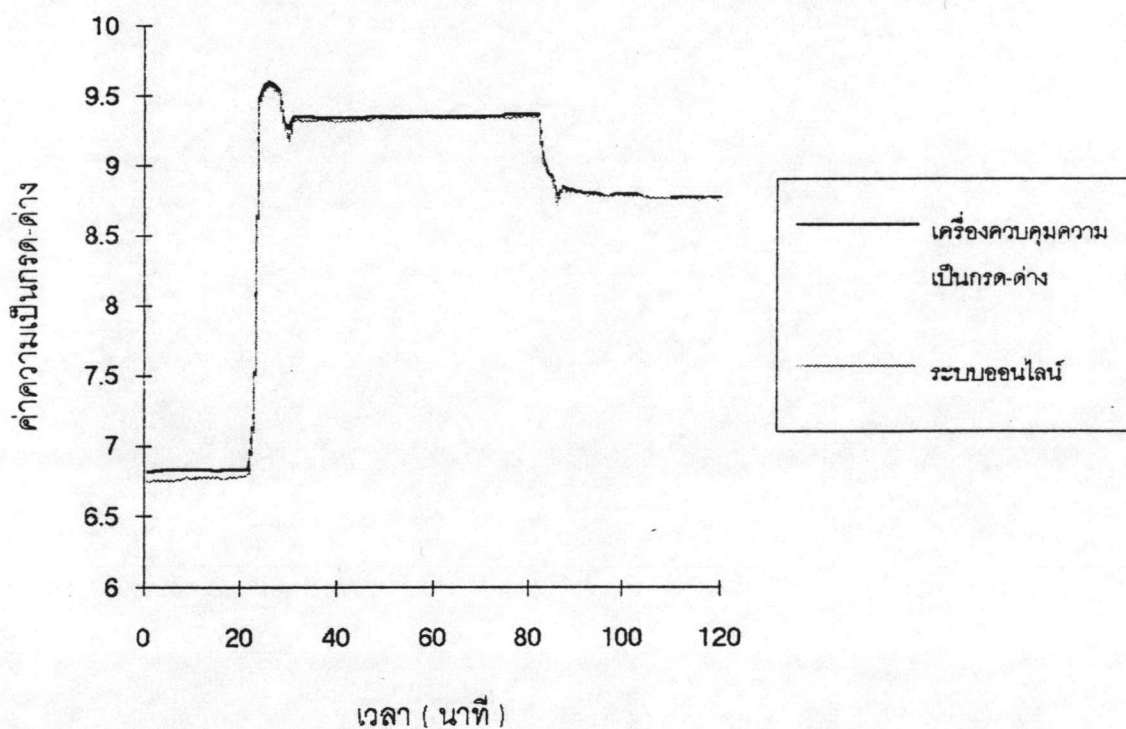
การทดลองจะนำกลาสอิเล็กโตรดมาวัดค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ซึ่งเป็นสารละลายตัวอย่าง สำหรับการทดสอบระบบออนไลน์ในการติดตามค่าความเป็นกรด-ด่าง โดยค่าที่ได้

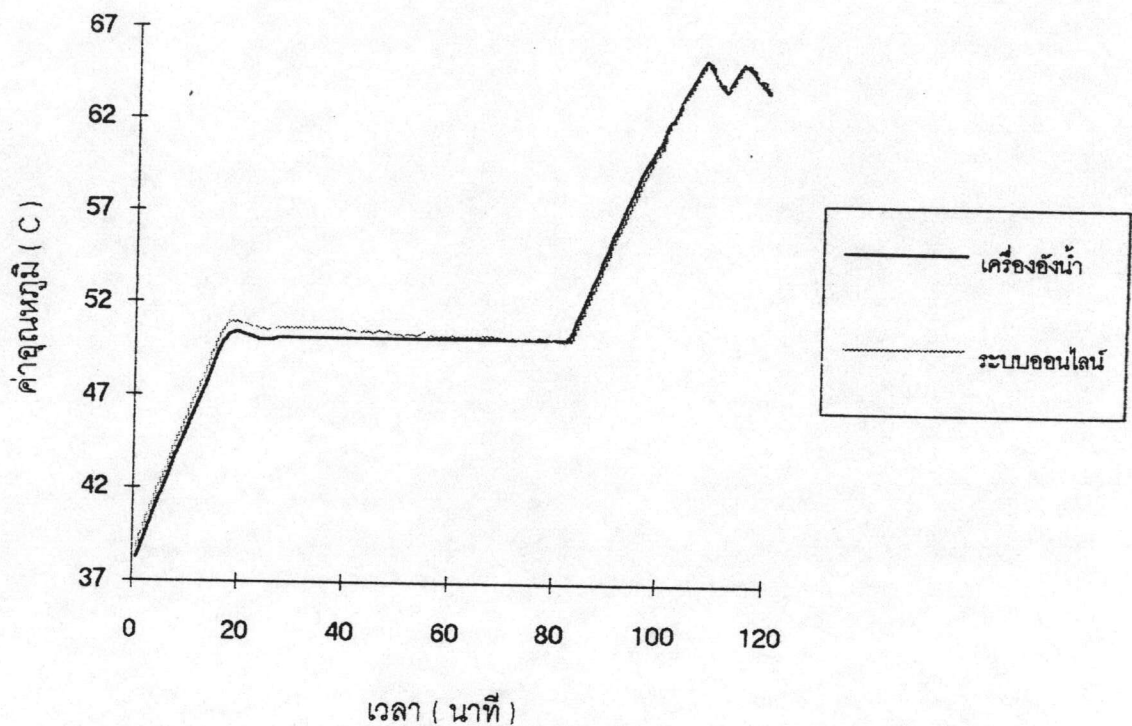
จากระบบออนไลน์จะนำมาเปรียบเทียบกับค่าความเป็นกรด-ด่างที่อ่านได้จากหน้าจอของเครื่องควบคุม

ความเป็นกรด-ด่าง ณ เวลาเดียวกัน โดยทำการอ่านค่าความเป็นกรด-ด่าง ทุกๆ 1 นาที สำหรับสารละลาย

โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ ในตอนเริ่มต้นจะเป็นสารละลายเจือจางแล้วค่อยๆเพิ่มความเข้มข้นขึ้นเรื่อยๆ โดยการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เข้มข้นลงไป สำหรับการทดสอบระบบออนไลน์ในการติดตามค่าอุณหภูมินั้น จะนำเทอร์โมคัปเปิลมาวัดอุณหภูมิของน้ำที่อยู่ในเครื่องอ้งน้ำที่สามารถปรับอุณหภูมิได้ ค่าอุณหภูมิที่ได้จากระบบออนไลน์จะนำมาเปรียบเทียบกับค่าอุณหภูมิที่อ่านได้จากหน้าจอของเครื่องอ้งน้ำ ณ เวลาเดียวกัน โดยทำการอ่านค่าอุณหภูมิทุกๆ 1 นาที เช่นกัน ผลการทดลองแสดง ในรูปที่ 21 และ 22



รูปที่ 21 กราฟเปรียบเทียบค่าความเป็นกรด-ด่างที่ได้จากระบบออนไลน์กับค่าที่อ่านได้จากเครื่องควบคุมความเป็นกรด-ด่าง



รูปที่ 22 กราฟเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ได้จากระบบออนไลน์กับค่าที่อ่านได้จากเครื่องอ่านน้ำ

จากรูปทั้งสองจะเห็นว่า เส้นกราฟซึ่งเป็นค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดกับเส้นกราฟซึ่งเป็นค่าที่ระบบออนไลน์แสดงออกมา จะต่างกันเล็กน้อย โดยในรูปที่ 21 พบว่าค่าเบี่ยงเบนอยู่ในช่วง ± 0.07 หน่วย และรูปที่ 22 พบว่าค่าเบี่ยงเบนอยู่ในช่วง $\pm 0.5^\circ \text{C}$ โดยค่าเบี่ยงเบนที่เกิดขึ้นมีผลมาจากสัญญาณรบกวนที่ปนเข้ามาทับสัญญาณข้อมูลที่ส่งมาจากเซ็นเซอร์ของเครื่องมือวัด แม้ว่าในโปรแกรมจะมีการกรอง

สัญญาณรรบกวณโดยวิธีการเฉลี่ยค่า แต่ก็เป็นกรขจัดสัญญาณรรบกวณออกได้เพียงสวณหนึ่งเทอนั้น กรที่ขจัดสัญญาณรรบกวณออกจกสัญญาณข้อมูลให้ได้หมดนั้น ต้องอศยอุปกรณทงด้นฮาร์ดแวร์ เช่น วงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับขจัดสัญญาณรรบกวณ เป็นต้น เข้มขช่วยก็อจจะทให้ได้สัญญาณข้อมูลที่ถูกต้องขึ้น

อย่งไรก็ตาม จกรูบทังสองจะเห็นได้ว่ ค่ำควมเป็นกรด-ด่งและค่ำอุนหภูมิที่ระบบที่พัฒน

ขึ้นแสดงผลออกมได้นั้ มีค่ำถูกต้องในระดับที่เพียงพอต่อการนำป้ใช้งนได้

2 กรทำนยกรเปลี่ยนแปลงของตัวแปรสณนะจกแบบจ่ำลองทงคณิตศสตร์ กรทดสอบ

ในสวณนี้ได้ใช้แบบจ่ำลองทงคณิตศสตร์ (3) ที่ได้แสดงด้วยสมกร (44) - (53) มแล้ว แล้วนำมเขียนเป็น

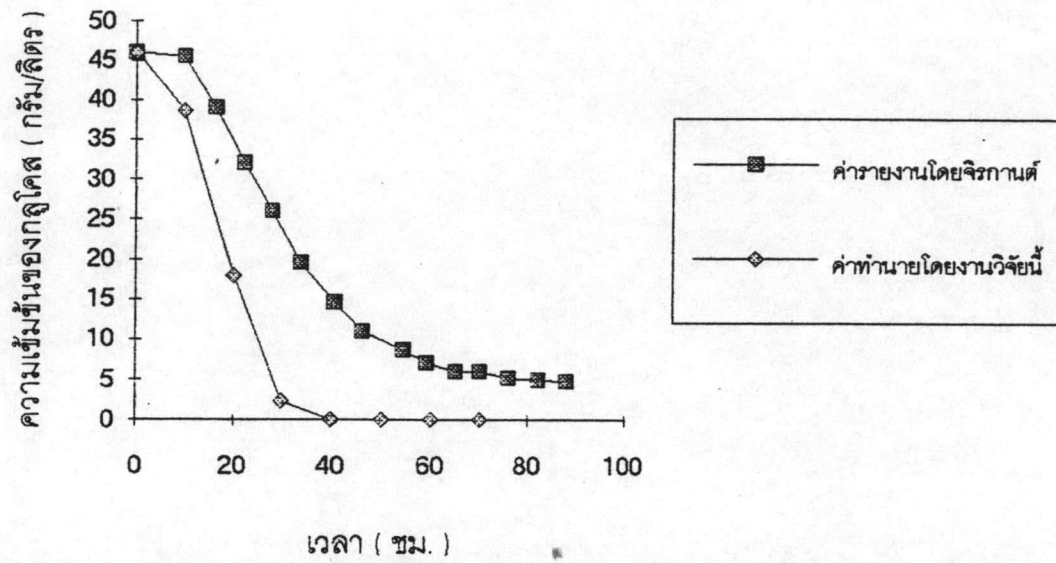
โปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยใช้ค่ำค่งที่ $(k_1 - k_{1u})$ ที่ Votruba และคณะหมมได้ (ด่งแสดงไว้ในตารง ง-2) แล้ว

ให้โปรแกรมคำนวณกรเปลี่ยนแปลงของค่ำควมเข้มชั้นของ ซ้วมวล สรต้งต้น และผลิตภณธ์ ณ เวล

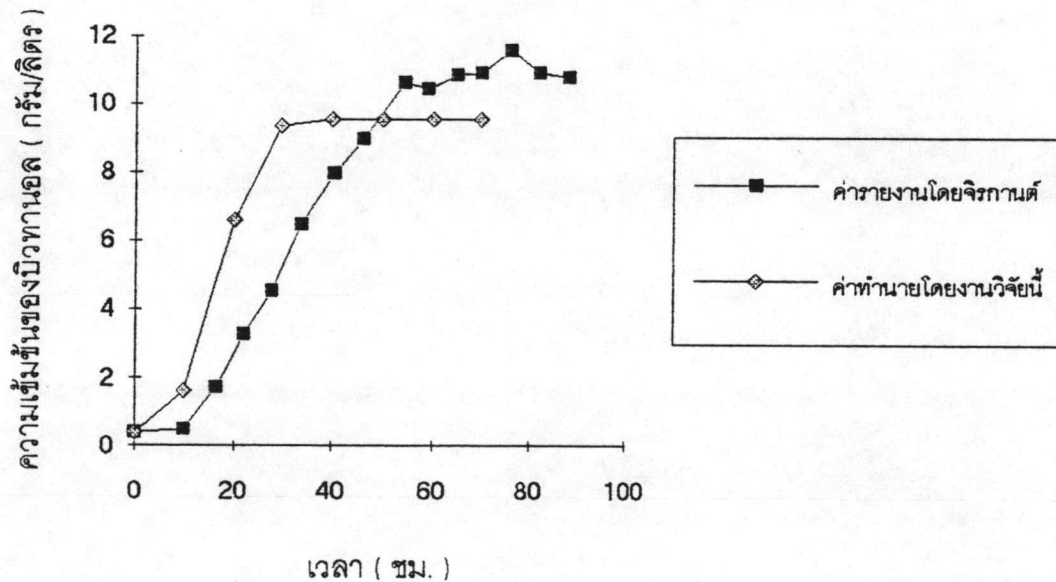
ด่งๆ โดยกำหนดค่ำควมเข้มชั้นเริ่มต้นของสรต้งต้น และเงื่อนไขกรทดลองตมที่ระบุในตารง ง-1 เพื่อ

นำผลที่ได้จกการทำนยของโปรแกรม มเปรียบเทียบกับผลที่แสดงไว้ในตารง ง-1 โดยผลกรทดลอง

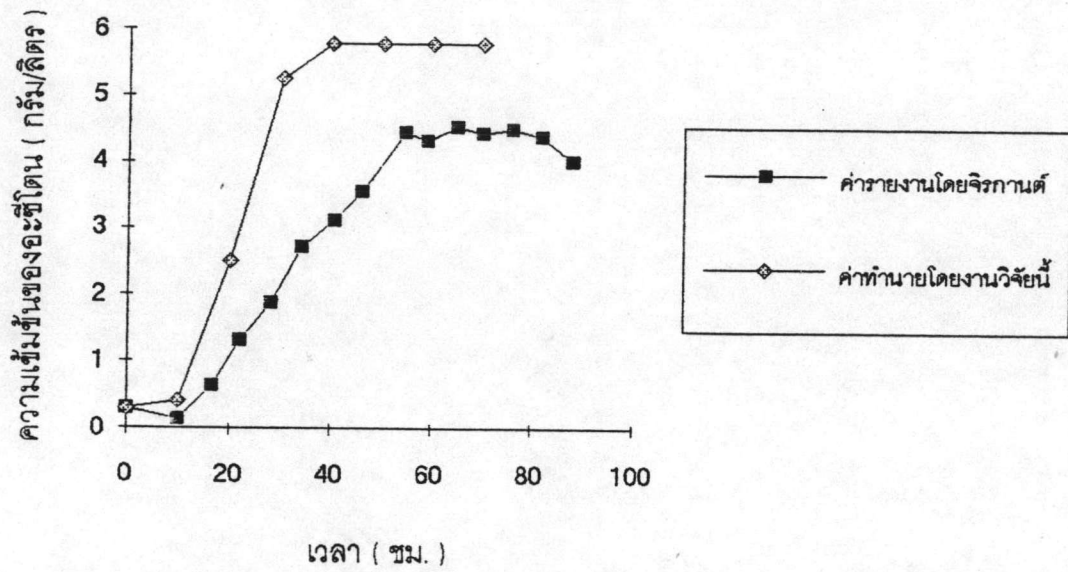
แสดงในรูปที่ 23-29



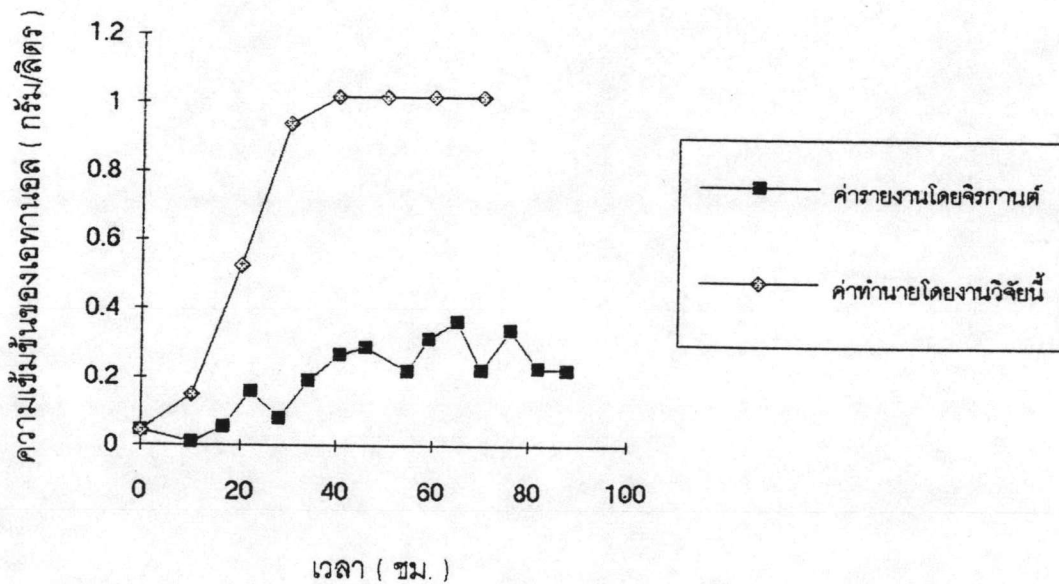
รูปที่ 23 เปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของกลูโคสที่ได้จากการทำนายโดยงานวิจัยนี้กับค่าที่รายงานโดยจิริกานต์และคณะ



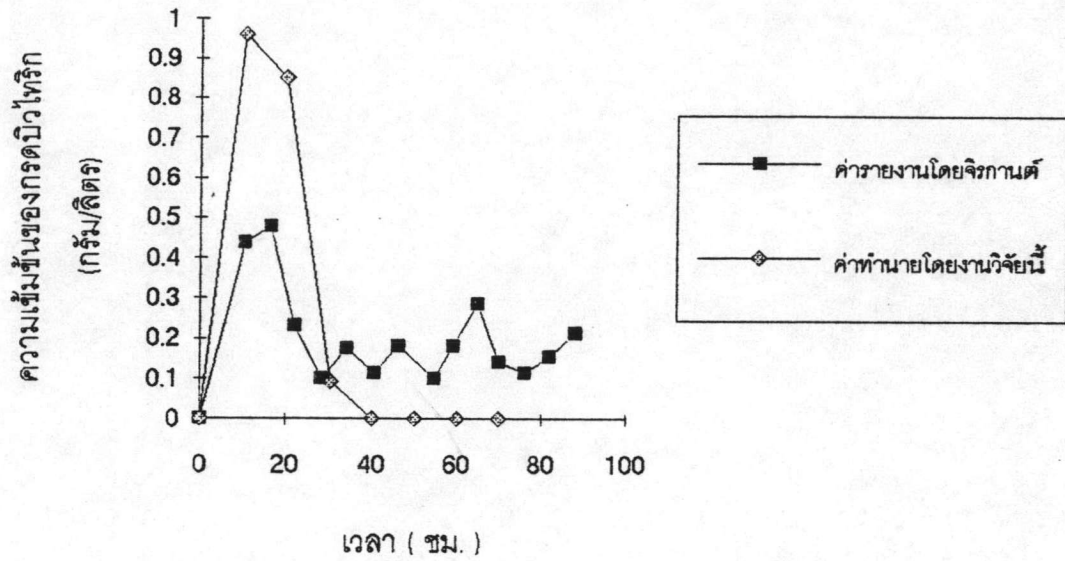
รูปที่ 24 เปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของบิวทานอลที่ได้จากการทำนายโดยงานวิจัยนี้กับค่าที่รายงานโดยจิริกานต์และคณะ



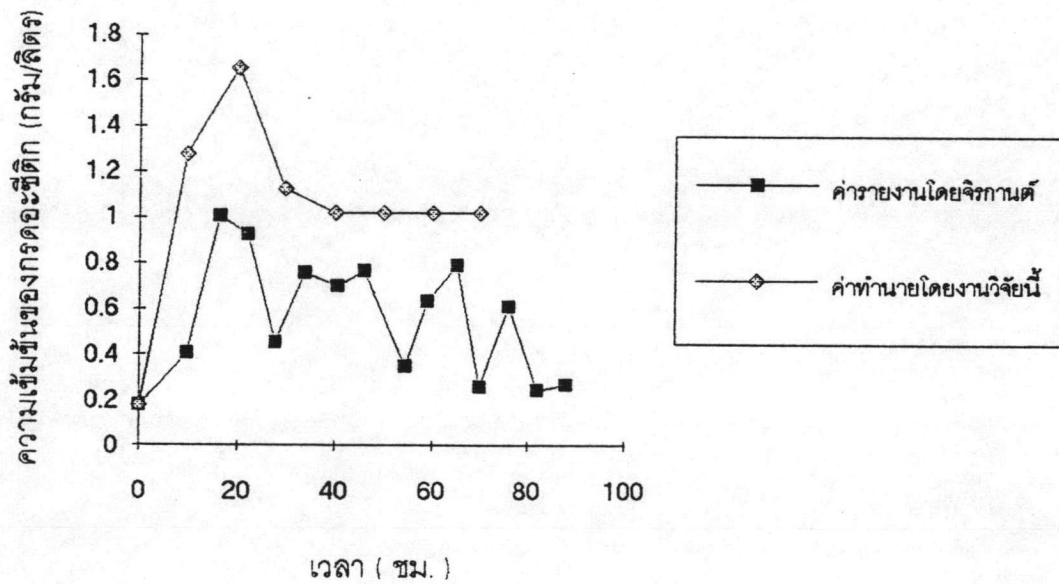
รูปที่ 25 เปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของอะซีโตนที่ได้จากการทำนายโดยงานวิจัยนี้กับค่าที่รายงานโดยจิรกานต์และคณะ



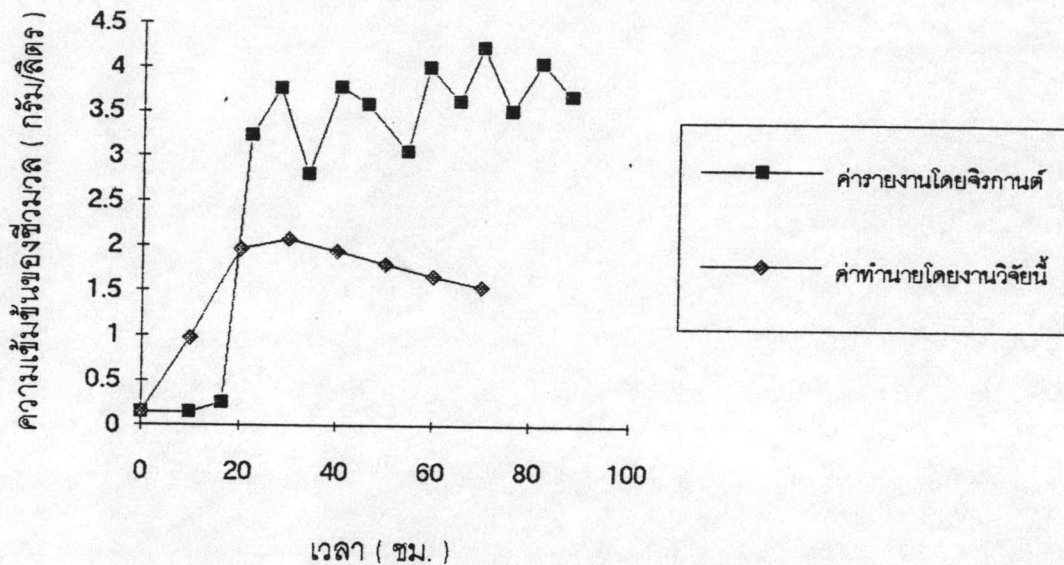
รูปที่ 26 เปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของเอทานอลที่ได้จากการทำนายโดยงานวิจัยนี้กับค่าที่รายงานโดยจิรกานต์และคณะ



รูปที่ 27 เปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของกรดบิวไทริกที่ได้จากการทำนายโดยงานวิจัยนี้กับค่าที่รายงานโดยจักรกานต์และคณะ



รูปที่ 28 เปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของกรดอะซิติกที่ได้จากการทำนายโดยงานวิจัยนี้กับค่าที่รายงานโดยจักรกานต์และคณะ



รูปที่ 29 เปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของชีวมวลที่ได้จากการทำนายโดยงานวิจัยนี้กับค่าที่รายงานโดยจักรกานต์และคณะ

จากรูปที่ 23-29 จะเห็นได้ว่า เส้นกราฟที่ได้จากการทำนายจะห่างจากเส้นกราฟที่ได้จากการทดลองมาก แต่มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงคล้ายกัน ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้ตั้งสมมติฐานว่า ค่าคงที่ (k_1 - k_{14}) ของ Votruba ยังไม่เหมาะสมกับภาวะการปฏิบัติการของข้อมูลการทดลองที่นำมาใช้ทดสอบโปรแกรม จึงได้ทำการหาค่าคงที่ค่าใหม่ซึ่งทำได้โดยอ้างอิงข้อมูลการทดลองในตาราง ง-1 และใช้เทคนิคการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear regression) ซึ่งได้ค่าคงที่ดังนี้

ค่าคงที่	ค่าปรับใหม่	ค่าของ Votruba และคณะ
k_1	0.005247	0.009
k_2	0.0028	0.0008
k_3	0.02237	0.0255
k_4	0.4992	0.6764
k_5	0.02103	0.0136
k_6	0.8853	0.117
k_7	0.01044	0.0113
k_8	0.515	0.715
k_9	0.135	0.135
k_{10}	0.1238	0.1558
k_{11}	0.0058	0.0258
k_{12}	0.6139	0.6139
k_{13}	0.0185	0.0185
k_{14}	0.00013	0.00013

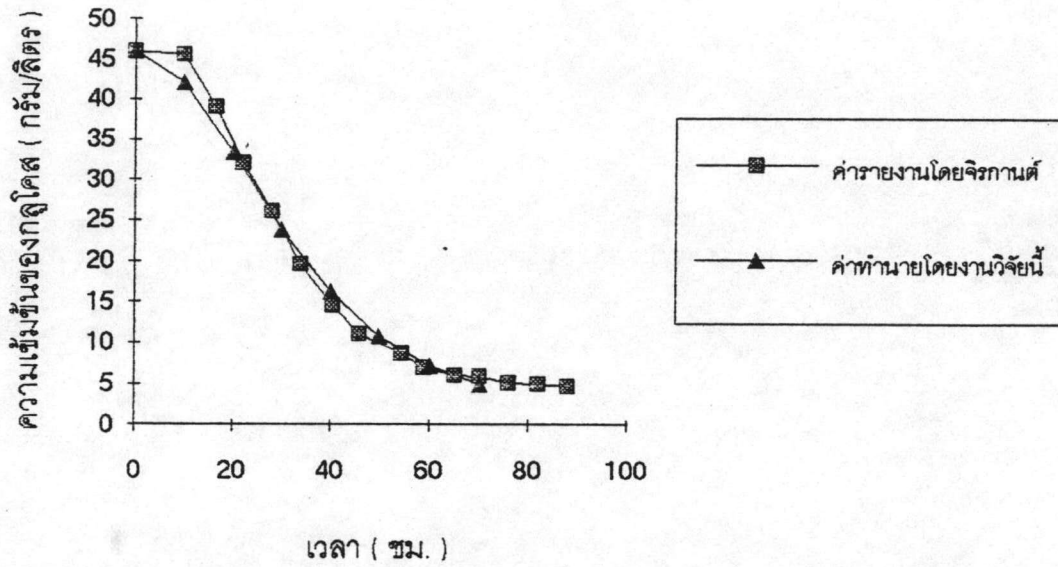
ตารางที่ 1 เปรียบเทียบค่าคงที่ ($k_1 - k_{14}$) ที่รายงานโดย Votruba และคณะ กับค่าที่ปรับใหม่

เมื่อนำค่าคงที่ที่ได้มาใหม่เหล่านี้แทนลงในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ชุดเดิม แล้วนำมาใช้
 ทำนายการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มข้นของ ชีวมวล สารตั้งต้น และผลิตภัณฑ์ ณ เวลาต่างๆ โดย
 กำหนดค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารต่างๆ ตามที่ระบุในตาราง ง-1 เหมือนเดิม จะได้ผลการทดสอบดังรูปที่

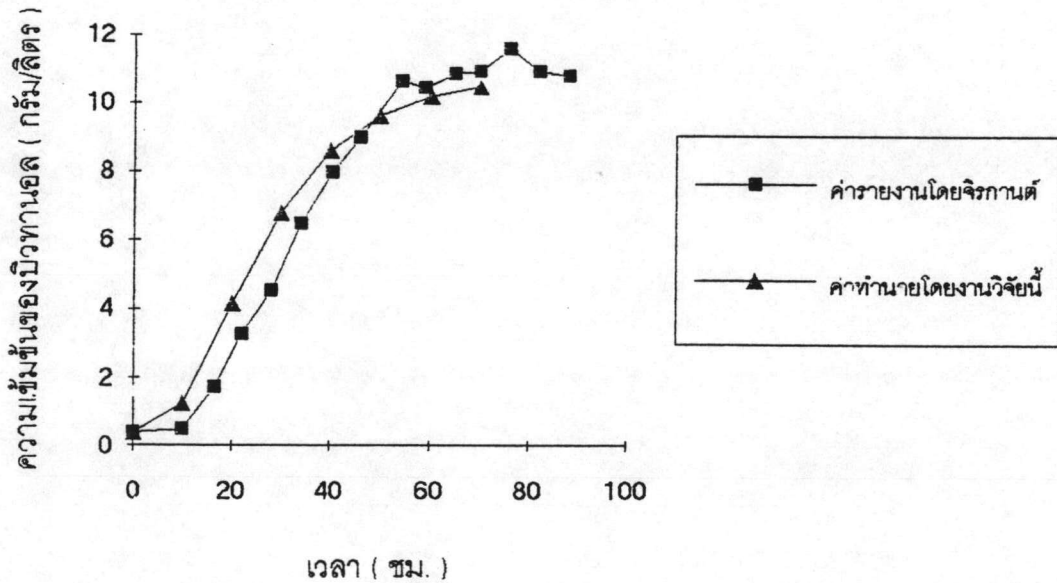
30 - 36

จากรูปที่ 30 - 36 จะเห็นได้ว่าค่าคงที่ที่หาได้ใหม่ให้ผลการทำนายค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้น
 และผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองมากกว่าเดิม สำหรับในกราฟรูปที่ 36 ค่าความ
 เข้มข้นของชีวมวลที่ได้จากการทำนาย จะต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดลอง เนื่องจากค่าที่ได้จากการทดลอง
 จะแสดงถึงปริมาณของชีวมวลทั้งที่มีชีวิตและไม่มีชีวิตรวมกัน ในขณะที่ ค่าที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบ
 จำลองทางคณิตศาสตร์ แสดงถึงปริมาณของชีวมวลที่มีชีวิตเท่านั้น โดยเห็นได้จากสมการ (44) และ (45)
 ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีการใช้เทอม " y " ซึ่งเป็นตัวแปรไร้มิติของ RNA มาคิดรวมอยู่ในสมการ
 ด้วย

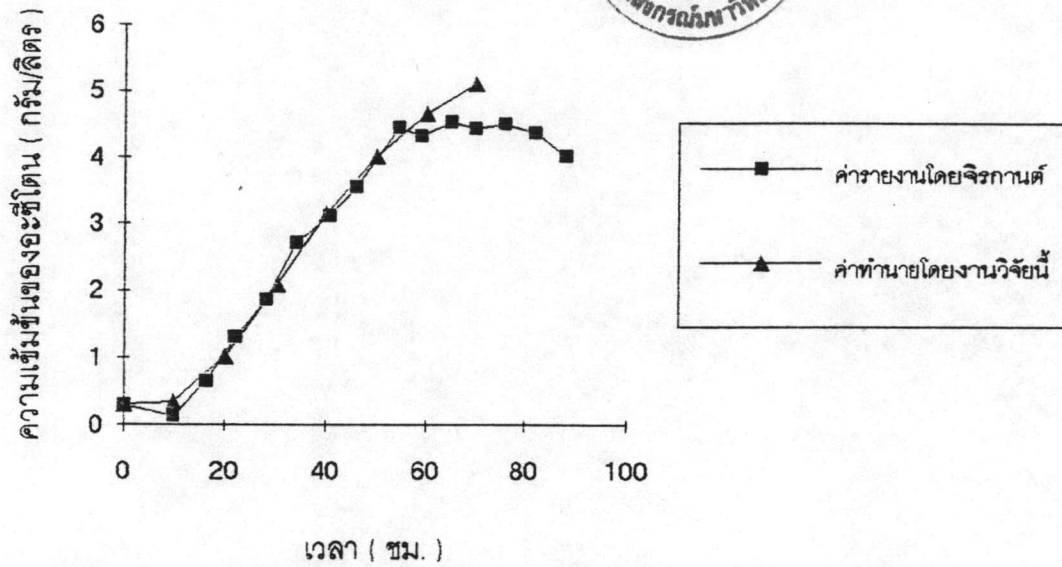
อนึ่งความแตกต่างของค่าความเข้มข้นของชีวมวลที่ได้จากทั้งสองวิธี จะทำให้เกิดความแตกต่าง
 กัน ในผลที่ได้จากส่วนของการประมาณค่าของตัวแปรสถานะที่วัดไม่ได้อีกด้วย ซึ่งจะแสดงให้เห็นเป็นลำดับ
 ต่อไป



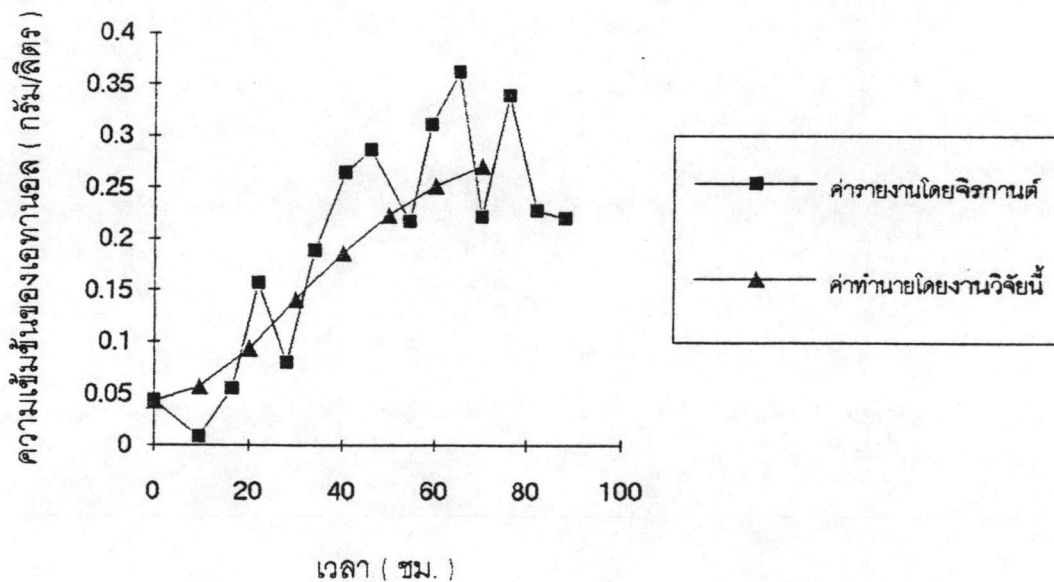
รูปที่ 30 เปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของกลูโคสที่ได้จากการทำนายโดยงานวิจัยนี้กับค่าที่รายงานโดยจิริกานต์และคณะ



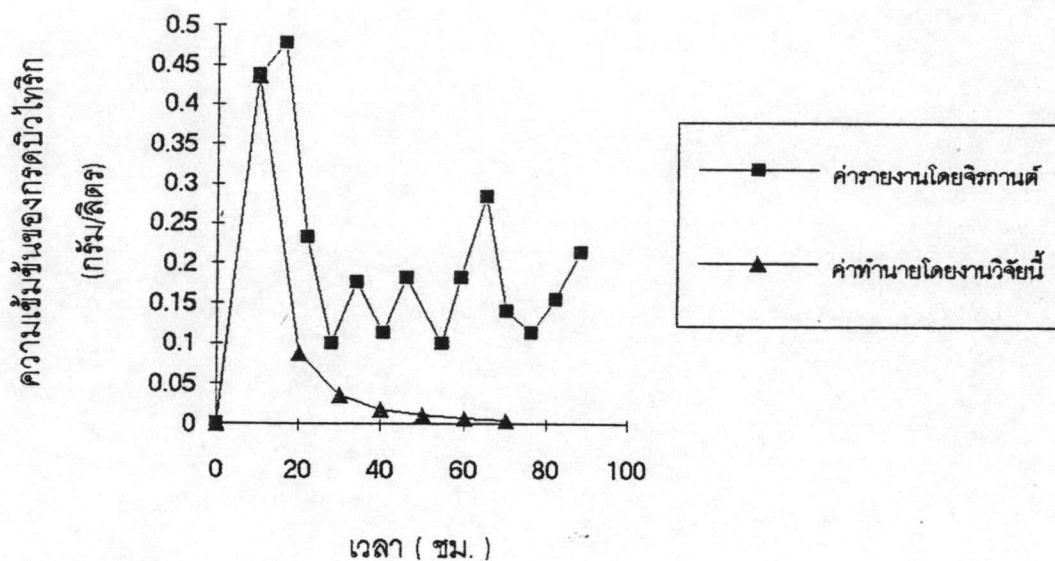
รูปที่ 31 เปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของบิวททานอลที่ได้จากการทำนายโดยงานวิจัยนี้กับค่าที่รายงานโดยจิริกานต์และคณะ



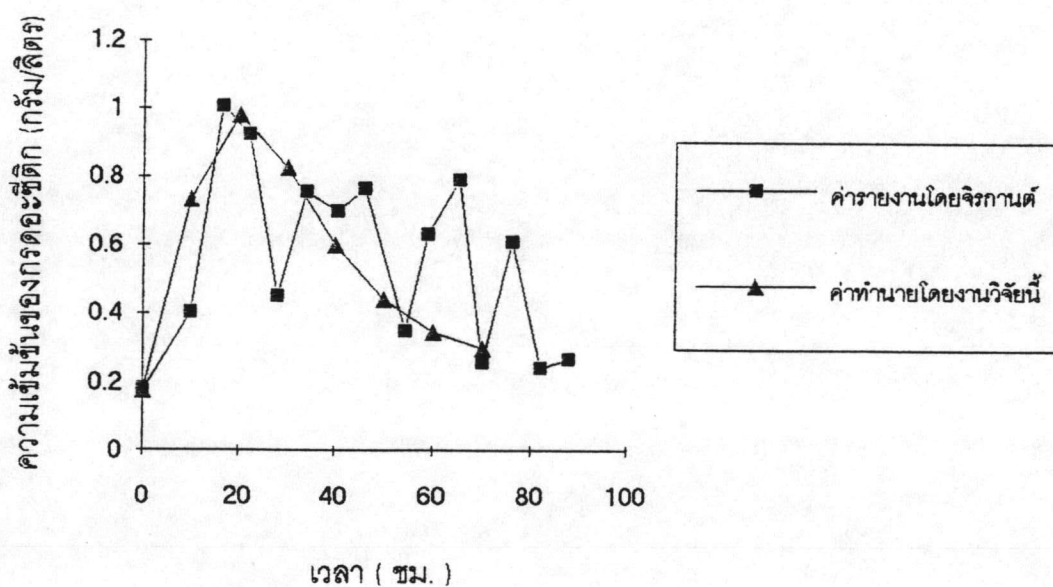
รูปที่ 32 เปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของอะซีโตนที่ได้จากการทำนายโดยงานวิจัยนี้กับค่าที่รายงานโดยจักรกานต์และคณะ



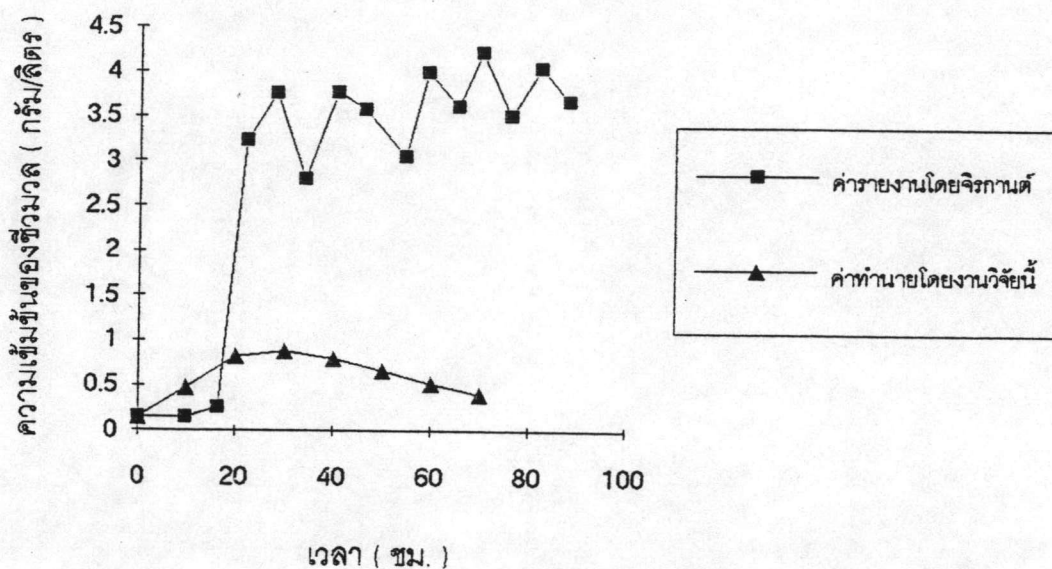
รูปที่ 33 เปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของเอทานอลที่ได้จากการทำนายโดยงานวิจัยนี้กับค่าที่รายงานโดยจักรกานต์และคณะ



รูปที่ 34 เปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของกรรตบิวไทริกที่ได้จากการทำนายโดยงานวิจัยนี้กับค่าที่รายงานโดยจิรกานต์และคณะ



รูปที่ 35 เปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของกรรตอะซีติกที่ได้จากการทำนายโดยงานวิจัยนี้กับค่าที่รายงานโดยจิรกานต์และคณะ



รูปที่ 36 เปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของชีวมวลที่ได้จากการทำนายโดยงานวิจัยนี้กับค่าที่รายงานโดยจิรกานต์และคณะ

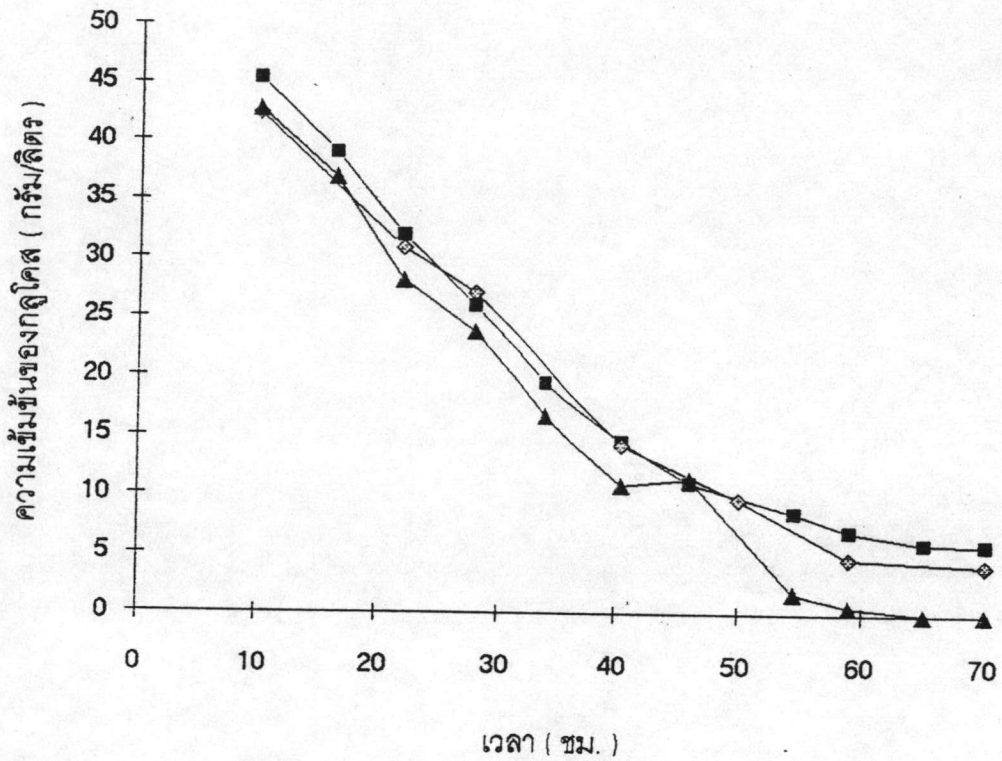
3 การประมาณค่าของตัวแปรสถานะที่วัดไม่ได้ จากค่าความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ต่างๆที่ได้

จากตาราง ง-1 และค่าความเข้มข้นของชีวมวลทั้งที่ได้จากตาราง ง-1 และที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบ

จำลองทางคณิตศาสตร์ สามารถนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าความเข้มข้นของกลูโคสที่เหลือในถังหมัก ณ

เวลาต่างๆได้ โดยใช้สมการ (17)-(20) และ (22)-(29) ซึ่งแสดงไว้ในบทที่ 2 แล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่า

ความเข้มข้นของกลูโคสที่เหลือในถังหมักที่รายงานโดยจิรกานต์ (ตาราง ง-1) ผลที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 37



- ค่าความชื้นของกลุโคสที่รายงานโดยจักรกานต์
- ◇ ค่าความชื้นของกลุโคสที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ค่าความชื้นของชีวมวลที่ได้จากการทำนายโดยงานวิจัยนี้
- ▲ ค่าความชื้นของกลุโคสที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ค่าความชื้นของชีวมวลที่รายงานโดยจักรกานต์

รูปที่ 37 เปรียบเทียบผลการใช้ค่าชีวมวลที่ได้จากการทำนายโดยงานวิจัยนี้กับค่าชีวมวลที่รายงานโดยจักรกานต์ และคณะในการคำนวณหาค่าความชื้นของกลุโคสด้วยสมการสำหรับหาค่าของตัวแปรที่วัดไม่ได้

จากรูปเห็นได้ว่า การคำนวณหาค่าความเข้มข้นของกลูโคสโดยใช้ค่าความเข้มข้นของซีรัมวอล
 ที่ได้จากการทำนายโดยงานวิจัยนี้ ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าความเข้มข้นของกลูโคสที่รายงานโดยจิริกานต์
 ได้มากกว่า การใช้ค่าความเข้มข้นของซีรัมวอลที่รายงานโดยจิริกานต์มาคำนวณหา โดยการใช้ค่าความเข้มข้น
 ของซีรัมวอลที่ได้จากการทำนายมาคำนวณหาค่าความเข้มข้นของกลูโคส จะมีค่าความผิดพลาดไปจากค่าที่
 รายงานโดยจิริกานต์โดยเฉลี่ยประมาณ 4% ในขณะที่การใช้ค่าความเข้มข้นของซีรัมวอลที่รายงานโดยจิริกานต์
 มาคำนวณหาค่าความเข้มข้นของกลูโคส จะมีค่าความผิดพลาดโดยเฉลี่ยประมาณ 13% ทั้งนี้เป็นผลมา
 จากค่าความเข้มข้นของซีรัมวอลที่ได้จากการทำนายโดยงานวิจัยนี้ เป็นค่าที่แสดงถึงปริมาณของซีรัมวอลที่มี
 ชีวิตเท่านั้น ในขณะที่ ค่าความเข้มข้นของซีรัมวอลที่รายงานโดยจิริกานต์จะแสดงถึงปริมาณของซีรัมวอลทั้งที่มี
 ชีวิตและไม่มีชีวิตรวมอยู่ด้วยกัน ดังนั้นการนำค่าความเข้มข้นของซีรัมวอลเฉพาะค่าที่มีชีวิตมาใช้งานจะให้ค่าที่
 ถูกต้องกว่า การใช้ค่าความเข้มข้นของซีรัมวอลที่แสดงค่าที่มีชีวิตและไม่มีชีวิตรวมกัน

อย่างไรก็ตาม ในการคำนวณหาค่าความเข้มข้นของกลูโคสโดยใช้ค่าความเข้มข้นของซีรัมวอล
 ที่ได้จากการทำนายโดยงานวิจัยนี้ จะมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น ถ้าสามารถวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้น
 ของอะซีโตอินซึ่งมีปริมาณเพียงเล็กน้อยออกมาได้