บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

การทดลองการผลิตเอธานอลโดยกระบวนการหมักแบบต่อเนื่องในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของการหมักแบบไม่มีการนำเซลกลับมาใช้เปรียบเทียบกับแบบมีการนำเซลกลับมาใช้ โดยข้อมูลการทดลองทั้งหมดได้แสดงในภาคผนวก ข.

4.1 อัตราการเจือจางที่เหมาะสมในระบบหมักต่อเนื่องแบบไม่มีการนำเซลกลับมาใช้ (สรุปผลในตารางที่ 4.1)

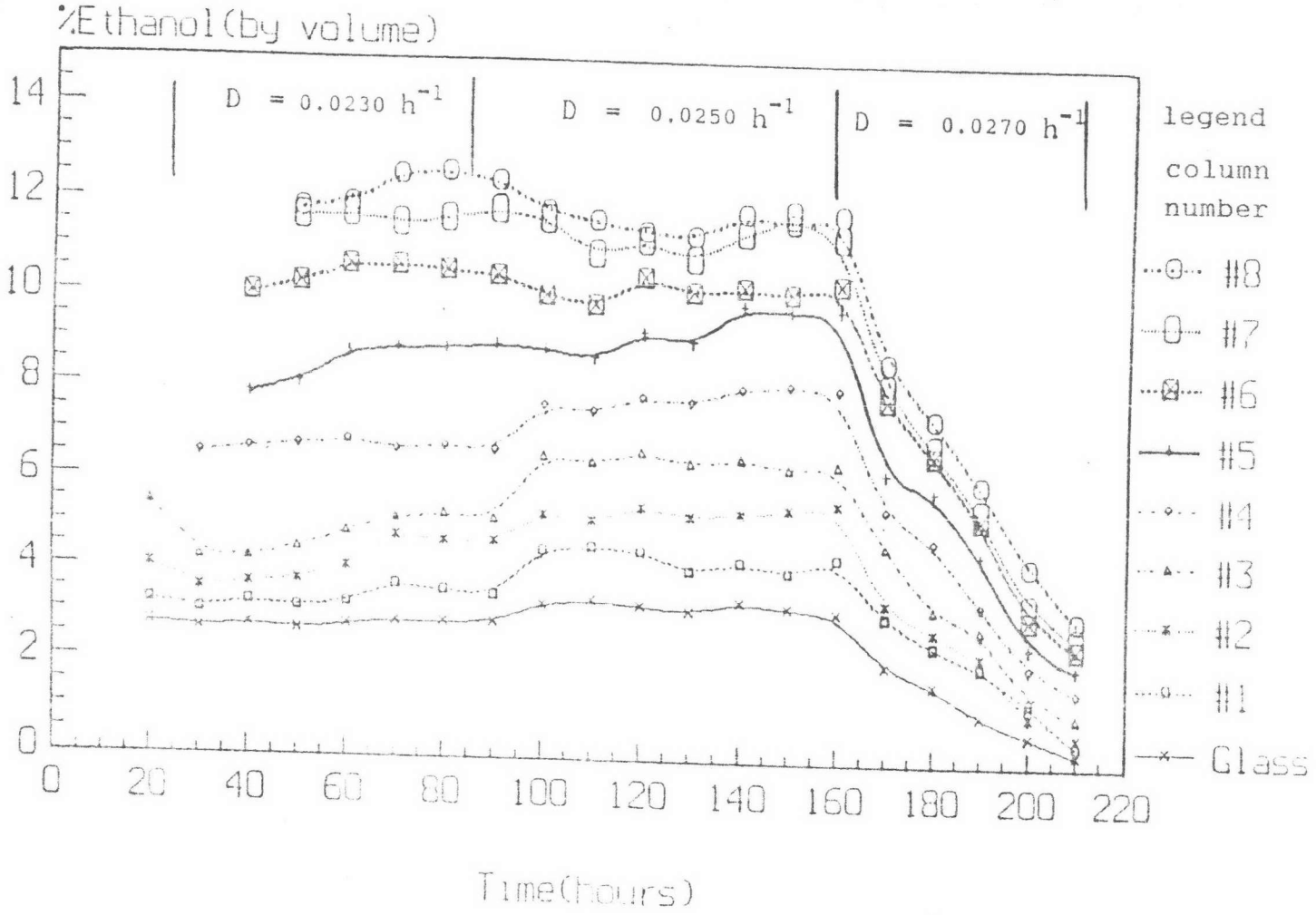
รูปที่ 4.1 - 4.3 แสดงประสิทธิภาพระบบหมักเอธานอลแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง ที่อัตราเจือจาง 0.23 , 0.25 และ 0.27 ชั่วโมง$^{-1}$ โดยแสดงการเปลี่ยนแปลงเอธานอล, จำนวนเซลยีสต์และความเข้มข้นน้ำตาลที่เหลือ ตามลำดับโดยใช้น้ำสับปะรดที่มีความเข้มข้นสารละลายน้ำตาล 18 องศาบริกซ์ โดยใช้เชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* อัตราการให้อากาศ 0.5 vvm ช่วง 4 ชั่วโมงแรกของการทดลอง จากนั้นลดเหลือ 0.04 - 0.06 vvm ตลอดการทดลอง เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 21 ชั่วโมง ตามวิธีการทดลองของศจี (2528) จากนั้นปล่อยน้ำหมักจากตอนล่างของคอลัมน์ให้อากาศเข้าตอนล่างของคอลัมน์ไม่ให้อากาศ แล้วไหลล้นจากตอนบนของคอลัมน์นี้ไปเข้าตอนล่างของคอลัมน์ถัดไปจนครบทุกคอลัมน์ อัตราการเจือจางตั้งแต่ชั่วโมงที่ 21-90 เท่ากับ 0.0230 ชั่วโมง$^{-1}$ พบว่า ปริมาณการผลิตเอธานอลอยู่ในระดับสูงร้อยละ 12 โดยปริมาตร ค่าสัมประสิทธิ์การผลิตเอธานอล 2.69 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง (ตาราง ข.1 ในภาคผนวก ข.) จำนวนเซลยีสต์มีจำนวนสูงถึง 1,100 ล้านเซลต่อมิลลิลิตร และความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลที่เหลือจากคอลัมน์ให้อากาศไปจนถึงคอลัมน์ไม่ให้อากาศคอลัมน์ที่ 8 จะค่อยๆ ลดเหลือ 5 องศาบริกซ์ที่คอลัมน์นี้ ซึ่งน้ำตาลที่เหลือเป็นน้ำตาลนอนอินเวิร์ท (non-inverted sugar) ซึ่งเซลยีสต์ไม่สามารถย่อยได้ จากผลการทดลองช่วงนี้ จะเห็นได้ว่า หากให้อัตราเจือจางระดับนี้ต่อไป การเจริญเติบโตของเซลยีสต์มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเกิดการยับยั้งการเจริญเติบโตของเซลยีสต์ โดยความเข้มข้นสูงของเอธานอลที่ผลิตขึ้นและมีการสะสมเกิดขึ้น(Wang, 1979) จากนั้นชั่วโมงที่ 91 - 160 ได้เพิ่มอัตราการเจือจางเป็น 0.0250 ชั่วโมง$^{-1}$ ผลที่

ระบบสามารถรักษาเสถียรภาพ* ไว้ได้ โดยน้ำหมักจากคอลัมน์สุดท้ายมีปริมาณเอธานอลสูงถึง ร้อยละ 11 โดยปริมาตร กำลังการผลิตเอธานอล 2.90 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง ได้เอธานอลวันละ 37.5 ลิตร จำนวนเซลยีสต์ 1,000 ล้านเซลต่อมิลลิลิตร และความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลเหลือ 5 องศาบริกซ์ ระบบสามารถรักษาเสถียรภาพไว้ได้ เนื่องจากอัตราสร้างเซลสูงกว่าอัตราสูญเสียเซลจากระบบ เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองเดิม (คนอง ,2532) อัตราการเจือจางเท่ากับ 0.0230 ชั่วโมง$^{-1}$ สามารถผลิตเอธานอลได้วันละ 35 ลิตร ซึ่งใกล้เคียงกับผลการทดลองนี้ ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 161 จนสิ้นสุดการทดลองชั่วโมงที่ 210 ได้เพิ่มอัตรการเจือจางเป็น 0.0270 ชั่วโมง$^{-1}$ พบว่าระบบมีการผลิตเอธานอลลดลงตามเวลาการหมัก เนื่องจากเซลยีสต์ถูกชะล้างออกไปตลอดเวลา โดยความเข้มข้นของเซลยีสต์ลดลงแบบ logarithmic ส่วนความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลที่เหลือในแต่ละถังหมักจะสูงขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป เพราะจำนวนเซลยีสต์ในระบบมีจำนวนลดลง เมื่อเทียบกับปริมาณน้ำตาลที่มีอยู่ การเปลี่ยนน้ำตาลในน้ำสัมประสิทธิ์ให้เป็นเอธานอลมีประสิทธิภาพลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มอัตราการเจือจางสูงกว่าค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดมาก ๆ ($D >> \mu_{max}$) เซลยีสต์จึงถูกชะล้างออกไปตลอดเวลา ถ้าระยะเวลาการหมักยาวนานมาก ๆ เซลยีสต์จะลดลงจนหมดในที่สุด เรียกสภาวะที่เกิดว่า Washout (Aiba, 1973) ฉะนั้นการควบคุมสภาพการหมักในระบบต่อเนื่องนี้ให้สมดุล จำเป็นต้องให้ค่า D มีค่าไม่เกิน μ_{max} ตารางที่4.1 สรุปประสิทธิภาพการทำงานของระบบหมักเอธานอลที่ไม่มีการหมุนเวียนน้ำหมัก ที่อัตราเจือจางต่าง ๆในการศึกษาทดลองนี้ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า สำหรับระบบหมักเอธานอลไม่มีการหมุนเวียนเซลยีสต์ อัตราเจือจางเหมาะสม เท่ากับ 0.0250 ชั่วโมง$^{-1}$ ซึ่งได้เอธานอลสูงสุดร้อยละ 11 โดยปริมาตร และมีน้ำตาลเหลือ 5 องศาบริกซ์ มีประสิทธิภาพการผลิตเอธานอล 2.9 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง และประสิทธิภาพการเปลี่ยนเป็นเอธานอล เท่ากับ 0.9 กรัมต่อกรัมน้ำตาลที่ถูกใช้ไป

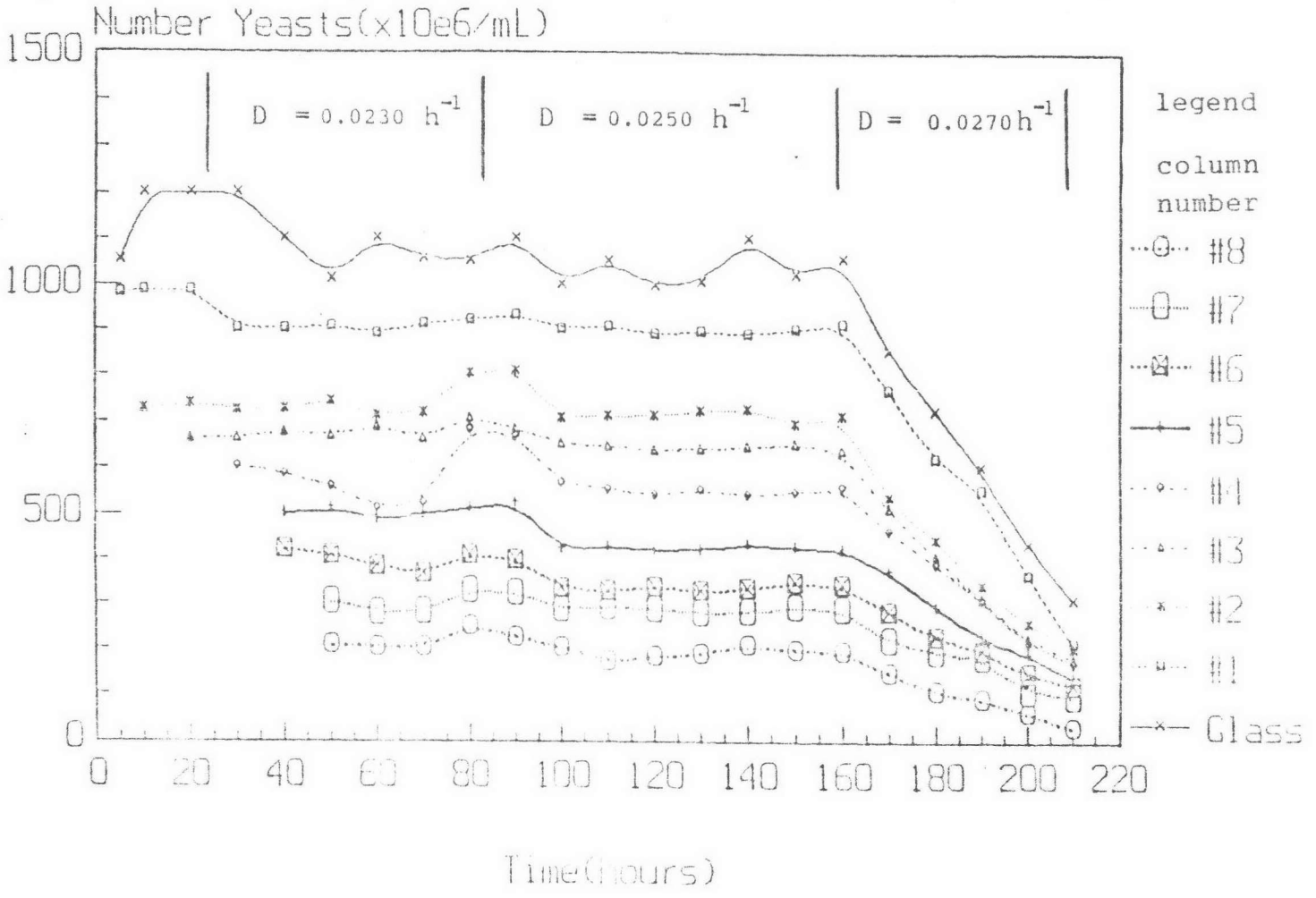
* เสถียรภาพ(Stability) หมายถึง อัตราการไหลผ่านของน้ำหมักที่เหมาะที่จะทำให้อัตราการเพิ่มของเซล เนื่องจากการเจริญของจุลินทรีย์ เท่ากับ อัตราการไหลออกของเซล อัตราการเพิ่มของสารอาหารเข้าสู่ถังหมัก เท่ากับ อัตราการใช้สารอาหาร โดยจุลินทรีย์ในน้ำหมักและอัตราการผลิตผลิตภัณฑ์เท่ากับการไหลออกของผลิตภัณฑ์ในน้ำหมัก (Aiba,1968)

ตารางที่ 4.1 สรุปผลอัตราการเจือจางเหมาะสมในระบบหมักต่อเนื่องแบบไม่มีการนำเซลกลับมาใช้

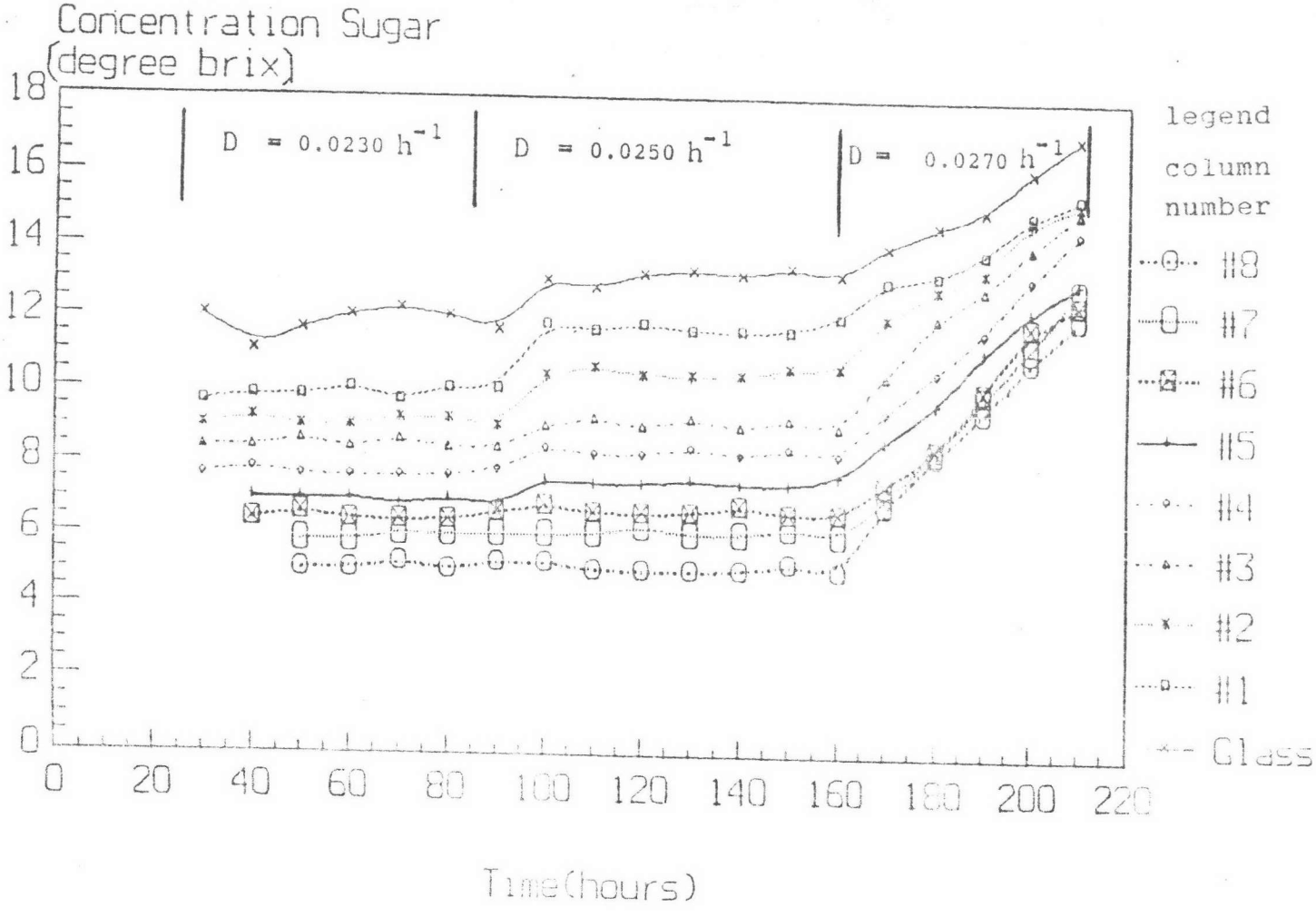
อัตราการเจือจางเหมาะสม ($ชั่วโมง^{-1}$)	ผลิตเอธานอล (ลิตร / วัน)	ได้เอธานอลออกมา (กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง)	ประสิทธิภาพการสร้างเอธานอล (กรัมเอธานอล/กรัมน้ำตาลที่ถูกใช้)
0.0230	34.5	2.69	0.90
0.0250	37.5	2.90	0.90
0.0270	41.5	1.55	0.64



รูปที่ 4.1 แสดงปริมาณการผลิตเอทานอลเทียบกับเวลาในระบบการหมักแบบต่อเนื่องชนิดต่อเนื่อง อัตราการให้อากาศ 0.5 vvm 4 ชั่วโมงแรก จากนั้นลดเหลือ 0.04 - 0.06 vvm ตลอดการทดลอง เริ่มป้อนสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 21 ชั่วโมง



รูปที่ 4.2 แสดงจำนวนเซลล์ยีสต์ที่มีชีวิตเวลาในระบบการหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง อัตราการให้อากาศ 0.5 vvm 4 ชั่วโมงแรก จากนั้นลดเหลือ 0.04 - 0.06 vvm ตลอดการทดลอง เริ่มป้อนสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 21 ชั่วโมง



รูปที่ 4.3 แสดงความเข้มข้นของน้ำตาลที่เหลือในน้ำหมักกับเวลาในระบบการหมักแบบต่อเนื่องชนิดคอลัมน์ อัตราการให้อากาศ 0.5 vvm ที่ชั่วโมงแรกจากนั้นลดลงเหลือ 0.04 - 0.06 vvm ตลอดการทดลอง เริ่มป้อนสารอาหารเมื่อผ่านไป 21 ชั่วโมง

4.2 ความสามารถของเซลยีสต์ในการเปลี่ยนน้ำสับปะรดให้เป็นเอธานอลในแต่ละคอลัมน์

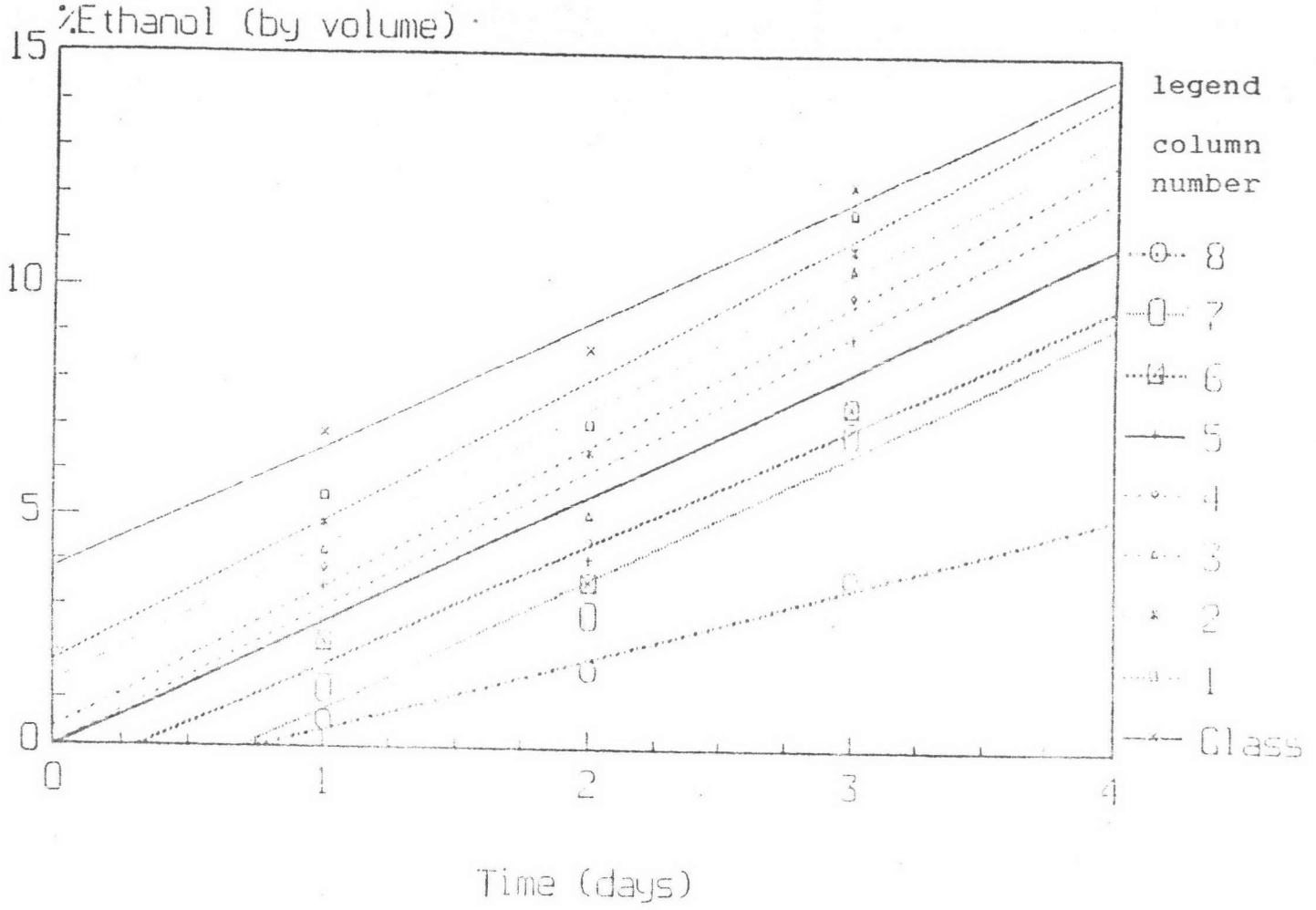
ผลการทดลองหาความสามารถเซลยีสต์จากคอลัมน์ต่างๆในการเปลี่ยนน้ำสับปะรดให้เป็นเอธานอลได้แสดงในรูปที่ 4.4 - 4.6 เป็นการหมักแบบ (batch fermentation) ในระดับขวดเขย่าขนาด 1 ลิตร (สภาวะที่ใช้ตามวิธีการทดลองข้อ3.3.2) ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณเอธานอล, จำนวนเซลยีสต์และน้ำตาลในช่วงเวลาทดลอง จากผลการทดลองสามารถ สรุปได้ว่า มีความความสามารถของเซลยีสต์จากแต่ละคอลัมน์ในการเปลี่ยนน้ำสับปะรดให้เป็นเอธานอลมีแตกต่างกัน แบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มแรกเป็นเซลยีสต์จากคอลัมน์ให้อากาศกับคอลัมน์ไม่ให้อากาศคอลัมน์ที่ 1ถึง 5 ซึ่งให้ผลดังนี้ เมื่อเวลาหมักดำเนินมา 1 วัน เซลยีสต์จากแต่ละคอลัมน์สามารถเปลี่ยนน้ำสับปะรดบางส่วนให้เป็นเอธานอลปริมาณร้อยละ 1-6 โดยปริมาตร และใช้น้ำสับปะรดบางส่วนในการเจริญเติบโตจำนวนเซลยีสต์ 200 -1,800 ล้านเซลต่อมิลลิลิตรเพิ่มจากจำนวนเซลตกบเริ่มต้น 150 ล้านเซลต่อมิลลิลิตร และความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลลดลงอยู่ในช่วง 7.6 - 15.2 องศาบริกซ์ เมื่อเวลาหมักผ่านไป 2 วัน ปริมาณเอธานอลที่ผลิตได้จากเซลแต่ละคอลัมน์มีค่าสูงประมาณ ร้อยละ 4 - 8.6 โดยปริมาตร จำนวนเซลยีสต์ในระบบมีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 885 - 2,500 ล้านเซลต่อมิลลิลิตร และความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลที่เหลือมีค่าสูง ประมาณ 7.6 - 12 องศาบริกซ์ ส่วนในกลุ่มที่สอง (คือเซลจากคอลัมน์ไม่ให้อากาศคอลัมน์ที่ 6 ถึง 8) เมื่อเวลาหมักผ่านไป 2 วัน ได้ปริมาณเอธานอลที่ผลิตจากยีสต์จากแต่ละคอลัมน์อยู่ในช่วง ร้อยละ 1.6 - 3.6 โดยปริมาตร เซลยีสต์ในระบบเพิ่มขึ้นประมาณ 395 - 760 ล้านเซลต่อมิลลิลิตร จะเห็นว่า มีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกลุ่มแรกและความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลที่เหลือในน้ำหมักมีค่าสูง ต่อมา เมื่อทำการหมักผ่านไปจนครบ 3 วัน ผลที่ได้คือ การผลิตเอธานอลของเซลในกลุ่มแรกสูงถึง ร้อยละ8.9 - 12.2 โดยปริมาตร จำนวนเซลยีสต์เพิ่มขึ้นถึง 1,310 -3,610 ล้านเซลต่อมิลลิลิตร และความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลที่เหลือมีค่าต่ำลงอยู่ในช่วง 5.2-6.4 องศาบริกซ์ ค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ อยู่ในช่วง 0.76-0.86 ชั่วโมง$^{-1}$ เมื่อเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากเซลในกลุ่มที่สอง พบว่า ปริมาณเอธานอลที่ผลิตได้ต่ำกว่ากลุ่มแรกคือผลิตได้ประมาณ ร้อยละ 3.6 - 7.4 โดยปริมาตร จำนวนเซลยีสต์มีค่าสูงขึ้นกว่าเมื่อใช้เวลาหมัก 2 วัน คือ 670 -1,000 ล้านเซลต่อมิลลิลิตร แต่ถ้าเทียบกับในกลุ่มแรกยังถือว่ามีจำนวนต่ำกว่ามากและ

ตารางที่ 4.2 ค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะในการทดลองความสามารถของโปรติเอส จากคอลัมน์ต่าง ๆ

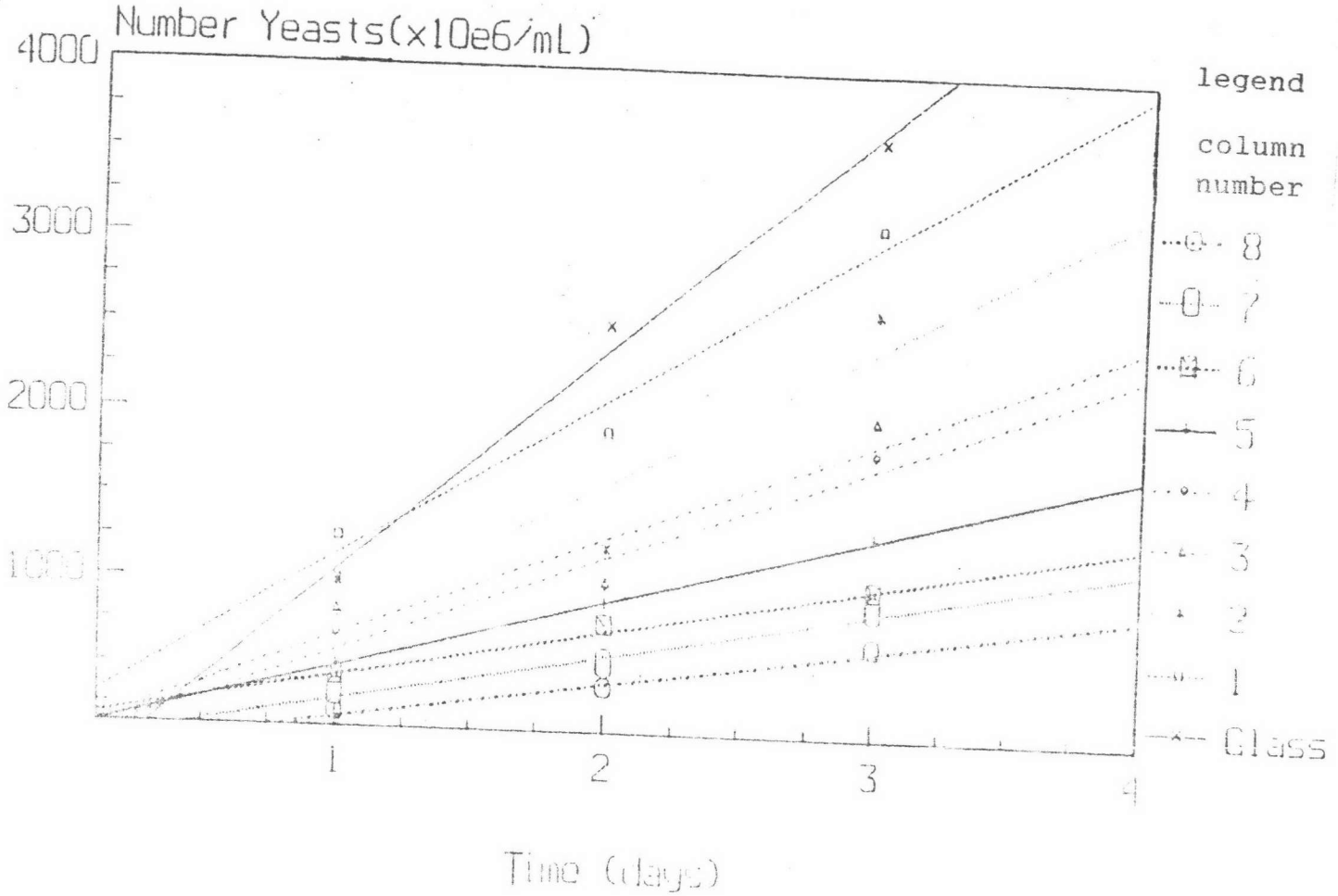
คอลัมน์	μ (ชั่วโมง$^{-1}$)			
	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	ค่าเฉลี่ย
แก้ว	0.91	0.95	0.80	0.89
1.	0.96	0.88	0.86	0.90
2.	1.12	0.65	0.77	0.85
3.	1.23	0.67	0.76	0.89
4.	1.20	0.76	0.84	0.93
5.	1.09	0.77	0.80	0.89
6.	1.10	0.63	0.77	0.83
7.	1.06	0.52	0.76	0.78
8.	1.03	0.39	0.68	0.70

ความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลที่เหลือในน้ำหมัก มีค่าสูงกว่าผลในกลุ่มแรก อยู่ในช่วง 8.2 -13.0 องศาบริกซ์ ส่วนค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ มีค่าต่ำกว่า อยู่ในช่วง 0.68-0.77 ชั่วโมง$^{-1}$

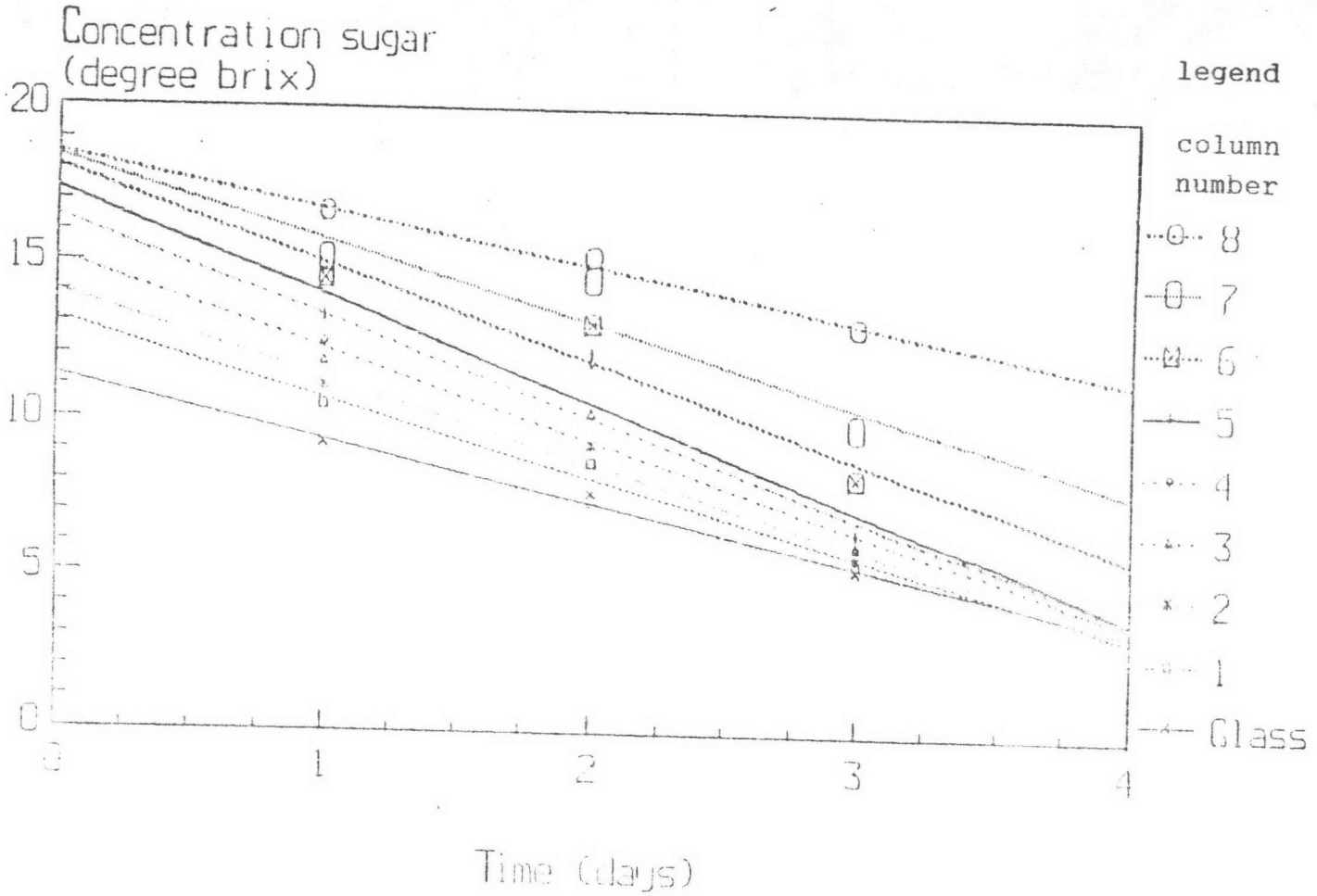
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (μ) ของยีสต์จากคอลัมน์ต่าง ๆ โดยคำนวณในแต่ละวัน และค่าเฉลี่ยตลอดช่วงการทดลอง จากตารางที่ 4.2 พบว่า ค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะในวันที่หนึ่งของเซลยีสต์จากคอลัมน์ต่าง ๆ มีค่าสูงและใกล้เคียงกัน ค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของเซลยีสต์มีค่าลดลงในวันที่สองและสาม เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ จะเห็นได้ว่า ยีสต์จากคอลัมน์ 6,7,8 มีค่าต่ำกว่า ยีสต์จากคอลัมน์แก้วและคอลัมน์ไม่ให้อากาศ 1 ถึง 5 ทั้งนี้ เนื่องจากยีสต์ในคอลัมน์ท้าย ๆ คือ 6 ถึง 8 เป็นเซลที่ตายหรืออ่อนแอในจำนวนที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับคอลัมน์อื่น ๆ ซึ่งเนื่องจากมีสารอาหารน้อยลง เมื่อน้ำหมักผ่านไปตามคอลัมน์ต่าง ๆ ตามลำดับ



รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแอลกอฮอล์กับเวลาในการเปรียบเทียบความสามารถของเชื้อที่ได้จากการเปลี่ยนน้ำสับปะรดให้เป็นแอลกอฮอล์ การทดลองระยะที่ 1 ปริมาตรน้ำหมัก 500 มิลลิลิตร



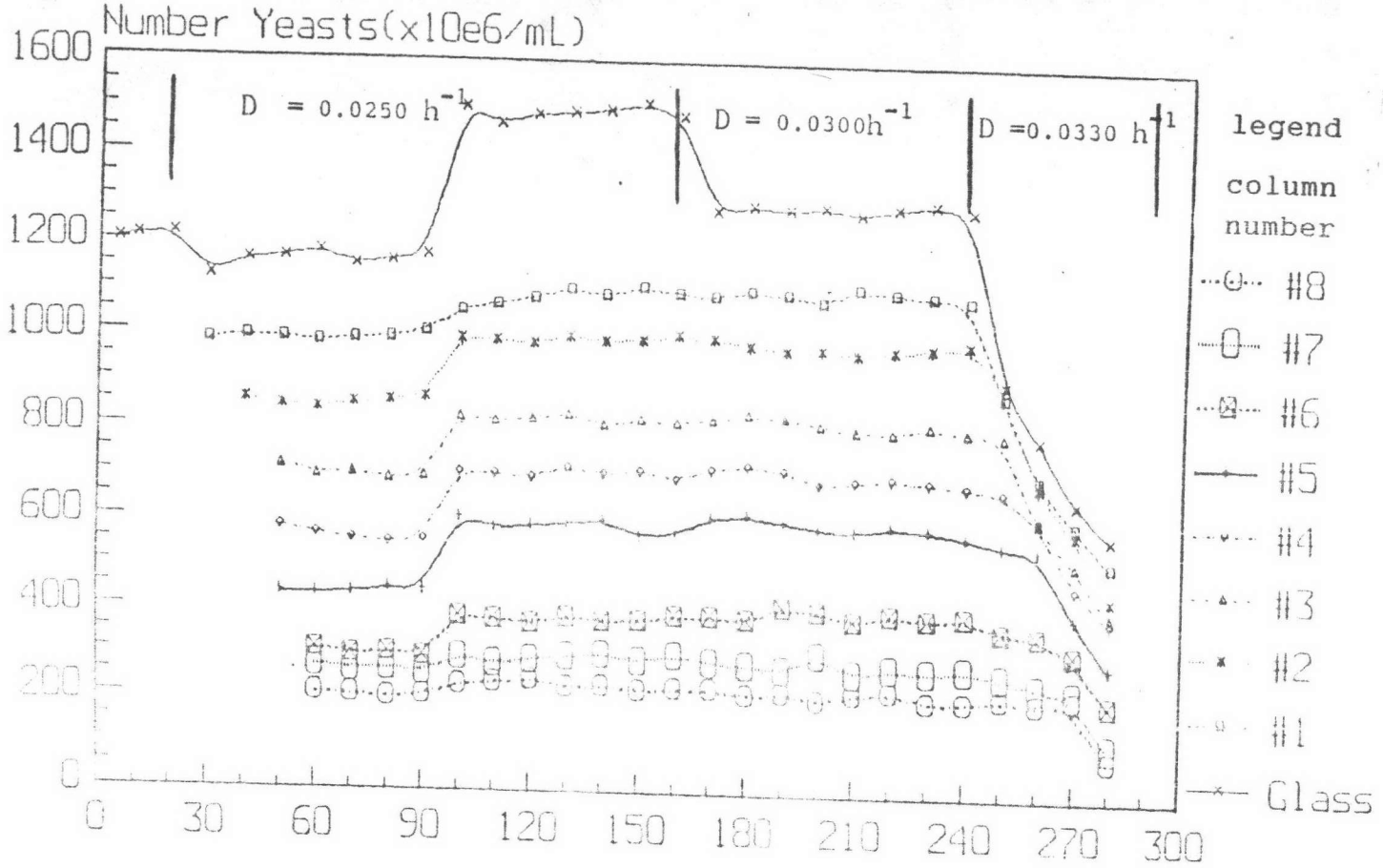
รูปที่ 4.5 แสดงจำนวนเซลยีสต์ที่นับได้กับเวลาในการเปรียบเทียบความสามารถของเซลยีสต์จากการเปลี่ยนน้ำฟันประดิษฐ์ทันทีและอย่างนอก การทดลองระดับขวดเขย่าซึ่งมีปริมาตรน้ำหมัก 500 มิลลิลิตร



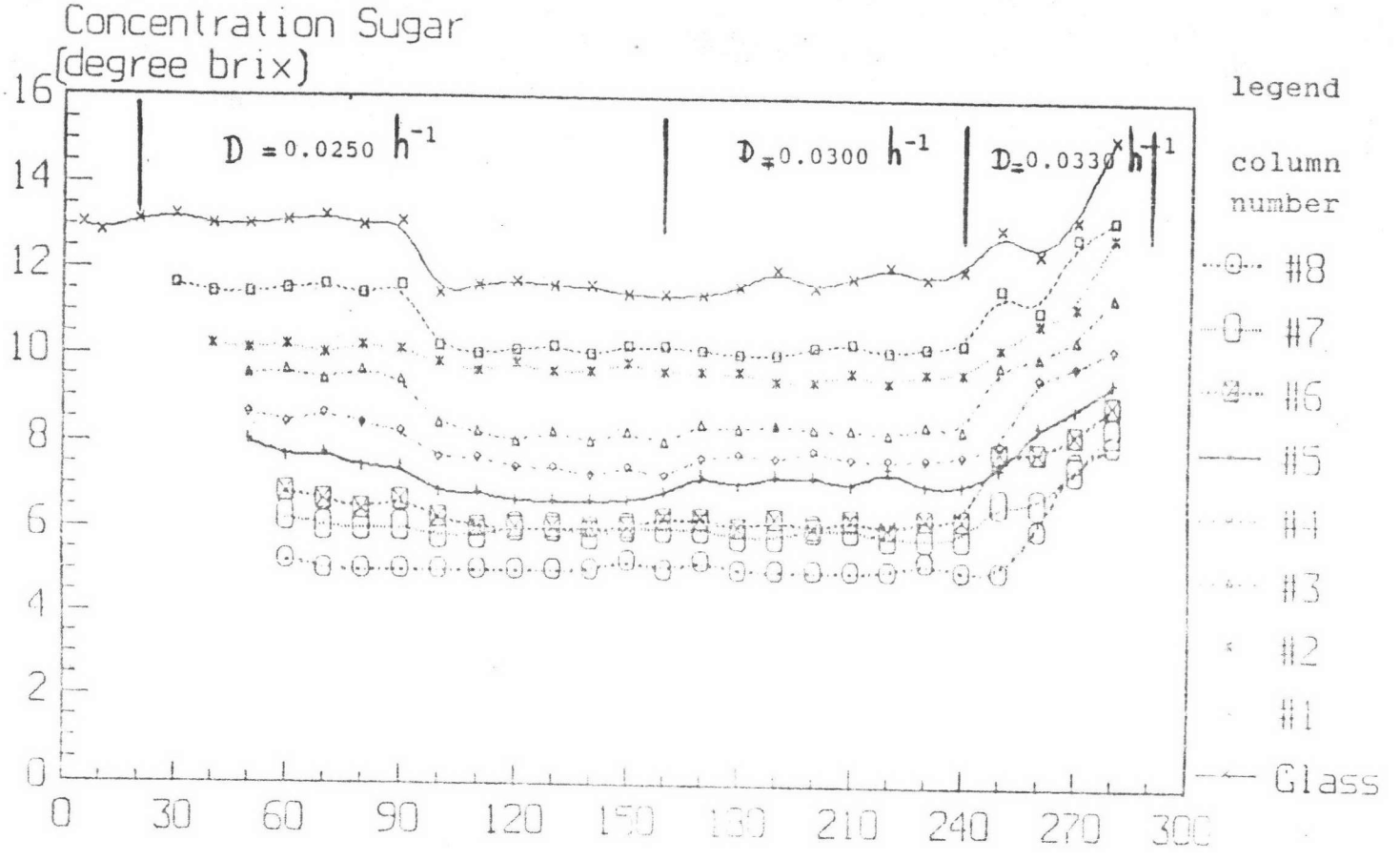
รูปที่ 4.6 แสดงความเข้มข้นของน้ำตาลที่เหลือในน้ำหมักกับเวลาในการเปรียบเทียบความสามารถของเซลยีสต์จากการเลี้ยงน้ำสับปะรดให้เป็นเอธานอลการทดลองระดับขวดแบ่งเป็นขวดน้ำหมัก 500 มิลลิลิตร

4.3 ประสิทธิภาพระบบหมักโดยน้ำน้ำหมักป้อนกลับ

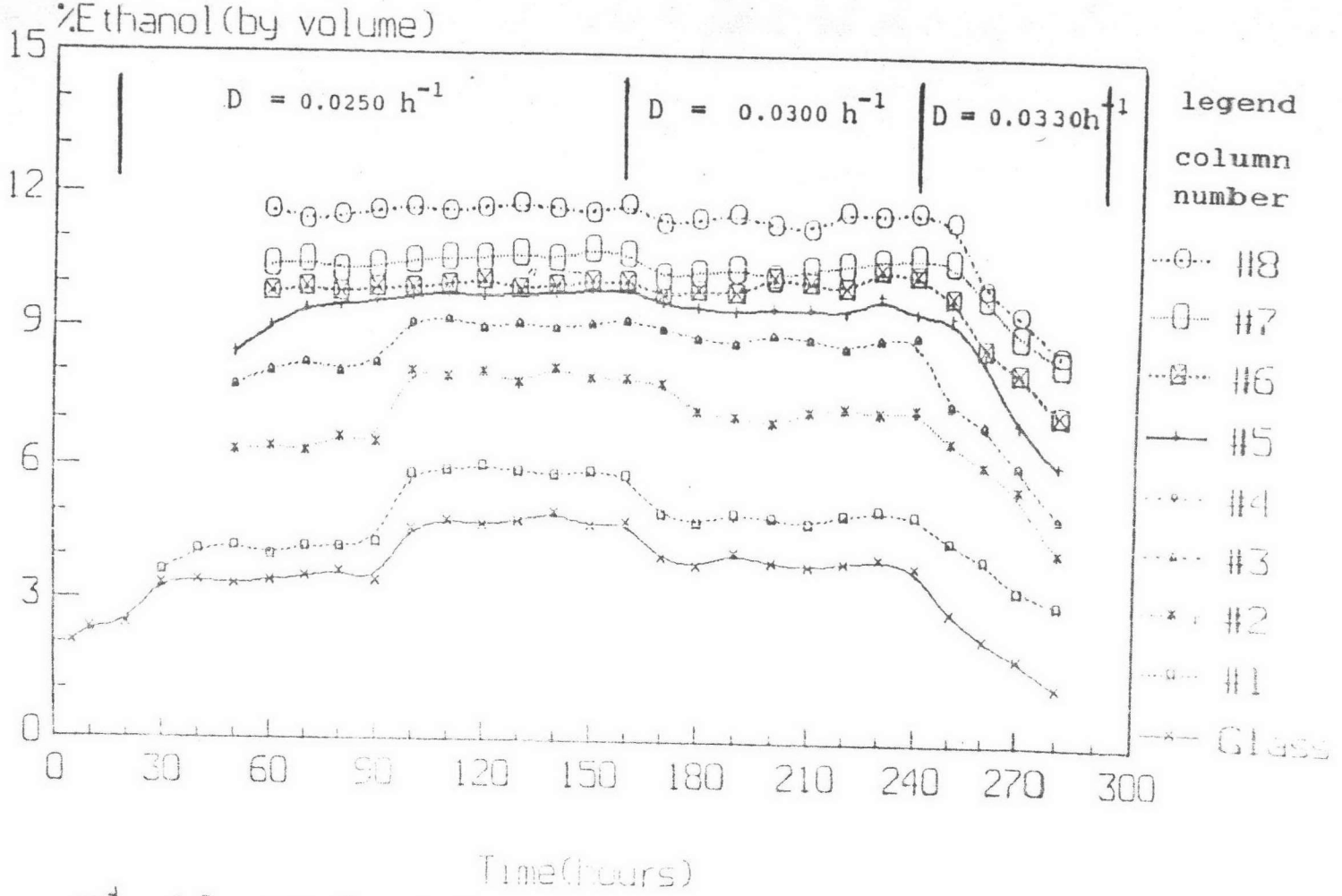
รูปที่ 4.7 - 4.9 แสดงข้อมูลการทดลองระบบหมักน้ำเสียประเภทเพื่อผลิตเอธานอล ในเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่องที่อัตราเจือจางต่างๆ โดยใช้สภาวะเริ่มต้นควบคุมระบบหมักเช่นเดิมดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1 ในช่วงชั่วโมงที่ 21 - 90 ระบบหมักถูกควบคุมที่อัตราการเจือจาง 0.0250 ชั่วโมง$^{-1}$ พบว่า น้ำล้นจากคอลัมน์ที่ 8 มีปริมาณเอธานอล ร้อยละ 11 โดยปริมาตร จำนวนเซลยีสต์ 1,100 ล้านเซลต่อมิลลิลิตร และความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลเหลือ 5 องศาบริกซ์ สรุปได้ว่า ระบบมีเสถียรภาพดี หลังจากชั่วโมงที่ 91 ได้ทำการดึงน้ำหมักจากคอลัมน์ไปให้ลากาศคอลัมน์ที่ 5 (เซลยีสต์ที่ดึงกลับมาใช้เป็นเซลของคอลัมน์ที่ 5 ที่ไหลล้นมาเข้าตอนล่างคอลัมน์ที่ 6) ดังได้กล่าวมาแล้วว่า เซลยีสต์คอลัมน์ที่ 5 เป็นเซลที่สอนแอบต่ำกว่าแรงกว่าเซลยีสต์ในคอลัมน์ที่ 6 ,7 , 8 ตามลำดับ โดยควบคุมอัตราส่วนการป้อนป้อนกลับ 0.3 และให้อัตราการเจือจาง 0.0250 ชั่วโมง$^{-1}$ จนถึงชั่วโมงที่ 160 พบว่า ระบบมีเสถียรภาพได้ดี โดยน้ำหมักจากคอลัมน์ที่ 7และ 8 มีปริมาณเอธานอล ร้อยละ 10-11 โดยปริมาตร ค่าสัมประสิทธิ์เอธานอล 2.86 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง (ตารางข.11 ในภาคผนวก ข.) และมีจำนวนเซลยีสต์มีจำนวนสูงประมาณ 1,500 ล้านเซลต่อมิลลิลิตร จากนั้นชั่วโมงที่ 161 - 240 เพิ่มอัตราการเจือจางเป็น 0.0300 ชั่วโมง$^{-1}$ พบว่า ระบบรักษาเสถียรภาพไว้ได้ ปริมาณเอธานอลที่ผลิตได้ยังคงสูงเท่าระดับเดิม ทั้งนี้เนื่องจากมีปริมาตรสารอาหารเข้าสู่ระบบเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ยีสต์สามารถนำสารอาหารในน้ำหมักมาใช้ในการเจริญเติบโต และเพิ่มปริมาณเซลในระบบให้มากขึ้น ประสิทธิภาพในการทำกิจกรรมเพิ่มขึ้นด้วย (Rosario,1979) หลังจากชั่วโมงที่ 240 ถึง280 เพิ่มค่าอัตราการเจือจางเป็น 0.0330 ชั่วโมง$^{-1}$ พบว่า ระบบมีเสถียรภาพรักษาไว้ได้ ปริมาณเอธานอลที่ผลิตลดลงตลอดเวลา และจำนวนเซลยีสต์มีปริมาณน้อยลงจนเหลือจำนวนน้อยมาก ส่วนความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลจะเพิ่มขึ้นมาก ดังนั้นจึงควบคุมระบบที่อัตราเจือจางนี้ยาวนานออกไป ดังนั้น ภายใต้สภาวะการทดลองนี้ อัตราเจือจางสูงสุดที่ระบบรับได้ มีค่า 0.0300 ชั่วโมง$^{-1}$ ในที่สุดระบบจะล้มเหลว เนื่องจาก Wash out



รูปที่ 4.8 แสดงจำนวนเซลยีสต์ที่เกิดขึ้นตามเวลาในถังหมักแบบคอนทินิวอัสที่ต่อ
เนื่อง อัตราการไหล เท่ากับ 0.6 vvm 4 ชั่วโมงแรก จากนั้นลดเหลือ
0.04 - 0.06 vvm ตลอดการทดลอง เริ่มป้อนสารอาหารเมื่อเวลาผ่าน
ไป 21 ชั่วโมง ถังหมักมีเซลยีสต์ ตลอดการทดลองที่ 5 ตัวอย่างมีการ
ปั่นผสมกับ 0.3 ในช่วงที่ 91 - 200

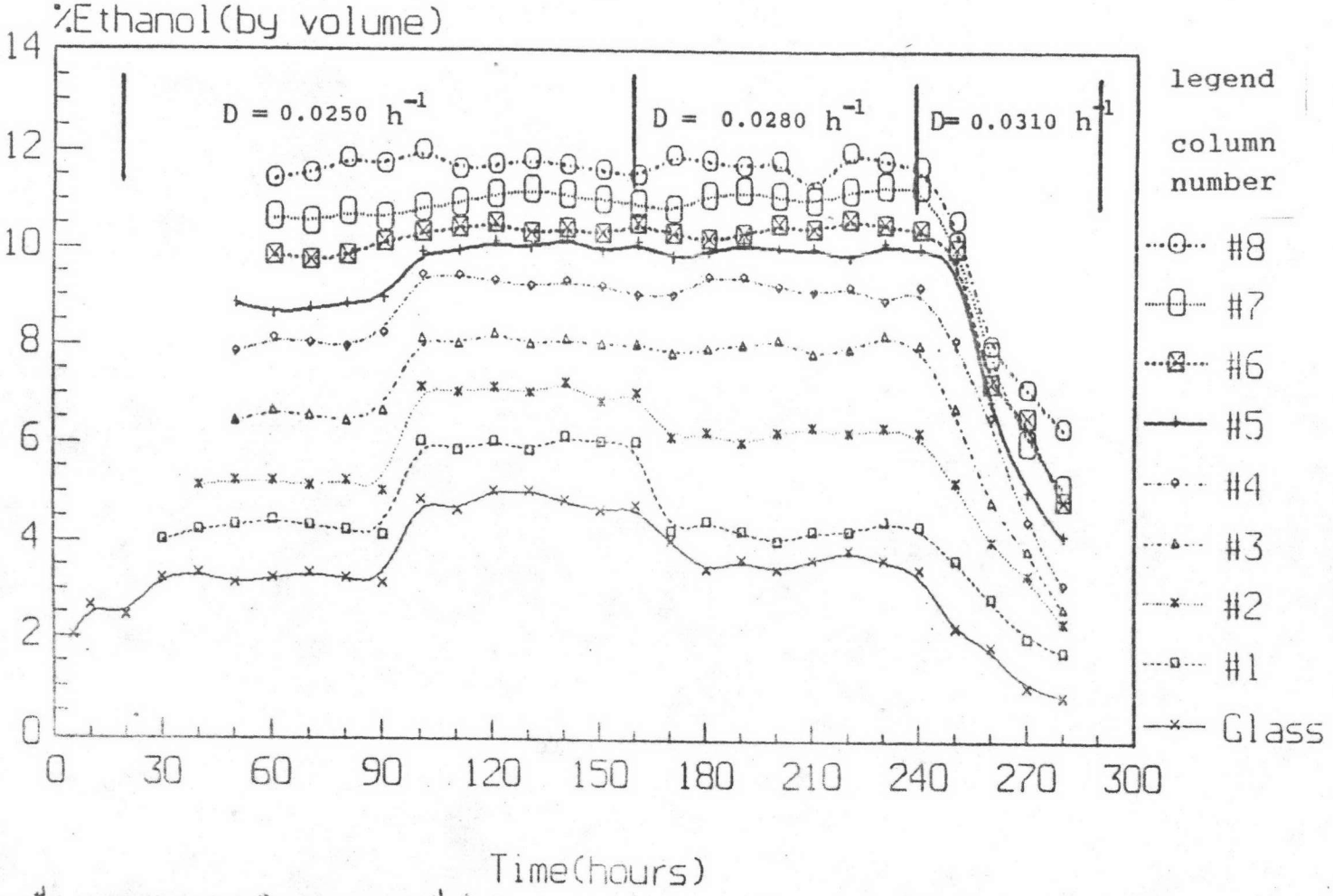


รูปที่ 4.9 แสดงความเข้มข้นของน้ำตาลที่ขึ้นกับเวลาในกระบวนการหมัก แบบคอลัมน์ต่อเนื่อง อัตราการเจือจาง 0.5 vvm 4 ชั่วโมงแรก จากนั้นลดเหลือ 0.04 - 0.05 vvm ทำให้ผลลัพธ์การทดลอง เริ่มปล่อย สารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 21 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของน้ำตาลในคอลัมน์ที่ 5 ด้วยอัตราส่วนการเจือจาง 0.3 ในช่วงที่ 91 - 280

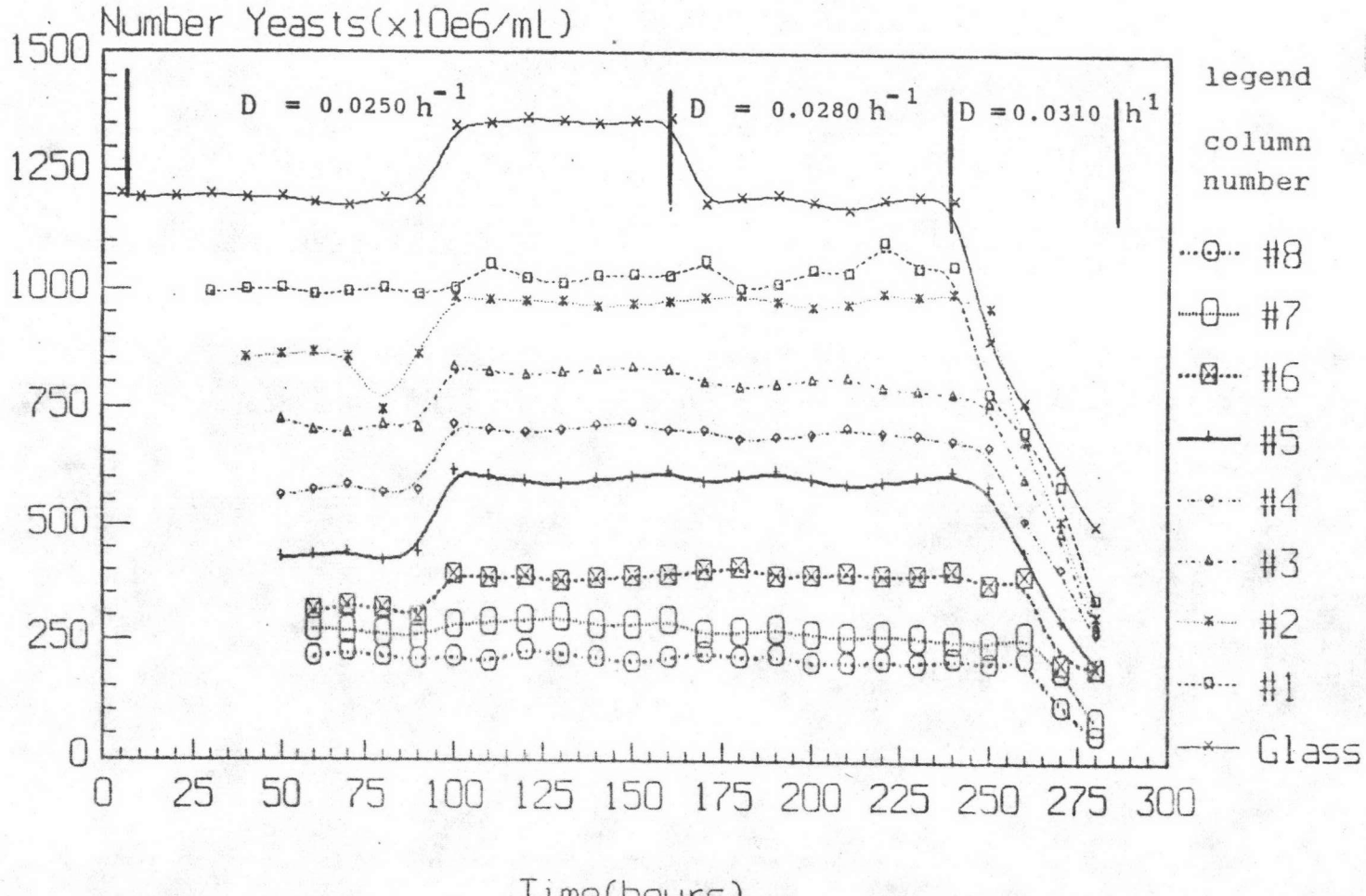


รูปที่ 4.7 แสดงปริมาณความเข้มข้นของเอทานอลภายในกระบวนการหมักแบบต่อเนื่องของยีสต์ชนิดตกตะกอน โดยการให้อากาศ 0.5 vvm 4 ชั่วโมงแรก จากนั้นลดเหลือ 0.04 - 0.06 vvm ตลอดการทดลอง เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 21 ชั่วโมง ด้วยอัตราส่วนการป้อนเข้าเป็น 0.3 ในช่วงเวลา 91 - 280 คอลัมน์ที่ 5

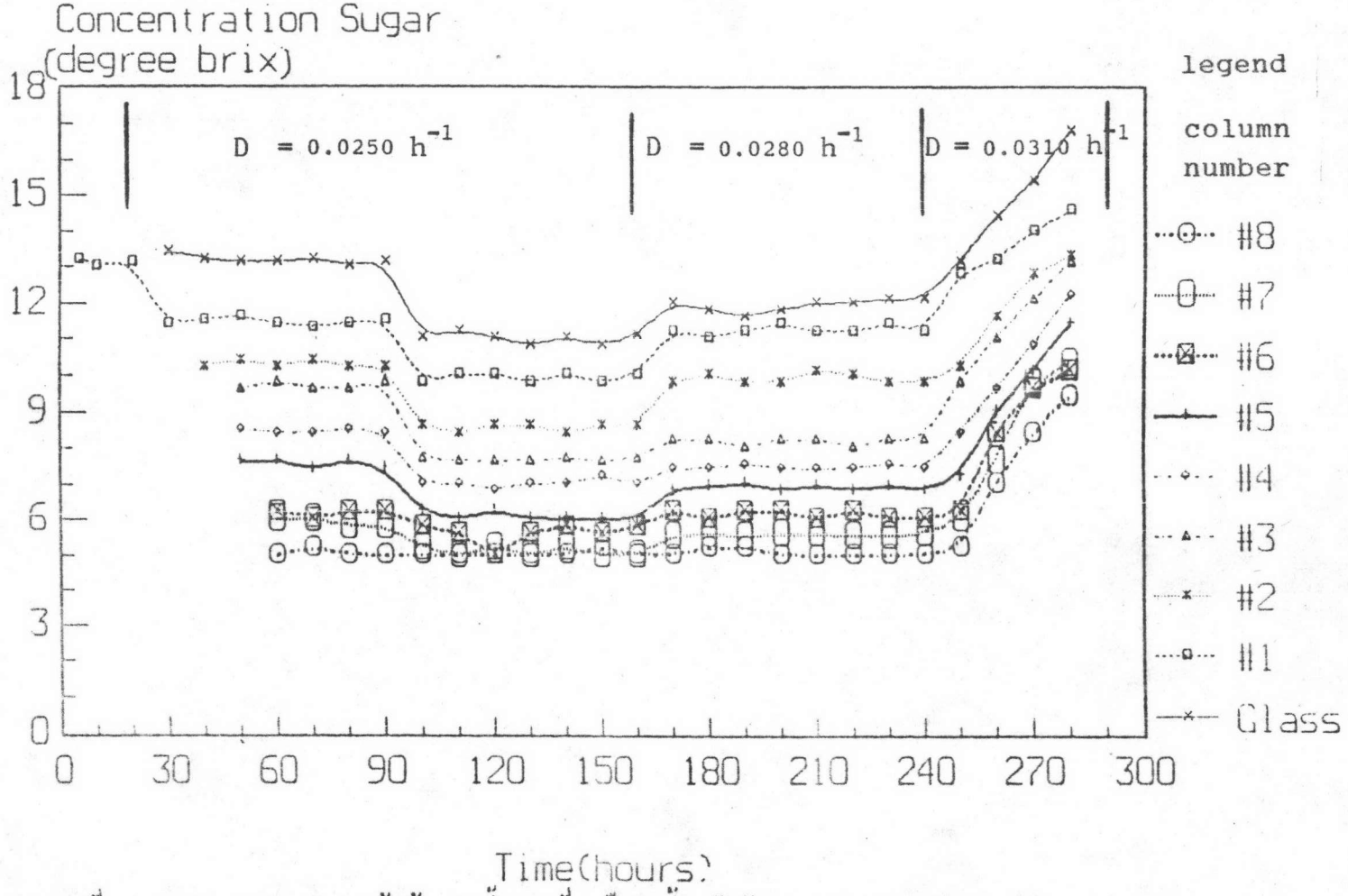
รูปที่ 4.10 - 4.12 แสดงข้อมูลการทดลองระบบหมักน้ำสัมประดิษฐ์เพื่อผลิตเอธานอล ในเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่องที่อัตราเจือจางต่าง ๆ โดยในช่วงแรกได้ควบคุมระบบภายใต้วิธีการเดินตังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1 ในชั่วโมงที่ 21 - 90 ได้ควบคุมระบบที่อัตราเจือจาง เท่ากับ 0.0250 ชั่วโมง$^{-1}$ พบว่า ระบบสามารถรักษาเสถียรภาพได้ดี ต่อมาชั่วโมงที่ 91 ถึงชั่วโมงที่ 160 ทำการดึงน้ำหมักจากคอลัมน์น้ำได้ออกจากคอลัมน์ที่ 6 (เซลยีสต์ที่ดึงกลับมาใช้เป็นเซลของคอลัมน์ที่ 6 ที่ไหลลัยมาเข้าคอลัมน์ต่างคอลัมน์ที่ 7) กลับไปรวมกับสารอาหารที่ป้อนเข้าคอลัมน์ให้ความเข้มข้นของน้ำตาลเหลือ 5 กรัมต่อลิตร ด้วยอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 0.3 พบว่า ระบบอยู่ในสภาวะเสถียร ได้ปริมาณเอธานอลที่ผลิต ร้อยละ 10 โดยปริมาตร กำลังการผลิตเอธานอล 2.88 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง (ตารางที่ ข.15 ในภาคผนวก ข) จำนวนเซลยีสต์ 1,300 ล้านเซลต่อมิลลิลิตร ความเข้มข้นน้ำตาลเหลือ 5 กรัมต่อลิตร หลังจากนั้นชั่วโมงที่ 161 - 240 เพิ่มอัตราการเจือจางเป็น 0.0280 ชั่วโมง$^{-1}$ พบว่า ระบบยังคงสามารถรักษาเสถียรภาพไว้ได้และมีประสิทธิภาพที่ระดับเดิม ทำให้ได้ผลผลิตมากขึ้นและเร็วขึ้น เนื่องมาจากปริมาณอาหารเข้าสู่ระบบสูงขึ้น ทำให้ได้เซลยีสต์เพิ่มสูงขึ้นและ ทำให้อัตราการผลิตเอธานอลสูงขึ้น แต่หลังจากชั่วโมงที่ 241 ถึง 280 ได้เพิ่มอัตราการเจือจางเป็น 0.0310 ชั่วโมง$^{-1}$ โดยอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับคงเดิม พบว่า ระบบไม่สามารถรักษาสภาวะเสถียรไว้ได้ คือ ประสิทธิภาพของระบบการหมักลดลงตลอดเวลา กล่าวคือ ปริมาณเอธานอลที่ผลิตได้ลดลงและจำนวนเซลลดลง ในขณะที่น้ำตาลสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเกิดสภาพ Wash out ขึ้นเอง ดังนั้นจากการศึกษาระบบครั้งนี้ อัตราเจือจางสูงสุดที่ระบบรับได้ คือ 0.0280 ชั่วโมง$^{-1}$



รูปที่ 4.10 แสดงปริมาณเอธานอลที่ผลิตกับเวลาในกระบวนการหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง อัตราการให้อากาศ 0.5 vvm 4 ชั่วโมงแรก จากนั้นลดเหลือ 0.04 - 0.06 vvm ตลอดการทดลอง เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 21 ชั่วโมง ทำการดึงเซลยีสต์ ของคอลัมน์ตัวที่ 6 ด้วยอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 0.3 ในชั่วโมงที่ 91 - 280

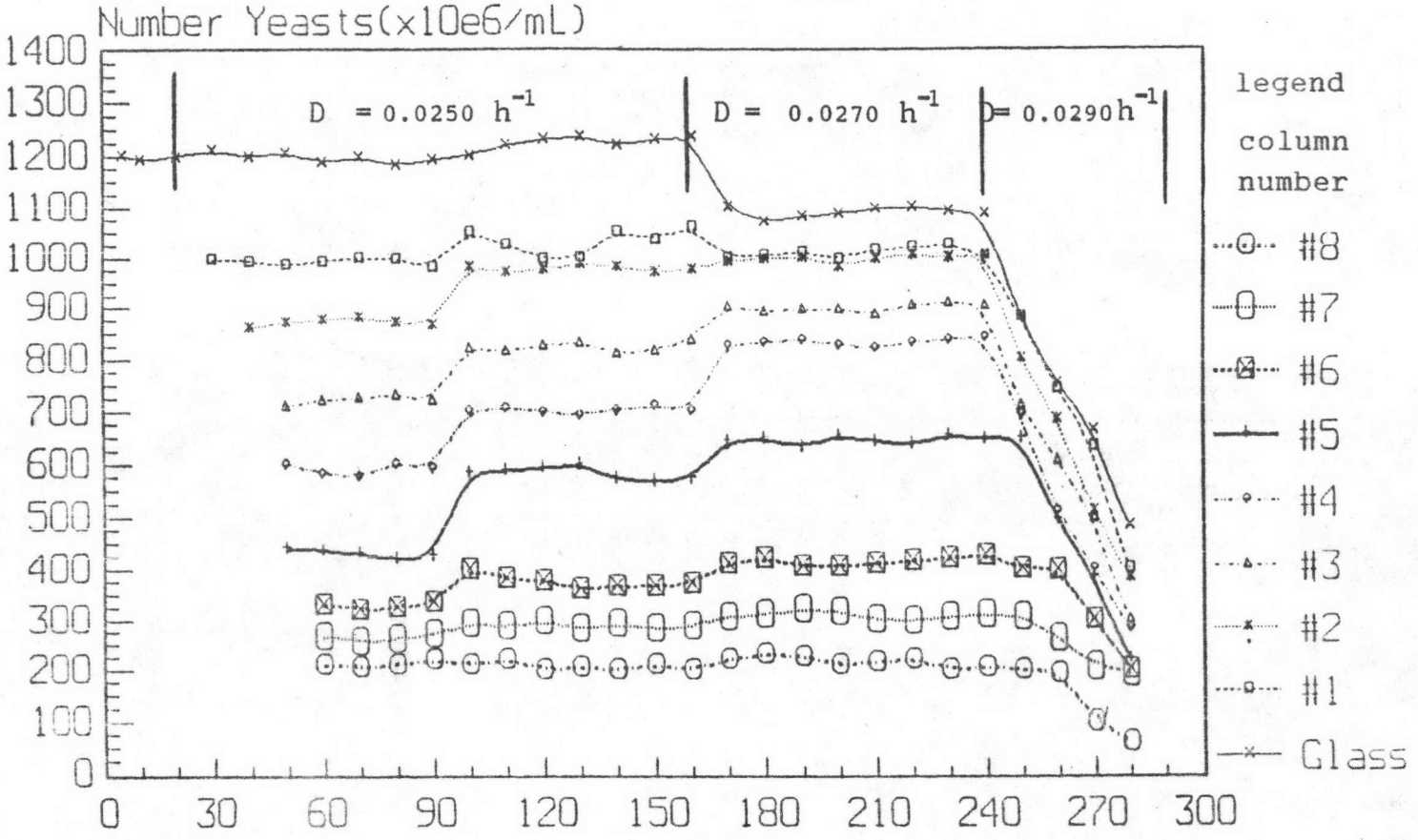


รูปที่ 4.11 แสดงจำนวนเซลยีสต์ที่นับได้กับเวลาในกระบวนการหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง อัตราการให้อากาศ 0.5 vvm 4 ชั่วโมงแรก จากนั้นลดเหลือ 0.04 - 0.06 vvm ตลอดการทดลอง เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 21 ชั่วโมง ทำการดึงเซลยีสต์ คอลัมน์ตัวที่ 6ด้วยอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 0.3 ในชั่วโมงที่ 91 - 280

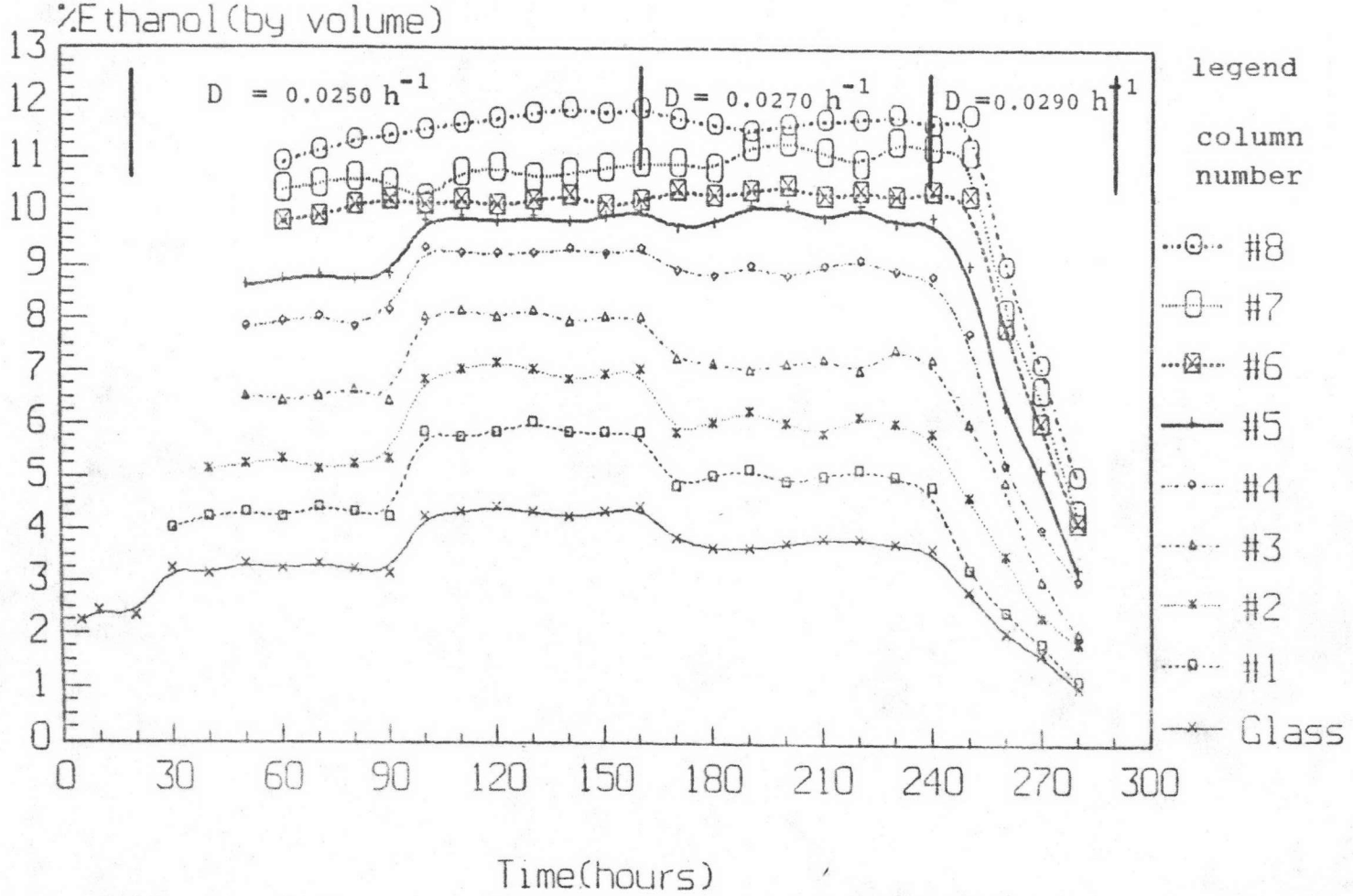


รูปที่ 4.12 แสดงความเข้มข้นของน้ำตาลที่เหลือในน้ำหมักกับเวลาในกระบวนการหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง อัตราการให้อากาศ 0.5 vvm 4 ชั่วโมงแรก จากนั้นลดเหลือ 0.04 - 0.06 vvm ตลอดการทดลอง เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 21 ชั่วโมง ท่าการดึงเซลยีสต์ ของคอลัมน์ตัวที่ 6 ด้วยอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 0.3 ในชั่วโมงที่ 91 - 280

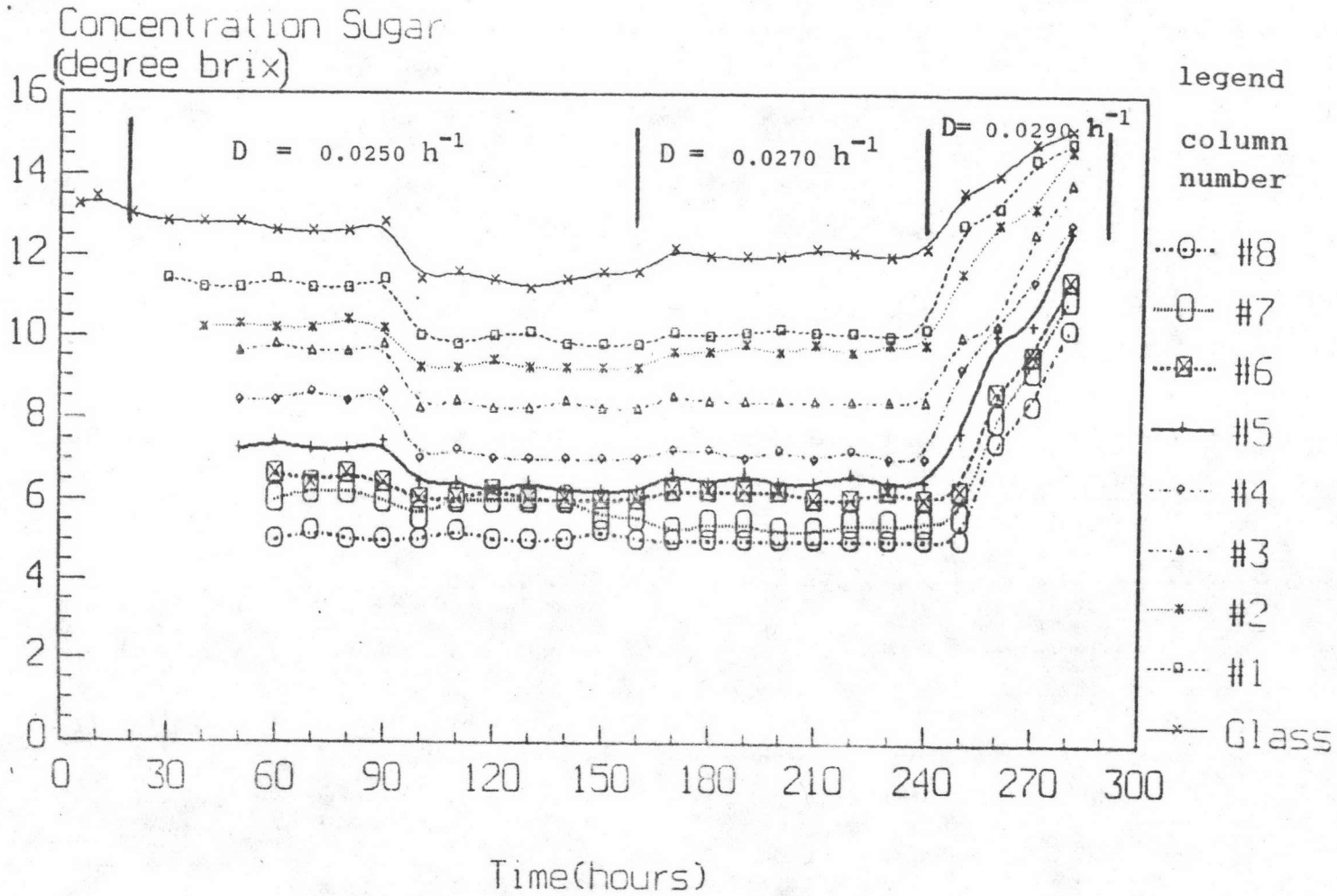
รูปที่ 4.13 - 4.15 แสดงข้อมูลการทดลองระบบหมักน้ำสับปะรดเพื่อผลิตเอธานอล โดยเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่องที่อัตราเจือจางต่างๆ ในช่วงแรกได้ควบคุมระบบภายใต้วิธีการเดิมดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1 โดยให้อัตราการเจือจางชั่วโมงที่ 21 ถึงชั่วโมงที่90 เท่ากับ 0.0250 ชั่วโมง$^{-1}$ ระบบสามารถรักษาสภาวะเสถียรภาพไว้ได้ ที่ระดับปริมาณเอธานอล ร้อยละ 11 โดยปริมาตร กำลังการผลิตเอธานอล 2.76 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง (ตารางข.19 ในภาคผนวก ข.) จำนวนเซลยีสต์ 1,100 ล้านเซลต่อมิลลิลิตร ความเข้มข้นสารละลายน้ำตาลที่เหลือ 5 องศาบริกซ์ จากนั้นชั่วโมงที่ 91 ถึงชั่วโมงที่ 160 ดึงน้ำหมักจากคอลัมน์ไม่ให้อากาศคอลัมน์ที่ 7 (เซลยีสต์ที่ดึงกลับมาใช้เป็นเซลของคอลัมน์ที่ 7 ที่ไหลล้นมาเข้าตอนล่างคอลัมน์ที่ 8) กลับไปรวมกับสารอาหารที่ป้อนเข้าคอลัมน์ให้อากาศ ด้วยอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 0.3 พบว่า ระบบรักษาสภาวะเสถียรไว้ได้ และผลิตเอธานอลได้เร็วขึ้น เพราะว่า ในระบบมีจำนวนเซลยีสต์เพิ่มขึ้นสามารถเปลี่ยนน้ำสับปะรดให้กลายเป็นเอธานอลได้เร็วขึ้น เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตวิธีหนึ่ง ต่อจากนั้นชั่วโมงที่ 161 จนถึงชั่วโมงที่ 240 เพิ่มอัตราการเจือจางเป็น 0.0270 ชั่วโมง$^{-1}$ ระบบมีประสิทธิภาพในการผลิตดีขึ้น สามารถผลิตปริมาณเอธานอลได้สูงขึ้น กำลังการผลิตเอธานอล 3.11 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง และใช้เวลาในการผลิตน้อยลง ทำให้ได้เอธานอลร้อยละ 10 -11 โดยปริมาตร แต่หลังจากชั่วโมงที่ 241 ถึงชั่วโมงที่ 280 เพิ่มอัตราการเจือจางเป็น 0.0290 ชั่วโมง$^{-1}$ ระบบเสียสมดุลไปโดยอัตราการผลิตเอธานอลลดลง กำลังการผลิตเอธานอลลดเหลือ 2.35 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง และเซลยีสต์จะถูกชะล้างออกไป และความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลจะสูงขึ้นเรื่อย ๆ ในที่สุด ระบบเสียสมดุลไปโดยสิ้นเชิง ถ้ายังคงควบคุมอัตราเจือจางนี้ต่อไป ภายใต้สภาวะการทดลองนี้ สามารถสรุปได้ว่า อัตราเจือจางสูงสุดที่ระบบรับได้ คือ 0.0270 ชั่วโมง$^{-1}$



รูปที่ 4.14 แสดงจำนวนเซลยีสต์ที่นับได้กับเวลาในกระบวนการหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่องอัตราการให้อากาศ 0.5 vvm 4 ชั่วโมงแรก จากนั้นลดเหลือ 0.04 - 0.06 vvm ตลอดการทดลอง เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 21 ชั่วโมง ทำการดึงเซลยีสต์ ของคอลัมน์ตัวที่ 7 ด้วยอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 0.3 ในชั่วโมงที่ 91 - 280

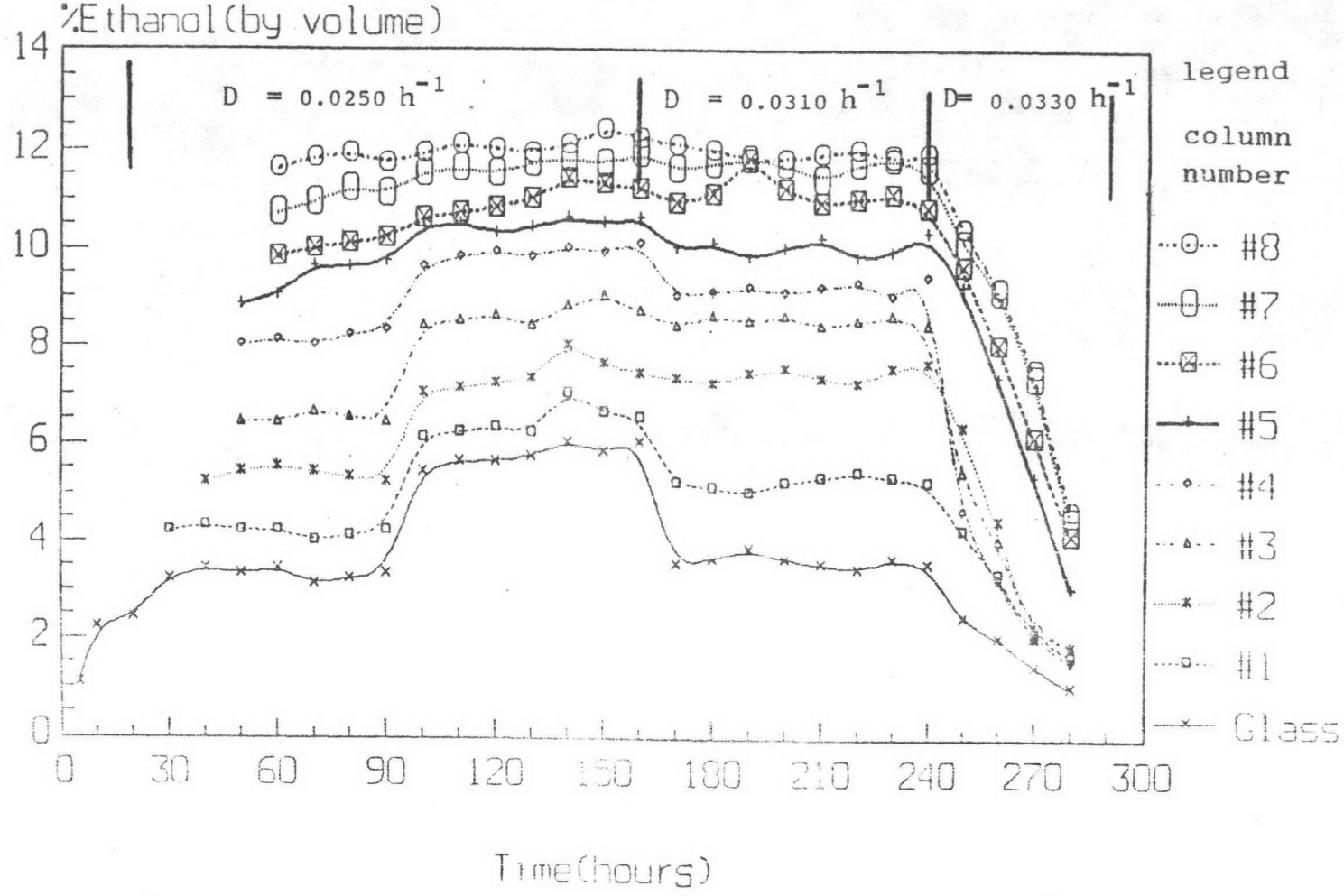


รูปที่ 4.13 แสดงปริมาณเอธานอลที่ผลิตกับเวลาในกระบวนการหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง อัตราการให้อากาศ 0.5 vvm 4 ชั่วโมงแรก จากนั้นลดเหลือ 0.04 - 0.06 vvm ตลอดการทดลอง เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 21 ชั่วโมง ทำการดึงเซลยีสต์ ของคอลัมน์ตัวที่ 7 ด้วยอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 0.3 ในชั่วโมงที่ 91 - 280

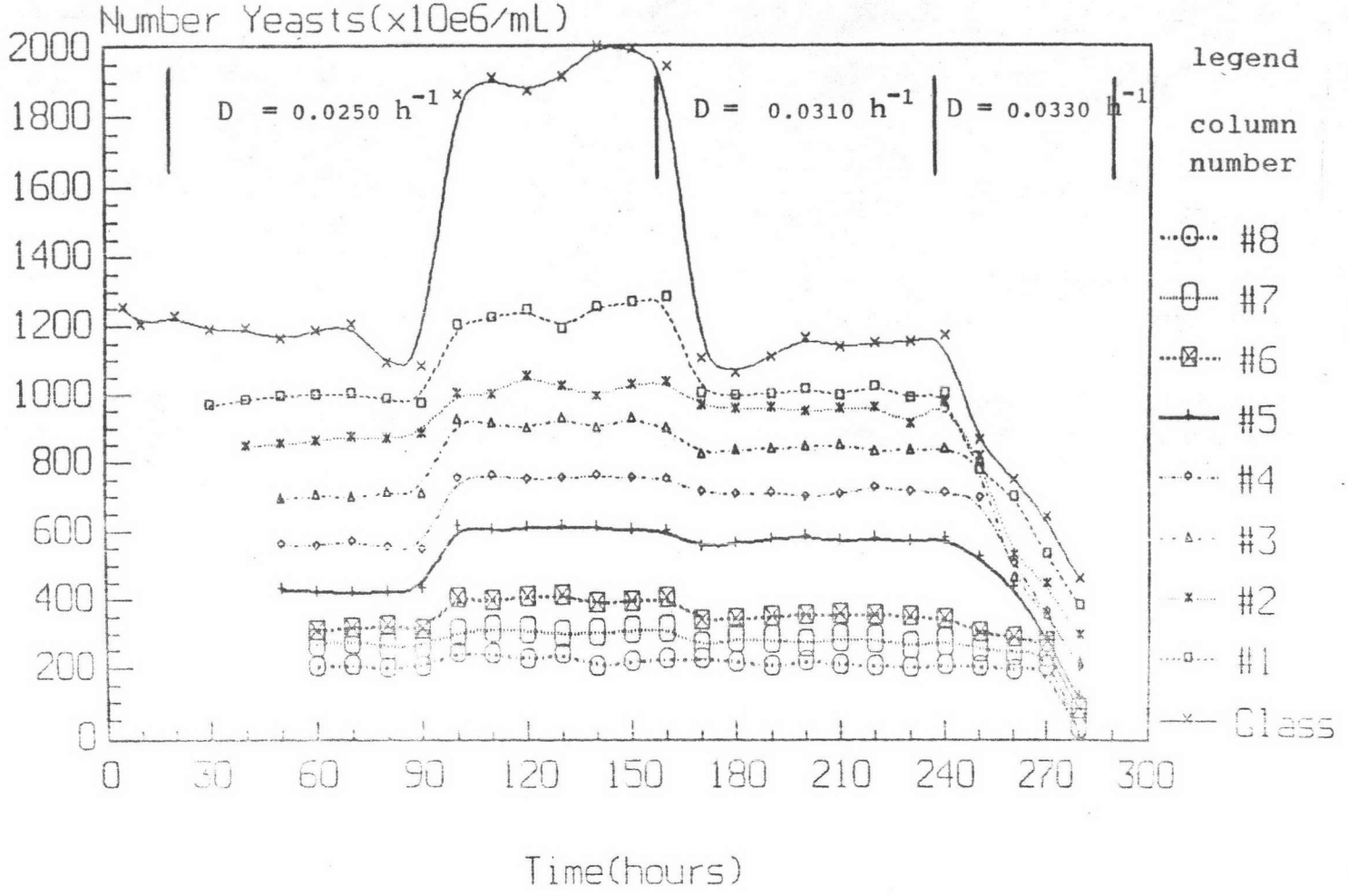


รูปที่ 4.15 แสดงความเข้มข้นของน้ำตาลที่เหลือในน้ำหมักกับเวลาในกระบวนการหมัก แบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง อัตราการให้อากาศ 0.5 vvm 4 ชั่วโมงแรก จากนั้นลดเหลือ 0.04 - 0.06 vvm ตลอดการทดลอง เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 21 ชั่วโมง ท่าการตึงเซลยีสต์ ของคอลัมน์ตัวที่ 7 ด้วยอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 0.3 ในชั่วโมงที่ 91 - 280

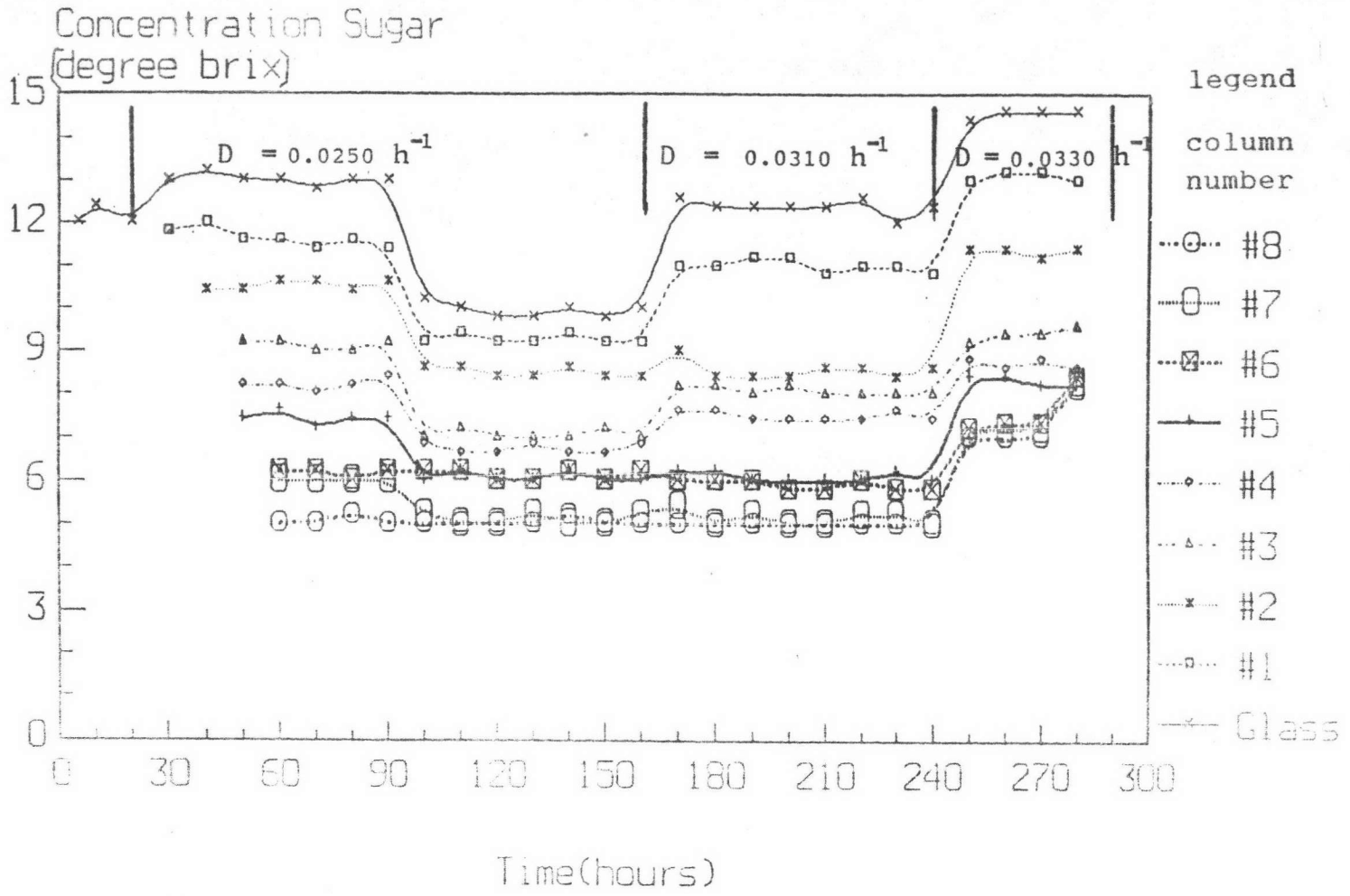
รูปที่ 4.16 – 4.18 แสดงข้อมูลการทดลองระบบหมักน้ำเสียประเภทเดือนผลิตเอธานอล ในเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง ที่อัตราเจือจางต่าง ๆ ควรเริ่มต้นระบบโดยวิธีการเช่นเดียวกับที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1 ในช่วงโมงที่ 21 ถึงช่วงโมงที่ 90 ได้ควบคุมอัตราเจือจางเป็น 0.0250 ชั่วโมง$^{-1}$ ระบบรักษาเสถียรภาพไว้ได้ ที่ปริมาณเอธานอล ร้อยละ 11 โดยปริมาตร กำลังการผลิตเอธานอล 2.90 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง (ตาราง ข.23 ในภาคผนวก ข) จำนวนเซลยีสต์ 1,100 ล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตร ความเข้มข้นสารละลายน้ำตาล 5 องศาบริกซ์ ต่อมาช่วงโมงที่ 91 ถึงช่วงโมงที่ 160 ได้ดึงน้ำหมักจากคอลัมน์ไม่ให้อากาศคอลัมน์ที่ 5 (เซลยีสต์ที่ดึงมาใช้เป็นเซลของคอลัมน์ที่ [illegible] ที่ไหลล้นมาเข้าของคอลัมน์ที่ 6) กลับไปรวมกับสารอาหารที่ป้อนเข้าคอลัมน์ให้อากาศ ด้วยอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 0.5 โดยใช้อัตราการเจือจาง 0.0250 ชั่วโมง$^{-1}$ จะเห็นว่าระบบสามารถรักษาเสถียรภาพไว้ได้ โดยมีจำนวนเซลยีสต์สูงถึง 1,800 ล้านเซลต่อมิลลิลิตร ได้ปริมาณเอธานอลร้อยละ 11 โดยปริมาตร มีกำลังการผลิตเอธานอล 2.98 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่สภาวะการควบคุมเหมือนกัน แต่มีอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 0.3 พบว่า ที่อัตราส่วนป้อนย้อนกลับสูงขึ้น ระบบมีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยเปรียบเทียบจากค่ากำลังผลิตเอธานอล ทั้งนี้เนื่องจากที่อัตราป้อนย้อนกลับสูงขึ้น ทำให้ระบบมีเซลยีสต์สูงขึ้น หลังจากนั้นช่วงโมงที่ 161 ถึง 240 เพิ่มอัตราการเจือจางเป็น 0.0310 ชั่วโมง$^{-1}$ ระบบก็ยังสามารถรักษาสภาวะเสถียรไว้ได้ เป็นการเพิ่มผลผลิตขึ้นกำลังการผลิตเอธานอลสูงถึง 3.67 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมของยีสต์ที่มีสารอาหารที่สมบูรณ์มากขึ้น (มีทั้งสารอาหารและอาหารเสริม) ทำให้ยีสต์สามารถเปลี่ยนน้ำสับปะรดซึ่งใช้เป็นสารอาหารให้กลายเป็นเอธานอลได้มากขึ้น ในการทดลองนี้ระบบผลิตเอธานอลซึ่งมีปริมาณร้อยละ 10 -11 โดยปริมาตร (เริ่มผลิตจั้งแต่คอลัมน์ไม่ให้อากาศที่ 5) หลังจากชั่วโมงที่ 241 จนสิ้นสุดการทดลองชั่วโมงที่ 280 ได้เพิ่มอัตราการเจือจางเป็น 0.0330 ชั่วโมง$^{-1}$ พบว่า ระบบไม่สามารถรักษาเสถียรภาพในระดับเดิมได้ ปริมาณการผลิตเอธานอลและจำนวนเซลยีสต์เริ่มลดลง ความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลเหลือมากขึ้นเช่นกันดังได้กล่าวมาแล้ว ระบบได้สูญเสียเสถียรภาพอันเนื่องจากการสูญเสียเซลยีสต์ (Wash out) ภายใต้สภาวะการทดลองนี้ อาจกล่าวได้ว่า อัตราเจือจางสูงสุดที่ระบบรักษาได้คือ 0.0310 ชั่วโมง$^{-1}$



รูปที่ 4.16 แสดงปริมาณเอธานอลที่ผลิตกับเวลาในกระบวนการหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่องอัตราการให้อากาศ 0.5 vvm 4 ชั่วโมงแรก จากนั้นลดเหลือ 0.04 - 0.06 vvm ตลอดการทดลอง เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 21 ชั่วโมง ทำการดึงเซลยีสต์ ของคอลัมน์ตัวที่ 5 ด้วยอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 0.5 ในชั่วโมงที่ 91 - 280

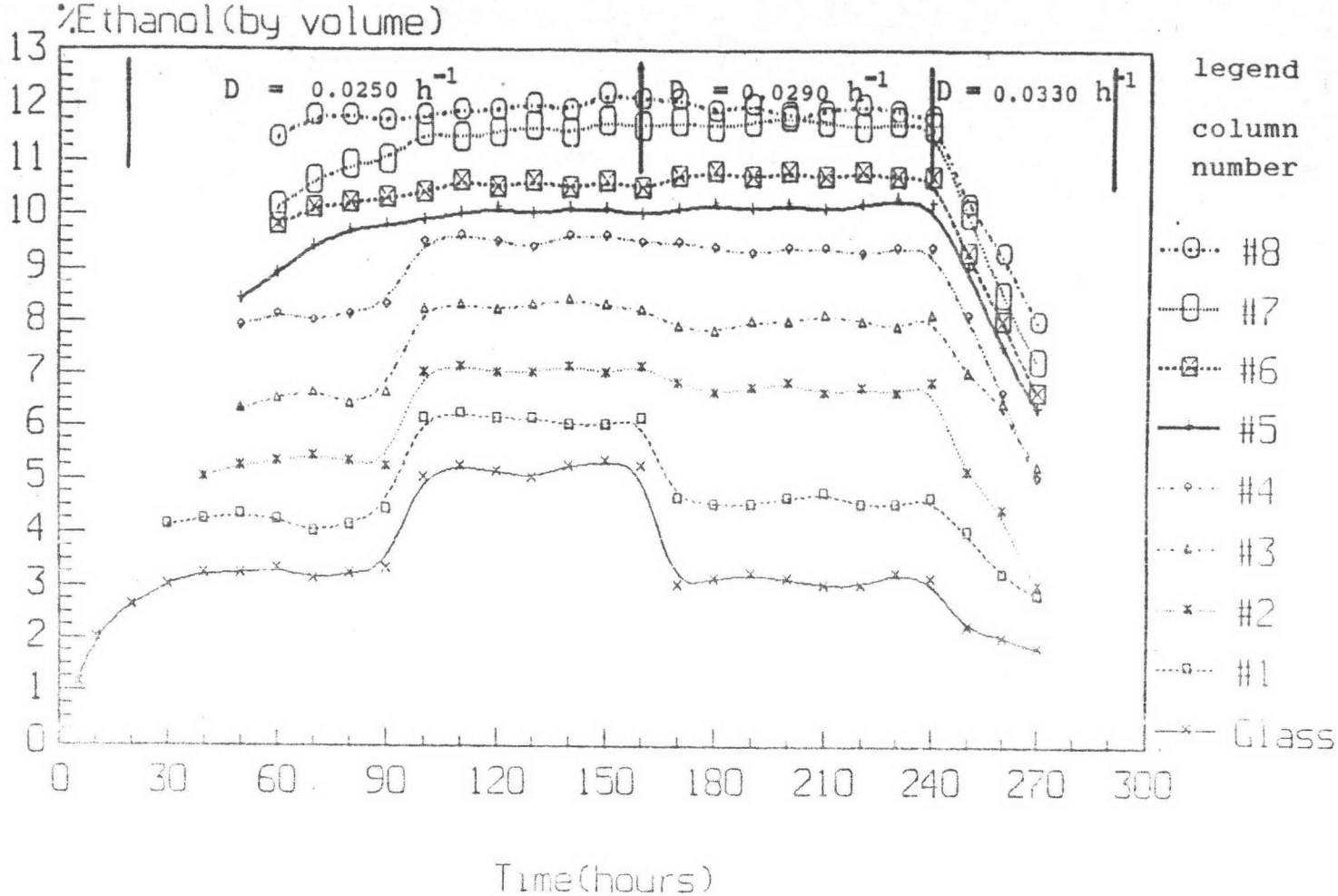


รูปที่ 4.17 แสดงจำนวนเซลยีสต์ที่นับได้กับเวลา ในกระบวนการหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่องอัตราการให้อากาศ 0.5 vvm 4 ชั่วโมงแรก จากนั้นลดเหลือ 0.04 - 0.06 vvm ตลอดการทดลอง เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 21 ชั่วโมง ทำการดึงเซลยีสต์ ของคอลัมน์ตัวที่ 5 ด้วยอัตราส่วนการไหลย้อนกลับ 0.5 ในชั่วโมงที่ 91 -280

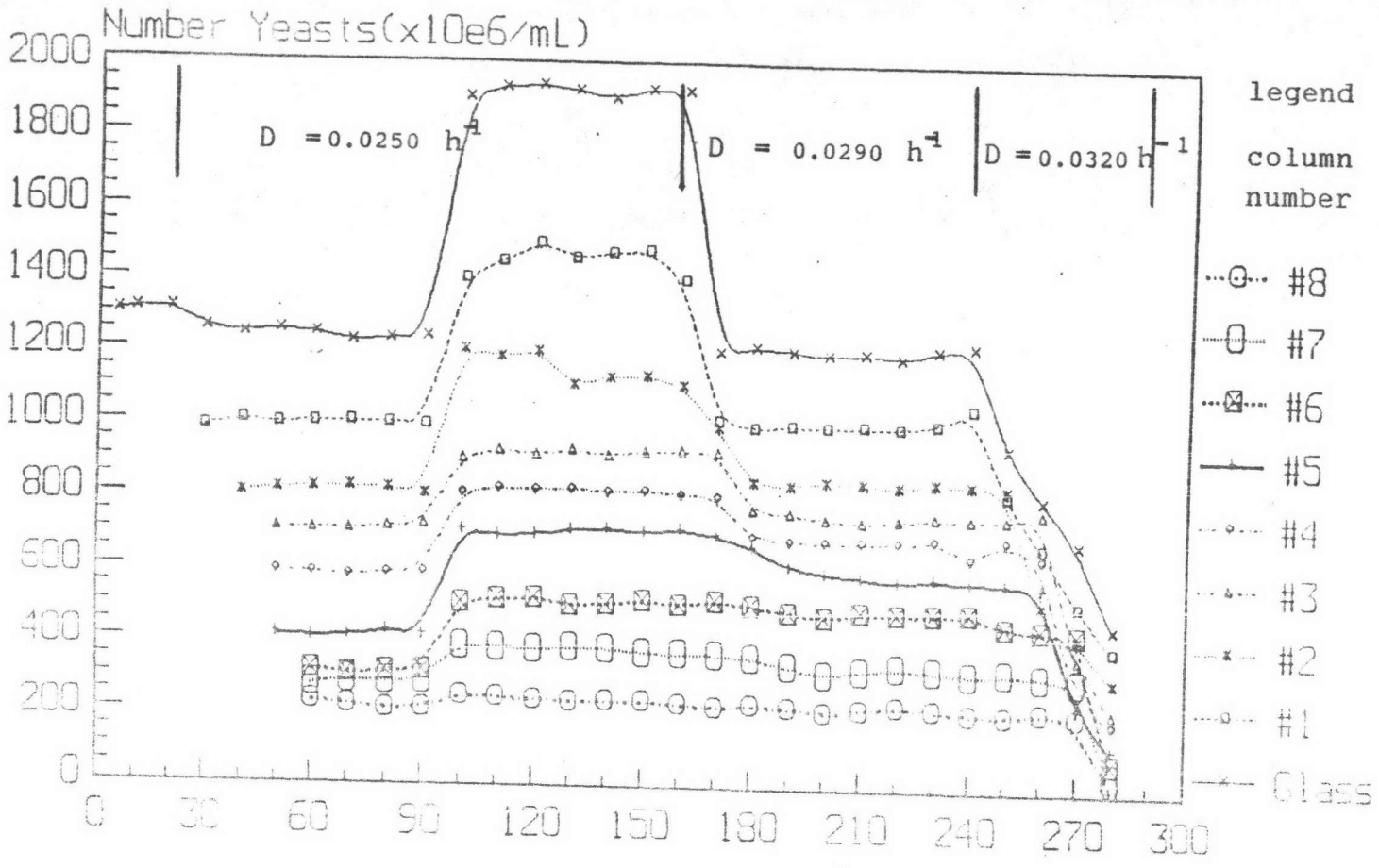


รูปที่ 4.18 แสดงความเข้มข้นของน้ำตาลที่เหลือในน้ำหมักกับเวลาในกระบวนการหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง อัตราการให้อากาศ 0.5 vvm 4 ชั่วโมงแรก จากนั้นลดเหลือ 0.04 - 0.06 vvm ตลอดการทดลอง เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 21 ชั่วโมง ทำการดึงเซลยีสต์ของคอลัมน์ตัวที่ 5 ด้วยอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 0.5 ในชั่วโมงที่ 91 - 280

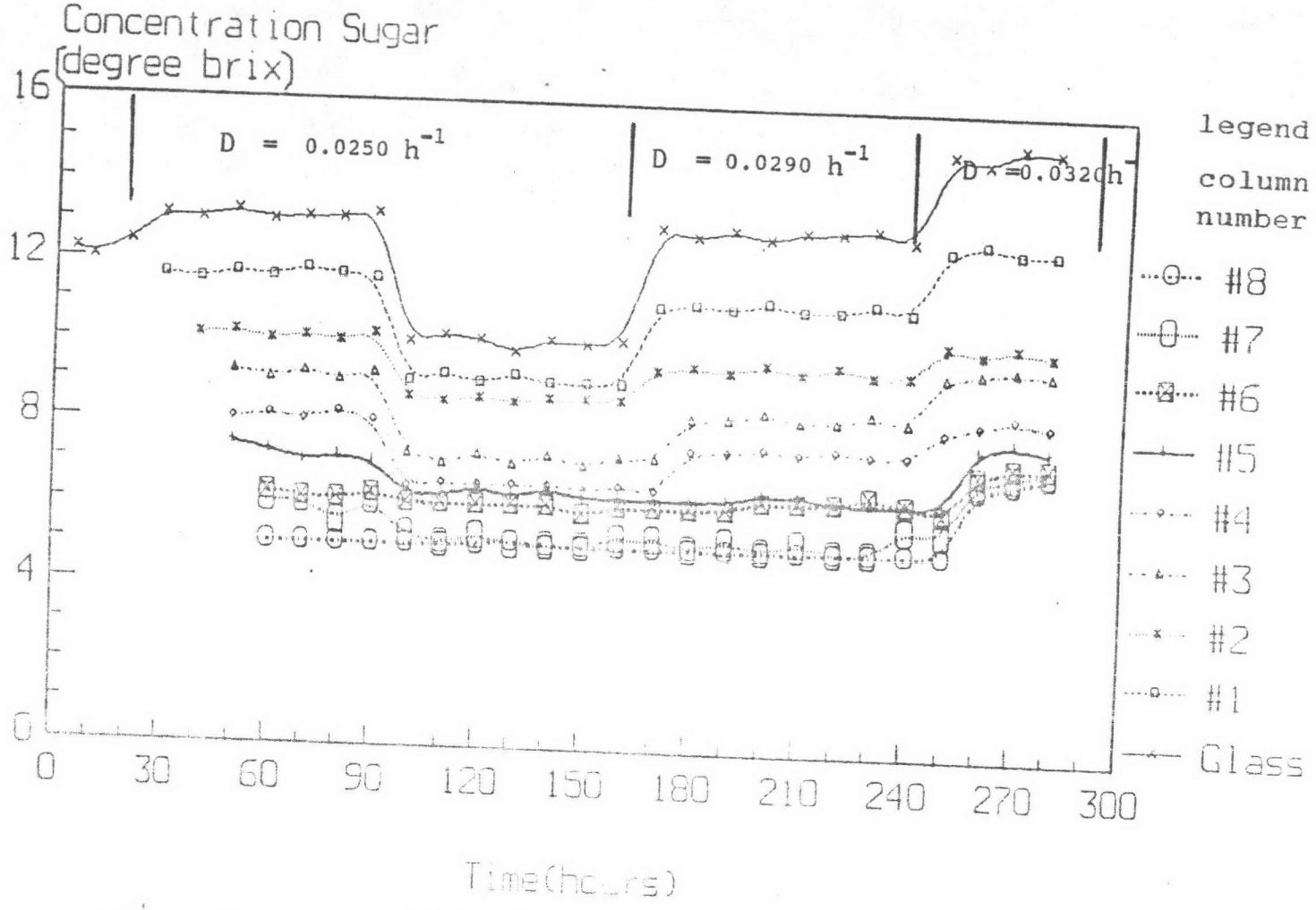
รูปที่ 4.19 - 4.21 แสดงข้อมูลการทดลองระบบหมักน้ำเสียประจำเพื่อผลิตเอธานอล **ในเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อ**เนื่องที่อัตราเจือจางต่าง ๆ [illegible] **สภาวะ**เช่นเดิมดังได้กล่าวมาแล้วในข้อ 4.1 ในช่วงชั่วโมงที่ 1 ถึง 90 ได้ควบคุมอัตรา **เจือจาง** เท่ากับ 0.0250 ชั่วโมง$^{-1}$ ระบบสามารถรักษาเสถียรภาพไว้ได้ และเมื่อ **ชั่วโมงที่** 91 ถึง 160 ได้ดึงน้ำหมักจากคอลัมน์ที่ 6 (เซลล์สลัดที่ **ดึงกลับมาใช้**เป็นเซลของคอลัมน์ที่ 6 ที่ไหลลับมาเข้าคอลัมน์ที่ 7) กลับไปรวมกับ **สารอาหารที่ป้อน**เข้าในคอลัมน์ให้อากาศ ด้วยอัตราส่วนการป้อนป้อนกลับ 0.5 อัตราการ **เจือจางคงเดิม** พบว่า ระบบอยู่ในสภาวะเสถียร ปริมาณเอธานอลร้อยละ 11 โดยปริมาตร **กำลังการผลิต**เอธานอล 2.93 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง (ตาราง ข.27 ในภาคผนวก ข) **มีจำนวน**เซลล์สลัดสูงถึง 1,900 ล้านเซลต่อมิลลิลิตร และมีความเข้มข้นของสารละลาย **น้ำตาล**เหลือ 5 องศาบริกซ์ ต่อมาชั่วโมงที่ 161 จนถึงชั่วโมงที่ 240 เพิ่มอัตราการ **เจือจาง**เป็น 0.0290 ชั่วโมง$^{-1}$ ระบบก็ยังสามารถรักษาสภาวะเสถียรภาพไว้ได้และสามารถ **ผลิต**เอธานอลที่มีปริมาณร้อยละ 11 โดยปริมาตร และมีกำลังผลิตเอธานอลสูงขึ้น จากนั้น **ชั่วโมงที่** 241 ถึง 280 ได้เพิ่มอัตราเจือจางเป็น 0.0330 ชั่วโมง$^{-1}$ พบว่า ระบบไม่ **สามารถรักษา**เสถียรภาพไว้ได้ เนื่องจากอัตราการเจือจางที่เพิ่มขึ้นสูงกว่าอัตราการเจริญ **เติบโตจำเพาะ** ทำให้เซลล์สลัดถูกชะล้างออกไป จนระบบล้มเหลวไปในที่สุด ถ้าระบบยัง คงควบคุมที่ค่าอัตราเจือจางนี้ในระยะยาวนาน [illegible] จากผลการทดลองนี้จะเห็นได้ว่า ระบบ **สามารถผลิต**เอธานอลได้สูงสุดที่อัตราเจือจางสูงสุด คือ 0.0290 ชั่วโมง$^{-1}$



รูปที่ 4.19 แสดงปริมาณเอธานอลที่ผลิตกับเวลาในกระบวนการหมักแบบคอลัมน์ ชนิดต่อเนื่อง อัตราการให้อากาศ 0.5 vvm 4 ชั่วโมงแรก จากนั้นลดเหลือ 0.04 - 0.06 vvm ตลอดการทดลอง เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 21 ชั่วโมง ทำการดึงเซลยีสต์ ของคอลัมน์ตัวที่ 6 ด้วยอัตราส่วนการไหลย้อนกลับ 0.5 ในชั่วโมงที่ 91 - 280



รูปที่ 4.38 แสดงจำนวนเซลยีสต์ที่มีชีวิตกับเวลาในกระบวนการหมักแบบคอลัมน์ ชนิดต่อเนื่องเมื่อมีการให้อากาศ 0.5 vvm 4 ชั่วโมงแรก จากนั้นลดเหลือ 0.04 - 0.06 vvm ตลอดการทดลอง เริ่มป้อนสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 21 ชั่วโมง ทำการดึงเซลยีสต์ของคอลัมน์ของคอลัมน์ถังที่ 6 ด้วยอัตราส่วนการไหลย้อนกลับ 0.5 ในชั่วโมงที่ 91 - 280



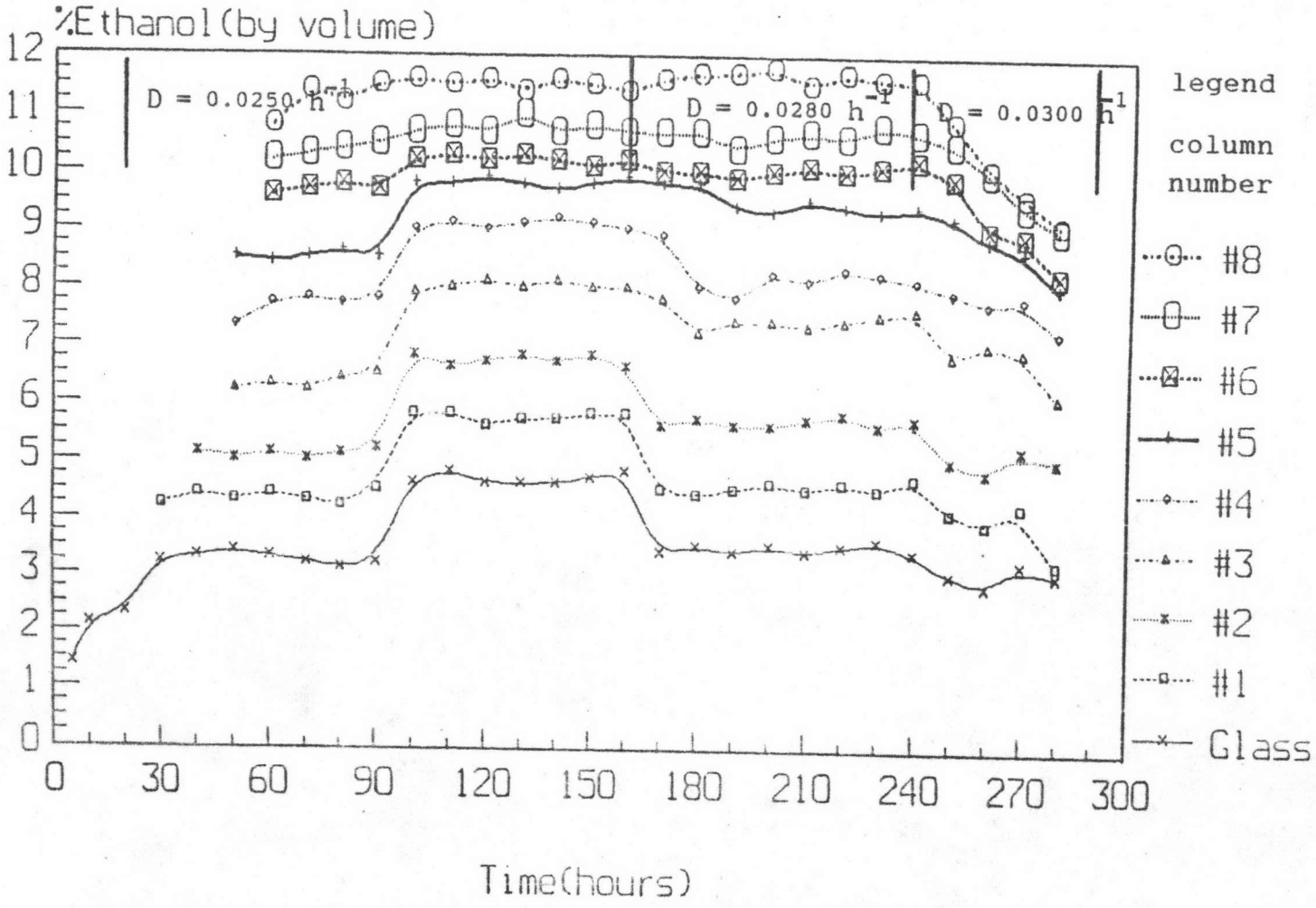
รูปที่ 4.21 แสดงความเข้มข้นของน้ำตาลที่เหลือในน้ำหมักกับเวลาในกระบวนการหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง มีการให้อากาศ 0.5 vvm 4 ชั่วโมงแรก จากนั้นลดเหลือ 0.04 - 0.06 vvm ตลอดการทดลอง เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 21 ชั่วโมง ทำการดึงเซลล์ยีสต์คอลัมน์ตัวที่ 6 ด้วยอัตราส่วนการไหลย้อนกลับ 0.5 ในชั่วโมงที่ 91 - 280

รูปที่ 4.22 - 4.24 แสดงข้อมูลการทดลองระบบหมักน้ำสับปะรดเพื่อผลิตเอธานอลโดยเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง ที่อัตราเจือจางต่างๆ โดยใช้สภาวะดังที่ได้กล่าวมาแล้วในเช่นเดียวกับข้อ 4.1 ในชั่วโมงที่ 21ถึง 90 ได้ควบคุมอัตราการเจือจาง 0.0250 ชั่วโมง$^{-1}$ ระบบรักษาสภาวะเสถียรภาพ ที่ระดับปริมาณเอธานอล ร้อยละ 10 - 11 โดยปริมาตร กำลังการผลิตเอธานอล 2.81 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง (ตาราง ข.31 ในภาคผนวก ข.) จำนวนเซลยีสต์ 1,200 ล้านเซลต่อมิลลิลิตร ความเข้มข้นสารละลายน้ำตาล 5 องศาบริกซ์ จากนั้นชั่วโมงที่ 91 จนถึงชั่วโมงที่ 160 ทำการดึงน้ำหมักคอลัมน์ไม่ให้อากาศคอลัมน์ที่ 7 (เซลยีสต์ที่ดึงกลับมาใช้เป็นเซลของคอลัมน์ที่ 7 ที่ไหลล้นมาเข้าตอนล่างคอลัมน์ที่ 8) กลับไปรวมกับสารอาหารที่ป้อนเข้าคอลัมน์ให้อากาศ ด้วยอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 0.5 จะได้ว่าระบบยังอยู่ในสภาวะเสถียร ต่อมาชั่วโมงที่ 161 ถึง 240 เพิ่มอัตราการเจือจาง 0.0280 ชั่วโมง$^{-1}$ แล้วระบบยังคงสามารถรักษาสภาวะเสถียรไว้ได้ที่ระดับเดิม และสามารถผลิตปริมาณเอธานอลได้ร้อยละ 10 - 11 โดยปริมาตร และมีค่ากำลังผลิตเอธานอลสูงขึ้น หลังจากชั่วโมงที่ 241 จนสิ้นสุดการทดลองชั่วโมงที่ 280 ได้เพิ่มอัตราการเจือจางเป็น 0.0300 ชั่วโมง$^{-1}$ พบว่าระบบไม่สามารถรักษาสภาวะเสถียรไว้ได้ ภายใต้สภาวะการทดลองนี้ สรุปได้ว่าอัตราเจือจางสูงสุดที่ระบบรับได้ คือ 0.0280 ชั่วโมง$^{-1}$

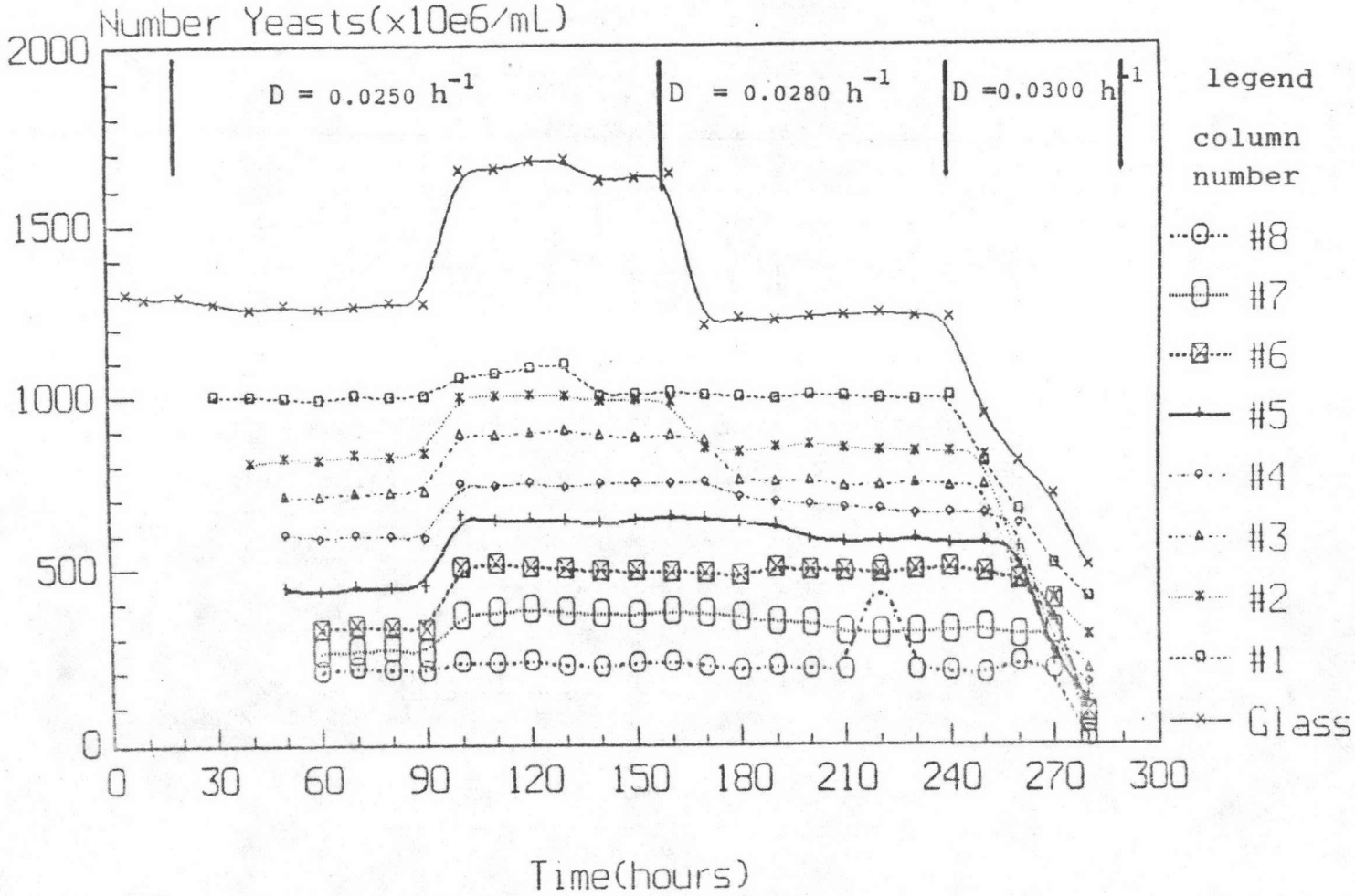
จากผลการทดลองการนำน้ำหมักย้อนกลับ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบหมักเอธานอลโดยนำน้ำหมักจากคอลัมน์ต่าง ๆและที่อัตราย้อนกลับต่าง ๆ ดังได้กล่าวมาแล้วในแต่ละสภาวะการทดลองได้สรุปอัตราเจือจางสูงสุดที่ระบบรับได้ เพื่อให้สามารถสรุปสภาวะที่เหมาะสมต่าง ๆ ในการการควบคุมระบบหมักเอธานอลต่อเนื่องแบบนำเซลยีสต์กลับมาใช้ จึงได้รวมรวมผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งแสดงประสิทธิภาพการทำงานของระบบที่การนำน้ำหมักจากคอลัมน์ 5,6 และ7 ที่อัตราส่วนป้อนย้อนกลับ 0.3 และ 0.5 และที่อัตราเจือจางสูงสุด โดยสามารถสรุปได้ว่า การนำน้ำหมักจากคอลัมน์ที่ 5 ให้ประสิทธิภาพสูงสุด และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนป้อนย้อนกลับจาก 0.3 และ 0.5 พบว่า ประสิทธิภาพการผลิตเอธานอลสูงขึ้น ดังนั้นจึงกล่าวสรุปได้ว่า การเพิ่มประสิทธิภาพระบบหมักเอธานอล ควรนำน้ำหมักจากคอลัมน์ 5 ป้อนย้อนกลับที่อัตราส่วน 0.5 ระบบจะมีอัตราเจือจางสูงสุด 0.0310 ชั่วโมง$^{-1}$ สามารถผลิตเอธานอลได้ 48 ลิตรต่อวัน มีอัตราการผลิตเอธานอลสูงถึง 3.67 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง และค่าประสิทธิภาพการสร้างเอธานอลสูง 0.91 กรัมต่อกรัมน้ำตาลที่ถูกใช้

ตารางที่ 4.3 สรุปผลการนำเซลยีสต์จากผลผลิตกลับมาใช้ในกระบวนการหมักแบบต่อเนื่อง

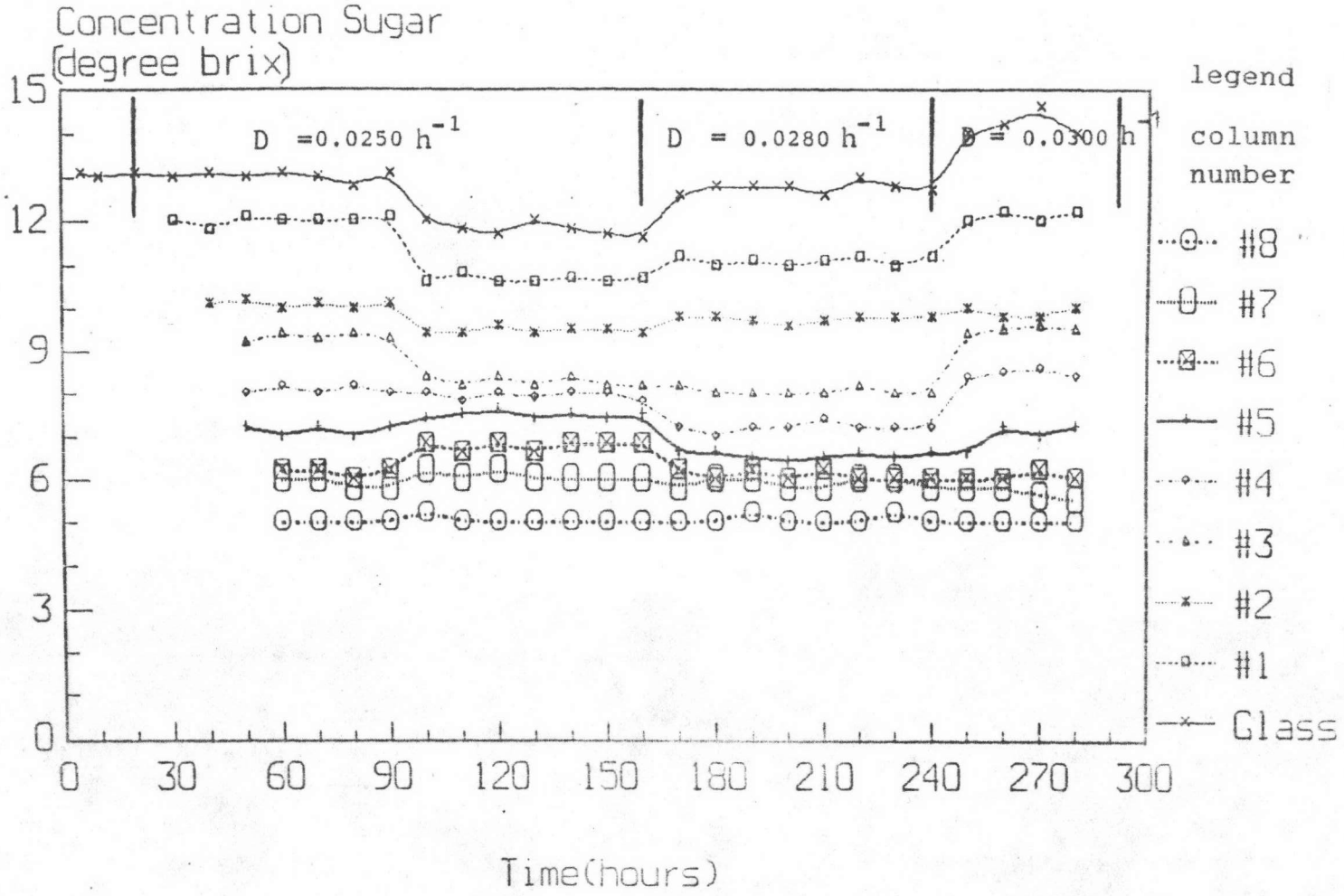
คอลัมน์ตัวที่	อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ	อัตราการเจือจางเหมาะสมสูงสุด ($ชั่วโมง^{-1}$)	ผลิตเอธานอล (ลิตร/วัน)	ได้เอธานอลออกมา (กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง)	ประสิทธิภาพการสร้างเอธานอล (กรัมเอธานอล/กรัมน้ำตาลที่ถูกใช้)
5	0.3	0.0300	46	3.48	0.89
6		0.0280	43.2	3.25	0.89
7		0.0270	42	3.11	0.88
5	0.5	0.0310	48	3.67	0.91
6		0.0290	45	3.40	0.90
7		0.0280	44	3.22	0.88



รูปที่ 4.22 แสดงปริมาณเอธานอลที่ผลิตกับเวลาในกระบวนการหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง อัตราการให้อากาศ 0.5 vvm 4 ชั่วโมงแรก จากนั้นลดเหลือ 0.04 - 0.06 vvm ตลอดการทดลอง เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 21 ชั่วโมง ทำการดึงเซลยีสต์ ของคอลัมน์ตัวที่ 4 ด้วยอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 0.5 ในชั่วโมงที่ 91 - 280



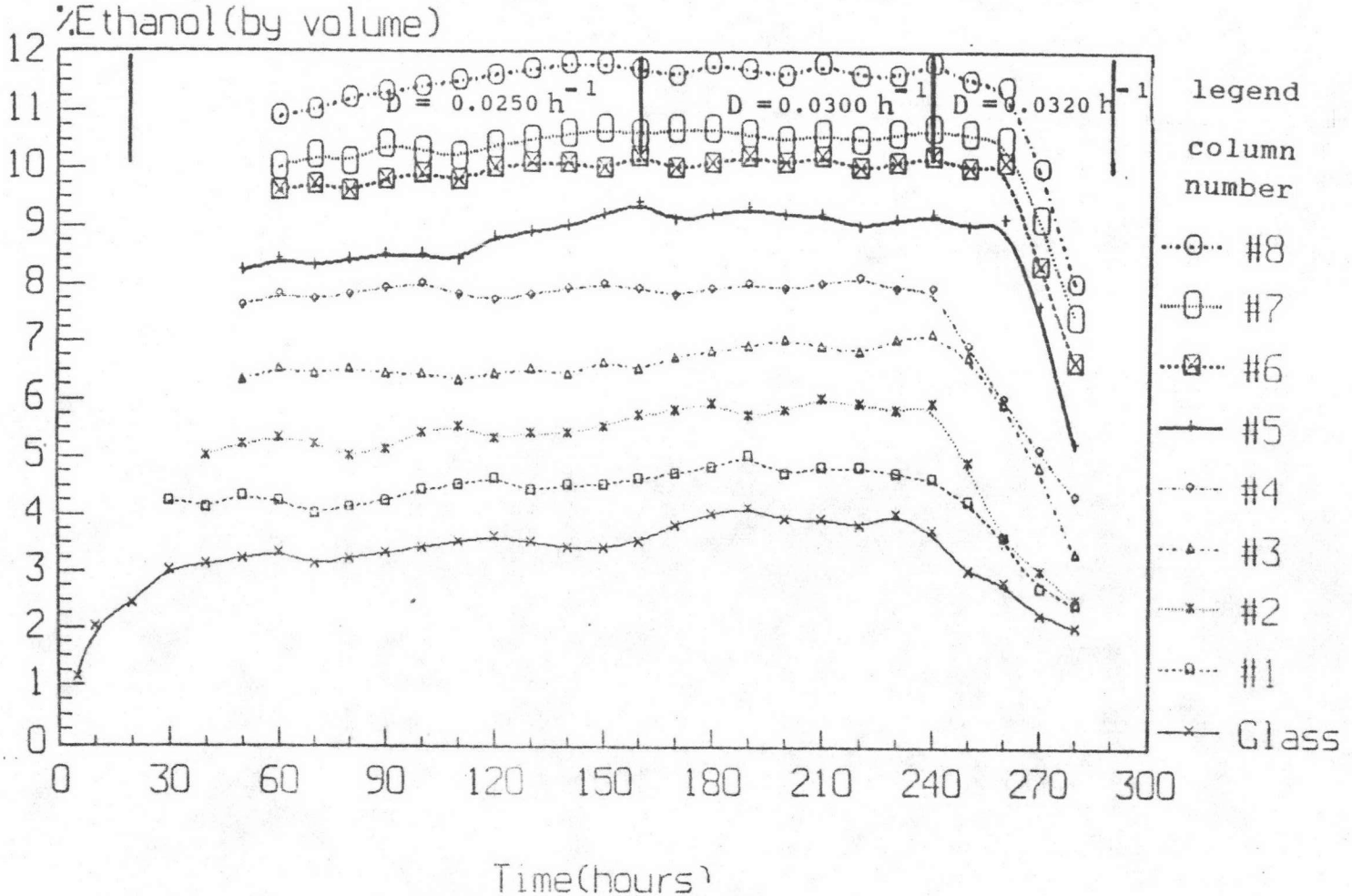
รูปที่ 4.23 แสดงจำนวนเซลยีสต์ที่มีชีวิตกับเวลาในกระบวนการหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง อัตราการให้อากาศ 0.5 vvm 4 ชั่วโมงแรก จากนั้นลดเหลือ 0.04 - 0.06 ตลอดการทดลอง เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 21 ชั่วโมง ทำการดึงเซลยีสต์ ของคอลัมน์ตัวที่ 7 ด้วยอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 0.5 ในชั่วโมงที่ 91 - 280



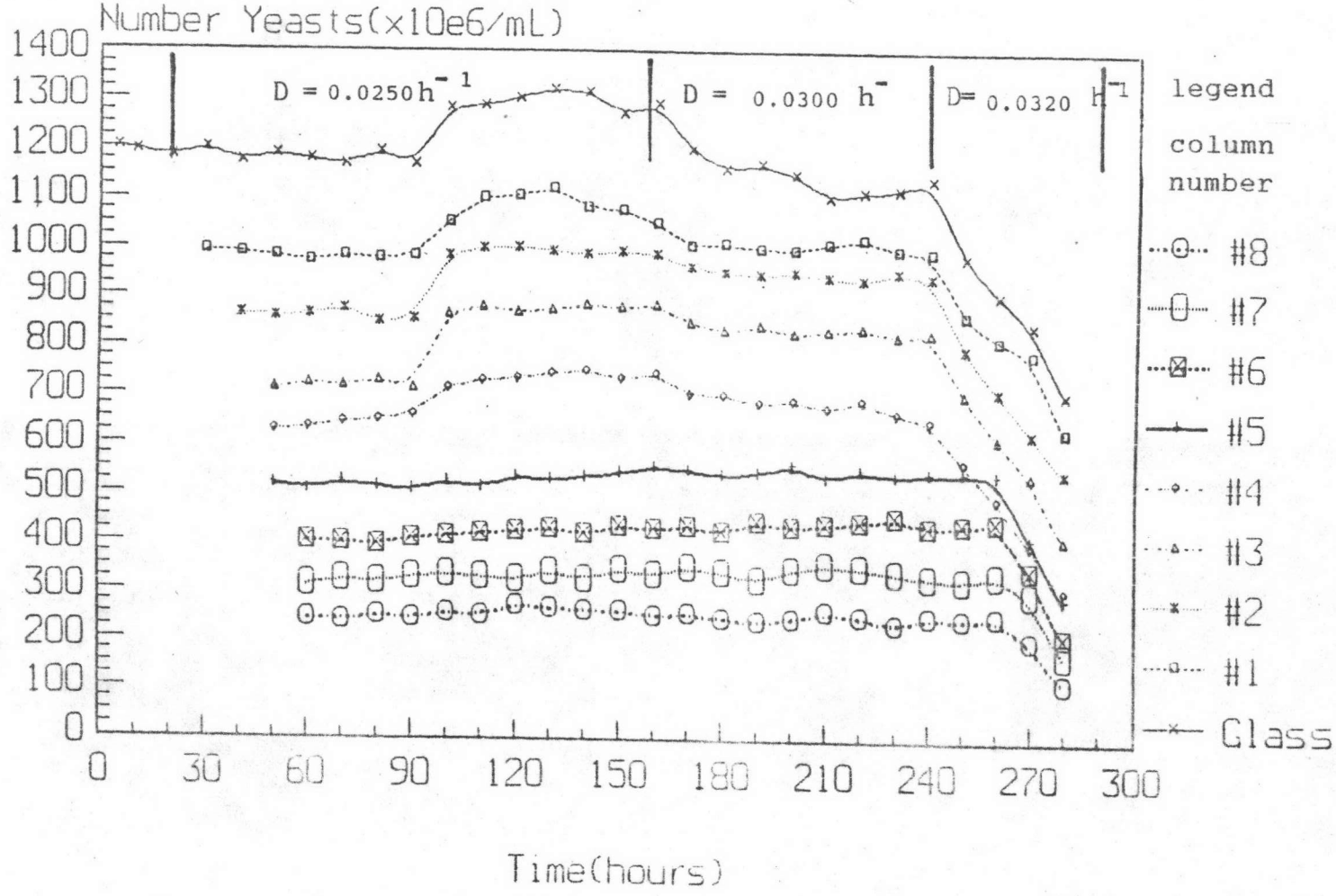
รูปที่ 4.24 แสดงความเข้มข้นของน้ำตาลที่เหลือในน้ำหมักกับเวลาในกระบวนการหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง อัตราการให้อากาศ 0.5 vvm 4 ชั่วโมงแรก จากนั้นลดเหลือ 0.04 - 0.06 vvm ตลอดการทดลอง เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 21 ชั่วโมง ทำการดึงเซลยีสต์ของคอลัมน์ตัวที่ ๆ ด้วยอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 0.5 ในชั่วโมงที่ 91 - 280

4.4 ผลการเติมอากาศประสิทธิภาพระบบหมักแบบป้อนเซลยีสต์ป้อนกลับ

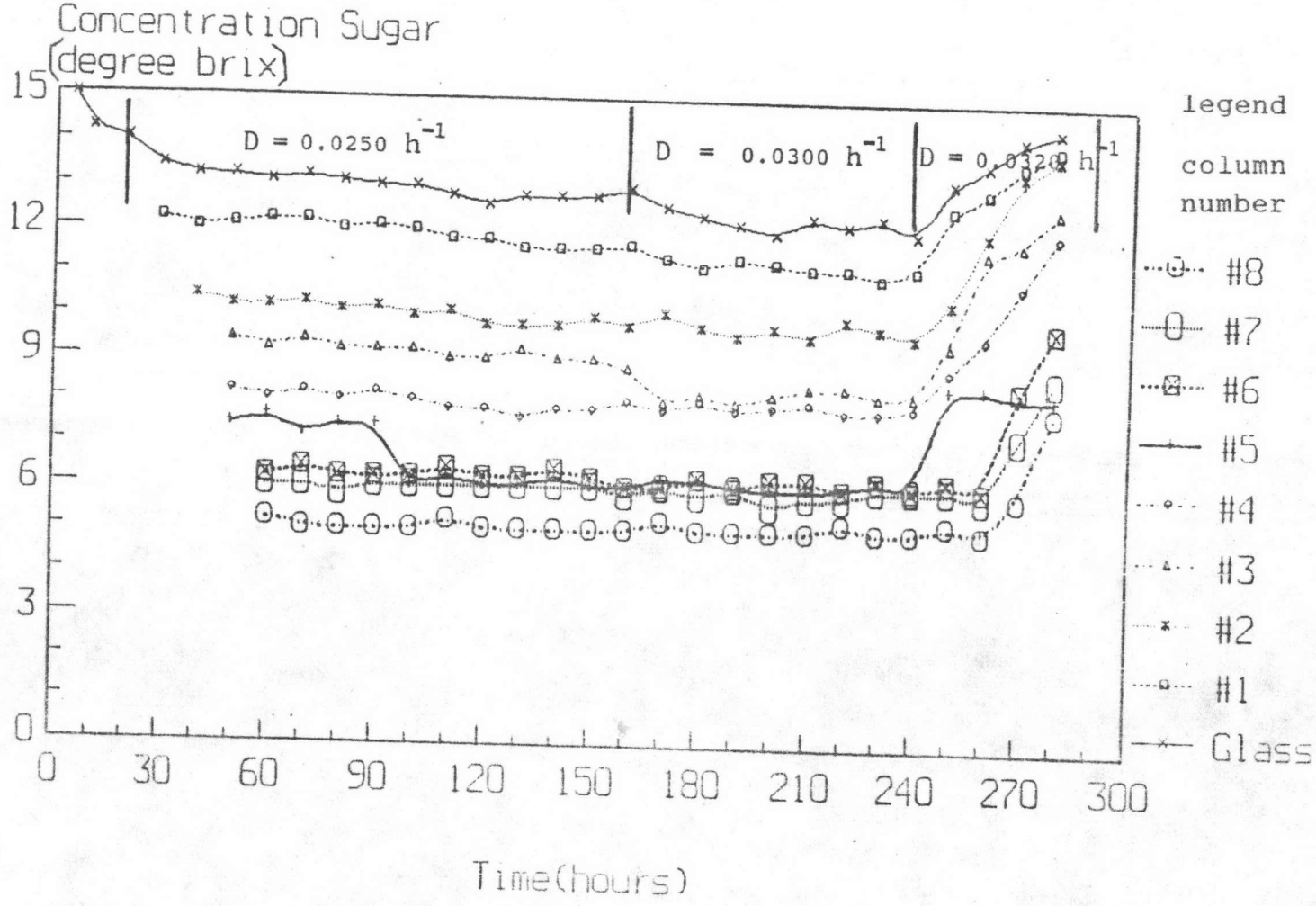
รูปที่ 4.25 - 4.27 แสดงข้อมูลการทดลองระบบหมักน้ำสับปะรดเพื่อผลิตเอธานอล โดยเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง ที่อัตราเจือจางต่างๆ โดยควบคุมระบบหมักเริ่มต้นดังเช่นที่กล่าวมาแล้วในข้อ 4.1 ในชั่วโมงที่ 21 ถึงชั่วโมงที่ 90 เท่ากับ 0.0250 ชั่วโมง$^{-1}$ ส่วนการให้อากาศ 0.04 - 0.06 vvm พบว่า ระบบอยู่ในสภาวะเสถียร ที่ปริมาณเอธานอลร้อยละ 11 โดยปริมาตร กำลังการผลิตเอธานอล 2.76 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง (ตารางข.35 ในภาคผนวก ข.) จำนวนเซลยีสต์ 1,100 ล้านเซลต่อมิลลิลิตร ความเข้มข้นสารละลายน้ำตาล 5 องศาบริกซ์ จากนั้นชั่วโมง 91 ถึงชั่วโมงที่ 16 ทำการดึงน้ำหมักจากคอลัมน์ไม่ให้อากาศคอลัมน์ที่ 5 (เซลยีสต์ที่ดึงกลับมาใช้เป็นเซลของคอลัมน์ที่ 5 ที่ไหลลับมาเข้าตอนล่างคอลัมน์ที่ 6) กลับไปรวมกับสารอาหารที่ป้อนเข้าคอลัมน์ให้อากาศด้วยอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 0.5 อัตราการเจือจาง 0.0250 ชั่วโมง$^{-1}$ พร้อมกับเติมอัตราการให้อากาศเป็น 0.08 vvm ตลอดการทดลอง ระบบสามารถรักษาเสถียรภาพที่ระดับเดิม ต่อมาชั่วโมงที่ 161 จนถึงชั่วโมงที่ 240 ทำการเพิ่มอัตราการเจือจางใหม่เป็น 0.0300 ชั่วโมง$^{-1}$ พบว่าปริมาณเอธานอลที่ผลิตปริมาณร้อยละ 10 - 11 โดยปริมาตร จำนวนเซลยีสต์เพิ่มเป็น 1,300 ล้านเซลต่อมิลลิลิตร และความเข้มข้นน้ำตาลที่เหลือ 5 องศาบริกซ์ จะเห็นได้ว่าระบบสามารถปรับตัวให้ดีขึ้น เซลยีสต์ที่อ่อนแอและขาดสารอาหารเมื่อถูกนำกลับในสภาวะแวดล้อมที่อุดมสมบูรณ์และเหมาะสม เซลสามารถปรับตัวให้แข็งแรงขึ้นและการเปลี่ยนสารอาหารให้เป็นผลิตภัณฑ์ได้มาก ทำให้ระบบผลิตสารผลิตภัณฑ์ได้เร็วขึ้นและผลผลิตที่ได้สูงขึ้นด้วย (Cysewski และ Wilke, 1977) ในชั่วโมงที่ 241 จนสิ้นสุดการทดลองที่ 280 เพิ่มอัตราการเจือจางเป็น 0.0320 ชั่วโมง$^{-1}$ โดยอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับคงเดิมและอัตราการให้อากาศคงเดิม พบว่าระบบไม่สามารถรักษาสภาวะเสถียรไว้ได้ตั้งขึ้นภายใต้สภาวะการทดลอง อัตราเจือจางสูงสุดที่ระบบรับได้ คือ 0.0330 ชั่วโมง$^{-1}$



รูปที่ 4.25 แสดงปริมาณเอธานอลที่ผลิตกับเวลาในกระบวนการหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง อัตราการให้อากาศ 0.5 vvm 4 ชั่วโมงแรก จากนั้นลดเหลือ 0.04 - 0.06 vvm ทำการดึงเซลยีสต์ของคอลัมน์ตัวที่ 5 ด้วยอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 0.5 พร้อมกับเพิ่มอัตราการให้อากาศเป็น 0.08 vvm ในชั่วโมงที่ 91 - 280

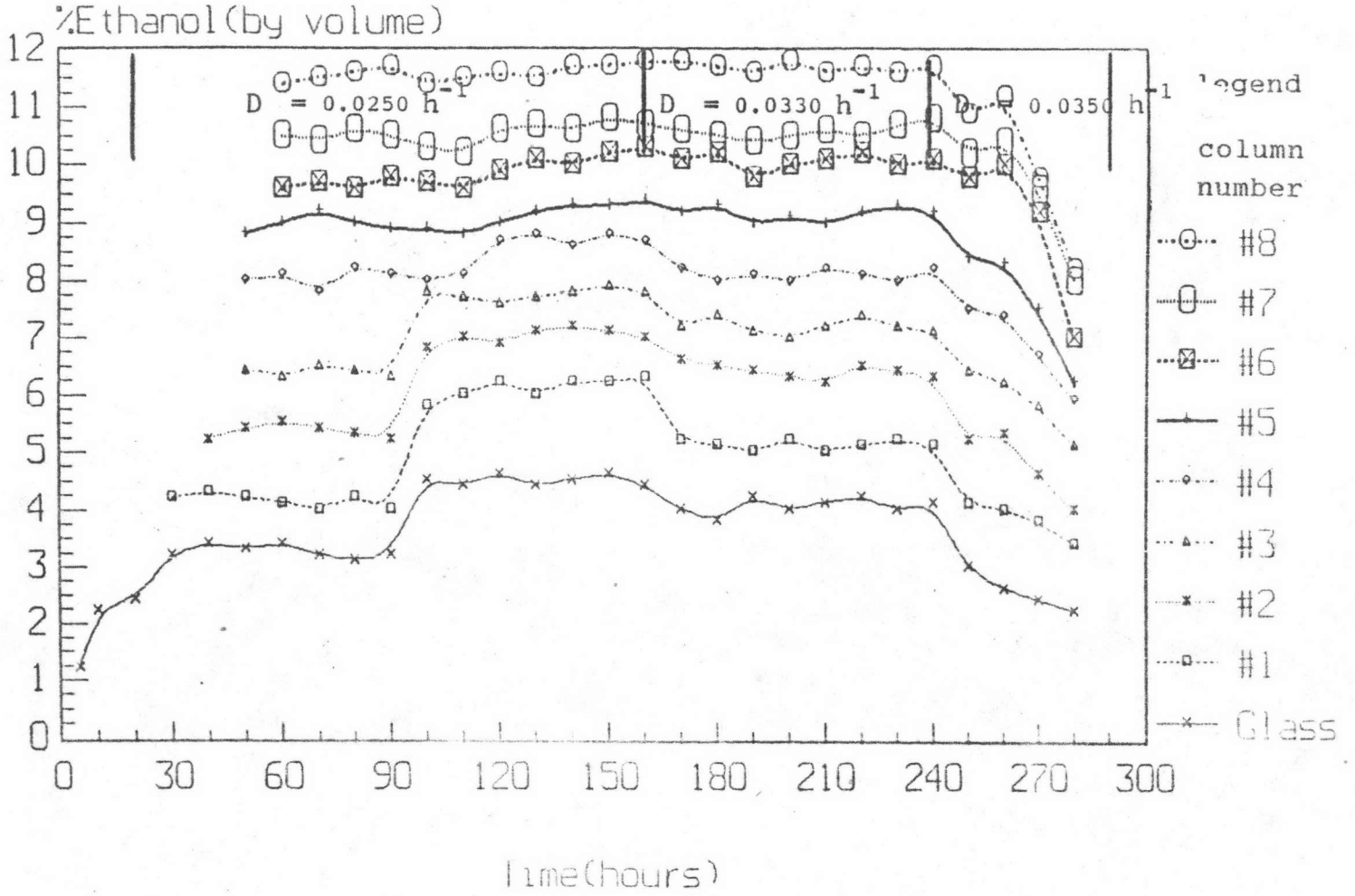


รูปที่ 4.26 แสดงจำนวนเซลยีสต์ที่นับได้กับเวลาในกระบวนการหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง อัตราการให้อากาศ 0.5 vvm 4 ชั่วโมงแรก จากนั้นลดเหลือ 0.04 - 0.06 vvm จนถึงชั่วโมงที่ 90 เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 21 ชั่วโมง ทำการดึงเซลยีสต์ของคอลัมน์ตัวที่ **5** ด้วยอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 0.5 พร้อมกันเพิ่มอัตราการให้อากาศเป็น 0.08 vvm ในชั่วโมงที่ 91 - 280

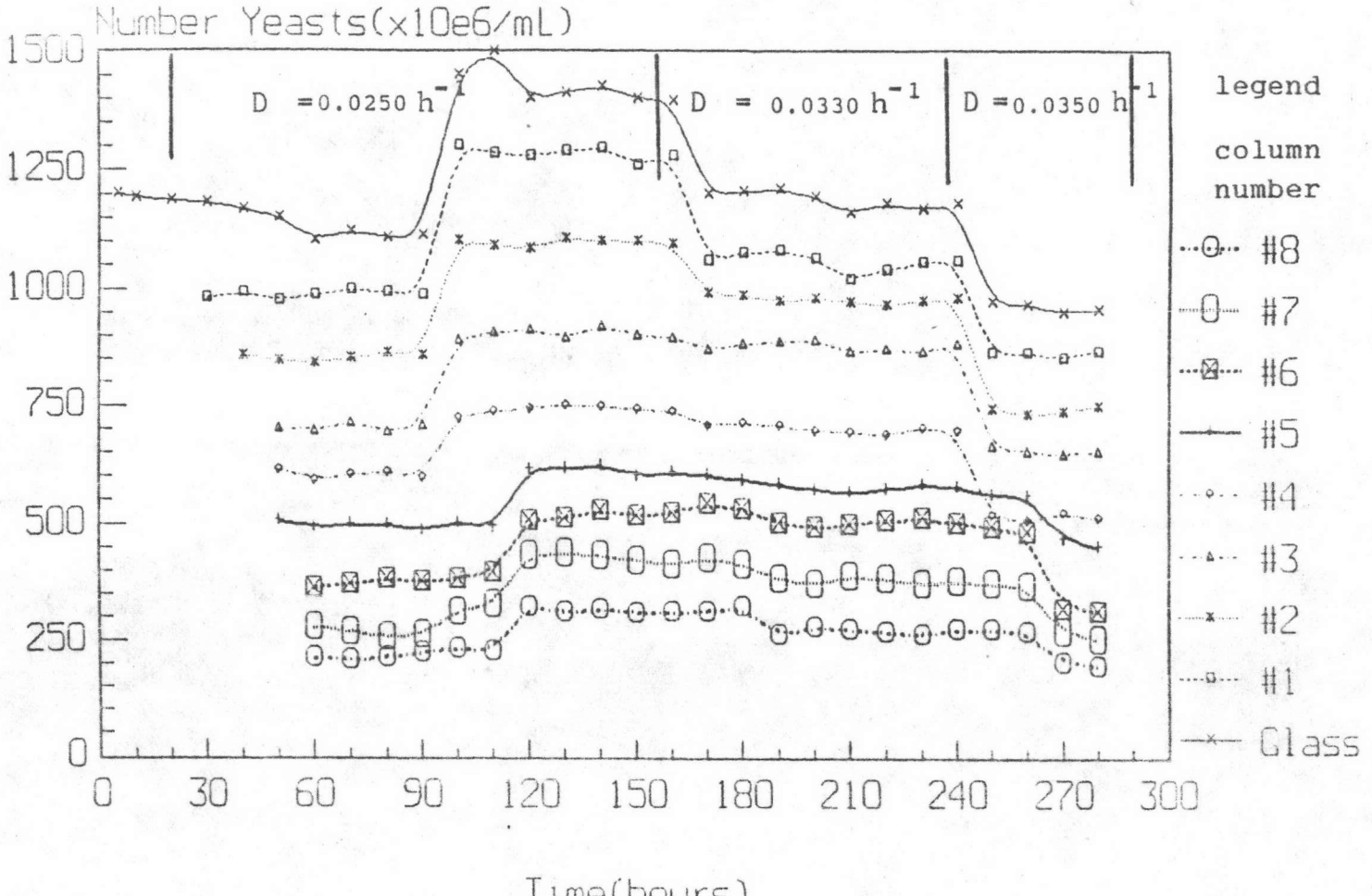


รูปที่ 4.27 แสดงความเข้มข้นน้ำตาลที่เหลือในน้ำหมักกับเวลาในกระบวนการหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง อัตราการให้อากาศ 0.05 vvm 4 ชั่วโมงแรก จากนั้นลดเหลือ 0.04 - 0.06 vvm จนถึงชั่วโมงที่ 90 เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 21 ชั่วโมง ทำการถึงเซลยีสต์ของคอลัมน์ตัวที่ 5 พร้อมกับเพิ่มอัตราการให้อากาศเป็น 0.08 vvm ในชั่วโมงที่ 91 - 280

รูปที่ 4.28 - 4.30 แสดงข้อมูลการทดลองระบบหมักน้ำสับปะรดเพื่อผลิตเอธานอล โดยเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง ที่อัตราเจือจางต่างๆ ใช้สภาวะที่กล่าวมาแล้วข้อ 4.1 ให้อัตราการเจือจางชั่วโมงที่ 21 ถึงชั่วโมงที่ 90 0.0250 ชั่วโมง$^{-1}$ ระบบรักษาเสถียรภาพที่ระดับเดียวกับตอนต้น จากนั้นชั่วโมงที่ 91 จนถึงชั่วโมงที่ 160 ดึงน้ำหมักคอลัมน์ไม่ให้อากาศคอลัมน์ที่ 5 (เซลยีสต์ที่ดึงกลับมาใช้เป็นเซลของคอลัมน์ที่ 5 ที่ไหลล้นมาเข้าตอนล่างคอลัมน์ที่ 6) กลับไปรวมกับสารอาหารที่ป้อนเข้าคอลัมน์ให้อากาศ ด้วยอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 0.5 อัตราการเจือจางคงเดิม แต่เพิ่มอัตราการให้อากาศเป็น 0.12 vvm พบว่า ระบบยังคงอยู่ในสภาวะเสถียร เนื่องจากการเปลี่ยนสภาวะแวดล้อมของเซลยีสต์ให้ดีขึ้น โดยการเพิ่มอัตราการให้อากาศ ทำให้ประสิทธิภาพในการทำกิจกรรมเพิ่มขึ้น (Rosario, 1979) ทำให้มีกำลังการผลิต 2.86 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง (ตารางข.39 ในภาคผนวก ข.) จากนั้นชั่วโมงที่ 161 ถึงชั่วโมงที่ 240 ได้เพิ่มอัตราการเจือจางเป็น 0.0330 ชั่วโมง$^{-1}$ โดยให้อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ และอัตราการให้อากาศคงเดิม พบว่า ระบบรักษาสภาวะสมดุลไว้ได้และสามารถผลิตเอธานอล(เริ่มผลิตตั้งแต่คอลัมน์ไม่ให้อากาศคอลัมน์ที่ 6) เป็นการลดระยะเวลาหมักให้น้อยลง พร้อมกับเพิ่มผลผลิตในกระบวนการหมักให้สูงขึ้น กำลังการผลิตเอธานอล 3.72 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง หลังจากชั่วโมงที่ 241 จนสิ้นสุดการทดลองชั่วโมงที่ 280 ได้เพิ่มอัตราการเจือจางเป็น 0.0350 ชั่วโมง$^{-1}$ ระบบเริ่มเสียเสถียรภาพ โดยมีอัตราการผลิตเอธานอลลดลง เซลยีสต์ถูกชะล้างออกไปและความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลสูงขึ้น ซึ่งเกิดการ Wash out นั่นเอง ภายใต้สภาวะทดลองนี้สรุปได้ว่า อัตราเจือจางสูงสุดที่ระบบรับได้ คือ 0.0330 ชั่วโมง$^{-1}$

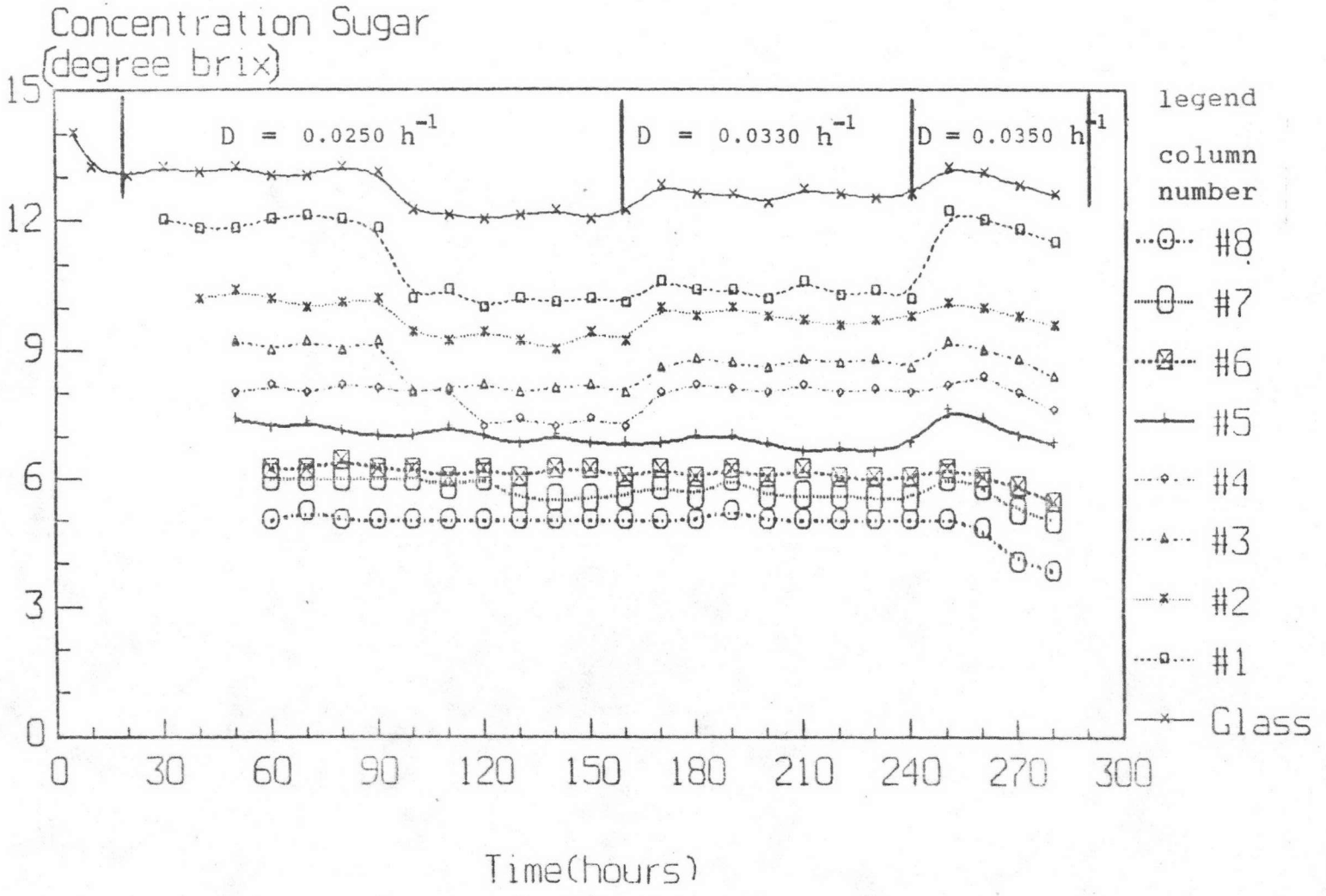


รูปที่ 4.28 แสดงปริมาณเอธานอลที่ผลิตกับเวลาในกระบวนการหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง อัตราการให้อากาศ 0.5 vvm 4 ชั่วโมงแรก จากนั้นลดเหลือ 0.04 - 0.06 vvm จนถึงชั่วโมงที่ 90 เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 21 ชั่วโมง ทำการดึงเซลยีสต์ออกจากคอลัมน์ตัวที่ 5 ด้วยอัตราส่วนการไหลย้อนกลับ 0.5 พร้อมกับเพิ่มอัตราการให้อากาศเป็น 0.12 vvm ในชั่วโมงที่ 91 - 280



รูปที่ 4.29 แสดงจำนวนเซลยีสต์ที่นับได้กับเวลาในกระบวนการหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง อัตราการให้อากาศ 0.5 vvm 4 ชั่วโมงแรก จากนั้นลดเหลือ 0.04 - 0.06 vvm จนถึงชั่วโมงที่ 90 เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 21 ชั่วโมง ทำการดึงเซลยีสต์ ของคอลัมน์ตัวที่ 5 ด้วยอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 0.5 พร้อมกันเพิ่มอัตราการให้อากาศเป็น 0.12 vvm ในชั่วโมงที่ 91 - 280

หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.30 แสดงความเข้มข้นของน้ำตาลที่เหลือในน้ำหมักกับเวลาในกระบวนการหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง อัตราการให้อากาศ 0.5 vvm 4 ชั่วโมงแรกจากนั้นลดเหลือ 0.04 - 0.06 vvm จนถึงชั่วโมงที่ 90 เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 21 ชั่วโมง ทำการติงเซลยีสต์ - ของคอลัมน์ตัวที่ **5** ด้วยอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 0.5 พร้อมกับเพิ่มอัตราการให้อากาศเป็น 0.12 vvm ในชั่วโมงที่ 91 - 280

รูปที่ 4.31 - 4.33 แสดงข้อมูลการทดลองระบบหมักน้ำสัมประรดเพื่อผลิตเอธานอล โดยเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง ที่อัตราเจือจางต่าง ๆ ควบคุมระบบหมักดังข้อ 4.1 ในชั่วโมงที่ 21 ถึงชั่วโมงที่ 90 เริ่มให้อัตรการเจือจาง 0.0250 ชั่วโมง$^{-1}$ พบว่าระบบอยู่ในสภาวะเสถียร ต่อมาชั่วโมงที่ 91 ถึงชั่วโมงที่ 160 ทำการดึงน้ำหมักจากคอลัมน์ไม่ให้อากาศคอลัมน์ที่ 5 (เซลยีสต์ที่ดึงกลับมาใช้เป็นเซลของคอลัมน์ที่ 5 ที่ไหลลัมมาเข้าตอนล่างคอลัมน์ที่ 6) กลับไปเข้าคอลัมน์ให้อากาศ ด้วยอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 0.5 อัตราเจือจาง 0.0250 ชั่วโมง$^{-1}$ พร้อมกับเพิ่มอัตราการให้อากาศเป็น 0.16 vv ตลอดการทดลอง จำนวนเซลยีสต์สูงถึง 1,400 ล้านเซลต่อมิลลิลิตร ปริมาณเอธานอลที่ผลิตร้อยละ10 - 11 โดยปริมาตร กำลังการผลิตเอธานอล 2.66 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง (ตาราง ข.43 ในภาคผนวก ข.) ความเข้มข้นสารละลายน้ำตาลเหลือ 5 องศาบริกซ์ แสดงให้เห็นว่าเมื่อเซลได้รับอากาศเพิ่มขึ้น และสารอาหารที่สมบูรณ์ ทำให้เซลมีการเจริญเติบโตและการผลิตผลิตภัณฑ์มากขึ้น ระบบยังอยู่ในสภาวะเสถียร ต่อมาชั่วโมงที่ 161 ถึงชั่วโมงที่ 240 ได้เพิ่มอัตราการเจือจางเป็น 0.035 ชั่วโมง$^{-1}$ พบว่า ระบบผลิตเอธานอลซึ่งมีปริมาณเอธานอลร้อยละ 9 - 10 โดยปริมาตร ซึ่งลดลงจากเดิม ส่วนเซลยีสต์ในระบบมีจำนวนเพิ่มขึ้นสูงมากถึงประมาณ 1,900 ล้านเซลต่อมิลลิลิตร แสดงว่า ปริมาณอากาศที่เพิ่มให้แกระบบเป็นค่าสูงสุด จะไปกระตุ้นให้เซลนำสารอาหารไปใช้ในขบวนการเจริญเติบโตของเซลมากกว่าที่จะนำไปใช้ในการหมักให้เป็นเอธานอล และ ความเข้มข้นของสารน้ำตาลที่เหลือมีค่าสูง ต่อจากนั้นชั่วโมงที่ 241 จนถึงชั่วโมงที่ 280 ได้ลดอัตราการเจือจางเหลือ 0.0280 ชั่วโมง$^{-1}$ พบว่า จำนวนเซลยีสต์ในระบบมีค่าสูงขึ้น และความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลลดลง เนื่องจาก อัตราการเจือจางที่ให้เหมาะสมกับระบบ เซลยีสต์มีการนำสารอาหารไปใช้ในการผลิตเอธานอล มากกว่า นำไปใช้ในการเจริญเติบโต เมื่อเทียบกับชั่วโมงที่ 161 ถึงชั่วโมงที่ 240 ดังนั้น เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณเอธานอลในระบบจึงสูงขึ้น (Aiba, 1968) ภายใต้สภาวะการทดลองนี้สามารถสรุปได้ว่า อัตราเจือจางสูงสุดที่ระบบรับได้ คือ 0.0250 ชั่วโมง$^{-1}$ ซึ่งให้ประสิทธิภาพการผลิตเอธานอลสูงสุดในรูปของปริมาณเอธานอลสูงสุด

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพและอัตราเจือจางสูงสุด ที่อัตราเติมอากาศต่าง ๆ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า อัตราเติมอากาศที่เหมาะสม คือ 0.12 vvm กล่าวคือ

ตารางที่ 4.4 สรุปผลการให้อากาศแก่เซลยีสต์ที่นำกลับมาใช้ในกระบวนการหมักแบบต่อเนื่อง

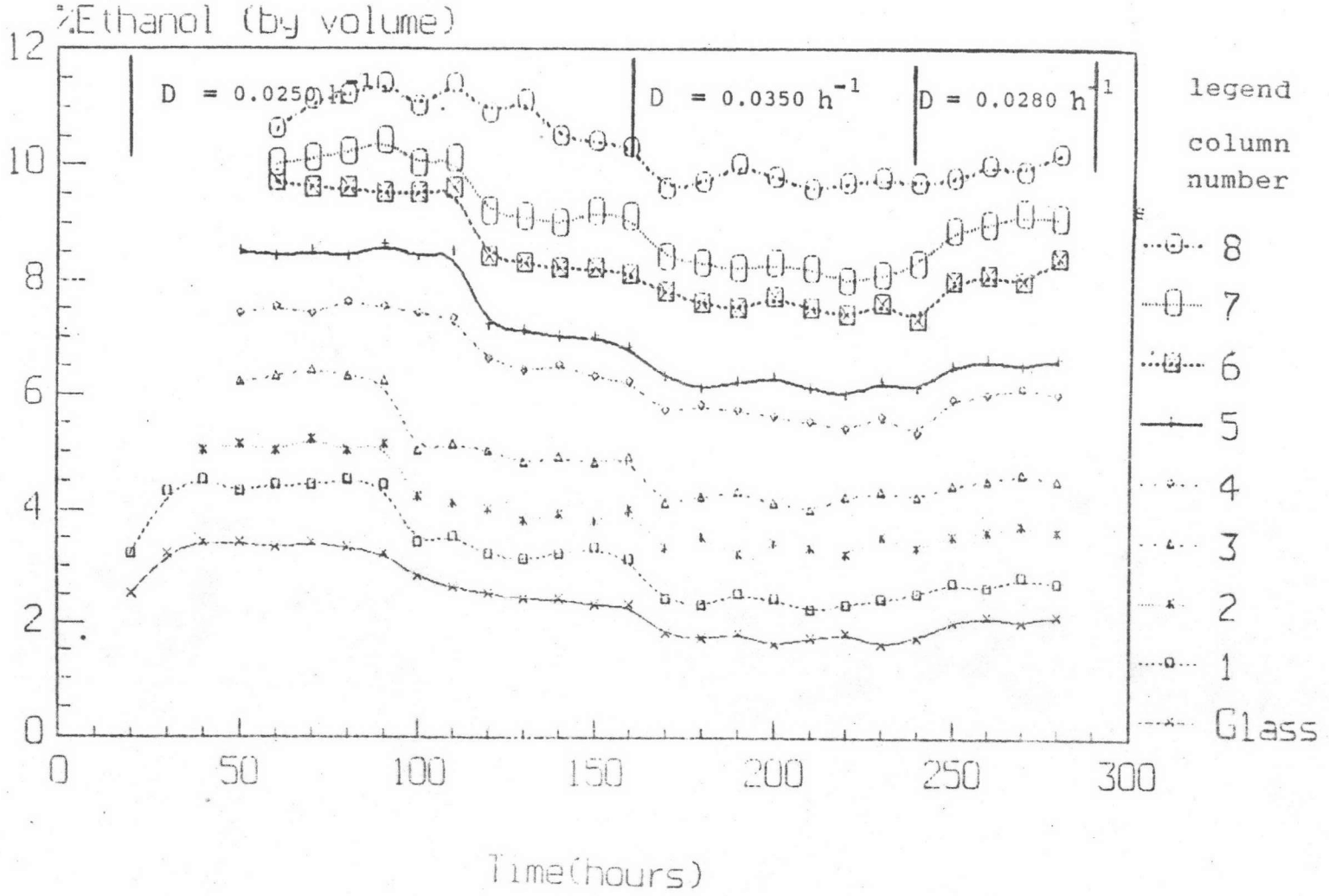
คอลัมน์	อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ	อัตราการให้อากาศ(vvm)	อัตราการเจือจาง (ชั่วโมง)	ผลิตเอธานอลได้(ลิตร/วัน)	ได้เอธานอลออกมา (กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง	ประสิทธิภาพการสร้างเอธานอล (กรัมเอธานอล/กรัมน้ำตาลที่ถูกใช้)
5	0.5	0.08	0.0300	46	3.48	0.89
		0.12	0.3300	50	3.72	0.91
		0.16	0.0250	38	2.90	0.78

ถ้าอัตราเติมอากาศสูงกว่าค่านี้ น้ำตาลจะถูกนำไปใช้ในการสร้างเซลมากขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพการผลิตเอธานอลต่ำลง

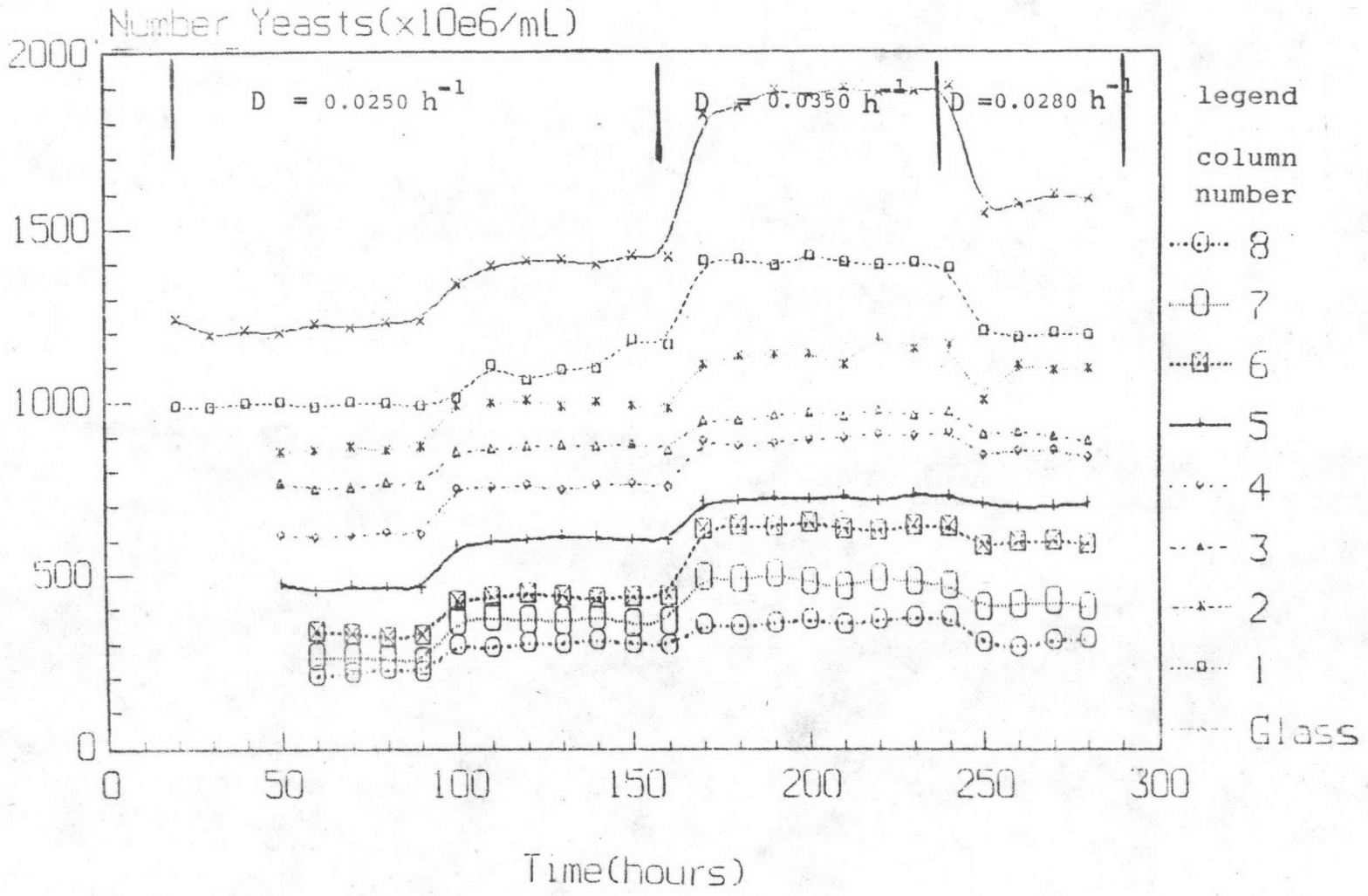
จากผลการทดลองทั้งหมดที่กล่าวมาแล้ว สามารถสรุปผลได้ว่าการนำเซลยีสต์กลับมาใช้ใหม่ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตเอธานอล โดยวิธีการนำเซลยีสต์กลับมาใช้ในการทดลองนี้ ได้นำน้ำหมักบ่อนย้อนกลับซึ่งเป็นการหมุนเวียนเซลยีสต์ที่สูญเสียจากระบบจึงเป็นการเพิ่มเซลยีสต์ในระบบ เซลยีสต์ดังกล่าวซึ่งส่วนหนึ่งเป็นเซลที่ตายและอ่อนแอจึงจำเป็นต้องเติมอากาศเพื่อเป็นการกระตุ้นและเพิ่มจำนวนเซลโดยการเติมอากาศในอัตราส่วนการเติมอากาศที่เหมาะสม สภาวะเหมาะสมในการนำเซลยีสต์กลับมาใช้ใหม่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพระบบหมัก สรุปได้ดังนี้

- ควรนำน้ำหมักจากตคอลัมน์ที่ 5 มาบ่อนย้อนกลับ
- อัตราส่วนบ่อนกลับ 0.5
- อัตราส่วนการให้อากาศ 0.12 vvm
- อัตราเจือจางสูงสุด 0.33 ชั่วโมง$^{-1}$

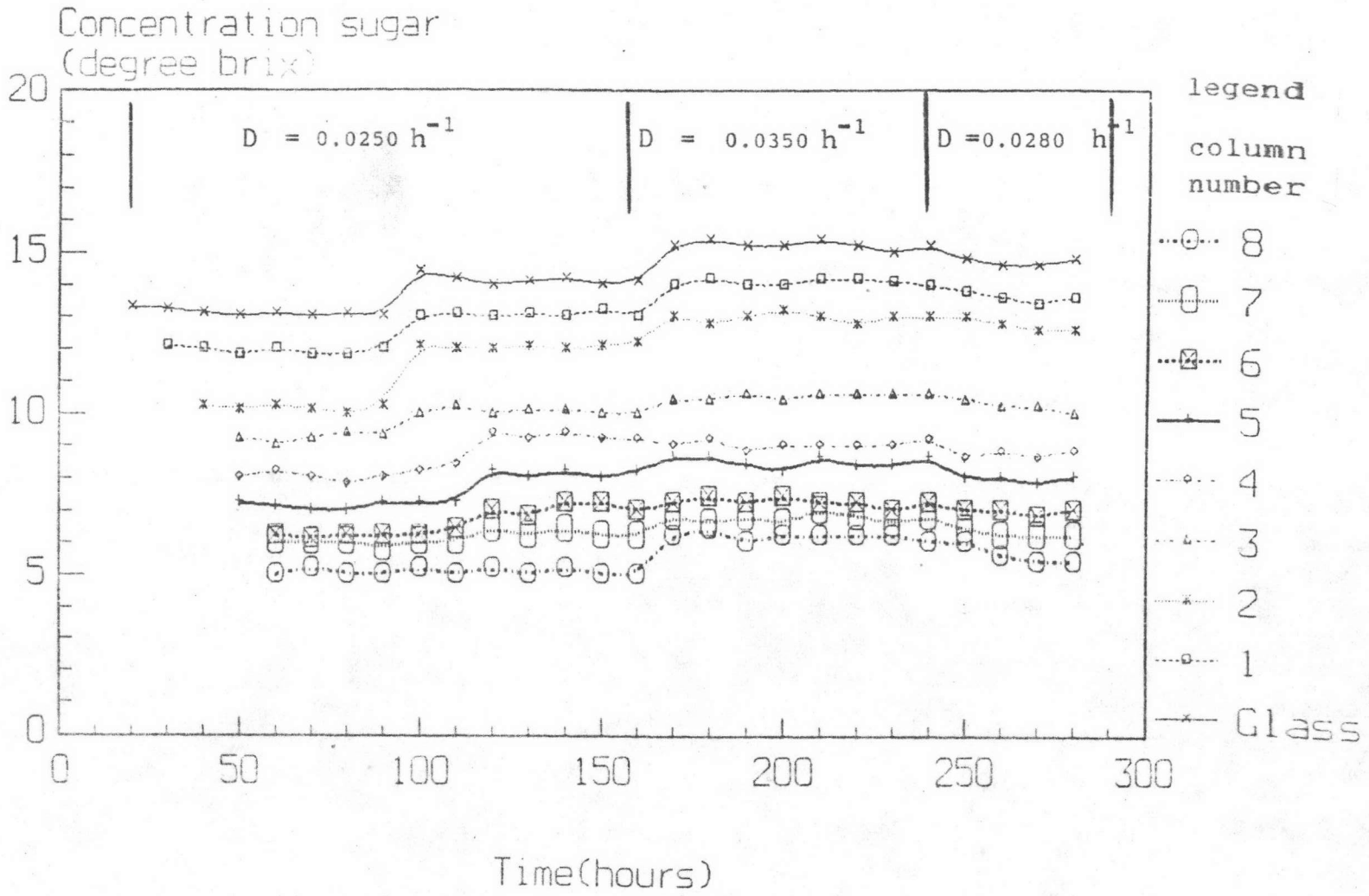
โดยที่สภาวะเหมาะสมนี้ ระบบหมักเอธานอลแบบต่อเนื่องนี้ สามารถผลิตเอธานอลได้ 50 ลิตรต่อวัน มีอัตราผลิตเอธานอล 3.72 กรัมต่อลิตรต่อ. ชั่วโมง และมีประสิทธิภาพสร้างเอธานอล 0.91 กรัมต่อกรัมน้ำตาลที่ถูกใช้



รูปที่ 4.31 แสดงปริมาณเอธานอลที่ผลิตกับเวลาในกระบวนการหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่องอัตราการให้อากาศ 0.5 vvm 4 ชั่วโมงแรก จากนั้นลดเหลือ 0.04 - 0.06 vvm จนถึงชั่วโมงที่ 90 เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 21 ชั่วโมง ทำการดึงเซลยีสต์ของคอลัมน์ตัวที่ 5 ด้วยอัตราส่วนการไหลมีค่าเท่ากับ 0.5 พร้อมกับเพิ่มอัตราการให้อากาศเป็น 0.16 vvm ในชั่วโมงที่ 91 - 280



รูปที่ 4.32 แสดงจำนวนเซลยีสต์ที่นับได้กับเวลาในกระบวนการหมักแบบคอลัมน์ ชนิดต่อเนื่อง อัตราการให้อากาศ 0.5 vvm 4 ชั่วโมงแรก จากนั้นลดเหลือ 0.04 - 0.06 vvm จนถึงชั่วโมงที่ 90 เริ่มปล่อยสารอาหารเลี้ยงเวลาผ่านไป 21 ชั่วโมง ทำการดึงเซลยีสต์ ของคอลัมน์ตัวที่ 5ด้วยอัตราส่วนการไหลเวียนกลับ 0.5 พร้อมกับเพิ่มอัตราให้อากาศเป็น 0.16 vvm ในชั่วโมงที่ 91 - 280



รูปที่ 4.33 แสดงความเข้มข้นของน้ำตาลที่เหลือในน้ำหมักกับเวลาในกระบวนการหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง อัตราการให้อากาศ 0.5 vvm 4 ชั่วโมงแรก จากนั้นลดเหลือ 0.04 - 0.06 vvm จนถึงชั่วโมงที่ 90 เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 21 ชั่วโมง ทำการดึงเซลยีสต์ ของคอลัมน์ตัวที่ 5 ด้วยอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 0.5 พร้อมกับเพิ่มอัตราการให้อากาศเป็น 0.16 vvm ในชั่วโมงที่ 91 - 280