บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

ผลการผลิตเอทานอลในเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดไม่ต่อเนื่อง

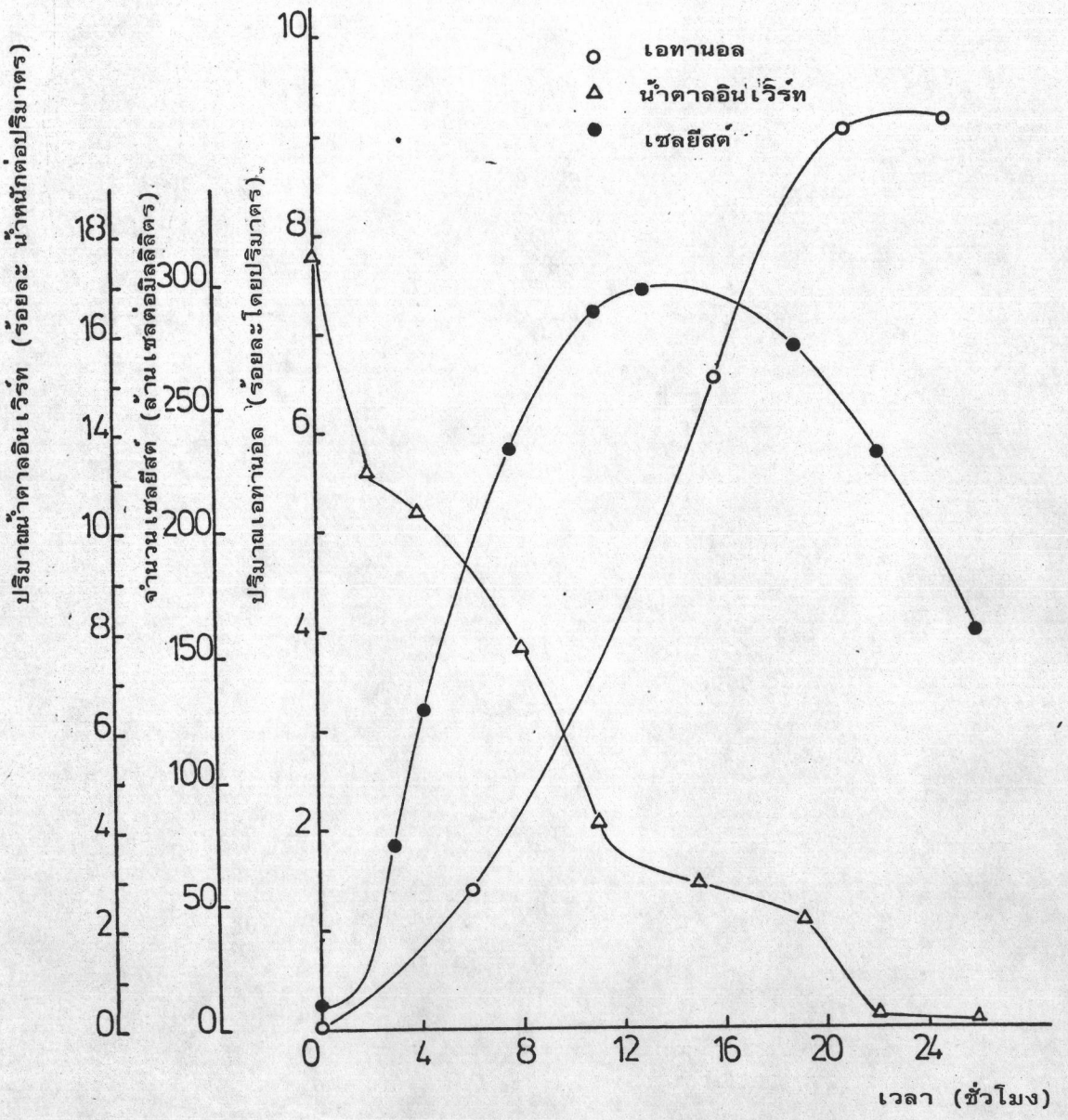
การทดลองนี้จะทดสอบการผลิตเอทานอลด้วยเชื้อ S. ellipsoideus ภายใต้สภาวะการทดลองจากตารางที่ 3-1 พบว่ายีสต์สามารถผลิตเอทานอลได้ร้อยละ 1.3, 6.5, 9.0 และ 9.2 (โดยปริมาตร) ภายในเวลา 6, 16, 21 และ 25 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งในช่วงเวลา 21 ชั่วโมงนี้มีการผลิตเอทานอล การเพิ่มปริมาณเซลยีสต์และการลดลงของน้ำตาลอินเวิร์ทเป็นไปอย่างรวดเร็ว กราฟค่อนข้างเป็นเส้นตรง แต่เมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้นเกินกว่า 21 ชั่วโมง ปริมาณการผลิตต่ำลง และปริมาณน้ำตาลอินเวิร์ทในน้ำหมักก็ลดลงจนเกือบหมด ขณะเดียวกันเซลยีสต์ ซึ่งมีปริมาณ 290 ล้านเซลต่อมิลลิลิตรในชั่วโมงที่ 13 จะลดปริมาณลงเหลือ 150 ล้านเซลต่อมิลลิลิตรในชั่วโมงที่ 25 ทั้งนี้เนื่องจากในกระบวนการหมักด้วยระบบไม่ต่อเนื่องยีสต์มีการเจริญผ่านช่วงระยะต่าง ๆ จนครบวงจรชีวิต (Aiba, 1965) การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในน้ำหมักมีผลต่อกิจกรรมของเซลโดยตรง ดังนั้นประสิทธิภาพในการผลิตเอทานอลจึงลดลง จากข้อมูลเหล่านี้สามารถนำไปศึกษาเป็นแนวทางในการผลิตเอทานอลด้วยระบบกึ่งต่อเนื่องและต่อเนื่องต่อไป และจากสมการการคำนวณอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (specific growth rate (Wang, 1979)

$$\mu = \frac{1}{X}\frac{dX}{dt}$$

ซึ่ง X = จำนวนเซลยีสต์ที่นับได้ (เซลต่อมิลลิตร)

t = ระยะเวลาที่ทำการหมัก (ชั่วโมง)

พบว่าภายใต้สภาวะการทดลองจากตารางที่ 3-1 เชื้อยีสต์มีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะที่เวลาของการหมัก 2, 4, 8, 11 และ 13 ชั่วโมง เท่ากับ 0.23, 0.21, 0.11,



รูปที่ 4-1 แสดงปริมาณเอทานอล จำนวนเซลยีสต์ที่นับได้โดยตรงจากกล้องจุลทรรศน์ และปริมาณน้ำตาลอินเวิร์ทที่เหลืออยู่ในน้ำหมัก ในการผลิตเอทานอลของเชื้อ S. ellipsoideus ด้วยเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดไม่ต่อเนื่อง เมื่อใช้สารอาหารและสภาวะในการหมัก ดังแสดงในตารางที่ 3-1

0.07 และ 0.01 ชั่วโมง$^{-1}$ ตามลำดับ จะเห็นว่า ช่วงเวลาที่เหมาะสมกับการแบ่งเซลมากที่สุด คือ ระหว่างชั่วโมงที่ 2-8 ขณะเดียวกันถ้าพิจารณาปริมาณเอทานอลที่ได้ในช่วงเวลานี้มีค่าน้อยคือ ร้อยละ 2 (โดยปริมาตร) และน้ำตาลอินเวิร์ทเหลืออยู่ในน้ำหมักในปริมาณสูงประมาณร้อยละ 8 (น้ำหนักต่อปริมาตร) จึงต้องปล่อยให้การหมักดำเนินต่อไป ซึ่งหลังจากชั่วโมงที่ 13 การเจริญเติบโตของเซลยีสต์มีค่าน้อยลง ยีสต์มีแนวโน้มในการใช้น้ำตาลผลิตเอทานอลมากกว่าใช้ในการเจริญเติบโต จนกระทั่งชั่วโมงที่ 16 และ 21 ยีสต์สามารถผลิตเอทานอลได้ร้อยละ 6.5 และ 9 (โดยปริมาตร) หลังจากการหมักดำเนินไป 21 ชั่วโมง อัตราการเพิ่มขึ้นของผลผลิตเอทานอลช้ามาก จนในที่สุดเมื่อน้ำตาลอินเวิร์ทไม่มีเหลือสะสมอยู่ในน้ำหมัก อัตราการผลิตเอทานอลก็จะลดลงจนเกือบเป็น 0 ขณะเดียวกันปริมาณเซลยีสต์ลดลงด้วย ทั้งนี้เนื่องจากมีการตายเกิดขึ้น (Wang, 1979)

<u>ทดสอบการผลิตเอทานอลด้วยวิธีการหมักแบบกึ่งต่อเนื่อง</u>

เพื่อนำข้อมูลจากการทดลองนี้ไปใช้เป็นพื้นฐานในการศึกษาการหมักในเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง การทดลองได้ศึกษาอิทธิพลของการให้อากาศ และช่วงเวลาในการถ่ายเทน้ำหมัก ผลการศึกษามีดังนี้

1. การให้อากาศ 0.5 ปริมาตรอากาศ ต่อปริมาตรน้ำหมัก ต่อนาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ในช่วงแรกของการทดลอง พบว่าได้ปริมาณเอทานอลร้อยละ 8 โดยปริมาตร ภายในเวลา 24 ชั่วโมง ดังรูปที่ 4-2 การทดลองนี้ใช้สภาวะที่เหมาะสมจากผลการวิจัยที่ผ่านมา คือ ทำการถ่ายเทน้ำหมักออกร้อยละ 25 (โดยปริมาตร) ทุก 3 ชั่วโมง (วิชาพงษ์, 2525) แล้วเติมน้ำสับปะรดสดที่มีความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาล 18 องศาบริกซ์ พร้อมอาหารเสริมลงไปทดแทนด้วยปริมาตรที่เท่ากัน ผลปรากฏว่าปริมาณเอทานอลที่ได้ในชั่วโมง 27 ลดลงเป็นร้อยละ 6.5 (โดยปริมาตร) ขณะเดียวกันปริมาณเซลถูกถ่ายเทออกไปจนเหลืออยู่ในน้ำหมักน้อยลง เนื่องจากยีสต์ในน้ำหมักไม่สามารถสร้างเซลให้ทันกับการถ่ายเทออกไปได้ ส่วนปริมาณน้ำตาลที่เหลืออยู่ในคอลัมน์ก็เริ่มสะสมมากขึ้น แสดงว่าช่วงเวลาในการถ่ายเทน้ำหมัก 3 ชั่วโมง เร็วเกินไป จึงได้ทดลองเพิ่มเวลาในการถ่ายเทเป็น 4 ชั่วโมง พบว่าได้ปริมาณเอทานอลไม่สูงขึ้นมากนัก คือ

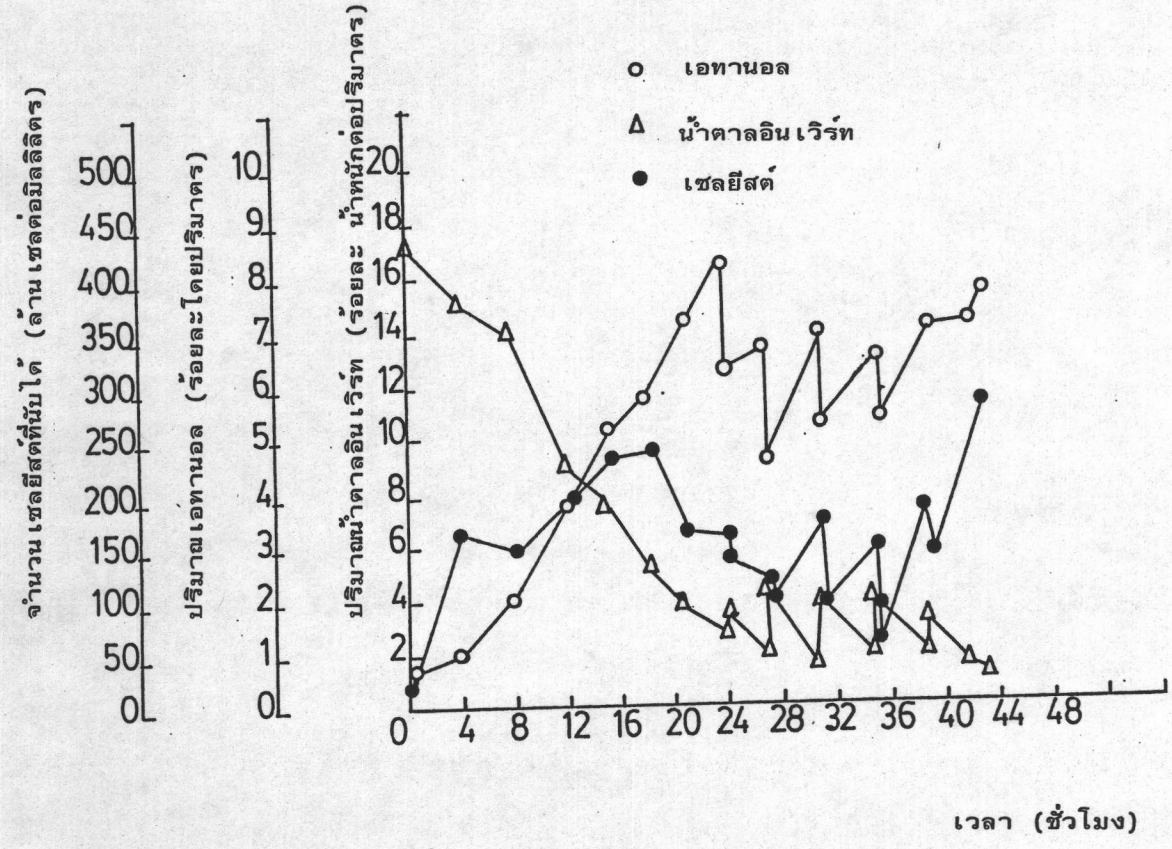
รูปที่ 4-2 แสดงปริมาณเอทานอล จำนวนเซลยีสต์ที่นับได้โดยตรงจากกล้องจุลทรรศน์ และปริมาณน้ำตาลอินเวิร์ทที่เหลืออยู่ในน้ำหมัก ในการผลิตเอทานอลของเชื้อ S. ellipsoideus ด้วยเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดกึ่งต่อเนื่อง เมื่อใช้สารอาหารและสภาวะในการหมัก ดังแสดงในตารางที่ 3-1 เริ่มทำการถ่ายเทน้ำหมักครั้งแรกในชั่วโมงที่ 24 ด้วยอัตราการถ่ายเทน้ำหมักร้อยละ 25 (โดยปริมาตร) และทดแทนด้วยสารละลายน้ำสับปะรดสดที่มีความเข้มข้น 18 องศาบริกซ์ ในอัตราเดียวกัน พร้อมทั้งเติมอาหารเสริม

ช่วงเวลาในการถ่ายเทเป็นดังนี้

ทำการถ่ายเทน้ำหมักทุก 3 ชั่วโมง ระหว่างชั่วโมงที่ 24-27

ทำการถ่ายเทน้ำหมักทุก 4 ชั่วโมง ระหว่างชั่วโมงที่ 31-43

และทดลองให้อากาศในอัตรา 0.5 ปริมาตรอากาศ ต่อปริมาตรน้ำหมัก ต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที หลังจากชั่วโมงที่ 39


จำนวนเซลยีสต์ที่นับได้ (ล้านเซลต่อมิลลิลิตร)
500
450
400
350
300
250
200
150
100
50
0
ปริมาณเอทานอล (ร้อยละโดยปริมาตร)
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0
ปริมาณน้ำตาลอินเวิร์ท (ร้อยละ น้ำหนักต่อปริมาตร)
20
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0
4 8 12 16 20 24 28 32 36 40 44 48
เวลา (ชั่วโมง)
เอทานอล
น้ำตาลอินเวิร์ท
เซลยีสต์

รูปที่ 4-2

ได้ร้อยละ 6.8, 6.3 และ 6.8 (โดยปริมาตร) ในชั่วโมงที่ 31, 35 และ 39 ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่า การเพิ่มระยะเวลาในการถ่ายเทน้ำหมักเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอที่จะทำให้ผลผลิตเอทานอลอยู่ในระดับที่ต้องการได้ ดังนั้นหลังจากถ่ายเทน้ำหมักในชั่วโมงที่ 39 ได้ทดลองให้อากาศในอัตรา 0.5 ปริมาตรอากาศ ต่อปริมาตรน้ำหมัก ต่อนาที เพื่อกระตุ้นให้มีการสร้างเซลมากขึ้น พบว่าการถ่ายเทในชั่วโมงที่ 43 ปริมาณเอทานอลเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 7.5 (โดยปริมาตร) ปริมาณเซลยีสต์สูงขึ้นเป็น 280 ล้านเซลต่อมิลลิลิตร และเหลือน้ำตาลในน้ำหมักเพียงร้อยละ 1.7 (น้ำหนักต่อปริมาตร) แสดงให้เห็นว่าการให้อากาศมีประโยชน์ในแง่ที่ทำให้เซลส่วนบนมีโอกาสไหลลงมารับอากาศบริสุทธิ์จากหัวกระจายอากาศได้ง่ายขึ้น (อำนวย, 2520) ช่วยให้มีการเพิ่มปริมาณและกิจกรรมของเซล เอทานอล รวมถึงการใช้น้ำตาลในน้ำหมักด้วย (วิชาพงษ์, 2525)

2. การให้อากาศ 0.5 ปริมาตรอากาศ ต่อปริมาตรน้ำหมัก ต่อนาที เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ปล่อยให้น้ำหมักอยู่ในสภาวะที่มีอากาศจำกัด ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4-3 ขณะศึกษาการให้อากาศได้ศึกษาช่วงเวลาในการถ่ายเทน้ำหมักด้วย พบว่าการถ่ายเทน้ำหมักครั้งแรกในชั่วโมงที่ 24 ในอัตราร้อยละ 25 (โดยปริมาตร) ได้เอทานอลร้อยละ 8 (โดยปริมาตร) ปริมาณเซลยีสต์ 260 ล้านเซลต่อมิลลิลิตร น้ำตาลที่เหลือในน้ำหมักร้อยละ 2.5 (น้ำหนักต่อปริมาตร) ทำการถ่ายเทน้ำหมัก 5 ชั่วโมง/ครั้ง ระหว่างชั่วโมงที่ 24-39 ผลปรากฏว่าในชั่วโมงที่ 29, 34 และ 39 ได้เอทานอลร้อยละ 7.7, 7.5 และ 7.8 (โดยปริมาตร) ปริมาณเซลยีสต์ 240, 180 และ 210 ล้านเซลต่อมิลลิลิตร ส่วนน้ำตาลอินเวิร์ทที่เหลือในน้ำหมักเป็นร้อยละ 2.5, 3.2 และ 2.6 (น้ำหนักต่อปริมาตร) ตามลำดับ จะเห็นว่าปริมาณเอทานอลค่อนข้างสม่ำเสมอ แต่เมื่อคิดเป็นอัตราการผลิตต่อหน่วยเวลาแล้วมีค่าต่ำมาก จึงทดลองลดระยะเวลาในการถ่ายเทน้ำหมักให้สั้นเข้าเป็น 4 ชั่วโมง/ครั้ง จะเห็นว่าในชั่วโมงที่ 43 ได้เอทานอลร้อยละ 8.1 (โดยปริมาตร) ภายหลังการถ่ายเทน้ำหมักครั้งนี้ได้ทดลองให้อากาศในอัตรา 0.5 ปริมาตรอากาศ ต่อปริมาตรน้ำหมัก ต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ภายหลังการถ่ายเทน้ำหมักทุกครั้ง พบว่าระหว่างชั่วโมงที่ 47-60 ปริมาณเอทานอลลดลงจากร้อยละ 7.5 เป็น 6.4 (โดยปริมาตร) ส่วนปริมาณน้ำตาลในน้ำหมักจะเหลืออยู่ในช่วง 3.0-3.3 (น้ำหนักต่อปริมาตร) ทั้งนี้เนื่องจากการให้อากาศในปริมาณนี้เหมาะสมสำหรับการเพิ่มปริมาณเซลยีสต์ (อำนวย, 2520) ระบบจึงมีแนวโน้มที่จะใช้น้ำตาลในการผลิตเซลยีสต์มากกว่าผลิตเอทานอล

รูปที่ 4-3 แสดงปริมาณเอทานอล จำนวนเซลยีสต์ที่นับได้โดยตรงจากกล้องจุลทรรศน์ และปริมาณน้ำตาลอินเวิร์ทที่เหลืออยู่ในน้ำหมัก ในการผลิตเอทานอลของเชื้อ S. ellipsoideus ด้วยเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดกึ่งต่อเนื่อง เมื่อใช้สภาวะต่าง ๆ ของการหมัก ดังแสดงในตารางที่ 3-1 เริ่มทำการถ่ายเทน้ำหมักครั้งแรกชั่วโมงที่ 24 ด้วยอัตราการถ่ายเทน้ำหมักร้อยละ 25 และทดแทนด้วยสารละลายน้ำสับปะรดสดที่มีความเข้มข้น 18 องศาบริกซ์ ในอัตราเดียวกัน พร้อมทั้งเติมอาหารเสริม

ช่วงเวลาในการถ่ายเทน้ำหมักเป็นดังนี้

ทำการถ่ายเทน้ำหมัก 5 ชั่วโมง/ครั้ง ระหว่างชั่วโมงที่ 24-39

ทำการถ่ายเทน้ำหมัก 4 ชั่วโมง/ครั้ง ระหวางชั่วโมงที่ 43-60

และให้อากาศในอัตรา 0.5 ปริมาตรอากาศ ต่อปริมาตรน้ำหมัก ต่อนาที หลังจากถ่ายเทน้ำหมักในชั่วโมงที่ 43

หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เวลา (ชั่วโมง)
0 4 8 12 16 20 24 28 32 36 40 44 48 52 56 60 64 68 72
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
0 50 100 150 200 250 300 350 400 450 500
0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20
o เอทานอล
Δ น้ำตาลอินเวิร์ท
● เซลล์ยีสต์

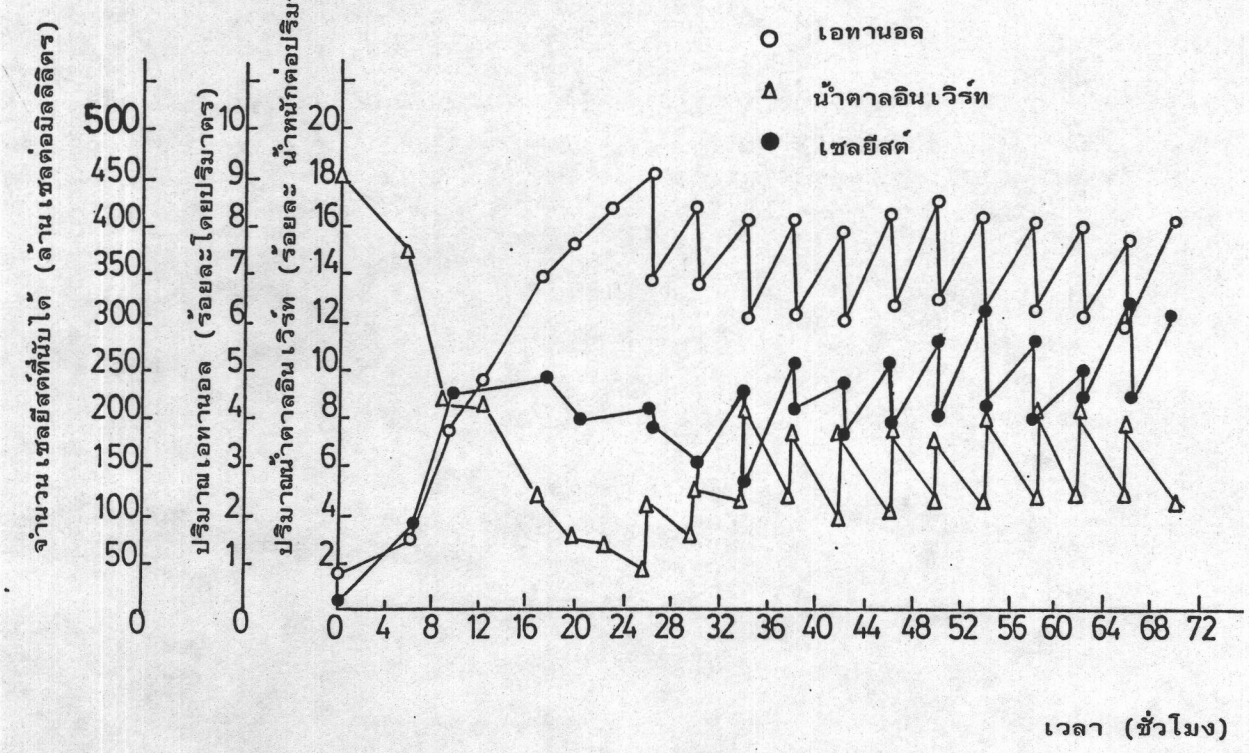
รูปที่ 4-3

3. การให้อากาศ 0.5 ปริมาตรอากาศ ต่อปริมาตรน้ำหมัก ต่อนาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วลดลงเหลือ 0.04-0.06 ปริมาตรอากาศ ต่อปริมาตรน้ำหมัก ต่อนาที ตลอดการทดลอง เริ่มถ่ายเทน้ำหมักในชั่วโมงที่ 24 ด้วยอัตราร้อยละ 25 ทุก 4 ชั่วโมง ผลการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 4-4 พบว่าสภาวะเช่นนี้ ได้ผลผลิตเอทานอลค่อนข้างสม่ำเสมอ คือ ร้อยละ 8 (โดยปริมาตร) ปริมาณเซลยีสต์ก็อยู่ในระดับ 260-350 ล้านเซลต่อมิลลิลิตร และน้ำตาลอินเวิร์ทเหลือในน้ำหมักร้อยละ 4 (น้ำหนักต่อปริมาตร) ทั้งนี้เนื่องจากการให้อากาศแม้เพียงเล็กน้อย ก็มีส่วนช่วยหมุนเวียนน้ำหมักอยู่ตลอดเวลา ยีสต์มีโอกาสรับออกซิเจนอย่างทั่วถึง (วิชาพงษ์, 2525) และไม่มีผลกระทบต่อปริมาณเอทานอลที่อยู่ในระบบ (Ricketts & Hough, 1961)

4. การหาอัตราการให้อากาศที่เหมาะสมแก่น้ำหมัก เมื่อทดลองเปลี่ยนสภาวะการให้อากาศจากข้อ 3. เป็น 0.16-0.18 ปริมาตรอากาศ ต่อปริมาตรน้ำหมัก ต่อนาที ระหว่างชั่วโมงที่ 34-42 ผลดังแสดงไว้ในรูปที่ 4-5 พบว่าปริมาณเอทานอลโดยเฉลี่ยจะลดลงเหลือร้อยละ 7.6 (โดยปริมาตร) และมีแนวโน้มลดลงต่อไป ขณะเดียวกันปริมาณเซลยีสต์เพิ่มขึ้นเป็น 220 ล้านเซลต่อมิลลิลิตร และเมื่อเปลี่ยนการให้อากาศเป็น 0.04-0.06 ปริมาตรอากาศต่อปริมาตรน้ำหมัก ต่อนาที เท่าเดิม ในชั่วโมงที่ 42-54 ปริมาณเอทานอลที่ได้ก็จะเริ่มสูงขึ้นประมาณร้อยละ 8 หลังจากนั้นได้ทดลองไม่ให้อากาศ ในระหว่างชั่วโมงที่ 54-62 พบว่าปริมาณเซลยีสต์ และเอทานอล จะลดลงจาก 250 ล้านเซลต่อมิลลิลิตร เป็น 170 ล้านเซลต่อมิลลิลิตร และร้อยละ 7.8 เป็น 7.4 (โดยปริมาตร) ตามลำดับ ต่อจากนั้นในชั่วโมงที่ 62 ได้เปลี่ยนสภาวะการให้อากาศเป็น 0.04-0.06 ปริมาตรอากาศ ต่อปริมาตรน้ำหมัก ต่อนาที ดังเดิม ปริมาณเอทานอลก็สูงขึ้นเป็นร้อยละ 7.8

จากประสบการณ์ของ Ricketts & Hough, 1961 ในโรงงานผลิตเบียร์ พบว่า ภายใต้สภาวะที่มีอากาศจำกัด อัตราการผลิตจะต่ำมาก เมื่อมีการให้อากาศแม้เพียงเล็กน้อยในอัตรา 30 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ก็จะช่วยเพิ่มปริมาณเซลยีสต์ได้ และยังช่วยให้เซลยีสต์สามารถดำรงชีวิตได้นานขึ้นอีกด้วย จากผลการทดลองภายใต้สภาวะการให้อากาศ 0.04-0.06 ปริมาตรอากาศ ต่อปริมาตรน้ำหมัก ต่อนาที ในรูปที่ 4-4 ได้ทำการคำนวณค่าตามแนวของระบบต่อเนื่องโดยใช้สมการอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ

รูปที่ 4-4 แสดงปริมาณเอทานอล จำนวนเซลยีสต์ที่นับได้โดยตรงจากกล้องจุลทรรศน์ และปริมาณน้ำตาลอินเวิร์ทที่เหลืออยู่ในน้ำหมักในการผลิตเอทานอลของเชื้อ S. ellipsoideus ด้วยเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดกึ่งต่อเนื่อง เมื่อใช้สารอาหารและสภาวะในการหมัก ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3-1 เริ่มทำการถ่ายเทน้ำหมักครั้งแรกในชั่วโมงที่ 24 ด้วยอัตราการถ่ายเทน้ำหมักร้อยละ 25 ทุก 4 ชั่วโมง และทดแทนด้วยสารละลายน้ำสับปะรดที่มีความเข้มข้น 18 องศาบริกซ์ ในอัตราเดียวกัน พร้อมทั้งเติมอาหารเสริม ทดลองให้อากาศในอัตรา 0.5 ปริมาตรอากาศ ต่อปริมาตรน้ำหมัก ต่อนาที ในช่วง 4 ชั่วโมงแรก แล้วลดปริมาณเหลือ 0.04-0.06 ปริมาตรอากาศ ต่อปริมาตรน้ำหมัก ต่อนาที ตลอดการทดลอง


จำนวนเซลยีสต์ที่นับได้ (ล้านเซลต่อมิลลิลิตร)
ปริมาณเอทานอล (ร้อยละโดยปริมาตร)
ปริมาณน้ำตาลอินเวิร์ท (ร้อยละ น้ำหนักต่อปริมาตร)
เอทานอล
น้ำตาลอินเวิร์ท
เซลยีสต์
เวลา (ชั่วโมง)

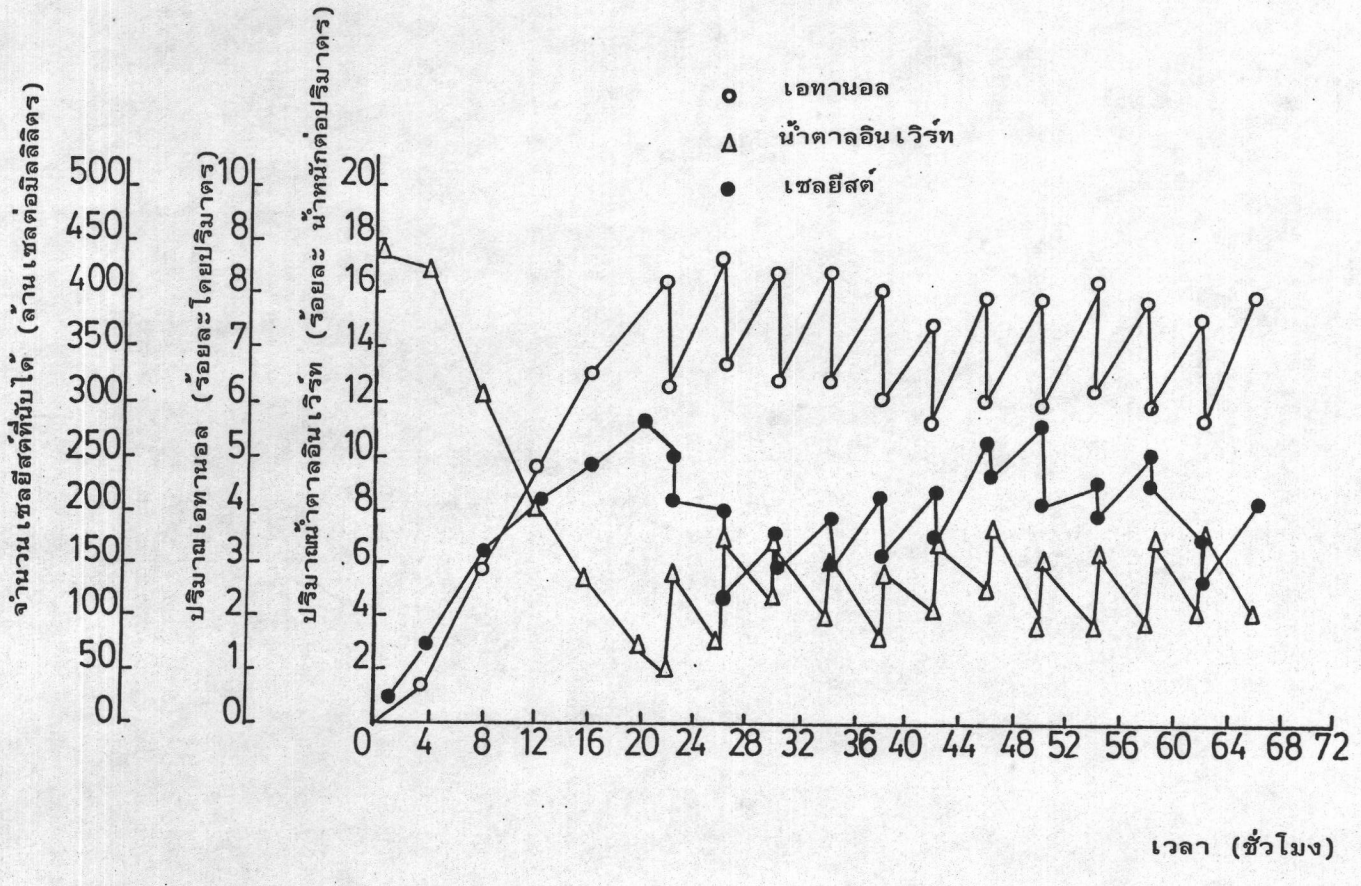
รูปที่ 4-4

รูปที่ 4-5 แสดงปริมาณเอทานอล จำนวนเซลยีสต์ที่นับได้โดยตรงจากกล้องจุลทรรศน์ และปริมาณน้ำตาลอินเวิร์ทที่เหลืออยู่ในน้ำหมัก ในการผลิตเอทานอลของเชื้อ S. ellipsoideus ด้วยเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดกึ่งต่อเนื่อง เมื่อใช้สารอาหารและสภาวะในการหมัก ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3-1 เริ่มทำการถ่ายเทครั้งแรกในชั่วโมงที่ 22 ด้วยอัตราการถ่ายเทน้ำหมักร้อยละ 25 ทุก 4 ชั่วโมง และทดแทนด้วยสารละลายน้ำสับปะรดสดที่มีความเข้มข้น 18 องศาบริกซ์ พร้อมอาหารเสริม ระหว่างการทดลองให้อากาศในอัตราต่าง ๆ กัน ดังนี้

ปริมาณอากาศ 0.04-0.06 ปริมาตรอากาศ ต่อปริมาตรน้ำหมักต่อนาที ในระหว่างชั่วโมงที่ 22-34, 42-54, 62-66

ปริมาณอากาศ 0.16-0.18 ปริมาตรอากาศ ต่อปริมาตรน้ำหมักต่อนาที ระหว่างชั่วโมงที่ 34-42

ไม่ให้อากาศเลย ระหว่างชั่วโมงที่ 54-62


จำนวนเซลยีสต์ที่นับได้ (ล้านเซลต่อมิลลิลิตร)
500
450
400
350
300
250
200
150
100
50
0
ปริมาณเอทานอล (ร้อยละโดยปริมาตร)
10
8
8
7
6
5
4
3
2
1
0
ปริมาณน้ำตาลอินเวิร์ท (ร้อยละ น้ำหนักต่อปริมาตร)
20
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0
เอทานอล
น้ำตาลอินเวิร์ท
เซลยีสต์
0 4 8 12 16 20 24 28 32 36 40 44 48 52 56 60 64 68 72
เวลา (ชั่วโมง)

รูปที่ 4-5

$$\mu = \frac{1}{X}\frac{dX}{dt}$$

คำนวณอัตราการเจือจาง $D = F/V$

เมื่อ F คือ อัตราเร็วของการป้อนสารอาหาร, ลิตรต่อชั่วโมง, V คือ ปริมาตรของคอลัมน์, ลิตร

ความสัมพันธ์ของ μ และ D จะเป็น

$$\frac{dX}{dt} = X(\mu - D)$$

ที่ค่า μ สูงกว่า D ปริมาณเซลจะสะสมขึ้นเรื่อย ๆ

ที่ค่า μ น้อยกว่า D ปริมาณเซลจะลดลงเรื่อย ๆ

ที่ค่า μ เท่ากับ D ปริมาณเซลจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง (ไพบูลย์, 2520)

จากการคำนวณที่อัตราการถ่ายเทน้ำหมักด้วยอัตราร้อยละ 25 ของ 6 ลิตร ทุก 4 ชั่วโมง ได้ค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะเฉลี่ย 0.07 ชั่วโมง$^{-1}$ คำนวณอัตราการเจือจางมีค่า 0.06 ชั่วโมง$^{-1}$ ซึ่งทั้ง 2 ค่าใกล้เคียงกัน สภาวะของการถ่ายเทน้ำหมักเช่นนี้เหมาะสมทำให้อัตราการเกิดเซลใกล้เคียงกับอัตราการถ่ายเทเซลออกจากคอลัมน์ ซึ่งจะมีผลต่อการผลิตเอทานอล ทำให้ยีสต์สามารถผลิตเอทานอลได้สม่ำเสมอกว่าสภาวะการถ่ายเทอื่น ๆ

<u>ผลการศึกษาเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง</u>

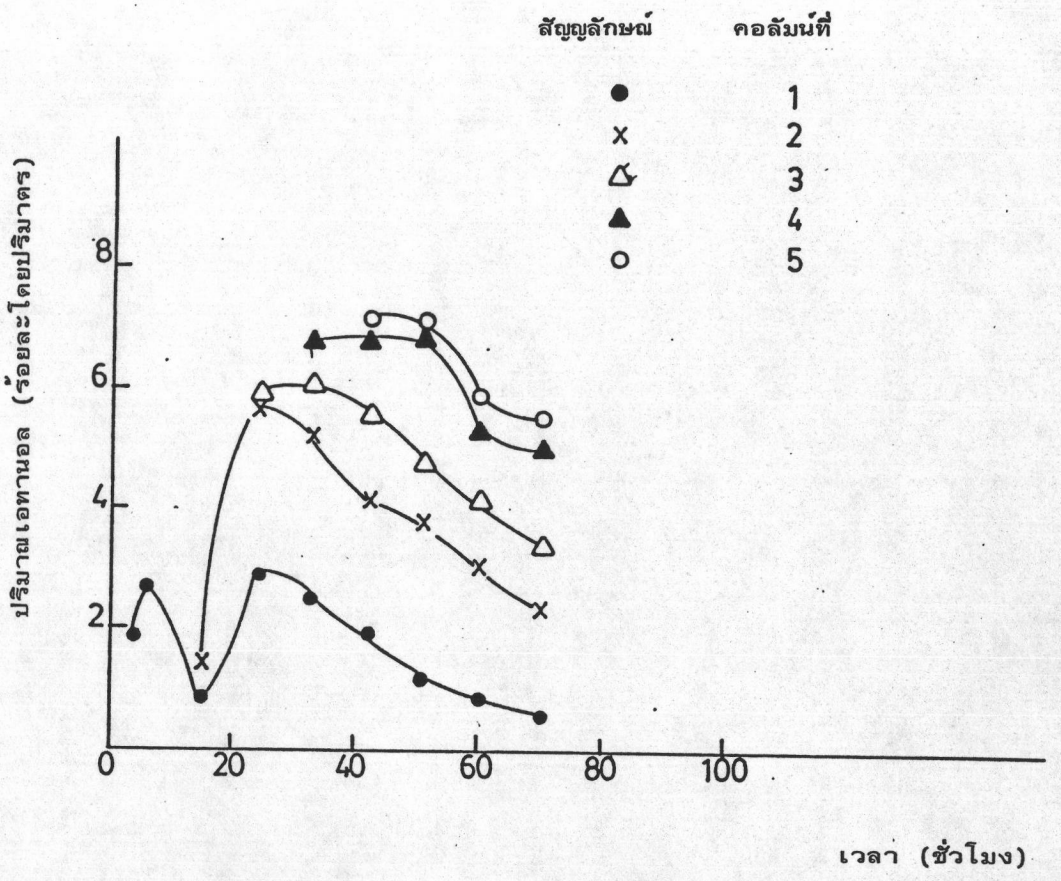
จากผลการทดลองผลิตเอทานอลด้วยระบบต่อเนื่อง ได้ศึกษาอิทธิพลของการให้อากาศและระยะเวลาที่ปล่อยให้เกิดการหมักภายในคอลัมน์แรก รวมทั้งศึกษาอัตราการเจือจางที่เหมาะสม

1. ผลการให้อากาศ 0.5 ปริมาตรอากาศ ต่อปริมาตรน้ำหมัก ต่อนาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง อัตราการเจือจางน้ำหมัก 0.11 ชั่วโมง$^{-1}$

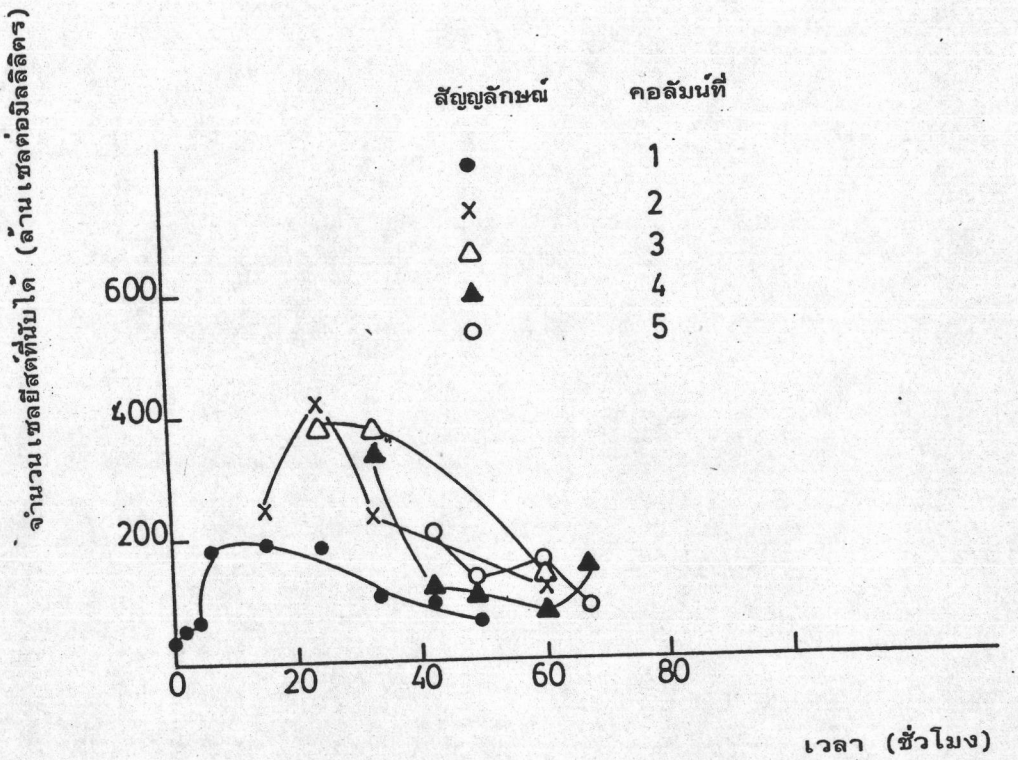
1.1 เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 4 ชั่วโมง ซึ่งขณะนั้นมีปริมาณเอทานอลร้อยละ 2.6 (โดยปริมาตร) ปริมาณเซลยีสต์ 185 ล้านเซลต่อมิลลิลิตร พบว่าจะได้ผลผลิตเอทานอลร้อยละ 7 (โดยปริมาตร) ที่คอลัมน์ 5 ในชั่วโมงที่ 42 ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4-6, 4-7, 4-8 การทดลองในสภาวะเช่นนี้สามารถรักษาสมดุลย์ได้ประมาณ 10 ชั่วโมง คือ ระหว่างชั่วโมงที่ 42 ถึงชั่วโมงที่ 52 ต่อจากนั้น ผลผลิตเอทานอล ปริมาณเซลยีสต์ก็เริ่มลดลง และน้ำตาลในน้ำหมักเริ่มสะสมมากขึ้นเป็นลำดับ จะเห็นว่าการให้อากาศในปริมาณจำกัดเช่นนี้ไม่เพียงพอกับความต้องการในการเพิ่มปริมาณเซลยีสต์ เมื่อปล่อยสารอาหารจะทำให้ปริมาณเซลยีสต์ที่กระจายไปยังคอลัมน์ถัดไปน้อย ความสามารถในการผลิตเอทานอลจึงน้อยลงด้วย ทั้งนี้เนื่องจากก๊าซออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำหมักเป็นปัจจัยสำคัญในการสร้างกรดโอลิอิค (Oleic acid) และเออโกสเตอรอล (Ergosterol) ซึ่งเป็นสารช่วยกระตุ้นให้ยีสต์มีการเจริญเติบโตและเพิ่มปริมาณ ถ้าก๊าซออกซิเจนมีน้อยหรือไม่มีเลย ยีสต์จะเจริญได้ไม่ดีเท่าที่ควรหรือไม่สามารถเจริญได้ ความสามารถในการผลิตเอทานอลจึงน้อยลงไปด้วย (Nagodawithana, 1974)

1.2 เริ่มปล่อยสารอาหาร เมื่อเวลาผ่านไป 16 ชั่วโมง ซึ่งขณะนั้นมีปริมาณเอทานอลร้อยละ 7 (โดยปริมาตร) ปริมาณเซลยีสต์ 700 ล้านเซลต่อมิลลิลิตร พบว่าจะได้ผลผลิตเอทานอลร้อยละ 10 (โดยปริมาตร) ที่คอลัมน์ 5 ในชั่วโมงที่ 55 ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4-9, 4-10, 4-11 ซึ่งการทดลองในสภาวะที่ปล่อยให้มีการหมักในคอลัมน์แรกเป็นเวลา 16 ชั่วโมงนี้สามารถรักษาสภาวะสมดุลย์ได้ประมาณ 20 ชั่วโมง คือ ระหว่างชั่วโมงที่ 55-75 การที่สภาวะสมดุลย์นานกว่าข้อ 1.1 ก็เนื่องจากในการหมักแบบต่อเนื่องนั้นถ้าปล่อยให้มีการผลิตเอทานอลถึงระดับสูงก่อนที่จะเริ่มระบบต่อเนื่อง ก็จะช่วยให้ระบบมีสภาวะสมดุลย์ได้นานขึ้น (Hough, 1971) แต่เนื่องจากก๊าซออกซิเจนที่ละลายในน้ำหมักมีปริมาณจำกัด ระบบจึงไม่สามารถรักษาสภาวะสมดุลย์ไว้ได้นานกว่านี้ หลังจากชั่วโมงที่ 80 ปริมาณเอทานอลที่ได้จึงลดลง

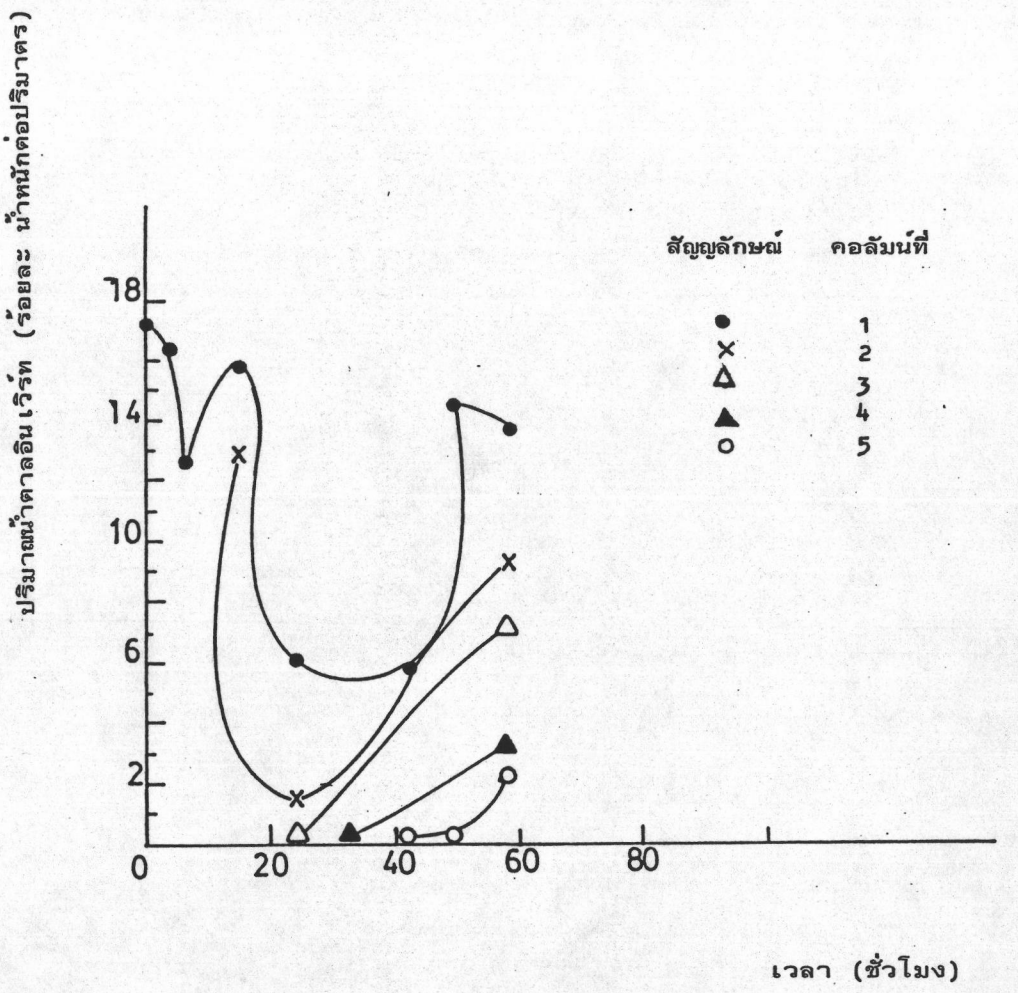
2. ผลการให้อากาศ 0.5 ปริมาตรอากาศ ต่อปริมาตรน้ำหมัก ต่อนาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ต่อจากนั้นลดปริมาณอากาศเหลือ 0.04-0.06 ปริมาตรอากาศ ต่อปริมาตรน้ำหมักต่อนาที ตลอดการทดลอง อัตราการเจือจางน้ำหมัก 0.17 ชั่วโมง$^{-1}$



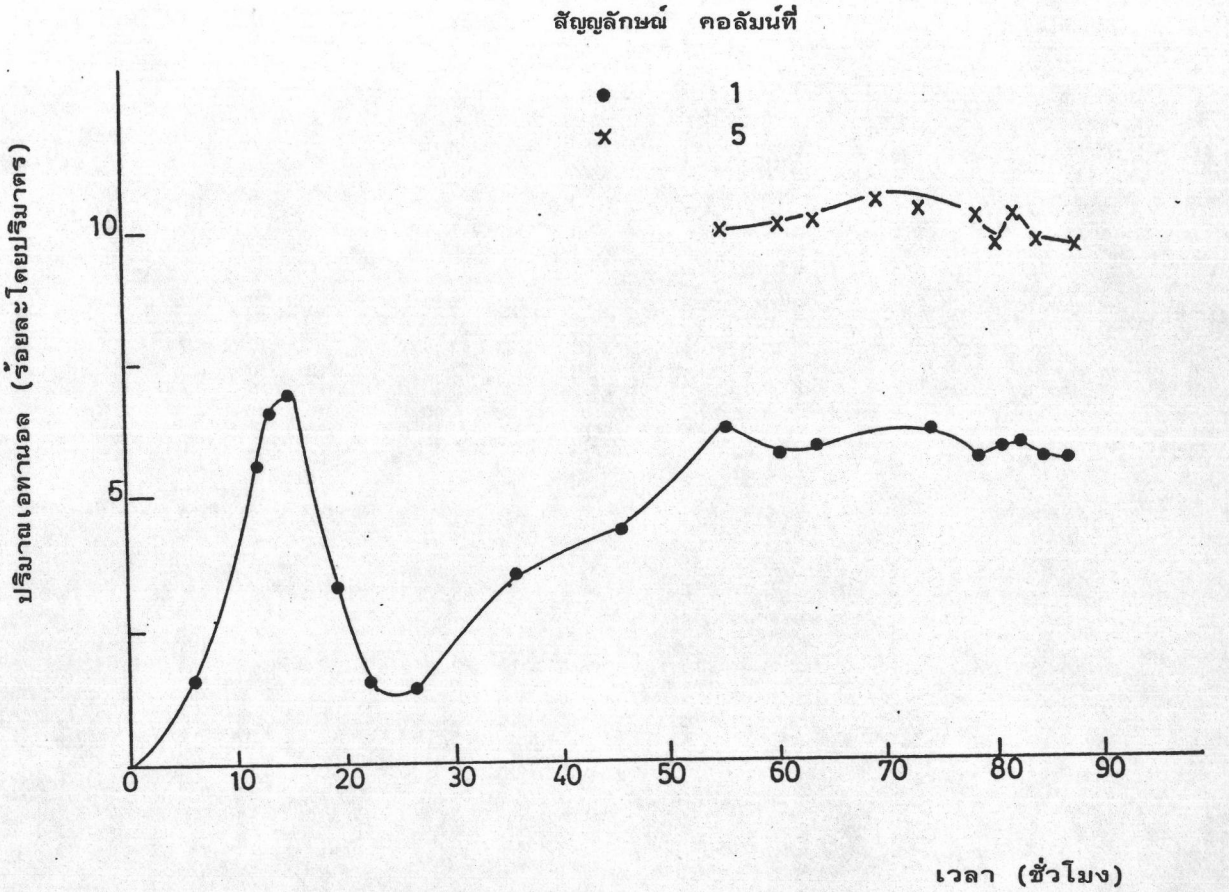
รูปที่ 4-6 แสดงปริมาณเอทานอลที่ได้ในการผลิตเอทานอลของเชื้อ S. ellipsoideus ด้วยเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง อัตราการให้อากาศเป็น 0.5 ปริมาตรอากาศ ต่อปริมาตรน้ำหมัก ต่อนาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการเจือจางน้ำหมัก 0.11 ชั่วโมง$^{-1}$ เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 4 ชั่วโมง



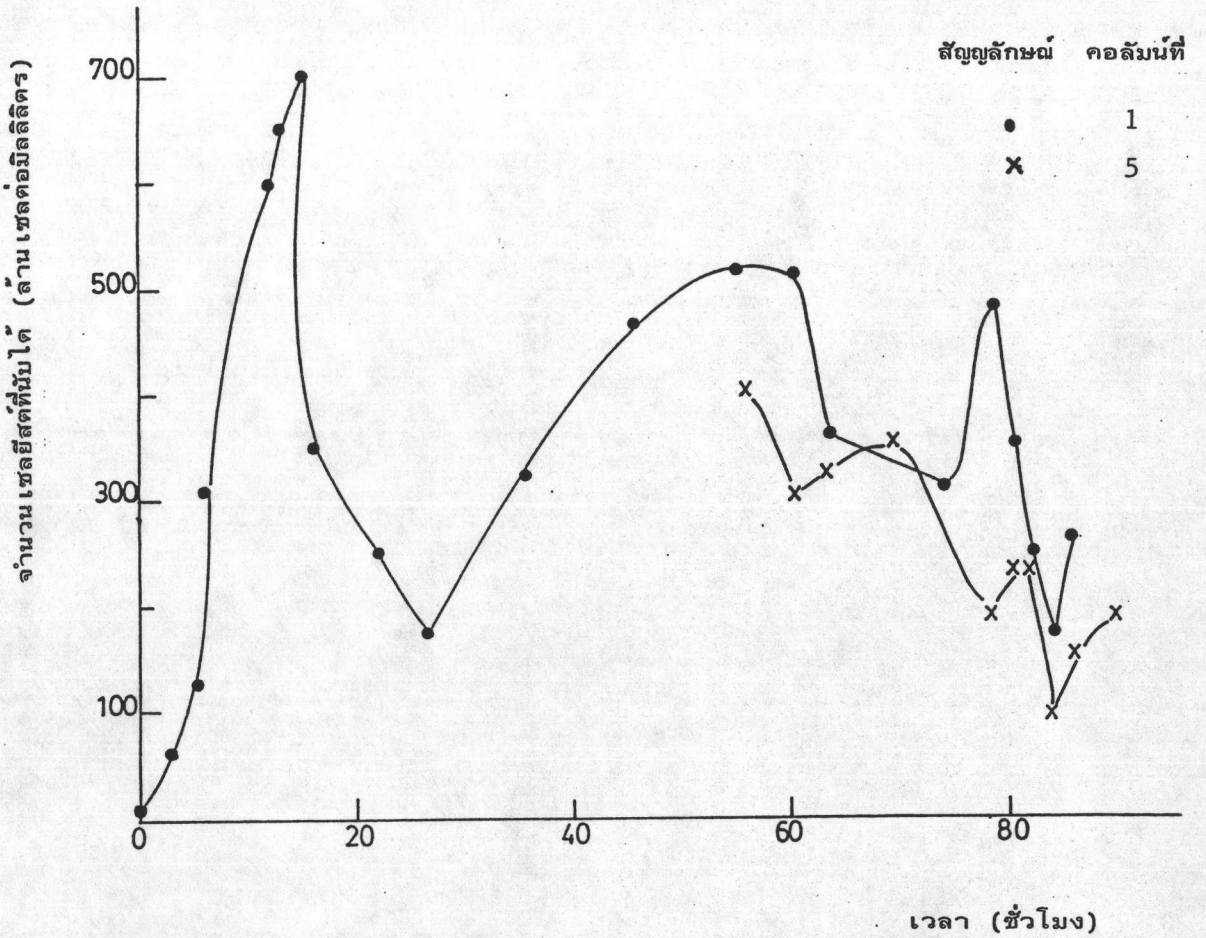
รูปที่ 4-7 แสดงจำนวนเซลยีสต์ที่นับได้โดยตรงจากกล้องจุลทรรศน์ ในการผลิตเอทานอลของเชื้อ S. ellipsoideus ด้วยเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง อัตราการให้อากาศเป็น 0.5 ปริมาตรอากาศ ต่อปริมาตรน้ำหมัก ต่อนาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง อัตราการเจือจาง น้ำหมัก 0.11 ชั่วโมง$^{-1}$ เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 4 ชั่วโมง



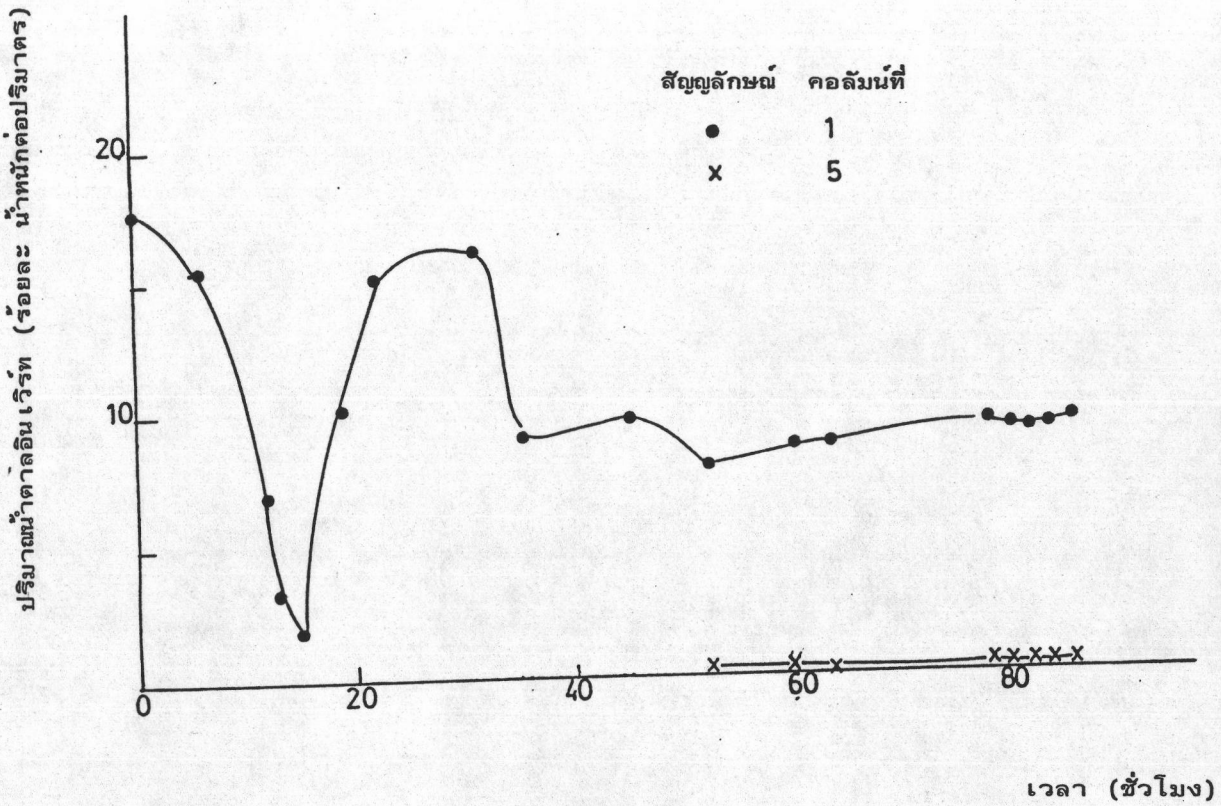
รูปที่ 4-8 แสดงปริมาณน้ำตาลอินเวิร์ทที่ได้ในการผลิตเอทานอลของเชื้อ S. ellipsoideus ด้วยเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง อัตราการให้อากาศเป็น 0.5 ปริมาตรอากาศ ต่อปริมาตรน้ำหมักต่อนาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง อัตราการเจือจางน้ำหมัก 0.11 ชั่วโมง$^{-1}$ เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 4 ชั่วโมง



รูปที่ 4-9 แสดงปริมาณเอทานอลที่ได้ในการผลิตเอทานอลของเชื้อ S. ellipsoideus ด้วยเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง อัตราการให้อากาศ 0.5 ปริมาตรอากาศ ต่อปริมาตรน้ำหมัก ต่อนาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง อัตราการเจือจางน้ำหมัก 0.11 ชั่วโมง$^{-1}$ เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 16 ชั่วโมง



รูปที่ 4-10 แสดงจำนวนเซลยีสต์ที่นับได้โดยตรงจากกล้องจุลทรรศน์ ในการผลิตเอทานอลของเชื้อ S. ellipsoideus ด้วยเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง อัตราการให้อากาศ 0.5 ปริมาตรอากาศ ต่อปริมาตรน้ำหมัก ต่อนาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง อัตราการเจือจางน้ำหมัก 0.11 ชั่วโมง$^{-1}$ เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 16 ชั่วโมง



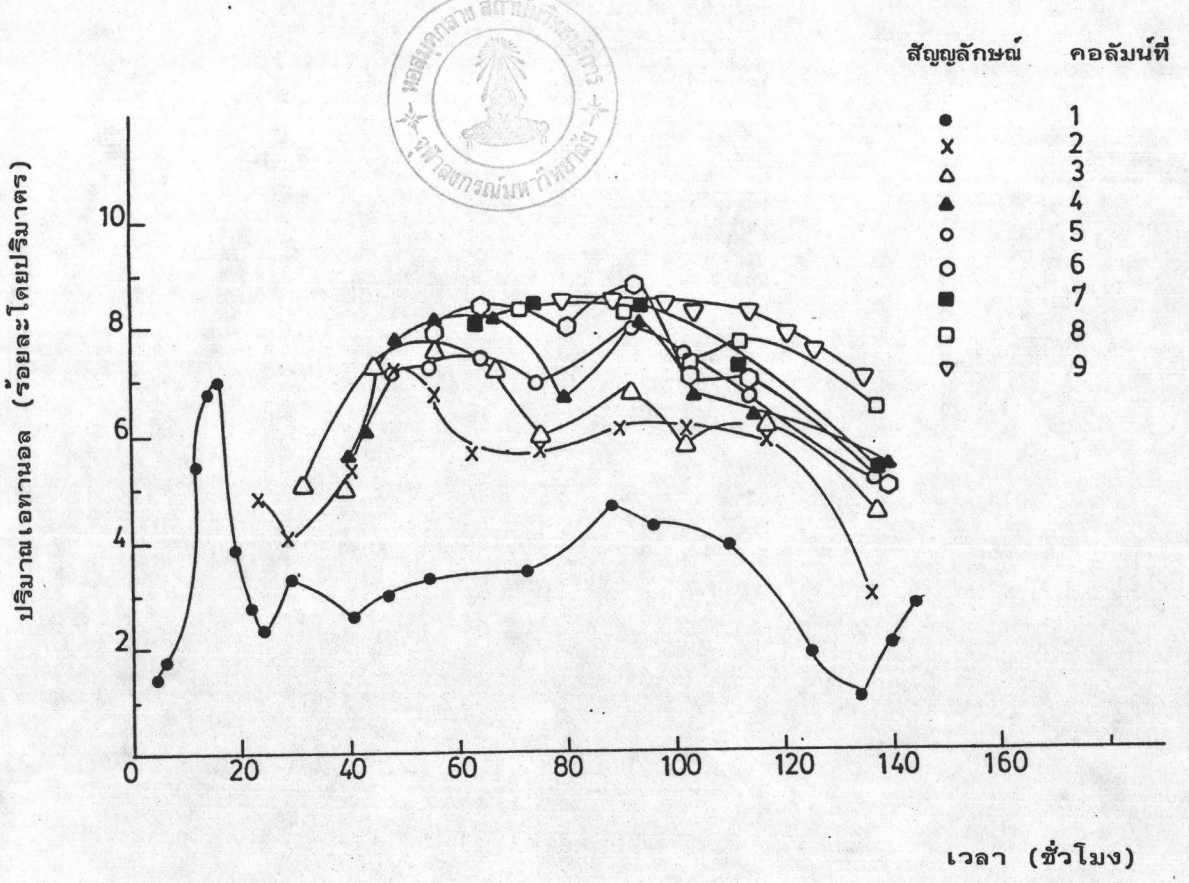
รูปที่ 4-11 แสดงปริมาณน้ำตาลอินเวิร์ทที่เหลืออยู่ในน้ำหมัก ในการผลิตเอทานอลของเชื้อ S. ellipsoideus ด้วยเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง อัตราการให้อากาศ 0.5 ปริมาตรอากาศ ต่อปริมาตรน้ำหมักต่อนาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง อัตราการเจือจางน้ำหมัก 0.11 ชั่วโมง$^{-1}$ เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 16 ชั่วโมง.

2.1 เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 16 ชั่วโมง ซึ่งขณะนั้นมีปริมาณเอทานอลร้อยละ 7 (โดยปริมาตร) ปริมาณเซลยีสต์ 750 ล้านเซลต่อมิลลิลิตร พบว่าจะให้ผลผลิตเอทานอลร้อยละ 8 (โดยปริมาตร) ที่คอลัมน์ 9 ในชั่วโมงที่ 80 ดังแสดงในรูปที่ 4-12, 4-13, 4-14 การทดลองในสภาวะเช่นนี้สามารถรักษาสภาวะสมดุลย์ได้นานประมาณ 30 ชั่วโมง คือ ระหว่างชั่วโมงที่ 80 ถึงชั่วโมงที่ 110

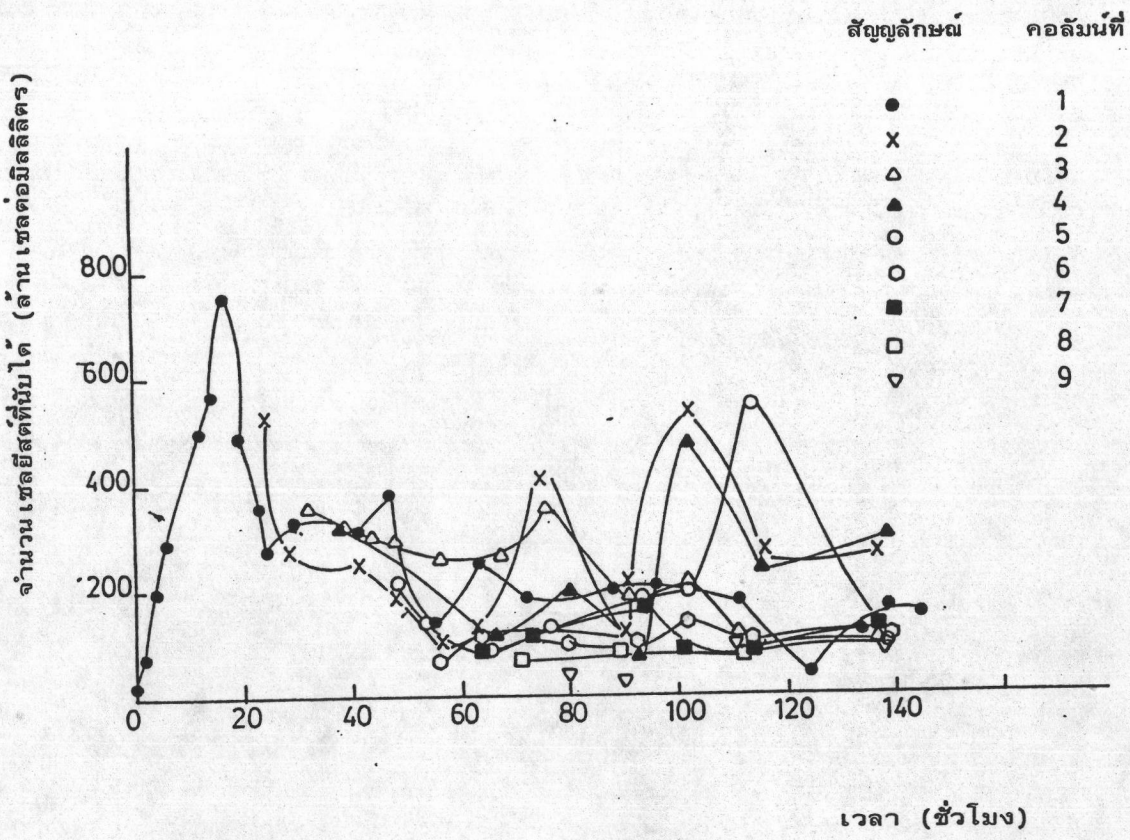
จะเห็นได้ว่าการให้อากาศเพียงเล็กน้อยตลอดเวลา จะช่วยลดสภาวะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมสำหรับยีสต์ ช่วยให้ยีสต์ดำรงชีวิตและมีกิจกรรมได้นานขึ้น ส่งผลให้ปริมาณเอทานอลที่ได้ค่อนข้างสม่ำเสมอเป็นเวลา 30 ชั่วโมง และเนื่องจากการเพิ่มอัตราการเจือจางเป็น 0.17 ชั่วโมง$^{-1}$ จึงต้องใช้จำนวนคอลัมน์มากขึ้น เพื่อให้ได้ปริมาณเอทานอลในปริมาณสูงสุด

2.2 เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 21 ชั่วโมง ซึ่งขณะนั้นมีปริมาณเอทานอลร้อยละ 9 (โดยปริมาตร) ปริมาณเซลยีสต์ 810 ล้านเซลต่อมิลลิลิตร พบว่าจะให้ผลผลิตเอทานอลร้อยละ 10 (โดยปริมาตร) ที่คอลัมน์ 5 ในชั่วโมงที่ 53 ดังแสดงในรูปที่ 4-15, 4-16, 3-17 การทดลองในสภาวะเช่นนี้สามารถรักษาสภาวะสมดุลย์ได้นาน 70 ชั่วโมง คือ ระหว่างชั่วโมงที่ 53-123 จะเห็นได้ชัดว่า การปล่อยให้มีการผลิตเอทานอลในปริมาณสูงก่อนเริ่มปล่อยสารอาหารในระบบต่อเนื่อง จะช่วยให้ระบบมีสภาวะสมดุลย์ได้นาน ผลผลิตก็จะออกมาเร็ว และจำนวนคอลัมน์ที่ใช้ก็น้อยลง และการให้อากาศเพียงเล็กน้อยในระหว่างการปล่อยสารอาหารยังช่วยกระตุ้นให้ยีสต์มีประสิทธิภาพในการทำงานเพิ่มขึ้น เป็นผลให้ได้เอทานอลออกมาในปริมาณสูง (Ricketts & Hough, 1961)

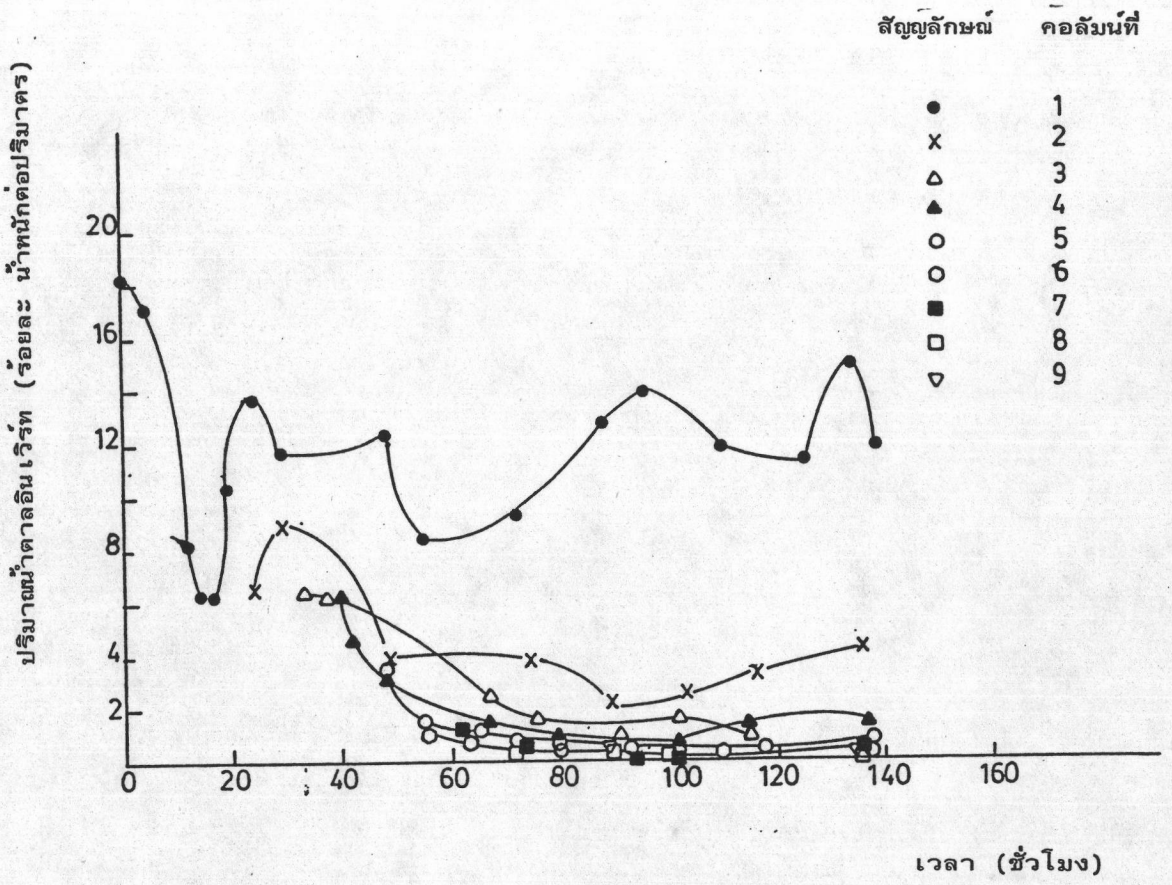
เพื่อให้ผลการทดลองชัดเจนยิ่งขึ้นได้นำค่าต่าง ๆ จากการทดลองในระบบต่อเนื่องนี้มาหาจุดที่เริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุลย์จนกระทั่งสิ้นสุดสภาวะสมดุลย์มาสร้างกราฟ พบว่าสภาวะที่มีอัตราการเจือจาง 0.17 ชั่วโมง$^{-1}$ ปริมาณเอทานอลเริ่มต้นร้อยละ 9 (โดยปริมาตร) ให้ปริมาณผลผลิตสูง และรักษาสภาวะสมดุลย์ได้นานอย่างน้อย 70 ชั่วโมง ดังเห็นได้จากรูปที่ 4-18, 4-19, 4-20 จำนวนเซลยีสต์ที่นับได้อยู่ในช่วง 300 ล้านเซลต่อมิลลิลิตร และปริมาณน้ำตาลอินเวิร์ทมีค่าใกล้ศูนย์ ถึงแม้ว่าที่อัตราการเจือจาง 0.11 ชั่วโมง$^{-1}$ จะให้ผลผลิตออกมาในปริมาณใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเปรียบเทียบอัตราการผลิตจะต่ำกว่าและรักษาสภาวะสมดุลย์ได้ไม่นาน



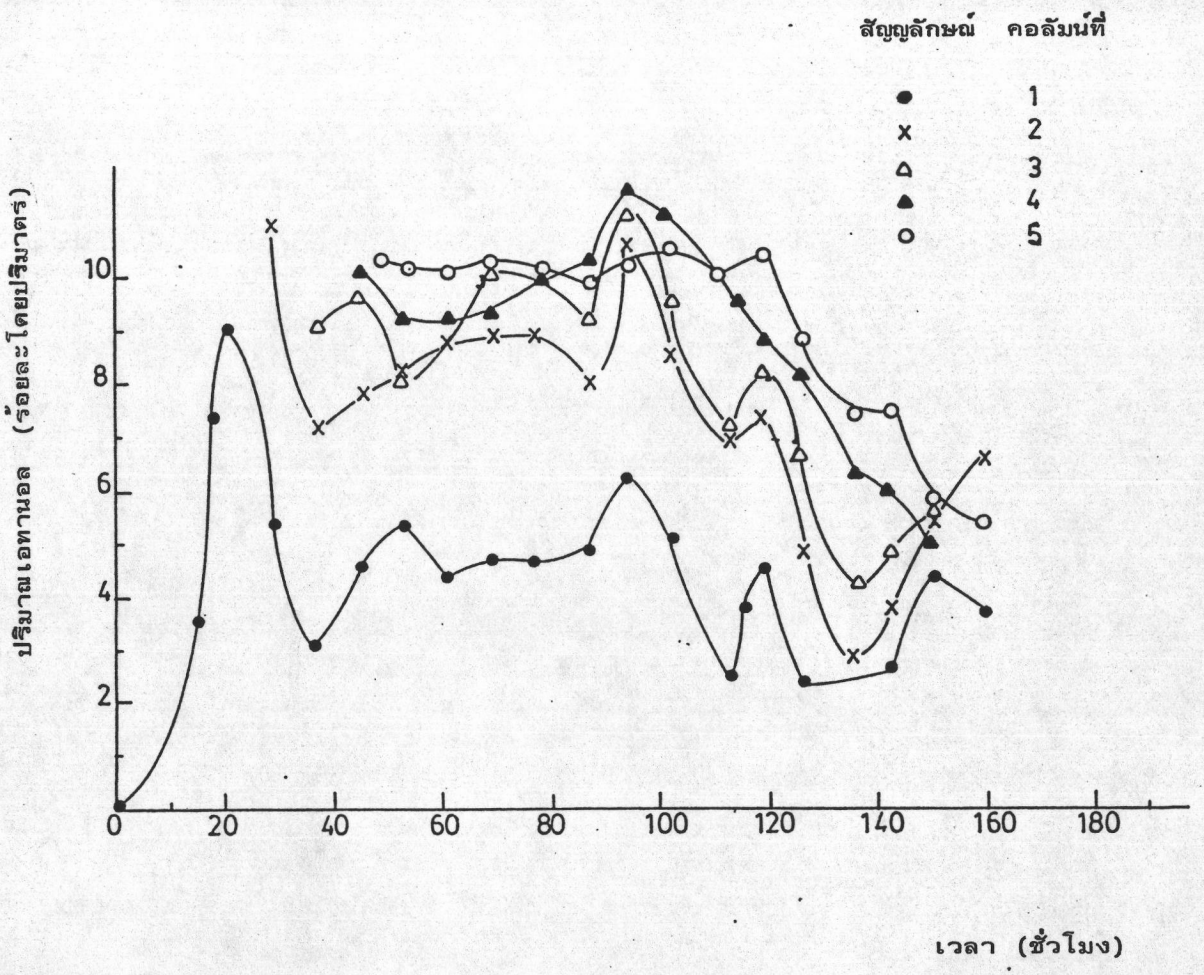
รูปที่ 4-12 แสดงปริมาณเอทานอลที่ได้ในการผลิตเอทานอลของเชื้อ S. ellipsoideus ด้วยเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง อัตราการให้อากาศ 0.5 ปริมาตรอากาศ ต่อปริมาตรน้ำหมัก ต่อนาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ต่อจากนั้นลดปริมาณอากาศลงเป็น 0.04-0.06 ปริมาตรอากาศ ต่อปริมาตรน้ำหมัก ต่อนาที อัตราการเจือจางน้ำหมัก 0.17 ชั่วโมง$^{-1}$ เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 16 ชั่วโมง



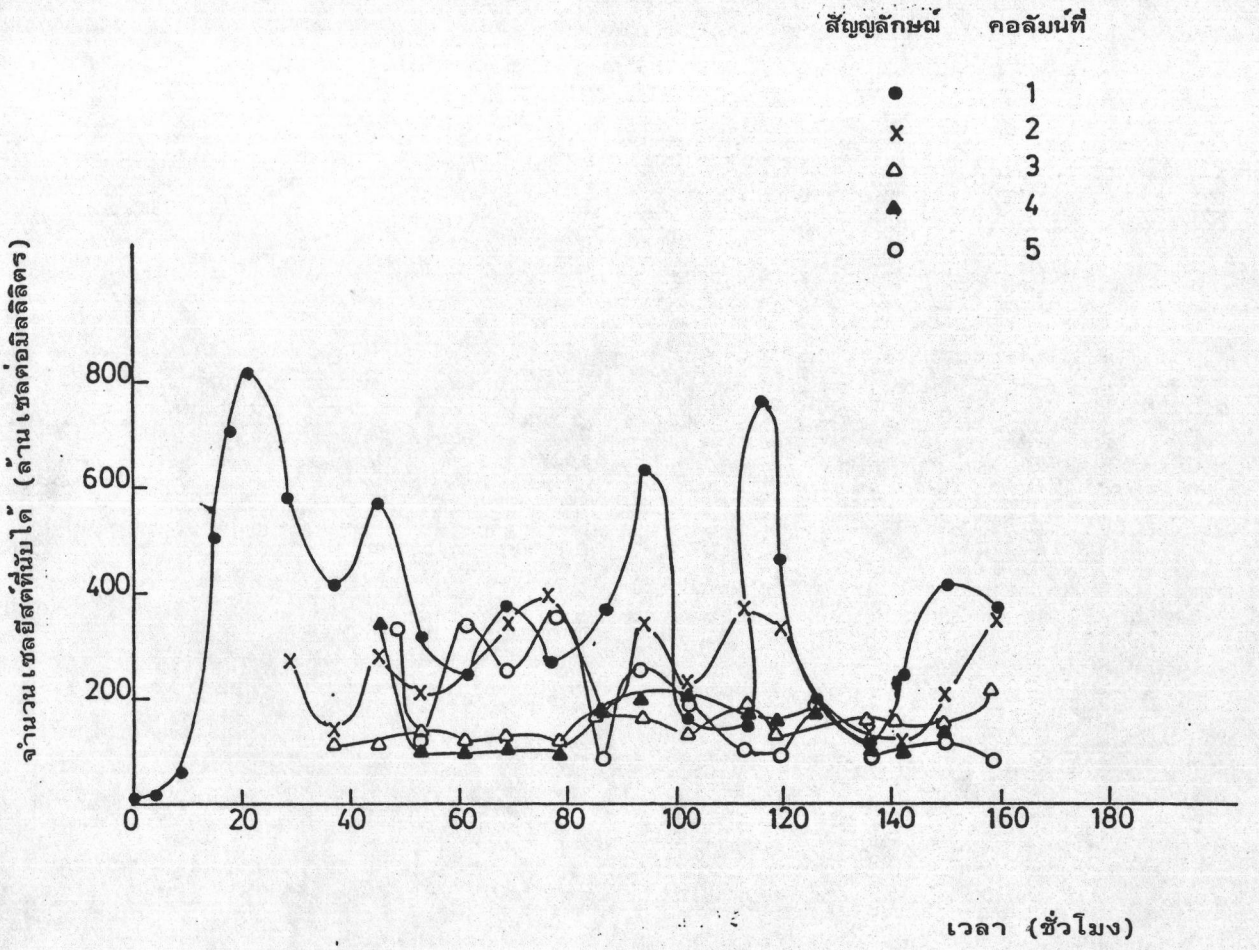
รูปที่ 4-13 แสดงจำนวนเซลยีสต์ที่นับได้โดยตรงจากกล้องจุลทรรศน์ ในการผลิตเอทานอลของเชื้อ S. ellipsoideus ด้วยเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง มีอัตราการให้อากาศ 0.5 ปริมาตรอากาศ ต่อปริมาตรน้ำหมัก ต่อนาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ต่อจากนั้นลดปริมาณอากาศลงเป็น 0.04-0.06 ปริมาตรอากาศ ต่อปริมาตรน้ำหมัก ต่อนาที อัตราการเจือจางน้ำหมัก 0.17 ชั่วโมง$^{-1}$ เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 16 ชั่วโมง



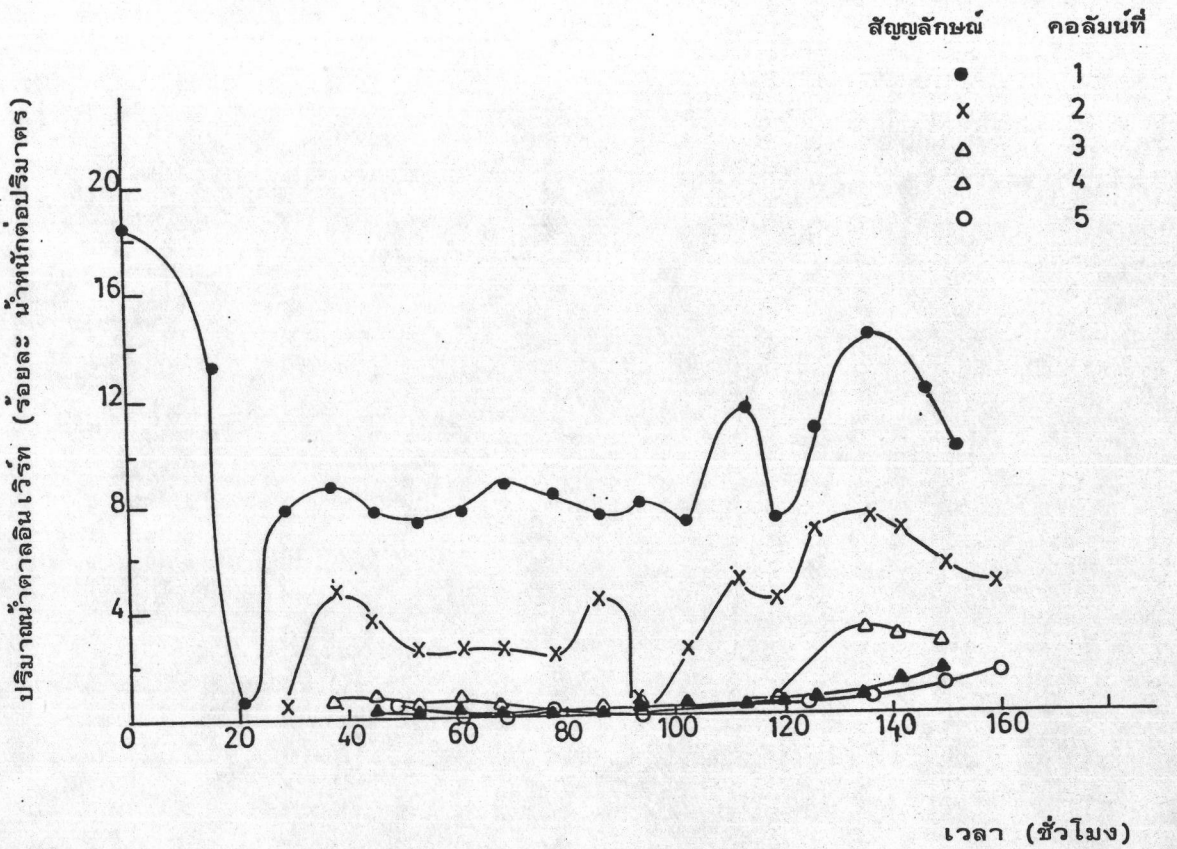
รูปที่ 4-14 แสดงปริมาณน้ำตาลอินเวิร์ทที่เหลืออยู่ในน้ำหมัก ในการผลิตเอทานอลของเชื้อ S. ellipsoideus ด้วยเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง อัตราการให้อากาศ 0.5 ปริมาตรอากาศ ต่อปริมาตรน้ำหมัก ต่อนาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ต่อจากนั้นลดปริมาณอากาศลงเป็น 0.04-0.06 ปริมาตรอากาศ ต่อปริมาตรน้ำหมัก ต่อนาที อัตราการเจือจางน้ำหมัก 0.17 ชั่วโมง$^{-1}$ เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 16 ชั่วโมง



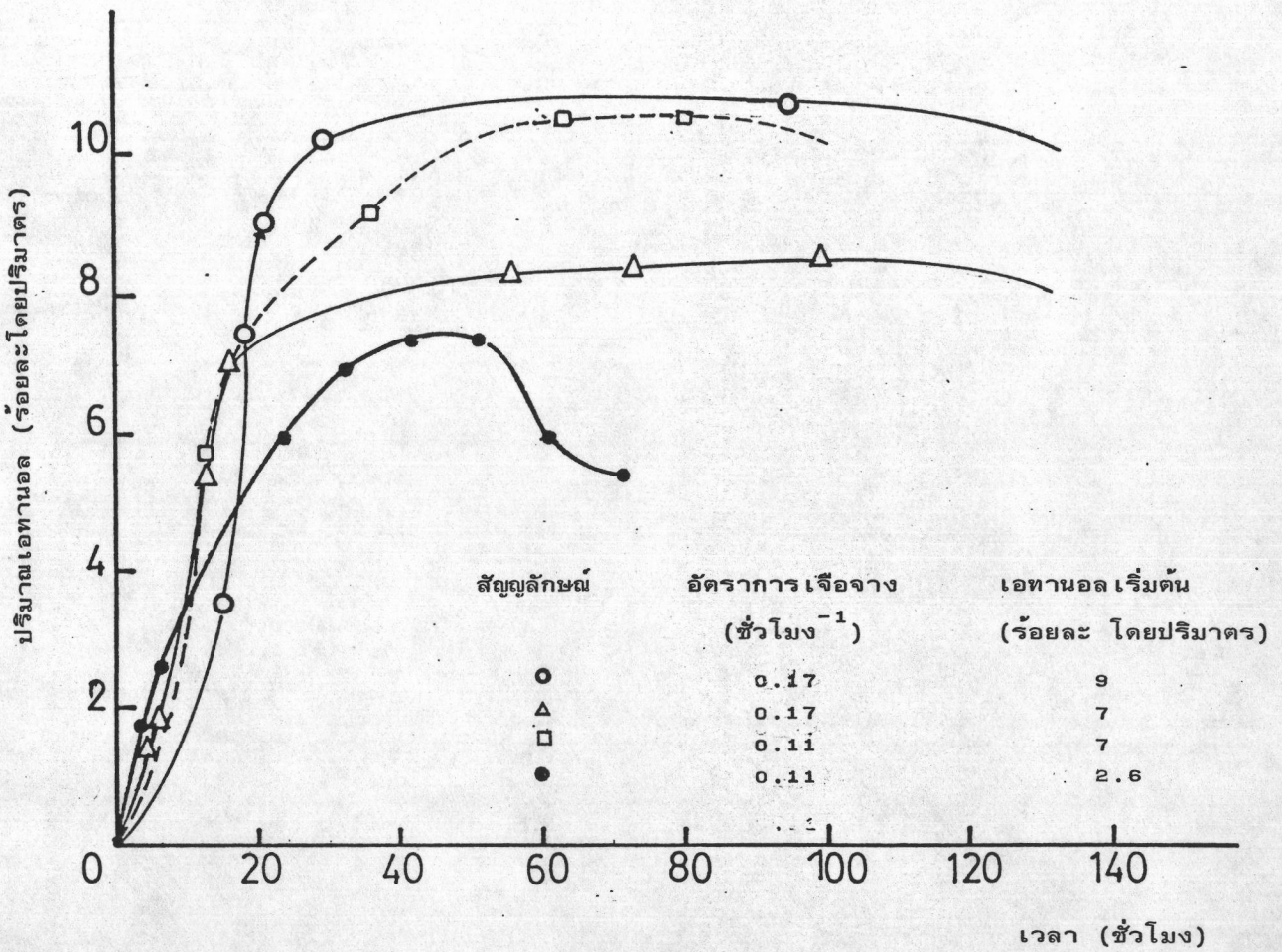
รูปที่ 4-15 แสดงปริมาณเอทานอลที่ได้ในการผลิตเอทานอลของเชื้อ S. ellipsoideus ด้วยเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง มีอัตราการให้อากาศ 0.5 ปริมาตรอากาศ ต่อปริมาตรน้ำหมัก ต่อนาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ต่อจากนั้นลดปริมาณอากาศลงเป็น 0.04-0.06 ปริมาตรอากาศ ต่อปริมาตรน้ำหมัก ต่อนาที อัตราการเจือจางน้ำหมัก 0.17 ชั่วโมง$^{-1}$ เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 21 ชั่วโมง



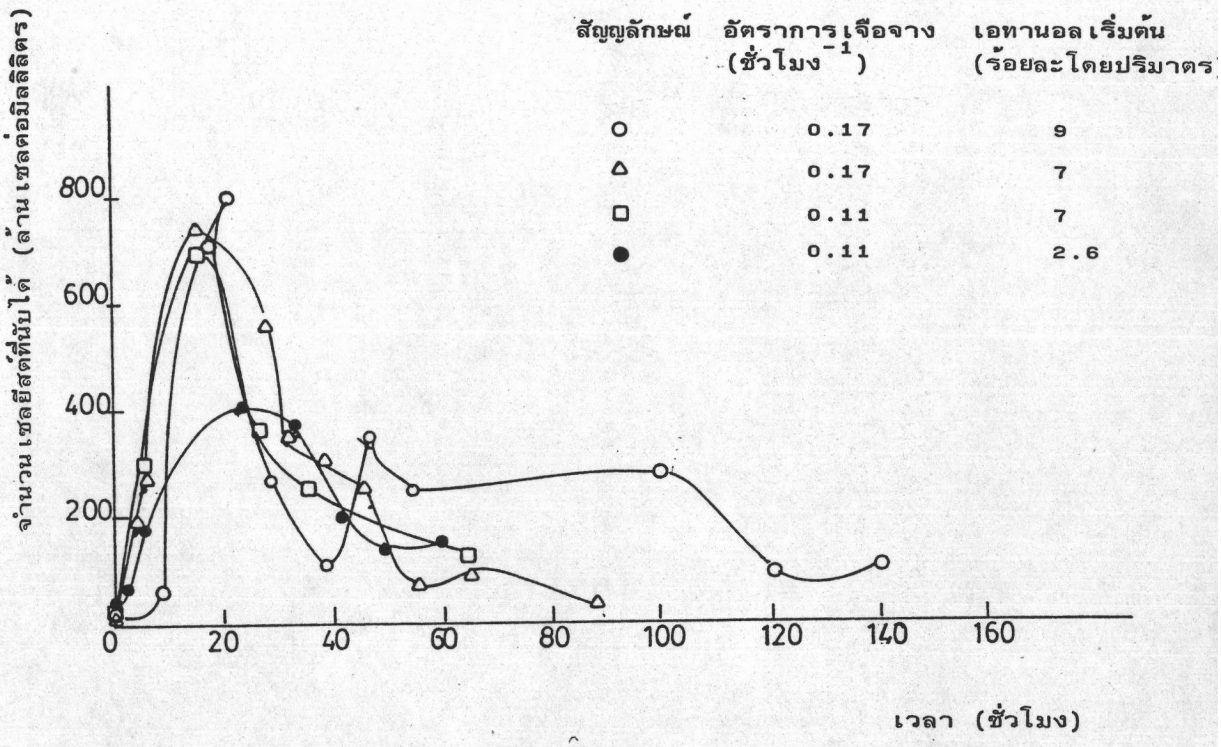
รูปที่ 4-16 แสดงจำนวนเซลยีสต์ที่นับได้โดยตรงจากกล้องจุลทรรศน์ ในการผลิตเอทานอลของเชื้อ S. ellipsoideus ด้วยเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง มีอัตราการให้อากาศ 0.5 ปริมาตรอากาศ ต่อปริมาตรน้ำหมัก ต่อนาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ต่อจากนั้นลดปริมาณอากาศลงเป็น 0.04-0.06 ปริมาตรอากาศต่อปริมาตรน้ำหมัก ต่อนาที อัตราการเจือจางน้ำหมัก 0.17 ชั่วโมง$^{-1}$ เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 21 ชั่วโมง



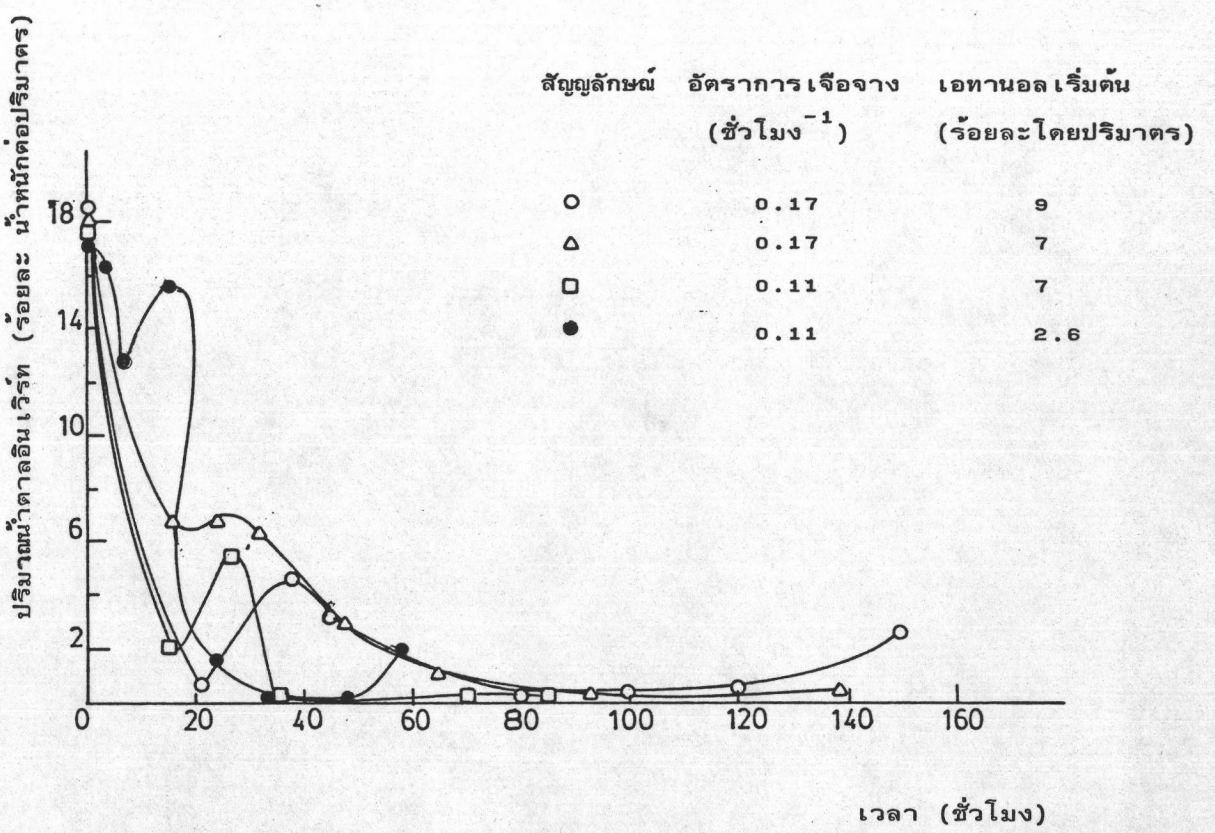
รูปที่ 4-17 แสดงปริมาณน้ำตาลอินเวิร์ทที่เหลืออยู่ในน้ำหมัก ในการผลิตเอทานอลของเชื้อ S. ellipsoideus ด้วยเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง อัตราการให้อากาศ 0.5 ปริมาตรอากาศ ต่อปริมาตรน้ำหมัก ต่อนาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ต่อจากนั้นลดปริมาณอากาศลงเป็น 0.04-0.06 ปริมาตรอากาศต่อปริมาตรน้ำหมัก ต่อนาที อัตราการเจือจางน้ำหมัก 0.17 ชั่วโมง$^{-1}$ เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 21 ชั่วโมง



รูปที่ 4-18 แสดงปริมาณเอทานอล เมื่อระบบเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุลย์ จนกระทั่งสิ้นสุดสภาวะสมดุลย์



รูปที่ 4-19 จำนวนเซลยีสต์ที่นับได้โดยตรงจากกล้องจุลทรรศน์ เมื่อระบบเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุลย์ จนกระทั่งสิ้นสุดสภาวะสมดุลย์



รูปที่ 4-20 แสดงปริมาณน้ำตาลอินเวิร์ท เมื่อระบบเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุลย์ จนกระทั่งสิ้นสุดสภาวะสมดุลย์

เนื่องจากการหมักดำเนินไปเป็นเวลานาน เซลยีสต์บางส่วนก็จะมีประสิทธิภาพในการทำกิจกรรมลดลง ซึ่งก็เป็นไปได้ที่แนวโน้มของผลผลิตจะลดลงด้วย เพื่อรักษาประสิทธิภาพการทำงานของยีสต์ อาจนำยีสต์ที่ไม่ active ซึ่งเป็นส่วนที่ตกตะกอนทับถมตามบริเวณตอนล่างของคอลัมน์ออกมาทำให้ active ด้วยการปรับสภาพตะกอนยีสต์ให้เป็นกรดหรือโดยการให้อากาศ(Lyons, 1981) จากการทดลองได้ดึงตะกอนยีสต์จากคอลัมน์ที่ 5 ใส่ลงไปในคอลัมน์แรกซึ่งเป็นคอลัมน์ที่มีการให้อากาศโดยตรง ในชั่วโมงที่ 120 ของสภาวะการทดลองในระบบต่อเนื่องข้อ 3.1.2 ไม่ให้อากาศเพิ่มเติม ดังแสดงในรูปที่ 4-12, 4-13, 4-14 ผลปรากฏว่าชั่วโมงที่ 140 ปริมาณเอทานอล ปริมาณเซลยีสต์ ในคอลัมน์แรกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 1 เป็นร้อยละ 2 (โดยปริมาตร) และ 40 เป็น 150 ล้านเซลต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ ส่วนปริมาณน้ำตาลอินเวิร์ทลดลงจากร้อยละ 15 เป็นร้อยละ 12 (น้ำหนักต่อปริมาตร) ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนสภาวะแวดล้อมที่ขาดสารอาหารมาเป็นสภาวะแวดล้อมที่อุดมสมบูรณ์กว่า คือ มีสารอาหารพร้อมอาหารเสริม ทำให้ยีสต์เริ่มมีการนำสารอาหารในน้ำหมักมาใช้ในการเจริญเติบโตและเพิ่มปริมาณเซล ดังนั้นประสิทธิภาพในการทำกิจกรรมจึงเพิ่มขึ้นด้วย (Rosario, 1979) ต่อมาได้ทดลองนำเซลยีสต์กลับมาใช้งานใหม่ โดยใช้สภาวะการทดลองในระบบต่อเนื่องข้อ 3.1.2 ดังแสดงในรูปที่ 4-15, 4-16, 4-17 ในชั่วโมงที่ 88 ของการหมัก โดยนำเซลยีสต์จากส่วนล่างของคอลัมน์ที่ 5 ใส่ลงในคอลัมน์แรก ซึ่งจากการสังเกตุจะเห็นตะกอนยีสต์สะสมในคอลัมน์ที่ 5 มากกว่าคอลัมน์อื่น ในการทดลองไม่ให้อากาศเพิ่มเติมพบว่า ปริมาณเอทานอลในคอลัมน์แรกลดลงเรื่อย ๆ จากชั่วโมงที่ 93-113 จากนั้นจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 2.5 เป็น 4.5 (โดยปริมาตร) ในชั่วโมงที่ 120 ในช่วงเวลา 7 ชั่วโมงด้วยความหวังว่าระบบจะสามารถผลิตเอทานอลได้เพิ่มขึ้น จึงทดลองเพิ่มอัตราการเจือจางเป็น 0.2 ชั่วโมง$^{-1}$ ระหว่างชั่วโมงที่ 120-125 ผลปรากฏว่า ผลผลิตในคอลัมน์แรกลดลงอย่างรวดเร็ว แสดงว่าอัตราการเจือจางสูงเกินไป ดังนั้นในชั่วโมงที่ 125 ของการหมัก ได้นำยีสต์จากส่วนล่างของคอลัมน์ที่ 5 ใส่กลับเข้าคอลัมน์แรกใหม่ และเพิ่มการให้อากาศเป็น 0.5 ปริมาตรอากาศ ต่อปริมาตรน้ำหมัก ต่อนาที จนกระทั่งปริมาณเซลยีสต์เพิ่มขึ้นถึง 300 ล้านเซลต่อมิลลิลิตร ต่อจากนั้นลดการให้อากาศเหลือ 0.04-0.06 ปริมาตรอากาศ ต่อปริมาตรน้ำหมัก ต่อนาที เท่าเดิม พบว่าการเพิ่มของเอทานอลในคอลัมน์แรกเริ่มรวดเร็วขึ้นจากร้อยละ 2.5 เป็นร้อยละ 4.5 (โดยปริมาตร) ปริมาณเซลยีสต์เพิ่มขึ้นจาก 250 เป็น 300 ล้านเซลต่อมิลลิลิตร และปริมาณน้ำตาลอินเวิร์ทลดลงจากร้อยละ 12.5 เป็น 9 (น้ำหนักต่อปริมาตร) ในช่วงเวลา 5 ชั่วโมง คือ

ระหว่างชั่วโมงที่ 145-150 คาดว่าปริมาณผลผลิตที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลไปยังคอลัมน์ถัดไป จนกระทั่งได้ผลผลิตออกมาตามต้องการ

<u>การเปรียบเทียบความสามารถของการหมัก</u>

การเปรียบเทียบความสามารถในการหมักระหว่างแบบไม่ต่อเนื่องกับแบบต่อเนื่อง

จากสมการ (2.31) $$\frac{\left(\gamma_{cont}\right)_{max}}{\gamma_{batch}} = \ln \frac{X_m}{X_i} + t_e \mu_{max}$$

ถ้าปริมาณเซลที่เติมลงไป (Inoculum size) ร้อยละ 5 (โดยปริมาตร);

$X_i/X_m = 0.05$

t_e = 10 ชั่วโมง

ในระบบไม่ต่อเนื่องมีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด, μ_{max} = 0.23 ชั่วโมง$^{-1}$

$$\frac{\left(\gamma_{cont}\right)_{max}}{\gamma_{batch}} = \ln 20 + 2.3 = 5.3$$

จะได้ $\frac{\text{ผลผลิตของการหมักแบบต่อเนื่อง}}{\text{ผลผลิตของการหมักแบบไม่ต่อเนื่อง}}$ = 5.3

เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ลงในสมการ (2.31) สามารถหาอัตราส่วนของความสามารถของการหมักแบบต่อเนื่องกับแบบไม่ต่อเนื่องที่อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะเท่ากับ 0.23 ชั่วโมง$^{-1}$ พบว่าความสามารถในการหมักแบบต่อเนื่องมีค่าสูงเป็น 5.3 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับการหมักแบบไม่ต่อเนื่อง

ทำนองเดียวกันจะเปรียบเทียบความสามารถในการหมักแบบไม่ต่อเนื่องกับกึ่งต่อเนื่องได้ดังนี้

จากสมการ (2.35) $$\frac{\gamma_{semi}}{\gamma_{batch}} = \frac{1}{2}\left\{\ln \frac{X_m}{X_i} + t_e u_{max} + 1\right\}$$

$$= \frac{1}{2}(\ln 20 + 3.3) = 3.1$$

จะได้ $$\frac{\text{ผลผลิตของการหมักแบบกึ่งต่อเนื่อง}}{\text{ผลผลิตของการหมักแบบไม่ต่อเนื่อง}} = 3.1$$

จะเห็นว่า ความสามารถของการหมักแบบกึ่งต่อเนื่องมีค่าสูงเป็น 3 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับการหมักแบบไม่ต่อเนื่อง

เมื่อเปรียบเทียบผลจากการทดลองแบบต่อเนื่องกับแบบไม่ต่อเนื่องและกึ่งต่อเนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมา (วิชาพงษ์, 2525) พบว่าผลผลิตเอทานอลต่อชั่วโมงมีค่าต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 อัตราการผลิตเอทานอลต่อชั่วโมง ในกระบวนการผลิตเอทานอลแบบต่อเนื่อง กึ่งต่อเนื่อง และไม่ต่อเนื่อง

การผลิตแบบต่อเนื่อง เมื่ออัตราการเจือจาง 0.17 ชั่วโมง$^{-1}$ ปริมาณเอทานอลเริ่มต้นร้อยละ 9 (โดยปริมาตร)	การผลิตแบบกึ่งต่อเนื่อง*	การผลิตแบบไม่ต่อเนื่อง*
ปริมาณเอทานอลร้อยละ 10 (โดยปริมาตร) ทุก 1 ชั่วโมง ต่อเนื่องกันเป็นเวลา 70 ชั่วโมง ระหว่างชั่วโมงที่ 53-123	ปริมาณเอทานอลร้อยละ 10 (โดยปริมาตร) ทุก 3 ชั่วโมง ทำการถ่ายเทต่อเนื่องกันเป็นเวลา 31 ชั่วโมง	ปริมาณเอทานอลร้อยละ 12 (โดยปริมาตร) ในเวลา 22 ชั่วโมง
น้ำหมักทั้งหมด 70 ลิตร	น้ำหมักทั้งหมด 13.5 ลิตร	น้ำหมักทั้งหมด 6 ลิตร
ได้เอทานอลประมาณ 100 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง	ได้เอทานอลประมาณ 44 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง	ได้เอทานอลประมาณ 33 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง
จำนวนคอลัมน์ที่ใช้ 5 คอลัมน์	คอลัมน์ที่ใช้ 1 คอลัมน์	คอลัมน์ที่ใช้ 1 คอลัมน์

*วิชาพงษ์ 2525

จากตารางที่ 4-1 จะเห็นว่าอัตราการผลิตเอทานอลในระบบต่อเนื่องเร็วประมาณ 2 และ 3 เท่า ของระบบกึ่งต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ตามลำดับ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณความสามารถในการหมักโดยอาศัยค่าการเจริญเติบโตจำเพาะแล้ว ปรากฏว่ายังมีค่าต่ำ จึงน่าจะมีการทดลองปรับปรุงและแก้ไขวิธีการทดลองให้มีประสิทธิภาพสูงยิ่งขึ้น