

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์

อาศัยข้อมูลจากการผลิตเอทานอล แบบกึ่งต่อเนื่องและแบบต่อเนื่อง (ศจ. 2528) มาเพื่อศึกษาผลของทิศทางการไหลของน้ำหมักในคอลัมน์ที่ไม่มีการให้อากาศ ผลของการนำเซลล์ยีสต์จากผลผลิตกลับมาใช้ในกระบวนการหมัก และความเป็นไปได้ในการนำวัสดุการเกษตรอื่น ๆ มาใช้ในกระบวนการหมัก โดยการใช้เครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง

4.1 ผลการทดลองเพื่อศึกษาผลของทิศทางการไหลของน้ำหมักในคอลัมน์ที่ไม่มีการให้อากาศที่มีต่อการผลิตเอทานอลในเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง

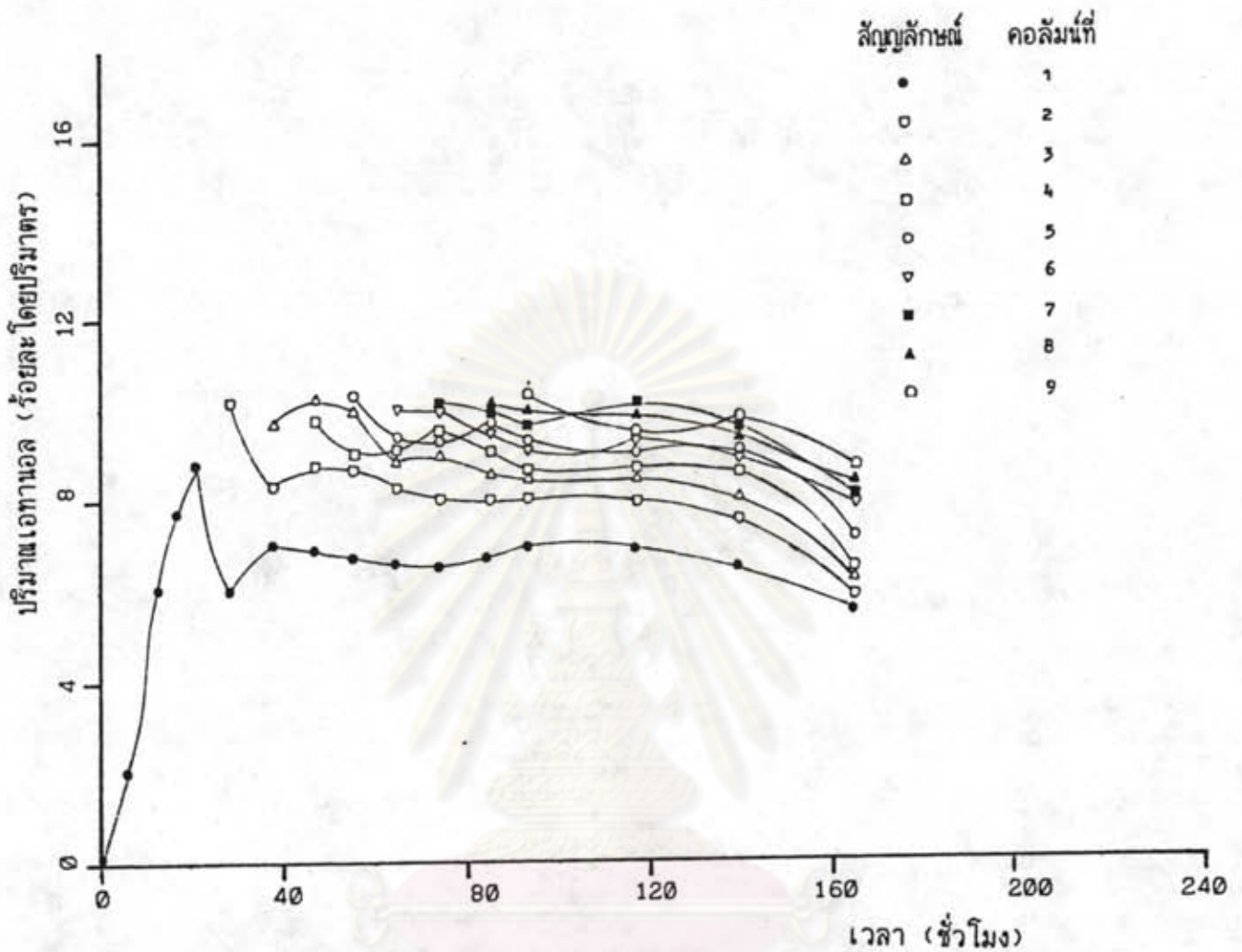
4.1.1 จากกราฟรูปที่ 4.1 ก - 4.1 ค ซึ่งเป็นระบบการหมักเพื่อผลิตเอทานอลในเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง ด้วยน้ำล้นปะรดที่มีความเข้มข้นสารละลายน้ำตาล 18 องศาบริกซ์ (วิชาพงษ์, 2525) โดยใช้เชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* อัตราการให้อากาศ 0.5 vvm ช่วง 4 ชั่วโมงแรกของการทดลอง จากนั้นลดเหลือ 0.04-0.06 vvm ตลอดการทดลอง เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาทำการหมักผ่านไป 21 ชั่วโมง (ศจ. 2528) จากนั้นปล่อยน้ำหมักจากตอนล่างของคอลัมน์ที่มีการให้อากาศ (คอลัมน์ที่เตรียมเชื้อหมักเริ่มต้น) ให้ไหลเข้าตอนบนของคอลัมน์ที่ไม่มีการให้อากาศ แล้วไหลลงจากตอนล่างของคอลัมน์นี้ไปเข้าตอนบนของคอลัมน์ถัดไปจนครบทุกคอลัมน์ ด้วยอัตราเจือจาง  $0.17 \text{ ชั่วโมง}^{-1}$  (ศจ. 2528) จนถึงชั่วโมงที่ 118 ผลปรากฏว่า เอทานอลเริ่มปล่อยร้อยละ 8.9 โดยปริมาตร จำนวนเซลล์ยีสต์ 350 ล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตร ความเข้มข้นสารละลายน้ำตาล 4.8 องศาบริกซ์ ซึ่งระบบสามารถรักษาสภาวะสมดุล\* (Steady state) ไว้ได้ ที่ระดับการผลิตเอทานอลร้อยละ 10 โดยปริมาตร การที่ให้ความเข้มข้นของเอทานอลสูงจะช่วยให้สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายการลงทุนและ

\* สภาวะสมดุล หมายถึง อัตราการไหลผ่านของน้ำหมักพอเหมาะที่จะทำให้อัตราการเพิ่มของเซลล์ เนื่องจากการเจริญของจุลินทรีย์เท่ากับอัตราการไหลออกของเซลล์ อัตราการเพิ่มของสารอาหารเข้าสู่ถังหมัก เท่ากับอัตราการใช้สารอาหาร โดยจุลินทรีย์ในน้ำหมัก และอัตราการผลิตผลิตภัณฑ์ เท่ากับการไหลออกของผลิตภัณฑ์ในน้ำหมัก (Aiba, 1968)

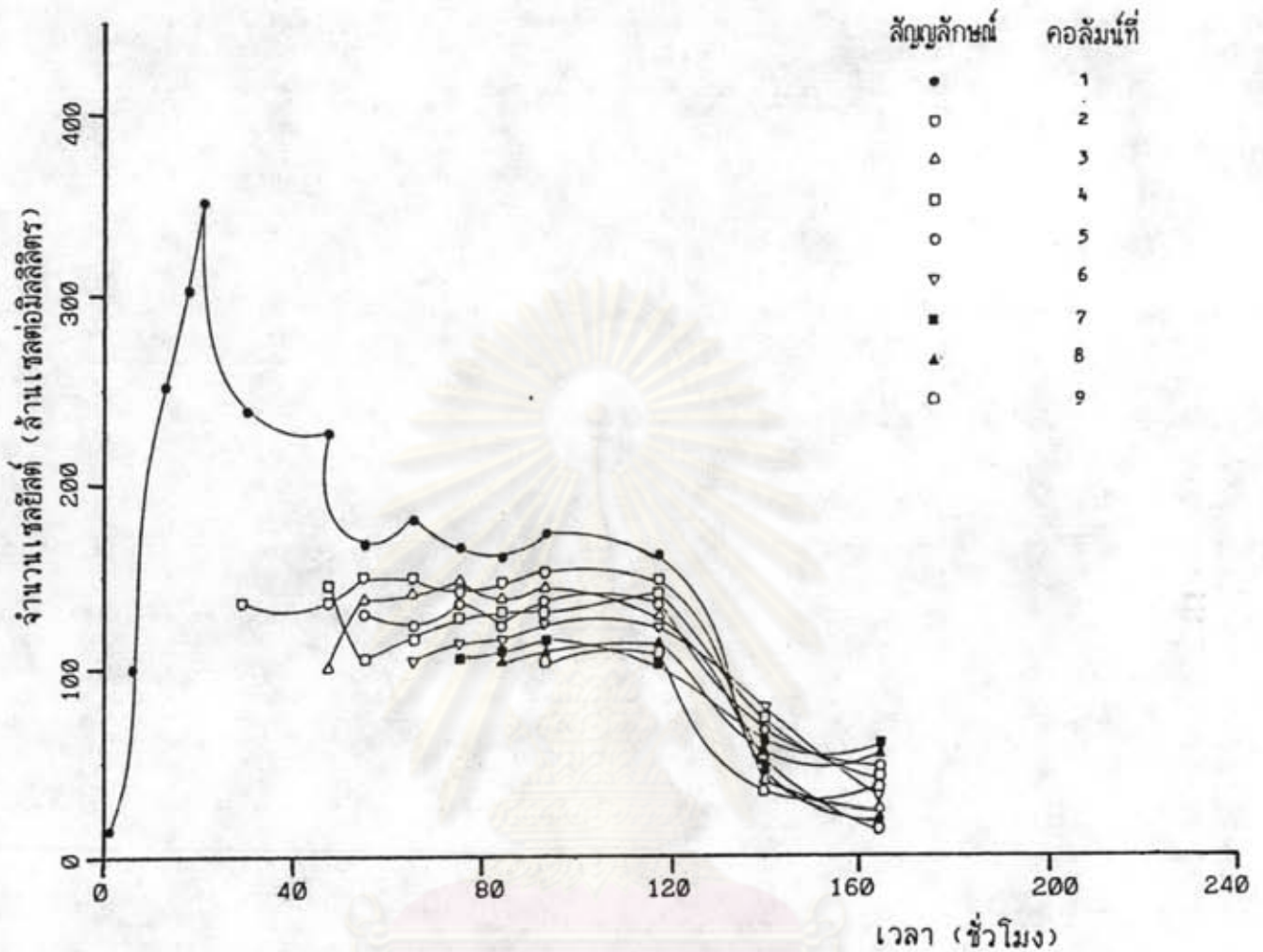
กระบวนการกำจัดน้ำเสีย แต่จะมีผลต่อผลผลิตต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของกังหมัก (รัชนีและวิวัฒน์, 2526) จำนวนเซลล์ 150 ล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตร และความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาล 5 องศาบริกซ์ หรือจากชั่วโมงที่ 118 จนถึงสิ้นสุดการทดลองชั่วโมงที่ 164 ได้เพิ่มอัตราการเจริญ เป็น  $0.18 \text{ ชั่วโมง}^{-1}$  พบว่าระบบมีการผลิตเอทานอลลดลง เซลล์จะถูกชะล้างออกไปใน ลักษณะความเข้มข้นของเซลล์ลดลงแบบ Logarithmic และความเข้มข้นของสารละลาย น้ำตาลจะสูงขึ้นเรื่อย ๆ หากเพิ่มอัตราเจริญมากกว่าค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด มาก ๆ ( $D > \mu_{max}$ ) เซลล์จะยอมถูกชะล้างออกไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งหมดไปในที่สุด เรา เรียกว่า Washout (Aiba, 1968) ดังนั้น จะควบคุมสภาพการหมักในระบบต่อเนื่องนี้ให้ สมดุลได้ก็ต่อเมื่อ  $D$  มีค่าไม่เกิน  $\mu_{max}$  ( $D < \mu_{max}$ )



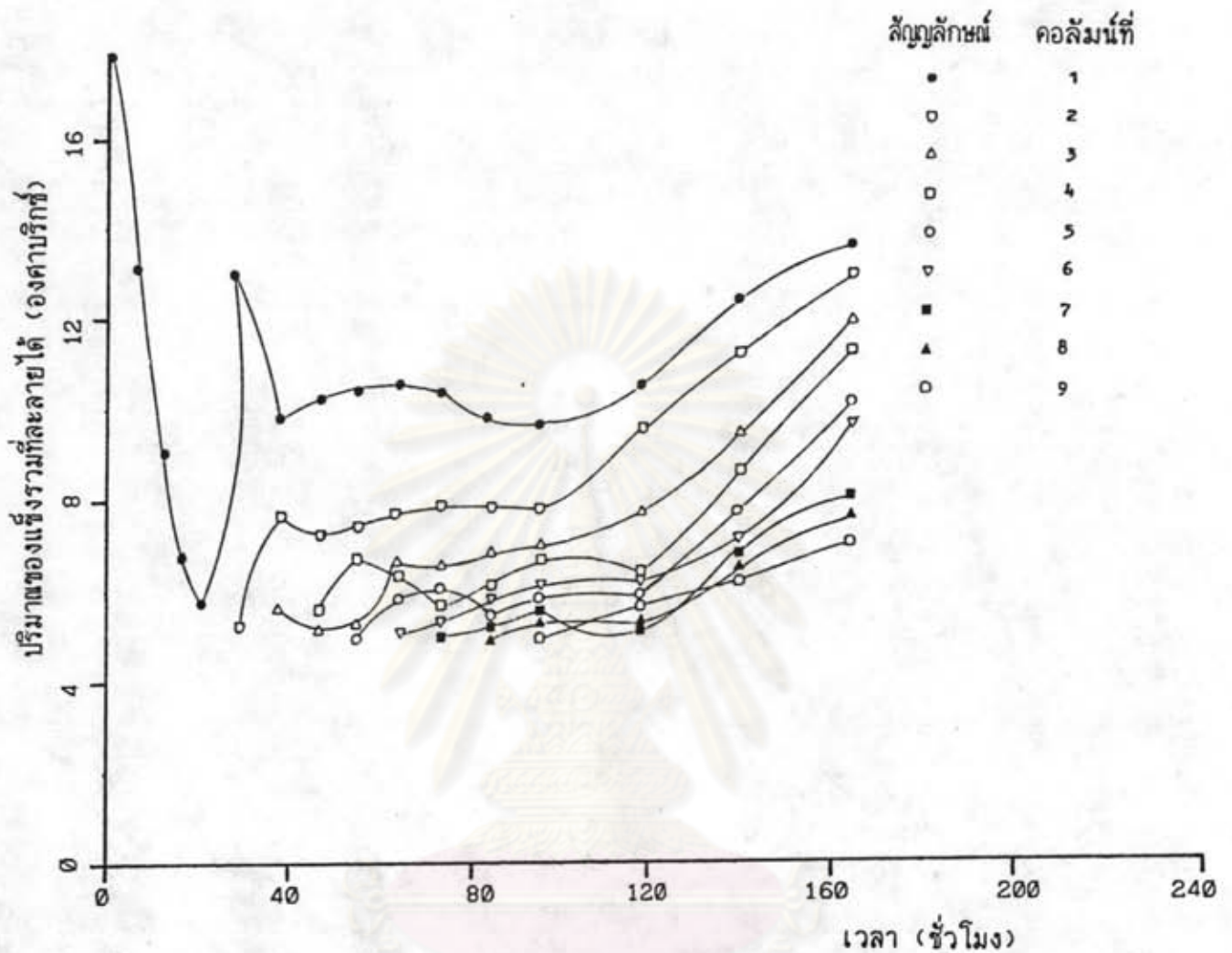
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.1ก ปริมาณการผลิตเอทานอลกับเวลา ด้วยเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง โดยใช้  
 ใช้น้ำสับปะรดเป็นสารอาหาร และใช้เชื้อยีสต์ *S. cerevisiae* อัตราการให้อากาศ  
 0.5 vvm 4 ชั่วโมงแรก จากนั้นลดเหลือ 0.04-0.06 vvm ตลอดการทดลอง เริ่ม  
 ปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 21 ชั่วโมง ทิศทางการไหลของน้ำหมักจากตอนล่าง  
 ของคอลัมน์ที่มีการให้อากาศเข้าตอนบนของคอลัมน์ที่ไม่มีการให้อากาศแล้วไหลลงจาก  
 ตอนล่างของคอลัมน์นี้เข้าตอนบนของคอลัมน์ถัดไปจนครบทุกคอลัมน์ อัตราการเจือจาง  
 ชั่วโมงที่ 21-118 เท่ากับ  $0.17 \text{ ชั่วโมง}^{-1}$  จากนั้นชั่วโมงที่ 119-140 เพิ่มอัตรา  
 การเจือจางเป็น  $0.18 \text{ ชั่วโมง}^{-1}$  ต่อมาเพิ่มอัตราการเจือจางอีกเป็น  $0.19 \text{ ชั่วโมง}^{-1}$   
 จนถึงสิ้นสุดการทดลองชั่วโมงที่ 164



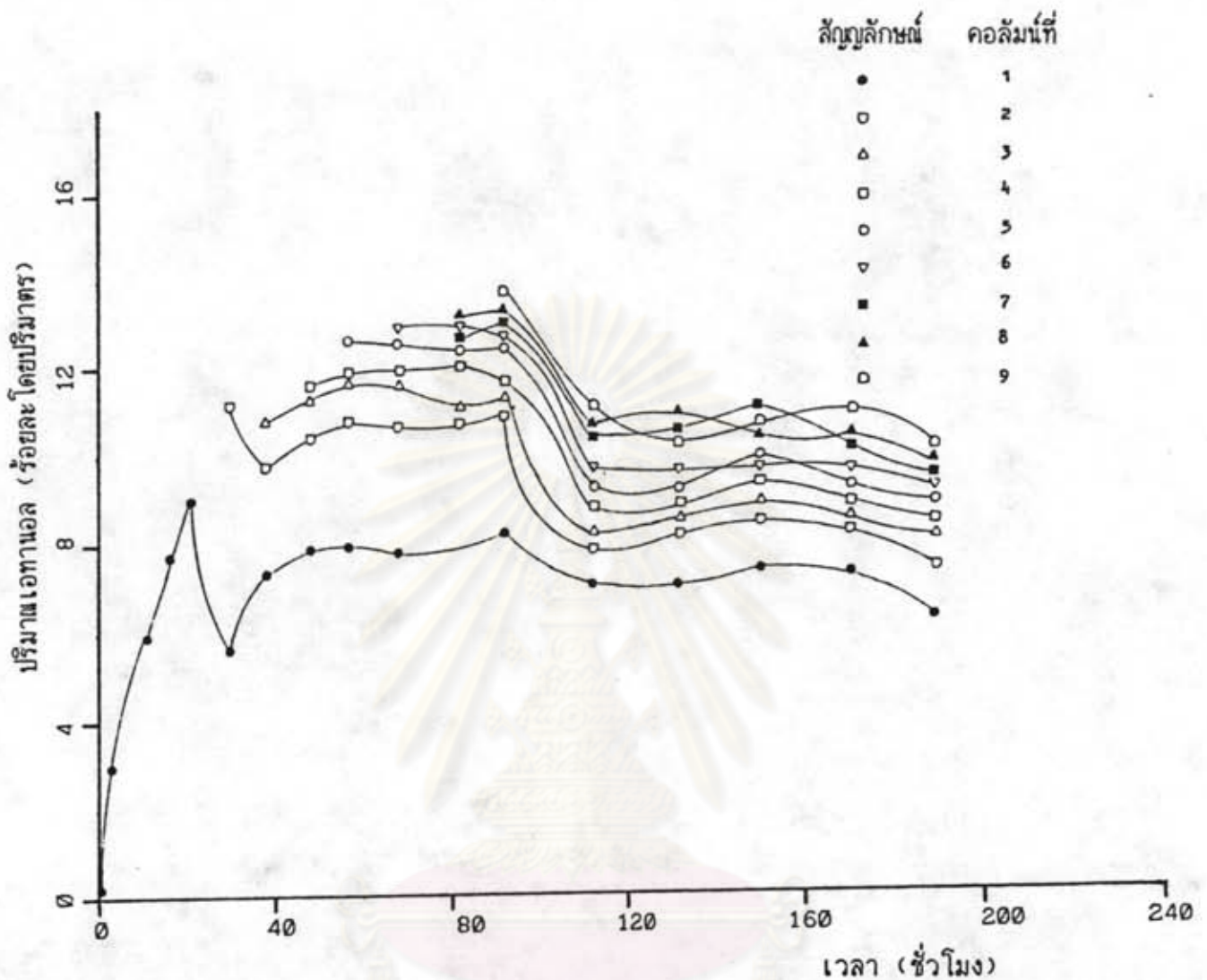
รูปที่ 4.1ข จำนวนเซลล์ที่นับได้กับเวลาในแต่ละคอลัมน์ของเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง ทำการหมักโดยใช้น้ำลึบประดเป็นสารอาหารและใช้เชื้อยีสต์ *S. cerevisiae* อัตราการให้อากาศ 0.5 VVM 4 ชั่วโมงแรก จากนั้นลดเหลือ 0.04-0.06 VVM ตลอดการทดลอง เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 21 ชั่วโมง ทิศทางการไหลของน้ำหมักจากตอนล่างของคอลัมน์ที่มีการให้อากาศเข้าตอนบนของคอลัมน์ที่ไม่มีการให้อากาศแล้วไหลลงจากตอนล่างของคอลัมน์นี้เข้าตอนบนของคอลัมน์ถัดไปจนครบทุกคอลัมน์ อัตราการเจือจางชั่วโมงที่ 21-118 เท่ากับ  $0.17 \text{ ชั่วโมง}^{-1}$  จากนั้นชั่วโมงที่ 119-140 เพิ่มอัตราการเจือจางเป็น  $0.18 \text{ ชั่วโมง}^{-1}$  ต่อมาเพิ่มอัตราการเจือจางอีกเป็น  $0.19 \text{ ชั่วโมง}^{-1}$  จนสิ้นสุดการทดลองชั่วโมงที่ 164



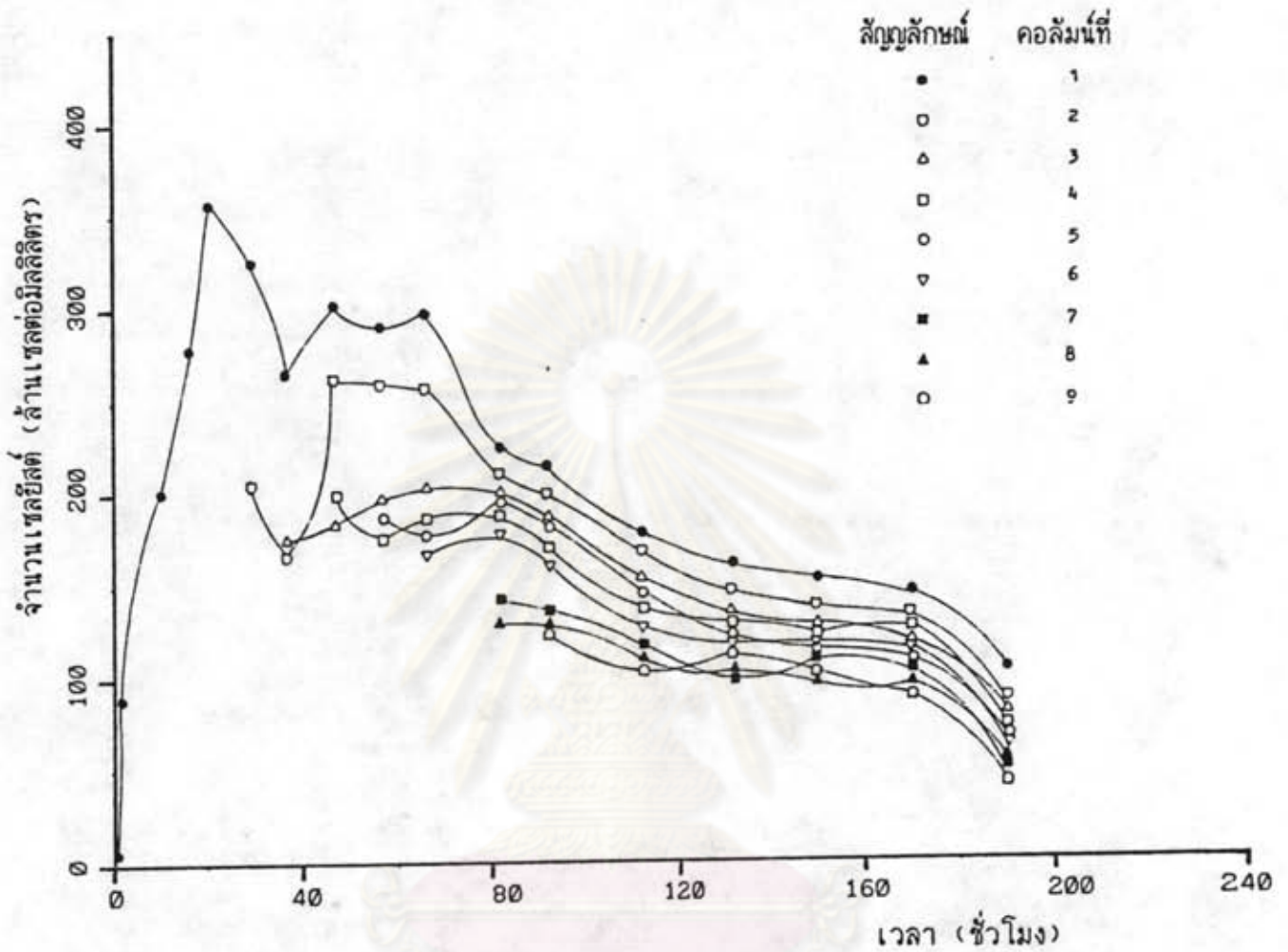
รูปที่ 4.1ค ความเข้มข้นของน้ำตาลที่เหลือในน้ำหมักกับเวลาในแต่ละคอลัมน์ของเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง ทำการหมักโดยใช้น้ำตาลปะรดเป็นสารอาหารและใช้เชื้อยีสต์ *S. cerevisiae* อัตราการให้อากาศ 0.5 vvm 4 ชั่วโมงแรก จากนั้นลดเหลือ 0.04-0.06 vvm ตลอดการทดลอง เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 21 ชั่วโมง ทิศทางการไหลของน้ำหมักจากตอนล่างของคอลัมน์ที่มีการให้อากาศเข้าตอนบนของคอลัมน์ที่ไม่มีการให้อากาศแล้วไหลลงจากตอนล่างของคอลัมน์นี้เข้าตอนบนของคอลัมน์ถัดไปจนครบทุกคอลัมน์ อัตราการเจือจางชั่วโมงที่ 21-118 เท่ากับ 0.17 ชั่วโมง<sup>-1</sup> จากนั้นชั่วโมงที่ 119-140 เพิ่มอัตราการเจือจางเป็น 0.18 ชั่วโมง<sup>-1</sup> ต่อมาเพิ่มอัตราการเจือจางอีกเป็น 0.19 ชั่วโมง<sup>-1</sup> จนถึงสิ้นสุดการทดลองชั่วโมงที่ 164

4.1.2 จากกราฟรูปที่ 4.2 ก - 4.2 ค เป็นระบบการหมักเพื่อผลิตเอทานอลใน เครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง ด้วยน้ำล้นปะรด โดยใช้สภาวะเช่นเดียวกับข้อ 4.1.1 ยก เว้นทิศทางการไหลของน้ำหมักจากตอนล่างของคอลัมน์ที่มีการให้อากาศเข้าตอนล่างของคอลัมน์ที่ ไม่มีการให้อากาศ แล้วไหลล้นจากตอนบนของคอลัมน์นี้ไปเข้าตอนล่างของคอลัมน์ถัดไปจนครบทุก คอลัมน์ อัตราการเจือจางตั้งแต่ชั่วโมงที่ 21-92 เท่า  $0.17 \text{ ชั่วโมง}^{-1}$  พบว่าปริมาณการ ผลิตเอทานอลอยู่ในระดับสูงร้อยละ 12 โดยปริมาตร จำนวนเซลล์ยังอยู่ในระดับสูง 250 ล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตร ความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาล 5 องศาบริกซ์ หากให้อัตราการเจือ จางระดับนี้ การเจริญเติบโตของเซลล์จะมีค่าน้อยลง เซลล์มีแนวโน้มการใช้น้ำตาลผลิตเอทา นอลมากกว่าใช้ในการเจริญเติบโต จนในที่สุด เมื่อไม่มีน้ำตาลเหลือสะสมอยู่ในน้ำหมัก อัตรา การผลิตเอทานอลก็จะลดลงจนเกือบเป็นศูนย์ ขณะเดียวกันปริมาณเซลล์จะลดลง เนื่องจาก การยับยั้งจากความเข้มข้นเอทานอล และการตายเกิดขึ้น (Wang, 1979) จากนั้นชั่วโมงที่ 93-170 ได้เพิ่มอัตราการเจือจางเป็น  $0.18 \text{ ชั่วโมง}^{-1}$  พบว่าระบบสามารถรักษาสภาวะสมดุลไว้ ที่ปริมาณเอทานอลร้อยละ 10 โดยปริมาตร จำนวนเซลล์ 170 ล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตร และ ความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาล 5 องศาบริกซ์ จะเห็นว่า เมื่อเราเปลี่ยนทิศทางการไหล ของน้ำหมัก ระบบสามารถรักษาสภาวะสมดุลที่อัตราการเจือจางสูงขึ้น เป็นเพราะน้ำหมักผสม ผสานกันในลักษณะ fluidization (สมศักดิ์, 2526) เซลล์มีประสิทธิภาพการกระจาย (distribution efficiency) นั่นคือ การเพิ่ม Residence time ของเชื้อโดยเฉลี่ยจะ นานขึ้น ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการเปลี่ยนสารอาหารเป็นเอทานอล หลังจากชั่วโมงที่ 170 จนถึงที่สุดการทดลองชั่วโมงที่ 188 ได้เพิ่มอัตราการเจือจางเป็น  $0.19 \text{ ชั่วโมง}^{-1}$  พบว่า ระบบเริ่มสูญเสียสภาพสมดุลไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

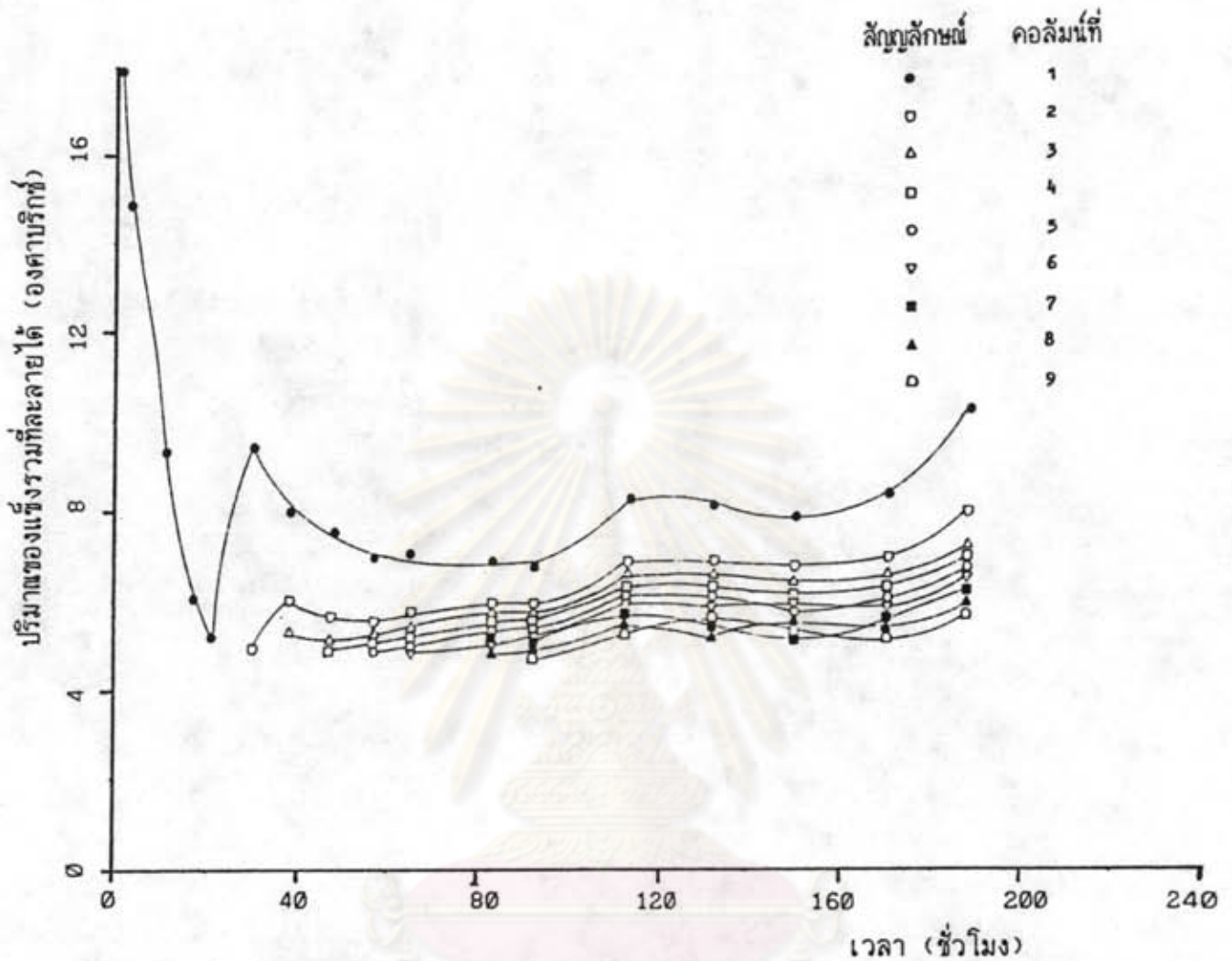


รูปที่ 4.2ก ปริมาณการผลิตเอทานอลกับเวลา ด้วยเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง โดยใช้ น้ำสับปะรดเป็นสารอาหาร และใช้เชื้อยีสต์ *S. cerevisiae* อัตราการให้อากาศ 0.5 VVM 4 ชั่วโมงแรก จากนั้นลดเหลือ 0.04-0.06 VVM ตลอดการทดลอง เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 21 ชั่วโมง ทิศทางการไหลของน้ำหมักจากตอนล่างของคอลัมน์ที่มีการให้อากาศเข้าตอนล่างของคอลัมน์ที่ไม่มีการให้อากาศแล้วไหลลงจากตอนบนของคอลัมน์ก็ค้ำไปจนครบทุกคอลัมน์ อัตราการเจือจางชั่วโมงที่ 21-92 เท่ากับ 0.17 ชั่วโมง<sup>-1</sup> จากนั้นชั่วโมงที่ 93-170 เพิ่มอัตราการเจือจางเป็น 0.18 ชั่วโมง<sup>-1</sup> ต่อมาเพิ่มอัตราการเจือจางอีกเป็น 0.19 ชั่วโมง<sup>-1</sup> จนถึงสิ้นสุดการทดลอง ชั่วโมงที่ 188



รูปที่ 4.2ข จำนวนเซลล์ที่นับได้กับเวลาในแต่ละคอลัมน์ของเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง ทำการหมักโดยใช้น้ำสับประคเป็นสารอาหารและใช้เชื้อยีสต์ *S. cerevisiae* อัตราการให้อากาศ 0.5 VVM 4 ชั่วโมงแรก จากนั้นลดเหลือ 0.04-0.06 VVM ตลอดการทดลอง เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 21 ชั่วโมง ทิศทางการไหลของน้ำหมักจากตอนล่างของคอลัมน์ที่มีการให้อากาศเข้าตอนล่างของคอลัมน์ที่ไม่มีการให้อากาศแล้วไหลลงจากตอนบนของคอลัมน์นี้เข้าตอนล่างของคอลัมน์ถัดไปจนครบทุกคอลัมน์ อัตราการเจือจางชั่วโมงที่ 21-92 เท่ากับ 0.17 ชั่วโมง<sup>-1</sup> จากนั้นชั่วโมงที่ 93-170 เพิ่มอัตราการเจือจางเป็น 0.18 ชั่วโมง<sup>-1</sup> ต่อมาเพิ่มอัตราการเจือจางอีกเป็น 0.19 ชั่วโมง<sup>-1</sup> จนถึงสิ้นสุดการทดลองชั่วโมงที่ 188

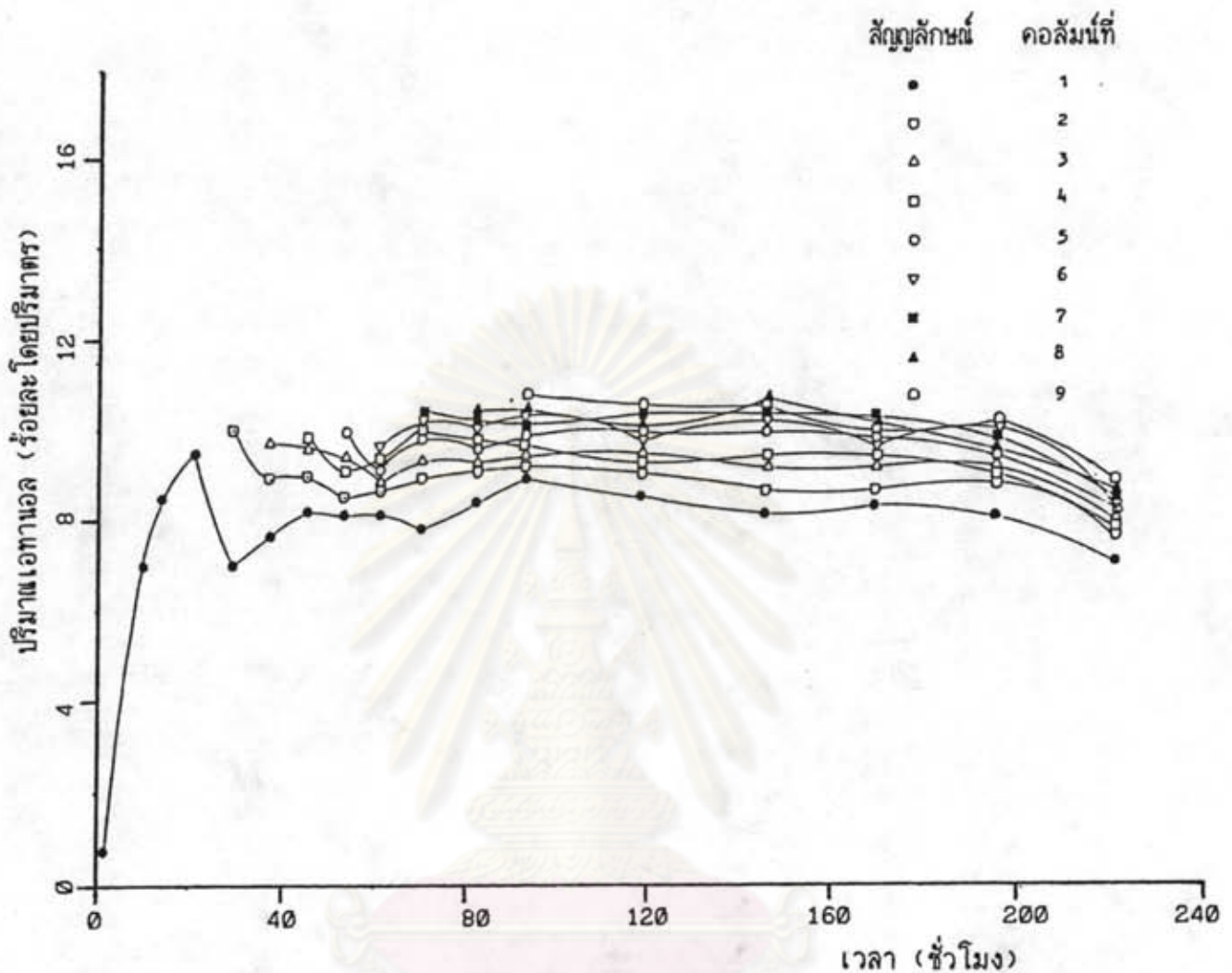




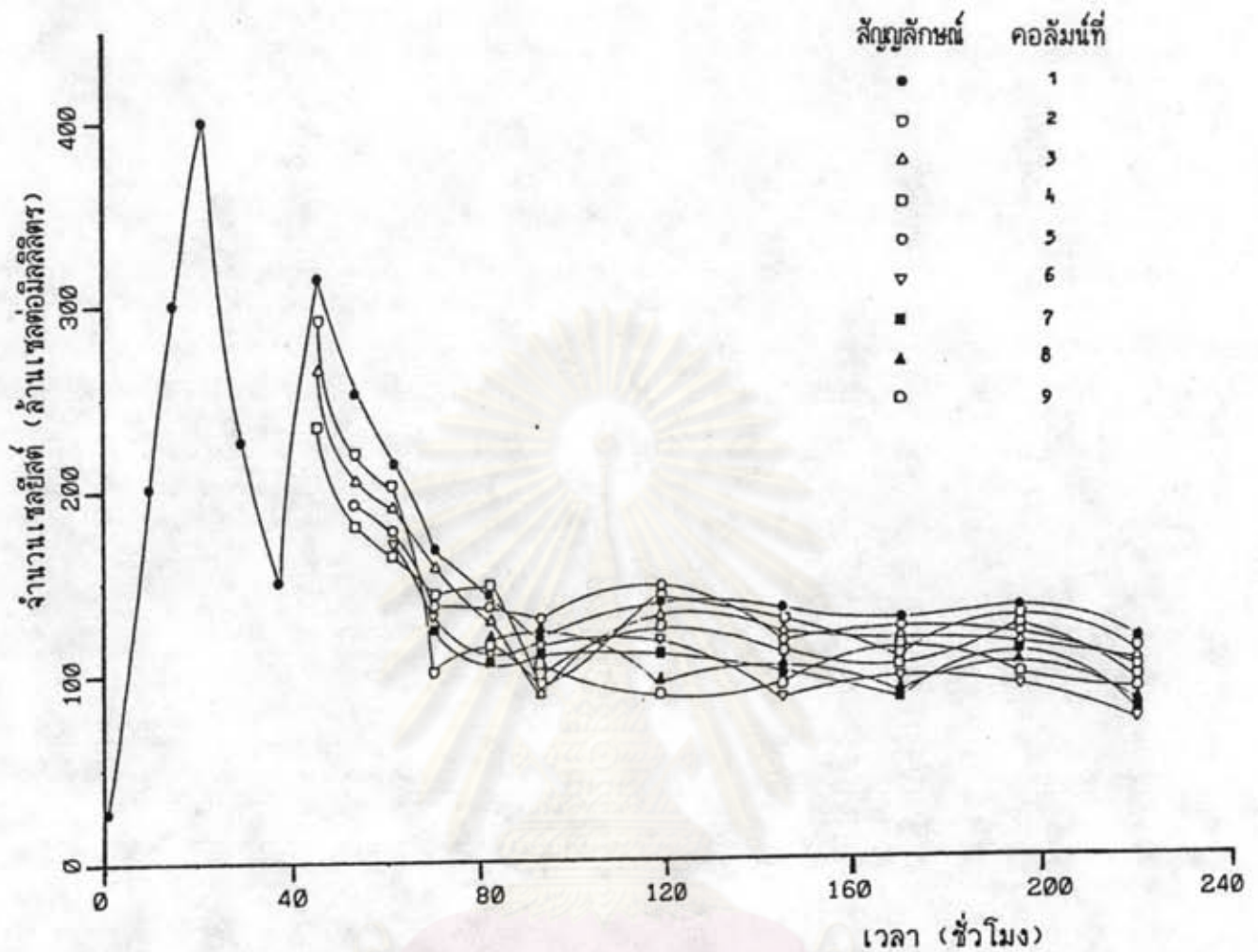
รูปที่ 4.2ค ความเข้มข้นน้ำตาลที่เหลือในน้ำหมักกับเวลาในแต่ละคอลัมน์ของเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง ทำการหมักโดยใช้น้ำตาลประดเป็นสารอาหาร และใช้เชื้อยีสต์ *S. cerevisiae* อัตราการให้อากาศ 0.5 vvm 4 ชั่วโมงแรก จากนั้นลดเหลือ 0.04-0.06 vvm ตลอดการทดลอง เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 21 ชั่วโมง ทิศทางการไหลของน้ำหมักจากตอนล่างของคอลัมน์ที่มีการให้อากาศเข้าตอนล่างของคอลัมน์ที่ไม่มีการให้อากาศแล้วไหลลงจากตอนบนของคอลัมน์นี้เข้าตอนล่างของคอลัมน์ถัดไปจนครบทุกคอลัมน์ อัตราการเจือจางชั่วโมงที่ 21-92 เท่ากับ 0.17 ชั่วโมง<sup>-1</sup> จากนั้นชั่วโมงที่ 93-170 เพิ่มอัตราการเจือจางเป็น 0.18 ชั่วโมง<sup>-1</sup> ต่อมาเพิ่มอัตราการเจือจางอีกเป็น 0.19 ชั่วโมง<sup>-1</sup> จนสิ้นสุดการทดลองชั่วโมงที่ 188

4.2 ผลการทดลองเพื่อศึกษาผลของการนำเซลล์จากผลผลิตกลับมาใช้ในกระบวนการหมักด้วยน้ำล้นปะรด โดยใช้เครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง ได้เลือกวิธีตั้งน้ำหมักบางส่วนจากตอนล่างของคอลัมน์สุดท้ายกลับไปเข้าในคอลัมน์แรก ซึ่งมีการให้อากาศตลอดเวลา เป็นวิธีที่ง่าย สะดวกต่อการทำงานและซ่อมแซม ป้องกันการปนเปื้อนจากจุลินทรีย์ชนิดอื่นได้ดี รวมทั้งจะประหยัดกว่าการใช้เครื่องแยกเซลล์ (Separator) แยกออกมาเป็นยีสต์ครีมก่อนจะนำไปเข้าในระบบต้องเพิ่มกิจกรรมของเซลล์โดยการล้างด้วยกรดเพื่อปรับ pH ให้ได้ประมาณ 2-3 (Harrison, 1970)

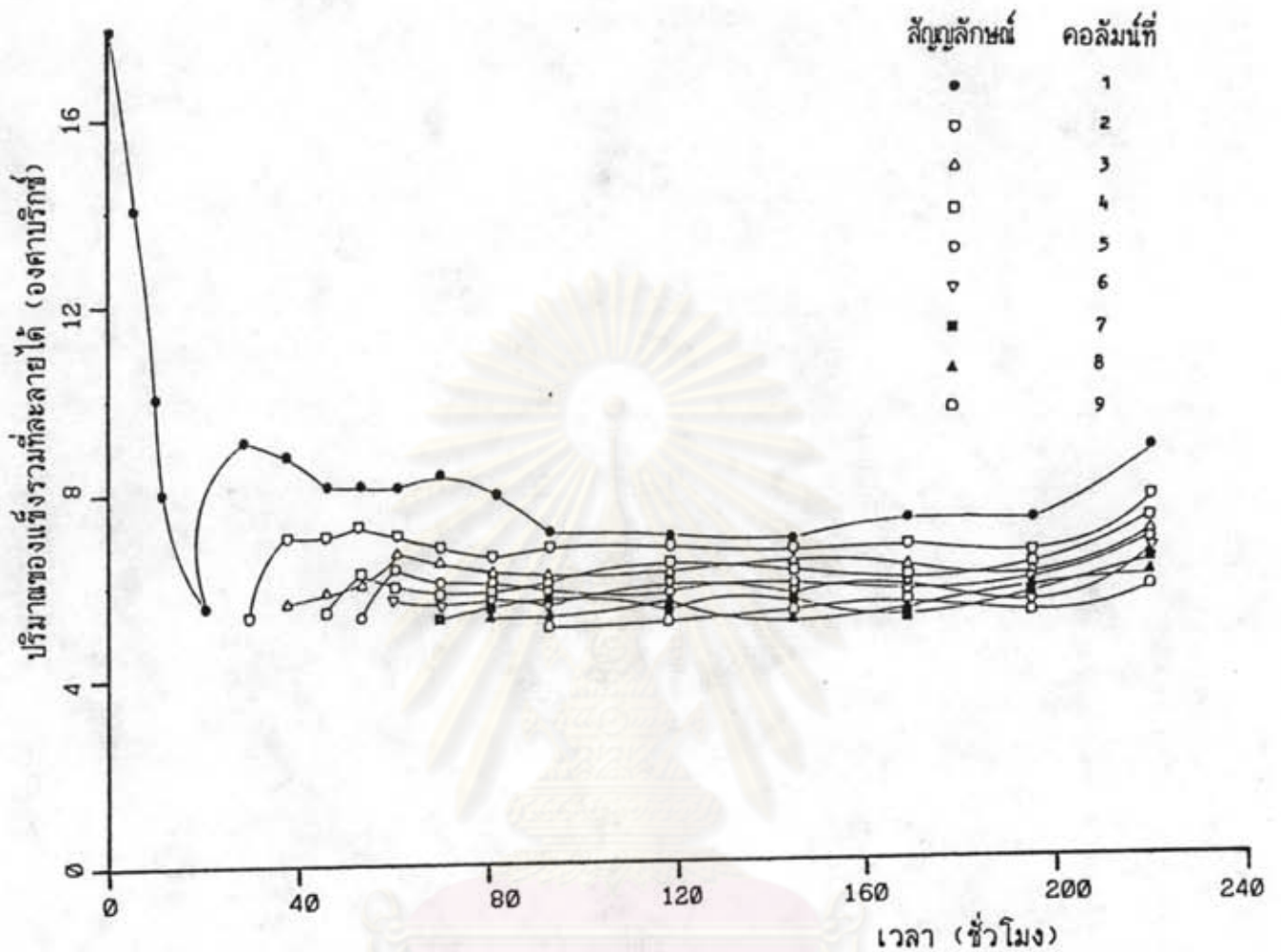
4.2.1 จากกราฟรูปที่ 4.3 ก - 4.3 ค ซึ่งเป็นระบบการหมักด้วยน้ำล้นปะรด เพื่อผลิตเอทานอลในเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง โดยใช้สภาวะเช่นเดียวกับข้อ 4.1.2 ต่างกันตรง ชั่วโมงที่ 21-92 เริ่มปล่อยน้ำหมักด้วยอัตราการเจือจาง  $0.18 \text{ ชั่วโมง}^{-1}$  ระบบสามารถรักษาสภาวะสมดุลไว้ที่ระดับปริมาณเอทานอลร้อยละ 10 โดยปริมาตร จำนวนเซลล์ยีสต์ 100 ล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตร และความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาล 5 องศาบริกซ์ หลังจาก ชั่วโมงที่ 92 ได้ตั้งน้ำหมักบางส่วนจากตอนล่างของคอลัมน์สุดท้ายกลับไปรวมกับสารอาหารที่ป้อนเข้าในคอลัมน์แรก ซึ่งมีการให้อากาศตลอดเวลา ด้วยอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ (recycle ratio)  $0.2625$  เพิ่มอัตราการเจือจางใหม่เป็น  $0.20 \text{ ชั่วโมง}^{-1}$  จนถึง ชั่วโมงที่ 195 ระบบก็ยังสามารถรักษาสภาวะสมดุลได้ที่ระดับเดียวกับตอนต้น เป็นการเพิ่มผลผลิตขึ้น เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมของยีสต์จากการขาดสารอาหารมาเป็นสภาวะแวดล้อมที่อุดมสมบูรณ์กว่า (มีทั้งสารอาหารและอาหารเสริม) ทำให้ยีสต์มีการนำสารอาหารในน้ำหมักมาใช้ในการเจริญเติบโตและเพิ่มปริมาณเซลล์ ประสิทธิภาพในการทำกิจกรรมจึงเพิ่มขึ้นด้วย (Rosario, 1979) หลังจาก ชั่วโมงที่ 195 จนถึงสิ้นสุดการทดลอง ชั่วโมงที่ 220 ทดลองแปรค่าอัตราเจือจางเพิ่มเป็น  $0.22 \text{ ชั่วโมง}^{-1}$  พบว่าระบบไม่สามารถรักษาสภาวะสมดุลในระดับเดิมได้ ปริมาณการผลิตเอทานอลและจำนวนเซลล์ยีสต์เริ่มลดลง ความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลจะเหลือมากขึ้น



รูปที่ 4.3ก ปริมาณการผลิตเอทานอลกับเวลา ด้วยเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง โดยใช้ น้ำสับปะรดเป็นสารอาหาร และใช้เชื้อยีสต์ *S. cerevisiae* อัตราการให้อากาศ 0.5 VVM 4 ชั่วโมงแรก จากนั้นลดเหลือ 0.04-0.06 VVM ตลอดการทดลอง เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 21 ชั่วโมง ทิศทางการไหลของน้ำหมักจากตอนล่างของคอลัมน์ที่มีการให้อากาศเข้าตอนล่างของคอลัมน์ที่ไม่มีการให้อากาศ แล้วไหลลงจากตอนบนของคอลัมน์นี้เข้าตอนล่างของคอลัมน์ถัดไปจนครบทุกคอลัมน์ อัตราการเจือจางชั่วโมงที่ 21-92 เท่ากับ  $0.18 \text{ ชั่วโมง}^{-1}$  จากนั้นดึงน้ำหมักบางส่วนจากตอนล่างของคอลัมน์สุดท้ายกลับไปรวมกับสารอาหารที่จะปล่อยเข้าในคอลัมน์แรก ด้วยอัตราการบ่อนย้อนกลับ  $0.2625 \text{ ชั่วโมง}^{-1}$  93-195 เพิ่มอัตราการเจือจางใหม่เป็น  $0.20 \text{ ชั่วโมง}^{-1}$  จากนั้นเพิ่มอัตราการเจือจางอีกเป็น  $0.22 \text{ ชั่วโมง}^{-1}$  จนถึงสิ้นสุดการทดลองชั่วโมงที่ 220



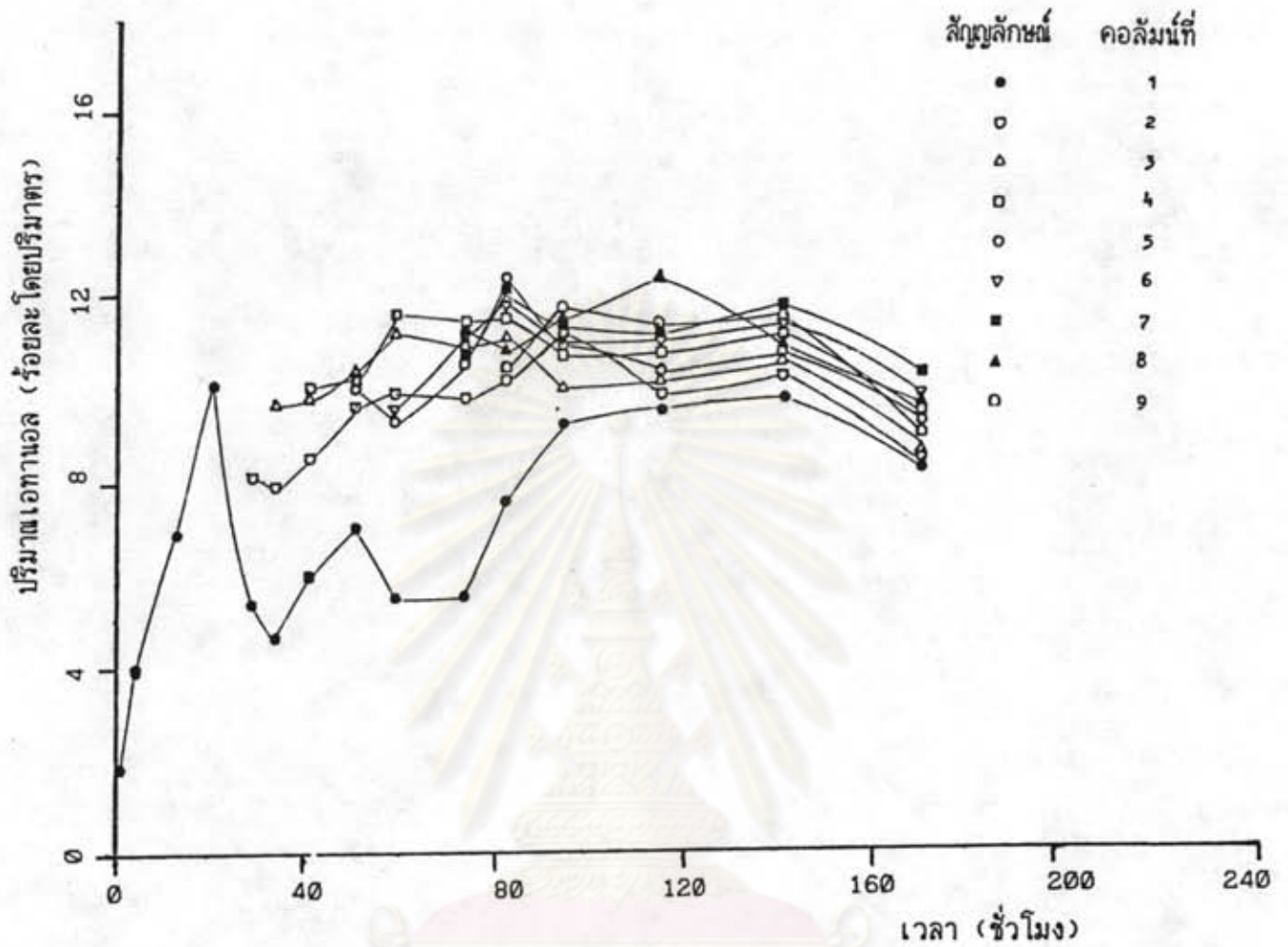
รูปที่ 4.3 ข จำนวนเซลล์ที่นับได้กับเวลาในแต่ละคอลัมน์ของ เครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่องทำการหมักโดยใช้ น้ำสับปะรดเป็นสารอาหารและใช้เชื้อยีสต์ *S. cerevisiae* อัตราการให้อากาศ 0.5 vvm 4 ชั่วโมงแรก จากนั้นลดเหลือ 0.04-0.06 vvm ตลอดการทดลอง เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 21 ชั่วโมง ทิศทางการไหลของน้ำหมักจากตอนล่างของคอลัมน์ที่มีการให้อากาศเข้าตอนล่างของคอลัมน์ที่ไม่มีการให้อากาศ แล้วไหลลงจากตอนบนของคอลัมน์นี้เข้าตอนล่างของคอลัมน์ถัดไปจนครบทุกคอลัมน์ อัตราการเจือจางชั่วโมงที่ 21-92 เท่ากับ  $0.18 \text{ ชั่วโมง}^{-1}$  จากนั้นตั้งน้ำหมักบางส่วนจากตอนล่างของคอลัมน์สุดท้ายกลับไปรวมกับสารอาหารที่จะปล่อยเข้าในคอลัมน์แรก ด้วยอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 0.2625 ชั่วโมงที่ 93-195 เพิ่มอัตราการเจือจางใหม่เป็น  $0.20 \text{ ชั่วโมง}^{-1}$  จากนั้นเพิ่มอัตราการเจือจางอีกเป็น  $0.22 \text{ ชั่วโมง}^{-1}$  จนถึงสิ้นสุดการทดลองชั่วโมงที่ 220



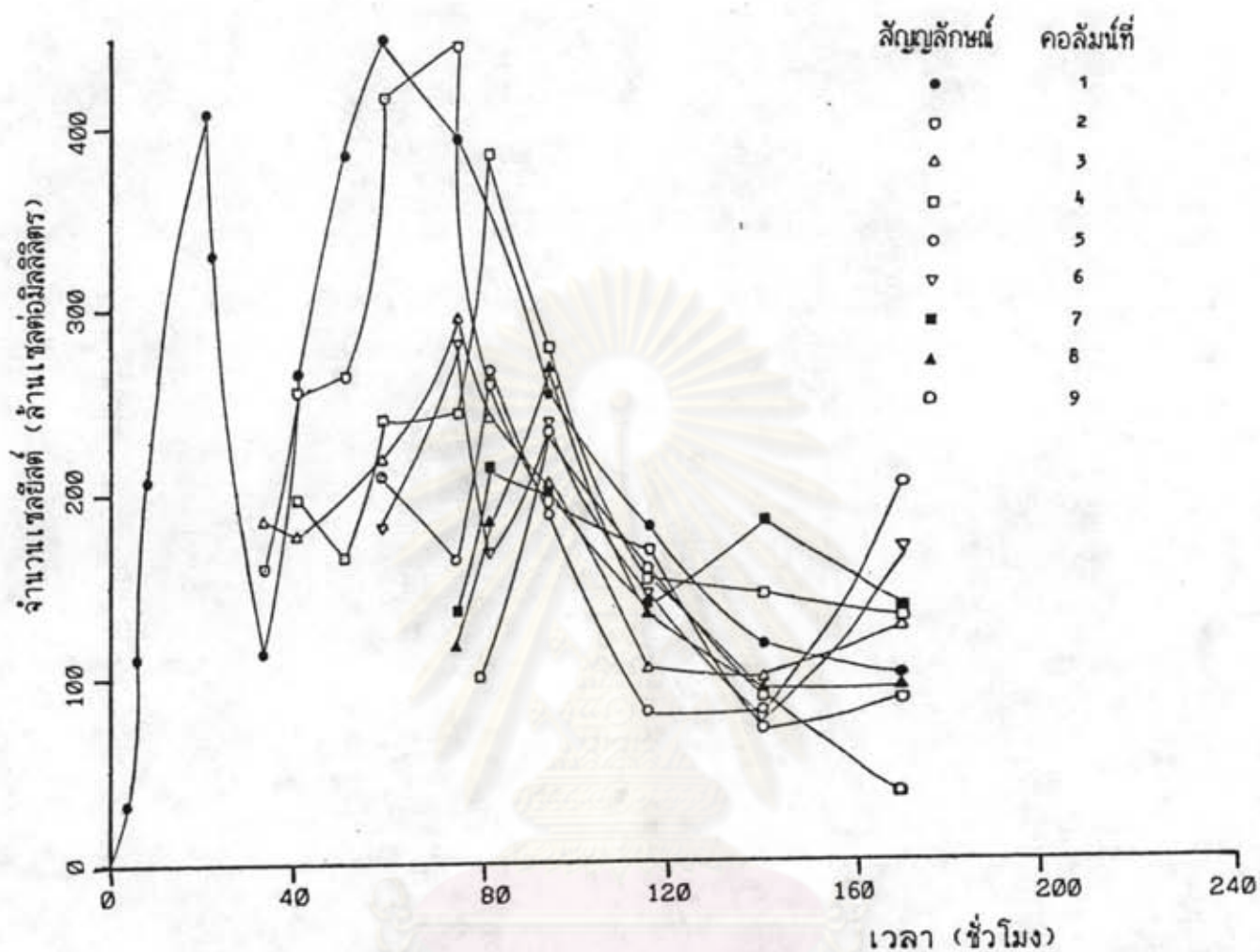
รูปที่ 4.3ค ความเข้มข้นของน้ำคาลที่เหลือในน้ำหมักกับเวลาในแต่ละคอลัมน์ของเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่องทำการหมักโดยใช้น้ำสับปะรดเป็นสารอาหาร และใช้เชื้อยีสต์ *S. cerevisiae* อัตราการให้อากาศ 0.5 vvm 4 ชั่วโมงแรก จากนั้นลดเหลือ 0.04-0.06 vvm ตลอดการทดลอง เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 21 ชั่วโมง ทิศทางการไหลของน้ำหมักจากตอนล่างของคอลัมน์ที่มีการให้อากาศเข้าตอนล่างของคอลัมน์ที่ไม่มีการให้อากาศแล้วไหลลงจากตอนบนของคอลัมน์นี้เข้าตอนล่างของคอลัมน์ถัดไปจนครบทุกคอลัมน์ อัตราการเจือจางชั่วโมงที่ 21-82 เท่ากับ  $0.18 \text{ ชั่วโมง}^{-1}$  จากนั้นดึงน้ำหมักบางส่วนจากตอนล่างของคอลัมน์สุดท้ายกลับไปรวมกับสารอาหารที่จะป้อนเข้าคอลัมน์แรก ด้วยอัตราส่วนการบ้อนย้อนกลับ  $0.2625$  ชั่วโมงที่ 83-195 เพิ่มอัตราการเจือจางใหม่เป็น  $0.20 \text{ ชั่วโมง}^{-1}$  จากนั้นเพิ่มอัตราการเจือจางอีกเป็น  $0.22 \text{ ชั่วโมง}^{-1}$  จนสิ้นสุดการทดลองชั่วโมงที่ 220

4.2.2 จากกราฟรูปที่ 4.4 ก - 4.4 ค ซึ่งเป็นระบบการหมักน้ำล้นประตเพื่อผลิตเอทานอลโดยเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง ใช้สภาวะเช่นเดียวกับข้อ 4.2.1 โดยให้อัตราการเจือจางชั่วโมงที่ 21-95 เท่ากับ  $0.18 \text{ ชั่วโมง}^{-1}$  ระบบสามารถรักษาสภาวะสมดุลที่ระดับปริมาณเอทานอลร้อยละ 11.5 โดยปริมาตร จำนวนเซลล์ยีสต์ 250 ล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตร ความเข้มข้นสารละลายน้ำตาล 5 องศาบริกซ์ จะเห็นว่าระบบสามารถรักษาสภาวะสมดุลที่ระดับสูงเพราะมีการปล่อยให้มีการผลิตเอทานอลในระดับสูงก่อน (เอทานอลเริ่มปล่อยร้อยละ 10 โดยปริมาตร) สารอาหารในระบบต่อเนื่อง และจำนวนคอลัมน์ที่ใช้ก็น้อยลง (ศจ. 2528) ชั่วโมงที่ 96-162 มีการดึงน้ำหมักบางส่วนจากตอนล่างคอลัมน์สุดท้ายกลับไปรวมกับสารอาหารที่ป้อนเข้าคอลัมน์แรก แล้วใช้อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ  $0.3000$  ซึ่งมีผลทำให้สามารถเพิ่มอัตราการเจือจางใหม่เป็น  $0.25 \text{ ชั่วโมง}^{-1}$  แล้วระบบยังคงสามารถรักษาสภาวะสมดุลไว้ได้ที่ระดับเต็ม เนื่องมาจากการเปลี่ยนสภาวะสิ่งแวดล้อมของเซลล์ยีสต์ให้ดีขึ้น ประสิทธิภาพในการทำกิจกรรมจึงเพิ่มขึ้น (Rosario, 1979) จากคอลัมน์แรก ซึ่งมีการให้อากาศตลอดเวลา จึงทำให้ได้เซลล์ยีสต์ที่ active เข้าไปในระบบ ทำให้อัตราในการผลิตเอทานอลสูงขึ้นด้วย (Wang, 1979) แต่หลังจากชั่วโมงที่ 143-171 ซึ่งได้เพิ่มอัตราการเจือจางเป็น  $0.27 \text{ ชั่วโมง}^{-1}$  โดยอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับคงเดิม ระบบไม่สามารถรักษาสภาวะสมดุลไว้ได้ เนื่องจากอัตราการเจือจางที่เพิ่มสูงมากกว่าค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ ทำให้เซลล์ยีสต์ถูกชะล้างออกไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งหมดไปในที่สุด ซึ่งเรียกว่า Washout (Aiba, 1965)

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

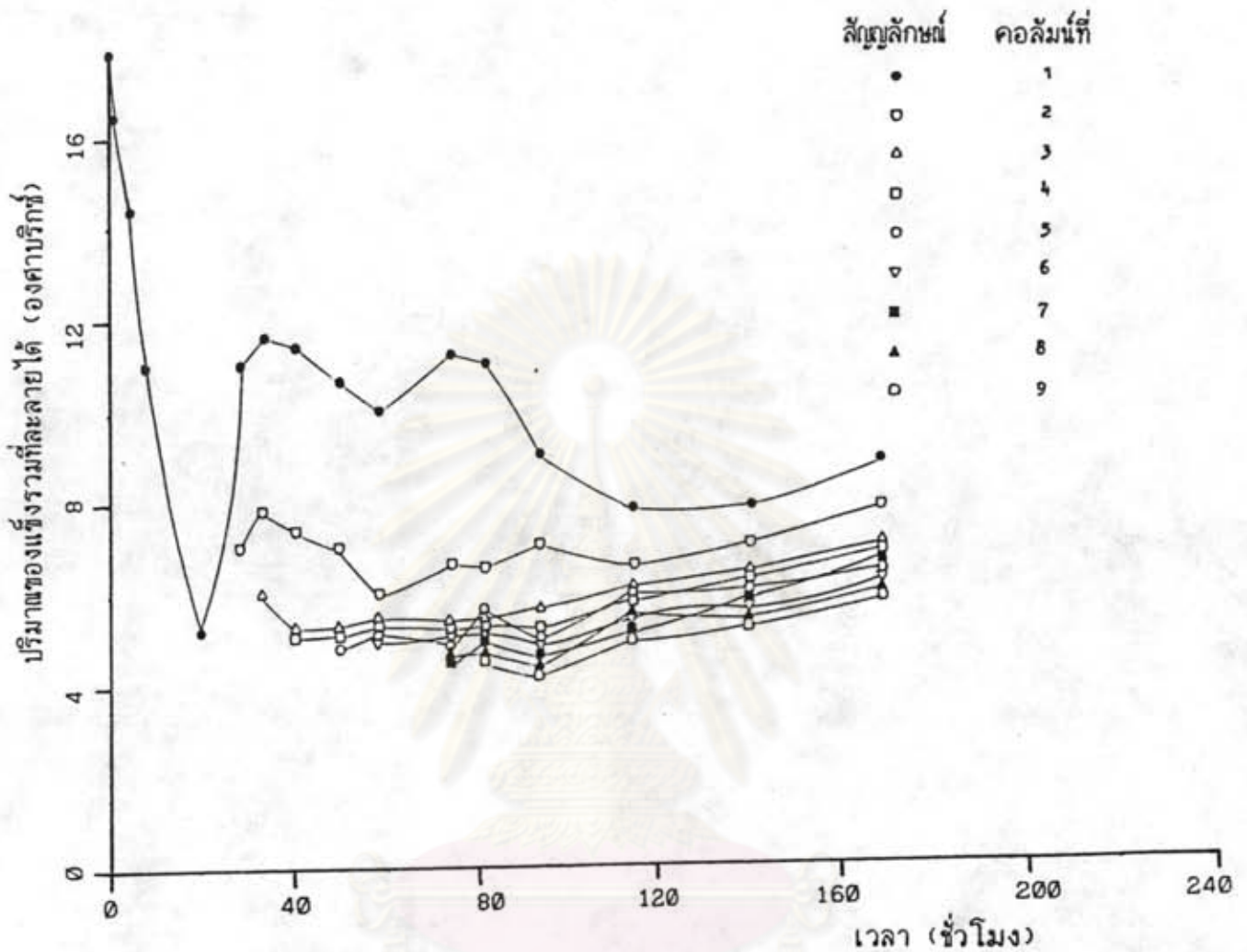


รูปที่ 4.4ก ปริมาณการผลิตเอทานอลกับเวลา ด้วยเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง โดยใช้น้ำล้นประคเป็นสารอาหาร และใช้เชื้อยีสต์ *S. cerevisiae* อัตราการให้อากาศ 0.5 VVM 4 ชั่วโมงแรก จากนั้นลดเหลือ 0.04-0.06 VVM ตลอดการทดลอง เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 21 ชั่วโมง ทิศทางการไหลของน้ำหมักจากตอนล่างของคอลัมน์ที่มีการให้อากาศเข้าตอนล่างของคอลัมน์ที่ไม่การให้อากาศ แล้วไหลลงจากตอนบนของคอลัมน์นี้เข้าตอนล่างของคอลัมน์ถัดไปจนครบทุกคอลัมน์ อัตราการเจือจาง ชั่วโมงที่ 21-95 เท่ากับ 0.18 ชั่วโมง<sup>-1</sup> จากนั้นตั้งน้ำหมักบางส่วนของคอลัมน์สุดท้ายกลับไปรวมกับสารอาหารที่จะป้อนเข้าในคอลัมน์แรก ด้วยอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 0.3000 ที่ชั่วโมงที่ 96-142 เพิ่มอัตราการเจือจางใหม่เป็น 0.25 ชั่วโมง<sup>-1</sup> หลังจากนั้นเพิ่มอัตราการเจือจางอีกเป็น 0.27 ชั่วโมง<sup>-1</sup> จนถึงสิ้นสุดการทดลองชั่วโมงที่ 171



รูปที่ 4.4ข จำนวนเซลล์ที่นับได้กับเวลาในแต่ละคอลัมน์ของเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่องทำการหมักโดยใช้น้ำตาลเประคเป็นสารอาหารและใช้เชื้อยีสต์ *S. cerevisiae* อัตราการให้อากาศ 0.5 vvm 4 ชั่วโมงแรก จากนั้นลดเหลือ 0.04-0.06 vvm ตลอดการทดลอง เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 21 ชั่วโมง ทิศทางการไหลของน้ำหมักจากตอนล่างของคอลัมน์ที่มีการให้อากาศเข้าตอนล่างของคอลัมน์ที่ไม่การให้อากาศ แล้วไหลลงจากตอนบนของคอลัมน์นี้เข้าตอนล่างของคอลัมน์ถัดไปจนครบทุกคอลัมน์ อัตราการเจือจาง ชั่วโมงที่ 21-95 เท่ากับ  $0.18 \text{ ชั่วโมง}^{-1}$  จากนั้นตั้งน้ำหมักบางส่วนของคอลัมน์สุดท้ายกลับไปรวมกับสารอาหารที่จะป้อนเข้าในคอลัมน์แรกด้วยอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 0.3000 ที่ชั่วโมงที่ 96-142 เพิ่มอัตราการเจือจางใหม่เป็น  $0.25 \text{ ชั่วโมง}^{-1}$  หลังจากนั้นเพิ่มอัตราการเจือจางอีกเป็น  $0.27 \text{ ชั่วโมง}^{-1}$  จนถึงสิ้นสุดการทดลองชั่วโมงที่ 171

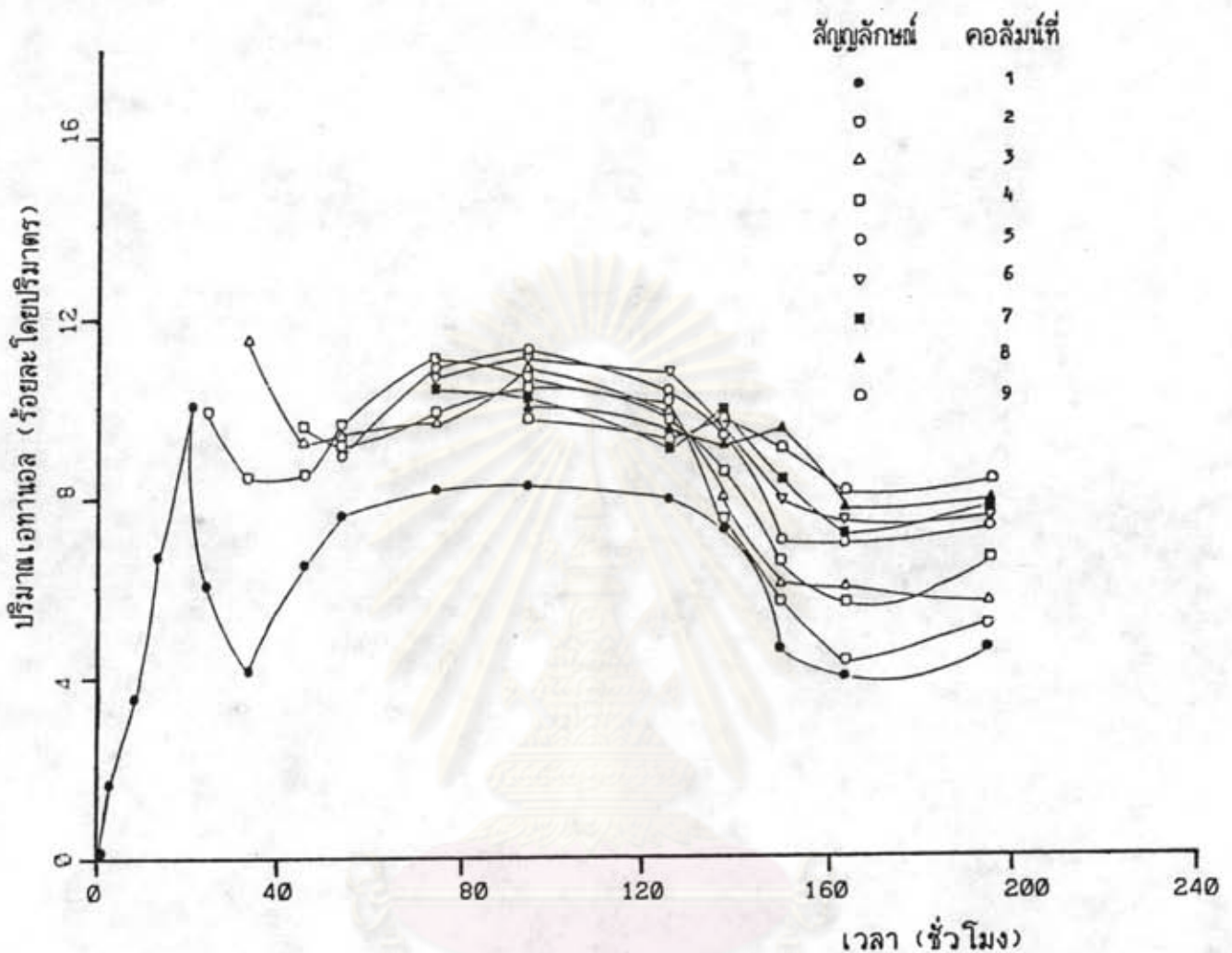




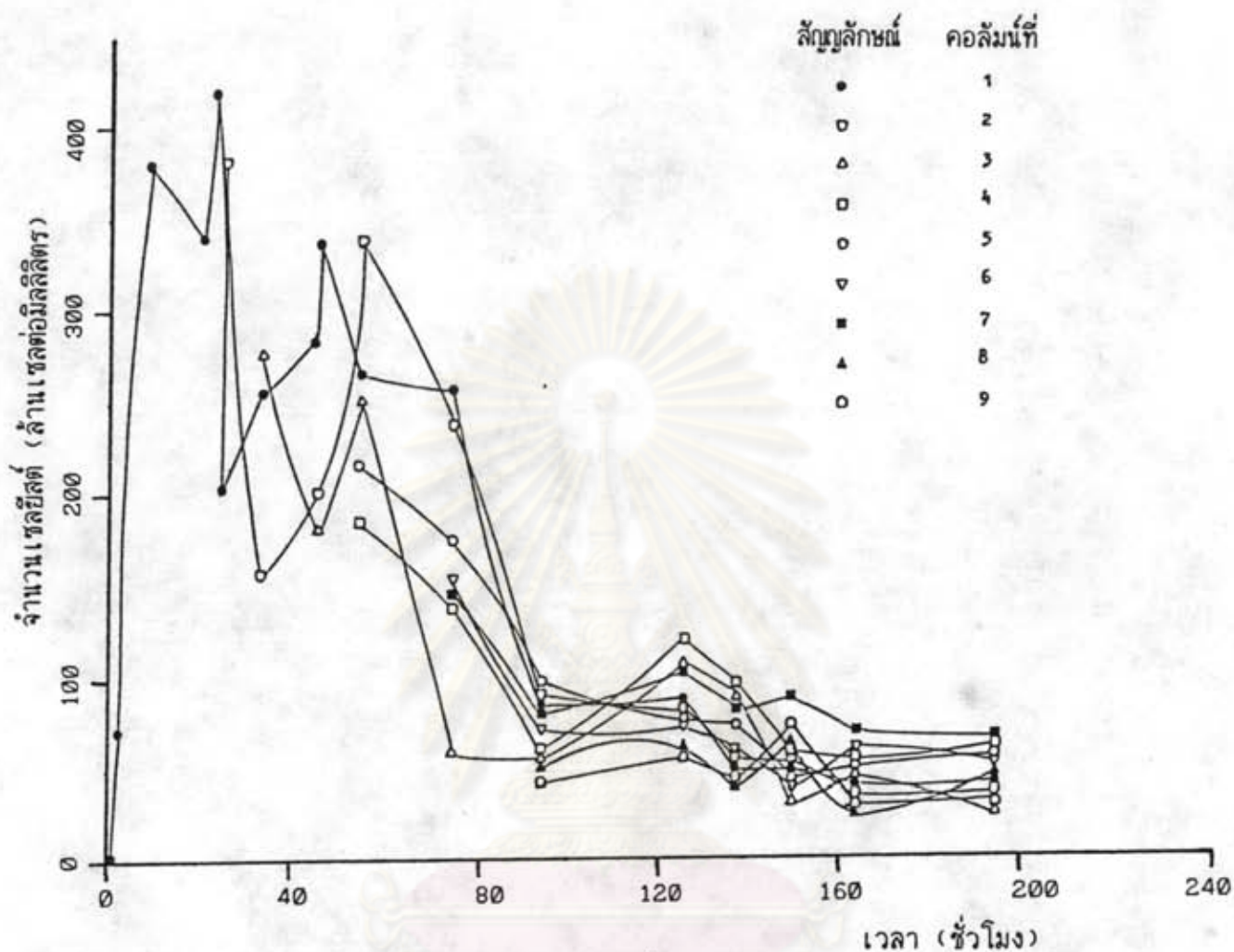
รูปที่ 4.4ค ความเข้มข้นของน้ำตาลที่เหลือในน้ำหมักกับเวลาในแต่ละคอลัมน์ของเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่องทำการหมักโดยใช้น้ำตาลประดเป็นสารอาหาร และใช้เชื้อยีสต์ *S. cerevisiae* อัตราการให้อากาศ 0.5 vvm 4 ชั่วโมงแรก จากนั้นลดเหลือ 0.04-0.06 vvm ตลอดการทดลอง เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 21 ชั่วโมง ทิศทางการไหลของน้ำหมักจากตอนล่างของคอลัมน์ที่มีการให้อากาศเข้าตอนล่างของคอลัมน์ที่ไม่การให้อากาศ แล้วไหลลงจากตอนบนของคอลัมน์นี้เข้าตอนล่างของคอลัมน์ถัดไปจนครบทุกคอลัมน์ อัตราการเจือจาง ชั่วโมงที่ 21-95 เท่ากับ  $0.18 \text{ ชั่วโมง}^{-1}$  จากนั้นจึงนำหมักบางส่วนของคอลัมน์สุดท้ายกลับไปรวมกับสารอาหารที่จะป้อนเข้าในคอลัมน์แรก ด้วยอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 0.3000 ที่ชั่วโมงที่ 96-142 เพิ่มอัตราการเจือจางใหม่เป็น  $0.25 \text{ ชั่วโมง}^{-1}$  หลังจากนั้นเพิ่มอัตราการเจือจางอีกเป็น  $0.27 \text{ ชั่วโมง}^{-1}$  จนถึงผลการทดลองชั่วโมงที่ 171

4.2.3 จากกราฟรูปที่ 4.5 ก - 4.5 ค ซึ่งเป็นระบบการหมักน้ำสับปะรด เพื่อผลิตเอทานอลในเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง ใช้สภาวะเดียวกับข้อ 4.2.1 โดยให้อัตราการเจือจางชั่วโมงที่ 21-94 เท่ากับ  $0.18 \text{ ชั่วโมง}^{-1}$  ระบบสามารถรักษาสภาวะสมดุลที่ระดับการผลิตเอทานอลร้อยละ 11 โดยปริมาตร จำนวนเซลยีสต์ 200 ล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตร ความเข้มข้นสารละลายน้ำตาล 5 องศาบริกซ์ ชั่วโมงที่ 95-125 ดึงน้ำหมักบางส่วนจากตอนล่างคอลัมน์สุดท้ายกับไปรวมกับสารอาหารที่บ้อนเข้าคอลัมน์แรก แล้วให้อัตราส่วนการบ้อนย้อนกลับ  $0.3250$  พร้อมกับเพิ่มอัตราการเจือจางเป็น  $0.30 \text{ ชั่วโมง}^{-1}$  จะเห็นว่าระบบยังสามารถรักษาสภาวะสมดุลที่ระดับเดิมได้ ชั่วโมงที่ 126-164 เพิ่มอัตราการเจือจางอีกเป็น  $0.35 \text{ ชั่วโมง}^{-1}$  ระบบสูญเสียลักษณะสมดุลอย่างรวดเร็ว โดยอัตราการผลิตเอทานอลลดลง เซลยีสต์จะถูกชะล้างออกไป และความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลจะสูงขึ้นเรื่อยๆ หลังจากนั้น ชั่วโมงที่ 165 จนถึงสิ้นสุดการทดลอง ชั่วโมงที่ 195 ทดลองลดอัตราการเจือจางเหลือ  $0.28 \text{ ชั่วโมง}^{-1}$  พบว่าจำนวนเซลยีสต์มีค่าเพิ่มขึ้นและความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลต่ำลงเรื่อยๆ เนื่องจากเซลยีสต์มีการนำสารอาหารไปใช้ในการผลิตเอทานอลมากกว่าการนำไปใช้ในการเจริญเติบโต (Aiba, 1968) ดังนั้นปริมาณเอทานอลจึงเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ

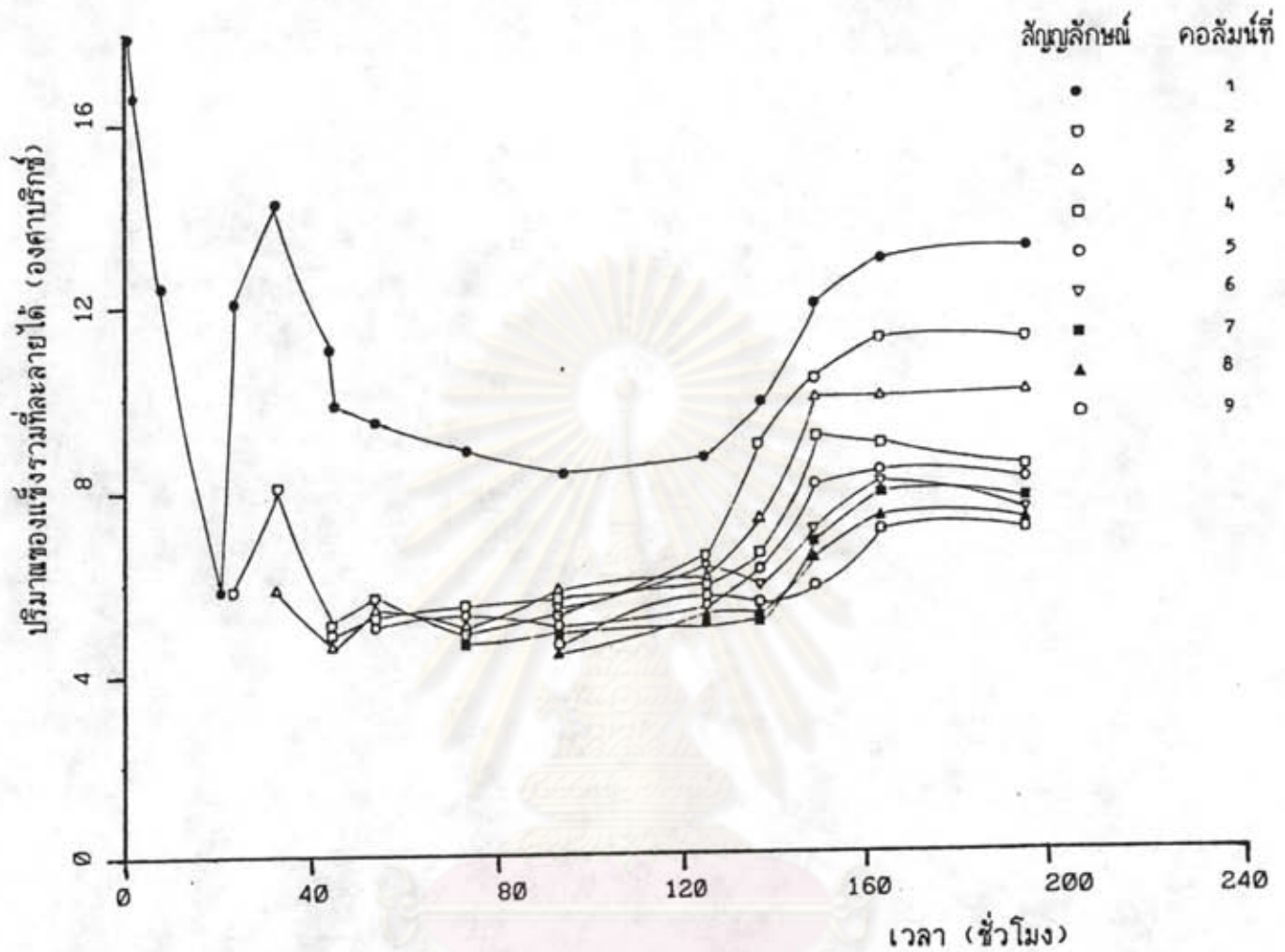
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.5ก ปริมาณการผลิตเอทานอลกับเวลา ด้วยเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง โดยใช้ น้ำสลับประคเป็นสารอาหาร และใช้เชื้อยีสต์ *S. cerevisiae* อัตราการให้อากาศ 0.5 VVM 4 ชั่วโมงแรก จากนั้นลดเหลือ 0.04-0.06 VVM ตลอดการทดลอง เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 21 ชั่วโมง ทิศทางการไหลของน้ำหมักจากตอนล่างของคอลัมน์ที่มีการให้อากาศเข้าตอนล่างของคอลัมน์ที่ไม่มีการให้อากาศ แล้วไหลลงจากตอนบนของคอลัมน์นี้เข้าตอนล่างของคอลัมน์ถัดไปจนครบทุกคอลัมน์ อัตราการเจือจางชั่วโมงที่ 21-84 เท่ากับ  $0.18 \text{ ชั่วโมง}^{-1}$  จากนั้นดึงน้ำหมักบางส่วนจากตอนล่างของคอลัมน์สุดท้ายกลับไปรวมกับสารอาหารที่จะป้อนเข้าในคอลัมน์แรก ด้วยอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ  $0.3250 \text{ ชั่วโมง}^{-1}$  95-125 เพิ่มอัตราการเจือจางใหม่เป็น  $0.30 \text{ ชั่วโมง}^{-1}$  ชั่วโมงที่ 126-164 เพิ่มอัตราการเจือจางอีกเป็น  $0.35 \text{ ชั่วโมง}^{-1}$  หลังจากนั้นลดอัตราการเจือจางเหลือ  $0.28 \text{ ชั่วโมง}^{-1}$  จนสิ้นสุดการทดลองชั่วโมงที่ 195



รูปที่ 4.5 ข จำนวนเซลล์ยีสต์ที่นับได้กับเวลาในแต่ละคอลัมน์ของเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่องทำการหมักโดยใช้น้ำสับปะรดเป็นสารอาหารและใช้เชื้อยีสต์ *S. cerevisiae* อัตราการให้อากาศ 0.5 vvm 4 ชั่วโมงแรก จากนั้นลดเหลือ 0.04-0.06 vvm ตลอดการทดลอง เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 21 ชั่วโมง ทิศทางการไหลของน้ำหมักจากตอนล่างของคอลัมน์ที่มีการให้อากาศเข้าตอนล่างของคอลัมน์ที่ไม่มีการให้อากาศ แล้วไหลลงจากตอนบนของคอลัมน์นี้เข้าตอนล่างของคอลัมน์ถัดไปจนครบทุกคอลัมน์ อัตราการเจือจางชั่วโมงที่ 21-84 เท่ากับ 0.18 ชั่วโมง<sup>-1</sup> จากนั้นตั้งน้ำหมักบางส่วนจากตอนล่างของคอลัมน์สุดท้ายกลับไปรวมกับสารอาหารที่จะบ้อนเข้าคอลัมน์แรก ด้วยอัตราส่วนการบ้อนย้อนกลับ 0.3250 ชั่วโมงที่ 85-125 เพิ่มอัตราการเจือจางใหม่เป็น 0.30 ชั่วโมง<sup>-1</sup> ชั่วโมงที่ 126-164 เพิ่มอัตราการเจือจางอีกเป็น 0.35 ชั่วโมง<sup>-1</sup> หลังจากนั้นลดอัตราการเจือจางเหลือ 0.28 ชั่วโมง<sup>-1</sup> จนสิ้นสุดการทดลองชั่วโมงที่ 185

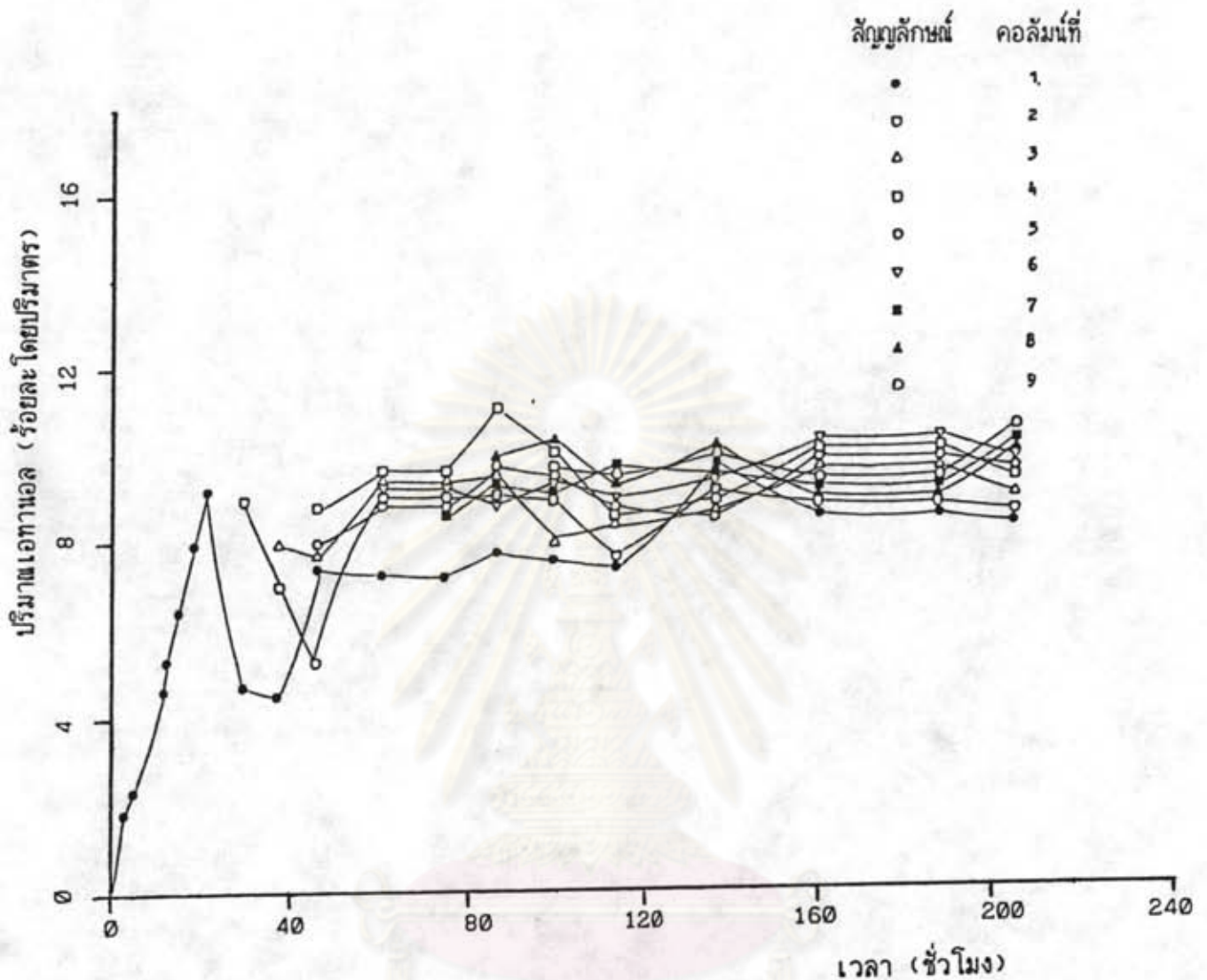


รูปที่ 4.5ค ความเข้มข้นของน้ำตาลที่เหลือในน้ำหมักกับเวลาในแต่ละคอลัมน์ของเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่องทำการหมักโดยใช้น้ำตาลประเภทเป็นสารอาหาร และใช้เชื้อยีสต์ *S. cerevisiae* อัตราการให้อากาศ 0.5 vvm 4 ชั่วโมงแรก จากนั้นลดเหลือ 0.04-0.06 vvm ตลอดการทดลอง เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 21 ชั่วโมง ทิศทางการไหลของน้ำหมักจากตอนล่างของคอลัมน์ที่มีการให้อากาศเข้าตอนล่างของคอลัมน์ที่ไม่มีการให้อากาศแล้วไหลลงจากตอนบนของคอลัมน์นี้เข้าตอนล่างของคอลัมน์ถัดไปจนครบทุกคอลัมน์ อัตราการเจือจางชั่วโมงที่ 21-94 เท่ากับ 0.18 ชั่วโมง<sup>-1</sup> จากนั้นดึงน้ำหมักบางส่วนจากตอนล่างของคอลัมน์สุดท้ายกลับไปรวมกับสารอาหารที่จะป้อนเข้าคอลัมน์แรก ด้วยอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 0.3250 ชั่วโมงที่ 95-125 เพิ่มอัตราการเจือจางใหม่เป็น 0.30 ชั่วโมง<sup>-1</sup> ชั่วโมงที่ 126-164 เพิ่มอัตราการเจือจางอีกเป็น 0.35 ชั่วโมง<sup>-1</sup> หลังจากนั้นลดอัตราการเจือจางเหลือ 0.28 ชั่วโมง<sup>-1</sup> จนสิ้นสุดการทดลองชั่วโมงที่ 195

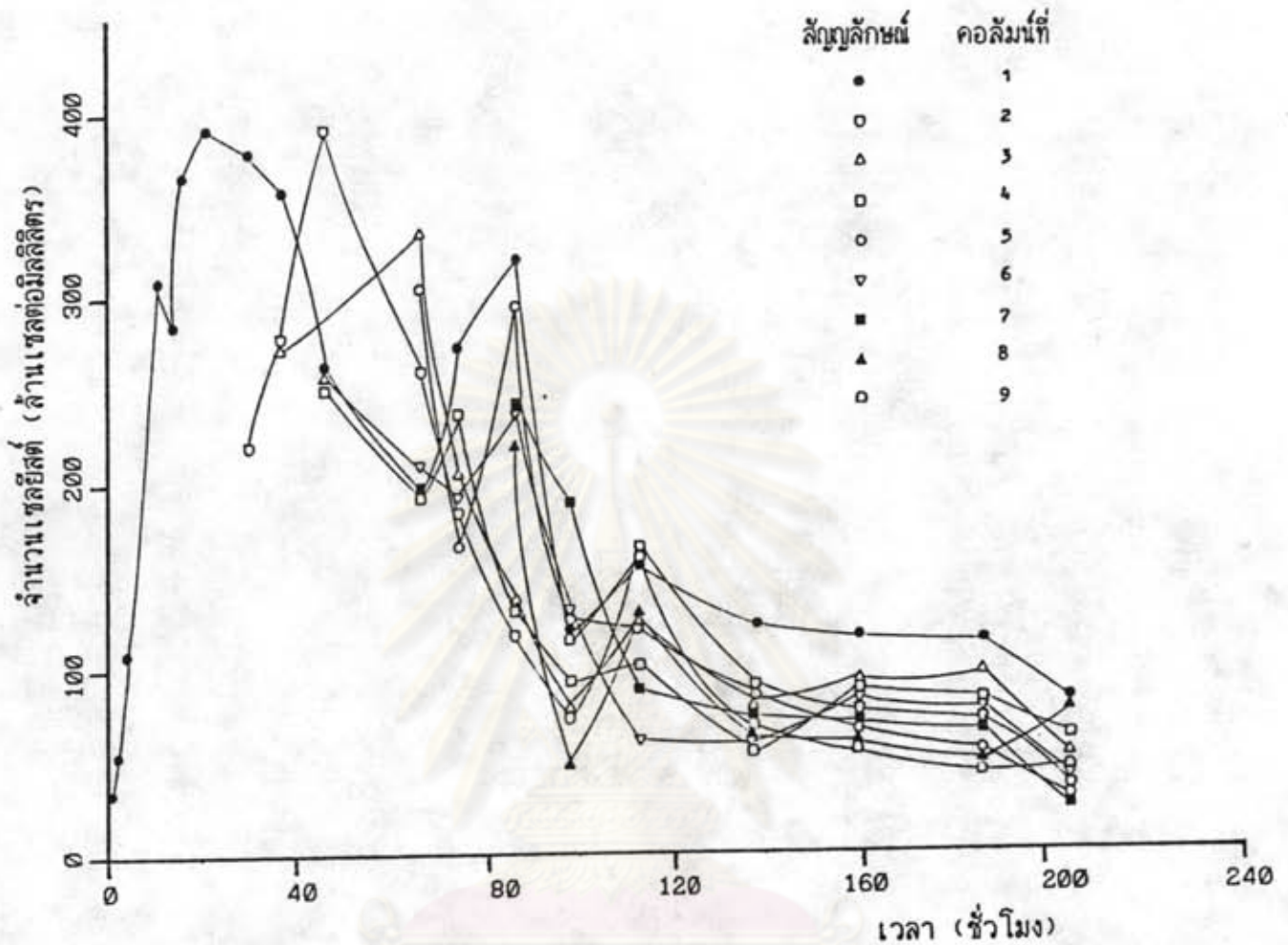
4.3 ผลการทดลองเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำวัสดุทางการเกษตรอื่นๆ มาใช้ในกระบวนการหมักเพื่อผลิตเอทานอลโดยใช้เครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง ได้เลือกใช้น้ำอ้อยแทนน้ำสับปะรด เนื่องจากอ้อยมีการเพาะปลูกได้ง่ายทั่วทุกพื้นที่ของประเทศไทย (ตาราง ค-2ก,ข) อีกทั้งมีสารอาหารอยู่มากพอต่อการเจริญเติบโตและการหมักของยีสต์ และต้องการอาหารเสริมเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ส่วนประกอบของน้ำอ้อย (ตารางที่ 2.2-2.6)

4.3.1 จากกราฟรูปที่ 4.6ก-4.6ค ซึ่งเป็นระบบการหมักเพื่อผลิตเอทานอลด้วยเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง ใช้สภาวะเช่นเดียวกับข้อ 4.2.1 แต่ต่างกันตรงที่ใช้น้ำอ้อยแทนน้ำสับปะรด โดยชั่วโมงที่ 21-99 ใช้อัตราเจือจาง 0.18 ชั่วโมง<sup>-1</sup> พบว่าระบบสามารถรักษาสภาวะสมดุล ที่ระดับปริมาณเอทานอลร้อยละ 9.5 โดยปริมาตร จำนวนเซลล์ยีสต์ 200 ล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตร ความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาล 5 องศาบริกซ์ ชั่วโมงที่ 100-189 ซึ่งมีการดึงน้ำหมักบางส่วนจากตอนล่างของคอลัมน์สุดท้ายกลับไปรวมกับสารอาหารที่บ้อนเข้าคอลัมน์แรกด้วยอัตราส่วนการบ้อนย้อนกลับ 0.2625 จากนั้นเพิ่มอัตราการเจือจางใหม่ขึ้นเป็น 0.20 ชั่วโมง<sup>-1</sup> ซึ่งระบบยังสามารถรักษาสภาวะสมดุลที่ระดับปริมาณเอทานอลและความเข้มข้นสารละลายน้ำตาลคงเดิม จำนวนเซลล์ยีสต์ 100 ล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตร ต่อมาชั่วโมงที่ 188 จนถึงสิ้นสุดการทดลอง ชั่วโมงที่ 205 ทดลองเพิ่มค่าอัตราการเจือจางอีกเป็น 0.22 ชั่วโมง<sup>-1</sup> โดยอัตราส่วนการบ้อนย้อนกลับคงเดิม ระบบมีการผลิตเอทานอลลดลง เนื่องจากเซลล์ยีสต์ถูกชะล้างออกไป ความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

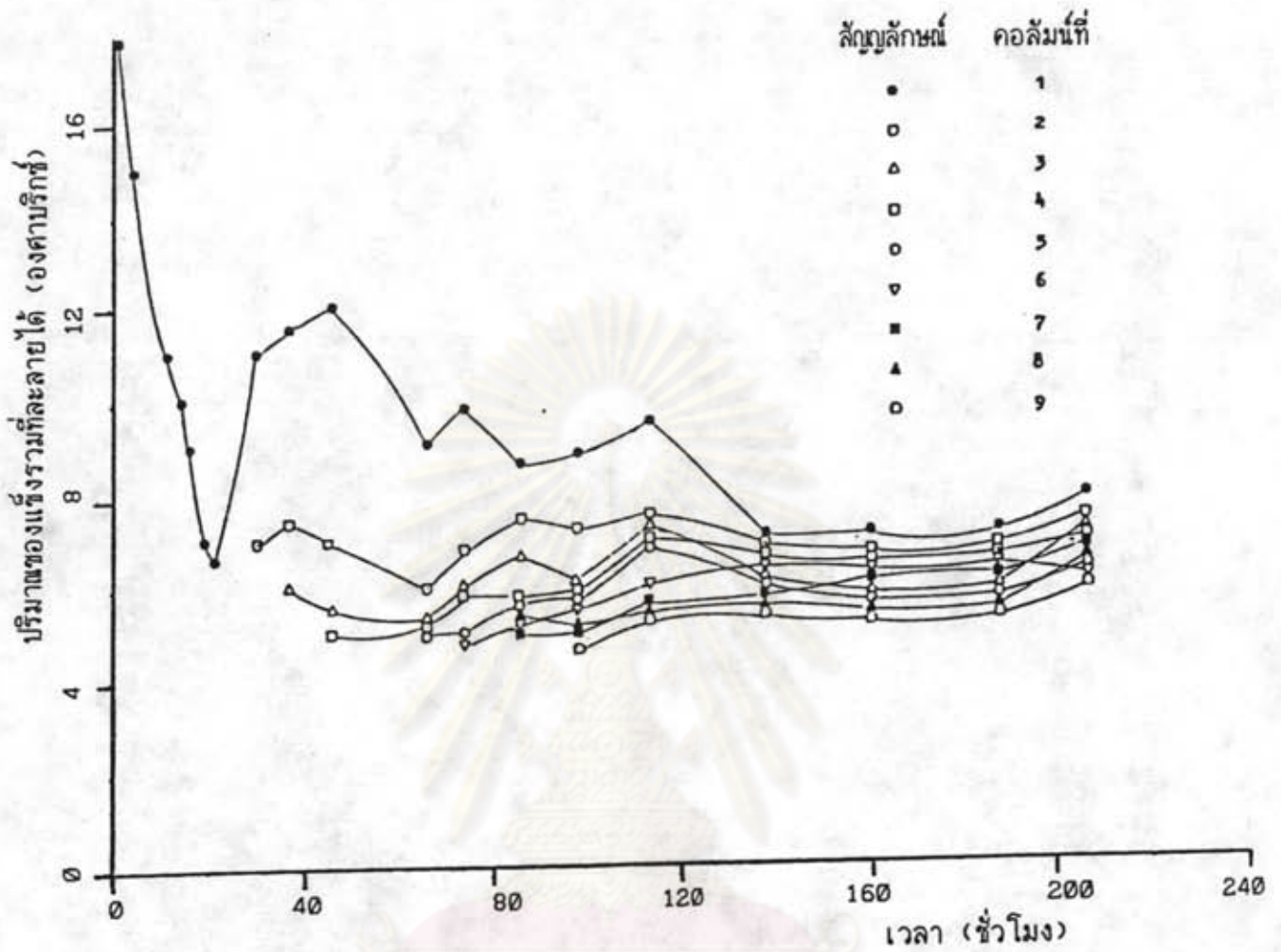


รูปที่ 4.6ก ปริมาณการผลิตเอทานอลกับเวลา ด้วยเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง โดยใช้น้ำอ้อยเป็นสารอาหาร และใช้เชื้อยีสต์ *S. cerevisiae* อัตราการให้อากาศ 0.5 VVM 4 ชั่วโมงแรก จากนั้นลดเหลือ 0.04-0.06 VVM ตลอดการทดลอง เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 21 ชั่วโมง ทิศทางการไหลของน้ำหมักจากตอนล่างของคอลัมน์ที่มีการให้อากาศเข้าตอนล่างของคอลัมน์ที่ไม่มีการให้อากาศ แล้วไหลขึ้นจากตอนบนของคอลัมน์นี้เข้าตอนล่างของคอลัมน์ถัดไปจนครบทุกคอลัมน์ อัตราการเจือจางชั่วโมงที่ 21-99 เท่ากับ 0.18 ชั่วโมง จากนั้นดึงน้ำหมักบางส่วนจากตอนล่างของคอลัมน์สุดท้ายกลับไปรวมกับสารอาหารที่จะป้อนเข้าคอลัมน์แรก ด้วยอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 0.2625 ชั่วโมงที่ 100-187 เพิ่มอัตราการเจือจางใหม่เป็น 0.20 ชั่วโมง<sup>-1</sup> หลังจากนั้นเพิ่มอัตราการเจือจางใหม่เป็น 0.22 ชั่วโมง<sup>-1</sup> จนถึงสิ้นสุดการทดลองชั่วโมงที่ 205



รูปที่ 4.6 ข จำนวนเซลล์ยีสต์ที่นับได้กับเวลาในแต่ละคอลัมน์ของเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่องทำการหมักโดยใช้น้ำอ้อยเป็นสารอาหาร และใช้เชื้อยีสต์ *S. cerevisiae* อัตราการให้อากาศ 0.5 vvm 4 ชั่วโมงแรก จากนั้นลดเหลือ 0.04-0.06 vvm ตลอดการทดลอง เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 21 ชั่วโมง ทิศทางการไหลของน้ำหมักจากตอนล่างของคอลัมน์ที่มีการให้อากาศเข้าตอนล่างของคอลัมน์ที่ไม่มีการให้อากาศ แล้วไหลกลับจากตอนบนของคอลัมน์นี้เข้าตอนล่างของคอลัมน์ถัดไปจนครบทุกคอลัมน์ อัตราการเจือจางชั่วโมงที่ 21-89 เท่ากับ 0.18 ชั่วโมง จากนั้นตั้งน้ำหมักบางส่วนจากตอนล่างของคอลัมน์สุดท้ายกลับไปพร้อมกับสารอาหารที่จะป้อนเข้าคอลัมน์แรกด้วยอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 0.2625 ชั่วโมงที่ 100-187 เพิ่มอัตราการเจือจางใหม่เป็น 0.20 ชั่วโมง<sup>-1</sup> หลังจากนั้นเพิ่มอัตราการเจือจางใหม่เป็น 0.22 ชั่วโมง<sup>-1</sup> จนสิ้นสุดการทดลองชั่วโมงที่ 205



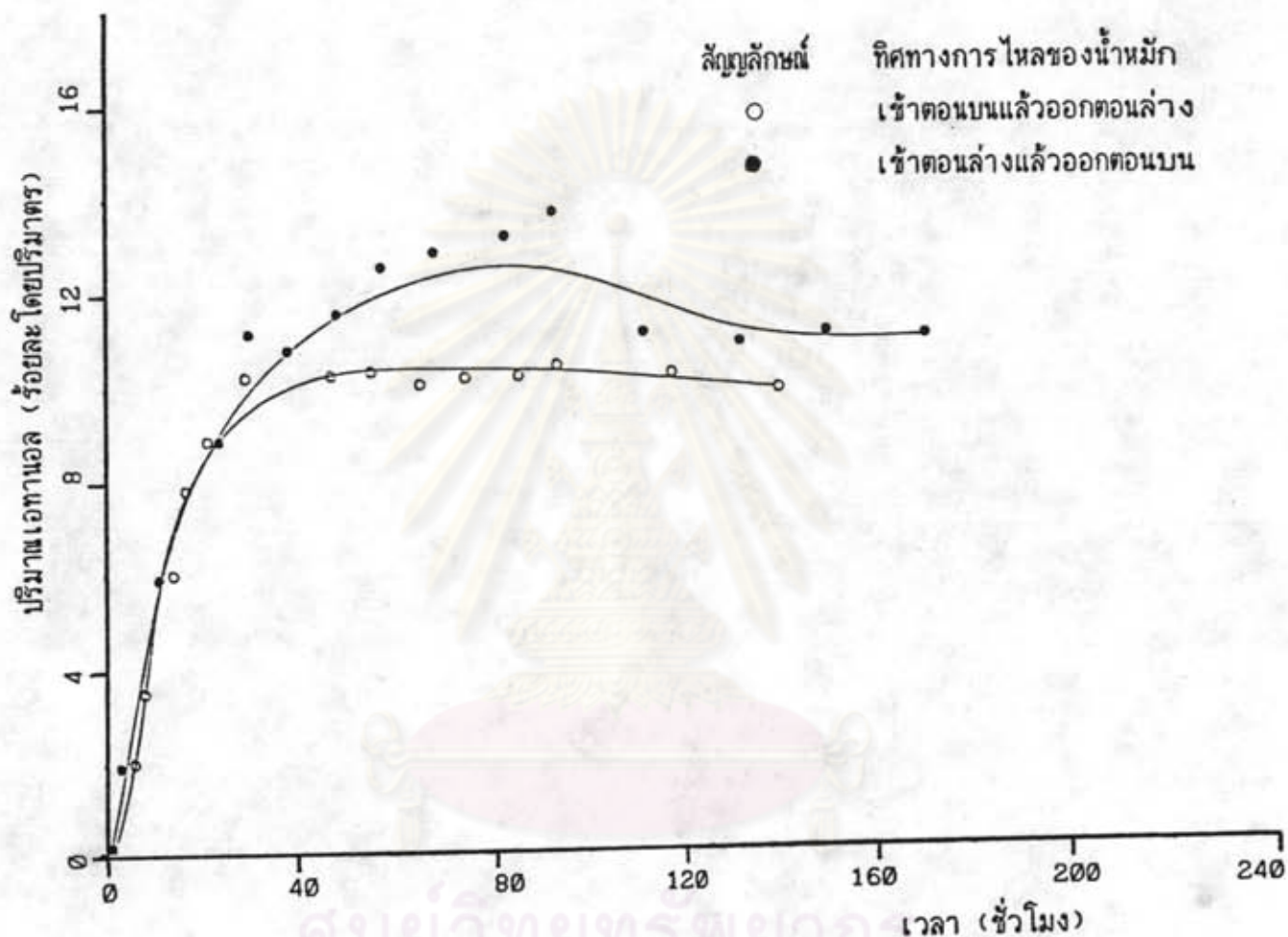


รูปที่ 4.6ค ความเข้มข้นของน้ำตาลที่เหลือในน้ำหมักกับเวลาในแต่ละคอลัมน์ของเครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง ทำการหมักโดยใช้น้ำอ้อยเป็นสารอาหาร และใช้เชื้อยีสต์ *S. cerevisiae* อัตราการให้อากาศ 0.5 vvm 4 ชั่วโมงแรก จากนั้นลดเหลือ 0.04-0.06 vvm ตลอดการทดลอง เริ่มปล่อยสารอาหารเมื่อเวลาผ่านไป 21 ชั่วโมง ทิศทางการไหลของน้ำหมักจากตอนล่างของคอลัมน์ที่มีการให้อากาศเข้าตอนล่างของคอลัมน์ที่ไม่มีให้อากาศ แล้วไหลลงจากตอนบนของคอลัมน์นี้เข้าตอนล่างของคอลัมน์ถัดไปจนครบทุกคอลัมน์ อัตราการเจือจางชั่วโมงที่ 21-99 เท่ากับ 0.18 ชั่วโมง จากนั้นตั้งน้ำหมักบางส่วนจากตอนล่างของคอลัมน์สุดท้ายกลับไปรวมกับสารอาหารที่จะบ้อนเข้าคอลัมน์แรก ด้วยอัตราส่วนการบ้อนย้อนกลับ 0.2625 ชั่วโมงที่ 100-187 เพิ่มอัตราการเจือจางใหม่เป็น 0.20 ชั่วโมง<sup>-1</sup> หลังจากนั้นเพิ่มอัตราการเจือจางใหม่อีกเป็น 0.22 ชั่วโมง<sup>-1</sup> จนถึงสิ้นสุดการทดลองชั่วโมงที่ 205

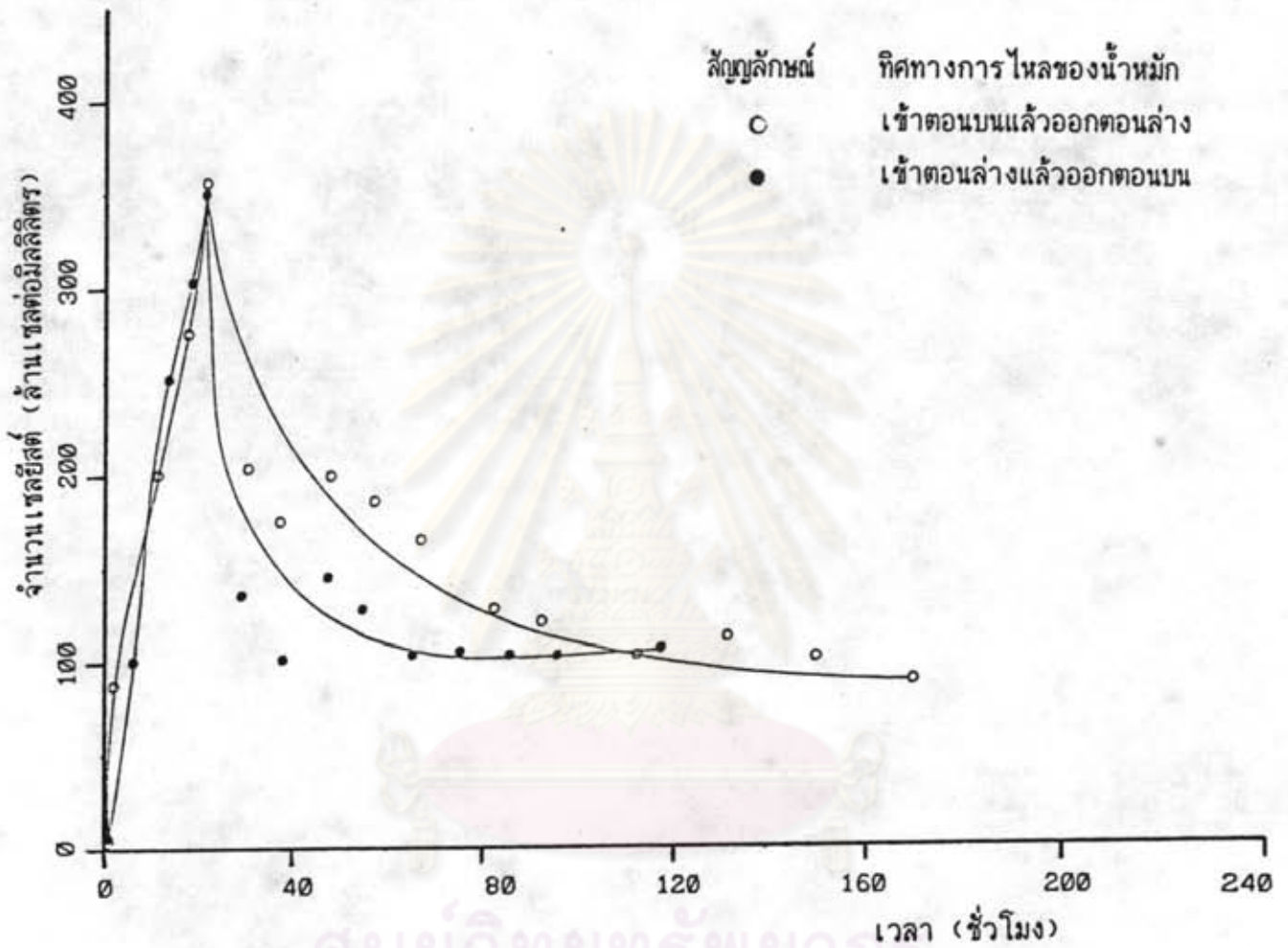
4.4 จากกราฟรูปที่ 4.7-4.9 จะเป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้ จำนวนเซลล์ และความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาล ในการหมักเพื่อผลิตเอทานอลโดย เครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง เมื่อระบบอยู่ในสภาวะสมดุล

4.4.1 จากกราฟรูปที่ 4.7ก-4.7ค เป็นการเปรียบเทียบทิศทางการไหลของน้ำหมัก ในคอลัมน์ที่ไม่มีการให้อากาศ พบว่าทิศทางการไหลเข้าทางตอนล่างของคอลัมน์จะมีเสถียรภาพ ดีกว่าทิศทางการไหลเข้าทางตอนบนของคอลัมน์ โดยทิศทางการไหลของน้ำหมักเข้าทางตอนล่าง ของคอลัมน์จะให้ปริมาณการผลิตเอทานอล ความเข้มข้นของเซลล์ ขณะอยู่ในสภาวะสมดุล ในระดับที่สูงกว่า ความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลที่เหลือในน้ำหมักก็อยู่ในระดับที่ต่ำกว่า เนื่อง จากทิศทางการไหลเข้าทางตอนล่างของคอลัมน์ น้ำหมักผสมผสานกันในลักษณะ fluidization (สมศักดิ์, 2528) ทำให้ประสิทธิภาพการกระจาย (distribution efficiency) ของเชื้อ ยีสต์ในคอลัมน์โดยเฉลี่ยจะนานกว่าทิศทางการไหลเข้าทางตอนบนของคอลัมน์ ซึ่งหมายถึงโอกาสที่ เชื้อยีสต์จะได้รับสารอาหารได้อย่างทั่วถึง เกิดการแบ่งเซลล์ และสามารถผลิตเอทานอลได้ดีกว่า ทิศทางการไหลเข้าทางตอนบนของคอลัมน์ซึ่งมีโอกาสที่จะตกตะกอน (sedimentation) ได้ง่าย (ศรีจี, 2528)

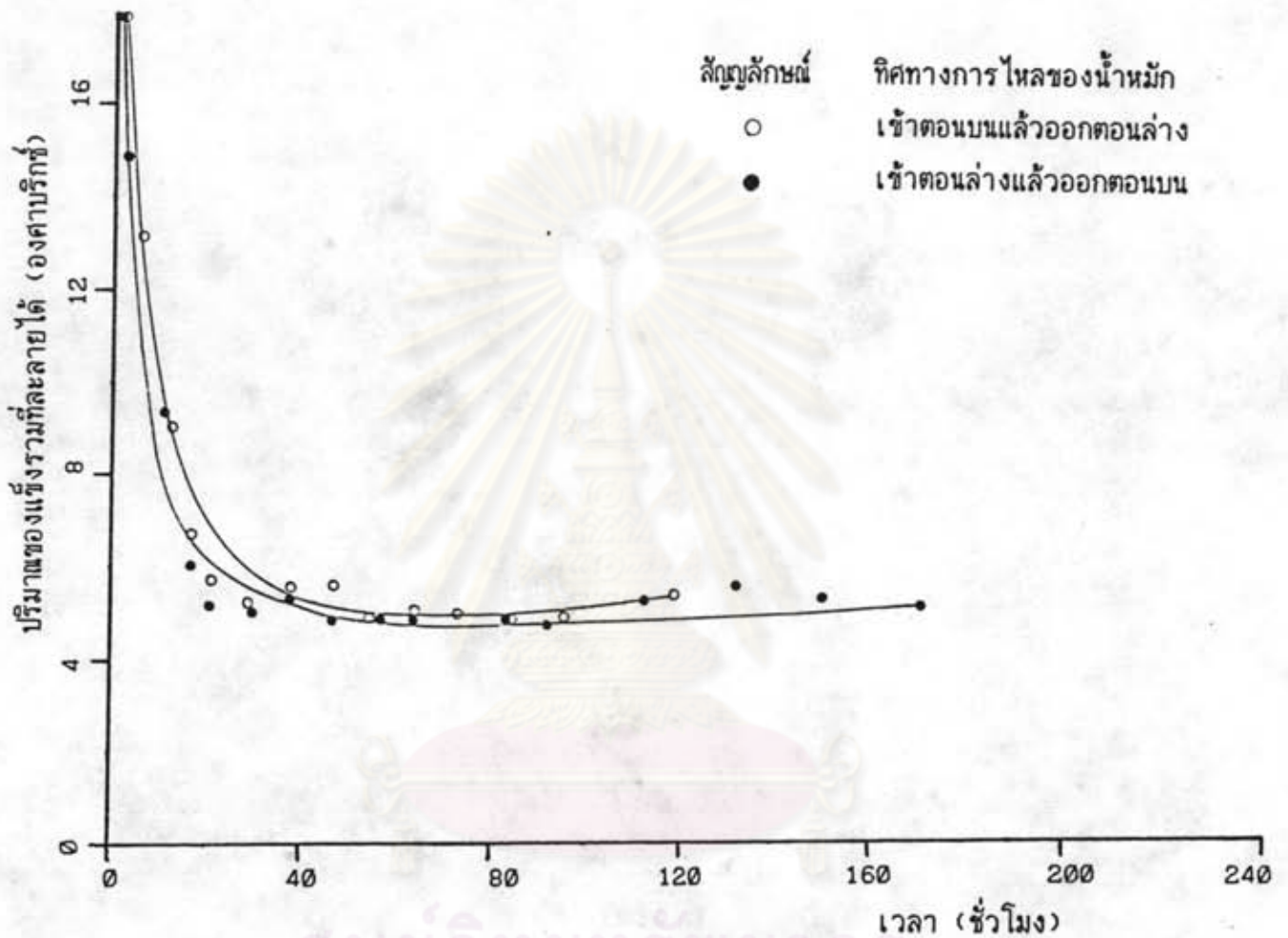
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.7ก เปรียบเทียบปริมาณเอทานอล สำหรับการหมักแบบต่อเนื่อง โดยใช้ น้ำสับปะรด เป็นสารอาหาร สำหรับทิศทางการไหลของน้ำหมักระหว่างการไหลเข้าทางตอนบน ไหลออกทางตอนล่างกับการไหลเข้าทางตอนล่าง ไหลออกทางตอนบนในคอลัมน์ที่ไม่มี การให้อากาศ ด้วยอัตราการเจือจางเหมาะสม  $0.17$  และ  $0.18$  ชั่วโมง<sup>-1</sup> ตามลำดับ



รูปที่ 4.7x เปรียบเทียบความเข้มข้นของเซลิสต์ สำหรับการหมักแบบต่อเนื่องโดยใช้น้ำ  
 สับปะรดเป็นสารอาหาร สำหรับทิศทางการไหลของน้ำหมักระหว่างการไหลเข้าทาง  
 ตอนบนไหลออกทางตอนล่างกับการไหลเข้าทางตอนล่างไหลออกทางตอนบนในคอลัมน์  
 ที่ไม่มีการให้อากาศ ด้วยอัตราการเจือจางเหมาะสม 0.17 และ 0.18 ชั่วโมง<sup>-1</sup>  
 ตามลำดับ

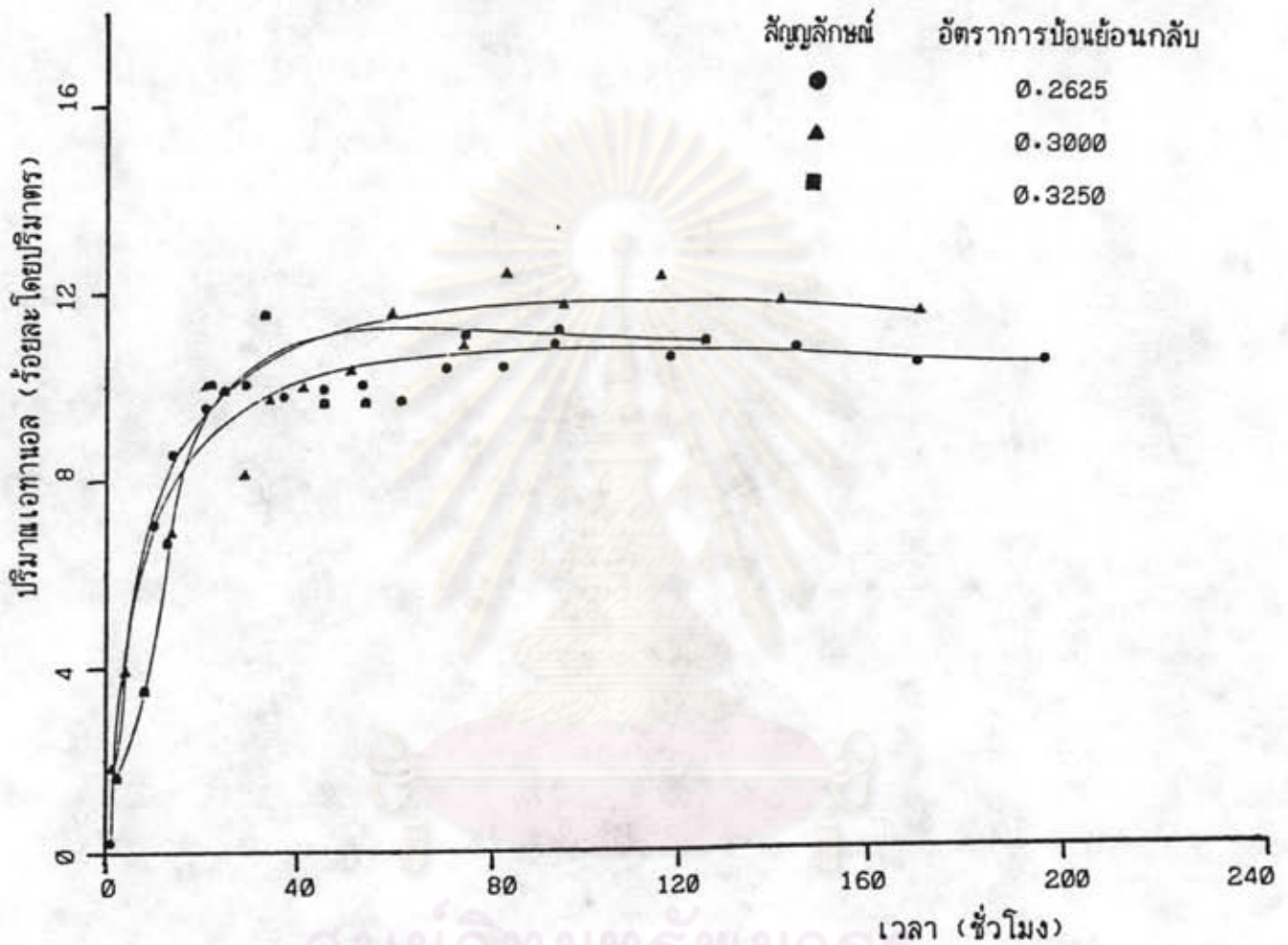


รูปที่ 4.7ค เปรียบเทียบความเข้มข้นของน้ำตาล สำหรับการหมักแบบต่อเนื่อง โดยใช้ น้ำ สับปรตเป็นสารอาหาร สำหรับทิศทางการไหลของน้ำหมักระหว่างการไหลเข้าทาง ตอนบนไหลออกทางตอนล่างกับการไหลเข้าทางตอนล่างไหลออกทางตอนบนในคอลัมน์ ที่ไม่มีการให้อากาศ ด้วยอัตราการเจือจางเหมาะสม 0.17 และ 0.18 ชั่วโมง<sup>-1</sup> ตามลำดับ

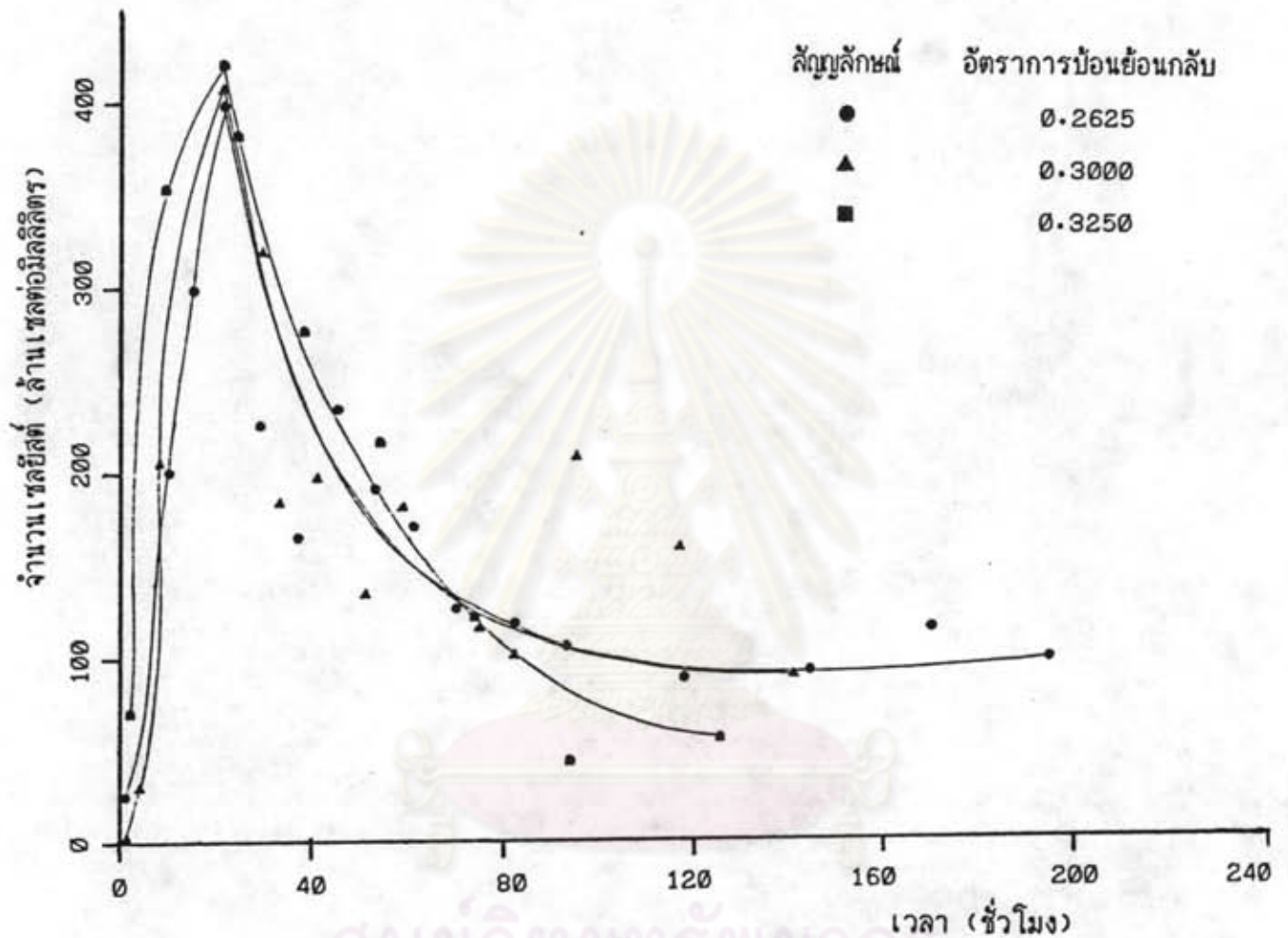
4.4.2 จากกราฟรูปที่ 4.8ก-4.8ค เป็นการเปรียบเทียบผลของการนำเซลล์จากผลผลิตกลับมาใช้ในกระบวนการหมัก ซึ่งมีการแปรค่าอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 3 ค่า พร้อมทั้งหาค่าอัตราการเจริญเหมาะสมแต่ละค่า พบว่าอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 0.3250 อัตราการเจริญเหมาะสม  $0.30 \text{ ชั่วโมง}^{-1}$  ให้อัตราการผลิตเอทานอลสูงกว่าอัตราส่วนอื่นๆ (ตาราง ค-4) ที่ทำการทดลอง หากเปรียบเทียบอัตราการผลิตเอทานอลกับการหมักแบบไม่ต่อเนื่อง (วิชาพงษ์, 2525) จะเป็น 8.07 เท่า (ตาราง ค-5) หรือเปรียบเทียบในแง่ผลผลิต (productivity) ในกระบวนการหมักแบบต่อเนื่องกรณีน้ำหมักไหลเข้าตอนบนของคอลัมน์ที่ไม่มีการให้อากาศและไม่มีการนำเซลล์กลับมาใช้ จะเป็น 1.94 เท่า (ตาราง ค-6) เนื่องจากเมื่อมีอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับมากขึ้นจะเป็นการนำเซลล์จากผลผลิตกลับมาใช้ได้มากขึ้น การผลิตเอทานอลก็มากขึ้นเพื่อจะรักษาสภาพสมดุลที่การผลิตเอทานอลประมาณร้อยละ 10 โดยปริมาตร นั่นคืออัตราการเจริญก็ต้องมากตามด้วย



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

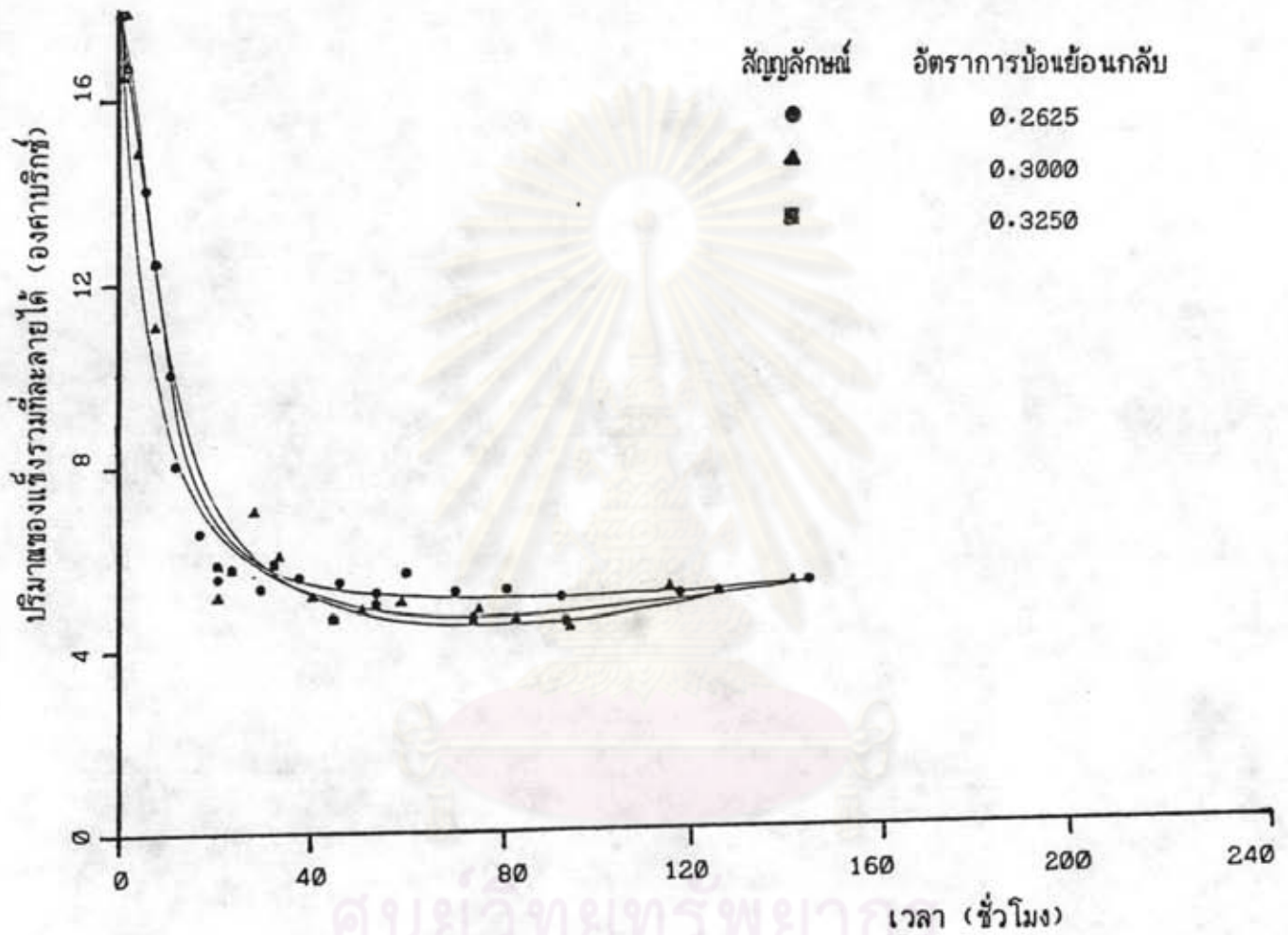


รูปที่ 4.8ก เปรียบเทียบปริมาณเอทานอล สำหรับการหมักแบบต่อเนื่อง โดยน้ำหมักไหลเข้าทางตอนล่างไหลออกจากตอนบนในคอลัมน์ที่ไม่มีอากาศ โดยใช้ น้ำสับปะรดเป็นสารอาหาร และมีการนำเซลล์จากผลผลิตกลับมาใช้ในกระบวนการหมักที่อัตราส่วนการบ่มย้อนกลับ 0.2625 อัตราการเจือจางเหมาะสม 0.20 ชั่วโมง<sup>-1</sup>, อัตราส่วนการบ่มย้อนกลับ 0.3000 อัตราการเจือจางเหมาะสม 0.25 ชั่วโมง<sup>-1</sup>, และอัตราส่วนการบ่มย้อนกลับ 0.3250 อัตราการเจือจางเหมาะสม 0.30 ชั่วโมง<sup>-1</sup> ตามลำดับ



รูปที่ 4.8 ข เปรียบเทียบความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์ สำหรับการหมักแบบต่อเนื่องโดยน้ำหมัก  
 ไหลเข้าทางตอนล่างไหลออกทางตอนบนในคอลัมน์ที่ไม่มีอากาศ โดยใช้น้ำ  
 สับปรดเป็นสารอาหาร และมีการนำคลอโรฟิลล์จากผลผลิตกลับมาใช้ในกระบวนการหมัก  
 ที่อัตราส่วนการบ่อนย้อนกลับ 0.2625 อัตราการเจือจางเหมาะสม 0.20 ชั่วโมง<sup>-1</sup>,  
 อัตราส่วนการบ่อนย้อนกลับ 0.3000 อัตราการเจือจางเหมาะสม 0.25 ชั่วโมง<sup>-1</sup>,  
 และอัตราส่วนการบ่อนย้อนกลับ 0.3250 อัตราการเจือจางเหมาะสม 0.30 ชั่วโมง<sup>-1</sup>  
 ตามลำดับ

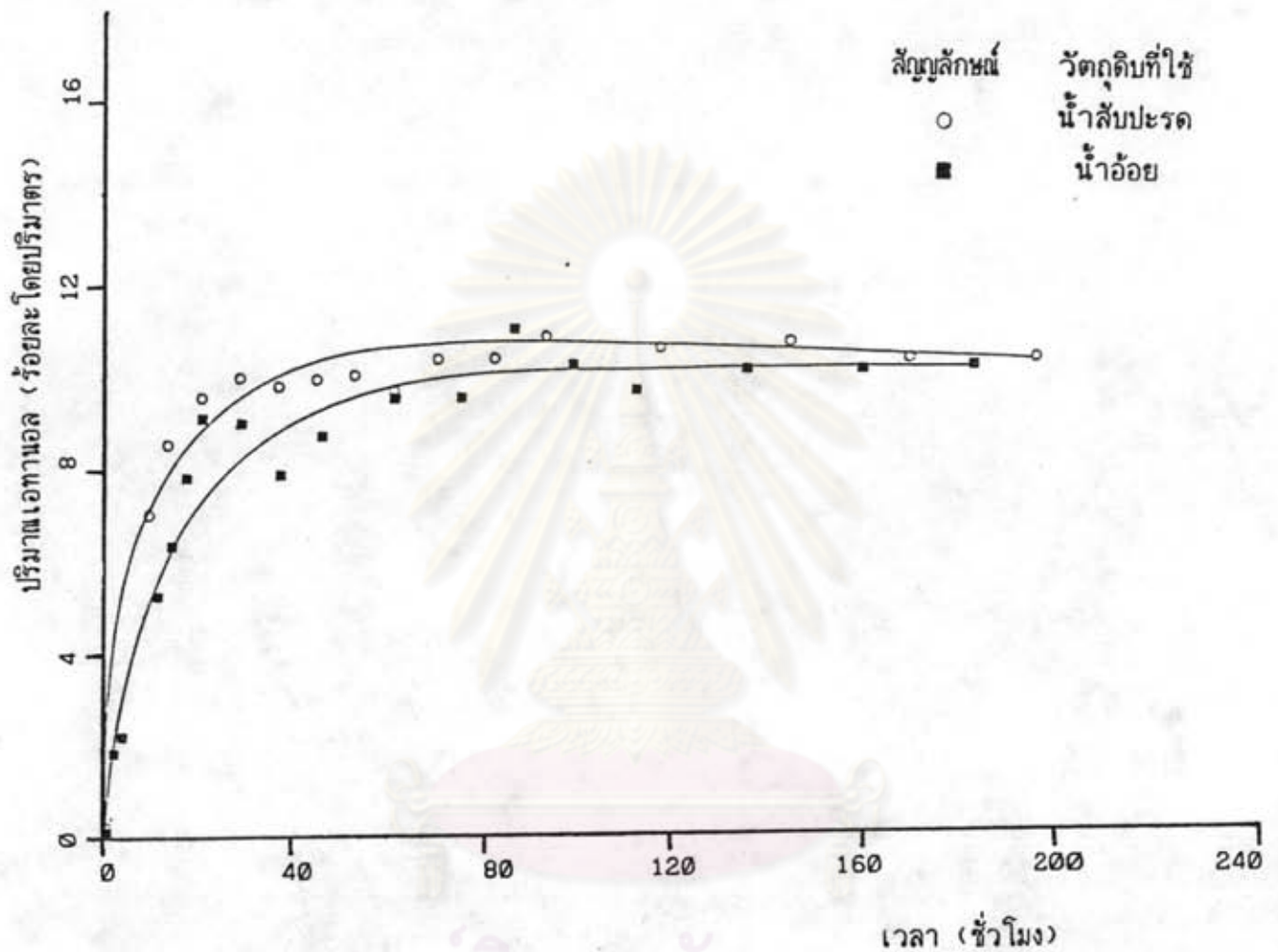




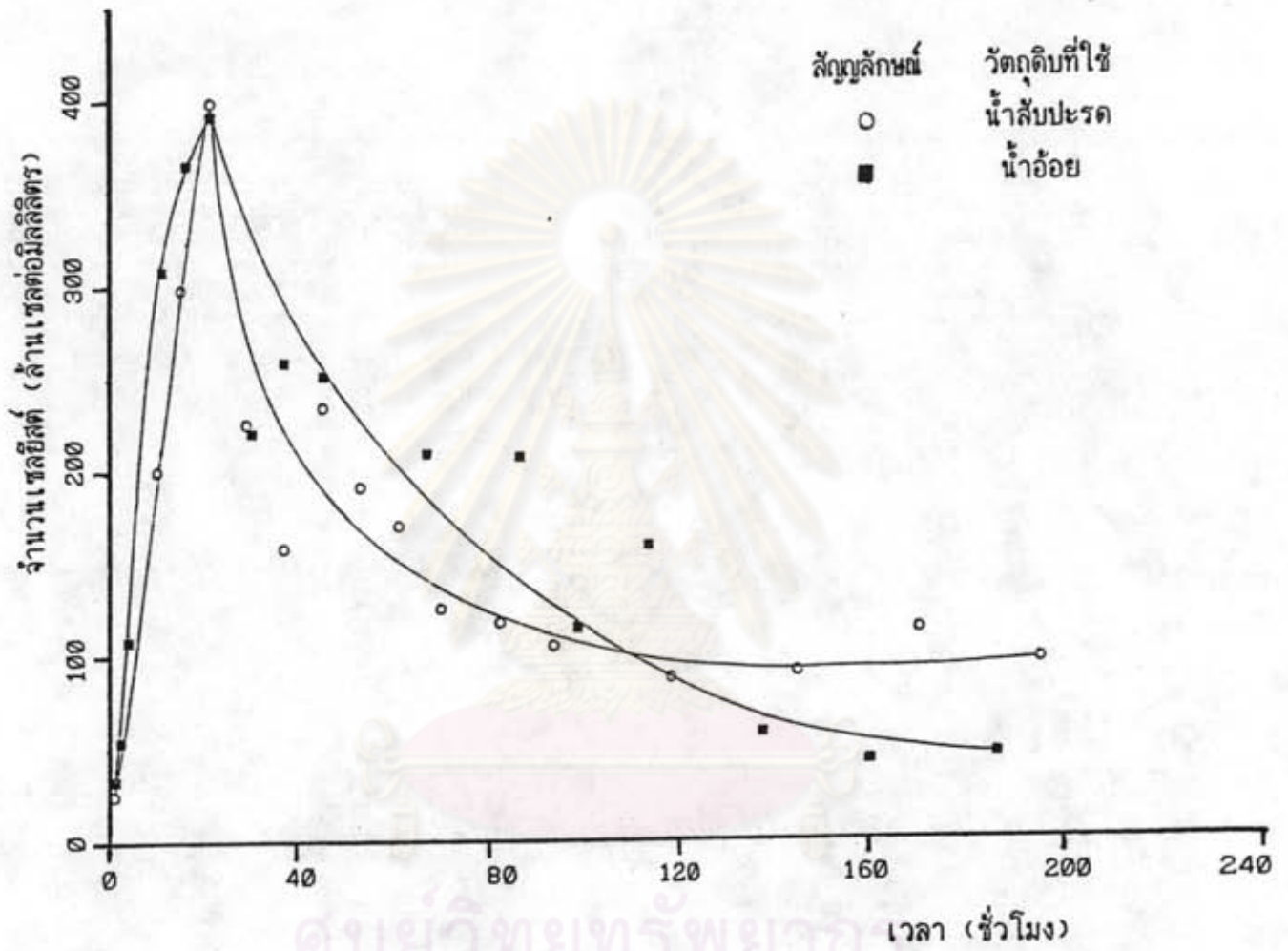
รูปที่ 4.8ค เปรียบเทียบความเข้มข้นของน้ำตาล สำหรับการหมักแบบต่อเนื่อง โดยน้ำหมักไหลเข้าทางตอนล่างไหลออกทางตอนบนในคอลัมน์ที่ไม่มีกำรให้อากาศ โดยใช้ น้ำลึบประตเป็นสารอาหาร และมีการนำเซลล์จากผลผลิตกลับมาใช้ในกระบวนการหมัก ที่อัตราส่วนการบ่อนย้อนกลับ 0.2625 อัตราการเจือจางเหมาะสม 0.20 ชั่วโมง<sup>-1</sup>, อัตราส่วนการบ่อนย้อนกลับ 0.3000 อัตราการเจือจางเหมาะสม 0.25 ชั่วโมง<sup>-1</sup>, และอัตราส่วนการบ่อนย้อนกลับ 0.3250 อัตราการเจือจางเหมาะสม 0.30 ชั่วโมง<sup>-1</sup> ตามลำดับ

4.4.3 จากกราฟรูป 4.9ก-4.9ค เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำวัสดุทางการเกษตรอื่นมาใช้ในกระบวนการหมัก โดยเปรียบเทียบผลเมื่อนำน้ำอ้อยมาใช้แทนน้ำสับปะรด ทำการหมักเพื่อผลิตเอทานอลโดยใช้เครื่องหมักแบบคอลัมน์ชนิดต่อเนื่อง โดยการใช้สภาวะเดียวกัน พบว่าที่อัตราส่วนการบ้อนย้อนกลับ 0.2625 อัตราการเจือจางเหมาะสม 0.20 ชั่วโมง<sup>-1</sup> จะให้ผลการผลิตเอทานอลใกล้เคียงกัน (ตาราง ค-4) โดยเมื่อใช้น้ำสับปะรดทำการหมัก จะให้ระดับการผลิตเอทานอลสูงกว่าเล็กน้อย ทั้งนี้เป็นเพราะส่วนประกอบทางเคมีของทั้งน้ำอ้อยและน้ำสับปะรด มีสารอาหารอยู่มากพอต่อการเจริญเติบโต และการหมักของยีสต์ (ตารางที่ 2.3-2.10) แต่ความนิยมมาผลิตเป็นไวน์จะขึ้นกับการนำไวน์ไปใช้ประโยชน์อะไรต่อไป หากจะใช้น้ำไวน์ไปผลิตเป็นน้ำส้มสายชูจะนิยมใช้น้ำสับปะรดมากกว่าน้ำอ้อย (ประพนธ์, ไพจิตร, 2530) เนื่องจากกลิ่นและสีดีกว่า แต่หากจะนำไวน์ไปผลิตเป็นเอทานอลโดยผ่านกระบวนการกลั่นแล้วนำเอทานอลไปใช้ประโยชน์ต่างๆมากมาย เช่น การผลิตแก๊สโซฮอล์หรือเป็นโซฮอล์ (รายงานการวิจัย สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2529) และอื่นๆ (ตาราง ค-1) นิยมใช้น้ำอ้อยมากกว่าน้ำสับปะรดเนื่องจากอ้อยมีแหล่งเพาะปลูกอยู่ทั่วประเทศ (ตาราง ค-2ก, ข) ดังนั้นเราสามารถนำน้ำอ้อยมาทดแทนการใช้น้ำสับปะรดในกระบวนการหมักได้ในการผลิตเอทานอลน้ำสับปะรด แต่การแปรรูปวัตถุดิบไปเป็นผลิตภัณฑ์สำหรับอ้อยไม่กว้างขวางเท่าสับปะรด (รูปที่ ค-2) แต่ผลผลิตสับปะรดต่อไร่ต่ำกว่าอ้อย (ตาราง ค-3)

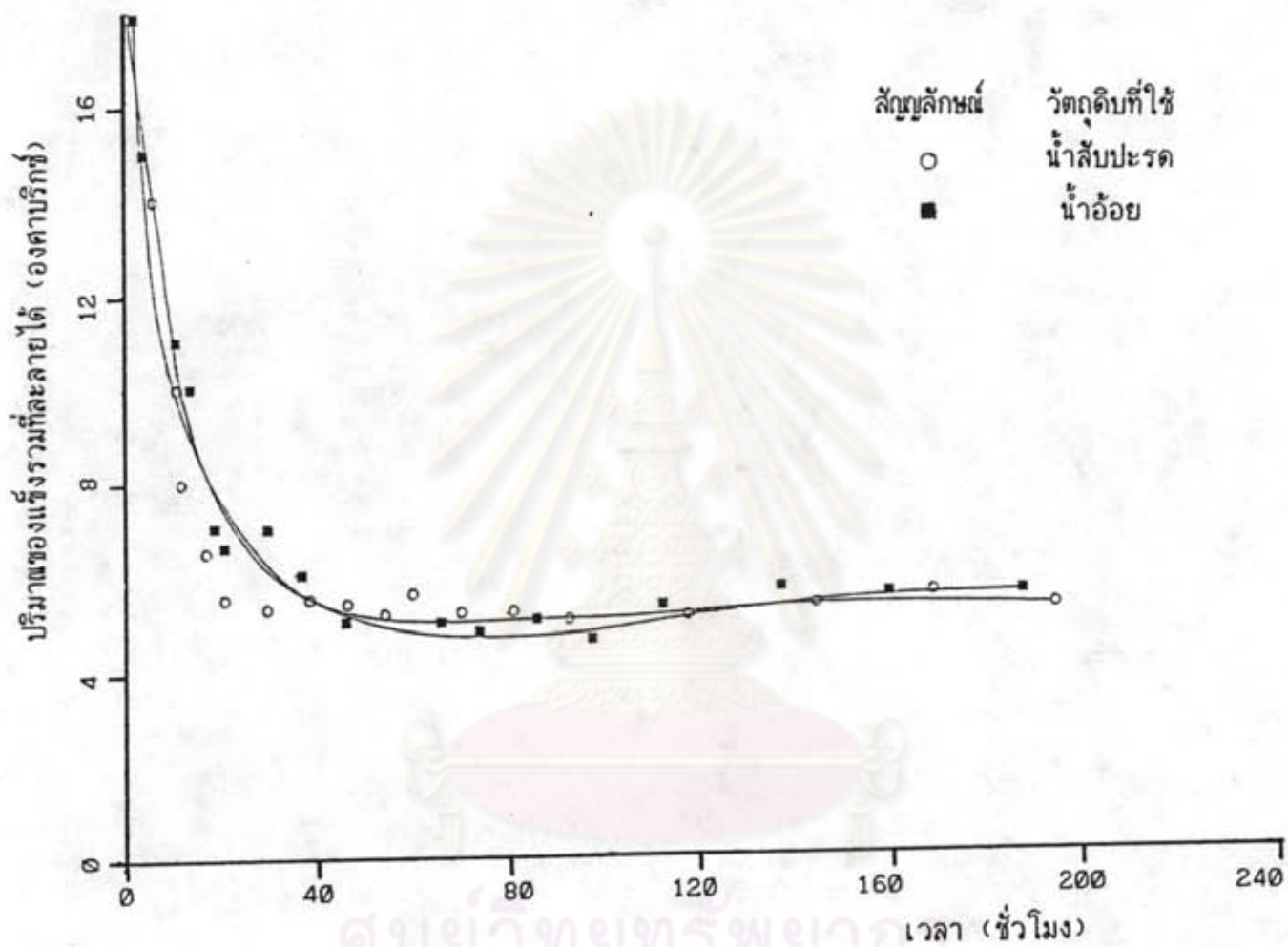
ศูนย์วิทยพัชยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.9ก เปรียบเทียบปริมาณเอทานอล สำหรับการหมักแบบต่อเนื่อง โดยใช้น้ำหมักไหลเข้าทางตอนล่างไหลออกทางตอนบนในคอลัมน์ที่ไม่มีอากาศ ด้วยการใช้น้ำสับปะรดและน้ำอ้อยเป็นสารอาหาร ซึ่งมีการนำเซลล์จากผลผลิตกลับมาใช้ในกระบวนการหมัก ด้วยอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับและอัตราการเจือจางเหมาะสม เดียวกันคือ  $0.2625$  และ  $0.20$  ชั่วโมง<sup>-1</sup> ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 ข เปรียบเทียบความเข้มข้นของเซลลูโลส สำหรับการหมักแบบต่อเนื่องโดยน้ำหมัก  
 ไหลเข้าทางตอนล่างไหลออกทางตอนบนในคอลัมน์ที่ไม่มีการให้อากาศ ด้วยการใช้น้ำลึบประรดและน้ำอ้อยเป็นสารอาหาร ซึ่งมีการนำเซลลูโลสจากผลผลิตกลับมาใช้ใน  
 กระบวนการหมัก ด้วยอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับและอัตราการเจือจางเหมาะสม  
 เดียวกันคือ  $0.2625$  และ  $0.20$  ชั่วโมง<sup>-1</sup> ตามลำดับ



รูปที่ 4.9ค เปรียบเทียบความเข้มข้นของน้ำตาล สำหรับการหมักแบบต่อเนื่อง โดยน้ำหมักไหลเข้าทางตอนล่างไหลออกทางตอนบนในคอลัมน์ที่ไม่มีกาให้อากาศ ด้วยการใช้น้ำลิ้นประดและน้ำอ้อยเป็นสารอาหาร ซึ่งมีการนำเซลล์จากผลผลิตกลับมาใช้ในกระบวนการหมัก ด้วยอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับและอัตราการเจือจางเหมาะสมเดียวกันคือ  $0.2625$  และ  $0.20$  ชั่วโมง<sup>-1</sup> ตามลำดับ