บทที่ 5

วิจารณ์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองในการผลิตน้ำส้มสายชูจากไวน์สับปะรด ซึ่งได้แสดงไว้ในบทที่ 4 พอจะสรุปผลของแต่ละการทดลองได้ดังนี้

ในเรื่องการศึกษาถึงวัสดุต่าง ๆ ที่ใช้เป็นแพคเบด งานวิจัยครั้งนี้เลือกใช้ไม้มะค่า ไม้ตะเคียน ไม้ไผ่ ไม้สัก ไม้แดง และพลาสติก ซึ่งมีคุณสมบัติดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.5 (14, 17) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร เมื่อศึกษาในขวดเขย่าพบว่าวัสดุแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 5 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ไม้มะค่า ไม้ตะเคียน ไม้สัก และไม้ไผ่ไม่แตกต่างกัน แต่ไม้มะค่า ไม้ตะเคียน แตกต่างจากไม้แดง ส่วนไม้ไผ่ ไม้สัก และพลาสติกไม่แตกต่างจากไม้แดง แต่ไม้ไผ่และไม้สักแตกต่างจากพลาสติก จะเห็นได้ว่าไม่สามารถที่จะแยกออกให้เห็นชัดเจน แต่จากการสังเกตค่าอัตราการเกิดกรดอะซิติก เมื่อใช้วัสดุที่ทำจากไม้มะค่าเป็นแพคเบดมีค่าสูงสุดคือ ให้ร้อยละ 0.0337 ต่อชั่วโมง ให้ผลเช่นเดียวกับกราฟรูปที่ 15 ดังนั้นจึงทำการศึกษาในเครื่องหมักแบบหนึ่งขั้น พบว่าไม้มะค่าแตกต่างจากไม้ทุกชนิด ส่วนไม้ตะเคียนกับไม้ไผ่ไม่แตกต่างกัน และไม้แดงกับไม้สักไม่แตกต่างกัน โดยที่เมื่อใช้ไม้มะค่าเป็นแพคเบดจะให้อัตราการเกิดกรดอะซิติกสูงสุดเช่นกัน คือร้อยละ 0.0403 ต่อชั่วโมง ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับกราฟรูปที่ 16 คือให้กรดอะซิติกร้อยละ 4.8 ในชั่วโมงที่ 96 ส่วนสาเหตุที่ใช้วัสดุลักษณะทรงกลม เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเครื่องหมัก ดังนั้นจำเป็นที่จะต้องตรึงค่าตัวแปรอื่น ๆ ให้คงที่ เพื่อง่ายต่อการทดลองตัวแปรดังกล่าวคือ พื้นที่ผิวสัมผัส ความสูงของแพคเบด ช่องว่างในแพคเบด (void) ความแตกต่างความดันภายในก่อนและหลังแพคเบด (pressure drop) ซึ่งการตรึงตัวแปรเหล่านี้ทำได้โดยใช้วัสดุเป็นรูปทรงกลม เพื่อง่ายต่อการคำนวณพื้นที่ผิวสัมผัสและรักษาระดับความสูงโดยการควบคุมจำนวนและความสูงเพื่อที่จะให้ช่องว่างภายในแพคเบดคงที่ ซึ่งการกำหนดความสูงและช่องว่างนี้ ก็จะทำให้ความดันซึ่งเกิดขึ้นจากการพ่นอากาศและการไหลของน้ำหมัก ส่วนทางกันเกิดขึ้นอย่างคงที่ แต่เนื่องจากขนาดของวัสดุที่ใช้เส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร เป็นขนาดเล็กที่สุดที่สามารถจะกลึงได้ ฉะนั้นงานวิจัยครั้งนี้จึงใช้ขนาดนี้ แต่ถ้ากลึงใหญ่กว่านี้จะทำให้เกิด

อิทธิพลของผนัง (wall effect) และทำให้จำนวนของลูกทรงกลมที่บรรจุในคอลัมน์น้อยลง เมื่อกำหนดความสูง ซึ่งจะทำให้พื้นที่ผิวน้อยลงด้วย หรือเมื่อกำหนดจำนวนลูก จะทำให้ปริมาตรของช่องว่างเหนือแพคเบดลดลง ซึ่งจากผลการทดลองของ พรทิพย์ (6) พบว่าการกำหนดส่วนสูงของแพคเบด ถ้าแพคเบดยิ่งสูง(จำนวนลูกของวัสดุเพิ่มขึ้น)ก็จะทำให้ผลดีขึ้น แต่ถ้าสูงเกินยึดจำกัดแล้วจะทำให้เกิดการท่วมล้นของน้ำหมัก เมื่อให้ปริมาณของอากาศและน้ำหมักคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากความดันที่เกิดขึ้นภายในจะมีค่ามากขึ้น

ในการหมักน้ำส้มสายชู นอกจากแอลกอฮอล์แล้ว ปริมาณของกรดอะซีติกที่เติมเข้าไปก่อนการหมัก ก็มีอิทธิพลต่อการหมักด้วย เนื่องจากการปรับกรดนี้จะป้องกันการเจริญเติบโตของแบคทีเรียอื่น ๆ ที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้น และเป็นการส่งเสริมให้แบคทีเรียตัวที่จะผลิตน้ำส้มสายชูเจริญได้ดี ดังนั้นย่อมเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องศึกษาหาอัตราส่วนของเอทานอลและกรดอะซีติก เริ่มต้นในการหมัก เพื่อหาว่าสภาวะไหนที่สามารถทำให้เชื้อผลิตกรดได้เร็วที่สุด ซึ่งในงานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการทดลองที่อัตราส่วนต่าง ๆ กันดังนี้ 7:1, 8:1, 6:2 และ 7:2 โดยใช้เครื่องหมักแบบหนึ่งขั้น พบว่าที่ระดับนัยสำคัญ 5 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนของเอทานอลต่อกรดอะซีติก 7:1 จะแตกต่างจากอัตราส่วนอื่น ๆ ส่วน 8:1 กับ 6:2 ไม่แตกต่างกัน และ 7:2 แตกต่างจากอัตราส่วนอื่น ๆ โดยที่อัตราส่วน 7:1 ให้อัตราการเกิดกรดอะซีติกสูงสุด ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับกราฟรูปที่ 18 และย่อมทำให้ปริมาณการใช้เอทานอลสูงตามไปด้วยดังรูปที่ 19 ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับงานก่อน (6)

ต่อมาได้ศึกษาเครื่องหมักแบบหลายขั้น เพื่อให้ประสิทธิภาพในการผลิตน้ำส้มสายชูเร็วขึ้น เพราะว่าโอกาสที่เชื้อจะได้รับอาหาร และอากาศในแต่ละขั้นได้สม่ำเสมอเท่ากันย่อมมีมากกว่าขั้นเดียว เนื่องจากน้ำหมักและอากาศสามารถกระจายได้ทั่วถึงทุกจุดในคอลัมน์ได้ง่ายกว่าเครื่องหมักขั้นเดียว โดยศึกษาตามลำดับขั้นตอนดังนี้

เครื่องหมักอนุกรมสี่ขั้นแบบแยกคอลัมน์ เนื่องจากเครื่องหมักนี้มีอากาศและน้ำหมักไหลตลอดเวลา จึงจำเป็นต้องสร้างในแบบที่ป้องกันการปนเปื้อน ดังนั้นเครื่องหมักนี้จึงมีลักษณะค่อนข้างเกือบเป็นระบบปิดสนิท ซึ่งจะทำให้สภาวะการไหลของอากาศและน้ำหมักไม่ดีเท่าที่ควร ฉะนั้นควรปรับปรุงแก้ไขเครื่องหมักเพื่อที่จะให้ได้การหมักดีที่สุด และสิ่งที่ไม่ต้องการให้เกิดคือการท่วมล้น

ของน้ำหมัก เพื่อที่จะให้ปริมาณอากาศและน้ำหมักเข้าได้อย่างอิสระ ซึ่งในเครื่องหมักอนุกรมสี่ชั้นแบบแยกคอลัมน์นี้ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของระบบการไหลของน้ำหมักโดยใช้ระบบกาสักน้ำและระบบท่อน้ำล้น พบว่าเมื่อใช้ระบบกาสักน้ำจะทำให้เกิดการท่วมล้นของน้ำหมัก จะมีผลทำให้อัตราการถ่ายเทมวลสารไม่ดีเท่าที่ควร (14) ทั้งนี้โดยหลักที่แท้จริงแล้วเราต้องการให้มีการกระจายของน้ำหมักผ่านแพคเบดอย่างทั่วถึง และไหลเป็นฟิลม์บาง ๆ รอบแพคเบดเหล่านั้น ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.5.1 ว่าวัตถุประสงค์สำคัญในการใส่แพคเบดลงในเครื่องหมักก็เพื่อที่จะให้เชื้อน้ำส้มเกาะและเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอากาศที่ไหลขึ้นไปและน้ำหมักที่ไหลลงมาโดยเชื้อ A. aceti จะได้รับสารอาหารและออกซิเจนในน้ำหมักด้วยวิธีการแพร่กระจายจากภายนอกเซลล์เข้าไปภายในเซลล์ และจะมีการแพร่กระจายของสารที่เกิดขึ้นจากปฏิกริยาออกมาในทิศทางตรงข้าม ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยหลักการถ่ายเทมวลสาร โดยที่อัตราการถ่ายเทมวลสารเป็นอัตราส่วนผกผันกับความหนาของฟิลม์ ดังนั้นระบบกาสักน้ำ จึงให้อัตราการเกิดกรดอะซีติกต่ำคือให้ร้อยละ 0.0253 ต่อชั่วโมง ต่อมาเพื่อแก้ปัญหาการท่วมของน้ำหมักเหนือแพคเบด จึงใช้ระบบท่อน้ำล้นแทน ซึ่งให้อัตราการเกิดกรดอะซีติกเร็วขึ้นกว่าเดิมเพียงเล็กน้อยคือ ร้อยละ 0.0315 ต่อชั่วโมง และจากรูปที่ 20 พบว่าเมื่อใช้ระบบกาสักน้ำและระบบท่อน้ำล้นจะให้กรดอะซีติกร้อยละ 2.82 และ 3.37 ชั่วโมงที่ 91 ตามลำดับ ถึงแม้จะเปลี่ยนระบบการไหลของน้ำหมักเป็นระบบท่อน้ำล้นแล้วก็ตาม แต่น้ำหมักยังขังอยู่ส่วนล่างของแพคเบดเล็กน้อย และการไหลไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นจึงหันมาดูลักษณะของคอลัมน์และแพคเบดที่บรรจุในคอลัมน์นำมาเปรียบเทียบกับเครื่องหมักแบบหนึ่งชั้น พบว่าอัตราส่วนของแพคเบดต่อปริมาตรช่องว่างเหนือแพคเบดไม่เท่ากัน ฉะนั้นจึงคิดว่าการที่ปริมาตรของช่องว่างเหนือแพคเบดน้อยกว่าก็จะทำให้ความแตกต่างภายในแพคเบดสูงกว่าในคอลัมน์เดียว ดังนั้นย่อมทำให้เกิดการท่วมล้นของน้ำหมักได้ง่าย เพื่อเป็นการทดสอบว่าจะเป็นไปตามที่กล่าวหรือไม่ ก็ทำการทดลองเพิ่มอัตราส่วนของปริมาตรแพคเบดต่อปริมาตรช่องว่างเหนือแพคเบดจาก 1:0.95 ไปเป็น 1:1.85 พบว่าไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 5 เปอร์เซ็นต์ แต่จากการสังเกตลักษณะการไหลจะทำการควบคุมได้ง่ายไม่เกิดการท่วมล้นของน้ำหมัก ฉะนั้นเมื่อเป็นดังนี้จึงแก้ไขเครื่องหมักต่อไปนี้อีกโดยให้มีอัตราส่วนของแพคเบดต่อปริมาตรช่องว่างเหนือแพคเบดเท่ากับของ พรทิพย์ (6) โดยทำเป็นเครื่องหมักอนุกรมสองชั้นแบบแยกคอลัมน์ พบว่าอัตราการไหลของอากาศและน้ำหมักดียิ่งขึ้น

ดังนั้นในเครื่องหมักอนุกรมล่องยั้นแบบแยกคอลัมน์ ได้ศึกษาปริมาณการให้อากาศต่าง ๆ กัน คือ 0, 0.02, 0.04, 0.21 ปริมาตรอากาศต่อปริมาตรน้ำหมักต่อนาที (VVM) ทั้งนี้เนื่องจากเชื้อ Acetobacter ต้องการออกซิเจน ดังนั้นในการหมักจึงมีการให้อากาศอย่างเพียงพอ เพื่อเปลี่ยนเอทานอลให้เป็นกรดอะซีติก (4) และพบว่าที่ระดับนัยสำคัญ 5 เปอร์เซ็นต์ อัตราการให้อากาศ 0.04 กับ 0.21 ไม่แตกต่างกัน แต่แตกต่างจาก 0.00 และ 0.02 VVM โดยที่อัตราการให้อากาศ 0.04 ให้อัตราการเกิดกรดอะซีติกสูงสุดคือ ร้อยละ 0.0305 ต่อชั่วโมง ให้ผลเช่นเดียวกับกราฟรูปที่ 24 ซึ่งให้กรดอะซีติกร้อยละ 2.89, 3.35, 3.66, 3.85 เมื่ออัตราการให้อากาศ 0.00, 0.02, 0.21 และ 0.04 VVM ตามลำดับในชั่วโมงที่ 90 และในรูปกราฟที่ 25 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณการให้อากาศ ปริมาณการลดลงของเอทานอลจะเป็นสัดส่วนกันในชั่วโมงที่ 50 เมื่ออัตราการให้อากาศ 0, 0.02, 0.21 และ 0.04 VVM จะมีเอทานอลเหลือร้อยละ 4.05, 3.56, 2.17, 2.56 โดยปริมาตรตามลำดับ ฉะนั้นจึงพบว่าเมื่ออัตราการให้อากาศสูง ๆ จะทำให้เอทานอลและกรดอะซีติกบางส่วนสูญหายไป ซึ่งตรงกับรายงานของ U.S. Patent (11) และ Kreipe (23) ดังนั้นเพื่อที่จะลดปัญหาการสูญเสียอันเนื่องมาจากอัตราการให้อากาศ ก็ควรจะให้ในอัตราที่พอดี ซึ่งจากสมการการเปลี่ยนเอทานอลไปเป็นกรดอะซีติก พอที่จะคำนวณอากาศที่ต้องการในทางทฤษฎีได้ดังนี้คือ

$$\underset{92}{2CH_3CH_2\text{-}OH} + \underset{64}{2O_2} \longrightarrow \underset{2 \times 60}{2CH_3COOH} + 2H_2O$$

ในงานวิจัยใช้น้ำหมักทั้งหมด 15 ลิตร มีปริมาณเอทานอลร้อยละ 7 โดยปริมาตรที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และมีค่าเท่ากับร้อยละ 3.702 โดยน้ำหมักที่ 30 องศาเซลเซียส (Perry) และความหนาแน่นของเอทานอลร้อยละ 7 โดยปริมาตรที่ 30 องศาเซลเซียสเท่ากับ 0.9898 กรัม/ซม^3

นั่นคือน้ำหมัก 15 ลิตรจะมีเอทานอล = 0.03702 x 15000 x 0.9898

= 549.69 กรัมเอทานอล

จากสมการข้างบนเอทานอล92 กรัมต้องการออกซิเจน = 64 กรัม

∴ เอทานอลทั้งหมด 549.69 กรัมต้องการ = $\frac{64 \times 549.69}{92}$

= 382.39 กรัม O_2

= 11.9498 โมล O_2

1 โมลของก๊าซใด ๆ ที่ STP = 22.4 ลิตร

= 22.4 x 11.9498

= 267.675 ลิตร O_2

แต่ในอากาศมี O_2 = $\frac{1}{5}$

นั่นคือน้ำหมัก 15 ลิตร ต้องให้อากาศเข้าไป = 267.675 x 5 ลิตรอากาศ/15 ลิตรน้ำหมัก

= 1338.38 ลิตรอากาศ

เวลาที่ใช้ในการหมักทั้งหมดเฉลี่ย 96 ชั่วโมง

∴ อัตราการให้อากาศจริง ๆ ตามทฤษฎี = $\frac{1338.38}{15 \times 96 \times 60}$

= 0.0155 ปริมาตรอากาศ/ปริมารน้ำหมัก/นาที

ฉะนั้นอัตราการให้อากาศทางทฤษฎีควรมีค่าเท่ากับ 0.0155 ปริมาตรอากาศต่อปริมาตรน้ำหมักต่อนาที (VVM) และจาก U.S. Patent (11) กล่าวไว้ว่าในการหมักน้ำส้มสายชูควรให้อัตราการให้อากาศอยู่ในช่วง 0.02-0.05 ปริมาตรอากาศต่อปริมาตรน้ำหมักต่อนาที ไม่ควรสูงหรือต่ำกว่านี้ และจากที่ พิสุทธิพย์ (6) ได้ทดลองในเครื่องหมักแบบหนึ่งชั้น พบว่าอัตราการให้อากาศ 0.02 VVM เหมาะสมที่สุด ซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็นการให้อากาศมากกว่าทางทฤษฎีเพียงเล็กน้อย แต่การทดลองในเครื่องหมักสองชั้นนี้ เมื่อให้อากาศเพียง 0.02 VVM โดยให้ชั้นละ 0.01 VVM จะให้ผลไม่ดีเนื่องจากอากาศ 0.02 VVM นี้มีแรงดันเพียงเล็กน้อย ดังนั้นอากาศที่ออกมาในแต่ละคอลัมน์น้อยมาก โดยการลังเกตฟองอากาศขึ้นมาเพียงเล็กน้อย ซึ่งเครื่องหมักแบบ 2 ชั้นนี้จำเป็นต้องให้อากาศมากเพื่อให้มีความดันมากพอที่อากาศสามารถขึ้นไปในแต่ละชั้นได้ ฉะนั้นจึงทำการทดลองให้อากาศ 0.04 VVM โดยใช้ชั้นละ 0.02 VVM พบว่าสามารถหมักได้ดีขึ้น แต่ถ้าให้อากาศ 0.21 จะหมักให้ผลใกล้เคียงกับ 0.04 VVM แต่จะทำให้เอทานอลสูญหายไปได้มากกว่า ฉะนั้นอัตราการให้อากาศที่เหมาะสมที่สุดคือ 0.04 VVM

นอกจากนี้ยังศึกษาระบบการไหลของน้ำหมักเพื่อจะดูว่าระบบท่อน้ำล้นจะให้ผลดีกว่ากาลักน้ำเหมือนกับเครื่องหมักอนุกรมสี่ชั้นแบบแยกคอลัมน์หรือไม่ ปรากฏว่าระบบกาลักน้ำให้ผลดีกว่าคือให้อัตราการเกิดกรดอะซิติกร้อยละ 0.0354 ต่อชั่วโมง และระบบการไหลจะเป็นจังหวะ

เหมือนกับหนึ่งขั้นส่วนระบบท่อน้ำล้นยังมีน้ำขังส่วนล่างของคอลัมน์ แต่เนื่องจากการเกิดกรดอะซีติกยังอยู่ในอัตราที่ค่อนข้างต่ำ และเมื่อมาพิจารณาดูการเตรียมเชื้อหมักเริ่มต้น พบว่าเมื่อเตรียมในคอลัมน์ทั้งหมดจะให้ผลดีขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเตรียมในคอลัมน์เชื้อจะสามารถได้รับอากาศและอาหารได้อย่างเต็มที่ แต่ถ้าเชื้อหมักเริ่มต้น ร้อยละ 50 ไปใส่ขวดแล้วนำไปเขย่า โอกาสที่เชื้อจะได้รับอากาศย่อมน้อยกว่าในคอลัมน์ เพราะในคอลัมน์เราให้อากาศโดยตรง ซึ่งให้อัตราการเกิดกรดอะซีติกร้อยละ 0.0410 ต่อชั่วโมง ซึ่งให้ผลเช่นเดียว กับกราฟรูปที่ 28

ดังที่กล่าวมาแล้วเราได้ศึกษาถึงตัวแปรต่าง ๆ แต่ถ้ากำหนดตัวแปรของเครื่องหมักมีสภาพเดียวกันหมดเช่น อัตราการให้อากาศ อัตราการไหลของน้ำหมัก จำนวนลูกในแพคเบดสารอาหารเสริม อัตราส่วนแอลกอฮอล์และอะซีติกเริ่มต้น ดังนั้นตัวแปรของการหมักจะขึ้นอยู่กับลักษณะของเครื่องหมัก และเนื่องจากเครื่องหมักแบบนี้ไม่มีผู้สร้างมาก่อน จึงจำเป็นต้องปรับปรุงเครื่องหมักตลอดเวลา เพื่อให้การหมักดีที่สุดเท่าที่จะทำได้ ดังนั้นต่อมาได้ปรับปรุงเป็นเครื่องหมัก 4 ขั้นแบบขนาน ซึ่งจะให้ผลดังรูปที่ 34 จะเห็นได้ว่าสามารถหมักได้เร็วขึ้น แต่ต่อมาได้ดัดแปลงเป็นเครื่องหมักอนุกรม 4 ขั้นแบบรวมคอลัมน์ดังรูปกราฟที่ 37

และเมื่อนำเครื่องหมักทั้งหมดที่กล่าวมาแล้วมาเปรียบเทียบกัน โดยกำหนดตัวแปรของเครื่องหมักให้มีสภาพเดียวกันหมด ดังผลแสดงในรูปที่ 38, 39 ซึ่งพบว่าเมื่อหมักในเครื่องหมักแบบหนึ่งขั้น อนุกรมสี่ขั้นแบบแยกคอลัมน์ อนุกรมสองขั้นแบบแยกคอลัมน์ สี่ขั้นแบบขนาน และอนุกรมสี่ขั้นแบบรวมคอลัมน์ จะให้กรดอะซีติกร้อยละ 3.14, 2.79, 3.5, 4.0 และ 4.07 และมีเอทานอลเหลือร้อยละ 1.89, 3.19, 2.14, 1.28, 1.78 ตามลำดับ ในชั่วโมงที่ 60 เมื่อหาความแตกต่างที่ระดับนัยสำคัญ 5 เปอร์เซ็นต์ พบว่า เครื่องหมักแบบหนึ่งขั้นและอนุกรมสองขั้นแบบแยกคอลัมน์ไม่แตกต่างกัน แต่ทั้งสองแบบนี้แตกต่างจากเครื่องหมักอนุกรมสี่ขั้นแบบแยกคอลัมน์สี่ขั้นแบบขนาน และอนุกรมสี่ขั้นแบบรวมคอลัมน์ ซึ่งแต่ละแบบก็แตกต่างกัน โดยที่เครื่องหมักอนุกรมสี่ขั้นแบบรวมคอลัมน์ ให้อัตราการเกิดกรดอะซีติกสูงสุดคือให้ร้อยละ 0.0471 ต่อชั่วโมง ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับกราฟรูปที่ 38 ดังที่กล่าวมาแล้ว ทั้งนี้เนื่องจากเครื่องหมักอนุกรมสี่ขั้นแบบแยกคอลัมน์ อนุกรมสองขั้นแบบแยกคอลัมน์ สี่ขั้นแบบขนาน และอนุกรมสี่ขั้นแบบรวมคอลัมน์จะให้เวลาที่น้ำหมักอยู่ในคอลัมน์ไม่เท่ากันนั่นคือน้ำหมักทั้งหมดสามารถผ่านคอลัมน์ได้ 13, 17, 52 และ 104 รอบต่อชั่วโมงในเวลาที่เท่ากันตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเครื่องหมักอนุกรมสี่ขั้นแบบรวมคอลัมน์สามารถให้น้ำหมักผ่านได้จำนวนรอบมากที่สุด แสดงว่าน้ำหมักมี

โอกาสสัมผัสกับอากาศใหม่ได้มากครั้ง ซึ่งย่อมทำให้การหมักน้ำส้มสายชูได้เร็วขึ้น นอกจากนั้นยังได้ทำการศึกษาการหมักน้ำส้มสายชูแบบป้อนกึ่งต่อเนื่องเพื่อดูแนวโน้มที่จะเป็นไปได้โดยทำการถ่ายน้ำส้มสายชูออกร้อยละ 50 ของปริมาตรน้ำหมักทั้งหมด 15 ลิตร ทุก ๆ 60 ชั่วโมง แล้วทำการเติมไวน์ลงไปเท่ากับจำนวนที่ดึงออก โดยกำหนดให้ปริมาณเอทานอลรวมเท่ากับร้อยละ 6 ซึ่งจากผลการทดลองปรากฏว่าทุก ๆ ครั้งที่มีการดึงน้ำส้มสายชูจำนวนหนึ่งจะมีการสะสมของกรดอะซีติกและเอทานอลดังรูปกราฟที่ 40, 41 และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ หากทำการทดลองต่อไปอีกระยะหนึ่ง และคาดว่าเมื่อถึงจุดสุดท้าย อัตราการเปลี่ยนเอทานอลไปเป็นกรดอะซีติกจะลดลง ทั้งนี้เนื่องจากอัตราส่วนของเอทานอลต่อกรดอะซีติกลดลง และ ความเข้มข้นรวมทั้งหมดเพิ่มขึ้น อัตราการเจริญเติบโตของเชื้อจะลดลงตาม U.S. Pentent (11) ได้รายงานไว้ ดังนั้นปริมาณการเกิดกรดอะซีติกก็ลดลงตามไปด้วย โดยการสังเกตุความชันของเส้นกราฟจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป ส่วนค่าสภาพการดูดกลืนแสงจากกราฟรูปที่ 42 จะมีค่าสูงขึ้น โดยที่จริงแล้วควรจะมีค่าลดลง เพราะอัตราการเจริญเติบโตของเชื้อจะลดลง แต่ที่สูงขึ้นนี้อาจเนื่องจากการสะสมของกรดอะซีติกและเอทานอล มิใช่เกิดจากอัตราการเจริญเติบโตของเชื้อแต่เพียงอย่างเดียว