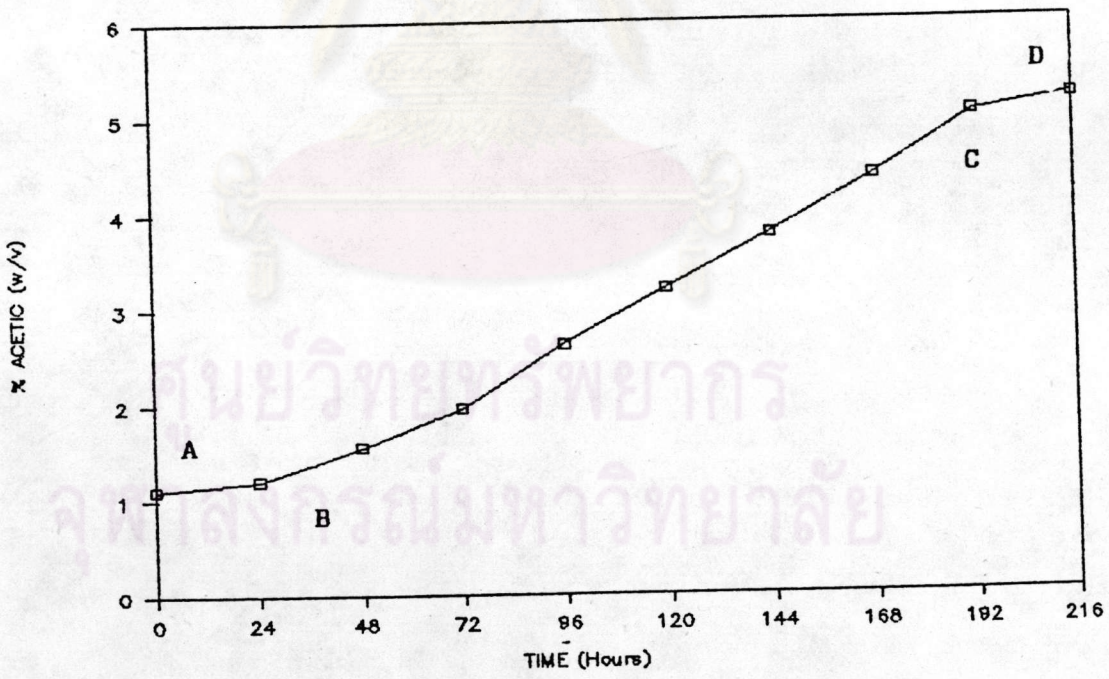
บทที่ 5

วิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเครื่องหมักหลายคอลัมน์ชนิดแพคเบดในการผลิตน้ำส้มสายชูอย่างต่อเนื่องจากไวน์สับปะรด โดยการนำผลการทดลองจากผู้วิจัยคนก่อนซึ่งทำการผลิตแบบไม่ต่อเนื่องและกึ่งต่อเนื่องมาพิจารณาออกแบบการผลิตแบบต่อเนื่อง โดยนำเครื่องมือและอุปกรณ์ที่มีอยู่มาดัดแปลงแก้ไขให้สามารถเดินเครื่องในการผลิตแบบต่อเนื่องได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้เพื่อจุดประสงค์ในแง่ของกำลังการผลิตที่สูงขึ้น เมื่อเทียบกับกระบวนการผลิตแบบไม่ต่อเนื่องและกึ่งต่อเนื่อง

การนำข้อมูลของผู้วิจัยคนก่อนมาวิเคราะห์ เริ่มจากการพิจารณาปริมาณกรดอะซิติกต่อเวลาในกระบวนการผลิตแบบไม่ต่อเนื่อง ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ปริมาณกรดอะซิติกต่อเวลา ในกระบวนการหมักแบบไม่ต่อเนื่อง

จากรูปที่ 5.1 พบว่า ช่วง AB และ CD เป็นช่วงที่มีอัตราการเกิดกรดอะซิติกค่อนข้างต่ำ เมื่อเทียบกับช่วง BC ทั้งนี้เนื่องจากการหมักแบบไม่ต่อเนื่อง เชื้ออยู่ในเครื่องหมักตลอดระยะเวลาของการหมักแต่ละครั้ง ดังนั้นช่วง AB จึงเป็นช่วงที่เชื้อเริ่มปรับตัวและเจริญพันธุ์ ความสามารถในการผลิตต่ำ เช่นเดียวกับช่วง CD ซึ่งเป็นช่วงที่เชื้อมีอายุมาก อาหารสำหรับการดำรงชีวิตน้อยลง การเจริญพันธุ์จึงเริ่มช้าลงทำให้ความสามารถในการผลิตต่ำลง(23) อัตราการเกิดกรดอะซิติกจึงต่ำลงด้วย แต่ในช่วง BC เชื้อมีการเจริญพันธุ์ที่ดี มี activity สูง(23) และมีอาหารสมบูรณ์ ความสามารถในการผลิตสูงขึ้นทำให้ช่วงนี้อัตราการเกิดกรดอะซิติกสูงกว่า 2 ช่วงแรก

จากผลการทดลองของการหมักแบบไม่ต่อเนื่อง ในช่วงที่มีอัตราการผลิตกรดอะซิติกสูง (ช่วง BC) ได้แก่ ช่วงปริมาณกรดอะซิติกร้อยละ 1 ถึง 5 (โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) ซึ่งถ้าพัฒนาการผลิตแบบไม่ต่อเนื่องเป็นการผลิตแบบต่อเนื่องด้วยการป้อนวัตถุดิบที่มีปริมาณเอทานอลร้อยละต่อปริมาณกรดอะซิติกร้อยละเท่ากับ 7:1 เข้าเครื่องหมัก (โดยคำนึงถึงระยะเวลาในการเปลี่ยนเอทานอลเป็นกรดอะซิติกจากร้อยละร้อยละ 1 ถึง 5) จะทำให้ได้น้ำส้มสายชูหมัก ซึ่งมีปริมาณกรดอะซิติกร้อยละ 5 เป็นผลผลิตอย่างสม่ำเสมอ แต่เนื่องจากระยะเวลาในการเปลี่ยนแปลงเอทานอลเป็นกรดอะซิติกจากร้อยละร้อยละ 1 ถึง 5 ค่อนข้างนาน (ประมาณ 5-10 วัน) ดังนั้นจึงใช้เครื่องย่อย 4 เครื่อง ทำหน้าที่ผลิตกรดอะซิติกเป็นช่วงสั้น ๆ ต่อเนื่องกันไป (เครื่องหมักที่ 1 ผลิตกรดอะซิติกจากร้อยละ 1 ถึง 2, เครื่องหมักที่ 2 ผลิตกรดอะซิติกจากร้อยละ 2 ถึง 3, เครื่องหมักที่ 3 ผลิตกรดอะซิติกจากร้อยละ 3 ถึง 4 และเครื่องหมักที่ 4 ผลิตกรดอะซิติกจากร้อยละ 4 ถึง 5 เพื่อลดเวลาในการผลิตทั้งหมดให้น้อยลง

ในงานวิจัยเริ่มแรก จะทำการทดลองเพื่อหาคุณลักษณะที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องหมักย่อยที่จะทำให้การผลิตกรดอะซิติกช่วงสั้น ๆ ได้เร็วที่สุด เพื่อให้แต่ละเครื่องหมักทำหน้าที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สุดเมื่อนำมาประกอบกันเป็นกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง

5.1 ศึกษาความสูงของแพคเบด

อัตราส่วนความสูงของช่องว่างเหนือแพคเบดต่อความสูงของแพคเบดที่นำมาพิจารณาเปรียบเทียบ มี 2 ตัวแปรคือ 1:1.22 และ 1:0.95 โดยที่อัตราส่วน 1:0.95 เป็นอัตราส่วนต่ำสุดจากผลการทดลองของศิริวรรณ มีปริมาณลูกแพคเบดเท่ากับ 180 เม็ด ความสูงของช่องว่าง

เหนือแผคเบดและแผคเบดเท่ากับ 20.5 และ 19.5 เซนติเมตร สามารถให้อัตราการเกิดกรดอะซิติกเท่ากับ 0.01675 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณลูกแผคเบดเป็น 195 เม็ด ซึ่งทำให้อัตราส่วนเป็น 1:1.22 มีความสูงของช่องว่างเหนือแผคเบดและแผคเบดเป็น 18 และ 22 เซนติเมตร (โดยเป็นความสูงของแผคเบดสูงสุดที่จะทำให้ไม่เกิดการท่วมล้น) ทำให้อัตราการเกิดกรดอะซิติกเพิ่มขึ้นเป็น 0.01682 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งอธิบายได้ว่าการเพิ่มพื้นที่ผิวจะทำให้เอทานอล ออกซิเจน ที่ละลายในน้ำหมักสัมผัสกับเชื้อจุลินทรีย์มากขึ้น อัตราการเกิดกรดอะซิติกจึงสูงขึ้น (14) แต่เมื่อพิจารณาอัตราการเกิดกรดอะซิติกที่เพิ่มขึ้น คิดเป็นร้อยละ 0.39 ซึ่งเมื่อเทียบกับปริมาณลูกแผคเบดที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 8.33 พบว่าจำนวนลูกแผคเบดที่เพิ่มขึ้นจาก 180 เม็ดเป็น 195 เม็ด ทำให้อัตราการเกิดกรดอะซิติกของอัตราส่วนความสูงของช่องว่างเหนือแผคเบดต่อความสูงของแผคเบดเท่ากับ 1:0.95 พบว่าพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้นค่อนข้างน้อยมาก กล่าวคือประมาณร้อยละ 8.33 ของจำนวนลูกแผคเบดเดิม ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลการทดลองในรูปที่ 4.1 เห็นได้ว่าอัตราการเกิดกรดอะซิติกของทั้งสองตัวแปรเกือบจะไม่แตกต่างกันเลย กล่าวคือ เพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 0.39 ดังนั้นการเลือกใช้อัตราส่วนสูงของช่องว่างเหนือแผคเบดต่อความสูงของแผคเบดเท่ากับ 1:0.95 เป็นสภาวะที่จะใช้ในการทดลองขั้นต่อไปจึงไม่มีผลต่ออัตราการผลิตกรดอะซิติกมากนัก

5.2 ศึกษาระบบการไหลเวียนของน้ำหมัก

การพิจารณาระบบการไหลเวียนของน้ำหมักที่ผ่านแผคเบดมีความสำคัญมากอย่างหนึ่งในการทำให้อัตราการเกิดกรดอะซิติกเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการไหลเวียนของน้ำหมักที่ดีจะส่งเสริมให้มีการใช้พื้นที่ผิวที่มีเชื้อแบคทีเรียเกาะอยู่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจากรูปที่ 4.2 พบว่าการไหลเวียนแบบกาลักน้ำทำให้อัตราการเกิดกรดอะซิติกสูงกว่าแบบไหลผ่านธรรมดาโดยให้เหตุผลได้คือ การไหลเวียนแบบกาลักน้ำมีการเคลื่อนที่ของน้ำหมัก 2 จังหวะ คือ จังหวะท่วมแผคเบดและจังหวะไหลผ่าน ซึ่งจังหวะท่วมแผคเบดจะทำให้น้ำหมักซึ่งมีทั้งเอทานอลและออกซิเจนละลายอยู่ได้สัมผัสกับเชื้อบนแผคเบดได้อย่างทั่วถึง ซึ่งนอกจากทำให้เชื้อทำหน้าที่ได้ทุกพื้นที่ผิวของแผคเบดแล้วยังทำให้เชื้อที่หลุดออกไปจากแผคเบดสามารถกลับมาเกาะที่ผิวของแผคเบดได้อีกด้วย และเมื่อถึงจังหวะไหลผ่าน เชื้อจะได้รับออกซิเจนอย่างจากส่วนล่างของคอลัมน์ ซึ่งจะทำให้เชื้อสามารถใช้ออกซิเจนในการดำรงชีวิตพร้อมกับการเกิดกรดอะซิติกได้ในเวลาเดียวกัน แต่ในการไหลเวียนของน้ำหมักแบบไหลผ่านนั้นถึงแม้ว่าเชื้อบนแผคเบดจะได้รับออกซิเจนมาก แต่เอทานอลในน้ำหมักจะมีระยะเวลาในการสัมผัสกับเชื้อบนแผคเบดได้น้อยกว่า ปริมาณกรดอะซิติกที่เกิดขึ้นจึงน้อยกว่า

และระบบการไหลผ่านนี้ยังมีโอกาสทำให้เชื้อบนแพคเบดหลุดออกไปได้ง่ายอีกด้วย ซึ่งจะทำให้พื้นที่ที่ใช้ในการผลิตกรดอะซิติกน้อยลง อัตราการผลิตจึงต่ำกว่าระบบกาลักน้ำ

5.3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินเครื่อง

จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในแต่ละเครื่องหมักโดยแปรค่าอัตราการไหลเข้าของน้ำหมักเท่ากับ 3.2, 2.8 และ 2.4 ลิตรต่อนาทีและอัตราการให้อากาศเท่ากับ ๐.๐๘, ๐.๐๖ และ ๐.๐๔ ปปน. ระบบการไหลเวียนของน้ำหมักแบบกาลักน้ำ อัตราส่วนความสูงของช่องว่างเหนือแพคเบดต่อความสูงของแพคเบดเท่ากับ 1:๐.95 พบว่า

เครื่องหมักที่ 1,2,3 และ 4 มีอัตราการไหลเข้าของน้ำหมักที่เหมาะสมเท่ากับ 2.8 ลิตรต่อนาที โดยที่อัตราการไหลเข้าของน้ำหมัก 3.2 ลิตรต่อนาที จะทำให้ปรากฏการณ์ภายในของแพคเบดเปลี่ยนไป เนื่องจากการสเปรย์น้ำหมักค่อนข้างรุนแรงเป็นเหตุให้ฟองอากาศที่ผ่านเข้าทางด้านล่างของคอลัมน์ผุดขึ้นไม่ทันเกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้นไม่ให้น้ำหมักผ่านลงมาด้านล่างของคอลัมน์ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า อากาศก้น (air block) ซึ่งจะเกิดขึ้นในบางจังหวะระหว่างการเดินเครื่อง ทำให้เสียพื้นที่ผิวการถ่ายเทมวลสารของสารตั้งต้นผ่านเข้าสู่เซลล์จึงเป็นเหตุให้อัตราการเกิดกรดอะซิติกลดลง (14)

เมื่อใช้อัตราการไหลเข้าของน้ำหมัก 2.8 ลิตรต่อนาที ปรากฏการณ์ต่าง ๆ ภายในแพคเบดค่อนข้างราบเรียบ ฟองอากาศที่ผุดขึ้นในแพคเบดเมื่อน้ำหมักท่วมแพคเบดจะเป็นฟองเล็ก ๆ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ ๐.3-๐.5 เซนติเมตร ผ่านตามช่องว่างของแพคเบดและเมื่อน้ำหมักถูกแรงกาลักน้ำดูดลงถัง อากาศจากด้านล่างของคอลัมน์ก็ผ่านผิวของแพคเบดสวนทางขึ้นกับการสเปรย์ของน้ำหมักลงมาที่ไม่รุนแรงนัก ประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสารของสารตั้งต้นจึงดีกว่า อัตราการเกิดกรดอะซิติกจึงสูงกว่า

ในกรณีที่ใช้อัตราการไหลเข้าของน้ำหมัก 2.4 ลิตรต่อนาที พบว่าอัตราการเกิดกรดอะซิติกลดลงมาก โดยเป็นเหตุจากการสเปรย์กระจายไม่ทั่วถึงเนื่องจากอัตราการไหลเข้าของน้ำหมักไม่สูงนัก จังหวะการท่วมล้นค่อนข้างช้า ถึงแม้จะให้อากาศ ๐.๐๘ ปปน. ซึ่งมีผลทำให้ฟองอากาศผ่านน้ำหมักในปริมาณมากขึ้น แต่ก็เป็นการเพิ่มสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาเพียงตัวเดียว การสนับสนุนให้เกิดการเพิ่มอัตราการผลิตจึงไม่สมบูรณ์ ผลที่ได้จึงต่ำกว่าอัตราการไหลเข้าของน้ำหมักค่าอื่น ๆ เมื่ออัตราการให้อากาศเท่ากัน

ในการพิจารณาอัตราการให้อากาศพบว่าอัตราการให้อากาศ ๐.๐๘ ปปน. ทำให้เกิดปรากฏการณ์ภายในคอลัมน์ค่อนข้างรุนแรงซึ่งมีทั้งผลต่อการทดลองใน 2 กรณี กรณีแรกคือ เมื่อใช้อัตราการให้อากาศ ๐.๐๘ ปปน. มาเดินเครื่องขณะที่อัตราการไหลเข้าของน้ำหมัก 3.2 ลิตรต่อนาที การผุดขึ้นของฟองอากาศที่ค่อนข้างเร็วกับการไหลเข้าของน้ำหมักที่มีปริมาณมากจะเกิดการกั้นของอากาศภายในแพคเบดทำให้สูญเสียพื้นที่ผิวในการถ่ายเทมวลสาร อัตราการเกิดกรดอะซิติกจึงช้าลง กรณีที่สองคือเมื่อใช้อัตราการให้อากาศ ๐.๐๘ ปปน.มาเดินเครื่องกับอัตราการไหลเข้าของน้ำหมัก 3.2 ลิตรต่อนาที พบว่าฟองอากาศที่ผุดขึ้นเป็นไปอย่างสม่ำเสมอแต่ค่อนข้างเร็วและมักรวมตัวกันเป็นฟองใหญ่ ๆ ซึ่งก็จะเป็นการลดพื้นที่ผิวในการถ่ายเทมวลสารเช่นเดียวกัน อัตราการเกิดกรดอะซิติกจึงไม่ดีเท่าที่ควร

การถ่ายเทมวลสารของออกซิเจนจากฟองอากาศเข้าสู่เซลล์โดยผ่าน ฟิล์มรอบฟองอากาศและรอบเม็ดแพคเบด ปัญหาของการส่งผ่านมวลส่วนหนึ่งอยู่ที่ความหนาของฟิล์มของน้ำหมัก ซึ่งอัตราการไหลเข้าของน้ำหมักที่พอเหมาะจะชะผิวของแพคเบดทำให้ความหนาของฟิล์มลดลงไปได้ (36) แต่ถ้าใช้อัตราการไหลเข้าของน้ำหมักแรงเกินไปกลับทำให้เชื้อที่เกาะอยู่บนผิวของแพคเบดถูกเซาะหลุดออกไปได้ง่าย (17)

เมื่อพิจารณาถึงอัตราการไหลเข้าของน้ำหมัก 3.2 ลิตรต่อนาที พบว่าน้ำหมักปริมาณ 15 ลิตร สามารถผ่านแพคเบดในแต่ละวันมากที่สุด คือประมาณ 304 ครั้ง ในขณะที่อัตราการไหลเข้าของน้ำหมัก 2.8 และ 2.4 ลิตรต่อนาที ผ่านแพคเบดประมาณ 268 และ 230 ครั้งตามลำดับ ซึ่งการผ่านแพคเบดบ่อยครั้งต่อวัน ทำให้ระยะเวลาในการสัมผัสแพคเบดมากกว่า การเกิดกรดอะซิติกควรจะสูงกว่า แต่ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจริงในแพคเบดถึงแม้อัตราการไหลเข้าของน้ำหมัก 3.2 ลิตรต่อนาที จะมีจำนวนครั้งในการผ่านแพคเบดมากกว่า 2.8 ลิตรต่อนาที แต่ขนาดของฟองอากาศใหญ่กว่า พื้นที่ผิวสัมผัสของฟองอากาศน้อยกว่า การถ่ายเทมวลสารของออกซิเจนเข้าสู่น้ำหมักน้อยกว่า อัตราการเกิดกรดอะซิติกจึงต่ำกว่า และเมื่อเปรียบเทียบอัตราการไหลเข้าของน้ำหมัก 3.2 ลิตรต่อนาที กับ 2.4 ลิตรต่อนาที พบว่าอัตราการไหลเข้าของน้ำหมัก 3.2 ลิตรต่อนาทีให้อัตราการเกิดกรดอะซิติกสูงกว่า ซึ่งสามารถให้เหตุผลได้ว่าจำนวนครั้งของการไหลผ่านมีผลต่อปริมาณการถ่ายเทมวลสารของออกซิเจนมากกว่าขนาดของฟองอากาศซึ่งจะเห็นได้จากอัตราการเกิดกรดอะซิติกมากกว่า

การเพิ่มอัตราการให้อากาศมีผล 2 กรณีต่อการถ่ายเทมวลสาร

1. ในกรณีที่ pH อยู่ในช่วง 3.7-4.2 เชื้อค่อนข้างใหม่ยังไม่สร้างเมือก (slime) เพื่อป้องกันตัวเอง ดังนั้นการถ่ายเทมวลสารจึงขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของอากาศและเวลาที่ฟองอากาศอยู่ในแพคเบด อัตราการให้อากาศ ๐.๐๔ ปปน. จึงมีผลต่ออัตราการผลิตมากกว่า ซึ่งเมื่อเทียบกับอัตราการให้อากาศ ๐.๐๖ ปปน.ฟองอากาศใหญ่กว่า การเคลื่อนที่เร็วกว่า และมักรวมตัวเป็นฟองใหญ่ขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งอัตราการให้อากาศ ๐.๐๘ ปปน. ไม่ว่าจะนำมาเดินเครื่องกับอัตราการไหลเข้าของน้ำหมักค่าใดก็ตาม โดยส่วนใหญ่เกิดปรากฏการณ์อากาศก้น (air block) ซึ่งทำให้อากาศผ่านขึ้นลงได้ลำบาก พื้นที่ผิวของแพคเบดที่สัมผัสกับน้ำหมักหรืออากาศจึงน้อยลง เป็นเหตุให้อัตราการเกิดกรดอะซิติกลดลงอย่างมาก

2. ในกรณีที่ pH อยู่ในช่วง 3.3-3.7 ในช่วงนี้เชื้อมี activity สูงขึ้นพร้อมกับมีอัตราการผลิตจำเพาะสูง แต่ในขณะเดียวกันก็มีการสร้างเมือกบาง ๆ เพื่อป้องกันเซลล์ได้รับอันตรายจากสภาพความเป็นกรด ดังนั้นการใช้อัตราการให้อากาศ ๐.๐๔ ปปน. ถึงแม้ว่าพื้นที่ผิวของฟองอากาศในการถ่ายเทมวลสารจะมากกว่า แต่อัตราการให้อากาศ ๐.๐๖ ปปน. การเคลื่อนที่ของฟองอากาศสัมผัสกับผิวของแพคเบดมีความแรงมากกว่าจึงสามารถลดความหนาของเมือกลงได้ การถ่ายเทมวลสารของออกซิเจนเข้าสู่เซลล์จึงเกิดได้ง่ายขึ้น (37) แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าใช้อัตราการให้อากาศ ๐.๐๘ ปปน. จะเกิดปรากฏการณ์อากาศก้น ซึ่งทำให้พื้นที่ผิวของการถ่ายเทมวลสารลดลงและยิ่งไปกว่านั้นความแรงของการไหลเข้าของอากาศอาจทำให้เชื้อที่เกาะแพคเบดหลุดออกไปได้ง่ายอีกด้วย

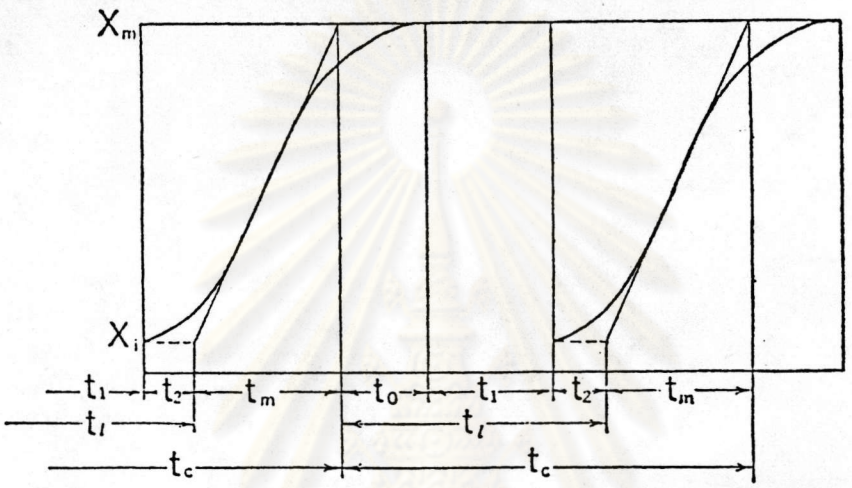
5.4 ศึกษาการเดินเครื่องแบบต่อเนื่อง

จากผลการทดลองในข้อ 4.1,4.2 และ 4.3 จะนำสภาวะต่าง ๆ มาใช้เป็นสภาวะคงที่ในการเดินเครื่องแบบต่อเนื่องเพื่อหาอัตราการเจือจางที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ปริมาณกรดอะซิติกในแต่ละเครื่องหมักคงที่ ซึ่งจะสามารถผลิตน้ำส้มสายชูที่มีกรดอะซิติกร้อยละ 5 ตลอดเวลาที่มีการป้อนเข้าของไวน์ โดยที่อัตราการเจือจางที่เหมาะสมซึ่งได้จากการแปรค่าต่าง ๆ คือ ๐.๐๑๙๒ (ชั่วโมง)$^{-1}$ แต่เมื่อพิจารณาปริมาณเชื้อในแต่ละเครื่องหมักพบว่าเครื่องหมักที่ 1 เท่านั้นที่คงที่ ส่วนปริมาณเชื้อในเครื่องหมักที่ 2,3 และ 4 มีแนวโน้มที่จะเพิ่มมากขึ้นซึ่งถ้าเป็นเช่นนี้ในระหว่างการเดินเครื่องจะทำให้น้ำส้มสายชูที่ได้มีปริมาณกรดอะซิติกเพิ่มขึ้น ๆ แสดงให้เห็นถึงความไม่เสถียรในการเดินเครื่องในระยะเวลายาวนาน จากปรากฏการณ์นี้สามารถให้เหตุผลได้ว่า ปริมาณเชื้อในเครื่องหมักที่ 1

มีการสูญเสียไปกับทางออกโดยที่ไม่ได้รับทางเข้าจากเครื่องหมักก่อนหน้า ดังนั้นปริมาณเชื้อที่คงที่ในเครื่องหมักที่ 1 จึงเป็นผลมาจากการเท่ากันของปริมาณเชื้อที่ออกไปกับปริมาณเชื้อที่เกิดขึ้นจากการเจริญพันธุ์ของเชื้อเอง แต่ในเครื่องหมักที่ 2,3 และ 4 ปริมาณเชื้อเพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณเชื้อที่ได้รับมีมากกว่าที่เสียออกไปจึงเกิดการสะสมภายในเครื่องหมักมากขึ้นเรื่อย ๆ ดังจะเห็นจากกราฟแสดงปริมาณเชื้อต่อเวลาในรูปที่ 4.21 และด้วยเหตุนี้เพื่อที่จะทำให้ปริมาณเชื้อในเครื่องหมักที่ 2,3 และ 4 คงที่จึงเพิ่มอัตราการเจือจางให้มากขึ้นเป็น ๐.๐2๐4 (ชั่วโมง)$^{-1}$ แต่อัตราการเจือจางนี้กลับทำให้ปริมาณเชื้อในเครื่องหมักที่ 1 ลดลง ซึ่งก็ทำให้การเดินเครื่องไม่เสถียรเช่นเดียวกัน จึงต้องนำบางส่วนของผลผลิตซึ่งมีทั้งกรดอะซิติกและเชื้อบ้อนกลับมายังเครื่องหมักที่ 1 เพื่อรักษาสมดุลย์ของปริมาณเชื้อและกรดให้คงที่พร้อมกับการแก้ปัญหาความไม่เสถียรระหว่างเครื่องหมักที่ 1 กับเครื่องหมักที่ 2,3 และ 4 โดยพิจารณาหาค่าอัตราการเจือจางและอัตราส่วนการบ้อนกลับที่เหมาะสม ซึ่งเท่ากับ ๐.๐216 (ชั่วโมง)$^{-1}$ และ 1:๐.2 ตามลำดับ ซึ่งจากการบ้อนกลับนี้ทำให้ปริมาณกรดอะซิติกและเชื้อคงที่ขึ้น ดังรูปที่ 4.23 และ 4.25

5.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตของกระบวนการผลิตแบบไม่ต่อเนื่อง กึ่งต่อเนื่องและต่อเนื่อง

จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตของทั้ง 3 กระบวนการ พบว่า กระบวนการแบบไม่ต่อเนื่อง กึ่งต่อเนื่อง และต่อเนื่อง สามารถผลิตน้ำส้มสายชู (กรดอะซิติกร้อยละ 5) ได้วันละ 5.4,6.๐ และ 7.8 ลิตร ซึ่งจากผลการทดลองนี้สามารถอธิบายได้ว่า กระบวนการผลิตแบบไม่ต่อเนื่องและกึ่งต่อเนื่องจะมีบางช่วงที่อัตราการเกิดกรดอะซิติกต่ำในระหว่างการผลิต โดยเฉพาะอย่างยิ่งกระบวนการผลิตแบบไม่ต่อเนื่องช่วงต้นและช่วงปลายของการผลิตแต่ละครั้ง อัตราการเกิดกรดอะซิติกค่อนข้างต่ำ ทั้งนี้เมื่อเทียบกับกราฟปริมาณเชื้อต่อเวลา (รูปที่ 5.2) พบว่ารูปกราฟมีลักษณะเหมือนกัน จึงให้เหตุผลได้ว่า ช่วงที่อัตราการเกิดกรดอะซิติกต่ำเนื่องจากเมื่อมีการเปลี่ยนน้ำหมักทุกครั้งที่เริ่มมีการผลิตใหม่ระยะแรก (t_2) เชื้อต้องปรับตัวให้เข้ากับสภาวะแวดล้อมเริ่มต้นเพื่อการดำรงชีวิต ดังนั้นพฤติกรรมในการผลิตกรดอะซิติกและการเจริญพันธุ์จึงต่ำ เช่นเดียวกับในระยะปลายเชื้อเริ่มมีอายุมาก อีกทั้งอาหารเลี้ยงเชื้อลดน้อยลง พฤติกรรมในการผลิตและการเจริญพันธุ์จึงต่ำลงด้วย



เมื่อ X_m = ปริมาณเชื้อสูงสุด

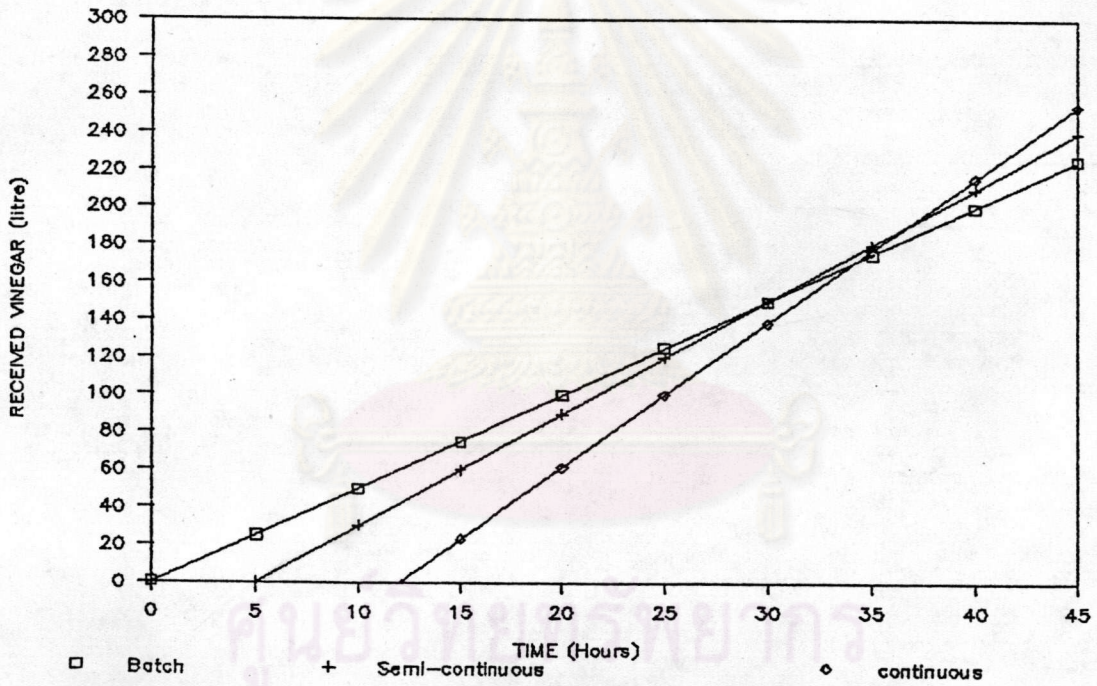
X_i = ปริมาณเชื้อเริ่มต้น

$t_1 = t_0 + t_1 + t_2$

รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเซลล์ต่อเวลา ในการหมักแบบไม่ต่อเนื่อง

ในการผลิตแบบต่อเนื่อง จะใช้ข้อมูลจากกราฟของเชื้อต่อเวลาของการผลิตแบบไม่ต่อเนื่องมาพิจารณา โดยใช้ช่วงชีวิตของเชื้อที่มีการเจริญพันธุ์คงที่ (ประมาณช่วงกลางของกราฟ) ซึ่งเป็นช่วงที่เชื้อมีพฤติกรรมในการผลิตสูงเป็นจุดเริ่มป้อนวัตถุดิบ ดังนั้นการผลิตจึงเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่มีการสูญเสียเวลาในการปรับตัวของเชื้อ นอกจากนี้การผลิตแบบต่อเนื่องยังมีผลให้เชื้อ active ตลอดเวลา ทั้งนี้เนื่องจากการเข้าออกของอาหารเลี้ยงเชื้อและวัตถุดิบอย่างสม่ำเสมอเป็นผลให้พฤติกรรมการผลิตไม่เปลี่ยนแปลง (23)

จากการพิจารณาพฤติกรรมของเชื้อที่มีผลต่ออัตราการผลิตกรดอะซิติกดังกล่าวข้างต้น บอกให้รู้ว่ากระบวนการผลิตแบบไม่ต่อเนื่องและกึ่งต่อเนื่องจะใช้เวลาในการผลิตสูงกว่าแบบต่อเนื่องในปริมาณที่เท่ากัน และเมื่อเปรียบเทียบเป็นกำลังการผลิต จะเห็นได้ชัดว่า กระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องมีกำลังการผลิตสูงที่สุด (กราฟมีความชันมากที่สุด) ดังรูปที่ 5.3 ซึ่งจะเป็นข้อดีอย่างมากในแง่ของการเพิ่มปริมาณการผลิตเมื่อมีการพัฒนาเป็นอุตสาหกรรม



รูปที่ 5.3 การเปรียบเทียบปริมาณน้ำส้มสายชูที่ได้รับต่อเวลาของกระบวนการหมักแบบไม่ต่อเนื่อง กึ่งต่อเนื่อง และต่อเนื่อง

เมื่อเปรียบเทียบกำลังการผลิตน้ำส้มสายชูระหว่างกระบวนการผลิตแบบไม่ต่อเนื่อง กึ่งต่อเนื่อง และต่อเนื่อง จากเครื่องหมักหลายคอลัมน์ โดยใช้ข้อมูลต่อไปนี้นำมาพิจารณาประกอบการคำนวณ

1. ระยะเวลาการผลิต 1 ปี

2. ระยะเวลาการหมักแต่ละครั้งของกระบวนการหมักแบบไม่ต่อเนื่องและกึ่งต่อเนื่อง ประมาณ 11 และ 5 วันตามลำดับ

3. ระยะเวลาการเตรียมเชื้อและเครื่องหมักก่อนการหมักครั้งต่อไป ในกระบวนการผลิตแบบไม่ต่อเนื่องประมาณ 2 วัน

4. ระยะเวลาการเตรียมเชื้อและเครื่องหมักก่อนการผลิตก่อนการหมักครั้งต่อไป (ทำการเตรียมทุก 3 เดือน) ในกระบวนการผลิตแบบกึ่งต่อเนื่องประมาณ 8 วัน

5. ระยะเวลาการเตรียมเชื้อและเครื่องหมักก่อนการหมักครั้งต่อไป (ทำการเตรียมทุก 6 เดือน) ในกระบวนการหมักแบบต่อเนื่องประมาณ 10 วัน

กระบวนการหมักแบบไม่ต่อเนื่อง

- เวลาทั้งหมดที่ใช้ในการหมักแบบไม่ต่อเนื่องแต่ละครั้ง	=	11+2	
	=	13	วัน
- การหมักแต่ละครั้งได้น้ำส้มสายชู	=	60	ลิตร
- ระยะเวลาการผลิต 1 ปีได้น้ำส้มสายชู	=	(300/13)x60	
	=	1384.6	ลิตร
คิดเป็นกำลังการผลิตโดยเฉลี่ย	=	1384.6/300	
	=	4.6	ลิตรต่อวัน

กระบวนการหมักแบบกึ่งต่อเนื่อง

- เวลาทั้งหมดที่ใช้ในการหมักแบบกึ่งต่อเนื่องแต่ละครั้ง	=	5	วัน
- ระยะเวลาการเตรียมเชื้อและเครื่องหมัก ก่อนการหมักครั้งต่อไป	=	8	วัน

- ในระหว่างการผลิต 1 ปี ต้องล้างเครื่อง 4 ครั้ง	=	32	วัน
- การหมักแต่ละครั้งได้น้ำส้มสายชู	=	30	ลิตร
- ระยะเวลาในการหมักน้ำส้มสายชูจริง	=	300-32	
	=	268	วัน
- ระยะเวลาการผลิต 1 ปี (268 วัน) ได้น้ำส้มสายชู	=	(268/5)x30	
	=	1608	ลิตร
คิดเป็นกำลังการผลิตโดยเฉลี่ย	=	1608/300	
	=	5.4	ลิตรต่อวัน

กระบวนการหมักแบบต่อเนื่อง

- ระยะเวลาการเตรียมเชื้อและเครื่องหมัก ก่อนการหมักครั้งต่อไป	=	10	วัน
- ในระหว่างการผลิต 1 ปี ต้องล้างเครื่อง 2 ครั้ง	=	20	วัน
- ระยะเวลาในการหมักน้ำส้มสายชูจริง	=	300-20	
	=	280	วัน
- กระบวนการหมักแบบต่อเนื่องมีกำลังการผลิตน้ำส้มสายชู	=	7.8	ลิตรต่อวัน
- ระยะเวลา 1 ปี (280 วัน) ได้น้ำส้มสายชู	=	2184	ลิตร
คิดเป็นกำลังการผลิตโดยเฉลี่ย	=	2184/300	
	=	7.3	ลิตรต่อวัน

จากกำลังการผลิตของกระบวนการหมักทั้งสาม จะเห็นว่าเมื่อนำช่วงเวลาการเตรียมเชื้อและเครื่องมาคำนวณร่วมกับการผลิตในสภาวะคงที่ พิจารณาจากระยะเวลาการผลิตเป็น 1 ปี จะทำให้กำลังการผลิตลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังการผลิตเดิมซึ่งคิดเฉพาะที่สภาวะคงที่ พบว่ากำลังการผลิตลดลง โดยที่กระบวนการหมักแบบไม่ต่อเนื่องลดลงมากที่สุดคือประมาณ 0.8 ลิตรต่อวัน และกระบวนการหมักแบบกึ่งต่อเนื่องและต่อเนื่องลดลง 0.6 และ 0.5 ลิตรต่อนาทีตามลำดับจากผลวิเคราะห์นี้แสดงให้เห็นว่า กระบวนการหมักแบบไม่ต่อเนื่องและกึ่งต่อเนื่องจะเสียเวลาในการผลิตจากการเตรียมเชื้อและเครื่องหมักมากกว่ากระบวนการแบบต่อเนื่อง ดังเหตุผลทางพฤติกรรมของเชื้อที่ได้กล่าวข้างต้นและจากเหตุผลนี้เมื่อนำมาขยายขนาดเพื่อเพิ่มกำลังการผลิต การลดลง

ของกำลังการผลิตจะมีผลต่อปริมาณการผลิตน้ำส้มสายชูมากยิ่งขึ้น

5.6 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ในการผลิตน้ำส้มสายชูจากกระบวนการหมักแบบต่อเนื่อง

จากผลการทดลองในการหมักแบบต่อเนื่องของเครื่องหมักหลายคอลัมน์ในข้อ 4.5 เมื่อนำข้อมูลมาขยายขนาดการผลิตเป็น 1000 กิโลกรัมต่อวัน (961.5 ลิตรต่อวัน) เพื่อผลิตเป็นอุตสาหกรรม โดยการใช้น้ำสับปะรดเป็นวัตถุดิบ เริ่มต้นจากกระบวนการหมักไวน์ กระบวนการหมักน้ำส้มสายชู และกระบวนการทำให้ใส จนกระทั่งได้น้ำส้มสายชูหมักที่มีปริมาณกรดอะซิติกร้อยละ 5 พร้อมที่จะบรรจุขวดเพื่อออกจำหน่ายต่อไป (ภาคผนวก ง.)

น้ำสับปะรดที่ใช้ (ก่อนผ่านเครื่องกรอง F_1) ประมาณวันละ 701.09 กิโลกรัมและเมื่อกรองเอากากสับปะรดออกจะเหลือน้ำสับปะรดใสประมาณ 616.96 กิโลกรัมหรือประมาณ 560.87 ลิตร เมื่อผ่านเข้าเครื่องหมักไวน์สามารถผลิตไวน์อย่างต่อเนื่องที่มีปริมาณเอทานอลร้อยละ 12 ได้วันละ 605.74 กิโลกรัมหรือ 560.87 ลิตร ก่อนป้อนเข้าเครื่องหมักน้ำส้มสายชูจะต้องปรับไวน์ให้มีปริมาณเอทานอลร้อยละต่อปริมาณกรดอะซิติกร้อยละเท่ากับ 7:1 โดยการเจือจางไวน์ที่มีปริมาณเอทานอลร้อยละ 12 ด้วยน้ำกลั่นวันละ 400.63 ลิตร ทำให้ได้ปริมาณไวน์ที่ป้อนเข้าเครื่องหมักน้ำส้มสายชูวันละ 1008.85 กิโลกรัม ได้น้ำส้มสายชูวันละ 1009.33 ลิตร (มวลเซลล์ของเชื้อแบคทีเรียที่เกิดจากการหมักวันละ 0.48 กิโลกรัม) น้ำส้มสายชูที่ได้ค่อนข้างขุ่นเนื่องจากตะกอนเชื้อ (ยีสต์) และตะกอนสับปะรดที่แขวนลอยอยู่ ดังนั้นจึงต้องผ่านกระบวนการทำให้ใสโดยใช้เบนโทไนท์ประมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร น้ำส้มสายชูที่ได้ในขั้นตอนสุดท้ายจะเหลืองใสตามสภาวะของสีน้ำสับปะรด พร้อมทั้งมีกลิ่นหอมเนื่องจากเอทานอลในไวน์ที่เหลืออยู่ (ประมาณร้อยละ 0.5)

เมื่อวิเคราะห์เงินลงทุนทั้งหมดโดยคิดจากเงินลงทุนคงที่และเงินลงทุนจากการดำเนินการพบว่าเป็นเงินทั้งสิ้น 3,423,588 บาท และค่าผลผลิตทั้งหมดเป็นเงิน 4,800,000 บาท ซึ่งจากน้ำส้มสายชูที่ผลิตได้ปีละ 961.5 ลิตร คิดเป็นต้นทุนการผลิตลิตรละ 16.64 บาทและจากราคาขายโดยทั่วไปในท้องตลาดราคาขวด (720 มิลลิลิตร) ละ 23 บาท สามารถทำกำไรได้ประมาณปีละ 1,366,872.03 บาท (หลังหักภาษีนิติบุคคล) มีผลตอบแทนการลงทุนก่อนและหลังหักภาษีเท่ากับ 73.33 % และ 47.67 % ระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 1.36 ปี

จากผลการวิเคราะห์การลงทุนและผลกำไร จะเห็นได้ว่าผลตอบแทนการลงทุนก่อนและหลังหักภาษี ค่อนข้างสูงคือ 73.34% และ 47.67% ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลตอบแทนการลงทุน

ที่ให้อัตราเสี่ยงต่ำสุดในการสร้างโรงงานที่เกี่ยวกับกระบวนการผลิตทางเคมีประมาณ 45% และ 21%(38) พบว่ามีค่ามากเป็น 2 เท่า ดังนั้นจึงเป็นโครงการที่น่าลงทุนมากและเมื่อพิจารณาระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 1.36 ปี จะเห็นได้ว่า เป็นระยะเวลาที่สั้นมากเหมาะกับการลงทุนเกี่ยวกับโรงงานเคมีซึ่งมีอายุการใช้งานไม่นานนัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการผลิตน้ำส้มสายชูจำเป็นต้องคำนึงถึงการจัดหาวัตถุดิบและตลาดที่จะรองรับผลผลิต เนื่องจากผลผลิตทางการเกษตรที่ใช้เป็นวัตถุดิบในแต่ละปีมีปริมาณไม่คงที่ ราคาวัตถุดิบในแต่ละปีไม่แน่นอน (39) ทำให้ต้นทุนผลผลิตทั้งหมดเปลี่ยนไปด้วย นอกจากนี้ทางด้านการแบ่งตลาดเป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่ต้องนำมาพิจารณา จากผลความไม่แน่นอนของต้นทุนผลผลิตในแต่ละปี ทำให้ผลกำไรเปลี่ยนแปลงไป ทั้งนี้เนื่องจากการแข่งขันทางด้านการตลาดมีมาก โรงงานใหม่จำเป็นต้องควบคุมราคาขายของผลผลิต เพื่อสามารถแบ่งตลาดในช่วงแรกได้บ้าง ดังนั้นในบางปีที่ต้นทุนผลผลิตสูง กำไรจะน้อยลง ระยะเวลาคืนทุนสั้นย่อมเป็นผลดีในแง่การป้องกันการเปลี่ยนแปลงทางเศรษฐกิจที่อาจเกิดขึ้นได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย