บทที่ 5
สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

1. ปริมาณผลผลิตกรดแลคติกจากกระบวนการหมักเศษผลไม้แบบไร้อากาศ โดยแบคทีเรีย *Lactobacillus plantarum* สายพันธุ์ TISTR 926 มีค่าสูงสุดจากการหมักแกนสับปะรด (56 kg/ton wt substrate) ซังขนุน (57 kg/ton wt substrate) และเปลือกแตงโม ให้ผลผลิตกรดแลคติกต่ำที่สุด (26 kg/ton wt substrate) ตามลำดับ

2. สภาวะสำหรับกระบวนการหมักกรดแลคติกจากเศษผลไม้แบบไร้อากาศ โดยแบคทีเรีย *Lactobacillus plantarum* สายพันธุ์ TISTR 926 ที่ให้ปริมาณผลผลิตสูงที่สุดสำหรับการศึกษาครั้งนี้ คือ อุณหภูมิการหมัก 35°C และค่าความเป็นกรดด่างเริ่มต้น 4.74, 6.81 และ 7.02 สำหรับเปลือกแตงโม ซังขนุน และแกนสับปะรด ตามลำดับ

5.2 อภิปรายผลการวิจัย

1. ส่วนประกอบของสับสเตรตที่ใช้ในการหมักกรดแลคติก

สับสเตรตที่ใช้ในการหมักกรดแลคติกในการศึกษาครั้งนี้ ได้แก่ เศษผลไม้ (เปลือกแตงโม ซังขนุน และแกนสับปะรด) โดยเปลือกแตงโมเป็นเศษผลไม้ที่มีค่าเฉลี่ยความเป็นกรดด่างและปริมาณความชื้นสูงที่สุด ซึ่งอาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ได้ผลผลิตกรดแลคติกต่ำกว่าเศษผลไม้อีก 2 ชนิด ส่วนเศษผลไม้ที่พบว่ามีปริมาณเฉลี่ยของค่าทีเคเอ็นสูงที่สุด คือ ซังขนุน (2.67 g/kg, SD = 0.21) สำหรับเศษผลไม้ที่มีปริมาณน้ำตาลทั้งหมดโดยเฉลี่ยสูงที่สุด คือ แกนสับปะรด (39.06 g/kg, SD = 4.62) ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่เหมาะสมสำหรับนำเข้าสู่กระบวนการหมักกรดแลคติกในครั้งนี้

2. ปริมาณผลผลิตกรดแลคติก (Lactic acid production) จากกระบวนการหมักเศษผลไม้แบบไร้อากาศ

จากการหมักเศษผลไม้เพื่อให้ได้ผลผลิตกรดแลคติกในการศึกษาครั้งนี้ พบว่า เปลือกแตงโมให้ค่าผลผลิตสูงสุดเมื่อทำการหมักเป็นระยะเวลา 4 วัน โดยมีค่าเท่ากับ 26 kg/ton wt substrate ภายใต้อุณหภูมิการหมัก 35°C และค่าความเป็นกรดด่างเริ่มต้น 4.74 อย่างไรก็ตาม เมื่อค่าความเป็นกรดด่างเริ่มต้นของการหมักเพิ่มขึ้น (7.25) ผลผลิตกรดแลคติกที่ได้มีปริมาณน้อยลง (แผนภูมิที่ 6) ในขณะที่ผลผลิตกรดแลคติกที่ได้จากการหมักซังขนุนมีค่าสูงกว่า (57 kg/ton wt substrate) เมื่อทำการหมักโดยมีค่าความเป็นกรดด่างเริ่มต้นสูงกว่า (6.81) ภายใต้อุณหภูมิการหมัก 35°C เช่นเดียวกัน โดยเมื่ออุณหภูมิการหมักสูงขึ้น (40°C) ประกอบกับค่าความเป็นกรดด่างลดลง (4.14) ผลผลิต

กรดแลคติกที่ได้มีค่าต่ำลง (แผนภูมิที่ 7) นอกจากนี้ จากผลการทดลอง พบว่า ผลผลิตกรดแลคติกที่ได้จากการหมักแกนสับปะรดมีค่าใกล้เคียงกับการหมักซังขนุน โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 56 kg/ton wt substrate เมื่อทำการหมักเป็นระยะเวลาเพียง 2 วัน ภายใต้อุณหภูมิการหมัก 35ºC และค่าความเป็นกรดด่างเริ่มต้น 7.02 (แผนภูมิที่ 8) เมื่ออุณหภูมิการหมักสูงขึ้น และค่าความเป็นกรดด่างเริ่มต้นน้อยลง ผลผลิตกรดแลคติกที่ได้มีค่าลดลง ซึ่งปริมาณผลผลิตกรดแลคติกสูงสุดที่ได้จากการหมักแกนสับปะรดในครั้งนี้ (10.9423 g/L) มีค่าสูงกว่าผลผลิตที่ได้จากงานวิจัยของ ธนพร วิชัย และ วรรัตน์ (2554) (1.41 g/L จากการหมักกากชานอ้อย) และมีค่าที่ใกล้เคียงกับปริมาณผลผลิตที่ได้จากงานวิจัยของ แพรวพรรณ ยุวเดชกุล และคณะ (2554) (10.21 g/L จากการหมักฟางข้าวและชานอ้อย) แต่มีค่าต่ำกว่าผลผลิตกรดแลคติกที่ได้จากงานวิจัยของ Jawad, A.H. et al. (2013) (17.484 g/L จากการหมักเปลือกมะม่วง)

เมื่อพิจารณาปริมาณผลผลิตกรดแลคติกที่ได้จากการหมักเศษผลไม้ทั้ง 3 ชนิด แล้ว พบว่า แกนสับปะรด เป็นเศษผลไม้ที่มีศักยภาพที่สุด และเหมาะที่จะนำมาเป็นสับสเตรตสำหรับการหมักเพื่อให้ได้ผลผลิตกรดแลคติกในปริมาณสูงโดยใช้ระยะเวลาหมักเพียง 2 วัน ทั้งนี้ ส่วนหนึ่งน่าจะมาจากปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่เป็นส่วนประกอบของแกนสับปะรด ที่มีปริมาณเพียงพอสำหรับกระบวนการแปรสภาพของแบคทีเรีย ซึ่งน้ำตาลโดยเฉพาะกลูโคส จัดเป็นแหล่งคาร์บอนที่ดีสำหรับการผลิตกรดแลคติก นอกจากนี้วิตามินต่าง ๆ ที่เป็นส่วนประกอบในแกนสับปะรด ยังมีส่วนช่วยในการเจริญเติบโตและการสร้างผลผลิตกรดแลคติกให้กับแบคทีเรียอีกด้วย (Litchfield, J.H. 2009)

3. ผลผลิตจำเพาะ (Specific Yield) ที่ได้จากการหมักเศษผลไม้แต่ละชนิด

ผลการคำนวณค่าผลผลิตจำเพาะ (Specific yield) ของกรดแลคติกที่ได้จากการหมักเศษผลไม้ที่มีส่วนประกอบของสารอินทรีย์ที่แตกต่างกัน ชี้ให้เห็นว่า ปริมาณสารอินทรีย์ที่เป็นส่วนประกอบในเศษผลไม้แต่ละชนิด (น้ำตาลในรูปต่าง ๆ เช่น กลูโคส ฟรุคโตส และไซโลส เป็นต้น) ถูกเปลี่ยนไปเป็นผลผลิตกรดแลคติกประมาณร้อยละ 40 โดยเปลือกแตงโมที่มีปริมาณของแข็งระเหย (Volatile solid; VS) เป็นส่วนประกอบต่ำที่สุด (ร้อยละ 5.15) มีปริมาณผลผลิตกรดแลคติกต่อปริมาณของแข็งระเหย เท่ากับ 18.5 gVS/L ส่วนซังขนุนและแกนสับปะรดมีปริมาณของแข็งระเหยสูงกว่า โดยมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 15.56 และร้อยละ 14.34 และมีปริมาณผลผลิตกรดแลคติกต่อปริมาณของแข็งระเหย เท่ากับ 31.1 และ 21.5 gVS/L ตามลำดับ ซึ่งจากข้อมูลที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ (สภาวะที่ใช้ในการหมัก และผลผลิตหลักที่เกิดขึ้น) เป็นส่วนสนับสนุนว่า การหมักครั้งนี้เป็นการหมักแบบโฮโมแลคติก (Homolactic Fermentation, สมการที่ 1)

$$C_6H_{12}O_6 \xrightarrow{\text{Homolactic Fermentation}} 2CH_3CHOHCOOH + 1ATP \qquad (1)$$

4. สภาวะที่มีผลต่อปริมาณผลผลิตกรดแลคติกจากกระบวนการหมักเศษผลไม้แบบไร้อากาศ

จากผลการศึกษาสภาวะที่มีผลต่อปริมาณผลผลิตกรดแลคติกจากกระบวนการหมักเศษผลไม้แบบไร้อากาศ (ค่าความเป็นกรดด่างเริ่มต้น และอุณหภูมิการหมัก) ชี้ให้เห็นว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการหมักมีผลต่อปริมาณผลผลิตกรดแลคติก เนื่องจากอุณหภูมิมีบทบาทสำคัญในการแสดงออกของเอ็นไซม์บางชนิดที่เกี่ยวข้องกับการผลิตกรด แลคติก เช่น เอ็นไซท์แลคแตทดีไฮโดรจิเนส (Lactate dehydro genase) โดยซังขนุนเป็นสับสเตรตที่แสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนที่สุดถึงผลของอุณหภูมิที่ใช้สำหรับการหมัก ซึ่งอุณหภูมิการหมักที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ คือ อุณหภูมิการหมักที่ 35°C (ภาพที่ 31) ทั้งนี้ อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับแบคทีเรีย *Lactobacillus plantarum* สายพันธุ์ TISTR 926 ซึ่งจัดเป็นแบคทีเรียในกลุ่มแฟคัลเททีฟ และเป็นแบคทีเรียที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ ที่ศูนย์เก็บรักษาและรวบรวมข้อมูลจุลินทรีย์ สถาบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย แนะนำให้ใช้ในการหมัก คือ อุณหภูมิ 30°C อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้ (35°C) มีค่าสูงกว่า แต่ยังคงอยู่ในช่วงอุณหภูมิสำหรับการเจริญเติบโตและการทำงานของแบคทีเรียในกลุ่มแฟคัลเททีฟ (Panesar, P.S. et al. 2007) ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 20-40°C (Idris, A., and Suzana, W., 2006) และมีค่าเท่ากับในงานวิจัยของ Jawad, A.H. et al. (2013)

สำหรับผลของค่าความเป็นกรดด่างเริ่มต้นที่ใช้ในการหมัก เมื่อใช้เปลือกแตงโมเป็นสับสเตรตในการหมัก ภายใต้อุณหภูมิการหมักต่าง ๆ ชี้ให้เห็นแนวโน้มว่า เมื่อค่าความเป็นกรดด่างเริ่มต้นสูงขึ้นปริมาณผลผลิตกรดแลคติกที่ได้ลดต่ำลง โดยเฉพาะที่อุณหภูมิการหมัก 35°C (ภาพที่ 30) ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีที่ระบุว่า ค่าความเป็นกรดด่างที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตและการทำงานของแบคทีเรียที่ใช้ในการหมักครั้งนี้ (*Lactobacillus plantarum* สายพันธุ์ TISTR 926) อยู่ในสภาวะที่เป็นกรด (pH = 4.5-6.5) (Liu, 2003) โดยเมื่อหมักในสภาวะที่ความเป็นกรดลดลง (pH ใกล้เคียง 7.0) หรือในสภาวะที่เป็นด่าง จะทำให้ได้ผลผลิตหลักชนิดอื่น เช่น กรดอะซีติก เป็นต้น อย่างไรก็ตาม จากการรายงานของ Wee et al. (2004) พบว่า *E. faecalis* RKY1 สามารถผลิตกรดแลคติกได้ในปริมาณสูงจากการใช้น้ำตาลกลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอนในสภาวะที่เป็นกลาง (พีเอช 7.0) ซึ่งปริมาณกรดแลคติกที่ได้ มีค่าใกล้เคียงกับปริมาณกรดแลคติกที่เลี้ยงในสภาวะที่เป็นกรด (พีเอช 6.0) (พัฒนา เหล่าไพบูลย์ และวิเชียร ลีลาวัชรมาศ. 2549) โดยในการศึกษาครั้งนี้ เมื่อใช้ซังขนุนและแกนสับปะรดเป็นสับสเตรตในการหมัก พบว่า ค่าความเป็นกรดด่างเริ่มต้น ไม่มีผลต่อปริมาณผลผลิตกรดแลคติกที่ได้ (ภาพที่ 31-32) อย่างไรก็ตาม ค่าความเป็นกรดด่างเริ่มต้นที่เหมาะสม

สำหรับการหมักในครั้งนี้ (6.81 สำหรับซังขนุน และ 7.02 สำหรับแกนสับปะรด) มีค่าสูงกว่าในงานวิจัยของ จงกล จริยกุล (2550) ที่พบว่า การผลิตกรดแลคติกจากเวย์โดยเชื้อ *Lactobacillus* casei TISTR 1341 เมื่อทำการหมักที่อุณหภูมิ 37°C ได้ผลผลิตกรดแลคติกภายใต้ค่าความเป็นกรดด่างเริ่มต้นที่ 6.5 แต่มีค่าต่ำกว่าในงานวิจัยของ Jawad, A.H. et al. (2013) ที่พบว่า การผลิตกรดแลคติกจากเปลือกมะม่วงโดยเชื้อจุลินทรีย์ เมื่อทำการหมักที่อุณหภูมิ 35°C ได้ผลผลิตกรดแลคติกสูงสุดภายใต้ค่าความเป็นกรดด่างเริ่มต้นที่ 10

5.3 ข้อเสนอแนะจากการวิจัย

1. ข้อเสนอแนะจากการวิจัยในครั้งนี้

ในการหมักเศษผลไม้เพื่อให้ได้ผลผลิตกรดแลคติก มีปัจจัยที่สำคัญ คือ ค่าความเป็นกรดด่างเริ่มต้นและอุณหภูมิที่ใช้ในการหมัก นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับชนิดของจุลินทรีย์ที่ใช้ในการหมักอีกด้วย โดยจุลินทรีย์ที่มีความเหมาะสม คือ แบคทีเรีย *Lactobacillus plantarum* สายพันธุ์ TISTR 926 และแกนสับปะรดเป็นสับสเตรตที่มีศักยภาพสำหรับการหมักแบบไร้อากาศเพื่อให้ได้ผลผลิตกรดแลคติกในปริมาณสูง ภายใต้อุณภูมิการหมัก 35°C และค่าความเป็นกรดด่างเริ่มต้น เท่ากับ 7.02

2. ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยครั้งต่อไป

ควรทำการศึกษาศักยภาพการหมักเพื่อให้ได้ผลผลิตกรดแลคติกจากสับสเตรตชนิดอื่น ๆ เพิ่มเติม เช่น เปลือกกล้วย เปลือกมะละกอ เปลือกมังคุด เป็นต้น หรือเลือกใช้สับสเตรต ประเภทเศษผลไม้ที่มีศักยภาพหลาย ๆ ชนิด เช่น แกนสับปะรดและเปลือกมะม่วง นำมาหมักรวมกันเพื่อเพิ่มปริมาณผลผลิตกรดแลคติกให้สูงขึ้น เพื่อให้เกิดประโยชน์ทั้งในเชิงสิ่งแวดล้อม และการประยุกต์ใช้ในเชิงอุตสาหกรรม