

## บทที่ 4

### สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตน้ำเชื่อมกลูโคสจากการย่อยกากมันสำปะหลัง โดยเน้นถึงการทำให้เกิดการย่อยแบ่งที่ตกค้างอยู่ในกากมันไปเป็นกลูโคสได้โดยสมบูรณ์ด้วยวิธีการต่าง ๆ ทั้งโดยการใช้กรดและใช้เอนไซม์ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพและหาสภาวะที่ดีที่สุดสำหรับการผลิต

สำหรับการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรด เป็นการใช้กรดร่วมกับความร้อนในการทำลายพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic bond) ระหว่างหน่วยกลูโคส ทำให้ลูกโซ่กลูโคสมีขนาดสั้นลง ดังนั้นจึงต้องควบคุมสภาวะการย่อยให้เหมาะสมเพื่อให้เกิดการย่อยเป็นน้ำตาลกลูโคสได้ปริมาณสูง โดยไม่เกิดผลิตภัณฑ์ที่ไม่พึงประสงค์หรือเกิดขึ้นได้เพียงเล็กน้อย ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการผลิตซึ่งได้ทำการศึกษาเพื่อควบคุมปัจจัยเหล่านั้นให้มีสภาวะที่เหมาะสมได้แก่

ชนิดของกรดต่อประสิทธิภาพการผลิต ซึ่งกรดที่นำมาใช้ในการศึกษามี 3 ชนิด คือ กรดซัลฟิวริก, กรดออกซาลิก และกรดซัลฟิวริก จากการทดลองพบว่า กรดซัลฟิวริกให้ประสิทธิภาพการผลิตต่ำที่สุด กรดซัลฟิวริกที่นำมาใช้ทดลองได้นำมาจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังโดยตรงจึงมีความเข้มข้นต่ำเพียง 0.05 โมลาร์ ทำให้ประสิทธิภาพของการผลิตกลูโคสจากการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดซัลฟิวริกเกิดขึ้นได้ไม่ดี แม้จะใช้กรดไปในปริมาณมากถึง 40 มล. ต่อกากมัน 5 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง โดยสังเกตจากน้ำเชื่อมที่ได้จากการทดลองยังมีลักษณะขุ่นขาวเป็นน้ำแป้ง เมื่อนำไปวิเคราะห์น้ำตาลกลูโคส พบว่ามีปริมาณต่ำมากเกิดการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล (Conversion) ได้เพียงร้อยละ 2.80 ของน้ำหนักกากมันเริ่มต้น ดังนั้นจึงทดลองเปลี่ยนชนิดของกรดที่ใช้ในการศึกษามาเป็นกรดออกซาลิกซึ่งเป็นกรดที่ยังคงใช้ในการย่อยแบ่งเพื่อผลิตกลูโคสอยู่ในปัจจุบัน และสามารถเตรียมให้มีความเข้มข้นสูงกว่ากรดซัลฟิวริกได้จึงน่าจะให้ประสิทธิภาพการผลิตที่ดี ซึ่งในการทดลองได้ทำการแปรความเข้มข้น 2.0, 1.0 และ 0.5 โมลาร์ ร่วมกับการแปรปริมาตร 40, 20 และ 10 มล. หากพิจารณาเฉพาะปริมาณกลูโคสที่มีในน้ำเชื่อม ผลผลิตกลูโคสที่ได้จะมีปริมาณต่ำ เนื่องจากในการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดออกซาลิกต้องผ่านขั้นตอนการปรับสภาพความเป็นกรดต่างด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต เป็นผลให้เกิดเกลือแคลเซียมออกซาลेटซึ่งละลายน้ำได้ยากเป็นตะกอนปนอยู่ในน้ำเชื่อม สามารถปั่นแยกออกไปได้

แต่จะสูญเสียกลูโคสบางส่วนไปกับตะกอนจึงต้องทำการล้างตะกอนเพื่อละลายกลูโคสที่เกาะอยู่ตามอนุภาคตะกอนให้มาละลายอยู่ในส่วนของน้ำล้าง เป็นการนำส่วนผลิตภัณฑ์ที่ตกค้างในกระบวนการผลิตให้ได้กลับคืน (recovery) ซึ่งการล้างตะกอนในงานทางเคมีวิเคราะห์มักจะใช้ของเหลวปริมาณน้อยแต่ล้างซ้ำหลายครั้ง แทนการใช้ของเหลวปริมาณมากที่ทำการล้างน้อยครั้ง (คุภชัย ใช้เทียมวงศ์, 2537) ดังนั้นจึงศึกษาจำนวนครั้งของการล้างที่เหมาะสม ต่อการล้างตะกอน แคลเซียมออกซาลาต และพบว่าจำนวนครั้งของการล้างตะกอนขึ้นกับความเข้มข้นของกรดออกซาลิกที่ใช้ ทำการล้างตะกอนไปจนกระทั่งความเข้มข้นของน้ำล้างตะกอนลดลงเหลือประมาณ 10 กรัมต่อลิตร จึงยุติการล้างตะกอน โดยสภาวะที่ทำให้เกิดการย่อยที่ดีทำให้น้ำเชื่อมกลูโคสเข้มข้นมาก เป็นผลให้กลูโคสตกค้างกับตะกอนมากขึ้นด้วย จึงต้องใช้จำนวนครั้งของการล้างเพิ่มขึ้น คือการย่อยด้วยกรดออกซาลิกเข้มข้น 2.0 และ 1.0 โมลาร์ ซึ่งให้ประสิทธิภาพของการผลิตกลูโคสที่ไม่ต่างกันมาก ใช้การล้างตะกอนที่เหมาะสมคือ 4 ครั้ง ส่วนกรด 0.5 โมลาร์ ใช้การล้างเพียง 2 ครั้งก็เพียงพอ และนอกจากนี้ยังพบว่าการใช้กรดออกซาลิก 2.0 โมลาร์ 40 มล. ในการย่อยโดยทำการล้างตะกอนที่เกิดขึ้น 4 ครั้งให้ผลผลิตกลูโคสได้สูงสุด ทำให้เกิดการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาลได้ร้อยละ 48.41 ของน้ำหนักกากเริ่มต้น แต่เนื่องจากกรดออกซาลิกละลายน้ำได้น้อยสามารถเตรียมให้มีความเข้มข้นได้สูงที่สุดเพียง 1.13 โมลาร์ ในการทดลองเตรียมให้กรดออกซาลิกมีความเข้มข้น 2.0 โมลาร์ ได้โดยการใช้ความร้อนเพื่อเพิ่มความสามารถในการละลายแล้วดำเนินการทดลองทันที จึงทำให้เกิดผลึกของกรดออกซาลิกปนอยู่กับกากมันหลังจากผ่านการย่อยและปล่อยให้เย็นตัวลง ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองกรดที่นำมาใช้ ดังนั้นจึงเลือกใช้สภาวะที่มีความเข้มข้นของกรดเหลือเพียง 1.0 โมลาร์ ปริมาตร 40 มล. ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาลได้ร้อยละ 41.53 ของกากมัน 5 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง โดยมีระดับความเข้มข้นที่ไม่เกินความสามารถในการละลายของมันทำให้ไม่เกิดผลึกของกรดส่วนเกิน เป็นสภาวะที่นำไปใช้ในการศึกษาถึงผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการย่อยต่อไป

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตของการย่อยกากมันลำปะหลังด้วยกรดออกซาลิกเข้มข้น 1.0 โมลาร์ ปริมาตร 40 มล. ภายใต้อุณหภูมิ 121 และ 115 องศาเซลเซียส พบว่าประสิทธิภาพของการย่อยที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เกิดขึ้นได้เร็วและมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าที่ 115 องศาเซลเซียส โดยปฏิบัติการให้ผลผลิตเริ่มคงที่ตั้งแต่เมื่อใช้ระยะเวลาในการย่อย 15 นาที ในขณะที่อุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียส จะเริ่มคงที่เมื่อใช้ระยะเวลาในการย่อย 60 นาที โดยทำให้เกิดการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาลได้ร้อยละ 40.77 และ 34.35 ตามลำดับ ซึ่งแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตกลูโคสด้วยกรดออกซาลิกอาจจะทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิในการย่อยให้

สูงกว่า 121 องศาเซลเซียส แต่ข้อจำกัดของการใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไป ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นและยังทำให้สารละลายจากการย่อยมีสีคล้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาบราวน์นิ่ง(Browning reaction)เพิ่มมากขึ้น ที่เป็นผลจากน้ำตาลรีดิวซ์ที่เกิดขึ้นทำปฏิกิริยากับกรดอะมิโนในแป้ง (Mayer, 1978) ซึ่งจากการทดลองก็ให้ผลที่สอดคล้องกันคือสีของน้ำเชื่อมกลูโคสที่ได้จากการย่อยกากมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เข้มกว่าน้ำเชื่อมจากการย่อยที่ 115 องศาเซลเซียส ดังนั้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตกลูโคสโดยหลีกเลี่ยงการย่อยที่ต้องใช้อุณหภูมิสูงเกินกว่า 121 องศาเซลเซียส จึงพิจารณานำกรดชนิดอื่นมาใช้ในการศึกษาแทนการใช้กรดออกซาลิก

จากงานวิจัยของ Srikanta และคณะ (1987) ที่รายงานถึงการย่อยแป้งในกากมันสำปะหลังไปเป็นน้ำตาลรีดิวซ์ได้อย่างสมบูรณ์ ด้วยการใช้กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 4 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ดังนั้นจึงนำกรดซัลฟิวริกมาใช้ในการศึกษาแทนการใช้กรดออกซาลิก

ในการนำกรดซัลฟิวริกมาใช้ในการย่อยกากมันสำปะหลัง ซึ่งคาดว่าจะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าการใช้กรดออกซาลิกโดยใช้กรดซัลฟิวริกคุณภาพ เกรดวิเคราะห์ ที่มีการแปรระดับความเข้มข้นร่วมกับปริมาตร พบว่าจำนวนครั้งของการล้างตะกอนแคลเซียมซัลเฟตแตกต่างไปจากการล้างตะกอนแคลเซียมออกซาลาเลท เนื่องจากกรดซัลฟิวริกเป็นกรดแก่แตกตัวได้ดีในน้ำจึงให้ประสิทธิภาพการย่อยที่ดีกว่าดังที่คาดไว้ จึงมีผลต่อการล้างตะกอน คือ เมื่อการย่อยเกิดขึ้นได้ดี ทำให้ได้กลูโคสเพิ่มขึ้น ปริมาณกลูโคสที่ตกค้างรวมอยู่กับตะกอนจึงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าที่ระดับความเข้มข้นกรด 1.0 โมลาร์ ให้ประสิทธิภาพการผลิตกลูโคสได้สูงกว่าการใช้กรด 2.0 และ 0.16 โมลาร์ เมื่อใช้ปริมาตรกรดเท่ากัน เนื่องจากการย่อยด้วยกรดที่มีความเข้มข้นต่ำเกินไป ทำให้เกิดการย่อยได้ไม่สมบูรณ์ผลผลิตกลูโคสที่เกิดขึ้นจึงมีปริมาณน้อย แต่ในทางตรงกันข้ามการใช้กรดที่มีความเข้มข้นสูงเกินไป ทำให้เกิดการย่อยในสภาวะที่รุนแรงเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงได้สารที่มีสีเข้มและมีรสขม กลูโคสที่ได้จึงมีปริมาณลดลงและพบว่าสีของน้ำเชื่อมที่เกิดขึ้นจากกรด 2.0 โมลาร์ มีสีเข้มกว่าน้ำเชื่อมที่ได้จากการย่อยด้วยกรดที่มีความเข้มข้น 1.0 และ 0.16 โมลาร์ และที่ระดับความเข้มข้นเท่ากัน ปริมาตรของกรดก็เป็นส่วนที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการผลิตด้วยเช่นกัน คือ การย่อยด้วยกรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้น 2.0 โมลาร์ การเพิ่มปริมาตรกรดกลับทำให้ประสิทธิภาพของการผลิตลดลง เพราะกรดที่มีความเข้มข้นสูงเกินไป การเพิ่มปริมาตรกรดที่ใช้ขึ้นไปอีกเป็นผลให้เนื้อกรดในระบบมีมากเกินไป ทำให้เกิดการย่อยไปเป็นสารที่มีสีเข้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่การย่อยด้วยกรดที่มีความเข้มข้น 1.0 และ 0.16 โมลาร์ การเพิ่มปริมาตรกรดที่ใช้เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต โดยประสิทธิภาพสูงสุดได้จากการย่อยด้วยกรดที่มีความ

เข้มข้น 1.0 โมลาร์ ปริมาตร 40 มล. ให้ร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาล 71.76 เปอร์เซ็นต์ แต่ความเข้มข้นของน้ำเชื่อมกลูโคสที่เกิดขึ้นเพียง 91.93 กรัมต่อลิตร เจือจางเกินไป เนื่องจากผลิตภัณฑ์น้ำเชื่อมกลูโคสที่ต้องการควรจะมีเข้มข้นไม่น้อยกว่า 120 กรัมต่อลิตร การใช้กรดที่มีปริมาณมากเกินไปจึงเป็นส่วนที่ไปเจือจางน้ำเชื่อมกลูโคส ทำให้มีความเข้มข้นลดลง ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานและค่าใช้จ่ายในการระเหยน้ำออกไปเพื่อให้ น้ำเชื่อมกลูโคสเข้มข้นขึ้น ดังนั้นจึงพิจารณาสภาวะของการย่อยเมื่อใช้ปริมาณของกรดลดลง ซึ่งทำให้ได้น้ำเชื่อมกลูโคสที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นได้ โดยสภาวะที่จะนำไปใช้ในการศึกษาผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการย่อยต่อไป จึงเลือกใช้กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์ ปริมาตร 10 มล. ซึ่งเป็นสภาวะที่ใช้ปริมาณกรดในการย่อยน้อยที่สุด และทำให้ได้น้ำเชื่อมกลูโคสเข้มข้น 157.80 กรัมต่อลิตร เกิดการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาลได้ร้อยละ 59.79 ของน้ำหนักกากมันเริ่มต้น

สำหรับการผลิตน้ำเชื่อมกลูโคสจากการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรด พบว่ากรดซัลฟิวริกเป็นกรดที่ให้ประสิทธิภาพการผลิตได้ดีที่สุด โดยกรดซัลฟิวริกที่นำมาใช้ในการศึกษาเป็นกรดที่มีคุณภาพระดับ เกรดวิเคราะห์ ซึ่งมีความบริสุทธิ์สูงและราคาค่อนข้างแพง เพื่อหาแนวทางการลดต้นทุนการผลิตลง จึงได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการผลิตด้วยการนำกรดซัลฟิวริกคุณภาพเกรดทางการค้า ที่มีราคาถูกกว่ามาใช้ทดแทน พบว่าที่สภาวะของการย่อยเช่นเดียวกันนั้นคุณภาพของกรดไม่ได้ทำให้ประสิทธิภาพการผลิตแตกต่างกัน โดยระดับความเข้มข้นและปริมาณกรดซัลฟิวริก เกรดทางการค้า ที่เหมาะสมสำหรับการย่อยกากมันให้ผลที่สอดคล้องกับผลของการย่อยด้วยกรดซัลฟิวริก เกรดวิเคราะห์ คือ ที่ระดับความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ ปริมาตร 10 มล. ได้น้ำเชื่อมกลูโคสเข้มข้น 159.83 กรัมต่อลิตร ทำให้เกิดการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาลได้ร้อยละ 56.88 ของน้ำหนักกากมันเริ่มต้น ดังนั้นจึงเลือกกรดซัลฟิวริก เกรดทางการค้า ที่สภาวะดังกล่าวมาใช้แทน เกรดวิเคราะห์ เพื่อทำการศึกษาถึงปัจจัยอีก 2 ชนิดที่มีผลต่อการผลิต คือ อุณหภูมิ และระยะเวลาในการย่อยต่อไป

ในการศึกษาอุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการย่อยกากมันสำปะหลังที่มีการแปรอุณหภูมิเป็น 4 ระดับ คือ 100, 110, 115 และ 121 องศาเซลเซียส พบว่าระยะเวลาที่ทำให้ปฏิกิริยาของการย่อยดำเนินไปจนสมบูรณ์ขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้ คือ การย่อยที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาเกิดได้ช้ามาก แม้จะให้ปฏิกิริยาดำเนินไปจนครบ 90 นาทีแต่ยังไม่มีแนวโน้มว่าปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ การเพิ่มระยะเวลาในการย่อยต่อไปจะทำให้ผลผลิตกลูโคสเพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ผลผลิตกลูโคสจะเริ่มคงที่เมื่อใช้ระยะเวลาในการย่อยประมาณ 60 นาที ส่วนที่ 115 และ 121 องศาเซลเซียส ผลผลิตกลูโคสเริ่มคงที่เมื่อใช้ระยะเวลา

ในการย่อย 30 นาทีเท่ากัน ซึ่งการเปรียบเทียบอัตราเร็วของปฏิกิริยาด้วยวิธีดังกล่าวไม่มีมาตรฐานที่แน่นอน จึงได้นำทฤษฎีทางจลนพลศาสตร์มาใช้ในการคำนวณเพื่อหาค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยา ซึ่งเป็นค่าบ่งชี้ถึงอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาที่เป็นสากล เป็นที่ยอมรับและยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการทำนายผลการทดลองและควบคุมปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ จากการคำนวณสามารถหาค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 100, 110 และ 115 องศาเซลเซียส มีค่า 0.0458, 0.0581 และ 0.0599 (นาที)<sup>-1</sup> ตามลำดับ ส่วนที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาดำเนินไปเร็วมากจึงไม่สามารถติดตามผลให้มีความละเอียดได้เพียงพอจะนำมาใช้ในการคำนวณพบว่าค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาจากการคำนวณตามทฤษฎีสอดคล้องกับผลการทดลอง คือ ถ้าค่าคงที่อัตราเร็วมีค่ามาก หมายถึง ปฏิกิริยาเกิดขึ้นเร็ว นั่นคือ ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เร็วที่อุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียส รองลงมาคือ 110 องศาเซลเซียส และที่ 100 องศาเซลเซียส เกิดได้ช้าที่สุด ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีการชนทางจลนพลศาสตร์ คือ ปฏิกิริยาเคมีจะเกิดขึ้นได้เมื่อโมเลกุลของสารที่เข้าทำปฏิกิริยาเกิดการชนกันในทิศทางที่เหมาะสมและมีพลังงานเพียงพอแก่การเกิดปฏิกิริยา ที่เรียกว่า “การชนที่มีผล” (effective collision) ซึ่งที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ โมเลกุลของสารจะมีพลังงานต่าง ๆ กัน มีโมเลกุลสารเพียงบางส่วนที่มีพลังงานสูงพอจะเกิดปฏิกิริยาได้เมื่อเกิดการชน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นโมเลกุลจะถูกกระตุ้นให้มีพลังงานและความถี่ของการชนเพิ่มขึ้น จึงทำให้โอกาสของการเกิดการชนที่มีผลมีมากขึ้น เป็นผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาและค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาสูงขึ้นตามไปด้วย และจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยากับอุณหภูมิสามารถนำมาคำนวณค่าพลังงานกระตุ้น (activation energy) ของการเกิดปฏิกิริยาด้วยสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) ได้เท่ากับ 22.55 KJ/mol

การที่สภาวะของการย่อยขึ้นกับปัจจัยหลายอย่างประกอบกัน นอกจากอุณหภูมิที่มีผลต่ออัตราเร็วของการย่อยแล้ว การใช้ความเข้มข้นกรดเพิ่มขึ้นก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ช่วยเร่งให้ปฏิกิริยาการย่อยเกิดเร็วขึ้นได้ ซึ่งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส การย่อยกากมันด้วยกรดซัลฟิวริก 1.0 โมลาร์ ปริมาตร 10 มล. ดำเนินไปช้ามาก หากเพิ่มความเข้มข้นกรดขึ้นเป็น 2.0 โมลาร์ อาจจะช่วยเร่งปฏิกิริยาให้เกิดเร็วขึ้น และประสิทธิภาพการผลิตสูงขึ้นได้โดยใช้อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งผลจากการศึกษานี้พบว่า แม้ประสิทธิภาพการผลิตโดยใช้กรดเข้มข้น 2.0 โมลาร์ จะดีกว่าการใช้กรด 1.0 โมลาร์ ภายใต้สภาวะเดียวกัน แต่ประสิทธิภาพการผลิตดังกล่าวยังคงต่ำกว่าการย่อยด้วยกรด 1.0 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 110, 115 และ 121 องศาเซลเซียส ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการย่อยกากมันสำปะหลัง 5 กรัมโดยน้ำหนักแห้งด้วยกรดซัลฟิวริก 1.0 โมลาร์ ปริมาตร 10 มล. จึงควรจะทำการย่อยที่อุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ซึ่งผล

ผลิตกลูโคสประมาณ 2633.61 มก. หรือเกิดการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาลได้ร้อยละ 52.67 ของน้ำหนักกากมันเริ่มต้น 5 กรัม แต่จากผลการทดลองที่ 3.1.3.4 พบว่าน้ำเชื่อมกลูโคสจากการย่อยที่ 115 องศาเซลเซียส มีความเข้มข้นสูงกว่าที่ได้จากการย่อยที่ 110 และ 121 องศาเซลเซียส เนื่องจากกากมันที่ใช้อยู่เดิมนั้นหมดไป จึงนำกากมันรุ่น (lot) ใหม่มาทำการย่อยที่ 115 องศาเซลเซียส และการที่กากมันที่นำมาใช้แต่ละรุ่นมีความชื้นไม่เท่ากัน จากการวิเคราะห์ (ภาคผนวก ข.) พบว่ามีปริมาณความชื้นอยู่ระหว่าง 70-78 เปอร์เซ็นต์ แต่การนำมาใช้ในการทดลอง ได้มีการควบคุมปริมาณกากมันเท่ากับน้ำหนักแห้ง 5 กรัมในทุกการทดลอง หากกากมันมีความชื้นสูง ปริมาณน้ำในกากมันจึงเป็นส่วนที่เข้าไปเจือจางน้ำเชื่อมที่ผลิตขึ้น ความเข้มข้นของน้ำเชื่อมที่ได้จึงน้อย และในทางกลับกันกากมันรุ่นใดมีความชื้นน้อยก็จะทำให้ได้น้ำเชื่อมที่เข้มข้น แต่เมื่อพิจารณาโดยรวม ในส่วนของผลผลิตกลูโคสที่เกิดขึ้น หรือร้อยละของการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาลแล้วจะมีค่าไม่แตกต่างกัน เพราะกากมันที่เป็นสารตั้งต้นถูกควบคุมไว้ให้มีปริมาณเท่ากัน

จากการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรด และควบคุมปัจจัยเหล่านั้นให้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสมแก่การผลิตได้ ดังนั้นจึงทำการศึกษาประสิทธิภาพของการผลิตเมื่อเพิ่มปริมาณการผลิตขึ้น 25 เท่าของการศึกษาในสภาวะต้นแบบ คือที่สภาวะต้นแบบใช้กากมัน 5 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณการผลิตเป็น 125 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง ทำการย่อยด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์เท่าเดิม แต่เพิ่มปริมาตรกรดที่ใช้เป็นสัดส่วนกับกากมัน คือ กากมัน 5 กรัมต่อกรด 10 มล. จึงใช้กากมัน 125 กรัมต่อกรด 250 มล. ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพการผลิตที่ได้ยังใกล้เคียงกับการผลิตในสภาวะต้นแบบเกิดการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาลได้ร้อยละ 49.25 ของน้ำหนักกากมันเริ่มต้น ดังนั้นจึงสามารถผลิตน้ำเชื่อมกลูโคสจากการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดภายใต้สภาวะดังกล่าว และนำน้ำเชื่อมไปใช้ประโยชน์ได้จริง เนื่องจากสามารถผลิตได้ในปริมาณที่เพียงพอจะนำไปใช้ได้ ซึ่งแต่ละครั้งของการย่อยจะได้น้ำเชื่อมกลูโคสเข้มข้น 123.56 กรัมต่อลิตร ประมาณ 392 มล. โดยความเข้มข้นและปริมาตรน้ำเชื่อมอาจแปรผันได้ขึ้นกับปริมาณความชื้นของกากมันสด

เนื่องจากยังไม่พบรายงานถึงการผลิตน้ำเชื่อมกลูโคสโดยการใช้เอนไซม์ในการย่อยกากมันสำปะหลัง ดังนั้นในงานวิจัยนี้ที่เน้นถึงการย่อยแบ่งที่ตกค้างอยู่ในกากมันไปเป็นน้ำตาลกลูโคส จึงต้องนำสภาวะรวมถึงชนิดของเอนไซม์ที่ใช้ย่อยแบ่งอยู่ในโรงงานอุตสาหกรรมในปัจจุบัน มาใช้เป็นสภาวะต้นแบบของการศึกษา โดยใช้เอนไซม์ BAN ซึ่งเป็นชื่อทางการค้าของเอนไซม์อะไมเลสที่ผลิตจากเชื้อ *Bacillus subtilis* ในการทำให้เกิดลิเคอแฟชัน (liquefaction) เพื่อให้

เกิดการย่อยแบ่งอย่างสุ่ม จากนั้นจึงใช้เอนไซม์ SPEZYME ซึ่งเป็นชื่อทางการค้าของเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดสที่ผลิตจากเชื้อ *Aspergillus niger* มาทำให้เกิดแซคคาริฟิเคชัน (saccharification) เพื่อให้แบ่งถูกย่อยต่อไปจนสมบูรณ์ การวัดประสิทธิภาพของการย่อยแบ่งในขั้นตอนการเกิดลิเคอแฟคชันด้วยเอนไซม์อะไมเลส บ่งบอกได้ด้วยค่าสมมูลเดกซ์โทรส (Inglett, 1974) ซึ่งเป็นค่าที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการเกิดแซคคาริฟิเคชันต่อไป เพราะค่าสมมูลเดกซ์โทรสที่พอเหมาะจึงจะทำให้เกิดการย่อยลูกโซ่กลูโคสของแป้งไปเป็นหน่วยกลูโคสได้สมบูรณ์ โดยการย่อยแบ่งเพื่อผลิตกลูโคสทางการค้านิยมใช้น้ำแป้งที่มีค่า DE ประมาณ 8-12 ที่ได้จากการย่อยแบ่งด้วยเอนไซม์อะไมเลสที่อุณหภูมิ 90-100 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 1-2 ชั่วโมง (Chaplin and Bucke, 1990) โดยมีสภาวะของการย่อยขึ้นกับแหล่งของเอนไซม์ที่นำมาใช้ แต่เนื่องจากกากมันสำปะหลังมีองค์ประกอบ ที่แตกต่างจากแป้งมันทำให้มีสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการย่อยต่างไปจากการย่อยแป้ง จึงได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเอนไซม์ BAN กับระยะเวลาใช้ในการย่อยกากมันต่อค่าสมมูลเดกซ์โทรสเริ่มต้น จากผลของการศึกษาพบว่า ค่าสมมูลเดกซ์โทรสแปรผันตามปริมาณเอนไซม์และระยะเวลาในการย่อย โดยสามารถแบ่งค่าสมมูลเดกซ์โทรสออกเป็นช่วง ๆ ตามปริมาณเอนไซม์ที่ใช้ คือ ค่าระหว่าง 20-29 ได้จากการใช้เอนไซม์ 250 หน่วย , ค่าระหว่าง 28-33 ได้จากเอนไซม์ 500 หน่วย ส่วนการใช้เอนไซม์ 750 และ 1000 หน่วย ให้ช่วงของค่าสมมูลเดกซ์โทรสใกล้เคียงกัน คือ อยู่ในช่วงประมาณ 34-45

จากการศึกษาเพื่อหาค่าสมมูลเดกซ์โทรสของกากมันสำปะหลังที่เหมาะสมต่อการเกิดแซคคาริฟิเคชัน โดยเตรียมกากมันที่ผ่านขั้นตอนการทำให้เกิดลิเคอแฟคชันด้วยเอนไซม์ BAN ให้มีค่าสมมูลเดกซ์โทรสเริ่มต้นเท่ากับ 28, 30 และ 33 มาทำการย่อยต่อด้วยเอนไซม์ SPEZYME ที่มีค่าสมมูลเดกซ์โทรสเริ่มต้นเท่ากับ 300 และ 1500 หน่วย เนื่องจากในการศึกษานี้ยังไม่ทราบปริมาณเอนไซม์ SPEZYME ที่ทำให้เกิดแซคคาริฟิเคชันได้สมบูรณ์ ดังนั้นการใช้เอนไซม์ปริมาณต่ำเกินไปจะไม่สามารถสรุปได้ว่าประสิทธิภาพของการผลิตกลูโคสที่เกิดขึ้นไม่ดีนั้นเป็นผลจากค่าสมมูลเดกซ์โทรสที่ไม่เหมาะสมหรือเอนไซม์ SPEZYME ที่ใช้ปริมาณน้อยเกินไป จึงแปรปริมาณเอนไซม์ SPEZYME ที่ใช้เป็น 2 ระดับ เพื่อดูความแตกต่างของผลที่เกิดขึ้น พบว่าเมื่อใช้ปริมาณเอนไซม์ SPEZYME เท่ากัน การย่อยกากมันที่มีค่าสมมูลเดกซ์โทรสเท่ากับ 30 และ 33 ให้ประสิทธิภาพการผลิตที่พิจารณาจากค่าร้อยละของกลูโคสใกล้เคียงกัน ส่วนกากมันที่มีค่าสมมูลเดกซ์โทรสเท่ากับ 28 ให้ประสิทธิภาพการผลิตได้ต่ำที่สุด ซึ่งเมื่อเพิ่มปริมาณเอนไซม์ SPEZYME ที่ใช้มากขึ้นสามารถทำให้ประสิทธิภาพการผลิตเพิ่มขึ้นได้ และการย่อยกากมันที่มีค่าสมมูลเดกซ์โทรส 28 ที่เพิ่มปริมาณเอนไซม์ SPEZYME ที่ใช้จาก 300 เป็น 1500 หน่วย แม้จะให้ค่าร้อยละของกลูโคส

สูงขึ้น แต่ก็ยังต่ำกว่าการย่อยกากมันที่มีค่าสมมูลเดกซ์โทรส 30 และ 33 ที่ใช้เอนไซม์ SPEZYME เพียง 300 หน่วย ซึ่งแสดงว่าค่าสมมูลเดกซ์โทรสมีผลอย่างยิ่งต่อประสิทธิภาพของการผลิต ดังนั้น ค่าสมมูลเดกซ์โทรสของกากมันสำปะหลังที่เหมาะสม สำหรับที่จะนำไปย่อยให้เกิดแซคคาริฟิเคชันต่อไปจนสมบูรณ์ ด้วยเอนไซม์ SPEZYME จึงควรมีค่าประมาณ 30 ซึ่งแตกต่างไปจากค่าสมมูลเดกซ์โทรสที่เหมาะสมสำหรับการย่อยแป้งเพื่อผลิตกลูโคสที่มีค่าประมาณ 8-12 (Chaplin and Bucke, 1990)

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดแซคคาริฟิเคชันของกากมันสำปะหลังนอกจากจะขึ้นกับค่าสมมูลเดกซ์โทรสที่เป็นผลจากการเกิดลิเคอแฟคชันแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นเนื่องมาจากปริมาณเอนไซม์ SPEZYME ที่นำมาใช้ จะต้องมียุทธศาสตร์ที่เพียงพอต่อการย่อยเพื่อให้เกิดแซคคาริฟิเคชันต่อไปได้จนสมบูรณ์ ดังนั้นจึงทำการศึกษายุทธศาสตร์ปริมาณเอนไซม์ SPEZYME ที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ โดยเตรียมกากมันสำปะหลังให้มีค่าสมมูลเดกซ์โทรสจากการเกิดลิเคอแฟคชันประมาณ 30 มาทำการย่อยด้วยเอนไซม์ SPEZYME ที่มีการแปรปริมาณเป็น 300, 450 และ 600 หน่วย ซึ่งในการทดลองนี้ได้เพิ่มการเขย่าระหว่างการเกิดปฏิกิริยา เพื่อให้เอนไซม์คลุกเคล้าเป็นเนื้อเดียวกับกากมันสำปะหลังได้เร็วขึ้น จึงพบว่าปฏิกิริยาของการย่อยด้วยเอนไซม์เกิดได้เร็วขึ้น ผลผลิตกลูโคสของการย่อยกากมันที่มีการแปรปริมาณเอนไซม์ทั้ง 3 ระดับ มีปริมาณไม่แตกต่างกันและเริ่มคงที่เมื่อให้เกิดการย่อยไปเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดังนั้นจึงแปรปริมาณเอนไซม์ SPEZYME ที่ใช้ลดลงเป็น 75, 150 และ 300 หน่วย เพื่อศึกษายุทธศาสตร์ปริมาณเอนไซม์ที่น้อยที่สุดที่สามารถทำให้เกิดการย่อยได้อย่างสมบูรณ์ แต่การศึกษาในคราวนี้ได้ปรับปรุงวิธีการปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างของกากมันตามวิธีการทดลองข้อ 2.1.3.2 ซึ่งช่วยปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างได้ทั่วถึงกันได้ดีกว่าวิธีการเช่นเดิม จึงทำให้ได้ประสิทธิภาพการผลิตที่สูงขึ้น เพราะเอนไซม์เป็นสารจำพวกโปรตีนทำงานได้ดีในสภาวะที่สภาพความเป็นกรด-ด่างที่พอเหมาะ และจะถูกยับยั้งการทำงานหรือสูญเสียสภาพไปได้ เมื่ออยู่ในสภาวะที่ไม่เหมาะสม โดยเฉพาะเอนไซม์ BAN เป็นเอนไซม์อะไมเลสที่ทำหน้าที่ย่อยแป้งซึ่งเป็นคาร์โบไฮเดรตโมเลกุลใหญ่ มีหน่วยของกลูโคสเกาะกันเป็นสายยาวให้มีขนาดเล็กลงเป็นหน่วยกลูโคสสายสั้น ๆ ละลายในน้ำ เมื่อเอนไซม์ BAN อยู่ในสภาวะที่เหมาะสมทำให้สามารถย่อยแป้งที่เกาะอยู่ตามเส้นใยของกากมันได้ดีและให้ผลผลิตกลูโคสสูงขึ้น ซึ่งผลจากการศึกษาพบว่าปริมาณเอนไซม์ SPEZYME 75 และ 150 หน่วย ทำให้การย่อยดำเนินไปได้ช้ากว่าและให้ประสิทธิภาพของการผลิตได้ต่ำกว่าการใช้เอนไซม์ 300 หน่วย ดังนั้นเอนไซม์ SPEZYME 300 หน่วย จึงเป็นปริมาณที่เพียงพอแก่การย่อยกากมันสำปะหลัง 5 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง ที่ผ่านขั้นตอนการเกิดลิเคอแฟคชันด้วยเอนไซม์ BAN จนมีค่าสมมูลเดกซ์โทรสเท่ากับ 30



โดยมีระยะเวลาในการย่อยที่เหมาะสมคือ 24 ชั่วโมง ได้ผลผลิตกลูโคสสุทธิ 2832.69 มก. หรือเกิดการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาลได้ร้อยละ 56.65 ได้น้ำเชื่อมกลูโคสที่มีความเข้มข้น 54.45 กรัมต่อลิตร

การที่กากมันสำปะหลังมีองค์ประกอบส่วนใหญ่คือ แป้งและเส้นใย (Grace, 1977) ในการที่จะย่อยแป้งที่มีอยู่ในกากมันไปเป็นน้ำตาลกลูโคสให้ได้สมบูรณ์จึงมีสภาวะที่แตกต่างไปจากการย่อยแป้งตามปกติ ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากเส้นใยที่มีอยู่เป็นอุปสรรคต่อการย่อย คือ เป็นส่วนที่ดูดซับเอนไซม์ไว้ทำให้เอนไซม์ไม่สามารถเร่งปฏิกิริยาของการย่อยแป้งได้อย่างเต็มที่ จึงเป็นการสิ้นเปลืองเนื่องจากเอนไซม์มีราคาแพง ในการศึกษาเพื่อหาแนวทางลดปริมาณเอนไซม์ที่ใช้ลง จึงย่อยกากมันสำปะหลังให้เกิดลิเคอแฟคชันจนมีค่าสมมูลเดกซ์โทรสประมาณ 30 และแยกเอาเฉพาะส่วนสารละลายจากการย่อย (liquor) มาย่อยให้เกิดแซคคาริฟิเคชันต่อไปด้วยเอนไซม์ SPEZYME ซึ่งคาดว่าจะทำให้สิ้นเปลืองเอนไซม์ SPEZYME ลดลง เมื่อเปรียบเทียบผลผลิตกลูโคสจากการย่อย liquor ที่มีการแปรปริมาณเอนไซม์ SPEZYME ที่ใช้เท่ากับ 150, 240 และ 600 หน่วย พบว่าให้ผลไม่แตกต่างกัน คือ ให้ผลผลิตกลูโคสได้สูงสุดเมื่อใช้เวลาในการย่อย 72 ชั่วโมง ประมาณ 1500 มก. ซึ่งต่ำกว่าที่ได้จากการย่อยกากมันที่ไม่แยกส่วนกากกับ liquor ออกจากกัน คาดว่าน่าจะเกิดจาก liquor ที่นำมาย่อยต่อไปมีส่วนของแป้งที่ถูกย่อยให้ละลายอยู่ในน้ำใส่น้อย ยังมีแป้งบางส่วนตกค้างอยู่กับกากมันส่วนที่ถูกแยกออกไป หากใช้ระยะเวลาในการเกิดลิเคอแฟคชันด้วยเอนไซม์ BAN นานขึ้น น่าจะช่วยให้เกิดการย่อยแป้งที่ยังเหลือในน้ำให้ละลายอยู่ใน liquor ได้มากขึ้น นอกจากนี้การย่อยกากมันที่ไม่แยกส่วนกากกับ liquor ออกจากกันให้ประสิทธิภาพของการเกิดแซคคาริฟิเคชันได้ดีกว่า น่าจะเป็นผลจากการทำงานของเอนไซม์ BAN ที่ยังคงทำงานต่อไปได้ที่สภาวะซึ่งเหมาะกับการทำงานของเอนไซม์ SPEZYME ที่มีสภาพความเป็นกรด-ด่างประมาณ 4.3-4.5 แต่เอนไซม์ BAN จะถูกยับยั้งการทำงานเมื่อมีสภาพความเป็นกรด-ด่างต่ำกว่า 4 จึงทำให้เอนไซม์ BAN สามารถย่อยแป้งต่อไปร่วมกับการทำงานของเอนไซม์ SPEZYME ซึ่งปฏิกิริยาจะเริ่มคงที่เมื่อให้ปฏิกิริยาดำเนินไปเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดังนั้นในการเตรียม liquor เพื่อให้เอนไซม์ BAN ทำงานได้อย่างเต็มที่จึงเพิ่มระยะเวลาของการเกิดลิเคอแฟคชันจาก 40 นาทีเป็น 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำ liquor ที่ได้ไปทำการย่อยต่อด้วยเอนไซม์ SPEZYME ต่อไป

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณผลผลิตกลูโคสที่ได้จากการย่อย liquor ด้วยเอนไซม์ SPEZYME 25 และ 75 หน่วย พบว่าการใช้เอนไซม์ 75 หน่วยให้ ประสิทธิภาพการผลิตกลูโคสที่ดีกว่า และปฏิกิริยาดำเนินไปได้เร็วกว่าการใช้เอนไซม์ 25 หน่วย โดยปฏิกิริยาของการเกิดแซคคาริฟิเคชันด้วยเอนไซม์ SPEZYME เริ่มคงที่เมื่อให้ปฏิกิริยาดำเนินไป 12 ชั่วโมง ได้ผลผลิตกลูโคส 2258.23

มก. หรือเกิดการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาลได้ร้อยละ 45.16 ของน้ำหนักกากมันสำปะหลังเริ่มต้น และเมื่อปรับปรุงวิธีการปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างของกากมันสำปะหลังเพื่อให้ผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีขึ้นตามวิธีการทดลองข้อ 2.1.3.2 โดยแปรปริมาณเอนไซม์ SPEZYME ที่ใช้ย่อย liquor เพิ่มขึ้นเป็น 75 , 150 และ 300 หน่วย พบว่าการใช้เอนไซม์ 150 และ 300 หน่วย ทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปได้เร็วกว่าการใช้เอนไซม์ 75 หน่วย โดยปฏิกิริยาเริ่มคงที่เมื่อให้เกิดแซคคาไรฟิเคชันไปเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ส่วนปฏิกิริยาของการใช้เอนไซม์ 75 หน่วย จะเริ่มคงที่เมื่อทำการย่อยไปเป็นเวลา 12 ชั่วโมง แต่ผลผลิตกลูโคสที่เกิดขึ้นจากทั้ง 3 สภาวะมีปริมาณไม่แตกต่างกัน คือ ได้ผลผลิตกลูโคส 2506.92 , 2565.04 และ 2606.92 มก. หรือเกิดการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาลได้ร้อยละ 50.14 , 51.30 และ 52.13 ของน้ำหนักกากมันสำปะหลังเริ่มต้นที่นำมาใช้ ตามลำดับ ดังนั้นสภาวะสำหรับการย่อย liquor 50 มล. จึงเป็นการใช้เอนไซม์ SPEZYME 75 หน่วยเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ซึ่งเป็นสภาวะที่ใช้เอนไซม์ปริมาณน้อยที่สุดทำให้ได้ปริมาณกลูโคสสุทธิ 2506.92 มก. หรือเท่ากับเกิดการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาลได้ 50.14 เปอร์เซ็นต์

แม้ว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์จะให้ประสิทธิภาพการผลิตที่ดี คือ เกิดการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาลได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 ของน้ำหนักกากมันเริ่มต้น แต่น้ำเชื่อมกลูโคสจากการผลิตกลับมีความเข้มข้นต่ำจึงหาแนวทางในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำเชื่อมให้มีความเข้มข้นสูงขึ้น จากการทดลองที่ผ่านมาเป็นการใช้อัตราส่วนระหว่างกากมันกับปริมาณน้ำที่เติมเท่ากับ 5 กรัม ต่อน้ำ 50 มล. ซึ่งคาดว่าเป็นอัตราส่วนที่ไม่เหมาะสม คือ มีปริมาณน้ำที่สูงเกินไปจึงเจือจางให้น้ำเชื่อมมีความเข้มข้นลดลง ดังนั้นจึงศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของกากมันต่อปริมาณน้ำที่เติม โดยแปรปริมาณน้ำตั้งแต่ 10 - 50 มล. ต่อน้ำหนักกากมันเริ่มต้น 5 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง และควบคุมสภาวะของการย่อยให้เป็นไปตามสภาวะที่เหมาะสมต่อการย่อยเช่นเดียวกับที่ได้จากการศึกษา พบว่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมคือ 40 มล. ซึ่งสามารถเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเชื่อมกลูโคสให้สูงขึ้นได้ โดยยังคงเกิดการเปลี่ยนกากมันเป็นน้ำตาลได้ประมาณร้อยละ 50 ของน้ำหนักกากมันเริ่มต้น หากใช้ปริมาณน้ำที่น้อยกว่า 40 มล. แม้จะทำให้ น้ำเชื่อมกลูโคสสูงขึ้นได้แต่ประสิทธิภาพของการผลิตกลับลดลงอย่างเห็นได้ชัด เพราะผลผลิตกลูโคสที่เกิดขึ้นแปรผันตามปริมาณน้ำที่เติม เนื่องจากน้ำเป็นตัวกลางที่ทำให้เกิดการแพร่ของเอนไซม์ไปยังส่วนต่างๆ ของกากมัน ดังนั้นปริมาณน้ำที่น้อยเกินไปทำให้เอนไซม์คลุกเคล้าเข้าเป็นเนื้อเดียวกับกากมันได้ยากจึงทำให้การย่อยเกิดขึ้นได้ไม่ดี มีประสิทธิภาพการผลิตต่ำ

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการผลิตน้ำเชื่อมกลูโคสจากการย่อยกากมันสำปะหลังโดยรวม ทั้งจากการย่อยด้วยกรด และย่อยด้วยเอนไซม์ดังตารางที่ 4 - 1 พบว่ามีประสิทธิภาพการผลิตที่

ไม่แตกต่างกัน สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนจากมันเป็นน้ำตาลได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 ของ น้ำหนักกากมันเริ่มต้น เมื่อทำการย่อยภายใต้สภาวะที่เหมาะสมของแต่ละวิธี แต่หากพิจารณา จากความเข้มข้นของน้ำเชื่อมที่เกิดขึ้นแล้วการย่อยด้วยกรดจะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า โดย สามารถผลิตน้ำเชื่อมที่มีความเข้มข้นได้สูงประมาณ 140 - 150 กรัมต่อลิตร ในขณะที่การย่อย ด้วยเอนไซม์ให้น้ำเชื่อมที่เข้มข้นเพียง 40 - 50 กรัมต่อลิตร ซึ่งข้อได้เปรียบของการย่อยด้วยกรดที่ ให้ความเข้มข้นของน้ำเชื่อมได้สูงกว่าคือ ประหยัดค่าใช้จ่ายในการระเหยน้ำส่วนเกินออกไป และ กลูโคสที่นิยมนำไปใช้เป็นแหล่งคาร์บอนในกระบวนการหมักควรมีความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 200 - 220 กรัมต่อลิตร (ประเสริฐ หาญเมืองใจ, 2537 ; Shah และคณะ, 1993) ดังนั้นหากน้ำ เชื่อมกลูโคสที่จะนำมาใช้นั้นมีความเข้มข้นต่ำเกินไปจึงต้องเสียเวลาและพลังงานในการระเหยน้ำ ออกไปจนกว่าจะได้น้ำเชื่อมที่มีความเข้มข้นเท่าที่ต้องการ และเมื่อพิจารณาถึงการนำไปใช้ ประโยชน์ จากงานวิจัยของสินีนาด เจียมอนุกุลกิจ (2539) รายงานถึงการใช้สารละลายน้ำตาล จากการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดซัลฟิวริกเป็นแหล่งคาร์บอนของการผลิตกรดมะนาว พบ ว่าให้ผลผลิตที่ดีไม่มีปัญหาด้านความหนืดของน้ำหมัก จึงมีความเป็นไปได้สูงในการจะนำไปใช้ ทดแทนกลูโคสจากการย่อยแป้ง

ดังนั้นจากผลของงานวิจัยนี้ จึงทำให้ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการย่อยกากมัน สำปะหลังและสามารถผลิตน้ำเชื่อมกลูโคสที่มีต้นทุนการผลิตต่ำ รวมถึงจลนพลศาสตร์ของการ ผลิตที่สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับพัฒนาการผลิตต่อไปในระดับอุตสาหกรรมเพื่อใช้ เป็นวัตถุดิบของการผลิตแทนกลูโคสที่ได้จากการย่อยแป้งต่อไปในอนาคต

ตารางที่ 4-1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตน้ำเชื่อมกลูโคสของการย่อยด้วยกรดและการย่อยด้วยเอนไซม์

| สภาวะของการย่อย                                   | การย่อยด้วยกรด  | การย่อยด้วยเอนไซม์                                      |   |
|---|---|---|---|
|   |   | LCP   | liquor  |
|   | H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 1.0 โมลาร์, 10 มล.<br>115°C, 30 นาที | BAN 500 หน่วย, 40 นาที<br>SPEZYME 300 หน่วย, 24 ชั่วโมง | BAN 500 หน่วย, 40 นาที<br>SPEZYME 300 หน่วย, 24 ชั่วโมง |
| ประสิทธิภาพการ<br>เปลี่ยนกากมันเป็น<br>น้ำตาล (%) | 52.67   | 56.65   | 50.14   |
| ความเข้มข้นของ<br>น้ำเชื่อม (กรัมต่อลิตร)         | 158.55  | 49.48   | 40.44   |