

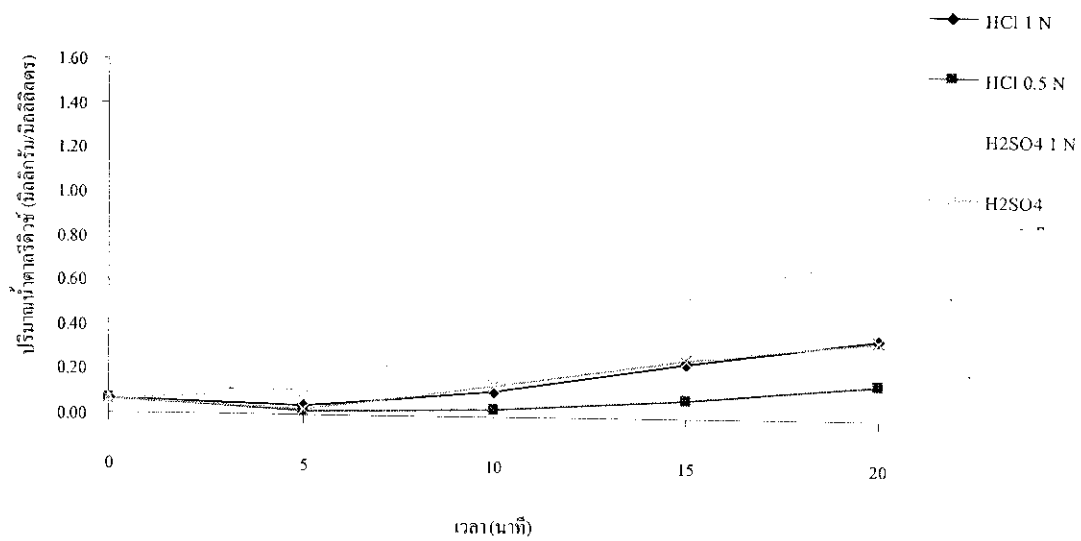
บทที่ 4

ผลการศึกษา

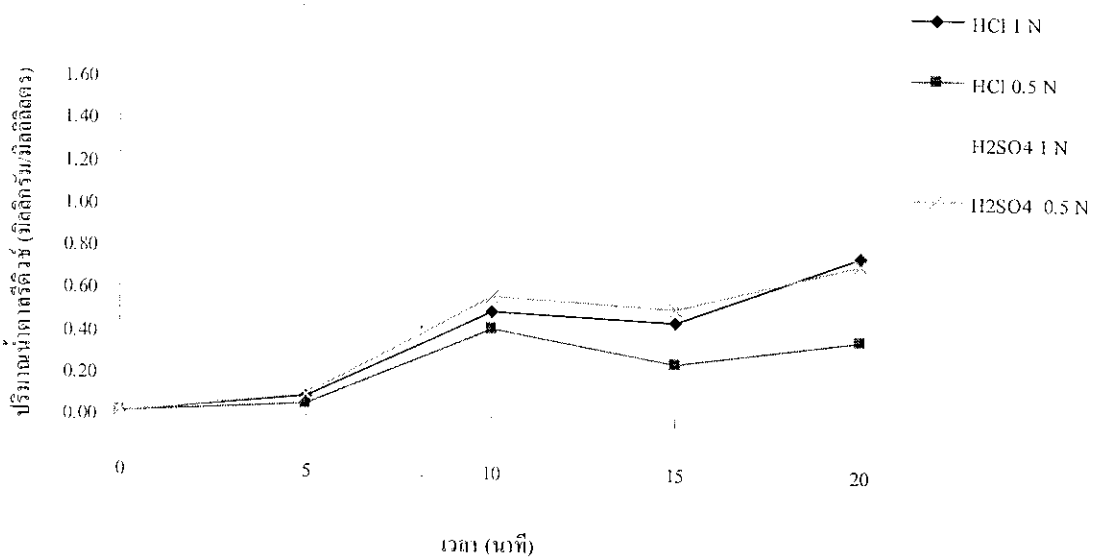
การสลายแป้งทางสารเคมี

1. การหาสภาวะที่เหมาะสมในการสลายแป้งมันสำปะหลังโดยใช้กรด

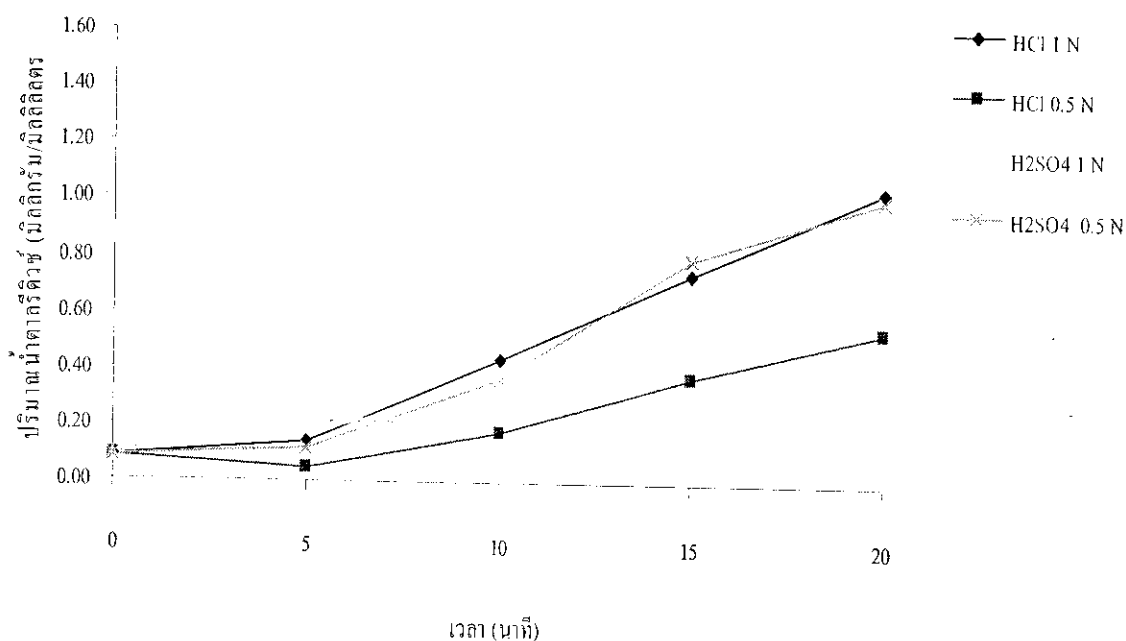
จากการทดลองสลายแป้งมันสำปะหลังความเข้มข้น 0.35 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนัก/ปริมาตร) ปริมาณ 4 มิลลิลิตร ด้วยกรด 2 ชนิด คือ กรดไฮโดรคลอริก และกรดซัลฟูริก ที่ความเข้มข้น 0.5 และ 1.0 นอร์มอล ที่อุณหภูมิ 90, 95 และ 98 องศาเซลเซียส ที่ใช้เวลา 5, 10, 15 และ 20 นาที ผลการศึกษาพบว่าเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาจะได้ของเหลวสีน้ำตาลแดงอ่อน ๆ และ เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการสลายแป้งนานขึ้นสีของเหลวที่ได้ก็จะมีสีเข้มขึ้น จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นกรด และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาให้สูงขึ้น อัตราการสลายแป้งให้เป็นน้ำตาลจะมีสูงขึ้น สืบเนื่องจากปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อให้อุณหภูมิ และความเป็นกรดเท่ากัน กรดซัลฟูริกสลายแป้งได้ดีกว่ากรดไฮโดรคลอริก ดังนั้น สภาวะการสลายแป้งมันสำปะหลัง ด้วยกรดที่เหมาะสมที่สุด คือ การใช้ กรดซัลฟูริก ความเข้มข้น 1.0 นอร์มอล ที่อุณหภูมิ 98 องศาเซลเซียส ทำให้ได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงที่สุด (ภาพที่ 4-1 ค) เนื่องจากเป็นความเข้มข้นของกรดที่สูงสุดและอุณหภูมิสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์ว่า กรดซัลฟูริก ความเข้มข้น 1.0 นอร์มอล ที่อุณหภูมิ 98 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่ากรดสามารถย่อยสลายแป้งให้เป็นน้ำตาลได้ดีที่อุณหภูมิสูงมากกว่าที่อุณหภูมิต่ำ ๆ และ เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการสลายแป้งนานขึ้น จะทำให้ได้ปริมาณน้ำตาลมากขึ้นตามไปด้วย ส่วนกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 1.0 นอร์มอล และกรดซัลฟูริก ที่ความเข้มข้น 0.5 นอร์มอล ทำให้ได้ปริมาณน้ำตาลรองลงมานั้น ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์เนื่องจากกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 1.0 นอร์มอล และกรดซัลฟูริก ที่ความเข้มข้น 0.5 นอร์มอลมีความสามารถในการย่อยปริมาณสลายแป้งได้ใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 4-1 ก ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการสลายแป้งมันที่สลายด้วยกรด 2 ต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลาต่าง ๆ กัน



ภาพที่ 4-1 ข ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการสลายแป้งมันที่สลายด้วยกรด 2 ชนิดที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลาต่าง ๆ กัน

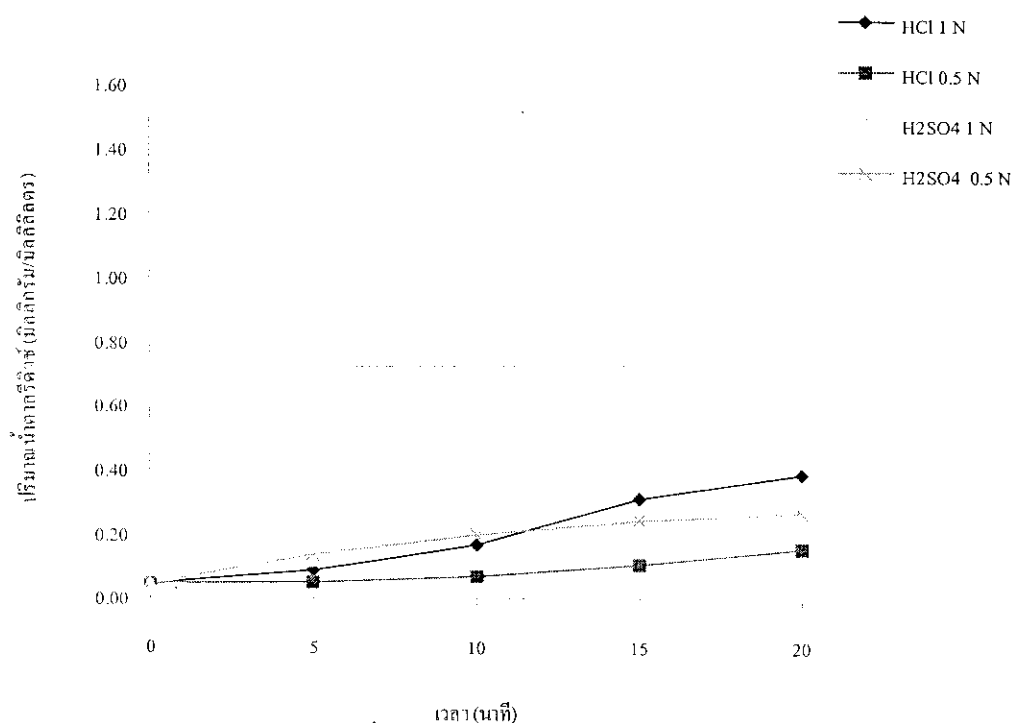


ภาพที่ 4-1 ค ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการสลายแป้งมันที่สลายด้วยกรด 2 ชนิดที่อุณหภูมิ 98 องศาเซลเซียส เป็นเวลาต่าง ๆ กัน

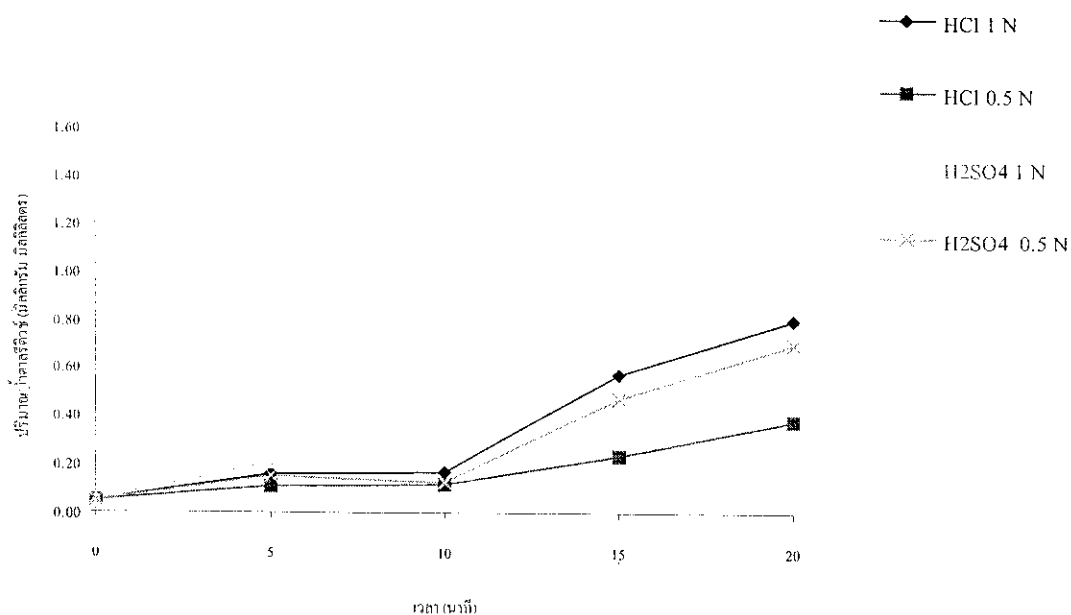
2. การหาสถานะที่เหมาะสมในการสลายมันเส้นโดยใช้กรด

จากการทดลองสลายแป้งมันสำปะหลังความเข้มข้น 0.35 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนัก/ปริมาตร) ปริมาณ 4 มิลลิตร ด้วยกรด 2 ชนิดคือ กรดไฮโดรคลอริก และกรดซัลฟูริก ที่ความเข้มข้น 0.5 และ 1.0 นอร์มอล ที่อุณหภูมิ 90, 95 และ 98 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5, 10, 15 และ 20 นาที ผลปรากฏว่าเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาจะได้ของเหลวสีน้ำตาลแดงอ่อน ๆ และ เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการสลายแป้งนานขึ้นสีของเหลวที่ได้มีสีเข้มขึ้น จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลพบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นกรด และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้น อัตราการสลายแป้งให้เป็นน้ำตาลสูงขึ้นด้วยสังเกตจาก ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อให้อุณหภูมิและความเข้มข้นเท่ากัน กรดซัลฟูริกจะสลายแป้งได้ดีกว่ากรดไฮโดรคลอริก ดังนั้นสถานะการสลายแป้งมันสำปะหลังด้วยกรดที่เหมาะสมที่สุดคือ การใช้ กรดซัลฟูริก ความเข้มข้น 1.0 นอร์มอล ที่อุณหภูมิ 98 องศาเซลเซียส (ดังภาพที่ 4-2 ค) เพราะได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงที่สุด เนื่องจากเป็นความเข้มข้นของกรดที่สูงสุดและอุณหภูมิสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์ ว่า กรดซัลฟูริก ความเข้มข้น 1.0 นอร์มอล ที่อุณหภูมิ 98 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่ากรดสามารถย่อยสลายแป้งให้เป็นน้ำตาลได้ดีที่

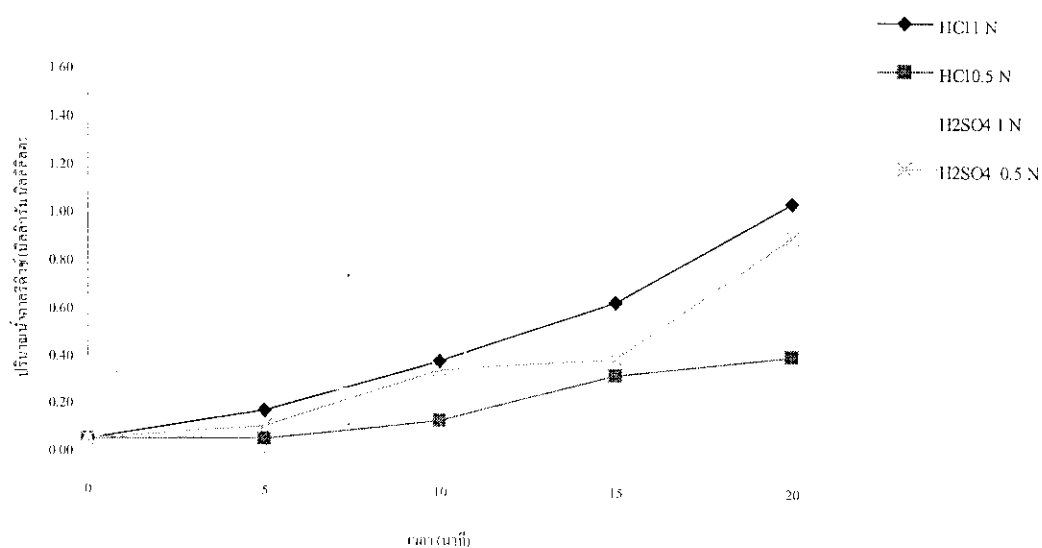
อุณหภูมิสูงกว่าที่อุณหภูมิต่ำ ๆ ดังภาพที่ 4-2 ก- ค และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการสลายแป้งนานขึ้น ก็จะทำให้ได้ปริมาณน้ำตาลมากขึ้นตามไปด้วย ส่วนกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 1.0 นอร์มอล และกรดซัลฟูริก ที่ความเข้มข้น 0.5 นอร์มอล ที่มีปริมาณน้ำตาลรองลงมานั้นไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์เนื่องจากกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 1.0 นอร์มอล และกรดซัลฟูริก ที่ความเข้มข้น 0.5 นอร์มอลมี ความสามารถในการย่อยปริมาณย่อยสลายแป้งได้ใกล้เคียงกัน เช่นเดียวกันการหาสภาวะที่เหมาะสมในการสลายแป้งมันสำปะหลังด้วยกรด



ภาพที่ 4-2 ก ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการสลายมันเส้นที่สลายด้วยกรด 2 ชนิดที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลาต่าง ๆ กัน



ภาพที่ 4-2 ข ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการสลายมันเส้นที่สลายด้วยกรด 2 ชนิดที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลาต่าง ๆ กัน

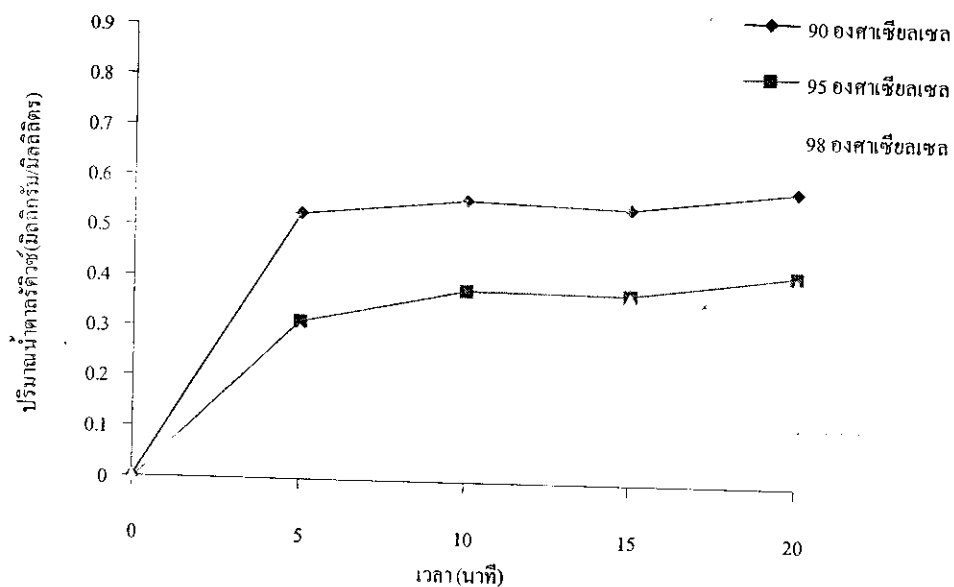


ภาพที่ 4-2 ค ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากแป้งจากการสลายมันเส้นที่สลายด้วยกรด 2 ชนิดที่อุณหภูมิ 98 องศาเซลเซียส ณ เวลาต่าง ๆ กัน

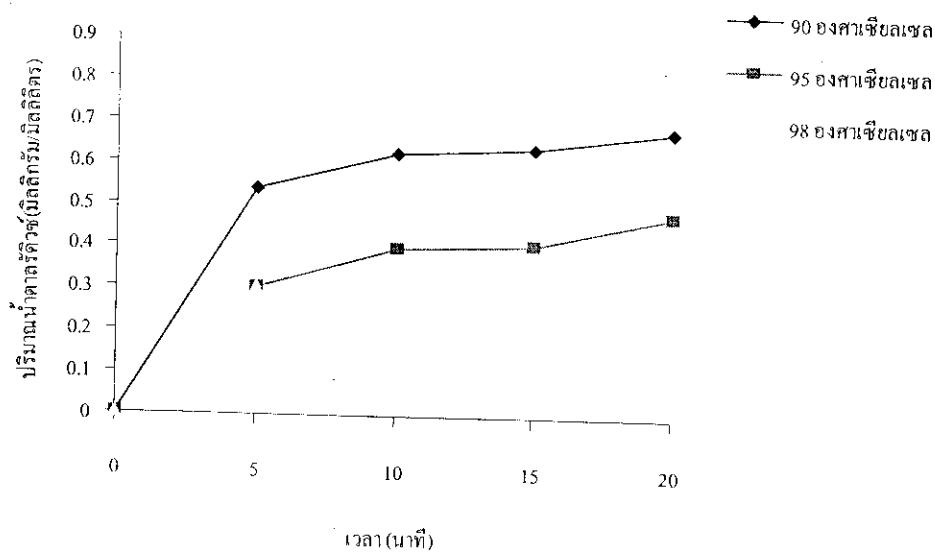
การสลายแป้งทางชีวภาพ

1. การหาสภาวะที่เหมาะสมในการสลายแป้งมันสำปะหลังครั้งแรกด้วยการใช้เอนไซม์เทอร์มาลิล

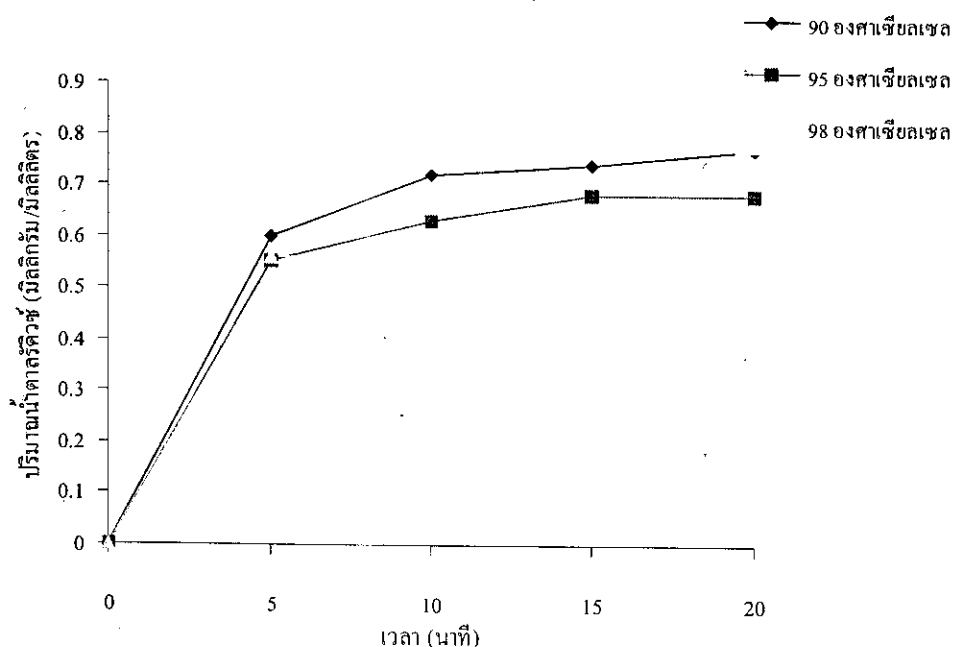
จากการทดลองสลายแป้งมันสำปะหลังความเข้มข้น 0.35 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนัก/ปริมาตร) ปริมาณ 4 มิลลิลิตร ด้วยเอนไซม์เทอร์มาลิลความเข้มข้น 0.05 เปอร์เซ็นต์ (ปริมาตร/ปริมาตร) ปริมาณ 15 ไมโครลิตรที่ความเป็นกรด-ด่าง 3 ระดับคือ 5.5, 6.0 และ 6.5 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ คือ 90, 95 และ 98 องศาเซลเซียส พบว่า ที่ค่าสภาวะความเป็นกรด-ด่างต่างกัน เอนไซม์จะทำงานได้ดีแตกต่างกัน ซึ่งความเร็วของการสลายแป้งขึ้นอยู่กับความเป็นกรด-ด่าง โดยจะมีผลทำให้กรดอะมิโนที่บริเวณเร่งของเอนไซม์เกิดการคลายตัวแตกต่างกันไป ถ้าเอนไซม์อยู่ในสภาวะที่เหมาะสม โครงสร้างที่บริเวณเร่งของเอนไซม์จะเกิดการคลายตัวให้อยู่ใน สภาพที่เหมาะสมกับแป้ง ทำให้ตัดโมเลกุลของแป้งเกิดเป็นน้ำตาลได้มากยิ่งขึ้น ดังนั้นสภาวะกรด-ด่างที่เหมาะสมที่สุดในการสลายแป้งมันสำปะหลังคือ ค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.5 และเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นพบว่า การทำงานของเอนไซม์จะทำงานได้ดีขึ้นในระดับหนึ่ง ความเร็วของการสลายแป้งจะมีมากขึ้นเนื่องจากเอนไซม์และแป้งเข้าทำปฏิกิริยาได้มากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงเกินไป จะทำให้เอนไซม์เสียสภาพธรรมชาติไป โครงสร้างที่บริเวณเร่งของเอนไซม์เปลี่ยนไปทำให้ กิจกรรมของเอนไซม์ลดลง ดังจะเห็นจากภาพ 4-3 ก-ค ซึ่งทำให้ได้ปริมาณน้ำตาลลดลง จากการทดลองจะเห็นได้ว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด คือ 90 องศาเซลเซียส ซึ่งปริมาณน้ำตาลจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้น ดังภาพที่ 4-3 ค ซึ่งจากกับการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์ พบว่าความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิแต่ละระดับมีผลต่อการย่อยสลายแป้งความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ



ภาพที่ 4-3 ก ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการสลายแป้งมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์เทอร์นามิลที่ความเป็นกรด-ด่าง 5.5 ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ กัน



ภาพที่ 4-3 ข ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการสลายแป้งมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์เทอร์นามิลที่ความเป็นกรด-ด่าง 6.0 ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ กัน

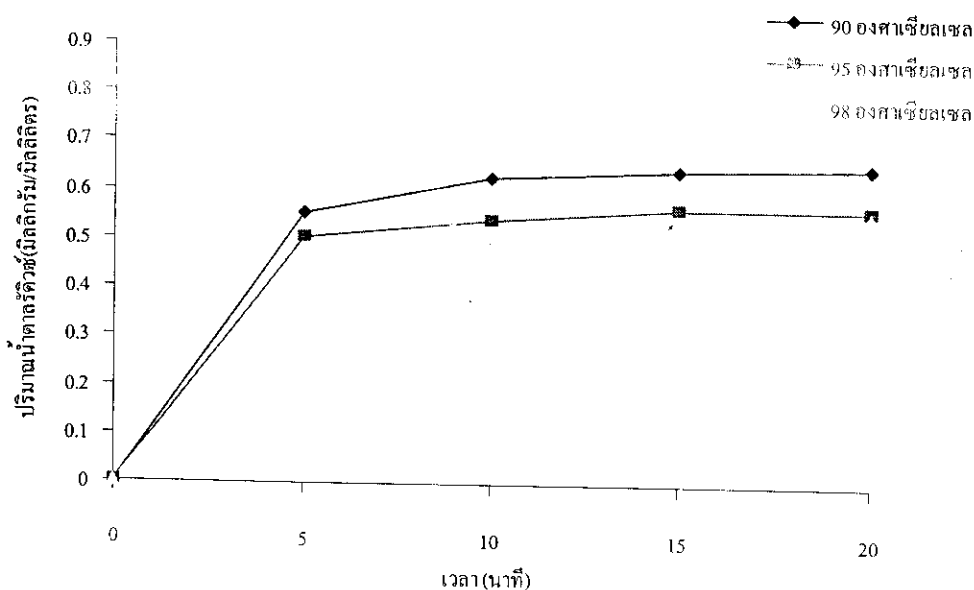


ภาพที่ 4-3 ค ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการสลายแป้งมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์เทอร์มามิลที่
ความเป็นกรด-ด่าง 6.5 ที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ กัน

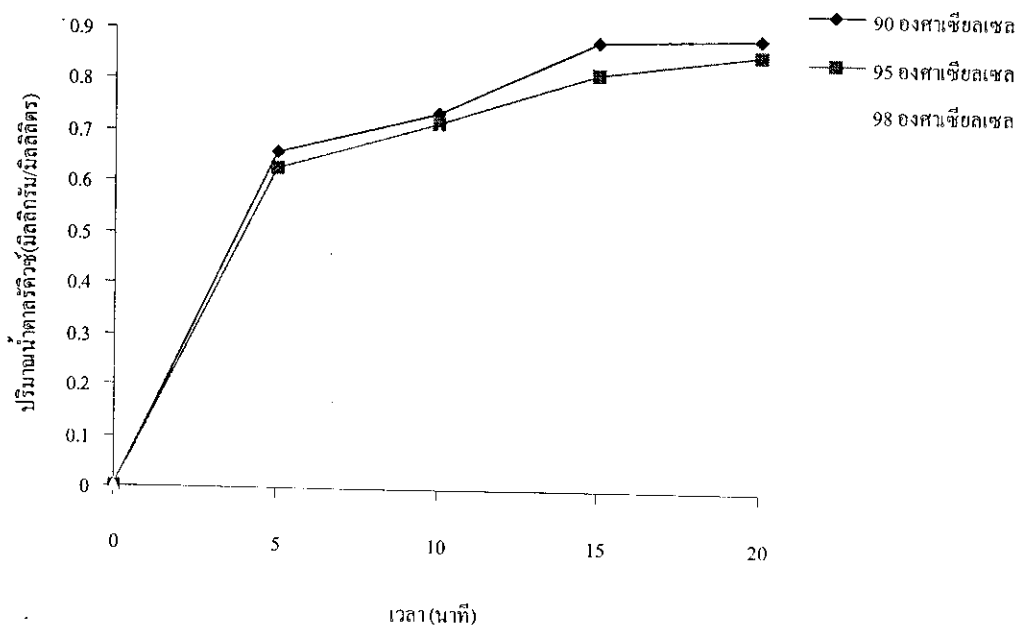
2. การหาสภาวะที่เหมาะสมในการสลายมันเส้นด้วยการใช้เอนไซม์เทอร์มามิล

จากการทดลองสลายมันเส้นความเข้มข้น 0.35 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนัก/ปริมาตร) ปริมาณ 4 มิลลิลิตร ด้วยเอนไซม์เทอร์มามิลความเข้มข้น 0.05 เปอร์เซ็นต์ (ปริมาตร/ปริมาตร) ปริมาณ 15 ไมโครลิตรที่ค่าความเป็นความกรด-ด่าง 3 ระดับ คือ 5.5, 6.0 และ 6.5 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ คือ 90, 95 และ 98 องศาเซลเซียส พบว่าของเหลวที่ผ่านการย่อยจะมีลักษณะเหลืองอ่อน และมีความหนืดลดลงและมีตะกอนบ้างเล็กน้อย เมื่อให้แป้งความเป็นกรด-ด่างต่าง ๆ กัน เอนไซม์จะมีทำงานได้ดีแตกต่างกันไป ความเร็วของการสลายแป้งขึ้นอยู่กับความเป็นกรด-ด่าง เนื่องจากความเป็นกรด-ด่างและอุณหภูมิต่างกัน จะมีผลทำให้กรดอะมิโนที่บริเวณเร่งของเอนไซม์เกิดการคลายตัวให้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสมกับสารตั้งต้น จะทำให้เกิดผลผลิตมากยิ่งขึ้นดังนั้นสภาวะกรด-ด่างที่เหมาะสมในการสลายแป้งมันสำปะหลัง คือ ความเป็นกรด-ด่าง 6.5 เพราะเอนไซม์และสารตั้งต้นเข้าทำปฏิกิริยาได้ดี และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงเกินไปกิจกรรมของเอนไซม์จะลดลง ทำให้ได้ปริมาณน้ำตาลลดลงซึ่งจากการทดลองจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิที่เหมาะสม คือ 90 องศาเซลเซียสดังภาพที่ 4-4 ค เช่นเดียวกับสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งปริมาณน้ำตาลจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้น ซึ่งจากการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์ ว่า

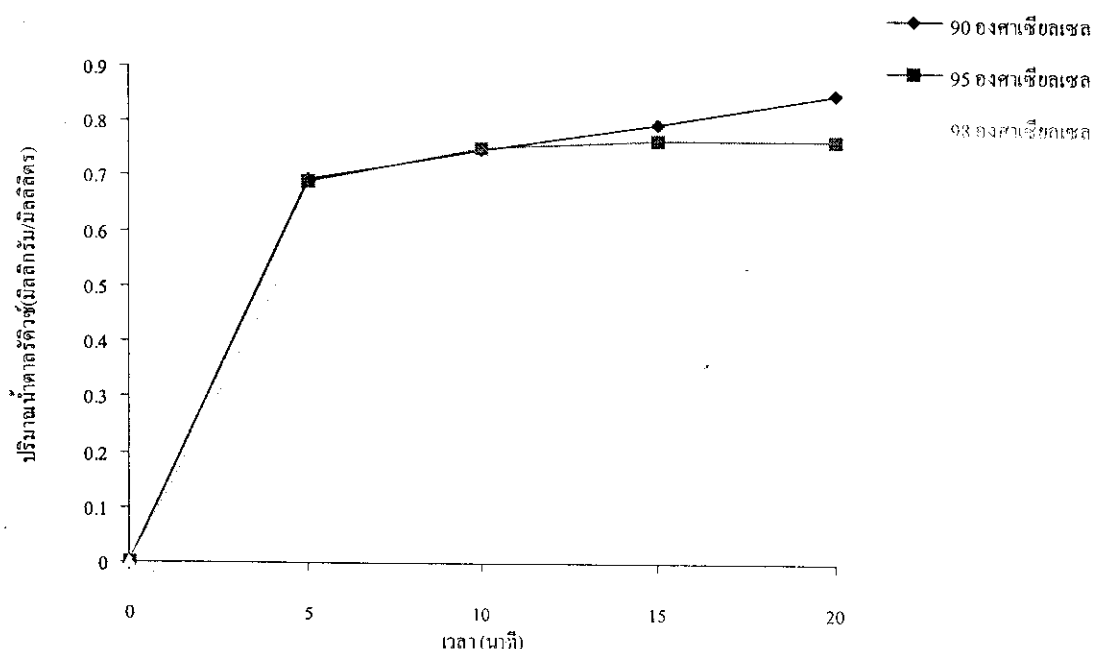
ความเป็นกรด-ด่าง และผลของอุณหภูมิแต่ละระดับมีผลต่อการสลายแป้งความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เช่นเดียวกับในแป้งมัน



ภาพที่ 4-4 ก ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการสลายมันเส้นที่สลายด้วยเอนไซม์เทอร์มามิลที่ความเป็นกรด-ด่าง 5.5 ที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ กัน



ภาพที่ 4-4 ข ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการสลายมันเส้นที่สลายด้วยเอนไซม์เทอร์มามิลที่ความเป็นกรด-ด่าง 5.5 ที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ กัน



ภาพที่ 4-4 ก ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการสลายมันเส้นที่สลายด้วยเอนไซม์เทอร์มามิลที่
ความเป็นกรด-ด่าง 6.5 ที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ กัน

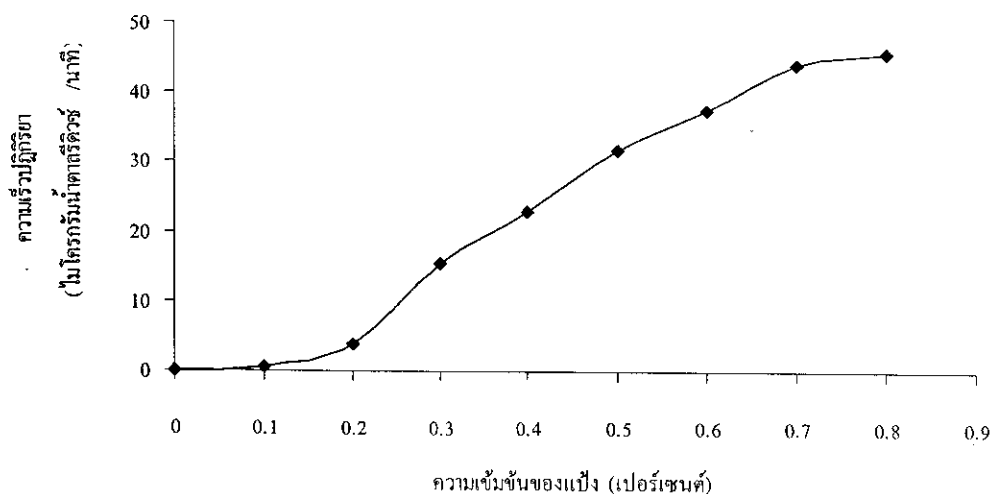
3. การศึกษาจลนศาสตร์ของการสลายแป้งด้วยเอนไซม์เทอร์มามิลในการย่อยครั้งแรก

3.1 การศึกษาจลนศาสตร์ของการสลายแป้งมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์เทอร์มามิล

จากการศึกษาในข้อ 1 ทำให้ทราบสถานะที่เหมาะสมต่อกิจกรรมของเอนไซม์ว่า

เอนไซม์เทอร์มามิลทำงานได้ดีค่อนข้างที่จะสูง (90 องศาเซลเซียส และสถานะค่าความเป็นกรด-ด่างที่เป็นกรดอ่อน ๆ (6.5) จึงนำสถานะที่เหมาะสมดังกล่าวมาศึกษาจลนศาสตร์ของเอนไซม์เทอร์มามิลในการสลายแป้งมันสำปะหลังสุกความเข้มข้น 0.05 ถึง 1.0 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนัก/ปริมาตร) ปริมาณ 4 มิลลิตร ด้วยเอนไซม์เทอร์มามิลความเข้มข้น 0.05 เปอร์เซ็นต์ (ปริมาตร/ปริมาตร) ปริมาณ 15 ไมโครลิตร ที่ความเป็นกรด-ด่าง 6.5 อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ผลปรากฏว่า อัตราเร็วในการสลายแป้งในช่วงแรกจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่อถึงสถานะหนึ่งอัตราเร็วจะคงที่ เนื่องจากในช่วงแรก ๆ ปริมาณเอนไซม์มีมากแต่ปริมาณแป้งมีน้อย เอนไซม์จะแย่งกันจับโมเลกุลของแป้ง ทำให้เกิดการสลายแป้งและเกิดผลผลิต (น้ำตาลรีดิวซ์) ได้อย่างรวดเร็ว แต่เมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของสารตั้งต้นขึ้นเรื่อย ๆ แต่กำหนดปริมาณเอนไซม์และเวลาคงที่ อัตราเร็วในการเกิดปริมาณน้ำตาลก็จะเริ่มคงที่ เพราะเอนไซม์มีปริมาณจำกัดและ

ความจำเพาะในการจับกับโมเลกุลแป้ง แม้จะมีการเพิ่มปริมาณของสารตั้งต้นลงไปแต่เนื่องจาก เอนไซม์มีปริมาณจำกัด อัตราการสลายแป้งก็จะเกิดขึ้นเท่าเดิม (ดังภาพที่ 4-5 ก) และจากการศึกษา จลนศาสตร์เอนไซม์เทอร์มามิล คำนวณจากกราฟได้ดังนี้ ค่า K_m เท่ากับ 0.51 กรัมแป้ง/100 มิลลิลิตร V_{max} เท่ากับ 45.78 ไมโครกรัมน้ำตาลรีดิวซ์/นาที

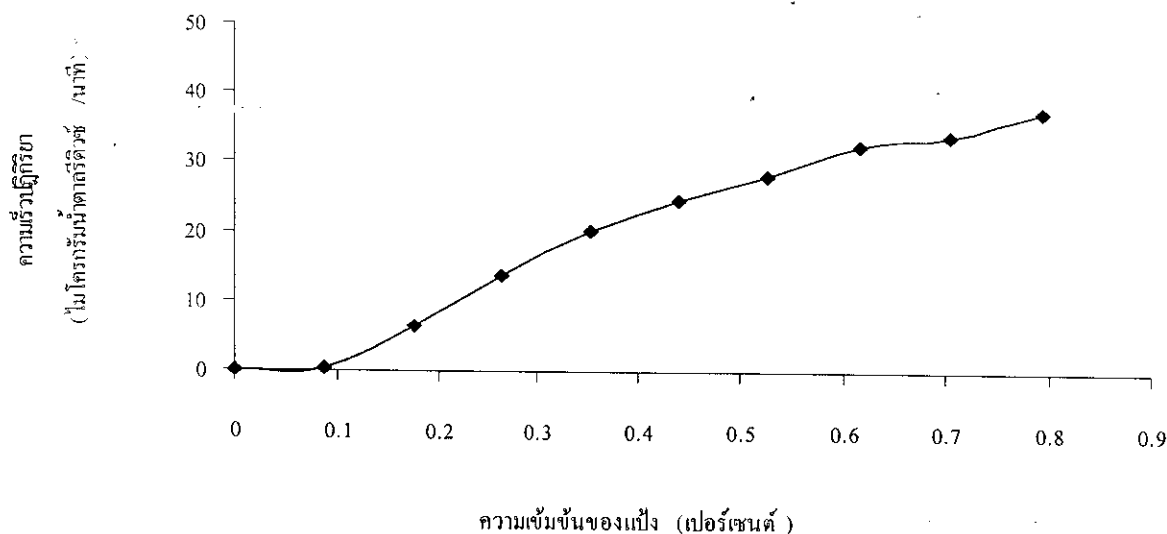


ภาพที่ 4-5 ก อัตราเร็วของปฏิกิริยาการสลายแป้งมันสำปะหลังสุกที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน เอนไซม์เทอร์มามิล

3.2 การศึกษาจลนศาสตร์ของเอนไซม์เทอร์มามิลในมันเส้น

จากการศึกษาในข้อ 2 ทำให้ทราบสถานะที่เหมาะสมต่อกิจกรรมของเอนไซม์ว่า เอนไซม์เทอร์มามิลทำงานได้ดีก่อนข้างที่จะสูง (90 องศาเซลเซียส) และสถานะค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่เป็นกรดอ่อน ๆ (6.5) จึงนำสถานะที่เหมาะสมดังกล่าวมาศึกษาจลนศาสตร์ของเอนไซม์เทอร์มามิลในการสลายแป้งมันสำปะหลังสุกความเข้มข้น 0.05 ถึง 1.0 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนัก/ปริมาตร) ปริมาณ 4 มิลลิลิตร ด้วยเอนไซม์เทอร์มามิลความเข้มข้น 0.05 เปอร์เซ็นต์ (ปริมาตร/ปริมาตร) ปริมาณ 15 ไมโครลิตรที่ความเป็นกรด-ด่าง 6.5 อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ผลปรากฏว่า อัตราเร็วในการสลายแป้งในช่วงแรกจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่อถึงสถานะหนึ่ง ๆ อัตราเร็วจะคงที่ เนื่องจากในช่วงแรก ๆ ปริมาณเอนไซม์มีมากแต่ปริมาณแป้งมีน้อย เอนไซม์จะแย่งกันจับ โมเลกุลของแป้ง ทำให้เกิดการสลายแป้งและเกิดผลผลิต (น้ำตาลรีดิวซ์) ได้อย่างรวดเร็ว แต่เมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของสารตั้งต้นขึ้นเรื่อย ๆ แต่กำหนดปริมาณเอนไซม์และเวลาคงที่ อัตราเร็วในการเกิดปริมาณน้ำตาลก็จะเริ่มคงที่ เพราะเอนไซม์มีปริมาณจำกัดและความจำเพาะในการจับกับโมเลกุลแป้ง แม้จะมีการเพิ่มปริมาณของสารตั้งต้นลงไปแต่เนื่องจาก

เอนไซม์มีปริมาณจำกัด อัตราการสลายแป้งก็จะเกิดขึ้นเท่าเดิม (ดังภาพที่ 4-5 ข) และจากการศึกษา จลนศาสตร์เอนไซม์เทอร์มามีล คำนวณจากกราฟ พบว่ามีค่า K_m เท่ากับ 0.31 V_{max} เท่ากับ 32.38 ไมโครกรัมน้ำตาลรีดิวซ์/นาที



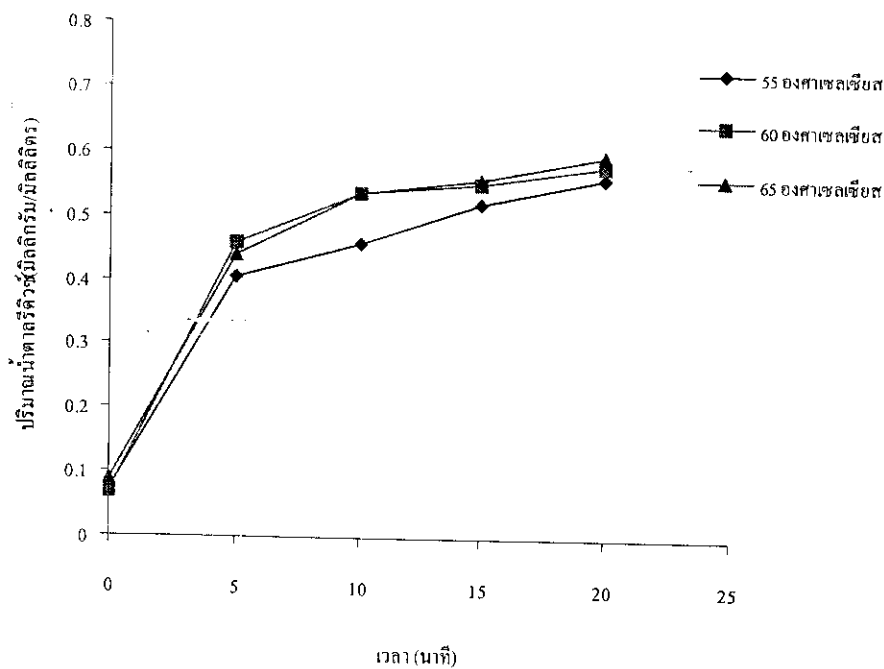
ภาพที่ 4-5 ข ความเร็วของปฏิกิริยาการสลายแป้งมันสำปะหลังสุกที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน ด้วยเอนไซม์เทอร์มามีล

4. การหาสภาวะที่เหมาะสมในการสลายแป้งมันสำปะหลังด้วย เอนไซม์กลูโคอะไมเลส

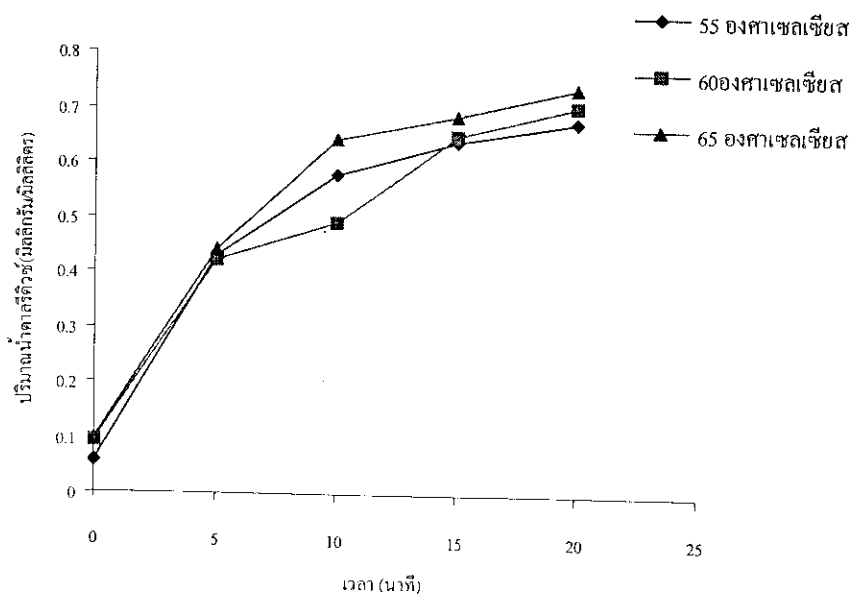
4.1 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการสลายแป้งมันสำปะหลังด้วยเอนเอนไซม์ กลูโคอะไมเลส

จากการทดลองสลายแป้งมันสำปะหลังความเข้มข้น 0.35 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนัก/ปริมาตร) ปริมาณ 4 มิลลิลิตร ด้วยเอนไซม์เทอร์มามีลความเข้มข้น 0.1 เปอร์เซ็นต์ (ปริมาตร/ปริมาตร) ปริมาณ 20 ไมโครลิตรที่ค่าความเป็นความกรด-ด่าง 3 ระดับ คือ 4.0, 4.5 และ 5.0 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ คือ 55, 60 และ 65 องศาเซลเซียส พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการสลายแป้งมันสำปะหลัง คือ ความเป็นกรด-ด่าง 4.5 และอุณหภูมิที่เหมาะสม คือ 65 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 4-7 ข ซึ่งปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์จะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้น ซึ่งปริมาณน้ำตาลสูงสุดที่วัดได้ที่เวลา 20 นาทีเท่ากับ 739.2 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร หรือ 0.739 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร จากการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์ ว่า ผลของความเป็น

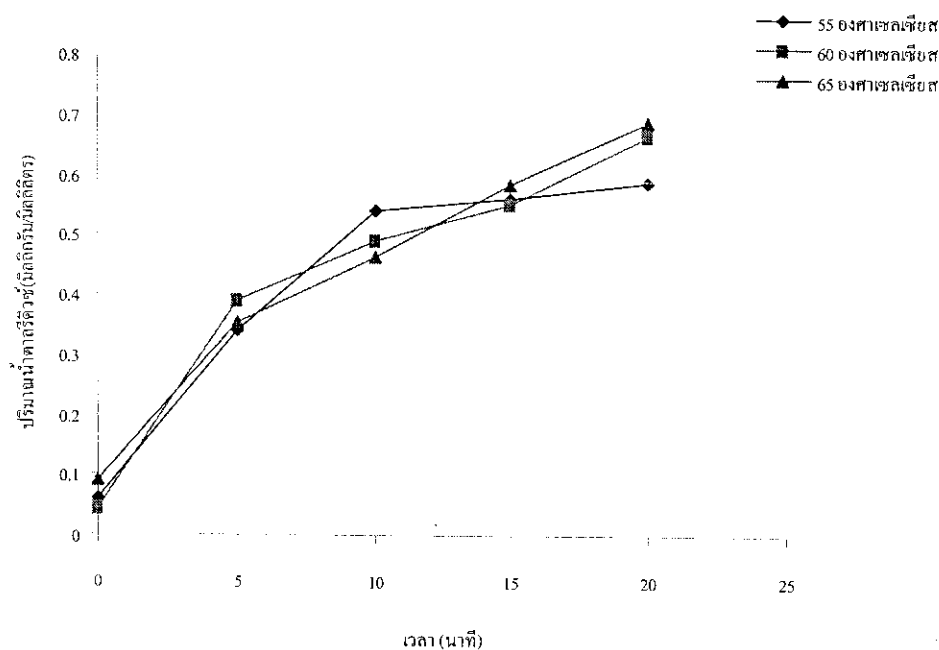
กรด-ด่าง และอุณหภูมิแต่ละระดับมีผลต่อการย่อยสลายแป้งด้วยเอนไซม์กลูโคอะไมเลสแตกต่างกัน
อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ



ภาพที่ 4-6 ก ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์จากการสลายแป้งมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์กลูโคอะไมเลสที่
ความเป็นกรด-ด่าง 4.0 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ



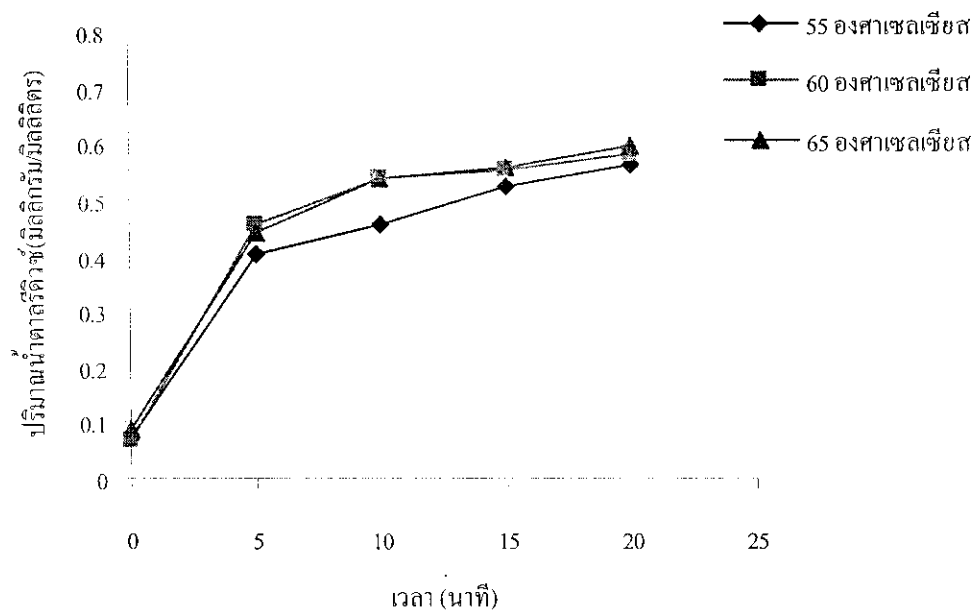
ภาพที่ 4-6 ข ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์จากการสลายแป้งมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์กลูโคอะไมเลสที่
ความเป็นกรด-ด่าง 4.5 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ



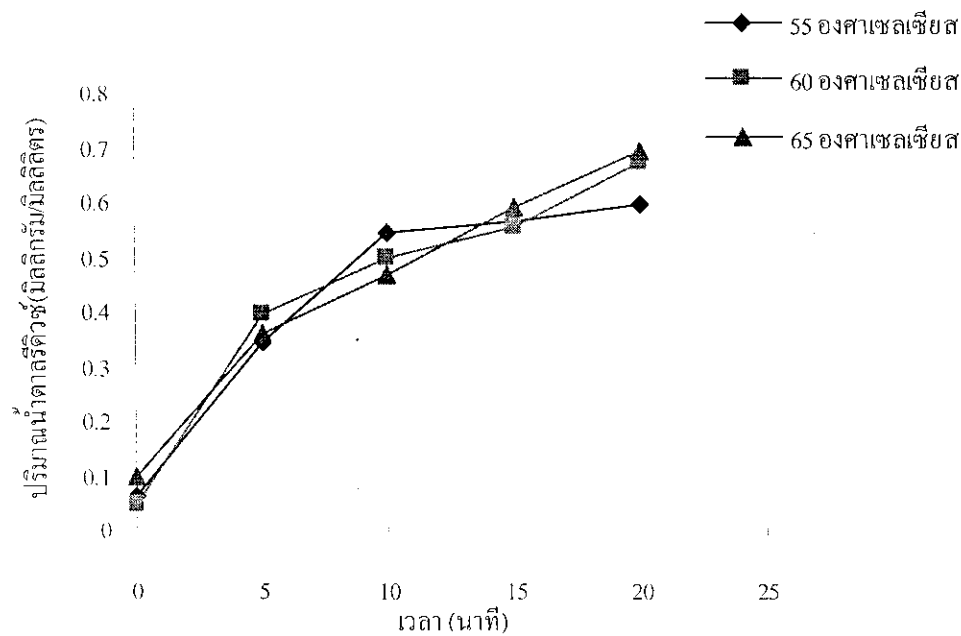
ภาพที่ 4-6 ค ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์จากการสลายแป้งมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์กลูโคอะไมเลสที่
ความเป็นกรด-ด่าง 5.0 ที่อุณหภูมิต่างๆ

4.2 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการสลายมันเส้นด้วยเอนไซม์กลูโคอะไมเลส

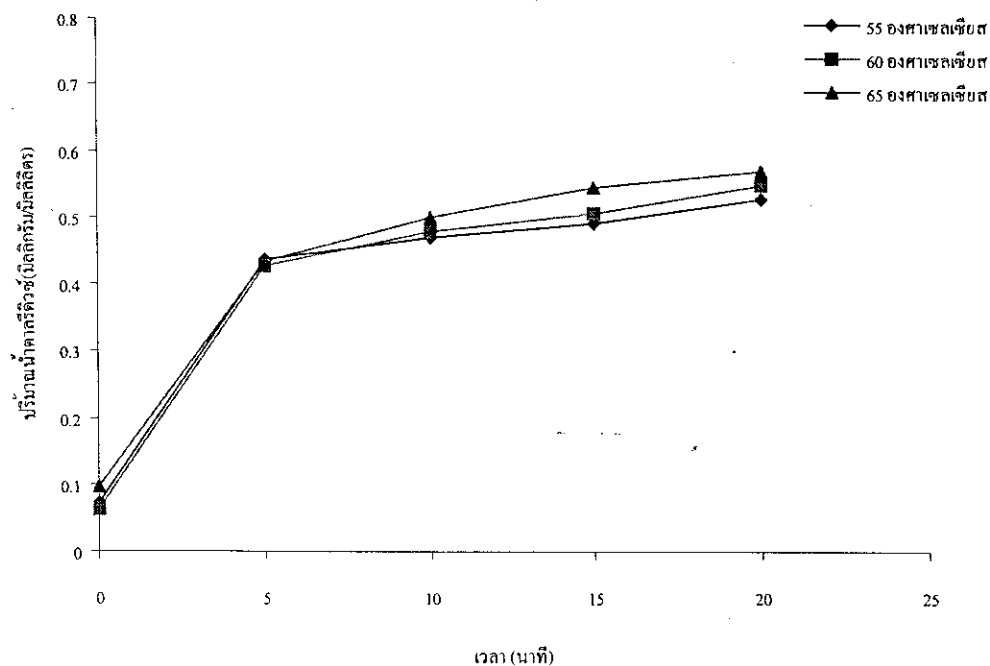
จากการทดลองสลายแป้งมันสำปะหลังความเข้มข้น 0.35 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนัก/ปริมาตร) ปริมาณ 4 มิลลิกรัม ด้วยเอนไซม์เทอร์มามีความเข้มข้น 0.1 เปอร์เซ็นต์ (ปริมาตร/ปริมาตร) ปริมาณ 20 ไมโครลิตรที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 3 ระดับ คือ 4.0, 4.5 และ 5.0 ที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 55, 60 และ 65 องศาเซลเซียส พบว่าสภาวะของเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมในการสลายแป้งมันสำปะหลัง คือ ความเป็นกรด-ด่าง 4.5 และอุณหภูมิที่เหมาะสม คือ 65 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ที่ 4-8 (ก-ค) ซึ่งปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์จะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้น ซึ่งปริมาณน้ำตาลสูงสุดที่วัดได้ที่เวลา 20 นาทีเท่ากับ 706.5 ไมโครกรัม/มิลลิกรัม หรือ 0.71 มิลลิกรัม/มิลลิกรัม จากการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์ ว่าผลของความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิแต่ละระดับมีผลต่อการย่อยสลายแป้งด้วยเอนไซม์กลูโคอะไมเลสแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ



ภาพที่ 4-7 ก ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์จากการสลายมันเส้นด้วยเอนไซม์กลูโคอะไมเลส ที่ความเป็นกรด-ด่าง 4.0 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ



ภาพที่ 4-7 ข ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์จากการสลายมันเส้นด้วยเอนไซม์กลูโคอะไมเลส ที่ความเป็นกรด-ด่าง 4.5 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

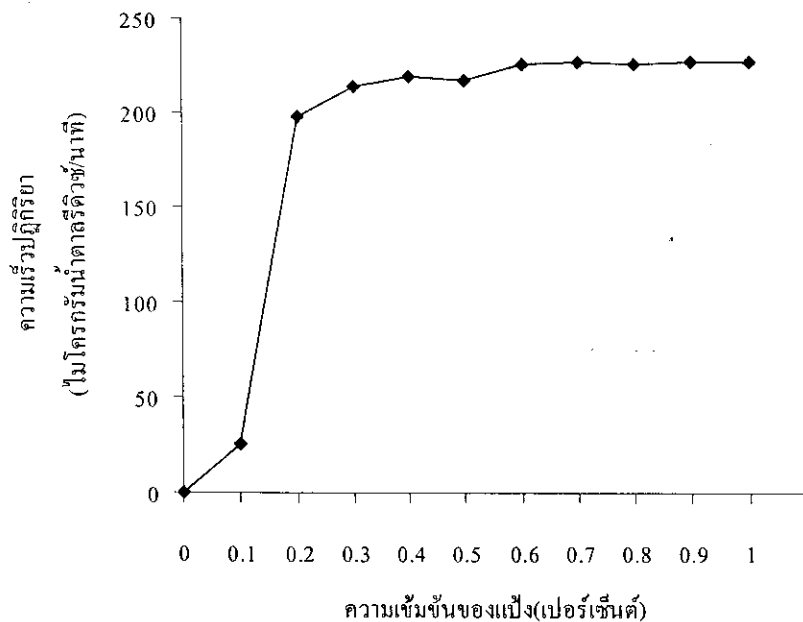


ภาพที่ 4-7 ค ปริมาณน้ำตารีดิวซ์จากการสลายมันเส้นด้วยเอนไซม์กลูโคอะไมเลส ที่ความเป็นกรด-ด่าง 5.0 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

5. การศึกษาจลนศาสตร์ของการสลายแป้งด้วยเอนไซม์กลูโคอะไมเลสในการย่อยครั้งสุดท้าย

5.1 การศึกษาจลนศาสตร์ของการสลายแป้งด้วยเอนไซม์กลูโคอะไมเลสในการย่อยครั้งสุดท้าย

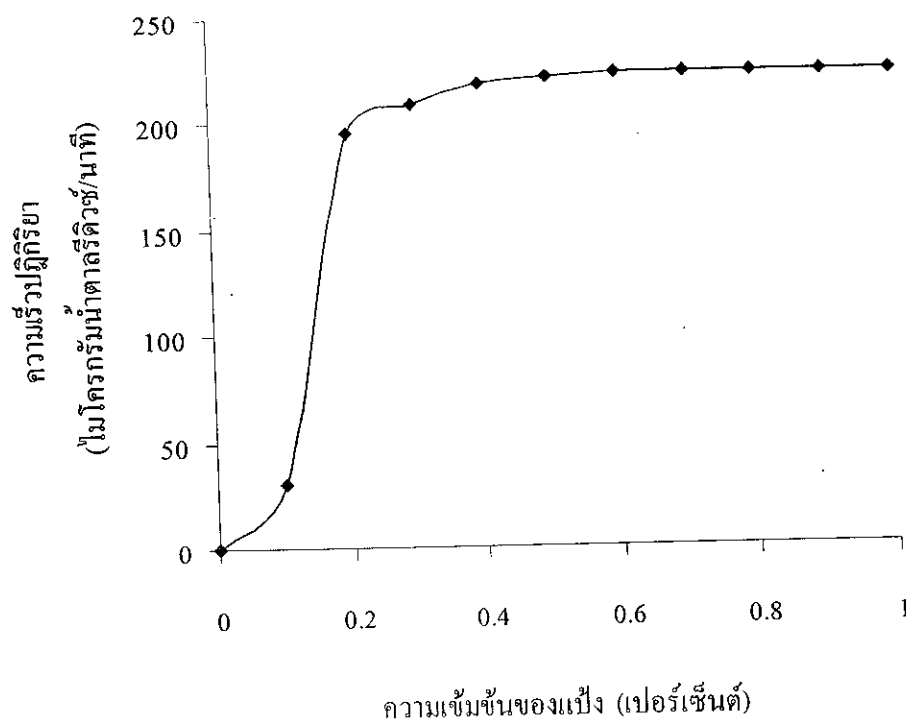
เมื่อทำการสลายแป้งมันสำปะหลังสุกความเข้มข้น 0.1 ถึง 1.0 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณ 4 มิลลิตร ด้วยเอนไซม์เทอร์มามีลความเข้มข้น 0.1 เปอร์เซ็นต์ (ปริมาตร/ปริมาตร) ปริมาณ 20 ไมโครลิตร ที่ความเป็นกรด-ด่าง 4.5 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เวลา 10 นาที ได้ผลการทดลอง ดังภาพที่ 4-8 ก และจากการศึกษาจลนศาสตร์เอนไซม์เทอร์มามีล คำนวณจากกราฟพบว่ามีค่า K_m เท่ากับ 0.15 1 และค่า V_{max} เท่ากับ 213.78 ไมโครกรัม น้ำตารีดิวซ์/นาที



ภาพที่ 4-8 ก อัตราเร็วของปฏิกิริยาการสลายแป้งมันสำปะหลังสุกที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กันด้วย เอนไซม์กลูโคอะไมเลส

5.2 การศึกษาจลนศาสตร์ของเอนไซม์กลูโคอะไมเลสในมันเส้น

เมื่อทำการสลายมันเส้นสุกความเข้มข้น 0.1 ถึง 1.0 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณ 4 มิลลิกรัม ด้วยเอนไซม์เทอร์มามีลความเข้มข้น 0.1 เปอร์เซ็นต์ (ปริมาตร/ปริมาตร) ปริมาณ 20 ไมโครลิตรที่ ความเป็นกรด-ด่าง 4.5 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เวลา 10 นาที ได้ผลการทดลอง ดังภาพที่ 4-5 ก และจากการศึกษาจลนศาสตร์เอนไซม์เทอร์มามีล คำนวณจากกราฟพบว่ามีค่า K_m เท่ากับ 0.18 V_{max} เท่ากับ 202.12 ไมโครกรัม น้ำตาลดีวซ์/นาทีก



ภาพที่ 4-8 ข อัตราเร็วของปฏิกิริยาการสลายมันเส้นที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กันด้วยเอนไซม์
กลูโคอะไมเลส

การขยายขนาดการสลายแป้งมันสำปะหลังในปฏิกรณ์ชีวภาพความจุ 4 ลิตร

1. ศึกษาวิธีการและผลของการกวนผสม (mixing) ที่มีต่อการย่อยสลายแป้ง

จากศึกษาการสลายแป้งมันสำปะหลังที่ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนัก/ปริมาตร) ปริมาตร 1.5 ลิตร ในปฏิกรณ์ชีวภาพแก้วขนาดความจุ 4 ลิตร ด้วยเอนไซม์เทอร์มามีลิต์ที่ไม่มีการเจือจางเข้มข้นประมาณ 0.038 มิลลิลิตร (คิดจากความเข้มข้น 0.05 เปอร์เซ็นต์ (ปริมาตร/ปริมาตร) ที่ความเป็นกรด-ด่าง 6.5 อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 180 นาที โดยทำการสลายแป้งที่สภาวะต่าง ๆ กันคือ

ถังที่ 1 แป้งแขวนลอยในน้ำทำให้สุกก่อนแล้วจึงย่อยด้วยเอนไซม์

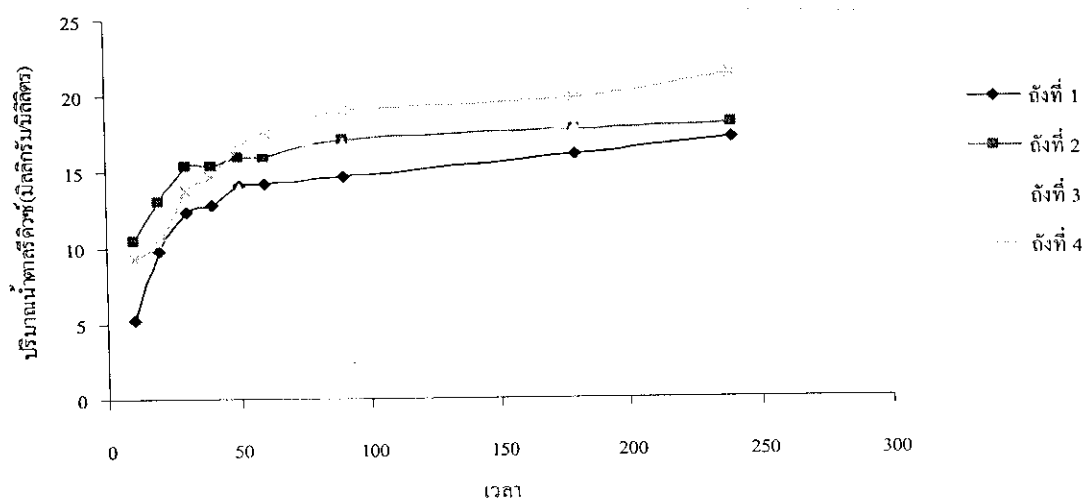
ถังที่ 2 แป้งแขวนลอยในน้ำผสมเอนไซม์แล้วให้ความร้อน

ถังที่ 3 แป้งแขวนลอยในน้ำทำให้สุกก่อนแล้วย่อยด้วยเอนไซม์ขณะเดียวกันกวนด้วย

ใบพัด Ekato Intermig ความเร็ว 200 รอบ/นาที

ถึงที่ 4 แป้งแขวนลอยในน้ำผสมเอนไซม์แล้วให้ความร้อนขณะเดียวกันกวนด้วยใบพัด Ekato Intermig ความเร็ว 200 รอบ/นาที

ผลปรากฏว่า ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแก้วที่มีการกวนด้วยใบพัด Ekato Intermig ทั้ง 2 ถัง (ถึงที่ 3 และ ถึงที่ 4) มีการสลายแป้งได้ดีกว่าถังปฏิกรณ์ชีวภาพแก้วที่ไม่มีการกวนด้วยใบพัด (ถึงที่ 1 และ ถึงที่ 2) เพราะเอนไซม์สามารถผสมกับโมเลกุลของแป้งได้อย่างทั่วถึงทำให้สลายแป้งได้ดี นอกจากนี้ยังพบว่าถังปฏิกรณ์ชีวภาพแก้วแป้งแขวนลอยในน้ำผสมเอนไซม์แล้วให้ความร้อน และมีการกวนด้วยใบพัด (ถึงที่ 4) จะทำงานได้ดีกว่าถังที่ทำให้โมเลกุลของแป้งสุกก่อนย่อยด้วย เอนไซม์ (ถึงที่ 3) เพราะในการทำปฏิกิริยาถึงที่ 4 นั้น ขณะที่มีการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นไปเรื่อย ๆ จนถึงอุณหภูมิที่แป้งสุก เอนไซม์จะมีการผสมกับโมเลกุลของแป้งได้ดีกว่าซึ่งจะทำให้เกิดการสลาย แป้งได้ดี ในขณะที่ถึงที่ 3 การทำให้แป้งสุกก่อนแล้วจึงค่อยทำการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ถึงแม้มี การกวนด้วยใบพัด การย่อยสลายก็ย่อยไม่ดีเท่าถึงที่ 4 เพราะการทำให้แป้งสุกก่อนจะทำแป้งมีความหนืดสูงซึ่งเอนไซม์ไม่สามารถแทรกผ่าน โมเลกุลของแป้งสุกได้อย่างทั่วถึง ดังแสดงใน ภาพที่ 4-9



ภาพที่ 4-9 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์จากการย่อยสลายแป้งมันด้วยเอนไซม์ด้วยวิธีการต่าง ๆ

ถึงที่ 1 หมายถึง แป้งแขวนลอยในน้ำทำให้สุกก่อนแล้วค่อยผสมเอนไซม์

ถึงที่ 2 หมายถึง แป้งแขวนลอยในน้ำผสมเอนไซม์แล้วให้ความร้อน

ถึงที่ 3 หมายถึง แป้งแขวนลอยในน้ำทำให้สุกก่อนแล้วผสมเอนไซม์ขณะเดียวกันกวนด้วยใบพัด Ekato Intermig ความเร็ว 200 รอบ/นาที

ถึงที่ 4 หมายถึง แป้งแขวนลอยในน้ำผสมเอนไซม์แล้วให้ความร้อนขณะเดียวกันกวนด้วยใบพัด Ekato Intermig ความเร็ว 200 รอบ/นาที

2. ศึกษาการย่อยสลายแป้งมันสำปะหลังด้วยความเข้มข้นต่าง ๆ กันด้วยเอนไซม์เทอร์มาลิต (โดยให้สัดส่วนปริมาณแป้ง : ปริมาณเอนไซม์คงที่)

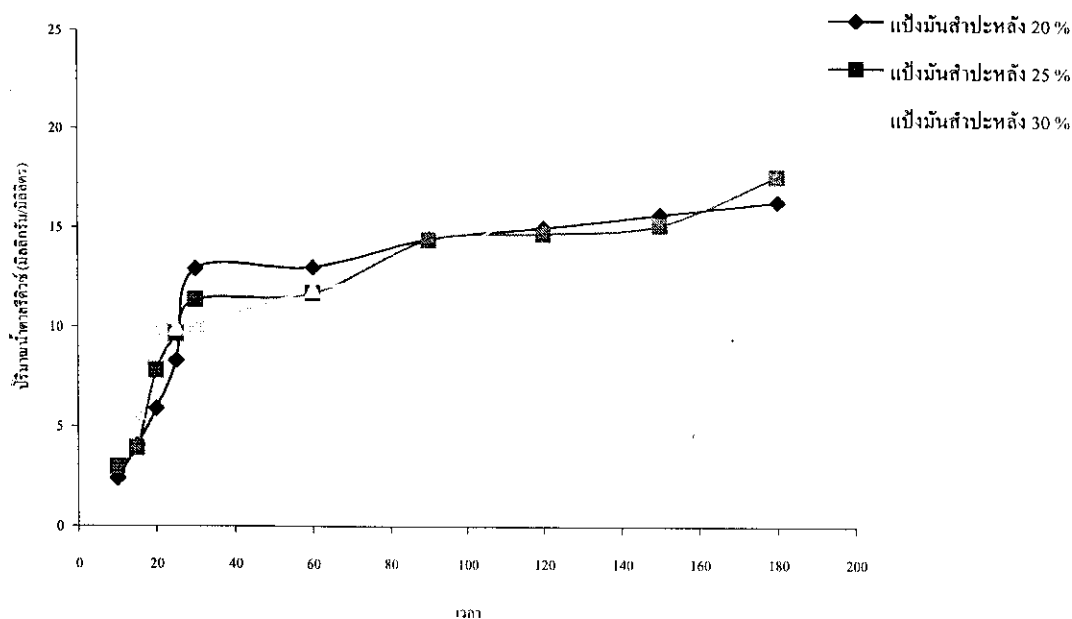
จากการศึกษาขั้นที่ผ่านมาทำให้ทราบว่า ในถึงปฏิกรณ์ชีวภาพที่มีแป้งแขวนลอยในน้ำผสมเอนไซม์แล้วให้ความร้อนแล้วกวนด้วยใบพัด Ekato Intermig ความเร็ว 200 รอบ/นาที ความเป็นกรด-ด่าง 6.5 อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เวลา 180 นาที เป็นวิธีการสลายแป้งที่ดีที่สุด ดังนั้นจึงนำสภาวะดังกล่าวมาทำการศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมต่อการสลายแป้งมันสำปะหลังโดยทำการสลายแป้งมันสำปะหลังที่ความเข้มข้นต่าง ๆ คือ

ถึงที่ 1 ความเข้มข้นของแป้งมันสำปะหลัง 20 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 2 ลิตร เติมเอนไซม์เทอร์มาลิตความเข้มข้น 0.05 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณ 0.125 มิลลิตร

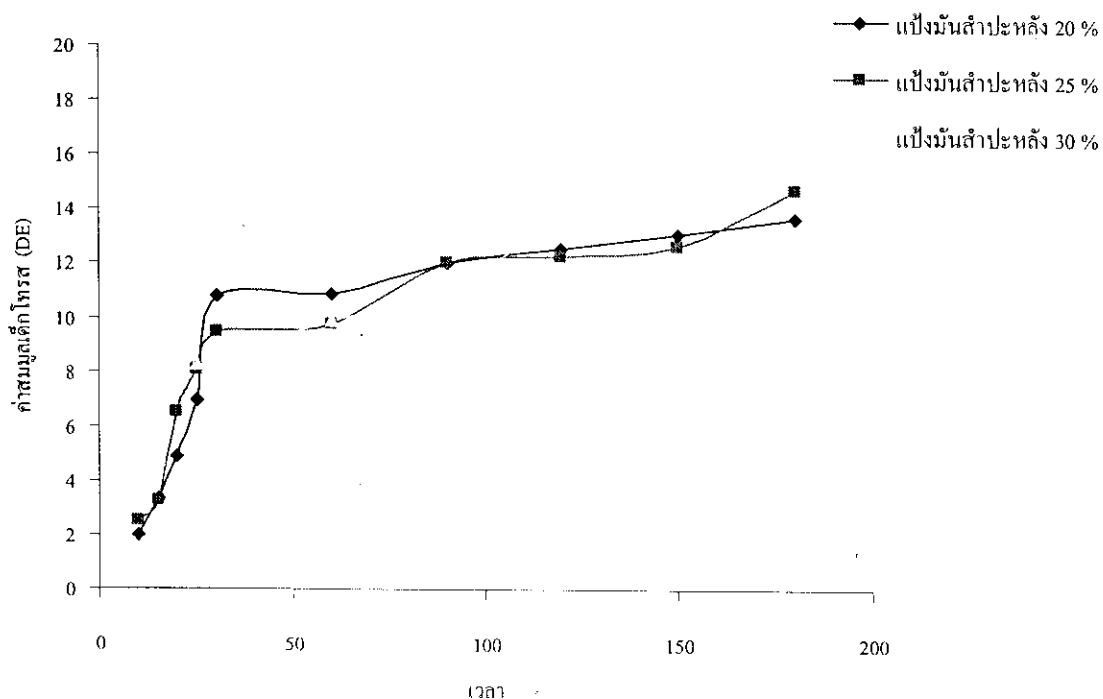
ถึงที่ 2 ความเข้มข้นของแป้งมันสำปะหลัง 25 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 2 ลิตร เติมเอนไซม์เทอร์มาลิตความเข้มข้น 0.05 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณ 0.156 มิลลิตร

ถึงที่ 3 ความเข้มข้นของแป้งมันสำปะหลัง 30 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 2 ลิตร เติมเอนไซม์เทอร์มาลิตความเข้มข้น 0.05 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณ 0.188 มิลลิตร .

จากการทดลองพบว่า ถึงแม้จะเพิ่มความเข้มข้นของแป้งมันสำปะหลังเป็น 30 เปอร์เซ็นต์ การย่อยสลายแป้งก็ยังให้ผลดี เพราะปริมาณเอนไซม์ที่ใช้มากขึ้นตามไปด้วยซึ่งเพียงพอต่อการสลายประกอบกับการกวนผสมส่งเสริมการย่อยสลายถึงแม้ความเข้มข้นของแป้งจะสูงก็ตาม ซึ่งก็แสดงให้เห็นว่าการกวนผสมที่ดีช่วยให้การย่อยสลายแป้งในถึงปฏิกรณ์ชีวภาพแบบนี้ได้ผลดี ถึงแม้ความเข้มข้นของแป้งจะเพิ่มขึ้นถึง 30 เปอร์เซ็นต์ก็ตาม โดยได้ปริมาณน้ำตาลสูงสุดเท่ากับ 21.3 มิลลิกรัม/มิลลิตร ดังภาพที่ 4-10 ซึ่งสอดคล้องกับค่า สมมูลเด็กโทรส ซึ่งจะให้ค่า สูงสุดเท่ากับ 17.7 ดังภาพที่ 4-11



ภาพที่ 4-10 ปริมาณน้ำตาลที่ละลายน้ำได้จากการสลายแป้งมันสำปะหลังที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กันด้วย เอนไซม์แอลฟาอะไมเลส



ภาพที่ 4-11 ค่า DE จากการสลายแป้งมันสำปะหลังที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กันด้วยเอนไซม์ แอลฟาอะไมเลส

การสลายแป้งมันสำปะหลังในปฏิกรณ์ชีวภาพขยายส่วนขนาด 10 ลิตร

นำสภาวะที่เหมาะสมในการสลายแป้งให้เป็นน้ำตาลด้วยเอนไซม์ทั้งสองชนิด คือ แอลฟาอะไมเลส (เทอร์มามิล) และกลูโคอะไมเลส จากการทดลองข้างต้น มาขยายการทดลองใน ถึงปฏิกรณ์ชีวภาพขนาด 10 ลิตร (ภาพที่ 4-12) ที่ความเข้มข้นของแป้งมันสำปะหลัง 30 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 5 ลิตร ที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.5 อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เวลา 180 นาที เติมเอนไซม์ เทอร์มามิลความเข้มข้น 0.05 เปอร์เซ็นต์ (ปริมาตร/ปริมาตร) ปริมาณ 0.5630 มิลลิลิตร เติม แคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 30 พีพีเอ็ม ปริมาณ 1.625 มิลลิลิตร เก็บตัวอย่างทุก 30 นาที จากนั้น หยุดปฏิกิริยาของเอนไซม์ด้วยการลดค่าความเป็นกรดต่างเป็น 3.0 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 นอร์มอล และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 นอร์มอล เป็นเวลา 15-20 นาที จากนั้นลด อุณหภูมิเป็น 60 องศาเซลเซียส เพื่อให้เหมาะสมกับการทำงานของเอนไซม์กลูโคอะไมเลสที่ ความเข้มข้น 0.1 เปอร์เซ็นต์ (ปริมาตร/ปริมาตร) โดยการเติมเอนไซม์กลูโคอะไมเลส 2.5 มิลลิลิตร ทำการเก็บ ตัวอย่าง ที่เวลา 1 , 4, 8, 16 และ 20 ชั่วโมง



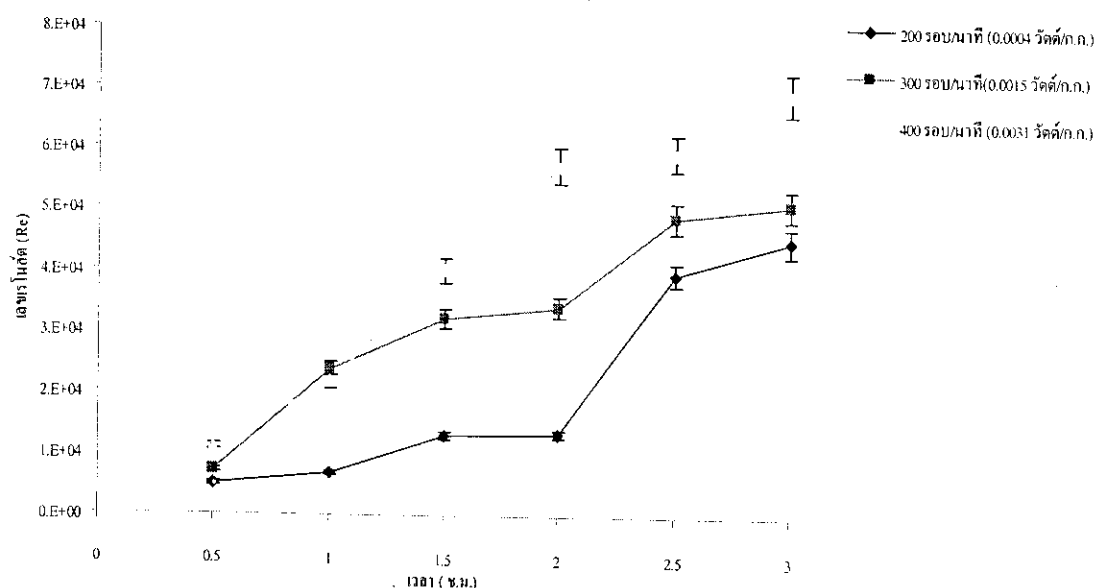
ภาพที่ 4-12 ถึงปฏิกรณ์ชีวภาพขนาด 10 ลิตร เพื่อการขยายขนาดการย่อยแป้งมันสำปะหลังด้วย เอนไซม์

ศึกษาสภาวะในการย่อยสลายแป้งมันสำปะหลัง วิเคราะห์ผลผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์ทั้ง 2 ชนิด ทำการกวนผสมด้วยใบพัด Ekato Intermig ที่ความเร็ว 200, 300 และ 400 รอบ/นาที โดยวิเคราะห์หาสภาวะการกวนผสม power input คุณสมบัติด้าน วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายแป้ง ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะเป็นตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพของระบบ ทำการทดลองอย่างละ 2 ชั่วโมง ซึ่งผลการทดลองที่ได้เป็นดังต่อไปนี้

การวิเคราะห์หาพลังงาน (Power) ที่ใช้ในการย่อยสลายแป้ง คำนวณได้จากสมการ $P = P_0 / \rho N^3 D^5$ จากนั้นคำนวณพลังงานต่อหน่วยน้ำหนักของของเหลว (Power input) ที่ใช้สำหรับการทำงานของปฏิกรณ์ชีวภาพซึ่งคำนวณได้จาก $E_T = P / \rho V$ และสภาวะการไหลของของเหลว คำนวณได้จากค่า Reynolds number (Re) โดยที่ $Re = \rho N D^2 / \mu$

1. ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า Power input และ Re

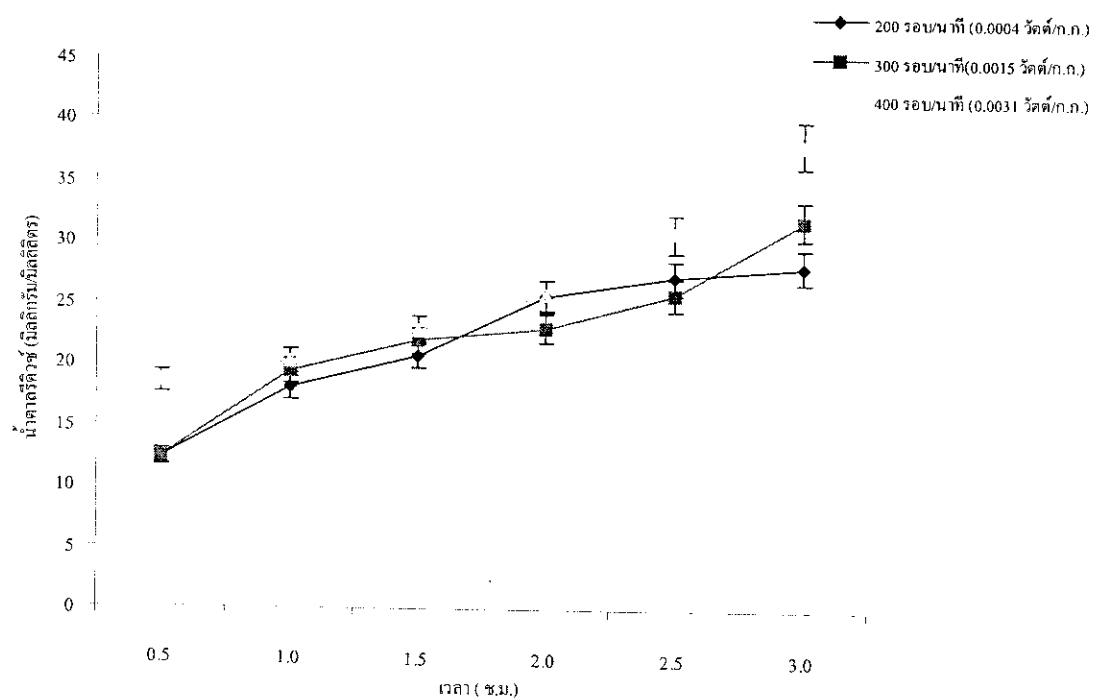
พบว่า ที่อัตราการกวนผสมที่ 200 รอบ/นาที จะมี การใช้พลังงานน้อยกว่าที่อัตราการกวนผสมที่สูง 300 และ 400 รอบ/นาที แต่ไม่แตกต่างกันมาก เนื่องจากสารละลายมีความหนืดที่ค่อนข้างต่ำจึงไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงพลังมากนัก และค่า Reynolds number (Re) จะแสดงถึงสภาวะการไหลของเหลวว่ามีลักษณะการไหลแบบใด จากการทดลองนี้จะเห็นได้ว่าค่า Re ของสารที่อัตราการกวนผสมที่ 200 และ 300 รอบต่อนาทีในช่วงแรกที่เวลา 0.5 ชั่วโมงพบว่า สารละลายแป้งจะมีการไหลแบบ transition ($Re = 10^2 - 10^4$) แสดงไว้ในภาพที่ 4-13 จะเห็นว่าสารละลายแป้งในช่วงนี้ยังผสมกันไม่ดีมากนัก ซึ่งในระยะนี้มอเตอร์ของเครื่องมือจะทำงานหนักเพราะ Torque ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งความหนืดของแป้งที่มีการกวนด้วยใบพัดที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาทีที่เวลา 0.5 ชั่วโมง (ประมาณ 20 มิลลิปาสคาส) จะมีค่าความหนืดสูงที่สุดเพราะเป็นอัตราการกวนผสมที่ความเร็วต่ำที่สุดซึ่งในช่วงแรกการถ่ายความร้อน การผสมของสารละลายแป้งยังไม่ดี และเวลาในการกวนผสมไม่นานพอที่จะทำให้การสลายเสร็จสมบูรณ์ และต่อมาเมื่อการย่อยสลายนานขึ้น เอนไซม์เทอร์มาลิลจะทำงานได้ดีขึ้น โดยที่เมื่อแป้งสุกอนุภาคของเม็ดแป้งจะเกิดการพองตัวซึ่งทำให้เอนไซม์สามารถเข้าย่อยได้สะดวก ทำให้ความหนืดของแป้งลดลงจนกระทั่งโมเลกุลของแป้งถูกย่อยสลายหมดทำให้ค่าความหนืดของแป้งค่อย ๆ คงที่ดังภาพที่ 4-13 ก-ค เมื่อความหนืดลดลงจึงทำให้สารละลายแป้งมีการไหลแบบปั่นป่วน แสดงว่าสารละลายแป้งในปฏิกรณ์ชีวภาพมีการกวนผสมที่ดี ซึ่งค่า Re มากกว่า 10^4



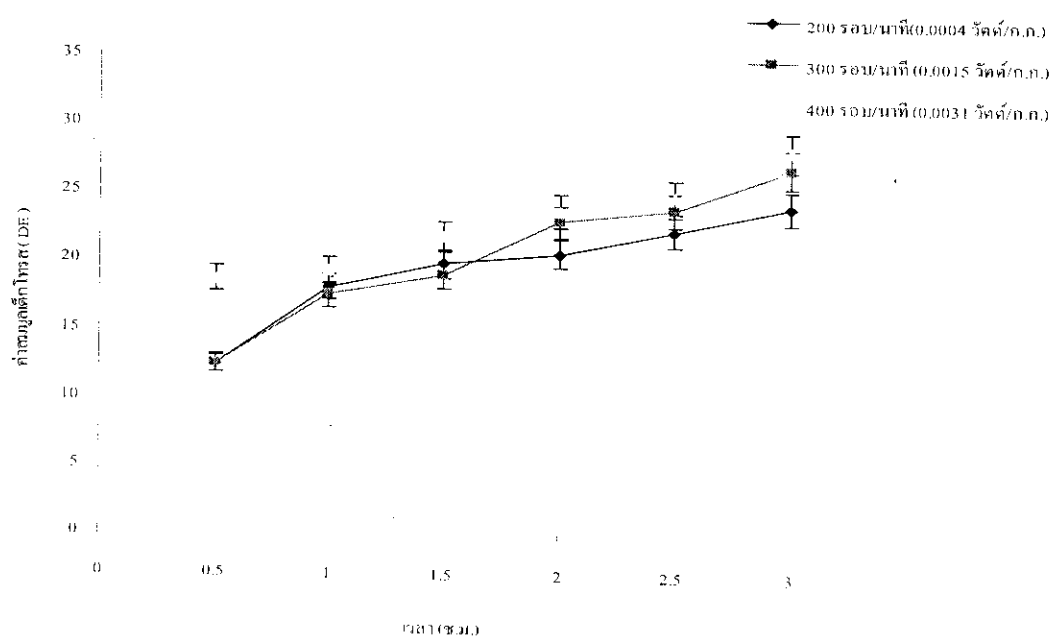
ภาพที่ 4-13 ค่า Re ขณะย่อยสลายแป้งครั้งแรกด้วยเอนไซม์เทอร์มามิลที่อัตราเร็วของใบพัดและเวลาในการย่อยต่าง ๆ กัน

2. น้ำตาลรีดิวซ์ และค่า DE

จากการทดลองพบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์จะค่อย ๆ สูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 1 ชั่วโมงแรก แล้วเริ่ม คงที่เมื่อผ่านชั่วโมงที่ 2 ไปแสดงว่าการย่อยในครั้งแรกค่อนข้างจะสมบูรณ์จึงทำให้ชั่วโมงที่ 3 ปริมาณน้ำตาลเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเท่านั้น โดยพบว่าการกวนที่ความเร็วใบพัด 200 รอบต่อนาที จะให้ปริมาณน้ำตาลต่ำสุด คือ 28 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ในขณะที่ความเร็วใบพัด 400 รอบต่อนาที จะให้ปริมาณน้ำตาล สูงที่สุด คือ 38 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ในการย่อยสลาย แป้งในครั้งแรกนี้ การกวนผสมที่ความเร็วรอบของใบพัดสูง ๆ สารละลายแป้งจะผสมกับเอนไซม์ ได้ดีกว่า ทำให้การย่อยสลายแป้งเกิดได้ดีกว่า ดังภาพที่ 4-14 และค่า DE ของการย่อยสลายแป้งจะแปรผันตามปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่สูงขึ้น ซึ่งค่า DE ที่ได้จะอยู่ใน ช่วง 24-28 ดังภาพที่ 4-15 โดยที่ความเร็วใบพัด รอบ 400 รอบต่อนาทีจะให้ค่า DE สูงสุด คือ 28 ซึ่งจากการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซนต์ พบว่าผลของความเร็วรอบแต่ละระดับทำให้ค่าปริมาณน้ำตาลที่ได้และค่า DE มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ



ภาพที่ 4-14 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ของการย่อยสลายแป้งด้วยเอนไซม์ เทอร์รามิล ที่เวลาต่าง ๆ กัน และที่อัตราเร็วในการกวนต่าง ๆ

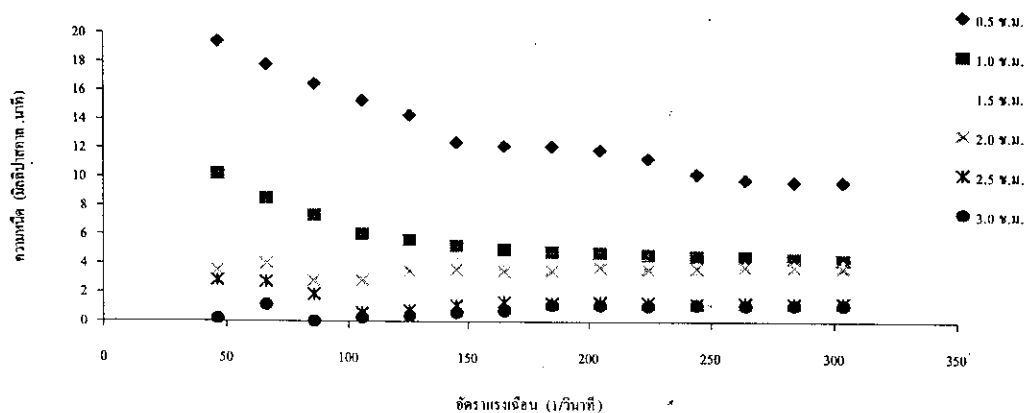


ภาพที่ 4-15 Power input และ DE ของการย่อยสลายแป้งด้วยเอนไซม์ เทอร์รามิล ที่เวลาต่าง ๆ กัน และที่อัตราเร็วในการกวนต่าง ๆ

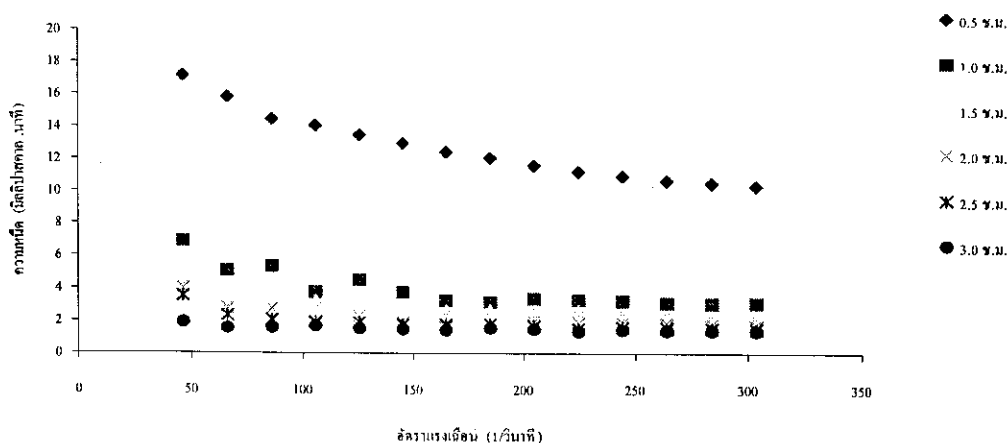
3 คุณสมบัติทางรีโอโลยี

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืด (viscosity) กับอัตราแรงเฉือน (shear rate) พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราแรงเฉือนมากขึ้น ความหนืดของสารจะลดลงเรื่อย ๆ โดยสังเกตได้จากตัวอย่างที่ 0.5 ชั่วโมงแรกของทุก ๆ อัตราความเร็วรอบของใบพัดความหนืดจะสูงกว่าชั่วโมงอื่น (โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความเร็วรอบ 200 รอบ/นาที) ที่ 0.5 ชั่วโมงของอัตราเร็วในการกวนทั้ง 3 ระดับ จะมีความหนืดสูงสุด ดังภาพที่ 4-14 (ก-ค) แสดงให้เห็นว่าช่วงนี้การย่อยสลายของแป้งยังไม่สมบูรณ์ นอกจากนั้นตัวอย่างที่ 0.5 ชั่วโมงของทุกอัตราเร็วในการกวน กราฟแสดงความหนืด (viscosity curve) และกราฟความเครียด-อัตราแรงเฉือน (flow curve) แสดงคุณสมบัติของของเหลวที่มีความซับซ้อนทาง (rheological complexity) คือ เมื่ออัตราแรงเฉือนมากขึ้น ความหนืดจะลดลง เส้นกราฟที่ได้จะเป็นเส้นลาดลงซึ่งแสดงคุณสมบัติของ shear thinning ซึ่งของเหลวนี้อยู่ในพวก pseudoplastic fluid

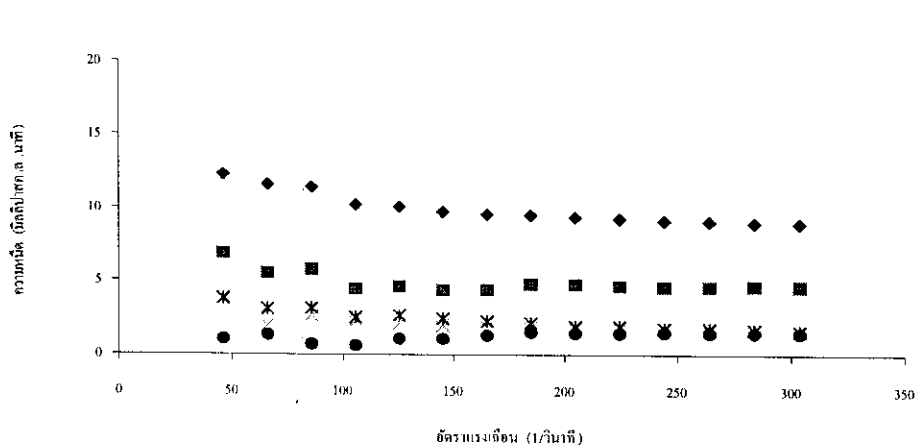
หลังจาก 1 ชั่วโมงไปแล้ว ตัวอย่างจากทุก ๆ ความเร็วรอบในการกวน (โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความเร็วรอบ 400 รอบ/นาที) ความหนืดจะลดลงอย่างมาก ซึ่งความหนืดของทุก ๆ ตัวอย่างลดลงสัมพันธ์โดยตรงกับอัตราเร็วในการกวนและเวลาในการย่อยสลาย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการย่อยสลายแป้งเกิดขึ้นได้ดีหลังจาก 1 ชั่วโมงไปแล้ว โดยผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับการทดลองที่ผ่านมาแล้วในตอนต้น ๆ เมื่อเวลาในการย่อยสลายนานขึ้นประกอบกับที่ ๆ อุณหภูมิสูง [การย่อยสลายที่ 90 องศาเซลเซียส เส้นกราฟแสดงความหนืดที่ได้ค่อนข้างจะคงที่หรือลดลงเพียงเล็กน้อย และกราฟความเครียด-อัตราแรงเฉือนแสดงความสัมพันธ์แบบเส้นตรงซึ่งเป็นคุณสมบัติของของเหลวในอุดมคติ (Newtonian fluid) (ภาพที่ 4-15 ก-ค)] แสดงให้เห็นว่าเมื่อเวลาผ่านไปแป้งเริ่มมีการทำงานนานขึ้น โดยเฉพาะที่ความเร็วรอบในการกวนสูง การย่อยสลายแป้งเพิ่มมากขึ้น มีผลทำให้ความหนืดของแป้งลดลง และยังถ้าการย่อยสลายเสร็จสมบูรณ์ค่าความหนืดจะคงที่ และผลจากการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการย่อยพบว่าให้ผลสัมพันธ์กันคือเมื่อความหนืดคงที่ปริมาณน้ำตาลที่ได้สูงสุดค่อนข้างคงที่ด้วย



ก.ความเร็วในการกวณผสมของใบพัดที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที

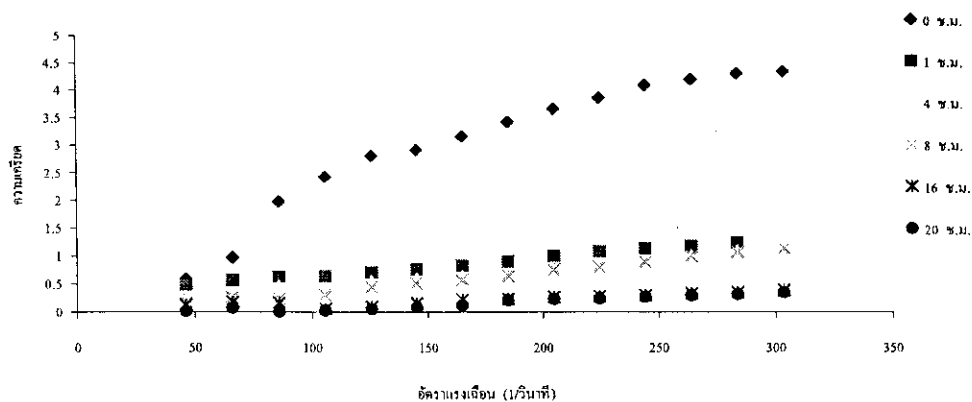


ข.ความเร็วในการกวณผสมของใบพัดที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที

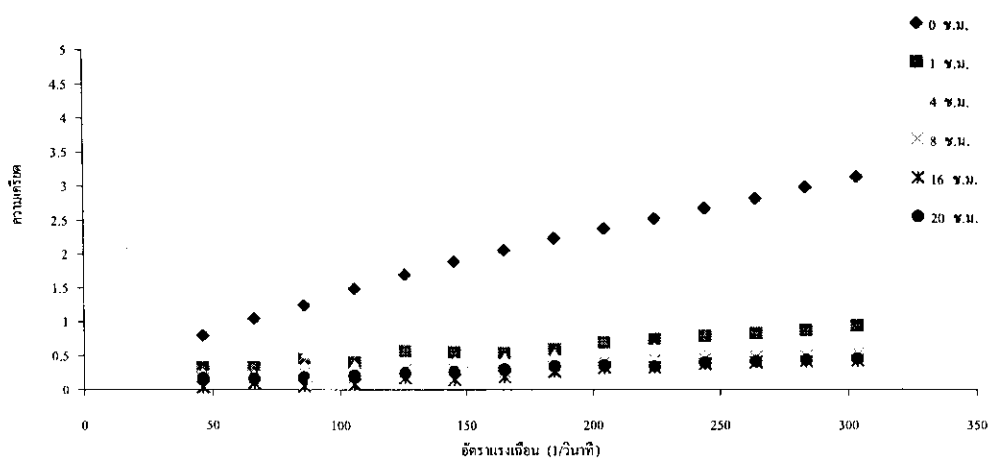


ค.ความเร็วในการกวณผสมของใบพัดที่ความเร็วรอบ 400 รอบต่อนาที

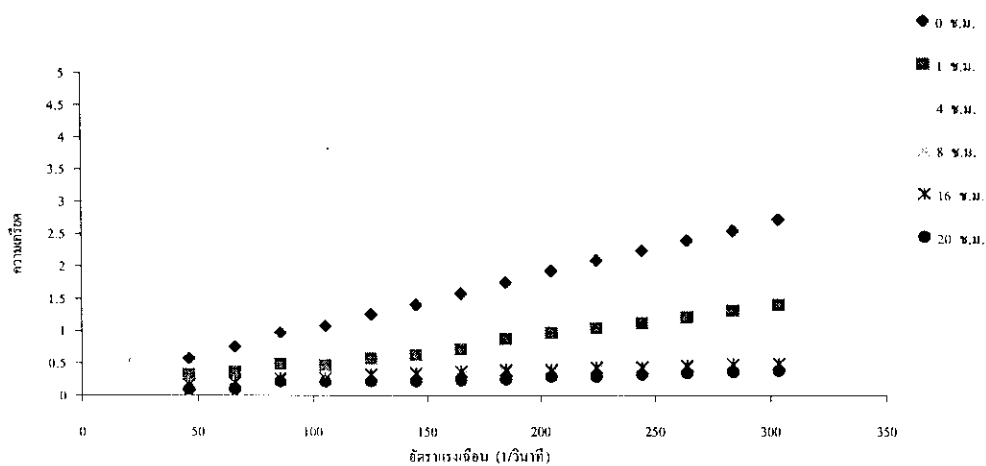
ภาพที่ 4-16 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอัตราแรงเฉือนของตัวอย่างแป้งที่ได้จากการสลายด้วยเอนไซม์เทอร์มาลีนในปฏิกรณ์ชีวภาพที่มีการกวณผสมด้วยใบพัด Ekato Intermig ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ และเวลาต่าง ๆ กัน



ก.ความเร็วในการกวนผสมของใบพัดที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที



ข.ความเร็วในการกวนผสมของใบพัดที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที



ค.ความเร็วในการกวนผสมของใบพัดที่ความเร็วรอบ 400 รอบต่อนาที

ภาพที่ 4-17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับอัตราเร่งของตัวอย่างแปรงที่ได้จากการสลายด้วยเอนไซม์เทอร์มามิล ในปฏิกรณ์ชีวภาพที่มีการกวนผสมด้วยใบพัด Ekato Intermig ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ ที่เวลาในการย่อยต่าง ๆ

2. การย่อยแป้งมันสำปะหลังครั้งสุดท้ายด้วยเอนไซม์กลูโคอะไมเลส

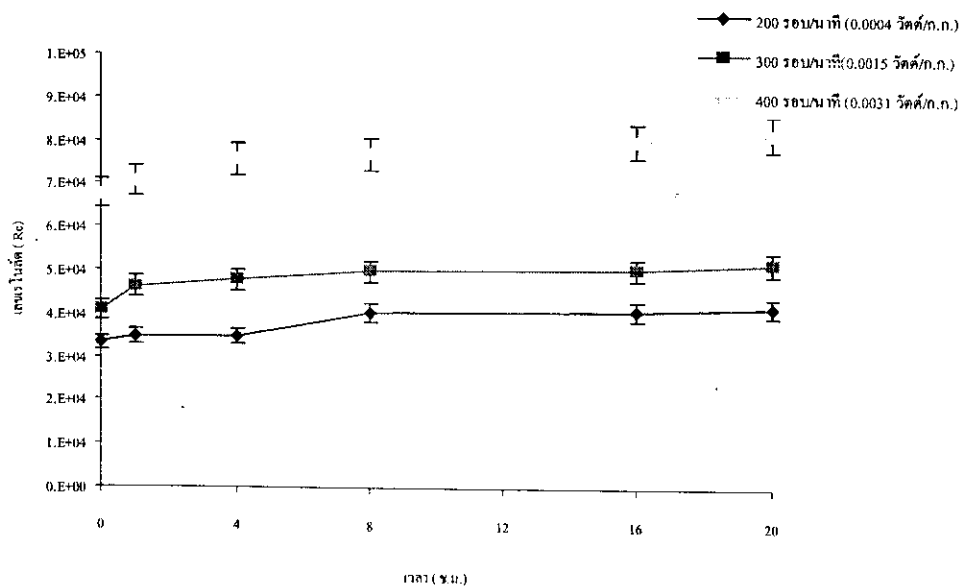
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า Power input และ Re

ที่อัตราการกวนผสมที่ต่ำ (200 รอบ/นาที) จะมีการใช้พลังงานน้อยกว่าที่อัตราการกวนผสมที่สูง (300 และ 400 รอบ/นาที) แต่ก็ไม่ได้แตกต่างกันมาก เนื่องจากสารละลายมีความหนืดที่ค่อนข้างต่ำจึงไม่ค่อยสิ้นเปลืองพลังงานมากนักเช่นเดียวกับการย่อยสลายแป้งในช่วงแรก และของเหลวที่อัตราการกวนผสมทุกระดับมีอยู่ในสถานะปั่นป่วน (ค่า Re สูงกว่า 10^4) ดังภาพ 4-18 โดยที่ช่วงโมเมนต์แรก ๆ ของการทดลองจะมีค่าความหนืดสูงสุด ประมาณ 2 - 3 เท่าของน้ำ (2 - 3 มิลลิปาสคาล วินาที) และเมื่อเวลาผ่านไป ค่า Re ก็จะมีค่าสูงมากขึ้น และความหนืดลดลงซึ่งอธิบายได้ว่าอัตราการกวนผสมที่ความเร็วรอบ 200, 300 และ 400 รอบ/นาที มีความหนืดอยู่ในช่วง 0.5 - 3.5 มิลลิปาสคาล วินาที โดยอัตราการกวนผสมที่ทุก ๆ ความเร็ว ในช่วงแรก ๆ ของการย่อยสลายความหนืดจะมีค่าสูง และเมื่อเวลาผ่านไปความหนืดจะลดลง (ภาพที่ 4-18 ก-ค) เนื่องจากเอนไซม์กลูโคอะไมเลสย่อยโอลิโกแซคคาไรด์ เมื่อเวลาผ่านไปความหนืดของสารละลายคงที่เนื่องจากการย่อยสลายเริ่มจะสมบูรณ์แล้ว โดยดูได้จากปริมาณน้ำตาลที่เพิ่มขึ้น ดังภาพ 4-19

5. คุณสมบัติทางรีโอโลยี

ความสัมพันธ์ระหว่างของความหนืด กับอัตราแรงเฉือนพบว่า เมื่อเพิ่มอัตราแรงเฉือนมากขึ้น ความหนืดของตัวอย่างลดลงในช่วงอัตราแรงเฉือนต่ำ (น้อยกว่า 150 ต่อวินาที) ความหนืดค่อนข้างต่างกัน (เล็กน้อย) อย่างไรก็ตามความต่างนี้สัมพันธ์ผกผันกับเวลาในการย่อยสลาย และอัตราเร็วในการกวนของใบพัด ผลจากการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลพบว่าปริมาณน้ำตาลที่ได้จากตัวอย่างต่าง ๆ สัมพันธ์ผกผันกับความหนืด

ที่อัตราแรงเฉือนระหว่าง 150-300 ต่อวินาที ตัวอย่างจากทุก ๆ อัตราเร็วในการกวนและทุกช่วงโมเมนต์ของการย่อยพบว่าของเหลวแสดง คุณสมบัติของเหลวเป็น Newtonian fluid ที่มีความหนืดประมาณสองเท่าของน้ำ เนื่องจากโมเลกุลของน้ำตาลที่ได้จากการย่อยสลายแป้งมีขนาดเล็ก ถึงแม้ว่าจะทำการย่อยที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส (30 องศาเซลเซียสต่ำกว่าการย่อยครั้งแรก ภาพที่ 4-17 ก-ค) แม้อัตราแรงเฉือนสูงขึ้นความหนืดของตัวอย่างก็ไม่เปลี่ยนแปลงหรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากในทุก ๆ ตัวอย่าง



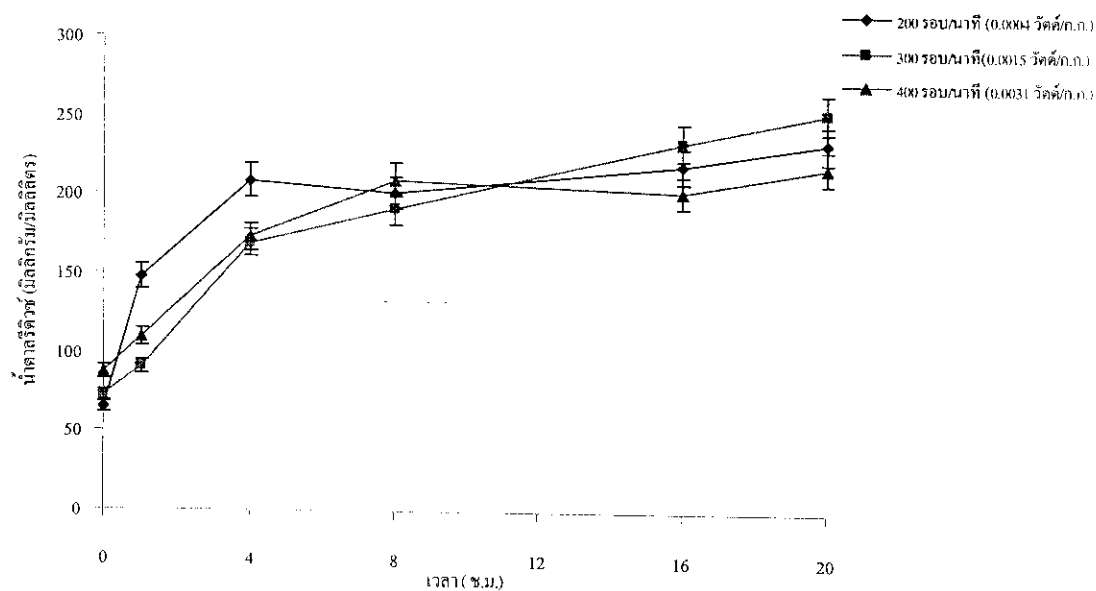
ภาพที่ 4-18 ค่า Re ขณะย่อยสลายแป้งครั้งที่สองด้วยเอนไซม์กลูโคอะไมเลสที่อัตราเร็วของใบพัด และเวลาในการย่อยสลายต่าง ๆ กัน

2.3 น้ำตาลรีดิซซ์ และค่า DE

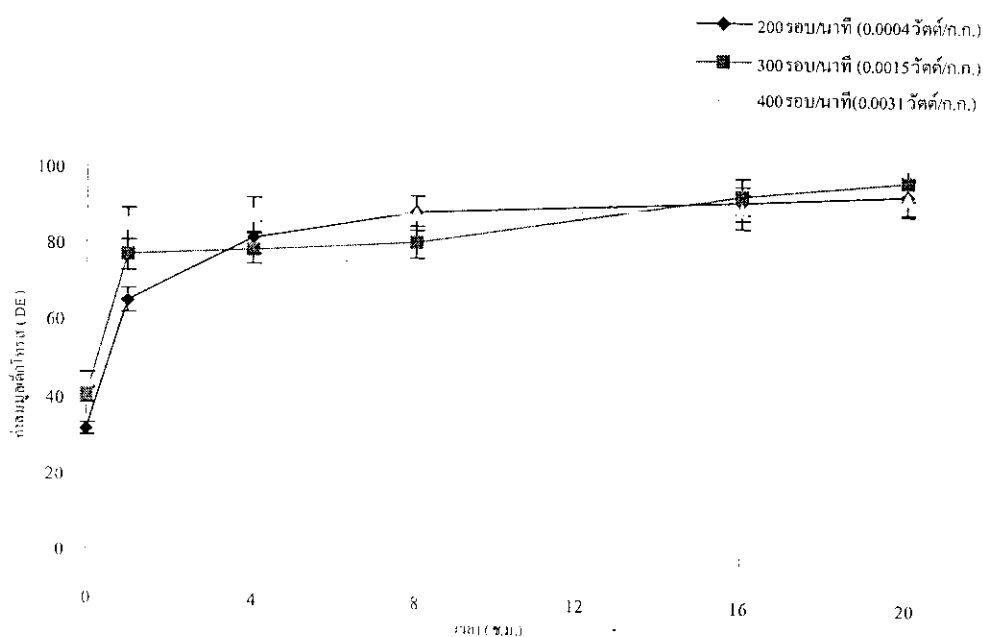
จากการทดลองพบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิซซ์ในขั้นที่สุดท้ายนี้ จะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วมากกว่าการทำงานของเอนไซม์ตัวแรก เพราะเอนไซม์จะเข้าไปตัดโครงสร้างของโอลิโกแซคคาไรด์ จากปลายด้านนอนรีดิซซ์ที่ตำแหน่ง แอลฟา (1-4), (1-3) และ (1-6) เข้าไปที่ละหน่วย ซึ่งจะทำการย่อยโครงสร้างของโอลิโกแซคคาไรด์ต่อจากเอนไซม์ตัวแรกทำให้เกิดผลผลิตเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก ๆ แล้ว ซึ่งทำให้ปริมาณน้ำตาลเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 16 ชั่วโมง แสดงว่าการย่อยครั้งสุดท้ายจะสมบูรณ์แล้ว ปริมาณน้ำตาลที่เวลา 20 ชั่วโมง เพิ่มขึ้นเล็กน้อย และพบว่าอัตราการกวนผสมที่เหมาะสมคือความเร็วใบพัด 300 รอบต่อนาที เพราะให้ปริมาณสูงที่สุด คือ 253 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร รองลงมาคือความเร็วรอบใบพัด 200 รอบต่อนาที ได้ปริมาณน้ำตาล 233 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร และความเร็วรอบใบพัด 400 รอบต่อนาที ได้ปริมาณน้ำตาล 218 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

ดังนั้นความเร็วรอบที่เหมาะสมในการย่อยขั้นนี้ คือ ความเร็วใบพัด 300 รอบต่อนาที จึงทำให้เกิดสภาวะการกวนผสมที่ดีและไม่เกิดการแทรกของฟองอากาศลงในปฏิกรณ์ปริมาณน้ำตาลจากการย่อยโดยดูได้จากภาพที่ 4-19 และค่า DE (ภาพที่ 4-20) สูงสุด คือ 98.57 ซึ่งจากการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ พบว่าการกวนผสมที่ความเร็วรอบของ

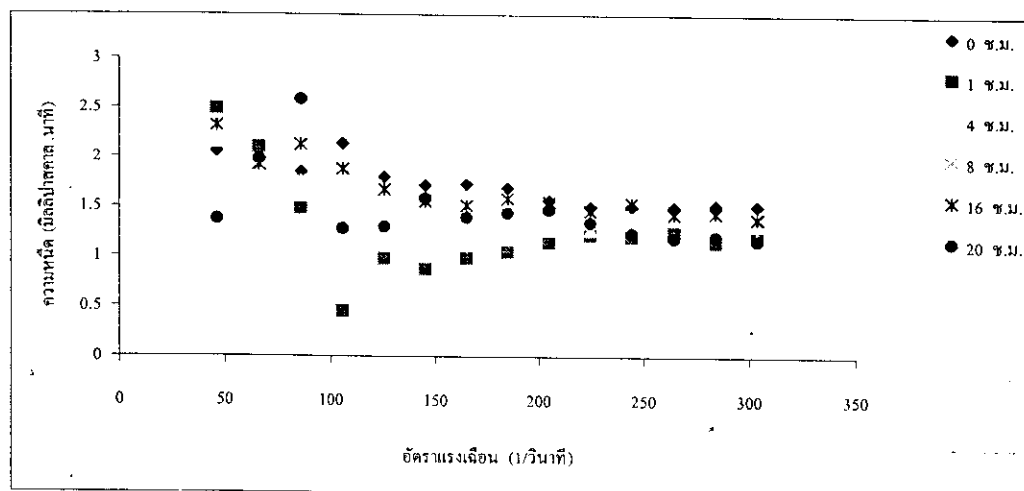
ใบพัดต่าง ๆ กัน มีผลต่อความแตกต่างของปริมาณน้ำตาลที่ได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยที่อัตราความเร็วของใบพัด 200 และ 300 รอบ/นาที ให้ผลไม่แตกต่างกัน



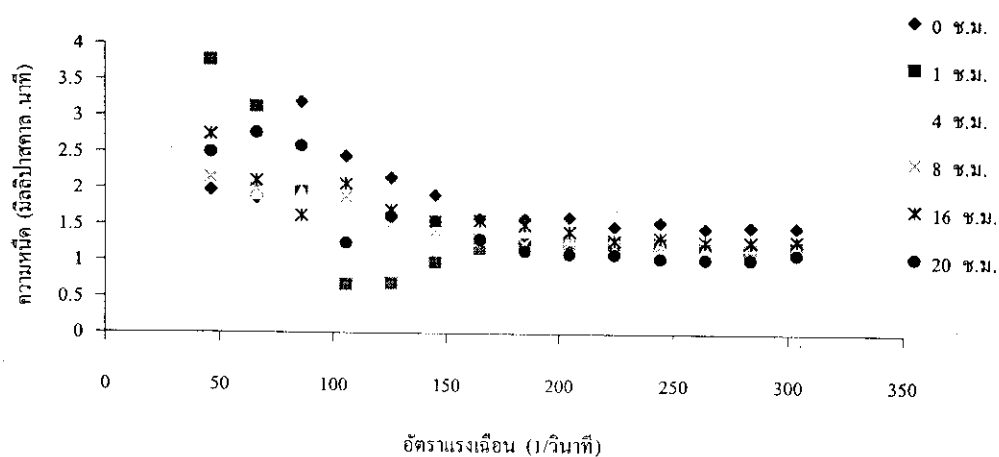
ภาพที่ 4-19 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ของการย่อยสลายแป้งครั้งที่สองด้วยเอนไซม์กลูโคอะไมเลสที่เวลาต่าง ๆ กัน และที่อัตราเร็วในการกวนต่าง



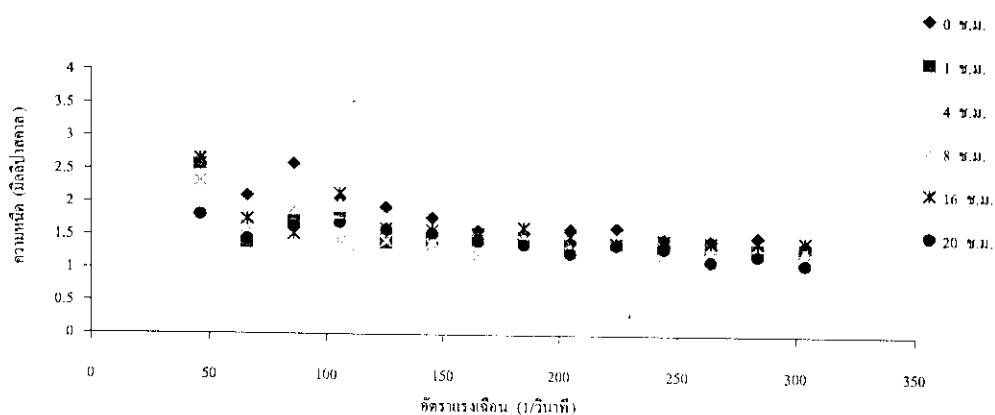
ภาพที่ 4-20 ค่า DE ของการย่อยสลายแป้งครั้งที่สองด้วยเอนไซม์กลูโคอะไมเลสที่เวลาต่าง ๆ กัน และที่อัตราเร็วในการกวนต่าง ๆ



ก.ความเร็วในการกวณผสมของใบพัดที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที

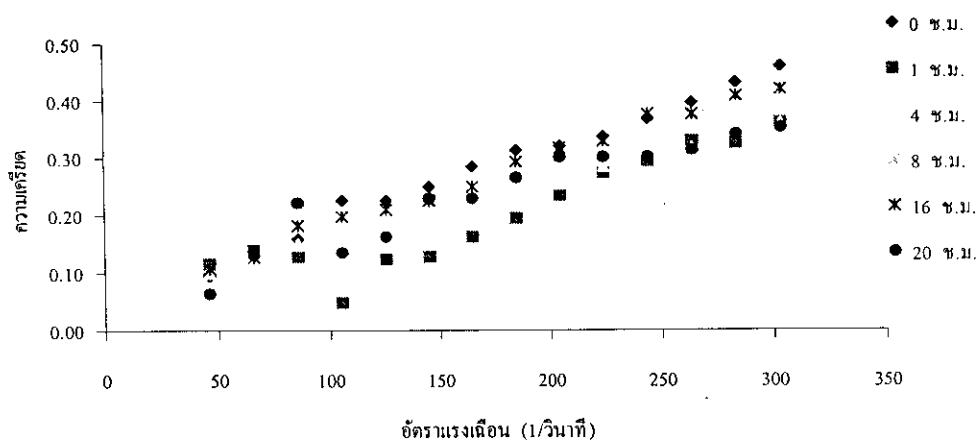


ข.ความเร็วในการกวณผสมของใบพัดที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที

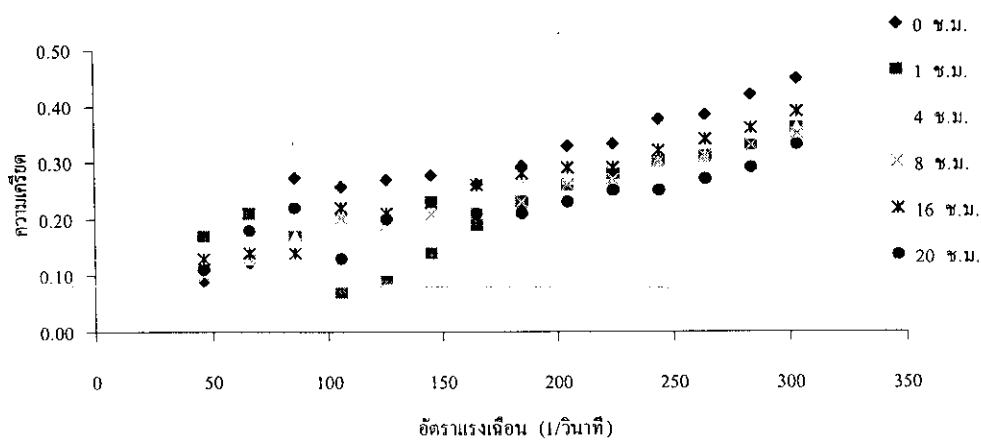


ค.ความเร็วในการกวณผสมของใบพัดที่ความเร็วรอบ 400 รอบต่อนาที

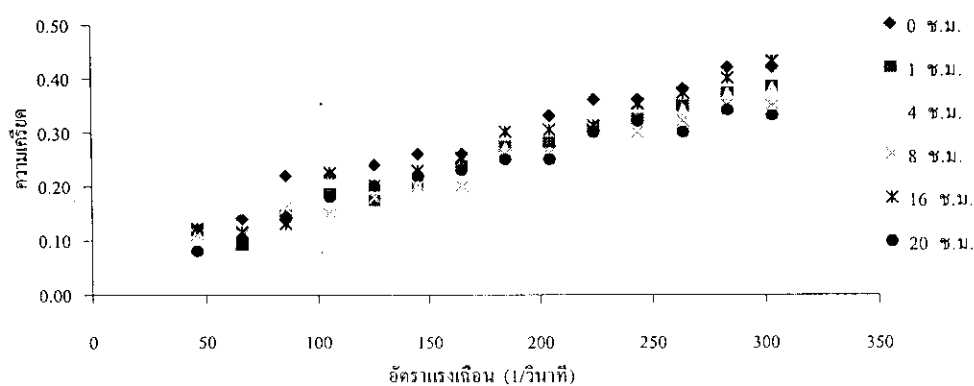
ภาพที่ 4-21 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนากับอัตราแรงเหวี่ยง ของตัวอย่างที่ได้จากการย่อยสลาย
ด้วยเอนไซม์กลูโคอะไมเลสในปฏิกรณ์ชีวภาพที่มีการกวณผสมด้วยใบพัด Ekato
Intermig ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ ที่เวลาต่าง ๆ กัน



ก.ความเร็วในการกวนผสมของใบพัดที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที



ข.ความเร็วในการกวนผสมของใบพัดที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที



ค.ความเร็วในการกวนผสมของใบพัดที่ความเร็วรอบ 400 รอบต่อนาที

ภาพที่ 4-22 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับอัตราแรงเฉือนของตัวอย่างที่ได้จากการย่อยสลายด้วยเอนไซม์กลูโคอะไมเลสในปฏิกรณ์ชีวภาพที่มีการกวนผสมด้วยใบพัด Ekato Interdig ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ ที่เวลาต่าง ๆ กัน