บทที่ 4

สรุปและวิจารณ์

4.1 ลักษณะทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังที่ใช้เป็นสารตั้งต้น

จากการสุ่มตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังที่จำหน่ายอยู่ในท้องตลาด จำนวน 4 ตัวอย่าง บริษัทที่ผลิต (ชินเฮงหลี ซื้อเลี่ยงเฮงจั่น ตงจั่น และไทยผลิตผลแป้งมัน) นำมาตรวจสอบเบื้องต้น โดยละลายแป้งมันสำปะหลังความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ พิจารณาสีของสารละลาย พีเอช ตะกอนและสิ่งเจือปนต่าง ๆ พบว่า แป้งมันสำปะหลังที่ผลิตโดยบริษัทตงจั่น (ตราปลามังกร) มีคุณสมบัติทางกายภาพดีที่สุด หลังจากนั้นทำการตรวจสอบคุณลักษณะทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังตามวิธีทดลองของ A.O.A.C. และ มอก.274-2521 พบว่า แป้งมันสำปะหลังดังกล่าวมีคุณลักษณะของชั้นคุณภาพอยู่ในชั้นที่ 2 แสดงให้เห็นว่า แป้งมันสำปะหลังที่นำมาทดลองมีคุณลักษณะทางเคมีอยู่ในเกณฑ์ดี โดยเฉพาะปริมาณแป้งมีปริมาณสูง (ประมาณ 96 เปอร์เซ็นต์) สิ่งเจือปนน้อย ซึ่งมีผลกระทบต่อผลผลิตของน้ำเชื่อมฟรักโทสและการทำงานของเอนไซม์ย่อยแป้งในกระบวนการผลิต

4.2 สภาวะที่เหมาะสมต่อการไฮโดรไลซ์แป้งมันสำปะหลังด้วย Termamyl (Liquefaction : Galatinization and Dextrinization Processes)

งานวิจัยนี้ดัดแปลงการทดลองในการไฮโดรไลซ์แป้งมันสำปะหลัง ตามวิธีของ NOVO Industri เป็นข้อมูลเบื้องต้น โดยใช้ Termamyl (120 KNU/g) หรืออัลฟาอะไมเลส ซึ่งได้จาก Bacillus licheniformis ตามข้อแนะนำของ NOVO Industri เอนไซม์ชนิดนี้เหมาะสมใช้ในการไฮโดรไลซ์แป้งข้าวโพด แป้งสาลี และแป้งมันฝรั่ง แต่การทดลองนี้ดัดแปลงใช้กับแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งมีองค์ประกอบทางกายภาพและเคมีแตกต่างจากแป้งทั้ง 3 ชนิด ดังกล่าวมาแล้วข้างต้น ดังนั้นจึงทำการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซ์แป้งมันสำปะหลัง

จากผลการทดลอง แปรค่าปริมาณ Termamyl อุณหภูมิของการไฮโดรไลซ์ และระยะเวลาที่เหมาะสมของการไฮโดรไลซ์พบว่า ที่ปริมาณ Termamyl 1.2 กรัม (Termamyl ต่อ 1,000 กรัม แป้งมันสำปะหลัง) อุณหภูมิของการไฮโดรไลซ์ที่ 105 องศาเซลเซียส ได้น้ำตาลรีดิวซ์สูงสุดเท่ากับ 78.55 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ปฏิกิริยาเริ่มคงที่ในเวลา 2 ชั่วโมง และให้ค่าสมมูลเดกซ์โทรสเท่ากับ 20 ดังนั้นจึงเลือกใช้สภาวะดังกล่าวทำการทดลองในครั้งต่อ ๆ ไป

4.3 สภาวะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซ์แป้งมันสำปะหลังไฮโดรไลเซทด้วย AMG และ Promozyme ในขวดเขย่าและหอปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบไม่ต่อเนื่อง (Saccharification Process)

นำแป้งมันสำปะหลังไฮโดรไลเซทที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ตามวิธีทดลอง (ข้อ 2.9.1) ซึ่งไฮโดรไลเซทที่ได้มีสีน้ำตาลอ่อนขุ่นเล็กน้อย ความหนืดลดลง ทำการไฮโดรไลซ์อีกดัดแปลงตามวิธีของ NOVO Industri เพื่อเปลี่ยนแป้งทั้งหมดให้เป็นน้ำตาล โดยใช้ AMG หรืออะไมโลกลูโคซิเดส (200 AGU/ml) เป็นเอนไซม์ที่ได้จาก Aspergillus niger นอกจากนี้ยังใช้ Promozyme (200 PUN/g) ได้จาก Bacillus acidopullulyticus เพื่อช่วยเร่งปฏิกิริยาการไฮโดรไลซ์ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ทำการไฮโดรไลซ์ในขวดเขย่าขนาด 500 มิลลิลิตร และพัฒนาการไฮโดรไลซ์ในหอปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด แบบไม่ต่อเนื่องปริมาตร 1,200 มิลลิลิตร แปรค่าปริมาณ AMG และ Promozyme อุณหภูมิของปฏิกิริยาและระยะเวลาที่เหมาะสม จากการทดลองพบว่าเมื่อใช้ปริมาณ AMG 1.5 มิลลิลิตร (AMG ต่อ 1,000 กรัมแป้ง) ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ได้น้ำตาลรีดิวซ์สูงสุดเท่ากับ 371.52 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ปฏิกิริยาเริ่มคงที่ในเวลา 48 ชั่วโมง ในขวดเขย่า ส่วนในหอปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด ได้น้ำตาลรีดิวซ์สูงสุดเท่ากับ 371.96 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ปฏิกิริยาคงที่ในเวลา 40 ชั่วโมง ได้ค่าสมมูลเดกซ์โทรสเท่ากับ 93 นอกจากนี้การใช้ปริมาณ Promozyme 0.6 กรัม (Promozyme ต่อ 1,000 กรัมแป้งมันสำปะหลัง) ร่วมกับ AMG 1.3 มิลลิลิตร(AMG ต่อ 1,000 กรัม แป้งมันสำปะหลัง) ไฮโดรไลซ์แป้งมันสำปะหลังไฮโดรไลเซททั้งในขวดเขย่าและหอปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด สามารถเร่งปฏิกิริยาการไฮโดรไลซ์มีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้น้ำตาลรีดิวซ์สูงสุด เท่ากับ 386.30 และ 391.88 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ

ค่าสมมูลเดกซ์โทรสอยู่ในช่วง 96-98 แต่เวลาของการเร่งปฏิกิริยาแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด มีค่าเท่ากับ 40 และ 36 ชั่วโมง ตามลำดับ

การทำลายและไม่ทำลายแอคติวิตีของ Termamyl ก่อนนำไปไฮโดรไลซ์ด้วย AMG และ Promozyme ไม่มีผลกระทบต่อการทำงานของเอนไซม์ ได้น้ำตาลรีดิวซ์ไม่แตกต่างกัน แต่การทำลายแอคติวิตีของ Termamyl ทำให้แป้งมันสำปะหลังไฮโดรไลเซทมีความเข้มของสีสูงกว่าประมาณ 60-100 หน่วย (ICUMSA color index) ซึ่งทำให้เสียเวลาและค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นในการกำจัดภายหลัง

4.4 สภาวะที่เหมาะสมต่อการเร่งปฏิกิริยากลูโคสไอโซเมอไรเซชั่นด้วย Sweetzyme T

Sweetzyme T คือ กลูโคสไอโซเมอเรสที่ได้จาก Streptomyces murinus ซึ่งนำเอาเซลล์ที่มีกลูโคสไอโซเมอเรสมาตรึง (whole cell immobilized) โดยใช้กลูตารัลดีไฮด์เป็นสารเชื่อมโยง (cross-linking) (NOVO Industri A/S, 1987) การเร่งปฏิกิริยาของ Sweetzyme T เหมือนกับกลูโคสไอโซเมอเรสทั่วไปที่ต้องการไดวาเลนท์แคทไอออน เช่น Mg^{++} (Richard, 1979) เพื่อกระตุ้นการทำงานและป้องกันไม่ให้สูญเสียสภาพธรรมชาติ (denature) จากการทดลองแปรค่าปริมาณแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4.7H_2O$) พบว่าแอคติวิตีของ Sweetzyme T เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อความเข้มข้นแมกนีเซียมซัลเฟตเพิ่มขึ้น แอคติวิตีจะสูงสุดที่ความเข้มข้น 0.20 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) แล้วแอคติวิตีค่อย ๆ ลดต่ำลง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟตมากขึ้น ดังนั้นในการทดลองต่อ ๆ ไปจึงใช้แมกนีเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้น 0.20 เปอร์เซ็นต์(น้ำหนักต่อปริมาตร) นอกจากนี้การใช้โซเดียมเบตาไบซัลไฟท์ ($Na_2S_2O_5$) ความเข้มข้น 0.04 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) ร่วมกับแมกนีเซียมซัลเฟต 0.02 เปอร์เซ็นต์ ในการเร่งปฏิกิริยากลูโคสไอโซเมอเรส จะช่วยให้ Sweetzyme T มีแอคติวิตีสูงขึ้น

ในการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อการเร่งปฏิกิริยาของ Sweetzyme T อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อแอคติวิตีของ Sweetzyme T จะไม่แตกต่างกันมากนักคือ อยู่ในช่วง 60-80 องศาเซลเซียส หากอุณหภูมิสูงหรือต่ำไปจากช่วงนี้แล้วทำให้แอคติวิตีลดลง แต่เมื่อตรวจสอบ

ผลกระทบของอุณหภูมิต่อความเสถียรของแอคติวิตี Sweetzyme T พบว่า อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส Sweetzyme T มีความเสถียรของแอคติวิตีสูงสุด

เมื่อทำการทดลองเร่งปฏิกิริยากลูโคสไอโซเมอไรเซชั่นโดย Sweetzyme T ในถังกวนแบบไม่ต่อเนื่อง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ควบคุมพีเอชของสารละลายให้อยู่ในช่วงพีเอช 7.5-8.0 ถ้าใช้ความเข้มข้นของกลูโคสสูงกว่า 45 เปอร์เซ็นต์ อัตราของการเร่งปฏิกิริยาเริ่มลดลง ถึงแม้ว่าปริมาณฟรักโทสจะเพิ่มขึ้นแต่เปอร์เซ็นต์ conversion ลดลง ซึ่งอาจเนื่องจากการยับยั้งของผลผลิตหรือความเข้มข้นของกลูโคสที่สูง ที่มีผลกระทบต่อการเร่งปฏิกิริยาของ Sweetzyme T. NOVO Industri (NOVO Industri A/S, 1987) ได้รายงานว่า การใช้ความเข้มข้นของกลูโคสที่สูง (มากกว่า 45 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) จะเกิดความต้านทานของฟิล์ม (film resistance) การเร่งปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการผลิตน้ำเชื่อมฟรักโทส

4.5 สภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตน้ำเชื่อมฟรักโทสโดยใช้ Sweetzyme T ในหอปฏิกรณ์แพคเบด

ในการผลิตน้ำเชื่อมฟรักโทสในหอปฏิกรณ์แพคแบดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พบว่า ความเข้มข้นของสารละลายกลูโคสและอัตราการป้อนสารละลายกลูโคสสูงขึ้น มีผลกระทบต่อการผลิต ทำให้ปริมาณฟรักโทสและเปอร์เซ็นต์ conversion ต่ำลง จากรูปที่ 3.13 และ 3.14 พบว่า ความเข้มข้นของสารละลายกลูโคส 45 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก) และที่อัตราการป้อนสารละลายกลูโคส 0.3 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณฟรักโทสสูงสุดที่เกิดขึ้นเท่ากับ 10.49×10^{2} มิลลิโมลต่อมิลลิลิตร มีค่าเปอร์เซ็นต์ conversion เท่ากับ 42 เปอร์เซ็นต์ และมีเวลาสเปซเท่ากับ 120 นาที

4.6 สภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตน้ำเชื่อมฟรักโทสโดยใช้ Sweetzyme T ในหอปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด

การศึกษา Sweetzyme T ในหอปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด ต่อการผลิตน้ำเชื่อมฟรักโทรส พบว่า เมื่อปริมาณของ Sweetzyme T เพิ่มขึ้นอัตราเร็ว การเกิดปฏิกิริยากลูโคสไอโซเมอไรเซชั่นเป็นฟรักโทส จะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นปฏิภาคกัน และจะให้ปริมาณฟรักโทสสูงสุดเพิ่มขึ้นด้วย แต่ก็พบอีกว่า เมื่อปริมาณ Sweetzyme T ในหอปฏิกรณ์มากขึ้น สภาวะของการเกิดฟลูอิไดเซชั่นนี้จะทำให้ Sweetzyme T มีการผุกร่อนสูง เนื่องจากการชนกันของอนุภาคและการชนของ Sweetzyme T กับผนังของหอปฏิกรณ์ ผลจากการติดตามการสูญเสียน้ำหนักของ Sweetzyme T ภายหลังจากการเกิดปฏิกิริยาแล้วเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่ามีการลดลงของน้ำหนักทั้งหมดถึง 5 เปอร์เซ็นต์ สำหรับใช้ Sweetzyme T เริ่มต้นน้ำหนัก 150 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ในขณะที่ค่าการสูญเสียของน้ำหนัก Sweetzyme T เพียง 0.3-0.5 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้ Sweetzyme T น้ำหนัก 75-125 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ในการทดลองต่อ ๆ ไป จึงเลือกใช้ปริมาณ Sweetzyme T น้ำหนัก 125 กรัม ทั้งที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาและปริมาณผลผลิตของฟรักโทสสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าไม่แตกต่างไปจากเมื่อใช้ปริมาณ Sweetzyme T น้ำหนัก 150 กรัม

เมื่อแปรค่าความเข้มข้นของกลูโคสที่เข้าสู่หอปฏิกรณ์พบว่า อัตราเร็วของปฏิกิริยากลูโคสไอโซเมอไรเซชั่น มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ปริมาณฟรักโทสสูงสุดที่เกิดขึ้นจะไม่เป็นปฏิภาคกับความเข้มข้นของกลูโคสที่มีค่าสูงกว่า 45 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก) แม้ว่าจะเพิ่มความเข้มข้นของกลูโคสขึ้นสูงถึง 48 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก) ปริมาณฟรักโทสสูงสุดเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากอัตราการป้อนสารละลายกลูโคสเข้าสู่หอปฏิกรณ์เร็วเกินไป ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ หรืออาจเป็นผลมาจากการยับยั้งของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นก็เป็นได้ แต่เมื่อเรานำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากหอปฏิกรณ์นั้นใส่กลับไปทำปฏิกิริยาใหม่ (recycle) แล้วปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาอีกพบว่า ปริมาณฟรักโทสสูงสุดมีค่าไม่แตกต่างจากเดิม ดังนั้นผลกระทบของการยับยั้งปฏิกิริยาเนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นน่าจะมีผล และอาจเป็นผลกระทบร่วมกับอัตราการป้อนสารละลายกลูโคสเข้าสู่หอปฏิกรณ์เร็วเกินไปด้วย

ในการศึกษาและกระทบของอัตราการป้อนสารละลายกลูโคสเข้าสู่หอปฏิกรณ์ พบว่าเมื่ออัตราการป้อนสารละลายกลูโคสลดลง จะมีผลทำให้ปริมาณฟรักโทสสูงสุดเพิ่มขึ้น นอกจากนี้อัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นด้วยถึงแม้ไม่มากนักก็ตาม ทั้งนี้อธิบายได้ว่า เมื่อลดอัตราการป้อนสารละลายกลูโคสเข้าสู่หอปฏิกรณ์ เท่ากับเป็นการเพิ่มเวลาที่สารละลายกลูโคสมีเวลาอยู่ในหอปฏิกรณ์ (residence time) นานขึ้น ทำให้การเกิดปฏิกิริยาระหว่าง Sweetzyme T กับสารละลายกลูโคสมีเวลามากขึ้น จึงมีผลทำให้ปริมาณฟรักโทสสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย และเมื่อทำการศึกษาผลกระทบของอัตราการให้อากาศเข้าสู่หอปฏิกรณ์ต่อการผลิตน้ำเชื่อมฟรักโทส พบว่าไม่มีความแตกต่างในแง่จลนพลศาสตร์ เมื่อใช้อัตราการให้อากาศในช่วง 1.25-2.5 ลิตรต่อนาที แต่จะพบว่า Sweetzyme T มีการผุกร่อนสูงกว่าเมื่อใช้อัตราการให้อากาศอยู่ในช่วง 3-4 ลิตรต่อนาที โดยสังเกตจากตะกอนขุ่นแขวนลอยภายในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากหอปฏิกรณ์ แสดงให้เห็นว่าอัตราการให้อากาศที่ใช้นั้นมีเพียงพอต่อการกวนในหอปฏิกรณ์อย่างสม่ำเสมอ

4.7 <u>การตรวจสอบคุณลักษณะที่ต้องการของน้ำเชื่อมฟรักโทสที่ผลิตได้</u>

เนื่องจากน้ำเชื่อมฟรักโทส ทางสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม ยังไม่ได้ออกประกาศกำหนดมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงพิจารณาใช้มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกลูโคสซีรัป (มอก.286-2521) และมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำตาลทราย (มอก.56-2516) เป็นเกณฑ์กำหนดคุณภาพของน้ำเชื่อมฟรักโทสที่ผลิตได้ จากการทดลอง (ตารางที่ 3.3 และ 3.4) คุณลักษณะทางเคมีเป็นไปตามกำหนดในตารางผนวกที่ 2 กล่าวคือ น้ำเชื่อมฟรักโทสซึ่งประกอบด้วยน้ำน้อยกว่า 29 เปอร์เซ็นต์ (หลังจากทำให้เข้มข้นในเครื่องระเหยสูญญากาศ) และสารที่ไม่ใช่น้ำมากกว่า 71 เปอร์เซ็นต์ (ประกอบด้วยฟรักโทสมากกว่า 42 เปอร์เซ็นต์ กลูโคส + ฟรักโทส มากกว่า 94 เปอร์เซ็นต์ น้ำตาลโมเลกุลใหญ่น้อยกว่า 6 เปอร์เซ็นต์) นอกจากนี้ความเข้มของสีน้ำเชื่อม วัตถุเจือปนในอาหารและสารปนเปื้อน ก็อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมให้มีได้ในปริมาณสูงสุด

4.8 ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ในเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการผลิตน้ำเชื่อมฟรักโทส โดยใช้ Sweetzyme T ในหอปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด

ปริมาณฟรักโทสที่ผลิตได้ในหอปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด แต่ละครั้ง ได้มากน้อยแตกต่างกันไป พิจารณาจากรูปที่ 3.17-3.23 พบว่า ปริมาณฟรักโทสที่เกิดจากการเร่งปฏิกิริยากลูโคสไอโซเมอไรเซชั่นโดย Sweetzyme T มีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะแรก แล้วค่อย ๆ ช้าลง จนในที่สุดได้ผลผลิตคงที่ในทุกตัวแปร ที่เป็นเช่นนี้แสดงว่า ณ สภาวะดังกล่าวนี้ ระบบการทำงานระหว่าง Sweetzyme T กับสารละลายกลูโคสได้ถึงจุดสมดุลย์ทางเทอโมไดนามิกส์ของระบบทำงานแบบต่อเนื่อง

ในระบบการทำงานแบบต่อเนื่อง ระยะเวลาของการเข้าทำปฏิกิริยาของสารทั้งหลายจึงมิได้มีอิทธิพลต่อการเกิดผลิตผล การศึกษาการผลิตน้ำเชื่อมฟรักโทสในหอปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด ตัวแปรหลักที่สำคัญควรศึกษาได้แก่

ก. ปริมาณ Sweetzyme T (E) (กรัม น้ำหนักแห้ง)
ข. ความเข้มข้นของกลูโคส (S) (เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก)
ค. อัตราการป้อนสารละลายกลูโคส (F) (มิลลิลิตรต่อชั่วโมง)
ง. อัตราการให้อากาศ (U) (ลิตรต่อนาที)

เมื่อกำหนดให้ปริมาณฟรักโทสที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ Y (มิลลิโมลต่อมิลลิลิตร) สมการของความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ในทางคณิตศาสตร์สามารถเขียนได้เป็น

$$Y = f_1 [E, S, F, U] \qquad (1)$$

พิจารณาถึงการเร่งปฏิกิริยาของ Sweetzyme T ในระบบการทำงาน ถ้าเราไม่ป้อนอากาศให้กับระบบ Sweetzyme T ก็ยังสามารถทำงานได้อยู่ ซึ่งระบบจะคล้ายกับแพคเบด ดังนั้นตัวแปรของ U ควรอยู่ในรูปของ 1+U จึงเหมาะสมกว่า ความสัมพันธ์จึงควรอยู่ในรูปของ

$$Y = f_2 [E, S, F, 1+U] \qquad (2)$$

จากการศึกษาเบื้องต้นได้แปรค่าอัตราการให้อากาศเข้าสู่หอปฏิกรณ์เป็น 3 ช่วง(รูปที่ 3.23) ไม่ปรากฏความแตกต่างของการผลิตน้ำเชื่อมฟรักโทส ดังนั้นตัวแปรหลักที่สำคัญจึงเหลือเพียง

$$Y = f_3 [E, S, F] \qquad (3)$$

สมการที่ 3 เมื่อเขียนให้อยู่ในรูปของสมการ Power function จะได้เป็น

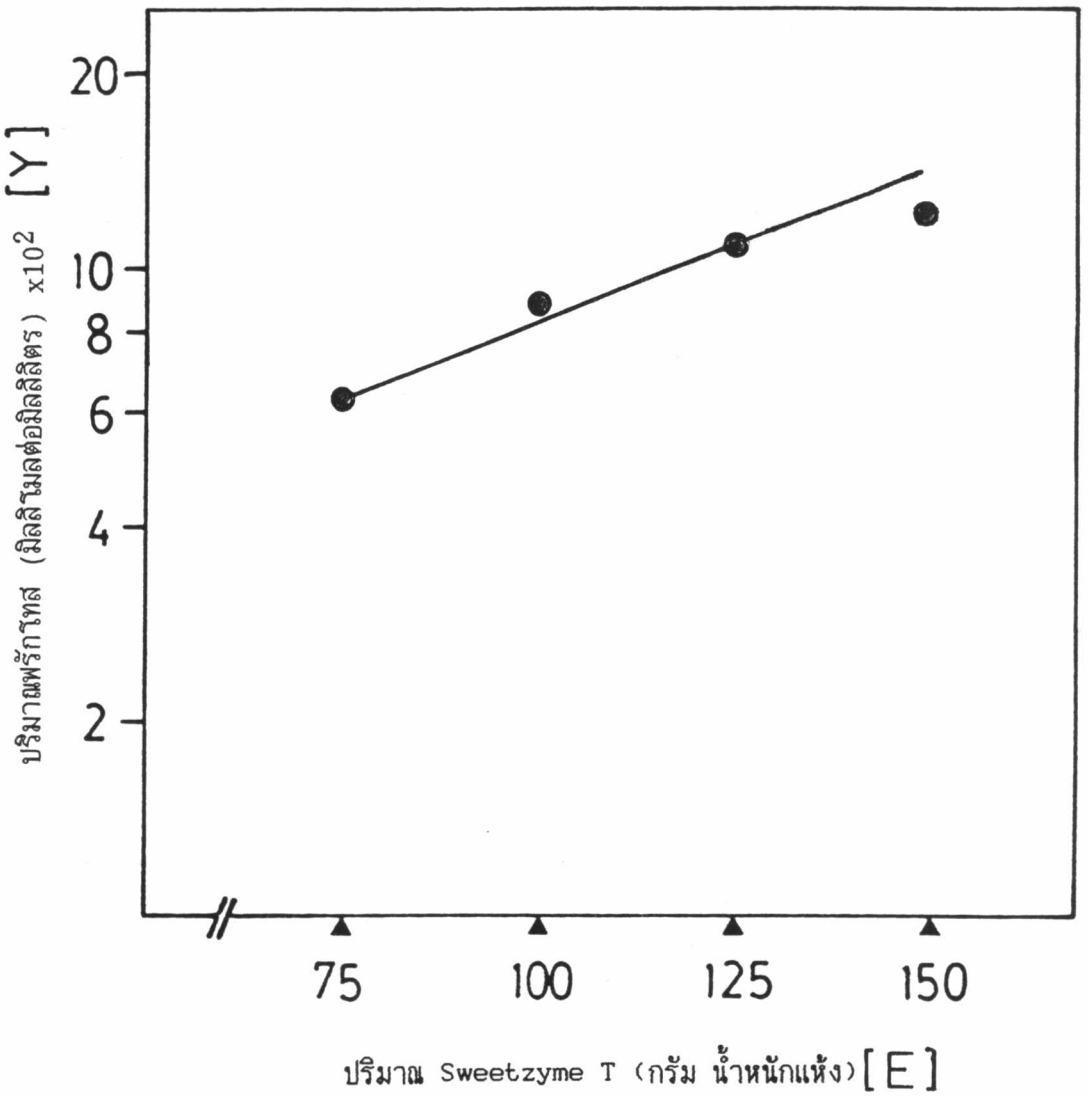
$$Y = k_1 E^{n1} S^{n2} F^{n3} \qquad (4)$$

การศึกษาหาความสัมพันธ์ดังกล่าวควรศึกษาทีละตัวแปร ดังต่อไปนี้

ความสัมพันธ์ Y และ E

ที่ความเข้มข้นของสารละลายกลูโคส 45 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก) อัตราการป้อนกลูโคสเข้าสู่หอปฏิกรณ์เท่ากับ 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งแปรค่าปริมาณ Sweetzyme T (E) ต่าง ๆ กัน จากการทดลองพบว่า ระบบมีการผลิตฟรักโทส ปริมาณเริ่มคงที่เมื่อระยะเวลาการเร่งปฏิกิริยาตั้งแต่ 10 ชั่วโมงผ่านไป นำค่าของปริมาณฟรักโทสที่ได้มาเขียนกราฟหาความสัมพันธ์กับปริมาณของ Sweetzyme T ที่ใช้ในสเกล Semi-logarithmmic ดังแสดงในรูปที่ 3.17 ได้ความสัมพันธ์เป็นกราฟเส้นตรง แสดงว่าความสัมพันธ์ของ Y และ E เป็นแบบเอกซ์โปแนนเชี่ยล ดังสมการ

$$Y = k_2 \exp n_4 E \qquad (5)$$



รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟรักโทส [Y] กับปริมาณ Sweetzyme T [E] เมื่อตัวแปรอื่น ๆ คงที่

ความสัมพันธ์ระหว่าง Y กับ S

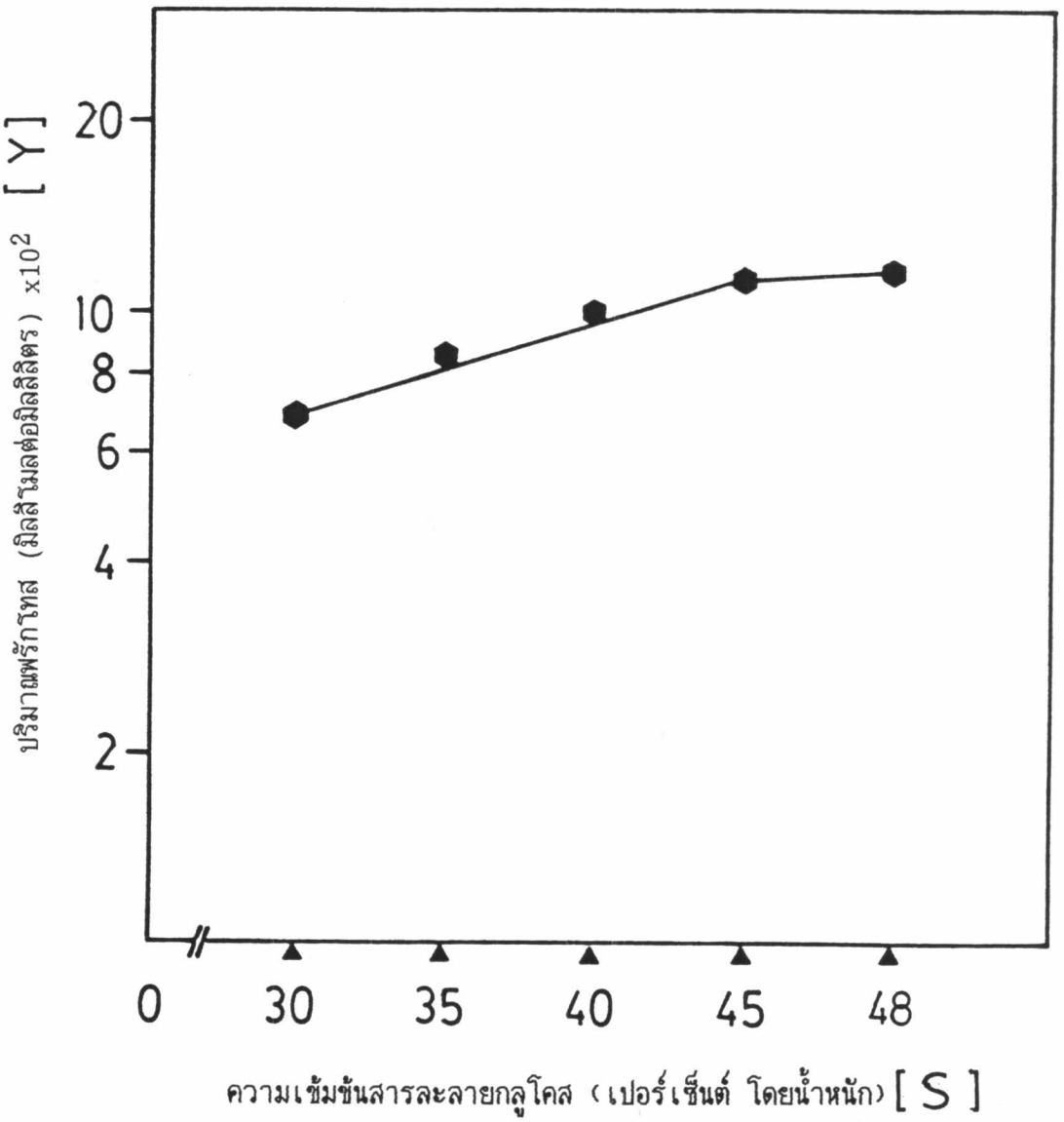
ที่ความเข้มข้นของสารละลายกลูโคส 30-35 การเร่งปฏิกิริยาให้เข้าสู่สภาวะสมดุลย์โดยใช้ Sweetzyme T สามารถผลิตฟรักโทสได้คงที่นั้น ใช้เวลาสั้นกว่าการใช้สารละลายกลูโคสความเข้มข้นสูง ๆ อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าจะใช้ความเข้มข้นกลูโคสสูงถึง 45 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก) ใช้ปริมาณ Sweetzyme T น้ำหนัก 125 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ก็สามารถทำให้ระบบอยู่ในสภาวะสมดุลย์เมื่อเวลาผ่านไป 10 ชั่วโมง ณ เวลา 10 ชั่วโมงนี้ เรานำข้อมูลจากการทดลองที่ได้มาเขียนกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ของ Y และ S ใหม่ในสเกล Semi-logarithmic ปรากฏว่า ที่ความเข้มข้นของสารละลายกลูโคสไม่สูงนัก จะได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง เมื่อความเข้มข้นสูงกว่า 45 เปอร์เซ็นต์ อัตราการเร็วของปฏิกิริยาการเปลี่ยนกลูโคสเป็นฟรักโทส เพิ่มขึ้นน้อย (รูปที่ 3.19) จึงเป็นข้อจำกัดอันหนึ่ง แต่ข้อจำกัดนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของ Sweetzyme T ด้วย ดังนั้นความสัมพันธ์ที่ได้จะอยู่ในเทอมของ

$$Y = k_s S^{n2} \qquad (6)$$

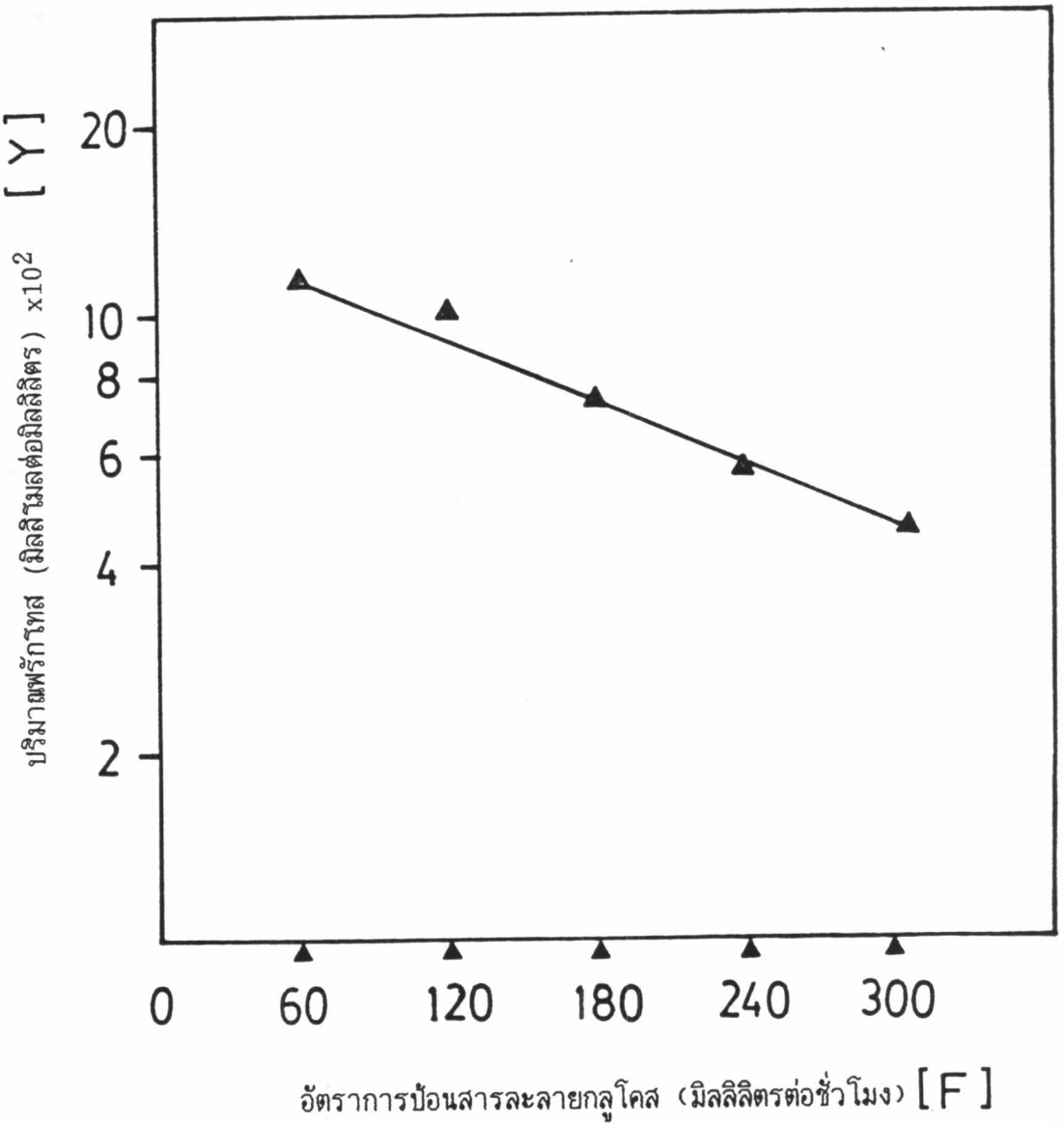
ความสัมพันธ์ Y กับ F

ในการทดลองได้แปรค่าอัตราการป้อนสารละลายกลูโคสเข้าสู่หอปฏิกรณ์ ที่อัตราเร็วต่าง ๆ กัน เพื่อหาอัตราเร็วที่เหมาะสม และได้พบว่าการเพิ่มอัตราการป้อนกลูโคสมากขึ้น โอกาสที่จะเกิดปฏิกิริยาระหว่าง Sweetzyme T กับสารละลายกลูโคสมีน้อยลงหรืออาจกล่าวได้ว่า เวลาที่กลูโคสอยู่ในหอปฏิกรณ์นั้นสั้นลง แต่อย่างไรก็ตามระบบการทำงานของ Sweetzyme T ระบบการทำงานของ Sweetzyme T ในหอปฏิกรณ์เข้าสู่สภาวะสมดุลย์ในเวลา 10 ชั่วโมง เมื่อนำผลการทดลองมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ของ Y และ F เขียนในสเกล Semi-logarithmic ดังแสดงในรูปที่ 3.21 พบว่า ความสัมพันธ์ของ Y และ F อยู่ในฟังก์ชั่นเอกซ์โปแนนเชี่ยล ดังสมการ

$$Y = k_4 \exp n_s F \qquad (7)$$



รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟรักโทส [Y] กับความเข้มข้นของสารละลายกลูโคส [S] เมื่อตัวแปรอื่น ๆ คงที่



รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟรักโทส [Y] กับอัตราการป้อนสารละลายกลูโคส [F] เมื่อตัวแปรอื่น ๆ คงที่

ความสัมพันธ์ของ Y, E, S และ F

จากความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ดังกล่าว เมื่อนำตัวแปรทั้งหมดมาหาความสัมพันธรวม สามารถทำได้โดยรวมสมการที่ 5 6 และ 7 เข้าด้วยกัน จะได้ความสัมพันธ์ใหม่ ดังนี้

$$Y = k_s S^{n2} \exp n_4 I \exp n_5 F \qquad (8)$$

Beck และคณะ (1986) ได้จำลองสมการทางคณิตศาสตร์ของปฏิกิริยากลูโคส-ฟรักโทสไอโซเมอไรเซชั่น โดยใช้เซลล์ตรึงของกลูโคสไอโซเมอเรสในหอปฏิกรณ์แพคเบดและฟลูอิไดซ์เบด พบว่า ตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อกระบวนผลิตน้ำเชื่อมฟรักโทสมีดังนี้

1. ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับตัวเร่งปฏิกิริยา (biocatalyst) จลนพลศาสตร์ และสมบัติของของไหล (kinetic and fluid properties) ได้แก่ d_p, u, ρ_s, ρ_l, D, ϵ_i, v'_m, $C_{G;b}$, K'_m, g, ϵ, X, t

2. สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (effective diffusion coefficient, D_{EFF}) ของการแพร่ผ่านรูพรุน คำนวณได้จากสมการของ Satterfield และคณะ

$$D_{EFF} = (D/t)\ 10^{-2x}$$

3. Dimensionless number : Re, Se, Pe, Ga, Ar, Mv, Da, Bi, Φ

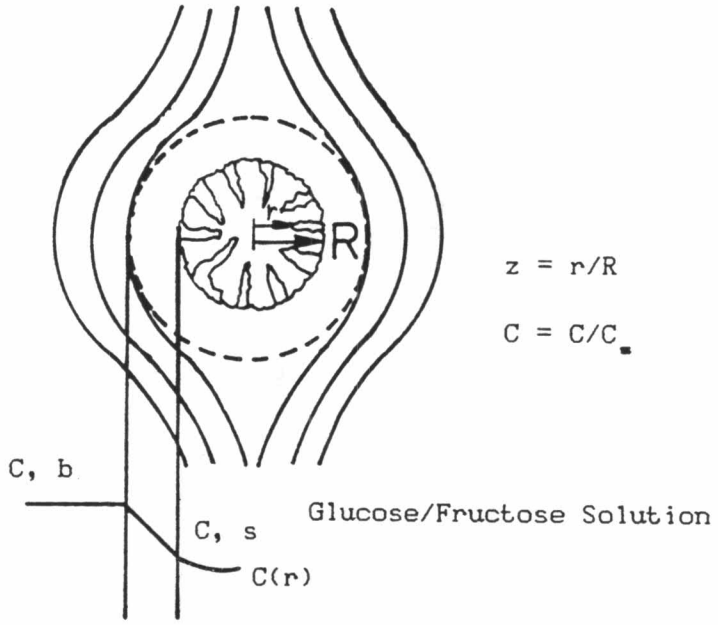
4. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของของไหล/อนุภาค (k_t)

ในหอปฏิกรณ์แพคเบด คำนวณได้จากสมการของ Wilson และ Geankoplis :

$$k_t = [(1.09\ u)/\epsilon]\ Re^{-2/3}\ Sc^{-2/3}$$

ส่วนหอปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด คำนวณจากสมการของ Tournie และคณะ

$$k_t = [(0.245\ D)/d_p]\ Ga^{0.323}\ Mv^{0.3}\ Sc^{0.4}$$



$$\text{Film Diffusion} \quad Svk_t (C_b - C_s) = \frac{V'm \; C_{G;eq}}{k'm + C_{G;eq}}$$

$$\text{Pore Diffusion} \quad \frac{d^2c}{dz^2} + \frac{2}{z}\frac{dc}{dz} = \frac{v[C(r)]R^2}{Deff \; C_{G;s}}$$

$$BC : C = 1 \; ; \; (z = 1), \quad dc/dz = 0 \; ; \; z = 0$$

$$\text{Film and Pore Diffusion} : \frac{d^2c}{dz^2} + \frac{2}{z}\frac{dc}{dz} = \frac{v[C(r)]R^2}{Deff \; C;b}$$

$$BC : k_t (C_b - C) = Deff \; (dc/dz) \; ; \; (z = 1) \; ; \; dc/dz = 0 \; ; \; z = 0$$

รูปที่ 4.4 แนวความคิดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายมวลของของเหลว/อนุภาคและระหว่างอนุภาค

5. effectiveness factor :

ก. ปฏิกิริยาควบคุมโดยการถ่ายเทมวลภายนอก (external mass transfer)

$$\eta = X \frac{(K'm / C_{G;b} + 1)}{(K'm / C_{G;b} + X)}$$

ซึ่ง $$X = 1/2(Da + K'm/C_{G;b} - 1) \left(\pm \sqrt{1 + \frac{4\ K'm/C_{G;b}}{(Da + K'm/C_{G;b} - 1)^2}} - 1\right)$$

ข. ปฏิกิริยาควบคุมโดยการถ่ายเทมวลภายใน (internal mass transfer)

$$\eta_i = 4\pi R^2 D_{EFF} (-dC_G/dr)\ r = R\ /(4/3)\pi R^2 V (C_{G;s})$$

ค. Overall effectiveness factor

$$\eta_o = 4\pi R^2 D_{EFF} (-dc_G/dr)\ r = R\ /(4/3)\pi R^3 V (C_{G;b})$$

จากความสัมพันธ์ของตัวแปรในสมการที่ 8 เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองสมการคณิตศาสตร์ของ Beck และคณะ เป็นเพียงข้อมูลเบื้องต้นของตัวแปรหลักต่าง ๆ ในกระบวนการผลิตน้ำเชื่อมฟรักโทสในหอปฏิกรณ์แพคเบดและฟลูอิไดซ์เบด สมการดังกล่าวนี้ยังมีตัวแปรอื่น ๆ อีกที่ยังไม่ได้ศึกษารวมอยู่ในเทอมของค่าคงที่ k_s ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรอื่น ๆ ให้ละเอียดต่อไป

4.9 ความเป็นไปได้ในการผลิตน้ำเชื่อมฟรักโทสในหอปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด

สภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตน้ำเชื่อมฟรักโทสในหอปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด นอกจากปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของ Sweetzyme T จากกระบวนการผลิต ยังขึ้นอยู่กับเงื่อนไขทางเศรษฐศาสตร์ จึงควรมีการศึกษาในแง่ต่าง ๆ ต่อไป สำหรับในแง่กลไก

ของการเกิดปฏิกิริยา เป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุด ซึ่งมีผลกระทบอย่างมากต่อแอคติวิตีของ Sweetzyme T คือ ข้อจำกัดของการแพร่ของสับสเตรท และผลิตภัณฑ์ผ่านฟิล์ม (film diffusion limitation) ซึ่งล้อมรอบ Sweetzyme T เปรียบเสมือนเยื่อฟิล์มบาง ๆ ซึ่งขวางกั้นการถ่ายเทมวลระหว่างของเหลวภายนอกและภายในเซลล์ตรึงรูป ดังเช่นแนวความคิดของ Beck และคณะ ซึ่งมีผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุด (maximum conversion) ของ Sweetzyme T ด้วย กล่าวคือ ถึงแม้ว่าจะลดอัตราเร็วของการป้อนสับสเตรทลง อัตราการเปลี่ยนกลูโคสเป็นฟรักโทสที่ได้ก็จะไม่เกินค่า maxinum conversion นอกเหนือไปจากปัจจัยธรรมชาติของเอนไซม์เองแล้ว ในทางปฏิบัติจึงควรเลือกใช้อัตราเร็วของการไหลให้สูงพอที่จะลดข้อจำกัดในการแพร่ผ่านฟิล์มนั้น

ในการวิจัยแม้ว่าจะศึกษาในระดับห้องทดลอง และใช้เอนไซม์ที่ผลิตในเชิงการค้าของ NOVO Industri ซึ่งคำนึงถึงการนำไปใช้ประโยชน์ที่เป็นจริงในระดับขยายส่วน จนสามารถพัฒนาการผลิตน้ำเชื่อมฟรักโทสโดยใช้เทคนิคทางฟลูอิ ไดเซชั่น ซึ่งมีศักยภาพในการผลิตสูง ดังนั้นควรมีการศึกษาและพัฒนาการผลิตเอนไซม์ขึ้นเองที่มีประสิทธิภาพสูงต่อการผลิต รวมทั้งการนำไปประยุกต์ใช้ในระดับขยายส่วนต่อไป

สัญญลักษณ์

C_G = ความเข้มข้นของกลูโคส (กก./ลบ.ม)

D = ส.ป.ส. การแพร่ของโมเลกุล (ตรม./วินาที)

D_{EFF} = ส.ป.ส.การแพร่ประสิทธิผล (ตรม./วินาที)

dp = ขนาดของเม็ดเอนไซม์ตรึง (ม.)

g = ความถ่วงจำเพาะ

K'm = ค่าคงที่ของ Michalis-Menten (กก./ลบ.ม.)

k_t = ส.ป.ส.การถ่ายเทมวล (ม./วินาที)

u = ความเร็วของของไหล (ม./วินาที)

V'm = อัตราเร็วของปฏิกริยา [กก./(ลบ.ม.-วินาที)]

P_a, P_i = ความหนาแน่นปรากฏ ความหนาแน่นของของเหลว (กก./ลบ.ม.)

ϵ_i, ϵ = ช่องว่างภายในเม็ดเอนไซม์ตรึง ช่องว่างภายในเบด

X = แฟกเตอร์ในสมการ

T = แฟกเตอร์ tortusity

η = แฟกเตอร์ประสิทธิผล

Ar = ค่าของอาร์เคมีดิส (Archemedes number)

Bi = ค่าของไบออท (Biot number)

Da = ค่าของแครมโคลเลอร์ (Damkochler number)

Ga = ค่าของกาลิเลโอ (Galileo number)

Mv = ค่าของความถ่วงจำเพาะ (Mass volumique number)

Pe = ค่าของเพคเลท (Peclet number)

Re = ค่าของเรโนลด์ (Reynold number)

Se = ค่าของชมิดท์ (Schmidt number)

Φ = Thiele modulus