

วิจารณ์ผลการทดลอง

องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง พบว่ามีความชื้นอยู่ร้อยละ 13.6 และมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตร้อยละ 85.85 ของน้ำหนักแป้งทั้งหมด หรือเทียบเท่ากับ ร้อยละ 99.4 ของน้ำหนักแป้งแห้ง การหาปริมาณความชื้นและคาร์โบไฮเดรตในแป้งนี้ เพื่อประโยชน์ในการคำนวณปริมาณลิเคอไฟสตาไรซ์และ D.E. ของผลิตภัณฑ์

ศึกษาการผลิตมอลโตเดกซ์ทรินโดยการเติมเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสครั้งเดียวในกระบวนการผลิตแบบกะ

จากการค้นคว้าและศึกษาข้อมูลเบื้องต้น พบว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการผลิตมากที่สุด คือ ความเข้มข้นของเอนไซม์ อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการผลิต ดังนั้น จึงเลือกศึกษาอิทธิพลของ ทั้ง 3 ปัจจัยที่มีต่อปริมาณลิเคอไฟสตาไรซ์และ D.E. ของผลิตภัณฑ์ โดยการกำหนดช่วงค่าของแต่ละ ปัจจัยจะศึกษาจากการทดลองที่คล้ายคลึงกัน ซึ่งช่วงค่าของปัจจัยที่เลือกมาศึกษาคือ ความเข้มข้นของเอนไซม์ร้อยละ 0.01 ถึง 0.10 และเวลาในการผลิต 40 ถึง 120 นาทีนั้น คาดว่าเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตมอลโตเดกซ์ทรินที่มีค่า D.E. ไม่เกิน 20 ส่วนอุณหภูมิ 80 ถึง 90 องศาเซลเซียส เป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลส Termamyl 120L^R เมื่อดำเนินการทดลองแล้ว พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่า D.E. สูงสุดถึง 30.75 ± 0.83 ในสภาวะการผลิตที่มีความเข้มข้นของเอนไซม์เป็นร้อยละ 0.10 อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และเวลา 120 นาที นอกจากนี้ ยังมีสภาวะอื่น ๆ อีกที่ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่า D.E. สูงกว่า 20 ดังแสดงในตารางที่ 8 ทั้งนี้เพราะสารตั้งต้นที่ใช้ในการทดลองเป็นสตาไรซ์ที่มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตสูงถึง ร้อยละ 99.4 (โดยน้ำหนักแห้ง) และทำการผลิตในขนาดเล็ก น้ำหนักของน้ำแป้งที่ใช้เพียง 100 กรัม การกวนผสมในระหว่างการผลิตจะใช้เวลาโดยเครื่องเขย่าที่มีความเร็วรอบสูงแทนการ

ใช้ใบพัดกวนแบบการผลิตในขนาดใหญ่ทำให้การผลิตมีประสิทธิภาพ เอนไซม์สัมพันธ์กับสารตั้งต้น (Substrate) ได้ทั่วถึงตลอดเวลาการผลิต จึงทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณโคไฟสตาร์ชและ D.E. สูงกว่า เมื่อเทียบกับสภาวะในการผลิตมอลโตเดกซ์ทรินจากแป้งข้าวเจ้าที่มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตร้อยละ 90.1 (โดยน้ำหนักแห้ง) ในการทดลองของวรัญญู ศรีเดช (2537)

1. ศึกษาผลของความเข้มข้นของเอนไซม์ อุลทงูมิ และเวลาที่ใช้ในการผลิตในกระบวนการผลิตแบบกะต่อปริมาณโคไฟสตาร์ชและค่า D.E. ของมอลโตเดกซ์ทริน

1.1 ผลของความเข้มข้นของเอนไซม์ อุลทงูมิ และเวลาที่ใช้ในการผลิตในกระบวนการผลิตแบบกะต่อปริมาณโคไฟสตาร์ช

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณโคไฟสตาร์ชของผลิตภัณฑ์อันเนื่องมาจากความเข้มข้นของเอนไซม์ อุลทงูมิ เวลาที่ใช้ในการผลิต และอิทธิพลร่วมของปัจจัยทั้งสาม ดังแสดงในตารางที่ 9 พบว่า ปัจจัยทั้งสาม และอิทธิพลร่วมดังกล่าวมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณโคไฟสตาร์ชอย่างมีนัยสำคัญ ดังต่อไปนี้

1.1.1 ผลของความเข้มข้นของเอนไซม์ต่อปริมาณโคไฟสตาร์ชของผลิตภัณฑ์

จากผลการทดลองในตารางที่ 10 พบว่า เมื่อความเข้มข้นของเอนไซม์เท่ากับร้อยละ 0.01 0.05 และ 0.10 ค่าเฉลี่ยของปริมาณโคไฟสตาร์ชของผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเป็นร้อยละ 79.54 91.88 และ 96.26 ตามลำดับ ทั้งนี้เพราะเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอนไซม์ จำนวนเอนไซม์ที่เข้าไปจับบน Active site ในโมเลกุลของแป้งจะเพิ่มขึ้น อัตราการย่อยสลายแป้งเพิ่มขึ้น ปริมาณแป้งที่ละลายได้ หรือโคไฟสตาร์ชจึงเพิ่มขึ้น แต่มีข้อสังเกตว่า เมื่อความเข้มข้นของเอนไซม์เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 0.10 ผลิตภัณฑ์มอลโตเดกซ์ทรินที่ได้จะมีกลิ่นผิดปกติที่เป็นกลิ่นเฉพาะของเอนไซม์ ซึ่งไม่เหมาะแก่การนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหาร

1.1.2 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณโคไฟสตาร์ชของผลิตภัณฑ์

จากผลการทดลองในตารางที่ 11 พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในกระบวนการผลิตเป็น 80 85 และ 90 องศาเซลเซียส ค่าเฉลี่ยของปริมาณโคไฟสตาร์ชของผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเป็นร้อยละ 85.85 90.37 และ 91.47 ตามลำดับ ทั้งนี้เพราะ การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้แป้งเกิดเจลลาคีไนซ์มากขึ้น เอนไซม์ย่อยสลายแป้งเจลลาคีไนซ์นี้ได้ นอกจากนี้ เอนไซม์ Termamyl 120L[®] ที่ใช้ในการผลิตนี้ เป็นเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลส

ที่ทนความร้อนได้สูง สามารถย่อยสลายแป้งในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงได้ และมี Activity สูงสุดที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ดังนั้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 80 เป็น 90 องศาเซลเซียส อัตราการย่อยสลายแป้งจึงเพิ่มขึ้น

1.1.3 ผลของเวลาในการผลิตต่อปริมาณโคไฟสตาร์ชของผลิตภัณฑ์

จากผลการทดลองในตารางที่ 12 พบว่า เมื่อเพิ่มเวลาในการผลิตจาก 40 เป็น 80 นาที ค่าเฉลี่ยของปริมาณโคไฟสตาร์ชของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญจากร้อยละ 85.32 เป็นร้อยละ 91.03 แต่เมื่อเพิ่มเวลาในการผลิตเป็น 120 นาที ค่าเฉลี่ยของปริมาณโคไฟสตาร์ชเท่ากับ 91.34 ซึ่งไม่แตกต่างจากค่าเฉลี่ยของปริมาณโคไฟสตาร์ชที่เวลา 80 นาทีอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เป็นเพราะเมื่อเวลาในการย่อยสลายของเอนไซม์เพิ่มขึ้น ปริมาณโคไฟสตาร์ชซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการย่อยแป้งของเอนไซม์เพิ่มขึ้น จนถึงระดับหนึ่งจะเกิดสภาวะที่เรียกว่า Product inhibition เอนไซม์จะทำงานได้ในอัตราที่ต่ำลง ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นใหม่จึงน้อยลง ดังนั้นค่าเฉลี่ยของปริมาณผลิตภัณฑ์จึงค่อนข้างจะคงที่

1.1.4 ผลของอิทธิพลร่วมของความเข้มข้นของเอนไซม์กับอุณหภูมิ ความเข้มข้นของเอนไซม์กับเวลา และอุณหภูมิกับเวลาในการผลิตต่อปริมาณโคไฟสตาร์ชของผลิตภัณฑ์

จากรูปที่ 4 5 และ 6 ซึ่งแสดงผลของอิทธิพลร่วมของปัจจัยหลัก 2 ปัจจัยใดๆ ต่อปริมาณโคไฟสตาร์ชของผลิตภัณฑ์ พบว่า อิทธิพลของปัจจัยหลัก 2 ปัจจัยใดๆ ใน 3 ปัจจัยที่กล่าวถึง คือ ความเข้มข้นของเอนไซม์ อุณหภูมิ และเวลาในการผลิต จะให้ผลร่วมกันในทางที่เสริมกัน คือ เมื่อเพิ่มระดับของปัจจัยใดปัจจัยหนึ่ง หรือเพิ่มระดับของ 2 ปัจจัยพร้อมๆ กัน มีผลให้ปริมาณโคไฟสตาร์ชเพิ่มขึ้น เนื่องจากทั้ง 3 ปัจจัยมีผลในทางบวกต่อปริมาณโคไฟสตาร์ชทั้งสิ้น และในปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์นั้น ถ้าเลือกทำการทดลองในช่วงอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมแล้วการเพิ่มอุณหภูมิและ/หรือเวลาจะเป็นการเพิ่ม activity ของเอนไซม์ด้วย

1.2 ผลของความเข้มข้นของเอนไซม์ อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการผลิตต่อค่า D.E. ของผลิตภัณฑ์

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า D.E. ของผลิตภัณฑ์อันเนื่องมาจากความเข้มข้นของเอนไซม์ อุณหภูมิ และเวลาในการผลิต พบว่า ปัจจัยหลักทั้งสามและอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยหลัก 2 ปัจจัยใดๆ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า D.E. ของผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญดังต่อไปนี้

1.2.1 ผลของความเข้มข้นของเอนไซม์ต่อค่า D.E. ของผลิตภัณฑ์

จากผลการทดลองในตารางที่ 14 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ

เอนไซม์เป็นร้อยละ 0.01 0.05 และ 0.10 พบว่า ค่าเฉลี่ยของ D.E. ของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเป็น 8.22 19.34 และ 24.18 ตามลำดับ ดังที่กล่าวในหัวข้อวิจารณ์ผลการทดลองที่ 1.1.1 แล้วว่า การเพิ่มความเข้มข้นของเอนไซม์จะทำให้อัตราการย่อยสลายแป้งเพิ่มขึ้น ซึ่งแป้งที่ถูกย่อยสลายแล้วจะมี Reducing power เพิ่มขึ้น ซึ่งมีปริมาณแป้งที่ถูกย่อยสลายหรือลิเคอไฟสตาร์ชเพิ่มขึ้นมากเท่าใด Reducing power ก็เพิ่มขึ้นมากเท่านั้น ทำให้ค่า D.E. ของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น

1.2.2 ผลของอุณหภูมิในกระบวนการผลิตต่อค่า D.E. ของผลิตภัณฑ์

จากผลการทดลองในตารางที่ 15 เมื่ออุณหภูมิในกระบวนการผลิตเป็น 80 85 และ 90 องศาเซลเซียส ค่าเฉลี่ยของ D.E. ของผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเป็น 15.50 17.03 และ 19.21 ตามลำดับ ด้วยเหตุผลเดียวกับที่กล่าวไว้ในหัวข้อวิจารณ์ผลการทดลองที่ 1.1.2 คือ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในกระบวนการผลิต ปริมาณแป้งที่เสียสภาพ และ Activity ของเอนไซม์เพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถในการย่อยสลายแป้งเพิ่มขึ้น ค่า D.E. ของผลิตภัณฑ์จึงเพิ่มขึ้น

1.2.3 ผลของเวลาในการผลิตต่อ D.E. ของผลิตภัณฑ์

จากผลการทดลองในตารางที่ 16 เมื่อเวลาในการผลิตเป็น 40 80 และ 120 นาที ค่าเฉลี่ยของ D.E. ของผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเป็น 13.05 18.21 และ 20.48 ตามลำดับ ทั้งนี้เพราะ เมื่อเพิ่มเวลาในการย่อยสลายแป้ง จะมีผลให้ค่า D.E. ของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น เมื่อย้อนกลับไปพิจารณารายละเอียดในหัวข้อวิจารณ์ผลการทดลองที่ 1.1.3 จะเห็นว่า ที่เวลา 80 และ 120 นาที ค่าเฉลี่ยของปริมาณลิเคอไฟสตาร์ชมีค่าเท่ากับร้อยละ 91.03 และ 91.34 ตามลำดับ ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ การที่เกิดความไม่สอดคล้องกันของการเปลี่ยนแปลงของค่า D.E. ตามเวลา และการเปลี่ยนแปลงปริมาณลิเคอไฟสตาร์ชตามเวลา เกิดเนื่องจาก อัตราการเพิ่มขึ้นของ Reducing power ในระยะแรกของการย่อยสลายแป้งจะต่ำกว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของ Reducing power ในระยะหลังของการย่อยสลายแป้ง นอกจากนี้ เมื่อถึงจุดที่แป้งถูกย่อยสลายเป็นลิเคอไฟสตาร์ชสมบูรณ์แล้ว การย่อยสลายลิเคอไฟสตาร์ชที่มี D.P. ต่ำ ให้มี D.P. ต่ำลงไปอีก ก็จะทำให้ค่า Reducing power ก็เพิ่มขึ้น โดยที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณลิเคอไฟสตาร์ชเลย

1.2.4 ผลของอิทธิพลร่วมของความเข้มข้นของเอนไซม์กับอุณหภูมิ ความเข้มข้นของเอนไซม์กับเวลา และอุณหภูมิกับเวลาในการผลิตต่อค่า D.E. ของผลิตภัณฑ์

จากผลการทดลองในรูปที่ 7 8 และ 9 จะเห็นว่าอิทธิพลร่วมของความเข้มข้นของเอนไซม์กับอุณหภูมิ ความเข้มข้นของเอนไซม์กับเวลา และอุณหภูมิกับเวลา

ในการผลิต มีผลให้ค่า D.E. ของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นทั้งสิ้น สามารถให้เหตุผลได้เช่นเดียวกับการวิจารณ์ผลการทดลองในหัวข้อที่ 1.1.4 นั่นคือ ปัจจัยหลักทั้งสาม คือ ความเข้มข้นของเอนไซม์ อุณหภูมิในกระบวนการผลิต และเวลาในการผลิต มีผลในทางบวกต่อค่า D.E. ของผลิตภัณฑ์ และอิทธิพลระหว่างปัจจัยทั้ง 3 คู่มผลในทางที่เสริมกัน ทำให้ค่า D.E. ของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระดับของปัจจัยหนึ่งปัจจัย หรือมากกว่า

1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า D.E. และปริมาณลิเคอไฟสตาไรซ์ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการผลิตแบบกะ

พิจารณาค่า R-squared ของสมการที่ 1 และ 2 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า D.E. และปริมาณลิเคอไฟสตาไรซ์ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการผลิตแบบกะ พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า D.E. และปริมาณลิเคอไฟสตาไรซ์ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการผลิตแบบกะ มีแนวโน้มเป็นความสัมพันธ์แบบ Power law อธิบายลักษณะของความสัมพันธ์ได้ดังนี้ คือ ระยะแรกอัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณลิเคอไฟสตาไรซ์ต่ออัตราการเพิ่มขึ้นของค่า D.E. จะสูง ปริมาณลิเคอไฟสตาไรซ์จะเพิ่มขึ้นมาก ในขณะที่ค่า D.E. มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ต่อมา อัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณลิเคอไฟสตาไรซ์ต่อการเพิ่มของค่า D.E. นี้จะค่อยๆ ลดลง ในช่วงนี้ ปริมาณลิเคอไฟสตาไรซ์ และค่า D.E. จะเพิ่มขึ้นควบคู่กันไป จนถึงระดับที่อัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณลิเคอไฟสตาไรซ์เข้าใกล้ศูนย์ นั่นคือ แม้จะมีการเพิ่มของค่า D.E. แต่ปริมาณลิเคอไฟสตาไรซ์เปลี่ยนแปลงน้อยมาก ทั้งนี้เพราะ ในระยะแรก สารละลายแป้งเจลาตินโซลจะมีความหนืด เอนไซม์สัมผัสกับ Substrate ได้ไม่เต็มที่ การย่อยสลายเกิดขึ้นบริเวณสายโพลีเมอร์ส่วนนอก และเป็นการย่อยแป้งเป็นลิเคอไฟสตาไรซ์ที่ยังคงเป็นโพลีเมอร์ที่มีค่า D.P. สูง และมี Reducing power ต่ำ ค่า D.E. จึงเพิ่มขึ้นน้อยมาก การย่อยสลายแป้งให้เป็นลิเคอไฟสตาไรซ์ที่มีสายโพลีเมอร์สั้นลง มีค่า D.P. ต่ำ และมี Reducing power สูง จะเกิดได้ดีเมื่อสารละลายแป้งถูกย่อยสลายจนกระทั่งมีปริมาณลิเคอไฟสตาไรซ์อยู่ในช่วงร้อยละ 85 ถึง 90 เนื่องจากในช่วงนี้ สารละลายแป้งจะมีความหนืดต่ำลง เอนไซม์สัมผัสกับ Substrate ได้ดี ดังนั้น ค่า D.E. จึงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การย่อยสลายแป้งหรือโพลีแซคคาไรด์ที่มีค่า D.P. สูงๆ เป็นโอลิโกแซคคาไรด์ จนกระทั่งเป็นโมโนแซคคาไรด์นั้น อัตราการเพิ่มขึ้นของค่า Reducing power จะเพิ่มขึ้นเป็นลำดับ ในกรณีที่อัตราการเพิ่มของปริมาณลิเคอไฟสตาไรซ์เป็นศูนย์ แต่ค่า D.E. ยังคงเพิ่มขึ้นอยู่นั้น เนื่องจากการย่อยสลายของเอนไซม์เป็นการย่อยสลายลิเคอไฟสตาไรซ์ในส่วนที่ยังเป็นโพลีแซคคาไรด์ที่มี D.P. ต่ำให้เป็นโอลิโกแซคคาไรด์และแซคคาไรด์อื่นๆนั่นเอง

R-squared ของสมการแสดงความสัมพันธ์แบบ Power law ของค่า D.E. และปริมาณลิเคอไฟสตาไรซ์ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการผลิตแบบกะ (สมการที่ 2) มีค่าเท่ากับ

0.6874 ซึ่งเป็นค่าที่ไม่สูงพอที่จะทำให้สรุปได้อย่างแน่นอนว่า ความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นแบบ Power law แต่อาจกล่าวได้ว่าความสัมพันธ์มีแนวโน้มที่จะเป็นในแบบ Power law

2. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตมอลโตเดกซ์ทรินโดยการเติมเอนไซม์เพียงครั้งเดียวในกระบวนการผลิตแบบกะ

ในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตโดยใช้ RSM นี้ วางแผนการทดลองโดย Box-Behnken Design เนื่องจากเป็นแผนการทดลองที่มีลักษณะแบบ Rotatable คือในทุกๆสภาวะการทดลอง (Treatment) จะมีการกำหนดค่าของปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งในระดับกลาง เพื่อให้การเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยที่เกิดขึ้นในแต่ละสภาวะ มีระยะทางจากจุดกลางเท่าๆกัน และจะต้องมีการทำการทดลองซ้ำหลายครั้งในสภาวะที่เป็นค่ากลางของทุกปัจจัย (Center point) เพื่อให้การสร้างสมการทางคณิตศาสตร์จากข้อมูลการทดลองนี้เป็นไปอย่างถูกต้องแม่นยำที่สุด

ในการทดลองนี้ ได้ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 17 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตมอลโตเดกซ์ทริน จะพิจารณาเฉพาะค่า D.E. ของผลิตภัณฑ์เท่านั้น เนื่องจากค่า D.E. เป็นค่าที่สำคัญที่ใช้ในการจำแนกประเภทของมอลโตเดกซ์ทริน สามารถหาสมการทางคณิตศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า D.E. ของผลิตภัณฑ์ ความเข้มข้นของเอนไซม์ อุณหภูมิ เวลาที่ใช้ในการผลิต และอิทธิพลร่วม ได้ตั้งสมการที่ 4 แต่จากการทดลองหาสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง D.E. ของผลิตภัณฑ์โดยตัดเทอมที่มีความมีนัยสำคัญต่ำออก จะได้สมการแสดงความสัมพันธ์ใหม่ตั้งสมการที่ 5 ซึ่งจากการเปรียบเทียบค่า R-Squared ของทั้งสองสมการแล้ว สมการที่ 5 เป็นสมการที่เหมาะสมในการทำนายสภาวะการผลิต เนื่องจากมีค่า R-Squared สูงกว่า (R-Squared เท่ากับ 0.9403) เมื่อกำหนดให้อุณหภูมิในการผลิตซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า D.E. น้อยที่สุดให้คงที่ที่ 80 85 และ 90 องศาเซลเซียส จะได้สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า D.E. ความเข้มข้นของเอนไซม์ เวลาในการผลิต และอิทธิพลร่วม ดังสมการที่ 6 7 และ 8 สามารถแสดงความสัมพันธ์นี้ในรูปกราฟ 3 มิติดังรูปที่ 12 14 และ 16 ตามลำดับ ส่วนรูปที่ 13 15 และ 17 จะเป็น contour plot ของสมการที่ 6 7 และ 8 ตามลำดับ

จากกราฟ 3 มิติภาพที่ 12 14 และ 16 จะเห็นการเปลี่ยนแปลงของค่า D.E. เมื่อเพิ่มเวลาในการผลิตและ/หรือเพิ่มความเข้มข้นของเอนไซม์ที่ใช้ในกระบวนการผลิต ค่า D.E. ของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มเวลาจะมีผลให้ค่า D.E. เพิ่มขึ้นในอัตราที่ต่ำกว่าการเพิ่มความเข้มข้นของเอนไซม์ และสังเกตได้ว่า ในทุกๆอุณหภูมิที่ทำการทดลองนั้น ค่า D.E. จะเพิ่มขึ้นเป็นลำดับ เมื่อเพิ่มเวลาในการผลิตจาก 40 เป็น 80 นาที การเพิ่มของค่า D.E. ลดลง จนกระทั่ง

แทบจะคงที่เมื่อเพิ่มเวลาในการผลิตให้อยู่ในช่วง 80 ถึง 120 นาที ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเอนไซม์และค่า D.E. จะเป็นในลักษณะเดียวกันนี้ คือ ในการเพิ่มความเข้มข้นของเอนไซม์ในช่วงร้อยละ 0.01 ถึง 0.08 ค่า D.E. จะเพิ่มขึ้นมากกว่าการเพิ่มความเข้มข้นของเอนไซม์ในช่วงร้อยละ 0.08 ถึง 0.10 ความสัมพันธ์นี้ สามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจนใน Contour plot ภาพที่ 13 15 และ 17 การเปลี่ยนแปลงความชันของเส้นเท่าของค่า D.E. เมื่อมีการแปรค่าเวลา และความเข้มข้นของเอนไซม์ที่ใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งให้เห็นถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า D.E. เมื่อมีการแปรค่าปัจจัยทั้งสองในช่วงต่างๆ ซึ่งจะเห็นว่า ที่ความเข้มข้นของเอนไซม์คงที่ การเพิ่มเวลาในการผลิตจาก 40 เป็น 80 นาที ค่า D.E. จะเพิ่มขึ้นรวดเร็ว และอัตราการเพิ่มของค่า D.E. ค่อยๆลดลงเมื่อแปรเวลาในการผลิตเป็น 80 ถึง 100 นาที เนื่องจาก เกิดผลิตภัณฑ์จากการย่อยสลายแป้งของเอนไซม์มากขึ้น เกิด Product inhibition จนกระทั่งค่า D.E. เกือบจะคงที่ เมื่อมีการแปรค่าเวลาในการผลิตในช่วง 100 ถึง 120 นาที แสดงว่าการย่อยสลายแป้งเกิดได้เกือบจะสมบูรณ์ที่เวลา 100 นาที และเมื่อพิจารณาที่เวลาคงที่ใดๆ จะเห็นว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอนไซม์ในช่วงร้อยละ 0.01 ถึง 0.08 ค่า D.E. ของผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอนไซม์ในช่วงร้อยละ 0.08 ถึง 0.10 ค่า D.E. ของผลิตภัณฑ์แทบจะไม่มีเปลี่ยนแปลงอีกเลย แสดงว่า ที่อุณหภูมิ 80 ถึง 90 องศาเซลเซียส และเวลา 40 ถึง 120 นาที ความเข้มข้นของเอนไซม์ที่มากที่สุดที่ยังคงมีผลให้ค่า D.E. เพิ่มขึ้น คือ ร้อยละ 0.08

นอกจากนี้ สามารถพิจารณาจากเส้นเท่าของค่า D.E. ใน Contour plot เพื่อทำนายสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตมอลโตเดกซ์ทรินที่มีค่าตามต้องการได้ จากการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่า D.E. ในช่วงค่าของปัจจัยที่ทำการทดลอง จะได้ว่า เวลาที่เหมาะสมในการผลิตมอลโตเดกซ์ทรินนั้น มีค่าอยู่ในช่วง 40 ถึง 80 นาที และความเข้มข้นของเอนไซม์มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.01 ถึง 0.08

ศึกษาการผลิตมอลโตเดกซ์ทรินโดยการเติมเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสครั้งเดียวในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแบบสกรูคู่

1. ศึกษาผลของความชันของส่วนผสมวัตถุดิบ ความเข้มข้นของเอนไซม์ และอุณหภูมิของโถ ในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแบบสกรูคู่ต่อปริมาณลิเคอไฟสตา์ชและค่า D.E. ของมอลโตเดกซ์ทริน

1.1 ผลของความชื้นของส่วนผสมวัตถุดิบ ความเข้มข้นของเอนไซม์ และอุณหภูมิของโตะ ต่อปริมาณลิเคโอไฟสตาร์ช

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณลิเคโอไฟสตาร์ชของผลิตภัณฑ์อันเนื่องมาจาก ความชื้นของส่วนผสมวัตถุดิบ ความเข้มข้นของเอนไซม์ อุณหภูมิของโตะ และอิทธิพลร่วม ดังแสดงในตารางที่ 19 พบว่า ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณลิเคโอไฟสตาร์ชอย่างมีนัยสำคัญ คือ ความเข้มข้นของเอนไซม์ เมื่อแปรความเข้มข้นของเอนไซม์เป็นร้อยละ 0.01 0.05 และ 0.10 ค่าเฉลี่ยของปริมาณลิเคโอไฟสตาร์ชเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเป็นร้อยละ 48.27 52.67 และ 60.57 ดังแสดงในตารางที่ 20 เนื่องจาก เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอนไซม์ อัตราการย่อยสลายแป้งจะเพิ่มขึ้นนั่นเอง ส่วนการแปรปริมาณความชื้นของส่วนผสมวัตถุดิบหรือการแปรอุณหภูมิของโตะ ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณลิเคโอไฟสตาร์ชอย่างมีนัยสำคัญ แต่อิทธิพลร่วมระหว่างความชื้นของส่วนผสมวัตถุดิบและอุณหภูมิของโตะกลับมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณลิเคโอไฟสตาร์ชอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 18 สามารถอธิบายได้ดังนี้ ในกระบวนการผลิตแบบเอกซ์ทรูชันนั้น การเสียสภาพของแป้งเกิดได้จาก 2 สาเหตุคือ การเสียสภาพเนื่องจากการย่อยโดยเอนไซม์ และการเสียสภาพเนื่องจากแรงทางกลคือแรงเฉือน (Shear force) ภายในโตะ ซึ่งทำให้เกิด Fractionation หรือการฉีกขาดของโมเลกุลของแป้งทำให้ขนาดโมเลกุลเล็กลง และอุณหภูมิของโตะ ซึ่งทำให้เกิด Dextrinization คือการย่อยสลายแป้งบางส่วนด้วยความร้อนสูง สาเหตุของการเสียสภาพจากแรงทางกลนี้ จะเกิดโดยแรงเฉือนที่เกิดภายในโตะในระหว่างการเอกซ์ทรูดเป็นหลัก ซึ่งแรงเฉือนที่เกิดขึ้นภายในโตะในระหว่างการเอกซ์ทรูดนั้นจะขึ้นกับความเร็วยรอบในการหมุนของสกรู (Screw speed) และความชื้นของส่วนผสมวัตถุดิบ ถ้าความชื้นต่ำและความเร็วยรอบในการหมุนของสกรูสูง แรงเฉือนจะสูง ในการทดลองนี้ได้กำหนดให้ความเร็วยรอบในการหมุนของสกรูคงที่ 150 รอบต่อนาที ดังนั้น ปัจจัยที่ส่งผลถึงการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนภายในโตะ คือ ความชื้นของส่วนผสมวัตถุดิบ แต่จากผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่า การแปรความชื้นของส่วนผสมวัตถุดิบหรือการแปรอุณหภูมิของโตะเพียงปัจจัยเดียว ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณลิเคโอไฟสตาร์ชอย่างมีนัยสำคัญ อาจเป็นเพราะการแปรค่าความชื้นของส่วนผสมวัตถุดิบ และอุณหภูมิของโตะอยู่ในช่วงที่แคบ เมื่อแปรค่าหนึ่งค่าใดเพียงอย่างเดียวยังไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณลิเคโอไฟสตาร์ชอย่างมีนัยสำคัญ การลดความชื้นของส่วนผสมวัตถุดิบเพื่อเพิ่มแรงเฉือน และการเพิ่มอุณหภูมิของโตะควบคู่กันไป จะทำให้เกิด Fractionation และ Dextrinization ซึ่งมีผลให้ปริมาณลิเคโอไฟสตาร์ชเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ จากผลการทดลองในรูปที่ 18 ที่อุณหภูมิของโตะ 130 องศาเซลเซียส เมื่อลดความชื้นจากร้อยละ 40 เป็นร้อยละ 35 และ 30 จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณลิเคโอไฟสตาร์ชสูงขึ้นมาก

1.1 ผลของความชื้นของส่วนผสมวัตถุดิบ ความเข้มข้นของเอนไซม์ และอุณหภูมิของโถ ต่อปริมาณลิเคอไฟสตาร์ช

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณลิเคอไฟสตาร์ชของผลิตภัณฑ์ อันเนื่องมาจาก ความชื้นของส่วนผสมวัตถุดิบ ความเข้มข้นของเอนไซม์ อุณหภูมิของโถ และอิทธิพลร่วม ดังแสดงในตารางที่ 19 พบว่า ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณลิเคอไฟสตาร์ชอย่างมีนัยสำคัญ คือ ความเข้มข้นของเอนไซม์ เมื่อแปรความเข้มข้นของเอนไซม์ เป็นร้อยละ 0.01 0.05 และ 0.10 ค่าเฉลี่ยของปริมาณลิเคอไฟสตาร์ชเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเป็นร้อยละ 48.27 52.67 และ 60.57 ดังแสดงในตารางที่ 20 เนื่องจาก เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอนไซม์ อัตราการย่อยสลายแป้งจะเพิ่มขึ้นนั่นเอง ส่วนการแปรปริมาณความชื้นของส่วนผสมวัตถุดิบหรือการแปรอุณหภูมิของโถ ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณลิเคอไฟสตาร์ชอย่างมีนัยสำคัญ แต่อิทธิพลร่วมระหว่างความชื้นของส่วนผสมวัตถุดิบและอุณหภูมิของโถกลับมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณลิเคอไฟสตาร์ชอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 18 สามารถอธิบายได้ดังนี้ ในกระบวนการผลิตแบบเอกซ์ทรูชันนั้น การเสียดสีของแป้งเกิดได้จาก 2 สาเหตุคือ การเสียดสีเนื่องจากการย่อยโดยเอนไซม์ และการเสียดสีเนื่องจากแรงทางกลคือแรงเฉือน (Shear force) ภายในโถ ซึ่งทำให้เกิด Fractionation หรือการฉีกขาดของโมเลกุลของแป้งทำให้ขนาดโมเลกุลเล็กลง และอุณหภูมิของโถ ซึ่งทำให้เกิด Dextrinization คือการย่อยสลายแป้งบางส่วนด้วยความร้อนสูง สาเหตุของการเสียดสีจากแรงทางกลนี้ จะเกิดโดยแรงเฉือนที่เกิดภายในโถในระหว่างการเอกซ์ทรูดเป็นหลัก ซึ่งแรงเฉือนที่เกิดขึ้นภายในโถในระหว่างการเอกซ์ทรูดนั้นจะขึ้นกับความเร็วยรอบในการหมุนของสกรู (Screw speed) และความชื้นของส่วนผสมวัตถุดิบ ถ้าความชื้นต่ำและความเร็วยรอบในการหมุนของสกรูสูง แรงเฉือนจะสูง ในการทดลองนี้ได้กำหนดให้ความเร็วยรอบในการหมุนของสกรูคงที่ที่ 150 รอบต่อนาที ดังนั้น ปัจจัยที่ส่งผลถึงการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนภายในโถ คือ ความชื้นของส่วนผสมวัตถุดิบ แต่จากผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่า การแปรความชื้นของส่วนผสมวัตถุดิบหรือการแปรอุณหภูมิของโถเพียงปัจจัยเดียว ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณลิเคอไฟสตาร์ชอย่างมีนัยสำคัญ อาจเป็นเพราะการแปรค่าความชื้นของส่วนผสมวัตถุดิบ และอุณหภูมิของโถอยู่ในช่วงที่แคบ เมื่อแปรค่าหนึ่งค่าใดเพียงอย่างเดียวยังไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณลิเคอไฟสตาร์ชอย่างมีนัยสำคัญ การลดความชื้นของส่วนผสมวัตถุดิบเพื่อเพิ่มแรงเฉือน และการเพิ่มอุณหภูมิของโถควบคู่กันไป จะทำให้เกิด Fractionation และ Dextrinization ซึ่งมีผลให้ปริมาณลิเคอไฟสตาร์ชเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ จากผลการทดลองในรูปที่ 18 ที่อุณหภูมิของโถ 130 องศาเซลเซียส เมื่อลดความชื้นจากร้อยละ 40 เป็นร้อยละ 35 และ 30 จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณลิเคอไฟสตาร์ชสูงขึ้นมาก

1.2 ผลของความชื้นของส่วนผสมวัตถุดิบ ความเข้มข้นของเอนไซม์ และอุณหภูมิของโตน ต่อค่า D.E. ของผลิตภัณฑ์

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า D.E. ของผลิตภัณฑ์ อันเนื่องมาจากความชื้นของส่วนผสมวัตถุดิบ ความเข้มข้นของเอนไซม์ และอุณหภูมิของโตน ดังแสดงในตารางที่ 21 พบว่า ความเข้มข้นของเอนไซม์ และอิทธิพลร่วมระหว่างความชื้นของส่วนผสมวัตถุดิบกับอุณหภูมิของโตนมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า D.E. เช่นเดียวกับที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณลิเคอไฟสตาไรซ์ ตารางที่ 22 แสดงการเพิ่มของค่า D.E. เมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของเอนไซม์ โดยเมื่อความเข้มข้นของเอนไซม์เป็นร้อยละ 0.01 0.05 และ 0.10 ค่าเฉลี่ยของ D.E. จะเป็น 3.32 9.90 และ 14.10 ตามลำดับ เนื่องจาก เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอนไซม์ อัตราการย่อยสลายแป้งจะเพิ่มขึ้น ดังรายละเอียดที่กล่าวในหัวข้อที่ 1.1 ส่วนรูปที่ 19 แสดงอิทธิพลร่วมของความชื้นของส่วนผสมวัตถุดิบและอุณหภูมิ ต่อค่า D.E. ของผลิตภัณฑ์ อาจแบ่งการพิจารณาได้เป็น 2 ช่วงคือ ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มความชื้นของส่วนผสมวัตถุดิบค่า D.E. จะเพิ่มขึ้น และที่อุณหภูมิสูงคือ 130 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มความชื้นของส่วนผสมวัตถุดิบ ค่า D.E. กลับลดลง สาเหตุเพราะ การย่อยสลายแป้งนั้น เกิดเนื่องจากการย่อยสลายโดยเอนไซม์และการย่อยสลายด้วยแรงทางกล ดังได้กล่าวรายละเอียดในหัวข้อที่ 1.1 ที่อุณหภูมิต่ำนั้น การย่อยสลายส่วนมากเกิดขึ้นภายใต้อิทธิพลของเอนไซม์ เอนไซม์จะทำงานได้ดีในสภาวะที่มีความชื้นสูง เนื่องจาก ประการแรก สภาวะที่มีความชื้นสูงจะทำให้แป้งเกิดเจลาติไนเซชันได้ดี ซึ่งแป้งเจลาติไนเซชันจะถูกย่อยสลายได้ดีโดยเอนไซม์ ประการที่สอง เมื่อความชื้นของส่วนผสมวัตถุดิบเพิ่มขึ้น Water activity ในส่วนผสมวัตถุดิบจะเพิ่มขึ้น ซึ่งเอนไซม์จะทำงานได้ดีขึ้นเมื่อ Water activity เพิ่มขึ้น ดังนั้น เมื่อเพิ่มความชื้นของส่วนผสมวัตถุดิบ แม้การย่อยสลายที่เกิดจากแรงทางกลจะต่ำ แต่การย่อยสลายแป้งโดยเอนไซม์เกิดขึ้นในปริมาณสูง ค่า D.E. ของผลิตภัณฑ์จึงเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อิทธิพลจากแรงทางกลต่อการย่อยสลายแป้งเริ่มเด่นกว่าอิทธิพลจากการทำงานของเอนไซม์ เนื่องจาก เอนไซม์จะทำงานได้ไม่ดีในสภาวะที่อุณหภูมิสูง ดังนั้น การย่อยสลายแป้งส่วนใหญ่เกิดจากแรงทางกล คือ แรงเฉือน ซึ่งจะมีค่ามากขึ้นเมื่อลดความชื้นของส่วนผสมวัตถุดิบ แรงเฉือนทำให้เกิด Fractionation ของเม็ดแป้ง นอกจากนี้ การลดความชื้นในส่วนผสมวัตถุดิบในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงยังทำให้เกิดการสะสมความร้อนในโตน เนื่องจากปริมาณน้ำที่จะระเหยออกจากโตนผ่านทางรูเปิดที่ผนังบาร์เรล (Vent) มีน้อย อุณหภูมิในโตนจะเพิ่มขึ้น ทำให้เกิด Dextrinization มากขึ้น การเกิด Fractionation ประกอบกับ Dextrinization นี้ มีผลให้ค่า D.E. ของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น

1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า D.E. และปริมาณเเคไฟสตาร์ชของผลิตภัณฑ์ที่ได้ จากกระบวนการเอกซ์ทรูชันแบบสกรูคู่

เมื่อนำค่า D.E. และปริมาณเเคไฟสตาร์ชของผลิตภัณฑ์ในตารางที่ 18 มา หาความสัมพันธ์กันโดย Multivariate method พบว่า ปริมาณเเคไฟสตาร์ชและค่า D.E. ของผลิตภัณฑ์ไม่มีความสัมพันธ์กัน ถึงแม้การเปลี่ยนแปลงของทั้งปริมาณเเคไฟสตาร์ชและค่า D.E. จะขึ้นกับปัจจัยหลักและอิทธิพลร่วมเดียวกัน ทั้งนี้เพราะ ค่า D.E. ของผลิตภัณฑ์นั้นจะขึ้นกับปริมาณ และสัดส่วนของโพลีแซคคาไรด์ D.P. ต่างๆ ที่มี Reducing power ในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแบบ สกรูคู่ นั้น ปริมาณการย่อยสลายจะมีผลมาจากความชื้นของส่วนผสมวัตถุดิบ ความเข้มข้นของเอนไซม์ และอุณหภูมิของโด ส่วนสัดส่วนของโพลีแซคคาไรด์ที่มีค่า D.P. ต่างๆ จะขึ้นกับรูปแบบการย่อยสลายแป้งของเอนไซม์ ซึ่งได้รับอิทธิพลจาก Temperature profile หรืออุณหภูมิในโซน (Zone) ต่างๆ ตลอดความยาวของบาร์เรล (Barrel) เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ที่ใช้ในการทดลอง นั้น จะมีโซนที่มีอุณหภูมิต่างๆกัน 9 โซน ในการกำหนดให้อุณหภูมิของโดคงที่ที่ค่าใดๆก็ตาม จะต้องปรับอุณหภูมิในโซนต่างๆเหล่านี้เพื่อให้เกิดเป็น Temperature profile ที่จะให้ค่าอุณหภูมิของโดตามที่ต้องการ แต่การกำหนดอุณหภูมิของโดให้คงที่ที่ค่าหนึ่งใน Treatment ที่ต่างกันไม่อาจใช้ Temperature profile เดียวกันได้ เนื่องจาก ถ้ามีการแปรค่าความชื้นของส่วนผสมวัตถุดิบ หรือแปรค่าความเข้มข้นของเอนไซม์ ลักษณะทางการไหลของโด (Dough rheology) จะแตกต่างกันไป แรงเฉือนและแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน ดังนั้น ค่าความร้อนในโดที่เกิดจากแรงเฉือนและแรงเสียดทานจะแตกต่างกันไปด้วย จึงต้องมีการปรับปริมาณความร้อนที่ให้จาก บาร์เรลในโซนต่างๆ เพื่อให้เกิดเป็นอุณหภูมิของโดที่คงที่ตลอดเวลา นั่นคือ ใน Treatment หนึ่งๆ จะมี Temperature profile เฉพาะตัว สิ่งนี้เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ปริมาณการย่อยสลายแป้งเป็นโพลีแซคคาไรด์ที่มี D.P. ต่างๆ แตกต่างกันไปในแต่ละ Treatment

2. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตมอลโตเดกซ์ทรินโดยการเติมเอนไซม์เพียงครั้งเดียวในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแบบสกรูคู่

ผลการทดลองจากแผนการทดลองแบบ Box-Behnken design แสดงในตารางที่ 23 ส่วนผลการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า D.E. ของผลิตภัณฑ์กับความชื้นของส่วนผสมวัตถุดิบ ความเข้มข้นของเอนไซม์ อุณหภูมิของโด และอิทธิพลร่วมทั้งหมด แสดงได้ดังสมการที่ 11 ซึ่งสมการนี้มีค่า R-Squared เท่ากับ 0.8439

เมื่อกำหนดให้อุณหภูมิของโดในสมการที่ 11 คงที่ที่ 120 125 และ 130 องศาเซลเซียส จะได้สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า D.E. ของผลิตภัณฑ์ ความชื้นของส่วนผสม

วัตถุดิบ ความเข้มข้นของเอนไซม์ และอิทธิพลร่วม ดังสมการที่ 12 13 และ 14 ตามลำดับ และสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ในรูปกราฟ 3 มิติ ดังรูปที่ 20 22 และ 24 ตามลำดับ ส่วน Contour plot ที่สร้างจากสมการที่ 12 13 และ 14 แสดงไว้ในรูปที่ 21 23 และ 25 ตามลำดับ

จากกราฟ 3 มิติและ Contour plot แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง D.E. ของผลิตภัณฑ์ ความชื้นของส่วนผสมวัตถุดิบ และความเข้มข้นของเอนไซม์ ที่ระดับอุณหภูมิของโศต่างๆกัน พบว่า เมื่ออุณหภูมิของโศเท่ากับ 120 และ 125 องศาเซลเซียส การเพิ่มความชื้นของส่วนผสมวัตถุดิบและ/หรือการเพิ่มความเข้มข้นของเอนไซม์ มีผลให้ค่า D.E. ของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น เนื่องจาก ที่อุณหภูมิเท่านี้ การย่อยสลายแป้งเกิดขึ้นภายใต้อิทธิพลจากการทำงานของเอนไซม์เป็นหลัก การเพิ่มความชื้นของส่วนผสมวัตถุดิบทำให้แป้งเกิดเจลลาคีโนเซชันได้ดียิ่งขึ้นและยังเป็นการเพิ่ม Water activity ในส่วนผสมวัตถุดิบ ทำให้เอนไซม์ทำงานได้ดีขึ้น ส่วนการเพิ่มความเข้มข้นของเอนไซม์ ทำให้มีปริมาณเอนไซม์ที่จะไปจับ Active site บนสายโศเลกุลของแป้งมากขึ้น ปริมาณการย่อยสลายเพิ่มขึ้น ค่า D.E. ของผลิตภัณฑ์จึงเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิของโศเท่ากับ 130 องศาเซลเซียส การย่อยสลายแป้งจะเกิดภายใต้อิทธิพลจากแรงทางกล คือ แรงเจียนและความร้อนเป็นหลัก การเพิ่มความชื้นของส่วนผสมวัตถุดิบจะมีผล 2 ประการ คือ ประการแรก ทำให้ความหนืดของส่วนผสมวัตถุดิบลดลง แรงเจียนภายในส่วนผสมวัตถุดิบหรือโศเกิดขึ้นน้อย การย่อยสลายที่เกิดจาก Fractionation มีน้อย ประการที่สอง ทำให้การระบายความร้อนภายในโศเกิดขึ้นมาก Dextrinization ที่เกิดจากความร้อนจึงลดลง ทำให้ค่า D.E. ของผลิตภัณฑ์ลดลง ในขณะที่การเพิ่มความเข้มข้นของเอนไซม์ มีผลให้ค่า D.E. ของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น จะเห็นว่าคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างค่า D.E. ของผลิตภัณฑ์และปัจจัยต่างๆ ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส จะต่างจากความสัมพันธ์ที่อุณหภูมิ 120 และ 125 องศาเซลเซียส ซึ่งสาเหตุของความแตกต่างในการเปลี่ยนแปลงค่า D.E. นี้ได้กล่าวไว้อย่างย่อๆแล้วข้างต้น และมีรายละเอียดแสดงในหัวข้อที่ 1.2

จากการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่า D.E. ในช่วงค่าของปัจจัยที่ทำการทดลอง โดยอาศัยกราฟ 3 มิติ และ Contour plot ประกอบกับผลจากการ Partial differentiate ค่า Y ในสมการที่ 11 จะได้ว่าอุณหภูมิของโศที่เหมาะสมในการผลิตมอลโตเดกซ์ทริน ไม่เกิน 126.4 องศาเซลเซียส ความชื้นของส่วนผสมวัตถุดิบไม่เกินร้อยละ 34.9 และความเข้มข้นของเอนไซม์ในช่วงร้อยละ 0.01 ถึง 0.10

ศึกษาสมบัติทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของมอลโตเดกซ์ทรินที่ผลิตได้

1. การผลิตมอลโตเดกซ์ทรินตามสภาวะจากการทำนายโดยใช้ Contour plot จากผลการทดลองในตารางที่ 24 และ 25 แสดงให้เห็นความแตกต่างระหว่างค่า D.E. ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ และค่า D.E. ที่วัดได้จริงของมอลโตเดกซ์ทรินที่ผลิตตามสภาวะที่ได้จากการทำนายโดยใช้สมการและกราฟ จะเห็นว่า เมื่อใช้กราฟในการทำนายสภาวะการผลิตในกระบวนการผลิตแบบกะ มอลโตเดกซ์ทรินที่ผลิตได้จะมีค่า D.E. ใกล้เคียงกับค่า D.E. ที่คาดไว้มาก โดยเมื่อเลือกสภาวะการผลิตที่คาดว่าจะให้มอลโตเดกซ์ทรินที่มีค่า D.E. เท่ากับ 9.91 และ 13.98 และทำการผลิตตามนั้น มอลโตเดกซ์ทรินที่ได้จะมีค่า D.E. เป็น 10.06 และ 14.11 เทียบเป็นความแตกต่างได้ร้อยละ 1.51 และ 0.93 ตามลำดับ ทั้งนี้เพราะ Contour plot นั้นสร้างขึ้นจากสมการมีค่า R-Squared สูง จึงมีความแม่นยำในการทำนายสภาวะการผลิตค่อนข้างสูง สำหรับการที่ใช้สมการทำนายสภาวะการผลิตในกระบวนการผลิตโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชันแบบสกรูคูล์ เมื่อดำเนินการผลิตตามสภาวะที่คาดว่าจะให้มอลโตเดกซ์ทรินที่มีค่า D.E. 10.03 และ 13.97 มอลโตเดกซ์ทรินที่ผลิตได้จะมีค่า D.E. เป็น 10.68 และ 12.81 ซึ่งมีความแตกต่างจากค่า D.E. จากการคำนวณเป็นร้อยละ 6.48 และ 8.38 ตามลำดับ ความคลาดเคลื่อนในการทำนายค่า D.E. นี้เกิดจากสมการที่ใช้มีค่า R-Squared เพียง 0.8439 เนื่องจาก ปัจจัยที่เลือกศึกษาในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแบบสกรูคูล์ และนำมาสร้างเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์นี้ ไม่ครอบคลุมถึงปัจจัยที่มีผลต่อค่า D.E. ของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด เมื่อดำเนินการผลิตตามสภาวะที่ทำนาย ปัจจัยอื่นที่มีผลต่อค่า D.E. จึงทำให้ค่า D.E. เบี่ยงเบนไปจากค่าที่คาดไว้ ซึ่งการเบี่ยงเบนมาน้อยเพียงใดนั้นขึ้นกับความสำคัญของปัจจัยเหล่านั้น ในกระบวนการผลิตแบบกะ ปัจจัยอื่นนอกเหนือจากปัจจัยหลักทั้งสาม ที่มีผลต่อการทำงานของเอนไซม์และส่งผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงของค่า D.E. คือ ความเข้มข้นของน้ำแป้ง ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ และค่าความเป็นกรด-ด่าง นั้น ได้ถูกกำหนดให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์แล้ว ดังนั้นการเบี่ยงเบนของค่า D.E. ที่วัดได้จริงจากค่า D.E. จากการคำนวณจึงต่ำ เพราะสามารถควบคุมความแปรปรวนที่เกิดจากปัจจัยอื่นๆ ได้ทั้งหมด แต่ในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแบบสกรูคูล์นั้น แม้จะสามารถควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ การป้อนวัตถุดิบ ความเร็วรอบในการหมุนของสกรู และขนาดอนุภาคของวัตถุดิบไว้ได้ก็ตาม แต่ไม่สามารถควบคุม Temperature profile ให้คงที่ได้ตลอดการผลิตในสภาวะหนึ่งๆ นอกจากนี้ แรงเฉือนและแรงเสียดทานที่เกิดในโค ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ไม่อาจควบคุมได้อย่างแน่นอน แม้จะมีการควบคุมปริมาณความชื้นและความเร็วรอบในการหมุนของสกรูแล้วก็ตาม การเปลี่ยนแปลงของค่าเหล่านี้

มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า D.E. ทั้งสิ้น เมื่อไม่สามารถควบคุมปัจจัยเหล่านี้ได้ จึงทำให้ค่า D.E. ที่ได้จริงเบี่ยงเบนจากค่า D.E. จากการคำนวณ

2. สมบัติทางเคมีของมอลโตเดกซ์ทริน

2.1 การวิเคราะห์ Residual Enzyme Activity

เนื่องจากเอนไซม์ Termamyl 120L^R เป็นเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสที่ทนความร้อนได้สูง ดังนั้น การยับยั้งการทำงานของเอนไซม์โดยใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียวจึงไม่เพียงพอ ต้องมีการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 3.5 ควบคู่กันไปด้วย โดยมีข้อควรระวังคือ ไม่ปรับค่า pH ให้ต่ำกว่า 3.5 เพราะ นอกจากจะเกินความจำเป็นในการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์แล้ว ยังทำให้เกิดการย่อยสลายแป้งโดยกรด ในการทดลองนี้ สำหรับกระบวนการผลิตแบบกะ การปรับค่า pH ให้เท่ากับ 3.5 และให้ความร้อนที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาทีทันทีหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการผลิต ถือได้ว่าเพียงพอต่อการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ Termamyl 120L^R เนื่องจากไม่มี Residual enzyme activity ในผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์โดยวิธีดังกล่าว

สำหรับผลิตภัณฑ์จากกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันแบบสกรูคู่ นั้น หลังจากเตรียมเอ็กซ์ทรูเดทให้อยู่ในรูปผงแห้งแล้ว นำมาวัด Residual enzyme activity พบว่า เอ็กซ์ทรูเดทจากกระบวนการผลิตเกือบทุกตัวอย่าง ยกเว้นตัวอย่างที่ได้จากกระบวนการผลิตที่มีอุณหภูมิของโด 130 องศาเซลเซียส และผ่านการอบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะยังคงมี Residual enzyme activity อย่างไรก็ตาม เมื่อนำตัวอย่างที่เป็นผงแห้งไปละลายน้ำ ปรับค่า pH ให้เท่ากับ 3.5 และให้ความร้อนที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จะไม่มี Residual enzyme activity ในผลิตภัณฑ์สุดท้าย

2.2 การวิเคราะห์ปริมาณลิเคอไฟสตาร์ชและค่า D.E. ของมอลโตเดกซ์ทริน

จากผลการทดลองในตารางที่ 26 พบว่า ในกระบวนการผลิตแบบกะ จะได้ผลผลิตของมอลโตเดกซ์ทรินที่มีค่า D.E. เท่ากับ 10.06 และ 14.11 คิดเป็นร้อยละ 85.27 และ 88.79 ตามลำดับ สำหรับกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันแบบสกรูคู่ จะได้ผลผลิตของมอลโตเดกซ์ทรินที่มีค่า D.E. 10.68 และ 12.81 คิดเป็นร้อยละ 53.94 และ 56.16 ตามลำดับ จะเห็นว่า ปริมาณลิเคอไฟสตาร์ชของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันแบบสกรูคู่จะต่ำกว่ามาก แม้ว่าในการผลิตในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันแบบสกรูคู่จะเป็นแบบแรงเฉือนสูง ซึ่งทำให้เกิดลิเคอไฟสตาร์ชได้มากก็ตาม แต่ยังคงต้องอาศัยเอนไซม์ในการย่อยสลายแป้งให้เกิดเป็นลิเคอไฟสตาร์ชได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ซึ่งการทำงานของเอนไซม์นั้น จะต้องมีสภาวะที่เหมาะสม และต้องใช้

เวลานานพอสมควร แต่ในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแบบสกรูคู่นี้ ความชื้นของส่วนผสมวัตถุดิบจะต่ำ และอุณหภูมิในการผลิตสูง แม้จะเป็นสภาวะแบบอุณหภูมิสูงเวลาสั้น (High Temperature Short Time-HTST) แต่ก็อาจจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการทำงานของเอนไซม์ต่ำ อีกทั้งระยะเวลาในการผลิตสั้น ดังนั้น ปริมาณเอนไซม์ที่จำเป็นจะต่ำกว่าในกระบวนการผลิตแบบกะซึ่งมีระยะเวลาในการผลิตนานถึงอย่างน้อย 40 นาที และความชื้นในวัตถุดิบยังสูงถึงร้อยละ 70 ทำให้เอนไซม์ทำงานได้ดี การย่อยสลายแป้งเกิดได้สมบูรณ์ ปริมาณเอนไซม์ที่จำเป็นจะสูงขึ้น

2.3 การวิเคราะห์สัดส่วนของคาร์โบไฮเดรตชนิดต่างๆในมอลโตเดกซ์ทริน

การวิเคราะห์สัดส่วนของคาร์โบไฮเดรตที่มี D.P. ตั้งแต่ 1 ถึง 6 ในผลิตภัณฑ์มอลโตเดกซ์ทริน แสดงผลการทดลองได้ดังตารางที่ 27 สาเหตุของการวิเคราะห์สัดส่วนของคาร์โบไฮเดรตที่มี D.P. ตั้งแต่ 1 ถึง 6 เนื่องจาก ผลิตภัณฑ์สุดท้ายจากการย่อยสลายแป้งของเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสจะเป็นคาร์โบไฮเดรตที่มี D.P. ตั้งแต่ 1 ถึง 6 ซึ่งสัดส่วนของคาร์โบไฮเดรตเหล่านี้ขึ้นกับค่า D.E. ของผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ยังขึ้นกับสภาวะในการผลิต และสัดส่วนของคาร์โบไฮเดรต D.P. ต่างๆนี้ มีผลต่อสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของมอลโตเดกซ์ทริน

เมื่อพิจารณาสัดส่วนของคาร์โบไฮเดรตที่มี D.P. ต่างๆในมอลโตเดกซ์ทริน ทั้ง 4 ตัวอย่าง พบว่า ในมอลโตเดกซ์ทรินที่มีค่า D.E. ใกล้เคียงกัน ไม่ว่าจะผลิตจากกระบวนการผลิตแบบกะหรือกระบวนการเอกซ์ทรูชันแบบสกรูคู่ก็ตามจะมีโครงสร้างของสัดส่วนของคาร์โบไฮเดรต D.P. ต่างๆ (Saccarides profile) เป็นแบบเดียวกัน แสดงว่ารูปแบบของกระบวนการผลิตทั้งสองนี้ ไม่มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่เกิดจากการย่อยสลายแป้งของเอนไซม์ สัดส่วนผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้จากกระบวนการย่อยสลายของเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสยังคงเป็นเช่นเดิม แต่ถ้าค่า D.E. ของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น สัดส่วนของคาร์โบไฮเดรตที่มี D.P. ตั้งแต่ 1 ถึง 6 จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากเอนไซม์ย่อยสลายแป้งจนเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ได้มากขึ้นสังเกตได้ว่า โครงสร้างของสัดส่วนของคาร์โบไฮเดรตในมอลโตเดกซ์ทรินทั้ง 4 ตัวอย่างจะมีมอลโตไตรโอสในสัดส่วนที่สูงที่สุด ทั้งนี้เพราะในสายโพลีแซคคาไรด์นั้น ตำแหน่งของพันธะ α -1,4-glucosidic ที่ 3 นับจาก Reducing end จะมีแนวโน้มที่จะถูกเอนไซม์ย่อยสลายได้มากกว่าพันธะในตำแหน่งอื่นๆ

จากการทราบสัดส่วนของคาร์โบไฮเดรตในมอลโตเดกซ์ทรินนี้ อาจทำให้ตั้งสมมติฐานได้ว่า มอลโตเดกซ์ทรินที่ผลิตจากกระบวนการทั้งสองแบบ ที่มีค่า D.E. ใกล้เคียงกัน น่าจะมีสมบัติทางกายภาพที่คล้ายคลึงกันด้วย เนื่องจากมีสัดส่วนของคาร์โบไฮเดรตเป็นแบบเดียวกัน จึงได้ทดสอบสมบัติทางกายภาพบางประการ เช่น สมบัติทางการไหลของมอลโตเดกซ์ทรินที่ได้จากกระบวนการผลิตทั้งสองแบบ

3. สมบัติทางกายภาพของมอลโตเดกซ์ทริน

3.1 การวิเคราะห์ปริมาณของแข็งทั้งหมดและความหนืดของมอลโตเดกซ์ทริน

จากผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 28 พบว่า มอลโตเดกซ์ทรินชนิดเหลว จากกระบวนการผลิตแบบกะที่มีค่า D.E. เท่ากับ 10.06 ปริมาณของแข็งทั้งหมดร้อยละ 25.82 และ D.E.14.11 ปริมาณของแข็งทั้งหมดร้อยละ 26.32 มีความหนืดที่วัดโดย Brookfield viscometer เท่ากับ 55.6 และ 32.0 mPas. ตามลำดับ เมื่อนำมอลโตเดกซ์ทรินนี้มาทำให้เข้มข้นโดย Rotary vacuum evaporator จะมีความหนืดเพิ่มขึ้นเป็น 89.6 และ 87.6 mPas. ซึ่งมีความหนืดใกล้เคียงกับน้ำมันพืชตัวอย่าง (82.8 mPas.) และวัดปริมาณของแข็งทั้งหมดได้เท่ากับ 32.16 และ 47.43 ตามลำดับ พิจารณาเปรียบเทียบระหว่างมอลโตเดกซ์ทรินทั้ง 2 ตัวอย่าง จะเห็นว่า มอลโตเดกซ์ทรินที่มีค่า D.E. สูง จะมีความหนืดต่ำกว่ามอลโตเดกซ์ทรินที่มีค่า D.E. ต่ำ เมื่อปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่าๆกัน ทั้งนี้เพราะ ในมอลโตเดกซ์ทรินที่มีค่า D.E. สูงกว่านั้น มีสัดส่วนของโพลีแซคคาไรด์สายสั้นๆมากกว่า ซึ่งโพลีแซคคาไรด์สายสั้นเหล่านี้ เมื่อละลายในน้ำจะมีความหนืดต่ำกว่าโพลีแซคคาไรด์สายยาว เนื่องจากมีความสามารถในการเกิดเป็นโครงสร้าง (Network) ต่ำ

จากนั้น ได้ใช้ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแข็งทั้งหมด และความหนืดของมอลโตเดกซ์ทรินชนิดเหลวที่ได้จากกระบวนการผลิตแบบกะ เป็นแนวทางในการเตรียมตัวอย่างมอลโตเดกซ์ทรินชนิดผงที่ได้จากกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันแบบสกรูคู่ ให้เป็นมอลโตเดกซ์ทรินเหลวที่มีความหนืดใกล้เคียงกับน้ำมันพืชตัวอย่าง จากผลการทดลอง เมื่อนำมอลโตเดกซ์ทริน D.E. 10.68 และ 12.81 มาละลายน้ำจนมีปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ ร้อยละ 31.96 และ 46.65 จะได้มอลโตเดกซ์ทรินเหลวที่มีความหนืดเท่ากับ 84.87 และ 88.34 mPas. ตามลำดับ แสดงว่า ความสัมพันธ์ระหว่างค่า D.E. ปริมาณของแข็งทั้งหมดและความหนืดของมอลโตเดกซ์ทรินจากกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันแบบสกรูคู่ เป็นความสัมพันธ์เดียวกับของมอลโตเดกซ์ทรินที่ผลิตจากกระบวนการผลิตแบบกะ นั่นคือ มอลโตเดกซ์ทรินจากทั้งสองกระบวนการผลิตที่มีค่า D.E. ใกล้เคียงกัน จะมีสมบัติทางกายภาพบางประการใกล้เคียงกันด้วย ซึ่งผลการทดลองนี้สนับสนุนผลการทดลองในเรื่องการวิเคราะห์สัดส่วนของคาร์โบไฮเดรตชนิดต่างๆ ในมอลโตเดกซ์ทรินที่ได้จากกระบวนการผลิตทั้งสองแบบ นั่นคือ เมื่อผลิตกัมมัลมอลโตเดกซ์ทรินมีโครงสร้างของสัดส่วนของคาร์โบไฮเดรตชนิดต่างๆ เป็นแบบเดียวกัน จะมีสมบัติทางกายภาพบางประการเหมือนกัน

3.2 การวิเคราะห์สมบัติทางการไหลของมอลโตเดกซ์ทริน

จากผลการวิเคราะห์สมบัติทางการไหลของมอลโตเดกซ์ทรินเทียบกับน้ำมันพืชตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 29 พบว่า Consistency index และ Flow behavior index ของน้ำมันพืชและผลิตภัณฑ์มอลโตเดกซ์ทรินทั้ง 4 ตัวอย่างมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งค่า Consistency index เป็นค่าที่บ่งบอกถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า Shear stress ต่อค่า Shear rate ค่า Consistency index นี้ ขึ้นกับความหนืดของตัวอย่าง และขึ้นกับอุณหภูมิขณะที่ทำการวัดลักษณะการไหล ถ้าค่า Consistency index ต่ำ แสดงว่า ของเหลวนั้นมีการเปลี่ยนแปลงค่า Shear stress น้อยมากเมื่อมีการเพิ่ม Shear rate นั่นคือ มีค่าความหนืดต่ำ จากตารางที่ 29 จะเห็นว่า ค่า Consistency index ของน้ำมันพืช (0.037 mPas) และมอลโตเดกซ์ทรินทั้ง 4 ตัวอย่าง (0.046±0.007) มีค่าที่ใกล้เคียงกันและมีค่าต่ำ เพราะฉะนั้นน้ำมันพืชและมอลโตเดกซ์ทรินทั้ง 4 ตัวอย่างมีค่าความหนืดใกล้เคียงกัน และทำการวัดลักษณะการไหลที่อุณหภูมิเดียวกัน ส่วนค่า Flow behavior index นั้น ใช้ในการกำหนดสมบัติทางการไหลของของเหลว ค่า Flow behavior index เท่ากับ 1 แสดงว่า ของเหลวมีสมบัติการไหลเป็นแบบ Newtonian flow หรือเรียกว่าเป็น Newtonian fluid ตัวอย่างของ Newtonian fluid คือ น้ำ น้ำมัน และน้ำเชื่อม จากผลการทดลองในตารางที่ 29 พบว่า น้ำมันมีค่า Flow behavior index เท่ากับ 1.057 ซึ่งเข้าใกล้ 1 จึงอาจสรุปได้ว่าน้ำมันพืชตัวอย่างนี้เป็น Newtonian fluid ส่วนมอลโตเดกซ์ทรินทั้ง 4 ตัวอย่างมีค่า Flow behavior index อยู่ในช่วง 1.03±0.02 ซึ่งใกล้เคียงกับน้ำมันพืชตัวอย่าง และมีค่าเข้าใกล้ 1 จึงกล่าวได้ว่า มอลโตเดกซ์ทรินทั้ง 4 ตัวอย่าง มีสมบัติทางการไหลเป็นแบบเดียวกับน้ำมันพืชตัวอย่าง สามารถแสดงข้อสรุปนี้ให้เห็นได้ชัดเจนขึ้นจากรูปที่ 30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Shear rate และ Apparent viscosity ของน้ำมันพืชและมอลโตเดกซ์ทรินทั้ง 4 ตัวอย่าง จากรูป เมื่อ Shear rate มีค่ามากกว่า 150 วินาที⁻¹ ทั้งน้ำมันพืชและมอลโตเดกซ์ทรินทั้ง 4 ตัวอย่าง จะมีลักษณะการไหลเป็นแบบ Newtonian flow คือ Apparent viscosity ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเพิ่ม Shear rate ดังนั้น พิจารณาในลักษณะทางกายภาพแล้ว สามารถนำมอลโตเดกซ์ทรินทั้ง 4 ตัวอย่างมาใช้ทดแทนน้ำมันพืชในผลิตภัณฑ์อาหารได้

การนำมอลโตเดกซ์ทรินไปใช้ทดแทนน้ำมันพืชในน้ำสลัดชนิดข้น

จากตารางที่ 30 แสดงผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์น้ำสลัดชนิดข้นที่มีการใช้มอลโตเดกซ์ทรินทดแทนน้ำมันในปริมาณร้อยละ 25 และ 50 ของน้ำมันพืชในสูตร พบว่าการใช้มอลโตเดกซ์ทรินทดแทนน้ำมันในปริมาณดังกล่าว ไม่ทำให้ผลิตภัณฑ์น้ำสลัดชนิดข้นมีความข้นหนืดและรสชาติแตกต่างไปจากเดิมอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับในด้านกลิ่นนั้น มีเพียง 2 ตัวอย่างคือ ตัวอย่างที่ใช้ BMD 14.11 แทนน้ำมันพืชในปริมาณร้อยละ 50 และตัวอย่างที่ใช้ TMD 12.81 ทดแทนน้ำมันในปริมาณร้อยละ 50 ที่มีคะแนนของกลิ่นน้อยกว่าตัวอย่างมาตรฐานซึ่งมีการใช้น้ำมันพืชเต็มสูตร โดยผู้ทดสอบส่วนใหญ่ให้ความเห็นว่า กลิ่นของน้ำสลัดชนิดข้น เช่นกลิ่นไข่ กลิ่นมะนาว และกลิ่นมีสตาร์ดในน้ำสลัด 2 ตัวอย่างนี้จะอ่อนกว่าในน้ำสลัดที่เป็นตัวอย่างมาตรฐาน สันนิษฐานว่า กลิ่นของมอลโตเดกซ์ทรินทำให้กลิ่นของน้ำสลัดเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากมอลโตเดกซ์ทรินที่ใช้ในน้ำสลัดชนิดข้นทั้ง 2 ตัวอย่างนี้ คือ BMD 14.11 ซึ่งเป็นมอลโตเดกซ์ทรินที่มีค่า D.E. เท่ากับ 14.11 ผลิตจากกระบวนการผลิตแบบกะที่มีความเข้มข้นของเอนไซม์ร้อยละ 0.05 ส่วน TMD 12.81 เป็นมอลโตเดกซ์ทรินที่มีค่า D.E. 12.81 ผลิตจากกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันแบบสกรูคู่ที่มีความเข้มข้นของเอนไซม์ร้อยละ 0.085 ซึ่งเอนไซม์ Termamyl 120L[®] ที่ใช้ในการผลิตนี้มีกลิ่นเฉพาะตัวเป็นกลิ่นที่แรงมาก แม้จะใช้ในปริมาณดังกล่าว ก็จะมีผลให้มอลโตเดกซ์ทรินที่ได้มีกลิ่นแปลกปลอม นอกจากนี้ ตัวอย่างน้ำสลัดทั้ง 2 ตัวอย่างดังกล่าว ยังมีการใช้มอลโตเดกซ์ทรินทดแทนน้ำมันพืชในปริมาณที่สูงถึงร้อยละ 50

สำหรับค่าพลังงานของน้ำสลัดชนิดข้นทั้ง 8 สูตร พบว่า น้ำสลัดชนิดข้นที่มีการใช้มอลโตเดกซ์ทรินทดแทนน้ำมันพืชในปริมาณร้อยละ 25 และ 50 จะมีค่าพลังงานลดลงจากน้ำสลัดชนิดข้นสูตรมาตรฐานคิดเป็นร้อยละ 14 ± 0.67 และ 28 ± 1.24 ตามลำดับ