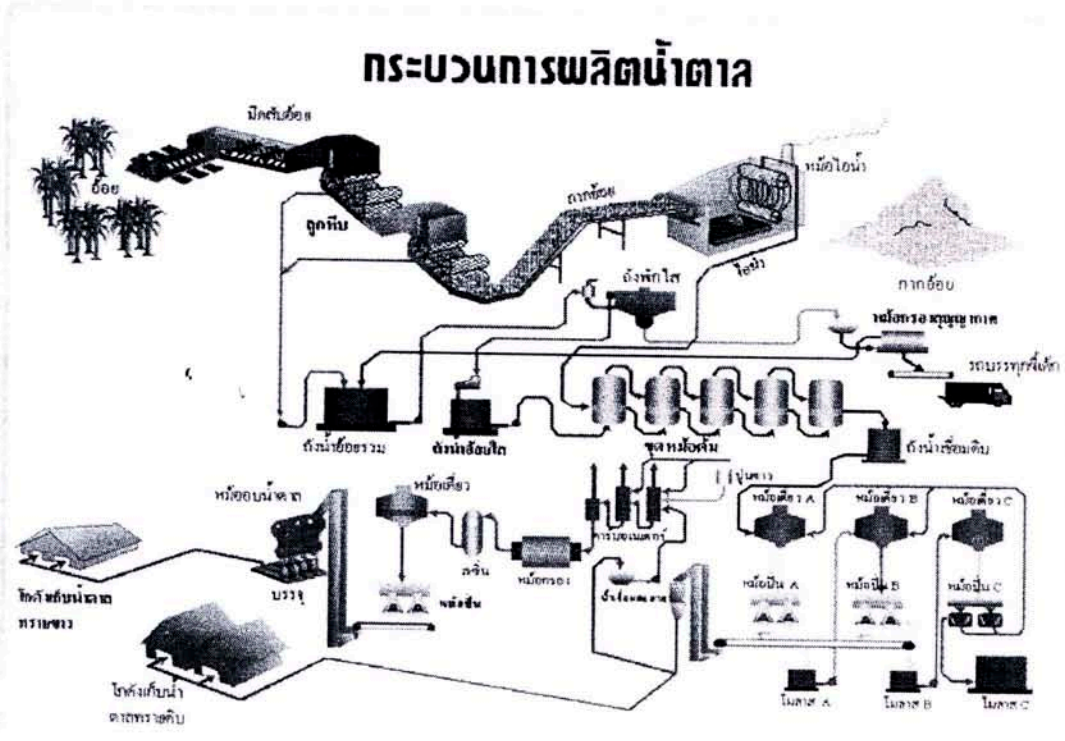
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อุตสาหกรรมน้ำตาล

น้ำตาลทรายเป็นผลิตผลจากอุตสาหกรรมเกษตรที่มีความสำคัญมากทางด้านเศรษฐกิจทั้งในระดับชาติและนานาชาติ ประเทศไทยมีรายได้จากการส่งออกและจำหน่ายน้ำตาลทรายในแต่ละปีเป็นมูลค่าหลายล้านบาท โดยในปี พ.ศ. 2548 ประเทศไทยมีปริมาณการส่งออกน้ำตาลทราย 2,556,439.11ตัน มีมูลค่าการส่งออกสูงถึง 23,730.4 ล้านบาท และในปี 2552 ประเทศไทยมีปริมาณการส่งออุกน้ำตาลทรายเพิ่มขึ้นเป็น 2,694,467 ตัน ซึ่งมีมูลค่าการส่งออก 35,503.4 ล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรกระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2552) ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกอ้อยทั้งหมดสี่ภาคคือ ภาคกลาง ภาคเหนือ ภาคตะวันออก และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ รวมพื้นที่ปลูกอ้อยทั้งหมด 6,837,025 ไร่ โดยภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีพื้นที่ปลูกอ้อยมากที่สุดซึ่งมีพื้นที่การเพาะปลูกเท่ากับ 2,773,934 ไร่ รองมาคือภาคกลางโดยมีพื้นที่การเพาะปลูกเท่ากับ 2,259,673ไร่ ภาคเหนือมีพื้นที่ปลูกอ้อยมากเป็นลำดับที่สามโดยมีพื้นที่การเพาะปลูกเท่ากับ 1,343,375 ไร่ และภาคตะวันออกมีพื้นที่การเพาะปลูกน้อยที่สุดเท่ากับ 460,043 ไร่ แต่ภาคเหนือมีผลผลิตต่อไร่เฉลี่ยสูงที่สุดเท่ากับ 11.20 ตันต่อไร่ เมื่อเปรียบเทียบกับผลผลิตอ้อยเฉลี่ยกับภาคอื่นๆ (สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย, 2552) กระบวนการผลิตน้ำตาลทรายจากอ้อยต้องผ่านกรรมวิธีหลายขั้นตอน (ภาพ 1) เริ่มจากการคัดเลือกวัตถุดิบ ทำการแยกส่วนที่ไม่ต้องการออกและทำความสะอาดเท่าที่จำเป็น ต่อจากนั้นเข้าสู่กระบวนการสกัดน้ำอ้อย (Juice Extraction) โดยทำการสกัดเอาน้ำหวานออกโดยใช้เครื่องรีดน้ำอ้อยหรือลูกหีบ (Mill Tandem) จากนั้นน้ำอ้อยที่ผลิตได้ทั้งหมดจะเข้าสู่กระบวนการทำความสะอาดหรือทำใส (Juice Purification) โดยการกรองเพื่อทำให้น้ำหวานที่ได้สะอาดขึ้น จากนั้นน้ำอ้อยที่ผ่านการทำใสแล้วจะผ่านกระบวนการต้มหรือเคี่ยวเพื่อระเหยเอาน้ำออก (Evaporation) ทำให้น้ำหวานมีความเข้มข้นมากขึ้นแล้วเข้าสู่ขั้นตอนการตกผลึก (Crystallization) หลังจากนั้นทำการปั่นแยกผลึกน้ำตาล (Centrifugaling) เพื่อรวมผลึกที่ได้โดยใช้เครื่องปั่นเหวี่ยง เมื่อสิ้นสุดกระบวนการเหล่านี้แล้วจะได้น้ำตาลดิบซึ่งต้องนำมาผ่านขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์อีกครั้ง ขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์ประกอบด้วย การปั่นละลาย (Affinated Centrifugaling) การทำความสะอาดและฟอกสี (Clarification) การเคี่ยว (Crystallization) การปั่นแยกผลึกน้ำตาล (Centrifugaling) และการอบ (Drying) เพื่อไล่ความชื้น

แล้วจึงได้น้ำตาลทรายที่บริสุทธิ์พร้อมจำหน่ายต่อไป (สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย, 2549)



ภาพ 1 กระบวนการผลิตน้ำตาลทราย

ที่มา: บริษัท ไทยชูการ์ มิลเลอร์ จำกัด, 2553

การสูญเสียซูโครสในน้ำอ้อย

ผลผลิตน้ำตาลแปรผันโดยตรงกับปริมาณซูโครสในวัตถุดิบคืออ้อย หากมีการลดลงของซูโครสในอ้อยระหว่างกระบวนการผลิตย่อมส่งผลต่อผลได้ในกระบวนการผลิตน้ำตาล การสูญเสียซูโครสในน้ำอ้อยเกิดจากหลายสาเหตุ เช่น เกิดจากการที่อ้อยถูกไฟไหม้ เมื่ออ้อยถูกไฟไหม้จะทำให้การระเหยของน้ำในลำอ้อยเป็นไปอย่างรวดเร็ว เมื่อทิ้งค้างไร่เป็นเวลานาน จะทำให้ค่าความหวาน (ซี.ซี.เอส.) ลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่ออ้อยเกิดบาดแผลหรือรอยแตกทำให้เชื้อจุลินทรีย์สามารถเข้าไปทำลายและเปลี่ยนน้ำตาลไปเป็นสารประกอบตัวอื่น เช่น กรดซิตริก แอลกอฮอล์ หรือ เด็กซ์แทรน รวมทั้งเกิดจากการล่าช้าในขั้นตอนการขนส่ง การเก็บรักษาก่อนส่งอ้อยเข้าหีบ โดยทั่วไปอ้อยที่ทำ

การตัดแล้วยังต้องใช้เวลาหลายวันก่อนถูกส่งเข้าหีบ การสูญเสียน้ำตาลเกิดขึ้นได้ทันทีหลังการเก็บเกี่ยวและมีแนวโน้มของปริมาณการสูญเสียที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิสูงซึ่งเป็นผลมาจากการเผาอ้อยก่อนการเก็บเกี่ยว (Solomon, 2000, p. 9) จากการศึกษาการสูญเสียซูโครสหลังการเก็บเกี่ยวโดยการสุ่มตัวอย่างจากเหง้าอ้อยที่ถูกเผา ทำการวิเคราะห์ปริมาณการสูญเสียน้ำตาลในอ้อยที่ผ่านการเผา ตัด และสกัด พบว่าอ้อยที่ถูกตัดแล้วทิ้งไว้เป็นเวลา 48 ชั่วโมง มีการสูญเสียซูโครสร้อยละ 0.2 - 6.4 และเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 3.5 - 9.0 เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นเป็น 72 ชั่วโมง นอกจากนี้ยังพบว่ามีการสูญเสียซูโครสสูงถึง 1.2 หน่วย หลังจากการเผา การตัด และการสกัดเป็นเวลา 40 ชั่วโมง (Larrahondo, et al., 2006, p. 233) การเก็บรักษาอ้อยที่ไม่ได้คุณภาพในระหว่างการขนส่ง การรอเข้าหีบ เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ปริมาณน้ำตาลซูโครสในน้ำอ้อยลดลง เนื่องจากอุณหภูมิสูงในระหว่างการขนส่งเป็นผลทำให้จุลินทรีย์ปนเปื้อนเกิดการเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ปริมาณซูโครสลดลง จากการศึกษาคุณภาพของน้ำอ้อยที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าน้ำอ้อยที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ (10 องศาเซลเซียส) มีอายุการเก็บรักษาได้นานถึง 9 วัน และน้ำอ้อยยังคงมีคุณภาพสูงสุดถึงวันที่ 11 ส่วนน้ำอ้อยที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิสูงกว่า 16 องศาเซลเซียส มีปริมาณซูโครสลดลงเมื่อเก็บไว้ เป็นเวลา 3 วัน โดยมีปริมาณกลูโคสและฟรุกโตสเพิ่มขึ้น และน้ำอ้อยที่เก็บที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส มีปริมาณซูโครสลดลงอย่างรวดเร็วหลังจากเก็บไว้เป็นเวลามากกว่า 4 วัน โดยสามารถสังเกตุได้ด้วยตาเปล่าจากสีและกลิ่นรสที่เปลี่ยนแปลงไป รวมถึงความหนืดที่เพิ่มขึ้น (Yusof, 2000, p. 397)

มีการรายงานว่าสาเหตุหลักของการสูญเสียซูโครสในน้ำอ้อยมีสามประการได้แก่ การสูญเสียเนื่องจากจุลินทรีย์ คิดเป็นร้อยละ 93.0 การสูญเสียเนื่องจากเอนไซม์ คิดเป็นร้อยละ 5.7 และการสูญเสียเนื่องจากกลไกทางเคมี คิดเป็นร้อยละ 1.3 จากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นได้ว่าเชื้อจุลินทรีย์เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการสูญเสียซูโครสในน้ำอ้อย (Eggleston, 2002, p. 100) เชื้อจุลินทรีย์ส่วนใหญ่มีแหล่งที่มาจากสภาพแวดล้อม เช่น ดินและแหล่งน้ำที่ใช้ในการเพาะปลูก โดยการปนเปื้อนพบมากในส่วนของรากและส่วนต่างๆของลำต้น เมื่ออ้อยได้รับบาดแผลในระหว่างการเก็บเกี่ยวหรือถูกไฟไหม้ ส่งผลให้เชื้อจุลินทรีย์เหล่านี้เข้าไปในลำต้นและใช้น้ำตาลซูโครสเป็นแหล่งคาร์บอนเพื่อการเจริญเติบโตและเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆ เช่น เด็กซ์แทรน แอลกอฮอล์ และกรดอินทรีย์ต่างๆ จุลินทรีย์ที่มีบทบาทสำคัญจะอยู่ในกลุ่มยีสต์ รา และแบคทีเรียแลคติก (Eggleston, 2002, pp. 97-100; Solomon, 2000, pp. 3-9; Yusof Shian and Osman, 2002, pp. 399-400) โดยยีสต์จะทำหน้าที่เปลี่ยนน้ำตาลซูโครสให้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว คือ กลูโคส และฟรุกโตรส จากนั้นก็จะเปลี่ยนน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวให้เป็นแอลกอฮอล์ มีราหลายชนิดที่

สังเคราะห์และขับเอนไซม์ออกจากเซลล์ เช่น เอนไซม์อินเวอร์เทสใช้ย่อยซูโครสให้เป็นกลูโคสกับฟรุกโตส และมีเชื้อราหลายชนิดที่เปลี่ยนน้ำตาลซูโครสเป็นกรดซิตริกได้ เช่น *Aspergillus niger* แต่แบคทีเรียแลคติกจัดว่ามีบทบาทสำคัญต่ออุตสาหกรรมน้ำตาลมากกว่า เพราะนอกจากจะมีผลต่อการสูญเสียซูโครสในปริมาณที่สูงกว่าแล้ว การย่อยสลายซูโครสโดยแบคทีเรียกลุ่มนี้ยังก่อให้เกิดสารเด็กซ์แทรน (Dextran) ที่ก่อให้เกิดความหนืดสูง ซึ่งมีผลกระทบมากมายต่อกระบวนการผลิตน้ำตาลทราย โดยแบคทีเรียแลคติกที่มีความสามารถเปลี่ยนซูโครสไปเป็นเด็กซ์แทรนได้จัดอยู่ในกลุ่ม Dextran-producing Lactic Acid Bacteria (DPLAB)

แบคทีเรียแลคติกกลุ่มของ Dextran-producing Lactic Acid Bacteria (DPLAB)

แบคทีเรียแลคติกที่สามารถเปลี่ยนซูโครสไปเป็นเด็กซ์แทรนได้จัดอยู่ในกลุ่ม Dextran-producing Lactic Acid Bacteria (DPLAB) ซึ่งประกอบไปด้วยแบคทีเรียในสกุล *Lactobacillus Leuconostoc Streptococcus* และ *Weissella* (Bounaix, et al., 2010, p. 18; Monsan, et al., 2001; Björkroth and Holzapfel, 2006; van Hijum, et al., 2006)

Lactobacillus spp. เป็นแบคทีเรียแลคติกที่สามารถผลิตเอกซ์โซโพลีแซกคาไรด์ (exopolysaccharides; EPS) และโอลิโกแซกคาไรด์ (oligosaccharides) ได้หลายชนิด โดยใช้ซูโครสเป็นสารตั้งต้นและมีเอนไซม์กลูโคซิลทรานสเฟอเรส (glycosyltransferases) เป็นสารเร่งปฏิกิริยา โฮโมโพลีแซกคาไรด์ (Homopolysaccharides) ที่ผลิตโดย *Lactobacillus* ที่แยกได้จากธัญพืช (cereal-associated *Lactobacilli*) มีหลายชนิด เช่น อะมัยโลส (amylose) เป็นโฮโมโพลีแซกคาไรด์ที่สายหลักต่อกันด้วยพันธะ α-1, 4 มูแทน (mutan) เป็นโฮโมโพลีแซกคาไรด์ที่สายหลักต่อกันด้วยพันธะ α-1,3 อัลเทอแรน (alternan) เป็นโฮโมโพลีแซกคาไรด์ที่สายหลักต่อกันด้วยพันธะ α-1,3 และ α -1,6 และเด็กซ์แทรน (dextran) ซึ่งเป็นโฮโมโพลีแซกคาไรด์ของน้ำตาลกลูโคสที่สายหลักต่อกันด้วยพันธะ α-1,6 กลูโคซิดิก (Tieking and Gänzle, 2005, p. 80) มีรายงานว่า *Lactobacillus confuses* สามารถผลิตเด็กซ์แทรนได้ในปริมาณสูงและเด็กซ์แทรนที่ได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ทางด้านการแพทย์ ในการเป็นสารเพิ่มปริมาณเลือด (blood volume expander) และใช้เพิ่มประสิทธิภาพการไหลเวียนของเลือด (Sharpe, et al., 1972, pp. 389-397)

Streptococci spp. เป็นจุลินทรีย์ที่มีบทบาทสำคัญเกี่ยวข้องกับโรคเยื่อบุหัวใจอักเสบ (endocarditis) ในมนุษย์ โดยการอักเสบของเยื่อบุหัวใจมีสาเหตุมาจาก *Streptococci* ที่มีความสามารถในการผลิตเด็กซ์แทรน (dextran-producing streptococci) โดย *Streptococcus sanguis* เป็น *Streptococcus* สายพันธุ์ดั้งเดิมที่เป็นสาเหตุของโรคเยื่อบุหัวใจอักเสบและเป็น

สายพันธุ์ที่สามารถผลิตเด็กซ์แทรนได้ (Parker and Ball, 1976, p. 279) นอกจากนี้ยังพบว่า *Streptococcus bovis* มีความสามารถในการผลิตเด็กซ์แทรนและฟรุกโตสเมื่อเจริญเติบโตในอาหารที่มีซูโครสเป็นแหล่งคาร์บอน (Bourne Hutson and Weigel, 1961, pp. 549-553)

Weissella **spp.**เป็นแบคทีเรียแลคติกที่ใช้ในการผลิตขนมปังแป้งหมัก (wheat sourdough) จากการศึกษาของ Katina, et al. (2009, pp. 734-743) พบว่า *Weissella confusa* สามารถผลิตเด็กซ์แทรนและไอโซมอลโตโอลิโกแซคคาไรด์ (isomaltooligosaccharides) ได้ในปริมาณสูงในขนมปังแป้งหมัก (sourdough) โดยเด็กซ์แทรนและไอโซมอลโตโอลิโกแซคคาไรด์ที่ผลิตโดย *W. confusa* มีบทบาทในการปรับปรุงคุณภาพของขนมปังและทำให้แป้งโดมีความหนืดเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังมีรายงานการแยก *Weissella cibaria* และ *Weissella confusa* ได้จากแป้งหมัก และพบว่าจุลินทรีย์ทั้งสองสายพันธุ์ มีความสามารถในการสังเคราะห์เอนไซม์เด็กแทรนซูเครสในปริมาณสูงและสามารถผลิตเด็กซ์แทรนสายตรงที่มีพันธะ α-1,6 (linear dextrans containing α-1,6 glucose) จากซูโครสได้ (Bounaix, et al., 2010, pp. 18-26)

Leuconostoc **spp.**จัดเป็นแบคทีเรียแลคติกกลุ่มที่มีบทบาทสำคัญต่ออุตสาหกรรมน้ำตาลมากที่สุด เนื่องจากมีผลกระทบต่อการสูญเสียซูโครสในปริมาณสูง และสามารถเปลี่ยนซูโครสไปเป็นเด็กซ์แทรนได้ (Eggleston, 2002, p. 95; Eggleston and Harper, 2006, p. 366; Solomon, 2000, p. 3; Yusof Shinan and Osman, 2000, p. 399) ซึ่งเด็กซ์แทรนส่งผลเสียมากมายต่อกระบวนการผลิตน้ำตาล

Leuconostoc spp.เป็นแบคทีเรียประจำถิ่นที่ปนเปื้อนอยู่ตามดิน พบได้ทั่วไปในธรรมชาติ เช่น ดิน หญ้า น้ำนม องุ่น และพืชหลายชนิด เป็นแบคทีเรียที่ผลิตกรดแลคติก โดยใช้สารอินทรีย์ เช่น ซูโครสเป็นแหล่งคาร์บอน เซลล์มีรูปร่างกลม (cocci) ขนาด 0.9 -1.2 ไมครอน มักอยู่รวมกันเป็นคู่ โคโลนีมีขนาดเล็ก ผิวเรียบเป็นมัน มีสีขาว เมื่อนำมาย้อมสีแกรมจะติดสีแกรมบวก ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ และไม่สร้างสปอร์ (non-spore forming) สามารถเจริญได้ทั้งในที่ที่มีและไม่มีออกซิเจน (facultative bacteria) (Garvie, 1984, pp. 147-178) เจริญเติบโตได้ที่อุณหภูมิ 5 – 30 องศาเซลเซียส แต่ช่วงที่เหมาะสมที่สุดคือระหว่าง 25 - 30 องศาเซลเซียส และช่วงพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของเซลล์ คือ 6.0 – 6.9 ลักษณะเด่นของจุลินทรีย์ชนิดนี้คือความสามารถในการสร้างเมือก (slime layer) เมื่อเจริญในอาหารที่มีซูโครสในปริมาณสูง เมือกที่พบเป็นโครงสร้างที่ห้อหุ้มผนังเซลล์ ประกอบด้วยโพลิแซ็คคาไรด์ ที่ยึดกันอย่างหลวมๆ สามารถแยกจากกันได้ง่ายด้วยกรดอ่อน เป็นโครงสร้างที่ช่วยให้แบคทีเรียทนทานต่อความแห้งแล้งและสารเคมีต่างๆได้ดี โพลิแซ็คคาไรด์ดังกล่าวประกอบด้วยน้ำตาลหลายชนิดซึ่งจะแตกต่างกันไป

น้ำตาลที่พบมากได้แก่ น้ำตาลกลูโคส (glucose) กาแลคโตส (galactose) และลีวูโลส (luvulose) แบคทีเรียที่เหล่านี้จะสร้างโพลิแซ็คคาไรด์เมื่อเจริญในอาหารที่มีน้ำตาลเท่านั้น แต่ในอาหารที่ไม่มีน้ำตาลแบคทีเรียเหล่านี้จะไม่สร้างสารดังกล่าวหรือสร้างเพียงเล็กน้อยเท่านั้น *L. mesenteroides* สามารถผลิตโพลิแซ็คคาไรด์ได้ดีเมื่อเจริญในอาหารที่มีซูโครส โดยโพลิแซ็คคาไรด์ที่เกิดขึ้นมีความหนามากและไม่มีสี องค์ประกอบทางเคมีที่พบในโพลิแซ็คคาไรด์ของแบคทีเรียแต่ละชนิดมีส่วนประกอบแตกต่างกันไป

ในอาหารที่มีซูโครสเป็นแหล่งคาร์บอนเชื้อ *Leuconostoc* spp. จะใช้ซูโครสในการเจริญเติบโตและสร้างเด็กซ์แทรน โดยกลไกการเกิดเด็กซ์แทรนเกิดจากเมื่อ *Leuconostoc* spp. เจริญบนอาหารที่เติมไปด้วยน้ำตาลซูโครส เชื้อแบคทีเรียจะใช้ซูโครสดังกล่าวในการเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนเซลล์ ในขณะเดียวกันในแต่เซลล์จะผลิตเอนไซม์เด็กซ์แทรนซูเครสขึ้น ซึ่งซูโครสเป็นสารตั้งต้นเพียงชนิดเดียวที่ทำให้เกิดการผลิตเอมไซม์นี้ เอนไซม์เด็กซ์แทรนซูเครสจะเข้าไปย่อยซูโครสที่เหลืออยู่ และก่อให้เกิดการผลิตเด็กซ์แทรนและฟรุกโตสออกมา จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการหมักสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการเคมีดังนี้

$$\text{Sucrose} \xrightarrow{Cells} \text{more Cells} \qquad (1)$$

$$\text{Cells} \rightarrow \text{Enzyme} \qquad (2)$$

$$\text{n Sucrose} \xrightarrow{Enzyme} \text{Dextran} + \text{n Fructose} \qquad (3)$$

เด็กซ์แทรน (Dextran)

เด็กซ์แทรน $(C_6H_{10}O_5)_n$ จัดอยู่ในกลุ่มของเอ็กซ์โซโพลิแซ็กคาไรด์ (exopolysaccharide) ที่สังเคราะห์และถูกปล่อยออกมาภายนอกเซลล์โดยเชื้อแบคทีเรีย เด็กซ์แทรนเป็นสารประกอบพวกโฮโมโพลิแซ็กคาไรด์ของน้ำตาลกลูโคส ร้อยละ 95 ของสายหลักต่อกันด้วยพันธะ α-1,6 กลูโคซิดิก (Santos, et al., 2000, p. 182; Brown and McAvoy, 1989, pp. 405–414) และอีกร้อยละ 5 เป็นสายย่อยที่ต่อกันด้วยพันธะชนิด α-1,3 ในบางชนิดสายย่อยอาจต่อกันด้วยพันธะชนิด α-1,2 หรือ α-1,4 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของแบคทีเรียที่เกี่ยวข้อง (Galvez-Mariscal and Lopez-Munguia, 1991, pp. 327-331) ในปัจจุบันมีการนำเด็กซ์แทรนมาใช้ประโยชน์ทางด้านการแพทย์และอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง เนื่องมาจากเด็กซ์แทรนมีลักษณะเป็น non-ionic และมีความคงตัวที่ดีภายใต้การดำเนินการที่สภาวะปกติ โดยด้านการแพทย์มีการนำเด็กซ์แทรนมาทำให้มีมวลโมเลกุลที่เล็กลงเพื่อให้เหมาะสำหรับการใช้เพิ่มปริมาณเลือด (blood volume expander) ใช้ผลิตสารที่ใช้

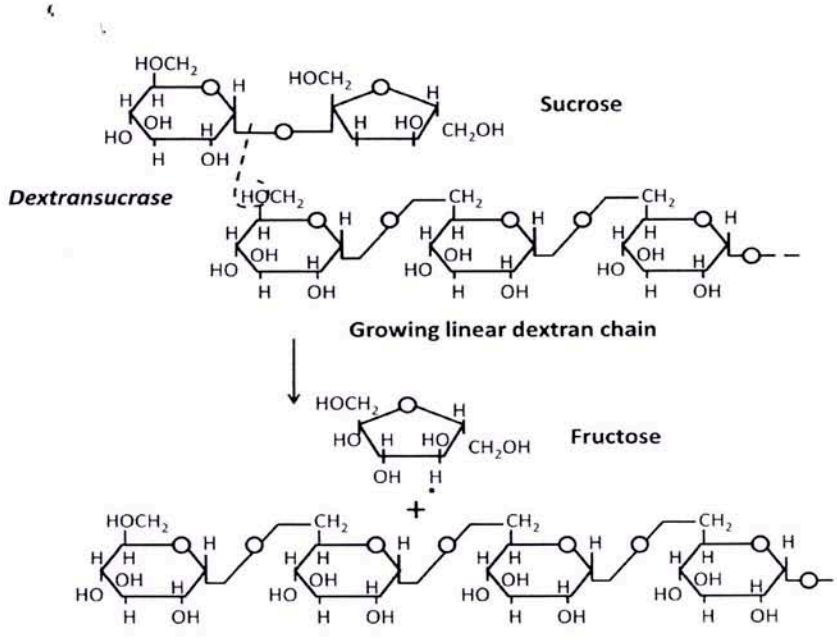
ดูดซับน้ำเลือด (restore blood volume) ให้กับผู้ป่วยที่เกิดอาการช็อคเนื่องจากเสียเลือดมาก (Santos, et al., 2000, p. 182; Koepsell and Tsuchiya, 1952, pp. 293–295) ส่วนด้านอุตสาหกรรมมีการนำเด็กซ์แทรนมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตเซฟลาเด็ก (Sephadex) สำหรับ Gel Filtration Techniques และใช้เป็น chromatographic media (Shamala and Prasad, 1995, pp. 237–241) แต่ในขณะเดียวกันเด็กซ์แทรนยังก่อให้เกิดปัญหาในอุตสาหกรรมน้ำตาล เนื่องจากเด็กซ์แทรนที่ปนเปื้อนในกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายมีผลทำให้ประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตน้ำตาลลดต่ำลง ปริมาณผลผลิตน้ำตาลทรายที่ได้จากน้ำอ้อยมีปริมาณลดลงและได้ผลผลิตที่มีคุณภาพต่ำ

เด็กซ์แทรนส่วนใหญ่ถูกสังเคราะห์จากเอนไซม์เด็กแทรนซูเครส ซึ่งมีชื่อเรียกตามระบบการเรียกชื่อของเอนไซม์ว่า α-1,6-glucan D-fructose-2-glucosyltransferase (Dsase); EC 2.4.1.5 เอ็นไซม์ชนิดนี้ถูกผลิตขึ้นจากแบคทีเรียในสกุลของ *Lactobacillus Leuconostoc Streptococcus* และ *Weissella* (Bounaix, et al., 2010, p. 18; Monsan, et al., 2001; Björkroth and Holzapfel, 2006; van Hijum, et al., 2006) โดย *Leuconostoc* spp. สายพันธุ์ *Leuconostoc mesenteroides* และ *Leuconostoc dextranicum* เป็นสองสายพันธุ์ที่เป็นที่รู้จักกันดีในการผลิตเด็กซ์แทรนทางการค้า เอนไซม์เด็กแทรนซูเครสจะทำหน้าที่ย้ายหมู่กลูโคซิล (transglucosylation) จากโมเลกุลของน้ำตาลซูโครส ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ไปเป็นเด็กซ์แทรนและปลดปล่อยส่วนของฟรุกโตสออกมา ดังสมการ (Santos, et al., 2000, p. 177)

$$\underset{\text{Sucrose}}{nC_{12}H_{12}O_{11}} \xrightarrow{Enzyme} \underset{\text{Dextran}}{\left(C_6H_{10}O_5\right)_n} + \underset{\text{Fructose}}{nC_6H_{12}O_6} \qquad (4)$$

เด็กซ์แทรนที่เกิดขึ้นจะส่งผลต่อการลดประสิทธิภาพของการกรองและการเคี่ยวน้ำตาล ทำให้อัตราการเกิดผลึกของน้ำตาลทรายช้าลงหรือไม่สมบูรณ์ ซึ่งเด็กซ์แทรนที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 สามารถเพิ่มความหนืดของน้ำหวานได้ 2 เท่า นอกจากนี้แบคทีเรียดังกล่าวยังใช้น้ำตาลแล้วสร้างกรดแลคติก กรดอะซิติก และ เอทธิลแอลกอฮอล์มีผลทำให้ปริมาณน้ำตาลในน้ำหวานลดลง หากมีการสะสมเด็กซ์แทรนในปริมาณสูงจะก่อให้เกิดตะกรันอุดตันบริเวณท่อ หม้อเคี่ยว และแผ่นกรองได้ นอกจากนี้ยังก่อให้เกิดปัญหาต่างๆขึ้นในระหว่างกรรมวิธีการผลิตอีกมากมาย เช่น เป็นอุปสรรคต่อการล้างทำความสะอาดเครื่องมือ เนื่องจากเด็กซ์แทรนไปอุดตันตามรู ท่อ ข้อต่อ ของเครื่องมือเครื่องใช้ ขัดขวางระบบการทำใสของน้ำอ้อยโดยขัดขวางไม่ให้อนุภาคของ

น้ำตาลรวมตัวกันแล้วตกตะกอนตามที่ควรจะเป็น ทำให้น้ำตาลมีความหนืดเพิ่มขึ้นส่งผลต่ออัตราการแลกเปลี่ยนความร้อน ทำให้ระบบการผลิตน้ำตาลทั้งระบบกินเวลามากขึ้น และทำให้การเกิดผลึกของน้ำตาลที่ผิดรูปแบบไป โดยผลึกน้ำตาลเปลี่ยนเป็นรูปเข็มมากขึ้นซึ่งจะเข้าไปขัดขวางระบบการปั่นน้ำตาล ทำให้การปั่นน้ำตาลใช้เวลานานขึ้น และผลึกน้ำตาลหลุดปนไปกับโมลาสมากขึ้น ทำให้ปริมาณการสูญเสียน้ำตาลสูงขึ้น นอกจากนั้นระบบการหมุนเวียนของโมลาสผสมน้ำตาล (massecuite) ซึ่งจะต้องถูกปั๊มเข้ามาสร้างให้เป็นผลึกน้ำตาลใหม่อีกครั้งหนึ่งทำให้ได้น้ำตาลที่มีคุณภาพต่ำกว่ามาตรฐาน ปริมาณการผลิตน้ำตาลต่อตันอ้อยของโรงงานน้อยลง และได้โมลาสที่มีน้ำตาลฟรุคโตส หรือน้ำตาลรูปอื่นและกรดอินทรีย์ต่าง ๆมากขึ้น ปัญหาดังกล่าวส่งผลให้กระบวนการผลิตน้ำตาลทั้งระบบกินเวลานานมากขึ้น และเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายให้กับโรงงาน



ภาพ 2 การย่อยน้ำตาลซูโครสโดยเอนไซม์เด็กซ์แทรนซูเครสเพื่อสังเคราะห์เด็กซ์แทรน

ที่มา: มธุรส จันทร์ศุภมงคล, 2543; Jame and Chung, 1993

การลดการสูญเสียซูโครสในกระบวนการผลิตน้ำตาล

การลดการสูญเสียซูโครสในกระบวนการผลิตอาจทำได้โดยการยับยั้งการเจริญเติบโตของ DPLAB ระหว่างกระบวนการผลิตโดยใช้อุณหภูมิและสารชีวฆาต (biocides) มีการรายงานว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์และกิจกรรมของเอนไซม์

(Santos, et al., 2000, pp. 177–188) การเพิ่มอุณหภูมิมีผลทำให้อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของสับสเทรตมีพลังงานจลน์มากขึ้น ทำให้อัตราเร็วของการชนกันระหว่างเอนไซม์สูงขึ้น แต่จากการที่เอนไซม์เป็นสารประกอบเชิงซ้อนของโปรตีน และกิจกรรมของการเร่งปฏิกิริยาเกิดจากโครงสร้างตติยภูมิเรียงต่อกันอย่างมีระเบียบในทิศทางที่ต้องจับกับสับสเทรตที่บริเวณจับและบริเวณเร่งของปฏิกิริยา การที่อุณหภูมิสูงมากเกินไปมีผลทำให้สับสเทรตมีพลังงานจลน์สูงเกินไป โครงรูปตติยภูมิของเอนไซม์ซึ่งยึดกันด้วยพันธะที่มีแรงอ่อนเกิดการเสียหาย ทำให้เอนไซม์เสียสภาพหรือสูญเสียกิจกรรมไป Santos, et al. (2000, pp. 177-188) ได้ทำการศึกษาสภาวะการหมักที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตเด็กซ์แทรนและฟรุกโตสจากซูโครส โดยใช้ *Leuconostoc mesenteroides* NRRL-B 512(F) การออกแบบการทดลอง เป็นการดำเนินการศึกษาแบบเบ็ดเสร็จในถังปฏิกรณ์ชีวภาพที่มีปริมาตร 1.5 ลิตร โดยการศึกษาถึงผลของอุณหภูมิ (20-40 องศาเซลเซียส) พีเอช (5.5 และ 6.7) และความเข้มข้นของซูโครส (10-120 กรัมต่อลิตร) พบว่าที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเติบโตของจุลินทรีย์ และไม่พบการเจริญของเชื้อที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิมีผลทำให้กิจกรรมของเอนไซม์ลดลง และพบว่าที่พีเอช 6.7 เหมาะสมที่สุดสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ซึ่งตรงกับงานวิจัยอื่นๆ ที่สนับสนุนว่าพีเอช 6.7 เป็นค่าพีเอชที่เซลล์จุลินทรีย์มีการเจริญเติบโตสูงสุด ถึงแม้ว่าที่พีเอช 5.5 ค่ากิจกรรมของเอนไซม์ที่ได้สูงกว่าแต่น้ำหนักเซลล์แห้งน้อยกว่า และใช้ระยะเวลาในการหมักน้อยกว่าพีเอช 6.7 ประมาณ 3 ชั่วโมง จากการศึกษาการให้อากาศพบว่าการให้อากาศไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญในการหมัก โดยการให้อากาศมีผลเชิงบวกต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ แต่ส่งผลในเชิงลบต่อกิจกรรมของเอนไซม์ การเจริญเติบโตของเซลล์จุลินทรีย์ไม่ถูกยับยั้งโดยปริมาณความเข้มข้นของซูโครสที่สูง แต่อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของซูโครสที่สูงเกินกว่า 40 กรัมต่อลิตร ส่งผลให้การแยกผลิตภัณฑ์ออกจากเซลล์ทำได้ยากขึ้น

สารชีวฆาต (Biocide)

สารชีวฆาตถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมน้ำตาลเพื่อลดการสูญเสียซูโครสในน้ำอ้อย เนื่องจากเชื้อจุลินทรีย์ สารชีวฆาตมีความสามารถในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียพวกที่ทนความร้อนสูง (thermophilic bacteria) ในน้ำอ้อยได้ภายในระยะเวลาอันสั้น (Solomon, 2000, p. 14) โดยจะควบคุมจุลินทรีย์และการสร้างกรดในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการผลิตน้ำตาล การศึกษาผลของการใช้สารชีวฆาตพบว่าการใช้โซเดียมเอไซด์ร้อยละ 0.08 ในน้ำอ้อยที่มีการปรับพีเอชเป็น 5.16 และบ่มที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0 7 14 23 31 38 47 55 และ 71 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างที่เวลาต่างๆมาวิเคราะห์ค่าพีเอช องศาบริกซ์ (°Brix) ปริมาณเด็กซ์แทรน ปริมณซูโครส

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 05 ต.ค. 2555
เลขทะเบียน 219063
เลขเรียกหนังสือ

กลูโคสและฟรุกโตส พบว่า โซเดียมเอไซด์สามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ปนเปื้อนได้ดี แต่สารชนิดนี้มีความเป็นพิษสูงไม่เหมาะกับการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร (Eggleston, 2002, p. 97) มีสารชีวฆาตอีกหลายชนิดที่มีประสิทธิภาพดีในการยับยั้งจุลินทรีย์ในสภาวะที่เป็นกรด สารชีวฆาตที่สามารถนำมาใช้โดยไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ควรมีลักษณะทั่วไปคือ ควรยับยั้งจุลินทรีย์ได้หลายชนิดที่พีเอชของน้ำอ้อยซึ่งอยู่ในช่วง pH 5.2 - 5.5 ควรมีความปลอดภัยต่อมนุษย์ มีความเป็นพิษต่ำไม่มีฤทธิ์กัดกร่อนพื้นผิวสัมผัส ง่ายต่อการเก็บและดูแลรักษา ควรก่อให้เกิดปฏิกิริยาน้อยที่สุดในวัตถุอินทรีย์ ไม่ตกค้างในน้ำตาลหรือโมลาส และควรมีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์โดยสมบูรณ์โดยเฉพาะแบคทีเรียในกลุ่ม DPLAB และแบคทีเรียที่ทนความร้อนสูงในน้ำอ้อยได้ มีสารชีวฆาตที่สามารถนำมาใช้โดยมีประสิทธิภาพดีในการยับยั้งจุลินทรีย์ในสภาวะที่เป็นกรดไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์และมีราคาถูก ชนิดที่ได้รับความสนใจจากอุตสาหกรรมอาหาร เช่น Hexamethylenetetramine แต่ข้อมูลด้านการใช้ในอุตสาหกรรมน้ำตาลยังมีจำกัด

Hexamethylenetetramine มีชื่อทางการค้าคือ Hexamine ถูกเตรียมขึ้นจากปฏิกิริยาของฟอร์มาลดีไฮด์ (formaldehyde) และแอมโมเนีย (ammonia) โดย hexamine เป็นผงผลึกสีขาว มีกลิ่นของเอมีนเล็กน้อย สามารถละลายได้ในน้ำ แอลกอฮอล์ และคลอโรฟอร์ม แต่ไม่ละลายในอีเทอร์ โดย hexamine ใช้เป็นสารต้านเชื้อแบคทีเรียในการรักษาการติดเชื้อที่ทางเดินปัสสาวะซึ่งออกฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรียภายใต้สภาวะความเป็นกรดอ่อนโดยจะปลดปล่อยฟอร์มาลดีไฮด์ในตัวกลางที่เป็นกรด (Greenwood and Slack, 1981, pp. 223-227) โดยฟอร์มาลดีไฮด์มีกลไกการออกฤทธิ์ฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ด้วยการทำให้โปรตีนตกตะกอนโดยวิธี alkyltion ซึ่งมีการนำ Hexamine มาใช้เป็น primary feed material ในอุตสาหกรรมยาและใช้เป็น intermediate material ในอุตสาหกรรมเคมี (Alamdari and Tabkhi, 2004, p. 803)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากที่กล่าวมาแล้วในข้างต้นการสูญเสียซูโครสเกิดจากการที่ DPLAB ที่มี *Leuconostoc* spp. เป็นแบคทีเรียต้นแบบ ได้ใช้ซูโครสเป็นแหล่งคาร์บอนในการเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนเซลล์ โดยแต่ละเซลล์จะมีการผลิตเอนไซม์เด็กซ์แทรนซูเครสขึ้น ซึ่งเอนไซม์นี้จะเข้าไปย่อยซูโครสที่เหลืออยู่และทำให้เกิดการผลิตเด็กซ์แทรนและฟรุกโตสออกมา สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการเคมีดังสมการที่ (1) (2) และ (3) ดังนั้นจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการหมัก สามารถจำแนกออกได้เป็นทั้งหมดสี่อัตรา การเปลี่ยนแปลงที่เกี่ยวข้องกันคือ อัตราการใช้ซูโครสของ *Leuconostoc* spp. อัตราการเจริญเติบโตของ *Leuconostoc* spp. อัตราการผลิตเอนไซม์เด็กซ์แทรนซูเครส และอัตราการเกิดเด็กซ์แทรนและฟรุกโตส ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวน

การหมักนี้สามารถใช้ระบบสมการเชิงอนุพันธ์เพื่อประมาณค่าของการสูญเสียซูโครสในกระบวนการหมักได้

ข้อมูลจากการทดลองจริงของการทดลองที่สภาวะใดสภาวะหนึ่ง สามารถให้ค่าจำเพาะต่อสภาวะนั้นๆ การที่จะทำให้ได้ข้อมูลจริงสำหรับทุกสภาวะมีความเป็นไปได้ยาก เนื่องจากข้อจำกัดของการทดลอง ทั้งค่าใช้จ่าย อุปกรณ์ที่เหมาะสม และระยะเวลาที่ใช้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อาศัยความเข้าใจจากสภาวะที่เกิดขึ้นจริง มักได้คำตอบที่มีแนวทางเป็นไปได้สูง จึงเป็นเครื่องมือที่มีบทบาทมากขึ้นในการใช้ควบคู่ไปกับการทดลอง เพื่อลดระยะเวลาและโอกาสเกิดความผิดพลาด

จากการศึกษาของ Santos, et al. (2000, pp. 182-188) ได้มีการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาสภาวะการหมักที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตของเด็กซ์แทรนและฟรุกโตส โดยทำการพิจารณาระบบสมการเชิงอนุพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับอัตราการใช้ซูโครส ทั้งจากอัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียและจากอัตราการผลิตเด็กซ์แทรนและฟรุกโตส ซึ่งในขณะเดียวกันอัตราการผลิตเด็กซ์แทรนและฟรุกโตสก็ขึ้นอยู่กับอัตราการผลิตเอนไซม์เด็กซ์แทรนซูเครสด้วย แบบจำลองคณิตศาสตร์ของกระบวนการหมักดังกล่าว ยังเป็นเครื่องมือสำคัญที่ช่วยในการติดตามผลิตภัณฑ์ที่ถูกสร้างขึ้น อีกทั้งยังช่วยในการวางแผนเพื่อกำหนดสภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตอีกด้วย

สำหรับแบบจำลองการเจริญเติบโต ซึ่งจากสมการเคมีที่ (1) เขียนสมการอัตราการเจริญเติบโตของเซลล์ได้ดังนี้

$$r_X = \frac{dX}{dt} = \mu X = \mu_m \left(1 - \frac{X}{X_{max}}\right) X \qquad (5)$$

เมื่อ r_X คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของเซลล์ (g/l/h)

X คือ ความเข้มข้นของเซลล์ (g/l)

t คือ เวลา (h)

μ คือ อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะที่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของเซลล์ (h^{-1})

X_{max} คือ ความเข้มข้นสูงสุดของเซลล์ (g/l)

μ_m คือ อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด (h^{-1})

สำหรับแบบจำลองการผลิตเอนไซม์เด็กซ์แทรนซูเครส อัตราการผลิตเอนไซม์เด็กซ์แทรนซูเครสจะพิจารณาเฉพาะเทอมที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตได้สมการดังนี้

$$r_{\mathrm{E}} = \frac{dE}{dt} = Y_{E/X}\frac{dX}{dt} \qquad (6)$$

เมื่อ

r_{E} คือ อัตราการผลิตเอนไซม์ (DSU/ml/h)

E คือ ความเข้มข้นของเอนไซม์ที่ผลิตได้ (DSU/ml)

$Y_{E/X}$ คือ ผลได้ของเอนไซม์จากเซลล์ โดยถือว่าเซลล์ที่ไม่สามารถทำงานได้จะไม่สร้างเอนไซม์ มีเฉพาะเซลล์ที่ทำงานได้เท่านั้นที่มีการผลิตเอนไซม์ (DSU/mg cell)

สำหรับแบบจำลองการผลิตเด็กซ์แทรนและฟรุกโตส เด็กซ์แทรนและฟรุกโตสเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างเอนไซม์เด็กซ์แทรนซูเครสกับซูโครส ดังนั้นอัตราการผลิตเด็กซ์แทรนและฟรุกโตสสามารถเขียนในรูปสมการดังนี้

$$r'_F = \frac{dF'}{dt} = k'\frac{M_F}{M_S}E(t)S'(t) - \frac{1}{Y_{X/F}}\frac{dX}{dt} \qquad (7)$$

$$r'_D = \frac{dD'}{dt} = k'\frac{(M_G - M_W)}{M_S}E(t)S'(t) \qquad (8)$$

เมื่อ

r'_F คือ อัตราการผลิตฟรุกโตส (mol/l/h)

r'_D คือ อัตราการผลิตเด็กซ์แทรน(mol/l/h)

D' คือ ความเข้มข้นของเด็กซ์แทรน (g/l)

F' คือ ความเข้มข้นของฟรุกโตส (g/l)

S' คือ ความเข้มข้นของซูโครส (mol/l)

E คือ ความเข้มข้นของเอนไซม์ที่ผลิตได้ (DSU/ml)

$M_D M_F$ และ M_S คือ มวลโมเลกุลของเด็กซ์แทรน ฟรุกโตส และ ซูโครส ตามลำดับ

k' คือ ค่าคงที่ (ml/DSU/h)

$Y_{X/F}$ คือ ผลได้ของเซลล์จากฟรุกโตส (g cells/g fructose)

สำหรับแบบจำลองการใช้ซูโครส จากการพิจารณาค่าความเข้มข้นของซูโครสที่ใช้ไปทั้งหมดจะคำนวณจากซูโครสที่ถูกใช้ในการเจริญเติบโตของเซลล์รวมกับซูโครสที่ถูกใช้เพื่อการผลิตเด็กซ์แทรนและฟรุกโตส

$$\Delta S = \Delta S_{Assimilated\ in\ to\ biomass} + \Delta S_{Used\ by\ extracellular\ enzyme\ produce\ dextran\ and\ fructose}$$

ดังนั้นสามารถเขียนอัตราการใช้ซูโครสให้อยู่ในรูปสมดุลมวลได้ดังนี้

$$r' = \frac{dS'}{dt} = -\frac{1}{Y_{X/S}}\frac{dX}{dt} + nkE(t)S'(t) \qquad (9)$$

เมื่อ

r' คือ อัตราการใช้ซูโครส (g/l/h)

$Y_{X/S}$ คือ ผลได้ของเซลล์จากซูโครส(g cells/g sucrose)

เทอมของ $\frac{1}{Y_{X/S}}\frac{dX}{dt}$ คือ ซูโครสที่ถูกใช้ในการเจริญเติบโตของเซลล์

เทอมของ $nkE(t)S'(t)$ คือ ซูโครสที่ถูกใช้เพื่อการผลิตเด็กซ์แทรนและฟรุกโตส

เนื่องจากในงานวิจัยครั้งนี้มีการศึกษาผลของอุณหภูมิและสารชีวฆาตต่อการสูญเสียซูโครสเนื่องจากแบคทีเรียแลคติกในน้ำอ้อย โดยอุณหภูมิและสารชีวฆาตเป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียแลคติก ซึ่งอุณหภูมิเป็นตัวแปรทางกายภาพตัวแปรหนึ่งที่สามารถเร่งปฏิกิริยาได้ ในกรณีของจุลินทรีย์ อุณหภูมิเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางชีวภาพ โดยการใช้อุณหภูมิที่ไม่สูงมากเชื้อจุลินทรีย์จะสามารถเจริญเติบโตได้ แต่เมื่ออุณหภูมิสูงเกินช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต (optimum temperature) จะส่งผลทำให้เซลล์จุลินทรีย์ตายได้ เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงจะ ทำให้โปรตีน (เอนไซม์) ในเซลล์ของจุลินทรีย์เสียสภาพทำให้ไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้เพราะโปรตีนและเอนไซม์เป็นองค์ประกอบสำคัญของกลไกการทำงานต่าง ๆ ในเซลล์ ซึ่งสมการที่อธิบายการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ สามารถอธิบายได้โดย square root model จากการศึกษาของ Cayré, et al. (2003, pp. 562-564) ได้นำ square root model มาอธิบายถึงผลของอุณหภูมิต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียแลคติก ที่อุณหภูมิ 0 8 และ 15 องศาเซลเซียส พบว่า square root model ที่นำมาใช้สามารถยอมรับได้ทางสถิติและมีความยืดหยุ่นเพียงพอที่จะใช้กับข้อมูลจากการทดลองจริง ดังนั้นในการศึกษานี้จึงจะนำ square root model มาอธิบายผลของอุณหภูมิต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียแลคติกดังนี้

$$\sqrt{\mu_{max}} = \mathrm{b} \cdot (T - T_{min}) \cdot \left(1 - exp\left(c(T - T_{max})\right)\right) \qquad (10)$$

เมื่อ μ_{max} คือ อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด (h^{-1})

T คือ อุณหภูมิ (^0C)

T_{min} คือ อุณหภูมิต่ำสุดที่จุลินทรีย์สามารถเจริญได้ (^0C)

T_{max} คือ อุณหภูมิสูงสุดที่จุลินทรีย์สามารถเจริญได้ (^0C)

b คือ ค่าคงที่ ($(h^{-1})^{-1/2}/^0C^{-1}$)

c คือ ค่าคงที่ (^0C)

สารชีว่ฆาต (biocide) เป็นสารยับยั้งที่มีผลต่ออัตราการเติบโตของจุลินทรีย์ จากการศึกษาของ Medawar, et al. (2003, pp. 527-532) ได้เสนอแบบจำลองอย่างง่าย เพื่อหาช่วงระยะปรับตัว (lag phase) ก่อนการเจริญเติบโตของยีสต์ที่เป็นฟังก์ชันของความเข้มข้นของเอทานอลในอาหารเลี้ยงเชื้อ โดยมีเอทานอลเป็นตัวยับยั้ง(inhibitor) การเจริญเติบโตของยีสต์ที่สำคัญในไวน์ ซึ่งสมการที่สามารถอธิบายถึงผลของตัวยับยั้งต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในรูปแบบของอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะมีดังนี้

$$\mu = \mu_0 \left(1 - \frac{[I]}{[I_{max}]}\right) \qquad (11)$$

เมื่อ μ คือ อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (h^{-1})

I คือ ความเข้มข้นของสารยับยั้ง (g/l)

I_{max} คือ ความเข้มข้นของสารยับยั้งสูงสุด (g/l)

ดังนั้นผลของอุณหภูมิและสารชีวฆาตต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียแลคติกสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการได้ดังนี้

$$\sqrt{\mu_{max}} = \mathrm{b} \cdot (T - T_{min}) \cdot \left(1 - exp\left(c(T - T_{max})\right)\right) \cdot \sqrt{\left(1 - \frac{[I]}{[I_{max}]}\right)} \qquad (12)$$

ในการศึกษาครั้งนี้จึงจะประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่กล่าวมาข้างต้น คือ แบบจำลองการเจริญเติบโต สมการที่ (5) แบบจำลองการผลิตเอนไซม์เด็กซ์แทรนซูเครส สมการที่

(6) แบบจำลองการผลิตฟรุกโตส สมการที่ (7) แบบจำลองการผลิตเด็กซ์แทรน สมการที่ (8) และแบบจำลองการใช้ซูโครสสมการที่ (9) มาใช้เพื่อทำนายการสูญเสียซูโครสจากน้ำอ้อยอันเนื่องมาจากแบคทีเรียแลคติกที่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารชีวมาตต่อไป