บทที่ 2
วารสารปริทัศน์

2.1 กระบวนการผลิตน้ำตาลทราย

2.1.1 กระบวนการผลิตน้ำตาลทรายดิบ ประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังนี้ (5)

2.1.1.1 ขั้นตอนการขนถ่ายอ้อยลงบนสะพานป้อนอ้อย

เมื่ออ้อยผ่านการตรวจสอบคุณภาพ และชั่งน้ำหนักแล้วจะถูกขนถ่ายลงบนสะพานป้อนอ้อย เพื่อเตรียมพร้อมเข้าสู่เครื่องมือชนิดต่างๆ ลักษณะการขนถ่ายอ้อยลงบนสะพานป้อนอ้อยแสดงดังรูป 2.1

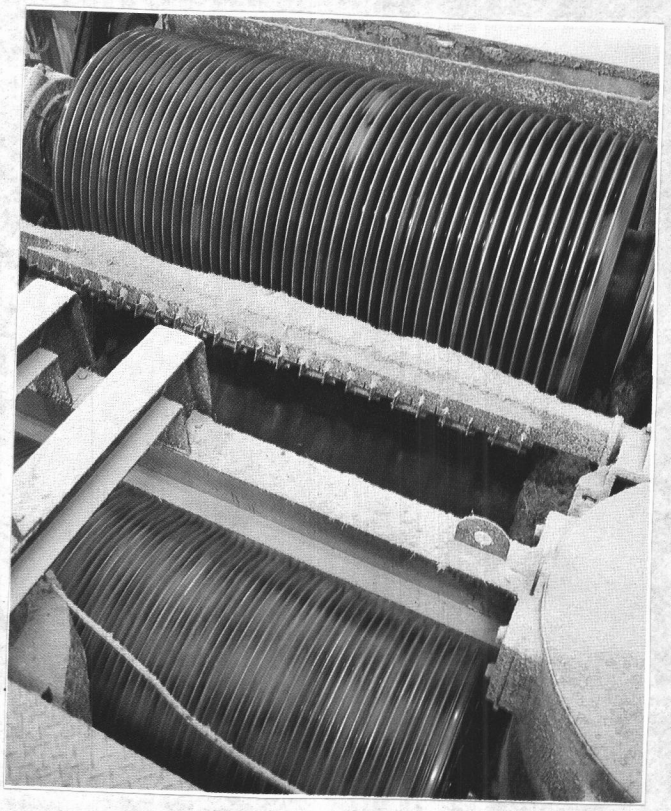
รูปที่ 2.1 ลักษณะการขนถ่ายอ้อยลงบนสะพานป้อนอ้อย

2.1.1.2 ขั้นตอนการเตรียมอ้อยป้อนลูกหีบ

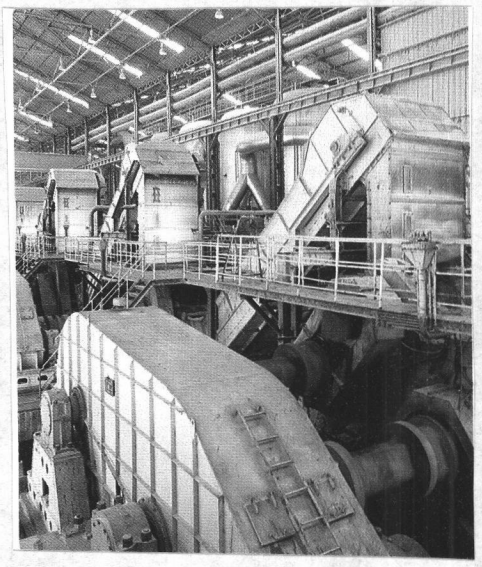
การเตรียมอ้อยให้อยู่ในลักษณะที่ชุดลูกหีบสามารถสกัดน้ำอ้อยได้สะดวกโดยเครื่องมือประกอบด้วย มีดหมุนสับอ้อยให้เป็นท่อนขนาดเล็กลงและเครื่องฉีก (shredder) ฉีกย่อยอ้อยให้เป็นฝอยละเอียด โดยอาศัยการตีของแท่งฆ้อนที่เหวี่ยงตัวหมุนลงมา ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องฉีกย่อยอ้อยในระดับที่ดีนั้นจะต้องฉีกเซลอ้อยให้แตกได้ประมาณร้อยละ 80-85 จึงจะช่วยให้การสกัดน้ำอ้อยของชุดลูกหีบได้ผลดีที่สุด

2.1.1.3 ขั้นตอนการสกัดน้ำอ้อย

ประกอบด้วยชุดลูกหีบ 4-7 ชุด อ้อยจะถูกนำเข้าชุดลูกหีบชุดที่ 1 น้ำอ้อยที่สกัดได้เรียกว่าน้ำอ้อยสกัดขั้นแรก ซึ่งเป็นน้ำอ้อยแท้ จากนั้นกากอ้อยจะถูกนำมาพรมน้ำแล้วนำเข้าชุดลูกหีบชุดต่อๆ มาได้น้ำอ้อยสกัดขั้นที่สอง ส่วนผสมของน้ำอ้อยทั้งสองส่วนเรียกว่าน้ำอ้อยรวม (mixed juice) ก่อนที่จะส่งน้ำอ้อยรวมเข้าขั้นตอนการทำน้ำอ้อยบริสุทธิ์จะต้องนำน้ำอ้อยรวมมาผ่านตะแกรงแยก ผงกากอ้อย เพื่อป้องกันมิให้สีของน้ำอ้อยเพิ่มขึ้นในระหว่างการผสมกับปูนขาว ป้องกันไม่ให้ระดับพีเอช ของน้ำอ้อยหลังการผสมกับปูนขาวแล้วลดลง และสุดท้ายช่วยป้องกันมิให้ผงกากอ้อยเข้าไปเป็นส่วนประกอบของตะกรันซึ่งเป็นฉนวนและขัดขวางการส่งผ่านความร้อน ลักษณะของลูกหีบเป็นดังรูปที่ 2.2 และลักษณะของชุดลูกหีบเป็นดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 ลักษณะของลูกหีบ



รูปที่ 2.3 ลักษณะของชุดลูกหีบ

2.1.1.4 ขั้นตอนการทำน้ำอ้อยบริสุทธิ์

ขั้นตอนนี้จะแยกสิ่งสกปรกออกจากน้ำอ้อยโดยการทำให้ตกตะกอน วิธีการคือนำน้ำอ้อยรวมที่ผ่านการแยกผงกากอ้อยแล้วมาแยกสิ่งสกปรกตามกรณีของการผลิตน้ำตาลทรายซึ่งมีวิธีต่างๆ กัน เช่น

กระบวนการผลิตน้ำตาลทรายดิบ จะใช้วิธีที่เรียกว่า defecation method โดยนำน้ำอ้อยรวมเข้าหม้ออุ่นน้ำอ้อยเมื่อุณหภูมิถึง 55 องศาเซลซียส จึงเติมปูนขาวลงไปจนกระทั่งมีพีเอชประมาณ 7.0-7.2 ระยะเวลาผสมไม่ควรเกิน 3 นาที จากนั้นนำเข้าหม้ออุ่นให้น้ำอ้อยมีอุณหภูมิ 102-105 องศาเซลเซียส และผสมกับสารรวมตะกอน (flocculant) สิ่งสกปรกที่ตกตะกอนลงมาเรียกตะกอนตม (mud) ซึ่งมีประมาณร้อยละ 25 ของน้ำอ้อยใส

กระบวนการผลิตน้ำตาลทรายขาว จะทำน้ำอ้อยบริสุทธิ์โดยเพิ่มกรรมวิธีฟอกสีน้ำอ้อย เช่นการใช้ระบบ ซัลฟิเตชั่น (sulphitation) ฟอกสีน้ำอ้อยด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และระบบคาร์บอเนชั่น (carbonation) ใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งทั้งสองระบบนี้ยังคงต้องใช้น้ำปูนขาวและความร้อนในการทำน้ำอ้อยบริสุทธิ์ส่วนการแยกตะกอนออกทำให้น้ำอ้อยใสนั้น ระบบซัลฟิเตชั่นยังคงต้องใช้ถังพักใส เช่นเดียวกับการผลิตน้ำตาลทรายดิบ แต่ระบบคาร์บอเนชั่นจะใช้เครื่องกรองแบบมีผ้ากรอง

2.1.1.5 ขั้นตอนการทำน้ำอ้อยให้เป็นน้ำเชื่อม

ขั้นตอนนี้น้ำอ้อยใสที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์ตามระบบดังกล่าวข้างต้น จะถูกส่งเข้าชุดหม้อต้ม หม้อต้มที่ใช้อาจเป็นระบบ 4-6 ชุด ชุดหนึ่งประกอบด้วยหม้อต้ม 1 ใบหรือมากกว่า การทำงานของหม้อต้มระเหยจะต่อเนื่องกันจนน้ำเชื่อมมีความเข้มข้น 65 องศาบริกซ์ ภายใต้ภาวะสุญญากาศ

2.1.1.6 ขั้นตอนการทำน้ำเชื่อมบริสุทธิ์

ตามปกตินำเชื่อมจากชุดหม้อต้มจะส่งเข้าถังพัก ในกรณีของการผลิตน้ำตาลทรายดิบโดยทั่วไปจะใช้น้ำเชื่อมนี้ป้อนหม้อเคี่ยวโดยตรง ยกเว้นกรณีที่ต้องการน้ำตาลทรายดิบคุณภาพสูง หรือต้องการที่จะเพิ่มความสะดวกในการเคี่ยว และการปั่นแยกผลึก

น้ำตาลก็จะทำน้ำเชื่อมให้บริสุทธิ์ โดยการแยกสารไม่บริสุทธิ์จำพวกของแข็งแขวนลอยที่ทำให้น้ำเชื่อมขุ่นและมีความหนืดสูง ส่วนกรณีการผลิตน้ำตาลทรายขาวชนิดผลิตจากอ้อยโดยตรงมีการใช้ระบบทาโลดูรา (talodura) โดยการนำน้ำเชื่อมมาอุ่นจนมีอุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส แล้วผสมกับกรดฟอสฟอริค และน้ำปูนขาวภายในท่อส่งน้ำเชื่อม ตะกอนจะถูกฟองอากาศขนาดเล็กพยุงให้ลอยขึ้นมาข้างบนแล้วมีระบบพายหมุนกวาดฟองสกปรกให้ล้นออกจากขอบปากถัง การใช้ระบบซัลฟิเตชั่นใช้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ฟอกสีในกรรมวิธี 2 ครั้ง คือ ฟอกสีน้ำอ้อย 1 ครั้งและฟอกสีน้ำเชื่อม 1 ครั้งเรียกว่า double sulphitation การใช้ระบบคาร์บอเนชั่นจะนำระบบซัลฟิเตชั่นมาร่วมด้วย โดยน้ำเชื่อมจะฟอกสีด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ควบคุมให้พีเอชประมาณ 5.8-6.0 โดยระบบนี้ให้ผลผลิตสูงกว่าระบบซัลฟิเตชั่น 2% และมีการใช้ปูนขาวมากกว่า แต่กำมะถันน้อยกว่า

2.2.1.7 ขั้นตอนการเคี่ยวน้ำเชื่อมให้เป็นผลึกน้ำตาลทราย

น้ำเชื่อมที่ได้ทั้งที่ผ่านกระบวนการทำน้ำเชื่อมบริสุทธิ์หรือบางกรณีไม่ได้ทำให้บริสุทธิ์ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณภาพของน้ำตาลทรายที่ต้องการจะถูกนำมาป้อนหม้อเคี่ยวเพื่อเคี่ยวให้เป็นผลึกน้ำตาลทราย ซึ่งโดยทั่วไปสามารถกระทำได้หลายวิธีคือ

2.2.1.7.1 การเคี่ยวให้เกิดผลึกน้ำตาลขึ้นเอง จะต้องเคี่ยวจนกระทั่งความเข้มข้นของน้ำเชื่อมเพิ่มถึงภาวะเหนือจุดอิ่มตัวสูงสุด และลดความเข้มข้นลงโดยเติมน้ำหรือน้ำเชื่อม เลี้ยงผลึกน้ำตาลที่เกิดขึ้นให้โตถึงขนาดที่ต้องการ ในปัจจุบันไม่นิยมวิธีนี้ เพราะการควบคุมปริมาณ ขนาด และความสม่ำเสมอของผลึกน้ำตาลกระทำได้ยาก

2.2.1.7.2 วิธีกระตุ้นให้เกิดแกนผลึกเฉียบพลัน (shock seeding) โดยเคี่ยวน้ำเชื่อมให้มีความเข้มข้นระดับหนึ่งตามกำหนด แล้วเติมผงเชื้อน้ำตาลซึ่งได้จากการบดน้ำตาลทรายขาวที่อบแห้ง ให้เป็นผงละเอียดขนาด 0.03 มิลลิเมตรลงไปในหม้อเคี่ยว หลังจากเติมผงเชื้อน้ำตาลเข้าไปแล้วประมาณ 2-3 นาทีความเข้มข้นของน้ำตาลสูงระดับหนึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาการกระตุ้นอย่างเฉียบพลัน (shock) น้ำตาลที่ละลายในน้ำเชื่อม จะแยกตัวออกมาเป็นแกนผลึกอย่างต่อเนื่องมากมาย เมื่อแกนผลึกมีจำนวนมากพอแล้ว หยุดปฏิกิริยาโดยเติมน้ำเชื่อมเข้าหม้อเคี่ยวระดับหนึ่งจนความเข้มข้น

ลดลงถึงระดับความเข้มข้นที่พอเหมาะในการเลี้ยงแกนผลึก เพื่อให้มีขนาดโตตามต้องการ

2.2.1.7.3 วิธีเติมผงเชื้อน้ำตาลตามจำนวนจริง (true seeding) โดยบดน้ำตาลทรายขาวที่อบแห้งแล้วผสมกับแอลกอฮอล์ แล้วเติมลงในน้ำเชื่อมที่มีความเข้มข้นถึงระดับที่กำหนด ปิดไอน้ำที่เข้าหม้อเคี่ยวจนกระทั่งผงเชื้อกระจายตัวทั่วน้ำเชื่อมแล้วจึงเปิดไอน้ำเคี่ยวต่อประมาณ 15-30 นาที เติมน้ำเชื่อมเข้าไปอย่างต่อเนื่องเลี้ยงผลึกที่เกิดขึ้นให้มีขนาดโตตามต้องการ

น้ำเชื่อมที่มีผลึกน้ำตาลอยู่ด้วยเรียกว่าแมสซีควิท (massecuites) ซึ่งจะถูกปล่อยจากหม้อเคี่ยวแล้วผ่านเข้าถังพักเลี้ยงผลึก (crystalliter) ก่อนส่งไปปั่นแยกผลึกน้ำตาล

2.1.1.8 ขั้นตอนการปั่นแยกผลึกน้ำตาล

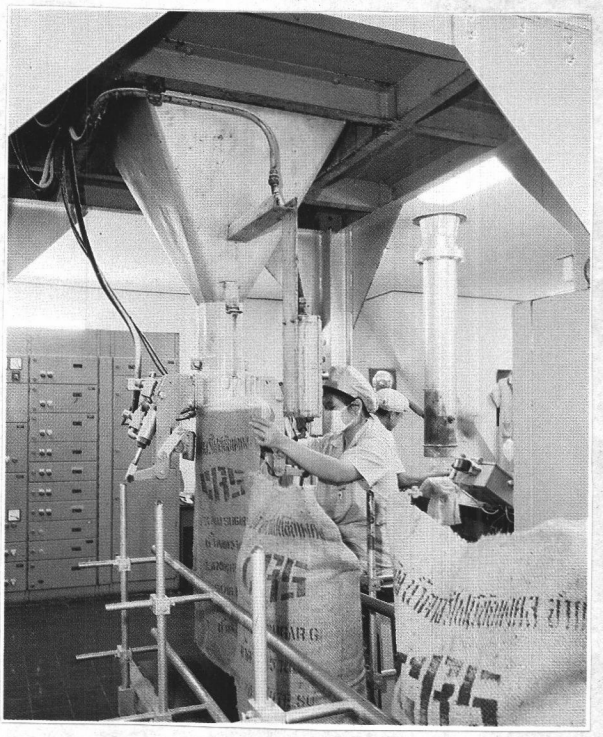
เป็นขั้นตอนการแยกผลึกน้ำตาลออกจากแมสซีควิทโดยอาศัยการทำงานของหม้อปั่นน้ำตาลซึ่งมีหลายแบบ ตัวหม้อรับแมสซีควิทจะทำด้วยเหล็กอ่อนหรือเหล็กกล้า หรือโลหะผสมนิคเกิ้ล มีรูข้างหม้อเป็นแถวโดยรอบ เมื่อหม้อปั่นหมุนด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์ กากน้ำตาล (molasses) จะระบายผ่านรูตะแกรงออกมา

2.1.1.9 ขั้นตอนการอบ บรรจุ และเก็บน้ำตาลทราย

การผลิตน้ำตาลทรายดิบแบบนี้จะได้ผลึกน้ำตาลซูโครสร้อยละ 96-98 และความชื้นร้อยละ 1-2 ต้องนำมาอบแห้งให้มีความชื้น เหลือเพียงร้อยละ 0.5 หรือไม่เกิน ร้อยละ 1 ถ้ามากกว่านี้น้ำตาลจะเสียในขณะเก็บไว้ในโกดังโดยสิ ความชื้นและกลิ่นของน้ำตาลเกิดจากน้ำเชื่อม (mother liquor) ซึ่งเคลือบที่ผิวของผลึกน้ำตาล

การบรรจุและการเก็บน้ำตาลทรายควรมีช่องว่างเหลือน้อยที่สุดการเก็บน้ำตาลอาจจะวางกองกับพื้นดังแสดงในรูปที่ 2.4 หรือเก็บโดยบรรจุกระสอบก่อนการเก็บดังแสดงในรูปที่ 2.5

รูปที่ 2.4 การเก็บน้ำตาลในโกดังโดยวางกองกับพื้น



รูปที่ 2.5 การเก็บน้ำตาลโดยบรรจุกระสอบก่อนเก็บ

ภาชนะบรรจุจะต้องปิดสนิท สถานที่เก็บจะต้องปิดสนิทและควรมีพัดลมดูดความชื้นออก น้ำตาลทรายดิบจากกระบวนการผลิตดังกล่าวข้างต้นจะมีสมบัติทางเคมีดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางเคมีของน้ำตาลทรายดิบ (7)

โพล (Polarization หรือ pol)	ไม่ต่ำกว่า 96
ความชื้น	ไม่เกิน ร้อยละ 1
เถ้า	ไม่เกิน ร้อยละ 0.85
น้ำตาลรีดิวซ์	-
สี	3800 หน่วย ICUMSA

2.1.2 กระบวนการผลิตน้ำตาลทรายบริสุทธิ์จากน้ำตาลทรายดิบ (7)

การผลิตน้ำตาลทรายบริสุทธิ์ ประกอบด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.1.2.1 กำจัดสิ่งสกปรกและสี (Affination)

เป็นการทำให้ผิวที่เคลือบผลึกน้ำตาลอ่อนตัวลงโดยการผสมกับน้ำร้อน และปั่นคลุกเคล้ากัน ผิวที่เคลือบจะละลายออกมาพร้อมกับสิ่งที่สกปรก เมื่อแยกผลึกน้ำตาลที่ทำความสะอาดออกมาแล้ว นำไปตกผลึกและทำให้แห้งซึ่งจะได้น้ำตาลทรายบริสุทธิ์ตามต้องการ

2.1.2.2 การละลาย (Melting)

น้ำตาลที่ล้างผิวออกแล้วจะถูกส่งเข้าเครื่องละลาย (melter)โดยเติมน้ำร้อน และไอน้ำจนสารละลายน้ำตาลมีความเข้มข้น 65 องศาบริกซ์ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส สารละลายน้ำตาลสะอาดจะเข้าสู่เครื่องกรอง กรองเอาสิ่งสกปรกออกแล้วเข้าสู่หม้อฟอก

2.1.2.3 การฟอกด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbonation)

เป็นการขจัดสิ่งสกปรกประเภทสี สารแขวนลอย ที่ละลายปนอยู่อีกครั้งหนึ่ง ปูนขาวจะถูกนำมาผสมลงในอัตราประมาณร้อยละ 1 ของสารละลายน้ำตาล แล้วเข้าหม้อฟอกที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ดังนี้

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \longrightarrow CaCO_3 + H_2O$$

(หินปูน)

ตะกอนของหินปูนจะพาเอาสิ่งสกปรกแขวนลอยหลุดออกมาด้วย ทำให้น้ำตาลใสสะอาดยิ่งขึ้น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ได้จากการเผาไหม้กากอ้อยในหม้อน้ำแล้วผ่านการกรองให้สะอาดใช้ปั๊มดูดเข้าสู่หม้อฟอก ซึ่งมีเครื่องกระจายก๊าซ น้ำเชื่อมที่ฟอกแล้วเรียกว่า carbonated liqour ซึ่งจะผ่านเครื่องกรองแยกเอาหินปูนออก

2.1.2.4 การกรอง (Filtration)

เครื่องกรองมีลักษณะต่างๆ กันแล้วแต่ผู้ผลิต แต่ที่นิยมใช้กันมากเป็นแบบ rotary pressure filter ผ้ากรองที่ใช้จะหุ้มเป็นแผ่นกรองอย่างมิดชิดน้ำเชื่อมที่กรองแล้ว จะมีสีลดลงจาก 1000 เหลือเพียง 500 หน่วย ICUMSA และมีความบริสุทธิ์สูงกว่า ร้อยละ 99 น้ำเชื่อมบริสุทธิ์นี้จะต้องผ่านการดูดสีอีกครั้งหนึ่ง

2.1.2.5 การดูดสี (decolorization)

กระบวนการดูดสีที่นิยมใช้กันมีอยู่ 2 วิธีคือ

2.1.2.5.1 การใช้คาร์บอน (active carbon หรือ granular carbon) เป็นตัวดูดสี

2.1.2.5.2 การใช้เรซิน (ion exchange resin) สีที่มีขนาดใหญ่จะมีประจุไฟฟ้าลบ ซึ่งจะใช้ประจุไฟฟ้าบวกดูดประจุลบเอาไว้ น้ำเชื่อมที่มีสี 500 หน่วยเมื่อผ่านเรซินแล้วจะมีสีเหลือเพียง 100 หน่วย ICUMSA

2.1.2.6 การตกผลึก (Crystallization) หลักการเดียวกับการทำน้ำตาลทรายดิบ คือใช้หม้อเคี่ยว เพื่อให้น้ำระเหยออก จนน้ำเชื่อมอิ่มตัว เติมเชื้อน้ำตาลลงไปทำให้ตกผลึก แล้วเลี้ยงผลึกให้มีขนาดใหญ่ตามต้องการ แล้วจึงปล่อยลงหม้อพัก

2.1.2.7 การปั่นแยก (Purging) แยกผลึกน้ำตาลออกจากกาก น้ำตาลโดยการปั่นแยก กากน้ำตาลจะไหลลงสู่ถังพัก เรียกว่ากากน้ำตาลชั้นหนึ่ง (molasses A)ซึ่งนำกลับไปเข้ากระบวนการใหม่ ส่วนผลึกน้ำตาลที่มีความชื้นสูง จะต้องนำไปอบแห้ง

2.1.2.8 การอบแห้ง (Drying) น้ำตาลจะผ่านลมร้อนแล้วตกลงมาเป็นชั้นๆ ความชื้นขั้นสุดท้ายต้องไม่เกินร้อยละ 0.03 นำไปผ่านตะแกรงโยกคัดขนาดเกล็ด แล้วบรรจุลงกระสอบต่อไป

น้ำตาลทรายบริสุทธิ์ที่ผลิตได้จะมีสมบัติทางเคมีดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางเคมีของน้ำตาลทรายบริสุทธิ์ (7)

โพล	ไม่ต่ำกว่า	99.7
ความชื้น	ไม่เกินร้อยละ	0.1
เถ้า	ไม่เกินร้อยละ	0.02
น้ำตาลรีดิวซ์	ไม่เกินร้อยละ	0.04
สี	ไม่เกิน	60 หน่วย ICUMSA

2.2 การสูญเสียผลผลิตซูโครสในกระบวนการผลิตน้ำตาลทราย

2.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำอ้อย

อ้อยมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Saccharum officinarum* มีการปลูกอ้อยตามภาคต่างๆ ทั่วประเทศ ซึ่งแต่ละภาคมีการปลูกอ้อยสายพันธุ์ต่างๆกัน ตามความเหมาะสมอ้อยจะให้ผลผลิตน้ำตาลสูงสุดเมื่อมีอายุ 11-16 เดือน และโรงงานต่างๆ ทั่วประเทศ จะเปิดหีบอ้อยช่วงเดือน พ.ย.- พ.ค. ส่วนประกอบของอ้อย จะแตกต่างกันไปตามสายพันธุ์ อายุ และสภาพแวดล้อม อ้อยที่นำมาหีบ เพื่อผลิตน้ำตาลทรายมีองค์ประกอบดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบของอ้อยที่นำมาหีบเพื่อผลิตน้ำตาลทราย (7)

ส่วนประกอบของอ้อย	เปอร์เซนต์
น้ำ	65 - 76
ของแข็ง	24 - 27
เยื่อ	11 - 16
ของแข็งที่ละลายได้ (soluble solid)	10 - 16
ส่วนประกอบของน้ำอ้อย	**เปอร์เซนต์จากของแข็งที่ละลายได้**
น้ำตาล	75 - 79
น้ำตาลอ้อย (sucrose)	70 - 88
กลูโคส (glucose)	2 - 4
ฟรุคโตส (fructose)	2 - 4
เกลือ	3.0-7.5
เกลือของกรดอินทรีย์	1.5 - 4.5
เกลือของกรดอินทรีย์	1.0 - 3.0
กรดอินทรีย์อิสระ	0.5 - 2.5
สารอื่นที่ไม่ใช่น้ำตาล(Other organic non sugar)	3.8 - 6.8
โปรตีน	0.5 - 0.6
แป้ง	0.001 - 0.05
ยาง (gum)	0.3 - 0.6
ไขและขี้ผึ้ง (wax and fat)	0.05 - 0.15
สารอื่นที่ไม่ทราบชัด	3.0 - 5.0

สำหรับรายละเอียดของส่วนประกอบต่างๆ ในน้ำอ้อยที่ได้จากส่วนต่าง ๆ ของลำต้น แสดงดังภาคผนวกที่ ก-7

เมื่อนำอ้อยเข้าสู่กระบวนการผลิต และทำการสกัดน้ำอ้อย ซึ่งน้ำอ้อยชนิดต่างๆ ที่ผลิตได้ในกระบวนการผลิต มีสมบัติ ทางเคมี ฟิสิกส์ และชีววิทยา ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สมบัติทางเคมี ฟิสิกส์ และชีววิทยาของน้ำอ้อยชนิดต่างๆ ในกระบวนการผลิตน้ำตาลทราย (8)

ชนิดของน้ำอ้อย	อุณหภูมิ ($^{\circ}$c)	พีเอช	น้ำตาล ($^{\circ}$Bx)	กรดแลคติค (%)	viable cell (cell/ml)
น้ำอ้อยจากลูกหีบชุดที่ 1	29.33	5.25	19.31	0.42	1.2×10^{7}
น้ำอ้อยรวม	29.33	4.92	15.37	0.44	1.9×10^{8}
น้ำอ้อยพักใส	97.06	7.04	16.07	0.12	1.4×10^{2}

การสูญเสียผลผลิตน้ำตาลซูโครสนั้นเกิดตั้งแต่ขั้นตอนการเก็บเกี่ยวอ้อย จนกระทั่งขั้นตอนสุดท้ายคือ การผลิตน้ำตาลบริสุทธิ์ (refine sugar) ซึ่งมีการสูญเสียผลผลิตประมาณร้อยละ 5-35 ซึ่งมีความผันแปรอยู่ในช่วงกว้าง ทั้งนี้ขึ้นกับปัจจัยหลายประการ เช่น ปัจจัยทางด้านภูมิศาสตร์ และเทคนิคการผลิตน้ำตาลทรายของประเทศต่าง ๆ (9)

2.2.2 ขั้นตอนที่เกิดการสูญเสียซูโครสมีดังนี้

2.2.2.1 การเก็บเกี่ยวอ้อย (Cane harvesting) ซึ่งเกิดการสูญเสียซูโครสประมาณร้อยละ 5-25 ในขั้นตอนนี้เกิดการปนเปื้อนโดยจุลินทรีย์ที่สร้าง

เดกซ์แทรน เช่น *Leuconostoc mesenteroid* ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่พบในอากาศ ดิน และน้ำ ซึ่งจำเป็นต้องปรับปรุงประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวเพื่อป้องกันการเจริญของจุลินทรีย์โดยการใช้สารฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ (biocide)

2.2.2.2 การผลิตน้ำตาลทรายดิบ (Raw sugar mill) นอกจากจะปรับปรุงการเก็บเกี่ยวให้มีประสิทธิภาพแล้วจะต้องนำอ้อยเข้าสู่กระบวนการผลิตทันทีหลังการเก็บเกี่ยว และในกระบวนการผลิต จะต้องมีการควบคุมขั้นตอนต่างๆ เป็นอย่างดี การสูญเสียซูโครสไปกับส่วนของกากอ้อยมีประมาณร้อยละ 3-8

2.2.2.3 การผลิตน้ำตาลทรายบริสุทธิ์ (Cane sugar refinery) ในขั้นตอนนี้พีเอชมีประมาณ 7.0 ถึง 9.0 ซึ่งเป็นพีเอชที่ซูโครสมีความเสถียรมากที่สุด อย่างไรก็ตาม มีการสูญเสียซูโครส เนื่องจากกระบวนการ self-catalyzing ของน้ำตาลอินเวอร์ทเกิดเป็นกรดอินทรีย์ และจากการศึกษาโดยใช้ HPLC พบว่ามีการสูญเสียน้ำตาลซซูโครสในขั้นตอนการทำใส (clarification) โดยวิธีคาร์โบเนชั่น ซึ่งทำให้เกิดน้ำตาลอินเวอร์ท

จากการศึกษา พบว่าในภาวะที่เป็นกลางหรือด่างนั้น เกิดการสูญเสียน้ำตาลซูโครสประมาณร้อยละ 0.004-0.04 ซึ่งการสูญเสียนี้ส่วนใหญ่เนื่องมาจากสารเคมีและความร้อน เมื่อสารละลายซูโครสอยู่ในภาวะที่มีอุณหภูมิสูง ความเข้มข้นของซูโครสสูงและพีเอชเป็นกลาง (9)

2.2.3 ประเภทของการสูญเสียผลผลิตน้ำตาลซูโครส 4 ประเภท คือ

2.2.3.1 การสูญเสียเนื่องจากสาเหตุทางกายภาพ(Physical loss) เป็นการสูญเสียน้ำตาลซูโครสโดยตรง เนื่องจากเทคนิคการเก็บเกี่ยว การเก็บรักษา รวมทั้งการขนส่งอ้อยและน้ำตาล ทำอย่างไม่มีประสิทธิภาพ ทำให้เกิดการปนเปื้อนและการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ นอกจากนี้ยังสูญเสียซูโครสส่วนหนึ่งไปกับส่วนของน้ำเสียในโรงงาน และส่วนของตะกอน (mud) ทั้งนี้เนื่องจากในกระบวนการผลิตไม่สามารถล้างซูโครสออกจากส่วนของตะกอนได้ทั้งหมด ซึ่งการสูญเสียลักษณะนี้สามารถทำให้ลดลงได้โดยจัดการส่วนต่างๆ ของกระบวนการผลิตอย่างมีประสิทธิภาพปัญหาการสูญเสียจะลดลงจนถึงระดับที่ยอมรับได้

2.2.3.2 การสูญเสียเนื่องจากจุลินทรีย์ (Microbiological cause of sucrose loss)

การสูญเสียซูโครสเนื่องจากจุลินทรีย์เจริญเติบโต และสร้างสารประกอบเดกซ์แทรนโดยเฉพาะจุลินทรีย์ในสกุล *Leuconostoc sp.* และจุลินทรีย์สร้างเมือกบางชนิด เดกซ์แทรนก่อให้เกิดการสูญเสียน้ำตาลซูโครส และก่อให้เกิดผลกระทบต่อกระบวนการผลิต คุณภาพของน้ำตาลทราย และผลิตภัณฑ์ที่นำน้ำตาลทรายไปใช้เป็นส่วนประกอบซึ่งจะกล่าวถึงในลำดับต่อไป สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเดกซ์แทรน ปริมาณซูโครสที่สูญเสียรวมทั้งปริมาณฟรุคโตส และกรดที่เกิดขึ้นดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ปริมาณเดกซ์แทรน และการสูญเสียน้ำตาลซูโครสในน้ำตาลทรายดิบ (9)

เดกซ์แทรน (ร้อยละ)	ร้อยละซูโครสที่สูญเสีย (กก./ตันน้ำตาล)	ฟรุคโตสที่เกิดขึ้น (กก./ตันน้ำตาล)	กรดที่เกิดขึ้น (ร้อยละ)
0.05	0.20 (1.98 กก./ตัน)	0.99	0.07
0.1	0.40 (3.98 กก./ตัน)	1.98	0.14
0.5	2.00 (19.8 กก./ตัน)	9.9	0.7

นอกจากนี้ยังมีจุลินทรีย์ชนิดอื่นที่เจริญเติบโตและใช้ซูโครส แต่ไม่สร้างสารประกอบเดกซ์แทรน ได้แก่ ยีสต์ รา แบคทีเรียโดยเฉพาะยีสต์ในสายพันธุ์ *Saccharomyces sp.* ซึ่งเจริญเติบโตและสร้างเอธานอล แบคทีเรีย *Clostridium thermosaccharolyticum* ซึ่งสร้างกรดบิวทีริค

2.2.3.3 การสูญเสียซูโครสเนื่องจากความร้อน (Thermal sucrose loss)

การสูญสลายของซูโครสเนื่องจากความร้อนก่อให้เกิดสารเชิงซ้อนและสารให้สีอื่นๆ ในน้ำเชื่อมระหว่างกระบวนการผลิต และในผลึกน้ำตาลในระหว่างการเก็บ กระบวนการที่เกิดขึ้นเรียกว่าการเกิดคาราเมล (caramel formation) ปฏิกิริยานี้เกิดในส่วนของโมลาส หรือน้ำเชื่อมที่เคลือบส่วนผิวของผลึกน้ำตาล ในภาวะที่มีน้ำหรือความชื้นเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยา ก่อให้เกิดการสูญเสียซูโครสขณะเก็บและอุณหภูมิภายในโกดังที่เก็บน้ำตาลสูงขึ้นด้วย การเกิดสีเพิ่มขึ้นนี้เป็นสิ่งที่บ่งชี้ว่าเกิดการสูญเสียผลผลิตน้ำตาลซูโครส

2.2.3.4 การสูญเสียซูโครสเนื่องจากสารเคมี (Chemical sucrose loss)

การสูญเสียซูโครสเนื่องจากสารเคมีประกอบด้วยการที่ซูโครสถูกทำลายด้วยความร้อนได้คาราเมล ซึ่งเกิดขึ้นทั้งภาวะกรด และภาวะด่าง สำหรับพีเอชที่น้ำตาลซูโครสเสถียรมากที่สุดคือ พีเอชด่าง (8.0-8.5)

2.2.3.4.1 ภาวะกรด เกิดการผกผันของซูโครสไปเป็นกลูโคส และฟรุคโตส ในน้ำอ้อยปฏิกิริยาการผกผันถูกเร่งโดยอินเวอร์เทส (invertase) ในทุกภาวะ ที่พีเอชต่ำ และเอนไซม์จะถูกยับยั้งเมื่ออุณหภูมิถึง 80 องศาเซลเซียส และการผกผันของซูโครสเนื่องจากภาวะกรดจะไม่เกิดขึ้นเมื่อพีเอชสูงกว่า 6.0

น้ำตาลรีดิวซ์ที่เกิดขึ้นจะเกิดการสูญสลายผ่านตัวกลางหลายตัว เช่น 5-hydroxymethyl furfural (HMF) และสารให้สีอื่น ซึ่งวิถีการเกิดสารให้สีในสารละลายกรดประกอบด้วย การ condensation ของ HMF กับ กรดอะมิโน ได้สารสีน้ำตาล และการ condensation ของกลูโคสกับสารประกอบเอมีน ได้สารประกอบที่จะเกิด Amadori rearrangement และเกิดการโพลีเมอร์ไรเซชั่น (polymerization) ของปฏิกริยา Maillard reaction ให้สารสีน้ำตาลหรือเกิด melanoidin

2.2.3.4.2 ภาวะด่าง การสูญเสียน้ำตาลซูโครสในภาวะนี้ไม่ใช่ปัญหาสำคัญ แต่ทำให้เกิดปัญหาด้านสีและเพิ่มการสูญเสียซูโครสในส่วนของโมลาส ทั้งนี้เนื่องจากในภาวะด่างซูโครสจะสลายตัวให้กรดอินทรีย์โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรดแลคติคและให้สารประกอบเชิงซ้อนที่ให้สีทั้งในรูปของ melanoidin และสารประกอบในรูปของกรดแซคคารินิค (saccharinic acid) ซึ่งปฏิกิริยาการเกิดนี้ถูกเร่งโดยแคลเซียมอิออน

น้ำตาลรีดิวซ์ที่มีอยู่ในภาวะด่างซึ่งเป็นภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดสารให้สี ซึ่งลักษณะนี้เกิดในน้ำอ้อยที่ถูกทิ้งให้อยู่ในภาวะกรดนานๆ ก่อนที่จะปรับให้พีเอชสูงขึ้นโดยใช้ด่าง ในกรณีนี้ด่าง (lime) จะเป็นตัวทำลายน้ำตาลรีดิวซ์โดยตรง แต่ปฏิกิริยาการทำลายก่อสารให้สี อาจกล่าวได้ว่าน้ำตาลรีดิวซ์ในสารละลายจะทำปฏิกิริยากับเอมีนจากโปรตีนซึ่งจะได้สาร melanoidin

2.2.4 จุลินทรีย์ในน้ำอ้อย

การเก็บเกี่ยวอ้อยเพื่อส่งเข้าโรงงานนั้นอ้อยไม่ได้รับการปฏิบัติที่ดีภายหลังเก็บเกี่ยวทั้งนี้เนื่องจากอ้อยเป็นวัตถุดิบที่มีราคาถูกจากนั้นอ้อยจะถูกลำเลียงเข้าโรงงานโดยนิยมใช้รถบรรทุก 10 ล้อ ซึ่งเมื่อมาถึงโรงงานจะรออยู่ที่ลานพักอ้อย(cane yard) เพื่อรอการเรียกตามคิวที่ทางโรงงานแจกให้กับหัวหน้าโควต้าแต่ละรายบางครั้งถ้าอ้อยมีปริมาณมากๆจะต้องใช้เวลา ถึง 5-7 วันดังแสดงในรูปที่ 2.6 (10)

รูปที่ 2.6 รถยนต์ 10 ล้อ บรรทุกอ้อยมารอที่ลานพักอ้อย

มีการประเมินถึงความเสียหายจากการทิ้งอ้อยไว้เป็นเวลานานก่อนนำเข้ากระบวนการผลิต ดังนี้

	ทิ้งไว้ 1 วัน	ทิ้งไว้ 5 วัน
ความหวานลดลง (Polarization)	0.41	2.05
ความบริสุทธิ์ของน้ำอ้อยลดลง (Purity)	2.10	10.50
น้ำหนักของอ้อยลดลง(ก.ก.)	1.5	12.5
น้ำตาลรีดิวซ์	0.036	0.015

จากองค์ประกอบของน้ำอ้อยพบว่าองค์ประกอบดังกล่าวเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ เนื่องจากมีสารอาหารที่จุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ได้กล่าวคือ ความเข้มข้นของน้ำตาล วิตามิน สารช่วยในการเจริญเติบโต (growth factor) อยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต ช่วยให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตได้ดียิ่งขึ้น

ตามปกติอ้อยมีจุลินทรีย์ตามธรรมชาติ (natural flora) เมื่ออ้อยผ่านขั้นตอนการสกัดน้ำอ้อย จุลินทรีย์ปนเปื้อนลงในน้ำอ้อย นอกจากนี้อาจมีจุลินทรีย์ที่ติดมาจากดิน อากาศและสภาพแวดล้อมภายในโรงงานเอง จากการศึกษาของ บุญส่ง แสงอ่อน และวิวัฒน์ แดงสุภา (8) ถึงแบคทีเรียในน้ำอ้อยจากกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายในประเทศไทย พบว่าอ้อยจะเสียเวลารอชั่งน้ำหนักและเรียกเข้าหีบประมาณ 12 ชั่วโมง เป็นอย่างน้อย ทำให้ความหวานของน้ำอ้อยลดลง นอกจากนี้ยังพบว่า อุณหภูมิของน้ำอ้อย จากลูกหีบชุดที่ 1 และน้ำอ้อยรวมซึ่งประมาณ 30 องศาเซลเซียส มีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ และช่วงเวลาที่น้ำอ้อยจากลูกหีบชุดที่ 1 กลายเป็นน้ำอ้อยรวมใช้เวลาประมาณ 20 นาที การสูญเสียซูโครสโดยการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพวก *Streptococcus sp.*, *Lactobacillus fermentum* ,*Leuconostoc mesenteroides* และ *Lactobacillus cellobiosus* แบคทีเรียเหล่านี้นอกจากจะใช้น้ำตาลซูโครสเพื่อการเจริญเติบโตและทำให้ปริมาณซูโครสลดลงร้อยละ 0.2-0.6 แล้วยังสร้างกรดเพิ่มน้ำตาลรีดิวซ์และสร้างสารเมือกเดกซ์แทรน ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญที่มีผลกระทบโดยตรงต่อกระบวนการผลิต ผลผลิตคุณภาพของน้ำตาล และผลิตภัณฑ์ที่นำน้ำตาลไปเป็นส่วนประกอบ

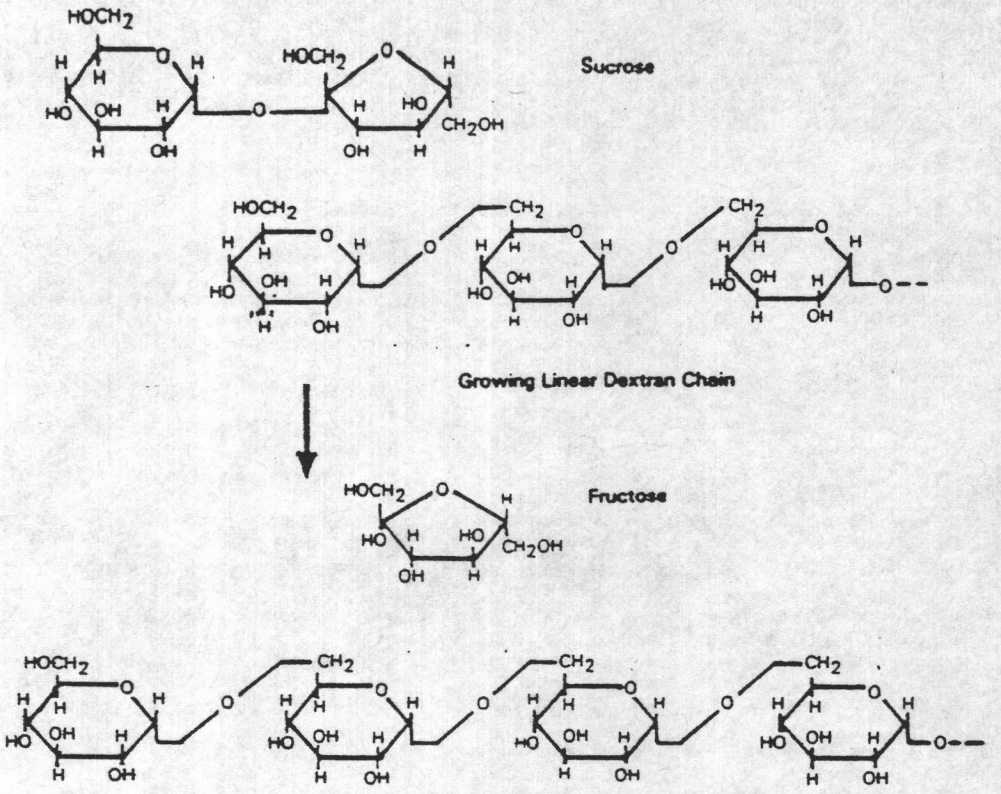
2.3 การเกิดเดกซ์แทรน (11)

เดกซ์แทรนเป็นชื่อทั่วไปของสารโฮโมโพลีเมอร์ของกลูโคส มีลักษณะอณูเชื่อมเรียงต่อกันเป็นแบบเส้นยาวคล้ายลูกโซ่ ประกอบด้วย ส่วนย่อยที่เป็นอณูของกลูโคส เชื่อมเรียงต่อกันด้วยพันธะ α-1,6 glucosidic เป็นแกนหลัก และมีการแตกแขนงกับแกนหลักด้วยพันธะ α-1,3 และบางส่วนด้วยพันธะ α-1,4 หรือ α-1,2 แบคทีเรียสร้างสารประกอบนี้โดยอาศัยเดกซ์แทรนซูเครส (dextransucrase,EC 2.4.1.5)เอนไซม์นี้สามารถย่อยสลายน้ำตาลซูโครสในน้ำอ้อยให้เป็นหน่วยของน้ำตาล กลูโคส และฟรุคโตส จากนั้นกลูโคสจะมาต่อกันเป็นสารโพลีเมอร์ด้วยพันธะ α-1,6 เป็นแกนหลัก โดยโมเลกุลของเดกซ์แทรนจะต้องประกอบด้วยพันธะ α-1,6 glucosidic ประมาณร้อยละ 50-60 และถึงแม้ว่าเดกซ์แทรนจะมีการแตกแขนงที่ต่างกันก็ตาม แต่ก่อให้เกิดปัญหาต่อกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายในลักษณะเดียวกัน และการที่เดกซ์แทรนมีโครงสร้างของโมเลกุลและน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน ส่งผลให้การวิเคราะห์เดกซ์แทรนโดยวิธีตกตะกอนด้วยแอลกอฮอล์ (Haze method) ผิดพลาด เนื่องจากถูกรบกวนด้วยสารอื่นในน้ำอ้อย อาทิเช่น แป้ง กัม และโปรตีน กลไกการสังเคราะห์เดกซ์แทรนเป็นดังปฏิกิริยา

$$\text{Sucrose} + (\text{glucose})_n(1\rightarrow 6) \xrightarrow{\text{Dextransucrase}} \underset{\alpha\text{-1,6 glucan}}{(\text{glucose})_n(1\rightarrow 6)}$$

$$\text{Dextran } (1\rightarrow 6) + \text{D-Fructose}$$

และรูปที่ 2.7 (9)



รูปที่ 2.7 การสังเคราะห์เดกซ์แทรนจากซูโครส (9)

จากรูปที่ 2.7 จะเห็นว่าทุกโมเลกุลของซูโครสนั้นเฉพาะโมเลกุลกลูโคสเท่านั้นที่ถูกนำมาสร้างสารประกอบเดกซ์แทรน ส่วนฟรุคโตสนั้นอาจอยู่ในรูปของฟรุคโตสอิสระเมื่อถูกจุลินทรีย์ใช้แล้วอาจจะถูกเมตาบอไลท์ออกมาในรูปของกรด อินทรีย์ และสารให้สีซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้มีเอชของน้ำอ้อยลดลงและการผกผันของซูโครสยิ่งสูงขึ้นไปอีกผลพลอยได้ของการสร้างสารประกอบเดกซ์แทรนคือกรดอะซิติค กรดแลคติค มานิทอล และเอทธานอล สารต่างๆ เหล่านี้ทำให้มีเอชของน้ำอ้อยลดลงและสร้างสารให้สี

ตามปกติแล้วเชื้อแบคทีเรียทั้งแกรมบวก และแกรมลบหลายชนิดเช่น *Aerobacter sp.*, *Streptococcus sp.*, *Streptobacterium sp.* และ *Leuconostoc sp.* สามารถสร้างสารโพลีเมอร์เดกซ์แทรนขึ้นมาได้โดยเฉพาะอย่างยิ่ง *L.mesenteroides* และ *L.dextranicum*

เปรียบเทียบสภาวะการเจริญเติบโตของ *Leuconostoc sp.* และสภาวะในน้ำอ้อยเป็นดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 เปรียบเทียบสภาวะการเจริญเติบโตของ *Leuconostoc sp.* และสภาวะในน้ำอ้อย (12)

ปัจจัย	สภาวะเหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์	สภาวะในน้ำอ้อย
อุณหภูมิ(องศาฟาเรนไฮต์)	65-90	-
พีเอช	5.2-7.0 (ไม่เจริญเติบโตที่พีเอชน้อยกว่า 5.2)	4.8-6.0
ความเข้มข้นของซูโครส	ต้องการเพื่อสร้างเดกซ์แทรน	8-15%
สารอาหาร	ต้องการวิตามินและกรดไขมันบางชนิด	มีกรดไขมันบางชนิด

จากตารางที่ 2.6 จะพบว่าภาวะต่างๆ ในน้ำอ้อยค่อนข้างเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของ *Leuconostoc sp.* กล่าวคือ ความเข้มข้นของน้ำตาลประมาณร้อยละ 8-15 ซึ่งค่อนข้างจะเหมาะสมการเจริญเติบโต ไม่สูงเกินไปจนยับยั้งการเจริญเติบโต มีวิตามิน และกรดไขมันเพื่อการเจริญเติบโต

สำหรับน้ำหนักโมเลกุลของเดกซ์แทรนที่สังเคราะห์โดยจุลินทรีย์ *Leuconostoc* นั้นมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วงกว้าง และเชื่อว่าเดกซ์แทรนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า 40,000 ซึ่งเป็นเดกซ์แทรนที่ละลายน้ำได้ (soluble dextran) ทำให้เกิดปัญการต่อกระบวนการผลิต เนื่องจากไม่สามารถแยกหรือกำจัดออกได้ ทำให้ความหนืดของ น้ำอ้อย น้ำเชื่อม และแมสซีควิท (น้ำเชื่อมที่มีผลึกน้ำตาล) เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังมีผลต่ออัตราการตกผลึกและการโตของผลึกน้ำตาล ทั้งนี้เนื่องจากพวก soluble dextran จะเกิด temporary adsorption บน crystal lattices ทำให้อัตราการตกผลึกช้าลงและผลึกที่ได้เป็นลักษณะรูปเข็ม ส่วนเดกซ์แทรนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะไม่ละลายน้ำ (insoluble dextran) แต่อย่างไรก็

ตามจุลินทรีย์ *Leuconostoc* จะสร้างเดกซ์แทรนตั้งแต่ชนิดที่ละลายน้ำได้ จนถึงชนิดละลายน้ำไม่ได้ ทั้งนี้เนื่องจากปัจจัยหลายประการเช่น ความเข้มข้นของซูโครส ปริมาณฟรุคโตส และ isomaltose เริ่มต้นในน้ำอ้อย และพบว่าสภาวะในน้ำอ้อยจะส่งเสริมการสร้างเดกซ์แทรนที่ละลายน้ำได้ (12)

จากการศึกษาของ Jolly และ Prakash (4) ในประเทศอินเดีย ถึงปริมาณเดกซ์แทรนในน้ำอ้อย ฤดูกาล 2526/27 และ 2527/28 โดยเป็นปริมาณเดกซ์แทรนเฉลี่ยในแต่ละเดือน ในน้ำอ้อยสกัดครั้งแรก และน้ำอ้อยสกัดขั้นที่สอง ซึ่งมีปริมาณแตกต่างกัน ขึ้นกับสภาวะการเก็บเกี่ยว การเก็บที่โรงงาน และระยะเวลาที่นำเข้ากระบวนการผลิต ซึ่งแสดงดังตารางที่ 2.7 (4)

ตารางที่ 2.7 ปริมาณเดกซ์แทรนเฉลี่ยแต่ละเดือนในน้ำอ้อยสกัดขั้นแรก และน้ำอ้อยสกัดขั้นที่สอง ฤดูกาลผลิตปี 2526/27 และ ปี 2527/28 (มิลลิกรัม/ลิตร/100 องศาบิกซ์)

เดือน	ปริมาณเดกซ์แทรนเฉลี่ย 2626/27		ปริมาณเดกซ์แทรนเฉลี่ย 2527/28	
	น้ำอ้อยสกัดขั้นแรก	น้ำอ้อยสกัดขั้นที่ 2	น้ำอ้อยสกัดขั้นแรก	น้ำอ้อยสกัดขั้นที่ 2
ธันวาคม	19,665	23,103	18,534	23,993
มกราคม	19,453	25,355	13,245	15,873
กุมภาพันธ์	18,079	20,000	15,377	19,667
มีนาคม	20,117	26,703	14,352	18,154

2.4 ผลกระทบของเดกซ์แทรนต่ออุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาลทราย

คุณภาพของน้ำตาลทรายดิบในต่างประเทศ กำหนดว่าต้องมีเดกซ์แทรนต่ำกว่า 250 ส่วนในล้านส่วน เพราะหากเกินกว่ากำหนดนี้ นอกจากจะถูกปรับจากราคาซื้อขายแล้ว ยังทำให้ค่าใช้จ่ายในการผลิตน้ำตาลทรายบริสุทธิ์สูงมากขึ้นกว่าปกติอีกด้วย (3) และผลกระทบเนื่องจากเดกซ์แทรนต่อกระบวนการผลิต ผลผลิตคุณภาพของน้ำตาล และผลิตภัณฑ์ที่นำน้ำตาลไปใช้เป็นส่วนประกอบซึ่งพอจะกล่าวได้โดยสังเขปดังนี้ (14)

2.4.1 เนื่องจากเดกซ์แทรนมีลักษณะหนืด เกาะติดกับพื้นผิวต่างๆ ได้ดี ทำให้เกิดการอุดตันตามท่อ หรือรางส่งน้ำอ้อย เป็นผลให้การทำงานของปั๊มต่างๆ ไม่สะดวก

2.4.2 ในขั้นตอนการทำให้น้ำอ้อยบริสุทธิ์ หากมีปริมาณเดกซ์แทรนในน้ำอ้อยสูง ความเป็นกรดของน้ำอ้อยจะสูงขึ้น และพีเอชของน้ำอ้อยจะต่ำลงมาก เนื่องจากมีการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์หลายชนิดไปพร้อมกับจุลินทรีย์ที่สร้างเดกซ์แทรน ทำให้สิ้นเปลืองปูนขาวในการสะเทินในขั้นตอนการทำน้ำอ้อยบริสุทธิ์จำนวนมาก ต้องการระยะเวลาในการตกตะกอนนานขึ้น ความหนืดของน้ำอ้อยใสจะสูงขึ้นและตะกอนตม (mud) ซึ่งมีลักษณะละเอียดแขวนลอยเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก

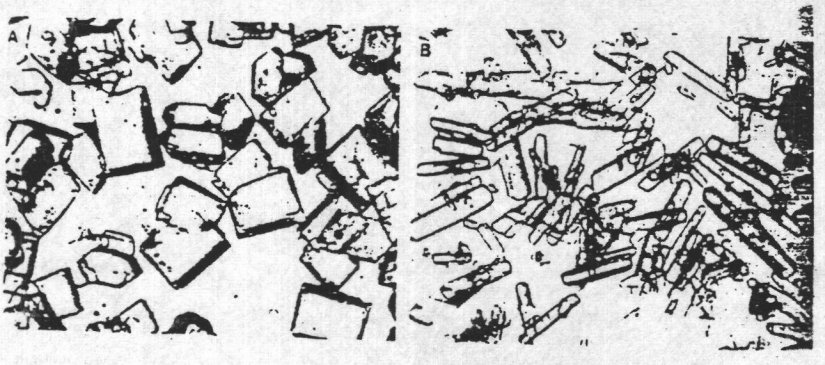
2.4.3 มีผลต่อการเคี่ยวระเหย และอัตราการตกผลึกของซูโครส เนื่องจากเดกซ์แทรนทำให้ความหนืดของน้ำเชื่อม และแมสซีควิทสูงขึ้น ต้องการระยะเวลาเคี่ยวระเหยนานขึ้น อัตราการตกผลึกของซูโครสลดลงประมาณร้อยละ 20-50 และผลึกน้ำตาลที่ได้เป็นผลึกรูปเข็มซึ่งผลึกมีลักษณะยาว

2.4.4 การเกิดตะกรัน เดกซ์แทรนมีผลทำให้การเกิดตะกรันในหม้อต้มระเหยมากขึ้น การแลกเปลี่ยนความร้อนในส่วนดังกล่าวมีประสิทธิภาพต่ำลง ต้องเพิ่มระยะเวลาในการต้มระเหยนานขึ้น เวลาการต้มระเหยที่นานขึ้นนี้ทำให้เกิดการผกผันของน้ำตาลซูโครสไปเป็นน้ำตาลรีดิวซ์มากขึ้น และทำให้สูญเสียผลผลิตซูโครสมากยิ่งขึ้น

2.4.5 รูปร่างของผลึก การเกิดเดกซ์แทรน นอกจากจะมีผลต่ออัตราตกผลึกแล้วยังมีผลต่อรูปร่างของผลึกด้วย โดยลักษณะของผลึกเป็นผลึกรูปเข็ม ซึ่งไม่เป็นที่ต้องการในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาลทรายดิบเนื่องจากแยกผลึกน้ำตาลซูโครสออกจากแมสซีควิทกระทำได้ยาก ผลึกรูปเข็มจะอุดตันรูตะแกรงของเครื่องปั่น ทำให้เครื่องเสีย

สมดุลย์ ผลผลิตน้ำตาลทรายต่ำลง ลักษณะของผลึกไม่เป็นที่ต้องการของลูกค้า และคุณภาพของน้ำตาลทรายดิบที่จะนำไปทำน้ำตาลทรายบริสุทธิ์มีคุณภาพต่ำลงเพราะผลึกน้ำตาลทรายบริสุทธิ์ที่ผลิตได้จะเป็นผลึกรูปเข็มด้วย

จากการทดลองปฏิบัติการเปรียบเทียบลักษณะของผลึกน้ำตาลที่ผลิตจากอ้อยเผาไฟและเก็บเกี่ยวโดยเครื่องมือกล (chopper harvested) โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนคือ A นำอ้อยที่เก็บเกี่ยวแล้วเข้ากระบวนการผลิตทันที และ B ทิ้งอ้อยดังกล่าวไว้ 3 วันก่อนเข้ากระบวนการผลิตลักษณะของผลึกน้ำตาลที่ผลิตได้เป็นดังรูปที่ 2.8 (13)



รูปที่ 2.8 ลักษณะของผลึกน้ำตาลที่ผลิตจากอ้อยเผาไฟ และเก็บด้วยเครื่องมือกล

A นำอ้อยเข้ากระบวนการผลิตทันที

B ทิ้งอ้อยไว้ 3 วันก่อนนำเข้ากระบวนการผลิต

และจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ (13) โดยเติมเดกซ์แทรนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่างๆ กันลงในสารละลายซูโครสบริสุทธิ์ พบว่า หากเป็น polysaccharide ที่ไม่ใช่เดกซ์แทรนจะไม่มีผลทำให้เกิดผลึกรูปเข็ม แต่ถ้าเป็นเดกซ์แทรน ซึ่งมี α-1,6 glucosidic linkage จะส่งผลให้เกิดผลึกรูปเข็มและพบว่ายิ่งเป็น glucan polymer ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง จะมีผลมากกว่าพวกที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

2.4.6 การวิเคราะห์ค่าโพลหรือโพลาไรเซชั่น (Pol or polarization) ของตัวอย่างน้ำตาลระหว่างกระบวนการผลิตสูงกว่าความเป็นจริง เนื่องจากเดกซ์แทรนมีสมบัติทางทัศนศาสตร์ (optics) สามารถหมุนระนาบของเครื่องโพลาริมิเตอร์ (polarimeter) ไปทางขวาและมีค่า specific rotation เป็น 3 เท่าของซูโครส (เดกซ์แทรนมี specific rotation 199 ส่วนซูโครสมี specific rotation 66.51) ดังนั้น การวิเคราะห์ค่าความบริสุทธิ์ (purity)ระหว่างกระบวนการผลิตจะสูงกว่าความเป็นจริง ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน

2.4.7 มีการสูญเสียซูโครสไปกับส่วนของโมลาสสูง เนื่องจากแยกผลึกน้ำตาลออกจากโมลาสได้น้อย ทำให้ผลผลิตน้ำตาลต่ำลง ลักษณะของผลึกที่แยกได้มีลักษณะเหนียวยากแก่การนำไปทำแห้ง

2.4.8 มีผลต่อกำลังการผลิตของโรงงาน เนื่องจากต้องเพิ่มระยะเวลาในการผลิตและการจัดการในขั้นตอนต่างๆ นานขึ้น เป็นผลให้ระยะเวลาในการผลิตน้ำตาลทรายนานขึ้น แต่ผลผลิตที่ได้ต่ำลง

2.4.9 เดกซ์แทรนในส่วนของโมลาส ทำให้ความหนืดของโมลาสสูงขึ้นเมื่อนำโมลาสไปผลิตเป็นสารชนิดอื่น เช่น ผลิตแอลกอฮอล์ จะมีปัญหาด้านการจัดการ

2.4.10 ผลิตภัณฑ์ที่นำน้ำตาลไปใช้เป็นส่วนประกอบ หากมีเดกซ์แทรนในน้ำตาลจะทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์นั้นต่ำลง เนื่องจากเดกซ์แทรนทำให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะหนืด เพิ่มสีและความขุ่นให้กับผลิตภัณฑ์ การวิเคราะห์ค่าโพลาไรเซชั่นของผลิตภัณฑ์สูงกว่าความเป็นจริง แม้ว่าผลิตภัณฑ์นั้นจะใช้น้ำตาลทรายบริสุทธิ์เป็นส่วนประกอบก็ตาม แต่เนื่องจากกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายบริสุทธิ์นั้นมีเพียงขั้นตอน affination และระบบ carbonation เท่านั้นที่สามารถกำจัด เดกซ์แทรนออกไปได้ เพียงบางส่วน ขั้นตอนอื่นๆ ไม่สามารถกำจัดเดกซ์แทรนออกไปได้เลย (14)

สำหรับปริมาณเดกซ์แทรนที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อกระบวนการผลิตในขั้นตอนต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.8 (14)

ตารางที่ 2.8 ความเข้มข้นของเดกซ์แทรนที่ทำให้เกิดผลกระทบต่อกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายดิบ น้ำตาลทรายบริสุทธิ์ และผลิตภัณฑ์บางชนิด (14)

ผลกระทบต่อกระบวนการผลิต	เดกซ์แทรนในน้ำตาลทรายดิบ พีพีเอ็ม (นน.โมเลกุล 40,000)
ค่าโพลาไรเซชั่นในน้ำตาลทรายดิบ	300
ความยาวของผลึกน้ำตาลทรายดิบ	600
ความยาวของผลึกน้ำตาลทรายบริสุทธิ์ (remelt)	400*
ความข่นของน้ำล้างผลึก	350
คุณภาพของผลิตภัณฑ์ประเภท cordial	250
ความหนืดของแมสซีควิทในการผลิตน้ำตาลทรายบริสุทธิ์ (remelt)	400*

หมายเหตุ * ข้อมูลจากน้ำตาลทรายบริสุทธิ์โดยใช้ระบบ carbonation ถ้าไม่ใช้ระบบ carbonation ความเข้มข้นน้อยกว่านี้ ก็ทำให้เกิดปัญหาได้

2.5 <u>การป้องกันและกำจัดเดกซ์แทรนออกจากกระบวนการผลิต</u>

จากผลกระทบของเดกซ์แทรนดังกล่าวข้างต้น อุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาลทรายจึงพยายามหาวิธีการในการป้องกันและแก้ไขปัญหาการเกิดเดกซ์แทรน ซึ่งสามารถกระทำได้หลายวิธี ดังนี้ (13)

2.5.1 การป้องกันมิให้เกิดเดกซ์แทรน

อ้อยเมื่อเก็บเกี่ยวจากไร่แล้ว ควรนำเข้ากระบวนการผลิตทันที ไม่ควรทิ้งอ้อยค้างไร่ หรือค้างที่โรงงานเป็นเวลานาน เนื่องจากจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ โดยเฉพาะพวก *L.mesenteroides* จะเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ในอ้อยที่ถูกเผาไฟ อ้อยที่ถูกแช่แข็งด้วยความเย็นจัด (freeze) และอ้อยที่ตัดเป็นท่อนด้วยเครื่องมือกล เนื่องจากเนื้อเยื่อส่วนที่เก็บน้ำตาลของอ้อยเหล่านี้ถูกทำลาย จุลินทรีย์สามารถเข้าไปเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ดังนั้นอ้อยที่เก็บเกี่ยวแล้วต้องนำเข้ากระบวนการผลิตทันที แต่โดยสภาพความเป็นจริงแล้วไม่สามารถปฏิบัติเช่นนั้นได้ เนื่องจากสาเหตุขัดข้องของกระบวนการผลิตกล่าวคือ เมื่อถึงฤดูกาลผลิต มีวัตถุดิบเข้าโรงงานเป็นจำนวนมากไม่สามารถทำการผลิตได้ทัน ปัญหาการขัดข้องเครื่องจักรระหว่างกระบวนการผลิต และปัญหาการหยุดงานของคนงานในบางโอกาส เช่นการนัดหยุดงาน วันหยุดของโรงงาน สาเหตุต่างๆ เหล่านี้ทำให้ยังคงมีอ้อยตกค้างอยู่ จึงต้องหามาตรการ การป้องกันด้วยวิธีอื่นๆ ได้แก่

2.5.1.1 พัฒนาสายพันธุ์อ้อยที่ต้านทานต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์เช่นสายพันธุ์ Q66 มีเดกซ์แทรนปริมาณมากกว่า 2000 พีพีเอ็มต่อองศาบริกซ์ ในขณะที่สายพันธุ์ 082/RR และ 091/2R มีความต้านทานต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ที่สร้างเดกซ์แทรนซึ่งพบว่าเป็นการยากที่จะพัฒนาสายพันธุ์ที่มีความเหมาะสมในแต่ละภูมิประเทศ และภูมิอากาศที่แตกต่างกันได้

2.5.1.2 พัฒนาวิธีการทางกายภาพ และทางเคมี เพื่อควบคุมจำนวนจุลินทรีย์ เช่น การเก็บที่อุณหภูมิต่ำ การควบคุม a$_w$ การควบคุมพีเอช และการใช้สารเคมีฆ่าเชื้อเพื่อควบคุมจุลินทรีย์โดยการใช้สารเคมีนั้นสารจะต้องคงอยู่ ในระหว่างกระบวนการผลิต จนถึงผลิตภัณฑ์สุดท้าย และต้องเป็นสารเคมีที่กฎหมายอนุญาตให้ใช้ได้ สารเคมีที่ใช้ เป็นสารจำพวก quaternary ammonium วิธีการใช้อาจฉีดพ่นที่ใบมีดของเครื่องตัดอ้อย นอกจากนี้อาจใช้สารจำพวก formaldehyde และ formalin และพบว่า silicon จาก sodium metasilicate ให้ผลน่าพอใจในการยับยั้งจุลินทรีย์ แต่หากนำมาใช้ในอุตสาหกรรมยังประสบปัญหา

การใช้วิธีทางกายภาพเพื่อป้องกันการเกิดเดกซ์แทรนตามที่กล่าวมาแล้วนั้นไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในอุตสาหกรรม เนื่องจากต้องเสียค่าใช้จ่ายสูง

ส่วนวิธีการทางเคมีนั้น สารเคมีบางชนิดนอกจากจะมีราคาสูงแล้วยังมีปัญหาทางด้านความปลอดภัยในการใช้ และบางชนิดอาจปนเปื้อนเข้าไปในผลิตภัณฑ์สุดท้ายด้วย

2.5.1.3 ปรับปรุงวิธีการเก็บเกี่ยว การขนส่ง และการเก็บที่โรงงานให้มีประสิทธิภาพ เช่น อ้อยที่ตัดเป็นท่อนควรนำเข้ากระบวนการผลิตภายในเวลา 12-18 ชั่วโมง และอ้อยที่ตัดเป็นลำต้นควรนำเข้ากระบวนการผลิตภายในเวลา 24-36 ชั่วโมง

แต่อย่างไรก็ตามการเก็บเกี่ยวอ้อยโดยใช้เครื่อง chopped harvester ซึ่งจำเป็นต้องเผาอ้อยก่อน 24 ชั่วโมง เพื่อความสะดวกในการเก็บเกี่ยว ทำให้การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ และปัญหาการเกิดเดกซ์แทรนก็ยังคงมีอยู่ และเป็นปัญหาใหญ่ในหลายประเทศ เช่น ออสเตรเลีย

2.5.1.4 ใช้มาตรการการควบคุมคุณภาพและระบบการตัดราคาสำหรับอ้อยที่ต้องค้างอยู่ในไร่เป็นเวลานาน อ้อยที่ถูกเผาไฟ หรืออาจปรับปรุงวิธีการรับซื้ออ้อยจากเกษตรกรโดยให้ราคาตามคุณภาพความหวาน (ซีซีเอส) เพื่อให้เกษตรกรส่งเฉพาะอ้อยที่มีคุณภาพดีเข้าสู่โรงงาน แต่เนื่องจากวิธีการต่างๆ ดังกล่าวข้างต้นยังไม่มีวิธีใดที่เหมาะสมทั้งทางด้านเศรษฐศาสตร์ และความรู้ความเข้าใจของผู้ปฏิบัติงานเกี่ยวกับเชื้อจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายเช่น จากการศึกษาของ บุญส่ง แสงอ่อน และวิวัฒน์ แดงสุภา (15) พบว่าความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้ในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ ในกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายในประเทศไทยไม่เพียงพอต่อการฆ่าเชื้อเพราะใช้ความเข้มข้นต่ำเกินไป โดยความเข้มข้นและวิธีการเติมก็แตกต่างกันไปในแต่ละโรงงาน ดังนั้นปัญหาเรื่องการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ และการผลิตเดกซ์แทรนยังคงเป็นปัญหาอยู่ในปัจจุบัน

2.5.2 การกำจัดเดกซ์แทรนออกจากกระบวนการผลิต

คือการกำจัดเดกซ์แทรนออกจากกระบวนการผลิตก่อนที่จะทำให้เกิดปัญหาซึ่งสามารถกระทำได้หลายวิธี เช่น การใช้ ultrasonic wave การใช้แสง U.V. การใช้วิธี ultrafiltration การใช้วิธี dialysis และการใช้ วิธี reverse osmosis แต่วิธีการต่างๆ เหล่านี้ไม่เหมาะสมกับการกำจัดเดกซ์แทรนใน

ระดับอุตสาหกรรม เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายสูง และวิธีการที่เหมาะสมวิธีหนึ่งในปัจจุบันนี้คือ การใช้เอนไซม์ในการกำจัดเดกซ์แทรน เนื่องจากความจำเพาะเจาะจงของเอนไซม์ต่อสับสเตรทและการเกิดปฏิกิริยาไม่ต้องการสภาวะที่รุนแรงทำให้มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดเดกซ์แทรนเอนไซม์ที่ใช้คือ เดกซ์แทรนเนส (dextranase หรือ 1,6 α-D glucan 6-gluconohydrolase, EC 3.2.1.11) ซึ่งมีการใช้ในหลายประเทศ เช่น ออสเตรเลีย จาไมก้า เปอร์โตริโก และ บางประเทศในทวีปอเมริกาใต้ การใช้เอนไซม์ดังกล่าวอยู่ในรูปเอนไซม์อิสระ ปริมาณที่ใช้ขึ้นกับปริมาณเดกซ์แทรนที่ตรวจพบในแต่ละโรงงาน Inkerman (16) พบว่าการใช้เอนไซม์เพียง 5-10 หน่วยในการผลิตปกติ ก็สามารถย่อยสลาย เดกซ์แทรนให้มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า 10,000 ซึ่งถือว่าเป็นการเพียงพอต่อการขจัดปัญหา เนื่องจากเดกซ์แทรน โดยไม่ต้องรอให้การย่อยสลายเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ เพราะการย่อยสลายระดับนี้เพียงพอต่อการลดจำนวนผลึกรูปเข็มลงได้

2.6 <u>แหล่งของเดกซ์แทรนเนส</u> (17)

แหล่งของเดกซ์แทรนเนสในตามธรรมชาติ พบใน แบคทีเรีย ยีสต์ รา และแอคติโนมัสซีตีส

2.6.1 เดกซ์แทรนเนสจากแบคทีเรีย ได้แก่

Achromobacter sp., Bacillus subtilis, Bacillus sp., Bacterium sp., Brevibacterium sp., Brevibacterium fuscum, Cellvebrio fluvus, Cytophaga johnsonii, Fucobacterium fusiforme, Lactobacillus bifidus, Streptococcus mitis

2.6.2 เดกซ์แทรนเนสจากยีสต์ ได้แก่

Lipomyces starkeyi

2.6.3 เดกซ์แทรนแนสจากรา ได้แก่

Aspergillus sp., A. caneus, A. luchvansis, Fusarium moniliforme, Chaetomium gracile, Gibberella fujukuroi, Penicillium funiculosum, P. luteum, P. lilacinum, P. verruculosum, P. aculeatum, Verticillium sp.

2.6.4 เดกซ์แทรนเนสจาก แอคติโนมัสซีตีส ได้แก่

Actinomyces israelrii, Streptomyces cinamonensis

2.7 ลักษณะการย่อยสลายของเดกซ์แทรนเนส

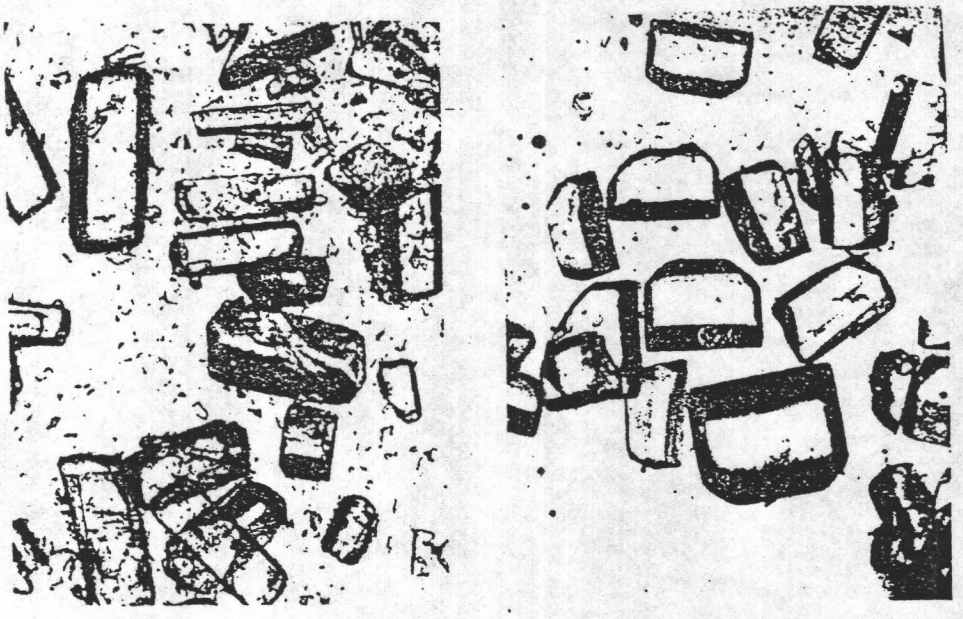
มี 2 แบบ คือ

2.7.1 Exo-spliting dextranase เป็นเดกซ์แทรนเนสที่ย่อยสลายพันธะที่เชื่อมโมเลกุลของกลูโคสจากปลายของสายเดกซ์แทรน แล้วตัดทีละโมเลกุลของกลูโคสได้ผลผลิตอยู่ในรูปน้ำตาลกลูโคส

2.7.2 Endo-spliting dextranase เป็นเดกซ์แทรนเนสที่ย่อยสลายพันธะที่จุดใดจุดหนึ่งในสายเดกซ์แทรนทำให้ได้โพลีเมอร์ที่สั้นลง เดกซ์แทรนเนสจากเชื้อราโดยทั่วไปจะมีการย่อยสลายแบบ Endo- สายเดกซ์แทรนที่ย่อยแล้ว จะมีขนาดที่เล็กลง โดยอาจพบอยู่ในรูปของโอลิโกเมอร์ ไดเมอร์ หรือโมโนเมอร์ของน้ำตาลกลูโคสแต่โดยทั่วไปแล้วมักพบอยู่ในรูปของน้ำตาล isomaltose และ isomaltotriose (18)

ผลของการย่อยสลายเดกซ์แทรนนี้จะทำให้ได้เดกซ์แทรนที่มีขนาดความยาวสั้นลงและคุณสมบัติความเหนียวหนืดลดลง สามารถละลายน้ำได้มากขึ้น ลดปัญหาต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นได้ เช่นการเกิดผลึกรูปเข็ม ปัญหาความเหนียวหนืดของน้ำอ้อย น้ำเชื่อม และแมสซีควิท

จากการศึกษาของ Hidi และ Staker (19) ซึ่งทำการทดลองในกากน้ำตาล-บี ซึ่งมีเดกซ์แทรนอยู่ 1400-2800 พีพีเอ็ม เติมเดกซ์แทรนเนสในระดับที่เหมาะสมบ่มไว้ที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 2 ชั่วโมง ซึ่งทำให้กากน้ำตาล-บีมีความหนืดลดลงร้อยละ 12 อย่างรวดเร็ว โดยวัดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความหวาน 66 องศาบริกซ์ นำกากน้ำตาล-บี ไปตกผลึกเป็นน้ำตาล-ซี ลักษณะของผลึกน้ำตาล-ซีที่เกิดขึ้นจากกากน้ำตาล-บี ที่เติม และไม่เติมเดกซ์แทรนเนสเป็นดังรูปที่ 2.9 (19)



1A Untreated—elongation 2.9:1 1B Treated—elongation 1.5:1

รูปที่ 2.9 ลักษณะของผลึกน้ำตาล-ซี ที่ผลิตจากกากน้ำตาล-บี: 1A ไม่เติมเอนไซม์, 1B เติมเอนไซม์

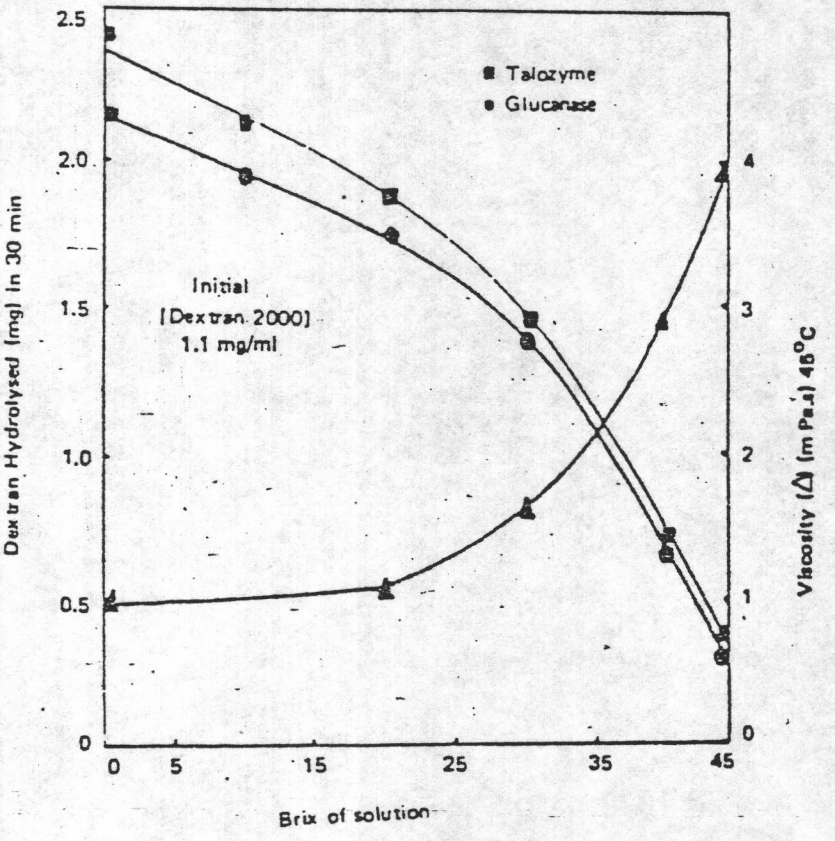
2.8 <u>การใช้เดกซ์แทรนเนสอิสระย่อยสลายเดกซ์แทรนในน้ำอ้อย</u> (16)

น้ำอ้อยรวมที่มีปริมาณเดกซ์แทรน 500 พีพีเอ็มต่อองศาบริกซ์(วิเคราะห์โดยวิธี Haze method) ไม่จำเป็นต้องเติมเดกซ์แทรนเนสเพื่อย่อยสลายเดกซ์แทรน เนื่องจากความเข้มข้นของเดกซ์แทรนระดับนี้ต่ำมากหากใช้เดกซ์แทรนเนสจะไม่เป็นการประหยัดเมื่อพิจารณาถึงข้อได้เปรียบหลังจากการกำจัดเดกซ์แทรนพบว่าที่ความเข้มข้นของเดกซ์แทรน 700 พีพีเอ็มต่อองศาบริกซ์ ค่าใช้จ่ายทางด้านราคาของเอนไซม์จะสมดุลย์กับข้อได้เปรียบอื่นๆ ที่จะได้รับหลังจากการกำจัดเดกซ์แทรน เช่นขั้นตอนการทำน้ำอ้อยใสและการตกผลึกนอกจากนี้ยังสามารถลดการสูญเสียซูโครสไปกับส่วนของโมลาส และหากมีปริมาณเดกซ์แทรนสูงกว่า 700 พีพีเอ็มต่อองศาบริกซ์ การลดค่าใช้จ่ายของเอนไซม์สามารถทำได้โดยเพิ่มระยะเวลาการบ่มเอนไซม์กับน้ำอ้อยรวมให้นานกว่าปกติ โดยทั่วไปพบว่าการใช้เดกซ์แทรนเนสประมาณ 5-10 หน่วย ในกระบวนการผลิตปกติ สามารถลดปัญหาเนื่องจากเดกซ์แทรนได้โดยไม่จำเป็นต้องย่อยสลายอย่างสมบูรณ์

การวิเคราะห์เดกซ์แทรนโดยวิธี Haze method พบว่าปริมาณเดกซ์แทรนวิเคราะห์ได้แต่ละครั้งประมาณ 300 พีพีเอ็ม วิเคราะห์ได้จากสารอื่นที่ไม่ใช่เดกซ์แทรน (non-dextran Haze forming meterial) เช่นแป้งหรือโพลีแซคคาไรด์ชนิดอื่นซึ่งสามารถตกตะกอนได้ด้วยแอลกอฮอล์

จากการศึกษาของ Inkerman (16) (ประเทศออสเตรเลีย) โดยนำเดกซ์แทรนเนสทางการค้า 3 ชนิด คือ Talozyme (Tate and Lyle), Glucanase D-1 (Pfizer Chemicals) และ Dextranase Novo 25 L (Novo) กำจัดเดกซ์แทรนในน้ำอ้อย พบว่าการใช้เดกซ์แทรนเนส Novo 25 L ในการกำจัดเดกซ์แทรนในน้ำอ้อยให้ประสิทธิภาพการกำจัดที่สูงกว่า ถึงแม้ว่าความเข้มข้นของเดกซ์แทรนในน้ำอ้อยมีปริมาณต่ำก็ตามเดกซ์แทรนเนสที่ใช้มีแอคติวิตีสูงสุดที่พีเอช 5.0 และพบว่าน้ำอ้อยรวมที่มีปัญหาเดกซ์แทรนมีพีเอชประมาณ 4.5-5.5 ซึ่งเอนไซม์จะมีแอคติวิตีเหลือเพียงร้อยละ 80 เท่านั้นเมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะที่เอนไซม์สามารถทำงานได้สูงสุด สำหรับอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์คือ 55 องศาเซลเซียส

และจากการศึกษาของ Fulcher and Inkerman (20) พบว่าความเข้มข้นของซูโครสในน้ำอ้อยจะยับยั้งปฏิกิริยาของเดกซ์แทรนเนสทางการค้าทุกชนิดดังแสดงในรูปที่ 2.10 (20)



รูปที่ 2.10 ความเข้มข้นของซูโครสต่อแอคติวิตีของเดกซ์แทรนเนสและความหนืดของสารละลาย

จากรูปจะเห็นว่าอัตราเร็วการย่อยสลายเดกซ์แทรนลดลงประมาณร้อยละ 15 เมื่อความเข้มข้นของซูโครสเป็น 15 องศาบริกซ์ และอัตราการย่อยสลายเดกซ์แทรนลดลงมากถึง 100 เท่า เมื่อความเข้มข้นของซูโครสสูงถึง 70 องศาบริกซ์ (ในน้ำเชื่อม)

2.8.1 ข้อได้เปรียบเนื่องจากการกำจัดเดกซ์แทรนในน้ำอ้อยด้วยเดกซ์แทรนเนส

การย่อยสลายเดกซ์แทรนในน้ำอ้อยด้วยเดกซ์แทรนเนสนั้นให้ผลดีต่อกระบวนการผลิตน้ำตาลทราย สามารถลดปัญหาเนื่องจากเดกซ์แทรนในน้ำอ้อยได้เป็นอย่างดีในทุกขั้นตอนของกระบวนการผลิต แต่ที่จะนำมากล่าวในที่นี้มี 2 ประเด็น คือ

2.8.1.1 ขั้นตอนการทำน้ำอ้อยใส และเพิ่มความสามารถในการกรอง

เดกซ์แทรนทำให้ความสามารถในการกรองของน้ำอ้อยรวมต่ำ เนื่องจากตะกอน (mud) ที่เกิดขึ้นเป็นตะกอนละเอียดแขวนลอยในน้ำอ้อย ทำให้ไม่

สามารถตกตะกอนในขั้นตอนการพักใสได้ทั้งหมด ตะกอนเหล่านี้อาจจะติดมากับน้ำอ้อยที่จะนำเข้าสู่ขั้นตอนการทำน้ำอ้อยให้เป็นน้ำเชื่อมโดยใช้หม้อต้มระเหย ซึ่งเป็นผลให้เกิดตะกรันในหม้อต้มระเหยเป็นปริมาณมาก การแลกเปลี่ยนความร้อนไม่ดีดังนั้นการใช้เดกซ์แทรนเนสสำหรับกำจัดเดกซ์แทรนสามารถลดปัญหาในขั้นตอนการทำใสได้เป็นอย่างดี

2.8.1.2 ความยาวของผลึกน้ำตาลซูโครส

จากที่ได้กล่าวแล้วว่าเดกซ์แทรนก่อให้เกิดปัญหาผลึกรูปเข็มเพราะความยาวของผลึกทางด้านแกน c มากกว่าแกน b เป็นเหตุให้อัตราส่วน c/b ของผลึกน้ำตาลมีค่ามากกว่า 1 เป็นลักษณะของผลึกรูปเข็มไม่เป็นที่ต้องการในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาล ดังนั้นการกำจัดเดกซ์แทรนด้วยเดกซ์แทรนเนสสามารถแก้ปัญหา ความยาวของผลึกน้ำตาลซูโครสได้

Day (21) พบว่า ความยาวของผลึกน้ำตาลซูโครสขึ้นกับปัจจัยหลายประการได้แก่

2.8.1.2.1 ความเข้มข้น และขนาดโมเลกุลของเดกซ์แทรน

2.8.1.2.2 ระดับของ super saturation ของน้ำเชื่อมขณะตกผลึก

2.8.1.2.3 ความบริสุทธิ์ของน้ำเชื่อมที่ใช้เลี้ยงผลึกและอุณหภูมิขณะเลี้ยงผลึกน้ำตาล

จากการศึกษาในประเทศออสเตรเลีย ปี ค.ศ.1976, 1977 และ 1978 ในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาลพบว่าเปอร์เซนต์ของผลึกรูปเข็มที่เกิดขึ้นในน้ำตาลทรายดิบลดลงเมื่อเติมเดกซ์แทรนเนสในน้ำอ้อยรวม ทั้งนี้เนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของเดกซ์แทรนลดลงเพราะถูกย่อยสลายด้วยเดกซ์แทรนเนสปัญหาการเกิดผลึกรูปเข็มจึงลดลงด้วย

2.8.2 ข้อเสียเปรียบที่ควรปรับปรุงจากการย่อยสลายด้วยเดกซ์แทรนเนสอิสระ

จากการศึกษาในประเทศออสเตรเลีย พบว่าน้ำตาลทรายดิบ น้อยกว่าร้อยละ 2 ผลิตจากน้ำอ้อยรวมที่ผ่านการเติมเดกซ์แทรนเนสโดยการเติมเดกซ์แทรนเนส

จะเติมเฉพาะอ้อยบางชุดที่มีปัญหาเรื่องเดกซ์แทรนจนไม่สามารถนำเข้าสู่กระบวนการผลิตปกติได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการกำจัดเดกซ์แทรนด้วยเดกซ์แทรนเนส ไม่ได้รับความนิยมเท่าที่ควร ถึงแม้ว่าภายหลังจากการกำจัดเดกซ์แทรนออกไปแล้วจะให้ผลดีต่อกระบวนการผลิตก็ตาม ทั้งนี้เนื่องจากสาเหตุบางประการคือ (20)

2.8.2.1 ราคาของเอนไซม์ พบว่าราคาของเอนไซม์มีราคาสูงเกินไปหากนำมาใช้ในกระบวนการผลิตน้ำตาลทราย เช่นจากการศึกษาของ Jolly และ Prakash (4) ทดลองกำจัดเดกซ์แทรนออกจากน้ำอ้อยโดยใช้เดกซ์แทรนเนส (Novo 25L) ปริมาณ 100 พีพีเอ็ม บ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 15 นาที สามารถกำจัดเดกซ์แทรนออกไปได้ร้อยละ 48-52 แต่การนำเอนไซม์มาใช้ในอุตสาหกรรมยังคงประสบปัญหาเนื่องจากราคาเอนไซม์สูง และไม่สามารถนำเอนไซม์กลับมาใช้ใหม่ได้ ทำให้เป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิต

2.8.2.2 ความไม่สะดวก หากนำมาใช้ในกระบวนการผลิตแบบเดิม เนื่องจากการบ่มเดกซ์แทรนเนสกับน้ำอ้อยรวม ต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 55 องศาเซลเซียส และระยะเวลาการบ่มนานถึง 40 นาที ซึ่งจำเป็นต้องสร้างถังเก็บ (storage tank) เพื่อใช้บ่มน้ำอ้อยรวมกับเดกซ์แทรนเนส และต้องเพิ่มหน่วยนี้เข้าไปในกระบวนการผลิตจึงเป็นการไม่สะดวก

2.8.2.3 ปริมาณวัตถุดิบเข้าโรงงานมีมากเกินไปจนไม่สามารถกำจัดเดกซ์แทรนได้ทัน เช่นโรงงานที่มีกำลังการผลิต 400 ตันอ้อยต่อชั่วโมง สามารถทำการหีบและผลิตน้ำอ้อยรวมได้ถึง 400,000 ลิตรต่อชั่วโมง ดังนั้นการกำจัดเดกซ์แทรนในอุตสาหกรรมจึงไม่สะดวก รวมทั้งต้องใช้ระยะเวลาการเก็บรวบรวมน้ำอ้อย และระยะเวลาในการบ่มน้ำอ้อยรวมกับเดกซ์แทรนเนสใช้เวลานานนานอาจก่อให้เกิดปัญหาการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในน้ำอ้อยขึ้นได้

2.8.3 การกำจัดเดกซ์แทรนในน้ำอ้อยรวมโดยใช้ระบบต่อเนื่อง

การกำจัดเดกซ์แทรนในน้ำอ้อยรวมโดยใช้ระบบต่อเนื่อง โดยอาศัยเทคนิคเอนไซม์ตรึงรูปมาประยุกต์กับอุตสาหกรรมน้ำตาลทรายจึงให้ผลดีกว่าในแง่ของประสิทธิภาพการใช้งานและการปฏิบัติในโรงงานกล่าวคือ

2.8.3.1 สามารถแก้ปัญหาในเรื่องของเอนไซม์มีราคาสูงได้ เนื่องจากสามารถนำเอนไซม์กลับมาใช้ใหม่ได้ ก่อให้เกิดความประหยัดในอุตสาหกรรม ดังนั้นศักยภาพที่จะนำมาใช้ในอุตสาหกรรมจึงมีความเป็นไปได้สูง

2.8.3.2 การควบคุมอุณหภูมิของการบ่ม สามารถควบคุมเฉพาะหน่วยที่เกิดปฏิกิริยาของเอนไซม์ได้โดยไม่ต้องควบคุมอุณหภูมิของน้ำอ้อยทั้งหมด จึงสามารถนำมาปฏิบัติในอุตสาหกรรมได้สะดวก และระยะเวลาการทำปฏิกิริยาของเอนไซม์ตรึงรูปกับเดกซ์แทรนในน้ำอ้อย (resident time) ก็สามารถควบคุมได้จากอัตราการไหลของน้ำอ้อย ทำให้สามารถควบคุมอัตราการย่อยสลายในระดับที่เหมาะสมได้

2.8.3.3 ไม่จำเป็นที่จะต้องรวบรวมน้ำอ้อยให้ได้ปริมาณมากก่อนที่จะนำไปกำจัดเดกซ์แทรน และสามารถสร้างหน่วยกำจัดเดกซ์แทรนให้เหมาะสมกับกำลังการผลิตของโรงงานได้

2.8.3.4 เนื่องจากการกำจัดเดกซ์แทรนในระบบต่อเนื่อง จึงไม่ทำให้จุดใดจุดหนึ่งของสายงานการผลิตหยุดชงัก สามารถทำการได้เหมือนการผลิตปกติ

จากข้อได้เปรียบดังกล่าวจึงมีนักวิทยาศาสตร์หลายท่านได้ศึกษาถึงการตรึงรูปเดกซ์แทรนเนสบนตัวพยุงชนิดต่างๆ อย่างกว้างขวาง

2.9 เดกซ์แทรนเนสตรึงรูป

2.9.1 เอนไซม์ตรึงรูป

เอนไซม์ตรึงรูปคือ เอนไซม์ที่ถูกกำหนด หรือทำให้อยู่ในขอบเขตที่จัดไว้ และยังคงมีความไวต่อปฏิกิริยา สูงกว่า น้อยกว่า หรือเท่ากับเอนไซม์เดิม รวมทั้งสามารถนำมาใช้ซ้ำหรือต่อเนื่องได้ นอกจากนี้เอนไซม์ที่ได้จะถูกเปลี่ยนเป็นเอนไซม์ที่ละลายน้ำไม่ได้

ข้อดีของเอนไซม์ตรึงรูปมีหลายประการดังนี้

(1) เพิ่มเสถียรภาพของเอนไซม์

(2) นำเอนไซม์กลับมาใช้ใหม่ หรือแยกเอนไซม์ออกจากระบบได้ง่าย

(3) เอนไซม์ที่ใช้ตรึงรูปอาจจะไม่ต้องนำมาทำให้บริสุทธิ์ก่อน เช่นตรึงรูปจุลินทรีย์ที่ สร้างเอนไซม์

(4) สามารถเปลี่ยนสภาวะการทำปฏิกิริยาได้โดยเลือกชนิดของตัวพยุง

(5) กำหนดรูปร่างของเอนไซม์ได้ตามชนิดของตัวพยุงให้เหมาะสมกับชนิดของ Bioreactor, Stirred tank, fluidized bed และกรรมวิธีการนำ ไปใช้ เช่น Biosensor

(6) สามารถใช้ multienzyme system ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

(7) แอคติวิตีของเอนไซม์อาจจะเพิ่มขึ้นถ้าตัวพยุงมีสารประกอบบางอย่างช่วยเสริม ปฏิกิริยา

ข้อเสียเปรียบบางประการของเอนไซม์ตรึงรูป

(1) แอคติวิตีอาจจะถูกกระทบกระเทือน เนื่องจากเปลี่ยนโครงรูป (conformation) ของเอนไซม์โดยตัวพยุงที่ไม่เหมาะสม

(2) ตัวพยุงที่ไม่เหมาะสมอาจมีผลกระทบต่อผลผลิต

2. 9.2 การตรึงรูปเอนไซม์

2.9.2.1 การเชื่อมกับตัวพยุง (Carrier binding method) หมายถึงการเชื่อมเอนไซม์กับตัวพยุงที่ไม่ละลายน้ำ ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 วิธีตามลักษณะการเชื่อมกับเอนไซม์

2.9.2.1.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) เป็นการดูดซับเอนไซม์โปรตีนบนผิวของตัวพยุงที่ไม่ละลายน้ำวิธีนี้มีผลกระทบเล็กน้อย หรือไม่มีเลยต่อการเปลี่ยนความคงรูปของเอนไซม์ ดังนั้นจึงไม่มีผลต่อการทำลายบริเวณเร่งแต่วิธีนี้มีข้อจำกัดคือ เอนไซม์เกาะกับตัวพยุงไม่แน่น

2.9.2.1.2 การเชื่อมแบบอิออนิค (Ionic binding method) เป็นการเชื่อมโปรตีนเอนไซม์กับตัวพยุงที่ไม่ละลายน้ำโดยพันธะอิออนิควิธีนี้มีผลกระทบต่อแอคติวิตีของเอนไซม์น้อย ทั้งทางด้านการเปลี่ยนแปลงโครงรูป หรือบริเวณเร่ง แต่วิธีนี้มีข้อจำกัดคือ แรงเกาะกันระหว่างเอนไซม์กับตัวพยุงอ่อนเป็นผลให้เอนไซม์หลุดง่ายในขณะทำปฏิกิริยาในภาวะที่มีความเข้มของอิออนิคสูง หรือมีการเปลี่ยนพีเอช

2.9.2.1.3 การเชื่อมแบบโควาเลนท์ (Covalent binding method) เป็นการเชื่อมโปรตีนเอนไซม์กับตัวพยุงที่ไม่ละลายน้ำโดยพันธะโควาเลนท์ ซึ่งหากจะแบ่งชนิดของวิธีเชื่อมแบบโควาเลนท์ตามชนิดของพันธะได้ 3 วิธีคือ

(1) พันธะ Diazo หรือ วิธี Diazo

(2) พันธะ Peptide หรือ วิธี Peptide

(3) พันธะ Alkyl หรือ วิธี Alkyl

การเชื่อมโดยพันธะโควาเลนท์นั้นอาจกระทบกระเทือนการเปลี่ยนโครงรูป และศูนย์กลางบริเวณเร่งของเอนไซม์ เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแอคติวิตีของเอนไซม์ต่อสับสเตรท แต่แรงเกาะของเอนไซม์กับตัวพยุงค่อนข้างแข็งแรง

2.9.2.2 การเชื่อมข้าม (Cross-linking method) หมายถึง การเชื่อมข้ามระหว่างโมเลกุลของเอนไซม์โดยใช้ตัวกลางซึ่งเชื่อมระหว่าง 2 โมเลกุล (bifunctional agent) หรือตัวกลางเชื่อมระหว่างหลายโมเลกุล (multifunctional agent)

2.9.2.3 การห่อหุ้ม (Entrapping method) หมายถึง การบรรจุเอนไซม์ลงในช่องว่าง หรือโพรง (Lattice) ของเจลที่จะสามารถซึมผ่านบางส่วน หรือห่อหุ้มเอนไซม์ด้วยเมมเบรนโพลิเมอร์ที่สามารถซึมผ่านได้บางส่วน สามารถแบ่งได้ 2 วิธี คือ

2.9.2.3.1 การบรรจุในตาข่าย (lattice type)

2.9.2.3.2 การห่อหุ้มในแคปซูลเล็ก (microcapsule type)

ทั้งสองวิธีนี้เอนไซม์ไม่เชื่อมกับเจลของช่องตาข่าย หรือเมมเบรนที่ห่อหุ้ม

2.9.3 ตัวอย่างงานวิจัยเดกซ์แทรนเนสตรึงรูป เพื่อแก้ปัญหาเดกซ์แทรนในน้ำอ้อย

ในปี ค.ศ.1973 Cheetham และ Richards (22) ได้ทดลองตรึงรูปเดกซ์แทรนเนสจากแบคทีเรีย โดยใช้ 3 วิธีเปรียบเทียบกัน ดังนี้คือ ตรึงรูปบน cellulose carbonate , carboxymethyl cellulose azide และ cyanogen bromide-activated cellulose เปรียบเทียบคุณสมบัติของเอนไซม์ตรึงรูปแต่ละวิธี และเปรียบเทียบกับเอนไซม์อิสระพบว่าการตรึงรูปบน cyanogen bromide-activated

cellulose ให้เอนไซม์ตรึงรูปที่มีแอคติวิตีสูงที่สุดทั้งความจำเพาะของเอนไซม์และแอคติวิตีต่อกรัมของตัวพยุง เนื่องจากเกิด reactive cyclic imidocarbamate ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับหมู่อะมิโนของเอนไซม์ ซึ่งได้แก่ carbamate หรือ N-substituted carbamate ของเอนไซม์อิสระ เอนไซม์ตรึงรูปโดยวิธี cyanogen bromide-activated cellulose มีเสถียรภาพต่อความร้อนสูงที่สุด และยังคงมีแอคติวิตีเหลืออยู่ถึงร้อยละ 50 เมื่อบ่มที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง นอกจากนี้ยังพบว่าหากมีสับสเตรทเดกซ์แทรนอยู่ในตัวกลางขณะบ่มจะมีผลทำให้เสถียรภาพต่อความร้อนสูงขึ้น

ปี ค.ศ. 1977 Gray และ Livingstone (23) ทดลองตรึงรูปเดกซ์แทรนเนสบนตัวพยุงหลาย ชนิดเปรียบเทียบกัน โดยใช้ m-diaminobenzene ที่ผ่านการเติม $NaNO_2$ ที่อุณหภูมิต่ำซึ่งได้สารโพลีเมอร์ที่เรียกว่า Bismarck Brown มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีน้ำตาลแดงแต่สารนี้มีข้อเสียคือการนำไปประยุกต์ใช้สำหรับตรึงรูปเอนไซม์มีข้อจำกัด เพราะมีความคงทนต่อสภาวะการใช้งานต่ำ การบรรจุลงคอลัมน์ลำบากและการนำกลับมาใช้ใหม่ทำได้ยาก ดังนั้นเพื่อความสะดวกจึงใช้ตัวพยุงชนิดอื่น เช่น Biogel P-300 , Biogel P-6 , CM Cellulose , DEAE-Cellulose , Bioglas 1000 , Celite และ Neosyl มาประยุกต์ใช้ร่วมกับ m-diamiobenzene พบว่าเมื่อ m-diaminobenzene เกิดพันธะ diazo ในสภาพที่มีเซลลูโลสนั้น Bismark Brown จะเกาะอยู่บนอนุภาคของเซลลูโลส จากนั้นจึงนำไปใช้ตรึงรูปเอนไซม์ ซึ่งมีข้อดีคือ มีขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น คงตัวต่อสภาพการใช้งาน และเหมาะสมต่อการนำมาตรึงรูปเอนไซม์ เมื่อประยุกต์ใช้ตัวพยุงชนิดอื่นแทนเซลลูโลส พบว่าการเกิดพันธะ diazo บนตัวพยุงเหล่านี้มีความแปรปรวนขึ้นกับชนิดของตัวพยุง และพบว่าการตรึงรูปบน DEAE-cellulose , Biogel 1000 , Celite และ Neosyl ให้เอนไซม์ตรึงรูปที่มีแอคติวิตีสูง ส่วนตัวพยุงอื่น เช่น Biogel P-3000 , Biogel P-6 , nylon mesh , CM-Cellulose , glass tube , Ballotini beads และ Polythene sheets ให้แอคติวิตีต่ำทั้งนี้ขึ้นกับธรรมชาติของตัวพยุงแต่ละชนิดหากตัวพยุงที่มีพื้นที่ผิวมาก และเป็นรูพรุน ก็จะเหมาะสมต่อการตรึงรูปเอนไซม์

และในปี ค.ศ.1977 เช่นเดียวกัน Kennedy และ Kay (24) ทดลอง

ตรึงรูปเดกซ์แทรนเนสบน porous titanium (IV) oxide โดยนำเอนไซม์มาตรึงรูปบนอนุภาคดังกล่าว โดยวิธีใช้และไม่ใช้แอมโมเนียมอิออน เปรียบเทียบกัน พบว่าการใช้แอมโมเนียทำให้การจับตัวของเดกซ์แทรนเนสตรึงรูปบนตัวพยุงดีกว่าการไม่ใช้แอมโมเนีย แต่ในขณะเดียวกันกลับพบว่า การใช้แอมโมเนียทำให้ความจำเพาะของเอนไซม์ต่อสับสเตรทลดลงมากกว่าการไม่ใช้แอมโมเนีย เมื่อนำเอนไซม์ตรึงรูปบรรจุลงคอลัมน์ขนาด 8.5x0.4 เซนติเมตร จากนั้นผ่านสารละลายเดกซ์แทรนความเข้มข้นร้อยละ 0.5-20 ลงในคอลัมน์พบว่าไม่เกิดการสูญเสียแอคติวิตีของเอนไซม์ตรึงรูปในขณะใช้งาน และพบว่าการสูญเสียแอคติวิตีของเอนไซม์ตรึงรูปเกิดเนื่องจากพีเอชเพียงอย่างเดียว

การตรึงรูปเอนไซม์โดยใช้แอมโมเนีย ให้ผลผลิตเอนไซม์ตรึงรูปสูงกว่าการไม่ใช้แอมโมเนียเนื่องจากความสามารถในการจับกัน (chelating) ของ hydrous titanium (IV) oxide กับเอนไซม์สูงกว่า และยังเกิดอนุพันธ์ในลักษณะที่ไม่มีแอมโมเนียได้ด้วย สำหรับภาวะที่เหมาะสมต่อการตรึงรูปขึ้นกับพีเอช และเวลาในการตรึงรูป อัตราส่วนระหว่างเอนไซม์กับตัวพยุง ในกรณีของการตรึงรูปโดยใช้แอมโมเนียนั้น พบว่า พีเอชมีผลต่อการตรึงรูปน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการตรึงรูปแบบที่ไม่ใช้แอมโมเนีย ซึ่งจะให้แอคติวิตีสูงเมื่อพีเอชต่ำกว่า 6

จากนั้น Kennedy และ Kay (25) ได้ศึกษาการตรึงรูปเดกซ์แทรนเนสบน titanium (IV) oxide ที่ผ่านการเคลือบอนุภาคด้วย diazotise 1,3 diamino-benzene โดยหมู่ไดอะโซเนียมที่มากเกินพอจะถูกกำจัดออกโดยทำปฏิกิริยากับ 2-naphthol พบว่าการตรึงรูปเดกซ์แทรนเนสบนตัวพยุงดังกล่าวให้ผลผลิตเอนไซม์ตรึงรูปเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าเนื่องจากเกิดพันธะโควาเลนท์ เมื่อนำเอนไซม์ตรึงรูปบรรจุลงคอลัมน์ขนาด 9.0x0.4 เซนติเมตร ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเดกซ์แทรน พีเอช อุณหภูมิ และอัตราไหล ต่อการใช้งานอย่างต่อเนื่องพบว่าอัตราการไหลที่เหมาะสม คือ 1.8 มิลลิลิตรต่อนาที พีเอช 3.5-5.0 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสับสเตรทสูงขึ้น

ในปี ค.ศ.1980 Ramesh และ Singh (26) ทดลองตรึงรูปเดกซ์แทรนเนสจากแบคทีเรียบน alkylamine glass ที่ผ่านการเคลือบอนุภาคด้วย

zirconia โดยใช้กลูตารัลดีไฮด์ (glutaraldehyde) เป็นสารสร้างพันธะเชื่อมพบว่าเอนไซม์ตรึงรูปที่เตรียมได้มีแอคติวิตีจำเพาะร้อยละ 62 ของแอคติวิตี เริ่มต้นผลผลิตของเอนไซม์ตรึงรูปเป็น 18 มิลลิกรัมโปรตีนต่อกรัมตัวพยุง เอนไซม์ตรึงรูปมีค่า K_m ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับเอนไซม์อิสระ พีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 5.2-6.2 และมีเสถียรภาพต่อความร้อนสูงถึงอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ขณะที่เอนไซม์อิสระมีพีเอชเหมาะสมที่ 4.5 เสถียรภาพต่อความร้อนเพียง 50 องศาเซลเซียส เสถียรภาพต่อการเก็บของเอนไซม์ตรึงรูปที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลซียส เป็นระยะเวลามากกว่า 20 วัน และสูญเสียแอคติวิตีอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 8 วัน และมีค่าครึ่งชีวิตของเอนไซม์ 5 วัน

สำหรับการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางด้านจลนพลศาสตร์ของเอนไซม์ตรึงรูปเมื่อเปรียบเทียบกับเอนไซม์อิสระนั้นเกิดเนื่องจากสาเหตุหลายประการอาทิเช่น การเปลี่ยนแปลงโครงรูปของเอนไซม์ (conformation) การที่บริเวณผิวของเอนไซม์ตรึงรูปมีประจุไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป และผลจากการแพร่ของสับสเตรท เข้าสู่เอนไซม์ตรึงรูปบนตัวพยุงที่อาจถูกบดบังเนื่องจากตัวพยุง

และพบว่าค่า E_a (activation energy) ของเอนไซม์ตรึงรูปมีค่าต่ำกว่าเอนไซม์อิสระ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการตรึงรูปเป็นการเพิ่มความคงตัว และประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์เนื่องจากกระบวนการตรึงรูป ทั้งนี้เนื่องจากเหตุผลหลายประการได้แก่ ชนิดของเอนไซม์ สับสเตรท ตัวพยุง ความเหมาะสมของการถ่ายเทอิเลคตรอนระหว่างสารปฏิกิริยา (reactant) และโพลีเมอร์ และการเปลี่ยนแปลงขั้ว (polarity) หรือ ionic strength ตรงบริเวณเร่งของเอนไซม์ให้เหมาะสมต่อการทำปฏิกิริยากับสับสเตรทมากยิ่งขึ้น

พีเอชเหมาะสมของเดกซ์แทรนเนสตรึงรูปอยู่ในช่วงที่กว้างกว่าเดกซ์แทรนเนสอิสระ และพีเอชเหมาะสมเลื่อนมาทางด้านด่าง แสดงให้เห็นว่าพีเอชที่ผิวของตัวพยุงมีพีเอชต่ำ เพราะ zirconia มีประจุบวก

ในปี ค.ศ. 1985 Madhu และ Prabhu (27) ได้ทดลองตรึงรูปเดกซ์แทรนเนสจากเชื้อรา *Penicillium aculeatum* บนเบนโทไนท์ (bentonite)

แล้วนำเอนไซม์ตรึงรูปที่ได้นำมาเก็บในลักษณะเป็นผงแห้งหรือเก็บในอะซีเตทบัฟเฟอร์ที่ พีเอช 5.6 เป็นเวลา 3 สัปดาห์ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส โดยไม่สูญเสียแอคติวิตี เอนไซม์ตรึงรูป และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านความจำเพาะของเอนไซม์ต่อสับสเตรท ผลผลิตของเอนไซม์ตรึงรูปเป็น 0.1-0.6 มิลลิกรัมโปรตีนต่อเบนโทไนท์ 1 กรัม จากการศึกษาพบว่าหากมีซูโครสอยู่ในสารละลายจะช่วยให้เสถียรภาพต่อความร้อนของเอนไซม์ตรึงรูปสูงขึ้นเนื่องจากซูโครสมีสมบัติ highly polar nature ช่วยป้องกันเอนไซม์จากความร้อน เอนไซม์ตรึงรูปสามารถใช้ได้ประมาณ 6 รอบโดยไม่เสียแอคติวิตี

ในปี ค.ศ.1989 Kobayashi และคณะ (28) ทดลองตรึงรูปเดกซ์แทรนเนสโดยใช้ EDC (1-ethyl-3-(3-dimethyl aminopropyl) carbodiimide) เป็นสารสร้างพันธะเชื่อมขวาง โดยปรับปรุงสภาวะให้เหมาะสมต่อการตรึงรูปโดยนำ EDC ทำปฏิกิริยากับตัวพยุง CMC (Carboxymethyl cellulose) เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ล้าง EDC ส่วนเกินออกได้ตัวพยุงในรูป EDC activated CMC ซึ่งเมื่อนำมาตรึงรูปเอนไซม์เดกซ์แทรนเนส ทำให้ได้ผลดีเนื่องจากหมู่คาร์บอกซิลที่จำเป็นสำหรับบริเวณเร่งไม่ถูกทำปฏิกิริยากับ EDC และ EDC activated CMC นั้นไม่ทำปฏิกิริยากับ หมู่อะมิโนในบริเวณเร่งของเอนไซม์

2.9.4 การตรึงรูปเอนไซม์บนตัวพยุงทราย

ทรายจัดเป็นวัสดุตามธรรมชาติที่สามารถหาได้ง่าย ราคาถูก และมีศักยภาพที่จะนำมาประยุกต์ใช้เพื่อตรึงรูปเอนไซม์ได้ดีไม่แพ้แก้วพรุน (porous glass) รวมทั้งมีหลายขนาดให้เลือกได้ตามความเหมาะสมของลักษณะงานที่จะนำไปใช้

การใช้ทรายเป็นตัวพยุงสำหรับการตรึงรูปเอนไซม์มีข้อได้เปรียบหลายประการอาทิเช่น ทรายมีความคงตัวสูง ทนต่อการทำลายเชิงกล และการทำลายโดยจุลินทรีย์ และมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานในภาวะที่มีพีเอชเป็นกรดเล็กน้อย (mildly acidic condition) ดังนั้นจึงมีนักวิทยาศาสตร์หลายท่านทดลองตรึงรูปเอนไซม์บนตัวพยุงทราย

Byrne และ Johnson (29) ทดลองตรึงรูปเอนไซม์บีต้า-กาแลคโตสิเดส จากเชื้อรา *Aspergillus niger* และ *Saccharomyces*

fragilis บนตัวพยุง 2 ชนิดคือ ทรายขนาดอนุภาคเล็กกว่า 125 μm และแก้วพรุนขนาดอนุภาค 0.209 μm โดยวิธีกระตุ้นตัวพยุงด้วย $TiCl_4$ และ 3-aminopropyltriethoxysilane (เอพีทีเอส) ร่วมกับการใช้กลูตารัลดีไฮด์ (glutaraldehyde) พบว่าการใช้เอพีทีเอส ให้ประสิทธิภาพการกระตุ้นตัวพยุงที่สูงกว่าการใช้ $TiCl_4$ ในตัวพยุงทั้งสองชนิด และพบว่าการใช้ทรายเป็นตัวพยุงสำหรับตรึงรูป บีต้า-กาแลคโตซิเดส จาก *A.niger* ให้แอคติวิตีเอนไซม์ตรึงรูปที่สูงกว่าการใช้แก้วพรุนทั้งกรณีการใช้ $TiCl_4$ และการใช้เอพีทีเอส ทั้งนี้อาจเนื่องจากการที่มีขนาดอนุภาคและพื้นที่ผิวที่เหมาะสมต่อการตรึงรูป แต่สำหรับกรณีของเอนไซม์จาก *S.fragilis* แล้วพบว่าการตรึงรูปบนแก้วพรุนให้แอคติวิตีสูงกว่าการตรึงรูปบนทราย

Brotherton , Emery และ Redwell (30) ทดลองตรึงรูปเอนไซม์หลายชนิดบนตัวพยุงทรายโดยใช้เอพีทีเอส เป็นสารกระตุ้นตัวพยุง แล้ววิเคราะห์หมู่เอมีนที่ไวต่อปฏิกิริยา (recactive amine group) บนอนุภาคทรายและทรายที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเอพีทีเอส โดยให้ทำปฏิกิริยากับกรดมาโลนิค [2-^{14}C_ ในภาวะที่มี 1-ethyl-3-(3-dimethylaminopropyl)-carbodiimide.HCl พบว่าทรายที่ผ่านการเติมเอพีทีเอส มีหมู่เอมีนไวต่อปฏิกิริยา 12 $\pm$ 2 นาโนโมลของกรดมาโลนิคต่อกรัม และทรายที่ผ่านการล้างด้วยน้ำมีหมู่เอมีนไวต่อปฏิกิริยา 3 นาโนโมลของกรดมาโลนิคต่อกรัม จากนั้นทดลองตรึงรูปเอนไซม์แอลกอฮอล์ดีไฮโดรจีเนส (ADH) และแลคเตทดีไฮโดรจีเนส (LDH) บนแก้วพรุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 ไมครอน และทรายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 200-300 ไมครอน ที่ผ่านการเตรียมโดยวิธีดังกล่าวสำหรับตัวพยุงทั้งสองชนิดพบว่าการตรึงรูป ADH บนตัวพยุงทั้งสองชนิดให้แอคติวิตีจำเพาะเท่ากัน แต่การตรึงรูป LDH บนตัวพยุงทรายให้แอคติวิตีจำเพาะสูงกว่าตัวพยุงแก้วพรุน

จากการศึกษาของ Puvanakrishnan และ Bose (31) ทดลองตรึงรูปทริปซินบนตัวพยุงทราย โดยใช้ 5 วิธีเปรียบเทียบกันคือ

1.ทราย + เอพีทีเอส + กลูตารัลดีไฮด์ + ทริปซิน

2.ทราย + กลูตารัลดีไฮด์ + ทริปซิน

3.ทราย + Hexamethylenetetraamine + กลูตารัลดีไฮด์ + ทริปซิน

4.ทราย + Hexamethylenediamine + กลูตารัลดีไฮด์ + ทริปซิน

5.ทราย + melamine + กลูตารัลดีไฮด์ + ทริปซิน

พบว่าการตรึงรูปทริปซินโดยวิธีที่ 1 ให้แอคติวิตีเอนไซม์ตรึงรูปสูงสุด ทั้งแอคติวิตีจำเพาะและแอคติวิตีต่อกรัมตัวพยุง พีเอชที่เหมาะสมสำหรับการทำปฏิกิริยาของเอนไซม์พบว่า การตรึงรูปมีผลทำให้พีเอชที่เหมาะสมต่อการทำปฏิกิริยาเลื่อนไปทางด้านกรด อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับเอนไซม์อิสระและเอนไซม์ตรึงรูปอยู่ที่อุณหภูมิเดียวกันคือ 45 องศาเซลเซียส เสถียรภาพต่อพีเอชของเอนไซม์ตรึงรูปอยู่ในช่วง 3.0-7.0 ขณะที่เอนไซม์อิสระมีเสถียรภาพที่พีเอช 5.0 หากพีเอชสูงหรือต่ำกว่านี้แอคติวิตีจะลดลง เอนไซม์ตรึงรูปมีเสถียรภาพต่อความร้อนสูงถึง 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ขณะที่เอนไซม์อิสระมีเสถียรภาพต่อความร้อนเพียง 30 องศาเซลเซียสเท่านั้น

จากนั้นได้ศึกษาสมบัติของทริปซินตรึงรูปบนตัวพยุงทราย (32) โดยใช้เอพีทีเอสและกลูตารัลดีไฮด์ นอกจากนี้ได้ปรับปรุงลักษณะของทรายที่นำมาใช้เป็นตัวพยุง โดยแช่ทรายในกรดไนตริคเข้มข้นเป็นเวลา 1 วัน ล้างด้วยน้ำจนหมดกรด อบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จากนั้นนำมาเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ทำให้เย็น ทรายที่เตรียมได้นำมาเติมเอพีทีเอส ตามวิธีที่ 1 นำมาวิเคราะห์ปริมาณหมู่เอมีนที่ไวต่อปฏิกิริยา ในทรายที่ผ่านการเติมเอพีทีเอส ทรายที่ผ่านการแช่กรดและเผา และทรายที่ผ่านการล้างด้วยน้ำกลั่นธรรมดา โดยให้ทำปฏิกิริยากับกรดมาโลนิค ($2-^{14}C$) แล้ววัดปริมาณก้มมันตรังสี (radioactivity) ที่ถูกทำปฏิกิริยาโดยวิธีเดียวกับ Brotherton (30) พบว่าทรายที่ผ่านการเติมเอพีทีเอส มีหมู่เอมีนที่ไวต่อปฏิกิริยามากที่สุด คิดเป็น 15.5 นาโนโมลของกรดมาโลนิคต่อกรัม รองลงมาคือทรายที่ผ่านการแช่กรดและเผามีหมู่เอมีนที่ไวต่อปฏิกิริยา 4.5 นาโนโมลของกรดมาโลนิคต่อกรัม และทรายที่ผ่านการล้างด้วยน้ำกลั่นธรรมดามีหมู่เอมีนที่ไวต่อปฏิกิริยาเพียง 2.7 นาโนโมลของกรดมาโลนิคต่อกรัม

จะเห็นได้ว่าการกระตุ้นตัวพยุงด้วยเอพีทีเอส เป็นการเพิ่มหมู่เอมีนที่ไวต่อปฏิกิริยาให้แก่ตัวพยุงทรายซึ่งคิดเป็น11นาโนโมลของกรดมาโลนิคต่อกรัม หากจะเปรียบเทียบกับการทดลองของ Brotherton (30) แล้วการทดลองนี้ให้ปริมาณหมู่เอมีน

ที่ไวต่อปฏิกิริยามากกว่า ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการแช่ทรายด้วยกรด แล้วนำมาเผาที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เป็นวิธีการเตรียมตัวพยุงที่มีประสิทธิภาพมากกว่าและการใช้สารละลายเอพีทีเอส ในอะซีโตนนั้นเป็นวิธีการกระตุ้นตัวพยุงที่ดีกว่า การใช้สารละลายเอพีทีเอสในน้ำกลั่น

Thomplison , Angelo และ Mathur (33) ทดลองตรึงรูปเรนินตัวพยุงบนทรายโดยใช้เอพีทีเอสและกลูตารัลดีไฮด์ โดยนำทรายแม่น้ำขนาด 50 เมชแช่ในกรดไนตริค ความเข้มข้น 14 นอร์มัล จากนั้นนำมาล้างด้วยน้ำกลั่นหลายๆ รอบ เติมเอพีทีเอสความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยปริมาตร บ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ล้างเอพีทีเอสออกด้วยน้ำกลั่น เติมกลูตารัลดีไฮด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยปริมาตร บ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ล้างกลูตารัลดีไฮด์ออกด้วยน้ำขจัดไอออน จากนั้นนำมาตรึงรูปเรนิน พบว่าทรายเป็นตัวพยุงที่เหมาะสมสำหรับการตรึงรูปเรนินโดยวิธีเชื่อมพันธะโควาเลนต์

จากงานวิจัยต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วข้างต้นจะเห็นได้ว่า ทรายเป็นตัวพยุงที่เหมาะสมสำหรับการตรึงรูปเอนไซม์โดยใช้เอพีทีเอส เป็นสารกระตุ้นตัวพยุงและกลูตารัลดีไฮด์เป็นสารสร้างพันธะเชื่อม ซึ่งได้ทำการทดลองอย่างกว้างขวางในโปรติเอส ดังนั้นจึงควรนำมาทดลองตรึงรูปในเอนไซม์ชนิดอื่นบ้างเช่นเดกซ์แทรนเนส เพื่อดูศักยภาพของทรายในการเป็นตัวพยุงสำหรับการตรึงรูปเอนไซม์ชนิดอื่นนอกเหนือจากโปรติเอส

2.10 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด (Fluidized bed reactor)

2.10.1 นิยาม

ฟลูอิไดเซชั่น คือ กระบวนการที่ของไหล ซึ่งได้แก่ ของเหลวและก๊าซ ทำให้อนุภาคของของแข็งเกิดการเคลื่อนไหวแบบของไหล (34)

ลักษณะทั่วไปของการเกิดฟลูอิไดเซชั่นจะเกิดภายในภาชนะ ซึ่งนิยมใช้รูปทรงกระบอก บรรจุไว้ด้วยอนุภาคของของแข็ง ซึ่งวางอยู่บนแผ่นกระจายตัว (distributor) ซึ่งอาจเป็นแผ่นวัสดุที่มีรูพรุน เช่น แผ่นเซรามิค หรือโลหะเจาะรูเล็กๆ หรือ ตะแกรงถี่ ชั้นของอนุภาคนี้เรียกว่า เบด (bed) เมื่อของไหลไหลผ่านเบดความดันของของไหลจะลดลง

เนื่องจาก แรงเสียดทานระหว่างของไหลกับผนังภาชนะและแรงเสียดทานระหว่างของไหลกับอนุภาคของของแข็ง ความดันของของไหลที่ลดลงหมายถึง พลังงานจลน์ที่สูญเสียไปเนื่องจากการไหลผ่านภาชนะที่บรรจุด้วยอนุภาคของแข็งซึ่งขึ้นกับความเร็วหรืออัตราการไหลของของไหล ขณะที่ความเร็วต่ำเบดจะไม่มีการเคลื่อนไหว แต่ความดันลดลงมากขึ้น เมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลมากขึ้นจนถึงจุดหนึ่งที่เบดเริ่มมีการเคลื่อนไหว เนื่องจากแรงที่กระทำต่ออนุภาคอยู่ในลักษณะสมดุลย์ อนุภาคพยายามจัดเรียงตัวใหม่เพื่อให้เกิดแรงต้านต่อการไหลลดลงน้อยที่สุดเป็นผลให้อนุภาคเกิดการเคลื่อนไหว ขณะเดียวกันเบดจะมีการขยายตัวทำให้ความสูงของเบดเพิ่มขึ้น ความดันที่วัดได้ขณะนี้จะมีค่าเท่ากับน้ำหนักของอนุภาคหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของเบด เมื่อเพิ่มความเร็วต่อไปอีกเบดจะมีการขยายตัวเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แต่ความดันที่วัดได้มีค่าคงที่ เท่ากับน้ำหนักของเบดหารด้วยพื้นที่หน้าตัด และหากเพิ่มความเร็วต่อไปอีก จนกระทั่งความเร็วของของไหลมีค่าเท่ากับความเร็วที่อนุภาคตกอย่างอิสระ (free falling velocity หรือ terminal velocity) อนุภาคจะหลุดออกจากภาชนะไปพร้อมกับของไหล

2.10.2 ประเภทของฟลูอิไดเซชั่น

2.10.2.1 ฟลูอิไดเซชั่นสองสถานะ (Two-phase fluidization)

หมายถึงในหอทดลอง หรือเบดที่ใช้งานจะประกอบด้วยของสองสถานะ คือของแข็งกับของไหล ซึ่งอาจเป็นของเหลวหรือก๊าซ ซึ่งฟลูอิไดเซชั่นสองสถานะ อาจแบ่งออกเป็น ก๊าซฟลูอิไดเซชั่น (gas fluidization) ฟลูอิไดเซชั่นของเหลว (liquid fluidization)

2.10.2.2 ฟลูอิไดเซชั่นสามสถานะ (Three-phase fluidization)

หมายถึงในหอทดลอง หรือเบดที่ใช้งานประกอบด้วยของสามสถานะอยู่ด้วยกัน คือของแข็ง ของเหลว และก๊าซ

ในกรณีที่สารละลายสับสเตรทมีความข้นหนืดสูง หรือสับสเตรทเป็นก๊าซ หรือผลผลิตเป็นก๊าซ หากนำมาประยุกต์ใช้ในปฏิกิริยาแบบต่อเนื่องแล้วเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดเซชั่นจะเหมาะสมที่สุด เพราะระบบนี้ไม่ต้องระมัดระวังด้านการสูญเสียและสูญสลายของเอนไซม์ตรึงรูปเท่าใดนัก ขนาดของอนุภาคของเอนไซม์ตรึงรูปเป็นปัจจัยสำคัญของการเกิดฟลูอิไดซ์เบด

2.10.3 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดเซชั่นสำหรับการกำจัดเดกซ์แทรนในน้ำอ้อย

2.10.3.1 ความเหมาะสมของการนำเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดเซชั่นมาประยุกต์ใช้กับการกำจัดเดกซ์แทรนในน้ำอ้อยมีข้อได้เปรียบดังนี้

2.10.3.1.1 มีการกำจัดเดกซ์แทรนในน้ำอ้อยอย่างต่อเนื่อง หลังจากที่อ้อยถูกหีบ ก็สามารถส่งน้ำอ้อยส่วนนี้เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์เพื่อกำจัดเดกซ์แทรนได้โดยทันที ไม่จำเป็นต้องมีภาชนะสำหรับจัดเก็บ (storage tank) เหมือนกับกรณีการใช้เอนไซม์อิสระ

2.10.3.1.2 มีการสูญเสียพลังงานน้อย เพราะลดแรงเสียดทานต่อการไหล และความดันตกได้ดีกว่าระบบอื่น

2.10.3.1.3 เพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างเอนไซม์ตรึงรูปกับเดกซ์แทรนในน้ำอ้อยได้มากกว่าระบบอื่น เมื่อใช้เอนไซม์ตรึงรูปจำนวนเท่ากัน

2.10.3.1.4 เพิ่มความเร็วและความสม่ำเสมอของการผสมระหว่างสับสเตรทและเอนไซม์ตรึงรูปได้เนื่องจากเอนไซม์ตรึงรูปมีการเคลื่อนไหวตลอดเวลาเหมือนเครื่องผสม ดังนั้นอุณหภูมิภายในเบดจึงคงที่สม่ำเสมอทั่วทั้งเบดและสามารถกำหนดระดับการย่อยสลายเดกซ์แทรนในน้ำอ้อยได้ โดยกำหนดความเร็วของน้ำอ้อยที่ผ่านเข้าเครื่องปฏิกรณ์ซึ่งการกำจัดเดกซ์แทรนนั้นไม่จำเป็นที่จะต้องย่อยสลายเดกซ์แทรนอย่างสมบูรณ์เพียงย่อยสลายเดกซ์แทรนให้มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า 10,000 ก็เพียงพอต่อการแก้ปัญหาและมีความสะดวกกรณีที่วัตถุดิบที่เข้ามาแต่ละรุ่น มีปริมาณเดกซ์แทรนต่างๆ กันสามารถกำหนดระดับการย่อยสลายจนถึงระดับที่ต้องการได้

2.10.3.2 ข้อเสียเปรียบของระบบฟลูอิไดเซชั่น

การใช้ระบบฟลูอิไดเซชั่นเพื่อกำจัดเดกซ์แทรนในน้ำอ้อยนั้นอาจมีข้อเสียเปรียบบางประการ ทำให้มีข้อกำจัดของการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมบ้างกล่าวคือ

2.10.3.2.1 ระยะเวลาที่เดกซ์แทรนในน้ำอ้อยสัมผัสกับเอนไซม์ตรึงรูปสั้นมาก หากมีปริมาณเดกซ์แทรนในน้ำอ้อยสูงมากเกินไปในวัตถุดิบบางรุ่น

ทำให้ไม่สามารถย่อยสลายเดกซ์แทรนในระดับที่ต้องการได้ จำเป็นต้องใช้เบดสูงขึ้น หรือใช้เบดหลายชั้นหรือสร้างหลายคอลัมน์ ทำให้สิ้นเปลืองเงินลงทุน

2.10.3.2.2 การควบคุมต้องแม่นยำ เนื่องจากความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิไดเซชั่นแปรผกผันกับความหนืดของน้ำอ้อย หากความหนืดของน้ำอ้อยต่างกัน อันเป็นผลเนื่องมาจากปริมาณเดกซ์แทรนในน้ำอ้อยต่างกัน หรือสายพันธุ์ของอ้อยแตกต่างกัน เป็นผลให้ปริมาณสารอื่นๆ เช่น แป้ง และ กัม (gum) มีปริมาณต่างกัน ความหนืดของน้ำอ้อยจะต่างกันด้วย ดังนั้นการควบคุมความเร็วต้องแม่นยำ หากความเร็วของน้ำอ้อยสูงมากเกินไปจะส่งผลให้อนุภาคของเอนไซม์ตรึงรูปหลุดออกไปจากเบดพร้อมกับน้ำอ้อย และเกิดปัญหาการกำจัดออกจากกระบวนการผลิตในที่สุด