บทที่ 2

วารสารปริทรรศน์

น้ำตาลเป็นสารให้ความหวานประเภทหนึ่งที่ผลิตจากอ้อยในประเทศร้อน และบีทในประเทศหนาว นิยมบริโภคกันทั่วโลกมากกว่าสารให้ความหวานที่ผลิตจากวัตถุดิบชนิดอื่น เช่น หญ้าหวานและข้าวโพดที่ในปัจจุบันหลายประเทศได้พยายามนำมาใช้ทดแทนน้ำตาล แต่ไม่สามารถเข้ามาแย่งส่วนแบ่งทางตลาดได้มากนัก เพียงแต่ใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมประเภทเครื่องดื่มเท่านั้น

ในปัจจุบันน้ำตาลเป็นที่นิยมบริโภคกันแพร่หลายทั่วโลก จึงนับได้ว่าเป็นสินค้าที่มีตลาดกว้างขวางและเป็นสินค้าทางเศรษฐกิจของหลายประเทศ เนื่องจากผลิตแล้วมีตลาดจำหน่ายมากกว่าสินค้าประเภทอื่น โดยเฉพาะกลุ่มประเทศกำลังพัฒนาได้มีการส่งเสริมการผลิตเพื่อการส่งออก แสวงหาเงินตราต่างประเทศ ตลอดจนเป็นการกระจายรายได้สู่ประชากร เพราะทำให้เกิดการจ้างงานในโรงงานน้ำตาลและในไร่อ้อยหรือบีทเป็นจำนวนมาก

สำหรับประเทศไทยเป็นประเทศหนึ่งที่ผลิตน้ำตาลจากอ้อยมาเป็นเวลานานแล้ว เนื่องจากอยู่ในสภาพภูมิศาสตร์และมีสภาพดินฟ้าอากาศที่เหมาะสมในการปลูกอ้อย ซึ่งแต่เดิมเป็นการผลิตเฉพาะน้ำตาลทรายแดงที่ไม่ได้ใช้เทคโนโลยีในการผลิต เพียงใช้วิธีการเคี่ยวโดยอาศัยแรงงานคนภายในครัวเรือนเท่านั้น หลังจากนั้นก็ได้พัฒนาการผลิตมาเรื่อยๆ จนมีการผลิตน้ำตาลทรายขาวที่เป็นผลึกโดยอาศัยเทคโนโลยีเข้ามาช่วย ดังนั้นในปี 2480 รัฐบาลจึงได้ส่งเสริมให้มีการผลิต โดยจัดตั้งให้มีโรงงานผลิตน้ำตาลทรายขาวขึ้นเป็นแห่งแรกที่จังหวัดลำปาง จากนั้นก็ได้รับการส่งเสริมเรื่อยมา จนกระทั่งถึงปัจจุบันประเทศไทยมีโรงงานน้ำตาลทั้งสิ้น 46 โรง

ความสำคัญของน้ำตาล

น้ำตาลเป็นสินค้าที่ได้จากอุตสาหกรรมเกษตร ที่ใช้วัตถุดิบที่เป็นสินค้าการเกษตรคือ อ้อย แต่น้ำตาลให้มูลค่าเพิ่มของผลผลิตมากกว่าอ้อย ในขณะเดียวกันน้ำตาลก็ยังนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตสินค้าเกษตรกรรมอื่นๆ เช่น อุตสาหกรรมผลิตอาหาร นมข้นหวาน และเภสัชกรรมเป็นต้น จึงนิยมผลิตน้ำตาลทรายมากกว่านำอ้อยไปบริโภค อุตสาหกรรมน้ำตาลนอกจากผลิตน้ำตาลออกมาแล้ว ยังมีผลพลอยได้ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อีกคือ กากน้ำตาล สามารถนำไปใช้ใน

อุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมผงชูรส การผลิตอาหารสัตว์ การผลิตแอลกอฮอล์ เป็นต้น สำหรับกากอ้อยก็สามารถนำไปใช้ผลิตกระดาษ ไม้อัด และโรงงานน้ำตาลส่วนใหญ่นิยมใช้กากอ้อยเป็นเชื้อเพลิงในโรงงาน

ประเภทของน้ำตาล (สุภัทรา น.วรรณพิณ และ พวงเพชร สุรัตนกวีกุล, 2541)

น้ำตาลที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีหลายชนิดและมีคุณสมบัติแตกต่างกันไป โดยสามารถแบ่งน้ำตาลออกเป็นชนิดต่างๆตามลักษณะการผลิตได้ดังนี้ คือ

1. น้ำตาลพื้นบ้าน หรือน้ำตาลที่ไม่เป็นเกล็ด (Non-centrifugal Sugar) คือ น้ำตาลที่ยังไม่ได้ผ่านการปั่นเพื่อแยกกากน้ำตาลและผลึกน้ำตาลออกจากกัน การผลิตมักจะทำกันแบบง่ายๆภายในครัวเรือนโดยไม่ต้องอาศัยเครื่องจักร พืชที่เป็นวัตถุดิบในการผลิตได้แก่ อ้อย มะพร้าว ตาล ต้นจาก น้ำตาลชนิดนี้ได้แก่

1.1 น้ำตาลทรายแดง (Soft Brown Sugar) มีลักษณะเป็นผงละเอียดจับกันเป็นก้อน มีความชื้นมาก มีสีน้ำตาลอ่อนถึงเข้ม ผลิตจากอ้อยโดยการเคี่ยวในกระทะ

1.2 น้ำตาลปี๊บ มีลักษณะเป็นก้อนเหนียว มีความหนืดสูง ผลิตจากต้นตาล มะพร้าว และต้นจาก

1.3 น้ำตาลกรวด มีลักษณะเป็นก้อนเหลี่ยม สีขาวใส ผลิตจากน้ำเชื่อมโดยทิ้งให้ตกผลึกเอง น้ำตาลชนิดนี้จะมีความหวานน้อยกว่าน้ำตาลชนิดอื่น

2. น้ำตาลที่ผลิตจากโรงงานอุตสาหกรรมหรือน้ำตาลเกล็ด (Centrifugal Sugar) เป็นการผลิตโดยใช้เครื่องจักรและเทคนิคสมัยใหม่ น้ำตาลที่ได้จะอยู่ในรูปของผลึกที่เกิดจากการปั่นแยกกากน้ำตาลและผลึกน้ำตาลออกจากกัน วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตได้แก่ อ้อย หัวบีทและเมเบิล น้ำตาลชนิดนี้ได้แก่

2.1 น้ำตาลทรายดิบ (Raw Sugar) เป็นน้ำตาลที่มีผลึกเป็นสีน้ำตาลเข้ม ถูกห่อหุ้มไปด้วยกากน้ำตาลจำนวนมาก มีความชื้นสูง มีความบริสุทธิ์ต่ำเพราะไม่ได้ผ่านการฟอกสีเพื่อทำให้มีความบริสุทธิ์สูงขึ้น ผลึกน้ำตาลจะเกาะติดกันไม่ร่วนเหมือนน้ำตาลสีรำ

2.2 น้ำตาลทรายสีรำ (Brown Sugar) มีลักษณะเป็นเกร็ดใส แต่เกร็ดเล็กกว่าน้ำตาลทรายดิบเล็กน้อย มีขนาดเดียวกับน้ำตาลทรายขาวทั่วไป สีน้ำตาลอ่อนหรือสีคล้ายรำ มีความชื้นน้อยกว่าน้ำตาลดิบ น้ำตาลทรายสีรำส่วนมากผลิตจากน้ำตาลทรายแดงและน้ำเชื่อมที่มีความบริสุทธิ์ต่ำ กระบวนการผลิตน้ำตาลทรายสีรำส่วนใหญ่คล้ายกับการผลิตน้ำตาลทรายขาว แต่ในกรรมวิธีทำบริสุทธิ์นั้นทำอย่างง่ายๆเพียงบางส่วน สีของน้ำตาลนี้จึงยังไม่ขาวสะอาด

2.3 น้ำตาลทรายขาว (Plantation white sugar) มีลักษณะเป็นผลึกสีขาว มีความบริสุทธิ์สูง เป็นเกร็ดใสมีสีขาวถึงสีเหลืองอ่อน มีความชื้นเล็กน้อย เกร็ดน้ำตาลร่วนไม่ติดกันมีกากน้ำตาลอยู่เป็นส่วนน้อย ปกติน้ำตาลชนิดนี้ผลิตจากอ้อยโดยตรง สำหรับโรงงานที่มีลูกหีบ และผ่านกรรมวิธีฟอกสีโดย คาร์บอเนชัน (Carbonation) และ ซัลฟิเทชัน (Sulphitation)

2.4 น้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์ (Refined Sugar) มีลักษณะเป็นผลึกใสสะอาด มีความบริสุทธิ์สูงมีสีขาวใสปราศจากกากน้ำตาล เกือบไม่มีความชื้นเลย ในการผลิตน้ำตาลทรายขาวนั้นปกติใช้น้ำตาลทรายดิบเป็นวัตถุดิบ

น้ำตาลไม่ว่าชนิดใดก็ตามหมายถึงน้ำตาลซูโครสที่ใช้บริโภคกันทั่วโลกนั้นเอง ดังนั้นแต่ละประเทศจึงพยายามคิดค้นวิธีการผลิตน้ำตาลซูโครสออกมาในรูปแบบต่างๆกันเพื่อการบริโภคและซื้อขายแลกเปลี่ยน กรรมวิธีการผลิตน้ำตาลจากอ้อยหรือพืชที่ให้น้ำตาลอื่นๆนั้น ก็มีขั้นตอนการผลิตแตกต่างกันไป สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลกล่าวถึงกระบวนการผลิตน้ำตาลจากอ้อย โดยประกอบด้วยขั้นตอนหลักๆดังต่อไปนี้

ขั้นตอนการผลิตน้ำตาล

1. **การเตรียมอ้อยป้อนลูกหีบ** ขั้นตอนนี้เป็นจุดสำคัญอันดับแรกของขบวนการผลิตน้ำตาลทราย จะต้องดูแลใกล้ชิดเพราะเป็นจุดที่ช่วยให้สารสกัดน้ำอ้อยหรือน้ำตาลจากอ้อยได้มากที่สุด โดยการแปรรูปอ้อยให้อยู่ในสภาพที่ชุดลูกหีบสามารถสกัดน้ำอ้อยหรือน้ำตาลจากอ้อยได้อย่างสะดวกราบรื่นและอย่างมีประสิทธิภาพสูง

2. **การสกัดน้ำอ้อย** ในขั้นตอนนี้อ้อยมีลักษณะเป็นฝอยหรือเป็นเส้นยาวละเอียดพอควร การเตรียมอ้อยป้อนชุดลูกหีบจะมีประสิทธิภาพอยู่ในระดับที่ดี ถ้าเซลล์อ้อยถูกทำลายให้แตกได้ประมาณร้อยละ 80–85 เครื่องมือที่ใช้สกัดน้ำอ้อยโดยทั่วไปได้แก่ชุดลูกหีบล้วนๆ บางโรงงานอาจใช้เครื่องสกัดน้ำอ้อยแบบใหม่เรียกว่า ดิฟฟิวเซอร์ (diffuser) แต่โรงงานน้ำตาลทั่วไปยังนิยมใช้ชุด

ลูกหีบล้วนๆ ซึ่งติดตั้งเป็นแถวต่อเนื่องกัน แถวหนึ่งอาจประกอบด้วยชุดลูกหีบ 4 – 5 ชุด หรือมากกว่า ลูกหีบชุดหนึ่งๆ ใช้ลูกกลิ้ง 3 ลูก เพื่อช่วยจับยึดอ้อยที่ป้อนเข้ามาและคายออกไป และช่วยสกัดน้ำอ้อยระบายลงรางรับน้ำอ้อย จากการสกัดน้ำอ้อยจะได้น้ำอ้อยที่เรียกว่าน้ำอ้อยรวม (Mixed juice)

3. **การทำน้ำอ้อยให้บริสุทธิ์** น้ำอ้อยรวมที่ได้จากลูกหีบ จะมีค่าความเป็นกรดเบส ประมาณ 5.5 มีสีเขียวคล้ำ ขุ่น ดังนั้นจึงต้องกำจัดความขุ่น สี และทำให้ได้น้ำอ้อยเป็นกลางหรือกำจัดสิ่งปนเปื้อนออก กระบวนการที่ใช้ในการทำให้น้ำอ้อยใสมีอยู่ 3 กระบวนการ คือ วิธีดีเฟกชัน (Defection) เป็นการใช้ปูนขาวและความร้อน โดยปูนขาวจะปรับน้ำอ้อยให้เป็นกลาง น้ำอ้อยผสมปูนขาวนำไปให้ความร้อนจนเดือด เกิดการจับตัวเป็นก้อนของสารประกอบปูนขาวโดยน้ำตาลดิบที่ได้จะไม่ใช้ในการบริโภคแต่จะใช้ในการผลิตน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์ วิธีซัลฟิเทชัน หมายถึงการฟอกสีแยกสิ่งสกปรกออกจากน้ำอ้อยด้วยแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และวิธีคาร์บอเนชัน หมายถึงการฟอกสีแยกสิ่งสกปรกออกจากน้ำอ้อยด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

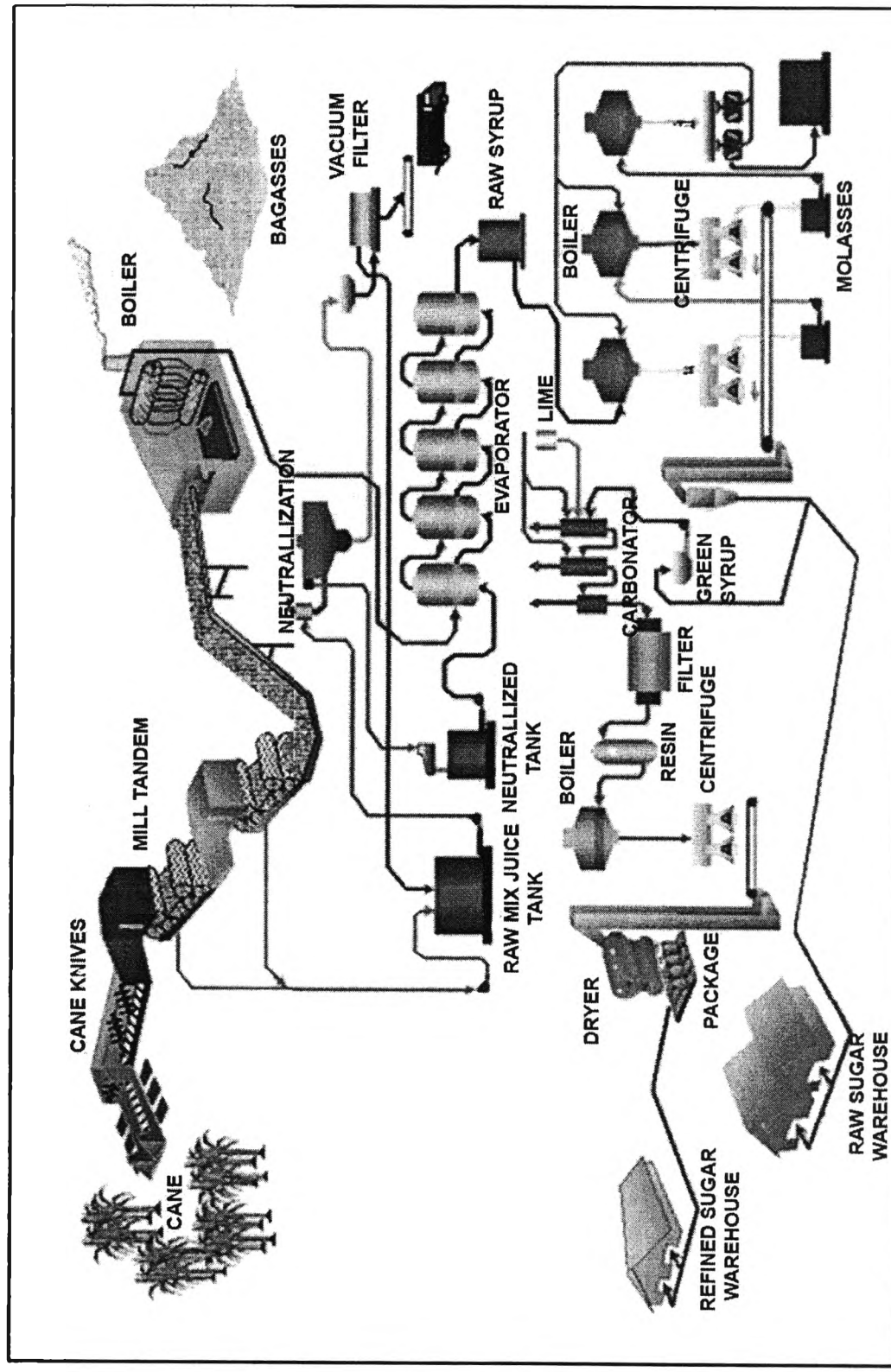
4. **การต้มน้ำอ้อยเป็นน้ำเชื่อม** น้ำอ้อยใสที่ผ่านกรรมวิธีที่ทำให้บริสุทธิ์ตามกรรมวิธีต่างๆดังกล่าวข้างต้น จะถูกส่งเข้าชุดหม้อต้มซึ่งทำงานต้มระเหยต่อเนื่อง จนออกมาเป็นน้ำเชื่อมที่มีความเข้มข้นตามต้องการ หม้อต้มที่ใช้อาจเป็นระบบ 4–6 ชุด ซึ่งชุดหนึ่งๆอาจประกอบด้วยหม้อต้ม 1 ใบหรือมากกว่านั้น หม้อต้มชุดแรกหรือใบแรกจะใช้ไอเสียจากความร้อนเครื่องจักรกลชนิดใช้ไอน้ำ ส่วนไอระเหยของน้ำอ้อยที่เกิดขึ้นในหม้อต้มชุดแรกหรือใบแรกจะถูกป้อนเข้าถังไอของหม้อต้มชุดต่อไป เป็นเช่นนี้ต่อเนื่องกันไปจนถึงหม้อต้มชุดสุดท้ายหรือใบสุดท้าย โดยวิธีการนี้ความร้อนจากการควบแน่นไอน้ำ 1 กิโลกรัม อาจใช้ระเหยน้ำได้ถึง 4 หรือ 5 กิโลกรัม เพราะไอน้ำที่ได้จากการระเหยน้ำในหม้อต้มชุดแรกนำไปทำให้ควบแน่นและคายความร้อนเพื่อใช้ในการระเหยน้ำจากน้ำอ้อยชุดถัดไป การทำงานในชุดหม้อต้มนี้จะอยู่ภายใต้สุญญากาศ เพื่อทำให้จุดเดือดของน้ำอ้อยต่ำลง เป็นการป้องกันการเสื่อมของน้ำตาลในน้ำอ้อย

5. **การทำน้ำเชื่อมให้บริสุทธิ์** น้ำเชื่อมที่ได้จากชุดหม้อต้มจะส่งเข้าไปถังพัก ในการผลิตน้ำตาลทรายดิบโดยทั่วไปน้ำเชื่อมจะถูกป้อนเข้าหม้อเคี่ยวโดยตรง ยกเว้นในกรณีที่ต้องการน้ำตาลทรายดิบคุณภาพสูงและเพื่อเพิ่มความสะดวกในการเคี่ยวและปั่นแยกเม็ดน้ำตาล จะมีการทำน้ำเชื่อมให้บริสุทธิ์เฉพาะ การแยกสารไม่บริสุทธิ์จำพวกสารของแข็งแขวนลอย ซึ่งเป็นต้นเหตุให้น้ำเชื่อมขุ่นมัวและมีความหนืดสูง ส่วนการผลิตน้ำตาลทรายขาวโดยตรงจากอ้อยและกรณีการผลิตน้ำตาลทรายบริสุทธิ์จากน้ำตาลทรายดิบ จะใช้กรรมวิธีการฟอกสีน้ำเชื่อมแบบต่างๆ เทคโนโลยีที่ใช้มีหลายวิธีแตกต่างกันไปดังที่กล่าวมาแล้ว

6. **การตกผลึกน้ำตาลทราย** น้ำเชื่อมที่ผ่านกรรมวิธีทำให้บริสุทธิ์แล้ว จะถูกส่งต่อไปยังหม้อเคี่ยวเพื่อเคี่ยวให้เป็นเม็ดน้ำตาลทรายในระบบการเคี่ยวแบบสุญญากาศ จะต้มเคี่ยวระเหยน้ำเชื่อมจนอิ่มตัว และที่จุดอิ่มตัวนี้จะเติมเชื้อลงไปเพื่อเป็นแกนสำหรับผลึกน้ำตาล เติมน้ำเชื่อมเพื่อเลี้ยงผลึกให้โต เคี่ยวต่อไปจนเต็มหม้อเคี่ยว ผลึกน้ำตาลที่ได้ควรมีขนาดใกล้เคียงกัน ผลึกน้ำตาลและน้ำเชื่อมที่รวมกันอยู่เรียกว่า แมสคิต (Massecuite) เมื่อเคี่ยวเสร็จจะปล่อยออกทางวาล์วด้านล่างของหม้อเคี่ยวลงไปในรางพักเกล็ด เพื่อรอการนำมาปั่นแยกเม็ดน้ำตาล

7. **การปั่นแยกเม็ดน้ำตาลทราย** การแยกเม็ดน้ำตาลออกจากแมสคิตชนิดต่างๆ นั้นอาศัยการทำงานของหม้อปั่นน้ำตาลซึ่งมีหลายแบบหลายชนิด โดยทั่วไปหม้อน้ำตาลมักจะทำด้วยเหล็กอ่อนหรือเหล็กกล้าหรือโลหะผสมนิเกิลหรือเหล็กกล้าไร้สนิม มีรูที่ข้างหม้อเป็นแถวสำหรับระบายกากน้ำตาลขณะหม้อปั่นทำงาน โดยกากน้ำตาลจะแยกตัวจากแมสคิตด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ทิ้งเม็ดน้ำตาลให้ค้างบนตะแกรงหม้อปั่นแล้วลอดผ่านแผ่นโครงรองรับตะแกรงซึ่งอยู่ระหว่างแผ่นตะแกรงกับผนังด้านข้างของตัวหม้อปั่นออกไปปะทะกับถังหุ้มหม้อปั่นรวมตัวกันไหลออกจากช่องระบายกากน้ำตาลหลังหม้อปั่น เทคโนโลยีที่ใช้ในการกวาดเม็ดน้ำตาลที่เกาะอยู่บนตะแกรงข้างหม้อปั่น การล้างเม็ดน้ำตาลและการลำเลียงเม็ดน้ำตาลทรายออกจากหม้อปั่นแตกต่างกันตามชนิดของน้ำตาลทราย

8. **การอบบรรจุหรือเก็บน้ำตาล** น้ำตาลทรายขาวหรือน้ำตาลทรายบริสุทธิ์ที่ออกจากหม้อปั่นปกติจะมีความชื้นอยู่ในช่วง 1–2 % ยกเว้นจะมีการใช้ไอน้ำอบไล่ความชื้นบางส่วนออกไปก่อน อย่างไรก็ตามถ้าปล่อยให้มีความชื้นอยู่กับเม็ดน้ำตาลทรายดังกล่าว น้ำตาลที่ชื้นนี้จะเสื่อมคุณภาพเร็วและถูกทำลายได้โดยง่าย ดังนั้นจึงต้องมีการนำน้ำตาลที่ออกจากหม้อปั่นไปผ่านหม้ออบน้ำตาลก่อนนำไปบรรจุและเก็บต่อไป



รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงกระบวนการผลิตน้ำตาลทราย

ที่มา : http://www.wangkanai.com

ประเทศไทยในปีเพาะปลูก 2547/48 มีพื้นที่เพาะปลูกอ้อย 6.34 ล้านไร่ ได้ผลผลิตอ้อยประมาณ 47.82 ล้านตัน และแนวโน้มการผลิตอ้อยของไทยมีอัตราการเพิ่มของผลผลิตตลอดช่วงระยะเวลา 10 ปี ที่ผ่านมา ในขณะที่ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีศักยภาพต่อการเพาะปลูกอ้อยและมีพื้นที่เพาะปลูกอ้อยที่มีความเหมาะสม ดังนั้นการส่งเสริมการปลูกอ้อยจึงถือว่าเป็นสาขาอาชีพที่จะสามารถสร้างงาน และสร้างรายได้ให้กับเกษตรกรได้อย่างยั่งยืน หากรัฐบาลและโรงงานน้ำตาลทรายมีความสามารถในการแข่งขันการส่งออก จะสามารถสร้างตลาดให้มีความต้องการน้ำตาลของไทยเพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 2.1 พื้นที่เพาะปลูก ผลผลิตอ้อยและน้ำตาลของไทย ตั้งแต่ปีการผลิต 2541/42-2547/48

ปีเพาะปลูก	พื้นที่เพาะปลูก (ล้านไร่)	ผลผลิตอ้อย (ล้านตัน)	ผลผลิตน้ำตาล (ล้านตัน)
2541/42	5.46	50.06	5.19
2542/43	5.88	53.13	5.52
2543/44	5.85	48.65	4.99
2544/45	6.04	59.49	6.18
2545/46	6.65	74.07	7.28
2546/47	6.83	64.48	7.01
2547/48	6.34	47.82	5.18

ที่มา : รายงานผลการผลิตน้ำตาลทรายฤดูการผลิตปี 2541/42 – 2547/48 ฝ่ายวิชาการและวางแผน ศูนย์บริการการผลิต สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย

ส่วนการผลิตน้ำตาลของไทยในปี 2547/48 สามารถผลิตน้ำตาลได้ทั้งสิ้น 5.18 ล้านตัน จากโรงงานน้ำตาลทราย 46 โรง ที่กระจายอยู่ทั่วประเทศ และมีมูลค่าการผลิตน้ำตาลทรายประมาณห้าหมื่นล้านบาท ซึ่งประเทศไทยสามารถผลิตน้ำตาลทรายได้เป็นอันดับ 4 ของโลก รองจากบราซิล อินเดีย และสหภาพยุโรป แต่ในด้านการส่งออกประเทศของเราส่งออกน้ำตาลเป็นอันดับ 2 ของโลกรองจากบราซิล โดยมีปริมาณการส่งออกในปี 2546/47 ถึง 5.11 ล้านตัน มีตลาดนำเข้าที่สำคัญได้แก่ อินโดนีเซีย รัสเซีย สหรัฐอเมริกาและจีน จึงกล่าวได้ว่าประเทศไทยเป็นผู้ผลิตและส่งออกน้ำตาลรายใหญ่ของโลก

ตารางที่ 2.2 ปริมาณการผลิตน้ำตาลของประเทศที่สำคัญ

ประเทศ	2547/48 (ล้านตัน) ประมาณการ	2546/47 (ล้านตัน)	2545/46 (ล้านตัน)	2544/45 (ล้านตัน)	2543/44 (ล้านตัน)
บราซิล	31.426	26.472	24.397	22.286	18.133
สหภาพยุโรป	19.957	19.701	21.834	19.133	21.420
อินเดีย	14.729	14.995	21.902	20.159	20.106
ไทย	7.100	7.460	7.670	6.494	5.439
ออสเตรเลีย	5.456	5.255	5.536	4.752	4.401

ที่มา : รายงานประจำปี 2547 บริษัทอ้อยและน้ำตาลไทยจำกัด

ตารางที่ 2.3 ปริมาณการส่งออกน้ำตาลของประเทศผู้ส่งออกน้ำตาลที่สำคัญ

ประเทศ	2547/48 (ล้านตัน) ประมาณการ	2546/47 (ล้านตัน)	2545/46 (ล้านตัน)	2544/45 (ล้านตัน)	2543/44 (ล้านตัน)
บราซิล	18.336	15.785	14.006	12.660	8.980
ไทย	4.984	5.117	4.746	4.565	3.664
ออสเตรเลีย	4.201	3.670	3.937	3.829	3.108
อินเดีย	2.084	0.310	2.023	1.143	1.138
สหภาพยุโรป	1.724	1.151	2.843	1.408	4.234

ที่มา : รายงานประจำปี 2547 บริษัทอ้อยและน้ำตาลไทยจำกัด

จากการเติบโตของอุตสาหกรรมน้ำตาลภายในประเทศ ทำให้พื้นที่ในการเพาะปลูกอ้อยเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมากผลที่ตามมาคือการขาดแคลนแรงงานในการเก็บเกี่ยวอ้อย ปัจจุบันเกษตรกรจึงนิยมเผาต้นอ้อย เพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการเก็บเกี่ยว การเผาอ้อยนั้นทำให้ความร้อนในบรรยากาศเพิ่มขึ้น ในการเผานอกจากจะเป็นการทำลายระบบนิเวศแล้ว ยังเป็นการคัดเลือกเชื้อจุลินทรีย์ในดินที่ติดมากับบาดแผลของอ้อยที่ถูกเผาไฟ ก่อให้เกิดปัญหาในการผลิตต่อมา คาดกันว่าต่อไปอาจมีการประกาศกันว่าน้ำตาลที่มีการซื้อขายในตลาดโลกนั้นต้องได้จากอ้อยที่ไม่เผา การซื้อขายน้ำตาลในตลาดโลกอาจมีการกำหนดมาตรฐานออกมาเพื่อกีดกัน ดังนั้นปัญหาอ้อยไฟไหม้จึงเป็นปัญหาที่สำคัญมากในอุตสาหกรรมน้ำตาล

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบปริมาณอ้อยสดและอ้อยไฟไหม้ที่เข้าหีบตั้งแต่ปีการผลิต 2542/43 – 2547/48

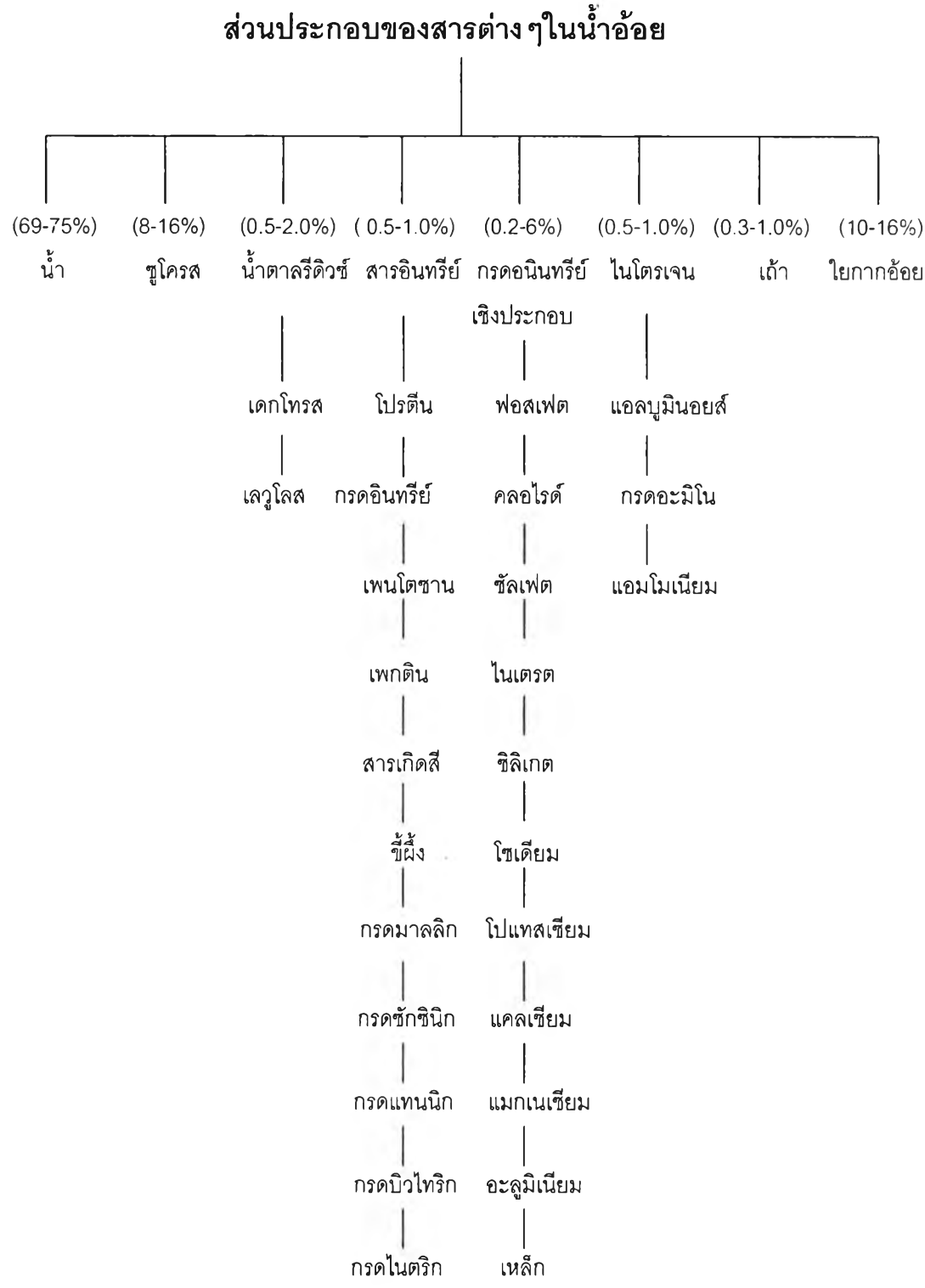
ปีการผลิต	ปริมาณอ้อยเข้าหีบ(ล้านตัน)			
	อ้อยสด	ร้อยละ	อ้อยไฟไหม้	ร้อยละ
2542/43	22.610	42.56	30.518	57.44
2543/44	20.488	42.11	28.162	57.89
2544/45	25.941	43.60	33.552	56.40
2545/46	29.485	39.81	44.586	60.19
2546/47	35.958	55.76	28.525	44.24
2547/48	25.108	52.51	22.107	47.49

ที่มา : รายงานผลการผลิตน้ำตาลทรายฤดูการผลิตปี 2542/43 – 2547/48 ฝ่ายวิชาการและวางแผน ศูนย์บริการการผลิต สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย

อิทธิพลของจุลินทรีย์ในอุตสาหกรรมน้ำตาลทราย

ในระหว่างกรรมวิธีการผลิตน้ำตาลทรายนั้น พวกจุลินทรีย์ที่ติดมากับบาดแผลอ้อยไหม้ไฟส่วนมากจะเป็นจุลินทรีย์ที่สามารถใช้น้ำตาลซูโครสซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในน้ำอ้อยเป็นอาหารและสร้างสารที่เป็นเมือกเหนียวที่เรียกว่าเดกซ์แทรนออกมา ได้แก่ จุลินทรีย์ในกลุ่ม *Leuconostoc* spp. (Tsuchyia และคณะ, 1952) พวกจุลินทรีย์ต่างๆจะทำให้เกิดการสูญเสียน้ำตาลในน้ำอ้อยรวม โดยถ้าทิ้งน้ำอ้อยไว้ 6 ชั่วโมง จะสูญเสียซูโครสไปถึง 14.3 % และถ้าเป็นอ้อยที่เผาไฟเมื่อไม่นำมาหีบประมาณ 7-8 วัน หลังไฟไหม้ความบริสุทธิ์จะลดลง 4.16–5.9 % ตามลำดับ (สามชัย ไชยทิพย์อาสน์, 2508) นอกจากนี้ยังทำให้เกิดภาวะการต้มเคี่ยวช้ากว่าปกติ เกิดภาวะผลึกน้ำตาลมีลักษณะเป็นเข็มและการกรองยากขึ้น ภาวะที่กล่าวมาทั้งหมดนี้เป็นสาเหตุที่ทำให้ประสิทธิภาพการผลิตของโรงงานลดลงอย่างมาก โดยเฉพาะอ้อยที่ผ่านการเผาไฟ จุลินทรีย์ใช้น้ำตาลในกลุ่ม *Leuconostoc* spp. ซึ่งสามารถสร้างสปอร์และทนความร้อนได้ ก็จะสามารถเจริญได้โดยไม่มีการแข่งขันจึงมีการสร้างเดกซ์แทรนในปริมาณที่มากตามมา แม้ว่าหลังจากผ่านขั้นตอนการทำใสจุลินทรีย์ในกลุ่ม *Leuconostoc* spp. จะถูกทำลายและเดกซ์แทรนขนาดโมเลกุลใหญ่ตกตะกอนแต่ก็ยังมีเดกซ์แทรนหรือพอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลเล็กๆ อีกมากมายซึ่งสามารถจับตัวกันเป็นโมเลกุลใหญ่ในขั้นตอนการทำให้เข้มข้นได้อีก เดกซ์แทรนจึงจัดเป็นปัญหาที่สำคัญในอุตสาหกรรมน้ำตาลด้วย

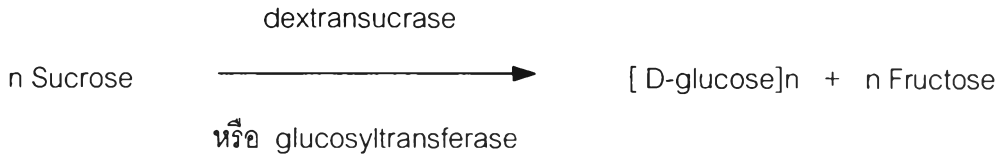
อุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลถือว่าเป็นอุตสาหกรรมใหญ่เกี่ยวพันกับชีวิต ความเป็นอยู่และสิ่งแวดล้อม การพิจารณาเรื่องการเผาอ้อยจึงควรพิจารณาทุกรูปแบบทั้งด้านสังคม สิ่งแวดล้อม เทคโนโลยี และการตลาด กฎเกณฑ์ต่างๆที่ตั้งขึ้นมาไม่ควรเน้นไปที่การปรับหรือลงโทษ ผลที่ต้องการคือ การลดปริมาณของอ้อยเผา การรณรงค์ต้องใช้เวลานานและการให้ความรู้อย่างถูกต้อง และต้องกระทำอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้ต้องมีการร่วมมือกันทั้งภาครัฐบาล ภาคเอกชนและเกษตรกร



รูปที่ 2.2 แสดงส่วนประกอบของสารต่างๆในน้ำอ้อย (อัสวิทย์ ปัทมะเวนณุ, 2539)

เดกซ์แทรน(Dextran)

เดกซ์แทรนเป็นพอลิแซ็กคาร์ไรด์ชนิดหนึ่งที่ประกอบไปด้วยหน่วยย่อยเป็นน้ำตาล ดี-กลูโคส (D-glucose) มาเชื่อมต่อกันเป็นสายยาวด้วยพันธะ α1,6 เป็นแกนหลักประมาณ 60-90% และอาจมีการแตกแขนงออกเป็นพันธะ α1,3 และ α1,4 โดยจะมีลักษณะเป็นเมือกเหนียว ละลายได้ยาก เดกซ์แทรนเกิดจากปฏิกิริยาการย่อยสลายน้ำตาลซูโครส โดยอาศัยเอนไซม์เดกซ์แทรนซูเครส (dextransucrase) หรือกลูโคซิลทรานสเฟอเรส (glucosyltransferase) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำตาลฟรุกโทสและน้ำตาลกลูโคส จากนั้นกลูโคสแต่ละตัวจะมาเรียงต่อกันเป็นสายยาวของเดกซ์แทรนดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การสังเคราะห์เดกซ์แทรนจากซูโครสโดยเดกซ์แทรนซูเครส (Barnes, 1974)

เดกซ์แทรนที่จุลินทรีย์แต่ละชนิดสร้างขึ้นจะมีความยาว ขนาดโมเลกุลและจำนวนแขนงย่อยแตกต่างกัน โดยจะมีขนาดโมเลกุลตั้งแต่หลายพันไปจนถึงหลายล้านดาลตัน น้ำหนักโมเลกุลที่มากและการแตกแขนงของพันธะกลูโคส จะทำให้ความสามารถในการละลายน้ำของเดกซ์แทรนลดลง จุลินทรีย์ที่พบว่าสามารถสร้างเดกซ์แทรนซูเครสได้ดี คือกลุ่มของ *Leuconostoc* sp., *Streptococcus* sp., *Acetobacter* sp. และ *Betabacterium* sp. แต่ที่พบมากคือ *Leuconostoc mesenteroides* และ *Leuconostoc dextranicum* โดยที่จุลินทรีย์เหล่านี้จะปนเปื้อนมากับบาดแผลของอ้อยที่ไฟไหม้ และสามารถเปลี่ยนน้ำตาลซูโครสในน้ำอ้อยให้เป็นเดกซ์แทรน (Irvine, 1981) ก่อเกิดปัญหาในกระบวนการผลิตน้ำตาล

ประเทศไทยนั้นประสบปัญหาการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ที่ผลิตเดกซ์แทรนมาเป็นเวลานานแล้ว จากการสำรวจพบว่ามีโรงงานน้ำตาลที่มีปัญหาเกี่ยวกับการต้มเคี่ยว ตกผลึก และความเร็วของการทำงานซึ่งเป็นผลมาจากความหนืดของเดกซ์แทรนที่เกาะติดอยู่กับผิวต่างๆ เช่น ท่อส่งน้ำอ้อย ถัง เครื่องกรอง และอุดตัน เป็นผลให้อัตราการไหลของน้ำอ้อยต่ำลง เกิดการล่าช้าของการต้มเคี่ยวอันเนื่องมาจากสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ลดลง ขนาดรูปร่างและผลึกน้ำตาลที่ไม่ได้มาตรฐาน (กล้าณรงค์ ศรีรอด, 2540) โดยปริมาณเดกซ์แทรนร้อยละ 1 สามารถเพิ่มความหนืดของน้ำอ้อยได้ 2 เท่า และถ้ามีเดกซ์แทรนร้อยละ 6 จะสามารถเพิ่มความหนืดของสารละลายได้ถึง 37 เท่า (สามชัย ไชยทิพย์อาสน์, 2508) นอกจากนี้ความเหนียวหนืดของเดกซ์แทรนนั้นยังทำให้แบคทีเรียอื่นๆ ที่ปนเปื้อนมาในน้ำอ้อยสามารถยึดเกาะไว้ (บุญส่ง แสงอ่อน, 2527) แล้วย่อยสลายน้ำตาลปลดปล่อยกรดอินทรีย์ต่างๆออกมา เช่น กรดแลคติก กรดบิวทิริก ซึ่งจะทำให้ความเป็นกรดของน้ำอ้อยเพิ่มขึ้นเป็นสาเหตุให้น้ำอ้อยบูดเปรี้ยว สำหรับฟรุกโตสที่เหลืออยู่ก็จะสลายตัวเป็นกรดอินทรีย์และสารประกอบที่มีสี ทำให้การเกิดผลึกของน้ำตาลช้าลงหรือเกิดได้ไม่สมบูรณ์ (สันต์ ฉายตระกูล, 2525)

เดกซ์แทรนจึงเป็นอุปสรรคสำคัญ ที่ทำให้เกิดความสูญเสียในกระบวนการผลิตน้ำตาล ก่อให้เกิดการสูญเสียรายได้ของโรงงานน้ำตาลในแต่ละปีเป็นจำนวนมาก ดังนั้นถ้าสามารถป้องกันการเกิดหรือกำจัดเดกซ์แทรนออกไปได้ก็จะช่วยลดความเสียหายที่เกิดขึ้นได้ สำหรับการป้องกันการเกิดเดกซ์แทรนทำได้โดยการยับยั้งการเจริญของเชื้อด้วยวิธีการทางชีวภาพ เช่น การเก็บที่อุณหภูมิต่ำ การใช้ความร้อน การควบคุมความเป็นกรดเบสของน้ำอ้อย และการฉายรังสี หรือวิธีการทางเคมี เช่น การใช้สารเคมีฆ่าหรือยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ซึ่งวิธีการทางชีวภาพนั้นสามารถให้ผลดีเฉพาะในระดับห้องปฏิบัติการเท่านั้น แต่เมื่อไปใช้จริงในโรงงานที่มีขนาดใหญ่จะไม่สามารถทำได้ ส่วนการใช้สารเคมีก็อาจทำให้เกิดการตกค้างไปสู่ผู้บริโภค เมื่อการป้องกันการเกิดเดกซ์แทรนทำได้ยากดังนั้นจึงต้องใช้วิธีกำจัดเดกซ์แทน โดยการกำจัดเดกซ์แทรนในน้ำอ้อยสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การสลายเดกซ์แทรนด้วยกรดร่วมกับการใช้ความร้อน (Monsan และ Paul, 1991) แต่วิธีนี้ปฏิกิริยาเกิดค่อนข้างรุนแรง การตัดโมเลกุลของเดกซ์แทรนจะเป็นแบบสุ่มและอาจทำให้เกิดซูโครสอินเวอร์ชันได้ วิธีต่อมาคือการใช้รังสีอัลตราไวโอเลตหรือคลื่นแสงที่มีความถี่สูงในการกำจัดเดกซ์แทรน (Watson และ Woff, 1955) หรืออาจใช้วิธีการทางชีวภาพ เช่น อัลตราฟิลเทรชัน (ultrafiltration) ในการแยกเดกซ์แทรนออกจากน้ำอ้อยซึ่งวิธีการดังกล่าวมีต้นทุนในการดำเนินงานสูงจึงไม่เป็นที่นิยม

ภายหลังจึงได้มีความสนใจนำเดกซ์แทรนเนสมาใช้ในการกำจัดเดกซ์แทรนที่เกิดขึ้น ซึ่ งถือว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมาก เพราะเดกซ์แทรนเนสเป็นเอนไซม์ที่มีความจำเพาะต่อเดกซ์แทรนสูง ปฏิกิริยาเกิดในภาวะไม่รุนแรง มีความเป็นพิษต่ำ และใช้ในปริมาณน้อยได้ผลสูง (Imrie และ Tilbury, 1972) ผลจากการย่อยสลายเดกซ์แทรน นอกจากจะทำให้โมเลกุลมีความยาวสั้นลง แล้วยังทำให้ความหนืดลดลง (Galvez-Mariscal และ Lopez-Munguia, 1991) สามารถละลายน้ำได้มากขึ้น ช่วยแก้ปัญหาการอุดตันของท่อส่งน้ำอ้อยได้ การใช้เดกซ์แทรนเนสในการกำจัดเดกซ์แทรน นอกจากจะช่วยลดความเสียหายอันเนื่องมาจากเดกซ์แทรนแล้ว ยังทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตน้ำตาลและผลผลิตของน้ำตาลที่ได้เพิ่มสูงขึ้นด้วย

เดกซ์แทรนเนส(dextranase)

เดกซ์แทรนเนส เป็นเอนไซม์ที่มีชื่อเรียกตามระบบว่า α-1,6-glucan-6-glucanohydrolase, E.C.3.2.1.11 มีความจำเพาะต่อการสลายพันธะ α-1,6 ซึ่งเป็นพันธะหลักภายในสายเดกซ์แทรน ผลจากการสลายทำให้เดกซ์แทรนมีขนาดเล็กลงสามารถละลายได้มากขึ้น และคุณสมบัติความหนืดก็จะลดลงด้วย โดยหากผลิตภัณฑ์ที่ได้มีขนาดกลูโคสน้อยกว่า 8 หน่วย แล้วเดกซ์แทรนจะสูญเสียสมบัติความหนืดทั้งหมด เดกซ์แทรนเนสเป็นเอนไซม์ที่ต้องอาศัยสารชักนำ (inducible enzyme) คือ เดกซ์แทรน ในการสร้างและถูกปลดปล่อยออกมานอกเซลล์ (Koenig และ Day, 1989) โดยการสลายพันธะของเดกซ์แทรนทำได้ 2 แบบคือ

1. เอกโซเดกซ์แทรนเนส (Exo-dextranase) ทำงานโดยการย่อยสลายพันธะที่เชื่อมโมเลกุลของกลูโคสจากปลายของสายเดกซ์แทรนด้านใดด้านหนึ่ง เป็นการตัดทีละโมเลกุลของกลูโคสจากปลายสายทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นกลูโคส
2. เอนโดเดกซ์แทรนเนส (Endo-dextranase) ทำงานโดยการย่อยสลายพันธะที่จุดใดจุดหนึ่งของสายเดกซ์แทรน ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นพอลิเมอร์ขนาดต่างๆ อาจเป็น โอลิโกเมอร์ ไดเมอร์ หรือโมโนเมอร์ของน้ำตาลกลูโคสขึ้นอยู่กับความห่างระหว่างจุดที่ตัด

เดกซ์แทรนเนสสามารถพบได้ในจุลินทรีย์หลายชนิด ทั้งในแบคทีเรีย รา ยีสต์ และแอคติโนมัยซีส ดังแสดงในตารางที่ 2.5 จากรายงานพบว่าราเป็นแหล่งที่สำคัญที่สุดในการผลิตเดกซ์แทรนเนสในเชิงพาณิชย์ (Sidebotham, 1974) เนื่องจากมีปริมาณเอนไซม์สูง พบว่าเดกซ์แทรนเนสจากราจะมีการย่อยสลายเดกซ์แทรนแบบเอนโดเดกซ์แทรนเนส โดยที่ผ่านมามีรายงานการวิจัยเกี่ยวกับการผลิตเดกซ์แทรนเนสมากมาย

Fukumoto และคณะ (1971) ได้ศึกษาหาสูตรอาหารเลี้ยงเชื้อที่เหมาะสมต่อการผลิตเดกซ์แทรนเนสจาก *Penicillium luteum* ATCC 966 พบว่าสามารถผลิตเดกซ์แทรนเนสได้ 13 หน่วยต่อมล.

Shukla และคณะ (1989) ศึกษาการผลิตเดกซ์แทรนเนสจากราหลายชนิด เช่น *Penicillium spp., Aspergillus spp , Trichodoma spp.* พบว่า *Penicillium aculeatum* NSI 4 สามารถผลิตเอนไซม์ได้สูงสุด 230 หน่วยต่อมิลลิลิตร เมื่อเลี้ยงในอาหารสูตร Fukumoto ที่มีเดกซ์แทรน 1.5 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักโมเลกุล 4 x 10^6) อุณหภูมิ 30 - 35 องศาเซลเซียส อัตราการเขย่า 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 96 - 120 ชั่วโมง

ตารางที่ 2.5 เชื้อจุลินทรีย์บางชนิดที่สร้างเดกซ์แทรนเนส

เชื้อจุลินทรีย์	เอกสารอ้างอิง
แบคทีเรีย ได้แก่	
Achromobacter sp.	Foxgarty และ Kelly (1984)
Bacillus sp.	Zevenhuizen (1968)
Brevibacterium sp.	Yamaguchi และ Gocho (1973)
Cytophaga johnsonii	Foxgarty และ Kelly (1984)
Flavobacterium sp.	Kobayashi และคณะ (1983)
Lactobacillus bifidus	Foxgarty และ Kelly (1984)
Streptococcus mitis	Staat และ Schachtele (1974)
Thermophlic bacterium,Rt364	Wynter และคณะ (1997)
รา ได้แก่	
Aspergillus sp.	Foxgarty และ Kelly (1984)
	Godfrey และ Reichelt (1983)
Aspergillus carneus	Hirsoka และคณะ (1972)
Chaetomium gracile	Hattori และ Ishibashi (1981)
Giberrella fujikuroi	Hattori และ Ishibashi (1981)
Penicillium funiculosum	Abdel-Naby และคณะ (1999)
	Kosaric และคณะ (1973)
	Chaiet และคณะ (1970)
Penicillium lilacinus	Galves-Mariscal และ Lopez-Munguia (1991)
Penicillium verriculosum	Tchuchiya และคณะ (1952)
	Wheatley และ Moo-Young (1977)
Penicillium aculedatum	Madhu และ Prabhu (1984)
Penicillium notatum	Szczodrak และคณะ (1994)
Penicillium sp. Strain 61	เอก เสียงวิเชียร (2531)
Penicillium sp. SMCU 3-14	สุวรรณา นพพรพันธุ์ (2538)
Verticillium sp.	Tchuchiya และคณะ (1952)

ยีสต์ ได้แก่ *Lipomyces stakeyi*	 Webb และ Spencer-Martins (1983) Koenig และ Day (1988)
แอคติโนมัยซีส ได้แก่ *Actinomyces israelrii* *Streptomyces cinamonensis*	 Staat และ Schachtele (1974) Staat และ Schachtele (1974)

การนำเดกซ์แทรนเนสไปใช้ประโยชน์

1. ทางด้านทันตสาธารณสุข

มีการนำเดกซ์แทรนเนสไปใช้แก้ปัญหาโรคฟันผุ โดยโรคฟันผุนี้มีสาเหตุมาจากกลุ่มจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในช่องปากเมื่อคนบริโภคอาหารที่มีน้ำตาลเข้าไป จุลินทรีย์จะใช้น้ำตาลแล้วปล่อยกรดอินทรีย์ออกมากัดกร่อนเนื้อฟันทำให้เกิดฟันผุ จุลินทรีย์ที่พบเป็นสาเหตุให้เกิดฟันผุได้แก่ *Streptococci* sp., *Lactobacilli* sp. และ *Actinomycetes* sp. โดยเฉพาะ *Steptococcus mutans* และ *Streptococcus salivarius* (Melville, 1981 และ Wolinsky, 1988 และ Hamada, 1986) ส่วน *S. mutans* มักพบเป็นสาเหตุหลักของการเกิดฟันผุ เพราะนอกจากจะปล่อยกรดออกมาแล้ว ยังสามารถสร้างเดกซ์แทรนชนิดที่ไม่ละลายน้ำออกมาเป็นจำนวนมาก เดกซ์แทรนที่ถูกสร้างขึ้นมาจะช่วยยึดแบคทีเรียให้เกาะติดได้ดีขึ้น การที่ *S. mutans* สามารถสร้างเดกซ์แทรนได้ก็เนื่องจากการมีเอนไซม์ที่เรียกว่าเดกซ์แทรนซูเครส เพื่อเปลี่ยนน้ำตาลซูโครส ในปากเช่นเดียวกันกับกลไกที่เกิดขึ้นจากแบคทีเรียในกระบวนการผลิตน้ำตาลทราย ดังนั้นจึงได้มีการนำเดกซ์แทรนเนสมาย่อยสลายเดกซ์แทรนที่แบคทีเรียสร้างขึ้น เพื่อลดการสะสมของคราบฟัน และเป็นการลดจุลินทรีย์ที่เกาะติดอยู่ในคราบฟันด้วย ข้อดีของการนำเดกซ์แทรนเนสมาใช้ในการแก้ปัญหาฟันผุ คือ เอนไซม์สามารถย่อยเดกซ์แทรนได้ทั้งเดกซ์แทรนที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ อีกทั้งยังสามารถยับยั้งการสร้างเดกซ์แทรนที่ไม่ละลายน้ำด้วย นอกจากนี้ยังไปมีผลต่อการทำงานและผลิตภัณฑ์ของเดกซ์แทรนซูเครส (Hayacibara และคณะ, 2004) ซึ่งส่งผลต่อการสร้างเดกซ์แทรนและเดกซ์แทรนเนสสามารถลดการรวมตัวและยับยั้งการยึดเกาะของเซลล์ *S. mutans* ได้อีกด้วย

2. **ทางด้านการแพทย์**

โดยเริ่มต้นขึ้นในสมัยสงครามโลกครั้งที่ 2 มีการนำเดกซ์แทรนมาใช้เป็น blood plasma expander (Okami, 1980) ใช้กับทหารที่ได้รับบาดเจ็บจากสงคราม สายเดกซ์แทรนที่นำมาใช้เกือบทั้งหมดจะประกอบด้วยหน่วยย่อยของกลูโคสที่ต่อเรียงกันด้วยพันธะ α-1,6 ซึ่งได้มาจากจุลินทรีย์ในกลุ่ม *Leuconostoc mesenteroides* โดยเดกซ์แทรนที่ได้มีคุณสมบัติคล้ายกับเดกซ์แทรนที่มาจากเชื้อในกลุ่ม Streptococi ในช่องปาก แต่จะต่างกันตรงที่ขนาดโมเลกุลของเดกซ์แทรนที่มาจากแบคทีเรียในช่องปากมีขนาดใหญ่กว่า ซึ่งไม่สามารถใช้เป็นพลาสมาสังเคราะห์ได้ จึงได้มีการนำเดกซ์แทรนเนสมาใช้ลดขนาดของเดกซ์แทรนให้ได้ตามต้องการ เพื่อให้สามารถนำไปใช้ได้ โดยแหล่งของเอนไซม์มาจากเชื้อราหลายชนิด โดยเฉพาะจาก *Penicillium* sp. และ *Aspergillus* sp. ที่สามารถผลิตเดกซ์แทรนเนสได้มากและมีประสิทธิภาพดี

3. **ทางด้านอุตสาหกรรม**

เดกซ์แทรนเนสมีส่วนสำคัญอย่างมากในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตน้ำตาล เนื่องจากการผลิตน้ำตาลวัตถุดิบหลักที่ใช้ก็คือน้ำอ้อย และองค์ประกอบหลักของน้ำอ้อยคือน้ำตาลซูโครส ซึ่งปริมาณของซูโครสที่มากพอนี้เองที่ทำให้แบคทีเรียบางชนิดที่ปนเปื้อนในกระบวนการผลิตนำมาใช้เป็นอาหาร และก่อให้เกิดผลเสียต่อการผลิต ปัญหาที่สำคัญก็คือ การที่แบคทีเรียเหล่านี้สร้างเดกซ์แทรนที่เป็นสารเมือกออกมา ทำให้น้ำอ้อยมีความหนืดเกิดการอุดตันตามท่อส่งในกระบวนการผลิต จึงได้มีความพยายามนำเดกซ์แทรนเนสมาใช้ย่อยสลายเดกซ์แทรน และในปัจจุบันได้มีการทดลองนำเดกซ์แทรนเนสไปใช้แก้ไขปัญหาการปนเปื้อนของเดกซ์แทรนในโรงงานน้ำตาล

Edye และคณะ (1997) ศึกษาปัญหาโรงงานน้ำตาลในประเทศออสเตรเลียพบว่าระหว่างการต้มเคี่ยวเป็นช่วงที่เดกซ์แทรนโมเลกุลเล็กๆจะจับตัวเป็นสายยาว ดังนั้นจึงได้มีการนำเดกซ์แทรนเนสที่ผลิตจาก *Chaetomium gracile* มาย่อยเดกซ์แทรนออกเป็นโอลิโกเมอร์ โดยเดกซ์แทรนเนสสามารถทำงานได้ในช่วงค่าความเป็นกรดเบส 5 ถึง 7 และสามาร ถทำงานในช่วงอุณหภูมิสูงถึง 60 - 70 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้นน้ำตาลสูงถึง 65°Brix อย่างไรก็ดี โอลิโกเมอร์ที่เหลืออยู่ก็อาจสร้างปัญหาเกี่ยวกับรูปร่างของผลึกน้ำตาลได้บ้างแต่ไม่ร้ายแรงเท่าเดกซ์แทรน (More du Boil,1991)

Eggleston และ Monge (2005) พบว่าจากรายงานที่ผ่านมาการนำเดกซ์แทรนเนสไปใช้ในโรงงานน้ำตาลของประเทศสหรัฐอเมริกายังไม่ประสบความสำเร็จเท่าที่ควร เพราะยังไม่มีข้อมูลที่แน่ชัดว่าควรจะใช้เอนไซม์ในขั้นตอนใดของกระบวนการผลิต ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงทำการศึกษาเพื่อหาจุดที่เหมาะสมในการใช้เดกซ์แทรนเนสที่ได้จาก *Chaetomium gracile* และ *Chaetomium erraticum* ในกระบวนการผลิตน้ำตาล โดยเลือกใช้เอนไซม์ใน 2 ช่วง คือ น้ำอ้อยดิบและน้ำเชื่อม จากผลการทดลองพบว่าเดกซ์แทรนเนสสามารถทำงานได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเป็นกรดเบส 5.4 – 5.8 และเอนไซม์จะเริ่มเสียแอคติวิตีเมื่อความเข้มข้นน้ำตาลเพิ่มขึ้นมากกว่า 25 – 30°Brix ผลจากความเข้มข้นของน้ำตาลทำให้เอนไซม์ทำงานในน้ำอ้อยดิบซึ่งมีความเข้มข้นน้ำตาลประมาณ 15°Brix ได้ดีกว่าในน้ำเชื่อมที่มีความเข้มข้นน้ำตาลสูงถึงประมาณ 65°Brix นอกจากนี้ผู้วิจัยยังเปรียบเทียบการใช้เอนไซม์ในรูปของเอนไซม์หยาบและเอนไซม์ที่ผ่านการทำให้เข้มข้น โดยพบว่าเอนไซม์หยาบ 10 ppm สามารถกำจัดเดกซ์แทรนที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ได้เพียง 46.3 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่เอนไซม์ที่ผ่านการทำเข้มข้น 4 ppm สามารถกำจัดเดกซ์แทรนในภาวะเดียวกันได้ถึง 66.6 เปอร์เซ็นต์ และสุดท้ายศึกษาการเก็บเอนไซม์ที่ 4 องศาเซลเซียส เมื่อเวลาผ่านไป 90 วัน พบว่าเดกซ์แทรนเนสที่ผ่านการทำเข้มข้นมีแอคติวิตีลดลงเพียง 9 เปอร์เซ็นต์ ส่วนเดกซ์แทรนเนสหยาบสูญเสียแอคติวิตีไปถึง 46 เปอร์เซ็นต์

สำหรับการศึกษาวิจัยเดกซ์แทรนเนสในประเทศไทยนั้น ได้มีการศึกษาที่ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดย เอก แสงวิเชียร (2531) ได้การเก็บตัวอย่างดินจากแหล่งต่างๆในประเทศไทย เพื่อคัดเลือกหาราที่สามารถสร้างเดกซ์แทรนเนสได้ จากตัวอย่างทั้งหมดพบรา *Penicillium* sp. สายพันธุ์ 61 สามารถผลิตเอนไซม์ได้ 42 หน่วยต่อมล. เมื่อเลี้ยงในสูตรอาหารของ Fukumoto ที่ผ่านการปรับปรุงภายใต้การบ่มเขย่าที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 6 วัน จากนั้นมีการพัฒนาต่อมาเพื่อให้เชื้อสามารถสร้างเอนไซม์ได้มากขึ้น จากรายงานของสุวรรณา นพพรพันธุ์ (2538) ทำการกลายพันธุ์ด้วยแสงอัลตราไวโอเลตและกลายพันธุ์ต่อด้วย เอ็น เมทิลเอ็นไนโตรเอ็นไนโตรกวานิดีน (N–methyl–N'–nitro–N-nitrosoguanidine หรือ NTG) ทำให้ได้ *Penicillium* sp. สายพันธุ์ SMCU 3 - 14 ที่สามารถผลิตเดกซ์แทรนเนสได้สูงถึง 330 หน่วยต่อมล. ต่อมาได้มีการปรับปรุงสูตรอาหารที่มีการเติมกากน้ำตาลลงไป ทำให้เชื้อสามารถสร้างเอนไซม์ได้สูงถึงประมาณ 600 หน่วยต่อมล. (ศิโรจน์ ศรีสรากรณ์, 2547)

ผลจากการพัฒนาปรับปรุงสายพันธุ์และสูตรอาหารเลี้ยงเชื้อที่ผ่านมา ทำให้ปัจจุบันสามารถผลิตเดกซ์แทรนเนสที่มีศักยภาพสูงพอที่จะสามารถนำไปใช้จริงในอุตสาหกรรมน้ำตาลอย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายนั้นเดกซ์แทรนเนสถูกนำไปใช้ในขั้นตอนการหีบอ้อย ซึ่งในแต่ละปีมีฤดูการหีบอ้อยเพียง 4–5 เดือน และมีอ้อยที่เข้าหีบประมาณ 60 ล้านตันต่อปี โดยอ้อย 1 ตันจะให้น้ำอ้อยประมาณ 600 ลิตร (ที่มา:http://www.mitrphol.com /thai-about-factory.htm) เพราะฉะนั้นใน 1 ฤดูการผลิตจะมีน้ำอ้อยเข้าหีบประมาณ 36,000 ล้านลิตร และจากรายงานของ Inkerman (1980) พบว่าการใช้เดกซ์แทรนเนส 10 หน่วยต่อน้ำอ้อย 100 มิลลิลิตร สามารถย่อยสลายเดกซ์แทรนอย่างมีประสิทธิภาพได้ ดังนั้นหากต้องการนำเดกซ์แทรนเนสที่ผลิตจาก *Penicillium* sp. สายพันธุ์ SMCU 3-14 ซึ่งมีแอคติวิตีประมาณ 600 หน่วยต่อมิลลิลิตร ไปใช้ในการกำจัดเดกซ์แทรนในโรงงานน้ำตาลเพียงแค่ 1 โรง ต้องใช้ปริมาณเอนไซม์สูงถึง 130,000 ลิตร นับว่าเป็นความต้องการเอนไซม์ในปริมาณสูงมาก จนกระบวนการผลิตเอนไซม์อาจไม่เพียงพอ ดังนั้นจึงต้องมีการผลิตไว้ล่วงหน้าและโดยปกติเดกซ์แทรนเนสที่ผลิตได้จะมีความเสถียรอยู่ระดับหนึ่งหากต้องเก็บไว้เป็นเวลานานอาจทำให้สูญเสียความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้

ตารางที่ 2.6 แสดงระยะเวลาที่ใช้ในการหีบอ้อยของแต่ละภูมิภาคทั่วประเทศไทย
ปีการผลิต 2546/47

ภาค	เฉลี่ย (วัน)
เหนือ	129
กลาง	126
ตะวันออก	122
ตะวันออกเฉียงเหนือ	161

ที่มา : รายงานผลการผลิตน้ำตาลทรายฤดูการผลิตปี 2546/47 ฝ่ายวิชาการและแผน ศูนย์บริการการผลิต สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย

ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของเอนไซม์ (พัชรา วีระกะลัส, 2543)

1. ความเข้มข้นของเอนไซม์และสารเริ่มต้น การเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์ จะต้องมีการรวมตัวกันของ เอนไซม์-สารเริ่มต้น อัตราเร็วของปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับจำนวนการชนกันของโมเลกุลทั้งสอง ถ้ามีสารเริ่มต้นพอเพียง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอนไซม์เป็นสองเท่าจะทำให้อัตราเร็วเพิ่มขึ้นไปเป็น 2 เท่าด้วย แต่เมื่อมีการเพิ่มปริมาณเอนไซม์ต่อไปเรื่อยๆ อัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นแนวระนาบเพราะสารเริ่มต้นเริ่มหมดไป ทำให้เป็นตัวจำกัดการเกิดปฏิกิริยาได้ อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับการชนกันของโมเลกุลซึ่งจะชนกันมากขึ้นเมื่อปริมาณเอนไซม์หรือสารเริ่มต้นมากขึ้น

K_m หรือ Michaelis-Menten Constant คือค่าความเข้มข้นของสารเริ่มต้นที่ทำให้อัตราเร็วของปฏิกิริยาเป็นครึ่งหนึ่งของความเร็วสูงสุด ค่า K_m สามารถบ่งบอกถึงความเร็วในการรวมตัวของเอนไซม์และสารเริ่มต้น เช่น ถ้าเปรียบเทียบสารเริ่มต้นสองชนิด ว่าชนิดใดจะรวมตัวกับเอนไซม์ได้ดีกว่านั้นสามารถดูจากค่า $1/K_m$

ค่า K_m ขึ้นอยู่กับชนิดของโคเอนไซม์ ความเป็นกรดด่างและอุณหภูมิ ค่า K_m ของเอนไซม์ที่พบในปัจจุบันอยู่ในช่วง 10^{-3} ถึง 10^{-7} M ถ้าเอนไซม์ชนิดเดียวกันสามารถทำปฏิกิริยาได้กับสารเริ่มต้น 2 ชนิด ค่า K_m ของเอนไซม์จะต่างกันตามชนิดของสารเริ่มต้นด้วย การที่ค่า K_m ต่ำแสดงให้เห็นว่าเอนไซม์-สารเริ่มต้น จะค่อนข้างอยู่ตัว หรือนั่นคือถ้ามีสารเริ่มต้นสองชนิดที่คล้ายกันเอนไซม์จะเข้าทำปฏิกิริยากับสารเริ่มต้นซึ่งมีค่า K_m ต่ำกว่า

2. ความเป็นกรดเบส (pH) ความเป็นกรดเบสของสารละลายจะมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาของเอนไซม์ในหลายด้าน ตามปกติเอนไซม์แต่ละชนิดจะมีความเป็นกรดเบสที่เหมาะสมในการทำงาน ซึ่งการทำงานของเอนไซม์จะลดลงเมื่อความเป็นกรดเบสสูงหรือต่ำกว่าความเป็นกรดเบสที่เหมาะสม ความเป็นกรดเบสที่เหมาะสมของเอนไซม์ส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง 6 - 8 การที่ความเป็นกรดเบสสูงมากหรือต่ำมากจะทำให้เอนไซม์เสื่อมสภาพ

นอกจากความเป็นกรดเบสจะทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของเอนไซม์แล้วความเป็นกรดเบสยังมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาอีก 2 ทาง คือ

2.1 กิจกรรมของเอนไซม์จะขึ้นอยู่กับการปรากฏของกลุ่มอะมิโน และกลุ่มคาร์บอกซิล ซึ่งทั้ง 2 กลุ่มอาจจะมีประจุหรือไม่มีประจุก็ได้ แต่เอนไซม์จะทำงานได้ดีเพียงเมื่อกลุ่มทั้ง 2 มีประจุหรือไม่มีประจุแล้วแต่ชนิดของเอนไซม์ ถ้าเอนไซม์ทำงานได้ดีเมื่อกลุ่มอะมิโนไม่มีประจุ ความเป็นกรดเบสที่เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์ชนิดนี้มักจะสูง ในขณะที่ถ้าเอนไซม์ทำงานได้ดี เมื่อคาร์บอกซิลเป็นกลาง ความเป็นกรดเบสที่เหมาะสมจะต่ำ

2.2 ความเป็นกรดเบสควบคุมการแตกตัวของสารเริ่มต้น ซึ่งมีหลายปฏิกิริยาต้องเกิดการแตกตัวของสารเริ่มต้นก่อนปฏิกิริยาจึงจะดำเนินต่อไปได้

3. อุณหภูมิ การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้พลังงานจลน์เพิ่มขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นด้วย

4. ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น (Reaction product) อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่มีเอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้น สามารถวัดได้จากอัตราการหายไปของสารเริ่มต้น หรืออาจจะวัดจากการปรากฏขึ้นของผลิตภัณฑ์ หรือทำทั้ง 2 วิธีพร้อมกัน แต่ไม่ว่าจะวัดโดยวิธีใด จะพบว่าอัตราเร็วของปฏิกิริยาจะช้าลงเมื่อเวลาผ่านไป อัตราเร็วของปฏิกิริยาที่เกิดช้าลงนี้เป็นเพราะเกิดการเสื่อมสภาพของเอนไซม์ นอกจากนั้นยังเกิดเพราะมีการลดลงของสารเริ่มต้น และผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์มากขึ้นจนถึงความเข้มข้นหนึ่ง อาจจะทำให้เกิดปฏิกิริยาผันกลับ (Reversibility) โมเลกุลของผลิตภัณฑ์จะรวมกับเอนไซม์แทนสารเริ่มต้นทำให้ปฏิกิริยาถูกจำกัดได้

5. สารยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ (Inhibitors) มีสารหลายชนิดที่สามารถยับยั้งการเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์ได้ สารเหล่านี้อาจจะเป็นสารอนินทรีย์ เช่น โลหะหนักต่างๆ หรืออาจจะเป็นสารอินทรีย์ เช่น สารประกอบฟีโนลิค (Phenolic) หรือโปรตีน แต่อย่างไรก็ตามสารเหล่านี้แบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ดังนี้

5.1 การยับยั้งแบบแข่งขัน (Competitive Inhibitor) เป็นสารยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่มีโครงสร้างคล้ายคลึงกับสารเริ่มต้นมาก และเข้าแย่งทำปฏิกิริยากับเอนไซม์ที่บริเวณออกฤทธิ์ (active side) ของเอนไซม์ เมื่อเกิดการรวมกันเป็นเอนไซม์-สารยับยั้ง (Enzyme-Inhibitor) จะทำให้ปริมาณของเอนไซม์ลดลง ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง สารยับยั้งเหล่านี้อาจจะเปลี่ยนหรือไม่เปลี่ยนไปก็ได้ การเพิ่มปริมาณของสารเริ่มต้นให้มากขึ้นจะลดผลของการยับยั้งแบบแข่งขันได้

5.2 การยับยั้งไม่แข่งขันแบบ Noncompetitive (Noncompetitive Inhibitor) สารยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ชนิดนี้จะเข้ารวมกับเอนไซม์แต่จะไม่รวมที่บริเวณออกฤทธิ์ (active side) สารพวกนี้มีลักษณะต่างจากสารเริ่มต้น การเพิ่มปริมาณของสารเริ่มต้นจะไม่สามารถลบล้างผลของสารเหล่านี้ได้ โลหะที่เป็นพิษทั้งหลาย และสารที่รวมหรือทำลาย กลุ่มซัลฟ์ไฮดริล มักจะเป็นสารในกลุ่มนี้ เช่น การที่มีออกซิเจนมาก จะทำให้ -SH ถูกออกซิไดส์ เกิดสะพานไดซัลไฟด์ขึ้นมา ซึ่งทำให้โครงสร้างของเอนไซม์เปลี่ยนไป ทำให้บริเวณออกฤทธิ์รวมกับสารเริ่มต้นไม่ได้ ส่วนโลหะ เช่น Hg^{+2} และ Ag^{+} จะเข้าแทนที่ไฮโดรเจนอะตอมของกลุ่มซัลฟ์ไฮดริล เกิดเป็นเมอแคปไทด์ (Mercaptides) ซึ่งไม่ละลายน้ำ

5.3 การยับยั้งไม่แข่งขันแบบ Uncompetitive (Uncompetitive Inhibitor) สารยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ชนิดนี้ไม่รวมกับเอนไซม์อิสระ และไม่มีผลกระทบต่อปฏิกิริยาของเอนไซม์และสารเริ่มต้น แต่จะเข้ารวมกับ เอนไซม์-สารเริ่มต้น ทำให้ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาต่อไปได้ การยับยั้งการทำงานของเอนไซม์จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีสารเริ่มต้นมากขึ้น สารยับยั้งชนิดนี้มักจะพบในปฏิกิริยาซึ่งมีสารเริ่มต้นสองชนิด

การเสื่อมสภาพของเอนไซม์ (Denaturation) (Lapanje, 1978)

เมื่อโครงสร้างของเอนไซม์เปลี่ยนไป จนสารเริ่มต้นรวมกับเอนไซม์ที่บริเวณออกฤทธิ์ไม่ได้ จะทำให้สมบัติในการเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์หมดไป ซึ่งมีปัจจัยหลายอย่างทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของเอนไซม์ มีหลายกรณีที่เมื่อเอนไซม์เกิดการเสื่อมสภาพไปแล้ว ไม่สามารถจะกลับคืนมาสู่สภาพที่ทำงานได้อีก เช่น กรณีที่ได้รับอุณหภูมิสูงทั้งนี้เพราะอุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดการสร้างแขนชนิดโควาเลนท์ระหว่างสายพอลิเพปไทด์ (Polypeptide chain) หรือในสายพอลิเพปไทด์เดียวกัน และแขนเหล่านี้จะมีความคงตัวมากจนไม่สามารถทำให้แตกหักได้

ดังนั้นในการสกัดเอนไซม์ออกจากพืช หรือการทำให้เอนไซม์บริสุทธิ์ จึงมักต้องทำที่อุณหภูมิต่ำ เพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพของเอนไซม์จากความร้อน ทั้ง ๆ ที่ถ้าเอนไซม์อยู่ในเซลล์อาจจะทนต่ออุณหภูมิสูงระดับหนึ่งได้ แต่เมื่อสกัดออกจากเซลล์ความทนทานต่ออุณหภูมิสูงจะลดลง ซึ่งยังไม่เข้าใจนักว่าเป็นเพราะเหตุใด แต่คาดกันว่าอาจจะเป็นเพราะในระหว่างการสกัดเอนไซม์นั้นได้กำจัดสารป้องกันเอนไซม์ออกไปหรืออาจทำให้สารดังกล่าวเจือจางลง

ออกซิเจนและตัวออกซิไดส์สามารถทำให้เอนไซม์หลายชนิดเสื่อมสภาพได้ (Aehel, 2004) โดยมักจะทำให้เกิดสะพานไดซัลไฟด์ (Disulfide Bridges) ในสายพอลิเพปไทด์ที่มีหมู่ -SH ของกรดอะมิโนซิสเตอีน (Cysteine) ตัวรีดิวซ์สามารถทำให้เอนไซม์เสื่อมสภาพได้ในเหตุผลตรงกันข้าม คือ จะไปทำลายสะพานไดซัลไฟด์ เกิดเป็นหมู่ –SH 2 หมู่ นอกจากนั้นโลหะหนัก เช่น Ag^{+}, Hg^{+2} และ Pb^{+2} ก็สามารถทำให้เอนไซม์เสื่อมสภาพได้เช่นกัน

ในสภาพที่แห้ง เอนไซม์จะมีความคงทนต่ออุณหภูมิสูงดีกว่าในสภาพที่มีน้ำมาก และด้วยเหตุนี้เมล็ดที่แห้งหรือสปอร์ของเชื้อราและแบคทีเรียที่แห้ง จึงต้านทานต่ออุณหภูมิสูง ดังนั้นในการฆ่าสปอร์ของเชื้อราและแบคทีเรีย การใช้ความร้อนชื้นจากหม้อนึ่งอัดไอน้ำ จึงมีประสิทธิภาพดี นอกจากนั้นในสภาพที่แห้งเมล็ดและสปอร์ที่แห้ง ยังทนต่ออุณหภูมิต่ำในระหว่างฤดูหนาวได้ดีเช่นกัน

ตารางที่ 2.7 ตัวอย่างปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการทำงานของเอนไซม์

ปัจจัย	เป้าหมาย	กลไก	ผลที่เกิดขึ้น
ทางกายภาพ			
ความร้อน	H bonds	เพิ่มการเคลื่อนที่ของโมเลกุลและชักนำให้เกิดพันธะโควาเลนท์	โครงสร้างเปลี่ยนแปลงหรือรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน
ความเย็น	Hydrophobic bonds Solvated groups	เปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ดึงน้ำออกจากโมเลกุล	รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน
แรงกลต่างๆ	Solvated groups Void volume	เปลี่ยนแปลงปริมาตรและการละลาย	โครงสร้างเปลี่ยนแปลง
รังสี	Functional group	ลดการทำให้เกิดโครงสร้าง	โครงสร้างเปลี่ยนแปลง
ทางเคมี			
กรด-เบส	Charged groups	ลดอันตรกิริยาไอออนิก (Ionic interaction)	โครงสร้างถูกทำลาย
ตัวทำละลาย	Nonpolar groups	การละลายของหมู่ไม่มีขั้ว	Large helical region
สารลดแรงตึงผิว	Hydrophobic domain	เกิดโครงสร้างคล้ายไมเซลล์	Large helical region
โลหะหนัก	Functional Groups	บดบังกลุ่มที่เกี่ยวกับการทำงาน	ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์
Chelating agent	ไอออนที่สำคัญต่อการทำงาน	กำจัดไอออนที่จำเป็น	ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์
ทางชีวภาพ			
โปรติเอส	Peptide bonds	เกิดการย่อยสลายพันธะเพปไทด์	ได้ โอลิโกเพปไทด์และกรดอะมิโน

เป็นที่ทราบกันอยู่แล้วว่าเอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพสูง ดังนั้นจึงได้มีการนำไปใช้ประโยชน์มากมายหลายด้าน แต่เมื่อพิจารณาโครงสร้างของเอนไซม์ที่เป็นโปรตีนซึ่งสามารถถูกทำลายได้ง่ายในภาวะที่ไม่เหมาะสม และการเตรียมเอนไซม์ปริมาณมากเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมนั้น จะประสบกับปัญหาการสูญเสียแอคติวิตีของเอนไซม์ในระหว่างการเก็บรักษา ในปัจจุบันจึงได้มีการคิดค้นหาวิธีการในการเก็บรักษาให้เอนไซม์มีความเสถียร และคงสภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้มากที่สุดเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งมีอยู่หลายวิธี เช่น การตรึงเอนไซม์ (Immobilization) เป็นวิธีที่ช่วยให้เอนไซม์มีความเสถียรเพิ่มขึ้นและสามารถนำมาใช้งานซ้ำได้ (Sundaram, 1982), การดักจับ (Entrapment) หรือล้อมจับ (Encapsulation) เอนไซม์ไว้ในพอลิเมอร์เป็นวิธีป้องกันโมเลกุลของเอนไซม์จากภาวะภายนอก (Martinek และคณะ, 1977), การเติมสารเคมีที่ช่วยรักษาความเสถียรของเอนไซม์ (Hellman และคณะ, 1983 และ Asther และ Meunier, 1990 และ Ye และคณะ, 1988), การเก็บเอนไซม์ที่อุณหภูมิต่ำ และการไลโอฟิไลซ์สำหรับการป้องกันการสูญเสียแอคติวิตีของเอนไซม์ขณะทำให้แห้งต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อโครงสร้างของโปรตีน (Hanafusa, 1977) ซึ่งได้แก่ ความเป็นกรดเบส ชนิดของบัพเฟอร์ ความเข้มข้นของโปรตีนและสารผสมอื่นๆ (Seguro และคณะ, 1990) เวลาในการแช่แข็งและอุณหภูมิในการทำให้แห้งก็มีผลต่อแอคติวิตีของเอนไซม์ด้วย (Hanafusa, 1977) นอกจากนี้ปัจจุบันวิธีการเก็บรักษาเอนไซม์ได้พัฒนาไปถึงขั้นการดัดแปลงโครงสร้างหรือหมู่ฟังก์ชันต่างๆ โดยวิธีทางเคมี (Chemical modification) (Torchilin และ Martinek, 1979) และการทำวิศวกรรมโปรตีน (Protein engineering) (Fagain, 2003) ซึ่งการที่จะเลือกใช้วิธีใดก็ขึ้นอยู่กับชนิดของเอนไซม์

ตารางที่ 2.8 ตัวอย่างรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำวิศวกรรมโปรตีน

เอนไซม์	หลักการ	ข้อดี	เอกสารอ้างอิง
เพอร์ออกซิเดส	DNA shuffling	ความเสถียรต่ออุณหภูมิและความเสถียรต่อการออกซิไดส์เพิ่มขึ้น 174 และ 100 เท่าตามลำดับ	Cherry และ คณะ (1999)
แคทาเลส	การต่อสายพอลิเพปไทด์แบบสุ่ม	ความเสถียรเพิ่มขึ้น	Matsuura และคณะ (1999)
ไฟเทส	การก่อการกลายพันธุ์บริเวณลำดับอนุรักษ์	มีความเสถียรต่ออุณหภูมิ 15-26 องศาเซลเซียส	Lehmann และคณะ (2000)

รายงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Izutsu และคณะ (1993) รายงานว่าสารในกลุ่มน้ำตาลและกรดอะมิโน เช่น กลูโคสกับทรีฮาโลส และ โปรลีนกับโซเดียมกลูตาเมต ช่วยรักษาความเสถียรของบีตากาแลคโทซิเดสเมื่อเก็บโดยการไลโอฟิไลซ์

Gibson และคณะ (1993) ทำการศึกษาอายุการเก็บของ แอลกอฮอล์ออกซิเดส และ ฮอร์สราดิชเพอร์ออกซิเดส โดยวิธีการทำให้แห้งด้วยเครื่องดูดสุญญากาศร่วมกับการเติมสารเติมแต่งชนิดต่างๆ จากผลการทดลองพบว่า แอลกอฮอล์ออกซิเดส มีแอคติวิตีคงเหลืออยู่ในช่วง 80 - 100 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเก็บที่ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 สัปดาห์ โดยการเติมเดกซ์แทรนอย่างเดียว และ เติม DEAE-เดกซ์แทรน ร่วมกับ ไอโนซิทอล แมนนิทอล และแลคโทส ตามลำดับ ในขณะที่เมื่อเก็บแบบไม่มีสารเติมแต่ง เอนไซม์สูญเสียแอคติวิตีไปถึง 74 เปอร์เซ็นต์ สำหรับ ฮอร์สราดิชเพอร์ออกซิเดส เมื่อเก็บแบบแห้งโดยการเติม แลคทิทอลร่วมกับ Gafquat 755N และ แลคทิทอลร่วมกับซิงค์ไอออน (zinc ion) ทำให้เอนไซม์มีแอคติวิตีคงเหลือ 100 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เมื่อเวลาผ่านไป 10 วัน

Ward และคณะ (1999) ศึกษาหาปริมาณของแซ็กคาร์ไรด์ได้แก่ ทรีฮาโลส แลคโทส มอลโทส ซูโครส กลูโคส และแมนนิทอล ที่เหมาะสมในการรักษาความเสถียรของ แอล-แอสพาราจิเนส (L-asparaginase) ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่สามารถแตกตัวเป็นหน่วยย่อยในระหว่างการไลโอฟิไลซ์ จากการทดลองพบว่าแซ็กคาร์ไรด์ทุกชนิดสามารถช่วยป้องกันโครงสร้างและแอคติวิตีเอนไซม์ได้เหมือนกัน สำหรับกลไกในการป้องกันยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด

Bhushan (2000) ศึกษาการผลิตไคติเนสจาก *Bacillus* sp BG–11 และหาวิธีรักษาความเสถียรของเอนไซม์ โดยพบว่าเมื่อเก็บไคติเนสใน โซเดียมเอไซด์ ความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อ มล. โซเดียมเมทาไบซัลไฟต์ ความเข้มข้น 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และโปแทสเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้เอนไซม์มีแอคติวิตีคงเหลือ 100 เปอร์เซ็นต์ ที่ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลานานถึง 8 สัปดาห์

Cheon และคณะ (2000) ทำการเก็บรักษา ดีไฮเดนโตไอเนส (D-hydantoinase) จาก *Bacillus stearothermophilus* SD1 เป็นเอนไซม์ที่มีโครงร่างแบบเททราเมอร์ ในภาวะปกติที่เอนไซม์ทำงานจะแตกตัวออกเป็นหน่วยย่อยทำให้เสียสภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา วิธีการ

แก้ปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้โดยการลดการแตกตัวของเอนไซม์ ด้วยการเชื่อมขวางระหว่างหน่วยย่อย (Inter subunit cross-link) โดยการใช้ 1-เอทิล-3-(-3-ไดเมทิลอะมิโนโพรพิล) คาร์โบไดอิไมด์, ไฮโดรคลอไรด์ (1-ethyl-3-(-3-dimethylaminopropyl)carbodiimide, hydrochloride) โดยวิธีการดังกล่าวเอนไซม์จะสามารถพยุงโครงสร้างไว้ได้ พบว่าเอนไซม์ที่ผ่านการเชื่อมขวางระหว่างหน่วยย่อยมีความเสถียรโดยมีค่าครึ่งชีวิต (half life) นานกว่าเอนไซม์ปกติถึง 4 เท่า และมีความเสถียรที่อุณหภูมิสูงถึง 70 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ สามารถทำงานได้ในภาวะที่เป็นกรด รวมถึงมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนซับสเตรตเป็นผลิตภัณฑ์ได้ดีกว่า

Belghith และคณะ (2001) รายงานการเก็บรักษาเซลลูเลสจาก *Penicillium ocitanis* โดยวิธีการทำแห้งโดยการพ่นผ่านลมร้อน (Spray drying) ร่วมกับการเติมมอลโทเดกซ์ทริน จะช่วยรักษาความเสถียรของเอนไซม์ไว้ได้นานถึง 8 เดือนเมื่อเก็บที่ 30 องศาเซลเซียส

Melendo และคณะ (2001) ทำการศึกษาวิธีการเก็บรักษาแอคติวิตีในการย่อยสลายโปรตีนของสารสกัดจากม้ามหมูโดยการเก็บที่อุณหภูมิต่างๆกัน พบว่าการเก็บที่อุณหภูมิต่ำถึง – 80 องศาเซลเซียสและเก็บในไนโตรเจนเหลวจะช่วยให้เอนไซม์รักษาแอคติวิตีไว้ได้ และเมื่อเวลาผ่านไป 2 ปี เอนไซม์มีแอคติวิตีเพิ่มขึ้นร้อยละ 140 อาจเป็นผลเนื่องมาจากการเก็บที่อุณหภูมิต่ำมากๆ มีผลทำให้โครงร่างของเอนไซม์เปลี่ยนไป ในกรณีนี้ส่งผลให้เอนไซม์ทำงานได้ดีขึ้น ในขณะเดียวกันได้ทำการเก็บเอนไซม์ที่ -20 องศาเซลเซียสร่วมกับการเติมกลีเซอรอลหรือซอร์บิทอลมีผลทำให้เอนไซม์รักษาแอคติวิตีไว้ได้เช่นเดียวกัน

Brena และคณะ (2003) ศึกษาผลร่วมกันของเอทานอล อะซีโตน ไดออกเซน และไดเมทิลฟอร์มาไมด์ ที่มีต่อความเสถียรของบีตากาแลคโทซิเดสตรึงรูปเทียบกับเอนไซม์อิสระ โดยรายงานว่าอัตราส่วนความเข้มข้นของสารผสมที่ทำให้เอนไซม์มีความเสถียรมากที่สุด คือ เอทานอล อะซีโตน และไดออกเซน 18 เปอร์เซ็นต์ และ ไดเมทิลฟอร์มาไมด์ 6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

Betancor และคณะ (2004) ศึกษาปัจจัยสำคัญที่มีผลทำให้ความเสถียรของเอนไซม์ลดลงในระหว่างการเร่งปฏิกิริยา คือ แรงกระทำระหว่างผิวหน้าของฟองอากาศและผิวหน้าของสารละลายอินทรีย์ กับโมเลกุลของเอนไซม์ซึ่งมีผลทำให้เอนไซม์สูญเสียแอคติวิตีไปบางส่วน ในงานวิจัยชิ้นนี้มุ่งที่จะป้องกันโมเลกุลของเอนไซม์โดยใช้เดกซ์แทรนแอลดีไฮด์ (Dextran-aldehyde) ซึ่งจะเข้าจับและล้อมรอบโมเลกุลของเอนไซม์ไว้ สำหรับเอนไซม์ที่เลือกมาศึกษามี 3 ชนิด คือ กลูโคสออกซิเดส, ดี-อะมิโนแอซิดออกซิเดส และทริปซิน โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 สภาวะคือ

ภาวะแรกมีการกวนเพื่อให้เกิดฟองอากาศ และภาวะที่ 2 มีการกวนร่วมกับการเติมสารละลายอินทรีย์ จากผลการทดลองพบว่าขนาดโมเลกุลของเดกซ์แทรนที่ทำให้เอนไซม์มีความเสถียรมากที่สุดจะอยู่ในช่วงประมาณ 20,000 ดาลตัน และเอนไซม์ทั้ง 3 ชนิดที่ผ่านการดัดแปลงด้วยเดกซ์แทรนแอลดีไฮด์ สามารถทนต่อภาวะที่มีฟองอากาศได้นานถึง 10 ชั่วโมงโดยไม่สูญเสียแอคติวิตีเช่นเดียวกับในภาวะที่มีการเติมสารละลายอินทรีย์ จะพบว่าเอนไซม์ที่ผ่านการดัดแปลงมีความเสถียรมากกว่าเอนไซม์อิสระ