บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรม

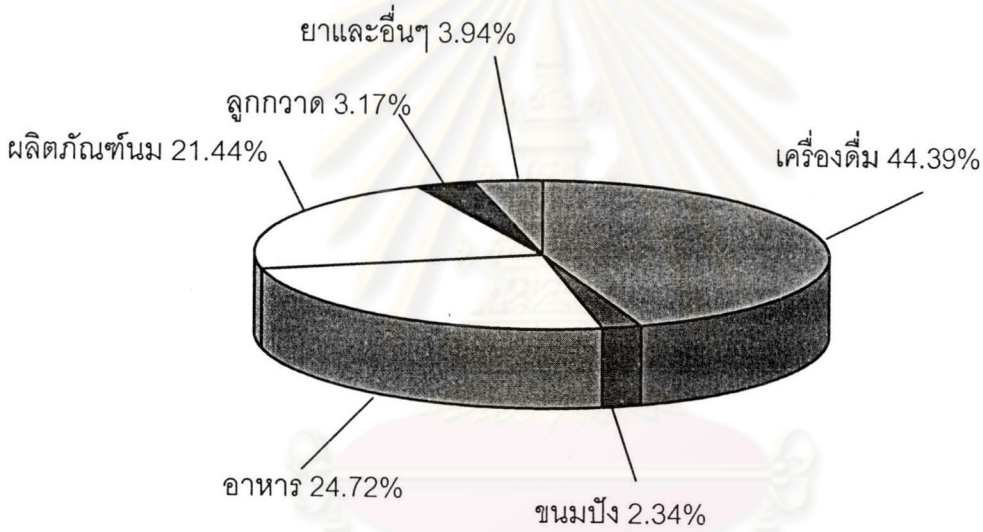
อุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาลทรายจากอ้อย เป็นอุตสาหกรรมหลักอย่างหนึ่งในปี 2547 ของประเทศซึ่งมีแนวโน้มของตัวเลขการส่งออกภายในกลุ่มสินค้าเกษตร และอุตสาหกรรมการเกษตรแปรรูปขยายตัวเพิ่มขึ้นร้อยละ 20-22 น้ำตาลทรายเป็นสินค้ามีมูลค่าส่งออกประมาณ 670 ล้านเหรียญสหรัฐต่อปี ใช้ปริมาณอ้อยเป็นวัตถุดิบ 60.2 ล้านตันต่อปี อัตราการผลิตน้ำตาลทรายในปีการผลิต 2545/2546 เพิ่มขึ้นร้อยละ 18.6 เมื่อเทียบกับปีการผลิต 2544/2545 และมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามความต้องการของตลาดโลก ในไตรมาสที่ 4 ของปี 2547 สามารถจำหน่ายน้ำตาลทรายภายในประเทศมากถึง 4,850,116.33 กระสอบ (100 กิโลกรัมต่อกระสอบ) (สำนักงานกองทุนอ้อยและน้ำตาลทราย, 2547) สำหรับภาคการส่งออกสามารถนำเงินตราเข้าประเทศได้มากถึงร้อยละ 15 จากมูลค่าการส่งออกสินค้าภาคเกษตรกรรมทั้งหมด นอกจากนี้อุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาลทรายยังเป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่มีโรงงานทั้งสิ้น 46 โรงงานทั่วประเทศ กระจายตามภูมิภาคต่างๆของประเทศไทย โดยมีโรงงานในภาคเหนือ 10 โรงงาน ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 13 โรงงาน ภาคตะวันออก 5 โรงงาน และภาคกลาง 18 โรงงาน (สำนักงานกองทุนอ้อยและน้ำตาลทราย, 2547) ก่อให้เกิดการจ้างงานในระบบขึ้นมากกว่า 600,000 คน ลดปัญหาการว่างงานในพื้นที่ชนบท ส่งผลให้เกิดเงินหมุนเวียนในระบบเศรษฐกิจระดับมหภาคมากกว่า 150,000 ล้านบาทต่อปี นอกจากนี้ยังทำให้ภาครัฐสามารถจัดเก็บภาษีได้ปีละหลายพันล้านบาท

สำหรับปี 2547 มีปริมาณความต้องการใช้น้ำตาลจำนวน 143.13 ล้านตัน เพิ่มขึ้นจากปีก่อน จำนวน 4.4 ล้านตัน หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 3.17 ประเทศที่มีความต้องการใช้น้ำตาลมากที่สุด คือ อินเดีย จำนวน 20.71 ล้านตัน รองลงมาคือ สหภาพยุโรป และ จีน มีจำนวน 14.78 และ 11.04 ล้านตัน หรือคิดเป็นร้อยละ 10.6 และ 7.9 ตามลำดับ ของปริมาณความต้องการใช้น้ำตาลทั้งหมด

ผู้ส่งออกน้ำตาลทรายในตลาดโลกสามอันดับแรกได้แก่ บราซิล อินเดีย และสหภาพยุโรป โดยมีประเทศไทยเป็นลำดับที่หก โดยแม้จะมีวัตถุดิบทางการเกษตรหลายชนิดเช่นหัวผักกาดหวาน ต้นเมเปิ้ล ที่สามารถใช้ในการผลิตน้ำตาลได้ แต่วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเพียงอย่างเดียวของประเทศไทยคือ อ้อย ซึ่งมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Saccharum officinarum* ซึ่งพบปลูกในทุกภูมิภาคของประเทศไทย เนื่องจากเป็นพืชที่เหมาะสมต่อสภาวะภูมิอากาศแบบร้อนชื้น (บุญส่ง แสงอ่อน, 2525) แต่ละภูมิภาค

ของประเทศจะมีการปลูกอ้อยพันธุ์ที่ต่างกันไปตามลักษณะอากาศและสภาพดิน โดยในปี 2547 และ 2548 ประเทศไทยมีการปลูกทั้งสิ้น 49 จังหวัด จังหวัดกาญจนบุรีเป็นแหล่งที่สามารถปลูกอ้อยได้มากที่สุด โดยมีพื้นที่การปลูกอ้อยทั้งประเทศจำนวน 6,831,639 ไร่ ผลผลิตต่อไร่ 9.28 ตัน สามารถส่งเข้าโรงงานผลิตน้ำตาลทราย 60,199,648 ตัน (สำนักงานกองทุนอ้อยและน้ำตาลทราย, 2547)

ในประเทศไทยน้ำตาลทรายนอกจากจะนำมาบริโภคโดยตรงเป็นเครื่องปรุงอาหารแล้ว (ร้อยละ 65.73) อุตสาหกรรมอาหารอื่นๆก็มีการซื้อน้ำตาลทรายไปเป็นวัตถุดิบในการผลิตด้วย (ร้อยละ 34.27) ได้แก่ อุตสาหกรรมเครื่องดื่มจำนวน 18 ราย ขนมปัง (รวมสุราและเบียร์) 9 ราย อาหาร (รวมอาหารกระป๋องและน้ำปลา) 104 ราย ผลิตภัณฑ์นม 18 ราย ลูกกวาด 8 ราย ยาและอื่นๆ 13 ราย รวมทั้งสิ้น 184 ราย (สำนักงานกองทุนอ้อยและน้ำตาลทราย, 2547) ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สัดส่วนของอุตสาหกรรมที่ซื้อน้ำตาลทรายเป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์ปี 2547
ที่มา : สำนักงานกองทุนอ้อยและน้ำตาลทราย, 2547

น้ำตาลทราย

น้ำตาลทรายมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่าซูโครส (sucrose) (α-D-glucopyranosyl-β-D-fructofuranoside, $C_6H_{12}O_6$, น้ำหนักโมเลกุล 342.3) จัดเป็นน้ำตาลโมเลกุลคู่ (disaccharide) โดยประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (monosaccharide) สองชนิดต่อเข้าด้วยกัน คือ กลูโคส (glucose) และฟรักโตส (fructose) เมื่อระบบทางเดินอาหารมนุษย์รับเอาน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวทั้งสองชนิดนี้เข้าสู่ร่างกาย กลูโคสและฟรักโตสจะถูกดูดซึมไปใช้ที่บริเวณลำไส้เล็กในทันทีเพื่อเป็นการรักษาระดับ

น้ำตาลในกระแสโลหิตเนื่องจากความจำเป็นต่อสมองและเซลล์ทุกชนิดในร่างกาย ฉะนั้นซูโครสจึงถือเป็นสารอาหารที่ร่างกายใช้ได้ง่ายชนิดหนึ่ง ซึ่งแตกต่างจากอาหารชนิดอื่นในด้านคุณภาพความหวานและคงไว้ซึ่งรสชาติโดยไม่เปลี่ยนแปลง สามารถกล่าวได้ว่าซูโครสเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในการประกอบอาหารของทุกชนชาติ ทุกวัฒนธรรมเนื่องจากมีสมบัติดังต่อไปนี้

1. จากคุณสมบัติทางชีวเคมี น้ำตาลเป็นคาร์โบไฮเดรต ซึ่งสามารถถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายได้โดยง่าย ช่วยให้ร่างกายใช้ทดแทนพลังงานที่สูญเสียไปอย่างรวดเร็ว
2. เป็นสารให้ความหวานที่มีผู้นิยมใช้กันมากเนื่องจากให้ระดับความหวานที่พอเหมาะ ไม่พบสารตกค้างภายหลังการรับประทาน นอกจากนี้ยังสามารถช่วยเพิ่มรสชาติในอาหาร
3. น้ำตาลเป็นแหล่งให้ความหวานและพลังงานที่มีราคาถูก ให้พลังงานมากกว่า และมีราคาถูกกว่าอาหารส่วนมาก

<u>ชนิดของน้ำตาลทราย</u>

นอกจากอ้อยซึ่งเป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำตาลทรายที่สำคัญของประเทศแล้ว ยังมีพืชอีกหลายชนิดเช่นต้นตาล มะพร้าว ข้าวโพดหวาน เมเปิล และหัวผักกาดหวาน แต่น้ำตาลที่ผลิตภายในประเทศนั้นผลิตจากอ้อยเพราะอ้อยเป็นพืชให้ความหวานที่ปลูกมากที่สุดในประเทศ โดยในน้ำอ้อยมีซูโครสเป็นองค์ประกอบประมาณ 70-80% (โดยน้ำหนัก) (Irvine, 1981) น้ำตาลที่ผลิตออกมาจากโรงงานน้ำตาลสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายชนิด ซึ่งมีแตกต่างกันตามกระบวนการการผลิต ดังต่อไปนี้ (บุญส่ง แสงอ่อน, 2525; อนันตพงษ์ สุขเกษ, 2543)

1. น้ำตาลทรายดิบ (Raw sugar) เป็นผลิตผลขั้นสุดท้ายในโรงงานหีบอ้อย และใช้เป็นวัตถุดิบในการนำไปทำเป็นน้ำตาลทรายบริสุทธิ์ แต่น้ำตาลทรายดิบยังไม่บริสุทธิ์เพียงพอที่จะบริโภคได้ น้ำตาลดิบที่ดีต้องมีค่าความบริสุทธิ์ (Purity) อยู่ระหว่างร้อยละ 97-99 โดยมีกากน้ำตาลหุ้มอยู่รอบเมล็ด ลักษณะเม็ดน้ำตาลเป็นเกร็ดใสสีน้ำตาลอ่อนจนถึงเข้มตามสีของกากน้ำตาล มีความชื้นปานกลางทำให้เกล็ดน้ำตาลมีการเกาะตัวกันไม่ร่วน วิธีการผลิตใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) เป็นสารฟอกสีน้ำอ้อย

2. น้ำตาลทรายขาว (White sugar) เป็นผลึกซูโครสที่มีความบริสุทธิ์สูง เป็นเกร็ดใสสีขาวถึงสีเหลืองอ่อน พบความชื้นเจือปนเล็กน้อย เกร็ดน้ำตาลจึงมีลักษณะร่วนไม่ติดกันมากกว่าน้ำตาลทราย

ดิบ มีกากน้ำตาลเจือปนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น การผลิตใช้น้ำอ้อยโดยตรง โดยมีการใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารฟอกสี

3. น้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์ (Refined white sugar) กรรมวิธีผลิตต่อจากขั้นตอนการผลิตน้ำตาลทรายขาว ทำให้ได้ผลึกซูโครสที่มีความบริสุทธิ์สูงสุด ลักษณะเป็นเกร็ดใส เกือบไม่มีความชื้น เมล็ดน้ำตาลจึงละเอียด มีสีขาวเพราะปราศจากกากน้ำตาลเจือปน

4. น้ำตาลทรายแดง (Soft brown sugar) ผลิตจากอ้อยโดยตรง ลักษณะเมล็ดเป็นผงละเอียด หรืออาจมีการจับตัวกันเล็กน้อยหากมีความชื้นเล็กน้อย มีสีน้ำตาลอ่อนถึงเข้ม กรรมวิธีการผลิตใช้ผ่านวิธีการเคี่ยวในกระทะ จึงเกิดกลิ่นน้ำตาลไหม้

5. น้ำตาลทรายสีคล้ำ (Brown sugar) เป็นน้ำตาลทรายขาวทั่วๆไป มีเกล็ดใสซึ่งมีขนาดเล็กกว่าน้ำตาลทรายดิบเล็กน้อย มีสีน้ำตาลอ่อนเนื่องเพราะน้ำตาลไหม้หรือสีจากกากน้ำตาล ความชื้นของน้ำตาลชนิดนี้น้อยกว่าน้ำตาลดิบ โดยผลิตจากน้ำตาลทรายแดงหรือน้ำเชื่อม

6. น้ำตาลปึก ลักษณะเป็นก้อนเหนียวมีความชื้นมาก สีเหลืองอ่อนจนถึงเข้ม มีความหนืดสูง ผลิตจากต้นตาลและมะพร้าว ส่วนมากใช้ในการประกอบอาหาร

7. น้ำตาลกรวด (Crystalline sugar) เป็นก้อนเหลี่ยมสีขาวใส ผลิตจากน้ำเชื่อมของน้ำอ้อย โดยให้ผ่านกระบวนการตกผลึกอย่างช้าหลายวัน ความหวานของน้ำตาลชนิดนี้น้อยกว่าชนิดอื่นๆ

<u>การผลิตน้ำตาลทรายจากอ้อย</u> (Knowledge and Information services, The Schumacher centre for technology and development, 2004)

กระบวนการพื้นฐาน

อ้อยจะถูกนำมาหีบเพื่อทำการแยกเอาน้ำอ้อยออกมาจากส่วนอื่นของอ้อย โดยกระบวนการหีบต้องมีการบีบบริเวณข้ออ้อยให้แตกและลำต้นของอ้อยให้แบนมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้จากนั้นจะเหลือเป็นกากชานอ้อย (bagasse) ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงต่อไป น้ำอ้อยที่ได้มาจะถูกแยกไว้และนำไปผ่านการกรอง จากนั้นจะต้องมีการทำให้ใสต่อไปด้วยการใช้สารเคมี และนำน้ำอ้อยที่ผ่าน

กระบวนการไปต้มเคี่ยวเอาน้ำที่เหลือออก ให้ได้เหลือเป็นผลึกของแข็งและผ่านกระบวนการต่อไป เพื่อให้ได้เป็นน้ำตาลชนิดต่างๆ

ผลผลิตน้ำตาลทรายจากอ้อย

ผลผลิตของน้ำตาลทรายจากอ้อยขึ้นอยู่กับคุณภาพของอ้อย และประสิทธิภาพในการแยกน้ำอ้อยออกมาจากอ้อย โดยตารางที่ 2.1 แสดงค่าที่เกี่ยวข้องดังนี้

ตารางที่ 2.1 ผลผลิตน้ำตาลทรายจากการใช้อ้อยคุณภาพดีและต่ำเป็นวัตถุดิบ

	อ้อยคุณภาพสูง	อ้อยคุณภาพต่ำ
ปริมาณน้ำอ้อยที่ได้ต่ออ้อย 100 กิโลกรัม (กิโลกรัม)	50	40
ร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำตาลในน้ำอ้อย	22	17
ปริมาณน้ำตาลทรายที่ผลิตได้ต่ออ้อย 100 กิโลกรัม (กิโลกรัม)	10	7

อ้อยคุณภาพสูงจะให้ปริมาณน้ำอ้อยมากและมีระดับน้ำตาลในอ้อยสูง (ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ขึ้นไป) โดยอ้อยคุณภาพต่ำหรืออ้อยที่ผ่านการเก็บเกี่ยวก่อนเวลาอันควรอาจให้ปริมาณน้ำอ้อยที่เท่ากันแต่มีระดับน้ำตาลในอ้อยลดลง

ประสิทธิภาพในการแยกน้ำอ้อยออกมาจากอ้อยมักถูกจำกัดด้วยเทคโนโลยีที่ใช้ เครื่องหีบอ้อยที่มีลูกหีบ 3 ลูกที่ใช้กันทั่วไปในโรงงานน้ำตาลทราย จะไม่สามารถแยกน้ำอ้อยออกมาจากอ้อย 100 กิโลกรัม ได้เกิน 50 กิโลกรัม (อ้างอิงจาก http://www.itdg.org) เพราะข้อจำกัดของเครื่องมือ

ผลผลิตอาจสามารถทำให้เพิ่มขึ้นได้ โดยควบคุมกระบวนการต้มเคี่ยวน้ำตาลอย่างระมัดระวัง โดยให้รวดเร็วที่สุดที่จะเป็นได้ในสภาวะที่มีความสะอาดมากที่สุดเช่นกัน เพื่อลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ที่อาจปนเปื้อนเข้ามา

1. กระบวนการหีบอ้อย (Crushing)

ในโรงงานผลิตน้ำตาลที่มีเทคโนโลยีระดับกลาง ผู้ผลิตส่วนใหญ่มักใช้เครื่องหีบอย่างง่ายที่ประกอบด้วยลูกหีบซึ่งทำด้วยเหล็ก 3 ลูก ซึ่งหมุนโดยใช้พลังงานดีเซล ซึ่งถ้าเป็นเครื่องยนต์ 5 แรงม้า จะสามารถหีบอ้อยได้ชั่วโมงละ 300 กิโลกรัม โดยสิ่งที่ต้องคำนึงถึงในระหว่างกระบวนการหีบคือ

- อ้อยควรถูกหีบภายใน 24 ชั่วโมงหลังจากการตัด หลังจากช่วงนี้แล้วค่าความเป็นกรด-ด่างของอ้อยอาจลดต่ำลงเนื่องจากมีการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ ทำให้จุลินทรีย์ชนิดต่างๆสามารถเจริญได้ดีและมีการใช้น้ำตาล ซึ่งอาจมีการเปลี่ยนไปเป็นน้ำตาลตัวอื่นที่ไม่สามารถตกผลึกได้
- ประสิทธิภาพของการหีบต้องให้ได้มากที่สุด สามารถรีดเอาน้ำอ้อยที่อยู่ในอ้อยออกมาให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้เพื่อให้ได้ผลผลิตน้ำตาลทรายมากที่สุด

2. การทำให้น้ำอ้อยใส

น้ำอ้อยต้องผ่านการกรองก่อนในอันดับแรกเพื่อทำการลดอนุภาคเล็กๆที่ปนเปื้อนและตกค้างอยู่ในกระบวนการหีบ ในโรงงานผลิตน้ำตาลต้องมีการเติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลงไปในน้ำอ้อย เพื่อทำการตกตะกอนสิ่งเจือปนต่างๆลงมา จากนั้นน้ำอ้อยจะถูกนำมาฟอกสีด้วยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ สำหรับผู้ผลิตน้ำตาลระดับชาวบ้านอาจมีการเติมสารช่วยทำให้ใส เช่นเถ้าของไม้ลงไป ผู้ผลิตมักมีการเติม "ไฮดรอส" (โซเดียมไฮโดรเจนซัลเฟต) ลงไปในขั้นตอนสุดท้ายของการต้มซึ่งจะทำให้ไล่ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เหลือออกไปจากน้ำอ้อย และทำให้สีของน้ำตาลที่ออกมาอ่อนลง โดยหากไม่ใส่ "ไฮดรอส" ลงไปจะทำให้มีปริมาณซัลเฟอร์ตกค้างในน้ำอ้อยสูง

3. การต้มเคี่ยวน้ำอ้อย

การต้มเคี่ยวเป็นการทำให้โมเลกุลของน้ำที่อยู่ในน้ำอ้อยระเหยออกไป โดยต้องทำให้เร็วที่สุด ผลึกน้ำตาลจะตกลงสู่ด้านล่างของหม้อต้มเคี่ยว โดยส่วนที่เป็นส่วนที่ไม่ต้องการจะลอยขึ้นมาด้านบนและถูกกวาดออกไป และถูกแยกนำไปใช้เลี้ยงสัตว์ในอุตสาหกรรมปศุสัตว์

การต้มเคี่ยวจะถูกดำเนินการเรื่อยๆจนได้ความเข้มข้นของน้ำเชื่อมที่ต้องการ โดยมีการวัดค่าปริมาณของแข็งทั้งหมด (°Brix) เป็นระยะ

4. การตกผลึกน้ำตาล

การต้มเคี่ยวน้ำเชื่อมให้เป็นผลึกน้ำตาลทำโดยนำน้ำเชื่อมที่มีค่าปริมาณของแข็งทั้งหมด (60-65°Brix) ที่อยู่ในบ่อพักไปต้มในหม้อเคี่ยวที่ให้ความร้อนต่ำภายใต้สุญญากาศ หลังจากที่ออกจากหม้อต้มเคี่ยวนั้นจะมีทั้งผลึกน้ำตาลและน้ำเลี้ยงผลึก ซึ่งในน้ำเลี้ยงผลึกยังคงมีปริมาณน้ำตาลละลายอยู่มากพอที่จะตกผลึกออกมาอีก เมื่ออุณหภูมิลดลงแล้ว ในกรณีที่ต้องการผลผลิตน้ำตาลทรายปริมาณสูงจะมีการพักเลี้ยงผลึกประมาณ 2-4 ชั่วโมงก่อนกระบวนการปั่นแยกผลึกน้ำตาลทราย

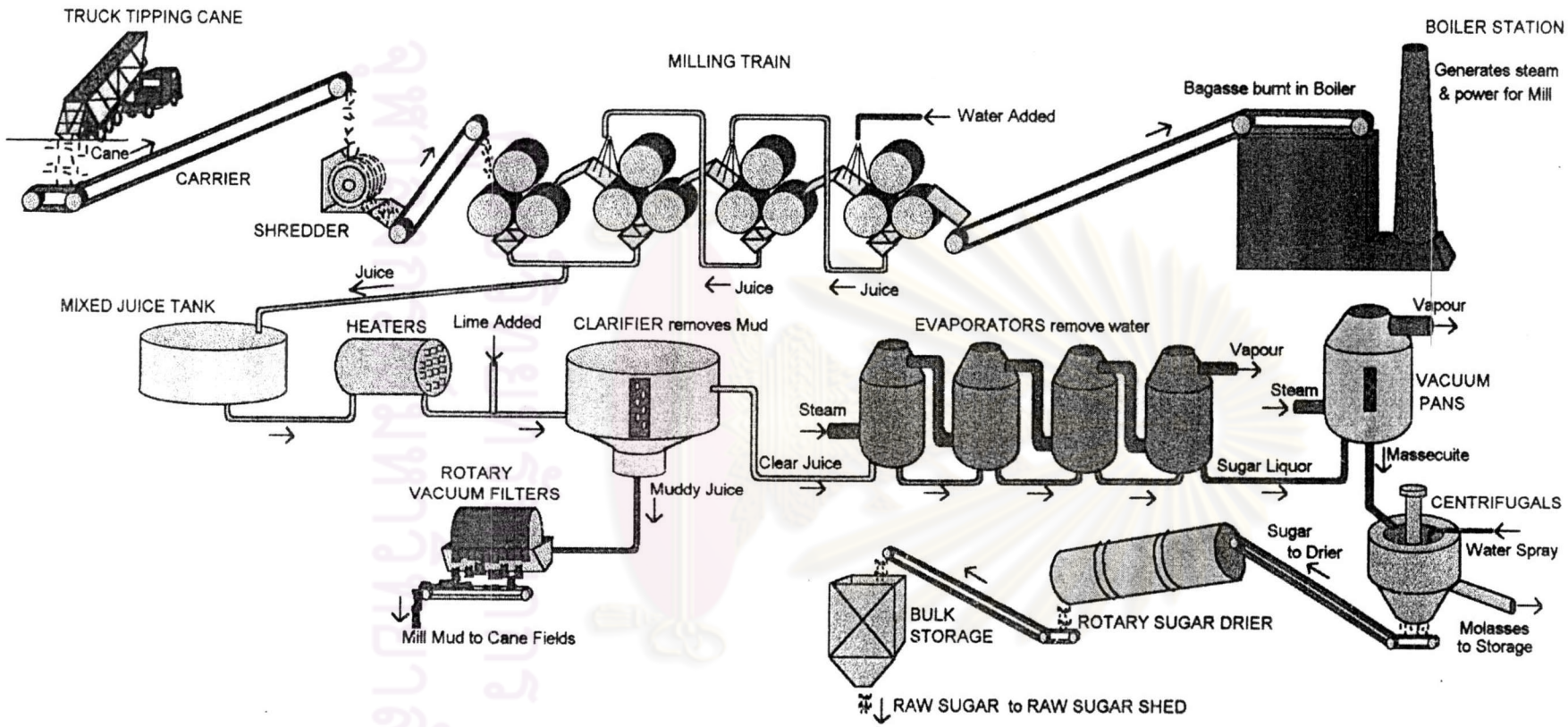
5. การปั่นแยกผลึกน้ำตาลทรายในหม้อปั่น

หม้อปั่นน้ำตาลจะมีโลหะที่มีรูข้างหม้อเป็นแถวๆ สำหรับระบายกากน้ำตาลออกมาในขณะที่หม้อปั่นทำงาน โดยกากน้ำตาลจะแยกตัวออกมาด้วยแรงหนีจุดศูนย์กลาง ทิ้งให้ผลึกน้ำตาลค้างอยู่บนตะแกรงหม้อปั่น จากนั้นจะลอดผ่านแผ่นโครงรองรับตะแกรง รวมตัวไหลออกจากช่องระบายน้ำตาลที่อยู่ด้านล่างของหม้อปั่น น้ำตาลที่ออกมาจะมีความชื้นปนออกมาด้วยประมาณร้อยละ 1-2 ซึ่งต้องใช้ไอน้ำอบไล่ความชื้นออกบางส่วน เนื่องจากน้ำตาลที่มีความชื้นอาจเสียหายจากการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ และไม่สามารถเก็บไว้ได้นาน จากนั้นจึงนำน้ำตาลที่ได้ไปบรรจุและเก็บต่อไป

โดยกระบวนการในการผลิตน้ำตาลทรายดิบ และน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์ ได้แสดงในรูปที่ 2.2 และ 2.3

ในโรงงานอุตสาหกรรมใดๆก็ตาม ถ้าหากว่าในโรงงานมีสุขลักษณะอนามัยที่ไม่ดีเพียงพอย่อมเป็นสาเหตุที่จะทำให้จุลินทรีย์ต่างๆ เจริญเติบโตขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ปัญหาต่างๆในโรงงานก็จะตามมาภายหลัง โรงงานน้ำตาลก็เช่นเดียวกันต้องรักษาสภาพของโรงงานให้สะอาดถูกอนามัยอยู่เสมอ ซึ่งเป็นการลดจำนวนการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ นอกจากนี้แล้วสิ่งที่ต้องคำนึงอีกประการคือจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนมากับวัตถุดิบตั้งแต่ต้นและยังไม่ได้ถูกกำจัดออกไปด้วย

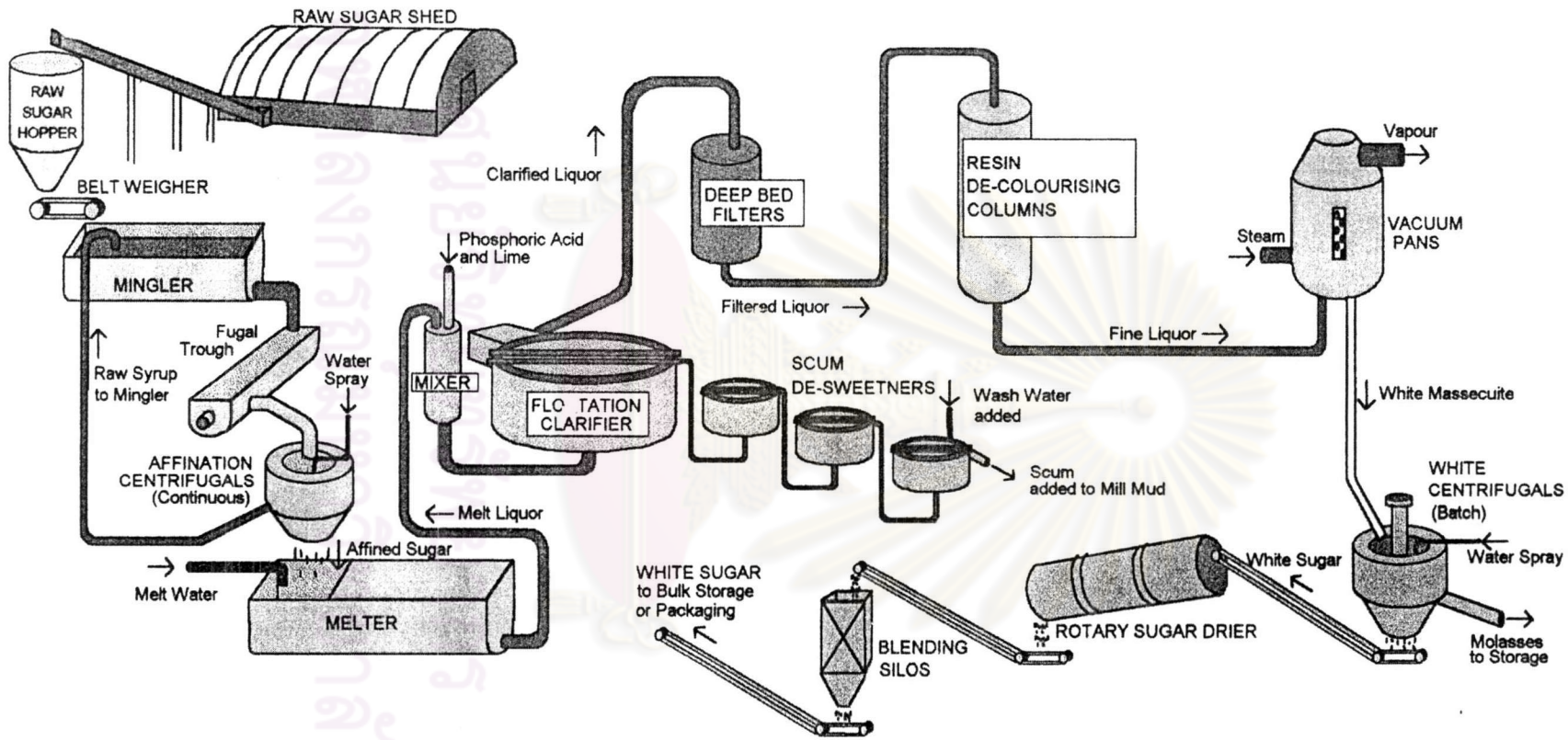
กระบวนการผลิตน้ำตาลทรายดิบ



รูปที่ 2.2 แผนภาพกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายดิบ

ที่มา : New South Wales Sugar Milling Co-operative Ltd.

กระบวนการผลิตน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์



รูปที่ 2.3 แผนภาพกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์

ที่มา : New South Wales Sugar Milling Co-operative Ltd.

ปัญหาจากการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ในกระบวนการผลิตน้ำตาลทราย

ในกระบวนการผลิตน้ำตาลจากอ้อยนั้นพบว่าจุลินทรีย์นั้นสามารถก่อปัญหาการปนเปื้อนในกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายดังนี้

1. จุลินทรีย์ปนเปื้อนอยู่ในน้ำอ้อยโดยติดมาจากอ้อย ซึ่งมีอยู่หลายชนิด
2. จุลินทรีย์ชนิดต่างๆซึ่งหลงเหลืออยู่ จะผ่านไปตามกระบวนการผลิตขั้นต่างๆ
3. จุลินทรีย์จะปนเปื้อนอยู่ในผลิตภัณฑ์ที่ผลิตขึ้น
4. สารที่จุลินทรีย์สร้างขึ้นสามารถก่อปัญหาในกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายครั้งต่อไป

ในธรรมชาติมีจุลินทรีย์จำนวนมากในดินบริเวณที่ปลูกอ้อย และสามารถเข้าสู่อ้อยได้ทางบาดแผลของอ้อย หากอ้อยมีบาดแผลมากก็จะปนเปื้อนในต้นอ้อยนั้นมากตามไปด้วยดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 จำนวนจุลินทรีย์เปรียบเทียบระหว่างใบอ้อยปรกติและใบอ้อยที่เป็นแผล (หน่วยของจำนวนโคโลนีที่เกิดขึ้นต่อมิลลิลิตร)

	แบคทีเรีย	รา	ยีสต์	ทั้งหมด
ใบอ้อยปรกติ	1,253,000	41,000	248,000	1,737,000
ใบอ้อยเป็นแผล	6,836,000	125,400	216,800	7,267,000

ที่มา : สันต์ ฉายตระกูล (2525)

ส่วนมากจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่จะเป็นกลุ่มที่สามารถใช้น้ำตาลต่างๆได้ดี เป็นอาหารและสร้างเมือกที่เป็นพอลิแซคคาไรด์ขึ้น ในกระบวนการเก็บเกี่ยวอ้อยที่มีการเผาอ้อยจะทำให้เชื้อที่ไม่ทนร้อนหรือไม่สร้างสปอร์ถูกทำลายลงไป เมื่ออ้อยเย็นตัวลง จุลินทรีย์ที่ยังมีชีวิตอยู่จะสามารถเจริญขึ้นได้อย่างรวดเร็วโดยเฉพาะพวกที่สร้างสปอร์หรือใช้น้ำตาลได้ดี (กล้าณรงค์ และ สิริวัฒนา, 2539) โดยได้แก่เชื้อในกลุ่ม *Leuconostoc* spp. ซึ่งมี 2 สายพันธุ์ที่สำคัญคือ *L. mesenteroides* และ *L. dextranicum* (Tsuchiya และคณะ, 1952) ซึ่งสามารถเจริญได้ดีในสภาวะอากาศเช่นประเทศไทย เพราะมีความร้อนชื้นที่เหมาะสม จึงเพิ่มปริมาณเป็นจำนวนมาก เมื่อจุลินทรีย์กลุ่มนี้เล็ดลอดเข้ามาในระบบการผลิตช่วงการหีบน้ำอ้อย จะใช้น้ำตาลที่มีอยู่ในน้ำอ้อยเพื่อการเจริญเติบโตและสร้างผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารที่มีความเหนียวหนืดออกมาได้แก่ เดกซ์แทรน ซึ่งมีขนาดความยาว และขนาดโมเลกุลต่างๆกัน ได้อย่างรวดเร็ว

ความหนืดที่เกิดขึ้นจากเดกซ์แทรนที่ถูกสร้างขึ้น จะทำให้ภาวะในการต้มเคี่ยวข้ามากกว่าปกติ การตกผลึกน้ำตาลจะเกิดขึ้นอย่างไม่สมบูรณ์เกิดเป็นผลึกน้ำตาลรูปเข็ม และทำให้การกรองทำได้ยากมากขึ้น ซึ่งเหล่านี้ล้วนเป็นสาเหตุทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตน้ำตาลทรายจากอ้อยลดลงอย่างมาก

<u>เดกซ์แทรน</u>

เดกซ์แทรนเป็นสายโฮโมพอลิเมอร์ซึ่งมีหน่วยย่อยเป็นดี-กลูโคส (D-glucose) ที่มีการเชื่อมหน่วยย่อยนี้เข้าด้วยกันด้วยพันธะ α-1,6 กลูโคสิดิก (α-1,6 glucosidic linkage) เป็นสายหลักและมีการแตกแขนงออกเป็นสายกิ่งซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยพันธะแบบ α-1,3 และ α-1,4 ได้ เกิดจากปฏิกิริยาการย่อยสลายซูโครสให้กลายเป็นกลูโคสและฟรักโตส โดยเดกซ์แทรนซูเครส (dextransucrase) หรือที่เรียกอีกชื่อว่ากลูโคซิลทรานสเฟอเรส (glucosyltransferase, GTF) ซึ่งแบคทีเรียในกลุ่ม *Leuconostoc* spp. สามารถสังเคราะห์เอนไซม์นี้ขึ้น ทำให้สามารถใช้ซูโครสในน้ำอ้อยเพื่อการเจริญเติบโตได้ กลูโคสแต่ละหน่วยที่ถูกปลดปล่อยออกมาจะถูกนำมาต่อเรียงกันเป็นสายโฮโมพอลิเมอร์ของกลูโคส (Imrie และ Tilbury, 1972) โดยมีกลไกการสังเคราะห์สายเดกซ์แทรนเป็นดังรูปที่ 1.2

เดกซ์แทรนที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นนี้มีความยาวของสาย และน้ำหนักโมเลกุลสูงแตกต่างกันมาก คือตั้งแต่ 10^3 – 10^7 ดาลตัน (Monsan, 1991) ซึ่งทำให้เกิดลักษณะเหนียวและมีความหนืดมาก เดกซ์แทรนจึงสามารถจับติดกับท่อส่งน้ำอ้อยภายในโรงงานผลิตน้ำตาลทราย ก่อให้เกิดการอุดตันบริเวณท่อ ถัง เครื่องกรอง แผ่นกรองและอื่นๆ เกิดการอุดตันขึ้นในส่วนการกรอง เป็นผลทำให้อัตราการไหลของน้ำอ้อยในระบบลดต่ำลง การถ่ายเทความร้อนกับอุปกรณ์หล่อเย็นเป็นไปได้ช้า การต้มระเหยน้ำใช้เวลานานรวมไปถึงการเคี่ยวน้ำตาล การตกผลึกน้ำตาลช้าลงและไม่สมบูรณ์ โดยเดกซ์แทรนที่มีขนาดโมเลกุลสูงจะไปเปลี่ยนแปลงกระบวนการตกผลึกของน้ำตาลทำให้รูปร่างผิดไปจากเดิมเป็นรูปร่างแหลมคล้ายเข็ม (Imrie และ Tilbury, 1972; กล้าณรงค์ ศรีรอด, 2540)

คุณสมบัติความเหนียวและหนืดของเดกซ์แทรนที่เจือปนในน้ำอ้อย ทำให้แบคทีเรียอื่นๆที่ปนเปื้อนมาในน้ำอ้อยถูกจับไว้ด้วย เมื่อแบคทีเรียเหล่านี้ใช้น้ำตาลในการเจริญเติบโตจะมีการปลดปล่อยสารเมแทบอไลต์จำพวกกรดอินทรีย์เช่น กรดแลกติก กรดบิวทิริก เป็นต้น ก่อให้เกิดการบูดเน่าของน้ำอ้อยได้ (Madhu และ Prabhu, 1985)

จากการศึกษาของ Tilbury (1971) พบว่าการสูญเสียซูโครสเนื่องจากการสร้างเดกซ์แทรนจากเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อน คิดเป็นร้อยละ 4.75 ของปริมาณซูโครสที่ได้ต่อวัน และจากความสูญเสียนี้

ประมาณได้ว่าเป็นการสูญเสียน้ำตาลมากถึงร้อยละ 9.2 ของผลผลิตน้ำตาลที่ได้ต่อปี ตัวอย่างเช่นในปีการผลิต 2544/2545 ประเทศไทยมีการขายน้ำตาลภายในประเทศ 451,941,625 ก.ก. ซึ่งเป็นมูลค่า 6.3 พันล้านบาท ในอัตราดังกล่าวจะประมาณการณ์ได้ว่าเดกซ์แทรนก่อให้เกิดการสูญเสียรายได้ถึง 600 ล้านบาท ซึ่งนับว่าสูงมาก

จากปัญหาดังกล่าว จะเห็นได้ว่าเดกซ์แทรนเป็นอุปสรรคยิ่งที่ก่อให้เกิดความสูญเสียขึ้นในกระบวนการผลิตน้ำตาลทราย โดยจากการศึกษาของบุญส่ง แสงอ่อน (2525) พบว่าจากการประเมินความเสียหายอย่างคร่าวๆ ที่เกิดจากเชื้อกลุ่ม *Leuconostoc* spp. สามารถทำให้สูญเสียเงินถึง 70 ล้านบาทต่อฤดูกาลผลิต โดยมิได้คิดความเสียหายอันเนื่องมาจากเดกซ์แทรนซึ่งจะทำให้มูลค่าของความเสียหายเพิ่มขึ้นจากนี้มาก ดังนั้นหากมีการลดความเสียหายอันเนื่องมาจากเดกซ์แทรนแล้ว ยังจะช่วยให้ประสิทธิภาพในการผลิตน้ำตาลทราย และผลผลิตน้ำตาลทรายเพิ่มสูงขึ้นอีกด้วย การแก้ปัญหาในโรงงานน้ำตาลจึงอาจทำให้ปลอดเชื้อด้วยความร้อน (heat sterilization) หรือเติมสารกำจัดแบคทีเรีย (bacteriocide) ลงไป แต่เนื่องจากความไม่คุ้มค่าใช้จ่ายในทางปฏิบัติ เพราะวิธีแรกต้องมีการติดตั้งเครื่องทำความร้อนซึ่งใช้พลังงานสูง ส่วนวิธีที่สองจะทำให้ผลผลิตน้ำตาลที่ได้สุดท้ายมีสีและรสชาติเปลี่ยนไปจากเดิม อีกวิธีที่สามารถแก้ไขปัญหาได้ดีคือการนำอ้อยที่ผ่านการตัดแล้วเข้ากระบวนการผลิตโดยทันทีภายใน 24 ชั่วโมง แต่เป็นการยากเนื่องจากปริมาณวัตถุดิบอาจมีมากกว่ากำลังผลิตในแต่ละวัน เห็นได้ว่าวิธีการดังที่กล่าวมาเป็นการควบคุมปริมาณจุลินทรีย์ในระบบ

อีกวิธีที่เป็นที่แพร่หลายคือการควบคุมปริมาณเดกซ์แทรนในระบบ โดยสามารถกระทำได้ 2 วิธี (Imrie และ Tibury, 1972) คือ

1. การกำจัดเดกซ์แทรนออกจากน้ำอ้อย โดยสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่

1.1 การใช้คลื่นเสียงความถี่สูง (ultrasonic wave) และรังสีอัลทราไวโอเลต ในการสลายเดกซ์แทรน นอกจากนี้ ยังอาจมีการใช้วิธีการทางกายภาพอื่นร่วมด้วย เช่น อัลทราฟิลเทรชัน (ultrafiltration) ไดอะไลซิส (dialysis) และรีเวอร์สออสโมซิส (reverse osmosis) แต่เป็นวิธีที่ไม่ได้รับความนิยมเนื่องจากมีต้นทุนที่สูงเพราะปริมาณน้ำอ้อยจำนวนมาก (Watson และ Woff, 1955)

1.2 การสลายด้วยกรดร่วมกับความร้อน (Monson และ Paul, 1991) โดยทำให้สายโมเลกุลยาวของเดกซ์แทรนถูกตัดย่อยลงเป็นกลูโคส แต่เกิดข้อเสียคือ เกิดการตัดโมเลกุลเดกซ์แทรน

อย่างสุ่ม (random) และอาจทำให้เกิดการแยกตัวของโมเลกุลซูโครสเป็นกลูโคสและฟรักโทส ซึ่งทำให้ผลผลิตน้ำตาลทรายลดลง

2. กำจัดต้นเหตุของการเกิดเดกซ์แทรนในกระบวนการผลิต โดยจำกัดการปนเปื้อนของ *L. mesenteroides* และ *L. dextranicum* โดย

2.1 การใช้วิธีการทางเคมี โดยการใช้สารเคมีช่วยฆ่าหรือยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย (bacteriocide หรือ bacteriostatic) เกลือของโลหะฮาโลเจน กับต้นอ้อย พ่นลงสู่ที่ดินที่ใช้ปลูก หรือใช้ร่วมกับเครื่องมือในขณะตัดอ้อย แต่วิธีนี้มีข้อพึงระวังถึงสารเคมีตกค้างที่สามารถถ่ายทอดสู่ผู้บริโภคได้

2.2 การใช้วิธีทางกายภาพ ทำการป้องกันน้ำอ้อยบูดเนื่องจากจุลินทรีย์โดยการควบคุมภาวะทางกายภาพของน้ำอ้อย เพื่อหยุดยั้งการเจริญเติบโต เช่นเก็บน้ำอ้อยที่อุณหภูมิห้อง การใช้ความร้อน การควบคุมความเป็นกรด-ด่างของน้ำอ้อย การฉายรังสี และการควบคุมปริมาณน้ำที่จุลินทรีย์ใช้ได้ (water activity; A_w) อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวเหล่านี้ สามารถทำได้ในระดับห้องปฏิบัติการเท่านั้น การปฏิบัติในโรงงานอุตสาหกรรมจะทำให้ต้องลงทุนจำนวนมากในการติดตั้งอุปกรณ์

วิธีการโดยตรงที่จะกำจัดโมเลกุลเดกซ์แทรน และแก้ปัญหาภายในโรงงานน้ำตาลได้อย่างปลอดภัยต่อผู้บริโภค คือ การใช้เอนไซม์ในการตัดสลายเดกซ์แทรน ซึ่งมีข้อดีกว่าวิธีทางเคมีและกายภาพกล่าวคือ เป็นปฏิกิริยาทางชีวเคมีที่มีความจำเพาะต่อเดกซ์แทรนสูง ปฏิกิริยาเกิดในภาวะ (อุณหภูมิ และ ความเป็นกรด-ด่าง) ไม่รุนแรง ใช้เพียงปริมาณน้อยแต่มีประสิทธิภาพสูง และไม่ก่อให้เกิดสารพิษตกค้างในระบบ (Imrie และ Tilbury, 1972)

พบว่าการใช้เอนไซม์เดกซ์แทรนเนสเพียง 3 หน่วยต่อน้ำอ้อย 100 มิลลิลิตรสามารถกำจัดเดกซ์แทรนออกจากน้ำอ้อยได้มากถึงร้อยละ 68.5 ในเวลาเพียง 20 นาทีที่ความเป็นกรด-ด่างคงที่ที่ 7.0 และอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

เดกซ์แทรนเนส

เดกซ์แทรนเนส เป็นเอนไซม์ที่มีชื่อเรียกตามระบบสากลว่า E.C.3.2.1.11, α-1,6-D-glucan-6-glucanohydrolase ซึ่งสามารถย่อยสลายพันธะ α-1,6 ภายในสายโฮโมพอลิเมอร์เดกซ์แทรน (Koh และ Khown, 1970; Galvez-Mariscal และ Lopez-Munguia, 1991) ได้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นไอโซมอลโตส และโอลิโกแซคคาไรด์อื่นๆ และอาจได้กลูโคสบ้างเล็กน้อย (Tsuchiya และคณะ, 1956; Koenig และ Day, 1989) ผลของการย่อยจะทำให้เหลือสายของเดกซ์แทรนที่สั้นลง (น้ำหนักโมเลกุลลดลง) โดยหากผลิตภัณฑ์ที่ได้มีขนาดจำนวนกลูโคสน้อยกว่า 8 หน่วยแล้วจะทำให้คุณสมบัติความหนืดและเหนียวลดลงจนหมด ซึ่งเป็นวิธีแก้ไขปัญหาเดกซ์แทรนในน้ำอ้อย ซึ่งก่อความเสียหายในกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายได้

เดกซ์แทรนเนสสามารถผลิตได้โดยเชื้อจุลินทรีย์หลายชนิด (ตารางที่ 2.3) ทั้งแบคทีเรีย เช่น *Micrococcus* สายพันธุ์ Z-10 (ณฐินี สุวรรณสิงห์, 2540) ยีสต์ เช่น *Lipomyces starkeyi* (Koenig และ Day, 1989a,b) และราในหลายสายพันธุ์เช่น *Penicillium* sp. (Chaiet และคณะ, 1970; Madhu และ Prabhu, 1984; Shukla และคณะ, 1989) *Aspergillus* sp. (Joshi และ Tamhane, 1975) *Chaetomium* sp. (Hattori และคณะ, 1981) นอกจากนี้ยังพบว่ามีการผลิตในพืชชั้นสูง และเนื้อเยื่อสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมบางชนิด โดยพบว่าเชื้อราเป็นแหล่งที่สำคัญที่สุดของการผลิตเอนไซม์เดกซ์แทรน-เนสในเชิงพาณิชย์ (Sidebotham, 1974) อีกทั้งได้มีการนำไปใช้ผลิตทางการค้า (Novo, 1983)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.3 เชื้อจุลินทรีย์ที่สามารถผลิตเดกซ์แทรนเนสได้

จุลินทรีย์	เอกสารอ้างอิง
<u>แบคทีเรีย</u>	
Acromobacter sp.	Sawei และคณะ, 1974; Foxgarty และ Kelly, 1984
Arthrobacter sp.	Kubo และคณะ, 1993
Arthrobacter globiformis	Iwai และคณะ, 1996
Bacillus circulan	Okami และคณะ, 1980; Okami, 1986
Bacillus megaterium	Zevenhuizen, 1968
Bacillus subtilis	Zevenhuizen, 1968
Bacteroides sp.	Staat และคณะ, 1973; Staat และ Schachtele, 1974
Bacteroides melaninogenicus	Holbrook และ Mcmillan, 1977
Bacteroides ochraceus	Schachtele, 1975;Holbrook และ Mcmillan, 1977
Bacteroides oralis	Takahashi, 1982; Wynter และคณะ, 1995
Bacteroides ovatus	Holbrook และ Mcmillan, 1977
Bacteroides thetaiotaomicron	Holbrook และ Mcmillan, 1977
Bifidobacterium sp.	Kaster และ Brown, 1983
Brevibacterium sp.	Yamaguchi และ Gocho, 1983
Brevibacterium fuscum	Sugiura และ Ito, 1975
Brevibacterium fuscum var dextranlyticum	Mizuno และคณะ, 1999
Capnocytophaga ochracea	Igarashi และคณะ, 1998
Capnocytophaga sputigena	Igarashi และคณะ, 1998
Cellovibrio fulva	Forgarty และ Kelly, 1984
Cellovibrio mixtus	Wynter และคณะ, 1995
Cytophagus johnsonii	Forgarty และคณะ, 1984
Flavobacterium sp.	Koboyashi และคณะ, 1983
Fusobacterium fusiforme	Costa และคณะ, 1974
Lactobacillus sp.	Staat และคณะ, 1973; Wynter และคณะ,1995
Prevotella oralis	Igarashi และคณะ, 1998
Prevotella melaninogenica	Igarashi และคณะ, 1998
Prevotella loescheii	Igarashi และคณะ, 1998
Pseudomonas sp.	Galvez-Mariscal และ Lopez-Munguia, 1991

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.3 (ต่อ)

จุลินทรีย์	เอกสารอ้างอิง
Pseudomonas mixta	Wynter และคณะ, 1995
Streptococcus mitis	Forgarty และคณะ, 1984
Lactobacillus sp.	Staat และคณะ, 1973; Wynter และคณะ,1995
Prevotella oralis	Igarashi และคณะ, 1998
Prevotella melaninogenica	Igarashi และคณะ, 1998
Prevotella loescheii	Igarashi และคณะ, 1998
Pseudomonas sp.	Galvez-Mariscal และ Lopez-Munguia, 1991
Pseudomonas mixta	Wynter และคณะ, 1995
Streptococcus mitis	Forgarty และคณะ, 1984
Streptococcus mutans	Igarashi และคณะ, 1992
Micrococcus sp. สายพันธุ์ Z-10	ณฐินี สุวรรณสิงห์, 2533
แอคติโนมัยซีส	
Actinomyces cinemonensis	Schachtele และคณะ, 1975
Streptomyces cinemonensis	Hattori และ Ishibashi, 1981
ยีสต์	
Lipomyces starkei	Webb และ Spencer, 1983; Koenig, 1989
รา	
Aspergillus sp.	Forgarty และ Kelly, 1984
Aspergillus carneus	Fukumoto และคณะ, 1971
Aspergillus luchvasis	Hattori และ Ishibashi, 1981
Aspergillusfumigatus	Hattori และ Ishibashi, 1981
Chetomium gracile	Mizuno และคณะ, 1999
Chetomium indicum	Wynter และคณะ, 1995
Chetomium luteum	Wynter และคณะ, 1995
Chetomium thermophilum var coprophilum	Wynter และคณะ, 1995
Chetomium thermophilum var thermophilum	Wynter และคณะ, 1995
Chetomium virescens	Wynter และคณะ, 1995
Fusarium moniliforme	Simonson และ Liberta, 1975
Gibberella fukuroi	Hattori และ Ishibashi, 1981

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.3 (ต่อ)

จุลินทรีย์	เอกสารอ้างอิง
Hamicola grisea	Hattori และ Ishibashi, 1981
Paecilomyces lilacinus	Hattori และ Ishibashi, 1981
	Charles และ Farrell, 1957
Penicillium aculeatum	Madhu และ Prabhu ,1985
Penicillium funiculosum	Chaiet และ คณะ,1970;Kosaricและคณะ,1973
Penicillium lilacinum	Galvez-Mariscal และ Lopez-Munguia,1991
Penicillium luteum	Fukumoto,1971
Penicillium minioluteum	Mizuno และ คณะ,1999
Penicillium purpurogenum	Galvez-Mariscal และ Lopez-Munguia,1991
Penicillium roguefortii	Hattori และ Ishibashi,1981
Penicillium verruculosum	Whetley และ Moo-Yong,1977
Spicaria sp.	Yamaguchi และ Gocho,1973
Spirotichum asteroides	Hottari และ Ishibashi ,1981
Verticellium sp.	Tchuchiya และ คณะ, 1952

ที่มา : สุหัทยา จิระนันทิพร, 2543

เอนไซม์เดกซ์แทรนเนสเป็นเอนไซม์ที่สร้างขึ้นโดยต้องอาศัยสารชักนำ (inducible enzyme) ซึ่งก็คือเดกซ์แทรน และถูกปลดปล่อยออกมานอกเซลล์ (extracellular enzyme) (Koenig และ Day, 1989a,b) เอนไซม์นี้สามารถย่อยเดกซ์แทรนได้สองแบบคือ

1. Endo-spliting dextranase เป็นเดกซ์แทรนเนสที่ย่อยสลายพันธะที่จุดใดจุดหนึ่งในสายเดกซ์แทรนทำให้ได้สายสายพอลิเมอร์น้ำตาลสายสั้นๆ โดยผลจากการที่เดกซ์แทรนถูกย่อยเป็นสายสั้นทำให้สมบัติความเหนียวหนืดลดลงตามไปด้วย ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วพบว่าเดกซ์แทรนเนสจากเชื้อราจะมีการย่อยสลายแบบนี้ สายเดกซ์แทรนที่ถูกย่อยแล้ว จะมีขนาดเล็กลง มักพบอยู่ในรูปของโอลิโกเมอร์ ไดเมอร์ หรือ โมโนเมอร์ของน้ำตาลกลูโคส แต่โดยส่วนมากแล้วจะอยู่ในรูปของไอโซมอลโทส (isomaltose)

เดกซ์แทรนเนสจากจาก *Penicillium* sp. มีคุณสมบัติการย่อยสลายแบบ endo-1,6-α-D-glucosidase (Tsuru และคณะ, 1971; เอก แสงวิเชียร, 2532) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นไอโซมอลโตส และไอโซมอลโตแซคคาไรด์เป็นส่วนใหญ่

เดกซ์แทรนเนสที่ผลิตจากแบคทีเรียมักมีคุณสมบัติเป็นเอนโดเดกซ์แทรนเนส ที่ให้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นไทร-, เททระ-, และ เพนทะแซคคาไรด์ และมีไอโซมอลโทสเป็นส่วนน้อย (Riffer, 1983)

2. Exo-spliting dextranase เป็นเดกซ์แทรนเนสที่ทำการย่อยสลายพันธะที่เชื่อมโมเลกุลของกลูโคสจากปลายของเดกซ์แทรนด้านใดด้านหนึ่ง เป็นการตัดทีละโมเลกุลของกลูโคส

จากปัญหาที่เกิดขึ้นภายในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาล อันเนื่องมาจากเดกซ์แทรนนั้น มีบริษัทเคมีภัณฑ์หลายแหล่งที่ผลิตเดกซ์แทรนเนสออกมาในเชิงพาณิชย์ เพื่อนำไปใช้ในการแก้ปัญหาดังกล่าว ทั้งนี้เพราะความจำเพาะต่อสับสเทรตสูงของเดกซ์แทรนเนส ไม่ก่อให้เกิดปัญหาอื่นๆตามมาในขั้นตอนกระบวนการผลิตส่วนอื่นๆ ยกตัวอย่างเช่น

Dextranex™ L-400 ของบริษัท Solvey Asia Pacific จากประเทศสิงคโปร์ (Solvey, 1996)
Dextranase 25L และ 50L ของบริษัท Novo ประเทศเดนมาร์ก (Novo, 1983)
Glucanase D-1 ของบริษัท Pfizer ประเทศสหรัฐอเมริกา (Tilbury, 1974)
Talozyme ของบริษัท Tate and Lyte ประเทศอังกฤษ (Inkerman, 1980)

โรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาลของประเทศที่ส่งออกเป็นสินค้าหลักเช่น ออสเตรเลีย จาไมก้า เปอร์โตริโก้ อินเดีย และกลุ่มประเทศลาตินอเมริกา ได้มีการทดลองนำเดกซ์แทรนเนสไปใช้ในการแก้ปัญหาเดกซ์แทรน

Tilbury (1972) ทำการศึกษาโรงงานในแถบหมู่เกาะเวสต์อินดีส์ พบว่ามีการใช้เดกซ์แทรนเนส 3 หน่วยต่อน้ำอ้อย 100 มล. สามารถกำจัดเดกซ์แทรนออกไปจากระบบได้ร้อยละ 68.5 โดยใช้เวลาทั้งสิ้น 20 นาที โดยมีอุณหภูมิขณะใช้งานอยู่ที่ 40 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังพบว่าความรุนแรงของปัญหาเดกซ์แทรนในแต่ละประเทศในแถบนี้มีไม่เท่ากัน โดยต่อมา Tilbury (1974) กล่าวว่ากรณีที่มีเดกซ์แทรนปริมาณปานกลางหรือมากนั้นควรใช้เดกซ์แทรนเนส 6-7 หน่วยต่อน้ำอ้อย 100 มล. ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ปริมาณเดกซ์แทรนที่ถูกกำจัดจะเป็นร้อยละ 66 มีค่าใช้จ่ายในการใช้งานประมาณ 1.0-1.5 เหรียญสหรัฐต่อการผลิตน้ำตาลทราย 1 ตัน ค่าใช้จ่ายเหล่านี้คิดเป็นเพียงประมาณ

ร้อยละ 1 ของรายจ่ายที่จะเพิ่มมากขึ้น เมื่อเทียบกับความสูญเสียถึงร้อยละ 10 ที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากปัญหาเดกซ์แทรน

Inkerman (1980) รายงานไว้ว่าโรงงานน้ำตาลอ้อยแห่งหนึ่งในรัฐควีนส์แลนด์ ประเทศออสเตรเลียใช้เดกซ์แทรนเนสจาก *Penicillium* sp. แก้ปัญหาเดกซ์แทรน โดยใช้ปริมาณ 8 หน่วยต่อน้ำอ้อย 100 มล. ซึ่งมากกว่าที่ Tilbury รายงานในปี 1972 5 หน่วย พบว่าคุณภาพและปริมาณของน้ำตาลทรายเพิ่มขึ้น และยังรายงานอีกว่าการใช้เดกซ์แทรนเนส 2 ยี่ห้อคือ Glucanase D-1 และ Novo Dextranase กับเดกซ์แทรนที่-2000 อัตราการย่อยสลายเดกซ์แทรนที่-2000 จะลดลงหาก มีความเข้มข้นมากกว่า 4 กรัมต่อลิตร

Inkerman (1980) รายงานว่าเดกซ์แทรนเนสมีประโยชน์มากกับอ้อยที่มีการเจือปนของเดกซ์แทรนก่อนเข้าสู่กระบวนการหีบ โดยการใช้เดกซ์แทรนเนส 5-10 หน่วย ในภาวะการผลิตปรกติ โดยหากย่อยสลายเดกซ์แทรนให้มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า 10,000 หน่วย ถือว่าเพียงพอต่อการขจัดความเสียหายอันเนื่องมาจากเดกซ์แทรนได้ โดยไม่จำเป็นต้องย่อยสลายอย่างสมบูรณ์ ซึ่งการย่อยระดับนี้สามารถลดปัญหาการตกผลึกน้ำตาลทรายออกมาเป็นรูปเข็มได้ อย่างไรก็ตามหากมีเดกซ์แทรนเนสที่สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 70 องศาเซลเซียสจะทำให้ดียิ่งขึ้น เพราะส่วนมากเดกซ์แทรนเนสที่ขายในรูปการค้าทั่วไปจะสลายตัวที่ 65 องศาเซลเซียส สำหรับค่าใช้จ่ายถือว่าคุ้มค่าหากเทียบกับปริมาณการผลิตที่ลดต่ำลงเนื่องจากสูญเสียไปในรูปเดกซ์แทรนและกากน้ำตาล

Jolly และ Prakash (1987) ทดลองใช้ Novo Dextranase 25L ในโรงงานผลิตน้ำตาลทรายประเทศอินเดียเพื่อกำจัดเดกซ์แทรน โดยใช้ปริมาณ 100 ppm ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลา 15 นาที สามารถกำจัดเดกซ์แทรนออกไปได้ร้อยละ 48-52 และถ้ามีการต้มน้ำอ้อยให้เดือดหลังจากการกรองแล้ว จะทำให้กำจัดเดกซ์แทรนออกไปได้เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 61-85

Inkerman และ James รายงานไว้ในปี 1976 ถึงการใช้เดกซ์แทรนเนสเชิงพาณิชย์ที่มีชื่อทางการค้าว่า Glucanase D-1 สามารถย่อยสลายเดกซแทรนที่อยู่ในน้ำอ้อยออกไปได้มากถึงร้อยละ 95-97 แต่เนื่องจากการผลิตเดกซ์แทรนเนสทำได้ยาก ต้นทุนสูง ราคาจึงแพง ทำให้ไม่สามารถนำมาใช้ได้จริงในระบบอุตสาหกรรม

จากเอกสารคู่มือการใช้เดกซ์แทรนเนสของบริษัท Novo ซึ่งตีพิมพ์ในปี 1983 มีการเสนอให้ใช้เดกซ์แทรนเนสเติมลงในน้ำอ้อยดิบหรือระหว่างการหีบ ในช่วงแรกของกระบวนการผลิตน้ำตาลทราย

ซึ่งจะเป็นช่วงที่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดเดกซ์แทรนในวัตถุดิบได้ดีที่สุด แต่อาจเติมได้ในช่วงที่ทำให้น้ำอ้อยใส (Clarification) หรือช่วงต้มระเหยน้ำอ้อย แต่จะให้ประสิทธิภาพลดลง การเติมเดกซ์แทรนเนสโดยใช้เอนไซม์ 5 กรัมต่อน้ำอ้อย 1 ตัน ในภาวะที่มีเดกซ์แทรนอยู่ 10,000 ppm ปริมาณน้ำตาล 20 °บริกซ์ ค่าความเป็นกรด-ด่างที่ 5.0 ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จะสามารถลดปริมาณเดกซ์แทรนในน้ำอ้อยให้เหลือเพียงร้อยละ 10 ได้ สำหรับภาวะที่เหมาะสมของการทำงานของเดกซ์แทรนเนสคือช่วงอุณหภูมิ 50-55 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-ด่าง 5.0-5.5 โดยระยะเวลาการทำงานไม่ควรเกิน 30 นาที ก่อนเดกซ์แทรนเนสจะสูญเสียสภาพ

สำหรับ Dextranex™ L-400 ของบริษัท Solvey Asia Pacific นั้นทางบริษัทได้ตีพิมพ์คำแนะนำในการใช้ในปี 1996 ว่าหากมีเดกซ์แทรนมากกว่าร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนักในน้ำอ้อย จะทำให้ในน้ำอ้อยมีความเหนียวหนืดสูงมากและส่งผลต่อกระบวนการขั้นตอนการทำบริสุทธิ์ (refining process) ให้ยากขึ้น นอกจากนี้ยังส่งผลต่ออัตราเร็วในการกรอง เนื่องจากเดกซ์แทรนจะไปเคลือบที่แผ่นกรองทำให้เกิดปัญหากรองได้ช้าและเพิ่มความดันบริเวณแผ่นกรอง อัตราการต้มเคี่ยวจะนานขึ้น เกิดการตกผลึกน้ำตาลที่ไม่สมบูรณ์ การสูญเสียซูโครสไปในรูปของเดกซ์แทรนและกากน้ำตาล ผลผลิตน้ำตาลต่อปริมาณอ้อยลดลง และที่เสียหายมากที่สุดคือจำเป็นต้องถึงขั้นปิดโรงงานเพื่อทำความสะอาดหน่วยการผลิตอื่นๆทำให้สูญเสียเงินจำนวนมหาศาล เดกซ์แทรนเนส Dextranex™ L-400 ของทางบริษัท ซึ่งผลิตได้จากเชื้อ *Chaetomium gracile* (ตารางที่ 2.3) เป็นที่ยอมรับขององค์การอาหารและยาของสหรัฐอเมริกาให้ใช้ได้ในอุตสาหกรรมอาหาร และไม่มีอินเวอเทสซึ่งอาจทำลายน้ำตาลได้ Dextranex™ L-400 มีภาวะเหมาะสมคือช่วงอุณหภูมิการใช้ 50-60 องศาเซลเซียส ช่วงความเป็นกรด-ด่าง 5.0-5.5 ความหวานของน้ำตาลในระบบ (10 °บริกซ์) เดกซ์แทรนเนสตัวนี้สามารถใช้ได้ดีในโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาล เนื่องจากสามารถทนต่ออุณหภูมิสูงภายในสายการผลิต และยังปลอดภัยต่อผู้บริโภค

ปัญหาที่ต้องคำนึงถึงในการใช้เดกซ์แทรนเนสในโรงงานอุตสาหกรรมก็คือ การใช้ประโยชน์จากเอนไซม์จะสามารถทำได้ครั้งเดียว โดยเอนไซม์ที่ค้างอยู่ในน้ำอ้อยก็จะออกไปกับน้ำอ้อยตามกระบวนการขั้นตอนอื่นๆต่อไป ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แม้ว่ายังมีแอคติวิตีของเดกซ์แทรนเนสอยู่ก็ตาม อีกทั้งราคาต้นทุนในการใช้สูง ดังนั้นจึงมีผู้พยายามคิดค้นหาวิธีการคุ้มค่าโดยการนำเอนไซม์กลับมาใช้ใหม่โดยวิธีการตรึงรูปเดกซ์แทรนเนสกับแมทริกซ์ที่เหมาะสม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อุษณีย์ กุลินทรประเสริฐ (2535) ได้ศึกษาการนำเดกซ์แทรนเนสจากเชื้อ *Penicillium* sp. สายพันธุ์ 61 (เอก แสงวิเชียร, 2531) มาตรึงรูปบนคาร์บอนกัมมันต์พบว่าเดกซ์แทรนเนสตรึงรูปมีค่าครึ่งชีวิตมากกว่า 45 วัน และมีแอคติวิตีจำเพาะสูงขึ้น

Sugiura และ Ito (1975) ได้ตรึงรูปเดกซ์แทรนเนสกับ Sepharose 4B โดยใช้ไซยาโนเจน-โบรไมด์เป็นตัวกระตุ้น พบว่าเดกซ์แทรนเนสมีความทนต่อความร้อนสูงขึ้น สามารถนำมาใช้ในระบบต่อเนื่องและนำกลับมาใช้ใหม่ได้

อนันตพงษ์ สุขเกษ (2543) ได้ทำการตรึงรูปเดกซ์แทรนเนสจาก *Penicillium* sp. สายพันธุ์ SMCU3-14 บนผิวของทราย โดยใช้สารกลูตารัลดีไฮด์ทำหน้าที่เป็นสารช่วยตรึงพบว่ายังคงรักษาแอคติวิตีของเดกซ์แทรนเนสไว้ได้ร้อยละ 65 หลังจากใช้งานผ่านไป 10 รอบ และเดกซ์แทรนเนสตรึงรูปมีความเสถียรต่ออุณหภูมิมากกว่าเดกซ์แทรนเนสอิสระ

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรึงรูปเดกซ์แทรนเนสเพื่อนำมาใช้ในการลดการปนเปื้อนของเดกซ์แทรนในกระบวนการผลิตน้ำตาลทราย ทำให้เกิดปัญหาตามมาคือ ความจำเป็นในการผลิตเดกซ์-แทรนเนสให้มีปริมาณมากพอสำหรับรองรับการใช้ในการตรึงรูปด้วยวิธีการต่างๆ ซึ่งเดิมการศึกษาส่วนมากมุ่งเน้นไปในการผลิตระดับขวดเขย่าเป็นส่วนใหญ่ นอกจากความต้องการเดกซ์แทรนเนสปริมาณมากแล้ว ปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงคือแอคติวิตีของเดกซ์แทรนเนสต้องสูงเพียงพอในการทำงานในกระบวนการผลิตน้ำตาล

Joshi และ Tamhane (1975) ศึกษาการผลิตเดกซ์แทรนเนส โดยเชื้อรา *Aspergillus luchensis* ในอาหารเลี้ยงเชื้อแบบ complex medium ซึ่งประกอบด้วยเดกซ์แทรนร้อยละ 2 เพื่อเป็นสารชักนำในการสร้างเดกซ์แทรนเนส, สารสกัดจากยีสต์ร้อยละ 1, สารสกัดจากเนื้อวัวร้อยละ 2, เปปโตนร้อยละ 0.5 และน้ำแช่ข้าวโพด (corn steep liquor) ร้อยละ 2 พบว่าสูตรอาหารดังกล่าว *A. luchensis* จะสร้างเดกซ์แทรนเนสสูงสุดที่ชั่วโมงที่ 96 ในขณะที่ Madhu และ Prabhu (1983) ซึ่งเลี้ยง *Penicillium aculeatum* ในอาหารสูตร Fukumoto พบว่า รานี้ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีแอคติวิตีเดกซ์แทรนเนสสูงสุดถึง 60-70 หน่วยต่อมิลลิลิตร ที่ชั่วโมงที่ 96 ของการเลี้ยงเชื้อ

Shukla และคณะ (1989) ศึกษาตัวแปรต่างๆต่อการผลิตเดกซ์แทรนเนสโดย *Penicillium aculeatum* NSI-4 พบว่าเมื่อเลี้ยงในอาหารสูตร Fukumoto ซึ่งมีเดกซ์แทรนร้อยละ 1.5 (น้ำหนักโมเลกุล 4 x 10^7) เป็นสารชักนำ ความเป็นกรด-ด่าง 5.5-6.0 ที่อุณหภูมิ 30-35 องศาเซลเซียส อัตราการเขย่า 200 รอบต่อนาที จะให้ปริมาณแอคติวิตีของเดกซ์แทรนเนสสูงสุดถึง 230 หน่วยต่อ มล.

สำหรับการศึกษาในประเทศไทยโดยเอก แสงวิเชียร (2531) ซึ่งเป็นผู้คัดเลือกเชื้อราจากตัวอย่างดินแหล่งต่างๆ ในประเทศไทยพบว่า *Penicillium* sp. สายพันธุ์ 61 ซึ่งเป็นเชื้อที่ได้จากการปนเปื้อนในภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สามารถผลิตเดกซ์แทรนเนสได้สูงประมาณ 60 หน่วยต่อมิลลิลิตร ในอาหารเลี้ยงเชื้อที่ปรับปรุงจากสูตรของ Fukumoto ซึ่งประกอบด้วยเดกซ์แทรนร้อยละ 1 (น้ำหนักโมเลกุล 3-50 x 10^6) เป็นแหล่งคาร์บอน, โซเดียมไนเทรตร้อยละ 0.2, ไดโปแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟตร้อยละ 0.2, โปแทสเซียมคลอไรด์ร้อยละ 0.05, แมกนีเซียมซัลเฟต 0.05 ความเป็นกรด-ด่างที่ 6.0 เลี้ยงเชื้อที่อุณหภูมิห้อง ในวันที่ 6 ของการเลี้ยงเชื้อ

<u>กากน้ำตาล</u>

กากน้ำตาลเป็นผลิตภัณฑ์ร่วม (by-product) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตน้ำตาลทราย โดยกากน้ำตาลจะถูกแยกออกมาจากกระบวนการผลิตในขั้นตอนการปั่นแยกผลึกน้ำตาลทรายในหม้อปั่น กากน้ำตาลจะถูกแยกออกจากแมสซิควิทด้วยแรงหนีจุดศูนย์กลางออกมาทางระบายข้างหม้อปั่น

ปริมาณกากน้ำตาลที่เกิดขึ้นของแต่ละโรงงานผลิตน้ำตาล ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพโดยรวมของกระบวนการผลิต หากสามารถผลิตน้ำตาลทรายต่อตันอ้อยในปริมาณที่สูงกากน้ำตาลที่เกิดขึ้นจะสูง ในกระบวนการตกผลึกน้ำตาลหากมีการตกผลึกอย่างสมบูรณ์ จะทำให้มีกากน้ำตาลเหลือออกมาภายหลังปริมาณต่ำ สำหรับโรงงานผลิตน้ำตาลในประเทศไทยเนื่องจากยังไม่สามารถแก้ไขปัญหาเดกซ์แทรนและพอลิแซคคาไรด์ในน้ำอ้อยได้อย่างสมบูรณ์ จึงทำให้เกิดปัญหาการตกผลึกน้ำตาลบางส่วนและทำให้เกิดกากน้ำตาลออกมา (Stowell และคณะ, 1987) ปริมาณกากน้ำตาลของแต่ละโรงงานเป็นตัวสะท้อนถึงความรุนแรงของปัญหาการปนเปื้อนของเดกซ์แทรนในระบบการผลิต โดยเฉลี่ยจะมีกากน้ำตาลเกิดขึ้น 300-360 กิโลกรัมจากการผลิตน้ำตาลทราย 1 ตัน (Parker, 1982) ในปีการผลิต 2545/2546 มีกากน้ำตาลถูกผลิตออกมา 3.5 ล้านตัน (ตารางที่ 2.4) ซึ่งสูงกว่าปีการผลิตอื่นๆ มาก

นอกจากนี้กากน้ำตาลอาจมีปริมาณของกลูโคสและฟรักโทสสูงเนื่องจากมีเอนไซม์อินเวอร์เทส ซึ่งสร้างจากเชื้อจุลินทรีย์ที่ติดมากับอ้อย นอกจากนี้ยังพบว่ากากน้ำตาลยังอุดมไปด้วยวิตามินและแร่ธาตุต่างๆมากมาย (ตารางที่ 2.5) จึงมีการนำกากน้ำตาลมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในโรงงานทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพ เช่นการผลิตเอธานอล (Sobocan และ Glavic, 2000)

ตารางที่ 2.4 ปริมาณกากน้ำตาลที่ผลิตขึ้นจากโรงงานน้ำตาลทั่วประเทศ

ปีการผลิต	ปริมาณการผลิตกากน้ำตาล (ตัน)				
	ภาคเหนือ	ภาคกลาง	ภาคตะวันออก	ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	รวมทั่วประเทศ
2531/32	316,091.517	981,689.019	204,461.180	244,655.904	1,746,897.620
2532/33	287,657.980	945,148.996	207,576.479	278,438.974	1,718,822.429
2533/34	480,268.650	1,090,762.406	197,308.855	399,792.182	2,168,132.093
2534/35	555,060.390	1,168,612.289	208,329.009	469,575.948	2,401,577.636
2535/36	411,194.740	742,592.229	151,285.670	317,975.931	1,623,048.570
2536/37	455,111.200	870,205.174	157,228.948	435,502.897	1,918,048.219
2537/38	617,667.243	1,069,279.235	182,072.323	767,424.183	2,636,442.984
2538/39	703,243.569	1,027,967.262	220,460.398	901,672.740	2,853,343.969
2539/40	638,445.510	1,043,956.701	156,074.592	755,887.967	2,594,364.770
2540/41	502,758.220	704,670.967	116,177.190	894,459.718	2,218,066.095
2541/42	502,229.047	862,253.340	148,254.525	883,098.575	2,395,835.487
2542/43	496,788.890	854740.085	152,744.260	916,775.310	2,421,048.545
2543/44	480,010.610	822,623.330	140,591.900	823,207.078	2,266,432.918
2544/45	556,850.280	958,301.110	190,462.300	1,097,592.410	2,803,206.100
2545/46	669,712.902	1,178,192.748	208,335.160	1,480,099.180	3,536,339.990

ที่มา : สำนักงานกองทุนอ้อยและน้ำตาลทราย (2547)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.5 วิตามินและเกลือแร่ที่พบในกากน้ำตาลจากโรงงานน้ำตาลจากอ้อย

วิตามิน	ปริมาณ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)
ไบโอติน (Biotin)	3
กรดโฟลิก (Folic acid)	0.04
อิโนซิทอล (Inositol)	6,000
แพนโทเธเนท (Pantothenate)	55
ไพริดอกซิน (Pyridoxine)	3
ไรโบฟลาวิน (Riboflavin)	3
ไธอามีน (Thiamine)	2
กรดนิโคทินิก (Nicotinic acid)	800
โคลีน (Choline)	600
เกลือแร่	ปริมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
โซเดียม (Sodium)	0.1 – 0.4
โปแทสเซียม (Potassium)	1.5 – 5.0
แคลเซียม (Calcium)	0.4 – 0.8
คลอไรด์ (Chloride)	0.7 – 3.0
ฟอสฟอรัส (Phosphorus)	0.03 – 0.1
ซัลเฟอร์ (Sulphur)	0.3 – 0.8

(ดัดแปลงจาก Baker, 1982; Paturao, 1982)

กากน้ำตาลจากอ้อยมีการนำมาจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ เพื่อนำรายได้เข้าสู่โรงงานน้ำตาลทดแทนที่ต้องสูญเสียไปในการเกิดกากน้ำตาลในกระบวนการ คุณภาพของกากน้ำตาลขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยตัวอย่างเช่น อายุของอ้อยที่นำมาเป็นวัตถุดิบ ปริมาณน้ำตาลที่มีอยู่ กรรมวิธีการแยกกากน้ำตาลในประเทศไทยพบ 3 รูปแบบด้วยกันคือ

1. กากน้ำตาลที่ไม่ผ่านการใช้กำมะถันในกระบวนการผลิตน้ำตาล (Unsulphured molasses) เป็นกากน้ำตาลที่มีคุณภาพดีที่สุด ผลิตจากอ้อยที่มีอายุเหมาะสมในช่วงเก็บเกี่ยว

Navarro และคณะ (2000) ได้ใช้กากน้ำตาลจากอ้อยเป็นส่วนประกอบของอาหารเลี้ยงในถังหมัก ร่วมกับส่วนประกอบอื่นๆ เพื่อใช้ในการหมักแอลกอฮอล์เนื่องจากกากน้ำตาลเป็นแหล่งของน้ำตาลสำหรับเป็นสับสเทรต

กากน้ำตาลจากอ้อยถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวาง ในรูปของแหล่งคาร์บอนราคาถูกในการผลิตยีสต์ทางอุตสาหกรรมสำหรับทำขนมปัง (White, 1954) เนื่องจากประกอบไปด้วยวิตามินและเกลือแร่สำคัญหลายชนิด สามารถนำมาใช้เป็นสารเร่งการเจริญเติบโตได้ (growth factors) (Malathi และ Chakraborty, 1991)

2. กากน้ำตาลที่ผ่านการใช้กำมะถันในกระบวนการผลิตน้ำตาล (Sulphured molasses) เป็นกากน้ำตาลที่ได้จากวัตถุดิบอ้อยที่มีอายุไม่ถึงช่วงเก็บเกี่ยว และมีการใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในขั้นตอนการทำให้น้ำอ้อยใส กากน้ำตาลที่ได้จากช่วงการต้มครั้งแรกจะมีคุณภาพมากกว่าที่ได้จากการต้มน้ำอ้อยในรอบที่สองเนื่องจากมีปริมาณน้ำตาลเจือปนอยู่มากกว่า กากน้ำตาลที่ได้จากการต้มน้ำอ้อยรอบสองจะมีปริมาณน้ำตาลเหลือน้อยกว่า สีเข้มมากกว่าและมีกลิ่น

3. กากน้ำตาลที่ได้จากการต้มน้ำอ้อยรอบที่สาม (Backstrap molasses หรือ Final molasses) กากน้ำตาลชนิดนี้มีปริมาณน้ำตาลเหลือน้อยมากและมีปริมาณโลหะเจือปนปริมาณสูง เหมาะสำหรับนำไปเป็นอาหารสัตว์เท่านั้น

Ryan และ Johnson (2001) นำเอาวิธีไดอะไลซิสและอัลทราฟิลเทรชันมาใช้กับกากน้ำตาลจากอ้อยเพื่อทำการแยกเอาปริมาณโลหะหนัก เกลือโปแทสเซียมออกไปก่อนนำมาใช้ในการเป็นอาหารเลี้ยงเชื้อ เนื่องจากมีรายงานว่าโลหะหนักบางชนิดยับยั้งการผลิตเอธานอลด้วยเชื้อ *Zymomonas mobilis* ทำให้มีการผลิตเอธานอลมากขึ้น

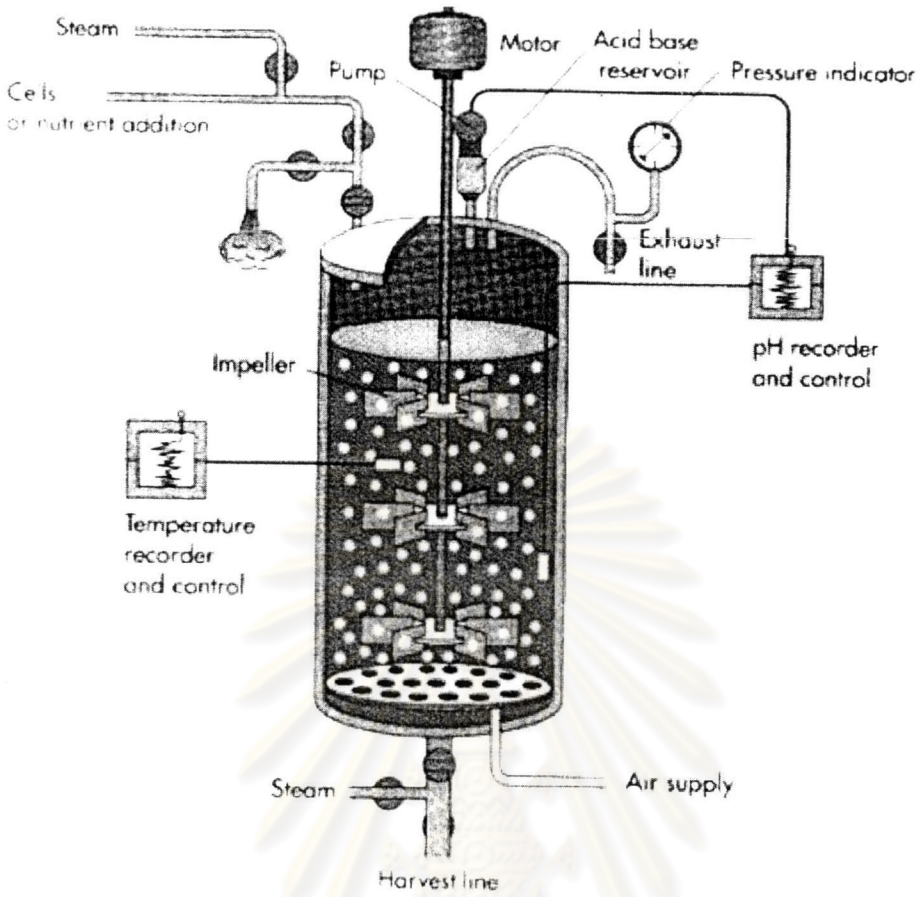
จากการรายงานของ Rearick ในปี 1995 ที่ทำให้กับ Amalgamated Research Inc. พบว่ามีปริมาณเดกซ์แทรนปนอยู่ในกากน้ำตาลถึง 2,600 ppm โดยปริมาณเดกซ์แทรนในแต่ละปีจะแปรผันเนื่องจากปัจจัยต่างๆตั้งแต่วัตถุดิบในการผลิตคืออ้อยในแต่ละปี และการควบคุมกระบวนการผลิตในโรงงาน

การผลิตในระดับขยายส่วน

การวิจัยในสาขาด้านเทคโนโลยีชีวภาพของจุลินทรีย์ มักเริ่มต้นจากการเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ในระดับขนาดเล็กเพื่อศึกษาลักษณะการเจริญเติบโต และการสร้างผลิตภัณฑ์ของจุลินทรีย์แต่ละชนิด โดยมุ่งศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อภาวะในการเจริญ และหาภาวะกายภาพที่เหมาะสมที่สุดที่จะส่งผลต่อการผลิตผลิตภัณฑ์ให้ได้มากที่สุด ยกตัวอย่างเช่น อุณหภูมิที่ใช้ในการเพาะเลี้ยง ความเป็นกรด-ด่าง ความเร็วรอบในการเขย่าขวดเพาะเลี้ยงเพื่อให้อากาศ จากนั้นเมื่อมีความจำเป็นต้องเพาะเลี้ยงปริมาณมาก หรือต้องการผลิตภัณฑ์จากจุลินทรีย์ในปริมาณสูง การเลี้ยงในระดับขวดเขย่าจึงเป็นเรื่องไม่สะดวกและเพียงพออีกต่อไป การผลิตในระดับขยายส่วนจึงเข้ามามีบทบาทเพื่อมุ่งหวังให้สามารถสร้างผลิตภัณฑ์ให้มากขึ้น โดยใช้เวลาในการเพาะเลี้ยงให้น้อยที่สุด โดยเครื่องมือสำคัญที่สุดอย่างหนึ่งสำหรับการผลิตระดับขยายขนาดคือ ถังหมักหรือเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพ (Fermentor หรือ Bioreactor)

โดยหน้าที่ที่สำคัญของถังหมักคือ ทำให้เกิดภาวะแวดล้อมที่สามารถควบคุมได้ สำหรับการเจริญของจุลินทรีย์เพื่อให้ได้ผลผลิตตามต้องการ การออกแบบถังหมักเพื่อใช้ในกระบวนการหมักแต่ละชนิดอาจมีรายละเอียดเล็กน้อยที่ต่างกันไป แต่โดยทั่วไปต้องมีคุณสมบัติพื้นฐานเช่น มีความแข็งแรงทนทานต่อความร้อน และความดันสูงได้ โดยมีระบบการให้อากาศเข้าสู่ถังหมัก ระบบการกวน ควบคุมอุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่าง และการควบคุมการเกิดฟองที่ดี เป็นต้น (กำเนิด สุภัณวงษ์, 2535)

การออกแบบถังหมักที่ถูกต้องต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญในสาขาต่างๆเช่น นักจุลชีววิทยา นักชีวเคมี วิศวกรเคมี วิศวกรเครื่องกล และนักวิเคราะห์ต้นทุน ในปัจจุบันแม้ว่าจะมีการออกแบบถังหมักหลายแบบ แต่มีเพียงไม่กี่แบบเท่านั้นที่ใช้ได้ดีกับกระบวนการหมักที่ต้องการอากาศในระดับอุตสาหกรรม ถังหมักแบบที่นิยมใช้กันมากที่สุด ได้แก่ ถังหมักรูปทรงกระบอกตั้งที่มีใบพัดสำหรับกวนผสม และมีท่อให้อากาศทางด้านล่าง (รูปที่ 2.4)



รูปที่ 2.4 รูปแบบถังหมักพื้นฐานที่นิยมใช้ในการทำการผลิตระดับขยายขนาด
ที่มา : Chynoweth (2004)

ลักษณะและขนาดของถังหมัก

ขนาดของถังหมักแบ่งเป็น 3 ระดับตามลักษณะการใช้งานคือ

1. ถังหมักระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory scale fermentor) มีขนาดตั้งแต่ 1-20 ลิตร ซึ่งปริมาตรใช้งาน (Working volume) จะเป็น 0.5-15 ลิตร

2. ถังหมักระดับโรงงานนำทาง (Pilot-plant scale fermentor) ถังหมักมีปริมาตรใช้งาน 40, 100 ถึง 200 ลิตร ในบางกรณีที่การผลิตต้องการใช้ถังหมักขนาดใหญ่มากๆ ก็อาจใช้ถังหมักระดับโรงงานที่มีขนาดใหญ่ถึง 1,000 ลิตร

3. ถังหมักระดับโรงงานผลิต (Factory scale fermentor) จะมีขนาดตั้งแต่ 20,000 และ 50,000 จนถึง 500,000 ลิตร ถังหมักที่มีขนาดใหญ่กว่า 500,000 ลิตร มักสร้างเป็นรูปทรงกลม (Horton Sphere) ซึ่งอาจสร้างใหญ่ถึงขนาด 2,500,000 ลิตร

ปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการผลิตระดับถังหมัก

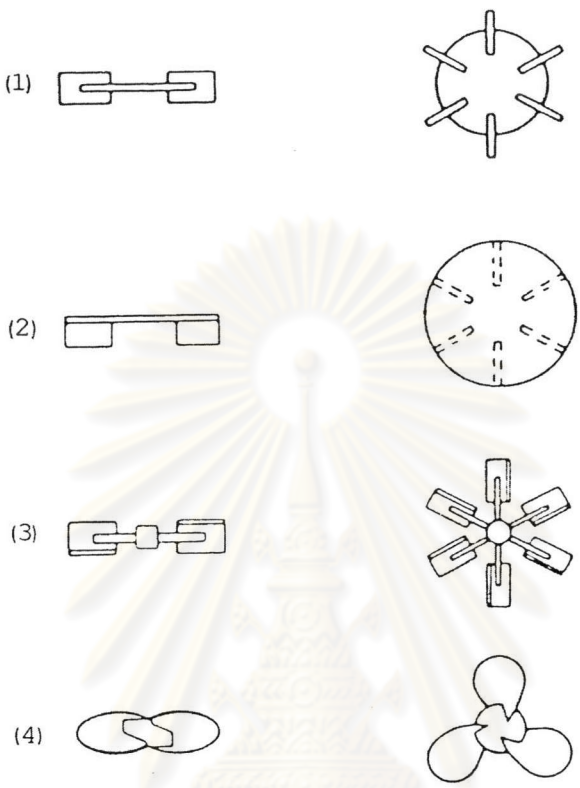
ในการเลี้ยงจุลินทรีย์ให้เจริญเติบโต และสร้างผลิตภัณฑ์ออกมาในระดับขยายส่วนในถังหมักนั้น มีปัจจัยที่ต้องคำนึงถึง และอุปกรณ์ต่างๆ ที่จะช่วยให้การทำงานในถังหมักเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ดังนี้คือ

1. การปั่นกวนโดยใบพัดกวน (Agitation)

การปั่นกวนเป็นการทำให้ส่วนผสมต่างๆ ที่อยู่ในถังหมักสามารถเกิดการผสมกันได้อย่างเป็นเนื้อเดียว (homogeneous) อันได้แก่ อาหารเลี้ยงเชื้อ ซึ่งอาจประกอบไปด้วยสารเคมีซึ่งมีการละลายกับตัวทำละลายเป็นเนื้อเดียวแล้ว หรือวัตถุดิบซึ่งเป็นของแข็ง อาจเป็นสับสเทรตในการเจริญหรือผลิตผลิตภัณฑ์ของจุลินทรีย์ นอกจากนี้ยังมีจุลินทรีย์ซึ่งเจริญอยู่ในน้ำหมัก โดยหากมีการปั่นกวนอย่างทั่วถึงโดยตลอดทั้งถังหมักจะทำให้จุลินทรีย์สามารถใช้อาหารที่มีอยู่ได้เร็วยิ่งขึ้น ส่งผลต่อการเจริญและการผลิตผลิตภัณฑ์ อากาศและออกซิเจนที่เข้ามาสู่ถังหมักหากได้รับการปั่นกวนอย่างทั่วถึง จะทำให้ไม่มีจุดบอดหรือบริเวณที่ได้รับออกซิเจนไม่เพียงพอ ทำให้กำจัดเมแทบอลิซึมของเชื้อจุลินทรีย์โดยเฉพาะเชื้อจุลินทรีย์ที่มีความต้องการออกซิเจนในการเจริญ (ธีรวัฒนา ภาระมาตย์, 2543)

การปั่นกวนในถังหมักเกิดขึ้นโดยเครื่องกวนซึ่งติดตั้งต่อจากมอเตอร์ หรือใช้แรงแม่เหล็กไฟฟ้าในการหมุน ประกอบด้วย มอเตอร์ที่ใช้หมุนใบพัด (Impeller) ติดตั้งอยู่บนแกนซึ่งติดตั้งอยู่ตรงกลางของถังหมัก จำนวนใบพัดอาจมีมากกว่า 1 อัน ขึ้นอยู่กับความสูงของถังหมัก รูปที่ 2.5 แสดงใบพัดแบบต่างๆที่ใช้กันในอุตสาหกรรมหมัก ซึ่งใบพัดแต่ละชนิดจะมีความเหมาะสมในการใช้งานแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับชนิดของจุลินทรีย์ที่ใช้ เช่น ใบพัดแบบ Disc turbine มีความเหมาะสมในการเลี้ยงเชื้อรา เพราะไม่ก่อให้เกิดแรงเฉือนอย่างรุนแรงเหมือนใบพัดชนิดอื่น ซึ่งจะทำให้สายใยของเชื้อราที่เลี้ยงฉีกขาด เป็นสายสั้นๆ ทำให้อัตราการเจริญเติบโต และการสร้างผลิตภัณฑ์ของเชื้อราลดลงได้ ในขณะที่ใบพัดชนิด Marine propeller (ใบพัดเรือ) เป็นใบพัดที่สามารถใช้เลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย หรือยีสต์ที่มีการเจริญแบบเซลล์เดี่ยวได้ดี เพราะแรงเฉือนที่เกิดขึ้น ไม่ทำอันตรายต่อเซลล์มากนัก และทำให้เกิดการปั่น

กวนอย่างทั่วถึงในถังหมัก ออกซิเจนที่เข้ามาจะถูกทำให้อนุภาคเล็กลงและแพร่ไปได้อย่างทั่วถึง (อรทัย สุขเจริญ, 2542)



รูปที่ 2.5 ใบพัดแบบต่างๆ โดยที่รูปทางด้ายซ้ายมือเป็นรูปจากการมองด้านข้าง รูปทางด้านขวามือเป็นรูปจากการมองด้านบน

(1) Disc Turbine (2) Vaned Disc

(3) Open Turbine (4) Marine Propeller

(ที่มา : Stanbury และคณะ, 1998)

ค่าอัตราการปั่นกวนของใบพัดที่เหมาะสมเป็นจุดสมดุลระหว่างอัตราการถ่ายเทมวลสารและการผสมที่ดีที่สุด กับอัตราการเกิดการหักของสายใย และการที่เซลล์ถูกทำลายเนื่องจากแรงเฉือน

การทำงานของเครื่องกวนจะใช้กำลังงาน 0.9 แรงม้า ต่ออาหารเลี้ยงเชื้อ 100 แกลลอน การกวนจะช่วยให้เซลล์จุลินทรีย์กระจายอยู่ในอาหารเหลวอย่างสม่ำเสมอ และช่วยตีฟองอากาศให้แตกเป็นฟองเล็กๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนแก๊ส

Ujcova และคณะ (1980) พบว่าเมื่อให้อัตราการปั่นกวนของใบพัดเท่ากับ 600 รอบต่อนาที จะทำให้สามารถผลิตกรดซิตริกจาก *Aspergillus niger* ได้มากที่สุด โดยหากเมื่อเพิ่มความเร็วให้มากกว่านี้ขึ้นไป สายใยจะเกิดการหักมากขึ้นและอัตราการผลิตกรดซิตริกจะลดลง

Makagiansar และคณะ (1993) พบว่า เมื่อมีการเพิ่มอัตราเร็วของการปั่นกวนมากขึ้น จะไปลดค่าอัตราจำเพาะของการผลิตเพนิซิลลิน (q_{pen}, หน่วยต่อมิลลิกรัมของน้ำหนักเซลล์แห้งต่อชั่วโมง) โดยสรุปว่าเกิดเพราะการหักอย่างรุนแรงของสายใย *Penicillin chrysogenum*

Konig และคณะ (1981) เสนอว่าการให้อัตราการปั่นกวนที่สูงแต่เหมาะสม จะทำให้ส่งเสริมการทำงานของวิถีเมแทบอลิซึมอื่นๆในเซลล์ และทำให้มีการเจริญของเชื้อรา

การหมุนของใบพัดจะทำให้ของเหลวหมุนไปตามใบพัดและทำให้เกิดวอร์เทกซ์ (Vortex) ซึ่งการเคลื่อนที่ของของเหลวในลักษณะนี้ จะไม่ทำให้เซลล์จุลินทรีย์ผสมกับอาหารเลี้ยงเชื้อเพียงแต่หมุนตามกันไป วิธีแก้ไขทำโดยติดตั้งแผ่นโลหะ 4 ชิ้นไว้ในแนวตั้งของถังหมัก โครงสร้างนี้เรียกว่า แบฟเฟิล (Baffle) แบฟเฟิลมีขนาดประมาณ 1 ใน 10 ของเส้นผ่าศูนย์กลางของถังหมัก การติดตั้งแบฟเฟิลควรให้มีช่องว่างระหว่างแบฟเฟิลกับผนังของถังหมัก ซึ่งจะทำให้ของเหลวเคลื่อนที่แบบที่ทำความสะอาดแบฟเฟิลไปในตัว ซึ่งจะทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญเกาะติดกับแบฟเฟิลได้ การติดตั้งแบฟเฟิล จะทำให้ของเหลวเกิดการผสมกันอย่างทั่วถึงโดยไม่เกิดวอร์เทกซ์ ซึ่งจะทำให้ออกซิเจนละลายในของเหลวได้มากขึ้นด้วย (อรทัย สุขเจริญ, 2542)

2. <u>การให้อากาศ</u> (Aeration)

ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเลคตรอนในปฏิกิริยาออกซิเดชั่นรีดักชั่นของเซลล์เพื่อให้เกิดพลังงานและนำมาใช้ในการเจริญเติบโตของเซลล์ทั่วไป เพราะฉะนั้นหากมีออกซิเจนให้กับเซลล์สิ่งมีชีวิตน้อยเกินไป อาจทำให้วิถีเมแทบอลิซึมของเซลล์เปลี่ยน (Voet และ Voet, 1995) ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์อื่นที่ไม่เป็นที่ต้องการ

ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำซึ่งอยู่ในถังหมัก เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการผลิตผลิตภัณฑ์โปรตีนจากเซลล์ ทำให้เกิดการแตกของเซลล์ สัณฐานของเซลล์มีการเปลี่ยนแปลงไป และอื่นๆ (Cui และคณะ, 1998a,b)

ออกซิเจนเป็นแหล่งให้พลังงานกับเชื้อจุลินทรีย์ หากมีออกซิเจนไม่เพียงพอสามารถทำให้เกิดการเจริญเติบโตและผลิตโปรตีนต่างๆของเซลล์ลดลงได้ (Wongwicharn และคณะ (1999); Rothberg และคณะ (1999); Kreiner และคณะ (2000))

Kim และคณะ (2005) พบว่าในการผลิตเอกโซพอลิแซคคาไรด์ (EPS) โดย *Agaricus blazei* จำเป็นต้องมีการควบคุมให้มีปริมาณออกซิเจนในน้ำหมักให้คงที่ขณะทำการหมักตลอด 120 ชั่วโมงให้อยู่ที่ร้อยละ 20 โดยหากมีออกซิเจนมากกว่านี้จะไม่มีผลต่อการเจริญและการผลิตต่อไป แต่หากว่าให้ออกซิเจนน้อยกว่าร้อยละ 20 จะทำให้อัตราการเจริญเติบโตและการผลิต EPS ลงลดอย่างมีนัยสำคัญเปรียบเทียบกับเมื่อไม่มีการควบคุมออกซิเจนในน้ำหมัก

Macris และ Kokke (2004) พบว่าในการผลิตโปรตีนจากเชื้อ *Fusarium moniliforme* ต้องให้ออกซิเจนเข้าสู่ถังหมักถึงร้อยละ 60-80 เพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการของรา โดยหากมีออกซิเจนในน้ำหมักน้อยกว่านี้ทำให้โปรตีนที่ผลิตออกมาน้อยลงตามปริมาณออกซิเจน

การให้ออกซิเจนแก่เชื้อจุลินทรีย์ในอุตสาหกรรมชีวภาพ วิธีที่ประหยัดที่สุดคือให้ในรูปอากาศซึ่งมีออกซิเจนเจือปนอยู่ประมาณร้อยละ 20 (Silva, V.S.C.F, 2003) วิธีที่ให้อากาศทำได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับขนาดของภาชนะเลี้ยงเชื้อ หากเป็นการเลี้ยงเชื้อในระดับขวดชมพู่ ที่มีปริมาตรอาหารเลี้ยงเชื้อ 50 – 100 มล. ทำโดยใช้เครื่องเขย่าซึ่งอาจมีการควบคุมอุณหภูมิได้ กรณีเลี้ยงเชื้อใน ขนาดโรงงานนำทาง และโรงงานผลิต มีการใช้เครื่องกวนพร้อมกับการให้อากาศโดยเครื่องสูบอากาศ ถังหมักระดับห้องปฏิบัติการปริมาตร 1 ลิตร ก็ใช้ระบบเครื่องกวน (ใช้เครื่องกวนระบบแม่เหล็กเนื่องจากของเหลวปริมาตรน้อย) และเครื่องสูบอากาศเพราะสามารถควบคุมการให้อากาศปริมาณต่างๆได้ ถังหมักบางแบบสามารถทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนแก๊สได้ดีโดยไม่ต้องใช้เครื่องกวน (กำเนิด สุภัณวงษ์, 2535)

เครื่องให้อากาศประกอบด้วย

(1) เครื่องสูบอากาศ (Air pumper)

(2) เครื่องกรองอากาศ (Air filter)

(3) หัวจ่ายอากาศ (Sparger) เป็นส่วนปลายสุดของระบบจ่ายอากาศให้แก่ถังหมัก ในถังหมักอาจมีการใช้หัวจ่ายเพียงอย่างเดียวหรือใช้ร่วมกับใบพัด

ปริมาณอากาศที่จ่ายให้แก่ถังหมักมีหน่วยเรียกเป็น vvm ปริมาณอากาศ 1 vvm ที่จ่ายให้แก่ถังหมักที่มีอาหารเลี้ยงเชื้อบรรจุอยู่ 5 ลิตร คือปริมาณอากาศ 5 ลิตรต่อนาที โดยปรกติปริมาณอากาศมากที่สุดที่จ่ายให้แก่ถังหมักคือ 1 vvm

อัตราความเร็วของใบพัดกวน และอัตราการให้อากาศที่เหมาะสม เป็นสองสิ่งที่เป็นปัจจัยหลักในการเจริญและผลิตผลิตภัณฑ์ของเซลล์ ซึ่งเป็นปัจจัยที่ต้องมีการพิจารณาร่วมกัน ไม่สามารถแยกพิจารณาแต่ละปัจจัยโดยเดี่ยวได้ (Wang และคณะ 2005)

3. อุณหภูมิ

จากการศึกษาเรื่องของอุณหภูมิต่อการเจริญเติบโตและการสร้างสารเมแทบบอไลต์ของเชื้อราที่สร้างสายใยโดย Bull และ Bushell (1976) พบว่าหากมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในถังหมักเพียงเล็กน้อย จะส่งผลทำให้ภาวะต่างๆในการเลี้ยงเชื้อเปลี่ยนตามได้ด้วย เช่น ค่าออกซิเจนละลายน้ำก็ลดลงด้วยหากมีการเพิ่มอุณหภูมิ รวมไปถึงสารอาหารและค่าความเป็นกรด-ด่าง การเพิ่มของอุณหภูมิในภาวะที่เชื้อราสามารถเจริญได้ เป็นการเพิ่มอัตราการเจริญเติบโตและค่า Q_{10} (ค่าที่เกิดขึ้นเมื่อมีอัตราการตายของเซลล์หากมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส) ให้มากขึ้น เชื้อราแต่ละชนิดจึงมีภาวะที่เหมาะสมต่างกันไปในการเจริญและการสร้างผลิตภัณฑ์

Almeida และคณะ (2001) พบว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจนถึงจุดที่เหมาะสม จะทำให้เวลาที่ใช้ในถังหมักลดลง และทำให้การผลิตผลิตภัณฑ์จากเซลล์เพิ่มขึ้น

ปรกติถังหมักต้องมีเครื่องควบคุมอุณหภูมิเป็นส่วนประกอบอยู่ด้วย เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นในถังหมักที่เกิดจากเมทาบอลิซึมของจุลินทรีย์และการเคลื่อนไหวของเครื่องปั่นกวน ถ้าความร้อนที่เกิดขึ้นน้อยเกินไปก็จะต้องให้ความร้อนแก่ถังหมัก แต่ถ้าความร้อนที่เกิดขึ้นมากเกินไปก็จะต้องมีการระบายความร้อน เพื่อให้อุณหภูมิลงลดอยู่ในระดับที่เหมาะสม ในระดับห้องปฏิบัติการหากมีความร้อนเกิดขึ้นน้อยอาจใช้วิธีแช่ถังหมักไว้ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ แต่หากเป็นการหมักขนาดใหญ่อาจมีการใช้อุปกรณ์ระบายความร้อนที่หุ้มอยู่รอบถังหมัก เป็นการแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำ (Jacket) (Stanbury และคณะ, 1998)

เครื่องมือที่ใช้วัดอุณหภูมิคือเทอร์โมมิเตอร์ชนิดต่างๆแล้วแต่ความเหมาะสม การควบคุมอุณหภูมิของถังหมักขนาดเล็กมักต้องใช้ทั้งความร้อน และการระบายความร้อนควบคู่กันไป แต่ในถัง

หมักขนาดใหญ่การเจริญของจุลินทรีย์จำนวนมากจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นมาก การควบคุมอุณหภูมิจึงใช้การระบายความร้อนด้วยน้ำเย็นเพียงอย่างเดียว ถังหมักขนาด 10 ลิตร จะใช้ขดลวดความร้อนขนาด 300-400 วัตต์ ระบบน้ำเย็นสามารถปิด-เปิดได้ตามต้องการ แต่ในระบบถังหมักที่มีขนาดเล็กเช่นนี้นิยมควบคุมอุณหภูมิโดยการเปิดน้ำเย็นให้ไหลในอัตราเร็วคงที่ แล้วขดลวดความร้อนจะทำงานเป็นช่วงๆ เพื่อปรับอุณหภูมิให้สูงขึ้นตามที่ต้องการ (กำเนิด สุภัณวงษ์, 2535)

4. ค่าความเป็นกรด-ด่าง

เชื้อราส่วนใหญ่มีค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมในการเจริญและการสร้างผลิตภัณฑ์อยู่ที่ 4.0-7.0 (Talaro, 2005) โดยเชื้อแต่ละชนิด และสายพันธุ์จะมีความชอบต่อค่าความเป็นกรด-ด่างต่างกัน ซึ่งขึ้นกับองค์ประกอบของอาหารเลี้ยงเชื้อด้วย

จากการทดลองของ Ikram-ul-Haq (2002) พบว่าการผลิตเอนไซม์ไซแลนเนส โดย *Aspergillus niger* GCBMX-45 มีค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมอยู่ที่ 4.5 โดยค่าที่มากหรือน้อยกว่านี้จะทำให้อัตราการผลิตไซแลนเนสลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งรายงานไว้ว่า ประจุในอาหารเลี้ยงเชื้อมีผลต่อการเจริญเติบโต การนำสารอาหารจากภายนอกเข้าสู่เซลล์

ในการหมักแบบกะเดียว (Batch fermentation) ค่าความเป็นกรด-ด่างของอาหารเลี้ยงเชื้อจะเปลี่ยนแปลงไปจากค่าที่มีความเหมาะสม ซึ่งจะทำให้เชื้อเจริญช้าลง หรือผลิตสารที่ต้องการได้น้อยลง ในกระบวนการผลิตจึงมีความจำเป็นต้องควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างให้คงที่พอสมควร การควบคุมให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของถังหมัก ใช้วิธีเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อแก้การเป็นกรดหรือเติมกรดซัลฟุริก เพื่อแก้การเป็นด่าง โดยปกติการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างของกระบวนการหมักใดๆ จะเปลี่ยนในทิศทางเดียวเท่านั้น

การวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง ในอุตสาหกรรมหมักใช้ Combined Glass Reference Electrode ซึ่งสามารถทนต่อการฆ่าเชื้อด้วยไอน้ำอุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ได้ อิเลคโตรดอาจเป็นแบบ Silver/silver chloride ที่มีโปแทสเซียมคลอไรด์เป็นอิเลคโทรไรต์ ในบางกรณีอาจใช้ Calomel/mercury อิเลคโทรด การควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างทำโดยการทำงานของมาตรวัดความเป็นกรด-ด่าง คู่กับชุดควบคุม การทำงานของเครื่องควบคุมทำโดยตั้งค่าความเป็นกรด-ด่างที่ต้องการไว้ เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเปลี่ยนไปจากค่าที่ตั้งไว้จะมีสัญญาณกระตุ้นเครื่องสูบให้ทำการสูบกรดหรือด่าง ลงสู่ถังหมัก หลังจากมีการผสมของอาหารในถังหมักเรียบร้อยแล้ว เครื่องวัดค่าความเป็น

กรด-ด่างจึงจะทำงานอ่านค่าความเป็นกรด-ด่างว่าอยู่ในระดับที่ต้องการหรือไม่ ถ้ายังไม่อยู่ในระดับที่ต้องการเครื่องสูบก็จะทำงานอีกครั้ง

5. การเกิดฟอง

ในกระบวนการหมักส่วนใหญ่จะเกิดฟองเนื่องจากการให้อากาศและการกวน ฟองเกิดขึ้นจากโปรตีนที่รอยต่อระหว่างของเหลวกับอากาศเปลี่ยนสภาพ (Denature) เป็นผิวที่แตกตัวยาก อาหารเลี้ยงเชื้อที่มีโปรตีนเป็นส่วนประกอบมาก จะเกิดฟองมากกว่าอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีน้ำตาลมาก (Bryce, 1999)

การควบคุมการเกิดฟองทำได้โดยเติมสารกำจัดฟอง (Antifoamer) สารกำจัดฟองลดแรงตึงผิวของฟองทำให้ฟองแตกง่าย ในการเติมสารกำจัดฟองจะทำก็ต่อเมื่อมีฟองเกิดขึ้นมาก เนื่องจากในสารกำจัดฟองอาจส่งผลรบกวนต่อกระบวนการหมักได้โดยทำให้อัตราการแลกเปลี่ยนออกซิเจนในถังหมักลดลง ดังนั้นการใช้สารกำจัดฟองจึงต้องใช้ในปริมาณน้อยที่สุดเท่าที่จำเป็น โดยความเข้มข้นของสารกำจัดฟองที่ใช้โดยทั่วไปเท่ากับ 0.1-0.5 มิลลิลิตรต่อลิตร ถ้าอัตราการแลกเปลี่ยนออกซิเจนลดลงมากอาจต้องใช้เครื่องกำจัดฟองช่วย (กำเนิด สุภัณวงษ์, 2535)

การผลิตในระดับขวดเขย่าและระดับขยายส่วน

การผลิตในระดับขวดเขย่านั้น มักใช้ศึกษาเบื้องต้น เกี่ยวกับรูปแบบลักษณะการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ และการสร้างผลิตภัณฑ์ที่สนใจ ต่อมาเมื่อได้ข้อมูลเบื้องต้นมากเพียงพอ จึงนำเอาข้อมูลพื้นฐานการศึกษาในระดับขวดเขย่า มาทำการศึกษาในระดับขยายส่วนในถังหมักต่อไป ซึ่งการผลิตในระดับเล็กและระดับใหญ่ต่างมีข้อดี-ข้อเสียแตกต่างกันไป ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.6 ข้อดีและข้อเสียของการผลิตในระดับขวดเขย่าและระดับขยายส่วน

	ข้อดี	ข้อเสีย
1. การผลิตระดับขวดเขย่า	(1) สามารถทำการศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับรูปแบบการเจริญ และการสร้างผลิตภัณฑ์ได้อย่างรวดเร็วและสะดวก (2) สามารถเก็บเกี่ยวผลิตภัณฑ์มาทำการวิเคราะห์ศึกษาต่อ ได้โดยง่าย (3) สามารถแปรผันค่าต่างๆในการทดลองได้ทีละหลายๆค่า	(1) ไม่สามารถควบคุมปัจจัยทางกายภาพบางอย่างได้ เช่นความเป็นกรด-ด่างของอาหารเลี้ยงเชื้อ (ยกเว้นใช้บัฟเฟอร์) (2) การเตรียมการผลิตต้องใช้หน่วยผลิตจำนวนมาก (3) ปริมาณอากาศที่เข้าสู่ขวดเขย่ามีไม่แน่นอน (4) กรณีเลี้ยงในอุณหภูมิห้อง จะมีการแปรผันของอุณหภูมิในช่วงต่างๆ (5) สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆได้ปริมาณน้อยไม่สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ได้
2. การผลิตระดับขยายส่วน	(1) สามารถควบคุมปัจจัยทางกายภาพได้ต่อเนื่อง ตลอดการทดลองที่ทำในถังหมัก (2) โดยส่วนมากแล้วได้ผลิตภัณฑ์มากกว่าที่ผลิตในระดับขวดเขย่า (3) ทำการผลิตครั้งเดียวได้ปริมาณผลิตภัณฑ์มากกว่าระดับขวดเขย่าหลายเท่า (4) สามารถนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมได้	(1) ไม่เหมาะกับการศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับเชื้อและการผลิตผลิตภัณฑ์ (2) ในการทำวิจัยไม่สามารถแปรผันค่าที่ใช้ในการทดลองได้หลายค่า (3) มีเครื่องมือ อุปกรณ์ เข้ามาเกี่ยวข้องในการผลิตมาก (4) ต้องใช้ผู้ชำนาญ ในการผลิตผลิตภัณฑ์จากการใช้ถังหมัก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย