แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 7
เทคโนโลยีเอนไซม์ในอุตสาหกรรม

หัวข้อเนื้อหา

1. ชีวเคมีของเอนไซม์
2. การใช้เอนไซม์ในอุตสาหกรรมอาหาร
3. การใช้เอนไซม์ในอุตสาหกรรมสิ่งอุปโภค
4. การใช้เอนไซม์ทางการแพทย์
5. สรุป

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

เมื่อผู้เรียนศึกษาบทเรียนนี้แล้วสามารถ

1. เข้าใจและสามารถอธิบายหลักการทำงานทางชีวเคมีของเอนไซม์ได้
2. สามารถอธิบายการประยุกต์ใช้ความรู้ทางชีวเคมีที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้
3. สามารถจัดการเรียนการสอนที่มีเนื้อหาด้านเทคโนโลยีชีวภาพที่ใช้เอนไซม์ในอุตสาหกรรมได้

วิธีสอนและกิจกรรมการเรียนการสอน

1. วิธีสอน

1.1 วิธีสอนแบบบรรยาย ให้ความรู้เกี่ยวกับเอนไซม์และกลไกการทำงานของเอนไซม์โดยใช้วิธีการตั้งคำถาม และตอบคำถามระหว่างผู้สอนและผู้เรียน

1.2 กำหนดให้มีการอภิปราย สรุปประเด็นสำคัญที่เกี่ยวกับเทคโนโลยีเอนไซม์ด้านต่าง ๆ

2. กิจกรรมการเรียนการสอน

2.1 แสดงตัวอย่างการประยุกต์ใช้เอนไซม์ในอุตสาหกรรม

2.2 สืบค้นการใช้ประโยชน์จากเอนไซม์ในอุตสาหกรรมที่เป็นนวัตกรรมใหม่

2.3 ออกแบบการจัดการเรียนรู้แบบโครงงานที่มีการใช้เทคโนโลยีเอนไซม์ในการผลิตอาหาร

สื่อการเรียนการสอน

1. เครื่องคอมพิวเตอร์และอินเทอร์เน็ต
2. เพาเวอร์พอยต์พรีเซนเตชัน เรื่องเทคโนโลยีเอนไซม์ในอุตสาหกรรม
3. สำเนาเอกสารคำสอนรายวิชาชีวเคมีประยุกต์

การวัดผลและการประเมินผล

1. สังเกตการตอบคำถามในชั้นเรียน
2. สังเกตจากการอภิปรายโต้ตอบ ซักถาม และการแสดงความคิดเห็น
3. สังเกตพฤติกรรมความกระตือรือร้นในการร่วมกิจกรรม
4. ประเมินคุณภาพของงานที่มอบหมาย

บทที่ 7
เทคโนโลยีเอนไซม์ในอุตสาหกรรม

เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชีวเคมีให้เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ปฏิกิริยาที่เร่งด้วยเอนไซม์จะมีความจำเพาะต่อสารตั้งต้นสูงและให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความจำเพาะทางสเตอริโอเคมีได้ จึงมีการสกัดเอนไซม์ออกจากเซลล์สิ่งมีชีวิตที่เป็นแหล่งเอนไซม์ต่าง ๆ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมอาหาร ยารักษาโรค กระดาษ เครื่องหนัง และผลิตภัณฑ์ซักล้าง เป็นต้น การใช้เอนไซม์ในกระบวนการผลิตจะช่วยลดต้นทุนการผลิต ลดการใช้พลังงาน ลดระยะเวลา และลดการใช้สารเคมีที่มีราคาสูง ทำลายสิ่งแวดล้อม และอาจเป็นอันตรายต่อผู้บริโภคโดยตรง รัฐบาลหลายประเทศจึงให้การสนับสนุนการค้นคว้าพัฒนาเพื่อนำเอนไซม์มาใช้ทดแทนกระบวนการผลิตทางเคมี ในปัจจุบันเอนไซม์ส่วนใหญ่มักจะได้มาจากจุลินทรีย์ที่มีการตัดแต่งพันธุกรรมให้ผลิตเอนไซม์ชนิดหนึ่ง ๆ ออกมาในปริมาณที่สูงและมีการทำให้เอนไซม์บริสุทธิ์ขึ้นก่อนการใช้งาน

ชีวเคมีของเอนไซม์

เอนไซม์เป็นชีวโมเลกุลประเภทโปรตีนที่ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาทางชีวเคมีที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต เช่น การสลายโมเลกุลสารอาหารให้กลายเป็นพลังงาน และการสังเคราะห์ชีวโมเลกุลจากสารตั้งต้นขนาดเล็ก การทำงานของเอนไซม์จะมีความจำเพาะเจาะจงสูงในการเปลี่ยนซับเสตรท (substrate) ไปเป็นผลิตภัณฑ์ (product) และจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วมากขึ้นภายใต้สภาวะของเซลล์ที่ไม่จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิสูง หรือภาวะกรดด่างที่รุนแรง สมการการเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เอนไซม์ (นิธิยา รัตนาปนนท์, 2557 : 272-273 และ เปยมสุข พงษสวัสดิ์ และคณะ, 2559 : 125-126) ภาพประกอบ 7.1 แสดงแบบจำลองการเร่งปฏิกิริยาการสลายซับเสตรทคือซูโครสผ่านตัวกลางเอนไซม์ซับเสตรทคอมเพล็กซ์ (enzyme-substrate complex) จนได้เป็นผลิตภัณฑ์คือน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโทส

1. คุณลักษณะและสมบัติของเอนไซม์

เอนไซม์มีความสำคัญและจำเป็นสำหรับสิ่งมีชีวิตทุกชนิด เนื่องจากทำหน้าที่เร่งปฏิกิรยาเคมีในระบบชีวภาพให้เกิดขึ้นได้อย่างจำเพาะ คุณลักษณะและสมบัติของเอนไซม์ มีดังนี้ (สุกัญญา สุนทรส และวิเชียร ริมพณิชยกิจ, 2553 : 257-258 ; เจษฎา เรืองสุริยะ, 2558 : 135 และ เปยมสุข พงษสวัสดิ์ และคณะ, 2559 : 128-134)

1.1 เอนไซม์มีประสิทธิภาพสูงในการเร่งปฏิกิริยา

เอนไซม์มีประสิทธิภาพสูง (efficiency) คือสามารถเร่งปฏิกิริยาได้ดีกว่าตัวเร่งสังเคราะห์ 10^6 ถึง 10^{12} เท่า โดยการใช้ปริมาณเอนไซม์เพียงระดับไมโครโมลาร์ นอกจากนี้เอนไซม์สามารถเร่งปฏิกิริยาได้ภายใต้สภาวะที่ไม่รุนแรง ไม่ต้องใช้อุณหภูมิสูงหรือสภาพกรดเบสรุนแรง ซึ่งเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับสภาวะภายในเซลล์และเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตทั่วไป

1.2 เอนไซม์มีความจำเพาะเจาะจงต่อปฏิกิริยาสูงมาก

เอนไซม์จะเลือกทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของสารตั้งต้นที่จำเพาะ (specificity) และยังจำเพาะต่อสารตั้งต้นถึงในระดับสเตอริโอไอโซเมอร์ ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกริยาที่เร่งด้วยเอนไซม์ก็มีความจำเพาะในระดับสเตอริโอไอโซเมอร์ด้วย

1.3 เอนไซม์ทำงานโดยการลดพลังงานกระตุ้น

เอนไซม์สามารถเร่งปฏิกิริยาได้โดยการลดพลังงานกระตุ้น (activation energy) ให้สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นได้ และช่วยทำให้ปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุลเร็วขึ้นโดยไม่มีผลต่อค่าคงที่สมดุล แต่การเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์จะไม่เปลี่ยนแปลงค่าของผลต่างของพลังงานอิสระ (free energy change, G) หรือค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยา (equilibrium constant)

1.4 เอนไซม์สามารถเร่งปฏิกิริยาซ้ำอีกได้

เอนไซม์จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ หลังจากที่เกิดการเร่งปฏิกิริยาแล้ว ทำให้เอนไซม์สามารถกลับไปเร่งปฏิกิริยาได้อีก โดยสามารถบอกได้เป็นค่าตัวเลขเทอร์นโอเวอร์ (turnover number) ซึ่งเป็นค่าที่บอกว่าเอนไซม์หนึ่งโมเลกุลสามารถเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนซับสเตรต ให้เป็นผลิตภัณฑ์ ได้จำนวนกี่ครั้งในหนึ่งหน่วยเวลา

2. ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของเอนไซม์

เนื่องจากเอนไซม์เป็นโปรตีนทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาของสารตั้งต้นจนได้เป็นผลิตภัณฑ์แล้วจะสามารถกลับมาทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาได้อีกอย่างต่อเนื่อง ปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมจึงมีผลต่อการทำงานของเอนไซม์ โดยปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการทำงานของเอนไซม์ มีดังนี้ (สุกัญญา สุนทรส และวิเชียร ริมพณิชยกิจ, 2553 : 272-274 และ เจษฎา เรืองสุระ, 2558 : 147-148)

2.1 ความเข้มข้นของเอนไซม์และสารตั้งต้น

ในการเพิ่มความเข้มข้นจะทำให้อัตราเร็วของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเฉพาะในกรณีที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้น ค่า pH และอุณหภูมิคงที่ และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารตั้งต้นอัตราเร็วของปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่มีความเร็วสูงสุด ในกรณีที่มีสารตั้งต้นเพียงชนิดเดียวและความเข้มข้นของเอนไซม์คงที่และหลังจากนั้นแม้จะเพิ่มความเข้มข้นของสารตั้งต้น อัตราเร็วของปฏิกิริยาก็ไม่เพิ่มขึ้น

2.2 ค่าความเป็นกรด-ด่าง

เอนไซม์ส่วนใหญ่จะเร่งปฏิกิริยาได้ในช่วง pH 4-10 ถ้า pH ต่ำกว่าหรือสูงกว่าจะทำให้เอนไซม์ถูกยับยั้งอย่างถาวร ยกเว้นเพปซิน เรนนิน และอัลคาไลน์-ฟอสฟาเทส เพราะว่าเอนไซม์ทุกชนิดเป็นโปรตีน การเปลี่ยนแปลง pH จะส่งผลต่อโมเลกุลของโปรตีน ทำให้การทำงานที่บริเวณเร่งของเอนไซม์ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ เอนไซม์แต่ละชนิดจึงมีค่า pH ที่เหมาะสมสำหรับเร่งปฏิกิริยาให้ได้ความเร็วสูงสุด

2.3 อุณหภูมิ

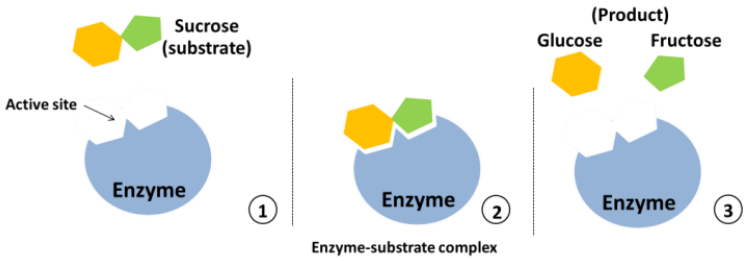
การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้สารที่ทำปฏิกิริยาถูกกระตุ้นและมีพลังงานมากขึ้น ทำให้สารตั้งต้นเปลี่ยนแปลงเป็นสารผลิตภัณฑ์ได้เร็วขึ้น ดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิจึงทำให้อัตราเร็วของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น และหากอุณหภูมิที่สูงเกินไปจะทำให้โปรตีนแปลงสภาพ จะทำให้เอนไซม์มีสมบัติในการเร่งปฏิกิริยาลดลงหรือเสียไป

2.4 ตัวยับยั้ง

ตัวยับยั้งการทำงานของเอนไซม์มีทั้งชนิดที่ผันกลับได้ (reversible inhibition) และแบบผันกลับไม่ได้ (irreversible inhibition) โดยทั้งตัวยับยั้งชนิดที่ผันกลับได้จะสามารถแย่งจับกับเอนไซม์เพื่อแข่งขันกับสารตั้งต้นหรืออาจขัดขวางการเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ช้าลง ในขณะที่ตัวยับยั้งแบบผันกลับไม่ได้จะจับกับเอนไซม์ด้วยพันธะโควาเลนต์ ทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่คงตัว เอนไซม์จึงไม่สามารถเร่งปฏิกิริยาต่อไปได้ และไม่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมเพื่อเร่งปฏิกิริยาได้อีก

2.5 โคแฟคเตอร์และโคเอนไซม์

เอนไซม์หลายชนิดสามารถจับกับสารตั้งต้นและทำปฏิกิริยากันได้เลย แต่สำหรับเอนไซม์บางชนิดจะต้องการโคแฟคเตอร์ (cofactor) หรือโคเอนไซม์ (coenzyme) โดยจับกับเอนไซม์บนตำแหน่งที่เฉพาะเจาะจง เพื่อทำให้เอนไซม์ทำงานได้ คำว่าโคเอนไซม์นิยมใช้เรียกสารอินทรีย์และวิตามินต่าง ๆ ในขณะที่โคแฟคเตอร์จะนิยมใช้เรียกสารอนินทรีย์และธาตุต่าง ๆ



ภาพประกอบ 7.1 การทำงานของเอนไซม์

ที่มา : ภาพโดย วรวัฒน์ พรหมเด่น (2560)

ตาราง 7.1 ค่า pH ที่เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์บางชนิด

ชนิดของเอนไซม์	แหล่งของเอนไซม์	ซับเสตรท	ค่า pH ที่เหมาะสม
เพปซิน	กระเพาะอาหาร	โปรตีน	2
ไคโมทริปซิน	ตับอ่อน	โปรตีน	7.8
ปาเปน	มะละกอ	โปรตีน	7-8
ไลเพส	จุลินทรีย์	น้ำมันมะกอก	5-8
แอลฟา-กลูโคซิเดส	จุลินทรีย์	มอลโทส	6.6
เบตา-อะไมเลส	มอลต์	สตาร์ช	5.2
อินเวอร์เทส	มะเขือเทศ	ซูโครส	4.5
เพกตินไลเอส	จุลินทรีย์	กรดเพกติน	9.0-9.2
แซนทีนออกซิเดส	น้ำนม	แซนทีน	8.3
บรอมเมลิน	สับปะรด	โปรตีน	7-8

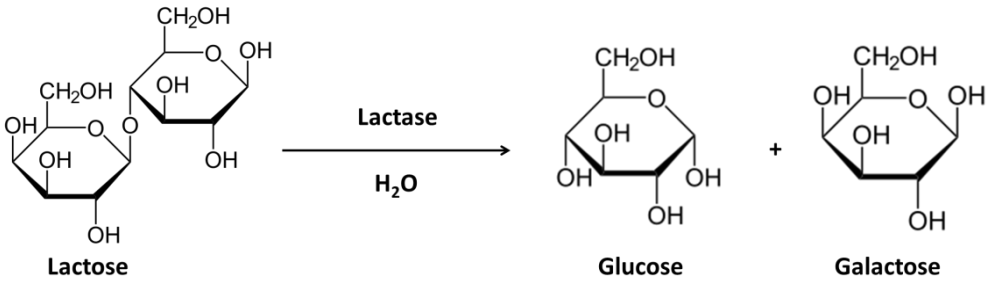
ที่มา : ดัดแปลงจาก นิธิยา รัตนาปนนท์ (2557 : 279) และ เจษฎา เรืองสุระ (2558 : 148)

การใช้เอนไซม์ในอุตสาหกรรมอาหาร

ในปัจจุบันมีการใช้เอนไซม์ในอุตสาหกรรมอาหารอย่างแพร่หลาย เพื่อช่วยให้ประสิทธิภาพการผลิตสูงขึ้น ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณลักษณะตามที่ต้องการได้ และสามารถควบคุมการผลิตได้คงที่ อุตสาหกรรมอาหารที่มีการใช้เอนไซม์ ได้แก่ อุตสาหกรรมอาหารประเภทนมและชีส (dairy) เครื่องดื่มและน้ำผลไม้ การแปรรูปเนื้อสัตว์ ขนมอบ และอุตสาหกรรมแปรรูปแป้งและผลิตสารให้ความหวานและน้ำเชื่อม (กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2553)

1. อุตสาหกรรมนม

ในมนุษย์บางคนเกิดภาวะพร่องเอนไซม์แล็กเทส (lactase) เมื่อดื่มนมแล้วจะมีอาการท้องอืดและท้องเสียเกิดขึ้น เพราะร่างกายไม่สามารถย่อยน้ำตาลแล็กโทส (lactose) ที่อยู่ในนมได้ ในอุตสาหกรรมการผลิตนมจึงมีการเติมเอนไซม์แล็กเทส ที่มีความสามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาของน้ำตาลแล็กโทส เพื่อให้แล็กโทสถูกย่อยสลายเป็นน้ำตาลกาแล็กโทส (galactose) และน้ำตาลกลูโคส (glucose) อย่างละหนึ่งโมเลกุล (ภาพประกอบ 7.2) ซึ่งจะทำให้ผู้ที่ป่วยที่เป็นภาวะพร่องแล็กเทสสามารถดื่มนมได้ และยังทำให้นมมีความหวานเพิ่มมากขึ้นด้วย เพราะเมื่อย่อยแล้วจะได้น้ำตาลกลูโคสซึ่งมีความหวานมากกว่าน้ำตาลแล็กโทส (ไฉน ตาคำแสน และนพพล เล็กสวัสดิ์, 2556 : 3) ปัจจุบันสามารถพบผลิตภัณฑ์นมปราศจากน้ำตาลแล็กโทสในท้องตลาดมากขึ้น (ภาพประกอบ 7.3)



ภาพประกอบ 7.2 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำตาลแล็กโทสเร่งปฏิกิริยาโดยเอนไซม์แล็กเทส
ที่มา : ภาพโดย วรวัฒน์ พรหมเด่น (2560)

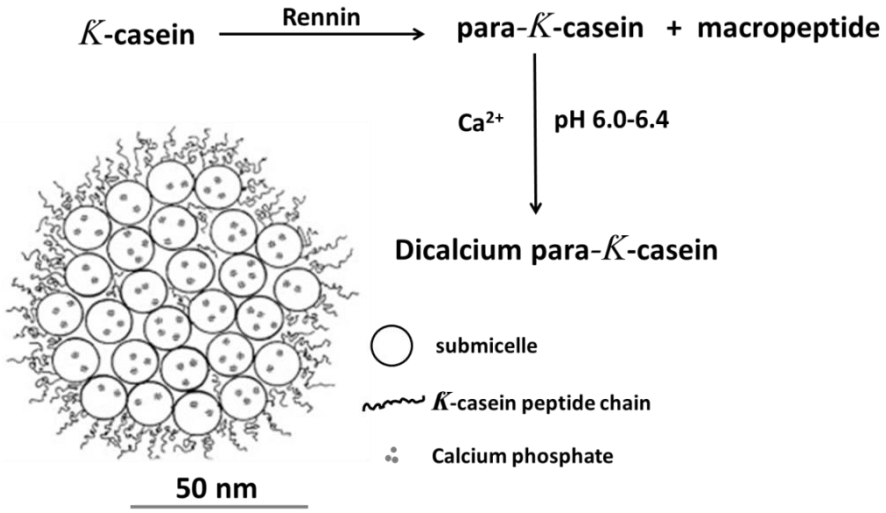
ภาพประกอบ 7.3 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์นมปราศจากน้ำตาลแล็กโทส
ที่มา : Mary Anne Co. Ltd. (2560)

2. อุตสาหกรรมการผลิตเนยแข็ง

เนยแข็ง (cheese) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำนม หางเนยหรือเวย์อย่างหนึ่งอย่างใดหรือหลายอย่างมาผสมกับเอนไซม์ หรือกรด หรือจุลินทรีย์จนเกิดการรวมตัวเป็นก้อนแล้วแยกส่วนที่เป็นน้ำออกและจะนำมาใช้ในลักษณะสดหรือนำมาบ่มให้ได้ที่ก่อนใช้ โดยกรรมวิธีการผลิตเนยแข็งเริ่มจากการตรวจคุณภาพน้ำนมดิบ ซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตเนยแข็ง จากนั้นจึงเข้าสู่กระบวนการการตกตะกอน ซึ่งการตกตะกอนสามารถแบ่งเป็น 3 แบบ (ปิยวรรณ ศุภวิทิตพัฒนา, 2555 : 2-10 และปราณี อ่านเปรื่อง, 2558 : 324-327) ดังนี้

2.1 การตกตะกอนด้วยเรนเนท

วิธีการนี้เป็นการตกตะกอนโปรตีนเคซีน (casein) ที่เป็นโปรตีนหลักในนม โดยการนำเอนไซม์เรนนิน (rennin) มาช่วยในการทำให้น้ำนมตกตะกอน เรนนิน หรือเรียกอีกชื่อว่า ไคโมซิน (chymosin) มีชื่อทางการค้าว่า เรนเนท (rennet) โดยเอนไซม์เรนนินจะตัด κ-casein ที่ตำแหน่ง Phe_{105} และ Met_{106} ได้ para-κ-casein ซึ่งจะมาจับตัวกันเป็น dicalcium para-κ-casein และเกิดตกตะกอน ปฏิกิริยาแสดงดังภาพประกอบ 7.4



ภาพประกอบ 7.4 ปฏิกิริยาการตกตะกอนเคซีนด้วยเอนไซม์
ที่มา : ดัดแปลงจาก Walstra (1999 : 190)

2.2 การตกตะกอนด้วยกรด

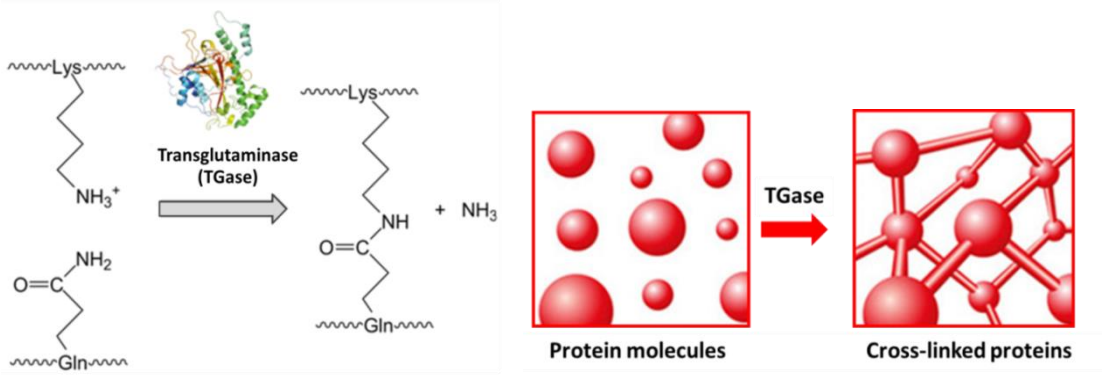
วิธีการนี้เป็นการตกตะกอนโดยใช้กรด และเมื่อมีสภาวะความเป็นกรดของน้ำนมจะทำให้เคซีนเกิดการตกตะกอน ซึ่งสามารถทำได้โดยการเติมกรดลงไปโดยตรง หรือเป็นกรดที่สร้างจากแบคทีเรียที่สร้างกรดแลคติก (lactic acid bacteria) ซึ่งใช้เป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์ จุลินทรีย์ดังกล่าว ได้แก่ *Lactobacillus Lactococcus Leuconostoc* และ *Streptococcus* นอกจากนี้ปัจจุบันยังมีการใช้ *Pediococcus* ร่วมด้วย ซึ่งจุลินทรีย์ที่สามารถสร้างกรดแลกติกเพียงอย่างเดียว เรียกว่า homofermentative และกลุ่มที่สร้างกรดแลคติก คาร์บอนไดออกไซด์ สารให้กลิ่นและรส เรียกว่า heterofermentative

2.3 การตกตะกอนด้วยกรดร่วมกับเรนเนท

วิธีการนี้เป็นการใช้การตกตะกอนด้วยกรดร่วมกับเรนเนท ซึ่งค่าความเป็นกรด-ด่างมีผลต่อลักษณะของตะกอนหรือเคิร์ดที่เกิดขึ้น กล่าวคือ ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำกว่า 5.15 จะเป็นลักษณะตะกอนที่ดีกว่าการใช้กรดเพียงอย่างเดียว เมื่อตกตะกอนแล้วโปรตีนเคซีนจะสูญเสียสภาพธรรมชาติมีลักษณะเป็นลิ่มนมเรียกว่าเคิร์ด (curd) จากนั้นจึงแยกส่วนที่เป็นของเหลวที่เรียกว่าเวย์ (whey) ออก เนยแข็งส่วนมากหลังจากที่ได้เคิร์ดแล้วจะนำมาอัดเป็นก้อน แรงที่ใช้อัดก้อนและระยะเวลาที่อัดจะทำให้เนยแข็งมีเนื้อสัมผัสแตกต่างกันจากนั้นจึงนำไปแช่ในน้ำเกลือ เนยแข็งบางชนิดหลังอัดก้อนแล้วอาจมีการเพาะสปอร์เชื้อราที่ผิวหน้าแล้วจึงนำไปบ่มเพื่อให้ได้รสชาติที่ต้องการเรียกว่าการบ่มเนยแข็ง

3. อุตสาหกรรมโยเกิร์ต

มีการใช้เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส (transglutaminase) ในอุตสาหกรรมโยเกิร์ต เนื่องจากในน้ำนมประกอบไปด้วยโปรตีนเคซีนซึ่งไม่สามารถเกิดเจลได้เมื่อโดนความร้อน เมื่อเติมเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสลงไปจะเป็นการเพิ่มร่างแหให้แก่โปรตีนในโยเกิร์ต (ภาพประกอบ 7.5) และจะทำให้เคซีนเกิดเจลที่ทนความร้อน และทำให้มีความหนืดเพิ่มขึ้น โดยที่จุลินทรีย์ในกลุ่มแล็กโตบาซิลัสจะสร้างกรดแล็กติกและสร้างเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสขึ้นมาเกิดเป็นเจลลิ่มขึ้นในเนื้อโยเกิร์ต และลดการแยกชั้นของน้ำ (syneresis) ตามปฏิกิริยาของเอนไซม์ จะได้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถควบคุมลักษณะเนื้อสัมผัสได้และสม่ำเสมอ (ไฉน ตาคำแสน และนพพล เล็กสวัสดิ์, 2556 : 4 ; ปราณี อ่านเปรื่อง, 2558 : 332 และ อรัญ หันพงศ์กิตติกูล, 2560 : 231-234) และเช่นเดียวกันกับอุตสาหกรรมนม มีการผลิตโยเกิร์ตชนิดปราศจากน้ำตาลแล็กโทส (lactose free) โดยการเติมเอนไซม์แล็กเทสก่อนนำมาทำโยเกิร์ต ทำให้ผู้มีภาวะพร่องแล็กเทสสามารถรับประทานโยเกิร์ตได้ (ภาพประกอบ 7.6)



ภาพประกอบ 7.5 ปฏิกิริยาของเอนไซม์เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส

ที่มา : ดัดแปลงจาก Hirakawa *et al*. (2007 : 454)

ภาพประกอบ 7.6 ตัวอย่างโยเกิร์ตชนิดปราศจากน้ำตาลแล็กโทส

ที่มา : Loblaw Companies Limited (2017) ; Green Valley Organics (2017) and Bronhill Health Distributors (2016)

4. อุตสาหกรรมการผลิตซีอิ๊ว

ซีอิ๊วเป็นผลิตภัณฑ์เครื่องปรุงรสที่เป็นของเหลวได้จากการย่อยโปรตีนของถั่วเหลืองด้วยการหมักหรือกรรมวิธีอื่นที่เหมาะสมจะแต่งรสหรือสีหรือไม่ก็ได้ การผลิตซีอิ๊วเริ่มต้นจากการนำถั่วเหลืองที่แช่น้ำและนึ่งจนสุกแล้วมาคลุกกับแป้ง จากนั้นเติมเชื้อรา *Aspergillus oryzae* หรือ *Aspergillus soyae* เชื้อรานี้จะสร้างสปอร์และผลิตเอนไซม์โปรทีเอส (protease) และเอนไซม์อะไมเลส (amylase) ออกมาย่อยโปรตีนและแป้งในถั่วเป็นกรดอะมิโนและน้ำตาลจะได้ก้อนหมักที่เรียกว่า โคจิ (koji) จากนั้นนำก้อนโคจิไปหมักในน้ำเกลือเข้มข้น เอนไซม์ในโคจิจะย่อยโปรตีนและแป้งต่อ และในน้ำหมักจะมีกรดอะมิโนและน้ำตาลอยู่ แบคทีเรียแลกติกที่ทนเกลือได้สูงจำพวก *Pediococcus soyae* และ *Pediococcus halophilus* จะเปลี่ยนน้ำตาลให้เป็นกรดแลคติก ซึ่งจะทำให้น้ำหมักมีสภาวะเหมาะสมต่อการเจริญของยีสต์ *Saccharomyces rouxii* ซึ่งยีสต์นี้จะเปลี่ยนน้ำตาลให้เป็นแอลกอฮอล์ และช่วยเพิ่มกลิ่นและรสให้แก่ซีอิ๊ว (ปราณี พัฒนพิพิธไพศาล, 2556 : 221 ; ปราณี อ่านเปรื่อง, 2558 : 352 และ พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนาปนนท์, ม.ป.ป.)

5. อุตสาหกรรมขนมปังและขนมอบ

ในอุตสาหกรรมขนมปังและขนมอบได้มีการใช้เอนไซม์ในกระบวนการผลิตมานานหลายทศวรรษ ตัวอย่างเอนไซม์ที่มีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมนี้ ได้แก่ (ปราณี พัฒนพิพิธไพศาล, 2556 : 219-220 และ อรัญ หันพงศ์กิตติกูล, 2560 : 234)

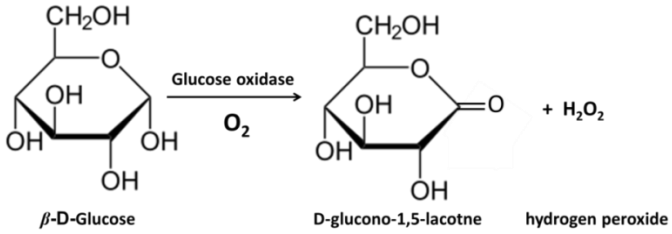
5.1 เอนไซม์อะไมเลส (amylase) ช่วยในการย่อยแป้งทำให้กระบวนการหมักด้วยยีสต์มีอัตราสูงขึ้น จึงเกิดก๊าซมากขึ้นทำให้ได้ขนมปังที่เป็นก้อนกลมพรุน และมีขนาดใหญ่ เอนไซม์ผลิตได้โดยเชื้อ *Aspergillus oryzae*

5.2 เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส (glucose oxidsase) ช่วยในการกำจัดกลูโคส และออกซิเจนในขนมปัง ทำให้สามารถเก็บขนมปังได้นานขึ้น เอนไซม์ผลิตได้โดยเชื้อ *Aspergillus niger* และ *penicillium sp.* ปฏิกิริยาของเอนไซม์แสดงดังภาพประกอบ 7.7

5.3 เอนไซม์ลิเพส (lipase) เป็นเอนไซม์ที่ช่วยทำให้ภายในขนมปังมีสีขาวและมีเนื้อสัมผัสนุ่ม เอนไซม์ผลิตได้โดยเชื้อ *Aspergillus niger*

5.4 เอนไซม์โปรทีเอส (protease) ใช้ย่อยโปรตีนกลูเทน (gluten) ในแป้งสาลี ซึ่งโปรตีนกลูเทนนี้จะทำให้ขนมอบแข็งตัว จึงมีการนำเอนไซม์โปรทีเอสมาช่วยในการย่อยกลูเทนทำให้ขนมอบมีความยืดหยุ่นและสามารถม้วนคลึงให้บางได้ เอนไซม์ผลิตได้จากเชื้อ *Aspergillus oryzae*

5.5 เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส (transglutaminase) เนื่องจากกลูเทนเป็นโปรตีนในแป้งที่สามารถเชื่อมกันได้โดยเอนไซม์ ทรานส์กลูตามิเนส จึงมีการใช้เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสในการผลิตขนมปัง โดยการเชื่อมพันธะโควาเลนต์ระหว่างไกลซีนและกลูตามีนของโปรตีนในแป้งสาลีในระหว่างการเตรียมก้อนแป้ง (dough) สำหรับการผลิตขนมปังและครัวซองท์ซึ่งการเชื่อมพันธะดังกล่าวทำให้ก้อนแป้งมีความสามารถในการอุ้มน้ำดีขึ้น และใช้พลังงานกลในการนวดลดลง ทำให้ได้ขนมปังที่มีปริมาตรสูงขึ้นและมีเนื้อสัมผัสที่ดี (วราภรณ์ กาพันสิทธิ์ และนพพล เล็กสวัสดิ์, 2556 : 6)



ภาพประกอบ 7.7 ปฏิกิริยาของเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส
ที่มา : ภาพโดย วรวัฒน์ พรหมเด่น (2560)

6. อุตสาหกรรมแปรรูปเนื้อสัตว์

เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส (transglutaminase) เป็นเอนไซม์ที่พบได้ในสิ่งมีชีวิตทั้งพืช สัตว์ และจุลินทรีย์ มีหน้าที่ประสานให้เกิดโครงสร้างของโปรตีน เช่น ช่วยให้เลือดแข็งตัว ทำงานด้วยการกระตุ้นให้สร้างพันธะโควาเลนท์ระหว่างกรดอะมิโนสองชนิด คือกลูตามีน (glutamine) และไลซีน (lysine) ทำให้โครงสร้างโปรตีนแข็งแรงขึ้น (ภาพประกอบ 7.5) และด้วยคุณสมบัตินี้จึงสามารถใช้ในการเชื่อมเศษเนื้อชิ้นเล็ก ๆ ที่เป็นผลพลอยได้จากการตัดแต่งเนื้อสัตว์หรือเศษเนื้อติดกระดูกเพื่อ

การผลิตเนื้อขึ้นรูป สามารถทำให้ชิ้นเนื้อชิ้นเล็ก ๆ จับตัวกันเป็นเนื้อชิ้นใหญ่ (ภาพประกอบ 7.8) ซึ่งจัดเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับเศษเนื้อสัตว์ที่เป็นวัตถุดิบราคาถูก นอกจากนี้เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสยังมีบทบาทสำคัญในการเกิดปรากฏการณ์ซูวาริ (suwari) ซึ่งมีผลทำให้เนื้อปลาบดเกิดเจลโปรตีนที่มีคุณภาพดี และเป็นสิ่งที่ต้องการในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ซูริมิ (surimi) เช่น ลูกชิ้นแท่ง ปูเทียม ปูอัด เต้าหู้ปลา เป็นต้น (ภาพประกอบ 7.9) (Vicchi Enterprise Co., Ltd., 2017) ดังนั้นการเติมเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส เพื่อเชื่อมพันธะของโปรตีนในเนื้อปลาบดจึงเป็นแนวทางในการปรับปรุงคุณภาพเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์จากเนื้อปลาได้เป็นอย่างดี และยังใช้ในการเพิ่มมูลค่าของเนื้อปลา (วราภรณ์ กาพันสิทธิ์ และนพพล เล็กสวัสดิ์, 2556 : 3)

ภาพประกอบ 7.8 ตัวอย่างการใช้เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสกับเนื้อสัตว์ สามารถทำให้ชิ้นเนื้อชิ้นเล็ก ๆ จับตัวกันเป็นเนื้อชิ้นใหญ่ได้

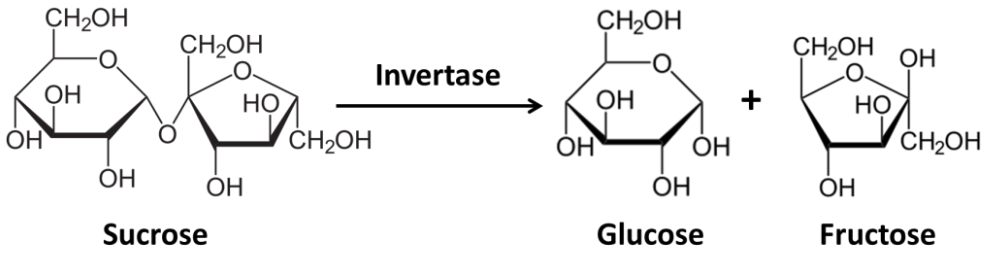
ที่มา : Vicchi Enterprise Co., Ltd. (2017)

ภาพประกอบ 7.9 ผลิตภัณฑ์ซูริมิที่ทำจากเนื้อปลาดอลลี่

ที่มา : Vicchi Enterprise Co., Ltd. (2017)

7. อุตสาหกรรมน้ำตาล

เอนไซม์อินเวอร์เทส (invertase) ซึ่งมีชื่อเรียกอื่น ๆ เช่น ซัคคาเรส (saccharase) กลูโคซูเครส (glucosucrase) หรือ ซูเครส (sucrose) มีการใช้ในอุตสาหกรรมเพื่อย่อยน้ำตาลซูโครส (sucrose) ให้เป็นน้ำตาลกลูโคส (glucose) และฟรุกโตส (fructose) (ภาพประกอบ 7.10) ใน อุตสาหกรรมผลิตน้ำผึ้งเทียม ลูกกวาดและเครื่องดื่มน้ำอัดลม เอนไซม์อินเวอร์เทสเป็นเอนไซม์ที่พบได้ทั่วไปทั้งในจุลินทรีย์ พืช และสัตว์ ซึ่งพบว่ามีการผลิตเอนไซม์อินเวอร์เทสในยีสต์สายพันธุ์ *Saccharomyces cerevisiae* และ *Saccharomyces carlsbergensis* และราสายพันธุ์ *Aspergillus niger Aspergillus Oryzae* และ *Aspergillus Japonicas* เป็นต้น ซึ่งเอนไซม์นี้จะทำงานได้ดีต้องอยู่ใน สภาพแวดล้อมที่เหมาะสมโดยมี pH ที่เหมาะสมคือในช่วง 3.5-5.5 (วิราวรรณ สายชล และนพพล เล็กสวัสดิ์, 2557 : 2 และ อรัญ หันพงศ์กิตติกูล, 2560 : 160)



ภาพประกอบ 7.10 ปฏิกิริยาของเอนไซม์อินเวอร์เทส
ที่มา : ภาพโดย วรวัฒน์ พรหมเด่น (2560)

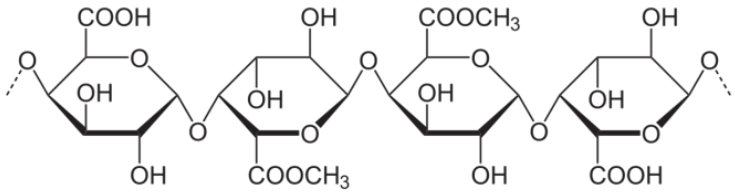
8. อุตสาหกรรมน้ำผลไม้

เพกทิน (pectin) เป็นพอลิแซ็คคาไรด์ (ภาพประกอบ 7.11) ที่พบในพืชเกือบทุกชนิด ซึ่งเพกทินจะอยู่รวมกับสารพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ ของเซลล์พืช ก่อให้เกิดปัญหาความขุ่นในน้ำผลไม้และไวน์ซึ่งกำจัดได้ยาก จึงมีการใช้เอนไซม์มาช่วยในการย่อยสลายเพกทิน ทำให้น้ำผลไม้ใส มีความหนืดลดลง และเพิ่มปริมาตรของน้ำผลไม้อีกด้วย เอนไซม์ที่สามารถย่อยเพกทินผลิตได้จาก *Aspergillus niger* ซึ่งประกอบด้วยเอนไซม์หลายชนิด ดังนี้ (Barman *et al*., 2015 : 3579-3589 ; Anand *et al*., 2017 : 1069-1074 and Mahmoodi *et al*., 2017 : 4123-4128)

8.1 พอลิกาแล็กทูโรเนส (polygalacturonase; EC 3.2.1.15) เป็นเอนไซม์ที่เร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายพันธะ α-1,4 กาแล็กทูโรนิก แบบสุ่ม

8.2 เพกทินเอสเทอเรส (pectin esterase; EC 3.2.1.11) ทำหน้าที่ปลดปล่อยเมทานอล (methanol) จากเพกทิลเมทิลเอสเทอร์ (pectyl methyl esters) (ภาพประกอบ 7.12) ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญก่อนที่พอลิกาแล็กทูโรเนสจะทำหน้าที่ได้สมบูรณ์ เมทานอลที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยกว่าในธรรมชาติและไม่มีผลต่อสุขภาพ

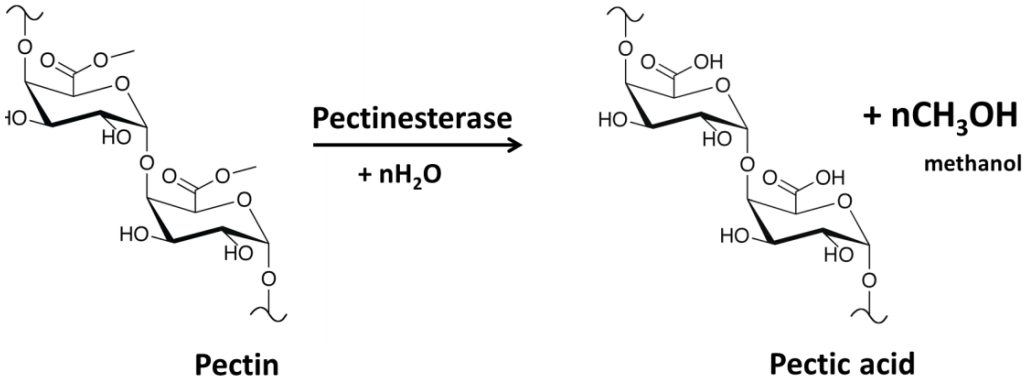
8.3 เพกทินไลเอส (pectin lyase; EC 4.2.2.10) ย่อยสลายเพกทินได้โอลิโกแซ็กคาไรด์ (oligosaccharide) (ภาพประกอบ 7.13) โดยสภาวะที่เหมาะสมต่อกิจกรรมของเอนไซม์คือ pH 4.0-5.0 และอุณหภูมิต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส



Pectin (pectic polysaccharide)

ภาพประกอบ 7.11 โครงสร้างของเพกทิน

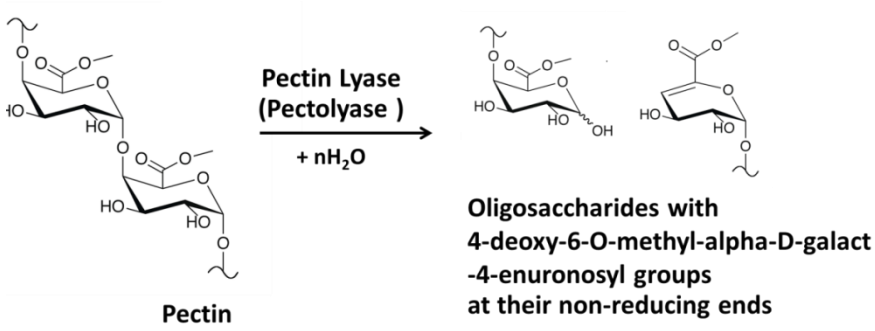
ที่มา : Neurotiker (2008)



Pectin **Pectic acid**

ภาพประกอบ 7.12 ปฏิกิริยาของเอนไซม์เพกทินเอสเทอเรส

ที่มา : Worthington Biochemical Corporation (n.d.)



ภาพประกอบ 7.13 ปฏิกิริยาของเอนไซม์เพกทินไลเอส
ที่มา : Worthington Biochemical Corporation (n.d.)

การใช้เอนไซม์ในอุตสาหกรรมสิ่งอุปโภค

อุตสาหกรรมการผลิตวัสดุเครื่องใช้ต่าง ๆ มีการใช้เอนไซม์เพื่อปรับปรุงคุณภาพของวัสดุให้มีคุณสมบัติตามต้องการ อุตสาหกรรมที่มีการใช้เอนไซม์ ได้แก่ อุตสาหกรรมเครื่องหนัง กระดาษ สารซักฟอก และสิ่งทอ

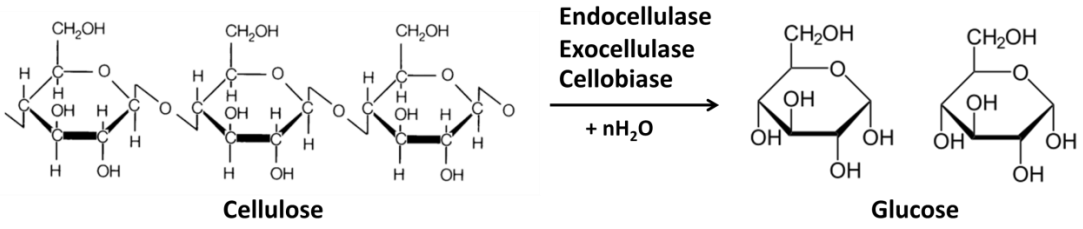
1. อุตสาหกรรมเครื่องหนัง

อุตสาหกรรมเครื่องหนังเป็นอุตสาหกรรมที่มีการใช้เอนไซม์ในกระบวนการผลิตค่อนข้างสูง โดยมีการใช้เอนไซม์แอลคาไลโปรทีเอส (alkaline protease) สำหรับการสลายขนสัตว์และหนังสัตว์เพื่อให้หนังสัตว์อ่อนตัว สามารถพับและเย็บได้ ปริมาณเอนไซม์ที่ใช้อยู่ในช่วงประมาณ 0.1-1.0 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก) และจะต้องควบคุมดูแลอย่างดีเพื่อป้องกันการสูญเสียคุณภาพของหนัง โดยเอนไซม์แอลคาไลโพรทีเอสนี้ ผลิตโดยเชื้อจุลินทรีย์ที่ชอบสภาวะด่าง (alkaliphilic bacteria) เช่น *Bacillus* sp. (ปราณี พัฒนพิพิธไพศาล, 2556 : 214 และ อรัญ หันพงศ์กิตติกูล, 2560 : 210-211)

นอกจากนี้ยังมีการใช้เอนไซม์ในการปรับแต่งเส้นใยขนสัตว์ด้วยกัน ได้แก่ โปรทีเอสลิเพส (protease lipase) โปรตีนไดซัลไฟด์ไอโซเมอเรส (protein disulfide isomerase) และทรานสกลูทามิเนส (transglutaminase) ตัวอย่างเช่น การนำโพรทีเอสซับทิลิซิน (protease subtilin) มาใช้ในการปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ขนสัตว์ ให้มีความคงทนต่อการหดตัวของเส้นใย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งาน แต่ข้อเสียการใช้สารเคมีจะทำให้คุณภาพของเส้นใยลดลง เนื่องจากสารเคมีในเส้นใยจะเสียหาย ทำให้อายุการใช้งานน้อยลง จึงได้มีการค้นคว้าหาวิธีที่ส่งผลกระทบต่อการเคมีในเส้นใยให้น้อยลงและป้องกันการหดของเส้นใยได้ เช่น การใช้เอนไซม์ทรานส์กลูทามิเนส ซึ่งช่วยลดการหดตัวของเส้นใยและเพิ่มความคงทนของเส้นใยได้ (ปราณี พัฒนพิพิธไพศาล, 2556 : 214 และ อรัญ หันพงศ์กิตติกูล, 2560 : 210-211)

2. อุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ

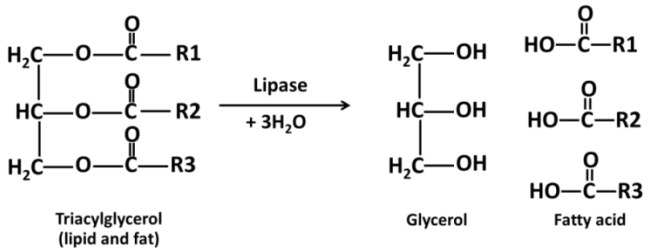
ปัจจุบันอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษมีปัญหาในกระบวนการผลิตเนื่องจากของเสียที่ได้จากโรงงานฟอกเยื่อกระดาษด้วยสารประกอบคลอรีนซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จึงมีการนำเอนไซม์มาช่วยในกระบวนการผลิต ได้แก่ เซลลูเลส (cellulase) ลิกนินเนส (ligninase) เฮมิเซลลูเลส (hemicellulase) เพกทิเนส (pectinase) และลิเพส (lipase) แต่ที่นิยมใช้มากที่สุดคือ เซลลูเลส เนื่องจากสามารถย่อยสลายเซลลูโลสซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในเยื่อกระดาษได้ดี (ภาพประกอบ 7.14) และยังใช้ในการกำจัดเส้นใยที่อยู่บริเวณพื้นผิวของเส้นใยกระดาษที่นำกลับมาใช้ใหม่ ทำให้ง่ายต่อการคัดแยกทำความสะอาดเยื่อหลังการฟอก มีการใช้เอนไซม์ลิเพสในขั้นตอนการบดแยกเส้นใยเพื่อป้องกันการตกตะกอนของยางน้ำมันไม้โดยผ่านกระบวนการไฮโดรไลซ์ไทรกลีเซอไรด์ (hydrolized triglyceride) การฟอกกระดาษโดยวิธีการทางเคมีจะได้เยื่อที่มีสีน้ำตาลเนื่องจากยังมีลิกนินและ อนุพันธ์ของลิกนินหลงเหลืออยู่ซึ่งอาจใช้เป็นกระดาษสีน้ำตาล จึงมีการกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลสที่เหลืออยู่เพื่อให้เยื่อกระดาษมีสีขาวโดยใช้เอนไซม์ลิกนินเนสและเฮมิเซลลูเลสมาใช้ในการฟอกเพื่อกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลสออกจากเยื่อ สามารถผลิตเอนไซม์ลิกลินเนสได้จากเชื้อราสายพันธุ์ *Polyporus sp.* เยื่อที่ได้จากการฟอกเรียกว่าเยื่อฟอกขาว (bleached pulp) ซึ่งจะส่งไปเก็บในถังเก็บเยื่อเพื่อส่งต่อไปยังขั้นตอนการทำแผ่นกระดาษ (sheet forming) และการใช้เอนไซม์เพกทิเนสในการฟอกเยื่อกระดาษจะเพิ่มประสิทธิภาพในการประสานกับเส้นใยได้ดียิ่งขึ้น แม้ว่าการใช้สารเคมีในการฟอกจะทำให้ได้เยื่อที่มีประสิทธิภาพดีกว่าแต่การใช้เอนไซม์ในการฟอกจะทำให้มีความปลอดภัยมากกว่า (ศิริรัตน์ ศิริพรวิศาล, 2553 : 69-73 และ ปราณี พัฒนพิพิธไพศาล, 2556 : 209-210)



ภาพประกอบ 7.14 ปฏิกิริยาของเอนไซม์เซลลูเลส
ที่มา : ภาพโดย วรวัฒน์ พรหมเด่น (2560)

3. อุตสาหกรรมสารซักฟอก

ผลิตภัณฑ์ที่ใช้สำหรับการชำระล้างสิ่งสกปรกให้ออกจากเสื้อผ้าและเครื่องนุ่งห่มคือสารซักฟอกซึ่งเป็นเกลือของกรดซัลโฟนิก โมเลกุลของสารซักฟอกประกอบด้วย 2 ส่วนเช่นเดียวกับสบู่ คือส่วนที่ละลายในไขมัน และส่วนที่ละลายในน้ำ แต่สารซักฟอกยังมีส่วนประกอบอื่น ๆ อีกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการซักล้าง เช่น เอนไซม์โปรตีเอส (protease) ใช้กำจัดคราบโปรตีน คราบเลือด และคราบอาหารออกจากเนื้อผ้า เอนไซม์อะไมเลส (amylase) ใช้กำจัดคราบแป้งบนเนื้อผ้า เอนไซม์ไลเปส (lipase) เพื่อกำจัดคราบไขมันจากอาหารและเหงื่อออกจากเนื้อผ้า (ภาพประกอบ 7.15) (ปกรณ์ หิรัญวัฒนานนท์, 2559 และ อรัญ หันพงศ์กิตติกูล, 2560 : 211)



ภาพประกอบ 7.15 ปฏิกิริยาของเอนไซม์ไลเปส
ที่มา : ภาพโดย วรวัฒน์ พรหมเด่น (2560)

4. อุตสาหกรรมสิ่งทอ

อุตสาหกรรมสิ่งทอมีการใช้เอนไซม์เพกเทตไลเอส (pectatelyase) มาใช้ในการทำความสะอาดสิ่งทอในรูปของสารชีวภาพในการทำสะอาดเส้นใย เรียกว่า ไบโอสเคาริง (bioscouring) จากการใช้เอนไซม์ในขั้นตอนการทำความสะอาดเส้นใย ทำให้มีการนำเอนไซม์หลายชนิดมาประยุกต์ใช้ในขั้นตอนอื่น ๆ ของกระบวนการฟอกย้อม เช่น การลอกแป้ง (desizing) การซักด้วยหินขัด (stone washed process) การฟอกขาว (bleaching) และการตกแต่งสำเร็จ (finishing) ทั้งนี้เพื่อผลประโยชน์ของโรงงานอุตสาหกรรมและเป็นผลดีต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ยังมีการใช้เอนไซม์เพื่อการลอกกาวไหมซึ่งเป็นการกำจัดสิ่งสกปรกที่มีอยู่ในเส้นใย ซึ่งมีการนำเอนไซม์โปรทีเอสไปใช้ในกระบวนการดังกล่าว เอนไซม์โปรทีเอสสามารถกำจัดกาวไหมออกได้อย่างสมบูรณ์และสม่ำเสมอ อีกทั้งเส้นไหมยังคงมีความแข็งแรง พื้นผิวเรียบ นุ่มนวล เงามัน และเส้นไหมมีความสามารถในการดูดติดสีรีแอ็กทิฟมากขึ้นด้วย (ปราณี พัฒนพิพิธไพศาล, 2556 : 210-213 และ อรัญ หันพงศ์กิตติกูล, 2560 : 207)

ตาราง 7.2 เอนไซม์และการประยุกต์ใช้เอนไซม์ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ

เอนไซม์	ปริมาณ (%)
อัลฟา-อะไมเลส	กำจัดสารลงแป้งออกจากเส้นใย ทำให้เส้นใยนุ่มขึ้น
เซลลูเลส และเฮมิเซลลูเลส	กำจัดกัมหรือยางเหนียวของเซลลูเลส กำจัดเส้นใยบริเวณพื้นผิวผ้าฝ้าย ทำให้ผ้านุ่มขึ้น
เพกติเนส	กำจัดกัมของเส้นใยจากผักเป็นสารไบโอสเคา (bioscour) ทดแทนโซดาไฟหรือโซดาแอช
โพรทีเอส	กำจัดกัมของเส้นใยจากสัตว์ ปรับสภาพเส้นใยขนสัตว์
ไลเพส	กำจัดไขมัน น้ำมัน
เพอร็อกซิเดส	ออกซิไดส์สีธรรมชาติ
คะตะเลส	กำจัดเพอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการฟอกขาว เพื่อให้ผ้าย้อมติดสีดีขึ้น

ที่มา : ปราณี พัฒนพิพิธไพศาล (2556 : 211)

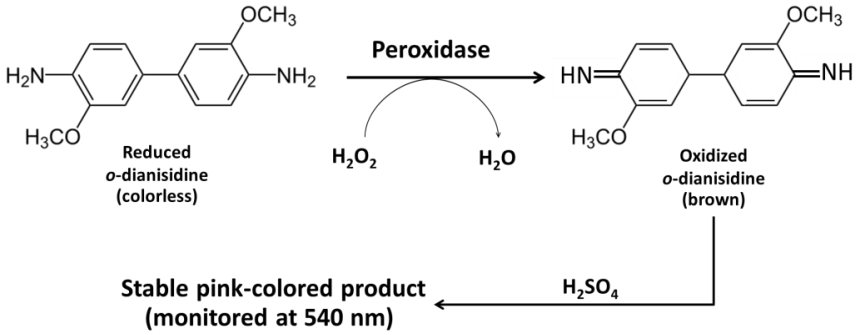
การใช้เอนไซม์ทางการแพทย์

มีการนำเอนไซม์มาประยุกต์ใช้ในการแพทย์ในปัจจุบันอย่างแพร่หลายซึ่งมีทั้งเพื่อการตรวจวิเคราะห์สารชีวโมเลกุลในสิ่งส่งตรวจทำให้ปัจจุบันสามารถตรวจวิเคราะห์ได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำมากขึ้น นอกจากนี้เอนไซม์บางชนิดยังมีการนำใช้เป็นยารักษาโรค

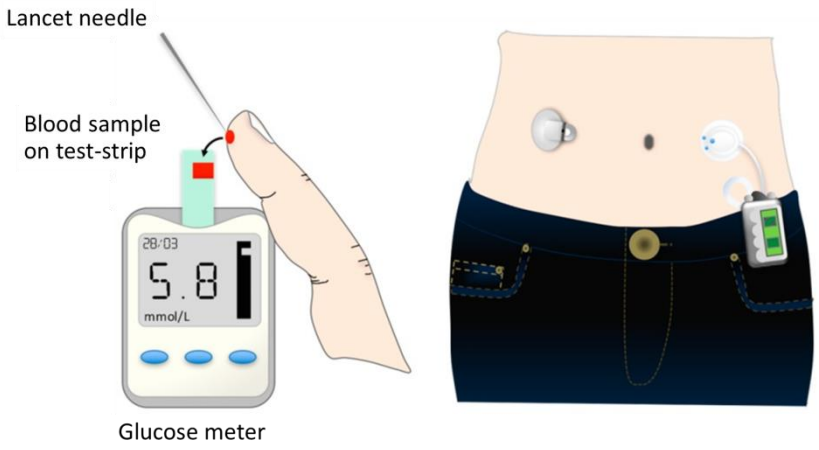
1. เอนไซม์ที่ใช้เพื่อตรวจวิเคราะห์

การใช้เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส และเอนไซม์เปอร์ออกซิเดส เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลกลูโคสในเลือดและปัสสาวะ เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส (glucose oxidase) เร่งปฏิกิริยาการออกซิไดซ์กลูโคส (β-D-glucose) ได้กลูโคโนแลคโตน (D-gluconolactone) โดยออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอน เกิดเป็นไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (H_2O_2) จากนั้นเอนไซม์เพอร์ออกซิเดส (peroxidase) จะเปลี่ยนไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ให้เป็นน้ำและนาสเซนต์ ออกซิเจน (nascent oxygen) ซึ่งจะไปออกซิไดซ์ ออร์โธ-ไดแอนนิซิดีน (*o*-dianisidine) ซึ่งเมื่อเติมกรดลงไปจะให้สีชมพู (ภาพประกอบ 7.16) สามารถวัดปริมาณกลูโคสที่มีในสารละลายจากการวัดสีที่เกิดขึ้นนี้ วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมาก เนื่องจากเอนไซม์กลูโคสออกซิเดสมีความจำเพาะต่อกลูโคสสูง สะดวก ปลอดภัยและง่าย นอกจากนี้ยังสามารถวัดปริมาณของกลูโคสที่อยู่ในสารละลายที่มีปริมาณน้อยในระดับไมโครกรัมได้ (ปราณี พัฒนพิพิธไพศาล, 2556 : 234-236 และ อรัญ หันพงศ์กิตติกูล, 2560 : 291) แต่ในปัจจุบันมีเครื่องที่สามารถวัดปริมาณกลูโคสได้จากเลือดเพียงหยดเดียว โดยใช้วิธีการตรึงเอนไซม์กลูโคสออกซิเดสไว้

บนแผ่นโลหะที่ต่อกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เมื่อหยดเลือดลงบนแผ่นโลหะแล้วปฏิกิริยาการเปลี่ยนน้ำตาลกลูโคสโดยเอนไซม์ก็จะเกิดขึ้น ทำให้เกิดสัญญาณไฟฟ้าเพื่อบอกปริมาณกลูโคสในเลือดได้ภายในเวลาไม่กี่วินาที (Klonoff, 2007 : 797-800 and Newman and Turner, 2005 : 2435-2453) ดังภาพประกอบ 7.17



ภาพประกอบ 7.16 ปฏิกิริยาของเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส
ที่มา : ภาพโดย วรวัฒน์ พรหมเด่น (2560)



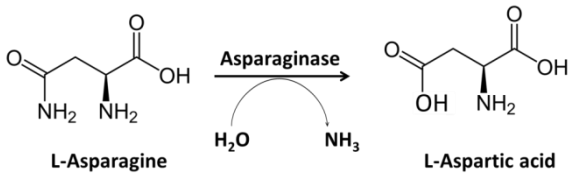
ภาพประกอบ 7.17 อุปกรณ์ตรวจปริมาณกลูโคสในเลือดแบบอิเล็กทรอนิกส์ (blood glucose monitoring device) แบบเจาะเลือดจากปลายนิ้ว (ซ้าย) และแบบตรวจวัดต่อเนื่อง (ขวา)
ที่มา : Bruen *et al*. (2017 : 3)

2. เอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการรักษาโรค

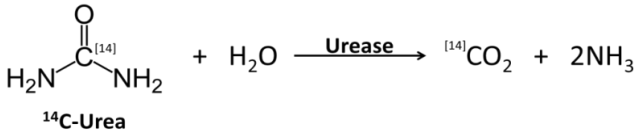
มีการใช้เอนไซม์เพื่อเป็นยารักษาโรค เช่น ยาช่วยย่อยอาหาร เกิดจากการนำ เอนไซม์อะไมเลส (amylase) ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่ใช้ย่อยแป้ง นำมาร่วมกับเอนไซม์ประเภทโปรตีเอส (protease) เช่น โบรเมเลน (bromelain) ซึ่งใช้ย่อยโปรตีน เกิดเป็นยาที่ช่วยย่อยอาหารขึ้น (Ianiro *et al*., 2016 : 187-193) (ภาพประกอบ 7.18) มีการใช้เอนไซม์ในการรักษามะเร็งหรือเนื้องอกบางชนิด เช่น มะเร็งเม็ดเลือดขาว (acute lymphoblastic leukemia; ALL) ซึ่งสามารถใช้เอนไซม์แอสพาราจิเนส (asparaginase) เร่งปฏิกิริยาการเปลี่ยนแอสพาราจีนให้เป็นกรดแอสพาติก (ภาพประกอบ 7.19) เนื่องจากโดยปกติเซลล์มะเร็งจะได้รับแอสพาราจีนจากกระแสเลือดเป็นหลัก เมื่อผู้ป่วยได้รับเอนไซม์แอสพาราจิเนสจะทำให้ปริมาณแอสพาราจีนลดลง ทำให้เซลล์มะเร็งไม่ได้รับแอสพาราจีนอย่างเพียงพอและเซลล์มะเร็งจะตายในที่สุด (Egler *et al*., 2016 : 62-71)

นอกจากนี้ยังสามารถนำหลักการของการทำงานของเอนไซม์มาใช้ในการวิเคราะห์สาเหตุของโรคได้ เช่น ในกระเพาะอาหารหรือลำไส้เล็กมีเชื้อแบคทีเรีย *Helicobacter Pylori* ซึ่งเป็นสาเหตุของโรคกระเพาะอาหารหรือทางการแพทย์เรียกว่า โรคแผลเปปติค (peptic ulcer) เนื่องจากเชื้อดังกล่าวมีการผลิตเอนไซม์ยูรีเอส (urease) ออกมา จึงสามารถตรวจการมีอยู่ของเชื้อได้จากการให้คนไข้รับประทานยูเรียที่ติดฉลากด้วยไอโซโทป (C-14 หรือ C-13) และรอประมาณ 20 นาที หากในกระเพาะอาหารของคนไข้มีเชื้อแบคทีเรีย *H. Pylori* ยูเรียจะถูกย่อยโดยเอนไซม์ยูรีเอสเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ติดฉลากไอโซโทปออกมาทางลมหายใจ (Savarino *et al*., 1999 : 18-22 and Sreekumar *et al*., 2015 : 1-6) ปฏิกิริยาแสดงดังภาพประกอบ 7.20

ภาพประกอบ 7.18 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ยาช่วยย่อยอาหารที่มีส่วนผสมของเอนไซม์โบรเมเลน
ที่มา : HealthAid Limited (n.d.)



ภาพประกอบ 7.19 ปฏิกิริยาของเอนไซม์แอสพาราจิเนส
ที่มา : ภาพโดย วรวัฒน์ พรหมเด่น (2560)



ภาพประกอบ 7.20 ปฏิกิริยาของเอนไซม์ยูรีเอส
ที่มา : ภาพโดย วรวัฒน์ พรหมเด่น (2560)

สรุป

เอนไซม์เป็นสารชีวโมเลกุลประเภทโปรตีนที่มีหน้าที่เร่งปฏิกิริยาในเซลล์สิ่งมีชีวิต เทคโนโลยีการใช้เอนไซม์เป็นการใช้ความรู้พื้นฐานทางชีวเคมีที่เกี่ยวข้องกับการเร่งปฏิกิริยาร่วมกับการใช้ความรู้ทางเทคโนโลยีชีวภาพที่เกี่ยวข้องกับการผลิตทางชีวภาพ เพื่อให้กระบวนการผลิตระดับอุตสาหกรรมได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติตามต้องการพร้อมกับลดต้นทุนและระยะเวลาการผลิต มีการนำเทคโนโลยีเอนไซม์มาใช้ในอุตสาหกรรมหลายวงการ ซึ่งเห็นตัวอย่างชัดเจนในทางการแปรรูปอาหาร เช่น การใช้เอนไซม์เรนเนทเพื่อให้น้ำนมตกตะกอนเป็นเคิร์ดสำหรับการผลิตชีส การใช้เอนไซม์แล็กเทสเพื่อย่อยน้ำตาลแล็กโทสในน้ำนม การใช้เอนไซม์อะไมเลสในการย่อยแป้งให้เป็นน้ำตาล การใช้เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสเพื่อประสานเนื้อสัตว์ชิ้นเล็ก ๆ ให้จับตัวกันเป็นเนื้อชิ้นใหญ่เพื่อเพิ่มมูลค่า หรือใช้ปรับปรุงรสชาติและเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์เนื้อปลาแปรรูปโดยทำให้เกิดเป็นเจลโปรตีน เอนไซม์ยังถูกใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องหนัง สิ่งทอ และกระดาษ เพื่อการย่อยสลายสารชีวโมเลกุลที่ไม่ต้องการออกจากผลิตภัณฑ์ เพื่อปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้มีคุณสมบัติที่เหมาะแก่การใช้งาน นอกจากนี้เทคโนโลยีเอนไซม์ยังมีความสำคัญด้านการแพทย์โดยใช้เป็นน้ำยาสำหรับตรวจวิเคราะห์ปริมาณสารชีวโมเลกุลเพื่อการใช้วินิจฉัยโรค รวมถึงการใช้เอนไซม์เป็นยารักษาโรคบางชนิดได้

คำถามท้ายบท

1. เอนไซม์เรนเนทมีแหล่งที่มาจากที่ใดและใช้ในอุตสาหกรรมใด
2. ผู้ที่ดื่มนมแล้วจะมีอาการท้องอืดและท้องเสียเกิดขึ้น เกิดจากสาเหตุใด และในอุตสาหกรรมอาหารมีวิธีการให้แก้ไขปัญหานี้อย่างไร
3. ในกระบวนการผลิตขนมปังมีการเติมเอนไซม์ที่ใดในส่วนผสม และมีวัตถุประสงค์อย่างไร
4. เอนไซม์ทรานกลูตามิเนสมีความสำคัญอยางไรในกระบวนการผลิตซูริมิ และอตุสาหกรรมโยเกิร์ต
5. ให้นักศึกษาค้นคว้าผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดผ้าในท้องตลาดว่ามีการเติมเอนไซม์ชนิดใดบ้าง และมีวัตถุประสงค์เพื่ออะไร
6. จงเขียนปฏิกิริยาการย่อยสลายน้ำตาลทรายด้วยเอนไซม์อินเวอร์เทส พร้อมระบุผลิตภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้
7. โครงสร้างของอะไมลสและเซลลูโลสประกอบด้วยกลูโคสเป็นมอนอเมอร์เหมือนกัน เพราะเหตุใดจึงใช้เอนไซม์ต่างชนิดกันในการย่อย จงอธิบายโดยละเอียด
8. ในการทำให้น้ำผลไม้ใสจะต้องใช้เอนไซม์ชนิด ปฏิกิริยาเกิดขึ้นเพื่อกำจัดสิ่งใด
9. จงยกตัวอย่างเอนไซม์ที่ใช้ในทางการแพทย์ที่มีการพัฒนาเป็นชุดตรวจวินิจฉัยโรคมา 5 ชนิด
10. จงค้นคว้าตัวอย่างการใช้เอนไซม์ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอางมา 2 ชนิด

เอกสารอ้างอิง

กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. (2553). **เอนไซม์กับการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร.** สืบค้นวันที่ 10 เมษายน 2560, จาก แหล่งความรู้ด้านไอทีเทคโนโลยีสำหรับ SMEs ไทย. เว็บไซต์ : http://www.itforsme.net/knc_detail.php?id=148

เจษฎา เรืองสุริยะ. (2558). **ตำราชีวเคมีพื้นฐานสำหรับวิทยาศาสตรทางการแพทย เลม 1.** เชียงใหม: พงษสวัสดิ์การพิมพ.

ไฉน ตาคำแสน และนพพล เล็กสวัสดิ์. (2556). **แล็กเทส.** สืบค้นวันที่ 15 เมษายน 2560, จาก สำนักวิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. เว็บไซต์ : http://www.agro.cmu.ac.th/absc/data/57/57-023.pdf

นิธิยา รัตนาปนนท์. (2557). **เคมีอาหาร.** พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.

ปกรณ์ หิรัญวัฒนานนท์. (2559). **ปฏิกิริยาผงซักฟอก.** สืบค้นวันที่ 18 เมษายน 2560, จาก สาขาวิชาวิศกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ. เว็บไซต์ : http://detergentsrxn.Blogspot.com/?view=classic

ปราณี พัฒนพิพิธไพศาล. (2556). **เอนไซม์เทคโนโลยี.** กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ปราณี อ่านเปรื่อง. (2558). **เอนไซม์ทางอาหาร.** พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ปิยวรรณ ศุภวิทิตพัฒนา. (ม.ป.ป.). **เอกสารคำสอนรายวิชาเทคโนโลยีนมและผลิตภัณฑ์ บทที่ 12 เรื่องเนยแข็ง.** สืบค้นวันที่ 20 เมษายน 2560, จาก คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอาหาร มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม. เว็บไซต์ : http://elearning.psru.ac.th /courses/104/lesson2086.html

เปยมสุข พงษสวัสดิ์ ศิริพร สิทธิประณีต และธีรพงษ บัวบูชา. (2559). **ชีวเคมี.** พิมพครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพแหงจุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนาปนนท์. (ม.ป.ป.) . **ซีอิ๊ว.** สืบค้นวันที่ 13 เมษายน 2560, จาก ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหารครบวงจร (Food Network Solution). เว็บไซต์ : http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1435/ซีอิ๊ว

วราภรณ์ กาพันสิทธิ์ และนพพล เล็กสวัสดิ์ (2556). **เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส.** สืบค้นวันที่ 15 เมษายน 2560, จาก สาขาวิชาวิศวกรรมกระบวนการอาหาร สำนักวิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. เว็บไซต์ : http://www.agro.cmu.ac.th/absc/data/57/57-027.pdf

วิราวรรณ สายชล และนพพล เล็กสวัสดิ์ (2557). **เอนไซม์อินเวอร์เทส.** สืบค้นวันที่ 15 เมษายน 2560, จาก สาขาวิชาวิศวกรรมกระบวนการอาหาร สำนักวิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. เว็บไซต์ : http://www.agro.cmu.ac.th/absc/data/57/57-028.pdf

ศิริรัตน์ ศิริพรวิศาล. (2553). **เทคโนโลยีเอนไซม์ในอุตสาหกรรมกระดาษ.** วารสาร Technology promotion. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). 37 (213): 69-73.

สุกัญญา สุนทรส และวิเชียร ริมพณิชยกิจ. (2553). **ชีวโมเลกุล.** พิมพครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพแหงจุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย.

อรัญ หันพงศ์กิตติกูล. (2560). **เทคโนโลยีเอนไซม์.** พิมพครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.

Anand, G., Yadav, S., and Yadav, D. (2017). **Production, purification and biochemical characterization of an exo-polygalacturonase from *Aspergillus niger* MTCC 478 suitable for clarification of orange juice.**Three Biotech. 7(2): 122. 1069-1074.

Barman, S., Sit, N., Badwaik, L.S., and Deka, S.C. (2015). **Pectinase production by *Aspergillus niger* using banana (*Musa balbisiana*) peel as substrate and its effect on clarification of banana juice.** J Food Sci Technol. 52(6): 3579-3589.

Bronhill Health Distributors. (2016). **Arambah lactose free natural yoghurt.** Retrieved April 25, 2017, from Dairy Product. Available URL: http://www.bronhill.com.au/Barambah_Lactose_Free_Natural_Yoghurt.html

Bruen, D., Delaney, C., Florea, L., and Diamond , D. (2017). **Glucose sensing for diabetes monitoring: Recent developments**. Sensors. 17(8): 1866. 1-21.

Egler, R.A., Ahuja, S.P., and Matloub, Y. (2016). **L-asparaginase in the treatment of patients with acute lymphoblastic leukemia.** J Pharmacol Pharmacother. 7(2): 62-71.

Green Valley Organics (2017). **Lactose-free strawberry yogurt.** Retrieved April 25, 2017, from Dairy Product. Available URL: https://greenvalleylactosefree.com/product/lactose-free-strawberry-yogurt

HealthAid Limited (n.d.). **Bromelain 500mg.** Retrieved April 21, 2017, from HealthAid Product Categories. Available URL: https://www.healthaid.co.uk/bromelain-500mg-capsules

Hirakawa, H., Kamiya, N., Tanaka,T., and Nagamune, T. (2007). **Intramolecular electron transfer in a cytochrome P450cam system with a site-specific branched structure.** Protein Engineering Design and Selection, 20: 453-459.

Ianiro, G., Pecere, S., Giorgio, V., Gasbarrini, A., and Cammarota, G. (2016). **Digestive enzyme supplementation in gastrointestinal diseases.** Curr Drug Metab. 17(2): 187-193.

Klonoff, D.C. (2007). **The benefits of implanted glucose sensors.** J Diabetes Sci Technol. 1(6): 797–800.

Loblaw Companies Limited. (2017). **PC plain lactose-free 2% M.F. yogurt.** Retrieved April 25, 2017, from Loblaw Companies Limited. Available URL: https://www.presidentschoice.ca/en_CA/products/productlisting/pc-plain-4123-4128lactose-free-2--m-f--yogurt.html

Mahmoodi, M., Najafpour, G.D., and Mohammadi M. (2017). **Production of pectinases for quality apple juice through fermentation of orange pomace.** J Food Sci Technol. 54(12): 4123-4128.

Mary Anne Co., Ltd. (2560). **Lactose free milk.** Retrieved June 25, 2017, from Mary Anne Dairy Product. Available URL: http://www.maryanne.co.th/product/

Neurotiker, M. (2008). **Structure of pectin.** Retrieved April 24, 2017, Wikimedia Commons, the free media repository. Available URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pektin2.svg

Newman, J.D., Turner, A.P. (2005). **Home blood glucose biosensors: a commercial perspective.** Biosens Bioelectron. 20(12): 2435-2453.

Savarino, V., Vigneri, S., and Celle, G. (1999). **The ^{13}C urea breath test in the diagnosis of *Helicobacter pylori* infection.** Gut. 45(Suppl 1): 18-22.

Sreekumar, J., France, N., Taylor,S., Matthews, T., Turner, P., Bliss, P., Brook, A,H. and Watson, A.J.M. (2105). **Diagnosis of *Helicobacter pylori* by carbon-13 urea breath test using a portable mass spectrometer.** SAGE Open Med. 2015; 3: 2050312115569565. 1-6.

Vicchi Enterprise Co., Ltd. (2017). **Transglutaminase in food industry.** Retrieved May 9, 2017, from Vicchi Article Knowledge Center. Available URL: http://www.vicchienterprise.co.th/transglutaminase.html

Walstra, P. (1999). **Casein sub-micelles: do they exist?** International Dairy Journal. 10(9): 189-192.

Worthington Biochemical Corporation. (n.d.). **Pectinesterase and pectin lyase.** Retrieved April 26, 2017, from Worthington Enzyme Manual. Available URL: http://www.worthington-biochem.com/index/manual.html