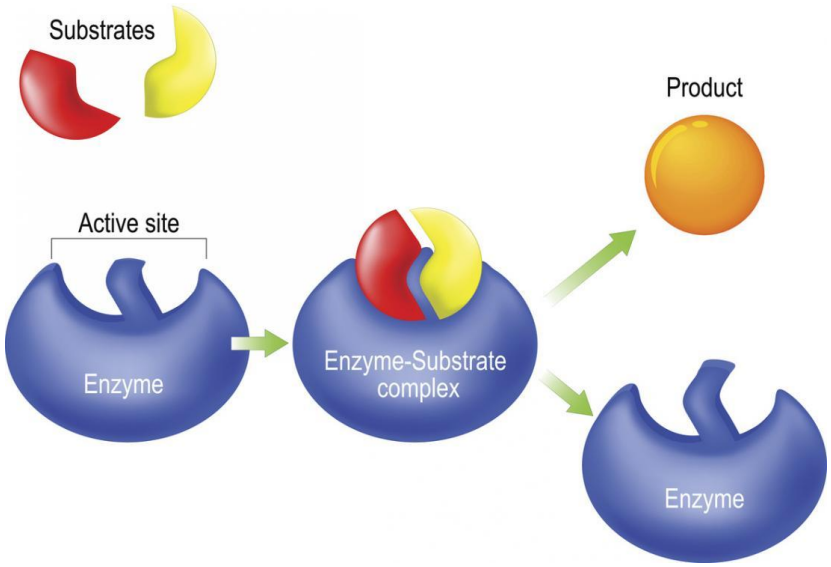
ห่วงโซ่อุปทานของการผลิตเอนไซม์

เอนไซม์ (Enzyme) เป็นกลุ่มของโปรตีนที่มีหน้าที่พิเศษแตกต่างจากโปรตีนทั่วไป คือ มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาทางชีวเคมีที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ของสิ่งมีชีวิตได้ทั้งในกระบวนการแคแทบอลิซึม (Catabolism) คือ การสลายเพื่อให้ได้พลังงาน และกระบวนการแอนาบอลิซึม (Anabolism) คือ การสร้างพอลิเมอร์ของสารชีวโมเลกุล เป็นต้น โดยเอนไซม์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันนั้นจะมีความจำเพาะต่อสารที่ทำปฏิกิริยาที่ต่างกัน เช่น ความจำเพาะต่อสารตั้งต้น (Substrate specificity) ความจำเพาะต่อพันธะ (Bond specificity) และความจำเพาะต่อหมู่ที่จะย่อย (Group specificity) โดยการทำงานของเอนไซม์นั้นสามารถเกิดขึ้นได้โดยไม่จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิที่สูง หรือใช้ความรุนแรงของกรดด่างมากซึ่งมีความปลอดภัย และเมื่อสิ้นสุดการทำปฏิกิริยาแล้วจะได้เอนไซม์กลับคืนมาในรูปแบบเดิมโดยไม่ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์รูปแบบอื่น

รูปที่ 1 การทำงานของเอนไซม์ที่มีความจำเพาะต่อสารตั้งต้น

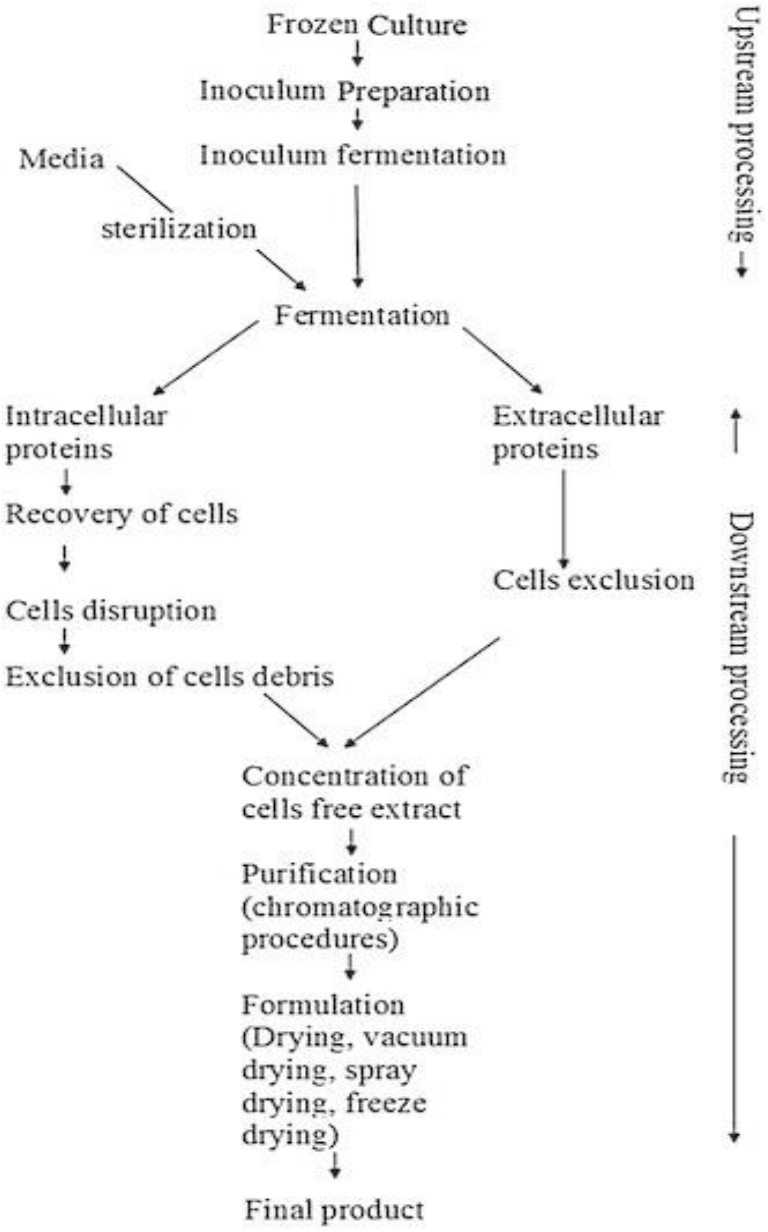


ที่มา: www.medicalnewstoday.com/articles/319704

การผลิตเอนไซม์เพื่อใช้งานในปัจจุบันนั้นหลัก ๆ สามารถผลิตได้จากกระบวนการสกัดและการแยก (Extract and separation) คือ การสกัดเอนไซม์และแยกออกจากเนื้อเยื่อของพืชและสัตว์ และกระบวนการสังเคราะห์ทางชีวภาพ (Biosynthesis)[1] คือ การผลิตเอนไซม์จากจุลินทรีย์ซึ่งการสังเคราะห์โดยกระบวนการนี้มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นวิธีที่มีขั้นตอนไม่ยุ่งยาก มีค่าใช้จ่ายไม่สูง ประกอบกับสามารถผลิตได้ในปริมาณมาก ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดการพัฒนาคิดค้นเทคโนโลยี งานวิจัยต่าง ๆ และแหล่งที่มารองรับเพื่อใช้ในการผลิตเอนไซม์นำมาใช้งานอย่างมีนัยสำคัญ โดยการผลิตเอนไซม์จากกระบวนการสังเคราะห์ทางชีวภาพ (Biosynthesis) ในอุตสาหกรรม มีขั้นตอนคร่าว ๆ ดังแสดงใน***รูปที่ 2***

[1] ที่มา www.creative-enzymes.com

รูปที่ 2 การผลิตเอนไซม์จากกระบวนการสังเคราะห์ทางชีวภาพ (Biosynthesis) ในอุตสาหกรรม



ที่มา: Mittal, et al., 2006, p.5

ปัจจุบันการเติบโตของตลาดเอนไซม์โลกนั้นมีทิศทางการเติบโตที่เพิ่มมากขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 14.20 หรือคิดเป็น 17.45 พันล้านเหรียญสหรัฐ ในปี 2569 ซึ่งสะท้อนให้เห็นการเติบโตที่รวดเร็วของตลาดเอนไซม์ทั่วโลกและมีทิศทางการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเป็นผลมาจากกระแสในการผลักดันเศรษฐกิจฐานชีวภาพ ความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม การลดการใช้สารเคมีซึ่งอาจส่งผลอันตรายต่อสุขภาพในระยะยาว รวมไปถึงการประหยัดพลังงานรักษาสิ่งแวดล้อม รวมถึงความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีก็ส่งผลในทางบวกนี้ด้วยเช่นกัน

โดยกลุ่มเอนไซม์จำพวก Carbohydrase Amylase Cellulase Proteinase และ Lipase ยังเป็นเอนไซม์ที่สำคัญและมีส่วนแบ่งการตลาดที่สูงอยู่ในปัจจุบัน[2]

ในส่วนของประเทศไทยขณะนี้ยังมีการนำเข้าเอนไซม์จากต่างประเทศเพื่อนำมาใช้ในภาคอุตสาหกรรมภายในประเทศ ซึ่งคิดเป็นมูลค่าประมาณ 2 พันล้านบาทต่อปี แต่ด้วยไทยนั้นเป็นประเทศที่มีความหลากหลายทางชีวภาพสูง เนื่องด้วยตำแหน่งที่ตั้งของประเทศและสภาพภูมิอากาศ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดความหลากหลายของจุลินทรีย์รวมถึงชีววัตถุต่าง ๆ จากการประเมินพบว่าประเทศไทยพบสายพันธุ์จุลินทรีย์นี้มากถึงร้อยละ 10 ของจุลินทรีย์ที่มีในโลก โดยศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ (BIOTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ได้มีการคัดแยกและรวบรวมสายพันธุ์จุลินทรีย์จากทั่วประเทศไว้ในธนาคารจุลินทรีย์ไบโอเทค ซึ่งพบว่า มีมากกว่า 80,000 สายพันธุ์ จึงส่งผลให้เป็นแหล่งต้นทางของจุลินทรีย์ที่ใหญ่อันดับ 6 ของโลก[3] ซึ่งเหตุนี้จึงทำให้ประเทศไทยมีศักยภาพในการวิจัยและผลิตผลิตภัณฑ์เอนไซม์ที่มีคุณภาพเพื่อการส่งออกและใช้ในภาคอุตสาหกรรมภายในประเทศเพื่อสร้างความเข้มแข็งและตอบโจทย์อุตสาหกรรมกลุ่มเป้าหมายภายในและภายนอกประเทศได้เป็นอย่างดี

- **ห่วงโซ่อุปทานของอุตสาหกรรมการผลิตเอนไซม์**

เอนไซม์เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความสำคัญและจำเป็นโดยเฉพาะอุตสาหกรรมชีวภาพ โดยเอนไซม์จะทำหน้าที่เป็นสารเร่งปฏิกิริยาทางชีวภาพ (Bio-catalyst) ที่จะช่วยในการเร่งการเกิดปฏิกิริยาเคมีของสารตั้งต้น (Substrate) เพื่อเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ในสภาวะที่เหมาะสม โดยเอนไซม์ที่มีประสิทธิภาพจะสามารถช่วยให้เกิดร้อยละของผลได้ (Yield) ของปฏิกิริยาสูง กล่าวคือ ได้ผลิตภัณฑ์เป้าหมายที่ต้องการในสัดส่วนที่มากเมื่อเทียบกับการใช้สารตั้งต้นในปริมาณที่เท่ากัน นอกจากนี้ ยังช่วยลดสัดส่วนของการเกิดผลิตภัณฑ์ข้างเคียง (Byproduct) รวมถึงของเสียจากกระบวนปฏิกิริยาหรือการผลิตได้เป็นจำนวนมาก ทำให้ในปัจจุบันการพัฒนาประสิทธิภาพของเอนไซม์มีการแข่งขันสูง ซึ่งประสิทธิภาพของเอนไซม์นั้น เป็นหนึ่งในปัจจัยที่ส่งผลต่อราคาด้วยเช่นกัน

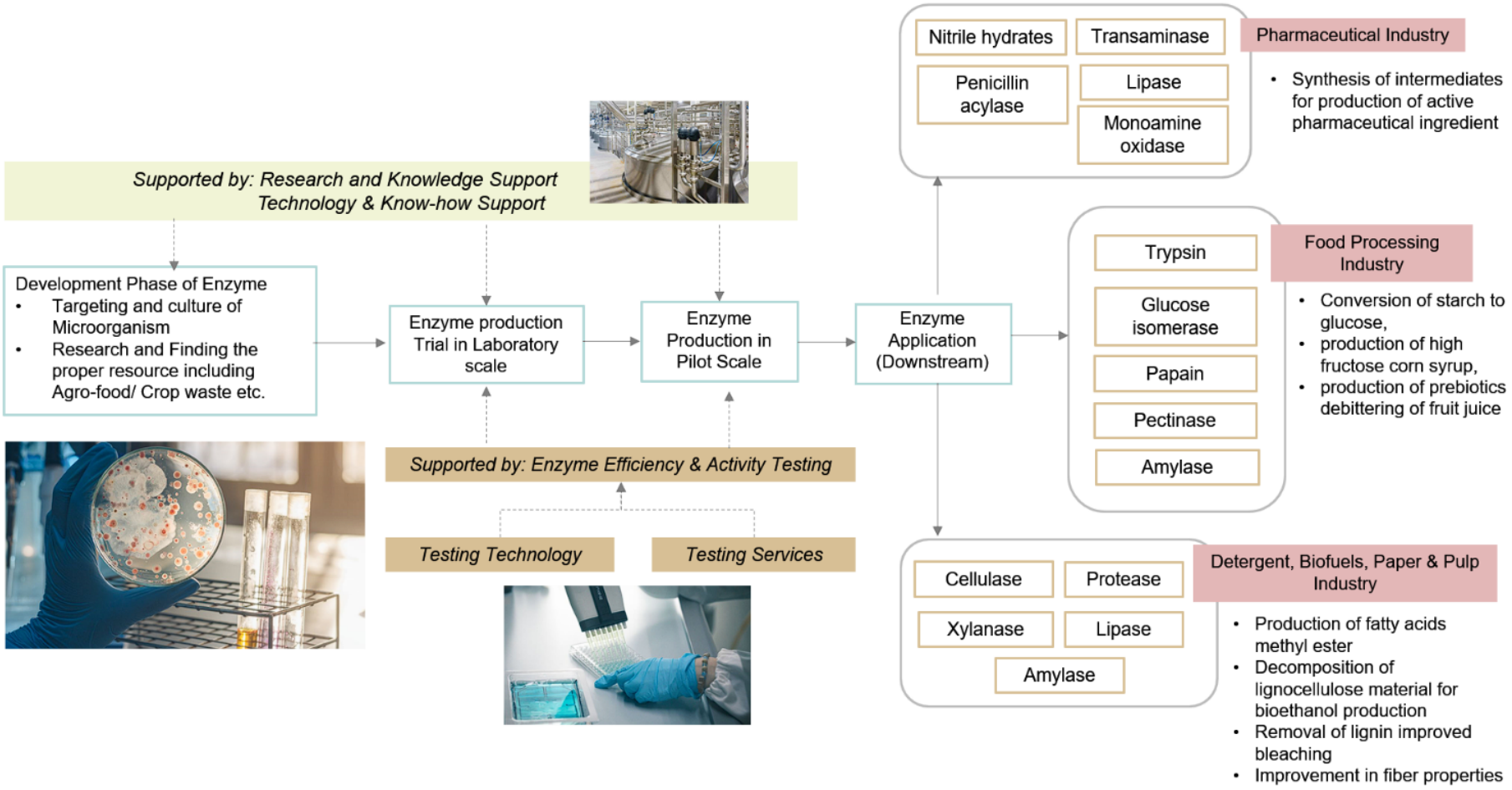
ในห่วงโซ่อุปทานอุตสาหกรรมการผลิตเอนไซม์ ในระยะเริ่มต้น หลังจากที่มีการดำหนดเป้าหมายในการใช้งานเอนไซม์เรียบร้อยแล้ว จะเป็นการศึกษา เพื่อรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับจุลินทรีย์หรือสิ่งมีชีวิตที่สามารถผลิตเอนไซม์ที่มีความจำเพาะต่อปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เป้าหมาย ซึ่งขั้นต้นนี้จำเป็นต้องอาศัยระยะเวลาในการศึกษาทดทอง งบประมาณในการวิจัยและพัฒนา รวมถึงองค์ความรู้และเทคโนโลยีสนับสนุนด้านการวิจัยและพัฒนา อาทิ ห้องเพาะเลี้ยงเชื้อ อุปกรณ์สำหรับการควบคุมสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเพาะเลี้ยงเชื้อ สารอาหารที่ใช้สำหรับการเพาะเลี้ยงเชื้อ อุปกรณ์สำหรับการทำปฏิกิริยาเคมี และการทำให้บริสุทธิ์ เป็นต้น โดยหลังจากที่ได้มีการคัดเลือกจุลินทรีย์เป้าหมายที่สามารถผลิตเอนไซม์เป้าหมายที่มีประสิทธิภาพแล้ว จะเป็นการพัฒนาต่อยอดในการผลิตระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory scale production) เพื่อทดลองหา

[2] ที่มา https://vocal.media/fyi/industrial-enzymes-market-by-types-companies-forecast-by-2027

[3] ที่มา: mgronline.com/science/detail/9600000107780

สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเติบโตของจุลินทรีย์และการผลิตเอนไซม์ของจุลินทรีย์ในห้องปฏิบัติการ โดยจะได้มีการศึกษาวิจัยเพื่อปรับปรุงโครงสร้างของเอนไซม์ให้มีความจำเพาะต่อสารตั้งต้นมากยิ่งขึ้น ซึ่งผลจากการศึกษาจะได้นำไปใช้ในการเพิ่มขนาดการผลิต (Up-scale production) เพื่อผลิตในปริมาณที่เพิ่มขึ้นก่อนที่จะเป็นการผลิตในระดับอุตสาหกรรม (Industrial Scale) ต่อไป โดยจะได้มีการทดสอบประสิทธิภาพของเอนไซม์โดยใช้เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง หรือการบริการจากหน่วยงานที่รับบริการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเอนไซม์ที่มีอยู่ในปัจจุบัน

รูปที่ 3 ห่วงโซ่อุปทานของอุตสาหกรรมการผลิตเอนไซม์



จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเป็นกิจกรรมบางส่วนที่เกิดขึ้นในห่วงโซ่อุปทานของการผลิตและพัฒนาเอนไซม์ ซึ่งหลังจากที่ได้เอนไซม์เป้าหมายแล้ว จะเข้าสู่ขั้นตอนของการทำการตลาด โดยในปัจจุบันมีตัวแทนจำหน่ายเอนไซม์จำนวนมากกระจายอยู่ในหลายพื้นที่ทั่วโลก (***รูปที่ 4***) ซึ่งช่วยให้ผู้ประกอบการในภาคอุตสาหกรรมสามารถเข้าถึงผลิตภัณฑ์เอนไซม์ที่เหมาะสมต่อการผลิตผลิตภัณฑ์เป้าหมายได้ง่ายมากขึ้น

รูปที่ 4 ผู้พัฒนาและผู้แทนจำหน่ายเอนไซม์รายใหญ่ของโลก

เอนไซม์ได้ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมปลายทางจำนวนมาก เนื่องจากเอนไซม์มีความสำคัญต่อภาคการผลิตและแปรรูปผลิตภัณฑ์ เช่น

- เอนไซม์ Nitrile hydrates, Transaminase, Penicillin acylase, Lipase Monoamine oxidase นำไปใช้ในการผลิตสารขั้นกลาง (Intermediate) ซึ่งจะเป็นส่วนผสมสำคัญในอุตสาหกรรมการผลิตยา (Pharmaceuticals industry)
- เอนไซม์ Trypsin, Glucose isomerase, Papain, Pectinase และ Amylase นำไปใช้ในการแปรรูปแป้งเป็นน้ำตาลกลูโคส การผลิตสารให้ความหวาน (Syrup) จากข้าวโพดที่มีส่วนผสมของน้ำตาลฟรุกโตสสูง (High fructose corn syrup) เป็นต้น
- เอนไซม์ Cellulase, Protease, Xylanase, Lipase และ Amylase นำไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิต Fatty acids methyl ester อุตสาหกรรมการผลิต Bioethanol จาก Lignocellulose การกำจัดลิกนินทำให้การฟอกสีดีขึ้น เป็นต้น

นอกจากอุตสาหกรรมหลักที่ได้กล่าวถึงข้างต้นแล้ว เอนไซม์ยังมีการใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอื่น ๆ อีกจำนวนมาก ซึ่งจะได้กล่าวรายละเอียดไว้ในหัวข้อถัดไป

○ การใช้ประโยชน์จากเอนไซม์ในภาคอุตสาหกรรม

ปัจจุบันการใช้เอนไซม์ในภาคอุตสาหกรรมพบได้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมหลักหลายประเภท โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมอาหารและยาที่มีการพึ่งพาเอนไซม์ในการผลิตค่อนข้างสูง นอกจากนี้ยังมีการใช้ในอุตสาหกรรมอื่น ๆ เช่น พลังงาน สิ่งทอ การแปรรูปแป้ง รวมถึงการผลิตเครื่องอุปโภคต่าง ๆ โดยเอนไซม์นั้นสามารถนำมาใช้เร่งปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตโดยตรง หรือเพื่อนำมาปรับใช้เพื่อลดปริมาณการใช้สารเคมีในระหว่างกระบวนการ รวมไปถึงลดการใช้พลังงานในกระบวนการผลิต การใช้เสริมในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติและมูลค่าทางการตลาด ให้แก่ผลิตภัณฑ์ โดยจำแนกตามชนิดเอนไซม์และการใช้งานในอุตสาหกรรมได้ดัง***ตารางที่ 1***

ตารางที่ 1 ชนิดเอนไซม์และรูปแบบการใช้งานในอุตสาหกรรม

เอนไซม์	การใช้งาน
1. อะไมเลส (Amylase) โดยมี 2 ชนิด ไดแก β-amylase และ α -amylase	● ใช้ในกระบวนการผลิตกลูโคส (Glucose syrup)และผลิตสตาร์ชดัดแปร (Modified starch) ประเภท enzyme treated starch ในอุตสาหกรรมอาหาร
2. β-galactozidase หรือ lactase	● ใช้ในเพิ่มปริมาณของแข็งในผลิตภัณฑ์นม(dairy product) ผสมในอาหารทารก และใช้เป็นตัวพา (Carrier) สารให้กลิ่น (Flavoring agent) ในอุตสาหกรรมอาหาร
3. เซลลูเลส (cellulase)และเฮ-ไมเซลยูเลส (hemicellulase)	● ใช้ในการปรับและเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการของอาหารเม็ดจำพวกพืชและหญ้าหมักในอาหารสัตว์ นอกจากนี้ยังใช้ในอุสาหกรรมอาหารแปรรูป เช่นการทำให้ผลไม้มีเนื้อนุ่ม น้ำผลไม้มีสีใส การผลิตไวน์ให้มีรสชาติดีขึ้น ใช้ในการสกัดน้ำมันมะกอกสกัดสารแคโรทีนอยด์ (Carotenoid) และใช้ในการการย่อยเปลือกวนิลาในการผลิตสารสกัดจากวนิลา ● ปรับปรุงคุณภาพเนื้อผ้าในอุตสาหกรรมสิ่งทอ และใช้เป็นส่วนผสมในอุตสาหกรรมผงซักฟอก ● ใช้ในการเพิ่มความสามารถในการฟอกขาวในอุตสาหกรรมกระดาษ ● ใช้เป็นตัวไฮโดรไลซ์เพื่อให้ได้น้ำตาลในการนำมาผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจำพวกเอทานอล (Ethanol)[4]
4. เพกติเนส (pectinase)	● ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหารโดยใช้ในการทำให้น้ำผลไม้มีเนื้อนุ่ม และทำให้น้ำผลไม้คั้นสดแยกชั้น นำมาใช้ในการกรอง

[4] งานวิจัย เรื่อง Cellulases: From Bioactivity to a Variety of Industrial Applications จาก www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8293267/

เอนไซม์	การใช้งาน
	เพิ่มเพิ่มรสชาติและสีของการผลิตไวน์ และนำมาใช้ในการลดการเกิดฟองในการชงชาชนิดผง รวมทั้งใช้ในกระบวนการหมักกาแฟ ● ใช้ในการกำจัดสารคัดขนาดในการผลิตเส้นใยฝ้ายแทนการใช้สารเคมี ● ใช้ในการปรับคุณภาพน้ำเสียจากอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารจำพวกพืชก่อนเข้าสู่กระบวนการบำบัด ● ใช้ย่อยเปลือกไม้ในอุตสาหกรรมกระดาษเพื่อลดความเหลืองของกระดาษ[5]
5. โปรติเอส (Protease) โดยมีเอนไซม์ที่นิยมใช้ คือ เรนนิน (Rennin) โบรมิเลน (Bromelain) และปาเปน (Papain)	● ใช้ในการผลิตเบียร์ (Beer) หลังจากการต้มข้าวมอลต์ (Malt) ในเวอร์ต (Wort) เบียร์ ยังมีลักษณะขุ่นเนื่องจากมีโปรตีน (Protein) ของข้าวมอลต์ ที่ยังแขวนลอยอยู่ การใช้เอนไซม์ Protease เพื่อย่อยสลายโปรตีนให้มีขนาดเล็กหรือเป็นกรดแอมิโนที่ละลายในน้ำได้ดี ช่วยทำให้เบียร์ใสขึ้น ใช้ทำให้เนื้อนุ่ม (Meat tenderizer) รวมถึงใช้ตกตะกอนเคซีน (Casein) ซึ่งเป็นโปรตีนนม (Milk protein) เพื่อผลิตเนยแข็ง (Chesse) ในอุตสาหกรรมการผลิตอาหาร
6. กลูโคสออกซิเดส (Glucose oxidase)	● ใช้เพิ่มประสิทธิภาพของกลูเต็นในแป้งข้าวสีและแป้งข้าวโพด จำพวกช่วยในการกำจัดกลูโคสและออกซิเจนจากอาหารหรือเครื่องดื่มสำหรับผู้ป่วยโรคเบาหวาน รวมถึงการยืดอายุของผลิตภัณฑ์อาหารให้นานขึ้น[6] ● ช่วยกำจัดสารอนุมูลอิสระ และช่วยในการย่อยอาหารของสัตว์ในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ ● ช่วยในการลดการเกิดโรคในช่องปากและการผุของฟัน
7. คาลาเตส (Calatase)	● ใช้เป็นตัวเข้าสลายพันธะทางเคมีของไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ในอาหาร และนม รวมถึงการใช้เป็นดีทอกซ์ในอาหารสัตว์รวมถึงเป็นอาหารเสริมในสัตว์เพื่อเพิ่มภูมิต้านทานและการฟื้นตัวจากการป่วย ● ใช้ในการกำจัดสารไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ในอุตสาหกรรมกระดาษ

[5] งานวิจัย เรื่อง Pectinase from Microorganisms and Its Industrial Applications จาก www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8293267/

[6] Khurshid et al., 2011

เอนไซม์	การใช้งาน
	และเส้นใย ● ในอุตสาหกรรมอาหารใช้เป็นตัวปรับปรุงเนื้อสัมผัสของเบเกอรี่ และใช้ในกระบวนการหมักเบียร์และวิสกี้และยืดอายุของอาหาร[7]
8. ลิโพออกซิจิเนส (Lipoxygenase)	● ใช้ในการให้ได้สีของขนมปังเป็นสีน้ำตาลนวลโดยจะไปควบคุมปฏิกิริยาการเกิด browning ของน้ำตาลในขณะอบ
9. ไลเปส (Lipase)	● สลายไขมันในอาหารมนุษย์และสัตว์ และใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบ่มเพื่อผลิตบลูชีส

[7] งานวิจัย เรื่อง Catalase Enzyme เผยแพร่ www.myskinrecipes.com