บทที่ 2

ทฤษฎีและวารสารที่เกี่ยวข้อง

ปัญหาที่พบในงานวิจัยที่ผ่านมา [1] คือกระบวนการผลิตเซลลูเลส เอนไซม์จากการหมักกึ่งเหลวโดยใช้เชื้อราไตรโคเดอร์มา รีสิอี RMUTT01 ในอาหารเหลวบัฟเฟอร์มีฟางข้าวเป็นสับสเตรท พบว่าต้นทุนการผลิตครูดเอนไซม์สูงเนื่องจากใช้สารเคมีหลายชนิด ในอาหารเหลวบัฟเฟอร์ และกระบวนการเตรียมเซลลูโลสบริสุทธิ์จากฟางข้าวยุ่งยาก ต้องใช้เวลา พลังงาน และสารเคมี (โซเดียมไฮดรอกไซด์) และน้ำล้าง ครูดเอนไซม์มีสถานะเป็นของเหลวต้องนำไปใช้ย่อยสลายกากมันสำปะหลังทันที หรือถ้าต้องการเก็บทำได้โดยเก็บไว้ในตู้เย็นจึงยืดอายุเชื้อราได้ระดับหนึ่งทำให้มีปัญหาในการจัดเก็บ

กรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย การหมักแข็งได้รับความนิยมในการผลิตเซลลูเลสจากเชื้อราไตรโคเดอร์มา รีสิอี เพราะมีข้อดีมากกว่าข้อด้อย เช่น ขนาดถังหมักเล็กกว่าทำให้ราคาถูก ลดการปนเปื้อนเพราะความชื้นต่ำ แยกผลิตภัณฑ์ได้ง่ายกว่า ใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิ์ภาพ และสามารถพัฒนาการผลิตได้เต็มที่หลายรูปแบบ ข้อเสียเปรียบของการหมักกึ่งเหลวเมื่อใช้สับสเตรทเป็นเส้นใย ได้แก่ การผสมระหว่างอาหารเหลวและสับเตรทไม่ทั่วถึง การควบคุมพีเอช ความชื้น และอุณหภูมิทำได้ยาก ต้องใช้อัตราเร็วรอบของการหมุนที่เหมาะสมไม่เช่นนั้นจะไปทำให้เส้นใยขาดได้ ตัวแปรสำคัญในการควบคุมกระบวนการหมักแข็ง เช่น ความชื้น ความเข้มข้นของเชื้อรา อุณหภูมิ พีเอช ขนาดอนุภาคและการกวนหรือการเติมอากาศ งานวิจัยนี้จึงนำเสนอ <u>กระบวนการหมักแข็งต้นทุนต่ำ เนื่องจากใช้กากมันสำปะหลังแห้งเป็นสับสเตรทและอาหารเหลวสูตรเฉพาะ</u> เซลลูเลส เอนไซม์ชนิดผงแห้งสามารถนำไปใช้ได้สะดวก เก็บรักษาง่ายและมีอายุการใช้งานนาน สำหรับการอบแห้งเซลลูเลส เอนไซม์เป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่สำคัญในการผลิตเซลลูเลสเอนไซม์ชนิดผงแห้ง ทั้งนี้มีจุดประสงค์เพื่อลดความชื้นให้น้อยกว่าร้อยละ 13 โดยใช้ความร้อนเพื่อให้น้ำในเซลลูเลสเกิดการระเหยเข้าสู่อากาศที่อยู่รอบๆ การออกแบบกระบวนการอบแห้งทั่วไปต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายชนิด เช่น สภาวะการทำงานของเครื่องอบแห้ง (ความดันไอ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์) การสัมผัสระหว่างแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงกับของแข็งเปียก กลไกการระเหยความชื้นออกจากของแข็ง โครงสร้างและขนาดของวัสดุ การเสื่อมสภาพของของแข็ง เป็นต้น ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ล้วนมีผลต่อประสิทธิภาพการอบแห้ง ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการอบแห้งแล้วต้องผ่านการบดและคัดขนาดอนุภาคก่อนนำไปใช้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเอนไซม์

นอกจากการผลิตเซลลูเลส เอนไซม์ชนิดผงแห้งต้นทุนต่ำที่ได้จากกระบวนการหมักแข็งกากมันสำปะหลังด้วยเชื้อราไตรโคเดอร์มา รีสิอี เพื่อการย่อยสลายเส้นใยสำหรับอุตสาหกรรมเอทานอลแล้ว ผลิตภัณฑ์ที่ได้นี้ยังสามารถนำไปใช้เป็นหัวเชื้อราแห้งสำหรับการควบคุมโรคพืชและการทำปุ๋ยอินทรีย์ซึ่งเป็นที่ต้องการของเกษตรกรในประเทศอยู่ในขณะนี้

เซลลูเลสเป็นเอนไซม์ที่สำคัญในการย่อยสลายเซลลูโลสโดยทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยการเติมโมเลกุลของน้ำเข้าไปเพื่อสลายพันธะเคมี พบมากในจุลินทรีย์หลายชนิด โดยเฉพาะเชื้อรา และแบคทีเรียบางชนิดในลำไส้ปลวก เซลลูโลสเป็นโพลิเมอร์ของกลูโคส พบประมาณ 40-60 % ขององค์ประกอบของเซลล์พืช การย่อยสลายเซลลูโลสให้เป็นกลูโคสใช้เอนไซม์เซลลูเลส ซึ่งปัจจุบันได้พัฒนาเทคโนโลยีเพื่อผลิตเอนไซม์เซลลูเลสปริมาณมาก การผลิตเอทานอล 1 แกลลอน ต้องใช้เอนไซม์ประมาณ 100 กรัม สหรัฐอเมริกาต้องการใช้เอทานอลปีละ1000 ล้านแกลลอน จึงต้องใช้เอนไซม์มากถึง 110,000 ตันต่อปีซึ่งเป็นปริมาณ 2 เท่าของอุตสาหกรรมการผลิตเอนไซม์ [16] ในกระบวนการผลิตเอทานอลจากเซลลูโลสจะคล้ายคลึงกันกับการผลิตจากแป้งแต่จุลินทรีย์หรือเอนไซม์ที่ใช้แตกต่างกัน เอนไซม์หลักที่ใช้ในการย่อยสลายเซลลูโลสได้แก่เอนไซม์เซลลูเลส ซึ่งปัจจุบันยังมีราคาสูง จุลินทรีย์หลายชนิดสามารถผลิตเอนไซม์นี้ได้ เช่น รา เห็ด แบคทีเรีย [16, 17]

2.1 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง

การผลิตเซลลูเลส เอนไซม์ใน semi-solid state culture ใช้เชื้อรากลายพันธุ์ไตรโคเดอร์มา รีสิอี D-78085 ในถังหมักปฏิกรณ์ชีวภาพประกอบด้วยแผ่นพอลิยูเรเทนโฟมแนวตั้ง ป้อนอาหารแลคโทส 0.5% อย่างต่อเนื่อง ที่พีเอช 4.0 ได้เซลลูเลส แอคทิวิตีเท่ากับ 2.6 FPU/mL ผลได้เอนไซม์แลคโทสต่อกรัมเท่ากับ 520 FPU/g เทียบกับที่ผลิตได้จากถังปฏิกรณ์กวนผสมเท่ากับ 160 FPU/g [2]

การศึกษาเชื้อรากลายพันธุ์ไตรโคเดอร์มา รีสิอี 3 สายพันธุ์ในการหมักแข็งฟางข้าวสาลีในถังปฏิกรณ์ชนิดถาด เชื้อรากลายพันธุ์ไตรโคเดอร์มา รีสิอี MCG 80 ให้เซลลูเลสดีที่สุดย่อยสลายเซลลูโลสที่กำจัดลิกนินออกก่อนได้อย่างสมบูรณ์เมื่อเทียบกับไตรโคเดอร์มา รีสิอี QMY-1 และ *Aspergillus phoenicis* [3]

การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการหมักแข็งที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไซแลนเนสจาก *Trichoderma longibrachaitum* บนฟางข้าวสาลีในระบบที่มีการเติมอากาศ เช่น การเติมอากาศ ความชื้นเริ่มต้นของสับสเตรท ความลึกของสับสเตรท ในถังปฏิกรณ์ชนิดถาด เซลลูเลส แอคทิวิตีมากที่สุดที่การเติมอากาศ 2.9 L/min/kg bran (ให้ค่า 738 U/g ความชื้นเริ่มต้นและความลึกสับสเตรทเฉลี่ย) ความชื้น 55% (ให้ค่า 556 U/g อัตราการไหลของอากาศและความลึกของสับสเตรทเฉลี่ย) ความลึกสับสเตรทเฉลี่ยไม่มีผลต่อเซลลูเลสแอคทิวิตี [4]

การหมักแข็งประสบความสำเร็จในการผลิตเซลลูเลสเป็นอย่างยิ่ง ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีจุลินทรีย์เติบโตบนของแข็งและนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมเกษตรและการควบคุมโรคพืช การหมักแข็งมีประสิทธิภาพเหนือกว่าการหมักกึ่งเหลว ในระดับการขยายขนาด พบว่าการหมักแข็งให้ผลิตภัณฑ์ที่เสถียรภาพ ใช้พลังงานน้อย ในถังปฏิกรณ์ขนาดเล็กเหมาะสำหรับการเติบโตของแบคทีเรียและรา [5]

การศึกษาการเกิดเส้นใยที่มีผลต่อการหมักแข็งสับสเตรทในถังหมักที่มีการเติมอากาศของเชื้อรา *Aspergillus oryzae* พบว่าในการหมักแข็งใช้การกวนในตอนเริ่มต้นเพื่อหลีกเลี่ยงการรวมกลุ่มก้อนของ

สับสเตรทในเบดโดยไม่ต้องใช้พ่นน้ำเพิ่ม ลดการสูญเสียความชื้น และเกิดเกรเดียนท์ของอุณหภูมิอย่างสม่ำเสมอ [6]

การศึกษาข้อได้เปรียบของการหมักแข็งจากเชื้อราในระดับปฏิบัติการ ที่ผ่านมาการศึกษาได้มุ่งเน้นที่ศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการหมักแข็งผลิตเอนไซม์โดยใช้วัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรในระดับอุตสาหกรรม เช่น การเพิ่มของอุณหภูมิ พีเอช ปริมาณออกซิเจน สับสเตรทต่อเกรเดียนท์ของความชื้น ในงานวิจัยนี้ศึกษาบทบาทของสมบัติทางกายภาพและยีนส์ของจุลินทรีย์ที่ใช้ระหว่างการเติบโตบนของแข็งเปรียบเทียบกับในการหมักกึ่งเหลว พบว่าการหมักแข็งมีข้อดีกว่าเช่นผลผลิตที่ได้จากการหมักสูง มีเสถียรภาพ การเลี้ยงเชื้อราต่างๆ บนสับสเตรทที่ไม่ละลายน้ำ และเนื่องจากใช้น้ำน้อยมากจึงทำการหมักที่ใช้การทำให้ปลอดเชื้อน้อยกว่าการหมักกึ่งเหลว [7]

การศึกษาภาพรวมของระบบการหมักแข็ง ประกอบด้วยการทบทวนหลักเกณฑ์ของการหมักแข็งที่ผ่านมา ซึ่งประกอบด้วยตัวแปรที่มีผลต่อการหมักแข็ง ชีวมวล ถังปฏิกรณ์ชีวภาพ และเอนไซม์จากจุลินทรีย์ในอุตสาหกรรม เทคโนโลยีการหมักแข็งมีความเป็นไปได้ในทางเศรษฐศาสตร์สำหรับการผลิตระดับอุตสาหกรรม เช่น อะไมเลส เซลลูเลส ไซแลนเนส ไลเปส เป็นต้น การนำเทคโนโลยีการหมักแข็งไปใช้ในการผลิตต่างๆ เช่น เชื้อเพลิงชีวภาพ สารควบคุมโรคพืช [8]

การปรับปรุงการผลิตเซลลูเลสโดยใช้ *Trichoderma reesei* RUT C 30 ภายใต้การหมักแข็งผ่านกระบวนการที่เหมาะสม อุปสรรคสำคัญในการผลิตเอทานอลโดยใช้การย่อยสลายชีวมวลด้วยเอนไซม์คือต้นทุนของเอนไซม์เซลลูเลส ต้นทุนการผลิตเซลลูเลสรวมทั้งการนำสับสเตรทลิกโนเซลลูโลสิกมาใช้ในการหมักที่มีประสิทธิภาพ การศึกษานี้ผลิตเซลลูเลสเอนไซม์จาก *Trichoderma reesei* RUT C 30 ในการหมักแข็งโดยรำข้าวสาลีเป็นสับสเตรท พบว่าการรวมสภาวะที่เหมาะสมของความชื้นเริ่มต้นและอุณหภูมิของการเลี้ยงเชื้อเท่ากับ 37.56 % และ 30^{o}C ตามลำดับ ผลิตภัณฑ์เซลลูเลสที่ได้สูงสุดโดยการเติบโตของเชื้อราบนรำข้าวสาลี [9]

การผลิตกลูโคอะไมเลสจาก *Aspergillus niger* ในการหมักแข็งชานอ้อยโดยการใช้ถังปฏิกรณ์การไหลสวนทางแบบต่อเนื่อง พบว่า ผลิตภัณฑ์เอนไซม์ที่ได้ 40 U/g ของแข็งแห้งทางออกโดยไม่ทำลายเส้นใยหรือการเกิดสปอร์ การผลิตจากการหมักแข็งทำภายใต้สภาวะที่ไม่ต้องทำให้ปลอดเชื้อ ใช้การเติมอากาศและการควบคุมความชื้นโดยการพาความร้อนธรรมชาติ กระบวนการนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการผลิตเอนไซม์อย่างต่อเนื่องจากเชื้อราชนิดอื่นๆ จากการหมักแข็งชีวมวลในระดับอุตสาหกรรมที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมได้อีกด้วย [10]

กระบวนการผลิตเซลลูเลสขั้นสูงจากการหมักแข็งประกอบด้วย จุลินทรีย์ วัตถุดิบ การปรับสภาพวัตถุดิบเบื้องต้น การทำให้ปลอดเชื้อและการเลี้ยงเชื้อ ผลของตัวแปรควบคุม เช่น อุณหภูมิ องค์ประกอบของน้ำ พีเอช การเติมอากาศและสับสเตรท ศึกษาชนิดของถังปฏิกรณ์ชีวภาพ 8 ชนิด ข้อดี-ข้อเสียของการหมักแข็ง รวมทั้งแนะนำหลักเกณฑ์ทางวิศวกรรมศาตร์ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการหมักแข็งให้กับการวิจัยและพัฒนาการผลิตเซลลูเลสจากการหมักแข็งต่อไปในอนาคต [11]

การวิเคราะห์โปรไฟล์จลนพลศาสตร์ของการเติบโตในการหมักแข็งโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายต่างๆ ประกอบด้วยสมการเส้นตรง เอ็กซ์โพเนนเชียล และล็อก นำมาเทียบกับโปรไฟล์ที่ได้จากการทดลอง พบว่าสมการล็อกให้ผลดีสำหรับการเติบโตของสมรรถนะถังปฏิกรณ์ชนิดหนึ่งเท่านั้น ไม่สามารถนำสมการที่ได้ไปใช้กับการหมักแข็งในถังปฏิกรณ์ชนิดอื่นได้ ต้องทำการปรับปรุงพารามิเตอร์ต่างๆ ก่อน [12]

งานวิจัยเกี่ยวกับภาพรวมของการหมักแข็งตามหลักวิศวกรรมศาตร์ นำเสนอการใช้เทคนิคการหมักแข็งโดยเปลี่ยนวัสดุธรรมชาติไปเป็นสารเคมีต่างๆ ที่เรียกว่าผลิตภัณฑ์เคมี-ชีวภาพ กระบวนการประกอบด้วยของแข็งสับสเตรท ทำการหมักร่วมกับจุลินทรีย์ที่ไม่มีน้ำไหลผ่าน การพัฒนาใหม่นี้เน้นศักยภาพเทคโนโลยีชีวภาพเป็นทางเลือกแทนการผลิตสารเคมีสังเคราะห์ดั้งเดิม การหมักแข็งใช้ในการผลิตอาหาร เชื้อเพลิง เอนไซม์ ปฏิชีวนะ อาหารสัตว์ และการย่อยสลายสี งานวิจัยนี้นำเสนอปัญหาต่างๆ ทางวิศวกรรมศาตร์จากระดับเล็กถึงระดับใหญ่ของการหมักแข็งและคำตอบที่เป็นไปได้สำหรับการผลิตได้จริงทางการค้า [13]

การผลิตเซลลูเลสภายใต้การหมักแข็งด้วย *Trichoderma reesei* RUT C 30 การหาตัวแปรของกระบวนการที่เหมาะสมเชิงสถิติโดยใช้ชานอ้อยเป็นสับสเตรทเพื่อเพิ่มเซลลูเลสให้ได้มากที่สุด ตัวแปรที่ใช้คือ อุณหภูมิการเลี้ยงเชื้อ ช่วงเวลาการเลี้ยงเชื้อ และความเข้มข้นสารเหนี่ยวนำ งานวิจัยนี้ใช้การออกแบบการทดลองของ Box-Benhken พบว่า เซลลูเลสที่ได้สูงสุด (25.6 FPU/g dry substrate) เมื่อความเข้มข้นของสารเหนี่ยวนำเท่ากับ 0.331 mL/gds และอุณหภูมิของการเลี้ยงเชื้อเท่ากับ 33^{o}C ใช้เวลา 67 ชั่วโมง [14]

การหาสภาวะเหมาะสมหลายตัวแปรสำหรับการผลิตเอนโดกลูคาเนสโดยใช้ *Trichoderma reesei* RUT C 30 ในการหมักแข็งเมล็ด *Ocimum gratissimum* ซึ่งเป็นพืชตระกูลโหระพาที่เป็นของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมเกษตร พบว่า สภาวะที่ผลิตเอนโดกลูคาเนส (CMCase) หรือเซลลูเลสที่ได้สูงสุดเท่ากับ 175.8 IU/gds คือ อุณหภูมิ 28^{o}C ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 79 % พีเอชของอาหารเท่ากับ 4.8 ความเข้มของสารเคมี (mg/L) ที่ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์สูงสุด กรดนิโคตินิก 15, แนฟทาลีน กรดอะซิติก 7, เฟอริก ครอไรด์ 5 และทวีน-80, 6 ตามลำดับ [15]

การคัดเลือกเชื้อจุลินทรีย์เพื่อใช้ในการผลิตเอนไซม์เซลลูเลสและไซแลนเนสของเชื้อจุลินทรีย์ 3 ชนิด คือ *T.reesei* สายพันธุ์ QM, *T.reesei* สายพันธุ์ C และเชื้อ *A.pullulans* พบว่า *T.reesei* สายพันธุ์ QM ผลิตเอนไซม์หลักคือเซลลูเลสได้แอคติวิตีสูงสุด 0.296 U/ml ขณะที่มีไซแลนเนส เพียงเล็กน้อย (0.089 U/ml) *T.reesei* สายพันธุ์ C ผลิตเอนไซม์ผสมทั้ง 2 ได้ดีมากคือเซลลูเลสสูงที่สุด 5.365 U/ml ขณะที่ *A.pullulans* ผลิตไซแลนเนสเป็นหลักได้ถึง 7.344 (U/ml) แต่ผลิตเซลลูเลสได้น้อยมากในระดับ 0.091 U/ml ดังนั้นจะเห็นได้ว่า *T.reesei* สายพันธุ์ C เหมาะสำหรับการผลิตเอนไซม์ผสมที่มีแอคติวิตีของทั้ง 2 เอนไซม์ได้ดีที่สุด เมื่อนำครูดเอนไซม์ (crude enzyme) มาตกตะกอนด้วย $(NH_4)_2SO_4$ 80 % ได้เอนไซม์เซลลูเลสที่มี endoglucanase สูงกว่า exoglucanase และ β-glucosidase อยู่มาก เนื่องจากเชื้อรา *T-reesei* สายพันธุ์ C เป็นเชื้อที่เหมาะสมในการผลิตเอนไซม์ทั้งสองจึงได้มีการเพิ่มกำลังผลิตเป็นขนาด 1 ลิตร และในระดับถังหมัก

ขนาด 5 ลิตร พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเอนไซม์จาก *T.reesei* สายพันธุ์ C คือที่ pH 5.0 และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เหมาะต่อการทำงานของเอนไซม์เซลลูเลสและไซแลนเนสดีที่สุด และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเหมาะต่อการทำงานของเอนไซม์เซลลูเลสและไซแลนเนสดีที่สุด โดยเฉพาะ endoglucanase มีแอคติวิตีสูงที่สุด

การนำเอนไซม์ที่ผลิตได้ทั้งห้าชนิดมาใช้ในขั้นตอนต่าง ๆ ในการเตรียมผ้า จำเป็นต้องลอกแป้ง เอนไซม์อะไมเลสที่ผลิตขึ้นไม่เหมาะสมที่จะใช้สำหรับการลอกแป้งบนผ้าทอจำเป็นต้องใช้เอนไซม์อะไมเลสที่สามารถลอกแป้งที่อุณหภูมิสูงได้ ในส่วนขั้นตอนการกำจัดสิ่งสกปรกสามารถใช้เอนไซม์กำจัดสิ่งสกปรกได้ผลดีเท่ากับการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และสามารถใช้เอนไซม์ที่ผลิตขึ้นกำจัดสิ่งสกปรกได้ผลดีในแง่การดูดซึมน้ำเทียบเท่าการใช้เอนไซม์ที่จัดหามาสำหรับการฟอก เอนไซม์ที่ใช้ฟอกผ้ายังมีประสิทธิภาพการฟอกให้ผ้าขาวไม่เท่าการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเอนไซม์กลูโคสออกซิเดสเป็นเอนไซม์ชนิดเดียวที่สามารถฟอกผ้าให้ขาวได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับเอนไซม์ชนิดอื่น ๆ [18]

การศึกษาเอทานอลจากลิกโนเซลลูโลสโดยการใช้ครูดเซลลูเลสจากกระบวนการหมักแข็งของ MitchellLever และคณะ, (2553) เป็นวิธีที่ง่ายและมีศักยภาพในกระบวนการเปลี่ยนเซลลูโลสเป็นเอทานอล การศึกษานี้เพื่อหาสิ่งที่มาแทนเอนไซม์ทางการค้า เอนไซม์ทางการค้ามีราคาแพงและใช้พลังงานสูง ครูดเซลลูเลสผลิตโดยกระบวนการหมักแข็งของไตรโครเดอร์มา รีสิอี บนฟางข้าวสาลีบดจากนั้นนำครูดเซลลูเลสเพียง 5 % มาผสมกับฟางข้าวสาลีและยีสต์จะได้เอทานอลออกมา การวิจัยนี้จะใช้ลิกโนเซลลูโลสแทนการใช้เอนไซม์ทางการค้ามาผลิตเป็นเอทานอล [19]

2.2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับกากมันสำปะหลัง

2.2.1 แหล่งที่มาของกากมันสำปะหลัง

กากมันสำปะหลังเป็นผลพลอยได้จากการผ่านกรรมวิธีการผลิตแป้งมันสำปะหลัง กรรมวิธีการผลิตที่ใช้ในการผลิตแป้งมันสำปะหลังสำหรับโรงงาน สามารถแบ่งออกได้ 2 วิธี คือ

ก. กรรมวิธีที่ใช้ในการผลิตแป้งมันสำปะหลังแบบสลัดแห้ง ในการผลิต หัวมันจะถูกส่งเข้าสู่ตะแกรงร่อนดินทราย (Sand Removal Drum) เพื่อกำจัดดินทรายที่ติดมากับหัวมันและลอกผิวออก ซึ่งดินทรายและผิวมันที่แยกออกมาได้นี้ จะนำไปใช้ทำปุ๋ยอินทรีย์ ต่อจากนั้นหัวมันที่ปอกเปลือกเรียบร้อยแล้วจะถูกส่งไปยังเครื่องล้างหัวมัน (Root Washer) ทำความสะอาดโดยใช้น้ำฉีด และทำการฟอกสีมันสำปะหลังโดยการเติมกำมะถัน(Sulfur Water) หัวมันที่ล้างเรียบร้อยแล้วจะส่งต่อไปยังเครื่องหั่นหัวให้หั่นเป็นชิ้นเล็กๆ ขนาดประมาณ 1-2 นิ้ว แล้วผ่านเข้าสู่เครื่องขูดหัวมัน (Root Rasper) ทำให้ได้มันสำปะหลังชิ้นละเอียด หลังจากนั้นจะเข้าสู่เครื่องแยกหยาบแยก (Coarse Extractor) แยกเอากากมันสำปะหลังออกจากน้ำแป้งกากที่ได้จะเข้าเครื่องอัดกากและนำไปตากแดดได้เป็นกากมันสำปะหลังชนิดแห้งและขายเพื่อเป็นอาหารสัตว์ต่อไป

ข. กรรมวิธีที่ใช้ในการผลิตแป้งมันสำปะหลังแบบอังไฟ กรรมวิธีเริ่มต้นของการผลิตแป้งมันคล้ายคลึงกับวิธีแบบสลัดแห้ง กล่าวคือ หลังจากได้มันสำปะหลังที่ขูดเป็นชิ้นละเอียดแล้วมันสำปะหลังจะถูกส่งไปยังตะแกรงร่อนรูปทรงกระบอก มีการหมุนและฉีดพ่นน้ำตลอดเวลา เพื่อชะแป้งให้ออกจากชิ้นมันละเอียด แป้งมันจะแยกออกจากกากมันเพื่อน้ำแป้งจะไหลลงสู่ถังด้านล่าง ส่วนกากมันจะถูกนำไปเข้าเครื่องอัดและทำให้แห้งเป็นกากมันสำปะหลังแห้ง

ข้อดีของกากมันสำปะหลัง

กากมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบที่น่าสนใจในการนำมาใช้ผลิตเอนไซม์ เนื่องจากมีข้อได้เปรียบกว่าวัตถุดิบอื่น ดังนี้

1) การปลูกมันสำปะหลังไม่จำเป็นต้องใช้ดินที่มีคุณภาพดี มีความต้านทาน โรคสูงและมีการปลูกทุกภาคของประเทศไทย

2) ประเทศไทยมีการผลิตแป้งมันสำปะหลังปริมาณมาก จึงทำให้กากมันสำปะหลังมากด้วย

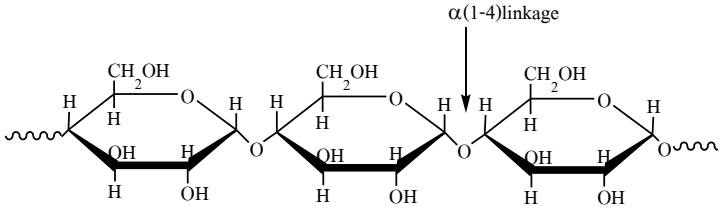
3) กากมันเป็นของเหลือจากอุตสาหกรรมที่มีมูลค่าต่ำ

4) สามารถย่อยให้เป็นน้ำตาลโดยใช้เอนไซม์เช่นเดียวกับแป้งมัน

2.2.2 โครงสร้างทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง

การย่อยกากมันสำปะหลังให้เป็นน้ำตาล ในที่นี้หมายถึงการย่อยแป้งที่เหลือในกากมันสำปะหลังให้เป็นน้ำตาล (Starch Saccharification) เนื่องจากลักษณะของแป้งที่ได้จากพืชเป็นโพลิเมอร์ของกลูโคสซึ่งประกอบด้วยหน่วยของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะของกลูโคซิติก (Glucosidic Linkage) แป้งประกอบไปด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคสแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ พอลิเมอร์เชิงเส้น หรือ อะไมโลส (Amylose) และพอลิเมอร์เชิงกิ่งหรืออะไมโลเพกติน (Amylopectin) โดยมีอะไมโลสเป็นองค์ประกอบหลักประมาณ 75-85 เปอร์เซ็นต์

อะไมโลสเป็นโพลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 1,000 – 6,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α-1, 4 – Glycosidic Linkage อาจพบกิ่งก้านสาขาในโมเลกุลของอะไมโลสได้บ้างในปริมาณเล็กน้อย



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของอะไมโลส

โดยทั่วไปแป้งจากธัญพืช เช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลี แป้งข้าวฟ่าง มีปริมาณของอะไมโลสสูงประมาณ 22-30 เปอร์เซ็นต์ ส่วนแป้งจากรากและหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง แป้งสาคูจะมีปริมาณอะไมโลสต่ำกว่าคืออยู่ในช่วง18-24 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักโมเลกุลของอะไมโลสอยู่ในช่วง 105 ถึง 106

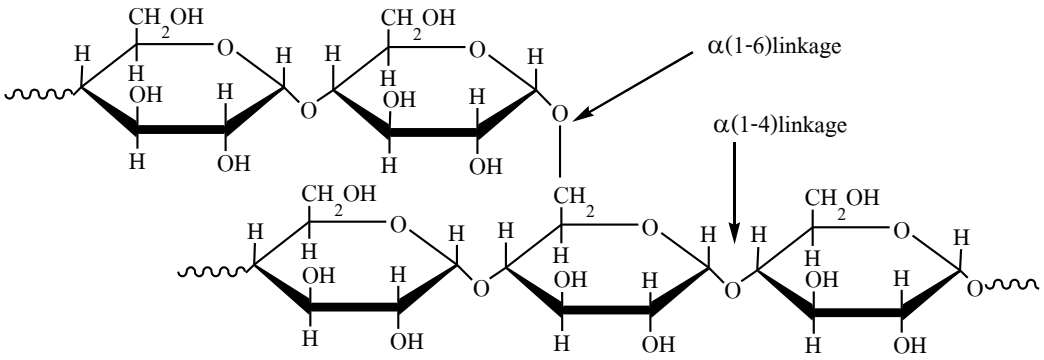
ดาลตัน โดยอะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันเนื่องจากแป้งแต่ละชนิดมี degree of polymerization (DP) ของอะไมโลสแตกต่างกัน แป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังมี DP ของ อะไมโลสอยู่ในช่วง 1,000 ถึง 6,000 สูงกว่าแป้งข้าวโพดและแป้งสาลีซึ่งมี DP ของอะไมโลสในช่วง 200 ถึง 1,200 แป้งที่มีสายโซ่ของอะไมโลสยาวมากจะมีแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) ลดลง ปริมาณของอะไมโลสในแป้งชนิดต่างๆ ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ปริมาณของอะไมโลสในแป้งชนิดต่างๆ [5]

แป้ง	ปริมาณอะไมโลส (เปอร์เซ็นต์นน้ำหนักแห้ง)	ปริมาณอะไมโลส (เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง)
	Apparent	Absolute
ข้าวสาลี	28.8	25.8
ข้าวโพด	29.4	22.5
ข้าวเจ้า	25	20.5
ข้าวบาร์เลย์	25.5	23.6
มันฝรั่ง	36	16.9
มันสำปะหลัง	23.5	17.8
พุทธรักษา	43.2	22.7
ถั่วเขียว	37.9	30.7

การตรวจสอบปริมาณอะมิโลสโดยการทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนและวัดสีที่เกิดขึ้นเป็นวิธีการที่ง่ายและนิยมใช้กันมากแต่อาจมีข้อผิดพลาดได้จากความไม่อยู่ตัวของสีที่เกิดขึ้น การรบกวน ผลการวัดจากอะมิโลเพคตินโดยเฉพาะอะมิโลเพคตินที่มีความยาว สายโซ่กิ่งมากๆ ซึ่งจะเกิดสารเชิงซ้อนกับไอโอดีนได้เช่นเดียวกัน จึงทำให้วิเคราะห์ปริมาณของอะมิโลสได้มากเกินจริง นอกจากนี้ไขมันที่เกิดสารเชิงซ้อนกับอะมิโลสอยู่เดิมจะทำให้ปริมาณอะมิโลสโมเลกุลนั้นจับกับไอโอดีนไม่ได้ ทำให้ค่าที่วิเคราะห์ได้ต่ำกว่าความเป็นจริง ในกรณีนี้ต้องทำการสกัดไขมันออกก่อน การวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลสอาจใช้วิธีการวัดเอนทัลปีในการหลอมเหลวของ starch - lipid complex แต่ประสิทธิภาพของวิธีการนี้ขึ้นกับความสามารถในการละลายของอะมิโลสในตัวอย่างแป้งแต่ละชนิด วิธีการที่มีความแม่นยำมากกว่าคือการใช้ Gel Permeation Chromatography (GPC) (Salomonsson & Sundberg, 1994) แต่วิธีการนี้ไม่เหมาะกับตัวอย่างที่มีจำนวนมาก นอกจากนี้ก็มีการใช้ High Pressure Size Exclusion Chromatography (Bradbury & Bello, 1993) ซึ่งจะเร็วกว่าการใช้ GPC อีกวิธีการคือการใช้ Concanavalin A มาตกตะกอนอะมิโลเพคตินออกไปและวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลสที่เหลืออยู่

อะไมโลเพคตินเป็นโพลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α(1-4) Glycosidic linkage และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นโพลิเมอร์กลูโคสสายสั้นมี DP อยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α(1-6) Glycosidic linkage ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของอะไมโลเพคติน

หน่วยกลูโคสที่มีพันธะ α(1-6) Glycosidic linkage มีอยู่ประมาณ 5% ของปริมาณหน่วยกลูโคสในอะไมโลเพคตินทั้งหมด อะไมโลเพคตินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000 เท่าของอะไมโลส ประมาณ 107 ถึง 109 ดาลตัน และมีการคืนตัวต่ำ เนื่องจากอะไมโลเพคตินมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่ง อะไมโลเพคตินทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักของเม็ดแป้ง ดังนั้นเมื่อมีอะไมโลเพคตินเพียงอย่างเดียว จึงยังสามารถรวมตัวเป็นเม็ดแป้งได้

ในปี 1940 Meyer และคณะ (1940) เสนอโมเดลโครงสร้างของอะมิโลเพคติน เป็นแบบการแตกกิ่งแบบสุ่ม (Random Branching) หลังจากนั้น Nikuni (1978) เสนอ Clustered Branching Model เป็นต้นแบบของโมเดลที่ยอมรับกันในปัจจุบัน และนำเสนอโดย Hizukuri (1986) ลักษณะที่สำคัญของโมเดลนี้ ก็คือจะมีการแบ่งสายโซ่กิ่งเป็นกลุ่มๆ ตามขนาดความยาวของสายโซ่ที่มีช่วงที่แน่นอน (Certain Periodicity) อะไมโลเพคตินประกอบด้วยสายโซ่ (Chain) 3 ชนิด คือ

1) สาย A (A–chain) เชื่อมต่อกับสายอื่นที่ตำแหน่งเดียว ไม่มีกิ่งเชื่อมต่อออกจากสายชนิดนี้ (Unbranched Structure)

2) สาย B (B-chain) มีโครงสร้างแบบกิ่งเชื่อมต่อกับสายอื่นๆ 2 สาย หรือมากกว่า สายโซ่แบบ B นี้ยังแบ่งเป็นกลุ่มย่อย B1 B2 B3 และ B4 ซึ่งมีความยาวคร่อมหนึ่ง สอง สามและสี่คลัสเตอร์ (Cluster) ตามลำดับ

3) สาย C (C–chain) แบบสายแกนซึ่งประกอบด้วย หมู่รีดิวซิง 1 หมู่ ในแต่ละโมเลกุลของ อะไมโลเพคติน ประกอบด้วยสาย C หนึ่งสายเท่านั้น

2.3 เอนไซม์ที่ใช้ย่อยแป้ง

ลักษณะการทำงานของเอนไซม์ที่มีคุณสมบัติในการย่อยแป้ง แบ่งได้ 3 กลุ่ม คือ

2.3.1 เอนไซม์ย่อยภายนอก (Exo-Enzyme)

กลูโคอะไมเลส (Glucoamylase) เป็นเอนไซม์ที่สามารถพบในเชื้อราบางชนิด เช่น *Aspergillus Niger*, *Aspergillus Oryzae*, และ *Rhizopus spp*. เอนไซม์นี้จะเป็นแบบแอลฟาอะมิเลส (α-amylase) ชนิดหนึ่งที่ย่อยจากปลายโมเลกุล (Exo-Hydrolase) ทั้งพันธะแอลฟา (1, 4) และแอลฟา (1, 6) เอนไซม์นี้เป็นเอนไซม์ที่ไม่ต้องการโคแฟกเตอร์

บีต้าอะไมเลส (β-amylase) ย่อยสลายจากปลายโมเลกุล (Exo-Hydrolase) ครั้งละ 2 โมเลกุล กลูโคสทำให้ได้น้ำตาลมอลโตสเป็นผลผลิต ส่งผลต่อพันธะแอลฟา (1, 4) และเมื่อย่อยมาถึงพันธะแอลฟา (1, 6) กิจกรรมเอนไซม์จะหยุดลง เอนไซม์นี้จะเป็นเอนไซม์ที่ต้องการแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) เป็นโคแฟกเตอร์

2.3.2 เอนไซม์ย่อยภายใน (Endo-Enzyme)

แอลฟาอะไมเลสเป็นเอนไซม์ที่ย่อยจากภายในโมเลกุล (Endo-Hydrolase) ที่พันธะแอลฟา (1, 4) แต่ไม่สามารถย่อยพันธะแอลฟา (1, 6) ได้ ผลผลิตที่ได้จากการทำงานของเอนไซม์ชนิดนี้เป็นสารผสมของโอลิโกแซกคาไรด์ (Oligosaccharide) เอนไซม์นี้เป็นเอนไซม์ที่ต้องการแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) เป็นโคแฟกเตอร์ได้จากจุลินทรีย์ *Aspergillus Oryzae, Bacillus- Subtilis, Bacillus Licheniformis* และ *Bacillus Anyloliquefaciens* เป็นต้น

2.3.3 เอนไซม์ย่อยพันธะกิ่ง (Debranching Enzyme)

พูลลูลาเนส (Pullulanase) เป็นเอนไซม์ที่ใช้ตัดพันธะแอลฟา (1, 6) บริเวณกิ่งเป็นเอนไซม์ที่ย่อยจากปลายโมเลกุลสามารถย่อยจนได้สายกลูโคสที่มีความยาว 2-3 หน่วย ไม่สามารถย่อยจนได้กลูโคส 1 หน่วย ไอโซอะไมเลส (Isoamylase) เป็นเอนไซม์ที่สามารถย่อยจุดที่เป็นกิ่งของไกลโคเจนและ อะไมโลแพคตินได้ดี ไม่ต้องการโคแฟกเตอร์

2.4 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของเอนไซม์

ปฏิกิริยาของเอนไซม์จะดำเนินไปได้อย่างไรนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ ดังนี้

2.4.1 อุณหภูมิ

เอนไซม์แต่ละชนิด มีความไวต่ออุณหภูมิแตกต่างกัน อุณหภูมิที่เอนไซม์ทำงานได้ดีที่สุด (Optimum Temperature) โดยทั่วไปอยู่ประมาณ 25 - 40 องศาเซลเซียส ถ้าอุณหภูมิสูงเกินไปปฏิกิริยาจะลดลงทั้งนี้เพราะเอนไซม์ซึ่งเป็นโปรตีนจะเกิดการเสียสภาพ (Denature) จึงเข้ารวมกับซับสเตรทไม่ได้

2.4.2 ความเป็นกรดเป็นด่าง

มีผลต่อปฏิกิริยาของเอนไซม์ เอนไซม์แต่ละชนิดจะทำงานได้ดีที่สุด ในสภาวะที่มีความเป็นกรดเป็นด่างพอเหมาะ (Optimum pH) ซึ่งอาจแตกต่างกัน

เช่น ซูโครสทำงานได้ดีที่สุดที่ pH = 6 .2 ลิเพส = 7.0 เพปซิน = 1.5-2.5 ทริปซิน = 8-11

2.4.3 ปริมาณของเอนไซม์

ถ้ามีเอนไซม์มากจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่ถ้าเอนไซม์มากเกินพอ ความเร็วของปฏิกิริยาจะไม่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะ ไม่มีซับสเตรทเหลือพอที่จะเข้าทำปฏิกิริยา

2.4.4 ปริมาณซับสเตรท

มีผลเช่นเดียวกับปริมาณของเอนไซม์คือถ้าเพิ่มซับสเตรทมากเกินไป ปฏิกิริยาก็จะไม่เกิดเร็วขึ้น เพราะปริมาณเอนไซม์มีไม่เพียงพอ

2.5 เซลลูโลส (Cellulose)

ผนังเซลล์พืชมีเซลลูโลสเป็นส่วนประกอบที่สำคัญ ซึ่งเป็นหน่วยเล็กๆ ที่ประกอบรวมกัน เป็นเนื้อเยื่อพืช ในเซลล์พืชมีโปรโตปลาสซึมและสารหล่อเลี้ยงในเซลล์โดยมีผนังบางๆ ที่ไม่มีสี เรียกว่า เซลล์เมมเบรนห่อหุ้ม

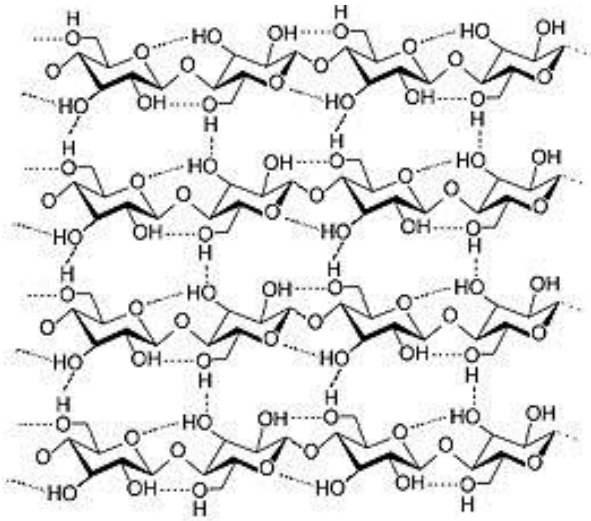
2.5.1 ส่วนประกอบทางเคมีของเซลลูโลส

เซลลูโลส (Cellulose) เป็นสารประกอบอินทรีย์ประเภทคาร์โบไฮเดรตที่เป็นแบบพอลิแซ็กคา-ไรด์ ซึ่งประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสหลายโมเลกุลเรียงต่อกันเป็นโครงสร้างคล้ายลูกโซ่ การจัดเรียงตัวของกลูโคสจะอยู่ในลักษณะของรูปเก้าอี้ โมเลกุลจับตัวกันด้วยพันธะไกลโกสิดิกระหว่างคาร์บอนตัวที่หนึ่งของกลูโคสกับคาร์บอนตัวที่สี่ของกลูโคสตัวถัดไป เนื่องจากคาร์บอนตัวที่หนึ่งหมู่ของไฮดรอก-ซิลอยู่ในตำแหน่งเบต้า จึงเรียกพันธะนี้ว่า เบต้า -1-4- ไกลโคสิดิก การจัดเรียงตัวของโมเลกุลเซลลูโลสมีลักษณะเป็นเส้นตรง ไม่มีแขนงย่อย ดังนั้นจึงมีสูตรเคมีทั่วไปคือ $(C_6 H_{10} O_5)_n$- เมื่อ n คือจำนวนหน่วยกลูโคสทั้งหมดที่ประกอบกันเป็นโครงสร้าง จำนวนเซลลูโลสในสายกลูโคสไม่สามารถทราบจำนวนที่แท้จริงได้ เนื่องจากระหว่างสายเซลลูโลสจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนซึ่งเรียงแน่นเป็นมัดไมโครไฟบริลจึงมีความแข็งแรง และไม่ละลายน้ำหรือสารอินทรีย์ใดๆ สามารถแบ่งชนิดของเซลลูโลสตามปริมาณการละลายในสารละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้เป็น 3 ชนิด คือ

1) แอลฟา-เซลลูโลส คือ เซลลูโลสที่ไม่ละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 17.5 เปอร์เซ็นต์

2) เบต้า-เซลลูโลส คือ เซลลูโลสที่ละลายโซเดียมไฮดรอกไซม์เข้มข้น 17.5 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิห้อง แต่สามารถตกตะกอนได้ง่ายในสารละลายที่มีสภาพเป็นกรด

3) แกมมา-เซลลูโลส คือ เซลลูโลสที่ละลายได้ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 17.5 เปอร์เซ็นและสารละลายกรด แต่สามารถตกตะกอนได้โดยใช้แอลกอฮอล์



รูปที่ 2.3 เส้นประแสดงพันธะไฮโดรเจนภายในและระหว่างโมเลกุลของสายโมเลกุลเซลลูโลส

2.5.2 การย่อยเซลลูโลส

เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเป็นโพลิเมอร์ของน้ำตาล เมื่อนำมาทำการย่อยสลายจะได้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (Monosaccharide) ถ้าเซลลูโลสถูกย่อยสลายอย่างสมบูรณ์จะให้น้ำตาลกลูโคสเพียงอย่างเดียว การย่อยสลายไม่สมบูรณ์จะได้ทั้งกลูโคส เซลโลไบโอสจะให้น้ำตาลเพนโตสหลายชนิดปนกัน ขึ้นกับโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่บริสุทธิ์ การย่อยเซลลูโลสแบ่งได้ 2 วิธี คือ

1) การย่อยสลายด้วยสารเคมี

2) การย่อยสลายด้วยเอนไซม์

สำหรับในที่นี้จะกล่าวถึงการย่อยสลายเซลลูโลสด้วยเอนไซม์ เอนไซม์เป็นโปรตีนชนิดหนึ่งที่สิ่งมีชีวิตสร้างขึ้น เพื่อเร่งปฏิกิริยาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ซึ่งเอนไซม์มีความเฉพาะต่อปฏิกิริยาหนึ่งๆ เท่านั้น ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความบริสุทธิ์สูง เอนไซม์ที่ใช้ในปฏิกิริยาการย่อยสลายเซลลูโลส คือ เอนไซม์เซลลูเลส (Cellulase) ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่พบในจุลินทรีย์หลายชนิดทั้งเชื้อราและแบคทีเรีย

ชนิดและตำแหน่งการทำงานของเอนไซม์ เอนไซม์เซลลูเลสเป็นกลุ่มของเอนไซม์ 3 ชนิด ที่ทำงานร่วมกันแบบ “Synergistication” ได้แก่

- เอ็นโดรกลลูคาเนส (Endoglucanase) ทำหน้าที่ย่อยสลายโอลิโกแซคคาไรด์และยังย่อยสลายเซลลูโลสให้เปลี่ยนเป็นเซลโลไบโอส โดยจะย่อยสลายจากด้านปลายรีดิวซ์ของสายโซ่เซลลูโลส

- เอ็กโซกลูคาเนส (Exoglucanase) ทำหน้าที่ย่อยสลายโอลิโกแซคคาไรด์และยังย่อยสลายเซลลูโลสให้เปลี่ยนเป็นเซลโลไบโอส ตำแหน่งที่ทำงานจะเป็นแบบสุ่ม

- เบต้า – กลูโคสิเดส (β-glucosidase) ทำหน้าที่ย่อยสลายเซลโลไบโอสให้เปลี่ยนเป็นกลูโคส

การทำงานของเอนไซม์เซลลูเลสจะถูกยับยั้งด้วยปริมาณของสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นดังนี้ β-glucosidase จะถูกยับยั้งด้วยปริมาณกลูโคสที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะส่งผลยับยั้งต่อเนื่อง คือ ทำให้มีการสะสมของเซล

โลไบโอสเพิ่มขึ้น ซึ่งจะเป็นตัวยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ Endoglucanase และ Exoglucanase ทำให้ปฏิกิริยาช้าลงและยุติในที่สุด

การสังเคราะห์เซลลูโลสยังไม่เป็นที่เข้าใจทั้งหมดแต่น่าจะเป็นการรวมตัวของหน่วยย่อยพื้นฐานคือเซลโลไบโอสเข้าไปในลูกโซ่ของโมเลกุลมากกว่าที่จะเป็นการเติมโมเลกุลเดี่ยวๆ ของกลูโคส UDP-glucose และน้ำตาล lipid-pyrophosphate มีความจำเป็นในขั้นตอนการสังเคราะห์ ส่วนในผลิตผลหลังการเก็บเกี่ยวการสังเคราะห์เซลลูโลสค่อนข้างจำกัดเว้นแต่ว่าจะมีการเจริญเติบโตซึ่งนับว่าน้อยมาก

โมเลกุลของเซลลูโลสมีความเสถียรมาก แต่สามารถถูกทำลายได้ด้วยกรดแก่หรือโดยการย่อยของเอนไซม์เซลลูเลส (cellulase) แต่เอนไซม์เซลลูเลสนี้พบปริมาณน้อยมากในผลิตผลหลังการเก็บเกี่ยวและพบว่าไม่มีความสำคัญในการอ่อนนิ่มของผลิตผล การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างของเซลลูโลสในผลไม้ที่กำลังสุกมีน้อยมากและระดับของปฏิกิริยาของเอนไซม์ก็ไม่มีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงการอ่อนนิ่มของผลไม้ในระหว่างการสุก เป็นที่ทราบกันว่า เซลลูเลสจะมีการทำงานในขณะที่มีการหลุดร่วงของใบไม้หรืออวัยวะส่วนอื่นจากต้นพ่อแม่ อย่างไรก็ตาม ปรากฏว่าเป็น isoenzyme ซึ่งแตกต่างจากเอนไซม์เซลลูเลสทั่วไปที่พบในเซลล์ส่วนใหญ่

2.6 การหมัก (Fermentation)

2.6.1 ความหมายของการหมัก

การหมัก (Fermentation) เป็นคำที่มีรากศัพท์มาจากภาษาละติน “Fevere” แปลว่า “เดือด” ซึ่งครั้งแรกได้ใช้อธิบายลักษณะที่เกิดจากการกระทำของยีสต์ในน้ำสกัดจากผลไม้หรือเมล็ดข้าวมอล์ต เนื่องจากยีสต์ย่อยสลายน้ำตาลภายใต้สภาวะไม่มีออกซิเจน ทำให้เกิดฟองแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ผุดขึ้นมาเหมือนน้ำเดือด ในภาวะปัจจุบันนักชีวเคมีและจุลชีววิทยาอุตสาหกรรมได้นำคำว่าการหมักมาใช้ในความหมายที่แตกต่างกันไปบ้าง

ในทางชีวเคมี การหมักหมายถึง การสร้างพลังงานจากการย่อยสลายของสารประกอบอินทรีย์ หรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารประกอบอินทรีย์เนื่องจากเอนไซม์ โดยมีสารอินทรีย์เป็นทั้งตัวให้และตัวรับอิเล็กตรอน

ในทางจุลชีววิทยาอุตสาหกรรม การหมักหมายถึง กระบวนการผลิตใดก็ตาม ที่ได้จากการเพาะเลี้ยงจุลินทรีย์จำนวนมาก (Mass Culture) ซึ่งจะครอบคลุมถึงกระบวนการใช้และไม่ใช้ออกซิเจน ในขณะที่การหมักทางชีวเคมีหมายถึงเฉพาะกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนเท่านั้น

2.6.2 ชนิดของการหมัก

การหมักที่มีความสำคัญทางการค้าแบ่งได้ 4 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1) การหมักที่ให้ผลผลิตเป็นตัวเซลล์ (Microbial Cell or Biomass) การผลิตเซลล์จุลินทรีย์ที่มีความสำคัญทางการค้า ได้แก่ การผลิตเซลล์ยีสต์เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมขนมปัง (Bakers’Yeast) ซึ่งเริ่มผลิต

ในอุตสาหกรรมครั้งแรกตั้งแต่ต้นศตวรรษที่ 19 และการผลิตเซลล์จุลินทรีย์เพื่อใช้เป็นอาหารมนุษย์หรือสัตว์ (Single Cell Protein, SCP) ซึ่งเริ่มผลิตครั้งแรกในระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 1 ในประเทศเยอรมนี

2) การหมักที่ให้ผลผลิตเป็นเอนไซม์ (Microbial Enzyme) การผลิตเอนไซม์สามารถผลิตได้ทั้งจากพืช สัตว์ และจุลินทรีย์ อย่างไรก็ตามจุลินทรีย์ได้รับการยอมรับว่าเป็นแหล่งผลิตเอนไซม์ที่มีความสำคัญมากที่สุด เนื่องจากสามารถผลิตได้ปริมาณมากได้ในระยะเวลาสั้น โดยใช้เทคนิคการหมัก และสามารถปรับปรุงให้ได้ผลผลิตสูงขึ้นได้ง่ายกว่าจากการผลิตจากพืชหรือสัตว์ และการนำมาใช้ประโยชน์ซึ่งส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมอาหารและยา นอกจากนี้ก็ยังมีการใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ อีกด้วย เช่น ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตผงซักฟอก (Detergent) อุตสาหกรรมสิ่งทอ การฟอกหนัง และใช้ในงานวิจัยเป็นต้น

3) การหมักที่ให้ผลผลิตเป็นสารเมทาบอไลท์ (Microbial Metabolite) และโดยที่สารเมทาบอไลท์ที่ผลิตจากจุลินทรีย์ผลิตได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ สารเมทาบอไลท์ปฐมภูมิ (Primary Metabolite) และสารเมทาบอไลท์ทุติยภูมิ (Secondary Metabolite)

สารเมทาบอไลท์ปฐมภูมิ เป็นสารที่มีความจำเป็นต่อการเจริญของจุลินทรีย์ ตัวอย่าง เช่น โปรตีน กรดอะมิโน นิวคลีโอไทด์ กรดนิวคลีอิก ลิปิด และคาร์โบไฮเดรต จุลินทรีย์จะผลิตสารเหล่านี้ขึ้นในช่วง Trophophase (Log Phase) ของการเจริญ ตัวอย่างของสารเมทาบอไลท์ปฐมภูมิที่มีความสำคัญทางการค้าและการผลิตขึ้นโดยการหมัก เช่น เอทานอล กรดซิตริก กรดกลูตามิก ไลซีน อะซีโตน บิวทานอล นิวคลีโอไทด์ โพลีแซคคาไรด์ และวิตามิน

สารเมทาบอไลท์ทุติยภูมิ เป็นสารที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสารมัธยัตร์ (Intermediate) หรือผลผลิตจากกระบวนการเมทาบอลิซึมปฐมภูมิ (Primary Metabolism) ซึ่งพบในจุลินทรีย์บางชนิดในช่วง Idiophase (Stationary Phase) ของการเจริญ และอาจพบได้ในการเลี้ยงเชื้อแบบต่อเนื่อง (Continuous Culture) ที่มีอัตราการเจริญต่ำจุลินทรีย์ที่ พบว่ามีการสังเคราะห์ สารเมทาบอไลท์ทุติยภูมิ ได้แก่ แบคทีเรียที่มีลักษณะเป็นเส้นสาย (Filamentous Bacteria) แบคทีเรียที่สร้างสปอร์ได้ (Spore Forming Bacteria) และฟังไจ (Fungi) จุลินทรีย์ที่ยังไม่พบว่ามีการสังเคราะห์สารเมทาบอไลท์ทุติยภูมิได้แก่ แบคทีเรียในแฟมิลี Enterobactereaceae สำหรับบทบาททางสรีรวิทยาของสารเมทาบอไลท์ทุติยภูมิในเซลล์จุลินทรีย์ที่ผลิตสารนี้ขึ้นมานั้น ยังไม่ทราบแน่ชัด แต่ไม่พบว่ามีหน้าที่ในกระบวนการเมาทาบอ-ลิซึมของเซลล์ อย่างไรก็ตาม สารเหล่านี้มีความสำคัญมากต่อในทางอุตสาหกรรมการหมัก เนื่องจากมีผลต่อจุลินทรีย์ชนิดอื่น เช่น ยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ชนิดอื่นได้ ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์บางชนิด เป็นสารส่งเสริมการเจริญ (Growth Promoter) หรือมีคุณสมบัติเป็นยารักษาโรค เป็นต้น

4) การหมักเพื่อเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารประกอบ (Transformation Process) เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารประกอบให้อยู่ในรูปที่คล้ายกัน แต่มีราคาสูงขึ้น ซึ่งสามารถทำได้โดยการใช้เอนไซม์จากจุลินทรีย์หรือสารเคมีเป็นตัวเร่งทำให้เกิดปฏิกิริยา Dehydrogenation, Dehydroxylation, Dehydration, Decarboxylation, Deamination, Oxidation, Condensation หรือ Isomerization การใช้เอนไซม์จากจุลินทรีย์มีข้อดีกว่าการใช้สารเคมี คือ มีความจำเพาะมากกว่า และสามารถ

ทำได้ที่อุณหภูมิต่ำ โดยไม่ต้องใช้โลหะหนักซึ่งเป็นสารมลพิษเป็นตัวเร่ง Transformation Process ที่ใช้จุลินทรีย์ที่รู้จักกันดีได้แก่ กระบวนการผลิตน้ำส้มสายชู (การเปลี่ยนเอทานอลไปเป็นกรดอะซิติก) อย่างไรก็ตาม Transformation Process ส่วนใหญ่ จะเกี่ยวข้องกับการผลิตสารที่มีราคาแพง เช่น สารปฏิชีวนะ สเตรอยด์ (Steriod) และพรอสตาแกลนดิน (Prostaglandin) เป็นต้น

การแบ่งตามลักษณะหรือปริมาณน้ำในอาหารเลี้ยงเชื้อได้เป็น 2 ชนิด คือ การหมักด้วยอาหารแข็ง ซึ่งมีการเติมน้ำเล็กน้อยเพียงเพื่อให้เหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์ที่ต้องการเท่านั้น เช่น การหมักกรดอะซิติกโดยเชื้อรา เป็นต้น การหมักแบบเพาะเลี้ยงจุลินทรีย์ในอาหารเหลวที่มีลักษณะเหลว เช่น การหมักแอลกอฮอล์ และน้ำส้มสายชู

การแบ่งตามลักษณะของกระบวนการที่ใช้ได้เป็น 3 แบบ คือ

1) การหมักแบบกะ (Batch Fermentation) เป็นการหมักแบบไม่ต่อเนื่องซึ่งทำในระบบปิดที่มีสารอาหารเริ่มต้นปริมาณจำกัด เมื่อใส่จุลินทรีย์ที่ต้องการเพาะเลี้ยงลงในระบบแล้วจะไม่มีการเติมสารอาหารใดๆ เพิ่มลงไปอีก

2) การหมักแบบต่อเนื่อง (Continuous Fermentation) เป็นการหมักแบบต่อเนื่องโดยมีการเติมสารอาหารใหม่และถ่ายอาหารเก่าออกจากระบบในอัตราเดียวกันตลอดเวลา ทำให้จุลินทรีย์สามารถเจริญเพิ่มจำนวนได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่มีข้อจำกัดในเรื่องอาหาร

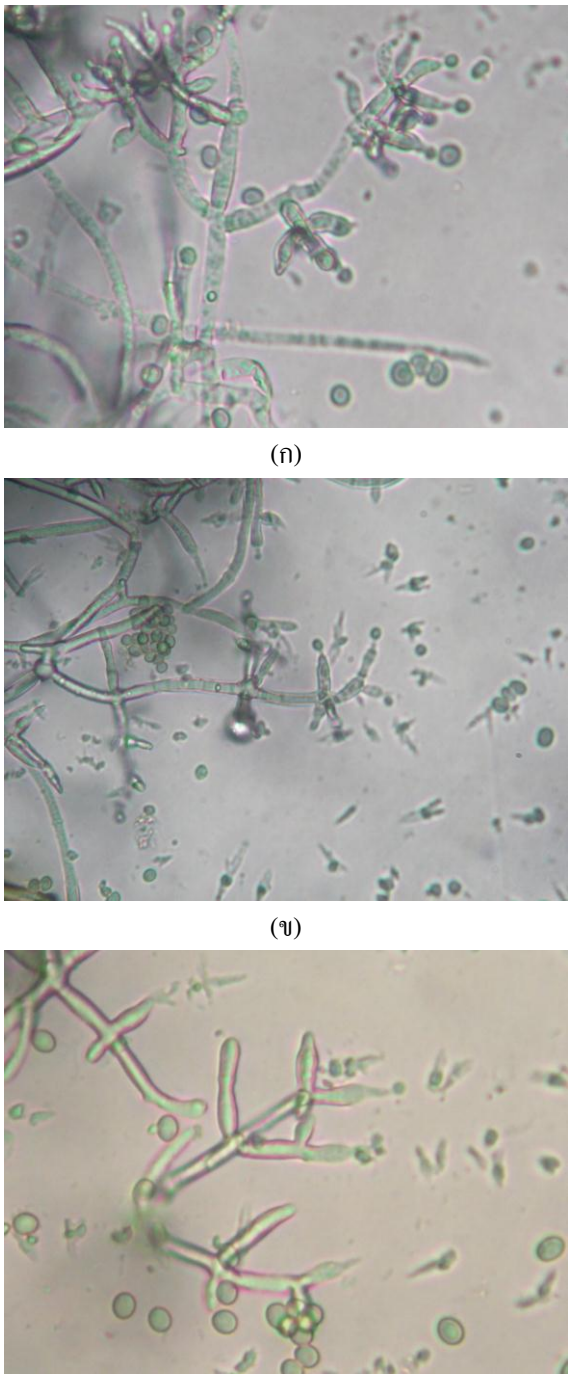
3) การหมักแบบเฟดแบทช์ (Fed- Batch Fermentation) เป็นการหมักที่มีการเติมสารอาหารบางอย่างเพิ่มลงไปในอาหารที่ใช้เพาะเลี้ยงจุลินทรีย์เป็นระยะๆ เพื่อให้จุลินทรีย์เจริญและใช้สารอาหารได้อย่างเต็มที่โดยไม่มีการถ่ายอาหารเก่าออก การหมักแบบนี้ส่วนใหญ่ให้เพื่อแก้ปัญหาเกี่ยวกับข้อจำกัดเรื่องความเข้มข้นของสารอาหารเริ่มต้น ซึ่งถ้าใช้มากไปอาจจะมีผลยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ได้ หรืออาจทำให้มีปัญหาในการให้ออกซิเจนในปริมาณที่เพียงพอได้ยาก

2.7 จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตเซลลูเลส เอนไซม์

2.7.1 ความรู้เกี่ยวกับเชื้อรา

เชื้อรา (Fungi) จัดเป็นจุลินทรีย์ชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญในทางอุตสาหกรรมโดยเฉพาะพวกราเส้นใย (Filamentous Fungi) ซึ่งได้ถูกนำมาใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ ทั้งในด้านอุตสาหกรรมอาหารและอุตสาหกรรมยา เชื้อรามีทั้งชนิดที่เป็นเซลล์เดียว เช่นยีสต์ และที่เป็นหลายเซลล์เรียงเป็นเส้นใย (Hypha) กลุ่มของเส้นใยเรียกไมซีเลียม (Mycelium) เส้นใยทั่วไปมีความกว้าง 5-10 ไมโครเมตรและมีความยาวมาก เส้นใยประกอบด้วยผนังเซลล์ เยื่อหุ้มเซลล์ และช่องว่างภายในที่บรรจุโปรโตพลาซึม เยื่อหุ้มเป็นเยื่อ 2 ชั้นล้อมรอบโปรโตพลาซึม ส่วนผนังเซลล์ประกอบด้วยเฮมิเซลลูโลส และไคติน ในเชื้อราชั้นต่ำผนังประกอบด้วยเซลลูโลส การเจริญของเส้นใยเกิดทางด้านใกล้ปลายโดยมีการยืดตัวบริเวณนั้น เส้นใยมีการแบ่งตัวเว้าเข้าเซลล์ (Centripental Invagination) และเกิดผนังกั้นโดยเยื้อหุ้มเซลล์ชิดเข้ามาเกิดเป็นผนังที่ไม่

สมบูรณ์เพราะมีรูตรงกลางผนังเพื่อให้โปรโตรพลาสซึมไหลเวียนกันได้แม้แต่นิวเคลียสก็เคลื่อนที่จากเซลล์หนึ่งไปยังอีกเซลล์หนึ่งได้ ดังรูปที่ 2.4



(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 2.4 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบเลนส์ประกอบ กำลังขยาย 40 เท่าของไตรโคเดอร์มา รีสิอี RT-P1 ที่ได้จากการเพาะเลี้ยงบนอาหารแข็งพีดีเอ [21]

สำหรับเส้นใยราแบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ

1) เส้นใยไม่มีผนังกั้น เส้นใยจะเป็นท่อทะลุถึงกันมีไซโตพลาสซึมและนิวเคลียสต่อเนื่องกัน
2) เส้นใยที่มีผนังกั้น และมีนิวเคลียสอันเดียวในแต่ละเซลล์
3) เส้นใยมีผนังกั้น และมีนิวเคลียสหลายอันในแต่ละเซลล์

ลักษณะการเจริญของเชื้อราเชื้อราเป็นเส้นใยจะมีการเจริญออกไปได้สองทิศทาง คือทางขวางจะเจริญไปเต็มที่แล้วจึงหยุด ส่วนการเจริญทางด้านยาวนั้นเส้นใยของเชื้อราจะงอกยาวไปและแตกแขนงอย่างไม่จำกัดตราบเท่าที่สภาพแวดล้อมเหมาะสม สายใยเหล่านี้เรียกว่าไมซีเลียมทำให้เชื้อรามีขนาดทำให้มองเห็นด้วยตาเปล่า ไมซีเลียมมีสองชนิด คือ Vegetative mycelium เป็นส่วนที่ยึดเกาะกับอาหารเพื่อทำหน้าที่นำอาหารไปสู่ส่วนต่างๆ ของทัสลัส อีกชนิดหนึ่ง ได้แก่ Aerial mycelium เป็นส่วนที่ยื่นไปในอากาศทำหน้าที่สร้างสปอร์จึงเรียกไมซีเรียมแบบนี้ว่า Reproductive Mycelium ในบางระยะของการเจริญอาจพบไมซีเรียมมาเรียงอัดตัวประสานกันเป็นลักษณะเนื้อเยื่อมีสองชนิด คือ Prosenchym ประกอบด้วยไมซีเรียมอัดตัวกันอย่างหลวมๆ และขนานกันตามความยาว และอีกชนิดหนึ่งคือ Pseudoparenchyma ประกอบด้วยไมซีเรียมเรียงตัวอัดกันอย่างหนาแน่นมีลักษณะของเชื้อราคล้ายเนื้อเยื่อ Parenchyma ในพืชชั้นสูง

การเจริญเติบโตของเชื้อราจะเติบโตบริเวณปลายไฮฟา (Hypha Tip) และมักมีการแตกแขนงอันแรกทำให้เกิดแขนงอันที่สองต่อไป แขนงเหล่านี้เติบโตไปด้านหน้าทางขอบของโคโลนี และแยกห่างจากอันอื่นๆ การเจริญเติบโตจะหยุดลงเมื่อไมซีเรียมใช้อาหารรอบๆบริเวณนั้นหมดไปและแตกแขนงไปอย่างรวดเร็วในอาหารที่ยังไม่ได้ใช้ การเติบโตลักษณะนี้ทำให้โคโลนีมีลักษณะเป็นวงกลมในอาหารแข็ง เส้นใยของเชื้อราบนอาหารแข็งบางส่วนหยั่งลึกลงไปในอาหารเพื่อดูดอาหารส่งไปให้ส่วนที่ไม่ได้สัมผัสกับอาหาร โคโลนีของราจะแตกต่างกัน บางชนิดเส้นใยจะอัดกันแน่น บางชนิดเส้นใยจะอัดกันอยู่หลวมๆมีลักษณะฟูผิวหน้าโคโลนี บางชนิดแห้ง บางชนิดเปียก หรือเหนียว สีเส้นใยอาจมีสีดำ เทา น้ำตาล แดงเหลือง ส่วนสปอร์ที่เห็นอาจมีสีเขียว น้ำตาลแกรมเขียว ส้ม ชมพู น้ำตาล ดำ เทา เป็นต้น ส่วนการเจริญเติบโตของเชื้อราบนอาหารเหลวมักเติบโตเป็นแผ่นอยู่บนผิวหน้าอาหาร แต่ถ้าให้อากาศโดยการเขย่าเส้นใยจะรวมตัวกันเป็นกระจุกส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นเม็ดกลมๆ เรียกว่า Pellet ซึ่งเป็นรูปแบบ การเจริญที่มีผลต่อการเจริญและการเกิดผลิตภัณฑ์ภายในกลุ่มของส้นใยเนื่องจากภายในกลุ่มเส้นใยจะได้รับสารอาหารน้อยมาก โดยเฉพาะบริเวณตรงกลางของกลุ่มเส้นใยจะได้รับสารอาหารน้อยมาก จนกระทั่งอาจไม่ได้รับสารอาหารเลย นอกจากนั้นแล้วผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นก็ไม่สามารถนำออกจากกลุ่มเส้นใยได้ซึ่งบางครั้งจะทำให้เกิดการยับยั้งการสร้างผลิตภัณฑ์

นอกจากนี้การเจริญเติบโตของเชื้อราในอาหารแข็งจะแตกต่างกับการเจริญเติบโตของราเส้นใยในอาหารเหลวโดยทั่วไปการเพาะเลี้ยงในอาหารเหลวในถังหมักที่มีใบพัดกวนนั้นเชื้อราจะเพิ่มจำนวนโดยการแตกหักของไมซีเซียม แต่ในบางครั้งเส้นใยของเชื้อราอาจจะรวมกันอยู่เป็นกลุ่มทำให้เกิดลักษณะที่เรียกว่า Pellet ดังที่กล่าวโดยลักษณะของเพลเลทนั้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน ในอาหารเลี้ยงเชื้อ ปริมาณของสปอร์รวมกล้าเชื้อ (Inoculum)

อาหารเลี้ยงเชื้อที่มีเส้นใยราในรูป เพลเลท จะมีความหนืดน้อยกว่าอาหารเลี้ยงเชื้อรา ที่ราเจริญเป็นเส้นใยและปัญหาที่เกี่ยวกับการผสม และอัตราการถ่ายเทอากาศก็จะน้อยกว่าด้วย ปัญหาที่พบที่อยู่ในรูปของเพลเลท ก็คือ การขนส่งอาหารเข้าสู่เซลล์ โดยทั่วไปแล้วจะเกิดโดยวิธีการแพร่ผ่านที่ซึ่งอยู่ข้างในเพลเลทจะขนส่งได้ยากกว่า โดยการเจริญเติบโตของเส้นใยจะเกิดที่เส้นใยด้านนอกของเพลเลท

สำหรับการเจริญเติบโตของราในอาหารแข็งส่วนปลายเส้นใยทั้งสองด้านจะมีการเจริญเติบโตยืดออก แต่ทิศทางของการเจริญเติบโตและอัตราการเจริญเติบโตนั้นจะขึ้นอยู่กับสารอาหาร และชนิดของสับสเตรท โดยทั่วไปพบว่าอัตราการเจริญเติบโตของเชื้อราในอาหารแข็งจะต่ำกว่าอัตราการเจริญเติบโตในอาหารเหลวมาก

ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของเชื้อรา สภาพแวดล้อมที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของเชื้อราตลอดจนคุณภาพของการผลิต เช่นชนิดของสารตั้งต้น ความเป็นกรดด่าง อุณหภูมิ สารตั้งต้นหรือวัตถุดิบที่ใช้สำหรับบนอาหารแข็ง ส่วนใหญ่จะเป็นวัสดุทางการเกษตร เช่น ข้าวโพด ข้าวฟ่าง โดยวัตถุดิบเหล่านี้จะมีแหล่งคาร์บอน ก็คือคาร์โบไฮเดรตซึ่งเป็นอาหารหลัก ราเจริญได้แตกต่างกันบนวัตถุดิบแต่ละชนิด สำหรับค่าพีเอช และอุณหภูมิก็มีผลต่อการเจริญเติบโตของเชื้อรา ลักษณะการเพาะเลี้ยงเชื้อราสามารถแบ่งการเลี้ยงได้ 2 ประเภท ตามลักษณะของการผลิตที่ใช้เพาะเลี้ยง คือ

1) การหมักบนอาหารแข็ง (Solid Substrate Fermentation)

เป็นการเพาะเลี้ยงบนอาหารแข็งโดยเชื้อราจะเจริญบนสารตั้งต้นที่มีลักษณะแข็ง เช่น ข้าว เปลือกถั่ว ฟาง ข้าวโพด เป็นต้น โดยการเพาะเลี้ยงในขวด ถุงพลาสติก หรือถาดที่เชื้อราเจริญบนอาหารแข็งก็จะสามารถได้สารตั้งต้นเหล่านี้เป็นแหล่งคาร์บอนและเป็นตัวยึดเกาะให้เส้นใยเจริญเติบโต ดังนั้นในอาหารแข็งเหล่านี้ต้องมีน้ำ ความชื้นและอุณหภูมิที่เหมาะสม

2) การหมักในอาหารเหลว (Liquid Substrate Fermentation)

เป็นการเพาะเลี้ยงเชื้อราในอาหารเหลวโดยที่สารตั้งต้นอยู่ในสภาพที่เป็นของเหลว ซึ่งอาหารเหลวนั้นจะมีแหล่งคาร์บอน และธาตุอาหารที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต สามารถเพาะเลี้ยงได้ในถังหมักซึ่งจะสามารถควบคุมสภาพแวดล้อมต่างๆได้ เช่น พีเอช การให้อากาศ อุณหภูมิ และจะใช้พื้นที่น้อยกว่าการหมักบนอาหารแข็ง

2.7.2 ขั้นตอนของกระบวนการหมัก

กระบวนการหมักโดยทั่วไป ยกเว้น Transformation Process บางชนิด ประกอบด้วยขั้นตอน 6 ขั้นตอนที่สำคัญ ดังนี้ คือ

1) การเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ ทั้งที่ใช้ในการผลิตเชื้อเริ่มต้น และที่ใช้ในขั้นตอนกระบวนการหมัก

2) การทำอาหารเลี้ยงเชื้อ ถังหมัก และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องให้ปราศจากเชื้อ

3) การผลิตเชื้อเริ่มต้นที่บริสุทธิ์ และว่องไว (Active) ในปริมาณที่มากพอสำหรับในการหมัก

4) การเพาะเลี้ยงจุลินทรีย์ในถังหมัก ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญของสารที่ต้องการ

5) การสกัดผลผลิตและการทำให้บริสุทธิ์

6) การกำจัดของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการทั้งหมด

2.7.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการหมัก

1) ปัจจัยภายใน ควรพิจารณาถึงสิ่งเหล่านี้และเลือกควบคุมเฉพาะปัจจัยที่ควบคุมได้ เช่น

การเจริญของเซลล์ จะมีผลต่อผลิตผลที่ต้องการ เช่น สารเมแทบอไลท์ปฐมภูมิจะเกี่ยวข้องกับการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ (Growth Associated) แต่สารเมแทบอไลท์ทุติยภูมิซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ (Non-Growth Associated)

- การเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของจุลินทรีย์
- การใช้สับสเตรต
- การตายของจุลินทรีย์เป็นผลมาจากสารยับยั้ง การย่อยสลายตัวเอง ความเสียหายจากใบพัดหรือกลไกต่างๆ
- การสะสมของสารเมแทบอไลท์
- การใช้ออกซิเจนและความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำต่ำ
- การเกิดคาร์บอนไดออกไซด์
- กิจกรรมของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้อง
- การเกิดฟองและการทำลายฟอง
- พีเอช และรีดอกซ์โพเทนเชียล (Redox Potentials)
- ความหนืด หรือความสม่ำเสมอของอาหาร
- การกระจายความเข้มข้นในอาหาร
- ความร้อนในระหว่างการหมัก
- ลักษณะการไหลของอาหาร

2) ปัจจัยภายนอก โดยทั่วไปต้องควบคุมปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อการคงสภาพของปัจจัยภายใน

- การปลูกเชื้อ
- ส่วนประกอบของอาหารเลี้ยงเชื้อ
- การทำอาหารให้ปราศจากเชื้อ
- อุณหภูมิ และการระบายความร้อน
- การกวนและการให้อากาศ
- ความดันภายในถังหมัก

2.8 เอนไซม์ (Enzyme)

2.8.1 นิยามของเอนไซม์

เอนไซม์นั้นได้มีการศึกษาในแง่ชีวเคมีกันมาช้านาน แต่ความรู้เกี่ยวกับการใช้เอนไซม์เป็นอาหารเสริมหรือใช้ในการบำบัดโรคยังไม่แพร่หลายซึ่งวิตามินและแร่ธาตุเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการมีสุขภาพดี เช่นเดียวกับสมุนไพรก็มีความสำคัญเป็นที่รู้กันอย่างกว้างขวาง เอนไซม์เป็นโมเลกุลของโปรตีน ซึ่งใช้ในการสร้างพลังงานที่จำเป็นต่อทุกปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในร่างกายของเรา โดยจะมีเอนไซม์ประมาณ 3,000 ชนิดที่ถูกค้นพบในร่างกายของมนุษย์ เอนไซม์จะทำงานร่วมกับโคเอนไซม์ เพื่อใช้ใน การสร้างสารเคมีกว่า 10,000 ชนิดที่ช่วยในการมองเห็น ได้ยินเสียง ช่วยให้รู้สึกได้ การเคลื่อนไหว การย่อยอาหาร และการนึกคิด ในทุกๆ อวัยวะ ทุกๆ เนื้อเยื่อ และทุกๆ ล้านเซลล์ในร่างกายจะขึ้นอยู่กับเมตา-บอลิซึมของเอนไซม์และพลังงานที่เอนไซม์สร้างขึ้นเองซึ่งเอนไซม์เหล่านี้มีอยู่ก่อนที่ร่างกายจะมีปฏิกิริยาเคมีใดๆ เกิดขึ้น แม้กระทั่งวิตามิน แร่ธาตุหรือฮอร์โมนก็ไม่สามารถทำงานได้หากไม่มีเอนไซม์ เอนไซม์มีขนาดเล็กมากจนไม่สามารถมองเห็นได้ แม้ใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายสูงสุดแล้วก็ตาม เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเป็นพลังการขับเคลื่อนที่ทำให้เราสามารถทำงานต่างๆ ได้อย่างมีสุขภาพดีหรือกล่าวได้ว่า **"เราไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้หากขาดเอนไซม์"**

2.8.2 แหล่งผลิตเอนไซม์

เอนไซม์จากอาหาร เช่น ผัก ผลไม้ มีความสามารถในการย่อยอาหารก็ต่อเมื่อยังไม่ผ่านการปรุงให้สุกเท่านั้น ตัวอย่างเช่นกล้วยสุกที่เกิดมาจากกล้วยดิบผ่านขบวนการทำงานของเอนไซม์ในผลกล้วย ทำให้กล้วยสุกอ่อนนุ่มและมีรสหวาน ที่มาอันมหัศจรรย์อีกแห่งของเอนไซม์ก็คือ เอนไซม์เสริมเพื่อช่วยย่อยอาหาร เอนไซม์เหล่านี้สกัดจาก**เอนไซม์ในพืช** เนื่องจากการผลิตเอนไซม์ไม่สามารถทำได้เหมือนกับการสังเคราะห์วิตามินและแร่ธาตุ เราจึงต้องปลูกพืชแล้ว ผ่านขบวนการสกัดในห้องปฏิบัติการ เอนไซม์เสริมเพื่อช่วยย่อยอาหารจะทานไปพร้อมกับอาหารเพื่อช่วยย่อยโดยเฉพาะในมื้อนั้นๆ ซึ่งจะเป็นการช่วยย่อยทั้งระบบตั้งแต่หลอดอาหารถึงลำไส้ใหญ่ส่วนปลาย เอนไซม์อื่นๆ ที่บริโภคได้เป็น **เอนไซม์จากสัตว์** เช่น เอนไซม์แพนเครียติน ได้มาจากตับอ่อนของหมูหรือวัว เอนไซม์แพนเครียตินจะทำงานในส่วนของลำไส้เล็กซึ่งมีสภาวะเหมาะสมกับการย่อยสลายไขมัน

เอนไซม์สามารถแบ่งออกมาได้เป็นกลุ่มหลัก 3 กลุ่มได้แก่

1) เอนไซม์ที่มีหน้าที่ในการย่อยสลายอาหาร เอนไซม์กลุ่มนี้จะถูกหลั่งออกมาจากต่อมน้ำลาย กระเพาะอาหาร ตับอ่อนและลำไส้เล็ก เอนไซม์เหล่านี้จะช่วยย่อยอาหารที่เรากินให้มีขนาดที่เล็กลง ดังนั้นสารอาหารทั้ง 45 ชนิด ก็สามารถถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายได้

2) เอนไซม์ที่มีหน้าที่เกี่ยวกับเมตาบอลิซึม เอนไซม์กลุ่มนี้มีหน้าที่เหมือนกับตัวกระตุ้นปฏิกิริยาภายในเซลล์ ซึ่งจะมีหน้าที่เกี่ยวกับการสร้างพลังงาน

3) เอนไซม์ที่มีอยู่ในอาหาร (Food Enzyme) เอนไซม์กลุ่มนี้ที่มีอยู่ในอาหาร แต่เมื่อนำอาหารไปปรุงสุกแล้ว จะทำให้สูญเสียสภาพธรรมชาติของเอนไซม์ไป

การย่อยอาหารของคนเรานั้นต้องใช้เอนไซม์หลัก 4 ชนิด และเสริม 3 ชนิด ดังนี้

เอนไซม์หลัก 4 ชนิด คือ

<u>เอนไซม์อะไมเลส</u> ย่อยอาหารกลุ่มคาร์โปไฮเดรตและแป้ง เช่น ข้าว ขนมปัง ผักและผลไม้ การย่อยอาหารที่ไม่สมบูรณ์จะทำให้เกิดภาวะเหมือนการหมักแป้งในท้องของเรา จะทำให้เกิดแก๊สและมีอาการไม่สบายต่างๆ

<u>เอนไซม์โปรตีเอส</u> มีหน้าที่ย่อยอาหารกลุ่มโปรตีน เช่น เนื้อสัตว์ต่างๆ ไก่ ปลา ถั่ว หากย่อยไม่ดีโปรตีนก็จะเน่า ท้องอืด ท้องเฟ้อ และเป็นพิษต่อร่างกาย

<u>เอนโซม์ไลเปส</u> มีหน้าที่ย่อยสลายไขมันและช่วยรักษาสมดุลกรดไขมัน ในร่างกาย ไขมันที่ไม่ถูกย่อยจะทำให้เหม็นหืน เหม็นเปรี้ยว และปริมาณโคเลสเตอรอลเสียสมดุล

ส่วนเอนไซม์เสริม 4 ชนิดคือ

<u>เอนไซม์เซลลูเลส</u> ย่อยสลายเซลลูโลส เป็นไฟเบอร์ที่พบในผักต่างๆ โดยปกติแล้วร่างกายเราไม่สามารถผลิดเอนไซม์เซลลูเลสเองได้ ดังนั้นไฟเบอร์สังเคราะห์ที่บางท่านใช้ล้างลำไส้แทนการรับประทานผัก ผลไม้สดนั้น มักจะทำให้เกิดปัญหากับลำไส้มากกว่า เพราะไฟเบอร์ที่ตกค้างจะกลายเป็นไขมันเคลือบผนังลำไส้เล็ก ทำให้เกิดเกี่ยวกับการดูดซึมอาหารตามมา

<u>เอนไซม์แลคเตส</u>ในน้ำนม หากร่างกายไม่มีเอนไซม์นี้ก็จะทำให้เกิดอาการไม่ย่อย นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากนมก็ อาจทำให้เกิดภูมิแพ้ได้

<u>เอนไซม์ซูเครส</u> ช่วยย่อยน้ำตาลในอาหาร

<u>เอนไซม์มอลเตส</u> ช่วยย่อยน้ำตาลในอาหาร

2.9 การย่อยสลายเซลลูโลสโดยเชื้อราเพื่อการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ

เชื้อราที่เรียกว่า *Trichoderma reesei* และได้ถูกค้นพบว่าเป็นสิ่งมีชีวิตที่สามารถย่อยสลายเส้นใยพืช (plant fiber) ให้เปลี่ยนเป็นโมเลกุลน้ำตาลได้ การค้นพบดังกล่าวจะช่วยให้สามารถผลิตเชื้อราที่ออกแบบให้ผลิตเอ็นไซม์หรือสารเร่งปฏิกิริยาที่คุ้มค่าในการลงทุนในการย่อยสลายเซลลูโลส ในผนังเซลพืชซึ่งจะเป็นขั้นตอนแรกในการเปลี่ยนชีวมวลไปสู่เชื้อเพลิงเพื่อการคมนาคมขนส่ง และสารเคมีที่จะใช้เป็นหน่วยแรกในการนำไปสังเคราะห์สารเคมีอื่นๆ ต่อไป

เชื้อราดังกล่าวถูกค้นพบเป็นครั้งแรกเมื่อเชื้อรานี้เกิดขึ้นในชุดเครื่องแบบทหารและเต๊นท์ผ้าใบในทะเลแปซิฟิคตอนใต้ระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 จากนั้นนักวิทยาศาสตร์ค้นคว้าจนพบว่าเชื้อราพันธุ์นี้ หรือพันธุ์ข้างเคียงเป็นตัวผลิตเอนไซม์ที่ทำลายย่อยสลายเซลลูโลสได้อย่างมีประสิทธิภาพดีเลิศ และปัจจุบันมีการใช้อย่างแพร่หลายในการผลิตเส้นใยและสินค้าอุตสาหกรรมอื่นๆ มากมาย เพื่อที่จะหาแนวทางทำความเข้าใจว่าเชื้อราดังกล่าวซึ่งมีสีเขียวแก่ผลิตเอนไซม์ที่ย่อยสลายเซลลูโลสได้อย่างไร ได้ทำการเปรียบเทียบยีนส์ของเชื้อรานี้กับลำดับพันธุกรรมของเชื้อราอื่นๆ ที่ย่อยสลายเซลลูโลสเช่นกันอีก 13 ชนิด สิ่งที่ค้นพบนั้นเกินความคาดหมาย กล่าวคือ เชื้อรา *T. reesei* นั้นมียีนส์เพียง 2 – 3 ยีนส์ที่ทำหน้าที่ผลิตเอนไซม์เซลลูโลส

(Cellulose) เอนไซม์ เฮมิเซลลูเลส (hemicellulases) และเอนไซม์อื่นๆ ที่ทำหน้าที่ย่อยสลายเซลลูโลส ยีนส์เหล่านี้จะรวมตัวเข้าด้วยกันเป็นกลุ่มก้อนในยีนส์มากกว่าที่จะกระจายตัวอย่างไม่เป็นระบบ (Random) เช่น ที่เป็นในยีโนมของ เชื้อราพันธุ์อื่นๆ

การค้นหาลำดับการเรียงตัวของยีนส์เชื้อรา *T. reesei* จะเป็นบันไดสำคัญที่มุ่งสู่การใช้วัตถุดิบที่เกิดใหม่ได้ (renewable feedstocks) เพื่อการผลิตเชื้อเพลิงและสารเคมี และข้อมูลที่ได้จากยีนส์จะช่วยให้นักวิทยาศาสตร์เข้าใจได้ดีขึ้นถึงการทำงานของเชื้อราทำให้มีความเป็นไปได้ที่จะนำไปสู่การลดค่าใช้จ่ายที่สูงในปัจจุบันในการเปลี่ยนชีวมวลจำพวกเซลลูโลสไปสู่น้ำตาลที่จะนำไปหมักเป็นแอลกอฮอล์ในที่สุด

2.10 การอบแห้ง

การอบแห้ง (Drying) หมายถึง การให้ความร้อนภายใต้สภาวะที่มีการควบคุมเพื่อกำจัดน้ำที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ การอบแห้งมักเป็นกระบวนการสุดท้ายก่อนการบรรจุโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อการกำจัดน้ำ และยืดอายุการเก็บรักษาเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์จากการมีค่าความชื้นเกินค่าที่กำหนดไว้ในวัสดุอาหาร การมีความชื้นมากเกินไปอาจทำให้เกิดเชื้อราหรือการยึดเกาะกันเป็นก้อนของผลิตภัณฑ์ที่เป็นเม็ดหรืออาจจะมีผลกระทบต่อการนำไปใช้ในกระบวนการผลิตในขั้นต่อไป

การอบแห้งถือว่าเป็นการกำจัดความชื้นออกด้วยวิธีทางความร้อนโดยให้ความร้อนเพื่อการระเหยความชื้นออกสู่ตัวกลางซึ่งส่วนใหญ่เป็นอากาศร้อนและแห้งโดยอากาศดังกล่าวนอกจากจะเป็นแหล่งความร้อนเพื่อการระเหยแล้วยังทำหน้าที่พาความชื้นจากการระเหยออกจากห้องอบด้วย

ความชื้นสุดท้ายในผลิตภัณฑ์ต่างๆ นั้นมากน้อยแตกต่างกันออกไปของแข็งบางชนิดสามารถอบจนแห้งปราศจากน้ำเรียก Bone dry solid แต่ส่วนใหญ่แล้วจะยังมีความชื้นเหลืออยู่บ้างตัวอย่างเช่นเกลือแกงที่ว่าแห้งจะมีความชื้นประมาณ 0.5 % ถ่านหินแห้งมีความชื้นประมาณ 4 %

การอบแห้งโดยแท้จริงแล้วหมายถึงการทำความชื้นให้ลดลงด้วยวิธีทางความร้อนให้ได้ความชื้นในระดับที่รับได้ ไม่ได้หมายความว่าอบแห้งจนมีค่าความชื้นเป็นศูนย์ เนื่องจากของแข็งมีอยู่หลายรูปแบบ เช่น เกล็ด (Flakes) เม็ด ผลึก ผง หรือแผ่น ความชื้นอยู่ในของแข็งหลายรูปแบบ เช่น อาจเคลือบอยู่บนผิวผลึก เช่น การอบเกลือ น้ำที่อยู่ในเนื้อวัสดุเช่นแผ่นยางหรือไม้กระดานหรืออาจจะเป็นแบบผสมคือบางส่วนเป็นความชื้นที่อยู่ข้างนอก บางส่วนอยู่ข้างในเนื้อวัสดุ อาจจะอยู่ในสภาพของแข็งของเหลวหรือเป็น Slurry สภาวะของวัสดุเหล่านี้เป็นกำหนดรูปแบบของอุปกรณ์ที่ใช้ในการอบซึ่งก็มีอยู่หลากหลายชนิดเช่นเครื่องอบแบบถาด อุโมงค์ ถังหมุน พ่นฝอย และ Rotary ดังนั้น การอบแห้งจึงเป็นเทคโนโลยีที่มีขอบข่ายกว้างมาก

2.10.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้ง

ในการอบแห้งมีปัจจัยที่มีผล เช่น ความดันไอ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ ในการสัมผัสแหล่งความร้อนของวัสดุเปียก มีกลไกการระเหยความชื้นออกจากวัสดุ รวมถึงโครงสร้างและขนาดของวัสดุ ปัจจัยที่มีผลกระทบดังนี้

1) ความดันไอและความชื้นสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิใดๆ ปริมาณองค์ประกอบที่อยู่ในอากาศผสมสัมพันธ์โดยตรงกับความดันไอขององค์ประกอบ ทั้งนี้รวมไปถึงการระเหยความชื้นออกจากผิวของวัสดุเป็นผลเนื่องมาจากความแตกต่างของความดันไอบริเวณรอบของแข็งและความดันไอของอากาศที่ไหลผ่านวัสดุ ทั้งนี้ความชื้นของอากาศที่ไหลผ่านไม่ควรมากกว่าความชื้นของวัสดุ เพราะอากาศที่ไหลผ่านวัสดุจะไม่สามารถรับความชื้นจากวัสดุออกมาได้

2) อุณหภูมิมีผลต่อประสิทธิภาพในการอบแห้งมาก เนื่องจากการถ่ายโอนความร้อนเกิดขึ้นจากความแตกต่างของอุณหภูมิเป็นตัวขับเคลื่อน ทำให้เกิดการถ่ายโอนมวลของความชื้นสู่อากาศที่อยู่รอบวัสดุ ส่งผลให้อัตราการระเหยของน้ำในวัสดุดีมากยิ่งขึ้น ถ้าหากอุณหภูมิที่ให้สูงเกินไปจะมีผลทำให้วัสดุเสื่อมสภาพ เช่น ไหม้ วัสดุมีสีเข้ม เกิดการบิดตัว การงอตัวของวัสดุ หรือเกิดรอยร้าวได้

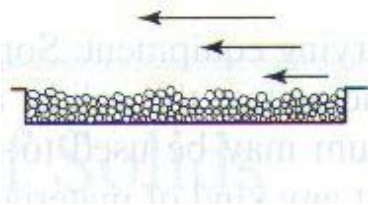
3) การเคลื่อนที่ของอากาศ ลักษณะการสัมผัสระหว่างผิววัสดุและอากาศจะมีผลต่อการอบแห้ง การอบแห้งในภาชนะปิดขนาดเล็ก ปริมาณอากาศจะน้อยและหยุดนิ่ง ทำให้การระเหยช้าและเกิดการอิ่มตัวได้เร็ว เครื่องอบแห้งขนาดใหญ่ที่มีอากาศร้อนส่งเข้าเครื่องอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดการระเหยที่ดีกว่า

4) การเคลื่อนที่ของความชื้นภายในวัสดุ ในการอบแห้งวัสดุเมื่อให้อากาศไหลผ่านผิวด้านหน้าของวัสดุดังกล่าวจะเกิดการระเหยของน้ำออกไปจากและความชื้นในระดับที่ต่ำลงจากผิววัสดุจะเกิดการเคลื่อนที่ขึ้นมาแทนที่ ถ้าการเคลื่อนที่เข้ามาแทนที่ผิวหน้ามีความสม่ำเสมอจะทำให้อัตราการระเหยมีลักษณะคงที่ตามไปด้วย แต่ในระยะสุดท้ายของการอบแห้งความชื้นในวัสดุมีน้อย การระเหยยากมากขึ้น ส่งผลทำให้การเคลื่อนที่ขึ้นมาแทนที่ผิววัสดุมีความไม่สม่ำเสมอขึ้นได้

2. 10.2 ลักษณะการแลกเปลี่ยนความร้อนของวัสดุในเครื่องอบแห้ง

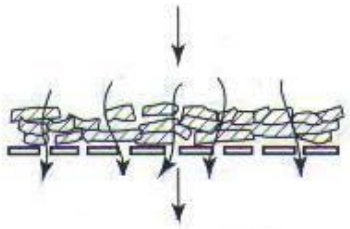
เครื่องอบแห้งมีหลายประเภทแต่ละประเภทมีเกณฑ์ในการพิจารณาที่แตกต่างกัน ซึ่งเราจะกล่าวถึงเครื่องอบแห้งแบบสัมผัสตรงเป็นหลักซึ่งแบ่งตามลักษณะของการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างวัสดุที่มีความชื้นกับอากาศร้อนในเครื่องอบแห้ง มีหลายประเภท ดังนี้

1) การอบแห้งแบบไหลเวียนผ่านผิว (cross-circulation drying) เป็นการอบแห้งโดยใช้อากาศร้อนไหลขนานผ่านผิวหน้าของวัสดุเปียก โดยจะไหลผ่านผิวหน้าด้านบนหรือด้านล่างหรือทั้งสองด้านพร้อมกันก็ได้ ลักษณะการอบแห้งประเภทนี้ ควรคำนึงถึงความสูงของชั้นวัสดุควรมีชั้นเดียวหรือชั้นบางๆ เครื่องอบแห้งประเภทนี้ได้แก่ เครื่องอบแห้งแบบถาด (tray dryer) ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การอบแห้งสัมผัสตรงแบบไหลเวียนผ่านผิว (McCabe, 1993)

2) การอบแห้งแบบไหลเวียนแทรกผ่าน (through-circulation drying) กลุ่มของวัสดุที่ถูกวางบนตะแกรง ให้อากาศร้อนเคลื่อนที่แทรกผ่านชั้นของวัสดุจากผิวด้านบนสู่ด้านล่างของชั้นวัสดุอากาศร้อนผ่านตะแกรงออกไปหรือทำในทิศทางตรงกันข้ามคือ ให้อากาศร้อนผ่านจากด้านล่างสู่ด้านบน ทั้งนี้ควรปรับความเร็วให้เหมาะสมเพราะวัสดุอาจเกิดการเคลื่อนที่ได้ นอกจากนี้ควรปรับความเร็วของอากาศร้อนไม่ให้สูงมากเพราะจะเกิดการพัดพาวัสดุออกไปจากเครื่อง ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การอบแห้งสัมผัสตรงแบบไหลเวียนแทรกผ่าน (McCabe, 1993)

2.10.3 ปริมาณความชื้นในวัสดุ

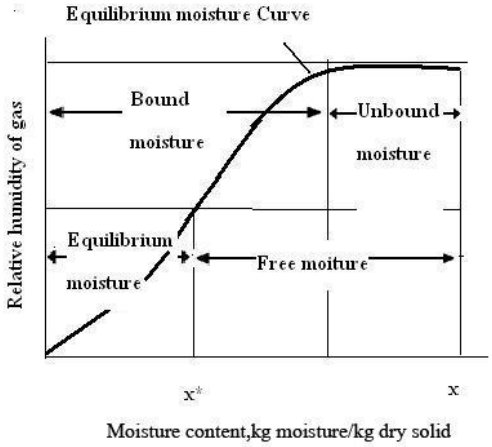
ปริมาณความชื้น (moisture content) ระบุโดยใช้ฐานแห้ง (dry basis) และฐานเปียก (wet basis) การระบุค่าความชื้นฐานเปียก หมายถึงการเทียบปริมาณความชื้นกับน้ำหนักของแข็งรวมกับความชื้น ค่าความชื้นฐานแห้งเป็นการเทียบปริมาณความชื้นกับของแข็ง เช่นวัสดุมีค่าความชื้น 20% wet basis หมายความว่ามีน้ำ 20 กรัมต่อของแข็ง 80 กรัม ถ้าเป็น 20% dry basis หมายถึงมีน้ำ 20 กรัมต่อของแข็ง 100 กรัม การอบแห้งในระบบอากาศ-น้ำ โดยไม่จำกัดเวลาในการอบ พบว่าความชื้นสุดท้ายของวัสดุจะแปรผันตรงกับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ใช้อบคือ ความชื้นในวัสดุจะมีค่าต่ำสุด เนื่องจากความชื้นของอากาศที่ใช้อบแห้งนั้นเอง ซึ่งปริมาณความชื้นที่น้อยที่สุดที่สภาวะสมดุลนี้เรียกว่า ปริมาณความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content, X^*) จึงแยกได้ 2 กรณีคือ กรณีที่ปริมาณความชื้นของวัสดุมากกว่าปริมาณความชื้นสมดุล การถ่ายโอนมวลจะถ่ายโอนจากวัสดุสู่อากาศ ในทางตรงกันข้ามหากวัสดุมีปริมาณความชื้นน้อยกว่าความชื้นสมดุล ของแข็งจะดูดซับความชื้นจากอากาศเข้าสู่ตัวเอง จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุล โดยทั่วไปเมื่ออุณหภูมิของอากาศเพิ่มสูงขึ้น ปริมาณความชื้นสมดุลจะมีแนวโน้มลดลง หากกำหนดให้ X_t เป็นปริมาณความชื้นทั้งหมดในวัสดุจะได้ว่า

$$X = X_t - X^* \qquad (2.1)$$

โดยที่ X คือความชื้นของวัสดุที่จะถูกกำจัดออกหรือเรียกว่าความชื้นอิสระ (free moisture content)

ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศและความชื้นฐานแห้งของวัสดุ ดังรูปที่ 2.7 ถ้าต่อปลายเส้นกราฟสัมผัสที่ความชื้น 100 % ปริมาณความชื้นที่สัมผัสจะเป็นปริมาณความชื้นต่ำสุดที่จะให้ความดันไอ ความชื้นในส่วนแรกจากสภาวะเริ่มต้นจนถึงจุดสัมผัสที่ความชื้นสัมพัทธ์ที่ 100 % เรียกว่า น้ำบาวด์ (bound water) ซึ่งความดันไอต่ำกว่าความดันไอของน้ำบริสุทธิ์ ณ อุณหภูมิเดียวกัน สำหรับความชื้น

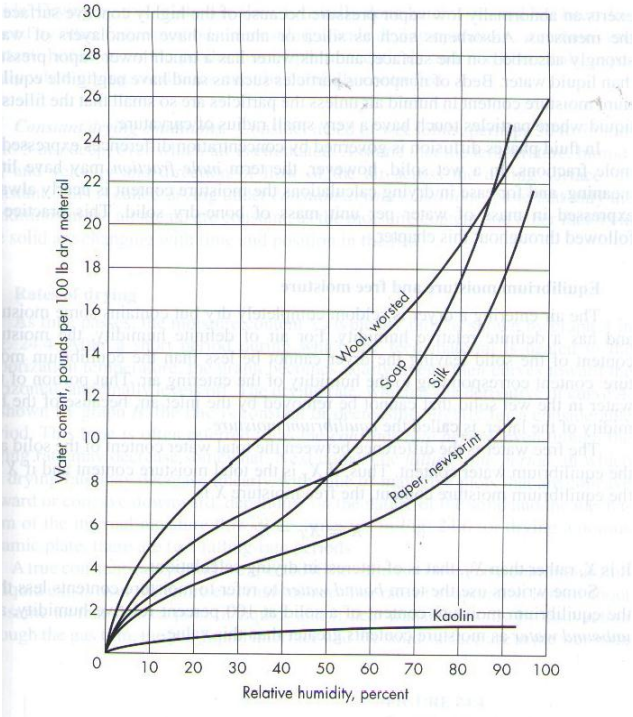
ส่วนหลังตั้งแต่จุดสัมผัสแกนที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100 % เป็นต้นไปนั้นจะเรียกว่า น้ำอันบาวด์ (Unbound Water) คือปริมาณความชื้นในของแข็งมีความดันไอได้เพียงสูงสุดที่เท่ากับความดันไอน้ำบริสุทธิ์



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศและความชื้นฐานแห้งของวัสดุ

2.10.4 การดุลมวลและอัตราการถ่ายโอนความร้อนของเครื่องอบแห้ง

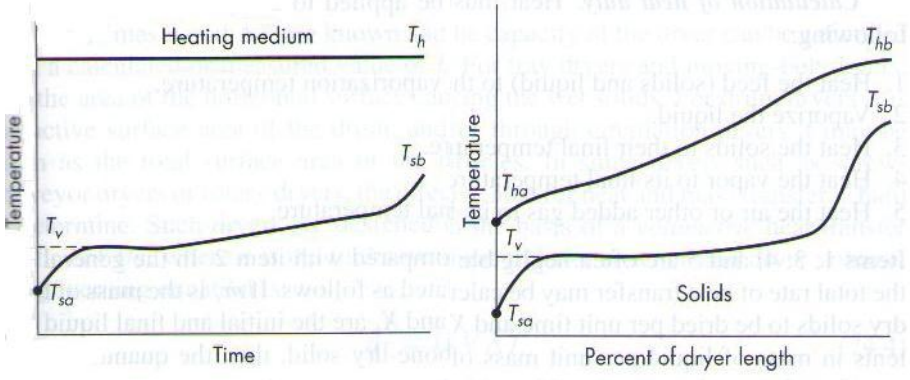
การอบแห้งเป็นกระบวนการที่ใช้อากาศร้อนไล่ความชื้นในอนุภาคของวัสดุ โปรไฟล์อุณหภูมิของวัสดุขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่นชนิดเครื่องอบแห้ง ชนิดของวัสดุ เวลาอบแห้ง ปริมาณความชื้นที่อยู่ในวัสดุ เป็นต้น



รูปที่ 2.8 ปริมาณความชื้นสมดุลของวัสดุประเภทต่างๆ ที่ อุณหภูมิ 25 °C (ที่มา Geankoplis C.J. 2003)

เมื่อป้อนสารที่สภาวะเริ่มต้น T_{sa} ค่าจะต่ำกว่าอุณหภูมิระเหย T_v เมื่อสารเข้าสู่เครื่องอบแห้งแล้ว อุณหภูมิของวัสดุ T_{sa} จะเพิ่มสูงขึ้นเท่ากับอุณหภูมิระเหย T_v หากใช้เครื่องระเหยแบบไม่เป็นอะเดียบาติก (adiabatic) และไม่มีการอัดส่งแก๊สผ่านเครื่องระเหย แล้ว T_v จะเป็นอุณหภูมิเดือด ณ ความดันของเครื่องระเหย อย่างไรก็ตามถ้ามีการไหลผ่านของก๊าซเข้าเครื่องระเหยแบบไม่อะเดียบาติกหรือแบบอะเดียบาติก อุณหภูมิระเหย T_v คืออุณหภูมิกระเปาะเปียก เมื่ออุณหภูมิคงที่ T_v จะเกิดขึ้นช่วงเวลาหนึ่ง เมื่อให้ความร้อนแก่ระบบสูงขึ้นอุณหภูมิตรงทางออก T_{sb} สูงขึ้นดังรูปที่ 2.9 (ก)

รูปที่ 2.9 (ข) แสดงโปรไฟล์อุณหภูมิการอบแห้งแบบอะเดียบาติกที่ทำงานต่อเนื่อง สังเกตได้ว่าอุณหภูมิของวัสดุเปลี่ยนตามระยะทางที่วัสดุเคลื่อนที่แต่จะคงที่ที่ตำแหน่งนั้นๆ จากรูปจะเห็นว่าของแข็งเปียกถูกป้อนเข้าด้านซ้าย ผลิตภัณฑ์แห้งขึ้นที่ด้านขวาของเครื่องในขณะที่ป้อน อากาศร้อนเข้าทางด้านขวา เคลื่อนที่สวนทางกันอุณหภูมิของวัสดุจะเพิ่มสูงขึ้นย่างรวดเร็วเป็นอุณหภูมิระเหย ซึ่งอุณหภูมิ T_v จะเปลี่ยนแปลงในระหว่างการอบแห้งแม้ว่าอุณหภูมิในกระเปาะเปียกจะคงเดิมก็ตาม



(ก) (ข)

รูปที่ 2.9 โปรไฟล์อุณหภูมิในเครื่องอบแห้ง (ที่มา Geankoplis C.J. 2003)

ในทางปฏิบัติการออกแบบเครื่องอบแห้งต้องพิจารณาถึงอัตราการอบแห้งเพื่อหาเวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งสำหรับอัตราความร้อนที่ต้องให้แก่เครื่องอบแห้งสามารถคำนวณได้จากอัตราการความร้อนที่ถ่ายโอนจากอากาศร้อนให้แก่วัสดุซึ่งประกอบด้วย 4 ขั้นตอนดังนี้

1. การให้ความร้อนแก่ของแข็งเปียกจนกระทั่งของแข็งเปียกมีค่าเท่ากับอุณหภูมิระเหย
2. ที่อุณหภูมิระเหยจะมีการระเหยของความชื้นออกจากของแข็ง
3. ของแข็งมีอุณหภูมิสูงขึ้นเป็นอุณหภูมิสุดท้าย
4. ไอมีอุณหภูมิสูงขึ้นเป็นอุณหภูมิสุดท้าย

ดังนั้น ค่าความจุความร้อนของวัสดุ C_{ps} และความจุความร้อนของของเหลว C_{pl} มีค่าคงที่หรือสามารถใช้ค่าเฉลี่ยความจุความร้อนในช่วงอุณหภูมิอบแห้งได้แล้ว สมการของอัตราความร้อนทั้งหมดที่ถ่ายโอน q_T ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของแข็งแห้ง แสดงได้ดังนี้

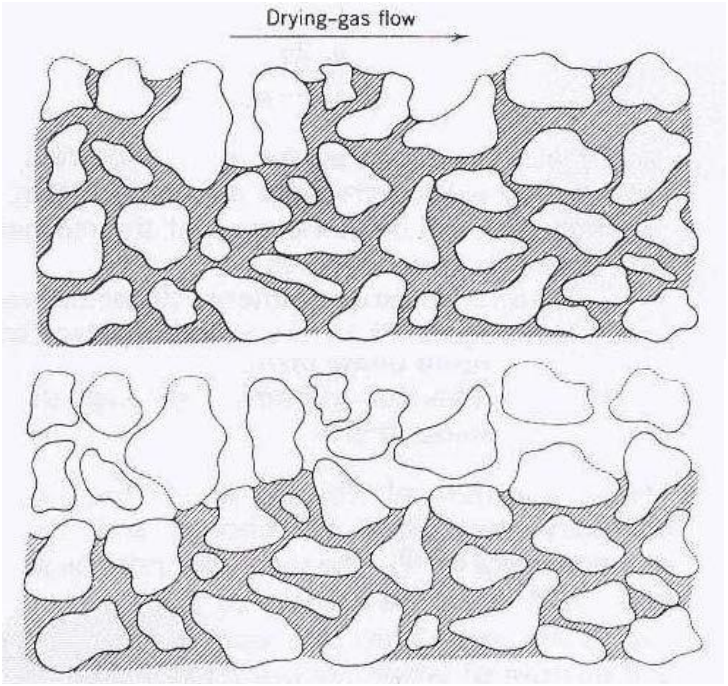
$$q_T/m_s = C_{ps}(T_v - T_{sa}) + X_1 C_{pl}(T_v - T_{sa}) + (X_1 + X_2)\lambda$$

$$+ X_2 C_{pl}(T_{sb} - T_v) + (X_1 + X_2) C_{pv}(T_{v1} - T_v) \qquad (2.2)$$

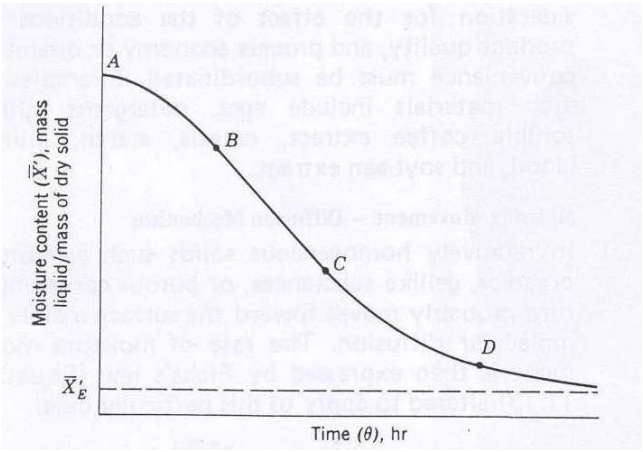
โดยที่ m_s = น้ำหนักของของแข็งแห้งต่อเวลา T_v = อุณหภูมิของระเหย T_{sa} = อุณหภูมิกระเปาะเปียกเมื่อเป็นเครื่องอบแห้งแบบอะเดียบาติก T_{v1} = อุณหภูมิสุดท้ายของไอ λ = ความร้อนแฝงของการระเหยที่อุณหภูมิระเหยและ C_{pv} = ความจุความร้อนของไอ สำหรับ X_1 และ X_2 เป็นปริมาณความชื้นในของแข็งที่สภาวะเริ่มต้นและสภาวะสุดท้ายตามลำดับ เนื่องจากอัตราการถ่ายโอนความร้อนในตอนที่หนึ่ง สามและสี่ มีค่าน้อยกว่าขั้นตอนที่สองมาก ดังนั้นการหาค่าความร้อนอย่างคร่าวๆ จึงสามารถหาค่าได้จากเฉพาะขั้นตอนที่สองเพียงอย่างเดียวได้

2.10.5 หลักการอบแห้งพื้นฐานและการอบแห้งแบบไหลเวียนผ่านผิว

เมื่ออากาศร้อนพัดผ่านบนผิววัสดุที่เปียก ดังรูปที่ 2.10 ความร้อนจะถูกถ่ายเทไปยังผิวของวัสดุและระเหยออกมาด้วยความร้อนแฝงของการเกิดไอ ไอน้ำจะถูกพัดพาไปโดยลมร้อนที่เคลื่อนที่ สภาวะนี้จะทำให้ความดันไอที่ผิวหน้าของวัสดุต่ำกว่าความดันไอด้านในวัสดุ เมื่อความดันไอของวัสดุภายนอกและภายในวัสดุแตกต่างกันจะทำให้เกิดการถ่ายเทมวล กล่าวคือความชื้นจะถูกไล่ออกไปเรื่อยๆ ดังรูปที่ 2.11 เมื่อเวลาผ่านไปวัสดุจะแห้งมากขึ้น



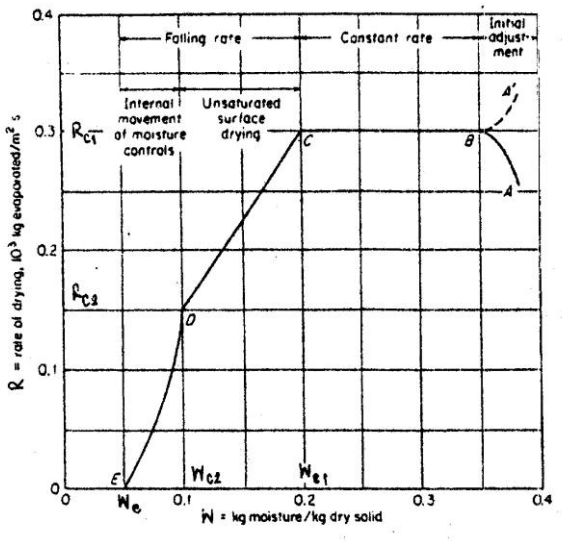
รูปที่ 2.10 การอบแห้งแบบไหลเวียนผ่านผิว



รูปที่ 2.11 โปรไฟล์ความชื้นของวัสดุที่ได้จากการอบแห้ง

อัตราการแห้ง (drying rate) และความชื้นในสารนั้น (moisture content, W) แบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ Initial Adjustment Period (ED), Constant Rate Drying (R_c) และ Falling Rate Drying (R_f) ดังรูปที่ 2.12

อัตราการอบ (R) หมายถึงค่าความชื้นที่ระเหยออกไปได้ต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลา หน่วยอาจเป็นปอนด์น้ำต่อตารางฟุตชั่วโมงหรือกิโลกรัมน้ำต่อตารางเมตรชั่วโมง Constant Rate Drying (R_c) คือการอบแห้งในช่วงการอบที่มีค่าอัตราการระเหยต่อพื้นที่และเวลาคงที่เป็นการอบที่มีความชื้นในวัสดุเหลือเฟือจึงเดินทางมาสู่ผิวหน้าได้ทันเวลากับความร้อนที่จ่ายจากลมร้อนมาที่ผิวเป็นปริมาณความร้อนที่อยู่ในประเภท Unbound Moisture ที่สำคัญคือการอบในช่วงนี้เกิดโดยที่อุณหภูมิวัสดุคงที่ Twet Bulb ของอากาศแห้งที่ใช้อบ



รูปที่ 2.12 กราฟอัตราการแห้ง (จุด E คือความชื้นสมดุล,W_e) ที่มา: Geankoplis C.J. (2003)

Falling Rate Drying คือการอบในช่วงที่ปริมาณน้ำที่ผิววัสดุแห้งลงเมื่อน้ำระเหยมาที่ผิวไม่ทันอัตราการระเหยต่อหน่วยพื้นที่และเวลาก็จะลดในช่วงนี้อุณหภูมิที่ผิวอาจค่อยๆ เพิ่มขึ้นและค่า R_f อาจจะแปรผันตรงกับค่าความชื้นที่เหลืออยู่ (กราฟ Falling Rate เป็นเส้นตรง) หรือไม่ขึ้นกับค่า X' โดยตรง กราฟของ Falling Rate อาจเป็นเส้นโค้งได้ วัสดุอบบางประเภทอาจมีแต่ falling rate ตลอดการอบ

1. ช่วงการปรับสภาวะเบื้องต้น (Initial Adjustment Period) เป็นช่วงที่ความชื้นที่มีอยู่ในวัสดุปรับตัวเพื่อมีอุณหภูมิเท่ากับลมร้อน อัตราการแห้งจะต่ำและจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงช่วงที่อัตราการอบแห้งคงที่ ที่บริเวณผิวหน้าของแข็งมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิที่จะเริ่มเกิดการระเหยในตอนแรกจะสูงและค่อยๆ ลดลงจนคงที่

2. ช่วงอัตราการแห้งคงที่ (Constant Rate Period) เป็นช่วงที่น้ำในวัสดุระเหยเป็นไออย่างต่อเนื่องคล้ายกับการระเหยของน้ำโดยทั่วไป

3. ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling Rate Period) เป็นช่วงที่ความชื้นในวัสดุเหลือน้อยจนแพร่ไปยังผิวหน้าวัสดุอย่างไม่ต่อเนื่อง ทำให้ชั้นของเหลวที่ปกคลุมอยู่ไม่สม่ำเสมอ อัตราการแห้งจึงลดลง และเมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้นความชื้นจะลดลงเรื่อยๆ จนถึงความชื้นสมดุล น้ำในวัสดุไม่สามารถระเหยออกมาได้อีก

เมื่ออัตราการอบแห้งช่วงลดลงเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นที่ผ่านจุดกำเนิดกับปริมาณความชื้น จะแสดงถึงช่วงของอัตราการอบแห้งลดลงทั้งหมด นั่นคือช่วง C ถึง E จะเป็นเส้นตรงเดียวกันและผ่านจุดกำเนิด

1.11 ทฤษฎีการออกแบบเครื่องอบแห้งต้นแบบ

1.11.1 หลักการไหลเวียนของน้ำจากหม้อต้มน้ำด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้า

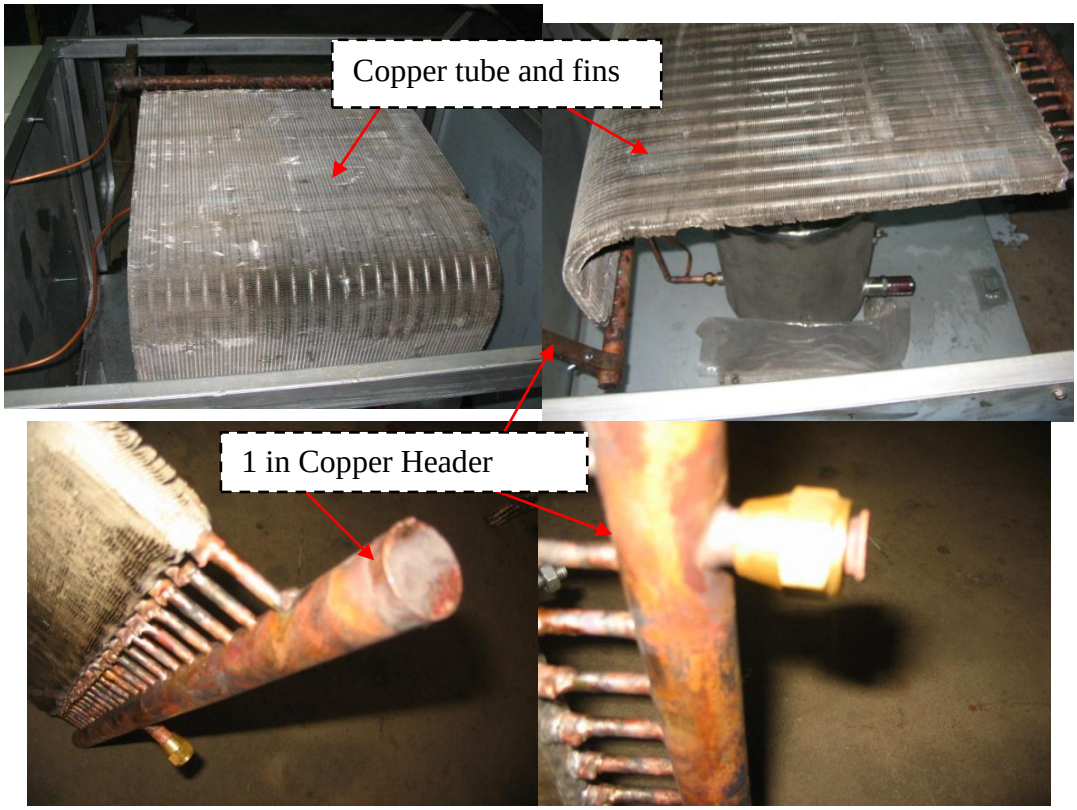
เมื่อให้ความร้อนแก่น้ำด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่ติดตั้งอยู่ในหม้อต้มน้ำขนาด 30 ลิตร ที่ทำจากเหล็กสแตนเลส ดังรูปที่ 2.12 โดยตั้งอุณหภูมิ set point ไว้ที่ 102 – 103 ^{o}C น้ำจะถูกต้มจนกระทั่งมีอุณหภูมิสูงจนเป็นไอน้ำอิ่มตัว ไอน้ำลอยขึ้นด้านบนของหม้อเข้าสู่เฮดเดอร์ทองแดงและท่อทองแดงสาขาต่างๆ ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ทำให้อุหภูมิที่ผิวท่อทองแดงของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (T_s) มีอุณหภูมิสูงประมาณ 55 ^{o}C ขณะที่อุณหภูมิอากาศที่ล้อมรอบมีค่าประมาณ 31 ^{o}C จึงเกิดการถ่ายโอนการพาความร้อนธรรมชาติผ่านแผงกระจายความร้อนจากผิวภายนอกท่อทองแดงติดครีบที่ทำจากอะลูมิเนียม ดังรูปที่ 2.13 จากด้านล่างของเครื่องอบแห้งต้นแบบขึ้นสู่ด้านบน ความร้อนนี้เป็นตัวพาความชื้นของ ตัวอย่างที่วางตามชั้นต่างๆ ขึ้นไปด้านบน เมื่อน้ำในท่อทองแดงระบายความร้อนออกไปแล้วทำให้อุณหภูมิของน้ำลดลง ค่าความหนาแน่นสูงขึ้น น้ำในท่อทองแดงจะไหลวนกลับเข้าหม้อต้มอีกครั้งและรับความร้อนเพิ่มจากฮีตเตอร์ไฟฟ้า

แหล่งให้ความร้อนที่ทำให้เกิดอัตราการถ่ายโอนการพาความร้อนธรรมชาติในช่องว่างปิดของเครื่องอบแห้งต้นแบบ มาจาก 2 แหล่ง คือ

แหล่งความร้อนที่ 1 ได้จากหม้อต้มน้ำด้วยฮีตเตอร์ซึ่งอยู่ด้านล่างของเครื่อง ภายในช่องว่างปิดเป็นสี่เหลี่ยมขนาดกว้าง (W) x ยาว (L) x สูง (H) เท่ากับ 1 x 1 x 2 m ดังรูปที่ 2.14

แหล่งความร้อนที่ 2 ได้จากโซลาร์ คอลเล็คเตอร์เป็นช่องว่างปิดรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีขนาดกว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 1 x 2 x 0.2 m ซึ่งวางเอียงทำมุมประมาณ 17 องศา ดังรูปที่ 2.15

รูปที่2.13 ถังกักเก็บน้ำร้อนหรือหม้อต้มน้ำ



รูปที่ 2.14 ส่วนประกอบของแผงกระจายความร้อน

รูปที่ 2.15 เครื่องอบแห้งต้นแบบที่มีช่องว่างปิดรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาดกว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 1 x 1 x 2 m

รูปที่ 2.16 โซลาร์ คอลเล็คเตอร์เป็นช่องว่างปิดรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีขนาดกว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 1 x 2 x 0.15 m ซึ่งวางเอียงทำมุมประมาณ 17 องศา

2.11.2 การคำนวณออกแบบ [21]

(1) การคำนวณอัตราการถ่ายโอนการพาความร้อนจากผิวท่อทองแดงของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนไปยังอากาศที่อยู่ล้อมรอบภายในเครื่องอบแห้งต้นแบบ จากสมการ

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (W) \qquad (2.3)$$

โดยที่ $\dot{Q}_{conv}$ คือ อัตราการถ่ายโอนการพาความร้อนธรรมชาติ (W)

h คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนการพาความร้อนธรรมชาติ ($W/m^2.{}^oC$)

T_s คือ อุหภูมิที่ผิวท่อทองแดงของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (^oC)

T_∞ คืออุหภูมิอากาศที่ล้อมรอบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (^oC)

A_s คือพื้นที่ผิวของการถ่ายโอนการพาความร้อนธรรมชาติ (m^2)

<u>สมมติให้</u> ท่อมีอุณหภูมิที่ผิวท่อคงที่ตลอดความยาวท่อ อากาศที่ผ่านเข้ามีอุณหภูมิ $T_\infty = 31\ ^oC$ อุณหภูมิที่ผิวด้านนอก T_S ของท่อเฉลี่ยประมาณ 50 ^oC ถึง 66 ^oC ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดลองในที่นี้แสดงตัวอย่างการคำนวณทางทฤษฎีของอัตราการถ่ายโอนการพาความร้อนธรรมชาติ เมื่อ T_s เฉลี่ยประมาณ 55 ^oC

อัตราการถ่ายโอนการพาความร้อนธรรมชาติต่อหนึ่งหน่วยความยาวของท่อ หาได้จากสมการ

$$\frac{\dot{Q}_{conv}}{L} = \pi Dh(T_s - T_\infty) \qquad (2.4)$$

โดยที่ D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อหน้าตัดวงกลม (m)

L คือ ความยาวท่อ (m)

สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนการพาความร้อนธรรมชาติ ($W/m^2.{}^oC$)หาได้จากเลขนัสเซิลท์

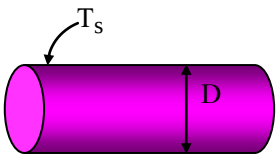
$$h = \frac{Nu \cdot k}{L} \qquad (2.5)$$

โดยที่ Nu คือ เลขนัสเซิลท์

k คือ สภาพการนำความร้อนของอากาศที่อุณหภูมิฟิล์ม ($W/m.{}^oC$)

L_C คือความยาวคุณลักษณะของรูปทรง (m) กรณีเป็นท่อวงกลม $L_c = D$

สหสัมพันธ์อย่างง่ายสำหรับเลขนัสเซิลท์ของการพาความร้อนธรรมชาติเหนือผิวสำหรับทรงกระบอกนอน $Ra_D \leq 10^{12}$



$$Nu = \left\{ 0.6 + \frac{0.387Ra_D^{1/6}}{[1+(0.559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \qquad (2.6)$$

เลขนัสเซิลท์ของการพาความร้อนธรรมชาติหาได้จากเลขเรย์ลี คือ

$$Ra_D = Gr_L\ Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)D^3}{\nu^2} Pr \qquad (2.7)$$

โดยที่ Ra_L คือ เลขเรย์ลี (Rayleigh number) ซึ่งคือผลคูณของเลขเกรชอฟกับเลขแพรนดท์

Gr_L คือ เลขเกรชอฟ

Pr คือ เลขแพรนด์ (Prandtl number)

g คือ ความเร่งจากแรงโน้มถ่วง m/s^2

β คือ สัมประสิทธิ์ของการขยายปริมาตร 1/K ($\beta = 1/T$ สำหรับก๊าซอุดมคติ), (K^{-1})

T_s คือ อุหภูมิที่ผิวท่อทองแดงของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (^oC)

$T\infty$ คืออุหภูมิอากาศที่ล้อมรอบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (^oC)

D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อ (m)

ν คือ ความหนืดจลน์ของอากาศที่อุณหภูมิฟิล์ม (m^2/s)

สมบัติของอากาศที่อุณหภูมิฟิล์ม $T_f = \frac{328+304}{2} = 316$ K นำไปเปิดตารางหาสมบัติของอากาศได้ดังนี้ $\nu = 1.75 \times 10^{-5}$ m^2/s, k = 0.02699 W/m.^{o}C, $\beta = \frac{1}{316}$ K^{-1} และ Pr = 0.7241

แทนค่าตัวแปรต่างๆ ลงในสมการ (2.7) จะได้เลขเรย์ลีสำหรับท่อเฮดเดอร์

$$Ra_D = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)D^3}{\nu^2} Pr$$

$$= \frac{9.81(1/316)(0.025)^3(328-304)}{(1.75\times10^{-5})^2} = 2.87 \times 10^4$$

แทนค่าเลขเรย์ลีลงในสมการ (2.6) เลขนัสเซิลท์ที่ได้คือ

$$Nu = \left\{0.60 + \frac{0.387Ra_D^{1/6}}{[1+(0.559/Pr)^{9/16}]^{8/27}}\right\}^2$$

$$= \left\{0.60 + \frac{0.387(3.191\times10^4)^{1/6}}{[1+(0.559/0.705)^{9/16}]^{8/27}}\right\}^2 = 5.67$$

$$h = \frac{Nu \cdot k}{D} = \frac{5.67(0.02699)}{0.025} = 6.12\ W/m^2.^oC$$

แทนค่าในสมการ (2.3)

$$\dot{Q}_{conv} = \pi(0.025\ m)(1\ m)(6.12\ W/m^2.^oC)(328\text{-}304)\ (^oC)$$

$$= 11.54\ W = 0.012\ kW$$

อัตราการถ่ายโอนแผ่รังสีความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการอบแห้ง จากสมการ

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon A_s \sigma(T_s^4 - T_{sur}^4) \qquad (2.8)$$

โดยที่ $\dot{Q}_{rad}$ คือ อัตราการถ่ายโอนแผ่รังสีความร้อน (W)

ε คือ สภาพการเปล่งรังสี

σ คือ ค่าคงที่ของชเตฟาน-โบลต์ซมันน์ (Stefan-Boltzmann constant) มีค่าเท่ากับ 5.67×10^{-8} $W/m^2.K^4$

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ของผิวมีหน่วยเป็น K

แทนค่าตัวแปรต่างๆ ที่ทราบค่าลงในสมการ (2.8) จะได้

$\dot{Q}_{rad}$ = 14.01 W หรือ = 0.014 kW

รวมอัตราการถ่ายโอนความร้อนของท่อเฮดเดอร์จากการพาความร้อนธรรมชาติและการแผ่รังสีความร้อนมีค่าเท่ากับ 0.026 kW

สำหรับท่อทองแดงขนาดเล็กที่แผงคอนเดนเซอร์หรือเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

$$Ra_D = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)D^3}{\nu^2} Pr$$

$$= \frac{9.81(1/316)(0.01)^3(328-304)}{(1.75\times10^{-5})^2}(0.7241) = 1.84 \times 10^3$$

$$Nu = \left\{0.60 + \frac{0.387Ra^{1/6}}{[1+(0.559/Pr)^{9/16}]^{8/27}}\right\}^2$$

$$= \left\{0.60 + \frac{0.387(2.04\times10^3)^{1/6}}{[1+(0.559/0.705)^{9/16}]^{8/27}}\right\}^2 = 2.98$$

$$h = \frac{Nu \cdot k}{D} = \frac{3.121(0.027)}{0.01} = 8.04\ W/m^2.K$$

<u>สมมติให้</u>สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน มีค่าเท่ากันระหว่างท่อมีครีบและไม่มีครีบ แทนค่าในสมการ (2.3)

$\dot{Q}_{conv}$ = π(0.01 m)(22 m)(8.04 $W/m^2.^oC$)(328-304) (^oC)

= 133.36 W = 0.133 kW

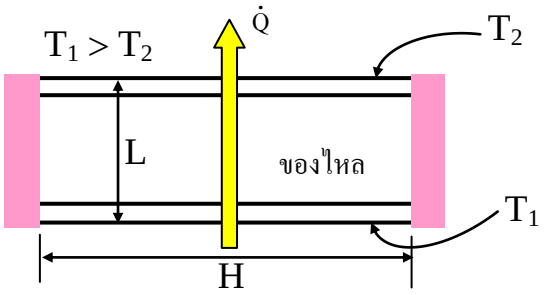
$\dot{Q}_{rad}$ = 123.26 W หรือ = 0.123 kW

รวมอัตราการถ่ายโอนความร้อนของท่อเฮดเดอร์จากการพาความร้อนธรรมชาติและการแผ่รังสีความร้อนมีค่าเท่ากับ 0.256 kW

อัตราการถ่ายโอนความร้อนทั้งหมดจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (เฮดเดอร์และแผงระบายอากาศร้อน) มีค่าเท่ากับ 0.026 + 0.256 = 0.282 kW

(2) การคำนวณอัตราการถ่ายโอนการพาความร้อนธรรมชาติในช่องว่างปิดรูปทรงสี่เหลี่ยม

เครื่องอบแห้งต้นแบบมีช่องว่างปิดขนาดกว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 1 x 1 x 2 m ดังรูปที่ 2.15 ใช้สหสัมพันธ์ของเลขนัสเซิลท์สำหรับ *ช่องว่างปิดสี่เหลี่ยมผืนผ้าแนวนอน* ดังสมการ



รูปที่ 2.17 ช่องว่างปิดสี่เหลี่ยมผืนผ้าผิวไอโซเทอร์มัลวางแนวนอน

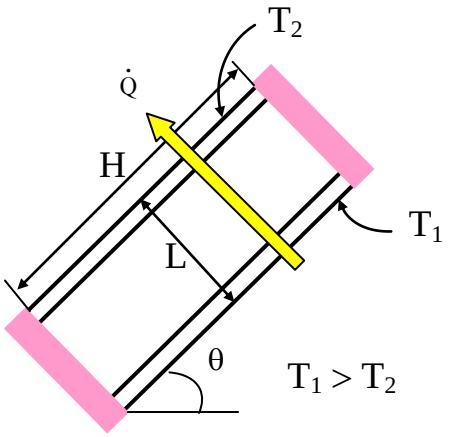
สหสัมพันธ์ของช่องว่างปิดแนวนอนมีการให้ความร้อนที่แผ่นล่าง (Globe and Dropkin, 1959)

$$Nu = 0.069 Ra_L^{1/3} Pr^{0.074} \qquad 3\times10^5 < Ra_L < 7\times10^9 \qquad (2.9)$$

โซลาร์ คอลเล็กเตอร์ คือ *ช่องว่างปิดสี่เหลี่ยมผืนผ้าเอียงทำมุมกับแนวนอน*

การถ่ายโอนความร้อนผ่านช่องว่างปิดที่วางเอียงทำมุมกับแนวนอนขึ้นกับอัตราส่วนระหว่างความสูงของแผ่นเอียง ระยะทางของช่องว่าง H/L และมุมเอียงกับแนวนอน θ ดังรูปที่ 2.18 สำหรับช่องว่างปิดที่อัตราส่วน H/L $<$ 12 สหสัมพันธ์ต่อไปนี้สามารถนำมาใช้กับมุมเอียงน้อยกว่ามุมเอียงวิกฤต θ_{cr} ดังตารางที่ 2.2 (Catton, 1978)

$$Nu = Nu_{\theta=0^\circ}\left(\frac{Nu_{\theta=90^\circ}}{Nu_{\theta=0^\circ}}\right)^{\theta/\theta_{cr}} (\sin\theta_{cr})^{\theta/(4\theta_{cr})} \qquad 0^\circ < \theta < \theta_{cr} \qquad (2.10)$$



รูปที่ 2.18 ช่องว่างปิดสี่เหลี่ยมผืนผ้าเอียงผิวไอโซเทอร์มัล

ตารางที่ 2.2 มุมวิกฤตของช่องว่างปิดสี่เหลี่ยมผืนผ้าเอียงทำมุมกับแนวนอน (Cengel, 2003:480)

อัตราส่วน H/L	มุมวิกฤต θ_{cr}
1	25°
3	53°
6	60°
12	37°
>12	70°

2.11.3 ฮีทเตอร์ (heater)

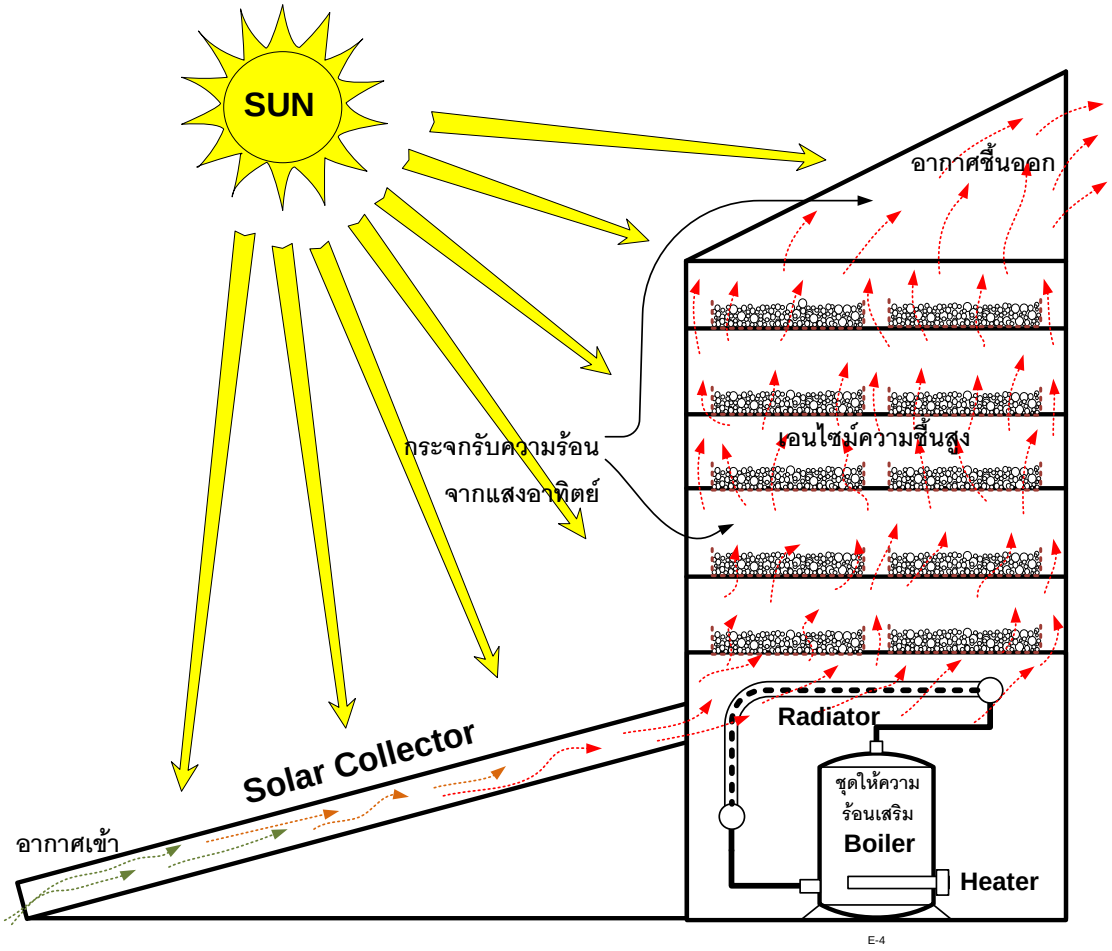
ฮีทเตอร์ (heater) ในงานวิจัยนี้หมายถึงอุปกรณ์ทำความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้า ทำหน้าที่ต้มน้ำเพื่อส่งความร้อนให้กับเครื่องอบแห้งเอนไซม์ผงในกระบวนการพลังงานเสริมของการอบแห้ง

2.11.4 หลักการทำงานของตู้อบแห้ง

หลักการทำงานของตู้อบแห้งพลังงานร่วมตู้อบแห้งพลังงานร่วมนี้ได้รวมเอาพลังงานสองแหล่งมาช่วยในกระบวนการอบแห้ง คือพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานหลักและใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานเสริมในกรณีที่ต้องการอบแห้งต่อเนื่องในช่วงเวลากลางคืน ฝนตก หรือแสงอาทิตย์น้อย ซึ่งจะช่วยลดเวลาในการอบแห้ง หลักการทำงานของตู้อบแห้งพลังงานร่วมแบ่งออกเป็น 3 กรณี ตามเงื่อนไขที่กำหนด ได้แก่ การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว การอบแห้งด้วยชุดความร้อนเสริมอย่างเดียวและการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับชุดความร้อนเสริม รายละเอียดหลักการทำงานของตู้อบแห้งดังนี้

กรณีที่ 1 การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว

การเลือกใช้การอบแห้งจะขึ้นอยู่กับปริมาณแสงอาทิตย์ในแต่ละวันและความเหมาะสมของเวลาในการอบแห้งตามผลิตภัณฑ์ที่นำมาอบแห้งนั้นๆ กรณีที่ผลิตภัณฑ์สามารถรอเวลาข้ามวันโดยไม่เสียหาย การเลือกใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว ดังรูปที่ 2.19 ก็จะสามารถลดค่าใช้จ่ายในการอบแห้งลงได้มาก เนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่ไม่ต้องซื้อและยังเป็นพลังงานสะอาดช่วยลดโลกร้อนได้อีกด้วย เมื่อพลังงานแสงอาทิตย์ส่องผ่านกระจกลงมากระทบแผงรับรังสีสีดำ และผลิตภัณฑ์ที่นำมาอบแห้งเข้าทางด้านบนตู้เพื่อเป็นตัวเพิ่มปริมาณความร้อนภายในตู้อบแห้งให้สูงขึ้นเกิดการถ่ายเทความร้อน ไปยังวัตถุดิบที่ชื้นทำให้น้ำที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ระเหยออกไปเป็นน้ำลอยตัวไหลออกมาทางด้านบนของตู้อบแห้ง อากาศเย็นจากภายนอกจะไหลเข้าทางด้านหน้าส่วนล่างของตู้อบแห้ง ไปแทนที่อากาศร้อน ดังนั้น อากาศภายในตู้อบแห้งจะไหลเวียนโดยธรรมชาติตลอดเวลาที่มีความร้อนเข้ามาจนกระทั่งวัตถุดิบที่นำมาอบแห้งมีความชื้นลดลง ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งสามารถเก็บรักษาได้นานโดยไม่เสีย ทั้งนี้ระยะเวลาของการอบแห้งนั้นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและลักษณะของวัตถุดิบที่จะนำมาอบ



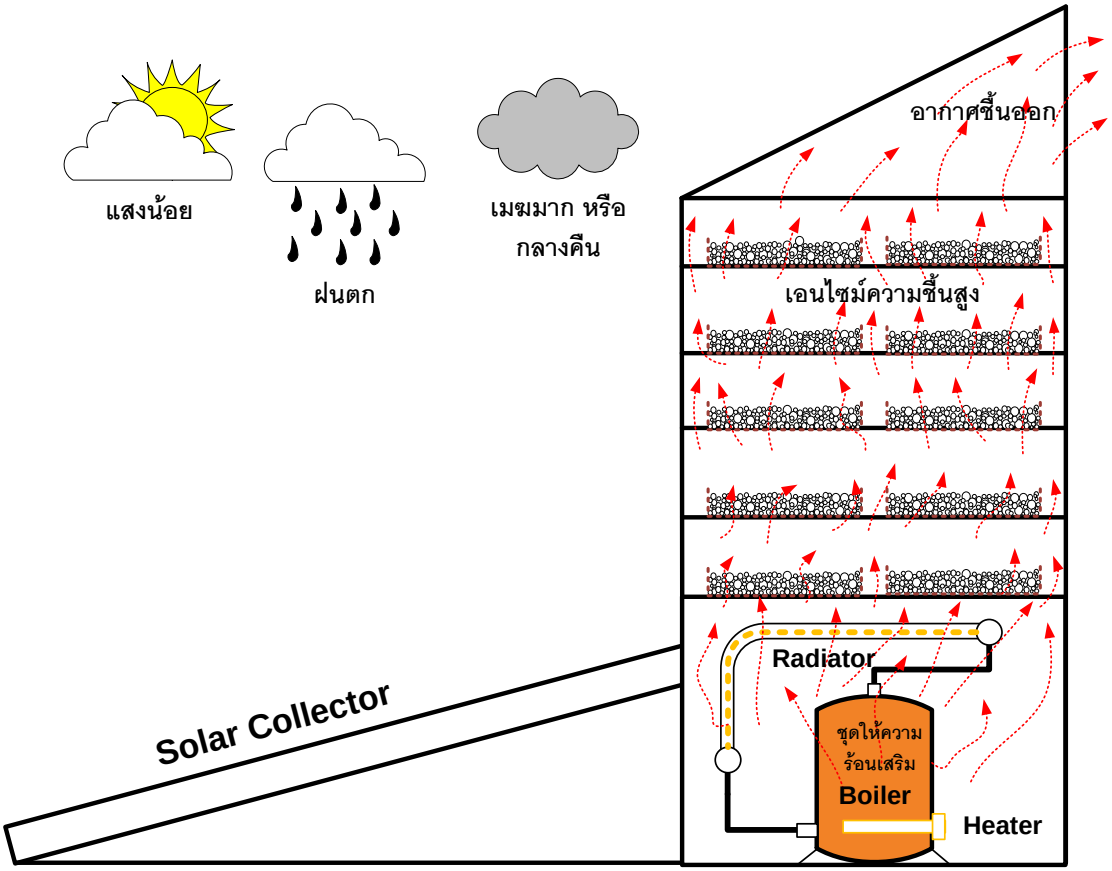
รูปที่ 2.19 การทำงานของตู้อบแห้ง กรณีใช้พลังงานแสงอาทิตย์

กรณีที่ 2 การอบแห้งด้วยชุดความร้อนเสริมอย่างเดียว

เมื่อฤดูกาลเปลี่ยนไป เช่นฤดูฝน มีเมฆมากบดบังแสงอาทิตย์ หรือวันที่มีฝนตก หรือจะทำการอบแห้งตอนกลางคืน การใช้แหล่งความร้อนจากดวงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวไม่ได้ จำเป็นต้องใช้แหล่งความร้อนอื่น ในที่นี้ใช้แหล่งความร้อนจากหม้อต้มและเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นแผงที่ใช้ควบแน่นน้ำในระบบเครื่องปรับอากาศถูกนำมาใช้เป็นอุปกรณ์ถ่ายโอนความร้อนให้กับอากาศที่อยู่ภายในช่องว่างของเครื่องอบแห้ง อากศร้อนด้านล่างจะไล่ความชื้นที่ถูกไล่ออกจากตัวอย่างและลอยขึ้นไปทางด้านบน ดังรูปที่ 4.20

สำหรับการอบแห้งโดยชุดสะสมความร้อน จะใช้อบกรณีที่ไม่มีแสงอาทิตย์เป็นการอบแบบต่อเนื่อง เช่น ตอนกลางคืน หรือ ขณะฝนตกและสามารถนำความร้อนจากการเผาไหม้ ถ้านำมาใช้ควบคู่กับความร้อนที่ได้จากแสงอาทิตย์จะทำให้ระยะเวลาในการอบเร็วขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อพลังงานแสงอาทิตย์ไม่มีหรือมีน้อยไม่เพียงพอต่อการให้ความร้อนเพื่อดึงความชื้นออกจากวัตถุดิบ จำเป็นต้องใช้

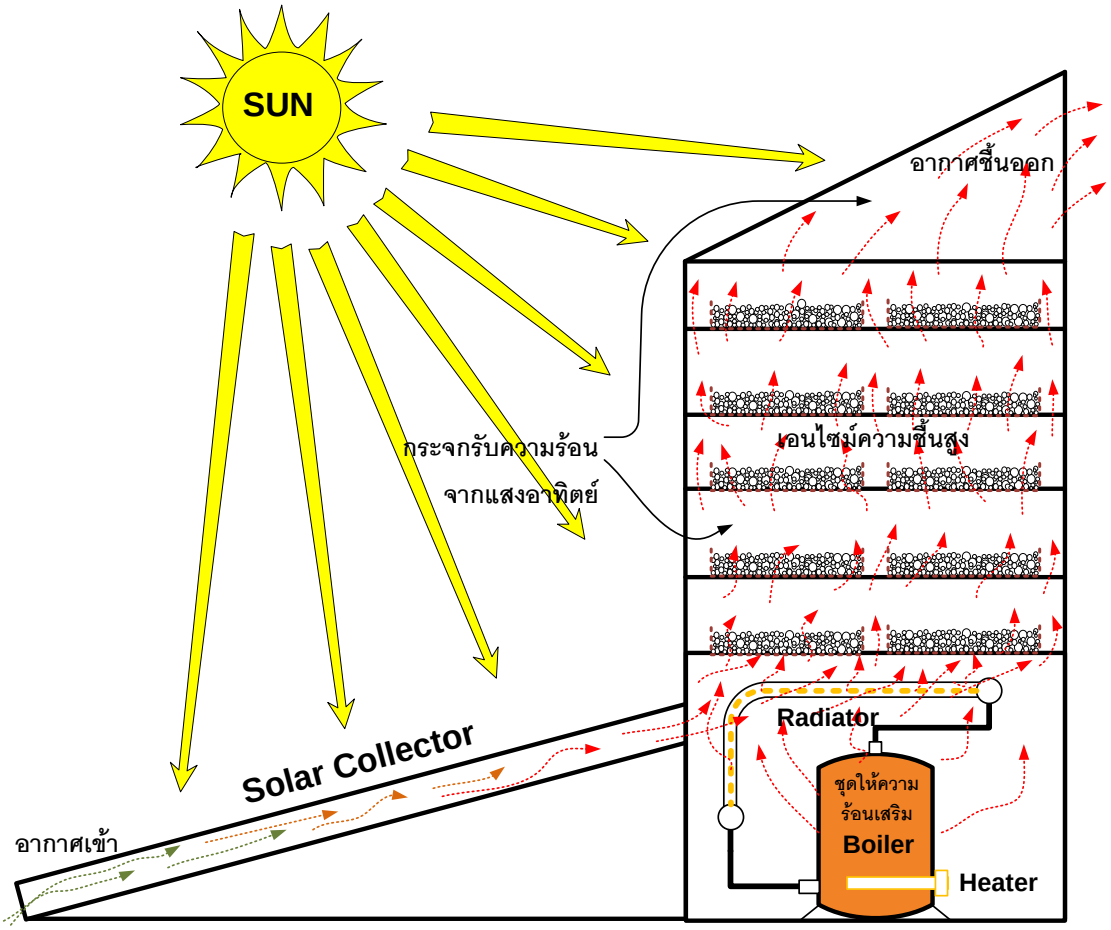
ความร้อนจากชุดสะสมความร้อน ซึ่งมีหลักการคือ ใช้ฮีทเตอร์ไฟฟ้าทำให้น้ำร้อนเป็นตัวกลางพาความร้อนจากหม้อต้มน้ำไปยังแผงระบายความร้อนให้ความร้อนแก่ตู้อบแห้งและไหลหมุนเวียนกลับคืนยังหม้อต้มน้ำ การไหลของน้ำร้อนทำให้มีความร้อนสะสมในเครื่องอบแห้งเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.20 การทำงานของตู้อบแห้งกรณีใช้ระบบให้ความร้อนเสริมอย่างเดียว

กรณีที่ 3 การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับชุดความร้อนเสริม

การอบแห้งกรณีนี้อาจเรียกว่า ระบบ Hybrid คือระบบอบแห้งที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานในรูปแบบอื่นๆ ช่วยในเวลาที่มีแสงอาทิตย์ไม่สม่ำเสมอหรือต้องการให้ผลิตผลทางการเกษตรแห้งเร็วขึ้น เช่น ใช้ร่วมกับพลังงานเชื้อเพลิงจากชีวะมวล พลังงานไฟฟ้า วัสดุอบแห้งจะได้รับความร้อนจากอากาศร้อนที่ผ่านเข้าแผงรับแสงอาทิตย์ และการหมุนเวียนของอากาศจะอาศัยพัดลม หรือเครื่องดูดอากาศช่วย งานวิจัยนี้จะใช้ความร้อนจากหม้อต้มน้ำด้วยฮีทเตอร์ไฟฟ้าร่วมกับความร้อนจากแสงอาทิตย์ หม้อต้มน้ำให้ความร้อนหรือมีการถ่ายโอนความร้อนธรรมชาติ (Thermo siphon system) เป็นถังเก็บอยู่สูงกว่าแผงรับแสงอาทิตย์ ใช้หลักการหมุนเวียนตามธรรมชาติ เมื่อน้ำได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์จะมีความหนาแน่นน้อยลงจึงไหลขึ้นสู่ด้านบนของถังน้ำเย็นจึงไหลเข้ามาแทนที่ เหมาะสำหรับการใช้ในที่อยู่อาศัย หรือมีปริมาณการใช้ไม่สูงมากนัก ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 การทำงานของตู้อบแห้งใช้พลังงานร่วมระหว่างแสงอาทิตย์กับชุดความร้อนเสริม