บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิจารณ์

4.1 องค์ประกอบทางเคมีของกากมันสำปะหลัง

กากมันสำปะหลังที่ใช้เป็นวัตถุดิบได้จากลานมันอำเภอครบุรี จังหวัดนครราชสีมา ขนาดอนุภาคประมาณ 80 – 200 เมช ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของกากมันสำปะหลัง

องค์ประกอบ	ร้อยละ โดยน้ำหนัก
เซลลูโลส	57.61
เฮมิเซลลูโลส	2.37
ลิกนิน	1.26
คาร์โบไฮเดรต	25.81
ความชื้น	12.95

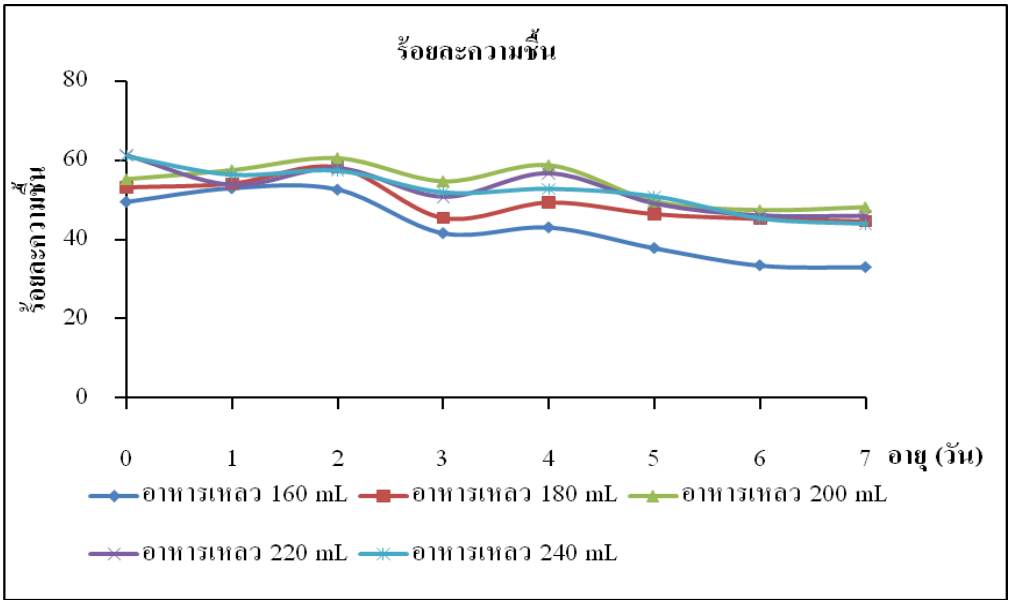
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกากมันสำปะหลังพบว่า ปริมาณเซลลูโลสมีค่ามากที่สุดคือประมาณร้อยละ 57.61 คาร์โบไฮเดรตเหลืออยู่ประมาณร้อยละ 25.81 โดยน้ำหนัก ขณะที่เฮมิเซลลูโลสและลิกนินมีค่าน้อย นั่นคือ กากมันสำปะหลังมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นแหล่งคาร์บอนได้ เนื่องจากกากมันสำปะหลังเป็นสิ่งเหลือทิ้งจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง เชื้อไตรโคเดอร์มา รีสิอี RT-P1 เมื่อเติบโตในสภาวะที่เหมาะสมจะผลิตเซลลูเลสย่อยสลายเซลลูโลสและอะมายโลสย่อยแป้งได้

4.2 ผลการหมักแข็งในระดับห้องปฏิบัติการ

4.2.1 สภาวะที่เหมาะสมของการผลิตหัวเชื้อสด (Fresh starter) ในชามแก้ว

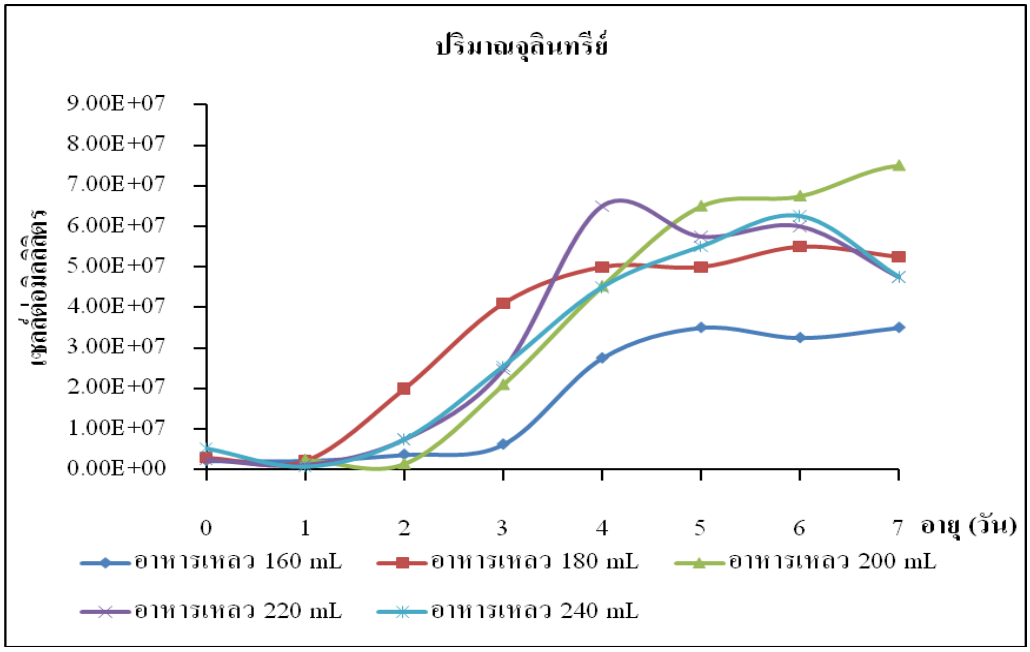
การหมักแข็งกากมันสำปะหลังในชามแก้วด้วยเชื้อราไตรโคเดอร์มา รีสิอี RT-P1 ความเข้มข้นเริ่มต้นคงที่ประมาณ 10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ในอาหารเหลวสูตร LM พีเอช 5 ที่ความเข้มข้นน้ำตาลมะพร้าวเริ่มต้นคงที่เท่ากับ 30 กรัมต่อลิตร ทำการแปรผันปริมาตรอาหารเหลวเท่ากับ 160, 180, 200 และ 220 มิลลิลิตร กากมันสำปะหลัง (สับสเตรท) ที่ใช้ปริมาณคงที่เท่ากับ 200 กรัม พบว่า สภาวะที่เหมาะสมคือความชื้นเฉลี่ยเริ่มต้นในกากมันสำปะหลังมีค่าประมาณร้อยละ 55 โดยน้ำหนัก เมื่อใช้ปริมาตรอาหารเหลวเท่ากับ 200 มิลลิลิตร ระยะเวลาที่เชื้อราเติบโตสูงสุดเท่ากับ 7 วัน การเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์สูงสุดประมาณ 7.5×10^7 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ดังรูปที่ 4.1 และ รูปที่ 4.2 ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.2 การหมักกากมันสำปะหลังในชามแก้ว เชื้อราไตรโคเดอร์มา รีสิอี RT-P1 ที่ปริมาณกากมันสำปะหลัง (กรัม) ต่อปริมาตรอาหารเหลว (มิลลิลิตร) เท่ากับ 200:200, 200:220 และ 200:240 ใช้เวลาปรับตัวประมาณ 2 วัน จากนั้นเป็นระยะเวลาการเติบโตแบบเอ็กซ์โพแนนเชียลถึงระยะเวลาหมัก 4-5 วัน แต่ที่อัตราส่วน 200:200 เป็นสภาวะที่การเจิญเติบโตดีที่สุด ส่วนที่ปริมาณกากมันสำปะหลัง (กรัม) ต่อปริมาตรอาหารเหลว (มิลลิลิตร) เท่ากับ 200:160 เป็นสภาวะที่ไม่เหมาะสมเนื่องจากเวลาปรับตัวของเชื้อรามากที่สุดคือ 3 วัน และมีค่าความเข้มข้นของเชื้อราต่ำที่สุด เนื่องจากความชื้นเริ่มต้นและสารอาหารน้อยเกินไป สำหรับปริมาณกากมันสำปะหลัง (กรัม) ต่อปริมาตรอาหารเหลว (มิลลิลิตร) เท่ากับ 200:180 ถึงแม้จะใช้เวลาปรับตัวน้อยที่สุดคือ 1 วัน แต่ความเข้มข้นของจุลินทรีย์ที่ได้มีค่าน้อยกว่า เนื่องจากปริมาณอาหารน้อยกว่านั่นเอง

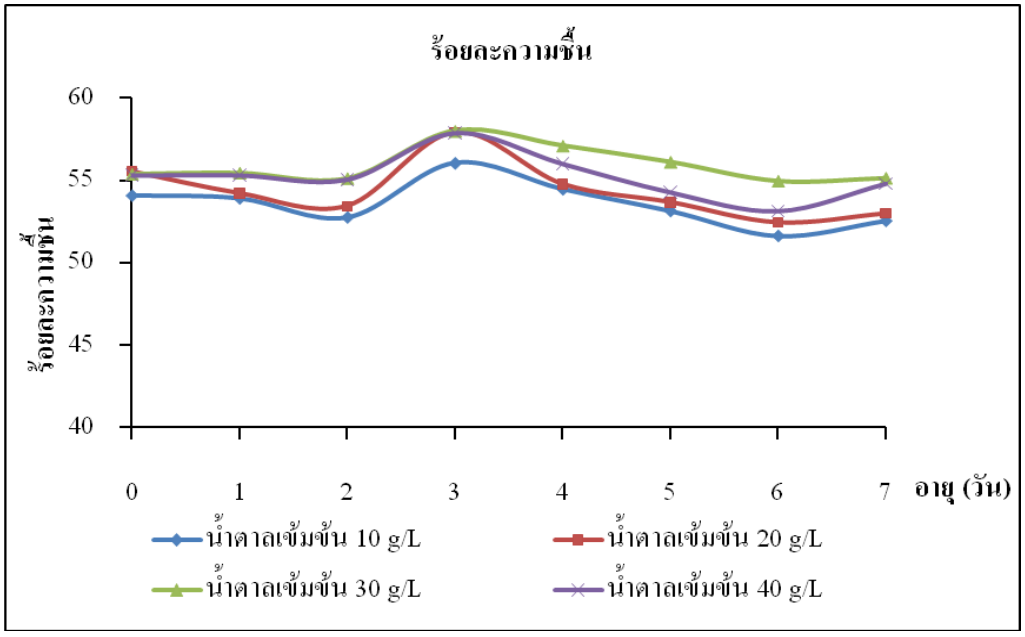


รูปที่ 4.1 ร้อยละความชื้นที่ปริมาตรอาหารเหลวต่างๆ ต่อกากมันสำปะหลังคงที่ 200 กรัม

ผลการหมักกากมันสำปะหลังที่ปริมาณกากมันสำปะหลัง (กรัม) ต่อปริมาตรอาหารเหลว (มิลลิลิตร) เท่ากับ 200:200 โดยทำการแปรผันความเข้มข้นของน้ำตาลมะพร้าวในอาหารเหลวเท่ากับ 10, 20, 30 และ 40 กรัมต่อลิตร พบว่า ความเข้มข้นน้ำตาลมะพร้าวเริ่มต้นเท่ากับ 30 กรัมต่อลิตร มีความเหมาะสม โดยที่ความชื้นเริ่มต้นประมาณร้อยละ 55 โดยน้ำหนัก สภาวะนี้ความชื้นของกากมันสำปะหลังระหว่างการหมักมีค่าสูงกว่าที่อัตราส่วนอื่นๆ ดังรูปที่ 4.3



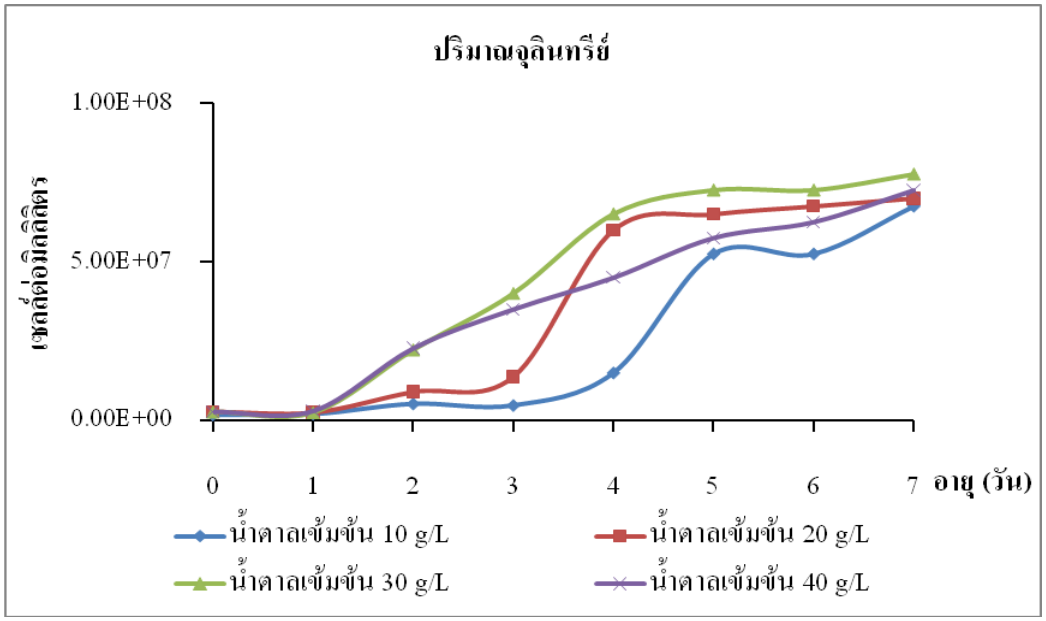
รูปที่ 4.2 ความเข้มข้นของจุลินทรีย์ที่ปริมาตรอาหารเหลวต่างๆ ต่อกากมันสำปะหลังคงที่ 200 กรัม



รูปที่ 4.3 ปริมาณร้อยละความชื้นที่ความเข้มข้นน้ำตาลมะพร้าวในอาหารเหลว 10 20 30 และ 40 g/L

พิจารณาโปรไฟล์ของความเข้มข้นของเชื้อราที่ความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้นเท่ากับ 30 กรัมต่อลิตร พบว่า เชื้อราใช้เวลาปรับตัวประมาณ 1 วัน หลังจากนั้นเป็นการเติบโตแบบเอ็กซ์โพแนนเชียลจนถึงระยะเวลา 4 วัน และเติบโตสูงสุดใช้เวลา 7 วัน สำหรับความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้นเท่ากับ 40 กรัมต่อลิตร ถึงแม้จะใช้เวลาปรับตัวประมาณ 1 วัน แต่ความเข้มข้นของเชื้อรามีค่าน้อยกว่าที่ความเข้มข้นน้ำตาล

เริ่มต้น 30 กรัมต่อลิตรที่ระยะเวลาหมัก 3 ถึง 4 วัน เนื่องจากน้ำตาลที่มากกว่าเป็นตัวยับยั้งการเติบโตของเชื้อรา ส่วนความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้น 20 กรัมต่อลิตร ถึงแม้จะให้ความเข้มข้นเชื้อราที่ระยะเวลาหมัก 4 วัน ใกล้เคียงกับที่ความเข้มข้นน้ำตาล 30 กรัมต่อลิตร แต่ใช้เวลาปรับตัวนาน 2 ถึง 3 วัน ดังนั้น ความเข้มข้นน้ำตาลเริ่มต้นที่เหมาะสมคือ 30 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของเชื้อราสูงสุดเท่ากับ 7.75×10^7 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ที่ระยะเวลาหมัก 7 วัน เชื้อราใช้เวลาปรับตัวประมาณ 1 วัน การเติบโตแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลเกิดขึ้นที่ระยะเวลา 1 ถึง 4 วัน ความชันของเส้นกราฟสูงกว่าที่สภาวะอื่นๆ แสดงว่ามีอัตราการเติบโตของเชื้อราดีกว่าที่สภาวะอื่นๆ ดังรูปที่ 4.4



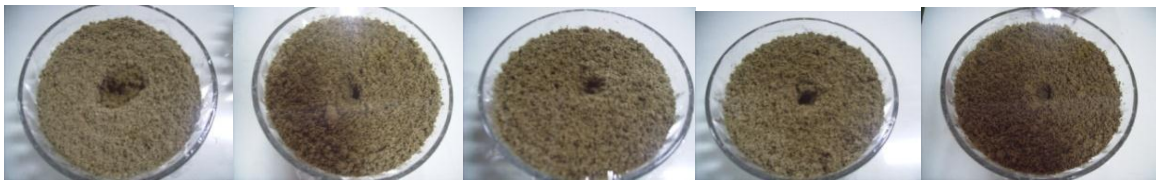
รูปที่ 4.4 ปริมาณจุลินทรีย์ที่ความเข้มข้นของน้ำตาลมะพร้าวในอาหารเหลว 10 20 30 และ 40 g/L

4.2.2 ลักษณะการเจริญเติบโตของเชื้อราในชามแก้วตลอดระยะเวลา 7 วัน

การหมักกากมันสำปะหลังในอาหารเหลวพีเอช 5 ด้วยเชื้อราไตรโคเดอร์มา รีสิอี RT-P1 ในชามแก้ว ซึ่งจะเรียกว่า หัวเชื้อสด (fresh starter) หรือ FS นอกจากการวิเคราะห์ในเรื่องของปริมาณความชื้นและปริมาณจุลินทรีย์ของหัวเชื้อสด ดังได้กล่าวมาแล้วนั้น ต่อไปจะพิจารณาลักษณะการเจริญเติบโตของเชื้อราในกระบวนการหมักหัวเชื้อสดในชามแก้วซึ่งสามารถที่จะบ่งบอกได้ว่าสภาวะใดที่เหมาะสมในการทำหัวเชื้อสดในชามแก้วมากที่สุดและการเก็บตัวอย่างเพื่อวัดความเข้มข้นของเชื้อราในแต่ละวัน รูปแบบการจัดวางหัวเชื้อสดในชามแก้วในห้องปรับอากาศที่อุณหภูมิ 26 องศาเซลเซียส และให้แสงสว่างจากหลอดไฟฟ้าตลอดระยะเวลา ดังรูปที่ 4.5

รูปที่ 4.5 รูปแบบการจัดวางหัวเชื้อสดในชามแก้วในห้องปรับอากาศที่อุณหภูมิ 26 องศาเซลเซียส

การเจริญเติบโตของหัวเชื้อในชามแก้วในอายุ 1 วัน ที่ปริมาตรอาหารเหลวต่างๆ ไม่สามารถเห็นการเจริญเติบโตได้จากตาเปล่า แต่จากการวัดความเข้มข้นของจุลินทรีย์ก็ยืนยันได้ว่าเชื้อรายังคงใช้เวลาปรับตัว ความเข้มข้นคงที่ใกล้เคียงกับค่าเริ่มต้น ดังรูปที่ 4.6



(ก) (ข) (ค) (ง) (จ)

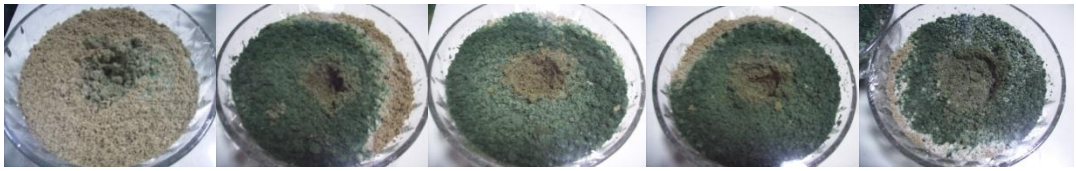
รูปที่ 4.6 หัวเชื้อสดในชามแก้วอายุ 1 วันที่ปริมาตรอาหารเหลว (ก) 160 มิลลิลิตร (ข) 180 มิลลิลิตร (ค) 200 มิลลิลิตร (ง) 220 มิลลิลิตร และ (จ) 240 มิลลิลิตร

การเจริญเติบโตของเชื้อราในชามแก้วอายุ 2 วันจะเห็นได้ว่าที่ปริมาตรอาหารเหลวเท่ากับและมากกว่า 180 มิลลิลิตร เชื้อรามีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว แต่ที่อาหารเหลวเท่าปริมาตร 160 มิลลิลิตร เชื้อราเติบโตน้อยมาก เนื่องจากอาหารเหลวน้อยในปริมาณกากมันสำปะหลังที่มาก ทำให้ความชื้นในกากมันสำปะหลังน้อยมากเกินไป จึงเป็นสภาวะที่ไม่เหมาะสม เชื้อราจึงเติบโตช้ากว่าที่ปริมาตรอาหารเหลวอื่นๆ ดังรูปที่ 4.7

(ก) (ข) (ค) (ง) (จ)

รูปที่ 4.7 หัวเชื้อสดในชามแก้วอายุ 2 วันที่ปริมาตรอาหารเหลว (ก) 160 มิลลิลิตร (ข) 180 มิลลิลิตร (ค) 200 มิลลิลิตร (ง) 220 มิลลิลิตร และ (จ) 240 มิลลิลิตร

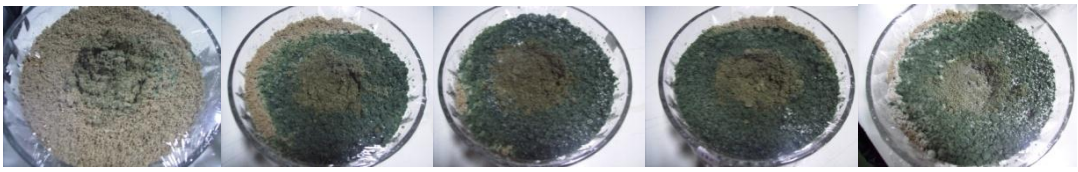
การเจริญเติบโตของเชื้อราในชามแก้วอายุ 3 วัน ของการหมักกากมันสำปะหลัง 200 กรัมด้วยอาหารเหลวปริมาตร 200 มิลลิลิตร จะเห็นได้ว่าเชื้อรามีการเจริญเติบโต พิจารณาจากสีเขียวเต็มชามแก้ว โดยที่ปริมาตรอาหารเหลวน้อยกว่า 200 มิลลิลิตร เชื้อราเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยสังเกตจากสีเขียวที่เกิดขึ้นเฉพาะตรงกลางชามเพียงเล็กน้อย ส่วนอาหารเหลวเท่ากับ 220 มิลลิลิตรและ 240 มิลลิลิตร เชื้อราที่เจริญเติบโตจะเป็นสีเขียวแต่ไม่เต็มชาม ดังรูปที่ 4.8



(ก) (ข) (ค) (ง) (จ)

รูปที่ 4.8 หัวเชื้อสดในชามแก้วอายุ 3 วันที่ปริมาตรอาหารเหลว (ก) 160 มิลลิลิตร (ข) 180 มิลลิลิตร (ค) 200 มิลลิลิตร (ง) 220 มิลลิลิตร และ (จ) 240 มิลลิลิตร

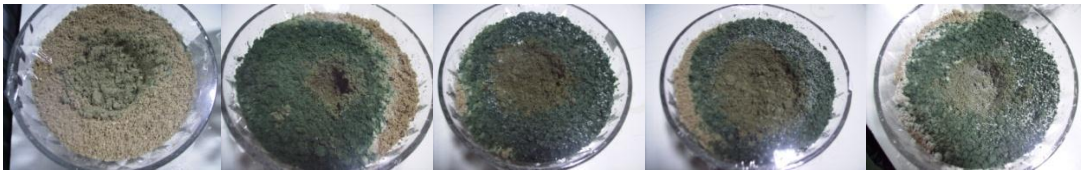
การเจริญเติบโตของเชื้อราในชามแก้ว อายุ 4 วัน ของการหมักกากมันสำปะหลังด้วยอาหารเหลวปริมาตร 200 มิลลิลิตรต่อกากมันสำปะหลัง 200 กรัม การเจริญเติบโตของเชื้อรายังคงความเขียวสดและกินบริเวณลึกลงไปในชามแก้ว โดยที่ปริมาตรอาหารเหลวที่น้อยกว่า 200 มิลลิลิตร เชื้อราเริ่มหยุดการเจริญเติบโตทำให้หัวเชื้อที่ได้เขียวไม่เต็มชามแก้ว ส่วนที่ปริมาตรอาหารเหลว 220 และ 240 มิลลิลิตร เชื้อราบริเวณผิวหน้าไม่สดเท่าที่ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ดังรูปที่ 4.9



(ก) (ข) (ค) (ง) (จ)

รูปที่ 4.9 หัวเชื้อสดในชามแก้วอายุ 4 วันที่ปริมาตรอาหารเหลว (ก) 160 มิลลิลิตร (ข) 180 มิลลิลิตร (ค) 200 มิลลิลิตร (ง) 220 มิลลิลิตร และ (จ) 240 มิลลิลิตร

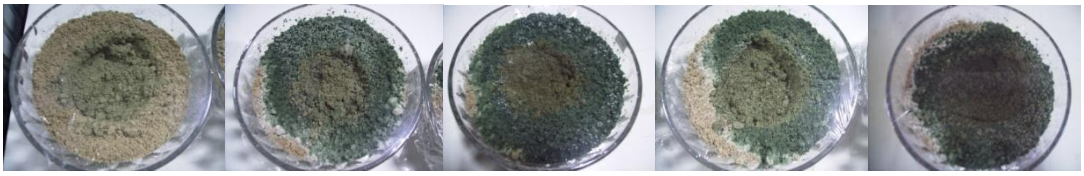
การเจริญเติบโตของเชื้อราในชามแก้วอายุ 5 วัน ที่ปริมาตรอาหารเหลว 220 และ 240 มิลลิลิตร เริ่มเป็นสีเขียวแก่ ขณะที่ปริมาตรอาหารเหลว 200 มิลลิลิตรยังคงเขียวสดเหมือนเดิม อาจจะมีส่วนที่เป็นของเชื้อราที่เพิ่งเกิดซึ่งมีสีขาวปริมาณน้อยกว่า เชื้อราที่มีสีขาวเป็นส่วนของเส้นใย ขณะที่สีเขียวคือเชื้อราส่วนที่เป็นสปอร์ สภาวะที่เหมาะสมจะก่อให้เกิดเชื้อราที่มีสีเขียว ไม่ต้องการสีขาว ดังรูปที่ 4.10



(ก) (ข) (ค) (ง) (จ)

รูปที่ 4.10 หัวเชื้อสดในชามแก้วอายุ 5 วันที่ปริมาตรอาหารเหลว (ก) 160 มิลลิลิตร (ข) 180 มิลลิลิตร (ค) 200 มิลลิลิตร (ง) 220 มิลลิลิตร และ (จ) 240 มิลลิลิตร

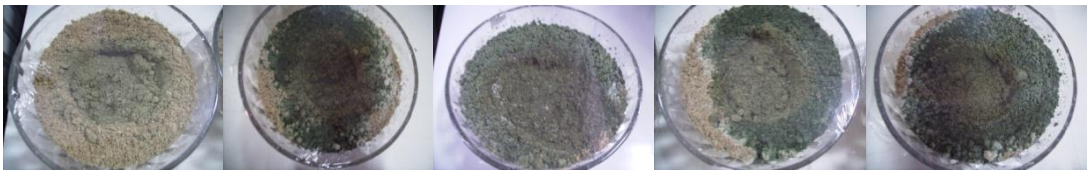
การเจริญเติบโตของเชื้อราในวันที่ 6 พบว่าที่ปริมาตรอาหารเหลวที่ 220 และ 240 มิลลิลิตร ความเข้มข้นของเชื้อราลดลงเรื่อยๆ เช่นเดียวกับที่ปริมาตรอาหารเหลวที่ 160 มิลลิลิตรและ 180 มิลลิลิตร โดยความเข้มข้นของเชื้อราที่ปริมาตรอาหารเหลวที่ 200 มิลลิลิตรมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นเชื้อรา สามารถเจริญเติบโตโดยใช้อาหารเหลวปริมาตร 200 มิลลิลิตรได้จนมีอายุ 7 วัน ดังรูปที่ 4.11



(ก) (ข) (ค) (ง) (จ)

รูปที่ 4.11 หัวเชื้อสดในชามแก้วอายุ 6 วันที่ปริมาตรอาหารเหลว (ก) 160 มิลลิลิตร (ข) 180 มิลลิลิตร (ค) 200 มิลลิลิตร (ง) 220 มิลลิลิตร และ (จ) 240 มิลลิลิตร

การเจริญเติบโตของเชื้อราในชามแก้วอายุ 7 วัน เป็นวันสุดท้ายที่ทำการทดลองในการหมักแข็งกากมันสำปะหลังหัวเชื้อสดในชามแก้วทำให้สามารถเลือกสภาวะที่เหมาะสมได้ คืออาหารเหลวปริมาตร 200 มิลลิลิตรต่อกากมันสำปะหลังคงที่ 200 กรัม ความเข้มข้นน้ำตาลมะพร้าวในอาหารเหลวเท่ากับ 30 กรัมต่อลิตร เมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าพบว่า กากมันสำปะหลังมีความเขียวสม่ำเสมอบริเวณตรงกลางชาม เมื่อเทียบกับที่อัตราส่วนอื่นๆ ดังรูปที่ 4.12



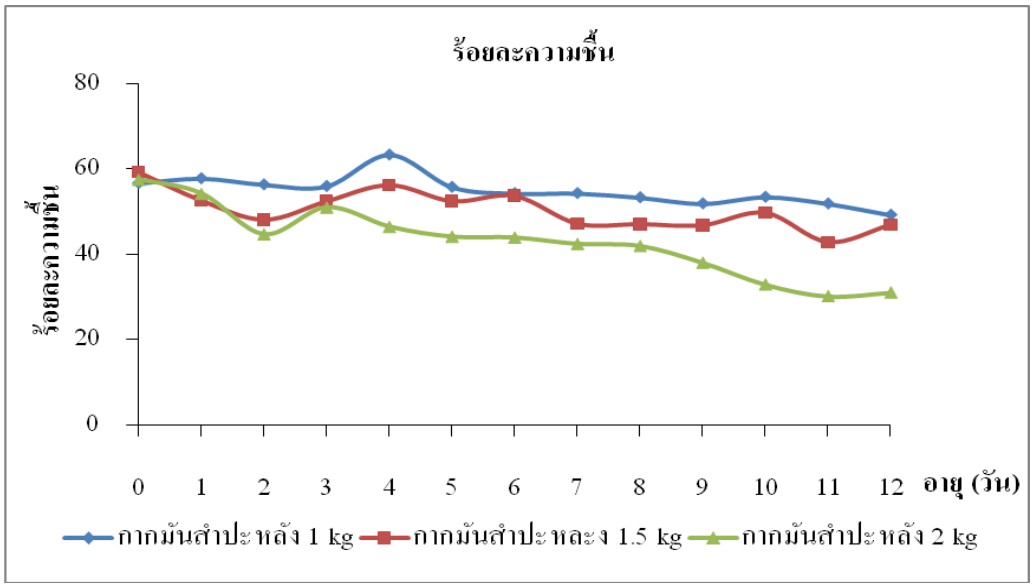
(ก) (ข) (ค) (ง) (จ)

รูปที่ 4.12 หัวเชื้อสดในชามแก้วอายุ 7 วันที่ปริมาตรอาหารเหลว (ก) 160 มิลลิลิตร (ข) 180 มิลลิลิตร (ค) 200 มิลลิลิตร (ง) 220 มิลลิลิตร และ (จ) 240 มิลลิลิตร

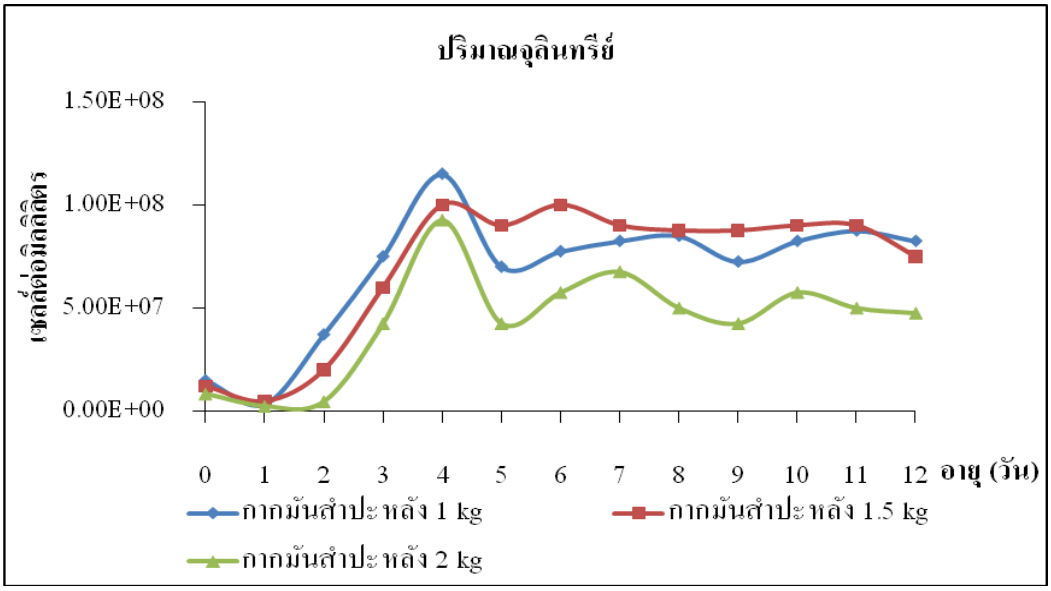
4.3 ผลการหมักกากมันสำปะหลังในระดับขยายขนาด 20 กิโลกรัมต่อการหมัก 1 ครั้ง

4.3.1 ผลการหาสภาวะของการผลิตครูดเซลลูเลส เอนไซม์ระดับขยายขนาด

จากสภาวะที่เหมาะสมของการผลิตหัวเชื้อสดในชามแก้ว ขั้นตอนต่อไปคือการหาสภาวะของการผลิตครูดเซลลูเลส เอนไซม์ระดับขยายขนาดของกระบวนการหมักแข็งกากมันสำปะหลังในถังหมักพลาสติกขาวขุ่นขนาดความจุ 45 ลิตร ใช้หัวเชื้อสดในชามแก้วคงที่เท่ากับ 200 กรัม โดยแปรผันปริมาณกากมันสำปะหลังเท่ากับ 1.0, 1.5 และ 2.0 กิโลกรัมในอาหารเหลวสูตร LM พีเอช 5 ปริมาตร 1.0, 1.5 และ 2.0 ลิตร ตามลำดับ ระยะเวลาที่ใช้หมักเท่ากับ 12 วัน ถังหมักพลาสติกขาวขุ่นขนาด 45 ลิตร พื้นที่หน้าตัดประมาณ 1400 ตารางเซนติเมตร เก็บตัวอย่างวัดเปอร์เซ็นต์ความชื้น เซลลูเลส แอคติวิตี้และความเข้มข้นจุลินทรีย์ทุกวัน ทำการทดลองจำนวน 2 ซ้ำ พบว่า หัวเชื้อสดในชามแก้ว 200 กรัมเหมาะสมกับกากมันสำปะหลัง 1 กิโลกรัมในอาหารเหลวปริมาตร 1 ลิตร ความชื้นเริ่มต้นที่สภาวะนี้เท่ากับร้อยละ 56 โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.13 เชื้อราใช้เวลาปรับตัว 1 วัน หลังจากนั้นมีการเจริญเติบโตแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ช่วงเวลานี้เชื้อราคายน้ำออกมาทำให้ความชื้นของกากมันสำปะหลังเพิ่มสูงขึ้น ความเข้มข้นของเชื้อราสูงสุดเท่ากับ 1.15×10^{8} เซลล์ต่อมิลลิลิตรที่อายุ 4 วัน ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.13 โปรไฟล์ความชื้นของการหมักแข็งกากมันสำปะหลังปริมาณ 1, 1.5 และ 2.0 กิโลกรัม ในอาหารเหลว 1, 1.5 และ 2 ลิตร

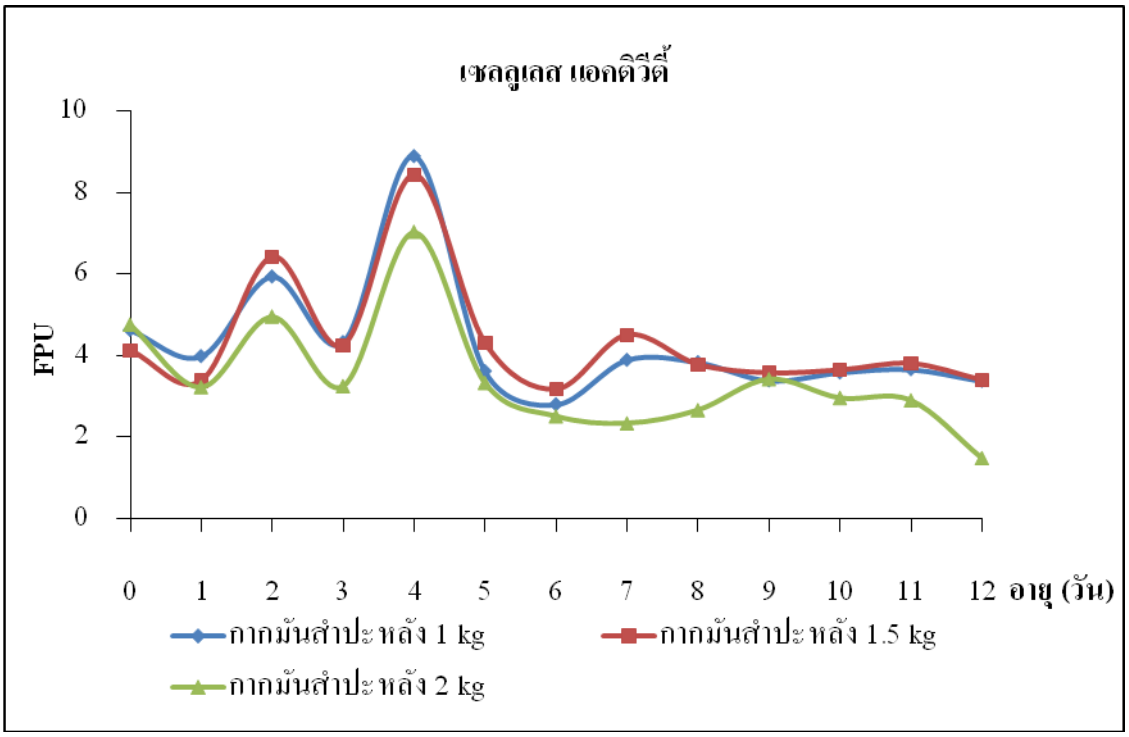


รูปที่ 4.14 โปรไฟล์ความเข้มข้นเชื้อราของการหมักแข็งกากมันสำปะหลังที่ 1, 1.5 และ 2.0 กิโลกรัม ในอาหารเหลว 1, 1.5 และ 2 ลิตร

เมื่ออายุได้ 5 วันความเข้มข้นของเชื้อราลดลงอย่างมาก อาจเนื่องจากปริมาณอาหารมีจำกัดและเกิดสารผลิตภัณฑ์ที่ไปยับยั้งการเติบโตของเชื้อราขึ้น อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นของเชื้อราที่ลดลงมีค่าเฉลี่ยค่อนข้างคงที่ตลอดระยะเวลาหมัก 12 วัน ดังรูปที่ 4.14

ในทำนองเดียวกัน ค่าความสามารถในการเกิดเอนไซม์เซลลูเลส หรือเซลลูเลส แอคทิวิตี (cellulase activity) ของเชื้อราไตรโคเดอร์มา รีสิอี RT-P1 พบว่า ที่อัตราส่วนกากมันสำปะหลังต่ออาหารเหลว (น้ำตาลเริ่มต้น 30 กรัมต่อลิตร) ต่อหัวเชื้อสดในขามแก้ว เท่ากับ 1:1:0.2 ค่าเซลลูเลส แอคทิวิตีมีค่าสูงสุดที่ระยะเวลาหมัก 4 วัน หลังจากนั้นจะลดลงอย่างมากและมีค่าคงที่ประมาณค่าเริ่มต้น ดังนั้น การผลิตครูดเซลลูเลส เอนไซม์จากการหมักแข็งกากมันสำปะหลังในอาหารเหลว พีเอช 5 ที่อุณหภูมิ 26 ^{o}C จึงควรใช้เวลาเพาะเลี้ยงเชื้อ 4 วัน เนื่องจากความชื้นในกากมันสำปะหลังลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งมีผลต่อการเติบโตและเซลลูเลส แอคทิวิตีของเชื้อรา

นอกจากนี้อุณหภูมิที่ใช้บ่มเชื้อราก็มีผลอย่างมาก ซึ่งได้จากการสังเกตอย่างชัดเจนจากการทดลอง พบว่า ถ้าอุณหภูมิไม่มีการควบคุมให้คงที่ อย่างเช่น ถ้าอากาศร้อนอบอ้าว และความชื้นในอากาศมากจนเกินไปก็จะก่อให้เกิดน้ำหยดบริเวณขอบถังหมัก และหยดลงที่ผิวด้านบนของกากมันสำปะหลังในถังหมัก ซึ่งตอนแรกมีสีเขียวสดเข้ม เมื่อถูกหยดน้ำเชื้อราบริเวณดังกล่าวจะอ่อนแอลง เกิดเส้นใยมากขึ้น ทำให้มีสีขาว ทำให้ความเข้มข้นของเชื้อราลดลง



รูปที่ 4.15 โปรไฟล์เซลลูเลส แอคทิวีตี ของการหมักแข็งกากมันสำปะหลังที่ 1, 1.5 และ 2.0 กิโลกรัม ในอาหารเหลว 1, 1.5 และ 2 ลิตร

ถังพลาสติกขุ่นขนาดความจุ 45 ลิตรเจาะรูที่ฝาถัง จึงเหมาะสมกับปริมาณกากมันสำปะหลัง 1 กิโลกรัม ในอาหารเหลวพีเอช 5 ปริมาตร 1 ลิตร ใช้หัวเชื้อสดในขามแก้ว 200 กรัม อุณหภูมิคงที่ 26 ^{o}C เพราะที่ปริมาณนี้ทำให้ความสูงของการหมักแข็งเหมาะสมมีค่าประมาณ 4.5 เซนติเมตร ทำให้อากาศสามารถแพร่เข้าไปได้ง่ายกว่าการใช้กากมันสำปะหลังปริมาณ 1.5 และ 2.0 กิโลกรัม ซึ่งมีความหนาหรือความสูงของสับสเตรทประมาณ 5.0 และ 6.0 เซนติเมตร จึงเป็นความหนาที่ไม่เหมาะสมสำหรับถังหมักพลาสติกความจุขนาด 45 ลิตร ปริมาณกากมันสำปะหลังจึงมีผลต่อการหมักแข็งในถังหมักดังกล่าว เชื้อราไม่สามารถเติบโตได้ดี ถ้าหนามากและอัดแน่น เนื่องจากเชื้อราต้องการอากาศในการเติบโต

การหมักกากมันสำปะหลังที่ปริมาณ 1.5 และ 2.0 กิโลกรัมในถังหมักดังกล่าวจึงไม่เหมาะสม สาเหตุเนื่องมาจากความหนาของกากมันที่มีการอัดตัวไปกับความชื้นที่เกิดขึ้นมากซึ่งในสภาวะที่เชื้อราต้องการที่จะเจริญเติบโตเมื่อค่าความชื้นมากและการอัดแน่นของอาหารทำให้เชื้อราไม่สามารถที่จะย่อยอาหารได้ทำให้จุดที่เชื้อราต้องมีการเจริญเติบโตอาจจะต้องหยุดการเจริญเติบโต เนื่องจากสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต

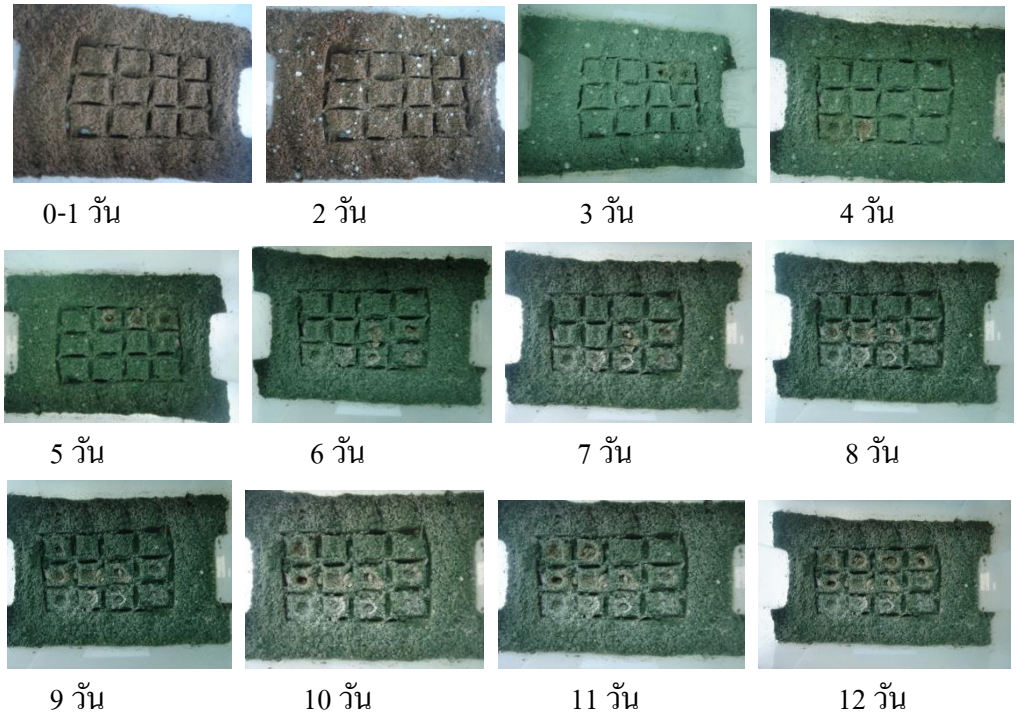
4.3.2 ลักษณะการเจริญเติบโตของเชื้อราในถังหมักพลาสติกขาวขุ่นความจุขนาด 45 ลิตร

การเก็บตัวอย่างและสังเกตลักษณะการเติบโตของเชื้อราของการหมักแข็งที่อัตราส่วนกากมันสำปะหลังต่ออาหารเหลว พีเอช 5 เท่ากับ 1:1 (กิโลกรัม:ลิตร) ที่อุณหภูมิ 26 ^{o}C ระยะเวลาใช้หมัก 12 วัน

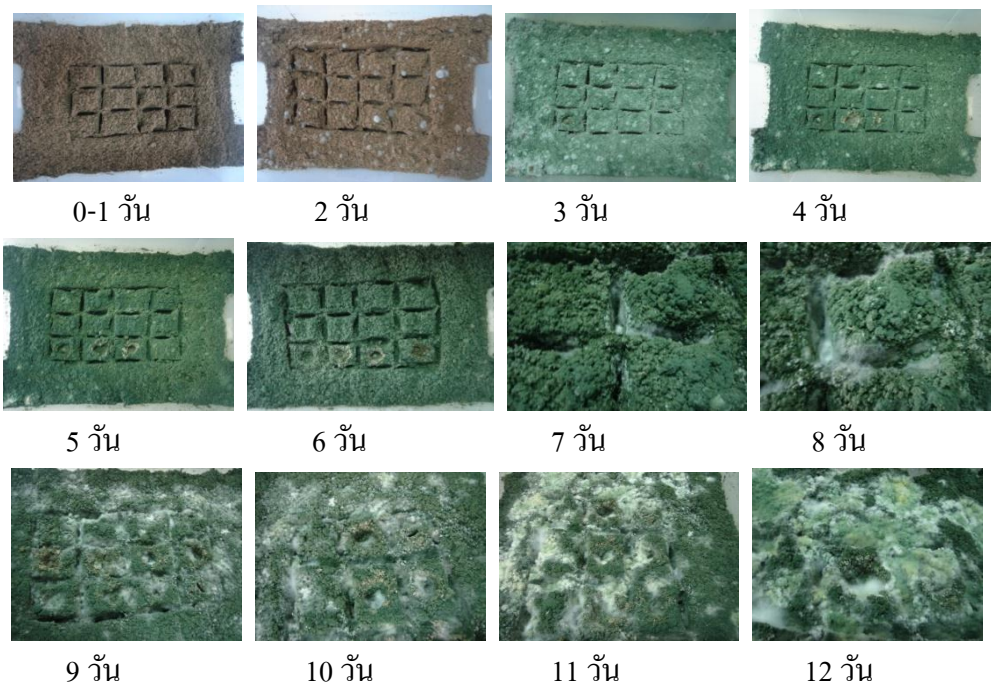
พบว่า ลักษณะการเกิดของเชื้อราภายในถังหมักคล้ายกันกับลักษณะที่เกิดในชามแก้ว เราสามารถทำการหยุดกระบวนการหมักได้ทันทีที่อายุ 6-7 วัน ซึ่งเชื้อราเกิดสปอร์เต็มที่ ให้ค่าเซลลูเลส แอคติวีตี้เพิ่มขึ้น

การเจริญเติบโตของเชื้อราในถังหมัก 1 กิโลกรัม ลักษณะการเกิดของเชื้อราภายในถังหมักจะเห็นได้ว่าเราสามารถทำการหยุดกระบวนการได้ทันทีที่อายุได้อายุ 5-6 วัน เนื่องจากที่ระยะเวลาหมัก 7 วัน ภายในถังหมักเกิดเส้นใยฟูสีขาวคล้ายสำลีขึ้นมาปกบริเวณผิวหน้าบางจุดที่เป็นช่องว่างตามร่องซึ่งจะทำให้เชื้อราไม่สามารถเจริญเติบโตได้ต่อไป ณ ตรงบริเวณที่เกิดเช่นนี้เปรียบเสมือนตัวที่ปิดกั้นการเจริญเติบโตของเชื้อรา ดังรูปที่ 4.16

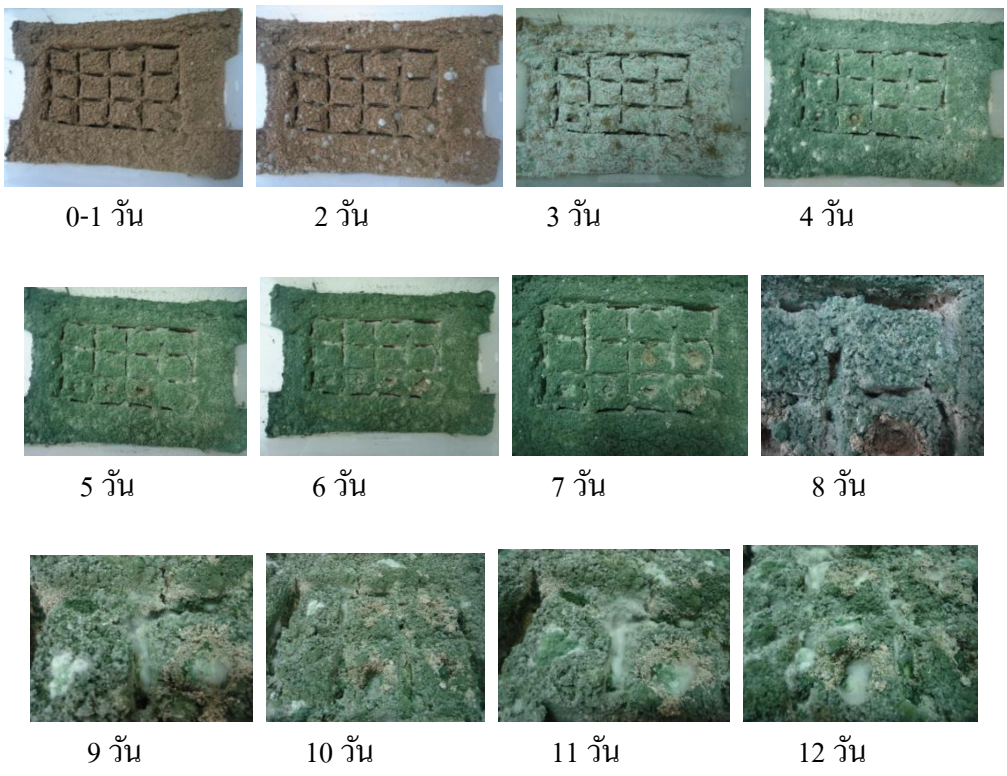
ในถังหมักกากมันสำปะหลังปริมาณ 1.5 และ 2.0 กิโลกรัม พบว่า การเจริญเติบโตของเชื้อราภายในถังหมักจะเกิดเป็นเส้นใยสีขาวคล้ายสำลีซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นเมื่อเกิดเส้นใยสีขาวลักษณะคล้ายสำลีขึ้นต้องรีบทำการหยุดกระบวนการเจริญเติบโตเพราะเส้นใยสีขาวนี้จะไปปกคลุมผิวหน้าไม่ให้เชื้อราเติบโตต่อไปได้ ความชื้นจะเพิ่มมากขึ้นเกิดการเน่าหรือการปนเปื้อนขึ้นได้ ดังรูปที่ 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ



รูปที่ 4.16 การเก็บตัวอย่างและลักษณะของเชื้อราในถังหมักกากมันสำปะหลัง 1 กิโลกรัมด้วยอาหารเหลว พีเอช 5 และหัวเชื้อ 200 กรัม



รูปที่ 4.17 การเก็บตัวอย่างและลักษณะของเชื้อราในถังหมักกากมันสำปะหลัง 1.5 กิโลกรัมด้วยอาหารเหลว พีเอช 5 และหัวเชื้อ 200 กรัม



รูปที่ 4.18 การเก็บตัวอย่างและลักษณะของเชื้อราในถังหมักกากมันสำปะหลัง 2.0 กิโลกรัมด้วยอาหารเหลว พีเอช 5 และหัวเชื้อ 200 กรัม

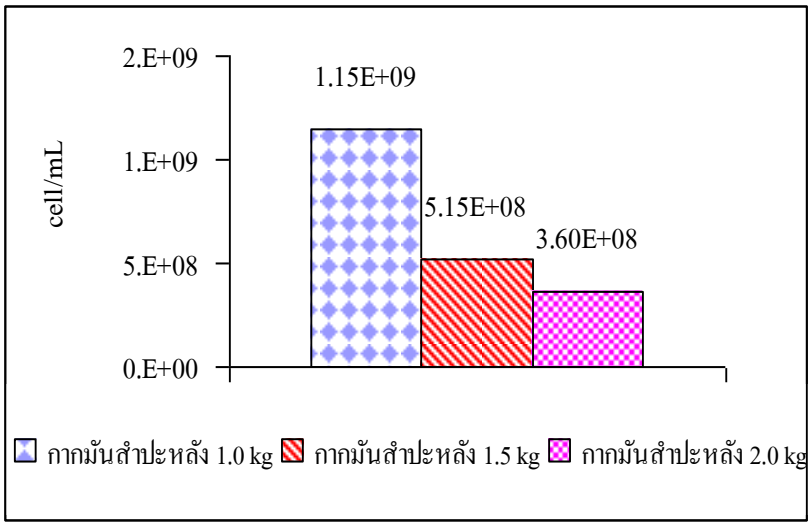
ครูดเซลลูเลสที่ได้จากกระบวนการหมักแข็งเมื่อมีการเจริญเติบโตเต็มที่หรือได้จากการเจริญเติบในสภาวะที่เหมาะสมแล้วนั้นจะเห็นได้ว่ายังคงหลงเหลือความชื้นอยู่ เมื่อเราทำการหยุดกระบวนการเจริญเติบโตของเชื้อราด้วยการอบแห้งให้ความชื้นลดลงไม่มากกว่าร้อยละ 13 โดยน้ำหนัก ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของผงแห้ง ดังนั้น เพื่อให้สะดวกในการนำไปใช้จึงได้นำครูดเซลลูเลส เอนไซม์สดที่ผ่านการหมักแข็งไปผ่านกระบวนการอบแห้งที่สภาวะเหมาะสมเพื่อให้ได้เป็นผลิตภัณฑ์ครูดเซลลูเลสผง พบว่า ครูดเซลลูเลสผง ที่ได้จากการหมักกากมันสำปะหลังปริมาณ 1 กิโลกรัม ด้วยอาหารเหลว พีเอช 5 ปริมาตร 1 ลิตร และใช้หัวเชื้อสดในชามแก้ว 200 กรัม มีค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นเชื้อราและเซลลูเลสแอคทิวิตี สูงที่สุดคือ 1.15×10^9 เซลล์ต่อมิลลิลิตร และ 7.88 FPU ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 รูปที่ 4.19 และ 4.20 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 ความเข้มข้นเชื้อราเฉลี่ยของครูดเอนไซม์ผงแห้งในกระบวนการหมักแข็งที่กากมันสำปะหลังปริมาณ 1, 1.5 และ 2 กิโลกรัมในอาหารเหลว 1, 1.5 และ 2 ลิตร ด้วยหัวเชื้อสดคงที่ 200 กรัม

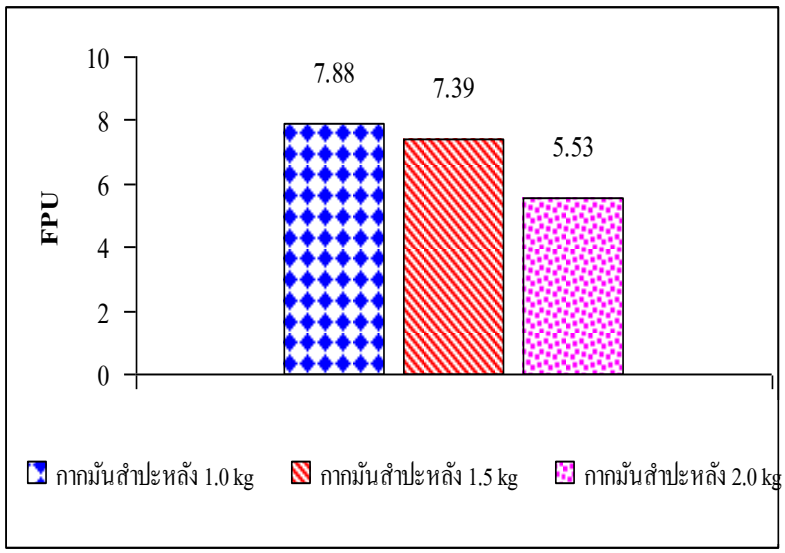
ความเข้มข้นจุลินทรีย์เฉลี่ย (cell/mL)	
1 กิโลกรัม	1.15×10^9
1.5 กิโลกรัม	5.15×10^8
2 กิโลกรัม	3.6×10^8

ตารางที่ 4.3 เซลลูเลส แอคทิวิตีของครูดเอนไซม์ผงแห้งในกระบวนการหมักแข็งที่กากมันสำปะหลังปริมาณ 1, 1.5 และ 2 กิโลกรัมในอาหารเหลว 1, 1.5 และ 2 ลิตร ด้วยหัวเชื้อสดคงที่ 200 กรัม

เซลลูเลส แอคติวีตี้ (FPU)	
1 กิโลกรัม	7.88
1.5 กิโลกรัม	7.39
2 กิโลกรัม	5.53



รูปที่ 4.19 ความเข้มข้นเชื้อราเฉลี่ยของครูดเอนไซม์ผงแห้งในกระบวนการหมักแข็งที่กากมันสำปะหลังปริมาณ 1, 1.5 และ 2 กิโลกรัมในอาหารเหลว 1, 1.5 และ 2 ลิตร ด้วยหัวเชื้อสดคงที่ 200 กรัม



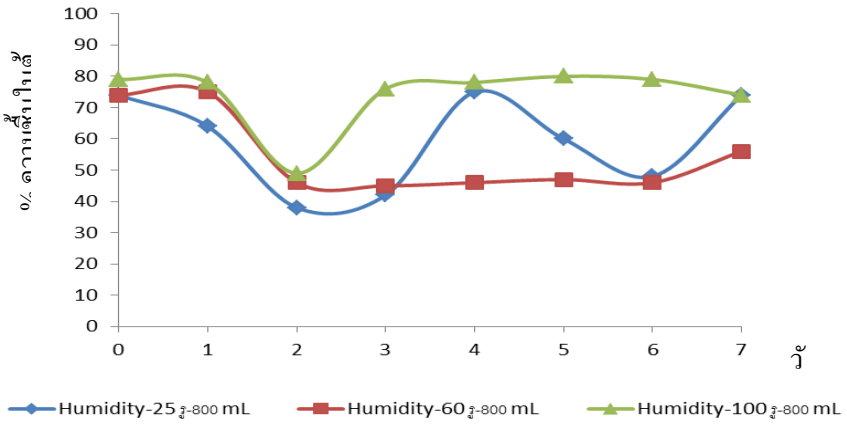
รูปที่ 4.20 เซลลูเลส แอคทิวิตีของครูดเอนไซม์ผงแห้งในกระบวนการหมักแข็งที่กากมันสำปะหลังปริมาณ 1, 1.5 และ 2 กิโลกรัมในอาหารเหลว 1, 1.5 และ 2 ลิตร ด้วยหัวเชื้อสดคงที่ 200 กรัม

ความเข้มข้นของเชื้อราและเอนไซม์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพาะเลี้ยงในระดับขยายขนาดโดยใช้ปริมาณหัวเชื้อจากการหมักแข็งกากมันสำปะหลัง เนื่องจากเชื้อราได้ปรับตัวกับกากมันสำปะหลังในขั้นตอนการผลิตหัวเชื้อแล้ว การเติบโตของเชื้อราต้องการอากาศในการถ่ายเทและแสงสว่างที่เหมาะสม ความชื้นมากเกินไปทำให้การถ่ายโอนอากาศไม่ดีและกากมันสำปะหลังรวมตัวกันอย่างหนาแน่นเป็นสาเหตุของเกิดเส้นใยมากขึ้น ทำให้อากาศแทรกเข้าไปได้น้อยลง ปริมาณของเชื้อรา และเซลลูเลสแอคทิวิตี จึงมีค่าลดลง

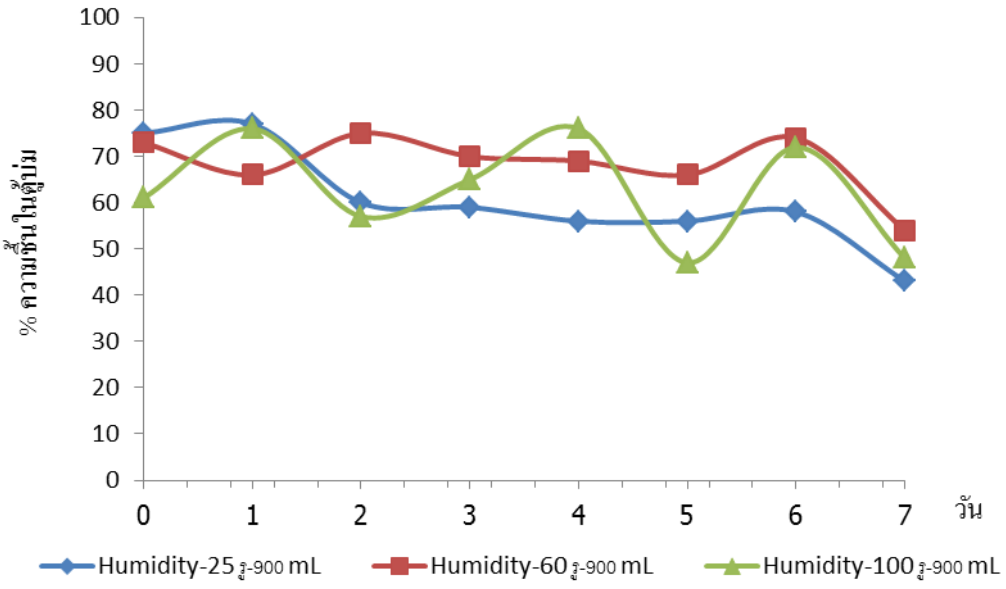
4.4 ผลการผลิตครูดเซลลูเลส เอนไซม์ในระดับขยายขนาด 5 กิโลกรัมต่อการบ่ม 1 ครั้ง

ผลการทดลองหาสภาวะของการหมักแข็งในระดับห้องปฏิบัติการ พบว่า ที่สภาวะเหมาะสม อัตราส่วนกากมันสำปะหลังต่ออาหารเหลวต่อหัวเชื้อสด เท่ากับ 1:1:0.2 โดยใช้ถังหมักพลาสติกขาวขุ่น ความจุขนาด 45 ลิตร ความสูงของชั้นสับสเตรทเท่ากับ 4.5 เซ็นติเมตร ปิดด้วยฝาที่เจาะรู วางไว้ในห้องปรับอากาศที่อุณหภูมิ 26 ^{o}C เปิดไฟฟ้าให้แสงสว่างตลอดเวลา เมื่อนำสภาวะดังกล่าวมาใช้ในการหมักแข็งกากมันสำปะหลังในตู้บ่มเชื้อต้นแบบที่ควบคุมอุณหภูมิ 24 $\pm$ 2 ^{o}C ความจุของตู้บ่มต้นแบบเท่ากับ 600 ลิตร จากการศึกษาเบื้องต้น พบว่า ปริมาตรอาหารเหลวที่อัตราส่วนดังกล่าวน้อยเกินไป ทำให้ความชื้นของกากมันสำปะหลังไม่ได้ตามต้องการ ที่แต่ละชั้นจึงต้องวางกล่องพลาสติกความจุขนาด 2 ลิตรใส่น้ำสะอาดปริมาตร 1 ลิตรเพื่อเพิ่มความชื้นภายในตู้บ่มเชื้อต้นแบบไม่ให้ภายในตู้แห้งมากเกินไป เนื่องจากตู้บ่มต้นแบบมี 4 ชั้น การหมักกากมันสำปะหลังในตู้บ่มต้นแบบจึงต้องใช้ถังหมักพลาสติกใส ขนาด 10 ลิตร จำนวน 8 ใบ โดยวางถังหมัก 2 ใบที่แต่ละชั้นของตู้บ่ม และบรรจุกากมันสำปะหลังปริมาณ 625 กรัมลงในถังหมักแต่ละใบ จึงจะได้กำลังการผลิต 5 กิโลกรัมต่อครั้ง

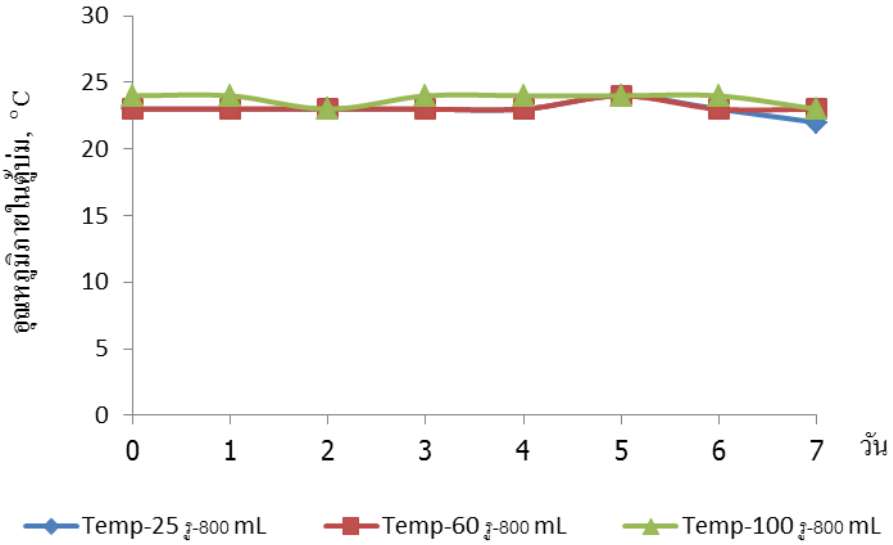
ผลการทดลองที่ได้จากการหมักแข็งในตู้บ่มต้นแบบที่อุณหภูมิ 24 $\pm$ 2 ^{o}C เมื่อทำการหมักแข็งกากมันสำปะหลังปริมาณ 625 กรัม ในถังหมักขนาดความจุ 10 ลิตร ที่มีฝาปิดเจาะรูจำนวน 25, 60 และ 100 รู โดยใช้อาหารเหลวปริมาตร 800 และ 900 มิลลิลิตร ความเข้มข้นของเชื้อราเริ่มต้นประมาณ 10^{6} เซลล์ต่อมิลลิลิตร ผลจากการทดลองพบว่า การหมักแข็งกากมันสำปะหลังปริมาณ 625 กรัม ด้วยอาหารเหลวปริมาตร 800 มิลลิลิตร ดีกว่าเมื่อใช้ปริมาตรอาหารเหลวที่ 900 มิลลิลิตร แสดงว่าที่ปริมาตรอาหารเหลว 800 มิลลิลิตรเป็นสภาวะที่มีความชื้นความเหมาะสม จึงทำให้โปรไฟล์ความชื้นในตู้บ่มที่วัดได้มีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อเทียบกับที่สภาวะอื่นๆ ยกเว้นในวันที่สองของการหมักที่ความชื้นในตู้บ่มลดลง หลังจากนั้นมีค่าค่อนข้างคงที่มีค่าเฉลี่ยประมาณ 77 % โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.21 ถึง 4.22 ส่วนอุณหภูมิในตู้บ่มมีค่าค่อนข้างคงที่ประมาณ 24 ^{o}C ดังรูปที่ 4.23 และ 4.24 ตามลำดับ



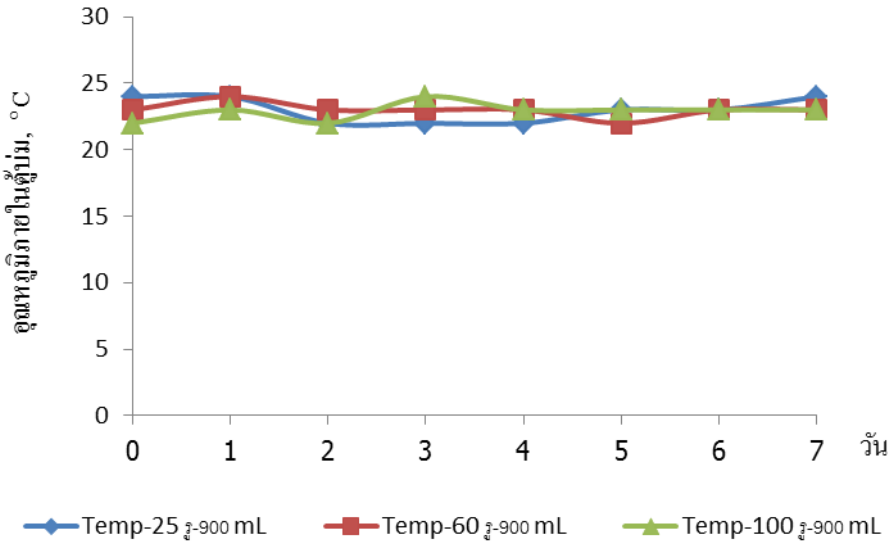
รูปที่ 4.21 โปรไฟล์ความชื้นในตู้บ่มต้นแบบของการหมักแข็งกากมันสำปะหลัง 625 กรัมด้วยอาหารเหลว 800 มิลลิลิตร ที่ปิดถังหมักด้วยฝาเจาะรูจำนวน 25, 60 และ 100 รู



รูปที่ 4.22 โปรไฟล์ความชื้นในตู้บ่มต้นแบบของการหมักแข็งกากมันสำปะหลัง 625 กรัมด้วยอาหารเหลว 900 มิลลิลิตร ที่ปิดถังหมักด้วยฝาเจาะรูจำนวน 25, 60 และ 100 รู



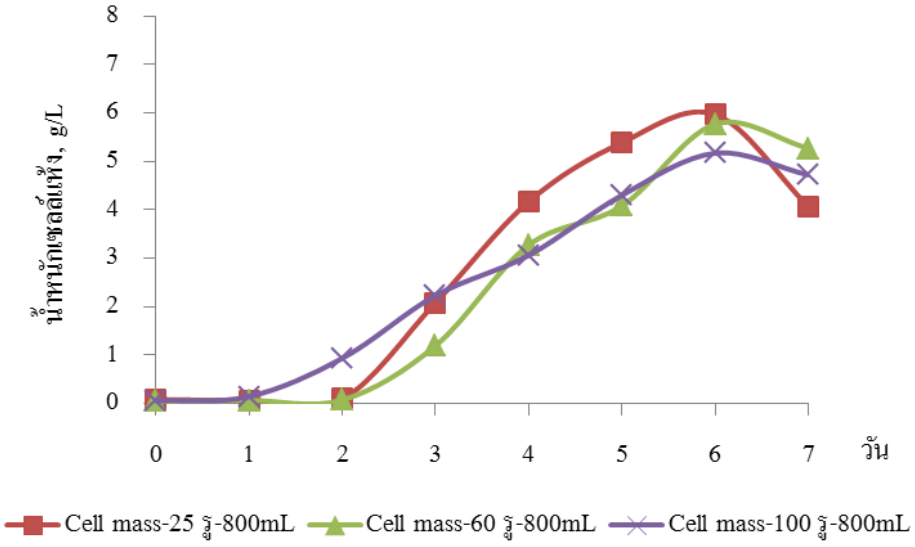
รูปที่ 4.23 โปรไฟล์อุณหภูมิในตู้บ่มต้นแบบของการหมักแข็งกากมันสำปะหลัง 625 กรัมด้วยอาหารเหลว 800 มิลลิลิตร ที่ปิดถังหมักด้วยฝาเจาะรูจำนวน 25, 60 และ 100 รู



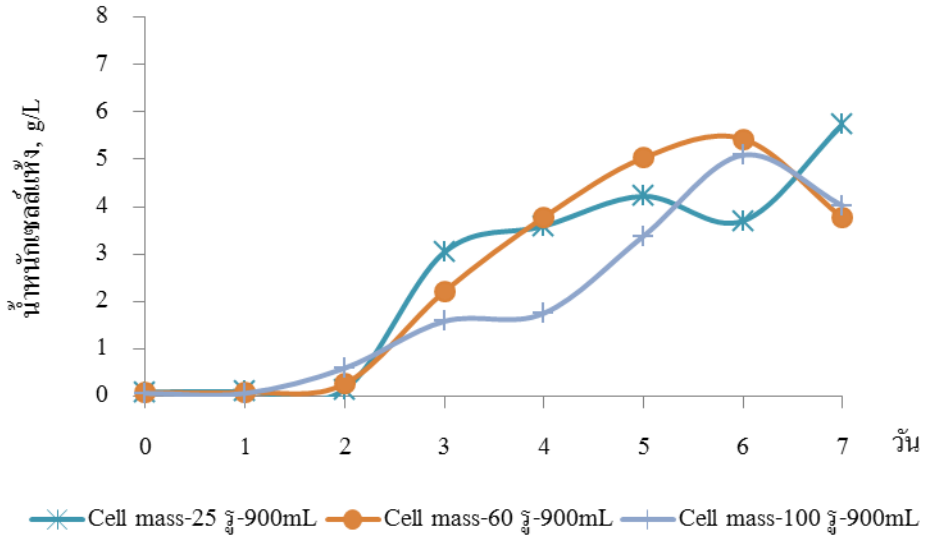
รูปที่ 4.24 โปรไฟล์อุณหภูมิในตู้บ่มต้นแบบของการหมักแข็งกากมันสำปะหลัง 625 กรัมด้วยอาหารเหลว 900 มิลลิลิตร ที่ปิดถังหมักด้วยฝาเจาะรูจำนวน 25, 60 และ 100 รู

นอกจากนี้ ยังพบอีกว่าการหมักในถังหมักที่เจาะรูระบายอากาศที่ฝาถังจำนวน 100 รู มีความเหมาะสมที่สุด เพราะเชื้อราได้รับอากาศมากกว่า จึงทำให้โปรไฟล์ของน้ำหนักเซลล์แห้งในช่วงวันแรกของการหมักถึงสามวันมีความชันสูงกว่า ซึ่งหมายถึงอัตราการเติบโตมากกว่าถังหมักที่เจาะรูจำนวน 25 และ 60 รู ที่ปริมาตรอาหารเหลว 800 มิลลิลิตรเท่ากัน อย่างไรก็ตาม ที่ปริมาตรอาหารเหลว 900 มิลลิลิตร อัตราการเติบโตจะต่ำกว่าในถังหมักทุกถังเมื่อเทียบกับอาหารเหลวปริมาตร 800 มิลลิลิตร นั่นคือ อัตราการเติบโตสูงที่สุดของเชื้อราไตรโคเดอร์มา รีสิอี RT-P1 ที่ปริมาตรอาหารเหลว 800 มิลลิลิตรในถังหมักที่ใช้ฝาปิดเจาะรูระบายอากาศจำนวน 100 รู น้ำหนักเซลล์แห้งที่ได้เท่ากับ 5.17 กรัมต่อลิตรที่ระยะเวลาหมัก 6 วัน ความชื้นประมาณ 74 % โดยน้ำหนัก และอุณหภูมิเฉลี่ย 24 $^{\circ}$C ดังรูปที่ 4.25 และ 4.26 ตามลำดับ

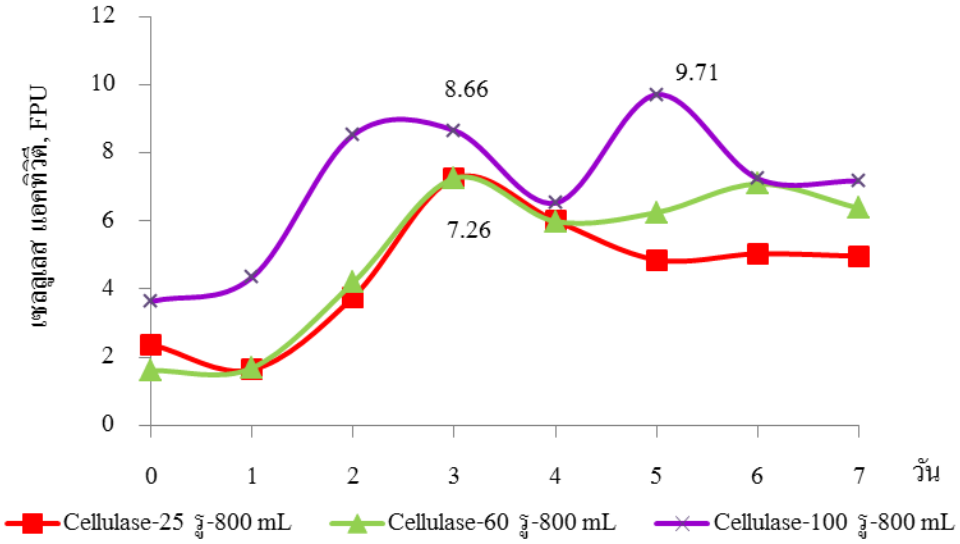
โปรไฟล์ของเซลลูเลส แอคทิวิตี ของการหมักกากมันสำปะหลังในตู้บ่มต้นแบบ ครั้งละ 5 กิโลกรัม ในถังหมักพลาสติกขนาดความจุ 10 ลิตร จำนวน 8 ถัง ปริมาณกากมันสำปะหลังคงที่เท่ากับ 625 กรัมต่อถัง เชื้อราเริ่มต้นคงที่ประมาณ 10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร โดยแปรผันปริมาตรอาหารเหลวเท่ากับ 800, 900 มิลลิลิตร และรูระบายอากาศที่ฝาถังหมักเท่ากับ 25, 60 และ 100 รู ดังรูปที่ 4.27 และ 4.28 พบว่า ค่าเซลลูเลส แอคทิวิตีเฉลี่ยที่ปริมาตรอาหารเหลว 800 มิลลิลิตร ใช้ฝาถังที่เจาะรู 100 รู มีค่าสูงที่สุดประมาณ 9.71 FPU ที่ระยะเวลา 5 วัน



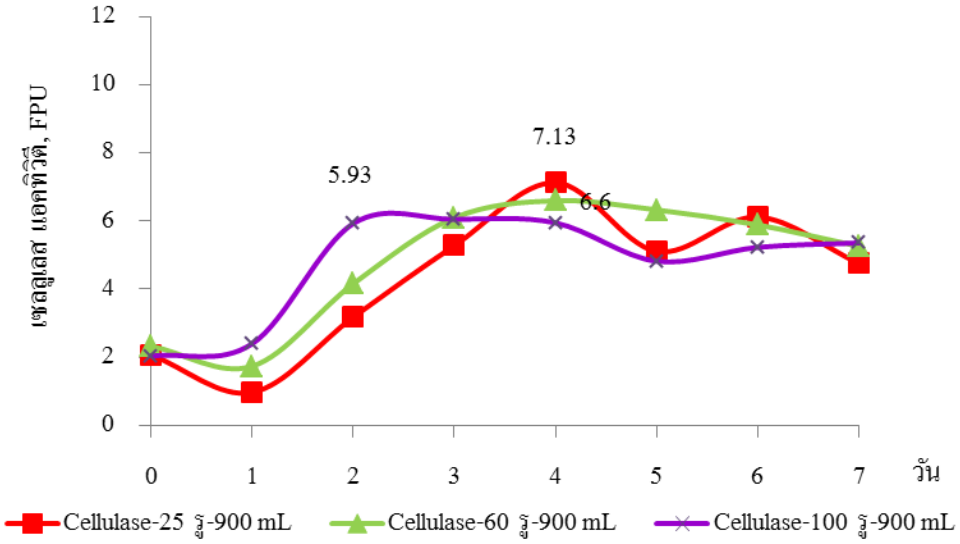
รูปที่ 4.25 โปรไฟล์น้ำหนักเซลล์แห้งของเชื้อราไตรโคเดอร์มา รีสิอี RT-P1 ของการหมักแข็งกากมันสำปะหลัง 625 กรัมด้วยอาหารเหลว 800 มิลลิลิตร ในตู้บ่มต้นแบบที่ปิดถังหมักด้วยฝาเจาะรู จำนวน 25, 60 และ 100 รู



รูปที่ 4.26 โปรไฟล์น้ำหนักเซลล์แห้งของเชื้อราไตรโคเดอร์มา รีสิอี RT-P1 ของการหมักแข็งกากมันสำปะหลัง 625 กรัมด้วยอาหารเหลว 900 มิลลิลิตร ในตู้บ่มต้นแบบที่ปิดถังหมักด้วยฝาเจาะรู จำนวน 25, 60 และ 100 รู



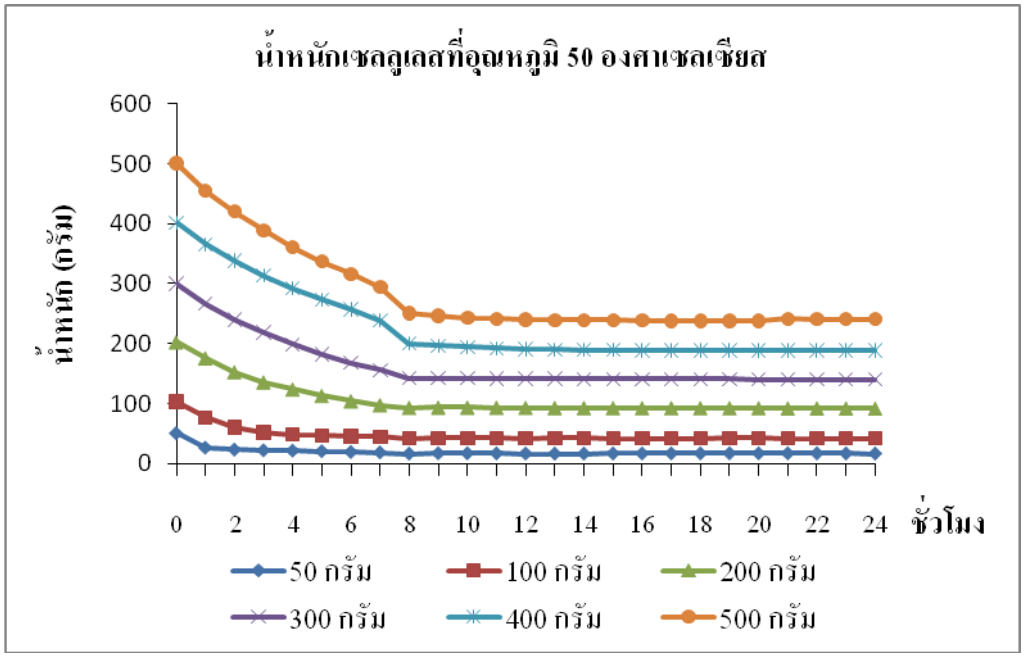
รูปที่ 4.27 โปรไฟล์ของเซลลูเลส แอคทิวิตี ของการหมักแข็งกากมันสำปะหลัง 625 กรัมด้วยอาหารเหลว 800 มิลลิลิตร ในตู้บ่มต้นแบบที่ปิดถังหมักด้วยฝาเจาะรูจำนวน 25, 60 และ 100 รู



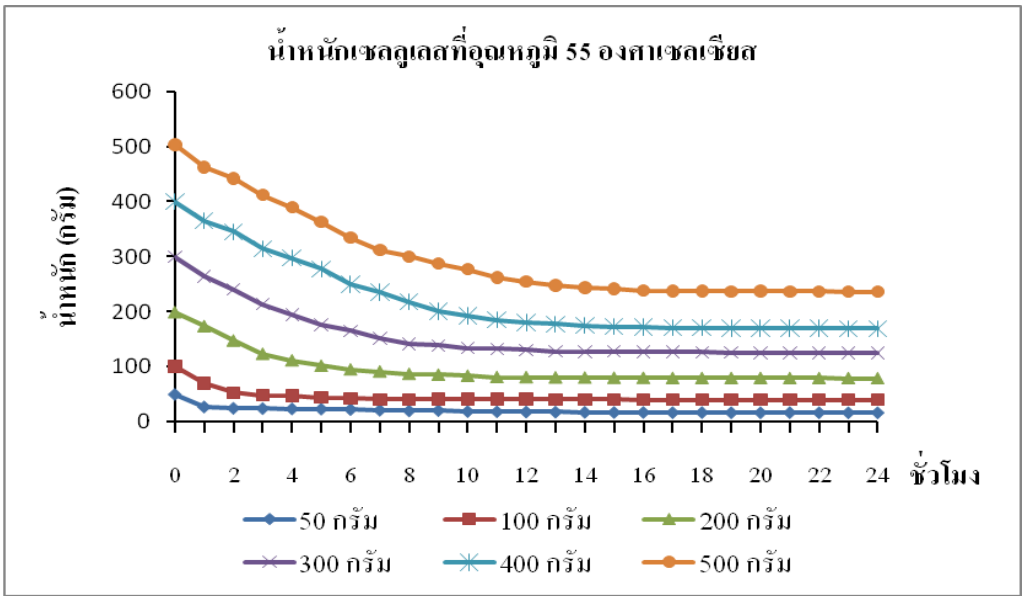
รูปที่ 4.28 โปรไฟล์ของเซลลูเลส แอคทิวิตี ของการหมักแข็งกากมันสำปะหลัง 625 กรัมด้วยอาหารเหลว 900 มิลลิลิตร ในตู้บ่มต้นแบบที่ปิดถังหมักด้วยฝาเจาะรูจำนวน 25, 60 และ 100 รู

4.5 ผลการอบแห้งเซลลูเลส เอนไซม์ในตู้อบลมร้อน

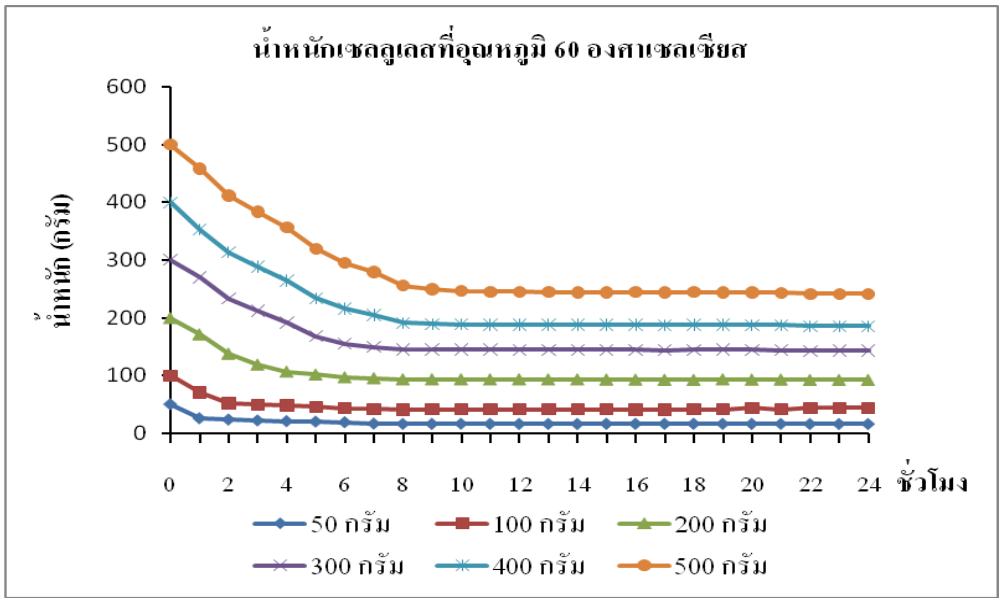
ขั้นตอนการศึกษากระบวนการอบแห้งที่เหมาะสมเพื่อหาสภาวะที่ใช้ในการผลิตครูดเซลลูเลส เอนไซม์ผงแห้งโดยทำการแปรผันน้ำหนักครูดเซลลูเลส เอนไซม์สดเท่ากับ 50, 100, 200, 300, 400 และ 500 กรัม และอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งเท่ากับ 50, 55 และ 60 องศาเซลเซียส ใช้ถาดอะลูมิเนียม เส้นผ่าศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร ใส่ครูดเซลลูเลส ในเครื่องอบลมร้อนความจุขนาด 100 L ใช้เวลาอบแห้ง 24 ชั่วโมง ความชื้นเริ่มต้นของครูดเซลลูเลสมีค่าประมาณร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก หาน้ำหนักน้ำที่ถูกระเหยโดยวิธีชั่งน้ำหนักทุกๆ ชั่วโมงที่เวลาเริ่มต้นจนถึง 8 ชั่วโมงจากนั้นทำการวัดทุกๆ 2 ชั่วโมงจนครบ 24 ชั่วโมง ผลการอบแห้งของครูดเซลลูเลสปริมาณต่างๆ ที่อุณหภูมิ 50, 55 และ 60 ^{o}C พบว่า น้ำหนักเริ่มต้นของครูดเซลลูเลสที่นำมาทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50, 55 และ 60 องศาเซลเซียส โปรไฟล์ 2 แบบ คือ โปรไฟล์ของครูดเซลลูเลสเริ่มต้นปริมาณ 200,300, 400 และ 500 กรัมมีค่าลดลงมากตั้งแต่ระยะเวลาเริ่มจนถึง 8 ชั่วโมง จากนั้นจะมีน้ำหนักคงที่ไปจนถึง 24 ชั่วโมง ส่วนโปรไฟล์ของครูดเซลลูเลสเริ่มต้นปริมาณ 50, และ 100 กรัม มีค่าลดลงเล็กน้อย และน้ำหนักครูดเซลลูเลสเริ่มมีค่าคงที่ เมื่ออบแห้งผ่านไปประมาณ 2 ชั่วโมง ดังรูปที่ 4.29 ถึง 4.31 ตามลำดับ นั่นคือน้ำหนักเริ่มของครูดเซลลูเลสที่ต้องการใช้ในการอบแห้งจึงไม่ควรมีปริมาณต่ำกว่า 200 กรัม



รูปที่ 4.29 โปรไฟล์น้ำหนักครูดเซลลูเลส เอนไซม์ของการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

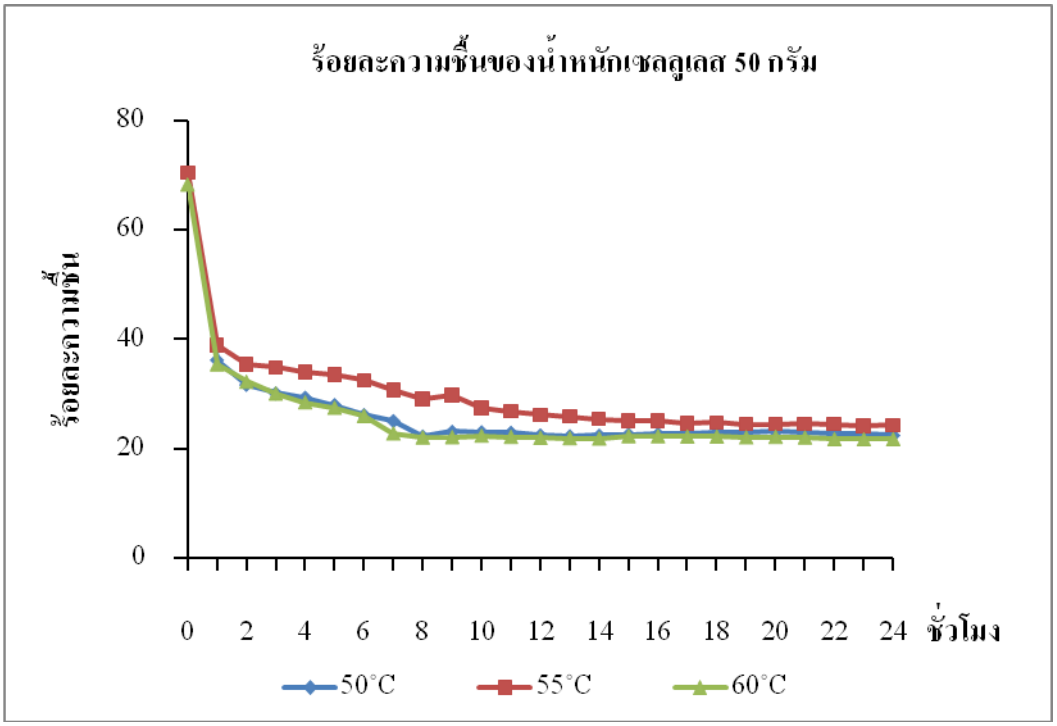


รูปที่ 4.30 โปรไฟล์น้ำหนักครูดเซลลูเลส เอนไซม์ของการอบแห้งที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส

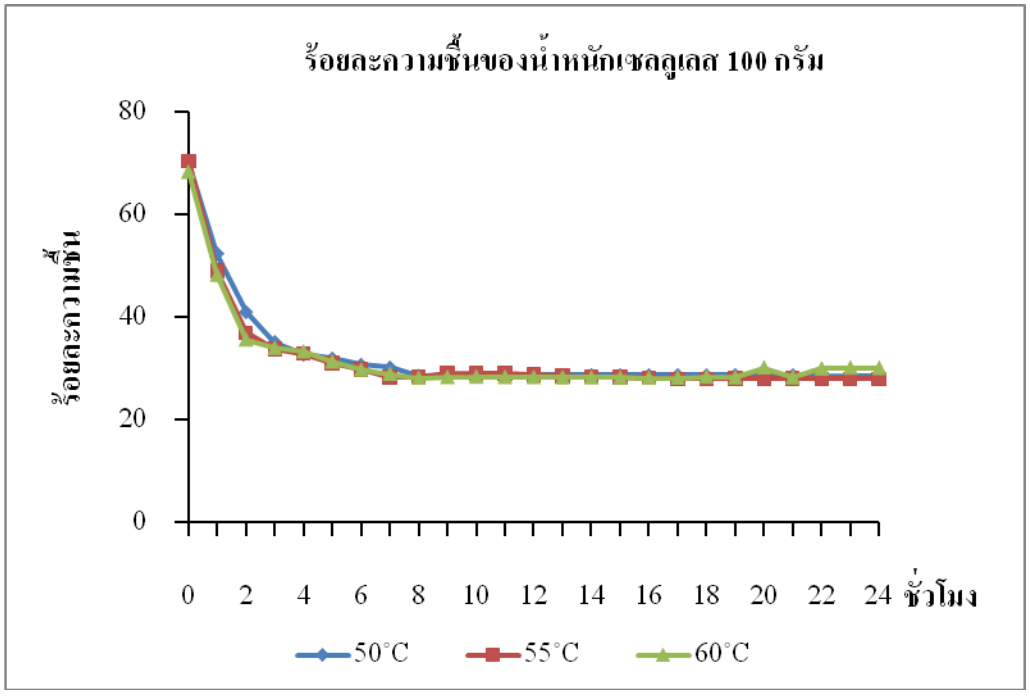


รูปที่ 4.31 โปรไฟล์น้ำหนักครูดเซลลูเลส เอนไซม์ของการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

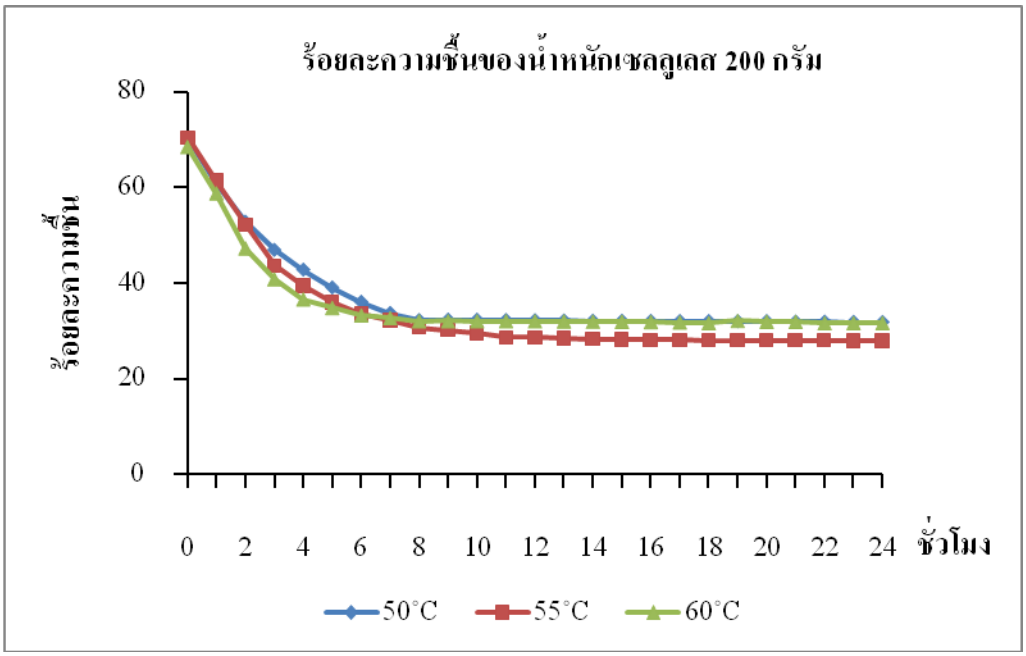
ผลการคำนวณการหาร้อยละความชื้นในครูดเซลลูเลส เอนไซม์ทุกชั่วโมง ภายใน 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิต่างๆ ดังรูปที่ 4.32 ถึง รูปที่ 4.37 พบว่า ร้อยละความชื้นเริ่มต้นของครูดเซลลูเลสมีค่าประมาณร้อยละ 70 โดยน้ำหนักและมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงชั่วโมงที่ 8 ของการอบแห้งในทุกๆ ตัวอย่างตั้งแต่ 200 กรัม ถึง 500 กรัม ยกเว้น 50 กรัม และ 100 กรัม โปรไฟล์ร้อยละความชื้นมีค่าคงที่หลังจากชั่วโมงที่ 8 ถึงชั่วโมงที่ 24 มีค่าในช่วงร้อยละ 20 ถึง 40 โดยน้ำหนัก



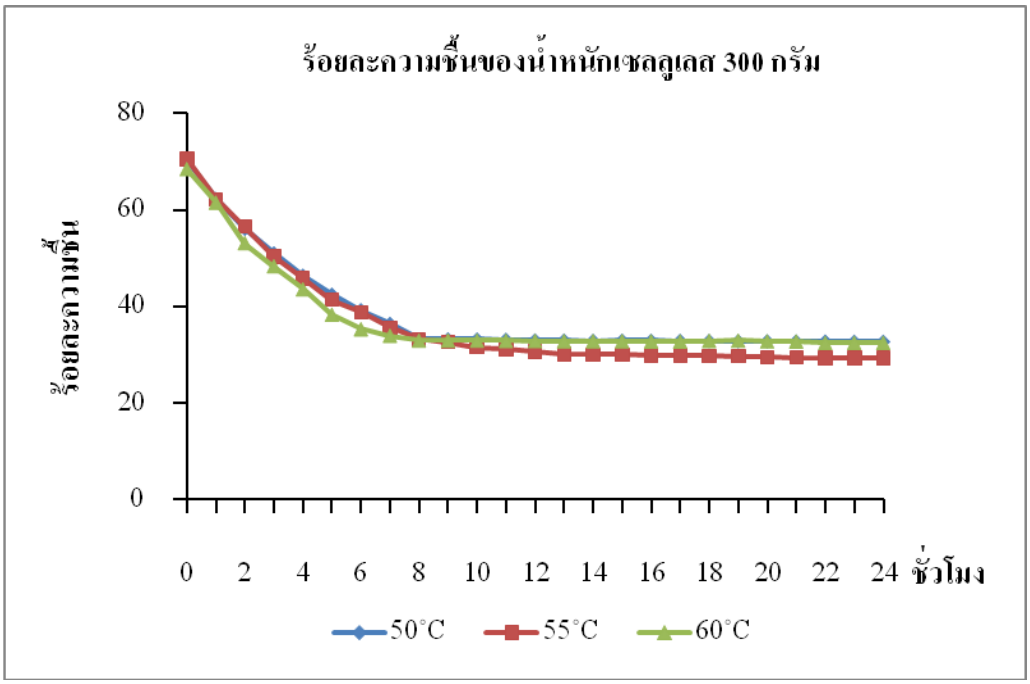
รูปที่ 4.32 โปรไฟล์ของร้อยละความชื้นของครูดเซลลูเลสเอนไซม์ปริมาณ 50 กรัม ที่อุณหภูมิต่างๆ



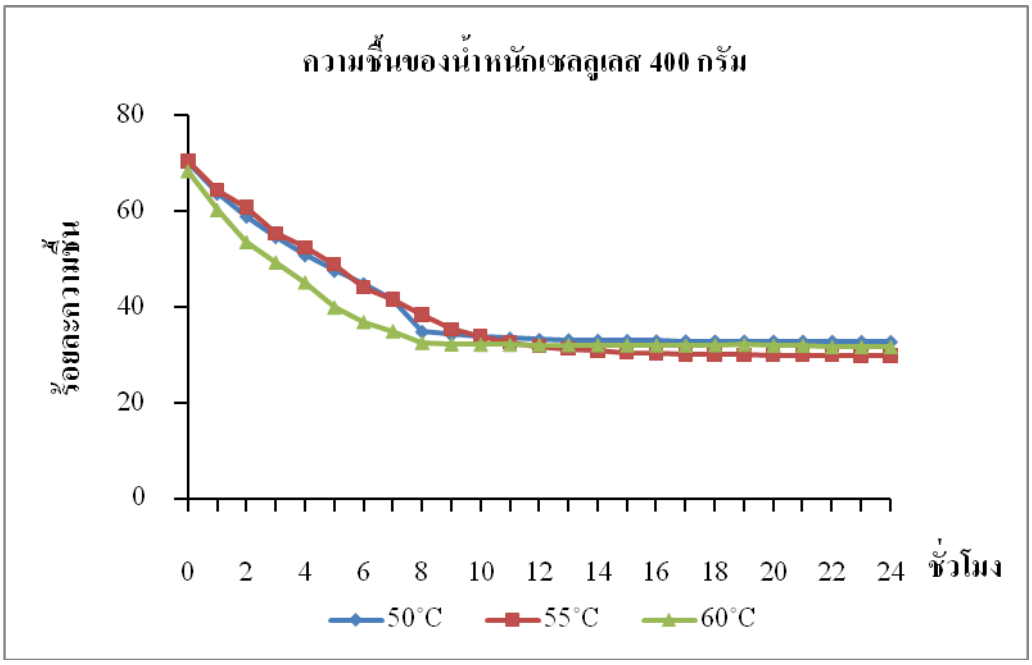
รูปที่ 4.33 โปรไฟล์ของร้อยละความชื้นของครูดเซลลูเลสเอนไซม์ปริมาณ 100 กรัม ที่อุณหภูมิต่างๆ



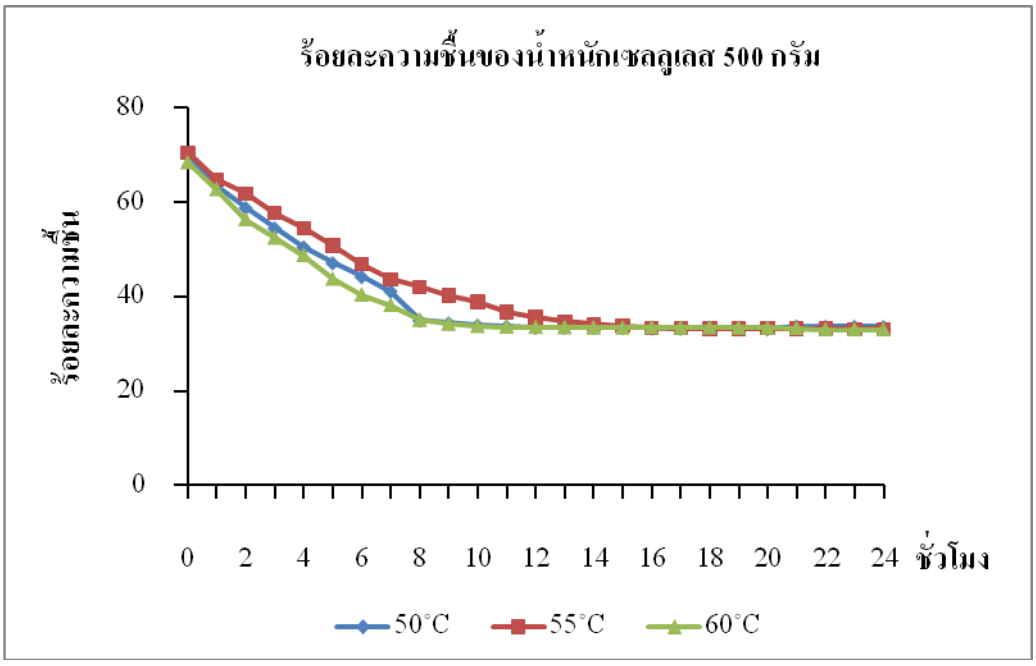
รูปที่ 4.34 โปรไฟล์ของร้อยละความชื้นของครูดเซลลูเลสเอนไซม์ปริมาณ 200 กรัม ที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.35 โปรไฟล์ของร้อยละความชื้นของครูดเซลลูเลสเอนไซม์ปริมาณ 300 กรัม ที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.36 โปรไฟล์ของร้อยละความชื้นของครูดเซลลูเลสเอนไซม์ปริมาณ 400 กรัม ที่อุณหภูมิต่างๆ

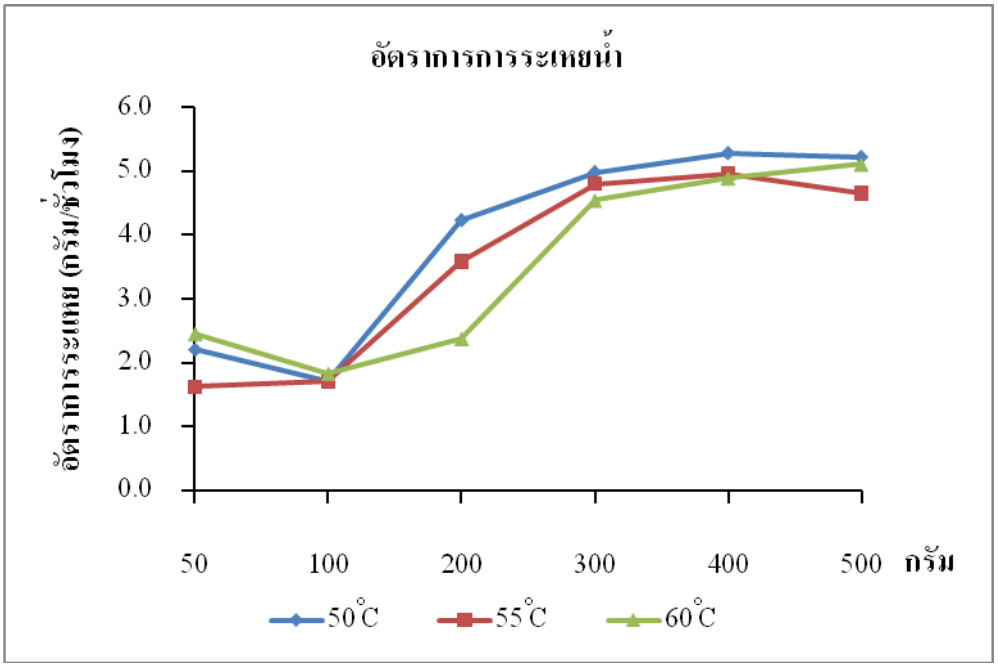


รูปที่ 4.37 โปรไฟล์ของร้อยละความชื้นของครูดเซลลูเลสเอนไซม์ปริมาณ 500 กรัม ที่อุณหภูมิต่างๆ

จากข้อมูลดังกล่าวจะนำไปคำนวณหาอัตราการอบแห้งครูดเซลลูเลสเพื่อเปรียบเทียบหาประสิทธิภาพในการอบแห้งในช่วงเวลา 3-8 ชั่วโมง เนื่องจากกราฟที่ได้มีอัตราการอบแห้งเป็นเส้นตรงในช่วงระยะเวลาดังกล่าว

ตารางที่ 4.4 อัตราการอบแห้งที่น้ำหนักครูดเซลลูเลสเริ่มต้นและอุณหภูมิที่ใช้อบแห้ง 50, 55 และ 65 °C

อุณหภูมิ	อัตราการอบแห้ง (กรัม/ชั่วโมง) ที่น้ำนักครูดเซลลูเลสเริ่มต้น					
	50 กรัม	100 กรัม	200 กรัม	300 กรัม	400 กรัม	500 กรัม
50 °C	2.2	1.7	4.2	5.0	5.3	5.2
55 °C	1.6	1.7	3.6	4.8	5.0	4.7
60 °C	2.5	1.8	2.4	4.5	4.9	5.1

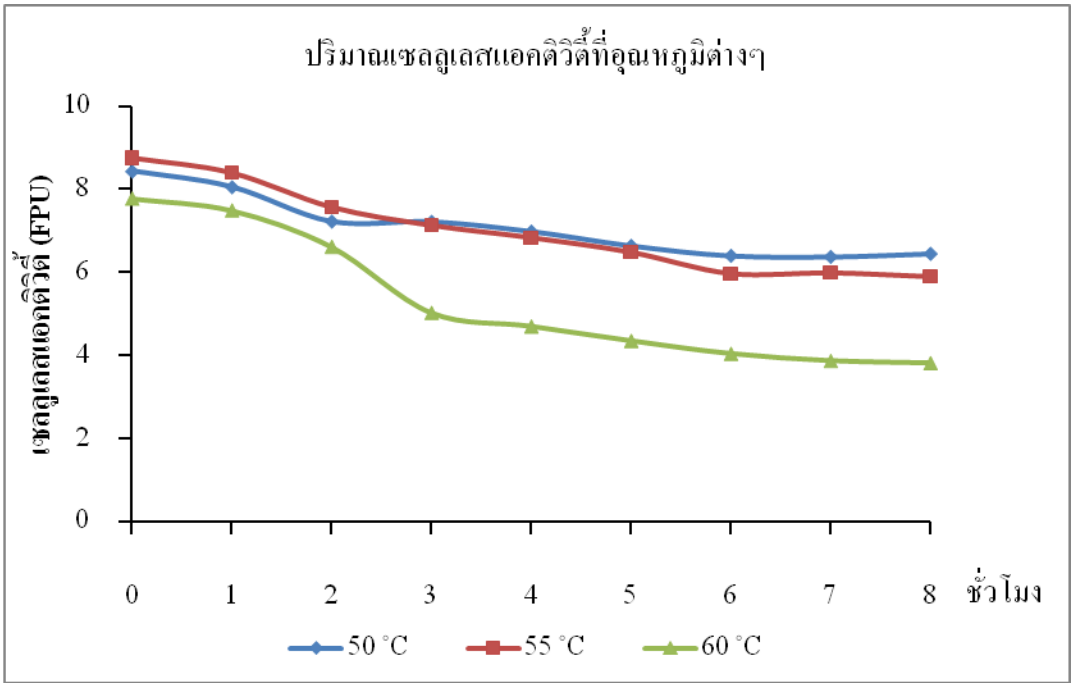


รูปที่ 4.38 อัตราการอบแห้งที่น้ำหนักครูดเซลลูเลสเริ่มต้นและอุณหภูมิที่ใช้อบแห้ง 50, 55 และ 65 °C

ผลของอัตราการอบแห้งครูดเซลลูเลส ดังรูปที่ 4.38 พบว่า อัตราการอบแห้งครูดเซลลูเลสน้ำหนักเริ่มต้น 300, 400 และ 500 กรัม มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับอุณหภูมิที่ใช้อบแห้ง ดังตารางที่ 4.3 มีค่าอัตราการอบแห้งเฉลี่ยประมาณ 4.8, 5.1 และ 5.0 กรัมต่อชั่วโมงตามลำดับ ยกเว้นที่ 200 กรัม อุณหภูมิอบแห้งที่เหมาะสม คือ 50 °C ซึ่งมีค่าอัตราการอบแห้งประมาณ 4.2 กรัมต่อชั่วโมง

ตารางที่ 4.5 ปริมาณเซลลูเลส แอคทิวิตีเฉลี่ยที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ และเวลาตั้งแต่เริ่มต้น 1 ถึง 8 ชั่วโมง

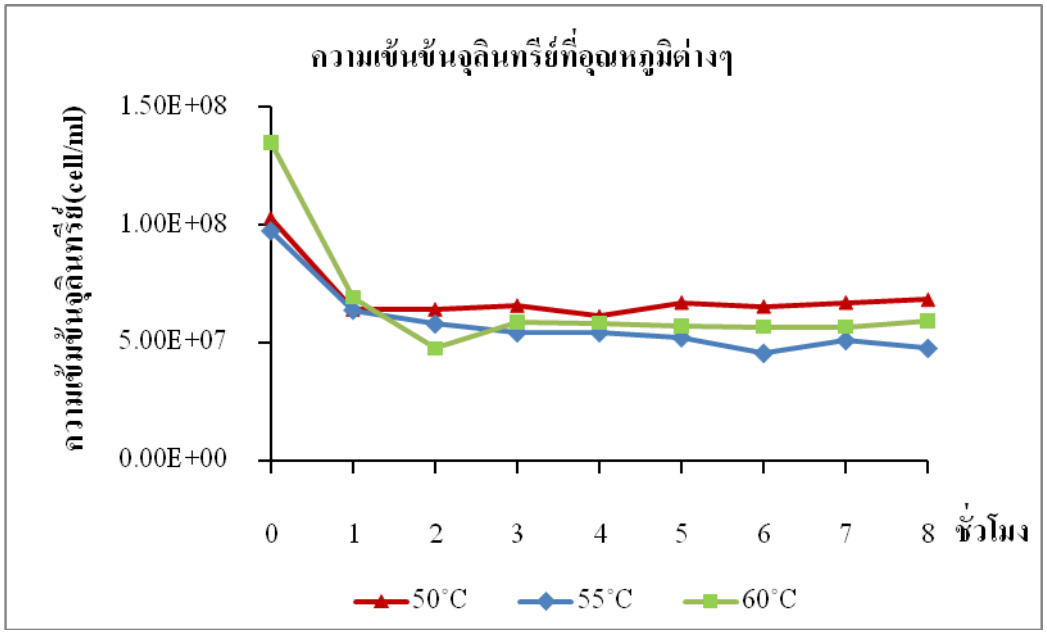
ชั่วโมง	เซลลูเลสแอคติวิตี้ (FPU)		
	50 องศาเซลเซียส	55 องศาเซลเซียส	60 องศาเซลเซียส
0	8.43	8.75	7.77
1	8.06	8.39	7.48
2	7.23	7.57	6.61
3	7.22	7.13	5.02
4	6.99	6.84	4.70
5	6.64	6.48	4.35
6	6.40	5.97	4.04
7	6.38	5.99	3.87
8	6.45	5.89	3.82



รูปที่ 4.39 ปริมาณเซลลูเลสแอคติวิตี้เฉลี่ยที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ ในช่วงเวลาการอบแห้ง 1 ถึง 8 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.6 ความเข้มข้นจุลินทรีย์เฉลี่ยที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ ในช่วงเวลาการอบแห้ง 1 ถึง 8 ชั่วโมง

ชั่วโมง	ความเข้มข้นจุลินทรีย์ (cell/ml)		
	50 องศาเซลเซียส	55 องศาเซลเซียส	60 องศาเซลเซียส
0	$1.03x10^{8}$	$9.75 x10^{7}$	$1.35 x10^{8}$
1	$6.42x10^{7}$	$6.38 x10^{7}$	$6.92 x10^{7}$
2	$6.42 x10^{7}$	$5.79 x10^{7}$	$4.75 x10^{7}$
3	$6.58 x10^{7}$	$5.42 x10^{7}$	$5.88 x10^{7}$
4	$6.13 x10^{7}$	$5.42 x10^{7}$	$5.83 x10^{7}$
5	$6.71 x10^{7}$	$5.21 x10^{7}$	$5.71 x10^{7}$
6	$6.54 x10^{7}$	$4.54 x10^{7}$	$5.67 x10^{7}$
7	$6.71 x10^{7}$	$5.08 x10^{7}$	$5.67 x10^{7}$
8	$6.83 x10^{7}$	$4.75 x10^{7}$	$5.92 x10^{7}$



รูปที่ 4.40 ความเข้มข้นจุลินทรีย์ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วงระยะเวลาการอบแห้งตั้งแต่เริ่มต้นถึงชั่วโมงที่ 8

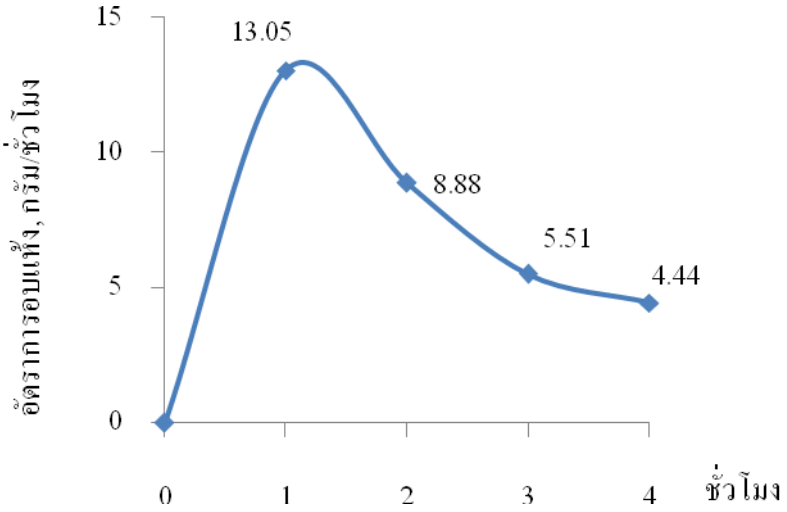
ผลของอุณหภูมิต่อเซลลูเลส แอคทิวีตี ดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.39 พบว่า เซลลูเลส แอคทิวิตีมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องตั้งแต่เริ่มต้นทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50, 55 และ 60 °C เนื่องจากเชื้อราตายเพราะถูกความร้อนโดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 60 °C ดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.40

จากการทดลองศึกษากระบวนการอบแห้งที่สภาวะต่างๆ ปริมาณน้ำหนักของครูดเซลลูเลสที่มีผลต่ออัตราการระเหยของน้ำ และอุณหภูมิมีผลต่อน้ำหนักของครูดเซลลูเลส จากการทดลองพบว่าน้ำหนักครูดเซลลูเลสเริ่มต้นปริมาณ 400 กรัม อบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการอบแห้งด้วยเครื่องอบลมร้อน (Hot Air Oven) ซึ่งมีขนาดปริมาตร 100 L โดยใส่ครูดเซลลูเลสลงในถาดอะลูมิเนียมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งประมาณ 12 ชั่วโมง ครูดเซลลูเลสจะมีค่าเซลลูเลส แอคทิวีตี และความเข้มข้นของจุลินทรีย์สูงกว่าที่สภาวะอื่นๆ อย่างไรก็ตาม ครูดเซลลูเลสผงที่ได้ยังมีร้อยละของความชื้นประมาณ 20 ถึง 40 โดยน้ำหนัก ซึ่งเครื่องอบลมร้อนนี้ ยังไม่สามารถใช้อบแห้งให้ได้ร้อยละความชื้นของครูดเซลลูเลสตามที่ต้องการ คือ ต้องมีค่าร้อยละความชื้นน้อยกว่า 13 ที่เวลา 24 ชั่วโมง

4.6 ผลการอบแห้งในเครื่องอบแห้งต้นแบบ

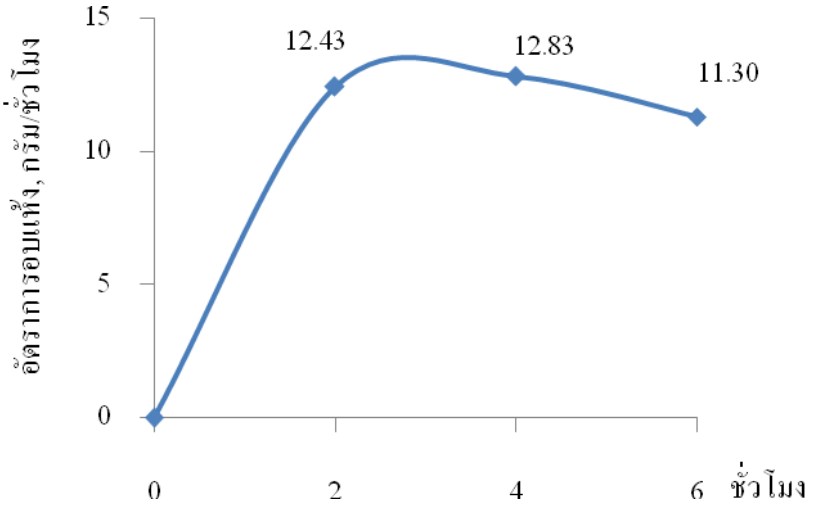
4.6.1 ผลการใช้ความร้อนจากหม้อต้มน้ำร่วมกับความร้อนจากดวงอาทิตย์

ผลการทดลองที่ 1 อัตราการอบแห้งตัวอย่างปริมาณ 1 กิโลกรัม ที่อุณหภูมิเฉลี่ย 50 °C พบว่า เมื่อตั้งค่าอุณหภูมิที่หม้อต้มน้ำไว้ที่ประมาณ 86 ถึง 98 °C อุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งมีค่าเฉลี่ยประมาณ 50 °C อัตราการอบแห้งเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 13.05 กรัม/ชั่วโมง ที่เวลา 1 ชั่วโมง เนื่องจากการให้ความร้อนภายในเครื่องอบแห้งไม่เพียงพอ และการทดลองนี้ใช้ถาดอะลูมิเนียมรองรับตัวอย่าง ทำให้ความชื้นที่อยู่ในตัวอย่างถูกให้ความร้อนเพียงผิวหน้า ตัวอย่างที่อยู่ด้านล่างของถาดไม่ได้สัมผัสกับความร้อนเลยจึงไม่สามารถนำความชื้นออกจากตัวอย่างได้ ดังนั้น อัตราการอบแห้งเฉลี่ยลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ดังรูปที่ 4.41



รูปที่ 4.41 อัตราการอบแห้งตัวอย่าง 1 กิโลกรัมที่อุณหภูมิการอบแห้งเฉลี่ย 50 °C

ผลการทดลองที่ 2 อัตราการอบแห้งตัวอย่างปริมาณ 10 กิโลกรัม พบว่า การเพิ่มค่าอุณหภูมิให้กับหม้อต้มน้ำที่อุณหภูมิเฉลี่ย 99.4 °C ทำให้อุณหภูมิในเครื่องอบแห้งต้นแบบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 51 °C อัตราการอบแห้งเฉลี่ยสูงสุดประมาณ 12.83 กรัม/ชั่วโมง ที่เวลา 4 ชั่วโมง ดังรูปที่ 4.42



รูปที่ 4.42 อัตราการอบแห้งตัวอย่าง 10 กิโลกรัมที่อุณหภูมิการอบแห้งเฉลี่ย 51 °C

ตัวอย่าง 10 กิโลกรัมมีความชื้นเริ่มต้นประมาณร้อยละ 82.65 โดยน้ำหนัก เมื่อผ่านการอบแห้งได้ความชื้นสุดท้ายเฉลี่ยประมาณร้อยละ 32 โดยน้ำหนัก การอบแห้งของการทดลองนี้ใช้ปริมาณพลังงานไฟฟ้าสุทธิเท่ากับ 33 หน่วย (kW.h) ซึ่งทำให้ความชื้นของตัวอย่างมีค่าลดลงคิดเป็นร้อยละ 61.28

4.6.2 ผลการใช้ความร้อนจากหม้อต้มน้ำร่วมกับดวงไฟ

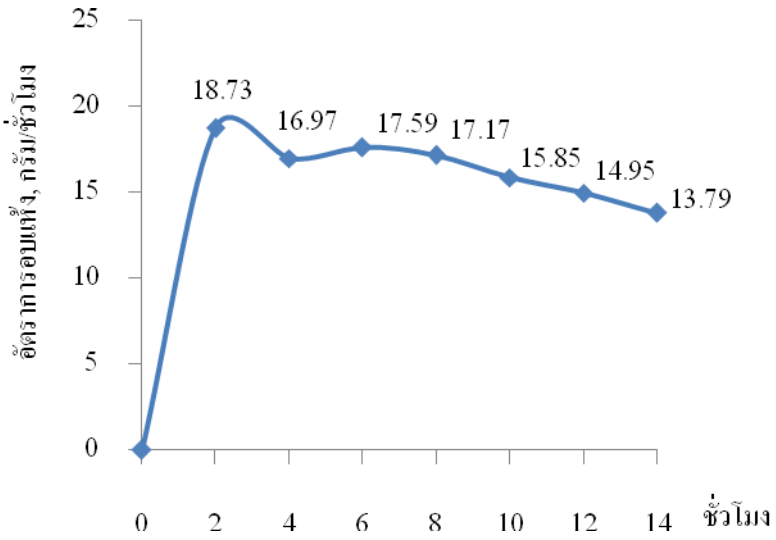
ผลการทดลองที่ 3 การหาอัตราการอบแห้งตัวอย่างปริมาณ 4 กิโลกรัมจากความร้อนหม้อต้มน้ำและดวงไฟที่ติดตั้งภายในเครื่อง

วิธีการทดลองที่ 3.1 เครื่องอบแห้งต้นแบบไม่ได้ปิดกระจกด้วยกระดาษสีดำ

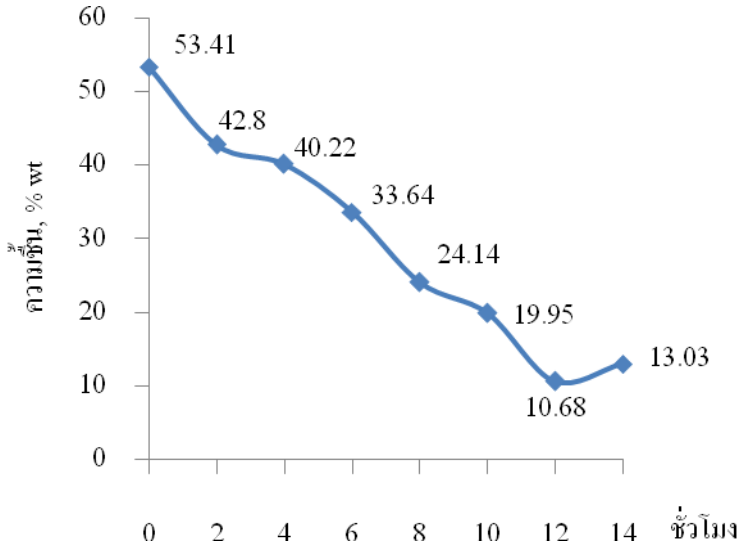
การทดลองนี้ใช้แหล่งความร้อนจากฮีทเตอร์และดวงไฟ ในเครื่องอบแห้งต้นแบบปริมาตรช่องว่างภายในตัวเครื่องประมาณ 2 m^3 โดยไม่มีโซลาร์ คอลเล็คเตอร์ และทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ การอบแห้งครั้งนี้ได้ตั้ง set point อุณหภูมิฮีทเตอร์ในหม้อต้มน้ำ ขนาด 3 kW และ 4 kW เป็น 102 °C และ 103 °C ตามลำดับ ทำให้อุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งมีค่าเฉลี่ย 59 °C พบว่า อัตราการอบแห้งสูงสุดชั่วโมงที่ 2 มีค่าประมาณ 18.7 กรัมต่อชั่วโมง และลดลงเล็กน้อยโดยมีค่าค่อนข้างคงที่ถึงชั่วโมงที่ 8 จากนั้นมีอัตราลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงชั่วโมงที่ 14 ดังรูปที่ 4.43

ปริมาณของตัวอย่าง 4 กิโลกรัมมีความชื้นเริ่มต้นประมาณร้อยละ 53.41 โดยน้ำหนัก เมื่อผ่านการอบแห้งนาน 14 ชั่วโมง ความชื้นสุดท้ายเฉลี่ยประมาณร้อยละ 13.03 โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.44 การ

อบแห้งของการทดลองนี้ใช้ปริมาณพลังงานไฟฟ้าสุทธิเท่ากับ 16.2 หน่วย (kW.h) ซึ่งทำให้ความชื้นของตัวอย่างมีค่าลดลงคิดเป็นร้อยละ 75.6 โดยน้ำหนัก นั่นคือ การเปลี่ยนจากถาดอะลูมิเนียมใส่ตัวอย่างปริมาณ 400 กรัมต่อถาดมาเป็นถาดพลาสติกก้นถาดมีรูระบายอากาศ รวมทั้งการปรับระยะห่างระหว่างชั้นให้ห่างขึ้นจาก 20 เซนติเมตรเป็น 40 เซนติเมตร ทำให้อากาศร้อนไล่ความชื้นออกไปด้านบนได้ดีขึ้น โดยอบแห้งตัวอย่างที่มีความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 53.41 โดยน้ำหนัก ให้มีความชื้นสุดท้ายประมาณร้อยละ 13 โดยน้ำหนักได้ภายในช่วงเวลา 12 ชั่วโมง



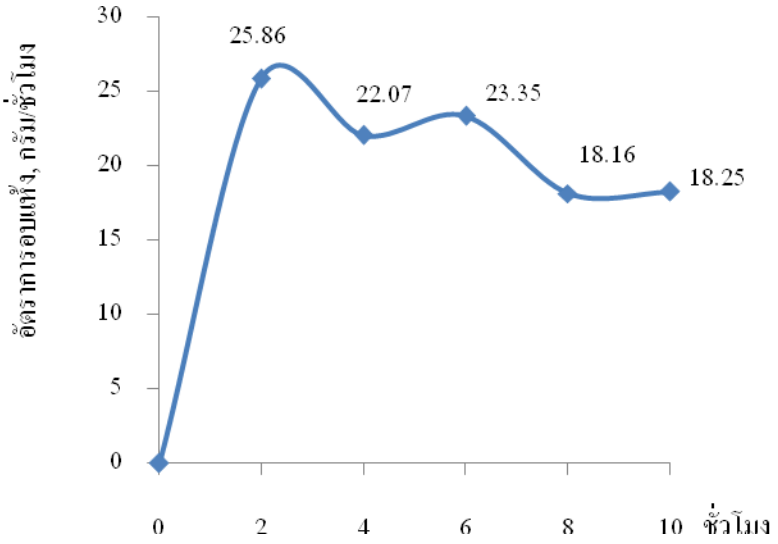
รูปที่ 4.43 อัตราการอบแห้งตัวอย่าง 4 กิโลกรัมที่อุณหภูมิการอบแห้งเฉลี่ย 59 °C เมื่อไม่ได้ปิดกระดาษดำที่ตัวเครื่อง



รูปที่ 4.44 โปรไฟล์ความชื้นของการอบแห้งตัวอย่าง 4 กิโลกรัมที่อุณหภูมิการอบแห้งเฉลี่ย 59 °C

วิธีการทดลองที่ 3.2 เครื่องอบแห้งต้นแบบที่ปิดกระจกด้วยกระดาษสีดำ

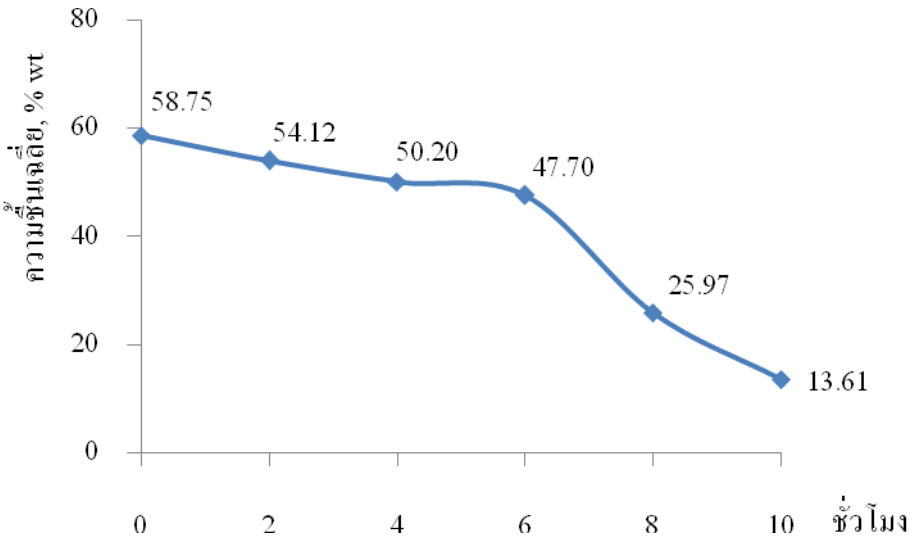
การทดลองนี้ใช้แหล่งความร้อนจากฮีทเตอร์และดวงไฟที่ติดตั้งอยู่ในเครื่องอบแห้งต้นแบบซึ่งมีปริมาตรช่องว่างภายในตัวเครื่องประมาณ 2 m^3 โดยไม่มีโซลาร์ คอลเล็คเตอร์ และทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ การอบแห้งครั้งนี้ได้ตั้ง set point อุณหภูมิฮีทเตอร์ของหม้อต้มน้ำขนาด 3 kW และ 1 kW เป็น 102 ^{o}C และ 103 ^{o}C ตามลำดับ การปิดกระจกด้วยกระดาษสีดำทำให้อุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 66 ^{o}C ซึ่งมีค่าสูงกว่าที่ไม่ได้ปิดกระจกด้วยกระดาษสีด พบว่า อัตราการอบแห้งสูงสุดชั่วโมงที่ 2 มีค่าประมาณ 25.86 กรัมต่อชั่วโมง และลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงชั่วโมงที่ 10 ดังรูปที่ 4.45 การปิดกระจกด้วยกระดาษดำสามารถลดการสูญเสียพลังงานความร้อนลงได้เมื่อเทียบกับที่ไม่ได้ปิดกระดาษดำ อัตราการอบแห้งของวิธีการทดลองที่ 3.2 มีค่าเพิ่มขึ้น 7.18, 5.1, และ 5.76 กรัมต่อชั่วโมง ที่ระยะเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ แต่มีอัตราการอบแห้งใกล้เคียงกันหลังจากระยะเวลานาน 8 ชั่วโมงเป็นต้นไป เมื่อเทียบกับของวิธีการทดลองที่ 3.1



รูปที่ 4.45 อัตราการอบแห้งตัวอย่าง 4 กิโลกรัมที่อุณหภูมิการอบแห้งเฉลี่ย 66 ^{o}C เมื่อปิดกระดาษดำที่กระจก

ปริมาณของตัวอย่าง 4 กิโลกรัมมีความชื้นเริ่มต้นประมาณร้อยละ 58.75 โดยน้ำหนัก เมื่อผ่านการอบแห้งนาน 10 ชั่วโมง ความชื้นสุดท้ายเฉลี่ยประมาณร้อยละ 13.61 โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.46 การอบแห้งของการทดลองนี้ใช้ปริมาณพลังงานไฟฟ้าสุทธิเท่ากับ 17.36 หน่วย (kW.h) ซึ่งทำให้ความชื้นของตัวอย่างมีค่าลดลงคิดเป็นร้อยละ 76.9 เครื่องอบแห้งต้นแบบที่ปิดกระจกด้วยกระดาษดำและใช้แหล่งความร้อนร่วมจากหม้อต้มน้ำและดวงไฟที่ส่องอยู่ภายในตัวเครื่องสามารถอบแห้งตัวอย่างให้ได้ความชื้นสุดท้ายเฉลี่ยมีค่าประมาณร้อยละ 13.61 โดยน้ำหนัก เวลาที่ใช้ในการอบแห้งลดลง 4 ชั่วโมง การใช้ไฟฟ้าของเครื่องอบแห้งที่ปิดด้วยกระดาษดำมีค่ามากกว่าอยู่ประมาณ 1.16 หน่วย เนื่องจากความชื้นเริ่มต้นของ

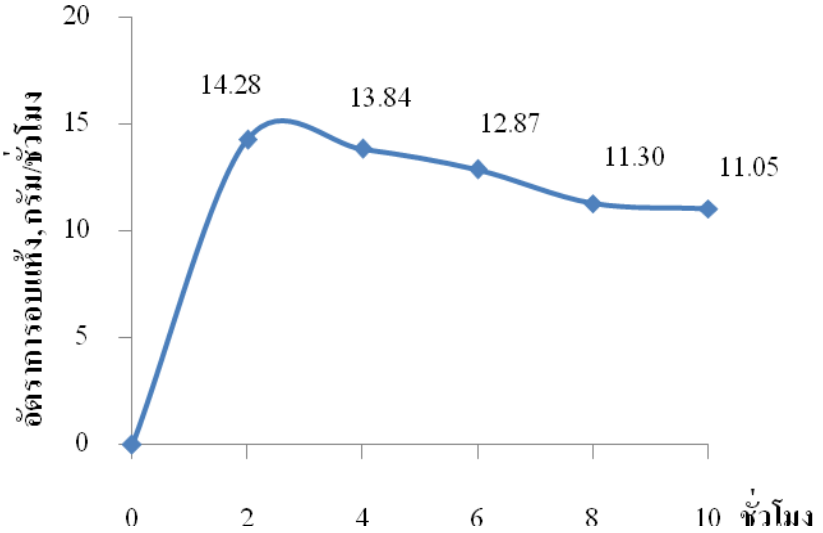
ตัวอย่างในเครื่องอบแห้งที่ปิดกระจกด้วยกระดาษดำมีค่ามากกว่าอยู่ประมาณร้อยละ 5.34 โดยน้ำหนัก การใช้ดวงไฟเป็นแหล่งความร้อนเพิ่มจากการใช้แหล่งความร้อนจากหม้อต้มน้ำและการปิดกระจกด้วยกระดาษดำทำให้การอบแห้งของเครื่องอบแห้งต้นแบบสามารถทำให้ได้ร้อยละความชื้นของตัวอย่างที่น้อยกว่าร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ดังนั้นควรมีการปรับปรุงและพัฒนาแหล่งความร้อนที่ต้องการใช้ในเครื่องอบแห้งต้นแบบให้เพียงพอ โดยการใช้แหล่งความร้อนจากหลอดอินฟาเรดเป็นแหล่งความร้อนแทนดวงไฟจากสปอร์ไลท์และควรติดตั้งอยู่ภายในเครื่องอบแห้งต้นแบบ



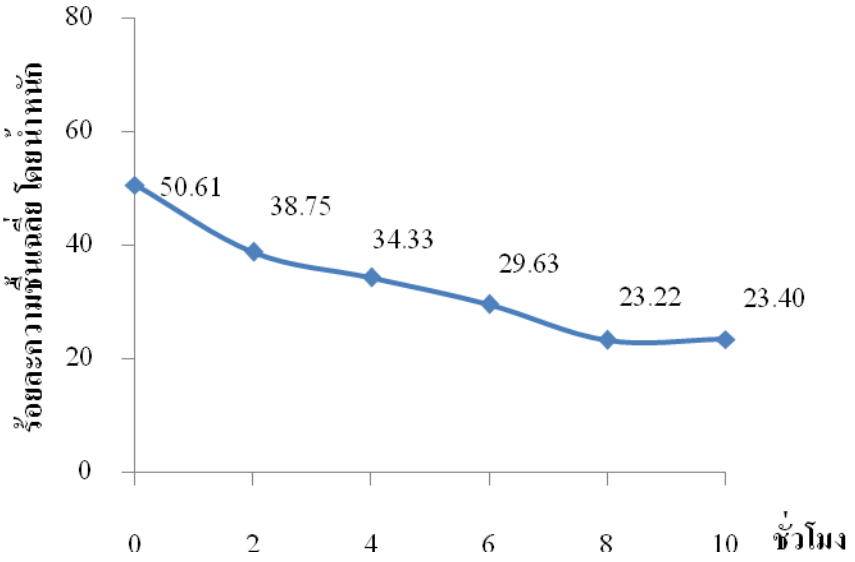
รูปที่ 4.46 โปรไฟล์ความชื้นเฉลี่ยของการอบแห้งตัวอย่าง 4 กิโลกรัมที่อุณหภูมิการอบแห้งเฉลี่ย 66 °C

ผลการทดลองที่ 4 อัตราการอบแห้งจากการใช้ความร้อนจากหม้อต้มน้ำร่วมกับดวงไฟที่ติดตั้งเหนือโซลาร์ คอลเล็คเตอร์ และกระจกด้านบนของเครื่องอบแห้งต้นแบบ ทำการอบแห้งตัวอย่างภายในห้องปฏิบัติการ 3 ซ้ำ พบว่า อัตราการอบแห้งเท่ากับ 14.28 กรัมต่อชั่วโมง ในชั่วโมงที่ 2 ตัวอย่างมีความชื้นเฉลี่ยเริ่มต้นร้อยละประมาณ 50.61 โดยน้ำหนัก ใช้เวลาอบแห้งที่อุณหภูมิภายในเครื่องเฉลี่ยประมาณ 57 °C นาน 10 ชั่วโมง ความชื้นสุดท้ายที่ได้เฉลี่ยประมาณร้อยละ 23.4 โดยน้ำหนัก เครื่องอบแห้งต้นแบบสามารถลดความชื้นของตัวอย่างลงได้ประมาณร้อยละ 54 หน่วยไฟฟ้าที่ใช้เฉลี่ย 19.42 หน่วย โดยมีอัตราการอบแห้งสูงสุดชั่วโมงที่ 2 จากนั้นอัตราการอบแห้งมีค่าลดลงจนถึงชั่วโมงที่ 8 หลังจากนั้นมีค่าค่อนข้างคงที่สอดคล้องกับโปรไฟล์ร้อยละความชื้นเฉลี่ยโดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.47 และ 4.48 ตามลำดับ นั่นคือ การอบแห้งโดยใช้ความร้อนร่วมระหว่างหม้อต้มน้ำและดวงไฟ มีอัตราการอบแห้งคงที่ภายใน 8 ชั่วโมง แต่ยังไม่สามารถอบแห้งตัวอย่างให้มีความชื้นสุดท้ายเฉลี่ยน้อยกว่าร้อยละ 13 โดยน้ำหนักได้ เนื่องจากแหล่งความร้อนยังไม่เพียงพอเมื่อเทียบกับวิธีการทดลองที่ 3.2

การใช้แหล่งความร้อนจากหม้อต้มน้ำร่วมกับดวงไฟซึ่งทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเครื่องอบแห้งต้นแบบมีค่าน้อยกว่า 60 °C นั้น ไม่สามารถอบแห้งตัวอย่างให้ได้ความชื้นสุดท้ายน้อยกว่าร้อยละ 15 โดยน้ำหนักได้ ดังนั้นการใช้แหล่งความร้อนดังกล่าวจึงไม่พอเพียงกับเครื่องอบแห้งต้นแบบ เนื่องจากภายในเครื่องมีอากาศในช่องว่างมากกว่า 2 ลูกบาศก์เมตร แหล่งความร้อนดังกล่าวน้อยเกินไป จึงทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเครื่องไม่ถึง 60 °C



รูปที่ 4.47 อัตราการอบแห้งจากการใช้ความร้อนจากหม้อต้มน้ำร่วมกับดวงไฟที่ติดตั้งเหนือโซลาร์ คอลเล็คเตอร์ และกระจกด้านบนของเครื่องอบแห้งต้นแบบ



รูปที่ 4.48 โปรไฟล์ความชื้นเฉลี่ยของการอบแห้งตัวอย่าง 4 กิโลกรัมที่อุณหภูมิการอบแห้งเฉลี่ย 57 °C

4.6.3 การวิเคราะห์อัตราการถ่ายโอนการพาความร้อนธรรมชาติของเครื่องอบแห้งต้นแบบ

การคำนวณอัตราการถ่ายโอนการพาความร้อนธรรมชาติของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เกิดจากเฮดเดอร์และท่อทองแดงมีค่าเท่ากับ 0.282 kW (จาก 2.11.2)

การคำนวณอัตราการถ่ายโอนการพาความร้อนของเครื่องอบแห้งต้นแบบซึ่งเป็นช่องว่างปิดรูปทรงสี่เหลี่ยม กว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 1 x 1 x 2 เมตร และมีช่องว่างปิดของโซลาร์ คอลเล็คเตอร์วางเอียงทำมุมประมาณ 17 องศากับพื้นระนาบ ซึ่งมีขนาด 1 x 2 x 0.2 เมตร (แสดงการคำนวณในภาคผนวก จ) ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.7 อัตราการถ่ายโอนการพาความร้อนของช่องว่างปิดรูปทรงสี่เหลี่ยมและประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งต้นแบบ

การทดลอง	อัตราการถ่ายโอนการพาความร้อนของช่องว่างปิด (kW)			เวลาที่ใช้อบแห้ง (h)	หน่วยพลังงาน (kW.h) ที่		ประสิทธิภาพ (%)
	ตู้รูปทรงสี่เหลี่ยม	โซลาร์คอลเล็คเตอร์	รวม (kW)		ออกจากระบบ	เข้าสู่ระบบ	
หม้อต้มน้ำ + ดวงไฟให้ความร้อนตัวอย่างโดยตรงและไม่ได้ปิดกระจกด้วยกระดาษสีดำ (ในห้องปฏิบัติการ)	0.193	-	0.193	14	2.70	16.20	16.67
หม้อต้มน้ำ + ดวงไฟให้ความร้อนตัวอย่างโดยตรงและปิดกระจกด้วยกระดาษสีดำ (ในห้องปฏิบัติการ)	0.337	-	0.337	10	3.37	17.36	19.41
หม้อต้มน้ำ + ดวงไฟให้ความร้อนโซลาร์คอลเล็คเตอร์ + ดวงไฟให้ความร้อนกระจกด้านบนเครื่องและปิดกระจกด้วยกระดาษสีดำ (ในห้องปฏิบัติการ)	0.266	0.099	0.364	10	3.64	19.42	18.74

วิธีการทดลองที่ 4 ทำการทดลอง 3 ซ้ำ จากการคำนวณหน่วยพลังงานที่ได้ออกมาจากการถ่ายโอนความร้อนทั้งหมดเฉลี่ยเท่ากับ 3.64 kW.h ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งต้นแบบในแต่ละการทดลอง พบว่า การอบแห้งโดยติดตั้งดวงไฟเพื่อให้ความร้อนตัวอย่างภายในตู้ทรงสี่เหลี่ยมและปิดกระจกด้วยกระดาษสีดำมีค่าประสิทธิภาพดีที่สุดเมื่อเทียบกับการทดลองอีก 2 การทดลอง ดังตารางที่ 4.7 อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งต้นแบบมีค่าน้อย จึงต้องพัฒนาและปรับปรุงต่อไป โดยต้องคำนึงถึงการเลือกชนิดของแหล่งความร้อนที่ต้องการและต้องทำการติดตั้งภายในตู้ทรงสี่เหลี่ยมเพิ่มเติมในงานวิจัยต่อไปในอนาคต

4.7 ผลการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์เพื่อหาต้นทุนกระบวนการผลิต

ผลการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์เพื่อหาต้นทุนของกระบวนการผลิต คิดบนพื้นฐานของการหมักกากมันสำปะหลังครั้งละ 5 กิโลกรัมในตู่บ่มต้นแบบซึ่งแบ่งออกเป็นค่าใช้จ่ายวัตถุดิบ สารเคมี และค่าไฟฟ้าของอุปกรณ์ช่วยต่างที่ใช้ในการบวนการหมัก ผลที่คำนวณได้ดังตารางที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ

ส่วนค่าใช้จ่ายในการดำเนินการอบแห้งเอนไซม์ที่ได้ครั้งละประมาณ 4 กิโลกรัม คือหน่วยไฟฟ้าที่วัดได้กับกำลังไฟฟ้าจากดวงไฟ คิดจากการทดลองที่ 3.2 และการทดลองที่ 4 รวมกันและคิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 18.39 หน่วย (kW.h)

ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน สำหรับการผลิตครูดเอนไซม์ปริมาณ 5 กิโลกรัม คำนวณได้คือ

ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน = ค่าวัตถุดิบ น้ำและสารเคมี + ค่าไฟฟ้า

= 216.07 + 130.71 = 346.78 บาท

ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ 346.78 บาทต่อการผลิตเอนไซม์ปริมาณ 5 กิโลกรัม นั่นคือ 1 กิโลกรัมครูดเอนไซม์มีค่าใช้จ่ายประมาณ 69.35 บาท ซึ่งเป็นค่าใช้จ่ายที่ยังไม่คิดค่าแรงงาน เมื่อนำราคาต้นทุนของเครื่องบ่มและเครื่องอบแห้งต้นแบบมารวมกับค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน สำหรับการผลิตเอนไซม์ 5 กิโลกรัม จะได้ค่าใช้จ่ายทั้งหมด ดังสมการ

ค่าใช้จ่ายทั้งหมด = ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน + ค่าเครื่องบ่ม + ค่าเครื่องอบแห้งต้นแบบ

= 23,000 + 98,000 + 346.78 = 121,346.78 บาท

สมมุติราคาขายของครูดเอนไซม์เท่ากับ 300 บาทต่อกิโลกรัม ทำการผลิตครั้งละ 5 กิโลกรัม

รายรับ = 300 x 5 = 1,500 บาท

เพื่อให้ได้รายรับเท่ากับ 121,346.78 บาท จำนวนครั้งที่ต้องการผลิตคือ

การผลิตครูดเอนไซม์ = 121,346.78/1500 = 81 ครั้ง

การผลิตครูดเอนไซม์ 1 ครั้งใช้เวลา 6 วัน ดังนั้น จำนวนวันที่ต้องทำการผลิตหรือระยะเวลาคืนทุนคือ

ระยะเวลาคืนทุน = 81 x 6 วัน = 486 วัน หรือประมาณ 16.2 เดือนหรือ 1 ปี 4 เดือน

ตารางที่ 4.8 ค่าวัตถุดิบและสารเคมีของกระบวนการหมักกากมันสำปะหลังในตู้บ่มต้นแบบ

ลำดับ	รายการ	ราคาต่อหน่วย	ปริมาณที่ใช้	เป็นเงิน (บาท)
1	กากมันสำปะหลัง	2 บาท/กิโลกรัม	5 กิโลกรัม	10.00
2	แคลเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 2 น้ำ	8 บาท/กรัม	5 กรัม	40.00
3	แมกนีเซียมซัลเฟต 7 น้ำ	1.4 บาท/กรัม	5 กรัม	7.00
4	ปุ๋ยยูเรีย	0.02 บาท/กรัม	40 กรัม	0.80
5	ปุ๋ยฟอสเฟต	0.09 บาท/กรัม	75 กรัม	6.75
6	น้ำตาลมะพร้าว	0.06 บาท/กรัม	150 กรัม	9.00
7	กรดซิตริก	0.58 บาท/กรัม	2 กรัม	1.16
8	อาหารเลี้ยงเชื้อพีดีเอ	5.7 บาท/กรัม	14.63 กรัม	83.36
9	น้ำอาร์โอ	0.4 บาท/ลิตร	20 ลิตร	8.00
10	อื่นๆ	10 บาท/กิโลกรัม	5 กิโลกรัม	50.00
รวมเป็นเงินทั้งสิ้น (บาท/กากมันสำปะหลัง 5 กิโลกรัม)				216.07
รวมเป็นเงินทั้งสิ้น (บาท/กากมันสำปะหลัง 1 กิโลกรัม)				43.21

ตารางที่ 4.9 ค่าดำเนินงานของกระบวนการหมักกากมันสำปะหลังในตู้บ่มต้นแบบ

ลำดับ	อุปกรณ์	กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์)	เวลาที่ใช้ในการดำเนินงาน (ชั่วโมง)	หน่วยไฟฟ้า (kW.h)	เป็นเงิน (บาท)
1	ตู้เขี่ยเชื้อ	2.2	1	2.2	7.72
2	หม้อนึ่งความดันไอน้ำ	2.2	1	2.2	7.72
3	เครื่องกวนแม่เหล็ก	1.03	½	0.51	1.79
4	เครื่องบดมูลิเน็กซ์	0.50	3	1.5	5.27
5	เครื่องบดกากมันสำปะหลัง	1.65	0.08	0.132	0.46
6	ตู้บ่มต้นแบบ	0.3	144	158.4	43.2
7	เครื่องอบแห้งต้นแบบ	1.839	10	18.39	64.55
รวมทั้งสิ้น (บาทต่อ 5 กิโลกรัม)					130.71
รวมทั้งสิ้น (บาทต่อ 1 กิโลกรัม)					26.14

4.8 การเผยแพร่ผลงานวิจัย

ผลผลิตที่ได้จากงานวิจัยนี้คือครูดเซลลูเลสจากการหมักแข็งกากมันสำปะหลังในระดับขยายขนาด หลังจากการอบแห้งแล้วได้นำไปใช้ในการหมักกึ่งเหลวเพื่อผลิตเอทานอลโดยใช้แหล่งคาร์บอนชนิดต่างๆ ที่เป็นของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการเกษตร ดังนี้

4.8.1 เศษเปลือกสับปะรด นำเสนอในการประชุมวิชาการ คือ

Pradabrat Prajankate and Pongsri Siwarasak. 2011. Co-culture of *Trichoderma reesei* RT-P1 with *Saccharomyces cerevisiae* RT-P2: Morphological studies. Journal of Microscopy Society of Thailand. 107, 75-78.

P. Siwarasak, N. Kuppithayanant, C. Duangduen and P. Prajankate. 2010. Two strains co-culture of *Trichoderma reesei* RT-P1 and *Saccharomyces cerevisiae* RT-P2 and its production of ethanol from pineapple peel waste. In: Proceedings of the 2nd Rajamangala University of Technology International Conference. November 24 – 26, 2010. Chulabhorn Research Institute, Bangkok, Thailand.

Pongsri Siwarasak and Pradabrat Prajankate. 2010. Cellulase production from pineapple peel in submerge-state fermentation by using *Trichoderma reesei* RT-P1 and co-culture of *Trichoderma reesei* RT-P1 and *Saccharomyces cerevisiae* RT-P2. In: Proceedings of the 17th Regional Symposium on Chemical Engineering. November 22 – 23, 2010. Queen Sirikit National convention Center, Bangkok, Thailand.

ผ่องศรี ศิวราศักดิ์, เยาวลักษณ์ แถลงกัณฑ์, จุฑารัตน์ น้อยหนู, นิรันดร์ เจริญศรี และต้อม แม้นรัมย์. 2554. การใช้ครูดเอนไซม์ผงสำหรับการหมักเอทานอลจากเปลือกสับปะรด (Crude enzyme powder utilization for ethanol fermentation from pineapple skins). ในการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7. 3 – 5 พฤษภาคม 2554. ภูเก็ต ออร์คิด รีสอร์ท และ สปา จังหวัดภูเก็ต.

4.8.2 ลำต้นสดข้าวฟ่างหวาน โดยได้นำเสนอผลงานดังกล่าวในที่ประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติ รวมทั้งได้รับการตีพิมพ์ลงวารสารวิจัยที่มี impact factor เท่ากับ 4.365 คือ

Pongsri Siwarasak, Pradatrat Pajantagate and Knoktip Prasertlertrat. 2012. Use of *Trichoderma reesei* RT-P1 crude enzyme poder for ethanol fermentation of sweet sorghum fresh stalks. Bioresource Technology. 107, 200-204.

4.8.3 กากมันสำปะหลัง นำเสนอในการประชุมวิชาการ คือ

นุสรา สาระมาศ, เจษฎา ทองศิริ, ธาดาพันธ์ ยอดนุ่ม และผ่องศรี ศิวราศักดิ์. 2553. การผลิตเซลลูเลสชนิดผงแห้งจากการหมักแข็งกากมันสำปะหลังโดยใช้ไตรโคเดอร์มา

รีสิอี RT-P1 (Cellulase production from solid-state fermentation of cassava waste by using *Trichoderma reesei* RT-P1). ในการประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 20. 22-23 พฤศจิกายน 2553. ศูนย์การประชุมแห่งชาติสิริกิติ์ กรุงเทพมหานคร.

ประดับรัฐ ประจันเขตต์, ผ่องศรี ศิวราศักดิ์, จุไรรัตน์ ดวงเดือน และณัฐวรรณ คุปพิทยานันท์. 2553. การศึกษาสัณฐานวิทยาของเชื้อผสมระหว่าง *Trichoderma reesei* RT-P1 และ *Saccharomyces cerevisiae* RT-P2 เพื่อการผลิตเอทานอล (A study on morphology of co-culture between *Trichoderma reesei* RT-P1 and *Saccharomyces cerevisiae* RT-P2 for ethanol production). ในการประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 20. 22-23 พฤศจิกายน 2553. ศูนย์การประชุมแห่งชาติสิริกิติ์ กรุงเทพมหานคร.