



รายงานฉบับสมบูรณ์

การออกแบบและสร้างเครื่องอบมันเส้นแบบสายพานลำเลียงต่อเนื่องชนิดหลาย

สถานะการอบ

Design and Construction of a Multi-Stage Continuous Apron Dryer
for Cassava Chip

โดย ผศ.ดร.ธนา ราษฎร์ภักดี สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
 รศ.ดร. สมชาย ชวนอุดม สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร
 ผศ.ดร. คมกฤษ ปิติฤกษ์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2562

สัญญาเลขที่ RDG60T0079

รายงานฉบับสมบูรณ์

การออกแบบและสร้างเครื่องอบมันเส้นแบบสายพานลำเลียงต่อเนื่องชนิดหลาย

สถานะการอบ

Design and Construction of a Multi-Stage Continuous Apron Dryer
for Cassava Chip

	คณะผู้วิจัย	สังกัด
1.	ผศ.ดร.ธนา ราษฎร์ภักดิ์	สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
2.	รศ.ดร.สมชาย ขวณอุดม	สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร
3.	ผศ.ดร.คมกฤษ ปิติฤกษ์	สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

ชุดโครงการ “การพัฒนาอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดย่อม” ปีงบประมาณ 2560

สนับสนุนโดย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานฉบับนี้เป็นของผู้วิจัย วช. - สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปผู้บริหาร

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหา

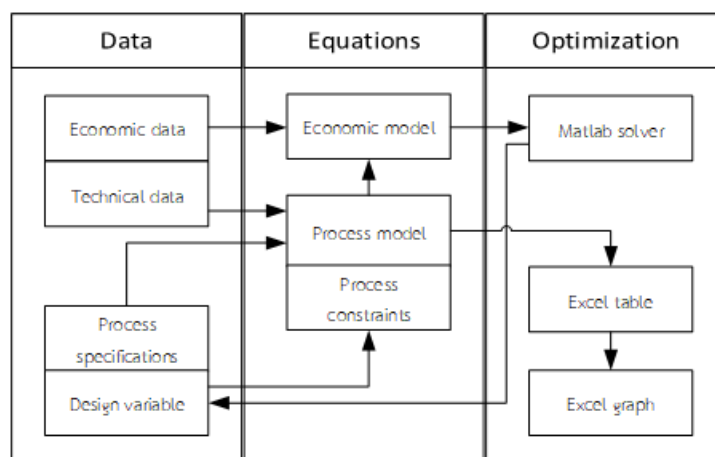
การผลิตมันเส้นโดยการนำหัวมันสำปะหลังเข้าเครื่องสับให้เป็นชิ้นๆ จากนั้นนำไปลดความชื้นด้วยการตากแดดบนลานคอนกรีต มันเส้นที่ถูกตากจะถูกพลิกกลับเป็นระยะจากมีความชื้นประมาณ 14-15 เปอร์เซ็นต์ ฐานเปียก จากนั้นจะถูกรวบรวมกองไว้ จึงมีโอกาสมันเส้นจะเปียกเข้ามาในระหว่างกระบวนการผลิต ในพื้นที่ที่มีความชื้นอากาศสูงการตากแดดไม่สามารถช่วยให้มันเส้นแห้งได้อย่างสม่ำเสมอ ปัญหาสภาวะอากาศชื้นของประเทศไทยที่ส่งผลต่อการทำมันเส้นแห้ง และความต้องการมันเส้นที่สะอาด เครื่องอบแห้งจึงเป็นแนวทางหนึ่งในการผลิตมันเส้นให้มีคุณภาพ

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ออกแบบและสร้างเครื่องอบมันเส้นแบบสายพานลำเลียงต่อเนื่องชนิดหลายสถานะการอบ

3. การออกแบบเตาอบมันเส้นที่ใช้ในการวิจัย

เพื่อป้องกันมันสำปะหลัง ถูกความร้อนสูง ที่ผิวหน้าของชิ้นมันซึ่งจะเกิดเจลแป็ง และความชื้นภายในจะไม่สามารถระเหยออกมาได้ เครื่องอบที่ออกแบบจึงประกอบด้วยห้องความร้อน สภาวะอุณหภูมิต่ำ ไปสูง 3 สถานะ และ ห้องคลายความร้อน 1 สถานะ ตัวเครื่องอบและอุปกรณ์ต่อร่วม ถูกออกแบบด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนและมวลสำหรับลักษณะเครื่องอบแบบสายพานลำเลียง บนวิธีการ Spread sheet – aided dryer design (แสดงขั้นตอนในภาพที่ 1.1) ร่วมกับวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบ Hybrid differential evolution & Nelder and Mead method ตัวเครื่องอบที่สร้างขึ้น มีสายพานแสดนเลสชั้นเดียว ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ขนาด 4.8 กิโลวัตต์ ด้วยความเร็วสายพานต่ำสุด 2 เมตรต่อชั่วโมง เครื่องอบใช้พลังงานความร้อนจากแก๊สร้อนของหัวเผาขนาด 245 กิโลวัตต์ แก๊สร้อนไหลผ่านท่อหุ้มฉนวน เข้าที่ห้องอบด้านบน ใน 3 สถานะ แรก และเข้าที่ห้องอบด้านล่าง ทั้ง 4 สถานะ ด้วยความเร็วลมเฉลี่ย 20 เมตรต่อวินาที ความชื้นถูกผลักออกจากกระบบห้องอบจากความแตกต่างของความดัน ผ่านช่องทาง ออกด้านบน จำนวน 8 ช่อง ในแต่ละสถานะ ภาพของเตาอบมันเส้นที่สร้างแล้วเสร็จแสดงในภาพที่ 1.2



ภาพที่ 1.1 model implementation ในรูปแบบ functional block diagram



ภาพที่ 1.2 ลักษณะของเครื่องอบและส่วนประกอบต่าง ๆ

4. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องอบแบบปัจจัยทั่วไป (general factorial design) สรุปได้ว่าความชื้นของมันเส้นก่อนการอบและอุณหภูมิในการอบมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความชื้นของมันเส้นหลังการอบ และไม่มีปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของมันเส้นก่อนอบกับอุณหภูมิในการอบ เมื่อนำข้อมูลมาสร้างสมการถดถอย พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการอบมันเส้นเพื่อให้ได้ความชื้นไม่เกิน 16 %wb คือ เมื่อความชื้นมันเส้นก่อนอบประมาณ 40 %wb ควรใช้อุณหภูมิในการอบไม่น้อยกว่า 120 องศาเซลเซียส หรือ เมื่อมันเส้นมีความชื้นก่อนอบ 65 %wb ควรใช้อุณหภูมิในการอบไม่น้อยกว่า 125 องศาเซลเซียส ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ พบว่า ค่าวัตถุดิบไม่ควรเกิน 3.49 บาทต่อกิโลกรัม กำลังการผลิตขั้นต่ำ 1,191.46 กิโลกรัมต่อวัน ราคาขายมันอบแห้งไม่ควรต่ำกว่า 5.62 บาทต่อกิโลกรัม จะทำให้โครงการนี้ไม่ขาดทุนและนำลงทุน

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องอบมันเส้นแบบสายพานลำเลียงต่อเนื่องชนิดหลายสถานะการอบ เพื่อป้องกันมันสำปะหลัง ถูกความร้อนสูง ที่ผิวหน้าของชิ้นมันซึ่งจะเกิดเจลแป็ง และความชื้นภายในจะไม่สามารถระเหยออกมาได้ เครื่องอบที่ออกแบบจึงประกอบด้วยห้องความร้อน สภาวะอุณหภูมิต่ำไปสูง 3 สถานะ และ ห้องคลายความร้อน 1 สถานะ ตัวเครื่องอบและอุปกรณ์ต่อร่วม ถูกออกแบบด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนและมวลสำหรับลักษณะเครื่องอบแบบสายพานลำเลียง บนวิธีการ Spread sheet – aided dryer design ร่วมกับวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบ Hybrid differential evolution & Nelder and Mead method ตัวเครื่องอบที่สร้างขึ้น มีสายพานสแตนเลสชั้นเดียว เจาะรูด้านล่าง เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ห่างกัน 25 มิลลิเมตร 3 แถวบนแนวยาวของชิ้นสายพาน เมื่อประกอบกันได้สายพานกว้าง 2 เมตร ยาว 9 เมตร ความยาวทั้งหมด 20 เมตร ระยะห้องอบ 6 เมตร ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ขนาด 4.8 กิโลวัตต์ ด้วยความเร็วสายพานต่ำสุด 2 เมตรต่อชั่วโมง เครื่องอบใช้พลังงานความร้อนจากแก๊สร้อนของหัวเผาขนาด 245 กิโลวัตต์ แก๊สร้อนไหลผ่านท่อหุ้มฉนวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว เข้าที่ห้องอบด้านบน ใน 3 สถานะแรก และเข้าที่ห้องอบด้านล่าง ทั้ง 4 สถานะ ด้วยความเร็วลมเฉลี่ย 20 เมตรต่อวินาที ความชื้นถูกผลักรอกจากระบบห้องอบจากความแตกต่างของความดัน ผ่านช่องทาง ออกด้านบน ขนาด 20 X 20 ตารางเซนติเมตร จำนวน 8 ช่อง ในแต่ละสถานะ พร้อมปล่องช่วยปล่อยอากาศออกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว ที่ห้องอบ 3 สถานะแรกเพื่อเพิ่มความสามารถในการอบเมื่อ ความชื้นบรรยากาศสูง

การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องอบมันเส้นแบบการออกแบบการทดลองแบบปัจจัยทั่วไป (general factorial design) สามารถสรุปได้ว่าความชื้นของมันเส้นก่อนการอบและอุณหภูมิในการอบมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความชื้นของมันเส้นหลังการอบ และไม่มีปฏิกริยาสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของมันเส้นก่อนอบกับอุณหภูมิในการอบ เมื่อนำข้อมูลมาสร้างสมการถดถอย (Linear regression model) พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการอบมันเส้นเพื่อให้ได้ความชื้นไม่เกิน 16 %wb คือ เมื่อความชื้นมันเส้นก่อนอบประมาณ 40 %wb ควรใช้อุณหภูมิในการอบไม่น้อยกว่า 120 องศาเซลเซียส หรือ เมื่อมันเส้นมีความชื้นก่อนอบ 65 %wb ควรใช้อุณหภูมิในการอบไม่น้อยกว่า 125 องศาเซลเซียส ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์พบว่า ค่าวัตถุดิบไม่ควรเกิน 3.49 บาทต่อกิโลกรัม กำลังการผลิตขั้นต่ำ 1,191.46 กิโลกรัมต่อวัน ราคาขายมันอบแห้งไม่ควรต่ำกว่า 5.62 บาทต่อกิโลกรัม จะทำให้โครงการนี้ไม่ขาดทุนและน่าลงทุน

Abstract

The aims of this research are to design and to construct the multi-stage line-cassava baking machine with continuous apron conveying system. The purpose of this design is to protect line-cassava from overheated causing surface gel and moisture ventilation clogged. The proposed machine consists of multi-chambers allowing temperature to increase for 3 stages and remaining stage is set for cooling the higher temperature. The baking machine equipped with all accessories is adopted to heat and mass transfer theory for conveying system on spread sheet – aided dryer design and evolution & Nelder and Mead method. The built machine has one-layer stainless apron conveyor with 5 mm diameter reamed and 25 mm separated throughout 6 meters long of the stainless belt. The dimension of machine conveying is of the total length of 20 meters (upper and lower parts) and 6 meters for baking chamber and width of 2 meters driven by 4.8 kw motor with the lowest speed of 2 meters per hour. The machine is fueled by the 245-kilowatt burner. The hot air is transferred via 6 inched diameter insulated duct to the machine's first three upper chambers and 4 stages of the lower chamber with average air flow of 20 meters per second. The moisture is pushed from the system with different pressures through 8 channels with the dimension of 20 X 20 centimeters in each stage and 6-inch hood at the baking chamber in order to enhance the baking efficiency at high atmospheric humidity.

The performance testing of the machine is designed according to the general factorial design and it can be concluded that the prior moisture of the line cassava and temperature are significant different but the interaction between moisture of cassava before baking and temperature is not significant different at $\alpha = 0.5$.

All data are analyzed and constructed the linear regression model. It can be summarized that, to obtain 16%wb cassava, the prior moisture of cassava at 40%wb should be baked at 120 C while that of 65%wb should be baked at 65 C, respectively.

For engineering economic analysis, the machine investment is very attractive at current situation. And for sensitivity analysis, the raw material cost is at most 3.49 baht per kilogram, the lowest daily capacity is at least 1,191.46 kilogram, and the baked cassava price is at least 5.62 baht per kilogram will make this machine investment preferable.

สารบัญ

บทที่	หัวข้อ	หน้า
บทที่ 1	บทนำ	
	1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหา	1
	1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
	1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
	1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ	2
	1.5 กรอบแนวความคิดของการวิจัยและขั้นตอนการวิจัยในภาพรวม	2
	1.6 แผนงานโครงการ	4
บทที่ 2	การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง	
	2.1 วรรณกรรม/สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง	5
บทที่ 3	วิธีการดำเนินการวิจัย	
	3.1 แนวคิดในการออกแบบเตาอบมันเส้นที่ใช้ในการวิจัย	10
	3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	14
	3.3 การหาอัตราการอบแห้ง (Drying rate)	30
	3.4 การออกแบบการทดลองแบบ 3^k	31
บทที่ 4	แนวทางการออกแบบ Apron Conveyor Dryer เบื้องต้น	
	4.1 การกำหนดลักษณะของ Conveyor Dryer	36
	4.2 ส่วนประกอบของ Conveyor Dryer	37
	4.3 การพิจารณาขนาดของ Conveyor Dryer	38
บทที่ 5	การออกแบบ Dryer ด้วยวิธี Spreadsheet-Aided and Optimization	
	5.1 ทฤษฎีและเทคนิคสำหรับการออกแบบด้วย Spreadsheet-aided Process design	42
	5.2 การออกแบบ a conveyor belt dryer	43
	5.3 ผลการจำลองโดยโปรแกรม excel และ matlab simulink	53
	5.4 ลักษณะของเครื่องอบที่ได้ออกแบบ	55
บทที่ 6	ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของเครื่องอบแห้งมันเส้น	
	6.1 ผลการทดสอบเครื่องอบแห้งมันเส้น	59
	6.2 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของเครื่องอบแห้งมันเส้น	62
	6.3 ข้อจำกัดและข้อเสนอแนะในการวิจัย	67
รายการเอกสารอ้างอิง		
	รายการเอกสารอ้างอิง	68
ภาคผนวก		
	ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้ และกิจกรรมที่ดำเนินมา และผลที่ได้รับตลอดโครงการ และตารางสรุปความคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิ	71

สารบัญตาราง

รายการตาราง	หน้า
ตารางที่ 1 แสดงแนวคิดและลักษณะเครื่องอบที่จะทำการออกแบบสร้าง	3
ตารางที่ 2 ระยะเวลาดำเนินโครงการ 12 เดือน ตั้งแต่ 1 มิถุนายน 2560 ถึง 31 พฤษภาคม 2561	4
ตารางที่ 3 ตำแหน่งและตัวแปรที่ต้องการวัดของลมร้อน (ภาพที่ 10)	13
ตารางที่ 4 ตำแหน่งและตัวแปรที่ต้องการวัดของวัสดุ (ภาพที่ 11)	14
ตารางที่ 5 นิยามกลุ่มสมการ	42
ตารางที่ 6 การกำหนดลักษณะของปัญหา	43
ตารางที่ 7 แสดง Process Variables	47
ตารางที่ 8 แสดง Technical Data	48
ตารางที่ 9 Process Specifications และ Design Variables	49
ตารางที่ 10 แสดง Cost Data	50
ตารางที่ 11 แสดง NOMENCLATURE	50
ตารางที่ 12 การออกแบบการทดลองแบบปัจจัยทั่วไป	59
ตารางที่ 13 รูปแบบการวิเคราะห์ความแปรปรวน	60
ตารางที่ 14 ผลการทดสอบการอบมันเส้น	61
ตารางที่ 15 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน	61
ตารางที่ 16 แสดงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองและใช้ในการวิเคราะห์	62
ตารางที่ 17 แสดงข้อมูลการวิเคราะห์กระแสเงินสดสุทธิ	63
ตารางที่ 18 กระแสเงินสดสุทธิของเครื่องจักร	65

สารบัญภาพ

รายการภาพ	หน้า
ภาพที่ 1 การแบ่งปริมาตรควบคุมในท่ออบออกเป็นส่วนๆ เท่าๆ กัน	6
ภาพที่ 2 ระบบอบแห้งกากถั่วเหลือง	6
ภาพที่ 3 แผนภาพแสดงหนึ่งปริมาตรควบคุมของท่ออบในกรณีการไหลแบบสวนทาง	8
ภาพที่ 4 บล็อกไดอะแกรมปริมาตรควบคุมใด ๆ กรณีเชื่อมต่อกับปริมาตรการควบคุมอื่น ๆ	9
ภาพที่ 5 airless batch dryer with vapor recompression	10
ภาพที่ 6 continuous airless dryer	11
ภาพที่ 7 pulsed fluid bed with a dual butterfly valve	11
ภาพที่ 8 การสร้าง ความดันต่ำกว่าบรรยากาศใน tower dryer ด้วยพัดลมดูด	12
ภาพที่ 9 ตัวอย่างเครื่องอบแห้งแบบสายพานและมีความดันภายในต่ำกว่าบรรยากาศ	12
ภาพที่ 10 หน้าตัดเครื่องอบแห้งและตำแหน่งที่ต้องการเก็บข้อมูล	13
ภาพที่ 11 รายละเอียดด้านข้างและตำแหน่งที่ต้องการเก็บข้อมูล	14
ภาพที่ 12 รายละเอียดการไหลของก๊าซร้อนและวัสดุภายในห้องอบแห้ง	15
ภาพที่ 13 แบบจำลองการถ่ายเทมวลและพลังงานที่เกิดขึ้นภายในปริมาตรเสมือนควบคุมใด ๆ ของเครื่องอบแห้ง	15
ภาพที่ 14 สภาวะอากาศบนแผนภาพไซโครเมตริก	16
ภาพที่ 15 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศและไอน้ำเมื่อไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน	17
ภาพที่ 16 เปรียบเทียบอุณหภูมิก๊าซร้อนที่ออกจากกระบบระหว่างผลจากงานวิจัยของ Ratchaphon and Thana (2012) กับผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ M.G. Ortega และคณะ 2007	18
ภาพที่ 17 เปรียบเทียบความชื้นของวัสดุที่ออกจากกระบบระหว่างผลจากงานวิจัยของ Ratchaphon and Thana (2012) เทียบกับผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ M.G. Ortega และคณะ 2007	19
ภาพที่ 18 แสดงตัวอย่าง moisture ratio ต่อเวลาของขึ้นมันสำปะหลัง	20
ภาพที่ 19 แสดงโครงสร้างการควบคุมแบบ 2 sliding surface บน multi-sliding mode	21
ภาพที่ 20 แสดง input และ output ของระบบควบคุม	21
ภาพที่ 21 การรวมปัจจัยแบบ 3^2	32
ภาพที่ 22 การรวมปัจจัยแบบ 3^3	32
ภาพที่ 23 หน้าตัดของตัวอย่างเตาอบแบบชั้นเดียว ที่ใช้ไอน้ำเป็นสารทำความร้อน	37
ภาพที่ 24 Multiple stage dryers $n=3$	37
ภาพที่ 25 ผลของการไหลอากาศร้อนที่เกิดขึ้นจากการใส่วัสดุดิบไม่สม่ำเสมอ	38
ภาพที่ 26 เครื่องอบ single pass/multi stages dryer ที่ออกแบบเบื้องต้น	40
ภาพที่ 27 model implementation ในรูปแบบ functional block diagram	43
ภาพที่ 28 ส่วนประกอบและตัวแปรที่สนใจของ belt dryer ที่ออกแบบ	44
ภาพที่ 29 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการสร้าง spreadsheet ในการออกแบบ belt dryer ในงานวิจัยนี้	53
ภาพที่ 30 subprogram สำหรับอ่านและเขียนค่าจากการทำ iteration ลงบนตาราง spreadsheet	54
ภาพที่ 31 ผลการจำลองโปรแกรมเป็นการ convergence ของค่า objective function	54
ภาพที่ 32 ลักษณะของเครื่องอบและส่วนประกอบต่าง ๆ	55

รายการภาพ	หน้า
ภาพที่ 33 ภาพแสดงอุณหภูมิในห้องอบซึ่งแสดงบนหน้าจอ SCADA	56
ภาพที่ 34 ภาพแสดงชั้นมันสด (65.8% wb) ก่อนนำไปเข้ากระบวนการอบ	56
ภาพที่ 35 ภาพแสดงชั้นมันตาก (40.7% wb) ก่อนนำไปเข้ากระบวนการอบ	57
ภาพที่ 36 ภาพแสดงชั้นมันทดสอบบนสายพานก่อนเข้าสู่ห้องอบ	57
ภาพที่ 37 ภาพแสดงชั้นมันหลังเข้ากระบวนการอบ	58
ภาพที่ 38 ภาพแสดงชั้นมันทดสอบนำมาหาค่าความชื้น	58

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

มันสำปะหลังเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย โดยประเทศไทยสามารถผลิตมันสำปะหลังมากกว่า 30 ล้านตัน และนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ทั้งอุตสาหกรรมมันเส้น อุตสาหกรรมมันอัดเม็ด อุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง และอุตสาหกรรมการผลิตเอทานอล และสามารถส่งออกได้เป็นอันดับหนึ่งของโลก โดยส่งออกผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังรวมประมาณ 94,000 ล้านบาท ประมาณ 52,000 ล้านบาท เป็นการส่งออกในภาพของมันเส้น (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2559) [1] เหตุที่มันเส้นมีการส่งออกมากเนื่องจากสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง ทั้งใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตอาหารสัตว์ สุรา เอทานอล และกรดซิตริก เป็นต้น เนื่องจากมันเส้นสามารถเก็บสต็อกไว้ได้ตลอดทั้งปี และขนย้ายได้สะดวก มันเส้นที่ใช้ในอุตสาหกรรมดังกล่าวต้องมีคุณภาพดี และสะอาด

ในการผลิตมันเส้นโดยการนำหัวมันสำปะหลังเข้าเครื่องสับให้เป็นชิ้นๆ จากนั้นนำไปลดความชื้นด้วยการตากแดดบนลานคอนกรีต มันเส้นที่ถูกตากจะถูกพลิกกลับเป็นระยะจากมีความชื้นประมาณ 14-15 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก จากนั้นจะถูกรวบรวมกองไว้ จึงมีโอกาสมันเส้นจะมีสิ่งเจือปนเข้ามาในระหว่างกระบวนการผลิต จากการศึกษาของ ชยะ หัสติเสวี (2530) [2] ในการทำมันเส้นในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ พบว่า มันเส้นที่ได้จากการตากลานอัตราการเปลี่ยนหัวมันสดให้เป็นมันเส้นอยู่ที่ 2.13:1 โดยปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำแห้งมันเส้นที่ตากลานประกอบด้วย ความเข้มแสงแดด ความเร็วลม ความชื้นของอากาศ ลักษณะเฉพาะของชิ้นมัน ประกอบด้วย ความหนาของชิ้น ความสม่ำเสมอของขนาดชิ้น และความหนาของชั้นที่ตาก จากการศึกษาของ Olufayo and Ogunkunle (1996) [3] ได้ศึกษาการตากมันสำปะหลังด้วยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในภาพแบบต่าง ๆ ในบริเวณโซนอากาศชื้นของประเทศไทยในจีเรีย พบว่า ในพื้นที่ที่มีความชื้นอากาศสูงการตากแดดไม่สามารถช่วยให้ชิ้นมันเส้นแห้งได้อย่างสม่ำเสมอ

ถึงแม้มันเส้นเป็นที่ต้องการของอุตสาหกรรมต่าง ๆ แต่การผลิตมันเส้นให้มีคุณภาพเป็นสิ่งที่ควบคุมได้ยากโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความชื้นและสิ่งเจือปน จึงมีความจำเป็นต้องมีการพัฒนาการผลิตมันเส้นแบบใหม่เพื่อให้ได้มันเส้นที่มีคุณภาพ จากปัญหาสภาวะอากาศชื้นของประเทศไทยที่ส่งผลต่อการทำมันเส้นแห้งและความต้องการมันเส้นที่สะอาด เครื่องอบแห้งจึงเป็นแนวทางที่ดีแนวทางหนึ่งในการผลิตมันเส้นให้มีคุณภาพ

คำนี้ วาทยธา (2548) [4] ได้ศึกษาการอบแห้งมันเส้นด้วยไมโครเวฟและลมร้อนในห้องปฏิบัติการพบว่า พฤติกรรมการอบแห้งแบบชั้นบางเกิดขึ้นเมื่อความเร็วของอากาศมีค่า 0.4 เมตร/วินาที และทุกระดับความชื้นของไมโครเวฟไม่มีอิทธิพลต่อการลดลงของความชื้นในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ แต่ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงทุกความชื้นไมโครเวฟมีอิทธิพลต่อการลดลงของความชื้นอย่างมากเมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว

วีรชัย อาจหาญ และคณะ (2551) [5] ได้พัฒนาเครื่องอบแห้งมันเส้นแบบโรตารีมีความสามารถในการอบ 4,630 กิโลกรัม/ชั่วโมง ค่าพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง 9.79 MJ/kgwater ใช้เวลาในการเคลื่อนที่ภายในห้องอบนานประมาณ 47 นาที/รอบ ซึ่งเครื่องนี้มีข้อจำกัดคือ มีขนาดใหญ่ ใช้พื้นที่ติดตั้งมาก และราคาแพงประมาณ 6 ล้านบาท

ในอดีตมันเส้นมีราคาค่อนข้างต่ำและมีความผันผวนมาก แต่ในปัจจุบันความต้องการมันเส้นมีแนวโน้มสูงขึ้นประกอบกับผลผลิตที่มีในประเทศลดลง ส่งผลให้ราคามันเส้นมีแนวโน้มสูงขึ้น การลงทุนเครื่องอบแห้งจะช่วยลดข้อจำกัดของการทำแห้งมันเส้นด้วยลานตาก และการเพิ่มคุณภาพของมันเส้นสำหรับการใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้ประกอบกับที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการอบแห้งมันเส้นในห้องปฏิบัติการ ส่วนการพัฒนาเครื่องอบก็มีความใหญ่และราคาแพง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อสร้างต้นแบบ เครื่องอบแห้งที่มีขนาดพอเหมาะแบบสายพานสำหรับอบมันเส้นได้อย่างต่อเนื่อง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ออกแบบและสร้างเครื่องอบมันเส้นแบบ Apron Conveyor ชนิดหลาย Stage การอบ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 เครื่องอบมันเส้นมีกำลังการผลิตมากกว่า 1 ตันต่อวันได้ค่าความชื้นสุดท้ายไม่เกิน 16%wb

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ

1.4.1 ได้เครื่องอบมันเส้นต้นแบบชนิด Apron Conveyor แบบหลาย Stage

1.5 กรอบแนวความคิดของการวิจัยและขั้นตอนการวิจัยในภาพรวม

1.5.1 กรอบแนวคิดของการวิจัย

จากความต้องการมันเส้น ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อความสำคัญและที่มาของปัญหาแล้วนั้น ราคาซื้อจะขึ้นอยู่กับคุณภาพของมันเส้น โดยคุณภาพมันเส้นที่เป็นมาตรฐานคือ

ความชื้น = ไม่เกิน 16%

ปริมาณทราย = ไม่เกิน 4%

(ผลรวมของตัวแปรสองตัวนี้ต้องไม่เกิน 20%)

ถ้าความชื้นสูงกว่า 16% จะทำให้ถูกตัดราคา แต่ถ้าความชื้นต่ำกว่า 16% จะไม่มีการเพิ่มราคาให้ และหากมันมีความสะอาดจะได้ราคารับซื้อสูงขึ้นอีก ทางทีมวิจัยจึงมีแนวคิดที่จะผลิตเครื่องอบมันเส้นต้นแบบที่มีศักยภาพในการอบมันเส้นได้ประมาณ 1-2 ตันต่อ 20 ชั่วโมง และสามารถควบคุมคุณภาพการผลิตได้โดยความชื้นไม่เกิน 14% ฐานเปียก เพื่อป้องกันการเกิดเชื้อรา โดยลักษณะของเครื่องอบที่จะใช้ในงานวิจัยนี้มีการออกแบบคิดในภาพรวมแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงแนวคิดและลักษณะเครื่องอบที่จะทำการออกแบบสร้าง

Criterion	Types
Mode of operation	continuous
Heat input type	convection
State of wet material	moving
Operating pressure	slightly below atmospheric
Drying medium	air or superheated steam
Drying temperature	Multi stages below or above boiling temperature
Relative motion between medium and wet material	Cross flow
Number of stages	Multistage
Residence time	Long
Physical form of feed	Odd shapes
Average throughput	Kg/hr
Expected variation in throughput	Small
Fuel choice	Gas or/and electricity

1.5.2 ขั้นตอนการวิจัย

1. ศึกษาปัญหาและปัจจัย ที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องอบแห้งมันสำปะหลังแบบเส้นตลอดจนพฤติกรรมการทำงานของมันเส้น
2. ออกแบบเครื่องอบและอุปกรณ์ต่อร่วมต่าง ๆ เขียนแบบผลิตและ วางแผนการทดลอง
3. สร้างเครื่องอบและติดตั้งอุปกรณ์ตามที่ได้ออกแบบไว้พร้อมกับทดสอบการทำงานของระบบ และเครื่องมือวัดที่ได้ทำการติดตั้ง

4. เก็บข้อมูล และปรับตั้งตัวแปรควบคุมที่เกี่ยวข้องตามที่เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์คำนวณและออกแบบการทดลอง
5. สรุปผลการดำเนินงาน และชี้แจงพนักงานผู้ดูแลระบบให้มีความเข้าใจระบบเพื่อที่จะสามารถควบคุมการทำงานของระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

1.6 แผนงานโครงการ

ตารางที่ 2 ระยะเวลาดำเนินโครงการ 12 เดือน ตั้งแต่ 1 มิถุนายน 2560 ถึง 31 พฤษภาคม 2561

ขั้นตอนการดำเนินงาน		เดือนที่											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	ศึกษาปัญหาและปัจจัย ที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องอบแห้งมันสำปะหลังแบบเส้นตลอดจนพฤติกรรมการทำงานของมันเส้น												
2	ออกแบบเครื่องอบและอุปกรณ์ต่อร่วมต่าง ๆ เขียนแบบผลิตและ วางแผนการทดลอง												
3	สร้างเครื่องอบและติดตั้งอุปกรณ์ตามที่ได้ออกแบบไว้พร้อมกับทดสอบการทำงานของระบบ และเครื่องมือวัดที่ได้ทำการติดตั้ง												
4	เก็บข้อมูล และปรับตั้งตัวแปรควบคุมที่เกี่ยวข้องตามที่เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์คำนวณและออกแบบการทดลอง												
5	สรุปผลการดำเนินงาน และชี้แจงพนักงานผู้ดูแลระบบให้มีความเข้าใจระบบเพื่อที่จะสามารถควบคุมการทำงานของระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป												

ผลลัพธ์ที่ได้ในแต่ละขั้นตอน

ขั้นตอนที่ 1 ทราบปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องอบแห้งและอัตราการอบแห้งมันเส้น

ขั้นตอนที่ 2 ได้แผนการทดลอง และการเก็บข้อมูลตลอดโครงการ

ขั้นตอนที่ 3 เครื่องอบแห้งมันเส้นที่มีการติดตั้งระบบการเก็บข้อมูล และการแสดงผลปัจจัยต่างๆ ของเครื่องอบแห้ง

ขั้นตอนที่ 4 ได้ข้อมูลที่เป็นปัจจัยต่อการทำงานของเครื่องอบแห้ง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และผลการควบคุมแบบ supervisory

ขั้นตอนที่ 5 ผลการดำเนินงาน ผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของเครื่องอบแห้ง

การทบทวนวรรณกรรม/ สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง

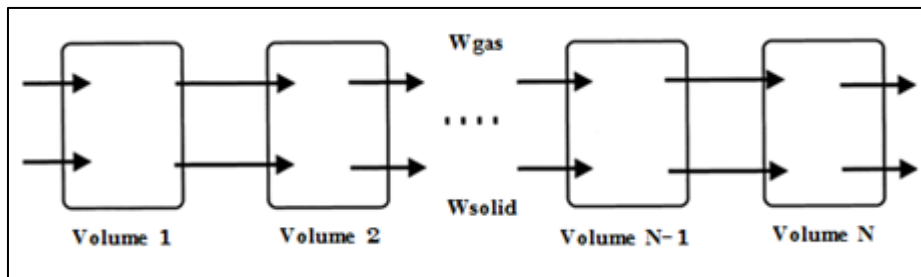
2.1 วรรณกรรม/สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง

ความสำคัญของอุตสาหกรรมมันสำปะหลังได้กล่าวไว้ในบทนำ ก่อนหน้านี้อีกแล้ว ดังนั้นในส่วนนี้จะขอยกเอาวรรณกรรมที่ได้กล่าวไว้ในข้อเสนอโครงการและจะเพิ่มเติมส่วนที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เพื่อควบคุมการอบแห้งในตอนท้าย เมื่อกล่าวถึงการอบแห้งซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญในการจัดการวัตถุดิบทางการเกษตร ซึ่งการอบแห้งเป็นกระบวนการถ่ายเท ความร้อนและมวลสาร โดยทั่วไปจะอาศัยความร้อนจากภายนอก ถ่ายเทความร้อนเข้าสู่วัสดุที่ต้องการ ความร้อน ที่ถ่ายเทเข้าไปจะทำให้ความชื้นของวัสดุ ที่อยู่ที่ผิวและเนื้อวัสดุระเหยออกมา ทั้งนี้ พลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง จะถูกกำหนดโดยระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (Drying Time) จากความชื้น เริ่มต้นไปสู่ความชื้นที่ต้องการ ซึ่งการอบแห้งในอุตสาหกรรมนั้นต้องการพัฒนาให้เพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ดังนั้นนักวิจัยหลายท่านได้ทำการพัฒนากระบวนการ การออกแบบ ตลอดจนการควบคุมกระบวนการอบแห้งให้ดีขึ้น

ไพบูลย์ และสมชาติ (2535) [6] ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการอบแห้งข้าวโพดด้วยเครื่องอบแบบหมุน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของสภาวะอากาศภายในเครื่องอบแห้งจำเป็นต้องมีการทำสมดุลมวลและพลังงานร่วมภายในเครื่องอบแห้ง ในควบคุมปริมาตรควบคุมเฉพาะ และสามารถเขียนสมการแสดงสมดุลพลังงานได้ว่า ผลรวมของการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของกระแสอากาศ การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของผลิตภัณฑ์ และความร้อนที่สูญเสียย่อมเท่ากับศูนย์ และสามารถเขียนสมการแสดงสมดุลมวลได้ว่าปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ย่อมเท่ากับปริมาณน้ำที่อากาศได้รับ

Helge (2002) [7] ได้ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบพลวัตโดยใช้หลักการของมวล พลังงานและโมเมนตัม ในกรณีศึกษาที่อบแห้งขึ้นหัวผักกาดน้ำตาลแบบไหลขนานซึ่งจะแบ่งปริมาตรควบคุมของท่ออบออกเป็นช่วง ๆ เท่า ๆ กัน ดังภาพที่ 1 โดยมีหลักการดังนี้ 1) การแลกเปลี่ยนความร้อนจะเกิดขึ้นเมื่อขึ้นผักกาดน้ำตาลโดนโปรยหรือเคลื่อนที่ในท่ออบ 2) ในแต่ละปริมาตรควบคุมจะไม่มี การไล่ระดับอุณหภูมิ

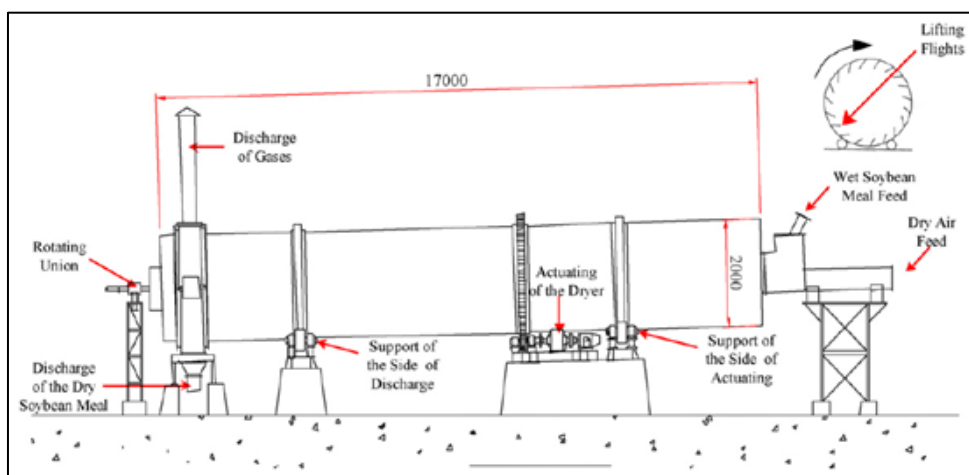
และความชื้นในแต่ละส่วนปริมาตร 3) อุณหภูมิของแก๊สแล้วของแข็งจะส่งผลต่อความชื้น และ 4) พื้นผิวการถ่ายเทความร้อนจะเท่ากับผลรวมของพื้นผิวของชิ้นผักกาดน้ำตาลที่เคลื่อนที่ ซึ่งผลจากแบบจำลองสามารถทำนายความชื้นของผลิตภัณฑ์ได้



ภาพที่ 1 การแบ่งปริมาตรควบคุมในท่ออบออกเป็นส่วนๆ เท่าๆ กัน (Helge 2002)

Lobato et.al (2008) [8] ได้นำเมตาอีวิริสติกส์ Different Evolutions มาประยุกต์ใช้เพื่อประมาณค่าอัตราการอบแห้งที่ไม่ทราบค่าในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของท่ออบแห้งแบบหมุนชนิดสวนทางในกรณีศึกษาการอบแห้งปุ๋ย Super-phosphate (SSPG) โดยในกรณีศึกษาครั้งนี้ค่าอัตราการอบที่ไม่ทราบค่ามีทั้งหมด 5 ตัว ซึ่งผลจากการใช้ Different Evolutions สามารถหาผลที่ดีที่สุด 20 ผล เวลาในการคำนวณประมาณ 14.2 นาที ในการประยุกต์ใช้สามารถนำ Different Evolutions ไปหาค่าที่ไม่สามารถวัดได้หรือหาค่าแทนการทดลองได้

Gianini et.al (2010) [9] ได้ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบพลวัตโดยใช้หลักการการสมดุลของมวลและพลังงาน ในกรณีศึกษาท่ออบแห้งกากถั่วเหลืองดังภาพที่ 2 เพื่อใช้ในการทำนายผลของความชื้นของผลิตภัณฑ์และนำมาควบคุมความชื้นโดยเครื่องมือควบคุม ซึ่ง Gianini et.al ได้ใช้เครื่องมือควบคุมแบบ Proportional, Integral and Derivative (PID) control ในการคำนวณจะใช้โปรแกรม MATLAB ในการควบคุมแบบ PID ซึ่งผลในการควบคุมสามารถควบคุมความชื้นได้เมื่อถูกรบกวนจากสภาพแวดล้อมในแบบต่าง ๆ



ภาพที่ 2 ระบบอบแห้งกากถั่วเหลือง (Gianini et.al 2010)

Hamed et.al (2013) [10] ได้ศึกษาผลกระทบของตัวแปรควบคุมต่าง ๆ ต่อค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ ในท่ออบแห้งแบบหมุนในกรณีศึกษาการอบแห้ง Ammonium nitrate (AN) โดยใช้ท่ออบแห้งแบบหมุน ในการศึกษาผลกระทบ Hamed et.al ได้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการศึกษา โดยวิธีการศึกษาผลกระทบจะใช้วิธีปรับเพิ่ม-ลดค่าตัวแปรจากค่ามาตรฐาน ซึ่งในการปรับจะปรับเพิ่ม 20 % และปรับลด 20% เพื่อดูค่าผลตอบสนอง ซึ่งค่าที่มีผลต่อค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์มากที่สุด คือ ค่าความชื้นขาเข้าและค่าอุณหภูมิอากาศร้อน

Francisco et.al (2015) [11] ได้ทำการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ระบบอบแห้งแบบหมุนชนิดไหลขนานของกากมะกอกจากการผลิตน้ำมันมะกอก ซึ่งแบบจำลองของ Francisco จะใช้แบบจำลองในแต่ละสถานะแตกต่างกัน คือ สถานะยังไม่คงตัว (Transient) และสถานะคงตัว (Steady-state) อีกทั้งยังสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของห้องเผาไหม้ที่สร้างความร้อนให้กับการอบแห้ง การประยุกต์ใช้สมการทางคณิตศาสตร์ Francisco et.al จะโดยใช่การควบคุมแบบ PID ในการควบคุมอัตโนมัติสำหรับการเผาไหม้ให้สัมพันธ์กับระบบอบแห้งแบบหมุนเพื่อให้เกิดการประหยัดพลังงานสูงสุด

ในการออกแบบการควบคุมอัตโนมัติสำหรับเตาอบนั้นส่วนใหญ่นักวิจัยจะทำการวิจัยและทำการทดสอบโดยการสร้างแบบจำลองในโรงงานนำร่องขนาดเล็ก (Pilot Plant) นอกจากนี้ยังทำในช่วงการอบแห้งที่น้อยมาก คือใช้เวลาในการอบแห้งไม่มากวัสดุที่ผ่านการอบก็จะออกมาจากเครื่องอบหรือกระบวนการอบ ดังนั้นในการอบแห้งด้วยเครื่องอบมีแนวทางพิจารณาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการอบ จากการศึกษาของ Courtois, F และคณะ 1994 [12] จะมีแนวทางดังนี้

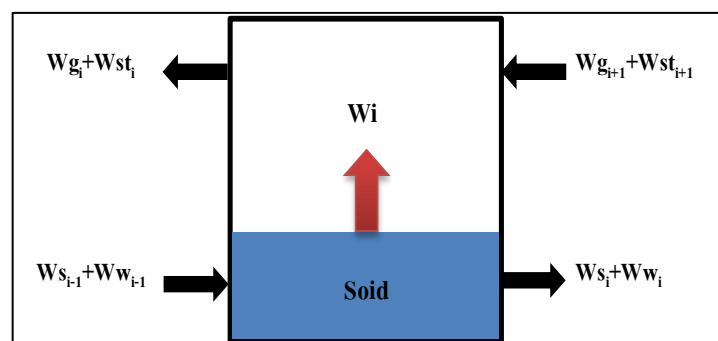
- 1) รักษาความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ระหว่างขีดจำกัดที่กำหนด
- 2) เพิ่มประสิทธิภาพของผลผลิตและลดการใช้พลังงาน
- 3) ลดผลกระทบของการรบกวนระบบควบคุม
- 4) รักษาอุณหภูมิของของวัสดุเพื่อไม่ให้เกิดการย่อยสลายด้วยกระบวนการทางความร้อนแก่วัสดุ

โดยเป้าหมายเหล่านี้จะถูกตั้งเป็นข้อกำหนดในการออกแบบกลยุทธ์การควบคุม โดยใช้ตัวแปรควบคุม เช่นอุณหภูมิก๊าซร้อนที่เข้าและออก อุณหภูมิกระเปาะเปียกที่ออก ความชื้นที่อยู่ในวัสดุ อัตราการไหลของก๊าซ อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ และปริมาณไอน้ำที่อยู่ในอากาศที่ทางออกเครื่องอบ Savaresi, S. et al. (2001) [13] ทั้งนี้ การควบคุมระบบจะขึ้นอยู่กับเป้าหมายที่ต้องการและจำนวนตัวแปร ซึ่งปัญหาของระบบที่ต้องการแก้ไขสามารถทำการควบคุมตัวแปรต้นและผลตอบสนองได้ในสองภาพแบบคือ 1) แบบตัวแปรต้นและตัวแปรตามมีอย่างละหนึ่งตัวแปร (Single input single output: SISO) โดยตัวแปรที่ควบคุมอาจจะเป็นอุณหภูมิของก๊าซร้อนและความชื้นของวัสดุ 2) แบบ ตัวแปรต้นและตัวแปรตามมีมากกว่าหนึ่งตัวแปรขึ้นไป (Multi input multi output: MIMO) โดยที่ตัวแปรควบคุมอาจเป็น อัตราการไหลของวัสดุที่มีความชื้น และอัตราการไหลของเชื้อเพลิง ดังนั้นตัวแปรตามอาจเป็นค่าความชื้นในวัสดุเปียกและอุณหภูมิของก๊าซร้อนที่ออกจากระบบ (M.G. Ortega et al., 2007 ; R. Arjona et al., 2005) [14,15] ซึ่งในปัจจุบันตัวแปรที่กล่าวมาเป็นที่ยอมรับสำหรับใช้

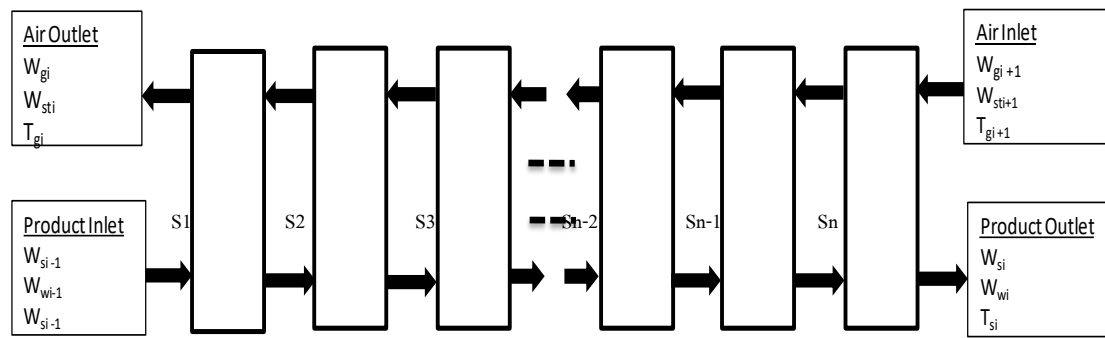
ในการเป็นตัวแปรในการควบคุมระบบสำหรับกระบวนการอบโดยเครื่องอบแบบหมุน และหรือเครื่องอบแบบอื่น ๆ

ในการออกแบบกฎการควบคุมหรือเทคนิคการควบคุมสำหรับเตาอบแบบหมุนนั้น Duchesne et al. (1997) [16] กล่าวว่า กระบวนการอบแห้งในเครื่องอบแห้งแบบหมุนเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนมากเนื่องจากต้องมีการหมุนของท่ออบ เพื่อให้วัสดุต้องสัมผัสกับอากาศร้อน โดยจะต้องมีความเข้าใจเกี่ยวกับการใช้เครื่องอบ เช่น กำลังการผลิตสำหรับเครื่องอบแห้งแบบหมุน ความสามารถในการอบแห้ง และลักษณะทางกายภาพทั่วไปของเครื่องอบจึงจะสามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้อย่างถูกต้อง โดยการออกแบบเครื่องอบแบบหมุนนั้นใช้ใน หลายๆกรณี เช่น การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Douglas และคณะ 1993 [17] และ Sharples et al. (1964) [18] พวกเขาได้นำเสนอการพัฒนากลยุทธ์การควบคุมแบบผสมผสานสำหรับการอบแห้งน้ำตาลในเครื่องอบแห้ง โดยทำการสมมูลมวลของวัสดุและความร้อน โดยใช้ชุดสมการเชิงอนุพันธ์ที่จะอธิบายการถ่ายเทความร้อนของมวลวัสดุและพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งน้ำตาล รวมถึงงานวิจัยของ ไพบูลย์ และคณะ 2535 [6] ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการอบแห้งข้าวโพด เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของสภาวะอากาศภายในเครื่องอบแห้งจำเป็นต้องมีการทำสมมูลมวลและพลังงานรวมภายในเครื่องอบแห้ง ในปริมาตรควบคุมเฉพาะ และสามารถกล่าวถึงสมมูลพลังงาน ได้ว่า ผลรวมของการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของกระแสอากาศ การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของผลิตภัณฑ์ และความร้อนที่สูญเสียย่อมเท่ากับศูนย์ และสามารถเขียนสมการแสดงสมมูลมวลได้ว่าปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ย่อมเท่ากับปริมาณน้ำที่อากาศได้รับ

จากภาพที่ 3-4 พิจารณาในหนึ่งปริมาตรควบคุมซึ่งสามารถสร้างเป็นบล็อกไดอะแกรมเพื่อใช้พิจารณาสมมูลมวลและพลังงานในหนึ่งปริมาตรควบคุมเพื่อใช้สร้างสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับเตาอบแบบไหลสวนทาง โดยพิจารณาตามหลักการของ M.G. Ortega และคณะ 2007 [14]



ภาพที่ 3 แผนภาพแสดงหนึ่งปริมาตรควบคุมของท่ออบในกรณีการไหลแบบสวนทาง



ภาพที่ 4 บล็อกไดอะแกรมปริมาตรควบคุมใด ๆ กรณีเชื่อมต่อกับปริมาตรการควบคุมอื่น ๆ

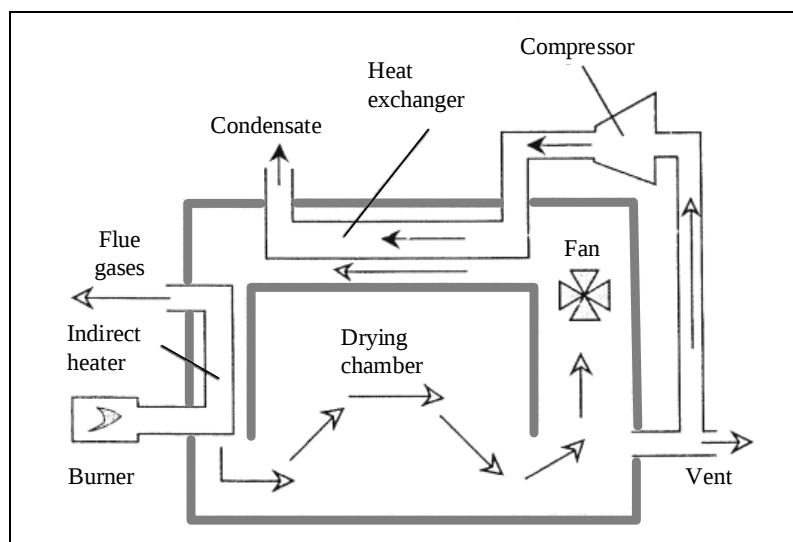
จากนั้น M.G.Ortega และคณะ 2007 [14] จึงได้ออกแบบและวิเคราะห์เกี่ยวกับเครื่องอบแบบหมุนต่อเนื่องโดยใช้การควบคุมแบบคงทนโดยการสร้างชุดคอนโทรลขึ้นมา 3 แบบ คือ ฟัซซี่ (FUZZY) และแบบคงทน (Robust Controller) บนแนวทางการควบคุมแบบหลายตัวแปร ผลจากการจำลองแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของชุดควบคุมแบบคงทน ที่ดีกว่าการควบคุมแบบอื่น ซึ่งควบคุมตัวแปรตามระบบคือ ความชื้นหลังการอบและอุณหภูมิที่ใช้ออบ นอกจากนี้การแก้ปัญหาความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบยังใช้การออกแบบภาพแบบการควบคุมแบบผสมผสาน (Hybrid controller) ตัวแปรที่ใช้ในการควบคุมใช้แบบหลายตัวแปร ซึ่งภาพแบบการควบคุมใช้เทคนิคแบบการควบคุมป้อนกลับเชิงปริมาณ (Quantitative Feedback Design: QFT) โดยเทคนิคนี้จะเป็นการปรับค่าความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากสมการเอกลักษณ์ของระบบจริงแบบเชิงเส้น (linear identified plants) และความแตกต่างที่จุดที่สามารถทำงานได้ (Operating points) ซึ่งนำมาใช้เป็นค่าประมาณค่าความไม่แน่นอนแบบไม่มีโครงสร้าง (Unstructured uncertainty) ที่สภาวะการทำงานจริงซึ่งผลสรุปของการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่ดีของชุดควบคุม โดยตัวแปรตาม (Output Variable) ของกระบวนการที่จะใช้ในการจำลองนี้คือ ความชื้นขาออกของวัสดุแห้งและอุณหภูมิของอากาศร้อนที่ออกจากเครื่องอบ โดยใช้อัตราการไหลของวัสดุเปียกและอัตราการไหลของเชื้อเพลิงในกระบวนการอบเป็นตัวแปรควบคุม (Input Variable) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการควบคุมแบบหลายตัวแปร และยังมีอีกหลายงานวิจัยที่การนำภาพแบบการควบคุมต่างมาเปรียบเทียบ เช่นการนำเสนอความแตกต่างของการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบขั้นสูงคือ Fuzzy logic controller (FLC) และชุดควบคุมแบบโครงข่ายประสาทเทียม (Neural network: NN) เปรียบเทียบกับชุดควบคุมฟัซซี่ พบว่าชุดควบคุมแบบขั้นสูงนี้สามารถกำจัดสิ่งรบกวนได้ดีกว่าชุดควบคุมแบบทั่วไป และจากการจำลองแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของชุดควบคุมซึ่งสามารถทำนายพฤติกรรมได้ใกล้เคียงกับสภาวะการทำงานจริงของเครื่องอบแบบหมุน (Yliniemi, L, 1999) [19] นอกจากนี้เทคนิคการควบคุมสำหรับเครื่องอบแบบหมุนยังสามารถประยุกต์ใช้เทคนิควิธีการพยากรณ์ร่วมกับการใช้ชุดการควบคุมเพื่อใช้ในการพยากรณ์กระบวนการอบแห้งในได้แบบจำลอง (Model predictive control MPC) (M.G. Ortega และคณะ, 2007)

วิธีการดำเนินการวิจัย

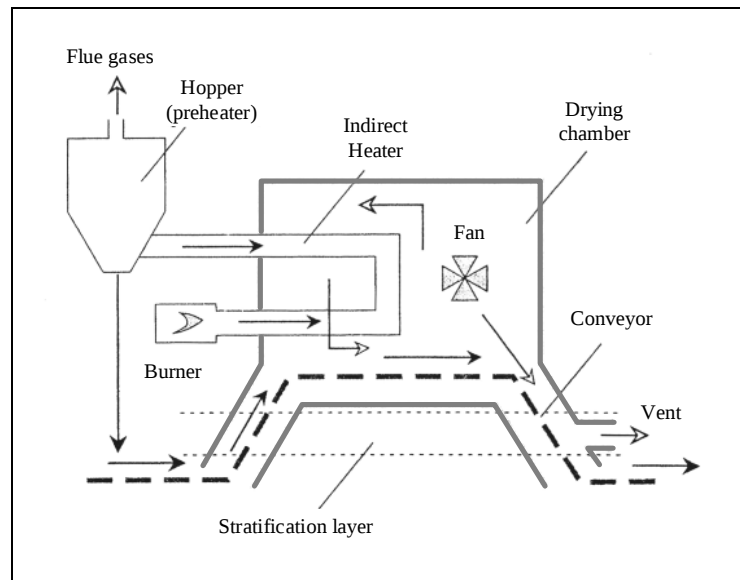
จากกรอบแนวคิดและขั้นตอนการดำเนินการวิจัยในหัวข้อที่ผ่านมา วิธีการดำเนินการวิจัย เริ่มจากการวิเคราะห์ หาทฤษฎีที่ใช้ และแนวคิดเบื้องต้นที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบเครื่องอบมันเส้น ซึ่งทางทีมวิจัย ได้ศึกษาและประเมินไปพอสมควรแล้วใน ข้อเสนอโครงการ ในที่นี้ขอยกเอาสิ่งที่ได้ศึกษาไว้ มาอธิบายเพิ่มเติม และได้แสดงการคำนวณเพื่อออกแบบเตาอบมันเส้นในเบื้องต้นต่อไป

3.1 แนวคิดในการออกแบบเตาอบมันเส้นที่ใช้ในการวิจัย

ทีมวิจัยได้เลือกที่ประยุกต์ใช้ Apron Dryer เป็นพื้นฐานและควบคุม การไหลของอากาศเป็น cross-flow ในแต่ละ zones เพื่อลด non-homogeneity ของ drying rates นอกจากนี้ยังประยุกต์ใช้ Pulsator เพื่อป้อนของไหลตัวกลางร้อนเพื่อเพิ่ม การผสมกันของ hot medium และ wet material ซึ่งตัวกลางของ ไหลร้อนอาจเป็นอากาศ หรือ ไอดของน้ำ จากการระเหยที่ออกมาจากวัสดุเปียกเอง เพื่อลดการใช้พลังงาน จากกระบวนการระเหยนํ้าด้วยพลังงานความร้อนแฝง ดังนั้นการใช้ ไอดในบาง zone จะช่วยลดการใช้ พลังงานลงได้ซึ่งการทำลักษณะนี้จะเป็นต้องประยุกต์ใช้หลักการของ airless drying เข้ามาร่วมด้วยดังแสดง ในภาพที่ 5 และ 6



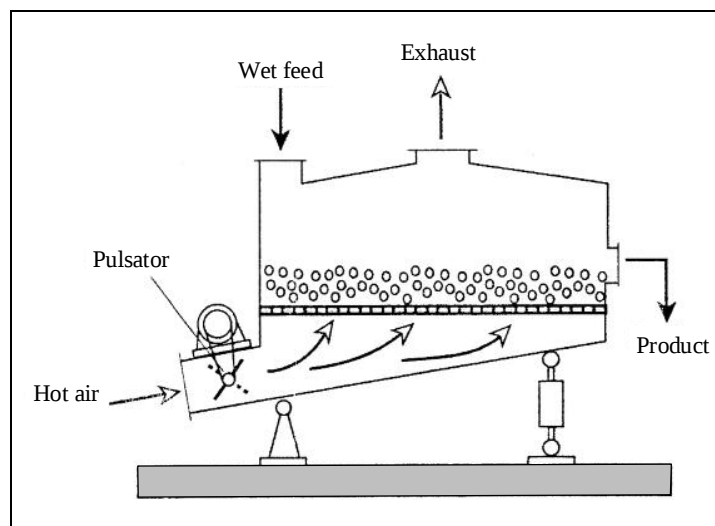
ภาพที่ 5 airless batch dryer with vapor recompression [20]



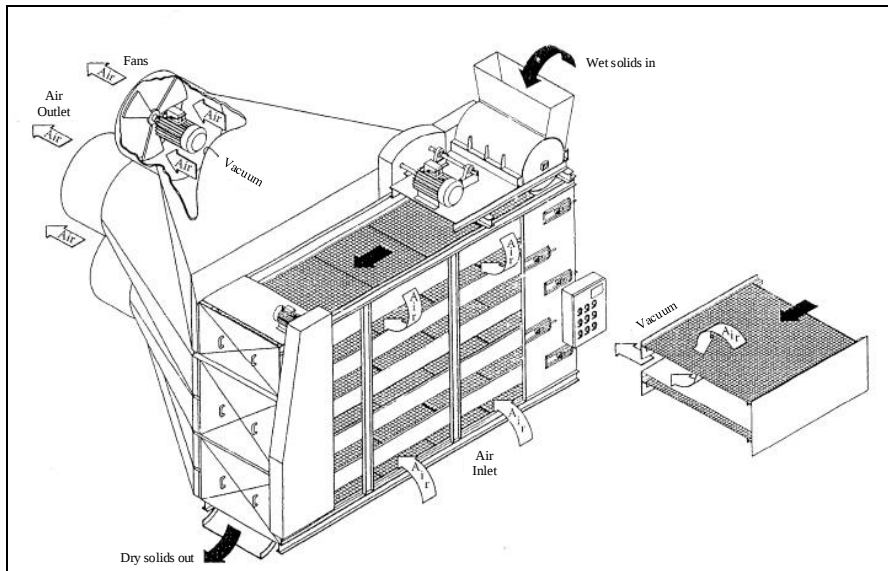
ภาพที่ 6 continuous airless dryer [20]

เนื่องจากการอบมันเส้นนั้นสามารถใช้ แก๊สร้อนได้โดยตรงดังนั้นทางที่มวิจัยจึงสามารถนำ Hot gas เข้าไปในระบบ apron dryer ได้โดยตรงและเพิ่ม pulsator เพื่อปรับจังหวะการผสมของแก๊สร้อนดังภาพที่ 7 และการสร้างความดันต่ำกว่าบรรยากาศสามารถทำได้โดยใช้ vacuum fan ดังแสดงในภาพที่ 8

ด้วยแนวคิดการผสมผสาน ดังที่กล่าวไปข้างต้นนำไปออกแบบต้นแบบ ซึ่งตัวอย่างของเครื่องอบแบบ Apron conveyor ในท้องตลาดแสดงในภาพที่ 9 ซึ่งจากการคำนวณโดยประมาณ สภาวะการทำงานของ เครื่องอบแห้ง ใช้พลังงานความร้อนประมาณ 80 kW ความเร็วของสายพานบนและล่างประมาณ 1.6-1.9 เมตร/นาที่ ความเร็วพัดลมของมอเตอร์ควรอยู่ที่ 80-90 เปอร์เซนต์ และความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ทางออกควร มีค่าประมาณ 11 เปอร์เซนต์ ซึ่งจากการสำรวจข้อมูลเบื้องต้นความชื้นของวัสดุที่ทางออกเครื่องอบแห้งก่อน การบรรจุจะต้องมีค่าไม่เกิน 13 เปอร์เซนต์ อย่างไรก็ตามสามารถประยุกต์ใช้ก๊าซร้อนแทนได้ (ตัวเลขการ คำนวณสามารถเปลี่ยนแปลงได้)



ภาพที่ 7 pulsed fluid bed with a dual butterfly valve [20]

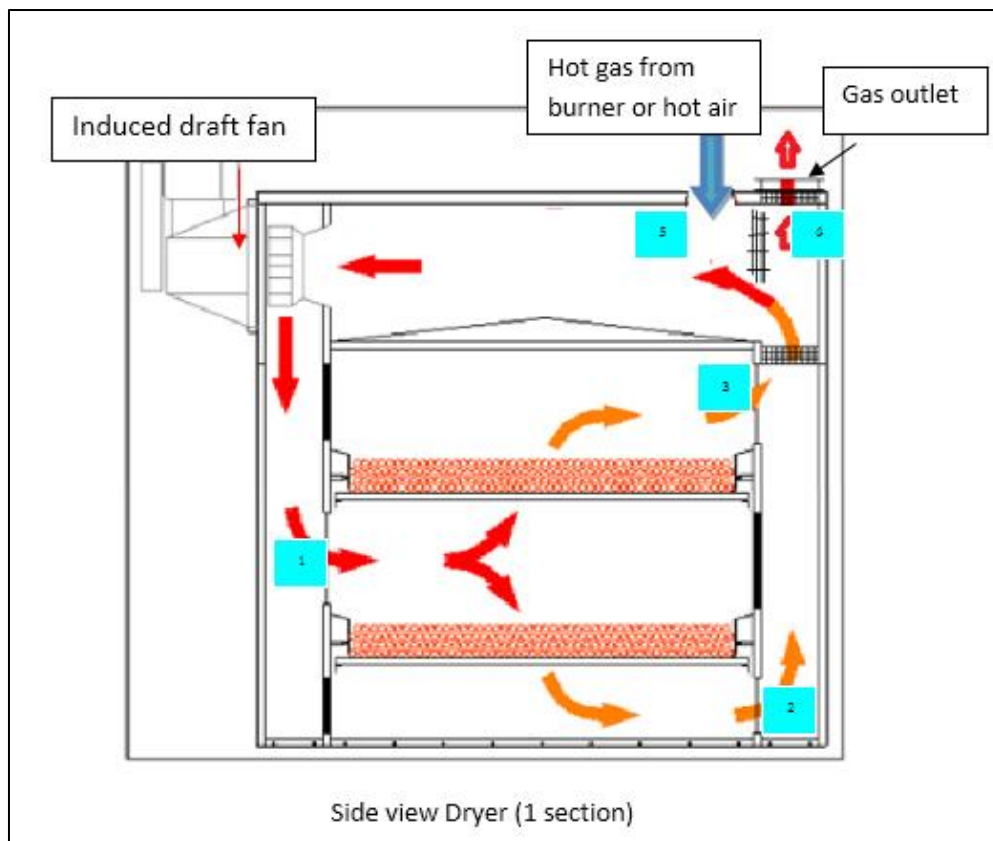


ภาพที่ 8 การสร้าง ความดันต่ำกว่าบรรยากาศใน tower dryer ด้วยพัดลมดูด [20]



ภาพที่ 9 ตัวอย่างเครื่องอบแห้งแบบสายพานและมีความดันภายในต่ำกว่าบรรยากาศ

นอกจากนี้ยังพบว่าจำเป็นต้องมีการระบุตำแหน่งที่ต้องการตรวจวัด (ภาพที่ 10) เพื่อติดตั้งเครื่องมือที่เกี่ยวข้องกับก๊าซร้อนจำนวน 2 section คือด้านหน้าเครื่องอบ (ทิศทางที่มีการป้อนผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นสูง ภาพที่ 11 ตำแหน่งหมายเลข 1) และด้านหลังท้ายเครื่องอบ (ดังแสดงในภาพที่ 11 หมายเลข 3) ซึ่งประกอบด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิ ความเร็ว และความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศ ดังแสดงรายละเอียดในภาพที่ 10 และตารางที่ 3 สำหรับในกรณีของตัวผลิตภัณฑ์ที่ไหลภายในเครื่องอบแห้งจำเป็นต้องมีการตรวจวัดตัวแปรต่างๆ คือ พื้นที่การถ่ายเทความร้อน อัตราการไหล ความชื้นจำเพาะ อุณหภูมิ ซึ่งประกอบด้วย 3 ตำแหน่ง ดังแสดงในภาพที่ 11

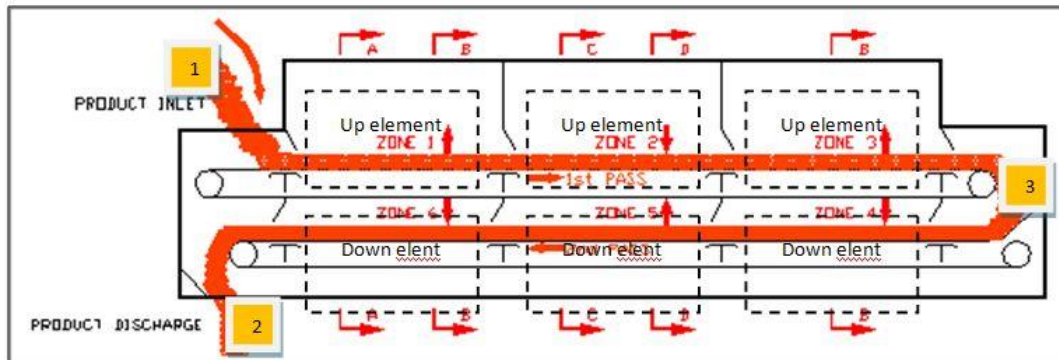


ภาพที่ 10 หน้าตัดเครื่องอบแห้งและตำแหน่งที่ต้องการเก็บข้อมูล

ตารางที่ 3 ตำแหน่งและตัวแปรที่ต้องการวัดของลมร้อน (ภาพที่ 10)

จุดที่ Position	อุณหภูมิ (°C) Temp.	ความชื้น (%) Moisture	ความเร็วลม(m/s) Velocity
1	✓	✓	✓
2	✓	✓	✓
3	✓	✓	✓
4	✓	✓	✓
5	✓	✓	✓
6	Outside tube surface area of heat exchanger (A, m ²)		

✓= จัดเก็บข้อมูล ณ ตำแหน่งที่ระบุในตารางที่ 3 และภาพที่ 7



ภาพที่ 11 รายละเอียดด้านข้างและตำแหน่งที่ต้องการเก็บข้อมูล

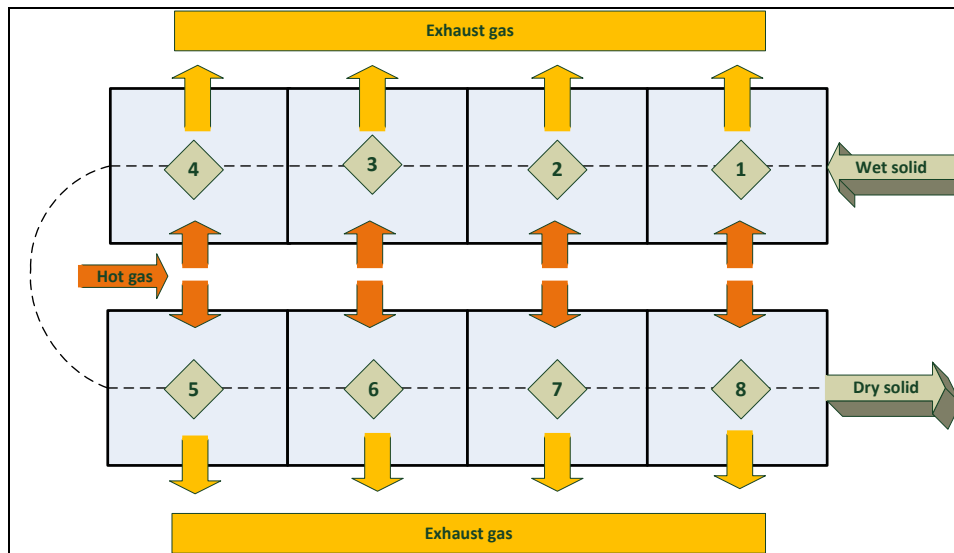
ตารางที่ 4 ตำแหน่งและตัวแปรที่ต้องการวัดของวัสดุ (ภาพที่ 11)

ตำแหน่ง	พื้นที่	อัตราการไหล	ความชื้นจำเพาะ	อุณหภูมิ
Position	Feeding area (m ²)	Mass flow rate (kg/s)	Specific humidity	Temperature (°C)
1	✓	✓	✓	✓
2	✓	✓	✓	✓
3	✓	-	✓	✓

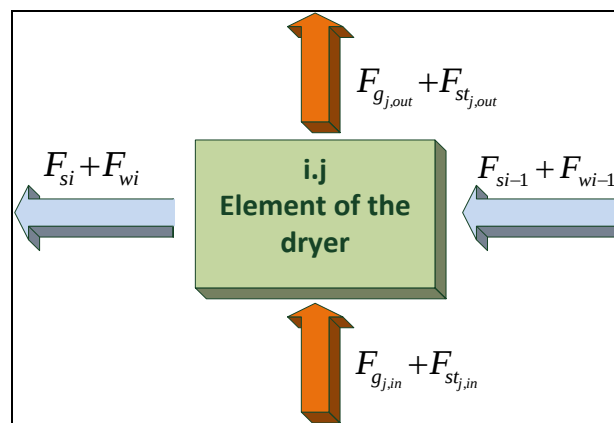
[1= Input, 2= Output, 3=Intermediate]

3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การหาความสัมพันธ์ของตัวแปรในกระบวนการอบแห้งนั้น มีหลายวิธี สำหรับในงานวิจัยนี้จะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้แนวทางของ M.G. Ortega et al. (2007) [14] และ H. Didriksen (2002) [7] ซึ่งพิจารณาว่าน้ำถูกระเหยออกจากวัสดุด้วยกระแสอากาศร้อน เป็นการถ่ายเทความร้อนให้วัสดุเพื่อลดความชื้นและพิจารณาว่าการส่งผ่านความร้อนหลักเป็นแบบการนำและการพาในสภาพไม่สูญเสียความร้อน (adiabatic condition) ทำให้สามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ได้จากสมดุลมวลและพลังงานเข้าออกจากระบบ แต่เนื่องจากเครื่องอบมีความยาวและซับซ้อน นอกจากนั้นยังเกิดการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิตลอดระยะความยาวค่อนข้างมาก เพื่อหลีกเลี่ยงความสัมพันธ์แบบ partial derivatives จึงทำการแบ่งระบบอบแห้งออกเป็น ส่วน ๆ ซึ่งค่าของตัวแปร output จากปริมาตรควบคุมจะถูกใช้เป็น input สำหรับชิ้นส่วน element ถัดไป ดังภาพที่ 12 และ 13 ตามลำดับ



ภาพที่ 12 รายละเอียดการไหลของก๊าซร้อนและวัสดุภายในห้องอบแห้ง



ภาพที่ 13 แบบจำลองการถ่ายเทมวลและพลังงานที่เกิดขึ้นภายในปริมาตรเสมือนควบคุมใด ๆ ของเครื่องอบแห้ง

3.2.1 สมการสมดุลมวลและพลังงานที่เกิดขึ้นภายในเครื่องอบแห้ง

พิจารณาภาพที่ 13 โดยกำหนดให้ ตัวห้อย s คือของแข็งแห้ง w คือน้ำ g คืออากาศร้อน st คือไอน้ำ i คือตำแหน่งปริมาตรเสมือนควบคุมในแนวระนาบ j คือปริมาตรเสมือนควบคุมในแนวตั้ง wb หมายถึงค่ากระเปาะเปียก

F คืออัตราการไหลเชิงมวล h คือค่าเอนทาลปีของของไหล T คืออุณหภูมิ t คือเวลา A คือพื้นที่การถ่ายเทมวลและความร้อน W คืออัตราการระเหยของมวลน้ำออกจากวัสดุ U คือความสามารถในการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยปริมาตรของกระบวนการ V คือปริมาตรควบคุมที่สนใจ C คือค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุ Y คือสัดส่วนความชื้นในอากาศ X คือสัดส่วนความชื้นในวัสดุ สำหรับรายละเอียดสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากงานของ M.G. Ortega et al. (2007) [14] และ H. Didriksen (2002) [7] จะได้ว่า

1) สมดุลมวลที่เกิดขึ้นภายในวัสดุเปียกและก๊าซร้อน

วัสดุเปียก (Wet solid) :

$$\frac{dm_{s_i}}{dt} = F_{s_{i-1}} - F_{s_i} \quad (1)$$

$$\frac{dm_{w_i}}{dt} = F_{w_{i-1}} - F_{w_i} - \frac{h' A}{h_{fg}} [T_{g_{ij}} - T_{wb_{ij}}] \quad (2)$$

ก๊าซร้อน (Hot gas) :

$$\frac{dm_{g_{ij}}}{dt} = F_{g_{ij,in}} - F_{g_{ij,out}} \quad (3)$$

$$\frac{dm_{st,ij}}{dt} = F_{st_{ij,in}} - F_{st_{ij,out}} + W_{ij} \quad (4)$$

2) สมดุลพลังงานที่เกิดขึ้นภายในวัสดุเปียกและก๊าซร้อน

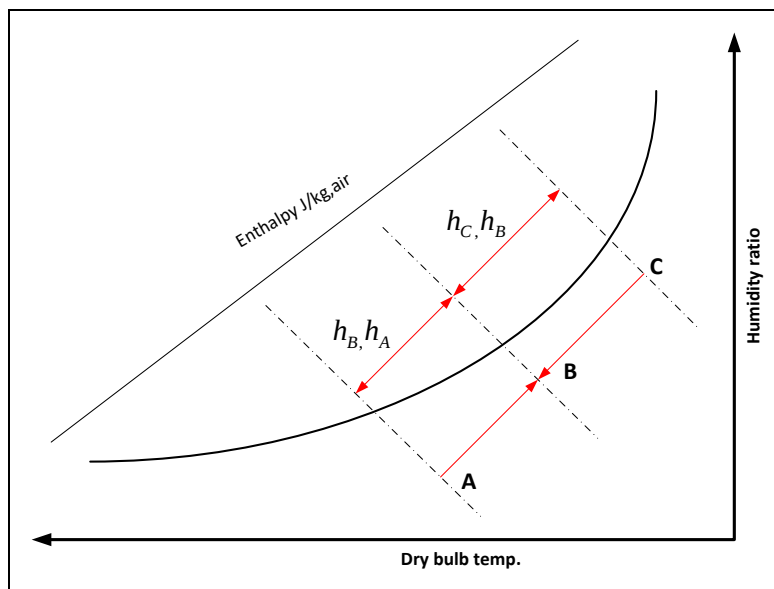
วัสดุเปียก (Wet solid) :

$$[C_s m_{s_i} + C_w m_{w_i}] \frac{dT_{s_{ij}}}{dt} = UV[T_{g_{ij}} - T_{s_{ij}}] + (F_{s_{i-1}} C_s + F_{w_{i-1}} C_w) [T_{s_{i-1}} - T_{s_i}] - W_{ij} (C_{st} T_{s_i} - C_w T_{s_i} + \lambda) \quad (5)$$

ก๊าซร้อน (Hot gas) :

$$[C_{st} m_{st_i} + C_g m_{g_i}] \frac{dT_{g_{ij}}}{dt} = UV[T_{g_{ij}} - T_{s_{ij}}] + (F_{g_{i-1}} C_g + F_{st_{i-1}} C_{st}) [T_{g_{i-1}} - T_{g_i}] - W_{ij} C_{st} (T_{g_{ij}} - T_{g_i}) \quad (6)$$

3) สมดุลพลังงานไอน้ำที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน



ภาพที่ 14 สภาวะอากาศบนแผนภาพไซโครเมตริก

สมดุลเอนทาลปี (Enthalpy balance)

$$\dot{m}_B h_B = \dot{m}_A h_A + \dot{m}_C h_C \quad (7)$$

สมดุลมวลของอากาศ (Mass balance of air)

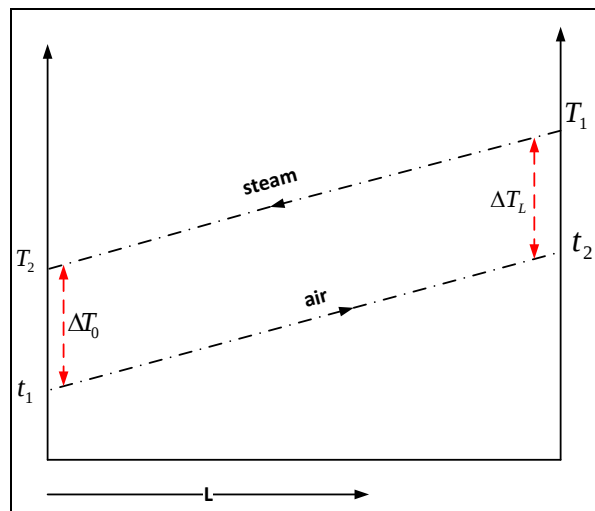
$$\dot{m}_B = \dot{m}_A + \dot{m}_C \quad (8)$$

สมดุลมวลของน้ำ (Moisture balance)

$$\dot{m}_B Y_B = \dot{m}_A Y_A + \dot{m}_C Y_C \quad (9)$$

4) การไหลแบบ Cross flow

เงื่อนไขการไหลกำหนดให้ของไหลร้อนไม่มีการผสมกัน แต่ของไหลเย็นจะมีการผสมกันก่อนเข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของไหลที่เกิดขึ้นเมื่อไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสามารถหาได้จากสมการ LMTD method ดังนี้



ภาพที่ 15 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศและไอน้ำเมื่อไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

เนื่องจากพฤติกรรมการไหลภายในเครื่องอบแห้งเป็นแบบ cross flow ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของไหลที่เกิดขึ้นเมื่อไหลผ่านเครื่องอบแห้งสามารถหาได้จาก effective temperature difference ,

$$\Delta T_{corr}$$

$$\Delta T_{corr} = F \Delta T_{ln} \quad (10)$$

$$\Delta T_o = T_{h,out} - T_{c,in} \quad (11)$$

$$\Delta T_L = T_{h,in} - T_{c,out} \quad (12)$$

ดังนั้น

$$\Delta T_{\ln} = \frac{\Delta T_o - \Delta T_L}{\ln\left(\frac{\Delta T_o}{\Delta T_L}\right)} \quad (13)$$

ค่า correction factor ,F สามารถหาได้โดยคำนวณค่า P และ R จากนั้นนำไปเปิดตารางเพื่อหาค่า F ต่อไป ซึ่งตัวแปร P และ R สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} \quad (14)$$

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} \quad (15)$$

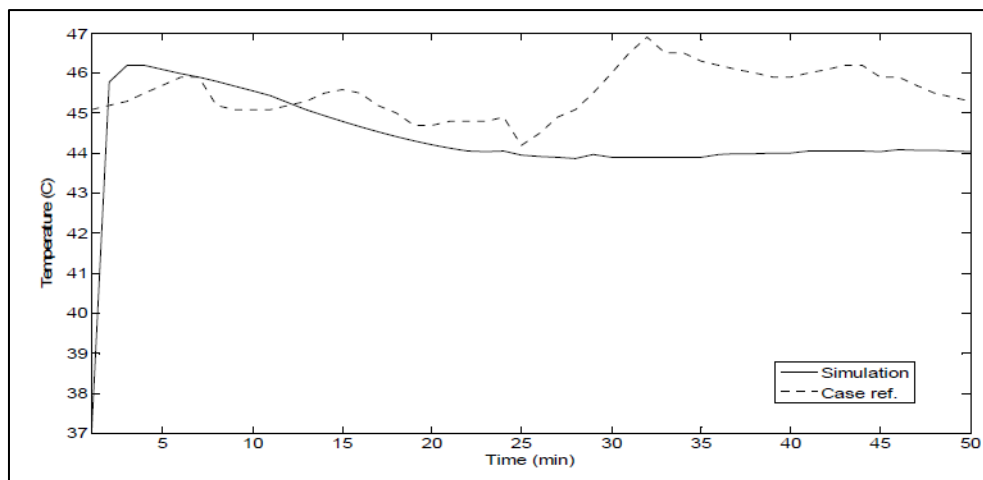
อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$Q = AU\Delta T_{correc} \quad (16)$$

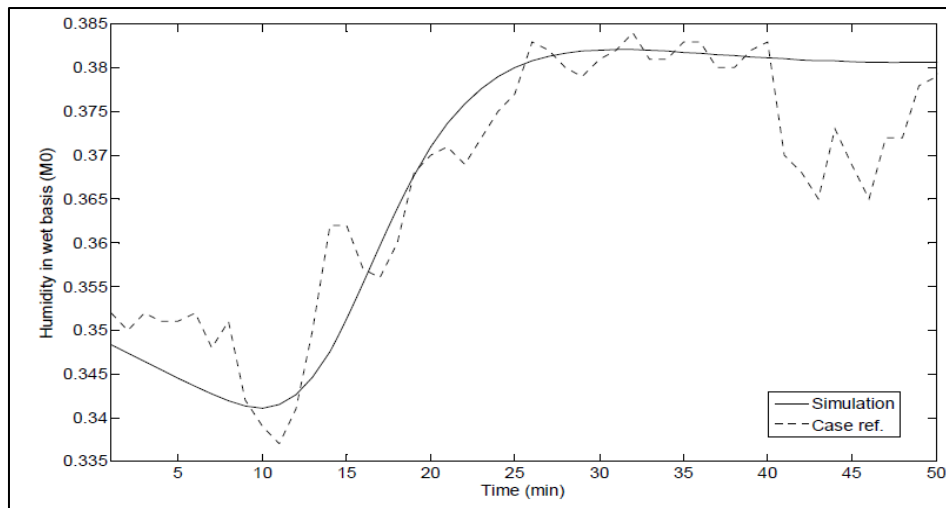
อัตราการไหลของมวลไอน้ำสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$Q = m_{st} C_{st} (T_{h,in} - T_{h,out}) \quad (17)$$

จากนั้นนำสมการทางคณิตศาสตร์ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นมาจำลองการทำงานและผลลัพธ์ของตัวแปรที่สนใจโดยใช้โปรแกรม matlab ยกตัวอย่างงานวิจัยที่มีการศึกษาโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดในระบบการผลิตจริงที่นำเสนอโดย Ratchaphon and Thana (2012) [21] ซึ่งการออกแบบของแข็งโดยใช้ก๊าซร้อนไหลในทิศตรงข้ามกันผลของแบบจำลองแสดงได้ในภาพที่ 16, 17 โดยเป็นกราฟเปรียบเทียบผลระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองของกรณีศึกษา



ภาพที่ 16 เปรียบเทียบอุณหภูมิก๊าซร้อนที่ออกจากระบบระหว่างผลจากงานวิจัยของ Ratchaphon and Thana (2012) [21] กับผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ M.G. Ortega และคณะ 2007 [14]



ภาพที่ 17 เปรียบเทียบความชื้นของวัสดุที่ออกจากระบบระหว่างผลจากงานวิจัยของ Ratchaphon and Thana (2012) [21] เทียบกับผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ M.G. Ortega และคณะ 2007 [14]

จากหัวข้อที่ผ่านมาพบว่ามีความเป็นไปได้ที่เราจะทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้อธิบายพฤติกรรมของระบบและทำให้เราสามารถทราบได้ว่าจะต้องปรับตั้งตัวแปรใดบ้างเพื่อให้ได้ค่าผลตอบแทน (ความชื้น) ตามที่ต้องการผ่านการควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติ

3.2.2 การควบคุมการอบแห้งในแต่ละโซน (ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะเทคนิคการควบคุมที่เป็นส่วนสำคัญเท่านั้นสำหรับ sensors and actuators สามารถวัดได้ทั้งโดยตรงและโดยอ้อมดังแสดงไว้ในหัวข้อที่ 3.1 แล้ว)

จากหัวข้อที่ 3.1 จะแสดงให้เห็นว่าการอบแห้งในแต่ละโซนนั้นสามารถพิจารณาจากภาพที่ 10-13 จะได้ว่าการไหลกลับข้าม zone ของก๊าซร้อนที่รับความชื้นแล้วเป็นไปได้น้อย กล่าวคือการไหลข้าม zone ระหว่างชั้นล่างและชั้นบนจะถูกกั้นด้วย apron conveyor ซึ่งถูกเคลือบด้วยมันเส้นที่ถูกอัดด้วยลมร้อนจากบริเวณกลางชั้นสายพาน (ช่องหมายเลข 1 ในภาพที่ 10) ขณะที่ช่องด้านบนจะเป็น ความดันต่ำกว่าจากการดูดของ induced draft fan ทำให้อากาศที่รับความชื้นทั้งชั้นบนและชั้นล่างถูกดูดให้ไหลออกไปทางช่องด้านข้าง 2, 3, 4 ทาง gas outlet ส่วนระหว่าง zone ในแนวยาวของตู้อบนั้นจะถูกกั้นด้วย guide plate ซึ่งอากาศจะไหลได้ลำบากและเป็นส่วนช่วยเกลี่ยความหนาของชั้นมันเส้นให้สม่ำเสมอตลอดในแต่ละ zone อีกด้วย เนื่องจากลมร้อนอาจมีการปล่อยแบบ pulse เพื่อให้เพิ่มอัตราการระเหยน้ำที่ผิวของวัสดุเปียก ดังนั้นจากการออกแบบดังกล่าวสามารถทำให้ทีมวิจัย ตั้งสมมติฐานเบื้องต้นได้ว่า แต่ละ zone สามารถพิจารณาแยกเป็น control volume ใดๆ ได้ดังภาพที่ 12-13 และหากพิจารณาจากสมการที่ 1-6 จะพบว่าระบบมีลักษณะการควบคุมเป็นลำดับขั้นกล่าวคือ ใช้ความร้อนเพื่อลดความชื้น ดังนั้นเพื่อชดเชยกับค่าความไม่แน่นอนและความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ ทีมวิจัยจึงเลือกใช้การควบคุมแบบ Multi-sliding mode control ซึ่งอยู่ในกลุ่มของ robust adaptive เพื่อควบคุมระบบดังกล่าวดังที่จะได้แสดงต่อไป

ซึ่งการควบคุมในแต่ละโซนนั้นจำเป็นจะต้องทราบถึง เส้นโค้งอัตราการอบแห้ง เพื่อที่เราจะสามารถควบคุมค่าความร้อนให้เหมาะกับค่าความชื้นที่ต้องนำออกโดยธรรมชาติของตัวมันเส้นเอง อย่างไรก็ตามอัตราการอบแห้งนั้น ขึ้นอยู่กับเทคนิคของการอบแห้ง คุณสมบัติของมันเส้น เช่น พันธุ์ ขนาดของมันเส้น อายุการเก็บเกี่ยว ระดับการซึมผ่านของลมร้อน ฯลฯ ซึ่งการอบแห้งด้วยวิธีที่ทีมวิจัยนำเสนอแบบ apron dryer นั้นสามารถพิจารณาได้เป็นลักษณะของชั้นบางพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงความชื้นในการอบแห้ง อาจสามารถทำนายออกมาในลักษณะของเส้นโค้ง Exponential decay ตามสมการของ Page's equation หรือแบบจำลองอื่น ๆ เช่น Henderson, Logarithms, Newton etc. [22] (ทีมงานต้องทำการทดลองเพื่อหาเส้นโค้งนี้ก่อนปรับตั้งระบบควบคุมแต่ละ Zone) ดังสมการที่ 18

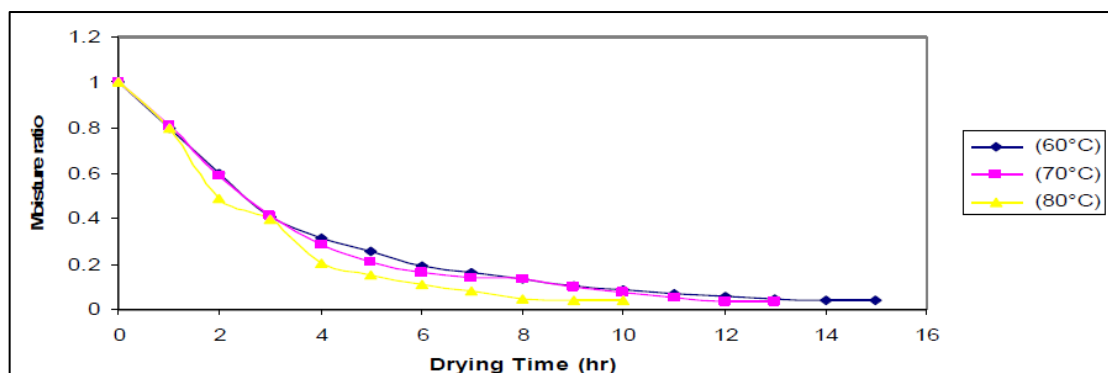
$$e^{-kt^n} = \frac{M - M_e}{M_i - M_e} \quad (18)$$

เมื่อ M = ความชื้นที่เวลา t ใด ๆ

M_e = ความชื้นสมดุล k และ n = ค่าคงที่

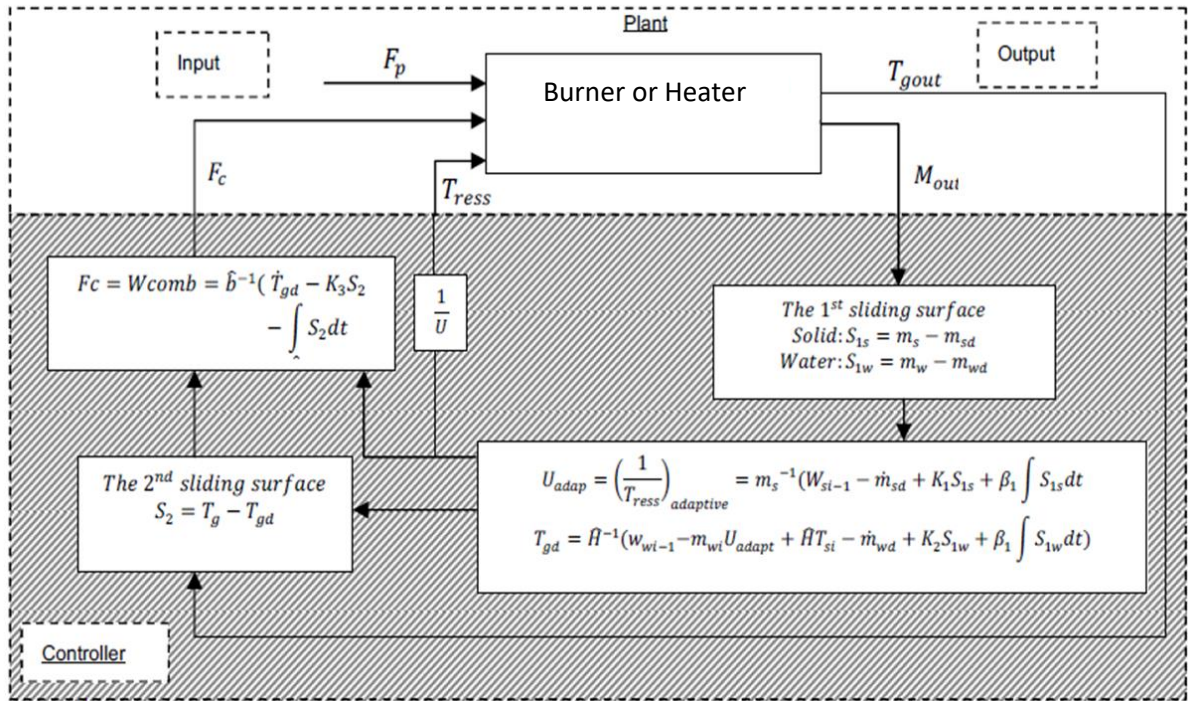
M_i = ความชื้นเริ่มต้น

ซึ่งตัวอย่างของการเปลี่ยนแปลงความชื้นเทียบกับเวลา แสดงดังในงานของ นักวิจัยท่านต่าง ๆ [4, 22] ภาพที่ 18 โดยทีมวิจัยจำเป็นต้องทดลองใหม่เช่นกัน หากแต่ต้องการแสดงให้เห็นว่าการควบคุมเวลาที่ของแข็งเปียกและเวลาที่ลมร้อน ณ อุณหภูมิต่าง ๆ อยู่ในระบบของแต่ละ Zone นั้นสามารถทำได้จากข้อมูลของเส้นโค้งดังกล่าว ที่มาจากการทดลอง เพื่อป้องกันการไหม้ที่ผิวของชั้นมันเส้นอันจะทำให้ไม่สามารถนำความชื้นที่ค้างอยู่ภายในออกได้



ภาพที่ 18 แสดงตัวอย่าง moisture ratio ต่อเวลาของชั้นมันสำปะหลัง [22]

โดยจะใช้การควบคุมแบบ Multi-sliding mode control [21] ซึ่งที่มวิจยของละการพิสูจน์ เสถียรภาพไว้เนื่องจากมีความซับซ้อนจะแสดงเฉพาะโครงสร้างของกฎการควบคุมที่ใช้ดังแสดงในภาพที่ 19



ภาพที่ 19 แสดงโครงสร้างการควบคุมแบบ 2 sliding surface บน multi-sliding mode

เมื่อ ตัวห้อย res คือ residual time สำหรับรายละเอียดสามารถพิจารณาได้จาก [21]

$$X_i = \frac{\omega_{wi}}{\omega_{si}} = \frac{m_{wi}}{m_{si}}, Y_i = \frac{\omega_{sti}}{\omega_{gi}} = \frac{m_{sti}}{m_{gi}}$$

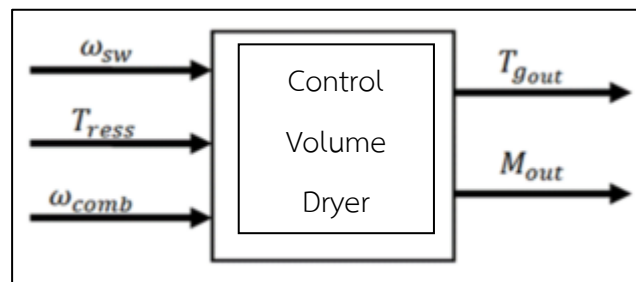
$$M_i = \frac{X_i}{1 + X_i}, X_i = \frac{M_i}{1 - M_i}$$

$$m_{si} = \omega_{si} t_{ress}, m_{wi} = \omega_{wi} t_{ress}$$

$$m_{sti} = \omega_{sti} t_{resg}, m_{gi} = \omega_{gi} t_{resg}, \omega_{sw} = \omega_s + \omega_w$$

$$m_{wd} = \omega_{sw} M_d t_{ress}$$

$$m_{sd} = \omega_{sw} (1 - M_d) t_{ress}$$



ภาพที่ 20 แสดง input และ output ของระบบควบคุม

โดยสรุปแล้วในส่วนของการตอบเมื่อพิจารณาขึ้นส่วนปริมาตรควบคุมใด ๆ จะได้สมการความสัมพันธ์เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์คือ สมการที่ 5-6 จะพบว่าตัวแปร input คือ อัตราการไหลเข้าของวัสดุเปียกคือ F_p และอัตราการไหลของก๊าซร้อน F_c ในปริมาตรควบคุมแรกจะถือว่าทราบค่า input แล้ว output ที่ได้จะถูกส่งต่อไปให้ปริมาตรควบคุมถัดไป ขณะที่ output ที่ได้สามารถพิจารณาเป็นอุณหภูมิออกของก๊าซร้อน T_{go} และ สัดส่วนความชื้นฐานเปียก M_{out} (ภาพที่ 20) อย่างไรก็ตามส่วนประกอบที่สำคัญอีกส่วนหนึ่งในแบบจำลองก็คือส่วนของการเผาไหม้เพื่อสร้างก๊าซร้อน โดยพิจารณาจากสมดุลมวลของก๊าซร้อน คือ อัตราการไหลของก๊าซร้อน = อัตราการไหลของอากาศแห้งที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ + อัตราการไหลของเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ได้

$$w_{go} = w_{genv} + w_{comb} \quad (19)$$

และสามารถหาอุณหภูมิของก๊าซร้อนที่ส่งเข้าสู่ท่ออบได้จากสมดุลพลังงานเข้าและออกจากระบบเผาไหม้ ดังนี้

$$w_{genv}F_{genv}T_{a\ env} + w_{comb}H_{comb}\eta_{comb} + w_{com_L}H_{com_L}\eta_{com_L} = C_gT_{go} w_{go} \quad (20)$$

ซึ่ง w_{go} สามารถหาได้จากสมการก๊าซสมบูรณ์ (Perfect gas) คือ

$$w_{go} = \frac{Q_{go}\mu_g P_{atm}}{R(T_{go}+273)} \quad (21)$$

สำหรับความชื้นของแก๊สร้อนที่สถานะเริ่มต้นกำหนดให้เท่ากับสิ่งแวดล้อม $Y_o = Y_{a\ env}$

โดยหลักการของวิธีนี้มีอยู่ว่าบน sliding surface แรกใช้พิจารณาจากค่า feedback ของปริมาณของแข็งและปริมาณน้ำ เพื่อใช้ควบคุมความชื้น ขาออกของผลิตภัณฑ์ จากนั้นนำไปสร้าง virtual control law จากการใช้ Layapunov direct method ซึ่งตัวสัญญาณควบคุมเสมือนดังกล่าวจะถูกใช้เป็นค่าอ้างอิงเสมือนให้กับ อุปกรณ์ขับเร้าที่ถูกรออกแบบบนค่าเสถียรภาพรวมบนชั้นของ sliding surface ที่ 2 จากนั้นจะนำค่าดังกล่าวไปขับอุปกรณ์อีกชั้นหนึ่งในที่นี้เป็นตัวอย่างการขับระบบเผาไหม้ก๊าซมีเทนแทนความร้อนจากไฟฟ้า หากใช้ไฟฟ้าก็ต้องเปลี่ยนสมการการเผาไหม้เป็นสมการความร้อนจากไฟฟ้าซึ่งอยู่ในภาพฟังก์ชันของกระแส ก็จะควบคุมง่ายขึ้นไปอีก กล่าวคือเทคนิคนี้จะนำไปใช้ควบคุมอุปกรณ์ขับเร้าใน zone ต่าง ๆ เพื่อรักษาค่าอุณหภูมิ และความชื้นให้เหมาะสมตามค่าเส้นโค้งการอบแห้ง ที่ได้ทดสอบไว้

3.2.3 เสถียรภาพของระบบควบคุมและการทำงานของ Multi-sliding mode control

1) พื้นผิวเลื่อนไถลที่มีหลายองค์ประกอบ (The multi sliding surface)

ในการควบคุมความชื้นฐานเปียก M ของผลิตภัณฑ์จากสมการที่ (1) และ (2) มีสมมุติฐานว่าวัสดุเปียกได้รับพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งจากก๊าซร้อนเท่านั้นไม่ได้คำนึงถึงผลของการแพร่ของความชื้นและการนำความร้อนในวัสดุ ที่ใช้พิจารณาในปริมาตรควบคุมใด ๆ

ในการควบคุมอัตราส่วนมวลของน้ำต่อมวลของแข็ง m_w/m_s ใช้ค่าที่ต้องการในการออกแบบ m_{wd}/m_{sd} ซึ่งสามารถคำนวณได้จากความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ M_d ดังสมการ

$$m_{wd} = w_{sw} \cdot M_d \cdot t_{ress} \quad (22a)$$

$$m_{sd} = w_{sw} \cdot (1 - M_d) \cdot t_{ress} \quad (22b)$$

จากการพิจารณาฟังก์ชันเลื่อนไถล $s_t = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} e$ ร่วมกับค่าความคลาดเคลื่อนของมวลของน้ำภายในวัสดุ $e_w = m_w - m_{wd}$ และค่าความคลาดเคลื่อนของมวลวัสดุ $e_s = m_s - m_{sd}$ จะทำให้ได้พื้นผิวเลื่อนไถลที่ 1 ในรูปของสัดส่วนระหว่างมวลของน้ำและมวล ของของแข็งในวัสดุผสมที่ถูกป้อนเข้าสู่ระบบจากสมการที่ (1) ถึง (17) พบว่าระยะเวลาที่วัสดุอยู่ภายใต้ให้อบมีความเกี่ยวข้องและสามารถควบคุมมวลของวัสดุ m_s ในแต่ละปริมาตรที่พิจารณาได้ ในขณะที่มวลของน้ำ m_w ถูกควบคุมโดยอุณหภูมิของก๊าซร้อน T_g ในปริมาตรนั้นๆ สมการความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นสมการอนุพันธ์อันดับที่ 1 และสามารถนำมาสร้างเป็นสมการพื้นผิวเลื่อนไถลที่ 1 สำหรับการควบคุมในปริมาตรย่อยที่ i ของห้องอบได้ จากนั้นการออกแบบการควบคุมในลำดับต่อไปสามารถพิจารณาถึงออบแห้งทั้งหมดให้เป็นปริมาตรควบคุมเดี่ยว เพราะลักษณะที่คงทน ของการควบคุมแบบสไลด์ิงโหมด สามารถจัดการต่อการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรในแต่ละปริมาตรย่อยได้ ดังนั้นพจน์ที่เป็นตัวแทนของปริมาตรย่อยในสมการจึงเปลี่ยนเป็นของปริมาตรถึงออบแห้งทั้งหมด สัญลักษณ์ i ที่อยู่ห้อยท้ายตัวแปรจึงหายไป และ $i \pm 1$ ก็ถูกแทนที่ด้วย in ซึ่งแสดงถึงค่าที่ทางเข้าของระบบ สำหรับงานวิจัยนี้สามารถแบ่งพื้นผิวเลื่อนไถลออกได้เป็นสององค์ประกอบ ดังนี้

1.1) พื้นผิวเลื่อนไถลที่ 1: The 1st sliding surface

ก) องค์ประกอบที่เป็นของแข็ง

สมการ (1) และ (2) เป็นสมการอนุพันธ์อันดับที่ 1 ($n=1$) พื้นผิวเลื่อนไถลที่ 1 ของส่วนของแข็ง S_{1s} คือ

$$S_{1s} = m_s - m_{sd} \quad (23)$$

แทนค่าสมการที่ (5) ลงในอนุพันธ์ของสมการที่ (23) ได้เป็น

$$\dot{S}_{1s} = w_{sin} - m_s u_1 - \dot{m}_{sd} ; u_1 = \frac{1}{t_{ress}} \quad (24)$$

จากวิธีการออกแบบกฎการควบคุมของ Slotine (1991) จะได้ว่า ค่าที่ดีที่สุดของสัญญาณควบคุม อินพุตเสมือน U_{1eq} ต้องทำให้ได้ $\dot{s}_{1s} = 0$ ดังนั้น:

$$U_{1eq} = \hat{m}_s^{-1}(\hat{w}_{sin} - \dot{m}_{sd}) \quad (25)$$

โดยที่ $\hat{m}_s$ หมายถึงค่าที่ได้จากการประมาณ

จากนั้นได้มีการเพิ่มการประมาณค่าเกินของสัญญาณควบคุมด้วยวิธี Gain margin method เพื่อชดเชยความคลาดเคลื่อนของค่าเกิน ด้วยการกำหนดให้ $\beta_1 = \sqrt{\frac{m_{s\max}}{m_{s\min}}}$ และกำหนดขอบเขตของ m_s , $0 < m_{s\min} \leq m_s \leq m_{s\max}$ จะได้ขอบเขตของอัตราส่วนค่าเกินของสัญญาณควบคุมเป็น $\beta_1^{-1} \leq \frac{m_s}{\hat{m}_s} \leq \beta_1$ ด้วยเทคนิคการประมาณค่าเกินดังกล่าวนี้ จะได้กฎการควบคุมสำหรับทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าเข้าสู่ศูนย์ดังสมการที่ 26

$$U_1 = \hat{m}_s^{-1}(\hat{w}_{sin} - \dot{m}_{sd} + k_1 s_{1s}) \quad (26)$$

เมื่อค่าเกินเลื่อนไกล (Sliding gain) ในพื้นที่ผิวที่ 1 มีค่าเป็น $k_1 \geq \beta_1(F_1 + \eta_1) + (\beta_1 - 1)|\hat{w}_{sin} - \dot{m}_{sd}|$, $|w_{sin} - \hat{w}_{sin}| \leq F_1$, และมีค่าเป็นบวกเสมอคือ $\eta_1 \geq |\hat{R}_{1s}|$ เพื่อปรับปรุงกฎการควบคุมในสมการที่ (26) เพื่อลด steady state error จึงได้เพิ่มวิธีการประมาณค่า residual error ของสัญญาณควบคุม ด้วยวิธีการที่ใช้ในงานของ Soldatos และคณะ 2005 ดังนั้นกฎการควบคุมที่ได้จึงมีค่าเป็น

$$U_{1adapt} = \hat{m}_s^{-1}(\hat{w}_{sin} - \dot{m}_{sd} + k_1 s_{1s} + \hat{R}_{1s}) \quad (27)$$

และกฎการปรับค่าที่สอดคล้องกันคือ

$$\hat{R}_{1s} = \beta_1 \int s_{1s} dt \quad (28)$$

ข) องค์ประกอบส่วนที่เป็นน้ำ

ฟังก์ชันเลื่อนไกลและอนุพันธ์อันดับที่ 1 ของส่วนนี้คือ

$$s_{1w} = m_w - m_{wd} \quad (29)$$

$$\dot{s}_{1w} = w_{win} - m_w u_{1adapt} - \frac{h'A}{h_{fg}}(T_g - T_{wb}) - \dot{m}_{wd} \quad (30)$$

ภายในท่ออบแห้งมีก๊าซร้อนจำนวนมากไหลผ่านวัสดุเปียกซึ่งรับเอาพลังงานความร้อนจากก๊าซร้อนไปใช้ในการระเหยน้ำ ความชื้นจากวัสดุเปียกถ่ายเทเข้าสู่ก๊าซร้อนและทำให้ค่าความชื้นของก๊าซเปลี่ยนแปลงไป

แต่ละปริมาตรย่อยที่แยกพิจารณา ดังนั้นจึงกำหนดให้อัตราการอบแห้งของวัสดุเป็นค่าคงตัวและให้อุณหภูมิของวัสดุส่วนที่เป็นของแข็งมีค่าโดยประมาณเท่ากับอุณหภูมิก๊าซร้อนในปริมาตรนั้น ๆ เพื่อความสะดวกในการพิจารณา กำหนดให้ $H = \frac{h'A}{h_{fg}}$ และจากสมการที่ (30) จึงสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\dot{S}_{1w} = w_{win} - m_w u_{1adapt} - HT_g + HT_s - \dot{m}_{wd} \quad (31)$$

ดังนั้นค่าอุณหภูมิสมมูลที่ใช้ในการควบคุมปริมาณน้ำจึงมีค่าเป็น

$$T_{geq} = \hat{H}^{-1}(\hat{w}_{win} - \hat{m}_w u_{1adapt} + \hat{H}T_s - \dot{m}_{wd}) \quad (32)$$

และเพื่อชดเชยความคลาดเคลื่อนของคอนโทรลเกน $\hat{H}$ และชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนตกค้างในสัญญาณควบคุมจึงประยุกต์ใช้วิธีการเดียวกันกับที่ใช้ในการพิจารณาส่วนที่เป็นของแข็งซึ่งได้แสดงไว้แล้วข้างต้น จากสมการที่ (32) จึงได้เป็น

$$T_{gadapt} = \hat{H}^{-1}(\hat{G} - \dot{m}_{wd} + k_2 s_{1w} + \hat{R}_{1w}) \quad (33)$$

และ

$$\hat{R}_{1w} = \beta_2 \int s_{1w} dt$$

เมื่อ $\hat{H}$ คืออัตราการระเหยหรือเป็นค่าที่ใช้ประมาณค่าคอนโทรลเกน หรือกล่าวได้ว่า $\hat{G} = \hat{w}_{win} - \hat{m}_w u_{adapt} + \hat{H}T_s$ คือค่าความคลาดเคลื่อนตกค้างในพื้นที่ผิวเลื่อนไถล $k_2 \geq \beta_2(F_2 + \eta_2) + (\beta_2 - 1)|G - \dot{m}_{wd}|$ คือค่าเกนเลื่อนไถล (Sliding gain) ลำดับที่สอง โดยที่ $|G - \hat{G}| \leq F_2$ และ $\eta_2 \geq |\hat{R}_{1w}|$ ด้วยการกำหนดเงื่อนไข gain margin เช่นเดียวกับในส่วนที่เป็นของแข็งทำให้ได้ว่า $\beta_2 = \sqrt{\frac{m_w \max}{m_w \min}}$ และ m_w มีขอบเขตเป็น $0 < m_w \min \leq m_w \leq m_w \max$ ดังนั้น อัตราส่วนของคอนโทรลเกน ในส่วนที่เป็นน้ำจึงมีขอบเขตเป็น $\beta_2^{-1} \leq \frac{m_w}{\hat{m}_w} \leq \beta_2$

1.2) พื้นที่ผิวเลื่อนไถล ที่ 2: The 2nd sliding surface

ตัวแปร T_{gadapt} คือค่า กฎการควบคุมเสมือน ที่ถูกใช้เป็นค่าอ้างอิงในการควบคุมอุณหภูมิของก๊าซร้อนในสมการที่ (6) หากอุณหภูมิดังกล่าวถูกควบคุมจนกระทั่งมีค่าเท่ากับ T_{gadapt} อัตราส่วนมวลของน้ำ m_{wd} ต่อมวลของแข็ง m_{sd} ก็จะมีค่าเข้าสู่ค่าที่ออกแบบตามไปด้วย พิจารณาสมการความสัมพันธ์ของอุณหภูมิก๊าซร้อน (6) และ (20) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{dT_g}{dt} = f + bw_{comb} \quad (34)$$

เมื่อ

$$f = \frac{-UV(T_g - T_s) + (w_{gin}c_g + w_{stin}c_{st})(-T_g) - WC_{st}(T_g - T_s)}{(c_{st}m_{st} + c_gm_g)} + \frac{bw_{aenv}C_{aenv}T_{aenv}}{C_gw_{go}}$$

$$b = \frac{(w_{gin}c_g + w_{stin}c_{st})H_{comb}\eta_{comb}}{(c_{st}m_{sti} + c_gm_{gi})C_gw_{go}}$$

จากสมการที่ (34) เมื่ออุณหภูมิก๊าซร้อนที่ควบคุมมีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่ต้องการ $T_{gd} = T_{gadapt}$ จะสามารถสร้างสมการพื้นที่ผิวเลื่อนไถลที่ 2 และหาอนุพันธ์ได้เป็น

$$s_2 = T_g - T_{gd} \quad (35)$$

$$\dot{s}_2 = f + bw_{comb} - \dot{T}_{gd} \quad (36)$$

ค่าคอนโทรลเลอร์ b เป็นค่าบวกที่เป็นฟังก์ชันของตัวแปรอีกหลายตัวได้แก่ $f(w_g, w_{st}, m_{st}, m_g, c_g, c_{st}, H_{comb}, \eta_{comb}, w_{go})$ และการใช้วิธีการประมาณค่าเกนเหมือนที่ผ่านมา สามารถหาค่าขอบเขตได้ยาก ดังนั้น จึงได้นำเอาเทคนิคการปรับตัวของเกน (Gain adaptation) ในงานของ Radpukdee และ Jirawattana 2009 มาประยุกต์ใช้ และทำให้ได้ค่า คอนโทรลเลอร์ b ใหม่เป็น

$$\hat{b} = (b_{s2} + |g_2| + \alpha |\int g_2 dt|) \quad (37)$$

เมื่อ $g_2 = \dot{s}_2$ คือค่าความคลาดเคลื่อนตกค้าง ในพื้นที่ผิวเลื่อนไถลที่ 2, b_{s2} และ α คือค่าคงตัวที่เป็นบวกที่ได้มาโดยการสุ่มค่า

จากการใช้เทคนิควิธีการเดียวกับพื้นที่ผิวเลื่อนไถลที่ 1 มาประยุกต์ใช้กับสมการที่ (34) และ (35) จะได้ค่า control input (อัตราการป้อนก๊าซเชื้อเพลิง) มีค่าเป็น

$$w_{comb} = \hat{b}^{-1}(-\hat{f} + \dot{T}_{gd} - k_3s_2 - \hat{R}_2) \quad (38)$$

และ

$$\hat{R}_2 = \int s_2 dt$$

นอกจากนี้ ค่าพื้นที่ผิวเลื่อนไถล k_3 สามารถหาได้จากโดยพิจารณาจาก gain margin ซึ่งจะช่วยให้ระบบควบคุมมีลักษณะคงทน มากยิ่งขึ้น กำหนดให้ $\beta = \sqrt{\frac{b_{max}}{b_{min}}}$ และ b เป็นค่าที่รู้ขอบเขต $0 <$

$b_{min} \leq b \leq b_{max}$ ดังนั้นค่าที่เป็นขอบเขตของคอนโทรลเกนจึงสามารถหาค่าได้เป็น $\beta^{-1} \leq \frac{b}{\hat{b}} \leq \beta$ ดังนั้น

$$k_3 \geq \beta(F + \eta) + (\beta - 1)|\hat{f} - \dot{T}_{gd}|$$

เมื่อ $|f - \hat{f}| \leq F$ และค่าคงที่ที่เป็นบวกมีค่าเป็น $\eta \geq |\hat{R}_2|$

เนื่องจากการควบคุมอัตราส่วนเชิงมวลของน้ำและของแข็ง (m_{wd}/m_{sd}) อัตราการป้อนวัสดุเปียกเข้าสู่ระบบ w_{sw} จึงต้องสัมพันธ์กันกับค่าอัตราส่วนนั้นหรือกล่าวได้ว่าอัตราการป้อนวัสดุเปียกเป็นค่าที่ต้องถูกควบคุมโดยอัตราการไหลเชิงมวลของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการอบแห้ง w_s ดังสมการ

$$w_{swd} = (1 + \frac{M_d}{1-M_d})w_s \quad (39)$$

2) การวิเคราะห์เสถียรภาพ (Stability analysis)

จากสมการที่ (1) ถึง (21) พิจารณาตัวแปรอุณหภูมิของก๊าซร้อนที่ออกจากท่ออบ T_g และค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ขาออก M เป็นตัวแปรตามในขณะที่มีอัตราการป้อนของวัสดุเปียก w_{sw} ระยะเวลาในถังอบ t_{ress} และอัตราการไหลของก๊าซเชื้อเพลิงที่เข้าหัวเผา w_{comb} เป็นตัวแปรควบคุม จากการพิจารณาสมการของระบบพบว่ามี 2 พื้นที่ผิวเลื่อนไถล ดังนั้น Lyapunov function จึงต้องครอบคลุมทั้งสองพื้นที่ผิว โดยวิธีการของ Soldatos และคณะ 2005 ดังสมการที่ (40)

$$V = V_{1s} + V_{1w} + V_2 \quad (40)$$

เมื่อ

$V_{1s} = \frac{1}{2}(s_{1s}^2 + \tilde{R}_{1s}^2)$ เป็น Lyapunov function ของพื้นที่ผิวเลื่อนไถลที่ 1 ของส่วนที่เป็นของแข็ง

$V_{1w} = \frac{1}{2}(s_{1w}^2 + \tilde{R}_{1w}^2)$ เป็น Lyapunov function ของพื้นที่ผิวเลื่อนไถลที่ 1 ของส่วนที่เป็นน้ำ

$V_2 = \frac{1}{2}(s_2^2 + \tilde{R}_2^2)$ เป็น Lyapunov function ของพื้นที่ผิวเลื่อนไถลที่ 2

$\tilde{R}_{ij} = (R_{ij} - \hat{R}_{ij})$ เป็นค่าความผิดพลาดของการประมาณค่าความคลาดเคลื่อนตกค้าง

โดยที่สัญลักษณ์ i บอกลำดับของพื้นที่ผิวเลื่อนไถล และ j คือสัญลักษณ์ที่บ่งบอกว่าเป็นส่วนของแข็งและน้ำ จะได้อนุพันธ์อันดับ 1 ของ Lyapunov function เป็น

$$\dot{V} = s_{1s}\dot{s}_{1s} + \tilde{R}_{1s}(\dot{R}_{1s} - \dot{\hat{R}}_{1s}) + s_{1w}\dot{s}_{1w} + \tilde{R}_{1w}(\dot{R}_{1w} - \dot{\hat{R}}_{1w}) + s_2\dot{s}_2 + \tilde{R}_2(\dot{R}_2 - \dot{\hat{R}}_2) \quad (41)$$

ในกระบวนการออกแบบทั้งโดยทั่วไปจะมีการระบุค่าความขึ้นของผลิตภัณฑ์ขาออกให้เป็นค่าคงตัว และค่าเปลี่ยนแปลงของความคลาดเคลื่อนตักข้าง $\dot{R}_{1s}$, $\dot{R}_{1w}$, และ $\dot{R}_2$ มีค่าน้อยมากจนสามารถตัดทิ้งได้ เนื่องจากมีค่า gain margin ที่ช่วยปรับค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวได้ อนุพันธ์อันดับ 1 ของ V จะต้องมีค่าเป็นลบ (-) เพื่อรับรองถึงการลู่เข้าของสัญญาณตอบสนองไปสู่ค่าที่ต้องการ จากนั้นทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของแต่ละพื้นที่ผิว โดยเริ่มพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนของสมการไดนามิกที่ (24) และ (31) ด้วยค่าตัวแปรนำเข้าจากสมการที่ (27) และ (33) โดยไม่ได้มีการประมาณค่าความคลาดเคลื่อนตักข้าง จะสามารถหาสมการไดนามิกของความคลาดเคลื่อนของพื้นที่ผิวเลื่อนไถลที่ 1 ได้เป็น $\dot{s}_1 = -C_1 s_1 + R_1$ เมื่อ C_1 คือค่าคงที่บวกจากการควบคุมแบบคงทนและ R_1 คือค่าความคลาดเคลื่อนตักข้างของพื้นที่ผิวเลื่อนไถลแรก ถึงแม้ค่า gain margin k_1 จะสามารถลดอิทธิพลของ R_1 ได้ ซึ่งจำเป็นต้องพิจารณาค่านี้เพื่อปรับปรุงความเข้มแข็งของระบบควบคุมเมื่อสัญญาณตอบสนองมีค่าเข้าใกล้เคียงกับ พื้นที่ผิวเลื่อนไถลสำหรับส่วนที่เป็นของแข็งในพื้นที่ผิวที่ 1 แทนค่ากฎการควบคุมจากสมการที่ (27) ลงในสมการที่ (33) จะได้สมการไดนามิกของค่าความคลาดเคลื่อนดังนี้

$$\dot{s}_{1s} = \left(w_{sin} - \frac{m_s}{\hat{m}_s} \hat{w}_{sin} \right) - \left(1 - \frac{m_s}{\hat{m}_s} \right) \dot{m}_{sd} - \frac{m_s}{\hat{m}_s} k_1 s_{1s} - \frac{m_s}{\hat{m}_s} \hat{R}_{1s} \quad (42)$$

นั่นคือ

$$\dot{V}_{1s} = s_{1s} \cdot \dot{s}_{1s} = s_{1s} \cdot \left(R'_{1s} - \frac{m_s}{\hat{m}_s} k_1 s_{1s} - \frac{m_s}{\hat{m}_s} \hat{R}_{1s} \right) \tilde{R}_{1s} \dot{R}_{1s} \quad (43)$$

เมื่อ $R'_{1s} = \frac{m_s}{\hat{m}_s} \cdot R_{1s} = \frac{m_s}{\hat{m}_s} \left[\left(\frac{\hat{m}_s}{m_s} \right) w_{sin} - \hat{w}_{sin} - \left(\frac{\hat{m}_s}{m_s} - 1 \right) \dot{m}_{sd} \right]$

ดังนั้นสามารถเขียนสมการที่ (43) ได้ใหม่เป็น

$$\begin{aligned} \dot{V}_{1s} &= \frac{m_s}{\hat{m}_s} (R_{1s} - \hat{R}_{1s}) s_{1s} - \frac{m_s}{\hat{m}_s} k_1 s_{1s}^2 - \tilde{R}_{1s} \dot{R}_{1s} \\ &= \frac{m_s}{\hat{m}_s} \tilde{R}_{1s} s_{1s} - \frac{m_s}{\hat{m}_s} k_1 s_{1s}^2 - \tilde{R}_{1s} \dot{R}_{1s} \end{aligned} \quad (44)$$

จากการใช้กฎการปรับตัว (Adaptation law) $\dot{\hat{R}}_{1s} = \tilde{R}_{1s} s_{1s}$ และ $k_1 \geq \beta_1 (F_1 + \eta_1) + (\beta_1 - 1) |\hat{w}_{sin} - \dot{m}_{sd}|$ อนุพันธ์อันดับ 1 ของ Lyapunov function จะมีค่าเป็น

$$\dot{V}_{1s} \leq -\frac{m_s}{\hat{m}_s} k_1 s_{1s}^2, \quad \dot{V}_{1w} \leq -\frac{m_w}{\hat{m}_w} k_1 s_{1w}^2$$

และโดยอาศัยวิธีการเดียวกันกับส่วนของข้าง การพิสูจน์เสถียรภาพโดยวิธีของ Lyapunov สำหรับส่วนที่เป็นน้ำจึงสามารถพิสูจน์ได้เช่นเดียวกัน ทั้งนี้ค่า control input ในสมการที่ (33) และสมการไดนามิกส์ของพื้นที่ผิว (30) ก็สามารถพิสูจน์ได้ว่า $\dot{V}_{1w}$ มีค่าเป็นลบเสมอเช่นกัน สำหรับพื้นที่ผิวเลื่อนไถลที่ 2 กำหนดค่าคอนโทรลเกนเป็น $b = \hat{b} + \Delta b$ เมื่อ $\hat{b}$ คือค่า gain โดยประมาณ Δb คือตัวแปรไม่ทราบค่าซึ่งไม่ส่งผลต่อการควบคุม จากนั้นแทนค่า control input จากสมการ (38) ลงในสมการ (36) จะได้สมการไดนามิกของค่าความคลาดเคลื่อนสำหรับ พื้นที่ผิวเลื่อนไถลที่ 2 เป็น

$$\begin{aligned}\dot{s}_2 &= \hat{f} + \Delta f + b\hat{b}^{-1}(-\hat{f} + \dot{T}_{gd} - \hat{R}_2 - k_3s) - \dot{T}_{gd} \\ &= \Delta b w_{comb} + \Delta f - \hat{R}_2 - k_3s\end{aligned}\quad (45)$$

ดังนั้นอนุพันธ์อันดับ1ของ Lyapunov function สำหรับพื้นที่ผิวเลื่อนไถลที่ 2 จึงมีค่าเป็น

$$\begin{aligned}\dot{V}_2 &= s_2[\Delta b \hat{b}^{-1}(-\hat{f} + \dot{T}_{gd} - k_3s_2 - \hat{R}_2) + \Delta f - \hat{R}_2] - k_3s_2^2 - \tilde{R}_2\dot{\hat{R}}_2 \\ &= s_2(\Delta b \cdot w_{comb} + \Delta f - \hat{R}_2) - k_3s_2^2 - \tilde{R}_2\dot{\hat{R}}_2 \\ &= s_2(R - \hat{R}_2) - k_3s_2^2 - \tilde{R}_2\dot{\hat{R}}_2 \\ &= s_2\tilde{R}_2 - k_3s_2^2 - \tilde{R}_2\dot{\hat{R}}_2\end{aligned}\quad (46)$$

จากสมการที่ (46) ใช้วิธีการเดียวกันกับในพื้นที่ผิวเลื่อนไถลที่ 1 โดยให้ $\dot{\hat{R}}_2 = s_2$ และ $k_3 \geq \beta(F + \eta) + (\beta - 1)|\hat{f} - \dot{T}_{gd}|$ จะพบว่าค่า $\dot{V}_2$ มีค่าเป็นลบเสมอ โดยที่ตัวแปร $\hat{b}$ เป็นค่าในกรณีที่ระบบเกิดการอิ่มตัวของค่านำเข้าและเกิดการสะสมของความคลาดเคลื่อนตกค้างในค่า $\hat{R}_2$ เนื่องจากผลของอินทิกรัล พิจารณาสมการที่ (46) ตัวแปร $\hat{R}_2$ ถูกดัดแปลงเป็น $\left|\frac{\dot{\hat{R}}_2}{\hat{b}}\right| = \left|\frac{\int s_2 dt}{b_{s2} + |s_2| + \alpha|\int s_2 dt|}\right| < 1$

เป็นการพิสูจน์เงื่อนไขตามวิธีการของ Lyapunov สำหรับพื้นที่ผิวเลื่อนไถลที่ 1 และ 2 อุณหภูมิก๊าซร้อนสามารถถูกควบคุมให้มีค่าตามที่ต้องการ ซึ่งจะส่งผลต่อการควบคุมอัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ออกจากท่ออบได้

3.3 การหาอัตราการอบแห้ง (Drying rate)

3.3.1 วิธีการทดลอง

มันสำปะหลังที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้มีอายุประมาณ 10 เดือน โดยมีขั้นตอนการเตรียม คือ นำหัวมันสำปะหลังสดมาล้างทำความสะอาด แล้วหั่นด้วยเครื่องหั่นมันเส้นให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2-3 เซนติเมตร ใช้ตัวอย่างจำนวน 10 กิโลกรัม หลังจากนั้นทำการอบแห้งจนกระทั่งน้ำหนักของมันเส้นคงที่ โดยมีเงื่อนไขในการทดลอง อุณหภูมิอบแห้งที่ 60, 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการไหลของอากาศร้อน $1.5-2 \text{ m/s}^2$ ในระหว่างทำการทดลองได้บันทึกข้อมูลการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก และอุณหภูมิอบแห้งทุกๆ 1 ชั่วโมง

3.3.2 การวิเคราะห์ผล

งานวิจัยนี้ ได้วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองตั้งแต่ ช่วงความชื้นของมันเส้นเริ่มต้นประมาณ 130-150 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง จนกระทั่งความชื้นสุดท้ายเหลือประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ มาตรฐานแห้ง โดยความชื้น (Moisture content, MC) ของผลิตภัณฑ์คำนวณจากสมการที่ (47)

$$MC = \frac{W_t - W_d}{W_d} \times 100\% \quad (47)$$

เมื่อ MC คือ ความชื้น (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง)
 W_t คือ น้ำหนักมันเส้นที่เวลาใดๆ (กรัม)
 W_d คือ น้ำหนักแห้งของเส้น (กรัม)

การศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งของชิง ศึกษาในรูปของอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) โดย คำนวณจากสมการที่ (48)

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} \quad (48)$$

เมื่อ M_{in} คือ ความชื้นเริ่มต้น (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง)
 M_t คือ ความชื้นที่เวลาใด ๆ
(เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง)
 M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง)

การคำนวณค่าอัตราส่วนความชื้นในงานวิจัยนี้ เป็นการคำนวณค่าโดยประมาณ คือ ไม่คิดค่าความชื้นสมดุล โดยตั้งสมมติฐานว่า ความชื้นสมดุลมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความชื้นเริ่มต้นในส่วนของการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบอบแห้ง ได้กำหนดพารามิเตอร์เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการศึกษาเปรียบเทียบดังนี้

1) อัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR) คือ อัตราการ เปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นต่อหน่วยเวลา ซึ่งคำนวณได้จาก สมการที่ (49) (Kar & Gupta, 2003) [23]

$$DR = \frac{M_o - M_T}{T} \quad (49)$$

เมื่อ M_o คือ ปริมาณความชื้นเริ่มต้น (กรัมน้ำ/กรัมมวลแห้ง)
 M_T คือ ปริมาณความชื้นที่เวลา T (กรัมน้ำ/กรัมมวลแห้ง)
T คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (นาที)

2) ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) คือ อัตราส่วนระหว่าง ปริมาณพลังงาน ที่ใช้ในการอบแห้งต่อปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุอบแห้ง โดยสามารถคำนวณได้จาก สมการที่ (50)

$$SEC = \frac{E_E}{M_W} \quad (50)$$

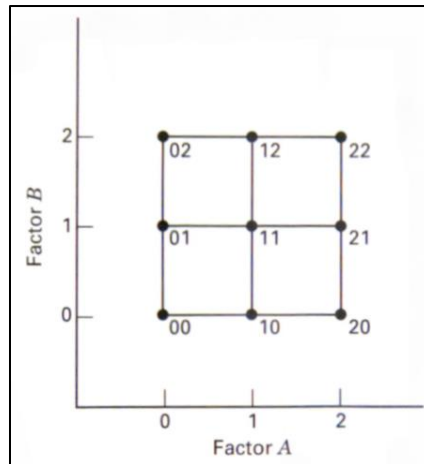
เมื่อ E_E คือ พลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)
 M_W คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากเนื้อวัสดุ (กิโลกรัม)

3.4 การออกแบบการทดลองแบบ 3^k

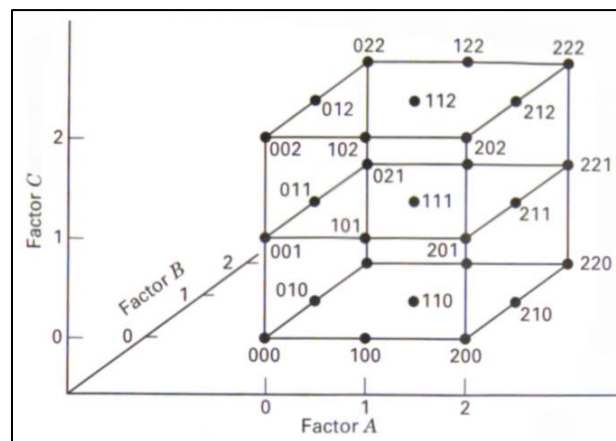
การออกแบบการทดลองแบบ 3^k คือ การทดสอบปัจจัยต่างๆ ซึ่งแต่ละปัจจัยจะมี 3 ระดับ นั่นคือ ระดับ ต่ำ กลาง และ สูง โดยที่ตัวเลขที่ใช้เป็นการระบุระดับ คือ 0 แทนระดับต่ำ 1 แทนระดับกลาง และ 2 แทนระดับสูง ในแต่ละตัวประกอบจะถูกกำหนดตำแหน่งตัวเลขโดย k ตำแหน่ง โดยที่ตัวเลขตำแหน่งแรกจะเป็นการบอกระดับของปัจจัย A และตัวเลขตำแหน่งที่สองจะเป็นการบอกระดับของปัจจัย B เป็นต้น

ตัวอย่าง ถ้าเป็นการทดลองแบบ 3^2 โดยที่ตัวประกอบคือ 00 หมายความว่าปัจจัย A และ B ที่อยู่ในระดับต่ำทั้งคู่ หรือ 12 คือ ปัจจัย A อยู่ในระดับกลางในขณะที่ปัจจัย B อยู่ในระดับสูง เป็นต้น โดยที่ภาพที่ 21-22 แสดงถึงตัวอย่างของการรวมกันของปัจจัยสำหรับการออกแบบ 3^2 และ 3^3

อย่างไรก็ตามในการออกแบบการทดสอบแบบ 3^k เมื่อปัจจัยเป็นเชิงปริมาณ (Quantitative) ดังนั้น ระดับต่ำ กลาง และสูงจึงมักจะแทนด้วย -1 0 และ +1 ตามลำดับ เพื่อที่ให้ง่ายเมื่อนำไปใช้กับตัวแบบสมการเชิงถดถอย (Regression model) ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับการตอบสนองกับระดับของปัจจัย



ภาพที่ 21 การรวมปัจจัยแบบ 3^2



ภาพที่ 22 การรวมปัจจัยแบบ 3^3

ตัวอย่าง จากรูปที่ 17 กำหนด x_1 แทนปัจจัย A และ x_2 แทนปัจจัย B ตัวแบบสมการเชิงถดถอย
เกี่ยวข้องกับผลตอบแทน y กับ x_1 และ x_2 สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \epsilon \quad (51)$$

สำหรับการทดลองกับมันสัมปะหลัง ที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้มีอายุประมาณ 10 เดือน โดยมีขั้นตอนการเตรียม คือ นำหัวมันสำปะหลังสดมาล้างทำความสะอาด แล้วหั่นด้วยเครื่องหั่นมันเส้นให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2-3 เซนติเมตร ใช้ตัวอย่างหน่วยเป็นกิโลกรัม หลังจากนั้นทำการอบแห้งจนกระทั่งน้ำหนักของมันเส้นคงที่ โดยมีเงื่อนไขในการทดลอง อุณหภูมิอบแห้งที่ 90, 100 และ 110 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการไหลของอากาศร้อน ซึ่งมีหน่วยเป็น m/s^2 และอัตราการไหลก๊าซร้อนหน่วยเป็น m/s โดยที่ทั้งอัตราการไหลของอากาศร้อนและอัตราการป้อนจะถูกแบ่งเป็น 3 ระดับ (ต่ำ กลาง และสูง) เช่นเดียวกัน

3.4.1 การวิเคราะห์ผล

งานวิจัยนี้ ได้วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองตั้งแต่ ช่วงความชื้นของมันเส้นเริ่มต้นประมาณ 130-150 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง จนกระทั่งความชื้นสุดท้ายเหลือประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ มาตรฐานแห้ง โดยความชื้น (Moisture content, MC) ของผลิตภัณฑ์คำนวณจากสมการที่ (52)

$$MC = \frac{W_t - W_d}{W_d} \times 100\% \quad (52)$$

เมื่อ MC คือ ความชื้น (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง)

W_t คือ น้ำหนักมันเส้นที่เวลาใดๆ (กรัม)

W_d คือ น้ำหนักแห้งของเส้น (กรัม)

อัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR) คือ อัตราการ เปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นต่อหน่วยเวลา ซึ่งคำนวณได้จาก สมการที่ (53) (Kar & Gupta, 2003)

$$DR = \frac{M_o - M_T}{T} \quad (53)$$

เมื่อ M_o คือ ปริมาณความชื้นเริ่มต้น (กรัมน้ำ/กรัมมวลแห้ง)

M_T คือ ปริมาณความชื้นที่เวลา T (กรัมน้ำ/กรัมมวลแห้ง)

T คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (นาท)

ในเบื้องต้นปัจจัยที่ขึ้นการทดสอบอาจจะมีเพียง อุณหภูมิอบแห้ง อัตราการไหลของอากาศร้อน และ อัตราการป้อน

3.4.2 ตัวอย่างสมมุติที่จะทำการทดลอง

Hot air flow rate (C)	Temp (A)								
	90			100			110		
	Feed rate (B)								
	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1
-1	50	20	17	12	22	34	36	46	33
	40	36	26	42	31	36	19	18	41
0	15	10	25	23	58	30	16	32	11
	43	25	16	43	12	24	42	33	11
1	30	44	40	44	13	53	56	10	59
	45	20	47	35	49	35	32	31	48

ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ดังนี้

General Linear Model: Drying Rate versus Temp, A, Feed rate, B, ...

Factor	Type	Levels	Values
Temp, A	fixed	3	90, 100, 110
Feed rate, B	fixed	3	-1, 0, 1
Hot air, C	fixed	3	-1, 0, 1

Analysis of Variance for Drying Rate, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Temp, A	2	61.4	61.4	30.7	0.16	0.855
Feed rate, B	2	368.8	368.8	184.4	0.94	0.402
Hot air, C	2	1385.3	1385.3	692.7	3.54	0.043
Temp, A*Feed rate, B	4	227.4	227.4	56.9	0.29	0.882
Temp, A*Hot air, C	4	263.9	263.9	66.0	0.34	0.850
Feed rate, B*Hot air, C	4	1222.6	1222.6	305.6	1.56	0.213
Temp, A*Feed rate, B*Hot air, C	8	1156.6	1156.6	144.6	0.74	0.657
Error	27	5283.5	5283.5	195.7		
Total	53	9969.5				

จากผลลัพธ์สมมุติสามารถที่จะสรุปได้ว่ามีเพียงอัตราการไหลของอากาศร้อนเท่านั้นที่แตกต่างอย่างมีนัยยะสำคัญ จากนั้นจึงใช้เฉพาะอัตราการไหลของอากาศร้อนเพื่อสร้างสมการ regression เพื่อทำการพยากรณ์ drying rate ต่อไป

บทที่ 4

แนวทางการออกแบบ

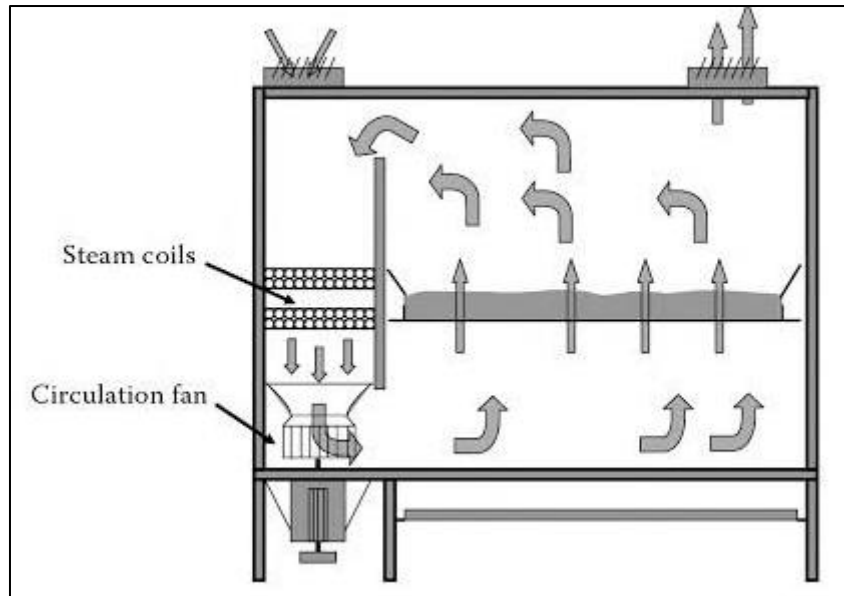
Apron Conveyor Dryer เบื้องต้น

4.1 การกำหนดลักษณะของ Conveyor Dryer

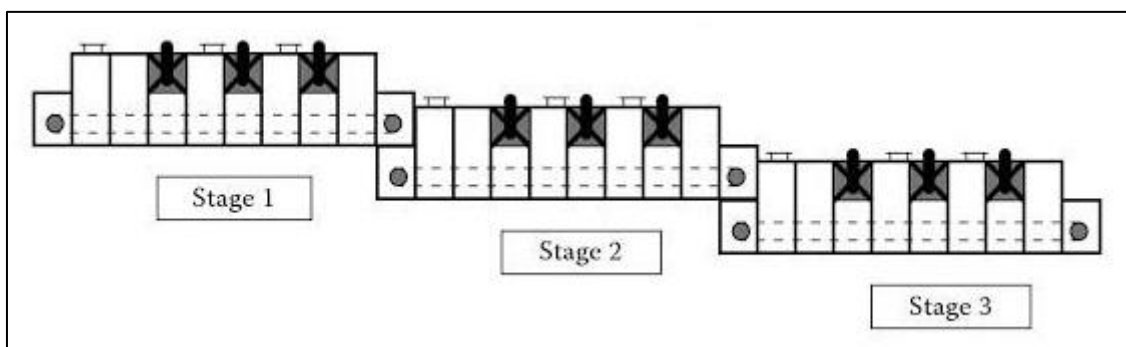
ในบทที่ 3 ผู้วิจัยได้มีแนวคิดที่จะออกแบบเตาอบแบบสายพานลำเลียงโดยที่มีการ นำก๊าซร้อนกลับมาใช้ในชั้นล่าง ดังแสดงในภาพที่ 11 อย่างไรก็ตามการพิจารณาขนาดของเครื่องอบ จำเป็นต้องพิจารณาในภาพรวมก่อนเพื่อทราบ อัตราการใช้พลังงานความร้อนรวม จากนั้นข้อมูลจากการทดลองจะเป็นแนวทางใช้กำหนด สภาวะในแต่ละ stage ของเตาอบเพื่อใช้ในการปรับแบบและควบคุมต่อไป

จากข้อมูลของ ปรกติแล้วเตาอบระบบสายพานลำเลียงจะเหมาะกับการอบแห้งวัสดุที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 1-50 มม. การอบแห้งทำโดยการบังคับก๊าซร้อนให้ไหลผ่าน สายพานและวัสดุเปียกที่ต้องการ โดยความชื้นของวัตถุดิบเข้าสู่ได้ถึง 95% wb และสามารถลดความชื้นจนได้ผลิตภัณฑ์จนถึง 1%wb เวลาที่ใช้ในการอบมีตั้งแต่ 5-240 นาที รูปแบบของเครื่องอบขึ้นอยู่กับการจัดวางทิศทางการไหลบนสายพาน และทิศทางการไหลของก๊าซร้อน เพื่อให้ง่ายในการสร้างและควบคุม ทีมผู้วิจัยได้เลือกที่จะใช้ Single pass แบบ Multi stage dryers แทนที่จะใช้ แบบ Double pass ดังที่ได้เลือกไว้ก่อนหน้านี้ ทั้งนี้นอกจากความสะดวกในการออกแบบแล้ว ทางผู้ประกอบการที่ร่วมโครงการ ไม่มีข้อจำกัดในเรื่องพื้นที่การจัดวางและต้องการ ให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถเข้าใจและปรับตั้งการควบคุมสภาวะการอบได้สะดวก โดยลักษณะของห้องอบสามารถพิจารณาได้จากตัวอย่างในภาพที่ 23 ซึ่งใช้น้ำในการให้ความร้อนกับอากาศ

ทั้งนี้เนื่องจากการอบมันเส้นนั้นจำเป็นต้องค่อย ๆ ให้ความร้อนกับวัตถุดิบเพื่อป้องกันการไหม้ ของเส้นมันและจะทำให้เสียราคา แนวคิดการอบหลายสถานะดังที่เสนอไว้ในครั้งแรกจึงนำมาใช้ต่อ โดยหากสมมุติว่ามีการควบคุมอุณหภูมิ อยู่ n ระดับ ก็จะมี stage การอบเท่ากับ n เช่นกัน ภาพที่ 24 แสดง stage การอบเมื่อ $n=3$ ที่เรียกว่า Multiple stage dryers



ภาพที่ 23 หน้าตัดของตัวอย่างเตาอบแบบชั้นเดียว ที่ใช้น้ำเป็นสารทำความร้อน [24]



ภาพที่ 24 Multiple stage dryers $n=3$ [24]

4.2 ส่วนประกอบของ Conveyor Dryer

4.2.1 ชุดรางสายพาน

ชุดประกอบสายพานเป็นส่วนสำคัญในการนำวัตถุดิบเข้าสู่และออกจากห้องอบ จึงต้องเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงพอเมื่อทำงานที่อุณหภูมิสูงและมีการบำรุงรักษาต่ำ และยังสามารถให้ก๊าซร้อนผ่านได้ และต้องเลือกพอที่จะไม่ให้วัตถุดิบตกหล่น สายพานปกติเป็นตาข่ายโลหะที่รับด้วย slider bar และ traveling support frame หรือ แผ่นโลหะเจาะรู ที่ประกอบกับ integral stiffeners กว้างตั้งแต่ 100-300 มม. ยาว 1-4 เมตร วัสดุเป็น AISI 300 หรือ 400 series stainless steels

4.2.2 ชุดตัวเครื่องอบ

โครงสร้างเครื่องอบ มักสร้างด้วยโครงเหล็กกล้า ประกอบเข้าด้วยผนังกันความร้อนและช่องเปิดที่ออกแบบสำหรับควบคุมการไหลของก๊าซ ปรกติใช้โครงสร้าง เป็น stainless steel เพื่อให้ทนต่อการทำความสะอาด และบำรุงรักษา

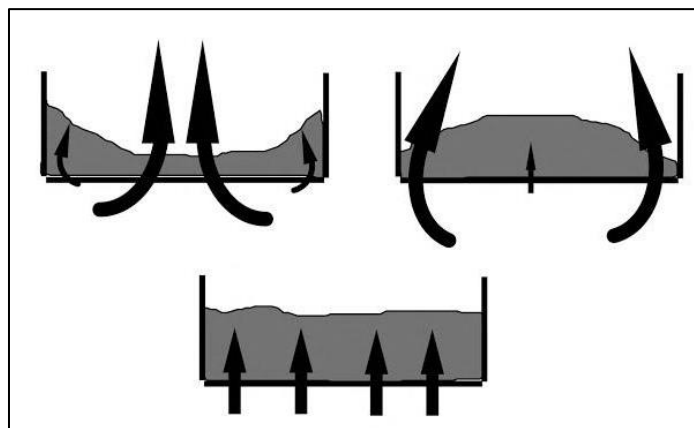
4.2.3 ชุดตัวพัดลม

ตัวพัดลมสามารถติดกับห้องอบหรืออยู่ภายนอกขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบ พัดลมที่ทำหน้าที่หมุนเวียนก๊าซร้อนผ่าน สายพานเหล็ก จะแยกชุดกันกับพัดลมที่ทำหน้าที่เอาก๊าซร้อนขึ้นออกจากระบบอบ เนื่องจากเครื่องอบจะทำงานในสภาวะที่เปลี่ยนแปลงดังนั้นพัดลมต้องมีความสามารถในการปรับค่าได้สอดคล้องกัน พัดลมที่นิยมจะมีใบพัดลักษณะ backward inclined fan เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง เสียงเบา และราคาถูก

นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ยังจะใช้พัดลมดูดอากาศเพื่อสร้างความดันให้ต่ำกว่าบรรยากาศเล็กน้อยเพื่อเพิ่มอัตราการอบแห้ง

4.2.4 ชุดป้อนและเกลียววัตถุดิบ

เนื่องจากการอบเป็นแบบการพาความร้อนเป็นหลัก ความสม่ำเสมอของการไหลของก๊าซร้อน ทั้งถึงผลิตภัณฑ์มีผลโดยตรงต่ออัตราการอบแห้ง ภาพที่ 25 แสดงลักษณะการใส่วัตถุดิบบนสายพานแบบต่าง ๆ และผลต่อการไหลของก๊าซร้อน



ภาพที่ 25 ผลของการไหลอากาศร้อนที่เกิดขึ้นจากการใส่วัตถุดิบไม่สม่ำเสมอ [24]

4.3 การพิจารณาขนาดของ Conveyor Dryer

การพิจารณาหาขนาดของเครื่องอบ ต้องพิจารณาถึงค่าความร้อนที่จำเป็นต้องใช้ก่อนเป็นอันดับแรก และเนื่องจากการหาค่า พื้นที่ผิวของวัตถุดิบในปริมาณมาก ๆ เป็นไปไม่ได้ การพิจารณาในเชิงปริมาตรจึงสะดวกกว่ามาก ซึ่งการถ่ายเทความร้อนระหว่างวัตถุดิบกับอากาศร้อนพิจารณาได้จากสมการต่อไปนี้

$$Q = h_v \cdot V \cdot \Delta T \quad (54)$$

เมื่อ Q คือ การถ่ายเทความร้อน kW

h_v คือ volumetric heat transfer coefficient $kW/m^2 \cdot ^\circ C$

V คือ volume of the product m^3

ΔT คือ temperature difference between the hot gas and the product $^\circ C$

4.3.1 พิจารณา Heat to product

คือค่าความร้อนที่ต้องการจะให้ความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์ เพื่อเปลี่ยนอุณหภูมิซึ่งขึ้นอยู่กับค่า ความจุความร้อนจำเพาะของผลิตภัณฑ์จะได้ว่า

$$Q_{product} = m_{product} \cdot C_{Pproduct} \cdot \Delta T_{product} \quad (55)$$

เมื่อ $Q_{product}$ คือ การถ่ายเทความร้อนเพื่ออุ่นวัสดุ kW

$m_{product}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของผลิตภัณฑ์ออกจากเครื่องอบ kg/h

$C_{Pproduct}$ คือ Specific heat of product ที่ออกจากเครื่องอบ $kJ/kg \cdot ^\circ C$

$\Delta T_{product}$ คือ temperature difference between the product out of dryer and the Product entering the dryer $^\circ C$

4.3.2 พิจารณา Heat to evaporated water

ความร้อนที่ต้องการในการระเหยน้ำและให้ความร้อนแก่น้ำที่ระเหยแล้วไปยังอุณหภูมิที่ทางออกก๊าซ ต้องสามารถพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลง enthalpy ของน้ำ ไปเป็น water vapor ดังนั้น total heat ที่ใช้ในการระเหยน้ำคือ

$$Q_{evap} = m_{evap} \cdot (h_{vapor} - h_{water}) \quad (56)$$

เมื่อ Q_{evap} คือ heat transferred to the evaporated water kW

m_{evap} คือ อัตราการไหลเชิงมวลของ evaporated water out of the dryer kg/h

h_{water} คือ enthalpy of the water ของผลิตภัณฑ์ที่เข้าเครื่องอบ kJ/kg

h_{vapor} คือ enthalpy of the vapor ที่ออกจากเครื่องอบ kJ/kg

4.3.3 พิจารณา Heat to exhaust air

อากาศที่เดิมเข้าสู่ระบบเครื่องอบนั้น จะออกจากเครื่องอบด้วยอุณหภูมิที่สูงขึ้น ซึ่งสามารถพิจารณาค่าการถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศได้ดังสมการต่อไปนี้

$$Q_{air} = m_{air} \cdot C_{Pair} \cdot \Delta T_{air} \quad (57)$$

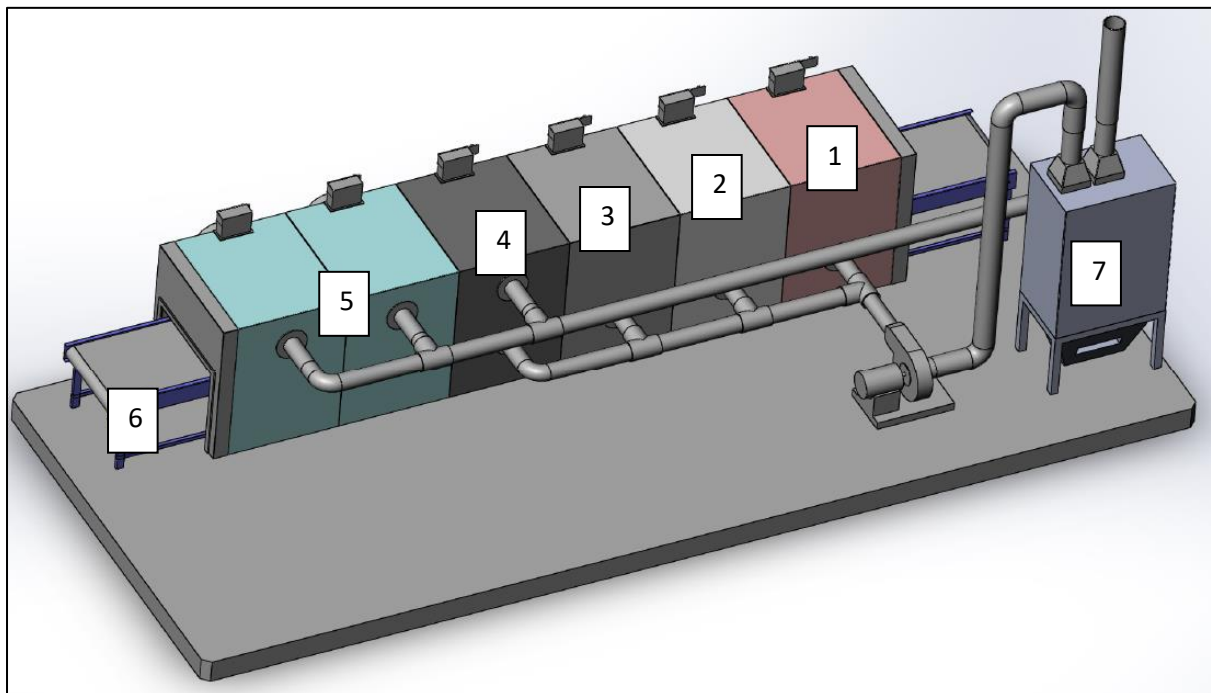
เมื่อ Q_{air} คือ การถ่ายเทความร้อนเพื่ออุ่นอากาศที่เดิมเข้าและออกจากระบบ kW

m_{air} คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่เข้าสู่เครื่องอบ kg/h

C_{Pair} คือ Specific heat of air ที่เข้าสู่เครื่องอบ $kJ/kg \cdot ^\circ C$

ΔT_{air} คือ temperature difference between the air out of dryer and the air entering the dryer $^\circ C$

ความสัมพันธ์ของค่าการถ่ายเทความร้อนและมวลที่แสดงไว้ข้างต้นสามารถนำมาใช้ในการออกแบบขนาดเครื่องอบในเบื้องต้นได้ อย่างไรก็ตามการคำนวณจะยังไม่แสดงในที่นี้ ภาพที่ 26 แสดงเครื่องอบที่ได้ทำการออกแบบไว้เบื้องต้น เป็น single pass/multi stages dryer



ภาพที่ 26 เครื่องอบ single pass/multi stages dryer ที่ออกแบบเบื้องต้น

จากภาพจะเห็นว่าเครื่องจะมีทั้งหมด 4 สภาวะการอบโดยสายพานหมายเลข 6 จะนำวัตถุดิบเข้าที่ห้องอบหมายเลข 1 เป็นอันดับแรกโดยใช้ก๊าซร้อนจากห้องเผาไหม้หมายเลข 7 (ยังไม่กำหนดชนิดเชื้อเพลิง) สภาวะที่ 1-4 (ห้องอบที่ 1-4) จะเพิ่มอุณหภูมิขึ้นจาก 60 70 80 90 องศาเซลเซียส ตามลำดับเพื่อป้องกันวัตถุดิบไหม้จากนั้นเมื่ออบได้ความชื้นที่ต้องการจะทำการลดอุณหภูมิลง โดยการนำอากาศจากภายนอกเข้ามาแลกเปลี่ยนความร้อนที่ช่วงท้ายแล้วนำความร้อนทิ้งที่ห้องอบสุดท้าย สภาวะที่ 4 และส่วน cool down (ห้องหมายเลข 5) นำกลับมาอุ่นอากาศในห้องเผาไหม้ หรือนำมาช่วยอบในห้องอบที่ 1-3 ก็ได้ สาเหตุที่นำเอาความร้อนที่ส่วนท้ายมาใช้เนื่องจาก ในสภาวะ 1-3 นั้นอากาศจะมีความชื้นสูงจำเป็นต้องระบายทิ้งไป สำหรับการปรับให้ห้องอบต่าง ๆ มีความดันต่ำลงสามารถทำได้ด้วยการเพิ่มพัดลมดูดดึงได้กล่าวไว้ในบทที่ 2

การออกแบบ Dryer ด้วยวิธี Spreadsheet-Aided and Optimization

5.1 ทฤษฎีและเทคนิคสำหรับการออกแบบด้วย Spreadsheet-aided Process design

ระบบสมการของกระบวนการอบแห้งที่ต้องการพิจารณานั้น สามารถถูกแบ่งออกเป็นกลุ่มๆ ดังนี้ 1) สมการตัวแปรต้น 2) สมการตัวแปรทางเทคนิค 3) สมการวัตถุประสงค์ ดังนั้นการออกแบบเครื่องอบจึงจำเป็นต้องอาศัยวิธีการคำนวณด้วยวิธีเชิงเลข เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดบนสถานการณ์ขอบเขตที่กำหนด วัตถุประสงค์ของบทนี้ จะแสดงให้เห็นถึง การนำกระบวนการทำงานของ belt dryer ที่ต้องการออกแบบเข้าสู่โปรแกรม excel และนำค่าที่ได้ไปคำนวณด้วยโปรแกรม matlab เพื่อหาค่าออกแบบเริ่มต้นที่เหมาะสมที่สุด สำหรับใช้ในการสร้างเครื่องต่อไป กลุ่มของสมการพื้นฐานแสดงนิยามไว้ในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5 นิยามกลุ่มสมการ

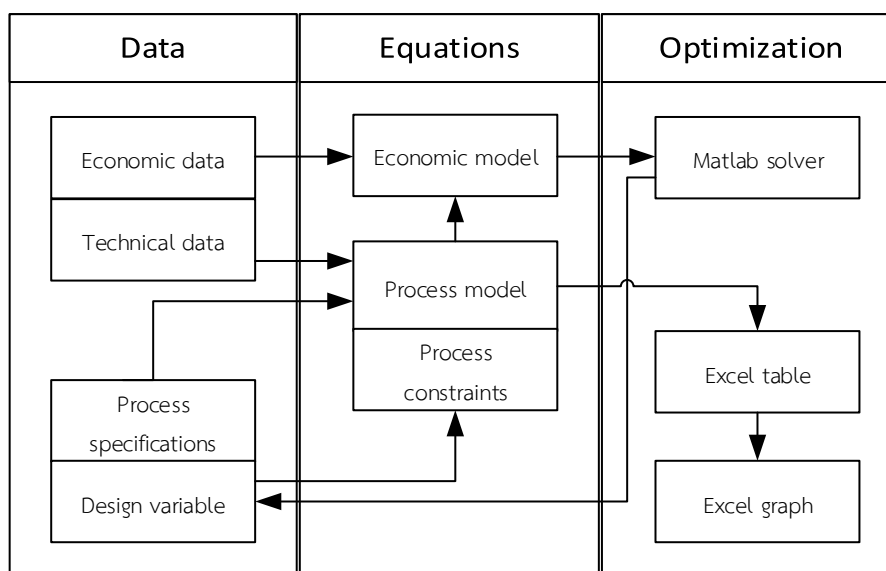
Basic terms	Definitions
Modeling	The procedure to translate the physical laws of a process to math equations.
Simulation	The suitable software in which estimates the real performance of a process.
Design	The procedure to specify the equipment size and characteristics
Rating	Given the process specification and operating conditions

นอกจากนี้การกำหนดลักษณะของปัญหาที่พบทั่วไปยังสามารถพิจารณาได้ดังตารางที่ 5.2 โดยที่ค่าสำหรับ ตัวแปรที่ออกแบบจะขึ้นอยู่กับวิศวกรผู้ออกแบบ โดยที่จำนวนตัวแปรและสมการมักจะกำหนดให้เท่ากันเพื่อความสะดวกในการคำนวณ อย่างไรก็ตามในทางวิศวกรรมอาหารหรือเคมีแล้ว ทุก ๆ ค่าตัวแปรมักปรากฏในจำนวนสมการที่น้อยกว่า ทำให้ระบบจำเป็นต้องมีการแก้ปัญหาเป็นลำดับไปและยังต้องมีการวนค่าเพื่อคำนวณอีกด้วย ดังนั้นวิธีการที่สะดวกที่สุด ในการแก้ปัญหานี้คือการใช้ระเบียบวิธีเชิงเลขและวิธีการหาค่าที่เหมาะสม จากกลุ่มของสมการในตารางที่ 5.1 และการกำหนดลักษณะของปัญหาเป็นการออกแบบ

design ในตารางที่ 6 ทำให้สามารถเขียนออกมาเป็น functional block diagram สำหรับการออกแบบได้ดังภาพที่ 27

ตารางที่ 6 การกำหนดลักษณะของปัญหา

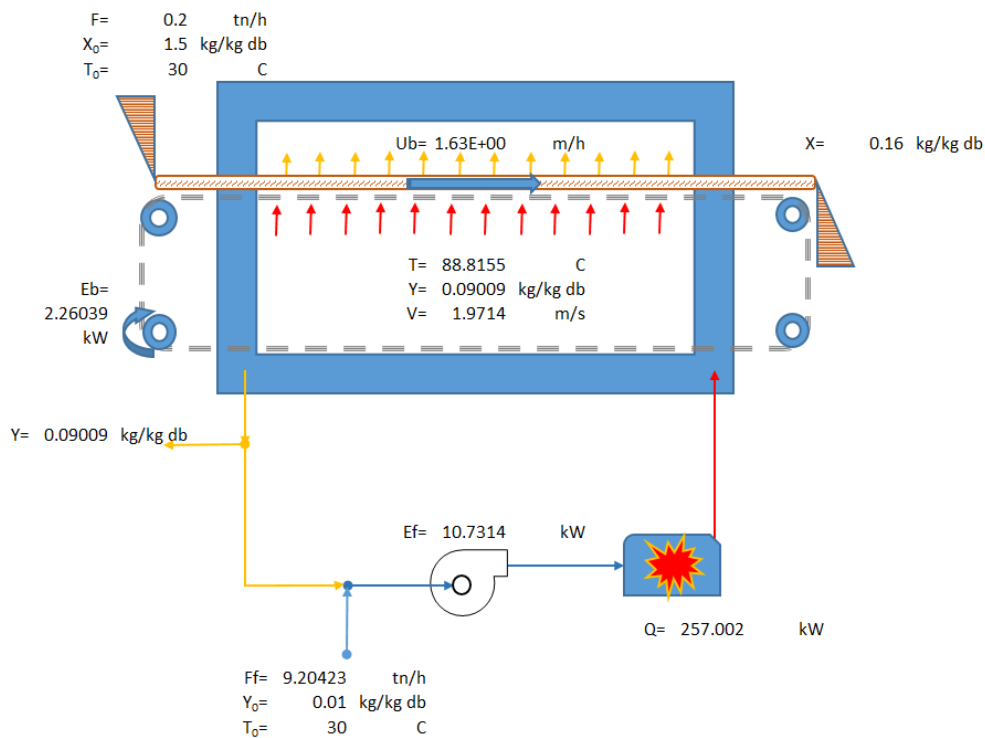
Type	Direct		Design		Rating		Identification	
	Given	Calculate	Given	Calculate	Given	Calculate	Given	Calculate
The characteristics of input streams	✓		✓		✓		✓	
The equipment characteristics	✓			✓	✓			✓
The operating conditions	✓			✓		✓	✓	
The characteristics of output streams		✓	✓		✓		✓	



ภาพที่ 27 model implementation ในรูปแบบ functional block diagram

5.2 การออกแบบ a conveyor belt dryer

ลักษณะของปัญหาในงานวิจัยนี้เป็นการ ออกแบบ design ดังนั้น ค่าที่กำหนดให้คือ The characteristics of input/output streams และต้องหาวิธีเพื่อทำการคำนวณค่า The equipment characteristics และ The operating conditions ออกมา พิจารณาภาพแสดงแผนผังของ dryer ที่วิเคราะห์แบบ lump system analysis เฉพาะส่วนอบแต่ละส่วนจะได้ดังภาพที่ 28



ภาพที่ 28 ส่วนประกอบและตัวแปรที่สนใจของ belt dryer ที่ออกแบบ

จากภาพที่ 28 อัตราการไหลของแข็งเปียก F (kg/s db) มีอุณหภูมิ T_0 (°C) และค่าความชื้น X_0 (kg/kg db) ถูกป้อนกระจายบนสายพานและส่งเข้าสู่เครื่องอบ วัสดุที่ถูกรอบแห้งออกจากเครื่องอบที่อัตราการไหลเชิงมวลเท่ากัน F (kg/s db) มีอุณหภูมิเป็น T (°C) ค่าความชื้นลดลงเป็น X (kg/kg db) สายพานเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว u (m/s) ต้องการกำลังไฟฟ้า E_b (kW) ขณะที่อากาศแห้งเข้าสู่เครื่องอบด้วยอัตราการไหลเชิงมวล F_f (kg/s db) อุณหภูมิ T_0 (°C) มีค่าความชื้นอากาศ Y (kg/kg db) โดยที่อุณหภูมิของก๊าซร้อนที่ใช้อบถูกควบคุมด้วยหัวเผาอัตราการไหลของอากาศใหม่ F_a (kg/s db) ถูกป้อนด้วยพัดลมดูดส่ง ต้องการกำลังไฟฟ้า E_f (kW) ส่งอากาศเข้าสู่หัวเผาใช้ก๊าซ LPG ให้ค่าความร้อน Q (kW) สภาพของอากาศป้อนในการออกแบบสามารถพิจารณาให้คงที่เนื่องจากการหมุนเวียนอากาศที่รวดเร็ว โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการในภาพที่ 5.2 สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 58-84 [24]

5.2.1 แบบจำลองคณิตศาสตร์ของ Belt Dryer

Psychrometric equations

$$P_s = \exp[a_1 - a_2/(a_3 + T)] \quad (58)$$

$$Y = m a_w P_s / (P - a_w P_s) \quad (59)$$

Drying kinetics

$$X_e = b_1 \exp[b_2/(237 + T)][a_w/(1 - a_w)]^{b^3} \quad (60)$$

$$t_c = c_0 d^{c^1} V^{c^2} T^{c^3} Y^{c^4} \quad (61)$$

$$t = -t_c \ln[(X - X_e)/(X_0 - X_e)] \quad (62)$$

Material balance

$$W = F(X_0 - X_e) \quad (63)$$

$$W = F(Y - Y_0) \quad (64)$$

Thermal energy requirements

$$Q_{we} = F(X_0 - X_e)[\Delta H_0 - (C_{PL} - C_{PV})T] \quad (65)$$

$$Q_{sh} = F[C_{PS} + X_0 C_{PL}](T - T_0) \quad (66)$$

$$Q_{ah} = F_a[C_{PA} + Y_0 C_{PV}](T - T_0) \quad (67)$$

$$Q = Q_{we} + Q_{sh} + Q_{ah} \quad (68)$$

Hot gas generation from combustion process

$$F_{g0} = F_{genv} + F_{comb} \quad (69)$$

$$F_{genv} C_{genv} T_{genv} + F_{comb} H_{comb} \eta_{comb} = C_g T_{g0} F_{g0} \quad (70)$$

$$Q = h_v V_o (\Delta T)_{ln} \quad (71)$$

Belt dryer

$$M = tF(1 + X_0) \quad (70)$$

$$M = (1 - \varepsilon) \rho_s H \quad (71)$$

$$H = Z_D DL \quad (72)$$

$$A_b = LD \quad (73)$$

$$U_b = L/t \quad (74)$$

Fan

$$\Delta P = f_1 Z_0 V^2 \quad (75)$$

$$F_i = \rho_a VDL \quad (76)$$

$$E_f = \Delta P F_f / \rho_a \quad (77)$$

Belt driver

$$E_b = e_l L(1 + X_0)F \quad (78)$$

Electrical energy requirements

$$E = E_b + E_f \quad (79)$$

Performance indices

$$n = Q_{we}/Q \quad (80)$$

$$r = W/A_b \quad (81)$$

Equipment cost

$$C_{eq} = C_{bel} A^{n_{bel}} + C_{cc} A^{n_{cc}} + C_{fan} E_f^{n_{fan}} + F_c C_{comb} \quad (82)$$

Annual operating cost

$$C_{op} = (C_{comb} Q + C_e E) t_y \quad (83)$$

Total annual cost (objective function)

$$TAC = C_{eq} + C_{op} \quad (84)$$

จากสมการข้างต้นตัวแปรของกระบวนการออกแบบทั้งหมดแสดงไว้ในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 แสดง Process Variables

Drying gas

F_a	ton/h	Fresh airflow rate
F_f	ton/h	Recycle airflow rate
F_g	kg/s	hot gas flow rate
$F_{genv} = F_a$		
T	°C	Drying air temperature
Y	kg/kg db	Drying air humidity
V	m/s	Drying air velocity
P	bar	Drying pressure
T_0	°C	Ambient temperature
Y_0	kg/kg db	Ambient humidity
P_s	bar	Vapor pressure at drying conditions
a_w	-	Water activity at drying conditions

Material

F	ton/h	Material flow rate
X_0	kg/kg db	Initial moisture content
X	kg/kg db	Final moisture content
X_e	kg/kg db	Equilibrium moisture content at drying conditions
d	m	Particle size
t_e	h	Drying time constant at drying conditions
t	h	Drying time

Dryer

W	ton/h	Drying rate
L	m	Dryer length
D	m	Dryer width
M	ton	Dryer mass holdup
Vo	m ³	Dryer volume holdup
A_b	m ²	Belt area

A_s	m ²	Air heater transfer area
u_b	m/s	Belt velocity
Z_0	m	Loading depth
ΔP	bar	Pressure loss of air flowing through belt
<i>Thermal load</i>		
Q_{we}	kW	Water vaporization
Q_{sh}	kW	Solid heating
Q_{ah}	kW	Air heating
Q	kW	Total thermal load
T_g	°C	Hot gas temperature
<i>Electrical load</i>		
E_b	kW	Belt driver
E_f	kW	Fan
E	kW	Total power requirement
<i>Performance</i>		
n	-	Thermal efficiency
r	kg/h m ²	Specific rate of evaporation

ตารางที่ 8 แสดง Technical Data

Density (kg/m³)

ρ_w	Water
ρ_a	Air
ρ_s	Dry material

Specific heat (kJ/kg K)

C_{PL}	Water
C_{PV}	Water vapor
C_{PA}	Air

C_{PS}	Dry material
<i>Latent heat (kJ/kg)</i>	
ΔH_0	Steam condensation at 0 °C
μ_g	Molecular weight of hot gas in kg/kmol
R	Constant of perfect gas J/kmol. °C
H_{comb}	Heating value of combustible gas in kJ/kg comb
η_{comb}	Combustion efficiency
h_v	Volumetric heat transfer coefficient in kW/ m ³ K
<i>Other</i>	
ε	Void (empty) fraction of loading
<i>Empirical constants</i>	
a_1, a_2, a_3	Antoine equation for vapor pressure of water
b_1, b_2, b_3	Oswin equation for material isotherms
c_0, c_1, c_2, c_3, c_4	Drying kinetics equation
e_1	Belt driver power equation
f_1	Pressure loss equation

ตารางที่ 9 Process Specifications และ Design Variables

F	ton/h db	Feed Flow rate
X_0	kg/kg db	Initial material moisture content
X	kg/kg db	Fianal material moisture content
d	m	Material characteristic size
T_0	°C	Ambient temperature
Y_0	kg/kg db	Ambient humidity
Z_0	m	Loading depth
P	bar	Ambient pressure
T_s	°C	Heating steam temperature
Y	kg/kg db	Drying air humidity

T	°C	Drying air temperature
V	m/s	Drying air velocity
D	m	Belt width

ตารางที่ 10 แสดง Cost Data

Utility cost

C_e B/kW h Cost of electricity

C_f B/kW h Cost of fuel

Equipment unit cost

C_{bel} B/m² Belt dryer

C_{cc} B/m² Combustion chamber

C_{fan} B/kW Fan

Equipment size scaling factor

n_{bel} - Belt dryer

n_{exc} - Combustion chamber

n_{fan} - Fan

Other

t_y h/year Annual operating time

ตารางที่ 11 แสดง NOMENCLATURE

a_i Antoine equation constants

A_b belt area, m²

A_s air heater transfer area, m²

a_w water activity

b_i Oswin equation constants

c_i drying kinetics equation constants

C_{bel} belt dryer unit cost, \$/m²

C_e cost of electricity, \$/kW h

C_{cc} Combustion chamber unit cost, \$/m²

C_{fan}	fan unit cost. \$/kW
C_{PA}	specific heat of air, kJ/kg K
C_{PL}	specific heat of water, kJ/kg K
C_{PS}	specific heat of dry material, kJ/kg K
C_{PV}	specific heat of water vapor, kJ/kg K
C_{PW}	specific heat of liquid water, kJ/kg K
C_s	cost of heating steam, \$/kW h
D	dryer width, m
d	particle size, m
db	dry basis
E	total power requirement, kW
e	capital recovery factor
e_1	belt driver power equation constant
E_b	belt driver power, kW
E_f	fan power, kW
E_r	rotating driver power, kW
F	material flow rate, ton/h db
f_l	pressure loss equation power
F_a	fresh airflow rate, ton/h
F_f	recycle airflow rate, ton/h
H	dryer volume holdup, m ³
i_r	interest rate
L	dryer length, m
l_f	lifetime, year
m	air-water molecular weight ratio
M	dryer mass holdup, ton
n	thermal efficiency
n_{bel}	belt dryer scaling factor
n_{cc}	Combustion chamber

n_f	number of flights
n_{fan}	fan scaling factor
P	pressure, bar
P_s	vapor pressure at temperature T , bar
Q	total thermal load, kW
Q_{ah}	air-heating thermal load, kW
Q_{sh}	solid-heating thermal load, kW
Q_{we}	water vaporization thermal load, kW
r	specific rate of evaporation, kg/h m ²
t	drying time, h
T	drying air temperature, °C
t_c	drying time constant, h
T_0	ambient temperature, °C
T_g	Hot gas temperature, °C
t_y	annual operating time, h/year
u_b	belt velocity, m/s
U_s	heat transfer coefficient at air heater, kW/m ² K
V	drying air velocity, m/s
W	evaporating capacity, ton/h
X	final moisture content, kg/kg db
X_e	equilibrium moisture content, kg/kg db
X_0	initial moisture content, kg/kg db
Y	drying air humidity, kg/kg db
Y_0	ambient air humidity, kg/kg db
Z_0	loading depth, m
ΔH_0	latent heat of water evaporating at 0 °C, kJ/kg
ΔP	pressure loss of air, bar
ε	void (empty) fraction of loading
ρ_a	air density, kg/m ³

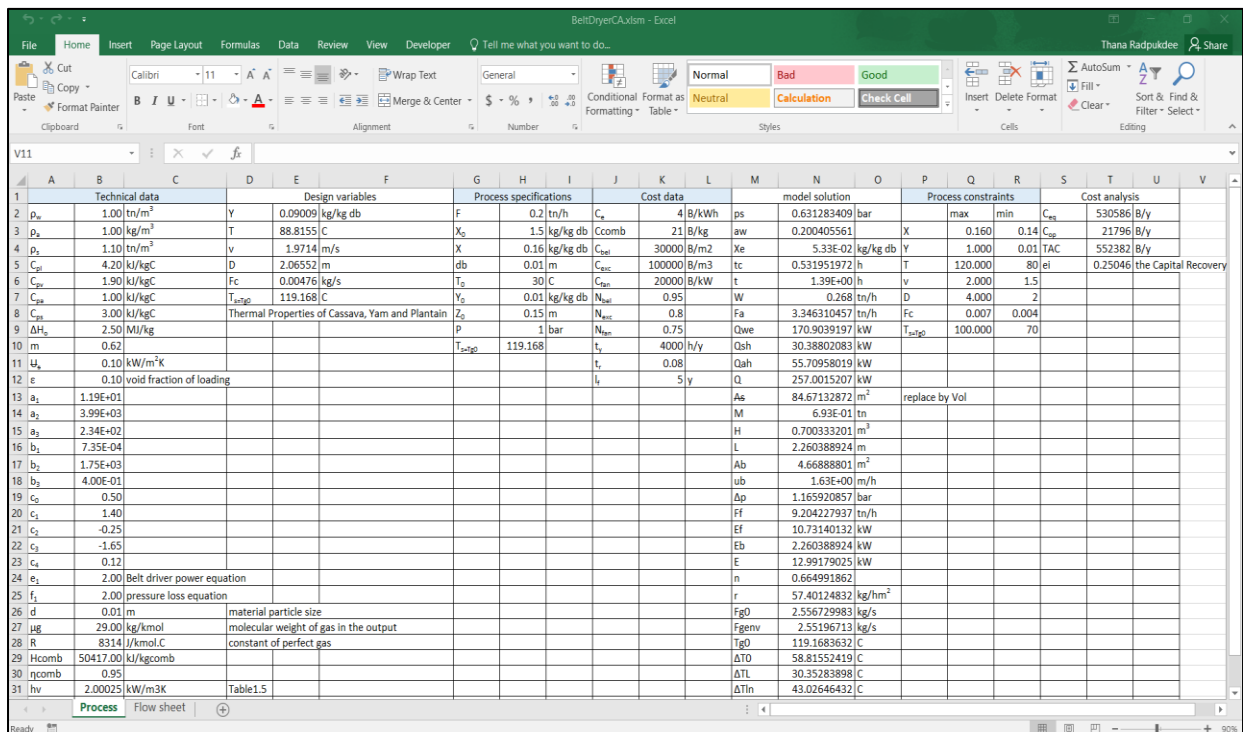
ρ_m construction material density, kg/m³

ρ_s dry material density, kg/m³

ρ_w water density, kg/m³

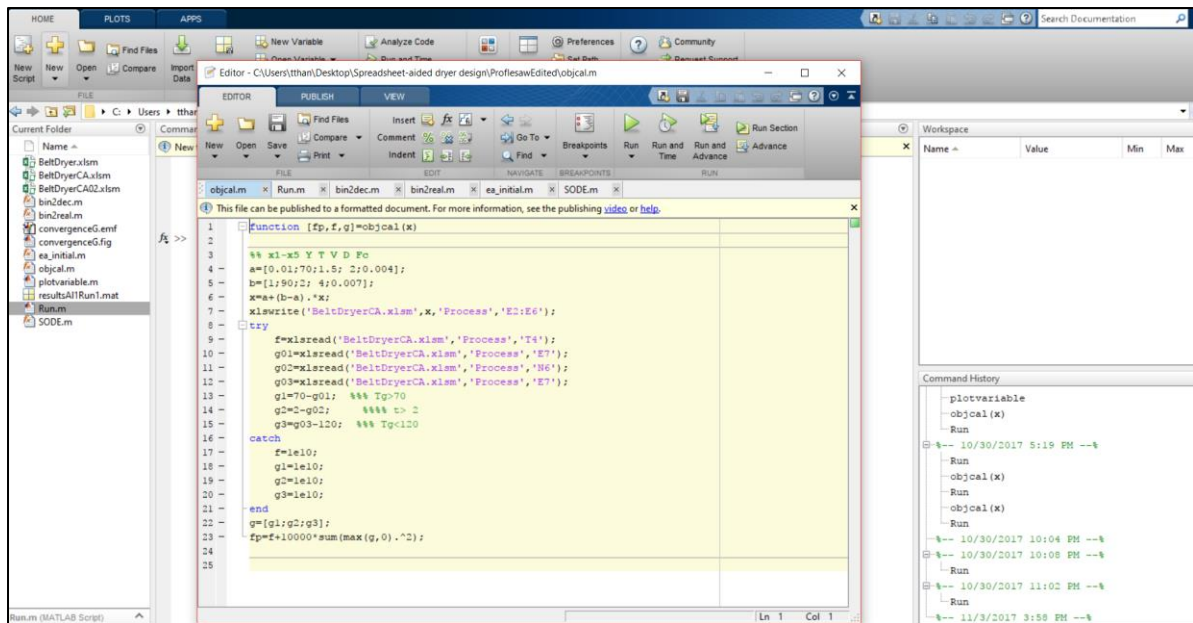
5.3 ผลการจำลองโดยโปรแกรม excel และ matlab simulink

จากความสัมพันธ์ในหัวข้อที่ 5.2 ที่มียุทธศาสตร์ได้นำมาสร้างเป็นตารางคำนวณเพื่อใช้สำหรับส่งค่าให้กับโปรแกรมส่วน optimization ต่อไปดังภาพที่ 29 โดยตัวแปร design variables จะถูกปรับค่าอัตโนมัติตามค่าขอบบน upper bound และขอบล่าง lower bound ของค่าออกแบบ ซึ่งค่าที่ได้จาก process model จะถูกจำกัดความสัมพันธ์ด้วย process constraints โดยในที่นี้ใช้ การหาค่าที่เหมาะสมแบบ 1 วัตถุประสงค์ คือ ค่า cost ซึ่งค่าต่าง ๆ ที่ได้บนโปรแกรม excel ซึ่งถูกควบคุมโดย matlab จะนำไปใช้ในการพิจารณาจุดคุ้มทุนจากการจำลองและนำไปใช้ออกแบบเครื่องอบในหัวข้อ 5.4 และ 5.5 ต่อไป



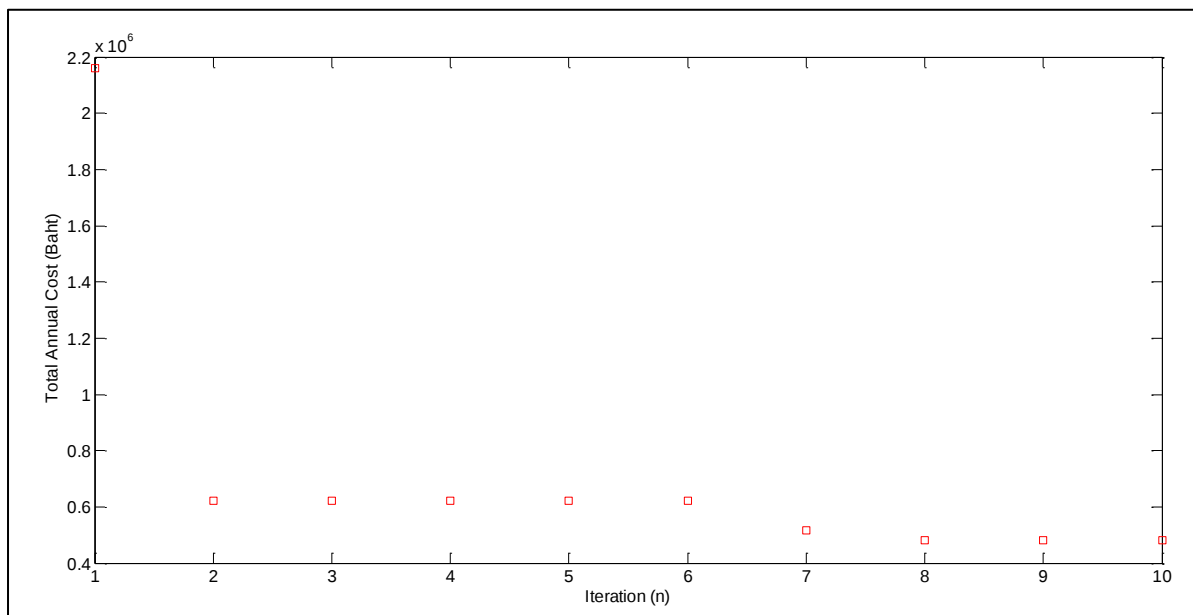
ภาพที่ 29 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการสร้าง spreadsheet ในการออกแบบ belt dryer ในงานวิจัยนี้

ค่าเหมาะสมสุดท้ายที่ได้จากการทำ iteration ด้วยวิธี Hybrid differential evolution & Nelder and Mead method จะแสดงใน flow sheet ดังปรากฏในภาพที่ 5.2 ก่อนหน้านี้



ภาพที่ 30 subprogram สำหรับอ่านและเขียนค่าจากการทำ iteration ลงบนตาราง spreadsheet

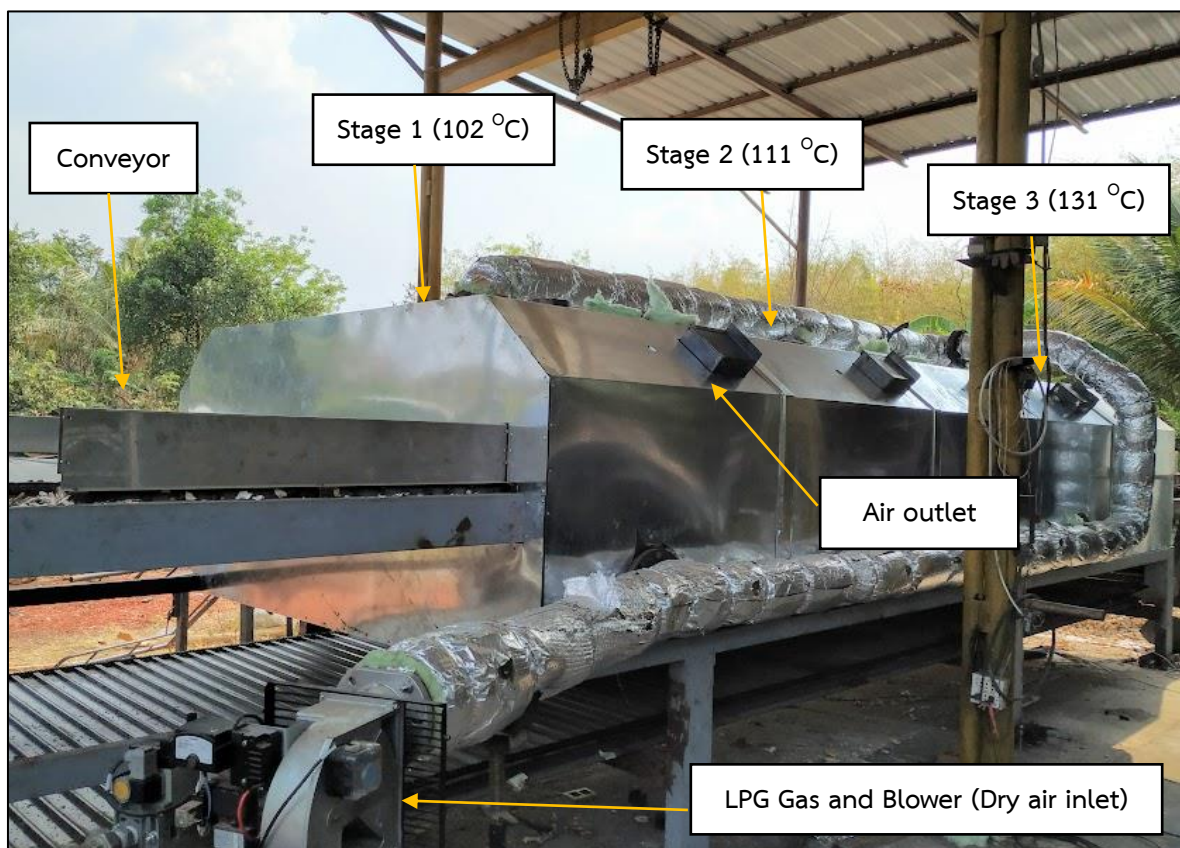
ในภาพที่ 30 เมื่อกำหนด objective function ใน script “objcal” ใช้โปรแกรมหลัก รัน Hybrid differential evolution & Nelder and Mead method [25-28] ใน “SODE” script จนกว่าจะเข้าสู่ค่าต่ำสุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ดังภาพที่ 31



ภาพที่ 31 ผลการจำลองโปรแกรมเป็นการ convergence ของค่า objective function

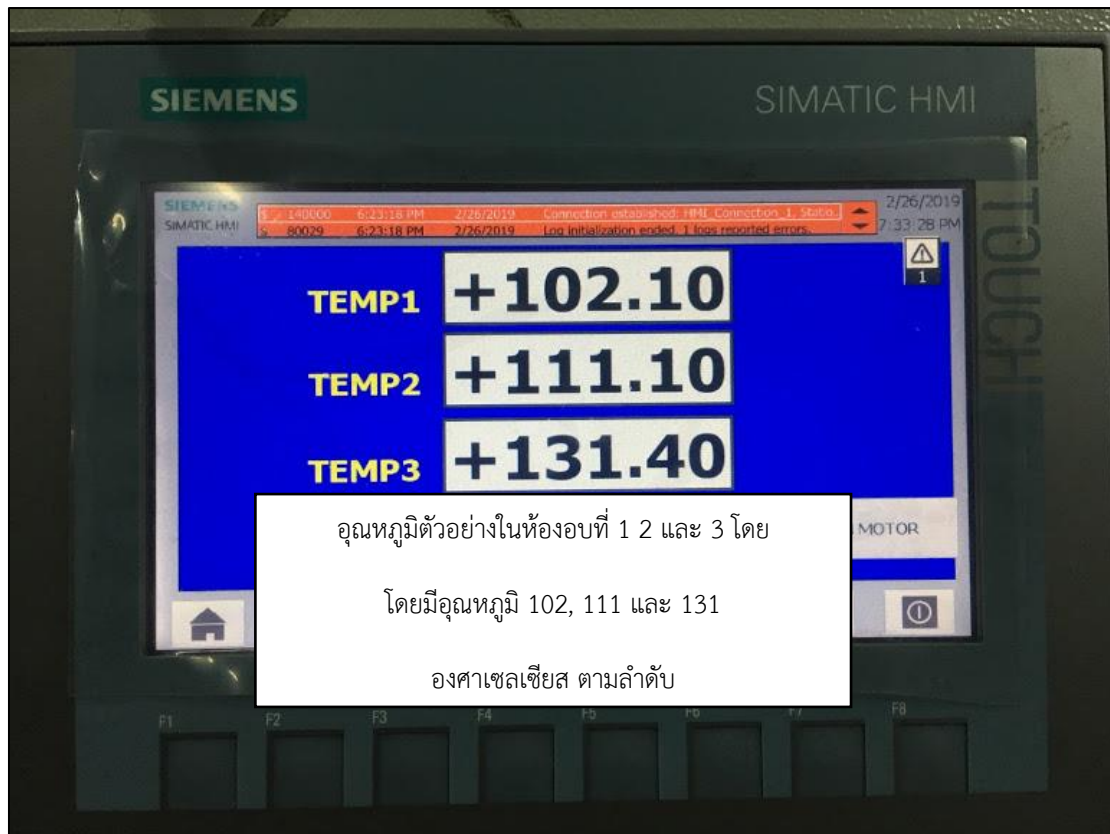
5.4 ลักษณะของเครื่องอบที่ได้ออกแบบ

ตัวอย่างการอบ จากการคำนวณด้วยโปรแกรม math lab ปริมาตรของเตาอบใน stage ที่ 2 heating stage ที่มีความร้อน 111 องศาเซลเซียสประมาณ 1 ลบ.ม.ต่อหนึ่ง section ความกว้างของ belt ประมาณ 2 เมตรใช้พลังงานรวมประมาณ 245 kW ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ lump system analysis ยังจำเป็นต้องพิจารณาขนาดเพื่อสำหรับประสิทธิภาพการอบที่น้อยกว่าทฤษฎี อย่างไรก็ตามลักษณะของเครื่องอบได้แสดงไว้ดังภาพที่ 32-33



ภาพที่ 32 ลักษณะของเครื่องอบและส่วนประกอบต่าง ๆ

ทั้งนี้เนื่องจากการคำนวณในทางทฤษฎีนั้น สมมุติฐานว่า ก๊าซร้อนสามารถสัมผัสและผสมในปริมาตรควบคุมได้ ทั้งหมด ซึ่งในทางปฏิบัติไม่เป็นเช่นนั้น ผู้ออกแบบจึงเผื่อให้ระยะเวลาที่ของแข็งเปียกอยู่ในระบบได้นานขึ้น ด้วยอัตราการไหลของแข็งเปียกประมาณ 2 เมตรต่อชั่วโมง จะทำให้ขนาดที่ได้ออกแบบผลิตมันเส้นแห้งได้ประมาณ 1.4 ตันต่อวัน



ภาพที่ 33 ภาพแสดงตัวอย่างอุณหภูมิในห้องอบซึ่งแสดงบนหน้าจอ SCADA



ภาพที่ 34 ภาพแสดงชิ้นมันสด (65.8% wb) ก่อนนำไปเข้ากระบวนการอบ



ภาพที่ 35 ภาพแสดงชิ้นมันตาก (40.7% wb) ก่อนนำไปเข้ากระบวนการอบ



ภาพที่ 36 ภาพแสดงชิ้นมันทดสอบบนสายพานก่อนเข้าสู่ห้องอบ



ภาพที่ 37 ภาพแสดงชิ้นไม้หลังเข้ากระบวนการอบ



ภาพที่ 38 ภาพแสดงชิ้นไม้ทดสอบนำมาหาค่าความชื้น

บทที่ 6

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของเครื่องอบแห้งมันเส้น

6.1 ผลการทดสอบเครื่องอบแห้งมันเส้น

ในการอบมันเส้นสิ่งที่สำคัญที่จะเป็นตัวชี้วัดถึงคุณภาพของมันเส้นก็คือ ความชื้นซึ่งต้องมีค่าไม่เกิน 16% (% wet base) อย่างไรก็ตามการที่จะได้มันเส้นคุณภาพดีต้องประกอบไปด้วยหลายปัจจัย และปัจจัยที่สำคัญ ๆ ได้แก่อุณหภูมิในการอบ ความชื้นของมันเส้นก่อนการอบ และจำนวนซ้ำ (replication) เพื่อลดข้อผิดพลาดในการเก็บข้อมูล

การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องอบมันเส้นจึงต้องมีการทดลอง เพื่อทำการสรุปผล ดังนั้นการทดลองจึงเป็นแบบการออกแบบการทดลองแบบปัจจัยทั่วไป (general factorial design) คือการออกแบบการทดลองโดยใช้ความชื้นของมันเส้นก่อนการอบ แบบ 2 ระดับ คือ 40.7 % wb และ 65.8 % wb อุณหภูมิในการอบ ณ ห้องอบสุดท้าย (ห้องที่ 3) ของเครื่องที่มีอุณหภูมิในการอบสูงสุดเป็น 3 ระดับ คือ 100 110 และ 130 C และจำนวนซ้ำ 3 ครั้ง ดังนั้นการออกแบบการทดลองสามารถแสดงในตารางที่ 12 ทั้งนี้อุณหภูมิของห้องอบที่ 2 และ 1 จะลดลงโดยลำดับ ดังตัวอย่างแสดงในหัวข้อที่ 5.4

ดังนั้นตัวแบบการวิเคราะห์ความแปรปรวน 2 ปัจจัย (two - factor analysis of variance model) สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 1

$$y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk} \quad \forall i, j, k \quad \dots(1)$$

สมมติปัจจัย A และ B คงที่ โดยมีรูปแบบการวิเคราะห์ความแปรปรวนสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 13

ตารางที่ 12 การออกแบบการทดลองแบบปัจจัยทั่วไป

A		
B	1	2
1	R1	R1
	R2	R2
	R3	R3

2	R1	R1
	R2	R2
	R3	R3
3	R1	R1
	R2	R2
	R3	R3

ตารางที่ 13 รูปแบบการวิเคราะห์ความแปรปรวน

source of variation	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F_0
A	SS_A	$a - 1$	MS_A	$F_0 = \frac{MS_A}{MS_E}$
B	SS_B	$b - 1$	MS_B	$F_0 = \frac{MS_B}{MS_E}$
AB	SS_{AB}	$(a - 1)(b - 1)$	MS_{AB}	$F_0 = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$
Error	SS_E	$abc(n - 1)$	MS_E	
Total	SS_T	$abcn - 1$		

โดยที่ total sum of squares, $SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn}$

และ sum of squares ของปัจจัยสามารถคำนวณได้ดังนี้ $SS_A = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a y_{i..}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn}$ และ $SS_B = \frac{1}{an} \sum_{j=1}^b y_{.j.}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn}$ และสามารถที่จะคำนวณ sum of squares ของ two-factor interaction ได้ดังนี้ $SS_{AB} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij.}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} - SS_A - SS_B$ และ error sum of square $SS_E = SS_T - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij.}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn}$

จากการทดสอบได้ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 14 และผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน ดังแสดงในตารางที่ 15

ตารางที่ 14 ผลการทดสอบการอบมันเส้น

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความชื้นมันเส้นก่อนอบ	
	40.7 % wb	65.8 % wb
100	30.3	46.3
	42.9	42.4
	36.7	36.4
110	18.5	34.3
	17.9	29.0
	25.0	30.3
130	4.0	4.8
	12.5	10.5
	4.0	8.0

ตารางที่ 15 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน

General Linear Model: Yield versus Moisture, Temp						
Factor	Type	Levels	Values			
Moisture	fixed	2	1, 2			
Temp	fixed	3	1, 2, 3			
Analysis of Variance for Yield, using Adjusted SS for Tests						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Moisture	1	140.00	140.00	140.00	7.00	0.021
Temp	2	3073.49	3073.49	1536.75	76.87	0.000
Moisture*Temp	2	72.62	72.62	36.31	1.82	0.205
Error	12	239.89	239.89	19.99		
Total	17	3526.00				

จากตารางที่ 15 สามารถสรุปได้ว่าความชื้นของมันเส้นก่อนการอบและอุณหภูมิในการอบมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความชื้นของมันเส้นหลังการอบ และไม่มีปฏิกริยาสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของมันเส้นก่อนอบกับอุณหภูมิในการอบ เมื่อนำข้อมูลมาสร้างสมการถดถอย (Linear regression model) โดยโปรแกรม MINITAB ทำได้สมการดังนี้

$$\%wb\ yield = 134 + 0.223 \cdot Moisture - 1.06 \cdot Temperature \quad \dots(2)$$

จากสมการที่ 2 สามารถที่หาสภาวะที่เหมาะสมในการอบมันเส้น (optimal condition) ได้ดังสมการ

$$16\%wb\ yield = 134 + 0.223 \cdot Moisture - 1.06 \cdot Temperature \quad \dots(3)$$

$$40.7 \leq Moisture \leq 65.8$$

$$100 \leq Temperature \leq 130$$

จากสมการที่ 3 พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการอบมันเส้นเพื่อให้ได้ความชื้นไม่เกิน 16 %wb คือ เมื่อความชื้นมันเส้นก่อนอบประมาณ 40 %wb ควรใช้อุณหภูมิในการอบไม่น้อยกว่า 120 องศาเซลเซียส หรือเมื่อมันเส้นมีความชื้นก่อนอบ 65 %wb ควรใช้อุณหภูมิในการอบไม่น้อยกว่า 125 องศาเซลเซียส

6.2 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของเครื่องอบแห้งมันเส้น

ตารางที่ 16 แสดงข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองและใช้ในการวิเคราะห์

รายการ	รายละเอียด
ราคาเครื่อง (บาท)	1,608,200.00
ค่าซาก (บาท)	160,820.00
วิธีคิดค่าเสื่อมราคาเครื่องจักร	MACRS 5 year class
อายุเครื่องจักร(ปี)	10
ดอกเบี้ย	7.18%
ภาษี	7%
ราคามันต่อ กก (บาท)	6.8
ค่าไฟฟ้า (บาท) ต่อหน่วย	3.75
กำลังการผลิต กก ต่อวัน	2,000
ค่าแรง (บาท) ต่อวัน	300
ค่าซ่อมแซมบำรุงรักษา(บาทต่อปี)	20,000.00
ปริมาณวัตถุดิบ (กิโลกรัม)	400,000
ค่าวัตถุดิบต่อ กก (บาท)	2.8
ค่าแรง (บาท) ต่อวัน	200
ชั่วโมงการทำงานในหนึ่งวัน	20
ค่าใช้จ่ายในด้านเชื้อเพลิงและดำเนินการ (บาทต่อปี)	145,200

จากข้อมูลข้างต้นสามารถที่จะคำนวณหาค่ากระแสเงินสดสุทธิ (Net Cash Flow) ได้ตามตารางด้านล่าง

ตารางที่ 17 แสดงข้อมูลการวิเคราะห์กระแสเงินสดสุทธิ

ปีที่	กระแสเงินสดสุทธิ
0	-1,608,200
1	485,236
2	498,745
3	484,336
4	475,690
5	475,690
6	469,206
7	462,722
8	462,722
9	462,722
10	612,284

โดยสามารถที่จะคำนวณค่าเทียบเท่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value; NPV) ได้จากสมการ

$$NPV = \sum_{n=0}^N \frac{A_n}{(1+i)^n} \quad (85)$$

โดย

A_n = ค่ากระแสเงินสดสุทธิรายปี (Annual Net Cash Flow)

i = อัตราดอกเบี้ย

n = จำนวนปีของโครงการ $n = 0, 1, 2, \dots, N$

ค่าเทียบเท่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value) จากสมการด้านบนที่อัตราดอกเบี้ยร้อยละ 7.18 ต่อปีเท่ากับ 1,783,637 บาท ดูรายละเอียดได้ที่ ตารางที่ 18 และสามารถที่จะคำนวณค่ากำไรรายปี (Annual Equivalent Profit; AEP) จากสมการ

$$A = P \left[\frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \right] \quad (86)$$

A = ค่าเทียบเท่ารายปี (Annual Equivalence)

P = ค่าปัจจุบัน (Present Value)

เมื่อใช้สมการทำให้ทราบว่าค่าเทียบเท่ารายปีอยู่ที่ปีละ 256,008 บาทต่อปีที่อัตราดอกเบี้ยร้อยละ 7.18 ซึ่งสามารถที่จะสรุปได้ว่าโครงการนี้ดึงดูดในการลงทุน และค่าเฉลี่ยค่าใช้จ่ายต่อกิโลกรัมมันอบแห้งเท่ากับ 5.62 บาท และจากข้อมูลข้างต้นสามารถที่จะทำการวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) ซึ่งได้ผลสรุปดังนี้

ค่าวัตถุดิบต่อ กก (บาท)	3.49
กำลังการผลิต กก ต่อวัน	1,191.46
ราคามันต่อ กก (บาท)	5.62

ค่าวัตถุดิบไม่ควรเกิน 3.49 บาทต่อกิโลกรัม กำลังการผลิตขั้นต่ำ 1,191.46 กิโลกรัมต่อวัน ราคาขายมันอบแห้งไม่ควรต่ำกว่า 5.62 บาทต่อกิโลกรัม จะทำให้โครงการนี้ไม่ขาดทุนและนำลงทุน

ตารางที่ 18 กระแสเงินสดสุทธิของเครื่องจักร

ค่าเสื่อมราคา MACRS 5 year		20%	32%	19.20%	11.52%	11.52%	5.76%				
รายการบัญชีรายได้											
ปี	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
รายได้											
ราคามันต่อ กก		6.6	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6
กำลังการผลิต กก ต่อปี		280,000	280,000	280,000	280,000	280,000	280,000	280,000	280,000	280,000	280,000
รายได้รวมต่อปี		1,848,000	1,848,000	1,848,000	1,848,000	1,848,000	1,848,000	1,848,000	1,848,000	1,848,000	1,848,000
ค่าใช้จ่าย											
ค่าแรง		60,000	60,000	60,000	60,000	60,000	60,000	60,000	60,000	60,000	60,000
ค่าแก๊ส		145,200	145,200	145,200	145,200	145,200	145,200	145,200	145,200	145,200	145,200
ค่าวัตถุดิบ		1,120,000	1,120,000	1,120,000	1,120,000	1,120,000	1,120,000	1,120,000	1,120,000	1,120,000	1,120,000
ค่าไฟฟ้า		5,250	5,250	5,250	5,250	5,250	5,250	5,250	5,250	5,250	5,250
ค่าน้ำมันดีเซล		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ค่าเสื่อมราคา		321,640	514,624	308,774	185,265	185,265	92,632	0	0	0	0
ค่าซ่อมแซมบำรุงรักษา		20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000
ค่าเสื่อมราคาอาคาร											
รายได้ก่อนหักภาษี		175,910	(17,074)	188,776	312,285	312,285	404,918	497,550	497,550	497,550	497,550
ภาษีเงินได้		12,314	(1,195)	13,214	21,860	21,860	28,344	34,829	34,829	34,829	34,829
รายได้สุทธิ		163,596	(15,879)	175,561	290,425	290,425	376,573	462,722	462,722	462,722	462,722

งบกระแสเงินสด											
กิจกรรมดำเนินการ											
รายได้สุทธิ		163,596	(15,879)	175,561	290,425	290,425	376,573	462,722	462,722	462,722	462,722
ค่าเสื่อมราคา		321,640	514,624	308,774	185,265	185,265	92,632	0	0	0	0
ค่าเสื่อมราคาอาคาร		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
กิจกรรมลงทุน											
ค่าเครื่องจักร	(1,608,200)										
ค่าซาก											160,820
Gains Tax											(11,257)
ค่าอาคารสถานที่											
กระแสเงินสดสุทธิ	(1,608,200)	485,236	498,745	484,336	475,690	475,690	469,206	462,722	462,722	462,722	612,284
NPV	1,783,637										

จากตารางกระแสเงินสดสุทธิพบว่านอกจากค่าวัตถุดิบแล้วยังมีค่าใช้จ่ายในส่วน of ค่าแรง ค่าแก๊ส ค่าไฟฟ้า ค่าเสื่อมราคา รวมถึงค่าบำรุงรักษา ดังนั้นในส่วนต้นทุน ค่าใช้จ่ายอื่นตลอดระยะเวลาอายุการใช้งานของเครื่องจักร (useful life) ซึ่งมีระยะเวลา 10 ปี พบว่า ค่าใช้จ่ายในส่วนนี้คำนวณได้จากผลรวมค่าใช้จ่ายในแต่ละปีหารด้วย กำลังการผลิตแล้วจึงหารด้วยระยะเวลา 10 ปี จะได้ต้นทุนเฉลี่ยอยู่ที่ 1.40 บาทต่อกิโลกรัม

6.3 ข้อจำกัดและข้อเสนอแนะในการวิจัย

เครื่องอบแห้งมันเส้นที่พัฒนาในโครงการนี้ ในการทำงานจริงยังมีข้อจำกัดการทำงานที่ยังไม่ค่อยสะดวกคือ การกระจายมันเส้นบนสายพานของเครื่องอบ ที่ปัจจุบันใช้แรงงานคนในการป้อนและกระจายมันเส้น ซึ่งการกระจายตัวของมันเส้นบนสายพานการอบจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพในการอบที่สม่ำเสมอ อีกทั้งในการทำงานโดยรวมของระบบยังไม่เบ็ดเสร็จในตัว คือยังขาดในส่วนของการสับหัวมันสดให้เป็นเส้น ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงขอเสนอแนะการพัฒนาเครื่องอบแห้งมันเส้นในโครงการต่อไปหรือในอนาคต ควรมีการพัฒนาต่อยอดในเรื่องของการเพิ่มชุดสับหัวมันสดและชุดป้อนและกระจายมันเส้นบนสายพานของเครื่องอบแห้ง โดยทั้งชุดสับหัวมันสดและชุดป้อนและกระจายมันเส้น ควรติดตั้งไว้ส่วนแรกของเครื่องอบแห้ง

รายการเอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2559. สถิตินำเข้าและส่งออก. ออนไลน์ อ้างอิงเมื่อ 14 พฤศจิกายน 2559.
http://www.oae.go.th/oae_report/export_import/export.php
- [2] ชยะ หัสติเสวี. 2530. การใช้องค์ความรู้ในการผลิต ตุนทุนการผลิต และกำไรของโรงงานมันเส้นในภาคตะวันออกเชิงเหนือของประเทศไทย พ.ศ. 2528. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [3] Olufayo, A.A. and O.J. Ogunkunle. 1996. Natural Drying of Cassava Chips in the Humid Zone of Nigeria. *Bioresource Technology* 58: 89-91.
- [4] คำนิง วาทยธา. 2548. การอบแห้งขึ้นมันสำปะหลังด้วยไมโครเวฟและลมร้อน. *Postharvest Newsletter*. 4(4): 1-2.
- [5] วีระชัย อางหาญ วีระศักดิ์ เลิศสิริโยธิน พยุงศักดิ์ จุลยุเสน เทวรัตน์ ทิพย์วิมล คชา วาทยกิจ พรรษา ลิบลับ ชาญชัย โรจนสรโรช สามารถ บุญอาจ และวิเชียร ดวงสีเสน. 2551. การพัฒนากระบวนการผลิตวัตถุดิบจากมันสำปะหลังสำหรับอุตสาหกรรมเอทานอล. รายงานโครงการวิจัย เสนอต่อ ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว
- [6] ไพบุลย์ โรจน์วิบูลย์วิชัยและสมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์. การอบแห้งข้าวโพดด้วยเครื่องอบแบบหมุนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และแนวทางการอบแห้ง.วารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2535: 50-59.
- [7] Helge Didriksen (2002). Model based predictive control of a rotary dryer, *Chemical Engineering Journal*, 86 (2002) 53–60.
- [8] Lobato F. S. et al. (2008). Estimation of drying parameters in rotary dryers using differential evolution. *Journal of Physics : Conference Series*, 135:012063
- [9] Gianini et.al (2010). Dynamic modeling and control of soybean meal drying in a direct rotary dryer. *Food and bioproducts processing*, 88 : 90–98
- [10] Hamed Abbasfard et al. (2013). Mathematical modeling and simulation of an industrial rotary dryer: A case study of ammonium nitrate plant. *Powder Technology*, 239 : 499–505
- [11] Francisco et.al. (2015). Modeling of olive-oil mill waste rotary dryers: Green energy recovery system. *Applied Thermal Engineering*, 80 362-373
- [12] F. Courtois, M. Abud Archila, C. Bonazzi, J.M. Meot, G. Trystram. Modeling and control of a mixed-flow rice dryer with emphasis on breakage quality. *Journal of Food engineering*, 49 (2001) 303-309

- [13] Savaresi, S., Bitmead, R., & Peirce, R. (2001). On modelling and control of a rotary dryer. *Control Engineering Practice*, 9, 249–266.
- [14] M.G. Ortega, F. Castan o, M. Vargas, F.R. Rubio. (2007). Multivariable robust control of a rotary dryer: Analysis and design, In: *Control Engineering Practice*. Vol 15 487–500.
- [15] R. Arjona, P. Ollero, F. Vidal B. (2005). Automation of an olive waste industrial rotary dryer. *Journal of Food Engineering*, 68, 239–247.
- [16] Duchesne, C., Thibault, L., & Bazin, C. (1997). Modelling and dynamic simulation of an industrial rotary dryer. *Developments in Chemical Engineering & Mineral Processing*, 5(3/4), 155–182.
- [17] Douglas, P. L., Kwade, A., Lee, P. L., & Mallick, S. K. (1993). Simulation of a rotary dryer for sugar crystalline. *Drying Technology*, 11(1), 129–155.
- [18] Sharples, K., Glikin, P. G., & Warne, R. (1964). Computer simulation of rotary dryers. *Transactions of the Institute of Chemical Engineers*, Vol 42, T275–T284.
- [19] Yliniemi, L. (1999). **Advanced control of a rotary dryer**. Ph.D. thesis, University of Oulu.
- [20] T. Kudra and A. S. Mujumdar, *Advanced Drying Technology*, CRC Press 2nd edition
- [21] R. Santivarakorn, T. Radpukdee. Multi Sliding Mode Control with Residual Error Estimation for a Counter Flow Rotary Dryer. *Advanced Science Letters*, Volume 19, Number 11, November 2013 , pp. 3263-3271(9).
- [22] Ajala, A.S.*, Aboiye, A.O, Popoola, J.O., Adeyanju, J.A., *Drying Characteristics and Mathematical Modelling of Cassava Chips*, *Chemical and Process Engineering Research* ISSN 2224-7467 (Paper) ISSN 2225-0913 (Online) Vol 4, 2012
- [23] Kar A, Gupta DK. Air drying of osmosed button mushrooms. *J Food Sci Technol*. 2003;40:23–27.
- [24] Arun S. Mujumdar. *Hand book of Industrial Drying*. 4th edition. 2015 Taylor and Francis Group
- [25] Pholdee, N., Bureerat, S. Comparative performance of meta-heuristic algorithms for mass minimisation of trusses with dynamic constraints (2014) *Advances in Engineering Software*, 75, pp. 1-13.
- [26] Pholdee, N., Bureerat, S., Park, W.-W., Kim, D.-K., Im, Y.-T., Kwon, H.-C., Chun, M.-S. Optimization of flatness of strip during coiling process based on evolutionary algorithms (2015) *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 16 (7), pp. 1493-1499.

- [27] Bureerat, S., Pholdee, N. Optimal Truss Sizing Using an Adaptive Differential Evolution Algorithm (2016) Journal of Computing in Civil Engineering, 30 (2), art. no. 04015019, .
- [28] Pholdee, N., Park, W.-W., Kim, D.-K., Im, Y.-T., Bureerat, S., Kwon, H.-C., Chun, M.-S. Efficient hybrid evolutionary algorithm for optimization of a strip coiling process (2015) Engineering Optimization, 47 (4), pp. 521-532.

ภาคผนวก

ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้และกิจกรรมที่ดำเนินการมาและผลที่ได้รับตลอดโครงการ

วัตถุประสงค์โครงการ	กิจกรรมที่วางแผน	กิจกรรมที่ดำเนินการ	ผลที่ได้รับตลอดโครงการ
1. ออกแบบและสร้างเครื่องอบมันเส้นแบบ Apron ชนิดหลาย Stage	1. ศึกษาปัญหาและปัจจัย ที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพการทำงาน ของเครื่องอบแห้งมันสำปะหลังแบบเส้นตลอดจนพฤติกรรม การแห้งของมันเส้น 2. ออกแบบเครื่องอบและอุปกรณ์ต่อร่วมต่าง ๆ เขียนแบบผลิต และวางแผนการทดลอง	1. หาปัญหาและปัจจัย ที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง 2. ออกแบบเครื่องอบและอุปกรณ์ต่อร่วมต่าง ๆ	1. ดันแบบเครื่องอบมันเส้นที่ทำงานด้วยระบบ supervisory control กำลังผลิต 2 ตัน วัตถุดิบต่อวัน
	1. สร้างเครื่องอบและติดตั้งอุปกรณ์ตามที่ได้ออกแบบไว้พร้อมกับทดสอบการทำงานของระบบ และเครื่องมือวัดที่ ได้ทำการติดตั้ง 2. เก็บข้อมูลและปรับตั้งตัวแปรควบคุมที่เกี่ยวข้องตามที่ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์คำนวณ และออกแบบการทดลอง	1. สร้างเครื่องอบและติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบการทำงานของระบบ 2. เก็บข้อมูลและปรับตั้งตัวแปรควบคุมที่เกี่ยวข้องและออกแบบการทดลอง	
	1. สรุปผลการดำเนินงาน และชี้แจงพนักงานผู้ดูแลระบบให้มี ความเข้าใจระบบเพื่อที่จะสามารถควบคุมการทำงาน ของระบบ ได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป 2. จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์	1. สรุปผลการดำเนินงาน และชี้แจงพนักงานผู้ดูแลระบบ 2. จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์	

ตารางสรุปความเห็นของ ผู้ทรงคุณวุฒิ นักวิจัย และผู้ประสานงานต่อรายงานฉบับสมบูรณ์ของโครงการ

ชื่อแผนงาน/โครงการ “การออกแบบและสร้างเครื่องอบมันเส้นแบบสายพานลำเลียงต่อเนื่องชนิดหลายสถานะการอบ”

ประเด็นวิธีการ

ความเห็นผู้ทรงคุณวุฒิ	คำชี้แจงของนักวิจัย	การจัดการของผู้ประสานงาน
ในด้านเศรษฐศาสตร์ น่าจะประเมินค่าเสื่อมในระยะเวลาประมาณ 20 ปีได้	เครื่องจักรในโครงการนี้จัดอยู่ใน mid length ที่ 5 ปี จึงใช้การประเมินค่าเสื่อมราคาแบบ MACRS CLASS 5 Yrs	☐ ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย ☐ ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็นไม่ได้และ ☐ ส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาใหม่แล้วซึ่ง ☐ ผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว ☐ นักวิจัยแก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ
สามารถต่อยอดงานวิจัยทำเป็นคู่มือสำหรับการ operate เครื่องได้ง่ายขึ้น	เห็นด้วยกับผู้ทรงฯ งานวิจัยนี้ ควรต้องการการพัฒนาต่อยอด รวมทั้งการทำคู่มือสำหรับการใช้งาน เครื่องได้อย่างถูกต้อง	☐ ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย ☐ ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็นไม่ได้และ ☐ ส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาใหม่แล้วซึ่ง ☐ ผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว ☐ นักวิจัยแก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ
กระบวนการทำงานของเครื่องอบต้องพ่วงกับเครื่องสับ เพื่อควบคุมคุณภาพการอบ	เห็นด้วยกับผู้ทรงฯ งานวิจัยนี้ ควรต้องการการพัฒนาต่อยอดเพื่อให้การทำงานเบ็ดเสร็จและมีคุณภาพที่ดี คือการนำชุดสับชิ้นมันต่อส่วนแรกของเครื่องอบฯ	☐ ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย ☐ ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็นไม่ได้และ ☐ ส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาใหม่แล้วซึ่ง ☐ ผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว ☐ นักวิจัยแก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ

ความเห็นผู้ทรงคุณวุฒิ	คำชี้แจงของนักวิจัย	การจัดการของผู้ประสานงาน
ควรปรับการเขียนรายงานในส่วนการทดลองเรื่องความร้อนการอบ ให้ผู้อ่านเข้าใจได้ง่ายขึ้น	การทดลองเรื่องความร้อนในการอบได้อธิบายเพิ่มเติมไว้ในหัวข้อที่ 5.4 และ 6.1 เรียบร้อยแล้ว	☐ ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย ☐ ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็นไม่ได้และ ☐ ส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาใหม่แล้วซึ่ง ☐ ผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว ☐ นักวิจัยแก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ
ในการคำนวณค่า LPG ในรายงาน น่าจะเพิ่มเติมค่าใช้จ่ายต่อกิโลกรัมของน้ำมัน	ได้เพิ่มเติมค่าใช้จ่ายด้านพลังงานในหัวข้อ 6.2 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของเครื่องอบแห้งน้ำมัน ตามที่ผู้ทรงคุณวุฒิได้แนะนำแล้วครับ	☐ ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย ☐ ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็นไม่ได้และ ☐ ส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาใหม่แล้วซึ่ง ☐ ผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว ☐ นักวิจัยแก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ
แนะนำให้ใช้การเดินสายพานแบบเกี่ยว โดยตั้งเวลาในการเกี่ยวสายพานเป็นช่วง ๆ เพื่อลดค่าใช้จ่ายและค่าเสื่อม	ในโครงการนี้ ได้ใช้ การควบคุมมอเตอร์เกี่ยวสายพานด้วยอินเวอร์เตอร์ และมีการตั้งเวลาทำงานเป็นช่วง ๆ ด้วย PLC ซึ่งเป็นไปตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิครับ	☐ ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย ☐ ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็นไม่ได้และ ☐ ส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาใหม่แล้วซึ่ง ☐ ผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว ☐ นักวิจัยแก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ
เสนอให้ปาก burner และท่อไม่ควรใกล้กัน เพราะจะทำให้ท่อเหล็กเกิดการ oxidation ทำให้เสื่อมเร็วขึ้น	เห็นด้วยกับข้อเสนอแนะจากผู้ทรงคุณวุฒิ ซึ่งการออกแบบในช่วงแรกนั้น ทีมวิจัยได้ออกแบบห้องเผาไหม้แยก ก่อนป้อนเข้าสู่ระบบท่อ แต่เนื่องจาก ช่วงที่สร้างระบบเครื่องอบนั้น งบประมาณหมดลง ก่อน ทำให้ ต้องต่อตรงเข้า	☐ ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย ☐ ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็นไม่ได้และ ☐ ส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาใหม่แล้วซึ่ง ☐ ผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว

ความเห็นผู้ทรงคุณวุฒิ	คำชี้แจงของนักวิจัย	การจัดการของผู้ประสานงาน
	ระบบท่อย้าย อย่างไรก็ตามหาก มีโอกาสได้ งบประมาณมาพัฒนาต่อ จะได้เพิ่มเติมส่วนห้องเผาไหม้แยกต่อไป	☐ นักวิจัยแก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ