

# รายงานโครงการวิจัยเรื่อง

การพัฒนากระบวนการผลิตวัตถุดิบจากมันสำปะหลังสำหรับอุตสาหกรรมเอทานอล

## DEVELOPMENT OF A SMALL-SCALE CASSAVA FEEDSTOCK PROCESSING FOR BIO-ETHANAL INDUSTRY

เสนอ

ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว

งานวิจัยเพื่อนวัตกรรมประจำปีงบประมาณ 2551

จัดทำโดย ภาควิชาศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



# รายงานโครงการวิจัยเรื่อง

การพัฒนากระบวนการผลิตวัตถุดิบจากมันสำปะหลังสำหรับอุตสาหกรรมเอทานอล

## DEVELOPMENT OF A SMALL-SCALE CASSAVA FEEDSTOCK PROCESSING FOR BIO-ETHANAL INDUSTRY

จัดทำโดย

ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระชัย อ่างหาญ

(หัวหน้าโครงการ)

ผศ.ดร.วีระศักดิ์ เลิศศิริโยธิน

ดร.พญงศักดิ์ จุลยุเสณ

ดร. เทวรัตน์ ทิพย์วิมล

คชา วาทกิจ

พรรษา ลิบลับ

ชาญชัย โรจนสโรช

สามารถ บุญอาจ

วิเชียร ดวงสีเสณ

(นักวิจัย)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อนวัตกรรม

ประจำปีงบประมาณ 2551

กันยายน 2552

## กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว ประเภท ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อนวัตกรรมประจำปีงบประมาณ 2551 เป็นจำนวนเงินรวมทั้งสิ้น 1,862,000 บาท ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่เดือนตุลาคม 2551 ถึง เดือนกันยายน 2552 ทางคณะผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาการผลิตวัตถุดิบจากมันสำปะหลังสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตเอทานอล การศึกษาแบ่งออกเป็น การผลิตมันเส้นสะอาดให้ได้กำลังการผลิต 10 ตันต่อวัน โดยประกอบด้วยอุปกรณ์ที่สำคัญ คือ เครื่องทำความสะอาดแบบตะแกรงร้อน เครื่องสับ และเครื่องอบแห้งแบบโรตารี แหล่งความร้อนสำหรับอบมันเส้นที่ใช้ในการศึกษานี้ได้รับมาจากแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากเตาแก๊สซิฟิเคชันซึ่งใช้เหง้ามันเป็นวัตถุดิบ นอกจากนี้ ยังมีการศึกษาและการออกแบบเครื่องลดความชื้นแบบเอกทรวงศ์เพื่อเป็นแนวทางเพิ่มมูลค่าจากมันสำปะหลังที่ได้จากอุตสาหกรรมแป้ง การศึกษาถูกแบ่งออกเป็น 4 ส่วนหลัก คือ 1) การออกแบบเครื่องลดความชื้นจากมันสำปะหลังเปียกใช้หลักการเอกทรวงศ์เพื่อลดความชื้นจากมันสำปะหลังสด 2) การศึกษาด้านแบบเครื่องสับมันสำปะหลังเพื่อการผลิตมันเส้นสำหรับอุตสาหกรรมเอทานอล 3) การศึกษาการอบแห้งมันเส้นด้วยเครื่องอบแบบโรตารีโดยใช้ความร้อนจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน และ 4) การศึกษาการรวบรวมและแปรรูปเหง้ามันสำปะหลังสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล ในภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม โดยมีผลการทดลองดังนี้

1) ด้านแบบเครื่องลดความชื้นจากมันสำปะหลังที่ออกแบบและพัฒนาขึ้นอาศัยทฤษฎีการออกแบบสกรูอัดรีดหรือเทคโนโลยีเอกทรวงศ์ โดยต้นแบบเครื่องกำหนดให้เป็นชนิดสกรูคู่ (Twin Screw) แบบชนิดหมุนตามกัน (Co-Rotating) เป็นระบบลำเลียงและสร้างแรงอัดให้กับจากมันสำปะหลัง ชุดสกรูคู่ซึ่งแต่ละสกรูมีอัตราส่วน L:D เท่ากับ 10:1 มีองค์ประกอบของส่วนอัดรีดส่งวัสดุที่มีมุมบิดของเกลียวสกรูและระยะพิทช์แบบไม่คงตัวจากตำแหน่งของตัวส่งวัสดุไปสู่หัวคาย และชุดหัวคายเป็นหัวคายแบบสามทางออก ขนาดกำลังการผลิตสูงสุดของเครื่องไว้ที่ 80 ตัน/วัน ด้วยชุดมอเตอร์ส่งกำลังของสกรูอัดรีดขนาด 20 แรงม้า

2) การเตรียมมันเส้นสดสำหรับส่งต่อเข้าเครื่องอบแห้ง ประกอบไปด้วยเครื่องจักร 2 เครื่องที่สำคัญ คือ เครื่องทำความสะอาดแบบตะแกรงหมุน และเครื่องสับหัวมันสำปะหลังเป็นมันเส้น ผลการทดลองพบว่า ความสามารถในการผลิตของเครื่องทำความสะอาดจะขึ้นอยู่กับความเร็วรอบการหมุนของเครื่อง โดยประสิทธิภาพการทำความสะอาดที่ความเร็วรอบ 6 รอบต่อนาที มีค่าสูงสุดเท่ากับ 25.7 เปอร์เซ็นต์ และมีเปอร์เซ็นต์การเสียน้ำมันต่ำที่สุด เท่ากับ 2.5 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการเตรียมมันเส้นสดโดยใช้เครื่องสับพบว่า ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องคือ ความเร็วรอบของใบมีด และมุมเอียงของใบมีด โดยพบว่าความเร็วรอบที่เหมาะสมสำหรับการสับหัวมันสำปะหลังที่ไม่ก่อให้เกิดความเสียหายจะอยู่ที่ประมาณ 30-150 รอบต่อนาที ส่วนมุมเอียงที่เหมาะสมสำหรับผลิตมันเส้น คือ 4 องศา ซึ่งจะทำให้ได้ชิ้นมันเส้นหนาประมาณ 5 มิลลิเมตร

3) เหง้ามันสำปะหลังมีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการนำมาผลิตเป็นแก๊สเชื้อเพลิง คือ มีค่าความร้อน (High Heating Value) ค่าสารระเหย (Volatile Mater) ปริมาณธาตุคาร์บอน (C) และธาตุ

ไฮโดรเจน (H) ก่อนข้างสูง คือ 14.591 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม, 80 เปอร์เซ็นต์, 46.12 เปอร์เซ็นต์ และ 7.55 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สามารถผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้มีองค์ประกอบของ CO, H<sub>2</sub> และ CH<sub>4</sub> ในสัดส่วนโดยปริมาตรเฉลี่ยระหว่าง 13.22-14.96 เปอร์เซ็นต์, 16.38-17.91 เปอร์เซ็นต์ และ 1.96-2.39 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และมีค่าความร้อนระหว่าง 4.90-5.31 เมกกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร สามารถนำมาเผาไหม้เพื่อเป็นแหล่งความร้อนสำหรับอบมันเส้นได้เป็นอย่างดี เมื่อนำไปทดสอบกับเครื่องอบแห้งโรตารีแบบทำงานต่อเนื่อง จะให้อุณหภูมิอากาศร้อนประมาณ 323.6 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง 250 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง สามารถลดความชื้นมันลงได้ต่ำกว่า 13 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ค่าพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งมีค่าประมาณ 9.79 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมของน้ำ เมื่อคิดความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เมื่อมีการลงทุนสร้างสายการผลิตตั้งแต่ เครื่องทำความสะอาดแบบตะแกรงหมุน เครื่องสับสายพานลำเลียง และเครื่องอบแห้ง พบว่ามีระยะเวลาคืนทุน 3.33 ปี โดยมีอัตราผลตอบแทนการลงทุน 27.39 เปอร์เซ็นต์

4) จากการสำรวจและรวบรวมข้อมูลพบว่าเหง้ามันสำปะหลังที่เกิดขึ้นจะกระจายตามจุดต่าง ๆ ในแปลง โดยปริมาณเหง้ามันที่อยู่ในแปลงจะขึ้นอยู่กับพันธุ์มันที่เกษตรกรปลูก ซึ่งมันสำปะหลังพันธุ์หัวยวง 60 (HB60) มีปริมาณเหง้ามันสำปะหลังต่อไร่มากที่สุด รองลงมาได้แก่ พันธุ์ระยอง 90 (R90) และพันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 (KU50) ในปริมาณ 311.11, 289.17 และ 260.28 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาถึงสัดส่วนเหง้ามันสำปะหลังต่อหัวมันสำปะหลังสด พบว่าพันธุ์ KU50 มีค่าสูงที่สุด คือ 0.14 ผลการออกแบบเครื่องสับ/ย่อยเหง้ามันสำปะหลังแบบเคลื่อนที่ เพื่อทำการรวบรวมมาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลพบว่า ขนาดของเครื่องยนต์ต้นกำลังสำหรับสับ/ย่อยเหง้ามันสำปะหลังมีขนาด 80 แรงม้า และเมื่อทำการประเมินต้นทุนในการสับเหง้ามันสำปะหลังพบว่าจะมีต้นทุนการผลิตอยู่ที่ 336 บาทต่อตัน ซึ่งมีความเป็นไปได้ในการนำเหง้ามันสำปะหลังมาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงเชิงพาณิชย์ชนิดอื่น

## Abstract

This research aims to study cassava feedstock preparation for bio-ethanol industry. The study consisted mainly of cassava chip production with capacity of at least 10 ton/day using machines namely, cassava cleaning machine, cassava chipper and rotary dryer. The rotary dryer would be obtained heat from gas produced from gasifier (syngas) which used cassava rhizome as fuel. In addition, this research included the study and design of moisture-reducing extruder of cassava pulp derived from cassava industry which will be used as an alternative approach to value added. The study could be separated into 4 parts including 1) design of moisture-reducing machine of cassava pulp using principle of extrusion, 2) prototype study of cassava chipper for ethanol industry, 3) study of cassava chip drying with rotary-type dryer using heat source from gasification process and 4) study of cassava rhizome gathering and processing for using as biomass fuel in agricultural and industrial sectors. The results could be showed as follows:

1) Cassava pulp moisture-reducing machine was designed and developed using the principle of compress screw or extrusion technology. The prototype was designated as co-rotating twin screw which acts as cassava pulp conveying and compressing system, each of which has L:D proportion of 10:1. Their twist angle and pitch length from one end to the other were inconsistently designed. The die through which the material moves was set into three channels. The designed maximum capacity is 80 ton/day with motor power of 20 hp.

2) The preparation of fresh cassava chip for drying was composed mainly of 2 machines including trammel-type cassava cleaning machine and cassava chipper. The test results showed that the cleaning capability was dependent on the trammel revolution speed. At 6 rpm, it showed the highest cleaning efficiency and lowest percentage of damage of 25.7% and 2.5%, respectively. As for cassava chipper, it was found that the blade speed and blade angle set on the circular plate were important factors that affected to the capacity of the cassava chipper. The blade speeds that did not result in small pieces of cassava chip were between 30 and 150 rpm. The suitable blade angle was 4 degree which could produce cassava chip thickness of 5 millimeters.

3) Cassava rhizome has properties which are suitable for syngas production. It contains high content of high heating value, volatile matter, carbon and hydrogen elements with amounts of 14.591 MJ/kg, 80%, 46.12% and 7.55%, respectively. The syngas produced by gasification process was composed of useful gases including CO, H<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> with percentage by volume of 13.22-14.96%, 16.38-

17.91% and 1.96-2.39%, respectively. The total high heating value was found to be 4.90-5.31 MJ/Nm<sup>3</sup> which can be well used as heat source for cassava chip drying process. When the syngas was supplied to a continued rotary-type dryer, the temperature approximately 323.6 °C was derived at a syngas flow rate of 250 m<sup>3</sup>/h. The continued rotary-type dryer can reduce the moisture content to a lower level of 13% w.b. and the specific energy consumption was equal to 9.79 MJ/kg<sub>water</sub>. When economic cost benefit analysis of production line including trammel-type cassava cleaning machine, cassava chipper, conveyers and continued rotary-type dryer was taken into account, the payback period of 3.33 years was attained with internal rate return of 27.39%

4) The surveying and gathering data showed that cassava rhizome was somewhat dissipated over cassava fields. The amounts of cassava rhizome depended on their varieties among which Huay Bong 60 (HB60) showed the highest amount. Rayong 90 (R90) and Kasetsart 50 (KU50) were descendent in order. Their amounts were 311.11, 289.17 and 260.28 kg/rai, respectively. However, the KU50 seems to show the highest ratio of cassava root and cassava rhizome with a value of 0.14. For the design of mobile chopper, engine power of 80 hp was selected. When the cost of chopped cassava rhizome preparation was taken into consideration, it was found to be 336 Baht/ton. This means chopped cassava rhizome has a potential to be used as biomass fuel compared to other commercial biomass fuels.

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	
บทคัดย่อ	
สารบัญ	ก
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	3
บทที่ 2 ตรวจสอบเอกสาร	4
2.1 สถานการณ์มันสำปะหลัง	4
2.2 การแปรรูปมันสำปะหลัง	4
2.3 กระบวนการผลิตเอทานอล	7
2.4 การผลิตมันเส้น	7
2.5 การอบแห้งวัสดุเกษตร	10
2.6 เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน	16
2.7 การสับ/ย่อยแห้งมันสำปะหลัง	18
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	21
ส่วนที่ 1) การออกแบบเครื่องลดความชื้นกากมันสำปะหลังเปียกใช้หลักการ เอ็กซ์ทรูชันเพื่อลดความชื้นกากมันสำปะหลังสด	21
1. คุณสมบัติของกากมันสำปะหลัง	21
1.1 คุณสมบัติทั่วไป	21
1.2 คุณสมบัติทางกายภาพ	21
1.3 คุณสมบัติทางกล	23
2. การออกแบบเครื่องลดความชื้นกากมันสำปะหลัง	23
3. การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของแบบสกรูอัดลดความชื้นกากมัน	23
3.1 เงื่อนไขการจำลอง	24
3.2 Mesh Element	24



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 Solver Module and Solver Control	24
3.4 การตั้งค่าคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ	24
ส่วนที่ 2) การศึกษาต้นแบบเครื่องสับมันสำปะหลังเพื่อการผลิตมันเส้นสำหรับ อุตสาหกรรมเอทานอล	24
1. ศึกษาลักษณะทางกายภาพของหัวมันสำปะหลัง	25
2. ถังพัก (Hopper)	25
3. เครื่องทำความสะอาดหัวมันสำปะหลัง (Trommel Cleaner)	26
3.1 การออกแบบเครื่องทำความสะอาดหัวมันสำปะหลัง	26
3.2 การทดสอบเครื่องทำความสะอาดหัวมันสำปะหลังแบบตะแกรงหมุน	26
4. เครื่องสับหัวมันสำปะหลัง (Cassava Chipper)	27
4.1 ข้อมูลเบื้องต้นในการออกแบบ	27
4.2 การออกแบบเครื่องสับหัวมันสำปะหลัง	28
4.3 การทดสอบเครื่องสับมันสำปะหลัง	29
ส่วนที่ 3) การศึกษาการอบแห้งมันเส้นด้วยเครื่องอบแบบโรตารี โดยใช้ความร้อนจาก กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน	30
1. การออกแบบและทดสอบชุดเตาเชื้อเพลิงชีวมวลจากเหง้ามันสำปะหลัง	30
1.1 ออกแบบสร้างชุดเตาเชื้อเพลิงชีวมวลจากเหง้ามันสำปะหลัง	30
1.2 การทดสอบการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากเหง้ามันสำปะหลัง	32
2. การทดสอบการอบแห้งมันเส้น	32
2.1 วิธีการทดลอง	33
2.2 การประเมินสมรรถนะ	35
ส่วนที่ 4) การศึกษาการรวบรวมแปรรูปเหง้ามันสำปะหลังสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิง ชีวมวล ในภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม	36
1. การศึกษาลักษณะและการเก็บเกี่ยวเหง้ามันรวมไปถึงการประเมิน ความสามารถในการนำเหง้ามันสำปะหลังมาใช้เป็นพลังงาน	36
2. การออกแบบและทดสอบเครื่องสับย่อยเหง้ามันสำปะหลังเพื่อ ใช้เป็นพลังงาน	36

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์	38
ส่วนที่ 1) การออกแบบเครื่องลดความชื้นกากมันสำปะหลังเป็ยกใช้หลักการเอ็กซ์ทรูชัน เพื่อลดความชื้นกากมันสำปะหลังสด	39
1. คุณสมบัติของกากมันสำปะหลัง	39
1.1 คุณสมบัติทั่วไป	39
1.2 คุณสมบัติทางกายภาพ	40
1.3 คุณสมบัติทางกล	41
ส่วนที่ 2) การศึกษาต้นแบบเครื่องสับมันสำปะหลังเพื่อการผลิตมันเส้นสำหรับอุตสาหกรรมเอทานอล	50
1. ลักษณะทางกายของหัวมันสำปะหลัง	50
2. เครื่องทำความสะอาดมันสำปะหลังแบบตะแกรงหมุน (Trommel-Type Cassava Cleaning Machine)	51
2.1 หลักการทำงานของเครื่องทำความสะอาดมันสำปะหลังแบบตะแกรงหมุน	51
2.2 ผลการทดสอบเครื่องทำความสะอาดมันสำปะหลังแบบตะแกรงหมุน	52
3. เครื่องสับหัวมันสำปะหลัง (Cassava Chipper)	55
3.1 หลักการทำงานของเครื่องสับหัวมันสำปะหลัง	55
3.2 การทดสอบเครื่องสับมันสำปะหลัง	56
ส่วนที่ 3) การศึกษาการอบแห้งมันเส้นด้วยเครื่องอบแบบโรตารีโดยใช้ความร้อนจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน	58
1. การทดสอบการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากเหง้ามันสำปะหลัง	58
1.1 การศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของเหง้ามันสำปะหลังเพื่อนำไปผลิตเป็นแก๊สเชื้อเพลิง	58
1.2 คุณภาพของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากเหง้ามันสำปะหลัง	59
2. การศึกษาการอบแห้งมันเส้น	60
2.1 การศึกษาการทำมันเส้นโดยวิธีการตากลาน	60

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2 การศึกษาการอบแห้งมันเส้นด้วยเครื่องอบแห้งแบบโรตารีซึ่งใช้พลังงานความร้อนจากแก๊สซึ่งได้จากกระบวนการGasification	64
ส่วนที่ 4) การศึกษาการรวบรวมแปรรูปเหง้ามันสำปะหลังสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลในภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม	70
1. การศึกษาลักษณะและการเก็บเกี่ยวเหง้ามันรวมไปถึงการประเมินความสามารถในการนำเหง้ามันสำปะหลังมาใช้เป็นพลังงาน	70
1.1 การเก็บเกี่ยวมันสำปะหลังและลักษณะการกระจายตัวของเหง้ามันสำปะหลัง	70
1.2 การประเมินปริมาณเหง้ามันสำปะหลังในจังหวัด นครราชสีมา	74
2. การสร้างเครื่องสับย่อยเหง้ามันสำปะหลังต้นแบบ	75
2.1 การทดสอบการสับเหง้ามันสำปะหลังโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้า	75
2.2 การทดสอบการสับเหง้ามันสำปะหลังโดยใช้เครื่องยนต์และมีระบบป้อน	76
2.3 การวิเคราะห์ต้นทุนในการสับเหง้ามันสำปะหลัง	77
บทที่ 5 สรุป	78
เอกสารอ้างอิง	81
ภาคผนวก	83

## สารบัญตาราง

	หน้า	
ตารางที่ 2-1	การเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสีย ของเครื่องอบแห้งแต่ละชนิด	16
ตารางที่ 3-1	การกระจายตัวของมันสำปะ	29
ตารางที่ 4-1	ผลการทดลองค่าความหนาแน่น	40
ตารางที่ 4-2	ผลการทดลองหาค่าความชื้นเปียกของกากมันสำปะหลัง	40
ตารางที่ 4-3	อัตราการทำงานของเครื่องทำความสะอาดที่ความเร็วรอบต่าง ๆ	52
ตารางที่ 4-4	สัดส่วนของเปลือกและเนื้อมันสำปะหลังก่อนและหลังการทำความสะอาด	53
ตารางที่ 4-5	ส่วนประกอบของเศษมันสำปะหลังหลังจากทำความสะอาด	54
ตารางที่ 4-6	การสูญเสียเนื้อมันสำปะหลังหลังจากการทำความสะอาด	55
ตารางที่ 4-7	ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติแบบประมาณ (Proximate Analysis) และแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) ของเหง้ามันสำปะหลัง	59
ตารางที่ 4-8	คุณสมบัติแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากเหง้ามันสำปะหลัง	59
ตารางที่ 4-9	ค่าพลังงานแสงอาทิตย์ที่วัดได้จากสถานีตรวจอากาศอัตโนมัติ ID: 302101-001	62
ตารางที่ 4-10	ผลการประเมินค่าพลังงานที่ได้ในการทำมันเส้นแห้งด้วยวิธีการตากลานบนพื้นที่ 1 งาน	63
ตารางที่ 4-11	ผลการทดลองอบแห้งมันสำปะหลัง	67
ตารางที่ 4-12	ประมาณการค่าใช้จ่ายในการลงทุนระบบการอบแห้งมันเส้น	70
ตารางที่ 4-13	ลักษณะทางกายภาพของเหง้ามันสำปะหลัง	74
ตารางที่ 4-14	ศักยภาพชีวมวลไม่เชิงพาณิชย์ในการผลิตไฟฟ้า จากเหง้ามันสำปะหลัง จ. นครราชสีมา	74
ตารางที่ 4-15	การทดสอบกำลังการสับ/ย่อยสูงสุดของเครื่องสับ/ย่อยเหง้ามันสำปะหลังด้วยต้นกำลังมอเตอร์แบบไม่มีระบบป้องกัน (ทำการป้องกันโดยมีคขนาดที่เหมาะสมก่อนป้องกัน)	76
ตารางที่ 4-16	การทดสอบกำลังการสับ/ย่อยสูงสุดของเครื่องสับ/ย่อยเหง้ามันสำปะหลัง ด้วยต้นกำลังเครื่องยนต์แบบมีระบบป้องกัน	76
ตารางที่ 4-17	แสดงการเปรียบเทียบต้นทุนการสับ/ย่อยเหง้ามันสำปะหลังและกระถินยักษ์ขนาดต่างๆ	77

## สารบัญรูป

	หน้า	
รูปที่ 2-1	โครงสร้างตลาดมันสำปะหลังในประเทศไทย	5
รูปที่ 2-2	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้ง กับความชื้น	12
รูปที่ 2-3	เครื่องอบแห้งโรตารี (Rotary Dryer) แบบช่องเดี่ยว	13
รูปที่ 2-4	เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (Flash Dryer)	13
รูปที่ 2-5	ด้านข้างของ Disk Dryers	14
รูปที่ 2-6	ด้านข้างของ Cascade Dryers	15
รูปที่ 2-7	Superheat Steam Dryer	15
รูปที่ 2-8	ประเภทของเครื่องสับ/ย่อยลดขนาด จำแนกตามประเภทของหัวสับ	19
รูปที่ 2-9	เชรดเดอร์ (Shredder) กำลังการผลิต 13 ตัน/ชั่วโมง ต้นกำลังเครื่องยนต์ 400 HP	20
รูปที่ 3-1	ภาชนะบรรจุเพื่อการทดสอบหาความหนาแน่นปรากฏ	21
รูปที่ 3-2	ภาพตัวอย่างกากมันก่อนอบและหลังอบ	22
รูปที่ 3-4	ลักษณะ Hopper ที่ได้ทำการก่อสร้าง	25
รูปที่ 3-5	เครื่องทำความสะอาดมันสำปะหลังแบบตะแกรงหมุน	26
รูปที่ 3-6	ลักษณะงานตัดของเครื่องตัดหัวมันแบบจานรู	28
รูปที่ 3-7	ลักษณะมันเส้นที่ได้จากเครื่องตัดหัวมันแบบเจาะรู	28
รูปที่ 3-8	เครื่องสับหัวมันสำปะหลังต้นแบบ	29
รูปที่ 3-9	ผังการออกแบบระบบการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากเทค โน โลยีแก๊สซิฟิเคชัน	31
รูปที่ 3-10	ลักษณะเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Gasifier)	31
รูปที่ 3-11	ลักษณะเครื่องอบโรตารีแบบต่อเนื่อง	33
รูปที่ 3-12	ลักษณะของชิ้นมันเส้นที่ผ่านการสับด้วยเครื่องสับมัน	34
รูปที่ 3-13	การหาความชื้นมันด้วยเครื่องหาความชื้นวัสดุแบบอินฟราเรด	34
รูปที่ 3-14	ตำแหน่งวัตถุดิบอุณหภูมิร้อนและความชื้นมันบนเครื่องอบโรตารี	35
รูปที่ 3-15	แบบเครื่องต้นแบบเครื่องสับย่อยหัวมันสำปะหลัง	37
รูปที่ 4-1	กระบวนการผลิตมันเส้น โดยใช้ความร้อนจากเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง	39
รูปที่ 4-2	ลักษณะทั่วไปของกากมันสำปะหลัง	39
รูปที่ 4-3	ภาพประกอบต้นแบบเครื่องลดความชื้นกากมันสำปะหลัง	41
รูปที่ 4-4	ภาพลักษณะหัวคาย	42
รูปที่ 4-5	แสดงลักษณะหน้าตัดภายในของหัวคายต้นแบบ	42

## สารบัญญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4-6 ภาพแสดงส่วนแบ่งของชุดสกรูคู่ที่ใช้เพื่อการจำลองพฤติกรรมการอัดตัวของกากมันสำปะหลังเพื่อการออกแบบเครื่องลดความชื้นกากมันสำปะหลัง	42
รูปที่ 4-7 ภาพผลการจำลองความเร็ว (mm/s) ของกากมันสำปะหลังขณะถูกอัดรีดผ่านหัวคาย	43
รูปที่ 4-8 ภาพผลการจำลองความดัน (Pa) ของกากมันสำปะหลังขณะถูกอัดรีดผ่านหัวคาย	43
รูปที่ 4-9 ภาพผลการจำลองความหนืด (Pa.s) ของกากมันสำปะหลังขณะถูกอัดรีดผ่านหัวคาย	44
รูปที่ 4-10 ภาพผลการจำลองอัตราเฉือน (1/s) ของกากมันสำปะหลังขณะถูกอัดรีดผ่านหัวคาย	44
รูปที่ 4-11 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันขึ้นกับระยะตามแนวแกนกลางสกรูคู่จนถึงปลายทางเข้าของหัวคาย (ตำแหน่งศูนย์วัดที่สุดปลายเกลียวสกรู)	45
รูปที่ 4-12 ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน ณ ตำแหน่งทางเข้าหัวคายกับ ความเร็วรอบสกรู	46
รูปที่ 4-13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของกากมันสำปะหลังตามแนวแกนกลางสกรูคู่จนถึงปลายทางเข้าของหัวคาย (ตำแหน่งศูนย์วัดที่สุดปลายเกลียวสกรู)	47
รูปที่ 4-14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของกากมันสำปะหลัง ณ ตำแหน่งทางเข้าหัวคายกับความเร็วรอบสกรู	47
รูปที่ 4-15 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลของกากมันสำปะหลัง ณ ตำแหน่งทางเข้าหัวคายกับความเร็วรอบสกรู	48
รูปที่ 4-16 รูปแสดงโมเมนต์บิดบนเพลาสกรู	49
รูปที่ 4-17 ลักษณะหัวมันสำปะหลังที่ได้ทำการสำรวจ	51
รูปที่ 4-18 ส่วนประกอบของหัวมันสำปะหลังตามภาพตัดขวาง	51
รูปที่ 4-19 การทำงานของเครื่องทำความสะอาดมันสำปะหลังแบบตะแกรงหมุน	52
รูปที่ 4-20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ อัตราการทำงาน และกำลังไฟฟ้า	53
รูปที่ 4-21 สภาพหัวมันสำปะหลังหลังจากการทำความสะอาดที่ความเร็วรอบต่าง ๆ	54
รูปที่ 4-22 ส่วนประกอบของเครื่องสับหัวมันสำปะหลังต้นแบบ	55
รูปที่ 4-23 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของใบมีดและความสามารถในการสับ	57
รูปที่ 4-24 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของใบมีดและขนาดความกว้างเฉลี่ยของชิ้นมันสับ	57
รูปที่ 4-25 ความสามารถในการสับและค่าพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการสับ	58
รูปที่ 4-26 ลักษณะเปลวไฟจากแก๊สเชื้อเพลิงที่ใช้วัตถุดิบเป็นหัวมันสำปะหลัง	60
รูปที่ 4-27 ค่าพลังงานแสงอาทิตย์วันที่ 11 พฤษภาคม 2552	61
รูปที่ 4-28 ค่าพลังงานแสงอาทิตย์วันที่ 5 พฤษภาคม 2552	61

## สารบัญญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4-29 ลักษณะการป้อนมันเข้าสู่ห้องอบแห้งด้วยสายพานลำเลียง	64
รูปที่ 4-30 ลักษณะของมันเส้นแห้งที่ได้จากการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง โรตารีต้นแบบ	65
รูปที่ 4-31 ผงฝุ่นและชิ้นมันบางส่วนออกมาทางไซโคลนดักฝุ่น	65
รูปที่ 4-32 การกระจายของอนุภาคน้ำมันในห้องอบแห้ง	66
รูปที่ 4-33 เครื่องมือช่วยผ่อนแรงสำหรับชุดถอนที่เกษตรกรทั่วไปเรียกว่า “แมคโค”	71
รูปที่ 4-34 เครื่องชุดมันสำปะหลังแบบซี่แบบชุดไม่พลิกดินในเขตพื้นที่จังหวัดสระแก้วและฉะเชิงเทรา	72
รูปที่ 4-35 ผลชุดแบบจานโค้งในเขตพื้นที่จังหวัดกำแพงเพชร (ก) และเขตจังหวัดนครราชสีมา (ข)	72
รูปที่ 4-36 ลักษณะการชุดแบบไม่มีการพลิกดิน (ก) และแบบมีการพลิกดินให้พลิกไปด้านเดียว (ข)	73
รูปที่ 4-37 แสดงตำแหน่งของเหง้ามันในแปลงที่เกษตรกรจะทิ้งไว้เป็นจุด	73
รูปที่ 4-38 แสดงการขนส่งเหง้ามันและรถสำหรับขนส่งมันสำปะหลัง	74
รูปที่ 4-39 เครื่องสับเหง้ามันสำปะหลังแบบใช้มอเตอร์เป็นต้นกำลัง	75
รูปที่ 4-40 เครื่องสับ/ย่อยวัสดุชีวมวลภายในแปลงเกษตรกร	77

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญ

เมื่อวันที่ 2 กันยายน 2546 คณะรัฐมนตรีได้รับทราบและเห็นชอบ “ยุทธศาสตร์พลังงานเพื่อการแข่งขัน” ตามที่กระทรวงพลังงานได้เสนอยุทธศาสตร์การพัฒนาพลังงานทดแทน โดยกำหนดเป้าหมายในช่วง 8 ปี ตั้งแต่ พ.ศ. 2546-2554 จะต้องมีการใช้พลังงานทดแทนเพิ่มขึ้นจาก 0.5 % ของการใช้พลังงานทั้งหมดในปัจจุบัน เป็น 8% ใน 8 ปีข้างหน้า

ซึ่งกระทรวงพลังงาน ได้จัดทำแผนดำเนินการหรือ Road Map ในการส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานทดแทนอย่างชัดเจน เช่น มาตรการส่งเสริมการใช้น้ำมันแก๊สโซฮอล์ การเปิดเสรีโรงงาน ผลิตเอทานอล การปรับโครงสร้างราคาเอทานอลและราคาไบโอดีเซล การส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน สำหรับผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็ก (SPP)

ในส่วนของส่งเสริมการใช้น้ำมันแก๊สโซฮอล์ พบว่าตั้งแต่เริ่มมีการใช้น้ำมันแก๊สโซฮอล์ตั้งแต่ปี 2544 จนถึงปัจจุบัน (ปี 2549) ปริมาณการใช้น้ำมันแก๊สโซฮอล์ 95 เพิ่มขึ้นเป็น 3.5 ล้านลิตร/วัน ทั้งนี้มีกำลังการผลิตเอทานอลสำหรับใช้ผลิตแก๊สโซฮอล์ทั้งประเทศ 0.855 ล้านลิตร/วัน (ข้อมูลจาก ปตท., 2550) โดยที่แนวโน้มการผลิตเอทานอล สำหรับใช้ผลิตแก๊สโซฮอล์ มีแนวโน้มสูงขึ้นทั้งนี้เนื่องจากส่วนต่างระหว่างราคาน้ำมันเบนซินและน้ำมันแก๊สโซฮอล์ได้เพิ่มสูงขึ้นมาก ทำให้ประชาชนหันไปนิยมใช้น้ำมัน E10 เนื่องจากเป็นของดีราคาถูก อีกทั้งรัฐบาลได้ปรับลดอัตราภาษีสรรพสามิตสำหรับรถยนต์ E20 ขึ้นไปลง 5 % เมื่อวันที่ 9 พฤศจิกายน 2550 และมีผลบังคับใช้ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2551 และล่าสุดเพื่อสนับสนุนการใช้น้ำมันที่มีส่วนผสมของเอทานอลเพิ่มมากขึ้นไปอีก คณะรัฐมนตรีได้มีมติเมื่อวันที่ 3 มิถุนายน 2551 เห็นชอบมาตรการภาษีเพื่อสนับสนุนการใช้น้ำมัน E85 เป็นการเพิ่มเติม คือ 1) ยกเว้นอากรขาเข้าชิ้นส่วนสำหรับรถยนต์ E85 ที่มีลักษณะเฉพาะและเป็นอุปกรณ์หลักเพื่อปรับเปลี่ยนมาใช้ใช้น้ำมัน E85 และยังไม่ผลิตในประเทศ เป็นการชั่วคราว 3 ปี และ 2) ลดอัตราภาษีสรรพสามิตน้ำมัน E85 จากเดิม 3.6850 บาท/ลิตร เหลือ 2.5795 บาท/ลิตร

อย่างไรก็ดีปัญหาอุปสรรคของการส่งเสริมการใช้น้ำมันแก๊สโซฮอล์ ในส่วนของการผลิตเอทานอลคือ ปัญหาด้านการขาดแคลนวัตถุดิบ และราคาวัตถุดิบขยับตัวสูงขึ้น ไม่ว่าจะเป็น มันสำปะหลัง กากน้ำตาล ซึ่งแนวทางการแก้ไขจำเป็นที่จะต้องมีการส่งเสริมการปลูกมันสำปะหลัง อ้อย หรือ ส่งเสริมการปลูกพืชพลังงานอื่น ๆ ที่มีศักยภาพในการผลิตเอทานอล เช่น ข้าวฟ่างหวาน เป็นต้น

จากการวิเคราะห์สถานการณ์ของวัตถุดิบที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตแก๊สโซฮอล์ ได้แก่ กากน้ำตาล อ้อย และมันสำปะหลัง อ้อยและกากน้ำตาลมีความสัมพันธ์กันในด้านปริมาณ ปัจจุบันอ้อยมีพื้นที่เพาะปลูกประมาณ 6 ล้านไร่ มีปริมาณอ้อยประมาณ 60 ล้านตัน/ปี ซึ่งยังไม่เพียงพอต่อการความต้องการของโรงงานน้ำตาล ทั้งนี้ปริมาณกากน้ำตาลมีสัดส่วนประมาณร้อยละ 5 ของอ้อยสด (หรือประมาณ



3 ล้านตัน/ปี) ขณะที่ความต้องการกากน้ำตาลในประเทศแต่ละปีมีประมาณ 1.5 ล้านตัน ที่เหลืออีกประมาณ 1.5 ล้านตันใช้สำหรับส่งออก ซึ่งถ้าไม่มีการส่งออกกากน้ำตาลจะสามารถนำกากน้ำตาลนั้นมาผลิตเอทานอลได้ประมาณ 0.8 ล้านลิตร/วัน แต่ราคากากน้ำตาล ณ ปัจจุบันมีราคาสูง ประมาณ 4,800-5,200 บาท/ตัน ทำให้ต้นทุนการผลิตเอทานอลสูงจนโรงงานไม่สามารถนำมาผลิตเอทานอลได้

สำหรับมันสำปะหลังพบว่า มีพื้นที่เพาะปลูกประมาณ 6.5 ล้านไร่ ผลผลิตเฉลี่ย 3 ตัน/ไร่ ประมาณการได้ว่าผลผลิตของประเทศในปี 2552 จะมีประมาณ 20 ล้านตัน (หัวมันสด) ซึ่งปริมาณความต้องการใช้มันสำปะหลังมีเพียง 16 ล้านตันในการผลิตแป้ง มันเส้น มันอัดเม็ด ที่เหลือ 4 ล้านตันสามารถนำมาผลิตเอทานอลสำหรับใช้ผลิตแก๊ส โซลอสเพื่อใช้ในประเทศ นอกจากนี้พบว่า มันสำปะหลังยังมีศักยภาพในการเพิ่มผลิตให้ได้มากกว่า 3 ตัน/ไร่ (จนถึง 30 ตัน/ไร่) ทำให้มีมันสำปะหลัง มาเป็นวัตถุดิบผลิตเอทานอลมากพอโดยไม่ต้องเพิ่มพื้นที่ปลูก และไม่มีผลกระทบต่อการใช้บริโภคในประเทศ (กล้าณรงค์ และคณะ, 2544)

อย่างไรก็ดี จากข้อมูลที่ผ่านมาพบว่าโรงงานผลิตเอทานอลที่ใช้วัตถุดิบ เช่น บ.ไทยวังนแอลกอฮอล์ หรือ บ.อินเตอร์เนชั่นแนลแก๊ส โซลอส คอร์เปอร์เรชั่น ยังทำการผลิตได้ไม่เต็มที่ ทั้งนี้อาจมาจากสาเหตุหลายประการ แต่ที่เห็นได้ชัดคือ ปัญหาในการจัดหาวัตถุดิบ กล่าวคือที่กำลังการผลิตเอทานอล 100,000 ลิตรต่อวัน จะมีความต้องการหัวมันสดประมาณ 600 ตันต่อวัน ซึ่งมีค่าค่อนข้างมากในแต่ละวัน และคิดเป็นความต้องการประมาณ 75% ของความต้องการหัวมันสดของโรงงานแป้งมันสำปะหลังขนาดใหญ่ (200 ตันแป้งต่อวัน หรือเทียบเท่า 800 ตันหัวมันสดต่อวัน) การจัดหาวัตถุดิบในปริมาณมากจากพื้นที่ใกล้เคียงโรงงานแป้งมันสำปะหลังอาจเป็นปัญหา ทำให้ต้องรวบรวมมาจากแหล่งอื่นๆ ที่ไกลออกไป ดังนั้นการสร้างโรงงานเอทานอลโดยใช้มันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบ จำเป็นต้องพิจารณาถึงปัจจัยด้านวัตถุดิบเป็นสำคัญ วัตถุดิบที่น่าจะจัดการได้ง่ายกว่าในกรณีโรงงานเอทานอลจากมันสำปะหลัง จึงน่าจะเป็นมันเส้นที่สามารถเก็บไว้ได้นานกว่าหัวมันสด

การผลิตมันเส้นของประเทศไทย โดยทั่วไปเกษตรกรจะเป็นผู้ผลิตเอง โดยจะตั้งโรงงานใกล้กับพื้นที่ที่ปลูกมันสำปะหลัง เครื่องมือในโรงงานจะประกอบไปด้วย เครื่องสับ รถดัก และ ทำการตากแห้งโดยใช้ลานตากซึ่งมักจะมีขนาดตั้งแต่ 5-10 ไร่ จนถึงเป็น 100 ไร่ หัวมันสดจะถูกลำเลียงเข้าเครื่องสับ เมื่อได้มันเส้นสดก็จะถูกนำไปลดความชื้นโดยการตากในลานคอนกรีต มันเส้นซึ่งตากอยู่ในลานจะถูกกลับโดยใช้คราดซึ่งติดตั้งกับรถแทรกเตอร์ เมื่อมันเส้นแห้ง (ความชื้นประมาณ 14-15%) ก็จะถูกรวมเป็นกองโดยใช้แทรกเตอร์ ซึ่งความต้องการของมันเส้นภายในประเทศได้สูงขึ้นอย่างมากเนื่องจากนโยบายการผลิตเอทานอลสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิง ในประเทศและต่างประเทศ ประกอบกับความต้องการมันเส้นไปใช้ทดแทนข้าวโพดเพื่อผลิตอาหารสัตว์ นี้ทำให้ความต้องการมันเส้นเพิ่มขึ้นจาก 1.96 ล้านตัน ในปี 2546 เป็น 2.56 ล้านตัน ในปี 2547 (ปริมาณหัวมันสดที่ใช้ประมาณ 6.25 ล้านตัน) และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ

อย่างไรก็ดี แม้ว่ามันเส้นจะเป็นที่ต้องการของอุตสาหกรรมต่างๆมากมาย แต่การผลิตมันเส้นเพื่อให้ได้คุณภาพ เป็นสิ่งที่ทำได้ยาก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความชื้นและสิ่งปลอมปน จำเป็นต้องมีการพัฒนากระบวนการผลิตมันเส้นรูปแบบใหม่ เพื่อผลิตเป็นวัตถุดิบให้กับอุตสาหกรรมเอทานอลอย่างต่อเนื่อง

ขณะเดียวกันการพิจารณำผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง คือ กากมันสำปะหลังมาใช้เป็นวัตถุดิบผลิตเอทานอล และการนำเศษแห้งมันสำปะหลังมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการอบแห้งมันเส้นและกากมันสำปะหลัง การนำของเหลือทิ้งมาใช้ให้เกิดประโยชน์ หมุนเวียนกลับมาใช้เป็นพลังงานได้อีกต่อหนึ่ง

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตวัตถุดิบจากมันสำปะหลังแห้งสำหรับผลิตเอทานอล โดยใช้หลักการเอ็กซ์ทรูชันเพื่อลดความชื้นกากมันสำปะหลังสด
- 2) เพื่อทำการศึกษารูปแบบและกระบวนการผลิตมันเส้นสำหรับอุตสาหกรรมเอทานอล
- 3) เพื่อพัฒนาต้นแบบโรงงานผลิตมันเส้นขนาดเล็ก ประกอบไปด้วย เครื่องสับมันสำปะหลัง เครื่องสับมันเส้น เครื่องอบแห้ง เพื่อผลิตมันเส้นสำหรับอุตสาหกรรมเอทานอล
- 4) เพื่อศึกษาวิธีการเก็บรวบรวมและแปรรูปแห้งมันสำปะหลังที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้เป็นพลังงานในภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม
- 5) เพื่อศึกษาค้นแบบการนำแห้งมันสำปะหลังมาใช้เป็นเชื้อเพลิงผลิตความร้อน โดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน สำหรับการอบแห้งมันเส้น
- 6) เพื่อทำการประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งมันเส้นแบบหมุน โดยใช้เชื้อเพลิงชีวมวลจากแห้งมันสำปะหลังเปรียบเทียบกับวิธีตากแดด

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การพัฒนากระบวนการผลิตวัตถุดิบจากมันสำปะหลังสำหรับอุตสาหกรรมเอทานอล นี้มีเป้าหมายที่จะศึกษาแนวทางการจัดการวัตถุดิบผลิตเอทานอล โดยเน้นที่การใช้มันเส้นไปทำการผลิต เป็นนวัตกรรมหลังการเก็บเกี่ยวมันสำปะหลังแบบครบวงจร ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในระดับชุมชน โดยมีเป้าหมายในพัฒนากระบวนการผลิตมันเส้นขนาดกำลังผลิต 10 ตันต่อวัน

## 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1) ได้ผลการจำลองทางคณิตศาสตร์เรื่องการลำเลียงภายใต้แรงอัดตัวด้วยเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์เพื่อใช้ในการออกแบบเครื่องลดความชื้นกากมันสำปะหลังสดต่อไป
- 2) ได้โรงงานต้นแบบสำหรับผลิตมันเส้นสะอาดเพื่อป้อนเข้าสู่อุตสาหกรรมผลิตเอทานอลที่มีกำลังการผลิตมันเส้นสะอาด 10 ตันต่อวัน อันประกอบไปด้วย เครื่องทำความสะอาด และเครื่องสับหัวมันสำปะหลัง และเครื่องอบมันเส้น
- 3) ได้เครื่องต้นแบบสำหรับสับย่อยแห้งมันสำปะหลังเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิง ที่สามารถนำไปสับย่อยได้ในแปลงมันสำปะหลัง
- 4) ได้เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Gasifier) จากแห้งมันสำปะหลังเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงผลิตความร้อนให้กับโรงงานผลิตมันเส้นสะอาดสำหรับอุตสาหกรรมเอทานอล
- 5) ได้ทราบถึงต้นทุนในการผลิตมันเส้นสะอาดเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเอทานอล

## บทที่ 2

### ตรวจเอกสาร

#### 2.1 สถานการณ์มันสำปะหลัง

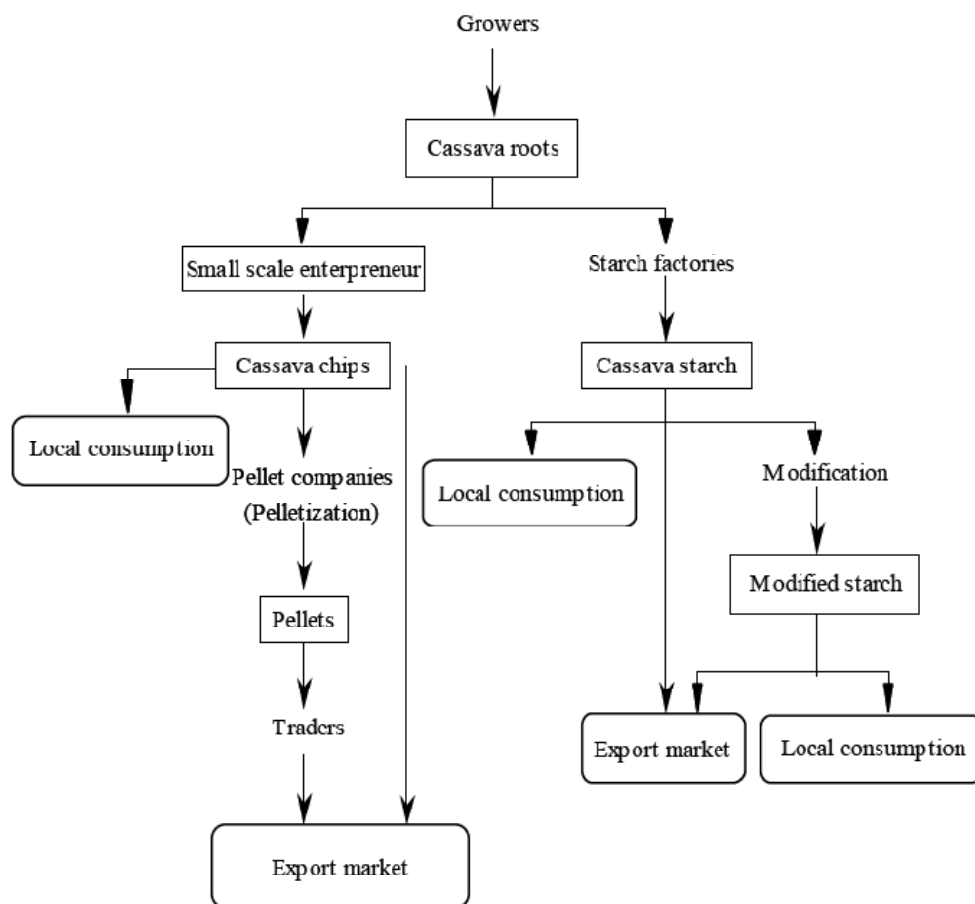
มันสำปะหลังเป็นพืชที่มีศักยภาพด้านการตลาด เนื่องจากสามารถนำไปแปรรูป เป็นผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อใช้ประโยชน์ได้นานาประการ ทั้งในรูปแบบอาหารและมีโซอาหาร เช่น มันเส้น มันอัดเม็ด ใช้เป็นส่วนประกอบอาหารสัตว์ และผลิตภัณฑ์แอลกอฮอล์ สำหรับแป้งมันสำปะหลังใช้ในอุตสาหกรรมต่อเนื่อง ได้แก่ อุตสาหกรรมอาหาร สารความหวาน ผงชูรส สิ่งทอ กระดาษ เป็นต้น รวมทั้งเอทานอลและภาชนะบรรจุย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ซึ่งในอนาคตจะมีการใช้ผลิตภัณฑ์ดังกล่าวมากยิ่งขึ้น เพราะช่วยลดปัญหาภาวะและสิ่งแวดล้อม ที่เกิดจากการใช้พลาสติกและโฟม ส่วนการส่งออกผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังไปยังต่างประเทศ คาดว่า จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน เนื่องจากในปัจจุบันประเทศไทยได้มีการเปิดการค้าเสรีในรูปของทวีภาคีมากขึ้น โดยเฉพาะในตลาดนำเข้าที่สำคัญของไทย

ผลผลิตที่ได้จากต้นมันสำปะหลังล้วนแต่มีประโยชน์ทั้งโดยตรงต่อมนุษย์ในรูปแบบของการบริโภคจากหัวมัน (หลังจากต้มหรือนึ่ง) หรือการใช้ประโยชน์ในรูปแบบของอาหารสัตว์ในฟาร์มซึ่งจะใช้มันตากแห้งหรือไบ การผลิตอาหารสัตว์เพื่อการค้า การผลิตแป้งหรือผลิตภัณฑ์จากแป้ง ในประเทศไทย มันสำปะหลังจะไม่นิยมบริโภคโดยตรงจากการต้ม แต่ส่วนใหญ่จะนำมาบริโภคในรูปแบบของแป้ง เช่น ผงชูรส (monosodium glutamate: MSG) หรือ อาหารที่ต้องผ่านกระบวนการอื่น

**รูปที่ 2-1** แสดงเส้นทางการใช้มันสำปะหลังเริ่มตั้งแต่เกษตรกรไปจนถึงผู้บริโภคสุดท้ายทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ เกษตรกรมีทางเลือกที่จะขายหัวมันเพื่อผลิตมันเส้นหรือผลิตแป้งก็ได้ ที่ลานผลิตมันเส้นหัวมันสดที่ความชื้นประมาณ 65% จะถูกลดความชื้นเหลือประมาณ 14-15% ซึ่งอาจจะนำมันเส้นนั้นมาทำมันอัดเม็ดเพื่อส่งออกต่อไป มันประเภทนี้ส่วนใหญ่ถูกนำไปเป็นอาหารสัตว์ ส่วนโรงงานแป้งมันสำปะหลัง หัวมันสดจะถูกเปลี่ยนเป็นแป้งดิบและอาจจะนำไปเป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตเป็นแป้งคัดแปรอีกต่อไป หรือ อาจจะนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์อื่น เช่น ผงชูรส สารเพิ่มความหวาน และ แอลกอฮอล์ เป็นต้น

#### 2.2 การแปรรูปมันสำปะหลัง

หัวมันสำปะหลังสดโดยทั่วไปจะถูกส่งไปโรงงานมันเส้นหรือโรงงานแป้งในวันเดียวกับที่ทำการเก็บเกี่ยว ช่วงเวลาในการเก็บรักษาของหัวมันจะขึ้นอยู่กับขนาดของโรงงานและจำนวนหัวมันที่ได้รับเข้ามา หัวมันจะเข้ากระบวนการแปรรูปภายใน 2-5 วัน การสับและการลดความชื้น หรือ กระบวนการผลิตแป้งควรที่จะทำให้เสร็จภายใน 4 วันหลังการเก็บเกี่ยว เนื่องจากปริมาณแป้งจะลดลงจาก 24% เมื่อเริ่มเก็บเกี่ยว เหลือ 20% เมื่อเวลาผ่านไป 4 วัน และ จะลดลงเหลือ 11% ถ้าเก็บไว้นาน 6 วัน คุณภาพของแป้งก็จะลดลงถ้ากระบวนการแปรรูปล่าช้า



รูปที่ 2-1 โครงสร้างตลาดมันสำปะหลังในประเทศไทย

### 1) อุตสาหกรรมมันเส้น

โดยทั่วไป ผู้ประกอบการมันเส้นจะเป็นเกษตรกรเองซึ่งจะมีโรงงานใกล้กับพื้นที่ที่ปลูกมันสำปะหลัง เครื่องมือในโรงงานจะประกอบไปด้วย เครื่องสับ รถตัก และ ลานตาก หัวมันสดจะถูกลำเลียงเข้าลานตัดโดยใช้แทรกเตอร์ขนาดเล็ก เมื่อได้มันเส้นสดก็จะถูกนำไปลดความชื้นโดยการตากในลานคอนกรีตซึ่งมีขนาดประมาณ 5 ไร่ จนถึง 100 ไร่ ซึ่งกระจายรอบบริเวณที่ปลูกมัน มันเส้นซึ่งตากในอยู่ในลานจะถูกกลับโดยใช้คราดซึ่งติดตั้งกับรถแทรกเตอร์ เมื่อมันเส้นแห้ง (ความชื้นประมาณ 14-15%) ก็จะถูกรวมเป็นกองโดยใช้แทรกเตอร์ที่ติดใบกวาด

มันเส้นบางส่วนจะถูกใช้เป็นอาหารสัตว์รวมถึงเป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตกรดมะนาว (citric acid) แนวโน้มความต้องการมันเส้นภายในประเทศได้สูงขึ้นอย่างมากเนื่องจากนโยบายการผลิตเอทานอลสำหรับเชื้อเพลิง นอกจากนี้ยังพบว่าในการส่งออกมันเส้นพบว่า ส่งออกไปประเทศแถบยุโรปน้อยลงเนื่องจากตลาดมีความต้องการมันอัดเม็ด เนื่องจากมีปริมาณฝุ่นที่เกิดขึ้นน้อย ทำให้ไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระหว่างการขนถ่าย อย่างไรก็ตาม ในต่างประเทศมีแผนการผลิตเอทานอลเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะประเทศจีนทำให้การส่งออกมันเส้น มีอัตราการเติบโตค่อนข้างมาก

## 2) อุตสาหกรรมมันอัดเม็ด

อุตสาหกรรมมันอัดเม็ดเริ่มครั้งแรก สองถึงสามปีหลังจากเริ่มมีการส่งออกมันไปสู่ยุโรป เนื่องจากมีความจำเป็นที่จะต้องพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้ได้ขนาดและรูปร่างตามที่ผู้ซื้อหรือผู้ใช้ต้องการ มันอัดเม็ดผลิตได้โดยการอัดมันเส้นผ่านหัวอัด (die) ขนาดใหญ่ ใช้ความชื้นและความร้อนเป็นตัวที่ช่วยในการขึ้นรูปซึ่งจะทำให้ได้มันอัดเม็ดที่เรียกว่า soft pellet ต่อมาได้มีการพัฒนาโดยจะบดมันเส้นก่อนแล้วตามด้วยการอัดโดยใช้ไอน้ำช่วย (steam extrusion) กระบวนการนี้จะทำให้มันอัดเม็ดที่แข็งกว่าซึ่งจะเรียกว่า hard pellet การส่งออกมันอัดเม็ดแบบ hard pellet ครั้งแรกเกิดขึ้นในปี 1981 และในปี 1989 มันที่ส่งออกสู่ยุโรปทั้งหมดเป็นมันอัดเม็ดแบบ hard pellet

วัตถุดิบที่ใช้ทำมันอัดเม็ดจะใช้มันเส้น โดยราคาซื้อก็ถูกกำหนดโดยราคาส่งออกในกรุงเทพฯ ขึ้นอยู่กับคุณภาพของมันเส้นก็เป็นตัวแปรที่สำคัญ โดยคุณภาพมันเส้นที่เป็นมาตรฐานคือ

ความชื้น = ไม่เกิน 16%

ปริมาณทราย = ไม่เกิน 4%

(ผลรวมของตัวแปรสองตัวนี้ต้องไม่เกิน 20%)

ถ้าความชื้นสูงกว่า 16% จะทำให้ถูกตัดราคา แต่ถ้าความชื้นต่ำกว่า 16% จะไม่มีการเพิ่มราคาให้ ในประเทศไทยมีโรงงานมันอัดเม็ดประมาณ 200 โรงงานซึ่งมีกำลังในการผลิตประมาณ 10 ล้านตัน/ปี อย่างไรก็ตามโควตาในการรับซื้อมันอัดเม็ดในยุโรปมีเพียง 5 ล้านตัน/ปี ดังนั้น โรงงานเหล่านี้ผลิตมันอัดเม็ดเพียง 50% ของกำลังการผลิตทั้งหมด

## 3) อุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง

ตั้งแต่เริ่มมีการนำมันสำปะหลังเข้ามาปลูกในประเทศไทยทางภาคใต้ (1786-1840) อุตสาหกรรมขนาดเล็กของการแปรรูปอาหารประเภทมันสำปะหลังก็ได้รับเทคโนโลยีจากประเทศเพื่อนบ้าน (มาเลเซีย และ สิงคโปร์) โดยหัวมันจะถูกบดและผสมกับน้ำแล้วตามด้วยการตกตะกอนและลดความชื้นด้วยการตาก ทำให้ได้แป้งที่เรียกว่า cassava flour แต่ปัจจุบันเรียกว่า cassava starch ซึ่งจะถูกนำไปผลิตเป็นสาธู ซึ่งเป็นขนมหวานพื้นบ้านทางภาคใต้ของประเทศไทย

ความต้องการแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและทำให้มีการพัฒนากระบวนการผลิตแป้งที่ทันสมัยในปี 1970 จากการสำรวจทำให้เห็นว่า มีโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังที่ทันสมัย 41 โรงงาน ในปี 1996 ที่ได้ลงทะเบียนเข้ากับสมาคมแป้งมันสำปะหลังไทย (Thai Tapioca Flour Industries Trade Association) โรงงานเหล่านี้จะใช้เทคโนโลยีการแยกและการอบแห้งสมัยใหม่ เวลาในการผลิตทั้งหมดประมาณ 30 นาที ปัจจุบัน โรงงานแป้งในประเทศไทยยังไม่มีที่ใช้กระบวนการตกตะกอนแป้ง

ประมาณ 4.75 ตันของหัวมันสดสามารถผลิตแป้งแห้งได้ 1 ตัน และประมาณ 40% ของแป้งที่ผลิตได้ จะใช้ภายในประเทศ และ อีก 60% ที่เหลือจะใช้สำหรับส่งออกต่างประเทศ การกระจายผู้ตลาดของ

แป้งมันสำปะหลังที่ผลิตได้จะแบ่งออกเป็น 3 ทาง ได้แก่ 1) ขายโดยตรงเพื่อการบริโภคและโรงงานในพื้นที่  
2) ขายไปสู่พ่อค้าคนกลางเพื่อขายปลีกในประเทศและส่งออกต่างประเทศ 3) ส่งออกต่างประเทศโดยตรง

#### 4) อุตสาหกรรมเอทานอล

หัวมันสดและมันเส้นสามารถนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตเอทานอล มีการคาดการณ์ว่าปริมาณการใช้เอทานอลในรถจะเพิ่มขึ้นจาก 0.3 ล้านลิตร/วันในปี 2005 มาเป็น 1.0 ล้านลิตร/วันในปี 2007 และ เป็น 3 ล้านลิตร/วันในปี 2011 ในช่วงปลายปี 2005 มีโรงงานที่ผลิตเอทานอลจาก molasses มีอยู่ 3 โรงงานด้วยกัน โรงงานที่ผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลังอย่างเดียวนี้อยู่ 1 โรงงานซึ่งมีกำลังการผลิต 0.17 ล้านลิตร/วัน และสุดท้ายโรงงานที่ผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลังและอ้อยอีก 1 โรงงาน ซึ่งมีกำลังการผลิต 0.675 ล้านลิตร/วัน ในปี 2008 คาดว่าจะมีโรงงานผลิตเอทานอล 8 โรงงานและมีกำลังการผลิตทั้งหมด 1.95 ล้านลิตร/วัน ปริมาณหัวมันสดที่ต้องการประมาณ 4.2 ล้านตัน/ต่อปี

### 2.3 กระบวนการผลิตเอทานอล

กระบวนการผลิตเอทานอล ประกอบด้วย กระบวนการเตรียมวัตถุดิบสำหรับผลิตเอทานอล กระบวนการหมัก และการแยกผลิตภัณฑ์เอทานอลและการทำให้บริสุทธิ์ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2551)

สำหรับวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตเอทานอลที่สำคัญประกอบด้วย ข้าว อ้อย มันสำปะหลัง และกากน้ำตาล ซึ่งการนำผลผลิตทางการเกษตรเหล่านี้มาใช้ในการผลิตเป็นเอทานอลอาจจะส่งผลกระทบต่อโครงสร้างการผลิตเพื่อบริโภคได้ ซึ่งจากรายงานการวิจัยของ กล้าณรงค์และคณะ (2544) พบว่ามันสำปะหลังเป็นพืชที่มีความเหมาะสมต่อการผลิตเอทานอลมากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากพื้นที่การเพาะปลูกมันสำปะหลังไม่สามารถลดลงน้อยกว่า 6.5 ล้านไร่ได้ เนื่องจากมีหลายเขตพื้นที่ที่ไม่มีพืชอื่นเหมาะสมกว่าการปลูกมันสำปะหลัง ผลผลิตของหัวมันต่อพื้นที่มีแนวโน้มสูงขึ้นเพราะมีการเปลี่ยนพันธุ์เพาะปลูกและใส่ปุ๋ยประมาณการได้ว่าผลผลิตของประเทศในช่วง 5 ปีข้างหน้าจะมีประมาณ 20 ล้านตันต่อปี ซึ่งจะก่อให้เกิดส่วนเกินของตลาดสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตเอทานอลได้ นอกจากนี้ยังได้แนะนำว่า ในการนำมันสำปะหลังมาใช้สำหรับเป็นวัตถุดิบในการผลิตเอทานอลนั้นควรที่จะทำการแปรรูปให้อยู่ในรูปของมันเส้น ทั้งนี้เนื่องจากมันเส้นสามารถเก็บสต็อกได้ตลอดปี ทำให้เกิดงานใหม่ขึ้นในหมู่บ้าน สะดวกต่อการขนส่ง ดังนั้นการเตรียมวัตถุดิบให้เพียงพอต่อความต้องการเอทานอลที่เพิ่มสูงขึ้นจากนโยบายของรัฐที่ผลักดันการผลิตแก๊สโซฮอล์ E85 จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง

### 2.4 การผลิตมันเส้น

ขั้นตอนการแปรรูปมันสำปะหลังให้ได้มันเส้นคุณภาพดี ประกอบด้วย การทำความสะอาด การสับ และการทำแห้ง

### 1) การทำความสะอาดมันสำปะหลัง

มันสำปะหลังที่เก็บเกี่ยวมักมีสิ่งเจือปนอยู่มาก วิธีการทำความสะอาดแบบแห้ง เช่น การร่อนผ่านตะแกรง (screening) และการขัดสี (abrasion cleaning) เป็นต้น เป็นกระบวนการที่เป็นที่ได้รับความนิยมในการกำจัดสิ่งเจือปนให้เหลือน้อยที่สุด สุกัญญา จัตตพรพงษ์ และคณะ (2547) ได้ออกแบบเครื่องทำความสะอาดและขูดผิวหัวมันสำปะหลัง โดยใช้เครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียวขนาด 10 - 13 แรงม้า เป็นต้นกำลัง จากการทดสอบ พบว่าเครื่องทำความสะอาดหัวมันสามารถร่อนทำความสะอาดหัวมันสำปะหลังได้ชั่วโมงละ 18-20 ตัน โดยสามารถสะกัดผิวนอกเปลือกหุ้มหัวมันสำปะหลังได้ประมาณ 50-80 เปอร์เซ็นต์และสามารถร่อนแยกดินทรายออกได้ประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ ของทั้งหมด มีอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง 0.095 ลิตรต่อตันหัวมันสด มันเส้นที่ทำจากหัวมันสำปะหลังที่ผ่านเครื่องทำความสะอาด แล้วพบว่ามีทรายเป็นป้อนเพียงประมาณ 0.50 เปอร์เซ็นต์

### 2) การสับมันสำปะหลัง

การสับมันสำปะหลังเป็นขั้นตอนสำคัญในการผลิตมันเส้นคุณภาพดี รูปแบบการสับมี 2 แบบ คือ การสับตามขวาง และการสับตามยาว ข้อดีของการสับตามขวาง คือ กระทำได้ง่ายกว่า ขึ้นมันที่ได้จะตากแห้งเร็วและบดได้ง่ายกว่า แต่มีข้อเสีย คือ มีการสูญเสียมากกว่าการสับตามยาว

Visvanathan et al., (1996) ได้แนะนำว่าการสับมันสำปะหลังด้วยความเร็วประมาณ 2.5 เมตรต่อวินาที มุมตัด (shear angle) 60 – 75 องศา และมุมใบมีด (knife bevel angle) 30 – 45 องศา จะใช้พลังงานการตัดจำเพาะ (specific cutting energy) น้อยที่สุด

วิรัตน์ (2547) ทำการศึกษาเครื่องสับมันสำปะหลังแบบใบมีดโยกสำหรับผลิตชิ้นมันเส้นที่เป็นส่วนผสมของอาหารโคนม เครื่องสับประกอบด้วย ชุดทำความสะอาดและชุดใบมีด ชุดทำความสะอาดใช้หลักการขัดสีโดยใช้ตะแกรงหมุนสัมผัสกับผิวมันสำปะหลัง ชุดใบมีดมีมุมตัด 70 องศา ตัดหัวมันแบบตามขวาง ผลการทดสอบพบว่า มีเปอร์เซ็นต์เปลือกติดค้างหลังจากการทำความสะอาด 19.2 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพการตัดชิ้นมันเท่ากับ 85.35 เปอร์เซ็นต์

ศุภสันต์ (2548) ทำการศึกษาอิทธิพลของจำนวนชุดใบมีด ความเร็วรอบใบมีด และความเร็วขับป้อน ที่มีผลต่อการสับชิ้นมันสำปะหลังเพื่อการผลิตแป้งดิบ พบว่า ที่ความเร็วรอบใบมีด 1,000 รอบต่อนาที และความเร็วขับป้อน 68 รอบต่อนาที มีพลังงานการตัดจำเพาะต่ำที่สุด

### 3) การทำแห้ง

สำหรับการทำมันเส้นหัวมันสดจะถูกนำมาสับให้เป็นชิ้นๆ จากนั้นนำไปตากลานเพื่อให้ได้มันเส้นแห้ง จากการศึกษาของ ชยะ (2530) ในการทำมันเส้นของพื้นที่ 6 จังหวัดในภาคตะวันออกเฉียงเหนือซึ่งประกอบด้วย จังหวัดนครราชสีมา ขอนแก่น อุดรธานี กาฬสินธุ์ มหาสารคาม และชัยภูมิ รวมจำนวน 104 โรงงาน พบว่ามันเส้นที่ได้จากการตากลานอัตราการเปลี่ยนหัวมันสดให้เป็นมันเส้นอยู่ที่ 2.13:1 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำแห้งมันเส้นที่ตากลานประกอบด้วย ความเข้มแสงแดด ความเร็วลม ความชื้นของอากาศ

ลักษณะเฉพาะของชั้นมัน เช่น ความหนาของชั้น ความสม่ำเสมอของขนาดชั้น และความหนาของชั้นที่ตก นอกจากปัจจัยที่กล่าวข้างต้นแล้ว Thanh *et al.* (1979) ได้ศึกษาเปรียบเทียบพื้นผิวของลานตาก 2 แบบคือ แบบพื้นผิวคอนกรีตเรียบ (Plain Cement Floor) และแบบพื้นผิวที่มีสีดำ (Black-topped Floor) พบว่าพื้นผิวที่มีสีดำจะลดระยะเวลาการตากแห้งชั้นมันได้มากกว่าพื้นที่ผิวคอนกรีตเรียบ นอกจากนี้ยังพบว่าชั้นมันสำปะหลังที่ผ่านการสับแบบมีรูปร่างไม่แน่นอน (Irregular Chip) จะใช้เวลาในการตากแห้งนานกว่าชั้นมันสำปะหลังที่มีการสับแบบแผ่นบาง (Thin Slice Chip) และยังพบว่าเวลาที่ใช้ในการตากแห้งชั้นมันจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณชั้นมันสำปะหลังต่อพื้นที่ตาก Olufayo and Ogunkunle (1996) ได้ศึกษาการตากมันสำปะหลังโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในรูปแบบต่างๆ ในบริเวณโซนอากาศชื้นของประเทศไนจีเรีย ดังนี้ คือ แบบตากบนถาดในที่โล่ง (OT) แบบตากบนถาดซึ่งวางไว้ในที่ร่ม (TS) ตากบนคอนกรีตริมถนน โดยไม่มีการเก็บในตอนกลางคืน (CS) และการใช้เครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์ (SD) ซึ่งผลจากการทดลองพบว่าอัตราการแห้งของชั้นมัน ไม่ได้ขึ้นอยู่กับรูปแบบของการตากอีกทั้งชั้นมันจะมีค่าความชื้นสมดุลคือ 16% ที่ความชื้นอากาศ 76% เมื่อทำการตากผ่านไป 9 วัน นอกจากนี้ยังพบว่าชั้นมันที่ตากมีการเกิดขึ้นของเชื้อรา โดยเกิดขึ้นกับชั้นมันในเครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์มากที่สุดและชั้นมันที่ตากบนคอนกรีตริมถนนนั้นมีการเกิดขึ้นของเชื้อราน้อยที่สุด ซึ่งจากผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าในพื้นที่ที่มีความชื้นอากาศสูงการตากแดดไม่สามารถช่วยให้ชั้นมันแห้งได้ตามต้องการ จากปัญหาเรื่องสภาวะอากาศที่ส่งผลต่อการทำชั้นมันเส้นแห้งนี้ เครื่องอบแห้งจึงเป็นแนวทางที่ดีในการผลิตมันเส้น ถ้าหากมองกลับไปในอดีตราคามันเส้นค่อนข้างต่ำและมีความผันผวนมาก แต่ในปัจจุบันความต้องการมันเส้นมีสูงขึ้นประกอบกับผลผลิตที่มีในประเทศลดต่ำลงทำให้ราคามันเส้นมีแนวโน้มสูงขึ้น การลงทุนเครื่องอบแห้งจะช่วยลดข้อจำกัดของการทำแห้งมันด้วยลานตากได้ จากรายงานผลการวิจัยของ Kajuna *et al.* (2001) เกี่ยวกับการทำแห้งมันสำปะหลังด้วยลมร้อนแบบชั้นบางเปรียบเทียบกับการตากลาน พบว่าที่อุณหภูมิการอบแห้งด้วยลมร้อน 55 °C และ 65 °C สามารถทำแห้งชั้นมันสำปะหลังได้ภายในเวลา 150 และ 125 นาทีตามลำดับ ซึ่งหากเปรียบเทียบกับการตากลานแบบชั้นบาง จะใช้เวลาในการตากนาน 2 -3 วัน และพบว่าส่วนบริเวณด้านล่างของชั้นมันที่สัมผัสกับลานตากเกิดการเปลี่ยนสี นอกจากนี้ยังพบว่าความหนาของชั้นมันที่ทำการอบแห้งมีผลต่ออัตราการอบแห้งเมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิการอบแห้งเดียวกัน

อย่างไรก็ตามเนื่องจากหัวมันสดที่ขูดขึ้นมาแล้วจะเกิดการเน่าเสียได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีภายในหัวมันสำปะหลังซึ่งจะทำการเปลี่ยนแปลงเป็นน้ำตาล ดังนั้นลักษณะของเครื่องอบแห้งที่จะนำมาใช้ควรที่จะมีความเหมาะสมต่อการอบแห้งวัสดุที่เป็นชื้น และควรมีการทำงานเป็นแบบต่อเนื่องมากกว่าแบบกะ ซึ่งจะพบว่าเครื่องอบแห้งแบบหมุน (rotary dryer) มีความเหมาะสมต่อแนวคิดนี้มากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากเครื่องอบแห้งแบบหมุนจะเป็นเครื่องอบแห้งที่ใช้สำหรับอบแห้งวัสดุที่เป็นชื้นหรือพวกเมล็ดพืชที่มีความชื้นสูง หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งชนิดนี้คือ ตัวเครื่องอบแห้งจะทำด้วยถังทรงกระบอกหมุน วางเอียงกับแนวราบเล็กน้อย วัสดุไหลเข้าทางปลายด้านสูงแล้วไหลออกที่ปลายด้านต่ำของถัง ภายในตัวถังจะมีแผ่นกริปทำหน้าที่ดึงวัสดุจากด้านล่างของถังขึ้นสู่ด้านบนแล้วไหลตกลงมาด้วย



แรงโน้มถ่วง พร้อมๆ กับการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า ในขณะที่เดียวกันลมร้อนจะไหลเข้ามาในถังเพื่อทำหน้าที่ลดความชื้นจากตัววัสดุ ในขณะที่วัสดุไหลตกลงมา ทำให้การถ่ายเทความร้อนและความชื้นเป็นอย่างรวดเร็ว (สมชาติ, 2540) สำหรับลักษณะการไหลของอากาศอบแห้งนั้นสามารถแบ่งออกเป็นสองแบบคือแบบไหลตาม (Co-current flow) โดยวัสดุและอากาศจะไหลไปในทิศทางเดียวกัน และแบบไหลสวนทาง (Counter-current flow) อากาศอบแห้งจะไหลสวนทิศกับการไหลของวัสดุ การเลือกใช้ลักษณะการไหลของอากาศแบบใดนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ โดยวัสดุที่ไวต่อความเสียหายเนื่องจากความร้อนควรจะใช้การไหลแบบตาม แต่หากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพในเชิงความร้อนการอบแห้งแบบไหลสวนทางจะมีประสิทธิภาพสูงกว่า

พิพัฒน์ (2548) ได้ทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งพริกด้วยเครื่องอบแห้งแบบหมุน พบว่าอัตราการอบแห้งขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ อัตราการหมุนของถัง ความเร็วลม อัตราการป้อนพริกและความลาดเอียงของถัง โดยสภาวะที่เขาแนะนำว่าเหมาะสมคือ อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งคือ 140°C อัตราการไหลอากาศ 1 m/s อัตราการหมุนของถัง 6 rpm อัตราการป้อนพริก 0.5 kg/min ความลาดเอียงของถัง 0.3° ซึ่งจะสามารถลดความชื้นพริกจำนวน 9 kg ที่ความชื้นเริ่มต้น 78-84 %wb ให้เหลือ 15 %wb โดยใช้เวลาประมาณ 5 ชั่วโมง

ไพบุลย์ (2533) ได้ทำการอบแห้งข้าวโพดด้วยเครื่องอบแห้งแบบหมุนพบว่าความสิ้นเปลืองพลังงานของเครื่องอบแห้งขึ้นอยู่กับมวลข้าวโพดที่ค้างอยู่ในเครื่องอบแห้ง (hold-up) โดยเมื่อปริมาณข้าวโพดเพิ่มขึ้นความสิ้นเปลืองพลังงานจะน้อย โดยทั่วไปมวลที่ค้างอยู่ในถังควรมีค่าประมาณ 10-15% ของปริมาตรถัง นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับความชื้นของข้าวโพดด้วยโดยมีความสิ้นเปลืองเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นลดลง

## 2.5 การอบแห้งวัสดุเกษตร

การอบแห้งเป็นขั้นตอนหนึ่งในการจัดการวัตถุดิบทางการเกษตร การอบแห้งเป็นกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร โดยทั่วไปจะอาศัยความร้อนจากภายนอก ถ่ายเทความร้อนเข้าสู่วัสดุที่ต้องการ ความร้อนที่ถ่ายเทเข้าไปจะทำให้ความชื้นของวัสดุ ที่อยู่ที่ผิวและเนื้อวัสดุระเหยออกมาดังแสดงไว้ในสมการ 2-1 ทั้งนี้พลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง จะถูกกำหนดโดยระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (Drying Time) จากความชื้นเริ่มต้นไปสู่ความชื้นที่ต้องการ

$$q_T = h_v A(T_v - T_i) = h_c A(T_v - T_i) + h_r A(T_v - T_i) + u_k A(T_v - T_i) \quad (2-1)$$

เมื่อ  $h_c$  = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โดยการพาความร้อนจากอากาศร้อนสู่ผิววัสดุ

$h_r$  = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โดยการแผ่รังสี ระหว่างวัสดุกับผนังของห้องอบ

$u_k$  = สัมประสิทธิ์รวมของการถ่ายเทความร้อนสู่ผิวหน้าของการอบ โดยการพาและการนำความร้อนผ่านชั้นวัสดุผิวหน้าซึ่งมีการระเหย

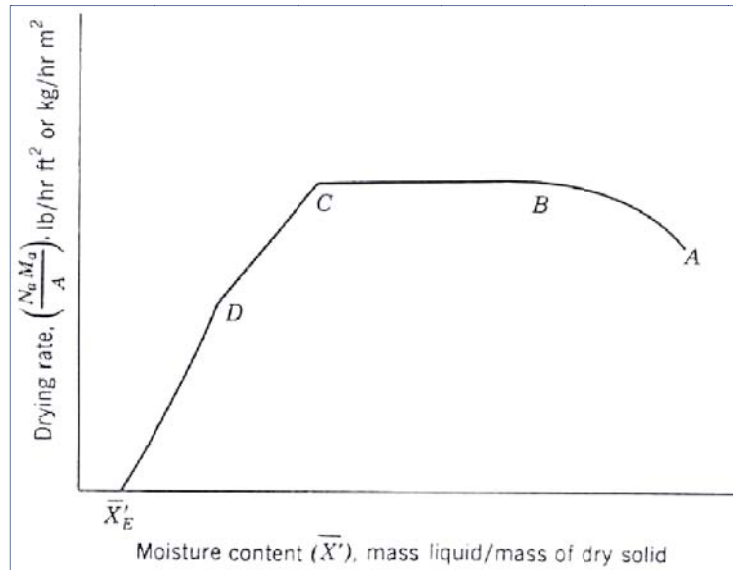
$T_v, T_i$  = ค่าอุณหภูมิอากาศที่ใช้อบแห้งและอุณหภูมิผิวต่อระหว่างอากาศและวัสดุ

ความชื้นเริ่มต้น (Moisture content) สามารถระบุได้ทั้งเป็น ความชื้นเปียก (wet basis, %wb) และ ความชื้นแห้ง (dry basis, %db) ซึ่งใช้ฐานในการเปรียบเทียบแตกต่างกัน wet basis หมายถึงการเทียบปริมาณความชื้นกับน้ำหนักรวมของวัสดุ ส่วน dry basis เป็นการเทียบปริมาณความชื้นกับน้ำหนักแห้งของวัสดุเท่านั้น ในการใช้คำนวณและออกแบบการอบแห้งนิยมใช้ dry basis เป็นมาตรฐาน

ตัวแปรสำคัญ ที่มีผลต่อพลังงานที่ใช้การอบแห้ง คือ สมบัติและประเภทของความชื้นของวัสดุ โดยปกติความชื้นที่อยู่ในวัสดุจะประกอบไปด้วย ความชื้นรอบผิว (Adsorbed moisture) และ ความชื้นในเนื้อวัสดุ (Absorbed moisture) ซึ่งความชื้นรอบผิวจะเป็นความชื้นที่ถูกล้างออกไปได้ง่าย นอกจากนี้ ยังมีความชื้นของบรรยากาศ (Relative Humidity) ซึ่งมีผลทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งนานขึ้นอีกด้วย โดยปกติในการอบแห้งวัสดุใดๆ ความชื้นสุดท้ายของวัสดุที่ยังคงเหลืออยู่ในเนื้อวัสดุจะสมดุลกับความชื้นอากาศที่ใช้อบ โดยที่ความชื้นในวัสดุดังกล่าวจะไม่ลดต่ำกว่านี้อีกแม้ว่าจะใช้เวลานานเท่าใดก็ตามเราเรียกความชื้น ณ จุดนี้ว่า ค่าความชื้นสมดุล (**Equilibrium Moisture Content,  $\bar{X}'_E$** )

อัตราการอบ (Drying Rate) เป็นตัวแปรอีกตัวหนึ่ง ที่สามารถบอกให้เรารู้ถึงระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึง ค่าความชื้นที่ระเหยออกไปได้ต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลา หน่วยอาจเป็น ปอนด์น้ำต่อตารางฟุตชั่วโมง หรือกิโลกรัมน้ำต่อตารางเมตรชั่วโมง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2-2 โดยปกติ ในการอบแห้งวัสดุหนึ่งๆ จะมีอัตราการอบแห้ง 2 ช่วง คือ ก) Constant Rate Drying ( $R_c$ ) คือ การอบแห้งในช่วงที่มีอัตราการระเหยน้ำต่อพื้นที่ เป็นการอบแห้งในช่วงที่วัสดุมีความชื้นเหลือเพื่อ ความชื้นจึงเดินทางมาสู่ผิวหน้าได้ทันเวลากับความร้อนที่ถ่ายจากลมร้อนมาที่ผิว ส่วนใหญ่จะเป็นความชื้นรอบผิว (Adsorbed moisture) หรือ ความชื้นอิสระ (Unbound moisture) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2-2 ช่วง B-C และ ข) Falling Rate Drying ( $R_f$ ) คือ การอบในช่วงที่ปริมาณน้ำที่ผิววัสดุแห้งลง เมื่อน้ำระเหยมาที่ผิวไม่ทันอัตราการระเหยต่อหน่วยพื้นที่และเวลาก็จะลด ในช่วงนี้อุณหภูมิที่ผิวอาจค่อย ๆ เพิ่มขึ้น และค่า  $R_f$  อาจจะแปรผันตรงกับค่าความชื้นที่เหลืออยู่ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2-2 ช่วง C-D วัสดุบางประเภทอาจมีแต่ falling rate ตลอดการอบเลยก็ได้ ทั้งนี้การอบแห้งจะสิ้นสุดลงเมื่อความชื้นของวัสดุลดลงถึงจุดความชื้นสมดุล,  $\bar{X}'_E$

จากหลักการลดความชื้นโดยวิธีการอบแห้ง ที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นว่าองค์ประกอบการอบแห้งจะประกอบไปด้วย 1) แหล่งพลังงานความร้อน 2) พัดลมในการพาความร้อน และ 3) ถังอบวัสดุ ซึ่งในส่วนของการเลือกใช้หรือการออกแบบเครื่องอบแห้ง จะต้องพิจารณาถึงวัสดุที่ต้องการนำมาอบแห้ง ซึ่งทฤษฎีนั้นมีจำนวนมากเนื่องจากเครื่องลดความชื้นนั้นมีอยู่รูปแบบซึ่งในหัวข้อนี้จะกล่าวแนวทางการพิจารณาการเลือกและออกแบบเครื่องลดความชื้น



รูปที่ 2-2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้ง กับความชื้น

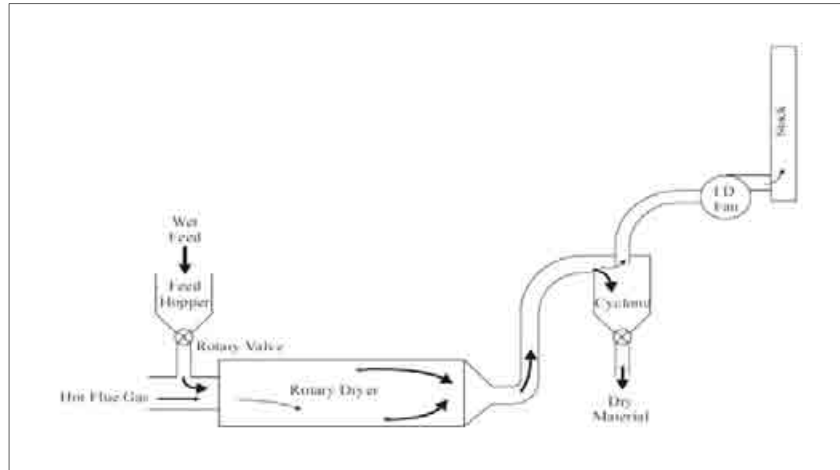
เครื่องอบแห้งที่นิยมใช้กับเชื้อเพลิงชีวมวล มีอยู่หลายประเภทจำแนกตามวิธีการ และชนิดของถังอบแห้ง ได้ 5 ประเภท (National Renewable Energy Laboratory, 1998) คือ

1. Rotary Dryers
2. Flash Dryers
3. Disk Dryers
4. Cascade Dryers
5. Superheated steam Dryers

### 1) Rotary Dryer (เครื่องอบแห้งแบบโรตารี)

เครื่องอบแห้งชนิดนี้มีหลายชนิด แต่นิยมใช้สำหรับอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวล จะมีลักษณะเป็นแบบช่องเดี่ยวที่รับสัมผัสความร้อนโดยตรง ดังรูปที่ 2-3 โดยหลักการทำงานจะใช้ลมร้อนสัมผัสกับวัสดุอบโดยตรง ภายในตัวถังที่หมุน การหมุนของตัวถังทรงกระบอก จะอาศัยใบพาช่วยโรยวัสดุอบผ่านอากาศร้อน เพื่อเพิ่มอุณหภูมิและเพิ่มอัตราการลดความชื้น ท่อลมร้อนจะต่อตรงเข้าไปในเครื่องอบแห้ง โดยตรง และอีกด้านหนึ่งจะติดตั้งหัวเผาหรือเครื่องทำความร้อน

เครื่องอบแห้งโดยทั่วไป วัสดุอบและลมร้อนจะไหลขนานกัน โดยลมร้อนที่สุดจะสัมผัสกับวัสดุอบที่มีความชื้นสูงที่สุด แต่สำหรับวัสดุที่อุณหภูมิไม่มีผลกับวัสดุ ลมร้อนกับวัสดุจะไหลในทิศสวนทางกัน คือวัสดุอบที่แห้งที่สุดจะปะทะลมร้อนที่ร้อนที่สุดและมีความชื้นสัมผัสน้อยที่สุด ในสุดท้ายวัสดุอบที่มีความชื้นน้อยก็จะออกจากเครื่องอบแห้ง แต่อาจจะมีการลุกไหม้เกิดขึ้น หากวัสดุอบที่แห้งแล้วเจอกับลมร้อนที่อุณหภูมิสูง เครื่องอบแห้งชนิดนี้เหมาะสำหรับวัสดุที่มีความหนาแน่นปานกลาง เช่น ไม้สับ เหง้ามันสำปะหลังสับ ทางปาล์มสับ

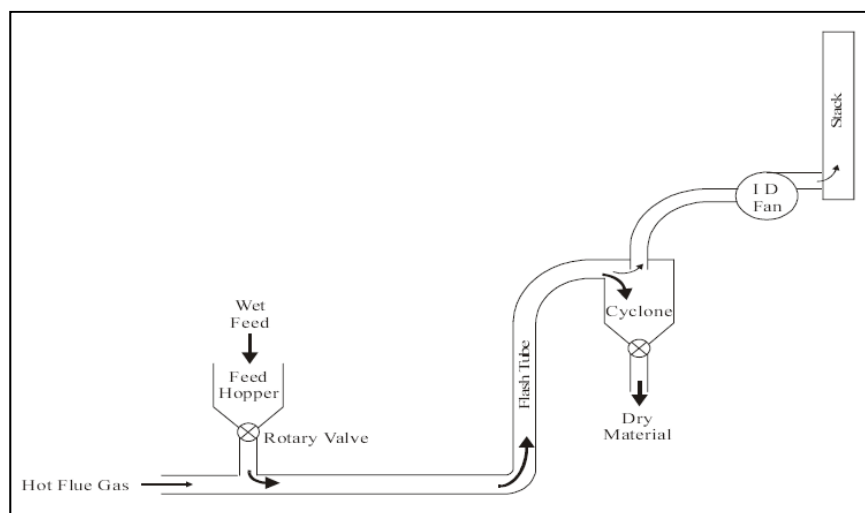


รูปที่ 2-3 เครื่องอบแห้งโรตารี (Rotary Dryer) แบบช่องเดี่ยว

## 2) Flash Dryers (เครื่องอบแห้งแบบพาดหลุม)

เครื่องอบแห้งชนิดนี้มีหลักการทำงาน คือ วัสดุอบจะถูกผสมกับลมร้อนที่มีความเร็วสูง การสัมผัสกันอย่างใกล้ชิดกันของวัสดุอบกับลมร้อนจะทำให้เกิดการลดความชื้นอย่างรวดเร็ว วัสดุอบและลมร้อนจะถูกแยกออกโดยใช้ไซโคลน ดังแสดงไว้รูปที่ 2-4 ในกรณีต้องการปล่อยลมร้อนออกสู่บรรยากาศ อาจจะต้องทำการดักฝุ่นละเอียดออกอีกครั้งโดยใช้ Water Scrubber

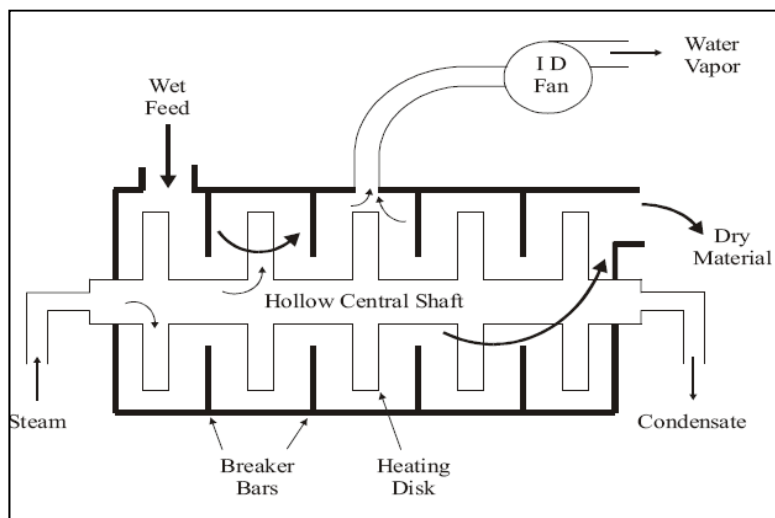
ข้อดีของเครื่องอบแห้งแบบพาดหลุม (Flash Dryer) คือ ระยะเวลาในการอบแห้งสั้น ขนาดเล็ก เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งแบบโรตารี อย่างไรก็ตามอัตราการสิ้นเปลืองไฟฟ้าจะสูง เพราะใช้ปริมาณลมร้อนที่สูงกว่า นอกจากนี้ยังมีขีดจำกัดคือ วัสดุอบจะต้องมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา หรือความหนาแน่นต่ำ และสามารถลอยตัวในอากาศได้ เครื่องอบประเภทนี้เหมาะสำหรับการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวล คือ ทะลายปาล์มสับ และ ชานอ้อย (Wang et al. 1990)



รูปที่ 2-4 เครื่องอบแห้งแบบพาดหลุม (Flash Dryer)

### 3) Disk Dryers

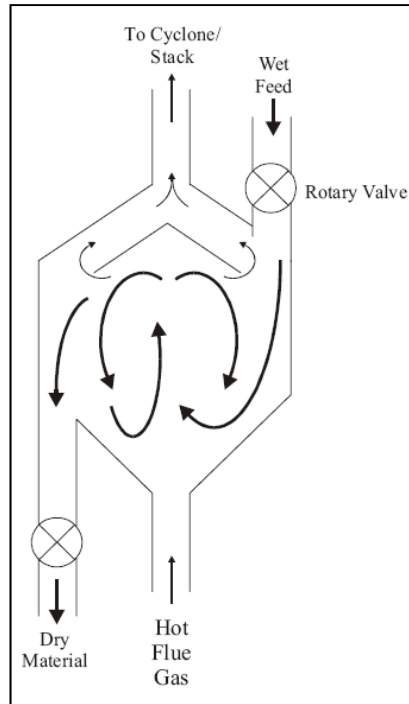
เครื่องอบชนิดนี้เหมาะสำหรับวัสดุอบที่มีการเคลื่อนตัวต่ำ ภายในเครื่องอบ วัสดุอบจะถูกทำให้ร้อนโดยไอน้ำจะเข้าไปในเพลากลาง ซึ่งมีจานที่มีรูติดอยู่เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อน โดยมีส่วนที่ยื่นออกมา (Finger) เพื่อช่วยผสมวัสดุและช่วยเก็บสะสมความร้อน เครื่องอบแห้งแบบนี้สามารถใช้งานได้ ในสภาวะสูญญากาศ หรือแรงดันต่ำได้ ส่วนไอน้ำที่ควบแน่นจากการอบสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้และนำกลับไปสู่หม้อต้ม (Boiler) ได้ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2-5 เครื่องอบแห้งชนิดนี้เหมาะสำหรับอบแห้งวัสดุที่มีลักษณะเป็นโคลน เช่น Sludge ต่างๆ



รูปที่ 2-5 ด้านข้างของ Disk Dryers

### 4) Cascade Dryers (เครื่องอบแห้งแบบโรยตัว)

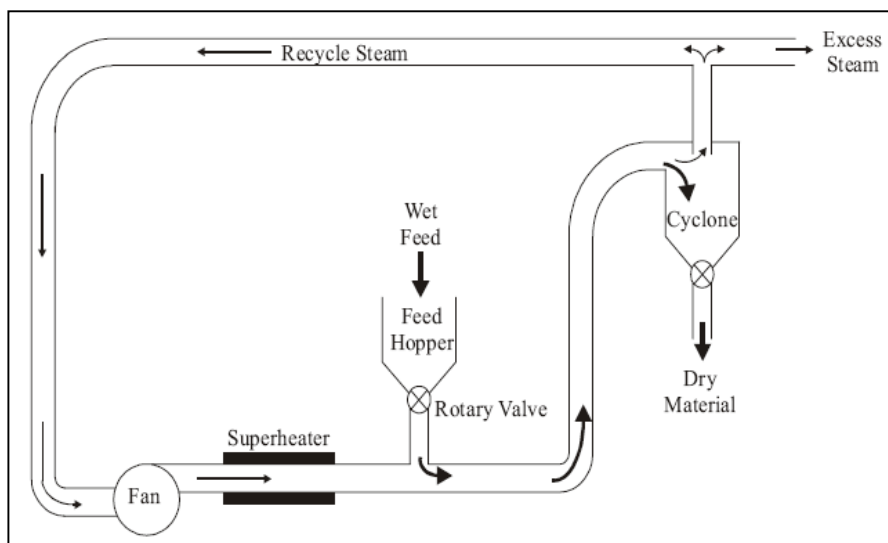
เครื่องอบแห้งชนิดนี้โดยทั่วไปจะใช้ในการอบแห้งเมล็ดพืช แต่เราสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับวัสดุอบที่เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล หลักการทำงานคือ วัสดุอบจะถูกนำเข้าสู่ถังและถูกโรยตัวเข้าไปในห้องอบ และลอยตัวโดยลมร้อน หมุนเวียนในห้องอบแห้ง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2-6 เมื่อความชื้นลดลงจะทำให้ น้ำหนักวัสดุอบเบาลงจะถูกเป่า ให้เคลื่อนที่ออกไปทางด้านช่องเปิดด้านข้างของถัง โดยทั่วไปวัสดุจะใช้เวลาอยู่ในถังอบประมาณ 2 นาที (MacCallum et al.1981) เครื่องอบแห้งแบบโรยตัวนี้ เหมาะสำหรับวัสดุอบที่มีน้ำหนักเบา และสามารถลอยตัวในอากาศได้ เหมือนกับเครื่องอบแบบพาหะลม



รูปที่ 2-6 ด้านข้างของ Cascade Dryers

### 5) Superheat Steam Dryer

เครื่องอบแห้งชนิดนี้จะมีลักษณะการทำงานคล้ายๆกับ Flash Dryers แต่จะใช้ไอน้ำแทนลมร้อน ดังรูปที่ 2-7 หลักการทำงานคือ จะใช้ไอน้ำมาเพิ่มอุณหภูมิให้สูงกว่าอุณหภูมิไอน้ำอิ่มตัวกลายเป็นไอน้ำยิ่งยวด มาถึงความชื้นออกจากวัสดุอบ ซึ่งไอน้ำอิ่มตัวยิ่งยวดจะเปลี่ยนเป็นไอน้ำอิ่มตัว สามารถนำกลับมาใช้ในกระบวนการอบแห้งได้อีก ประมาณ 90% ขณะที่อีก 10% จะถูกระบายทิ้งหรือเอาไปใช้ในส่วนของโรงงานได้ (Hulkkonen et al. 1994; Hulkkonen et al. 1991)



รูปที่ 2-7 Superheat Steam Dryer

เมื่อทำการเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสีย ของเครื่องอบแห้งแต่ละชนิด ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2-1 พบว่า เครื่องอบแห้งแบบโรตารี น่าจะเหมาะสมกับการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวล ทั้งนี้อาจจะเสี่ยงต่อการเกิดประกายไฟและการลุกไหม้ ซึ่งจำเป็นต้องทำการออกแบบในด้านความปลอดภัย เป็นอย่างดี

ตารางที่ 2-1 การเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสีย ของเครื่องอบแห้งแต่ละชนิด (Wade A. Amos, 1998)

ชนิด เครื่องอบแห้ง	ต้องการ วัสดุขนาด เล็ก	ต้องการ ขนาดวัสดุ ใกล้เคียงกัน	ความสะดวก ในการนำความ ร้อนกลับมาใช้	เสี่ยงต่อ ประกายไฟ	ใช้ไอน้ำ	ต้นทุน
Rotary Dryer	ไม่	ไม่	ยาก	สูง	ใช้ได้	ต่ำ
Flash Dryer	ใช่	ไม่	ยาก	ปานกลาง	ใช้ไม่ได้	ปานกลาง
Disk Dryer	ไม่	ไม่	ง่าย	ต่ำ	ใช้ได้	สูง
Cascade Dryer	ไม่	ใช่	ยาก	ปานกลาง	ใช้ไม่ได้	สูง
Superheated Steam Dryer	ใช่	ไม่	ง่าย	ต่ำ	ใช้ได้	สูง

## 2.6 เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน

เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน (Biomass Gasification) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้องค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงชีวมวล เปลี่ยนรูปไปเป็นก๊าซเชื้อเพลิงที่จุดไฟติดและมีค่าความร้อนสูง โดยอาศัยปฏิกิริยาอุณหเคมี (Thermo-chemical reaction) ซึ่งแก๊สเชื้อเพลิงดังกล่าวนี้ประกอบด้วย ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก๊าซไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) และ ก๊าซมีเทน (CH<sub>4</sub>) ซึ่งในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน เราสามารถแบ่งโซนการเกิดปฏิกิริยาออกเป็น 4 โซน ดังนี้

1. Combustion หรือ Oxidation Zone
2. Reduction Zone
3. Pyrolysis หรือ Distillation Zone
4. Drying Zone

**Combustion หรือ Oxidation Zone** เป็นบริเวณที่ป้อนอากาศ เมื่อถูกกระตุ้นด้วยความร้อน เชื้อเพลิงชีวมวลจะลุกไหม้ เกิดปฏิกิริยาอุณหเคมีระหว่างก๊าซออกซิเจนในอากาศกับคาร์บอนและไฮโดรเจน ซึ่งอยู่ในเชื้อเพลิงชีวมวล ผลของปฏิกิริยาดังกล่าวก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ดังสมการที่ 2-2 และ สมการ 2-3



ปฏิกิริยาในสมการที่ 2-2 และสมการที่ 2-3 เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนและความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาคูดความร้อนในโซน Reduction และ โซน Pyrolysis อุณหภูมิในโซน Combustion จะมีค่าระหว่าง 1,100 – 1,500 °C

**Reduction Zone** แก๊สร้อนที่ผ่านมาจาก Combustion Zone จะทำให้เกิดปฏิกิริยา Reduction ใน zone นี้จะมีอุณหภูมิระหว่าง 500 – 900 °C ทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำจะไหลผ่านคาร์บอนที่กำลังลุกไหม้อยู่ ก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน ดังสมการที่ 2-4 ถึง สมการที่ 2-8



ปฏิกิริยาในสมการที่ 2-4 เรียกว่า **Boundard Reduction** และปฏิกิริยาในสมการที่ 2-5 เรียกว่า **Water gas Reduction** เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 900 °C ก๊าซที่ได้จากทั้งสมการทั้งสองเป็นก๊าซที่เผาไหม้ได้ และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นก๊าซหลักที่ต้องการ ปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในก๊าซชีววมวลนี้จะขึ้นอยู่กับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ว่าจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่ร้อนได้มากน้อยเพียงใด

ในโซนของ Reduction นี้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะดีเพียงใดขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความเร็วของก๊าซที่สัมผัสกับเชื้อเพลิงชีววมวล และพื้นที่ผิวสัมผัสของเชื้อเพลิงชีววมวล ดังนั้นขนาดและปริมาณของเชื้อเพลิงชีววมวลที่ใช้จะมีผลต่อการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง ซึ่งเชื้อเพลิงชีววมวลขนาดใหญ่จะมีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรต่ำ ทำให้ยากต่อการจุดเผาภายในเตาและจะทำให้เกิดปริมาณของช่องว่างระหว่างเชื้อเพลิงด้วยกันมาก เป็นผลทำให้มีออกซิเจนไหลผ่านเข้าไปในระบบมากปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นก็จะน้อยตามไปด้วย ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีววมวลมีค่าต่ำ

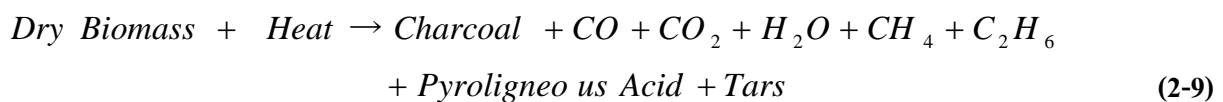
แต่ถ้าขนาดของเชื้อเพลิงมีขนาดเล็ก ก็จะทำให้เกิดการสูญเสียความดันภายในเตามาก จึงต้องใช้พัดลมขนาดใหญ่ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมากยิ่งขึ้นและแก๊สที่ผลิตได้ก็จะมีฝุ่นมากยิ่งขึ้น ขนาดเชื้อเพลิงแข็งที่เหมาะสมควรมีขนาด 20-200 มิลลิเมตร จากปฏิกิริยาถ้าอุณหภูมิในโซน reduction สูงกว่า 900 °C แล้วก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 90% จะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และถ้าอุณหภูมิสูงมากกว่า 1,100 °C จะทำให้ก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ทั้งหมดเปลี่ยนเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ นั่นคือประสิทธิภาพของเตาเผาจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของโซน reduction

ในขณะที่แก๊สร้อนจากโซน Combustion ไหลเคลื่อนเข้าสู่โซน Reduction จะทำให้อุณหภูมิของก๊าซลดลง เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน ดังนั้นไอน้ำกับคาร์บอนจะทำปฏิกิริยากันเพื่อก่อให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ 2-6 ซึ่งจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 500-600 °C



ปฏิริยานี้มีความสำคัญเพราะจะทำให้ส่วนผสมของก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซชีววมวลมีค่ามากขึ้น (ก๊าซไฮโดรเจนมีผลต่อการจุระเบิดของเครื่องยนต์สันดาปภายใน)แต่ถ้าในกระบวนการที่มีไอน้ำมากเกินไป จะทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนดั่งสมการที่ 2-7 (ปฏิริยานี้เรียกว่า Water Shift Reduction) ทำให้ค่าความร้อนของก๊าซชีววมวลที่ได้มีค่าลดลง ดังนั้นเชื้อเพลิงชีววมวลที่ใช้จะต้องมีความชื้นไม่มากเกินไป นอกจากนี้ในกระบวนการ Reduction ก๊าซไฮโดรเจนบางส่วนจะทำปฏิริยากับคาร์บอนทำให้เกิดก๊าซมีเทนขึ้นได้ ดั่งสมการที่ 2-8 ปฏิริยานี้เรียกว่า Methane Production

**Pyrolysis หรือ Distillation Zone** รับความร้อนจากโซน Reduction ทำให้ Volatile Matter ที่อยู่ในเชื้อเพลิงชีววมวลเกิดการสลายตัว เกิดเป็นเมทานอล กรดน้ำส้ม และทาร์ อุณหภูมิในโซนนี้จะมีค่าประมาณ 200-500 °C ของแข็งที่เหลืออยู่ภายหลังจากการผ่านกระบวนการนี้ก็คือ คาร์บอนในรูปถ่าน ซึ่งจะทำปฏิริยาต่อในโซน Reduction และ Combustion ปฏิริยาที่ได้ในโซนนี้แสดงไว้ในสมการที่ 2-9



**Drying Zone** ในโซนนี้ความร้อนจะลดลงมากทำให้อุณหภูมิไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดการสลายตัวของ Volatile Matter แต่ความชื้นในเชื้อเพลิงจะระเหยออกมาได้ โซนนี้จะมีอุณหภูมิประมาณ 100-200 °C

## 2.7 การสับ/ย่อยเห้งมันสำปะหลัง

การลดขนาดของเชื้อเพลิงชีววมวล ซึ่งเป็นวัสดุทางการเกษตร โดยทั่วไปจะใช้วิธีการสับ ย่อย หรือ บด เพื่อให้สอดคล้องต่อความต้องการของอุตสาหกรรม และลดต้นทุนในการขนส่ง การออกแบบเครื่องสับ/ย่อยเชื้อเพลิงชีววมวล จำเป็นต้องทราบคุณสมบัติทางกลและแรงต้านทานของชีววมวลที่มีต่อการตัดเพื่อที่จะเข้าใจพฤติกรรมของวัสดุเมื่อถูกตัดที่สภาวะต่างกัน โดย Womac และคณะ (Womac et al., 2005) เสนอว่าในการออกแบบเครื่องตัดจะต้องรู้ค่ากำลังเฉือนสูงสุดและพลังงานที่ใช้ในการเฉือน ซึ่งค่าเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของชีววมวล ขนาด อายุ ความชื้น และ โครงสร้างของเซลล์ภายในวัสดุ ทั้งนี้ Persson (Persson, 1987) ได้อธิบายพฤติกรรมในการตัดวัสดุชีววมวลว่า เมื่อใบมีดเคลื่อนที่ลงไปสัมผัสกับผิววัสดุชีววมวลจะทำให้เกิดแรงเค้นภายในเนื้อวัสดุชีวภาพสูงขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงจุดแตกหัก (failure point) ซึ่งวัสดุชีววมวลบางชนิดจะเกิดการแตกหักอาจเกิดขึ้นเพียงครั้งเดียวในขณะที่วัสดุชีวภาพบางชนิดเกิดจุดแตกหักขึ้นหนึ่งจุดก่อนแล้วแรงเค้นค่อยๆ สูงขึ้นและเกิดจุดแตกหักอีกครั้งเมื่อใบมีดผ่านเนื้อวัสดุ นั่นหมายความว่าพฤติกรรมในการตัดจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุชีวภาพซึ่งต้องใช้หลายหลักการในการอธิบาย

Chancellor (1957) แบ่งประเภทของวัสดุชีวภาพโดยขึ้นอยู่กับลักษณะการตัดออกเป็น 2 ประเภทคือ (1) วัสดุชีวภาพที่ไม่มีเส้นใย (non-fibrous materials) ซึ่งมีคุณสมบัติทางกลเป็นเนื้อเดียวกันในทุกทิศทางของการตัด โดยทั่วไปแล้วเซลล์ของวัสดุจะเต็มไปด้วยของเหลว และ (2) วัสดุชีวภาพที่มีเส้นใย (fibrous materials) วัสดุชีวภาพแบบนี้จะมีเส้นใยที่แข็งแรงและกำลังที่ใช้ในการตัดจะขึ้นอยู่กับทิศทางของการตัด

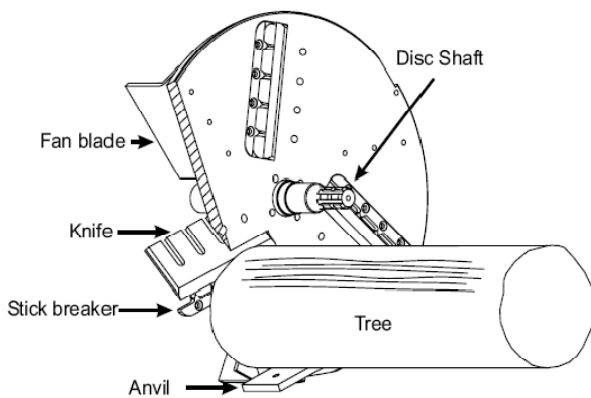
ผ่าน ซึ่งพฤติกรรมการตัดวัสดุเส้นใย ประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือ ส่วนที่แรงกดกระทำอย่างเดียว แรงกดกระทำร่วมกับแรงเฉือน และแรงเฉือนกระทำอย่างเดียว (Ince et al., 2005)

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการพลังงานที่ใช้ในการตัด อาทิเช่น คุณสมบัติทางกลและ คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ (เช่น แรง ความเค้น ความเครียด ขนาด ความหนาแน่น และ ความชื้น) โดย Mesquita and Hanna (1995), El Hag et al. (1971) และ Persson (1987) ลักษณะของใบมีด ความเร็วของใบมีด โดย Prasad and Gupta (1975) และ Chattopadhyay and Pandey (1999) ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบและเลือกใช้เครื่องสับ/ย่อยเชื้อเพลิงชีวมวลได้

ปัจจุบันเครื่องจักรกลสำหรับการลดขนาดเชื้อเพลิงชีวมวลมีมากมาย ผลิตทั้งในและต่างประเทศ โดยหลักการงานจะใช้แรงบีบอัด (Compression forces) แรงกระแทก (Impact forces) หรือแรงเฉือน (Shearing forces) ขึ้นอยู่กับการออกแบบ โดยทั่วไปการสับ/ย่อยลดขนาดเชื้อเพลิงชีวมวล จะใช้เครื่องจักร 2 ประเภท คือ

ก) เครื่องชิพ (Biomass Chipping and chunking) ซึ่งเป็นเครื่องสับ/ย่อยที่ใช้แรงกระแทกและแรงเฉือนประกอบกัน เป็นเครื่องจักรที่ได้รับความนิยมใช้กับ เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีขนาดเล็ก เช่น วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร และเศษไม้ สามารถนำไปใช้ได้ในการแปรรูปเชื้อเพลิงชีวมวล ณ แหล่งกำเนิด (On-site Biomass Feedstock Processing) และแบบรวมศูนย์ (Centralized Biomass Feedstock Processing) โดยการเปลี่ยนต้นกำลังเพื่อสามารถนำไปใช้ในแปลงได้

เครื่องชิพ สามารถจำแนกออกได้ตามประเภทของหัวสับ ออกเป็น 2 ประเภทคือ หัวสับชนิดจานกลม (Flywheel type) และ หัวสับชนิดทรงกระบอก (Cylinder type) ดังรูปที่ 2-8



(ก) หัวสับชนิดจานกลม (Flywheel type) (ข) หัวสับชนิดทรงกระบอก (Cylinder type)

### รูปที่ 2-8 ประเภทของเครื่องสับ/ย่อยลดขนาด จำแนกตามประเภทของหัวสับ

ข) เครื่องเชรดเดอร์ (Shredder) ซึ่งเป็นเครื่องสับ/ย่อยที่ใช้แรงกดและแรงเฉือนประกอบกัน เป็นเครื่องจักรที่ได้รับความนิยมใช้กับ เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีขนาดใหญ่และมีกิ่งก้าน เช่น ท่อนไม้ และเศษไม้

เฟอร์นิเจอร์ ราคไม้ ลักษณะการทำงานจะใช้หลักการ คบกันของเล็บสับ ที่ติดกับเพลาชับ 2 เพลลา หรือมากกว่า สามารถนำไปใช้ได้ในการแปรรูปเชื้อเพลิงชีวมวล ณ แหล่งกำเนิด (On-site Biomass Feedstock Processing) และแบบรวมศูนย์ (Centralized Biomass Feedstock Processing) ได้เช่นเดียวกัน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2-9



รูปที่ 2-9 เครื่องเคาะ (Shredder) กำลังการผลิต 13 ตัน/ชั่วโมง ต้นกำลังเครื่องยนต์ 400 HP

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

**ส่วนที่ 1)** การออกแบบเครื่องลดความชื้นกากมันสำปะหลังเปียกใช้หลักการเอ็กซ์ทรูชันเพื่อลดความชื้นกากมันสำปะหลังสด

#### 1. คุณสมบัติของกากมันสำปะหลัง

คุณสมบัติต่าง ๆ ของกากมันสำปะหลังนั้นเป็นสิ่งที่สำคัญและจำเป็นมากต่อการออกแบบเครื่องลดความชื้นกากมันสำปะหลัง คุณสมบัติของการมันสำปะหลังที่ทำการทดสอบประกอบไปด้วยคุณสมบัติทั่วไป คุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางกล การทดสอบคุณสมบัติแต่ละประการนั้นกระทำดังนี้

**1.1 คุณสมบัติทั่วไป** คุณสมบัติทั่วไปของกากมันสำปะหลังประกอบไปด้วยลักษณะอนุภาคของกากมันสำปะหลัง การจับตัวกันของกากมันสำปะหลังเมื่อออกจากสายการผลิต สี ลักษณะต่าง ๆ เหล่านี้ทดสอบได้โดยการสังเกตด้วยตาเปล่า

**1.2 คุณสมบัติทางกายภาพ** การวัดคุณสมบัติทางกายภาพประกอบได้ด้วยการวัดค่าความหนาแน่น ความชื้นแบบเปียก รวมไปถึงการทดสอบความหนืด (ภายใต้สภาวะเสมือนของไหล) วิธีการทดสอบคุณสมบัติแต่ละคุณสมบัตินั้นมีรายละเอียดดังนี้

**1) การวัดค่าความหนาแน่น** การวัดตัวอย่างความหนาแน่นของกากมันสำปะหลังในลักษณะปรากฏ ( Bulk density ) กระทำโดยการหาอัตราส่วนระหว่างมวลของกากมันสำปะหลังต่อปริมาตรที่บรรจุ การวัดทำได้โดยนำภาชนะทรงสี่เหลี่ยมขนาด 20 x 20 x 20 ลูกบาศก์เซนติเมตร ทำการชั่งเพื่อหามวลของภาชนะ จากนั้นนำตัวอย่างกากมันสำปะหลังใส่ลงในภาชนะให้เต็มแล้วชั่งอีกครั้ง นำค่าที่ได้จากการชั่งกากมันสำปะหลังรวมกับภาชนะบรรจุด้วยมวลของภาชนะบรรจุที่ชั่งครั้งแรกจะทำให้ได้มวลของกากมันสำปะหลังขณะเปียก จากนั้นนำไปหาค่าความหนาแน่นจากสมการ

$$\text{ความหนาแน่น} = \text{มวลของกากมันสำปะหลัง} / \text{ปริมาตรภาชนะบรรจุ}$$



รูปที่ 3-1 ภาชนะบรรจุเพื่อทดสอบหาความหนาแน่นปรากฏ

2) การวัดค่าความชื้นแบบเปียกของกากมันสำปะหลัง การทดสอบหาความชื้นแบบเปียกกระทำได้โดยนำภาชนะลักษณะรูปถ้วยมาชั่งน้ำหนักจากนั้นนำกากมันสำปะหลังใส่ลงไปจำนวนหนึ่งแล้วนำไปชั่ง เมื่อได้ค่ามวลรวมของภาชนะกับกากมันสำปะหลังแล้วนำไปอบออกจากมวลของภาชนะบรรจุก็จะได้มวลกากมันขณะเปียก หลังจากนั้นนำกากมันสำปะหลังที่บรรจุในภาชนะไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสด้วยเครื่องอบลมร้อน เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบ 24 ชั่วโมงแล้วนำกากมันสำปะหลังมาชั่งอีกครั้งนำค่ามวลที่ได้ลบออกด้วยค่าน้ำหนักภาชนะก็จะได้ค่ามวลกากมันขณะที่แห้ง จากนั้นนำผลที่ได้ไปคำนวณหาความชื้นเปียกจากความสัมพันธ์

$$\% \text{ ความชื้นแบบเปียก} = \{(\text{มวลกากมันสำปะหลังเปียก} - \text{มวลกากมันสำปะหลังแห้ง}) / \text{มวลกากมันสำปะหลัง เปียก}\} \times 100$$



รูปที่ 3-2 ภาพตัวอย่างกากมันก่อนอบและหลังอบ

### 3) การวัดค่าความหนืดด้วยคุณสมบัติทางวิทยากระแส (ภายใต้สถานะเสมือนของไหล)

คุณสมบัติทางวิทยากระแสนี้มีความสำคัญมากต่อการจำลองพฤติกรรมกรไหลด้วยโปรแกรมทางพลศาสตร์ของไหล คุณสมบัติดังกล่าวนี้ส่งผลโดยตรงต่อผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ การวัดค่าความหนืดด้วยคุณสมบัติทางวิทยากระแสของกากมันสำปะหลังกระทำโดยใช้เครื่อง TA Instruments AR 2000 Rheometer ใช้หัววัดแบบ Parallel plates เส้นผ่าศูนย์กลาง 40 มม. โดยตั้ง Gap ที่ 1.8 มม. อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส วัดในโหมด Oscillation mode โดยกำหนดให้ค่าของ frequency sweep อยู่ที่ 0.1-100 Hz และให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความเครียดคงที่ที่ 10 50 และ 100 ตามลำดับ ในส่วนของการวัดแบบ strain sweep ให้เปอร์เซ็นต์ความเครียดอยู่ที่ 10-1000 และให้ค่าความถี่คงที่ที่ 0.1 10 และ 100 Hz ตามลำดับ ทำการวัดกากมันสำปะหลังตามตัวแปรข้างต้นแล้วนำค่าที่ได้จากการวัดมาแปรผลด้วยวิธีการถอดแยกแบบไม่เชิงเส้นเพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรต่างๆที่ได้จากการทดลองกับแบบสมการทางคณิตศาสตร์ เมื่อทำการวิเคราะห์แล้วพบว่าผลที่ได้มีความสอดคล้องกับสมการที่ 3-1 ซึ่งเป็นสมการของ Non-Newtonian Power law

$$\eta = K(\lambda \dot{\gamma})^{n-1} \quad (3-1)$$

K และ n ที่เป็นค่าคงที่ของคุณสมบัติของตัวอย่างกากมันสำปะหลังโดยค่า k คือ consistency factor ค่า n คือ Power-law index นำค่า K และ n ที่ได้จากการทดลองไปคำนวณหาค่าความหนืดตามสมการที่ 3-1 เพื่อใช้ในการจำลองทางคอมพิวเตอร์ต่อไป

**1.3 คุณสมบัติทางกล** การทดสอบคุณสมบัติทางกลประกอบไปด้วยการทดสอบหาค่าการอัดตัว การทดสอบหาค่าความเค้นภายใต้การอัดตัว การทดสอบดังกล่าวนี้จะทำให้ทราบว่าเมื่อมีการอัดตัวแล้วกากมันสำปะหลังมีลักษณะเป็นอย่างไร รวมไปถึงทราบแรงดันที่สามารถทำให้น้ำแยกตัวออกจากกากมันสำปะหลังจนกากมันสำปะหลังมีความชื้นตามที่ต้องการซึ่งความชื้นเปียกเมื่อกากมันออกจากสายการผลิตแล้วมีค่าความชื้นอยู่ที่ 70 – 80 % สำหรับความชื้นที่ต้องการลดเพื่อเก็บรักษาอยู่ที่ 20–25 %

● **การทดสอบหาค่าความเค้นภายใต้การอัดตัว** การวัดค่าความเค้นอัดตัวกระทำโดยประยุกต์สร้างชุดวัดความความเค้นอัดขึ้นเองให้ทำงานร่วมกับเครื่องวัดความเค้นอัดความละเอียดสูง (Instron 5569) การวัดค่าโดยการเตรียมตัวอย่างกากมันสำปะหลังลงในอุปกรณ์รับตัวอย่างของชุดวัดความความเค้นอัดให้เต็มและเกลี่ยผิวหน้าให้เรียบ จากนั้นทำการกดอัดด้วยความเร็วของหัวกดอัด 10, 50 และ 100 mm/min เพื่อติดตามค่าความเค้นอัดที่ทำให้ตัวอย่างไหลออกจากหัวคายทรงกระบอก จับเวลาขณะที่กากมันสำปะหลังไหลออกจากหัวคายทรงกระบอกเพื่อคำนวณหาอัตราการไหลเชิงมวลและทำการวัดค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นเปียกของกากมันสำปะหลังเมื่อออกจากหัวคาย

## 2. การออกแบบเครื่องลดความชื้นกากมันสำปะหลัง

เมื่อได้ค่าคุณสมบัติที่ต้องการแล้วนำผลที่ได้มาคำนวณเพื่อออกแบบสกรูรวมถึงลักษณะคายหลักการออกแบบเครื่องลดความชื้นกากมันสำปะหลังทำโดยโดยใช้ทฤษฎีการออกแบบสกรูอัดแรงหรือที่รู้จักกันว่าเทคโนโลยีเอ็กซ์ทรูชัน ร่วมกับการใช้ทฤษฎีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลมาประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนาแบบชิ้นส่วนการทำงานของเครื่อง ต้นแบบ งานการเขียนแบบสามมิติและสองมิตินั้นใช้โปรแกรม SolidWorks

## 3. การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของแบบสกรูอัดลดความชื้นกากมัน

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของแบบสกรูอัดลดความชื้นกากมันสำปะหลังที่ออกแบบนั้นกระทำโดยนำแบบดังกล่าวไปวิเคราะห์และจำลองพฤติกรรมการไหลของกากมันสำปะหลังขณะทำการอัดรีดด้วยซอฟต์แวร์ POLYFLOW เพื่อวิเคราะห์ค่าแรงดันว่าเครื่องลดความชื้นกากมันสำปะหลังที่ออกแบบดังกล่าวสามารถสร้างแรงดันได้เท่ากับที่ต้องการหรือไม่ รวมไปถึงอัตราการไหลของกากมันสำปะหลังด้วยว่าเครื่องสามารถทำงานได้เพียงพอต่อกำลังการผลิตที่ต้องการหรือไม่ ผลการวิเคราะห์และจำลองที่ได้จะใช้เพื่อพัฒนาชิ้นส่วนของสกรูอัดและคายของเครื่องลดความชื้นกากมันแบบสกรูอัดรีดโดยประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องต้นแบบกำหนดไว้ว่าให้มีความสามารถในการลดความชื้นของกากมัน

สำปะหลัง การจำลองพฤติกรรมการอัดตัวของกากมันสำปะหลังที่เกิดขึ้นในแบบชุดสกรูและหัวค้ายทำโดยการประยุกต์ใช้ซอฟต์แวร์คำนวณทางพลศาสตร์ของไหล POLYFLOW 3.12.2 โดยมีรายละเอียดสำคัญดังนี้

### 3.1 เงื่อนไขการจำลอง

งานจำลองพฤติกรรมการอัดตัวของกากมันสำปะหลังเพื่อใช้ออกแบบหัวค้ายทำโดยการพิจารณากระบวนการอัดตัวเฉพาะส่วนของสกรูคู่ในช่วงดวงวัดปริมาณที่ต่อกับหัวค้าย เนื่องจากกากมันสำปะหลังถูกอัดตัวแน่นสูงสุดในช่วงดังกล่าวจึงสมมติให้การจำลองการอัดตัวทำได้โดยประยุกต์ใช้การจำลองการไหลภายใต้แบบจำลอง Generalized Newtonian Isothermal และใช้เทคนิคการลดอัตราส่วนของหัวค้ายประกอบการใช้ผลการจำลองการอัดตัวเพื่อการออกแบบชุดสกรูและหัวค้าย

### 3.2 Mesh Element

การสร้างภาพ mesh element ให้กับช่องทางการไหลของแบบชุดสกรูและหัวค้ายสร้างโดยใช้ซอฟต์แวร์ Gambit 2.4.6 โดยใช้รูปแบบผสมของการสร้าง mesh element ข้อมูลภาพ mesh element ที่ได้ประกอบด้วยจำนวน Cells เท่ากับ 336221 จำนวน Faces เท่ากับ 752618 และ จำนวน Nodes เท่ากับ 115235

### 3.3 Solver Module and Solver Control

การจำลองการไหลใช้ Solver Module ชนิด AMF Direct Solver

### 3.4 การตั้งค่าคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

#### 1) กากมันสำปะหลัง

การจำลองพฤติกรรมการอัดตัวของกากมันสำปะหลังกำหนดให้ใช้ค่าคุณสมบัติทางกายภาพของกากมันสำปะหลังดังรายละเอียดที่นำเสนอไว้ในหัวข้อถัดไป ยกเว้นค่าความหนืดกำหนดให้ใช้ค่าคงตัวค่าความหนืดปรากฏสูงสุดเท่ากับ 35900 Pa.s

#### 2) เหล็ก

การจำลองพฤติกรรมการอัดตัวของกากมันสำปะหลังกำหนดให้วัสดุของชิ้นส่วนทุกชิ้นเป็นเหล็ก AISI4340 Steel มีค่า Young modulus เท่ากับ  $2.05 \times 10^{11}$  Pa และค่า Poisson coefficient เท่ากับ 0.285

### ส่วนที่ 2) การศึกษาต้นแบบเครื่องสับมันสำปะหลังเพื่อการผลิตมันเส้นสำหรับอุตสาหกรรมเอทานอล

ในส่วนนี้จะทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพเบื้องต้นของหัวมันสำปะหลัง แล้วทำการออกแบบและทดสอบเครื่องต้นแบบผลิตมันเส้นสะอาดโดยจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ คือ ถังพักหัวมันสำปะหลัง เครื่องทำความสะอาด และเครื่องสับหัวมันสำปะหลัง โดยวิธีการและรายละเอียดในการออกแบบและทดสอบแสดงดังต่อไปนี้

## 1. ศึกษาลักษณะทางกายภาพของหัวมันสำปะหลัง

การศึกษาในขั้นตอนนี้จะเป็นการศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของหัวมันสำปะหลัง โดยพันธุ์ที่ใช้ในการศึกษา คือ พันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 เพื่อให้ได้ข้อมูลสำคัญประกอบการพิจารณาการออกแบบเครื่องทำความสะอาด เครื่องสับ และถังพักหัวมันสำปะหลังสำหรับผลิตเป็นมันเส้น โดยพารามิเตอร์ที่สนใจคือน้ำหนัก ขนาดและความยาวของหัวมัน ความหนาของเปลือก อัตราส่วนน้ำหนักของเปลือกต่อน้ำหนักทั้งหมดของหัวมัน เป็นต้น



รูปที่ 3-3 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของหัวมันสำปะหลัง

## 2. ถังพัก (Hopper)

ถังพักเป็นอุปกรณ์ตัวแรกในสายการผลิตมันเส้น มีวัตถุประสงค์เพื่อรองรับมันสำปะหลังสำหรับกระบวนการผลิตมันเส้น โดยตัวถังพักถูกออกแบบให้มีความจุเท่ากับ 7.5 ลูกบาศก์เมตร นอกจากนี้ ตัวถังพักยังถูกออกแบบให้มีตะแกรงเขย่าเพื่อกำจัดดินที่ติดมากับหัวมันเบื้องต้น ตะแกรงที่ใช้จะมีขนาดรู 25.4 mm ส่วนกลไกการเขย่าจะอาศัยการติดตั้งเพลายี่งอศูนย์ ซึ่งได้รับกำลังจากมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า ส่วนปริมาณของหัวมันที่ออกมาจากถังพักจะถูกควบคุมโดยบานพับที่ติดตั้งตรงทางออก ลักษณะถังพักที่ทำการออกแบบและสร้างแสดงดังรูปที่ 3-4



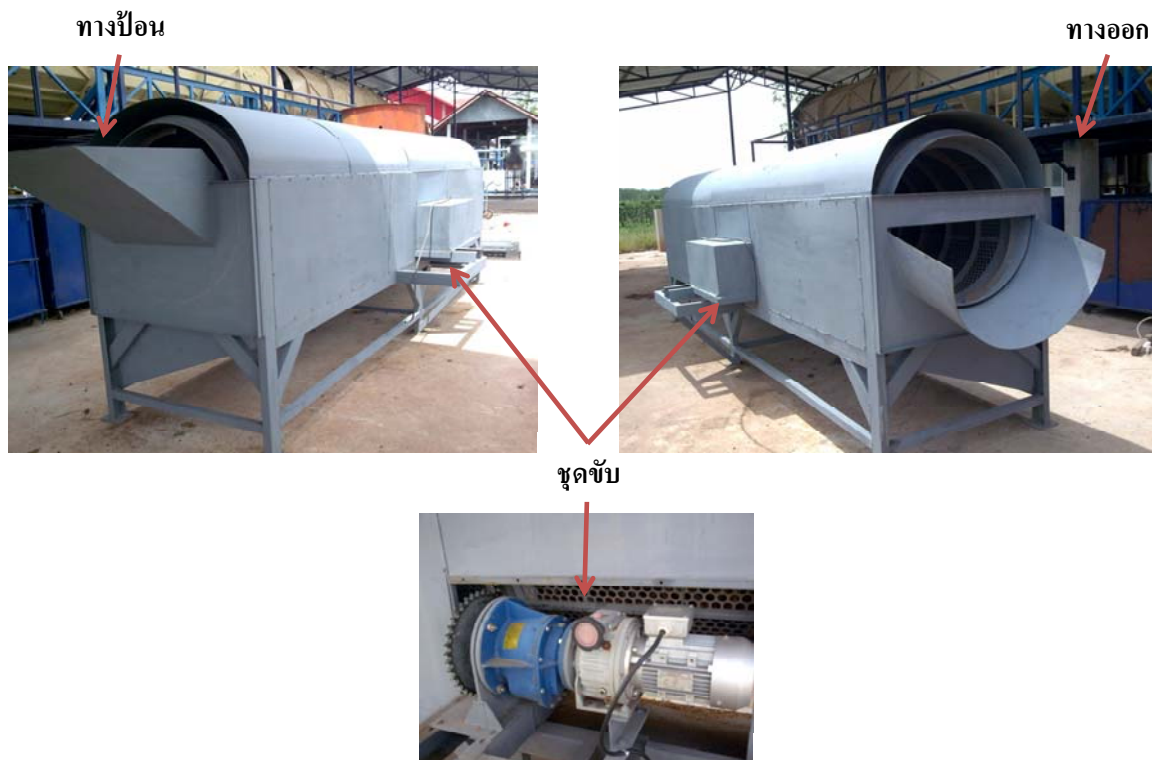
รูปที่ 3-4 ลักษณะถังพักที่ได้ทำการออกแบบและก่อสร้าง



### 3. เครื่องทำความสะอาดหัวมันสำปะหลัง (Trommel-type Cassava Cleaning Machine)

#### 3.1 การออกแบบเครื่องทำความสะอาดหัวมันสำปะหลัง

ชุดทำความสะอาดที่ออกแบบสร้างมาจากแผ่นเหล็กตะแกรงรูกลมขนาด 25.4 mm โดยมีลักษณะเป็นถังทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.0 m และยาว 4.8 m ภายในตะแกรงติดตั้งกริปพาเพื่อทำหน้าที่พามันสำปะหลังสู่ทางออก และติดตั้งใบมีดระหว่างเกลียวของกริปพาในทิศทางตามแนวการไหลของมันสำปะหลังเพื่อทำหน้าที่ขูดเปลือกและสิ่งเจือปนออกจากมันสำปะหลัง ตัวตะแกรงจะถูกปิดด้วยฝาครอบเพื่อลดปริมาณฝุ่นที่ฟุ้งกระจายในอากาศ และด้านล่างของตะแกรงมีพื้นเอียงสำหรับรวบรวมเศษเปลือกมันสำปะหลัง ดิน และสิ่งเจือปน ให้ไหลออกมาทางด้านข้างของเครื่อง ชุดขับเคลื่อนประกอบด้วยมอเตอร์ขนาด 1.5 kW ต่อเข้ากับชุดเกียร์ทดที่สามารถปรับอัตราทดได้



รูปที่ 3-5 เครื่องทำความสะอาดมันสำปะหลังแบบตะแกรงหมุน

#### 3.2 การทดสอบเครื่องทำความสะอาดหัวมันสำปะหลังแบบตะแกรงหมุน

ตัวแปรที่สำคัญที่มีอิทธิพลต่อการทำความสะอาดหัวมันสำปะหลัง คือ ความเร็วรอบของถังตะแกรง ดังนั้นในการทดสอบจึงปรับความเร็วรอบออกเป็น 4 ระดับ คือ 2, 4, 6 และ 8 rpm และคำนวณค่าต่าง ๆ ดังนี้

##### 1) อัตราการทำงาน

อัตราการทำงานสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$Q = \frac{W}{1,000 \times t} \quad (3-2)$$

เมื่อ  $Q$  คือ อัตราการทำงาน (ton/h)  
 $W$  คือ น้ำหนักมันสำปะหลัง (kg)  
 $t$  คือ เวลา (h)

## 2) ประสิทธิภาพการทำความสะอาด

ประสิทธิภาพการทำความสะอาดสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$C = \frac{(M_1 - M_2) \times 100}{1,000 \times t} \quad (3-3)$$

เมื่อ  $C$  คือ ประสิทธิภาพการทำความสะอาด (%)  
 $M_1$  คือ สัดส่วนของเปลือกมันสำปะหลังต่อน้ำหนักมันสำปะหลังรวมก่อนทำความสะอาด (%)  
 $M_2$  คือ สัดส่วนของเปลือกมันสำปะหลังต่อน้ำหนักมันสำปะหลังรวมหลังทำความสะอาด (%)

## 3) การสูญเสียเนื้อมันสำปะหลัง

การสูญเสียเนื้อมันสำปะหลังจากการทำความสะอาด สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$L = \frac{M_L \times 100}{N} \quad (3-4)$$

เมื่อ  $L$  คือ การสูญเสียเนื้อมันสำปะหลังหลังทำความสะอาด (%)  
 $M_L$  คือ น้ำหนักเศษเนื้อมันสำปะหลังรวมหลังทำความสะอาด (kg)  
 $N$  คือ น้ำหนักมันสำปะหลังรวมก่อนทำความสะอาด (kg)

## 4. เครื่องสับหัวมันสำปะหลัง (Cassava Chipper)

### 4.1 ข้อมูลเบื้องต้นในการออกแบบ

จากการศึกษาเครื่องผลิตมันเส้นที่มีใช้กันอยู่ในปัจจุบันจะมีลักษณะของส่วนที่ทำหน้าที่ตัดหัวมันดังรูปที่ 3-6 งานวงกลมนี้จะถูกตัดแต่งให้เป็นใบมีดอยู่ในวงกลมตลอดหน้า แต่ข้อเสียของเครื่องสับหัวมันแบบจากรูนี้คือ ขนาดของมันเส้นที่ได้จะมีลักษณะเป็นก้อน มีขนาดไม่สม่ำเสมอ มีทั้งที่เป็นชิ้นขนาดใหญ่จนถึงเป็นฝุ่นดังรูปที่ 3-7 ทำให้เมื่อนำไปลดความชื้น (ซึ่งส่วนมากจะเป็นการตากแดด) ใช้เวลานาน และความชื้นที่ได้ไม่แน่นอน



รูปที่ 3-6 ลักษณะงานสับของเครื่องตัดหัวมันแบบจานรู



รูปที่ 3-7 ลักษณะมันเส้นที่ได้จากเครื่องตัดหัวมันแบบเจาะรู

#### 4.2 การออกแบบเครื่องสับหัวมันสำปะหลัง

ต้นแบบเครื่องสับมันสำปะหลังถูกออกแบบและพัฒนาขึ้น โดยอาศัยทฤษฎีการตัดและสับ โดยอาศัยแรงกดและแรงเฉือนของใบมีดซึ่งติดตั้งบนแผ่นจานเหล็กที่หมุนอยู่โดยใช้กำลังขับเคลื่อนจากมอเตอร์ หัวมันสำปะหลังจะถูกสับในลักษณะเดียวกันกับการฟาน โดยความหนาของชิ้นมันสับจะขึ้นอยู่กับมุมของชุดใบมีดซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนได้โดยการเพิ่มหรือลดแหวนรองแผ่นจับยึดใบมีด การปรับมุมของชุดใบมีดจะส่งผลต่อช่องว่างระหว่างใบมีดและช่องเปิดของขอบจาน ซึ่งจะส่งผลต่อขนาดความหนาของมันเส้นสับที่ต้องการ โดยกำลังการผลิตตามที่ต้องการ คือ สามารถสับหัวมันสำปะหลังสดได้ประมาณ 30 ตัน/วัน เพื่อผลิตมันเส้นได้ 10 ตัน/วัน รูปเครื่องสับหัวมันสำปะหลังที่ออกแบบแสดงดังรูปที่ 3-8



รูปที่ 3-8 เครื่องสับหัวมันสำปะหลังต้นแบบ

#### 4.3 การทดสอบเครื่องสับมันสำปะหลัง

ค่าชี้วัดผลการทดสอบจะพิจารณาถึงความสามารถในการทำงาน ขนาดเฉลี่ยของชิ้นมัน ค่าพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการสับชิ้นมัน โดยมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังนี้

1) ความสามารถในการทำงานของเครื่องสับ จะวัดจากน้ำหนักของชิ้นมันเส้นที่สับได้ เมื่อเทียบกับช่วงเวลาที่หมดที่ใช้ในการสับ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง) ทั้งนี้โดยกำหนดอัตราการป้อนหัวมันสำปะหลังไว้คงที่เท่ากับ 120 กิโลกรัมต่อนาที

$$\text{ความสามารถในการทำงาน} = \frac{\text{น้ำหนักของชิ้นมันที่สับได้} \times 100}{\text{เวลาที่ใช้ในการสับทั้งหมด}} \quad (3-5)$$

2) ขนาดความกว้างเฉลี่ยของชิ้นมันสับ จะสุ่มวัดจากขนาดความกว้างเฉลี่ยของชิ้นมันที่สับได้และนำไปร่อนผ่านตะแกรงที่ขนาดต่าง ๆ เพื่อนำมาคำนวณหาขนาดเฉลี่ยของชิ้นมันดังแสดงในตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 การกระจายตัวของมันสับ

ขนาดของช่อง ตะแกรง (มม.)	ขนาดของชิ้นมันสับที่ ผ่านช่องตะแกรง (มม.)	ขนาดของชิ้นมันสับ เฉลี่ยบนตะแกรง (มม.)	น้ำหนักของชิ้นมันสับที่ค้าง อยู่บนช่องตะแกรง (กรัม)
25.4	< 25.4	12.7	A
57.0	25.4 - 57.0	41.2	B
110.0	57.0 - 110.0	83.5	C
155.0	110.0 - 155.0	132.5	D

$$\text{ขนาดความกว้างเฉลี่ยชั้นมันสำปะ} = \frac{(12.7 \times A + 41.2 \times B + 83.5 \times C + 132.5 \times D)}{W} \quad (3-6)$$

เมื่อ  $W =$  น้ำหนักของชั้นมันสำปะที่ค้างอยู่บนช่องตะแกรงทั้งหมด

3) ค่าพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการสับ จะคำนวณจากการใช้พลังงานของมอเตอร์ในการสับชั้นมันต่อความสามารถของเครื่องที่สับได้

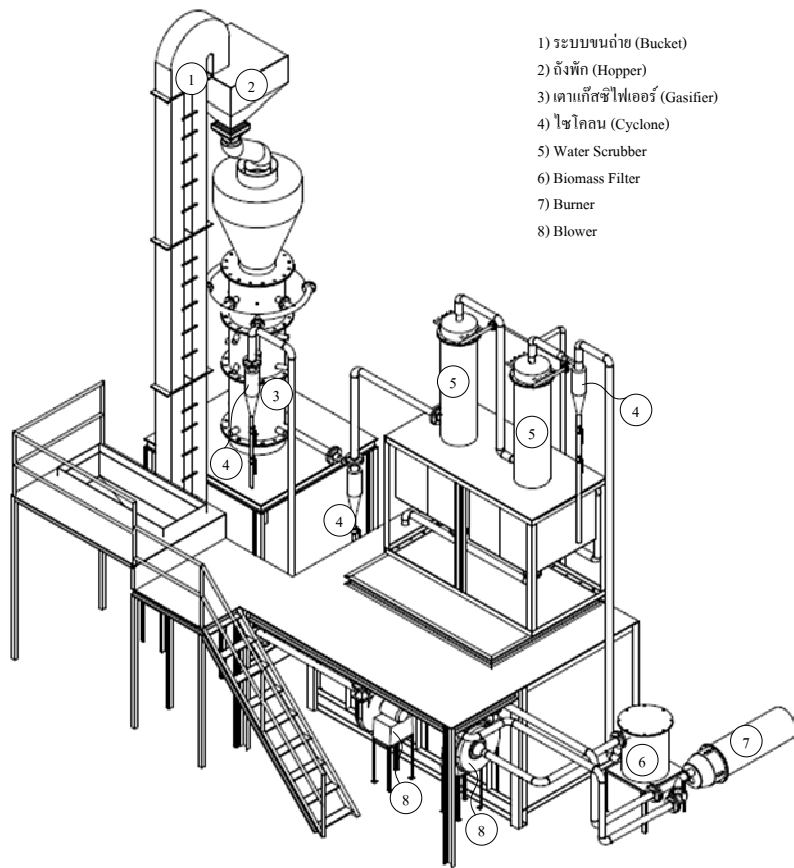
$$\text{ความสามารถในการทำงาน (kJ/kg)} = \frac{\text{กำลังที่ใช้ในการสับ (กิโลวัตต์)} \times 3600}{\text{ความสามารถในการทำงาน (กิโลกรัม/ชั่วโมง)}} \quad (3-7)$$

**ส่วนที่ 3) การศึกษาการอบแห้งมันสำปะด้วยเครื่องอบแบบโรตารีโดยใช้ความร้อนจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน**

### 1. การออกแบบและทดสอบชุดเตาเชื้อเพลิงชีวมวลจากเหง้ามันสำปะหลัง

#### 1.1 ออกแบบสร้างชุดเตาเชื้อเพลิงชีวมวล (Gasifier) จากเหง้ามันสำปะหลัง

ต้นแบบโรงงานผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่ถูกพัฒนาเป็นแบบ Hybrid Gasifier คือมีทั้งระบบ Updraft และ Downdraft การทำงานของระบบคือ วัตถุดิบจะถูกลำเลียงสู่ถังพักเพื่อรอที่จะเข้าสู่เตาแก๊สซิไฟเออร์ หลังจากนั้นวัตถุดิบจะถูกปล่อยลงสู่เตาแก๊สซิไฟเออร์และจะทำให้เกิดปฏิกิริยาขึ้น 4 โซนคือ โซนอบแห้ง (Drying Zone) โซนไพโรไลซิส (Pyrolysis Zone) โซนการเผาไหม้ (Combustion Zone) และ โซนรีดักชัน (Reduction Zone) ในเตาแบบนี้ แก๊สและทาร์ (Tar) ที่เกิดขึ้นในโซนไพโรไลซิสจะถูกดึงออกมาทางด้านบนต่างหาก (Updraft) เพื่อลดปริมาณทาร์ที่จะไหลไปสู่ด้านล่าง (Downdraft) ทาร์ที่มากับ Synthesis Gas นี้จะถูกควบแน่นโดยปล่อยให้ไหลผ่านอุปกรณ์ควบแน่น (Condenser) ส่วน Synthesis Gas ที่เกิดในโซนรีดักชันจะไหลผ่านทางออกด้านล่าง ไปสู่ไซโคลน และ Water Scrubber เพื่อกำจัดฝุ่นและลดอุณหภูมิ แก๊สที่ออกทางด้านล่างนี้จะมีคุณสมบัติเหมาะสมซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ได้ โดยในเบื้องต้นจะนำ Synthesis Gas มาใช้เผาไหม้โดยตรงในหัวเผาไหม้ (Burner) ความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะถูกนำไปใช้เป็นแหล่งความร้อนสำหรับเตาอบแบบหมุน (Rotary Dryer) ต่อไป โดยรูปแบบของโรงงานผลิตแก๊สเชื้อเพลิง โดยเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันแสดงไว้ในรูปที่ 3-9 และ รูปที่ 3-10



รูปที่ 3-9 ผังการออกแบบระบบการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชั่น



รูปที่ 3-10 ลักษณะเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Gasifier)

## 1.2 การทดสอบการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากเหง้ามันสำปะหลัง

### 1) การตรวจวัดคุณสมบัติทางเคมีของเหง้ามันสำปะหลังก่อนป้อนเข้าสู่เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Gasifier)

- วิเคราะห์สมบัติแบบประมาณ (Proximate Analysis) ของเหง้ามันสำปะหลัง โดยใช้ Method ASTM D5142 – 04 และ ASTM D5865-04 ในการวิเคราะห์ %Moisture Content, % Volatile Mater, %Ash, % Fixed Carbon และ ค่าความร้อน (HHV) ตามลำดับ

- วิเคราะห์สมบัติแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) ของเหง้ามันสำปะหลัง โดยใช้เครื่อง CHNS Analyzer ในการวิเคราะห์ธาตุ C, H, N และ S

### 2) วิเคราะห์คุณภาพแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้

- วิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิง โดยใช้เครื่อง Gas Chromatography ยี่ห้อ SIMADSU รุ่น GC-14B)

- คำนวณค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้

การคำนวณค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง (High heating value of producer gas) สามารถคำนวณได้จากสมการ 3-8

$$\text{High heating value of producer gas: } CV_g = \sum X_i H_i \quad (3-8)$$

เมื่อ

$CV_g$  คือ ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง ( $\text{MJ}/\text{Nm}^3$ )

$X_i$  คือ สัดส่วนโดยปริมาตรขององค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิง

$H_i$  คือ ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ )

โดยที่ ( $\text{CO} = 13.1 \text{ MJ}/\text{Nm}^3$ ,  $\text{H}_2 = 13.2 \text{ MJ}/\text{Nm}^3$  และ  $\text{CH}_4 = 41.2 \text{ MJ}/\text{Nm}^3$ )

### 3) การประเมินประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Gasification Efficiency)

Gasification Efficiency ( $\eta_g$ ) = [Rate of energy carried by producer gas]/

[Rate of energy supplied to reactor]

$$\text{Gasification Efficiency } (\eta_g) = [V_g \times \text{HHV}_g] / [m_{\text{fuel}} \times \text{HHV}_{\text{fuel}}] \quad (3-9)$$

เมื่อ

$m_{\text{fuel}}$  คือ ปริมาณการใช้เชื้อเพลิง ( $\text{kg}/\text{hr}$ )

$V_g$  คือ อัตราการไหลของแก๊ส ( $\text{Nm}^3/\text{hr}$ )

$\text{HHV}_{\text{fuel}}$  คือ ค่าความร้อนของเหง้ามันสำปะหลัง ( $\text{MJ}/\text{kg}$ )

$\text{HHV}_g$  คือ ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากเหง้ามันสำปะหลัง ( $\text{MJ}/\text{Nm}^3$ )

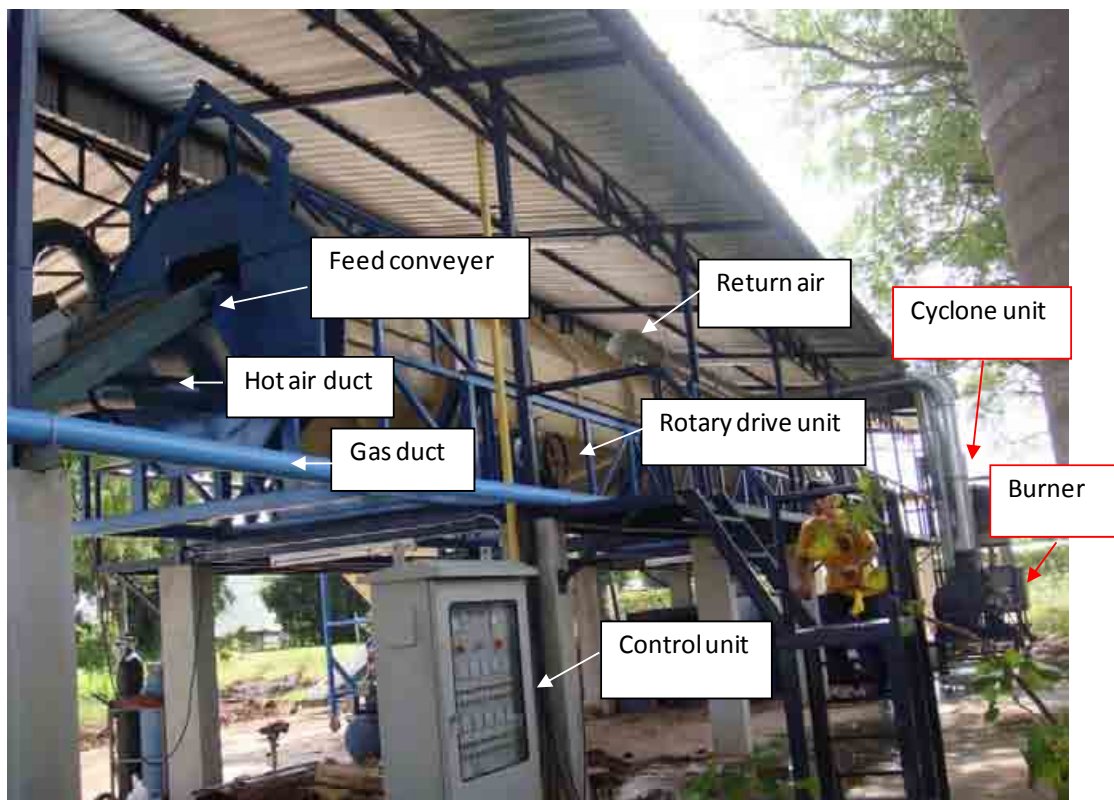
## 2. การทดสอบการอบแห้งมันเส้น

การดำเนินการวิจัยจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นการศึกษาการทำมันเส้นแห้งโดยวิธีการตากลานโดยมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาเพื่อประมาณการต้นทุนในด้านพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง โดยจะทำการศึกษาจากงานวิจัยที่ผ่านมาในด้านอัตราการผลิตต่อพื้นที่ลานตาก และใช้ข้อมูลด้านพลังงานแสงอาทิตย์ของจังหวัดนครราชสีมาจากสถานีตรวจวัดอากาศอัตโนมัติปากช่อง

ส่วนที่สองการอบแห้งมันเส้นด้วยเครื่องอบแห้งโรตารีต้นแบบที่ทำการพัฒนาขึ้นซึ่งจะมีการทำงานต่อเนื่อง ตัวห้องอบมีลักษณะเป็นทรงแปดเหลี่ยม 3 ชุดประกอบเข้าด้วยกัน โดยโรตารีแต่ละชุดจะมีมอเตอร์ขับเคลื่อนที่เป็นอิสระต่อกัน ด้านในมีครีบริบสำหรับพาวัดสุให้เคลื่อน 1 ใบ และครีบริบสำหรับดักวัสดุโรยจำนวน 7 ใบ

### 2.1 วิธีการทดลอง

การทดสอบจะอ้างอิงข้อมูลเบื้องต้นที่ได้ทำการทดสอบเครื่องอบแห้งโรตารีแบบกะซึ่งจากการทดสอบเบื้องต้นพบว่าอุณหภูมิความร้อน 110°C สามารถใช้ทำการอบแห้งมันเส้นจนมาความชื้นต่ำกว่า 14 % db. ได้ภายใน 5 ชั่วโมงที่ปริมาณการบรรจุ 42% ซึ่งเป็นตัวกำหนดเวลาสูงสุดที่มันต้องอยู่ภายในโรตารี หลังจากนั้นทำการดัดแปลงเครื่องอบแห้งโรตารีแบบต่อเนื่องที่มีอยู่แล้ว เช่น การปรับลักษณะของครีบริบภายใน ความเร็วรอบของโรตารี ระบบท่อร้อนภายใน เพื่อให้ได้ลักษณะมันและกำลังการผลิตที่ต้องการ ลักษณะเครื่องอบโรตารีที่ใช้ในการทดลองนี้แสดงดังรูปที่ 3-11



รูปที่ 3-11 ลักษณะเครื่องอบโรตารีแบบต่อเนื่อง



การทดสอบอบแห้งมันเส้น โดยใช้เครื่องอบแห้งแบบโรตารีแบบหมุนต่อเนื่องมีขั้นตอน ดังนี้

1. ทำการสับมันเส้นโดยใช้เครื่องสับเพื่อให้ได้ความหนาของชิ้นมันเส้นที่สม่ำเสมอ ลักษณะของชิ้นมันสดที่ผ่านการสับด้วยเครื่องสับมันเส้น ดังแสดงในรูปที่ 3-12



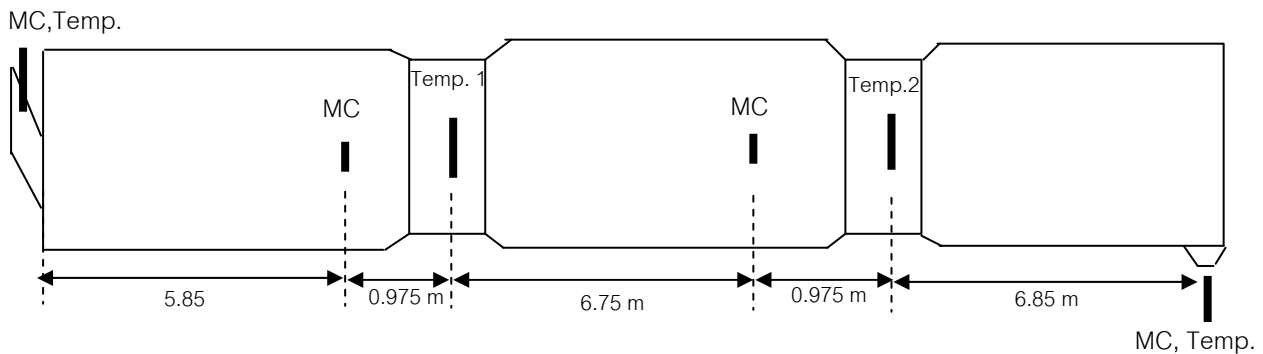
รูปที่ 3-12 ลักษณะของชิ้นมันเส้นที่ผ่านการสับด้วยเครื่องสับมัน

2. ทำการสุ่มตัวอย่างมันเส้นที่ผ่านการสับจำนวน 5 ตัวอย่าง เพื่อไปหาความชื้นเริ่มต้น ด้วยเครื่องหาความชื้นแบบอินฟราเรด (รูปที่ 3-13)



รูปที่ 3-13 การหาความชื้นมันด้วยเครื่องหาความชื้นวัสดุแบบอินฟราเรด

3. ทำการตั้งค่าการทำงานของเครื่องอบแห้งโรตารีดังนี้: ความเร็วรอบของโรตารี 1 rpm อัตราการไหลของอากาศ 255.6 m<sup>3</sup>/s
4. ทำการเปิดระบบ Gasification เพื่อนำแก๊สเข้าสู่เตาเผา เพื่อทำการอุ่นอากาศอบแห้ง
5. ในระหว่างทำการอบแห้ง ทุกๆ 1 ชั่วโมงจะทำการวัดอุณหภูมิของอากาศร้อนที่ตำแหน่งต่างๆ ของโรตารี ดังแสดงในรูปที่ 3-14



MC คือ ตำแหน่งหาความชื้นมัน Temp. คือ ตำแหน่งวัดอุณหภูมิอากาศ

รูปที่ 3-14 ตำแหน่งวัดอุณหภูมิร้อนและความชื้นมันบนเครื่องอบโรตารี

6. ในระหว่างการอบแห้งจะทำการสูมตัวอย่างมันออกมาหาความชื้นที่ตำแหน่งเก็บตัวอย่างตามความยาวของโรตารี ดังแสดงในรูปที่ 3-14

## 2.2 การประเมินสมรรถนะ

การประเมินสมรรถนะของการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งโรตารีต้นแบบ จะทำการประเมินจาก อัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR) โดยคิดจากปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุต่อระยะเวลาในการอบแห้ง มีหน่วยเป็น kg/h

$$DR = \frac{m_{pi} - m_{pf}}{t} \quad (3-10)$$

เมื่อ  $m_{pi}$  = น้ำหนักวัสดุก่อนอบแห้ง (kg)

$m_{pf}$  = น้ำหนักวัสดุหลังอบแห้ง (kg)

$t$  = เวลาทั้งหมดที่ใช้ในการอบแห้ง (h)

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) คือ ค่าพลังงานที่ใช้ต่อปริมาณน้ำระเหย มีหน่วยเป็น MJ/kg

$$SEC = \text{พลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง} / \text{ปริมาณน้ำระเหย}$$

$$= (\text{พลังงานจากระบบไฟฟ้า} + \text{พลังงานความร้อนจากแก๊สที่ได้จากกระบวนการ Gasification}) / \text{ปริมาณน้ำระเหย}$$

$$= (3.6Pe) + (Q \times t \times HV) / \text{ปริมาณน้ำระเหย} \quad (3-11)$$

Pe = ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kWh)

Q = อัตราการไหลของแก๊ส (m<sup>3</sup>/h)

HV = ค่า Heating value ของแก๊ส (MJ/m<sup>3</sup>) ซึ่งหาได้จากการวิเคราะห์แก๊สที่ได้จาก

กระบวนการ Gasification ด้วยเครื่อง Gas Chromatography

#### **ส่วนที่ 4) การศึกษาการรวบรวมแปรรูปเหง้ามันสำปะหลังสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล ในภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม**

ในส่วนการศึกษาการรวบรวมแปรรูปเหง้ามันสำปะหลังเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลแบ่งออกเป็น

##### **1) การศึกษาลักษณะและการเก็บเกี่ยวเหง้ามันสำปะหลังไปถึงการประเมินความสามารถในการนำเหง้ามันสำปะหลังมาใช้เป็นพลังงาน**

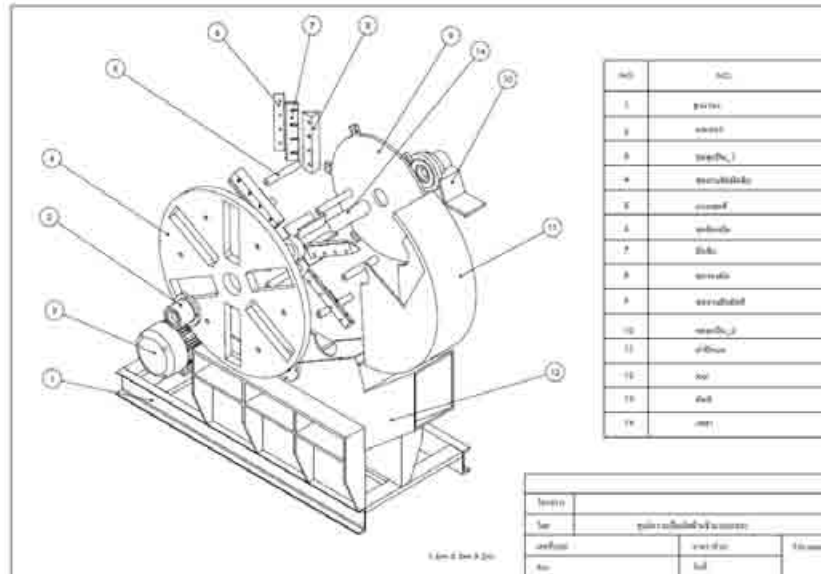
ทำการสำรวจลักษณะการเกี่ยวหัวมันสำปะหลังในจังหวัดนครราชสีมา และทำการเก็บข้อมูลในแปลงเกษตรกรในเขตอำเภอเมือง แบบสุ่ม ตำบลละ 3 แปลง โดยไม่ซ้ำสายพันธุ์กัน (หัวยง 60: HB 60, ระยอง 90: R90 และ เกษตรศาสตร์ 50: KU50) แต่ละแปลงทำการเก็บข้อมูล 18 ซ้ำ โดยค่าที่สนใจคือน้ำหนักมันสำปะหลังต่อไร่ น้ำหนักเหง้ามันต่อไร่ และสัดส่วนเหง้ามันสำปะหลังต่อเหง้ามันสำปะหลัง หลังจากนั้นนำข้อมูลที่ได้อาประเมินศักยภาพในการนำเหง้ามันสำปะหลังมาเป็นพลังงาน

##### **2) การออกแบบและทดสอบเครื่องสับย่อยเหง้ามันสำปะหลังเพื่อใช้เป็นพลังงาน**

ในการศึกษาครั้งนี้ เครื่องสับย่อยเหง้ามันถูกออกแบบให้สามารถเคลื่อนที่ได้ (Mobile Chopper) โดยจะอาศัยการต่อพ่วงเข้ากับรถแทรกเตอร์ และได้รับกำลังจากเครื่องยนต์ดีเซล ในเบื้องต้นจะทดสอบโดยใช้มอเตอร์ขนาด 30 แรงม้า เพื่อหาพลังงานที่ต้องการในการสับเหง้ามันสำปะหลังก่อน หลังจากนั้นนำค่าที่ได้ไปทำการเลือกเครื่องยนต์ต้นกำลังในการสับ เครื่องที่ได้ทำการออกแบบมีคุณลักษณะดังต่อไปนี้

<b>ขนาด (มม)</b>	: 1450x830 x1150 (กว้าง x ยาว x สูง)
<b>น้ำหนัก(กิโลกรัม)</b>	: 850 กิโลกรัม (ไม่รวมต้นกำลัง)
<b>ต้นกำลัง (แรงม้า)</b>	: มอเตอร์ 30 แรงม้า (22 kW) : KOMUTSU ขนาด 80 แรงม้า (60 kW)
<b>อัตราทด</b>	: 1:1.5 (พูลเลย์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4:6 นิ้ว) : 1:2.4 (พูลเลย์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5:12 นิ้ว)
<b>ระบบถ่ายทอดกำลัง</b>	: สานพานร่อน B จำนวน 4 เส้น

**ลักษณะชุดใบมีด** : มุมใบมีด 30 องศา ทำจากเหล็กกล้าคุณภาพสูง เกรด SKD 11 มีคุณสมบัติเป็นใบมีดตัด โลหะ ผ่านการชุบแข็ง มีความแข็งระหว่าง 50-62 HRC จำนวน 4 ใบ



รูปที่ 3-15 แบบเครื่องต้นแบบเครื่องสับข่อยแห้งมันสำปะหลัง

#### 4. การคำนวณหาพลังงานที่ใช้ในการสับแห้งมันสำปะหลัง

$$\text{การคำนวณแรงบิด (T) = F x R} \tag{3-12}$$

$$\text{การคำนวณกำลัง (P) = T x } \omega \tag{3-13}$$

เมื่อ

$$T = \text{แรงบิด}$$

$$P = \text{กำลัง}$$

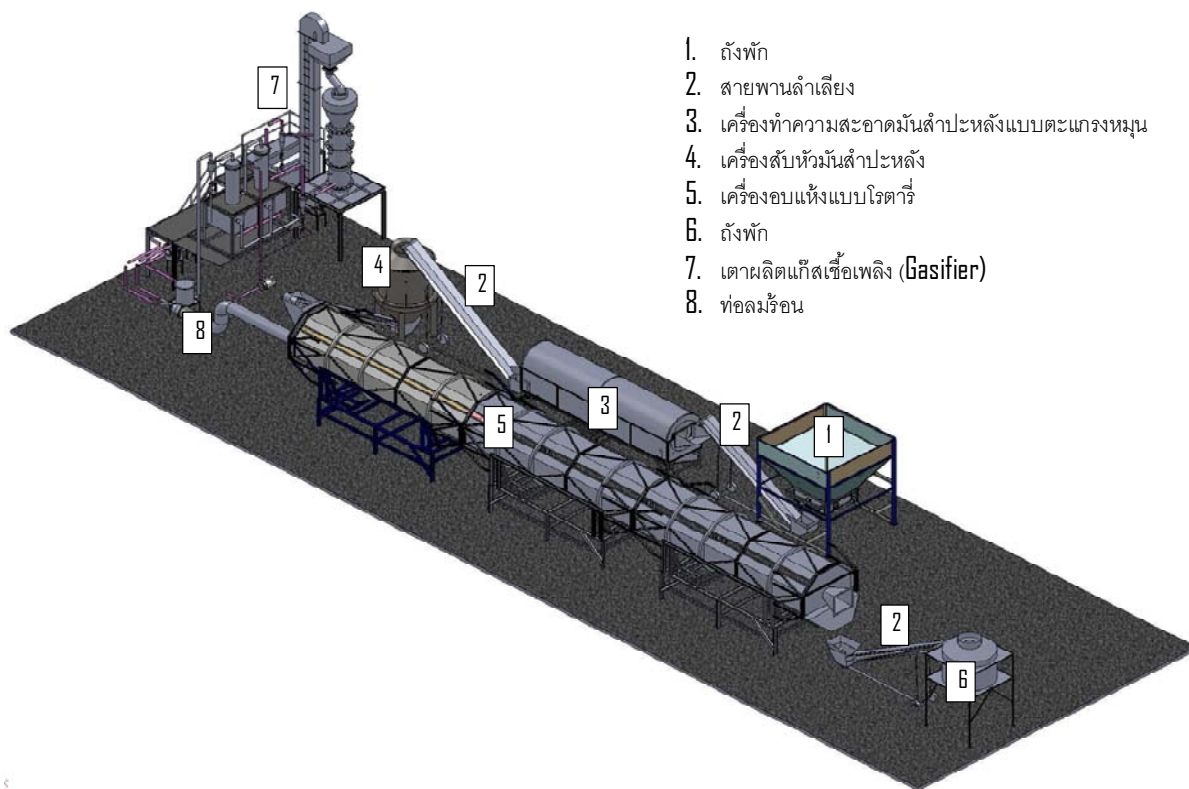
$$\omega = \text{ความเร็วรอบ (ใช้ 900 rpm เป็นความถี่ที่เหมาะสมต่อการออกแบบเครื่องสับ)}$$

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์

การวิจัยครั้งนี้เป็นพัฒนากระบวนการผลิตมันเส้นรูปแบบใหม่ เพื่อผลิตเป็นวัตถุดิบให้กับอุตสาหกรรมเอทานอลอย่างต่อเนื่อง โดยนำเศษหังมันมาผลิตเป็นแก๊สเชื้อเพลิง นอกจากนั้น ยังพิจารณานำผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง คือ กากมันสำปะหลัง มาศึกษาและออกแบบวิธีการลดความชื้นโดยอาศัยหลักการเอ็กซ์ทรูชัน เพื่อลดเวลาและพื้นที่ในการลดความชื้นจากวิธีปกติ (การตากบนลานปูน) ภาพรวมของโครงการถูกแบ่งออกเป็นการศึกษา 4 ส่วนใหญ่ ๆ ด้วยกันคือ **ส่วนที่ 1** การออกแบบเครื่องลดความชื้นกากมันสำปะหลังเพื่อกำหนดหลักการเอ็กซ์ทรูชันเพื่อลดความชื้นกากมันสำปะหลังสด **ส่วนที่ 2** การศึกษาต้นแบบเครื่องสับมันสำปะหลังเพื่อการผลิตมันเส้นสำหรับอุตสาหกรรมเอทานอล ในส่วนนี้จะรวมการออกแบบและก่อสร้าง Hopper เครื่องทำความสะอาดมันสำปะหลังแบบตะแกรงหมุน (Trommel-Type Cassava Cleaning Machine) และ เครื่องสับ (Cassava Chipper) **ส่วนที่ 3** การศึกษาการอบแห้งมันเส้นด้วยเครื่องอบแบบโรตารีโดยใช้ความร้อนจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ส่วนนี้จะประกอบด้วย การออกแบบและสร้างชุดเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Gasifier) จากหังมันสำปะหลัง และ การทดสอบการอบแห้งมันเส้นเบื้องต้นด้วยเครื่องอบแห้งแบบหมุน และ **ส่วนที่ 4** การศึกษาการรวบรวมแปรรูปหังมันสำปะหลังสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลในภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม ซึ่งจะเน้นการสร้างเครื่องสับย่อยหังมันสำปะหลังแบบเคลื่อนที่ (Mobile Chopper)

ภาพรวมของโครงการในส่วนของกระบวนการผลิตมันเส้นสะอาดสามารถแสดงในรูปที่ 4-1 กระบวนการเริ่มต้นโดย หังมันสำปะหลังสดที่ได้มาจากแปลงเกษตรกรจะถูกเทลงสู่ถังพัก (Hopper) โดยอาศัยรถแทรกเตอร์ตักหน้า ตัวถังพักนี้จะถูกออกแบบให้มีตะแกรงเขย่าที่ด้านล่างเพื่อกำจัดเศษดินและชิ้นส่วนที่มีขนาดเล็กออกไปส่วนหนึ่ง หลังจากนั้น หังมันสำปะหลังจะถูกลำเลียงต่อไปสู่เครื่องทำความสะอาดแบบตะแกรงหมุน ภายในเครื่องทำความสะอาดนี้จะติดตั้งครีบทาเพื่อพาหังมัน ไปสู่ทางออก และระหว่างครีบทาจะบิดไปมิดตามทิศทางการไหลของหังมันเพื่อให้ทำหน้าที่ขูดดินและสิ่งสกปรกที่ติดแน่นให้หล่นลงสู่ด้านล่าง เมื่อหังมันผ่านเครื่องทำความสะอาดจะไหลผ่านสายพานลำเลียงเพื่อเข้าไปสู่เครื่องสับต่อไป หังมันเมื่ออยู่ในเครื่องสับจะถูกสับโดยการหมุนของใบมีดในแนวระดับ ซึ่งจะอาศัยน้ำหนักของหังมันที่กดทับลงไปและแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity Force) เมื่อได้มันเส้นตามที่ต้องการแล้วจะถูกส่งต่อไปเข้าเครื่องอบแห้งแบบหมุน (Rotary Dryer) ซึ่งถูกออกแบบให้สามารถผลิตมันเส้นแห้ง 10 ตัน/วัน ที่ความชื้นประมาณ 13-14% w.b. เครื่องอบแห้งนี้จะได้รับความร้อนจากเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงซึ่งจะใช้หังมันสำปะหลังเป็นเชื้อเพลิง แก๊สที่ผลิตได้นี้จะถูกเผาในหัวเผา (Burner) แล้วพาความร้อนเข้าสู่เครื่องอบต่อไป มันเส้นแห้งที่ได้หลังจากเครื่องอบจะถูกนำไปเก็บไว้ในถังเก็บวัตถุดิบ



รูปที่ 4-1 กระบวนการผลิตมันเส้น โดยใช้ความร้อนจากเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

**ส่วนที่ 1)** การออกแบบเครื่องลดความชื้นกากมันสำปะหลังเป็ยใช้หลักการเอ็กซ์ทรูชันเพื่อลดความชื้นกากมันสำปะหลังสด

### 1. คุณสมบัติของกากมันสำปะหลัง

1.1 คุณสมบัติทั่วไป ลักษณะทั่วไปของกากมันสำปะหลังมีลักษณะจับตัวกันเป็นก้อนแบบหลวม ลักษณะของอนุภาคมีลักษณะเป็นเส้นใยผสมกับแป้ง สีเป็นสีขาว และสามารถอุ้มน้ำได้ดี ดังแสดงในรูปที่ 4-2



รูปที่ 4-2 ลักษณะทั่วไปของกากมันสำปะหลัง

## 1.2 คุณสมบัติทางกายภาพ

1) **ความหนาแน่น** ผลการวัดและคำนวณความหนาแน่นของกากมันสำปะหลังเป็นไปตามตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 ผลการทดลองค่าความหนาแน่น

ตัวอย่าง	น้ำหนักกล่อง (kg)	น้ำหนักกล่อง + น้ำหนักกากมันเปียก (kg)	น้ำหนักกากมัน (kg)	ความหนาแน่น kg/m <sup>3</sup>
1	3.05	8.55	5.50	687.50
2	3.05	8.95	5.90	737.50
3	3.05	8.75	5.70	712.50

ค่าความหนาแน่นเปียกเฉลี่ยเท่ากับ 712.5 kg/m<sup>3</sup> ภาชนะบรรจุปริมาตรเท่ากับ 0.008 m<sup>3</sup>

2) **ค่าความชื้นเปียก** ผลการวัดค่าความชื้นเปียกเป็นไปตามตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 ผลการทดลองหาค่าความชื้นเปียกของกากมันสำปะหลัง

ตัวอย่าง	น้ำหนัก จาน (กรัม)	น้ำหนักจาน + กากมัน ก่อนอบ (กรัม)	น้ำหนักจาน + กากมัน หลังอบ (กรัม)	น้ำหนักกากมัน ก่อนอบ (กรัม)	น้ำหนักกาก มันหลังอบ (กรัม)	น้ำหนักน้ำ ที่หายไป (กรัม)	% ความชื้น เปียก
1	9.20	62.87	20.91	53.67	11.17	41.96	78.18 %
2	11.39	68.09	23.69	56.70	12.30	44.4	78.31 %
3	9.26	71.26	22.87	62.00	13.61	48.39	78.05 %
4	11.09	69.88	24.22	58.79	13.13	45.66	77.67 %
5	9.59	89.46	28.58	79.87	18.99	60.88	76.22 %
6	10.99	85.25	28.14	74.26	17.15	57.11	76.91 %
7	11.13	83.29	27.39	72.16	16.26	55.90	77.47 %
8	9.21	75.46	24.36	65.25	15.15	51.10	77.13 %

ความชื้นแบบเปียกเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 77.49 % ความชื้นเปียก

3) **ค่าความหนืด**

ค่าความหนืดของกากมันสำปะหลังเป็นไปตามสมการที่ 3-1 เมื่อนำค่า K, n, และ  $\lambda$  ที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีการถดถอยแบบไม่เชิงเส้นแทนลงในสมการที่ 4-1 สามารถเขียนสมการความหนืดของกากมันสำปะหลังได้

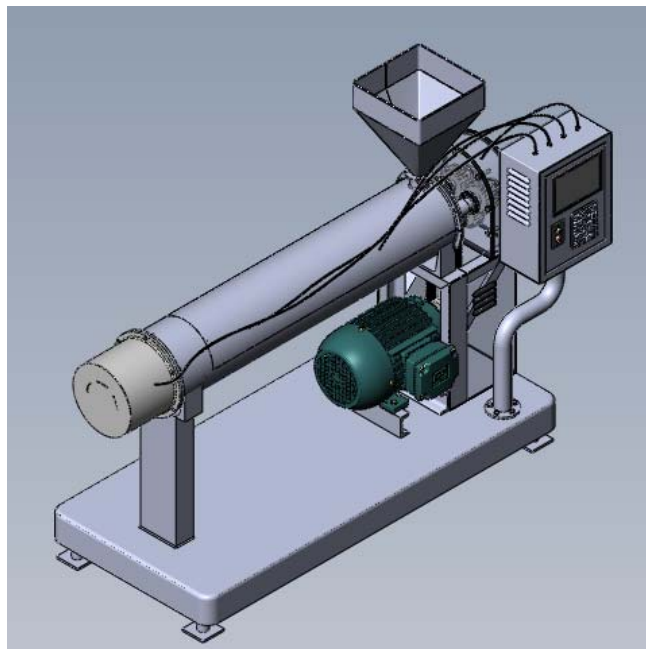
$$\eta = 619 \left\{ (2) \dot{\gamma} \right\}^{0.37-1} \quad (4-1)$$

### 1.3 คุณสมบัติทางกล

ผลจากการวัดค่าความเค้นอัดพบว่าค่าความเค้นอัดที่สามารถอัดกากมันสำปะหลังให้ออกจากหัวคายนและรีดน้ำออกได้ประมาณ 20% จากความชื้นตั้งต้นต่อหนึ่งรอบการกดอัดมีค่าประมาณ 10 MPa

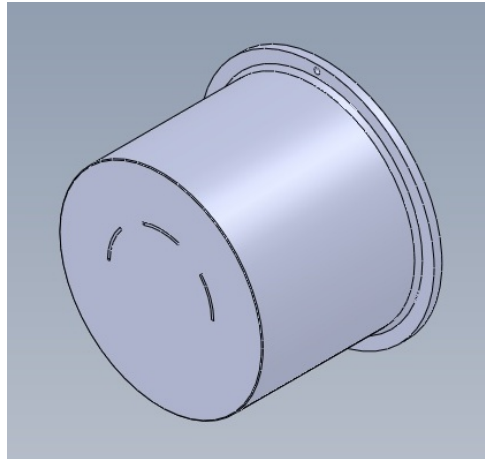
## 2. การออกแบบ

ต้นแบบเครื่องลดความชื้นกากมันสำปะหลังเป็นการออกแบบและพัฒนาขึ้น โดยอาศัยทฤษฎีการออกแบบแบบสกรูอัดรีดหรือเทคโนโลยีเอกซ์ทราซัน ต้นแบบเครื่องกำหนดให้เป็นชนิดสกรูคู่ (Twin screw) แบบชนิดหมุนตามกัน (Co-Rotating) เป็นระบบลำเลียงและสร้างแรงอัดให้กับกากมันสำปะหลัง ลักษณะของแบบและมิติของชุดสกรูคู่ นั้นได้รับการออกแบบให้เหมาะกับกระบวนการลดความชื้นของกากมันสำปะหลัง พร้อมกันนั้นได้ออกแบบชุดคายนให้มีลักษณะเฉพาะเพื่อให้สามารถกำจัดน้ำและลำเลียงกากมันในชุดเดียวกัน ภาพต้นแบบชิ้นส่วนหลักของสกรูคู่รวมถึงคายน (Die) เครื่องลดความชื้นกากมันสำปะหลังที่แสดงในรายงานฉบับนี้เป็นต้นแบบพื้นฐานเพื่องานวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีและมิติของเครื่องลดความชื้นของกากมันสำปะหลังดังแสดงไว้ในรูปที่ 4-3 รายละเอียดของต้นแบบเครื่องโดยสมบูรณ์ซึ่งครอบคลุมอุปกรณ์ภายนอก เช่น มอเตอร์ หรือว่ากลไกการขับเคลื่อนต่างๆ ได้แสดงในเอกสารภาคผนวก สำหรับการวิเคราะห์นั้นได้ให้ความสนใจมิติของสกรูในส่วนตวงวัด (Metering Section) หรือส่วนปลายทางออก เพราะเป็นตำแหน่งที่บ่งบอกถึงความสามารถในการอัดรีดน้ำให้หลุดออกจากกากมันสำปะหลัง ลักษณะหัวคายนที่ทำการออกแบบได้แสดงไว้ในรูปที่ 4-4 สำหรับรูปที่ 4-5 แสดงลักษณะหน้าตัดภายในของหัวคายน

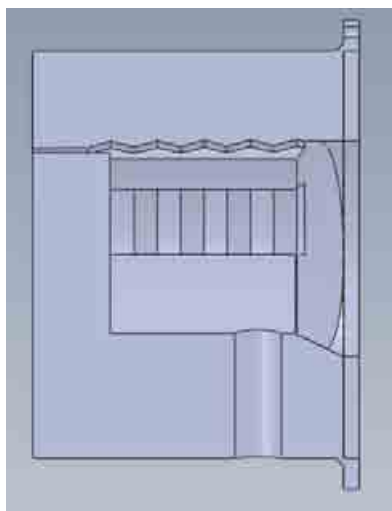


รูปที่ 4-3 ภาพประกอบต้นแบบเครื่องลดความชื้นกากมันสำปะหลัง



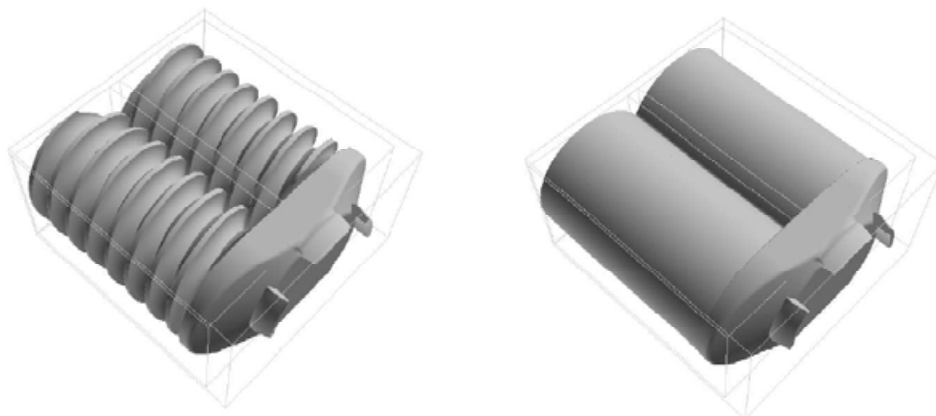


รูปที่ 4-4 ภาพลักษณะหัวคายน

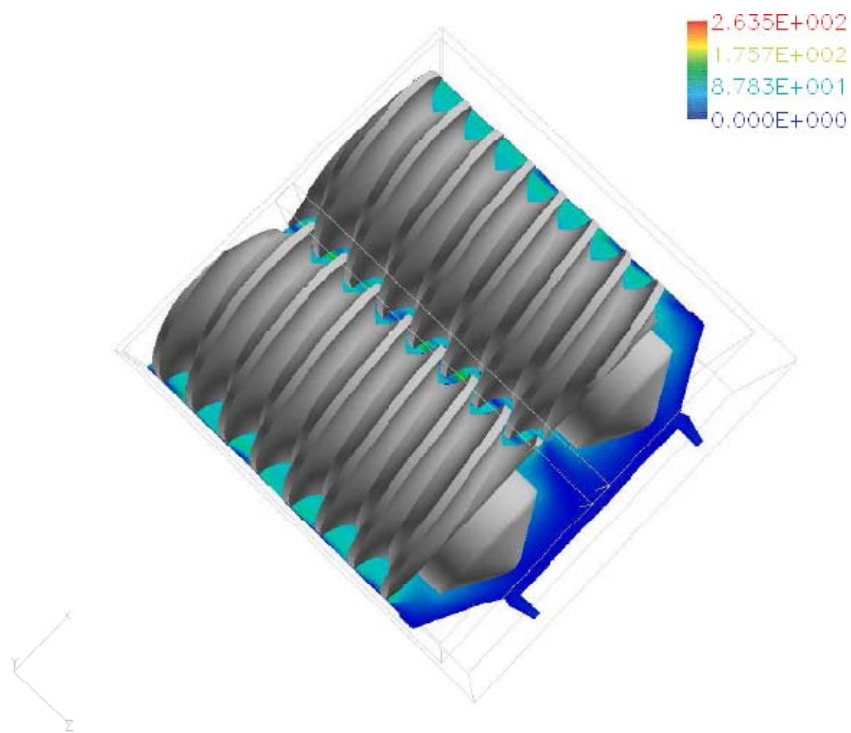


รูปที่ 4-5 แสดงลักษณะหน้าตัดภายในของหัวคายนแบบ

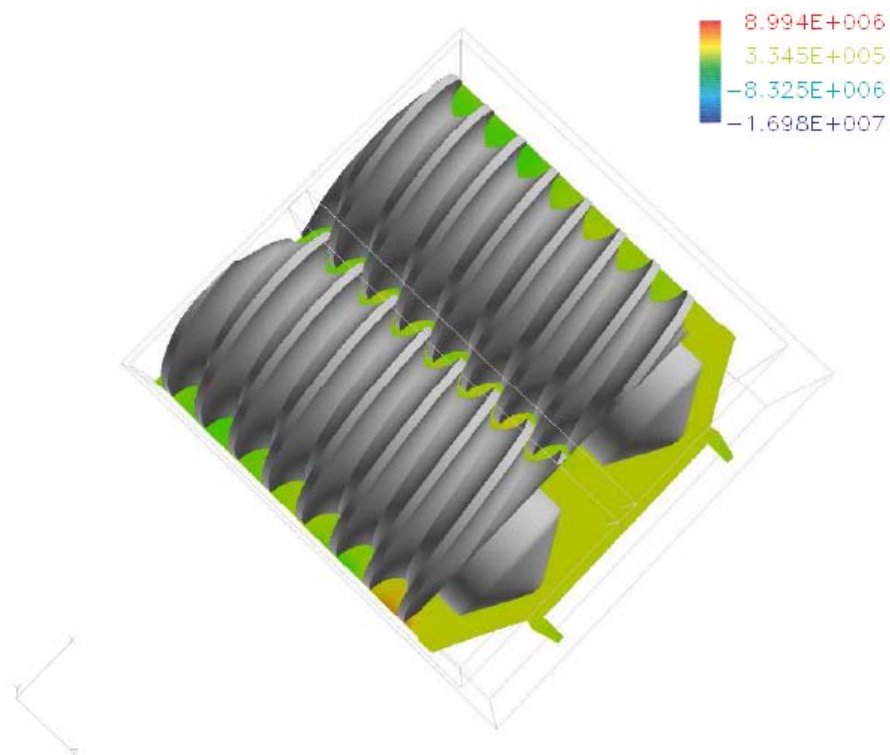
ผลการจำลองเบื้องต้นด้วยซอฟต์แวร์ POLYFLOW ได้ทำการวิเคราะห์ในส่วนส่วนตวงวัด (Metering section) ซึ่งต่อเชื่อมกับชุดหัวคายน สำหรับความเร็วรอบของการหมุนของสกรูคงที่ที่ 25 , 50 และ 75 รอบต่อนาที ผลการวิเคราะห์ได้แสดงในรูปที่ 4-6 ถึง รูปที่ 4-10



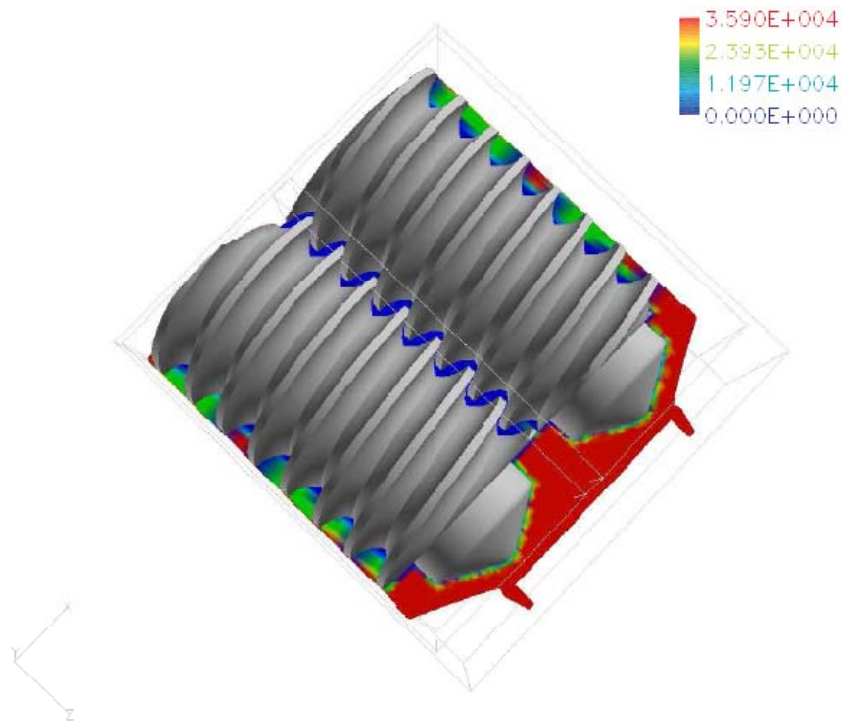
รูปที่ 4-6 รูปแสดงส่วนแบ่งของชุดสกรูคู่ที่ใช้เพื่อการจำลองพฤติกรรมกรอัดตัวของกากมันสำปะหลังเพื่อการออกแบบเครื่องลดความชื้นกากมันสำปะหลัง



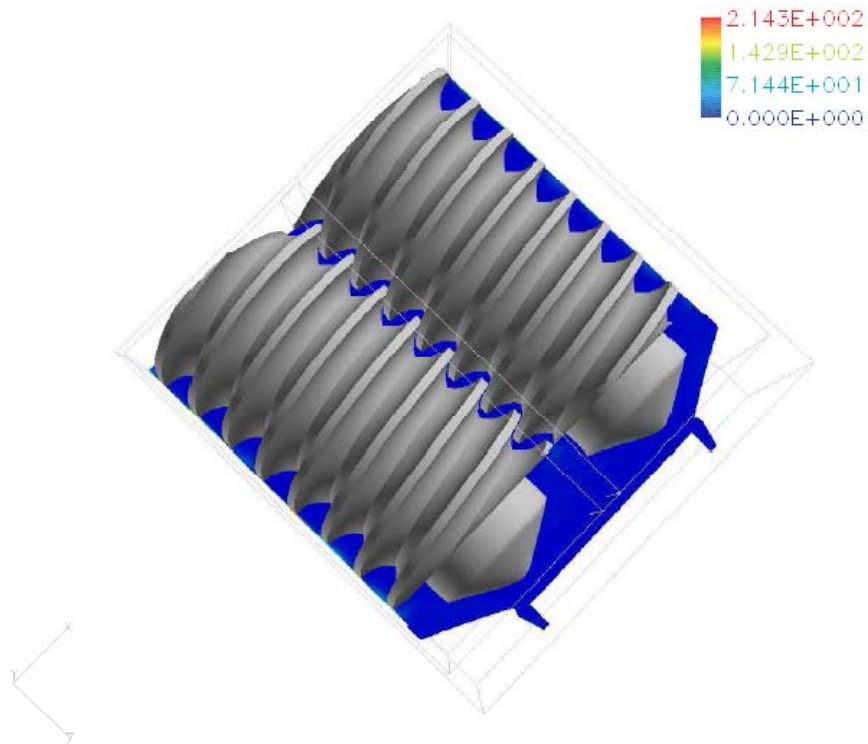
รูปที่ 4-7 ผลการจำลองความเร็ว (mm/s) ของกากมันสำปะหลังขณะถูกอัดรีดผ่านหัวคาย



รูปที่ 4-8 ผลการจำลองความดัน (Pa) ของกากมันสำปะหลังขณะถูกอัดรีดผ่านหัวคาย



รูปที่ 4-9 ผลการจำลองความหนืด (Pa.s) ของกากมันสำปะหลังขณะถูกอัดรีดผ่านหัวคายน



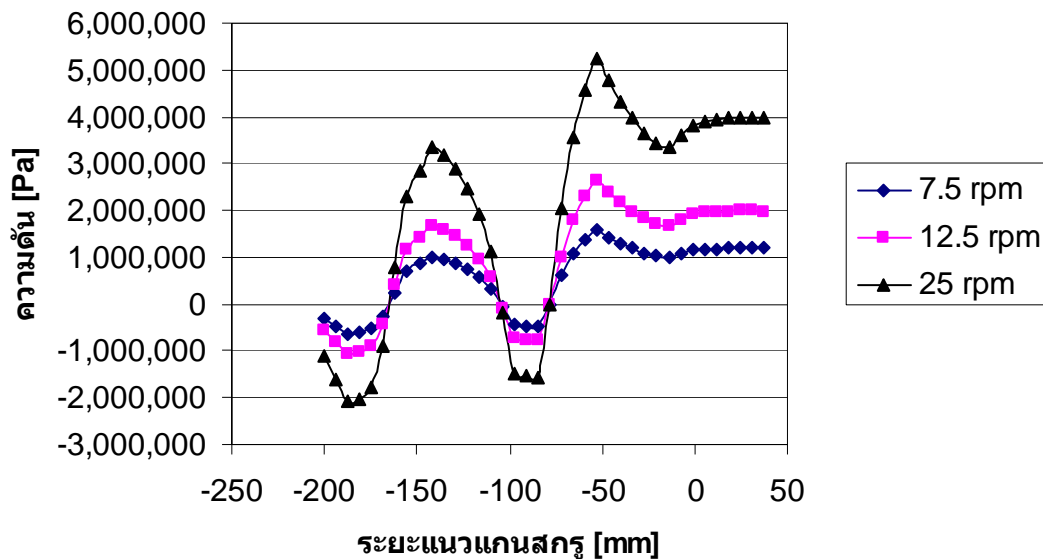
รูปที่ 4-10 ผลการจำลองอัตราเฉือน (1/s) ของกากมันสำปะหลังขณะถูกอัดรีดผ่านหัวคายน

### 3. ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับความเร็รรอบ

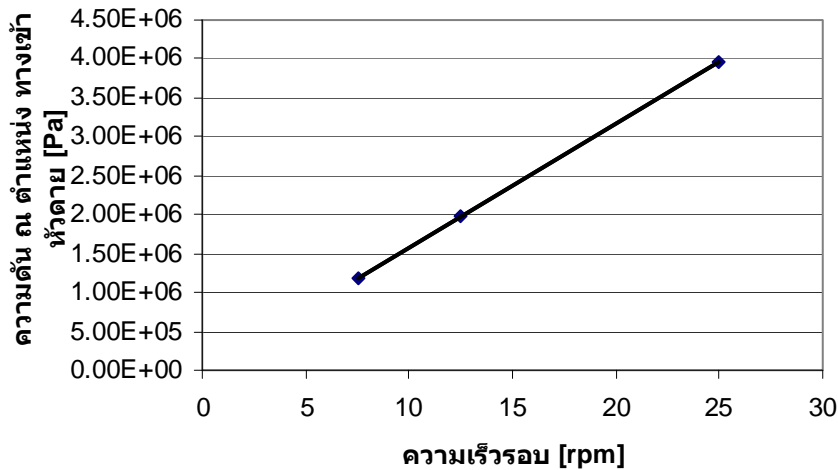
การจำลองพฤติกรรมการอัดตัวโดยแบบของชุดสกรูอัดรีดและหัวคายที่นำเสนอในที่หลายความเร็รรอบหมุนเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนี้ต่อความดันที่ปรากฏในก้ามมันสำปะหลังพบว่าความดันมีค่าแปรเปลี่ยนขึ้นกับความเร็รรอบหมุน โดยความดันขึ้นกับระยะตามแนวแกนกลางสกรูจนถึงปลายทางเข้าของหัวคาย (ตำแหน่งศูนย์วัดที่สุดปลายเกลียวสกรู) มีภาพดังปรากฏในรูปที่ 4-11 และความสัมพันธ์ระหว่างความดัน ณ ตำแหน่งก่อนเข้าส่วนขึ้นรูปของหัวคาย กับความเร็รรอบหมุนสกรูพบว่าเป็นฟังก์ชันแบบเชิงเส้นกับค่าความเร็รรอบเป็นดังแสดงในรูปที่ 4-12 ซึ่งมีสมการดังนี้

$$P = 158654n \quad (4-2)$$

เมื่อ  $n$  = ความเร็รรอบหมุนสกรู (rpm) และ  
 $P$  = ความดันที่ปรากฏในก้ามมันสำปะหลัง (Pa)



รูปที่ 4-11 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันขึ้นกับระยะตามแนวแกนกลางสกรูจนถึงปลายทางเข้าของหัวคาย (ตำแหน่งศูนย์วัดที่สุดปลายเกลียวสกรู)



รูปที่ 4-12 ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน ณ ตำแหน่งทางเข้าหัวคायกับ ความเร็วรอบสกรู

ผลของความเร็วยรอบหมุนสกรูที่มีต่อความดัน ณ ตำแหน่งทางเข้าหัวคाय ดังแสดงในรูปที่ 4-12 พบว่าเมื่อสกรูหมุนด้วยรอบที่สูงขึ้นความดันจะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าที่ความเร็วรอบเพิ่มขึ้นมีผลต่อความดันโดยตรง แต่ด้วยความดันที่ปรากฏ ณ ตำแหน่งทางเข้าหัวคाय เพิ่มสูงมากขึ้นซึ่งทำให้มีแรงกระทำต่อปลายสกรูเพิ่มมากขึ้นด้วยส่งผลให้ต้องใช้อัตอร์ต้นกำลังที่มีขนาดใหญ่ขึ้นมาก จากค่าความดันที่ได้จากการจำลองสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการทดลองการกวดอัดซึ่งพบว่าสามารถลดความชื้นกากมันสำปะหลังได้ 20 เปอร์เซ็นต์เทียบกับความชื้นเริ่มต้น

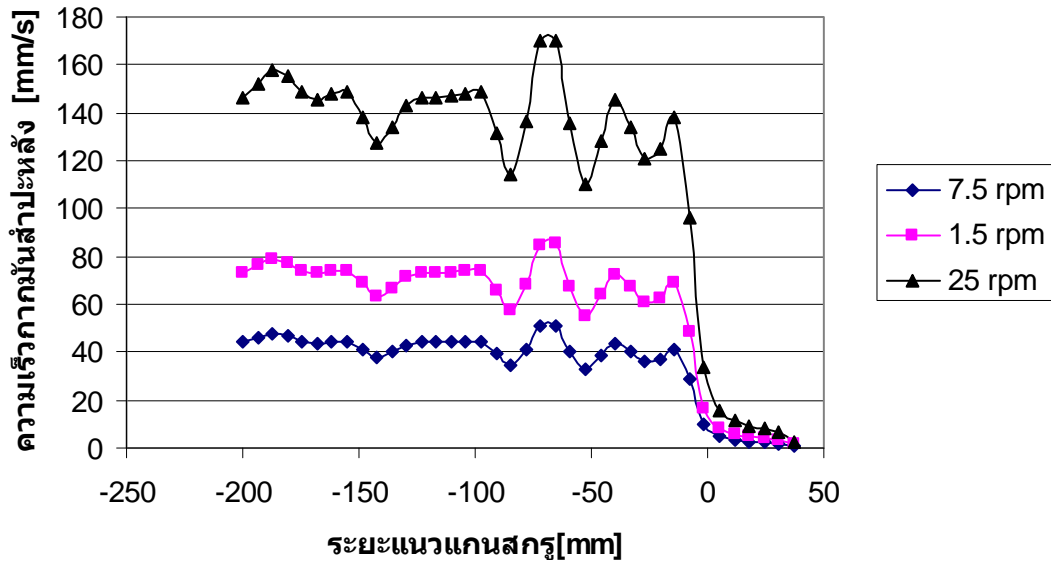
#### 4. ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของกากมันสำปะหลังกับความเร็วยรอบหมุนสกรู

ผลการจำลองพฤติกรรมกวดอัดตัวโดยแบบของชุดสกรูอัดรีดและหัวคायที่นำเสนอขึ้นเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันต่อความเร็วยรอบที่กล่าวในหัวข้อก่อนหน้านี้ ยังสามารถแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วของการไหลของกากมันสำปะหลังในอุปกรณ์ต่อความเร็วยรอบหมุนสกรู โดยความเร็วของการไหลของกากมันสำปะหลังบริเวณตามแนวแกนกลางสกรูจนถึงปลายทางเข้าของหัวคाय (ตำแหน่งศูนย์กลางที่สุดปลายเกลียวสกรู) มีภาพปรากฏดังรูปที่ 4-13 และความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของกากมันสำปะหลัง ณ ตำแหน่งทางเข้าหัวคाय กับความเร็วยรอบหมุนสกรูพบว่าเป็นฟังก์ชันแบบเชิงเส้นกับค่าความเร็วยรอบเป็นดังรูปที่ 4-14 ซึ่งมีสมการดังนี้

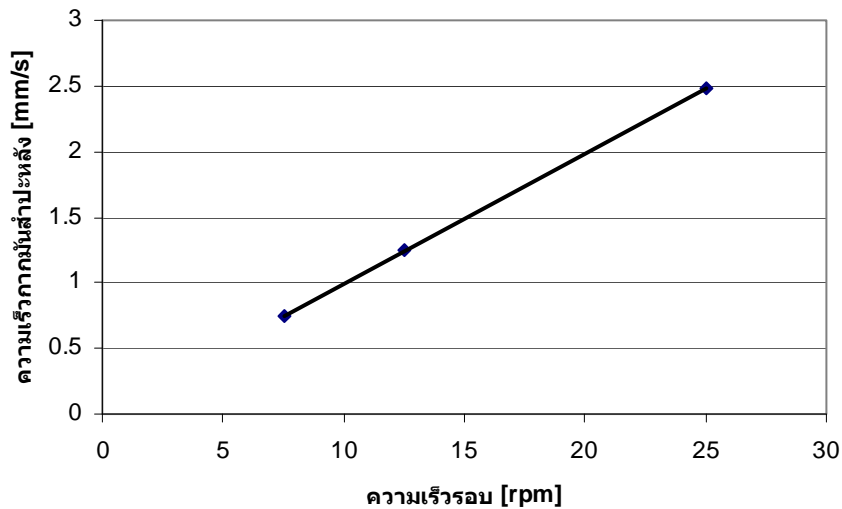
$$V = 0.0095n \quad (4-3)$$

เมื่อ  $n$  = ความเร็วยรอบหมุนสกรู (rpm) และ

$V$  = ความเร็วที่ปรากฏในกากมันสำปะหลัง (mm/s)



รูปที่ 4-13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของกากมันสำปะหลังตามแนวแกนกลางสกรูจนถึงปลายทางเข้าของหัวคाय (ตำแหน่งศูนย์วัดที่สุดปลายเกลียวสกรู)



รูปที่ 4-14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของกากมันสำปะหลัง ณ ตำแหน่งทางเข้าหัวคाय กับความเร็วรอบสกรู

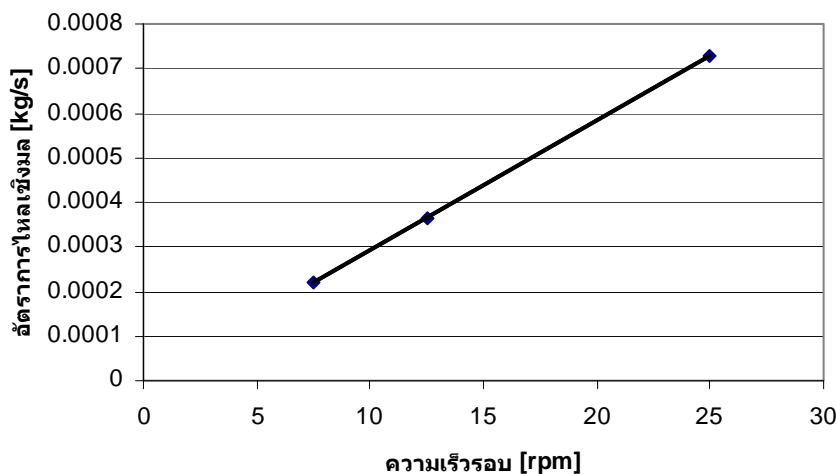
ข้อสังเกตจากผลการจำลองค่าความเร็วของกากมันสำปะหลังพบว่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วบริเวณตำแหน่งทางเข้าหัวคाय แม้ว่าจะมีลักษณะเป็นฟังก์ชันเพิ่มกับค่าความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้นแต่ขนาดของการเปลี่ยนแปลงของค่าความเร็วนั้นเกิดขึ้นน้อยกว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความดัน จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วขาออกจากส่วนของตำแหน่งทางเข้าหัวคायกับความเร็วรอบ ค่าอัตราการ

ไหลเชิงมวลของแบบเครื่องลดความชื้นกากมันสำปะหลังนี้ต่อความเร็วรอบหมุนสกรูเป็นดังรูปที่ 4-15 ซึ่งมีสมการดังนี้

$$m' = 2.9089 \times 10^{-5} n \quad (4-4)$$

เมื่อ  $n$  = ความเร็วรอบหมุนสกรู (rpm) และ

$m'$  = อัตราการไหลเชิงมวล (kg/s)



รูปที่ 4-15 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลของกากมันสำปะหลัง ณ ตำแหน่งทางเข้าหัวควย กับความเร็วรอบสกรู

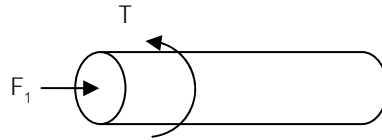
ค่าความสัมพันธ์ของความดันที่ปรากฏในกากมันสำปะหลังกับความเร็วรอบดังกล่าวมานี้ใช้เป็นข้อจำกัดในการคำนวณหาขนาดต้นกำลังสำหรับแบบเครื่องลดความชื้นกากมันสำปะหลังดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

#### 5. การคำนวณหาขนาดของต้นกำลังโดยประมาณ

ในการคำนวณหาขนาดของต้นกำลังเพื่อขับสกรูโดยประมาณ ควรคำนึงถึงตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้

- ถ้าสกรูมีความยาวไม่มากนักก็จะไม่เกิดการโก่งเมื่ออยู่ภายใต้แรงกด โดยปกติการโก่งจะเกิดขึ้นเมื่อสกรูมีความยาวมากกว่า 10 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง
- สกรูต้องรับทั้งความเค้นกดจากแรงกดที่เกิดจากความดันของการอัดกากมันสำปะหลัง และความเค้นเฉือนจากแรงบิดที่เกิดจากส่งกำลัง ดังนั้นในการคำนวณต้องคำนึงความเค้นผสมที่เกิดขึ้น โดยใช้ทฤษฎีความเสียหาย ในงานวิจัยนี้ใช้ ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด

พิจารณาให้สกรูรับแรงกดจากความดันที่เกิดขึ้นบริเวณปลายสกรู และรับโมเมนต์บิดจากมอเตอร์ ดังรูปที่ 4-16



รูปที่ 4-16 รูปแสดง โมเมนต์บิดบนเพลาสกรู

พื้นที่รับแรงของปลายสกรู  $A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \times 0.125^2}{4} = 0.0123 \text{ m}^2$

ความดันที่ปลายสกรูมีค่าประมาณ 10 MPa

ดังนั้น แรงกระทำที่ปลายสกรู  $F_1 = PA = 10 \times 10^6 \times 0.0123 = 123,000 \text{ N}$

ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด

$$\tau_d = 0.5\sigma_y = \sqrt{\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + \tau^2}$$

ความเค้นกดบนสกรู

$$\sigma = \frac{F_1}{A} = P = 10 \text{ MPa}$$

โมเมนต์บิดบนสกรู

เนื่องจากมุมอิทธิพล  $\alpha \approx 17.7^\circ$  และมุมเสียดทานระหว่างสกรูกับกากมันสำปะหลัง  $\beta \approx 11^\circ$  ดังนั้นจะได้

$$T = \frac{F_1 d}{2} \tan(\alpha + \beta) = \frac{123000 \times 0.125 \times \tan(17.7 + 11)}{2} = 4208.78 \text{ Nm}$$

ความเค้นเฉือนบนสกรู

$$\tau = \frac{16T}{d^3 \pi} = \frac{16 \times 4208.78}{0.125^3 \times \pi} = 10.97 \text{ MPa}$$

ความเค้นผสมใช้งานที่เกิดขึ้นบนสกรูสามารถคำนวณได้จากทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด

$$\tau_d = \sqrt{\left(\frac{10}{2}\right)^2 + 10.97^2} = 12.06 \text{ MPa}$$

กำลังที่ใช้กับเครื่องลดความเร็วขึ้นกากมันสำปะหลังที่ความเร็วรอบ 25 rpm โดยคิดประสิทธิภาพของระบบส่งกำลัง 80% คือ

$$W = \frac{2\pi n T}{\eta} = \frac{2\pi \times 25 \times 4208.78}{60 \times 0.8} = 13,773.20 \text{ W} = 18.46 \text{ hp}$$

เพราะฉะนั้น เลือกใช้ต้นกำลังเป็นมอเตอร์ขนาด 20 hp



## 6. การตรวจสอบความแข็งแรงของสกรู

สกรูรับกำลังจากมอเตอร์ขนาด 20 hp ที่มีประสิทธิภาพของระบบส่งกำลัง 80% และหมุนด้วยความเร็วรอบ 25 rpm

$$\text{โมเมนต์บิด} \quad T = \frac{W}{2\pi n} = \frac{20 \times 746 \times 0.8 \times 60}{2\pi \times 25} = 4559.22 \text{ Nm}$$

ความเค้นเฉือนบนสกรู

$$\tau = \frac{16T}{d^3 \pi} = \frac{16 \times 4559.22}{0.125^3 \times \pi} = 11.89 \text{ MPa}$$

แรงกระทำที่ปลายสกรู

$$F_1 = \frac{2T}{d \tan(\alpha + \beta)} = \frac{2 \times 4559.22}{0.125 \tan(17.75 + 11)} = 132,965.77 \text{ N}$$

ความดันหน้าสกรู

$$P = \frac{F_1}{A} = \frac{132965.77}{0.0123} = 10.81 \text{ MPa}$$

ความเค้นผสมใช้งานที่เกิดขึ้นบนสกรูสามารถคำนวณได้จากทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด

$$\tau_d = \sqrt{\left(\frac{10.81}{2}\right)^2 + 11.89^2} = 13.06 \text{ MPa}$$

วัสดุที่ใช้ทำสกรู คือ เหล็กกล้า AISI 4340 Steel

จากตารางเหล็ก  $\sigma_y = 470 \text{ MPa}$

$$\tau_y = 0.5\sigma_y = 0.5 \times 470 = 235 \text{ MPa}$$

เพราะฉะนั้น ค่าความปลอดภัยประมาณ  $N = \frac{\tau_y}{\tau_d} = \frac{235}{13.06} \approx 17.99$  เท่า

มุมบิดของเพลลา

$$\theta = \frac{TL}{GJ} = \frac{4559.22 \times 1.25 \times 32}{8 \times 10^{10} \times 0.125^4 \times \pi} = 0.003^\circ$$

## ส่วนที่ 2) การศึกษาต้นแบบเครื่องสับมันสำปะหลังเพื่อการผลิตมันเส้นสำหรับอุตสาหกรรมเอทานอล

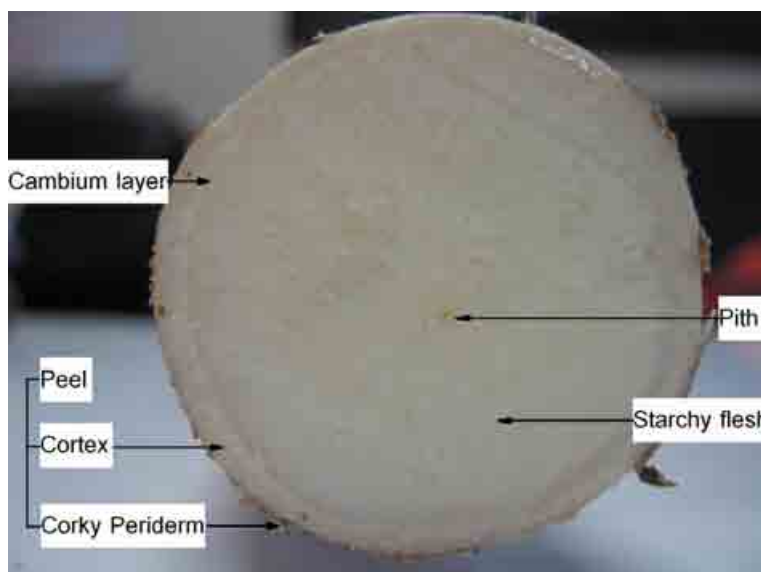
### 1. ลักษณะทางกายของหัวมันสำปะหลัง

จากการศึกษาหัวมันสำปะหลังสดที่ได้รับจากเกษตรกร ต. สุรนารี จังหวัดนครราชสีมา พบว่า มันส่วนใหญ่ที่ปลูกจะเป็นพันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 (KU50) มีความยาวและขนาดประมาณ 25 และ 7 เซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนความหนาของเปลือกมันจะประมาณ 2.5 มิลลิเมตร น้ำหนักโดยเฉลี่ยประมาณ 750 กรัม/หัว ความชื้นของหัวมันสดอยู่ที่ประมาณ 60% w.b. ลักษณะของหัวมันสามารถแบ่งได้เป็น

Conical, Conical-cylindrical, Cylindrical และ Fusiform ดังแสดงในรูปที่ 4-17 ส่วนลักษณะภาพตัดขวางของหัวมันสำปะหลังแสดงในรูปที่ 4-18 ค่าคุณสมบัติทางกายภาพของหัวมันสำปะหลังนี้จะถูกนำไปใช้ในการออกแบบเครื่องสับเครื่องทำความสะอาด และเครื่องอบแห้ง ต่อไป



รูปที่ 4-17 ลักษณะหัวมันสำปะหลังที่ได้ทำการสำรวจ



รูปที่ 4-18 ส่วนประกอบของหัวมันสำปะหลังตามภาพตัดขวาง

## 2. เครื่องทำความสะอาดมันสำปะหลังแบบตะแกรงหมุน (Trommel-type Cassava Cleaning Machine)

### 2.1 หลักการทำงานของเครื่องทำความสะอาดมันสำปะหลังแบบตะแกรงหมุน

เมื่อหัวมันสำปะหลังถูกลำเลียงเข้ามาในเครื่องทำความสะอาด หัวมันสำปะหลังจะกลิ้งอยู่ภายในตะแกรง ตะแกรงและใบมีดที่ติดอยู่ภายในจะขูดเปลือกมันและร่อนสิ่งเจือปนที่ติดกับหัวมัน

สำปะหลัง การทำความสะอาดเกิดจากการสัมผัสกันเองของหัวมันสำปะหลังและการสัมผัสกันของหัวมันสำปะหลังกับตะแกรง ใบมีด และครีบบา เศษเปลือกมันและสิ่งเจือปนจะหล่นลงด้านล่างของตะแกรงและจะถูกรวบรวมให้ออกมาทางด้านข้างของเครื่องด้วยพื้นเอียง หัวมันสำปะหลังจะถูกพาไปยังทางออกโดยครีบบา รูปที่ 4-19 แสดงการทำงานของเครื่องทำความสะอาดต้นแบบ



รูปที่ 4-19 การทำงานของเครื่องทำความสะอาดมันสำปะหลังแบบตะแกรงหมุน

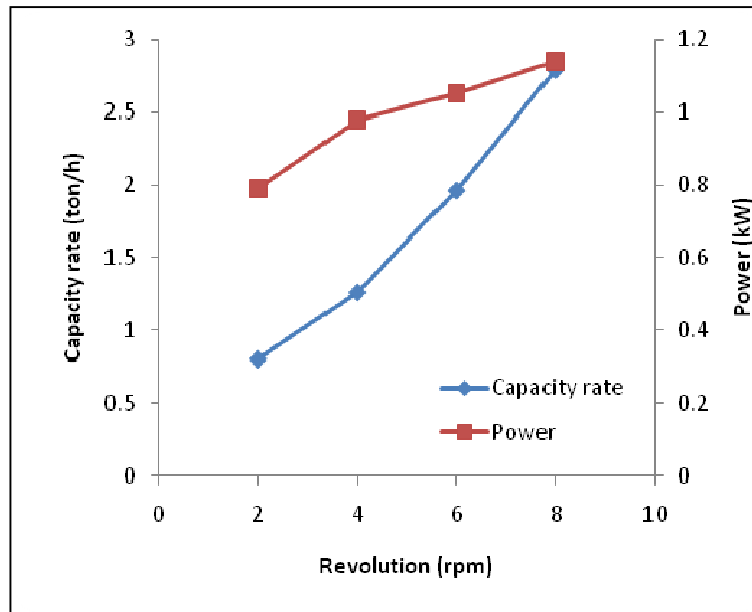
## 2.2 ผลการทดสอบเครื่องทำความสะอาดมันสำปะหลังแบบตะแกรงหมุน

### 1) อัตราการทำงาน

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของถังตะแกรง อัตราการทำงานของเครื่องทำความสะอาดและกำลังไฟฟ้าแสดงไว้ในตารางที่ 4-3 และรูปที่ 4-20 จากรูปจะเห็นว่าเมื่อความเร็วรอบของถังตะแกรงมากขึ้นจะทำให้อัตราการทำงานและกำลังไฟฟ้าของเครื่องเพิ่มมากขึ้นด้วย

ตารางที่ 4-3 อัตราการทำงานของเครื่องทำความสะอาดที่ความเร็วรอบต่าง ๆ

ความเร็วรอบ (rpm)	อัตราการทำงาน (ton/h)	กำลังไฟฟ้า (kW)
2	0.80	0.79
4	1.26	0.98
6	1.96	1.05
8	2.79	1.14



รูปที่ 4-20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ อัตราการทำงาน และกำลังไฟฟ้า

จากรูปที่ 4-20 พบว่าเมื่อต้องการผลิตมันเส้นในอัตรา 30 ton/day (น้ำหนักหัวมันสด) หรือ 1.25 ton/h สามารถกำหนดความเร็วรอบของตะแกรงร่อนที่ประมาณ 4 rpm

## 2) ประสิทธิภาพการทำความสะอาด

การเปรียบเทียบสัดส่วนของเนื้อและเปลือกมันสำปะหลังที่สุ่มมาก่อนทำความสะอาดและหลังการทำความสะอาดได้แสดงไว้ในตารางที่ 4-4 จากตารางพบว่าประสิทธิภาพการทำความสะอาดที่ความเร็วรอบ 6 rpm มีค่าสูงสุด และที่ความเร็วรอบ 2 rpm มีค่าต่ำสุด เท่ากับ 25.7 % และ 6.8 % ตามลำดับ ส่วนที่ความเร็วรอบ 4 rpm และ 8 rpm มีค่าใกล้เคียงกัน สภาพหัวมันสำปะหลังหลังจากการทำความสะอาดที่ความเร็วรอบต่าง ๆ ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4-21 จากรูปจะเห็นได้ว่าเครื่องทำความสะอาดสามารถขูดผิวนอกของเปลือกมันสำปะหลังและร่อนดินและสิ่งเจือปนได้เป็นอย่างดี

ตารางที่ 4-4 สัดส่วนของเปลือกและเนื้อมันสำปะหลังก่อนและหลังการทำความสะอาด

ความเร็วรอบ (rpm)	สัดส่วนของเนื้อและเปลือกมัน สำปะหลังก่อนทำความสะอาด (%)		สัดส่วนของเนื้อและเปลือกมัน สำปะหลังหลังทำความสะอาด (%)		ประสิทธิภาพ การทำความสะอาด (%)
	เนื้อมัน	เปลือกมัน	เนื้อมัน	เปลือกมัน	
2	85.2	14.8	86.2	13.8	6.8
4	85.2	14.8	87.1	12.9	12.8
6	85.2	14.8	89.0	11.0	25.7
8	85.2	14.8	87.3	12.7	14.2



รูปที่ 4-21 สภาพหัวมันสำปะหลังหลังจากการทำความสะอาดที่ความเร็วรอบต่าง ๆ

### 3) การสูญเสียเนื้อมันสำปะหลัง

เศษมันสำปะหลังที่เครื่องทำความสะอาดสามารถแยกออกมาจากหัวมันสำปะหลังได้ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ เศษเปลือกและดิน เศษเนื้อมันสำปะหลัง และมันสำปะหลังหัวเล็ก ผลการคำนวณหาสัดส่วนของส่วนประกอบของเศษมันสำปะหลังถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 ส่วนประกอบของเศษมันสำปะหลังหลังจากทำความสะอาด

ความเร็วรอบ (rpm)	เศษมันสำปะหลังรวม (kg)	ส่วนประกอบของเศษมันสำปะหลัง (%)		
		เปลือก	เศษเนื้อ	หัวเล็ก
2	37.85	48.0	34.0	18.0
4	44.35	43.0	36.0	21.0
6	51.00	57.0	24.0	19.0
8	67.75	43.0	40.0	17.0

ตารางที่ 4-6 แสดงเปอร์เซ็นต์การสูญเสียเนื้อมันสำปะหลังหลังจากทำความสะอาด จากตารางพบว่า การสูญเสียเนื้อมันที่ความเร็วรอบ 8 rpm มีค่าสูงที่สุด เท่ากับ 5.4 % ส่วนการสูญเสียเนื้อมันที่ความเร็วรอบ 2 และ 6 มีค่าใกล้เคียงกัน คือ 2.6 % และ 2.5 % ตามลำดับ ส่วนเปอร์เซ็นต์มันสำปะหลังหัวเล็กมีค่าอยู่ในช่วง 1.4 % - 2.3 % โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น

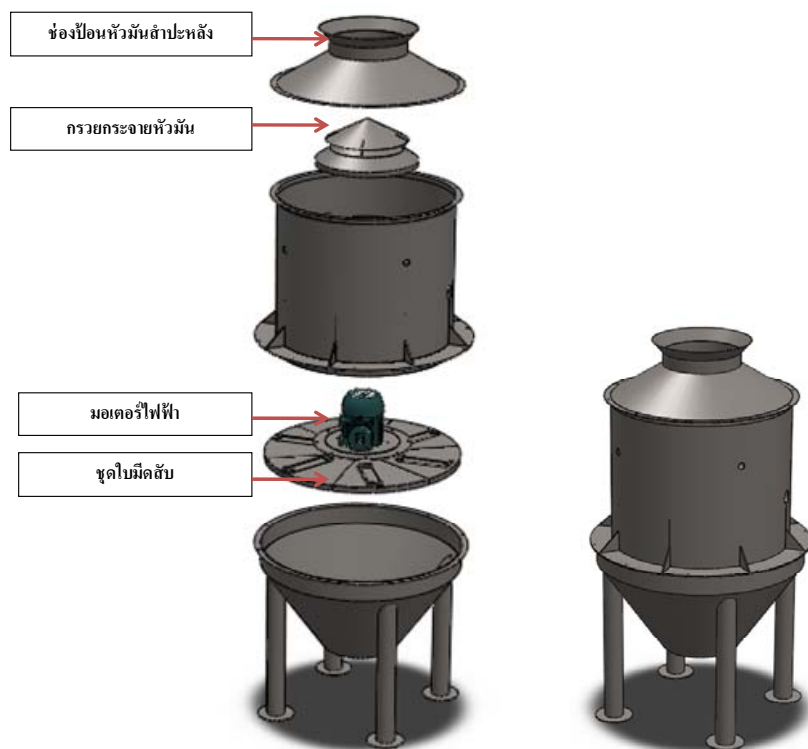
ตารางที่ 4-6 การสูญเสียเนื้อมันสำปะหลังหลังจากการทำความสะอาด

ความเร็วรอบ (rpm)	น้ำหนักมันสำปะหลังก่อนทำความสะอาด (kg)	การสูญเสียเนื้อมัน (%)	
		เศษเนื้อ	หัวเล็ก
2	500	2.6	1.4
4	500	3.2	1.9
6	500	2.5	1.9
8	500	5.4	2.3

### 3. เครื่องสับหัวมันสำปะหลัง (Cassava Chipper)

#### 3.1 หลักการทำงานของเครื่องสับหัวมันสำปะหลัง

ต้นแบบของเครื่องสับมันสำปะหลังมีลักษณะดังแสดงไว้ในรูปที่ 4-22 ตัวโครงสร้างของเครื่องจะมีลักษณะเป็นทรงกระบอกวางตัวอยู่ในแนวดิ่ง ด้านบนเป็นช่องทางสำหรับป้อนหัวมันสำปะหลัง ช่องทางป้อนดังกล่าวมีลักษณะเป็นกรวยเพื่อให้น้ำมันสำปะหลังที่ถูกป้อนลงมาทางด้านบนไหลรวมลงมาปะทะกับกรวยภายในซึ่งจะทำให้หัวมันสำปะหลังกระจายออกลงไปตามด้านล่างโดยรอบๆ ได้สม่ำเสมอมากขึ้น ที่ด้านล่างของเครื่องติดตั้งแผ่นจานและชุดใบมีดที่ใช้กำลังขับเคลื่อนจากมอเตอร์เพื่อสับหัวมันสำปะหลังให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ จากนั้นมันสำปะหลังที่ถูกสับแล้วจะไหลกลับไปรวมกันทางด้านล่างของเครื่องเพื่อรอขนถ่ายไปยังอุปกรณ์ในส่วนอื่นๆ ต่อไป



รูปที่ 4-22 ส่วนประกอบของเครื่องสับหัวมันสำปะหลังต้นแบบ

### 3.2 การทดสอบเครื่องสับมันสำปะหลัง

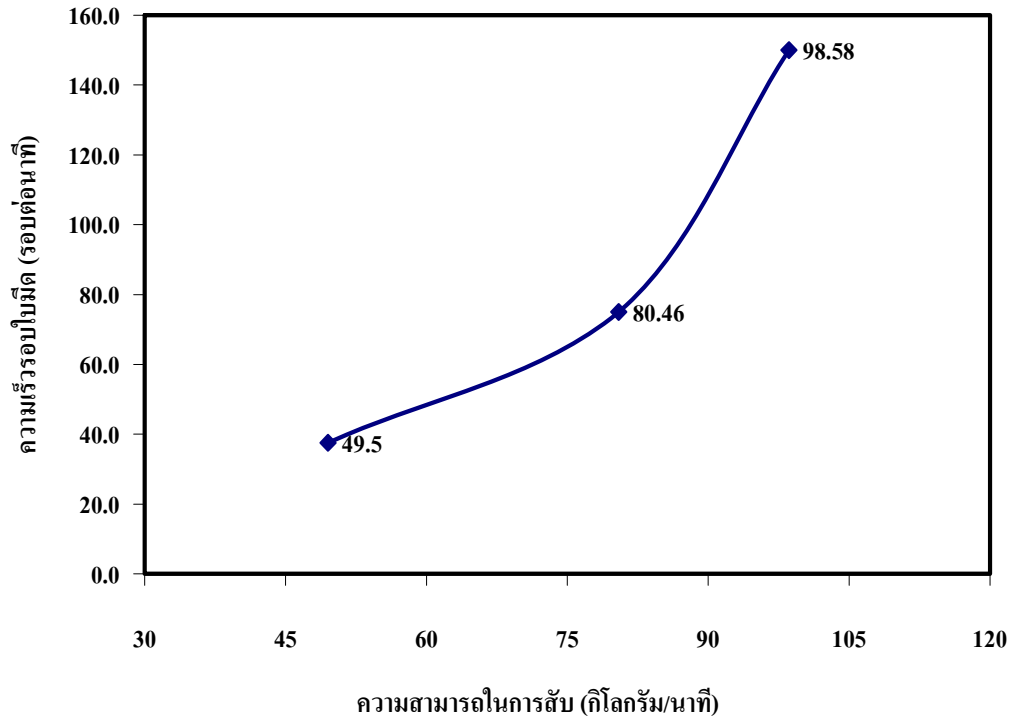
การศึกษาในขั้นตอนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลและศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของเครื่องสับมันสำปะหลัง โดยมีรายละเอียดต่างๆ ดังนี้

1) **ความเร็วรอบของใบมีด** จากการทดสอบเบื้องต้นพบว่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่เหมาะสมที่สามารถทำการสับมันสำปะหลังได้ต่อเนื่องอยู่ในช่วง 30 - 150 รอบต่อนาที โดยไม่ทำให้ชิ้นมันที่สับได้ละเอียดหรือมีขนาดใหญ่เกินไปมากนัก ดังนั้นจึงกำหนดระดับความเร็วรอบการสับไว้ที่ 3 ระดับ ได้แก่ 37.5 , 75 และ 150 รอบต่อนาที ตามลำดับ

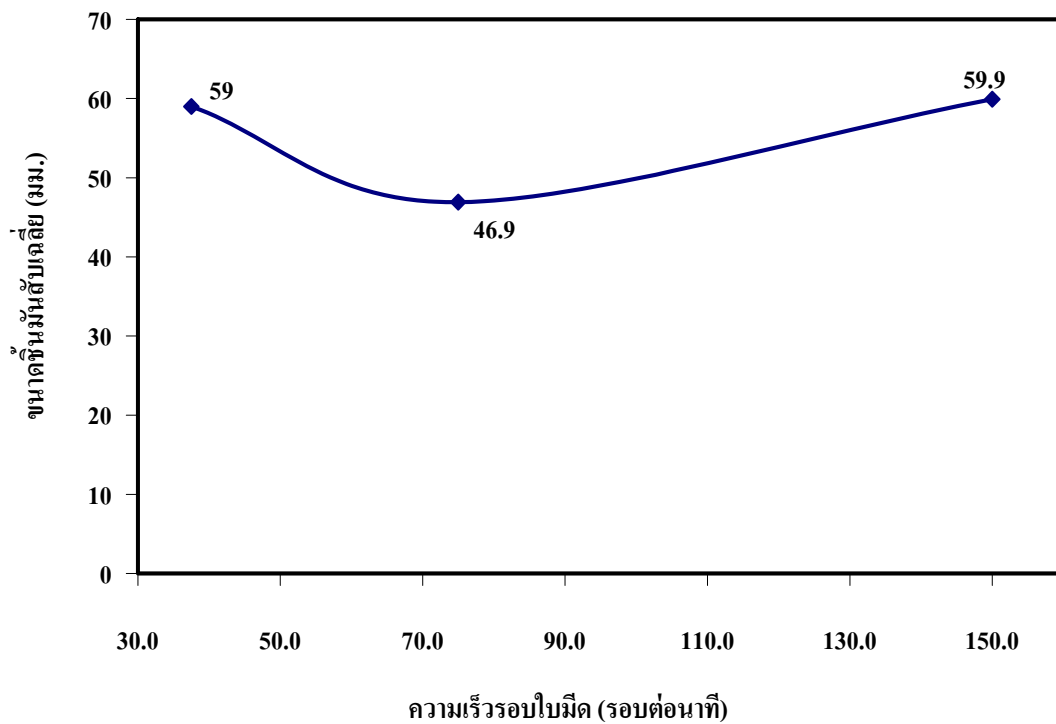
2) **มุมของใบมีด** จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่ามุมใบมีดที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 4 - 8 องศา โดยไม่ทำให้ขนาดความหนาของชิ้นมันมีขนาดใหญ่เกินไปนัก ทั้งนี้เนื่องจากการอบแห้งชิ้นมันเส้นขนาดความหนาที่ใหญ่ที่สุดที่เครื่องอบแห้งสามารถลดความชื้นลงได้ที่อัตราการผลิต 10 ตันต่อวัน จะอยู่ที่ประมาณ 5 mm ดังนั้นในการทดสอบจึงกำหนดมุมของใบมีดให้มีขนาดต่ำสุดคือที่ 4 องศา

#### 3) ความสามารถในการทำงานของเครื่องสับมันสำปะหลัง

จากผลการทดสอบเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของใบมีดและความสามารถในการสับพบว่าเมื่อความเร็วรอบของใบมีดมีค่าสูงขึ้น ความสามารถในการสับจะมีแนวโน้มที่จะมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4-23 อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลของความเร็วรอบของใบมีดที่มีต่อขนาดความกว้างเฉลี่ยของชิ้นมันสับ พบว่าขนาดเฉลี่ยของชิ้นมันสับที่ความเร็วรอบใบมีด 75 รอบต่อนาที มีแนวโน้มที่จะมีขนาดเล็กกว่าขนาดเฉลี่ยของชิ้นมันสับที่ความเร็วรอบใบมีด 37.5 และ 150 รอบต่อนาที ตามลำดับ (รูปที่ 4-24) ซึ่งสาเหตุอาจเนื่องมาจากหัวมันสำปะหลังที่หล่นกระจายลงมาจากช่องทางป้อนมีตำแหน่งที่เหมาะสมพอดีกับความเร็วรอบใบมีดดังกล่าว ในขณะที่ใบมีดหมุนมาปะทะจึงทำให้ได้ขนาดความกว้างของชิ้นมันสับที่เล็กกว่า ในขณะที่ความเร็วรอบใบมีดค่าอื่นๆ นั้น หัวมันสำปะหลังที่หล่นลงมาอาจไม่อยู่ในตำแหน่งที่พอดีในการสับ (อาจเกิดการกระดอนไปมาก่อนจะถูกสับ) นอกจากเหตุผลดังกล่าวแล้ว ส่วนหนึ่งจะสังเกตเห็นได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการสับและค่าพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการสับ (รูปที่ 4-25) โดยที่ความเร็วรอบใบมีด 75 รอบต่อนาที (ความสามารถในการสับ 80.4 กิโลกรัมต่อนาที) จะใช้พลังงานจำเพาะในการสับสูงสุด แสดงให้เห็นว่ามีหัวมันสำปะหลังที่ถูกสับที่ความเร็วรอบใบมีดดังกล่าวมากกว่าเมื่อเทียบกับน้ำหนัก จึงทำให้ต้องการกำลังงานที่ใช้ในการสับมากขึ้นนั่นเอง

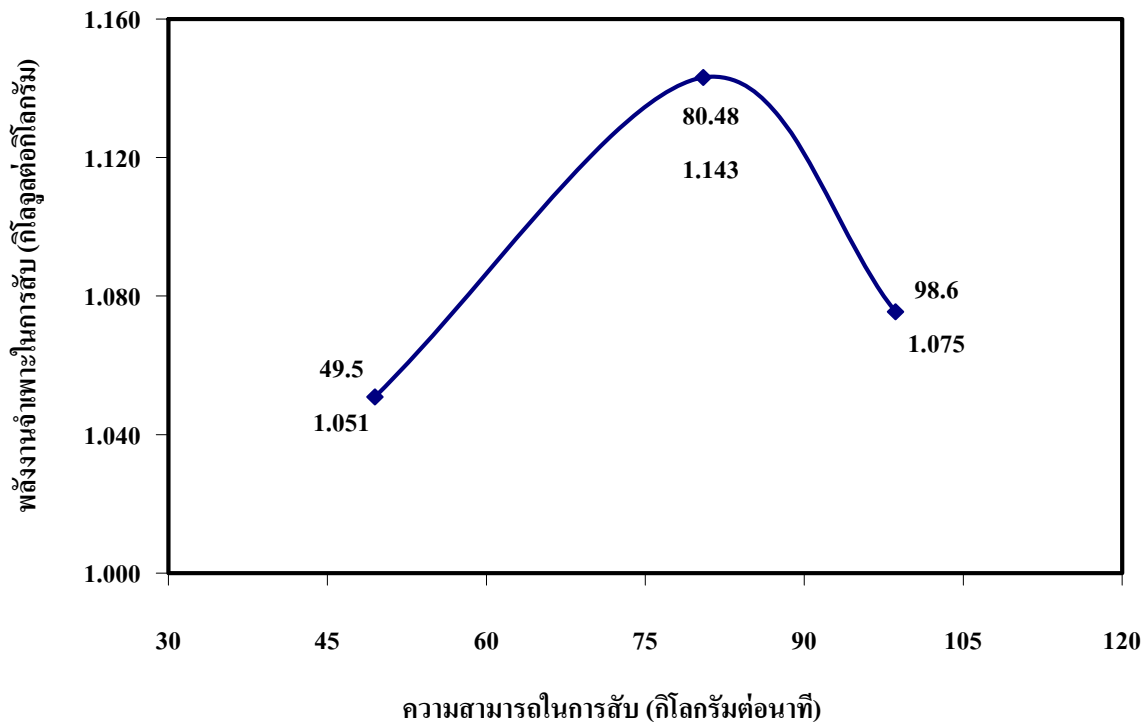


รูปที่ 4-23 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของใบมีดและความสามารถในการสับ



รูปที่ 4-24 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของใบมีดและขนาดความกว้างเฉลี่ยของชิ้นมันสับ





รูปที่ 4-25 ความสามารถในการสับและค่าพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการสับ

**ส่วนที่ 3) การศึกษาการอบแห้งมันเส้นด้วยเครื่องอบแบบโรตารีโดยใช้ความร้อนจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน**

**1. การทดสอบการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากเหง้ามันสำปะหลัง**

**1.1 การศึกษาคุณสมบัติของเหง้ามันสำปะหลังเพื่อนำไปผลิตเป็นแก๊สเชื้อเพลิง**

ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของเหง้ามันสำปะหลัง ประกอบไปด้วยการวิเคราะห์ แบบประมาณ (Proximate Analysis) และแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) ดังแสดงใน ตารางที่ 4-7 พบว่าเหง้ามันมีค่าความร้อน และปริมาณสารระเหย ก่อนข้างสูง คือ 14,591 MJ/kg และ 80% ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณเถ้า (Ash) ของเหง้ามันสำปะหลังมีค่าต่ำ ซึ่งหมายความว่า ในการเดินระบบเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจะมีปริมาณเถ้าต่ำ ทำให้ไม่จำเป็นต้องดึงเถ้าออกจากเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงบ่อย

เมื่อพิจารณาคู่สมบัตินี้แบบแยกธาตุของเหง้ามันสำปะหลังพบว่า ปริมาณคาร์บอน และไฮโดรเจนมีค่าค่อนข้างสูง คือ 46.12% และ 7.55% ตามลำดับ ธาตุทั้งสองชนิดนี้มีความสำคัญต่อระบบแก๊สซิฟิเคชัน เนื่องจากเป็นธาตุที่เปลี่ยนเป็นแก๊สเชื้อเพลิงเมื่อเกิดปฏิกิริยาอุณหภูมิ นอกจากนั้นยังพบว่า ปริมาณธาตุซัลเฟอร์ที่ตรวจพบในเหง้ามันสำปะหลังยังมีค่าต่ำ ทำให้แก๊สมลพิษที่อาจเกิดขึ้นในระหว่างการเผาไหม้มีปริมาณต่ำตามไปด้วย

**ตารางที่ 4-7 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติแบบประมาณ (Proximate Analysis) และแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) ของเหง้ามันสำปะหลัง**

คุณสมบัติ	ปริมาณ
<b>แบบประมาณ (Proximate Analysis)</b>	
- %MC (Moisture Content)	4.66
- %VM (Volatile Matter)	80.00
- %Ash	2.73
- %FC (Fixed Carbon)	12.61
- HHV (High Heating Value : kJ/kg)	14,591
<b>แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis)</b>	
- %C	46.12
- %H	7.55
- %N	1.13
- %S	0.03
- %O	45.17

**1.3 คุณภาพของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากเหง้ามันสำปะหลัง**

จากการทดลองเดินระบบเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่อัตราการไหลต่างกัน พบว่า ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Gasification Efficiency) เฉลี่ยเท่ากับ 60% คุณภาพแก๊สที่ผลิตได้มี คุณสมบัติที่ไม่แตกต่างกันมาก (ตารางที่ 4-8) โดยมี องค์ประกอบของ CO, H<sub>2</sub> และ CH<sub>4</sub> ในสัดส่วนโดย ปริมาณเฉลี่ยระหว่าง 13.22-14.96%, 16.38-17.91% และ 1.96-2.39% ตามลำดับ ค่าความร้อนที่ผลิตได้อยู่ ระหว่าง 4.90-5.31 MJ/Nm<sup>3</sup> ค่าความร้อนนี้สามารถนำไปใช้ในการอบแห้งมันสำปะหลังเพื่อผลิตมันเส้นได้ ลักษณะเปลวไฟที่ได้จากแก๊สเชื้อเพลิงแสดงดังรูปที่ 4-26

**ตารางที่ 4-8 คุณสมบัติแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากเหง้ามันสำปะหลัง**

Gas Flow (m <sup>3</sup> /hr)	Gas Properties						HHV (MJ/Nm <sup>3</sup> )	Biomass Consumption (kg/h)	Ash		Gasification Efficiency %
	Gas composition (%)								Production	%	
	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>			kg/h		
102.44	14.74	16.38	1.96	53.58	1.43	11.91	4.90	55	7.9	14.36	62.56
121.11	13.22	17.30	2.39	52.65	1.07	13.37	5.00	70.78	13.6	19.21	58.64
157.15	14.34	17.57	2.35	51.39	1.56	12.79	5.17	96.85	15.1	15.59	57.45
186.16	14.96	17.91	2.39	49.99	1.79	12.96	5.31	101.9	16.9	16.58	66.47



รูปที่ 4-26 ลักษณะเปลวไฟจากแก๊สเชื้อเพลิงที่ใช้วัตถุดิบเป็นเหง้ามันสำปะหลัง

## 2. การศึกษาการอบแห้งมันเส้น

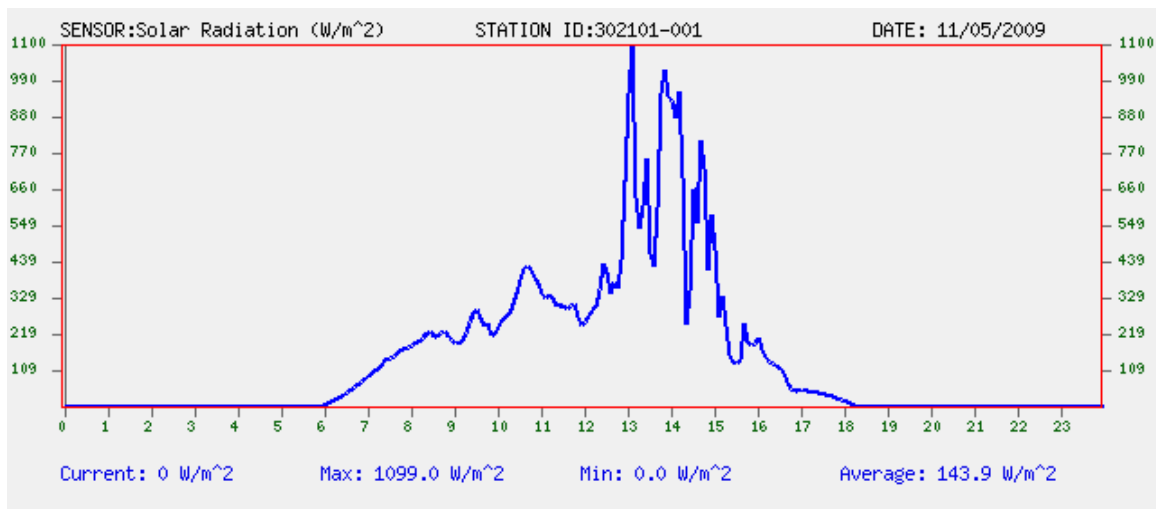
### 2.1 การศึกษาการทำมันเส้นโดยวิธีการตากลาน

ผลจากการศึกษาข้อมูลพบว่าพื้นที่ลานตาก 1 งานสามารถตากมันสดได้ในปริมาณ 3,808.94 กิโลกรัม โดยจะทำการตากเป็นเวลา 3-4 วันในวันที่แดดดี จนได้มันเส้นที่มีความชื้น 13 %wb โดยในระหว่างการตากเกษตรกรจะทำการกลับมัน 6-10 ครั้ง ต่อวัน และมันสด 2.17 กิโลกรัมจะเปลี่ยนเป็นมันแห้งได้ 1 กิโลกรัม (วรินธร, 2548) ซึ่งจากข้อมูลที่ได้นี้พบว่าหากมันเส้นแห้งที่ได้มีความชื้น 13 %wb จะได้ว่ามันที่เกษตรกรนำมาผลิตเป็นมันเส้นมีความชื้นเริ่มต้นอยู่ที่ประมาณ 59.90 % wb หากเกษตรกรใช้เวลาในการตากลานเวลา 4 วันจะใช้เวลาทั้งหมด 96 ชั่วโมง

ตารางที่ 4-9 แสดงข้อมูลค่าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้จากสถานีตรวจอากาศอัตโนมัติ ID: 302101-001 ซึ่งตั้งอยู่ที่ อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมาในช่วงเดือน พฤษภาคม ถึง กรกฎาคม 2552 พบว่าสถานะอากาศเป็นอุปสรรคหนึ่งของการทำมันเส้นแห้งด้วยการตากลาน โดยจะพบว่าค่าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้ในแต่ละวันจะไม่มีค่าสม่ำเสมอ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพของอากาศ ตัวอย่างเช่น วันที่ 11 พฤษภาคม 2552 จะมีค่าพลังงานแสงอาทิตย์ดังแสดงในรูปที่ 4-27

ส่วนในวันที่ 5 พฤษภาคม 2552 ลักษณะของกราฟแสดงค่าพลังงานแสงอาทิตย์จะเป็นไปในลักษณะระฆังคว่ำ โดยค่าพลังงานแสงอาทิตย์จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นในช่วงเช้า และจะมีค่าสูงสุดในช่วง

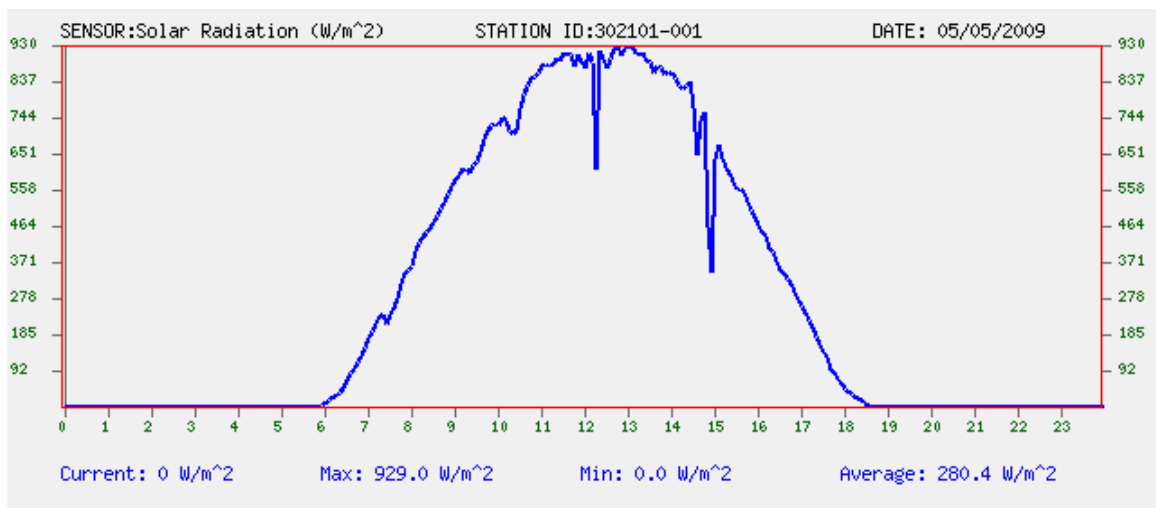
กลางวัน และจะค่อยๆ ลดลงในช่วงเย็น โดยลักษณะการของการเพิ่มขึ้นและลดลงของพลังงานแสงอาทิตย์ในวันดังกล่าวแสดงในรูปที่ 4-28



รูปที่ 4-27 ค่าพลังงานแสงอาทิตย์วันที่ 11 พฤษภาคม 2552

ที่มา: สถานีตรวจอากาศอัตโนมัติปากช่อง

(<http://www.weatherwatch.in.th/index.php?station=302101-001&date=2009-05-11&pid=10>)



รูปที่ 4-28 ค่าพลังงานแสงอาทิตย์วันที่ 5 พฤษภาคม 2552

ที่มา: สถานีตรวจอากาศอัตโนมัติปากช่อง

(<http://www.weatherwatch.in.th/index.php?station=302101-001&date=2009-05-05&pid=10>)

**ตารางที่ 4.9** ค่าพลังงานแสงอาทิตย์ที่วัดได้จากสถานีตรวจอากาศอัตโนมัติ ID: 302101-001

ว/ด/ป	ค่าพลังงานแสงอาทิตย์		ว/ด/ป	ค่าพลังงานแสงอาทิตย์		ว/ด/ป	ค่าพลังงานแสงอาทิตย์	
	(W/m <sup>2</sup> )			(W/m <sup>2</sup> )			(W/m <sup>2</sup> )	
	Max.	Aver.		Max.	Aver.		Max.	Aver.
1/05/09	1008	221.3	1/06/09	1076	203.1	1/07/09	937	194.1
2/05/09	1052	269.7	2/06/09	1019	187.7	2/07/09	946	217.4
3/05/09	906	267	3/06/09	1093	198.5	3/07/09	916	239.3
4/05/09	872	206.1	4/06/09	692	164.4	4/07/09	848	199
5/05/09	929	280.4	5/06/09	790	172.8	5/07/09	510	93.3
6/05/09	977	259.5	6/06/09	928	172.1	6/07/09	882	146.9
7/05/09	922	267.4	7/06/09	1012	233.5	7/07/09	936	207.6
8/05/09	977	275.9	8/06/09	1098	207.4	8/07/09	947	216.8
9/05/09	929	129.8	9/06/09	956	207.1	9/07/09	910	229.8
10/05/09	1012	219.2	10/06/09	962	236.5	10/07/09	962	247
11/05/09	1099	143.9	11/06/09	898	207.7	11/07/09	937	223.3
12/05/09	1056	114.5	12/06/09	985	199.6	12/07/09	923	256.9
13/05/09	1134	153.7	13/06/09	1005	218.4	13/07/09	781	148
14/05/09	894	165.3	14/06/09	934	180.2	14/07/09	648	120.4
15/05/09	1131	176.3	15/06/09	945	219.7	15/07/09	1086	192.7
16/05/09	907	148.1	16/06/09	901	211.8	16/07/09	561	112.6
17/05/09	995	179.6	17/06/09	1022	226.2	17/07/09	774	173.4
18/05/09	1068	164.8	18/06/09	1019	192.8	18/07/09	971	168.2
19/05/09	1016	265.5	19/06/09	1115	197	19/07/09	762	173.1
20/05/09	1046	188.9	20/06/09	1102	211.4	20/07/09	832	169.8
21/05/09	1058	223.4	21/06/09	1010	174.3	21/07/09	667	116.3
22/05/09	999	215.4	22/06/09	1040	209.8	22/07/09	663	113.8
23/05/09	1020	214.6	23/06/09	1094	154.8	23/07/09	586	136.1
24/05/09	962	231.2	24/06/09	1038	256.4	24/07/09	1034	243.7
25/05/09	1057	210	25/06/09	957	253.2	25/07/09	890	185.2
26/05/09	1173	236.3	26/06/09	896	208.7	26/07/09	939	216.2
27/05/09	891	190.9	27/06/09	984	191.9	27/07/09	907	206.8
28/05/09	1024	160.5	28/06/09	1003	175.6	28/07/09	770	160.4
29/05/09	1065	191.7	29/06/09	959	193.2	29/07/09	470	113.4
30/05/09	1063	181.7	30/06/09	1028	205.5	30/07/09	815	138.4
31/05/09	959	213				31/07/09	658	112

ที่มา : สถานีตรวจอากาศอัตโนมัติปากช่อง (<http://www.weatherwatch.in.th/index.php?pid=31&map=30&select=1&station=302101-001>)

จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้นเราสามารถที่จะทำการประเมินค่าพลังงานที่ใช้ในการทำมันเส้นแห้งในพื้นที่ 1 งาน ได้ดังแสดงในตารางที่ 4-10

ตารางที่ 4-10 ผลการประเมินค่าพลังงานที่ได้ในการทำมันเส้นแห้งด้วยวิธีการตากลานบนพื้นที่ 1 งาน

รายการ	ข้อมูล
-น้ำหนักมันเริ่มต้นเฉลี่ย (kg)*	3808.94
-น้ำหนักมันเส้นแห้ง (13% w.b.)**	1755.61
-เวลาที่ใช้ในการทำแห้ง (h)*	96
-ค่าพลังงานแสงแดดเฉลี่ย ( $W/m^2$ )**	194.66
-ปริมาณน้ำระเหย (kg)**	2053.32
-อัตราการระเหยน้ำเฉลี่ย ( $kg_{water}/h$ )**	21.39
-ค่าพลังงานแสงแดดทั้งหมดเฉลี่ยในการทำแห้ง (MJ)**	26,909.80
-ค่าพลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำเฉลี่ย ( $MJ/kg_{water}$ )**	13.11

หมายเหตุ: \* จากข้อมูลของ วรินทร (2548) \*\* จากการคำนวณ

จากตารางที่ 4-10 จะพบว่าค่าพลังงานที่ใช้ในการทำมันเส้นแห้งมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ  $13.30 MJ/kg_{water}$  หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ หากต้องการระเหยน้ำออกจากมันเส้นปริมาณ 1 กิโลกรัมต้องใช้พลังงานจำนวน  $13.30 MJ$  โดยพลังงานที่ได้จากการประเมินนี้เป็นค่าพลังงานที่ได้จากแสงแดดเพียงอย่างเดียว ซึ่งเป็นค่าพลังงานที่ได้เปล่า

นอกจากพลังงานจากแสงแดดแล้วการทำมันเส้นแห้งโดยการตากลานจะต้องใช้พลังงานอื่นช่วยด้วย เช่น แรงงานคน หรือรถแทรกเตอร์เพื่อช่วยในการกลับมันระหว่างการตากลานด้วย

วรินทร (2548) ได้แบ่งค่าใช้จ่ายในการผลิตมันเส้นสะอาดด้วยวิธีการตากลานออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนแรกเป็นค่าใช้จ่ายในการลงทุน ซึ่งประกอบไปด้วย ค่าที่ดินและค่าก่อสร้างลานตาก ค่าเครื่องสับหัวมันสำปะหลัง และอุปกรณ์ช่วยอื่น ๆ เช่น ตาชั่ง คราด พลั่ว ผ้าใบ ไม้พลิกขึ้นมัน ไม้ดันขึ้นมัน เข่งและไม้กวาด ส่วนที่สองเป็นค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ ประกอบด้วย ค่าหัวมันสำปะหลังสด ค่าแรงงาน (ประจำชั่วคราว) ค่าขนส่ง ค่าไฟฟ้าและน้ำมันเชื้อเพลิง และค่าซ่อมแซมเครื่องมือ

เมื่อมองถึงความสามารถในการผลิตมันเส้นเพื่อป้อนเข้าสู่อุตสาหกรรมเอทานอลซึ่งจากข้อมูลเบื้องต้นพบว่าโรงงานผลิตเอทานอลที่มีกำลังการผลิตเอทานอล 100,000 ลิตรต่อวัน จะมีความต้องการหัวมันสดประมาณ 600 ตันต่อวัน หรือคิดเป็นมันเส้นแห้งประมาณ 280 ตันต่อวัน เมื่อพิจารณาข้อมูลในตารางที่ 4-10 จะพบว่าต้องใช้พื้นที่ลานตากมากถึง 157 ไร่ นอกจากนี้สภาวะอากาศที่ไม่เอื้ออำนวยให้สามารถผลิตมันเส้นได้ตลอดทั้งปีและการสร้างลานตากในทางเศรษฐศาสตร์ถือว่าเป็นทรัพย์สินที่ทำให้ต้นทุนจม (Sunk Cost) จึงเป็นข้อจำกัดของการทำมันเส้นแห้งเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตเอทานอล

## 2.1 การศึกษาการอบแห้งมันเส้นด้วยเครื่องอบแห้งแบบโรตารีซึ่งใช้พลังงานความร้อนจากแก๊สซึ่งได้จากกระบวนการ Gasification

ในการทดลองอบแห้งมันเส้นด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบโดยใช้มันสดจำนวน 2,323.98 กิโลกรัม พบว่าสามารถทำการลดความชื้นมันสดจาก 60.1 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียกจนเหลือความชื้น 12.82 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ใช้เวลาในการอบแห้งทั้งสิ้น 8.74 ชั่วโมง โดยแบ่งเป็นเวลาที่ใช้ในการป้อนมันเข้าเครื่องอบแห้งที่ใช้ในการป้อนแต่ละรอบมันเฉลี่ย 30.11 นาที เวลาที่มันอยู่ในเครื่องอบแห้งเฉลี่ยรอบละ 47.12 นาที และเวลาที่ใช้ในการลำเลียงมันเพื่อป้อนกลับเข้าสู่ห้องอบแห้งเฉลี่ยรอบละ 12.21 นาที โดยทำการป้อนมันเข้าสู่ห้องอบแห้งทั้งสิ้นจำนวน 6 รอบ การป้อนจะทำการป้อนโดยใช้สายพานลำเลียงดังแสดงในรูปที่ 4-29



รูปที่ 4-29 ลักษณะการป้อนมันเข้าสู่ห้องอบแห้งด้วยสายพานลำเลียง

เนื่องจากในขณะที่มันอยู่ในเครื่องอบแห้งมันจะถูกพาให้เคลื่อนที่ไปด้านหลังด้วยครีปพาและทำการโรยมันให้สัมผัสกับลมร้อนด้วยครีป โรยดังนั้นมันจึงสามารถสัมผัสกับลมร้อนได้ทั่วถึงและเนื่องจากภายในเครื่องอบแห้งมีการเดินท่ออากาศร้อนซึ่งได้รับความร้อนจากการเผาไหม้แก๊สส่งมาจากเครื่อง Gasification เมื่อมันสัมผัสกับท่ออากาศร้อนก็จะได้รับความร้อนจากการนำความร้อนด้วยอีกทางหนึ่งทำให้ความชื้นในมันระเหยได้เร็วขึ้น การที่มันถูกพาให้เคลื่อนที่และตกลงหลาย ๆ ครั้งในเครื่องอบแห้งซึ่งมีความยาวรวมถึง 21.4 เมตร จึงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้มันเกิดการแตกหัก และมีเศษผงเกิดขึ้น โดยลักษณะของมันแห้งที่ได้จากการอบแห้งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4-30 ซึ่งจะเห็นว่ามันที่หักเนื่องจากการโรยตัว และจากการที่มันถูกปล่อยออกจากเครื่องอบแห้งที่ปากทางออกแล้วถูกนำกลับเข้าสู่เครื่องอบถึง 6 รอบ นอกจากนี้ยังเห็นว่าที่มันนั้นยังมีผงฝุ่นติดอยู่บางส่วนถึงแม้ว่าในระบบอบแห้งจะมีการติดตั้งไซโคลนเพื่อทำการกำจัดผงฝุ่นและเศษมันเล็ก ๆ ออกจากเครื่อง (รูปที่ 4-31) แล้วก็ตาม



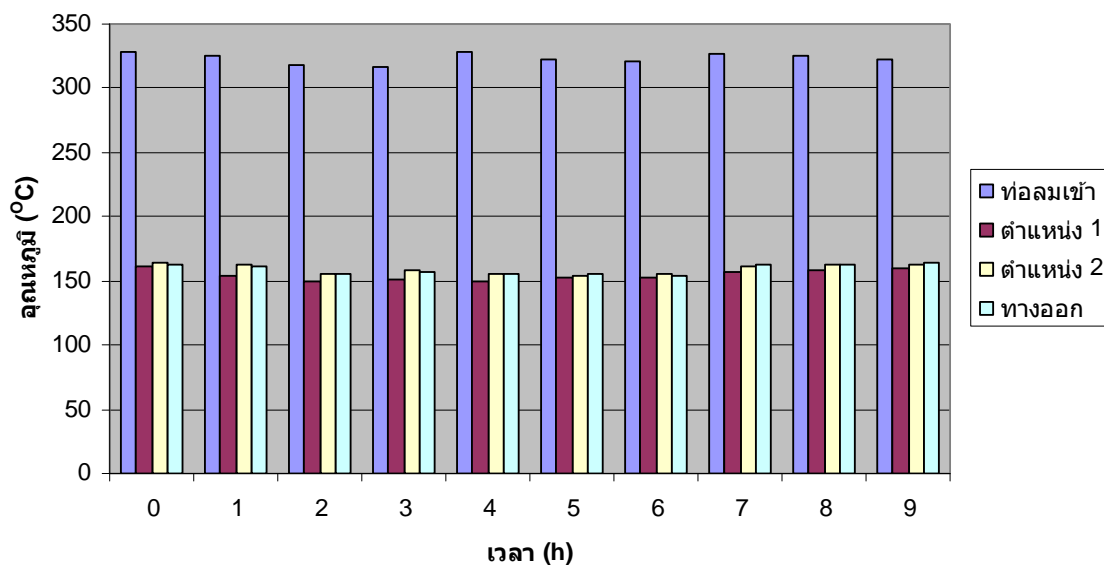
รูปที่ 4-30 ลักษณะของมันเส้นแห้งที่ได้จากการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งโรตารีต้นแบบ



รูปที่ 4-31 ผงฝุ่นและชิ้นมันบางส่วนออกมาทางไซโคลนดักฝุ่น



ในระหว่างการทดลองได้ทำการเก็บค่าอุณหภูมิอากาศอบแห้งตามความยาวของเครื่องอบแห้งโรตารีตามตำแหน่งที่ระบุไว้ในรูปที่ 3-14 ซึ่งจะพบว่าอุณหภูมิอากาศตามแนวความยาวของเครื่องอบแห้งมีความผันแปรไปตามปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง โดยอุณหภูมิของร้อนที่ทางเข้าจะมีค่าสูงมากเนื่องจากวัดที่ท่ออากาศร้อนก่อนเข้าสู่เครื่องอบแห้ง จากนั้นลมร้อนจึงแผ่กระจายเข้าสู่ห้องอบแห้งจึงทำให้อุณหภูมิที่ตำแหน่งถัดมามีค่าลดต่ำลงและเมื่อเริ่มต้นป้อนมันสดซึ่งมีความชื้นสูงเข้าสู่ห้องอบแห้งก็จะมีความลดต่ำลงอีก เมื่อเวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้นปริมาณความชื้นในมันลดลงอุณหภูมิของอากาศอบแห้งก็จะมีความเพิ่มสูงขึ้นมาดังแสดงในรูปที่ 4-32 ส่วนอุณหภูมิตำแหน่งถัดมาจะมีอุณหภูมิสูงกว่าตำแหน่งถัดจากอุณหภูมิลมร้อนทางเข้าเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากว่าลมร้อนที่ตำแหน่งนี้ได้สัมผัสกับท่ออากาศร้อนที่อยู่บริเวณตรงกลางของเครื่องอบแห้งซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าในช่วงเริ่มต้น แต่เมื่อมีการป้อนมันเข้าสู่เครื่องอบแห้งแล้วอุณหภูมิของลมร้อนก็จะไม่ค่อยแตกต่างกันนัก ทั้งนี้เนื่องจากความร้อนที่อากาศร้อนถ่ายเทให้กับชิ้นมัน จะได้รับคืนจากความร้อนของท่อลมร้อนซึ่งออกมาจากเตาเผาแก๊สที่อยู่แกนกลางของเครื่องนั่นเอง และเมื่อชิ้นมันมีความชื้นต่ำในช่วงท้ายของการอบแห้งอุณหภูมิของอากาศจะมีค่าสูงกว่าในช่วงเริ่มต้นการอบแห้งสำหรับอุณหภูมิของอากาศที่บริเวณทางออกก็จะมีพฤติกรรมเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4-32 การกระจายของอุณหภูมิในห้องอบแห้ง

### 1) สมรรถนะของเครื่องอบแห้ง

ผลจากการทดลองเพื่อทำการประเมินสมรรถนะการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งโรตารีต้นแบบในเทอมของอัตราการอบแห้งและค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะพบว่าเครื่องอบแห้งสามารถทำการระเหยน้ำออกจากชิ้นมันได้ในอัตรา 140.18 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำ 10.07 MJ/kg และค่าที่ได้จากการคำนวณเพื่อประเมินสมรรถนะการอบแห้งแสดงในตารางที่ 4-11

เนื่องจากการทดลองมีข้อจำกัดในเรื่องของเวลา แรงงานและค่าใช้จ่ายในการทดสอบระบบ ทำให้ไม่สามารถทำการทดสอบอบแห้งมันสำปะหลังได้เต็มความสามารถของเครื่องอบแห้ง ซึ่งถ้าหากสามารถทำการทดสอบได้อย่างเต็มความสามารถของเครื่องแล้วค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำอาจจะมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณไขมันที่ป้อนเข้าเครื่องอบแห้งมีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับความจุของเครื่อง และจากข้อมูลที่ได้พบว่าหากมันสำปะหลังอยู่ในเครื่องอบแห้งนาน 4.712 ชั่วโมงจะสามารถแห้งได้ถึงความชื้นที่ต้องการ (ต่ำกว่า 13% w.b.) ดังนั้นจึงควรที่จะต้องทำการปรับปรุงเครื่องอบแห้งให้ไขมันใช้เวลาในการเคลื่อนที่ประมาณ 5 ชั่วโมง ก็จะช่วยลดเวลาในการขนย้ายและการป้อนกลับเข้าสู่เครื่องได้

#### ตารางที่ 4-11 ผลการทดลองอบแห้งมันสำปะหลัง

รายการ	ข้อมูล
- น้ำหนักมันสด (kg)	2,323.98
-ความชื้นเริ่มต้น (%wb)	60.1
-ความชื้นสุดท้าย (%wb)	12.82
-อัตราการป้อนเฉลี่ย (kg/min)	77.17
-เวลาที่มันอยู่ในเครื่องอบแห้ง (h)	4.712
-เวลาที่ใช้ในการอบแห้งทั้งหมด (h)	8.74
-อุณหภูมิอากาศอบแห้งขาเข้าเฉลี่ย (°C)	323.6
-อุณหภูมิอากาศอบแห้งขาออกเฉลี่ย (°C)	159.1
-อัตราการไหลอากาศอบแห้ง (m <sup>3</sup> /s)	0.071
-อัตราการอบแห้ง (kg/h)	144.21
- อัตราการผลิตมันเส้นแห้ง (kg/h)	121.70
-อัตราการไหลของแก๊สเฉลี่ย (m <sup>3</sup> /h)	250
-ค่าความร้อนของแก๊ส (MJ/m <sup>3</sup> )	5.30
-ค่าพลังงานความร้อนจากแก๊ส (MJ)	11,580.5
-ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ (kWh)	211.65
-ค่าพลังงานไฟฟ้า (MJ)	761.94
-ค่าพลังงานจำเพาะในการระเหยน้ำ (MJ/kg <sub>water</sub> )	9.79

หมายเหตุ ผลการคำนวณในตารางเป็นค่าเฉลี่ยของข้อมูลตลอดการทดลอง

## 2) การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

จากข้อมูลค่าใช้จ่ายในการลงทุนสร้างเครื่องอบแห้งแบบโรตารีต้นแบบแสดงในตารางที่ 4-12 สามารถวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายและผลตอบแทนในเชิงเศรษฐศาสตร์โดยมีรายละเอียดและเงื่อนไขต่างๆ ของการคำนวณดังนี้

- ต้นทุนการสร้างระบบอบแห้งรวม 5,780,000.00 บาท
- สามารถอบแห้งมันเส้นได้ 10 ตันต่อวัน (ความชื้น 13% w.b.)
- จำนวนหัวมันสดที่ต้องใช้ 28,735.63 กิโลกรัมต่อวัน (คิดที่ความชื้น 60% w.b.)
- ราคาหัวมันสดอยู่ที่ราคา 1.15 บาทต่อกิโลกรัม (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2552)
- ราคามันเส้นแห้งกิโลกรัมละ 4.50 บาท
- ทำการอบแห้งสัปดาห์ละ 6 วัน ดังนั้นทำงานปีละ 312 วัน
- อัตราการใช้ไฟฟ้ารวมเฉลี่ยต่อชั่วโมงเท่ากับ 45.375 kWh
- อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง 1.25 ลิตรต่อชั่วโมง
- อัตราการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลเฉลี่ย 120 กิโลกรัมต่อชั่วโมง
- อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ 7.175% (ธนาคารแห่งประเทศไทย, 2552)
- ตัวเครื่องมีอายุการใช้งาน 10 ปี
- มูลค่าซากคิดเป็น 10% ของต้นทุน
- ค่าบำรุงรักษารายปีคิดเป็น 5% ของต้นทุน
- ค่าไฟฟ้าราคา 3.75 บาท/kWh
- ราคาน้ำมันเชื้อเพลิง 30 บาทต่อลิตร
- ราคาเชื้อเพลิงชีวมวลเฉลี่ย 0.7 บาทต่อกิโลกรัม
- ค่าแรงงาน 3 คน คนละ 200 บาท/วัน

ค่าใช้จ่ายเปรียบเทียบรายปีของต้นทุนสร้างเครื่อง

$$\begin{aligned}
 &= 5,780,000(A/P, 7.175\%, 10) - 5,780,000(0.1)(A/F, 7.175\%, 10) \\
 &= 5,780,000 \left( \frac{0.07175(0.07175 + 1)^{10}}{(0.07175 + 1)^{10} - 1} \right) - 5,780,000(0.1) \left( \frac{0.07175}{(0.07175 + 1)^{10} - 1} \right) \\
 &= 787,940.34 \text{ บาท}
 \end{aligned}$$

ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้ารายปี

$$\begin{aligned}
 &= \text{ชั่วโมงการทำงานรวม} \times \text{อัตราการใช้ไฟฟ้า} \times \text{ราคาไฟฟ้าต่อหน่วย} \\
 &= 312 \times 8 \times 45.375 \times 3.75 \\
 &= 424,710 \text{ บาท}
 \end{aligned}$$

ค่าใช้จ่ายค่าน้ำมันเชื้อเพลิงรายปี

$$\begin{aligned} &= \text{ชั่วโมงการทำงานรวม} \times \text{อัตราการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง} \times \text{ราคาน้ำมันเชื้อเพลิงต่อหน่วย} \\ &= 312 \times 8 \times 1.25 \times 30 \\ &= 93,600.00 \text{ บาท} \end{aligned}$$

ค่าใช้จ่ายค่าน้ำเชื้อเพลิงชีวมวล

$$\begin{aligned} &= \text{ชั่วโมงการทำงานรวม} \times \text{อัตราการใช้น้ำเชื้อเพลิงชีวมวล} \times \text{ราคาน้ำเชื้อเพลิงชีวมวลต่อหน่วย} \\ &= 312 \times 8 \times 120 \times 0.8 \\ &= 209,664 \text{ บาท} \end{aligned}$$

ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษารายปี

$$\begin{aligned} &= 5,780,000.00 \times 0.05 \\ &= 289,000.00 \text{ บาท} \end{aligned}$$

ค่าแรงงานรายปี

$$\begin{aligned} &= 312 \times 200 \times 3 \\ &= 187,200 \text{ บาท} \end{aligned}$$

ค่าวัตถุดิบรายปี

$$\begin{aligned} &= 312 \times 28,735.63 \times 1.15 \\ &= 10,310,344.04 \end{aligned}$$

ค่าใช้จ่ายรวมรายปี

$$\begin{aligned} &= 787,940.34 + 424,710 + 93,600 + 209,644 + 289,000 + 187,200 + 10,310,344.04 \\ &= 12,302,438.38 \text{ บาท} \end{aligned}$$

คั่งนั้นผลตอบแทนรายปี

$$\begin{aligned} &= \text{ปริมาณวัสดุ} \times \text{ราคาขาย} \\ &= 312 \times 10,000 \times 4.50 \\ &= 14,040,000.00 \text{ บาท} \end{aligned}$$

กำไรสุทธิรายปี

$$\begin{aligned} &= \text{ผลตอบแทน} - \text{ต้นทุนการผลิต} \\ &= 14,040,000.00 - 12,302,438.38 \\ &= 1,737,561.62 \text{ บาท} \end{aligned}$$

ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period)

$$\begin{aligned} &= \text{ต้นทุนสร้างเครื่อง} / \text{กำไรสุทธิรายปี} \\ &= 5,780,000.00 / 1,737,561.62 = 3.33 \text{ ปี} \end{aligned}$$

อัตราผลตอบแทนจากการลงทุน (Internal Rate Return)

$$5,780,000 = 1,737,561.62 (P/A, i, 10)$$

$$\frac{5,780,000}{1,737,561.62} = \left( \frac{(i+1)^{10} - 1}{i(i+1)^{10}} \right)$$

$$i = 0.2739 \text{ หรือ } 27.39\%$$

ตารางที่ 4-12 ประมาณการค่าใช้จ่ายในการลงทุนระบบการอบแห้งมันเส้น

รายการ	ราคา (บาท)	จำนวน	เงินลงทุน (บาท)
1. เครื่องอบแห้ง	1,800,000.00	1	1,800,000.00
2. ระบบลำเลียง	80,000.00	2	160,000.00
3. เครื่องสับมัน	200,000.00	1	200,000.00
4. เครื่องทำความสะอาดมัน	250,000.00	1	250,000.00
5. ระบบ Gasifier	750,000.00	1	750,000.00
6. เตาเผา	120,000.00	1	120,000.00
7. อาคาร	1,000,000.00	1	1,000,000.00
7. แทรกเตอร์พร้อม loader	1,500,000.00	1	1,500,000.00
<b>รวม</b>			<b>5,780,000.00</b>

**ส่วนที่ 4) การศึกษาการรวบรวมแปรรูปเหง้ามันสำปะหลังสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล ในภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม**

**1. การศึกษาลักษณะและการเก็บเกี่ยวเหง้ามันรวมไปถึงการประเมินความสามารถในการนำเหง้ามันสำปะหลังมาใช้เป็นพลังงาน**

**1.1 การศึกษาลักษณะการเก็บเกี่ยวมันสำปะหลังและปริมาณเหง้ามันสำปะหลังที่เกิดขึ้น**

การเก็บเกี่ยวมันสำปะหลังเป็นขั้นตอนที่สำคัญขั้นตอนหนึ่ง ในการผลิตมันสำปะหลัง เนื่องจากมีสัดส่วนของการลงทุนสูงสุดเมื่อเทียบกับขั้นตอนการเพาะปลูกอื่น มีผลกระทบต่อปริมาณและคุณภาพของผลผลิตที่ได้รับ ซึ่งขั้นตอนการเก็บเกี่ยวโดยทั่วไปประกอบด้วย 1) การตัดต้นโดยเฉพาะกรณีต้องการใช้เป็นท่อนพันธุ์ในฤดูการปลูกต่อไปหรือจำหน่ายท่อนพันธุ์ 2) การถอนหรือขุดหัวมันสำปะหลังออกจากดิน 3) การเก็บรวบรวมหัวมันสำปะหลังที่ขุดหรือถอนแล้วให้เป็นกอง 4) การตัดหัวมันสำปะหลังออกจากต้นหรือเหง้า และ 5) การขนลำเลียงหัวมันสำปะหลังขึ้นรถบรรทุกซึ่งมีหลากหลายชนิด เพื่อการขนย้ายไปจำหน่ายยังสถานที่รับซื้อต่อไป

จากการประเมินผลข้อมูลภาคสนามที่เกี่ยวข้องกับระบบการเก็บเกี่ยวมันสำปะหลัง พบว่ามีวิธีการเก็บเกี่ยวอยู่ 2 รูปแบบหลัก คือ การเก็บเกี่ยวแบบใช้แรงงานคนในทุกขั้นตอน และแบบใช้เครื่องขุดมันสำปะหลังร่วมกับการใช้แรงงานคน

### 1) การใช้แรงงานคนในทุกขั้นตอน

เป็นวิธีการเก็บเกี่ยวมันสำปะหลังที่ใช้ปฏิบัติกันมาตั้งแต่ในอดีตจนกระทั่งถึงปัจจุบัน โดยเกษตรกรจะใช้มือจับต้นมันสำปะหลัง แล้วดึงถอนขึ้นให้หัวมันแยกจากดิน แต่หากกำลังของคนไม่สามารถถอนได้ เนื่องจากหัวมันมีขนาดใหญ่ หรือดินแน่นแข็ง เกษตรกรก็จะใช้จอบ หรืออีเตอร์ขุดดินที่ใช้ในงานก่อสร้าง ทำการขุดบางส่วนรอบ ๆ ต้น แล้วจึงถอนต้นด้วยมือ ในบางพื้นที่มีการพัฒนาเครื่องมือที่ชาวบ้านเกษตรกรทั่วไปเรียกว่า “แมคโค” ที่เรียกเพี้ยนจากคำว่า “แบคโฮ” (Backhoe) ซึ่งหมายถึงรถขุดตัด โดยเครื่องมือง่ายๆ นี้จะใช้หลักการของคานคานัดมาช่วยผ่อนแรงในการถอน โดยพบว่า เครื่องมื่อดังกล่าวมีรูปร่างแตกต่างกันไป โดยมีทั้งแบบใช้แรงกด และแรงยก แบบที่มีการใช้มาเป็นเวลานานแล้ว จนถึงปัจจุบันจะมีลักษณะเป็นคานไม้กลม มีเหล็กลักษณะคล้ายง่าม 2 ขา สวมติดอยู่กับคานไม้ก่อนไปทางปลายด้านหน้า โดยเอาด้านยาวเป็นด้านสำหรับจับ แสดงดังรูปที่ 4-33 อย่างไรก็ตาม เครื่องมือนี้อาจทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพก็เฉพาะในพื้นที่ปลูกที่เป็นดินร่วนหรือร่วนปนทราย หรือ การปลูกแบบยกทรง ส่วนกรณีพื้นที่ซึ่งเป็นดินเหนียว อาจต้องทำการขุดดินบางส่วนก่อนแล้วจึงจะสามารถถอนได้

ในภาพรวมจะเห็นได้ว่า วิธีการรูปแบบนี้เป็นงานซึ่งต้องใช้กำลังของแรงงานมาก สมรรถนะในการทำงานต่ำ จุดด้อยสำคัญที่สุดของวิธีการนี้ ก็คือ การถอนด้วยกำลังแขนของคน ไม่ว่าจะใช้เครื่องมือช่วยขุดถอนหรือไม่ การดึงหรือขุดถอนจะมีลักษณะดึงกระตุกเป็นช่วง ๆ การดึงถอนในลักษณะนี้ จะทำให้หัวมันขาดตกค้างอยู่ในดิน มากน้อยขึ้นอยู่กับสภาพของดินและพันธุ์ที่ใช้ปลูก ซึ่งภายหลังการดึงถอนต้นมันขึ้นจากดินแล้ว จะทำการรวบรวมเป็นกองๆ ตัดต้น และตัดหัวมันออกจากเหง้า จากนั้นขนขึ้นรถบรรทุก เพื่อนำไปจำหน่าย โดยในทุกขั้นตอนจะใช้แรงงานคนทั้งหมด



รูปที่ 4-33 เครื่องมือช่วยผ่อนแรงสำหรับขุดถอนที่เกษตรกรทั่วไปเรียกว่า “แมคโค”

## 2) การใช้เครื่องขุดมันสำปะหลัง

เครื่องขุดมันสำปะหลังที่มีการผลิตจำหน่ายในปัจจุบันนั้น เป็นผลงานการวิจัยและพัฒนา ทั้งของภาครัฐและเอกชน ซึ่งมีการดำเนินงานมาต่อเนื่องเป็นเวลาหลายปีแล้ว จนมีเครื่องขุดหลากหลายรูปแบบ โดยที่บางแบบมีความสามารถในการทำงานสูงระดับหนึ่ง คือ มีความสามารถในการทำงาน 2 – 4 ไร่ต่อชั่วโมง มีการสูญเสียผลผลิตเนื่องจากเหลือตกค้างอยู่ในดินระหว่างร้อยละ 5 – 10 แต่ยังมีปัญหาการใช้งานบางประการที่ทำให้ไม่สามารถใช้งานได้อย่างกว้างขวางเท่าที่ควร สาเหตุส่วนหนึ่งเกิดจากเครื่องขุดแต่ละแบบยังมีข้อจำกัดในการใช้งานพอสมควร เกษตรกรที่ลงทุนซื้อเครื่องขุดไปใช้งานหลายรายต้องปรับปรุงดัดแปลงแบบจากที่จัดซื้อจากโรงงานผู้ผลิต เพื่อให้สามารถใช้งานได้มีประสิทธิภาพในสภาพพื้นที่ของตน

ซึ่งจากการสำรวจพบว่า แบบที่มีการผลิตจำหน่าย และเป็นที่ยอมรับของเกษตรกรอย่างกว้างขวางนั้น มีอยู่ 2 แบบหลัก คือ ฝาดขุดแบบซี่ (รูปที่ 4-34) และฝาดขุดแบบจานโค้ง (รูปที่ 4-35) ที่มีลักษณะการขุดทั้งแบบที่ไม่มีการพลิกดิน และแบบมีการพลิกดิน (รูปที่ 4-36)



รูปที่ 4-34 เครื่องขุดมันสำปะหลังแบบซี่แบบขุดไม่พลิกดินในเขตพื้นที่จังหวัดสระแก้วและฉะเชิงเทรา



(ก)



(ข)

รูปที่ 4-35 ฝาดขุดแบบจานโค้งในเขตพื้นที่จังหวัดกำแพงเพชร (ก) และเขตจังหวัดนครราชสีมา (ข)



(ก)

(ข)

รูปที่ 4-36 ลักษณะการขุดแบบไม่มีการพลิกดิน (ก) และแบบมีการพลิกดินให้พลิกไปด้านเดียว (ข)

จากการสำรวจในจังหวัดนครราชสีมาในพื้นที่ ต.สุรนารี และพื้นที่ใกล้เคียง พบว่าพฤติกรรมการเก็บเกี่ยวของเกษตรกรในพื้นที่นี้ นิยมใช้แรงงานเกษตรกรในการเก็บเกี่ยวมากกว่าการใช้เครื่องจักรเพื่อทำการขุดมันสำปะหลัง ดังนั้นเหง้ามันสำปะหลังที่เกิดขึ้น จะไม่กระจายตัวไปทั่วแปลงเหมือนการขุดมันโดยใช้เครื่องจักร แต่จะรวมกันเป็นกลุ่ม ใกล้เคียง ๆ หัวมันสำปะหลังสด และกองเป็นจุดในแปลงดังรูปที่ 4.37 สามารถขนถ่ายขึ้นรถได้เลย เมื่อทดลองใช้รถยนต์ในการขนถ่ายออกจากแปลง พบว่าจะทำการขนส่งได้เพียง 200-250 กิโลกรัม ซึ่งจะทำให้ไม่คุ้มค่าต่อการลงทุน และเมื่อทำการขนส่งด้วยรถขนส่งผลิตผลเกษตรขนาดเล็ก (รถอีแต๋น) และรถหกล้อที่ขนส่งมันสำปะหลังผู้โรงงาน จะได้อยู่ประมาณ 1 – 1.2 ตัน/เที่ยว และ 2-2.2 ตัน/เที่ยว ตามลำดับ ลักษณะการขนส่งเหง้ามันแสดงดังรูปที่ 4-38



รูปที่ 4-37 แสดงตำแหน่งของเหง้ามันในแปลงที่เกษตรกรจะทิ้งไว้เป็นจุด



รูปที่ 4-38 แสดงการขนส่งเหง้ามันและรถสำหรับขนส่งมันสำปะหลัง



ผลการเก็บข้อมูลภาคสนามพบว่า ปริมาณเหง้ามันสำปะหลังต่อไร่ของมันสำปะหลังพันธุ์ห้วยบง 60 มีปริมาณมากที่สุด รองลงมาได้แก่ พันธุ์ห้วยบง 60 และระยอง 90 ในปริมาณ 311.11, 289.17 และ 260.28 ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาถึงสัดส่วนเหง้ามันสำปะหลังต่อหัวมันสำปะหลังสด พบว่าพันธุ์ KU50 มีสัดส่วนเหง้ามันสูงที่สุด 0.14 (14%) ข้อมูลสรุปปริมาณเหง้ามันต่อไร่ และสัดส่วนของเหง้ามันสำปะหลังต่อหัวมันสำปะหลังสดแสดงดังตารางที่ 4-13

ตาราง 4-13 สรุปข้อมูลภาคสนาม สัดส่วนเหง้ามันสำปะหลังต่อหัวมันสำปะหลังสด

อำเภอ	พันธุ์	น้ำหนักมันสำปะหลังสด (ตัน/ไร่)	น้ำหนักเหง้ามันสำปะหลัง (กก./ไร่)	สัดส่วนเหง้ามันสำปะหลัง/หัวมันสำปะหลังสด
เมือง	HB60	3.6400	311.11	0.08961
	R90	2.3667	289.17	0.12439
	KU50	2.1611	260.28	0.14383

## 1.2 การประเมินปริมาณเหง้ามันสำปะหลังในจังหวัดนครราชสีมา

จากข้อมูลกรณีศึกษาเหง้ามันสำปะหลังที่มีอยู่ในจังหวัดนครราชสีมา สามารถสรุปคุณสมบัติทางกายภาพได้ดังตารางที่ 4-14 และสามารถประเมินศักยภาพของการนำไปใช้ประโยชน์ของเหง้ามันสำปะหลังดังตารางที่ 4-15 โดยมีปริมาณเหง้ามันสำปะหลังในจังหวัดคิดเป็น 360,490 ล้านตัน ตามลำดับคิดเป็นพลังงาน 2,952.42 GJ เทียบเท่าน้ำมันดิบ 69.90 ktoe สามารถนำมาผลิตไฟฟ้าได้ 164.02 GWh หรือป้อนเข้าสู่โรงไฟฟ้าขนาด 23.41 MW ซึ่งการศึกษาระบบจัดการเชื้อเพลิงที่จำเป็น ได้แก่ การรวบรวม การแปรรูป (การลดขนาด) การลดความชื้น และขนส่ง เนื่องจากเหง้ามันสำปะหลังมีรูปร่างไม่แน่นอน มีความชื้นสูง

ตารางที่ 4-14 ลักษณะทางกายภาพของเหง้ามันสำปะหลัง

ประเภทชีวมวล	ความชื้น (%w.b.)	ความหนาแน่น (MJ/kg)	ลักษณะทั่วไป
เหง้ามันสำปะหลัง	53.40	193	เป็นท่อนขนาด $\phi$ 1-2 นิ้ว มีแฉง ตรงปลาย

ตารางที่ 4-15 ศักยภาพชีวมวลไม่เชิงพาณิชย์ในการผลิตไฟฟ้า จากเหง้ามันสำปะหลัง จ. นครราชสีมา

ประเภทชีวมวล	ปริมาณคงเหลือ (ล้านตัน/ปี)	ความชื้น (%wb)	ค่าความร้อน MJ/kg	พลังงานทั้งสิ้น (GJ)	พลังงานเทียบเท่า น้ำมันดิบ (ktoe)	ศักยภาพผลิตกระแสไฟฟ้า (GWh)/ ขนาดโรงไฟฟ้า (MW)
เหง้ามันสำปะหลัง	360.49	53.40	8.19	2,952.42	69.90	164.02/23.41
รวม	360.49	-	-	2,952.42	69.90	164.02/23.41

## 2. การสร้างเครื่องสับย่อยเหง้ามันสำปะหลังต้นแบบ

ดังที่กล่าวมาข้างต้น การขนย้ายเหง้ามันออกมาจากแปลงเพื่อนำมาเป็นเชื้อเพลิงยังมีอุปสรรคอยู่ เนื่องจากมีลักษณะที่ไม่แน่นอนและมีปริมาตรต่อน้ำหนักสูงทำให้ต้องใช้รถที่มีขนาดใหญ่หรือถ้าใช้รถที่มีขนาดเล็ก จำเป็นต้องขนส่งหลายเที่ยว ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้ได้มีการพัฒนาเครื่องสับย่อยเหง้ามันแบบเคลื่อนที่ได้ (Mobile Chopper) การทดสอบเบื้องต้นจะใช้ต้นกำลังมอเตอร์ไฟฟ้าเพื่อศึกษาสมรรถนะและกำลังที่ต้องการในการลดขนาด ซึ่งเมื่อนำข้อมูลจากการทดสอบใช้ต้นกำลังมอเตอร์ไฟฟ้าไปออกแบบเพื่อเลือกเครื่องต้นกำลังที่เป็นเครื่องยนต์ซึ่งจะมีความเหมาะสมกับการปฏิบัติงานในแปลงของเกษตรกร

### 2.1 การทดสอบการสับเหง้ามันสำปะหลังโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้า

ในการทดสอบหาขนาดของเครื่องสับในเบื้องต้นจะใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 22 kW (รูปที่ 4-39) และมีการป้อนเหง้ามันสำปะหลังโดยใช้คนงาน พบว่า เครื่องสับที่ออกแบบไว้มีความสมรรถนะเฉลี่ย 1.59 ton/hr และต้องการกำลังเฉลี่ย 15.58 kW หรือพลังที่ใช้ในการสับเฉลี่ยเท่ากับ 9.82 kWh/t ดังแสดงในตารางที่ 4-16



รูปที่ 4-39 เครื่องสับเหง้ามันสำปะหลังแบบใช้มอเตอร์เป็นต้นกำลัง

นอกจากนั้นยังพบว่า ประสิทธิภาพการสับ/ย่อยเหง้ามันสำปะหลัง ขึ้นอยู่กับลักษณะการป้อนเหง้ามันสำปะหลังเข้าสู่เครื่องสับของคนงาน ดังนั้น จึงจำเป็นที่จะต้องมีการพัฒนาระบบป้อน (Feeder) เพื่อให้เครื่องจักรสามารถทำงานอย่างเต็มประสิทธิภาพ

**ตารางที่ 4-16** การทดสอบกำลังการสับ/ย่อยสูงสุดของเครื่องสับ/ย่อยเหง้ามันสำปะหลัง ด้วยต้นกำลังมอเตอร์แบบไม่มีระบบป้อน (ทำการป้อน โดยมีขนาดที่เหมาะสมก่อนป้อน)

การทดลองที่	น้ำหนัก (kg)	เวลาที่ใช้ (s)	กำลังที่ใช้ (kW)	สมรรถนะ (ton/hr)	พลังงานที่ใช้ในการสับ (kWh/ton)
1	300	606.74	15.65	1.78	8.79
2	311	761.63	14.95	1.47	10.17
3	295	689.61	15.65	1.54	10.16
4	302	688.10	16.07	1.58	10.17
<b>เฉลี่ย</b>	<b>302.00</b>	<b>686.52</b>	<b>15.58</b>	<b>1.59</b>	<b>9.82</b>

หมายเหตุ \*ความชื้น 53.5% w.b. ความหนาแน่นก่อนสับ 193 kg/m<sup>3</sup> ความหนาแน่นหลังสับ 332 kg/m<sup>3</sup>

## 2.2 การทดสอบการสับเหง้ามันสำปะหลังโดยใช้เครื่องยนต์และมีระบบป้อน

จากการทดลองสับโดยใช้ต้นกำลังเป็นมอเตอร์พบว่ากำลังที่ต้องการเฉลี่ย 15.58 kW หรือ ประมาณ 21 แรงม้า อย่างไรก็ตาม พบว่าเครื่องยนต์ต้นกำลังส่วนใหญ่จะมีขนาดต่ำสุดประมาณ 80 แรงม้า ดังนั้นทางคณะผู้วิจัยจึงได้เลือกเครื่องยนต์ขนาด 80 แรงม้า และได้ทำการทดสอบเครื่องยนต์ภายในห้องปฏิบัติการก่อนนำไปใช้งานและนำมาติดตั้ง พบว่าจำเป็นต้องเปลี่ยนอัตราทดเนื่องจาก มอเตอร์จะหมุนที่ 1450 rpm แต่เครื่องยนต์ต้นกำลังจะหมุน 2000 rpm และเมื่อทำการทดสอบติดตั้งเพื่อสับเหง้ามันสำปะหลังได้แรงบิดสูงสุด 131 N-m ซึ่งจะสิ้นเปลืองน้ำมัน 10.59 ลิตรต่อชั่วโมง ผลการทดลองสับย่อยเหง้ามันสำปะหลังโดยใช้เครื่องยนต์เป็นต้นกำลังและมีระบบป้อนแสดงดังตารางที่ 4-17

จากการวิเคราะห์การกระจายตัวของเหง้ามันที่สับได้พบว่า จะมีสัดส่วนที่ใหญ่กว่ารูตะแกรง 15 มม. อยู่ประมาณ 33 เปอร์เซ็นต์ และอยู่ในช่วง 15 - 10 มม. อยู่ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ และขนาดเล็กกว่า 10 มม. อยู่ประมาณ 37 เปอร์เซ็นต์

**ตารางที่ 4-17** การทดสอบกำลังการสับ/ย่อยสูงสุดของเครื่องสับ/ย่อยเหง้ามันสำปะหลัง ด้วยต้นกำลังเครื่องยนต์แบบมีระบบป้อน

การทดลองที่	น้ำหนัก * (kg)	เวลาที่ใช้ (s)	กำลังที่ใช้ (kW)	สมรรถนะ (ton/hr)	พลังงานที่ใช้ในการสับ (kWh/ton)
1	100	373	27.5	0.96	28.63
2	102	320	27	1.15	23.47
3	103	297	28.2	1.25	22.56
4	100	330	27.7	1.09	25.41
<b>เฉลี่ย</b>	<b>101</b>	<b>330</b>	<b>27.6</b>	<b>1.11</b>	<b>25.02</b>

หมายเหตุ \*ความชื้น 53.5%wb



รูปที่ 4-40 เครื่องสับ/ย่อยวัสดุชีวมวลภายในแปลงเกษตรกร

### 2.3 การวิเคราะห์ต้นทุนในการสับแห้งมันสำปะหลัง

จากผลการทดสอบที่ได้กล่าวมาข้างต้น สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ต้นทุนการสับ/ย่อยแห้งมันสำปะหลัง ได้ดังแสดงในตารางที่ 4-18

ตารางที่ 4-18 แสดงการเปรียบเทียบต้นทุนการสับ/ย่อยแห้งมันสำปะหลังและกระถินยักษ์ขนาดต่างๆ

วัสดุ	ต้นทุนการสับ/ย่อย(บาทต่อกิโลกรัม)				รวม
	ค่าใช้ เครื่องสับ/ย่อย <sup>1</sup>	ค่าซ่อมบำรุง ลับใบมีด <sup>2</sup>	พลังงานที่ใช้ <sup>3</sup>	คนป้อน <sup>4</sup>	
แห้งมันสำปะหลัง	0.063	0.0094	0.034/0.238	0.026	<b>0.132/0.336</b>

หมายเหตุ <sup>1</sup> ค่าเครื่องสับ พิจารณาต้นทุนเป็นชั่วโมงๆ ละ 100 บาทต่อชั่วโมง

<sup>2</sup> ค่าซ่อมบำรุงลับมีดพิจารณาต้นทุนเป็นชั่วโมงๆ ละ 15 บาทต่อชั่วโมง (อายุการใช้งาน 1000 ชั่วโมง ราคาต่อชุด 15000 บาทต่อจำนวน 4 ใบ)

<sup>3</sup> สมมติให้ค่าไฟฟ้าราคาหน่วยละ 3.5 บาท /ถ้าใช้ต้นกำลังเครื่องยนต์ดีเซลใช้ 10.59 ลิตรต่อชั่วโมง ลิตรละ 25 บาท/ลิตร (ไม่รวมค่าเช่าแทรกเตอร์)

<sup>4</sup> ใช้แรงงาน 2 คน ทำงานวันละ 8 ชั่วโมง (ค่าแรงงานขั้นต่ำ จังหวัดนครราชสีมา วันละ 165 บาท/วัน)

จากการเปรียบเทียบต้นทุนในการสับย่อยแห้งมันสำปะหลังพบว่า การสับแห้งมันแบบใช้เครื่องยนต์เป็นต้นกำลัง (25 kw-hr/tons) จะใช้พลังงานในการสับมากกว่าการใช้มอเตอร์เป็นต้นกำลัง (9.82 kw-hr/ton) ส่งผลให้ต้นทุนในการสับย่อยสูงตามไปด้วย คือ ประมาณ 336 บาทต่อตัน ในขณะที่การใช้มอเตอร์เป็นต้นกำลังมีต้นทุน 132 บาทต่อตัน อย่างไรก็ตาม การใช้เครื่องยนต์เป็นต้นกำลังในการสับย่อยมีความเหมาะสมและเป็นไปได้มากกว่าสำหรับการเก็บรวบรวมแห้งมันสำปะหลังในแปลงเกษตรกร ซึ่งมีความเป็นไปได้ในเรื่องราคาถ้าเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงเชิงพาณิชย์อื่น

## บทที่ 5

### สรุป

ในการศึกษาโครงการการพัฒนากระบวนการผลิตวัตถุดิบจากมันสำปะหลังสำหรับอุตสาหกรรมเอทานอล เป็นการศึกษาแบบครบวงจร โดยแบ่งการศึกษาออกเป็นการผลิตมันเส้นสะอาดให้ได้กำลังการผลิต 10 ตันต่อวัน โดยใช้เครื่องจักรที่สำคัญ คือ เครื่องทำความสะอาด เครื่องสับ และเครื่องอบแห้งแบบโรตารี แหล่งความร้อนสำหรับอบมันเส้นที่ใช้ในการศึกษานี้ได้รับมาจากแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากเตาแก๊สซิฟิเคชันซึ่งใช้หังามันเป็นวัตถุดิบ นอกจากนี้ ยังมีการศึกษาและการออกแบบเครื่องลดความชื้นแบบเอ็กทราชันเพื่อเป็นแนวทางเพิ่มมูลค่าจากมันสำปะหลังที่ได้จากอุตสาหกรรมแป้งให้เกิดประโยชน์สูงสุด จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

#### **ส่วนที่ 1) การออกแบบเครื่องลดความชื้นจากมันสำปะหลังเปียกใช้หลักการเอ็กทราชันเพื่อลดความชื้นจากมันสำปะหลังสด**

เครื่องลดความชื้นที่ทำการออกแบบจะใช้เทคโนโลยีเอ็กทราชัน ซึ่งเป็นการออกแบบมิติของชุดสกรูคู่และชุดหัวคาย จำนวน โดยใช้ข้อมูลผลการจำลองพฤติกรรมการอัดตัวของจากมันสำปะหลังด้วยซอฟต์แวร์คำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ร่วมกับหลักวิศวกรรมการออกแบบเครื่องจักรกลเกษตร แบบเครื่องลดความชื้นจากมันสำปะหลังเปียกที่ได้ประกอบด้วยสองส่วนหลักคือ ชุดสกรูคู่ซึ่งแต่ละสกรูมีอัตราส่วน L:D เท่ากับ 10:1 โดยองค์ประกอบของส่วนอัดรีดส่งวัสดุที่มีมุมบิดของเกลียวสกรูและระยะพิทช์แบบไม่คงตัวจากตำแหน่งของตัวส่งวัสดุไปสู่หัวคาย และชุดหัวคายเป็นหัวคายแบบสามทางออก นอกจากนี้การกำหนดชนิดของวัสดุและขนาดของแบบขึ้นส่วนหลักทุกชิ้นเป็นตามมาตรฐานของเครื่องจักรกลเกษตร และขนาดกำลังการผลิตสูงสุดของเครื่องไว้ที่ 80 ตัน/วัน ด้วยชุดมอเตอร์ส่งกำลังของสกรูอัดรีดขนาด 20 แรงม้า

#### **ส่วนที่ 2) การศึกษาต้นแบบเครื่องสับมันสำปะหลังเพื่อการผลิตมันเส้นสำหรับอุตสาหกรรมเอทานอล**

ในส่วนนี้เป็นการเตรียมมันเส้นสดสำหรับส่งต่อเข้าเครื่องอบแห้ง โดยประกอบไปด้วยเครื่องจักรที่สำคัญ 2 เครื่องด้วยกัน คือ เครื่องทำความสะอาดแบบตะแกรงหมุน และเครื่องสับหัวมันสำปะหลังเป็นมันเส้น โดยพบว่า ความสามารถในการผลิตของเครื่องทำความสะอาดจะขึ้นอยู่กับความเร็วรอบการหมุนของเครื่อง คือ ที่ความเร็วรอบของการทำงาน 2, 4, 6 และ 8 รอบต่อนาที จะมีกำลังการผลิตเท่ากับ 0.8, 1.27, 1.96 และ 2.79 ton/h ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพการทำความสะอาดที่ความเร็วรอบ 6 รอบต่อนาที มีค่าสูงสุดเท่ากับ 25.7 % และมีเปอร์เซ็นต์การเสียน้ำมันต่ำที่สุด เท่ากับ 2.5 % เครื่องทำความสะอาดต้นแบบนี้สามารถแยกสิ่งเจือปนและขูดเปลือกนอกของหัวมันสำปะหลังได้เป็นอย่างดี

ส่วนการเตรียมมันเส้นสดโดยใช้เครื่องสับพบว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อการทำงานของเครื่องคือ ความเร็วรอบของใบมีด และมุมเอียงของใบมีด โดยพบว่าความเร็วรอบที่เหมาะสมสำหรับการสับหัวมันสำปะหลังที่ไม่ก่อให้เกิดความเสียหายจะอยู่ที่ประมาณ 30-150 รอบต่อนาที และอัตราการผลิตมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นเมื่อความเร็วรอบมากขึ้น โดยที่ที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที มีอัตราการผลิตเท่ากับ 98.58 กิโลกรัมต่อนาที ส่วนมุมเอียงที่เหมาะสมสำหรับผลิตมันเส้น คือ 4 องศา ซึ่งจะทำให้ได้มันเส้นหนาประมาณ 5 มิลลิเมตร

### **ส่วนที่ 3) การศึกษาการอบแห้งมันเส้นด้วยเครื่องอบแบบโรตารีโดยใช้ความร้อนจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน**

การศึกษาในส่วนนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนย่อย คือ การศึกษาการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเพื่อเป็นแหล่งความร้อนสำหรับอบแห้งมันเส้นสดโดยใช้หัวมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบ และการศึกษาการทำมันเส้นสะอาดโดยเปรียบเทียบระหว่างวิธีการตากลาน และวิธีใช้เครื่องอบแห้งโรตารีแบบทำงานต่อเนื่อง

การศึกษาการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันพบว่า คุณสมบัติเบื้องต้นของหัวมันสำปะหลังเหมาะสำหรับการนำมาผลิตเป็นแก๊สเชื้อเพลิง โดยดูจากค่าคุณสมบัติที่ได้จากการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis) และแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) กล่าวคือ มีค่าความร้อน (High Heating Value) ค่าสารระเหย (Volatile Mater) ปริมาณธาตุคาร์บอน (C) และธาตุไฮโดรเจน (H) ก่อนข้างสูง คือ 14.591 MJ/kg, 80%, 46.12% และ 7.55% ตามลำดับ เมื่อนำมาแห้งมันสำปะหลังมาทดสอบกับเตาแก๊สซิฟิเคชันพบว่า แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้มีองค์ประกอบของ CO, H<sub>2</sub> และ CH<sub>4</sub> ในสัดส่วนโดยปริมาตรเฉลี่ยระหว่าง 13.22-14.96%, 16.38-17.91% และ 1.96-2.39% ตามลำดับ และมีค่าความร้อนระหว่าง 4.90-5.31 MJ/Nm<sup>3</sup> สามารถนำมาเผาไหม้เพื่อเป็นแหล่งความร้อนสำหรับอบมันเส้นได้เป็นอย่างดี

ส่วนการศึกษารลดความชื้นเพื่อผลิตมันเส้นโดยวิธีการตากบนลาน และการใช้เครื่องอบโรตารีแบบต่อเนื่อง พบว่า การทำมันเส้นแห้งโดยวิธีการตากแดดบนลานจะใช้เวลาในการตากลานประมาณ 3 - 4 วัน ซึ่งเมื่อนำค่าพลังงานแสงอาทิตย์มาคำนวณเพื่อหาค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจะพบว่ามีค่าการใช้พลังงานจำเพาะในการทำแห้ง 13.11 MJ/kg<sub>water</sub> โดยต้นทุนในการทำแห้งจะประกอบไปด้วยสองส่วน คือ ค่าใช้จ่ายในการลงทุน และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ โดยค่าในค่าใช้จ่ายในการดำเนินการจะสามารถตัดค่าใช้จ่ายเรื่องพลังงานในการทำแห้งได้เนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่ได้เปล่า แต่ก็ต้องเสี่ยงกับสภาวะอากาศที่ไม่เหมาะสมต่อการทำแห้ง

สำหรับเครื่องอบแห้งที่ทำการพัฒนาขึ้นเป็นเครื่องอบแห้งแบบโรตารีแบบทำงานต่อเนื่องซึ่งใช้พลังงานความร้อนจากกระบวนการ Gasification ให้อุณหภูมิอากาศร้อนที่อัตราการไหล 250 m<sup>3</sup>/h ประมาณ 323.6 °C ที่ทางเข้าห้องอบแห้ง มันเส้นจะถูกป้อนเข้าสู่ห้องอบแห้งด้วยอัตรา 77.17 kg/min และใช้เวลาเคลื่อนที่ภายในห้องอบนาน 47.12 นาที/รอบ โดยจะต้องทำการอบแห้งมันเส้นเป็นเวลา 6 รอบจึงจะสามารถ

ลดความชื้นมันลงได้ต่ำกว่า 13% w.b. ค่าพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งมีค่าประมาณ 9.79 MJ/kg<sub>water</sub> เมื่อคิดความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เมื่อมีการลงทุนสร้างสายการผลิตตั้งแต่ เครื่องทำความสะอาดแบบ ตะแกรงหมุน เครื่องสับ สายพานลำเลียง และเครื่องอบแห้ง พบว่ามีระยะเวลาคืนทุน 3.33 ปี โดยมีอัตรา ผลตอบแทนการลงทุน 27.39%

#### **ส่วนที่ 4) การศึกษาการรวบรวมแปรรูปเหง้ามันสำปะหลังสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล ในภาค เกษตรกรรมและอุตสาหกรรม**

จากการศึกษาและรวบรวมข้อมูลลักษณะการเก็บเกี่ยวมันสำปะหลังพบว่าขั้นตอนการเก็บเกี่ยว โดยทั่วไปประกอบด้วย 1) การตัดต้นโดยเฉพาะกรณีต้องการใช้เป็นท่อนพันธุ์ในฤดูการปลูกต่อไปหรือ จำหน่ายท่อนพันธุ์ 2) การถอนหรือขุดหัวมันสำปะหลังออกจากดิน 3) การเก็บรวบรวมหัวมันสำปะหลังที่ ขุดหรือถอนแล้วให้เป็นกอง 4) การตัดหัวมันสำปะหลังออกจากต้นหรือเหง้า และ 5) การขนลำเลียงหัวมัน สำปะหลังขึ้นรถบรรทุกซึ่งมีหลากหลายชนิด เพื่อการขนย้ายไปจำหน่ายยังสถานที่รับซื้อต่อไป ซึ่งพบว่า เหง้ามันสำปะหลังที่เกิดขึ้นจะกระจายตามจุดต่าง ๆ ในแปลง โดยปริมาณเหง้ามันที่อยู่ในแปลงจะขึ้นอยู่กับ พันธุ์มันที่เกษตรกรปลูก ซึ่งมันสำปะหลังพันธุ์ห้วยบง 60 มีปริมาณเหง้ามันสำปะหลังต่อไร่มากที่สุด รองลงมาได้แก่ พันธุ์ระยอง 90 และ พันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 ในปริมาณ 311.11, 289.17 และ 260.28 กิโลกรัม ต่อไร่ ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาถึงสัดส่วนเหง้ามันสำปะหลังต่อหัวมันสำปะหลังสด พบว่าพันธุ์ KU50 มีค่าสูงที่สุด คือ 0.14

ส่วนการออกแบบเครื่องสับ/ย่อยเหง้ามันสำปะหลังแบบเคลื่อนที่ เพื่อทำการรวบรวมมาใช้เป็น เชื้อเพลิงชีวมวลพบว่า ขนาดของเครื่องยนต์ต้นกำลังสำหรับสับ/ย่อยเหง้ามันสำปะหลังมีขนาด 80 แรงม้า มี แรงบิดสูงสุดที่ 131 N-m และอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงเท่ากับ 10.59 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีระบบ ป้อนวัตถุดิบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องให้ดีขึ้น จากการประเมินต้นทุนในการสับเหง้ามัน สำปะหลังพบว่าจะมีต้นทุนการผลิตอยู่ที่ 336 บาทต่อตัน ซึ่งมีความเป็นไปได้ในการนำเหง้ามันสำปะหลังมา ใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงเชิงพาณิชย์ชนิดอื่น

## เอกสารอ้างอิง

1. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2551. การผลิตเอทานอล. สืบค้นเมื่อวันที่ 17 กันยายน 2551 จาก <http://www.dede.go.th/dede/index.php?id=518>.
2. กล้าณรงค์ ศรีรอด, เจริญศักดิ์ โรจนฤทธิ์พิเชษฐ์, วิจารย์ วิชชุกิจ, เอ็จ สโรบล, พิพัฒน์ วีระถาวร และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ. 2544. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ โครงการศึกษาสถานภาพของวัตถุดิบที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตแก๊สโซฮอลล์. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
3. กรมการค้าต่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์. 2544. ประกาศกรมการค้าต่างประเทศเรื่อง การกำหนดคุณภาพและมาตรฐานมันเส้นสะอาด. 20 กรกฎาคม 2544.
4. ชยะ หัสดิเสวี. 2530. การใช้ปัจจัยในการผลิต ต้นทุนการผลิต และกำไรของโรงงานมันเส้นในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย พ.ศ. 2528. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
5. ธนาคารแห่งประเทศไทย. 2552. อัตราดอกเบี้ยให้สินเชื่อของธนาคารพาณิชย์. สืบค้นเมื่อวันที่ 13 กันยายน 2552, จาก [http://www.bot.or.th/Thai/Statistics/FinancialMarkets/Interestrates/\\_layouts/application/interest\\_rate/IN\\_Rate.aspx](http://www.bot.or.th/Thai/Statistics/FinancialMarkets/Interestrates/_layouts/application/interest_rate/IN_Rate.aspx).
6. พิพัฒน์ อมตฉายา. 2548. รายงานการวิจัย การอบแห้งพริกด้วยเครื่องอบแห้งแบบหมุน. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ นครราชสีมา.
7. ไพบุลย์ โรจน์วิบูลย์ชัย. 2535. การอบแห้งข้าวโพดด้วยเครื่องอบแห้งแบบหมุน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
8. วรินทร์ ถนัดคำ. 2548. การวิเคราะห์การลงทุนในการผลิตมันเส้นสะอาด: กรณีศึกษา อำเภอเสิงสาง จังหวัดนครราชสีมา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
9. สมชาติ โสภณธฤทธิ. 2540. การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
10. สถานีตรวจวัดอากาศอัตโนมัติ. 2552. แสงอาทิตย์วันที่ 5 พฤษภาคม 2525. สืบค้นเมื่อวันที่ 20 สิงหาคม 2552, จาก <http://www.weatherwatch.in.th/index.php?station=302101-001&date=2009-05-05&pid=10>.
11. สถานีตรวจวัดอากาศอัตโนมัติ. 2552. แสงอาทิตย์วันที่ 11 พฤษภาคม 2525. สืบค้นเมื่อวันที่ 20 สิงหาคม 2552, จาก <http://www.weatherwatch.in.th/index.php?station=302101-001&date=2009-05-11&pid=10>.



12. สถานีตรวจวัดอากาศอัตโนมัติ. 2552. สถานีวัดปากช่อง ID: 302101-001. สืบค้นเมื่อวันที่ 20 สิงหาคม 2552, จาก <http://www.weatherwatch.in.th/index.php?pid=31&map=30&select=1&station=302101-001>.
13. สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2551. มันสำปะหลังทำเป็นฝอย : ปริมาณและมูลค่าการส่งออกรายเดือน. สืบค้นเมื่อวันที่ 2 กันยายน 2551, จาก <http://www.oae.go.th/statistic/export/ExCa1.xls>.
14. สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2551. สถิติการเกษตรของประเทศไทยปี 2549: ตารางที่ 24 มันสำปะหลัง : เนื้อที่ ผลิต และผลผลิตต่อไร่ เป็นรายจังหวัด ปี 2548-2550. สืบค้นเมื่อวันที่ 14 กันยายน 2551, จาก <http://www.oae.go.th/statistic/yearbook49/section1/sec1table24.pdf>
15. สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2552. ข้อมูลราคามันสำปะหลังสด. สืบค้นเมื่อวันที่ 7 กันยายน 2552 , จาก [http://www.oae.go.th/oae\\_report/price/price\\_by\\_day\\_result.php](http://www.oae.go.th/oae_report/price/price_by_day_result.php).
16. สุกัญญา จัตตพรพงษ์ อุทัย คันโซ วัฒวณิช ประจวบวัน และไชยรงค์ หาราช, 2547. เครื่องทำความสะอาดแบบแห้งและขูดผิวหัวมันสำปะหลังบางส่วน, ครอบรอบ 25 ปี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน 12 พฤศจิกายน พ.ศ. 2547, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน หน้า 116-117.
17. วิรัตน์ หวังเขื่อนกลาง, 2547. การศึกษาเครื่องสับมันสำปะหลังแบบใบมีดโยกสำหรับผลิตชิ้นมันเส้น วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเครื่องจักรกลเกษตร มหาวิทยาลัยขอนแก่น .
18. วรินทร์ ถนัดคำ. 2548. การวิเคราะห์การลงทุนในการผลิตมันเส้นสะอาด: กรณีศึกษา อำเภอเสิงสาง จังหวัดนครราชสีมา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาเศรษฐศาสตร์การเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
19. สุกสันต์ สุขโรจน์, 2548. การศึกษาการหั่นชิ้นมันสำปะหลังเพื่อการผลิตแป้งดิบมันสำปะหลัง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเครื่องจักรกลเกษตร มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
20. Kajuna S.T. A.R., V. C.K. Silayo, A. Mkenda and P.J.J. Makungu. 2001. Thin-Layer Drying of Dice Cassava Roots. Africa Journal of Science and Technology (AJST) : Science and Engineering Series Vol. 2, No. 2, pp. 94-100.
21. Olufayo, A.A. and O.J. Ogunkunle. 1996. Natural Drying of Cassava Chips in the Humid Zone of Nigeria. Bioresource Technology 58: 89-91.
22. Thanh, N. C., S. Muttamara, B.N. Lohani, B.V. P. Crao, S. Burintaratikul. Optimization of drying and peeling techniques for tapioca root. Environmental Engineering division Asian Institute of Technology, Thailand.
23. Visvanathan, R., Sreenarayanan, V. V., Swaminathan, K. R., 1996. Effect of Knife Angle and Velocity on the Energy Required to Cut Cassava Tubers, J. agric. Engng Res. 64, 99 – 102.