วิทยานิพนธ์

ศึกษาและพัฒนาการอบแห้งใบมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้ง
แบบโรตารี่โดยใช้ก๊าซชีวมวลจากเหง้ามันสำปะหลัง

STUDY AND DEVELOPMENT OF CASSAVA LEAF DRYING BY ROTARY DRYER UTILIZED CASSAVA ROOT STEM AS ENERGY SOURCE WITH GASIFIER

นางสาววรางคณา รูปวิเชตร

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2551

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมการอาหาร)

ปริญญา

วิศวกรรมการอาหาร	วิศวกรรมการอาหาร
สาขา	**ภาควิชา**

เรื่อง ศึกษาและพัฒนาการอบแห้งใบมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบโรตารี่โดยใช้ก๊าซชีวมวลจากเหง้ามันสำปะหลัง

Study and Development of Cassava Leaf Drying by Rotary Dryer Utilized Cassava Root Stem as Energy Source with Gasifier

นามผู้วิจัย นางสาววรางคณา รูปวิเชตร

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ....

(รองศาสตราจารย์ประภาศรี สิงห์รัตน์, M.App.Sc.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์เชาว์ อินทร์ประสิทธิ์, D.Eng.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ....

(อาจารย์สุกัญญา จัตตุพรพงษ์, วท.ม.)

หัวหน้าภาควิชา ....

(รองศาสตราจารย์ประภาศรี สิงห์รัตน์, M.App.Sc.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

....

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.............. **เดือน**.................... **พ.ศ.**..............

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ศึกษาและพัฒนาการอบแห้งใบมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบโรตารี่ โดยใช้ก๊าซชีวมวลจากเหง้ามันสำปะหลัง

Study and Development of Cassava Leaf Drying by Rotary Dryer Utilized Cassava Root Stem as Energy Source with Gasifier

โดย

นางสาววรางคณา รูปวิเชตร

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมการอาหาร)
พ.ศ. 2551

วรางคณา รูปวิเชตร 2551: ศึกษาและพัฒนาการอบแห้งใบมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบโรตารี่โดยใช้ก๊าซชีวมวลจากเหง้ามันสำปะหลัง ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมการอาหาร) สาขาวิศวกรรมการอาหาร ภาควิชาวิศวกรรมการอาหาร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์ประภาศรี สิงห์รัตน์, M.App.Sc. 146 หน้า

การศึกษาและพัฒนากระบวนการอบแห้งใบมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบโรตารี่โดยใช้เตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดก๊าซไหลลงและใช้เหง้ามันสำปะหลังเป็นแหล่งพลังงานความร้อน แบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วน คือ (1) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวมวล มีตัวแปรที่ศึกษา คือ ขนาดเหง้ามันสำปะหลัง (เหง้ามันสำปะหลังก่อนลดขนาด และหลังลดขนาดด้วยเครื่องสับอย่างหยาบ) พบว่า เหง้ามันสำปะหลังที่ผ่านการลดขนาดด้วยเครื่องสับอย่างหยาบมีความหนาแน่นโดยรวม 140-155 กก./ลบ.ม. ความชื้น 8.84 % ที่อัตราการป้อน 11.25 กก./ชม. อัตราการป้อนอากาศ 47.49 ลบ.ม./ชม. สามารถผลิตก๊าซชีวมวลได้ 35.04 ลบ.ม./ชม. ก๊าซชีวมวลมีอุณหภูมิ 70.07 องศาเซลเซียส ก่อนออกจากหัวเผา มีองค์ประกอบ (%โดยปริมาตร) ดังนี้ O_2 1.64 %, N_2 43.60 %, H_2 14.05 %, CO 24.04 %, CO_2 14.66 % และ CH_4 2.02 % ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเตาผลิตก๊าซชีวมวลเท่ากับ 59.24 % และส่วนที่ (2) ศึกษากระบวนการอบแห้งใบมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบถังหมุนโดยใช้เตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดก๊าซไหลลงและใช้เหง้ามันสำปะหลังเป็นแหล่งพลังงานความร้อน มีตัวแปรที่ศึกษา คือ การเตรียมใบมันสำปะหลังสดก่อนอบแห้ง (ใบมันสำปะหลังสดสับ และใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่งนาน 12 ชม.) น้ำหนักใบมันสำปะหลังที่ป้อนเข้าเครื่องอบแห้ง (2, 4 และ 6 กก.) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องระบายอากาศร้อนชื้นออกจากห้องอบแห้ง (20 และ 30 ซม.) ทุกการทดลองได้คงที่ความเร็วรอบของเครื่องอบแห้งแบบหมุนที่ 4 รอบต่อนาที พบว่า ใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่งนาน 12 ชม. ที่น้ำหนัก 6 กก. ขนาดช่องระบายอากาศร้อนชื้น 20 ซม.ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด มีปริมาณโปรตีน 20.89 %DM สารไซยาไนด์ 35.82 มก./ก.(%db) และแทนนิน 15.22 มก./ก.(%db) ซึ่งอยู่ในระดับที่ยอมรับได้และไม่เป็นอันตรายต่อสัตว์

____________________ ____________________ ___ / ___ / ___

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Warangkana Roobvichat 2008: Study and Development of Cassava Leaf Drying by Rotary Dryer Utilized Cassava Root Stem as Energy Source with Gasifier. Master of Engineering (Food Engineering), Major Field: Food Engineering, Department of Food Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Prapasri Singrat, M.App.Sc. 146 pages.

The objective of this study is to develop the process of cassava leaf drying by rotary dryer utilized cassava root stem as energy source with downdraft gasifier. The experiment was divided into 2 parts. Firstly, in order to investigate the possibility of gasification from cassava root stem with the downdraft gasifier, therefore, the size of cassava root stem (before chopping and after chopping by rough feed chopping machine.) was investigated. Result of performance test shown that the size reduction of cassava root stem to bulk density of approximately 140-155 kg/ m^3 gave the continuous produced gas of 35.04 m^3/hr and 70.07 °C before leaving the burner's head with 47.49 m^3/hr inlet air flow rate and utilization 11.25 kg cassava root stem/hr. The compositions of produced gas were 1.64 % O_2, 43.60 % N_2, 14.05 % H_2, 24.04 % CO, 14.66 % CO_2 and 2.02 % CH_4 (% Vol). The thermal efficiency of the studied gasifier was about 59.24 %. Finally, The drying of cassava leaf by rotary drum dryer utilized cassava root stem as energy source with downdraft gasifier was studied. The variables for this study were fresh cassava leaf preparation (fresh cassava leaf chopping and fresh cassava leaf chopping after 12 hrs shading in the air) , fresh cassava leaf feeding weight (2, 4 and 6 kg) and the humid air exit diameters (20 and 30 cm) at fixed rotating drum speed of 4 rpm. The results of the experiment showed that the cassava leaf chopping after 12 hrs shading in the air with feeding weight of 6 kg and the humid air exit diameter of 20 cm, gave the shortest drying time. The dried cassava leaves contain 20.89 % crude protein in the dry matter, HCN 35.82 ppm (%db) and Tannin 15.22 ppm (%db). The HCN and Tannin contents are in the level of non-toxic to the animal.

____________________ ____________________ ___ / ___ / ___

Student's signature Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รศ. ประภาศรี สิงห์รัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ผศ.ดร.เชาว์ อินทร์ประสิทธิ์ และ อ.สุกัญญา จัตตุพรพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษาในการเรียน การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ และกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.รังสินี โสธรวิทย์ ประธานการสอบ และ รศ.ดร.ปานมนัส ศิริสมบูรณ์ ผู้ทรงคุณวุฒิจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความกรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมการอาหารทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมการอาหาร รวมถึงศูนย์ปฏิบัติการวิศวกรรมพลังงานและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน ที่สนับสนุนอุปกรณ์ในการทดลอง และเจ้าหน้าที่ศูนย์ค้นคว้าและพัฒนาวิชาการอาหารสัตว์ สถาบันสุวรรณวาจกกสิกิจ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ที่ให้ความช่วยเหลือและแนะนำเกี่ยวกับการใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์ต่างๆ รวมถึงความกรุณาเอื้อเฟื้อวัตถุดิบและสถานที่ในการวิจัยนี้

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่คุณพ่อ คุณแม่ บุคคลในครอบครัว และบุคคลรอบข้าง ที่คอยช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาและกำลังใจ ในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จอย่างสมบูรณ์ได้

วรางคณา รูปวิเชตร

เมษายน 2551

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	40
อุปกรณ์	40
วิธีการ	51
ผลและวิจารณ์	60
ผล	60
วิจารณ์	60
สรุปและข้อเสนอแนะ	79
สรุป	79
ข้อเสนอแนะ	80
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	81
ภาคผนวก	87
ภาคผนวก ก	88
ภาคผนวก ข	93
ภาคผนวก ค	142
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	146

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	พื้นที่เก็บเกี่ยว และผลผลิตต่อไร่ มันสำปะหลังของประเทศผู้ผลิตที่สำคัญ ปี 2546-2548	5
2	เนื้อที่ ผลผลิต ผลผลิตต่อไร่ ราคา และมูลค่าของผลผลิตตามราคาของมันสำปะหลังเกษตรกรขายได้ ปี 2541-2550	6
3	ข้อมูลเบื้องต้นใบมันสำปะหลังพันธุ์ต่างๆ ในศูนย์วิจัยพืชไร่นครราชสีมา และศูนย์วิจัยพืชไร่ขอนแก่น ปี 2002/2003	7
4	องค์ประกอบทางเคมีของใบมันสำปะหลัง	8
5	กรดอะมิโนในโปรตีนของใบมันสำปะหลัง	9
6	ค่าเฉลี่ยวัตถุแห้งและโปรตีนหยาบของใบพืชชนิดต่าง ๆ	10
7	ปริมาณของกรดไฮโดรไซยานิคในส่วนต่าง ๆ ของมันสำปะหลัง	12
8	ปริมาณกรดไซยาไนด์ (mg/kg dry matter)ในใบมันสำปะหลังที่ผ่านกระบวนการตากแดดที่ระยะเวลาต่าง ๆ	13
9	ปริมาณสารที่เหลืออยู่ในใบมันสำปะหลังเมื่อผ่านกระบวนการต่างๆ	15
10	ปริมาณเศษเหลือทางการเกษตรที่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ ปี 2548	29
11	ขนาดโดยประมาณของเชื้อเพลิงที่ใช้กับเตาผลิตก๊าซ	31
12	ค่าความชื้นและพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงบางชนิด	31
13	องค์ประกอบโดยประมาณของเหง้ามันสำปะหลังที่นำมาเป็นเชื้อเพลิง	60
14	ขนาดความยาวและความหนาแน่นโดยรวมของเหง้ามันสำปะหลังที่ทดสอบ	62
15	ข้อมูลระบบผลิตก๊าซชีวมวลเฉลี่ย (ภาคผนวกที่ ก)	63
16	องค์ประกอบของก๊าซชีวมวลที่ผลิตได้จากเตาผลิตก๊าซ	64
17	การอบแห้งใบมันสำปะหลังสดสับด้วยเครื่องอบแห้งโดยใช้พลังงานจากเตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลลง	66
18	การอบแห้งใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่งนาน 12 ชั่วโมง ด้วยเครื่องอบแห้งโดยใช้พลังงานจากเตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลลง	68

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
19	ปริมาณโปรตีนในใบมันสำปะหลังอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง	70
20	ปริมาณไซยาไนด์ในใบมันสำปะหลังอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง	72
21	ปริมาณแทนนินในใบมันสำปะหลังอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง	73
ก1	ข้อมูลการประมาณค่าองค์ประกอบทั่วไปในเหง้ามันสำปะหลัง	89
ก2	ข้อมูลองค์ประกอบของก๊าซที่ผลิตได้จากเหง้ามันสำปะหลัง	89
ก3	ความหนาแน่นโดยรวมของเหง้ามันสำปะหลัง	89
ก4	ระบบผลิตก๊าซชีวมวลและห้องผสมอากาศ การทดลองที่ 1	90
ก5	ระบบผลิตก๊าซชีวมวลและห้องผสมอากาศ การทดลองที่ 2	90
ก6	ระบบผลิตก๊าซชีวมวลและห้องผสมอากาศ การทดลองที่ 3	91
ก7	อัตราการไหลของอากาศเข้าเตาและอัตราการผลิตก๊าซชีวมวล การทดลองที่ 1	91
ก8	อัตราการไหลของอากาศเข้าเตาและอัตราการผลิตก๊าซชีวมวล การทดลองที่ 2	92
ก9	อัตราการไหลของอากาศเข้าเตาและอัตราการผลิตก๊าซชีวมวล การทดลองที่ 3	92
ข1	กระบวนการผลิตความร้อนเพื่ออบแห้งใบมันสำปะหลังการทดลองที่ 1-3	94
ข2	อุณหภูมิห้องอบแห้ง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 20 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับ ที่น้ำหนัก 2 กิโลกรัม	95
ข3	อุณหภูมิใบมันสำปะหลัง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 20 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับ ที่น้ำหนัก 2 กิโลกรัม	96
ข4	ความชื้นใบมันสำปะหลัง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 20 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับ ที่น้ำหนัก 2 กิโลกรัม	97
ข5	กระบวนการผลิตความร้อนเพื่ออบแห้งใบมันสำปะหลังการทดลองที่ 4-6	98
ข6	อุณหภูมิห้องอบแห้ง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 20 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับ ที่น้ำหนัก 4 กิโลกรัม	99
ข7	อุณหภูมิใบมันสำปะหลัง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 20 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับ ที่น้ำหนัก 4 กิโลกรัม	100

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่ **หน้า**

ตารางผนวกที่		หน้า
ข8	ความชื้นใบมันสำปะหลัง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 20 เซนติเมตรลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับ ที่น้ำหนัก 2 กิโลกรัม	101
ข9	กระบวนการผลิตความร้อนเพื่ออบแห้งใบมันสำปะหลังการทดลองที่ 7-9	102
ข10	อุณหภูมิห้องอบแห้ง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 20 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับ ที่น้ำหนัก 6 กิโลกรัม	103
ข11	อุณหภูมิใบมันสำปะหลัง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 20 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับ ที่น้ำหนัก 6 กิโลกรัม	104
ข12	ความชื้นใบมันสำปะหลัง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 20 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับ ที่น้ำหนัก 6 กิโลกรัม	105
ข13	กระบวนการผลิตความร้อนเพื่ออบแห้งใบมันสำปะหลังการทดลองที่ 10-12	106
ข14	อุณหภูมิห้องอบแห้ง ที่ขนาด∅ช่องระบาย 20 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่ง 12 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 2 กิโลกรัม	107
ข15	อุณหภูมิใบมันสำปะหลัง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 20 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่ง 12 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 2 กิโลกรัม	107
ข16	ความชื้นใบมันสำปะหลัง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 20 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่ง 12 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 2 กิโลกรัม	108
ข17	กระบวนการผลิตความร้อนเพื่ออบแห้งใบมันสำปะหลังการทดลองที่ 13-15	109
ข18	อุณหภูมิห้องอบแห้ง ที่ขนาด∅ช่องระบาย 20 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่ง 12 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 4 กิโลกรัม	110
ข19	อุณหภูมิใบมันสำปะหลัง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 20 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่ง 12 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 4 กิโลกรัม	111
ข20	ความชื้นใบมันสำปะหลัง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 20 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่ง 12 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 4 กิโลกรัม	112
ข21	กระบวนการผลิตความร้อนเพื่ออบแห้งใบมันสำปะหลังการทดลองที่ 16-18	113

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ข22	อุณหภูมิห้องอบแห้ง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 20 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่ง 12 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 6 กิโลกรัม	114
ข23	อุณหภูมิใบมันสำปะหลัง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 20 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่ง 12 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 6 กิโลกรัม	115
ข24	ความชื้นใบมันสำปะหลัง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 20 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่ง 12 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 6 กิโลกรัม	116
ข25	กระบวนการผลิตความร้อนเพื่ออบแห้งใบมันสำปะหลังการทดลองที่ 19-21	117
ข26	อุณหภูมิห้องอบแห้ง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 30 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับ ที่น้ำหนัก 2 กิโลกรัม	118
ข27	อุณหภูมิใบมันสำปะหลัง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 30 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับ ที่น้ำหนัก 2 กิโลกรัม	119
ข28	ความชื้นใบมันสำปะหลัง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 30 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับ ที่น้ำหนัก 2 กิโลกรัม	120
ข29	กระบวนการผลิตความร้อนเพื่ออบแห้งใบมันสำปะหลังการทดลองที่ 22-24	121
ข30	อุณหภูมิห้องอบแห้ง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 30 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับ ที่น้ำหนัก 4 กิโลกรัม	122
ข31	อุณหภูมิใบมันสำปะหลัง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 30 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับ ที่น้ำหนัก 4 กิโลกรัม	123
ข32	ความชื้นใบมันสำปะหลัง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 30 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับ ที่น้ำหนัก 4 กิโลกรัม	124
ข33	กระบวนการผลิตความร้อนเพื่ออบแห้งใบมันสำปะหลังการทดลองที่ 25-27	125
ข34	ความชื้นใบมันสำปะหลัง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 30 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับ ที่น้ำหนัก 6 กิโลกรัม	126
ข35	อุณหภูมิใบมันสำปะหลัง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 30 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับ ที่น้ำหนัก 6 กิโลกรัม	127

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่ **หน้า**

ข36	ความชื้นใบมันสำปะหลัง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 30 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับ ที่น้ำหนัก 6 กิโลกรัม	128
ข37	กระบวนการผลิตความร้อนเพื่ออบแห้งใบมันสำปะหลังการทดลองที่ 28-30	129
ข38	อุณหภูมิห้องอบแห้ง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศร้อน 30 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่ง 12 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 2 กิโลกรัม	130
ข39	อุณหภูมิใบมันสำปะหลัง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 30 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่ง 12 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 2 กิโลกรัม	131
ข40	ความชื้นใบมันสำปะหลัง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 30 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่ง 12 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 2 กิโลกรัม	132
ข41	กระบวนการผลิตความร้อนเพื่ออบแห้งใบมันสำปะหลังการทดลองที่ 31-33	133
ข42	อุณหภูมิห้องอบแห้ง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศร้อน 30 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่ง 12 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 4 กิโลกรัม	134
ข43	อุณหภูมิใบมันสำปะหลัง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 30 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่ง 12 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 4 กิโลกรัม	135
ข44	ความชื้นใบมันสำปะหลัง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 30 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่ง 12 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 4 กิโลกรัม	136
ข45	กระบวนการผลิตความร้อนเพื่ออบแห้งใบมันสำปะหลังการทดลองที่ 34-36	137
ข46	อุณหภูมิห้องอบแห้ง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 30 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่ง 12 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 6 กิโลกรัม	138
ข47	อุณหภูมิใบมันสำปะหลัง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 30 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่ง 12 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 6 กิโลกรัม	139
ข48	ความชื้นใบมันสำปะหลัง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 30 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่ง 12 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 4 กิโลกรัม	140
ข49	ผลการวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนที่ผ่านการอบแห้งที่ปัจจัยต่างๆ	141
ข50	ผลการวิเคราะห์ปริมาณไซยาไนด์ที่ผ่านการอบแห้งที่ปัจจัยต่างๆ	141
ข51	ผลการวิเคราะห์ปริมาณแทนนินที่ผ่านการอบแห้งที่ปัจจัยต่างๆ	141

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	Drying Curves	19
2	เตาผลิตชีวมวลชนิดอากาศไหลขึ้น (Updraft Gasifier)	36
3	เตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดอากาศไหลลง (Downdraft Gasifier)	37
4	เตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดอากาศไหลตามขวาง (Cross draft gasifier)	38
5	เตาผลิตก๊าซชีวมวลแบบฟูลอิดไดซ์เบด	39
6	อุปกรณ์ชุดผลิตก๊าซชีวมวล	40
7	เตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลลง	41
8	อุปกรณ์ทำความสะอาดก๊าซ	41
9	พัดลมเป่าอากาศ	42
10	หัวเผา	42
11	อุปกรณ์ชุดอบแห้งใบมันสำปะหลัง	43
12	ห้องผสมอากาศ	43
13	มอเตอร์สำหรับใบพัดดูดอากาศร้อน	44
14	ห้องอบแห้งแบบถังหมุน	44
15	เหง้ามันสำปะหลัง	45
16	ใบมันสำปะหลัง	45
17	แสดงระบบผลิตก๊าซชีวมวลและเครื่องอบแห้งใบมันสำปะหลัง	46
18	เครื่อง Autobomb	47
19	Gas Analyzer	47
20	เทอร์โมคัปเปิล Type K	48
21	ชุดอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ	48
22	ชุดวัดความเร็วลม	49
23	อุปกรณ์ชุดเก็บความชื้น และอุณหภูมิ	49

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
24	เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟาเรด	50
25	นาฬิกาจับเวลา	50
26	เหง้ามันสำปะหลังก่อนสับลดขนาด	52
27	เครื่องสับใบมันสำปะหลัง	55
28	แผนผังวิธีการอบแห้งใบมันสำปะหลัง	57
29	เครื่องสับอย่างหยาบสำหรับสับเหง้ามันสำปะหลังหลัง	61
30	เหง้ามันสำปะหลังหลังสับลดขนาด	62

ศึกษาและพัฒนาการอบแห้งใบมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้ง แบบโรตารี่โดยใช้ก๊าซชีวมวลจากเหง้ามันสำปะหลัง

Study and Development of Cassava Leaf Drying by Rotary Dryer Utilized Cassava Root Stem as Energy Source with Gasifier

คำนำ

ปัจจุบันการเลี้ยงสัตว์ในประเทศไทยขยายตัวมากขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภค และรองรับนโยบายครัวไทยสู่ครัวโลก ทำให้ประสบปัญหาขาดแคลนอาหารสัตว์ที่มีคุณภาพ และวัตถุดิบอาหารสัตว์มีราคาสูงขึ้นเรื่อยๆ ต้นทุนในการเลี้ยงสัตว์ทุกชนิดส่วนใหญ่เป็นค่าอาหารมากกว่าร้อยละ 60 ที่เหลือเป็นค่ายา ค่าโรงเรือน ฯลฯ (พันทิพา, 2543) ฉะนั้น ผู้เลี้ยงจึงพยายามลดต้นทุนค่าอาหาร โดยการผสมอาหารสัตว์ใช้เองจากวัสดุที่มีอยู่ภายในประเทศ เพื่อช่วยลดการนำเข้าวัตถุดิบอาหารสัตว์ที่เป็นแหล่งโปรตีนจากต่างประเทศ ในปี 2549 ประเทศไทยมีการนำเข้าถั่วเหลืองจากต่างประเทศ เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมน้ำมันและอาหารสัตว์มีมูลค่า 3.74 หมื่นล้านบาท และเพิ่มขึ้นเป็น 5.49 หมื่นล้านบาท ในปี 2550 (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2550) จากปัญหาดังกล่าวจึงน่าจะมีการนำใบมันสำปะหลังมาใช้เป็นแหล่งเสริมโปรตีนอาหารสัตว์ทดแทน

มันสำปะหลังเป็นพืชไร่เศรษฐกิจที่สำคัญอันดับที่ 4 ของประเทศไทย เนื่องจากมันสำปะหลังสามารถปลูกได้ในพื้นที่ที่ไม่สามารถปลูกพืชอย่างอื่นได้ ทนต่อความแห้งแล้งและโรคพืช หัวมันสำปะหลังที่ได้เป็นวัตถุดิบสำคัญสำหรับอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์มันสำปะหลัง ทำให้เป็นที่นิยมปลูกมากขึ้น พื้นที่ปลูกมันสำปะหลังในปี 2550 มีประมาณ 7.6 ล้านไร่ (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2550) ซึ่งมีใบมันสำปะหลังเหลือทิ้ง 3,800 ล้านตัน หากไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์จะทำให้ต้องสูญเสียโปรตีนประมาณ 585 - 1,638 ล้านตัน(แห้ง)ต่อปี ที่ผ่านมามีการใช้ ใบมันสำปะหลังเป็นแหล่งอาหารสัตว์ ด้วยการผึ่งแดดให้แห้งซึ่งต้องใช้เวลา 2 - 3 วัน (อุทัย และสุกัญญา, 2547) การผึ่งแดดพบปัญหาหลายอย่าง เช่น ส่วนใบมันสำปะหลังที่แห้งก่อนมักถูกลมพัดปลิวไป และยังมีปัญหาปนเปื้อนด้วยฝุ่นละออง ดินทราย มูลนก ที่สำคัญคือในฤดูฝนใบมันสำปะหลังมีปริมาณมาก แต่ปริมาณแสงแดดไม่เพียงพอ หรือฝนตกจนผึ่งแดดไม่ได้ ดังนั้นจึงสนใจที่จะพัฒนาเครื่องอบแห้งใบมันสำปะหลัง

เครื่องอบแห้งแบบโรตารี่สามารถใช้อบแห้งผลิตภัณฑ์ได้หลายรูปแบบ มีลักษณะเด่นที่น่าสนใจ คือ การทำงานไม่ยุ่งยาก สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูง และอบแห้งได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นสม่ำเสมอ (วิวัฒน์, 2529) เครื่องอบแห้งแบบโรตารี่ ประกอบด้วย ตัวถังทรงกระบอกทำมุมเอียงเล็กน้อยกับแนวระดับ ภายในมีตัวตักติดอยู่ที่ผนังตามแนวนอน ผลิตภัณฑ์จะถูกตักขึ้นและตกลงมาด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกผ่านกระแสอากาศร้อน การอบแห้งเกิดขึ้นขณะที่ผลิตภัณฑ์ตกผ่านอากาศร้อน ซึ่งเครื่องอบแห้งที่ใช้กันในปัจจุบัน จะใช้น้ำมันเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ และนำพลังงานความร้อนที่ได้ไปอบแห้งผลิตภัณฑ์ ทำให้ค่าใช้จ่ายในการอบแห้งจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับราคาของน้ำมันด้วย ซึ่งส่งผลการทบต่อต้นทุนในการอบแห้ง ดังนั้นเราสามารถหาพลังงานจากแหล่งอื่นมาทดแทนพลังงานจากน้ำมันอย่างวัสดุเศษเหลือทางการเกษตรมาเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลได้

การใช้พลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil fuel) อย่างถ่านหิน น้ำมัน มาใช้เป็นแหล่งพลังงานหลักมีราคาสูง และยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จึงได้นำพลังงานอื่นมาทดแทน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ และพลังงานเชื้อเพลิงชีวมวล เป็นต้น โดยเฉพาะพลังงานชีวมวลเป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติ เนื่องจากเป็นแหล่งพลังงานที่มีอยู่มากจากวัตถุดิบที่เหลือใช้ในธรรมชาติและการเกษตร สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้โดยตรง หรือนำชีวมวลมาเปลี่ยนรูป (Biomass energy conversion) ก่อนนำมาใช้เพื่อความสะดวกในการใช้งาน โดยเฉพาะกระบวนการผลิตก๊าซชีวมวล (Gasification process) และการแยกสลายด้วยความร้อน (Thermo-chemical conversion) ซึ่งนิยมใช้มาก เช่น วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรอย่าง เหง้ามันสำปะหลัง ที่ถูกตัดทิ้งกระจายอยู่ในไร่ประมาณ 1.4 ล้านตันต่อปี (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2549) และยังไม่มีการนำมาใช้ประโยชน์สามารถนำมาเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลได้

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาและพัฒนาการอบแห้งใบมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบโรตารี่โดยใช้ก๊าซชีวมวลชนิดไหลลงเป็นพลังงานจากเหง้ามันสำปะหลัง เพื่อใช้ใบมันสำปะหลังเป็นแหล่งเสริมโปรตีนอาหารสัตว์ที่หาได้ภายในประเทศ ซึ่งจะก่อให้เกิดรายได้เพิ่มแก่เกษตรกรผู้ปลูกมันสำปะหลัง และพัฒนาอาชีพการปลูกมันสำปะหลังให้ยั่งยืน ขณะเดียวกันผู้เลี้ยงสัตว์ก็จะมีแหล่งวัตถุดิบที่มีราคาถูกสำหรับสัตว์ ตามหลัก Good Manufacturing Practice (GMP) และ Food Safety

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษากระบวนการผลิตก๊าซชีวมวลด้วยเหง้ามันสำปะหลังโดยใช้เตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลลง

2. เพื่อพัฒนากระบวนการอบแห้งใบมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบโรตารี่โดยใช้เตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลลงโดยใช้เหง้ามันสำปะหลังเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงาน

การตรวจเอกสาร

มันสำปะหลัง

1. ลักษณะทั่วไปของมันสำปะหลัง

มันสำปะหลังเป็นพืชหัวและมีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของไทย การผลิตมันสำปะหลังส่วนใหญ่ของไทยมากกว่า 50 % ของผลผลิตทั้งหมดมาจากภาคตะวันออกเฉียงเหนือ รองลงมาคือภาคกลางประมาณ 33 % และ ภาคเหนือประมาณ 15 % โดยมีจังหวัดที่เป็นแหล่งเพาะปลูกที่สำคัญได้แก่ นครราชสีมา กำแพงเพชร ชัยภูมิ และฉะเชิงเทรา ตามลำดับ (สำนักงานเศรษฐกิจ, 2549)

มันสำปะหลังเป็นไม้ยืนต้นและเป็นพืชเมืองร้อน มีทรงพุ่มขนาดความสูง 1-4 เมตร และสามารถจัดหมวดหมู่ทางพฤกษศาสตร์ได้ดังนี้

Genus	*Manihot*
Family	*Euphorbiaceae*
Subdivision	*Agiospermae*
Class	*Dicotyledinae*
Order	*Geraniales*

มันสำปะหลังสามารถเจริญเติบโตได้ดีในบริเวณที่มีอุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส สามารถปรับตัวได้ดีในเขตที่มีฝนตกอยู่ระหว่าง 1,000– 3,000 มิลลิเมตรต่อปี มีความทนทานต่อสภาพอากาศร้อน และขาดน้ำได้ดีเป็นระยะเวลาติดต่อกัน 3 - 4 เดือน สามารถทนอยู่ได้ ลักษณะเด่นอีกประการหนึ่งของมันสำปะหลังคือ ทนทานต่อสภาพดินเป็นกรดจัด มันสำปะหลังเป็นพืชวันสั้น หากช่วงแสงของวันเกิน 10 - 12 ชั่วโมง จะมีผลทำให้ผลผลิตของมันสำปะหลังลดลง การปลูกมันสำปะหลังติดต่อกันหลายปีโดยไม่มีการใส่ปุ๋ยบำรุงดินอย่างถูกต้อง จะมีผลทำให้ความอุดมสมบูรณ์ของดินลดลงอย่างรวดเร็ว ตลอดจนโครงสร้างของดินถูกทำลาย (อุทัย และสุกัญญา, 2547) แต่เนื่องจากความทนทานต่อสภาพแวดล้อม และการดูแลรักษาที่ไม่ยุ่งยากทำให้มันสำปะหลังเป็นที่นิยมปลูกของเกษตรกรทั่วโลก นอกจากนี้ยังสามารถนำส่วนต่างๆ ของมันสำปะหลังมาใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย สำหรับพื้นที่ปลูกรวมถึงผลผลิตของแต่ละประเทศแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พื้นที่เก็บเกี่ยว และผลผลิตต่อไร่มันสำปะหลังของประเทศผู้ผลิตที่สำคัญปี 2546-2548

ประเทศ	พื้นที่เก็บเกี่ยว (1,000 ไร่)			ผลผลิต (1,000 ตัน)			ผลผลิตต่อไร่ (กิโลกรัม)		
	2546	2547	2548	2546	2547	2548	2546	2547	2548
ทั้งโลก	109,178	115,421	116,393	190,722	203,545	203,790	1,747	1,763	1,751
ไนจีเรีย	21,813	25,735	25,738	32,913	38,179	38,179	1,509	1,483	1,483
บราซิล	10,210	10,941	12,082	21,961	23,778	26,645	2,151	2,173	2,205
อินโดนีเซีย	7,778	7,849	7,648	18,524	19,425	19,459	2,381	2,475	2,544
ไทย	6,386	6,608	6,162	19,718	21,440	16,938	3,087	3,244	2,749
คองโก	11,511	11,516	11,534	14,945	14,951	14,974	1,298	1,298	1,298
กานา	5,045	4,899	4,899	10,239	9,739	9,739	2,030	1,988	1,988
อังโกลา	4,024	4,338	4,679	5,699	6,650	8,606	1,416	1,533	1,839
แทนซาเนีย	4,125	4,125	4,188	6,890	6,890	7,000	1,670	1,670	1,672
อินเดีย	1,500	1,500	1,500	7,000	6,700	6,700	4,667	4,467	4,467
โมซัมบิก	6,535	6,678	6,563	6,150	6,413	6,150	941	960	937
อื่นๆ	30,250	31,230	31,401	46,683	49,381	49,399	1,543	1,581	1,573

ที่มา: สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2549)

จากตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่าประเทศไทยมีผลผลิตมันสำปะหลังเป็นอันดับที่ 4 ของโลกในปี 2548 รองจากประเทศ ไนจีเรีย, บราซิล และอินโดนีเซีย ตามลำดับ และสามารถผลิตผลผลิตต่อไร่ได้สูงเป็นอันดับที่ 2 ของโลก รองจากประเทศอินเดีย จากความต้องการของตลาดโลก ทำให้เกษตรกรหันมาปลูกเพื่อส่งออกมากขึ้น เนื่องจากราคาส่งออกมีแนวโน้มสูงขึ้นแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เนื้อที่ ผลผลิต ผลผลิตต่อไร่ ราคา และมูลค่าของผลผลิตตามราคาของมันสำปะหลังเกษตรกรขายได้ ปี 2541-2550

ปี	เนื้อที่เพาะปลูก (1,000 ไร่)	เนื้อที่เก็บเกี่ยว (1,000 ไร่)	ผลผลิต (1,000 ตัน)	ผลผลิตต่อไร่ (กก.)	ราคาที่ขาย (บาท/กก.)	มูลค่าของผลผลิตที่ขาย (ล้านบาท)
2541	6,694	6,527	15,591	2,388	1.26	19,644
2542	7,200	6,659	16,507	2,479	0.91	15,021
2543	7,406	7,068	19,064	2,697	0.63	12,010
2544	6,918	6,558	18,396	2,805	0.69	12,693
2545	6,224	6,176	16,868	2,731	1.05	17,712
2546	6,435	6,386	19,718	3,087	0.93	18,337
2547	6,757	6,608	21,440	3,244	0.80	17,152
2548	6,524	6,162	16,938	2,749	1.33	22,528
2549	6,933	6,693	22,584	3,375	1.29	29.134
2550	7,479	7,201	26,411	3,668	1.12	29,581

ที่มา: สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2550)

จากตารางที่ 2 มูลค่าของผลผลิตที่ขายมีมูลค่าเพิ่มมากขึ้นทุกปี และมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นอีก เนื่องจากปัจจัยต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้น รวมถึงปัจจุบันมีการส่งเสริมการปลูกมันสำปะหลังเพื่อนำไปผลิตเป็นพลังงานทดแทน ซึ่งทางมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ นำโดยสถาบันสุวรรณวาจกกสิกิจฯ ศูนย์ค้นคว้าและพัฒนาวิชาการอาหารสัตว์ ได้สนับสนุนให้เกษตรกรเพิ่มผลผลิตมันสำปะหลังให้สูงขึ้นเพื่อผลิตเป็นอาหารสัตว์ รวมทั้งส่งเสริมการใช้ใบมันสำปะหลังเป็นอาหารเสริมโปรตีนในอาหารสัตว์ต่างๆ และการนำไปใช้ประโยชน์อย่างถูกวิธี

จากการศึกษาปัจจัยการผลิตใบมันสำปะหลังโดยนำส่วนยอดของต้นมันสำปะหลังมาเป็นแหล่งพืชโปรตีนอาหารสัตว์ เก็บเกี่ยวผลผลิตโดยการตัดยอดจำนวน 4 ครั้งต่อปี คือเก็บเกี่ยวทุกๆ 3 เดือน ในปี 2545/2546 ที่ศูนย์วิจัยพืชไร่นครราชสีมา และศูนย์วิจัยพืชไร่ขอนแก่น ได้ศึกษาปริมาณใบในแต่ละสายพันธุ์ ที่สามารถผลิตปริมาณโปรตีนสูงสุดดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ข้อมูลเบื้องต้นใบมันสำปะหลังพันธุ์ต่างๆ ในศูนย์วิจัยพืชไร่นครราชสีมา และศูนย์วิจัยพืชไร่ขอนแก่น ปี 2545/2546

พันธุ์	ใบมันสำปะหลังแห้ง (กก.ต่อ ไร่)	ปริมาณโปรตีนเฉลี่ย (%)	ผลผลิตโปรตีนทั้งหมด (กก.ต่อ ไร่)
ระยอง 1	2208.00	17.52	352.00
ระยอง 5	2110.40	18.20	368.00
ระยอง 90	2075.20	18.36	371.20
ระยอง 72	2009.60	19.18	380.80
เกษตรศาสตร์ 50	2476.80	17.30	412.80
ห้วยบง 60	2051.20	18.07	358.40

ที่มา: อัจฉรา (ม.ป.ป.)

2. การใช้ใบมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบอาหารสัตว์

ในการนำส่วนของใบมันสำปะหลังมาใช้เป็นแหล่งโปรตีนจะเน้นใช้แผ่นใบเป็นหลัก เนื่องจากก้านใบมีปริมาณโปรตีนเพียงหนึ่งในหกเท่าเมื่อเทียบกับโปรตีนที่แผ่นใบ (ภรณี, 2540) ส่วนประกอบต่างของต้นมันสำปะหลังเมื่อคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ พบว่าแบ่งเป็นรากหรือหัวมัน (roots) 45 % ลำต้น (stem) 35% และส่วนยอด (foliage) 20% ซึ่งส่วนยอดประกอบด้วยแผ่นใบ (leaf) 45% ก้านใบ (petiole) 25% และลำต้นอ่อน (tenderstem) 30% (Ravindran, 1993)

ใบมันสำปะหลังจัดเป็นวัตถุดิบที่มีคุณค่าทางอาหารสัตว์สูง เนื่องจากอุดมไปด้วยโปรตีน เยื่อใย ไขมัน แร่ธาตุ และสารสีแซนโทฟิลล์ จึงสามารถใช้ทดแทนหรือเสริมวัตถุดิบอาหารโปรตีน เช่น กากถั่วเหลือง และปลาป่น ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนในการเลี้ยงสัตว์ได้อย่างมาก องค์ประกอบในใบมันสำปะหลังจะแตกต่างกัน เนื่องจากพันธุ์และสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 องค์ประกอบทางเคมีของใบมันสำปะหลัง

องค์ประกอบทางเคมี	ใบมันสำปะหลัง (%โดยน้ำหนักแห้ง)
ความชื้น	9.28
โปรตีนหยาบ (Crude protein)	23.10
โปรตีนจริง (True protein)	20.02
เยื่อใย	21.11
ไขมัน	7.24
เถ้า	5.72
คาร์โบไฮเดรต	33.53
แซนโทฟิลล์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	660
แคลเซียม	0.99
ฟอสฟอรัส	0.73
กรดไฮโดรไซยานิค (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	30.50
พลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ (แคลอรี่ต่อกรัม)	2,123.82

ที่มา: อุทัย และสุกัญญา (2547)

นอกจากจะมีปริมาณโปรตีนสูง เมื่อพิจารณาจากกรดอะมิโนที่จำเป็น เปรียบเทียบกับกรดอะมิโนมาตรฐานอาหารสัตว์ของ FAO พบว่า ใบมันสำปะหลังมีกรดอะมิโนตัวอื่นๆ สูงกว่ามาตรฐาน ยกเว้น เมทไธโอนีนเท่านั้นที่ต่ำกว่ามาตรฐาน แสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 กรดอะมิโนในโปรตีนของใบมันสำปะหลัง

กรดอะมิโน	ใบมันสำปะหลัง		กรดอะมิโนที่จำเป็น
	จาไมก้า (%)	บราซิล (%)	ตามมาตรฐานของ FAO
อลานีน	5.98	6.19	-
อาจินีน	5.28	6.12	-
แอสฟาราดิค แอซิค	10.14	9.13	-
ซีสตีน	1.37	1.04	-
กลูตามิค แอซิค	10.22	10.12	-
ไกลซีน	5.39	5.32	-
ฮิสติดีน	2.33	2.56	-
ไอโซลิวซีน	5.01	4.84	4.20
ลิวซีน	8.89	8.85	4.80
ไลซีน	7.20	6.33	4.20
เมทไธโอนีน	1.65	1.71	2.20
เฟนนินอลานีน	5.82	5.53	2.80
โปรลีน	4.64	5.40	-
เซอรีน	5.16	4.60	-
ทรีโอนีน	4.92	4.73	2.80
ทริฟโตเฟน	1.47	2.07	1.40
ไทโรซีน	4.18	3.93	-
แวลีน	5.73	5.58	4.20

ที่มา: เจริญศักดิ์ (2532)

จากตารางที่ 5 แสดงให้เห็นว่าใบมันสำปะหลังมีปริมาณอะมิโนตามมาตรฐาน FAO จะมีเพียงแต่เมทไธโอนีนเท่านั้นที่ต่ำกว่ามาตรฐานสามารถแก้ปัญหาได้ (ภรณี, 2540) กล่าวว่า การเติมหรือเสริมพืชอื่น เช่น กากเมล็ดงา ซึ่งมีเมทไธโอนีนสูง ทำให้ได้กรดอะมิโนครบถ้วนและเกิดประโยชน์อย่างเต็มที่ เมื่อทดลองนำใบมันสำปะหลังแห้งไปใช้ผสมเป็นอาหารสัตว์

3. คุณค่าทางอาหารของใบมันสำปะหลัง

3.1 โปรตีน (Protein) เป็นส่วนประกอบหลักที่สำคัญของร่างกายสัตว์ ดังนั้นอาหารสัตว์ต้องมีปริมาณโปรตีนมากพอ ตามความต้องการของสัตว์ที่อายุและวัยแตกต่างกัน โปรตีนที่ใช้เป็นอาหารสัตว์มีทั้งโปรตีนจากพืช (plant protein) และโปรตีนจากสัตว์ (animal protein) ซึ่งมีคุณภาพต่างกัน โปรตีน คือ สารประกอบเชิงซ้อนของอินทรีย์สาร มีน้ำหนักโมเลกุลสูง โปรตีนอาหารสัตว์แบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ๆได้ 3 กลุ่ม คือ โปรตีนรวม (โปรตีนอย่างหยาบ), โปรตีนที่แท้จริงและโปรตีน (รวม) ที่ย่อยได้ ดังแสดงดังตารางที่ 6 พบว่า ใบมันสำปะหลังให้ปริมาณโปรตีนสูง กว่ากว่าใบพืชชนิดอื่นๆ ที่ปริมาณวัตถุแห้งต่ำกว่าใบพืชชนิดอื่นๆ ดังนั้นเมื่อใช้ใบพืชที่ปริมาณเท่ากันใบมันสำปะหลังสามารถให้ปริมาณโปรตีนได้มากกว่าใบพืชชนิดอื่นๆ

ตารางที่ 6 ค่าเฉลี่ยปริมาณวัตถุแห้งและโปรตีนหยาบของใบพืชชนิดต่างๆ

ตัวอย่างใบพืช	ปริมาณวัตถุแห้ง (%)	ปริมาณโปรตีนหยาบ (N*6.25 = %DM)
ใบมันสำปะหลัง	22.0	29.0
ใบกระถินยักษ์	35.7	27.8
ใบไผ่	45.6	15.9
ใบขนุน	43.8	15.0

ที่มา: Brenda *et al*. (1997)

3.2 สารสี (Pigment) ใบมันสำปะหลังมีสารสีแซนโทฟิลล์ ประมาณ 600 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง (อุทัย, 2547) จัดเป็นรงควัตถุในกลุ่มอนุพันธ์ของรงควัตถุประเภทแคโรทีนอยด์ ให้สีเหลือง สีส้ม จนถึงสีแดง โดยอยู่ควบคู่กับคลอโรฟิลล์ในสัดส่วนประมาณ 1 ใน 3 ของคลอโรฟิลล์ ซึ่งเป็นสัดส่วนที่น้อยจึงถูกสีเขียวของคลอโรฟิลล์บดบังไว้ แซนโทฟิลล์ ประกอบด้วยลูทีน (lutein), ซีแซนทิน (zeaxanthin) และแอสตาแซนทิน (astaxanthin) เป็นต้น ซึ่งปัจจุบันอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ได้มีการนำแซนโทฟิลล์ มาผสมในอาหารสัตว์บางชนิด เช่น อาหารสัตว์น้ำเพื่อให้ปลามีสีสันสวยงาม และใช้ผสมในอาหารสัตว์ปีกเพื่อให้ไข่แดงและหนังสัตว์ปีกต้มมีสีสวยน่ารับประทาน เป็นต้น ซึ่งการใช้ใบมันสำปะหลังเป็นแหล่งสารสีแซนโทฟิลล์ในอาหารไก่ไข่ และ

พบว่าการเพิ่มระดับใบมันสำปะหลังในสูตรอาหารสัตว์ทำให้คะแนนสีไข่แดงสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (ทวีศักดิ์ และคณะ, 2544)

สำหรับประเทศไทยพบว่ามีการนำเข้าสีผสมอาหารจากต่างประเทศ ในปี 2548 มีการนำเข้าวัตถุแต่งสีเป็นมูลค่า 16,581.4 ล้านบาท (ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร, 2549) และมีแนวโน้มการนำเข้าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ

4 ข้อจำกัดการใช้ใบมันสำปะหลังสำหรับเป็นอาหารเสริมโปรตีน

สารประกอบตามธรรมชาติในใบมันสำปะหลัง มีสารพิษหรือสารที่จำกัดคุณค่าทางอาหาร (antinutritional compound) ที่สำคัญคือ ไซยานิกไกลโคไซด์ (cyanic glycosides) และแทนนิน (Padmaja, 1989; Ravindran, 1993) สำหรับไซยานิกไกลโคไซด์สามารถถูกเอนไซม์ในเซลล์สลายให้กลายเป็นกรดไฮโดรไซยานิกอิสระ (free hydrocyanic acid) ก่อให้เกิดความเป็นพิษแก่ร่างกายมนุษย์และสัตว์ได้ (Padmaja, 1989; Ravindran, 1993; Voldrich, 1995) ขณะที่แทนนินซึ่งเป็นสารประกอบฟีนอลิก (phenolic compound) ชนิดหนึ่งสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับโปรตีนและสารมหโมเลกุล (macromolecules) อื่นๆ สารประกอบเชิงซ้อนนี้มีผลให้การย่อยได้ของโปรตีนลดลง ดังนั้นวัตถุดิบที่จะนำไปใช้ควรผ่านการเตรียมที่เหมาะสม เช่น การลดปริมาณไซยาไนด์โดยการบดและหมัก (Awoyinka et al., 1995) การผึ่งแดด ต้ม (Ravindran, 1993) และการอบแห้ง เป็นต้น โดยไซยาไนด์จะสูญเสียจากวัตถุดิบได้ในรูปก๊าซ (Fafunso and Bassir, 1976)

4.1 ไซยาโนเจนนิคไกลโคไซด์ (Cyanogenic glycosides) เป็นอนุพันธ์ไกลโคซิดิก ความเป็นพิษของใบมันสำปะหลังเกิดเนื่องจากไฮโดรไซยานิคหรือไฮโดรเจนไซยาไนด์อิสระ (HCN) ที่ถูกเปลี่ยนมาจาก ไซยาโนเจนนิคไกลโคไซด์ 2 ตัว คือ ลินามาริน (Linamarin) และโลทาวสทราลิน (Lotaustralin) ซึ่งพบว่าลินามารินมีปริมาณมากกว่าโลทาวสทราลิน การปลดปล่อยไฮโดรเจนไซยาไนด์อิสระเกิดในกรณีที่ไกลโคไซด์ทั้ง 2 ตัว ถูกย่อยสลายโดยเอนไซม์ลินามาเรส (Linamaraes) แล้วเปลี่ยนเป็นไฮโดรไซยานิค โดยเอนไซม์จะสัมผัสกับไกลโคไซด์เมื่อเนื้อเยื่อถูกทำลายโดยทางกล ในกรณีนี้ไฮโดรเจนไซยาไนด์อิสระบางส่วนมีโอกาสสูญเสียออกไปในรูปของก๊าซได้ระหว่างกระบวนการ (Fafunso and Bassir, 1976) จากการทดลองหาปริมาณของกรดไฮโดรไซยานิคในส่วนต่างๆ ของมันสำปะหลัง แสดงดังตารางที่ 7 พบว่าทุกส่วนของมันสำปะหลังมีปริมาณกรดไฮโดรไซยานิคสูงในระดับที่เป็นพิษมาก คือมีปริมาณของกรดไฮโดรไซยานิคมากกว่า 100 (ppm) น้ำหนักสด (Bruijn, 1971)

ตารางที่ 7 ปริมาณของกรดไฮโดรไซยานิคในส่วนต่างๆ ของมันสำปะหลัง

ส่วนของมันสำปะหลัง		ปริมาณกรดไฮโดรไซยานิค (ppm) น้ำหนักสด
ใบ	ใบอ่อน	490
	ใบเจริญเต็มที่	590
	ใบแก่	380
ก้านใบ	ก้านใบอ่อน	720
	ก้านใบเจริญเต็มที่	340
	ก้านใบแก่	150
ลำต้น	ส่วนบนใกล้ใบ	630
	ส่วนล่างที่สองในสามของลำต้น	310
หัว	เปลือก	640
	หักเอาเปลือกออก	440
	แกนใน	140

ที่มา: Bruijn (1971)

จากตารางที่ 7 ปริมาณของกรดไฮโดรไซยานิคในส่วนต่างๆ ของมันสำปะหลังมีปริมาณมากอยู่ในระดับที่เป็นอันตราย แต่เนื่องคุณค่าของใบมันสำปะหลังยังคงเป็นที่น่าสนใจในการผลิตเป็นพืชโปรตีน และสามารถลดสารไซยาไนด์ลงได้ด้วยกระบวนการผึ่งแดด แสดงดังตารางที่ 8 อธิบายว่า สารไซยาไนด์สามารถลดลงได้เมื่อสับใบมันสำปะหลัง และเมื่อผึ่งแดดที่เวลาวันมากขึ้น ปริมาณสารไซยาไนด์จะลดลงอยู่ในระดับที่เป็นพิษปานกลาง คือมีปริมาณของกรดไฮโดรไซยานิคระหว่าง 50 - 100 (ppm) น้ำหนักสด (Bruijn, 1971)

ตารางที่ 8 ปริมาณกรดไซยาไนด์ (mg/kg dry matter) ในใบมันสำปะหลังที่ผ่านการผึ่งแดด ที่ระยะเวลาต่างๆ [/1]

หน่วย : mg/kg dry matter

เวลา (วัน)	ผึ่งแดด	
	ใบมันสำปะหลังเต็มใบ [/2]	ใบมันสำปะหลังสับ[/3]
0	173 (88.0)/4	109 (92.4)
1	141 (90.2)	88 (93.4)
2	114 (92.1)	72 (95.0)
3	93 (93.5)	53 (96.3)

หมายเหตุ [/1] Ravindran (1993)

[/2] ปริมาณไซยาไนด์ในใบมันสำปะหลังสดเฉลี่ย 1,436 mg HCN /kg dry matter

[/3] ปริมาณไซยาไนด์ในใบมันสำปะหลังสดเฉลี่ย 1,045 mg HCN /kg dry matter

[/4] ในวงเล็บเป็น (%) ปริมาณไซยาไนด์ที่ลดลงจากที่มีในใบมันสำปะหลังสดที่เก็บมา

ที่มา: Ravindran (1993)

4.2 แทนนิน (Tannin) จัดเป็นสารประกอบฟีนอลิกมีน้ำหนักโมเลกุล 500 – 3,000 พบในพืชส่วนใหญ่ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl) จำนวนมาก สามารถทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับโปรตีนและโมเลกุลอื่น ๆ (Conn, 1973) แทนนินที่พบมากมีสองชนิด คือ ไฮโดรไลเซเบิลแทนนิน (Hydrolysable tannin) และคอนเดนส์แทนนิน (Condensed tannin) ตัวที่เป็นปัญหาสำคัญได้แก่ คอนเดนท์แทนนินในใบซึ่งมีปริมาณมากน้อยต่างกันในพืชแต่ละพันธุ์ แต่ละชนิด พบในรูปที่เชื่อมกับโปรตีนด้วยพันธะไฮโดรเจนหลายๆ ตำแหน่งซึ่งแยกออกไม่ได้โดยเอนไซม์ในระบบย่อยอาหารจึงทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่ย่อยยาก โปรตีนเกิดการตกตะกอน และมีกรดอะมิโนที่ถูกนำไปใช้ประโยชน์ได้ต่ำ และแทนนินทำให้เกิดรสฝาดในผลิตภัณฑ์ โดยการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโปรตีนและแทนนิน ส่งผลต่อสัตว์ในด้านลบ ทำให้สัตว์กินอาหารได้น้อยลง และการที่แทนนินไปจับกับโปรตีนอาหารสัตว์และน้ำย่อยที่เกี่ยวข้องกับการย่อยอาหารเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่อยู่ตัวและตกตะกอน จึงมีผลทำให้สัตว์ย่อยอาหารได้ลดลง (อุทัย, 2543)

5 วิธีการลดสารพิษในใบมันสำปะหลัง

5.1 วิธีหั่นหรือสับใบ ก้านใบและลำต้นส่วนยอดให้เป็นชิ้นฝอย หั่นหรือสับแล้วนำมาผึ่งไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง ก็จะช่วยลดกรดไฮโดรไซยานิคได้ เพราะระหว่างที่ผึ่งไว้สารไซยาโนเจนิค-ไกลโคไซด์จะถูกเปลี่ยนเป็นกรดไฮโดรไซยานิค สามารถจะระเหยไประหว่างที่ผึ่งได้

5.2 การหมักใบมันสำปะหลัง ก้านใบและลำต้นส่วนยอด โดยทั่วไปจะหมักแล้วจึงนำไปทำแห้งโดยการตากแดดอีกครั้ง จะช่วยลดกรดไฮโดรไซยานิคได้ดีกว่าการทำแห้งโดยตรง การหมักโดยนำใบมันสำปะหลังสดหั่นเป็นชิ้นเล็กๆใส่ในไซโลปิดให้แน่นไม่ให้อากาศเข้า ทิ้งไว้ 21 วันจึงนำไปเลี้ยงสัตว์ได้ (Du Thanh Hang, 1998)

5.3 การทำแห้งโดยใช้ความร้อนหรือแสงแดด กรดไฮโดรไซยานิคจะระเหยออกไปเมื่อถูกความร้อน แต่สารที่เป็นต้นกำเนิดของกรดนี้ คือ ไซยาโนเจนิค ไกลโคไซด์ ไม่สลายตัวเมื่อถูกความร้อน ที่อุณหภูมิสูงกว่า 55 องศาเซลเซียส (Ayodeji and Fasuyi, 2005) ดังนั้นกระบวนการแปรรูปเพื่อลดสารไซยาไนด์นั้น ควรจะมีระยะเวลาหนึ่งที่ทำให้สารไซยาโนเจนิค ไกลโคไซด์ เปลี่ยนเป็นกรดไฮโดรไซยานิคเสียก่อน เมื่อใช้ความร้อน หรือนำไปตากก็จะทำให้ระเหยออกไปได้

5.4 การล้างน้ำหรือแช่น้ำ ด้วยเหตุที่ว่ากรดไฮโดรไซยานิค สามารถละลายน้ำได้ ดังนั้นการนำเอาใบมันสำปะหลังไปล้างและแช่น้ำหลายๆ ครั้ง สามารถลดปริมาณกรดไฮโดรไซยานิคได้

5.5 การต้ม หรือนึ่ง โดยปกติเอนไซม์ลินามาเรส สามารถทำงานได้ในสภาวะที่เหมาะสม เช่น ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และ pH 5.5-6.0 แต่เมื่อให้ความร้อนแก่มันสำปะหลังที่อุณหภูมิสูงกว่า 72 องศาเซลเซียส ทำให้เอนไซม์ลินามาเรสถูกทำลายให้เสียสภาพไปและไม่สามารถทำงานได้ (Denature) (Hahn, 1989) ฉะนั้นเมื่อเอนไซม์อยู่ในสภาวะไม่เหมาะสมที่จะสามารถทำงานได้ก็ไม่ก่อให้เกิดสารพิษกรดไฮโดรไซยานิค ตามมาเช่นกัน

5.6 เครื่องบีบอัดใบโดยตรง เช่น เครื่องบีบอัดแบบเกลียว (Screw press) ปริมาณสารไซยาไนด์ในใบจะลดลงได้มากหลังผ่านขั้นตอนการทำให้ละเอียดและคั้นน้ำออกมา แม้มีหลงเหลืออยู่บ้างแต่เป็นปริมาณน้อยซึ่งอยู่ในเกณฑ์ปลอดภัย เมื่อบริโภคในปริมาณปกติ (Fafunso and Bassir, 1976; Ravindran, 1993)

Beuijn (1971) ได้จัดลำดับความเป็นพิษไว้อย่างกว้างๆ ดังนี้ คือ

ไม่เป็นพิษ	:	มีปริมาณกรดไฮโดรไซยานิค น้อยกว่า 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักสด (ppm)
เป็นพิษปานกลาง	:	มีปริมาณกรดไฮโดรไซยานิค ตั้งแต่ 50-100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักสด (ppm)
เป็นพิษมาก(อันตราย)	:	มีปริมาณกรดไฮโดรไซยานิค มากกว่า 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักสด (ppm)

Ayodeji and Fasuyi (2005) พบว่ากระบวนการต่างๆ ที่มีผลต่อการลดปริมาณสารไซยาไนด์และแทนนิน ดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ปริมาณสารที่เหลืออยู่ในใบมันสำปะหลังเมื่อผ่านกระบวนการต่างๆ

กระบวนการ	ปริมาณสารที่เหลืออยู่ในใบมันสำปะหลัง (%)	
	ไซยาไนด์	แทนนิน
ผึ่งแดด	4.1±1.1	63.9±21.6
อบแห้งด้วยเครื่องอบ	61.1±11.0	48.0±15.0
อบด้วยไอน้ำ	59.0±14.3	78.0±27.0
แช่น้ำ	69.1±5.3	99.8±39.4
อบด้วยไอน้ำ + ผึ่งแดด	44.3±15.0	62.6±18.1
สับ + ผึ่งแดด	3.7±0.1	62.3±8.3

ที่มา: Ayodeji and Fasuyi (2005)

หลักการพื้นฐานการอบแห้ง

1. หลักการอบแห้ง (Principle of drying)

การอบแห้ง (Drying) หมายถึง การกำจัดน้ำออกจากผลิตภัณฑ์เพื่อลดความชื้นให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัย ดังนั้นสิ่งที่สำคัญต่อการอบแห้งผลิตภัณฑ์อาหารคือ น้ำที่มีอยู่ในอาหาร Rockland (1969) กล่าวว่า น้ำมีอยู่ 3 ประเภท คือ (1) โมเลกุลน้ำที่ยึดกับไอออนิกกรุ๊ปได้แก่ กลุ่มคาร์บอกซิลและอะมิโน (2) โมเลกุลน้ำยึดกับกลุ่มไฮดรอกซิล และอะไมด์ (Amide) ด้วยพันธะไฮโดรเจน และ (3) น้ำอิสระพบในช่องว่างอินเตอร์สทิเชียล (Interstitial Pores) ซึ่งแรงคาพิลารี่และองค์ประกอบที่ละลายอยู่ทำให้ความดันไอลดลงในระหว่างกระบวนการอบแห้งนั้น ระดับความยากง่ายของการกำจัดน้ำออกไปจะแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับว่าน้ำนั้นอยู่ในกลุ่มใด ความยากง่ายในการกำจัดความชื้นออกไปจะลดลงตามลำดับและโอกาสที่น้ำจะถูกกำจัดออกไปเป็นปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ หมายความว่าน้ำอิสระที่ระเหยและกำจัดออกไปในตอนแรก จากนั้นจะเป็นโมเลกุลที่ยึดด้วยพันธะไฮโดรเจน และสุดท้ายจะเป็นน้ำที่ยึดด้วยพันธะอิออนิก จากข้อมูลนี้พอสรุปได้ว่าพลังงานที่ต้องใช้ในการกำจัดความชื้นจากน้ำแต่ละชนิดที่กล่าวมา อาจจะใช้พลังงานที่แตกต่างกันในการกำจัดออกไป เนื่องจากความต้องการพลังงานในการกำจัดความชื้นแตกต่างกันขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์และชนิดของน้ำ ดังนั้นการออกแบบเครื่องทำแห้ง จะต้องพิจารณาปัจจัยต่างๆ ให้มากที่สุดเท่าที่จะมากได้ ประสิทธิภาพของเครื่องที่ออกแบบขึ้นกับว่าสามารถกำจัดความชื้นตามที่ต้องการได้หรือไม่ นอกจากนี้กลไกที่แตกต่างกันของน้ำที่ยึดกับของแข็ง ยังมีผลต่อลักษณะเฉพาะของคุณภาพระหว่างการอบแห้งอีกด้วย (Singh and Heldman, 2001)

สมชาติ (2540) กล่าวว่า การอบแห้ง คือ กระบวนการลดความชื้น ส่วนใหญ่ใช้การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุที่ชื้น เพื่อไล่ความชื้นออกด้วยการระเหย ซึ่งความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหย การอบแห้งอาหารทั่วๆไป อาศัยหลักการที่ว่าปริมาณน้ำหรือความชื้นที่มีในอาหารสูง จะทำให้อาหารเน่าเสียได้ง่าย เนื่องจากจุลินทรีย์และปฏิกิริยาทางเคมี ดังนั้นการดึงเอาน้ำออกจากอาหารให้มีความชื้นลดลงจนพอเหมาะแก่อาหารแต่ละชนิดจะทำให้อาหารนั้นสามารถเก็บรักษาได้นานขึ้น ทั้งนี้ หลักการของการอบแห้งอาหารเกี่ยวเนื่องกับจุดประสงค์ของการอบแห้งซึ่งมีจุดประสงค์หลัก 2 ประการ คือ

1. ลดปริมาณน้ำในอาหารเพื่อป้องกันการเน่าเสียของอาหาร เนื่องจากจุลินทรีย์ จากผลการศึกษาพบว่าปริมาณความชื้นในอาหารที่จะป้องกันการเสื่อมเสียของอาหาร เนื่องจากเชื้อจุลินทรีย์ โดยทั่วไปควรจะดึงเอาน้ำออกให้เหลือไม่เกินร้อยละ10 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของอาหารเป็นสำคัญ

2. ต้องการลดน้ำหนักของอาหารเพื่อสะดวกต่อการขนส่ง เนื่องจากการขนส่งผลิตภัณฑ์บางชนิดในสภาพของสดจะต้องใช้พื้นที่มากและการดูแลรักษายากโดยเฉพาะพวกนมสด ถ้าทำเป็นผงจะทำให้น้ำหนักเบา การบรรจุขนส่งก็สะดวกและประหยัด

โดยทั่วไปความชื้นเป็นตัวบอกปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัสดุอบแห้งเป็นตัวชี้วัดคุณภาพและความปลอดภัยในการเก็บรักษา ซึ่งสามารถแสดงได้ 2 วิธี คือ ความชื้นฐานเปียก และความชื้นฐานแห้ง

1. ความชื้นฐานเปียก (Wet basis) คืออัตราส่วนของน้ำหนักน้ำที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์กับน้ำหนักทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ โดยทั่วไปค่าความชื้นมักแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ และนิยมใช้ในทางการค้าในการบอกค่าความชื้นผลิตภัณฑ์นั้น ๆ สมการสำหรับความชื้นฐานเปียก (M_w) คือ

$$M_w = \left(\frac{w-d}{w}\right)\times 100 \qquad (1)$$

เมื่อ w : มวลของวัสดุ (kg.)

d : มวลของวัสดุแห้ง (kg.)

2. ความชื้นฐานแห้ง (Dry basis) คืออัตราส่วนของน้ำหนักน้ำที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์กับน้ำหนักแห้งของผลิตภัณฑ์ ค่าน้ำหนักแห้งของผลิตภัณฑ์แสดงเป็นค่าคงที่เสมอ สมการสำหรับความชื้นฐานแห้ง (M_d) คือ

$$M_d = \left(\frac{w-d}{d}\right)\times 100 \qquad (2)$$

ในการอบแห้งวัสดุทั่วๆไปนั้น มักใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้ง ความร้อนจะถ่ายเทความร้อนจากอากาศไปยังผิววัสดุ ความร้อนส่วนใหญ่ถูกใช้ไปในการระเหยน้ำในขณะเดียวกันไอน้ำจะเคลื่อนที่บริเวณผิววัสดุมายังกระแสอากาศ ถ้าผิววัสดุมีปริมาณน้ำเป็นจำนวน

มาก อุณหภูมิ และความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวก็จะคงที่ ซึ่งส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและอัตราการอบแห้งคงที่ด้วย ถ้าอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วของกระแสอากาศคงที่

2. ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการอบแห้ง

ปริมาณความชื้นที่กำจัดออกไปจากอาหารเกิดขึ้น เนื่องจากการแพร่ของของเหลวหรือไอน้ำ (Water vapor) ผ่านโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ ขั้นตอนการเคลื่อนที่ของความชื้นจะเกิดขึ้นหลังจากการระเหยน้ำเกิดขึ้นที่บางตำแหน่งภายในผลิตภัณฑ์ และอัตราการแพร่กระจายประมาณได้จากกลไกที่ใช้อธิบายการแพร่ของโมเลกุลแมสฟลักซ์ (Mass flux) ของการเคลื่อนที่ความชื้นจะขึ้นกับความแตกต่างของความดันไอ รวมทั้งสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของไอน้ำในอากาศ ระยะทางของการเคลื่อนที่และอุณหภูมิ เนื่องจากความร้อนจำเป็นต้องใช้ระเหยความชื้น ดังนั้น กระบวนการนี้จึงมีการถ่ายเทความร้อนและมวลเกิดขึ้นพร้อมกัน

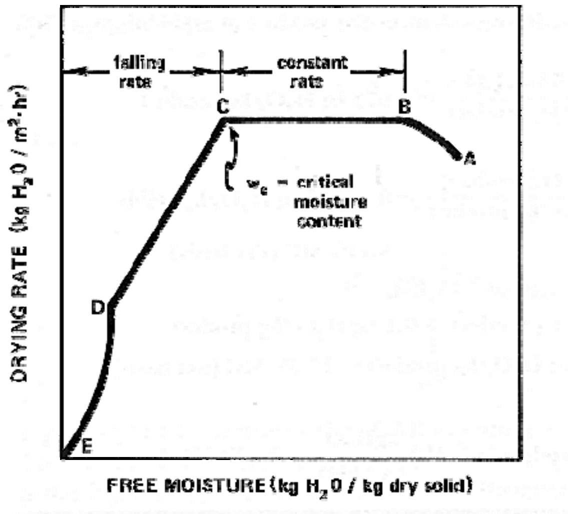
การกำจัดความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ จะขึ้นกับการถ่ายเทมวล โดยการพาที่ผิวของผลิตภัณฑ์ แม้ว่ากระบวนการส่งถ่ายนี้จะไม่ได้จำกัดด้วยเวลา (Rate-Limiting) ก็ยังจำเป็นต้องพิจารณาความสำคัญในการรักษาสภาวะขอบเขตที่เหมาะสมของการขนถ่ายความชื้นเช่นกัน (รุ่งนภา, 2535) ในการอบแห้งจะเกิดการถ่ายเท 2 ชนิด คือ

2.1 การถ่ายเทความร้อน (Heat tTransfer): โดยทั่วไปการถ่ายเทความร้อนมี 3 แบบ คือ การพาความร้อน (Convection) การนำความร้อน (Conduction) และ การแผ่รังสี (Radiation)

2.2 การถ่ายเทมวล (Mass Transfer): ส่วนมากคือการถ่ายเทโมเลกุลของน้ำในอาหารที่เกิดขึ้นในขณะทำการอบแห้ง ดังนี้ (1) การถ่ายเทน้ำจากชิ้นอาหารไปยังผิว ประกอบด้วย 2 แบบ คือ Capillary Flow การไหลในท่อเล็กด้วยแรง Capillary Force และ Diffusion ในระยะแรกจะมีการเคลื่อนที่ง่ายเมื่อน้ำน้อยลงการเคลื่อนที่จะยากขึ้น (2) การเปลี่ยนแปลงสถานะของน้ำเป็นไอน้ำที่ผิวของอาหารในช่วงแรกที่ผิวมีน้ำมากทำให้เกิดการระเหยได้มาก และในช่วงหลังน้ำน้อยทำให้อัตราการอบแห้งลดลง และ (3) การเคลื่อนที่ของไอน้ำจากผิวอาหาร โดยการพัดพาของอากาศ หรือน้ำ

3. อัตราการอบแห้ง

สมชาติ (2540) กล่าวว่า การอบแห้งโดยส่วนมากเป็นการถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุชื้นเพื่อไล่ความชื้นออกด้วยการระเหย โดยใช้ความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหยซึ่งปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการอบแห้ง ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ อัตราการไหลของอากาศ และประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง นอกจากนี้อธิบายถึงการอบแห้งซึ่งใช้ลมร้อนเป็นตัวกลางในการพาความชื้นออกจากวัสดุโดยสมมุติว่าอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วของอากาศเหนือผิวของการอบแห้งคงที่ตลอดกระบวนการ และมีการถ่ายเทความร้อนสู่วัสดุโดย การพาความร้อน การเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุตลอดกระบวนการอบแห้งโดยแบ่งการอบแห้งออกเป็น 3 ช่วง ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 Drying Curves

ที่มา: Heldman, 1981

ช่วง A-B เป็นช่วงสภาวะที่ผิวของวัสดุเข้าสู่สมดุลกับอากาศ จะเกิดเมื่อเริ่มทำการอบแห้ง อากาศร้อนจะสัมผัสกับวัสดุและอุณหภูมิของวัสดุจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงค่าๆ หนึ่ง และจะคงที่ที่ค่าอุณหภูมิในช่วงเวลาหนึ่ง เรียกช่วงนี้ว่า ช่วงการให้ความร้อนเบื้องต้นแก่วัสดุ

ช่วง B-C เป็นช่วงการอบแห้งคงที่ (Constant rate period of drying) ที่ช่วงการอบแห้งคงที่หลังจากที่วัสดุได้รับความร้อนในช่วงแรก ความร้อนส่วนมากจะถูกใช้ในการระเหยน้ำ การถ่ายเทความร้อนและมวลระหว่างวัสดุกับอากาศ เกิดขึ้นที่รอบๆผิววัสดุเท่านั้น น้ำจะเคลื่อนที่มาที่ผิววัสดุ

โดยการเคลื่อนที่แบบการไหลผ่านช่องแคบพร้อมกับไอน้ำที่เคลื่อนที่จากผิววัสดุมายังกระแสอากาศ น้ำที่เกาะอยู่ที่ผิวของวัสดุจำนวนมาก ทำให้การระเหยน้ำบริเวณรอบผิววัสดุเกิดขึ้นอย่างอิสระด้วยอัตราเร็วคงที่ เรียกช่วงนี้ว่า ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ เมื่อเพิ่มความเร็วลมที่ไหลผ่านและเพิ่มอุณหภูมิของอากาศอบแห้ง จะทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างที่ผิวและกระแสอากาศที่ไหลมีมากขึ้น เป็นผลให้การถ่ายเทความร้อนและมวลดีขึ้น

ช่วง C-D เป็นช่วงการอบแห้งลดลง (Falling rate period) เนื่องจากปริมาณความชื้นภายในเนื้อวัสดุเคลื่อนที่มาสู่ผิวด้านนอกลดลง ณ จุด C อัตราการอบแห้งเริ่มลดลงความชื้นของวัสดุในจุดนี้เรียกว่า ความชื้นวิกฤต การถ่ายเทความร้อนและมวลไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะที่ผิววัสดุเท่านั้น แต่เกิดขึ้นภายในวัสดุด้วย การเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในวัสดุมายังผิวช้ากว่าการพาความชื้นจากผิววัสดุไปยังอากาศ ทำให้อัตราการอบแห้งลดลง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศ จะทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิมีมากขึ้น นอกจากนี้ยังมีผลให้สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย (ศิวะ และ สมชาติ, 2533) การอบแห้งดำเนินต่อไปอุณหภูมิที่ผิววัสดุจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดกระบวนการ โดยปกติช่วงอัตราการอบแห้งลดลงประกอบไปด้วยสองช่วง คือ ช่วงของการอบแห้งลดลงส่วนที่ 1 (C-E) ช่วงนี้ผิวของวัสดุจะแห้งและอัตราการอบแห้งลดลง ช่วงแรกอบแห้งลดลงส่วนที่ 2 (E-D) ช่วงนี้ระนาบของการระเหยจะเคลื่อนตัวเข้าสู่ภายในเนื้อวัสดุและผลกระทบจากปัจจัยภายนอก เช่น อัตราการไหลของอากาศ มีค่าน้อยลง เมื่อพิจารณาตลอดการอบแห้งจะพบว่าช่วงการอบแห้งลดลงเป็นช่วงหลักที่เกิดขึ้น ดังนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิหรือลดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแล้ว จะเป็นผลให้การถ่ายเทความร้อนและมวลดีขึ้น

4. ปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้ง

4.1 ลักษณะทางธรรมชาติของวัสดุ วัสดุที่มีลักษณะเป็นรูพรุนจะมีอัตราการอบแห้งเร็ว

4.2 ขนาดและรูปร่างของวัสดุ ส่วนใหญ่คำนึงถึงเฉพาะความหนา เนื่องจากถ้าวัสดุมีความหนามากการอบแห้งจะเกิดได้ช้า

4.3 พื้นที่ผิววัสดุ ถ้ามีพื้นที่ผิวมากทำให้มีพื้นผิวสัมผัสกับอากาศร้อนมาก ทำให้การอบแห้งจะเกิดได้เร็ว

4.4 ปริมาณและตำแหน่งของวัสดุ การใส่วัสดุปริมาณมากไปทำให้การอบแห้งไม่ทั่วถึง

4.5 ความสามารถในการรับไอน้ำของอากาศ อากาศร้อนที่มีไอน้ำอยู่มากจะสามารถรับไอน้ำได้น้อยและจะมีผลต่ออัตราการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่

4.6 อุณหภูมิของอากาศร้อน ถ้าอากาศมีความชื้นคงที่ อุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้ความสามารถในการรับไอน้ำเพิ่มขึ้น มีผลต่ออัตราการอบแห้งในช่วงการอบแห้งคงที่ และอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้การแพร่กระจายของน้ำดีขึ้นมีผลต่ออัตราการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง

4.7 ความเร็วของอากาศร้อนการอบแห้งต้องการความรวดเร็ว เราจะต้องผ่านอากาศที่มีอุณหภูมิสูง ซึ่งอากาศร้อนนี้ต้องทำหน้าที่ 2 อย่าง ในเวลาเดียวกันกล่าวคือ ประการแรก ความร้อนที่มีอยู่ในอากาศจะถูกถ่ายเทให้กับวัสดุ เพื่อทำให้วัสดุคายความชื้นแล้วในวัสดุมีอุณหภูมิสูง หรือไปเพิ่มพลังงานให้กับน้ำที่อยู่ภายในวัสดุ ประการที่สอง อากาศร้อนจะช่วยพาความชื้นหรือไอที่ซึมผ่านผิวของวัสดุหลุดไปพร้อมๆ กับอากาศ

4.8 ความชื้นสมดุล คือค่าความชื้นของวัสดุที่มีค่าเท่ากับความดันไอของอากาศที่อยู่บริเวณรอบๆขึ้นกับชนิดของวัสดุ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

4.9 ความหนาแน่นของวัสดุ คือ อัตราส่วนระหว่างมวลของวัสดุต่อปริมาตรของวัสดุนั้น ขึ้นอยู่กับชนิดและความชื้นของวัสดุ

5. เครื่องอบแห้ง (Dryer)

ทั่วไปที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมมันสำปะหลังมีด้วยกัน 3 แบบ คือ

5.1 Static bed dryer เป็นเครื่องอบแห้งแบบเป็นกะ ผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งได้ในปริมาณไม่มากนัก และประสิทธิภาพทางความร้อนต่ำ ความชื้นของผลิตภัณฑ์ไม่สม่ำเสมอ เหมาะสมกับอาหารที่อยู่ในรูปของแข็ง

5.2 Moving bed dryer เป็นเครื่องอบแห้งแบบต่อเนื่องใช้ได้กับวัสดุที่มีความชื้นสูง ความชื้นของผลิตภัณฑ์สม่ำเสมอ เพราะว่ามีการควบคุมอุณหภูมิและมีประสิทธิภาพความร้อนสูง ซึ่งเครื่องอบประเภทนี้มีข้อเสียเปรียบในเรื่องของพลังงาน คือใช้พลังงานในการอบแห้งสูงมาก ตัวอย่างเครื่องอบแห้งชนิดนี้ได้แก่ เครื่องอบแห้งโดยใช้สายพาน

5.3 Rotary dryer เป็นห้องอบทรงกระบอกที่สามารถอบวัสดุที่มีความชื้นสูงได้ โดยที่เครื่องอบแบบนี้เป็นการผสมอากาศเข้าไปในผลิตภัณฑ์เพื่อไล่ความชื้น ซึ่งมีการไหลของอากาศสองแบบคือ อากาศไหลสวนทางกับผลิตภัณฑ์ และอากาศไหลตามทางเดียวกับผลิตภัณฑ์ ระบบการอบแห้งนี้มีอัตราการอบแห้งเร็วและอุณหภูมิของอากาศสูงก็สามารถใช้ได้ ซึ่งบางครั้งมีการใช้อุณหภูมิสูงเกินไปอาจทำให้ผลิตภัณฑ์แห้งแข็งหรืออาจไหม้เกรียมได้ เครื่องอบแห้งแบบโรตารี่เป็นเครื่องที่สามารถทำให้เกิดการขัดสีได้ขณะที่ทำการอบแห้ง และมีการพลิกกลับตลอดเวลาที่ทำการอบแห้ง (Kell, 1995)

เครื่องอบแห้งแบบโรตารี่ใช้กับวัสดุเป็นชิ้น หรือพวกเมล็ดที่มีความชื้นสูง ตัวถังทำด้วยถังทรงกระบอกหมุน วางเอียงกับแนวราบเล็กน้อย วัสดุไหลเข้าทางปลายด้านสูงและไหลออกที่ปลายด้านต่ำของถัง ภายในตัวถังจะมีครีบทำหน้าที่ตักวัสดุจากด้านล่างถังขึ้นสู่ด้านบน แล้วไหลลงมาด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก พร้อมๆ กับเคลื่อนที่ไปข้างหน้า ในขณะเดียวกันลมร้อนจะไหลเข้าในตัวถังเพื่อทำหน้าที่ลดความชื้นจากตัววัสดุ เนื่องจากวัสดุแขวนลอยอยู่ในอากาศขณะที่ไหลตกลงมา ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อน และความชื้นเป็นไปอย่างรวดเร็ว นอกจากแผ่นครีบที่ทำหน้าที่ตักวัสดุแล้ว ยังอาจมีแผ่นครีบที่ทำหน้าที่เป็นทางเกลียวบังคับให้วัสดุเคลื่อนที่ไปข้างหน้า

6. เครื่องอบแห้งแบบโรตารี่ (Rotary Dryer) (ไพบูรณ์, 2533)

6.1 การแบ่งชนิดเครื่องอบแห้งแบบหมุนเป็นเครื่องอบแห้งที่วัสดุอบแห้งมีการเคลื่อนที่สามารถแบ่งย่อยออกเป็นแบบให้ความร้อนโดยตรง (Direct-heat) กับให้ความร้อนโดยอ้อม (Indirect-heat)

6.1.1 เครื่องอบแห้งแบบหมุนชนิดให้ความร้อนโดยตรงประกอบด้วย ตัวถังทรงกระบอกที่วางในแนวระดับโดยมีอากาศร้อนไหลผ่าน ซึ่งตัวถังทรงกระบอกนี้สามารถหมุนได้และทำมุมเอียงเล็กน้อยกับแนวระดับ เพื่อให้วัสดุอบแห้งมีการเคลื่อนที่เนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกจากส่วนที่อยู่สูงไปยังส่วนที่ต่ำกว่าภายในเครื่องอบแห้งกระแสอากาศร้อนกับวัสดุอบแห้งอาจ

มีทิศทางการไหลตามกันหรือสวนทางกันก็ได้ และกระแสอากาศร้อนยังมีผลต่อการเคลื่อนที่ของวัสดุอบแห้งเนื่องจากการพัดพา

โดยปรกติด้านในของตัวถังทรงกระบอกจะติดตั้งตัวตัก ซึ่งติดตั้งตามแนวนอนของตัวถังทรงกระบอก ตัวตักนี้มีหน้าที่ตักวัสดุอบแห้งเพื่อให้วัสดุอบแห้งตกผ่านกระแสอากาศร้อน การที่วัสดุอบแห้งตกผ่านกระแสอากาศร้อน เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุอบแห้งกับกระแสอากาศร้อน ซึ่งมีผลต่ออัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น ในการใช้งานทั่วไปตัวตักตรง (Straight flights) จะติดตั้งทางด้านที่ป้อนวัสดุอบแห้ง เนื่องจากวัสดุอบแห้งยังมีความเหนียวหนืดหรือยังเปียกอยู่ ส่วนตัวตักมุม 45 และ 90 องศา มักใช้กับวัสดุอบแห้งที่ไหลได้อย่างอิสระ หรือเกือบแห้ง

ลักษณะการอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบหมุน มีลักษณะผสมกันระหว่างเครื่องอบแห้งแบบรวดเร็ว (Flash dryer) คือ ส่วนที่วัสดุอบแห้งแขวนลอยอยู่ในอากาศกับเครื่องอบแห้งแบบถาด (Tray dryer) คือ ส่วนที่ไม่ได้ถูกตัวตักตักขึ้นไป เครื่องอบแห้งแบบโรตารี่นี้สามารถรับปริมาณวัสดุอบแห้งได้ประมาณ 5-15 % ของปริมาตรตัวถังทรงกระบอก

สำหรับวัสดุที่ไวต่อความร้อน (Heat-sensitive) เครื่องอบแห้งแบบหมุนอาจทำงานที่ความเร็วของกระแสอากาศสูงๆ เพื่อพัดพาให้วัสดุอบแห้งผ่านเครื่องอบแห้งได้อย่างรวดเร็ว เมื่อพิจารณาทิศทางการไหลของกระแสอากาศกับวัสดุอบแห้ง ถ้าพิจารณาแบบคร่าวๆ อาจคิดว่าการไหลแบบสวนทางกันมีประสิทธิภาพดีกว่าแบบไหลตามกัน ซึ่งเป็นจริงสำหรับการใช้ความร้อนในการเผาไหม้ โดยไม่ได้พิจารณาถึงการลดความชื้น หรืออาจกล่าวได้ว่าเราต้องการเพียงอุณหภูมิสุดท้ายที่สูงๆเท่านั้น แต่ในเครื่องอบแห้งสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาคือ ความไวต่อความร้อนของวัสดุ ดังนั้น บ่อยครั้งพบว่าการไหลแบบตามกันจะมีประสิทธิภาพดีกว่าแบบไหลสวนทางกัน เพราะว่าเราสามารถใช้อุณหภูมิทางเข้าสูงๆได้

เนื่องจากการไหลแบบตามกัน อากาศร้อนทางเข้าจะสัมผัสกับวัสดุอบแห้งที่เปียก ดังนั้นอุณหภูมิของวัสดุยังคงอยู่ที่อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศ ซึ่งเป็นระยะเวลาที่วัสดุยังมีความชื้นสูงอยู่ แต่เมื่อเวลาผ่านไปวัสดุมีความชื้นลดลง ในทำนองเดียวกันอุณหภูมิกระเปาะแห้งก็ลดลงจนอยู่ต่ำกว่าจุดที่จะเป็นอันตรายต่อวัสดุอบแห้ง เช่น การประยุกต์ใช้เครื่องอบแห้ง อุณหภูมิอากาศเข้าอาจมีอุณหภูมิสูงถึง 177 °C แต่ของวัสดุจะไม่เกิน 54 °C เนื่องจากช่วงแรกวัสดุมีความชื้นสูง อุณหภูมิที่ให้ในช่วงแรกเป็นการระเหยน้ำภายในวัสดุจึงยังไม่เป็นอันตรายต่อวัสดุในช่วงแรก หากมีการใช้อุณหภูมิสูง ซึ่งการใช้อุณหภูมิเข้าสูงนี้จะทำให้เครื่องอบแห้งสามารถอบแห้งวัสดุ

อบแห้งได้มากขึ้น และยังเพิ่มประสิทธิภาพในการอบแห้งอีกด้วย เพราะเราใช้ปริมาณอากาศน้อยมาก ดังนั้นการสูญเสียความร้อนที่กระแสทางออกจึงต่ำ

สำหรับการไหลแบบสวนทางกัน วัสดุที่ใช้อบแห้งจะสัมผัสอากาศร้อนที่ทางออก การไหลแบบนี้จึงมีประโยชน์ถ้าเราต้องการให้วัสดุอบแห้งมีอุณหภูมิสูงๆ แต่ต้องไม่สูงกว่าอุณหภูมิที่ทำให้วัสดุอบแห้งเปลี่ยนคุณสมบัติ ส่วนการไหลแบบตามกัน วัสดุอบแห้งและอากาศที่ทางออกจะมีอุณหภูมิใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นอุณหภูมิของวัสดุอบแห้งสามารถควบคุมได้โดยการควบคุมอุณหภูมิอากาศที่ทางออก ส่วนปริมาณความชื้นที่ลดลงของวัสดุในเครื่องอบแห้งแบบหมุนนั้น เป็นสัดส่วนกับพื้นที่หน้าตัดของตัวถังทรงกระบอกและความเร็วของกระแสอากาศ แต่จากการศึกษาพบว่า ความเร็วของกระแสอากาศมีผลน้อยมากต่ออัตราการอบแห้ง ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (สมชาติ, 2529)

6.1.2 เครื่องอบแห้งแบบโรตารี่ชนิดให้ความร้อนโดยอ้อม เมื่อต้องการใช้เครื่องอบแห้งแบบให้ความร้อนโดยอ้อม แทนเครื่องอบแห้งแบบให้ความร้อนโดยตรงนั้น มีเหตุผลใหญ่ๆ ด้วยกัน 5 ข้อ คือ

1. เมื่อต้องการให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูง ในการเผาไหม้ก๊าซ
2. เมื่อวัสดุอบแห้งไม่สามารถถูกความร้อนได้โดยตรงจากการเผาไหม้
3. เมื่อราคาของไอน้ำต่ำ
4. เมื่อการพัดพาของอากาศร้อนทำให้เกิดฝุ่นมาก
5. เมื่อของเหลวที่ต้องการเอาออกจากวัสดุอบแห้งเป็นของเหลวที่มีราคาสูง

ถ้าวัสดุขณะทำการอบแห้งสามารถสัมผัสกับกระแสอากาศร้อนได้โดยตรงในการนำกระแสอากาศร้อนกลับมาใช้ เราควรใช้แบบการให้ความร้อนโดยตรง แต่ถ้าวัสดุขณะทำการอบแห้งมีฝุ่นมาก หรือของเหลวที่ระเหยออกมามีค่า ในการนำกระแสอากาศร้อนกลับมาใช้จะใช้แบบการให้ความร้อนโดยอ้อม เพื่อแยกกระแสอากาศร้อนกับวัสดุอบแห้งออกจากกัน ดังนั้นระบบแบบให้ความร้อนโดยอ้อมจึงเป็นระบบพื้นฐานที่ถูกเลือกใช้เป็นตัวควบคุมการเกิดฝุ่น เนื่องจากเราสามารถควบคุมทิศทางการไหลของลม และสามารถแยกทิศทางของอากาศร้อนกับอากาศร้อนที่ระบายออกหลังอบแห้งได้

6.2 การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบโรตารี่ส่วนมากความร้อนจะถูกถ่ายเทจากอากาศร้อนที่ใช้อบแห้งหรือผิวโลหะที่ร้อนไปยังวัสดุหรือจุดใดจุดหนึ่งในวัสดุที่ไกลจากแหล่งความร้อน อัตราการอบแห้งที่เกิดจากการถ่ายเทความร้อนนั้น เปลี่ยนแปลงไปในทางตรงกันข้ามกับระยะทางระหว่างแหล่งความร้อนและวัสดุนอกจากนี้อัตราการอบแห้งยังขึ้นอยู่กับ พื้นที่ผิวของวัสดุที่ถูกความร้อนจากแหล่งความร้อน อัตราการกวน และ ลักษณะการปั่นป่วนของอากาศร้อน

กรณีหลัก ๆ ที่ครอบคลุมการเพิ่มอัตราการอบแห้ง (Sloan, 1967) มีดังนี้

1. ความสามารถในการกระจายตัวของความชื้น: ถ้าเราต้องการอบแห้งให้ได้รวดเร็วตามที่ต้องการ ย่อมขึ้นกับความเป็นไปได้มากที่สุดในการเพิ่มพื้นที่ผิวของวัสดุ ดังนั้นวัสดุที่เป็นอนุภาคซึ่งสามารถแขวนลอยอยู่ในอากาศได้นั้นเหมาะที่จะนำมาอบแห้ง

2. ความแตกต่างของอุณหภูมิ: เมื่อพิจารณา พบว่าอัตราการอบแห้งเป็นสัดส่วนกับความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างตัวกลางที่ให้ความร้อน และวัสดุที่ใช้อบแห้ง

3. อัตราการกวน: การผสมหรือคลุกเคล้ากันระหว่างวัสดุ และตัวกลางที่ให้ความร้อนอย่างรวดเร็ว ทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น

4. ขนาดอนุภาค: การอบแห้งเกิดขึ้นได้ เพราะมีการระเหยความชื้นที่ผิวอนุภาค ดังนั้น การจะเอาความชื้นในอนุภาคออก ความชื้นต้องแพร่มายังผิวของอนุภาค กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นเร็วเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็ก

5. ลักษณะโครงสร้างของอนุภาค: เนื่องจากความชื้นต้องแพร่มายังผิวอนุภาคเพื่อเกิดกระบวนการระเหย อนุภาคที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนการอบแห้งจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่วนอนุภาคที่หนาแน่นมากๆ หรือไม่มีรูพรุน การอบแห้งก็ยาก

เนื่องจากวัสดุจากสิ่งมีชีวิตส่วนใหญ่มีโครงสร้างภายในที่มีลักษณะเป็นรูพรุน เมื่อถูกทำให้แห้งในลักษณะชั้นบาง ที่สภาวะของอากาศคงที่ (อุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วของกระแสอากาศ) อัตราการอบแห้งจะคงที่ในช่วงเวลาหนึ่ง หลังจากนั้นเริ่มลดลง ความชื้นของวัสดุขณะที่อัตราการอบแห้งเริ่มเปลี่ยนจากคงที่เป็นลดลง เรียกว่าความชื้นวิกฤต

เนื่องจากอัตราการอบแห้งอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ดังนั้นอัตราการถ่ายเทมวลจึงถูกควบคุมโดยกระบวนการถ่ายเทมวลจากภายในวัสดุไปยังผิววัสดุ ซึ่งการเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของเหลวจะเกิดขึ้นในระยะแรกๆขณะที่วัสดุยังมีความชื้นสูงแต่เมื่อความชื้นลดลงมากๆน้ำอาจเคลื่อนที่ในรูปของไอน้ำ จากเหตุผลดังกล่าวความเร็วลมไม่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง

6.3 การเคลื่อนที่ของอนุภาค (Particle Transport) ในเครื่องอบแห้งแบบถังหมุน นอกจากกระบวนการถ่ายเทความร้อนและถ่ายเทมวลแล้ว ยังมีการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในเครื่องอบแห้งอีกด้วย ซึ่งกระบวนการนี้เกิดขึ้นเนื่องจากผลของ Flight action, Kiln action และความเร็วลม โดยทั้งสามแบบเป็นอิสระต่อกัน (Foust, 1960)

6.3.1 Flight action เป็นผลจากการที่อนุภาคถูกตักด้วยตัวตัก (Flights) จากส่วนต่ำสุดของตัวถังทรงกระบอกไปยังส่วนที่สูงกว่า และตกลงมายังส่วนล่างของตัวถังทรงกระบอกอีกครั้ง การตกของอนุภาคนี้ อนุภาคจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าในกรณีที่มีมุมเอียงเกิดขึ้น

6.3.2 Kiln action เกิดจากอนุภาคบางส่วนที่ไม่ได้ถูกตักด้วยตัวตัก แต่อนุภาคมีการขยับเขยื้อน หรือกลิ้ง รวมทั้งการกระดอนของอนุภาคเมื่อตกลงมายังส่วนล่างของตัวถังทรงกระบอก Kiln action จะมีผลมากขึ้นเมื่ออนุภาคที่ไม่ได้ถูกตักมากขึ้น

6.3.3 ความเร็วลม เมื่อความเร็วลมมากขึ้นแรงที่ใช้พัดพาอนุภาคก็จะมากขึ้นด้วย ในกรณีที่ไหลตามกันอนุภาคจะเคลื่อนที่เร็วขึ้น

จากการตรวจเอกสารดังกล่าวจึงสนใจเครื่องอบแห้งแบบถังหมุนมาประยุกต์ใช้ และพัฒนาการทำแห้งใบมันสำปะหลัง เพื่อลดเวลาในการอบแห้งให้น้อยลง และเป็นทางเลือกหนึ่งให้กับกลุ่มที่สนใจ รวมถึงเพื่อแก้ปัญหาการขาดแคลนอาหารสัตว์ โดยใช้พลังงานความร้อนที่สามารถหาได้ง่ายภายในประเทศอย่างพลังงานชีวมวลต่อไป

พลังงานชีวมวล

ชีวมวล คือ สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาผลิตพลังงานได้ เช่น เศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร หรือกากจากกระบวนการการผลิตในอุตสาหกรรมการเกษตร เช่น แกลบ ชานอ้อย ซังข้าวโพด เป็นต้น ชีวมวลเป็นพลังงานประเภทหนึ่งคือพลังงานทางเคมีที่เกี่ยวข้องกับอะตอมของคาร์บอนและไฮโดรเจนมาจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ การสังเคราะห์แสงของพืชจะเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำไปเป็นสารอินทรีย์ต่างๆที่สามารถเผาไหม้ได้ องค์ประกอบที่จำเป็นสำหรับกระบวนการนี้ คือ คลอโรฟิลล์ และแสงอาทิตย์ โดยคลอโรฟิลล์ที่มีอยู่ในพืชสีเขียวจะดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อทำให้เกิดการสังเคราะห์แสงขึ้น (Probstin and Hick, 1982)

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมมีผลผลิตทางการเกษตรหลากหลายชนิด เช่น ข้าว น้ำตาล มันสำปะหลัง ยางพาราและน้ำมันปาล์ม เป็นต้น ผลผลิตบางส่วนมีเหลือเพียงพอที่จะส่งออกไปยังต่างประเทศ สร้างรายได้ให้แก่ประเทศปีละหลายหมื่นล้านบาท อย่างไรก็ตามระหว่างการเก็บเกี่ยว และการแปรรูปผลิตผลการเกษตร ก็จะก่อให้เกิดชีวมวล หรือวัสดุเศษเหลือทางการเกษตร ซึ่งบางส่วนถูกนำมาทำปุ๋ย วัตถุดิบ และเชื้อเพลิง บางส่วนถูกเผาทิ้งโดยเปล่าประโยชน์ เช่น ฟางข้าว ใบอ้อย ยอดอ้อย รากไม้ยางพารา และเหง้ามันสำปะหลัง เป็นต้น

พลังงานเป็นปัจจัยที่สำคัญในการตอบสนองความต้องการขั้นพื้นฐานของประชาชน และเป็นปัจจัยการผลิตที่สำคัญในอุตสาหกรรม รัฐจึงต้องมีการจัดหาพลังงานให้มีปริมาณเพียงพอกับความต้องการ ราคาเหมาะสม และคุณภาพที่ดีสอดคล้องกับความต้องการของผู้ใช้ ประเทศไทยต้องพึ่งพาพลังงานจากต่างประเทศประมาณร้อยละ 60 ของความต้องการพลังงานเชิงพาณิชย์ทั้งหมด ในขณะที่เกิดวิกฤตการณ์ราคาน้ำมันสูง ดังนั้นการเลือกใช้พลังงานหมุนเวียนต่างๆ เช่น น้ำ ลม ไม้ ฟืน แกลบ กาก (ชาน) อ้อย ชีวมวล ซึ่งเป็นพลังงานที่ใช้ไม่หมด มีแหล่งพลังงานอยู่ภายในประเทศ และมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่รัฐต้องเร่งให้ความสำคัญในการพัฒนาศักยภาพและสร้างความเชื่อมั่นกับการใช้พลังงานจากภายในประเทศ เพื่อลดความเสี่ยงต่อการพึ่งพาพลังงานเชิงพาณิชย์

1. แหล่งผลิตชีวมวล

พลังงานจากชีวมวลเป็นพลังงานที่ได้จากพืชและสัตว์ หรือองค์ประกอบของสิ่งมีชีวิตหรือสารอินทรีย์ต่างๆ รวมทั้งการผลิตจากการเกษตรและป่าไม้ รวมถึงการนำมูลสัตว์ของเสียจากโรงงานแปรรูปทางการเกษตร ชีวมวลแต่ละชนิดมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกัน บางชนิดไม่เหมาะสมที่จะนำมาเผาโดยตรง เช่น กากมันสำปะหลัง และส่าเหล้า เพราะมีความชื้นสูง 80 – 90 เปอร์เซ็นต์ บางชนิดต้องนำมาย่อยก่อนนำไปเผาไหม้ เช่น เศษไม้ยางพารา ชีวมวลที่มาจากพืชนั้นแบ่งตามแหล่งที่มา สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทคือ

1. ชีวมวลที่ได้จากตามโรงงานแปรรูปสินค้าทางการเกษตร เช่น แกลบได้จากโรงสี, ปีกไม้ เศษไม้ และขี้เลื่อยจากโรงเลื่อยไม้ โรงงานเฟอร์นิเจอร์ไม้, ใยปาล์ม ทะลายเปล่าและกะลาปาล์มได้จากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ, ซังข้าวโพดได้จากไซโลเก็บข้าวโพด, ชายอ้อยได้จากโรงงานน้ำตาล, เปลือกมันสำปะหลังได้จากโรงงานแป้งมัน, เปลือกไม้ยูคาลิปตัสได้จากโรงไม้สับ เป็นต้น

2. ชีวมวลที่หาได้จากตามไร่ สวน และนาข้าว เช่น ฟางข้าวอยู่ในนาข้าว, ปลายไม้ และรากไม้หรือตอไม้ยางพาราอยู่ในสวนยางพารา, ใบอ้อยและยอดอ้อยอยู่ในไร่อ้อย, เหง้ามันสำปะหลังอยู่ในไร่มันสำปะหลัง, ทางปาล์มหรือใบปาล์มอยู่ในสวนปาล์มน้ำมัน, ซังข้าวโพดได้จากไร่ข้าวโพดการนำชีวมวลประเภทนี้มาใช้งานต้องเสียค่าใช้จ่ายในการจัดเก็บและรวบรวมเพิ่มขึ้น เป็นผลให้ราคาต่อค่าความร้อนสูงกว่าประเภทแรก จึงถูกนำไปเป็นเชื้อเพลิงในสัดส่วนที่น้อยมาก ดังนั้นส่วนใหญ่ถูกเผาทิ้งอยู่ทุกปี

3. ชีวมวลที่ปลูกใหม่เพื่อเป็นพลังงานโดยเฉพาะ เช่น การปลูกไม้โตเร็วเพื่อนำไปเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า วิธีการนี้ยังไม่เป็นที่นิยมในประเทศไทย เพราะไม่คุ้มค่าต่อการลงทุน

2. การผลิตชีวมวลในประเทศไทย

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม มีผลผลิตทางการเกษตรเป็นจำนวนมาก เช่น ข้าว น้ำตาล ยางพารา น้ำมันปาล์ม และมันสำปะหลัง เป็นต้น อย่างไรก็ตามในการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรเหล่านี้ จะมีวัสดุเหลือใช้ออกมาจำนวนหนึ่งด้วยแสดงดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ปริมาณเศษเหลือทางการเกษตรที่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ปี 2548

ชีวมวล	ศักยภาพ (ตัน/ปี)	ปริมาณที่ใช้ไป (ตัน/ปี)	ปริมาณคงเหลือ (ตัน/ปี)
ชานอ้อย	23,000,000	23,000,000	0
ยอดและใบ อ้อย	8,319,000	4,000,000	4,319,000
ลำต้น ยอด ใบ มันสำปะหลัง	2,500,000	1,500,000	1,000,000
เหง้ามันสำปะหลัง	1,900,000	500,000	1,400,000
กากปาล์ม	1,364,879	1,200,000	164,879
กะลาปาล์ม	600,000	500,000	100,000
ทะลายปาล์ม	1,360,047	100,000	1,260,047
ฟางข้าว	43,443,525	18,751,512	24,692,013

ที่มา: ศักยภาพชีวมวลประเทศไทย (2548)

จากตารางที่ 10 เมื่อพิจารณาการนำมาใช้ประโยชน์เห็นได้ว่ายังมีเศษเหลือทางการเกษตรอีกมากที่ยังไม่นำมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด เช่น ยอดและใบอ้อย ส่วนต่างๆของมันสำปะหลังและทะลายปาล์ม ที่มีอยู่ในปริมาณมากสามารถใช้เป็นพลังงานทดแทนได้ โดยการกระตุ้นส่งเสริมให้ภาคเอกชน ภาครัฐ และประชาชนทั่วไป รวมพลังร่วมกันสนับสนุนการใช้พลังงานจากชีวมวลให้มีผลและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ช่วยลดต้นทุนการผลิตพลังงานต่อหน่วยลง

3. องค์ประกอบสำคัญของชีวมวล

องค์ประกอบที่สำคัญของชีวมวลคือ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses) และลิกนิน (Lignin) ซึ่งโครงสร้างส่วนใหญ่จะประกอบด้วยน้ำตาลและพอลิเมอร์ของน้ำตาลซึ่งเรียกว่า พอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharides)

3.1 เซลลูโลส คือเส้นใยของพอลิแซคคาไรด์ที่เป็นส่วนประกอบหลักในผนังเซลล์ของพืช และเป็นสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติมากที่สุด เซลลูโลสเป็นส่วนประกอบหลักในไม้ ปอ และฟาง คุณสมบัติทางเคมีที่สำคัญของเซลลูโลสคือเป็นตัวที่ไม่ละลายน้ำและไม่ทำปฏิกิริยา โดยเฉพาะไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

3.2 เฮมิเซลลูโลส เป็นพอลิแซคคาไรด์ที่เกิดขึ้นร่วมกับพวกเซลลูโลส แต่จะอยู่ในรูปอสัณฐานที่มีลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมทางเคมีต่างกับพวกเซลลูโลส เซลลูโลสส่วนใหญ่จะเกิดจากน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว พวกดี-กลูโคส ส่วนเฮมิเซลลูโลสมักจะประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวต่างชนิดหลายๆ ตัวมาต่อกันเป็นกลุ่ม

3.3 ลิกนิน เป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งในพืช มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการเป็นผนังเซลล์ของพืชที่เป็นเสมือนกาวยึดและเพิ่มความแข็งแรงของเซลล์พืช

3.4 องค์ประกอบของชีวมวลหรือสสารทั่วไป แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก คือ

1. ความชื้น (Moisture) ความชื้นหมายถึงปริมาณน้ำที่มีอยู่ ชีวมวลส่วนใหญ่จะมีความชื้นค่อนข้างสูงเพราะเป็นผลผลิตทางการเกษตร ถ้าต้องการแปรรูปชีวมวลเป็นพลังงานโดยการเผาไหม้ ชีวมวลควรมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 50

2. ส่วนที่เผาไหม้ได้ (Combustible substance) ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ สารระเหย (Volatiles matter) และคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) สารระเหย คือส่วนที่ลุกเผาไหม้ง่าย สลายตัวเมื่อได้รับความร้อนในที่ที่ไม่มีอากาศ ดังนั้นชีวมวลที่มีค่าสารระเหยสูงแสดงว่าติดไฟได้ง่าย

3. ขี้เถ้า (Ash) คือส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ ชีวมวลส่วนใหญ่จะมีขี้เถ้าประมาณร้อยละ 1 - 3 ยกเว้นแกลบและฟางข้าวจะมีสัดส่วนขี้เถ้าประมาณร้อยละ 10 - 20 ซึ่งเป็นปัญหาการเผาไหม้และกำจัดพอสมควร (สีนีนาฏ, 2547)

3.5 โครงสร้างทางกายภาพ เชื้อเพลิงจะแตกต่างกันไปตามแต่ละชนิด

1. ขนาดและรูปร่าง ชีวมวลโดยทั่วไปแล้วขนาด ความกว้าง ความยาว และสูงที่แตกต่างกัน ดังนั้นเพื่อช่วยให้อัตราการเผาไหม้เร็วขึ้น ทำให้การผลิตก๊าซชีวมวลมากขึ้น และชีวมวลต้องไม่เล็กมากจนทำให้เกิดการอัดแน่นจนสูญเสียความดันภายในเตาได้

ตารางที่ 11 ขนาดโดยประมาณของเชื้อเพลิงที่ใช้กับเตาผลิตก๊าซ

เชื้อเพลิง	ขนาด (mm)
ถ่านไม้	10-30
ไม้	20-100
พีท	25-80
ลิกไนต์	40-60

ที่มา: Skov and Papwarth (1975)

2. ความชื้นชีวมวลในสภาพสดจะมีความชื้นสูง ความชื้นที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงชีวมวลในการที่ปฏิกิริยาเกิดไฮโดรเจน แต่ถ้ามีมากเกินไปจะทำให้เกิดสูญเสียความร้อนภายในเตา เพื่อใช้ในการระเหยของน้ำและปฏิกิริยาที่เกิดคาร์บอนมอนอกไซด์จะลดลง โดยทั่วไปเชื้อเพลิงที่ใช้ผลิตก๊าซชีวมวลควรมีความชื้นประมาณ 10 - 15 % โดยน้ำหนัก (Skov and Papwarth, 1975) ถ้ามากเกินนี้ควรมีการตากแดดหรืออบแห้งก่อนนำมาใช้แสดงดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ค่าความชื้นและพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงบางชนิด

เชื้อเพลิง	ความชื้น (%โดยน้ำหนัก)	พลังงานความร้อนเฉลี่ย (MJ/kg dry basis)
ซังข้าวโพด	8-20	18.9
ไม้ฟืน	15-25	20
ถ่านไม้	2-10	29
แกลบ	-	15

ที่มา: ศูนย์ปฏิบัติการวิศวกรรมพลังงานและสิ่งแวดล้อม (2540)

4. เทคโนโลยีการเผาไหม้

เทคโนโลยีที่ใช้ในการแปรรูปชีวมวลที่ได้รับความนิยมในปัจจุบันเพื่อปรับปรุงคุณภาพให้มีคุณค่ามากขึ้นกว่าเดิมนั้นสามารถจำแนกได้ 2 เทคโนโลยีหลักๆ คือ กระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีชีวเคมี (Biochemical conversion process) และ กระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้พลังงานความร้อน (Thermochemical conversion process) ซึ่งก็คือ การเผาไหม้ สำหรับเทคโนโลยีการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลสามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภทคือ การเผาไหม้โดยตรง (Direct Combustion) และการผลิตก๊าซชีวมวลโดยใช้อากาศ (Air gasification) โดยที่กระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้พลังงานความร้อนโดยใช้อากาศนี้ยังสามารถจำแนกออกเป็นกระบวนการย่อยๆ ได้อีก 3 กระบวนการ คือ กระบวนการเผาไหม้ กระบวนการไพโรไลซิส และกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ทั้งนี้ลักษณะความแตกต่างของแต่ละกระบวนการนั้นขึ้นอยู่กับสภาวะที่ใช้ในการดำเนินการและวัตถุประสงค์หรือผลิตภัณฑ์หลักที่ต้องการ

4.1 การเผาไหม้โดยตรง (Direct combustion) การเผาไหม้เป็นวิธีที่ใช้กันมากในการนำเชื้อเพลิงชีวมวลมาใช้ให้เกิดประโยชน์โดยการเผาให้ความร้อนเพื่อเอา ก๊าซร้อนไปใช้ในกระบวนการผลิต เช่น การอบแห้ง หรือการนำความร้อนที่ได้ไปใช้ผลิตไอน้ำร้อนที่มีความดันสูงเพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า

4.2 การผลิตก๊าซชีวมวลโดยใช้อากาศ (Air gasification) กระบวนการผลิตก๊าซชีวมวลเป็นการเปลี่ยนเชื้อเพลิงชีวมวล ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงแข็งให้เป็นเชื้อเพลิงก๊าซ ด้วยการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งในที่ที่มีอากาศจำกัด โดยความร้อนที่เกิดขึ้นจะเร่งปฏิกิริยาแบบต่อเนื่องกลายเป็นชีวมวล ก๊าซชีวมวลมีองค์ประกอบหลักคือ ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) ก๊าซมีเทน (CH_4) และก๊าซไฮโดรเจน (H_2)

5. ระบบแก๊สซิฟิเคชั่น

แก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) และไพโรไลซิส (Pyrolysis) เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องและต่อเนื่องกันในการเปลี่ยนชีวมวลซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือ คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ให้กลายเป็นก๊าซที่เผาไหม้ได้ ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) และก๊าซมีเทน (CH_4) โดยกระบวนการดังกล่าวเป็นการเผาไหม้อินทรีย์สารแบบจำกัดปริมาณออกซิเจน ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์

กระบวนการไพโรไลซิสและกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันนั้นมีความคล้ายคลึงกันมาก เมื่อพิจารณาแล้วกระบวนการไพโรไลซิสนั้นนับว่าเป็นกระบวนการเริ่มต้น ซึ่งโดยทั่วไปแล้วกระบวนการไพโรไลซิสจะเกิดได้เร็วกว่ากระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ขั้นตอนโดยรวมนั้นเริ่มจากการทำให้ชีวมวลซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ประกอบไปด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ที่มีความชื้นประมาณร้อยละ 20 – 30 โดยน้ำหนักนั้นปราศจากน้ำโดยอาศัยกระบวนการทำแห้งที่อุณหภูมิประมาณ 120 – 150 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นชีวมวลจะถูกให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิประมาณ 500 – 600 องศาเซลเซียส เพื่อทำลายพันธะทางเคมีของโมเลกุลซึ่งเป็นขั้นตอนของกระบวนการไพโรไลซิสได้เป็นผลิตภัณฑ์จำพวกก๊าซต่างๆ ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน และไฮโดรเจน ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่สามารถกลั่นตัวได้ เช่น น้ำ กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก อะซิโตน เมทานอล เมทิลอะซิเตท ฟีนอล เป็นต้น รวมทั้งน้ำมันดิน หลังจากนั้นเมื่อมีการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นไปอีกจนมีอุณหภูมิประมาณ 900 – 1,100 องศาเซลเซียส ประกอบกับมีการเติมตัวออกซิไดส์ให้แก่ระบบจะทำให้น้ำมันดินเกิดการแตกตัวได้เป็นผลิตภัณฑ์ก๊าซต่อไป ซึ่งขั้นตอนนี้นั้นเป็นขั้นตอนของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน นั่นเอง

6. ปฏิกิริยาเคมีความร้อนของการเกิดก๊าซชีวมวล (Gasified)

กระบวนการผลิตก๊าซชีวมวลแบบใช้อากาศ เป็นกระบวนการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งเป็นเชื้อเพลิงก๊าซ โดยการเผาไหม้ในที่ที่มีอากาศปริมาณน้อยไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ แต่จะเกิดความร้อนเพื่อก่อให้เกิดปฏิกิริยา ประเภทต่างๆ ได้ดังนี้

6.1 โซนการเผาไหม้ (Combustion Zone) หรืออาจเรียกว่า โซนออกซิเดชั่น (Oxidation zone) อากาศจะถูกส่งผ่านเข้ามาในบริเวณนี้ และสัมผัสกับเชื้อเพลิงทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างก๊าซออกซิเจนในอากาศกับคาร์บอน และไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง ทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ดังสมการ

$$C + O \longrightarrow CO_2 \qquad (1)$$

$$2H_2 + O \longrightarrow 2H_2O \qquad (2)$$

ปฏิกิริยา (1) และ (2) เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน และความร้อนที่เกิดขึ้นในโซนนี้จะถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาดูดความร้อน ความร้อนโซนรีดักชัน และโซนการกลั่นสลายต่อไป อุณหภูมิในการโซนการเผาไหม้จะอยู่ระหว่าง 1100 – 1500 องศาเซลเซียส

6.2 โซนรีดักชัน (Reduction zone) เมื่ออากาศผ่านสู่โซนการเผาไหม้ และทำปฏิกิริยากับคาร์บอนและไฮโดรเจน ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำแล้ว ก็จะไหลผ่านเข้าสู่โซนรีดักชัน ดังนั้นปฏิกิริยาหลักในโซนนี้จะเป็นปฏิกิริยา แบบปฏิกิริยาดูดความร้อน (Reduction reaction) อุณหภูมิโซนนี้จะอยู่ระหว่าง 500 – 900 องศาเซลเซียส โซนการเผาไหม้นี้จะเปลี่ยนบางส่วนของก๊าซที่เผาไหม้ไม่ได้ (คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ) ให้เป็นก๊าซที่สามารถเผาไหม้ได้ โดยที่ก๊าซคาร์บอนที่กำลังลุกไหม้อยู่ จะได้ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจน ดังสมการต่อไปนี้

$C + CO_2$	$\longrightarrow$	$2CO$	(3)
$C + H_2O$	$\longrightarrow$	$CO+H_2$	(4)
$C + 2H_2O$	$\longrightarrow$	CO_2+2H_2	(5)
$CO + H_20$	$\longrightarrow$	CO_2+H_2	(6)
$C + 2H_2$	$\longrightarrow$	CH_4	(7)

ปฏิกิริยา (3) เรียกว่า Boudouard reaction และปฏิกิริยา (4) เรียกว่า Water reaction เป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อนเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และก๊าซที่ได้จาก 2 ปฏิกิริยานี้เป็นก๊าซที่สามารถเผาไหม้ได้ ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในก๊าซผสมที่ได้จากเตาผลิตก๊าซ ก๊าซหลักนี้ก็คือก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ จากปฏิกิริยาที่ (3) ถ้าอุณหภูมิในโซนรีดักชันสูงกว่า 900 องศาเซลเซียส แล้วก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะสามารถเปลี่ยนเป็นก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ได้ประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ และถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 1,100 องศาเซลเซียส แล้วก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จะเปลี่ยนเป็นก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์หมด ดังนั้นประสิทธิภาพของเตาผลิตก๊าซจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิโซนรีดักชันในเตาผลิตก๊าซ เมื่ออุณหภูมิสูงจากโซนการเผาไหม้ไหลเข้าสู่โซนนี้ อุณหภูมิจะลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาแบบดูดความร้อนในปฏิกิริยา (3) และ(4) ปฏิกิริยาไอน้ำกับคาร์บอนเพื่อที่จะผลิตก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปฏิกิริยา (5) โดยเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ คือประมาณ 500-600 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยานี้มีความสำคัญ เพราะทำให้ส่วนผสมของไฮโดรเจนในก๊าซมีมากขึ้น ซึ่งมีผลให้ก๊าซมีพลังงานความร้อนสูง แต่ถ้ามีไอน้ำมากเกินไปไอน้ำอาจทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนตามปฏิกิริยา (6) ปฏิกิริยานี้เรียกว่า Water shift reaction ทำให้ความร้อนของก๊าซที่ได้ลดลง แต่อย่างไรก็ตามบางส่วนของไฮโดรเจนก็จะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนทำให้เกิดก๊าซมีเทนได้เล็กน้อยดังปฏิกิริยา (7) ที่เรียกว่าการผลิตมีเทน (Methane production)

6.3 โซนการกลั่นสลาย (Pyrolysis zone) บริเวณนี้ได้รับความร้อนจากรีดักชัน ทำให้เกิดการสลายสารอินทรีย์ในเชื้อเพลิง ได้เมทานอล กรดน้ำส้มและน้ำมันดิน อุณหภูมิในส่วนนี้ประมาณ 200 – 500 องศาเซลเซียส ของแข็งที่เหลืออยู่หลังจากผ่านกระบวนการนี้แล้วคือ คาร์บอนในรูปของถ่าน ซึ่งจะไปทำปฏิกิริยาต่อไปในโซนรีดักชัน และโซนการเผาไหม้ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในโซนนี้สามารถเขียนได้ดังนี้

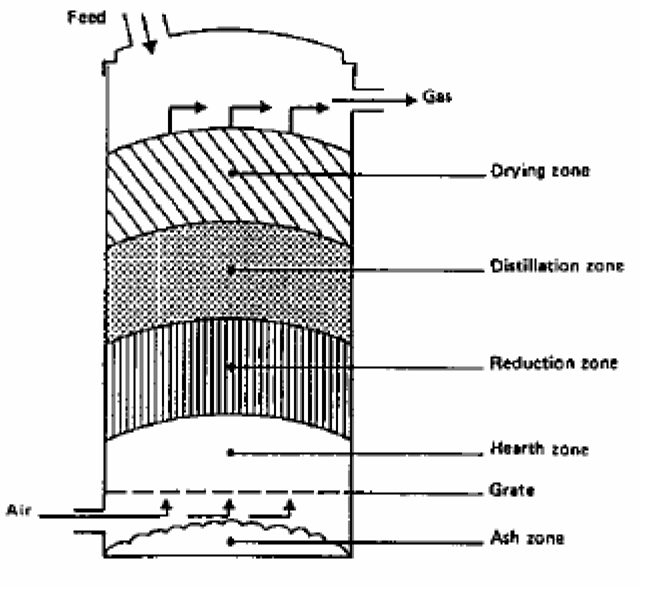
$$\text{Biomass} + \text{Heat} \longrightarrow \text{Charcoal} + CO + CO_2 + H_2O + C_2H_6 + \text{Tar} + \text{Pyroligneous acid}$$

6.4 โซนการอบแห้ง (Drying Zone) ในบริเวณนี้อุณหภูมิจะไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดการสลายตัวของสารระเหยต่าง ๆ โดยความร้อนที่ได้จากบริเวณที่เกิดไพโรไลซิสจะระเหยความชื้นที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงชีวมวลให้ออกมาในรูปของไอน้ำโดยอุณหภูมิในบริเวณนี้อยู่ที่ประมาณ 100-200 $^{\circ}$C

7. เตาผลิตก๊าซชีวมวล

เตาผลิตก๊าซชีวมวลแบ่งออกเป็น 4 ประเภทใหญ่ๆ แตกต่างกันออกไปตามความเหมาะสมของการใช้งาน วัตถุดิบที่ใช้ และคุณสมบัติของก๊าซที่ได้ สามารถแบ่งเตาผลิตก๊าซชีวมวลออกเป็น 4 แบบคือ แบบไหลขึ้น แบบไหลลง แบบไหลขวาง และแบบฟลูอิดไดซ์เบด (FAO, 1987)

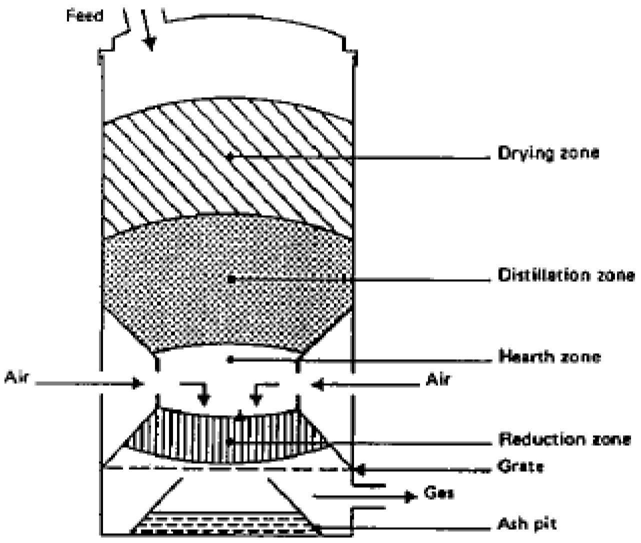
7.1 เตาผลิตก๊าซชนิดอากาศไหลขึ้น (Updraft gasifiers) เตาผลิตก๊าซชนิดนี้จะเป็นแบบที่ง่ายที่สุดและเก่าแก่ที่สุด โดยเชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าสู่เตาทางด้านบนโดยมีตะแกรงรองรับชีวมวลอยู่ด้านล่างของเตา ซึ่งก๊าซที่ผลิตได้จะไหลสวนทางกับเชื้อเพลิง อากาศหรือออกซิเจน จะถูกป้อนเข้าสู่เตาผลิตก๊าซทางด้านล่างโดยผ่านตะแกรงขึ้นไปด้านบน ซึ่งมีทิศทางสวนกันกับการไหลของเชื้อเพลิง เพื่อทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงในขณะเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ เตาผลิตก๊าซชนิดอากาศไหลขึ้นนี้จะประกอบด้วย บริเวณของการเกิดปฏิกิริยา ดังนี้ ชั้นที่ 1 Combustion zone, ชั้นที่ 2 Gasification or Reduction zone, ชั้นที่ 3 Pyrolysis zone และชั้นที่ 4 Drying zone เรียงตามลำดับดังแสดงในภาพที่ 2 ซึ่งเมื่อเรียงลำดับจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำจะสามารถเรียงลำดับได้ดังนี้คือ บริเวณการเผาไหม้ บริเวณที่เกิดการรีดักชัน บริเวณที่เกิดการไพโพไลซิส และบริเวณการเกิดการอบแห้งหรือลดความชื้น เตาแบบนี้เป็นระบบที่ง่ายที่สุดในการสร้างและการใช้งาน ก๊าซที่ได้ไม่มีเถ้าติดปน แต่มีทาร์และไอน้ำ จึงเหมาะกับเชื้อเพลิงที่ไม่มีทาร์ หรือมีอยู่น้อย



ภาพที่ 2 เตาผลิตก๊าซชนิดอากาศไหลขึ้น (Updraft Gasifies)
ที่มา: FAO (1986)

เตาผลิตก๊าซชนิดนี้จะมีประสิทธิภาพทางความร้อนสูงที่สุด เนื่องจากก๊าซร้อนที่เกิดขึ้นจะมีการไหลผ่านชั้นของเชื้อเพลิง ซึ่งความร้อนสัมผัสในก๊าซร้อนจะถูกถ่ายเทให้กับเชื้อเพลิง ทำให้อุณหภูมิของก๊าซที่ออกจากเตามีอุณหภูมิไม่สูงมากนัก โดยอุณหภูมิของก๊าซที่ออกจากเตาจะอยู่ที่ประมาณ 100-300°C

7.2 เตาผลิตก๊าซชนิดอากาศไหลลง (Downdraft Gasifiers) เชื้อเพลิงชีวมวลจะถูกป้อนเข้าสู่เตาทางด้านบนของเตา ขณะที่อากาศจะถูกป้อนเข้าทางด้านข้างของเตาในบริเวณที่เกิดการเผาไหม้ โดยก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จะไหลลงมาที่ส่วนล่างของเตา คือ ชั้น Gasification และอากาศจะไหลเข้าทางชั้น Combustion Zone ลักษณะที่ให้ก๊าซเชื้อเพลิงไหลลงออกทางด้านล่างก็เพื่อที่จะกำจัดน้ำมันดินในก๊าซโดยเฉพาะ เตาผลิตก๊าซชนิดอากาศไหลลงนี้ ส่วนล่างสุดจะเป็นบริเวณที่เกิดการรีดักชัน ถัดขึ้นมาคือบริเวณที่เกิดการเผาไหม้ บริเวณที่เกิดการไพโรไลซิส และบริเวณอบแห้งหรือลดความชื้น ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 3

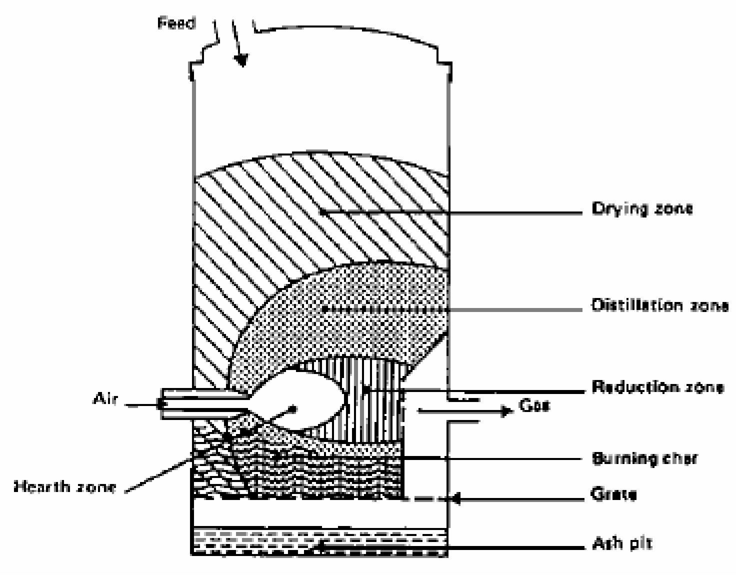


ภาพที่ 3 เตาผลิตก๊าซชนิดอากาศไหลลง (Downdraft Gasifies)

ที่มา: FAO (1986)

เตาแบบนี้ให้ปริมาณก๊าซเชื้อเพลิงสม่ำเสมอกว่าระบบไหลขึ้น และทาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสนั้นจะผ่านบริเวณเผาไหม้ไปพร้อมกับก๊าซอื่นๆ ทาร์เหล่านี้จะถูกทำให้สลายตัวไป เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงมากของบริเวณที่เกิดการเผาไหม้ จึงทำให้ก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้นี้มีปริมาณของทาร์ที่ปนเปื้อนอยู่ในปริมาณที่ต่ำมาก (น้อยกว่า 1 mg/m^3) ซึ่งเป็นข้อดีของเตาผลิตก๊าซชนิดนี้

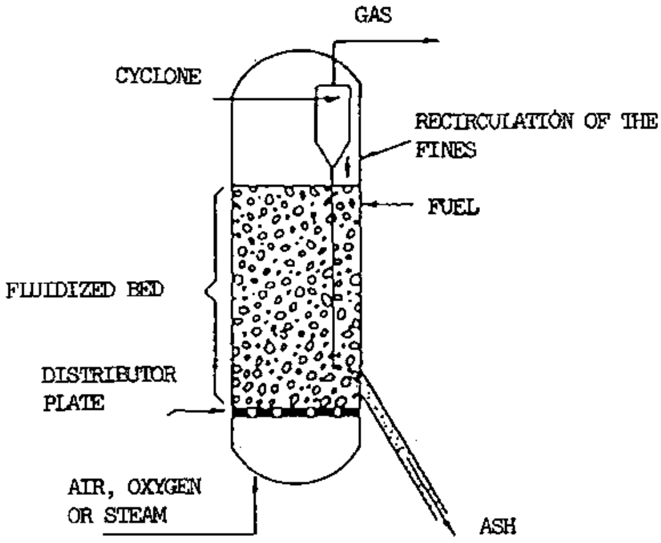
7.3 เตาผลิตก๊าซชนิดอากาศไหลตามขวาง (Cross draft Gasifier) เตาผลิตก๊าซแบบนี้จะเป็นแบบที่เล็กและเบาที่สุดใน 3 แบบ อากาศจะถูกดูดผ่านหัวฉีดซึ่งอยู่ในแนวราบ จะไหลในทิศทางขวางกับการไหลเลื่อนของเชื้อเพลิง ดังภาพที่ 4 ก๊าซจะออกสู่ภายนอกโดยผ่านตะแกรงซึ่งอยู่ในแนวตั้งรอบๆบริเวณชั้น Combustion และชั้น Gasification จะเป็นชั้นของ Pyrolysis และ Drying ทาร์ที่ได้จากชั้น Pyrolysis นี้จะผ่านชั้น Gasification ก่อนที่จะออกสู่ภายนอกซึ่งทำให้ทาร์แตกตัวเป็นก๊าซก่อนที่จะออกสู่ภายนอก ทำให้ก๊าซที่ได้มีปริมาณทาร์ต่ำ บริเวณเผาไหม้และบริเวณที่เกิดการรีดักชันจะอยู่ใกล้ชิดกันมาก ดังนั้นจึงสามารถผลิตก๊าซได้อย่างรวดเร็วและแปรผันได้ง่าย โดยปกติบริเวณการเผาไหม้จะอยู่กึ่งกลางของเตาผลิตก๊าซ แต่ขอบเขตการเผาไหม้อาจขยายกว้างขึ้นได้เมื่อความเร็วของอากาศสูงขึ้น



ภาพที่ 4 เตาผลิตก๊าซชนิดอากาศไหลตามขวาง (Cross draft Gasifies)
ที่มา: FAO (1986)

7.4 เตาผลิตก๊าซชีวมวลแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized Bed Gasifier) จากเตาทั้ง 3 แบบ ที่ได้กล่าวมาข้างต้น การทำงานจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางเคมี และทางกายภาพของเชื้อเพลิงเป็นอย่างมาก และปัญหาที่มักพบบ่อยก็คือ ขี้โลหะ (Slag) และความดันตกมากเกินไปเมื่อก๊าซผ่านเตา เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงได้ออกแบบเตาผลิตก๊าซแบบฟลูอิดไดซ์เบด โดยที่อากาศจะไหลผ่านชั้นของเชื้อเพลิงแข็งเมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศค่าหนึ่ง ชั้นของเชื้อเพลิงที่วางอยู่จะเริ่มลอยตัวขึ้นมีลักษณะคล้ายของไหลในตอนเริ่มติดเตา และจะได้รับความร้อนจากภายนอกจนอุณหภูมิสูงขึ้นถึงจุดติดไฟของเชื้อเพลิงหลังจากนั้นเชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าอย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอ การเผาไหม้จะเกิดทั่วๆ บริเวณเตา

ข้อได้เปรียบที่สำคัญของเตาแบบนี้ คือ การควบคุมอุณหภูมิในเตาจะทำได้ง่าย จึงสามารถรักษาอุณหภูมิให้ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของเถ้า ทำให้ไม่เกิดการจับตัวของขี้โลหะ จึงสามารถใช้เชื้อเพลิงที่มีเถ้ามากได้ ในส่วนของข้อเสีย คือ ก๊าซที่ผลิตได้จะมีปริมาณน้ำมันดินสูง (อาจสูงถึง 500 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) และยังไม่สามารถปรับตัวให้ตอบสนองกับภาวะที่เปลี่ยนแปลงได้ดีนัก การควบคุมการทำงานของเครื่องค่อนข้างลำบาก อีกทั้งระบบยังยุ่งยากซับซ้อนทำให้มีราคาแพง ดังนั้นจึงเหมาะสมกับระบบขนาดใหญ่ๆ เท่านั้น จึงไม่แพร่หลาย



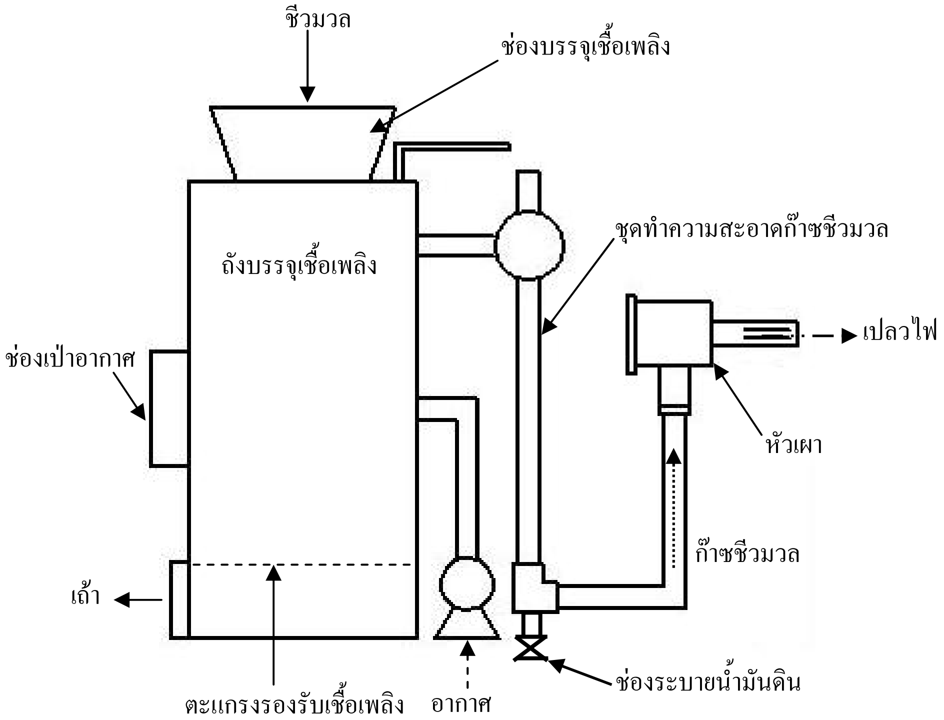
ภาพที่ 5 เตาผลิตก๊าซชีวมวลแบบฟลูอิดไดซ์เบด

ที่มา: FAO (1986)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์ชุดผลิตก๊าซชีวมวล



ภาพที่ 6 เตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลลง

1.1 เตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลลง

เตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลลง มีส่วนประกอบหลัก คือ ถังบรรจุเชื้อเพลิง ทำจากเหล็กหนา 2 มิลลิเมตร ม้วนเป็นรูปทรงกระบอก 2 ชั้น ด้านในเป็นปูนทนไฟหนา 5 เซนติเมตร ทำหน้าที่ป้องกันความร้อนสูญเสียที่บริเวณผนังเตา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 เซนติเมตร ความสูงรวม 120 เซนติเมตร ด้านบนสุดเป็นช่องบรรจุเชื้อเพลิงมีฝาปิดขนาดยาว 25 เซนติเมตร กว้าง 45 เซนติเมตร ด้านล่างเป็นตะแกรงรองรับเชื้อเพลิงทำจากเหล็กเส้นขนาด 5 มิลลิเมตร ด้านล่างสุดเป็นชั้นเก็บเถ้าและระบายเถ้าออกจากเตาผลิตก๊าซชีวมวล ดังภาพที่ 7

ภาพที่ 7 เตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลลง

1.2 ชุดทำความสะอาดก๊าซชีวมวล

ชุดทำความสะอาดก๊าซชีวมวล อาศัยหลักการควบแน่นไอของน้ำมันดินที่ปนเปื้อนมากับก๊าซชีวมวลให้ควบแน่นตกลงทางด้านล่างเพื่อระบายออกต่อไป ลักษณะเป็นแผงท่อเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว จำนวน 11 ท่อ ยาว 1 เมตร วางในแนวตั้งฉากกับพื้น ท่อด้านล่างมีวาล์วเปิด-ปิด ระบายสิ่งปนเปื้อนแสดงดังภาพที่ 8

ภาพที่ 8 อุปกรณ์ทำความสะอาดก๊าซชีวมวล

1.3 พัดลมเป่าอากาศ

พัดลมเป่าอากาศจากภายนอกเข้าเตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลลงเพื่อใช้ในการเผาไหม้ ขนาด 1 แรงม้า 1,440 RPM 220 V / 7.6A ดังภาพที่ 9

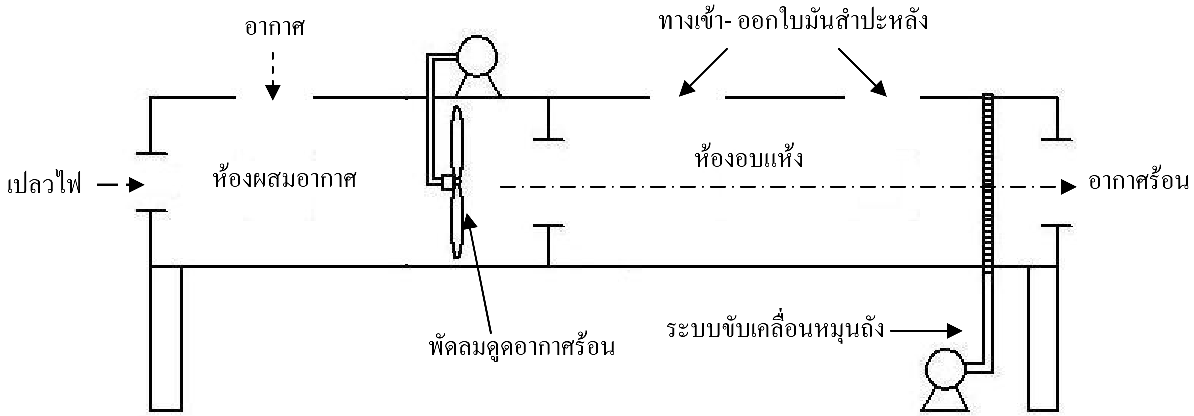
ภาพที่ 9 พัดลมเป่าอากาศ

1.4 หัวเผา

หัวเผาทำจากเหล็กหนา 2 มิลลิเมตร ม้วนเป็นทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ด้านข้างเจาะช่องสำหรับท่อให้ก๊าซชีวมวลไหลออกสู่หัวเผามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.8 เซนติเมตร ดังภาพที่ 10

ภาพที่ 10 หัวเผา

2. อุปกรณ์ชุดอบแห้งใบมันสำปะหลัง



ภาพที่ 11 อุปกรณ์ชุดอบแห้งใบมันสำปะหลัง

2.1 ห้องผสมอากาศ

ห้องผสมอากาศเป็นส่วนที่ครอบส่วนปลายของหัวเผาไว้ ทำจากถังน้ำมัน 200 ลิตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 58.5 เซนติเมตร ยาว 88.5 เซนติเมตร ทางด้านข้างมีช่องขนาดกว้าง 20 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร เพื่อเปิด-ปิดขึ้นลงทำหน้าที่ปรับอากาศจากภายนอกเข้าห้องผสมอากาศ ด้านหน้าเป็นช่องสำหรับใส่หัวเผาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร ทางด้านท้ายเป็นช่องเปิดต่อกับพัดลมเพื่อดูดอากาศร้อนเข้าห้องอบแห้ง ดังภาพที่ 12

ภาพที่ 12 ห้องผสมอากาศ

2.2 มอเตอร์

มอเตอร์สำหรับใบพัดดูดอากาศร้อนจากห้องผสมอากาศส่งเข้าห้องอบแห้ง มอเตอร์ขนาดเล็ก 0.5 แรงม้า 1,370 RPM 220 V / 2.8 A ดังภาพที่ 13

ภาพที่ 13 มอเตอร์สำหรับใบพัดดูดอากาศร้อน

2.3 ห้องอบแห้งแบบถังหมุน

ห้องอบแห้งแบบถังหมุนทำจากถังน้ำมัน 200 ลิตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 58 เซนติเมตร ยาว 177 เซนติเมตร ด้านติดห้องผสมอากาศเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร เป็นช่องทางเข้าอากาศร้อน และด้านท้ายเจาะรูเป็นช่องระบายอากาศร้อนชื้นหลังจากอบแห้ง (เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 และ 30 เซนติเมตร) ด้านข้างถังอบแห้งทำช่องขนาดกว้าง 20 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร สำหรับบรรจุและเก็บใบมันสำปะหลังที่อบแห้งแล้ว ดังภาพที่ 14

ภาพที่ 14 ห้องอบแห้งแบบถังหมุน

3. เชื้อเพลิงชีวมวล

เชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้เป็นเหง้ามันสำปะหลังที่รับจากเกษตรกรที่ อำเภอเลาขวัญ จังหวัดกาญจนบุรี ดังภาพที่ 15 ซึ่งเกษตรกรขายให้ในราคากิโลกรัมละ 50 สตางค์

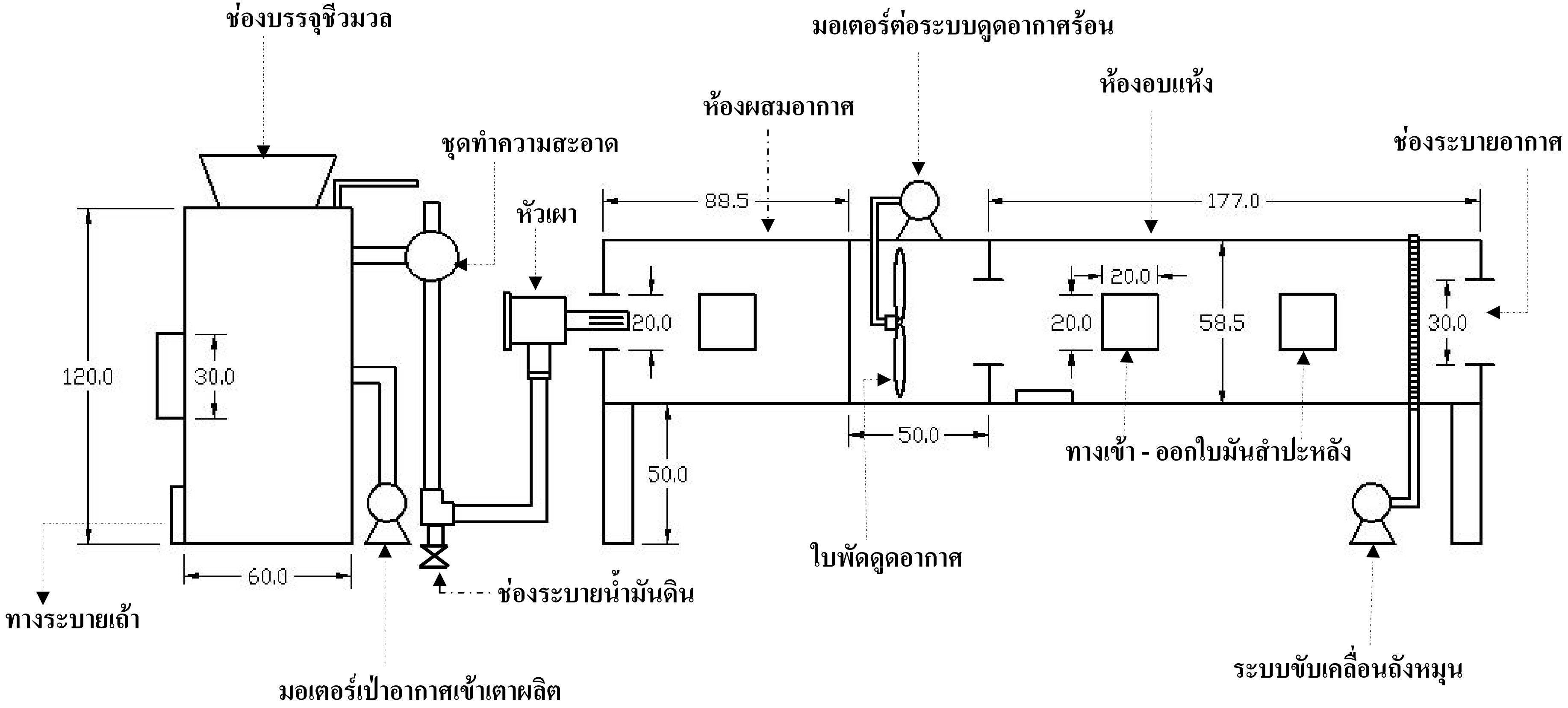
ภาพที่ 15 เหง้ามันสำปะหลัง

4. ใบมันสำปะหลัง

ใบมันสำปะหลังที่ใช้ในการทดลองได้รับซื้อมาจากลานมันสำปะหลัง บริเวณอำเภอเลาขวัญ จังหวัดกาญจนบุรี ซึ่งเป็นสถานที่ที่ผลิตใบมันสำปะหลังแห้งส่งขายเพื่อเป็นอาหารสัตว์

ภาพที่ 16 ใบมันสำปะหลัง

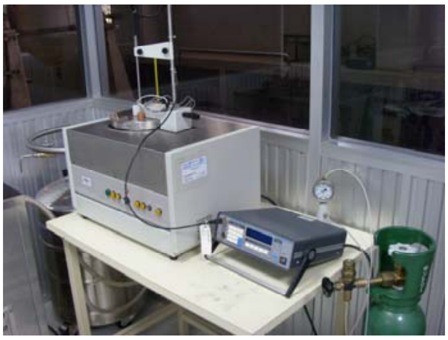
จากนั้นได้ทำการต่อระบบต่างๆ เพื่อเก็บข้อมูลในการทดลองอบแห้งใบมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งร่วมกับระบบผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลลงแสดงดังภาพที่ 17



ภาพที่ 17 แสดงระบบผลิตก๊าซชีวมวลและเครื่องอบแห้งใบมันสำปะหลัง

5. เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บและวิเคราะห์ข้อมูล

5.1 เครื่อง Autobomb calorimeter เพื่อใช้วิเคราะห์ค่าความร้อนของเหง้ามันสำปะหลัง ของ GALLENKAMP Autobomb, UK ดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 Bomb calorimeter

5.2 Gas Analyzer เครื่องตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซชีวมวล ของสถาบัน AIT ดังภาพที่ 19

ภาพที่ 19 Gas analyzer

5.3 เทอร์โมคัปเปิลเพื่อใช้วัดอุณหภูมิ ชนิด Type K มีความถูกต้อง ± 1 °C สามารถทนความร้อนได้ระหว่าง -200 ถึง 1,370 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 20

ภาพที่ 20 เทอร์โมคัปเปิล Type K

5.4 เครื่องบันทึกอุณหภูมิ Model 21 ของ Campbell Scientific, lnc. Canada เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลที่ได้จากสายเทอร์โมคับเปิล ดังภาพที่ 21

ภาพที่ 21 ชุดวัดอุณหภูมิ

5.5 เครื่องวัดความเร็วลมของ Testo 454 Logger สามารถต่อเข้ากับหัว Probe หลายชนิดได้ เป็นของบริษัท Entech Associated CO.,Ltd. USA. ดังภาพที่ 22

ภาพที่ 22 ชุดวัดความเร็วลม

5.6 เครื่องวัดความชื้นในบรรยากาศรุ่น Tri-Sense ต่อเข้ากับ Relative Humidity Temperature Probe ของบริษัท Cole Parmer CO.,Ltd. United States ดังภาพที่ 23

ภาพที่ 23 อุปกรณ์ชุดเก็บความชื้น และอุณหภูมิ

5.7 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟาเรด (Thermo Trace Infrared Thermometer) ของบริษัท Delta TRAK SCIENTIFIC, Canada ดังภาพที่ 24

ภาพที่ 24 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟาเรด

5.8 นาฬิกาจับเวลา เพื่อใช้จับเวลาสำหรับการบันทึกข้อมูล ภาพที่ 25

ภาพที่ 25 นาฬิกาจับเวลา

วิธีการ

ขั้นตอนการดำเนินงานเพื่อให้งานวิจัยบรรลุตามวัตถุประสงค์แบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. ศึกษาการผลิตก๊าซชีวมวลจากเหง้ามันสำปะหลังโดยใช้เตาผลิตก๊าซชนิดไหลลง

การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติของเหง้ามันสำปะหลังเหลือทิ้ง โดยพิจารณาจากองค์ประกอบของเหง้ามันสำปะหลัง เช่น ความชื้น สารระเหย เถ้า คาร์บอนคงที่ และค่าพลังงานความร้อน รวมถึงทดสอบขนาดเหง้ามันสำปะหลังที่รับจากเกษตรกรสามารถผลิตก๊าซชีวมวลได้หรือไม่ และศึกษาลักษณะการทำงาน การเกิดก๊าซชีวมวลของเตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลลง มีขั้นตอนการทดสอบ 2 ส่วน ดังนี้

1.1 ศึกษาองค์ประกอบและเหง้ามันสำปะหลังที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวมวล

1.1.1 ศึกษาองค์ประกอบของเหง้ามันสำปะหลัง

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาองค์ประกอบของเหง้ามันสำปะหลังที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตก๊าซชีวมวล โดยใช้เหง้ามันสำปะหลังที่รับซื้อจากเกษตรกร ซึ่งพบว่าเหลือทิ้งในแปลงปลูกมันสำปะหลังเมื่อเก็บผลผลิต

1. นำเหง้ามันสำปะหลังผึ่งแดดประมาณ 2 -3 วัน เพื่อลดความชื้น เนื่องจากถ้าชีวมวลมีความชื้นสูงต้องใช้ความร้อนในการระเหยน้ำในชีวมวลก่อนเผาไหม้

2. วิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงเหง้ามันสำปะหลังด้วยวิธี Proximate Analysis

3. สรุปผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงเหง้ามันสำปะหลัง

1.1.2. ทดสอบเหง้ามันสำปะหลังที่รับซื้อจากเกษตรกร

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการผลิตก๊าซชีวมวลของเหง้ามันสำปะหลังที่รับซื้อจากเกษตรกร (ภาพที่ 26) ซึ่งหากไม่ต้องลดขนาดของเหง้ามันสำปะหลังจะเป็นการลดค่าใช้จ่าย พลังงานในการลดขนาด และเวลาในการเตรียมเชื้อเพลิงชีวมวลลงได้

ภาพที่ 26 เหง้ามันสำปะหลังก่อนย่อยขนาด

1. นำเหง้ามันสำปะหลังที่รับซื้อจากเกษตรกรวัดความหนาแน่นโดยรวมโดยบรรจุในภาชนะที่ทราบปริมาตร เพื่อหาความหนาแน่นโดยรวม ในการทดสอบใช้กล่องพลาสติกขนาดกว้าง 25 เซนติเมตร ยาว 40 เซนติเมตร สูง 16 เซนติเมตร บรรจุเหง้ามันสำปะหลังจนเต็มกล่อง ชั่งน้ำหนัก และวัดขนาดเหง้ามันสำปะหลัง บันทึกผล

2. นำเหง้ามันสำปะหลังชั่งน้ำหนัก บันทึกผล ทดสอบกับเตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลลง เปิดฝาห้องเผาไหม้ นำเหง้ามันสำปะหลังที่ชั่งน้ำหนักเทใส่ช่องบรรจุเชื้อเพลิงด้านบนของเตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลลง ปิดฝาช่องบรรจุเชื้อเพลิง

3. เปิดวาล์วอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ เปิดพัดลมเป่าอากาศ ใช้กระดาษหนังสือพิมพ์จุดไฟใส่เข้าไปที่ช่องให้อากาศ เพื่อเริ่มต้นจุดไฟในเตาผลิตก๊าซชีวมวล

4. หลังจากเวลาผ่านไป 3-5 นาที ที่หัวเผาเริ่มมีก๊าซชีวมวลไหลออกมาเป็นลักษณะควันสีขาวขุ่น ทำการจุดไฟที่หัวเผาโดยใช้กระดาษเผาไฟจ่อบริเวณหัวเผา เพื่อจุดไฟบริเวณหัวเผา

5. สังเกตการเผาไหม้ที่หัวเผาสมบูรณ์หรือไม่ โดยสังเกตเปลวไฟที่ได้ หรือสังเกตว่ามีควันเกิดขึ้นที่หัวเผาหรือไม่ ถ้าการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ จะต้องปรับอากาศเข้าห้องเผาไหม้จนได้การเผาไหม้ที่สมบูรณ์ เพื่อให้ได้เปลวไฟที่หัวเผาไหม้แบบสมบูรณ์

1.2 ศึกษาลักษณะการเผาไหม้ของเตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลลง

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการผลิตก๊าซชีวมวลจากเตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลลงด้วยเหง้ามันสำปะหลัง และขั้นตอนการทำงานของเตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลลงโดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. ชั่งน้ำหนักเหง้ามันสำปะหลัง เปิดฝาห้องเผาไหม้ นำเหง้ามันสำปะหลังที่ชั่งแล้วเทใส่ทางด้านบนของเตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลลง จนเต็ม ปิดฝาจดบันทึก

2. เปิดวาล์วอากาศ และมอเตอร์พัดลมเป่าอากาศ ใช้กระดาษหนังสือพิมพ์จุดไฟใส่เข้าไปที่ช่องเป่าอากาศ เพื่อจุดไฟในเตาผลิตก๊าซชีวมวล

3. รอประมาณ 3-5 นาที ที่หัวเผามีก๊าซไหลออกมาเป็นลักษณะควันสีขาวขุ่น จุดไฟที่หัวเผาโดยใช้กระดาษเผาไฟจ่อที่หัวเผา ปรับอากาศจนหัวเผามีการเผาไหม้สมบูรณ์โดยสังเกตการเผาไหม้ที่หัวเผาต้องไม่มีควันเกิดขึ้น

4. บันทึกอัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิอากาศที่เข้าเตาผลิตชีวมวลที่บริเวณท่อส่งอากาศก่อนเข้าเตาผลิตก๊าซชีวมวล โดยการคำนวณจากความเร็วลมเฉลี่ยคูณด้วยพื้นที่หน้าตัดของท่อที่ใช้วัดโดยใช้ Vane Probe ต่อเข้ากับ Testo 454 Logger ทุกๆ 15 นาที

5. บันทึกอัตราการไหลของก๊าซและอุณหภูมิก๊าซที่บริเวณท่อส่งก๊าซชีวมวลก่อนออกสู่หัวเผาโดยการคำนวณจากความเร็วก๊าซเฉลี่ยคูณด้วยพื้นที่หน้าตัดของท่อที่ใช้วัด โดยใช้ Vane Probe ต่อเข้ากับ Testo 454 Logger ทุกๆ 15 นาที

6. เก็บตัวอย่างก๊าซที่ผลิตได้จากเตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลลงก่อนถึงหัวเผา เพื่อนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของก๊าซ โดยใช้ถุงเก็บก๊าซและส่งไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบก๊าซที่สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT)

7. ปล่อยให้เตาอุณหภูมิลดลงแล้วทำความสะอาดภายในเตา โดยนำเถ้าของเหง้ามัน-สำปะหลังออกจากเตาเพื่อหาอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ใช้ไปในแต่ละครั้ง

8. คำนวณประสิทธิภาพของเตาผลิตก๊าซชีวมวล จากสูตร

ประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลลง (η_F)

$$\eta_F = \left[\frac{\dot{V}_g (LHV)}{\dot{m}_{fl} (HHV) + W_{e1}} \right] \times 100 \qquad (3)$$

โดยที่ $\dot{V}_g$ คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของก๊าซชีวมวล (m^3/h)

LHV_g คือ ค่าความร้อนต่ำของก๊าซชีวมวล (kJ/m^3)

$\dot{m}_{fl}$ คือ อัตราการไหลของเชื้อเพลิง (kg/h)

HHV_m คือ ค่าความร้อนสูงของเหง้ามันสำปะหลัง (kJ/kg)

W_{e1} คือ ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ให้แก่มอเตอร์พัดลมดูดอากาศ (kJ/h)

2. ศึกษาการอบแห้งใบมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งโดยใช้พลังงานจากเหง้ามันสำปะหลัง

การทดลองมีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการอบแห้งใบมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งโดยเตาผลิตก๊าซชนิดไหลลงจากเหง้ามันสำปะหลังเป็นเชื้อเพลิง โดยพิจารณาจากความชื้นเริ่มต้นและสุดท้ายของใบมันสำปะหลัง เวลาในการอบแห้ง และอัตราการระเหยน้ำในการพิจารณาระบบอบแห้ง สุดท้ายทดสอบคุณภาพใบมันสำปะหลังทางด้านอาหารสัตว์ โดยใช้ปริมาณโปรตีน ปริมาณไซยาไนด์และปริมาณแทนนิน เป็นดัชนีชี้วัดคุณภาพใบมันสำปะหลังที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งในการพิจารณาความเหมาะสมร่วมด้วยประกอบด้วยขั้นตอน 2 ส่วน คือ

2.1 ศึกษากระบวนการอบแห้งใบมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบโดยใช้ก๊าซชีวมวลจากเตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลลงจากเหง้ามันสำปะหลัง

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของเครื่องอบแห้งต้นแบบอบแห้งใบมันสำปะหลังกับเตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลลง ในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งจะนำผลของเวลา ความชื้นสุดท้าย และอัตราการระเหยน้ำ มาเป็นข้อมูลในการตัดสินใจเลือกสภาวะการทำงานของเครื่องอบแห้ง มีขั้นตอนดังนี้

1. ทดสอบใบมันสำปะหลัง 2 ลักษณะ คือ ใบมันสำปะหลังสดสับ และใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่งนาน 12 ชั่วโมง ด้วยเครื่องสับใบมันสำปะหลังขนาด 3 แรงม้า ดังภาพที่ 27 เมื่อเปรียบเทียบลักษณะใบมันสำปะหลังที่ใช้ในการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถังหมุน

ภาพที่ 27 เครื่องสับใบมันสำปะหลัง

2. บรรจุใบมันสำปะหลังในห้องอบแห้งที่น้ำหนัก 2 , 4 และ 6 กิโลกรัมต่อครั้ง เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับเวลาในการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง

3. ชั่งน้ำหนักเหง้ามันสำปะหลัง เปิดฝาช่องบรรจุเชื้อเพลิง นำเหง้ามันสำปะหลังที่ชั่งแล้วเทใส่เตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลลงจนเต็ม ปิดฝาจดบันทึก เพื่อวิเคราะห์อัตราการใช้เชื้อเพลิงของเตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลลง

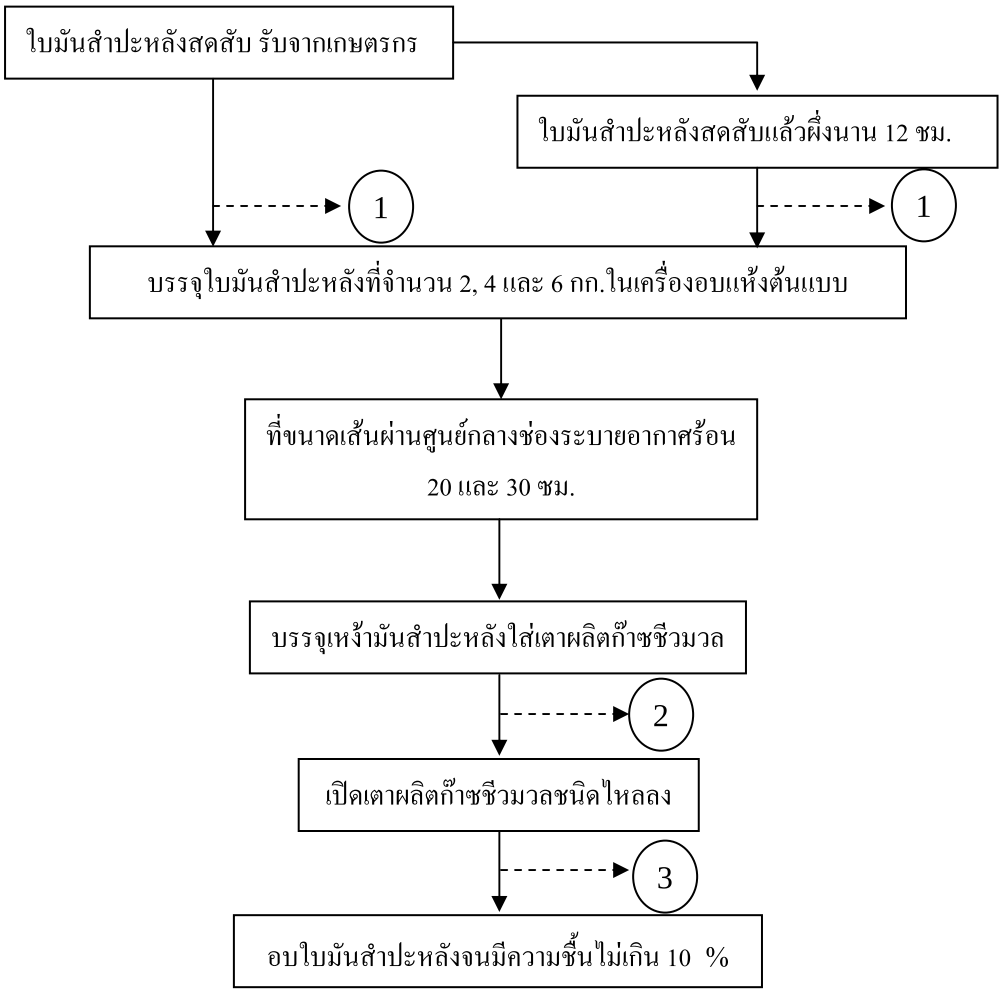
4. เปิดวาล์วเป่าอากาศ และมอเตอร์พัดลมเป่าอากาศ ใช้กระดาษหนังสือพิมพ์จุดไฟใส่เข้าไปที่ช่องเป่าอากาศ เพื่อจุดไฟในเตาผลิตก๊าซชีวมวล

5. เวลาผ่านไป 3-5 นาที ที่หัวเผามีก๊าซไหลออกมาเป็นลักษณะควันสีขาวขุ่น จุดไฟที่หัวเผาโดยใช้กระดาษเผาไฟจ่อที่หัวเผา ปรับอากาศจนหัวเผามีการเผาไหม้สมบูรณ์โดยสังเกตการเผาไหม้ที่หัวเผาต้องไม่มีควันเกิดขึ้น

6. ปรับสภาวะของเตาผลิตก๊าซชีวมวลให้เหมาะสมกับเครื่องอบแห้งต้นแบบ โดยพิจารณาจากการผลิตก๊าซที่ต่อเนื่อง และหัวเผาติดไฟตลอดเวลาที่เปิดมอเตอร์พัดลมดูดอากาศร้อนเข้าห้องอบแห้ง

7. ชั่งน้ำหนัก และความชื้นเริ่มต้นของใบมันสำปะหลังที่ทดสอบ ก่อนอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง กำหนดให้ถังหมุน 4 รอบต่อนาที ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องระบายอากาศร้อนที่ 20 และ 30 เซนติเมตร เก็บตัวอย่างใบมันสำปะหลังทุก 15 นาที วิเคราะห์ความชื้นใบมันสำปะหลังในห้องปฏิบัติการ ตามวิธี AOAC (2000)

8. บรรจุใบมันสำปะหลังที่ชั่งน้ำหนักแล้วใส่ในห้องอบแห้ง เปิดเตาผลิตก๊าซชีวมวลอบแห้งจนใบมันสำปะหลังมีความชื้นไม่เกิน 10 % บันทึกเวลาในการอบแห้ง, อุณหภูมิอากาศร้อน, อุณหภูมิใบมันสำปะหลัง แสดงดังภาพที่ 28



ภาพที่ 28 แผนผังวิธีการอบแห้งใบมันสำปะหลัง

หมายเหตุ (1) ถึง (3) เป็นตำแหน่งเก็บข้อมูลต่างๆ

(1) ความชื้นเริ่มต้นของใบมันสำปะหลัง

(2) ข้อมูลเบื้องต้นสำหรับระบบผลิตก๊าซชีวมวล : การใช้เชื้อเพลิง อัตราการป้อนอากาศ อัตราการผลิตก๊าซชีวมวล อุณหภูมิที่จุดต่างๆ

(3) ข้อมูลเบื้องต้นสำหรับเครื่องอบแห้ง : อุณหภูมิ อัตราการไหลของอากาศ

2.2 วิเคราะห์คุณภาพใบมันสำปะหลังที่ได้จากการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถังหมุนโดยใช้ก๊าซชีวมวลจากเตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลลงจากเหง้ามันสำปะหลัง

ในการวิเคราะห์นี้เพื่อคุณภาพใบมันสำปะหลังอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งโดยใช้เหง้ามันสำปะหลังเป็นเชื้อเพลิงชีวมวล เปรียบเทียบกับปัจจัยการอบแห้งแบบต่างๆ ดังนี้

1. ปริมาณโปรตีน ด้วย Kjeldahl Method
2. ปริมาณสารไซยาไนด์ ด้วยวิธี Alkaline Titration Method
3. ปริมาณแทนนิน ด้วยวิธี Burns (1971)

ผลการทดลองที่ได้นำมาวิเคราะห์ทางสถิติ เพื่อหาแนวโน้มของคุณภาพของใบมัน-สำปะหลังที่ผ่านการอบแห้งที่ปัจจัยต่าง ๆ การวิเคราะห์ทำได้โดยใช้โปรแกรม SPSS (version 15.0) วิเคราะห์แบบ Univariate of Variance และทำ Comparision test โดยใช้ Duncan multiple rang test (DMRT) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

3. การประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์

ในการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์ ประกอบไปด้วยค่าใช้จ่ายในการอบแห้งใบมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบถังหมุน ประกอบไปด้วย ค่าใช้จ่ายคงที่ (Fixed cost) และค่าใช้จ่ายผันแปร (Variable cost) สำหรับค่าใช้จ่ายคงที่ได้แก่ ค่าเสื่อมราคา และค่าเสียโอกาสของเงินลงทุน ซึ่งเป็นค่าใช้จ่ายที่ไม่แปรเปลี่ยนไปตามปริมาณการใช้งาน สำหรับค่าใช้จ่ายผันแปรได้แก่ ค่าจ้างแรงงาน ค่าไฟฟ้า ค่าใช้จ่ายเหล่านี้แปรเปลี่ยนไปตามการใช้งานของเครื่อง

ค่าเสื่อมราคา (Depreciation, DP) คิดค่าเสื่อมราคาแบบ Straight-Line Method

$$DP = (P-L)/n \tag{4}$$

โดยที่ P คือ ค่าซื้อเครื่องจักร (บาท)
L คือ ราคาขายหรือคงเหลือเมื่อเครื่องจักรหมดอายุ (บาท)
n คือ อายุการใช้งานของเครื่องจักร (ปี)

ค่าเสียโอกาสหรือดอกเบี้ย (Interest, I)

$$I = ((P+L)/2)*(i/100) \quad (5)$$

โดยที่ I คือ อัตราดอกเบี้ยต่อปี (%)

$$\text{ค่าใช้จ่ายในการทำงาน (บาท/กิโลกรัม)} = \frac{TC}{(E)(W)(D)} \quad (6)$$

โดยที่ TC คือ ค่าใช้จ่ายรวมของการอบแห้งใบมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้ง (บาท/ปี)

E คือ ความสามารถในการทำงาน (กิโลกรัม/ชั่วโมง)

W คือ ชั่วโมงการทำงาน (ชั่วโมง/วัน)

D คือ จำนวนวันที่ปฏิบัติงาน (วัน/ปี)

ผลและวิจารณ์

การวิเคราะห์ผลการทดลองอบแห้งใบมันสำปะหลังเพื่อใช้เป็นอาหารสัตว์ ด้วยเครื่องอบแห้งโดยใช้เตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดก๊าซไหลลงและใช้เหง้ามันสำปะหลังเป็นแหล่งพลังงานความร้อน สามารถแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนหลักๆ ดังต่อไปนี้

1. คุณสมบัติเหง้ามันสำปะหลังที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวมวล

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติของเหง้ามันสำปะหลังที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานความร้อน ด้วยวิธี Proximate Analysis ในห้องปฏิบัติการ โดยการสุ่มตัวอย่างเหง้ามันสำปะหลังที่รับซื้อจากเกษตรกร พบว่าเหง้ามันสำปะหลังมีองค์ประกอบแสดงผลในตารางที่ 13

ตารางที่ 13 องค์ประกอบโดยประมาณของเหง้ามันสำปะหลังที่นำมาเป็นเชื้อเพลิง

Sample	Moisture Content (%wb)	Volatile Matter (%)	Ash (%)	Fixed Carbon (%)	Calorific Value (kJ/kg)
1	9.26	67.34	2.44	20.01	7,870.71
2	9.24	67.54	3.28	19.00	7,839.65
3	8.01	68.04	4.78	18.48	7,910.55
Average	8.84±0.72	67.64±0.36	3.50±1.19	19.16±0.78	7,873.64±35.54

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเหง้ามันสำปะหลัง พบว่า เหง้ามันสำปะหลังมีความชื้น (Moisture) 8.84 เปอร์เซ็นต์ สารระเหย (Volatile matter) 67.64 เปอร์เซ็นต์ เถ้า (Ash) 3.50 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) 19.16 เปอร์เซ็นต์ และค่าความร้อน (Calorific value) 7,873.64 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ดังนั้นเหง้ามันสำปะหลังสามารถนำมาเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลได้ เนื่องจากมีความชื้นต่ำ มีสารระเหยสูง และให้ค่าพลังงานความร้อน โดยที่ปริมาณความชื้นของชีวมวลมีความสำคัญต่อค่าพลังงานความร้อน ชีวมวลที่มีความชื้นสูงเมื่อนำไปผลิตก๊าซชีวมวล ความร้อนที่ได้จะต้องนำไประเหยน้ำที่อยู่ในชีวมวลก่อนที่จะเกิดการเผาไหม้ ทำให้ประสิทธิภาพการ

ผลิตความร้อนลดลง (Jayah *et al.*, 2003) ซึ่งความชื้นชีวมวลที่เหมาะสมควรอยู่ระหว่าง 10 – 15 เปอร์เซ็นต์ (Skov and Papwarth, 1975) แม้ค่าความร้อนเหง้ามันสำปะหลังอาจมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับถ่านหินในประเทศไทยซึ่งมีค่าความร้อน 28,470.24 กิโลจูลต่อกิโลกรัม (กิตติยาณีย์, 2551) แต่ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงที่ใช้แล้วหมดไป เหง้ามันสำปะหลังเป็นพลังงานหมุนเวียนสามารถปลูกทดแทนได้

ชีวมวลส่วนมากมีขนาดและรูปทรงแตกต่างกัน จึงเป็นปัจจัยหนึ่งของเชื้อเพลิงชีวมวลที่ต้องคำนึงถึง ดังนั้นจึงทำการศึกษาขนาดของเหง้ามันสำปะหลังที่เหมาะสมสามารถนำมาใช้กับเตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลลงที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 เซนติเมตร สูง 120 เซนติเมตร โดยทำการทดลองเบื้องต้นกับเหง้ามันสำปะหลังที่รับจากเกษตรกร เนื่องจากถ้าใช้เหง้ามันสำปะหลังก่อนย่อยขนาดได้ก็จะเป็นการประหยัดพลังงานในการย่อยขนาด และลดเวลาในการเตรียมเหง้ามันสำปะหลังลง แต่พบว่าไม่สามารถผลิตก๊าซชีวมวลได้ต่อเนื่อง เนื่องจากขนาดใหญ่เกินไป ไม่เหมาะสมกับเตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลลงที่นำมาทดสอบจึงต้องลดขนาดมันสำปะหลังหลังด้วยเครื่องสับอาหารสัตว์อย่างหยาบ (ภาพที่ 29) เมื่อทดสอบเหง้ามันสำปะหลังที่ผ่านการสับลดขนาด (ภาพที่ 30) พบว่าสามารถผลิตก๊าซชีวมวลได้ติดต่อเนื่อง จากการวิเคราะห์ขนาดและความหนาแน่นโดยรวมของเหง้ามันสำปะหลังก่อนและหลังสับลดขนาดมีความแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 14

ภาพที่ 29 เครื่องสับอย่างหยาบสำหรับสับเหง้ามันสำปะหลัง

ภาพที่ 30 เหง้ามันสำปะหลังหลังสับลดขนาด

ตารางที่ 14 ขนาดความยาวเฉลี่ยและความหนาแน่นโดยรวมของเหง้ามันสำปะหลังที่ทดสอบ

เหง้ามันสำปะหลังที่ได้ทดสอบ	ความหนาแน่นโดยรวม (กก./ลบ.ม.)	ขนาดความยาวเฉลี่ย (ซม.)
เหง้ามันสำปะหลังก่อนย่อยสับลดขนาด	40 - 50	20-30
เหง้ามันสำปะหลังหลังสับลดขนาด	140 - 155	3-10

จากตารางที่ 14 พบว่า เหง้ามันสำปะหลังก่อนสับลดขนาดด้วยเครื่องสับอาหารอย่างหยาบ มีความหนาแน่นโดยรวม 40 - 50 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ขนาดความยาวเฉลี่ย 20-30 เซนติเมตร นั้นไม่เหมาะสมกับเตาผลิตก๊าซชีวมวล เนื่องจากมีขนาดยาวเกินไปการไหลของเหง้ามันสำปะหลัง จึงไม่ต่อเนื่อง ทำให้การผลิตก๊าซชีวมวลไม่ต่อเนื่องด้วย และเหง้ามันสำปะหลังหลังสับลดขนาด มีความหนาแน่นโดยรวม 140 -155 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ขนาดความยาวเฉลี่ย 3-10 เซนติเมตร สามารถผลิตก๊าซชีวมวลได้ติดต่อเนื่องนาน 105 นาที เมื่อป้อนเหง้ามันสำปะหลัง 11.58 กิโลกรัมต่อชั่วโมง จะเห็นได้ว่าเหง้ามันสำปะหลังที่สับลดขนาดสามารถผลิตก๊าซชีวมวลได้ติดต่อเนื่อง สอดคล้องกับวิรัช (2531) ซึ่งกล่าวว่าขนาดความยาวเชื้อเพลิงที่เหมาะสมกับเตาผลิตก๊าซชีวมวล คือ 2-3 เซนติเมตร ชีวมวลที่มีขนาดสั้นมีประสิทธิภาพดีกว่าโดยจะให้ปริมาณ CO สูงกว่าเชื้อเพลิงที่มีขนาดยาว ซึ่งขนาดที่เหมาะสมจะช่วยให้อัตราการเผาไหม้ต่อเนื่องและเร็วขึ้นผลิตก๊าซชีวมวลได้มากขึ้น Jayah *et al.* (2003) พบว่าขนาดความยาวเฉลี่ยของชีวมวลที่ใช้จะขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเตาผลิตก๊าซชีวมวลด้วย โดยที่ Walawender *et al.*(1989) ชีวมวลที่มีขนาดความยาว 4.7 เซนติเมตร เป็นขนาดที่เหมาะสมที่สุดกับเตาผลิตก๊าซชีวมวลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 เซนติเมตร ซึ่งเป็นเตาขนาดที่มีใช้กันอยู่ทั่วไป

2. ลักษณะการเผาไหม้ภายในเตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลลง

นำเหง้ามันสำปะหลังที่ผ่านการสับลดขนาดให้มีความยาวเฉลี่ย 3 - 10 เซนติเมตร ความหนาแน่นโดยรวม 140 - 155 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์ บรรจุใส่เตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลลง จุดเตา และเก็บข้อมูลเบื้องต้น เพื่อศึกษาลักษณะการผลิตก๊าซชีวมวล แสดงผลในตารางที่ 15

ตารางที่ 15 ข้อมูลระบบผลิตก๊าซชีวมวล (ภาคผนวกที่ ก)

รายการ	การทดลองที่			เฉลี่ย
	1	2	3	
เหง้ามันสำปะหลัง (กก./ชม.)	11.50	11.75	11.50	11.58±0.12
อัตราการไหลอากาศเข้าเตาผลิตก๊าซ (ตร.ม./ชม.)	120.75	113.70	112.80	115.75±3.55
อุณหภูมิอากาศเข้าเตาผลิตก๊าซ (°ซ)	46.45	46.59	45.68	46.24±0.40
อัตราการไหลก๊าซชีวมวล (ตร.ม./ชม.)	24.43	23.40	24.30	24.04±0.46
อุณหภูมิก๊าซชีวมวล (°ซ)	70.56	69.69	70.61	70.29±0.42

ตารางที่ 15 พบว่าเตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลลงใช้เหง้ามันสำปะหลังในการผลิตก๊าซชีวมวลเฉลี่ยที่ 11.58 กิโลกรัมต่อชั่วโมง พัดลมเป่าอากาศเข้าเตาผลิตก๊าซชีวมวลที่อัตราการไหลอากาศ 115.75 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ที่อุณหภูมิเฉลี่ย 46.22 องศาเซลเซียส ผลิตก๊าซชีวมวลที่อัตราการไหล 24.04 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง อุณหภูมิของก๊าซชีวมวลประมาณ 70.29 องศาเซลเซียส การที่อัตราการไหลของก๊าซชีวมวลที่ผลิตได้น้อยกว่าอัตราการไหลอากาศเข้าเตา อาจเนื่องมาจากขนาดท่อให้อากาศ และท่อก๊าซชีวมวลมีขนาดต่างกัน และระหว่างทำการทดลองสังเกตเห็นการรั่วของก๊าซชีวมวลจากช่องเปิดต่างๆ ทำให้ก๊าซที่ผลิตได้ออกมาน้อย ดังนั้นจึงควรปิดช่องต่างๆ ที่บริเวณเตา และท่อเพื่อป้องกันการสูญเสียก๊าซชีวมวลก่อนทดสอบกับระบบอบแห้งใบมันสำปะหลัง

เมื่อนำก๊าซชีวมวลที่ผลิตได้มาวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวมวลได้ผลตามตารางที่ 16

ตารางที่ 16 องค์ประกอบของก๊าซชีวมวลที่ผลิตได้จากเตาผลิตก๊าซ

ครั้งที่	CO_2 (%)	O_2 (%)	N_2 (%)	CH_4 (%)	H_2 (%)	CO (%)
1	23.97	1.67	43.75	1.98	14.38	14.75
2	24.01	1.68	43.87	2.05	13.85	14.69
3	24.06	1.71	43.25	2.03	13.93	14.50
เฉลี่ย	24.04±0.04	1.64±0.02	43.60±0.27	2.02±0.03	14.05±0.23	14.65±0.11

องค์ประกอบของก๊าซชีวมวลที่ผลิตได้จากเตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลลงมีองค์ประกอบของก๊าซชีวมวล คือ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) 24.04 เปอร์เซ็นต์ ออกซิเจน (O_2) 1.64 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน (N_2) 43.60 เปอร์เซ็นต์ มีเทน (CH_4) 2.02 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน (H_2) 14.05 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) 14.65 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร

ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO), ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) และก๊าซมีเทน (CH_4) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในการเผาไหม้ ซึ่งประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลลงคำนวณได้โดยใช้ค่าองค์ประกอบของก๊าซที่ผลิตได้ คำนวณจากสูตร (3)

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลลง

$$\eta_F = \left[\frac{\dot{V}_g (LHV_g)}{\dot{m}_{fl} (HHV_m) + W_{e1}} \right] \times 100 \qquad (3)$$

แทนค่าในสมการ (3) จะได้ (ภาคผนวก ค)

$$\eta_F = \left[\frac{13.68 \times 4182.48}{(11.58 \times 7,873.64) + 5400} \right] \times 100$$

$= 59.24$ %

เตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลลงมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ 59.24 เปอร์เซ็นต์ (แสดงการคำนวณอย่างละเอียดในภาคผนวก ค) สอดคล้องกับการทดสอบจากสถาบันวิจัยเคมี ศูนย์กลางสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล (2551) ที่ทดสอบใช้ก๊าซชีวมวลจากเหง้ามันสำปะหลังเป็นแหล่งพลังงานความร้อนเพื่อเผาขยะเปียก พบว่า เตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลลงมีประสิทธิภาพเชิงความร้อน 55.63 เปอร์เซ็นต์ สามารถเผาขยะเปียกได้ถึง 40 กิโลกรัม ซึ่งประโยชน์ในการนำพลังงานจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้เป็นพลังงานนอกจากนำมาใช้เป็นพลังงานในการเผาขยะแล้ว ยังสามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิตอื่นๆ เช่น การอบแห้งผลผลิตการเกษตร

3. การอบแห้งใบมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งโดยใช้ก๊าซชีวมวลจากเหง้ามันสำปะหลัง

จากการทดสอบเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของเตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลลงผลิตก๊าซชีวมวลเพื่อนำพลังงานความร้อนใช้ในการอบแห้งใบมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบ และทดสอบอบแห้งใบมันสำปะหลังเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ ที่กำหนด ได้แก่ ลักษณะใบมันสำปะหลัง (ใบมันสำปะหลังสดสับ และใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่งนาน 12 ชั่วโมง) ปริมาณใบมันสำปะหลังที่ป้อนเข้าห้องอบแห้งต่อครั้ง (2, 4 และ 6 กิโลกรัม) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องระบายอากาศร้อนชื้นออกจากห้องอบแห้ง (20 และ30 เซนติเมตร) โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งใบมันสำปะหลังเหมือนกันตลอดการทดลอง

ผลการทดสอบ พบว่า ต้องปรับสภาวะการทำงานของเตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลลง เนื่องจากเมื่อเปิดพัดลมดูดอากาศร้อนเข้าห้องอบแห้ง เปลวไฟที่หัวเผาดับเพื่อให้หัวเผาติดไฟอยู่เสมอจึงต้องปรับสภาวะให้เหมาะสมร่วมกับเครื่องอบแห้งใหม่ ดังนี้

ระบบผลิตก๊าซชีวมวลใช้เหง้ามันสำปะหลัง	11.25	กิโลกรัมต่อชั่วโมง
อัตราการป้อนอากาศ	47.49	ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง
ผลิตก๊าซชีวมวล	35.04	ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง
ก๊าซชีวมวลมีอุณหภูมิ	70.07	องศาเซลเซียส
อากาศร้อนเข้าห้องอบแห้งที่อัตราการไหล	174.75	ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมของเตาผลิตก๊าซชีวมวลที่สามารถทำงานร่วมกับเครื่องอบแห้งใบมันสำปะหลัง เริ่มทดสอบอบแห้งใบมันสำปะหลังโดยออกแบบให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องระบายอากาศร้อนออกจากห้องอบแห้งมีขนาดต่างกันคือ ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องระบาย

อากาศร้อน 20 เซนติเมตร จะสามารถระบายอากาศร้อนชื้นได้ที่อัตราการไหล 63.33 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง อุณหภูมิอากาศร้อนไหลออก 37.47 องศาเซลเซียส (ตารางภาคผนวกที่ ข1) และที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องระบายอากาศร้อนชื้น 30 เซนติเมตร สามารถระบายอากาศร้อนชื้นได้ที่อัตราการไหล 88.17 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง อุณหภูมิอากาศร้อนชื้นที่ไหลออกอยู่ที่ 42.27 องศาเซลเซียส ดังนั้นเมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมกับเครื่องอบแห้งจึงกำหนดใช้สภาวะนี้ตลอดการทดลองเพื่ออบแห้งใบมันสำปะหลังตามปัจจัยต่างๆ ซึ่งได้ผลดังนี้

ตารางที่ 17 การอบแห้งใบมันสำปะหลังสดสับด้วยเครื่องอบแห้งโดยใช้พลังงานจากเตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลลง

ขนาด ∅ ช่องระบายอากาศร้อน (เซนติเมตร)	ปริมาณใบมันสำปะหลัง (กิโลกรัม)	ความชื้นเริ่มต้น (%wb)	อัตราการระเหยน้ำ (กก.น้ำ/ชม.)	เวลาในการอบแห้ง (นาที)	อัตราการระบายอากาศร้อน (ลบ.ม./ชม.)
20	2	65.12±2.55^{b}	0.2254±0.02^{c}	180.00±0.00^{c}	63.33±2.26^{c}
	4	65.46±3.08^{b}	0.2736±0.01^{b}	300.00±0.00^{b}	63.30±3.91^{c}
	6	67.09±2.62^{a}	0.3449±0.01^{a}	360.00±0.00^{a}	59.53±2.61^{d}
30	2	61.67±0.83^{c}	0.1618±0.00^{d}	240.00±0.00^{b}	88.17±7.77^{a}
	4	60.54±1.15^{d}	0.2279±0.02^{c}	340.00±34.64^{a}	78.00±5.87^{b}
	6	61.75±0.98^{c}	0.3238±0.00^{a}	360.00±0.00^{a}	81.39±0.00^{b}

<u>หมายเหตุ</u> ^{a,b,c,d} แสดงค่าเฉลี่ยในแนวตั้ง ตามหลังเหมือนกัน แสดงว่าไม่มีความแตกต่างทางสถิติ โดยใช้ Duncan ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05

จากตารางที่ 17 พบว่า ใบมันสำปะหลังสดสับที่ช่องระบายอากาศร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 และ 30 เซนติเมตร มีอัตราการระเหยน้ำแตกต่างกัน โดยมีแนวโน้มว่าอัตราการระเหยน้ำเพิ่มขึ้นตามปริมาณใบมันสำปะหลังที่อบแห้งในแต่ละครั้ง เนื่องจากใบมันสำปะหลังที่นำมาทดสอบมีความชื้นสูงอยู่ระหว่าง 60.54 – 67.09 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นปริมาณใบมันสำปะหลังเพิ่มขึ้นจะมีปริมาณน้ำในใบมันสำปะหลังมากขึ้น เมื่ออบแห้งจึงสามารถระเหยน้ำได้มากน้อย

แตกต่างกันตามปริมาณใบมันสำปะหลังในการอบแห้ง ซึ่งสอดคล้องกับที่สมชาติ (2540) กล่าวว่า ค่าความชื้นเป็นตัวบ่งบอกปริมาณน้ำในวัตถุ ที่ปริมาณมากขึ้นปริมาณน้ำมากขึ้นด้วย ส่งผลให้การระเหยน้ำมากขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบอัตราการระเหยน้ำระหว่างที่ช่องระบายอากาศร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 กับ 30 เซนติเมตร พบว่าที่ขนาดช่องระบายอากาศร้อนเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร โดยรวมมีอัตราการระเหยน้ำมากกว่าที่ช่องระบายอากาศร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร เนื่องจากช่องระบายอากาศร้อนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกันส่งผลให้อัตราการระบายอากาศร้อนชื้นต่างกันด้วย โดยที่ช่องระบายอากาศร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร มีอัตราการระบายอากาศร้อนชื้นเฉลี่ยที่ 63.33 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง น้อยกว่าที่ช่องระบายอากาศร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร ซึ่งมีอัตราการระบายอากาศร้อนชื้น 88.17 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ที่อัตราการระบายอากาศร้อนน้อยกว่าทำให้อากาศร้อนอยู่ในห้องอบแห้งนานขึ้นการถ่ายเทความร้อนระหว่างใบมันสำปะหลังกับอากาศร้อนมากขึ้น การระเหยน้ำสูงขึ้น ซึ่งสมชาติ (2540) กล่าวว่า ที่อัตราการระบายอากาศร้อนต่ำทำให้การถ่ายเทความร้อนระหว่างวัตถุกับอากาศร้อนมีมากกว่า ส่งผลให้การระเหยน้ำเร็วขึ้น ใช้เวลาในการอบแห้งเร็วขึ้นด้วย

จากตารางที่ 17 ที่ช่องระบายอากาศร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 และ 30 เซนติเมตร ใช้เวลาในการอบแห้งต่างกัน และใช้เวลาในการอบแห้งนานขึ้นตามปริมาณใบมันสำปะหลังที่อบแห้งในแต่ละครั้ง เนื่องมาจากปริมาณใบมันสำปะหลังเพิ่มขึ้นมีปริมาณน้ำที่ต้องระเหยมากขึ้นด้วยซึ่งขนาดช่องระบายอากาศร้อนต่างกันส่งผลให้อัตราการไหลอากาศร้อนต่างกัน เกิดการถ่ายเทความร้อนของใบมันสำปะหลังกับอากาศร้อนเพื่อระเหยน้ำต่างกันออกไป โดยที่ช่องระบายอากาศร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร มีอัตราการไหลอากาศร้อนต่ำกว่า และเวลาในการอบแห้งน้อยกว่าที่ 30 เซนติเมตร ดังนั้นที่อัตราการไหลอากาศร้อนต่ำกว่าในการอบแห้งจะใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าที่อัตราการไหลอากาศร้อนสูง เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนที่อัตราการไหลอากาศร้อนต่ำดีกว่าที่อัตราการไหลของอากาศร้อนสูง สอดคล้องกับที่ กิตติศักดิ์ (2545) ทำการทดสอบเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมกับอินฟาเรด พบว่ารังสีอินฟาเรดช่วยลดเวลาในการอบแห้งที่ความชื้นเริ่มต้นสูง และอัตราการไหลอากาศต่ำ แต่จะมีอิทธิพลน้อยลงเมื่ออัตราการไหลอากาศสูงและไม่ช่วยลดเวลาในการอบแห้ง

ตารางที่ 18 การอบแห้งใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่งนาน 12 ชั่วโมง ด้วยเครื่องอบแห้งโดยใช้พลังงานจากเตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลลง

ขนาด ∅ ช่องระบายอากาศร้อน (เซนติเมตร)	ปริมาณใบมันสำปะหลัง (กิโลกรัม)	ความชื้นเริ่มต้น (%wb)	อัตราการระเหยน้ำ (กกน้ำ/ชม.)	เวลาในการอบแห้ง (นาที)	อัตราการระบายอากาศร้อน (ลบ.ม./ชม.)
20	2	36.04±1.96[c]	0.2384±0.01[d]	100.00±7.07[a]	58.78±0.00[c]
	4	54.82±4.28[a]	0.4635±0.02[b]	150.00±0.00[b]	62.55±1.07[c]
	6	44.09±3.12[b]	0.5594±0.03[a]	160.00±7.07[c]	60.29±1.07[c]
30	2	49.54±1.35[a]	0.2242±0.02[d]	150.00±0.00[b]	82.17±11.51[b]
	4	48.86±2.23[a]	0.3525±0.02[c]	180.00±0.00[c]	84.78±2.39[b]
	6	49.89±3.68[a]	0.4188±0.03[bc]	210.00±0.00[d]	93.26±4.79[a]

หมายเหตุ [a,b,c,d] แสดงค่าเฉลี่ยในแนวตั้ง ตามหลังเหมือนกัน แสดงว่าไม่มีความแตกต่างทางสถิติ โดยใช้ Duncan ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05

จากตารางที่ 18 พบว่าอัตราการระเหยน้ำที่ช่องระบายอากาศร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร มีอัตราการระเหยน้ำเพิ่มขึ้นตามปริมาณใบมันสำปะหลังที่อบแห้งในแต่ละครั้ง และมีอัตราการระเหยน้ำมากกว่าที่ช่องระบายอากาศร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร ในทำนองเดียวกันที่ขนาดช่องระบายอากาศร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร อัตราการระเหยน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณใบมันสำปะหลังด้วยเช่นกัน ดังนั้นอัตราการระเหยน้ำจะเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณใบมันสำปะหลังที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องและมีแนวโน้มตามตารางที่ 17

ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบเวลาในการอบแห้งระหว่างใบมันสำปะหลังสดสับกับใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่งนาน 12 ชั่วโมง พบว่า ที่ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่ง 12 ชั่วโมง ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่า เนื่องจากความชื้นโดยเฉลี่ยของใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่งนาน 12 ชั่วโมง มีค่าความชื้นน้อยกว่าใบมันสำปะหลังสดสับ เมื่อความชื้นน้อยกว่าที่ปริมาณใบมันสำปะหลังเท่ากันจะมีปริมาณน้ำที่ต้องระเหยน้อยกว่าจึงใช้เวลาในการระเหยน้ำออกจากใบมัน

สำปะหลังน้อยกว่าด้วย ซึ่งสอดคล้องกับสมชาติ (2540) ที่กล่าวไว้ว่าค่าความชื้นเป็นตัวบ่งบอกปริมาณน้ำในวัตถุที่อบแห้ง ดังนั้นที่ความชื้นสูงจึงต้องใช้เวลาในการระเหยน้ำนานขึ้นด้วย

จากตารางที่ 17 และ 18 สรุปได้ว่าความชื้นเริ่มต้นของใบมันสำปะหลัง ปริมาณใบมันสำปะหลัง และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องระบายอากาศร้อน มีผลต่อเวลาในการอบแห้ง โดยที่ความชื้นเริ่มต้นสูง และปริมาณใบมันสำปะหลังเพิ่มขึ้นจะใช้เวลาในการอบแห้งนานขึ้น ในทางกลับกันที่ขนาดช่องระบายอากาศ 20 เซนติเมตร ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าที่ขนาดช่องระบายอากาศร้อน 30 เซนติเมตร และพบว่าที่ปริมาณใบมันสำปะหลังเพิ่มขึ้น มีอัตราการระเหยน้ำสูงขึ้นและใช้เวลาในการอบแห้งนานขึ้น

ดังนั้นเราสามารถอบแห้งใบมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งได้ ซึ่งใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าการผึ่งแดดและสามารถอบได้ตลอดเวลา ความชื้นใบมันสำปะหลังแห้งมีความสม่ำเสมอความชื้นไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ จากการทดสอบเครื่องอบแห้งต้นแบบที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 58.5 เซนติเมตร ยาว 177 เซนติเมตร นี้สามารถอบแห้งใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่งนาน 12 ชั่วโมง ที่ 6 กิโลกรัม ซึ่งเป็นปริมาณที่เหมาะสมกับขนาดของเครื่องอบแห้งต้นแบบและสามารถพลิกกลับใบมันสำปะหลังได้ดี ทำให้ใบมันสำปะหลังสัมผัสกับอากาศร้อนได้อย่างทั่วถึง และระเหยน้ำออกได้ดี ซึ่งจากการทดสอบเครื่องอบแห้งต้นแบบนี้จะเห็นได้ว่าอัตราการระเหยน้ำที่แสดงในตารางที่ 17 และ 18 มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณใบมันสำปะหลังที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะอบแห้งใบมันสำปะหลังที่ปริมาณมากกว่า 6 กิโลกรัม ซึ่งส่งผลให้ใช้เวลาในการอบแห้งนานขึ้น เพราะปริมาณน้ำที่มีในใบมันสำปะหลังที่ต้องระเหยออกจากห้องอบแห้งมีมากขึ้นนั่นเอง

4. วิเคราะห์คุณภาพใบมันสำปะหลัง

การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนโดยใช้วิธี Kjeldahl ซึ่งเป็นการวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด จากการทดลองใบมันสำปะหลังจากการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง แสดงดังตารางที่ 19

ตารางที่ 19 ปริมาณโปรตีนในใบมันสำปะหลังอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง

หน่วย : % โดยน้ำหนักแห้ง

ขนาด ∅ ช่องระบายอากาศร้อน (เซนติเมตร)	ปริมาณใบมันสำปะหลัง (กิโลกรัม)	ใบมันสำปะหลังสดสับ	ใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่งนาน 12 ชั่วโมง
20	2	21.02±0.11[a]	21.11±0.26[a]
	4	21.19±0.39[a]	20.11±0.17[b]
	6	20.77±0.56[a]	20.72±0.24[b]
30	2	21.42±0.06[a]	20.85±0.13[ab]
	4	21.88±0.41[a]	20.24±0.53[a]
	6	20.28±0.23[b]	21.17±0.31[a]

<u>หมายเหตุ</u> [a,b] แสดงค่าเฉลี่ยในแนวตั้ง ตามหลังเหมือนกัน แสดงว่าไม่มีความแตกต่างทางสถิติ โดยใช้ Duncan ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05

จากตารางที่ 19 พบว่าใบมันสำปะหลังสดสับจำนวน 2, 4 และ 6 กิโลกรัม เมื่ออบที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องระบายอากาศ 20 เซนติเมตร มีโปรตีนไม่แตกต่างกัน ส่วนที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องระบายอากาศร้อน 30 เซนติเมตรที่จำนวนใบมันสำปะหลัง 2 และ 4 กิโลกรัม มีโปรตีนมากกว่าที่จำนวน 6 กิโลกรัม ทำนองเดียวกันใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่ง 12 ชั่วโมง ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องระบายอากาศ 20 เซนติเมตรที่จำนวน 4 และ 6 กิโลกรัม มีโปรตีนน้อยกว่าที่จำนวน 2 กิโลกรัม เนื่องจากใบมันสำปะหลังที่นำมาทดสอบไม่ได้กำหนดมาตรฐานพันธุ์ สัดส่วนของใบและก้านที่แน่นอน ซึ่งปริมาณโปรตีนที่ตัวใบมันสำปะหลังมีมากกว่าที่ก้านใบ

ถึงหกเท่า (ภรณี, 2540) และที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องระบายอากาศ 30 เซนติเมตร มีค่าไม่แตกต่างกัน ซึ่งปริมาณโปรตีนที่วิเคราะห์ได้นั้นอยู่ในช่วง 20.11-21.88 เปอร์เซ็นต์ นิลุบล (2550) กล่าวว่าวัตถุดิบที่เหมาะสำหรับใช้เป็นอาหารเสริมสำหรับการเลี้ยงสัตว์ได้ ควรมีโปรตีนมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้ง การอบแห้งใบมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งโดยใช้ความร้อนจากก๊าซชีวมวลไม่น่าจะส่งผลต่อปริมาณโปรตีนในใบมันสำปะหลัง

เนื่องจากใบมันสำปะหลังมีข้อจำกัดที่ต้องพิจารณา คือ ปริมาณสารไซยาไนด์ และแทนนิน ซึ่งทำให้ไม่สามารถนำมาเลี้ยงสัตว์ขณะยังสดอยู่ ต้องผ่านการทำให้แห้งให้ความชื้นไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ จึงจะสามารถใช้เป็นวัตถุดิบที่ดีในสูตรอาหารได้ (อุทัย และสุกัญญา, 2547) สำหรับการศึกษาครั้งนี้ พบว่า ใบมันสำปะหลังสดสับก่อนอบแห้งมีปริมาณสารไซยาไนด์ 51.97 ppm และใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่งนาน 12 ชั่วโมงก่อนอบแห้งมีปริมาณสารไซยาไนด์ 36.69 ppm เนื่องจากในการสับและการผึ่งไว้ก่อนสามารถลดสารไซยาไนด์ได้ไปในระดับหนึ่งแล้ว สอดคล้องกับการทดสอบ การลดลงของสารไซยาไนด์ที่ผ่านการผึ่งแดด Ravindran (1993) พบว่าใบมันสำปะหลังเต็มใบผึ่งแดด 1 วัน สามารถลดสารไซยาไนด์จาก 173 มิลลิกรัมต่อกรัมแห้ง เป็น 141 มิลลิกรัมต่อกรัมแห้ง และที่ใบมันสำปะหลังสับ สามารถลดได้จาก 109 มิลลิกรัมต่อกรัมแห้ง เป็น 88 มิลลิกรัม ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารไซยาไนด์แสดงไว้ในตารางที่ 20

ตารางที่ 20 ปริมาณไซยาไนด์ในใบมันสำปะหลังอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง

หน่วย : ppm

ขนาด ∅ ช่องระบายอากาศร้อน (เซนติเมตร)	ปริมาณใบมันสำปะหลัง (กิโลกรัม)	ใบมันสำปะหลังสดสับ	ใบมันสำปะหลังสดสับผึ่งนาน 12 ชั่วโมง
20	2	35.64±1.08[a]	34.56±0.00[a]
	4	37.80±1.08[b]	36.72±0.00[a]
	6	34.56±0.00[a]	37.80±1.08[b]
30	2	34.56±0.00[a]	34.56±0.00[a]
	4	35.64±1.08[a]	36.72±0.00[b]
	6	36.72±0.00[b]	34.56±0.00[a]

<u>หมายเหตุ</u> [a,b] แสดงค่าเฉลี่ยในแนวตั้ง ตามหลังเหมือนกัน แสดงว่าไม่มีความแตกต่างทางสถิติ โดยใช้ Duncan ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05

จากตารางที่ 20 พบว่า ปริมาณไซยาไนด์ที่ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องระบายอากาศ 20 เซนติเมตร ที่จำนวนใบมันสำปะหลัง 2 และ 6 กิโลกรัม มีปริมาณไซยาไนด์น้อยกว่าที่จำนวน 4 กิโลกรัม ส่วนที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องระบายอากาศ 30 เซนติเมตร ที่จำนวนใบมันสำปะหลัง 2 และ 4 กิโลกรัม มีปริมาณไซยาไนด์น้อยกว่าที่ 6 กิโลกรัม และที่ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่ง 12 ชั่วโมงที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องระบายอากาศร้อน 20 เซนติเมตร ที่จำนวน 2 และ 4 กิโลกรัม มีปริมาณไซยาไนด์น้อยกว่าที่ 6 กิโลกรัม ส่วนที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องระบายอากาศ 30 เซนติเมตร ที่จำนวนใบมันสำปะหลัง 2 และ 6 กิโลกรัม มีปริมาณไซยาไนด์น้อยกว่าที่จำนวน 4 กิโลกรัม การที่ปริมาณไซยาไนด์ค่อนข้างผันแปรไปเช่นนี้แสดงให้เห็นว่าที่อัตราการระบายอากาศมากขึ้นไม่สามารถลดไซยาไนด์ได้มากขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากไซยาโนเจนนิคไกลโคไซด์จะถูกย่อยสลายโดยเอนไซม์ลินามาเรสแล้วเปลี่ยนเป็นไฮโดรเจนไซยาไนด์ที่จะสูญเสียออกไปในรูปของก๊าซระหว่างกระบวนการผลิต ซึ่งต้องใช้ระยะเวลาในการย่อยสลายเพื่อเปลี่ยนรูปให้สามารถระเหยได้ (Fafunso and Bassir, 1976) ดังนั้นใน

การวิเคราะห์ปริมาณไซยาไนด์จึงต้องคำนึงถึงระยะเวลาในการเก็บตัวอย่างก่อนนำมาวิเคราะห์ด้วย หากเวลาต่างกันก็จะมีผลให้ปริมาณไซยาไนด์ต่างกันได้ โดยปริมาณไซยาไนด์ลดลงตามระยะเวลาการเก็บใบมันสำปะหลังที่นานขึ้น

นอกจากนี้ใบมันสำปะหลังที่นำมาทดสอบไม่ได้กำหนดสัดส่วนของใบและก้านมันสำปะหลัง ซึ่งในใบมันสำปะหลังสดมีปริมาณไซยาไนด์มากกว่าในก้านใบและลำต้น ตามตารางที่ 8 ใบมันสำปะหลังที่เป็นใบอ่อนมีปริมาณไซยาไนด์ 490 ppm ใบเจริญเต็มที่ 590 ppm ในก้านใบอ่อน 720 ppm ส่วนในก้านใบเจริญเต็มที่ 340 ppm ซึ่งเห็นได้ชัดว่าที่ก้านใบอ่อนเป็นส่วนที่มีปริมาณไซยาไนด์สูงสุด ดังนั้นหากสัดส่วนของใบอ่อน ใบเจริญเต็มที่ ก้านใบอ่อน และก้านใบเจริญเต็มที่มีปริมาณแตกต่างกันก็จะส่งผลให้ปริมาณไซยาไนด์ที่วิเคราะห์ได้แตกต่างกันด้วย อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์ไซยาไนด์ใบมันสำปะหลังอบแห้งในการทดลองนี้อยู่ในช่วง 34.56 - 37.80 ppm ซึ่งน้อยกว่า 50 ppm ถือว่าไม่เป็นอันตรายต่อสัตว์ (Bruijn, 1971)

ตารางที่ 21 ปริมาณแทนนินในใบมันสำปะหลังอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง

หน่วย : ppm

ขนาด ∅ ช่องระบายอากาศร้อน (เซนติเมตร)	ปริมาณใบมันสำปะหลัง (กิโลกรัม)	ใบมันสำปะหลังสดสับ	ใบมันสำปะหลังสดสับผึ่งนาน 12 ชั่วโมง
20	2	16.93±0.26[a]	11.82±0.33[a]
	4	19.23±0.72[b]	14.98±0.22[c]
	6	17.29±0.34[a]	11.44±0.03[a]
30	2	18.19±0.01[b]	12.49±0.04[b]
	4	18.88±0.29[b]	12.64±0.43[b]
	6	17.25±0.02[a]	12.01±0.44[b]

หมายเหตุ [a,b,c] แสดงค่าเฉลี่ยในแนวตั้ง ตามหลังเหมือนกัน แสดงว่าไม่มีความแตกต่างทางสถิติ โดยใช้ Duncan ที่ระดับนัยสำคัญ = 0.05

จากตารางที่ 21 พบว่าที่ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องระบายอากาศ 20 เซนติเมตรที่จำนวนใบมันสำปะหลัง 2 และ 6 กิโลกรัม มีปริมาณแทนนินน้อยกว่าที่จำนวน 4 กิโลกรัม ส่วนที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องระบายอากาศ 30 เซนติเมตร ที่จำนวนใบมันสำปะหลัง 2 และ 4 กิโลกรัม มากกว่าที่จำนวน 6 กิโลกรัม ในทำนองเดียวกันใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่ง 12 ชั่วโมงที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องระบายอากาศ 20 เซนติเมตร ที่จำนวนใบมันสำปะหลัง 2 และ 6 กิโลกรัม มีปริมาณแทนนินน้อยกว่าที่จำนวน 4 กิโลกรัม อาจเนื่องจากปริมาณและสัดส่วนของใบเจริญเต็มที่ ใบอ่อน และก้านใบเจริญเต็มที่ ที่นำมาทดสอบไม่สามารถกำหนดแน่นอนได้ ทั้งนี้ปริมาณแทนนินขึ้นอยู่กับการเจริญเติบโตของมันสำปะหลัง และมีมากน้อยแตกต่างกันตามพันธุ์ด้วย (อุทัย, 2543) ส่วนที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องระบายอากาศ 30 เซนติเมตร มีแทนนินไม่แตกต่างกัน สำหรับในการทดลองนี้ปริมาณแทนนินที่วิเคราะห์ได้อยู่ในช่วง 11.44 - 19.23 ppm โอภาส (2550) กล่าวว่าปริมาณแทนนินที่อยู่ในช่วงต่ำถึงปานกลาง (20-40 ppm) และในระดับนี้สามารถป้องกันการเกิดท้องอืด เพิ่มการไหลผ่านของ non-ammonia nitrogen และกรดอะมิโนที่สำคัญ ตลอดจนเป็นการเพิ่มจุลินทรีย์โปรตีนที่ไหลผ่านมายังตำแหน่งของลำไส้เล็ก จึงถือได้ว่าปริมาณแทนนิน ที่ผ่านการอบแห้งไม่เป็นอันตรายต่อสัตว์

จากการทดสอบเพื่อพัฒนากระบวนการทำแห้งใบมันสำปะหลัง ด้วยการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง สรุปได้ว่า การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งนั้นไม่ส่งผลกระทบต่อปริมาณโปรตีน ซึ่งกระบวนการลดขนาดใบมันสำปะหลัง และอบแห้งสามารถลดไซยาไนด์ รวมถึงแทนนินลงได้ในระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่อสัตว์ ดังนั้นเกษตรกรสามารถประยุกต์ใช้เครื่องอบแห้งแบบถังหมุนมาอบแห้งใบมันสำปะหลังเป็นอาหารสัตว์ได้ ซึ่งมีข้อดีคือสามารถอบแห้งโดยใช้ระยะเวลาน้อยกว่ากระบวนการผึ่งแดด ความชื้นที่ได้สม่ำเสมอ รวมถึงการปนเปื้อนจากภายนอกน้อยกว่าการตากแดด กระบวนการผลิตไม่สลับซับซ้อน และสามารถใช้อบใบมันสำปะหลังในช่วงที่ไม่มีแสงแดดได้

5. การวิเคราะห์ผลเชิงเศรษฐศาสตร์

สมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

ข้อมูลในการวิเคราะห์	ข้อมูล
1. ต้นทุนในการสร้างอุปกรณ์ทั้งระบบ	60,000 บาท
2. อายุการใช้งาน	7 ปี
3. ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาอุปกรณ์ต่อปี	5% ของค่าสร้างอุปกรณ์
4. ราคาเชื้อเพลิงต่อกิโลกรัม	0.50 บาท
5. อัตราการใช้เชื้อเพลิงเฉลี่ย	12 กิโลกรัมต่อชั่วโมง
6. ราคากระแสไฟฟ้าต่อหน่วย	3.50 บาท
7. อุปกรณ์ทั้งหมดใช้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย	2 กิโลวัตต์ ชั่วโมง
8. เครื่องอบแห้งทำงานต่อวัน	8 ชั่วโมง
9. ความสามารถในการอบใบมันสำปะหลังต่อวัน	

ปริมาณ 2 กิโลกรัม ใช้เวลาในการอบแห้ง 1.67 ชั่วโมง เท่ากับ 8 กิโลกรัมต่อวัน
ปริมาณ 4 กิโลกรัม ใช้เวลาในการอบแห้ง 2.50 ชั่วโมง เท่ากับ 12 กิโลกรัมต่อวัน
ปริมาณ 6 กิโลกรัม ใช้เวลาในการอบแห้ง 2.66 ชั่วโมง เท่ากับ 18 กิโลกรัมต่อวัน

10. จำนวนแรงงาน	1 คน
11. อัตราค่าจ้างแรงงาน (บรรจุและเก็บใบมันสำปะหลัง*)	

*คิดจากเวลาทำงานจริง ค่าจ้างแรงงาน 150 บาทต่อวัน ซึ่งในการอบแห้งไม่ต้องมีคนเฝ้าตลอดเวลา โดยจากการทดสอบ พบว่า ใช้เวลาในการบรรจุ และเก็บใบมันสำปะหลัง รวมถึงการบรรจุเหง้ามันสำปะหลังครั้งละ 20 นาที ทำการอบแห้ง 3 และ 4 ครั้งต่อวัน จะใช้เวลาทำงานจริง 1 ชั่วโมงต่อวันเมื่อคิดค่าจ้างแรงงานต่อ 1 ชั่วโมง มีค่าใช้จ่ายเพียง 18.75 และ 25 บาทต่อชั่วโมง ตามลำดับ

ในการอบแห้งใบมันสำปะหลังแต่ละครั้ง จะทำการอบครั้งละ 2, 4 และ6 กิโลกรัม จำนวน 4, 3 และ 3 ครั้งต่อวันตามลำดับ หรือ 8 ชั่วโมง และเครื่องทำงาน 12 เดือนต่อปีหรือ 360 วันต่อปี

1.	เงินลงทุนในการสร้างเครื่อง	60,000 บาท
2.	กำหนดอัตราดอกเบี้ยตลอดอายุการใช้งาน	7.5 %
3.	กำหนดอายุการใช้งานของเครื่องอบแห้ง	7 ปี
4.	ค่ากระแสไฟฟ้า (2 ×8×360×3.5)	20,160 บาทต่อปี
5.	ค่าเชื้อเพลิง (12×8×360×0.5)	17,280 บาทต่อปี
6.	ค่าพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง (20,160+17,280)	37,440 บาทต่อปี
7.	ค่าบำรุงรักษารายปี 5% ของมูลค่าเครื่องอบแห้ง	5,000 บาต่อปี
8.	ราคาขายใบมันสำปะหลังต่อกิโลกรัม	5 บาท
9.	สามารถอบแห้งใบมันสำปะหลังได้	

ปริมาณ 8 กิโลกรัม (8×360) เท่ากับ 2,880 กิโลกรัมต่อปี

ปริมาณ 12 กิโลกรัม (12×360) เท่ากับ 4,320 กิโลกรัมต่อปี

ปริมาณ 18 กิโลกรัม (18×360) เท่ากับ 6,480 กิโลกรัมต่อปี

10. ค่าจ้างแรงงาน

อบแห้ง 4 ครั้งค่าใช้จ่าย 25 บาทต่อวัน(25×360) เท่ากับ 9,000 บาทต่อปี

อบแห้ง 3 ครั้งค่าใช้จ่าย 18.75 บาทต่อวัน (18.75×360) เท่ากับ 6,750 บาทต่อปี

ผลการประมาณค่าใช้จ่ายในการทำงาน

ค่าใช้จ่ายในการทำงานของเครื่องอบแห้ง คำนวณได้จาก ต้นทุนคงที่ (Fixed cost) และต้นทุนแปรผัน (Variable cost) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ต้นทุนคงที่

ค่าเสื่อมราคา (Depreciation, DP) คิดค่าเสื่อมราคาแบบ Straight-Line Method โดยใช้สมการ DP=(P-L)/n โดยที่ P คือ ค่าซื้อเครื่องจักร (บาท), L คือ ราคาขายหรือคงเหลือเมื่อเครื่องจักรหมดอายุ (บาท) และ n คือ อายุการใช้งานของเครื่องจักร (ปี)

ราคาของเครื่องอบแห้ง 60,000 บาท มูลค่าซากเครื่องมือเมื่อสิ้นปีที่ 7 คงเหลือ 10 % ของราคาเครื่อง

ดังนั้นราคาซากเครื่อง = 6,000 บาท

ค่าเสื่อมราคา (DP) = (60,000-6,000)/7

= 7,714.28 บาทต่อปี

ค่าเสียโอกาสหรือดอกเบี้ย (Interest)

I=((P+L)/2)*(i/100) โดยที่ I คือ อัตราดอกเบี้ยต่อปี (%)

กำหนดให้อัตราดอกเบี้ยต่อปี เท่ากับ 7.5 % (อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ธนาคารกสิกรไทย เมื่อวันที่ 20 เมษายน พ.ศ. 2550)

ดังนั้นค่าเสียโอกาสต่อปี = ((60,000-6,000)/2)*(7.5/100) =2,025 บาทต่อปี

รวมต้นทุนคงที่ต่อปี(Fixed Cost) = 7,714.28+2,025 =9,739.28 บาทต่อปี

ต้นทุนคงที่ในการอบแห้งต่อกิโลกรัมใบมันสำปะหลัง

ที่ปริมาณ 2 กิโลกรัมต่อครั้ง เท่ากับ 9,739.28/2,880

= 3.38 บาทต่อกิโลกรัมใบมันสำปะหลัง

ที่ปริมาณ 4 กิโลกรัมต่อครั้ง เท่ากับ 9,739.28/4,320

= 2.25 บาทต่อกิโลกรัมใบมันสำปะหลัง

ที่ปริมาณ 6 กิโลกรัมต่อครั้ง เท่ากับ 9,739.28/6,480

= 1.50 บาทต่อกิโลกรัมใบมันสำปะหลัง

ต้นทุนผันแปร

ค่าบำรุงรักษารายปี 5% ของมูลค่าเครื่องอบแห้ง	5,000	บาทต่อปี
ค่าพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง	37,440	บาทต่อปี

ค่าจ้างแรงงาน

ที่ปริมาณ 2 กิโลกรัม อบแห้ง 4 ครั้งต่อวัน เท่ากับ 9,000 บาทต่อปี
ที่ปริมาณ 4 และ 6 กิโลกรัม อบแห้ง 3 ครั้งต่อปี เท่ากับ 6,750 บาทต่อปี

รวมต้นทุนผันแปร (Variable Cost)

ที่ปริมาณ 2 กิโลกรัม เท่ากับ 5,000 + 37,440 + 9,000 = 51,440 บาทต่อปี
ที่ปริมาณ 4 และ 6 กิโลกรัม เท่ากับ 5,000 + 37,440 + 6,750 = 49,190 บาทต่อปี

จะได้ต้นทุนผันแปรเท่ากับ

ที่ปริมาณ 2 กิโลกรัม เท่ากับ 51,440/ (2,880*2.4) = 7.44 บาทต่อกิโลกรัม
ที่ปริมาณ 4 และ 6 กิโลกรัม เท่ากับ 49,190 / (2,880*2.4) = 7.12 บาทต่อกิโลกรัม

ดังนั้นเมื่อวิเคราะห์ค่าใช้จ่าย พบว่า ค่าใช้จ่ายในส่วนของต้นทุนคงที่ในการอบแห้งใบมันสำปะหลังที่ปริมาณ 6 กิโลกรัม เท่ากับ 1.50 บาทต่อกิโลกรัม และต้นทุนผันแปรในการอบแห้งใบมันสำปะหลัง 7.12 บาทต่อกิโลกรัม ทำให้ต้นทุนรวมต่อใบมันสำปะหลัง 1 กิโลกรัมเท่ากับ 8.47 บาท โดยที่ 2 และ 4 กิโลกรัม มีต้นทุนรวมต่อใบมันสำปะหลัง 1 กิโลกรัม สูงกว่าที่ 9.96 และ 9.37 บาทต่อกิโลกรัม ซึ่งยังคงมีค่าใช้จ่ายสูงและมีแนวโน้มว่าเมื่ออบแห้งที่ปริมาณมากขึ้นจะสามารถลดค่าใช้จ่ายลงได้ เช่นที่ 8, 9 หรือมากกว่า จะให้ต้นทุนรวมน้อยลง ซึ่งต้องทำการศึกษาต่อไป ซึ่งในความเป็นจริงทำให้ความเป็นไปได้ที่จะใช้ระบบนี้ในการส่งเสริมเกษตรกรน้อยลง เนื่องจากเกษตรกรจะสามารถขายใบมันสำปะหลังแห้งได้เพียงกิโลกรัมละ 5-6 บาทเท่านั้น ดังนั้นจึงควรหาวิธีการลดค่าใช้จ่ายลง เช่น ออกแบบเครื่องอบให้มีขนาดเหมาะสมกับเตาผลิตก๊าซชีวมวล หรือออกแบบเตาผลิตก๊าซชีวมวลโดยใช้อุปกรณ์ที่ราคาประหยัด สำหรับการทดลองครั้งนี้เตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลลงที่นำมาทดสอบทำจากสแตนเลสซึ่งมีราคาสูงทำให้ต้นทุนการผลิตสูงไปด้วย ดังนั้นควรเลือกใช้วัสดุผลิตที่เหมาะสมกับการใช้งานซึ่งสามารถลดค่าใช้จ่ายลงได้

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาพัฒนากระบวนการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งซึ่งจากเดิมเกษตรกรทำแห้งใบมันสำปะหลังด้วยการผึ่งแดด ทำให้ใบมันสำปะหลังที่ได้มีความชื้นไม่สม่ำเสมอ การปนเปื้อนสูง รวมถึงสูญเสียระหว่างการทำแห้ง เมื่อทดสอบการอบแห้งใบมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้ง พบว่าสามารถอบแห้งใบมันสำปะหลังได้ ระบบการทำงานไม่ยุ่งยาก เกษตรกรสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้เอง โดยใช้พลังงานความร้อนจากเตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลลง ซึ่งใช้เหง้ามันสำปะหลังเป็นแหล่งเชื้อเพลิงในการผลิตก๊าซชีวมวล สามารถอบแห้งใบมันสำปะหลังทั้งใบมันสำปะหลังสดสับ และใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่งนาน 12 ชั่วโมง ก่อนนำไปอบ จนมีความชื้นต่ำกว่า 10 % สรุปได้ดังนี้

1. เหง้ามันสำปะหลังสามารถนำมาใช้เป็นชีวมวลในการผลิตก๊าซชีวมวลได้ โดยการย่อยให้มีขนาดความยาว 3-10 เซนติเมตร ความหนาแน่นโดยรวม 140 -155 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ก่อนนำมาเป็นเชื้อเพลิงผลิตก๊าซชีวมวลกับเตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลลงที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 เซนติเมตร สูง 120 เซนติเมตร ให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาผลิตก๊าซชีวมวลเท่ากับ 59.24 % ซึ่งเหง้ามันสำปะหลังที่มีขนาดความยาว 20 – 30 เซนติเมตรไม่สามารถผลิตก๊าซชีวมวลได้ เนื่องจากเหง้ามันสำปะหลังมีขนาดยาวมากเกินไปทำให้การผสมของอากาศกับชีวมวลไม่เหมาะสม การผลิตก๊าซชีวมวลไม่ต่อเนื่อง

2. สภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งใบมันสำปะหลัง คือ ที่อัตราการป้อนอากาศ 47.49 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ผลิตก๊าซชีวมวลได้ 35.04 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ก๊าซชีวมวลที่ผลิตได้มีอุณหภูมิ 70.07 องศาเซลเซียส สามารถผลิตอากาศร้อนเข้าห้องอบแห้งที่อัตราการไหล 174.75 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง อุณหภูมิอากาศร้อนเข้าห้องอบแห้งเฉลี่ย 80 องศาเซลเซียส อบแห้งใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่ง 12 ชั่วโมง ที่ปริมาณใบมันสำปะหลัง 6 กิโลกรัม มีต้นทุนในการอบแห้งใบมันสำปะหลัง 8.47 บาทต่อกิโลกรัม ซึ่งทำให้ความเป็นไปได้ที่จะใช้ระบบนี้ในการส่งเสริมเกษตรกรน้อยลง เนื่องจากเกษตรกรจะสามารถขายใบมันสำปะหลังแห้งได้เพียงกิโลกรัมละ 5-6 บาทเท่านั้น แต่ทั้งนี้เครื่องอบแห้งต้นแบบนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการอบแห้งใบมันสำปะหลังเพื่อเป็นอาหารสัตว์ได้ โดยใช้พลังงานทดแทนที่สามารถหาได้ภายในประเทศอย่าง เหง้า

มันสำปะหลังนำมาผลิตก๊าซชีวมวลด้วยเตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลลง โดยยังคงคุณค่าโปรตีน และลดสารไซยาไนด์ รวมทั้งแทนนินให้อยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่อสัตว์

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการออกแบบสร้างระบบแยกน้ำมันดินออกจากชุดทำความสะอาดก๊าซชีวมวล และออกแบบช่องเปิด-ปิดเตาให้สามารถป้องกันการรั่วของก๊าซชีวมวลได้

2. เตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลลงที่ได้ทำการทดลองต้องปรับปรุงในส่วนของการลำเลียงขี้เถ้าออกจากเตาเพื่อให้เตาผลิตก๊าซได้ต่อเนื่องมากขึ้น เนื่องจากเถ้าที่มีปริมาณมากไปลดการไหลของอากาศที่เข้าไปผสมกับเชื้อเพลิงทำให้ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ลดลง

3. เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการอบแห้งยังคงสูงเกินไป ทำให้ความเป็นไปได้ในการใช้งานน้อยลง จึงควรพัฒนาระบบให้มีราคาถูกมากกว่านี้ เช่น ผลิตเตาที่เหมาะสมในการผลิตความร้อน

4. ควรพัฒนาเครื่องอบแห้งให้อบแห้งแบบต่อเนื่องแทนการอบแห้งแบบเป็นชุด รวมถึงศึกษาหาขนาดเครื่องอบแห้งที่เหมาะสมในการอบแห้งใบมันสำปะหลัง และสามารถผลิตใบมันสำปะหลังแห้งได้เพียงพอต่อความต้องการอาหารสัตว์

5. ควรมีการพัฒนาระบบให้สามารถใช้งานร่วมกับแหล่งพลังงานความร้อนอื่น เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ หากมีแสงเพียงพอ หรือในกรณีที่เชื้อเพลิงชีวมวลขาดแคลน

6. ควรศึกษาอัตราการระเหยน้ำใบมันสำปะหลังที่ผึ่งแดดด้วย เพื่อเป็นข้อมูลในการเปรียบเทียบกับการอบแห้งใบมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้งแบบถังหมุนต่อไป

7. ควรมีการศึกษาคุณสมบัติของอากาศร้อนที่ปล่อยทิ้งให้นำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ เช่น นำอากาศร้อนที่เหลือทิ้งอบใบมันสำปะหลังก่อนเข้าเครื่องอบแห้งเพื่อเป็นการลดความชื้นก่อนอบแห้ง ซึ่งจะช่วยลดเวลาในการอบแห้งลง

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กิตติยาณีย์ สมหมาย. 2551. **พลังงานถ่านหินอีกหนึ่งทางเลือกทางรอดธุรกิจ.** กรุงเทพธุรกิจ. ฉบับวันที่ 11 กุมภาพันธ์ 2551 แหล่งข้อมูล : www.thaienergynews.com/Coal_energycoal.asp

กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์. 2545 .**เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมกับอินฟาเรด.**วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ

กรมวิชาการเกษตร. 2523. **มันสำปะหลัง.** กรุงเทพฯ.

เจริญศักดิ์ โรจนฤทธิ์พิเชษฐ์. 2532. **มันสำปะหลัง การปลูก อุตสาหกรรมการแปรรูป และการใช้ประโยชน์**. ภาควิชาพืชไร่ คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ

ทวีศักดิ์ เตชะเกรียงไกร, วิภาสิริ เสภารัตนานันท์, จีราภา เตียวสมบูรณ์กิจ, อุทัย คันโธ และ สุกัญญา จัตตุพรพงษ์. 2544. **การใช้ใบมันสำปะหลังเป็นอาหารสัตว์ปีก.** ศูนย์ค้นคว้าและพัฒนาวิชาการอาหารสัตว์ สถาบันสุวรรณวาจกกสิกิจ ฯ. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ

บงกช ประสิทธิ์ และสุขฤดี นาถกรณกุล. 2550. **การใช้พลังงานความร้อนจากเตาผลิตแก๊สซิไฟเออร์ร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อใช้ในการอบแห้งใบหม่อน.** วารสารวิจัยพลังงาน 4 (2550). สถาบันวิจัยพลังงาน. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ

พันทิพา พงษ์เพียรจันทร์. 2543. **หลักการอาหารสัตว์ เล่ม 1 โภชนะ.** ครั้งที่ 2. โอ เอส พริ้นติ้ง เฮ้าส์, กรุงเทพฯ.

ไพบูรณ์ โรจน์วิบูลย์ชัย. 2533. **การอบแห้งข้าวโพดด้วยเครื่องอบแห้งแบบถังหมุน.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.

ภรณี ศรีเสาวลักษณ์. 2540. **การผลิตโปรตีนเข้มข้นจากใบมันสำปะหลังโดยการปรับสภาพใบด้วยความร้อนและสารเคมี.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ

รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต. 2535. **วิศวกรรมแปรรูปอาหาร: การถนอมอาหาร บทที่ 7 การทำแห้งอาหาร.**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ.หน้า 220-267

ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร.2549. **การนำเข้าสินค้าสำคัญของไทย ปี 2545-2549 (มกราคม-พฤษจิกายน).** แหล่งข้อมูล:http://www.ops2.moc.go.th/trad/trade_imp.himl, 20 ธันวาคม 2549.

ศูนย์ปฏิบัติการวิศวกรรมพลังงานและสิ่งแวดล้อม. 2540. **การผลิตก๊าซชีวมวลจากซังข้าวโพดเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงอบเมล็ดข้าวโพด.** สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ

ศักยภาพชีวมวลในประเทศไทย. 2548. **ปริมาณวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร**. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, กรุงเทพฯ แหล่งข้อมูล: http://www.dede.go.th/dede/index.php?id=437

ศิวะ อัจฉรยวิริยะ และสมชาติ โสภณรณฤทธิ์ . 2533. **ศึกษาพารามิเตอร์สำหรับวิเคราะห์การอบแห้งมะละกอแช่อิ่ม.**วิทยาสารเกษตรศาสตร์.สาขาวิทยาศาสตร์ 24, 2(เม.ย.-มิ.ย.33)196-207

สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. 2529. **การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหาร.** ครั้งที่ 3. คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ

สมชาติ โสภณรณฤทธิ์.2540.**การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท.** สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ

สถาบันวิจัยเคมี ศูนย์กลางสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล. 2551. **การผลิตเชื้อเพลิงจากเหง้ามันสำปะหลัง**. บทความวิชาการ, แหล่งที่มา : www.cri.rmutt.ac.th ,8/4/2008

สินีนาฏ รอดจีน. 2547. **ไพโรไลซิสของชีวมวลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ

สุวรรณ์ แสงเพ็ชร์. 2542. **การผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยเหง้ามันสำปะหลัง.** สาระน่ารู้เกี่ยวกับไฟฟ้า, กรุงเทพฯ.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร.2549. **ข้อมูลการผลิตสินค้าการเกษตรที่สำคัญ.**กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. แหล่งที่มา http://www.oae.go.th/Prcai/area.php, 14 ธันวาคม 2549.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2550. **พืชอาหาร และพืชอาหารสัตว์: ผลผลิตมันสำปะหลังต่อไร่รายจังหวัด** แหล่งที่มา http://www.oae.go.th/statistic/yearbook49/, 3 มีนาคม 2551.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2550. **ข้อมูลการผลิตสินค้าเกษตรที่สำคัญ ประกอบด้วย 2 สาขา คือ ด้านพืช และ ด้านปศุสัตว์.** ข้อมูลการผลิตสินค้าที่สำคัญทางการเกษตร. แหล่งที่มา: http://www.oae.go.th/Prcai/area.php, 13 กุมภาพันธ์ 2550.

วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล. 2529. **ฟลูอิดไดเซชั่น** .สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

วิรัช อรุณลักษณ์ดำรง. 2531. **การผลิตก๊าซแบบไหลขึ้นเพื่อเผาไหม้โดยตรง.**วิทยานิพนธ์ วศ.ม. เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ

อัจฉรา ลิ่มศิลา.ม.ป.ป. **การเปรียบเทียบพันธุ์ในท้องถิ่นมันสำปะหลังเพื่อตัดใบ.** ศูนย์วิจัยพืชไร่นครราชสีมา. สำนักงานวิจัยและพัฒนาการเกษตรเขตที่ 4

อุทัย คันโธ. 2543. **สารพิษในอาหารสัตว์.** ภาควิชาสัตวบาล คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

อุทัย คันโธ และ สุกัญญา จัตตุพรพงษ์. 2547. **การใช้มันสำปะหลังเป็นอาหารสัตว์ : ผลการใช้และข้อมูลการวิจัยในประเทศไทย.** พิมพ์ครั้งที่ 2. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

โอภาส พิมพา. 2550. **ผลของแทนนินที่ได้รับจากใบกระถินต่อการย่อยของโปรตีนหยาบและกรดแอมิโนที่สำคัญในส่วนรูเมนและลำไส้เล็ก.** ภาควิชาวิทยาศาสตร์การเกษตร, มหาวิทยาลัยนเรศวร.

Association Of Official Analytical Chemists (AOAC). 2000. **Official Method Of Analysis Of The AssociationOf Analytical Chemists**. 17th Rev, Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC.

Ayodeji O Fasuyi. 2005. Nutrient Composition and Processing Effects on Cassava Leaf (*Manihot esculenta,Crantz*) Antinitrients. **Pakistan Journal of Nutrition 2005** (4(1)): 37-42.

Awoyinka, A. F., V. O. Abegunda and S. R. A. Adewusi. 1995**.** Nutrient content of young cassava leaves and assessment of their acceptance as a green vegetable in Nigeria. **Plant foods for human nutrition** 1995 (47):21-28.

Bruijn G.H.De. 1971. Etude du character cyanoglucosides, linamarin and lotaustralin in higher plants. **Phytochemistry** (4): 127 – 131

Brenda Keir, Nguyen Van Lai,T R Preston and E R Orskov. 1997. Nutritive value of leaves from tropical trees and shrubs : 1. in vitro gas production and in sacco rumen degradability.**Livestock Research for Rural Development** 9(4)

Brennan et al. 1990 J.G.Brennan,J.R.Butters,N.D.Cowell and A.E.Lillty,**Food Engineering Operations(3rd ed)** ,Applied Science,London.

Conn. E.E. 1973. Cyanoginic glucosides:their occurrence biosynthesis and function.In:B.Nestle and B.Mcintyr.Editors,**Chronic cassava toxicity.International Development Centre**.Ottawa,pp:55-63

Du Thang Hantg. 1998. Digestibility and nitrogen retention in fattening pigs fed different levels of ensiled cassava as a protein source and ensiled cassava root as energy source. **Livestock Research for Rural Development** 10(3). Available http:// www. Fao. Org/ livestock/ agap/ frg/ afris/ espanol/ document/ Irrd/ Irrd10/ 3/ hang1. Htm, (14/8/06)

FAO Corporate document repository. 1987. Wood gas as engine fuel. **FAO Forestry paper-72**. www.fao.org/DOCEP/TO512E/Contents.

Fafunso, M. A. and O Bassir. 1976. The disappearance of cyanide from cassava leaves during leaf protein extraction. **J. Biol. Appl. Chem**. 19 (2): 30.35.

Foust, A.S. 1960. **Principles of Unit Operation**. John Wiley & Son, New York.

Guillermo H. Crapiste and Enrique Rotstein. **Design and Performace Evalution of dryers in Handbook of Food Engineering Practice**. New York, P: 125-164

Hahn S.K. 1989. An overview of African Traditional Cassava Processing and Utilization, **Outlook on Agriculture**. 18: 110-118.

Heldman, Dennis R. 1981. Food Processing Engineering. **Westport, Conn**. 415.

Walawender WP, SM Chern, LT Fan. 1985. **Wood chip gasification in a commercial downdraft gasifier**. In: Overend RP, Milne TA,Mudge LK, editors.Fundamentals of thermochemical biomass conversion. London. Elsevier Applied Science Publishers.

Jayah T.H., Lu Aye, R.J.Fuller, D.F. Stewart. 2003. Computer simulation of a downdraft wood gasifier for tea drying. **Biomass and Bioenergy** 25(2003) 459-469.

Juarez, L. 1955. Estudio agronomico sobre la utilization de la yucca como forraje. **Lima, Estacion Experimental Agricola La Molina**. Bol. 58.

Kell, JJ. 1995. **Rotary Dryer.In:Mujumder A S (ed)Handbook of Industrial Drying.** Marcel Dekker,Inc., New York.

Padmaja, G. 1989. Evaluation of techniques to reduce assayable tannin and cyanide in cassava. **J.Agric. Food Chem**. 37: 712 – 716.

Payne, R.H. 1984. **Chemical Engineering Handbook**.Mc Graw-Hill, New York.893 p.

Probstin, and Hick. 1982. **Synthetic Fuels.** McGraw Hill.

Ravindran,V. 1993. Cassva Leaves as animal feed :Potential and Limitation. **J.Sci.Food.Agric 1993** (61): 141-150.

Rockland,L.B. 1969. Water activity and storage stability. **Food Technol** (23), 1241.

Voldrich,M., 1995. Cyanogens.In J.Davidek(ed.),**Natural toxic compounds of food: Formation and change during processing and storage**.pp.53-63.Boca Raton:CRC Press

Singh R.P. and D.R. Heldman. 2001. **Introduction to food engineering.** 3 ed. Academic Press, London,UK.

Sloan C.E. 1967. **Chemical Engineering**. Vol.74.No.14. McGraw-Hill, New York.

Skov,N.A. and M.L.Papwarth. 1975. **The Pegasus Unit**.PublisherInc.,Olympia,Washington.433p.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ข้อมูลองค์ประกอบทางเคมี และการทดสอบเบื้องต้น

ตารางผนวกที่ ก1 ข้อมูลการประมาณค่าองค์ประกอบทั่วไปในเหง้ามันสำปะหลัง

องค์ประกอบต่างๆ % dry basis	1	2	3	ค่าเฉลี่ย
ความชื้น (%wb)	9.26	9.24	8.01	8.84
ความชื้น (%db)	10.20	10.19	8.71	9.70
% เถ้า	2.44	3.28	4.78	3.50
% สารระเหย	67.34	67.54	68.04	67.64
% คาร์บอนคงตัว	20.01	19.00	18.48	19.16
พลังงานความร้อน (kJ/kg)	7,870.71	7,839.65	7,910.55	7,873.64

ตารางผนวกที่ ก2 ข้อมูลองค์ประกอบของก๊าซที่ผลิตได้จากเหง้ามันสำปะหลัง

Ultimate analysis % dry basis	1	2	3	ค่าเฉลี่ย
O_2	1.67	1.68	1.71	1.64
N_2	43.75	43.87	43.25	43.60
H_2	14.38	13.85	13.93	14.05
CO	14.75	14.69	14.50	14.65
CO_2	23.97	24.01	24.06	24.04
CH_4	1.98	2.05	2.03	2.02

ตารางผนวกที่ ก3 ความหนาแน่นโดยรวมของเหง้ามันสำปะหลัง

จำนวนซ้ำ	เหง้ามันสำปะหลัง (kg/m^3)	
	ก่อนลดขนาด	หลังลดขนาด
1	41.67	140.00
2	40.00	143.75
3	45.83	154.17
4	50.00	155.00
5	41.67	141.67

ตารางผนวกที่ ก4 ข้อมูลระบบผลิตก๊าซชีวมวลและห้องผสมอากาศ การทดลองที่ 1

เวลา (h)	อากาศแวดล้อม (°C)			อุณหภูมิก๊าซชีวมวล (°C)	อุณหภูมิขี้เถ้า (°C)	อุณหภูมิห้องผสมอากาศ (°C)		
	Tdb (°C)	Twb (°C)	%RH			ส่วนหน้า	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย
0	35.3	26.8	52.1	-	-	34.1	37.7	38.8
15	34.8	25.2	47.0	40	-	73.2	76.9	86.6
30	33.4	25.1	51.3	41	-	70.8	77.0	80.5
45	35.1	26.1	50.8	55	-	82.5	95.9	80.9
60	34.7	26.3	52.5	55	-	106.8	178.9	167.2
75	34.7	26.7	53.2	56	-	86.9	108.8	90.0
90	35.1	26.5	51.4	48	525	90.1	103.3	87.9

ตารางผนวกที่ ก5 ข้อมูลระบบผลิตก๊าซชีวมวลและห้องผสมอากาศ การทดลองที่ 2

เวลา (h)	อากาศแวดล้อม (°C)			อุณหภูมิก๊าซชีวมวล (°C)	อุณหภูมิขี้เถ้า (°C)	อุณหภูมิห้องผสมอากาศ (°C)		
	Tdb (°C)	Twb (°C)	%RH			ส่วนหน้า	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย
0	35.9	25.5	43.5	-	-	35.1	36.4	38.5
15	36.4	25.7	43.0	41.0	-	83.2	86.9	90.6
30	36.4	25.9	43.8	51.2	-	86.8	91.0	92.5
45	39.0	26.3	37.2	56.1	-	82.6	95.4	91.2
60	40.7	26.4	33.2	65.6	-	104.2	154.9	163.2
75	39.8	25.8	33.2	62.8	-	87.5	98.8	95.0
90	40.5	26.4	33.6	72.9	-	92.3	96.3	95.9
105	40.0	26.4	33.5	73.0	546	93.3	95.0	93.8

ตารางผนวกที่ ก6 ระบบผลิตก๊าซชีวมวลและห้องผสมอากาศ การทดลองที่ 3

เวลา (h)	อากาศแวดล้อม (°C) Tdb (°C)	Twb (°C)	%RH	อุณหภูมิก๊าซชีวมวล (°C)	อุณหภูมิขี้เถ้า (°C)	อุณหภูมิห้องผสมอากาศ (°C) ส่วนหน้า	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย
0	37.4	29.4	55.6	-	-	35.1	37.7	39.0
15	37.0	28.7	54.0	58	-	75.2	72.5	81.8
30	36.7	28.6	55.0	55	-	80.8	87.0	86.2
45	35.9	27.5	53.5	57	-	82.5	95.9	90.9
60	36.9	28.6	54.2	56	-	112.8	134.5	150.8
75	37.8	29.2	53.4	54	-	102.9	115.8	121.3
90	37.5	29.3	55.5	53	-	90.1	103.3	87.9
105	36.3	28.4	55.3	54	538	90.3	98.3	85.6

ตารางผนวกที่ ก7 อัตราการไหลของอากาศเข้าเตาและอัตราการผลิตก๊าซชีวมวล การทดลองที่ 1

เวลา (นาที)	อากาศไหลเข้าเตาชีวมวล ความเร็ว (m^3/h)	อุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิภายนอก (°C)	ก๊าซไหลออกจากเตาชีวมวล ความเร็ว (m^3/h)	อุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิภายนอก (°C)
0	120.6	40.9	38	32.4	39.9	43
15	113.4	42.4	37	29.4	72.3	62
30	115.8	44.7	38	25.8	69.8	54
45	143.4	47.9	39	21.6	74.5	57
60	112.2	49.4	39	22.8	77.1	56
75	117.0	49.1	39	21.0	77.9	55
90	115.8	49.3	39	21.2	77.8	56
105	128.4	47.9	40	21.2	74.6	56

ตารางผนวกที่ ก8 อัตราการไหลของอากาศเข้าเตาและอัตราการผลิตก๊าซชีวมวล การทดลองที่ 2

เวลา (นาที)	อากาศไหลเข้าเตาชีวมวล			ก๊าซไหลออกจากเตาชีวมวล		
	ความเร็ว (m^3/h)	อุณหภูมิภายใน (°C)	อุณหภูมิภายนอก (°C)	ความเร็ว (m^3/h)	อุณหภูมิภายใน (°C)	อุณหภูมิภายนอก (°C)
0	114.0	43.5	38	33.0	40.9	43
15	112.2	44.3	38	30.0	76.5	62
30	113.4	45.8	38	24.0	68.5	55
45	112.2	48.8	40	19.8	69.5	57
60	117.0	46.8	39	18.6	75.1	56
75	115.8	47.4	39	19.2	76.5	56
90	115.8	47.9	39	21.0	74.9	56
105	109.2	48.2	40	21.6	75.6	56

ตารางผนวกที่ ก9 อัตราการไหลของอากาศเข้าเตาและอัตราการผลิตก๊าซชีวมวล การทดลองที่ 3

เวลา (นาที)	อากาศไหลเข้าเตาชีวมวล			ก๊าซไหลออกจากเตาชีวมวล		
	ความเร็ว (m^3/h)	อุณหภูมิภายใน (°C)	อุณหภูมิภายนอก (°C)	ความเร็ว (m^3/h)	อุณหภูมิภายใน (°C)	อุณหภูมิภายนอก (°C)
0	113.4	39.9	38	32.4	39.9	43
15	109.2	40.2	37	26.4	72.3	62
30	112.2	43.7	38	26.4	71.8	54
45	111.0	45.9	39	21.0	74.5	57
60	113.4	49.4	40	23.4	78.1	56
75	114.0	50.1	45	19.2	77.9	55
90	113.4	49.3	42	22.2	75.8	56
105	115.8	46.9	41	23.4	74.6	56

ภาคผนวก ข

ข้อมูลการอบแห้งใบมันสำปะหลังด้วยเครื่องอบแห้ง
โดยพลังงานความร้อนจากเตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลลง

ตารางผนวกที่ ข1 กระบวนการผลิตความร้อนเพื่ออบแห้งใบมันสำปะหลังการทดลองที่ 1-3

รายการตรวจวัด	การทดลอง		
	1	2	3
1. เหง้ามันสำปะหลัง			
อัตราการป้อนเหง้ามันสำปะหลัง (kg/hr)	11.10	13.00	11.50
2. อากาศเข้าเตา			
อัตราการไหลอากาศเข้า (m^3/h)	47.03	46.87	46.79
อุณหภูมิอากาศเข้า (°C)	40.30	42.50	64.80
3. ก๊าซชีวมวล			
อัตราการไหลของก๊าซที่ผลิตได้ (m^3/h)	35.64	36.19	35.64
อุณหภูมิก๊าซที่ผลิตได้ (°C)	70.80	73.70	70.10
4. อากาศร้อนเข้าห้องอบแห้ง			
อัตราการไหลอากาศร้อน (m^3/h)	169.95	165.35	169.95
อุณหภูมิอากาศร้อน (°C)	86.40	85.70	83.40
5. อากาศร้อนไหลออกจากห้องอบแห้ง			
อัตราการไหลอากาศร้อน (m^3/h)	61.07	65.59	63.33
อุณหภูมิอากาศร้อน (°C)	35.80	38.20	38.40

ตารางผนวกที่ ข2 อุณหภูมิห้องอบแห้ง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 20 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับ ที่น้ำหนัก 2 กิโลกรัม

เวลา	การทดลองที่ 1			การทดลองที่ 2			การทดลองที่ 3		
	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย
0	35	36	35	32	31	32	30	29	29
15	45	40	39	50	45	42	40	38	34
30	50	48	45	52	50	48	50	45	40
45	55	54	53	51	48	45	52	50	45
60	57	55	53	50	48	47	52	50	45
75	56	52	50	51	49	47	53	51	47
90	57	55	53	52	50	48	54	52	48
105	57	56	56	53	51	48	54	53	48
120	56	54	52	52	51	48	52	52	48
135	58	55	54	53	51	48	53	51	49
150	60	58	53	52	51	48	52	51	48
165	61	56	53	53	52	49	53	52	51
180	60	56	54	54	52	48	55	52	52

ตารางผนวกที่ ข3 อุณหภูมิใบมันสำปะหลัง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 20 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับ ที่น้ำหนัก 2 กิโลกรัม

เวลา	การทดลองที่ 1			การทดลองที่ 2			การทดลองที่ 3		
	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย
0	34	35	34	44	38	38	30	30	30
15	42	37	36	45	40	41	38	35	34
30	54	48	45	48	43	41	43	40	39
45	54	49	47	54	43	40	44	40	38
60	55	47	45	53	45	41	45	40	40
75	53	48	46	52	46	41	46	40	38
90	54	50	47	51	44	41	47	39	39
105	55	52	51	56	46	41	45	39	38
120	54	53	50	55	50	44	48	41	40
135	55	54	52	58	49	42	48	41	41
150	53	52	50	57	50	43	53	45	42
165	54	53	52	60	50	42	54	48	45
180	55	53	51	61	52	45	54	48	47

ตารางผนวกที่ ข4 ความชื้นใบมันสำปะหลัง ที่ขนาด ∅ ช่องระบายอากาศ 20 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับ ที่น้ำหนัก 2 กิโลกรัม

เวลา	การทดลองที่ 1			การทดลองที่ 2			การทดลองที่ 3		
	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย
0	65.21	66.75	65.73	62.12	61.5	62.14	67.30	68.04	67.25
15	53.29	63.10	64.24	54.45	57.12	58.31	60.04	62.57	65.98
30	49.19	51.70	54.64	52.65	55.49	56.31	53.76	56.92	58.81
45	39.27	48.75	48.13	50.18	53.24	54.21	47.81	48.12	55.29
60	32.54	41.25	42.54	44.63	49.99	50.98	44.56	45.73	48.10
75	24.87	30.59	31.78	36.98	40.39	47.46	39.62	42.13	44.81
90	21.19	27.38	28.26	32.61	37.99	43.91	36.57	39.87	40.12
105	20.79	26.40	28.10	29.64	34.05	37.93	33.42	35.84	38.97
120	19.63	20.55	22.96	26.20	29.68	31.15	29.35	30.02	34.10
135	15.26	17.58	19.21	20.95	23.20	25.12	22.98	28.54	30.02
150	13.67	14.52	15.24	12.89	19.86	20.75	18.52	22.69	25.11
165	9.87	11.02	11.89	10.85	11.60	15.21	13.56	15.71	16.11
180	7.51	8.75	9.52	8.21	9.81	10.11	9.25	10.02	10.35

ตารางผนวกที่ ข5 กระบวนการผลิตความร้อนเพื่ออบแห้งใบมันสำปะหลังการทดลองที่ 4-6

รายการตรวจวัด	การทดลอง		
	4	5	6
1. เหง้ามันสำปะหลัง			
อัตราการป้อนเหง้ามันสำปะหลัง (kg/hr)	11.50	11.43	12.50
2. อากาศเข้าเตา			
อัตราการไหลอากาศเข้า (m^3/h)	47.58	64.77	47.26
อุณหภูมิอากาศเข้า (°C)	41.30	40.80	40.50
3. ก๊าซชีวมวล			
อัตราการไหลของก๊าซที่ผลิตได้ (m^3/h)	34.89	34.52	35.26
อุณหภูมิก๊าซที่ผลิตได้ (°C)	71.50	73.00	73.8
4. อากาศร้อนเข้าห้องอบแห้ง			
อัตราการไหลอากาศร้อน (m^3/h)	165.27	174.45	169.86
อุณหภูมิอากาศร้อน (°C)	82.10	84.40	85.70
5. อากาศร้อนไหลออกจากห้องอบแห้ง			
อัตราการไหลอากาศร้อน (m^3/h)	67.82	61.04	61.04
อุณหภูมิอากาศร้อน (°C)	38.40	40.10	38.50

ตารางผนวกที่ ข6 อุณหภูมิห้องอบแห้ง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 20 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับ ที่น้ำหนัก 4 กิโลกรัม

เวลา	การทดลองที่ 4			การทดลองที่ 5			การทดลองที่ 6		
	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย
0	30	31	32	31	32	31	30	29	30
15	58	46	44	60	58	52	51	48	42
30	62	51	47	60	59	55	57	51	44
45	57	50	47	60	58	56	61	53	49
60	58	55	51	61	54	53	62	54	48
75	57	54	52	59	55	54	58	52	50
90	59	53	51	59	54	52	57	53	51
105	59	54	52	58	55	51	58	54	52
120	53	49	46	62	56	53	59	55	53
135	55	49	44	64	58	53	60	57	54
150	57	47	44	59	56	52	61	58	53
165	54	48	45	60	57	53	59	56	52
180	53	44	42	61	58	54	58	52	51
195	55	47	43	59	57	52	57	48	47
210	57	55	47	58	56	52	60	51	49
225	56	53	51	59	57	53	61	51	48
240	56	55	53	60	58	54	62	52	49
255	60	58	55	59	56	54	58	51	49
270	59	58	56	58	55	53	57	49	47
285	61	59	57	60	57	54	60	54	50
300	61	58	55	58	56	55	59	53	50

ตารางผนวกที่ ข7 อุณหภูมิใบมันสำปะหลัง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 20 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับ ที่น้ำหนัก 4 กิโลกรัม

เวลา	การทดลองที่ 4			การทดลองที่ 5			การทดลองที่ 6		
	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย
0	25	26	25	29	30	31	31	30	29
15	56	41	41	56	50	48	43	40	39
30	49	44	43	58	51	49	51	43	40
45	55	44	42	59	50	48	49	42	40
60	46	43	41	55	49	46	50	43	41
75	58	52	49	56	52	48	52	44	41
90	47	43	42	57	53	49	54	46	42
105	52	45	43	56	55	49	55	47	43
120	46	44	41	58	56	47	57	49	44
135	53	45	42	59	57	46	56	50	45
150	52	44	43	58	56	48	54	49	44
165	54	42	42	57	55	49	51	50	46
180	49	45	43	56	54	50	52	51	47
195	52	47	44	58	56	49	54	52	47
210	60	50	46	58	56	50	56	53	47
225	58	52	51	57	55	51	60	55	48
240	56	51	52	58	56	49	61	56	49
255	60	55	53	59	57	50	58	55	50
270	61	54	53	60	58	51	56	54	49
285	60	55	54	61	59	52	55	54	50
300	61	57	54	61	58	51	56	55	51

ตารางผนวกที่ ข8 ความชื้นใบมันสำปะหลัง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 20 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับ ที่น้ำหนัก 4 กิโลกรัม

เวลา	การทดลองที่ 4			การทดลองที่ 5			การทดลองที่ 6		
	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย
0	67.27	68.1	67.27	65.71	68.31	67.71	61.75	62.87	60.11
15	64.65	65.39	66.71	63.79	65.24	66.13	59.78	60.91	62.07
30	58.71	60.15	62.72	58.94	62.72	64.81	58.91	60.49	61.71
45	56.49	58.12	60.42	55.1	59.31	61.95	57.02	59.23	60.02
60	51.7	55.14	58.73	49.79	54.73	59.74	54.18	55.05	57.91
75	48.58	51.16	55.27	47.66	50.16	54.77	51.31	53.46	55.82
90	46.55	49.18	52.17	45.4	48.33	50.42	47.34	50.13	52.76
105	42.51	46.53	49.87	41.14	46.61	48.23	45.46	48.7	51.81
120	40.17	42.57	48.01	38.57	42.12	45.86	42.17	46.1	49.23
135	36.57	39.76	45.85	34.61	39.57	41.37	38.38	43.19	46.82
150	31.37	37.19	41.28	30.07	35.19	38.75	35.42	39.95	42.11
165	29.71	32.42	38.37	27.33	32.74	35.44	31.46	37.56	37.91
180	26.48	29.31	35.45	25.01	29.21	31.58	29.57	33.71	35.46
195	22.9	27.11	31.11	20.21	27.81	29.12	25.46	29.48	31.11
210	18.63	25.01	28.46	18.7	22.19	25.09	22.51	25.11	27.81
225	15.17	20.24	26.29	15.85	19.11	22.85	19.38	21.43	23.59
240	12.31	18.32	21.97	13.03	16.34	20.01	14.86	17.82	20.11
255	9.98	15.66	18.72	9.78	14.05	18.11	10.76	13.43	17.87
270	8.71	14.48	15.61	8.19	11.16	15.44	9.01	11.61	13.41
285	8.11	11.01	12.71	7.59	9.87	12.98	8.62	9.87	10.27
300	7.85	9.72	10.12	7.52	8.61	10.09	7.56	8.42	9.81

ตารางผนวกที่ ข9 กระบวนการผลิตความร้อนเพื่ออบแห้งใบมันสำปะหลังการทดลองที่ 7-9

รายการตรวจวัด	การทดลอง		
	7	8	9
1. เหง้ามันสำปะหลัง			
อัตราการป้อนเหง้ามันสำปะหลัง (kg/hr)	9.86	10.31	12.80
2. อากาศเข้าเตา			
อัตราการไหลอากาศเข้า (m^3/h)	46.28	46.93	47.66
อุณหภูมิอากาศเข้า (°C)	41.30	42.40	41.3
3. ก๊าซชีวมวล			
อัตราการไหลของก๊าซที่ผลิตได้ (m^3/h)	34.52	34.16	35.26
อุณหภูมิก๊าซที่ผลิตได้ (°C)	72.10	70.80	70.9
4. อากาศร้อนเข้าห้องอบแห้ง			
อัตราการไหลอากาศร้อน (m^3/h)	174.45	169.86	183.63
อุณหภูมิอากาศร้อน (°C)	83.40	86.70	83.20
5. อากาศร้อนไหลออกจากห้องอบแห้ง			
อัตราการไหลอากาศร้อน (m^3/h)	61.04	56.52	61.04
อุณหภูมิอากาศร้อน (°C)	38.7	39.50	37.80

ตารางผนวกที่ ข10 อุณหภูมิห้องอบแห้ง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 20 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับ ที่น้ำหนัก 6 กิโลกรัม

เวลา	การทดลองที่ 7			การทดลองที่ 8			การทดลองที่ 9		
	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย
0	28	30	30	30	29	30	29	30	30
15	56	45	44	56	47	43	56	46	43
30	60	55	46	57	46	44	57	49	47
45	57	45	44	53	45	45	56	48	46
60	58	45	44	53	43	42	58	49	47
75	58	46	47	53	45	46	59	48	46
90	59	47	45	52	45	43	61	50	48
105	54	43	41	54	46	42	62	51	46
120	60	47	43	55	46	41	63	52	47
135	61	53	43	53	45	43	57	48	46
150	57	52	44	54	45	41	58	49	47
165	56	50	45	61	49	43	58	48	45
180	63	53	43	64	47	45	61	49	47
195	56	50	42	61	52	46	59	50	48
210	59	51	45	59	52	45	58	51	49
225	66	56	45	58	47	46	61	52	47
240	57	52	46	60	50	42	64	53	48
255	61	53	45	55	51	45	65	52	46
270	60	52	45	56	52	46	63	53	42
285	64	56	49	65	53	49	64	53	45
300	63	56	49	66	59	48	62	52	47
315	61	57	51	65	60	51	64	54	46
330	64	58	51	64	58	50	65	54	48
345	62	56	50	63	58	49	65	58	50
360	63	55	51	65	59	51	67	59	52

ตารางผนวกที่ ข11 อุณหภูมิใบมันสำปะหลัง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 20 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับ ที่น้ำหนัก 6 กิโลกรัม

เวลา	การทดลองที่ 7			การทดลองที่ 8			การทดลองที่ 9		
	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย
0	24	24	25	26	27	25	27	28	29
15	50	41	40	42	41	39	46	42	38
30	51	42	42	45	42	42	51	47	43
45	53	43	42	50	39	38	50	48	44
60	52	42	43	48	40	39	52	48	44
75	53	42	40	46	42	44	53	47	45
90	50	44	42	45	42	42	55	48	45
105	56	41	40	53	40	39	54	48	45
120	54	42	40	48	41	39	54	49	46
135	53	44	41	53	43	41	53	47	44
150	54	45	42	49	41	39	54	48	47
165	56	45	43	47	45	43	55	49	48
180	57	45	43	50	46	43	56	51	48
195	60	44	41	57	47	40	55	50	47
210	53	48	45	55	44	42	54	49	46
225	56	46	43	60	46	42	55	51	47
240	53	47	44	52	47	43	55	52	47
255	56	47	45	60	46	44	56	53	48
270	53	48	46	61	48	46	59	51	47
285	62	51	48	64	55	49	61	51	47
300	61	52	49	54	50	48	62	53	48
315	62	53	50	60	51	50	62	53	51
330	61	51	49	61	52	49	63	52	51
345	62	50	50	59	51	48	61	51	50
360	63	52	51	62	51	49	62	52	51

ตารางผนวกที่ ข12 ความชื้นใบมันสำปะหลัง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 20 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับ ที่น้ำหนัก 6 กิโลกรัม

เวลา	การทดลองที่ 7			การทดลองที่ 8			การทดลองที่ 9		
	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย
0	63.71	67.62	69.91	65.77	62.41	67.73	69.76	67.98	68.89
15	61.79	63.11	65.51	58.21	61.59	62.00	62.73	64.5	67.15
30	59.31	62.39	65.11	56.35	58.36	60.71	59.42	62.01	66.31
45	58.22	61.12	64.46	55.61	57.26	59.24	58.67	60.39	64.17
60	57.01	60.03	62.47	53.47	55.95	58.94	56.61	58.17	61.22
75	55.87	58.59	61.27	51.31	55.95	57.24	54.24	56.24	59.46
90	55.45	57.53	59.21	50.75	52.17	55.34	51.25	53.59	56.48
105	52.43	53.6	57.18	49.65	51.34	53.62	50.43	52.1	54.46
120	50.86	52.47	55.67	48.27	50.35	52.01	48.77	50.24	52.17
135	48.26	50.75	53.72	46.68	49.25	51.01	46.89	49.11	50.12
150	46.81	49.16	52.07	44.98	48.52	49.85	44.03	47.81	49.3
165	44.98	46.61	49.65	41.77	45.38	47.58	43.6	46.97	48.15
180	41.62	44.98	46.92	38.54	43.58	45.36	42.04	44.43	46.97
195	37.26	41.62	42.03	36.25	41.65	44.54	40.19	42.34	44.5
210	33.03	38.26	41.31	34.25	38.57	43.15	38.96	40.25	42.18
225	29.85	34.95	38.96	33.24	35.22	41.25	36.6	38.47	40.31
240	27.56	30.26	35.47	32.57	33.65	37.89	33.46	35.61	37.18
255	24.71	27.56	31.75	28.75	30.39	32.54	31.17	32.56	35.81
270	22.93	24.11	29.85	25.31	28.52	29.65	27.85	30.35	32.15
285	18.67	20.77	24.14	22.12	24.98	26.57	23.56	28.52	30.27
300	15.27	18.88	21.73	17.36	21.15	23.14	21.32	25.31	28.71
315	11.58	14.08	17.84	14.08	17.36	18.96	18.24	21.62	24.38
330	9.26	12.17	14.71	12.17	15.58	15.27	15.6	18.71	21.51
345	7.56	9.89	10.29	9.11	11.55	12.35	11.34	15.36	17.37
360	5.55	6.01	8.93	7.89	9.62	9.88	10.87	13.12	13.21

ตารางผนวกที่ ข13 กระบวนการผลิตความร้อนเพื่ออบแห้งใบมันสำปะหลังการทดลองที่ 10-12

รายการตรวจวัด	การทดลอง		
	10	11	12
1. เหง้ามันสำปะหลัง			
อัตราการป้อนเหง้ามันสำปะหลัง (kg/hr)	10.25	11.30	11.50
2. อากาศเข้าเตา			
อัตราการไหลอากาศเข้า (m^3/h)	46.85	47.34	47.58
อุณหภูมิอากาศเข้า (°C)	40.50	42.10	40.30
3. ก๊าซชีวมวล			
อัตราการไหลของก๊าซที่ผลิตได้ (m^3/h)	33.79	34.52	35.07
อุณหภูมิก๊าซที่ผลิตได้ (°C)	70.80	70.50	72.40
4. อากาศร้อนเข้าห้องอบแห้ง			
อัตราการไหลอากาศร้อน (m^3/h)	169.86	179.04	165.27
อุณหภูมิอากาศร้อน (°C)	82.40	85.70	83.80
5. อากาศร้อนไหลออกจากห้องอบแห้ง			
อัตราการไหลอากาศร้อน (m^3/h)	58.78	58.78	58.78
อุณหภูมิอากาศร้อน (°C)	38.70	40.30	38.50

ตารางผนวกที่ ข14 อุณหภูมิห้องอบแห้ง ที่ขนาด∅ช่องระบาย 20 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่ง 12 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 2 กิโลกรัม

เวลา	การทดลองที่ 10			การทดลองที่ 11			การทดลองที่ 12		
	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย
0	24	24	25	26	27	25	27	28	29
15	50	45	40	42	41	39	51	48	43
30	53	46	42	55	48	42	54	50	46
45	54	46	42	57	50	45	55	50	46
60	55	45	43	58	52	46	57	52	47
75	55	45	40	60	54	48	59	54	47
90	56	47	42	60	54	48	60	55	48
105	-	-	-	61	56	49	61	55	48

ตารางผนวกที่ ข15 อุณหภูมิใบมันสำปะหลัง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 20 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่ง 12 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 2 กิโลกรัม

เวลา	การทดลองที่ 10			การทดลองที่ 11			การทดลองที่ 12		
	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย
0	25	27	27	30	29	29	33	32	33
15	47	41	41	45	43	42	42	37	36
30	51	43	42	52	51	45	48	45	43
45	54	46	44	54	50	44	53	51	45
60	51	46	45	55	51	45	54	51	46
75	52	50	45	56	51	44	55	51	45
90	53	51	46	55	50	45	56	52	45
105	-	-	-	55	52	46	55	51	45

ตารางผนวกที่ ข16 ความชื้นใบมันสำปะหลัง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 20 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่ง 12 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 2 กิโลกรัม

เวลา	การทดลองที่ 10			การทดลองที่ 11			การทดลองที่ 12		
	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย
0	34.85	32.76	35.71	35.21	34.89	36.01	37.99	36.98	39.98
15	25.17	27.76	29.67	25.17	27.76	29.61	28.24	29.64	31.15
30	23.75	26.33	27.71	22.15	25.23	27.31	25.48	26.71	28.19
45	20.02	21.11	23.34	20.02	21.11	23.34	20.95	22.10	24.53
60	14.41	17.60	18.60	15.08	17.60	18.90	16.71	19.21	20.75
75	9.71	10.21	12.11	11.52	14.13	15.24	13.61	14.56	17.56
90	8.75	8.25	9.02	10.02	11.19	12.02	10.85	11.21	13.52
105	-	-	-	8.16	9.24	9.86	8.59	9.87	10.23

ตารางผนวกที่ ข17 กระบวนการผลิตความร้อนเพื่ออบแห้งใบมันสำปะหลังการทดลองที่ 13-15

รายการตรวจวัด	การทดลอง		
	13	14	15
1. เหง้ามันสำปะหลัง			
อัตราการป้อนเหง้ามันสำปะหลัง (kg/hr)	11.30	10.87	10.56
2. อากาศเข้าเตา			
อัตราการไหลอากาศเข้า (m^3/h)	46.93	47.34	46.93
อุณหภูมิอากาศเข้า (°C)	40.10	38.40	39.60
3. ก๊าซชีวมวล			
อัตราการไหลของก๊าซที่ผลิตได้ (m^3/h)	33.60	34.89	34.71
อุณหภูมิก๊าซที่ผลิตได้ (°C)	70.3	72.40	70.60
4. อากาศร้อนเข้าห้องอบแห้ง			
อัตราการไหลอากาศร้อน (m^3/h)	174.45	169.86	169.86
อุณหภูมิอากาศร้อน (°C)	85.80	84.60	85.40
5. อากาศร้อนไหลออกจากห้องอบแห้ง			
อัตราการไหลอากาศร้อน (m^3/h)	61.04	63.30	63.30
อุณหภูมิอากาศร้อน (°C)	38.40	40.10	38.50

ตารางผนวกที่ ข18 อุณหภูมิห้องอบแห้ง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 20 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่ง 12 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 4 กิโลกรัม

เวลา	การทดลองที่ 13			การทดลองที่ 14			การทดลองที่ 15		
	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย
0	38	40	37	37	35	36	31	30	30
15	56	49	47	55	50	48	49	45	43
30	60	54	52	61	55	50	52	48	47
45	61	53	50	65	54	51	56	49	45
60	62	53	53	63	54	52	57	50	48
75	61	51	50	62	56	52	59	50	48
90	62	50	46	59	55	54	60	51	49
105	61	50	50	58	49	47	60	50	48
120	62	53	47	59	52	49	61	51	47
135	62	53	46	61	55	51	57	52	50
150	63	55	50	62	56	52	59	54	51

ตารางผนวกที่ ข19 อุณหภูมิใบมันสำปะหลัง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 20 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่ง 12 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 4 กิโลกรัม

เวลา	การทดลองที่ 13			การทดลองที่ 14			การทดลองที่ 15		
	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย
0	33	32	35	35	34	35	30	29	28
15	51	47	45	52	48	44	46	44	39
30	53	51	49	53	50	47	53	50	40
45	54	50	48	57	50	49	54	49	41
60	55	52	51	55	49	47	57	52	41
75	56	54	51	56	53	48	55	53	42
90	60	55	53	54	50	47	56	53	43
105	61	56	53	56	54	51	55	52	42
120	65	55	53	58	55	52	54	53	42
135	64	56	54	59	53	51	57	54	44
150	63	57	55	60	55	52	59	55	45

ตารางผนวกที่ ข20 ความชื้นใบมันสำปะหลัง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 20 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่ง 12 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 4 กิโลกรัม

เวลา	การทดลองที่ 13			การทดลองที่ 14			การทดลองที่ 15		
	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย
0	57.40	64.7	58.38	51.09	53.15	53.66	51.21	52.32	51.51
15	43.85	53.73	54.47	43.85	45.7	48.23	48.62	50.87	51.01
30	39.08	48.76	51.30	37.73	40.49	43.19	41.11	42.32	45.82
45	33.84	45.13	48.23	33.92	35.59	37.6	32.52	35.87	40.19
60	29.87	37.85	42.20	27.64	28.97	31.56	29.28	31.87	35.82
75	27.60	33.84	39.08	24.06	26.62	28.58	22.12	29.18	30.79
90	24.03	27.39	33.84	20.32	22.91	23.01	19.87	24.32	28.37
105	18.85	21.49	26.57	16.65	19.92	20.15	14.71	20.11	22.84
120	13.51	17.48	21.67	14.80	16.73	18.42	10.02	15.87	19.32
135	10.54	15.4	18.31	9.56	10.77	11.2	9.87	10.72	12.87
150	9.37	10.43	11.67	8.98	9.56	10.56	8.95	9.76	10.01

ตารางผนวกที่ ข21 กระบวนการผลิตความร้อนเพื่ออบแห้งใบมันสำปะหลังการทดลองที่ 16-18

รายการตรวจวัด	การทดลอง		
	16	17	18
1. เหง้ามันสำปะหลัง			
อัตราการป้อนเหง้ามันสำปะหลัง (kg/hr)	11.50	12.30	11.55
2. อากาศเข้าเตา			
อัตราการไหลอากาศเข้า (m^3/h)	46.85	47.17	46.44
อุณหภูมิอากาศเข้า (°C)	41.30	40.30	38.70
3. ก๊าซชีวมวล			
อัตราการไหลของก๊าซที่ผลิตได้ (m^3/h)	35.07	35.44	34.89
อุณหภูมิก๊าซที่ผลิตได้ (°C)	71.80	70.50	73.80
4. อากาศร้อนเข้าห้องอบแห้ง			
อัตราการไหลอากาศร้อน (m^3/h)	174.45	174.45	174.45
อุณหภูมิอากาศร้อน (°C)	80.50	85.50	83.40
5. อากาศร้อนไหลออกจากห้องอบแห้ง			
อัตราการไหลอากาศร้อน (m^3/h)	58.78	61.04	61.04
อุณหภูมิอากาศร้อน (°C)	38.40	40.50	39.50

ตารางผนวกที่ ข22 อุณหภูมิห้องอบแห้ง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 20 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่ง 12 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 6 กิโลกรัม

เวลา	การทดลองที่ 16			การทดลองที่ 17			การทดลองที่ 18		
	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย
0	28	29	28	31	30	31	30	31	32
15	55	42	40	56	50	49	56	44	41
30	56	44	42	56	52	51	61	55	50
45	56	46	44	55	53	51	65	54	51
60	53	46	43	57	54	52	63	54	52
75	57	50	46	57	55	53	62	53	50
90	60	55	51	58	55	54	59	55	54
105	58	54	52	60	55	53	58	49	47
120	59	56	53	59	56	53	59	50	49
135	58	55	54	61	57	54	61	60	51
150	59	56	53	61	56	53	64	55	52
165	-	-	-	62	57	53	62	57	53

ตารางผนวกที่ ข23 อุณหภูมิใบมันสำปะหลัง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 20 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่ง 12 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 6 กิโลกรัม

เวลา	การทดลองที่ 16			การทดลองที่ 17			การทดลองที่ 18		
	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย
0	25	25	26	30	30	31	30	29	31
15	54	42	38	51	49	47	52	48	45
30	56	43	42	55	51	50	53	50	47
45	54	44	42	56	52	50	57	50	49
60	52	43	42	55	53	51	55	49	47
75	55	46	44	57	54	51	56	48	48
90	53	48	46	56	54	52	54	50	49
105	52	45	45	59	56	53	56	53	51
120	52	46	44	58	53	52	64	55	52
135	55	50	48	60	55	54	59	53	51
150	56	50	49	61	56	53	60	54	52
165	-	-	-	61	54	52	61	54	52

ตารางผนวกที่ ข24 ความชื้นใบมันสำปะหลัง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 20 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่ง 12 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 6 กิโลกรัม

เวลา	การทดลองที่ 16			การทดลองที่ 17			การทดลองที่ 18		
	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย
0	41.33	40.81	38.10	48.31	46.06	46.54	45.22	44.31	46.21
15	35.00	35.59	37.60	40.63	41.70	41.93	40.95	43.11	44.01
30	25.88	27.06	27.97	36.36	38.10	39.37	38.54	41.85	42.69
45	22.54	24.63	25.72	32.22	35.17	36.57	35.98	37.34	39.65
60	19.84	20.20	22.30	25.41	28.32	30.95	32.54	35.68	37.45
75	16.00	17.23	20.10	21.22	23.07	24.29	28.59	31.78	33.48
90	13.05	15.74	18.47	15.74	18.44	19.09	24.68	27.85	31.52
105	11.61	12.59	14.26	12.59	14.58	15.74	21.11	25.34	27.65
120	9.59	10.56	12.63	9.64	11.72	12.01	18.57	21.63	24.58
135	8.61	9.48	11.20	8.61	9.14	9.96	15.32	17.58	20.95
150	6.67	7.93	8.98	6.67	7.93	8.61	10.25	12.35	15.25
165	-	-	-	5.75	6.85	7.52	8.75	9.85	11.62

ตารางผนวกที่ ข25 กระบวนการผลิตความร้อนเพื่ออบแห้งใบมันสำปะหลังการทดลองที่ 19-21

รายการตรวจวัด	การทดลอง		
	19	20	21
1. เหง้ามันสำปะหลัง			
อัตราการป้อนเหง้ามันสำปะหลัง (kg/hr)	10.50	12.00	11.50
2. อากาศเข้าเตา			
อัตราการไหลอากาศเข้า (m^3/h)	46.68	46.60	46.44
อุณหภูมิอากาศเข้า (°C)	43.00	41.10	39.90
3. ก๊าซชีวมวล			
อัตราการไหลของก๊าซที่ผลิตได้ (m^3/h)	34.89	34.34	34.16
อุณหภูมิก๊าซที่ผลิตได้ (°C)	70.10	72.30	73.00
4. อากาศร้อนเข้าห้องอบแห้ง			
อัตราการไหลอากาศร้อน (m^3/h)	165.27	146.91	165.27
อุณหภูมิอากาศร้อน (°C)	85.30	83.70	85.20
5. อากาศร้อนไหลออกจากห้องอบแห้ง			
อัตราการไหลอากาศร้อน (m^3/h)	81.39	96.65	86.48
อุณหภูมิอากาศร้อน (°C)	43.10	42.70	41.00

ตารางผนวกที่ ข26 อุณหภูมิห้องอบแห้ง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 30 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับ ที่น้ำหนัก 2 กิโลกรัม

เวลา	การทดลองที่ 19			การทดลองที่ 20			การทดลองที่ 21		
	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย
0	30	31	30	30	31	30	31	31	32
15	55	48	45	53	48	45	49	45	41
30	56	49	45	55	52	48	55	48	45
45	56	50	46	56	53	48	56	48	46
60	58	51	48	55	53	48	56	48	45
75	59	53	49	57	54	50	55	49	46
90	59	54	51	58	54	50	56	50	47
105	60	55	52	59	55	51	55	51	47
120	61	56	53	58	56	51	57	50	48
135	60	55	53	59	55	52	58	50	48
150	61	56	54	60	56	53	60	51	48
165	62	57	53	60	55	54	61	51	49
180	59	54	52	61	56	55	60	51	49
195	59	55	53	60	56	55	61	52	50
210	61	56	53	61	57	56	61	51	50
225	61	57	54	63	57	54	62	52	50
240	63	57	55	64	58	55	63	53	51

ตารางผนวกที่ ข27 อุณหภูมิใบมันสำปะหลัง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 30 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับ ที่น้ำหนัก 2 กิโลกรัม

เวลา	การทดลองที่ 19			การทดลองที่ 20			การทดลองที่ 21		
	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย
0	31	30	30	29	28	29	30	30	28
15	50	45	40	48	42	40	47	41	39
30	51	45	41	50	43	40	51	45	43
45	52	45	41	52	44	42	54	48	45
60	51	45	40	53	45	43	55	48	45
75	52	46	40	54	45	44	56	48	44
90	55	47	42	54	46	44	53	47	43
105	56	48	42	55	46	44	53	47	43
120	55	48	42	52	44	43	55	48	45
135	56	48	42	53	45	43	56	48	45
150	57	49	45	53	45	43	55	47	44
165	59	50	47	54	46	44	56	47	44
180	60	51	48	56	47	45	57	48	44
195	60	51	49	57	47	45	58	49	45
210	61	52	48	58	50	46	58	49	46
225	62	53	49	59	51	46	59	50	47
240	63	54	50	58	51	47	60	51	47

ตารางผนวกที่ ข28 ความชื้นใบมันสำปะหลัง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 30 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับ ที่น้ำหนัก 2 กิโลกรัม

เวลา	การทดลองที่ 19			การทดลองที่ 20			การทดลองที่ 21		
	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย
0	62.31	61.58	62.13	62.11	61.87	60.09	61.31	62.81	60.79
15	55.30	56.13	58.71	50.42	52.49	55.21	51.31	55.87	57.39
30	51.45	53.47	55.67	47.28	50.53	53.41	47.89	53.41	54.81
45	46.71	51.58	53.47	45.47	47.63	49.94	45.78	50.63	52.81
60	43.52	47.91	50.77	43.16	45.48	47.24	43.81	48.87	50.11
75	41.81	43.77	48.73	41.15	43.47	45.31	38.91	44.01	47.39
90	36.72	38.65	45.67	38.54	40.78	41.46	35.37	40.72	45.31
105	33.59	36.48	40.31	35.54	36.63	38.51	32.71	38.22	40.51
120	31.42	34.82	38.48	32.32	34.52	36.47	27.48	35.41	37.65
135	28.73	31.42	35.87	29.62	30.13	32.87	24.37	30.33	33.02
150	25.82	28.13	31.86	24.13	26.88	30.90	21.41	28.43	31.49
165	21.55	23.07	28.72	22.41	24.87	26.91	17.39	23.41	28.41
180	19.48	21.18	25.41	21.37	22.11	23.73	15.34	21.37	25.33
195	15.71	18.44	21.43	16.54	18.81	19.37	13.41	18.25	21.48
210	12.41	14.87	16.91	13.87	15.62	16.78	10.51	16.88	18.42
225	9.66	11.35	15.42	10.10	12.02	10.57	9.01	12.81	15.82
240	7.82	9.16	10.37	8.57	9.87	10.02	7.35	9.1	11.84

ตารางผนวกที่ ข29 กระบวนการผลิตความร้อนเพื่ออบแห้งใบมันสำปะหลังการทดลองที่ 22-24

รายการตรวจวัด	การทดลอง		
	22	23	24
1. เหง้ามันสำปะหลัง			
อัตราการป้อนเหง้ามันสำปะหลัง (kg/hr)	10.30	11.40	10.80
2. อากาศเข้าเตา			
อัตราการไหลอากาศเข้า (m^3/h)	46.68	46.60	46.77
อุณหภูมิอากาศเข้า (°C)	40.10	42.10	41.30
3. ก๊าซชีวมวล			
อัตราการไหลของก๊าซที่ผลิตได้ (m^3/h)	35.99	35.07	35.62
อุณหภูมิก๊าซที่ผลิตได้ (°C)	70.11	68.40	72.00
4. อากาศร้อนเข้าห้องอบแห้ง			
อัตราการไหลอากาศร้อน (m^3/h)	169.86	179.04	169.86
อุณหภูมิอากาศร้อน (°C)	85.00	85.40	82.70
5. อากาศร้อนไหลออกจากห้องอบแห้ง			
อัตราการไหลอากาศร้อน (m^3/h)	81.39	81.39	71.22
อุณหภูมิอากาศร้อน (°C)	42.40	40.10	43.50

ตารางผนวกที่ ข30 อุณหภูมิห้องอบแห้ง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 30 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับ ที่น้ำหนัก 4 กิโลกรัม

เวลา	การทดลองที่ 22			การทดลองที่ 23			การทดลองที่ 24		
	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย
0	32	34	32	31	30	31	31	30	30
15	57	55	50	59	52	48	55	50	47
30	59	56	49	60	52	50	57	53	49
45	58	51	49	61	53	50	58	52	49
60	56	49	46	58	51	50	57	51	47
75	57	49	47	58	54	52	58	52	48
90	61	55	48	57	55	52	59	52	49
105	59	53	47	58	55	51	60	53	49
120	60	55	46	60	55	50	59	54	50
135	63	53	45	61	56	51	59	53	49
150	59	56	47	61	55	52	59	55	48
165	59	55	46	62	57	52	60	55	48
180	60	55	46	61	57	53	60	54	48
195	60	55	47	60	56	53	60	54	49
210	61	56	48	61	55	52	61	54	49
225	60	55	47	60	55	51	60	53	48
240	61	56	47	60	56	50	61	54	49
255	62	56	46	61	57	51	59	53	47
270	63	56	48	63	57	52	60	53	47
285	65	57	48	64	57	52	60	54	48
300	65	58	49	66	58	54	61	54	48
315	-	-	-	65	58	53	62	55	50
330	-	-	-	66	59	54	62	56	50
345	-	-	-	67	59	54	63	56	50
360	-	-	-	67	59	55	64	56	51

ตารางผนวกที่ ข31 อุณหภูมิใบมันสำปะหลัง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 30 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับ ที่น้ำหนัก 4 กิโลกรัม

เวลา	การทดลองที่ 22			การทดลองที่ 23			การทดลองที่ 24		
	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย
0	27	27	28	30	31	32	28	29	28
15	51	45	42	45	42	41	51	43	41
30	54	45	43	51	43	41	52	44	42
45	52	44	43	53	45	43	55	45	43
60	51	44	43	52	44	44	54	44	43
75	53	46	45	51	43	43	53	44	42
90	52	46	43	52	45	43	55	45	42
105	50	44	41	51	46	44	55	45	43
120	51	47	45	51	48	46	56	45	44
135	54	47	45	53	49	46	55	45	44
150	53	49	46	55	50	47	54	46	43
165	54	50	46	56	50	46	53	45	44
180	55	51	47	56	51	47	54	45	44
195	55	50	47	56	50	46	55	46	45
210	56	51	48	56	50	47	54	46	45
225	55	52	49	57	51	47	55	47	44
240	56	51	48	58	52	48	55	47	45
255	57	52	48	57	51	48	55	48	45
270	58	53	49	58	53	48	56	50	47
285	60	54	50	59	54	49	56	50	48
300	61	54	51	60	55	49	57	52	49
315	-	-	-	60	56	50	58	53	49
330	-	-	-	61	55	50	58	53	49
345	-	-	-	61	56	51	59	54	50
360	-	-	-	62	56	52	61	54	51

ตารางผนวกที่ ข32 ความชื้นใบมันสำปะหลัง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 30 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับ ที่น้ำหนัก 4 กิโลกรัม

เวลา	การทดลองที่ 22			การทดลองที่ 23			การทดลองที่ 24		
	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย
0	62.32	61.58	61.96	60.12	59.76	60.13	60.31	58.88	59.76
15	55.31	56.13	58.19	56.41	57.11	59.3	57.41	58.11	58.81
30	51.43	53.56	56.32	55.01	56.31	57.29	55.37	56.22	57.11
45	47.59	51.87	53.38	54.37	55.43	56.31	50.13	53.41	55.39
60	45.87	49.91	51.87	51.87	53.56	55.53	48.17	51.44	53.13
75	43.07	45.04	48.51	49.41	51.02	53.38	45.33	48.91	50.44
90	40.01	43.13	45.09	48.35	50.13	52.75	43.11	45.33	47.18
105	39.00	41.46	43.43	46.61	48.47	50.47	41.12	43.45	45.5
120	36.81	39.51	41.82	45.77	47.85	48.52	39.02	41.56	43.75
135	33.18	36.37	39.51	43.65	45.91	47.32	37.12	39.67	41.41
150	31.11	34.28	37.43	40.44	43.82	45.25	34.54	37.36	38.12
165	28.13	31.44	35.87	39.39	41.41	43.65	33.65	35.12	37.06
180	25.35	29.53	33.91	37.47	39.81	41.53	31.02	33.71	36.73
195	22.32	26.87	31.72	35.86	37.51	39.55	28.46	29.04	35.06
210	20.34	23.11	28.05	32.59	35.32	37.61	25.51	28.11	31.31
225	19.47	21.06	24.43	30.81	32.47	35.1	23.56	25.22	29.11
240	16.33	19.51	21.17	28.22	31.56	33.96	21.44	23.55	27.23
255	13.81	17.35	19.18	25.42	28.48	30.84	18.21	20.43	25.47
270	11.90	13.42	15.33	23.39	25.31	28.07	15.71	19.23	23.81
285	9.89	11.31	12.47	20.47	21.46	23.75	13.63	17.62	19.69
300	8.47	9.11	10.36	17.58	18.56	21.48	11.76	15.87	17.77
315	-	-	-	13.71	15.53	18.49	10.39	13.96	15.11
330	-	-	-	10.37	13.31	15.45	9.43	11.13	13.13
345	-	-	-	8.71	11.47	12.87	8.37	10.02	11.46
360	-	-	-	7.59	9.11	10.37	7.35	9.11	10.53

ตารางผนวกที่ ข33 กระบวนการผลิตความร้อนเพื่ออบแห้งใบมันสำปะหลังการทดลองที่ 25-27

รายการตรวจวัด	การทดลอง		
	25	26	27
1. เหง้ามันสำปะหลัง			
อัตราการป้อนเหง้ามันสำปะหลัง (kg/hr)	10.50	10.60	11.10
2. อากาศเข้าเตา			
อัตราการไหลอากาศเข้า (m^3/h)	47.09	47.42	47.17
อุณหภูมิอากาศเข้า (°C)	39.00	39.70	41.30
3. ก๊าซชีวมวล			
อัตราการไหลของก๊าซที่ผลิตได้ (m^3/h)	35.26	34.89	35.44
อุณหภูมิก๊าซที่ผลิตได้ (°C)	70.10	71.30	72.00
4. อากาศร้อนเข้าห้องอบแห้ง			
อัตราการไหลอากาศร้อน (m^3/h)	169.86	179.04	165.27
อุณหภูมิอากาศร้อน (°C)	84.40	80.50	82.30
5. อากาศร้อนไหลออกจากห้องอบแห้ง			
อัตราการไหลอากาศร้อน (m^3/h)	81.39	81.39	81.39
อุณหภูมิอากาศร้อน (°C)	40.40	39.30	41.10

ตารางผนวกที่ ข34 อุณหภูมิห้องอบแห้ง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 30 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับ ที่น้ำหนัก 6 กิโลกรัม

เวลา	การทดลองที่ 25			การทดลองที่ 26			การทดลองที่ 27		
	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย
0	31	30	31	29	30	29	31	32	31
15	58	50	45	48	45	41	55	48	45
30	58	51	48	55	48	44	58	50	44
45	59	52	48	59	51	46	60	52	48
60	60	52	48	59	52	46	60	52	48
75	61	52	48	61	53	48	58	51	49
90	62	52	49	62	53	48	59	52	48
105	63	53	50	62	53	48	60	52	48
120	63	53	50	62	53	49	60	52	48
135	65	54	50	63	53	50	61	53	49
150	65	54	49	63	53	49	62	53	50
165	66	54	49	63	54	50	63	53	50
180	65	54	50	62	54	51	65	54	51
195	64	53	49	63	54	50	66	55	52
210	63	53	50	64	54	50	65	55	52
225	63	53	51	65	55	51	65	55	52
240	64	52	50	65	55	51	65	56	52
255	65	53	51	65	56	50	64	56	52
270	65	53	52	66	56	52	64	56	53
285	65	53	51	66	56	52	65	56	53
300	66	54	50	66	56	52	65	57	53
315	66	54	51	65	55	50	64	57	52
330	67	55	52	64	55	50	66	58	53
345	66	55	53	66	56	51	66	58	54
360	65	55	52	67	56	51	65	58	54

ตารางผนวกที่ ข35 อุณหภูมิใบมันสำปะหลัง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 30 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับ ที่น้ำหนัก 6 กิโลกรัม

เวลา	การทดลองที่ 25			การทดลองที่ 26			การทดลองที่ 27		
	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย
0	29	30	30	29	30	29	31	32	31
15	45	38	35	45	42	40	48	43	40
30	51	44	38	48	45	43	50	45	42
45	54	45	43	50	46	44	51	48	45
60	55	46	45	53	46	44	53	47	45
75	54	48	44	54	46	45	54	47	44
90	54	48	45	55	46	45	55	48	45
105	54	47	45	55	45	44	56	49	46
120	53	48	46	56	45	44	56	49	45
135	53	47	45	54	45	43	57	48	45
150	54	47	45	53	45	43	55	48	45
165	55	48	45	55	46	42	56	49	46
180	56	48	46	55	46	42	57	49	46
195	56	48	47	55	45	42	57	50	47
210	54	48	46	54	46	43	58	51	48
225	55	49	46	53	46	44	57	52	48
240	54	48	46	54	47	45	56	51	48
255	55	48	47	55	48	45	55	50	47
270	56	49	46	56	49	46	54	51	47
285	56	49	46	56	48	46	53	51	46
300	56	50	47	57	48	46	54	52	46
315	57	49	48	58	49	45	55	51	47
330	58	51	47	59	49	47	57	52	48
345	59	52	48	59	48	47	58	53	49
360	60	53	49	60	49	47	60	54	50

ตารางผนวกที่ ข36 ความชื้นใบมันสำปะหลัง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 30 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับ ที่น้ำหนัก 6 กิโลกรัม

เวลา	การทดลองที่ 25			การทดลองที่ 26			การทดลองที่ 27		
	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย
0	59.87	62.61	62.54	61.37	62.48	62.37	60.71	61.39	62.47
15	56.11	57.48	58.91	59.28	60.3	60.79	57.39	58.91	60.03
30	55.45	57.01	58.02	57.09	58.9	59.47	55.11	56.33	58.47
45	53.41	55.13	56.22	55.2	57.49	59.01	52.71	54.66	56.93
60	51.36	53.41	55.37	53.61	55.78	57.66	50.39	53.47	55.01
75	47.44	52.33	54.56	51.89	53.35	55.12	48.33	51.67	53.53
90	45.66	49.37	51.41	49.47	51.09	53.63	46.30	49.98	51.33
105	43.52	47.39	48.31	47.11	49.03	51.23	43.78	47.69	49.66
120	41.36	44.31	46.23	45.66	47.98	49.74	40.66	45.11	47.34
135	39.42	42.91	44.71	43.77	45.37	47.24	37.49	43.25	45.31
150	37.01	40.13	41.63	41.56	42.67	43.63	35.34	41.66	43.91
165	35.47	38.46	40.90	39.48	40.02	41.13	33.64	37.94	41.84
180	32.52	35.51	38.63	36.37	37.98	39.63	31.71	35.01	38.31
195	30.47	33.10	36.41	33.19	35.61	37.42	29.23	33.61	36.47
210	28.41	31.21	34.71	31.87	32.47	35.13	27.13	31.36	34.93
225	26.91	28.33	31.41	29.59	30.73	32.09	25.90	29.27	31.23
240	24.81	26.40	29.37	27.39	28.41	30.53	22.39	26.16	29.36
255	23.16	25.13	27.63	25.67	26.06	27.81	20.35	23.71	27.61
270	21.09	23.44	25.39	22.51	23.71	24.6	19.20	21.48	24.52
285	18.11	20.60	23.01	20.66	21.41	21.99	17.47	18.27	21.84
300	15.60	17.81	20.45	18.44	19.02	20.98	15.91	16.93	19.62
315	13.47	14.88	17.55	15.42	16.39	17.41	13.56	14.75	17.63
330	10.11	13.16	15.37	13.21	13.47	15.67	11.33	12.30	14.31
345	8.39	11.39	13.21	10.31	11.37	12.58	9.31	10.68	12.86
360	7.85	9.57	10.81	8.65	9.87	10.37	7.65	9.42	10.23

ตารางผนวกที่ ข37 กระบวนการผลิตความร้อนเพื่ออบแห้งใบมันสำปะหลังการทดลองที่ 28-30

รายการตรวจวัด	การทดลอง		
	28	29	30
1. เหง้ามันสำปะหลัง			
อัตราการป้อนเหง้ามันสำปะหลัง (kg/hr)	11.50	12.10	11.80
2. อากาศเข้าเตา			
อัตราการไหลอากาศเข้า (m^3/h)	46.60	47.83	47.17
อุณหภูมิอากาศเข้า (°C)	41.00	38.50	40.10
3. ก๊าซชีวมวล			
อัตราการไหลของก๊าซที่ผลิตได้ (m^3/h)	33.79	35.44	35.26
อุณหภูมิก๊าซที่ผลิตได้ (°C)	70.50	71.30	70.90
4. อากาศร้อนเข้าห้องอบแห้ง			
อัตราการไหลอากาศร้อน (m^3/h)	179.04	165.27	165.27
อุณหภูมิอากาศร้อน (°C)	82.70	80.10	86.50
5. อากาศร้อนไหลออกจากห้องอบแห้ง			
อัตราการไหลอากาศร้อน (m^3/h)	68.48	81.39	96.65
อุณหภูมิอากาศร้อน (°C)	38.40	40.90	39.90

ตารางผนวกที่ ข38 อุณหภูมิห้องอบแห้ง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศร้อน 30 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่ง 12 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 2 กิโลกรัม

เวลา	การทดลองที่ 28			การทดลองที่ 29			การทดลองที่ 30		
	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย
0	30	31	30	32	31	31	35	32	33
15	58	49	45	50	48	45	50	48	45
30	60	51	46	55	54	53	52	51	48
45	59	50	46	57	55	53	54	52	48
60	60	51	45	56	52	50	55	54	48
75	61	52	47	57	55	53	56	55	49
90	61	53	48	56	54	52	58	54	49
105	62	54	48	58	55	54	59	55	50
120	58	52	47	60	58	53	58	56	50
135	61	52	46	61	56	53	59	56	51
150	60	53	47	60	56	54	61	57	52

ตารางผนวกที่ ข39 อุณหภูมิใบมันสำปะหลัง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 30 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่ง 12 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 2 กิโลกรัม

เวลา	การทดลองที่ 28			การทดลองที่ 29			การทดลองที่ 30		
	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย
0	31	31	32	31	32	31	34	34	33
15	52	48	45	42	37	36	48	44	42
30	54	50	49	54	48	45	50	46	43
45	55	51	48	54	49	47	52	47	44
60	56	51	47	55	47	45	53	47	44
75	55	48	46	53	48	46	54	48	45
90	56	49	45	54	50	47	53	47	45
105	55	50	47	55	52	51	54	46	46
120	57	51	48	54	53	50	54	47	45
135	60	52	49	55	54	52	55	48	47
150	61	53	50	53	52	50	56	48	45

ตารางผนวกที่ ข40 ความชื้นใบมันสำปะหลัง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 30 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่ง 12 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 2 กิโลกรัม

เวลา	การทดลองที่ 28			การทดลองที่ 29			การทดลองที่ 30		
	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย
0	48.31	50.12	50.64	47.35	48.59	48.21	50.31	51.02	51.33
15	43.69	45.13	47.59	43.11	45.66	47.02	45.21	47.31	48.65
30	41.11	43.11	45.18	40.36	43.68	45.21	38.59	43.25	46.22
45	39.56	41.13	42.36	36.82	36.11	42.18	35.41	39.68	43.13
60	35.28	38.15	38.58	32.17	33.61	38.05	31.52	35.11	37.66
75	27.69	30.15	32.68	28.64	29.81	34.18	26.85	31.05	31.54
90	23.51	26.84	27.58	23.57	25.64	28.45	22.65	28.64	27.30
105	17.69	21.58	23.64	19.87	21.41	23.61	17.88	23.51	23.58
120	13.48	18.68	18.91	15.69	15.68	18.54	13.25	18.69	19.36
135	9.57	12.65	13.68	10.25	11.58	13.52	9.96	13.58	14.65
150	8.68	9.31	10.62	8.54	9.68	10.36	8.55	9.89	10.35

ตารางผนวกที่ ข41 กระบวนการผลิตความร้อนเพื่ออบแห้งใบมันสำปะหลังการทดลองที่ 31-33

รายการตรวจวัด	การทดลอง		
	31	32	33
1. เหง้ามันสำปะหลัง			
อัตราการป้อนเหง้ามันสำปะหลัง (kg/hr)	11.50	12.10	11.30
2. อากาศเข้าเตา			
อัตราการไหลอากาศเข้า (m^3/h)	47.09	47.09	47.17
อุณหภูมิอากาศเข้า (°C)	41.00	40.10	42.30
3. ก๊าซชีวมวล			
อัตราการไหลของก๊าซที่ผลิตได้ (m^3/h)	35.07	34.16	35.07
อุณหภูมิก๊าซที่ผลิตได้ (°C)	71.50	70.10	73.40
4. อากาศร้อนเข้าห้องอบแห้ง			
อัตราการไหลอากาศร้อน (m^3/h)	169.86	179.04	165.27
อุณหภูมิอากาศร้อน (°C)	84.50	87.70	80.10
5. อากาศร้อนไหลออกจากห้องอบแห้ง			
อัตราการไหลอากาศร้อน (m^3/h)	86.48	81.39	86.48
อุณหภูมิอากาศร้อน (°C)	42.70	39.50	39.40

ตารางผนวกที่ ข42 อุณหภูมิห้องอบแห้ง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 30 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่ง 12 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 4 กิโลกรัม

เวลา	การทดลองที่ 31			การทดลองที่ 32			การทดลองที่ 33		
	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย
0	30	31	30	31	30	31	31	32	33
15	58	48	45	56	49	45	58	54	48
30	57	49	47	55	48	44	61	55	49
45	57	49	48	56	48	44	61	56	50
60	58	51	49	58	49	45	60	55	49
75	56	52	50	58	48	46	60	55	50
90	58	55	49	59	49	47	61	56	50
105	60	55	50	61	50	48	59	54	48
120	61	56	51	60	49	47	60	55	48
135	61	57	52	61	50	48	61	56	49
150	60	56	50	61	51	49	61	56	50
165	60	56	51	62	51	49	61	55	51
180	61	57	53	62	51	50	62	56	52

ตารางผนวกที่ ข43 อุณหภูมิใบมันสำปะหลัง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 20 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่ง 12 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 4 กิโลกรัม

เวลา	การทดลองที่ 31			การทดลองที่ 32			การทดลองที่ 33		
	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย
0	31	31	32	31	31	32	32	32	33
15	48	45	42	53	50	47	49	45	43
30	51	49	45	52	49	46	51	48	45
45	53	50	48	52	48	45	56	53	49
60	54	50	49	53	47	44	55	52	50
75	55	51	48	53	48	45	56	53	49
90	54	52	50	54	49	46	55	52	50
105	55	51	49	55	48	47	56	53	50
120	56	52	50	54	47	45	56	53	49
135	55	51	50	55	47	44	57	53	50
150	56	53	51	57	49	45	58	55	51
165	57	53	51	58	50	47	60	56	51
180	56	53	50	59	51	48	61	55	50

ตารางผนวกที่ ข44 ความชื้นใบมันสำปะหลัง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 20 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่ง 12 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 4 กิโลกรัม

เวลา	การทดลองที่ 31			การทดลองที่ 32			การทดลองที่ 33		
	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย
0	45.61	46.12	45.68	50.12	49.56	49.61	51.21	50.65	51.32
15	39.52	43.12	45.21	43.51	46.21	47.51	45.87	47.52	49.61
30	35.68	38.51	43.85	40.21	43.51	45.61	43.51	45.87	47.35
45	33.12	36.22	40.35	38.54	41.58	43.25	39.48	42.81	46.51
60	30.15	33.14	38.54	35.67	38.81	40.75	35.64	38.59	42.55
75	27.31	31.65	35.81	33.24	34.51	37.15	30.54	33.27	36.84
90	25.11	28.48	32.13	26.48	30.95	35.24	28.67	30.01	32.66
105	21.61	25.48	28.56	22.65	26.11	31.11	22.56	25.94	28.88
120	18.21	21.54	25.61	18.64	23.54	28.57	18.97	20.64	23.48
135	15.21	18.81	21.54	15.68	18.57	23.54	15.86	18.25	21.56
150	13.65	15.22	18.31	11.51	15.89	19.68	11.24	13.67	18.97
165	9.52	11.86	15.66	9.85	11.35	13.58	9.87	11.25	13.54
180	8.64	9.05	11.68	8.56	9.54	10.21	8.69	9.11	9.89

ตารางผนวกที่ ข45 กระบวนการผลิตความร้อนเพื่ออบแห้งใบมันสำปะหลังการทดลองที่ 34-36

รายการตรวจวัด	การทดลอง		
	34	35	36
1. เหง้ามันสำปะหลัง			
อัตราการป้อนเหง้ามันสำปะหลัง (kg/hr)	10.60	11.00	10.50
2. อากาศเข้าเตา			
อัตราการไหลอากาศเข้า (m^3/h)	46.74	46.93	46.77
อุณหภูมิอากาศเข้า (°C)	41.30	40.50	42.10
3. ก๊าซชีวมวล			
อัตราการไหลของก๊าซที่ผลิตได้ (m^3/h)	35.26	35.26	34.89
อุณหภูมิก๊าซที่ผลิตได้ (°C)	74.10	73.20	71.10
4. อากาศร้อนเข้าห้องอบแห้ง			
อัตราการไหลอากาศร้อน (m^3/h)	174.45	174.45	174.45
อุณหภูมิอากาศร้อน (°C)	85.30	83.40	81.80
5. อากาศร้อนไหลออกจากห้องอบแห้ง			
อัตราการไหลอากาศร้อน (m^3/h)	86.48	96.65	96.65
อุณหภูมิอากาศร้อน (°C)	43.70	42.80	39.40

ตารางผนวกที่ ข46 อุณหภูมิห้องอบแห้ง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 30 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่ง 12 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 6 กิโลกรัม

เวลา	การทดลองที่ 34			การทดลองที่ 35			การทดลองที่ 36		
	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย
0	35	40	42	36	35	35	30	31	30
15	64	56	47	60	52	47	59	56	52
30	64	60	48	58	52	45	59	55	53
45	62	55	49	59	54	48	60	57	54
60	62	56	48	57	53	47	61	57	49
75	61	55	48	58	57	50	59	55	50
90	60	54	49	60	56	53	58	56	51
105	59	53	50	61	56	52	59	57	51
120	58	50	48	58	55	54	60	58	52
135	58	52	49	57	54	50	59	56	52
150	59	55	51	58	55	51	58	56	51
165	61	59	52	59	55	50	59	57	52
180	62	60	53	60	56	52	60	57	53
195	61	59	54	61	58	54	61	58	55
210	61	60	54	61	58	55	61	58	56

ตารางผนวกที่ ข47 อุณหภูมิใบมันสำปะหลัง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 30 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่ง 12 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 6 กิโลกรัม

เวลา	การทดลองที่ 34			การทดลองที่ 35			การทดลองที่ 36		
	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย
0	38	35	34	33	32	34	31	32	32
15	49	45	43	54	53	44	47	45	43
30	49	47	45	56	54	43	51	48	44
45	50	51	44	55	53	44	53	49	44
60	52	50	45	54	52	45	54	51	47
75	54	48	45	53	49	46	53	50	47
90	53	49	46	52	48	45	53	50	46
105	54	50	46	53	50	45	54	51	48
120	55	50	45	54	50	44	55	50	48
135	57	55	51	53	49	45	56	51	49
150	58	55	54	52	48	46	54	51	48
165	58	57	55	54	50	47	55	52	49
180	60	58	57	55	51	47	54	51	48
195	59	58	56	56	53	48	55	52	49
210	60	58	58	56	54	49	56	53	50

ตารางผนวกที่ ข48 ความชื้นใบมันสำปะหลัง ที่ขนาด∅ช่องระบายอากาศ 30 เซนติเมตร ลักษณะใบมันสำปะหลังสดสับแล้วผึ่ง 12 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 6 กิโลกรัม

เวลา	การทดลองที่ 34			การทดลองที่ 35			การทดลองที่ 36		
	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย	ส่วนต้น	ส่วนกลาง	ส่วนท้าย
0	45.30	45.40	44.70	54.32	53.68	54.12	51.13	50.11	50.21
15	35.67	36.54	39.71	47.56	49.65	50.31	45.21	48.33	49.11
30	33.62	35.23	37.85	44.31	46.25	48.67	41.65	45.36	47.11
45	30.25	32.21	34.58	39.58	43.31	46.51	37.25	41.23	43.78
60	28.13	30.78	31.06	35.68	39.52	43.25	35.26	38.64	40.17
75	26.16	28.37	29.77	33.16	35.64	39.65	31.11	35.91	37.55
90	23.87	26.52	28.23	29.65	32.56	35.18	29.55	31.27	33.64
105	20.37	23.37	25.61	27.85	29.81	31.25	25.36	28.64	30.1
120	16.32	20.11	22.41	23.54	26.95	28.64	20.36	25.68	27.33
135	13.73	18.22	20.31	19.85	21.56	24.31	16.54	19.88	21.61
150	10.87	15.45	18.24	15.26	18.64	19.57	13.21	15.32	18.51
165	9.37	13.25	15.68	12.11	15.31	16.54	11.19	13.64	15.26
180	8.56	11.21	12.54	10.31	12.36	13.25	9.52	10.98	12.65
195	7.54	9.65	11.31	9.58	10.68	11.29	8.65	9.54	10.67
210	7.25	8.57	9.85	8.11	9.85	9.86	7.85	8.61	9.61

ตารางผนวกที่ ข49 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนที่ผ่านการอบแห้งที่ปัจจัยต่างๆ

หน่วย : % db

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (ซม.)		20			30		
น้ำหนัก (กก.)		2	4	6	2	4	6
ใบมันสำปะหลังสดสับ	1	20.93	20.65	21.55	21.35	21.75	20.55
	2	21.17	21.56	20.51	21.49	21.46	19.99
	3	20.95	21.38	20.25	21.42	22.43	20.31
ใบมันสำปะหลังสดสับผึ่งนาน 12 ชั่วโมง	1	21.34	20.00	20.53	21.02	19.54	21.35
	2	20.75	19.98	21.06	20.72	20.36	20.74
	3	21.23	20.35	20.58	20.80	20.82	21.42

ตารางผนวกที่ ข50 ผลการวิเคราะห์ปริมาณไซยาไนด์ที่ผ่านการอบแห้งที่ปัจจัยต่างๆ

หน่วย : ppm

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (ซม.)		20			30		
น้ำหนัก (กก.)		2	4	6	2	4	6
ใบมันสำปะหลังสดสับ	1	36.72	38.88	34.56	34.56	36.72	36.72
	2	34.56	36.72	34.56	34.56	34.56	36.72
ใบมันสำปะหลังสดสับผึ่งนาน 12 ชั่วโมง	1	34.56	36.72	38.88	34.56	36.72	34.56
	2	34.56	36.72	36.72	34.56	36.72	34.56

ตารางผนวกที่ ข51 ผลการวิเคราะห์ปริมาณแทนนินที่ผ่านการอบแห้งที่ปัจจัยต่างๆ

หน่วย : ppm

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (ซม.)		20			30		
น้ำหนัก (กก.)		2	4	6	2	4	6
ใบมันสำปะหลังสดสับ	1	16.67	18.51	17.63	18.19	18.59	17.23
	2	17.18	19.94	16.95	18.18	19.17	17.26
ใบมันสำปะหลังสดสับผึ่งนาน 12 ชั่วโมง	1	11.49	14.76	11.41	12.52	12.21	11.57
	2	12.15	15.20	11.46	12.45	13.06	12.45

ภาคผนวก ค

ตัวอย่าง และวิธีการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเตาผลิตก๊าซชีวมวล

และคุณภาพใบมันสำปะหลังอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้ง

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลลง

1. **การคำนวณข้อมูลบางส่วน**

1.1 คำนวณหาอัตราการไหลของก๊าซชีวมวล

หาความหนาแน่นของก๊าซชีวมวลจาก

$$PV = nRT = \left(m/M\right)RT \qquad (4)$$

จากสมการที่ (1) นำ M คูณตลอดจะได้

$$MPV = nmRT$$

$$\frac{MP}{RT} = \frac{nm}{V} \qquad \text{หรือ} \qquad \rho = \overline{M}P/RT \ \text{(kg/kmol)} \qquad (5)$$

โดยที่ $\overline{M}_g$ คือ มวลโมเลกุลของก๊าซ (g)

T_{pg} คือ อุณหภูมิของก๊าซชีวมวล เท่ากับ 343.44 K

P คือ ความดันบรรยากาศ เท่ากับ 1.013×10^5 Pa

R คือ ค่าคงที่ของก๊าซชีวมวล เท่ากับ 8.3143 kJ/kmol.K

ส่วนประกอบของก๊าซชีวมวลประกอบด้วย

CO_2 = 24.04 % มวลโมเลกุล = 44 ; 44×0.2404 = 10.5776 g

O_2 = 1.64 % มวลโมเลกุล = 32 ; 32×0.0164 = 0.5248 g

N_2 = 43.60 % มวลโมเลกุล = 28 ; 28×0.4360 = 12.2080 g

CH_4 = 2.02 % มวลโมเลกุล = 16 ; 16×0.0202 = 0.3232 g

H_2 = 14.05 % มวลโมเลกุล = 2 ; 2×0.1405 = 0.2810 g

CO = 14.65 % มวลโมเลกุล = 28 ; 28×0.1465 = 4.1020 g

$\overline{M}_g$ = 10.5776 + 0.5248 + …+ 4.1020 = 28.0166

แทนค่าในสมการ (5) จะได้

$$\rho = \frac{28.0166 \times (1.013 \times 10^5)}{8314.3 \times 343.44}$$

$$\rho = 0.9939 \ \text{kg/m}^3$$

จาก $$\dot{m} = \rho v \mathrm{A}$$

$$\dot{m} = 0.9939 \times 0.1 \times 0.038 = 0.0038 \ \text{kg/s}$$

เพราะฉะนั้น $$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho}$$

$$= \frac{0.0038}{0.9939} = 0.0038 \ \text{m}^3/\text{s} = 13.68 \ \text{m}^3/\text{h}$$

1.2 **หาค่าความร้อนของก๊าซชีวมวล**

ส่วนประกอบของก๊าซชีวมวล (ภาคผนวกที่ ก2) คำนวณค่าความร้อนได้จาก

$$LHV_g = HHV_g - 2016(H_2) + 2(CH_4) \quad \text{kJ/m}^3 \qquad (6)$$

$$HHV_g = 16284(CO) + 12810(H_2) + 39984(CH_4) \quad \text{kJ/m}^3 \qquad (7)$$

ดังนั้น $$LHV_g = 12684(CO) + 12810(H_2) + 39984(CH_4) - 2016(H_2) + 2(CH_4) \ \text{kJ/m}^3 \qquad (8)$$

แทนค่าในสมการ

$$HHV_g = 12684(0.1465) + 12810(0.1405) + 39984(0.0202)$$

$$= 4465.69 \ \text{kJ/m}^3$$

$$LHV_g = 4465.69 - 2016(0.1405) + 2(0.0202)$$

$$= 4182.48 \ \text{kJ/m}^3$$

2. **คำนวณประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลลง**

$$\eta_F = \left[\frac{\dot{V}_g (LHV_g)}{\dot{m}_{fl}(HHV_m) + W_{e1}} \right] \times 100 \qquad (9)$$

โดยที่ W_{e1} คือ ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ให้แก่มอเตอร์พัดลมดูดอากาศเข้าเตาผลิตก๊าซชีวมวล เท่ากับ 1.5 × 3600 เท่ากับ 5,400 kJ/h

HHV_m คือ ค่าพลังงานความร้อนของเหง้ามันสำปะหลัง เท่ากับ 7,873.64 kJ/kg

แทนค่าในสมการ (9) จะได้

$$\eta_F = \left[\frac{13.68 \times 4182.48}{(11.58 \times 7,873.64) + 5400} \right] \times 100$$

$$= 59.24 \ \%$$

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาววรางคณา รูปวิเชตร
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 1 สิงหาคม 2525
สถานที่เกิด	จังหวัดจันทบุรี
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (เกษตรกลวิธาน) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	มูลนิธิ มันสำปะหลัง แห่งประเทศไทย