



เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน เพื่อการจัดการกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

พิทักษ์ คล้ายชม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทรัพยากรธรรมชาติและ
สิ่งแวดล้อม

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์

กรกฎาคม 2564

เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชั่น เพื่อการจัดการกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์



พิทักษ์ คล้ายชม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทรัพยากรธรรมชาติและ
สิ่งแวดล้อม

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์

กรกฎาคม 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์

GASIFICATION TECHNOLOGY FOR CASHEW NUT SHELL RESIDUE
MANAGEMENT



Pitak Khlaichom

A Thesis Submitted in partial Fulfillment of Requirements
for Doctor of Philosophy Program (Natural Resources and
Environmental Management)
faculty of Science and Technology Uttaradit Rajabhat University

July 2021

Copyright of Uttaradit Rajabhat University

วิทยานิพนธ์ เรื่อง
เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน เพื่อการจัดการกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์
ของ
พิทักษ์ คล้ายชม

ได้รับการพิจารณาเห็นชอบจากคณะกรรมการที่ปรึกษาและคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
ให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาการจัดการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
เมื่อวันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

()

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

()

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรทิพพา พิญาพงษ์)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รองศาสตราจารย์ ดร.สิงห์เดช แต่งจวง)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์และเลขานุการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทร์เพ็ญ ชุมแสง)
ประธานกรรมการบัณฑิตศึกษาประจำหลักสูตร

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมคิด ทุ่งใจ)
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

(ดร.เชาวฤทธิ์ จันจัน)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุภาวิณี สัตย์ภรณ์)
อธิการบดีมหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์

บทคัดย่อ

| | |
|----------------------|---|
| ชื่อเรื่อง | เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน เพื่อการจัดการกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ |
| ผู้วิจัย | พิทักษ์ คล้ายชม |
| ปริญญา | หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (สาขาวิชาการจัดการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม) |
| อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก | รองศาสตราจารย์ ดร.สิงหนเดช แดงจวง |
| อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรทิพพา พิณญาพงษ์ |

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาชนิด ปริมาณ องค์ประกอบทางด้านเคมีของกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการเผากากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ด้วยวิธีเผาตรง ดำเนินการพัฒนาและศึกษาประสิทธิภาพระบบแก๊สซิฟิเคชันที่เหมาะสมต่อการใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง รวมถึงศึกษาด้านเศรษฐศาสตร์และวิเคราะห์มลภาวะทางอากาศที่ระบายออกจากปล่องเตาของระบบแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง โดยทำการวิเคราะห์องค์ประกอบเชื้อเพลิงและสัดส่วนของธาตุของกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ในพื้นที่อำเภอท่าปลา จังหวัดอุตรดิตถ์ และทดสอบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วยตัวชี้วัดทางเคมีของมลภาวะทางอากาศที่ระบายออกจากปล่องเตาเผากากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ด้วยวิธีการเผาตรง นำข้อมูลไปพัฒนาระบบแก๊สซิฟิเคชัน โดยกำหนดให้เตาแก๊สซิฟิเออร์มีขนาด 130 kW ใช้อากาศเป็นตัวกลางทำปฏิกิริยา ค่าความร้อนของโปรดิวเซอร์แก๊สที่คาดว่าจะได้รับ $5,000 \text{ kJ/m}^3$ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบแก๊สซิฟิเคชันที่คาดว่าจะได้รับ 70 % จากนั้นดำเนินการสร้างและทดสอบหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบแก๊สซิฟิเคชัน โดยเก็บตัวอย่างโปรดิวเซอร์แก๊สไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี ในด้านเศรษฐศาสตร์ได้ทำการวิเคราะห์ต้นทุนค่าใช้จ่ายรายปี ระยะเวลาคืนทุน มูลค่าปัจจุบันสุทธิ อัตราผลตอบแทนภายใน อัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุน และวิเคราะห์ต้นทุนสิ่งแวดล้อมของการปล่อยมลพิษทางอากาศ จากการเผากากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ด้วยเตาเผาตรง และการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในระบบแก๊สซิฟิเคชันที่พัฒนาขึ้น

ผลการวิจัยพบว่า องค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิงกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ มีค่าความชื้น 9.09 % ปริมาณเถ้า 2.39 % สารระเหย 88.28 % คาร์บอนคงตัว 0.24 % ปริมาณคาร์บอน (C) 54.09 % ไฮโดรเจน (H) 6.08 % ออกซิเจน (O) 38.45 % ไนโตรเจน (N) 1.38 % และค่าความร้อน $5,071.10 \text{ Kcal/Kg}$ ปริมาณสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากปล่องที่เกิดจากการ

เผาถ่านเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ด้วยวิธีเผาตรง มีค่าก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) 1.0 ppm ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) 103.9 ppm อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานกำหนด ส่วนค่าความเข้มข้นฝุ่นละออง (TSP) 648.329 mg/m³ และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีค่า 844.0 ppm เกินเกณฑ์มาตรฐานกำหนด การออกแบบระบบแก๊สซิฟิเคชัน ประกอบด้วย เตาแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลลงชนิด V-Hearth มีเส้นผ่านศูนย์กลางของคอคอดที่เล็กที่สุด (Throat) โชนเผาไหม้ เส้นรอบวงของปลายหัวฉีด ความสูงของโชนเผาไหม้ ระยะของระนาบหัวฉีดจาก Throat ความสูงของโชนรีดักชัน มีขนาด 130, 300, 248, 275, 110 และ 115 มิลลิเมตร ตามลำดับ มีหัวฉีด (Nozzle) จำนวน 5 หัว แต่ละหัวมีรูขนาด 12.5 มิลลิเมตร มุมเอียงของคอคอด (V-hearth) 45 องศา ระบบการกำจัดมลพิษทางอากาศ ประกอบด้วย ไส้โคลนแบบแลปเปิล และเครื่องตรวจจับฝุ่นแบบเปียกชนิดอีเจ็คเตอร์เวนจูรี จำนวน 2 ชุดต่ออนุกรมกัน สามารถสร้างแรงดูดอากาศเข้าสู่เตาทดแทนการใช้เครื่องเป่าลม ในการศึกษาประสิทธิภาพของระบบแก๊สซิฟิเคชัน สามารถวัดความเร็วอากาศที่ป้อนเข้าสู่เตาได้ 2.6 m/s มีอัตราการใช้เชื้อเพลิงเท่ากับ 11.4 kg/hr คิดเป็นอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง 2.22 วัตต์อัตราการไหลของแก๊สได้ 26.79 m³/hr องค์ประกอบของโปรดิวเซอร์แก๊สที่ผลิตได้ประกอบด้วย แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สไฮโดรเจน (H₂) และแก๊สมีเทน (CH₄) มีสัดส่วนร้อยละ 16 9.7 1.5 ค่าความร้อนของโปรดิวเซอร์แก๊สเท่ากับ 3.605 MJ/Nm³ และระบบแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ 39.92 เปอร์เซ็นต์

ผลการศึกษาคำนวณค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ในระยะเวลาดำเนินโครงการ 10 ปี พบว่าการลงทุนสร้างระบบแก๊สซิฟิเคชันเมื่อเทียบกับการใช้ฟืน มีระยะเวลาคืนทุน (PB) 5.07 ปี มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) 32,470 บาท อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) 14.8 % และอัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุน (BCR) 1.32 มีความคุ้มค่าและเหมาะสมในการลงทุนส่วนผลการวิเคราะห์ปริมาณสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากปล่องเตาจากการเผาด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชัน พบว่า มีค่าความเข้มข้นฝุ่นละออง (TSP) 2.532 mg/m³ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) 1.0 ppm ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) 8.1 ppm และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) 65.0 ppm มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานกำหนดทุกพารามิเตอร์ ผลการวิเคราะห์ต้นทุนสิ่งแวดล้อมของการปล่อยมลพิษทางอากาศ ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) และปริมาณฝุ่นละออง (TSP) โดยทำการประเมินการปล่อยมลพิษทางอากาศจากการเผาถ่านเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ของอำเภอท่าปลา จังหวัดอุตรดิตถ์ ซึ่งมีปริมาณ 3,822 ตันต่อปี พบว่า ต้นทุนสิ่งแวดล้อมจากการเผาถ่านเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

ด้วยเตาเผาตรง คิดเป็นมูลค่า 929,208 บาทต่อปี หากนำกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในระบบแก๊สซิฟิเคชัน จะมีต้นทุนสิ่งแวดล้อมคิดเป็นมูลค่าเพียง 198,835 บาทต่อปี

คำสำคัญ : กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์, เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน, ต้นทุนสิ่งแวดล้อม



Abstract

| | |
|------------|--|
| Title | GASIFICATION TECHNOLOGY FOR CASHEW NUT SHELL RESIDUE MANAGEMENT |
| Author | Pitak Khlaichom |
| Degree | Doctor of Philosophy Program (Natural Resources and Environmental Management) |
| Advisor | Associate Professor Dr. Singhadej Tangjuank |
| Co-Advisor | Assistant Professor Dr.Porntippa Pinyaphong |

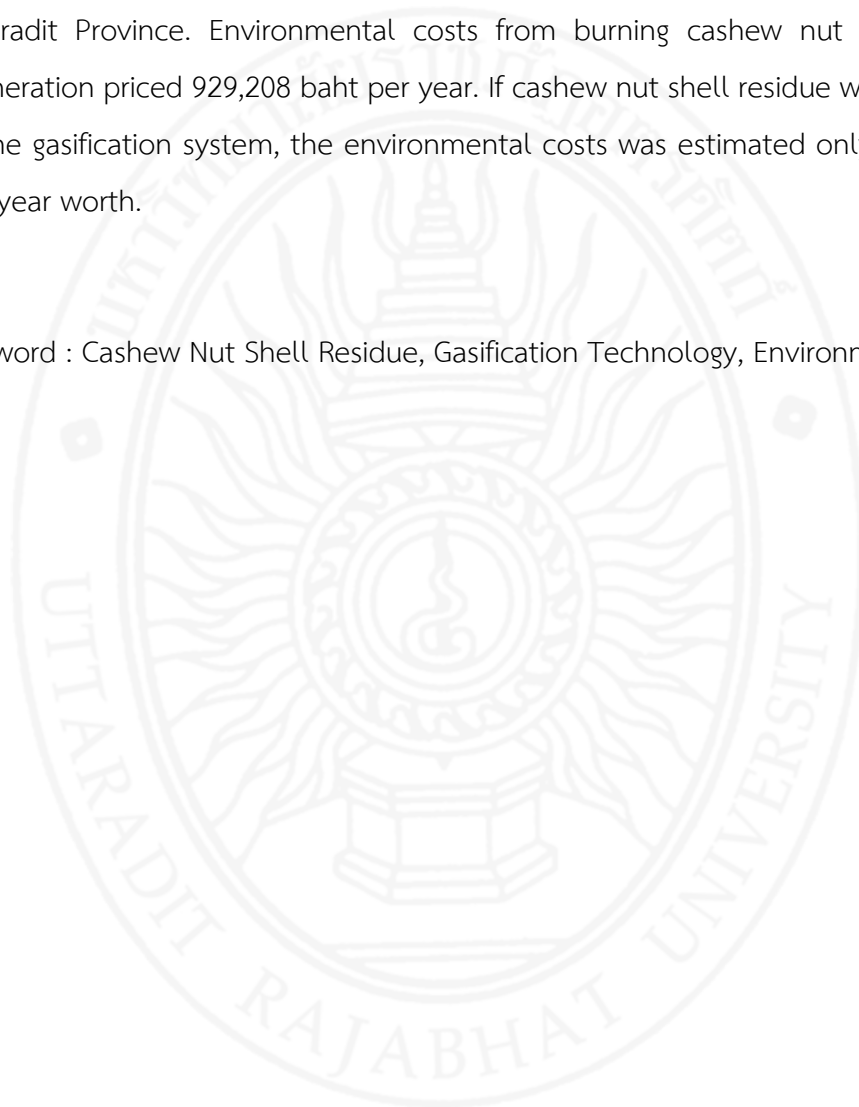
This research aimed to study the compositions of cashew nut shell residue in terms of type, quantity, chemical characteristics as well as its environmental impacts after direct incineration process was applied; develop and optimize the most effective gasification system for cashew nut shell fuel incineration; and study economic impacts and analyze the air pollution emitted from the gasification incinerator outlet. The results were derived through a study of the compositions and the proportions of the elements of the residue and air pollution found in the area of Tha Pla District in Uttaradit Province accompanied by tests and measurement of the environmental effects of the direct-fired incinerator waste and released air pollutants comparing to chemical indicators which the collected data were used to develop the gasification system. A 130-kW air reactor gasifier incinerator was set and specified with the expected heat of producer gases of 5,000 kJ/m³ and the expected thermal efficiency of the gasification system of 70%. The developed gasification system was tested via its thermal efficiency by examining the collected producer gas samples by using a gas chromatography. For economic impacts, the study used an annual cost and expense analysis, payback period, net present value, internal rate of return, benefit to cost ratio, as well as environmental cost analysis of the emitted air pollution from the direct burning incineration's residue, and environmental cost caused by cashew nut shell residue fueling in the developed gasification system.

The results showed that chemical compositions of cashew nut shell residue fuel existed 9.09 % moisture, 2.39 % ash, 88.28 % volatile matters, 0.24 % fixed carbon, 54.09 % carbon, 6.08 % hydrogen, 38.45 % oxygen, 1.38 % nitrogen, with calorific value at 5,071.10 Kcal/Kg. The quantity of compositions in the air discharged through the flue from the direct burning method of the cashew nut shell residue comprised sulfur dioxide of 1.0 ppm and nitrogen oxides of 103.9 ppm, both of which met the set standard, whereas, total suspended particulate matter (TSP) was at 648.329 mg/m³, and carbon monoxide was at 844.0 ppm, both of which exceeded the set standard. The design of the gasification system was done using a down-flow V-Hearth type gasifier incinerator with the following specifications of throat diameter, burning zone, circumference of the nozzle tips, burning zone height, distance of nozzle level from throat, and reduction zone height which they respectively came in size of 130, 300, 248, 275, 110, and 115 millimeters. 5 nozzles with 12.5 mm hole on each tip were used where the angle of the throat (V-hearth) was 45 degree. The air pollution removal system consisted of 2 serial-connected sets of a Lapple Cyclone and a wet ejector venturi type dust particle detector which produced air suction to the furnace instead of using an air blower. The study of the efficiency of the gasification system showed that the velocity of air fed into the furnace was 2.6 m/s, the fuel consumption rate was 11.4 kg/hr, the fuel consumption ratio was 2.22, and the gas flow rate was 26.79 m³/hr. The compositions of the producer gas consisted of carbon monoxide, hydrogen, and methane at 16 percent, 9.7 percent, and 1.5 percent. The producer gas calorific value was 3.605 MJ/Nm³ and had the thermal efficiency from the cashew nut shell residue gasification system at 39.92 percent.

Economic value analysis of the implemented project over a period of 10 years showed that the investment in gasification system comparing to the use of firewood was worthwhile and more suitable to invest according to the collected data of payback period (PB) of 5.07 years, net present value (NPV) of 32,470-baht, internal rate of return (IRR) at 14.8%, and benefit-cost ratio (BCR) at 1.32. The results of the amount of pollutant analysis in the air emitted from the gasification system incinerator flue contained total suspended particulate matter (TSP) at 2.532 mg/m³, 1.0 ppm

sulfur dioxide, 8.1 ppm nitrogen oxides, and 65.0 ppm carbon monoxide, all parameter values of which met the set standard. The results of the environmental cost analysis of air pollutants were as follows: carbon dioxide, carbon monoxide, nitrogen oxides, sulfur dioxide, and the total suspended particle (TSP) which 3,822 tons per year of air pollution was emitted from cashew nut shell residue burning in Tha Pla District in Uttaradit Province. Environmental costs from burning cashew nut shell in direct incineration priced 929,208 baht per year. If cashew nut shell residue was used as fuel in the gasification system, the environmental costs was estimated only 198,835 baht per year worth.

Keyword : Cashew Nut Shell Residue, Gasification Technology, Environmental Cost



กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงสมบูรณ์ได้ด้วย ความอนุเคราะห์อย่างยิ่งจากรองศาสตราจารย์ ดร.สิงหนเดช แดงจวง ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรทิพพา พิณญาพงษ์ กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทร์เพ็ญ ชุมแสง รองศาสตราจารย์ ดร.กันต์ อินทวงศ์ ที่กรุณาสละเวลาในการให้คำปรึกษา ชี้แนะในการทำวิทยานิพนธ์ ให้ข้อคิด ตลอดจนช่วยแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ด้วยความเอาใจใส่ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ทางวิชาการและสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.สหัสถยา ทองสาร ที่กรุณาสละเวลาให้ข้อมูล คำปรึกษา ด้านระบบบำบัดมลพิษทางอากาศในเตาแก๊สซีพีเคชั่น และด้านพลังงานเชื้อเพลิงชีวมวล

ขอขอบคุณ นางวันทนา ผ่านคำ ประธานวิสาหกิจชุมชนกลุ่มส่งเสริมอาชีพบ้านหาดไก่อ้อย ที่ให้ข้อมูลบริบทการผลิตเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ในเขตอำเภอท่าปลา จังหวัดอุตรดิตถ์ และให้ความอนุเคราะห์เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์สำหรับการวิจัย

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฏิพัทธ์ ถนอมพงษ์ชาติ ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือเก็บตัวอย่างก๊าซเชื้อเพลิง และให้คำปรึกษาด้านพลังงานเชื้อเพลิงชีวมวล

ขอขอบคุณ คณะบดีบัณฑิตวิทยาลัย และเจ้าหน้าที่บัณฑิตวิทยาลัยทุกท่าน ที่ให้การดูแลช่วยเหลือการจัดทำวิทยานิพนธ์ระบบอิเล็กทรอนิกส์ จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณ นักวิชาการศึกษา หลักสูตรการจัดการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ที่ให้การช่วยเหลือในด้านเอกสารการเรียน และการจัดทำวิทยานิพนธ์ระบบอิเล็กทรอนิกส์ด้วยดีเสมอมา

ตลอดเวลาการทำวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้าได้รับกำลังใจจากคุณพ่อคุณแม่ ภรรยา น้องปิ่นโต น้องอิมเอม และญาติ พี่น้องครอบครัวคล้ายชม พี่ ๆ นักศึกษาปริญญาเอก สาขาการจัดการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม รุ่นที่ 1 และกัลยาณมิตรทุกท่าน ด้วยดีเสมอมา เป็นพลังช่วยให้การจัดทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ประสบความสำเร็จ และถือเป็นความภาคภูมิใจร่วมกัน

พิทักษ์ คล้ายชม

สารบัญ

| บทที่ | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ก |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | ง |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ช |
| สารบัญ..... | ซ |
| สารบัญตาราง..... | ญ |
| สารบัญภาพ..... | ฎ |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... | 1 |
| คำถามการวิจัย..... | 5 |
| วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... | 5 |
| ขอบเขตของการวิจัย..... | 6 |
| นิยามศัพท์เฉพาะ..... | 7 |
| ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย..... | 8 |
| กรอบแนวคิดในการวิจัย..... | 8 |
| บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 9 |
| องค์ประกอบของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์..... | 9 |
| ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมจากการจัดการกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์..... | 16 |
| เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน..... | 21 |
| การออกแบบระบบกำจัดมลพิษทางอากาศในเตาเผาด้วยเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน..... | 38 |
| การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ และเศรษฐศาสตร์สิ่งแวดล้อม..... | 45 |
| เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 54 |

| | |
|---|-----|
| บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย | 58 |
| วิธีดำเนินการวิจัย | 58 |
| ขั้นตอนที่ 1 การศึกษาชนิด ปริมาณ องค์ประกอบทางด้านเคมีของกากเปลือกเมล็ดมะม่วง หิมพานต์ และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการเผากากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ด้วยวิธีเผาตรง | 58 |
| ขั้นตอนที่ 2 พัฒนา และศึกษาประสิทธิภาพระบบแก๊สซิฟิเคชัน ที่สามารถให้พลังงานความ ร้อนและเหมาะสมต่อการใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง | 62 |
| ขั้นตอนที่ 3 ศึกษาต้นทุนการผลิต เศรษฐศาสตร์ และมลภาวะทางอากาศที่ระบายออกจาก ปล่องเตาของระบบแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง . | 70 |
| บทที่ 4 ผลการวิจัย | 75 |
| ผลการวิจัย | 75 |
| ตอนที่ 1 ผลการศึกษาชนิด ปริมาณ องค์ประกอบทางด้านเคมีของกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิม พานต์ และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการเผากากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ด้วย วิธีเผาตรง | 75 |
| ตอนที่ 2 ผลการออกแบบและพัฒนาระบบแก๊สซิฟิเคชัน ที่สามารถให้พลังงาน ความร้อน และเหมาะสมต่อการใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ เป็นเชื้อเพลิง | 84 |
| ตอนที่ 3 ผลการศึกษาต้นทุนการผลิต เศรษฐศาสตร์ และมลภาวะทางอากาศที่ระบายออก จากปล่องเตาของระบบแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง | 92 |
| บทที่ 5 สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ | 105 |
| สรุปผลการวิจัย | 105 |
| อภิปรายผลการวิจัย | 108 |
| ข้อเสนอแนะ | 111 |
| บรรณานุกรม | 114 |
| ภาคผนวก | 119 |

| | | |
|--------------------------|--|-----|
| ภาคผนวก ก | ใบผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ และกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ | 120 |
| ภาคผนวก ข | ใบผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซของเชื้อเพลิงเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ และกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ | 123 |
| ภาคผนวก ค | ใบรายงานผลการตรวจวัดปริมาณสารเจือปนในอากาศที่ระบายออก จากปล่องระบายเตาแก๊สซีพีเออร์ และเตาดินเผา | 126 |
| ประวัติย่อผู้วิจัย | | 131 |



สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| ตารางที่ 1 องค์ประกอบของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (General Chemical Composition) . | 11 |
| ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางเคมีของ CNSL (Cashew Nut Shell Liquid) ของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 3 สายพันธุ์ | 13 |
| ตารางที่ 3 ส่วนประกอบของก๊าซเชื้อเพลิง | 24 |
| ตารางที่ 4 ข้อจำกัดและคุณภาพของก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้จากเตาแก๊สซีไฟเออร์แบบฟิกซ์เบด | 29 |
| ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบระบบแก๊สซีไฟเคชั่นแต่ละประเภท | 32 |
| ตารางที่ 6 ข้อดีและข้อเสียของเครื่องดักฝุ่นแบบเปียก | 42 |
| ตารางที่ 7 แสดงต้นทุนสิ่งแวดล้อม | 53 |
| ตารางที่ 8 แสดงพารามิเตอร์ วิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิง และสัดส่วนของธาตุ เชื้อเพลิงเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์และกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ | 60 |
| ตารางที่ 9 ตัวชี้วัดทางเคมี และวิธีการวิเคราะห์มลภาวะทางอากาศที่ระบายออกจากปล่องเตาจากกระบวนการเผาตรง..... | 61 |
| ตารางที่ 10 ตัวแปรต่าง ๆ ในการออกแบบเตาแก๊สซีไฟเออร์แบบไหลลงชนิด V-hearth..... | 63 |
| ตารางที่ 11 ขนาดต่าง ๆ ของเตาแก๊สซีไฟเออร์แบบไหลลงชนิด V-hearth | 64 |
| ตารางที่ 12 สัดส่วนของไซโคลนแบบ Lapple..... | 66 |
| ตารางที่ 13 ตัวชี้วัดทางเคมี และวิธีการวิเคราะห์มลภาวะทางอากาศที่ระบายออกจากปล่องเตา... | 73 |
| ตารางที่ 14 แสดงต้นทุนสิ่งแวดล้อมที่เป็นค่าใช้จ่ายในการกำจัดมลพิษทางอากาศในประเทศไทย. | 74 |
| ตารางที่ 15 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิงเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ และกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์..... | 81 |
| ตารางที่ 16 ปริมาณสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากปล่องที่เกิดจากการเผา กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ด้วยวิธีเผาตรง | 83 |
| ตารางที่ 17 ขนาดต่าง ๆ ของเตาแก๊สซีไฟเออร์ | 86 |

| | |
|---|-----|
| ตารางที่ 18 องค์ประกอบของโปรตีวเซอร์แก๊สที่เกิดขึ้นจากเชื้อเพลิงกากเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์..... | 91 |
| ตารางที่ 19 ประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบแก๊สซิฟิเคชันและคุณสมบัติต่าง ๆ..... | 92 |
| ตารางที่ 20 ข้อมูลต้นทุนแต่ละประเภท..... | 93 |
| ตารางที่ 21 การคำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) ของระบบแก๊สซิฟิเคชัน เมื่อเทียบการใช้ฟืน | 97 |
| ตารางที่ 22 ปริมาณสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากปล่องของระบบแก๊สซิฟิเคชันที่พัฒนาขึ้น โดยใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง | 101 |
| ตารางที่ 23 ปริมาณมลพิษทางอากาศที่ปล่อยออกจากการเผาตรงและระบบแก๊สซิฟิเคชัน | 102 |
| ตารางที่ 24 แสดงต้นทุนทางด้านสิ่งแวดล้อมของมลพิษทางอากาศ จากการเผากากเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์ด้วยเตาเผาตรง | 103 |
| ตารางที่ 25 แสดงต้นทุนทางด้านสิ่งแวดล้อมของมลพิษทางอากาศ จากการใช้กากเปลือกเมล็ด มะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิงในระบบแก๊สซิฟิเคชัน | 103 |
| ตารางที่ 26 ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของระบบแก๊สซิฟิเคชัน เปรียบเทียบกับการใช้ฟืน | 107 |

สารบัญภาพ

| ภาพที่ | หน้า |
|--|------|
| ภาพที่ 1 แสดงกรอบแนวคิดในการวิจัย..... | 8 |
| ภาพที่ 2 ส่วนประกอบของผลมะม่วงหิมพานต์ | 10 |
| ภาพที่ 3 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟเคชัน | 22 |
| ภาพที่ 4 กระบวนการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟเคชันภายในเตาปฏิกรณ์..... | 23 |
| ภาพที่ 5 (ก) เตาแก๊สซิฟเออร์แบบไหลขึ้น (ข) เตาแก๊สซิฟเออร์แบบไหลลง..... | 28 |
| ภาพที่ 6 แสดงแก๊สซิฟเออร์แบบ (ก) Bubbling Fluidized Bed (ข) Cicalating Fluidized Bed | 31 |
| ภาพที่ 7 แสดงระบบแก๊สซิฟเออร์แบบ Entrained Flow | 32 |
| ภาพที่ 8 ประสิทธิภาพการแยกของไฮโคลนประเภทต่าง ๆ | 40 |
| ภาพที่ 9 ตัวอย่างระบบทำความสะอาดก๊าซแบบ Wet Scrubber | 41 |
| ภาพที่ 10 การสำรวจสวนมะม่วงหิมพานต์ในพื้นที่อำเภอท่าปลา จังหวัดอุตรดิตถ์ | 59 |
| ภาพที่ 11 (ก) เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (ข) กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์..... | 60 |
| ภาพที่ 12 การเผากากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ในเตาดินเผา..... | 61 |
| ภาพที่ 13 แก๊สซิฟเออร์แบบไหลลงชนิด V-hearth และตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบ..... | 62 |
| ภาพที่ 14 สัดส่วนของไฮโคลนมาตรฐาน..... | 65 |
| ภาพที่ 15 สคริปเตอร์แบบอ็เจ็คเตอร์เวนจัวร์..... | 67 |
| ภาพที่ 16 การสัมภาษณ์ประธานกลุ่มส่งเสริมอาชีพบ้านหาดไก่อ้อย อำเภอท่าปลา จังหวัดอุตรดิตถ์ | 76 |
| ภาพที่ 17 กองเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เหลือทิ้งจากการกระบวนการแปรรูป..... | 76 |
| ภาพที่ 18 การสกัดน้ำมัน CNSL จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ด้วยเครื่องสกัดแบบเกลียวอัด.. | 77 |
| ภาพที่ 19 การกองและการเผากากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ในพื้นที่โล่งแจ้ง..... | 77 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| ภาพที่ 20 | ภาพการต้มและการอบเมล็ดมะม่วงหิมพานต์โดยใช้ฟืนและ LPG เป็นเชื้อเพลิง..... | 78 |
| ภาพที่ 21 | การทดลองใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิงในเตาแก๊สซีฟเฮอร์ทั่วไป . | 79 |
| ภาพที่ 22 | การเก็บตัวอย่างเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์และกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ วิเคราะห์หาคุณสมบัติทางเคมีในห้องปฏิบัติการ..... | 79 |
| ภาพที่ 23 | การตรวจวัดมลภาวะทางอากาศจากการเผากากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ด้วยวิธีการเผาตรง..... | 82 |
| ภาพที่ 24 | ขนาดที่สำคัญของเตาแก๊สซีฟเฮอร์แบบไหลลงชนิด V-hearth..... | 86 |
| ภาพที่ 25 | รูปแบบไซโคลนแบบ Lapple ที่พัฒนาขึ้น | 87 |
| ภาพที่ 26 | เครื่องดักฝุ่นแบบเปียกชนิดอีเจ็คเตอร์เวนจูร์ที่พัฒนาขึ้น | 88 |
| ภาพที่ 27 | รูปแบบภาพรวมระบบแก๊สซีฟเฮอร์ ที่เหมาะสมต่อการใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วง..... | 89 |
| ภาพที่ 28 | การสร้างและการติดตั้งระบบแก๊สซีฟเฮอร์..... | 90 |
| ภาพที่ 29 | การประเมินมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนกลุ่มส่งเสริมอาชีพบ้านหาดไก่อ้อย อำเภอบ้านลาด จังหวัดอุดรธานี..... | 99 |
| ภาพที่ 30 | การตรวจวัดมลภาวะทางอากาศจากการเผากากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ด้วยระบบแก๊สซีฟเฮอร์ที่พัฒนาขึ้น | 100 |

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

มะม่วงหิมพานต์ ถือเป็นพืชอุตสาหกรรมที่สำคัญของประเทศไทย แหล่งเพาะปลูกมะม่วงหิมพานต์กระจายอยู่ทั่วทุกภูมิภาคของประเทศไทย เนื่องจากเป็นพืชที่ทนแล้ง ปลูกง่าย เจริญเติบโตเร็ว ดูแลง่าย ขึ้นได้ในดินแทบทุกชนิดที่ระบายน้ำดี ในปี 2561 ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกมะม่วงหิมพานต์ 91,904 ไร่ ผลผลิตที่เก็บเกี่ยวได้ 21,058 ตัน ราคาที่เกษตรกรขายได้เฉลี่ย 47.50 บาทต่อกิโลกรัม คิดเป็นมูลค่า 1,000 ล้านบาทต่อปี (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2562) เมื่อนำเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ผ่านกระบวนการแปรรูป จะทำให้เกิดเศษวัสดุที่เหลือทิ้งจากการแปรรูปเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ คือ เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ โดยมีสัดส่วนการเกิดเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ต่อปริมาณผลผลิตเท่ากับ 0.74 (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2556) ปริมาณเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ของประเทศไทยจึงมีประมาณ 15,583 ตันต่อปี จังหวัดอุดรดิตถ์ ถือเป็นจังหวัดที่มีพื้นที่ปลูกมะม่วงหิมพานต์มากที่สุดในประเทศไทย มีพื้นที่ปลูก 34,831 ไร่ ได้ผลผลิต 7,267 ตันต่อปี (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2562) ซึ่งถ้ากะเทาะเปลือกแล้วจะได้มะม่วงหิมพานต์กะเทาะเปลือกประมาณ 1,890 ตันต่อปี (มะม่วงหิมพานต์ทั้งเปลือก 5 กิโลกรัมเมื่อกะเทาะแล้วจะได้มะม่วงหิมพานต์กะเทาะเปลือก 1.3 กิโลกรัม) และมีปริมาณเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เหลือทิ้งประมาณ 5,378 ตันต่อปี สำหรับการปลูกมะม่วงหิมพานต์ที่อำเภอท่าปลา จังหวัดอุดรดิตถ์ ได้มีการส่งเสริมการปลูกมะม่วงหิมพานต์มาตั้งแต่ปี 2514 โดยมีการรวมกลุ่มในการผลิตและแปรรูปมะม่วงหิมพานต์ขึ้นจากข้อมูลปี 2559 พบว่าอำเภอท่าปลามีพื้นที่ปลูกมะม่วงหิมพานต์ 27,811 ไร่ ได้ผลผลิตประมาณ 5,059.80 ตันต่อปี เฉลี่ย 300 กิโลกรัมต่อไร่ (สำนักงานเกษตรอำเภอท่าปลา จังหวัดอุดรดิตถ์, 2560) ซึ่งถ้ากะเทาะเมล็ดแล้วจะได้ประมาณ 1,300 ตัน และทำให้มีปริมาณเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่เหลือทิ้ง ประมาณ 3,744 ตันต่อปี หากไม่มีการจัดการเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ถูกต้องจะก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมกับชุมชนพื้นที่อำเภอท่าปลาในระยะยาว

การจัดการเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ในปัจจุบัน เกษตรกรบางส่วนได้รวบรวมเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์จำหน่ายให้พ่อค้าเพื่อส่งต่อไปยังโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งเกษตรกรต้องรวบรวมเปลือกให้มีปริมาณ 15 ตันขึ้นไป พ่อค้าจึงจะมารับซื้อในราคากิโลกรัมละ 1 บาท โดยโรงงานจะสกัดน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (Cashew Nut Shell Liquid : CNSL) ไปใช้ประโยชน์ ส่วนกากที่เหลือจะถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงให้พลังงานความร้อนด้วยวิธีการเผาตรงซึ่งก่อให้เกิดพิษทางอากาศ

แต่เนื่องจากปัจจุบันเกิดปัญหาค่าขนส่งราคาสูง กลุ่มพ่อค้าจึงลดจำนวนครั้งในการมารับซื้อลง และกดราคาเหลือเพียงกิโลกรัมละ 50 สตางค์ จึงทำให้เกษตรกรกลุ่มแปรรูปมะม่วงหิมพานต์ส่วนใหญ่ในอำเภอท่าปลาไม่นิยมรวบรวมเปลือกเพื่อจำหน่ายมากนัก โดยการนำเปลือกไปกำจัดหรือทำลายอย่างไม่ถูกวิธี นำไปทิ้งตามบ่อขยะสาธารณะหรือพื้นที่ว่างเปล่า ก่อให้เกิดปัญหามลภาวะต่อชุมชน เช่น กลิ่นเหม็น เกิดการเจ็บปสาธาณพิชจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ลงสู่แหล่งน้ำของชุมชน เกิดปัญหาขยะที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของคนในชุมชน อีกทั้งหากสัมผัสโดยตรงจะทำให้เกิดเป็นแผลพุพอง และเน่าเปื่อยได้ นอกจากนี้การกำจัดเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์โดยการเผาทำลาย จะทำให้เกิดมลพิษทางอากาศ มีกลิ่นฉุนจัด เป็นอันตรายต่อเยื่อหุ้มจมูกและนัยน์ตา ซึ่งทางองค์การปกครองส่วนท้องถิ่นได้มีมาตรการควบคุมดูแลอย่างเข้มงวด

เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ มีองค์ประกอบของความชื้นร้อยละ 13.17 น้ำมัน CNSL ร้อยละ 35.10 โปรตีนร้อยละ 4.06 เถ้าร้อยละ 6.74 เซลลูโลสและลิกนินร้อยละ 17.35 และน้ำตาล ร้อยละ 20.85 (Ohler, 1979, p.33) ซึ่งองค์ประกอบส่วนใหญ่ของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ คือน้ำมัน CNSL มีลักษณะเป็นของเหลวสีน้ำตาลคล้ำ เหนียวข้น มีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำแต่ละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์ (Organic Solvent) ทุกชนิดเป็นสารพิษ ทำให้ผิวหนังพุพองและเปื่อยได้ เมื่อน้ำมันดังกล่าวได้รับความร้อนสูง บางส่วนจะระเหยเป็นไอ มีกลิ่นฉุน กัดเยื่อจมูกและนัยน์ตา น้ำมัน CNSL ประกอบด้วยสารเคมีต่าง ๆ ได้แก่ กรดอนุคาร์ดิก 82 เปอร์เซ็นต์ คาร์ดอล 13.8 เปอร์เซ็นต์ คาร์ดานอล 1.6 เปอร์เซ็นต์ และเมทิลคาร์ดอล 2.6 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก (ประเทืองศรี สิ้นชัยศรี, 2535, น.14-15) สามารถสกัดแยกน้ำมันออกจากเปลือกได้หลายวิธีได้แก่ การหีบหรือบีบอัดด้วยเครื่องอัดเช่นการบีบอัดโดยเครื่องบีบอัดสกรู (Screw Press) หรือการบีบอัดด้วยเครื่องบีบอัดไฮดรอลิก (Hydraulic Press) การสกัดด้วยไอน้ำร้อน (Steam Extraction) การสกัดด้วยตัวทำละลายเคมี (Solvent Extraction) น้ำมัน CNSL สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในทางการแพทย์ พลังงานทดแทน และอุตสาหกรรม เช่น ยารักษาโรคผิวหนัง สารกำจัดศัตรูพืช ยาฆ่าแมลง ผ้าเบรค หน้าสัมผัสคลัตช์ สารเคลือบผิว สี กาวสำหรับผลิตไม้อัด และน้ำมันไบโอดีเซล เป็นต้น

ในปี 2559 ผู้วิจัยได้มีการถ่ายทอดเทคโนโลยีการสกัดน้ำมัน CNSL เพื่อเพิ่มมูลค่าเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่เหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูปในพื้นที่อำเภอท่าปลา จังหวัดอุตรดิตถ์ ด้วยเครื่องสกัดน้ำมันจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ออกแบบโดยใช้หลักการบีบอัดแบบเกลียวอัด และใช้กระบอกอัดแบบเว้นร่อง ระยะเวลา 3 มิลลิเมตร มีความสามารถในการบีบอัดน้ำมัน CNSL ได้เฉลี่ย 12 กิโลกรัมต่อชั่วโมง มีเปอร์เซ็นต์น้ำมันที่บีบอัดได้จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เฉลี่ย 22.56 เปอร์เซ็นต์ โดยจำหน่ายให้กับพ่อค้าที่รับซื้อน้ำมันพืชเก่าในราคากิโลกรัมละ 12 บาท หากนำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่เหลือทิ้งทั้งหมดในอำเภอท่าปลา จังหวัดอุตรดิตถ์ จำนวน 3,744 ตันต่อปี มาบีบน้ำมัน CNSL จะได้ 845 ตันต่อปี คิดเป็นมูลค่ากว่า 10 ล้านบาท เมื่อบีบน้ำมัน CNSL

ออกไปแล้วจะมีกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เหลือทิ้งอีกประมาณ 2,800 ตันต่อปี หากไม่มีวิธีจัดการที่ถูกต้องจะก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมกับชุมชนพื้นที่อำเภอท่าปลาในระยะยาวได้เช่นกัน จาก การลงพื้นที่ตำบลหาดลำ อำเภوتاปลา จังหวัดอุตรดิตถ์ และสัมภาษณ์นางวันทา ผ่านคำ (การ สือสารส่วนบุคคล, 22 มิถุนายน 2560) ประธานกลุ่มส่งเสริมอาชีพบ้านหาดไก่อ้อย ดำเนินการแปร รูปเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ พบว่ามีปริมาณการผลิตเมล็ดมะม่วงหิมพานต์กะเทาะเปลือก 80 ตันต่อปี มี ปริมาณเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่เหลือทิ้ง ประมาณ 227 ตันต่อปี หากนำเปลือกทั้งหมดมาบีบ น้ำมัน CNSL จะได้ประมาณ 50 ตันต่อปี และเกิดกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เหลือทิ้งประมาณ 170 ตันต่อปี ซึ่งพ่อค้าจะไม่รับซื้อกากเปลือกเนื่องจากถูกบีบน้ำมัน CNSL ออกไปแล้ว หากมีการ กำจัดโดยการกองกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ทิ้งไว้ให้ย่อยสลายไปตามธรรมชาติ จะส่งผล กระทบต่อดินและน้ำเนื่องจากยังมีน้ำมัน CNSL เหลืออยู่ในกากเปลือก และหากทำลายโดยวิธีการเผา ในพื้นที่โล่งแจ้ง จะก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศ มีกลิ่นฉุนจัด เป็นอันตรายต่อเยื่อหุ้มจมูกและนัยน์ตา เพิ่มเติมปัญหาหมอกควันที่ส่งผลกระทบต่อความเป็นอยู่และสุขภาพ โดยเฉพาะเด็กเล็ก ผู้สูงอายุ หญิงมีครรภ์ ผู้ป่วยเรื้อรัง โรคปอด หอบหืด ภูมิแพ้ เป็นต้น

การนำกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่เหลือทิ้งจากการแปรรูปไปใช้ประโยชน์จำเป็นต้องคำนึงถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากปัจจุบันปัญหาสิ่งแวดล้อมทวีความรุนแรงขึ้น ทั้งใน ระดับประเทศและระดับโลก โดยเฉพาะปัญหาภาวะโลกร้อน ที่เกิดจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกใน ภาคการเกษตร การจัดการกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ด้วยวิธีการทิ้งตามบ่อขยะสาธารณะหรือ บริเวณพื้นที่ว่างเปล่า และการจัดการโดยการเผา ก่อให้เกิดปัญหามลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งทางดิน น้ำ อากาศ และต่อสุขภาพของประชาชนในพื้นที่ใกล้เคียง ความเป็นพิษที่เกิดจากความเป็นกรดและสาร มลพิษจากสารประกอบฟีนอลในน้ำมัน CNSL ที่เหลือในกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ส่งผล กระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะสิ่งแวดล้อมทางน้ำ ในปี ค.ศ. 1970 สำนักงานป้องกันสิ่งแวดล้อม ของสหรัฐอเมริกา (United States Environmental Protection Agency : U.S.EPA) ได้เสนอชื่อ สารประกอบฟีนอลที่ก่อให้เกิดมลภาวะ 11 ชนิด ีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำเกิดการสะสมใน สิ่งมีชีวิตในห่วงโซ่อาหาร ทำให้น้ำมีรสและกลิ่นเปลี่ยนไป โดยทั่วไปสารประกอบฟีนอลจะไม่ทนทาน ในสภาพแวดล้อม เช่น อากาศ น้ำทะเล น้ำผิวดิน ดิน และในน้ำเสีย สารประกอบเหล่านี้จะเกิด ปฏิกิริยาเคมีกับแสงได้อย่างรวดเร็ว และเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพโดยใช้ออกซิเจนได้เป็นก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนการย่อยสลายโดยไม่ใช้ออกซิเจนจะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซ มีเทนเกิดขึ้น ซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจกที่ก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน

กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล ทดแทนการใช้ฟืนใน กระบวนการแปรรูปเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ได้ จากฐานข้อมูลศักยภาพชีวมวลในประเทศไทยประจำปี พ.ศ. 2556 ระบุว่าเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ มีค่าความร้อนเท่ากับ 5.49 MJ/Kg หาก

คำนวณจากปริมาณเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ในอำเภอท่าปลา 3,744 ตันต่อปี จะคิดเป็นพลังงานได้ 20.55 TJ หรือเท่ากับปริมาณน้ำมันดิบ 488 ตัน (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2556) ซึ่งปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมมีความสนใจในการใช้พลังงานจากชีวมวลกันมากขึ้น เพื่อลดต้นทุนด้านพลังงานได้แก่ ค่าไฟฟ้า ค่าน้ำมันหรือแก๊สหุงต้ม และค่าฟืน เป็นต้น โดยปกติเราสามารถใช้อยู่ชีวมวลในกระบวนการทางความร้อน-เคมี ได้ 3 วิธี คือ 1. การเผาไหม้ คือพลังงานความร้อนนำไปใช้ต้มน้ำในหม้อไอน้ำ 2. ไพโรไลซิส ได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำมันชีวภาพซึ่งสามารถใช้ได้เช่นเดียวกับน้ำมัน และ 3. แก๊สซิฟิเคชัน ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเชื้อเพลิงแก๊สนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงกังหันแก๊ส เครื่องยนต์แก๊ส (จตุพร แก้วอ่อน จอมพล แววศักดิ์ มาริณา มะหนิ และสุวิทย์ เพชรห้วยลึก, 2548, น.56-67) โดยเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความสนใจในการผลิตโปรดิวเซอร์แก๊ส ซึ่งกลุ่มส่งเสริมอาชีพบ้านหาดไเก้ต้อย อำเภอท่าปลา ได้เคยทดลองนำกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ไปใช้เป็นเชื้อเพลิงกับเตาแก๊สซิฟิเคชันที่ออกแบบมาเพื่อใช้กับชีวมวลทั่วไป ปรากฏว่าเตาแก๊สซิฟิเคชันสามารถผลิตโปรดิวเซอร์แก๊สได้ดี จุดติดไฟและมีค่าความร้อนสูง แต่ติดปัญหาที่เครื่องเป่าลมมีคราบน้ำมันติดเหนียวทำให้ยากต่อการทำความสะอาดและเสียหายได้ง่าย รวมถึงมีควันมากและกลิ่นเหม็นอีกด้วย

การผลิตโปรดิวเซอร์แก๊ส (Producer Gas) ผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเป็นการแปลงสภาพชีวมวลของแข็งโดยปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน (Partial Oxidation) ที่อุณหภูมิสูงด้วยอากาศออกซิเจน หรือไอน้ำ ในช่วง 800-1800 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดการแตกตัวมาเป็นก๊าซเชื้อเพลิง ที่มีค่าความร้อนค่อนข้างต่ำหรือปานกลางประมาณ 3-10 MJ/m³ ก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้ประกอบด้วย ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) ก๊าซไฮโดรเจน (H₂) และก๊าซมีเทน (CH₄) ก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้เรียกว่าโปรดิวเซอร์แก๊ส ซึ่งสภาวะที่ทำให้เกิดแก๊สดังกล่าวเป็นสภาวะการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ เป็นสภาวะที่มีการจำกัดปริมาณออกซิเจน เพราะหากมีออกซิเจนเพียงพอ จะกลายเป็นกระบวนการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ และมีการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำออกมา เตาปฏิกรณ์ของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเรียกว่า แก๊สซิฟิเคชัน (Gasifier) ซึ่งมีกระบวนการในตัวเตาปฏิกรณ์ แตกต่างกันขึ้นอยู่กับเทคนิคการทำงานในเตาปฏิกรณ์ จะเกิดกระบวนการทางเคมีและกายภาพที่แตกต่างกันออกไป ได้แก่ การทำแห้ง (Drying) ไพโรไลซิส (Pyrolysis) การเผาไหม้ (Combustion/Oxidation) และการรีดักชัน (Reduction) (นคร ทิพยาวงศ์, 2553, น.77-78) แก๊สซิฟิเคชัน สามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ คือ 1. แก๊สซิฟิเคชันชนิดเบดอยู่กับที่ (Fixed Bed Gasifier) 2. แก๊สซิฟิเคชันชนิดฟลูอิดไธซ์เบด (Fluidize Bed Gasifier) สำหรับเตาแก๊สซิฟิเคชันที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้กับเชื้อเพลิงชีวมวล คือเตาแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลลง (Downdraft Gasifier) เป็นเตาที่ออกแบบมาเพื่อขจัดน้ำมันดินที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงแข็งโดยเฉพาะ อากาศจะถูกดูดผ่านจากด้านบนลงสู่ด้านล่างของเตาผ่านกลุ่มของหัวฉีดแก๊สที่ได้จากบริเวณนี้จะเกิดรีดักชันในขณะที่ไหลลงสู่ด้านล่างและผ่านชั้นของคาร์บอนร้อนซึ่งอยู่

เหนือตะแกรง ขณะเดียวกันในชั้นของชีวมวลที่อยู่ทางด้านบนของบริเวณการเผาไหม้จะมีปริมาณออกซิเจนน้อยมาก ทำให้เกิดการสลายตัวทางความร้อน และไอของน้ำมันดินที่เกิดขึ้นจะไหลผ่านชั้นของคาร์บอนที่ร้อน ทำให้น้ำมันดินแตกตัวเป็นก๊าซ ซึ่งการแตกตัวนี้จะเกิดที่อุณหภูมิในช่วงระหว่าง 800-1,000 องศาเซลเซียส ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 1,000 องศาเซลเซียส ปฏิกริยาคายความร้อนจะทำให้แก๊สที่ผ่านบริเวณการเผาไหม้จะมีสารประกอบของน้ำมันดิน และน้ำมันที่มีปริมาตรลดลงเหลือน้อยกว่า 10 % และแก๊สที่ได้จะมีความสะอาดมากกว่า (นคร ทิพย์าวงศ์, 2553, น.84-86)

จากที่มาและความสำคัญของปัญหาดังกล่าวข้างต้น รวมถึงความต้องการของเกษตรกร จึงมีแนวคิดในการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันเพื่อการจัดการกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยทำการศึกษาชนิด ปริมาณ องค์ประกอบทางด้านเคมีและแนวทางการจัดการกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ พัฒนาและศึกษาประสิทธิภาพระบบแก๊สซิฟิเคชันในการให้ความร้อนสมบัติทางกายภาพและเคมีของมลภาวะทางอากาศ รวมถึงการวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์ เพื่อแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากการจัดการกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ อีกทั้งเป็นการเสริมศักยภาพในการเพิ่มมูลค่าและใช้ประโยชน์จากกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่เหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงแทนฟืนและแก๊สหุงต้ม เพื่อลดต้นทุนด้านพลังงานในกระบวนการแปรรูปเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ได้อย่างยั่งยืน

คำถามการวิจัย

ประสิทธิภาพของระบบแก๊สซิฟิเคชันที่พัฒนาขึ้น โดยใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง สามารถให้พลังงานความร้อนและกำจัดมลพิษทางอากาศที่เกิดจากกระบวนการเผา ได้อย่างไร

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาชนิด ปริมาณ องค์ประกอบทางด้านเคมีของกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการเผากากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ด้วยวิธีเผาตรง
2. พัฒนา และศึกษาประสิทธิภาพระบบแก๊สซิฟิเคชัน ที่สามารถให้พลังงานความร้อนและเหมาะสมต่อการใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง
3. ศึกษาด้านเศรษฐศาสตร์ และวิเคราะห์มลภาวะทางอากาศที่ระบายออกจากปล่องเตาของระบบแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง

ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันเพื่อการจัดการกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ผู้วิจัยได้กำหนดขอบเขตของการดำเนินโครงการไว้ดังนี้

ขอบเขตด้านเนื้อหา

1. ศึกษาชนิด และปริมาณกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง เก็บรวบรวมข้อมูลพื้นฐานสายพันธุ์มะม่วงหิมพานต์ที่ปลูกในพื้นที่อำเภอท่าปลา จังหวัดอุตรดิตถ์ หาสัดส่วนของกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่เหลือทิ้งจากกระบวนการบีบน้ำมันจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ และสภาพปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการจัดการกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่เหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูป ของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนผลิตและแปรรูปผลิตภัณฑ์เมล็ดมะม่วงหิมพานต์ อำเภอท่าปลา จังหวัดอุตรดิตถ์ โดยการสำรวจ สอบถามและสังเกตจากแหล่งข้อมูล ประกอบด้วย แกนนำกลุ่มเครือข่ายวิสาหกิจชุมชนผลิตและแปรรูปผลิตภัณฑ์เมล็ดมะม่วงหิมพานต์ อำเภอท่าปลา จังหวัดอุตรดิตถ์ หน่วยงานและองค์กรที่เกี่ยวข้อง

2. ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของเชื้อเพลิงเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์และกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ผ่านการบีบน้ำมัน CNSL ออกแล้ว เก็บตัวอย่าง ส่งวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการดำเนินการวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิง (Proximate Analysis) ประกอบด้วย ค่าความชื้น (Moisture Content) ปริมาณเถ้า (Ash) ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) ปริมาณสารระเหย (Volatile Matter) และวิเคราะห์สัดส่วนของธาตุ (Ultimate Analysis) ประกอบด้วย ปริมาณคาร์บอน (Carbon) ปริมาณไฮโดรเจน (Hydrogen) ปริมาณออกซิเจน (Oxygen) ปริมาณไนโตรเจน (Nitrogen) และค่าความร้อน (Heating Value)

3. ทดสอบการเผาเชื้อเพลิงกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ด้วยตัวชี้วัดทางเคมีของมลภาวะทางอากาศที่ระบายออกจากปล่องเตาจากกระบวนการเผาตรง ทดสอบด้วยการเผากากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ในเตาดินเผา ทำการต่อท่อระบายควันที่เกิดจากการเผา เก็บตัวอย่างหาปริมาณสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากปล่องในห้องปฏิบัติการ ตัวชี้วัดทางเคมีของมลภาวะทางอากาศที่ระบายออกจากปล่องเตาที่วิเคราะห์ ได้แก่ ปริมาณฝุ่นละออง (Total Suspended Particulate) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur Dioxide) ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน (Oxide of Nitrogen) และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon Monoxide)

4. ดำเนินการออกแบบและพัฒนาระบบแก๊สซิฟิเคชัน ที่สามารถให้พลังงานความร้อน และเหมาะสมต่อการใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ เป็นเชื้อเพลิง การออกแบบเตาแก๊สซิฟิเคชัน โดยการศึกษาเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ข้อมูลผลการศึกษาคู่สมมติของกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ และผลการทดสอบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของเตาเผากากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิม

พานต์ด้วยวิธีเผาตรง และดำเนินการพัฒนาระบบกำจัดมลพิษทางอากาศ สารปนเปื้อนในโปรติวเซอร์แก๊ส ของเตาแก๊สซีไฟเออร์ที่ใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง ได้แก่ ฝุ่นหยาบ ฝุ่นละเอียด และน้ำมันดิน โดยใช้ไซโคลนดักฝุ่น (Cyclone) และเครื่องดักฝุ่นแบบเปียก (Wet Scrubber)

5. ประเมินประสิทธิภาพของระบบแก๊สซีไฟเคชั่น ด้วยการหาค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบแก๊สซีไฟเคชั่น หรือค่าพลังงานความร้อนจากโปรติวเซอร์แก๊สที่ระบบสามารถผลิตได้ เทียบกับค่าพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงที่ใส่เข้าไปในระบบ นำตัวอย่างโปรติวเซอร์แก๊สที่ออกจากระบบส่งวิเคราะห์ห้องค์ประกอบแก๊สในห้องปฏิบัติการ และดำเนินการวิเคราะห์มลภาวะทางอากาศที่ระบายออกจากปล่องเตาจากการเผากากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ด้วยระบบแก๊สซีไฟเคชั่นที่พัฒนาขึ้น โดยทำการเก็บตัวอย่างปริมาณสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากปล่อง ส่งวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ ปริมาณฝุ่นละออง (Total Suspended Particulate) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur Dioxide) ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน (Oxide of Nitrogen) และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon Monoxide)

6. ศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบแก๊สซีไฟเคชั่นเพื่อการจัดการกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ โดยเปรียบเทียบกับการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในการต้มเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

ขอบเขตด้านพื้นที่

ผู้วิจัยกำหนดพื้นที่อำเภอท่าปลา จังหวัดอุตรดิตถ์ เพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลชนิด ปริมาณกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง ข้อมูลพื้นฐานสายพันธุ์มะม่วงหิมพานต์ที่ปลูกในพื้นที่ และสภาพปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการจัดการกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่เหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูป พร้อมทั้งประเมินด้านเศรษฐศาสตร์สิ่งแวดล้อม ในการใช้เทคโนโลยีแก๊สซีไฟเคชั่นเพื่อการจัดการกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

ขอบเขตด้านเวลา

ระยะเวลาที่ทำการวิจัย 12 เดือน ระหว่าง มกราคม 2562 ถึง ธันวาคม 2562

นิยามศัพท์เฉพาะ

1. กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ หมายถึง กากที่เหลือทิ้งจากการบีบน้ำมัน CNSL ออก ด้วยเครื่องสกัดน้ำมันจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ในพื้นที่อำเภอท่าปลา จังหวัดอุตรดิตถ์
2. เตาแก๊สซีไฟเออร์ หมายถึง เตาที่มีประสิทธิภาพในการให้ความร้อนและสมบัติทางกายภาพและเคมีที่สามารถช่วยลดมลภาวะทางอากาศจากการเผากากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

3. กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน หมายถึง การเปลี่ยนเชื้อเพลิงชีวมวลซึ่งอยู่ในสถานะของแข็งให้เป็นเชื้อเพลิงแก๊สซึ่งเกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในที่จำกัดอากาศโดยความร้อนที่เกิดขึ้นจะเร่งปฏิกิริยาแบบต่อเนื่องกลายเป็นโปรดิวเซอร์แก๊สหรือเชื้อเพลิงแก๊ส

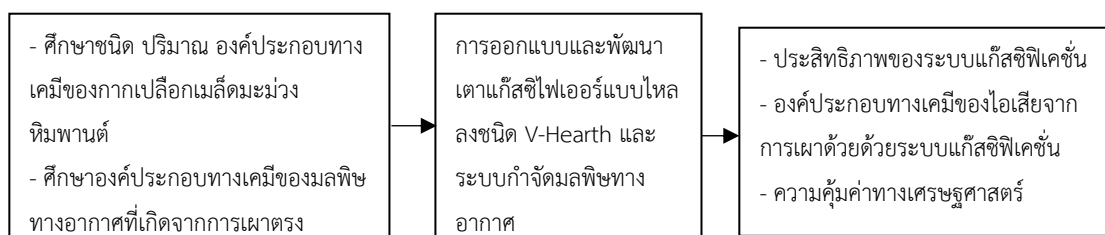
4. เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม หมายถึง การจัดการกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์โดยใช้เป็นเชื้อเพลิงในเตาแก๊สซิฟิเคชันที่มีประสิทธิภาพลดการเกิดมลภาวะทางอากาศต่อสิ่งแวดล้อม

5. เศรษฐศาสตร์สิ่งแวดล้อม หมายถึง การประเมินมูลค่ามลพิษของเตาแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง ด้วยการคำนวณจากต้นทุนความเสียหายจากมลพิษอากาศชนิดต่าง ๆ ที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ และปริมาณมลพิษที่เปลี่ยนแปลงเมื่อใช้เตาแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิงแทนการใช้ฟืน

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

1. เกษตรกรในพื้นที่อำเภอท่าปลา จังหวัดอุตรดิตถ์ มีความเข้าใจและตระหนักถึงผลกระทบของมลพิษที่เกิดจากกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์
2. ทราบถึงประสิทธิภาพของเตาแก๊สซิฟิเคชันในการให้ความร้อนและสมบัติทางเคมีของมลภาวะทางอากาศจากการเผากากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์
3. ได้แนวทางการจัดการกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์
4. เกิดการถ่ายทอดองค์ความรู้และเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันเพื่อการจัดการกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ให้กับกลุ่มวิสาหกิจชุมชนผู้ผลิตและแปรรูปผลิตภัณฑ์เมล็ดมะม่วงหิมพานต์
5. สามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาเทคโนโลยีด้านการใช้ประโยชน์จากเศษวัสดุเหลือใช้จากการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรให้กับหน่วยงานภาครัฐเอกชนนักวิจัยและนักประดิษฐ์คิดค้นเพื่อการต่อยอดและส่งเสริมการพึ่งพาตนเองด้านเทคโนโลยีของประเทศ

กรอบแนวคิดในการวิจัย



ภาพที่ 1 แสดงกรอบแนวคิดในการวิจัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยเรื่อง เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน เพื่อการจัดการกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ผู้วิจัยได้ทำการทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องแล้วนำมาสรุปรวมนำเสนอเนื้อหาตามลำดับหัวข้อดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. องค์ประกอบของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์
2. ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมจากกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์
3. เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน
4. การออกแบบระบบกำจัดมลพิษทางอากาศในเตาเผาเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน
5. การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ และเศรษฐศาสตร์สิ่งแวดล้อม
6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

องค์ประกอบของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

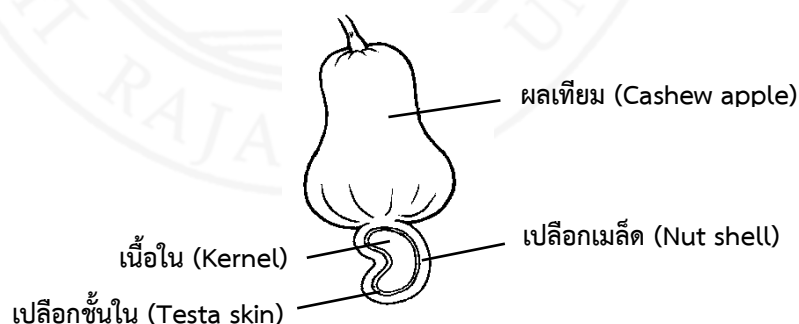
มะม่วงหิมพานต์ เป็นไม้ผลยืนต้นที่มีถิ่นกำเนิดอยู่ทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือของบราซิล จากนั้นจึงได้แพร่กระจายไปแถบตอนบนของอเมริกาใต้ อเมริกากลาง และอเมริกาเหนือ ตามหมู่เกาะต่าง ๆ ในมหาสมุทรแปซิฟิก ตลอดจนถึงทวีปเอเชีย มีการปลูกแพร่หลายและเพิ่มขึ้นจนทำให้มะม่วงหิมพานต์กลายเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศอินเดีย และกลายเป็นผู้นำในการค้าเมล็ด และนำมันจากเปลือกมะม่วงหิมพานต์รายใหญ่ของโลก ต่อมาได้มีการนำมาปลูกกันทั่วไปในทวีปเอเชีย เริ่มจากประเทศศรีลังกา มาเลเซีย และทางภาคใต้ของประเทศไทย (ทิพาพร อยู่วิทยา, 2534, น.3)

มะม่วงหิมพานต์ (Cashew) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Anacardium Occidentale* L. มะม่วงหิมพานต์เป็นต้นไม้ยืนต้นไม่ผลัดใบ สามารถขึ้นได้ดีในดินทุกชนิด โดยเฉพาะในดินทรายที่ขาดคามอุดมสมบูรณ์เช่นในเขตเหมืองแร่เก่า ก็สามารถเจริญเติบโตได้ดี ความสูงของต้นไม้เฉลี่ยสูงประมาณ 15 เมตร มีลักษณะทรงพุ่ม เป็นพืชเขตร้อนที่ขึ้นในแถบเส้นศูนย์สูตร (มโน ลีมวรพันธุ์, 2543, น.4) เนื้อไม้เป็นไม้เนื้ออ่อน มีเปลือกหุ้ม และมียางสีเหลืองและเหนียว เนื้อไม้มีสีเทา หรือสี

น้ำตาลแดง ส่วนเปลือกมีสีน้ำตาลปนเทา และมีน้ำรสฝาด ใบมีลักษณะหนา คล้ายรูปไข่โดยใบแหลมปลายป้อม หรือปลายคล้ายลั่นทมยาวประมาณ 10-12 เซนติเมตร กว้างประมาณ 5-7.5 เซนติเมตร เส้นกลางใบและเส้นข้างชัดเจนสีใบสีเขียวทั้งใบ ดอกมะม่วงหิมพานต์เป็นช่อผลจริงของมะม่วงหิมพานต์ คือ ส่วนที่เรียกว่า เมล็ด (Nut) ติดอยู่ตรงปลายก้านดอกมีลักษณะคล้ายไตติดอยู่ตรงปลายก้านดอก เมื่อเจริญเติบโตในระยะแรกจะมีสีชมพู หรือม่วง แล้วเปลี่ยนเป็นสีเขียว มีลักษณะผิวค่อนข้างอ่อนเมื่อโตเต็มที่จะลดขนาดลงเปลือกจะแข็ง และเปลี่ยนเป็นสีเทาอมเขียว และสีน้ำตาลปนเทาเมล็ดประกอบด้วยส่วนของเปลือก เยื่อหุ้มเปลือก ประมาณ 72-74 เปอร์เซ็นต์ และเมล็ดในอีก 25 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนนี้อาจแตกต่างกันในแต่ละแหล่งที่ปลูก (อาหะหะ สิงห์แพ, 2545, น.4)

โครงสร้างของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

1. ผลของมะม่วงหิมพานต์ ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ผลแท้และผลเทียม โดยผลเทียมหรือผลสามัญจะมีลักษณะคล้ายผลแอปเปิ้ล หรือรูปไข่ (ดังภาพที่ 2) เจริญเติบโตมาจากฐานดอก เมื่อผลสุกจะมีสีเหลืองหรือสีส้มแดง ความยาวประมาณ 5-11 เซนติเมตร ส่วนผลแท้ของมะม่วงหิมพานต์เป็นผลเมล็ดเดี่ยว รูปไต งอกออกมาจากปลายของผลเทียม โดยผลแท้ของมะม่วงหิมพานต์จะมีเปลือกแข็ง ผลอ่อนจะมีสีเขียวและจะขยายการเจริญเติบโตจนใหญ่กว่าผลเทียมในระยะแรก เมื่อได้ขนาดจะหยุดการเจริญและเปลี่ยนสีเป็นสีเทา ในขณะที่เดียวกันดอกที่เป็นผลเทียมจะเริ่มขยายตัวพอโตขึ้นจนใหญ่กว่าเมล็ด เมล็ดจะมีขนาดยาวประมาณ 3 เซนติเมตร กว้าง 2.5 เซนติเมตร เมื่อผ่าเมล็ดออกจะมีความหนาของเมล็ดประมาณ 2-3 มิลลิเมตร เมล็ดด้านในจะมีสีขาวนวลประกบกัน 2 ซีก ในทางพฤกษศาสตร์ถือว่าเป็น“เมล็ด” (Seed) เมล็ดจะถูกหุ้มด้วยเปลือกสองชั้น คือ เปลือกเมล็ด และเปลือกชั้นใน โดยเมล็ดมะม่วงหิมพานต์จะประกอบด้วยส่วนเปลือกประมาณ 72-75 เปอร์เซ็นต์ และเมล็ดอีกประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ โดยอัตราส่วนของเปลือกและเมล็ดจะแตกต่างกันตามแหล่งเพาะปลูก



ภาพที่ 2 ส่วนประกอบของผลมะม่วงหิมพานต์

ที่มา : ดัดแปลงมาจาก Azam-Ali & Judge, 2004

2. เปลือกเมล็ด (Nut Shell) จะมีผิวด้านนอกและด้านในติดกับเมล็ด (ดังภาพที่ 2) ลักษณะเรียบ เป็นมัน มีลักษณะคล้ายรวงผึ้ง เรียกว่า “Mesocarp” ทำหน้าที่ห่อหุ้มสารจำพวกยาง ฟีนอลิก (Caustic Phenolic Resin) และน้ำมัน (Urushiol) ซึ่งจะมีพิษที่ระคายเคืองต่อผิวหนังอย่างรุนแรง เนื่องจากยางนี้เป็นน้ำมันกรดอย่างแรง เมื่อถูกความร้อนสูงจะระเหยได้ มีกลิ่นฉุน กัดเยื่อจมูกและนัยน์ตา น้ำมันที่สกัดได้จากเปลือก เรียกว่า น้ำมันเปลือกมะม่วงหิมพานต์ (Cashew Nut Shell Liquid : CNSL) ซึ่งประกอบด้วย กรดอานาคาร์ดิก 90 เปอร์เซ็นต์ และกรดคาร์ดอล 10 เปอร์เซ็นต์ เปลือกชั้นใน (Testa Skin) จะห่อหุ้มเมล็ดอีกชั้นหนึ่ง ส่วนเนื้อใน (Kernel) มีลักษณะโค้งงอคล้ายไต มี 2 ซีก สีขาวนวล เป็นแหล่งอาหารที่มีคุณค่า ซึ่งประกอบไปด้วย โปรตีน 20 เปอร์เซ็นต์ ไขมัน 47 เปอร์เซ็นต์ เกลือแร่ วิตามิน ไนโตรเจนที่ละลายน้ำมันได้ ได้แก่ วิตามินเอ วิตามินบี และมีกรดไลโนลินิก ซึ่งสามารถช่วยป้องกันโรคไขมันในตับและโรคหัวใจได้ (Das et al., 2003, pp.113-117)

องค์ประกอบของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

จากการศึกษาองค์ประกอบของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ของ Tychopoulos & Tyman (1990, pp.71-83) พบว่า เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ประกอบด้วย ความชื้น 8-10 เปอร์เซ็นต์, น้ำมัน CNSL (Cashew Nut Shell Liquid) 40-48 เปอร์เซ็นต์ โปรตีน 18-20 เปอร์เซ็นต์ คาร์โบไฮเดรต 38-40 เปอร์เซ็นต์ เส้นใย 1-1.5 เปอร์เซ็นต์ และ Ohler (1979, p.31) ศึกษาเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ พบ เถ้า (Ash) 6.74 เปอร์เซ็นต์ เซลลูโลส และลิกนิน 17.35 เปอร์เซ็นต์ น้ำตาล 20.85 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (General Chemical Composition)

| องค์ประกอบ | ร้อยละ (%) ¹ | ร้อยละ (%) ² |
|---------------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| ความชื้น (Moisture) | 13.17 | 8-10 |
| น้ำมัน CNSL (Cashew Nut Shell Liquid) | 35.10 | 40-48 |
| โปรตีน (protein) | 4.06 | 18-20 |
| คาร์โบไฮเดรต | - | 38-40 |
| เส้นใย (Fiber) | - | 1-1.5 |
| เถ้า (Ash) | 6.74 | - |
| เซลลูโลส และลิกนิน | 17.35 | - |
| น้ำตาล | 20.85 | - |

ที่มา : ¹ Ohler, 1979, p.33

² Tychopoulos & Tyman, 1990, p.75

เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์จะมีปริมาณ น้ำมัน CNSL อยู่ประมาณ 30-40 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักเมล็ดรวมเปลือก ซึ่งสามารถสกัดออกมาได้โดยการนำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์มาผ่าน กระบวน การสกัดด้วยความร้อน สกัดด้วยสารละลาย หรือบีบด้วยเครื่องมือ (ระรินธร สายแสงทอง, 2557, น.32) น้ำมันจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (CNSL) เป็นของเหลว มีสีน้ำตาลเข้ม เหนียวข้น ไม่ละลายน้ำ ละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์แทบทุกชนิด มีความหนืดที่ 30 องศาเซลเซียสราว 550 เซนติพอยส์ เรียกว่า น้ำมัน CNSL ซึ่งใช้เป็นวัตถุดิบผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้มากกว่า 400 สูตร ประเทศที่ผลิตน้ำมัน CNSL ที่สำคัญของโลก คือ ประเทศโมซัมบิก บราซิล และอินเดีย โดยมีปริมาณผลผลิตเพิ่มขึ้นในแต่ละปี ประมาณปีละ 12,000 เมตริกตันในปี 2505 จนถึง 42,000 เมตริกตันในปี 2523 และประเทศที่ใช้น้ำมัน CNSL เข้าไปใช้มาก ได้แก่ สหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น สหราชอาณาจักร ออสเตรเลีย เกาหลีใต้ เนเธอร์แลนด์ ฝรั่งเศส และเบลเยียม ผลการศึกษาของ Aggarwal (1972, pp.163-169) พบว่า CNSL มีอยู่ในเปลือกเมล็ดประมาณร้อยละ 32-43 โดยน้ำหนัก โดยที่เปลือกเมล็ดมีส่วนโดยน้ำหนักประมาณร้อยละ 67 ของเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ทั้ง เมล็ด CNSL จะเป็นตัวป้องกันแมลงโดยธรรมชาติ ไม่ให้เข้าไปทำลายเมล็ดใน ซึ่งเป็นส่วนที่มีลักษณะโค้งเล็กน้อย มีเนื้อสัมผัสละเอียด และมีกลิ่นรสเป็นที่ต้องการ ประเทืองศรี สิ้นชัยศรี (2535, น.14-24) รายงานว่า น้ำมันชนิดนี้ ประกอบด้วยสารเคมีต่าง ๆ ดังนี้คือ กรดอนุคาร์ดิก (Anacardic acid) 82 เปอร์เซ็นต์ คาร์ดอล (Cardanol) 1.6 เปอร์เซ็นต์ และเมทิลคาร์ดอล 2.6 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสารเหล่านี้เมื่อนำไปผสมกับสารเคมีอื่น ๆ จะเกิดสารใหม่ขึ้น ซึ่งสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้ รายละเอียดองค์ประกอบหลักทางเคมี ของน้ำมัน CNSL มีอยู่ 4 ชนิด คือ

1. กรดอนุคาร์ดิก (Anacardic Acid) เป็นสารจำพวกกรดไฮดรอกซิล คาร์บอนซิลิก มีสูตรโมเลกุล $C_{22}H_{32}O_3$ เมื่อทำการสกัดด้วยความร้อนต่ำจะได้ปริมาณของกรดอนุคาร์ดิก 65-70 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของ CNSL มีฤทธิ์เป็นกรด กัดผิวหนัง มีกลิ่นฉุน การนำไปใช้ประโยชน์ เช่น นำไปรักษาโรคผิวหนังบางชนิด โรคเรื้อน และสารต่อต้านการเกิดมะเร็ง เป็นต้น

2. คาร์ดานอล (Cardanol) เป็นสารจำพวกฟีนอลิกที่มีหมู่ไฮดรอกซี 1 ตำแหน่ง เมื่อทำการสกัดด้วยความร้อนต่ำจะได้ปริมาณของคาร์ดานอล 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ CNSL แต่เมื่อทำการสกัดด้วยความร้อนสูงจะเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน โดยความร้อนจะไปทำการสลายหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลของกรดอนุคาร์ดิก น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ได้เรียกว่า “Technical CNSL” ซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นคาร์ดานอลอยู่ 60-65 เปอร์เซ็นต์ คาร์ดอล 15-20 เปอร์เซ็นต์ และสารพอลิเมอร์อื่น ๆ 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของ CNSL ซึ่งคาร์ดานอลสามารถนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตโพลียูรีเทน และอุตสาหกรรมทาสีได้ (Smith, Malaluan, Setianto, Inomata, & Arai et al., 2003, pp.1-7)

3. คาร์นอล (Cardol) เป็นสารจำพวกฟีนอลิก เมื่อทำการสกัดด้วยความร้อนต่ำจะได้ ปริมาณของคาร์ดอลอยู่ 5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของ CNSL

4. 2-เมทิลคาร์ดอล (2-Methy Cardol) เป็นสารจำพวกฟีนอลิกที่มีอนุพันธ์ปริมาณน้อยมาก ประมาณ 0.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของ CNSL และจะพบเมื่อทำการสกัดด้วยความร้อนสูง เนื่องจากมีปริมาณที่น้อยจึงไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์

กองเกษตรเคมี (อ้างถึงในชาคริต ทองอุไร สุธรรม สุขมณี และ สรวีศ จิตบรรเจิดกุล, 2541, น.3) ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของน้ำมัน CNSL ของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 3 สายพันธุ์ พบว่า เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์สายพันธุ์ ศก.60-1 ประมาณ 23 % รองลงมาคือ สายพันธุ์ SKA และ พันธุ์ ศก. 60-2 ตามลำดับ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางเคมีของ CNSL (Cashew Nut Shell Liquid) ของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 3 สายพันธุ์

| รายการ | ศก.60-1 | ศก.60-2 | พันธุ์ SKA |
|------------------------------------|---------|---------|------------|
| CNSL (%) (hydraulic press) | 23.00 | 18.70 | 21.10 |
| Specific gravity 25/25 °C | 0.9845 | 0.9900 | 0.9858 |
| Refractive index 25 °C | 1.5220 | 1.5420 | 1.5245 |
| Lodine value | 197 | 201 | 196 |
| Saponifiable matter | 91 | 95 | 95 |
| unsaponifiable matter | 0.55 | 0.54 | 0.43 |
| loss of heating ที่ 250 °C 30 นาที | 88.38 | - | - |

ที่มา : กองเกษตรเคมี (อ้างถึงในชาคริต ทองอุไร, สุธรรม สุขมณี และ สรวีศ จิตบรรเจิดกุล, 2541, น.4)

การประยุกต์ใช้น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ในทางอุตสาหกรรมและวิศวกรรมโดย CNSL เป็นของผสมระหว่างสารประกอบฟีนอลิกต่าง ๆ ที่ได้จากธรรมชาติการใช้งานของ CNSL ได้แก่ ใช้ทาสี และวารนิช ที่ต้องการความต้านทานต่อการกัดกร่อน และทำวัสดุเชิงประกอบ (Composite Materials) เป็นต้น จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์มาปรับแต่ง คุณสมบัติเบนซอกซาซินเรซิน พบว่า พอลิเมอร์อัลลอยด์ที่ได้จากสารดังกล่าวนี้มีสมบัติเหมาะแก่การ

ใช้เป็นกาวประสานในการผลิตวัสดุทดแทนไม้การประยุกต์ใช้น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ในทางอุตสาหกรรมและทางการแพทย์ สามารถดำเนินการ ได้ดังนี้

1. การนำ CNSL มาใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรม โดยจะนำไปผ่านกระบวนการ Polymerization โดยวิธีการต่าง ๆ แบ่งเป็นทางฟิสิกส์ โดยการให้ความร้อน ความดัน รังสีและทางเคมี โดยการเติมสารเข้าทำปฏิกิริยา โดยใช้การเกิดปฏิกิริยา Oxidation ประโยชน์ที่ได้รับ ได้แก่

1.1 ฉนวนเคลือบ (Insulating Varnishes) ในอุตสาหกรรมเกี่ยวกับไฟฟ้า โดยส่วนใหญ่จะผลิตเป็น Varnishes ซึ่งมีคุณสมบัติทางด้านการฟอร์มตัวเป็นแผ่นฟิล์ม มีความต้านทานความร้อน ป้องกันความชื้น และมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า

1.2 สารเคลือบ (Lacquer) เป็น Lacquer ใช้ประโยชน์ในด้านการเป็นฉนวน ป้องกันและ আবวัสดุตกแต่ง Lacquer ที่ได้จะมีความยืดหยุ่น และความเหนียวที่เหมาะสม มีความมัน และมีคุณสมบัติติดแน่น มีความต้านทานต่อความชื้น สารเคมีทั้งกรด และเบส

1.3 ตัวนำไฟฟ้า (Electrical Conductor) จะมีคุณสมบัติ คือ ป้องกันน้ำ และความชื้น ทนทานต่อความร้อนได้ถึง 260 องศาเซลเซียส หรือสูงกว่า และเมื่อทำให้เย็นจะไม่ทำให้ค่า Dielectric Value ลดต่ำลง

1.4 ลามิเนตเรซิน (Laminating Resins) ที่ได้จะมีความยืดหยุ่นสูงมาก สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้ เช่น อุตสาหกรรมกระดาษ เสื้อผ้า และใยแก้ว เป็นต้น

1.5 ปูนซีเมนต์ (Cement) โดยการนำ Cashew Polymer มาทำปฏิกิริยากับ Formaldehyde จะให้ Rubber Gel ซึ่งสามารถใช้แทน Cement ได้ แต่จะแข็งตัวช้ากว่า Cement สามารถทำให้แข็งตัวเร็วได้โดยการใช้ความร้อนเข้าช่วย Cement ที่ได้นี้จะสามารถติดได้ดีกับวัสดุพวก Steel, Carbon Block, Powder Brickwork เป็นต้น โดยที่ Cement ที่ได้มานี้ จะไม่เกิดปฏิกิริยากับสารทั้งที่เป็นกรดและเบส

1.6 ยางผสมเรซิน (Rubber Compounding Resins) สามารถทำได้โดยการนำ Cashew Phenol Formaldehyde Resins มาทำให้เกิดการรวมตัวกับยางสังเคราะห์ เช่น Nitrile Rubber โดยยางที่ผลิตขึ้นใหม่ จะมีค่า Tensile Strength ที่ดี แข็งแรง และทนทานต่อการเสียดสี

1.7 เบรก และคลัทช์ (Break and Clutch) สามารถทำได้โดยการใช้ Higher Cashew Polymer มาทำ Crosslinked กับ Aldehydes แล้วจะได้ Higher Resins ซึ่งจะใช้เป็น Friction Modifying Material ในการทำผ้าเบรก และคลัทช์ ซึ่งมีคุณสมบัติในด้านความเสียดทานสูง

1.8 อุตสาหกรรมเคมี (Chemical Industry) สามารถใช้เป็นตัว Emulsifiers ได้ คือเป็นตัวประสานระหว่างสาร 2 ชนิดที่ไม่สามารถละลายรวมได้ ทำให้สามารถรวมกันได้อย่างดี หรืออาจใช้เป็นตัวเร่งในการเกิดปฏิกิริยาเคมีก็ได้

2. การใช้ประโยชน์ CNSL ในด้านการแพทย์ ใช้ทำยารักษาผู้ป่วยที่เป็นโรคเหน็บชา วัณโรค โรคเท้าช้าง โรคเลือดคั่ง โรคเรื้อน โรคผิวหนัง หูด ตาปลา และสันเท้าแตกได้ (Tyman & Tychopoulos, 1984, pp.137-150)

การสกัดน้ำมันออกจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ เป็นเศษเหลือทิ้งจากการสกัดน้ำมันออกจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ด้วยการใช้วิธีทางกล และวิธีการสกัด ดังนี้

1. วิธีทางกลเป็นการบีบอัดโดยเครื่องบีบอัดแบบสกรู หรือการบีบอัดด้วยเครื่องบีบอัดระบบไฮดรอลิก หลักการจะเป็นการบีบอัดเปลือกมะม่วงหิมพานต์ที่ผ่านการกะเทาะเอาเมล็ดในออกแล้วด้วยเครื่องอัด ทำให้น้ำมันในเปลือกเมล็ดในไหลออกมา เปลือกที่ผ่านการบีบอัดด้วยวิธีนี้จะมีน้ำมันหลงเหลืออยู่ประมาณ 4-5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักกาก กากส่วนที่เหลือนี้สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนได้

2. วิธีการสกัด (Extraction) วิธีนี้สามารถสกัดเอาน้ำมันออกจากเปลือกได้ทั้งก่อนและหลังการกะเทาะเปลือก ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบใหญ่ ได้แก่

2.1 การสกัดด้วยไอน้ำร้อน (Steam Extraction) วิธีนี้ทำโดยการเอาเมล็ดหรือเปลือกที่ผ่านการกะเทาะออกแล้วบรรจุในหม้อทรงกระบอก แล้วผ่านไอน้ำที่อุณหภูมิประมาณ 200-250 °C ลงไปประมาณ 2-3 นาที ก็จะสามารถสกัดเอา CNSL ออกมา วิธีนี้จะมีน้ำมันหลงเหลือในเปลือกอยู่ประมาณ 7-12 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักกาก ซึ่งมากที่สุดในการบรรดากรรมวิธีต่าง ๆ

2.2 การสกัดด้วยการทอดในน้ำมันร้อน วิธีนี้เป็นวิธีที่มักจะใช้กับเมล็ดดิบก่อนการนำไปกะเทาะเปลือก มักพบการใช้วิธีนี้ในแถบภาคใต้ที่สามารถหาน้ำมันปาล์มได้ในราคาถูกกว่าภาคอื่น การทอดจะทอดด้วยอุณหภูมิประมาณ 200 °C ซึ่งจะช่วยให้ผิวนอกของมะม่วงหิมพานต์กรอบเปราะขึ้น สามารถกะเทาะเอาเมล็ดในออกมาได้ง่าย แต่อาจทำให้ CNSL ปนเปื้อนไปกับเมล็ดในที่กะเทาะออกมาได้ การแยกเอา CNSL ออกจากน้ำมันพืชทำได้ยาก

2.3 การสกัดด้วยตัวทำละลายเคมี วิธีนี้เป็นการอาศัยตัวทำละลายเคมี ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนมาสกัด CNSL ออกจากเปลือกที่กะเทาะเมล็ดในออกแล้ว ไม่นิยมใช้กับเมล็ดดิบที่ยังไม่กะเทาะเปลือกเพราะอาจจะมีตัวทำละลายปนเปื้อนในเมล็ดในที่กะเทาะออกมาได้ เริ่มโดยการนำเปลือกที่จะสกัดมาทำความสะอาดเอาเศษฝุ่นผงออก ทำการบดเป็นชิ้นเล็ก ๆ เพื่อลดความชื้นและทำให้สามารถสกัด CNSL ได้ดียิ่งขึ้น หลังจากสกัดด้วยตัวทำละลายแล้ว นำเอาส่วนผสมของ CNSL และตัวทำละลายมากลั่นแยกเอาตัวทำละลายออกเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่

สำหรับการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ ทางผู้วิจัยใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ที่เหลือทิ้งจากการสกัดน้ำมันออกจากเปลือกมะม่วงหิมพานต์ โดยใช้เครื่องบีบอัดน้ำมันจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิม

พานต์ (Cashew Nut Shell Liquid) ใช้หลักการบีบอัดแบบเกลียวอัด (Screw Press) ซึ่งออกแบบให้มีช่วงของการทำงานสองช่วง ประกอบด้วย 1. ช่วงการป้อนวัตถุดิบและลำเลียง (Feed Section) 2. ช่วงการอัดตัว (Compression Section) โดยหลักการทำงาน คือ เมื่อเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ป้อนเข้าเครื่องจะช่วยเพิ่มแรงอัด น้ำมันจะไหลออกจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่บริเวณใกล้กับรูทางออกของกาก ส่วนกากจะถูกอัดผ่านรูทางออกบริเวณหัวเกลียวหมุน ซึ่งรูทางออก (ช่องคายเศษ) (พิทักษ์ คล้ายชม กันต์ อินทวงศ์ และไพโรจน์ นะเที่ยง, 2559, น.17-18)

ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมจากการจัดการกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

การนำกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่เหลือทิ้งจากการแปรรูปไปใช้ประโยชน์จำเป็นต้องคำนึงถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากปัจจุบันปัญหาสิ่งแวดล้อมทวีความรุนแรงขึ้น ทั้งในระดับประเทศและระดับโลก โดยเฉพาะปัญหาภาวะโลกร้อน ที่เกิดจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในภาคการเกษตร การจัดการกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ด้วยการจัดการโดยการเผา และการกองทิ้งในพื้นที่โล่งแจ้ง ก่อให้เกิดฝุ่นละออง โดยเฉพาะที่มีขนาดเล็กประกอบด้วย สารมีพิษที่เป็นอินทรีย์สารและอนินทรีย์สารจำนวนมาก เช่น โลหะหนัก และ Polycyclic Aromatic Hydrocarbon เป็นต้น ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ ดิน น้ำ ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชนในชุมชน

มลพิษทางอากาศจากกระบวนการเผาไหม้แบบเผาตรง

การเผาในที่โล่ง (Open Burning) เป็นแหล่งกำเนิดมลพิษทางอากาศหลักแหล่งหนึ่ง ก่อให้เกิดมลพิษ ทางอากาศ ได้แก่ ก๊าซต่างๆ ที่เกิดจากการเผาไหม้ อาทิ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไนโตรเจนไดออกไซด์ รวมทั้งฝุ่นละออง ควีน เถ้า ซึ่งล้วนมีผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ จากการศึกษาทางระบาดวิทยาจำนวนมาก ในเรื่อง ผลกระทบระยะสั้นชี้ชัดว่า ความเข้มข้นของฝุ่นละอองมีผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ แม้ว่ามีการสัมผัสกับฝุ่นละอองในระดับที่น้อยมาก (สำนักที่ปรึกษากรมอนามัย, 2561) ส่วนก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นก๊าซไม่มีสี ไม่มีกลิ่น แต่ถ้าสูดหายใจเข้าไป อาจจะทำให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพอย่างรุนแรง การแพร่กระจายของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ สู่ชั้นบรรยากาศ ส่วนใหญ่เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ของเชื้อเพลิง และสารอินทรีย์อื่น ๆ ผลกระทบของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ที่เป็นอันตราย จึงมักเกิดกับอวัยวะ และเนื้อเยื่อที่ต้องการออกซิเจน ในปริมาณที่สูงมาก เช่น สมอง หัวใจ กล้ามเนื้อ และเด็กอ่อนในครรภ์ ที่กำลังเจริญเติบโต ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) มีสภาพเป็นก๊าซที่อุณหภูมิปกติ ก๊าซทั้งสองเกิดขึ้นตามธรรมชาติ ได้แก่ ฟาผ่า ฟาแลบ ภูเขาไฟระเบิดปฏิกิริยาของจุลินทรีย์ในดินหรืออาจเกิดจากการกระทำของมนุษย์ เช่น การเผาผลาญเชื้อเพลิง การอุตสาหกรรม การทำกรดไนตริก กรดกำมะถัน การชุบโลหะและการทำวัตถุระเบิด เป็นต้น ส่วนก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เป็นก๊าซไม่มีสีไม่มีไวไฟที่ระดับความเข้มข้นสูง จะมี

กลิ่นฉุนแสบจมูกเมื่อทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจนในอากาศจะเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์และจะรวมตัวเป็นกรดกำมะถัน เมื่อมีความชื้นเพียงพอหากอยู่ร่วมกับอนุภาคมวลสารที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น แอมโมเนีย เกล็ด และวานาเดียม จะเกิดมีปฏิกิริยาเติมออกซิเจนเกิดเป็นซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ และเป็นกรดกำมะถัน เช่นกัน การสันดาปเชื้อเพลิงเพื่อใช้พลังงานในการดำรงชีพของมนุษย์ ก๊าซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ และละอองกรดกำมะถัน ก่อให้เกิดอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจ เช่น โรคหลอดลมอักเสบเรื้อรัง นอกจากนี้ยังทำให้น้ำฝนที่ตกลงมามีสภาพความเป็นกรดมากขึ้น ซึ่งจะทำลายระบบนิเวศน์ ป่าไม้ แหล่งน้ำ สิ่งมีชีวิตต่าง ๆ รวมถึงการกัดกร่อนอาคารโบราณสถาน (กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2558) สำหรับมลพิษทางอากาศที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้แบบเผาตรง มีดังนี้

1. ออกไซด์ของไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ของไนโตรเจน ประกอบด้วย ไนตรัสออกไซด์ (N_2O) ไนตริกออกไซด์ (NO) ไดไนโตรเจนไตรออกไซด์ (N_2O_3) ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) ไดไนโตรเจนไดออกไซด์ (N_2O_2) ไดไนโตรเจนเตตราออกไซด์ (N_2O_4) และไนโตรเจนเพนออกไซด์ (N_2O_5) ซึ่งส่วนหนึ่งเกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงต่าง ๆ การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของออกไซด์ของไนโตรเจนซับซ้อนมากและขึ้นอยู่กับสารมลพิษอื่น ๆ เช่นไฮโดรคาร์บอนโอโซนและสารประกอบซัลเฟอร์รวมทั้งสภาวะทางธรรมชาติ เช่น แสงอาทิตย์ จะกล่าวเฉพาะไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) และไนตริกออกไซด์ (NO) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ซึ่งกลไกการเกิด NO_x จากกระบวนการเผาไหม้เกิดขึ้นจากกลไก 3 ประการ

1.1 กลไกการเกิด Thermal NO_x เมื่อนำเชื้อเพลิงมาเผาไหม้ในอากาศออกซิเจนและไนโตรเจนในอากาศบางส่วนจะรวมตัวกันเกิดเป็นไนตริกออกไซด์ (NO) และไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) ซึ่งจะเกิดขึ้นในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการเกิด NO_x ได้แก่ 1. อุณหภูมิของเปลวไฟ 2. ระยะเวลาที่ก๊าซจากการเผาไหม้อยู่ในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง และ 3. ปริมาณของออกซิเจนที่อยู่ในบริเวณที่เกิดการเผาไหม้ในกระบวนการเผาไหม้อุณหภูมิเปลวไฟอาจสูงได้เกินกว่า $1,371^\circ\text{C}$ ซึ่งจะทำให้เกิดมี NO ที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 1,000 ppm แต่ช่วงเวลาที่ก๊าซจากการเผาไหม้จะคงอยู่ในเปลวไฟที่มีอุณหภูมิสูงนั้นมีระยะเวลาสั้นมากจึงทำให้ NO ที่เกิดขึ้นในก๊าซจากการเผาไหม้ถูกออกซิไดซ์กลายเป็น NO_2 ได้น้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ และสำหรับการควบคุมการเกิด Thermal NO_x สามารถดำเนินการได้ 3 วิธีคือ

- 1.1.1 ควบคุมให้ความเข้มข้นของออกซิเจนในบริเวณที่เกิดการเผาไหม้น้อยลง
- 1.1.2 ควบคุมให้อุณหภูมิการเผาไหม้ต่ำลง
- 1.1.3 ทำให้ระยะเวลาที่ก๊าซจากการเผาไหม้อยู่ในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงสั้นลง

1.2 กลไกการเกิด Fuel NO_x สารประกอบที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบในเชื้อเพลิงทำให้เกิดเป็น NO และ NO_2 เมื่อเผาไหม้ความเข้มข้นของ NO_x ที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์กับปริมาณ

ไนโตรเจนที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงเมื่อปริมาณไนโตรเจนในเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นสัดส่วนของไนโตรเจนที่จะถูกเปลี่ยนเป็น NO_x มักจะลดลงเนื่องจากอัตราการเกิด NO_x จากไนโตรเจนในเชื้อเพลิงจะได้รับอิทธิพลจากความเข้มข้นของออกซิเจนในเปลวไฟและอัตราการผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศเป็นอย่างมากโดยสภาพแวดล้อมขณะที่มีการเผาไหม้จะมีอิทธิพลต่อการเกิด Fuel NO_x เป็นอย่างมากซึ่งคล้ายกับการเกิด Thermal NO_x

ดังนั้นวิธีการที่จะลด Fuel NO_x คือลดปริมาณไนโตรเจนที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงซึ่งในทางปฏิบัติแล้วไม่สามารถดำเนินการได้เสมอไปจึงต้องมีการใช้วิธีอื่นเช่นการปรับปรุงสภาพของการเผาไหม้โดยการลดปริมาณของออกซิเจนส่วนเกินใช้การเผาไหม้แบบหลายขั้นตอนหรือใช้วิธีอุ่นอากาศก่อนการเผาไหม้

1.3 กลไกการเกิด Prompt NO_x เกิดขึ้นได้จากปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลของไนโตรเจนกับอนุภาคนิวคลีอัสของสาร HCN, NH และ N ที่มีอยู่ในเปลวไฟมีชื่อเรียกว่า Prompt NO_x ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิของก๊าซขณะเผาไหม้ดังนั้นการปรับปรุงเทคนิคในการเผาไหม้จะไม่มีอิทธิพลมากนักต่อการเกิด Prompt NO_x

2. กลไกการเกิดออกไซด์ของซัลเฟอร์ (SO_x) หากนำเชื้อเพลิงที่มีกำมะถันหรือซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบไปเผาไหม้จะเกิดเป็น SO_2 ในกรณีของถ่านหินสารประกอบซัลเฟอร์ที่มีในถ่านหิน ได้แก่ Pyrite, Sulfate และสารอินทรีย์ที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงประมาณ 94-95 เปอร์เซ็นต์ ของสารประกอบซัลเฟอร์ จะเปลี่ยนเป็น SO_2 ดังสมการ



และเพียง 0.5 – 2.0 เปอร์เซ็นต์ จะถูกเปลี่ยนเป็น SO_3



และในกรณีที่อุณหภูมิของไอเสียดต่ำกว่า 316 °C (600 °F) SO_3 จะรวมตัวกับโมเลกุลของน้ำเกิดเป็นไอกรดซัลฟูริก



ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นก๊าซไม่มีสีไม่มีกลิ่นเมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศจะเกิดเป็นซัลเฟอร์ไตรออกไซด์และจะรวมตัวกับไอน้ำเป็นกรดซัลฟูริกเมื่อมีความชื้นเพียงพอ ก๊าซซัลเฟอร์

ได้ออกไซด์และละอองกรดซัลฟูริกจะก่อให้เกิดอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจ และจะเป็นอันตรายต่อสุขภาพมากขึ้นเมื่ออยู่ร่วมกับฝุ่นละอองบางชนิดเป็นสารมีพิษบางชนิด ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์กลายเป็นกรดซัลฟูริกได้รวดเร็วยิ่งขึ้น

3. อนุภาคฝุ่น (Particulate Matter) : TSP, PM10

อนุภาคฝุ่น หมายถึง อนุภาคของแข็งและละอองของเหลวที่แขวนลอยกระจายในอากาศ บางชนิดมีขนาดใหญ่ และมีสีดำจางมองเห็นได้ชัดเช่นเขม่าและควันแต่บางชนิด มีขนาดเล็กมากจนมองด้วยตาเปล่าไม่เห็นฝุ่นละอองที่แขวนลอยอยู่ในบรรยากาศโดยทั่วไปมีขนาดตั้งแต่ 100 ไมครอนมีขนาดตั้งแต่ 100 ไมครอนลงมาสามารถก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของคนสัตว์พืชเกิดความเสียหายต่ออาคารบ้านเรือน ทำให้เกิดความเดือดร้อนรำคาญบดบังทัศนวิสัยทำให้เกิดอุปสรรคในการคมนาคมขนส่ง จึงได้มีการกำหนดมาตรฐานอนุภาคฝุ่นในบรรยากาศขึ้น แต่เนื่องจากการศึกษาวิจัยพบว่าฝุ่นขนาดเล็กนั้นจะเป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัยมากกว่าฝุ่นรวมเนื่องจากสามารถผ่านเข้าไปในระบบทางเดินหายใจส่วนในได้จึงได้มีการยกเลิกมาตรฐานฝุ่นรวมและกำหนดค่ามาตรฐานฝุ่นขนาดเล็กเป็นสองชนิด ได้แก่

3.1 PM10 หมายถึงฝุ่นหยาบ (Course Particulate) เป็นอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5-10.0 ไมครอนมีแหล่งกำเนิดจากการจราจรบนถนนที่ไม่ได้ลาดยางจากการขนส่งวัสดุรวมทั้งฝุ่นจากกิจกรรมบดย่อยหิน

3.2 PM2.5 หมายถึง ฝุ่นละเอียด (Fine Particulate) เป็นอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 2.5 ไมครอน มีแหล่งกำเนิดจากควันเสียของรถยนต์ โรงไฟฟ้า โรงงานอุตสาหกรรม ควันที่เกิดจากการหุงต้มอาหารโดยใช้ฟืน นอกจากนี้ก๊าซ SO₂, NO_x และ VOCs (Volatile Organic Compounds) จะทำปฏิกิริยากับสารอื่นในอากาศทำให้เกิดเป็นฝุ่นละเอียดได้

ประเทศไทยได้มีการให้ความหมายของคำว่าอนุภาคฝุ่น หมายถึง ฝุ่นรวม (Total Suspended Particulate : TSP) ซึ่งเป็นฝุ่นขนาดใหญ่เส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 100 ไมครอน ลงมา และฝุ่นขนาดเล็ก PM10 หมายถึง ฝุ่นที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 10 ไมครอน ลงมา จากการประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์แสดงให้เห็นว่าถ้าสามารถลดปริมาณ PM10 ลงได้ 10 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จะช่วยลดผลต่อสุขภาพ เป็นจำนวนเงิน 35,000 - 88,000 ล้านบาทต่อปี

4. เขม่าและกลไกการเกิดเขม่า

การเผาไหม้เป็นปรากฏการณ์ที่มีความซับซ้อนอย่างยิ่งอนุภาคคาร์บอนที่เกิดขึ้นหลังจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงต่าง ๆ เรียกว่า “เขม่า” การเกิดเขม่ามีสาเหตุมาจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ในส่วนระเหยได้ของถ่านหิน ดังนั้นถ่านหินที่มีส่วนระเหยน้อยก็จะก่อให้เกิดเขม่าน้อยแต่ถึงจะมีส่วนระเหยมาก ถ้ามีอากาศเพียงพอในขณะที่เกิดการเผาไหม้ก็จะไม่เกิดเขม่าการเกิดของส่วนระเหยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเป็นส่วนใหญ่แต่การไหลผ่านของอากาศขึ้นอยู่กับสภาพช่องว่างในชั้น

ถ่านหิน ซึ่งช่องว่างในชั้นถ่านหินนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามการยึดตัวของถ่านหิน เนื่องจากการเผาไหม้ โดยที่ระดับของการยึดตัวเป็นสัดส่วนเกือบจะโดยตรงกับการเกาะตัวของถ่านหินที่มีคุณสมบัติการเกาะตัวดี ช่องว่างระหว่างอนุภาคถ่านหินจะแคบลง เมื่อเทียบกับก่อนการเผาไหม้ทำให้แรงต้านของอากาศในชั้นของถ่านหินสูงขึ้น

มลพิษทางดิน และมลพิษทางน้ำจากกระบวนการเผาไหม้แบบเผาตรง

การจัดการกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ด้วยการจัดการโดยการเผา ในพื้นที่โล่งแจ้ง ก่อให้เกิดก๊าซที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ ได้แก่ ฝุ่นละออง (TSP, PM10) คาร์บอนมอนอกไซด์ ไนโตรเจนไดออกไซด์ มีเทน เป็นต้น ซึ่งเป็นสารที่เคลื่อนย้ายจากอากาศสู่ดิน จากดินสู่พืช หรือจากดินสู่น้ำ โดยการชะล้างเข้าสู่มนุษย์และสัตว์ โดยปนเปื้อนอยู่ในอาหารและน้ำที่ใช้บริโภค ส่งผลต่อสุขภาพของผู้ได้รับ (สำนักจัดการกากของเสียและสารอันตราย กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2559) ความเป็นพิษของกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เกิดจากความเป็นกรดและสารมลพิษจากสารประกอบพีนอลในน้ำมัน CNSL ที่ตกค้างอยู่ในการกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทางน้ำ ในปี ค.ศ. 1970 สำนักงานป้องกันสิ่งแวดล้อมของสหรัฐอเมริกา (United States Environmental Protection Agency : U.S.EPA) ได้เสนอข้อสารประกอบพีนอลที่ก่อให้เกิดมลภาวะ 11 ชนิด มีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำเกิดการสะสมในสิ่งมีชีวิตในห่วงโซ่อาหาร ทำให้น้ำมีรสและกลิ่นเปลี่ยนไปจึงเกิดความจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์สารประกอบพีนอลในน้ำดื่มและน้ำผิวดิน อาหาร โดยทั่วไปสารประกอบพีนอลจะไม่ทนทานในสภาพแวดล้อม เช่น อากาศ น้ำทะเล น้ำผิวดิน ดิน และในน้ำเสีย สารประกอบเหล่านี้จะเกิดปฏิกิริยาเคมีกับแสงได้อย่างรวดเร็ว และเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพโดยใช้ออกซิเจนได้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนการย่อยสลายโดยไม่ใช้ออกซิเจนจะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซมีเทนเกิดขึ้น ซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจกที่ก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน (บัณฑิตย ศรีสังข์งาม, 2548, น.23)

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการกองทิ้งกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

การจัดการกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ซึ่งเป็นที่เศษเหลือทิ้งจากการแปรรูปเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ส่วนใหญ่มักใช้วิธีการจัดการโดยการนำไปทิ้งตามที่ตั้งขยะสาธารณะหรือในบริเวณพื้นที่ว่างเปล่า จึงก่อให้เกิดมลภาวะในหลายๆต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม ดังนี้

1. ทำให้เกิดทัศนอุจาด คือ แลดูสกปรก ขาดความเป็นระเบียบเรียบร้อย เกิดความรำคาญ เกิดมลภาวะทางสายตา รวมทั้งส่งกลิ่นเหม็น เป็นบ่อเกิดของโรค ส่งผลเสียต่อสุขภาพอนามัย ทำให้คนในชุมชนเสี่ยงต่อการเจ็บป่วยด้วยโรคต่าง ๆ เนื่องจากในกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ยังมีส่วนประกอบของกรดน้ำมันเหลืออยู่ ซึ่งเป็นอันตรายต่อผิวหนังและเนื้อเยื่อต่าง ๆ ของมนุษย์ ถ้าหากไปถูกหรือแตะต้องแล้วจะทำให้เกิดเป็นแผลพุพองและเน่าเปื่อย และส่งผลต่อระบบทางเดินหายใจของผู้ที่สูดดมเข้าไป

2. เป็นแหล่งทำให้เกิดมลพิษทางดิน น้ำ และอากาศ

2.1 มลพิษทางดิน เกิดจากการกองกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ทั้งลงพื้นดิน ทำให้พื้นดินสกปรก และสารพิษ กรดต่าง ๆ ปนเปื้อนซึมลงใต้ดิน ทำให้ดินเสื่อมสภาพ สมบัติทางกายภาพของดินเปลี่ยนไป ดินมีการปนเปื้อนสารพิษที่เป็นอันตราย ส่งผลต่อสิ่งมีชีวิตในดิน

2.2 มลพิษทางน้ำ เกิดจากการกองกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ทั้งในพื้นที่ เมื่อเกิดฝนตกจะชะล้างเศษกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ และคราบน้ำมัน CNSL ไหลลงสู่แหล่งน้ำ ทำให้น้ำเน่าเสีย น้ำเป็นพิษ และน้ำมีคราบน้ำมัน ซึ่งเป็นลักษณะของน้ำที่ไม่เหมาะกับการอุปโภคบริโภค สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงคุณภาพน้ำ และเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต ทั้งมนุษย์ พืช และสัตว์น้ำ

2.3 มลพิษทางอากาศ การกองกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ทั้งในพื้นที่ ก่อให้เกิดการหมักหมม ทำให้เกิดก๊าซพิษ และกลิ่นเหม็น และเมื่อเศษกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ถูกแดดเผาจะมีการระเหยกลายเป็นไอน้ำซึ่งมีความเป็นกรด รวมทั้งฝุ่นละออง เมื่อถูกลมพัดฟุ้งกระจายในอากาศ ก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางอากาศ

เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน

กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน เป็นกระบวนการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น ไม้ถ่านไม้ถ่านหิน แกลบ ชี้อ้อยและวัสดุที่เหลือใช้ทางการเกษตรที่สามารถติดไฟได้ โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน (Partial Oxidation) ที่อุณหภูมิสูงด้วยอากาศ ออกซิเจน หรือน้ำ ในช่วง 800-1,800 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดการแตกตัวมาเป็นก๊าซเชื้อเพลิง (Producer Gas) ที่มีค่าความร้อนค่อนข้างต่ำถึงปานกลางประมาณ 3-10 MJ/m³ (นคร ทิพย์าวงศ์, 2553, น.77) ซึ่งแก๊สที่ได้มีส่วน ประกอบหลัก คือ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), ไฮโดรเจน (H₂), แก๊สมีเทน (CH₄) และพวกสารระเหยต่าง ๆ ซึ่งแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ เรียกว่า โพรดิวเซอร์แก๊ส ประสิทธิภาพของการผลิตโพรดิวเซอร์แก๊ส ขึ้นกับกระบวนการผลิตและคุณภาพของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตเป็นหลัก (ณัฐวุฒิ ดุษฎี และชูรัตน์ ธารารักษ์, 2554, น.2-3)

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันภายในเตาปฏิกรณ์ หรือแก๊สซิไฟเออร์ (Gasifier) ดังภาพที่ 3 เตาปฏิกรณ์สำหรับผลิตเชื้อเพลิงจะเกิดกระบวนการทางเคมีและกายภาพที่แตกต่างกันออกไป ก๊าซเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นจะมีองค์ประกอบหลักเป็น H₂ และ CO ซึ่งเป็นก๊าซที่เผาไหม้ได้ นอกจากนี้ยังมี CO₂, CH₄, N₂, H₂O และอื่น ๆ โดยองค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงจะขึ้นอยู่กับ

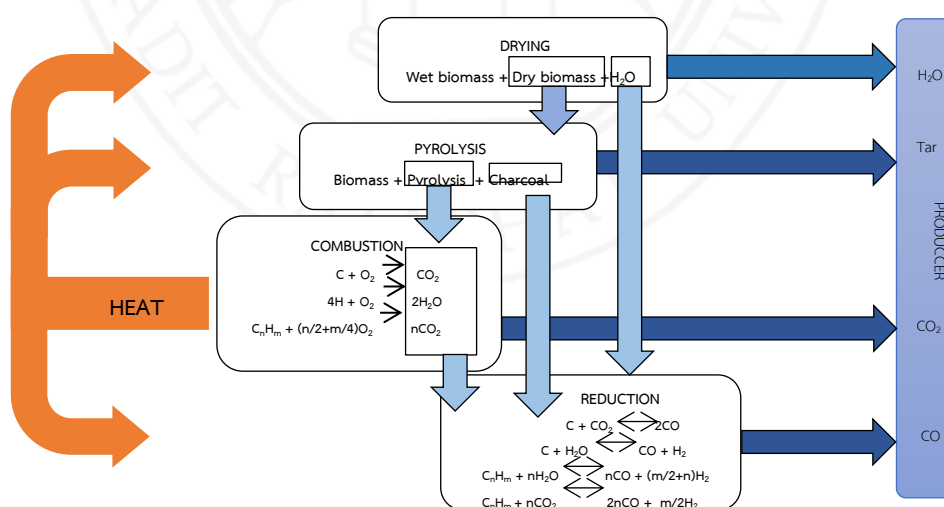
ประเภทของเตาปฏิกรณ์ สารออกซิไดเซอร์ และสภาพการทำงานของระบบกระบวนการที่เกิดขึ้นในเตาปฏิกรณ์สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 โซนปฏิกิริยา คือ

1. โซนอบแห้ง (Drying Zone) เป็นโซนที่อยู่ด้านบนบนสุดมีหน้าที่อบแห้งและระเหยน้ำออกจากวัตถุดิบด้วยความร้อนในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ประมาณ 40-200 องศาเซลเซียสโดยที่อุณหภูมิดังกล่าวจะทำให้ความชื้นลดลงได้ประมาณร้อยละ 5 และค่าความชื้นของวัตถุดิบที่เหมาะสมในการนำมาใช้งานควรมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 30 เพื่อให้วัตถุดิบเชื้อเพลิงมีความแห้งและง่ายต่อการติดไฟ

2. โซนกลั่นตัว (Devolatilization Zone) หรือโซนไพโรไลซิส (Pyrolysis Zone) เป็นโซนที่ติดอยู่กับโซนเผาไหม้และได้รับความร้อนโดยตรงจากโซนเผาไหม้โดยกระบวนการกลั่นตัว หรือไพโรไลซิสจะได้ก้อนถ่านและก๊าซ และได้ผลิตภัณฑ์ข้างเคียงคืออนุมูลของกรด (หรือน้ำส้มคว้นไม้) และน้ำมันดิน (Tar) โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิประมาณ 500-600 องศาเซลเซียส

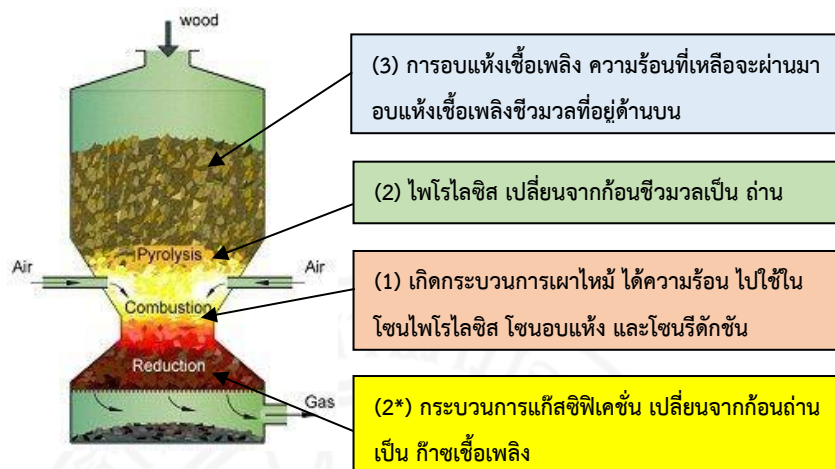
3. โซนเผาไหม้ (Combustion Zone) เป็นโซนที่ผลิตความร้อนเพื่อส่งความร้อนไปสู่โซนอื่นในเตาแก๊สซิไฟเออร์ในโซนนี้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้หรือปฏิกิริยาออกซิเดชันวัตถุดิบหรือถ่านคาร์บอนจากโซนไพโรไลซิสถูกเผาไหม้เกิดเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความร้อนความร้อนที่เกิดขึ้นถูกถ่ายเทโดยตรงให้กับโซนรีดักชันและโซนไพโรไลซิสและถ่ายเทให้กับโซนอบแห้ง

4. โซนรีดักชัน (Reduction Zone) เป็นโซนที่ผลิตก๊าซสังเคราะห์ประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนเป็นผลิตภัณฑ์หลักโดยกระบวนการแปรรูปถ่านคาร์บอนให้เป็นก๊าซสังเคราะห์ปฏิกิริยาเกิดในช่วงอุณหภูมิประมาณ 800-1,000 องศาเซลเซียสของการเผาไหม้ภายใต้สภาวะการจำกัดปริมาณอากาศซึ่งจะทำให้ถ่านคาร์บอนและน้ำมันดินแตกตัวเป็นก๊าซสังเคราะห์ (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2559, น.4-5)



ภาพที่ 3 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิไฟเคชัน

ที่มา : กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2559, น.6



ภาพที่ 4 กระบวนการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันภายในเตาปฏิกรณ์
ที่มา : กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2559, น.6

ค่าอัตราส่วนเทียบเท่าของอากาศต่อเชื้อเพลิง (Equivalent Ratio, ER)

ค่าอัตราส่วนเทียบเท่าของอากาศต่อเชื้อเพลิงมีผลต่อองค์ประกอบและค่าความร้อนของ Producer Gas โดยปกติขึ้นกับพารามิเตอร์ 3 อย่างคือ อุณหภูมิเปลวไฟค่าอัตราส่วนเทียบเท่าและอุณหภูมิ ซึ่งมีผลต่อค่าพลังงานเคมีและ Sensible Energy ของแก๊สผลิตภัณฑ์ค่าอัตราส่วนเทียบเท่าของอากาศต่อเชื้อเพลิงที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตแก๊สที่สภาวะ Steady State อยู่ระหว่าง 0.268-0.480 (Zainal, Rifau, Quadir, & Seetharamu, 2002, pp.283-289) ซึ่ง จะทำให้ เกิด Partial Combustion กรณีที่ค่าอัตราส่วนเทียบเท่า = 1 จะเกิดการเผาไหม้สมบูรณ์อุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งจะเกิดความผิดปกติขึ้นในเตาผลิตแก๊สสำหรับในการผลิตแก๊สจากไม้ค่าอัตราส่วนเทียบเท่า = 0.38 จะเป็นสภาวะที่เกิด CO สูงสุดค่าอัตราส่วนเทียบเท่าสามารถหาได้จากสมการที่ 2.1

$$ER = \frac{(A/F)_{\text{actual}}}{(A/F)_{\text{stoichiometric}}}$$

| | | |
|-----|---------------------------------|---|
| โดย | ER | คือ อัตราส่วนเทียบเท่าของอากาศต่อเชื้อเพลิง |
| | $(A/F)_{\text{actual}}$ | คือ ค่าอัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ใช้ |
| | $(A/F)_{\text{stoichiometric}}$ | คือ ค่าอัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ทางทฤษฎี |

การปรับค่าอัตราส่วนเทียบเท่าของอากาศต่อเชื้อเพลิงในทางปฏิบัติทำได้ 2 วิธีคือ การปรับอัตราการป้อนอากาศและการเปลี่ยนขนาดท่ออากาศเข้าสู่ชั้นเผาไหม้ทั้งสองวิธีทำให้ขนาด Partial Combustion เกิดการขยายตัวและหดตัวตามปริมาณอากาศที่เข้าทำปฏิกิริยาการเผาไหม้เนื่องจากปริมาณออกซิเจนที่ทำปฏิกิริยาการเผาไหม้เปลี่ยนแปลงซึ่งมีผลทำให้ระดับอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงด้วย ดังนั้นอุณหภูมิในชั้นเผาไหม้จึงได้เปลี่ยนแปลงตามค่าอัตราส่วนเทียบเท่าของอากาศต่อเชื้อเพลิง (วิชารุจ มนูญผล, 2555, น.16-17)

ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง

กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน อุณหภูมิและความดัน จะเป็นสภาวะที่กำหนดให้เกิดปฏิกิริยาบางปฏิกิริยา และเกิดก๊าซ หรือสารประกอบตามสภาวะสมดุลทางเคมี โดยทั่วไป ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 500 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยามักไม่สามารถดำเนินต่อไปได้ ที่อุณหภูมิมากกว่า 700 องศาเซลเซียส กระบวนการทางกายภาพ เช่น การแพร่ผสมคลุกเคล้าของก๊าซที่จะเข้าทำปฏิกิริยากับคาร์บอนจะตอบสนองไม่ทันเมื่อเทียบกับกระบวนการทางเคมีที่รวดเร็ว ทำให้ปฏิกิริยาเคมีเป็นตัวกำหนดสมดุล การเกิดปฏิกิริยาที่ขณะนั้นเท่านั้น ภายในเตาปฏิกรณ์จะมีปฏิกิริยาเคมีมากมายเกิดขึ้น สภาวะอุณหภูมิและความดันต่าง ๆ พื้นที่ที่ถูกจำกัดภายในเตาที่จะทำให้กระบวนการทางกายภาพทำหน้าที่คลุกเคล้าส่งถ่ายมวลสารได้ดีเพียงใด (นคร ทิพยาวงศ์, 2553, น.80) องค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้จะเป็นดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ส่วนประกอบของก๊าซเชื้อเพลิง

| ส่วนประกอบของก๊าซเชื้อเพลิง | ร้อยละโดยมวล |
|-----------------------------|--------------|
| H ₂ | 12-20 |
| CO | 17-22 |
| CO ₂ | 9-15 |
| CH ₄ | 2-3 |
| N ₂ | 50-54 |

ที่มา : นคร ทิพยาวงศ์, 2553, น.80

ปัจจัยที่ส่งผลให้ปฏิกิริยาทางเคมีบางปฏิกิริยาเกิดขึ้น และมีผลต่อก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้มีดังนี้

1. ความชื้นของเชื้อเพลิง (Moisture Content) ช่วยทำให้สัดส่วนของก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซเชื้อเพลิงสูงขึ้น แต่ความชื้นจะทำให้ประสิทธิภาพของเตาผลิตก๊าซ และค่าความร้อนที่ต้องการลดลง ความชื้นของเชื้อเพลิง ชีวมวลขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิง แหล่งที่มา และการเตรียมสภาพก่อนนำไปผลิตก๊าซชีวมวล ความชื้นในชีวมวล สามารถแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะ คือ

1.1 ความชื้นที่อยู่ภายในเนื้อชีวมวล เป็นส่วนที่สามารถอยู่ในรูเปิดของเซลล์ในชีวมวลได้โดยสมดุลกับบรรยากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 96-97 เปอร์เซ็นต์

1.2 ความชื้นที่ผิว เป็นส่วนที่ล้นเกินจากความชื้นในรูเปิดของเซลล์ชีวมวล

1.3 ความชื้นจากการสลายตัวของสารอินทรีย์ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 200-250 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิที่ใช้ระเหยความชื้นที่ผิวและความชื้นที่อยู่ภายในเนื้อชีวมวล ถ้าต้องการนำชีวมวลมาใช้เป็นพลังงาน ความชื้นทั้งหมดควรมีไม่เกิน 50 เปอร์เซ็นต์

2. ขนาดเชื้อเพลิง (Fuel Size) จะมีผลต่อการเกิดความดันตกคร่อม (Pressure Drop) ภายในเตาแก๊สซิฟิเคชัน ถ้าเกิดความดันภายในเครื่องมากเกินไปจะทำให้ต้องใช้พลังงานในการนำอากาศเข้าและพาก๊าซที่ได้ออกจากเตาแก๊สซิฟิเคชันมาก เครื่องยนต์ก็จะมีแรงดูดมากพอที่จะเอาชนะความดันตกของระบบทั้งหมดในทางทฤษฎี อากาศควรสัมผัสกับพื้นที่ผิวให้มากที่สุดเพื่อให้ได้ปริมาณก๊าซเพิ่มขึ้นและเกิดกระบวนการได้เร็วยิ่งขึ้น ในเตาแก๊สซิฟิเคชันขนาดเล็กติดตั้งกับที่ หากใช้เชื้อเพลิงขนาดใหญ่จะเกิดปัญหาการเผาไหม้ข้ามโซน ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดเถ้าหลอมเยิ้มติดผนัง เพราะถ้าเชื้อเพลิงมีขนาดใหญ่เกินไปเมื่อเทียบกับขนาดเครื่อง เมื่อเผาไหม้แล้วเชื้อเพลิงจะไหลลงไม่สะดวกและไม่ทันกับการเผาไหม้ที่มีอากาศเข้าเท่าเดิมอัตราการป้อนอากาศต่อเชื้อเพลิงจึงสูงขึ้น ทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงถึง 2,000 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงพอที่จะเหนียวนำไปเกิดเถ้าหลอมในเชื้อเพลิงทุกชนิดได้จึงควรมีการนำเชื้อเพลิงมาตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ ขนาดประมาณ 1 เซนติเมตร จะทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ดีขึ้น

3. การกระจายขนาด (Size Distribution) เชื้อเพลิงที่ไม่สร้างปัญหาให้กับเตาแก๊สซิฟิเคชันต้องมีขนาดที่สม่ำเสมอ ไม่แตกต่างกันมากนัก เพราะหากขนาดแตกต่างกันมาก อากาศและก๊าซจะไหลผ่านตามช่องว่างที่เกิดจากเชื้อเพลิงขนาดใหญ่และเล็กเกยกัน ทำให้บางบริเวณมีการเผาไหม้รุนแรงแต่บางบริเวณเย็นตัวลงและอาจสลับกันในเวลาต่อมา ทำให้เกิดการหลอมกันเป็นก้อน

4. ความหนาแน่นบัลค์ (Bulk density) เป็นค่าที่แสดงลักษณะการใช้ปริมาตรของเชื้อเพลิง คือ เมื่อเทเชื้อเพลิงที่เป็นเม็ดลงภาชนะรูปทรงของแต่ละเม็ดจะทำให้ผิวของเม็ดเชื้อเพลิงแนบกันไม่ได้คือเกิดช่องว่างระหว่างเม็ดเชื้อเพลิงขึ้น ทำให้เปลืองปริมาตรในภาชนะ บรรจุได้น้ำหนักน้อยเนื่องจากมีช่องว่างอากาศ ทำให้ค่าความหนาแน่นโดยรวมต่ำลง โดยทั่วไปเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตก๊าซจะเปลืองเนื้อที่ประมาณ 20-75 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรบรรจุ

5. สารระเหยในเชื้อเพลิง สารระเหย (Volatile Matter) ที่ปล่อยออกมาระหว่างปฏิกิริยาสามารถควบแน่นได้ที่อุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส ซึ่งจะก่อตัวเป็นน้ำมันดินและน้ำมันที่กลั่นตัวต่าง ถ้าเชื้อเพลิงมีสารละลายมากอาจจะสร้างปัญหาได้ เนื่องจากน้ำมันดินและไอน้ำที่มีอุณหภูมิควบแน่น 120-150 องศาเซลเซียส จะเกาะฝังตัวบนผนัง จึงต้องแยกออกก่อนนำไปใช้งานกับเครื่องยนต์

6. ชี๊ไถ้ เกิดจากสารแร่ธาตุที่เป็นส่วนประกอบในเชื้อเพลิงรวมตัวกับออกซิเจนขณะเผาไหม้ในความเป็นจริง อาจจะมีถ่านชาร์คค้างอยู่ด้วย สัดส่วนของชี๊ไถ้ในเชื้อเพลิงจะมีผลต่อการทำงานของเตาแก๊สซีไฟเออร์ ถ้าสัดส่วนชี๊ไถ้ในเชื้อเพลิงมีค่าสูง ก็จะทำให้พลังงานของก๊าซเชื้อเพลิงลดลง และเตาแก๊สซีไฟเออร์ต้องสำรองเนื้อที่เก็บชี๊ไถ้มากขึ้น และหากชี๊ไถ้หลอมตัว (ซึ่งมีโอกาสเกิดมากขึ้นเมื่อสัดส่วนชี๊ไถ้มีมากขึ้น ชี๊ไถ้มวลส่วนใหญ่จะมีชี๊ไถ้ประมาณ 1-3 เปอร์เซ็นต์ ยกเว้นแกลบและฟางข้าว จะมีสัดส่วนชี๊ไถ้ประมาณ 10-20 เปอร์เซ็นต์ จะมีปัญหาในการเผาไหม้และการกำจัดพอ สมควร

7. ความหนาของชั้นเชื้อเพลิง (Bed Thickness) จะมีผลต่อปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นในเตาเผา ในกรณีที่ความหนาของชั้นของเชื้อเพลิงเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้บริเวณที่เกิดปฏิกิริยารีดักชันมีช่วงกว้างขึ้น ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ส่งผลให้อุณหภูมิของเตาลดลง (นคร ทิพย์วงศ์, 2553, น.80-82)

ชนิดของเตาแก๊สซีไฟเออร์

ชนิดของเตาแก๊สซีไฟเออร์แบ่งออกเป็น 3 ชนิดหลัก ๆ ตามลักษณะการเคลื่อนที่ของเชื้อเพลิงและก๊าซเชื้อเพลิงภายในแก๊สซีไฟเออร์ คือ

1. เตาแก๊สซีไฟเออร์แบบ Fixed Bed

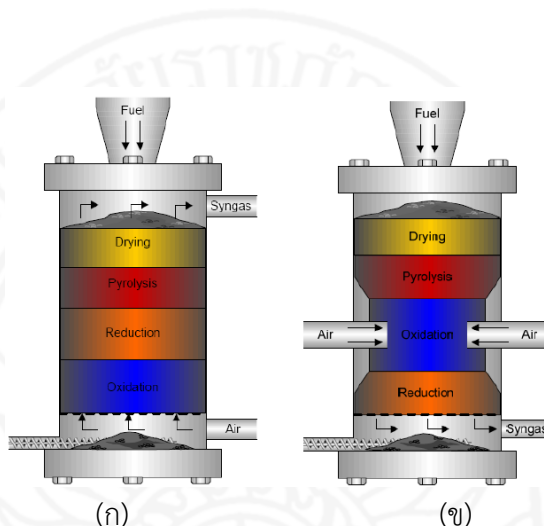
เตาแก๊สซีไฟเออร์แบบ Fixed Bed เหมาะสำหรับเชื้อเพลิงที่มีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะทำให้การไหลของเชื้อเพลิงมีความเสถียร โดยปกติเชื้อเพลิงจะมีขนาดประมาณ 1-100 มิลลิเมตร เชื้อเพลิงจะถูกป้อนทางด้านบนและตกลงสู่ด้านล่างของเตา เตาประเภทนี้ยังสามารถแบ่งตามทิศทางทางการไหลของอากาศ ออกได้เป็น 3 แบบ คือ

1.1 เตาแก๊สซีไฟเออร์ไหลขึ้น (Updraft Gasifier) เป็นเตาที่ผลิตใช้เริ่มแรกและเป็นแบบที่ง่ายที่สุด เชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าทางส่วนบนเตา และอากาศจะถูกส่งผ่านตะแกรงเข้ามาด้านล่าง บริเวณเหนือตะแกรงจะเป็นบริเวณการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง เกิดปฏิกิริยาขึ้นได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ก๊าซร้อนที่ผ่านจากบริเวณการเผาไหม้จะมีอุณหภูมิสูง และถูกส่งไปยังบริเวณปฏิกิริยารีดักชัน ซึ่งเป็นบริเวณที่มีปริมาณของคาร์บอนมากเพียงพอที่จะก่อให้เกิดปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ได้เป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน หลังจากนั้นก๊าซที่ได้จะไหลเข้าสู่ชั้นของชี๊ไถ้ใหม่ที่เพิ่งป้อน ก๊าซยังคงมีอุณหภูมิสูงอยู่จึงระเหยความชื้นที่อยู่ในชี๊ไถ้เหล่านั้นออก ทำให้อุณหภูมิต่ำลง ลักษณะการทำงานของเตาก๊าซซีไฟเออร์แบบไหลขึ้น ดังแสดงใน

ภาพที่ 5 เตาประเภทนี้มีรูปแบบที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน มีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง และก๊าซชีววมวลที่ได้มีอุณหภูมิไม่สูงนัก แต่มีข้อจำกัด คือ ก๊าซที่ผลิตได้จะมีผลิตภัณฑ์ประเภทน้ำมันและน้ำมันดินเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากจากบริเวณที่เกิดไพโรไลซิสและกลั่นตัวเมื่ออยู่ในบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ดังนั้นก๊าซที่ได้เหมาะกับการนำไปใช้กับหม้อไอน้ำหรือการอบแห้งวัสดุทางการเกษตร ซึ่งก๊าซที่ได้จะผสมกับอากาศและทำการเผาไหม้โดยตรงในห้องเผาไหม้ เพื่อให้ความร้อนในกระบวนการที่ใช้ความร้อน เตาประเภทนี้ยังเหมาะกับชีวมวลหลากหลายชนิด ง่ายต่อการเตรียมเชื้อเพลิง มีประสิทธิภาพสูง เพราะได้อุณหภูมิก๊าซออกต่ำ ติดตั้งง่ายและสะดวก แต่มีข้อเสียคือมีปริมาณน้ำมันดินออกมามาก เพราะน้ำมันดินที่ผลิตได้ในบริเวณไพโรไลซิสไม่ได้ผ่านบริเวณปฏิกริยาการเผาไหม้ก่อนออก จึงเกิดการสลายตัวทางความร้อนของน้ำมันดินน้อย การปรับการออกแบบบางอย่างสามารถลดปริมาณน้ำมันดินได้ เช่นการดึงก๊าซผลิตได้ออกที่เหนือบริเวณรีดักชัน หรือใช้วิธีการเติมไอน้ำร้อนผสมเข้ากับอากาศ เพื่อส่งเสริมให้เกิดปฏิกริยา Water Gas และจะได้ก๊าซเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพดีขึ้น ซึ่งการออกแบบมักจะรวมการสร้างไอน้ำไว้ในตัวเตา (นคร ทิพยาวงศ์, 2553, น.82-83)

1.2 เตาแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลลง (Downdraft Gasifier) การออกแบบเตาแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลลงออกแบบมาเพื่อขจัดน้ำมันดินที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงแข็งโดยเฉพาะ อากาศจะถูกดูดผ่านจากด้านบนลงสู่ด้านล่างของเตาผ่านกลุ่มของหัวฉีด ซึ่งเรียกว่า Tuyers บริเวณหัวฉีดจะเป็นบริเวณการเผาไหม้ ก๊าซที่ได้จากบริเวณนี้จะเกิดรีดักชันในขณะที่ไหลลงสู่ด้านล่างและผ่านชั้นของคาร์บอนร้อนซึ่งอยู่เหนือตะแกรง ขณะเดียวกันในชั้นของชีวมวลที่อยู่ทางด้านบนของบริเวณการเผาไหม้จะมีปริมาณออกซิเจนน้อยมาก ทำให้เกิดการสลายตัวทางความร้อน และไอของน้ำมันดินที่เกิดขึ้นจะไหลผ่านชั้นของคาร์บอนที่ร้อน ทำให้น้ำมันดินแตกตัวเป็นก๊าซ ซึ่งการแตกตัวนี้จะเกิดที่อุณหภูมิในช่วงระหว่าง 800-1,000 องศาเซลเซียส ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 1,000 องศาเซลเซียส ปฏิกริยาคายความร้อนจะทำให้ก๊าซที่ได้มีก๊าซที่ผ่านบริเวณการเผาไหม้จะมีสารประกอบของน้ำมันดิน และน้ำมันที่มีปริมาณลดลงเหลือน้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ของน้ำมันดิน และน้ำมันที่ได้จากเตาแบบก๊าซไหลขึ้น และก๊าซที่ได้จะมีความสะอาดมากกว่า ทำให้การกรองน้อยลง เตาแบบก๊าซไหลลง ไอน้ำที่หนีจากไพโรไลซิสจะต้องผ่านบริเวณการเผาไหม้จึงถูกทำให้สลายตัวทางความร้อน เตาประเภทนี้ออกแบบให้มีพื้นที่หน้าตัดลดแคบลงโดยมีการป้อนอากาศเข้าเหนือจุดพื้นที่หน้าตัดที่แคบที่สุด เรียกว่า คอคอด (Throat) เพื่อกำหนดให้เกิดบริเวณถ่านร้อนแดงแคบ ๆ ที่บังคับให้ก๊าซจากไพโรไลซิสผ่าน ยิ่งบริเวณคอคอดลดลงมากจะยิ่งทำให้อุณหภูมิบริเวณนี้เพิ่มสูงขึ้นภายในขอบเขตจำกัดระดับหนึ่งแต่หากคอคอดเล็กเกินไปจะส่งผลให้เกิดความดันตกคร่อมมาก ซึ่งจะกีดขวางการไหลของก้อนเชื้อเพลิงชีวมวล หากไม่ขนาดไม่เหมาะสม ฉะนั้นการออกแบบจึงต้องต้องพยายามให้มีช่องคอคอดที่ขนาดพอเหมาะ เพื่อไม่ให้มีปัญหาของการไหลหรือความดันตกคร่อม โดยอุณหภูมิที่บริเวณเผาไหม้ต้องรักษาระดับให้สูง เตาแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลลงจะไม่เหมาะกับเชื้อเพลิงที่มีเศษแฉะมาก เพราะสแลกหรือเศษแฉะที่ลอยขึ้นจาก

บริเวณออกซิเดชันจะไหลลงด้านล่าง เย็นตัวลง และแข็งตัวเป็นก้อนอย่างรวดเร็ว และจะกีดขวางทางการไหลของก๊าซและเชื้อเพลิง หากจำเป็นต้องใช้เชื้อเพลิงที่มีเศษเถ้ามาก จะต้องทำงานที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมตัวของเศษเถ้า และใช้ตะแกรงที่หมุนหรือขยับได้ ในเตาปฏิกรณ์แบบนี้จึงไม่ต้องการฉีดไอน้ำเข้าไป เพราะปริมาณความชื้นในเชื้อเพลิง และอากาศมีเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาอยู่แล้ว (นคร ทิพย์วงศ์, 2553, น.84-86) ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 (ก) เตาแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลขึ้น (ข) เตาแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลลง
ที่มา : กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2559, น.7

1.3 เตาแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลขวาง เตาประเภทนี้ อากาศจะถูกดูดผ่านหัวฉีดซึ่งอยู่ในแนวราบบริเวณการเผาไหม้จะอยู่ถัดจากหัวฉีดออกไป และถัดออกไปอีกจะเป็นบริเวณการเกิดรีดักชัน แล้วก๊าซชีวมวลจะออกสู่ภายนอกโดยผ่านตะแกรงรอบเตา ซึ่งอยู่ในแนวตั้งโดยรอบ ไอสารละลายและน้ำมันดินที่ได้จากการไพโรไลซิสจะผ่านบริเวณรีดักชันอุณหภูมิสูงก่อนที่จะออกไปสู่ภายนอกเตา ซึ่งทำให้น้ำมันและน้ำมันดินเกิดการแตกตัวเป็นก๊าซก่อน ทำให้ก๊าซชีวมวลที่ได้มีปริมาณน้ำมันและน้ำมันดินต่ำ เตาแบบนี้ได้ทำการออกแบบให้สามารถใช้กับยานพาหนะ เนื่องจากมีน้ำหนักเบาและมีผลตอบแทนเร็วต่อการเปลี่ยนแปลงของภาระที่กระทำอยู่ เชื้อเพลิงที่ควรนำมาใช้กับเตาเผาแบบนี้ควรเป็นถ่านไม้ที่มีคุณภาพสูง (นคร ทิพย์วงศ์, 2553, น.87)

การทำงานและประสิทธิภาพทั่วไปของเตาแก๊สซิฟิเคชันแบบฟิक्सเบด (Fixed Bed) ข้อนี้อาจเปรียบของระบบฟิक्सเบดโดยทั่วไปจะเป็นระบบที่มีการทำงานที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน ในกรณีระบบทั่วไปที่ใช้อากาศในการทำปฏิกิริยา ก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้จะมีค่าพลังงานต่ำ (LCV) อยู่ระหว่าง 4-6 MJ/Nm³ โดยส่วนใหญ่คุณภาพก๊าซที่ได้จะมีองค์ประกอบของธาตุต่าง ๆ ดังนี้ N₂ ร้อยละ 40-50

H₂ ร้อยละ 15–20 CO ร้อยละ 10–15 CO₂ ร้อยละ 10–15 และ CH₄ ร้อยละ 3–5 การใช้เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีความชื้นสูง (มากกว่าร้อยละ 20) ควรนำไปทำให้แห้งก่อนนำมาใช้งาน (Pre-Drying) จะเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ ในระบบที่ทันสมัยอาจมีการนำพลังงานความร้อนที่เหลือทิ้ง (Waste Heat) กลับมาใช้ในกระบวนการทำให้แห้ง (Pre-Drying) จะทำให้ก๊าซที่ได้มีค่าพลังงานเพิ่มสูงถึงร้อยละ 75 นอกจากนี้ปัญหาสิ่งเจือปนในก๊าซ เช่น สารระเหย (Volatiles) และเขม่าถ่านจะเป็นพารามิเตอร์ที่สามารถบ่งบอกถึงศักยภาพของระบบได้ ในปัจจุบันระบบฟิกส์เบดได้มีการปรับปรุงและพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน เช่น ระบบ Two-Stage process เป็นต้น (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2559, น.9) ดังตารางที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบข้อจำกัด และคุณภาพก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้จากเตาแก๊สซิไฟเออร์แบบฟิกส์เบด

ตารางที่ 4 ข้อจำกัดและคุณภาพของก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้จากเตาแก๊สซิไฟเออร์แบบฟิกส์เบด

| ตัวแปร | Downdraft | Updraft |
|--------------------------------------|-----------|--------------|
| อุณหภูมิก๊าซขาออก (°C) | 700 | 200-400 |
| น้ำมันดิน (Tar) (g/Nm ³) | 0.015-0.5 | 30-150 |
| ขนาดและรูปร่างเชื้อเพลิง | มีผลกระทบ | ไม่มีผลกระทบ |
| ค่าความร้อนก๊าซ, LHV | 4.5-5.0 | 5.0-6.0 |

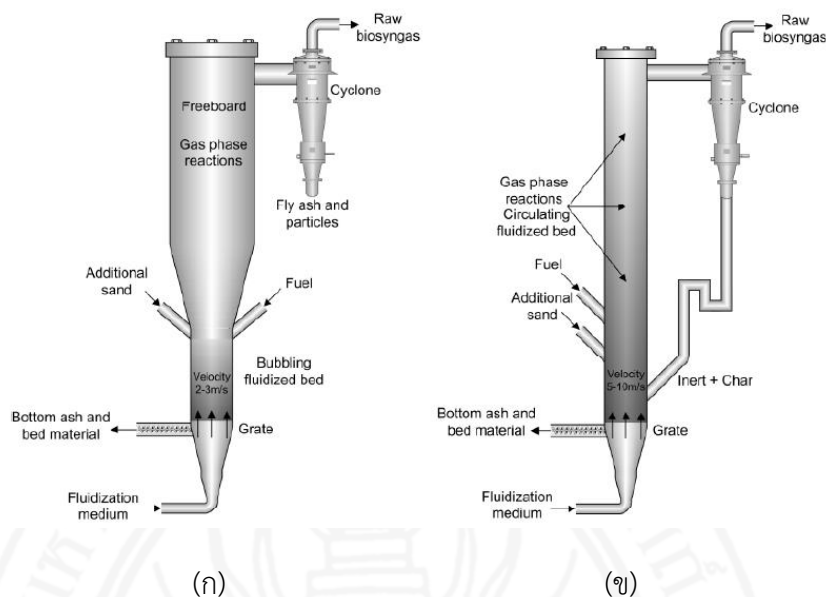
ที่มา : Knoef, 2005 (อ้างถึงใน กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2559, น.10)

2. แก๊สซิไฟเออร์แบบ Fluidized Bed ระบบเตาแก๊สซิไฟเออร์ แบบฟลูอิดไคซ์เบด

(Fluidize Bed Gasifier) เป็นระบบที่มีส่วนประกอบและโครงสร้างคล้ายคลึงกับเตาเผาเชื้อเพลิงโดยตรงแบบฟลูอิดไคซ์เบด (Fluidize Bed Combustor) เตาเผาแบบชั้นของไหล (Fluidize Bed Gasifier) เป็นการทำให้มีสภาวะเสมือนของไหล (Fluidized) หมายถึง การทำให้กลุ่มเม็ดของแข็งขนาดเล็กเปลี่ยนไปมีสภาวะคล้ายของไหลโดยการสัมผัสกับก๊าซหรือของเหลว ในชั้นของไหล (Fluidize Bed) แรงแม่เหล็กที่กระทำต่อน้ำหนักเม็ดของแข็งจะถูกต้านด้วยแรงจากแรงไคซ์ของก๊าซ ทำให้เม็ดของแข็งอยู่ในสภาวะกึ่งแขวนลอย พิจารณาการไหลของก๊าซหรืออากาศผ่านชั้นกลุ่มเม็ดของแข็งที่กองอยู่บนตะแกรงพูนภายในช่องท่อ เมื่อความเร็วของก๊าซเพิ่มสูงขึ้นจะมีผลต่อการเคลื่อนที่ของเม็ดของแข็งเหล่านี้ โดยที่ความเร็วก๊าซต่ำ ๆ กลุ่มเม็ดของแข็งจะอยู่นิ่งกับที่ตามปกติบนพื้นตะแกรง แต่เมื่อความเร็วสูงขึ้นเรื่อย ๆ แรงแยกบนเม็ดของแข็งจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งทำให้เม็ดของแข็งยกตัว ชั้นเม็ดของแข็งขยายตัวออกอยู่ในสภาพกึ่งแขวนลอยคล้ายของเหลวที่กำลังเดือด หากเพิ่ม

ความเร็วก๊าซขึ้นไปอีก ก็จะมีแรงมากพอที่จะเป่าเม็ดของแข็งเหล่านี้ให้หลุดออกไปได้ (นคร ทิพย์วงศ์, 2553, น.87-88)

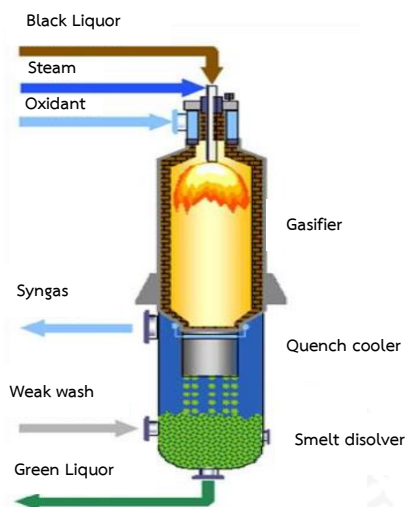
ระบบฟลูอิดไคซ์เบดโดยส่วนใหญ่จะนิยมใช้สำหรับโรงงานขนาดใหญ่เพื่อผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านหิน ข้อดีของระบบคือ การควบคุมอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ให้สม่ำเสมอทั่วกันนั้นสามารถทำได้ง่ายกว่าระบบฟิกส์เบด ซึ่งอุณหภูมิการทำงานของระบบประมาณ 800-850 องศาเซลเซียส (ต่ำกว่าระบบฟิกส์เบด) มีหลักการทำงานคือ การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาจะอาศัยตัวกลาง (Bed) เช่น ทราย กรวด วัสดุเซรามิก ซึ่งตัวกลางที่อยู่บริเวณด้านล่างของเตาปฏิกรณ์จะถูกทำให้ร้อนและเป่าให้ลอยขึ้นสู่ด้านบน เมื่อป้อนชีวมวลเข้าไปในระบบ ชีวมวลจะเคลื่อนตัวชนกับตัวกลางที่ร้อนและเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนจนเกิดการเผาไหม้และกลายเป็นก๊าซอย่างรวดเร็ว ซึ่งบริเวณการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ (Combustion) ไพโรไลซิส (Pyrolysis) และแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) จะเกิดในช่วงเดียวกันไม่มีการแบ่งแยกอย่างชัดเจน จึงทำให้มีน้ำมันดินเจือปนอยู่ในก๊าซเช่นเดียวกับระบบฟิกส์เบด แบบไหลขึ้นโดยน้ำมันดินที่เกิดขึ้นจะมีปริมาณปานกลางอยู่ระหว่างระบบไหลขึ้น (Updraft) และไหลลง (Downdraft) ระบบฟลูอิดไคซ์เบดเป็นระบบที่มีศักยภาพสูงในการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงหากเทียบกับระบบฟิกส์เบด คือ อัตราการเกิดความร้อน การแลกเปลี่ยนมวลสาร และกระจายความร้อนให้กับเชื้อเพลิงทำได้อย่างทั่วถึง ดังนั้น จึงทำให้ระบบเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วและเนื่องจากการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาอย่างทั่วถึงจึงทำให้ระบบมีความเสถียรมากกว่าระบบฟิกส์เบด ข้อได้เปรียบอีกประการหนึ่ง คือ การขยายขนาดเตาสามารถทำได้ตามความเหมาะสมโดยประเภทของระบบเตาแก๊สซิไฟเออร์แบบฟลูอิดไคซ์เบดได้มีการพัฒนาในหลายรูปแบบ เช่น Circulating Fluid Bed, Entrained Bed, Twin Fluid Bed เป็นต้น (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2559, น.10-11)



ภาพที่ 6 แสดงแก๊สซิไฟเออร์แบบ (ก) Bubbling Fluidized Bed (ข) Circulating Fluidized Bed
ที่มา : กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2559, น.11

การทำงานและประสิทธิภาพทั่วไปของระบบฟลูอิดไธเซต (Fluidize Bed) ปัญหาของระบบฟลูอิดไธเซต คือ เป็นระบบที่มีความซับซ้อนในการดำเนินงาน เนื่องจากต้องทำการควบคุมการทำงานของระบบภายใต้สภาวะความดันสูง เพื่อให้มีการเผาให้ตัวกลางลอยอยู่ในอากาศตลอดเวลา ดังนั้น ในระบบนี้การควบคุมการกระจายตัวของเบตจึงเป็นหัวใจสำคัญ การควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสมอาจช่วยลดการหลอมละลายของสารจำพวกซิลิกา (Silica) ที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในเบต (เช่น ทราย) กับสารประกอบเมทัลอัลคาไลน์ (Metal Alkaline) ในชีวมวลรวมตัวกันกับเบตทำให้เบตสูญเสียการกระจายตัว ซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้เกิดการสะสมและอุดตันตามชิ้นส่วนต่าง ๆ (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2559, น.11)

3. เตาแก๊สซิไฟเออร์แบบ Entrained Flow เหมาะสำหรับเชื้อเพลิงขนาดเล็กมาก คือ มีขนาดประมาณ 0.1-1 มิลลิเมตร หรือเชื้อเพลิงเหลว และใช้ออกซิเจนเป็นสารออกซิไดเซอร์ โดยออกซิเจนและเชื้อเพลิงจะถูกป้อนทางด้านบนของเตา การเกิดปฏิกิริยาภายในเตาจะไม่มีแบ่งโซนปฏิกิริยาที่ชัดเจน แต่การเกิดปฏิกิริยาจะเป็นรูปแบบของการผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงและสารออกซิเจนที่กระจายอยู่ทั่วแก๊สซิไฟเออร์ แก๊สซิไฟเออร์แบบนี้จะทำงานที่อุณหภูมิสูง จนกระทั่งในบางครั้งต้องมีระบบหล่อเย็นภายในเตาเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการหลอมตัวของซีไธ่ภายในเตา (สำนักพัฒนาทรัพยากรบุคคลด้านพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2555, น.3-37) ดังภาพที่ 7 แสดงลักษณะของแก๊สซิไฟเออร์แบบ Entrained Flow



ภาพที่ 7 แสดงระบบแก๊สซิไฟเออร์แบบ Entrained Flow

ที่มา : สำนักพัฒนาทรัพยากรบุคคลด้านพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2555, น.3-37)

ชนิดของเตาผลิตก๊าซชีววมวล

ชนิดของเตาแก๊สซิไฟเออร์ จำแนกออกโดยใช้ลักษณะการสัมผัสกันของเชื้อเพลิงกับตัวทำปฏิกิริยา โดยอาจสามารถจำแนกออกเป็น 3 ประเภทหลัก ๆ คือ 1. แบบ Fixed Bed และ Moving Bed 2. แบบ Fluidized Bed และ 3. แบบ Entrained Bed ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบระบบแก๊สซิไฟเคชันแต่ละประเภท

| ตัวแปร | แก๊สซิไฟเออร์ แบบ Fixed Bed | แก๊สซิไฟเออร์แบบ Fluidized Bed | แก๊สซิไฟเออร์แบบ Entrained Flow |
|------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| ขนาดเชื้อเพลิง | < 51 mm | < 6 mm | < 0.15 mm |
| การใช้เชื้อเพลิงขนาดเล็กกว่า | มีข้อจำกัด | ดี | ดีมาก |
| การใช้เชื้อเพลิงขนาดใหญ่กว่า | ดีมาก | ดี | ไม่ดี |
| อุณหภูมิก๊าซที่ออกจากระบบ | 450-600 °C | 800-1,000 °C | >1,260 °C |
| อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา | 1,090 °C | 800-1,000 °C | 1,990 °C |
| ประสิทธิภาพ | 80 % | 89 % | 80 % |
| การใช้งาน | ระบบขนาดเล็ก | ระบบขนาดกลาง | ระบบขนาดใหญ่ |
| ปัญหาของระบบ | มีทาร์และฝุ่นมาก | การเปลี่ยนรูปคาร์บอน | การลดอุณหภูมิก๊าซ |

ที่มา : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2561, น.65

พารามิเตอร์และการคำนวณที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบเตา

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์ระบบผลิตก๊าซชีววมวลมีหลายค่า เช่น อัตราการไหลของอากาศ อัตราการใช้เชื้อเพลิง ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง ค่าความร้อนของก๊าซชีววมวล เป็นต้น ซึ่งค่าต่าง ๆ จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณและประเมินสมรรถนะของระบบผลิตก๊าซต่อไป

1. Superficial Velocity เป็นค่าที่มีความสำคัญมากในการออกแบบเตาผลิตก๊าซชีววมวล เนื่องจากเป็นค่าที่ใช้ควบคุมอัตราการผลิตก๊าซ ค่าความร้อนของก๊าซ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง พลังงานที่ได้และอัตราการผลิตถ่านและน้ำมันดิน Reed & Das (1988, p.35) ได้ให้คำนิยาม Superficial Velocity, SV ตามสมการที่ 2.2 ดังนี้

$$SV = \frac{\text{อัตราการผลิตก๊าซชีววมวล}}{\text{พื้นที่หน้าตัดที่น้อยที่สุด}} \text{ (m/s)}$$

2. Heart load (Bs)

Food and Agriculture Organization of The United Nations (1986, p.35-36) และ Reed & Das (1988, p.35) ได้ให้ความหมายของ Heart load ไว้ว่า Bs คือ ปริมาณของเชื้อเพลิงแห้งที่ใช้หารด้วยพื้นที่หน้าตัดที่น้อยที่สุดมีหน่วยเป็น kg/cm²/h และ Bg คือ ปริมาตรก๊าซที่ผ่านพื้นที่หน้า ตัดต่อชั่วโมง มีหน่วยเป็น m³/ cm² /h เนื่องจาก 1 kg ของเชื้อเพลิงแห้งที่อยู่ด้านล่างของพื้นที่หน้า ตัดดังกล่าว สามารถผลิตก๊าซชีววมวลได้ 2.5 m³ ดังนั้น สามารถเขียนความสัมพันธ์ของค่า ทั้ง 2 ได้ตามสมการที่ 2.3 ดังนี้

$$Bs = 2.5 Bg \text{ และ } Bg = 0.36SV$$

โดยทั่วไปแล้วค่า Heart load จะใช้ในการออกแบบเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลลงเท่านั้น ซึ่งค่า Heart Load นี้เป็นหัวใจหลักของการออกแบบ เพื่อกำหนดค่าอื่น ๆ ต่อไป

3. อัตราส่วนสมมูล (Equivalence Ration, ER ϕ)

เพื่อลดจำนวนพารามิเตอร์ที่ใช้ในการประเมินสมรรถนะของระบบผลิตก๊าซชีววมวล จึงได้มีการกำหนดอัตราส่วนสมมูลขึ้น โดยให้นิยามว่า อัตราส่วนสมมูลระหว่างน้ำหนักของอากาศต่อน้ำหนักเชื้อเพลิงแห้งจริง เทียบกับ อัตราส่วนของน้ำหนักของอากาศต่อน้ำหนักของเชื้อเพลิงแห้งตามทฤษฎี ในการวิเคราะห์ระบบผลิตก๊าซชีววมวลสามารถคำนวณ โดยใช้สูตรคำนวณ ตามสมการที่ 2.4 ดังนี้

$$ER\phi = \frac{Q_{air} \times t}{m_{fuel} \times \left(\frac{A}{F} \text{ for } \phi = 1\right)}$$

| | |
|-------------------------------------|---|
| โดย $ER\phi$ | คือ อัตราส่วนสมมูล |
| Q_{air} | คือ อัตราการไหลของอากาศ (m^3/s) |
| t | คือ เวลาที่ใช้ในการเผา (s) |
| m_{Fuel} | คือ มวลเชื้อเพลิง (kg) |
| $\frac{A}{F} \text{ for } \phi = 1$ | คือ อัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิง (A/F) สำหรับ $\phi = 1$ คือ $5.22 m^3_{air}/kg$ ของชีวมวลแห้ง |

อัตราส่วนสมมูล สำหรับการผลิตก๊าซชีวมวลอยู่ในช่วง 0.268-0.43 ซึ่งในทางทฤษฎีแล้วอยู่ในช่วง 0.19-0.43 กรณี $ER = 0$ เป็นการสลายตัวด้วยความร้อนโดยมาใช้อากาศหรือปฏิกิริยาไพโรไลซิส และกรณี $ER = 1$ แสดงถึงการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ 100 เปอร์เซ็นต์ พอดีตามทฤษฎี

4. อัตราแก๊สซิฟิเคชันจำเพาะ (Specific Gasification Rate: SGR)

อัตราแก๊สซิฟิเคชันจำเพาะเป็นค่าที่บอกถึงปริมาณเชื้อเพลิงแข็งที่ใช้ไปกับการผลิตแก๊ส ซิฟิเคชันให้ได้ก๊าซชีวมวล ต่อ 1 หน่วยพื้นที่ของคอคอดหรือตะแกรง ในเวลา 1 ชั่วโมง หน่วยที่ใช้บอกปริมาณ คือ kg/m^2-h โดยคิดจากน้ำหนักเชื้อเพลิงที่ไม่มีความชื้น

5. Turn Down Ration

ค่าสำคัญที่เป็นตัวบอกความสม่ำเสมอที่จะเดินเครื่องๆ ได้ทั้งขณะเบาเครื่อง และเร่งเครื่อง คือ ค่า Turn Down Ration สำหรับเครื่องผลิตก๊าซ ตามสมการที่ 2.5 ดังนี้

$$\text{ค่า Turn Down Ration} = \frac{\text{ค่าสูงสุดของอัตราแก๊สซิฟิเคชันที่เกิดขึ้นได้}}{\text{ค่าต่ำสุดของอัตราแก๊สซิฟิเคชันที่เกิดขึ้นได้}}$$

ค่าสูงสุดของอัตราแก๊สซิฟิเคชันของเครื่องผลิตก๊าซแบบไหลลง = $1 m^3/cm^2-h$ กรณีใช้ไม้เป็นเชื้อเพลิง ค่าต่ำสุดของอัตราแก๊สซิฟิเคชันของเครื่องผลิตก๊าซชนิด Imbert = $0.3 m^3/cm^2-h$ ค่า Turn Down Ration ที่เหมาะสมกับรถยนต์ทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 4-6

6. ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal Efficiency)

ค่าที่มีความสำคัญทางด้านเทคนิคในการอธิบายความสามารถของระบบผลิตก๊าซชีววมวล คือ ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน โดยนิยามแล้ว คือ ปริมาณพลังงานความร้อนของก๊าซชีววมวลที่ได้ต่อพลังงานของเชื้อเพลิงที่ใช้ สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2.6 ดังนี้ FAO Forestry Department (1986, p.18)

$$\eta_m = \frac{H_g \times Q_g}{H_s \times M_s} \times 100$$

โดย η_m คือ ประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซชีววมวล (%)
 H_g คือ ค่าความร้อนของก๊าซชีววมวล (kJ/Nm³)
 Q_g คือ อัตราการไหลของก๊าซชีววมวล (m³/s)
 H_s คือ ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงชีววมวล (kJ/kg)
 M_s คือ อัตราการใช้เชื้อเพลิง (kg/s)

7. ค่าความร้อนของก๊าซชีววมวลที่ผสมกับอากาศแล้ว

ค่าความร้อนของก๊าซชีววมวลที่เหมาะสมทางทฤษฎี เพื่อให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์แล้ว สามารถคำนวณได้จาก องค์ประกอบของก๊าซ Food and Agriculture Organization of The United Nations (1986, p.10) ตามสูตรสมการที่ 2.7 ดังนี้

$$H_{ig} = \frac{12160V_{CO} + 10800V_{CO} + 35900V_{CH_4}}{1 + 2.38V_{CO} + 2.38V_{H_2} + 9.52V_{CH_4}}$$

โดย H_{ig} คือ ค่าความร้อนของก๊าซชีววมวลที่ผสมกับอากาศ (kJ/kg)

V_{CO} คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของคาร์บอนมอนอกไซด์ในก๊าซ (ก่อนผสมกับอากาศ)

V_{H_2} คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของไฮโดรเจนในก๊าซ (ก่อนผสมกับอากาศ)

V_{CH_4} คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของมีเทนในก๊าซ (ก่อนผสมกับอากาศ)

ค่าความร้อนของก๊าซชีววมวลที่ผสมกับอากาศแล้วจะมีค่าประมาณ 2,500 kJ/m³

8. ค่าความร้อนของชีววมวล สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.8 ดังนี้

$$Q = 8,419.7 + 479.3C + 667.6H + 58.8O - 1,207.7S$$

โดย Q เป็นค่าความร้อนสูงสุดต่อ 1 กิโลกรัม (mj/kg) ชีวมวลแห้ง และ C, H, O และ S คือค่าตัวเลขเป็นค่าร้อยละโดยน้ำหนักของคาร์บอน, ไฮโดรเจน, ออกซิเจน และซัลเฟอร์ ตามลำดับ

9. ประสิทธิภาพของระบบแก๊สซิฟิเคชัน

ประสิทธิภาพของระบบแก๊สซิฟิเคชัน นิยามโดยค่าพลังงานจากก๊าซชีวมวลที่ระบบสามารถผลิตได้ ต่อพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใส่ให้แก่ระบบ ซึ่งมีความสัมพันธ์เต็มรูป ตามสมการที่ 2.9 ดังนี้

$$\eta_{th} = \frac{(H_g \times O_g) + (O_g \times \rho_g \times C_p \times \Delta T)}{H_s \times M_s} \times 100\%$$

| | | |
|-----|-------------|---|
| โดย | η_{th} | คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบผลิตเชื้อเพลิงชีวมวล (%) |
| | H_g | คือ ค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิงชีวมวลที่ออกจากระบบ (kJ/Nm ³) |
| | Q_g | คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของก๊าซเชื้อเพลิงชีวมวลที่ออกจากระบบ (Nm ³ /hr.) |
| | ρ_g | คือ ค่าความหนาแน่นของก๊าซเชื้อเพลิงชีวมวล (kg/m ³) |
| | C_p | คือ ค่าความร้อนจำเพาะของก๊าซเชื้อเพลิงชีวมวล (kJ/kg.K) |
| | ΔT | คือ ค่าความร้อนแตกต่างระหว่างก๊าซเชื้อเพลิงชีวมวล กับอากาศที่เข้าเตา (K) |
| | H_s | คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใส่เป็นเชื้อเพลิงของระบบ (kJ/kg) |
| | M_s | คือ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงชีวมวลของระบบ (kg/s) |

ประเด็นทางด้านสิ่งแวดล้อมสำหรับเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน

1. ของแข็ง ของเสียในรูปของแข็ง ได้แก่ เถ้า (Ash) และถ่านชาร์ (Char) จากกระบวนการเผาไหม้สารอินทรีย์ ปริมาณเถ้าที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วงร้อยละ 1-20 น้ำหนัก ขึ้นอยู่กับชนิดและองค์ประกอบของชีวมวล การกักเก็บเถ้าสามารถทำได้โดยการเพิ่มความชื้นหรือการพรมน้ำให้เถ้าเกาะตัวกันเป็นก้อนเพื่อลดการฟุ้งกระจายอย่างใดก็ได้ การกำจัดเถ้าเหล่านี้ไม่ใช่ประเด็นปัญหาหลักทางด้านสิ่งแวดล้อม เนื่องจากของเสียเหล่านี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เช่น การนำไปใช้เป็นวัตถุดับในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ หรือการนำไปผสมเป็นวัสดุในการปรับปรุงดิน (Soil Conditioner)

2. ของเหลวน้ำเสียเกิดได้จากไอน้ำกลั่นตัวหรือคอนเดนเสต (Condensate) ที่ปนเปื้อนไปด้วยกรดอะซิติกฟีนอล และสารอินทรีย์ที่อยู่ในเนื้อไม้ หรือ “น้ำส้มควันไม้” มีฤทธิ์เป็นกรดอ่อน และ

หากใช้ระบบสครับเบอร์แบบเปียก (Wet Scrubber) ในการกำจัดสิ่งเจือปนจะทำให้เกิดน้ำเสีย (Scrubbing Water) ตามมา นอกจากนี้ น้ำเสียอาจปนเปื้อนน้ำมันชีวภาพ (Bio-Oil) ที่เกิดจากการเผาไหม้สารอินทรีย์ ดังนั้น น้ำเสียที่เกิดจากระบบแก๊สซิฟิเคชันหากมีปริมาณมากควรมีการติดตั้งระบบบำบัดก่อนปล่อยน้ำทิ้งลงสู่สิ่งแวดล้อม

3. ก๊าซมลพิษทางอากาศจากระบบแก๊สซิฟิเคชันที่ปล่อยออกสู่บรรยากาศ ได้แก่ ฝุ่นละออง และก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้ โดยระดับปริมาณมลพิษ เช่น ฝุ่นละออง และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะน้อยกว่าระบบเผาไหม้โดยตรง อย่างไรก็ตาม หากเปรียบเทียบกับการใช้เชื้อเพลิงจากฟอสซิลแล้วการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลจะมีปริมาณก๊าซที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์น้อยกว่า เช่น ซัลเฟอร์ออกไซด์ ไนโตรเจนออกไซด์ เป็นต้น โดยมลพิษทางอากาศหลัก ๆ ที่เกิดขึ้น ได้แก่ ฝุ่นละอองน้ำมันดิน และ ไรดิวิซ์ก๊าซต่าง ๆ

3.1 ฝุ่นละอองเกิดจากระบวนการเตรียมเชื้อเพลิง การเก็บรักษา และการนำมาใช้งาน (การเผาไหม้) ระบบรวบรวมและกำจัดเถ้า ปัญหาจากฝุ่นละออง มีดังนี้

3.1.1 การรบกวนและระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ

3.1.2 การระคายเคืองต่ออวัยวะต่าง ๆ เช่น ตา ผิวหนัง และระบบทางเดินหายใจ

3.1.3 การบดบังทัศนวิสัย

3.1.4 ฝุ่นที่ยังมีความร้อนและสามารถเกิดการติดไฟได้

3.1.5 การสะสมของฝุ่นละอองที่อาจก่อให้เกิดอันตรายจากการเกิดไฟฟ้าสถิตและการเกิดระเบิดตามมา

การลดการเกิดฝุ่นละอองจากการลดปริมาณการเก็บรักษาให้พอดีกับการใช้งาน ได้แก่ การปิดพื้นที่เพื่อป้องกันการฟุ้งกระจายของฝุ่นละออง การติดตั้งระบบดักฝุ่น นอกจากนี้ การฟุ้งกระจายของฝุ่นละอองอาจเกิดได้จากระบบเก็บเถ้าหรือระบบดักฝุ่นของระบบแก๊สซิฟิเคชันระหว่างการซ่อมบำรุงรักษา

3.2 ไรดิวิซ์ก๊าซต่าง ๆ (Reduced Gases) เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ กรดไฮโดรคลอริก ไฮโดรเจนซัลไฟด์แอมโมเนีย ซึ่งจะต้องถูกดักจับก่อนปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศ อาจทำได้โดยการติดตั้งระบบสครับเบอร์แบบเปียก การใช้สารประกอบต่าง การเผาทิ้ง เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การดักจับไรดิวิซ์ก๊าซสามารถทำได้ง่ายและมีประสิทธิภาพสูงกว่าการดักจับก๊าซออกไซด์ที่พบในระบบเผาไหม้ทั่วไป

3.3 กลิ่นกลิ่นเหม็นอาจเกิดจาก กลิ่นและควันที่เกิดจากระบวนการเผาไหม้การย่อยสลายของสารอินทรีย์การรั่วไหลของก๊าซ โดยเฉพาะไรดิวิซ์ก๊าซการเก็บกักของเสีย เช่น น้ำมันดิน น้ำเสีย เถ้า และของเสียอื่น ๆ

4. เสียงและแรงสั่นสะเทือน ประเด็นด้านผลกระทบทางเสียงและแรงสั่นสะเทือนเกิดจากการทำงานของเครื่องจักร โดยแหล่งกำเนิดเสียงได้แก่ อุปกรณ์และเครื่องจักรในการเตรียมชีวมวล (เช่น เครื่องตัด เครื่องบด) เครื่องบ่อนชีวมวล เครื่องอัดอากาศ และเครื่องยนต์ (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2559, น.12-14)

การออกแบบระบบกำจัดมลพิษทางอากาศในเตาเผาด้วยเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน

ระบบทำความสะอาดก๊าซเชื้อเพลิงเป็นระบบที่มีความสำคัญมาก สำหรับระบบผลิตก๊าซชีวมวล เพราะก๊าซที่ออกจากเตาผลิตก๊าซนั้นมีอุณหภูมิ และการเจือปนของสิ่งปนเปื้อน ซึ่งอุปกรณ์หลัก ในระบบทำความสะอาดก๊าซชีวมวล สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำความสะอาดก๊าซมีรายละเอียด ดังนี้

ไซโคลนดักฝุ่น

ไซโคลนเป็นอุปกรณ์ที่มีกลไกง่าย ๆ ในการที่ใช้ดักเก็บฝุ่นที่มีขนาดใหญ่ออกจากกระแสการไหลของก๊าซและใช้มากในอุตสาหกรรมผลิตไม้ โรงสี การผลิตซีเมนต์ ไซโคลนที่มีเพียงหนึ่งไซโคลนขนาดเล็กหลาย ๆ ไซโคลน (มัลติไซโคลน : Multicyclone) สามารถใช้กำจัดฝุ่นที่มีขนาดประมาณ 5 ถึง 10 ไมครอนได้ ไซโคลนที่ผลิตขึ้นมาสามารถทำด้วยวัสดุได้หลายชนิดและทำงานได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,000 °C โดยใช้สารที่ทนต่อความร้อนรองไว้ด้านในและโครงสร้างที่เหมาะสมที่จะทำงานได้ในที่ที่มีความดันสูง ราคาในการติดตั้งต่ำ และการดำเนินการน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับระบบอื่น ๆ

1. หลักการทำงานของไซโคลนดักฝุ่น

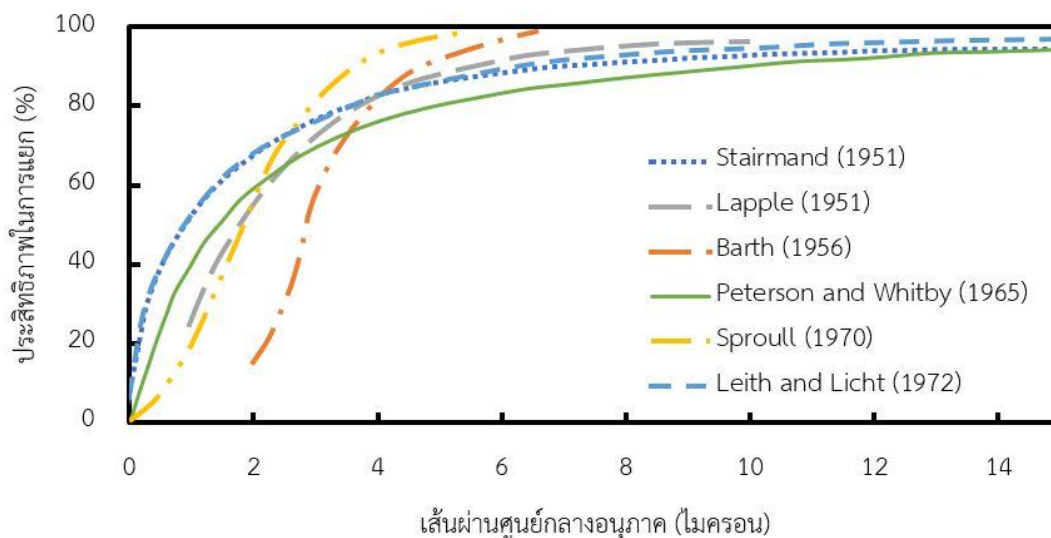
ไซโคลนทำงานโดยใช้แรงเหวี่ยงที่ถูกสร้างขึ้นด้วยกระแสของก๊าซที่หมุนในการแยกฝุ่นออกจากก๊าซฝุ่นในอากาศเข้าสู่ทางเข้าที่อยู่ใกล้กับส่วนบนของไซโคลน รูปร่างของไซโคลนทำให้ก๊าซที่ไหลเข้าสู่ไซโคลนมีการหมุนลงด้านล่างและแรงเหวี่ยงทำให้ฝุ่นมีการเคลื่อนที่ออกจากกระแสก๊าซ มีการปะทะกับผนังของไซโคลนและตกลงสู่ด้านล่าง อากาศที่บริสุทธิ์จะไหลออกทางด้านบนของไซโคลน ในไซโคลนแรงที่ถูกใส่เข้าไปให้ฝุ่นมีการหมุนเหวี่ยงได้มาจากการหมุนของกระแสก๊าซ ขนาดของแรงเหวี่ยงหาได้โดยพารามิเตอร์ต่าง ๆ (เช่น รูปร่างทางเรขาคณิต ขนาดและอัตราการไหลของไซโคลน) ซึ่งได้มาจากผู้ออกแบบ ซึ่งแรงนี้จะมากกว่าแรงถ่วงและให้ประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคมากกว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อฝุ่นมีขนาดใหญ่ และขนาดของอุปกรณ์ที่เล็กลง การที่ทำให้ได้ประสิทธิภาพสูงไซโคลนต้องมีขนาดเล็ก แต่ความดันตกคร่อม (Pressure Drop) จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว การที่จะยังคงให้ประสิทธิภาพสูงอยู่ได้ที่มีความดันตกคร่อมมีค่าที่ไม่มากทำได้โดยการนำไซโคลนขนาดเล็กจำนวนมากมาใช้แทนที่ในลักษณะการวางขนานกันเรียกว่า “มัลติไซโคลน”

2. ชนิดของไซโคลน

ไซโคลนที่ก๊าซไหลเข้าตามแนวสัมผัส มักเป็นไซโคลนขนาดใหญ่ มีทางเข้าด้านบน หรือด้านล่าง ไซโคลนที่ใช้ในการดักฝุ่นโดยทั่วไปเป็นชนิดด้านบน ส่วนไซโคลนชนิดทางเข้าด้านล่าง มักใช้ฝุ่นละอองที่ปนมากับหยดน้ำหลังจากผ่านการสับเบอร์ก๊าซไหลเข้ามาในแนวเส้นสัมผัสที่ด้านล่างของตัวไซโคลนและทำให้เกิดการหมุนวนขึ้นและไหลออกทางท่อออกด้านบนส่วนหยดน้ำ ซึ่งมีขนาดใหญ่ถูกเหวี่ยงไปยังผนังของไซโคลนและแยกออกจากกระแสก๊าซ

ไซโคลนชนิดด้านบนมีลักษณะท่อทางเข้ารูปร่างต่าง ๆ ที่ใช้มากที่สุด คือ ท่อเข้าตามแนวเส้นสัมผัส ส่วน Deflector Vane จะช่วยลดความปั่นป่วนของกระแสก๊าซที่ทางเข้า ทำให้ค่าความดันสูญเสียลดลง แต่ Deflector Vane มีผลต่อการเกิดกระแสวนทำให้ประสิทธิภาพการดักฝุ่นลดลง สำหรับท่อทางเข้าแบบ Helical Inlet ใช้เพื่อลดค่าความดันของไซโคลนและเพิ่มสมรรถนะในรูปเป็นท่อเข้าแบบ Involute Entry ทำให้เกิด Turbulence ที่ท่อเข้าน้อยที่สุด ดังนั้นค่าความดันสูญเสียมีค่าน้อยกว่าชนิดเข้าตามแนวเส้นสัมผัส สำหรับการถ่ายฝุ่น (Dust Discharge System) ของไซโคลนขนาดใหญ่ประกอบด้านล่างของไซโคลนที่เป็นรูปโคน และมีวาล์วสำหรับถ่ายฝุ่นที่เก็บได้ ซึ่งมีหลายชนิด ที่ใช้กันมากมี 4 ชนิด

สำหรับไซโคลนที่ทำงานที่สภาวะความดันติดลบต้องใช้วาล์วสำหรับระบายฝุ่น (Slide Discharge Valve) ที่มีการ Seal อย่างดีเพื่อป้องกันอากาศรั่วเข้าที่ก้นไซโคลน ซึ่งจะมีผลต่อการเกิดกระแสวน แสดง Slide Gate วาล์วชนิด Rotary Discharge Valve ซึ่งเป็นชนิดกันอากาศเข้า ถ้าใช้ Screw Conveyor ต้องใส่ Discharge Conveyor ระหว่างก้นไซโคลน และ Screw Conveyor เพื่อกันไม่ให้อากาศเข้า สำหรับท่อทางออกเป็นส่วนประกอบที่สำคัญ ในการออกแบบไซโคลนการใส่อุปกรณ์ Scroll หรือ Outlet Drum บนท่อทางออก จะช่วยลดการสูญเสียพลังงานของก๊าซที่หมุน ทำให้ความดันสูญเสียลดลงโดยไม่ทำให้ประสิทธิภาพลดลง ไซโคลนที่ก๊าซไหลเข้าตามแนวแกนมักเป็นไซโคลนที่มีขนาดเล็ก ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงกว่าไซโคลนขนาดใหญ่ เนื่องจากกระแสก๊าซถูกหมุนในกระแสวน ขนาดเล็กกว่า ดังนั้นกระแสก๊าซมีค่าความเร็ว (Radial Velocity) สูงในไซโคลนขนาดเล็ก ไซโคลนนี้มีทางก๊าซเข้าและออกในแนวแกนของไซโคลน กระแสก๊าซไหลเข้าสู่ไซโคลนโดยผ่านแผ่น Vane ทำให้เกิดการหมุนวน ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับที่เกิดในไซโคลนขนาดใหญ่ คือ ก๊าซที่ไหลเข้าทำให้เกิดกระแสวนส่วนนอก (Outer Vortex) ซึ่งเคลื่อนที่ลงไปยังส่วนปลายโคน แล้วก๊าซหมุนกลับเป็นกระแสวนด้านใน (Inner Vortex) และเคลื่อนที่ผ่านท่อออกด้านบน โดยทั่วไปใช้ไซโคลนขนาดเล็กนี้ (ขนาด 15-30 เซนติเมตร) หลายตัวมาต่อขนานกันเป็นมัลติไซโคลน (Multi-Cyclones) เพื่อรองรับกระแสก๊าซที่มีอัตราการไหลสูง (Reed, 2002 อ้างถึงใน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2561, น.82-86)



ภาพที่ 8 ประสิทธิภาพการแยกของไซโคลนประเภทต่าง ๆ

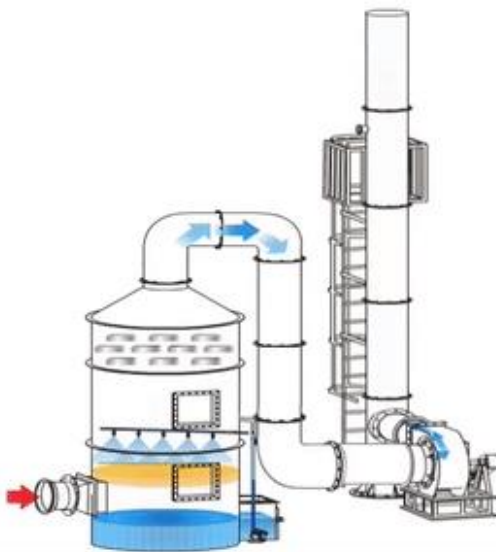
ที่มา: Leith & Mehta, 1973 อ้างถึงใน รัชชานนท์ เปี่ยมใจสว่าง, 2563

เครื่องเก็บแบบเปียก (Scrubbers or Wet Collector)

เครื่องเก็บแบบเปียกใช้ของเหลวซึ่งโดยปกติเป็นน้ำเป็นตัวจับอนุภาคหรือฝุ่น และเพิ่มขนาดของละอองไอ (Aerosols) ในกรณีทั้งสองนี้จะทำให้ขนาดมลสารเพิ่มขึ้น และช่วยให้การแยกมลสารจากกระแสก๊าซง่ายขึ้น

1. หลักการทำงานของเครื่องเก็บแบบเปียก

เครื่องเก็บแบบเปียก (Wet Scrubber) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้น้ำของเหลวในการดักจับฝุ่น กลิ่น หรือแก๊สที่มีอนุภาคเล็กมาก ๆ หรือ < 1 Micron ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับชนิดของอนุภาค หรือมลพิษนั้น ๆ ตั้งแต่กลิ่น แก๊ส ไอกรด ฝุ่นละออง ของเหลวที่ใช้ อาจเป็นน้ำ หรือของเหลวอื่น ๆ เช่น สารละลายต่าง กรด เป็นต้น Wet Scrubber เป็นระบบกรองฝุ่นควันและไอสารเคมีที่มีขนาดเล็กมีความชื้นและความร้อนสูง เช่น งานดัมสารเคมี งานเตาหลอมอลูมิเนียม เป็นต้น Wet Scrubber เป็นระบบที่ใช้น้ำในการ Scrub โดยมี Spray Nozzle มาจับฝุ่นไอ ควัน และกลิ่น หากในกรณีมีกลิ่นอินทรีย์สารอาจจะมี Media ในการกรองกลิ่นอีกชั้นหนึ่ง การติดตั้งระบบ Wet Scrubber มีข้อจำกัดในเรื่องการบำบัดน้ำที่อยู่ในระบบ หากโรงงานที่ติดตั้งไม่มีระบบบำบัดน้ำเสีย น้ำในระบบ Wet Scrubber นั้นไม่สามารถบำบัดได้ และรวมไปถึงการบำรุงรักษาที่ยุ่งยาก (กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2561, น.90) ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ตัวอย่างระบบทำความสะอาดก๊าซแบบ Wet Scrubber

ที่มา : Crane Global Limited, 2561

เครื่องดักฝุ่นแบบเปียก หรืออาจเรียกว่า สครับเบอร์แบบเปียก (Wet Scrubber) จะทำงานโดยอาศัยการสัมผัสกันระหว่างฝุ่น (หรือสารปนเปื้อนที่เป็นก๊าซและไอ) กับของเหลวซึ่งโดยปกติ คือน้ำ การสัมผัสจะทำให้ของเหลวรวมตัวกับฝุ่นส่งผลให้ฝุ่นมีขนาดใหญ่ขึ้น และแยกตัวออกจากอากาศ โดยฝุ่นที่ถูกแยกออกมาจะมีลักษณะคล้ายโคลน (Sludge) ในกรณีที่เป็นฝุ่นละเอียดของเหลวที่ใช้จะต้องมีลักษณะเป็นหยดเล็ก ๆ หรือเป็นฝอยละอองและต้องไหลหรือเคลื่อนตัวด้วยความเร็วสูง ซึ่งลักษณะเช่นนี้ต้องใช้พลังงานมาก โดยพลังงานที่ใช้เพื่อการทำให้อากาศสัมผัสกับฝุ่นถือเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งต่อค่าใช้จ่ายในการทำงานของเครื่องดักฝุ่น ด้วยเหตุที่ฝุ่นถูกดักจับได้จะมีลักษณะเปียกคล้ายโคลนหากปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมก็จะก่อให้เกิดมลภาวะทางน้ำ ดังนั้นจึงต้องมีการบำบัดหรือแยกฝุ่นออกจากของเหลวก่อน ซึ่งสามารถทำได้โดยจัดให้มีการตกตะกอนของฝุ่นภายในถัง หลังจากนั้นจึงนำตะกอนดังกล่าวไปทิ้ง ส่วนของเหลวอาจปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมหรืออาจนำกลับไปใช้อีกครั้ง สำหรับข้อดี และข้อเสียของเครื่องดักฝุ่นแบบเปียกเมื่อเทียบกับเครื่องดักฝุ่นชนิดอื่น (กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2561, น.91) ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ข้อดีและข้อเสียของเครื่องดักฝุ่นแบบเปียก

| ข้อดี | ข้อเสีย |
|---|---|
| 1. ใช้เงินลงทุนต่ำ | 1. มีค่าใช้จ่ายด้านการดำเนินงานและการบำรุงรักษาสูง |
| 2. ขนาดเล็กใช้พื้นที่ติดตั้งน้อย | 2. โครงสร้างต้องทำจากวัสดุที่มีความต้านทานการกัดกร่อนสูงหากนำไปใช้กับสารปนเปื้อนหรือมีความสามารถในการทนต่อการกัดกร่อน |
| 3. ใช้กับอากาศที่มีอุณหภูมิสูงและความชื้นสูงได้ดี | 3. ก่อให้เกิดมลภาวะทางน้ำอันเนื่องจากการผสมกันของฝุ่นและของเหลว |
| 4. ใช้ดักหรือแยกฝุ่นที่มีลักษณะเหนียวได้ดี | 4. ต้นทุนในการสร้างและดำเนินการในส่วนของระบบบำบัดน้ำ |
| 5. ใช้ดักหรือแยกสารปนเปื้อนที่เป็นก๊าซหรือไอได้ดี | 5. สิ้นเปลืองพลังงานในการทำงานมาก เนื่องจากมีความดันตกคร่อมระหว่างการทำงานสูง |
| 6. ไม่เกิดปัญหาเรื่องไฟไหม้หรือการระเบิด | |

ที่มา : กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2561, น.90.

เครื่องดักฝุ่นแบบเปียกมีหลักการทำงานประกอบด้วยกระบวนการที่สำคัญ 3 กระบวนการ ได้แก่

1.1 กระบวนการเพิ่มความชื้นให้อากาศ (Air Humidification) เป็นกระบวนการแรกของการดักฝุ่นกระทำโดยการของเหลวเข้ามาในกระแสการไหลของอากาศซึ่งมีฝุ่น ไหลปะปนมาด้วย กระบวนการนี้จะช่วยให้อุณหภูมิจากอากาศลดลงอันเป็นผลให้อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องดักฝุ่นมีค่าลดลงด้วย วิธีการนี้ช่วยลดพลังงานที่ต้องป้อนให้แก่พัดลมที่ใช้ในระบบหรือทำให้เราสามารถใช้อย่างมีประสิทธิภาพที่มีขนาดเล็กลงได้

1.2 กระบวนการสัมผัสกันระหว่างอากาศ ฝุ่น และของเหลว (Air-liquid Contact) เป็นกระบวนการที่สำคัญที่สุดซึ่งส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการแยกฝุ่น หากระยะเวลาที่อากาศและของเหลวสัมผัสกันมีมากประสิทธิภาพการแยกฝุ่นก็จะยิ่งมากเมื่อทั้งอากาศและของเหลวรวมกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้น มีลักษณะเป็นหยดของเหลว และเมื่อมีขนาดใหญ่ขึ้นจะตกลงสู่ด้านล่างด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก ส่วนหยดของเหลวที่มีขนาดเล็กจะถูกอากาศพัดพาขึ้นสู่ด้านบน

1.3 กระบวนการแยกของเหลวออกจากอากาศ (Liquid-air Separation) เป็นกระบวนการสุดท้ายของการดักฝุ่น กระบวนการนี้ช่วยไม่ให้หยดของเหลวขนาดเล็กถูกอากาศพัดพาหรือหอบออกสู่บรรยากาศ การแยกของเหลวและอากาศออกจากกันสามารถทำได้โดยใช้อุปกรณ์แยกของเหลว (Mist Eliminator) ซึ่งทำงานโดยใช้ของเหลวเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหลอย่างฉับพลัน

2. ชนิดของเครื่องดักฝุ่นแบบเปียก

เครื่องดักฝุ่นแบบเปียกถูกออกแบบมาให้ทำงานที่ความดันตกคร่อมตั้งแต่ 0.5 in.wg จนกระทั่งความดันตกคร่อมมากกว่า 60 in.wg ดังนั้นจึงสามารถแบ่งเครื่องดักฝุ่นแบบเปียกตามค่าความดันที่เกิดขึ้นระหว่างการทำงานได้ประกอบด้วย (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2561, น.92-93)

2.1 หอพ่นของเหลว (Spray Tower or Spray Chamber) เป็นเครื่องดักฝุ่นแบบเปียกที่ง่ายที่สุด ละอองของเหลวที่พ่นออกมาเกิดจากหัวฉีดซึ่งมีความดันไม่สูงมากนัก ทำให้ประสิทธิภาพการแยกฝุ่นค่อนข้างต่ำ สำหรับปริมาณของเหลวที่ใช้โดยทั่วไปไม่เกิน 5 gpm (แกลลอน/นาที) ต่ออัตราการไหลของอากาศที่ภาวะมาตรฐาน 1,000 cfm ความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นขณะการทำงานของหอพ่นของเหลวจะมีค่าค่อนข้างต่ำ อยู่ในช่วง 0.5 – 1.5 in.wg ในขณะที่ความดันของของเหลวที่ต้องใช้เพื่อให้เกิดฝอยละอองจะอยู่ในช่วง 10 – 400 psig

2.2 สกรับเบอร์แบบแพ็กเบด (Packed-Bed Scrubber) มีลักษณะคล้ายหอพ่นของเหลว แตกต่างกันที่มีการติดแผงกระจายของเหลว ขวางกระแสการไหลของของเหลวที่ถูกพ่นออกมา ทำให้ของเหลวแตกตัวมีขนาดเล็กและบางส่วนจะไหลเป็นฟิล์มไปตามผิวของแผงกระจายของเหลว ส่งผลให้ประสิทธิภาพการแยกฝุ่นสูงขึ้น ใช้ได้ดีกับสารปนเปื้อนที่เป็นฝุ่นและไอ อย่างไรก็ตาม การติดตั้งแผงกระจายของเหลวจะทำให้แรงดันตกคร่อมมีค่ามากขึ้นด้วย อยู่ในช่วง 1.5 – 3.5 in.wg

2.3 สกรับเบอร์แบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Scrubber) มีการทำงานคล้ายกับไซโคลนดักฝุ่น การทำงานเริ่มจากฝุ่นและอากาศจะถูกเหวี่ยงให้เกิดการหมุนวนไปกระทบกับผนังด้านในเปียก ซึ่งเกิดจากการพ่นของเหลวผ่านหัวฉีดที่ติดตั้งอยู่ด้านบน เกิดการสัมผัสกันของของเหลวและฝุ่น มีประสิทธิภาพการแยกฝุ่นสูงกว่าหอพ่นของเหลว เนื่องจากมีฝุ่นบางส่วนถูกแยกออกจากอากาศด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางก่อนที่ฝุ่นส่วนที่เหลือจะถูกเหวี่ยงให้ไปติดผนังที่เปียกและตกลงด้านล่าง โดยทั่วไปความดันตกคร่อมจะอยู่ในช่วง 2 – 8 in.wg ในขณะที่ของเหลวที่ใช้อยู่ในช่วง 2 - 5 gpm ต่ออัตราการไหลของอากาศที่ภาวะมาตรฐาน 1,000 cfm

2.4 สกรับเบอร์แบบเวนจูรี (Venturi Scrubber) อาศัยการดึงของเหลวให้มาสัมผัสกับอากาศที่ไหลผ่านเวนจูรี อากาศที่ไหลผ่านเวนจูรีจะมีความเร็วที่สูงมากบริเวณคอคออด ซึ่งเป็นส่วนที่แคบที่สุดของเวนจูรี มีความเร็วของอากาศ 12,000 – 24,000 fpm ของเหลวจะจ่ายเข้าสู่เวนจูรีโดย

ผ่านท่อที่ติดตั้งด้านบนใกล้กับคอคอดในอัตรา 5 -15 gpm ต่ออัตราการไหลของอากาศที่ภาวะมาตรฐาน 1,000 cfm ส่งผลให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างอากาศและของเหลว ซึ่งทำให้ฝุ่นถูกจับด้วยของเหลว การแยกตัวของฝุ่นออกจากกระแสการไหลของอากาศจะเกิดขึ้นภายในไซโคลนซึ่งติดตั้งต่อจากเวนจูรี เครื่องดักฝุ่นชนิดนี้มีประสิทธิภาพค่อนข้างสูง แต่ความดันตกคร่อมจะมีมากเช่นกัน ขึ้นอยู่กับขนาดของฝุ่นโดยอาจมีค่าต่ำเพียง 5 in.wg สำหรับฝุ่นหยาบ และอาจมากถึง 100 in.wg สำหรับฝุ่นละเอียดมาก

3. การติดตั้งอุปกรณ์ทำความสะอาดก๊าซชีววมวล

การติดตั้งอุปกรณ์ทำความสะอาดก๊าซชีววมวลในระบบผลิตก๊าซชีววมวลจำเป็นต้องพิจารณาองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องในประเด็นต่าง ๆ อย่างรอบด้าน เพื่อให้อุปกรณ์ที่นำมาติดตั้งสามารถทำความสะอาดก๊าซชีววมวลได้ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการก่อนนำก๊าซชีววมวลไปใช้งาน เนื่องจากอุปกรณ์ทำความสะอาดแต่ละชนิดมีคุณสมบัติในการทำความสะอาดสารปนเปื้อนที่แตกต่างกัน รวมถึงเงินลงทุนที่ในการติดตั้งระบบทำความสะอาดก๊าซชีววมวล ตลอดจนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ทำความสะอาดก๊าซชีววมวล เพื่อให้อุปกรณ์สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพตลอดการใช้งาน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องนำมาพิจารณาในการติดตั้งอุปกรณ์ทำความสะอาดก๊าซชีววมวล

สารปนเปื้อนในก๊าซชีววมวล ได้แก่ ฝุ่นหยาบ ฝุ่นละเอียด น้ำมันดิน และความชื้น อุปกรณ์ทำความสะอาดฝุ่น และน้ำมันดินในก๊าซชีววมวล ทำได้ 2 วิธี คือการทำความสะอาดแบบแห้ง และการทำความสะอาดแบบเปียก การทำความสะอาดแบบแห้งจะใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น ไซโคลน เครื่องแยกฝุ่น ถูกรอง เครื่องดักอนุภาคแบบใช้ไฟฟ้าสถิต ส่วนการทำความสะอาดแบบเปียกจะใช้สครับเบอร์แบบหอพ่นน้ำ สครับเบอร์แบบคอคอด และสครับเบอร์แบบหอบรรจุวัสดุ

การติดตั้งอุปกรณ์ทำความสะอาดก๊าซชีววมวลในการใช้งานจริงในระบบเตาผลิตก๊าซชีววมวลนั้น จะพิจารณาลำดับความสำคัญในการติดตั้ง ซึ่งเมื่อพิจารณาจากช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำงานของอุปกรณ์ทำความสะอาดก๊าซชีววมวลที่ติดตั้งก่อนเข้าสู่อุปกรณ์ลดอุณหภูมิของก๊าซชีววมวล และหลังจากลดอุณหภูมิของก๊าซ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2561, น.100) ได้ดังนี้

- ขั้นที่ 1 ติดตั้งไซโคลนเพื่อบำบัดฝุ่นหยาบ
- ขั้นที่ 2 ติดตั้งเครื่องดักฝุ่นแบบเปียก (Scrubber) เพื่อบำบัดฝุ่นละเอียด และน้ำมันดิน
- ขั้นที่ 3 ติดตั้งอุปกรณ์ลดอุณหภูมิก๊าซเชื้อเพลิง
- ขั้นที่ 4 ติดตั้งถูกรอง เพื่อบำบัดฝุ่นละเอียด

การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ และเศรษฐศาสตร์สิ่งแวดล้อม

การออกแบบเตาแก๊สซีไฟเออร์ เพื่อใช้ในการจัดการกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ มีความมุ่งหวังให้ที่ออกแบบมีประสิทธิภาพ และมีผลดีต่อวิสาหกิจชุมชนผู้ผลิตเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ โดยยึดหลักการประยุกต์ให้สามารถเกิดผลงานที่มีประสิทธิภาพ แม้จะพบว่าเป็นการออกแบบที่ดีในเชิงวิศวกรรม แต่บางครั้งพบว่างานออกแบบต่าง ๆ เหล่านั้น ไม่เป็นผลดีในแง่เศรษฐศาสตร์ หรือไม่มีความเหมาะสมในการลงทุน เนื่องจากข้อจำกัดของทรัพยากร เช่น วัสดุ แรงงาน ทรัพยากร และเวลา เป็นต้น ทำให้การออกแบบเพื่อให้เกิดผลดีทางด้านวิศวกรรมเป็นไปได้ยาก จึงมีการพิจารณาเชิงเศรษฐศาสตร์ ที่ต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายต่าง ๆ และการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างคุ้มค่า (มัชชุลิกา คอนเมฆ, 2555, น.18)

เยาวเรศ ทับพันธุ์ (2541, น.2-5) กล่าวว่า การประเมินโครงการทางด้านเศรษฐศาสตร์ มีความแตกต่างจากการประเมินโครงการด้านการเงิน เนื่องจากการประเมินที่ไม่ได้ให้ความสนใจกับกำไรที่เป็นตัวเงิน แต่เป็นการประเมินว่าทรัพยากรที่ใช้ไปในโครงการหนึ่ง จะก่อให้เกิดประโยชน์ในลักษณะต่าง ๆ ต่อสังคมอย่างไรบ้าง เป็นการใช้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดต่อสังคมหรือไม่ สามารถแบ่งการประเมินตามแนวทางเศรษฐศาสตร์เป็น 4 รูปแบบ ได้แก่ 1. การวิเคราะห์ต้นทุน-ผลประโยชน์ (Cost-Benefit Analysis : CBA) 2. การวิเคราะห์ประสิทธิผลของต้นทุน (Cost Effectiveness Analysis : CEA) 3. การวิเคราะห์ต้นทุนต่ำสุด (Cost Minimization Analysis : CMA) และ 4. การวิเคราะห์ต้นทุน-อรรถประโยชน์ (Cost Utility Analysis : CUA)

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยเลือกใช้การวิเคราะห์ต้นทุน-ผลประโยชน์ ซึ่งเป็นรูปแบบการวิเคราะห์ที่สมบูรณ์ที่สุดตามแนวความคิดพื้นฐานทางเศรษฐศาสตร์ โดยเป็นการวิเคราะห์โครงการที่คำนึงถึงต้นทุนและผลประโยชน์ที่เกิดขึ้นจากการมีโครงการ ซึ่งมีความพยายามที่จะประเมินต้นทุนและผลประโยชน์ที่เกิดขึ้นออกมาเป็นตัวเงิน เพื่อประเมินความคุ้มค่าของโครงการ แต่ในทางปฏิบัติอาจมีปัญหาในการนำไปใช้มากมายในการนำไปประเมิน โดยเฉพาะในการประเมินมูลค่าผลประโยชน์ของโครงการที่ให้ประโยชน์ต่อสังคมในลักษณะที่จับต้องไม่ได้

หลักเกณฑ์การวิเคราะห์ต้นทุนและผลตอบแทน

1. การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายรายปี สามารถคำนวณค่าใช้จ่ายรายปีได้จากการแปลงมูลค่าเงินลงทุนในปัจจุบันให้เป็นมูลค่าการลงทุนต่อปี ตลอดอายุการใช้งานของระบบแก๊สซีไฟเคชั่น โดยใช้การคำนวณเงินเท่ากันแบบสม่ำเสมอตามช่วงเวลา (Uniform Series Formulas) เป็นการพิจารณาเงินที่เป็นรายปีตามระยะเวลาและอัตราดอกเบี้ยที่กำหนด (กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2561, น.139)

ในการเปลี่ยนมูลค่าเงินลงทุนสร้างระบบในปัจจุบัน (PW) เป็นมูลค่าปัจจุบันของเงินลงทุนรายปี (C_p) สามารถคำนวณได้ด้วยสมการ (Capital-recovery Factor) ที่ 2.10

$$C_p = P_w \left(\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right)$$

โดยที่ P_w = มูลค่าเงินลงทุนสร้างระบบในปัจจุบัน (บาท)
 i = อัตราดอกเบี้ยต่อปี (%)
 n = อายุการใช้งานของระบบ (ปี)

ในการเปลี่ยนมูลค่าซากของระบบ เป็นมูลค่าซากของระบบในแต่ละปี (C_s) สามารถคำนวณได้ด้วยสมการที่ 2.11 (Sink-fund Factor) ต่อไปนี้

$$C_s = S \left(\frac{i}{(1+i)^n - 1} \right)$$

โดยที่ S = มูลค่าซากของระบบเมื่อหมดอายุการใช้งาน (บาท)
 i = อัตราดอกเบี้ยต่อปี (%)
 n = อายุการใช้งานของระบบ (ปี)

สามารถคำนวณต้นทุนค่าใช้จ่ายรายปีทั้งหมด (C_T) ได้ด้วยสมการที่ 2.12 ต่อไปนี้

$$C_T = C_p + C_m + C_e - C_s$$

โดยที่ C_m = ค่าบำรุงรักษาระบบต่อปี (บาท)
 C_e = มูลค่าพลังงานที่ใช้ต่อปี (บาท)

2. ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) การคำนวณระยะเวลาคืนทุน เป็นการหารระยะเวลาที่ผลตอบแทนสุทธิจากการดำเนินงานมีค่าเท่ากับค่าลงทุนของระบบ โดยส่วนใหญ่จะนับเวลาเป็นจำนวนปี โดยทั่วไประยะเวลาคืนทุนต้องไม่ยาวนานกว่าอายุการใช้งานของโครงการ ซึ่งจำนวนปีที่จะได้ผลตอบแทนที่คุ้มทุนสามารถหาค่าได้ ด้วยสมการที่ 2.13

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน (ปี)} = \frac{\text{เงินสดจ่ายลงทุนสุทธิ}}{\text{ค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้สุทธิต่อปี}}$$

เมื่อ เงินลงทุนเริ่มต้น ประกอบด้วย ค่าอุปกรณ์ ค่าติดตั้ง และค่าบริหารโครงการ เป็นต้น ค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้เฉลี่ยสุทธิต่อปี คือค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่ประหยัดได้เฉลี่ยต่อปีหลังจากหักค่าใช้จ่ายจากการดำเนินการแล้ว (มัชชูลิกา คอนเมฆ, 2555, น.19)

3. มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value : NPV) เนื่องจากผลตอบแทนของการใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชัน ในกระบวนการผลิตเมล็ดมะม่วงหิมพานต์มักเป็นผลตอบแทนในระยะยาวคือเราจะได้ผลตอบแทนจากการใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันเป็นเวลานาน หรือค่าใช้จ่ายส่วนใหญ่มักจะเกิดในช่วงเริ่มต้น ดังนั้นการที่จะเปรียบเทียบถึงผลตอบแทนและรายจ่ายที่ต้องเสียไปจะต้องทำการปรับค่าของเวลาและผลตอบแทนให้อยู่ในรูปของมูลค่าปัจจุบันของการใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันก่อน

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) คือ ผลต่างระหว่างมูลค่าปัจจุบันของการประหยัดต้นทุนพลังงานจากการใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิงในรูปตัวเงินที่คาดว่าจะได้รับ กับมูลค่าปัจจุบันของเงินที่จ่ายออกไปภายใต้โครงการที่กำลังพิจารณา ณ อัตราส่วนลด (Discount Rate) สามารถคำนวณหามูลค่าปัจจุบันสุทธิได้จากสมการที่ 2.14 ดังนี้

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{ES_t}{(1+i)^t} - I_0$$

| | | |
|-----------------|---|--|
| โดยที่ n | = | อายุของโครงการ (ปี) |
| ES _t | = | ต้นทุนพลังงานที่ประหยัดได้ (Energy Cost Savings) รายปี ตั้งแต่ปลายปีที่ 1 ถึง n |
| I ₀ | = | เงินจ่ายลงทุนตอนเริ่มโครงการ (Total Investment) |
| i | = | อัตราส่วนลด (Discount Rate) |

หลักในการตัดสินใจ (Decision Rule) เมื่อ NPV > 0 หรือมีค่าเป็นบวก แสดงว่าโครงการมีความเหมาะสมที่จะลงทุน (มัชชูลิกา คอนเมฆ, 2555, น.18-19)

4. อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return : IRR) คือ อัตราส่วนลด (Discount Rate) ที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) มีค่าเท่ากับเงินจ่ายลงทุนตอนเริ่มโครงการ (I₀) การคำนวณหาค่าอัตราผลตอบแทนภายใน คือการสุ่มหาค่าอัตราส่วนลดที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) มีค่าเท่ากับศูนย์ ถ้าค่าอัตราผลตอบแทนมากกว่าหรือเท่ากับค่าของต้นทุนอัตราส่วนลด (i) ที่ผู้

ลงทุนเลือกใช้เป็นจัดตัดสินใจ เช่น อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ ถือได้ว่าโครงการดังกล่าวเป็นโครงการที่น่าลงทุน สามารถคำนวณหาอัตราผลตอบแทนภายในได้จากสมการที่ 2.15 ดังนี้

$$-I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{ES_t}{(1+IRR)^t} = 0$$

| | | | |
|--------|-----------------|---|--|
| โดยที่ | n | = | อายุของโครงการ (ปี) |
| | ES _t | = | ต้นทุนพลังงานที่ประหยัดได้ (energy cost savings) รายปี ตั้งแต่ปลายปีที่ 1 ถึง n |
| | I ₀ | = | เงินจ่ายลงทุนตอนเริ่มโครงการ (Total Investment) |
| | IRR | = | อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return) |

โดยทั่วไป วิธีการประเมินโครงการจากมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) และอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) จะให้ผลการตัดสินใจรับโครงการ หรือปฏิเสธโครงการ เป็นไปในทำนองเดียวกัน

6. อัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุน (Benefit-Cost Ratio : BCR) คือ มูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์รวมหารด้วยมูลค่าปัจจุบันของต้นทุนรวม สามารถคำนวณหาอัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุนได้จากสมการที่ 2.16 ดังนี้

$$BCR = \frac{PVB}{PVC}$$

| | | | |
|--------|-----|---|--|
| โดยที่ | BCR | = | อัตราส่วนผลตอบแทนที่ได้ต่อต้นทุนของโครงการ |
| | PVB | = | มูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทน (บาท) |
| | PVC | = | มูลค่าปัจจุบันของต้นทุนรวม (บาท) |

หลักเกณฑ์ในการตัดสินใจ ถ้าค่าของ BCR ได้ออกมามีค่ามากกว่า หรือเท่ากับ 1 แสดงว่าโครงการนั้นมีความเหมาะสมที่จะลงทุนได้ แต่ถ้าค่า BCR มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่าโครงการนั้นไม่มีความสมที่จะลงทุน (ชูชีพ พิพัฒน์ศิริ, 2538 อ้างถึงใน ทินกร ไหมศรี ไพวัลย์ บุญศิริคำชัย และภาณุ ฤณอมวรสิน, 2550, น.21)

เศรษฐศาสตร์สิ่งแวดล้อม

เศรษฐศาสตร์สิ่งแวดล้อมเป็นความรู้ที่ไม่หยุดนิ่งมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา โดยแนวความคิดที่ได้เริ่มขึ้นตั้งแต่ทศวรรษที่ 1960 ตัวอย่างนิยามหรือขอบเขตของเศรษฐศาสตร์สิ่งแวดล้อมที่นักเศรษฐศาสตร์ได้กำหนดไว้มี ดังนี้

ณรงค์ศักดิ์ ธนวิบูลย์ชัย (2544, น.10) ให้นิยามความหมายของเศรษฐศาสตร์สิ่งแวดล้อมว่าเป็นวิธีการศึกษาเชิงวิทยาศาสตร์เกี่ยวกับพฤติกรรมของมนุษย์ในบางแง่มุมที่สัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อมทางธรรมชาติหรือแวดวงที่อยู่อาศัย

ศุภจิต มโนพิโมกษ์ (2542) สรุปเนื้อหาสาระที่สำคัญของเศรษฐศาสตร์สิ่งแวดล้อมไว้ประเด็นที่สำคัญคือ การเชื่อมโยงระบบสิ่งแวดล้อมกับระบบเศรษฐกิจการประเมินมูลค่าทรัพยากรและสิ่งแวดล้อมให้เป็นตัวเงิน การใช้มาตรการทางเศรษฐศาสตร์ควบคุมปัญหาสิ่งแวดล้อม การพัฒนาอย่างยั่งยืน และปัญหาสิ่งแวดล้อมระหว่างประเทศ และปัญหาสิ่งแวดล้อมโลก

Turner, Pearce และ Bateman (1994 อ้างถึงใน สุดาว เลิศวิสุทธิไพบูลย์, ม.ป.ป., น.31-32) ได้กำหนดกรอบของเศรษฐศาสตร์สิ่งแวดล้อมได้ 7 เรื่อง คือ 1. การพัฒนาอย่างยั่งยืน 2. สาเหตุของปัญหาสิ่งแวดล้อม 14-32 ระบบ เครื่องมือและการจัดการความเสี่ยงสำหรับสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรม อันเนื่องมาจากความล้มเหลวของตลาด 3. สาเหตุของปัญหาสิ่งแวดล้อมอันเนื่องมาจากความล้มเหลวของนโยบายรัฐบาล 4. การประเมินมูลค่าสิ่งแวดล้อมในรูปตัวเงิน 5. นโยบายรัฐบาลในการป้องกันรักษาสิ่งแวดล้อม 6. การใช้และการจัดการทรัพยากรธรรมชาติอย่างยั่งยืน และ 7. ประเด็นการศึกษาการจัดการสิ่งแวดล้อม ในระดับชุมชนและระดับโลก จากนิยามข้างต้นจึงสรุปได้ว่าเศรษฐศาสตร์สิ่งแวดล้อม (Environmental Economics) เป็นการศึกษาปัญหาเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมด้วยทัศนคติและแนวคิดเชิงเศรษฐศาสตร์เกี่ยวกับพฤติกรรมของมนุษย์ที่สัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อมในด้านต่าง ๆ

ขอบเขตของเศรษฐศาสตร์สิ่งแวดล้อม ครอบคลุมถึงการศึกษาปัญหาสิ่งแวดล้อมโดยใช้การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ความสัมพันธ์ระหว่างสิ่งแวดล้อมกับเศรษฐกิจ สาเหตุของปัญหาสิ่งแวดล้อมและผลกระทบของความเสื่อมโทรมของคุณภาพสิ่งแวดล้อม การศึกษาพฤติกรรมของมนุษย์ที่มีส่วนสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะการประกอบกิจกรรมทางเศรษฐกิจของมนุษย์ไม่ว่าทางด้านการผลิตและการบริโภคที่มีส่วนกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตลอดจนการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อมที่มีผลกระทบต่อมนุษย์ หลักการทางเศรษฐศาสตร์และมาตรการทางเศรษฐศาสตร์เกี่ยวกับการส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อม การประเมินมูลค่าสิ่งแวดล้อมในรูปตัวเงินการพัฒนาอย่างยั่งยืน และการใช้มาตรการทางเศรษฐศาสตร์ในการจัดการสิ่งแวดล้อมในระดับชุมชนและระดับโลก เศรษฐศาสตร์สิ่งแวดล้อมจึงมีความสำคัญต่อความเป็นอยู่ของประชาชน เพราะเป็นศาสตร์ที่ช่วยให้เข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์กับสิ่งแวดล้อม ตลอดจนการชี้ให้เห็นผลดีและผลเสียที่

เกิดขึ้นจากการกระทำของมนุษย์มีการใช้เศรษฐศาสตร์สิ่งแวดล้อมศึกษาผลกระทบทางด้านต่าง ๆ ไม่ว่าจะเกิดจากมลพิษทางอากาศ ทางน้ำ และทางด้านอื่น ๆ

หลักการทางเศรษฐศาสตร์ในการจัดการสิ่งแวดล้อม เกิดขึ้นเพื่อสอดคล้องกับสภาพปัญหาความล้มเหลวของตลาดเสรีที่ก่อให้เกิดวิกฤตทางสิ่งแวดล้อมและเศรษฐกิจ โดยหลักการทางเศรษฐศาสตร์แบบใหม่ มีแนวความคิดว่าระบบเศรษฐกิจที่มั่นคงต้องคำนึงถึงต้นทุนของทรัพยากรส่วนรวมและสิ่งแวดล้อม หลักการทางเศรษฐศาสตร์ในการจัดการสิ่งแวดล้อมสำคัญมี 3 หลักการ คือ

1. หลักการ “ผู้ก่อมลพิษเป็นผู้จ่าย” (Polluter Pays Principle หรือ PPP) เกิดขึ้นจากแนวคิดที่ว่า ภาระบวกรที่ก่อให้เกิดของเสียหรือมลพิษ เป็นวิถีทางธรรมชาติและเกิดขึ้นอยู่เสมอเป็นปกติ แต่การสะสมของมลพิษโดยเฉพาะมลพิษที่เกิดขึ้นโดยมนุษย์นั้น สามารถที่จะสะสมและมีปริมาณมากขึ้นเรื่อยๆ จากระยะเวลาที่ยาวนาน จนถึงระดับที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในสภาพแวดล้อมนั้น อาร์เธอร์เซซิล พิกู (Arthur C.Pigou, 1932 อ้างถึงใน สุดาว เลิศวิสุทธิไพบูลย์, ม.ป.ป., น.33) นักเศรษฐศาสตร์ชาวอังกฤษ ได้อธิบายปรากฏการณ์นี้โดยใช้ทฤษฎีเศรษฐศาสตร์และเรียกการบริโภคทรัพยากรโดยไม่รับผิดชอบต่อผลกระทบที่มีต่อธรรมชาติว่า “ผลกระทบภายนอก” (Externality) ซึ่งในทางเศรษฐศาสตร์ หมายถึง ผลของการดำเนินกิจกรรมทางเศรษฐกิจ ของหน่วยเศรษฐกิจหนึ่งที่เกิดกระทบไปยังหน่วยเศรษฐกิจอื่นๆ ที่มีได้เป็นผู้ดำเนินกิจกรรมทางเศรษฐกิจนั้น โดยตรง ผลกระทบภายนอกที่เกิดขึ้นอาจจะเป็นต้นทุนหรือผลประโยชน์ทั้งที่อยู่ในรูปของตัวเงินและไม่ใช่ตัวเงิน ผลกระทบภายนอกที่เป็นความเสียหายหรือต้นทุนเรียกว่า “ผลกระทบภายนอกเชิงลบ” (Negative Externality) เป็นผลกระทบจากกิจกรรมทางเศรษฐกิจที่ผู้ประกอบการไม่ได้นำต้นทุนนี้มาใส่ไว้โดยผลักภาระไปสู่สังคมและสิ่งแวดล้อมแทนที่ผู้ประกอบการจะดูแลเอาใจใส่เองตั้งแต่ต้น ตัวอย่าง เช่น โรงงานอุตสาหกรรมที่ไม่ยอมลงทุนระบบบำบัดน้ำเสียและได้ปล่อยน้ำเสียและของเสียต่างๆลงสู่แหล่งน้ำจนน้ำเน่าเสียปลาตายและคนในชุมชนได้รับผลกระทบไม่สามารถนำน้ำจากแหล่งน้ำนั้นมาใช้ได้ต้องหันไปใช้ น้ำจากแหล่งอื่นซึ่งต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นนอกจากนี้มลพิษที่เกิดขึ้นยังส่งผลกระทบต่อวิถีชีวิตและสุขภาพ อนามัยโดยอาจเจ็บป่วยต้องเสียค่ารักษาพยาบาล หรือต้องเปลี่ยนอาชีพ ต้องอพยพย้ายถิ่น เป็นต้น พิกูได้นำเสนอแนวคิดในการแก้ไขปัญหาผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อม โดยให้ผู้ก่อให้เกิดมลพิษ รับผิดชอบค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ในการดูแลรักษาสิ่งแวดล้อมที่เสียไปจากผลกระทบนั้น ๆ โดยมุ่งหวังที่จะทำให้เกิดความตระหนักในการเป็นเจ้าของและรับผิดชอบต่อผลกระทบของตนเอง ซึ่งตามข้อเสนอแนะขององค์การ เพื่อความร่วมมือทางเศรษฐกิจและการพัฒนา (Organization for Economic Co-operation and Development; OECD) คำว่า “ผู้ก่อให้เกิดมลพิษ” (Polluter) คือ บุคคลใด ๆ ก็ตามที่เป็นผู้กระทำให้เกิดความเสื่อมเสียของสภาพสิ่งแวดล้อมหรือชักนำให้เกิดความเสื่อมเสียขึ้นทั้งโดยทางตรงและทางอ้อม

2. หลักการ “ผู้ใช้เป็นผู้จ่าย” (User Pays Principle หรือ UPP) หรือ หลักการกำหนดราคาทรัพยากร เป็นหลักการที่มีฐานคิดทำนองเดียวกันกับหลัก PPP กล่าวคือ ผู้รับประโยชน์จะต้องชำระค่าใช้จ่ายทั้งหมดของการใช้ทรัพยากรและของบริการที่เกี่ยวข้อง ค่าใช้จ่ายทั้งหมดนี้รวมถึงค่าใช้จ่ายของการสูญเสียในอนาคตด้วย ตัวอย่างเช่น ปัญหาการขุดเจาะบ่อน้ำบาดาล เพื่อพัฒนาแหล่งน้ำใต้ดินขึ้นมาใช้ ซึ่งบางพื้นที่มีการใช้น้ำบาดาลจนเกินขีดความสามารถที่แหล่งน้ำบาดาลจะให้ได้ตามศักยภาพ จนก่อให้เกิดวิกฤตการณ์น้ำบาดาล และผลกระทบในหลายพื้นที่ โดยเฉพาะในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีชุมชนหมู่บ้านจัดสรรและโรงงานอุตสาหกรรมหนาแน่น ทำให้มีการทรุดตัวของแผ่นดินอย่างต่อเนื่องน้ำเค็มรุกกล้าเข้าในชั้น น้ำจืด ระดับน้ำใต้ดินลดต่ำมาก การขาดความสมดุลของน้ำใต้ดิน การขาดแคลนน้ำบาดาล และปัญหาผลกระทบต่อระบบนิเวศและสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการบริหารจัดการน้ำบาดาลอย่าง ถูกต้องตามหลักวิชาการเพื่อให้สามารถแก้ไขและป้องกันปัญหาผลกระทบดังกล่าวตลอดจนการใช้มาตรการทางเศรษฐศาสตร์ตามหลักการ “ผู้ใช้เป็นผู้จ่าย” หรือ UPP โดยการจัดเก็บค่าใช้น้ำบาดาลและค่าอนุรักษ์น้ำบาดาล เพื่อควบคุมปริมาณการใช้น้ำบาดาลดังกล่าว

3. หลักการ “ระมัดระวังล่วงหน้า” (Precautionary Principle หรือ PP) หลักการนี้มีแนวคิดในการปกป้องสิ่งแวดล้อมและสุขภาพ โดยพึงใช้ความระมัดระวังล่วงหน้า เพื่อป้องกันมิให้เกิดภัยอันตรายต่างๆ และหากไม่สามารถหลีกเลี่ยงไม่ก่อภัยต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพได้แล้ว สิ่งที่ต้องทำ จำเป็นต้องทำ คือ ต้องหาทางลดหรือบรรเทาภัยนั้นให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด ตัวอย่างเช่น ในพิธีสารคาร์ตาเฮนาว่าด้วยความปลอดภัยทางชีวภาพ ซึ่งเป็นพิธีสารต่อทำนองสัญญาว่าด้วยความหลากหลายทางชีวภาพ (Cartagena Protocol on Biosafety to Convention on Biological Diversity) มาตรา 1 ของพิธีสาร นี้ได้กำหนดกรอบวัตถุประสงค์ไว้ตามแนวทางการระมัดระวัง (Precautionary Approach) ซึ่งระบุไว้ใน หลักการที่ 15 ของปฏิญญาริโอว่าด้วยสิ่งแวดล้อมและการพัฒนา กล่าวคือ สนับสนุนให้มีความแน่ใจในการป้องกันในระดับที่พอเพียงในด้านความปลอดภัยในการเคลื่อนย้ายการดูแลและการใช้สิ่งมีชีวิตต่างๆที่ได้ รับการดัดแปลงทางพันธุกรรม (LMOs) ซึ่งเป็นผลมาจากเทคโนโลยีชีวภาพสมัยใหม่ ที่อาจมีผลกระทบใน ทางลบต่อการอนุรักษ์และต่อการใช้ประโยชน์ความหลากหลายทางชีวภาพอย่างยั่งยืน โดยคำนึงถึงความ เสี่ยงต่อสุขอนามัยของมนุษย์และเน้นในเรื่องการเคลื่อนย้ายข้ามเขตแดนเป็นพิเศษ ทั้งนี้ที่สำคัญที่สุดคือการระบุว่าการขาดความแน่นอนอันเนื่องมาจากความไม่เพียงพอของข้อมูล และความรู้ทางวิทยาศาสตร์เกี่ยวกับผลกระทบในทางลบของสิ่งมีชีวิตดัดแปลงพันธุกรรมชนิดใดชนิดหนึ่งจะ ไม่เป็นการกีดกันภาคีในอันที่จะดำเนินการตัดสินใจเกี่ยวกับการนำเข้าสิ่งมีชีวิตดัดแปลงพันธุกรรมชนิดนั้น กล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ พิธีสารรับรองสิทธิของประเทศสมาชิกที่จะปฏิเสธการนำเข้าสินค้าดัดแปลงพันธุกรรม โดยอาศัยหลัก PP ซึ่งการจำกัดการนำเข้าอาจอาศัยเพียงเหตุเพื่อป้องกันความเสี่ยงที่จะเกิดจากสินค้านำเข้า โดยไม่จำเป็นต้องใช้เหตุผล

ทางวิทยาศาสตร์ใด ๆ หลักการที่กล่าวมานี้ถูกนำมาใช้ในการออกแบบเครื่องมือทางเศรษฐศาสตร์ (Economic Instruments) เพื่อจัดการปัญหาสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ โดยหลักการจัดการสิ่งแวดล้อมและเครื่องมือทางเศรษฐศาสตร์นั้นมีความเกี่ยวเนื่องสัมพันธ์กัน เช่น การจะบรรลุถึงหลักการผู้ก่อมลพิษเป็นผู้จ่าย จะต้องอาศัยเครื่องมือทางเศรษฐศาสตร์ในการดำเนินการ ซึ่งเครื่องมือนี้มีได้หลายรูปแบบ เช่น การเก็บค่าธรรมเนียมมลพิษ (Emission Charge) การเก็บค่าธรรมเนียมการใช้ (User Charge) การออกใบอนุญาตปล่อยมลพิษ เป็นต้น (สุดาว เลิศวิสุทธิไพบูลย์, ม.ป.ป., น.34-36)

การวิเคราะห์ต้นทุนสิ่งแวดล้อม (Externality Cost)

ต้นทุนสิ่งแวดล้อม (Externality Cost) คือ สิ่งที่ทำให้ต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าสูงขึ้นอย่างไม่น่าพึงปรารถนา ดังนั้น ถ้ามีการใช้วิธีการผลิตใดหรือใช้วัตถุดิบใดที่ก่อให้เกิดมลภาวะน้อยที่สุด จะทำให้ต้นทุนทางสังคมหรือสิ่งที่สังคมต้องเสียสละไปทั้งหมด ต้นทุนสิ่งแวดล้อม ครอบคลุม ความเสียหาย 4 ลักษณะ ได้แก่ 1. ความเสียหายต่อสุขภาพ (Human Health) 2. ความเสียหายต่อสวัสดิการของมนุษย์ (Human Welfare) 3. ความเสียหายต่อทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (Environmental Resources) และ 4. ความเสียหายต่อระบบนิเวศ (Ecological System) (สมพจน์ วรรณนุช, 2550, น.287-288)

ต้นทุนสิ่งแวดล้อมเป็นการวิเคราะห์ต้นทุนผลกระทบภายนอกด้านอื่น ๆ ที่มีผลกระทบต่อสังคมและสิ่งแวดล้อม (Externality Cost) ที่ทำให้เกิดผลกระทบต่อสังคมและสิ่งแวดล้อม การเผาไหม้ น้ำมันเชื้อเพลิง ทำให้เกิดกรณีโลกร้อนขึ้น หากมีการลดก๊าซเรือนกระจก โดยการลดพลังงานเชื้อเพลิง ไม่เป็นเพียงการลดต้นทุนทางสังคมของโลกร้อนเท่านั้น แต่ต้นทุนภายนอกที่เกี่ยวกับการใช้พลังงาน เช่น การทำลายสุขภาพ ป่าไม้ และระบบนิเวศน์ จะลดลงไปด้วย การเกิดขึ้นของต้นทุนภายนอก (Externality Cost) จะถูกแยกออกจากต้นทุนที่จะคำนวณเข้ามาในการผลิตสินค้า เพื่อให้ได้ต้นทุนที่แท้จริง จำเป็นต้องมีการรวมต้นทุนภายนอกมาคิดคำนวณด้วย (ธีรนนทา ฤทธิมณี, 2545 อ้างถึงในอนุวัตร์ เดชครุฑ, 2548, น.39)

การคำนวณค่าต้นทุนสิ่งแวดล้อม

ประเมินความเสียหายของสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากสารพิษต่าง ๆ เช่น SO_2 , CO_2 , NO_x , CH_4 , N_2O ที่ถูกปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมในรูปแบบของต้นทุนสิ่งแวดล้อม โดยมีหน่วยมาตรฐานเป็น $US\$/kWh$ สามารถนำมาคำนวณผลกระทบจากมลพิษจากกระบวนการได้ง่าย การคำนวณหาค่าต้นทุนสิ่งแวดล้อมจะเป็นค่าที่ผันแปรตามอัตราการปล่อยสารมลพิษ (Emission Factor – EF) และมูลค่าความเสียหายของสิ่งแวดล้อม (Value of Environment Damage-VED) โดยค่า VED จะเท่ากับค่าใช้จ่ายหรือราคาอุปกรณ์ที่ใช้ในการกำจัดมลพิษต่อปริมาณสารพิษที่ถูกกำจัด แนวการคิด ค่า VED มี 2 วิธี คือ

1. คิดค่าใช้จ่ายจากการบำบัดมลพิษ กล่าวคือ เป็นการคำนวณจากค่าใช้จ่ายในการใช้เทคโนโลยีต่าง ๆ มาบำบัดก๊าซพิษ เช่น การประเมินค่าใช้จ่ายที่เกิดจากผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของก๊าซ SO₂ สามารถคิดค่าใช้จ่ายในการลดก๊าซ SO₂ จากเครื่องกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Flue Gas Desulphurization: FDG) เป็นเครื่องที่ใช้ในการกำจัดก๊าซ SO₂ ที่มีประสิทธิภาพสูง โดยนำข้อมูลค่าใช้จ่ายและความสามารถในการกำจัดก๊าซ SO₂ มาใช้ในการคำนวณหาค่าอัตราส่วนค่าใช้จ่าย ต่อ ปริมาณสาร SO₂ ที่กำจัดได้ และนำไปคำนวณหาก๊าซ SO₂ ที่ถูกปล่อยสู่บรรยากาศของกระบวนการต่าง ๆ

2. คิดจากค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นจากก๊าซพิษชนิดต่าง ๆ เช่น การก่อให้เกิดการเจ็บป่วยของมนุษย์โดยมีสาเหตุเนื่องมาจากก๊าซ SO₂ ต้องหาการที่ไม่สบายเนื่องจากก๊าซชนิดนี้ จะมีค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาอย่างไร ต้องหาค่าใช้จ่ายในการรักษาพยาบาลจากโรงพยาบาล ข้อมูลดังกล่าวค่อนข้างคำนวณได้ยาก ต้องมีการเก็บข้อมูลอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน Koomey and Krause, 1997, pp.2-10)

ค่าใช้จ่ายในการกำจัด CO₂, NO_x, CO, N₂O และ CH₄

สำหรับค่าใช้จ่ายในการกำจัด CO₂, NO_x, CO, N₂O และ CH₄ จะใช้ข้อมูลจาก Office of Clean Energy: USA, 2004 ซึ่งเป็นต้นทุนสิ่งแวดล้อมของรัฐ Massachusetts ประเทศสหรัฐอเมริกา ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 แสดงต้นทุนสิ่งแวดล้อม

| มลพิษ | ต้นทุนสิ่งแวดล้อม (2003\$ per Ton) |
|--------------------------------------|------------------------------------|
| NO _x | 9,620 |
| ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO ₂) | 2,220 |
| สารประกอบอินทรีย์ระเหยได้ | 7,844 |
| Total Suspended Particulates (TSP) | 5,920 |
| คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) | 1,288 |
| คาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂) | 33 |
| มีเทน (CH ₄) | 326 |
| ไนตรัสออกไซด์ (N ₂ O) | 5,861 |

ที่มา: Massachusetts Externality Adders, Office of Clean Energy, 2004 อ้างถึงในอนุวัตร เดชครุฑ, 2548, น.121

เนื่องจากข้อมูลที่อ้างอิงนั้นเป็นข้อมูลจากสหรัฐอเมริกาปี 2004 ซึ่งแสดงต้นทุนผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของสหรัฐอเมริกา แต่เมื่อนำมาใช้กับประเทศไทย จึงจำเป็นต้องมีการพิจารณาความสามารถในการจ่ายค่าความเสียหายต่อสิ่งแวดล้อม ของประเทศไทยด้วย (อนุวัตร์ เดชครุฑ, 2548, น.120-121)

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิชชาวุธ มนูญผล (2555) ศึกษาการวิเคราะห์สมรรถนะของเตาแก๊สซีฟิเออร์ โดยใช้เศษใบไม้และกิ่งไม้ แห่งเป็นเชื้อเพลิง โดยวัตถุประสงค์ของงานวิจัย คือ ศึกษาผลจากขนาดของคอคอดในชั้นเผาไหม้ (Combustion Zone) และค่าอัตราส่วนเทียบเท่าของอากาศต่อเชื้อเพลิง (Equivalent Ratio; ER) ที่มีผลต่อสมรรถนะของเตาแก๊สซีฟิเออร์โดยทำการปรับขนาดความกว้างของคอคอดในชั้นเผาไหม้ 120, 140, 160 มิลลิเมตร ความสูง 55, 65, 75 มิลลิเมตร มุมเอียงของคอคอด 60, 70, 80 องศา และใช้ค่าอัตราส่วนเทียบเท่าของอากาศต่อเชื้อเพลิงเท่ากับ 0.3, 0.4 และ 0.5 ซึ่งจะได้เตาแก๊สซีฟิเออร์ ทั้งหมด 27 เตา การวิจัยเริ่มต้นจากการวิเคราะห์ห้องประกอบของเศษใบไม้และกิ่งไม้ แห่งที่ได้จากป่าเต็งรัง เพื่อคำนวณหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้และเทียบผลกับปริมาณอากาศทางทฤษฎีสำหรับการเผาไหม้สมบูรณ์ เลือกใช้เตาแก๊สซีฟิเออร์ชนิดฟิกซ์เบดแบบไหลลง โดยออกแบบให้เตามีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วน คือ ส่วนบนเป็นถังป้อนเชื้อเพลิง ส่วนกลางเป็นถังปฏิกรณ์ และส่วนล่าง สำหรับเก็บเถ้า เชื้อเพลิงที่ใช้คือเศษใบไม้และกิ่งไม้แห่งป็นให้มีขนาดเล็ก ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 1 x 1 เซนติเมตร ควบคุมอัตราการป้อนเชื้อเพลิง 1 กิโลกรัม การทดลองพบว่า เตาที่สามารถให้สมรรถนะสูงสุดคือเตาแก๊สซีฟิเออร์ที่มีค่าความกว้างของคอคอดในชั้นเผาไหม้ 140 มิลลิเมตร ความสูงขนาด 75 มิลลิเมตร มุมเอียงของคอคอดขนาด 80 องศา และค่าอัตราส่วน เทียบเท่าของอากาศต่อเชื้อเพลิงเท่ากับ 0.3 ได้สมรรถนะสูงสุดเท่ากับ 12.7 เปอร์เซ็นต์

ธนิต มหิตธานันท์ (2553) ได้ทำการศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการติดตั้งเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่ออุ่นน้ำก่อนเข้าหม้อป้อนน้ำของโรงงานฟอกย้อม โดยมีค่าดัชนีการชี้วัดทางการเงิน ประกอบด้วย มูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการ อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน อัตราผลตอบแทนภายในและการวิเคราะห์ความอ่อนไหว โดยแยกเป็น 2 โครงการ คือ ใช้กะลาปาล์มเป็นเชื้อเพลิงและโครงการที่ใช้เชื้อเพลิงธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง ผลการวิเคราะห์ พบว่าในกรณีที่ใช้กะลาปาล์มเป็นเชื้อเพลิงไม่คุ้มค่าทางการเงิน เนื่องจากมีอัตราส่วนของผลตอบแทนต่อต้นทุนต่ำกว่าอัตราคิดลดที่กำหนด แต่จะคุ้มค่าในการลงทุนในกรณีที่ใช้ก๊าซธรรมชาติเกรดซีเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งมีอัตราผลตอบแทนการลงทุนเท่ากับ 3.41 และอัตราผลตอบแทนภายในโครงการเท่ากับ 28 ในส่วนของการวิเคราะห์ความไวในกรณีที่ราคาเชื้อเพลิงมีค่าสูงขึ้น การลดต้นทุนของการผลิตลง 20

เปอร์เซ็นต์ และมีการเปลี่ยนแปลงอัตราคิดลดลง 6 เปอร์เซ็นต์ จะพบว่าปัจจัยดังกล่าวมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงผลประโยชน์ของโครงการ แสดงให้ทราบถึงความอ่อนไหวทางการเงินมาก จึงสรุปว่าไม่มีความคุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์

สัญญา แก้วศรีงาม (2552) ศึกษาการใช้เชื้อเพลิงอัดแท่งจากขยะในเตาแก๊สซีไฟเออร์แบบแก๊สไหลลง ผลการวิจัยจากการป้อนอากาศ $20.6 \text{ nm}^3/\text{hr}$ ได้ผลผลิตก๊าซเชื้อเพลิงประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน และมีเทน เฉลี่ยร้อยละ 17.07, 13.61 และ 1.60 โดยปริมาตร ตามลำดับ มีค่าความร้อนสูงเฉลี่ย $1,083 \text{ kcal}/\text{nm}^3$ แต่เมื่อเทียบกับการใช้ไม้ยูคาลิปตัสเป็นเชื้อเพลิงพบว่าที่มีการป้อนอากาศ $28.3 \text{ nm}^3/\text{hr}$ ได้ผลผลิตก๊าซเชื้อเพลิงประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน และมีเทน เฉลี่ยร้อยละ 22.34, 15.90 และ 2.02 โดยปริมาตร ตามลำดับ มีค่าความร้อนสูงเฉลี่ย $1,352 \text{ kcal}/\text{nm}^3$ การใช้เชื้อเพลิงอัดแท่งจากขยะในเตาแก๊สซีไฟเออร์ไหลลง ให้ค่าประสิทธิภาพที่สถานะแก๊สมาตรฐานเฉลี่ยร้อยละ 54.05 เปรียบเทียบกับการใช้ไม้ยูคาลิปตัสเป็นเชื้อเพลิง มีค่าประสิทธิภาพที่สถานะแก๊สมาตรฐานเฉลี่ยร้อยละ 62.62 การใช้ไม้ยูคาลิปตัสเป็นเชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพสูงกว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งจากขยะ เนื่องจากปริมาณซี้ไถ้ในเชื้อเพลิงอัดแท่งจากขยะสูง ซี้ไถ้ไถ้ได้ปิดกั้นไม่ให้อากาศสัมผัสกับเชื้อเพลิง จึงมีการเผาไหม้เชื้อเพลิงได้น้อย และส่งผลให้อุณหภูมิภายในโซนเผาไหม้ลดต่ำลงไม่ถึง 1,000 องศาเซลเซียส และทำให้ได้สัดส่วนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน และมีเทนต่ำ ทำให้ประสิทธิภาพต่ำกว่าการใช้ไม้ยูคาลิปตัสเป็นเชื้อเพลิง

สุนทร ละอองนวล (2547) ทำการศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในเตาเผาแบบฟลักซ์เบค เป็นการศึกษาเชิงทดลองเพื่อหาข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับพารามิเตอร์ที่แสดงคุณลักษณะของการเผาไหม้อ้อยในเตาฟลักซ์เบคซึ่ง ได้แก่ อัตราการเผาไหม้ ความเร็วของเปลวไฟโดยทดลองแบบแบทช์ (Batch) และใช้ขานอ้อยเป็นเชื้อเพลิง ทั้งนี้เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ ปริมาณอากาศ ความเร็วอากาศที่ป้อนและอุณหภูมิอากาศที่ป้อน ที่มีผลต่อการเผาไหม้ดังกล่าว การทดลองได้กระทำในกรณีต่าง ๆ ดังนี้ คือ การเผาไหม้ขานอ้อยแบบแบทช์ กรณีปริมาณอากาศ 200, 300 และ 400 ลิตรต่อวินาที ที่ความเร็วอากาศปฐมภูมิ 188, 282 และ 377 มิลลิเมตรต่อวินาที และที่อุณหภูมิทางเข้าอากาศปฐมภูมิสถานะแวดล้อม, 100, 150 และ 200 องศาเซลเซียส ในการทดลองแต่ละครั้งได้ทำการบันทึกการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ อย่างต่อเนื่องแล้วนำผลที่ได้ไปคำนวณหาอัตราการเผาไหม้ ความเร็วของเปลวไฟ ผลการศึกษาพบว่า การเผาไหม้ขานอ้อยที่สถานะแวดล้อมโดยมีการเผาไหม้สารระเหยและถ่านอย่างต่อเนื่อง ด้วยอัตราการเผาไหม้ 0.044-0.338 กรัมต่อวินาที ความเร็วของเปลวไฟ 1.59-2.87 มิลลิเมตรต่อวินาที นอกจากนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณอากาศกับความเร็วกว่าที่ป้อนให้ โดยที่ปริมาณอากาศรวม 200, 300 และ 400 ลิตรต่อวินาที และความเร็วอากาศปฐมภูมิ 188, 282 และ 377 มิลลิเมตรต่อวินาที มีผลทำให้อัตราการเผาไหม้ 0.076, 0.188 และ

0.338 กรัมต่อวินาที และความเร็วเปลวไฟ 1.86, 1.71 และ 1.69 มิลลิเมตรต่อวินาที และเมื่อความเร็วของอากาศปฐมภูมิลดลง 94, 141 และ 188 มิลลิเมตรต่อวินาที มีผลทำให้อัตราการเผาไหม้ลดลงเป็น 0.044, 0.085 และ 0.177 กรัมต่อวินาทีและความเร็วเปลวไฟเพิ่มขึ้นเป็น 2.87, 1.94 และ 1.59 มิลลิเมตรต่อวินาที ตามลำดับ ในทางตรงข้ามเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิอากาศปฐมภูมิให้สูงขึ้น มีผลทำให้อัตราการเผาไหม้ ความเร็วของเปลวไฟ เกิดการเปลี่ยนแปลงไปโดยที่อัตราการเผาไหม้อยู่ในช่วง 0.017-0.114 กรัมต่อวินาที และความเร็วของเปลวไฟ 2.46-5.55 มิลลิเมตรต่อวินาที นอกจากนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณอากาศกับความเร็วดังที่ปริมาณอากาศ 200, 300 และ 400 ลิตรต่อวินาที มีผลทำให้อัตราการเผาไหม้ 0.036, 0.051 และ 0.077 กรัมต่อวินาที และความเร็วเปลวไฟ 4.37, 3.72 และ 3.50 มิลลิเมตรต่อวินาที และเมื่อความเร็วของอากาศปฐมภูมิลดลง 94, 141 และ 188 มิลลิเมตรต่อวินาที มีผลทำให้อัตราการเผาไหม้ลดลง 0.028, 0.56 และ 0.078 กรัมต่อวินาทีและความเร็วเปลวไฟเพิ่มขึ้นเป็น 5.43, 5.55 และ 5.30 มิลลิเมตรต่อวินาทีตามลำดับ อย่างไรก็ตามซึ่งพบว่าในการอุ่นอุณหภูมิอากาศปฐมภูมิที่ทางเข้าเพียงอย่างเดียวไม่ช่วยทำให้ อัตราการเผาไหม้ไปกว่าการเผาไหม้ชานอ้อยที่สภาวะแวดล้อม

Chen, Chung & Liu (2005) ทำการศึกษาอัตราการใช้พลังงาน สมดุลพลังงานและประสิทธิภาพของเตาเผา โดยทดลองใช้เตาเผาขนาด 250 Ton/hr แต่ใช้งานจริงประมาณ 121 Ton/hr แบบ Walking Bram และใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง งานวิจัยนี้ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการทำนายการกระจายตัวของอุณหภูมิภายใน Billet เพื่อนำมาพิจารณาหาเวลาสำหรับการกักเก็บ Billet ไว้ภายในเตา โดยทำการศึกษาอัตราการใช้พลังงานความร้อน 3 แบบ คือ High, Typical และ Low Heating Rate เพื่อแสดงให้เห็นว่าเตาเผาที่มีอัตราการผลิตสูงจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงดีกว่าถึงแม้อัตราการใช้พลังงานความร้อนสูง จะทำให้อัตราการสูญเสียพลังงานของเตาเผามากกว่า แต่เมื่อเทียบเวลาที่ Billet จะต้องอยู่ภายในเตาลดลง ถือว่าความร้อนสูญเสียของเตาเผาเป็นสัดส่วนที่น้อยกว่า และมีการตรวจวัดและเก็บข้อมูล เพื่อนำไปพิจารณาสมดุลพลังงานและคำนวณประสิทธิภาพการทำงานของเตาเผา ผลจากการศึกษา พบว่า เตาเผาที่มีประสิทธิภาพเท่ากับ 41.74 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อพิจารณา Recuperates พบว่า ประสิทธิภาพของ Heat Exchange มีค่าเท่ากับ 86.33 เปอร์เซ็นต์ และ Heat Recovery มีค่าเท่ากับ 47.76 เปอร์เซ็นต์

Miguel, Kenneth & Alberto (2014) ได้ทำการศึกษาการใช้เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิงในเตาแก๊สซีไฟเออร์ ในสาธารณรัฐโมซัมบิก โดยที่สาธารณรัฐโมซัมบิกเป็นประเทศที่อาศัยชีวมวลจากไม้ เพื่อตอบสนองความต้องการพลังงานในครัวเรือน เป็นหนึ่งในสาเหตุหลักของการตัดไม้ทำลายป่าที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยส่วนใหญ่เกิดในพื้นที่เมืองและหมู่บ้าน ในทางกลับกันประเทศสามารถผลิตพืชผลทางการเกษตรในปริมาณมาก มีวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจำนวนมากที่ไม่ถูกนำมาใช้อย่างเหมาะสมเพื่อใช้เป็นพลังงานทางเลือก โดยเฉพาะอย่างยิ่งชุมชนในชนบทที่มี

เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เหลือทิ้ง ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลอย่างหนึ่งที่มีพลังงานสูง อย่างไรก็ตาม การใช้ประโยชน์เป็นแหล่งพลังงานภายในประเทศยังอยู่ในระดับต่ำ ในสาธารณรัฐโมซัมบิก 90% ของครัวเรือนพึ่งพาชีวมวลในการปรุงอาหาร และใช้ชีวมวลเป็นพลังงานหมุนเวียน ทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในอุตสาหกรรม สำหรับเตาแก๊สซีฟเเออร์สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่พัฒนาขึ้น มีประสิทธิภาพเชิงความร้อน 35.5% และกำลังการผลิต 2.19 กิโลวัตต์ ใกล้เคียงกับเตาแก๊ส LPG และเตาน้ำมันก๊าดคือ 53.53% (0.69 กิโลวัตต์) และ 39.3% (0.6 กิโลวัตต์) ตามลำดับ แม้ว่าการใช้เตาแก๊สซีฟเเออร์สำหรับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์จะมีประสิทธิภาพน้อยกว่าที่กล่าวมาข้างต้น แต่ด้วยราคาน้ำมันที่เพิ่มสูงขึ้น ทำให้การใช้เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิงในเตาแก๊สซีฟเเออร์เป็นทางเลือกที่น่าสนใจ

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยเรื่อง เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน เพื่อการจัดการกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาชนิด ปริมาณ องค์ประกอบทางด้านเคมีของกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการเผากากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ด้วยวิธีเผาตรง เพื่อเป็นข้อมูลนำไปสู่การพัฒนา และศึกษาประสิทธิภาพระบบแก๊สซิฟิเคชัน ที่สามารถให้พลังงานความร้อนและเหมาะสมต่อการใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง และดำเนินการศึกษาด้านทุนการผลิต เศรษฐศาสตร์สิ่งแวดล้อม รวมถึงวิเคราะห์มลภาวะทางอากาศที่ระบายออกจากปล่องเตาของระบบแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง โดยมีวิธีดำเนินการวิจัยเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของการศึกษาดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. ศึกษาชนิด ปริมาณ องค์ประกอบทางด้านเคมีของกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการเผากากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ด้วยวิธีเผาตรง
2. พัฒนา และศึกษาประสิทธิภาพระบบแก๊สซิฟิเคชัน ที่สามารถให้พลังงานความร้อนและเหมาะสมต่อการใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง
3. ศึกษาด้านเศรษฐศาสตร์ และวิเคราะห์มลภาวะทางอากาศที่ระบายออกจากปล่องเตาของระบบแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง

วิธีดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนที่ 1 การศึกษาชนิด ปริมาณ องค์ประกอบทางด้านเคมีของกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการเผากากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ด้วยวิธีเผาตรง

1. ศึกษาชนิด และปริมาณกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่เหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูป ของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนผลิตและแปรรูปผลิตภัณฑ์เมล็ดมะม่วงหิมพานต์บ้านหาดไก่อ้อย อำเภอนาทวี จังหวัดอุตรดิตถ์ เก็บรวบรวมข้อมูลพื้นฐานสายพันธุ์มะม่วงหิมพานต์ที่ปลูกในพื้นที่อำเภอนาทวี จังหวัดอุตรดิตถ์ หาสัดส่วนของกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่เหลือทิ้งจากกระบวนการบีบน้ำมันจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ และสภาพปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการจัดการกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่เหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูป ของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนผลิตและแปรรูปผลิตภัณฑ์เมล็ดมะม่วงหิมพานต์บ้านหาดไก่อ้อย อำเภอนาทวี จังหวัดอุตรดิตถ์ โดยใช้แบบสำรวจ และการสังเกตจากแหล่งข้อมูล ประกอบด้วย แกนนำกลุ่มเครือข่ายวิสาหกิจชุมชนผลิต

และแปรรูปผลิตภัณฑ์เมล็ดมะม่วงหิมพานต์ อำเภอท่าปลา จังหวัดอุตรดิตถ์ หน่วยงานและองค์กรที่เกี่ยวข้อง นำข้อมูลทั้งหมดมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชื่อมโยงตามกรอบแนวคิด นำมาสรุป ตีความ และเขียนรายงานบรรยายเนื้อหาเชิงพรรณนา



ภาพที่ 10 การสำรวจสวนมะม่วงหิมพานต์ในพื้นที่อำเภอท่าปลา จังหวัดอุตรดิตถ์

2. ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของเชื้อเพลิงเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์และกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ผ่านการบีบอัดน้ำมัน CNSL ออกแล้ว ดังภาพที่ 11 โดยเก็บตัวอย่างประมาณ 1 กิโลกรัม ใส่ถุงซิปล็อค ส่งให้ห้องปฏิบัติการศูนย์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสวนดุสิต ดำเนินการวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิง (Proximate Analysis) และวิเคราะห์สัดส่วนของธาตุ (Ultimate Analysis) ของเชื้อเพลิงเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์และกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ตามพารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์ในตารางที่ 8 เพื่อเป็นข้อมูลประกอบการพิจารณาความเหมาะสมในการนำกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ใช้เป็นเชื้อเพลิง และการออกแบบระบบแก๊สซิฟิเคชันในการจัดการกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

ตารางที่ 8 แสดงพารามิเตอร์ วิธีวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิง และสัดส่วนของธาตุ เชื้อเพลิงเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์และกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

| พารามิเตอร์ | วิธีวิเคราะห์ |
|--|-----------------------------|
| องค์ประกอบของเชื้อเพลิง (Proximate Analysis) | |
| - ค่าความชื้น (Moisture Content) | Calculation (ASTM D3173) |
| - ปริมาณเถ้า (Ash) | Incineration (ASTM D3174) |
| - ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) | Incineration (ASTM D3174) |
| - ปริมาณสารระเหย (Volatile Matter) | Incineration (ASTM D3175) |
| สัดส่วนของธาตุ (Ultimate Analysis) | |
| - ปริมาณคาร์บอน (Carbon) | Incineration (ASTM D3178) |
| - ปริมาณไฮโดรเจน (Hydrogen) | Incineration (ASTM D3178) |
| - ปริมาณออกซิเจน (Oxygen) | Incineration (ASTM D3176) |
| - ปริมาณไนโตรเจน (Nitrogen) | Kjeldahl Method (EPA 1687) |
| - ค่าความร้อน (Heating Value) (DSCV) | Bomb Calorimeter (EPA 5050) |

ที่มา: Niedziotka, 2015



(ก)

(ข)

ภาพที่ 11 (ก) เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (ข) กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

3. ทดสอบการเผาเชื้อเพลิงกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ด้วยตัวชี้วัดทางเคมีของมลภาวะทางอากาศที่ระบายออกจากปล่องเตาจากกระบวนการเผาตรง เพื่อศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้านมลพิษทางอากาศที่เกิดขึ้นจากการเผาตรง ทดสอบด้วยการเผากากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ในเตาดินเผา ทำการต่อท่อระบายควันที่เกิดจากการเผา เพื่อเก็บตัวอย่างหาปริมาณสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากปล่อง ดังภาพที่ 12 และนำมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ ตามตัวชี้วัดทางเคมีของมลภาวะทางอากาศที่ระบายออกจากปล่องเตาที่วิเคราะห์ และวิธีการวิเคราะห์ แสดงดังตารางที่ 9 นำผลการตรวจวัดเทียบกับค่ามาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดค่าปริมาณของสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากโรงงาน พ.ศ. 2549

ตารางที่ 9 ตัวชี้วัดทางเคมี และวิธีการวิเคราะห์มลภาวะทางอากาศที่ระบายออกจากปล่องเตาจากกระบวนการเผาตรง

| พารามิเตอร์ | วิธีวิเคราะห์ |
|---|--------------------------------|
| ปริมาณฝุ่นละออง (Total Suspended Particulate) | Isokinetic, Gravimetric Method |
| ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur Dioxide) | Electrochemical sensor Method |
| ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน (Oxide of Nitrogen) | Electrochemical sensor Method |
| ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon Monoxide) | Electrochemical sensor Method |

ที่มา: สำนักจัดการคุณภาพอากาศและเสียง กรมควบคุมมลพิษ, 2549, น.101-197

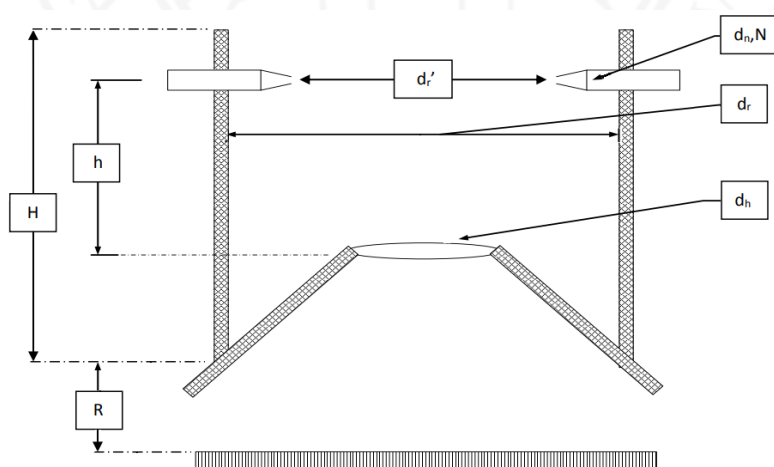


ภาพที่ 12 การเผากากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ในเตาดินเผา

ขั้นตอนที่ 2 พัฒนา และศึกษาประสิทธิภาพระบบแก๊สซิฟิเคชัน ที่สามารถให้พลังงาน ความร้อนและเหมาะสมต่อการใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง

การออกแบบและพัฒนาระบบแก๊สซิฟิเคชัน ที่สามารถให้พลังงานความร้อน และเหมาะสม ต่อการใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ เป็นเชื้อเพลิง มีวิธีดำเนินการดังต่อไปนี้

1. ออกแบบเตาแก๊สซิฟิเคชัน โดยการศึกษเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ประกอบกับ ข้อมูลการศึกษาคุณสมบัติของกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ และการทดสอบผลกระทบต่อ สิ่งแวดล้อมของเตาเผากากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ด้วยวิธีเผาดตรง พบว่าเตาแก๊สซิฟิเคชัน ที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้กับกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ คือ เตาแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลลง (Imbert Downdraft Gasifier) ชนิด V-Hearth ซึ่งเป็นเตาที่ออกแบบมาเพื่อขจัดน้ำมันดินที่มีอยู่ใน เชื้อเพลิงแข็งโดยเฉพาะ อากาศจะถูกดูดผ่านจากด้านบนลงสู่ด้านล่างของเตา ไหลผ่านวงแหวนเพื่อ กระจายอากาศให้หัวฉีดโดยรอบในโซนเผาไหม้ แก๊สที่ได้จากบริเวณนี้จะเกิดรีดักชันในขณะที่ไหลลงสู่ ด้านล่างและผ่านชั้นของคาร์บอนร้อนซึ่งอยู่เหนือตะแกรง ขณะเดียวกันในชั้นของชีวมวลที่อยู่ทางด้าน บนของบริเวณการเผาไหม้จะมีปริมาณออกซิเจนน้อยมาก ทำให้เกิดการสลายตัวทางความร้อน และ ไอของน้ำมันดินที่เกิดขึ้นจะไหลผ่านชั้นของคาร์บอนที่ร้อน ทำให้น้ำมันดินแตกตัวเป็นแก๊ส (นคร ทิพ ยาวงศ์, 2553, น.77-86) จุดเด่นของเตาแก๊สซิฟิเคชันชนิด V-Hearth จะออกแบบเป็นเหล็กรูปวง แหวนรูปตัว V คว่ำลง ดังภาพที่ 13 โดยบริเวณระหว่างระนาบของหัวฉีดและวงแหวนเหล็กจะมีถ้ำ ก่อตัวขึ้น ช่วยเพิ่มความเป็นฉนวนความร้อนทำให้เตาแก๊สซิฟิเคชันมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงขึ้น ในการออกแบบเตาแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลลงชนิด V-hearth จะต้องคำนวณขนาดของเตาตามตัวแปร ต่าง ๆ ในตารางที่ 10



ภาพที่ 13 แก๊สซิฟิเคชันแบบไหลลงชนิด V-hearth และตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบ ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2561, น.104

ตารางที่ 10 ตัวแปรต่าง ๆ ในการออกแบบเตาแก๊สซีฟเฮอร์แบบไหลลงชนิด V-hearth

| สัญลักษณ์ | คำอธิบาย |
|-----------|--|
| d_h | ขนาดของคอคออด (Throat) ที่เล็กที่สุดของเตา |
| d_r | ขนาดของโซนเผาไหม้ |
| d_r' | ขนาดของเส้นรอบวงของปลายหัวฉีด (Nozzle) |
| H | ขนาดความสูงของโซนเผาไหม้ |
| h | ความสูงของหัวฉีดวัดจากคอคออดที่เล็กที่สุด |
| R | ขนาดความสูงของโซนรีดักชัน |
| d_N | ขนาดรูหัวฉีด |
| N | จำนวนหัวฉีด |

ขั้นตอนการออกแบบเตาแก๊สซีฟเฮอร์

เตาแก๊สซีฟเฮอร์เป็นส่วนสำคัญที่สุดในระบบแก๊สซีฟเฮอร์ ดังนั้น เพื่อให้ได้ระบบที่มีขนาดเหมาะสมกับความต้องการใช้งานและทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงต้องมีการออกแบบที่ถูกต้องตามหลักวิชาการ ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การกำหนดขนาดกำลังความร้อนของเตาแก๊สซีฟเฮอร์ และค่าความร้อนของค่าความร้อนของโปรติวเซอร์แก๊สที่คาดว่าจะได้รับ

ขั้นตอนที่ 2 การคำนวณอัตราการกำลังความร้อนของชีวมวลที่ภาวะสูงสุด ดังสมการที่ 3.1

$$\text{อัตราการกำลังความร้อนของชีวมวลที่ภาวะสูงสุด} = \frac{\text{กำลังความร้อนที่ต้องการ}}{\text{ประสิทธิภาพเตาผลิตก๊าซ}}$$

ขั้นตอนที่ 3 การคำนวณอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและอัตราการไหลของโปรติวเซอร์แก๊ส ดังสมการที่ 3.2 และ 3.3

$$\text{อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง} = \frac{\text{อัตราการกำลังความร้อนของชีวมวลที่ภาวะสูงสุด}}{\text{ความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวล}}$$

$$\text{อัตราการไหลของโปรติวเซอร์แก๊ส} = \frac{\text{กำลังความร้อนที่ต้องการ}}{\text{ค่าความร้อนของโปรติวเซอร์แก๊ส}}$$

ขั้นตอนที่ 4 การคำนวณหาค่าพื้นที่หน้าตัดของ Throat ดังสมการที่ 3.4

$$B_g = \frac{Q}{A}$$

โดยที่ B_g คือ ค่า Heat load มีหน่วยเป็น $m^3/cm^2/h$
 Q คือ อัตราการไหลของโปรติวเซอร์แก๊ส (Nm^3/h)
 A คือ พื้นที่หน้าตัดของคอคอดหรือ Throat (cm^2)

ขั้นตอนที่ 5 การคำนวณหาขนาดของเตาแก๊สซีฟเออร์

การหาขนาดต่าง ๆ ของเตาแก๊สซีฟเออร์ ใช้วิธีการเปิดตารางตามทฤษฎีของ Reed and Das ตามตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ขนาดต่าง ๆ ของเตาแก๊สซีฟเออร์แบบไหลลงชนิด V-hearth

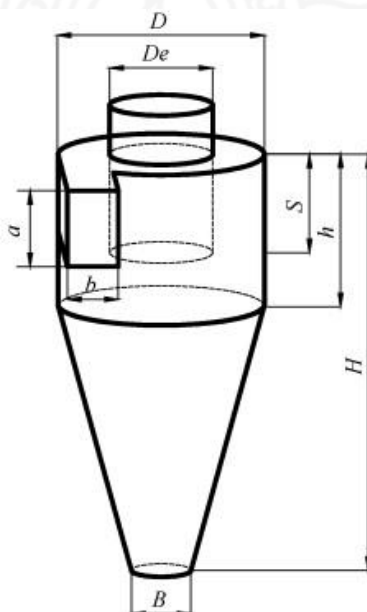
| d_r/d_h | d_h | d_r | d_r' | h | H | R | N | d_N |
|-----------|-------|-------|--------|-----|-----|-----|-----|-------|
| 268/60 | 60 | 268 | 150 | 80 | 256 | 100 | 5 | 7.5 |
| 268/80 | 80 | 268 | 176 | 95 | 256 | 100 | 5 | 9 |
| 268/100 | 100 | 268 | 202 | 100 | 256 | 100 | 5 | 10.5 |
| 268/120 | 120 | 268 | 216 | 110 | 256 | 100 | 5 | 12 |
| 300/100 | 100 | 300 | 208 | 100 | 275 | 115 | 5 | 10.5 |
| 300/115 | 115 | 300 | 228 | 105 | 275 | 115 | 5 | 11.5 |
| 300/130 | 130 | 300 | 248 | 110 | 275 | 115 | 5 | 12.5 |
| 300/150 | 150 | 300 | 258 | 120 | 275 | 115 | 5 | 14 |
| 400/130 | 130 | 400 | 258 | 110 | 370 | 155 | 7 | 10.5 |
| 400/150 | 150 | 400 | 258 | 120 | 370 | 155 | 7 | 12 |
| 400/175 | 175 | 400 | 308 | 130 | 370 | 155 | 7 | 13.5 |
| 400/200 | 200 | 400 | 318 | 145 | 370 | 155 | 7 | 16 |

ที่มา : T.B. Reed & A. Das, 1988, p.37

2. พัฒนาระบบกำจัดมลพิษทางอากาศ ของเตาแก๊สซีฟิเออร์ที่ใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง ต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ที่ต้องการกอนำโปรติวเซอร์แก๊สไปใช้งาน เนื่องจากอุปกรณ์ทำความสะอาดแต่ละชนิดมีคุณสมบัติในการทำมาสะอาดสารปนเปื้อนที่แตกต่างกันตลอดจนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ทำความสะอาดโปรติวเซอร์แก๊ส เพื่อให้อุปกรณ์สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพตลอดการใช้งาน โดยผู้วิจัยได้พัฒนาระบบกำจัดสารปนเปื้อนในโปรติวเซอร์แก๊ส ได้แก่ ฝุ่นหยาบ ฝุ่นละเอียด และน้ำมันดิน โดยใช้ไซโคลนดักฝุ่น (Cyclone) และเครื่องดักฝุ่นแบบเปียก (Wet Scrubber) โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1 การออกแบบไซโคลนดักฝุ่น (Cyclone)

การออกแบบไซโคลนสามารถกระทำได้หลายลักษณะ ขึ้นอยู่กับความต้องการของระบบ เงื่อนไขหรือข้อจำกัดต่าง ๆ หรือเงื่อนไขด้านพื้นที่ติดตั้ง โดยมีจุดมุ่งหมายให้ปริมาณของฝุ่นที่สามารถเล็ดลอดออกจากไซโคลนไปพร้อมกับโปรติวเซอร์แก๊สผ่านหัวเผาออกสู่ปล่องเตา ต้องมีความเข้มข้นไม่เกินค่าที่กำหนด จากการศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบไซโคลน ซึ่งได้รับการยอมรับและถูกนำมาใช้ในการออกแบบ เรียกว่า ไซโคลนมาตรฐาน (Standard Cyclone) มีลักษณะดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 สัดส่วนของไซโคลนมาตรฐาน

ที่มา : Alfa Lava, 2004 อ้างถึงใน กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2561, น.87

- โดยที่ D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไซโคลน
 De คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของช่องทางออก
 a คือ ความสูงของช่องทางเข้า
 b คือ ความกว้างของช่องทางเข้า
 S คือ ความยาวของช่องทางออก
 h คือ ความสูงของไซโคลนช่วงที่เป็นทรงกระบอก
 H คือ ความสูงทั้งหมดของไซโคลน
 B คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของช่องระบายฝุ่น

ไซโคลนมาตรฐานในปัจจุบันที่เน้นประสิทธิภาพการคัดแยกฝุ่น ได้แก่ ไซโคลนแบบ Stairmand ไซโคลนแบบ Peterson and Whitby ไซโคลนแบบ Leith and Licht และไซโคลนแบบ Lapple (รัชชานนท์ เปี่ยมใจสว่าง, 2563, น.3) ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยเลือกใช้ ไซโคลนแบบ Lapple ซึ่งมีสัดส่วนของไซโคลน ดังตารางที่ 12 เนื่องจากสามารถคัดแยกอนุภาคฝุ่นขนาดเล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 1 ไมครอนขึ้นไปได้ดี

ตารางที่ 12 สัดส่วนของไซโคลนแบบ Lapple

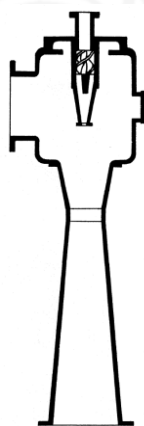
| ระยะ | สัดส่วน |
|------|---------|
| D | 1.0 |
| a | 0.5 |
| b | 0.25 |
| S | 0.625 |
| De | 0.5 |
| h | 2.0 |
| H | 4.0 |
| B | 0.25 |

ที่มา : Ray, 1994, pp.254-255

3. การออกแบบเครื่องดักฝุ่นแบบเปียก (Wet Scrubber)

เครื่องดักฝุ่นแบบเปียกแบ่งออกเป็น 4 ชนิดตามลักษณะโครงสร้าง ได้แก่ หอพ่นของเหลว (Spray Tower or Spray Chamber) สกรับเบอร์แบบแพ็กเบด (Packed-bed Scrubber) สกรับเบอร์แบบ

แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Scrubber) และสครับเบอร์แบบเวนจูรี (Venturi Scrubber) โดยเครื่องดักฝุ่นแบบเปียกทั้ง 4 ชนิด จะมีประสิทธิภาพ ปริมาณการใช้น้ำ และความดันตกคร่อม แตกต่างกันใน การออกแบบจะต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพในการดักฝุ่น ขนาดของฝุ่น รวมถึงต้นทุนต่าง ๆ ด้วย ในการศึกษาค้นคว้าวิจัยได้ออกแบบและพัฒนาสครับเบอร์แบบอีเจ็คเตอร์เวนจูรี (Ejector Venturi Scrubber) ซึ่งมีลักษณะการทำงานคล้ายกับสครับเบอร์แบบเวนจูรี แตกต่างที่สครับเบอร์แบบอีเจ็คเตอร์เวนจูรีไม่ได้ใช้แรงดันของแก๊สเป็นตัวขับเคลื่อนกระบวนการ แต่จะขับเคลื่อนกระบวนการด้วยการสเปรย์น้ำแรงดันสูงจากหัวฉีดเพียงหัวเดียว ฉีดน้ำไปยังคอคอดของเวนจูรี ทำให้เกิดแรงดูดสูญญากาศดึงโปรติวเซอร์แก๊สจากเตาแก๊สซิฟิเออร์ผ่านไซโคลนเข้ามายังสครับเบอร์ และส่งโปรติวเซอร์แก๊สที่สะอาดแล้วออกไปยังหัวเผาต่อไปได้เอง โดยไม่ต้องใช้พัดลมหรือเครื่องเป่าลม เป็นการป้องกันอันตรายจากการติดไฟ แก้ปัญหาใบพัดของเครื่องเป่าลมสกปรกอุดตันและชำรุดเสียหาย ซึ่งเกิดขึ้นบ่อยครั้งในระบบแก๊สซิฟิเคชัน ในด้านประสิทธิภาพการดักฝุ่นเทียบเท่าสครับเบอร์แบบเวนจูรี ซึ่งฝุ่นจะถูกดักจับด้วยละอองน้ำที่เกิดจากหัวฉีดแรงดันสูง และการที่โปรติวเซอร์แก๊สมีความเร็วต่ำกว่าความเร็วของน้ำมากยิ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพการดักฝุ่นสูงขึ้น ดังภาพที่ 15



ภาพที่ 15 สครับเบอร์แบบอีเจ็คเตอร์เวนจูรี
ที่มา : L. S. Harris, 1963, pp.613-632

4. การประเมินประสิทธิภาพของระบบแก๊สซิฟิเคชัน

การหาค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบแก๊สซิฟิเคชัน หรือค่าพลังงานความร้อนจากโปรติวเซอร์แก๊สที่ระบบสามารถผลิตได้ เทียบกับค่าพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงที่ใส่เข้าไปในระบบ (Food and Agriculture Organization of The United Nations, 1986, p.18) สามารถหาได้จากสมการที่ 3.5 ดังนี้

$$\eta_{th} = \frac{HV_{gas} \times Q_{gas}}{HV_{fuel} \times FCR_{fuel}} \times 100$$

โดยที่ η_{th} คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบแก๊สซิฟิเคชัน (%)

HV_{gas} คือ ค่าความร้อนของโปรดิวเซอร์แก๊ส (MJ/Nm³)

Q_{gas} คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของโปรดิวเซอร์แก๊สที่ออกจากระบบ (Nm³/hr)

HV_{fuel} คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (MJ/kg)

FCR_{fuel} คือ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง

ค่าความร้อนของโปรดิวเซอร์แก๊ส (Basu, 2010) มีหน่วยเป็น (MJ/Nm³) ซึ่งประกอบด้วยแก๊ส CO, H₂ และ CH₄ สามารถหาได้จากสมการที่ 3.6 ดังนี้

$$HV_{gas} = (X_{CO} \times 12.63) + (X_{H_2} \times 10.78) + (X_{CH_4} \times 35.88)$$

โดยที่ X_{CO} คือ สัดส่วนโดยปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์

X_{H_2} คือ สัดส่วนโดยปริมาณของไฮโดรเจน

X_{CH_4} คือ สัดส่วนโดยปริมาณของมีเทน

อัตราการไหลของแก๊ส (Gas Flow Rate) มีหน่วยเป็น m³/s ในท่อส่งโปรดิวเซอร์แก๊ส สามารถหาได้จากสมการที่ 3.7 ดังนี้

$$Q_{gas} = A \times V_{gas}$$

โดยที่ A คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อ (m²)

V_{gas} คือ ความเร็วของแก๊ส (m/s)

อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (Fuel Consumption Rate) มีหน่วยเป็น kg/s สามารถหาได้จากสมการที่ 3.8 ดังนี้

$$FCR_{fuel} = \frac{m_{fuel}}{t}$$

โดยที่ m_{fuel} คือ ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ (kg)

t คือ เวลาที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงทั้งหมด (s)

อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (Air Fuel Ratio: AF_{ratio}) สามารถหาได้จากสมการที่ 3.9

ดังนี้

$$AF_{ratio} = \frac{m_{air}}{FCR_{fuel}}$$

โดยที่ m_{air} คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg/s)

FCR_{fuel} คือ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (kg/s)

อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (m_{air}) มีหน่วยเป็น kg/s สามารถหาได้จากสมการที่

3.10 ดังนี้

$$m_{air} = \rho \times A \times v_{air}$$

โดยที่ ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (kg/m^3)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อ (m^2)

v_{air} คือ ความเร็วอากาศที่ป้อนเข้าสู่เตา (m/s)

ขั้นตอนการทดลองในแต่ละครั้ง เริ่มจากการเติมเชื้อเพลิงให้เต็มแล้วปิดฝาให้แน่น เติมน้ำให้เต็ม เปิดวาล์วควบคุมอากาศเข้าและวาล์วควบคุมการจ่ายโปรติวเซอร์แก๊ส จากนั้นเปิดปั๊มน้ำทั้ง 2 ตัว แล้วจุดไฟที่ช่องจุดไฟ เมื่อเชื้อเพลิงชีวมวลติดไฟแล้ว ให้ทดสอบการจุดติดไฟของโปรติวเซอร์แก๊สบริเวณหัวเผา เมื่อแก๊สติดไฟแล้วให้รอประมาณ 15 นาที แล้วเริ่มทำการวัดความเร็วของอากาศที่ป้อนเข้าสู่เตาแก๊สซีไฟเออร์และวัดอัตราการไหลของโปรติวเซอร์แก๊สด้วยเครื่องวัดความเร็วลมแบบใบพัด และใช้ชุดปั๊มดูดโปรติวเซอร์แก๊สเข้าสู่ถุงเก็บก๊าซขนาด 1 ลิตร ส่งตัวอย่างไปตรวจหา

องค์ประกอบในห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีของสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ขั้นตอนที่ 3 ศึกษาต้นทุนการผลิต เศรษฐศาสตร์ และมลภาวะทางอากาศที่ระบายออกจากปล่องเตาของระบบแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง

1. ศึกษาต้นทุนการผลิต และเศรษฐศาสตร์ของระบบแก๊สซิฟิเคชันเพื่อการจัดการกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ โดยเปรียบเทียบกับการใช้เตาฟืนในการต้มเมล็ด ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูลทางเศรษฐศาสตร์ ดังนี้

1.1 การวิเคราะห์ต้นทุนค่าใช้จ่ายรายปี (Uniform Annual Cost Method)

การคำนวณต้นทุนค่าใช้จ่ายรายปีทั้งหมด (C_T) ของแต่ละเชื้อเพลิง ประกอบด้วย ค่าเชื้อเพลิงที่ใช้ต่อปี (C_e) มูลค่าปัจจุบันของเงินลงทุนรายปี (C_p) และมูลค่าซากของระบบในแต่ละปี (C_s) มีวิธีการคำนวณดังนี้

1.1.1 ค่าเชื้อเพลิงที่ใช้ต่อปี (C_e) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.11

$$m_{\text{fuel}} = (P_{\text{stove}} / \text{HV}_{\text{fuel}}) \times 3600 \times H \times D$$

โดย m_{fuel} คือ ปริมาณเชื้อเพลิงที่ต้องการใช้ต่อปี (kg)

P_{stove} คือ กำลังความร้อนที่ต้องการของเตา (kW)

HV_{fuel} คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (kJ/kg)

H คือ จำนวนชั่วโมงทำงานต่อวัน (ชั่วโมง)

D คือ จำนวนวันทำงานต่อปี (วัน)

1.1.2 มูลค่าปัจจุบันของเงินลงทุนรายปี (C_p) สามารถคำนวณตามสมการที่ 3.12

$$C_p = P_w \left(\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right)$$

โดยที่ P_w คือ มูลค่าเงินลงทุนสร้างระบบในปัจจุบัน (บาท)

i คือ อัตราดอกเบี้ยต่อปี (%)

n คือ อายุการใช้งานของระบบ (ปี)

1.1.3 มูลค่าซากของระบบในแต่ละปี (C_s) สามารถคำนวณตามสมการที่ 3.13

$$C_s = S \left(\frac{i}{(1+i)^n - 1} \right)$$

โดยที่ S คือ มูลค่าซากของระบบเมื่อหมดอายุการใช้งาน (บาท)
 i คือ อัตราดอกเบี้ยต่อปี (%)
 n คือ อายุการใช้งานของระบบ (ปี)

1.2 ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period)

ระยะเวลาคืนทุนของระบบแก๊สซิฟิเคชัน เมื่อเทียบการกับใช้เตาฟืน ($PB_{\text{แก๊สซิฟิเคชัน/ฟืน}}$) สามารถคำนวณตามสมการที่ 3.14 ดังนี้

$$PB_{\text{แก๊สซิฟิเคชัน/ฟืน}} = P_{w, \text{แก๊สซิฟิเคชัน}} / (C_{T, \text{ฟืน}} - C_{T, \text{แก๊สซิฟิเคชัน}})$$

โดยที่ $P_{w, \text{แก๊สซิฟิเคชัน}}$ คือ เงินลงทุนสร้างระบบแก๊สซิฟิเคชัน
 $C_{T, \text{ฟืน}}$ คือ ต้นทุนค่าฟืนต่อปี
 $C_{T, \text{แก๊สซิฟิเคชัน}}$ คือ ต้นทุนระบบแก๊สซิฟิเคชันต่อปี

1.3 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value) ของระบบแก๊สซิฟิเคชัน เมื่อเทียบการกับใช้เตาฟืน สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.15 ดังนี้

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{ES_t}{(1+i)^t} - I_0$$

โดยที่ n คือ อายุของโครงการ (ปี)
 ES_t คือ ต้นทุนพลังงานที่ประหยัดได้ (energy cost savings)
 รายปี ตั้งแต่ปลายปีที่ 1 ถึง n
 I_0 คือ เงินลงทุนของระบบแก๊สซิฟิเคชัน
 i คือ อัตราส่วนลด (Discount Rate)

1.4 อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate Return) ของระบบแก๊สซิฟิเคชันเมื่อเทียบการกับใช้เตาฟืน สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.16

$$-I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{ES_t}{(1+IRR)^t} = 0$$

| | | |
|--------|--------|---|
| โดยที่ | n | คือ อายุของโครงการ (ปี) |
| | ES_t | คือ ต้นทุนพลังงานที่ประหยัดได้ (energy cost savings) รายปี ตั้งแต่ปลายปีที่ 1 ถึง n |
| | I_0 | คือ เงินจ่ายลงทุนตอนเริ่มโครงการ (Total Investment) |
| | IRR | คือ อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return) |

1.5 อัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุน (Benefit-Cost Ratio : BCR) ของระบบแก๊สซิฟิเคชันเมื่อเทียบการกับใช้เตาฟืน สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.17 ดังนี้

$$BCR = \frac{\text{ผลรวมของมูลค่าปัจจุบันสุทธิของกระแสเงินสดในแต่ละปี}}{\text{เงินลงทุน}}$$

1.6 การประเมินมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนกลุ่มส่งเสริมอาชีพบ้านหาดไก่อ้อย อำเภอกำปูลา จังหวัดอุดรธานี และประเมินศักยภาพของอำเภอกำปูลา จังหวัดอุดรธานี โดยเปรียบเทียบรูปแบบการจัดการเปลือกมะม่วงหิมพานต์ที่เหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูป โดยการรวบรวมเพื่อจำหน่ายให้กับพ่อค้าแบบเดิม กับรูปแบบการจัดการเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์แบบใหม่ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

2. การวิเคราะห์มลภาวะทางอากาศที่ระบายออกจากปล่องเตาจากการเผากากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชันที่พัฒนาขึ้น

การวิเคราะห์ทดสอบการเผาเชื้อเพลิงกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ด้วยตัวชี้วัดทางเคมีของมลภาวะทางอากาศที่ระบายออกจากปล่องเตา จากกระบวนการเผาด้วยเตาแก๊สซิฟิเคชันแบบไทม์ดราฟท์ (Imbert Downdraft Gasifier) ชนิด V-Hearth ซึ่งเป็นเตาที่ออกแบบมาเพื่อขจัดน้ำมันดินที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงแข็งโดยเฉพาะ ขนาด 130 kW ออกแบบและพัฒนาระบบทำความสะอาดโปรตีน เซอร์แก๊ส ประกอบด้วย ไชโคลนประสิทธิภาพสูง มีหน้าที่ดักเก็บฝุ่นที่มีขนาดใหญ่ และสกรับเบอร์แบบเวนจัวร์ต่ออนุกรมกันจำนวน 2 ชุด มีหน้าที่ดักจับฝุ่นละเอียด น้ำมันและกลิ่น ออกจากโปรตีน

เซอร์แก๊ส ก่อนที่จะถูกนำไปเผาไหม้ โดยทำการเก็บตัวอย่างปริมาณสารเจือปนในอากาศที่ระบายออก จากปล่อง และนำมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ ตัวชี้วัดทางเคมีของมลภาวะทางอากาศที่ระบายออก จากปล่องเตาที่วิเคราะห์ ดังตารางที่ 13 นำผลการตรวจวัดเทียบกับค่ามาตรฐานตามประกาศ กระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดค่าปริมาณของสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากโรงงาน พ.ศ. 2549 และผลการตรวจวัดมลภาวะทางอากาศที่ระบายออกจากปล่อง จากการทดสอบ ผลกระทบการเผาากกเปลือกมะม่วงหิมพานต์ด้วยวิธีการเผาตรง

ตารางที่ 13 ตัวชี้วัดทางเคมี และวิธีการวิเคราะห์มลภาวะทางอากาศที่ระบายออกจากปล่องเตา แก๊สซีพีเออร์

| พารามิเตอร์ | วิธีวิเคราะห์ |
|---|--------------------------------|
| ปริมาณฝุ่นละออง (Total Suspended Particulate) | Isokinetic, Gravimetric Method |
| ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur Dioxide) | Electrochemical sensor Method |
| ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน (Oxide of Nitrogen) | Electrochemical sensor Method |
| ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon Monoxide) | Electrochemical sensor Method |

ที่มา: สำนักจัดการคุณภาพอากาศและเสียง กรมควบคุมมลพิษ, 2549, น.101-197

3. การวิเคราะห์ต้นทุนสิ่งแวดล้อมของการปล่อยมลพิษทางอากาศ เพื่อศึกษาเปรียบเทียบ ผลกระทบจากมลพิษทางอากาศที่เกิดขึ้น จากการเผาากกเปลือกมะม่วงหิมพานต์ด้วยเตาเผา ตรง และการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในระบบแก๊สซิฟิเคชันที่พัฒนาขึ้น โดยงานวิจัยนี้คำนวณต้นทุน สิ่งแวดล้อมจากค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการบำบัดมลพิษแต่ละชนิด ได้แก่ ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) และปริมาณฝุ่นละออง (TSP) ซึ่งมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

3.1 การเปลี่ยนหน่วย ppm เป็น mg/m³ เนื่องจากการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ส่วนใหญ่จะมีหน่วยเป็น ppm แต่การคำนวณต้นทุนสิ่งแวดล้อมจะคิดจากค่าใช้จ่ายในการกำจัดมลพิษที่ ปล่อยออกมาต่อหน้าหนัก โดยสามารถเปลี่ยนหน่วย ppm เป็น mg/m³ ได้ตามสมการที่ 3.18

$$M = \frac{P \times MW}{24.45}$$

| | | |
|--------|-------|---|
| โดยที่ | M | คือ ความเข้มข้นของสารมลพิษในหน่วยน้ำหนักต่อปริมาตร (mg/m^3) |
| | P | คือ ค่าความเข้มข้นของสารมลพิษในหน่วยปริมาตรของแก๊สต่อ ปริมาตรอากาศล้านส่วน (ppm) |
| | MW | คือ น้ำหนักโมเลกุลของสารมลพิษ (g) |
| | 24.45 | คือ ปริมาตรในหน่วยลิตร ของก๊าซใด ๆ 1 g/mole ที่ 25 °c และ ความดัน 760 mmHg |

3.2 การคำนวณค่าใช้จ่ายในการกำจัดมลพิษทางอากาศในประเทศไทย จากข้อมูลของ Office of Energy: USA (2004) ซึ่งเป็นข้อมูลของประเทศสหรัฐอเมริกา กำหนดค่าต้นทุนสิ่งแวดล้อมต่อตันมลพิษของ CO_2 , CO, NO_x , SO_2 และ TSP เป็นเงิน 33 USD 1,288 USD 9,620 USD 2,220 USD และ 5,920 USD ตามลำดับ เมื่อนำมาใช้ในประเทศไทยจำเป็นต้องพิจารณาความสามารถในการจ่ายค่าความเสียหายต่อสิ่งแวดล้อม (Willingness to Pay: WTP) งานวิจัยกำหนดให้ค่า WTP ของประเทศไทยมีสัดส่วนเท่ากับ 0.183 ของค่า WTP ของประเทศสหรัฐอเมริกา และอัตราแลกเปลี่ยนเงินปี 2564 กำหนดให้ 1 USD เท่ากับ 31.44 บาท และเมื่อคำนวณเป็นต้นทุนสิ่งแวดล้อมมลพิษทางอากาศ CO_2 , CO, NO_x , SO_2 และ TSP ของประเทศไทย จะมีค่าดังตารางที่ 13

ตารางที่ 14 แสดงต้นทุนสิ่งแวดล้อมที่เป็นค่าใช้จ่ายในการกำจัดมลพิษทางอากาศในประเทศไทย

| มลพิษทางอากาศ | ต้นทุนสิ่งแวดล้อม (บาทต่อกิโลกรัม) |
|--------------------------------------|------------------------------------|
| ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ CO_2 | 0.19 |
| ปริมาณฝุ่นละออง TSP | 34.06 |
| ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ SO_2 | 12.77 |
| ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน NO_x | 55.35 |
| ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ CO | 7.41 |

ที่มา: ดัดแปลงจาก Massachusetts Externality Adders, Office of Clean Energy, 2004

บทที่ 4

ผลการวิจัย

การวิจัยเรื่อง เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันเพื่อการจัดการกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์
ผู้วิจัยนำเสนอผลการวิจัย โดยแบ่งเป็น 3 ตอน ดังนี้

ตอนที่ 1 ผลการศึกษาชนิด ปริมาณ องค์ประกอบทางด้านเคมีของกากเปลือกเมล็ดมะม่วง
หิมพานต์และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการเผากากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ด้วยวิธีเผาตรง

ตอนที่ 2 ผลการพัฒนาและประสิทธิภาพระบบแก๊สซิฟิเคชันที่สามารถให้พลังงานความร้อน
และเหมาะสมต่อการใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง

ตอนที่ 3 ผลการศึกษาต้นทุนการผลิต เศรษฐศาสตร์ และมลภาวะทางอากาศที่ระบายออก
จากปล่องเตาของระบบแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง

ผลการวิจัย

ตอนที่ 1 ผลการศึกษาชนิด ปริมาณ องค์ประกอบทางด้านเคมีของกากเปลือกเมล็ด
มะม่วงหิมพานต์ และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการเผากากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ด้วย
วิธีเผาตรง

ผลการศึกษาชนิด และปริมาณกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

ในปี พ.ศ. 2561 อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม มีพื้นที่ปลูกมะม่วงหิมพานต์ ประมาณ
26,224 ไร่ ให้ผลผลิตแล้ว 23,577 ไร่ เก็บเกี่ยวผลผลิตได้ประมาณ 6,000 -7,000 ตันต่อปี เมื่อ
กะเทาะเมล็ดแล้วได้ประมาณ 1,300-1,500 ตันต่อปี (ผลผลิตทั้งเปลือก 5 กิโลกรัมเมื่อกะเทาะแล้วได้
เมล็ดขาว 1.3 กิโลกรัม) พันธุ์มะม่วงหิมพานต์ที่ปลูกมากที่สุด คือ พันธุ์ศรีสะเกษ 60-1 (ศก. 60-1)
รองลงมาพันธุ์ศรีสะเกษ 60-2 (ศก. 60-2) ลักษณะมะม่วงหิมพานต์พันธุ์ ศก. 60-1 เป็นต้นพันธุ์จาก
แปลงรวบรวมพันธุ์ศูนย์วิจัยพืชสวนศรีสะเกษ ลำต้นทรงพุ่มโปร่ง ใบด้านบนสีเขียวเข้มใต้ใบสีเขียว
อ่อนช่อดอกยาว เมล็ดมีสีเทาน้ำหนักเฉลี่ย 6.3 กรัมต่อเมล็ด จำนวนเมล็ดทั้งเปลือก 158 เมล็ดต่อ
กิโลกรัม



ภาพที่ 16 การสัมภาษณ์ประธานกลุ่มส่งเสริมอาชีพบ้านหาดไก่อ้อย อำเภอท่าปลา จังหวัดอุตรดิตถ์

อำเภอท่าปลามีการแปรรูปผลิตภัณฑ์จากมะม่วงหิมพานต์สองลักษณะคือ การรวมกันของกลุ่มผู้ผลิตในลักษณะของกลุ่มเกษตรกร กลุ่มแม่บ้านเกษตรกร และกลุ่มส่งเสริมอาชีพลักษณะวิสาหกิจชุมชนเพื่อการแปรรูปมะม่วงหิมพานต์ จากการสัมภาษณ์คุณวันทรา ผ่านคำ ซึ่งเป็นประธานกลุ่มส่งเสริมอาชีพบ้านหาดไก่อ้อย ตำบลหาดล้า อำเภอท่าปลา จังหวัดอุตรดิตถ์ (เมื่อวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2562) ดังภาพที่ 16 พบว่า ผลผลิตมะม่วงหิมพานต์ของอำเภอท่าปลา ประมาณ 7,000 ตันต่อปี มีปริมาณเปลือกที่เหลือทิ้งจากการแปรรูปประมาณ 4,900 ตันต่อปี เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์จำนวนมาก ดังภาพที่ 17 หากไม่มีการจัดการที่ไม่ถูกต้องจะก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมกับชุมชนพื้นที่อำเภอท่าปลาในระยะยาว



ภาพที่ 17 กองเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เหลือทิ้งจากการกระบวนการแปรรูป

ปัจจุบันกลุ่มผู้แปรรูปมะม่วงหิมพานต์จึงนำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่เหลือทิ้ง มาบีบอัดให้ได้น้ำมัน CNSL (Cashew Nut Shell Liquid) ด้วยเครื่องสกัดแบบเกลียวอัด ดังภาพที่ 18 ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์น้ำมันที่บีบอัดได้ 22 เปอร์เซ็นต์ นำไปจำหน่ายราคากิโลกรัมละ 12 บาท ผลจากการบีบอัดน้ำมัน CNSL ทำให้เกิดปริมาณกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เหลือทิ้งจำนวน 78 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณเปลือกมะม่วงหิมพานต์ คิดเป็นปริมาณกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 3,822 ตันต่อปี ซึ่งถือว่ามามีปริมาณสูงมาก



ภาพที่ 18 การสกัดน้ำมัน CNSL จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ด้วยเครื่องสกัดแบบเกลียวอัด

จากการสำรวจและเก็บข้อมูลการจัดการกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ในพื้นที่อำเภอท่าปลา จังหวัดอุตรดิตถ์ พบว่า มีการกำจัดโดยการกองกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ทิ้งไว้ให้ย่อยสลายไปตามธรรมชาติ บางส่วนนำไปทำปุ๋ยหมัก และหากทำลายโดยวิธีการเผาในพื้นที่โล่งแจ้ง ดังภาพที่ 19 จะก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศ มีกลิ่นฉุนจัด เป็นอันตรายต่อเยื่อหุ้มจมูกและนัยน์ตาเพิ่มเติมปัญหาหมอกควันที่ส่งผลกระทบต่อความเป็นอยู่และสุขภาพ โดยเฉพาะเด็กเล็ก ผู้สูงอายุ หญิงมีครรภ์ ผู้ป่วยเรื้อรัง โรคปอด หอบหืด ภูมิแพ้ เป็นต้น อีกทั้งยังสร้างความเดือดร้อนรำคาญทัศนวิสัยไม่ดี เป็นอุปสรรคในการคมนาคมขนส่ง ทำลายระบบนิเวศป่าไม้ รวมถึงส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจการท่องเที่ยวอีกด้วย



ภาพที่ 19 การกองและการเผากากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ในพื้นที่โล่งแจ้ง

กระบวนการแปรรูปเมล็ดมะม่วงหิมพานต์มีหลายขั้นตอน คือ การต้มเมล็ด การกะเทาะ การอบแห้ง การลอกเยื่อ การคัดขนาดเมล็ด การอบปรุงรส และการบรรจุ ซึ่งในขั้นตอนการต้มเมล็ด และการอบเมล็ดที่กะเทาะแล้ว จำเป็นต้องใช้พลังงานความร้อน ในปัจจุบันกลุ่มเกษตรกรนิยมใช้ฟืน เป็นเชื้อเพลิงให้พลังงานความร้อนในการต้มเมล็ดก่อนการนำไปกะเทาะ และใช้แก๊ส LPG เป็นเชื้อเพลิงในการให้พลังงานความร้อนให้กับตู้อบเมล็ดทดแทนพลังงานแสงอาทิตย์ในวันที่ไม่มีแสงแดด ดังภาพที่ 20 ซึ่งเชื้อเพลิงทั้งฟืนและ LPG ถือเป็นต้นทุนที่สำคัญของกลุ่มเกษตรกร จากการคำนวณ ทางด้านพลังงานความร้อนที่ใช้ในขั้นตอนการต้มเมล็ด มีความต้องการกำลังความร้อน 50 kW โดย ต้องใช้ฟืนประมาณ 40 ตันต่อปี ต้นทุนฟืนตันละ 1,200 บาท คิดเป็นต้นทุนค่าฟืนทั้งหมด 48,000 บาทต่อปี และใช้ LPG ประมาณ 400 กิโลกรัมต่อปี ราคา กิโลกรัมละ 23 บาท คิดเป็นต้นทุนค่า LPG ประมาณ 9,200 บาทต่อปี



ภาพที่ 20 ภาพการต้มและการอบเมล็ดมะม่วงหิมพานต์โดยใช้ฟืนและ LPG เป็นเชื้อเพลิง

กลุ่มเกษตรกรได้มีการทดลองใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิงในเตาแก๊สซีไฟเออร์แบบไหลลงที่ออกแบบมาเพื่อใช้กับชีวมวลทั่วไป เพื่อประหยัดต้นทุนด้านพลังงานในกระบวนการแปรรูปทดแทนการใช้ฟืนและ LPG ผลปรากฏว่าเตาแก๊สซีไฟเออร์สามารถผลิตโปรตีน เซอร์แก๊สได้ดี จุดติดไฟและมีค่าความร้อนสูง แต่ติดปัญหาที่เครื่องเป่าลม วาล์ว และชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเตามีคราบน้ำมันติดเหนียวทำให้ยากต่อการทำความสะอาดและเกิดความเสียหายได้ง่าย รวมถึงมีควันมากและกลิ่นเหม็นอีกด้วย ดังภาพที่ 21 ทั้งนี้เนื่องจากในกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ยังมี น้ำมัน CNSL เหลืออยู่อีกประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 21 การทดลองใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิงในเตาแก๊สซีฟเออร์ทั่วไป

ผลการศึกษาคณสมบัติทางเคมีของเชื้อเพลิงกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

วัสดุเหลือทิ้งจากระบวนการแปรรูปเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ คือ เปลือกมะม่วงหิมพานต์ เมื่อทำการบีบน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ หรือ CNSL (Cashew Nut Shell Liquid) ออกไปแล้ว จะเหลือเป็นกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ โดยเก็บตัวอย่างเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์และกากเปลือกมะม่วงหิมพานต์ส่งไปวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิง ณ ห้องปฏิบัติการศูนย์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสวนดุสิต ดังภาพที่ 22 มีคุณสมบัติ ดังตารางที่ 14



ภาพที่ 22 การเก็บตัวอย่างเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์และกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ วิเคราะห์หาคุณสมบัติทางเคมีในห้องปฏิบัติการ

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์และกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เหลือทิ้ง ด้วยการวิเคราะห์โดยประมาณ ในตารางที่ 15 พบว่า เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์มีความชื้น (Moisture content) สูงถึงร้อยละ 37.50 เนื่องจากในพื้นที่อำเภอท่าปลา จังหวัดอุตรดิตถ์ ใช้วิธีการต้มเมล็ดก่อนนำไปกะเทาะเปลือก จึงทำให้เปลือกมีความชื้นสูง ส่วนเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ในพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทย และในต่างประเทศนิยมใช้วิธีการคั่วเมล็ดซึ่งทำให้มีความชื้นต่ำกว่ามาก ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ของ Miguel, Kenneth & Alberto (2014) พบว่า เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เหลือทิ้งในจังหวัดกาชา ประเทศโมซัมบิก มีความชื้นเพียงร้อยละ 3.83 เท่านั้น อย่างไรก็ตามเมื่อนำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ใช้ในการทดลองไปบีบน้ำมัน CNSL ออกไป เหลือเป็นกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ จะมีความชื้นลดลงเหลือเพียงร้อยละ 9.09 เท่านั้น ในส่วนที่เผาไหม้ได้ส่วนใหญ่เป็นสารระเหย (Volatile matter) จากผลการวิเคราะห์พบว่า กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์มีสัดส่วนสารระเหยสูงกว่าเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ แสดงให้เห็นว่ากากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์สามารถลุกไหม้ติดไฟได้ง่ายกว่าเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ สำหรับส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้หรือขี้เถ้าของเปลือกและกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ใช้ในการทดลองมีปริมาณน้อยและมีสัดส่วนที่ใกล้เคียงกัน

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ด้วยการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ พบว่าเปลือกและกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ใช้ทดลอง มีสัดส่วนใกล้เคียงกัน โดยมีองค์ประกอบได้แก่ คาร์บอน ออกซิเจน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน เรียงลำดับจากสัดส่วนมากไปน้อย ซึ่งองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็น คาร์บอน ออกซิเจน และไฮโดรเจน เนื่องจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีของพืชที่ เรียกว่า การสังเคราะห์แสง (Photosynthesis) ซึ่งเป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปจากคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในอากาศและน้ำ (H_2O) เป็นโมเลกุลคาร์โบไฮเดรต สะสมเป็นพลังงานศักย์ทางเคมี ส่วนไนโตรเจน ซึ่งพบในโปรตีน โดยเปลือกและกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ใช้ทดลองมีสัดส่วนไนโตรเจนร้อยละ 1.21 และ 1.38 ตามลำดับ อยู่ในระดับที่สูง เมื่อเทียบกับชีวมวลทั่วไป เนื่องจากมะม่วงหิมพานต์เป็นพืชตระกูลถั่วจึงมีโปรตีนสูง สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ของ Ohler (1979) พบว่ามีโปรตีนร้อยละ 4.06

ตารางที่ 15 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิงเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์และกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

| คุณสมบัติของเชื้อเพลิง | เปลือก ¹ | กากเปลือก ¹ | เปรียบเทียบเปลือก ² |
|--|---------------------|------------------------|--------------------------------|
| การวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate Analysis) | | | |
| Moisture content (%) | 37.50 | 9.09 | 3.83 |
| Volatile matter (%) | 59.57 | 88.28 | 73.41 |
| Fixed carbon (%) | 1.10 | 0.24 | 15.04 |
| Ash (%) | 1.83 | 2.39 | 7.53 |
| การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) | | | |
| Carbon (%) | 53.93 | 54.09 | 63.20 |
| Hydrogen (%) | 6.07 | 6.08 | 6.74 |
| Oxygen (%) | 38.79 | 38.45 | 21.9 |
| Nitrogen (%) | 1.21 | 1.38 | 0.63 |
| Heating value (kcal/kg) | 5,458.20 | 5,071.10 | 5,783.94 |

ที่มา: ¹ เปลือกและกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ใช้ในการทดลอง

² Miguel, Kenneth & Alberto (2014)

เนื่องจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์มีความชื้นอยู่ในเชื้อเพลิงสูงถึง 37.50 % ต้องใช้พลังงานปริมาณมากในการระเหยน้ำ หากนำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์มาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเตาแก๊สซีฟิเออร์ จะทำให้อุณหภูมิภายในเตาต่ำ ส่งผลให้โปรดิวเซอร์แก๊สที่ผลิตได้มีค่าความร้อนและคุณภาพต่ำ ซึ่งในระบบแก๊สซีฟิเคชั่นส่วนใหญ่นิยมใช้เชื้อเพลิงที่มีความชื้นไม่เกิน 20 % ในขณะที่กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์มีความชื้นเพียง 9.09 % จึงมีความเหมาะสมที่จะนำกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในเตาแก๊สซีฟิเออร์ ดังนั้นแนวทางที่ดีในการใช้ประโยชน์จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ คือการนำไปบิบสกัดเอาน้ำมัน CNSL ออกไปจำหน่ายหรือแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ แล้วนำกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในระบบแก๊สซีฟิเคชั่น เพื่อเป็นพลังงานความร้อนในกระบวนการแปรรูปเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ทดแทนการใช้ฟืนและ LPG

อย่างไรก็ตาม การนำกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์มาใช้เป็นเชื้อเพลิงต้องมีการศึกษาถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของคนในชุมชน เนื่องจากกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เมื่อถูกความร้อนสูงประมาณ 80-100 องศาเซลเซียส สารระเหยในกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์จะ

ระเหยออกมา มีกลิ่นฉุนจัด เป็นอันตรายต่อเยื่อหุ้มจมูก นัยน์ตาและต่อสิ่งแวดล้อม โดยผู้วิจัยได้ทำการศึกษามลภาวะทางอากาศที่ระบายออกจากปล่องเตาจากการเผาถ่านเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ด้วยวิธีการเผาตรง และเผาด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชันที่พัฒนาขึ้น

ผลการวิเคราะห์มลภาวะทางอากาศที่ระบายออกจากปล่องเตาจากการเผาถ่านเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ด้วยวิธีการเผาตรง

การจัดการกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์โดยวิธีการเผาในพื้นที่โล่งแจ้ง ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศ ผู้วิจัยจึงทำการทดสอบการเผาถ่านเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ด้วยวิธีการเผาตรง ระบบการเผาไหม้แบบเปิด ดำเนินการเผาถ่านเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ในเตาดินเผา ต่อปล่องระบายทรงกลมสูง 2.50 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางปล่อง 0.15 เมตร เพื่อใช้เป็นจุดเก็บตัวอย่างอากาศ โดยทำการตรวจวัดปริมาณฝุ่นละออง ด้วยการเก็บตัวอย่างอากาศแบบไอโซโคเนติก จากปล่องผ่านกระดาษกรองใยแก้วที่อุณหภูมิ 120 ± 14 องศาเซลเซียส และเครื่องควบแน่น เพื่อหาปริมาณฝุ่นละอองที่กรองและเก็บได้โดยวิธีการชั่งน้ำหนักหลังจากระเหยความชื้นออกแล้ว และดำเนินการเก็บตัวอย่าง วิเคราะห์ตัวอย่างอากาศ เพื่อหาค่าความเข้มข้นเป็นร้อยละ โดยปริมาตรของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซออกซิเจน (O_2) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ด้วยชุดวิเคราะห์ Orsat Analyzer ดำเนินการวัดความสูงปล่อง เส้นผ่านศูนย์กลางปล่อง วัดอุณหภูมิ ความเร็วอากาศ และความดันบรรยากาศภายในปล่อง อัตราการไหล ร้อยละของออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และความชื้น ทำการเก็บตัวอย่างอากาศจนได้ปริมาตร ตัวอย่างตามต้องการ บันทึกค่า นำไปคำนวณผล ดังภาพที่ 23



ภาพที่ 23 การตรวจวัดมลภาวะทางอากาศจากการเผาถ่านเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ด้วยวิธีการเผาตรง

ตารางที่ 16 ปริมาณสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากปล่องที่เกิดจากการเผาถ่านเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ด้วยวิธีเผาตรง

| พารามิเตอร์ตรวจวัด | หน่วย | ผลการวิเคราะห์ | มาตรฐาน |
|-----------------------------|---------------------|----------------|---------|
| Stack Height | m | 2.50 | - |
| Stack Diameter | m | 0.15 | - |
| Temperature in Stack | °C | 240.00 | - |
| Pressure Stack | mm.Hg | 749.98 | - |
| Air Velocity | m/s | 2.84 | - |
| Flow Rate | NM ³ /hr | 97.81 | - |
| Carbon dioxide Rate | % | 2.83 | - |
| Moisture | % | 9.20 | - |
| Total Suspended Particulate | mg/m ³ | 648.329 | <320 |
| Sulfur dioxide | ppm | 1.0 | <60 |
| Oxide of Nitrogen | ppm | 104.9 | <200 |
| Carbon monoxide | ppm | 844.0 | <690 |

ที่มา: ¹กระทรวงอุตสาหกรรม, 2549, น.8-9

ในการเก็บตัวอย่างมลภาวะทางอากาศผู้วิจัยได้ดำเนินการบันทึกค่าต่าง ๆ เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณปริมาณมลภาวะทางอากาศที่ระบายออกจากปล่อง ดังนี้ อุณหภูมิภายในปล่อง 240.00 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศในปล่อง 749.98 มิลลิเมตรปรอท ความเร็วอากาศในปล่อง 2.84 เมตรต่อวินาที อัตราการไหล 97.81 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ออกซิเจน ร้อยละ 15.64 คาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละ 2.83 และความชื้น ร้อยละ 9.20 นำมาคำนวณหาปริมาณมลภาวะทางอากาศที่ระบายออกจากปล่องเตา จากการเผาถ่านเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ด้วยวิธีการเผาตรง ที่ความดัน 1 บรรยากาศ หรือ 760 มิลลิเมตรปรอท อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ที่สภาวะแห้ง โดยมีปริมาตรออกซิเจนในอากาศเสีย ณ สภาวะจริงขณะตรวจวัด ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 14 พบว่า มีค่าความเข้มข้นฝุ่นละออง (Total Suspended Particulate) 648.329 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur Dioxide) มีค่า 1.0 ppm ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน (Oxide of Nitrogen) มีค่า 103.9 ppm และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon Monoxide) มีค่า 844.0 ppm

เมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานพบว่า ค่าความเข้มข้นฝุ่นละออง และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ เกินเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนดตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดค่าปริมาณของสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากโรงงาน พ.ศ. 2549 เกิดจากการเผาากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่มีส่วนประกอบทางเคมีของสารระเหย (88.28 %) ปริมาณคาร์บอน (54.09 %) และปริมาณออกซิเจน (38.45 %) สูง เมื่อทำการเผาากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์โดยตรง ก่อให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิง ส่งผลให้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ สูงเกินค่ามาตรฐาน รวมถึงปริมาณไนโตรเจน (1.38 %) ที่มีส่วนทำให้มีปริมาณฝุ่นละอองสูงเกินค่ามาตรฐานออกสู่สิ่งแวดล้อม ปริมาณฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นจะมีผลต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ เนื่องจากมีขนาดเล็กพอที่จะเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจส่วนล่างและถุงลมปอดของมนุษย์ เป็นผลให้เกิดโรคทางเดินหายใจโรคปอดต่าง ๆ เกิดการระคายเคืองและทำลายเยื่อหุ้มปอด หากได้รับในปริมาณมากและเป็นเวลานานจะเกิดการสะสม ทำให้เกิดพังผืดและเป็นแผลได้ ฝุ่นละอองยังส่งผลต่อสภาพบรรยากาศทั่วไป ทำให้ทัศนวิสัยไม่ดีเนื่องจากเป็นอนุภาคของแข็งที่ดูดซับ และหักเหแสงได้ ก่อให้เกิดความสกปรก และเป็นอันตรายต่อวัตถุ สิ่งก่อสร้าง เช่น กัดกร่อนผิวหน้าโลหะ หินอ่อน รั้วเหล็ก หลังคาสังกะสี เป็นต้น และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ที่ถูกปล่อยออกมา หากมนุษย์สูดหายใจเข้าไป อาจจะทำให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพอย่างรุนแรง เป็นอันตรายต่อสมอง หัวใจ กล้ามเนื้อ และเด็กอ่อนในครรภ์ ที่กำลังเจริญเติบโต (สำนักที่ปรึกษา กรมอนามัย, 2561) โดยที่ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ จะรวมตัวกับฮีโมโกลบินในเม็ดเลือดแดงได้มากกว่าออกซิเจน (O₂) ถึง 200-250 เท่า เกิดเป็น คาร์บอกซีฮีโมโกลบิน ทำให้เม็ดเลือดแดงไม่สามารถรับออกซิเจนได้ตามปกติ ร่างกายได้รับออกซิเจนน้อยลง หัวใจต้องสูบน้ำโลหิตมากขึ้น เพื่อให้โลหิตผ่านเข้าสู่ปอด หัวใจ หากร่างกายได้รับก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มากเกินไป อาจช็อก หมดสติ หรือตายได้ (สุริพร จิตต์ชื้อ, 2550)

ตอนที่ 2 ผลการออกแบบและพัฒนาระบบแก๊สซิฟิเคชัน ที่สามารถให้พลังงานความร้อน และเหมาะสมต่อการใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ เป็นเชื้อเพลิง

ผลการออกแบบเตาแก๊สซิฟิเคชัน

จากข้อมูลชนิด ปริมาณ องค์ประกอบทางด้านเคมีของกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการเผาากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ด้วยวิธีเผาตรงข้างต้น ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบและพัฒนาระบบแก๊สซิฟิเคชัน ที่สามารถให้พลังงานความร้อน และเหมาะสมต่อการใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง โดยในงานวิจัยนี้ มีความต้องการพลังงานความร้อนไปต้มน้ำปริมาณ 300 ลิตร เพื่อใช้ในกระบวนการแปรรูปเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ โดยกำหนดให้เตาแก๊สซิฟิเคชันมีขนาด 130 kW ใช้อากาศเป็นตัวกลางทำปฏิกิริยา โดยปกติค่าความร้อนของโปรติวเซอร์แก๊ส

จะอยู่ระหว่าง 4,000 – 6,000 kJ/m³ จึงกำหนดให้ค่าความร้อนของโปรตีนเซอร์แก๊สที่คาดว่าจะได้รับเท่ากับ 5,000 kJ/m³

1. การคำนวณหาอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและอัตราการไหลของโปรตีนเซอร์แก๊ส ระบบแก๊สซิฟิเคชันโดยทั่วไปมีประสิทธิภาพประมาณ 80% เนื่องจากระบบที่ออกแบบมีการสูญเสียความร้อนบางส่วน งานวิจัยนี้จึงกำหนดให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบแก๊สซิฟิเคชันที่คาดว่าจะได้รับเท่ากับ 70 % ซึ่งต้องสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น โดยสามารถคำนวณอัตรากำลังความร้อนของชีวมวลที่ภาระสูงสุด อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง และอัตราการไหลของโปรตีนเซอร์แก๊ส ตามบทที่ 3 สมการที่ 3.1 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ ได้ค่าดังนี้

$$\begin{aligned} \text{อัตรากำลังความร้อนของชีวมวลที่ภาระสูงสุด} &= 185.71 \text{ kW} \\ \text{อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง} &= 0.00875 \text{ kg/s} \\ &= 31.51 \text{ kg/h} \\ \text{อัตราการไหลของโปรตีนเซอร์แก๊ส} &= 0.026 \text{ Nm}^3/\text{s} \\ &= 93.6 \text{ Nm}^3/\text{h} \end{aligned}$$

2. การคำนวณหาขนาดของเตาแก๊สซิฟิเคชัน

สำหรับเตาแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลลงชนิด V-hearth ค่า Heart load (B_g) มีหน่วยเป็น m³/cm²/h มีค่าอยู่ในช่วง 0.3 – 0.9 ในงานวิจัยนี้กำหนดค่า B_g เท่ากับ 0.7 และจากค่าอัตราการไหลของโปรตีนเซอร์แก๊ส (Q) ในข้อ 1 มีค่าเท่ากับ 93.6 Nm³/h สามารถคำนวณพื้นที่หน้าตัดของ Throat ตามบทที่ 3 สมการที่ 3.4 ได้ค่าดังนี้

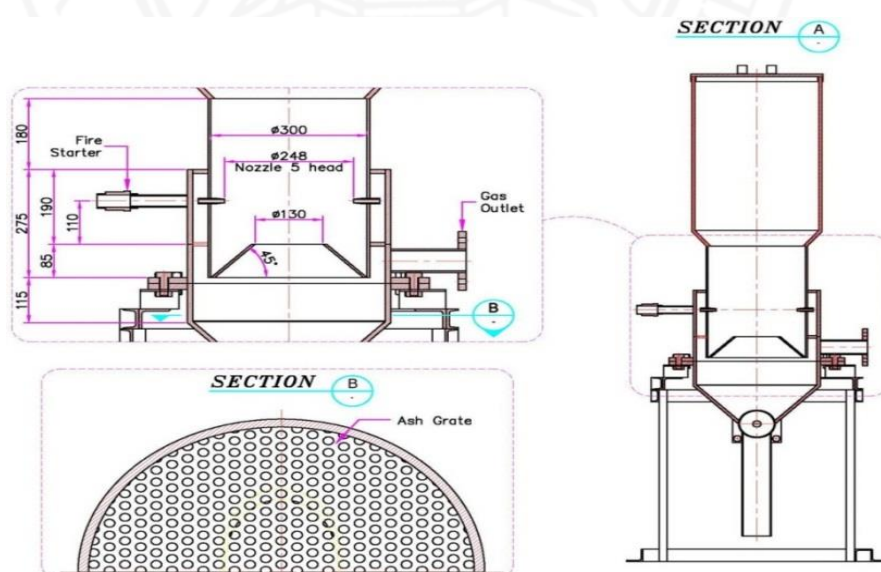
$$A = 131.71 \text{ cm}^2$$

ได้ค่าพื้นที่หน้าตัดของ Throat เท่ากับ 133.71 cm² มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ Throat เท่ากับ 13 cm หรือ 130 mm

ตารางที่ 17 ขนาดต่าง ๆ ของเตาแก๊สซีฟิเออร์

| ตัวแปร | ขนาด (มิลลิเมตร) |
|--------|------------------|
| d_h | 130 |
| d_r | 300 |
| d_r' | 248 |
| H | 275 |
| h | 110 |
| R | 115 |
| d_N | 12.5 |
| N | 5 หัว |

การหาค่าขนาดต่าง ๆ ของแก๊สซีฟิเออร์ ใช้วิธีการเปิดตารางตามทฤษฎีของ Reed & Das (1988, pp.32-38) ได้ค่าตามตารางที่ 17 ได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลางของคอคอด (Throat) ที่เล็กที่สุด (d_h) โชนเผาไหม้ (d_r) และเส้นรอบวงของปลายหัวฉีด (d_r') มีขนาด 130, 300 และ 248 มิลลิเมตร ตามลำดับ ความสูงของโชนเผาไหม้ (H) ระยะของระนาบหัวฉีดจาก Throat ที่เล็กที่สุด (h) ความสูงของโชนรีดักชัน (R) มีค่าเท่ากับ 275, 110 และ 115 มิลลิเมตร ตามลำดับ มีหัวฉีด (Nozzle) จำนวน 5 หัว แต่ละหัวมีรูขนาด 12.5 มิลลิเมตร มุมเอียงของคอคอด (V-hearth) เท่ากับ 45 องศา และแสดงขนาดของแก๊สซีฟิเออร์ในส่วนที่สำคัญดังภาพที่ 24

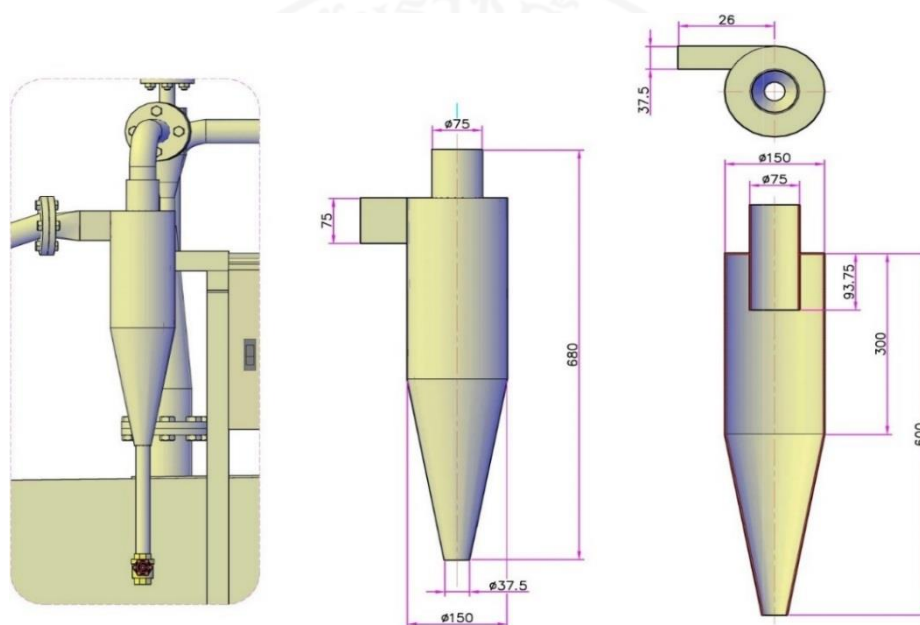


ภาพที่ 24 ขนาดที่สำคัญของเตาแก๊สซีฟิเออร์แบบไหลลงชนิด V-hearth

ผลการออกแบบระบบการกำจัดมลพิษทางอากาศ

1. ผลการออกแบบไซโคลนดักฝุ่น

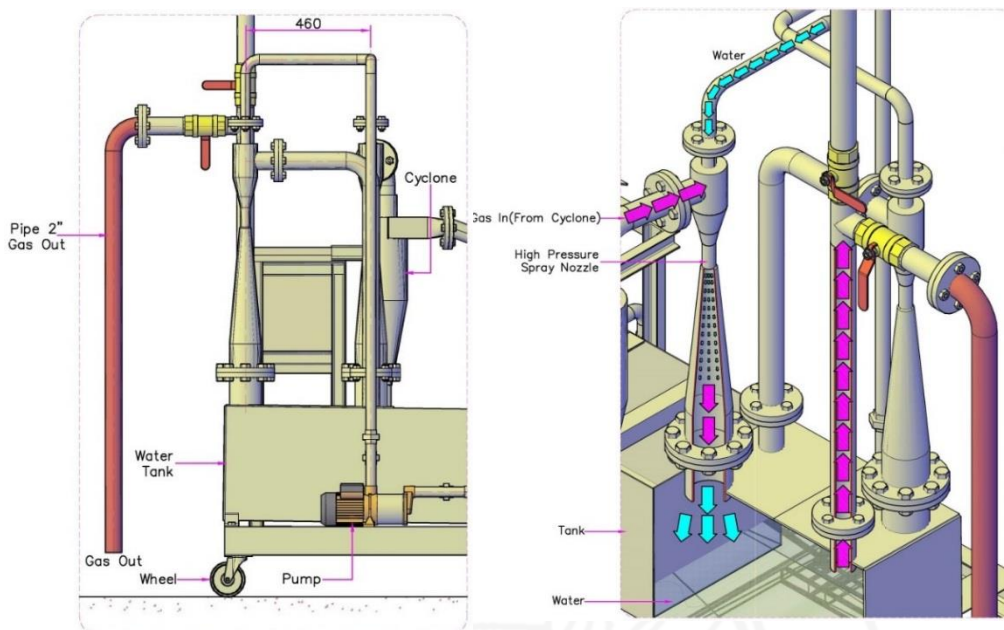
ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยเลือกใช้ไซโคลนแบบ Lapple เนื่องจากสามารถคัดแยกอนุภาคฝุ่นขนาดเล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 1 ไมครอนขึ้นไปได้ดี โดยได้ออกแบบไซโคลนตามสัดส่วนในตารางที่ 11 ในบทที่ 3 มีรูปแบบไซโคลนดังภาพที่ 25



ภาพที่ 25 รูปแบบไซโคลนแบบ Lapple ที่พัฒนาขึ้น

2. ผลการออกแบบเครื่องดักฝุ่นแบบเปียก (Wet Scrubber)

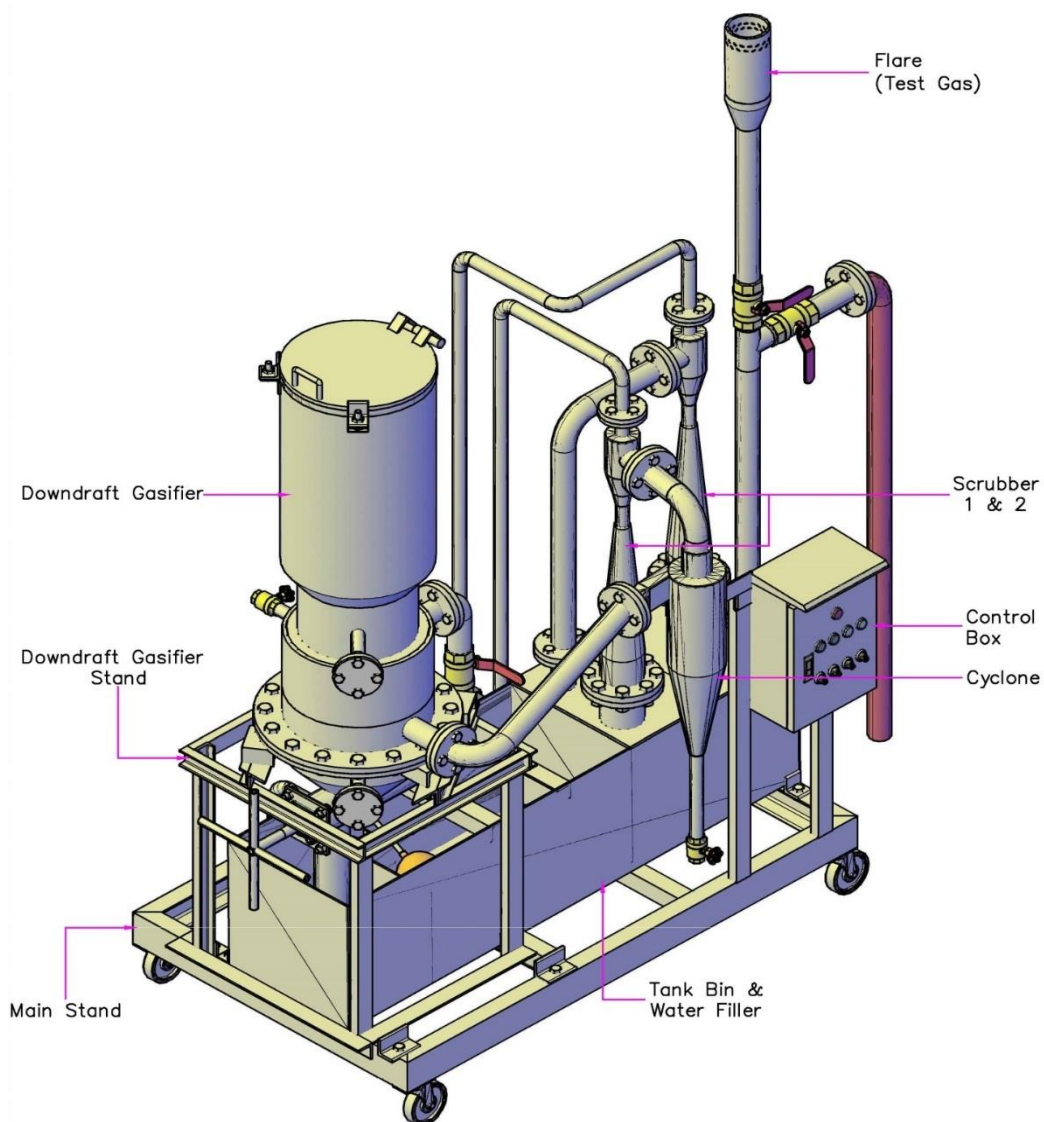
ผู้วิจัยได้ออกแบบและพัฒนาเครื่องดักฝุ่นแบบเปียกชนิดอีเจ็คเตอร์เวนจูรี (Ejector Venturi Scrubber) จำนวน 2 ชุด ต่ออนุกรมกัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดักจับฝุ่น น้ำมันดินและกลิ่น โดยอีเจ็คเตอร์เวนจูรีแต่ละชุดใช้ปั๊มน้ำแรงดันสูง (Multistage Centrifugal Pump) ขนาด 800 วัตต์ ต่อกับท่อน้ำขนาด 1 นิ้ว หมุนเวียนน้ำจากถังพักเพื่อทำความสะอาดโปรตีวเซอร์แก๊สตลอดเวลา ดังภาพที่ 26 ซึ่งการทำงานของสกรับเบอร์แบบอีเจ็คเตอร์เวนจูรีนี้ ทำให้เกิดการเหนียวนำของโปรตีวเซอร์แก๊ส และสร้างแรงดูดอากาศเข้าสู่เตาแก๊สซีไฟเออร์ให้สามารถทำงานได้โดยไม่ต้องใช้เครื่องเป่าลม (Blower) โปรตีวเซอร์แก๊สที่สะอาดแล้วจะถูกส่งไปที่หัวเผาเพื่อใช้งานต่อไป ลดปัญหาการเกาะตัวของคราบน้ำมันและสิ่งสกปรกที่ใบพัดของเครื่องเป่าลม



ภาพที่ 26 เครื่องดักฝุ่นแบบเปียกชนิดอีเจ็คเตอร์เวนจูรีที่พัฒนาขึ้น

ภาพรวมผลการออกแบบระบบแก๊สซิฟิเคชั่นที่พัฒนาขึ้น

ระบบแก๊สซิฟิเคชั่นที่พัฒนาขึ้น ประกอบด้วย 4 ส่วนหลักๆ ได้แก่ เตาแก๊สซิไฟเออร์แบบไหลลงชนิด V-hearth ขนาด 130 kW ไชโคลนแบบ Lapple เครื่องดักฝุ่นแบบเปียกชนิดอีเจ็คเตอร์เวนจูรี และแทงค์น้ำ โดยออกแบบระบบให้มีความกะทัดรัดสามารถเคลื่อนย้ายระบบได้สะดวก ง่ายต่อการติดตั้ง การใช้งานและการดูแลรักษา มีขนาดความกว้าง 1.00 เมตร ยาว 1.74 เมตร สูง 2.09 เมตร มีแทงค์น้ำเพื่อใช้รองรับขี้เถ้าของเตาแก๊สซิไฟเออร์ และน้ำสำหรับเครื่องดักฝุ่นแบบเปียกชนิดอีเจ็คเตอร์เวนจูรี อยู่บริเวณด้านล่างของระบบ แสดงรูปแบบระบบแก๊สซิฟิเคชั่น ดังภาพที่ 27



ภาพที่ 27 รูปแบบภาพรวมระบบแก๊สซิฟิเคชั่น ที่เหมาะสมต่อการใช้อากเปือกเมล็ดมะม่วง
หิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง

ผลการสร้างระบบแก๊สซิฟิเคชัน ที่เหมาะสมต่อการใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ เป็นเชื้อเพลิง



ภาพที่ 28 การสร้างและการติดตั้งระบบแก๊สซิฟิเคชัน

หลังจากที่ได้ออกแบบเตาแก๊สซิไฟเออร์ ไฮโคลนและสกรับเบอร์แล้ว จึงทำการสร้างและติดตั้งระบบแก๊สซิฟิเคชัน โดยมีการจัดวางส่วนประกอบดังรูปที่ 5 ประกอบด้วย เตาแก๊สซิไฟเออร์ ไฮโคลน สกรับเบอร์ และแทงค์น้ำ โดยแก๊สซิไฟเออร์ทำจากเหล็กหนา 10 มิลลิเมตร ม้วนขึ้นรูปและประกอบตามรูปแบบที่ได้ออกแบบไว้ มีถังสำหรับบรรจุเชื้อเพลิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 เซนติเมตร สูง 65 เซนติเมตร สามารถบรรจุเชื้อเพลิงได้ 40 กิโลกรัม โดยเปิดฝาเหล็กด้านบน ควบคุมปริมาณอากาศเข้าสู่เตาด้วยวาล์ว ใช้ท่อเหล็กขนาด 2 นิ้วป้อนอากาศให้ไหลผ่านห้องลมรอบ ๆ โชนเผาไหม้เพื่อเตรียมอากาศให้กระจายเข้าสู่หัวฉีดจำนวน 5 หัว อย่างสม่ำเสมอรอบทิศทาง มีช่องสำหรับจุดไฟซึ่งตรงกับตำแหน่งของหัวฉีด มีช่องสำหรับติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิของโชนต่าง ๆ และมีหม้อน้ำสำหรับระบายซีเมนต์ที่ลอดผ่านตะแกรงลงสู่น้ำในแทงค์น้ำ โปรติวเซอร์แก๊สที่ผลิตได้จะถูกส่งออกจากเตาด้วยท่อเหล็กขนาด 2 นิ้ว เข้าสู่ไฮโคลนประสิทธิภาพสูงแบบ Lapple เพื่อดักฝุ่นที่มีขนาดใหญ่ จากนั้นส่งแก๊สเข้าสู่เครื่องดักฝุ่นแบบเปียกชนิดอีเจ็คเตอร์เวนจูรี จำนวน 2 ชุด ซึ่งต่อแบบ

อนุกรมกัน เพื่อกำจัดน้ำมัน CNSL น้ำมันดิน ฟันละเอียดและกลั่น โดยแต่ละชุดใช้ปั๊มน้ำแรงดันสูง (Multistage Centrifugal Pump) ขนาด 800 วัตต์ ต่อกับท่อน้ำขนาด 1 นิ้ว หมุนเวียนน้ำจากถังพัก เพื่อทำความสะอาดโปรตีนเซอร์แก๊สตลอดเวลา ซึ่งการทำงานของเครื่องดักฝุ่นแบบเปียกชนิดอีเจ็คเตอร์เวนจัวร์นี้ทำให้เกิดการเหนียวนำของโปรตีนเซอร์แก๊ส และสร้างแรงดูดอากาศเข้าสู่เตาแก๊สซิไฟเออร์ให้สามารถทำงานได้โดยไม่ต้องใช้เครื่องเป่าลม (Blower) โปรตีนเซอร์แก๊สที่สะอาดแล้วจะถูกส่งไปที่หัวเผาเพื่อใช้งานต่อไป ลดปัญหาการเกาะตัวของคราบน้ำมันและสิ่งสกปรกที่ใบพัดของเครื่องเป่าลม ลดภาระในการดูแลรักษาระบบแก๊สซิไฟเคชั่น

ผลการประเมินประสิทธิภาพของระบบแก๊สซิไฟเคชั่น

1. อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง

ในการทดลองประเมินประสิทธิภาพของระบบแก๊สซิไฟเคชั่นที่สร้างขึ้นนี้ อาศัยแรงเหนียวนำของ สกรับเบอร์แบบเวนจัวร์ จำนวน 2 ชุด สร้างแรงดูดอากาศเข้าสู่เตาทดแทนการใช้เครื่องเป่าลม พื้นที่หน้าตัดของท่ออากาศเข้าเท่ากับ 0.002325 m^2 วัดความเร็วอากาศที่ป้อนเข้าสู่เตาได้ 2.6 m/s คำนวณอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศได้เท่ากับ 0.007039 kg/s อัตราการใช้เชื้อเพลิงเท่ากับ 11.4 kg/h หรือ 0.003167 kg/s อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงเท่ากับ 2.22

2. องค์ประกอบและค่าความร้อนของโปรตีนเซอร์แก๊ส

องค์ประกอบของโปรตีนเซอร์แก๊สมีผลต่อการคำนวณหาค่าความร้อนของโปรตีนเซอร์แก๊ส โดยได้ส่งตัวอย่างไปตรวจหาองค์ประกอบในห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี ซึ่งองค์ประกอบของโปรตีนเซอร์แก๊สประกอบด้วย มีเทน คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ออกซิเจน ไนโตรเจน และไฮโดรเจน

ตารางที่ 18 องค์ประกอบของโปรตีนเซอร์แก๊สที่เกิดขึ้นจากเชื้อเพลิงกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

| องค์ประกอบของโปรตีนเซอร์แก๊ส | สัดส่วนของแก๊ส (%) |
|------------------------------|--------------------|
| H ₂ | 9.7 |
| CO | 16 |
| CH ₄ | 1.5 |
| N ₂ | 61 |
| O ₂ | 4.7 |
| CO ₂ | 10 |

องค์ประกอบของโปรตีนเซอร์แก๊สที่เกิดขึ้นจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้เชื้อเพลิงกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ตามตารางที่ 18 มีสัดส่วนของแก๊สติดไฟเรียงลำดับจากมากไปน้อย ได้แก่ CO H₂ และ CH₄ โดยมีสัดส่วนของแก๊สร้อยละ 16 9.7 และ 1.5 ตามลำดับ เมื่อแทนค่าสัดส่วนของแก๊สในสมการที่ 3.6 บทที่ 3 แล้ว สามารถคำนวณค่าความร้อนของโปรตีนเซอร์แก๊สจากกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ได้เท่ากับ 3.605 MJ/Nm³

3. ประสิทธิภาพของระบบแก๊สซิฟิเคชัน

จากการทดลองประเมินประสิทธิภาพของระบบแก๊สซิฟิเคชัน มีพื้นที่หน้าตัดของท่อส่งโปรตีนเซอร์แก๊สเท่ากับ 0.002325 m² วัดความเร็วของแก๊สได้ 3.2 m/s จากสมการที่ 3.7 สามารถคำนวณอัตราการไหลของแก๊ส (Q_{gas}) ได้เท่ากับ 0.007441 m³/s หรือ 26.79 m³/h ค่าความร้อนของโปรตีนเซอร์แก๊ส (HV_{gas}) เท่ากับ 3.605 MJ/Nm³ คิดเป็นพลังงานความร้อน 26.82 kW และจากการคำนวณในสมการที่ 3.5 พบว่า ระบบแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง มีประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η_{th}) เท่ากับ 39.92 % โดยสรุปประสิทธิภาพและคุณสมบัติต่าง ๆ ของระบบแก๊สซิฟิเคชัน ดังตารางที่ 19

ตารางที่ 19 ประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบแก๊สซิฟิเคชันและคุณสมบัติต่าง ๆ

| Vair (m/s) | FCRfuel (kg/h) | A/Fratio | Qgas (m ³ /h) | HVgas (MJ/Nm ³) | nth (%) |
|---------------|-------------------|----------|-----------------------------|--------------------------------|------------|
| 2.6 | 11.4 | 2.22 | 26.79 | 3.605 | 39.92 |

ตอนที่ 3 ผลการศึกษาต้นทุนการผลิต เศรษฐศาสตร์ และมลภาวะทางอากาศที่ระบายออกจากปล่องเตาของระบบแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง

ในการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบแก๊สซิฟิเคชัน ที่ใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง จะทำการเปรียบเทียบกับการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล โดยการวิเคราะห์ประกอบด้วย ต้นทุนค่าใช้จ่ายรายปี (C_T) ระยะเวลาคืนทุน (PB) มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) และอัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุน (BCR) ซึ่งมีรายละเอียด ข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญ และผลการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

ข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญ ได้แก่

1. ต้องการขนาดความร้อนที่ใช้ในการต้มเมล็ดและอบเมล็ดปริมาณ 50 kW
2. ระบบแก๊สซิฟิเคชันมีต้นทุนราคา 100,000 บาท มีประสิทธิภาพเชิงความร้อน 40 %
3. เตาฟืนมีประสิทธิภาพเชิงความร้อน 25 % มีการใช้งานอยู่แล้ว จึงถือว่าไม่มีต้นทุน

4. ระบบแก๊สซิฟิเคชันมีอายุการใช้งาน 10 ปี
 5. ระบบแก๊สซิฟิเคชันมีมูลค่าซาก 10 %
 6. อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ 8.0 %
 7. ระยะเวลาทำงานในการต้มเมล็ด 6 ชั่วโมง/วัน และ 1 ปี ต้มเมล็ด 180 วัน
 8. ไม้พิน มีต้นทุน 1.20 บาท/kg มีค่าความร้อน 19,463 kJ/kg กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ถือว่าไม่มีต้นทุนเนื่องจากเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิต มีค่าความร้อน 21,217 kJ/kg
 9. ค่าบำรุงรักษา ซ่อมแซมและทำความสะอาดระบบแก๊สซิฟิเคชัน คิดในอัตราปีละ 6 % ของราคาต้นทุนระบบ เป็นเงิน 6,000 บาท/ปี
 10. ค่าไฟฟ้าของปั๊มน้ำขนาด 800 W จำนวน 2 ตัวของระบบแก๊สซิฟิเคชัน ทำงานวันละ 6 ชั่วโมง จำนวน 180 วัน คิดค่าไฟฟ้าหน่วยละ 4 บาท คิดเป็นต้นทุนค่าไฟฟ้า 6,912 บาท/ปี
 11. ค่าน้ำประปาของระบบแก๊สซิฟิเคชัน ปริมาณ 1 หน่วยต่อวัน จำนวน 180 วัน คิดค่าน้ำประปาหน่วยละ 6 บาท คิดเป็นต้นทุนค่าน้ำประปา 1,080 บาท/ปี
- จากข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญดังกล่าว สามารถสรุปข้อมูลได้ดังแสดงในตารางที่ 20

ตารางที่ 20 ข้อมูลต้นทุนแต่ละประเภท

| ลำดับ | รายการ | ประเภทเตา | |
|-------|----------------------------------|------------------------------|------------------|
| | | เตาพิน | เตาแก๊สซิฟิเคชัน |
| 1 | ขนาดกำลังความร้อนของเตา (kW) | 50 | 50 |
| 2 | ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (%) | 25 | 40 |
| 3 | เงินลงทุนระบบแก๊สซิฟิเคชัน (บาท) | - | 100,000 |
| 4 | ต้นทุนด้านเชื้อเพลิง (บาท/kg) | 1.20 | - |
| 5 | ค่าความร้อนเชื้อเพลิง (kJ/kg) | 19,463 | 21,217 |
| 6 | ระยะเวลาการทำงาน | 6 ชั่วโมง/วัน และ 180 วัน/ปี | |
| 7 | ค่าไฟฟ้า (บาท/ปี) | - | 6,912 |
| 8 | ค่าน้ำประปา (บาท/ปี) | - | 1,080 |
| 9 | ค่าบำรุงรักษา (บาท/ปี) | - | 6,000 |
| 10 | อัตราดอกเบี้ย (%) | - | 8 |
| 11 | อายุการใช้งาน (ปี) | - | 10 |
| 12 | มูลค่าซาก (%) | - | 10 |

ผลการวิเคราะห์ต้นทุนค่าใช้จ่ายรายปี (C_T)

การคำนวณต้นทุนค่าใช้จ่ายรายปีทั้งหมด (C_T) ของแต่ละเชื้อเพลิง ประกอบด้วย ค่าเชื้อเพลิงที่ใช้ต่อปี (C_e) มูลค่าปัจจุบันของเงินลงทุนรายปี (C_p) มูลค่าซากของระบบในแต่ละปี (C_s) ค่าบำรุงรักษาระบบต่อปี (C_m) และค่าใช้จ่ายอื่น ๆ เช่น ค่าไฟฟ้า ค่าน้ำประปา เป็นต้น

1. ค่าเชื้อเพลิงที่ใช้ต่อปี (C_e)

การคำนวณต้นทุนค่าเชื้อเพลิงที่ใช้ต่อปี จำเป็นต้องหาปริมาณเชื้อเพลิงแต่ละชนิดที่ต้องการใช้ต่อปี สามารถคำนวณได้ดังสมการ 4.1

$$m_{\text{fuel}} = (P_{\text{stove}} / \text{HV}_{\text{fuel}}) * 3600 \text{ (s)} * 6 \text{ (h)} * 180 \text{ (d)}$$

โดย m_{fuel} คือ ปริมาณเชื้อเพลิงที่ต้องการใช้ต่อปี (kg)

P_{stove} คือ กำลังความร้อนที่ต้องการของเตา (kW)

HV_{fuel} คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (kJ/kg)

และคำนวณหาอัตรากำลังความร้อนที่ภาระสูงสุดตามสมการที่ 4.2

$$\text{อัตรากำลังความร้อนของชีวมวลที่ภาระสูงสุด} = \frac{\text{กำลังความร้อนที่ต้องการ}}{\text{ประสิทธิภาพของเตา}}$$

การคำนวณปริมาณการใช้ฟืน ($m_{\text{ฟืน}}$) และต้นทุนต่อปี

เนื่องจากเตาฟืนมีประสิทธิภาพเชิงความร้อน 25 % จึงต้องคำนวณหาอัตรากำลังความร้อนของชีวมวลที่ภาระสูงสุดตามสมการที่ 4.2 ก่อน เพื่อใช้ในการหาปริมาณฟืนที่ต้องการใช้ต่อปีตามสมการที่ 4.1

$$\text{อัตรากำลังความร้อนของฟืนที่ภาระสูงสุด} = \frac{50}{0.25} = 200 \text{ kW}$$

$$\begin{aligned} m_{\text{ฟืน}} &= (200 \text{ kW} / 19,463 \text{ kJ/kg}) \times 3600 \text{ (s)} \times 6 \text{ (h)} \times 180 \text{ (d)} \\ &= 39,953 \text{ kg/ปี} \end{aligned}$$

$$\text{ค่าฟืนต่อปี} = 39,953 \times 1.20 = 47,944 \text{ บาท/ปี}$$

การคำนวณปริมาณการใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ($m_{\text{กากเปลือก}}$) และต้นทุนต่อปี เนื่องจากระบบแก๊สซิฟิเคชันมีประสิทธิภาพ 70 % จึงต้องคำนวณหาอัตรากำลังความร้อนของชีวมวลที่ภาระสูงสุดตามสมการที่ 4.2 ก่อน เพื่อใช้ในการหาปริมาณการใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

$$\text{อัตรากำลังความร้อนของชีวมวลที่ภาระสูงสุด} = \frac{50}{0.7} = 125 \text{ kW}$$

$$m_{\text{กากเปลือก}} = (125 \text{ kW} / 21,217 \text{ kJ/kg}) \times 3600 \text{ (s)} \times 6 \text{ (h)} \times 180 \text{ (d)}$$

$$= 22,906 \text{ kg/ปี}$$

$$\text{ค่ากากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ต่อปี} = 22,906 \times 0 = 0 \text{ บาท/ปี}$$

2. มูลค่าปัจจุบันของเงินลงทุนรายปี (C_p)

ในการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบแก๊สซิฟิเคชันในการผลิตความร้อน เป็นการเปรียบเทียบกับเตาฟืน ซึ่งโดยทั่วไปในสถานที่ผลิตจะมีการใช้ฟืนอยู่แล้ว จึงถือว่าไม่ได้ลงทุนเพิ่มเติม ดังนั้น $C_{p,\text{ฟืน}}$ จึงมีค่าเท่ากับ 0

ในการคำนวณมูลค่าปัจจุบันของเงินลงทุนรายปีของระบบแก๊สซิฟิเคชัน สามารถคำนวณตามสมการที่ 3.12 ได้ดังนี้

$$C_{p,\text{แก๊สซิฟิเคชัน}} = 100,000 \left(\frac{0.08(1 + 0.08)^{10}}{(1 + 0.08)^{10} - 1} \right) = 14,900 \text{ บาท/ปี}$$

3. มูลค่าซากของระบบในแต่ละปี (C_s)

การคำนวณมูลค่าซากรายปี (C_s) ของระบบแก๊สซิฟิเคชัน สามารถคำนวณตามสมการที่ 3.13 ได้ดังนี้

$$C_{s,\text{แก๊สซิฟิเคชัน}} = 10,000 \left(\frac{0.08}{(1 + 0.08)^{10} - 1} \right) = 690 \text{ บาท/ปี}$$

4. ต้นทุนค่าใช้จ่ายรายปีทั้งหมด (C_T)

คำนวณต้นทุนค่าใช้จ่ายรายปีทั้งหมด (C_T) ของเตาฟืน ตามสมการที่ 4.3 ได้ค่าดังนี้

$$\begin{aligned} C_{T, \text{ฟืน}} &= \text{ค่าฟืนต่อปี} \\ &= 47,944 \text{ บาท/ปี} \end{aligned}$$

คำนวณต้นทุนค่าใช้จ่ายรายปีทั้งหมด (C_T) ของระบบแก๊สซิฟิเคชัน ตามสมการที่ 4.4 ได้ค่า
ดังนี้

$$\begin{aligned} C_{T, \text{แก๊สซิฟิเคชัน}} &= C_{p, \text{แก๊สซิฟิเคชัน}} - C_{s, \text{แก๊สซิฟิเคชัน}} + \text{ค่าไฟฟ้า} + \text{ค่าน้ำ} + \text{ค่าบำรุงรักษา} \\ &= 14,900 - 690 + 6,912 + 1,080 + 6,000 \\ &= 28,202 \text{ บาท/ปี} \end{aligned}$$

ผลการวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุน (PB)

การคำนวณระยะเวลาคืนทุนของระบบแก๊สซิฟิเคชัน เมื่อเทียบการกับเตาฟืน ($PB_{\text{แก๊สซิฟิเคชัน/ฟืน}}$) เพื่อใช้เป็นพลังงานความร้อน โดยใช้เงินลงทุนสร้างระบบแก๊สซิฟิเคชัน ($P_w, \text{แก๊สซิฟิเคชัน}$) เป็นเงิน 100,000 บาท ตามสมการที่ 4.5 ได้ค่าดังนี้

$$\begin{aligned} PB_{\text{แก๊สซิฟิเคชัน/ฟืน}} &= P_w, \text{แก๊สซิฟิเคชัน} / (C_{T, \text{ฟืน}} - C_{T, \text{แก๊สซิฟิเคชัน}}) \\ &= 100,000 / (47,944 - 28,202) \\ &= 5.07 \text{ ปี} \end{aligned}$$

ผลการวิเคราะห์มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value, NPV)

ในการคำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) ของระบบแก๊สซิฟิเคชัน เมื่อเทียบการกับเตาฟืน สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.15

กำหนดให้ข้อมูลต่าง ๆ มีค่าดังนี้

$$I_0 = 100,000 \text{ บาท}$$

$$ES_t = C_{T, \text{ฟืน}} - C_{T, \text{โปรดิวเซอร์แก๊ส}} = 47,944 - 28,202 = 19,742 \text{ บาท/ปี}$$

$$i = 8\%$$

$$n = 10 \text{ ปี}$$

ตารางที่ 21 การคำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) ของระบบแก๊สซิฟิเคชัน เมื่อเทียบการกับใช้ฟืน

| ปีที่ | กระแสเงินสดสุทธิในปีที่ n ($ES_{t,n}$) | มูลค่าปัจจุบันสุทธิของกระแสเงินสดในปีที่ n |
|-------------------|--|--|
| 1 | 19,742 | 18,280 |
| 2 | 19,742 | 16,926 |
| 3 | 19,742 | 15,672 |
| 4 | 19,742 | 14,511 |
| 5 | 19,742 | 13,436 |
| 6 | 19,742 | 12,441 |
| 7 | 19,742 | 11,519 |
| 8 | 19,742 | 10,666 |
| 9 | 19,742 | 9,876 |
| 10 | 19,742 | 9,144 |
| ผลรวม | | 132,470 |
| เงินลงทุนเริ่มแรก | | 100,000 |
| NPV | | 32,470 |

จากผลการคำนวณในตารางที่ 21 พบว่า มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) ของระบบแก๊สซิฟิเคชัน เมื่อเทียบการกับใช้ฟืน มีค่าเท่ากับ 32,470 บาท

ผลการวิเคราะห์อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate Return, IRR)

ในการคำนวณอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.16 พบว่า อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) ของระบบแก๊สซิฟิเคชันเมื่อเทียบการกับเตาฟืน มีค่าเท่ากับ 14.8 %

ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุน (BCR)

สามารถคำนวณอัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุนของระบบแก๊สซิฟิเคชันเมื่อเทียบการกับเตาฟืน (BCRแก๊สซิฟิเคชัน/ฟืน) ตามสมการที่ 3.17 ได้ค่าดังนี้

$$BCR_{\text{แก๊สซิฟิเคชัน/ฟืน}} = \frac{132,470}{100,000} = 1.32$$

ผลการประเมินมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

จากข้อมูลของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนกลุ่มส่งเสริมอาชีพบ้านหาดไก่อ้อย อำเภอบ้านลาด จังหวัดอุดรดิตถ์ พบว่ามีปริมาณเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูป จำนวน 227 ตันต่อปี หากกลุ่มมีการจัดการเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์โดยการรวบรวมเพื่อจำหน่ายให้กับพ่อค้าแบบเดิม ในราคากิโลกรัมละ 1 บาท จะมีรายรับเป็นเงิน 227,000 บาท โดยพ่อค้าจะนำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ไปบิบน้ำมัน CNSL เพื่อจำหน่ายให้กับโรงงานอุตสาหกรรมต่อไป ส่วนกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่เหลือ จะถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการแปรรูปด้วยวิธีเผาตรง และกองทิ้งไว้ให้ย่อยสลายไปตามธรรมชาติ ซึ่งรูปแบบการจัดการดังกล่าวก่อให้เกิดปัญหาทางสิ่งแวดล้อม

ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษารูปแบบการจัดการเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์แบบใหม่ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยการนำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ปริมาณ 227 ตัน ไปบิบน้ำมัน CNSL ด้วยเครื่องสกัดน้ำมันแบบเกลียวอัด จะได้น้ำมัน CNSL ปริมาณ 50 ตัน จำหน่ายให้กับพ่อค้าในราคากิโลกรัมละ 12 บาท คิดเป็นรายรับ 600,000 บาท ส่วนกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่เหลือทิ้งจากการบิบน้ำมัน CNSL ปริมาณ 170 ตัน จะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในระบบแก๊สซิฟิเคชันจำนวน 23 ตัน เพื่อผลิตโปรตีนเซอร์แก๊สนำไปใช้เป็นพลังงานความร้อนในกระบวนการแปรรูป ลดต้นทุนการใช้ฟืนได้เป็นจำนวนเงิน 48,000 บาท และนำกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่เหลืออีก 147 ตัน ไปแปรรูปเป็นชีวมวลจำหน่ายให้กับโรงงานรับซื้อชีวมวล ราคากิโลกรัมละ 50 สตางค์ คิดเป็นรายรับ 73,500 บาท ดังนั้นรูปแบบการจัดการเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมจะก่อให้เกิดรายรับและลดต้นทุน รวมเป็นเงินทั้งสิ้น 721,500 บาท สูงกว่าการจัดการรูปแบบเดิม 494,500 บาท ดังภาพที่ 29

ในพื้นที่อำเภอบ้านลาด จังหวัดอุดรดิตถ์ มีผลผลิตมะม่วงหิมพานต์ประมาณ 7,000 ตันต่อปี หากดำเนินการแปรรูปในพื้นที่ทั้งหมดจะมีปริมาณเปลือกที่เหลือทิ้งจากการแปรรูปประมาณ 4,900 ตันต่อปี ถ้าใช้รูปแบบการจัดการแบบเดิมจะสร้างมูลค่าได้เพียง 4,900,000 บาท แต่ถ้าใช้รูปแบบการจัดการแบบใหม่ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยนำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ไปบิบน้ำมัน CNSL จะได้น้ำมัน CNSL ปริมาณ 1,078 ตัน คิดเป็นมูลค่า 12,936,000 บาท ส่วนกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่เหลือจากการบิบน้ำมัน ปริมาณ 3,822 ตัน หากนำกากเปลือกทั้งหมดไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในระบบแก๊สซิฟิเคชันเพื่อผลิตโปรตีนเซอร์แก๊ส จะสามารถลดต้นทุนค่าฟืนคิดเป็นมูลค่า 7,976,348 บาท ดังนั้นการจัดการเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์รูปแบบใหม่ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมีมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ทั้งสิ้น 20,912,348 บาท



ภาพที่ 29 การประเมินมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนกลุ่มส่งเสริมอาชีพบ้านหาดไก่อ้อย อำเภอลำปลาย จังหัดอุดรดิติถ์

ผลการวิเคราะห์มลภาวะทางอากาศที่ระบายออกจากปล่องเตาจากการเผาากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชันที่พัฒนาขึ้น

หลังจากการออกแบบและพัฒนา ระบบแก๊สซิฟิเคชัน ที่เหมาะสมต่อการ ใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิงแล้ว ผู้วิจัยจึงทำการทดสอบการเผาากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชันที่พัฒนาขึ้น ดำเนินการเผาากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ในเตาแก๊สซิฟิเคชัน ต่อปล่องระบายทรงกลมสูง 2.50 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางปล่อง 0.15 เมตร บริเวณปลายท่อเตา เพื่อใช้เป็นจุดเก็บตัวอย่างอากาศ โดยทำการตรวจวัดปริมาณฝุ่นละออง ด้วยการเก็บตัวอย่างอากาศแบบไอโซไคเนติก จากปล่องผ่านกระดาษกรองใยแก้วที่อุณหภูมิ 120 ± 14 องศาเซลเซียส และเครื่องควบแน่น เพื่อหาปริมาณฝุ่นละอองที่กรองและเก็บได้โดยวิธีการชั่งน้ำหนักหลังจากระเหยความชื้นออกแล้ว และดำเนินการเก็บตัวอย่าง วิเคราะห์ตัวอย่างอากาศ เพื่อหาค่าความเข้มข้นเป็นร้อยละ โดยปริมาตรของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซออกซิเจน (O_2) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ด้วยชุดวิเคราะห์ Orsat Analyzer ดำเนินการวัดความสูงปล่อง เส้นผ่านศูนย์กลางปล่อง วัดอุณหภูมิ ความเร็วอากาศ และความดันบรรยากาศภายในปล่อง อัตราการไหล ร้อยละของออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และความชื้น ทำการเก็บตัวอย่างอากาศจน

ได้ปริมาตรตัวอย่างตามต้องการ บันทึกค่านำไปคำนวณหาปริมาณมลภาวะทางอากาศที่ระบายออก จากปล่อง ดังภาพที่ 30



ภาพที่ 30 การตรวจวัดมลภาวะทางอากาศจากการเผาากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ด้วยระบบ แก๊สซิฟิเคชันที่พัฒนาขึ้น

ในการเก็บตัวอย่างมลภาวะทางอากาศผู้วิจัยได้ดำเนินการบันทึกค่าต่าง ๆ เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณปริมาณมลภาวะทางอากาศที่ระบายออกจากปล่อง ดังนี้ อุณหภูมิภายในปล่อง 236.00 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศในปล่อง 749.98 มิลลิเมตรปรอท ความเร็วอากาศในปล่อง 3.48 เมตรต่อวินาที อัตราการไหล 122.22 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ออกซิเจน ร้อยละ 17.06 คาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละ 2.25 และความชื้น ร้อยละ 4.60 นำมาคำนวณหาปริมาณมลภาวะทางอากาศที่ระบายออกจากปล่องเตาแก๊สซิฟิเคชัน ที่ใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง ที่ความดัน 1 บรรยากาศ หรือ 760 มิลลิเมตรปรอท อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ที่สภาวะแห้ง โดยมีปริมาตรออกซิเจนในอากาศเสีย ณ สภาวะจริงขณะตรวจวัด ผลการวิเคราะห์มลภาวะทางอากาศที่ระบายออกจากปล่องเตาของระบบแก๊สซิฟิเคชันที่พัฒนาขึ้น โดยใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง แสดงดังตารางที่ 22 พบว่า มีค่าความเข้มข้นฝุ่นละออง (Total Suspended Particulate) 2.532 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur dioxide) มีค่า 1.0 ppm ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน (Oxide of Nitrogen) มีค่า 8.1 ppm และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide) มีค่า 65.0 ppm เมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานพบว่า ทุกพารามิเตอร์มีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนดตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดค่าปริมาณของสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากโรงงาน พ.ศ. 2549 เป็นผลจากเตาแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลลงชนิด V-hearth ถูกออกแบบระบบกำจัดมลพิษทางอากาศ ด้วยการติดตั้งไซโคลนดักฝุ่น แบบ Lapple สามารถตัดแยกอนุภาคฝุ่นขนาดเล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 1 ไมครอนขึ้นไป ทำให้ปริมาณฝุ่นละออง

น้อยกว่าระบบเผาไหม้โดยตรง และติดตั้งเครื่องดักฝุ่นแบบเป็ยกชนิดอีเจ็คเตอร์เวนจูรี (Ejector Venturi Scrubber) จำนวน 2 ชุด ต่ออนุกรมกัน ช่วยดักจับฝุ่นละออง น้ำมันดิน ไรด์ิวซ์ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ไนโตรเจนไดออกไซด์ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 22 ปริมาณสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากปล่องของระบบแก๊สซิฟิเคชันที่พัฒนาขึ้น โดยใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง

| พารามิเตอร์ตรวจวัด | หน่วย | ผลการวิเคราะห์ | มาตรฐาน ¹ |
|--------------------------|---------------------|----------------|----------------------|
| ความสูงปล่องเตา | m | 2.50 | - |
| เส้นผ่าศูนย์กลางปล่องเตา | m | 0.15 | - |
| อุณหภูมิในปล่องเตา | °C | 236.00 | - |
| ความดันปล่องเตา | mm.Hg | 749.98 | - |
| ความเร็วอากาศ | m/s | 3.48 | - |
| อัตราการไหล | NM ³ /hr | 122.22 | - |
| ก๊าซออกซิเจน | % | 17.06 | - |
| ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ | % | 2.25 | - |
| ความชื้น | % | 4.60 | - |
| ปริมาณฝุ่นละออง | mg/m ³ | 2.532 | ≤320 |
| ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ | ppm | 1.0 | ≤60 |
| ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน | ppm | 8.1 | ≤200 |
| ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ | ppm | 65.0 | ≤690 |

ที่มา: ¹กระทรวงอุตสาหกรรม, 2549, น.8-9

ผลการวิเคราะห์ต้นทุนสิ่งแวดล้อมของการปล่อยมลพิษทางอากาศ

งานวิจัยนี้นอกจากจะมีการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์แล้ว ยังมีการคำนวณหาต้นทุนทางสิ่งแวดล้อม เพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลกระทบจากมลพิษทางอากาศที่เกิดขึ้น จากการเผาากเพลิงเม็ดเม็ดมะม่วงหิมพานต์ด้วยเตาเผาตรง และการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในระบบแก๊สซิฟิเคชันที่พัฒนาขึ้น โดยงานวิจัยนี้จะใช้ค่าใช้จ่ายในการกำจัดมลพิษทางอากาศที่ปล่อยออกจากระบบต่อหน่วย อ้างอิงข้อมูลจากประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งมลพิษทางอากาศที่ใช้ในการคำนวณหาต้นทุนสิ่งแวดล้อม ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) และปริมาณฝุ่นละออง (TSP)

จากข้อมูลปริมาณสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากปล่องเตาที่เกิดจากการเผาากเพลิงเม็ดเม็ดมะม่วงหิมพานต์ด้วยวิธีเผาตรงในตารางที่ 14 และปริมาณสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากปล่องของระบบแก๊สซิฟิเคชันที่พัฒนาขึ้นในตารางที่ 20 รวมถึงระยะเวลาที่ใช้ในการต้มเมล็ดของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนกลุ่มส่งเสริมอาชีพบ้านหาดไก่อ้อยู่ จำนวน 6 ชั่วโมงต่อวัน และ 180 วันต่อปี คิดเป็นระยะเวลาการดำเนินงานทั้งสิ้น 1,080 ชั่วโมงต่อปี เมื่อนำข้อมูลมาแปลงหน่วยให้เป็นกิโลกรัมต่อปี (kg/year) จะได้ปริมาณสารเจือปนหรือมลพิษทางอากาศ ดังตารางที่ 23

ตารางที่ 23 ปริมาณมลพิษทางอากาศที่ปล่อยออกจากการเผาตรงและระบบแก๊สซิฟิเคชัน

| มลพิษทางอากาศ | หน่วย | เผาตรง | ระบบแก๊สซิฟิเคชัน |
|-----------------|---------|-----------|-------------------|
| CO ₂ | kg/year | 5,488.657 | 5,452.821 |
| TSP | kg/year | 89.156 | 0.334 |
| SO ₂ | kg/year | 0.277 | 0.346 |
| NO _x | kg/year | 13.601 | 1.312 |
| CO | kg/year | 102.101 | 9.826 |

ค่าใช้จ่ายในการกำจัดมลพิษทางอากาศ ได้แก่ CO₂, CO, NO_x, SO₂ และ TSP อ้างอิงจาก Office of Energy: USA (2004) กำหนดค่าต้นทุนสิ่งแวดล้อมต่อตันมลพิษเป็นเงิน 33 USD, 1,288 USD, 9,620 USD, 2,220 USD และ 5,920 USD ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ข้อมูลที่อ้างอิงมานั้น แสดงถึงต้นทุนผลกระทบสิ่งแวดล้อมของประเทศสหรัฐอเมริกา เมื่อนำมาใช้ในประเทศไทย จำเป็นต้องพิจารณาความสามารถในการจ่ายค่าความเสียหายต่อสิ่งแวดล้อม (Willingness to Pay: WTP) งานวิจัยกำหนดให้ค่า WTP ของประเทศไทยมีสัดส่วนเท่ากับ 0.183 ของค่า WTP ของประเทศสหรัฐอเมริกา และอัตราแลกเปลี่ยนเงินปี 2564 กำหนดให้ 1 USD เท่ากับ 31.44 บาท และเมื่อ

คำนวณเป็นต้นทุนสิ่งแวดล้อมมลพิษทางอากาศ CO₂, CO, NO_x, SO₂ และ TSP ของประเทศไทย จะมีค่าเท่ากับ 0.19, 7.41, 55.35, 12.77 และ 34.06 บาทต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

ตารางที่ 24 แสดงต้นทุนทางด้านสิ่งแวดล้อมของมลพิษทางอากาศ จากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตมะม่วงหิมพานต์ด้วยเตาเผาตรง

| มลพิษทางอากาศ | ต้นทุนสิ่งแวดล้อม (บาทต่อกิโลกรัม) | ปริมาณมลพิษ (กิโลกรัมต่อปี) | ต้นทุนสิ่งแวดล้อมต่อปี (บาทต่อปี) |
|---------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| CO ₂ | 0.19 | 5,488.657 | 1,042.11 |
| TSP | 34.06 | 89.156 | 3,036.72 |
| SO ₂ | 12.77 | 0.277 | 3.53 |
| NO _x | 55.35 | 13.601 | 752.80 |
| CO | 7.41 | 102.101 | 756.62 |
| รวมต้นทุนสิ่งแวดล้อมต่อปี (บาท) | | | 5,591.78 |

ตารางที่ 25 แสดงต้นทุนทางด้านสิ่งแวดล้อมของมลพิษทางอากาศ จากการใช้ถ่านหินเพื่อผลิตมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิงในระบบแก๊สซิฟิเคชัน

| มลพิษทางอากาศ | ต้นทุนสิ่งแวดล้อม (บาทต่อกิโลกรัม) | ปริมาณมลพิษ (กิโลกรัมต่อปี) | ต้นทุนสิ่งแวดล้อมต่อปี (บาทต่อปี) |
|---------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| CO ₂ | 0.19 | 5,452.821 | 1,035.31 |
| TSP | 34.06 | 0.334 | 11.38 |
| SO ₂ | 12.77 | 0.346 | 4.42 |
| NO _x | 55.35 | 1.312 | 72.64 |
| CO | 7.41 | 9.826 | 72.81 |
| รวมต้นทุนสิ่งแวดล้อมต่อปี (บาท) | | | 1,196.55 |

จากการประเมินการใช้ถ่านหินเพื่อผลิตมะม่วงหิมพานต์จำนวน 23 ตันต่อปี ของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนกลุ่มส่งเสริมอาชีพบ้านหาดไก่อ้อย เมื่อคำนวณแล้วสามารถแสดงต้นทุนทางด้านสิ่งแวดล้อมของมลพิษทางอากาศ จากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตมะม่วงหิมพานต์ด้วยเตาเผาตรง มีรายละเอียดตามตารางที่ 24 ซึ่งรวมต้นทุนสิ่งแวดล้อมได้เท่ากับ 5,591.78 บาทต่อปี และแสดงต้นทุน

ทางด้านสิ่งแวดล้อมของมลพิษทางอากาศ จากการใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง ในระบบแก๊สซิฟิเคชันที่พัฒนาขึ้น มีรายละเอียดตามตารางที่ 25 ซึ่งรวมต้นทุนสิ่งแวดล้อมได้เท่ากับ 1,196.55 บาทต่อปี แสดงให้เห็นว่าระบบแก๊สซิฟิเคชันที่พัฒนาขึ้น สามารถลดต้นทุนสิ่งแวดล้อมได้ 4.67 เท่า ทั้งนี้หากทำการประเมินการปล่อยมลพิษทางอากาศจากการเผากากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ของอำเภอท่าปลา จังหวัดอุตรดิตถ์ ซึ่งมีปริมาณ 3,822 ตัน จะคำนวณต้นทุนสิ่งแวดล้อมจากการเผากากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ด้วยเตาเผาตรง คิดเป็นมูลค่า 929,208 บาทต่อปี หากนำกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ทั้งหมด ไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในระบบแก๊สซิฟิเคชัน จะมีต้นทุนสิ่งแวดล้อมคิดเป็นมูลค่าเพียง 198,835 บาทต่อปี



บทที่ 5

สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

ชนิด ปริมาณ องค์ประกอบทางด้านเคมีของกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการเผากากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ด้วยวิธีเผาตรง

อำเภอท่าปลา จังหวัดอุตรดิตถ์ มีพื้นที่เพาะปลูกมะม่วงหิมพานต์ ประมาณ 26,224 ไร่ เกือบเกี่ยวผลผลิตมะม่วงหิมพานต์ได้ ประมาณ 6,000 -7,000 ตันต่อปี พันธุ์มะม่วงหิมพานต์ที่ปลูกมากที่สุด คือ พันธุ์ศรีสะเกษ 60-1 (ศก. 60-1) ลักษณะลำต้นทรงพุ่มโปร่ง ใบด้านบนสีเขียวเข้ม ใต้ใบสีเขียวอ่อนช่อดอกยาว เมล็ดมีสีเทาน้ำหนักเฉลี่ย 6.3 กรัมต่อเมล็ด จำนวนเมล็ดทั้งเปลือก 158 เมล็ดต่อกิโลกรัม เปอร์เซนต์เมล็ดดี 89 % ผลผลิตมะม่วงหิมพานต์ทั้งหมดของอำเภอท่าปลาที่มีถึงปีละประมาณ 7,000 ตัน จะมีปริมาณเปลือกที่เหลือทิ้งจากการแปรรูปมะม่วงหิมพานต์ของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนในอำเภอท่าปลา ปีละประมาณ 4,900 ตัน ปัจจุบันทางกลุ่มผู้แปรรูปมะม่วงหิมพานต์นำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่เหลือทิ้ง มาบีบอัดน้ำมันจะได้น้ำมัน CNSL ทำให้เกิดกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เหลือทิ้ง 3,822 ตัน นำไปกำจัดโดยการกองทิ้งไว้ให้ย่อยสลายไปตามธรรมชาติ บางส่วนนำไปทำปุ๋ยหมัก และทำลายโดยวิธีการเผาอย่างไม่ถูกวิธี ซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของคนในชุมชน

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ พบว่า มีค่าความชื้น 9.09 % ปริมาณเถ้า 2.39 % ปริมาณสารระเหย 88.28 % ปริมาณคาร์บอนคงตัว 0.24 % ปริมาณคาร์บอน (Carbon) 54.09 % ปริมาณไฮโดรเจน (Hydrogen) 6.08 % ปริมาณออกซิเจน (Oxygen) 38.45 % ค่าความร้อน (Heating Value) 5,071.10 Kcal/Kg และปริมาณไนโตรเจน (Nitrogen) 1.38 % จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวเมื่อพิจารณาผลความชื้นของกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ซึ่งมีเพียง 9.09 % ประกอบกับการวิเคราะห์ระบบแก๊สซิฟิเคชันส่วนใหญ่นิยมใช้เชื้อเพลิงที่มีความชื้นไม่เกิน 20 % จึงมีความเหมาะสมที่จะนำกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในเตาแก๊สซิฟิเคชัน ก่อนนำกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ไปใช้เป็นเชื้อเพลิงผู้วิจัยได้ทำการศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการเผากากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ด้วยวิธีเผาตรง โดยทำการเผากากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ในเตาดินเผา ต่อท่อระบายมลพิษสำหรับเก็บตัวอย่างมลพิษทางอากาศที่ระบายออกจากปล่อง พบว่า ค่าความเข้มข้นฝุ่นละออง (Total Suspended Particulate) 648.329 mg/m³ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur dioxide) มีค่า 1.0 ppm ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน (Oxide of Nitrogen) มีค่า 103.9 ppm และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon

monoxide) มีค่า 844.0 ppm เมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานพบว่า ค่าความเข้มข้นฝุ่นละออง และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ เกินเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนดตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดค่าปริมาณของสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากโรงงาน พ.ศ. 2549

การออกแบบ พัฒนา และศึกษาประสิทธิภาพระบบแก๊สซิฟิเคชัน ที่สามารถให้พลังงานความร้อน และเหมาะสมต่อการใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ เป็นเชื้อเพลิง เพื่อการจัดการกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

การออกแบบและพัฒนาระบบแก๊สซิฟิเคชัน ที่สามารถให้พลังงานความร้อนไปต้มน้ำ ปริมาณ 300 ลิตร เพื่อใช้ในกระบวนการแปรรูปเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ โดยกำหนดให้เตาแก๊สซิฟิเคชันมีขนาด 130 kW ใช้อากาศเป็นตัวกลางทำปฏิกิริยา กำหนดให้ค่าความร้อนของโปรดิวเซอร์แก๊สที่คาดว่าจะได้รับเท่ากับ 5,000 kJ/m³ และออกแบบระบบแก๊สซิฟิเคชัน ให้เหมาะสมต่อการใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง ผลจากการออกแบบระบบแก๊สซิฟิเคชัน ประกอบด้วย เตาแก๊สซิฟิเคชัน ไฮโคลน สกรับเบอร์ และแทงค์น้ำ โดยเตาแก๊สซิฟิเคชันทำจากเหล็กหนาม้วนขึ้นรูป มีถังสำหรับบรรจุเชื้อเพลิงได้ 40 กิโลกรัม โดยเปิดฝาเหล็กด้านบน ควบคุมปริมาณอากาศเข้าสู่เตาด้วยวาล์ว ใช้ท่อเหล็กขนาด 2 นิ้วป้อนอากาศให้ไหลผ่านห้องลมรอบ ๆ โชนเผาไหม้ เพื่อเตรียมอากาศให้กระจายเข้าสู่หัวฉีดจำนวน 5 หัว อย่างสม่ำเสมอรอบทิศทาง มีช่องสำหรับจุดไฟซึ่งตรงกับตำแหน่งของหัวฉีด มีช่องสำหรับติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิของโชนต่าง ๆ มีมือหมุนสำหรับระบายซีลที่หลุดผ่านตะแกรงลงสู่น้ำในแทงค์น้ำ โปรดิวเซอร์แก๊สที่ผลิตได้จะถูกส่งออกจากเตาด้วยท่อเหล็ก เข้าสู่ไฮโคลนประสิทธิภาพสูงแบบ Lapple เพื่อดักฝุ่นที่มีขนาดใหญ่ ส่งแก๊สเข้าสู่เครื่องดักฝุ่นแบบเปียกชนิด อีเจ็คเตอร์เวนจัวร์ จำนวน 2 ชุด ซึ่งต่อบนอนุกรมกัน เพื่อกำจัดน้ำมัน CNSL น้ำมันดิน ฝุ่นละเอียดและกลิ่น โดยแต่ละชุดใช้ปั๊มน้ำแรงดันสูง ขนาด 800 วัตต์ ต่อกับท่อน้ำ หมุนเวียนน้ำจากถังพักเพื่อทำความสะอาดโปรดิวเซอร์แก๊สตลอดเวลา ซึ่งการทำงานของเครื่องดักฝุ่นแบบเปียกชนิดอีเจ็คเตอร์เวนจัวร์นี้ทำให้เกิดการเหนียวนำของโปรดิวเซอร์แก๊ส และสร้างแรงดูดอากาศเข้าสู่เตาแก๊สซิฟิเคชันให้สามารถทำงานได้โดยไม่ต้องใช้เครื่องเป่าลม (Blower) โปรดิวเซอร์แก๊สที่สะอาดแล้วจะถูกส่งไปที่หัวเผาเพื่อใช้เป็นพลังงานต่อไป

ผลการประเมินประสิทธิภาพของระบบแก๊สซิฟิเคชัน พบว่า อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเท่ากับ 11.4 kg/h อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงเท่ากับ 2.22 องค์กรประกอบของโปรดิวเซอร์แก๊สที่ใช้เชื้อเพลิงกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ มีสัดส่วนของแก๊สติดไฟ ได้แก่ CO H₂ และ CH₄ โดยมีสัดส่วนของแก๊สร้อยละ 16.97 และ 1.5 ตามลำดับ เมื่อทำการคำนวณหาความร้อนของโปรดิวเซอร์แก๊สจากกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ได้เท่ากับ 3.605 MJ/Nm³ ผลการประเมินประสิทธิภาพของระบบแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงเป็นเชื้อเพลิง มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ 39.92 %

ผลการศึกษาด้านทุนการผลิต เศรษฐศาสตร์ และมลภาวะทางอากาศที่ระบายออกจากปล่องเตาของระบบแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง

จากการศึกษาความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ในการลงทุนสร้างระบบแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง เพื่อลดต้นทุนค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ใช้ในกระบวนการแปรรูป โดยเปรียบเทียบกับค่าใช้จ่ายกับฟืนที่ใช้อยู่เดิม โดยใช้เงินลงทุนสร้างระบบแก๊สซิฟิเคชัน 100,000 บาท มีขนาดพลังงานความร้อนที่ผลิตได้สูงสุด 130 kW ใช้งานที่พลังงานความร้อน 50 kW ใช้ปริมาณกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 22,906 kg/ปี เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูปจึงไม่มีต้นทุน เมื่อเทียบกับปริมาณของฟืนที่ให้ขนาดพลังงานความร้อนเท่ากันมีค่าเท่ากับ 39,953 kg/ปี คิดเป็นต้นทุนค่าฟืน 47,944 บาท/ปี ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ในการลงทุนสร้างระบบแก๊สซิฟิเคชัน เพื่อใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง เปรียบเทียบกับการใช้ฟืน ดังแสดงในตารางที่ 26

ตารางที่ 26 ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของระบบแก๊สซิฟิเคชัน เปรียบเทียบกับการใช้ฟืน

| ลำดับที่ | รายการ | เทียบกับฟืน |
|----------|----------------------------------|-------------|
| 1 | ระยะเวลาคืนทุน (PB) | 5.07 ปี |
| 2 | มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) | 32,470 บาท |
| 3 | อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) | 14.8 % |
| 4 | อัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุน (BCR) | 1.32 |

จากระยะเวลาดำเนินโครงการ 10 ปี พบว่าการลงทุนสร้างระบบแก๊สซิฟิเคชันเมื่อเทียบกับการใช้ฟืน มีระยะเวลาคืนทุน (PB) เท่ากับ 5.07 ปี มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) เท่ากับ 32,470 บาท อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) เท่ากับ 14.8 % และอัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุน (BCR) เท่ากับ 1.32 ซึ่งผลการวิเคราะห์สรุปได้ว่าการลงทุนสร้างระบบแก๊สซิฟิเคชันเมื่อเทียบกับการใช้ฟืน มีความคุ้มค่าแก่การลงทุน ทั้งนี้หากมีการนำโปรดิวเซอร์แก๊สไปใช้เป็นพลังงานความร้อนให้กับตู้อบเมล็ดด้วย เพื่อใช้ออบเมล็ดทดแทนพลังงานแสงอาทิตย์ในช่วงวันที่ไม่มีแสงแดด จะสามารถลดต้นทุน LPG ลงได้อีก 9,200 บาทต่อปี ซึ่งทำให้การลงทุนสร้างระบบแก๊สซิฟิเคชันมีระยะเวลาคืนทุนเร็วมากขึ้นและมีอัตราผลตอบแทนในการลงทุนมากขึ้นไปอีก

ผลจากการตรวจวัดมลภาวะทางอากาศ ที่ออกกระบายออกจากปล่องระบบแก๊สซิฟิเคชัน พบว่าค่าความเข้มข้นของ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน และก๊าซ

คาร์บอนมอนอกไซด์ มีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนดตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดค่าปริมาณของสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากโรงงาน พ.ศ. 2549

ผลการวิเคราะห์ต้นทุนสิ่งแวดล้อมของการปล่อยมลพิษทางอากาศ เพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลกระทบจากมลพิษทางอากาศที่เกิดขึ้น จากการเผาากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ด้วยเตาเผาตรง และการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในระบบแก๊สซิฟิเคชันที่พัฒนาขึ้น ซึ่งมลพิษทางอากาศที่ใช้ในการคำนวณหาต้นทุนสิ่งแวดล้อม ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) และปริมาณฝุ่นละออง (TSP) โดยทำการประเมินการปล่อยมลพิษทางอากาศจากการเผาากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ของอำเภอท่าปลา จังหวัดอุตรดิตถ์ ซึ่งมีปริมาณ 3,822 ตันต่อปี พบว่า ต้นทุนสิ่งแวดล้อมจากการเผาากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ด้วยเตาเผาตรง คิดเป็นมูลค่า 929,208 บาทต่อปี หากนำกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ทั้งหมด ไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในระบบแก๊สซิฟิเคชันที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม จะมีต้นทุนสิ่งแวดล้อมคิดเป็นมูลค่าเพียง 198,835 บาทต่อปี

อภิปรายผลการวิจัย

การศึกษาความเหมาะสมของการเลือกใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง ผู้วิจัยทำการวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมีของกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ และทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับมาตรฐานควบคุมคุณภาพเชื้อเพลิงชีวมวลของกลุ่มยุโรป (ENplus) พบว่า ปริมาณความชื้น (9.09 %) ปริมาณเถ้า (2.39 %) มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดให้เชื้อเพลิงชีวมวล มีปริมาณความชื้น ไม่เกิน 10 % ปริมาณเถ้า ไม่เกิน 3 % ส่วนปริมาณไนโตรเจน (1.38 %) มีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดให้เชื้อเพลิงชีวมวลมีปริมาณไนโตรเจน ไม่เกิน 0.3 % (Tumuluru et al., 2010) เนื่องจากไนโตรเจนซึ่งพบในโปรตีน โดยกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ใช้ทดลองมีสัดส่วนไนโตรเจนอยู่ในระดับที่สูงเมื่อเทียบกับชีวมวลทั่วไป เนื่องจากมะม่วงหิมพานต์เป็นพืชตระกูลถั่วจึงมีโปรตีนสูง สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ของ Ohler (1979) ซึ่งพบว่าโปรตีนอยู่ร้อยละ 4.06 จากการวิเคราะห์สมบัติของเชื้อเพลิงและปริมาณเปลือกมะม่วงหิมพานต์ที่เกิดขึ้นในพื้นที่จำนวนมาก สามารถนำกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์มาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล เพื่อนำพลังงานความร้อนที่ได้ไปใช้ในกระบวนการแปรรูปเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ลดต้นทุนการผลิตด้านพลังงาน และสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงผลิตกระแสไฟฟ้า หรือนำไปใช้ในเชิงอุตสาหกรรมได้ในอนาคต ควรใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิงในเตาแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลลง ที่มีระบบทำความสะอาดโปรตีนเซอร์

แก๊ส เพื่อกำจัดมลพิษทางอากาศที่เกิดจากการเผาไหม้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

ผลของวิเคราะห์แบบแยกธาตุของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ พบว่ามีธาตุองค์ประกอบ ได้แก่ C H O และ N สัดส่วนร้อยละ 53.93, 6.07, 38.79 และ 1.21 ตามลำดับ มีค่าความร้อน 22.84 MJ/kg ใกล้เคียงกับผลวิเคราะห์ของ Miguel, Kenneth & Alberto (2014) ซึ่งมีสัดส่วนร้อยละ 63.20, 6.74, 21.9 และ 0.69 ตามลำดับ มีค่าความร้อน 24.2 MJ/kg เมื่อสกัดแยกน้ำมัน CNSL ออกแล้วจะเหลือกากเปลือกมะม่วงหิมพานต์ ซึ่งมีผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบ C H O และ N พบว่ามีสัดส่วนร้อยละ 54.09, 6.08, 38.45 และ 1.38 ตามลำดับ มีค่าความร้อน 21.22 MJ/kg ใกล้เคียงกับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ทั้งนี้เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์มีความชื้น (Moisture content) สูงถึงร้อยละ 37.50 เนื่องจากในพื้นที่อำเภอท่าปลา จังหวัดอุตรดิตถ์ ใช้วิธีการต้มเมล็ดก่อนนำไปกะเทาะเปลือก จึงทำให้เปลือกมีความชื้นสูง ส่วนเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ในพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทย และในต่างประเทศนิยมใช้วิธีการคั่วเมล็ดซึ่งทำให้มีความชื้นต่ำกว่ามาก ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ของ Miguel, Kenneth & Alberto (2014) พบว่า เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เหลือทิ้งในจังหวัดกาชา ประเทศโมซัมบิก มีความชื้นเพียงร้อยละ 3.83 เท่านั้น

ผลการตรวจวัดปริมาณสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากปล่องที่เกิดจากการเผากากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ด้วยวิธีการเผาตรง เพื่อนำผลมาวิเคราะห์ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการเผาการเผาเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ในพื้นที่โล่งแจ้ง พบว่า ค่าก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานกำหนด ส่วนค่าความเข้มข้นฝุ่นละออง และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ เกินเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด เนื่องจากการเผาเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่มีส่วนประกอบทางเคมีของสารระเหย ปริมาณคาร์บอน ไนโตรเจนและปริมาณออกซิเจนสูง เมื่อทำการเผาเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์โดยตรง ก่อให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิง ปริมาณฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นจะมีผลต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ เนื่องจากมีขนาดเล็กพอที่จะเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจส่วนล่างและถุงลมปอดของมนุษย์ เป็นผลให้เกิดโรคทางเดินหายใจโรคปอดต่าง ๆ เกิดการระคายเคืองและทำลายเยื่อหุ้มปอด ฝุ่นละอองยังส่งผลกระทบต่อสภาพบรรยากาศทั่วไป ทำให้ทัศนวิสัยไม่ดีเนื่องจากเป็นอนุภาคของแข็งที่ดูดซับ และหักเหแสงได้ ก่อให้เกิดความสกปรก และเป็นอันตรายต่อวัตถุ สิ่งก่อสร้าง และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ที่ถูกปล่อยออกมา หากมนุษย์สูดหายใจเข้าไป อาจจะทำให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพอย่างรุนแรง เป็นอันตรายต่อสมอง หัวใจ กล้ามเนื้อ และเด็กอ่อนในครรภ์ ที่กำลังเจริญเติบโต (สำนักที่ปรึกษา กรมอนามัย, 2561) โดยที่ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ จะรวมตัวกับฮีโมโกลบินในเม็ดเลือดแดงได้มากกว่าออกซิเจน ถึง 200-250 เท่า เกิดเป็นคาร์บอกซีฮีโมโกลบิน ทำให้เม็ดเลือดแดงไม่สามารถรับออกซิเจนได้ตามปกติ ร่างกายได้รับออกซิเจนน้อยลง หัวใจต้องสูบฉีดโลหิตมากขึ้น เพื่อทำให้โลหิตผ่านเข้าสู่ปอด หัวใจ หากร่างกายได้รับก๊าซ

คาร์บอนมอนอกไซด์มากเกินไป อาจซ็อก หมดสติ หรือตายได้ (สุรีพร จิตต์เชื้อ, 2550) ทั้งนี้การแก้ไข ปัญหาฝุ่นละออง และลดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยการทำให้เชื้อเพลิงกระจายตัว มีระบบการ กระจายลมในห้องเผาไหม้ (ศุภวัฒน์ ธาดาจารย์มงคล, 2559)

จากการศึกษาประสิทธิภาพของระบบแก๊สซิฟิเคชัน พบว่ามีประสิทธิภาพทางความร้อน เท่ากับ 39.92 % ที่อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง 2.22 ต่ำกว่าค่าประสิทธิภาพทางความร้อนที่กำหนด ในการออกแบบซึ่งกำหนดไว้เท่ากับ 70 % เนื่องจากระบบแก๊สซิฟิเคชันที่สร้างขึ้น อาศัยการ เหนี่ยวนำของสกรับเบอร์แบบเวนจูร์สร้างแรงดูดอากาศเข้าสู่เตาทดแทนการใช้เครื่องเป่าลม จึงมี อัตราการไหลของอากาศน้อย ทำให้เตาแก๊สซิฟิเออร์มีอัตรากำลังความร้อน อัตราการสิ้นเปลือง เชื้อเพลิง และอัตราการไหลของโปรตีนเซอร์แก๊ส ต่ำกว่าค่าที่ใช้ในการออกแบบเตาแก๊สซิฟิเออร์ ดังนั้นหากต้องการเพิ่มอัตรากำลังความร้อนของเตาแก๊สซิฟิเออร์ จำเป็นต้องเพิ่มอัตราการไหลของ อากาศเข้าสู่เตา โดยติดตั้งเครื่องเป่าลมต่อท่อเข้ากับวาล์วควบคุมอากาศเข้าของเตา แต่อย่างไรก็ตาม ระบบแก๊สซิฟิเคชันที่สร้างขึ้นสามารถกำจัดมลพิษสิ่งแวดล้อมทางอากาศ ได้แก่ ฝุ่นละออง ก๊าซ คาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และก๊าซออกไซด์ไนโตรเจน ได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับองค์ประกอบของโปรตีนเซอร์แก๊สที่ผลิตได้มีสัดส่วนของแก๊ส CO H₂ และ CH₄ คิดเป็นร้อยละ 16, 9.7 และ 1.5 ตามลำดับ มีค่าความร้อนของโปรตีนเซอร์แก๊สเท่ากับ 3.605 MJ/Nm³ และมีค่า คุณสมบัติต่าง ๆ สอดคล้องกับงานวิจัย ปัญญา นาคคำ, นิกราน หอมดวง, กิตติกร สาสุจิตต์ และอัครินทร์ อินทนิเวศน์ (2558, น.109-113) ซึ่งพบว่าโปรตีนเซอร์แก๊สที่ได้จากเชื้อเพลิงไม้ลำไยมี ค่าความร้อนเท่ากับ 3.441 MJ/Nm³ และมีสัดส่วนของแก๊ส CO H₂ และ CH₄ คิดเป็นร้อยละ 17.53, 9.29 และ 0.90 ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ในการลงทุนสร้างระบบแก๊สซิฟิเคชันที่ ใช้กากเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง พบว่ามีระยะเวลาคืนทุน (PB) เท่ากับ 5.07 ปี อัตราผลตอบแทน ภายใน (IRR) เท่ากับ 14.8 % และอัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุน (BCR) เท่ากับ 1.32 เมื่อเปรียบเทียบกับ การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์สำหรับการผลิตไฟฟ้าจากขยะด้วยเทคโนโลยีการ ผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากขยะแข็ง (กษมา ศิริสมบูรณ์ ภคพล ทับทิม และอัจฉรา นิลขีว, 2559, น.29) มีระยะเวลาคืนทุน (PB) เท่ากับ 4 ปี 1 เดือน อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) เท่ากับ 24.01 % และอัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุน (BCR) เท่ากับ 1.45 ผลการเปรียบเทียบพบว่า การลงทุนสร้าง ระบบแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้กากเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิง มีระยะเวลาคืนทุน (PB) มากกว่า มี อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) และอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) น้อยกว่า เนื่องจาก วิสาหกิจชุมชนกลุ่มส่งเสริมอาชีพบ้านหาดไก่อ้อย มีการต้มเมล็ดเพียง 180 วันต่อปี คิดเป็น 50 % เท่านั้น จึงไม่ได้ใช้งานระบบแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้กากเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิงได้อย่างเต็มที่ ทั้งนี้หากมีการนำโปรตีนเซอร์แก๊สที่ผลิตได้ไปใช้เป็นพลังงานความร้อนให้กับตู้อบเมล็ดในช่วงวันที่ไม่มี

แสงแดด เพื่ออบเมล็ดทดแทนการใช้ LPG จะสามารถลดต้นทุน LPG ลงได้อีก 9,200 บาทต่อปี ซึ่งทำให้การลงทุนสร้างระบบแก๊สซิฟิเคชันมีระยะเวลาคืนทุนเร็วมากขึ้นและมีอัตราผลตอบแทนในการลงทุนมากขึ้นไปอีก

ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะเชิงวิชาการ

1. ควรมีการศึกษาหาความเร็วอากาศที่ป้อนเข้าสู่เตา ที่ทำให้ระบบแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นเชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพสูงสุด
2. ควรมีการศึกษาส่วนผสมกับชีวมวลชนิดอื่นที่ทำให้เตาแก๊สซิฟิเคชันสามารถทำงานได้อย่างสม่ำเสมอ
3. ควรมีการพัฒนาาระบบเติมเชื้อเพลิงเมื่อเชื้อเพลิงหมด เพื่อให้ระบบแก๊สซิฟิเคชันสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง
4. ควรพัฒนาระบบวัดและควบคุมการทำงานของระบบแก๊สซิฟิเคชัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความปลอดภัยในการทำงานให้สูงขึ้น
5. ควรมีการศึกษาวิธีการเก็บบรรจุโปรดิวเซอร์แก๊ส เพื่อตอบสนองความต้องการใช้งานได้อย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง

ข้อเสนอแนะการนำไปใช้ประโยชน์

1. ควรมีการส่งเสริมกลุ่มวิสาหกิจชุมชน และผู้ประกอบการแปรรูปเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ นำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งไปใช้ประโยชน์ โดยการบีบน้ำมัน CNSL ออกแล้ว นำกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในระบบแก๊สซิฟิเคชัน ผลิตโปรดิวเซอร์แก๊ส เพื่อใช้เป็นพลังงานความร้อนในกระบวนการแปรรูป
2. ควรนำโปรดิวเซอร์แก๊สที่ผลิตได้ไปใช้งานกับตู้อบเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ทดแทนการใช้ LPG เพื่อประหยัดต้นทุน และทำให้การลงทุนสร้างระบบแก๊สซิฟิเคชันมีระยะเวลาคืนทุนเร็วมากขึ้น และมีอัตราผลตอบแทนในการลงทุนมากขึ้นไปอีก
3. สามารถนำชีวมวลชนิดอื่นมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในระบบแก๊สซิฟิเคชันที่พัฒนาขึ้นได้
4. น้ำทิ้งจากเครื่องดักฝุ่นแบบเปียกของระบบแก๊สซิฟิเคชัน สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการไล่ศัตรูพืช เช่น มด ปลวก หอยถาก เป็นต้น เนื่องจากในน้ำทิ้งมีน้ำมัน CNSL รวมอยู่ด้วย
5. ควรมีมาตรการความปลอดภัยในการทำงานของระบบแก๊สซิฟิเคชัน เพื่อป้องกันอันตรายจากการเกิดเพลิงไหม้ การระเบิด แก๊สรั่ว ความร้อน และอันตรายจากน้ำมัน CNSL

6. ควรทำการบำรุงรักษาระบบแก๊สซิฟิเคชัน ให้มีสภาพสมบูรณ์อยู่เสมอ เพื่อประสิทธิภาพและความปลอดภัยในการใช้งาน

7. ควรสร้างความตระหนักต่อปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากกิจกรรมการผลิตและการบริโภคของชุมชน และส่งเสริมให้ชุมชนใช้เทคโนโลยีการจัดการเข้ามาช่วยลดผลกระทบที่จะเกิดขึ้นกับสิ่งแวดล้อม





บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2556). *ฐานข้อมูลศักยภาพชีวมวลในประเทศไทยประจำปีเพาะปลูก พ.ศ. 2556*. สืบค้น 1 มีนาคม 2560, จาก <http://webkc.dede.go.th/testmax/node/2450>.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2561). *คู่มือฝึกอบรมหลักสูตรภาคปฏิบัติด้านพลังงานทดแทน แก๊สซิพีเคชั่นจากชีวมวล*. กรุงเทพมหานคร: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน.
- กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2558). *มลพิษทางอากาศ*. สืบค้น 12 มกราคม 2562, จาก <http://www.deqp.go.th/knowledge/อากาศ/มลพิษทางอากาศ>.
- กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. (2559). *เทคโนโลยีการผลิตพลังงานเชื้อเพลิงจากเศษไม้โครงการส่งเสริมการใช้เทคโนโลยีการนำวัสดุเหลือใช้และกากของเสียมาใช้ประโยชน์* (รายงานวิจัย). กรุงเทพมหานคร: กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่.
- กษมา ศิริสมบุญณ์ ภคพน ทับทิม และอัจฉรา นิลเขียว. (2559). การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์สำหรับการผลิตไฟฟ้าจากมูลฝอยด้วยเทคโนโลยีหลุมฝังกลบและเทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิงจากเชื้อเพลิงขยะแข็ง. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*. 23(3), 20-32.
- จตุพร แก้วอ่อน จอมพล แวศักดิ์ มารีนา มะหนิ และสุวิทย์ เพชรห้วยลึก. (2548). การเปลี่ยนรูปพลังงานจากชีวมวล : แก๊สซิพีเคชั่น. *วารสารวิทยาศาสตร์ทักษิณ*, 2(2), 56-67.
- ชาคริต ทองอุไร สุธรรม สุขมณี และสรวิศ จิตบรรเจิดกุล. (2541). *การสกัดน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์โดยตัวทำละลาย*. สงขลา: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ณรงค์ศักดิ์ ธนวิบูลย์ชัย. (2544). *หลักเศรษฐศาสตร์เบื้องต้น*. พิมพ์ครั้งที่ 11. ชลบุรี: มหาวิทยาลัยบูรพา.
- ณัฐภูมิ ดุษฎี และชूरิตน์ ธารารักษ์. (2554). *ศักยภาพการผลิตไฟฟ้าโดยใช้เชื้อเพลิงจาก RDF-5 กรณีศึกษามหาวิทยาลัยแม่โจ้* (รายงานวิจัย). เชียงใหม่: ศูนย์วิจัยพลังงาน มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- ทินกร ไหมศรี ไพวัลย์ บุญศิริคำชัย และภาณุ ถนอมวรสิน. (2550). *การศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบปรับอากาศพลังงานแสงอาทิตย์แบบดูดกลืน*. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก.

- ทิพาพร อยู่วิทยา. (2534). การใช้ประโยชน์จากผลมะม่วงหิมพานต์. *วารสาร สจ.ธ.*, 14(1), 1-14.
- ธนิต มหิธานันท์. (2553). การศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการติดตั้งเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่ออุ่นน้ำก่อนเข้าหม้อไอน้ำ กรณีศึกษา โรงงานฟอกย้อม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก.
- นคร ทิพยาวงศ์. (2553). เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล. (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพมหานคร: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- บัณฑิตย ศรีสังข์งาม. (2548). การแยกสารประกอบฟีนอลในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวด้วยความร้อนของน้ำมันจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพมหานคร.
- ปัญญาพร หนาดคำ นิกราน หอมดวง กิตติกร สาสุจิตต์ และอัครินทร์ อินทนิเวศน์. (2558). “การประเมินสมรรถนะของแก๊สซิไฟเออร์แบบไหลลงเมื่อใช้เชื้อเพลิงจากวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร”. ในการประชุมสัมมนาทางวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8. 4-6 พฤศจิกายน 2558. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี กรุงเทพมหานคร: 109-113, 2558.
- ประเทืองศรี สิ้นชัยศรี. (2535). คุณภาพและการใช้ประโยชน์เมล็ดในมะม่วงหิมพานต์. *อุตสาหกรรมเกษตร*, 3(2), 14-24.
- พิชญ์ สิทธิกร. (2553). การศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ต่อการเลือกใช้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงในรถยนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพมหานคร.
- พิทักษ์ คล้ายชม กันต์ อินทวงศ์ และไพโรจน์ นะเที่ยง. (2559). การถ่ายทอดเทคโนโลยีการสกัดน้ำมันเพื่อเพิ่มมูลค่าเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่เหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูป ด้วยรูปแบบการจัดการความรู้แบบมีส่วนร่วม (รายงานวิจัย). อุดรดิตถ์: คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์.
- มโน ลิ้มวรพันธุ์. (2543). ปฏิบัติการดีคาร์บอกซิเลชันและปฏิบัติการการเสื่อมสภาพของน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.
- มั่งชูลิกา คอนเมฆ. (2555). การศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์สำหรับการใช้หัวเผาประสิทธิภาพสูงในเตาเผาเหล็กของอุตสาหกรรมผลิตเหล็กและเหล็กกล้าในประเทศไทย. วิทยานิพนธ์

ปริญญาหมาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.

เยาวเรศ ทับพันธุ. (2541). *การประเมินโครงการตามแนวทางเศรษฐศาสตร์*. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

ระรินธร สายแสงทอง. (2557). *การใช้น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นสารลดแรงตึงผิวสำหรับดีโซลล์*. วิทยานิพนธ์ปริญญาหมาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร.

รัชชานนท์ เปี่ยมใจสว่าง. (2563). “ไซโคลน” เครื่องมือคัดแยกฝุ่นในภาคอุตสาหกรรม, *วารสารสิ่งแวดล้อม*, 24 (4), 1-9.

วันทา ผ่านคำ. (2560, 22 มิถุนายน). [สัมภาษณ์โดย พัทธ์ชัย คล้ายชม, ผู้วิจัย]. *การจัดการเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ของกลุ่มส่งเสริมอาชีพบ้านหาดไเก้ต้อยตำบลหาดล้า อำเภอกำปาศ จังหวัดอุดรดิตร*. ค้นเมื่อ 22 มิถุนายน 2560, จากตำบลหาดล้า อำเภอกำปาศ จังหวัดอุดรดิตร.

วิชชาวุธ มนูญผล. (2555). *การวิเคราะห์สมรรถนะของเตาแก๊สซีไฟเออร์โดยใช้เศษใบไม้และกิ่งไม้แห้งเป็นเชื้อเพลิง*. วิทยานิพนธ์ปริญญาหมาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.

สมพจน์ วรรณนุช. 2550. *เศรษฐศาสตร์สิ่งแวดล้อม*. กรุงเทพมหานคร: มิสเตอร์ก๊อปปี้(ประเทศไทย)

สัญญา แก้วศรีงาม. (2552). *การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากขยะชุมชนเพื่อใช้กับเตาแก๊สซีไฟเออร์*. วิทยานิพนธ์ปริญญาหมาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพมหานคร.

สำนักงานเกษตรอำเภอกำปาศ จังหวัดอุดรดิตร. (2560). *ข้อมูลการปลูกพืชเศรษฐกิจจังหวัดอุดรดิตร ปี2558/59*. สืบค้น 1 กันยายน 2560, จาก <http://www.uttaradit.doae.go.th/home/files/data57-59/october/58-59.pdf>.

สำนักจัดการกากของเสียและสารอันตราย กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2559). *สารไดออกซินและพีวแรน คืออะไร*. สืบค้น 4 ตุลาคม 2559, จาก http://www.pcd.go.th/info_serv/haz_dioxin.html.

สำนักที่ปรึกษา กรมอนามัย. (2561). *มลพิษทางอากาศ*. สืบค้น 12 มกราคม 2562, จาก <http://advisor.anamai.moph.go.th/main.php?filename=env202>.

สำนักพัฒนาทรัพยากรบุคคลด้านพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2555). *การประยุกต์ใช้พลังงานทดแทนสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมและอาคารธุรกิจ*. กรุงเทพมหานคร: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน.

สุดาว เลิศวิสุทธิไพบูลย์. (ม.ป.ป). *เศรษฐศาสตร์สิ่งแวดล้อม: แนวคิดและหลักการ*. หนังสือระบบเครื่องมือและการจัดการความเสี่ยงสำหรับสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรม. นนทบุรี : มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช.

- สุนทร ละอองนวล. (2547). *การศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในเตาเผาแบบฟิทช์เบค*.
 วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย สถาบัน
 เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพมหานคร.
- สุรีพร จิตต์ชื้อ. (2550). *มลพิษทางอากาศ*. สืบค้น 13 ธันวาคม 2563, จาก
http://www.thaigoodview.com/library/sema/sukhothai/sureeporn_j/toxic/sec01p02.html,)
- อนุวัตร เดชครุฑ. (2548). *การประเมินมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ของผลกระทบสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักร
 ของโรงไฟฟ้าถ่านหินแม่เมาะโดยเทคนิคแอลซีเอ*. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต,
 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่
- อาพะทะ สิงห์แพ. (2545). *การผลิตวาร์นิชพอลิยูรีเทนจากน้ำมันเปลือกมะม่วงหิมพานต์*. วิทยานิพนธ์
 ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.
- Aggarwal, J. (1972). *Chemistry and uses of cashew nut shell liquid*. Hyderabad India:
 Paint Manufacture.
- Azam-Ali, S. H., & Judge, E.C. (2004). *Small-Scale Cashew Nut Processing*. Retrieved
 February 12, 2013, from [http://www.fao.org/inpho_archive/content/
 document/vlibrary/ac306e/ac306e00.htm](http://www.fao.org/inpho_archive/content/document/vlibrary/ac306e/ac306e00.htm)
- Basu, P. (2010). *Gasification theory and modeling of gasifiers*. Retrieved 8 กันยายน
 2561, from <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374988-8.00005-2>
- Chen, W. H., Chung, Y.C., & Liu, J.L. (2005). Analysis on Energy Consumption and
 Performance of Reheating Furnaces in a Hot Strip Mill. *International
 Communications in Heat and Mass Transfer*, 32(5), 695-706.
- Crane Global Limited. (2561). *High Efficiency Wet Scrubber*. Retrieved 8 กันยายน 2561,
 from <https://gfyat.com/gifs/detail/miniaturesparklinghypacrosaurus>
- Das, P., & Ganesh, A. (2003). *Bio-Oil from Pyrolysis of Cashew Nut Shell-a near Fuel*.
Biomass and Bioenergy, 25(1), 113-117.
- Food and Agriculture Organization of The United Nations. (1986). *Wood Gas as Engine
 Fuel*. Rome, Italy: Mechanical Wood Products Branch Forest Industries Division
 FAO Forestry Department.

- Koomey, J. & Krause, F. (1997). *Introduction to Environmental Externality Costs*. CRC Press: United States of America.
- Miguel, M., Kenneth, M., & Alberto, J. (2014). Gasification of Cashew Nut Shell Using Gasifier Stove in Mozambique. Retrieved 28 กันยายน 2561, from <http://www.scirp.org/journal/jpeeh>.
- Ohler, J. G. (1979). *Cashew*. Amsterdam: Department of Agricultural Research, Koninklijk Instituut voor de Tropen.
- Parikka, M. (2004). Global Biomass Fuel Resources. *Biomass and Bioenergy*, 27(1), 613-620.
- Reed, T. B., & Das, A. (1996). A wood-gas Stove for Developing Countries. In *the Development in thermo chemical biomass*, Banff, Canada: Development in thermo chemical biomass.
- Reed, T. B., & Das, A. (1988). *Handbook of biomass downdraft gasifier engine*, Solar Energy Research Institute, Colorado.
- Smith, R. L., Malaluan, R. M., Setianto, W. B., Inomata, H., & Arai, K. (2003). Separation of cashew (*Anacardium occidentale*) nut shell liquid with supercritical carbon dioxide. *Bioresource Technology*, 88(1), 1-7.
- Tychopoulos, V., & Tyman, J. H. P. (1990). Long chain Phenols-The thermal and oxidation deterioration of phenolic lipids from the cashew (*Anacardium Occidentale*) nut shell. *J. Sci. Food and Agri*, 52(1), 71-83.
- Tyman, J. H. P., & Tychopoulos, V. C. (1984). Quantitative Analysis of Natural Cashew Nut Shell Liquid (*Anacardium Occidentale*) by High Performance Liquid Chromatography. *Chromatography A*, 303(1), 137-150.
- Uamusse, M. M., & Matsinhe, Jonas. (2010). *DESIGN AND TESTING OF CASHEW NUT SHELL GASIFIER STOVE*. Mozambique: Universidade Eduardo Mondlane Category Engineering.
- Zainal, Z. A., Rifau, A., Quadir, G. A., & Seetharamu, K. N. (2000). Experimental Investigation of a Downdraft Biomass Gasifier. *Biomass and Bioenergy*, 23(4), 283-289.





ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ใบผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์
และกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์



ห้องปฏิบัติการ ศูนย์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสวนดุสิต
228-228/1-3 ถนนสีรินธร เขตบางพลัด กรุงเทพฯ 10700
โทรศัพท์ : 02-423-9407-10 โทรสาร : 02-423-9409

ใบรายงานผลการทดสอบ

ชื่อลูกค้า : นายพิทักษ์ คล้ายชม

รายงานผลวิเคราะห์/ทดสอบเลขที่ : RT620700718

ที่อยู่ : มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ เลขที่ 27 ถนนอินใจมี ตำบลท่าอิฐ

หมายเลขปฏิบัติการ : SDS/62-0013

อำเภอเมือง จังหวัดอุดรดิตถ์ 53000

แหล่งเก็บตัวอย่าง : วิสาหกิจชุมชนบ้านหาดไก่อ้อย อำเภอกำแพง จังหวัดอุดรดิตถ์

ชนิดตัวอย่าง : เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

วันเดือนปีที่รับตัวอย่าง : 15 กรกฎาคม 2562

วันเดือนปีที่เก็บตัวอย่าง : 30 มิถุนายน 2562

วันเดือนปีที่ทำการทดสอบ : 15 กรกฎาคม - 16 สิงหาคม 2562

วิธีเก็บตัวอย่าง : สุ่มเก็บตัวอย่าง

เวลาที่เก็บตัวอย่าง : 17.04 น.

ผู้เก็บตัวอย่าง : นายพิทักษ์ คล้ายชม

หน้า 1/2

| รายการทดสอบ | หน่วย | วิธีทดสอบ | ค่าที่วิเคราะห์ได้ |
|--------------------------------------|---------|-----------------------------|--------------------|
| 1. ค่าความชื้น (Moisture Content) | % | Calculation (ASTM D3173) | 37.50 |
| 2. ปริมาณเถ้า (Ash) | % | Incineration (ASTM D3174) | 1.85 |
| 3. ปริมาณสารระเหย (Volatile matter) | % | Incineration (ASTM D3175) | 59.57 |
| 4. ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) | % | Incineration (ASTM D 3174) | 1.10 |
| 5. ปริมาณคาร์บอน (Carbon (C)) | % | Incineration (ASTM D3178) | 53.93 |
| 6. ปริมาณไฮโดรเจน (Hydrogen (H)) | % | Incineration (ASTM D3178) | 6.07 |
| 7. ปริมาณออกซิเจน (Oxygen (O)) | % | Incineration (ASTM D3176) | 38.79 |
| 8. ค่าความร้อน (Heating value) | | | |
| - DSCV | Kcal/Kg | Bomb Calorimeter (EPA 5050) | 5,458.20 |
| 9. ปริมาณไนโตรเจน (Nitrogen (N)) | % | Kjeldahl Method (EPA 1687) | 1.21 |

กน ๑๐๑

(นางสาวพรรณทิพา กิจภักดีกุล)

หัวหน้าทีมบริหารด้านวิชาการ

(16 สิงหาคม 2562)

ห้ามคัดถ่ายใบรับรองหรือรายงานผลแต่เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้อำนวยการศูนย์สิ่งแวดล้อมเป็นลายลักษณ์อักษร

รายงานนี้รับรองเฉพาะวัตถุตัวอย่างที่ได้ตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบเท่านั้น

ไม่รับรองวัตถุหรือสินค้าที่ใช้รายงานนี้ในการโฆษณาหรืออ้างอิง



ห้องปฏิบัติการ ศูนย์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสวนดุสิต
228-228/1-3 ถนนลิรินธร เขตบางพลัด กรุงเทพฯ 10700
โทรศัพท์ : 02-423-9407-10 โทรสาร : 02-423-9409

ใบรายงานผลการทดสอบ

ชื่อลูกค้า : นายพิทักษ์ คล้ายชม

รายงานผลวิเคราะห์/ทดสอบเลขที่ : RT620700718

ที่อยู่ : มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา เลขที่ 27 ถนนอินใจมี ตำบลท่าอิฐ

หมายเลขปฏิบัติการ : SDS/62-0014

อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 53000

แหล่งเก็บตัวอย่าง : วิสาหกิจชุมชนบ้านหาดไก่อ้อย อำเภอท่าปลา จังหวัดอุตรดิตถ์

ชนิดตัวอย่าง : กากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

วันเดือนปีที่รับตัวอย่าง : 15 กรกฎาคม 2562

วันเดือนปีที่เก็บตัวอย่าง : 30 มิถุนายน 2562

วันเดือนปีที่ทำการทดสอบ : 15 กรกฎาคม - 16 สิงหาคม 2562

วิธีเก็บตัวอย่าง : สุ่มเก็บตัวอย่าง

เวลาที่เก็บตัวอย่าง : 17.00 น.

ผู้เก็บตัวอย่าง : นายพิทักษ์ คล้ายชม

หน้า 2/2

| รายการทดสอบ | หน่วย | วิธีทดสอบ | ค่าที่วิเคราะห์ได้ |
|--------------------------------------|---------|-----------------------------|--------------------|
| 1. ค่าความชื้น (Moisture Content) | % | Calculation (ASTM D3173) | 9.09 |
| 2. ปริมาณเถ้า (Ash) | % | Incineration (ASTM D3174) | 2.39 |
| 3. ปริมาณสารระเหย (Volatile matter) | % | Incineration (ASTM D3175) | 88.28 |
| 4. ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) | % | Incineration (ASTM D 3174) | 0.24 |
| 5. ปริมาณคาร์บอน (Carbon (C)) | % | Incineration (ASTM D3178) | 54.09 |
| 6. ปริมาณไฮโดรเจน (Hydrogen (H)) | % | Incineration (ASTM D3178) | 6.08 |
| 7. ปริมาณออกซิเจน (Oxygen (O)) | % | Incineration (ASTM D3176) | 38.45 |
| 8. ค่าความร้อน (Heating value) | | | |
| - DSCV | Kcal/Kg | Bomb Calorimeter (EPA 5050) | 5,071.10 |
| 9. ปริมาณไนโตรเจน (Nitrogen (N)) | % | Kjeldahl Method (EPA 1687) | 1.38 |

พ.ว. อ.อ.

(นางสาวพรรณทิพา กิจภักดีกุล)

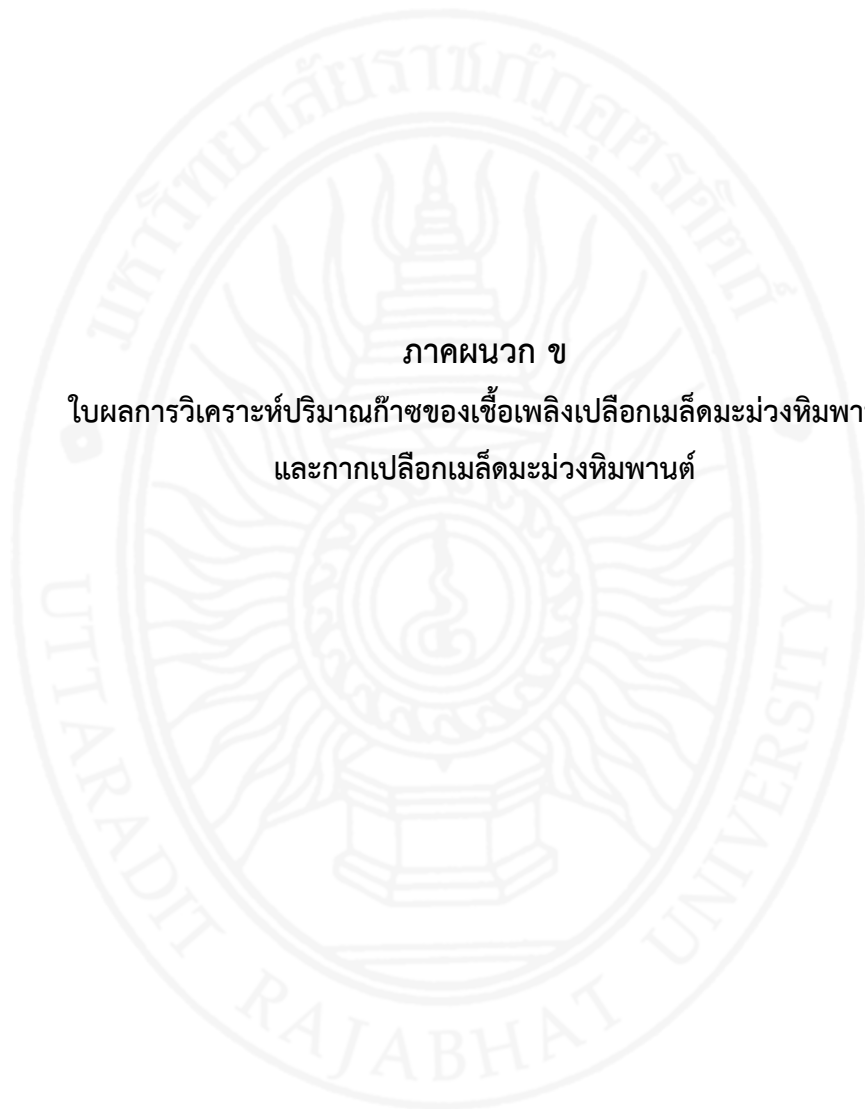
หัวหน้าทีมบริหารด้านวิชาการ

(16 สิงหาคม 2562)

ห้ามคัดถ่ายใบรับรองหรือรายงานผลแต่เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้อำนวยการศูนย์สิ่งแวดล้อมเป็นลายลักษณ์อักษร

รายงานนี้รับรองเฉพาะวัตถุตัวอย่างที่ได้ตรวจวิเคราะห์ ทดสอบเท่านั้น

ไม่รับรองวัตถุหรือสินค้าที่ใช้รายงานนี้ในการโฆษณาหรืออ้างอิง



ภาคผนวก ข

ใบผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซของเชื้อเพลิงเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์
และกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์



ERDI-Nakornping
Energy Research and Development Institute-Nakornping,
Chiang Mai University
สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Energy Research and Development Institute-Nakornping, Chiang Mai University

FM-QP-SIO-01 Rev. 07
วันที่ประกาศใช้: 11/06/2

ใบรายงานผลการทดสอบ

เลขที่รายงาน ERDI 63/122 : หน้า 1/1

ชื่อผู้รับบริการ : นายพิทักษ์ คล้ายชม
ที่อยู่ : คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์
27 ถ. อินใจมี ต. ท่าอิฐ อ. เมือง จ. อุตรดิตถ์ 53000
รายละเอียดตัวอย่าง : เชื้อเพลิงกากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ / ตัวอย่างวันที่ 16 มีนาคม 2563
ลักษณะ/สภาพตัวอย่าง : เก็บใส่ถุงเก็บก๊าซ สภาพตัวอย่างปกติ
วันที่รับตัวอย่าง : 17 มีนาคม 2563 (รหัสตัวอย่าง 63/3/17 550)
วันที่ทดสอบ : 17 - 24 มีนาคม 2563
ผลการทดสอบ :

| รายการทดสอบ | ผลการทดสอบ | หน่วย | วิธีทดสอบ / เทคนิคที่ใช้ |
|--------------------------------------|------------|--------|--------------------------------|
| 1. Methane (CH ₄) | 1.5 | % mole | *part 2720 C. **part D 1945 |
| 2. Carbon monoxide (CO) | 16 | % mole | |
| 3. Carbon dioxide (CO ₂) | 10 | % mole | |
| 4. Oxygen (O ₂) | 4.7 | % mole | |
| 5. Nitrogen (N ₂) | 61 | % mole | |
| 6. Hydrogen (H ₂) | 9.7 | % mole | |

หมายเหตุ : * In house methods based on Standard methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA, AWWA & WEF, 22nd edition, 2012

** In house methods based on American Society for Testing and Materials (ASTM), Volume 05.08 2015

ลงชื่อ ลิ่ง สุนส์ติน

(นางสาววิระญา ลิ่งส์ติน)

นักวิทยาศาสตร์

ลงชื่อ พิกุล สุทธิ

(นางสาวพรสวรรค์ ชติยศ)

หัวหน้างานห้องปฏิบัติการ

วันที่รายงาน (..... 24 มีนาคม 2563.....)

รายงานฉบับนี้เป็นเอกสารตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น รายงานผลการทดสอบไปยังผู้ส่งมอบควรตรวจสอบความถูกต้อง. ผลฉบับนี้ใช้ได้สำหรับการอ้างอิงใช้กับรายงานวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ ม.ช.

สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

239 ถ.ห้วยแก้ว ต.สุเทพ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

Energy Research and Development Institute-Nakornping, Chiang Mai University

239 Huay Kaew Rd., Suthep, Muang, Chiang Mai 50200, Thailand

Tel: 053-942007-9 Fax: 053-903760, 053-903763 http://erdi.cmu.ac.th



ERDI - Nakomping
Energy Research and Development Institute-Nakomping,
Chiang Mai University
สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Energy Research and Development Institute-Nakomping, Chiang Mai University

FM-2P-510-31 Rev. 37
วันที่ประกาศใช้: 03/06/2

ใบรายงานผลการทดสอบ

เลขที่รายงาน ERDI 63/127 : หน้า 1/1

ชื่อผู้รับบริการ : นายพิทักษ์ คล้ายชม
ที่อยู่ : คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตต์
27 ถ. อินใจมี ต. ท่าอิฐ อ. เมือง จ. อุดรดิตต์ 53000
รายละเอียดตัวอย่าง : เชื้อเพลิงเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ / ตัวอย่างวันที่ 26 มีนาคม 2563
ลักษณะ/สภาพตัวอย่าง : เก็บใส่ถุงเก็บก๊าซ สภาพตัวอย่างปกติ
วันที่รับตัวอย่าง : 1 เมษายน 2563 (รหัสตัวอย่าง 63/4/1 617)
วันที่ทดสอบ : 1 - 2 เมษายน 2563
ผลการทดสอบ :

| รายการทดสอบ | ผลการทดสอบ | หน่วย | วิธีทดสอบ / เทคนิคที่ใช้ |
|--------------------------------------|------------|--------|--------------------------------|
| 1. Methane (CH ₄) | 1.6 | % mole | *part 2720 C. **part D 1945 |
| 2. Carbon monoxide (CO) | 6.1 | % mole | |
| 3. Carbon dioxide (CO ₂) | 14 | % mole | |
| 4. Oxygen (O ₂) | 6.0 | % mole | |
| 5. Nitrogen (N ₂) | 67 | % mole | |
| 6. Hydrogen (H ₂) | 5.5 | % mole | |

หมายเหตุ : * In house methods based on Standard methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA, AWWA & WEF, 22nd edition, 2012

** In house methods based on American Society for Testing and Materials (ASTM), Volume 05.06 2015

ลงชื่อ ดร.น. สิ้นสุดิน

(นางสาววิระญา สิ้นสุดิน)
นักวิทยาศาสตร์

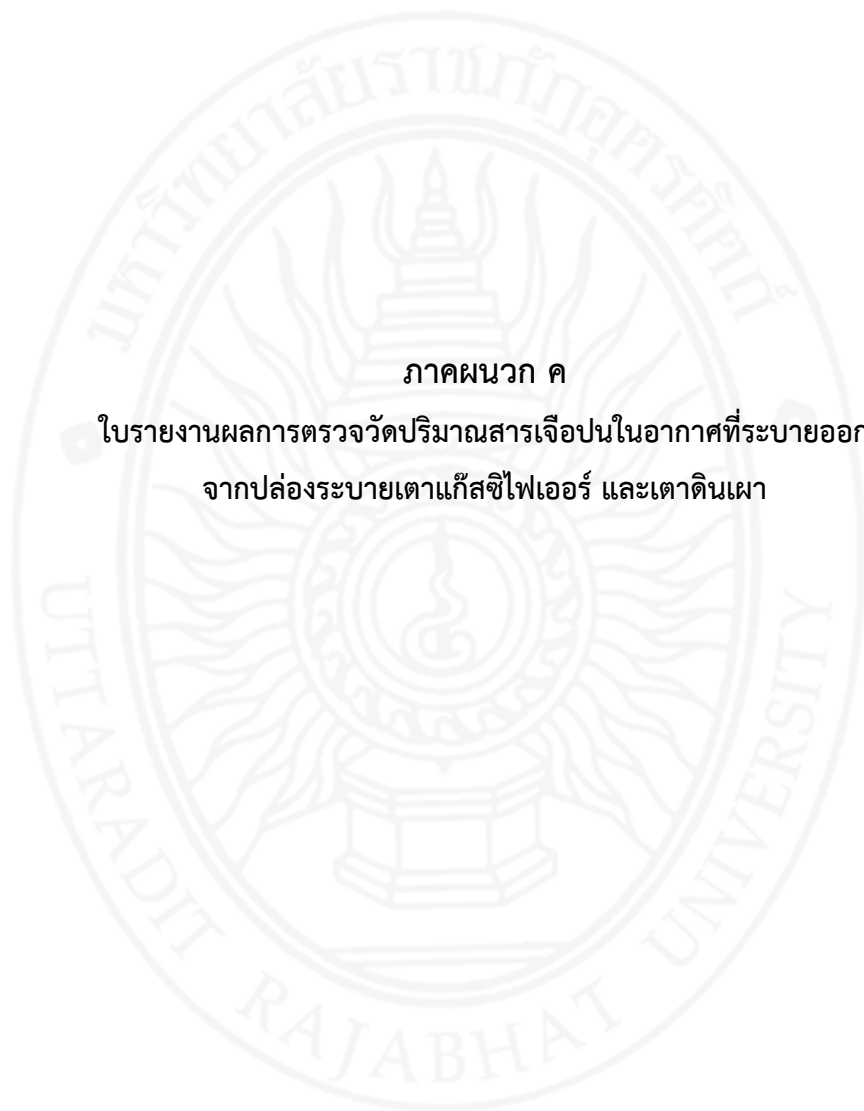
ลงชื่อ พจนานต์ ๐๗

(นางสาวพรสวรรค์ ชิตยศ)
หัวหน้างานห้องปฏิบัติการ

วันที่รายงาน (.....2.....เมษายน.....2563.....)

รายงานฉบับนี้เป็นเอกสารตัวอย่างที่นำมาทดสอบเท่านั้น รายงานผลการทดสอบคือข้อมูลอำนาจเฉพาะเพียงบางส่วน ยกเว้นที่ระบุไว้ โดยไม่ได้รับการยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ ม.อ.

สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
239 ถ.ห้วยแก้ว ต.สุเทพ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200
Energy Research and Development Institute-Nakomping, Chiang Mai University
239 Huay Kaew Rd., Suthep, Muang, Chiang Mai 50200, Thailand
Tel: 053-942007-9 Fax: 053-903760, 053-903763 http://erdi.cmu.ac.th



ภาคผนวก ค

**ใบรายงานผลการตรวจวัดปริมาณสารเจือปนในอากาศที่ระบายออก
จากปล่องระบายเตาแก๊สซีไฟเออร์ และเตาดินเผา**



บริษัท สแตก คอนซัลติ้ง จำกัด
Stack Consulting Co.,Ltd.

Stack Consulting Co.,Ltd
14/3052 Moo 14 Tambol Bang Bua Thong
Amphoe Bang Bua Thong, Nonthaburi 11110
Tel : 02-922-6573 Fax : 02-922-6573

ANALYSIS REPORT

Analysis No. : Lab-S 030/2563

Report Date : March 19, 2020

CUSTOMER NAME : มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์
ADDRESS : เลขที่ 27 ถนนอินใจมี ตำบลท่าอิฐ อำเภอเมือง จังหวัดอุตรดิตถ์ 53000
SAMPLING SOURCE : ปล่องระบายจากเตาดินเผา
SAMPLING DATE : March 14, 2020 SAMPLING TIME : 04:20 PM - 05:00 PM
RECEIVED DATE : March 16, 2020 ANALYTICAL DATE : March 16-19, 2020
SAMPLING METHOD : US. EPA Method SAMPLE CONDITION : Good
FUEL TYPE : เปลือกมะม่วงหิมพานต์ SYSTEM TYPE : Combustion open

| Item | Description | Unit | Method of Analysis | Actual Condition ^{2/} | Standard ^{1/} | Evaluation |
|------|-----------------------------|---------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------|------------|
| 1. | Stack Height | m | Measuring Tape | 2.50 | - | - |
| 2. | Stack Diameter | m | Measuring Tape | 0.15 | - | - |
| 3. | Temperature in Stack | °C | US. EPA Method 2 | 260.00 | - | - |
| 4. | Pressure Stack | mm.Hg | US. EPA Method 2 | 479.97 | - | - |
| 5. | Air Velocity | m/s | US. EPA Method 2 | 4.18 | - | - |
| 6. | Flow Rate | NM ³ /hr | US. EPA Method 2 | 132.03 | - | - |
| 7. | Oxygen Rate | % | US. EPA Method 3 | 14.04 | - | - |
| 8. | Carbon dioxide Rate | % | US. EPA Method 3 | 4.00 | - | - |
| 9. | Moisture | % | US. EPA Method 4 | 9.96 | - | - |
| 10. | Total Suspended Particulate | mg/m ³ | Isokinetic, Gravimetric Method | 1,234.933 | ≤320 | Fail |
| 11. | Sulfur dioxide | ppm | Electrochemical sensor method | 1.0 | ≤60 | Pass |
| 12. | Oxide of Nitrogen | ppm | Electrochemical sensor method | 106.5 | ≤200 | Pass |
| 13. | Carbon monoxide | ppm | Electrochemical sensor method | 4,208.0 | ≤690 | Fail |

Remark : 1. ^{1/} Notification of Ministry of Industry on the Prescription of the Content Values of Air Contaminants Emitted from the Factory B.E. 2549
: 2. ^{2/} Analyze results by Stack Consulting Co.,Ltd.Registration No.2-257

Approved by.....

(Mr.Chathri Sudjaiid)

Registration ID.2-257-ก-6721



Do not copy or modify.



บริษัท สแตค คอนซัลติ้ง จำกัด
Stack Consulting Co.,Ltd.

Stack Consulting Co.,Ltd
14/3052 Moo 14 Tambol Bang Bua Thong
Amphoe Bang Bua Thong, Nonthaburi 11110
Tel : 02-922-6573 Fax : 02-922-6573

ANALYSIS REPORT

Analysis No. : Lab-S 030/2563

Report Date : March 19, 2020

CUSTOMER NAME : มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์
ADDRESS : เลขที่ 27 ถนนอินใจมี ตำบลท่าอิฐ อำเภอเมือง จังหวัดอุตรดิตถ์ 53000
SAMPLING SOURCE : ปล่องระบายจากเตาดินเผา
SAMPLING DATE : March 14, 2020 SAMPLING TIME : 03:30 PM - 04:10 PM
RECEIVED DATE : March 16, 2020 ANALYTICAL DATE : March 16-19, 2020
SAMPLING METHOD : US. EPA Method SAMPLE CONDITION : Good
FUEL TYPE : กากเปลือกมะม่วงหิมพานต์ SYSTEM TYPE : Combustion open

| Item | Description | Unit | Method of Analysis | Actual Condition ^{2/} | Standard ^{1/} | Evaluation |
|------|-----------------------------|---------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------|------------|
| 1. | Stack Height | m | Measuring Tape | 2.50 | - | - |
| 2. | Stack Diameter | m | Measuring Tape | 0.15 | - | - |
| 3. | Temperature in Stack | °C | US. EPA Method 2 | 240.00 | - | - |
| 4. | Pressure Stack | mm.Hg | US. EPA Method 2 | 749.98 | - | - |
| 5. | Air Velocity | m/s | US. EPA Method 2 | 2.84 | - | - |
| 6. | Flow Rate | NM ³ /hr | US. EPA Method 2 | 97.81 | - | - |
| 7. | Oxygen Rate | % | US. EPA Method 3 | 15.64 | - | - |
| 8. | Carbon dioxide Rate | % | US. EPA Method 3 | 2.83 | - | - |
| 9. | Moisture | % | US. EPA Method 4 | 9.20 | - | - |
| 10. | Total Suspended Particulate | mg/m ³ | Isokinetic, Gravimetric Method | 648.329 | ≤320 | Fail |
| 11. | Sulfur dioxide | ppm | Electrochemical sensor method | 1.0 | ≤60 | Pass |
| 12. | Oxide of Nitrogen | ppm | Electrochemical sensor method | 103.9 | ≤200 | Pass |
| 13. | Carbon monoxide | ppm | Electrochemical sensor method | 844.0 | ≤690 | Fail |

Remark : 1. ^{1/} Notification of Ministry of Industry on the Prescription of the Content Values of Air Contaminants Emitted from the Factory B.E. 2549
: 2. ^{2/} Analyze results by Stack Consulting Co.,Ltd.Registration No.จ-257

Approved by.....

(Mr.Chathri Sudjaidi)

Registration ID.จ-257-ค-6721



Do not copy or modify.



บริษัท สแตค คอนซัลติ้ง จำกัด
Stack Consulting Co.,Ltd.

Stack Consulting Co.,Ltd
14/3052 Moo 14 Tambol Bang Bua Thong
Amphoe Bang Bua Thong, Nonthaburi 11110
Tel : 02-922-6573 Fax : 02-922-6573

ANALYSIS REPORT

Analysis No. : Lab-S 030/2563

Report Date : March 19, 2020

CUSTOMER NAME : มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์
ADDRESS : เลขที่ 27 ถนนอินใจมี ตำบลท่าอิฐ อำเภอเมือง จังหวัดอุตรดิตถ์ 53000
SAMPLING SOURCE : ปล่องระบายจากเตา Gasifier
SAMPLING DATE : March 14, 2020 SAMPLING TIME : 02:00 PM - 02:40 PM
RECEIVED DATE : March 16, 2020 ANALYTICAL DATE : March 16-19, 2020
SAMPLING METHOD : US. EPA Method SAMPLE CONDITION : Good
FUEL TYPE : กากเปลือกมะม่วงหิมพานต์ SYSTEM TYPE : Combustion open

| Item | Description | Unit | Method of Analysis | Actual Condition ^{2/} | Standard ^{1/} | Evaluation |
|------|-----------------------------|---------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------|------------|
| 1. | Stack Height | m | Measuring Tape | 2.50 | - | - |
| 2. | Stack Diameter | m | Measuring Tape | 0.15 | - | - |
| 3. | Temperature in Stack | °C | US. EPA Method 2 | 236.00 | - | - |
| 4. | Pressure Stack | mm.Hg | US. EPA Method 2 | 749.98 | - | - |
| 5. | Air Velocity | m/s | US. EPA Method 2 | 3.48 | - | - |
| 6. | Flow Rate | NM ³ /hr | US. EPA Method 2 | 122.22 | - | - |
| 7. | Oxygen Rate | % | US. EPA Method 3 | 17.06 | - | - |
| 8. | Carbon dioxide Rate | % | US. EPA Method 3 | 2.25 | - | - |
| 9. | Moisture | % | US. EPA Method 4 | 4.60 | - | - |
| 10. | Total Suspended Particulate | mg/m ³ | Isokinetic, Gravimetric Method | 2.532 | ≤320 | Pass |
| 11. | Sulfur dioxide | ppm | Electrochemical sensor method | 1.0 | ≤60 | Pass |
| 12. | Oxide of Nitrogen | ppm | Electrochemical sensor method | 8.1 | ≤200 | Pass |
| 13. | Carbon monoxide | ppm | Electrochemical sensor method | 65.0 | ≤690 | Pass |

Remark : 1. ^{1/} Notification of Ministry of Industry on the Prescription of the Content Values of Air Contaminants Emitted from the Factory B.E. 2549
: 2. ^{2/} Analyze results by Stack Consulting Co.,Ltd.Registration No.จ-257

Approved by.....

(Mr.Chathri Sudjaidi)

Registration ID.จ-257-ค-6721



Do not copy or modify.



ประวัติผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

| | |
|-------------------|--|
| ชื่อ-สกุล | นายพิทักษ์ คล้ายชม |
| วัน เดือน ปี เกิด | 21 กรกฎาคม 2522 |
| สถานที่เกิด | จังหวัดอุตรดิตถ์ |
| วุฒิการศึกษา | 2544 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมคอมพิวเตอร์) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร 2550 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมระบบการผลิตและ อัตโนมัติ) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร |
| ที่อยู่ปัจจุบัน | 278/6 ถนนบรมมาสน์ ตำบลท่าอิฐ อำเภอเมืองอุตรดิตถ์ จังหวัดอุตรดิตถ์ |

