การพัฒนากระบวนการเผาถ่านกัมมันต์จากเตาเผาถ่านรุ่นมังกรไฟ 84

ปิยณัฐ หงษ์กังวาล

วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาพลังงานทดแทน
ปีการศึกษา 2565
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

การพัฒนากระบวนการเผาถ่านกัมมันต์จากเตาเผาถ่านรุ่นมังกรไฟ 84

ปิยณัฐ หงษ์กังวาล

วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาพลังงานทดแทน
ปีการศึกษา 2565
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

วิทยานิพนธ์ เรื่อง "การพัฒนากระบวนการเผาถ่านกัมมันต์จากเตาเผาถ่านรุ่นมังกรไฟ 84"
ของ ปิยณัฐ หงษ์กังวาล
ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาพลังงานทดแทน

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ ดุษฎี)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(รองศาสตราจารย์ ดร.พิสิษฏ์ มณีโชติ)

..... กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัช สุริวงษ์)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สหัถยา ทองสาร)

อนุมัติ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.กรองกาญจน์ ชูทิพย์)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง การพัฒนากระบวนการเผาถ่านกัมมันต์จากเตาเผาถ่านรุ่นมังกรไฟ 84
ผู้วิจัย ปิยณัฐ หงษ์กังวาล
ประธานที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.พิสิษฏ์ มณีโชติ
กรรมการที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัช สุริวงษ์
ประเภทสารนิพนธ์ วิทยานิพนธ์ วท.ม. พลังงานทดแทน, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2565
คำสำคัญ เตาเผาถ่านรุ่นมังกรไฟ 84, ระยะเวลาการกระตุ้น, ถ่านกัมมันต์, ไม้ไผ่

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพัฒนากระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ จากเตาเผาถ่านรุ่นมังกรไฟ 84 ที่มีการปรับปรุงตัวเตาให้สามารถยกขึ้นได้ เพื่อเพิ่มอากาศเข้าไปในกระบวนการเผาไหม้ ทำให้เกิดกระบวนการกระตุ้นทางกายภาพด้วยอากาศและยังสามารถเพิ่มอุณหภูมิการเผาไหม้ของกระบวนการเผาถ่านได้ โดยทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติของถ่านต่อระยะเวลาของกระบวนการเปิดเตาเผาถ่านเท่ากับ 5 10 และ 15 นาที ตามลำดับ ผลการทดสอบพบว่า ใช้เวลาในกระบวนการเผาถ่านทั้งหมด 4 ชั่วโมง และอุณหภูมิในการเผาถ่านสูงสุดระหว่าง 800 - 900 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นทำการเปิดเตาเผาระยะเวลา 5 นาที อุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 1,004 องศาเซลเซียส มีค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 727.26 มิลลิกรัมต่อกรัม และจากการเปิดเตาเผาระยะเวลา 15 นาที อุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ1,214 องศาเซลเซียส มีค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 911.34 มิลลิกรัมต่อกรัม

Title	THE DEVELOPMENT OF ACTIVATED CHARCOAL PRODUCTION FROM FIRE DRAGON 84 CHARCOAL KLIN
Author	Piyanut Hongkangwarn
Advisor	Associate Professor Pisit Maneechot, Ph.D.
Co-Advisor	Associate Professor Tawat Suriwong, Ph.D.
Academic Paper	M.S. Thesis in Renewable Energy, Naresuan University, 2022
Keywords	Charcoal kiln, Activated charcoal, Bamboo, Activated time

ABSTRACT

The aim of this research was to improve the operating condition of Dragon Fire 84 charcoal kiln that The kiln wall could be raised up then the ambient air could enter into the combustion process then the yield was physical activated by air and the combustion temperature was increased. The charcoal yield qualities at various exposure periods of 5, 10 and 15 minutes during 5 hours of carbonization with highest temperature of 800-900 °C were investigated. For 5 min exposure, the maximum temperature was 1,004 °C and the yield iodine number was 727.26 mg/g while those of 15 min exposure were 1,214 °C and 911.34 mg/g, respectively.

ประกาศคุณูปการ

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจากหลายท่าน ผู้วิจัยของกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงในความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ ดร.พิสิษฏ์ มณีโชติ ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาอันมีค่ามาเป็นที่ปรึกษา พร้อมทั้งได้ให้คำแนะนำตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และขอกราบขอบพระคุณกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อันประกอบไปด้วย รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัช สุริวงษ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ ดุษฎี และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สหัถยา ทองสาร กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ ที่ได้ให้คำแนะนำตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ จนทำทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่างได้อย่างสมบูรณ์

ขอขอบคุณนายชาติ ไชยสิทธิ์ เจ้าหน้าที่สถาบันวิจัยและส่งเสริมพลังงานชุมชน(เอกชน) จังหวัดพิจิตร ที่ได้ให้ความรู้คำปรึกษา อีกทั้งให้ความอนุเคราะห์ด้านวัสดุอุปกรณ์และการใช้เครื่องมือต่างๆ และคุณประวิทย์ นิลวิเชียร ผู้เป็นต้นแบบแนวคิดเตาเผาถ่านรุ่นมังกรไฟ 84 และขอขอบคุณแหล่งทุนวิจัยที่ได้รับจาก สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) รวมไปถึงวิทยาลัยพลังงานทดแทนและสมาร์ตกริดเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านอุปกรณ์และเครื่องมือในการเก็บข้อมูล สำหรับการวิจัยในครั้งนี้

เหนือสิ่งอื่นใดขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และผู้ที่ให้กำลังใจและการสนับสนุนในทุกๆ ด้านอย่างที่ดีสุดเสมอมา

คุณค่าและคุณประโยชน์อันพึงจะมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบและอุทิศแด่ผู้มีพระคุณทุกๆ ท่าน ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า งานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาพลังงานทดแทนและผู้ที่สนใจต่อไป

ปิยณัฐ หงษ์กังวาล

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ค

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ง

ประกาศคุณูปการ ..... จ

สารบัญ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ฌ

สารบัญภาพ ..... ญ

บทที่ 1 บทนำ 1

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

วัตถุประสงค์ของการวิจัย 3

ขอบเขตการวิจัย 3

ประโยชน์ที่ได้รับ 3

คำสำคัญ 3

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ 5

เตาเผาถ่าน 7

กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ 11

การคาร์บอนไนซ์เซชั่น 12

การกระตุ้น 14

คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ 16

คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.....20
ไผ่..... 22
การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ 25
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 28
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย 32
ตัวแปรและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....33
เครื่องมือและการพัฒนาเครื่องมือ.....34
กระบวนการเผาถ่าน.....35
การเก็บรวบรวมข้อมูล.....37
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....38
ความเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในการเผาถ่าน 38
อุณหภูมิในช่วงระยะเวลาการกระตุ้น 39
วิเคราะห์ปริมาณผลผลิตที่ได้และค่าความชื้นของถ่านกัมมันต์ 41
ค่าพลังงานความร้อนของถ่านกัมมันต์.....42
ค่าการดูดซับไอโอดีน.....43
ภาพถ่ายอิเล็กตรอน(SEM) 43
การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและค่าปริมาตรรูพรุนของถ่าน.....45
ประเมินความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์.....46
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....48
สรุปผลการวิจัย.....48
ข้อเสอแนะ 48
บรรณานุกรม.....49

ภาคผนวก.....51

ประวัติผู้วิจัย 64

สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 การกระตุ้นทางกายภาพของวัตถุดิบทางการเกษตร 15

ตาราง 2 ข้อดีข้อเสียของกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นทางกายภาพและทางเคมี.....16

ตาราง 3 แสดงคุณสมบัติของถ่าน ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนและมาตรฐานอุตสาหกรรม.....21

ตาราง 4 ข้อมูลจำนวนและความหนาแน่นของไผ่ตามพื้นที่ของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2554.....23

ตาราง 5 รายการแสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....33

ตาราง 6 แสดงส่วนประกอบของเตาเผาถ่าน.....34

ตาราง 7 ปริมาณผลผลิตที่ได้และค่าความชื้นของถ่านกัมมันต์.....41

ตาราง 8 แสดงค่าของพลังงานที่ได้จากถ่านกัมมันต์.....42

ตาราง 9 แสดงค่าของการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์.....43

ตาราง 10 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและค่าปริมาตรรูพรุนของถ่าน 45

ตาราง 11 ประเมินความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ 46

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพ 1 เตาหลุมผี และเตาแกลบ....7
ภาพ 2 เตาดิน หรือเตาดินเหนียว....8
ภาพ 3 เตาอิฐก่อ....9
ภาพ 4 เตาเผาถ่าน 200 ลิตร แบบแนวนอน....10
ภาพ 5 เตาเผาถ่านขนาด 200 ลิตรแบบแนวตั้ง....11
ภาพ 6 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในการคาร์บอนไนซ์เซชั่น....12
ภาพ 7 ขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์[10]....19
ภาพ 8 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของถ่านไม้ไผ่....20
ภาพ 9 สัดส่วนของพื้นที่ปลูกไผ่ตามภูมิภาคต่างๆ ของประเทศไทย....23
ภาพ 10 แผนผังขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย....32
ภาพ 11 ส่วนประกอบของเตาเผาถ่าน....35
ภาพ 12 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบในการเผาถ่าน....35
ภาพ 13 ขั้นตอนในการเผาถ่าน....36
ภาพ 14 ขั้นตอนในการกระตุ้นถ่าน....36
ภาพ 15 ขั้นตอนในการหยุดกระบวนการ ดับถ่านด้วยเถ้า....37
ภาพ 16 การเก็บข้อมูลอุณหภูมิของการเผา....37
ภาพ 17 แสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในเตา....38
ภาพ 18 แสดงเปลวไฟที่ติดขึ้นหลังจากอุณหภูมิของการเผาถ่านก่อนเปิดเตา....39
ภาพ 19 แสดงอุณหภูมิของการเปิดเตาตามเวลาและทำการกลบถ่านด้วยเถ้า....39

ภาพ 20 แสดงอุณหภูมิของการเปิดเตาตามเวลาและทำการกลบถ่านด้วยเถ้าผสมน้ำ.....40

ภาพ 21 แสดงอุณหภูมิของการเปิดเตาตามเวลาและทำการดับด้วยน้ำ 40

ภาพ 22 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของถ่านที่ทำการเปิดเตาเป็นเวลา 5 นาที 44

ภาพ 23 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของถ่านที่ทำการเปิดเตาเป็นเวลา 10 นาที.....44

ภาพ 24 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของถ่านที่ทำการเปิดเตาเป็นเวลา 15 นาที.....45

บทที่ 1
บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยมีการใช้งานถ่านมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน โดยมีการนำถ่านมาใช้เป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนด้านต่างๆ โดยเฉพาะการหุงต้มประกอบอาหาร แม้ต่อมาได้มีการนำแก๊สหุงต้มมาใช้ ซึ่งให้ความร้อนดีกว่าถ่านมาก ทำให้การใช้ถ่านไม้ในครัวเรือนลดน้อยลง แต่อย่างไรก็ตามการใช้ถ่านไม้ก็ยังคงมีบทบาทที่สำคัญอยู่ในครัวเรือนตามชนบท และการทำอาหารประเภทปิ้งย่างในสังคมเมือง และยังมีการนำไปใช้ประโยชน์อื่น ๆ ในระดับครัวเรือนหรือบางครัวเรือนมีการทำเป็นอาชีพผลิตถ่านขายสร้างรายได้ให้กับครอบครัว โดยอาศัยวัตถุดิบในการเผาถ่านจากไม้ตามหัวไร่ปลายนาป่าชุมชนและป่าสาธารณะต่าง ๆ โดยมีเตาเผาถ่านหลากหลายชนิดที่ใช้ทั่วไปเตาเหล่านี้จะได้มีการปรับเปลี่ยนรูปแบบตามสถานการณ์สภาพปัญหาและสิ่งแวดล้อมตามแต่ละพื้นที่ โดยถ่านไม้เป็นผลผลิตที่ได้จากไม้ซึ่งถูกสลายตัวด้วยความร้อน โดยทำการเผาไหม้ถ่านภายในบริเวณที่มีอากาศอยู่เบาบางหรือในทางเทคนิคคือกระบวนการแยกสารอินทรีย์ภายในไม้ในสภาวะที่มีอากาศอยู่น้อยมากเมื่อมีการให้ความร้อนระหว่างการเผาถ่านจะช่วยกำจัดน้ำ น้ำมันดิน และสารประกอบอื่น ๆ ออกจากไม้ผลผลิตที่ได้จากกระบวนการคือ สารต่าง ๆ ประกอบด้วยคาร์บอนร้อยละ 80 นอกจากนั้นเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนร้อยละ 10-20 เถ้าร้อยละ 0.5-10 และแร่ธาตุต่าง ๆ เช่น กำมะถัน และฟอสฟอรัส ถ่านที่ได้จากกระบวนการผลิตจะมีปริมาณคาร์บอนสูงไม่มีความชื้น ทำให้มีปริมาณพลังงานในถ่านสูงโดยมีค่าเป็นสองเท่าของปริมาณพลังงานในไม้แห้ง [1]

ถ่านกัมมันต์ คือผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเปลี่ยนรูปชีวมวลด้วยความร้อนใน สภาพที่ไร้ออกซิเจน หรืออากาศซึ่งเรียกกันทั่วไปว่ากระบวนการไพโรไลซีส องค์ประกอบหลักของถ่านชีวภาพเต็มไปด้วยคาร์บอนจึงให้ความร้อนได้สูง ถ่านชีวภาพที่ได้จะมีประจุไฟฟ้า และความพรุนสูงสามารถนำไปใช้ปรับปรุงดินและและสามารถดูดซับสารเคมีในน้ำได้ ช่วยยึดธาตุอาหารให้แก่พืชแบบช้าๆ ทำให้ลดการสูญเสียธาตุอาหาร ช่วยดูดซับความชื้นในดินได้ดีสามารถเพิ่มปริมาณธาตุอาหารในดินได้และปรับปรุงดินให้มีประสิทธิภาพ ปรับสภาพความเป็นกรดในดิน เพิ่มความหลากหลายทางชีวภาพของจุลินทรีย์ในดิน กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์มีสองรูปแบบ คือ 1.) การกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation) เป็นการกระตุ้นด้วยการใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ อากาศ หรือ ไอน้ำ ซึ่งใช้อุณหภูมิในการเผากระตุ้นค่อนข้างสูงประมาณ 700 - 1000 องศาเซลเซียส เพราะไอน้ำที่ใช้จะต้องเป็นไอน้ำที่ร้อนยิ่งยวดเพื่อทำให้สารอินทรีย์ต่างๆ สลายไปและทำให้โครงสร้างภายในมีลักษณะรูพรุน ข้อดีคือได้ถานกัมมันตที่รูพรุนขนาดเล็กทำให้มีการดูดซับได้ดี ไม่มีสารเคมีตกค้างไม่เป็นอันตราย –

ต้นทุนในการผลิตต่ำ ข้อเสีย – วัสดุอุปกรณ์หายากมีความเฉพาะเจาะจง 2.) การกระตุ้นสารเคมี (Chemical activation) เป็นการนำวัตถุดิบมาผสมกับสารเคมี เช่น $ZnCl_2$ หรือ NaCl เพราะมีความสามารถดูดความชื้นได้ดีแล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 600 – 700 °C ล้างเอาสารเคมีออกผึ่งแดดให้แหง ตัวกระตุ้นจะแทรกเข้าไปในเนื้อถ่านทำให้เกิดรูพรุนขนาดใหญ่ไมนิยมนำมาบริโภค ข้อดีคือสะดวก งาย ไม่ยุ่งยากในการทำการทดลอง ข้อเสียคือได้ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่มีสารเคมีตกค้างต้องเสียเวลาล้างนานต้นทุนในการผลิตสูง [2]

การผลิตถ่านมีการพัฒนาหลายรูปแบบมาเป็นระยะเวลายาวนาน มีทั้งระบบประหยัดและมีประสิทธิภาพ และการเผาตามที่เคยทำมาในอดีตที่ไม่มีประสิทธิภาพ ซึ่งปัจจุบันได้พยายามที่จะพัฒนาให้มีการใช้เตาที่มีประสิทธิภาพเพื่อผลิตถ่านชีวภาพ สำหรับการหุงหาอาหารและสำหรับใช้ในทางเกษตรกรรมของประชาชนซึ่งมีอยู่ทั่วไปในพื้นที่ห่างไกล และจากที่ได้มีการศึกษาวิจัยพบว่าถ้ามีการควบคุมระบบการเผาไม้อย่างมีประสิทธิภาพโดยการใช้เทคโนโลยีเตาผลิตถ่านชีวภาพ และการผลิตถ่านที่ดีแล้ว ปัญหาด้านต่างๆ เช่น ปัญหาเรื่องฝุ่นและควันที่ลอยไปในอากาศและเป็นปัญหาช่วงฤดูหนาว ปริมาณเนื้อถ่านไม้ที่เหลือจากการเผา ก็จะลดลงหรือหมดไป ปัจจุบันการผลิตถ่านชีวภาพซึ่งเป็นการเผาเศษไม้และเศษของเหลือทิ้งจากกิจกรรมการ เกษตรกรรม ในเตาควบคุมอุณหภูมิและการถ่ายเทของอากาศภายนอก เป็นอีกหนึ่งเทคโนโลยีที่จะสามารถลดปัญหาการทำลายทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมได้

การเพิ่มนวัตกรรมใหม่ๆ เข้ามาเป็นอีกหนึ่งสิ่งที่มีความน่าสนใจ แถบชนบทของประเทศไทยยังใช้การเผาถ่านเพื่อเป็นเชื้อเพลิงจำนวนมาก แต่จะมีมูลค่าที่น้อยและใช้เวลานาน เตาเผาถ่านมังกรไฟ 84 ได้มีงานวิจัย ลุตฟี่ สือนิ และพิสิษฎ์ มณีโชติ (2561) ทดสอบการใช้ฉนวนกันความร้อนเพื่อสกัดกั้นความร้อนจากด้านในเตาไม่ให้ความร้อนออกมาได้ง่าย เป็นการลดการสูญเสียความร้อนของเตาเผาถ่านส่งผลให้อุณหภูมิในการเผาสูงถึง 750 องศาเซลเซียส เนื่องจากการเผาถ่านด้วยอุณหภูมิสูงสามารถไล่น้ำมันดินที่มีสารทาร์ (Tar) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งที่มีอยู่ในเนื้อไม้ให้ออกไปโดยใช้ความร้อนพาออกไป นี้ไม่มีสารก่อมะเร็งและเป็นถ่านบริสุทธิ์ เมื่อนำไปใช้ก็มีความปลอดภัยมากขึ้น[3]

ผู้วิจัยเล็งเห็นความสำคัญในการศึกษาและพัฒนาเตาเผาถ่านรุ่นมังกรไฟ 84 และกระบวนการเผาถ่านให้ได้ถ่านกัมมันต์ โดยเพิ่มการกระตุ้นทางกายภาพ จากการทำให้เตาเผาถ่านนั้นเปิดออกได้โดยการยกตัวเตาขึ้น เพื่อเพิ่มอากาศและอุณหภูมิในการเผาถ่าน และเพิ่มคุณภาพของถ่านให้สูงขึ้น

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาเตาเผาถ่านกัมมันต์ที่ใช้ระยะเวลาในการเผาลดลง
2. เพื่อทดสอบคุณสมบัติถ่านกัมมันต์ที่ได้
3. เพื่อวิเคราะห์ความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์ในการผลิตถ่านกัมมันต์

ขอบเขตการวิจัย

1. ใช้เตาเผาถ่าน แบบแนวตั้ง ทำการปรับปรุงรูปแบบเตาผลิตถ่านโดยการกระตุ้นด้วยอากาศ และทำการดับด้วย ขี้เถ้า ขี้เถ้าผสมน้ำ และ น้ำ
2. วัตถุดิบในการผลิตถ่าน ไม้ไผ่ ในการทดสอบ
3. ทดสอบกระบวนการกระตุ้นด้วยอากาศด้วยระยะเวลาที่แตกต่างกัน
4. ทดสอบการดูดซับสารพาราควอตของถ่านกัมมันต์ที่ได้

ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ได้กระบวนการใหม่ในการเผาถ่านกัมมันต์
2. ได้เตาเผาถ่านที่มีคุณภาพสูงสามารถเผาถ่านได้ถึงคุณภาพของถ่านกัมมันต์
3. ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพ

คำสำคัญ

เตาเผาถ่านแบบแนวตั้ง หมายถึง เตาเผาถ่านทำจากถังโลหะทรงกระบอก เป็นเตาที่มีประสิทธิภาพสูง เตาประเภทนี้อาศัยความร้อนไล่ความชื้นในเนื้อไม้ที่มีอยู่ในเตา ทำให้ไม้กลายเป็นถ่าน นอกจากนี้โครงสร้างลักษณะปิดทำให้สามารถควบคุมอากาศได้

เตาเผาถ่านมังกรไฟ 84 หมายถึง เตาเผาถ่านขนาด 200 ลิตร แบบแนวตั้ง ทำการปรับปรุงรูปแบบเตาผลิตถ่านโดยการเพิ่มท่อทรงกรวยตรงกลางของตะแกรงชั้นวางชีวมวล เมื่อจุดไฟจากด้านล่างของเตาความร้อนจะสลายโครงสร้างทางชีวเคมีที่อยู่ในเนื้อไม้จนเกิดเป็นแก๊สเชื้อเพลิง จากนั้นความร้อนจะลอยขึ้นสู่ด้านบนท่อทรงกรวย ทำให้ความร้อนกระจายไปยังไม้ฟืนได้อย่างทั่วถึง เตาเผาถ่านมังกรไฟ 84 แบบมีฉนวนกันความร้อน หมายถึง เตาเผาถ่านขนาด 200 ลิตร แบบแนวตั้ง โดยทำการเพิ่มฉนวนกันความร้อนบริเวณรอบตัวเตา ทำให้เตาเผาถ่านมีอุณหภูมิภายในเตาสูงขึ้น โดยได้ทำการเพิ่มฉนวนกันความร้อน 4 ชนิด คือ ดินเหนียว ทราย แกลบดำ และอิฐทนไฟ

ฉนวนกันความร้อน หมายถึง วัตถุหรือวัสดุที่มีความสามารถในการสกัดกั้นความร้อนไม่ให้ส่งผ่านจากด้านใดด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งได้ง่าย การส่งผ่านความร้อนจากด้านหนึ่งไปยังอีกด้าน

หนึ่งของวัสดุใดๆ หรือการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer) ระหว่างวัตถุสามารถเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่ออุณหภูมิของวัตถุทั้งสองมีความแตกต่างกัน ทั้งทางกายภาพและฟิสิกส์

การคาร์บอนไนซ์เซชัน (Carbonization) หมายถึง กระบวนการทางไพโรไลซิส (Pyrolysis) ทำโดยการเผาวัตถุดิบในที่อับอากาศในที่อุณหภูมิต่ำกว่า 800 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์สามประเภท ได้แก่ ถ่านที่มีลักษณะสีดำเรียกว่า ชาร์ (Char) ส่วนที่เป็นของเหลวเรียกว่าทาร์ (Tar) และส่วนที่เป็นแก๊ส

ถ่าน หมายถึง ไม้ที่ได้จากการเผาไหม้ภายในสภาวะควบคุมอากาศ เพื่อกำจัดน้ำ น้ำมันดิน และสารประกอบอื่นๆ ออกไป คงเหลือถ่านที่มีคาร์บอนสูงกว่าร้อยละ 80 คุณภาพของถ่านที่ได้นั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการเผา

ถ่านกัมมันต์ คือ ถ่านที่คุณภาพสูง เผาด้วยอุณหภูมิสูงกว่า 800 องศาเซลเซียสมีความสามารถในการดูดซับสารต่างๆ ได้ เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพที่มีพื้นที่ผิวตั้งแต่ 500 – 2,000 ตารางเมตรต่อกรัม[4]

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ถ่านไม้(Charcoal) คือ ไม้ที่นำมาผ่านกระบวนการให้ความร้อนโดยอาศัยความร้อนจากเปลวไฟในสภาวะที่ปราศจากก๊าซออกซิเจนที่เป็นตัวทำให้เกิดการเผาไหม้ การลุกติดไฟ ไม้จะได้รับความร้อนจนความชื้น สารสำคัญต่าง ๆ เช่น เซลลูโลส สารเฉพาะตัวต่าง ๆ เกิดการระเหยและสลายตัวออกไปจากเนื้อไม้ ซึ่งจะเหลือส่วนที่เป็นคาร์บอน ไม้จึงเปลี่ยนเป็นสีดำซึ่งเก็บไว้ใช้งานได้นานไม่มีปัญหาจากปลวกและมอดมากินไม้ เนื่องจากสารอาหารของปลวกและมอดถูกสลายไปสามารถใช้งานเป็นเชื่อเพลิงในด้านต่าง ๆ รวมทั้งมีคุณสมบัติพิเศษในการใช้งานอื่น ๆ ได้อย่างหลากหลาย เมื่อมีการเผาด้วยอุณหภูมิสูง ถ่านที่ดีลักษณะภายนอกหักแล้วมีความมันวาว เคาะกันแล้วมีเสียงดังกังวาน เมื่อใช้งานจะไม่มีควัน โดยปกติไม้ที่มีการส่งเสริมให้เผาเป็นถ่านเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการซื้อพลังงานเชื้อเพลิง จะเป็นไม้ที่มีการตัดแต่งกิ่ง เศษไม้กิ่งไม้ต่าง ๆ ซึ่งบางครั้งไม่สามารถเลือกได้ อีกลักษณะหนึ่ง คือการเผาถ่านเชิงพาณิชย์ จะเป็นการเผาถ่านจากไม้ที่มีการปลูกเองเพื่อใช้ในการเผาถ่านโดยเฉพาะ ซึ่งปัจจุบันมีทั้งไม้ยูคาลิปตัส ซึ่งเป็นไม้เศรษฐกิจที่โตเร็ว ไม้ไผ่ ไม้มะขาม ไม้สะเดา ไม้โกงกาง ไม้จะแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ ไม้ใยสั้น เป็นไม้ที่มีเส้นใยไม่ต่อกันยาว เมื่อเผาเป็นถ่านจะจุดติดไฟยากกว่าไม้ใยยาว แต่จะสามารถเผาไหม้ได้ยาวนานกว่าจะนิยมใช้ในการปิ้งย่างทั่วไป ที่ต้องการใช้ไฟในการปิ้งย่างนาน ไม้ใยยาวเป็นไม้ที่มีเส้นใยต่อกันยาว เมื่อเผาเป็นถ่านก็จะสามารถจุดติดไฟได้อย่างรวดเร็ว แต่ระยะเวลาการเผาไหม้จะเร็วกว่าถ่านที่มากจากไม้ที่เส้นใยสั้นไม่ต่อกัน

ถ่านกัมมันต์(Activated Carbon) เป็นสารคาร์บอนที่มีโครงสร้างรูพรุนและพื้นผิวจำเพาะภายในสูง มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก ร้อยละ 87- 97 และยังมีธาตุหรือสารประกอบอื่นๆ เป็นองค์ประกอบตามวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิต ด้วยคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่มีความสามารถในการดูดซับและกักเก็บโมเลกุลของสารต่างๆ ได้ดี ถ่านกัมมันต์จึงถูกนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลาย[5]

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์

วัตถุดิบที่นำมาผลิตถ่านกัมมันต์จะต้องมีโครงสร้างหลักประกอบด้วยคาร์บอน ซึ่งมีวัสดุที่หลากหลายสามารถนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ได้ นอกจากนี้ยังต้องราคาไม่สูงมากนัก เช่น วัสดุชีวมวล ถ่านหิน วัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมบางประเภท รวมไปถึงสารประเภทพอลิเมอร์สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบเริ่มต้นสำหรับผลิตได้ ทั้งนี้การนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์จึงได้

ประโยชน์ถึงสองทางเนื่องจากเป็นการนำวัสดุที่ต้องมีการจำกัดมาใช้ให้เกิดประโยชน์และสร้างมูลค่าได้ ซึ่งเป็นแนวทางการนำทรัพยากรมาใช้อย่างคุ้มค่า

ชีวมวล

ชีวมวล(Biomass) เป็นของเหลือทิ้งทางการเกษตรถือว่าเป็นวัตถุดิบที่มีศักยภาพมากที่สุดที่สามารถนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ เนื่องจากมีปริมาณเหลือใช้เป็นจำนวนมากที่ยังไม่ได้แปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อื่น ราคาจึงไม่สูงมาก ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกร ส่งผลให้มีวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจำนวนมาก เช่น ฟางข้าว แกลบ ชานอ้อย ทะลายปาล์ม ยูคาลิปตัส ไผ่ เป็นต้น มีกลไกการผลิตที่รวดเร็วและมีความสามารถในการดูดซับที่เหมาะสม นำมาฟื้นสภาพใหม่ได้และนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง[6]

ถ่านหิน

ถ่านหิน(Coal) คือ หินแร่ธรรมชาติที่เกิดจากการทับถมกันของซากพืชพันธุ์ไม้เป็นระยะเวลาหลายร้อยล้านปี ซึ่งได้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผิวโลก เช่น แผ่นดินไหว ภูเขาไฟระเบิด หรือ มีการทับถมของตะกอนมากขึ้น ส่งผลให้ซากพืชเหล่านั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงกลายเป็นถ่านหินชนิดต่างๆ ซึ่งเป็นสารประกอบของคาร์บอน(Carbonaceous material) เนื่องจากมีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนักหรือ ร้อยละ 70 โดยปริมาตร ส่งผลให้มีความสามารถในกรติดไฟได้ ลักษณะของถ่านหินนั้นจะมีสีน้ำตาลอ่อนไปจนถึงสีดำ น้ำหนักเบา มีทั้งผิวด้านและผิวมัน ธาตุที่เป็นส่วนประกอบสำคัญของถ่านหินมีทั้งหมด 4 อย่าง ดังนี้ คาร์บอน ไนโตรเจน ไฮโดรเจน และออกซิเจน โดยคุณภาพของถ่านหินนั้นขึ้นอยู่กับจำนวนคาร์บอนที่สูงและมีธาตุอื่นๆ ต่ำ จะให้ค่าความร้อนสูง

ในระบบ American Society for Testing and Materials (ASTM) ได้จำแนกถ่านหินตามลำดับชั้น(Rank) ซึ่งมีความชัดเจนต่อการใช้งาน โดยจะแบ่งเป็น 4 ลำดับ

ลิกไนต์(Lignite) เป็นถ่านหินที่มีสีน้ำตาลผิวด้าน เมื่อติดไฟมีควันแบะเถ้ามาก มีซากพืชปนอยู่จำนวนมาก มีปริมาณออกซิเจนค่อนข้างสูง และปริมาณความชื้นสูงถึงร้อยละ 30-70 เป็นถ่านหินที่เหมาะแก่การนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า บ่มใบยาสูบ และเป็นถ่านหินที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง

ซับบิทูมินัส(Subbituminous) เป็นถ่านหินที่ใช้เวลาในการเกิดนานกว่าลิกไนต์ มีสีน้ำตาลถึงสีดำคล้ายขี้ผึ้ง ผิวมีทั้งด้านและเป็นมัน มีทั้งเนื้ออ่อนและเนื้อแข็ง มีความชื้นร้อยละ 10 มีคาร์บอนสูงกว่าลิกไนต์ เป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพเหมาะสมในการผลิตกระแสไฟฟ้าและใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม

บีทูมินัส(Bituminous) เป็นถ่นาหินที่ใช้เวลาในการเกิดนานกว่าบีทูมินัส เนื้อแน่นอนมีลักษณะแข็ง มีสีน้ำตาลถึงสีดำ ประกอบด้วยชั้นถ่านหินสีดำมันวาวมีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 69-86

และมีความชื้นร้อยละ 1.5-7 ใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อการถลุงโลหะ และเป็นวัตถุดิบเพื่อเปลี่ยนเป็นเชื้อเพลิงอื่นๆ

แอนทราไซต์(Anthracite) เป็นถ่านหินที่ใช้เวลาในการเกิดนานกว่าบีทูมินัส มีลักษณะดำเป็นเงามีความวาวสูง มีรอยแตกเว้าแบบก้นหอย มีปริมาณคาร์บอนสูงถึงร้อยละ 86 ขึ้นไป มีปริมาณความชื้นต่ำประมาณร้อยละ 2-5 มีความร้อนสูงติดไฟยาก เมื่อติดไฟให้เปลวไฟสีน้ำเงิน ไม่มีควัน ใช้ในกระบวนการกรองน้ำและเป็นเชื้อเพลิงในบางอุตสาหกรรม

เตาเผาถ่าน

เตาเผาถ่านแบบดั้งเดิม

ในอดีตที่ยังไม่มีไฟฟ้าและแก๊สหุงต้มนั้น ชาวบ้านมีการหาเก็บฟืนมาใช้หุงต้ม เมื่อเกิดฝนตกจะทำให้ฟืนเปียกส่งผลให้เกิดความยากลำบากในการหุงต้ม ชาวบ้านจึงมีการนำไม้ชนิดต่างๆ มาทำการเผาให้เป็นถ่าน โดยทั่วไปมีการใช้เตาเผาถ่านหลากหลายชนิด โดยรูปแบบของเตาเผาถ่านเหล่านี้ได้ถูกปรับเปลี่ยนไปตามสถานการณ์ สภาพพื้นที่และสิ่งแวดล้อม บางชนิดพบเห็นได้น้อยลง แต่บางชนิดยังพบเห็นอยู่จนถึงปัจจุบัน ดังนี้ต่อไปนี้

เตาหลุมกลบดิน

เตาหลุมกลบดิน หรือเตาหลุมผี สามารถพบเห็นโดยทั่วไปในพื้นที่ชนบทของประเทศไทย ซึ่งมีการใช้งานตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เนื่องจากเป็นเตาที่ใช้ระยะเวลานานในการเผา ทั้งยังมีควันในกระบวนการเยอะ ทำให้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมาก มีกระบวนการสร้างเตาด้วยการขุดหลุมและวางไม้ที่ต้องการลงในหลุม หลังจากนั้นทำการใช้ดินกลบ ระยะเวลาในการเผาขึ้นอยู่กับปริมาณไม้ในแต่ละรอบ โดยใช้ระยะเวลาประมาณ 7 วันต่อรอบ ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพต่ำ

ภาพ 1 เตาหลุมผี และเตาแกลบ [1]

เตาลาน

เตาลาน เตาชนิดนี้เป็นเตาเป็นการเผากลางแจ้งเหมาะสมหรับการเผาไม้จำนวนมากในพื้นที่โล่ง ทางภาคใต้ของประเทศไทยมีการใช้งานเตาประเภทนี้อย่างมากในการเผาไม้ยางพารา โดยการนำไม้ที่ต้องเผาถ่านมาวางกองบนลานโล่ง และมีไม้หมอนรองรับด้านล่าง เพื่อให้มีช่องอากาศถ่านเทใต้กองไม้ที่จะเผาเป็นถ่าน หลังจากนั้นควบคุมอากาศในการเผาถ่านด้วยการใช้ขี้เลื่อยกลบคลุมกองไม้ การเผาถ่านด้วยเตาลานนั้นสามารถเผาได้ในปริมาณมาก ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของกองไม้ที่เป็นวัตถุดิบ

เตาดิน

เตาดิน หรือเตาดินเหนียวก่อ นั้นสามารถพบได้ทั่วไปในชนบทของประเทศไทย มีลักษณะเตาคล้ายวงรีหรือหรือจอมปลวก โดยผนังเตาส่วนหนึ่งจนอยู่บนดิน อีกส่วนมีการขุดลึกลงไปต่ำกว่าระดับผิวดิน เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและลดปริมาณดินเหนียวที่ต้องนำมาใช้ทำผนังเตา ซึ่งไม่จะเป็นต้องใช้ดินเหนียวล้วน อาจใช้ดินลูกรังหรือใช้ทรายหยาบปนได้เล็กน้อย เพื่อป้องกันผนังเตาเกิดการแตกร้าวระหว่างการเผา เตาชนิดนี้ไม่มีค่าวัสดุอุปกรณ์ในการสร้างใดๆ เลย หรือต้นทุนในการก่อสร้างต่ำมาก เนื่องจากใช้ดินเหนียวที่หาได้ตามพื้นที่ทั่วไป คุณภาพของถ่านที่ได้จะมีการสูญเสียมากกว่าเตาชนิดอื่น มีอายุการใช้งานสั้น โดยมีอายุการใช้งานเพียง 2-3 ครั้ง ไปจนถึง 10 ปี ขึ้นอยู่กับวิธีการก่อสร้างและการดูแลรักษา เช่น หากเตามีความหนาเกินไป จะทำให้เตาคลายความร้อนได้ช้า ใช้ระยะเวลาในการเผาถ่านเพิ่มขึ้น และทำให้เตาพังได้ง่าย เป็นต้น

ภาพ 2 เตาดิน หรือเตาดินเหนียว [1]

เตาอิฐก่อ

เตาอิฐก่อ มีลักษณะคล้ายเตาดิน แต่จะเตี้ยกว่าเตาดินเล็กน้อย แต่จะมีอายุการใช้งานที่นานกว่า เนื่องจากผนังเตาก่อด้วยอิฐมอญ อายุการใช้งานประมาณ 1-10 ปี กระบวนการเผาถ่านของเตาประเภทนี้ใช้ระยะเวลาเฉ,ยประมาณ 4-5 วัน ได้ปริมาณถ่านอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งเตา ซึ่งให้ผลผลิตปริมาณสูง รูปร่างลักษณะถ่านที่ออกมาดูดีมีน้ำหนักมาก ชาวบ้านมักเล่าว่าถ่านที่ได้จากเตาอิฐมีคุณภาพดีกว่าการเผาถ่านด้วยเตาแบบอื่นๆ เนื่องจากถ่านที่ได้นั้น เนื้อไม้แน่นเคาะแล้วเสียงดังกังวานไม่แตกง่าย ลักษณะเด่นของเตาประเภทนี้คือ ตัวเตาผนึกแน่น มีปล่องควันเพียงจัดเดียวเพื่อความสะดวกในการควบคุมอุณหภูมิ มีช่องใส่ฟืนหน้าเตาแยกจากช่องอากาศเข้า ตัวเตามีหลายขนาด ซึ่งสามารถมีความจุมากถึง 20 ลูกบาศก์เมตร [6] เนื่องจากเตาเผาถ่านประเภทนี้สามารถผลิตถ่านต่อครั้งได้ปริมาณมาก จึงถูกใช้งานอย่างมากเพื่อการค้าและในงานอุตสาหกรรม เช่น ใช้เผาถ่านจากไม้ยูคาลิปตัสและไม้โกงกาง เป็นต้น แต่เตาอิฐก่อนั้นมีการลงทุนก่อสร้างสูงกว่าเตาดินเนื่องจากต้องใช้อิฐในการก่อขึ้นรูปเตา หลังจากนั้นต้องนำดินเหนียวเป็นตัวประสานก้อนอิฐให้ติดกันเป็นรูปทรงของเตา การก่อสร้างนั้นไม่สามารถใช้ปูนซีเมนต์ได้ เนื่องจากการขยายตัวของอิฐกับปูนนั้นมีความแตกต่างกันมาก เมื่อเตาร้อนจะทำให้จะทำให้เตาเผาแตกหรือร้าวได้ จึงมีการใช้ดินเหนียวที่มีการขยายตัวน้อยแทนปูน ส่งผลให้ตัวเตามีรอยร้าว รอยแตกน้อย อายุการใช้งานของตัวเตายาวนานขึ้น

ภาพ 3 เตาอิฐก่อ [7]

เตาเผาถ่านประสิทธิภาพสูง

เตาเผาถ่าน 200 ลิตร แบบแนวนอน

เตาเผาถ่าน 200 ลิตร เป็นเตาที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าเตาเผาแบบอดีต เตาประเภทนี้ อาศัยความร้อนไล่ความชื้นในเนื้อไม้ที่มีอยู่ในเตา ทำให้ไม้กลายเป็นถ่านหรือเรียกว่า กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน นอกจากนี้โครงสร้างลักษณะปิดทำให้สามารถควบคุมอากาศได้ จึงไม่มีการลุกติดไฟของเนื้อไม้ ผลผลิตที่ได้จึงเป็นถ่านที่มีคุณภาพ ขี้เถ้าน้อยและผลพลอยได้จากกระบวนการเผาถ่านอีกอย่างหนึ่งคือน้ำส้มควันไม้ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในด้านการเกษตรได้[8]

ถ่านไม้ที่ได้มีข้อดีเหนือไม้ฟืนคือไม่มีควัน ถ่านไม้ยังมีประโยชน์ในการกำจัดกลิ่นอันเนื่องมาจากคุณสมบัติที่มีรูพรุนมากมาย ทำให้สารระเหยต่างๆ เข้าไปติดอยู่ภายใน ข้อดีของถ่านที่สำคัญอีกประการหนึ่ง คือ เป็นแหล่งเชื้อเพลิงที่ให้พลังงานได้ไม่มีวันหมดสามารถปลูกไม้ทดแทน ซึ่งเป็นแนวคิดการพัฒนาทางด้านพลังงานอย่างยังยืน เพราะไม้เป็นแหล่งพลังงานที่สามารถปลูกทดแทนได้หากมีการจัดการอย่างถูกต้องและเหมาะสม

ภาพ 4 เตาเผาถ่าน 200 ลิตร แบบแนวนอน

เตาเผาถ่าน 200 ลิตร แบบแนวตั้ง

ซึ่งมีการพัฒนาเป็นระบบความร้อนหมุนเวียนแบบชีวมวลซึ่งเหมือนกับเตาอิวาเตะที่มีการจุดไฟจากข้างล่างของเตา แล้วให้ความร้อนจากการเผาไหม้ข้างล่างเป็นตัวช่วยในการหมุนเวียนภายในแล้วให้ความร้อนลอยขึ้นด้านบนถัง ก่อให้เกิดการกระจายความร้อนไปยังไม้ฟืนได้อย่างทั่วถึงทั้งด้านหน้าเตา ด้านหลังของเตา ด้านล่างของเตา และด้านบนของเตา ทำให้เตามีอุณหภูมิในการเผาประมาณ 300 องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิด้านในทำให้สามารถเผาถ่านได้เร็วกว่าปกติใช้เวลาเพียง 40 นาที (จากเดิมต้องใช้เวลาประมาณ 5-6 ชั่วโมง) เป็นการเผาถ่านแบบเตาอบและไล่ไอน้ำ สามารถเผาได้แม้กระทั่งใบไม้ เศษใบหญ้ากลายเป็นถ่านได้ นอกจากนี้ยังทำให้ได้น้ำส้มควันไม้ด้วย

ภาพ 5 เตาเผาถ่านขนาด 200 ลิตรแบบแนวตั้ง [9]

กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์

การเตรียมวัตถุดิบ

ในการผลิตถ่านกัมมันต์ต้องมีการเตรียมวัตถุดิบให้เหมาะสม เพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณลักษะหรือคุณสมบัติให้ได้ตามที่ต้องการ โดยมีปัจจัยที่ควรพิจารณา ดังนี้

ความชื้น

ในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์นั้น การควบคุมความชื้นนั้นมีผลต่อกระบวนการทำให้เป็นถ่าน เนื่องจากยิ่งมีความชื้นต่ำจะเป็นการลดระยะเวลา ควัน และยังมีช่วยให้ใช้พลังงานลดลงอีกด้วย กระบวนการลดความชื้นสามารถทำได้หลายวิธี เช่นการอบด้วยเตาอบ หรือการตากแดดเป็นวิธีที่สะดวกและไม่มีค่าใช้จ่ายในการเตรียม

ขนาด

ขนาดของวัตถุดิบที่นำมาผลิตเป็นอีกปัจจัยที่มีผลในการกระจายตัวของความร้อนที่เข้าไปยังวัตถุดิบได้อย่างเหมาะสม ในกระบวนการคาร์บอนไนซ์เซชั่น เช่น การตัดไม้ให้มีขนาดใหญ่เกินไป การลดขนาดของถ่านหินเป็นต้น

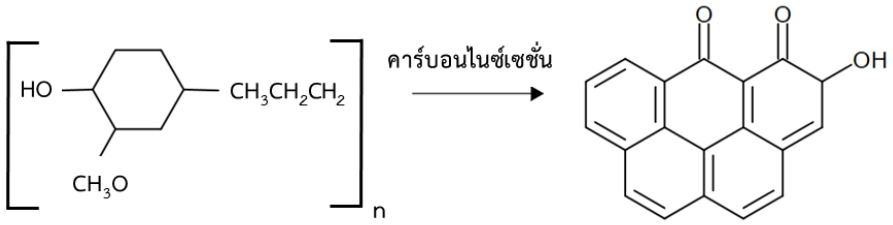
การเก็บวัตถุดิบ

เพื่อควบคุมคุณภาพของวัตถุดิบก่อนกระบวนการผลิต จึงควรมีการเก็บวัตถุดิบอย่างมิดชิด เพื่อป้องกันความชื้นอันเนื่องมาจากฝนหรือเก็บในพื้นที่ที่มีอากาศถ่ายเทสะดวกเพื่อป้องกันการติดไฟด้วยตัวเองในกรณีเก็บวัตถุดิบไว้นานในภาวะอากาศร้อน

การคาร์บอนไนซ์เซชั่น

กระบวนการคาร์บอนไนซ์เซชั่น หรือกระบวนการทำให้เกิดถ่าน เป็นกระบวนการไพโรไลซิส คือกระบวนการเผาไหม้ที่ภาวะไร้อากาศ เพื่อเพิ่มสัดส่วนคาร์บอนของสารอินทรีย์ ทั้งยังได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวและก๊าซออกมาด้วย โดยโครงสร้างหลักที่เหลือของชีวมวลจากวัตถุดิบหลักกลายเป็นโครงสร้างของถ่านชาร์ ส่วนโครงสร้างโมเลกุลที่มีขนาดเล็กกว่าจะกลั่นตัวออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้แก่ น้ำ แอมโมเนีย น้ำมันทาร์และก๊าซต่างๆ โดยการใช้กระบวนการทางความร้อนในการเผาเพื่อไล่สารประกอบภายในวัตถุดิบ

แสดงดังภาพที่ 4 เมื่อความร้อนไล่ความชื้น และสารระเหยได้ต่างๆ ออกจากวัตถุดิบ ทำให้เกิดเป็นลิตภัณฑ์ของแข็งสีดำ เรียกว่า ถ่านชาร์ ส่วนที่หลุดออกมา คือก๊าซและน้ำมันทาร์ กระบวนการคาร์บอนไนซ์เซชั่นจึงเป็นการเพิ่มร้อยละคาร์บอนให้สูงขึ้น



(ลิกนิน)

ภาพ 6 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในการคาร์บอนไนซ์เซชั่น

กระบวนการคาร์บอนไนซ์เซชั่นจัดว่าเป็นขั้นตอนสำคัญในการผลิตถ่านกัมมันต์ เนื่องจากเป็นกระบวนการที่จะทำให้เกิดโครงสร้างรูพรุน โดยระหว่างกระบวนการคาร์บอนไนซ์เซชั่น ธาตุและองค์ประกอบต่างๆ จะถูกระเหยออกไปด้วยกระบวนการทางความร้อน ในรูปแบบของแก๊สและทาร์ จากนั้นจะได้ถ่านที่มีการจัดตัวของโครงสร้างผลึกที่ไม่เป็นระเบียบซึ่งจะเกิดช่องว่างรูพรุนระหว่างผลึก เนื่องจากสารอนินทรีย์ที่เป็นทาร์ซึ่งอุดรูพรุนพวกนั้นได้ถูกกำจัดออกไป กระบวนการคาร์บอนไนซ์เซชั่นสามารถแบ่งได้ 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. ช่วงการไล่ความชื้น หรือเรียกว่า การดีไฮเดรชัน (Dehydration) เป็นระยะแรกของการเผาโดยการให้ความร้อนเพื่อระเหยน้ำออกจากวัตถุดิบอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 27-200 องศาเซลเซียส

2. ช่วงกระบวนการไพโรไรซิส โดยใช่ช่วงนี้จะเกิดก๊าซและน้ำมันทาร์อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 200 – 500 องศาเซลเซียส

3. ช่วงของการทำถ่านให้บริสุทธิ์ เรียกว่ารีไฟน์เมนท์ (Refinement) คือ การสลายน้ำมันดินที่ยังคงเหลืออยู่ภายในไม้ให้หมดอยู่ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 500 – 900 องศาเซลเซียส

กระบวนการคาร์บอนไนซ์เซชั่น ในสภาวะที่เหมาะสมจะได้ถ่านที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการมีตัวแปรที่สำคัญ ดังนี้

1. อุณหภูมิและเวลา

อุณหภูมิมีผลต่อปริมาณของผลิตภัณฑ์มากที่สุด และเป็นปัจจัยที่สำคัญของกระบวนการคาร์บอนไนซ์เซชั่น เมื่ออุณหภูมิของกระบวนการเพิ่มขึ้น น้ำหนักของผลผลิตถ่านนั้นจะลดลง ทั้งนี้การเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มพลังงานในการสลายพันธภายในโครงสร้างของวัตถุดิบอีกด้วย

2. อัตราการให้ความร้อน

อัตราการให้ความร้อน มีผลต่อคุณสมบัติของถ่าน ปริมาณของสารระเหยและน้ำมันทาร์ การเพิ่มอัตราการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วส่งผลให้สารระเหยภายในวัตถุดิบถูกปลดปล่อยอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ถ่านที่ได้มีปริมาณรูพรุนขนาดใหญ่ เนื่องจากกระบวนการคาร์บอนไนซ์เซชั่นด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว ทำให้การเรียงตัวของคาร์บอนมีความเป็นระเบียบน้อยลง จึงเกิดช่องว่างเป็นรูพรุนขนาดใหญ่กว่า อีกทั้งความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าถ่านที่ได้จากการให้ความร้อนด้วยอัตราที่ต่ำกว่า

3. ตัวกลางในการทำปฏิกิริยา

ตัวกลางในการทำปฏิกิริยาที่เป็นก๊าซจะมีผลกระทบต่อปฏิกิริยาคาร์บอนไนซ์เซชั่น โดยไอและก๊าซที่เกิดระหว่างช่วงการไพโรไรซิสถูกพาออกไปอย่างรวดเร็ว โดยก๊าซที่ใช้เป็นตัวกลางเช่น ไนโตรเจน (เป็นก๊าซเฉื่อยต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้ของคาร์บอน) และก๊าซจากการเผาไหม้ ในกรณีที่ใช้ตัวกลางในการเผาไหม้เป็นก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ ปริมาณถ่านที่ได้จะน้อยกว่าการใช้ไนโตรเจนเป็นตัวกลาง แต่จะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับตัวกระตุ้นสูงกว่า

4. ธรรมชาติของวัตถุดิบ

วัตถุดิบแต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน มีภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการคาร์บอนไนซ์เซชั่นที่แกตต่างกัน โดยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวัตถุดิบที่ต่างกันจึงต้องใช้วิธีกระตุ้นที่ต่างกัน ทั้งนี้เพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพดีที่สุดและเหมาะสมกับการนำไปใช้

ถ่านชาร์เป็นผลผลิตที่ได้มาจากกระบวนการคาร์บอไนซ์เซชั่น (Carbonization) โดยกระบวนการคาร์บอไนซ์เซชั่นเป็นกระบวนการนำวัตถุดิบมาให้ความร้อนในสภาวะที่มีการจำกัดอากาศ ซึ่งผลิตภัณฑ์หลักที่ได้คือ ถ่าน และมีผลิตภัณฑ์รองคือ ของเหลว และแก๊สบางชนิด

การกระตุ้น

การกระตุ้น(Activation) คือ การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของโครงสร้างคาร์บอนด้วยการเพิ่มพื้นผิวให้มากขึ้นโดยการทำให้เกิดรูพรุนมากขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสารและเพิ่มคุณภาพของถ่านกัมมันต์ มีทั้งกระบวนการที่เปลี่ยนวัตถุดิบไปเป็นถ่านกัมมันต์โดยตรงและกระบวนการเปลี่ยนวัตถุดิบไปเป็นถ่านชาร์ จากนั้นจะเปลี่ยนเป็นถ่านกัมมันต์ โดยทั่วไปการกระตุ้นทำได้ 2 วิธี คือการกระตุ้นทางกายภาพ และการกระตุ้นทางเคมี [5] ดังนี้

1. การกระตุ้นทางกายภาพ

การกระตุ้นทางกายภาพ(Physical activation) คือการเพิ่มปริมาตรรูพรุนและพื้นผิวโดยปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชั่น ด้วยก๊าซออกซิไดซ์ที่ช่วงอุณหภูมิ 700 ถึง 1000 ^{o}C ก๊าซที่ใช้โดยทั่วไปคือ คาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และอากาศ โดยอาจจะใช้ชนิดใดชนิดหนึ่งหรือใช้ก๊าซผสมของก๊าซดังกล่าวก็ได้[6]

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์เป็นตัวดูดซับที่ยังไม่ดีพอต้องผ่านขั้นตอนการกระตุ้นเพื่อให้ได้ถ่านมีการดูดซับที่สูง โดยการกระตุ้นซึ่งเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างถ่านกับก๊าซที่เป็นตัวออกซิไดซ์ดังตัวอย่าง

$$H_2O + C_x \longrightarrow H_2 + CO + C_{x-1} \quad (800\text{-}900\ ^{o}C) \quad (1)$$

$$CO_2 + C_x \longrightarrow 2CO + C_{x-1} \quad (800\text{-}900\ ^{o}C) \quad (2)$$

$$O_2 + C_x \longrightarrow 2CO + C_{x-2} \quad (800\text{-}900\ ^{o}C) \quad (3)$$

$$O_2 + C_x \longrightarrow CO_2 + C_{x-1} \quad (\text{ต่ำกว่า } 600\ ^{o}C) \quad (4)$$

ที่ผิวของคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ โดยมีการจัดเรียงตัวใหม่ในโครงสร้างซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ ปฏิกิริยาการกระตุ้นนี้อาจใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียวแต่ต้องใช้ความร้อนสูงถึง 1200 ^{o}C และพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้มีคุณภาพต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตโดยการกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ หรือไอน้ำกระตุ้นที่ความร้อนสูงเช่นกัน ข้อดีของการกระตุ้นวิธีทางกายภาพนี้คือไม่มีสารเคมีตกค้าง แต่มีข้อเสียคือต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่ากระตุ้นด้วยสารเคมี [6]

การกระตุ้นทางกายภาพ มีกระบวนการเตรียมถ่านกัมมันต์ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน เริ่มด้วยกระบวนการคาร์บอนไนซ์เชชันและตามด้วยกระบวนการกระตุ้นถ่านชาร์ที่อุณหภูมิภายใต้สภาวะของ

ก๊าซออกซิไดซ์ที่เหมาะ เช่น ไอน้ำ อากาศ คาร์บอนไดออกไซด์ หรือของผสมของก๊าซทั้งสาม แสดงดังตารางที่ 1

ตาราง 1 การกระตุ้นทางกายภาพของวัตถุดิบทางการเกษตร

การกระตุ้น	วัตถุดิบทางการเกษตร
ไอน้ำ	แกลบ ซังข้าวโพด เปลือกเมล็ดทานตะวัน เปลือกข้าวโพด ต้นข้าวโพด ฟางข้าว
คาร์บอนไดออกไซด์	แกลบ ชานอ้อย
อากาศหรือของผสม	เปลือกถั่วลิสง

2. การกระตุ้นทางเคมี

การกระตุ้นทางเคมี (Chemical Activation) เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับผลิตถ่านกัมมันต์ โดยการผลิตถ่านกัมมันต์ที่ใช้การเกิดปฏิกิริยาเคมีในการระตุ้น ซึ่งอัตราส่วนของสารกระตุ้นหรือความเข้มข้นและอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่มีผลต่อพื้นที่ผิว การกระจายตัวของรูพรุนและโครงสร้างของรูพรุนของถ่านกัมมันต์ การกระตุ้นทางเคมี จะแช่วัตถุดิบกับสารเคมีในปริมาณที่เหมาะสมก่อน หลังจากนั้นจะทำการไพโรไลซิส โดยผลิตภัณฑ์ถ่านกัมมันต์ที่ได้จะต้องนำมาล้างขจัดการเคมีที่ยังตกค้างอยู่ ทั้งนี้ สารที่ใช้ในการกระตุ้นแต่ละชนิดจะให้เกิดลักษณะของรูพรุนที่แตกต่างกันรวมไปถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น ซึ่งในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะใช้กรดฟอสฟอริก และสารพวกอัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ เป็นต้น ซึ่งข้อดีของวิธีนี้คือการใช้อุณหภูมิเพียง 400 – 600 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ไม่สูงมากนัก แต่ข้อเสียของการกระตุ้นทางเคมีคือ มีสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ จึงต้องใช้เวลาและค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมีตกค้างดังกล่าว อีกทั้งยังต้องใช้อุปกรณ์ชนิดพิเศษที่มีความต้านทานการกัดกร่อนสูง เพราะสารเคมีที่ใช้สามารถทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์เชิงอุตสาหกรรม

2.1 การกระตุ้นด้วยสังกะสีคลอไรด์

2.2 การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก

2.3 การกระตุ้นด้วยกรดไนตริก

2.4 การกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมคาร์บอเนต

2.5 การกระตุ้นด้วยแอมโมเนียมคลอไรด์

2.6 การกระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริก

2.7 การกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

ตาราง 2 ข้อดีข้อเสียของกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นทางกายภาพและทางเคมี

วิธีการกระตุ้น	ข้อดี	ข้อเสีย
ทางกายภาพ	- ไม่มีสารเคมีตกค้าง - ต้นทุนในการผลิตต่ำ	- ใช้อุณหภูมิสูง
ทางเคมี	- ใช้อุณหภูมิต่ำ	- มีสารเคมีตกค้าง - ต้องมีการล้างสารคเมี - ต้นทุนการผลิตสูง

คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์

หลังจากการผลิตถ่านกัมมันต์จากกระบวนการคาร์บอนไนซ์ และการกระตุ้นเพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ออกมา หลังจากนั้นสามารถทำการวิเคราะห์คุณสมบัติได้จาก 2 กระบวนการ คือ วิธีการวิเคราะห์โดยประมาณ(Proximate analysis) และวิธีการวิเคราะห์ธาตุ(Ultimate analysis) เพื่อตรวจสอบคุณภาพของถ่านกัมมันต์ โดยมีการวิเคราะห์ปริมาณสารระเหย คาร์บอนคงตัว และปริมาณเถ้า นอกจากนี้ยังมีการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ เช่น พื้นที่ผิวจำเพาะ ค่าความหนาแน่นรวม ค่าความแข็ง และสมบัติทางเคมี เช่น การดูดซับไอโอดีน การดูดซับเมทีลีนบลู เพื่อกำหนดคุณภาพของถ่านกัมมันต์ให้เป็นไปตามมาตรฐานสากล

การวิเคราะห์โดยประมาณ

การวิเคราะห์โดยประมาณ(Proximate analysis) เป็นการวิเคราะห์คุณสมบัติ ปริมาณความชื้น สารระเหย คาร์บอนคงตัว และปริมาณเถ้า ซึ่งมีวิธีการวิเคราะห์ ดังนี้

ความชื้น(Moisture, M)

ปริมาณความชื้นสามารถหาได้โดยการเผาถ้วยกระเบื้องในเตาเผาที่ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที แล้วทิ้งไว้ในโถดูดความชื้นให้เย็น และชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของถ้วยกระเบื้องหลังจากนั้นใส่ตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ประมาณ 2 กรัม (ความละเอียดที่ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) ลงในถ้วยกระเบื้องบันทึกน้ำหนักตัวอย่างรวมถ้วยกระเบื้องก่อนอบแห้ง จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ (ใช้เวลาประมาณ 3 ชั่วโมง) แล้วทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งและ

บันทึกน้ำหนักที่ได้ของตัวอย่างหลังอบแห้ง รวมน้ำหนักของถ้วยกระเบื้อง(ASTM D 2867-95,1996) [5]

คำนวณค่าความชื้น ดังสมการ

$$\text{ความชื้น(ร้อยละโดยน้ำหนัก)} = \left(\frac{C - D}{C - B}\right) \times 100 \qquad (5)$$

เมื่อ B คือ น้ำหนักของถ้วยกระเบื้อง

C คือ น้ำหนักของถ้วยกระเบื้องและตัวอย่างก่อนอบแห้ง

D คือ น้ำหนักของถ้วยกระเบื้องและตัวอย่างที่อบแห้ง

ปริมาณเถ้า(Ash)

การหาปริมาณเถ้าสามารถทำได้โดย นำถ่านกัมมันต์มาอบแห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เพื่อไล่ความชื้น แล้วหาน้ำหนักแห้งของถ่านกัมมันต์ จากนั้นเผาด้วยอุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส ในสภาพออกซิเดชันเพื่อกำจัดคาร์บอนให้หมด สารที่เหลือหลังจากการเผาจะเป็นเถ้าที่ไม่สลายทางความร้อน [5]

$$\text{ปริมาณเถ้า} = \frac{\text{น้ำหนักของแข็งหลังเผา (กรัม)}}{\text{น้ำหนักคาร์บอนเริ่มต้น (กรัม)}} \text{x}100 \qquad (6)$$

ปริมาณสารระเหย(Volatile matter)

การวิเคราะห์ปริมาณสารระเหย(Volatile matter) (ASTM 5832-95, 1996) สามารถทำได้โดย เผาถ้วยกระเบื้องในเตาเผาที่ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้นแล้วชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของถ้วยกระเบื้อง และใส่ตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ประมาณ 2 กรัม (ชั่งความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง) ลงในถ้วยกระเบื้อง บันทึกน้ำหนักที่ได้ของตัวอย่างก่อนอบแห้ง รวมน้ำหนักของถ้วยกระเบื้อง จากนั้นนำไปเผาในเจาความร้อนสูงที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ในสภาพไร้ออกซิเจนเป็นเวลา 7 นาที แล้วทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งและบันทึกน้ำหนักของตัวอย่างที่ได้หลังเผารวมน้ำหนักของถ้วยกระเบื้อง [5]

$$\text{น้ำหนักที่สูญเสีย(C), ร้อยละโดยน้ำหนัก} = \frac{A - B}{A} \times 100 \qquad (7)$$

เมื่อ A คือ น้ำหนักของตัวอย่าง
B คือ น้ำหนักของตัวอย่างหลังเผา

สารระเหย(ร้อยละโดยน้ำหนัก) = C – D – E (8)

เมื่อ C คือ ร้อยละน้ำหนักที่สูญเสีย
D คือ ร้อยละความชื้น
E คือ ร้อยละเถ้า

ปริมาณคาร์บอนคงตัว

คาร์บอนคงตัว(Fixed carbon) หาได้จากการดุลมวลสาร หลังจากหักปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย และปริมาณเถ้า โดยการคำนวณผลรวมร้อยละของความชื้น เถ้าและสารระเหยง่าย หักออกจาก 100 ดังนั้นค่าคาร์บอนคงตัวสามารถคำนวณได้ดังสมการ(ASTM D 3172-89, 1994) [5]

คาร์บอนคงตัว(ร้อยละ) = 100 – ปริมาณเถ้า – ปริมาณสารระเหย – ค่าความชื้น (9)

การดูดซับไอโอดีน

การดูดซับไอโอดีน (Iodine adsorption) เป็นการวิธีการหาความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ โดยใช้สารไอโอดีนซึ่งมีโมเลกุลขนาดเล็ก จึงบ่งบอกถึงปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กของคาร์บอนที่มีขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 นาโนเมตร และความสามารถในการดูดซับโมเลกุลที่มีน้ำหนักต่ำและขนาดเล็ก โดยการดูดซับไอโอดีแสดงเป็นเลขไอโอดีน(Iodine number) ในหน่วยมิลลิกรัมของไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อกรัมคาร์บอน(mg/g)

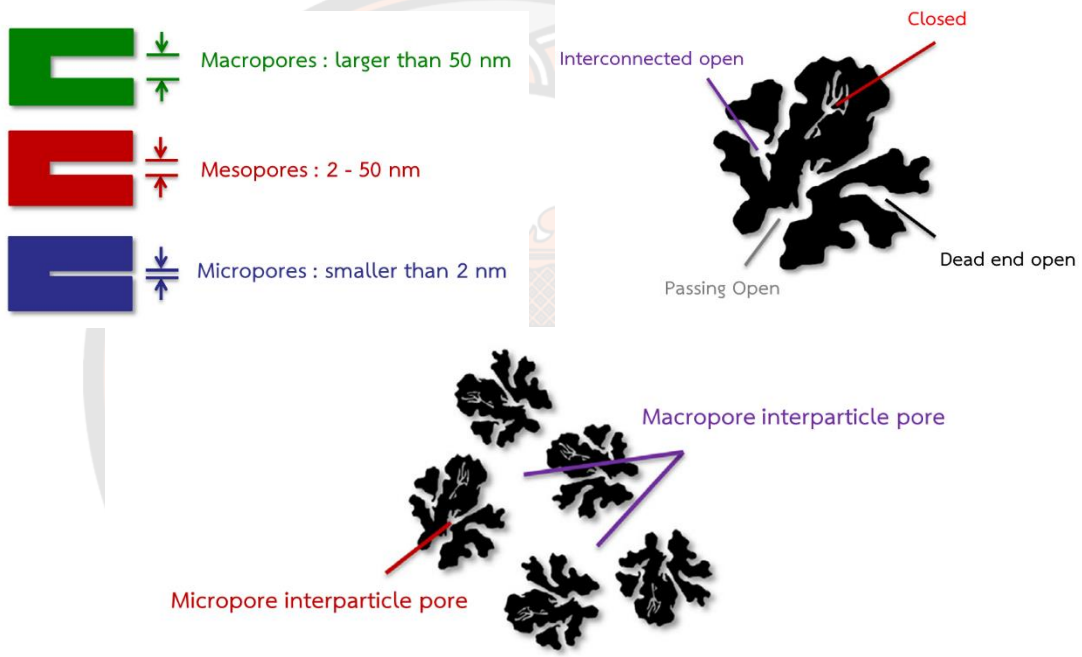
โครงสร้างรูพรุน

โครงสร้างรูพรุนเป็นสมบัติหลักของถ่านกัมมันต์ เกิดขึ้นจากรูพรุนขนาดต่างๆ ที่สามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มหลัก ตามการแยกประเภทของ International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) คือ

(1) รูพรุนขนาดเล็ก (micropores) มีความกว้างรูพรุนน้อยกว่า 2 นาโนเมตร เหมาะสำหรับใช้ในการดูดซับแก๊สและไอเสีย

(2) รูพรุนขนาดกลาง (mesopores) มีขนาดความกว้างรูพรุน ตั้งแต่ 2.0 นาโนเมตร ถึง 50 นาโนเมตร เหมาะสำหรับใช้ในการดูดซับสารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ เช่น การฟอกสี

(3) รูพรุนขนาดใหญ่ (macrospores) มีความกว้างรูพรุนมากกว่า 50 นาโมเตร ซึ่งไม่มีความสำคัญในการดูดซับสารต่างๆ แต่มีความเหมาะสมในการส่งผ่านอนุภาคที่ถูกดูดซับไปยังรูพรุนขนาดเล็ก ซึ่งส่งผลต่อความเร็วในการดูดซับ



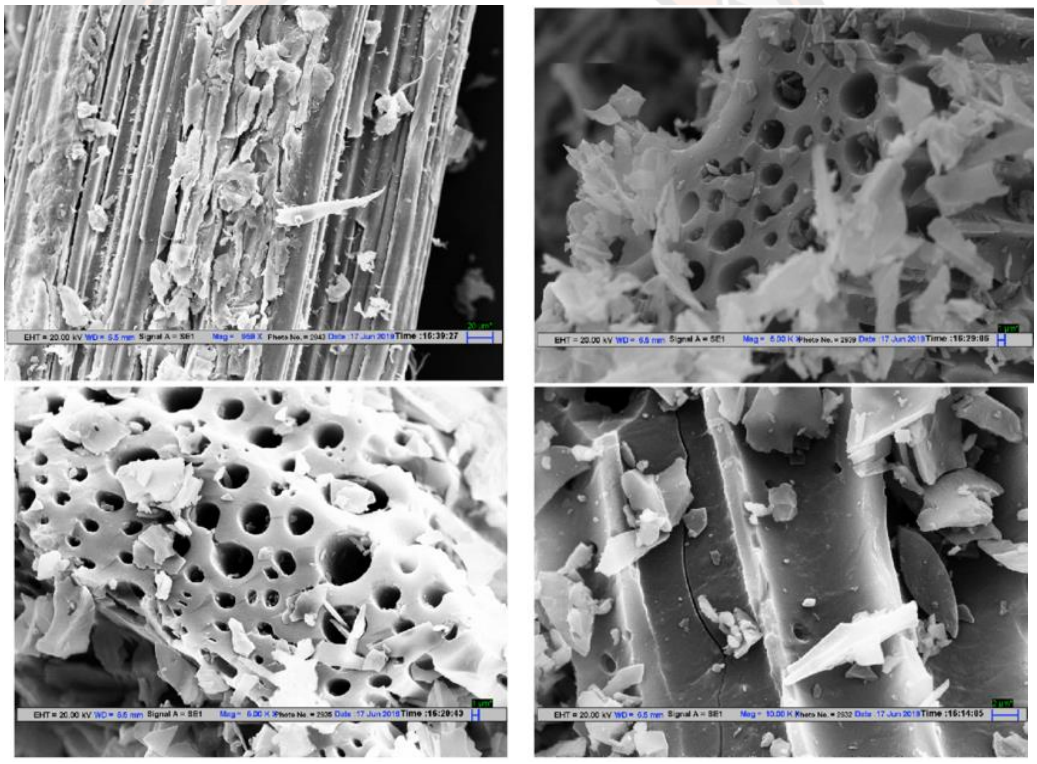
ภาพ 7 ขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์[10]

พื้นที่ผิว

พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์เกิดขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการคาร์บอนไนเซชันและการกระตุ้น การกระตุ้นทางกายภาพมีแนวโน้มทำให้ปริมาตรรูพรุนแบะขนาดของรูพรุนลดลงตามการเพิ่มของอุณหภูมิ และเป็นผลทำให้พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้น ในส่วนของปริมาณสารระเหยที่ลดลงทำให้เกิดทั้งรูพรุนขนาดกลางและขนาดเล็ก รวมไปถึงทำให้มีพื้นที่ผิวสูงขึ้นเช่นกัน สำหรับถ่านกัมมันต์ที่ที่กระตุ้นทางเคมี จะมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มอัตราส่วนการแช่สารกระตุ้นและอุณหภูมิการกระตุ้น ซึ่งเกิดจากกลไกการเผาไหม้และการสลายสารระเหยง่ายด้วยการกระตุ้น

การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด คือ การศึกษาโครงสร้างของวัตถุตัวอย่างด้วยการทำให้อิเล็กตรอนกราดไปบนพื้นผิว โดยอุปกรณ์ตรวจจับซึ่งอยู่ภายในจะจับเอาอิเล็กตรอนที่กระเจิงออกมาจากตัวอย่าง ซึ่งแสดงผลบนจอภาพที่สามารถบันทึกภาพได้ ซึ่งการเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์มีขั้นตอน คือ นำตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ไปอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ทิ้งในโถดูดความชื้น แล้วนำตัวอย่างที่แห้งไปวางบนเทปกาวและติดเทปกาวบนสตับ(Stup) จากนั้นทำการฉาบผิวด้วยทองในบรรยากาศอาร์กอน โดยใช้กระแส 40 มิลลิแอมป์ เป็นเวลา 60 วินาที ให้มีความหนาประมาณ 15 นาโนเมตร และนำตัวอย่างที่ผ่านการฉาบผิวด้วยทองมาตรวจวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ด้วยความต่างศักย์ในการเร่งอิเล็กตรอน 10 kV ภายใต้สุญญากาศ



ภาพ 8 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของถ่านไม้ไผ่ [11]

คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

ถ่านกัมมันต์ในปัจจุบันจะถูกแบ่งตามคุณสมบัติตามมาตรฐานของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 มาตรฐาน ดังนี้

- มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ถ่านไม้หุงต้ม มผช.657/2547

- มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ถ่านดูดกลิ่น มผช.180/2560
- มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ถ่านกัมมันต์ มอก.900–2547

ตาราง 3 แสดงคุณสมบัติของถ่าน ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนและมาตรฐานอุตสาหกรรม

คุณสมบัติ	มผช.657/2547	มผช. 180/2560	มอก. 900-2547
ค่าความชื้น (%)	<10%	<8%	<8%
สารระเหย (%)	<25%	<8%	<8%
ปริมาณเถ้า (%)	<8%		
ค่าคาร์บอนคงตัว (%)	<57%		
C (%)			
ค่าความร้อน (Cal/g)	6,000 < cal/g		
การดูดซับไอโอดีน (mg/g)		> 150	>600

** มผช.657/2547 ถ่านไม้หุงต้ม (Wood Charcoal for Cooking)[12], มผช.180/2560 ถ่านดูดกลิ่น (Deodorizing Charcoal)[13], มอก. 900–2547 ถ่านกัมมันต์ (for Activated Charcoal)[14]

นอกจากนี้คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.900-2547[14] ยังมีการแบ่งชนิดและขนาดของถ่านกัมมันต์ได้ดังนี้

ถ่านกัมมันต์แบ่งออกเป็น 4 ชนิด คือ

1. ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powdered activated carbon)
2. ถ่านกัมมันต์ชนิดเกร็ด (Granular activated carbon)
   - ชั้นคุณภาพพิเศษ (Premium grade)
   - ชั้นคุณภาพที่ 1 (First grade)
3. ถ่านกัมมันต์ชนิดอัดเม็ด (Pelletized activated carbon)
4. ถ่านกัมมันต์ชนิดแท่ง (Block activated carbon)

ขนาดของถ่านกัมมันต์

1. ชนิดผง ปริมาณที่ผ่านแร่ง 150 ไมโครเมตร ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก
2. ชนิดเม็ดและชนิดอัดเม็ด ปริมาณที่ผ่านแร่ง 150 ไมโครเมตร ต้องไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

ไผ่

ไผ่ (bamboo) เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยว (monocotyledon) จัดอยู่ในวงศ์หญ้า Poaceae (เดิมคือ Gramineae) ทั้งนี้นักพฤษศาสตร์ได้จัดแยกไผ่อยู่ในวงศ์ย่อย Bambusoideae ครอบครัว Bambusaceae เนื่องจากมีลักษณะทางสันฐานวิทยาและชีววิทยาคล้ายคลึงกับหญ้าทั่วไป แต่ไผ่มีข้อแตกต่างหลายประการ[15] เช่น การมีระบบเหง้าที่ชัดเจนใบที่ค่อนข้างกว้างและมีก้านใบเทียม (pseudopetiole) มีระบบการเจริญเป็นกิ่ง (branch complement) ที่ซับซ้อนและแข็งแรง ลักษณะช่อดอกและส่วนประกอบต่าง ๆ ของดอกที่ซับซ้อน รวมทั้งลักษณะที่คล้ายกับการมี เนื้อไม้ (woody bamboo) ซึ่งส่งผลให้ไผ่ส่วนมากมีลำต้นสูงใหญ่และมีอายุยืนนานหลายปี ไม้ไผ่ถือเป็นพืชเมืองร้อน (tropics) แต่ก็สามารถเจริญเติบโตได้ทุกทวีป ไม้ไผ่หลายสกุลพบมากที่สุดในเขตร้อนทางใต้และตะวันออกเฉียงใต้ของเอเชีย จากอินเดีย ไทย จีน ญี่ปุ่น เกาหลี มีน้อยสกุลพบในเขตอบอุ่น (temperates) ของโลกบางส่วนของทวีปอเมริกาก็พบมาก ในบางประเทศแถบอเมริกาใต้ เช่น เปอโตริโก ชิลี อาเยนตินา่ และก็มี 2-3 ชนิดที่พบในออสเตรเลีย

ทรัพยากรไผ่ในประเทศไทย

ไผ่เป็นทรัพยากรที่มีคุณค่าต่อการดำรงชีวิตของคนในท้องถิ่นไทยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เนื่องจากคุณสมบัติที่เป็นพืชโตเร็วและมีลักษณะเป็นไม้อเนกประสงค์ สามารถนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้ทั้งหมด ตั้งแต่เหง้า กอ หน่อ ใบ กาบ กิ่ง แขนงและลำต้น ทั้งยังสามารถผลิตออกซิเจนได้มากกว่าพืชชนิดอื่นๆ ถึงร้อยละ 35 และสามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดภาวะโลกร้อนอีกด้วย ประเทศไทยนั้นมีทรัพยากรไผ่อยู่หลากหลายชนิดทั่วทุกพื้นที่ของประเทศ เนื่องจากมีสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต จึงมีการนำไผ่มาใช้ประโยชน์ทั้งทางตรงและมีการนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ไผ่นั้นมีความเกี่ยวข้องอย่างมากกับวิถีชีวิตของคนไทย ทั้งด้านอาหาร ยารักษาโรค ที่อยู่อาศัย เครื่องเรือนเครื่องใช้ สังคมและภูมิปัญญา วัฒนธรรม ไปจนถึง พลังงานและสิ่งแวดล้อม

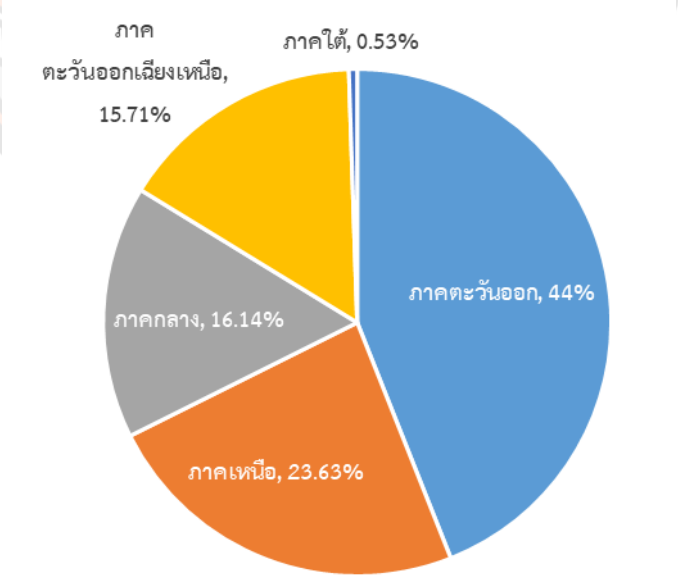
ไผ่มีความหลากหลายทางชนิดพันธุ์สูง ซึ่งพบในประเทศไทยประมาณ 17 สกุล 69 ชนิด โดยพบกระจายอยู่ในพื้นที่ต่างๆ โดยสำนักฟื้นฟูและพัฒนาพื้นที่อนุรักษ์ กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่าและพันพืช ได้สำรวจทรัพยากรไผ่ในพื้นที่ป่า โดยวิธีการสุ่มตัวอย่างแบบสม่ำเสมอในปี พ.ศ. 2544 พบว่าในพื้นที่ป่ามีไผ่รวม 27 ชนิด โดยชนิดที่พบมากที่สุดคือ ไผ่รวก รองลงมา คือ ไผ่ซางนวล ตามลำดับ โดยพบปริมาณไผ่ที่พบมากที่สุดในพื้นที่ภาคเหนือ รองลงมา คือ ภาคกลาง ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคใต้ ตามลำดับ ส่วนความหนาแน่นของไผ่มากที่สุดพบในภาคกลาง รองลงมาเป็น ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคเหนือและภาคใต้ ตามลำดับ ดังตารางที่ 4

ตาราง 4 ข้อมูลจำนวนและความหนาแน่นของไผ่ตามพื้นที่ของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2554

ภาค	พื้นที่ป่า (ไร่)	คาดประมาณจำนวนไผ่		ความหนาแน่น	
		(ล้านกอ)	(ล้านลำ)	(กอ/ไร่)	(ลำ/ไร่)
ภาคเหนือ	56,283,271.49	1,012.58	11,764.75	16.27	190.14
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	15,813,844.52	311.53	3,897.44	18.57	232.51
ภาคกลาง	18,846,764.53	412.29	6,148.65	21.36	319.40
ภาคใต้	9,911,717.95	57.94	990.42	5.69	97.24
รวม	100,855,898.50	1,794.35	22,801.27	16.56	207.00

ที่มา : กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช (2555)[16]

จากการศึกษาข้อมูลการปลูกไผ่ของประเทศไทย โดย กรมพัฒนาที่ดิน พบว่า พื้นที่ปลูกไผ่เพื่อการค้ามีการกระจายอยู่ทั่วประเทศ 91,746 ไร่ โดยภาคตะวันออกมีพื้นที่ปลูกไผ่มากที่สุด มีพื้นที่ 40,364 ไร่ รองลงมา คือ ภาคเหนือมีพื้นที่ 21,680 ไร่ ภาคกลางมีพื้นที่ 14,808 ไร่ ส่วนภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีพื้นที่ 14,410 ไร่ และภาคใต้มีพื้นที่ปลูกไผ่น้อยที่สุด มีพื้นที่ทั้งหมด 484 ไร่ ดังภาพที่ 9



ภาพ 9 สัดส่วนของพื้นที่ปลูกไผ่ตามภูมิภาคต่างๆ ของประเทศไทย

ที่มา : กรมพัฒนาที่ดิน (2563)[17]

ประเทศไทยนั้นมีการนำไผ่มาใช้ประโยชน์อย่างหลากหลาย ซึ่งสามารถแบ่งการใช้ประโยชน์ออกเป็นหมวดหมู่ต่างๆ ดังต่อไปนี้

ด้านอาหาร

ไผ่เป็นพืชที่อุดมไปด้วยสารอาหารและแร่ธาตุที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย จึงมีการนำไผ่มาใช้ประโยชน์ทางอาหารอย่างแพร่หลาย โดยหน่อเป็นส่วนที่จะถูกนำมาทำอาหาร ซึ่งหน่อไม้จะมีผลผลิตมาในช่วงฤดูฝน เนื่องจากไผ่เป็นพืชที่ต้องการน้ำเพื่อการดำรงชีวิต ดังนั้น เกษกรจึงมีการจัดการระบบน้ำให้น้ำกับไผ่ เพื่อให้มีหน่อไม้ไว้อุปโภคและขายได้ตลอดทั้งปี

ด้านยารักษาโรค

ในปัจจุบันมีการนำไผ่มาใช้และแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เพื่อเพิ่มมูลค่า ที่สำคัญไผ่นั้นสามารถนำมาใช้ในการรักษาโรคได้ทั้งยังมีคุณประโยชน์ที่สำคัญต่อร่างกาย โดยส่วนประกอบของไผ่ที่สามารถนำมาใช้ทำเป็นยารักษาโรคได้ เช่น ส่วนของหน่อสามารถนำมาต้มเพื่อให้เป็นยารักษาโรค ในขณะเดียวกันมีงานวิจัย พบว่า ใบไผ่มีสารต้านอนุมูลอิสระฟลาโวนอยด์กลัยโคไซด์(Flavonoids Glycoside) ซึ่งช่วยลดความเยงจากโรคอัลไซด์เมอร์ เบาหวาน ลดภาวะเส้นเลือดอุดตันในสมอง เป็นต้น ส่วนลำไผ่มีสรรพคุณแก้อาการปวดท้อง และรากไผ่สามารถใช้รักษาโรคกากเกลื้อนได้

ด้านเครื่องนุ่งห่ม

ไผ่เป็นพืชที่มีลักษณะของเส้นใยยาว มีความเป็นรูพรุนสูง จึงมีความสามารถในการดูดซับความชื้นได้ดี จึงเหมาะสมในการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์สิ่งทอ เสื้อผ้า กระเป๋า หมวก เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถนำเส้นใยจากไผ่มาผสมกับผงคาร์บอนจากถ่านไม้ไผ่ กลายเป็นเส้นใยสังเคราะห์ซึ่งมีคุณสมบัติในการดูดซับและระบายความชื้นได้ดี

ด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม

ไผ่ เป็นพืชที่มีศักยภาพในการนำไปใช้เป็นชีวมวล เนื่องจากต้นไผ่นั้นประกอบด้วยเซลลูโลสที่สามารถนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงพลังงานทดแทนได้ ไผ่จึงเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับการปลูกเป็นพืชพลังงานทดแทน นอกจากนี้ไผ่ยังเป็นพืชที่มีความสำคัญต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมาก โดยแหล่งอาหารของสัตว์ป่าและเป็นแหล่งที่อยู่อาศัย ทั้งยังทำหน้าที่ช่วยยึดตลิ่ง ซึ่งป้องการการพลังทลายของหน้าดิน ช่วยลดแรงปะทะของพายุ และยังช่วยในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากกว่าต้นไม้ทั่วไป เนื่องจากไผ่นั้นให้มวลชีวภาพต่อไร่ที่สูงกว่าพืชชนิดอื่นในระยะเวลาและพื้นที่ที่เท่ากัน

ถ่านคุณภาพจากไม้ไผ่

ในปัจจุบันได้มีการนำถ่านไม้ไผ่คุณภาพสูงที่มีการเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,000 องศาเซลเซียส โดยไผ่ที่มีควาเหมาะสมสำหรับการปลิตถ่านคุณภาพนั้นควรเป็นลำไผ่ที่มีอายุมากกว่า 3 ปีขึ้นไป โดยสามารถใช้ได้ทั้งลำ ปัจจุบันการผลิตถ่านคุณภาพจากไม้ไผ่ในประเทศไทยยังคงมีน้อย จึงควรศึกษา

องค์ความรู้ให้กับเกษตรกรหรือผู้ประกอบการให้ผลิตถ่านคุณภาพจากไม้ไผ่ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ต้องการของโลก ซึ่งช่วยเพิ่มรายได้ให้กับเกษตรกรผลู้ผลิตถ่านคุณภาพจากไม้ไผ่นำถ่านคุณภาพจากไม้ไผ่ไปใช้ประโยชน์ได้หลายทาง เช่น ทางยา ทางเวชสำองและผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพ เป็นต้น

การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์ผลทางด้านเศรษฐศาสตร์จะเป็นตัวช่วยในการตัดสินใจ โดยจะพิจารณาหาระยะเวลาคืนทุน สำหรับหรับงานวิจัยนี้ทำพิจารณาทางด้านเศรษฐศาสตร์มีดังนี้

1. มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value : NPV)

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ คือ การประเมินความสามารถในการสร้างผลประโยชน์สุทธิที่ได้รับตลอดระยะเวลาของโครงการ เพื่อใช้เป็นตัวชีวัดว่าโครงการนั้นจะให้ผลประโบชน์คุ้มค่าหรือมีผลกำไรในการลงทุนหรือไม่ ซึ่งมูลค่าปัจจุบันสุทธิ อาจจะมีค่าเป็นลบ เป็นศูนย์ หรือเป็นบวกขึ้นอยู่กับ มูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์รวม(PVB) ลบด้วยมูลค่าปัจจุบันของต้นทุนรวม(PVC)

$$NPV = PVB - PVC \tag{10}$$

$$NPV = \sum_{t=1}^{m} \frac{B_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=1}^{k} \frac{C_t}{(1+r)^t} \tag{11}$$

เมื่อ NPV คือ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ
PVB คือ มูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์รวม
PVC คือ มูลค่าปัจจุบันของต้นทุนรวม
t คือ ปี
m คือ อายุโครงการ
k คือ ระยะเวลาในการก่อสร้างระบบ
r คือ อัตราดอกเบี้ยหรืออัตราคิดลดที่เหมาะสม
B_t คือ ผลประโยชน์ของโครงการปีที่ t
C_t คือ ค่าใช้จ่ายในการลงทุนของโครงการในปีที่ t

หลักการตัดสินใจ (decision rule) ที่แสดงว่าโครงการมีความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์และการเงินหรือไม่นั้น สามารถพิจารณาจากมูลค่าปัจจุบันสุทธิ เมื่อมูลค่าปัจจุบันสุทธิมี

ค่าเป็นบวก แสดงว่าโครงการนั้นมีความเหมาะสมที่จะลวทุนได้ กล่าวคือ มูลค่าปัจจุบันมีผลประโยชน์รวมมากกว่ามูลค่าปัจจุบันของต้นทุนรวมนั้นเอง

2. อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน (Benefit-Cost Ratio : BCR)

อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุนคือ มูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์รวม หารด้วยมูลค่าปัจจุบันของต้นทุนรวมตลอดอายุของโครงการ ถึงแม้ว่าการลงทุนโครงการผ่านพ้นไปแล้วก็ตาม ในขณะเดียวกันต้นทุนการก่อสร้างจะเกิดขึ้นเฉพาะในช่วงของการลงทุนเท่านั้น ส่วนต้นทุนที่อยู่ในรูปค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน การซ่อมแซม บำรุงรักษา และทดแทนอุปกรณ์ที่เสื่อมสภาพ จะเกิดขึ้นตลอดอายุทางเศรษฐกิจของโครงการ จากนั้นจะนำเอากระแสผลประโยชน์และกระแสต้นทุนของโครงการที่ได้ปรับค่าไปตามเวลา หรือคิดเป็นมูลค่าปัจจุบันแล้วมาเปรียบเทียบกัน เพื่อหาอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุนดังนี้

$$BCR = \frac{PVB}{PVC} \tag{12}$$

$$BCR = \frac{\sum_{t=1}^{n} \frac{B_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^{n} \frac{C_t}{(1+r)^t}} \tag{13}$$

เมื่อ BCR คือ อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน

PVB คือ มูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์รวม

PVC คือ มูลค่าปัจจุบันของต้นทุนรวม

t คือ ปี

r คือ อัตราดอกเบี้ยหรืออัตราคิดลดที่เหมาะสม

B_t คือ ผลประโยชน์ของโครงการปีที่ t

C_t คือ ค่าใช้จ่ายในการลงทุนของโครงการในปีที่ t

หลักการตัดสินใจที่แสดงถึงความเหมาะสมและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และทางด้านการเงินหรือไม่นั้น พิจารณาจากอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน จะต้องมากกว่า หรือเท่ากับ 1

ในขณะเดียวกัน ค่าของอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุนของโครงการ สามารถเท่ากับ 1 มากกว่า 1 หรือน้อยกว่า 1 ก็ได้

3. อัตราผลตอบแทนภายในโครงการ (Internal Rate of Return : IRR)

อัตราผลตอบแทนภายในโครงการ คือ ผลตอบแทนที่คิดเป็นร้อยละต่อโครงการ หมายถึง อัตราดอกเบี้ยในกระบวนการคิดลดที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันของโครงการมีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นก็คืออัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ ถ้า อัตราผลตอบแทนภายในโครงการ มีค่าสูงกว่าอัตราดอกเบี้ยเงินกู้ก็แสดงว่าโครงการให้ผลประโยชน์คุ้มค่า(มีกำไร) ถ้าอัตราผลตอบแทนภายในโครงการมีค่าต่ำกว่าอัตราดอกเบี้ยเงินกู้ ก็แสดงว่าโครงการให้ผลประโยชน์ไม่คุ้มค่า(ขาดทุน) ถ้าอัตราผลตอบแทนภายในโครงการมีค่าเท่ากับอัตราดอกเบี้ยเงินกู้ ก็หมายความว่าโครงการให้ผลประโยชน์คุ้มทุนพอดี เมื่อกำหนดให้ r คือ อัตราผลตอบแทนภายในโครงการ แล้วค่าของ r สามารถหาได้จากการแก้สมการดังนี้

$$\sum_{t=1}^{n} \frac{(B_t - C_t)}{(1+r)^t} = 0 \qquad (14)$$

เมื่อ r คือ อัตราดอกเบี้ยหรืออัตราคิดลดที่เหมาะสม

B_t คือ ผลประโยชน์ของโครงการปีที่ t

C_t คือ ค่าใช้จ่ายในการลงทุนของโครงการในปีที่ t

หลักการตัดสินใจโครงการ จากอัตราผลตอบแทนภายในโครงการ(IRR) ต้องมีค่าสูงและต้องสูงกว่าอัตราดอกเบี้ยเงินกู้ โครงการจึงมีความคุ้มค่าและน่าลงทุน

4. ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period : PB)

ระยะเวลาคืนทุนของโครงการ คือ ระยะเวลาที่ผลตอบแทนสะสมจากการดำเนินงานของโครงการมีค่าเท่ากับต้นทุนของโครงการ จากการประเมินระยะเวลาคืนทุนทำให้ทราบว่าจะได้รับเงินทุนคืนช้าหรือเร็วเท่าใด เพราะถ้าระยะเวลาคืนทุนน้อยโอกาสที่จะเสี่ยงต่อการขาดทุนในอนาคตก็จะลดลง ซึ่งคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \frac{\text{ต้นทุนของโครงการ}}{\text{กระแสเงินสดที่ได้รับจากการลงทุนในแต่ละปี}} \qquad (15)$$

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อนุสรณ์ สินสะอาด [18] ได้พัฒนาเตาเผาถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว แบบแนวนอนซึ่งสามารถกระจายความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพเพื่อทำให้กระบวนการเผาไหม้เป็นไปอย่างที่กำหนด โดยนำกะลามะพร้าวมาเผาแต่ละครั้งคุณภาพของถ่านที่ได้แตกต่างกันไป การเผาถ่านกัมมันต์ที่ดีคือการเผาในช่วงอุณหภูมิ 700-900 องศาเซลเซียส เนื่องจากอุณหภูมิของการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ จะได้คาร์บอนที่มีรูพรุนหนาแน่นสามารถนำไฟฟ้าและฟอกอากาศได้ ช่วยลดระยะเวลาในการเผาจากเตาเผาแบบเดิมใช้เวลา 15-20 ชั่วโมง เหลือเพียง 8-10 ชั่วโมง ทดสอบค่าการดูดซับไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว เท่ากับ 390 มิลลิกรัมต่อกรัม

ลุตฟี สือนิ ; พิสิษฏ์ มณีโชติ [3] ได้ศึกษาการเปรียบเทียบคุณภาพถ่านกะลามะพร้าวที่ได้จากกระบวนการผลิตของเตาเผาถ่านขนาด 200 ลิตร โดยทำการปรับปรุงรูปแบบร่วมกับเทคนิคการผลิตถ่าน โดยใช้เตาเผาถ่านรุ่นมังกรไฟ 84 ที่มีการเพิ่มอุปกรณ์ทรงกรวยเข้าไปในห้องเผาที่ทำจากถังน้ำมัน 200 ลิตร โดยใช้ทำการเปรียบเทียบผลของคุณภาพถ่านต่อการหุ้มฉนวน 3 ชนิด คือ ดิน ทราย และแกลบดำ จากการศึกษาพบว่า เตาเผาถ่านแบบเพิ่มฉนวนกันความร้อนจะมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงกว่าเตาเผาถ่านแบบไม่มีฉนวนกันความร้อน เนื่องจากฉนวนกันความร้อนมีคุณสมบัติในการสกัดกั้นความร้อนจากด้านในเตาเผาไม่ให้ความร้อนถ่ายเทสู่บรรยากาศได้ง่าย ลดการศูนย์เสียความร้อนของเตาเผา และลดระยะเวลาในการาเผาถ่านได้ และฉนวนแกลบดำจะมีอุณหภูมิสูงสุดที่ 735.1 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการปิดเตา 70 นาที ปริมาณถ่านที่ได้ 4.6 กิโลกรัม ที่ปริมาณเริ่มต้น 25 กิโลกรัม จากการทดสอบค่าการดูดซับไอโอดีน พบว่าเตาเผาถ่านที่ใช้ฉนวนแกลบดำมีค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสุดเท่ากับ 910.446 มิลิกรัมต่อกรัม มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุดที่ 172.511 ตารางเมตรต่อกรัม และปริมาณรูพรุนของถ่านที่ 0.08257 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และมีค่าความร้อนมากสุดเท่ากับ 7,177 แคลอรีต่อกรัม

ธีรดิตถ์ โพธิตันติมงคล [19]ได้ทำการสรุปประเด็น และเผยแพร่เตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีเพื่อใช้กำจัดสารมลพิษในน้ำ ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุที่มีลักษณะโครงสร้างที่มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงประมาณ 600 – 2,400 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.20 – 1.00 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ โดยมีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักประมาณร้อยละ 80 – 90 ซึ่งได้จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น ฟางข้าว ซัง-ข้าวโพด กะลามะพร้าว ขุยมะพร้าว เปลือกปาล์ม ไม้เนื้อแข็ง ขั้นตอนในการเตรียมถ่านกัมมันต์มี 2 ขั้นตอน คือ การคาร์บอไนซ์ และการกระตุ้น ในขั้นตอนการกระตุ้นมี 2 วิธี ได้แก่ การกระตุ้นทางกายภาพและการกระตุ้นทางเคมี เมื่อเปรียบเทียบการกระตุ้นทางกายภาพและทางเคมี พบว่า การกระตุ้นทางเคมี

มีการศึกษาและนำไปใช้งานมากกว่าการกระตุ้นทางกายภาพ เนื่องจากใช้อุณหภูมิต่ำและระยะเวลาน้อยในการกระตุ้น แต่ได้ถ่านกัมมันต์ที่พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูง สารเคมีที่นิยมนำมาใช้ในการกระตุ้น ได้แก่ ซิงก์คลอไรด์ กรดฟอสฟอริก และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ถ่านกัม-มันต์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่ผลิตได้มีการนำไปใช้เป็นตัวดูดซับในกระบวนการดูดซับ ซึ่งเป็นการกำจัดสารมลพิษในน้ำที่ใช้งานอย่างแพร่หลาย และพบว่าถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรสามารถกำจัดสารมลพิษต่างๆ ได้แก่ โลหะหนัก สีย้อม สารกลุ่มฟีนอล สารฆ่าแมลง และศัตรูพืชในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สิริณ บุนนาค;สุภกร บุญยืน [20]ได้ศึกษาหาคุณภาพด้านพลังงานที่เหมาะสมของไม้ไผ่กิมซุ่งในช่วงอายุ 6, 9, 12, 15, 18และ 24 เดือน โดยน ไม้ไผ่กิมซุ่งส่วนหนึ่งไปผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันให้ได้ถ่านที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงแล้วบดให้ละเอียดจนเป็นผง ตรวจสอบสมบัติทางกายภาพและทางเคมีรวมถึงวิเคราะห์หาค่าความร้อนของถ่านแต่ละช่วงอายุ ความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูและการดูดซับไอโอดีน ปริมาณเถ้า ปริมาณซัลเฟอร์ การศึกษารูพรุนโดยใช้เครื่อง SEM และทดสอบหาค่าการดูดความชื้นของไม้ไผ่กิมซุ่ง ผลการทดสอบพบว่าค่าพลังงานความร้อนที่ดีที่สุดเฉลี่ย 3,555.27 cal/g คือ ไผ่กิมซุ่งที่อายุ 9 เดือนค่าการดูดซับไอโอดีนดีที่สุดที่ 2,315.025 mg/g คือ ไผ่กิมซุ่งที่อายุ 6 เดือน ค่าการดูดซับ เมทิลีนบลูที่เหมาะสมเฉลี่ย 98.30% คือ ไผ่กิมซุ่งที่อายุ 24 เดือน ปริมาณเถ้าที่เหมาะสมเฉลี่ย 10.82% และปริมาณซัลเฟอร์มากที่สุดเฉลี่ย 0.82% คือไผ่กิมซุ่งที่อายุ 15 เดือนส่วนการศึกษารูพรุนโดยใช้เครื่อง SEM พบว่าที่ไผ่กิมซุ่งอายุ 18เดือนมีขนาดรูพรุนใหญ่ที่สุดคือ 20 μm สำหรับผลการทดสอบการวัดค่าการดูดความชื้นพบว่าอายุของไม้ไผ่กิมซุงไม่มีผลต่อการดูดความชื้น

กิตติธัช สัจจากุล ; และคณะ [21] ได้ทำการผลิตถ่านไม้ไผ่คุณภาพสูงเพื่อพัฒนาเป็นถ่านกัมมันต์โดยใช้เตาเผาถ่านดัดแปลงจากถังน้ำมัน 200 ลิตร โดยถ่านที่ได้มาจากไม้ไผ่ 4 ชนิด คือ ไผ่ตงดำ ไผ่หวานอ่างขาง ไผ่หยก และไผ่มากินอย ในเตาเผาถ่านที่พัฒนาจากถังน้ำมัน 200 ลิตร สามประเภท คือ เตา KP1 เตา KP2 และเตา Nikome โดยใช้แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลของปัจจัยทั้งสองข้างต้น ผลจากการวิเคราะห์แบบการประมาณค่า (Approximate Analysis) พบว่าประเภทเตาและชนิดไม้ที่ใช้ไม่มีอิทธิพลร่วมต่อค่าคาร์บอนเสถียร (%FC) ที่ได้ โดยเตา KP2 ให้ค่าเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 80.84 ขณะที่ไม้ไผ่ตงดำให้ค่าเฉลี่ยสูงสุดที่ร้อยละ 84.78 ตามลำดับ ส่วนค่าร้อยละขี้เถ้า (%Ash) พบว่าเฉพาะชนิดไม้ไผ่เท่านั้นที่มีผลต่อร้อยละขี้เถ้าของถ่านไม้ไผ่ที่ได้ โดยไม้ไผ่ตงดำให้ค่าเฉลี่ยน้อยที่สุดอยู่ที่ร้อยละ 4.74 ซึ่งตรงข้ามกับผลการวิเคราะห์ร้อยละปริมาณสารระเหย (%VOCs) ที่เฉพาะประเภทเตาเผาถ่านเท่านั้นที่มีผลต่อค่าปริมาณสารระเหยของถ่านไม้ไผ่ที่ผลิตได้

โดยถ่านไม้ไผ่จากเตา KP1 และเตา KP2 จะมีร้อยละปริมาณสารระเหยน้อยกว่าถ่านไม้ไผ่จากเตา Nikome อย่างมีนัยสาคัญ โดยมีค่าที่ได้อยู่ที่ร้อยละ 5.69 และ 6.29 เปรียบเทียบกับ 10.50 ตามลาดับ กล่าวโดยสรุปคือ ไผ่ตงดำและไผ่มากินอยที่ได้จากเตา KP1 และ เตา KP2 มีคุณสมบัติพื้นฐานเบื้องต้นของการเป็นถ่านกัมมันต์ เมื่อพิจารณาคุณสมบัติถ่านไม้ไผ่ทั้งสองที่ได้เพิ่มเติม พบว่า ค่าความร้อน (Calorific Value) ของถ่านไม้ที่ได้จากไผ่ตงดำมีค่าสูงกว่าถ่านไม้ไผ่มากินอยโดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 7,402.04 และ 7,105.80 แคลอรี่ต่อกรัม ตามลำดับ ส่วนผลการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ (Ultimate Analysis) ขององค์ประกอบถ่านทั้งสอง ชี้ให้เห็นว่าในส่วนของร้อยละไนโตรเจน (%N) เฉพาะชนิดไม้ไผ่เท่านั้นที่มีผลต่อร้อยละไนโตรเจนของถ่านไม้ไผ่ที่ได้ โดยไม้ไผ่มากินอยให้ค่าเฉลี่ยน้อยที่สุดอยู่ที่ร้อยละ 0.32 ส่วนไผ่ตงดำอยู่ที่ 0.64 และผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุซัลเฟอร์ (%S) พบว่า ทั้งชนิดไม้ไผ่และเตาที่ใช้มีอิทธิพลต่อค่าซัลเฟอร์ของถ่านไม้ไผ่ทั้งสองชนิดที่ได้ โดยถ่านไม้ไผ่ตงดำจากเตา KP2 ให้ปริมาณธาตุซัลเฟอร์น้อยกว่าโดยอยู่ที่ร้อยละ 0.33 อย่างไรก็ตามถ่านไม้ไผ่ที่ได้จะต้องทำการวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับ (Adsorption Capacities) เพิ่มเติมเพื่อให้งานวิจัยนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

พัทธกมล สมบุตร [22] ได้ทำการศึกษาการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านจากผักตบชวาและถ่านกัมมันต์จากผักตบชวาที่กระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ การทดลองพบว่าที่อัตราส่วนปริมาณถ่านต่อปริมาณน้ำเดียวกัน ที่ระดับค่า pH เดียวกัน ถ่านกัมมันต์ผักตบชวามีความสามารถในการดูดซับกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำได้ประสิทธิภาพดีกว่าถ่านจากผักตบชวาเนื่องมาจากถ่านจากผักตบชวามีปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะ 4.05 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุนรวม 0.019 มิลลิลิตรต่อกรัม ซึ่งน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ผักตบชวาที่มีปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะ 30.42 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุนรวม 0.210 มิลลิลิตรต่อกรัม และถ่านจากผักตบชวายังมีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 1,883 นาโนเมตร ซึ่งมากกว่าถ่านกัมมันต์ผักตบชวามีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 276.1 นาโนเมตร เพราะถ่านกัมมันต์ผักตบชวามีการกระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์ที่มีฤทธิ์เป็นด่าง เมื่อเผากระตุ้นที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะทำปฏิกิริยาทำให้ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวและรูพรุนเพิ่มมากขึ้น ทำให้ถ่านกัมมันต์ผักตบชวามีรูพรุนขนาดเล็กแทรกตามพื้นผิวถ่านจำนวนมาก และเมื่อนำไปดูดซับแล้วจะเห็นว่าสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับกำจัดฟอสฟอรัสได้ประสิทธิภาพสูงสุดคือ การใช้อัตราส่วนปริมาณถ่านกัมมันต์ผักตบชวา 0.5 กรัม ต่อนำ 100 มิลลิลิตร ที่ค่าระดับเป็นกลางคือ pH 7

Pandiarajan, Kamaraj [23] ได้ทำการทดสอบถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากเปลือกส้ม โดยใช้กระบวนการไพโรไรซิส และทดสอบดูดซับสารเคมีกำจัดวัชพืชกรดคลอโรฟีนอกซีแอซีติกในน้ำ โดยถ่านกัมมันต์จากเปลือกส้มมีปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะ 592.471 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุนรวม 0.242 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ขนาดรูพรุนเฉลี่ย 1.301 นาโนเมตร ซึ่งวิเคราะห์แบบจำลองความ

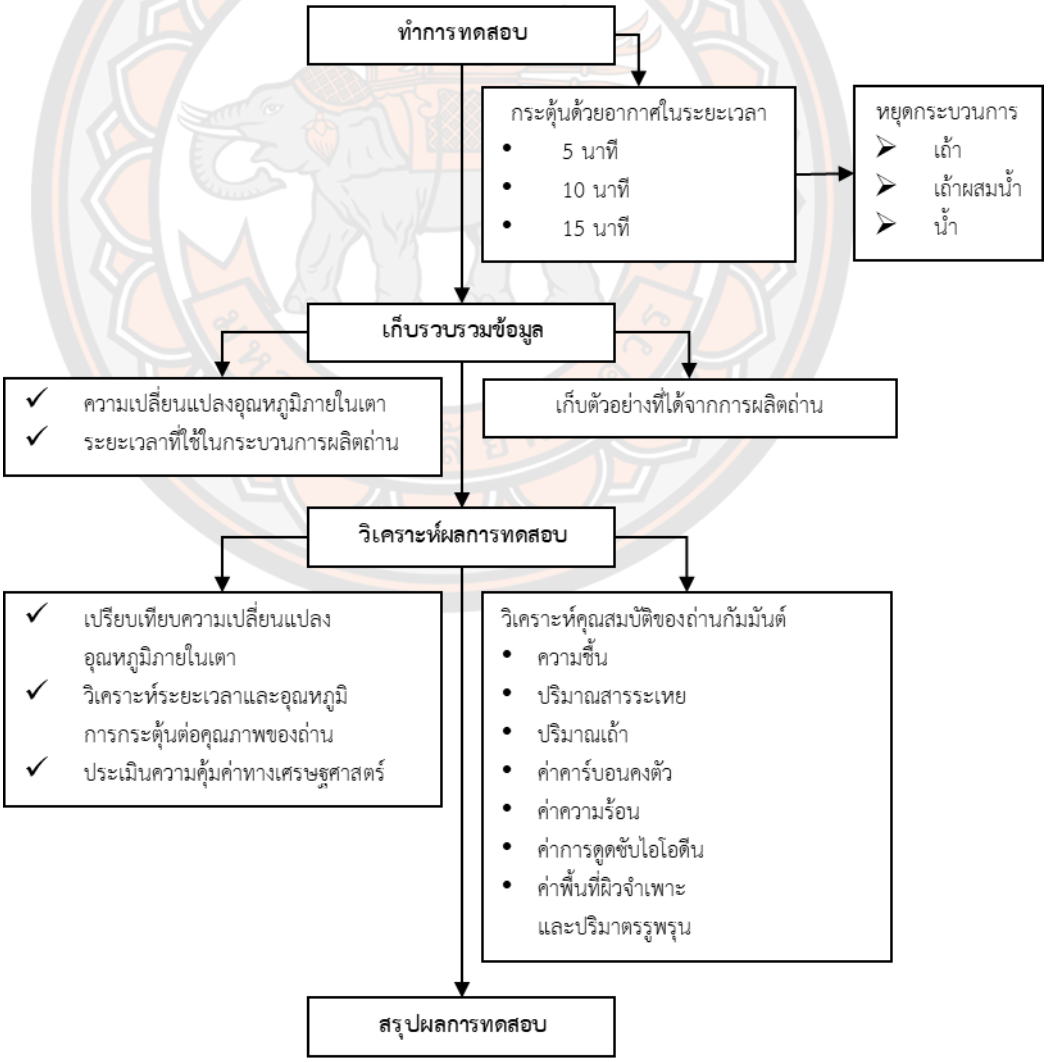
สมดุลจลนศาสตร์และอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับรวมไปถึงตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการเช่น pH และอุณหภูมิ เป็นต้น จากการทดสอบพบว่า จลนศาสตร์ของการดูดซับศึกษาจากแบบจำลอง Pseudo-first Order การใช้ถ่านกัมมันต์ที่จากเปลือกส้มสามารถใช้ได้กับสารเคมีกำจัดวัชพืชในกลุ่มที่มีกรดคลอโรฟีนอกซีแอซีติกได้ทั้งหมด และผลของการศึกษาอุณหพลศาสตร์พบว่า ความสามารถในการดูดซับของถ่านนั้นแปรผันตรงกับอุณหภูมิในการเผาถ่านกัมมันต์

บทที่ 3
วิธีดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเตาเผาถ่านและกระบวนการเผาถ่าน โดยให้ได้ถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ ด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพด้วยอากาศในช่วงระยะเวลาเปิดเตา หลังจากนั้นทำการหยุดกระบวนการ โดยการดับถ่านด้วยเถ้า เถ้าผสมน้ำและน้ำ ซึ่งมีรายระเอียดของการดำเนินงานวิจัยแบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่

1. การพัฒนาเตาเผาถ่านจากเตาเผาถ่านมังกรไฟ 84
2. การทดสอบเตาเผาถ่านและกระบวนการเผาถ่าน
3. การประเมินทางเศรษฐศาสตร์

โดยขั้นตอนดำเนินการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้



ภาพ 10 แผนผังขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

ตัวแปรและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

ตัวแปรที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้เป็นตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบถ่านกัมมันต์ เพื่อบ่งบอกถึงคุณภาพของถ่านกัมมันต์ที่ได้ ดังนี้

- ค่าการดูดซับไอโอดีน
- ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาณรูพรุน
- ค่าความร้อนของถ่านกัมมันต์
- ค่าปริมาณเถ้าและสารระเหย
- ค่าคาร์บอนคงตัว
- ค่าความชื้นของถ่านกัมมันต์

ตาราง 5 รายการแสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

อุปกรณ์และเครื่องมือการทดสอบการผลิตถ่าน	**ภาพประกอบ**	**รหัส/ประเภท**
1. อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ -เทอร์โมคัปเปิ้ล (Thermocouple) -สายเทอร์โมคัปเปิ้ล		-Type K
2. เครื่องบันทึกอุณหภูมิ		Graphtec midi Logger GL840

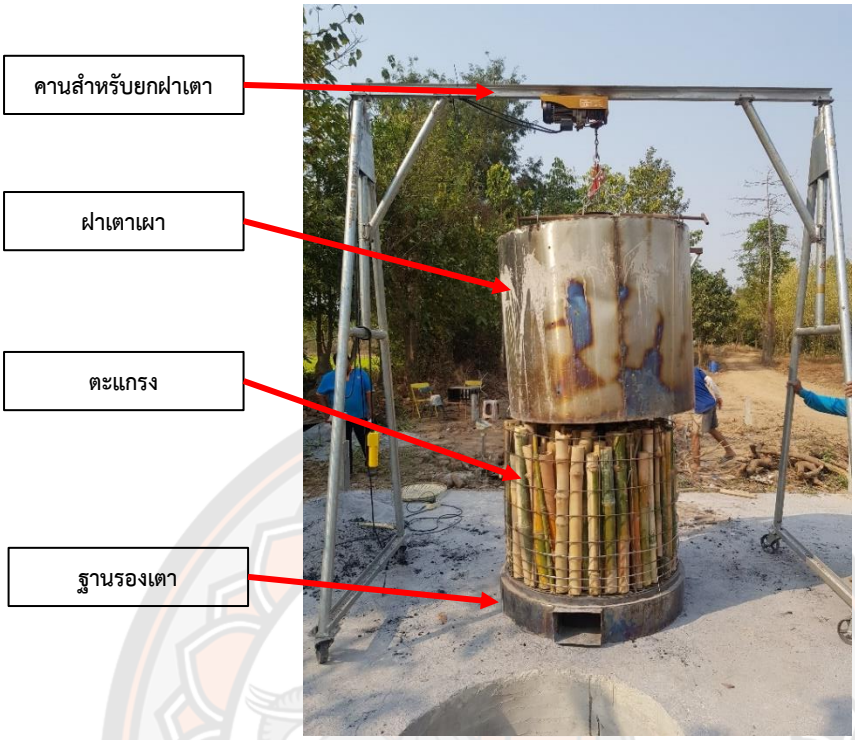
อุปกรณ์และเครื่องมือการทดสอบการผลิตถ่าน	ภาพประกอบ	รหัส/ประเภท
3. เครื่องมือวัดความชื้นชีวมวล (Moisture meter)		Moisture meter AR 971
4. เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอล		AND HW-100KGL

เครื่องมือและการพัฒนาเครื่องมือ

การออกแบบและสร้างเตาเผาถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพสูง มีส่วนประกอบดังนี้

ตาราง 6 แสดงส่วนประกอบของเตาเผาถ่าน

ข้อมูล	รายละเอียด
ฝาเตาเผา	ผนังของเตาเผานั้นหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อนจากเซรามิกส์ไฟเบอร์
ตะแกรงใส่วัตถุดิบ	เป็นตะแกรงที่มีการใช้สำหรับใส่ไม้ภายในเตาเผา
ฐานเตา	เป็นฐานที่รองรับตะแกรงและฝาเตาในการทำงาน
คานเหล็ก	เป็นคานเหล็กที่ใช้สำหรับเปิดเตาและยกฝาเตาออกเพื่อการกระตุ้น



ภาพ 11 ส่วนประกอบของเตาเผาถ่าน

กระบวนการเผาถ่าน

1. เตรียมวัตถุดิบในการเผาถ่านด้วยการตัดไม้ไผ่ความยาว 80 เซนติเมตร ทั้งหมด 300 กิโลกรัม ต่อการเผาหนึ่งครั้ง และทำการวัดความชื้นของไม้ไผ่ที่จะเผา จัดเรียงไม้ไผ่ลงตะแกรงเตาในแนวตั้ง และปิดฝาเตา หลังจากนั้นเตรียมไม้ฟืนสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงประมาณ 120 กิโลกรัม สำหรับการจุดหน้าเตาและเผาถ่าน ดังภาพ 11

ภาพ 12 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบในการเผาถ่าน

2. หลังจากการจุดไฟหน้าเตาติดแล้วทำการบันทึกอุณหภูมิของกระบวนการเผาถ่าน ในขณะเผาจะต้องคอยตรวจสอบอุณหภูมิ และเติมไม้ฟืนเป็นระยะ จนกระทั่งอุณหภูมิภายในเตาอยู่ในช่วง 800-1,000 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการเผา 4-5 ชั่วโมง ดังภาพ 12

ภาพ 13 ขั้นตอนในการเผาถ่าน

3. เมื่ออุณหภูมิภายในเตาสูงถึง 800 องศาเซลเซียส ให้ทำการกระตุ้นถ่านภายในเตา โดยการยกฝาเตาขึ้นเพื่อให้ถ่านสัมผัสกับอากาศเป็นเวลา 5 10 และ 15 นาที ซึ่งจะเป็นการไล่สารระเหยหรือสารทาร์ออกที่อาจหลงเหลืออยู่ ทำให้ถ่านบริสุทธิ์ขึ้น ดังภาพ 13

ภาพ 14 ขั้นตอนในการกระตุ้นถ่าน

4. เมื่อถึงเวลาที่กำหนดทำการหยุดกระบวนการกระตุ้นของถ่านโดยการดับถ่านด้วย เถ้า น้ำ ผสมเถ้า และน้ำ ดังภาพ 14 เพื่อนำตัวอย่างไปวิเคราะห์คุณสมบัติต่อไป

ภาพ 15 ขั้นตอนในการหยุดกระบวนการ ดับถ่านด้วยเถ้า

การเก็บรวบรวมข้อมูล

1. บันทึกค่าอุณหภูมิ ตามตำแหน่งต่างๆของเตาเผาถ่าน โดยการฝังอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ หรือเทอร์โมคัปเปิ้ล ทำการบันทึกค่าทุกๆ 5 นาที โดยเริ่มตั้งการจุดเตา ไปจนถึงการดับถ่าน
2. บันทึกน้ำหนักและวัดความชื้นของไม้ที่ใช้ในการเผาถ่าน
3. บันทึกน้ำหนักของถ่านที่ได้ก่อนการนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติ

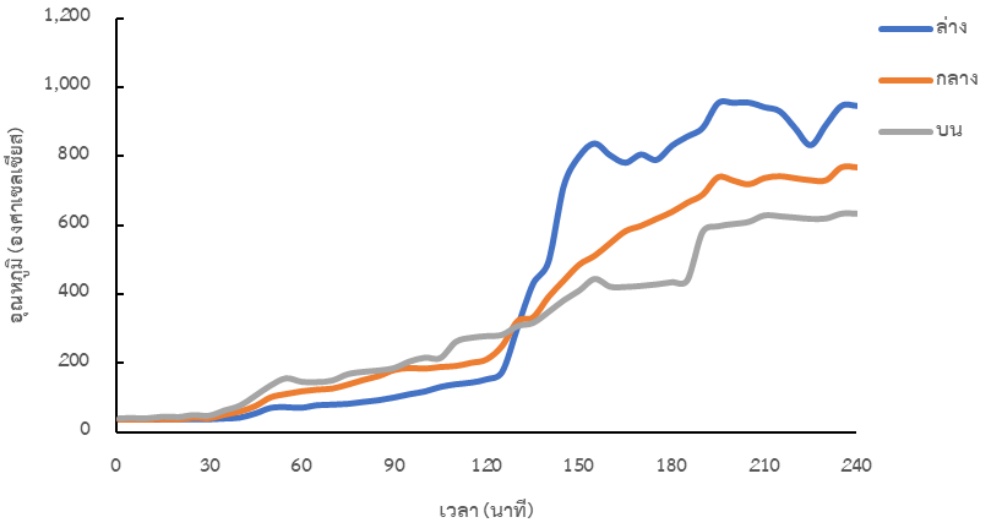
ภาพ 16 การเก็บข้อมูลอุณหภูมิของการเผา

บทที่ 4
ผลการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาเตาเผาถ่านรุ่นมังกรไฟ 84 และกระบวนการเผาถ่านให้ได้ถ่านกัมมันต์ โดยเพิ่มการกระตุ้นทางกายภาพ การเผาถ่านให้ได้ถ่านกัมมันต์นั้นต้องมีอุณหภูมิสูงกว่า 800 องศาเซลเซียส ซึ่งใช้เวลาในการเผา 4 -5 ชั่วโมง และทำการเปิดเตาเผากระตุ้นเป็นเวลา 5, 10, และ 15 นาที หลังจากนั้นทำการหยุดกระบวนการโดย 3 วิธี ใช้เถ้ากลบ ใช้น้ำดับและใช้เถ้าผสมน้ำ โดยมีผลการทดลองดังนี้

ความเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในการเผาถ่าน

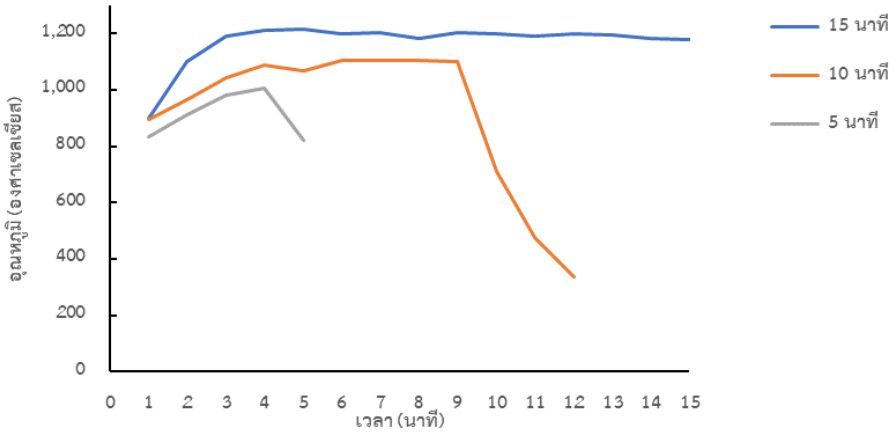
จากการทดสอบพบว่า การเผาถ่านกัมมันต์ด้วยเตาเผาถ่านรุ่นมังกรไฟ 84 สามารถเผาถ่านที่อุณหภูมิสงกว่า 800 องศาเซลเซียสได้ โดยกระบวนการเผาถ่านตั้งแต่เริ่มจนไปถึงเวลาประมาณ 120 นาที นั้นอยู่ในช่วงของ การไล่ความชื้นและสารระเหยภายในไม้ ทำให้อุณหภูมิของในแต่ละจุดนั้นมีความใกล้เคียงกันและอุณหภูมิในส่วนบนของเตาเท่ากับ 279 องศาเซลเซียส ส่วนกลางของเตาเท่ากับ 211 องศาเซลเซียส และส่วนล่างของเตา 153 องศาเซลเซียส และหลังจากนั้น อุณหภูมิส่วนล่างของเตาเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และจะสูงกว่าอุณหภูมิจะอยู่ในช่วง 800-1,000 องศาเซลเซียส ตั้งแต่นาทีที่ 150 ดังภาพที่ 17 ซึ่งความร้อนจะสูงกว่าในส่วนล่างของเตา เนื่องจากด้านบนของเตานั้นเหลือเพียงอากาศร้อนจากกระบวนการเผาถ่านซึ่งไม้ได้มีการลดขนาดลง ซึ่งกระบวนการเผาถ่านใช้ระยะเวลาทั้งหมด 240 นาที ในการไล่สารระเหยและน้ำมันทาร์ออกจากไม้ได้ทั้งหมดสังเกตจากควันของเตาที่ออกมา และจะมีไฟลุกติดที่ปล่องควันของเตา ดังภาพที่ 18



ภาพ 17 แสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในเตา

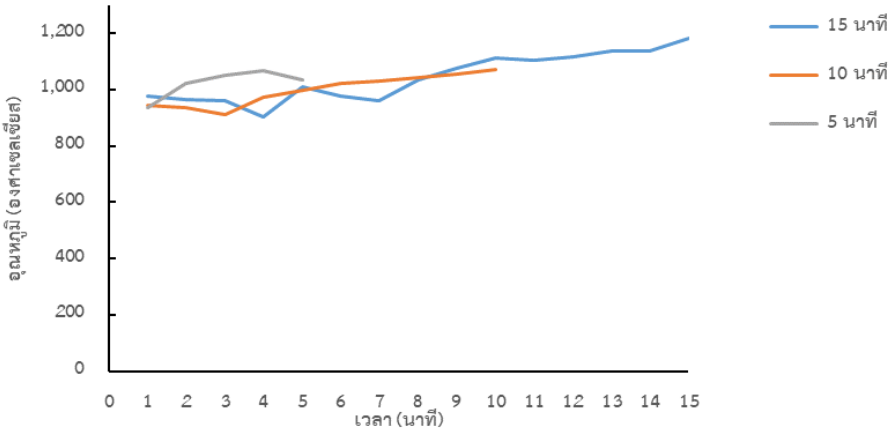
ภาพ 18 แสดงเปลวไฟที่ติดขึ้นหลังจากอุณหภูมิของการเผาถ่านก่อนเปิดเตา

อุณหภูมิในช่วงระยะเวลาการกระตุ้น



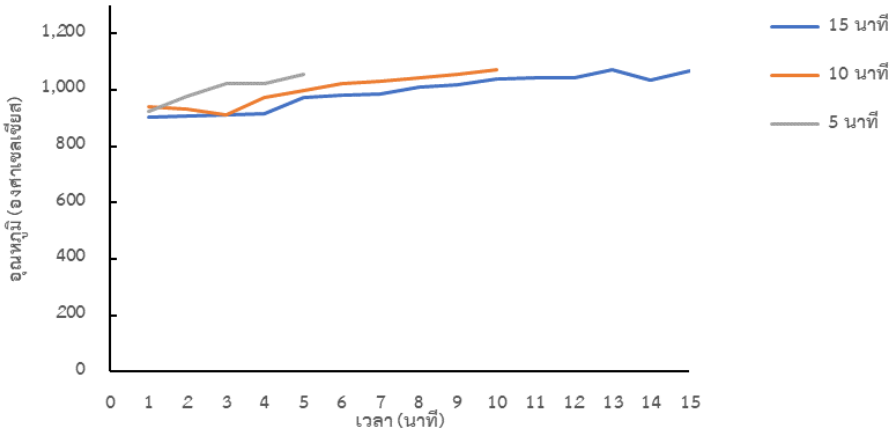
ภาพ 19 แสดงอุณหภูมิของการเปิดเตาตามเวลาและทำการกลบถ่านด้วยเถ้า

การทดลองกลบถ่านด้วยเถ้า โดยอุณหภูมิหลังจากเปิดเตาตามเวลา 5, 10, และ 15 นาที โดยอุณหภูมิหลังจาเปิดเตาตั้งสูงกว่า 800 องศาเซลเซียส และยังสูงขึ้นตามระยะเวลา โดยที่ 5 นาที อุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 1,004 องศาเซลเซียส ในเวลาที่ 4 นาที การเปิดเตาเวลา 10 นาที อุณหภูมิสูงสุด 1,106 องศาเซลเซียส ที่เวลา 7 นาที และอุณหภูมิลดลง การเปิดเตาที่ 15 นาที อุณหภูมิค่อยๆ สูงขึ้นและสูงที่สุดเท่ากับ 1,200 องศาเซลเซียส ในเวลา 12 นาที



ภาพ 20 แสดงอุณหภูมิของการเปิดเตาตามเวลาและทำการกลบถ่านด้วยเถ้าผสมน้ำ

การทดลองกลบถ่านด้วยเถ้าผสมน้ำ โดยอุณหภูมิหลังจากเปิดเตาตามเวลา 5, 10, และ 15 นาที โดยอุณหภูมิหลังจาเปิดเตาตั้งสูงกว่า 800 องศาเซลเซียส และยังสูงขึ้นตามระยะเวลา โดยที่ 5 นาที อุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 1,053 องศาเซลเซียส ในเวลาที่ 5 นาที การเปิดเตาเวลา 10 นาที อุณหภูมิสูงสุด 1,072 องศาเซลเซียส ที่เวลา 10 นาที และอุณหภูมิลดลง การเปิดเตาที่ 15 นาที อุณหภูมิค่อยๆสูงขึ้นและสูงที่สุดเท่ากับ 1,070 องศาเซลเซียส ในเวลา 15 นาที



ภาพ 21 แสดงอุณหภูมิของการเปิดเตาตามเวลาและทำการดับด้วยน้ำ

การทดลองดับด้วยน้ำ โดยอุณหภูมิหลังจากเปิดเตาตามเวลา 5, 10, และ 15 นาที โดยอุณหภูมิหลังจาเปิดเตาตั้งสูงกว่า 800 องศาเซลเซียส และยังสูงขึ้นตามระยะเวลา โดยที่ 5 นาที อุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 1,067 องศาเซลเซียส ในเวลาที่ 5 นาที การเปิดเตาเวลา 10 นาที อุณหภูมิ

สูงสุด 1,072 องศาเซลเซียส ที่เวลา 10 นาที และอุณหภูมิลดลง การเปิดเตาที่ 15 นาที อุณหภูมิค่อยๆสูงขึ้นและสูงที่สุดเท่ากับ 1,183 องศาเซลเซียส ในเวลา 15 นาที

วิเคราะห์ปริมาณผลผลิตที่ได้และค่าความชื้นของถ่านกัมมันต์

การวิเคราะห์ปริมาณผลผลิตและความชื้นของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกระบวนการเผาถ่าน โดยระยะเวลาเปิดเตานั้นมีผลต่อค่าความชื้นของถ่านที่ได้ ปริมาณของถ่านที่ได้นั้นแปรผกผันกับระยะเวลาที่เปิดเตา โดยการเปิดเตาที่ 5 นาทีจะได้ปริมาณของถ่านกัมมันต์ที่มากกว่าการเปิดเตาในระยะเวลา 10 และ 15 นาที เนื่องจากการเปิดเตามีผลต่อกระบวนการกระตุ้นที่เกิดขึ้น โดยระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นถ่านจะแปรสภาพกลายเป็นมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณถ่านที่ได้ลดลงอย่างมาก ดังตารางที่ 7

เนื่องจากในระยะเวลา 5 นาทีนั้นความชื้นมีค่ามากที่สุด และลดลงตามระยะเวลาการทดสอบ และประเภทของการดับนั้นมีผลอย่างมากต่อค่าความชื้น เนื่องจาก การดับด้วยเถ้านั้น ส่งผลให้มีค่าความชื้นของถ่านต่ำที่สุด และการใช้น้ำดับนั้นให้ค่าความชื้นน้อยกว่าการดับด้วยเถ้าผสมน้ำ เนื่องจากการดับด้วยเถ้าผสมน้ำนั้นส่งผลให้น้ำถูกดูดซับไว้ที่เถ้าส่งผลให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีค่าความชื้นสูงที่สุด

ตาราง 7 ปริมาณผลผลิตที่ได้และค่าความชื้นของถ่านกัมมันต์

การดับ	เวลาเปิดเตา (นาที)	น้ำหนักถ่าน (กิโลกรัม)	ค่าความชื้นมาตรฐานแห้ง
เถ้า	5	30	7.63
	10	26	2.65
	15	15	4.23
เถ้าผสมน้ำ	5	41	20.96
	10	33	16.28
	15	33	11.02
น้ำ	5	35	13.35
	10	33	19.55
	15	27	20.76

ค่าพลังงานความร้อนของถ่านกัมมันต์

การวิเคราะห์ค่าพลังงานความร้อนของถ่านกัมมันต์ที่ได้ โดยใช้การวัดค่าพลังงานความร้อนจากเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ เพื่อเปรียบเทียบถ่านจากกัมมันต์จากกระบวนการเผาถ่านด้วยเตาเผาถ่านรุ่นมังกรไฟ 84 ที่ทำการดับด้วย เถ้า เถ้าผสมน้ำ และน้ำ ค่าความร้อนสูงที่สุดเท่ากับ 7,562 แคลอรี่ต่อกรัม และมีค่าความร้อนน้อยที่สุด 6,511 แคลอรี่ต่อกรัม โดยถ่านที่ได้ต้องมีค่าความร้อนไม่ต่ำกว่า 6,000 แคลอรี่ต่อกรัม ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช.657/2547 ถ่านไม้หุงต้ม (Wood Charcoal for Cooking)[12]

ตาราง 8 แสดงค่าของพลังงานที่ได้จากถ่านกัมมันต์

การดับ	เวลาในการเปิดเตา (นาที)	ค่าความร้อน (จูลต่อกรัม)	ค่าความร้อน (แคลอรี่ต่อกรัม)
เถ้า	5	27,264	6,511
	10	31,467	7,515
	15	31,522	7,528
เถ้าผสมน้ำ	5	31,661	7,562
	10	30,401	7,261
	15	29,750	7,105
น้ำ	5	30,853	7,369
	10	31,216	7,455
	15	28,451	6,795

ค่าการดูดซับไอโอดีน

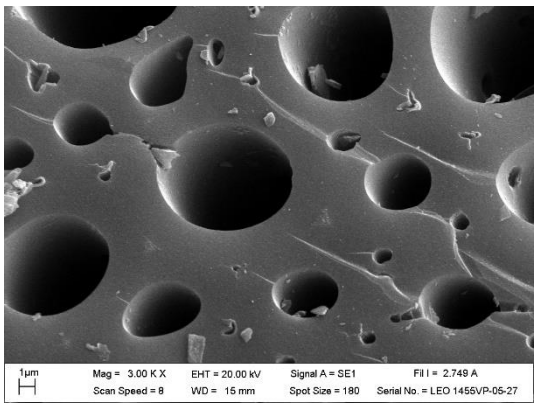
จากตารางที่ 9 พบว่าค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ นั้นเพิ่มขึ้นตามเวลา ในทุกการทดสอบโดยค่าการดูดซับไอโอดีนที่สูงที่สุดอยู่ในการใช้เถ้าดับที่ 15 นาทีมีค่าเท่ากับ 943.793 มิลลิกรัมต่อกรัมและค่าการดูดซับไอโอดีนที่ต่ำที่สุดอยู่ในการใช้น้ำดับที่ 5 นาทีมีค่าเท่ากับ 719.667 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งมากกว่า 150 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ถ่านดูดกลิ่น มผช.180/2560[13] และมากกว่า 600 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ถ่านกัมมันต์ มอก.900–2547[14]

ตาราง 9 แสดงค่าของการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์

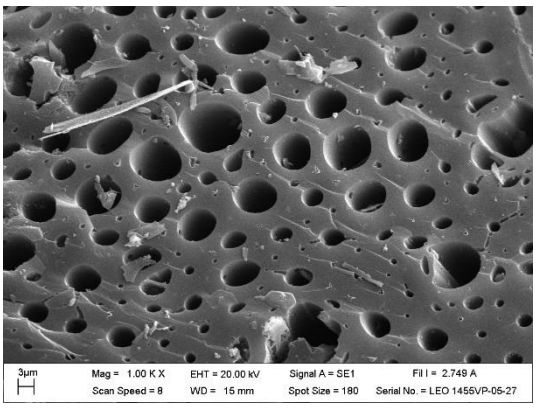
การดับ	เวลาในการเปิดเตา (นาที)	ค่าการดูดซับไอโอดีน (มิลลิกรัมต่อกรัม)
เถ้า	5	742.485
	10	901.750
	15	943.793
เถ้าผสมน้ำ	5	727.263
	10	894.062
	15	923.932
น้ำ	5	719.667
	10	860.306
	15	913.265

ภาพถ่ายอิเล็กตรอน(SEM)

ลักษณะโครงสร้างความเป็นรูพรุนของถ่านกัมมันต์ พบว่า รูพรุนที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นวงกลม ขนาดของรูพรุนนั้นมีความสัมพันธ์กับระยะเวลาในการเปิดเตาและอุณหภูมิในการเปิดเตา เนื่องจากในการเปิดเตา 5 นาทีนั้นขนาดของรูพรุนมีขนาดเล็กและปริมาณรูพรุนนั้นมีน้อยกว่า 10 และ 15 นาที

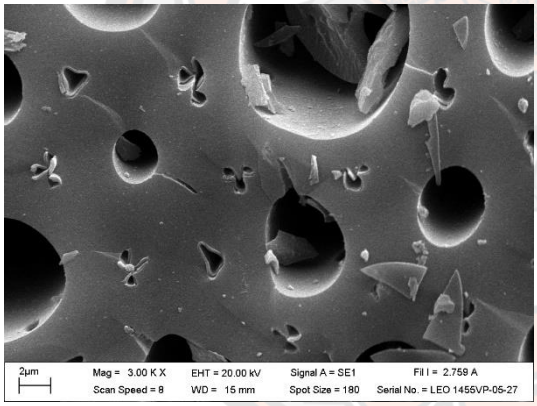


ก

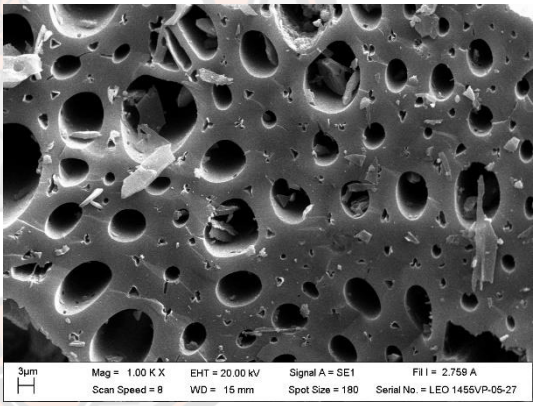


ข

ภาพ 22 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
ของถ่านที่ทำการเปิดเตาเป็นเวลา 5 นาที
(ก) กำลังขยาย 3000 เท่า
(ข) กำลังขยาย 1000 เท่า

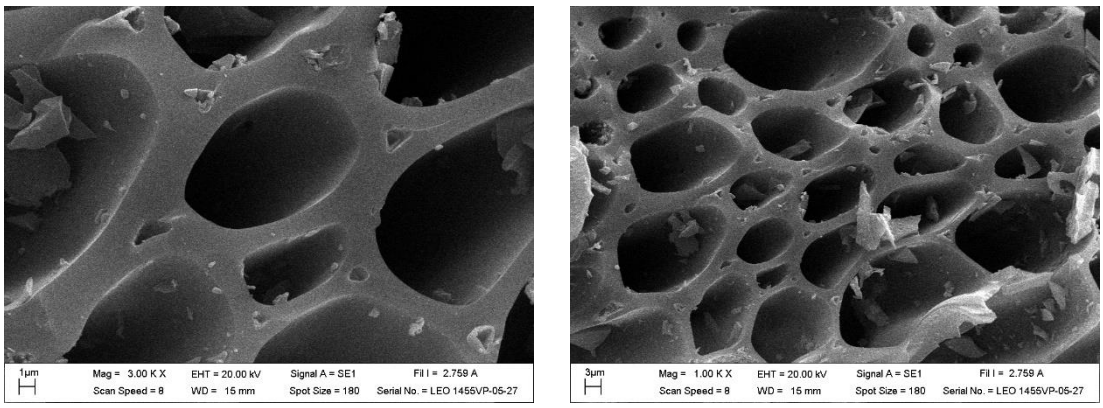


ก



ข

ภาพ 23 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
ของถ่านที่ทำการเปิดเตาเป็นเวลา 10 นาที
(ก) กำลังขยาย 3000 เท่า
(ข) กำลังขยาย 1000 เท่า



ก ข

ภาพ 24 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
ของถ่านที่ทำการเปิดเตาเป็นเวลา 15 นาที
(ก) กำลังขยาย 3000 เท่า
(ข) กำลังขยาย 1000 เท่า

การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและค่าปริมาตรรูพรุนของถ่าน

การทดสอบหาค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและค่าปริมาตรรูพรุนของถ่าน Surface area and porosity analyzer เป็นเทคนิคการวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิว (Surface area) ของสารที่ต้องการวิเคราะห์ โดยอาศัยเทคนิคการแทนที่พื้นที่ผิว หรือรูพรุนด้วยแก๊สไนโตรเจนไอโซเทิร์ม การดูดซับไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส จากการทดสอบพบว่า ช่วงระยะเวลาในการเปิดเตานั้นไม่มีผลต่อปริมาตรรูพรุนและขนาดของรูพรุนมากนั้น ในทางกลับกันการหยุดกระบวนการกระตุ้นด้วยการดับด้วยด้วยเถ้านั้น ให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่าการดับด้วยเถ้าผสมน้ำและน้ำ

ตาราง 10 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและค่าปริมาตรรูพรุนของถ่าน

การดับ	เวลาเปิดเตา (นาที)	พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเมตรต่อกรัม)	ปริมาตรของรูพรุน (ลูกบาศก์เมตร/กรัม)	ขนาดของรูพรุน (นาโนเมตร)
เถ้า	5	322.4263	0.1379	1.6441
	10	307.6319	0.13079	1.6939
	15	359.1234	0.1884	1.7775
น้ำเถ้า	5	120.4879	0.13886	1.6746
	10	304.5232	0.12507	1.7335
	15	116.5744	0.04647	1.7135

	5	120.807	0.03948	1.7697
น้ำ	10	349.2268	0.14465	1.7873
	15	213.7199	0.08966	1.6448

ประเมินความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการเผาถ่านกัมมันต์ด้วยเตาเผาถ่านรุ่นมังกรไฟ 84 งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตต่อหน่วย (Cost of production) พิจารณาจากราคาเครื่องมือและวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านของเตาเผาถ่าน ดังนี้

ตาราง 11 ประเมินความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์

รายการ	จำนวน	ราคา	หน่วย	รวม (บาท)
ต้นค่าทุนเตาเผาถ่าน	1	150,000	บาท/ชุด	150,000
ต้นทุนรายปีของเตาเผาถ่าน		7,500	บาท/ปี	7,500
ค่าแรงคนในการเผาถ่าน	2	300	บาท/คน	600
วัตถุดิบ	300	3	บาท/กิโลกรัม	900
เชื้อเพลิง	120	3	บาท/กิโลกรัม	300
ปริมาณถ่านที่ได้	30	120	บาท/กิโลกรัม	3,600
ต้นทุนรวมต่อการผลิต	1	1,200	บาท/รอบ	1,800
ราคาขายต่อรอบการผลิต	1	3,600	บาท/รอบ	3,600
กำไรต่อการผลิต	1	1,800	บาท/รอบ	1,800
ระยะเวลาที่ใช้ในการเผาถ่าน	5		ชั่วโมง	
จำนวนการเผาถ่านต่อเดือน	24		วัน/เดือน	

จำนวนการเผาถ่านต่อปี	12	เดือน/ปี

จากตาราง 11 ได้พิจารณาตุ้นทุนที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ ด้วยเตาเผาถ่านรุ่นมังกรไฟ 84 โดยใช้ไม้ไผ่ทั้งหมด 300 กิโลกรัม ต่อ 1 การผลิต จะได้ผลผลิตเฉลี่ย 30 กิโลกรัม คิดเป็นต้นทุนวัตถุดิบ 900 บาท ใช้เชื้อเพลิงเป็นไม้ทั้งหมด 100 กิโลกรัม คิดเป็นเงิน 300 บาท และมีการใช้คนตลอดกระบวนการเผาถ่านทั้งหมด 2 คน คิดเป็นเงิน 600 บาทต่อวัน รวมต้นทุนต่อการผลิตเท่ากับ 1,800 บาทต่อการผลิต ได้ถ่านกัมมันต์ทั้งหมด 30 กิโลกรัม ราคาขายเท่ากับ 100 บาทต่อกิโลกรัม การเผาถ่าน 1 ครั้งจะได้กำไรทั้งหมด 1,800 บาท จะคืนทุนจากการขายถ่านที่ได้จากการผลิตทั้งหมด 84 ครั้ง ซึ่งคิดเป็นเวลา 3 เดือน 15 วัน โดยประมาณ

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัย

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาเปรียบเทียบคุณภาพของถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ต่อช่วงเวลาการเปิดเตาเผาถ่านมังกรไฟ 84 และการหยุดกระบวนการด้วยการดับด้วยเถ้า น้ำผสมเถ้า และการใช้น้ำนั้น พบว่าระยะเวลาในการเปิดเตานั้นมีผลต่อคุณภาพของถ่าน และปริมาณถ่านที่ได้จากกระบวนการเผาถ่านโดยการเปิดเตาในระยะเวลา 5 นาที อุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 950 องศาเซลเซียส ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านเท่ากับ 719.667 มิลลิกรัมต่อกรัม และโครงสร้างรูพรุนที่มีขนาดเล็กและปริมาณน้อยที่สุด และระยะเวลาในการเปิดเตา 15 นาที อุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 1,200 องศาเซลเซียส ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านเท่ากับ 943.793 มิลิกรัมต่อกรัม และโครงสร้างรูพรุนมีขนาดใหญ่มากกว่า ซึ่งมีลักษณะของรูพรุนเป็นวงกลมเหมือนกัน เนื่องจากเป็นไม้ไผ่ชนิดเดียวกัน จากผลการเปรียบเทียบคุณภาพของถ่านกัมมันต์ที่กล่าวมา การเปิดเตาเผาถ่านที่ระยะเวลา 15 นาที ให้คุณภาพถ่านที่ดีที่สุด และมีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 235.19 ตารางเมตรต่อกรัม และปริมาตรรูพรุนของถ่านเท่ากับ 0.17 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม เนื่องการเปิดเตาเผาถ่านที่ระยะเวลา 15 นาที อุณหภูมิในช่วงเวลาการกระตุ้นสูงกว่า 1200 องศาเซลเซียส

ข้อเสอแนะ

1. วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ควรมีการตากแดดก่อนนำมาเผาถ่าน เนื่องจากวัตถุดิบมีความชื้นมากจะส่งผลต่อปริมาณเชื้อเพลิงหน้าเตา และทำให้เวลาในกระบวนการผลิตถ่านจะใช้เวลานานกว่าวัตุดิบชีวมวลที่มีความชื้นน้อยกว่า

2. ควรเพิ่มขั้นตอนการเก็บน้ำส้มควันไม้เพื่อลดการปลดปล่อยควันที่ออกจากเตา

3. ควรมีการนำถ่านกัมมันต์ไปทดสอบการดูดซับกลิ่นหรือการดูดซับสารเคมีต่างๆ เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าของถ่านกัมมันต์ที่ได้

บรรณานุกรม

1. พัชรินทร์ ฤชุวรารักษ์, พ.ต., การเผาถ่าน วิถีดั้งเดิมของชุมชนท้องถิ่น สู่เทคโนโลยีพลังงานทางเลือก. วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัยมย์ ปีที่ 6, 2557. 2: p. 52-71.
2. บุญ สวัสดิ์ชัย, การใช้ถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวลสำหรับการกำจัดโครเมียมจากน้ำเสียอุตสาหกรรม = *UTILIZATION OF ACTIVATED CARBON GENERATED FROM BIOMASS FOR REMOVAL OF CHROMIUM FROM INDUSTRIAL WASTE WATER*. 2548.
3. ลุตฟี สือนิ ; พิสิษฏ์ มณีโชติ, การปรับปรุงรูปแบบและเทคนิคการผลิตถ่านด้วยเตาขนาด 200 ลิตร. วารสารวิจัยเทคโนโลยีนวัตกรรม ปีที่ 2, 2561. ฉบับที่ 1: p. 21-34.
4. จันทิมา ชั่งสิริพร, แ., การผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้ยางพาราที่ได้จากโรงไฟฟ้าชีวมวลสำหรับงานเครื่องกรองน้ำ, in ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ 2559, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์: สงขลา.
5. สัมฤทธิ์ โม้พ่วง, คาร์บอนกัมมันต์. 2553, พิษณุโลก: มหาวิทยาลัยนเรศวร.
6. ธราพงษ์ วิทิตศานต์, ถ่านกัมมันต์ การผลิตและการนำไปใช้. พิมพ์ครั้งที่ 2. ed. 2554, กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
7. กรมป่าไม้, ส. โครงการธนาคารฟืน เตาเผาถ่าน. [cited 2566 16/5/2566]; Available from: http://old.forest.go.th/orip/index.php?option=com_content&view=article&id=465.
8. อรัญ ขวัญปาน; ชนะกานต์ พงศาสนองกุล, ประสิทธิภาพของน้าส้มควันไม้จากเตาเผาถ่าน. 2555, มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา.
9. ชัยชนะ, ธ. เตาเผาถ่าน 200 ลิตร. 2559 [cited 2566 15/04/2566]; Available from: https://engineer.mju.ac.th/wtms_webpageDetail.aspx?wID=1260.
10. Porada, S., et al., *Review on the science and technology of water desalination by capacitive deionization.* Progress in Materials Science, 2013. 58(8): p. 1388-1442.
11. Sahoo, S., et al., *Production and characterization of biochar produced from slow pyrolysis of pigeon pea stalk and bamboo.* Cleaner Engineering and Technology, 2021. 3: p. 100101.
12. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ถ่านไม้หุงต้ม มผช.657/2547. 2547, กรุงเทพฯ: กระทรวงอุตสาหกรรม.
13. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ถ่านดูดกลิ่น มผช.180/2560. 2560, กรุงเทพฯ: กระทรวงอุตสาหกรรม.
14. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ถ่านกัมมันต์ มอก.900-2547. 2547, กรุงเทพฯ: กระทรวงอุตสาหกรรม.

15. เฉลียว วัชรพุกก์. ไผ่:ความรู้ทั่วไปของไม้ไผ่. 2555 11 มิถุนายน 2563]; Available from: https://sites.google.com/site/bamjitra761/thin-ka-he-nid.

16. และพันธุ์พืช, ก.ส., การสำรวจไม้ไผ่ของประเทศไทย(พ.ศ.2552). 2555: จากกลุ่มสำรวจทรัพยากรป่าไม้ ส่วนสำรวจและวิเคราะห์ทรัพยากรป่าไม้ สำนักฟื้นฟูและพัฒาพื้นที่อนุรักษ์.

17. กรมพัฒนาที่ดิน. สัดส่วนของพื้นที่ปลูกไผ่ตามภูมิภาคต่างๆ ของประเทศไทย. 2563; Available from: http://www1.ldd.go.th/WEB_OLP/report_research_NE.html.

18. อนุสรณ์ สินสะอาด, การพัฒนาประสิทธิภาพเตาเผาถ่านกัมมันต์ จากกะลามะพร้าว. วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลาปาง ปีที่ 10 2561. ฉบับที่ 2: p. 95 - 108.

19. ธีรดิตถ์ โพธิตันติมงคล, ถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรโดยการกระตุ้นทางเคมี เพื่อการประยุกต์ใช้กำจัดสารมลพิษในน้ำ. วารสารหน่วยวิจัยวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อมเพื่อการเรียนรู้ ปีที่ 8 2560. 1.

20. สิริณ บุนนาค;สุภกร บุญยืน, คุณภาพด้านพลังงานของไม้ไผ่กิมซุ่ง (*Bambusa beecheyana)* ที่อายุการเติบโตต่างกัน. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปีที่ 8, 2561. ฉบับที่ 3 p. 7.

21. กิตติธัช สัจจากุล ; และคณะ การผลิตถ่านไม้ไผ่คุณภาพสูงเพื่อพัฒนาเป็นถ่านกัมมันต์โดยใช้เตาเผาถ่านดัดแปลงจากถังน้ำมัน 200 ลิตร. การประชุมการป่าไม้ ประจำปี พ.ศ. 2559 “เศรษฐกิจเชิงนิเวศบนฐานการป่าไม้”, 2559: p. 116-123.

22. พัทธกมล สมบุตร, การกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำด้วยถ่านกัมมันต์จากผักตบชวา, in สำนักวิทยบริการและเทคโนโลยีสารสนเทศ. 2561, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม: มหาสารคาม.

23. Pandiarajan, A., et al., *OPAC (orange peel activated carbon) derived from waste orange peel for the adsorption of chlorophenoxyacetic acid herbicides from water: Adsorption isotherm, kinetic modelling and thermodynamic studies.* Bioresour Technol, 2018. 261: p. 329-341.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก ข้อมูลการบันทึกอุณหภูมิในการทดลอง

ตาราง ก.1 ข้อมูลอุณหภูมิในช่วงเวลาการกระตุ้นด้วยการเปิดเตา 5, 10, และ 15 นาที หลังจากนั้นดับด้วยเถ้า

เวลา (นาที)	การเปิดเตา 15 นาที	การเปิดเตา 10 นาที	การเปิดเตา 5 นาที
1	898.2	896.8	834.4
2	1102.2	966.1	911.4
3	1189.2	1043.8	981.6
4	1212.8	1086.2	1004.7
5	1214.1	1066.5	822
6	1200.7	1103.1	
7	1204	1106.4	
8	1184.2	1105	
9	1203.6	1100.9	
10	1199.8	712.3	
11	1191.2	474.6	
12	1200.6	338.2	
13	1194.8		
14	1183.5		
15	1178.2		

ตาราง ก.2 ข้อมูลอุณหภูมิในช่วงเวลาการกระตุ้นด้วยการเปิดเตา 5, 10, และ 15 นาที หลังจากนั้นดับด้วยน้ำผสมเถ้า

เวลา (นาที)	การเปิดเตา 15 นาที	การเปิดเตา 10 นาที	การเปิดเตา 5 นาที
1	977.9	945.7	937.3
2	965.3	935.6	1023.5
3	960.9	912.6	1050.5
4	904.3	974.7	1067.4
5	1010.3	999.7	1035.5
6	978.6	1020.7	
7	960.2	1031.6	
8	1034.8	1044.8	
9	1076.6	1054.2	
10	1111.8	1072.6	
11	1104.4		
12	1116.4		
13	1135.7		
14	1137.2		
15	1183.6		

ตาราง ก.3 ข้อมูลอุณหภูมิในช่วงเวลาการกระตุ้นด้วยการเปิดเตา 5, 10, และ 15 นาที หลังจากนั้นดับด้วยน้ำ

เวลา (นาที)	การเปิดเตา 15 นาที	การเปิดเตา 10 นาที	การเปิดเตา 5 นาที
1	903.2	941.6	923.3
2	906	931.4	976
3	911.2	912.6	1020.5
4	914.3	974.7	1023.9
5	973.1	999.7	1053.8
6	983.2	1020.7	
7	985.4	1031.6	
8	1008.8	1044.8	
9	1019.5	1054.2	
10	1038.1	1072.6	
11	1042.3		
12	1043.1		
13	1070.8		
14	1035.5		
15	1067.3		

ภาคผนวก ข ผลการทดสอบค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน

ภาพ ข.1 แสดงข้อมูลการทดสอบหาค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่ทำการกระตุ้นด้วยการเปิดเตาที่ 15 นาที หลังจากนั้นทำการหยุดกระบวนการด้วยเถ้า

Sample:	002-538_Ash15min		
Operator:	TS		
Submitter:	K.Piyanut GS-Tech NU		
File:	F:\2023-04-10_K Pitanut SG-Tec...\002-53		
Started:	9/4/2566 9	Analysis a	N2
Completed:	10/4/2566	Analysis b	-195.850 °C
Report time:	18/4/2566	Thermal c	No
Sample mass:	0.1598 g	Ambient fr	11.2471 cm³ Measur
Analysis free space:	33.1130 c	Equilibrati	10 s
Low pressure dose:	None	Sample de	1.000 g/cm³
Automatic degas:	No		

Summary Report	
Surface Area	
Single point surface ar	355.6324 m²/g
BET Surface Area:	359.1234 m²/g
t-Plot Micropore Area:	306.3626 m²/g
t-Plot external surface	52.7608 m²/g
BJH Adsorption cumula	
between 1.7000 nm an	29.5571 m²/g

Pore Volume				
Single point adsorption				
less than 0.9384 nm wi	0.159586 cm³/g			
Single point desorption				
less than 20.7391 nm w	0.188413 cm³/g			
t-Plot micropore volume	0.155412 cm³/g			
BJH Adsorption cumula				
between 1.7000 nm and	0.023755 cm³/g			
BJH Desorption cumula				
between 1.7000 nm and	0.016981 cm³/g			
Pore Size				
Adsorption average por	1.7775 nm			
Desorption average por	2.0986 nm			
BJH Adsorption averag	3.2147 nm			
BJH Desorption averag	3.1495 nm			
D-H Desorption average	2.8554 nm			
DFT Pore Size				
Volume in Pores	<	1.483 nn	:	0.15311 c
Total Volume in Pores	<=	14.761 nn	:	0.15599 c
Area in Pores	>	14.761 nn	:	1.373 m
Total Area in Pores	>=	1.483 nn	:	3.829 m

ภาพ ข.2 แสดงข้อมูลการทดสอบหาค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่ทำการกระตุ้นด้วยการเปิดเตาที่ 10 นาที หลังจากนั้นทำการหยุดกระบวนการด้วยเถ้า

Sample:	002-535_Ash1min		
Operator:	TS		
Submitter:	K.Piyanut		
File:	F:\2023-04-07_K Piyanut SG-Tec...\002-535		
Started:	6/4/2566 1	Analysis a	N2
Completed	8/4/2566 8	Analysis b	-195.850 °C
Report tim	18/4/2566	Thermal c	No
Sample m	0.1429 g	Ambient fr	11.4243 cm³ Measure
Analysis fr	33.9911 cr	Equilibratic	10 s
Low pressu	None	Sample de	1.000 g/cm³
Automatic	No		

Summary Report

Surface Area	
Single poir	304.2172 m²/g
BET Surfa	307.6319 m²/g
t-Plot Micr	253.3499 m²/g
t-Plot exte	54.2819 m²/g
BJH Adso	
between 1.	29.4243 m²/g
BJH Deso	
between 1.	15.7569 m²/g

Pore Volume	
Single poir	
less than (	0.130276 cm³/g
Single poir	
less than 2	0.163739 cm³/g
t-Plot micr	0.128755 cm³/g
BJH Adso	
between 1.	0.029377 cm³/g
BJH Deso	
between 1.	0.015990 cm³/g

Pore Size	
Adsorption	1.6939 nm
Desorption	2.1290 nm
BJH Adso	3.9936 nm
BJH Deso	4.0591 nm
D-H Deso	2.5979 nm

DFT Pore Size

Volume in	<	1.483 nn	0.12484 c
Total Volu	<=	14.761 nı	0.13079 c
Area in Po	>	14.761 nı	0.000 m
Total Area	>=	1.483 nn	5.401 m

ภาพ ข.3 แสดงข้อมูลการทดสอบหาค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่ทำการกระตุ้นด้วยการเปิดเตาที่ 5 นาที หลังจากนั้นทำการหยุดกระบวนการด้วยเถ้า

TriStar II I	TriStar II 3	Page 1	
	Serial # 980	Unit 1	Port 2
Sample:	002-544_Ash5min		
Operator:	TS		
Submitter:	K.Piyanat SG-TechNU		
File:	F:\2023-05-01_K Piyanut SG-Tech...\002-5		
Started:	1/5/2566 1	Analysis a	N2
Completed	2/5/2566 2	Analysis b	-195.850 °C
Report tim	8/5/2566 1	Thermal c	No
Sample m	0.2169 g	Ambient fr	11.5417 cm³ Measure
Analysis f	34.4133 c	Equilibrati	10 s
Low press	None	Sample de	1.000 g/cm³
Automatic	No		
Summary Report			
Surface Area			
Single poi	339.3664 m²/g		
BET Surfa	322.4263 m²/g		
t-Plot Micr	250.8447 m²/g		

Pore Volume				
Single poir				
less than 0	0.132522 cm³/g			
Single poir				
less than 2	0.173857 cm³/g			
t-Plot micr	0.127590 cm³/g			
BJH Adso				
between 1.	0.034031 cm³/g			
BJH Deso				
between 1.	0.023633 cm³/g			
Pore Size				
Adsorption	1.6441 nm			
Desorptior	2.1569 nm			
BJH Adso	3.3384 nm			
BJH Deso	3.1643 nm			
D-H Deso	2.8771 nm			
DFT Pore Size				
Volume in	<	1.483 nm	:	0.13469 c
Total Volu	<=	14.761 nr	:	0.13790 c
Area in Po	>	14.761 nr	:	3.333 m²
Total Area	>=	1.483 nm	:	6.023 m²

ภาพ ข.4 แสดงข้อมูลการทดสอบหาค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่ทำการกระตุ้นด้วยการเปิดเตาที่ 15 นาที หลังจากนั้นทำการหยุดกระบวนการด้วยเถ้าผสมน้ำ

Sample:	002-539_WaterAsh15min		
Operator:	TS		
Submitter:	K.Piyanut GS-Tech NU		
File:	F:\2023-04-10_K Pitanut S...\002-539_Wat		
Started:	9/4/2566 9	Analysis a	N2
Completed	10/4/2566	Analysis b	-195.850 °C
Report tim	18/4/2566	Thermal c	No
Sample m	0.1527 g	Ambient fr	11.2656 cm³ Measure
Analysis f	33.3088 c	Equilibrati	10 s
Low press	None	Sample de	1.000 g/cm³
Automatic	No		

Summary Report

Surface Area	
Single poi	115.2135 m²/g
BET Surfa	116.5744 m²/g
t-Plot Micı	102.5712 m²/g
t-Plot exte	14.0032 m²/g
BJH Adso	
between 1	4.8278 m²/g

Pore Volume	
Single poi	
less than (	0.049937 cm³/g
Single poi	
less than :	0.059570 cm³/g
t-Plot micı	0.052199 cm³/g
BJH Adso	
between 1	0.005513 cm³/g
BJH Deso	
between 1	0.002113 cm³/g
Pore Size	
Adsorptior	1.7135 nm
Desorptior	2.0440 nm
BJH Adso	4.5674 nm
BJH Deso	60.3264 nm

DFT Pore Size

Volume in	<	1.483 nr	: 0.04054 c
Total Volu	<=	14.761 n	: 0.04647 c
Area in Pc	>	14.761 n	: 0.000 m
Total Area	>=	1.483 nr	: 7.655 m

ภาพ ข.5 แสดงข้อมูลการทดสอบหาค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่ทำการกระตุ้นด้วยการเปิดเตาที่ 10 นาที หลังจากนั้นทำการหยุดกระบวนการด้วยเถ้าผสมน้ำ

TriStar II I	TriStar II 3	Page 1						
	Serial # 980	Unit 1	Port 3					
Sample:	002-536_WaterAsh10min							
Operator:	TS							
Submitter:	K.Piyanut							
File:	F:\2023-04-07_K Piyanut S...\002-536_Wa							
Started:	6/4/2566 1	Analysis a	N2					
Completed	8/4/2566 8	Analysis b	-195.850 °C					
Report tim	18/4/2566	Thermal c	No					
Sample m	0.1461 g	Ambient fr	11.5581 cm³	Measure				
Analysis f	34.4889 c	Equilibrati	10 s					
Low press	None	Sample de	1.000 g/cm³					
Automatic	No							
Summary Report								
Surface Area								
Single poi	301.2613 m²/g							
BET Surfa	304.5232 m²/g							
t-Plot Micr	256.7697 m²/g							
Pore Volume								
Single poi								
less than (	0.131975 cm³/g							
Single poi								
less than :	0.159529 cm³/g							
t-Plot micr	0.130516 cm³/g							
BJH Adso								
between 1	0.020623 cm³/g							
BJH Deso								
between 1	0.006952 cm³/g							
Pore Size								
Adsorptior	1.7335 nm							
Desorptior	2.0955 nm							
BJH Adso	3.5242 nm							
BJH Deso	3.6425 nm							
D-H Deso	2.4392 nm							
DFT Pore Size								
Volume in	<	1.483 nr	:	0.10855 c				
Total Volu	<=	14.761 n	:	0.12507 c				
Area in Pc	>	14.761 n	:	0.000 m				

ภาพ ข.6 แสดงข้อมูลการทดสอบหาค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่ทำการกระตุ้นด้วยการเปิดเตาที่ 5 นาที หลังจากนั้นทำการหยุดกระบวนการด้วยเถ้าผสมน้ำ

TriStar II I	TriStar II 3	Page 1	
	Serial # 980 Unit 1 Port 3		
Sample:	002-545_WaterAsh5min		
Operator:	TS		
Submitter:	K.Piyanat SG-TechNU		
File:	F:\2023-05-01_K Piyanut SG...\002-545_W		
Started:	1/5/2566 1	Analysis a	N2
Completed	2/5/2566 2	Analysis b	-195.850 °C
Report tim	8/5/2566 1	Thermal c	No
Sample m	0.2083 g	Ambient fr	11.6419 cm³ Measure
Analysis fi	34.7716 ci	Equilibrati	10 s
Low press	None	Sample de	1.000 g/cm³
Automatic	No		
Summary Report			
Surface Area			
Single poi	354.4975 m²/g		
BET Surfa	335.0263 m²/g		
t-Plot Micı	286.5069 m²/g		
t-Plot exte	48.5194 m²/g		

Pore Volume			
Single poi			
less than (	0.146570 cm³/g		
Single poi			
less than :	0.174636 cm³/g		
t-Plot micı	0.145396 cm³/g		
BJH Adso			
between 1	0.020770 cm³/g		
BJH Deso			
between 1	0.010886 cm³/g		
Pore Size			
Adsorptior	1.7499 nm		
Desorptior	2.0850 nm		
BJH Adso	3.2329 nm		
BJH Deso	3.0701 nm		
D-H Deso	2.5303 nm		
DFT Pore Size			
Volume in	<	1.483 nr :	0.13048 c
Total Volu	<=	14.761 n :	0.13886 c
Area in Pc	>	14.761 n :	0.000 m

ภาพ ข.7 แสดงข้อมูลการทดสอบหาค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่ทำการกระตุ้นด้วยการเปิดเตาที่ 15 นาที หลังจากนั้นทำการหยุดกระบวนการด้วยน้ำ

TriStar II I	TriStar II 3	Page 1	
	Serial # 980	Unit 1	Port 1
Sample:	002-537_Water15min		
Operator:	TS		
Submitter:	K.Piyanut GS-Tech NU		
File:	F:\2023-04-10_K Pitanut SG-T...\002-537_		
Started:	9/4/2566 9	Analysis a	N2
Completed	10/4/2566	Analysis b	-195.850 °C
Report tim	18/4/2566	Thermal c	No
Sample m	0.1425 g	Ambient fr	11.2874 cm³ Measur
Analysis f	33.3590 c	Equilibrati	10 s
Low press	None	Sample de	1.000 g/cm³
Automatic	No		
Summary Report			
Surface Area			
Single poi	210.8392 m²/g		
BET Surfa	213.7199 m²/g		
t-Plot Micı	169.5120 m²/g		
t-Plot exte	44.2079 m²/g		

Single poi				
less than (	0.087880 cm³/g			
Single poi				
less than :	0.114968 cm³/g			
t-Plot micı	0.086313 cm³/g			
BJH Adso				
between 1	0.020950 cm³/g			
BJH Deso				
between 1	0.007565 cm³/g			
Pore Size				
Adsorptior	1.6448 nm			
Desorptior	2.1518 nm			
BJH Adso	3.8330 nm			
BJH Deso	3.7278 nm			
D-H Deso	2.4856 nm			
DFT Pore Size				
Volume in	<	1.483 nr	:	0.07803 c
Total Volu	<=	14.761 n	:	0.08966 c
Area in Pc	>	14.761 n	:	0.000 m
Total Area	>=	1.483 nr	:	11.457 r

ภาพ ข.8 แสดงข้อมูลการทดสอบหาค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่ทำการกระตุ้นด้วยการเปิดเตาที่ 10 นาที หลังจากนั้นทำการหยุดกระบวนการด้วยน้ำ

Sample:	002-534_Water10min		
Operator:	TS		
Submitter:	K.Piyanut		
File:	F:\2023-04-07_K Piyanut SG-T...\002-534_		
Started:	6/4/2566 1	Analysis a	N2
Completed	8/4/2566 8	Analysis b	-195.850 °C
Report tim	18/4/2566	Thermal c	No
Sample m	0.1458 g	Ambient fr	11.3019 cm³ Measur
Analysis f	33.6444 c	Equilibrati	10 s
Low press	None	Sample de	1.000 g/cm³
Automatic	No		
Summary Report			
Surface Area			
Single poi	345.8267 m²/g		
BET Surfa	349.2268 m²/g		
t-Plot Micr	301.3841 m²/g		
t-Plot exte	47.8427 m²/g		
BJH Adso			
between 1	25.3822 m²/g		

Pore Volume			
Single poi			
less than (	0.156041 cm³/g		
Single poi			
less than :	0.181722 cm³/g		
t-Plot micr	0.152877 cm³/g		
BJH Adso			
between 1	0.024087 cm³/g		
BJH Deso			
between 1	0.017140 cm³/g		
Pore Size			
Adsorptior	1.7873 nm		
Desorptior	2.0814 nm		
BJH Adso	3.7959 nm		
BJH Deso	3.9691 nm		
D-H Deso	2.6801 nm		
DFT Pore Size			
Volume in	<	1.483 nr :	0.14063 c
Total Volu	<=	14.761 n :	0.14465 c
Area in Pc	>	14.761 n :	0.000 m

ภาพ ข.9 แสดงข้อมูลการทดสอบหาค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่ทำการกระตุ้นด้วยการเปิดเตาที่ 5 นาที หลังจากนั้นทำการหยุดกระบวนการด้วยน้ำ

Sample:	002-543_Water5min		
Operator:	TS		
Submitter:	K.Piyanat SG-TechNU		
File:	F:\2023-05-01_K Piyanut SG-Te...\002-54		
Started:	1/5/2566 1	Analysis a	N2
Completed	2/5/2566 2	Analysis b	-195.850 °C
Report tim	8/5/2566 1	Thermal c	No
Sample m	0.2134 g	Ambient fr	11.2951 cm³ Measur
Analysis f	33.5058 c	Equilibrati	10 s
Low press	None	Sample de	1.000 g/cm³
Automatic	No		

Summary Report

Surface Area	
Single poi	128.8070 m²/g
BET Surfa	120.4879 m²/g
t-Plot Micı	119.3136 m²/g
t-Plot exte	1.1744 m²/g
BJH Adso	
between 1	0.1245 m²/g

Pore Volume	
Single poi	
less than (	0.053306 cm³/g
Single poi	
less than :	0.031096 cm³/g
t-Plot micı	0.060832 cm³/g
BJH Adso	
between 1	0.004590 cm³/g
BJH Deso	
between 1	0.009812 cm³/g
Pore Size	
Adsorptior	1.7697 nm
Desorptior	1.0323 nm
BJH Adso	147.4948 nm
BJH Deso	94.9191 nm

DFT Pore Size			
Volume in	<	1.483 nr :	0.03948 c
Total Volu	<=	15.941 n :	0.03948 c
Area in Pc	>	15.941 n :	0.000 m
Total Area	>=	1.483 nr :	0.000 m