การประยุกต์กากหม้อกรองจากโรงงานน้ำตาลเพื่อเป็นวัสดุเพาะเมล็ดโดยผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน

น.ส.ชนิตสิรี สุเมธี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Application of Filter Cake from Sugar Industry to Seed Sowing Media via Hydrothermal Carbonization

Miss Chanidsiree Sumathee

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Environmental Science
Inter-Department of Environmental Science
GRADUATE SCHOOL
Chulalongkorn University
Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์กากหม้อกรองจากโรงงานน้ำตาลเพื่อเป็นวัสดุเพาะเมล็ดโดยผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน
โดย	น.ส.ชนิตสิรี สุเมธี
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์ กนกกันฑพงษ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.บุณยฤทธิ์ ปัญญาภิญโญผล

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธรรมนูญ หนูจักร)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ชวาลภาฤทธิ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์ กนกกันฑพงษ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุณยฤทธิ์ ปัญญาภิญโญผล)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สีหนาท ประสงค์สุข)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพล เกียรติกิตติพงษ์)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไฮโดรชาร์จากกากหม้อกรองเหลือทิ้งโรงงานน้ำตาล เพื่อให้เป็นวัสดุเพาะเมล็ดคล้ายพีทมอส ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชันภายใต้อุณหภูมิ 160 180 และ 200 องศาเซลเซียส ที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง และอัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:5 1:10 และ 1:15 ผลการศึกษาพบว่า สภาวะไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชันที่เหมาะสม คือการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:5 ร้อยละผลผลิตที่ได้เป็น 84 เมื่อทดสอบทางสถิติพบว่าลักษณะสมบัติของไฮโดรชาร์และพีทมอสส่วนใหญ่ค่าไม่แตกต่างกัน ได้แก่ ค่าความสามารถในการอุ้มน้ำสูงสุดเป็น 4.57 และ 3.93 กรัมต่อกรัม ค่าความพรุนทั้งหมดร้อยละ 45.3 และ 38.9 ค่าช่องว่างขนาดใหญ่ร้อยละ 2.8 และ 3.0 และค่าช่องว่างขนาดเล็กร้อยละ 42.4 และ 35.7 ค่าการนำไฟฟ้า 151 และ 140 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ปริมาณไนโตรเจนร้อยละ 1.34 และ1.51 ฟอสฟอรัส 188.18 และ 413.73 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และโพแทสเซียม 146.70 และ 372.08 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ จากนั้นนำไฮโดรชาร์และพีทมอสทดสอบปลูกกับพืชสองชนิดพบว่าต้นอ่อนทานตะวันในวัสดุไฮโดรชาร์และพีทมอส ได้ค่าเปอร์เซ็นต์การงอกร้อยละ 95.31 และ 90.63 ในขณะที่ผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊คในวัสดุไฮโดรชาร์และพีทมอส ได้ค่าเปอร์เซ็นต์การงอกร้อยละ 89.06 และ 87.50 ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จึงสรุปได้ว่าไฮโดรชาร์มีความสามารถในการเพาะเมล็ดได้เหมือนกับพีทมอส นอกจากนี้ ต้นทุนค่าการดำเนินงานในการผลิตไฮโดรชาร์เท่ากับ 54.64 บาทต่อกิโลกรัม ซึ่งมีราคาต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพีทมอสที่ขายตามท้องตลาดที่ 80 บาทต่อกิโลกรัม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต .....

ปีการศึกษา 2562 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

6087117920 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE
KEYWORD: peat moss, hydrochar, hydrothermal carbonization

Chanidsiree Sumathee : Application of Filter Cake from Sugar Industry to Seed Sowing Media via Hydrothermal Carbonization. Advisor: Asst. Prof. Vorapot Kanokkantapong, Ph.D. Co-advisor: Assoc. Prof. Bunyarit Panyapinyopol, Ph.D.

This research aimed to determine the optimum condition for production of hydrochar derived from filter cake from sugar industry via hydrothermal carbonization under different temperature 160, 180 and 200 °C at the reaction time 1, 2 and 3 hours with biomass to water 1:5, 1:10 and 1:15. The results found that optimum hydrothermal process condition were at temperature 180°C, reaction time 3 hours and biomass to water 1:5. Yield of hydrochar production at this condition was 84 %. The statistical tests found that mainly properties of hydrochar and peat moss were not significant difference i.e., water holding capacity 4.57 and 3.93 g/g, total porosity 45.3 and 38.9 %, air-filled porosity 2.8 and 3 %, water-filled porosity 42.2 and 35.7 %, conductivity 151 and 140 μmhos/cm, nitrogen 1.51 and 13.4 %, phosphorus 188.18 and 413.73 mg/kg, and potassium 146.70 and 372.08 mg/kg, respectively. Hydrochar and peat moss were then investigated on planting with two plants. It was found that hydrochar and peat moss were not significant difference on germination of sunflower sprouts (95.31 and 90.63 %) and green oak lettuce (89.06 and 87.50 %). Hence, it can be concluded that hydrochar has the same seeding ability as peat moss. Furthermore, the operating cost of hydrochar production is 54.64 baht/kg which is lower cost than peat moss (sold in market) at 80 baht/kg.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Field of Study: Environmental Science Student's Signature .....
Academic Year: 2019 Advisor's Signature .....
Co-advisor's Signature .....

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์ กนกกันฑพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา ข้อแนะนำต่าง ๆ ให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมทั้งให้แนวคิดต่าง ๆ ในการทำงานและเป็นแบบอย่างที่ดีให้ยึดถือปฏิบัติตามอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่อศิษย์ อีกทั้งกำลังใจที่ดีตลอดมา และขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.บุณยฤทธิ์ ปัญญาภิญโญผล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมสำหรับคำแนะนำต่าง ๆ

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ ประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร.สีหนาท ประสงค์สุข กรรมการ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพล เกียรติกิตติพงษ์ สำหรับคำปรึกษาและความคิดเห็นต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัยรวมทั้งตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์และถูกต้องยิ่งขึ้น ขอขอบคุณภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับการใช้ห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทดลอง และขอขอบคุณหลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับทุนอุดหนุนเพื่อใช้ในการทำวิจัยครั้งนี้

ท้ายสุดขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา สมาชิกในครอบครัวทุกท่าน เพื่อนๆ และเจ้าหน้าที่บริการวิทยาศาสตร์หลักสูตรวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม สำหรับคำปรึกษาคำแนะนำต่าง ๆ และกำลังใจที่ดีตลอดการศึกษาและการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอดจนเสร็จสมบูรณ์

ชนิตสิรี สุเมธี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ค

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ง

กิตติกรรมประกาศ ..... จ

สารบัญ ..... ฑ

สารบัญรูป ..... น

สารบัญตาราง ..... ป

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ 2

1.3 สมมติฐานการวิจัย 3

1.4 ขอบเขตการวิจัย 3

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย 4

บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5

2.1 น้ำตาล 5

2.1.1 กระบวนการผลิตน้ำตาลทรายดิบ 5

2.1.1.1 กระบวนการสกัดน้ำอ้อย (Juice Extraction) 5

2.1.1.2 กระบวนการทำความสะอาดหรือทำใสน้ำอ้อย (Juice Purification) 5

2.1.1.3 การต้ม (Evaporation) 6

2.1.1.4 การเคี่ยว (Crystallization) 6

2.1.1.5 การปั่นแยกผลึกน้ำตาล (Centrifugaling) 6

2.1.2 กระบวนการผลิตน้ำตาลทรายขาวและน้ำตาลรีไฟน์ 6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.1.2.1 การปั่นละลาย (Affinated Centrifugaling) 6
2.1.2.2 การทำความสะอาดและฟอกสี (Clarification) 6
2.1.2.3 การอบ (Drying) 6
2.1.1.4 กากอ้อย (Bagasses) 6
2.2 วัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาล 7
2.2.1 ชานอ้อย (Bagasse) 7
2.2.2 กากน้ำตาล (Molasses) 7
2.2.3 กากหม้อกรองหรือตะกอนขี้หม้อกรอง (Filter Cake or Filter Mud) 7
2.3 กากหม้อกรอง 8
2.3.1 สมบัติกากหม้อกรอง 8
2.3.2 ประโยชน์ของกากหม้อกรอง 8
2.3.2.1 การใช้กากหม้อกรองเป็นวัสดุปรับปรุงดิน 8
2.3.2.2 การนำกากตะกอนไปใช้เป็นอาหารสัตว์ 9
2.4 เทคโนโลยีการแปรสภาพชีวมวล (Biomass Conversion Technology) 9
2.4.1 เทคโนโลยีการแปรสภาพด้วยวิธีการชีวเคมี (Biochemical Conversion Technology) 9
2.4.1.1 Enzymatic Hydrolysis 9
2.4.1.2 การย่อย (Digestion) 9
2.4.1.3 การหมัก (Fermentation) 10
2.4.2 เทคโนโลยีการแปรสภาพด้วยวิธีการทางความร้อนเคมี (Thermochemical Conversion Technology) 10
2.4.2.1 กระบวนการเผาไหม้ (Combustion) 10
2.4.2.2 การแยกสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis) 10
2.4.2.3 กระบวนการทอริแฟคชั่น (Torrefaction) 11

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.4.2.4 การทำให้เป็นก๊าซ (Gasification) 11
2.4.2.5 ปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal Reaction) 12
2.5 ไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน 16
2.5.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยา (Reaction mechanism) 16
2.5.1.1 ไฮโดรไลซิส 17
2.5.1.2 ดีไฮเดรชัน 17
2.5.1.3 ดีคาร์บอกซีเลชัน 17
2.5.1.4 พอลิเมอไรเซชัน 17
2.5.1.5 อะโรมาติกเซชัน 18
2.5.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน 18
2.5.2.1 อุณหภูมิ (Temperature) 18
2.5.2.2 เวลา (Time) 19
2.5.2.3 อัตราส่วนชีวมวลต่อน้ำ (Biomass to Water Content) 19
2.5.2.4 ความดัน (Pressure) 19
2.5.2.5 การป้อนน้ำเข้าสู่ระบบความเป็นกรด-ด่าง (Feedwater pH) 20
2.5.3 ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล 20
2.6 วัสดุเพาะเมล็ด 20
2.6.1 ความสำคัญและลักษณะของวัสดุ 20
2.6.2 วัสดุเพาะเมล็ดที่ดี 21
2.6.3 วัสดุเหลือใช้จากการเกษตรต่าง ๆ มาทำวัสดุเพาะกล้า 21
2.6.3.1 ขุยมะพร้าว (Coir Dust) 22
2.6.3.2 แกลบดิบ (Rice Hush) 22
2.6.3.3 ขี้เถ้าแกลบ (Rice Hush Ash) 22
2.6.3.4 ถ่านแกลบ (Rice husk charcoal) 22

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.6.3.5 ขี้เลื่อย (Saw Dust) 22
2.6.3.6 กากหม้อกรอง (Filter Cake) 23
2.6.3.7 เวอร์มิคูไลด์ (Vermiculite) 23
2.6.3.8 ร็อควูล 23
2.6.3.9 พีทมอส (Peat Moss) 23
2.6.4 คุณสมบัติบางประการทางเคมีและฟิสิกส์ของวัสดุเพาะที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช 25
2.6.4.1 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของวัสดุ 25
2.6.4.2 กิจกรรมของจุลินทรีย์กับค่าความเป็นกรด-ด่าง 25
2.6.4.3 ธาตุอาหารกับค่าความเป็นกรด-ด่าง 25
2.6.4.4 สารละลายเกลือในวัสดุเพาะและดิน 26
2.6.4.5 อิทธิพลของเกลือต่อการเจริญเติบโตของพืช 26
2.6.4.6 Buffering Capacity 26
2.6.4.7 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C:N ratio) ของวัสดุเพาะต่อพืช 26
2.6.4.8 ความหนาแน่น (Bulk Density) 27
2.6.4.9 ความโปร่ง (Porosity) 27
2.6.4.10 ความเสถียรภาพของวัสดุเพาะ 27
2.6.4.11 อากาศในดิน 27
2.6.4.12 อุณหภูมิของวัสดุ 28
2.6.5 การเพาะเมล็ด 28
2.6.5.1 ขั้นตอนในการเพาะเมล็ด 28
2.7 ต้นอ่อนทานตะวัน 29
2.7.1 ลักษณะต้นอ่อนทานตะวัน (Sunflower Sprout) 29
2.7.2 ระยะเวลาในการปลูก 29

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.7.3 ปัจจัยในการงอกของเมล็ด 29
2.7.3.1 การมีชีวิตของเมล็ดและการงอกของเมล็ด 29
2.7.3.2 สภาพแวดล้อมในขณะเพาะเมล็ดที่เหมาะสมดังนี้ 30
2.7.4 ประโยชน์ของพืช 30
2.7.4.1 คุณค่าทางโภชนาการ 30
2.7.4.2 คุณค่าทางเศรษฐกิจ 31
2.8 ผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊ค 31
2.8.1 ลักษณะของผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊ค (*Lactuca* sativa var. *crispa* L.) 31
2.8.2 ระยะเวลาในการปลูก 31
2.8.3 ปัจจัยในการงอก 31
2.8.4 ประโยชน์ของพืช 31
2.8.4.1 คุณค่าทางโภชนาการ 31
2.8.4.2 คุณค่าทางเศรษฐกิจ 32
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 32
2.9.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน 32
2.9.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบการใช้พืช 37
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย 44
3.1 พื้นที่ศึกษาวิจัย 44
3.2 เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมี 44
3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ 44
3.2.2 สารเคมี 45
3.2 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย 46
3.2.1 การเตรียมวัสดุและสารเคมี 46
3.2.2 สังเคราะห์วัสดุเพาะเมล็ดผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน 47

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.2.2.1 การติดตั้งอุปกรณ์ 47
3.2.2.2 ขั้นตอนการผลิตไฮโดรชาร์ 48
3.2.3 การศึกษาองค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของกากหม้อกรองและไฮโดรชาร์ 50
3.2.4 การเพิ่มปริมาณของวัสดุที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน 51
3.2.5 การทดสอบการปลูก 51
3.2.5.1 การเตรียมวัสดุเพาะเมล็ด 51
3.2.5.2 การเตรียมเมล็ดต้นอ่อนทานตะวันและผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊ค 51
3.2.5.3 การปฏิบัติดูแลรักษา 51
3.2.5.4 การเพาะเมล็ด 52
3.2.5.5 การบันทึกข้อมูล 52
3.3 การประเมินต้นทุนของการผลิตไฮโดรชาร์ 53
3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล 53
3.4.1 สถิติที่ใช้ในการศึกษา 53
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล 54
4.1 สมบัติของกากหม้อกรองที่นำมาใช้ในการทดลอง 54
4.2 สมบัติทางกายภาพของไฮโดรชาร์ 55
4.2.1 ผลผลิตที่ได้ (Yield) 56
4.2.2 ค่าความสามารถในการอุ้มน้ำ (Water holding capacity) 57
4.2.3 ค่าความหนาแน่นรวมของดิน (Bulk density) 58
4.2.4 ค่าความพรุนทั้งหมด (Total porosity) 60
4.2.5 ค่าช่องว่างขนาดใหญ่ (air-filled porosity) 61
4.2.6 ค่าช่องว่างขนาดเล็ก (water-filled porosity) 62
4.3 สมบัติทางเคมีของไฮโดรชาร์ 63
4.3.1 ความเป็นกรด–ด่าง (pH) 63

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.3.2 การนำไฟฟ้าของดิน (Electrical Conductivity) 66
4.3.3 ปริมาณอินทรียวัตถุ (Organic Matter) 67
4.3.4 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของดิน (Cation Exchange Capacity). 68
4.3.5 ธาตุอาหารหลัก (Macronutrients) 70
4.3.6 องค์ประกอบโดยละเอียด (Ultimate analysis) 71
4.4 การศึกษาการทดสอบการปลูก 72
4.4.1 การทดสอบปลูกต้นอ่อนทานตะวัน 73
4.4.2 การทดสอบการปลูกผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊ค 77
4.5 การศึกษาการประเมินต้นทุนของวัสดุหลังจากผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน 81
4.5.1 การคำนวณค่าไฟฟ้าและค่าน้ำ 81
4.5.1.1 การคำนวณค่าไฟฟ้าและค่าน้ำของตู้อบความร้อนที่ใช้ในการศึกษา 81
4.5.1.2 การคำนวณค่าไฟฟ้าและค่าน้ำของถังปฏิกรณ์ขนาดใหญ่ที่ใช้ในระดับอุตสาหกรรม 82
4.5.2 การคำนวณพลังงานไฟฟ้า 83
4.5.2.1 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของตู้อบความร้อนในระดับห้องปฏิบัติการ 83
4.5.2.2 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของถังปฏิกรณ์ขนาดใหญ่ในระดับอุตสาหกรรม 83
4.5.3 การคำนวณพลังงานความร้อน 83
4.5.3.1 พลังงานความร้อนในระดับห้องปฏิบัติการ 83
4.5.3.2 พลังงานความร้อนของถังปฏิกรณ์ขนาดใหญ่ในระดับอุตสาหกรรม 84
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 85
5.1 สรุปผลการวิจัย 85
5.2 ข้อเสนอแนะ 86
บรรณานุกรม 87

ภาคผนวก ก 94
ภาคผนวก ข 97
ภาคผนวก ค 101
ภาคผนวก ง 107
ประวัติผู้เขียน 122

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลย่อยสลายพันธะทางเคมีของชีวมวล 13

รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาที่เกิดในน้ำที่ความดันและอุณหภูมิสูง 14

รูปที่ 2.3 แผนผังของปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลลิควิแฟคชันเบื้องต้น 14

รูปที่ 2.4 แผนภาพเฟสของน้ำ 15

รูปที่ 2.5 กลไกการเกิดกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชั่น 15

รูปที่ 2.6 (1) ลักษณะของพีทมอสแบบละเอียด (2) ลักษณะของพีทมอสแบบหยาบ..... 24

รูปที่ 2.7 (1) ประเภทของพีมมอสแบบไวท์พีท (2) ประเภทของพีมมอสแบบแบล็คพีท 24

รูปที่ 3.1 แผนผังสรุปวิธีดำเนินการวิจัย..... 46

รูปที่ 3.2 ลักษณะกากหม้อกรอง..... 47

รูปที่ 3.3 Stainless steel reactor..... 47

รูปที่ 3.4 Glass reactor 48

รูปที่ 3.5 เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า (Power meter) 53

รูปที่ 4.1 ผลผลิตที่ได้ของไฮโดรชาร์จากกากหม้อกรอง..... 56

รูปที่ 4.2 ค่าความสามารถในการอุ้มน้ำของกากหม้อกรอง ไฮโดรชาร์ และพีทมอส 58

รูปที่ 4.3 ค่าความหนาแน่นรวมของดินของ กากหม้อกรอง ไฮโดรชาร์ และพีทมอส..... 60

รูปที่ 4.4 ค่าความพรุนทั้งหมดของกากหม้อกรอง ไฮโดรชาร์ และพีทมอส..... 61

รูปที่ 4.5 ค่าช่องว่างขนาดใหญ่ทั้งหมดของกากหม้อกรอง ไฮโดรชาร์ และพีทมอส 62

รูปที่ 4.6 ค่าช่องว่างขนาดเล็กทั้งหมดของกากหม้อกรอง ไฮโดรชาร์ และพีทมอส 63

รูปที่ 4.7 ค่าความเป็นกรด–ด่าง ของกากหม้อกรอง ไฮโดรชาร์ และพีทมอส 64

รูปที่ 4.8 ค่าการนำไฟฟ้าของกากหม้อกรอง ไฮโดรชาร์ และพีทมอส 67

รูปที่ 4.9 ปริมาณอินทรียวัตถุของกากหม้อกรอง ไฮโดรชาร์ และพีทมอส 68

รูปที่ 4.10 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของดิน..... 69

รูปที่ 4.11 ไฮโดรชาร์..... 72

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน 40

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตของพืช 42

ตารางที่ 3.1 การออกแบบการทดลอง..... 49

ตารางที่ 3.2 เครื่องมือ/เทคนิคที่ใช้สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกากหม้อกรองและไฮโดรชาร์..... 50

ตารางที่ 3.3 สถิติที่ใช้ในการศึกษาในระบบการทดลอง 53

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของกากหม้อกรองที่นำมาวิเคราะห์โดยวิธีทางเคมี..... 55

ตารางที่ 4.2 สมบัติกายภาพของไฮโดรชาร์เมื่อผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน..... 59

ตารางที่ 4.3 สมบัติทางเคมีของไฮโดรชาร์เมื่อผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน 65

ตารางที่ 4.4 ปริมาณธาตุอาหารหลักของวัสดุ..... 70

ตารางที่ 4.5 องค์ประกอบธาตุของไฮโดรชาร์เปรียบเทียบกับกากหม้อกรอง..... 72

ตารางที่ 4.6 เปอร์เซ็นต์การงอกของต้นอ่อนทานตะวันที่มีอายุ 7 วัน 73

ตารางที่ 4.7 ความสูงของต้นอ่อนทานตะวันในวัสดุแต่ละชนิดที่ใช้ในการทดสอบเพาะเมล็ด 74

ตารางที่ 4.8 ความยาวรากของต้นอ่อนทานตะวันที่มีอายุ 7 วัน 75

ตารางที่ 4.9 วัสดุเพาะเมล็ดทั้ง 3 ชนิดต่อน้ำหนักผลผลิตสดและน้ำหนักแห้งของต้นอ่อนทานตะวันในระยะเวลา 7 วัน 76

ตารางที่ 4.10 วัสดุเพาะเมล็ดทั้ง 3 ชนิดต่อต่อเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นของต้นอ่อนทานตะวันในระยะเวลา 7 วัน 76

ตารางที่ 4.11 เปอร์เซ็นต์การงอกของผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊คที่มีอายุ 7 วัน 77

ตารางที่ 4.12 ความสูงของผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊คในวัสดุแต่ละชนิดที่ใช้ในการทดสอบเพาะเมล็ด 78

ตารางที่ 4.13 ความยาวรากของผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊คที่มีอายุ 7 วัน 78

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.14 ความกว้างของผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊คในวัสดุแต่ละชนิดที่ใช้ในการทดสอบเพาะเมล็ด 79

ตารางที่ 4.15 จำนวนใบเฉลี่ยของผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊คที่มีอายุ 7 วัน 79

ตารางที่ 4.16 วัสดุเพาะเมล็ดทั้ง 3 ชนิดต่อน้ำหนักผลผลิตสดและน้ำหนักแห้งของผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊ค ในระยะเวลา 7 วัน 80

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ทำให้วัสดุในการเพาะเมล็ดมีความสำคัญอย่างมาก ทั้งช่วยในการเจริญเติบโตของต้นกล้าเพื่อช่วยค้ำจุนส่วนของพืชที่อยู่เหนือดินให้ตั้งตรง เก็บสำรองน้ำ ธาตุอาหาร และดูดซับความชื้น เพื่อเป็นประโยชน์ต่อพืช รวมทั้งสามารถแลกเปลี่ยนอากาศระหว่างรากพืชกับบรรยากาศเหนือวัสดุเพาะเมล็ด (เนตรชนก เกียรติ์นนทพัทธ์ และ ชวนพิศ อรุณรังสิกุล, 2555) พีทมอส (Peat moss) เป็นวัสดุจากธรรมชาติที่นิยมนำมาเพาะเมล็ด ได้จากการทับถมของซากพืชในสภาพอับอากาศในพื้นที่เขตอบอุ่นเป็นเวลานานหลายร้อยปี (ทองกร สุภาโชค, 2557) พีทมอสเป็นวัสดุที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ มีสมบัติทั้งทางกายภาพและเคมีที่เหมาะสมคือ มีน้ำหนักเบา สะอาด ปราศจากเชื้อโรค อุ้มน้ำได้ดี มีช่องว่างสำหรับการถ่ายเทหรือหมุนเวียนของอากาศ มีปริมาณธาตุอาหารเพียงพอสำหรับการเจริญเติบโต และสะดวกในการนำไปใช้ จากสมบัติดังกล่าวจึงทำให้พีทมอสมีราคาแพงเมื่อเทียบกับราคาของวัสดุอินทรีย์อื่น ๆ เช่น ขุยมะพร้าว แกลบดิบที่ใช้ในการปลูกพืช ด้วยเหตุนี้ประเทศไทยจึงต้องนำเข้าพีทมอสจากต่างประเทศราคากิโลกรัมละ 50-300 บาท คิดเป็นมูลค่ารวมปีละ 500 ล้านบาท และมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อย ๆ (ธรรมศักดิ์ ทองเกตุ, 2561) นอกจากนี้หลายประเทศเริ่มรณรงค์ให้เลิกใช้เพราะเป็นการทำลายสิ่งแวดล้อม เนื่องจากต้องขุดขึ้นมาจากชั้นดิน ดังนั้นหากสามารถหาแนวทางการผลิตวัสดุที่มีลักษณะคล้ายพีมทอสด้วยการใช้เทคโนโลยีได้ จะช่วยลดการนำเข้าจากต่างประเทศ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

การทำวัสดุเพาะเมล็ดเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์คล้ายพีทมอสนั้น เริ่มจากการนำวัสดุอินทรีย์มาผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน (Hydrothermal carbonization) จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า มีการนำกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชันมาประยุกต์ใช้กับวัสดุอินทรีย์เหลือทิ้ง เช่น งานวิจัยของ ทองกร สุภาโชค (2557) นำผักตบชวามาผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน ทำให้ได้วัสดุคล้ายพีทมอส โดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชันเป็นการย่อยสลายชีวมวลด้วยกระบวนการทางเคมีความร้อนเพื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติและสถานะของชีวมวล โดยให้ความร้อนกับชีวมวลในเครื่องปฏิกรณ์ที่เป็นสภาพปิด ความดันมากกว่า 1 บรรยากาศ มีสารตัวเร่งปฏิกิริยาและความชื้นภายใต้อุณหภูมิ 150-250 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 1-12 ชั่วโมง ซึ่งกระบวนการเหล่านี้จะลดระยะเวลาการทำปฏิกิริยาให้สั้นลงและเพิ่มผลผลิต ทั้งนี้ลักษณะของกระบวนดังกล่าวจะคล้ายคลึงกับกระบวนการเกิดเชื้อเพลิงตามธรรมชาติ เช่น ถ่านหิน น้ำมัน

ปิโตรเลียม และก๊าซธรรมชาติ ฯลฯ ที่เกิดจากการทับถมของซากพืช ซากสัตว์ ภายใต้อุณหภูมิ ความดัน และระยะเวลาหลายล้านปี แต่ในทางกลับกันกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลจะใช้ระยะเวลาที่สั้นกว่าเป็นอย่างมาก มวลที่ได้จากกระบวนการจะอยู่ในรูปของแข็งที่เรียกว่า ถ่านชีวภาพ หรือ ไฮโดรชาร์ โดยลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้จะผันแปรตามชนิดของชีวมวลเริ่มต้น ซึ่งวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีคาร์บอนปริมาณมากเหมาะกับการเป็นสารตั้งต้นในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน

อุตสาหกรรมน้ำตาลในระหว่างกระบวนการผลิตน้ำตาลจะเกิดผลผลิต 2 ประเภท คือ ผลิตภัณฑ์ ได้แก่ น้ำตาลประเภทต่าง ๆ และผลิตภัณฑ์พลอยได้ ได้แก่ กากอ้อย (Bagasse) กากน้ำตาล (Molasses) และกากหม้อกรองหรือกากขี้หม้อกรอง (Filter mud or Filter cake) ที่ได้จากการกรองน้ำอ้อยซึ่งมีสิ่งเจือปน เช่น เศษต้นอ้อย ดิน รวมทั้งไอออนของอินทรีย์และอนินทรีย์สารเมื่อผ่านผ้ากรอง กากตะกอนจะถูกกำจัดทิ้งจากกระบวนการผลิต จากปริมาณการผลิตน้ำตาลจำนวนมากทำให้มีปริมาณกากหม้อกรองในประเทศไทยประมาณ 1.5 - 4.5 ล้านตันต่อปี (ณัฐวุฒิ ปลื้มใจ, 2561) กากหม้อกรองจัดเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งปัจจุบันถูกวางกองทิ้งในโรงงานเพื่อรอส่งกำจัดในปริมาณมหาศาล แม้บางส่วนจะมีการนำไปให้เกษตรกรทำเป็นวัสดุปรับปรุงคุณภาพดิน แต่ก็ยังคงเป็นสิ่งที่ไม่มีราคา อย่างไรก็ตามองค์ประกอบของกากหม้อกรองมีคาร์บอนในปริมาณมาก จึงน่าจะสามารถนำมาเป็นวัสดุตั้งต้นในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน เพื่อใช้ให้เกิดประโยชน์ได้

ดังนั้นงานวิจัยครั้งนี้จึงสนใจศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกากหม้อกรองเหลือทิ้งซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากกระบวนการผลิตน้ำตาล มาปรับปรุงคุณภาพโดยผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน เพื่อให้ได้วัสดุที่มีลักษณะคล้ายพีทมอสซึ่งเป็นวัสดุเพาะเมล็ด และนำมาทดสอบประสิทธิภาพโดยการเพาะเมล็ดต้นอ่อนทานตะวันและผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊ค อันเป็นแนวทางในการพัฒนาผลผลิต เพิ่มมูลค่าของกากหม้อกรอง และลดปัญหาทางสิ่งแวดล้อม

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตวัสดุคล้ายพีทมอสจากกากหม้อกรองด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน

1.2.2 เพื่อศึกษาความสามารถในการเพาะเมล็ดของวัสดุคล้ายพีทมอส

1.3 สมมติฐานการวิจัย

1.3.1 กากหม้อกรองผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชันที่อุณหภูมิต่ำและเวลาน้อยจะให้ประสิทธิภาพที่เหมาะสมต่อการเพาะเมล็ดต้นอ่อนทานตะวันและผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊ค

1.3.2 วัสดุคล้ายพีทมอสที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชันทำให้ต้นอ่อนทานตะวันและผักกาดหอมเจริญเติบโตได้ดีเทียบเท่ากับพืชที่ปลูกในพีทมอส

1.4 ขอบเขตการวิจัย

การศึกษาครั้งนี้เป็นการวิจัยในห้องปฏิบัติการทดลอง (Experimental Research) โดยดำเนินการในห้องปฏิบัติการ ณ ห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีขอบเขตการวิจัยดังนี้

1.4.1 วัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาลที่นำมาใช้คือ กากหม้อกรอง ได้รับความอนุเคราะห์จากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาล ในจังหวัดเพชรบูรณ์

1.4.2 ศึกษากระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน โดยนำกากหม้อกรองลงในถังปฏิกรณ์โดยปรับอัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา และระยะเวลาทำปฏิกิริยา

1.4.3 วิเคราะห์องค์ประกอบทางกายภาพและทางเคมีของกากหม้อกรอง โดยวัดสมบัติที่ต้องการวิเคราะห์ของตัวอย่างทั้งหมด ได้แก่ ความหนาแน่นรวมของดิน (Bulk density) ความพรุนทั้งหมด (Total porosity) ความสามารถในการอุ้มน้ำ (Water holding capacity: WHC) เปอร์เซ็นต์ช่องว่างขนาดใหญ่ (Air-filled porosity) เปอร์เซ็นต์ช่องว่างขนาดเล็ก (Water-filled porosity) ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ปริมาณอินทรียวัตถุ (Organic Matter: OM) ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total phosphorus) ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมด (Total potassium) ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total nitrogen) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของดิน (Cation exchange capacity: C.E.C) การนำไฟฟ้าของดิน (Electrical Conductivity: EC) ความชื้น (Moisture) และองค์ประกอบธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน ทั้งก่อนและหลังเมื่อผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน

1.4.4 ศึกษาการเพิ่มปริมาณกากหม้อกรองที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน โดยทำการเลือกวัสดุที่มีอุณหภูมิ เวลา และอัตราส่วนของกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น ที่มีค่าใกล้เคียงกับคุณสมบัติพีทมอส

1.4.5 ศึกษาการเตรียมวัสดุเพาะเมล็ด โดยวัสดุปลูกแต่ละชนิดหรือวัสดุผสมมีทั้งหมด 3 สูตร ได้แก่ พีทมอส กากหม้อกรอง ไฮโดรชาร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1.4.6 บันทึกข้อมูลอัตราการเจริญเติบโตของพืช โดยทดสอบการปลูกต้นอ่อนทานตะวัน ได้แก่ เปอร์เซ็นต์การงอก ความสูงต้น น้ำหนักสดต้น น้ำหนักแห้งต้น เส้นผ่าศูนย์กลางต้น และทดสอบปลูกผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊ค ได้แก่ เปอร์เซ็นต์การงอก จำนวนใบ ความกว้างของพุ่ม ความสูงต้น น้ำหนักสดต้น น้ำหนักแห้งต้น

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1.5.1 ข้อมูลที่ได้จะเป็นพื้นฐานในการนำของเหลือทิ้งนำไปใช้ประโยชน์

1.5.2 เพื่อพัฒนาวัสดุเพาะเมล็ดให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับพีทมอสที่นำเข้าจากต่างประเทศ

1.5.3 เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาผลผลิตและเพิ่มมูลค่าของเหลือทิ้ง โดยการนำไปใช้ประโยชน์ทั้งทางด้านการเกษตรและในเชิงพาณิชย์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 2
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำตาล

องค์การน้ำตาลระหว่างประเทศ (International Sugar Organization: ISO) คาดการณ์ว่าในปี 2560 และ 2561 ผลผลิตน้ำตาลโลกอยู่ที่ระดับ 179.448 ล้านตัน ซึ่งมีปริมาณเพิ่มขึ้น 11.075 ล้านตัน จากปีก่อนที่ 168.378 ล้านตัน นอกจากนี้ประเทศไทยยังถือเป็นอันดับหนึ่งในการผลิตอ้อยและน้ำตาลในเขตภูมิภาคอาเซียนและส่งออกน้ำตาลมากเป็นอันดับสองของโลก โดยผลผลิตน้ำตาลทรายต่อตันอ้อยรวมทั้งประเทศอยู่ที่ 107.94 กิโลกรัมต่อตันอ้อย เมื่อเปรียบเทียบกับปีการผลิตในปี 2558 และ 2559 อยู่ที่ 104.05 กิโลกรัมต่อตันอ้อย (สำนักคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย, 2560)

โรงงานน้ำตาลจะมีช่วงฤดูการหีบอ้อยเพื่อที่จะผลิตน้ำตาลนั้นจะเริ่มดำเนินการผลิตเดือนพฤศจิกายนและสิ้นสุดประมาณเดือนพฤษภาคมของทุกปี โดยจะทำการผลิตน้ำตาลทราย 3 ประเภท คือน้ำตาลทรายดิบ (Raw Sugar) น้ำตาลทรายขาว (White Sugar) ทรายขาวบริสุทธิ์ (Refined Sugar) (กรกิจ ทันสมัย, 2554)

2.1.1 กระบวนการผลิตน้ำตาลทรายดิบ

กระบวนการผลิตน้ำตาลทรายเป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ซึ่งมีการใช้เครื่องจักรหนักหลากหลาย ดังนั้นกระบวนการย่อยในทุกส่วนของกระบวนการผลิต (ฉันทนา พันธุ์เหล็ก, 2557) มีดังนี้

2.1.1.1 กระบวนการสกัดน้ำอ้อย (Juice Extraction)

ทำการสกัดน้ำอ้อยโดยใส่อ้อยเข้าไปในชุดลูกหีบ 4-5 ชุด ส่วนกากอ้อยที่ผ่านการสกัดน้ำอ้อยจากลูกหีบ ชุดสุดท้ายจะถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้ภายในเตาหม้อไอน้ำเพื่อผลิตน้ำตาลทรายและไอน้ำมาใช้ในกระบวนการผลิต

2.1.1.2 กระบวนการทำความสะอาดหรือทำใสน้ำอ้อย (Juice Purification)

น้ำอ้อยที่ได้ทั้งหมดจะเข้าสู่กระบวนการทำใส เนื่องจากน้ำอ้อยมีสิ่งสกปรกต่าง ๆจึงต้องแยกเอาส่วนเหล่านี้ออก โดยผ่านวิธีทางกล เช่น ผ่านเครื่องกรองต่าง ๆ และวิธีทางเคมีเช่นโดยให้ความร้อนและผสมปูนขาว

2.1.1.3 การต้ม (Evaporation)

น้ำอ้อยที่ผ่านการทำใสแล้ว จะถูกนำเข้าสู่ชุดหม้อต้ม (Multiple Evaporator) เพื่อระเหยเอาน้ำออก (ประมาณร้อนละ 70) โดยน้ำอ้อยข้นออกมาจากหม้อต้มลูกสุดท้ายเรียกว่าน้ำเชื่อม (Syrup)

2.1.1.4 การเคี่ยว (Crystallization)

น้ำเชื่อมที่ได้จากการต้มจะถูกนำเข้าหม้อเคี่ยวระบบสุญญากาศ (Vacuum Pan) เพื่อระเหยน้ำออกจนน้ำเชื่อมถึงจุดอิ่มตัว ที่จุดนี้ผลึกน้ำตาลจะเกิดขึ้นมาโดยที่ผลึกน้ำตาลและกากน้ำตาลที่ได้จากการเคี่ยวนี้รวมเรียกว่า Massecuite

2.1.1.5 การปั่นแยกผลึกน้ำตาล (Centrifugaling)

Massecuite ที่ได้จากการเคี่ยวจะถูกนำไปปั่นแยกผลึกน้ำตาลออกจากกากน้ำตาลโดยใช้เครื่องปั่น (Centrifugals) ผลึกน้ำตาลที่ได้จะเป็นน้ำตาลดิบ

2.1.2 กระบวนการผลิตน้ำตาลทรายขาวและน้ำตาลรีไฟน์

น้ำตาลทรายดิบถูกนำไปละลายน้ำแล้วถูกผ่านเข้า 5 ขั้นตอนการผลิตดังนี้

2.1.2.1 การปั่นละลาย (Affinated Centrifugaling)

นำน้ำตาลดิบมาผสมกับน้ำร้อนหรือน้ำเหลืองจากการปั่นละลาย (Green Molasses) น้ำตาลดิบที่ผสมนี้เรียกว่า แมกม่า (Magma) และแมกม่านี้จะถูกนำไปปั่นละลายเพื่อล้างคราบเหลืองหรือกากน้ำตาลออก

2.1.2.2 การทำความสะอาดและฟอกสี (Clarification)

น้ำเชื่อมจะถูกนำไปละลายอีกครั้งจากหม้อปั่นเพื่อผลิตน้ำตาลและน้ำตาลบางส่วนที่ยังไม่หมดจากการปั่นจะผ่านตะแกรงกรองเข้าผสมกับปูนขาว เข้าฟอกสีด้วยผ่านเข้าไปในหม้อฟอก ต่อจากนั้นจะผ่านเข้าสู่การหม้อกรองแบบใช้แรงดันเพื่อแยกตะกอนออก ส่วนน้ำเชื่อมเข้าสู่การฟอกด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุเป็นครั้งสุดท้ายจะได้น้ำเชื่อมรีไฟน์ (Fine Liquor)

2.1.2.3 การอบ (Drying)

การผลิตน้ำตาลรีไฟน์และน้ำตาลทรายขาวที่ได้จากการปั่นจะเข้าสู่หม้ออบ (Dryer) เพื่อไล่ความชื้นออกแล้วบรรจุกระสอบเพื่อจำหน่าย

2.1.1.4 กากอ้อย (Bagasses)

ส่วนของชานอ้อยน้ำที่ได้จากกระบวนการสกัดน้ำอ้อยจากชุดลูกหีบสุดท้ายโดยปัจจุบันบริษัทใช้กากอ้อยเป็นเชื้อเพลิงสำหรับผลิตไฟฟ้าและไอน้ำในกระบวนการผลิตน้ำตาลนอกจากนี้กากอ้อยสามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเยื่อกระดาษและเป็นส่วนผสมในการผลิตอาหารสัตว์

2.2 วัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาล

ในระหว่างกระบวนการผลิตน้ำตาลนอกจากจะได้น้ำตาล ยังเกิดผลิตภัณฑ์พลอยได้อื่น ๆ ของอ้อยที่เหลือจากกระบวนการผลิตน้ำตาลที่สามารถนำไปใช้ในการทำเกษตรอินทรีย์ได้ เช่น ชานอ้อย (Bagasse) กากน้ำตาลหรือโมลาส (Molasses) กากหม้อกรองหรือตะกอนขี้หม้อกรอง (Filter Cake or Filter Mud) ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อีก ผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่ได้จากการผลิตน้ำตาล (ชมพู่ โทวรรณา, 2551) ได้แก่

2.2.1 ชานอ้อย (Bagasse)

เป็นเศษเหลือของลำต้นอ้อยมีลักษณะเป็นเส้นใยจากการหีบเอาน้ำอ้อยออกจากท่อนอ้อย ประโยชน์ของชานอ้อยสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงผลิตกระแสไฟฟ้า ด้วยสมบัติติดไฟง่าย มีค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงที่ 7.53 เมกะจูลต่อกิโลกรัม เหมาะสำหรับนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงของเตาหม้อน้ำ (สำนักคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย, 2560) ต่อมาได้มีการพัฒนาคิดค้นวิธีในการนำชานอ้อยไปใช้ประโยชน์อื่น ได้แก่ บรรจุภัณฑ์อาหารที่เป็นมิตรกับผู้ใช้และสิ่งแวดล้อม การนำไปเป็นวัสดุทดแทนไม้อัดด้วยการนำชานอ้อยผสมกับสารยึดติดได้เป็นแผ่นคล้ายไม้อัดและใช้ทำเยื่อกระดาษ และสารเฟอฟูราล (Furfural) เป็นสารประกอบที่สกัดได้จากชานอ้อย ที่มีประโยชน์สำหรับใช้ในอุตสาหกรรมน้ำมันหล่อลื่นหรือนำไปใช้เป็นส่วนผสมของกาวและตัวการที่ทำให้พลาสติกแข็งตัว นอกจากนี้ขี้เถ้าชานอ้อยพบว่ามีปริมาณซิลิกาสูงนำมาใช้สังเคราะห์วัสดุเช่น ซิลิกาเจล ซีโอไลต์และซิลิกอนคาร์ไบด์ เป็นต้น สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมยาง อุตสาหกรรมซีเมนต์ อุตสาหกรรมยา อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องสำอาง อุตสาหกรรมสี ดังนั้นการนำชานอ้อยมาใช้ระโยชน์ทำให้เพิ่มมูลค่าและก่อให้เกิดประโยชน์ในเชิงอุตสาหกรรมได้

2.2.2 กากน้ำตาล (Molasses)

เป็นของเหลวที่มีลักษณะหนืดข้น สีดำอมน้ำตาล ประโยชน์ของกากน้ำตาล ได้แก่ เป็นวัตถุดิบที่สำคัญการผลิตเอทานอล เพื่อใช้เป็นส่วนผสมของน้ำมันเบนซิน 91 หรือ 95 โดยกากน้ำตาลปริมาณ 1 ตัน จะผลิตเอทานอลได้ประมาณ 250 ลิตร นอกจากนี้กากน้ำตาลยังเป็นวัตถุดิบสำคัญในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น การผลิตแอลกฮอล์และสุรา ผลิตกรดมะนาวและกรดแลคติก ผลิตผงชูรส ซอสและซีอิ๊ว ผลิตยีสต์และขนมปัง

2.2.3 กากหม้อกรองหรือตะกอนขี้หม้อกรอง (Filter Cake or Filter Mud)

กากหม้อกรองถูกนำมาใช้เป็นวัสดุปรับปรุงคุณภาพดินที่อุดมไปด้วยสารอินทรีย์ ในหลายประเทศทั่วโลกเช่น บราซิล อินเดีย ออสเตรเลีย คิวบา ปากีสถาน ไต้หวัน แอฟริกาใต้ และอาร์เจนตินา โดยปุ๋ยดังกล่าวประกอบด้วยอินทรียวัตถุและแร่ธาตุที่มีความจำเป็นต่อพืช เหมาะสมทาง

การเกษตรสามารถนำมาใช้ทดแทนแร่ธาตุที่พืชต้องการในบางส่วนได้และยังพบว่ามีการนำมาปรับใช้กับแปลงเพาะปลูก (Prado, Caione and Campos, 2013)

2.3 กากหม้อกรอง

2.3.1 สมบัติกากหม้อกรอง

กากหม้อกรอง คือ ส่วนที่เป็นกากปนไปกับน้ำอ้อยหลังจากผ่านเครื่องหีบแล้วก่อนที่จะส่งน้ำอ้อยผ่านเข้าเครื่องต้ม เพื่อให้ได้น้ำอ้อยเข้มข้นที่จะทำเป็นน้ำตาลทรายต่อไป โดยน้ำอ้อยดังกล่าวจะต้องจะทำการพักใสแล้วหลังจากนั้นแยกออกด้วยการกรอง โดยในโรงงานทั่วไปจะใช้เครื่อง Rotary Vacuum Fillet และรวมตัวเป็นก้อนเกิดเป็นกากตะกอนซึ่งกากที่ผ่านการกรองที่ค่อนข้างละเอียดนี้เรียกว่า กากหม้อกรอง (Filter cake) กากตะกอนที่ได้จากเครื่องจะมีความชื้นร้อยละ 80 ปริมาณและองค์ประกอบกากตะกอนขึ้นอยู่กับสถานที่ปลูก พันธุ์อ้อย ประสิทธิภาพการกรองและวิธีการทำใส (สำนักคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย, 2560) ซึ่งประเทศไทยมีปริมาณของกากหม้อกรองในแต่ละโรงงานประมาณร้อยละ 3-9 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระบบการผลิตของแต่ละโรงงานหรือคิดเป็นกากหม้อกรองจากโรงงานน้ำตาลทรายในประเทศไทยเท่ากับ 1.5-4.5 ล้านตันต่อปี โดยทั่วไปจะใช้กากหม้อกรองเป็นวัสดุปรับปรุงคุณภาพดิน ซึ่งประกอบด้วยอินทรียวัตถุและแร่ธาตุที่มีความจำเป็นต่อพืช

2.3.2 ประโยชน์ของกากหม้อกรอง

โดยทั่วไปจะใช้กากตะกอนเป็นวัสดุปรับปรุงดิน และช่วยเพิ่มอินทรียวัตถุและธาตุอาหารในดิน นอกจากนี้ยังพบว่ากากตะกอนสามารถนำมาใช้ประโยชน์อย่างอื่นอีกมากมาย

2.3.2.1 การใช้กากหม้อกรองเป็นวัสดุปรับปรุงดิน

การนำกากหม้อกรองมาใช้ในการปรับปรุงดินในหลายประเทศทั่วโลก โดยจะใส่กากหม้อกรองคลุกเคล้าลงไปในดิน และพักดินทิ้งไว้ 1-2 เดือน เพื่อให้เกิดการย่อยสลาย ตัวอย่างเช่นในประเทศบราซิลมีการนำกากหม้อกรองมาปรับใช้ด้วยวิธีต่าง ๆ เช่น ใส่ผสมลงดิน 80-100 ตันต่อเฮกตาร์ ใช้ผสมรองก้นหลุม 15-30 ตันต่อเฮกตาร์ และใส่ระหว่างร่องการปลูก 40-50 ตันต่อเฮกตาร์ ทำให้ผลของการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีเมื่อนำกากหม้อกรองผสมลงดินคือ เพิ่มปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และแคลเซียม เพิ่มความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก ลดความเข้มข้นของปริมาณอะลูมินัมที่แลกเปลี่ยนได้ (Al^{3+}) และลดความเป็นพิษต่อพืช เป็นประโยชน์ต่อลักษณะทางกายภาพและชีวภาพของดิน (Prado et al., 2013)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.3.2.2 การนำกากตะกอนไปใช้เป็นอาหารสัตว์

น้ำอ้อยมีโปรตีนที่จำเป็นเกือบทุกชนิดหมายความว่าถ้ามีการนำกากตะกอนที่ได้ทั้งหมดมาทำปุ๋ย จะมีการสูญเสียโปรตีนที่จำเป็นต่อร่างกายมนุษย์ 1,200 ตันจากกากอ้อยทั้งหมด 1,000,000 ตันที่เข้ากระบวนการผลิต ดังนั้นจึงได้แนะนำให้มีการนำกากตะกอนที่ผ่านการทำแห้งแล้วมาใช้เป็นอาหารสัตว์ ดังนั้นกากตะกอนสามารถนำมาใช้เป็นอาหารสัตว์ที่มีประสิทธิภาพ มีการใช้กันในอินเดียตะวันตกในการเป็นอาหารให้กับวัวและหมู (กรกิจ ทันสมัย, 2554)

2.4 เทคโนโลยีการแปรสภาพชีวมวล (Biomass Conversion Technology)

การนำชีวมวลเป็นแหล่งเชื้อเพลิงมีการใช้กันมานานแล้วตั้งแต่สมัยดึกดำบรรพ์ เช่น การนำเศษกิ่งไม้แห้งมาก่อเป็นกองแล้วจุดไฟเพื่อให้ความร้อนและแสงสว่างของมนุษย์ในสมัยที่ไม่มีพลังงานไฟฟ้า ซึ่งในปัจจุบันมีความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีจึงได้นำเอามวลชีวภาพประเภทต่าง ๆ มาเปลี่ยนเป็นพลังงาน ซึ่งสารชีวมวลมักประกอบด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) โดยทำให้กลายเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพได้ ซึ่งเทคโนโลยีการเปลี่ยนชีวมวลเหล่านี้แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ เทคโนโลยีการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีชีวเคมี (Biochemical Conversion Technology) และเทคโนโลยีการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีความร้อน (Thermochemical Conversion Technology)

2.4.1 เทคโนโลยีการแปรสภาพด้วยวิธีการชีวเคมี (Biochemical Conversion Technology)

การเปลี่ยนมวลชีวภาพไปเป็นพลังงานรูปแบบต่าง ๆ จะใช้ประโยชน์ของปฏิกิริยาทำให้สารโมเลกุลใหญ่แตกตัวเป็นสารที่มีโมเลกุลเล็กลง และจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ซึ่งจะประกอบด้วย 3 กระบวนการดังนี้

2.4.1.1 Enzymatic Hydrolysis

การใช้เอนไซม์ในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสซึ่งกระบวนการนี้จะไปสลายพันธะ ทำให้สารโมเลกุลใหญ่ แตกตัวเป็นสารที่มีโมเลกุลเล็กลงพร้อมกับการเติมน้ำ

2.4.1.2 การย่อย (Digestion)

การย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยสภาวะใช้ออกซิเจนจะทำให้ได้ออกซิเจน และในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจน กระบวนการนี้อาศัยการย่อยมวลโดยแบคทีเรียจากธรรมชาติในสภาวะไร้อากาศจึงทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และในขณะเดียวกันถ้าสามารถแยกเอาคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ออก จะทำให้ก๊าซชีวภาพนี้มีสมบัติเหมือนกับก๊าซธรรมชาติ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.4.1.3 การหมัก (Fermentation)

การหมักเป็นกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ โดยการนำชีวมวลมาหมักด้วยแบคทีเรีย ซึ่งแป้งและน้ำตาลที่มีอยู่ในชีวมวลเมื่อถูกย่อยสลายด้วยเอมไซม์จะเปลี่ยนรูปเป็นแอลกฮอล์โดยมีเอทานอล (Ethanol) เป็นส่วนประกอบอยู่ประมาณร้อยละ 10 โดยปริมาตร

2.4.2 เทคโนโลยีการแปรสภาพด้วยวิธีการทางความร้อนเคมี (Thermochemical Conversion Technology)

การแปลงสภาพทางความร้อนเคมีเป็นกระบวนการที่อาศัยความร้อนร่วมกับปฏิกิริยาเคมี (Thermochemical Conversion) เพื่อเปลี่ยนแปลงสภาพวัสดุเหลือใช้ต่าง ๆ ที่เป็นชีวมวลให้เป็นพลังงานหรือเชื้อเพลิงสังเคราะห์ทั้งที่เป็นของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานความร้อนมาทำให้โครงสร้างทางเคมีเปลี่ยนรูป โดยกระบวนการทางเคมีโดยใช้พลังงานความร้อน มี 5 กระบวนการหลักดังนี้

2.4.2.1 กระบวนการเผาไหม้ (Combustion)

การนำมวลชีวภาพมาใช้ในการเผาไหม้เป็นเป็นกระบวนการที่นิยมใช้มานาน เพื่อให้ความร้อนและแสงสว่าง เป็นปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารประกอบไฮโดรคาร์บอนและออกซิเจนในอากาศเปลี่ยนผลิตภัณฑ์ก๊าซที่มีองค์ประกอบหลักที่เสถียรสองชนิดคือ น้ำ และคาร์บอนไดออกไซด์ นับเป็นรูปแบบที่นิยมสำหรับนำมาใช้เพื่อผลิตพลังงานในรูปของความร้อนจากชีวมวลและวัสดุเหลือทิ้ง โดยการเผาไหม้สามารถเขียนเป็นสมการทางเคมีได้คือ

$$C + O_2 \longrightarrow CO_2$$

$$2H_2 + O_2 \longrightarrow 2H_2O$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ในการเผาไหม้มวลชีวภาพจะได้พลังงานความร้อนโดยแปลงให้มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานให้สูงขึ้น อาจทำได้โดยการออกแบบเตาเผาให้มีความสามารถในการป้องกันการรั่วไหลของพลังงานความร้อนออกสู่ภายนอก การแปลงสภาพพลังงานความร้อนต่อเป็นพลังงานรูปแบบอื่น เช่น ไฟฟ้าโดยผ่านระบบกังหันไอน้ำ (Steam Turbine) (ประพันธ์ คูชลธารา และ ศศิธร สรรพ่อค้า, 2558)

2.4.2.2 การแยกสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis)

เป็นกระบวนการสลายตัวทางเคมีความร้อนในภาวะที่ไม่มีออกซิเจนหรืออากาศ โดยทั่วไปประกอบด้วยหลายปฏิกิริยาทางเคมีที่มีความซับซ้อนขึ้นอยู่กับชนิดของสารตั้งต้น โดยรวมเป็นกระบวนการแบบผันกลับไม่ได้ (Irreversible Process) และต้องการพลังงานหรือความร้อนเพื่อสลายพันธะเคมีของโครงสร้างสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการมีทั้ง

ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง ของเหลวและก๊าซ ตัวอย่างของการใช้กระบวนการนี้ได้แก่ การทำถ่าน (charcoal) เป็นการให้ความร้อนแก่ไม้จนอุณหภูมิสูงถึง 250 องศาเซลเซียส ทำให้ความชื้นในไม้ระเหยออกไปหมดและกลายเป็นถ่าน ซึ่งประกอบด้วยสารคาร์บอนซึ่งเมื่อนำไปใช้จะมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนถึงร้อยละ 80 นอกจากนี้กระบวนการนี้ยังใช้ในการทำให้มวลชีวภาพเปลี่ยนสถานะไปเป็นของเหลวหรือก๊าซได้เช่นกันเช่น ถ้าใช้กระบวนการนี้กับสารอินทรีย์ต่างๆ โดยให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิถึง 500-900 องศาเซลเซียส ที่ความดันปกติและไม่มีออกซิเจน จะได้เมทานอลออกมาจากกระบวนการ ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับยานยนต์ต่าง ๆ ได้

2.4.2.3 กระบวนการทอริแฟคชั่น (Torrefaction)

เป็นกระบวนการคล้ายกับคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิต่ำ 200–300 องศาเซลเซียสในภาวะไม่มีออกซิเจน ถูกนำมาใช้เป็นกระบวนการปรับปรุงสภาพขั้นต้น (Pretreatment Process) ของชีวมวล ช่วยเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงาน ลดค่าอัตราส่วนระหว่างออกซิเจนกับคาร์บอนและลดสภาพความชื้นของเชื้อเพลิง ออกซิเจนในองค์ประกอบถูกสลายตัวออกมาในรูปของน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้ชีวมวลที่ผ่านกระบวนการนี้มีองค์ประกอบของคาร์บอนสูงขึ้นและออกซิเจนลดลง ซึ่งกลไกของกระบวนการส่วนใหญ่เป็นการสลายตัวองค์ประกอบเฮมิเซลลูโลสที่มีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ที่ 150-280 องศาเซลเซียส (ประพันธ์ คูชลธารา และ ศศิธร สรรพ่อค้า, 2558) ทำให้ชีวมวลที่เป็นของแข็ง มีค่าความร้อนสูง การดูดความชื้นกลับต่ำ เปราะและแตกง่ายต่อการบด ส่งผลดีต่อกระบวนการลดขนาด การลดการใช้พลังงาน สมบัติที่ดีที่ถูกปรับปรุงเนื่องจากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสทำให้เกิดปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน ขั้นตอนแรกจะเป็นการสลายตัวของสารระเหยเบา (สัดส่วนของโมโนแซกคาไลน์ สัดส่วนของพอลีแซกคาไลน์ และดีไฮโดรชูก้า) ตามด้วยการสลายตัวแร่ธาตุทำให้เกิด ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ การแตกสลายพันธะคาร์บอน ทำให้เกิดการก่อตัวของกรดที่ช่วยเร่งการกำจัดน้ำ และปฏิกิริยาการแตกสลายด้วยความร้อนจะก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนิว ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง ของเหลวและแก๊ส (ดุษฎีพร สิทธิกุล, 2557)

2.4.2.4 การทำให้เป็นก๊าซ (Gasification)

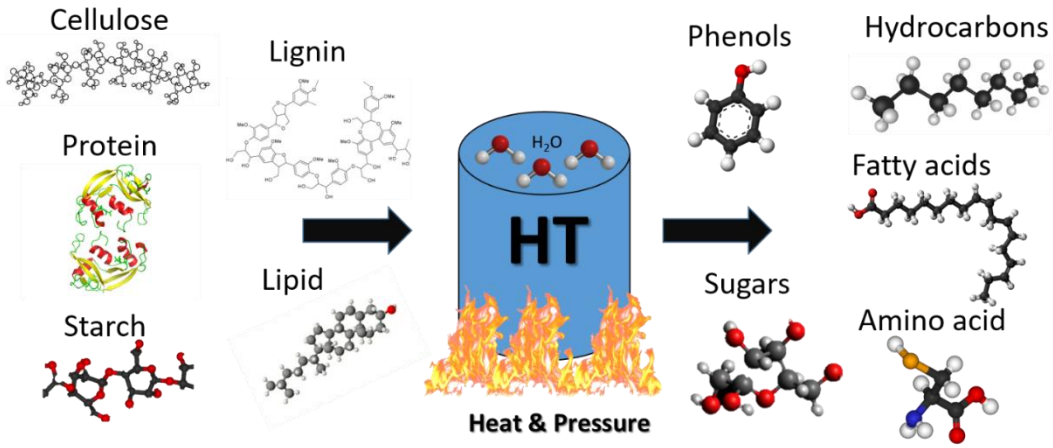
เป็นกระบวนการผลิตก๊าซจากมวลชีวภาพ โดยการเผาไหม้มวลชีวภาพโดยใช้อากาศหรือออกซิเจนในปริมาณน้อย ๆ ก๊าซที่ได้จากกระบวนการนี้จะประกอบด้วย คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน และมีเทน ซึ่งถือว่าเป็นก๊าซที่ให้ค่าพลังงานค่อนข้างต่ำประมาณ 1 ใน 6 ของพลังงานจากก๊าซธรรมชาติ ก๊าซนี้จะถูกนำไปใช้ในการขับกังหันก๊าซ (Gas Turbine) เพื่อผลิตไฟฟ้า หรือทำให้เกิดการควบแน่นแล้วนำไปกลั่นให้มีความบริสุทธิ์ถึงร้อยละ 98 ก็จะได้เป็นเมทานอล (Methanol) ออกมานอกจากนี้ยังสามารถนำก๊าซนี้ไปแยกประเภท แล้วใช้ตามวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกันตามสมบัติของก๊าซนั้น ๆ

2.4.2.5 ปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal Reaction)

เป็นกระบวนการหนึ่งที่อยู่ในส่วนของการแปลงชีวมวลด้วยเคมีความร้อนดังรูปที่ 2.1 ซึ่งมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อการลดขนาดเปลี่ยนแปลงสมบัติทางด้านกายภาพ และเคมีของชีวมวลที่มีความชื้นต่ำ เช่น เศษไม้ แกลบ ซังข้าวโพด เปลือกถั่วลิสง ฯลฯ และชีวมวลที่มีความชื้นสูง เช่น มูลสัตว์ ผักตบชวา สาหร่ายน้ำมัน ฯลฯ ให้อยู่ในรูปถ่านชีวภาพ หรือน้ำมันชีวภาพที่มีค่าความร้อนต่อหน่วยที่สูงขึ้น โดยปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลทั่วไปจะใช้น้ำ ณ สภาวะใต้จุดวิกฤต (Subcritical Water) ที่อุณหภูมิ 200-350 องศาเซลเซียส ความดัน 1.5-20 เมกกะปาสคาล เป็นสื่อกลางในการนำความร้อน และในบางครั้งอาจจะมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) เพื่อลดระยะเวลาการทำปฏิกิริยาให้สั้นลงหรือเพื่อเพิ่มผลผลิต ทั้งนี้ลักษณะของกระบวนดังกล่าวจะคล้ายคลึงกับกระบวนการเกิดเชื้อเพลิงตามธรรมชาติเช่น ถ่านหิน น้ำมันปิโตรเลียม และก๊าซธรรมชาติ ฯลฯ ที่เกิดการทับถมของซากพืช ซากสัตว์ ภายใต้อุณหภูมิ ความดัน และระยะเวลาหลายล้านปี แต่ในทางกลับกันกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลจะใช้ระยะเวลาที่สั้นกว่าการเกิดเชื้อเพลิงตามธรรมชาติเป็นอย่างมาก อีกทั้งกระบวนการดังกล่าวยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สำหรับกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลสามารถแบ่งตามสถานะของผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากการทำปฏิกิริยาออกเป็น 3 รูปแบบ คือ ไฮโดรเทอร์มอลลิควิดแฟรกชัน (Hydrothermal Liquefaction: HTL) ไฮโดรเทอร์มอลแก๊สซิฟิเคชั่น (Hydrothermal Gasification: HTG) และไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน (Hydrothermal Carbonization: HTC) (นิตย์ธินันท์ บริรักษ์, 2558)

ทั้งนี้ผลผลิตที่สำคัญในกระบวนการดังกล่าวจะประกอบไปด้วยของแข็ง ของเหลวและก๊าซ ซึ่งในแต่ละกระบวนการอาจจะใช้อุณหภูมิ ความดัน ตัวเร่งปฏิกิริยาและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ วัตถุดิบตั้งต้น และผลิตภัณฑ์ที่ต้องการต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

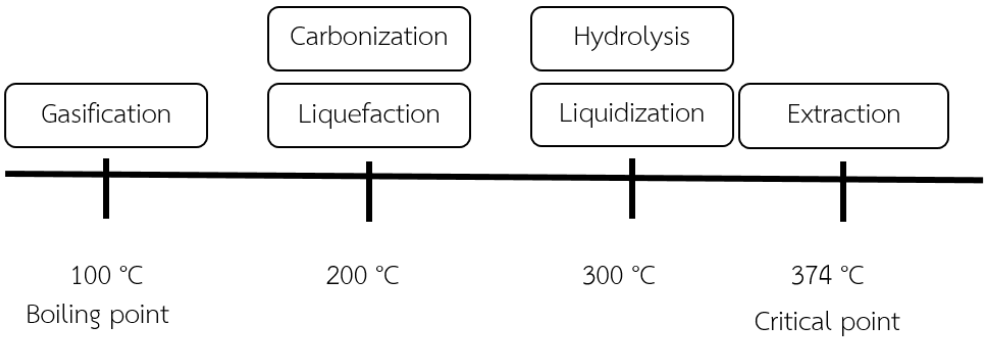


รูปที่ 2.1 กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลย่อยสลายพันธะทางเคมีของชีวมวล
ดัดแปลงจาก: (Department of Agricultural and Biological Engineering, 2013)

1) ไฮโดรเทอร์มอลลิควิดแฟรกชัน

เป็นกระบวนการที่ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง ไม่มีข้อจำกัดเรื่องความชื้นเริ่มต้นของชีวมวล ทำให้สามารถใช้ชีวมวลได้หลากหลาย ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับสารชีวมวลที่มีปริมาณความชื้นสูงโดยธรรมชาติหรือจากแหล่งผลิต เช่น สารชีวมวลน้ำ ขยะ กากอินทรีย์ ทะลายปาล์มเปล่า หญ้าเนเปียร์ และสาหร่าย เป็นต้น นอกจากนั้นสามารถเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิแตกต่างกันได้ ดังรูปที่ 2.2 แสดงปฏิกิริยาซึ่งเกิดขึ้นในน้ำที่มีความดันและอุณหภูมิสูงที่ประมาณ 100 องศาเซลเซียส สารที่ละลายได้จะละลายในน้ำและเหมาะกับการสกัดสารเหนืออุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เกิดการไฮโดรไลซิสจึงเปลี่ยนแปลงชีวมวลประเภทเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส โปรตีน และอื่น ๆ ทำให้พอลิเมอร์ย่อยกลายเป็นโมโนเมอร์ และที่อุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียสและความดัน 1 เมกกะปาสคาล ชีวมวลประเภทของแข็งเปลี่ยนเป็นของเหลว แต่สารประเภทน้ำมันยังไม่เกิดขึ้น เมื่ออุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียสและความดัน 10 เมกกะปาสคาล จะทำให้ได้สารจำพวกน้ำมัน นอกจากนี้เมื่อตัวแปรของปฏิกิริยามีการเปลี่ยนแปลง เช่น เวลาในการทำปฏิกิริยาและตัวเร่งปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์หลักจะถูกเปลี่ยนเป็นชาร์ (กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชั่น) และที่จุดวิกฤตร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา สารชีวมวลสามารถเปลี่ยนก๊าซ (Shinya and Matsumura, 2008)

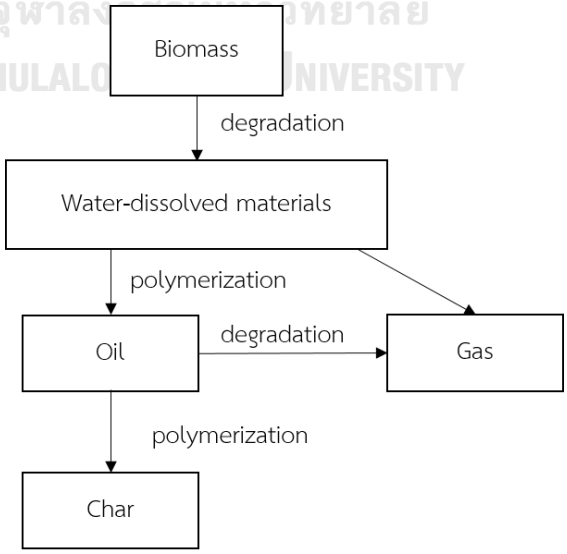
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



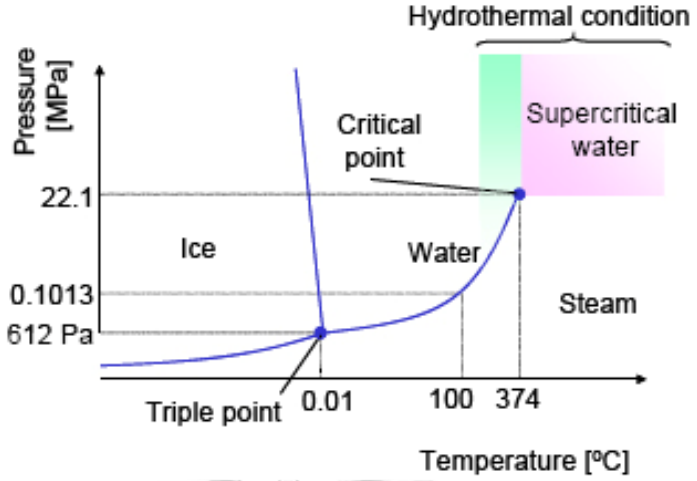
รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาที่เกิดในน้ำที่ความดันและอุณหภูมิสูง
(ดัดแปลงจาก: Shinya and Matsumura, 2008)

กระบวนการหลักไฮโดรเทอร์มอลลิควิดแฟรกชันคือ การไพโรไลซิสในน้ำที่มีความดันสูงประมาณ 30 เมกกะปาสคาลและอุณหภูมิสูงประมาณ 300 องศาเซลเซียส บางครั้งอาจจะมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ช่วยในการย่อยสลายพันธะทางเคมีของชีวมวลที่มีน้ำมันและความชื้นสูง (>50 %db) เนื่องจากไฮโดรเทอร์มอลลิควิดแฟรกชันเปลี่ยนเป็นไพโรไลซิส ดังนั้นจึงทำให้ปฏิกิริยาเกิดการสลายตัว จากแผนผังปฏิกิริยาพื้นฐานแสดงดังรูปที่ 2.3 ขั้นตอนแรกน้ำจะทำให้สารชีวมวลละลายต่อมาสารที่ละลายน้ำจะเกิดการโพลิเมอร์ไรเซชันเปลี่ยนเป็นน้ำมัน เมื่อเกิดปฏิกิริยานานขึ้น น้ำมันที่เกิดขึ้นจะเกิดการโพลิเมอร์ไรเซชันเปลี่ยนเป็นชาร์ (Char) ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ เช่น (กีรติ ประไพวัชรพันธ์, 2557) ได้นำสาหร่ายมาผ่านกระบวนการทำให้ได้ผลิตภัณฑ์คือ น้ำมันชีวภาพที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นร้อยละ 32 โดยน้ำหนัก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

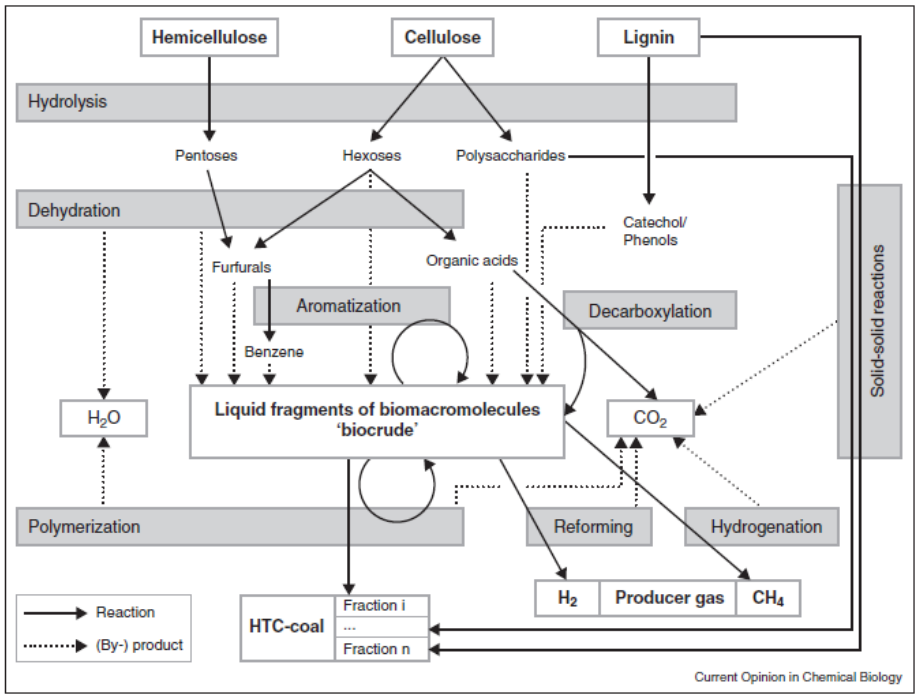


รูปที่ 2.3 แผนผังของปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลลิควิแฟคชันเบื้องต้น
(ดัดแปลงจาก: Shinya and Matsumura, 2008)



รูปที่ 2.4 แผนภาพเฟสของน้ำ

(Department of Agricultural and Biological Engineering, 2013)



รูปที่ 2.5 กลไกการเกิดกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชั่น

(Department of Agricultural and Biological Engineering, 2013)

2) ไฮโดรเทอร์มอลแก๊สซิฟิเคชัน

ไฮโดรเทอร์มอลแก๊สซิฟิเคชันคือ การทำปฏิกิริยาของสารชีวมวลในน้ำร้อนที่มีความดันและอุณหภูมิสูง โดยทั่วไปสูงกว่า 350 องศาเซลเซียสและสูงกว่า 20 เมกกะปาสคาลหรือบางครั้งเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยาจำพวกอัลคาไลด์ โลหะ และคาร์บอนนั้น เหมาะสำหรับการทำปฏิกิริยาของสารชีวมวลที่มีความชื้นต่ำ จะถูกทำให้กลายเป็นก๊าซ กระบวนการดังกล่าวช่วยเพิ่มความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ก๊าซเผาไหม้ได้ดังรูป 2.5 แสดงแผนภาพเฟสของน้ำซึ่งเส้นสมดุลก๊าซและของเหลวเริ่มจากจุดที่อยู่ในทั้งสามเฟสและสิ้นสุดที่จุดวิกฤต เงื่อนไขของไฮโดรเทอร์มอลนั้นอยู่ในบริเวณใกล้จุดวิกฤต เมื่ออุณหภูมิและความดันสูงมากกว่าอุณหภูมิวิกฤตและความดันวิกฤตตามลำดับ สถานะดังกล่าวเรียกว่า น้ำสภาวะยิ่งยวด (Supercritical Water) และแก๊สซิฟิเคชันในน้ำสภาวะยิ่งยวดนั้นเรียกว่า Supercritical Water Gasification น้ำที่มีความร้อนและความดันสูงนั้นจะมีความสามารถในการเกิดปฏิริยาสูง เมื่อสารชีวมวลอยู่ในน้ำจะถูกทำให้เป็นก๊าซโดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและไพโรไลซิส

ผลิตภัณฑ์จากไฮโดรเทอร์มอลแก๊สซิฟิเคชันคือ ก๊าซทาร์ (Tar Gas Free) โดยองค์ประกอบหลักได้แก่ ไฮโรเจนคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทน เนื่องจากปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นแก๊ส (Water Gas Shift Reaction) ผลิตผลของคาร์บอนไดออกไซด์นั้นมีน้อยมาก และที่อุณหภูมิสูง ความดันต่ำ วัตถุดิบตั้งต้นที่มีความเข้มข้นเจือจางจะทำให้เกิดไฮโดรเจนในปริมาณมาก ค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ของก๊าซผลิตภัณฑ์นั้นขึ้นกับเงื่อนไขของปฏิกิริยาและโดยปกติมีค่าตั้งแต่ 12-18 เมกกะจูลต่อลูกบาศก์เมตรนิวตัน (Shinya and Matsumura, 2008)

3) ไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน

ไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชันเป็นเทคโนโลยีใหม่ในการเปลี่ยนแปลงชีวมวลด้วยเคมีความร้อน ซึ่งได้รับความสนใจในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา เริ่มจากสารชีวมวลที่เข้าสู่กระบวนการนี้จะถูกทำให้เปลี่ยนแปลงภายใต้สภาวะน้ำที่อุณหภูมิต่ำและความดันเป็นเวลาหลายชั่วโมง โดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชันเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Moon et al., 2011)

2.5 ไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน

2.5.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยา (Reaction mechanism)

ไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชันคือ กระบวนการทางเคมีความร้อนที่ดำเนินการโดยอาศัยน้ำอุณหภูมิประมาณ 150-250 องศาเซลเซียส ที่เวลา 1-12 ชั่วโมง และภายใต้สภาวะความดัน 1.5-4 เมกกะปาสคาล เป็นตัวกลางในการส่งถ่ายความร้อนให้แก่ชีวมวลเพื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ และสถานะของชีวมวลให้อยู่ในรูปของแข็ง ของเหลว และก๊าซ โดยผลิตภัณฑ์ในรูปของเหลว เช่น การนำ

ชีวมวลเหลือทิ้งมาผลิตสารตั้งต้นที่มีมูลค่าในโรงงานต่าง ๆ เช่น การผลิตกรด Furfural, Furfuryl Alcohol และนำมาทำเป็นส่วนเชื้อเพลิง (Nakasorn et al., 2017) ส่วนผลิตภัณฑ์ในรูปของแข็งซึ่งส่วนมากที่ได้จากกระบวนการคือ ถ่านชีวภาพ และยังได้ผลิตภัณฑ์ที่มีวัสดุคล้ายดินจึงมีการนำมาใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพของดิน (ทองกร สุภาโชค, 2557) ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชันประกอบไปด้วยปฏิกิริยาหลายรูปแบบ เช่น ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ดีไฮเดรชัน (Dehydration) ดีคาร์บอกซีเลชัน (Decarboxylation) พอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) และ อะโรมาติกเซชัน (Aromatization) มีรายละเอียดดังนี้

2.5.1.1 ไฮโดรไลซิส

ไฮโดรไลซิสเป็นกระบวนการลดขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ ด้วยการทำปฏิกิริยาของน้ำและองค์ประกอบของสารชีวมวล โดยน้ำจะเข้าไปสลายพันธะ ทำให้สารโมเลกุลใหญ่ แตกตัวเป็นสารที่มีโมเลกุลเล็กลง ซึ่งผลิตภัณฑ์ ได้แก่ โอลิโกแซ็กคาไรด์ ฟีนอลลิก ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลขั้นตอนของการไฮโดรไลซิสของเฮมิเซลลูโลส จะมีอุณหภูมิช่วง 160 และ 180 องศาเซลเซียส (Pavlovič, Knez and Škerget, 2013)

2.5.1.2 ดีไฮเดรชัน

ดีไฮเดรชันเป็นปฏิกิริยาที่มีการกำจัดน้ำออกไป ซึ่งจะลดปริมาณของไฮโดรเจนและออกซิเจนในวัตถุดิบ (ลดอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอน อัตราส่วนของออกซิเจนต่อคาร์บอน) ตัวอย่างเช่นการดีไฮเดรชันของกลูโคส (Maria and Markus, 2010)

$$C_6H_{12}O_6 \longrightarrow C_6H_4O_2 + 4H_2O$$

$$\Delta H_R = -1040 \text{ kJ/mol}$$

$$C_6H_{12}O_6 \longrightarrow C_6H_2O + 5H_2O$$

$$\Delta H_R = -950 \text{ kJ/mol}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.5.1.3 ดีคาร์บอกซีเลชัน

ดีคาร์บอกซีเลชันเป็นปฏิกิริยาการกำจัดหมู่คาร์บอซิล (-COOH) และหมู่คาร์บอนิว (-C=O) ออกจากสารประกอบจะทำให้ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงกว่า 150 องศาเซลเซียส การกำจัดหมู่คาร์บอนิวและไฮดรอกซิล (-OH ในหมู่คาร์บอซิล) จะนำไปสู่การก่อให้เกิดของโมเลกุลที่ไม่เสถียรซึ่งจะทำปฏิกิริยาต่อไป

2.5.1.4 พอลิเมอไรเซชัน

พอลิเมอไรเซชันคือ กระบวนการเกิดสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ (พอลิเมอร์) จากสารที่มีโมเลกุลเล็ก (มอนอเมอร์) โมเลกุลที่ไม่เสถียรสามารถเกิดพอลิเมอไรเซชันซึ่งขึ้นกับวัตถุดิบหลักและเงื่อนไขในการทำปฏิกิริยา โดยจะกำจัดหมู่คาร์บอกซิลและไฮดรอกซิลออก

2.5.1.5 อะโรมาติกเซชัน

อะโรมาติกเซชัน เป็นการเปลี่ยนสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโซ่ตรงเป็นสารประกอบอะโรมาติกโดยใช้ความร้อนและตัวเร่งปฏิกิริยา

2.5.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน

ปัจจัยสามารถส่งผลกระทบต่อกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ในช่วงอุณหภูมิที่ 160-250 องศาเซลเซียส สามารถเปลี่ยนวัตถุดิบให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่หลากหลายเช่น ให้เกิดผลิตภัณฑ์ประเภทเชื้อเพลิงในรูปของแข็งที่มีองค์ประกอบคาร์บอนสูงร้อยละ 35-60 ซึ่งคล้ายกับถ่านหินลิกไนต์ ส่วนสารอินทรีย์ที่ละลายในเฟสของเหลว (Liquid phase) ที่ส่งผลให้คาร์บอนลดลงและมีก๊าซที่เกิดขึ้นปริมาณน้อย การจำแนกผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นต้องขึ้นอยู่กับประเภทของวัตถุดิบตั้งแต่เริ่มต้นและอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการ (Berge et al., 2011) อย่างไรก็ตาม เวลา (retention time) ความดัน การป้อนน้ำเข้าสู่ระบบความเป็นกรด-ด่าง (Feedwater pH) ซึ่งมีผลต่อการจำแนกผลิตภัณฑ์

2.5.2.1 อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิในระหว่างกระบวนการมีบทบาทสำคัญในปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอล ซึ่งการกระจายตัวของชีวมวลจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ จากงานวิจัย (Yao et al., 2007) พบว่าอุณหภูมิในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชันจะส่งผลต่อกลไกของการเปลี่ยนแปลงฟรักโทส (Frustose) เมื่ออุณหภูมิ 120-140 องศาเซลเซียส ฟรักโทสจะถูกเปลี่ยนเป็น 5-Hydroxymethlfurfural (HFM) ด้วยการคายน้ำภายในโมเลกุล (Gao et al., 2012) ผลผลิตของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งมีปริมาณลดลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 200-400 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงของเซลลูโลสไปเป็นออลิโดแซ็กคาไรด์ ดังนั้นการที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เซลลูโลสเกิดการย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ด้วยการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบของโมเลกุลจึงทำให้ส่งผลต่อทั้งของเหลวหรือก๊าซโมเลกุลต่ำ นอกจากนี้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของเซลลูโลสมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงผลิตภัณฑ์และเกิดการเปลี่ยนแปลงในขั้นตอน condensable gas เปลี่ยนเป็น Incondensable Low-Molecule Gas เมื่อเกิดความเสถียรทางความร้อนที่ดีผลที่ได้จะทำให้เกิดไฮโดรชาร์และผลิตภัณฑ์ประเภทของเหลวมีปริมาณลดลง และผลิตภัณฑ์ incondensable gas เพิ่มขึ้น การดำเนินปฏิกิริยาของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิประมาณ 250 องศาเซลเซียสจะได้ ผลิตภัณฑ์ประเภทของเหลว และหากดำเนินการกระบวนการที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซ จากงานวิจัยส่วนมากที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลมักจะใช้อุณหภูมิในการดำเนินการทดลองในช่วงที่ 180-300 องศาเซลเซียส โดยวัตถุดิบหลักคือชีวมวลเพื่อให้ได้ไฮโดรชาร์ที่มีมูลค่า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.5.2.2 เวลา (Time)

เวลาเป็นหนึ่งในปัจจัยหลักที่จำเป็นต้องพิจารณาของปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอล (Gan and Yuan, 2013) ได้ดำเนินการไฮโดรเทอร์มอลของเซลลูโลสที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส และเวลา 5 นาทีถึง 2 ชั่วโมง สามารถอธิบายได้ว่าเกิดการไฮโดรไลซิสขององค์ประกอบเซลลูโลสใน Water-soluble product ได้ที่เวลา 5 นาที และเวลาที่ 10 นาทีถึง 2 ชั่วโมง ผลผลิตของของแข็งที่เหลือ (Solid residue) ไม่มีอิทธิพลต่อการเกิดไฮโดรชาร์ จากผลของ SEM, TEM, FTIR และ XPS ไฮโดรชาร์มีโครงสร้าง Coreeshell ที่มีหมู่คาร์บอซิลิก คาร์บอนิว ดีโตน และหมู่อื่น ๆ ไฮโดรชาร์ที่ดำเนินการที่เวลานานสามารถสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในพื้นที่โดยมีหน้าที่เป็นวัสดุคาร์บอน (Lu et al., 2013) ได้ดำเนินกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชันของเซลลูโลสที่ 225 องศาเซลเซียสภายในตู้อบเป็นเวลานานกว่า 96 ชั่วโมง ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า การเปลี่ยนแปลงของเซลลูโลสมักเกิดขึ้นในช่วง 0.5 ถึง 4 ชั่วโมงแรก และองค์ประกอบภายในของ liquid phase ก็เปลี่ยนไปตาม เวลาด้วย ซึ่งในท้ายที่สุดทำให้เกิดการก่อตัวของกรดอินทรีย์และเมื่อเวลาที่มากกว่า 4 ชั่วโมงจะทำให้สมบัติทางเคมีของไฮโดรชาร์มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามเมื่อใช้ TGA (Thermogravimetric Analysis) ชี้ให้เห็นว่าไฮโดรชาร์ที่ผลิตขึ้นที่เวลามากกว่า 4 ชั่วโมง มีลักษณะคล้ายกับไพโรไลซิส ด้วยเหตุนี้เวลาของการปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลที่มีประสิทธิภาพในการศึกษานี้คือ 1-3 ชั่วโมง

2.5.2.3 อัตราส่วนชีวมวลต่อน้ำ (Biomass to Water Content)

ปริมาณของชีวมวลและน้ำถือเป็นปัจจัยสำคัญ ปริมาณน้ำที่สูงจะเหมาะสมสำหรับผลผลิต (Yield) ของเหลวและก๊าซ อัตราส่วนตัวทำละลายที่สูงต่อมวลสามารถลดปริมาณของไฮโดรชาร์ เนื่องจากชีวมวลเกิดการสลายตัวเพิ่มขึ้น (Bo et al., 2010) นอกจากนี้ ผลผลิตก๊าซลดลงในปริมาณสารละลายที่สูง ที่ปริมาณของชีวมวลที่สูงต่อปริมาณน้ำ ปฏิกิริยาของโมเลกุลชีวมวลและน้ำจะมีประสิทธิภาพน้อยลงซึ่งสามารถลดการสลายตัวขององค์ประกอบชีวมวลได้ จากที่ได้กล่าวข้างต้นทำให้การศึกษาส่วนมากจึงดำเนินการที่อัตราส่วนชีวมวลต่อน้ำ 1:10 ดังนั้นเพื่อให้ได้ปฏิกิริยาของชีวมวลต่อน้ำที่มีประสิทธิภาพสูงการศึกษานี้จึงดำเนินที่อัตราส่วน 1:5 ถึง 1:15

2.5.2.4 ความดัน (Pressure)

การเพิ่มอุณหภูมิหรือของเหลว ความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์จะเพิ่มตามปกติ ความดันของปฏิกิริยาจะมีอิทธิพลต่อ Reaction network ตามหลักการของ LeChatelier ปฏิกิริยาที่จุดสมดุลจะมีการเลื่อนเฟสของแข็งและเฟสของเหลวเมื่อความดันของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น พร้อมกับสารตั้งต้นที่ลดจำนวนโมล จากปฏิกิริยาดีไฮเดรชันและดีคาร์บอซิลเลชัน การกำจัดจากการสกัดของชีวมวล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จะทำปฏิกิริยาในความดันที่สูง มีการสันนิษฐานว่าการห่อหุ้มด้วยก๊าซ (Encapsulated Gases) เกิดการถูกอัดและละลายได้ง่ายในน้ำซึ่งช่วยให้เข้าถึงเฟสของเหลวได้กว้างขึ้น

2.5.2.5 การป้อนน้ำเข้าสู่ระบบความเป็นกรด-ด่าง (Feedwater pH)

ในการศึกษากระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชันส่วนใหญ่จะศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำระหว่างที่เกิดปฏิกิริยา ซึ่งมีข้อเสนอแนะว่ากรดอินทรีย์ที่หลากหลายที่เกิดจากอะซิติก ฟอร์มิก แลกติก และเลวูเลนิก เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้และในสิ่งแวดล้อมมีสภาพค่าเป็นกลางถึงมีค่าเป็นกรดอ่อน มีความจำเป็นต่อการจำลอง natural coalification ความแตกต่างของกรดและด่างจึงได้รับนำมาประยุกต์ใช้ในการทดลอง และศึกษาผลกระทบที่สำคัญต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา และลักษณะของผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ผลผลิตไฮโดรชาร์ที่ได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชันของฟางข้าวมีค่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 49.9 เป็น 54.1 โดยค่าการป้อนน้ำเข้าสู่ระบบความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้นจาก 2 เป็น 12.2 (Reza et al., 2015)

2.5.3 ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

ผลิตภัณฑ์ประเภทของแข็งที่จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ได้แก่ จากงานวิจัย (Belda, Lidón and Fornes, 2016) จะได้ไบโอชาร์ (Biochar) ไฮโดรชาร์ (Hydrochar) ที่นำมาช่วยในการปรับปรุงหรือเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดินเพื่อทำให้พืชเจริญเติบโตได้ดีขึ้นหรือช่วยในการฟื้นฟูคุณภาพของดิน หรือเรียกว่า ชาร์ (Char) (Hoekman, Broch and Robbins, 2011) และยังสามารถเป็นเชื้อเพลิงแข็งได้อีกด้วย (Solid fuel) ในงานวิจัยของ (Prawisudha, Namioka and Yoshikawa, 2012)

ผลิตภัณฑ์ประเภทของเหลวโดยส่วนมากที่ได้จากกระบวนการนี้จะเป็นเชื้อเพลิงเหลว หรือน้ำมันชีวภาพ เช่น ชีวมวลจากมะม่วงหิมพานต์ (นิตย์ธินันท์ บริรักษ์, 2558) และผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่า เช่น กรดเลวูเลนิก (Nakasorn et al., 2017)

ผลิตภัณฑ์ประเภทก๊าซที่เกิดจากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลแกประกอบด้วย ไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทนเป็นองค์ประกอบหลักและได้ก๊าซทาร์ (Tar gas free) (Shinya and Matsumura, 2008)

2.6 วัสดุเพาะเมล็ด

2.6.1 ความสำคัญและลักษณะของวัสดุ

การเพาะเมล็ดเป็นกระบวนการขยายพันธุ์ของพืช ดังนั้นวัสดุเพาะเมล็ดจึงมีความสำคัญและมีหน้าที่ช่วยในด้านการเจริญเติบโต ช่วยค้ำยันต้นพืชให้ตั้งตัวได้ดี ช่วยกระจายระบบรากของต้นพืชให้

ทำหน้าที่ได้ดี มีความสามารถในการเก็บความชื้นได้ดี โดยลักษณะของวัสดุที่นำมาทำเครื่องปลูกที่ดี (ปรียาภรณ์ แนมใส, 2546) มีดังนี้

1) วัสดุหาได้ง่ายมีขนาดมาตรฐาน

2) ลักษณะทางเคมีที่สม่ำเสมอและไม่มีปฏิกิริยากับสารเคมีอื่น

3) ปราศจากโรค แมลงและวัชพืช

4) มีการระบายน้ำและอุ้มน้ำพอสมควร

5) ความหนาแน่นต่ำ น้ำหนักเบา สะดวกในการเคลื่อนย้าย

6) มีการถ่ายเทอากาศดี

7) มีธาตุอาหารที่จำเป็นต่อพืชและอยู่ในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้

2.6.2 วัสดุเพาะเมล็ดที่ดี

วัสดุเพาะเมล็ดที่ดี คือ วัสดุที่ไม่มีสารพิษต่อพืชเจือปนอยู่ ไม่เป็นแหล่งสะสมของโรคแมลงและเมล็ดวัชพืช หาง่ายและราคาไม่แพง สามารถอุ้มน้ำได้ดี โดยไม่จำเป็นต้องให้น้ำบ่อยและไม่อุ้มน้ำมากเกินไป ความพรุนเพียงพอที่จะระบายน้ำส่วนเกินออกจากภาชนะได้ง่าย มีการแลกเปลี่ยนก๊าซออกซิเจนได้ดีเนื่องจากพืชต้องการใช้ในกระบวนการหายใจเพื่อการเจริญเติบโต ในกรณีที่วัสดุเพาะชำมีก๊าซออกซิเจนต่ำกว่าร้อยละ 12 การสร้างรากใหม่ของพืชจะหยุดชะงัก และวัสดุมีค่าความพรุนรวม (Total Porosity) ประมาณร้อยละ 50-80 โดยปริมาตร วัสดุจะไม่อัดตัวหรือยุบตัวเมื่อเปียกน้ำหรือเมื่อใช้นาน ๆ มีความหนาแน่นรวมน้อย น้ำหนักเบา ง่ายต่อการเคลื่อนย้ายไปยังแปลงปลูกใหม่ แต่ต้องมีน้ำหนักที่เพียงพอต่อการพยุงลำต้นให้ตรงได้ มีระดับความเป็นกรดเป็นด่างเหมาะสมกับพืชปลูก มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (C.E.C) เพียงพอที่จะรักษาอาหารที่เป็นประโยชน์ไว้ได้ (ชมพู่ โทวรรณา, 2551)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.6.3 วัสดุเหลือใช้จากการเกษตรต่าง ๆ มาทำวัสดุเพาะกล้า

การนำอินทรีย์วัสดุเหลือใช้บางชนิดจากการเกษตร เช่น เศษซากตอซังของพืช สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้คือ การนำมาใช้เป็นปุ๋ย ทั้งนี้อินทรีย์วัสดุเหลือใช้หลายชนิดมีสมบัติและองค์ประกอบที่มีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช ทั้งในด้านการปลดปล่อยธาตุอาหาร มีค่าการปลดปล่อยสารอนินทรีย์ไนโตรเจนของอินทรีย์วัสดุแตกต่างกันไป และวัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรมบางชนิดเช่น กากหม้อกรองจากโรงงานน้ำตาล กากตะกอนน้ำเสียจากโรงงานเบียร์ ฮิวมัสจากโรงงานผงชูรส มีคุณค่าในแง่ธาตุอาหารสูง พืชสามารถนำมาใช้ในเป็นปุ๋ยที่อุดมไปด้วยไนโตรเจนและฟอสฟอรัส (ปรียาภรณ์ แนมใส, 2546)

2.6.3.1 ขุยมะพร้าว (Coir Dust)

ขุยมะพร้าวคือ เปลือกมะพร้าวที่ปั่นเอาใยออก ขุยละเอียด เป็นวัสดุเศษเหลือจากอุตสาหกรรมการผลิตเส้นใยมะพร้าว ส่วนใหญ่ขุยมะพร้าวใช้ปรับปรุงในแง่ของคุณภาพทางฟิสิกส์ของเครื่องปลูกเพื่อเพิ่มความสามารถในการระบายน้ำและอากาศ ขุยมะพร้าวมีขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 0.5-2.0 มิลลิเมตร ความชื้นที่เป็นประโยชน์ร้อยละ 35.28 ความหนาแน่นรวม 0.06 กรัมต่อมิลลิเมตร ความพรุนทั้งหมด ร้อยละ 95.53 ข้อดีของขุยมะพร้าวมีราคาถูกและเป็นวัสดุค่อนข้างสะอาดมีความเป็นกรดเล็กน้อยประมาณ 6.2 ข้อเสียอาจมีปัญหาการระบายอากาศที่รากพืช การกำจัดโรคและแมลงได้ยาก

2.6.3.2 แกลบดิบ (Rice Hush)

แกลบดิบ คือ เปลือกแข็งของเมล็ดข้าวที่ได้จากการสีข้าว เป็นส่วนที่เหลือใช้จากการผลิตข้าวสาร เมล็ดมีลักษณะเป็นรูปทรงรี สีเหลืองอมน้ำตาลหรือเหลืองนวล แกลบประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และเถ้า (มีซิลิกาในเถ้าจำนวนมาก) แกลบไม่ละลายในน้ำ มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 6-7 มีความพรุนสูง ข้อดีคือ มีราคาถูก น้ำหนักเบา ขนส่งสะดวก ข้อเสียคือ ไม่อุ้มน้ำ กำจัดโรคและแมลงได้ยาก ธาตุอาหารน้อย และพืชอาจเกิดการขาดธาตุไนโตรเจนได้

2.6.3.3 ขี้เถ้าแกลบ (Rice Hush Ash)

เป็นส่วนของเปลือกข้าวที่ถูกเผาไหม้จากโรงสีข้าว ซึ่งมีสารประกอบซิลิกาเป็นสารประกอบหลักอยู่ร้อยละ 95 มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7-8.5 ทั้งนี้จะมีค่าของความเป็นกรด-ด่างที่ขึ้นกับอายุของกองขี้เถ้าแกลบ ถ้าอายุมากค่าความเป็นกรด-ด่างจะลดลง ข้อดีคือ ความพรุน (Porosity) มาก น้ำหนักเบา ราคาถูก มีพื้นที่ผิวมาก มีคุณสมบัติดูดซับความชื้น และสารเคมีได้ดี เมื่อนำมาปลูกต้นไม้ทำให้รากพืชสามารถแผ่ขยายได้ และต้นไม้เจริญเติบโตดี ใช้เป็นสารปรับสภาพดินให้มีความเป็นกรดลดลง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.6.3.4 ถ่านแกลบ (Rice husk charcoal)

เป็นวัสดุที่ได้จากการเอาแกลบมาเผาจนเป็นถ่าน (Carbonized Rice Husk) มีน้ำหนักเบาและความสามารถในการกักเก็บน้ำสูง ส่วนในด้านสมบัติทางกายภาพมีค่าความเป็นด่างสูง ก่อนทำการเพาะเมล็ดจึงควรทำการแช่น้ำ

2.6.3.5 ขี้เลื่อย (Saw Dust)

เป็นเศษที่เหลือของไม้จากโรงงานแปรรูปไม้ ซึ่งการจะนำมาปลูกพืชควรทำการหมักให้ผุก่อนเพราะว่าขี้เลื่อยที่ใหม่จนเกินไปจะทำให้พืชเกิดการขาดธาตุไนโตรเจนค่อนข้างมากและอาจมีสารพิษที่ปลดปล่อยออกมาจากขี้เลื่อย

2.6.3.6 กากหม้อกรอง (Filter Cake)

ปัจจุบันเกษตรกรนำบางส่วนไปใช้เป็นปุ๋ยในไร่อ้อย ที่เหลือจะกองทิ้งไว้ในที่โล่งแจ้ง การสะสมของกากตะกอนในปริมาณมากอาจทำให้เกิดการสะสมของจุลินทรีย์หรืออาจปนเปื้อนด้วยสารพิษหรือโลหะหนัก ซึ่งทำให้เกิดปัญหาสภาพแวดล้อมได้

2.6.3.7 เวอร์มิคูไลต์ (Vermiculite)

เป็นแร่ที่พบได้ตามธรรมชาติ (Aluminium Iron-Magnesium Silicate) มีลักษณะเป็นแผ่นซ้อนคล้ายผึ้ง มีลักษณะเป็นรูพรุน ช่องว่างมากคล้ายฟองน้ำ ใช้สำหรับการปลูกพืชที่ต้องการการถ่ายเทอากาศดี ไม่มีธาตุไนโตรเจน แต่มีฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมอยู่ร้อยละ 5-8 แมกนีเซียมร้อยละ 9-12 อยู่ในรูปที่นำมาใช้ประโยชน์ได้

2.6.3.8 ร็อควูล

เป็นวัสดุเพาะที่ดีมีความสามารถในการดูดน้ำได้มาก ข้อเสียคือ มีราคาแพงมาก หลังจากที่เพาะกล้าแล้วจึงมีการนำกลับมาใช้เพื่อลดต้นทุน แต่การนำกลับมาใช้ใหม่ต้องฆ่าเชื้อโรคและล้างเกลือที่ตกค้างภายใน

2.6.3.9 พีทมอส (Peat Moss)

วัสดุเพาะที่นิยมนำมาเพาะกล้า คือ พีทมอส ได้จากการย่อยสลายของมอสสายพันธุ์สแฟคนั่ม (*Sphagnum* sp.) ซึ่งตายทับถมกันมานานเป็นเวลาหลายพันปี เราจะพบพีทมอสอยู่ชั้นล่างของสแฟคนั่มมอสที่ยังมีชีวิต การที่จะเกิดพีทมอสได้หนาประมาณ 2-3 ฟุต ซึ่งใช้เวลาสะสมและย่อยสลายกว่า 1,000 ปี พีทมอสจะมีมากที่แถบอากาศหนาว เช่นที่ อลาสก้า ทางตอนเหนือของจีน และประเทศเยอรมันนี

ลักษณะของพีทมอสมีโครงสร้างโปร่ง ช่องว่างอากาศสูง สามารถเก็บความชื้นได้ดี มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 2.5-7 ความสามารถในการอุ้มน้ำ 4-15 เท่าของน้ำหนัก สามารถอุ้มน้ำไว้แต่จะไม่อมน้ำจนแฉะ ความหนาแน่นรวมเมื่อแห้ง 162-333 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความพรุนร้อยละ 85-95 ปราศจากเชื้อสาเหตุโรคพืช ปราศจากวัชพืช เป็นวัสดุที่ไม่เป็นแหล่งสะสมของโรคและแมลง จึงเป็นวัสดุที่เหมาะสำหรับใช้เพาะปลูกต้นกล้าที่ช่วยเพิ่มเปอร์เซ็นต์การงอก ต้นกล้าสมบูรณ์ แข็งแรง ช่วยในการเจริญเติบโต (ชมพู่ โทวรรณา, 2551) ลักษณะของพีทมอสมี 2 แบบ คือ แบบละเอียด และแบบหยาบ ดังรูปที่ 2.6 พีทมอส จะมีอยู่ 2 ประเภท ดังรูปที่ 2.7 ได้แก่ (บริษัทชาลีเอสคิวเอ็ม ประเทศไทยจำกัด, 2561)

1) ไวท์พีท (White Peat) เป็นพีทมอสที่อยู่บริเวณชั้นบน ซึ่งผ่านกระบวนการย่อยสลายที่ระยะเวลาไม่นาน ลักษณะของไวท์พีทค่อนข้างเนื้อหยาบเนื่องจากโครงสร้างประกอบด้วยเส้นใย

2) แบล็คพีท (Black Peat) เป็นพีทมอสที่อยู่บริเวณชั้นล่าง มีความสามารถในการอุ้มน้ำที่ดี มีลักษณะของแบล็คพีทที่มีเนื้อละเอียด มีความโปร่งน้อยเนื่องจากผ่านการย่อยสลายมานาน

รูปที่ 2.6 (1) ลักษณะของพีทมอสแบบละเอียด (2) ลักษณะของพีทมอสแบบหยาบ (บริษัทเอกะอะโกร จำกัด, 2561)

รูปที่ 2.7 (1) ประเภทของพีมมอสแบบไวท์พีท (2) ประเภทของพีมมอสแบบแบล็คพีท (บริษัทเอกะอะโกร จำกัด, 2561)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประโยชน์ของพีทมอส ได้แก่ เป็นวัสดุปลูกพืชที่มีความสะอาด ความชื้นเพียงพอและมีสภาพเป็นกลางจึงทำให้ปราศจากแมลง เชื้อโรค เชื้อรา แบคทีเรีย ปกป้องดินจากการแน่นแข็งของดิน ยังมีส่วนช่วยเติมอินทรียวัตถุในเนื้อดิน ลดปัญหาการสลายตัวของธาตุอาหารสามารถใช้ในปริมาณน้อยในการเพาะต้นกล้าดอกไม้ ต้นกล้าพืชผัก พีทมอสช่วยเร่งการทำให้เกิดปุ๋ยหมัก ลดการเกิดกลิ่นเหม็นและช่วยควบคุมการถ่ายเทอากาศและน้ำในกองปุ๋ยหมักได้ดี

การที่ใช้พีทมอสกับดินเหนียวจะช่วยเพิ่มอากาศในดิน ปรับให้ดินร่วนซุย ปรับช่วยในการถ่ายเทน้ำและอากาศได้สะดวก และการใช้กับดินทรายจะช่วยเพิ่มเนื้อดิน ปรับให้ดินเก็บรักษาความชื้น ธาตุอาหารในดิน ลดการชะล้างธาตุอาหารของน้ำ (บริษัทเอกะอะโกร จำกัด, 2561)

2.6.4 คุณสมบัติบางประการทางเคมีและฟิสิกส์ของวัสดุเพาะที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช

2.6.4.1 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของวัสดุ

ค่าความเป็นกรด-ด่าง ของดินและวัสดุเพาะเป็นสมบัติทางเคมีของดินและวัสดุเพาะที่มีความสำคัญมาก ซึ่งบ่งบอกถึงปฏิกิริยาของดิน ความเป็นกรด-ด่างหรือเป็นกลางของดินมีอิทธิพลต่อการละลายของแร่ธาตุต่าง ๆ ในดิน ความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืชรวมทั้งกิจกรรมต่าง ๆ ของจุลินทรีย์ในดิน ดินที่มีพีเอชน้อยกว่า 4 จะมีกรดอิสระ (Free Acid) ซึ่งเกิดการออกซิเดชัน (Oxidation) ของซัลไฟด์สะสมอยู่มาก ดินที่มีพีเอชมากกว่า 5.5 จะมี Exchangeable Al สะสมอยู่ และดินที่มีความเป็นกรด-ด่าง 7.8-8.2 มี $CaCO_3$ สะสมอยู่ (ปรียาภรณ์ แนมใส, 2546)

ค่าพีเอชของวัสดุเพาะจะมีค่าความเป็นกรดหรือด่าง ขึ้นอยู่กับค่าที่วัดได้ โดยใช้ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 จะมีค่าเป็นกลาง ในการวัดใช้สเกลลอการิทึม จาก 0-14 หากวัสดุมีค่าความเป็นกรด-ด่างมากกว่า 7 มีค่าเป็นด่าง และหากวัสดุมีมีค่าความเป็นกรด-ด่างน้อยกว่า 7 มีค่าเป็นกรด มีการวัดความเป็นกรดของพีเอชวัดได้จากความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน (H^+) ที่ปนอยู่ในอนุภาคของวัสดุ และส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุ อัตราส่วนผสมของวัสดุเพาะ การให้น้ำและการใส่ปุ๋ย มีผลกระทบต่อพีเอชของวัสดุเพาะ ภาชนะที่ใช้บรรจุวัสดุเพาะสามารถเพิ่มค่าพีเอช 0.5-1.0 หน่วย ระหว่างที่มีการเพาะปลูกซึ่งจะเป็นผลจากการให้น้ำที่มีพีเอชเป็นด่าง

2.6.4.2 กิจกรรมของจุลินทรีย์กับค่าความเป็นกรด-ด่าง

พีเอชของวัสดุมีผลกระทบต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ แบคทีเรียจะมีกิจกรรมที่ระดับพีเอชมากกว่า 5.5 ส่วนพวกราจะมีกิจกรรมอยู่ที่ระดับพีเอชต่ำกว่า 5.5 กระบวนการไนตริฟิเค-ชัน (Nitrification) จะเกิดขึ้นที่ระดับพีเอชเป็นกลาง กิจกรรมของแบคทีเรียบางอย่าง เช่น กระบวนการไนตริฟิเคชันคือกระบวนการออกซิเดชันทางชีวเคมีของแอมโมเนียม (NH_4^+) กลายเป็นไนเตรต (NO_3^-) จะเป็นไปได้ช้ามากถ้าดินเป็นกรดจัด (ปรียาภรณ์ แนมใส, 2546)

2.6.4.3 ธาตุอาหารกับค่าความเป็นกรด-ด่าง

ถึงแม้ว่าจะมีการให้ปุ๋ยแก่พืชตลอด แต่พืชไม่สามารถดูดธาตุอาหารรองไปใช้ได้เมื่อวัสดุเพาะมีค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 5.0<pH<6.5 แม้ว่าภาชนะที่ใช้ปลูกในโรงเรือนจะมีความสำคัญต่อระดับพีเอช แต่ในบางพืช แม้พีเอชของวัสดุจะสูงกว่า 6.5 แต่ระดับธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ยังคงเพียงพอสำหรับการเจริญเติบโตของพืช ค่าพีเอชของดินมีผลต่อธาตุอาหารในดินและมีความสำคัญต่อพืชและจุลินทรีย์ในดินกับ Base-Forming Cations (Ca^{2+} , Mg^{2+},K^+, Al^{3+}, Na^+ และ H^+) ซึ่งในขบวนการย่อยสลายอินทรียโดยจุลินทรีย์ ธาตุอาหารต่าง ๆ จะถูกปลดปล่อยมาด้วยธาตุอาหารพืช โดยส่วนใหญ่มีประจุบวก กระบวนการแทนที่แคตไอออน (Cation Exchange) ซึ่งในดิน แคตไอออนแลกเปลี่ยนได้ส่วนใหญ่จะเป็น Ca^{2+}, Mg^{2+},K^+, Al^{3+}, Na^+ และ H^+ ซึ่งมีความสำคัญต่อค่าพีเอชในดิน

นอกจากนั้นค่าความเป็นกรด-ด่างยังมีผลสภาพการละลายได้ของธาตุเช่น ธาตุแคลเซียม แมกนีเซียม และโพแทสเซียม จะมีในดินที่เป็นกรดในปริมาณต่ำจนพืชอาจขาดได้ ธาตุฟอสฟอรัสจะอยู่ในพืชที่เป็นประโยชน์ต่อพืชได้น้อยทั้งในสภาพที่ดินเป็นกรดหรือด่าง

2.6.4.4 สารละลายเกลือในวัสดุเพาะและดิน

เกลือคลอไรด์ เกลือซัลเฟตของแมกนีเซียม โพแทสเซียม เป็นเกลือที่ละลายน้ำโดยส่วนใหญ่และมีอิทธิพลต่อสมบัติทางชีวเคมีของดินเช่น กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนบวกในดิน กิจกรรมของจุลินทรีย์ดิน รวมทั้งสมบัติทางฟิสิกส์ของดิน

2.6.4.5 อิทธิพลของเกลือต่อการเจริญเติบโตของพืช

ในดินที่มีเกลือละลายอยู่จะเป็นดินเค็มกระทบต่อการเจริญเติบโต จะทำให้เกิดการยับยั้งการดูดน้ำขึ้นไปใช้ของพืช โดยไอออนในเกลือเป็นพิษต่อพืชเช่น โบรอนเป็นพิษกับพืช คลอไรด์ปริมาณสูงทำให้ใบไหม้ได้และโซเดียมจะขัดขวางกระบวนการทำงานของเมตาบอลิซึมในพืชทำให้เกิดการไม่สมดุลของธาตุอาหาร ทำให้พืชขาดแคลเซียมและแมกนีเซียมได้ พืชแต่ละชนิดสามารถทนต่อความเค็มได้ในระดับที่ต่างกัน

เกลือในธรรมชาติได้แก่ เกลือซัลเฟต เกลือคลอไรด์ของโซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม ซึ่งเกลือเหล่านี้มีผลต่อปริมาณไฮโดรเจนไอออน (H^+) ในสารละลายดินทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างลดลง และในดินด่างเกลือเหล่านี้มีผล คือปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะไปลดความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ (OH^-) และเพิ่มความเข้นข้นของไฮโดรเจนไอออน (H^+) ในสารละลายดิน และแรงดันออสโมซิส (Osmosis Potential) จะลดลงทำให้พืชไม่สามารถดูดน้ำไปใช้ได้

2.6.4.6 Buffering Capacity

ความสามารถของวัสดุในการคงสภาพของความเป็นกรด-ด่าง เป็นสมบัติหนึ่งที่ใช้วัดคุณภาพของวัสดุ หากมี buffering capacity สูง ถือว่ามีคุณภาพมาก แสดงว่ามีอินทรียวัตถุที่มีคุณภาพ ตัวอย่างเช่น พีทมอส เปลือกไม้ ขี้เลื่อย ปุ๋ยหมักของเสีย และก้อนเห็ดเก่า วัสดุเพาะที่มีลักษณะ buffering capacity ต่ำคือ วัสดุเพาะที่มีทรายประกอบอยู่มาก มีอินทรียวัตถุอยู่น้อย โดยในดินที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างระหว่าง 4.5-6.0 จะมีค่า buffering capacity สูงที่สุด (ปรียาภรณ์ แนมใส, 2546)

2.6.4.7 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C:N ratio) ของวัสดุเพาะต่อพืช

ในการหมักวัสดุเพาะและเลือกวัสดุก่อนที่จะนำไปใช้ ควรทำการหาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของวัสดุเพื่อใช้เป็นตัวบ่งชี้อัตราการย่อยสลายของสารอินทรีย์สารว่าผ่านกระบวนการ

หมักที่สมบูรณ์ เมื่อนำวัสดุไปเพาะจะไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อพืช อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนของฮิวมัสมีค่าประมาณ 10:1

2.6.4.8 ความหนาแน่น (Bulk Density)

วัดเป็นน้ำหนักต่อปริมาตรประกอบด้วยอนุภาคของแข็งและช่องอากาศ ความหนาแน่นมีความเกี่ยวข้องกับสมบัติการอุ้มน้ำ ช่องอากาศ ระยะห่างของแต่ละอนุภาค อัตราช่องอากาศเล็กและช่องอากาศใหญ่ ซึ่ง 2 ค่านี้เป็นตัวกำหนดความหนาแน่น ถ้าวัสดุเพาะมีสัดส่วนช่องอากาศต่อของแข็งต่ำ วัสดุเพาะจะมีลักษณะแข็งและแน่น ซึ่งมีผลต่อการแทงทะลุของรากพืช ลักษณะของแต่ละวัสดุมีผลต่อการอุ้มน้ำและมีผลต่อการดูดน้ำของพืชด้วย

2.6.4.9 ความโปร่ง (Porosity)

ลักษณะของช่องอากาศเกี่ยวข้องกับรูปร่าง ขนาด การเรียงตัวของอนุภาควัสดุ ซึ่งช่องอากาศแบ่งออกเป็น 2 ขนาดคือ แมกโครพอร์ (Macropores) และไมโครพอร์ (Micropores) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 0.06 มิลลิเมตร ถ้าใหญ่กว่านั้นถือว่าเป็นแมกโครพอร์ ลักษณะของช่องว่างอากาศขนาดแมคโครจะยอมให้น้ำและอากาศผ่านเข้าออก ซึ่งตรงกันข้ามกับลักษณะของช่องว่างอากาศขนาดไมโครที่ยอมให้น้ำและอากาศผ่านได้น้อย ทั้งนี้จำนวนช่องอากาศยังเป็นแหล่งดูดซับน้ำ ธาตุอาหาร และการแลกเปลี่ยนของก๊าซของระบบรากพืช ดังนั้นจึงมีการเติมวัสดุเช่นกรวดผสมลงในวัสดุทำให้วัสดุมีรูพรุน เพื่อให้เป็นแหล่งที่อยู่ของธาตุอาหาร

2.6.4.10 ความเสถียรภาพของวัสดุเพาะ

อินทรียวัตถุคือ วัตถุที่เหลือจากการเน่าเปื่อยรวมทั้งซากพืชซากสัตว์ เกิดจากการทำงานร่วมกันของแบคทีเรียและเห็ดรา ทำให้วัตถุเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ส่วนประกอบของอินทรีย์ได้แก่ โพลีแซคคาไรด์ ดินและวัสดุเพาะที่มีอินทรีย์วัสดุเป็นส่วนประกอบอยู่จะมีความเสถียรภาพมากกว่าดินและวัสดุเพาะที่มีอินทรียวัตถุเป็นส่วนประกอบอยู่ต่ำ นอกจากนั้นอินทรียวัตถุยังมีผลต่อการอุ้มน้ำของวัสดุ (Water Holding Capacities)

2.6.4.11 อากาศในดิน

คุณสมบัติของวัสดุเพาะที่ดีควรมีอากาศถ่ายเทดีเนื่องจากกระบวนการหายใจของพืช ซึ่งก๊าซที่มีความสำคัญในกระบวนการของรากพืชและจุลินทรีย์คือ ออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเกี่ยวข้องถึงการออกซิเดชันของสารประกอบอินทรีย์เช่น น้ำตาล ตลอดจนถึงการสังเคราะห์แสงของพืช จะทำให้พืชสร้างน้ำตาลจากปฏิกิริยาคาร์บอนไดออกไซด์รวมกับน้ำและปลดปล่อยออกซิเจน การถ่ายเทอากาศเป็นการแลกเปลี่ยนก๊าซระหว่างดินและบรรยากาศ เพื่อป้องกันการขาดออกซิเจนหรือมีออกซิเจนมากจนกลายเป็นพิษ อย่างน้อยในวัสดุเพาะสำหรับพืชควรมีออกซิเจนมากกว่าร้อยละ 10

ปัจจัยหลักคือ ช่องว่างในอากาศวัสดุเพาะ การระบายน้ำที่ดีขึ้นอยู่กับปริมาณช่องว่างอากาศขนาดแมกโครโพเรส นอกจากนี้ยังมีผลต่อการแลกเปลี่ยนก๊าซและปฏิกิริยาชีวเคมี

2.6.4.12 อุณหภูมิของวัสดุ

อุณหภูมิมีผลอย่างมากต่อกระบวนการทางฟิสิกส์ ชีววิทยาและเคมี ในดินที่มีอุณหภูมิต่ำอัตราของปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ กระบวนการย่อยสลายโดยสิ่งมีชีวิตเกิดขึ้นน้อยมาก ซึ่งทำให้เกิดการจำกัดของปริมาณธาตุอาหารเช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส ซัลเฟอร์และแคลเซียม และถ้าอุณหภูมิที่สูงจะช่วยเร่งอัตราการย่อยสลายของสารอินทรีย์ได้มาก โดยเฉพาะอุณหภูมิช่วง 25-35 องศาเซลเซียสคือช่วงที่อุณหภูมิเหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตทั้งนี้จะขึ้นกับชนิดของพืชด้วย (ปรียาภรณ์ แนมใส, 2546)

2.6.5 การเพาะเมล็ด

ก่อนการเพาะเมล็ดควรศึกษาชนิดของพืช ลักษณะของเมล็ดพันธุ์ ควรมีการจัดการเมล็ดก่อนเพื่อทำลายระยะพักตัวของเมล็ดทำให้เมล็ดงอกเร็วและสม่ำเสมอ การศึกษาจำนวนเมล็ด เพื่อเป็นแนวทางในการประมาณการใช้เมล็ดพันธุ์ และควรทดสอบความงอกก่อนเพาะ เพื่อเป็นแนวทางในการประมาณการใช้เมล็ด (ชมพู่ โทวรรณา, 2551)

การเพาะกล้า นิยมเพาะในกระบะเพาะเพราะสามารถกำหนดอายุกล้าและวันปลูกได้แน่นอน ทำให้ได้ต้นกล้าที่แข็งแรงและยังช่วยให้ประหยัดเมล็ดพันธุ์ การเพาะเมล็ดในกระบะเพาะ คือบรรจุวัสดุเพาะลงในกระบะเพาะ 104 หลุม หยอดเมล็ดลงในหลุมในกระบะเพาะ 1-2 หลุม รดน้ำให้ชุ่ม สำหรับพีทมอส ไม่จำเป็นต้องให้ปุ๋ยเสริม เนื่องจากมีธาตุอาหารเพียงพอสำหรับกล้าอายุ 25-30 วัน หรือถ้าให้ปุ๋ยสูตร 15-15-15 ความเข้มข้น 0.1 เปอร์เซ็นต์ รดกล้าเมื่อพืชอายุ 14 วันและ 21 วันก่อนย้ายปลูก (ปรียาภรณ์ แนมใส, 2546)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.6.5.1 ขั้นตอนในการเพาะเมล็ด

1) ศึกษาชนิดพืช ลักษณะของเมล็ดพันธุ์

2) ศึกษาจำนวนเมล็ดต่อน้ำหนัก เพื่อใช้เป็นแนวทางในการประมาณการใช้เมล็ด

3) ทดสอบความงอกของเมล็ดก่อนเพาะ เพื่อเป็นแนวทางในการประมาณการใช้เมล็ด

4) คัดเมล็ดที่มีขนาดใหญ่และสม่ำเสมอ

5) การจัดการเพาะเมล็ดก่อนเพาะ

- เมล็ดที่มีเปลือกหนา อาจทำให้แตกหรือกรีดเป็นรอย เพื่อให้น้ำและอากาศผ่านได้
- ควรทำลายระยะพักตัวก่อนเพาะ

- เมล็ดพืชบางชนิดอาจจะต้องการอุณหภูมิต่ำ 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3-7 วันก่อนเพาะ
- เมล็ดพืชบางชนิดต้องการอุณหภูมิสูง
- แช่น้ำอุ่นหรือกำจัดโดยการใช้สารเคมีเพื่อป้องกันโรคติดมากับเมล็ด
- ควรแช่เมล็ดเพื่อห้ดูดน้ำเข้าไปในเมล็ดและนำไปผึ่งลม

6) ศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการงอกของเมล็ด

7) ศึกษาขั้นตอนการเจริญเติบโตทางสัณฐานวิทยาของต้นกล้า

2.7 ต้นอ่อนทานตะวัน

2.7.1 ลักษณะต้นอ่อนทานตะวัน (Sunflower Sprout)

ต้นอ่อนทานตะวัน (Sunflower Sprout) คือต้นกล้าของทานตะวัน (Sunflower) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Helianthus Annuus* โดยจัดในสกุล *Helianthus* ซึ่งต้นอ่อนทานตะวันได้จากการเพาะเมล็ดทานตะวัน โดยเมล็ดทานตะวันจะมี 2 สายพันธุ์ ได้แก่ สายพันธุ์ที่เป็นอาหารสัตว์สำหรับนกและสัตว์ต่าง ๆ ส่วนอีกสายพันธุ์ไว้สำหรับรับประทานต้นอ่อน แหล่งที่มานั้นได้แก่ พันธุ์ที่ปลูกในประเทศและพันธุ์ที่นำเข้ามาจากประเทศจีน ต้นอ่อนทานตะวันที่สามารถเก็บผลผลิตได้ จะสังเกตเห็นลักษณะของใบเลี้ยงโผล่พ้นวัสดุเพาะและแผ่ออกประมาณ 45 องศา ความยาวลำต้นประมาณ 4-5 เซนติเมตร (ยุภาวดี พรรคยู และ ยุวธิดา พรรคยู, 2559) ในปัจจุบันต้นอ่อนทานตะวันได้มีการนำมาเพื่อบริโภคหรือจำหน่าย เนื่องจากเป็นที่นิยมของผู้บริโภคเพิ่มมากขึ้นเพราะต้นอ่อนทานตะวันมีประโยชน์ต่อร่างกาย มีคุณค่าทางโภชนาการสูง และปลอดภัยจากสารเคมีตกค้างจากการเพาะปลูก

2.7.2 ระยะเวลาในการปลูก

การเพาะต้นอ่อนทานตะวันใช้เวลาประมาณ 7-11 วัน ซึ่งขึ้นอยู่กับฤดูกาล โดยในช่วงฤดูร้อนจะมีอายุเก็บเกี่ยวสั้นกว่าฤดูหนาว เนื่องจากต้นอ่อนทานตะวันมีการเจริญเติบโตที่เร็วกว่า

2.7.3 ปัจจัยในการงอกของเมล็ด

การงอกของเมล็ดจะต้องมีปัจจัยที่เหมาะ ทั้งปัจจัยภายในคือตัวเมล็ดและปัจจัยภายนอกคือสภาพแวดล้อม ดังนี้

2.7.3.1 การมีชีวิตของเมล็ดและการงอกของเมล็ด

การมีชีวิตของเมล็ด การงอกของเมล็ดจะเกิดขึ้นได้เมื่อเมล็ดมีชีวิตเท่านั้น ดังนั้นจึงถือว่าเป็นปัจจัยสำคัญในการเพาะเมล็ด การที่เมล็ดมีชีวิตอยู่ได้น้อยอาจเนื่องจากการเจริญเติบโตของเมล็ดไม่เหมาะสมในขณะที่ยังอยู่บนต้นแม่หรือได้รับอันตรายขณะเก็บเกี่ยวหรือระหว่างกระบวนการผลิตไม่ดีพอ

2.7.3.2 สภาพแวดล้อมในขณะเพาะเมล็ดที่เหมาะสมดังนี้

1) น้ำ (Water) เป็นปัจจัยที่ช่วยทำให้เปลือกเมล็ดอ่อนตัวและเป็นตัวละลายสารอาหารสะสมภายในเมล็ดที่อยู่ในสภาวะเป็นของแข็งให้เปลี่ยนเป็นของเหลวและเคลื่อนที่ได้

2) อุณหภูมิ (Temperature) อุณหภูมิที่เหมาะสมจะช่วยให้เมล็ดดูดน้ำได้เร็วขึ้น กระบวนการในการงอกของเมล็ดเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วช่วยให้เมล็ดงอกได้เร็วขึ้น อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับพืชแต่ละชนิดไม่เท่ากัน

3) แสง (Light) เมล็ดเริ่มงอกจะมีทั้งชนิดที่ต้องการแสงและไม่ต้องการแสง ส่วนใหญ่เมล็ดที่เริ่มงอกจะไม่ต้องการแสง ดังนั้นการเพาะเมล็ดโดยทั่วไปจึงมักกลบดินปิดเมล็ดเสมอ แต่เมื่อเมล็ดเริ่มงอกแล้วแสงจึงมีบทบาทช่วยให้ช่วยต้นกล้าเจริญเติบโต แสงที่เหมาะสมจะทำให้ต้นกล้าแข็งแรงและเจริญเติบโตได้ดี

4) ออกซิเจน (Oxygen) เมื่อเมล็ดเริ่มงอกจำเป็นต้องใช้ออกซิเจนไปเพื่อเผาผลาญอาหารภายในเมล็ดให้เป็นพลังงานเพื่อใช้ในการงอก ยิ่งเมล็ดที่มีไขมันสูง (Fatty Acid) จำเป็นต้องใช้ออกซิเจนมากขึ้น ดังนั้นการกลบดินทับเมล็ดหนาเกินไป หรือใช้ดินที่เพาะเมล็ดถ่ายเทอากาศไม่ดีจะมีผลยับยั้งการงอกหรือทำให้เมล็ดงอกช้าลง หรือไม่งอกเลย

กระบวนการงอกเกิดขึ้นเมื่อเริ่มจากน้ำทำให้เปลือกเมล็ดอ่อนนุ่ม ช่วยทำให้ดูดซึมน้ำจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ผนังเซลล์ขยายตัวและเมล็ดมีขนาดใหญ่ขึ้น ผนังเซลล์ที่นุ่มจะดูดซับออกซิเจนได้ดี ทำให้กระบวนการหายใจค่อย ๆ เพิ่มขึ้นและมีการย่อยอาหารสะสมภายในเมล็ด โดยการย่อยโปรตีนเป็นกรดอะมิโน แป้งเป็นน้ำตาลซูโครสและไขมันเป็นกรดไขมัน นอกจากนี้น้ำยังเป็นตัวช่วยในการขนย้ายถ่ายเทอาหารที่เมล็ดสะสมไว้ไปยังจุดเจริญ จากนั้นต้นกล้าค่อย ๆ งอกออกมาจากเมล็ด โดยการงอกของเมล็ดจะมี 2 ลักษณะคือ การงอกแบบชูใบเลี้ยงขึ้นมาเหนือดิน (Epigcal Germination) จะมีรากอ่อนโผล่พ้นเมล็ดเจริญสู่พื้นดิน ไฮโปคอติล (Hypocotyl) จะงอกยืดยาวดึงใบเลี้ยงและเอปิคอติล (Epicotyl) ขึ้นมาเหนือดิน การงอกลักษณะนี้เป็นการงอกเมล็ดพืชใบเลี้ยงคู่ เช่น ทานตะวัน ถั่วต่าง ๆ เป็นต้นและการงอกแบบฝังใบเลี้ยงไว้ใต้ดิน (Hypogeal Germination) จะมีรากอ่อนโผล่พ้นเมล็ดเจริญสู่พื้นดินแต่จะไม่ชูใบเลี้ยงขึ้นมาเหนือดิน ส่วนของไฮโปคอติลสั้นเจริญช้า แต่ส่วนเอปิคอติลและยอดอ่อน (Plumule) เจริญยืดยาวได้อย่างรวดเร็ว การงอกลักษณะนี้เป็นการงอกของพืชใบเลี้ยงเดี่ยวเช่น ข้าว ข้าวโพดเป็นต้น

2.7.4 ประโยชน์ของพืช

2.7.4.1 คุณค่าทางโภชนาการ

ต้นอ่อนทานตะวันจัดเป็นพืชที่มีอุดมไปด้วยสารอาหาร ต้นอ่อนทานตะวันประกอบไปด้วยโปรตีน ไขมัน แคลเซียม สังกะสี คาร์โบไฮเดรต และโพแทสเซียมที่มีส่วนช่วยในการลดคลอเลสเตอรอลในร่างกายเหมาะกับทุกเพศทุกวัย อีกทั้งยังอุดมไปด้วยวิตามินเอ วิตามินบี 1 วิตามินบี 6

วิตามินอี โอเมก้า 3, 6, 9 ที่ช่วยในการบำรุงสายตา บำรุงผิวพรรณ บำรุงเซลล์สมอง ป้องกันโรคสมองเสื่อม และยังมีธาตุเหล็กสูงอีกด้วย เป็นประโยชน์ต่อร่างกายเพราะมีวิตามินและเอมไซม์สูง (ยุภาวดี พรรคยู และ ยุวธิดา พรรคยู, 2559)

จากข้อมูลงานวิจัย Medical Center, University of Maryland สหรัฐ เมื่อปี 2553 ระบุว่า ต้นอ่อนทานตะวัน มีกรดลิโนเลนิก (Liolenic) ในปริมาณมากช่วยในการบำรุงสมองและกระดูกให้แข็งแรง ทั้งยังอุดมไปด้วยวิตามินอีและโฟเลต ช่วยเพิ่มภูมิต้านทานร่างกายให้แข็งแรง ป้องกันโรคหัวใจและมะเร็ง และช่วยให้ระบบขับถ่ายดีด้วย (เดลินิวส์ออนไลน์, 2561)

2.7.4.2 คุณค่าทางเศรษฐกิจ

จากการเก็บข้อมูลในการวิจัยทางเกษตรได้สำรวจว่า การใช้เมล็ดจำนวน 1 กิโลกรัม ผลผลิตของต้นอ่อนทานตะวันประมาณ 5 กิโลกรัม เมื่อทำการขายต้นอ่อนทานตะวันได้กิโลกรัมละ 150 บาท คิดเป็นเงินได้ 750 บาทต่อกิโลกรัม (ศิวพร แพงคำ และคณะ, 2559)

2.8 ผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊ค

2.8.1 ลักษณะของผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊ค (*Lactuca sativa* var. *crispa* L.)

ลักษณะเป็นพืชล้มลุกขนาดเล็กเป็นพืชที่มีถิ่นกำเนิดในทวีปเอเชีย และยุโรป เป็นพืชฤดูเดียว ลำต้นสั้น ใบเจริญเป็นกระจุกและมีจำนวนมาก มีระบบรากแก้วที่สามารถเจริญลงไปในดินได้อย่างรวดเร็ว ช่อดอกเป็นแบบ Panicle สูง 2-4 ฟุต ประกอบด้วย ดอก 10 - 25 ดอกต่อช่อ เป็นดอกสมบูรณ์เพศกลีบดอกสีเหลือง หรือขาวปนเหลือง ดอกจะบานช่วงเช้า โดยเฉพาะในช่วงที่อุณหภูมิต่ำ รสชาติหวานกรอบ (สวัสดิ์ พิมพ์สุวรรณ, 2555)

2.8.2 ระยะเวลาในการปลูก

การเพาะผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊ค เมื่อต้นกล้างอกได้ ประมาณ 7-15 วัน ควรย้ายต้นกล้าปลูกในแปลงในดินที่เตรียมไว้และสามารถเก็บผลผลิตได้มีอายุประมาณ 40-50 วัน

2.8.3 ปัจจัยในการงอก

ผักกาดหอมกรีนโอ๊ค เป็นพืชที่ต้องการสภาพอากาศเย็น โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตอยู่ระหว่าง 10 – 25 องศาเซลเซียส การปลูกในสภาพภูมิอากาศสูง การเจริญเติบโตทางใบจะลดลงส่งผลให้พืชสร้างสารคล้ายน้ำนมที่มีลักษณะคล้ายยางมาก และมีรสขม

2.8.4 ประโยชน์ของพืช

2.8.4.1 คุณค่าทางโภชนาการ

ผักกาดหอมเป็นพืชที่มีธาตุอาหารเช่น โพแทสเซียม แคลเซียม โซเดียม และแมกนีเซียม เหล็ก แมงกานีส ทองแดง สังกะสีและซีลีเนียม รวมทั้งยังเป็นพืชที่อุดมไปด้วยรงควัตถุที่เกี่ยวข้องกับ

กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ได้แก่ คลอโรฟิลล์ และแคโรทีนอยด์รวมทั้งสารอาหารอื่น ๆ ที่มีซึ่งมีคุณค่าทางโภชนาการต่อผู้บริโภค อีกทั้งยังมีวิตามินบี วิตามินซีสูง อีกทั้งยังมีไฟเบอร์ ที่ช่วยบรรเทาอาการท้องผูก

2.8.4.2 คุณค่าทางเศรษฐกิจ

ผักกาดหอมเป็นพืชที่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจที่สามารถสร้างรายได้และยกระดับคุณภาพชีวิตให้แก่เกษตรกรได้ ซึ่งราคาขายปลีกจะอยู่ที่ประมาณ 100 บาทต่อกิโลกรัม ทั้งนี้ราคาอาจสูงหรือต่ำกว่านี้ขึ้นอยู่กับฤดูกาล

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน

ทองกร สุภาโชค (2557) ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำวัสดุผักตบชวาที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชันที่อุณหภูมิ 160 200 และ 240 องศาเซลเซียส ในห้องปฏิบัติการพบว่าเมล็ดพืชทดสอบงอกได้ดีขึ้นมากในวัสดุผักตบชวาที่ย่อยสลายด้วยอุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และผ่านการล้าง แต่ยังคงมีความงอกต่ำในวัสดุผักตบชวาที่ย่อยสลายด้วยอุณหภูมิ 200 และ 240 องศาเซลเซียส และผ่านการล้าง การเพาะเมล็ดดาวเรืองในวัสดุผักตบชวาที่ย่อยสลายด้วยอุณหภูมิ 160 180 และ 200 องศาเซลเซียส ที่ผ่านการล้าง และตัดย่อยให้มีเส้นใยสั้นลงร่วมกับการรดสารละลายปุ๋ยเสริมให้กับต้นกล้า เปรียบเทียบกับการเพาะเมล็ดในพีทมอส พบว่า การเพาะเมล็ดในวัสดุไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชั่นทั้ง 3 ชนิด มีเปอร์เซ็นต์การงอกไม่แตกต่างจากการเพาะเมล็ดในพีทมอส แต่ต้นกล้าที่ได้มีการเติบโตด้อยกว่าได้แก่ ช่วงอุณหภูมิ 180 และ 200 องศาเซลเซียส การเพาะเมล็ดดาวเรืองและแพงพวยในวัสดุผักตบชวาที่ย่อยสลายด้วยอุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส แล้วรดด้วยสารละลายปุ๋ยแอมโมเนียซัลเฟต หรือใส่ปุ๋ยละลายช้า (13-13-13) เสริมให้กับต้นกล้า เปรียบเทียบกับการเพาะเมล็ดในพีทมอส พบว่า เมล็ดดาวเรืองและแพงพวยที่เพาะในวัสดุที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส มีเปอร์เซ็นต์ความงอกมากกว่าที่เพาะในพีทมอส

Jamari and Howse (2012) ศึกษาเทคโนโลยีและกระบวนการเปลี่ยนรูปจากชีวมวล โดยนำเปลือกผลไม้เข้าสู่กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของวัสดุลิกโนเซลลูโลส ที่อุณหภูมิต่ำและความดันมีผลต่อผลิตภัณฑ์จึงทำให้มีปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้น ทำให้วัสดุที่ผ่านกระบวนการสามารถเพิ่มมูลค่า โดยที่อุณหภูมิ 180 ถึง 220 องศาเซลเซียส และความดันอิ่มตัว 1-22 เมกะปาสคาล คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีโดยวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ การวิเคราะห์ค่าความร้อน SEM FTIR และ GCMS ค่าออกซิเจนต่อคาร์บอนลดลง และการศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วยวิธี SEM พบว่าโครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย มีขนาดรูพรุนเล็ก 10 ถึง 13 ไมโครเมตร ที่อยู่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บนพื้นผิวของวัสดุเมื่อผ่านกระบวนการแสดงให้เห็นว่ามีโครงสร้างของคาร์โบไฮเดรตในขณะที่มีปริมาณคาร์บอนที่เพิ่มขึ้น วัสดุจึงอุดมไปด้วยคาร์บอน

Lu et al. (2013) การศึกษาแสดงให้เห็นว่ากระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชันของชีวมวล จุดประสงค์ของการศึกษาคือ เซลลูโลสในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน ที่อุณหภูมิแตกต่างกันและระยะเวลา 96 ชั่วโมงเพื่อตรวจสอบว่าการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์ส่งผลต่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ผลจากการทดลองแบบ batch พบว่าการแปลงเซลลูโลสส่วนใหญ่เกิดขึ้นระหว่างที่เวลา 0.5 ถึง 4 ชั่วโมง และการเปลี่ยนแปลงจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา

Zhang, Lin and Zhao (2014) กากตะกอนชุมชนน้ำเสียที่มีปริมาณมาก นำมาเข้าสู่กระบวนการไฮโดเทอร์มอลคาร์บอไนเซชันเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นไฮโดรชาร์เพื่อปรับปรุงสภาพดิน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติของไฮโดรคาร์ภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกันได้แก่ 190 และ 260 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 1 6 12 18 และ 24 ชั่วโมง ผลการศึกษาทำให้องค์ประกอบไนโตรเจน ออกซิเจนและไฮโดรเจนลดลงโดยมีค่าร้อยละ 54.6 37.9 และ 10 ตามลำดับ และมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยขององค์ประกอบคาร์บอน การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ^{13}C-NMR และ fourier transform infrared spectra (FTIR) พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างทางเคมีของไฮโดรชาร์ ซึ่งในไฮโดรชาร์จะประกอบไปด้วยออกซิเจนที่ต่ำ แต่มีปริมาณคาร์บอนและอะโรเมติกที่มาก ไฮโดรชาร์มีความเป็นไฮโดรโฟบิกทำให้มีความเป็นประจุบวกสูงทำให้เกิดโครงสร้างที่มีลักษณะรูพรุน ข้อเสนอแนะเพิ่มเติมเพื่อศึกษาต่อไปจะต้องมีการตรวจสอบความเสี่ยงของกากตะกอนที่ปรับปรุงเพิ่มเติมในดิน

Jakaphong, Kanokorn and Sombat (2014) ประเทศไทยมีปริมาณชีวมวลจำนวนมากที่ไม่ได้นำไปใช้ประโยชน์เช่น อุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มจึงมีปริมาณของเสียเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จึงใช้ประโยชน์ของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่าไฮโดรชาร์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิ 100 150 และ 200 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 ถึง 90 นาที จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า สมบัติทางเคมีและกายภาพของไฮโดรชาร์มีค่าสูงสุด ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที โดยเซลลูโลสมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 57.09 ถึง 59.14 โดยที่เวลาและอุณหภูมิส่งผลต่อลักษณะผลิตภัณฑ์ ตัวแปรในอุณหภูมิส่งผลให้เกิดการแตกหักเนื่องจากเกิดการลดลงของความมีขั้วเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ควรสังเกตเพิ่มเติมในค่าของพีเอชน้ำมีผลกระทบสำคัญต่อกลไกในการทำปฏิกิริยาของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในน้ำ ดังนั้นอุณหภูมิระหว่างกระบวนการจึงเป็นตัวแปรที่เป็นกลยุทธ์ในการดำเนินงานเพื่อการผลิตไฮโดรชาร์มีประสิทธิภาพ

Gronwald et al. (2015) ศึกษาการตรวจสอบการกักเก็บสารอาหารของไพโรชาร์และไฮโดรชาร์จากวัสดุที่แตกต่างกัน (กากตะกอนจากบ่อบำบัดน้ำเสีย หญ้ามิสแคนทัสและเศษไม้) นำมาผสมใน

ดินที่แตกต่างกัน (sandy loam และ silty loam) โดยไพโรชาร์และไฮโดรชาร์ถูกผสมกับดินแล้วนำมาบ่มเป็นเวลา 3 เดือน จากนั้นตรวจสอบการย่อยสลายของชาร์ต่อความสามารถในการกักเก็บสารอาหารโดยใช้เวลา 7 เดือน โดยไพโรชาร์จากวัสดุเศษไม้มีความสามารถในการกักเก็บไนเตรดแอมโมเนียมและฟอตเฟส การประยุกต์ใช้ไฮโดรชาร์ลงในดินส่งผลต่อการกักเก็บธาตุอาหารความสามารถในการดูดซับธาตุอาหารลดลงร้อยละ 60 ถึง 80 หรือไม่สามารถดูดซับไนเตรตและแอมโมเนียม

Röhrdanz et al. (2016) ศึกษาคุณสมบัติดินในไฮโดรชาร์ โดยนำชีวมวลมาจากพื้นที่จัดการภูมิทัศน์ที่ประกอบด้วยหญ้าหวาน กก นำมาผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชั่น ภายใต้ความแตกต่างของเวลาในการทำปฏิกิริยาและอุณหภูมิในกระบวนการผลิตไฮโดรชาร์ โดยวัตถุประสงค์เพื่อที่จะนำมาปรับปรุงดิน ตัวแปรที่ทำการวิเคราะห์คือความสามารถในการอุ้มน้ำ (WHC) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของดิน (C.E.C) ส่วนประกอบของธาตุ โดยใช้เครื่อง Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR) ผลที่ได้แสดงให้เห็นถึงผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าเมื่อความรุนแรงของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น (เวลาในการปฏิกิริยาและอุณหภูมิในกระบวนการผลิต) ความสามารถในการอุ้มน้ำ ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของดิน และอัตราส่วนระหว่างออกซิเจนต่อคาร์บอนของจะมีค่าลดลง การใช้ไฮโดรชาร์ที่ผลิตได้ในสภาพที่รุนแรงของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชั่น สามารถปรับปรุงความสามารถในการอุ้มน้ำความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของดิน แต่จะต้องมีการตรวจสอบในการศึกษาครั้งต่อไปต่อไป

Belda et al. (2016) ได้นำวัสดุที่ประกอบด้วยสารอินทรีย์ได้แก่ เศษใบไม้จากพุ่มไม้ นำมาเปลี่ยนแปลงให้กลายเป็นไบโอชาร์และไฮโดรชาร์เพื่อศึกษาคุณสมบัติเปรียบเทียบความแตกต่างของไบโอชาร์และไฮโดรชาร์ในการนำไปทดสอบปลูกกับต้นไม้หรือใช้ทดแทนขุยมะพร้าว จากผลการศึกษาแสดงได้เห็นว่า ไบโอชาร์สามารถเกิดกิจกรรมทางจุลินทรีย์ในกระบวนการไนโตรเจน Immobilization ในวัฏจักรไนโตรเจน แต่ไฮโดรชาร์ไม่สามารถเกิดกิจกรรมทางจุลินทรีย์ แต่การทดสอบในการปลูกต้นไม้ ไบโอชาร์ผสมกับดินในป่าและไฮโดรชาร์ผสมในดินที่ปลูกไม้พุ่มได้ดี ส่วนการนำไบโอชาร์ผสมกับขุยมะพร้าวจะเกิดความเป็นพิษ ดังนั้นไบโอชาร์และไฮโดรชาร์จะมีสมบัติที่แตกต่างกันที่จะส่งผลกระทบต่อพืชและยังขึ้นกับวัตถุดิบเริ่มต้นและกระบวนการผลิต

Breulmann et al. (2017) ศึกษาโดยการนำกากตะกอนน้ำเสียเรียกว่า sewchars มาใช้ในการผลิตชาร์เพื่อเปรียบเทียบและประเมินชาร์ที่ผลิตได้จากการบวนการไพโรไลซิสและไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน เพื่อนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดิน โดยกระบวนการไพโดรไลซิสใช้อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ที่เวลา 1 ชั่วโมง และกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชันใช้อุณหภูมิ 180-200 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 4-8 ชั่วโมง ผลแสดงว่าไฮโดรเทอร์มอลมีแนวโน้มในการปรับปรุง

ดินได้น้อยกว่าไพโรชาร์ ส่วนเวลาและอุณหภูมิในการทดลองของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลมีความสัมพันธ์ในทางบวกขององค์ประกอบของชาร์ในการดูดซับคาร์บอนและไนโตรเจน ในการเพิ่มของตัวแปรของอุณหภูมิ ค่าพีเอช เถ้า องค์ประกอบธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรองมีค่าเพิ่มมากขึ้น

Chen et al. (2017) ศึกษาการนำเปลือกแตงโมเหลือทิ้งมาผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชั่นภายใต้อุณหภูมิ 190 และ 260 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 6 และ 12 ชั่วโมง ผลการทดลองแสดงให้เห็นผลิตภัณฑ์ได้ที่คือไฮโดรชาร์ มีผลผลิต 46-95 % ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส จะได้ประสิทธิภาพสูงที่สุด อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจน 22.19-26.86 มากกว่า alkyl C, aryl C และ carbonyl C แต่ต่ำกว่าอัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนต่อคาร์บอน 0.98-1.22 อัตราส่วนระหว่างออกซิเจนต่อคาร์บอน 0.13-0.38 และวัตถุดิบ ดังนั้นจึงมีความเป็น aliphaticity ลดลงในขณะที่ aromatic เพิ่มขึ้น เพราะฉะนั้นควรระมัดระวังในเรื่องของสารพิษในไฮโดรชาร์ อาจก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อสิ่งแวดล้อมในขณะที่ใช้ในการปรับปรุงดิน

Paneque et al. (2017) การศึกษากระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชันด้วยการใช้กากตะกอนน้ำเสียเพื่อใช้ในการปรับปรุงดิน เพื่อประเมินความเป็นไปได้จากการใช้กากตะกอนบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมบำบัดน้ำเสียในชนบท โดยใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 200 และ 260 องศาเซลเซียส เวลา 0.5 และ 3 ชั่วโมง ซึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมี โครงสร้างอะโรเมติกของไฮโดรชาร์มีลักษณะโดดเด่น องค์ประกอบไนโตรเจนมีค่าสูงที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ด้วยเหตุนี้วัสดุที่นำมาใช้จะมีการปลดปล่อยของไนโตรเจนช้าๆ

Xu and Jiang (2017) กากตะกอนโดยเข้าสู่กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน จากผลการศึกษาพบว่า ผลิตภัณฑ์ของแข็งซึ่งมีลักษณะคล้ายดิน มีค่าผลผลิตที่ได้ลดลงจากร้อยละ 92.04 มีค่าร้อยละ 52.65 เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 150 ถึง 300 องศาเซลเซียส องค์ประกอบของโลหะหนักได้แก่ ทองแดง สังกะสี และตะกั่ว จะมีค่าลดลง ค่าความขุ่นและค่าซีโอดีในส่วนของผลิตภัณฑ์ของเหลวลดลงจากอุณหภูมิ 450 ถึง 175 องศาเซลเซียส โดยมีค่า 13 ถึง 6.8 กรัมต่อลิตร เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน ผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้เมื่ออุณหภูมิต่ำจะได้ผลผลิตสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิสูงเช่นปฏิกิริยาไพโรไลซิส องค์ประกอบของโลหะหนักได้แก่ ทองแดง สังกะสี และโครเมียม ถูกจำกัดออกหมด ดังนั้นผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อนำกากตะกอนผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน จะทำให้ไม่เกิดมลพิษและผลิตภัณฑ์อุดมไปด้วยแหล่งพลังงาน

Al-Wabel et al. (2019) จุดมุ่งหมายในการศึกษาเพื่อแยกแยะสมบัติของผลิตภัณฑ์ชีวภาพที่ผลิตจากต้นปาล์มและอนุพันธ์ไฮโดรชาร์ (derivative hydrochar) และตรวจสอบผลกระทบต่อระบบนิเวศต่อการเจริญเติบโตของพืช โดยชีวมวลที่นำมาคือใบปาล์มที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิส

และไฮเดอร์เทอร์มอลคาร์บอนเซชั่น ตามลำดับ และได้ไบโอชาร์และไฮโดรชาร์ ซึ่งศึกษาผลต่อการงอกของเมล็ดผักกาดหอม (*Lactuca sativa* L) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการชะน้ำของไบโอชาร์จะส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างลงลด ส่วนของไฮโดรชาร์ค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การชะด้วยน้ำทำให้องค์ประกอบของธาตุที่สำคัญเช่น Ca, Mg, Mn และ Zn ถูกยับยั้งให้มีผลต่อการงอกของผักกาดหอมร้อยละ 20 ของไฮโดรชาร์ ในขณะที่ไบโอชาร์มีการเจริญเติบโตของผักกาดหอมเพิ่มขึ้น ความยาวรากร้อยละ 51 ชีวมวลที่ได้ร้อยละ 114 ส่วนไฮโดรชาร์มีความเป็นพิษเนื่องจากมีปริมาณโพลีอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนสูง (98.8 mg kg^{-1}) ด้วยเหตุนี้จึงควรนำไฮโดรชาร์มาพิจารณาก่อนที่จะมีการประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงดิน

Melo et al. (2018) การศึกษาครั้งนี้เป็นการเปรียบเทียบผลของ sewchar และปุ๋ยแร่ธาตุ ต่อการตอบสนองของพืชประเภทถั่ว (*Phaseolus vulgaris*, var. "Jalo precoce") ทำการทดลองในกระถาง โดยออกแบบการทดลองแบบสุ่มและทำการเก็บเกี่ยวถั่วช่วงที่อุดมสมบูรณ์ ค่าตัวแปรที่ทำการวัดได้แก่ ความสามารถในการอุ้มน้ำ (WHC) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของดิน (C.E.C) ค่า Zn, Ca, Fe, Cu และ P และความเข้มข้นของไนเตรท แอมโมเนียม ไนโตรเจนทั้งหมด อินทรีย์คาร์บอนรวมและการอินทรีย์ที่สกัดด้วยน้ำหรือละลายด้วยน้ำร้อน จากผลการทดลองในการเก็บเกี่ยวถั่วครั้งที่สองพบว่ามวลชีวมวลในพืชได้ร้อยละ 96 ซึ่งสูงกว่าพืชในควบคุม นอกเหนือจากนี้ฟอสฟอรัสช่วยในการตอบสนองของพืชใน sewchar และมีแนวโน้มที่เป็นทางเลือกในการปรับปรุงดินเพื่อทดแทนปุ๋ยแร่ธาตุบางส่วนได้ ดังนั้นในอนาคตจึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อประเมินผลตกค้างในดินระยะยาว

Duman et al. (2018) ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชั่น โดยวิธีการพื้นผิวการตอบสนอง (RSM) ถูกนำมาใช้เพื่อตรวจสอบผลกระทบของแต่ละตัวแปร (อุณหภูมิ อัตราส่วนระหว่างมวลชีวภาพต่อน้ำและเวลาปฏิกิริยา) จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยาเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อปริมาณคาร์บอนในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชั่น สำหรับกากอุ่นพบว่าผลของปฏิกิริยาระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อผลผลิตมวลรวมมีนัยสำคัญ สมบัติของถ่านที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงดิน มีความสำคัญในการกำหนดประเภทของกระบวนการคาร์บอไนเซชั่น เมื่อเปรียบเทียบกับไบโอชาร์ที่ผลิตโดยคาร์บอไนเซชั่นแบบแห้ง ซึ่งไฮโดรชาร์มีความสามารถในการอุ้มน้ำ (WHC) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของดิน (C.E.C) สูง ค่าการนำไฟฟ้าของดิน (EC) ต่ำ มีค่าความเป็นกรด-ด่างเป็นกรดมากขึ้นและมีค่าความเสถียรของคาร์บอนที่ต่ำ แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างที่ประกอบด้วยไนโตรเจนในชีวมวลอาจถูกทำ

ให้เป็นรูปแบบโครงสร้าง N-heterocyclic aromatic ในขณะที่ไนโตรเจนในไบโอชาร์มีไนไตรท์และเอมีนไนโตรเจน

Puccini et al. (2018) ศึกษาเพื่อตรวจสอบความเหมาะสมของไฮโดรชาร์ เพื่อที่จะเพิ่มผลิตในระดับอุตสาหกรรมด้วยการใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชันที่อุณหภูมิ 180 และ 230 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 4-16 ชั่วโมง ได้นำวัสดุจากกิ่งก้านต้นไม้ เทศบาลขยะสีเขียวมาใช้เพื่อที่จะปรับปรุงดินและนำมาใช้เป็นตัวกลางของสารอินทรีย์ที่ช่วยในการเจริญเติบโตของพืชสวน ในการทดลองได้ทำการทดลองแบบ Washing และ Aging เพื่อเปรียบเทียบในแง่ของความเป็นพิษ รวมทั้งองค์ประกอบทางกายภาพและเคมีและทดสอบการงอกของเมล็ดผักกาดหอม ผลที่ได้ไฮโดรชาร์มีกิจกรรมทางชีวภาพและมีองค์ประกอบในสารอินทรีย์คาร์บอน แคลเซียม และธาตุอาหารรองสูง เปอร์เซ็นต์การงอกของเมล็ด 56 และ 54 ในสัดส่วนของไฮโดรชาร์ร้อยละ 5 และ 10 ตามลำดับ การยังยั้งการงอกของผักกาดหอมอาจเป็นการปรากฏของโพลีฟีนอล (เทนนิส) และ volatile fatty acid

2.9.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบการใช้พืช

ชมพู่ โทวรรณา (2551) เพื่อหาวัสดุเพาะกล้าที่ดีมาใช้ประโยชน์ในธุรกิจการเพาะกล้าเพื่อลดการนำเข้าจากต่างประเทศ จึงได้ศึกษาผลของวัสดุเพาะที่มีต่อการเจริญเติบโตของต้นกล้ามะเขือเทศ โดยวางแผนการทดลองแบบ Randomized complete block design (RCBD) มีวัสดุเพาะ 18 สูตรเป็นหน่วยทดลอง ทำ 4 ซ้ำ ทำการทดลองที่หมวดพืชผัก คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จากผลการทดลองพบว่า วัสดุเพาะกล้าสูตรที่ 17 (พีทมอส:แกลบเผา อัตรา 1:1ส่วน) และสูตรที่ 18 (พีทมอส:ขุยมะพร้าวอัตรา 1:1) มีอัตราการงอกและเปอร์เซ็นต์การงอกที่สูง (>90%) และเร็วใกล้เคียงกับสูตรที่ 1 พีทมอสซึ่งเป็นวัสดุที่นิยมใช้กันมากในการเพาะกล้า ส่วนการเจริญเติบโตของต้นกล้านั้น พบว่าสูตรที่ 4 (ขุยมะพร้าว:แกลบดิบ:แกลบดำ:กากหม้อกรอง อัตรา 1:0.5:1:1), สูตรที่ 15 พีทมอส:กากหม้อกรอง อัตรา 1:1), สูตรที่ 16 (พีทมอส:แกลบดิบ อัตรา 1:1), สูตรที่ 17 (พีทมอส:แกลบเผา อัตรา 1:1) มีการเจริญเติบโตที่ดีกว่าสูตรที่ 1 และยังพบว่าสูตรที่ 15 ให้น้ำหนักแห้งต้นกล้าสูงที่สุด

มิยดา นาเอก (2553) การใช้แร่อุตสาหกรรมเพอร์ไลท์และเวอร์มิคิวไลท์เพื่อปลูกผักกาดหอมแบบไม่ใช้ดินในระบบปลูกแบบให้สารละลายไหลผ่านรากพืชเป็นน้ำบาง ๆ (Nutrient Film Technique:NFT) โดยให้สารละลายธาตุอาหารพบว่า ผักกาดหอมในวัสดุปลูกเพอร์ไลท์ขนาด 4.75 มิลลิเมตร ให้เปอร์เซ็นต์การงอกดีสุด 78.85 เปอร์เซ็นต์ ในด้านการเจริญเติบโตของผักกาดหอมสัปดาห์ที่ 1 2 และ 3 หลังย้ายปลูกลงรางในวัสดุปลูกชนิดต่าง ๆ ไม่พบความแตกต่างกันทางสถิติในสัปดาห์ที่ 4 ผักกาดหอมมีความแตกต่างกันในด้านน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้ง แต่ในสัปดาห์ที่ 5 การเจริญเติบโตของผักกาดหอมมีความแตกต่างกันเกือบทุกด้าน ยกเว้นการเจริญเติบโตทางด้านความ

ราก โดยในวัสดุปลูกเพอร์ไลท์ผสมเวอร์มิคิวไลท์แบบลูกเต๋า อัตราส่วน 3:1 โดยมีจำนวนใบ ความยาวต้น น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้ง เฉลี่ยสูงสุด เท่ากับ 23.8 ใบต่อต้น 23.70 เซนติเมตร 62.10 กรัม และ 4.16 กรัม ตามลำดับ ดังนั้น การใช้เพอร์ไลท์ผสมเวอร์มิคิวไลท์ ในอัตราส่วน 3:1 โดยปริมาตร ให้ผลดีในการนำมาใช้เป็นวัสดุปลูกพืช

ธนิกพงศ์ ครองข้าวนาสาร (2555) ศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมของการเพาะต้นอ่อนทานตะวันเพื่อให้มีคุณค่าทางโภชนาการ (วิตามินซี คลอโรฟิลล์ และเส้นใยอาหาร) ที่สูงที่สุด โดยเพาะเมล็ดทานตะวันที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ในสภาพให้แสงตลอดวัน วิเคราะห์หาปริมาณวิตามินซี คลอโรฟิลล์ และเส้นใยอาหาร ในต้นทานตะวันงอกอายุ 1 2 3 4 และ 5 วันหลังเพาะเมล็ด ผลการทดลองพบว่าต้นทานตะวันงอกที่อายุ 5 วันหลังเพาะเมล็ด มีปริมาณวิตามินซีมากที่สุด 14.56 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 100 กรัม ปริมาณคลอโรฟิลล์ 0.73 ไมโครกรัมต่อกรัมน้ำหนักสด ส่วนเส้นใยอาหารพบมากที่สุดในต้นทานตะวันงอกอายุ 1 วันหลังเพาะเมล็ด มีปริมาณอยู่ที่ 1.25 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักสด

ดารณี เกียรติสกุล (2558) การศึกษาวัสดุเพาะและวิธีการเพาะเมล็ดเพื่อผลิตต้นอ่อนทานตะวันเพื่อการค้า การทดลองที่ 1 วัสดุเพาะและการแช่เมล็ด 16 ชั่วโมงหรือบ่มเมล็ดอีก 24 ชั่วโมง หลังจากเพาะได้ 5 วัน พบว่า วัสดุเพาะที่ทาให้ต้นอ่อนทานตะวันมีน้ำหนักมาก คือ ปุ๋ยหมัก: ขุยมะพร้าว 1:1, วัสดุปลูก : ขุยมะพร้าว 1:1 และ ดิน: ปุ๋ยหมัก 1:1 การทดลองที่ 2 วัสดุเพาะ และการแช่เมล็ดในน้ำ 24 ชั่วโมง การเพาะทั้งเมล็ดที่ลอยและจมพบว่า วัสดุเพาะที่เป็น วัสดุปลูก:ขุยมะพร้าว 1:1 และเมล็ดที่ลอย ทำให้เปอร์เซ็นต์การงอกและต้นอ่อนมีน้ำหนักดีที่สุด การทดลองที่ 3 การศึกษาวัสดุเพาะ และการแช่เมล็ด 16 ชั่วโมง ในน้ำเย็นหรือน้ำอุ่นพบว่า วัสดุปลูกผสมขุยมะพร้าวอัตรา 1:1 และการแช่น้ำเย็น 16 ชั่วโมง ทำให้น้ำหนักต้นอ่อนทานตะวันที่สุด

สุชาวลีวรรณ ตรีเสิน และ ชนิกาญจน์ จันทร์มาทอง (2559) ศึกษาผลของการแช่เมล็ดด้วยกรดซาลิซิลิก (salicylic acid, SA) ต่อความงอกของเมล็ด การเจริญเติบโตและศักยภาพในการต้านอนุมูลอิสระของต้นอ่อนทานตะวัน โดยนาเมล็ดมาแช่ในสารละลาย SA ความเข้มข้น 0 (ชุดควบคุม), 250, 500 และ 1000 μM เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ก่อนนำเมล็ดออกมาเพาะในถาดพลาสติกที่บรรจุด้วยแกลบดำ:ขุยมะพร้าว ในอัตราส่วน 1:1 ภายใต้สภาพอุณหภูมิ 30±3 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 65-70% เป็นเวลา 7 วัน แล้ววิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ความงอก ความสูงลำต้นและความยาวราก น้ำหนักสดต้น ผลการทดลองพบว่าการแช่เมล็ดด้วย SA ไม่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ความงอกของเมล็ดทานตะวัน การแช่เมล็ดด้วยสารละลาย SA ความเข้มข้น 500 μM สามารถเพิ่มการเติบโตของต้นอ่อนทานตะวันได้ ดังนั้นการแช่เมล็ดด้วย SA สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อเร่งการเติบโต และเพิ่มศักยภาพในการต้านอนุมูลอิสระของต้นอ่อนทานตะวันได้

Dalias et al. (2018) ป่าพรุเป็นแหล่งสะสมของคาร์บอนระดับโลกและมีความสำคัญต่อการอนุรักษ์ความหลากหลายทางชีวภาพ การนำชีวมวลอินทรีย์เช่นฟางข้าวโพดผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชันเพื่อให้ได้เป็นผลิตภัณฑ์คล้ายดินที่เรียกว่าพีท เป็นส่วนช่วยในการเจริญเติบโตของพืชทดแทนดินจากป่าพรุที่นิยมนำมาใช้ การศึกษามุ่งเน้นศึกษาลักษณะของไฮโดรชาร์ สมบัติทางเคมีและการประเมินการหายใจของจุลินทรีย์ จากนั้นจึงนำมาทดสอบปลูกกับต้นเทียนแดง (*Lepidium sativum*) เป็นระยะเวลา 10 วัน เพื่อดูการอัตราการรอดของเมล็ดพบว่าหลังจากการใช้วัสดุพีทที่ผ่านกระบวนการ อัตราการงอกเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะเมื่อมีการผสมระหว่างพีทและดิน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน

ผู้วิจัย	รายละเอียด													
	ผลิตภัณฑ์ตั้งต้น	BTW (g/ml)	อุณหภูมิ (^{0}C)	เวลา (ชม.)	pH	EC $mScm^{-1}$	CEC	Element (%)	C/N	O/C	H/C	Ash (%)	ผลิตภัณฑ์ที่ได้	% Yield
(Luca et al., 2014)	เมล็ดองุ่น	N/A	180, 220, 250	1, 3, 8	N/A	N/A	N/A	C = 70.7 H = 6.7 N = 2 O = 27.8	N/A	N/A	N/A	5.01	ไฮโดรชาร์	80.3
(Gronwald et al., 2015)	เศษไม้	1:10	200, 250	6	4.8	N/A	10.8	C = 76.9 N = 2.98	12.3	0.87	0.12	5.0-5.4	ไฮโดรชาร์ ไพโรชาร์	N/A
(Nakasorn et al., 2017)	เส้นใยต้นปาล์ม	1:5 1:10 1:15	140, 160, 180, 200	1, 2, 3, 4	N/A	N/A	N/A	C = 58.2 H = 6.42 N =1.27 O = 37.7	N/A	1.54	1.28	4.6-5.5	ไฮโดรชาร์	61.4
(Paneque et al., 2017)	กากตะกอนน้ำเสีย	N/A	200, 260	0.5, 3	6.5	N/A	N/A	C = 85.1 H = 75.2 N = 72.4 O = 55.5	N/A	0.4	1.6	76	ไบโอชาร์	N/A

CHULALONGKORN UNIVERSITY จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน (ต่อ)

ผู้วิจัย	รายละเอียด													
	ผลิตภัณฑ์ตั้งต้น	BTW (g/ml)	อุณหภูมิ (^{0}C)	เวลา (ชม.)	pH	EC $mScm^{-1}$	CEC	Element (%)	C/N	O/C	H/C	Ash (%)	ผลิตภัณฑ์ที่ได้	% Yield
(Breulmann et al., 2017)	กากตะกอนน้ำเสีย	N/A	180, 200	1, 4, 8	5.8	N/A	312	C = 58.6 H = 5.7 O = 23.2	N/A	0.8	1.9	61	ไบโอชาร์	N/A
(Chen et al., 2017)	เปลือกแตงโม	1:10	190, 260	1, 6, 12	4-6.5	3.42	N/A	C = 72.1 H = 6.56 N = 3.25 O = 29.0	26.9	0.38	1.22	4.2-9.2	ไฮโดรชาร์	95
(Al-Wabel et al., 2019)	ใบปาล์ม	1:10	70, 250	3, 24	5.32	3.47	13.46	C = 80.3 H = 6.56 N = 2.50 O = 10.6	N/A	0.10	0.98	16.15	ไฮโดรชาร์ ไบโอชาร์	65.47
(Puccini et al., 2018)	กิ่งไม้ เศษไม้	1:5	180, 230	4-16	5.8	2.07	3.8	C = 62.0 H = 6.5 N =1.4 O = 30.1	44	N/A	N/A	12.3	ไฮโดรชาร์	N/A

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตของพืช

ผู้วิจัย	พืช	วัสดุปลูก	จน. วัน	% การงอก	ความกว้างต้น (cm)	ความสูงต้น (cm)	ความยาวใบ (cm)	ความกว้างใบ (cm)	ความยาวราก (cm)	จำนวนใบ(cm)	น้ำหนักต้นสด (g)	น้ำหนักรากสด (g)	น้ำหนักแห้งต้น (g)	น้ำหนักแห้งราก (g)
(ชมพู่ โทวรรณา, 2551)	ต้นกล้ามะเขือเทศ	พีทมอสแกลบเผา	30	98.92	9.03	N/A	N/A	N/A	N/A	3.65	1.47	0.62	0.15	0.04
(สวัสดิ์ พิมพ์สุวรรณ, 2555)	กาบหอยแครง	พีทมอสผสมเพอร์ไลท์	84	68.75	5.7	0.88	2.43	1.15	N/A	84	N/A	N/A	N/A	N/A
(ชานนท์ มณีรัตน์, 2556)	ผักบุ้งจีน	salicylic acid	10	78.50	N/A	2.3	6.2	N/A	N/A	N/A	3.98	0.98	0.27	0.043
(ทองกร สุภาโชค, 2557)	ดาวเรือง	ผักตบชวา	7	73.6	N/A	4.53	N/A	0.19-0.63	N/A	1.31	N/A	N/A	0.036	0.017

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตของพืช (ต่อ)

ผู้วิจัย	พืช	วัสดุปลูก	จน.วัน	% การงอก	ความกว้างต้น (cm)	ความสูงต้น (cm)	ความยาวใบ (cm)	ความกว้างใบ (cm)	ความยาวราก (cm)	จำนวนใบ(cm)	น้ำหนักต้นสด (g)	น้ำหนักรากสด (g)	น้ำหนักแห้งต้น (g)	น้ำหนักแห้งราก (g)
(คงเอก ศิริงาม, 2558)	ผักกาดหอมใบพันธุ์กรีนโอ๊ค	เพอร์ไลท์ผสมเวอร์มิคิวไลท์	14	N/A	29.10	14.62	N/A	N/A	N/A	22	8.63	1.44	0.36	0.46
(เจนจิรา ชุมภูคำ และ สิริกาญจนา ตาแก้ว, 2559)	ต้นกล้ามัลเบอร์รี่พันธุ์เวียดนาม	ถ่านแกลบ : ทรายหยาบ : พีทมอส	30	73.33	13.9	9	7.17	5.31	N/A	7.27	2.13	0.23	0.31	0.03
(ดารณี เกียรติสกุล, 2558)	ต้นอ่อนทานตะวัน	ปุ๋ยหมัก:ขุยมะพร้าว	5	67.50	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.25	N/A	N/A	N/A
(สุชาวลีวรรณ ตรีเสิน และชนิกาญจน์ จันทร์มาทอง, 2559)	ต้นอ่อนทานตะวัน	แกลบดำ:ขุยมะพร้าว	7	N/A	N/A	12.14	N/A	N/A	4.57	N/A	0.74	N/A	N/A	N/A

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 พื้นที่ศึกษาวิจัย

การศึกษาครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) ดำเนินการในห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2 เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมี

3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1) เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง
2) เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 2 ตำแหน่ง
3) ตะแกรงร่อนดินขนาด 0.5 มิลลิเมตร
4) แท่งแก้วสำหรับคน
5) ช้อนตวง
6) กระบอกตวง
7) หลอดทดลอง
8) ขวดปริมาตรทรงกรวย
9) ขวดกรอง
10) ขวดปริมาตร
11) กรวยบุชเนอร์
12) บิวเรต
13) จานแก้ว
14) กระดาษกรอง (Filter Paper) Whatman No.42
15) Dispenser ขนาด 10 และ 20 มิลลิลิตร
16) ถาดเพาะชำ 104 หลุม
17) บีกเกอร์
18) กรวยกรองแก้ว
19) เครื่องกวน
20) เครื่องเขย่า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

21) เครื่องวัดพีเอช

22) เครื่องอบแห้ง

23) เครื่อง Atomic absorption spectrophotometer

24) เครื่อง Element analyzer

25) เครื่องกลั่นอัตโนมัติ (Buchi Distillation)

26) เครื่อง Electrical conductivity meter

27) Flamephotometer

28) Vacuum pump

3.2.2 สารเคมี

1) สารละลายมาตรฐานโปแตสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) 1.0 N

2) กรดซัลฟูริกเข้มข้น (Conc. H_2SO_4)

3) สารละลายเฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟต (Ferrous Ammonium sulfate) 0.5 N

4) สารละลายออร์โทฟีแนนโทรลีน อินดิเคเตอร์

5) สารละลายแอมโมเนียมอะซิเตรต (NH_4OAc) 1 M pH 7.0

6) สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH)

7) สารละลายมาตรฐานโพแตสเซียม

8) สารละลายสตรอนเซียมคลอไรด์ ($SrCl_2$)

9) เอทิลแอลกฮอล์ (Ethyl alcohol) 95%

10) สารละลายกรดเกลือหรือกรดโฮโดคคลอริก (HCl) 0.1 N

11) สารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

12) สารละลายกรดบอริก (H_3BO_3)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.2 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

งานวิจัยได้นำวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาลคือ กากหม้อกรอง (Filter cake) ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาล ในจังหวัดเพชรบูรณ์ มาทำการปรับสภาพด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นวัสดุคล้ายพีทมอสสำหรับใช้เพาะเมล็ดต้นอ่อนทานตะวันและผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊ค มีรายละเอียดดังนี้ (รูปที่ 3.1)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 3.1 แผนผังสรุปวิธีดำเนินการวิจัย

3.2.1 การเตรียมวัสดุและสารเคมี

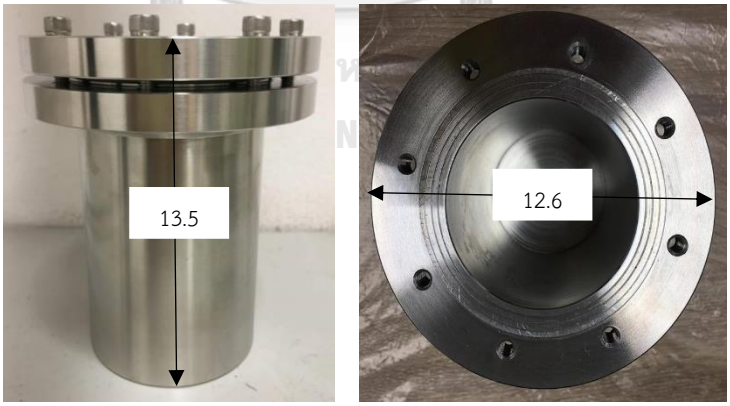
การศึกษาจะเตรียมวัสดุเหลือทิ้งคือ กากหม้อกรอง นำมาอบที่ 80 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำมาคัดแยกขนาดโดยร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 10 จะได้วัสดุที่มีขนาด 2 มิลลิเมตร นำวัสดุที่เตรียมได้เก็บไว้ในถุงพลาสติก ทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของกากหม้อกรองด้วย X-Ray Fluorescence (XRF) รุ่น BRUKER AXS model S4 Pioneer

รูปที่ 3.2 ลักษณะกากหม้อกรอง

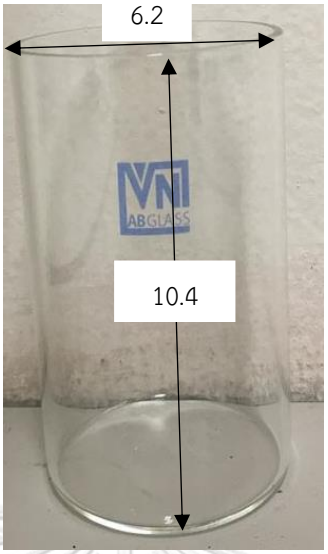
3.2.2 สังเคราะห์วัสดุเพาะเมล็ดผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน

3.2.2.1 การติดตั้งอุปกรณ์

ระบบการทำงานของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชันที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วย ถังปฏิกรณ์ความดันสูง ความสูง 13.5 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 12.6 เซนติเมตร และมีถังปฏิกรณ์แก้วอยู่ภายใน สูง 10.4 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 6.2 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.3 และ 3.4 โดยมีปริมาตรความจุภายในประมาณ 300 มิลลิลิตร หลังจากทำการติดตั้งอุปกรณ์เรียบร้อยจึงใช้งานภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่กำหนด



รูปที่ 3.3 Stainless steel reactor



รูปที่ 3.4 Glass reactor

3.2.2.2 ขั้นตอนการผลิตไฮโดรชาร์

1) นำกากหม้อกรองลงในถังปฏิกรณ์ โดยปรับอัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:5 (กากหม้อกรอง 40 กรัมต่อน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร), 1:10 (กากหม้อกรอง 22 กรัมต่อน้ำกลั่น 220 มิลลิลิตร) และ 1:15 (กากหม้อกรอง 16 กรัมต่อน้ำกลั่น 220 มิลลิลิตร)

2) นำเข้าเครื่องอบ โดยกำหนดอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 160 180 และ 200 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลาทำปฏิกิริยา 1 2 และ 3 ชั่วโมง

3) นำถังปฏิกรณ์ออกจากเครื่องอบ และทำให้เย็นอย่างรวดเร็วโดยการแช่ในน้ำเย็น

4) ในกรณีที่บ้างตัวแปรมีของเหลวจึงจำเป็นต้องแยกส่วนที่เป็นของแข็งและของเหลวของวัสดุที่ผ่านการอบ ด้วยกระดาษกรอง (Whatman No.42)

5) นำวัสดุที่ผ่านการกรองมาอบที่ 80 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง

6) การทดลองทั้งหมดจะทำซ้ำตัวอย่างละ 2 ซ้ำ โดยทำการออกแบบการทดลองดังตารางที่ 3.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 3.1 การออกแบบการทดลอง

Run	ตัวแปร		
	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (h)	อัตราส่วนระหว่างชีวมวลและน้ำ
1	160	1	1:5
2	180	1	1:5
3	200	1	1:5
4	160	2	1:5
5	180	2	1:5
6	200	2	1:5
7	160	3	1:5
8	180	3	1:5
9	200	3	1:5
10	160	1	1:10
11	180	1	1:10
12	200	1	1:10
13	160	2	1:10
14	180	2	1:10
15	200	2	1:10
16	160	3	1:10
17	180	3	1:10
18	200	3	1:10
19	160	1	1:15
20	180	1	1:15
21	200	1	1:15
22	160	2	1:15
23	180	2	1:15
24	200	2	1:15
25	160	3	1:15
26	180	3	1:15
27	200	3	1:15

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.2.3 การศึกษาองค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของกากหม้อกรองและไฮโดรชาร์

ศึกษาองค์ประกอบทางกายภาพและทางเคมีของกากหม้อกรอง ก่อนและหลังผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน (ไฮโดรชาร์) โดยวัดสมบัติขององค์ประกอบทางกายภาพและทางเคมีที่ต้องการวิเคราะห์ของตัวอย่างทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 เครื่องมือ/เทคนิคที่ใช้สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกากหม้อกรองและไฮโดรชาร์

สมบัติที่วิเคราะห์	วิธีวิเคราะห์	เครื่องมือ
<u>ทางกายภาพ</u>		
1. ความหนาแน่นรวมของดิน (Bulk density) *	Blake and Hartge, 1986	Oven รุ่น ED ยี่ห้อ Binder, Germany
2. ความพรุนทั้งหมด (Total porosity) *	Danielson and Sutherland, 1986	Digital Balance รุ่น Toledo MS802S ยี่ห้อ Mettler
3. ความสามารถในการอุ้มน้ำ (Water holding capacity: WHC) *	Alef method	
4. เปอร์เซ็นต์ช่องว่างขนาดใหญ่ (Air-filled porosity) *	Danielson and Sutherland, 1986	
5. เปอร์เซ็นต์ช่องว่างขนาดเล็ก (Water-filled porosity) *		
<u>ทางเคมี</u>		
6. ความเป็นกรด-ด่าง *	-	pH meter รุ่น Denver UB-10
7. ปริมาณอินทรียวัตถุ (Organic matter: OM) *	Walkly & Black method	$FeSO_4$ titration series
8. ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total phosphorus) **	Colorimetric method	Spectrophotometer
9. ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมด (Total potassium) **	Ammonium acetate extraction	Atomic absorption spectrophotometer: AAS รุ่น Agilent AA240
10. ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด(Total nitrogen) **	Kjeldahl method	Buchi Distillation รุ่น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สมบัติที่วิเคราะห์	วิธีวิเคราะห์	เครื่องมือ
11. ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของดิน (Cation exchange capacity: C.E.C) *	(Ammonium saturation method)	KjelFlex K-360
12. การนำไฟฟ้าของดิน * (Electrical Conductivity: EC)		Electrical Conductivity meter รุ่น Agilent AA240
Ultimate Analysis		
13. C, H, N, O ** (Total nitrogen)	LECO CHNS628, USA	Element Analyzer รุ่น Thermo Flash 2000

* วิเคราะห์ทุกตัวอย่าง

** วิเคราะห์บางตัวอย่าง (หลังจากผ่านการวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีสมบัติใกล้เคียงพีทมอส)

3.2.4 การเพิ่มปริมาณของวัสดุที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน

1) เลือกตัวอย่างไฮโดรชาร์ที่มีองค์ประกอบทางกายภาพและเคมีใกล้เคียงกับพีทมอส

2) เพิ่มปริมาณไฮโดรชาร์โดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชันที่อุณหภูมิ เวลา และอัตราส่วนของกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น ที่เหมาะสม

3.2.5 การทดสอบการปลูก

3.2.5.1 การเตรียมวัสดุเพาะเมล็ด

ใช้วัสดุปลูก 3 ชนิด ได้แก่ พีทมอสยี่ห้อเจี๋ยไต๋ (ลักษณะพีทมอสแบบหยาบ ประเภทแบบแบล็คพีท) กากหม้อกรอง และไฮโดรชาร์ เพื่อปลูกพืช

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.2.5.2 การเตรียมเมล็ดต้นอ่อนทานตะวันและผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊ค

การเพาะเมล็ดต้นอ่อนทานตะวันและผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊ค ใช้เมล็ดพันธุ์ยี่ห้อเจียไต๋ ซึ่งก่อนเพาะเมล็ดนำเมล็ดไปแช่น้ำเป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อทำให้เปลือกเมล็ดอ่อนและน้ำสามารถซึมเข้าไปภายในเมล็ดได้

3.2.5.3 การปฏิบัติดูแลรักษา

การให้น้ำ โดยให้น้ำปริมาณประมาณ 5 มิลลิลิตรต่อ 1 หลุมเพาะเมล็ด ให้น้ำทุกวันวันละ 2 ครั้งคือ ช่วงเช้าและช่วงเย็น

ปริมาณแสง ใช้หลอดไฟแอลอีดี เปิดนาน 12 ชั่วโมงต่อวัน

อุณหภูมิ ประมาณ 25 $\pm$ 2 องศาเซลเซียส

3.2.5.4 การเพาะเมล็ด

ทำการเพาะเมล็ดลงในวัสดุปลูกแต่ละชนิดหรือวัสดุผสม บรรจุลงในถาดเพาะเมล็ดขนาด 104 หลุม โดย 1 หลุมเพาะต่อ 1 วัสดุเพาะกล้า และนำวัสดุเพาะโรยกลบหน้าเมล็ดพันธุ์สูงประมาณครึ่งนิ้ว

3.2.5.5 การบันทึกข้อมูล

1) การงอกของเมล็ด บันทึกเปอร์เซ็นต์การงอกของเมล็ดหลังเพาะ 7 วันและไม่มีการงอกเพิ่มเติมหลังจากนั้น โดยใช้สูตร

$$\text{เปอร์เซ็นต์การงอก} = \frac{\text{จำนวนเมล็ดที่งอก} \times 100}{\text{จำนวนเมล็ดทั้งหมด}}$$

2) วัดการเจริญเติบโตของต้นอ่อนทานตะวัน

2.1) น้ำหนักสดต้น นำต้นอ่อนทานตะวันทุกส่วนไปชั่งน้ำหนักโดยใช้เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอล

2.2) น้ำหนักแห้งต้น นำต้นอ่อนทานตะวันไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักโดยใช้เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอล

2.3) เส้นผ่าศูนย์กลางต้น โดยวัดเส้นผ่าศูนย์กลางต้นบริเวณผิวดินด้วยเวอเนียคาลิปเตอร์หน่วยเป็นมิลลิเมตร

2.4) ความสูง บันทึกความสูงของต้น ทำการบันทึกเก็บตัวเลขทุก ๆ 2 วัน วัดจากระดับพื้นผิวของวัสดุปลูกจนถึงส่วนที่สูง ในหน่วยเซนติเมตร

3) วัดการเจริญเติบโตของผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊ค

3.1) บันทึกจำนวนใบ

3.2) บันทึกความกว้างของพุ่มวัดส่วนที่กว้างที่สุดของพุ่ม หน่วยวัดเป็นเซนติเมตร

3.3) บันทึกความสูงของพุ่ม วัดจากระดับพื้นผิวของวัสดุปลูกจนถึงส่วนที่สูงที่สุดของทรงพุ่ม ทำการบันทึกเก็บตัวเลขทุก ๆ 2 วัน หน่วยวัดเป็นเซนติเมตร

3.4) น้ำหนักสด นำต้นผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊คทุกส่วนไปชั่งน้ำหนักโดยใช้เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอล

3.5) น้ำหนักแห้ง นำผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊ค อบในตู้อบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักโดยใช้เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอล

ในขั้นตอนการทดสอบด้วยพืชจะทำการทดลอง 8 ซ้ำ และนำข้อมูลทั้งหมดที่ได้ไปวิเคราะห์เพื่อทำการคัดเลือกสูตรวัสดุเพาะกล้าที่ดีที่สุด โดยเลือกสูตรที่ให้อัตราการเจริญเติบโตของต้นกล้าสูงสุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.3 การประเมินต้นทุนของการผลิตไฮโดรชาร์

โดยทำการประเมินในด้านต้นทุนผันแปร (Variable Costs) ซึ่งเป็นค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ ได้แก่ ค่าไฟฟ้า ด้วยการตรวจวัดกระแสไฟฟ้า วัดกำลังรวมโดยใช้เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า (Power meter) ดังรูปที่ 3.5 ในช่วงขณะการใช้งานของตู้อบ และค่าน้ำประปาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

รูปที่ 3.5 เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า (Power meter)

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

3.4.1 สถิติที่ใช้ในการศึกษา

ศึกษาเงื่อนไขของอุณหภูมิ เวลา และอัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำ โดยวิเคราะห์อิทธิพลด้วยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) โดยใช้โปรแกรม SPSS

ตารางที่ 3.3 สถิติที่ใช้ในการศึกษาในระบบการทดลอง

ระบบการทดลอง	สถิติที่ใช้
กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน	การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way Analysis) และวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's new multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05
การทดสอบใช้พืช	การวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design; CRD) และการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance)

Chulalongkorn University

บทที่ 4
ผลการทดลองและอภิปรายผล

การศึกษาครั้งนี้เป็นการวิจัยในห้องปฏิบัติการ ณ ห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทำการทดลองเพื่อศึกษาการนำกากหม้อกรองซึ่งเป็นชีวมวลเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาล โดยหาสภาวะที่เหมาะสมหลังผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชันสำหรับการผลิตวัสดุคล้ายพีทมอส ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้เรียกว่า ไฮโดรชาร์ จากนั้นนำไฮโดรชาร์ที่ได้จากสภาวะที่เหมาะสม ทดสอบความสามารถในการเพาะเมล็ดต้นอ่อนทานตะวันและผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊ค เปรียบเทียบกับวัสดุพีทมอสจากท้องตลาด และกากหม้อกรองที่ยังไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน มีรายละเอียดผลการทดลองดังนี้

4.1 สมบัติของกากหม้อกรองที่นำมาใช้ในการทดลอง

กากหม้อกรองเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาลแห่งหนึ่งในจังหวัดเพชรบูรณ์ ถูกนำมาเป็นวัสดุในการทดลอง โดยอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาคัดแยกขนาดโดยร่อนผ่านตะแกรง ลักษณะทางกายภาพจากการสังเกตเบื้องต้นเป็นของแข็งสีน้ำตาล โดยมีสมบัติทางเคมีดังตารางที่ 4.1

จากตารางที่ 4.1 แสดงค่าความเป็นกรด-ด่างของกากหม้อกรองอยู่ที่ 6.70 ซึ่งมีสภาพค่อนข้างเป็นกลาง ค่าการนำไฟฟ้าของกากหม้อกรองมีค่า 631 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ซึ่งค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุเพาะเมล็ดควรมีค่าไม่เกิน 500 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร โดยจะส่งผลต่อการเติบโตของพืชได้ ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของดินเป็น 6.35 มิลลิอิควิวาเลนต์ต่อ 100 กรัม ระดับปริมาณของค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนอยู่ในระดับต่ำ ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดมีค่าร้อยละ 103.5 ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด และปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดมีค่า 624.99 และ 187.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ มีซิลิก้า ร้อยละ 27 ซึ่งใกล้เคียงกับปริมาณซิลิก้าที่พบในชั้นดินธรรมชาติ (ร้อยละ 27.7) (บริษัท เกษตรนำโชค จำกัด, 2561)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของกากหม้อกรองที่นำมาวิเคราะห์โดยวิธีทางเคมี

สมบัติทางเคมี	ค่าที่ได้
ค่าความเป็นกรด-ด่าง	6.70
การนำไฟฟ้าของดิน (µs/cm)	631
ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของดิน (meq/100g)	6.35
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (%)	103.5
ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (mg/kg)	624.99
ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมด (mg/kg)	187.7
C (%)	17.4
H (%)	5.8
N (%)	1.0
O (%)	27.32
SiO_2 (%)	27
Al_2O_3 (%)	5.25
CaO (%)	4.3
P_2O_5 (%)	3.57
Fe_2O_3 (%)	1.63
MgO (%)	1.01
K_2O (%)	0.87

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.2 สมบัติทางกายภาพของไฮโดรชาร์

จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของไฮโดรชาร์ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน โดยใช้ถังปฏิกรณ์ที่ปรับอัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:5 1:10 และ 1:15 กรัมต่อมิลลิลิตร อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 160 180 และ 200 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลาทำปฏิกิริยา 1 2 และ 3 ชั่วโมง ซึ่งจะได้เป็นไฮโดรชาร์ (แสดงภาพในภาคผนวก ข) ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพของไฮโดรชาร์ ได้แก่ ผลผลิตที่ได้ (Yield) ความสามารถในการอุ้มน้ำ ความหนาแน่นรวมของดิน ความพรุนทั้งหมด ช่องว่างขนาดใหญ่ และช่องว่างขนาดเล็ก โดยทำการทดสอบทางสถิติด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way Analysis) และวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan’s new multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

4.2.1 ผลผลิตที่ได้ (Yield)

ผลผลิตที่ได้ของไฮโดรชาร์ซึ่งคำนวณผลผลิตที่ได้ตาม Zhai et al. (2018) จากการปรับอัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำ (Biomass to weight: BTW) อุณหภูมิ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน แสดงในรูปที่ 4.1

รูปที่ 4.1 ผลผลิตที่ได้ของไฮโดรชาร์จากกากหม้อกรองที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากผลการศึกษา ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส พบว่าระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:5 ค่าผลผลิตที่ได้มากที่สุดร้อยละ 90.15 และที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:10 จะมีค่าผลผลิตที่ได้น้อยที่สุดร้อยละ 69.52 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 180 องศาเซลเซียส พบว่าระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:10 จะมีค่าผลผลิตที่ได้มากที่สุดร้อยละ 88.82 และที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:15 จะมีค่าผลผลิตที่ได้น้อยที่สุดร้อยละ 63.13 และที่อุณหภูมิสูงสุด 200 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:15 จะมีค่าผลผลิตที่ได้มากที่สุดที่ร้อยละ 87.69 และที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:15 จะมีค่าผลผลิตที่ได้น้อยที่สุดที่ร้อยละ 66.81

เมื่อเปรียบเทียบทั้งสามค่าอุณหภูมิในการศึกษาครั้งนี้ พบว่าผลผลิตที่ได้มากที่สุดในการทดลองอยู่ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:5 เท่ากับร้อยละ 90.15 (คิดเป็น 33.14 กรัม) โดยเมื่อทดสอบทางสถิติเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:5 พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่เวลาและอัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่นไม่ส่งผลต่อค่าผลผลิตที่ได้ของไฮโดรชาร์ ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูง ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดจะเร่งอัตราการระเหยของสารอินทรีย์ และการเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของหมู่ไฮดรอกซิล ทำให้โมเลกุลในชีวมวลเกิดการย่อยสลายและลดขนาดลง ส่งผลให้ผลผลิตที่ได้ของไฮโดรชาร์มีค่าลดลง (Cao and Harris, 2010 ; Muradov et al., 2012) นอกจากนี้ Duman et at. (2018) ได้กล่าวถึงการลดลงของค่าผลผลิตที่ได้ที่อุณหภูมิสูง ส่งผลให้ลิกโนเซลลูโลสในชีวมวลเกิดการย่อยสลายอย่างมีประสิทธิภาพ จากปฏิกิริยาเคมีที่หลากหลาย ได้แก่ ไฮโดรไลซิส ดีไฮรเดรชัน ดีคาร์บอกซิเลชัน อะโรเมติกเซชัน และพอลิเมอไรเซชัน

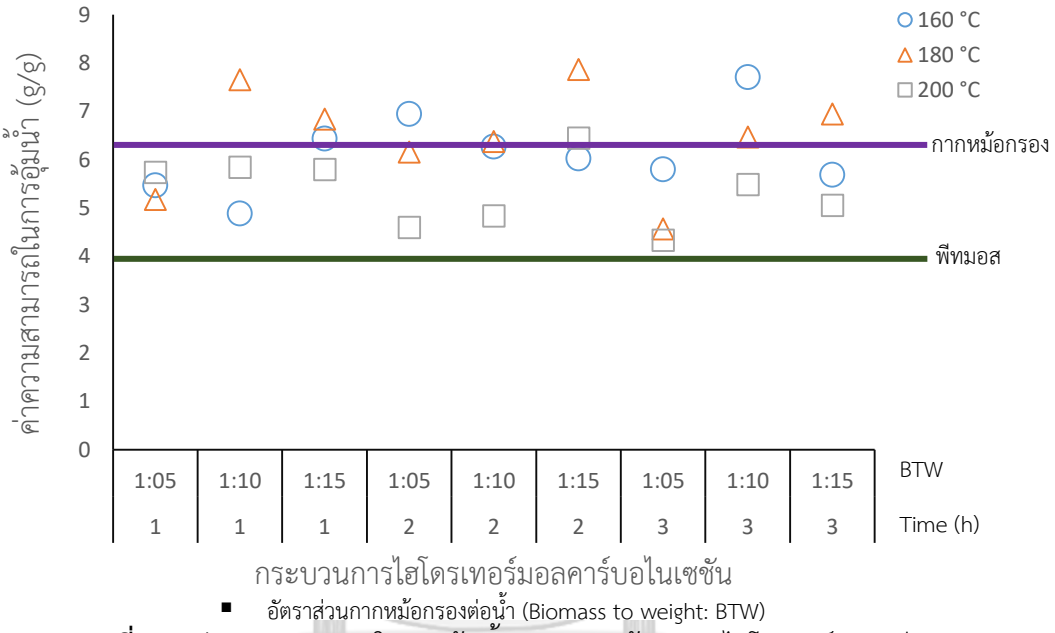
ค่าผลผลิตที่ได้ในการทดลองครั้งนี้มีค่าสูงที่อุณหภูมิต่ำ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chen et al. (2017) ที่ได้นำเปลือกแตงโมเหลือทิ้งผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชันที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส ผลผลิตที่ได้มีค่าร้อยละ 95 ในขณะที่ที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส ผลผลิตที่ได้มีค่าเพียงร้อยละ 56 และงานวิจัยของ Reza et al. (2015) ได้นำฟางข้าวสาลีเหลือทิ้งเข้าสู่กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชันที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ผลผลิตที่ได้มีค่าร้อยละ 54.1 และที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส ผลผลิตที่ได้ลดลงเหลือเพียงร้อยละ 31.3

4.2.2 ค่าความสามารถในการอุ้มน้ำ (Water holding capacity)

โดยทั่วไปการเจริญเติบโตของพืชมีความต้องการในด้านสมบัติทางกายภาพ เคมี และสารอาหารในแต่ละช่วงการเติบโตที่แตกต่างกัน ซึ่งการเจริญเติบโตของพืชในช่วงการงอกเมล็ดนั้นจำเป็นต้องใช้วัสดุเพาะเมล็ดที่เน้นสมบัติด้านกายภาพเพื่อกระตุ้นให้เมล็ดพันธุ์เกิดการงอก และสามารถแทงรากออกมาเพื่อยึดดินส่วนเริ่มแรกของการพยุงลำต้นให้ใบเลี้ยงขึ้นเหนือพื้นดิน เพื่อรอให้ใบจริงงอกตามมา ดังนั้นวัสดุในช่วงงอกควรมีใช้วัสดุที่มีค่าความสามารถในการอุ้มน้ำ (Water holding capacity) และค่าความพรุนสูง

จากผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของไฮโดรชาร์ (แสดงในรูปที่ 4.2) พบว่า ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:15 มีค่าความสามารถในการอุ้มน้ำมากที่สุด 7.87 กรัมต่อกรัม และที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:5 มีค่าความสามารถในการอุ้มน้ำน้อยที่สุด 4.34 กรัมต่อกรัม ในขณะที่กากหม้อกรองมีค่าความสามารถในการอุ้มน้ำสูงถึง 6.32 กรัมต่อกรัม การทดสอบทางสถิติในตารางที่

4.2 พบว่า มีสามสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมไฮโดรชาร์ให้มีค่าความสามารถในการอุ้มน้ำไม่ต่างจากพีทมอส ได้แก่ 1) ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:5 2) ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:5 และ 3) ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:15 ซึ่งมีค่าความสามารถในการอุ้มน้ำ 4.57 5.80 และ 5.06 กรัมต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่ง Yuan and Xu, 2017 ได้แนะนำว่ากระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชันที่ใช้อุณหภูมิต่ำจะมีความสามารถในการปรับปรุงคุณภาพดิน และยังทำการเพาะปลูกได้ดีกว่า



รูปที่ 4.2 ค่าความสามารถในการอุ้มน้ำของกากหม้อกรอง ไฮโดรชาร์ และพีทมอส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.2.3 ค่าความหนาแน่นรวมของดิน (Bulk density)

ค่าความหนาแน่นรวมของดิน บ่งบอกถึงระดับการอัดตัวของอนุภาคของดิน ดินที่มีการอัดตัวแน่นเกินไปส่งผลให้รากของพืชไม่สามารถชอนไชได้ง่ายและทำให้พืชเจริญเติบโตได้ไม่สมบูรณ์ จากผลการทดลองในรูปที่ 4.3 พบว่า ค่าความหนาแน่นรวมของดินของกากหม้อกรองมีค่า 0.114 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ส่วนไฮโดรชาร์อยู่ในช่วง 0.101-0.166 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยค่าความหนาแน่นรวมของดินมากที่สุดเกิดที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:5 มีค่า 0.166 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และค่าความหนาแน่นรวมของดินน้อยที่สุดเกิดที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:15 มีค่า 0.101 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ตารางที่ 4.2 สมบัติกายภาพของไฮโดรชาร์เมื่อผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน

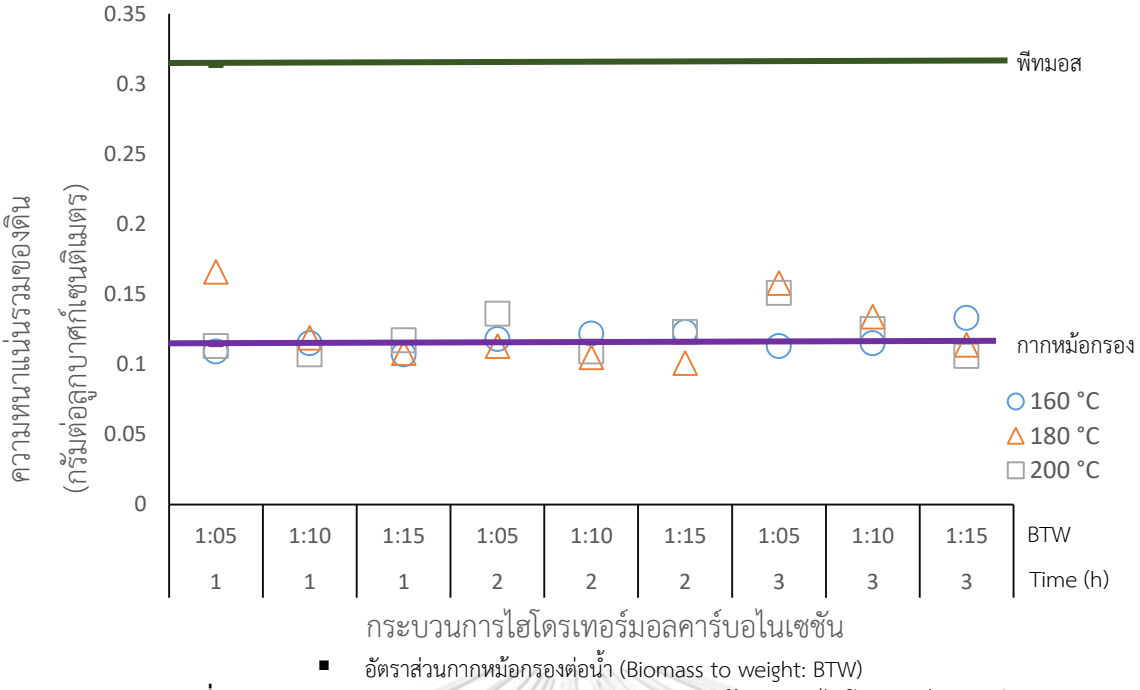
Treatment			WHC	Bulk density	Total	air-filled	water-filled
Temp(°C)	Time(h)	BTW	(g/g)	(g/cm^3)	porosity(%)	porosity(%)	porosity(%)
160	1	1:05	5.47	0.109	39.4 *	3.4 *	36.0 *
160	1	1:10	4.89	0.115	45.4 *	3.0 *	43.1 *
160	1	1:15	6.44	0.107	39.6 *	3.9 *	35.6 *
160	2	1:05	6.95	0.118	40.8 *	1.0	39.7 *
160	2	1:10	6.27	0.122	50.6	3.0 *	47.0 *
160	2	1:15	6.03	0.123	33.3 *	2.4 *	30.9 *
160	3	1:05	5.8	0.113	38.2 *	3.3 *	36.4 *
160	3	1:10	7.71	0.115	45.0 *	2.4	42.6 *
160	3	1:15	5.69	0.133	52.3 *	4.5	47.8
180	1	1:05	5.18	0.166	40.9 *	3.8 *	37.1 *
180	1	1:10	7.66	0.119	43.4 *	1.8 *	41.6
180	1	1:15	6.84	0.108	45.4 *	1.5	43.8 *
180	2	1:05	6.16	0.113	39.3 *	4.3	39.9 *
180	2	1:10	6.38	0.105	16.4	9.1	7.4
180	2	1:15	7.87	0.101	47.9	5.9	42.3 *
180	3	1:05	4.57 *	0.158	45.3 *	2.8 *	42.4 *
180	3	1:10	6.47	0.134	52.3	4.6	48.2 *
180	3	1:15	6.95	0.114	35.5 *	1.9 *	33.5
200	1	1:05	5.74	0.113	56.6	8.5 *	47.6 *
200	1	1:10	5.85	0.107	33.0 *	2.7	31.3 *
200	1	1:15	5.80 *	0.117	18.3	3.3 *	18.3
200	2	1:05	4.6 *	0.136	40.6 *	0.5	40.1 *
200	2	1:10	4.84	0.109	50.7	7.4	41.4 *
200	2	1:15	6.45	0.123	46.6 *	2.9	51.3
200	3	1:05	4.34 *	0.151	44.6 *	0.4	41.1 *
200	3	1:10	5.49	0.125	37.0 *	2.3 *	35.9 *
200	3	1:15	5.06	0.106	44.1 *	4.0	41.7 *
Filter cake			6.32	0.114	36.9 *	1.2	35.6 *
Peat moss			3.93 *	0.313	38.9 *	3.0 *	35.7 *

*หมายถึงไม่มีความแตกต่างทางสถิติตามการวิเคราะห์ด้วยวิธี Duncan's new multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

BTW (Biomass to water) อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น

WHC (Water holding capacity) ความสามารถในการอุ้มน้ำ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.3 ค่าความหนาแน่นรวมของดินของ กากหม้อกรอง ไฮโดรชาร์ และพีทมอส

อย่างไรก็ตามค่าความหนาแน่นรวมของดินที่ได้จากการทดลองมีค่าต่ำกว่าค่าที่เหมาะสมของวัสดุเพาะเมล็ดซึ่งเท่ากับ 0.4 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (Abad et al., 2005) โดยทั่วไปค่าความหนาแน่นรวมของดินที่ได้จากวัสดุที่ผ่านกระบวนไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชันมักมีค่าต่ำ เช่นเดียวกับไฮโดรชาร์จากกากมะพร้าวและชีวมวลจากเศษใบไม้ ที่มีค่าความหนาแน่นรวมของดินเป็น 0.17 และ 0.34 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ (Abad et al., 2005 ; Belda et al., 2016)

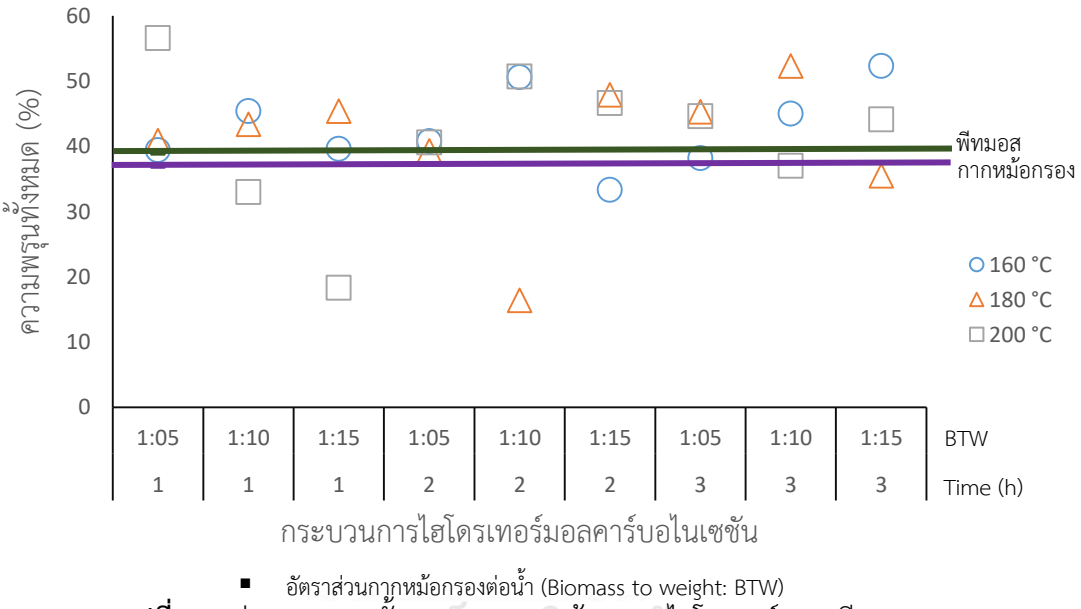
4.2.4 ค่าความพรุนทั้งหมด (Total porosity)

ค่าความพรุนทั้งหมดจะมีค่าแตกต่างกันไปในแต่ละวัสดุ โดยในวัสดุที่มีค่าความพรุนมากจะส่งผลให้มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนก๊าซระหว่างวัสดุเพาะเมล็ดกับบรรยากาศ และเมื่อมีก๊าซออกซิเจนเพียงพอที่ใช้ในการหายใจส่งผลเกิดการสร้างรากใหม่ของพืช จึงทำให้พืชสามารถเจริญเติบโตได้ดี ส่วนวัสดุที่มีความพรุนน้อยหรือช่องว่างระหว่างเม็ดดินมีขนาดเล็กจะทำให้เนื้อวัสดุติดกันแน่น ส่งผลให้ไม่มีออกซิเจนแทรกอยู่ ไม่มีการถ่ายเทอากาศและระบายน้ำ และจะมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงทำให้เกิดความเป็นพิษต่อพืช

ค่าความพรุนทั้งหมดจะมีความสัมพันธ์ต่อค่าสัดส่วนช่องว่างต่อปริมาณทั้งหมดของวัสดุ จากผลตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.4 กากหม้อกรองมีค่าความพรุนทั้งหมดร้อยละ 36.9 ส่วนไฮโดรชาร์มีค่าความพรุนทั้งหมดอยู่ระหว่างร้อยละ 16.4 – 56.6 ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:5 มีค่าความพรุนทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 56.6 และค่าความพรุน

ของดินน้อยที่สุด อยู่ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:10 มีค่าร้อยละ 16.4

โดยปกติวัสดุที่มีค่าความพรุนน้อยกว่าร้อยละ 5 ถือว่ามีค่าความพรุนต่ำ วัสดุที่มีค่าความพรุนระหว่างร้อยละ 5 ถึง 15 ถือว่ามีค่าความพรุนปานกลาง โดยวัสดุเพาะเมล็ดควรมีค่าความพรุนในช่วงที่ยอมรับได้ระหว่างร้อยละ 50 – 80 โดยปริมาตร (Jaenicke, 1999 ; Robbins, 2001) อย่างไรก็ตามค่าความพรุนทั้งหมดของพีทมอสมีค่าเท่ากับร้อยละ 38.9 ซึ่งผลทดสอบทางสถิติพบว่า ไฮโดรชาร์ที่ได้จากหลายสภาวะการทดลองมีค่าความพรุนทั้งหมดใกล้เคียงกับพีทมอส

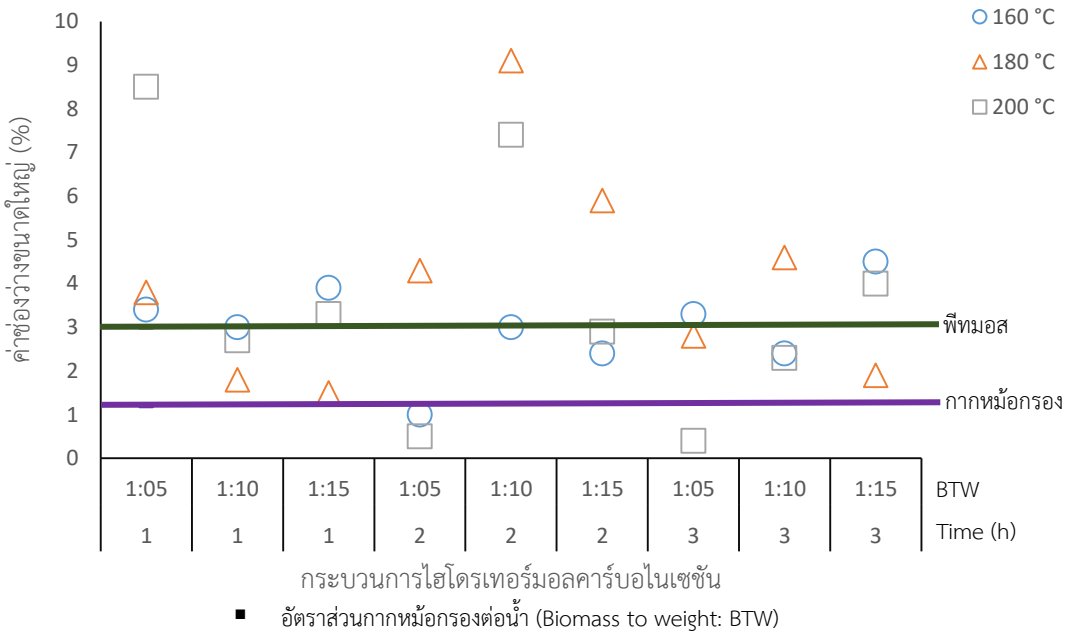


รูปที่ 4.4 ค่าความพรุนทั้งหมดของกากหม้อกรอง ไฮโดรชาร์ และพีทมอส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.2.5 ค่าช่องว่างขนาดใหญ่ (air-filled porosity)

ค่าช่องว่างขนาดใหญ่ จะส่งผลต่อการถ่ายเทอากาศได้สะดวก จากรูปที่ 4.5 กากหม้อกรองมีค่าช่องว่างขนาดใหญ่ร้อยละ 1.3 ในขณะที่ไฮโดรชาร์มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 0.4 – 9.1 โดยที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:10 มีค่าช่องว่างขนาดใหญ่มากที่สุดร้อยละ 9.1 และที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:5 มีค่าน้อยสุดที่ร้อยละ 0.4 เมื่อทดสอบทางสถิติแล้วพบว่า มีไฮโดรชาร์จากหลายสภาวะการทดลองที่ให้ค่าใกล้เคียงกับพีทมอส (ร้อยละ 3.0)

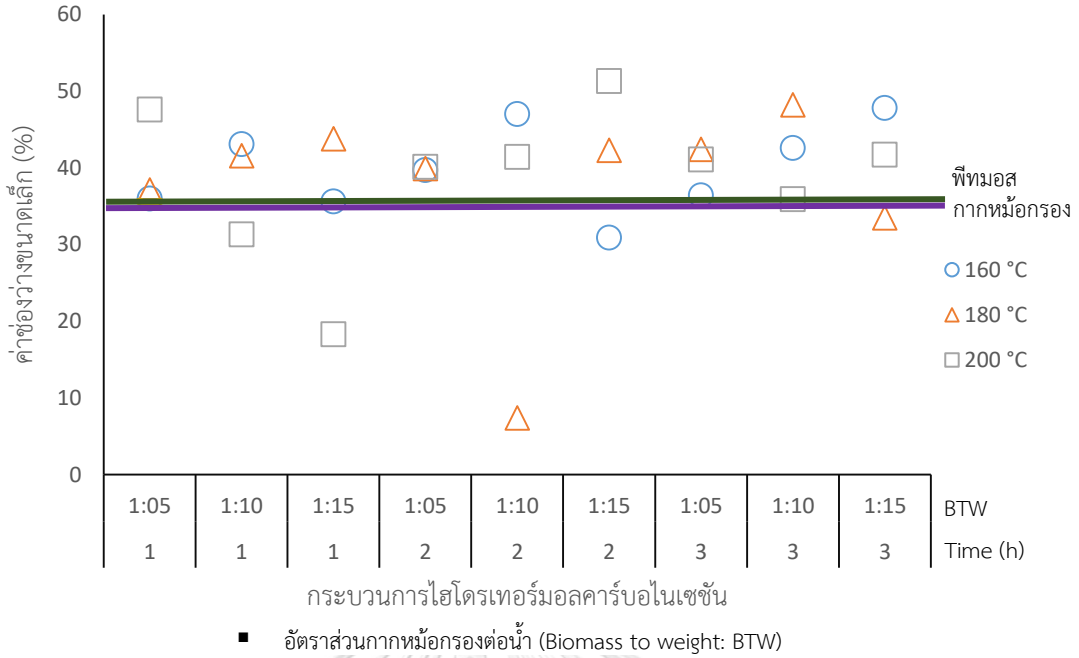


รูปที่ 4.5 ค่าช่องว่างขนาดใหญ่ทั้งหมดของกากหม้อกรอง ไฮโดรชาร์ และพีทมอส

4.2.6 ค่าช่องว่างขนาดเล็ก (water-filled porosity)

ค่าช่องว่างขนาดเล็ก มีผลต่อการไหลผ่านของน้ำได้ดี จากรูปที่ 4.6 พบว่า กากหม้อกรองมีค่าช่องว่างขนาดเล็กร้อยละ 35.6 ในขณะที่ไฮโดรชาร์ในการศึกษานี้มีอยู่ระหว่างร้อยละ 7.4 – 51.3 โดยค่าช่องว่างขนาดเล็กมากสุด อยู่ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:15 มีค่าร้อยละ 51.3 และค่าน้อยสุดอยู่ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:10 มีค่าร้อยละ 7.4 ซึ่งค่าที่เหมาะสมของวัสดุเพาะเมล็ดตามรายงานของ (Criely and Watanabe, 1974) ควรอยู่ระหว่างร้อยละ 30 – 60 เมื่อทดสอบทางสถิติแล้วพบว่ามีไฮโดรชาร์จากหลายสภาวะการทดลองที่ให้ค่าใกล้เคียงกับพีทมอส (ร้อยละ 35.7)

ภาพรวมสมบัติทางกายภาพของไฮโดรชาร์ มีค่าความหนาแน่นรวมของดินและค่าช่องว่างขนาดใหญ่ต่ำ ทำให้ค่าความพรุนทั้งหมดและค่าช่องว่างขนาดเล็กมีค่าสูง เมื่อเปรียบเทียบจากงานวิจัย Chen et al. (2016) พบว่า อุณหภูมิต่ำจะทำให้ได้สมบัติที่เหมาะสมต่อการปลูกพืช ดังนั้นในการศึกษาขั้นตอนการเพาะเมล็ดจะเลือกใช้ไฮโดรชาร์ที่เตรียมจากสภาวะอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:5 ซึ่งเป็นสภาวะที่ให้ค่าความสามารถในการอุ้มน้ำสูงสุดคือ 4.57 กรัมต่อกรัม ค่าความหนาแน่นรวม 0.158 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าความพรุนทั้งหมดร้อยละ 45.3 ค่าช่องว่างขนาดใหญ่และค่าช่องว่างขนาดเล็ก ร้อยละ 2.8 และ 42.4 ตามลำดับ



รูปที่ 4.6 ค่าช่องว่างขนาดเล็กทั้งหมดของกากหม้อกรอง ไฮโดรชาร์ และพีทมอส

4.3 สมบัติทางเคมีของไฮโดรชาร์

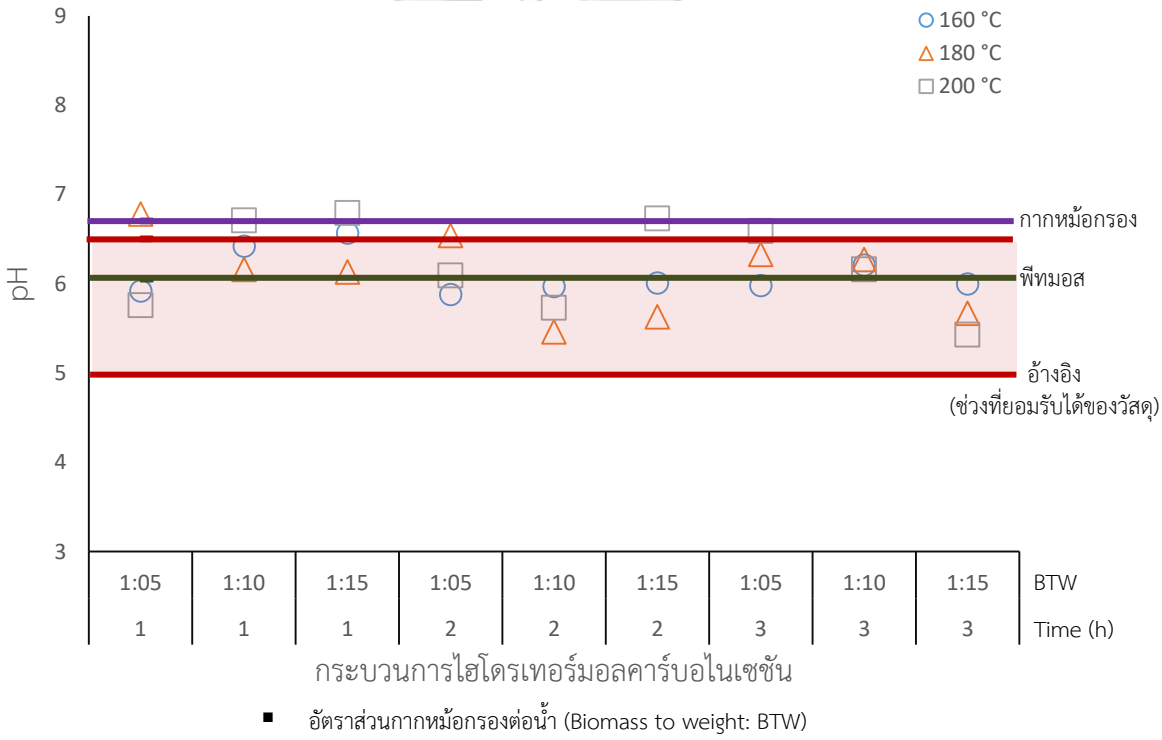
จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกากหม้อกรองที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน (ไฮโดรชาร์) โดยปรับอัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:5, 1:10 และ 1:15 กรัมต่อมิลลิลิตร อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 160 180 และ 200 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลาทำปฏิกิริยา 1 2 และ 3 ชั่วโมง ทำการวิเคราะห์สมบัติทางเคมี ได้แก่ ความเป็นกรด-ด่าง การนำไฟฟ้าของดิน ปริมาณอินทรียวัตถุ ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของดิน และธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชได้แก่ ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด ปริมาณโพแทสเซียมและวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุทั้งหมด แล้วทดสอบทางสถิติด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way Analysis) และวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's new multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ได้ผลดังนี้

4.3.1 ความเป็นกรด–ด่าง (pH)

ความเป็นกรด–ด่าง เป็นสมบัติที่มีความสำคัญต่อกระบวนการทางเคมีและชีวภาพ อีกทั้งยังส่งผลต่อการเจริญเติบโตและให้ผลผลิตของพืชด้วย จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.7 กากหม้อกรองมีค่าความเป็นกรด–ด่าง เท่ากับ 6.70 ในขณะที่ไฮโดรชาร์มีค่าความเป็นกรด-ด่าง สูงสุดเท่ากับ 6.79 ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:15 และมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 5.43 ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:15

ขณะที่พีทมอสมีค่าความเป็นกรด–ด่างเท่ากับ 6.50 โดยช่วงความเป็นกรด–ด่าง ที่อยู่เหมาะสมของวัสดุเพาะเมล็ดอยู่ที่ 5.0 – 6.5 ในส่วนของกากหม้อกรองมีค่าความเป็นกรด–ด่าง ไม่อยู่ในช่วงที่เหมาะสมของวัสดุเพาะเมล็ด

โดยสภาวะที่อุณหภูมิ 160 180 และ 200 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:15 มีค่าความเป็นกรด–ด่างเท่ากับ 6.57 6.13 และ 6.79 ตามลำดับ ค่าที่ได้ดังกล่าวนี้มีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยของ ได้ที่อุณหภูมิ 225 และ 250 องศาเซลเซียส เท่ากับ 4.78 และ 5.92 เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าความเป็นกรด–ด่างมีค่ามาก ทำให้เกินช่วงที่เหมาะสมของวัสดุเพาะเมล็ดเช่นกัน อย่างไรก็ตามจะสังเกตเห็นได้ว่า ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด–ด่างที่ได้มีค่ามากเกินช่วงของวัสดุเพาะเมล็ด เมื่อเทียบกับอุณหภูมิอื่น



รูปที่ 4.7 ค่าความเป็นกรด–ด่าง ของกากหม้อกรอง ไฮโดรชาร์ และพีทมอส

ตารางที่ 4.3 สมบัติทางเคมีของไฮโดรชาร์เมื่อผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน

Treatment			pH	EC	OM	CEC
Temp (°C)	Time (h)	BTW		(μS/cm)	(%)	(me/100g)
160	1	1:05	5.92 *	749	44.03	4.13
160	1	1:10	6.42 *	598	49.12	3.75
160	1	1:15	6.57	300	67.53	4.77
160	2	1:05	5.88 *	274	83.96 *	1.86
160	2	1:10	5.97 *	738	56.44	26.05
160	2	1:15	6.01 *	1015	41.86	2.89
160	3	1:05	5.98 *	521	77.62	22.53
160	3	1:10	6.21 *	555	66.07	27.51
160	3	1:15	6.00 *	760	35.77	3.98
180	1	1:05	6.78	452	90.39 *	1.82
180	1	1:10	6.16 *	616	81.02	32.82
180	1	1:15	6.13 *	865	83.96 *	23.83
180	2	1:05	6.54	1840	85.96 *	25.36
180	2	1:10	5.46	1797	71.91	19.67
180	2	1:15	5.63 *	409	83.23	21.14
180	3	1:05	6.33	151 *	81.44	28.44
180	3	1:10	6.27 *	455	81.16	25.81
180	3	1:15	5.67 *	2010	72.28	24.06
200	1	1:05	5.76 *	1262	88.36 *	26.38
200	1	1:10	6.71	245	86.20 *	3.34
200	1	1:15	6.79	1340	82.48	25.10
200	2	1:05	6.09 *	1880	88.45 *	26.32
200	2	1:10	5.73 *	1480	89.42 *	27.60
200	2	1:15	6.73	1729	87.16 *	31.23
200	3	1:05	6.59	1991	87.14 *	27.73
200	3	1:10	6.16 *	1942	63.29	26.85
200	3	1:15	5.43	1845	61.50	26.28
Filter cake			6.70	631	51.22	6.35
Peat moss			6.05 *	140 *	93.38 *	58.46

* สัญลักษณ์ดอกจันทร์ หมายถึง ไม่มีความแตกต่างทางสถิติตามการวิเคราะห์ด้วยวิธี Duncan's new multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

EC (Electrical Conductivity) ค่าการนำไฟฟ้า

OM (Organic Matter) ปริมาณอินทรียวัตถุ

CEC (Cation Exchange Capacity) ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของดิน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

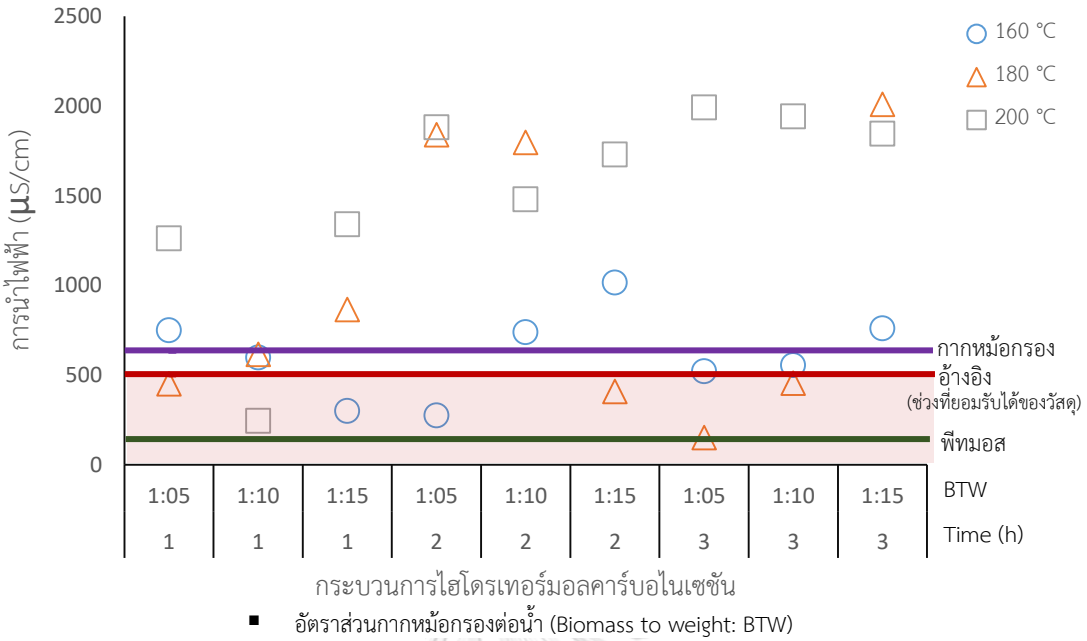
ไฮโดรชาร์ส่วนใหญ่ที่ได้จากการทดลองจะมีค่าความเป็นกรด เนื่องจากในระหว่างกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชันเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและแตกตัวของชีวมวล ส่งผลให้มีค่าความเป็นกรดมากขึ้น (Kambo and Dutta, 2015) กล่าวถึงความเป็นกรดเพิ่มขึ้นเนื่องจากระหว่างกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชันจะเกิดการก่อตัวของเกลือที่ไม่ละลายน้ำ (insoluble salts) แล้วเกิดการย่อยสลายของผลิตภัณฑ์ของสารอินทรีย์ (intermediate organic acidic products) จึงทำให้ไฮโดรชาร์ที่ได้มีค่าความเป็นกรดที่เพิ่มขึ้น (Al-Wabel et al., 2019 ; Reza et al., 2015)

4.3.2 การนำไฟฟ้าของดิน (Electrical Conductivity)

ค่าการนำไฟฟ้า แสดงถึงปริมาณเกลือที่ละลายในดิน เป็นปัจจัยสำคัญซึ่งส่งผลต่อการเจริญเติบโตของเมล็ด จากรูปที่ 4.8 ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:15 มีค่าการนำไฟฟ้าสูงสุดที่ 2,010 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร และที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:5 มีค่าการนำไฟฟ้าต่ำที่สุดที่ 151 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ในขณะที่กากหม้อกรองและพีทมอสมีค่าการนำไฟฟ้า 631 และ 139 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร

Abad et al. (2005) แนะนำว่า ค่าการนำไฟฟ้าสำหรับวัสดุเพาะเมล็ดควรมีค่าไม่เกิน 500 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร จากการเปรียบเทียบระหว่างพีทมอสและไฮโดรชาร์ที่ได้จากการทดลอง พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าที่ได้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมโดยไม่ส่งผลกระทบต่อการเพาะเมล็ด ได้แก่ ไฮโดรชาร์ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:15 ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:5 ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:5 และที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:10 มีค่าการนำไฟฟ้า 300 245 425 และ 245 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



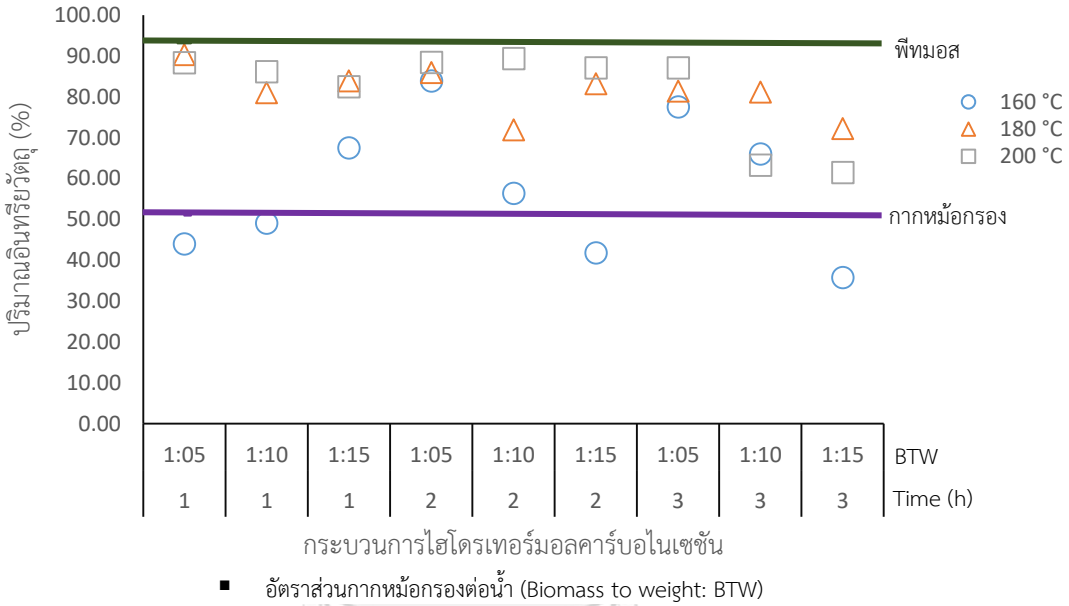
รูปที่ 4.8 ค่าการนำไฟฟ้าของกากหม้อกรอง ไฮโดรชาร์ และพีทมอส

โดยปัจจัยที่มีต่อผลค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ได้แก่ อุณหภูมิและเวลาที่เพิ่มขึ้น จากผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง และ 200 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:5 พบว่ามีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 749 และ 1,262 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ที่ 160 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง และ 200 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:15 จะมีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 760 และ 1,845 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร สาเหตุเนื่องมาจากในระหว่างกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน สารประกอบอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่เกิดการย่อยสลายและการละลายเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก และเปลี่ยนสู่สถานะของเหลว (Chen et al., 2017 ; Ren et al., 2017) นอกจากนี้ Dalias et al. (2018) ได้เสนอว่า การวัสดุไฮโดรชาร์มีค่าการนำไฟฟ้าที่ต่ำนั้น สามารถทดแทนด้วยพีทมอสบางส่วนได้เพื่อเป็นวัสดุเพาะเมล็ด

4.3.3 ปริมาณอินทรียวัตถุ (Organic Matter)

ปริมาณอินทรียวัตถุ ส่งผลต่อการสะสมธาตุอาหารพืช การถ่ายเทอากาศ และความสามารถในการอุ้มน้ำที่ดีของวัสดุเพาะเมล็ด จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.9 พบปริมาณอินทรียวัตถุสูงที่สุดในไฮโดรชาร์ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:5 มีค่าร้อยละ 90.39 และค่าต่ำที่สุดที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:15 มีค่าร้อยละ 35.77 โดยปริมาณอินทรียวัตถุในกากหม้อกรองและพีทมอสมีค่าร้อยละ

51.22 และ 93.38 ตามลำดับ เมื่อทดสอบทางสถิติพบว่า ไฮโดรชาร์ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:5 ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:5 และ 1:15 เวลา 2 ชั่วโมง อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:5 และที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:5 และ 1:10 เวลา 2 ชั่วโมง อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:5 1:10 และ 1:15 มีค่าปริมาณอินทรียวัตถุไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับพีทมอส



รูปที่ 4.9 ปริมาณอินทรียวัตถุของกากหม้อกรอง ไฮโดรชาร์ และพีทมอส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

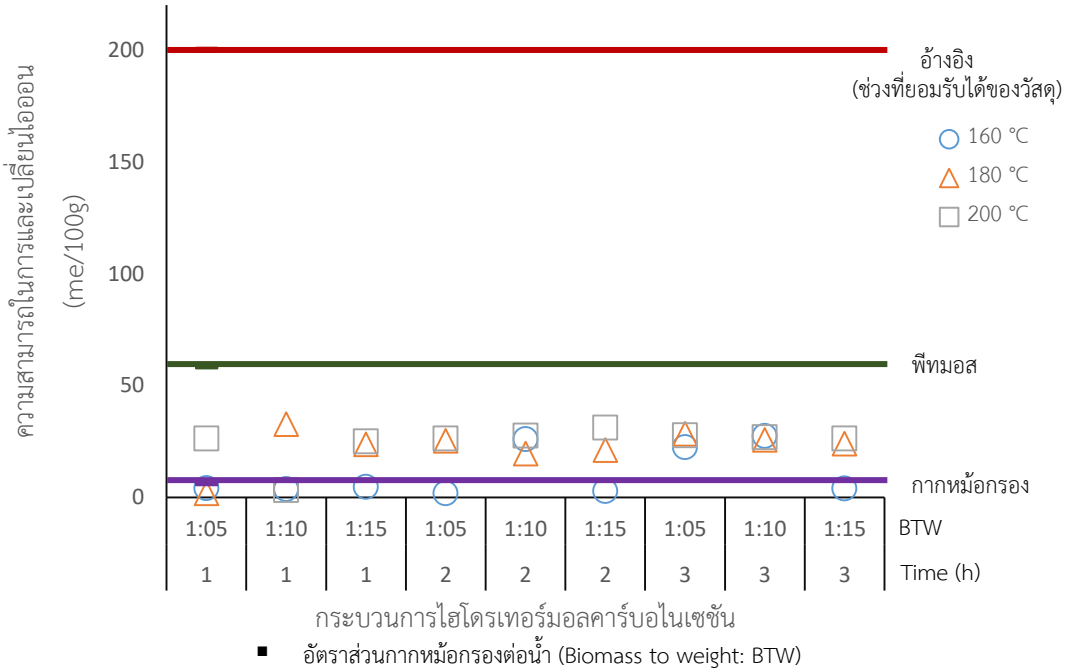
โดยสภาวะการทดลองดังกล่าว ทำให้อินทรียสารจำนวนมากในไฮโดรชาร์ถูกปลดปล่อยออกมา ช่วยในการเจริญเติบโตของพืชได้ดี และอินทรียสารที่มากนี้ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำ การถ่ายเทอากาศ และความสามารถในการแลกประจุบวกและลบได้ดี ซึ่งมีความสำคัญที่ป้องกันไม่ให้ธาตุอาหารพืชถูกชะละลายไปกับน้ำได้โดยง่าย

4.3.4 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของดิน (Cation Exchange Capacity)

จากรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของดินมีค่าสูงสุด 31.23 มิลลิอิควิวาเลนต์ต่อร้อยกรัม ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:15 และค่าต่ำสุด 1.82 มิลลิอิควิวาเลนต์ต่อร้อยกรัม ที่อุณหภูมิ 180 องศา

เซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:5 และเมื่อทดสอบทางสถิติเปรียบเทียบระหว่างพีทมอสและไฮโดรชาร์ทุกสภาวะพบว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของดินในช่วงที่เหมาะสมสำหรับวัสดุเพาะเมล็ดควรมีค่าอยู่ระหว่าง 100 – 150 มิลลิอิควิวาเลนต์ต่อร้อยกรัม (Theriault & Hachey Peat Moss Ltd, 2019) และจากรายงานของ Abad et al. (2005) ควรมีค่าไม่เกิน 200 มิลลิอิควิวาเลนต์ต่อร้อยกรัม แต่จากรูปที่ 4.10 พบว่าไฮโดรชาร์ทุกสภาวะไม่อยู่ในช่วงที่กำหนด โดยทั่วไปวัสดุที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน จะมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของดินลดลง เนื่องจากระหว่างกระบวนการฯ จะเกิดการกำจัดหมู่ฟังก์ชัน การเพิ่มกระบวนการอะโรมาติกเซชัน และการสะสมของเหลว (tar) บนพื้นผิวของไฮโดรชาร์ (Breulmann et al., 2017 ; Duman et al., 2018) อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ ได้มุ่งเน้นใช้ประโยชน์ไฮโดรชาร์เพื่อเป็นวัสดุเพาะเมล็ดในช่วงของการงอก ซึ่งในช่วงดังกล่าวนี้จำเป็นต้องอาศัยสมบัติทางกายภาพมากกว่าทางด้านเคมี โดยความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของดินจะจำเป็นในช่วงการเติบโต ที่มีการสร้างกิ่งก้านและใบจริง



รูปที่ 4.10 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของดิน กากหม้อกรอง ไฮโดรชาร์ และพีทมอส

4.3.5 ธาตุอาหารหลัก (Macronutrients)

ในช่วงการเจริญเติบโตของพืช เป็นช่วงที่พืชเริ่มสร้างใบจริงแล้วพัฒนาเติบโตสร้างกิ่งก้านต่อไป ซึ่งพืชในระยะช่วงเติบโตนี้ยังคงต้องการสมบัติทางกายภาพ อีกทั้งความต้องการด้านธาตุอาหารเพิ่ม เนื่องจากรากของพืชในช่วงนี้มีความแข็งแรงกว่าช่วงเริ่มงอก จึงต้องหาสารอาหารไปใช้ในการเจริญเติบโตต่อไป โดยธาตุอาหารหลักสำหรับการเจริญเติบโตของพืชคือ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ทั้งนี้การศึกษาครั้งนี้ได้เน้นการผลิตไฮโดรชาร์เพื่อใช้เป็นวัสดุเพาะเมล็ดกับพืช ซึ่งในช่วงนี้จำเป็นต้องมีสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสม จึงเลือกเฉพาะไฮโดรชาร์ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:5 โดยเป็นช่วงที่มีสมบัติทางกายภาพเหมาะสมที่สุด มาวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารหลัก ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ปริมาณธาตุอาหารหลักของวัสดุ

Treatment	Total nitrogen (%)	Total phosphorus (mg/kg)	Total potassium (mg/kg)
กากหม้อกรอง	103.50 [b]	624.99 [b]	187.70 [b]
ไฮโดรชาร์	1.51 [a]	188.18 [a]	146.70 [a]
พีทมอส	1.34 [a]	413.73 [c]	372.08 [c]

* ตัวเลขที่ตามด้วยอักษรที่เหมือนกันในแต่ละคอลัมน์ หมายถึง ไม่มีความแตกต่างทางสถิติตามการวิเคราะห์ด้วยวิธี Duncan's new multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ไนโตรเจนเป็นธาตุอาหารหลักที่พืชมีความต้องการ มีบทบาทสำคัญต่อการเจริญเติบโตเป็นอย่างมาก โดยกากหม้อกรองมีค่าปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดสูงสุด รองลงมาคือ ไฮโดรชาร์ และพีทมอส ที่ร้อยละ 103.50 1.51 และ 1.34 ตามลำดับ โดยเกณฑ์มาตรฐานของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดสำหรับวัสดุเพาะเมล็ด อยู่ในช่วงร้อยละ 0.8 – 2 (Abad et al., 2005) เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองพบว่า ไฮโดรชาร์และพีทมอสอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ผลทดสอบทางสถิติพบว่าปริมาณไนโตรเจนของพีทมอสและไฮโดรชาร์ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้อุณหภูมิสูงและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่นานจะส่งผลให้ไฮโดรชาร์มีค่าไนโตรเจนลดลง (Breulmann et al., 2017) ในระหว่างกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชันมีความเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยา เช่น พอลิเมอไรเซชันของหมู่แอลดีไฮด์และอะมิโน และไฮโดรไลเซส (Hydrolysates) เกิดการย่อยสลายของสารประกอบอินทรีย์ และชักนำให้เกิดการแจกจ่ายของธาตุอาหารระหว่างเฟสของแข็ง ของเหลว และก๊าซ (Chen et al., 2017 ; Xue and Huang, 2007)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ฟอสฟอรัสมีบทบาทต่อการเจริญเติบโตของการสร้างเมล็ดและราก เป็นส่วนประกอบที่สำคัญต่อกรดนิวคลีอิก ที่ช่วยควบคุมกระบวนการสร้างเอนไซม์และโปรตีน นอกจากนี้ฟอสฟอรัสยังมีหน้าที่ช่วยในกระบวนการสังเคราะห์แสง จากตารางที่ 4.5 ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดเรียงจากมากไปน้อย ได้แก่ กากหม้อกรอง พีทมอส และไฮโดรชาร์ มีค่า 624.99 413.73 และ 188.18 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งวัสดุทั้ง 3 ชนิด มีปริมาณฟอสฟอรัสแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยเกณฑ์มาตรฐานของปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (Abad et al., 2005) อยู่ในช่วง 5 – 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ดังนั้นทั้งกากหม้อกรอง ไฮโดรชาร์ และพีทมอสไม่อยู่ในช่วงที่กำหนด ซึ่งปริมาณฟอสฟอรัสที่ไม่สูงของไฮโดรชาร์ในการศึกษานี้ สอดคล้องกับงานของ Nieto et al. (2016) และ Dalias et al. (2018) ที่พบฟอสฟอรัสในไฮโดรชาร์มีค่า 135 และ 70 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เนื่องจากการใช้อุณหภูมิสูงและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่นานในระหว่างกระบวนการคาร์บอไนซ์ ส่งผลให้ชีวมวลเกิดการสลายตัว ทำให้พื้นผิวของไฮโดรชาร์มีค่าฟอสฟอรัสลดลง (Huang and Tang, 2015 ; Wang et al., 2016) ได้กล่าวว่า การนำไฮโดรชาร์ที่ได้ไปผสมกับดิน ไฮโดรชาร์จะมีความสามารถช่วยในการปลดปล่อยฟอสเฟตลงในดินอย่างช้าๆ โดยเฉพาะในสภาวะที่ดินเป็นด่าง เพื่อช่วยกระตุ้นให้พืชเติบโต

โพแทสเซียมเป็นธาตุอาหารที่มีความจำเป็นต่อกระบวนการสังเคราะห์แสง โดยมีหน้าที่ช่วยในการสร้างและกระตุ้นเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์แสง ทำให้เกิดพลังงานที่นำไปใช้ในการสังเคราะห์แป้งและการหายใจ อีกทั้งยังมีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านปากใบ จากตารางที่ 4.5 ค่าปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดเรียงจากมากไปน้อย คือ พีทมอส กากหม้อกรองและไฮโดรชาร์ ที่ 372.08 187.70 และ 146.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งวัสดุทั้ง 3 ชนิด มีปริมาณโพแทสเซียมแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โพแทสเซียมที่ได้มีค่าน้อยลงเมื่อเทียบกับกากหม้อกรอง เนื่องจากในระหว่างกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน โพแทสเซียมในชีวมวลเกิดการไฮโดรไลซ์และสลายตัว (Eibisch et al., 2018) หลังจากนั้นเกิดการกระจายตัวในสถานะของเหลว (liquid phase) ส่งผลให้โพแทสเซียมที่ได้มีค่าลดลง (Melo et al., 2018)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.3.6 องค์ประกอบโดยละเอียด (Ultimate analysis)

จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมี จะได้สภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมไฮโดรชาร์เพื่อเป็นวัสดุเพาะเมล็ดที่สภาวะอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:5 จึงนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน ผลแสดงในตารางที่ 4.5 พบว่า ปริมาณคาร์บอนของไฮโดรชาร์เป็นร้อยละ 32.3 สูงกว่ากากหม้อกรองที่มีค่าร้อยละ 17.4 ปริมาณคาร์บอนสูงขึ้นเนื่องจากระหว่างกระบวนการไฮโดรเทอร์

มอลคาร์บอไนเซชันที่อุณหภูมิสูง จะเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันและพอลิเมอไรเซชัน ดึงน้ำออกจากโมเลกุลของสารอินทรีย์ และกำจัดอะตอมของไฮโดรเจนและออกซิเจน (Zheng et al., 2015)

ปริมาณไฮโดรเจนของไฮโดรชาร์เป็นร้อยละ 4.2 ซึ่งน้อยกว่ากากหม้อกรองที่มีค่าร้อยละ 5.8 ในส่วนของปริมาณธาตุไนโตรเจนของไฮโดรชาร์มีค่าร้อยละ 1.1 ซึ่งมีค่ามากกว่ากากหม้อกรองที่มีค่าร้อยละ 1.0 และปริมาณธาตุออกซิเจนของไฮโดรชาร์มีค่าร้อยละ 24.5 น้อยกว่ากากหม้อกรองที่มีค่าร้อยละ 27.3 จะสังเกตได้ว่าปริมาณไฮโดรเจนและออกซิเจนมีค่าลดลง เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในระหว่างกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชันที่สูง เกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน ดีคาร์บอกซิเลชัน และไพโรไลซิส เกิดการแตกหักของพันธะออกซิเจนและไฮโดรเจน การที่ไฮโดรชาร์มีค่าคาร์บอนสูงกว่าค่าไฮโดรเจน ไนโตรเจนและออกซิเจน จะมีประโยชน์เป็นอย่างมากเมื่อประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงดิน (Fang et al., 2015 ; Peterson et al., 2008)

ตารางที่ 4.5 องค์ประกอบธาตุของไฮโดรชาร์เปรียบเทียบกับกากหม้อกรอง

Treatment	C (%)	H (%)	N (%)	O (%)
ไฮโดรชาร์	32.32	4.2	1.1	24.5
พีทมอส	44	7.7	1.2	29.8
กากหม้อกรอง	17.4	5.8	1.0	27.32

4.4 การศึกษาการทดสอบการปลูก

จากการศึกษากระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน เมื่อได้ผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่า ไฮโดรชาร์ ซึ่งมีลักษณะคล้ายดิน ได้ทำการคัดเลือกสภาวะที่เหมาะสมจากสมบัติทางกายภาพและทางเคมี พบว่า ไฮโดรชาร์ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:5 เป็นสภาวะที่เหมาะสม (รูปที่ 4.11) จากนั้นจึงทำการเพิ่มปริมาณของไฮโดรชาร์ที่สภาวะดังกล่าวเพื่อนำมาทดสอบปลูกพืช

รูปที่ 4.11 ไฮโดรชาร์

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบปลูกพืช ได้แก่ กากหม้อกรอง พีทมอส และไฮโดรชาร์ ทำการเพาะเมล็ดต้นอ่อนทานตะวัน และผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊ค ใช้ระยะเวลาในการทดสอบอัตราการเจริญเติบโต 7 วัน (แสดงภาพในภาคผนวก ง) โดยศึกษาเปอร์เซ็นต์การงอกของเมล็ดหลังเพาะ ความสูงต้น ความยาวราก น้ำหนักสดต้น น้ำหนักแห้งต้น และเส้นผ่าศูนย์กลางต้น จากนั้นจึงทดสอบทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way Analysis) และวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's new multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ผลการศึกษาเป็นดังนี้

4.4.1 การทดสอบปลูกต้นอ่อนทานตะวัน

1) เปอร์เซ็นต์การงอก

การเพาะเมล็ดทานตะวันเมื่อเมล็ดเริ่มงอกจะแทงรากออกมาก่อน และโผล่พ้นวัสดุเพาะเมล็ดตั้งแต่วันที่ 2 ทั้งนี้ผลการเพาะเมล็ดต้นอ่อนในวันที่ 7 จากวัสดุที่แตกต่างกัน 3 ประเภท (แสดงในตารางที่ 4.6) พบว่า เปอร์เซ็นต์การงอกที่มากที่สุด ได้แก่ ไฮโดรชาร์ร้อยละ 95.32 รองลงมาคือ พีทมอส และกากหม้อกรองที่ร้อยละ 90.66 และ 76.56 ตามลำดับ โดยเปอร์เซ็นต์การงอกของพีทมอสและไฮโดรชาร์ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จึงสรุปในเบื้องต้นได้ว่าพีทมอสและไฮโดรชาร์เป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับเพาะเมล็ด

ตารางที่ 4.6 เปอร์เซ็นต์การงอกของต้นอ่อนทานตะวันที่มีอายุ 7 วัน

วัสดุที่ใช้ในการปลูก	เปอร์เซ็นต์การงอก
กากหม้อกรอง	76.56 [b]
ไฮโดรชาร์	95.31 [a]
พีทมอส	90.63 [a]
F-test	**

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

* ตัวเลขที่ตามด้วยอักษรที่เหมือนกัน หมายถึง ไม่มีความแตกต่างทางสถิติตามการวิเคราะห์ด้วยวิธี Duncan's new multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

** มีความแตกต่างกันทางสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

2) ผลของวัสดุเพาะเมล็ดต่อความสูงต้น

จากตารางที่ 4.7 ในวันที่ 7 ของการเพาะเมล็ดพบว่า พีทมอสทำให้ต้นอ่อนทานตะวันมีความสูงมากที่สุด รองลงมาคือไฮโดรชาร์ และกากหม้อกรอง ที่ 14.6 11.5 และ 10.5 เซนติเมตร ตามลำดับ โดยความสูงของต้นอ่อนทานตะวันในช่วงแรก (1 – 5 วัน) จากวัสดุทั้ง 3 ชนิดมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ในวัน 6 – 7 วัน ความสูงของต้นอ่อนทานตะวันจากพีทมอสและไฮโดรชาร์ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่สูงกว่ากากหม้อกรอง เนื่องจากสมบัติทางกายภาพที่มีค่าช่องว่างขนาดใหญ่และค่าช่องว่างขนาดเล็กมากกว่า ซึ่งค่าดังกล่าวนี้ทำให้มีอากาศและน้ำในวัสดุเพาะจึงช่วยกระตุ้นการแบ่งเซลล์และขยายขนาดของเซลล์ ส่งผลให้มีการเพิ่มการยืดยาวของลำต้นและรากได้ดี (Yildirim, Turan and Guvenc, 2008)

ตารางที่ 4.7 ความสูงของต้นอ่อนทานตะวันในวัสดุแต่ละชนิดที่ใช้ในการทดสอบเพาะเมล็ด

วัสดุที่ใช้ในการปลูก	ความสูง (เซนติเมตร)						
	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	วันที่ 6	วันที่ 7
กากหม้อกรอง	0.84 [b]	1.36 [b]	1.94 [b]	2.56 [b]	3.17 [b]	3.82 [b]	4.37 [b]
ไฮโดรชาร์	1.20 [c]	2.03 [c]	2.93 [c]	3.70 [c]	4.05 [c]	5.35 [a]	6.28 [a]
พีทมอส	1.65 [a]	2.65 [a]	3.71 [a]	4.53 [a]	5.43 [a]	6.21 [a]	7.02 [a]
F-test	**	**	**	**	**	**	**

* ตัวเลขที่ตามด้วยอักษรที่เหมือนกันในแต่ละคอลัมน์ หมายถึง ไม่มีความแตกต่างทางสถิติตามการวิเคราะห์ด้วยวิธี Duncan's new multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

** มีความแตกต่างกันทางสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3) ผลของวัสดุเพาะเมล็ดต่อความยาวราก

จากตารางที่ 4.8 ความยาวรากของต้นอ่อนทานตะวันในวันที่ 7 ที่ปลูกด้วยพีทมอสมีความยาวรากมากที่สุด ในช่วง 3.0 – 15.9 เซนติเมตร ค่าเฉลี่ย 8.04 ± 3.9 เซนติเมตร รองลงมาคือ ไฮโดรชาร์ และกากหม้อกรอง มีความยาวราก 3.2 – 16.0 เซนติเมตร ค่าเฉลี่ย 7.82 ± 3.2 เซนติเมตร และ 3.5 – 13.7 เซนติเมตร ค่าเฉลี่ย 5.91 ± 4.0 เซนติเมตร ความยาวรากของพืชจากพีทมอสและไฮโดรชาร์ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยความยาวรากมีความสัมพันธ์กับค่าเปอร์เซ็นต์การงอก ความสูง และน้ำหนักสดต้น

ตารางที่ 4.8 ความยาวรากของต้นอ่อนทานตะวันที่มีอายุ 7 วัน

วัสดุที่ใช้ในการปลูก	ความยาวราก (เซนติเมตร)	
	ช่วง	เฉลี่ย
กากหม้อกรอง	3.5 – 13.7	5.91 ± 4.0 [b]
ไฮโดรชาร์	3.2 – 16	7.82 ± 3.2 [a]
พีทมอส	3 – 15.9	8.04 ± 3.9 [a]
F-test	**	**

* ตัวเลขที่ตามด้วยอักษรที่เหมือนกันในแนวตั้ง หมายถึง ไม่มีความแตกต่างทางสถิติตามการวิเคราะห์ด้วยวิธี Duncan's new multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

** มีความแตกต่างกันทางสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

4) ผลของวัสดุเพาะเมล็ดต่อน้ำหนักผลผลิตสดและแห้ง

จากตารางที่ 4.9 ต้นอ่อนทานตะวันที่อายุ 7 วัน พบน้ำหนักสดมากที่สุดด้วยการปลูกในพีทมอส ในช่วง 0.22 – 1.32 กรัม ค่าเฉลี่ย 0.59 ± 0.3 กรัม รองลงมาคือวัสดุไฮโดรชาร์ และกากหม้อกรอง มีน้ำหนักสด 0.32 – 1.28 กรัม ค่าเฉลี่ย 0.54 ± 0.2 กรัม และ 0.16 – 1.12 กรัม ค่าเฉลี่ย 0.43 ± 0.3 กรัม ตามลำดับ โดยพีทมอสและไฮโดรชาร์ให้น้ำหนักสดของต้นอ่อนทานตะวันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

นอกจากนี้น้ำหนักแห้งของต้นอ่อนทานตะวัน ของวัสดุเพาะเมล็ดทั้ง 3 ชนิด ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยต้นอ่อนทานตะวันในพีทมอสมีน้ำหนักแห้งในช่วง 0.0236 – 0.0951 กรัม ค่าเฉลี่ย 0.0412 ± 0.02 กรัม ไฮโดรชาร์มีน้ำหนักแห้งในช่วง 0.0217 – 0.0961 กรัม ค่าเฉลี่ย 0.0415 ± 0.01 กรัม และกากหม้อกรองมีน้ำหนักแห้ง 0.0280 – 0.0951 กรัม ค่าเฉลี่ย 0.0402 ± 0.06 กรัม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.9 วัสดุเพาะเมล็ดทั้ง 3 ชนิดต่อน้ำหนักผลผลิตสดและน้ำหนักแห้งของต้นอ่อนทานตะวันในระยะเวลา 7 วัน

วัสดุที่ใช้ในการปลูก	น้ำหนักสด (กรัม)		น้ำหนักแห้ง (กรัม)	
	ช่วง	เฉลี่ย	ช่วง	เฉลี่ย
กากหม้อกรอง	0.16 – 1.12	0.43 ± 0.3 [b]	0.0280 – 0.0951	0.0402 ± 0.06 [a]
ไฮโดรชาร์	0.32 – 1.28	0.54 ± 0.2 [a]	0.0217 – 0.0961	0.0415 ± 0.01 [a]
พีทมอส	0.22 – 1.32	0.59 ± 0.3 [a]	0.0236 – 0.0951	0.0412 ± 0.02 [a]
F-test	**	**	NS	NS

* ตัวเลขที่ตามด้วยอักษรที่เหมือนกันในแต่ละคอลัมน์ หมายถึง ไม่มีความแตกต่างทางสถิติตามการวิเคราะห์ด้วยวิธี Duncan's new multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

** มีความแตกต่างกันทางสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

* NS ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ

5) ผลของวัสดุเพาะเมล็ดต่อเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้น

ตารางที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่า เส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นจากการปลูกด้วยพีทมอสและไฮโดรชาร์ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และให้ค่าสูงกว่ากากหม้อกรอง โดยเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นของต้นอ่อนทานตะวันในพีทมอสมีค่าในช่วง 0.11 – 0.26 เซนติเมตร ค่าเฉลี่ย 0.160 ± 0.07 เซนติเมตร ไฮโดรชาร์มีค่าในช่วง 0.11 – 0.25 เซนติเมตร ค่าเฉลี่ย 0.164 ± 0.06 เซนติเมตร และกากหม้อกรองมีค่าในช่วง 0.10 – 0.24เซนติเมตร ค่าเฉลี่ย 0.119 ± 0.07 เซนติเมตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.10 วัสดุเพาะเมล็ดทั้ง 3 ชนิดต่อต่อเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นของต้นอ่อนทานตะวันในระยะเวลา 7 วัน

วัสดุที่ใช้ในการปลูก	เส้นผ่านศูนย์กลางลำต้น (เซนติเมตร)	
	ช่วง	เฉลี่ย
กากหม้อกรอง	0.10 – 0.24	0.119 ± 0.07 [b]
ไฮโดรชาร์	0.11 – 0.25	0.164 ± 0.06 [a]
พีทมอส	0.11 – 0.26	0.160 ± 0.07 [a]
F-test	**	**

* ตัวเลขที่ตามด้วยอักษรที่เหมือนกันในแนวตั้ง หมายถึง ไม่มีความแตกต่างทางสถิติตามการวิเคราะห์ด้วยวิธี Duncan's new multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

** มีความแตกต่างกันทางสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

4.4.2 การทดสอบการปลูกผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊ค

1) เปอร์เซ็นต์การงอก

การเพาะเมล็ดผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊ค โดยเมล็ดเริ่มงอกจะแทงราก หลังจากนั้นจึงโผล่พ้นวัสดุเพาะเมล็ดตั้งแต่วันที่ 3 ทั้งนี้ผลการเพาะเมล็ดต้นอ่อนในวันที่ 7 จากวัสดุที่แตกต่างกัน 3 ประเภท (แสดงในตารางที่ 4.11) พบว่า เปอร์เซ็นต์การงอกที่ดีที่สุด ได้แก่ ไฮโดรชาร์ร้อยละ 89.06 รองลงมาคือ พีทมอส และกากหม้อกรอง ที่ร้อยละ 87.50 และ 34.38 ตามลำดับ เมื่อทดสอบทางสถิติพบว่าเปอร์เซ็นต์การงอกของพีทมอสและไฮโดรชาร์ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ สาเหตุที่พีทมอสและไฮโดรชาร์มีเปอร์เซ็นต์การงอกที่ดีกว่ากากหม้อกรอง เนื่องจากมีค่าช่องว่างขนาดใหญ่และขนาดเล็กมากกว่า

ตารางที่ 4.11 เปอร์เซ็นต์การงอกของผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊คที่มีอายุ 7 วัน

วัสดุที่ใช้ในการปลูก	เปอร์เซ็นต์การงอก
กากหม้อกรอง	34.38 [b]
ไฮโดรชาร์	89.06 [a]
พีทมอส	87.50 [a]
F-test	**

* ตัวเลขที่ตามด้วยอักษรที่เหมือนกันในแนวตั้ง หมายถึง ไม่มีความแตกต่างทางสถิติตามการวิเคราะห์ด้วยวิธี Duncan's new multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

** มีความแตกต่างกันทางสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2) ผลของวัสดุเพาะเมล็ดต่อความสูงต้น

จากตารางที่ 4.12 ผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊คที่ทดสอบด้วยการใช้วัสดุเพาะ 3 ชนิด พบว่าความสูงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในทุกวัน โดยพีทมอสทำให้ความสูงในวันที่ 7 สูงมากที่สุด รองลงมาคือ ไฮโดรชาร์ และกากหม้อกรอง ที่ 3.9 3.6 และ 1.7 เซนติเมตร โดยความสูงของผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊คในช่วงแรก (1 – 5 วัน) จากวัสดุทั้ง 3 ชนิดมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ในวัน 6 – 7 วัน ความสูงของผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊คจากพีทมอส และไฮโดรชาร์ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ผลของความสูงต้นจะมีความสัมพันธ์กับความกว้างและจำนวนใบด้วย (อภิรักษ์ หลักชัยกุล, 2539)

ตารางที่ 4.12 ความสูงของผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊คในวัสดุแต่ละชนิดที่ใช้ในการทดสอบเพาะเมล็ด

วัสดุที่ใช้ในการปลูก	ความสูง (เซนติเมตร)						
	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	วันที่ 6	วันที่ 7
กากหม้อกรอง	0.1 [b]	0.1 [b]	0.2 [b]	0.2 [b]	0.2 [b]	0.3 [b]	0.3 [b]
ไฮโดรชาร์	0.4 [c]	0.7 [c]	0.9 [c]	0.9 [c]	1.2 [c]	1.3 [a]	1.4 [a]
พีทมอส	0.4 [a]	0.7 [a]	0.8 [a]	1.1 [a]	1.3 [a]	1.6 [a]	1.6 [a]
F-test	**	**	**	**	**	**	**

* ตัวเลขที่ตามด้วยอักษรที่เหมือนกันในแนวตั้ง หมายถึง ไม่มีความแตกต่างทางสถิติตามการวิเคราะห์ด้วยวิธี Duncan's new multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

** มีความแตกต่างกันทางสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

3) ผลของวัสดุเพาะเมล็ดต่อความยาวราก

จากตารางที่ 4.13 ความยาวรากของผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊คในวันที่ 7 พบว่าการปลูกด้วยพีทมอสให้ความยาวรากมากที่สุด ในช่วง 0.5 – 8.4 เซนติเมตร ค่าเฉลี่ย 2.91 ± 1.8 เซนติเมตร รองลงมาคือวัสดุไฮโดรชาร์ และกากหม้อกรอง มีความยาวราก 0.5 – 7.4 เซนติเมตร ค่าเฉลี่ย 2.94 ± 1.5 เซนติเมตร และ 0.5 – 3.5 เซนติเมตร ค่าเฉลี่ย 0.64 ± 1.1 เซนติเมตร ตามลำดับ สาเหตุที่ความยาวรากในการปลูกด้วยกากหม้อกรองมีค่าน้อยสุด เนื่องจากกากหม้อกรองมีลักษณะที่แข็งกว่าพีทมอสและไฮโดรชาร์ ส่งผลให้รากชอนไชผ่านวัสดุเพาะเมล็ดได้ยากกว่า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.13 ความยาวรากของผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊คที่มีอายุ 7 วัน

วัสดุที่ใช้ในการปลูก	ความยาวราก (เซนติเมตร)	
	ช่วง	เฉลี่ย
กากหม้อกรอง	0.5 – 3.5	0.64 ± 1.1 [b]
ไฮโดรชาร์	0.5 – 7.4	2.94 ± 1.5 [a]
พีทมอส	0.5 – 8.4	2.91 ± 1.8 [a]
F-test	**	**

* ตัวเลขที่ตามด้วยอักษรที่เหมือนกันในแนวตั้ง หมายถึง ไม่มีความแตกต่างทางสถิติตามการวิเคราะห์ด้วยวิธี Duncan's new multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

** มีความแตกต่างกันทางสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

4) ผลของวัสดุเพาะเมล็ดต่อความกว้างและจำนวนใบ

จากตารางที่ 4.14 ความกว้างของผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊ค ในวันที่ 7 พบว่า พีทมอสทำให้ผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊ค มีความสูงมากที่สุด รองลงมาคือไฮโดรชาร์ และกากหม้อกรอง ที่ 3.9 3.6 และ 1.6 เซนติเมตร ตามลำดับ เมื่อทดสอบทางสถิติ พบว่าวัสดุพีทมอสและไฮโดรชาร์ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.14 ความกว้างของผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊คในวัสดุแต่ละชนิดที่ใช้ในการทดสอบเพาะเมล็ด

วัสดุที่ใช้ในการปลูก	ความกว้าง (เซนติเมตร)						
	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	วันที่ 6	วันที่ 7
กากหม้อกรอง	0.09 [b]	0.14 [b]	0.19 [b]	0.22 [b]	0.27 [b]	0.30 [b]	0.34 [b]
ไฮโดรชาร์	0.43 [a]	0.65 [a]	0.93 [a]	1.16 [a]	1.39 [a]	1.55 [a]	1.75 [a]
พีทมอส	0.32 [a]	0.62 [a]	0.94 [a]	1.18 [a]	1.46 [a]	1.74 [a]	2.03 [a]
F-test	**	**	**	**	**	**	**

* ตัวเลขที่ตามด้วยอักษรที่เหมือนกันในแนวตั้ง หมายถึง ไม่มีความแตกต่างทางสถิติตามการวิเคราะห์ด้วยวิธี Duncan's new multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

** มีความแตกต่างกันทางสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

จากตารางที่ 4.15 จำนวนใบของผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊ค พบว่าจำนวนใบที่เพิ่มขึ้นในช่วง 7 วัน ของพีทมอสและไฮโดรชาร์ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งกากหม้อกรองมีจำนวนใบน้อยกว่า เนื่องจากพีทมอสและไฮโดรชาร์สามารถซึมซับน้ำได้ดี จึงทำให้พืชที่ปลูกในวัสดุดังกล่าวนี้นำน้ำไปใช้ได้มาก และมีการสูญเสียธาตุอาหารน้อยกว่าวัสดุที่มีการไหลซึมของน้ำที่เร็ว (อภิรักษ์ หลักชัยกุล, 2539)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.15 จำนวนใบเฉลี่ยของผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊คที่มีอายุ 7 วัน

วัสดุที่ใช้ในการปลูก	จำนวนใบเฉลี่ย
กากหม้อกรอง	0.906 [b]
ไฮโดรชาร์	2.906 [a]
พีทมอส	2.970 [a]
F-test	**

* ตัวเลขที่ตามด้วยอักษรที่เหมือนกันในแนวตั้ง หมายถึง ไม่มีความแตกต่างทางสถิติตามการวิเคราะห์ด้วยวิธี Duncan's new multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

** มีความแตกต่างกันทางสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

5) ผลของวัสดุเพาะเมล็ดต่อน้ำหนักผลผลิตสดและแห้ง

จากตารางที่ 4.16 ผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊คที่อายุ 7 วัน พบน้ำหนักสดมากที่สุดด้วยการปลูกในพีทมอส ในช่วง 0.0022 – 0.051 กรัม ค่าเฉลี่ย 0.0180 ± 0.02 กรัม รองลงมาคือไฮโดรชาร์ และกากหม้อกรอง มีน้ำหนักสดของผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊คในช่วง 0.0025 – 0.0453 กรัม ค่าเฉลี่ย 0.0159 ± 0.02 กรัม และ 0.00018 – 0.008 กรัม ค่าเฉลี่ย 0.0029 ± 0.005 กรัม ตามลำดับ เมื่อทดสอบทางสถิติพบว่าน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งเฉลี่ยในวัสดุพีทมอสและวัสดุไฮโดรชาร์ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

นอกจากนี้น้ำหนักแห้งของผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊ค ที่ปลูกในพีทมอสมีน้ำหนักแห้งในช่วง 0.0004 – 0.0039 กรัม ค่าเฉลี่ย 0.0016 ± 0.001 กรัม รองลงมาคือ ไฮโดรชาร์ และกากหม้อกรองมีน้ำหนักแห้งในช่วง 0.0003 – 0.0027 กรัม ค่าเฉลี่ย 0.0015 ± 0.0005 กรัม และ 0.0004 – 0.0007 กรัม ค่าเฉลี่ย 0.00028 ± 0.0005 กรัม ตามลำดับ น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊คมีความสัมพันธ์สอดคล้องกับจำนวนใบ และความกว้างในการเจริญเติบโต โดยพืชที่ปลูกในพีทมอสและไฮโดรชาร์ให้จำนวนใบและความกว้างใบมากกว่า ส่งผลให้มีน้ำหนักสดสูงกว่าที่ปลูกในกากหม้อกรอง

ตารางที่ 4.16 วัสดุเพาะเมล็ดทั้ง 3 ชนิดต่อน้ำหนักผลผลิตสดและน้ำหนักแห้งของผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊ค ในระยะเวลา 7 วัน

วัสดุที่ใช้ในการปลูก	น้ำหนักสด (กรัม)		น้ำหนักแห้ง (กรัม)	
	ช่วง	เฉลี่ย	ช่วง	เฉลี่ย
กากหม้อกรอง	0.00018 – 0.008	0.0029 ± 0.005 [b]	0.0004 – 0.0007	0.00028 ± 0.0005 [a]
ไฮโดรชาร์	0.0025 – 0.0453	0.0159 ± 0.02 [a]	0.0003 – 0.0027	0.0015 ± 0.0009 [a]
พีทมอส	0.0022 – 0.051	0.0180 ± 0.02 [a]	0.0004 – 0.0039	0.0016 ± 0.001 [a]
F-test	**	**	**	**

* ตัวเลขที่ตามด้วยอักษรที่เหมือนกันในแนวตั้ง หมายถึง ไม่มีความแตกต่างทางสถิติตามการวิเคราะห์ด้วยวิธี Duncan's new multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

** มีความแตกต่างกันทางสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

* NS ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.5 การศึกษาการประเมินต้นทุนของวัสดุหลังจากผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน

เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางกายภาพและทางเคมีของไฮโดรชาร์ในหัวข้อข้างต้นแล้ว จึงทำการประเมินต้นทุนในการผลิตไฮโดรชาร์จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน และพีทมอส เพื่อเปรียบเทียบความคุ้มค่าสำหรับเป็นวัสดุเพาะเมล็ด โดยจะทำการประเมินต้นทุนผันแปร (Variable Costs) ได้แก่ ค่าไฟฟ้า ค่าน้ำ คำนวณพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อนที่ในระหว่างกระบวนการ โดยการประเมินต้นทุนค่าไฟฟ้าของวัสดุในการศึกษาครั้งนี้ ไม่ได้นำข้อมูลในส่วนขั้นตอนการอบไล่ความชื้นของกากหม้อกรอง ก่อนและหลังผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์คาร์บอไนเซชัน มาใช้ในการคำนวณ โดยเน้นการคำนวณในขั้นตอนของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชันเท่านั้น เนื่องจากการนำกากหม้อกรองไปใช้จริง สามารถนำกากหม้อกรองไปตากให้แห้งโดยใช้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์เพื่อการระเหยความชื้นจากวัสดุ นอกจากนี้ทำการประเมินต้นทุนในระดับอุตสาหกรรมเพื่อดูความคุ้มค่าต่อการผลิตไฮโดรชาร์ โดยมีรายละเอียดการคิดดังนี้

4.5.1 การคำนวณค่าไฟฟ้าและค่าน้ำ

4.5.1.1 การคำนวณค่าไฟฟ้าและค่าน้ำของตู้อบความร้อนที่ใช้ในการศึกษา

1) กากหม้อกรองเหลือทิ้ง 1 กิโลกรัม ไม่มีค่าใช้จ่ายของชีวมวลเริ่มต้นในการเข้าสู่ระบบ

2) ค่าไฟฟ้า จากการทดลองผลิตไฮโดรชาร์ที่สภาวะอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:5 สามารถประเมินได้ว่า

- ถังปฏิกรณ์ 1 ถัง ใส่กากหม้อกรองได้ 40 กรัม ได้เป็นไฮโดรชาร์ประมาณ 33.14 กรัม
- ตู้อบความร้อน 1 ครั้ง สามารถนำถังปฏิกรณ์ได้ 12 ถัง คิดเป็นผลผลิตที่ได้ 397.68 กรัม
- การใช้ไฟฟ้าของการใช้ตู้อบความร้อน โดยไฮโดรชาร์ 397.68 กรัม (อบ 1 ครั้ง) ใช้ไฟฟ้าประมาณ 4.4 กิโลวัตต์-ชั่วโมง หากต้องการไฮโดรชาร์ 1 กิโลกรัม (อบ 2.45 ครั้ง) จะคิด เป็นค่าไฟฟ้าประมาณ 11.06 กิโลวัตต์-ชั่วโมง
- ค่าไฟฟ้าเฉลี่ยประมาณ 5 บาทต่อหน่วย (การไฟฟ้านครหลวง, 2561)

ดังนั้นคำนวณค่าไฟฟ้าที่ใช้ในผลิตไฮโดรชาร์ 1 กิโลกรัม มีค่าประมาณ 55.32 บาท

3) ค่าน้ำ

- ถังปฏิกรณ์ 1 ถัง ใช้น้ำ 200 มิลลิลิตร ดังนั้น ถ้าต้องการผลิตไฮโดรชาร์ 1 กิโลกรัม ต้องใช้น้ำ 6,035 มิลลิลิตรหรือ 0.006 ลูกบาศก์เมตร
- ค่าน้ำเฉลี่ยประมาณ 20 บาทต่อลูกบาศก์เมตร (การประปาส่วนภูมิภาค, 2561)

ดังนั้นคำนวณค่าน้ำที่ใช้ในผลิตไฮโดรชาร์ 1 กิโลกรัม มีค่าประมาณ 0.12 บาท

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4) ค่ากำจัดของเสีย เนื่องจากกากหม้อกรองจัดเป็นของเสียอุตสาหกรรมที่ต้องเสียค่ากำจัดในราคาประมาณ 800 บาทต่อตัน ซึ่งการนำกากหม้อกรองมาใช้ประโยชน์จะช่วยลดต้นทุนได้

รวมต้นทุนการผลิตไฮโดรชาร์เป็น กากหม้อกรองเหลือทิ้ง + ค่าไฟฟ้า + ค่าน้ำ - ค่ากำจัดของเสีย (0 + 55.32 + 0.12 – 0.8) เท่ากับ 54.64 บาทต่อกิโลกรัม เมื่อเปรียบเทียบกับพีทมอสที่ขายตามท้องตลาด (ยี่ห้อเจียไต๋) มีราคา 80 บาทต่อกิโลกรัม จึงสามารถสรุปได้ว่า การนำกากหม้อกรองซึ่งเป็นของเสียเหลือทิ้งจากโรงงานน้ำตาลมาผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน ที่สภาวะอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:5 ซึ่งได้เป็นไฮโดรชาร์ เมื่อนำมาใช้เป็นวัสดุเพาะเมล็ด มีความคุ้มค่ามากกว่าพีทมอสที่ขายตามท้องตลาด ทั้งในด้านประสิทธิภาพ (ดังผลการทดลองในหัวข้อ 4.4) และในด้านค่าใช้จ่าย อย่างไรก็ตาม แม้ว่าสมบัติทางด้านเคมีของไฮโดรชาร์อาจยังมีค่าไม่เหมาะสมสำหรับช่วงเติบโตและการสะสมอาหารของพืช แต่หากพิจารณาในช่วงการงอก ถือได้ว่าไฮโดรชาร์จัดเป็นวัสดุเพาะเมล็ดที่มีความสามารถใกล้เคียงกับพีทมอส

4.5.1.2 การคำนวณค่าไฟฟ้าและค่าน้ำของถังปฏิกรณ์ขนาดใหญ่ที่ใช้ในระดับอุตสาหกรรม

1) ถังปฏิกรณ์ขนาด 100 ลิตร (กากหม้อกรอง 16 กิโลกรัม ต่อน้ำ 80 ลิตร)

2) ค่าไฟฟ้า สามารถประเมินได้ว่า

- ถังปฏิกรณ์ 1 ถัง ใส่กากหม้อกรองได้ 16 กิโลกรัม ได้เป็นไฮโดรชาร์ประมาณ 13.26 กิโลกรัม
- การใช้ไฟฟ้าของถังปฏิกรณ์ขนาดใหญ่ ใช้กำลังไฟฟ้า 12 กิโลวัตต์-ชั่วโมง
- ค่าไฟฟ้าเฉลี่ยประมาณ 5 บาทต่อหน่วย (การไฟฟ้านครหลวง, 2561)

ดังนั้นคำนวณค่าไฟฟ้าที่ใช้ถังปฏิกรณ์ขนาดใหญ่ในการผลิตได้ไฮโดรชาร์ 13.26 กิโลกรัม มีค่าประมาณ 180 บาท

3) ค่าน้ำ

- ถังปฏิกรณ์ 1 ถัง ใช้น้ำ 80 ลิตร ดังนั้น การผลิตไฮโดรชาร์ต้องใช้น้ำ 0.08 ลูกบาศก์เมตร
- ค่าน้ำเฉลี่ยประมาณ 20 บาทต่อลูกบาศก์เมตร (การประปาส่วนภูมิภาค, 2561)

ดังนั้นคำนวณค่าน้ำที่ใช้ถังปฏิกรณ์ขนาดใหญ่ในการผลิตได้ไฮโดรชาร์ 13.26 กิโลกรัม มีค่าประมาณ 1.6 บาท

4) ค่ากำจัดของเสีย เนื่องจากกากหม้อกรองจัดเป็นของเสียอุตสาหกรรมที่ต้องเสียค่ากำจัดในราคาประมาณ 800 บาทต่อตัน ซึ่งการนำกากหม้อกรองมาใช้ประโยชน์จะช่วยลดต้นทุนได้

รวมต้นทุนการผลิตไฮโดรชาร์โดยใช้ถังปฏิกรณ์ขนาดใหญ่เป็น กากหม้อกรองเหลือทิ้ง + ค่าไฟฟ้า + ค่าน้ำ - ค่ากำจัดของเสีย (0 + 180 + 1.6 – 10.60) เท่ากับ 171 บาทต่อไฮโดรชาร์ 13.26 กิโลกรัม หรือ 12.90 บาทต่อกิโลกรัม จะสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อขยายขนาดของถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน ทำให้การผลิตไฮโดรชาร์มีปริมาณที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งค่าใช้จ่ายในด้านต้นทุนผันแปรได้แก่ ค่าไฟฟ้าและค่าน้ำที่ได้มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณการผลิตไฮโดรชาร์ในระดับห้องปฏิบัติการ ดังนั้นการใช้ถังปฏิกรณ์ขนาดใหญ่ในระดับอุตสาหกรรมจึงมีความคุ้มค่าต่อการผลิตไฮโดรชาร์ นอกจากนี้ยังการนำกากหม้อกรองเหลือทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์เป็นการช่วยหมุนเวียนของเสียกลับมาใช้ใหม่ และลดค่าใช้จ่ายในการส่งของเสียอุตสาหกรรมไปกำจัด

4.5.2 การคำนวณพลังงานไฟฟ้า

4.5.2.1 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของตู้อบความร้อนในระดับห้องปฏิบัติการ

การคำนวณพลังงานไฟฟ้าสามารถประเมินได้ดังนี้

1) การใช้ไฟฟ้าของตู้อบความร้อนประมาณ 1.64 กิโลวัตต์-ชั่วโมง

2) ระยะเวลาที่ใช้ในการผลิตไฮโดรชาร์ 3 ชั่วโมง (จากการทดลองผลิตไฮโดรชาร์ที่สภาวะอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:5)

ดังนั้นการใช้ตู้อบความร้อนในระดับห้องปฏิบัติการ มีการใช้พลังงานเท่ากับ 15,811,200 จูล

4.5.2.2 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของถังปฏิกรณ์ขนาดใหญ่ในระดับอุตสาหกรรม

การคำนวณพลังงานไฟฟ้าสามารถประเมินได้ดังนี้

1) ถังปฏิกรณ์ขนาด 100 ลิตร มีการใช้กำลังไฟฟ้า 12 กิโลวัตต์-ชั่วโมง

2) ระยะเวลาที่ใช้ในการผลิตไฮโดรชาร์ 3 ชั่วโมง

ดังนั้นการใช้ถังปฏิกรณ์ขนาดใหญ่ในระดับอุตสาหกรรมมีการใช้พลังงานเท่ากับ 129,600,000 จูล

4.5.3 การคำนวณพลังงานความร้อน

4.5.3.1 พลังงานความร้อนในระดับห้องปฏิบัติการ

การคำนวณพลังงานสามารถประเมินได้ดังนี้

1) กากหม้อกรองเข้าสู่ระบบมีปริมาณ 0.04 กิโลกรัม หรือ 40 กรัม (กรณี 1 ถังปฏิกรณ์) และน้ำที่เข้าสู่ระบบ 200 มิลลิลิตร

2) Specific Enthalpy of Liquid Water (sensible heat) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีค่า 120.06 กิโลจูลต่อกิโลกรัม Specific Enthalpy of Liquid Water (sensible heat) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส มีค่า 417.62 กิโลจูลต่อกิโลกรัม และ Specific Enthalpy of Steam (total heat) ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส มีค่า 2776.16 กิโลจูลต่อกิโลกรัม

3) ค่าความจุความร้อนจำเพาะของชานอ้อยมีค่า 0.46 จูลต่อกรัมต่อเคลวิน (Shrivastav and Hussain, 2013)

ดังนั้นพลังงานความร้อนที่ใช้ของกากหม้อกรองมีค่า 3,405 แคลอรี และพลังงานความร้อนที่ใช้ของน้ำมีค่า 126,882 แคลอรี เพราะฉะนั้นค่าพลังงานความร้อนทั้งหมดในระดับห้องปฏิบัติการ มีค่า 130,287 แคลอรี

4.5.3.2 พลังงานความร้อนของถังปฏิกรณ์ขนาดใหญ่ในระดับอุตสาหกรรม

การคำนวณพลังงานสามารถประเมินได้ดังนี้

1) กากหม้อกรองเข้าสู่ระบบมีปริมาณ 16 กิโลกรัม หรือ 16,000 กรัม และน้ำที่เข้าสู่ระบบ 80 ลิตร หรือ 80,000 กรัม

2) Specific Enthalpy of Liquid Water (sensible heat) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีค่า 120.06 กิโลจูลต่อกิโลกรัม Specific Enthalpy of Liquid Water (sensible heat) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส มีค่า 417.62 กิโลจูลต่อกิโลกรัม และ Specific Enthalpy of Steam (total heat) ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส มีค่า 2776.16 กิโลจูลต่อกิโลกรัม

3) ค่าความจุความร้อนจำเพาะของชานอ้อยมีค่า 0.46 จูลต่อกรัมต่อเคลวิน (Shrivastav and Hussain, 2013)

ดังนั้นพลังงานความร้อนที่ใช้ของกากหม้อกรองมีค่า 272,432 แคลอรี และพลังงานความร้อนที่ใช้ของน้ำมีค่า 50,752,759 แคลอรี เพราะฉะนั้นค่าพลังงานความร้อนทั้งหมดของถังปฏิกรณ์ขนาดใหญ่ในระดับอุตสาหกรรมจะมีค่า 51,025,782 แคลอรี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการนำกากหม้อกรองเหลือทิ้งเข้าสู่กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน โดยใช้ถังปฏิกรณ์ที่ปรับอัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:5 1:10 และ 1:15 กรัมต่อมิลลิลิตร อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 160 180 และ 200 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลาทำปฏิกิริยา 1 2 และ 3 ชั่วโมง ซึ่งจะได้เป็นไฮโดรชาร์ เพื่อใช้เป็นวัสดุเพาะเมล็ดทดแทนพีทมอส โดยทดสอบปลูกต้นอ่อนทานตะวัน และผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊ค สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

1. สภาวะที่เหมาะสมของไฮโดรชาร์เพื่อเป็นวัสดุเพาะเมล็ด เตรียมโดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชันที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำกลั่น 1:5 วัสดุไฮโดรชาร์

2. สมบัติด้านกายภาพของพีทมอส และไฮโดรชาร์ที่ได้จากการศึกษา มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ ค่าความสามารถในการอุ้มน้ำสูงสุดคือ 3.93 และ 4.57 กรัมต่อกรัม ค่าความพรุนทั้งหมดมีค่าร้อยละ 38.9 และ 45.3 ค่าช่องว่างขนาดใหญ่มีค่าร้อยละ 3 และ 2.8 และค่าช่องว่างขนาดเล็กมีค่าร้อยละ 35.7 และ 42.4 ตามลำดับ ส่วนค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ ความหนาแน่นรวมของดิน ซึ่งเท่ากับ 0.313 และ 0.158 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ

3. สมบัติทางเคมีของวัสดุเพาะพีทมอส และที่ไฮโดรชาร์สภาวะเหมาะสม มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ ค่าการนำไฟฟ้ามีค่า 140 และ 151 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ส่วนค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด–ด่าง 6.05 และ 6.33 แต่วัสดุพีทมอสและไฮโดรชาร์อยู่ในช่วงวัสดุเพาะเมล็ดที่มีค่าเหมาะสม ค่าปริมาณอินทรียวัตถุมีค่าร้อยละ 254.39 และ 133.14 ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของดินมีค่า 58.46 และ 28.44 มิลลิอิควิวาเลนต์ต่อร้อยกรัม นอกจากนี้ธาตุอาหารหลักที่มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญได้แก่ ไนโตรเจนมีค่าร้อยละ 1.34 และ 1.51 ส่วนค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด 413.73 และ 188.18 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และปริมาณโพแทสเซียม 372.08 และ 146.70 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

4. การทดสอบการเพาะเมล็ดพืชด้วยพีทมอสและไฮโดรชาร์ พบว่าวัสดุทั้งสองให้ผลผลิตมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยต้นอ่อนทานตะวันที่ปลูกในพีทมอสและไฮโดรชาร์ มีค่าเปอร์เซ็นต์การงอกเฉลี่ยร้อยละ 90.63 และ 95.31 ความสูงเฉลี่ย 14.6 และ 11.5 เซนติเมตร ความยาวราก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เฉลี่ย 8.04 และ 7.82 เซนติเมตร น้ำหนักสดเฉลี่ย 0.59 และ 0.56 กรัม และน้ำหนักแห้งเฉลี่ย 0.0412 และ 0.0414 กรัม เส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นเฉลี่ย 0.160 และ 0.164 เซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนการปลูกผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊คด้วยไฮโดรชาร์และพีทมอส ได้ค่าเปอร์เซ็นต์การงอกเฉลี่ยร้อยละ 87.50 และ 89.06 ความสูงเฉลี่ย 3.9 และ 3.6 เซนติเมตร ความยาวรากเฉลี่ย 2.91 และ 2.94 เซนติเมตร ความกว้างเฉลี่ย 3.6 และ 3.9 เซนติเมตร น้ำหนักสดเฉลี่ย 0.018 และ 0.016 กรัม และน้ำหนักแห้งเฉลี่ย 0.0016 และ 0.0015 กรัม ตามลำดับ

4. ค่าใช้จ่ายจากการประเมินต้นทุนผันแปร ได้แก่ ค่าไฟฟ้า และค่าน้ำ ในการผลิตไฮโดรชาร์ 1 กิโลกรัม จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชันเป็น 54.64 บาทต่อกิโลกรัม โดยมีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าพีทมอสที่ขายตามท้องตลาด (ยี่ห้อเจียไต๋) ซึ่งมีราคา 80 บาทต่อกิโลกรัม นอกจากนี้ถังปฏิกรณ์ขนาดใหญ่ที่ใช้ในระดับอุตสาหกรรม สามารถผลิตไฮโดรชาร์ได้ 12.90 บาทต่อกิโลกรัม

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. จากการทดลองได้วิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารหลัก ในกรณีที่ต้องการปลูกพืชที่มีความต้องการธาตุอาหารควรเติมปริมาณธาตุอาหารลงไปให้เหมาะสม เพื่อตอบสนองต่อการนำไปใช้ประโยชน์ของพืชที่ต้องการธาตุอาหารที่หลากหลาย

2. จากการนำวัสดุไฮโดรชาร์ทดสอบปลูกกับพืช เนื่องจากระยะเวลาที่ใช้ทดสอบเป็นเวลาสั้นในการทดลองจึงมุ่งเน้นศึกษาความสามารถในการเพาะเมล็ด ทั้งนี้หากต้องการศึกษาอัตราการเจริญเติบโตของพืชในช่วงเติบโตเต็มที่หรือพืชที่ใช้เวลาการเก็บเกี่ยว ควรขยายระยะเวลาในการทดสอบของวัสดุไฮโดรชาร์ต่อพืช เพื่อดูว่าผลผลิตที่ได้มีคุณภาพเทียบเคียงกับผลผลิตทั่วไป

3. วัสดุไฮโดรชาร์ที่ผ่านการทดสอบปลูกกับพืชแล้วควรทำการทดสอบปลูกกับพืชอีกครั้ง เพื่อเพิ่มความคุ้มค่าของวัสดุไฮโดรชาร์

4. งานวิจัยนี้ถังปฏิกรณ์ที่บรรจุวัตถุดิบมีปริมาณจำกัดจึงทำให้วัสดุไฮโดรชาร์ที่ได้จึงมีปริมาณน้อย ในกรณีการใช้งานจริงที่ต้องการผลิตภัณฑ์มาก ควรทำการประยุกต์ออกแบบถังปฏิกรณ์ให้เหมาะกับปริมาณที่มากขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บรรณานุกรม

Abad, M. et al. Physical Properties of Various Coconut Coir Dusts Compared to Peat. 40 (2005): 2138.

Al-Wabel, M. I., Rafique, M. I., Ahmad, M., Ahmad, M., Hussain, A. and Usman, A. R. A. Pyrolytic and hydrothermal carbonization of date palm leaflets: Characteristics and ecotoxicological effects on seed germination of lettuce. Saudi Journal of Biological Sciences 26 (2019): 665-672.

Belda, R. M., Lidón, A. and Fornes, F. Biochars and hydrochars as substrate constituents for soilless growth of myrtle and mastic. Industrial Crops and Products 94 (2016): 132-142.

Berge, N. D., Ro, K. S., Mao, J., Flora, J. R. V., Chappell, M. A. and Bae, S. Hydrothermal Carbonization of Municipal Waste Streams. Environmental Science & Technology 45 (2011): 5696-5703.

Bo, H., Kan, W., Liheng, W., Shu-Hong, Y., Markus, A. and Maria-Magdalena, T. Engineering Carbon Materials from the HydrothermalCarbonization Process of Biomass. Advance Materials 23 (2010): 812-828.

Breulmann, M., van Afferden, M., Müller, R. A., Schulz, E. and Fühner, C. Process conditions of pyrolysis and hydrothermal carbonization affect the potential of sewage sludge for soil carbon sequestration and amelioration. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 124 (2017): 256-265.

Chen, X., Lin, Q., He, R., Zhao, X. and Li, G. Hydrochar production from watermelon peel by hydrothermal carbonization. Bioresource Technology 241 (2017): 236-243.

Criely, R. A. and Watanabe, R. T. Respond of chrysanthemum in four soilless media. Scientia Horticulturea 9 (1974): 365-389.

Dalias, P., Prasad, M., Mumme, J., Kern, J., Stylianou, M. and Christou, A. Low-cost post-treatments improve the efficacy of hydrochar as peat replacement in growing media. Journal of Environmental Chemical Engineering 6 (2018): 6647-6652.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Duman, G., Tag, A. T., Ucar, S. and Yanik, J. Comparative evaluation of dry and wet carbonization of agro industrial wastes for the production of soil improver. Journal of Environmental Chemical Engineering 6 (2018): 3366-3375.

Eibisch, N. et al. Properties and degradability of hydrothermal carbonization products. Environmental Quality 42 (2013): 1565-1573.

Fang, J., Gao, B., Chen, J. and Zimmerman, A. R. Hydrochars derived from plant biomass under various conditions: Characterization and potential applications and impacts. Chemical Engineering Journal 267 (2015): 253-259.

Gan, J. and Yuan, W. Operating condition optimization of corncob hydrothermal conversion for bio-oil production. Applied Energy 103 (2013): 350-357.

Gao, Y., Wang, X.-H., Yang, H.-P. and Chen, H.-P. Characterization of products from hydrothermal treatments of cellulose. Energy 42 (2012): 457-465.

Gronwald, M., Don, A., Tiemeyer, B. and Helfrich, M. Effects of fresh and aged chars from pyrolysis and hydrothermal carbonization on nutrient sorption in agricultural soils. SOIL 1 (2015): 475-489.

Hoekman, S. K., Broch, A. and Robbins, C. Hydrothermal Carbonization (HTC) of Lignocellulosic Biomass. Energy & Fuels 25 (2011): 1802-1810.

Huang, R. and Tang, Y. Speciation Dynamics of Phosphorus during (Hydro)Thermal Treatments of Sewage Sludge. Environmental Science & Technology 49 (2015): 14466-14474.

Jaenicke, H. Good Tree Nursery Practices: Practical Guidelines for Research Nurseries. International Centre for Reseach in Agroforestry, Nairobi, Kenya. 1 (1999)

Jakaphong, K., Kanokorn, H. and Sombat, T. Influence of Reaction Temperature and Reaction Time on Product from Hydrothermal Treatment of Biomass Residue. American Journal of Environmental Sciences 10 (2014): 324-335.

Jamari, S. S. and Howse, J. R. The effect of the hydrothermal carbonization process on palm oil empty fruit bunch. Biomass and Bioenergy 47 (2012): 82-90.

Kambo, H. S. and Dutta, A. A comparative review of biochar and hydrochar in terms of production, physico-chemical properties and applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews 45 (2015): 359-378.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Lu, X., Pellechia, P. J., Flora, J. R. V. and Berge, N. D. Influence of reaction time and temperature on product formation and characteristics associated with the hydrothermal carbonization of cellulose. Bioresource Technology 138 (2013): 180-190.

Luca, F., Daniele, B., Daniele, C. and Marco, B. Hydrothermal Carbonization of Biomass: Design of a Batch Reactor and Preliminary Experimental Results. The Italian Association of Chemical Engineering 37 (2014): 55-61.

Maria, M. T. and Markus, A. Chemistry and materials options of sustainable carbon materials made by hydrothermal carbonization. Royal Society of Chemical 39 (2010): 102-116.

Melo, T. M. et al. Plant and soil responses to hydrothermally converted sewage sludge (sewchar). Chemosphere 206 (2018): 338-348.

Moon, S.-J. et al. Characterization of lignin-rich residues remaining after continuous super-critical water hydrolysis of poplar wood (Populus albaglandulosa) for conversion to fermentable sugars. Bioresource Technology 102 (2011): 5912-5916.

Nakasorn, K., Panyapinyopol, B., Kanokkantapong, K., Viriyaempikul, N., Kraithong, W. and Pavasant, P. Hydrothermal Carbonization of Oil Palm Pressed Fiber: Effect of Reaction Parameters on Product Characteristics. International Energy 17 (2017): 27-56.

Nieto, A., Gascó, G., Paz-Ferreiro, J., Fernández, J. M., Plaza, C. and Méndez, A. The effect of pruning waste and biochar addition on brown peat based growing media properties. Scientia Horticulturae 199 (2016): 142-148.

Paneque, M., De la Rosa, J. M., Kern, J., Reza, M. T. and Knicker, H. Hydrothermal carbonization and pyrolysis of sewage sludges: What happen to carbon and nitrogen? Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 128 (2017): 314-323.

Pavlovič, I., Knez, Ž. and Škerget, M. Hydrothermal Reactions of Agricultural and Food Processing Wastes in Sub- and Supercritical Water: A Review of Fundamentals, Mechanisms, and State of Research. Journal of Agricultural and Food Chemistry 61 (2013): 8003-8025.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Peterson, A. A., Vogel, F., Lachance, R. P., Fröling, M., Antal, J. M. J. and Tester, J. W. Thermochemical biofuel production in hydrothermal media: a review of suband supercritical water technologies. Energy and Environment science 1 (2008): 32-65.

Prado, R. d. M., Caione, G. and Campos, C. N. S. Filter Cake and Vinasse as Fertilizers Contributing to Conservation Agriculture. Applied and Environmental Soil Science 2013 (2013): 1-8.

Prawisudha, P., Namioka, T. and Yoshikawa, K. Coal alternative fuel production from municipal solid wastes employing hydrothermal treatment. Applied Energy 90 (2012): 298-304.

Puccini, M. et al. Hydrothermal Carbonization of Municipal Woody and Herbaceous Prunings: Hydrochar Valorisation as Soil Amendment and Growth Medium for Horticulture. Sustainability 10 (2018): 846

Ren, J. et al. Effect of sewage sludge hydrochar on soil properties and Cd immobilization in a contaminated soil. Chemosphere 189 (2017): 627-633

Reza, M. T., Rottler, E., Herklotz, L. and Wirth, B. Hydrothermal carbonization (HTC) of wheat straw: Influence of feedwater pH prepared by acetic acid and potassium hydroxide. Bioresource Technology 182 (2015): 336-344.

Robbins, J. A. Growing media for container production in a greenhouse or nursery: Part II (Physical and chemical properties). Cooperative Extension Service, University of Arkansas 2001.

Röhrdanz, M. et al. Hydrothermal carbonization of biomass from landscape management – Influence of process parameters on soil properties of hydrochars. Journal of Environmental Management 173 (2016): 72-78.

S. Abdel-Rehim, Z. and A. Nagib, Z. Solar Drying of Bagasse Pulp. Journal of Applied Sciences Research 3 (2007): 300-306.

Shinya, Y. and Matsumura, Y. The Asian biomass handbook. Forestry and Fisheriers,Japan: Ministry of Agriculture, 2008.

Shrivastav, S. and Hussain, I. Design of Bagasse Dryer to Recover Energy of Water Tube Boiler in a Sugar Factory. International Journal of Science and Research 2 (2013): 356-368.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Theriault & Hachey Peat Moss Ltd. Analytical Details of Professional Grades of Peat Moss. [ออนไลน์]. 2019. แหล่งที่มา:http://theriault-hachey.com/

Wang, L., Zhong, B., Liang, T., Xing, B. and Zhu, Y. Atmospheric thorium pollution and inhalation exposure in the largest rare earth mining and smelting area in China. Science of The Total Environment 572 (2016): 1-8.

Xu, X. and Jiang, E. Treatment of urban sludge by hydrothermal carbonization. Bioresource Technology 238 (2017): 182-187.

Xue, T. and Huang, X. Releasing characteristics of phosphorus and other substances during thermal treatment of excess sludge. Journal of Environmental Sciences 19 (2007): 1153-1158.

Yao, C. et al. Hydrothermal Dehydration of Aqueous Fructose Solutions in a Closed System. The Journal of Physical Chemistry C 111 (2007): 15141-15145.

Yildirim, E., Turan, M. and Guvenc, I. Effect of foliar salicylic acid applications on growth, chlorophyll and mineral content of cucumber (Cucumis sativus L.) grown under salt stress. Plant and nutrition of soil science 31 (2008): 593-612.

Yuan, J. H. and Xu, R. K. The amelioration effects of low temperature biochar generated from nine crop residues on an acidic Ultisol. Soil Use and Management 27 (2017): 110-115.

Zhang, J.-h., Lin, Q.-m. and Zhao, X.-r. The Hydrochar Characters of Municipal Sewage Sludge Under Different Hydrothermal Temperatures and Durations. Journal of Integrative Agriculture 13 (2014): 471-482.

Zheng, A. et al. Comparison of the effect of wet and dry torrefaction on chemical structure and pyrolysis behavior of corncobs. Bioresource Technology 176 (2015): 15-22.

กรกิจ ทันสมัย. แนวทางการจัดการผลผลิตพลอยได้จากการผลิตน้ำตาล. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาประกอบการ คณะบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิยาลัยศิลปากร, 2554.

กีรติ ประไพวัชรพันธ์. การผลิตน้ำมันชีวภาพด้วยสาหร่ายด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลลิควิดแฟกชันแบบสองขั้นตอน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2557.

การประปาส่วนภูมิภาค. อัตราค่าน้ำประปาส่วนภูมิภาค ประเภทธุรกิจขนาดเล็ก. [ออนไลน์]. 2561. แหล่งที่มา:https://www.pwa.co.th/contents/service/table-price

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

การไฟฟ้านครหลวง. อัตราค่าไฟฟ้าประเภทที่ 2 กิจการการขนาดเล็ก. [ออนไลน์]. 2561. แหล่งที่มา: https://www.mea.or.th/profile/109/112

คงเอก ศิริงาม. ผลของวิธีการปลูกต่อการเจริญเติบโตและปริมาณรงควัตถุของผักกาดหอมใบพันธุ์กรีนโอ๊ค. วารสารวิจัยราชภัฏพระนคร 1 (2558): 82-95.

เจนจิรา ชุมภูคำ และ สิริกาญจนา ตาแก้ว. ผลของวัสดุปลูกต่อการงอกของเมล็ด การรอดชีวิต และการเจริญเติบโตของต้นกล้ามัลเบอร์รี่พันธุ์เวียดนาม GO2. วารสารของคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ 1 (2559): 283-295.

ฉันทนา พันธุ์เหล็ก. คาร์บอนฟุตพริ้นท์เพื่อการวางแผนจัดการด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมของอุตสาหกรรมน้ำตาล. ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2557.

ชมพู่ โทวรรณา. ผลของวัสดุเพาะกล้าที่มีต่อการเจริญเติบโตของต้นกล้ามะเขือเทศ. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร39 1 (2551): 281-284.

ชานนท์ มณีรัตน์. ผลของการ priming ด้วย salicylic acid และ folic acid ต่อความงอก ความแข็งแรง และการเจริญเติบโตของต้นกล้าผักบุ้งจีน ปริญญานิพนธ์, ภาควิชาเทคโนโลยีการเกษตร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2556.

เนตรชนก เกียรติ์นนทพัทธ์ และ ชวนพิศ อรุณรังสิกุล. วัสดุปลูกที่เหมาะสมสาหรับการเจริญเติบโตและการเกิดรากของต้นกล้าฟักข้าว. ปริญญานิพนธ์, คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, 2555.

ณัฐวุฒิ ปลื้มใจ. การใช้ประโยชน์กากตะกอนหม้อกรองจากโรงงานน้ำตาล เพื่อเป็นปุ๋ยทางเลือกและลดการเสื่อมโทรมของดินหลังการปลูกอ้อย. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาเกษตรศาสตร์ คณะเกษตร มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2561.

ดารณี เกียรติสกุล. การศึกษาวัสดุเพาะและวิธีการเพาะเมล็ดเพื่อผลิตต้นอ่อนทานตะวันเพื่อการค้า ปริญญานิพนธ์, เทคโนโลยีการผลิตพืช วิทยาลัยเกษตรและเทคโนโลยีเชียงใหม่. สถาบันการอาชีวภาคเหนือ, 2558.

ดุษฎีพร สิทธิกุล. คุณสมบัติชีวมวลในกระบวนการทอรีแฟกชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมพลังงาน มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2557.

เดลินิวส์ออนไลน์. ต้นอ่อนทานตะวันเพื่อสุขภาพ [ออนไลน์]. 2561. แหล่งที่มา: https://www.dailynews.co.th/article/286933

ทองกร สุภาโชค. การทดสอบวัสดุผักตบชวาที่ผ่านกระบวนการย่อยสลายด้วยความร้อนชื้น (hydrothermal carbonization) เพื่อเป็นวัสดุเพาะเมล็ด. ปริญญานิพนธ์, ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตร มหาลัยเกษตรศาสตร์, 2557.

ธนิกพงศ์ ครองข้าวนาสาร. การวิเคราะห์ปริมาณวิตามินซี คลอโรฟิลล์ และเส้นใยอาหาร ของต้นทานตะวันงอก. ปริญญานิพนธ์, ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2555.

นิตย์ธินันท์ บริรักษ์. สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์โดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาลัยวิทยาลัยเชียงใหม่., 2558.

บริษัท เกษตรนำโชค จำกัด. ซิลิคอน กับการเกษตรกรรม. [ออนไลน์]. 2561. แหล่งที่มา: http://www.kasetnumchok.com/ซิลิคอน-กับการเกษตรกรรม

บริษัทเอกะอะโกร จำกัด. ลักษณะและประเภทของพีทมอส. [ออนไลน์]. 2561. แหล่งที่มา: https://www.aga-agro.com

บริษัทชาลีเอสคิวเอ็ม ประเทศไทยจำกัด. ลักษณะของพีทมอส. [ออนไลน์]. 2561. แหล่งที่มา: http://www.charleesqm.com/web/career.php

ประพันธ์ คูชลธารา และ ศศิธร สรรพ่อค้า. พลังงานจากชีวมวลและวัสดุเหลือใช้. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย., 2558.

ปรียาภรณ์ แนมใส. อิทธิพลของวัสดุต่อการเจริญเติบโตของต้นกล้าผัก. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาพืชสวน มหาวิทยาลัยแม่โจ้, 2546.

มิยดา นาเอก. การเจริญเติบโตของผักกาดหอมในวัสดุปลูก perlite และ vermiculite ชนิดต่างๆ ในระบบปลูก Nutrient Film Technique. ในการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48 1 (2553): 288-296.

ยุภาวดี พรรคยู และ ยุวธิดา พรรคยู. ผลการแช่เมล็ดด้วย EM อัตราต่างกันในการเพาะต้นอ่อนทานตะวัน. ปริญญานิพนธ์, คณะเกษตรศาสตร์ สถาบันการอาชีวเกษตรภาคใต้, 2559.

สวัสดิ์ พิมพ์สุวรรณ. ผลของวัสดุปลูกชนิดต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเจริญของกาบหอยแครง. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2555.

สุชาวลีวรรณ ตรีเสิน และ ชนิกาญจน์ จันทร์มาทอง. ผลของการแช่เมล็ดด้วยกรดซาลิซิลิกต่อความงอกของเมล็ด การเจริญเติบโต และศักยภาพในการต้านอนุมูลอิสระของต้นอ่อนทานตะวัน. วารสารพืชศาสตร์สงขลานครินทร์ปีที่ 3 ฉบับพิเศษ 10 (2559): 10-16.

อภิรักษ์ หลักชัยกุล. การศึกษาเปรียบเทียบวัสดุพืชไม่ใช้ดินในผักกาดหอม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงเสน, 2539.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก

สมบัติทางกายภาพ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สมบัติทางกายภาพ

1.1 ความสามารถในการอุ้มน้ำ (Water holding capacity: WHC)

วิธีวิเคราะห์โดย Alef method สามารถอธิบายโดยสมการดังนี้

$$\text{WHC [กรัม/กรัม]} = \frac{mwet - mdry - mfilter}{mdry}$$

โดย mwet คือ น้ำหนักเปียกของตัวอย่าง (กรัม)

mdry คือ น้ำหนักแห้งของตัวอย่าง (กรัม)

mfilter คือ น้ำหนักตัวอย่างหลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส (กรัม)

1.2 ความหนาแน่นรวมของดิน (Bulk density)

วิธีวิเคราะห์โดย Blake and Hartge ทำการวัดความหนาแน่นโดยการใช้ภาชนะที่ตัดมาจากถาดหลุมเพาะเมล็ด สามารถอธิบายการวิเคราะห์โดยสมการดังนี้

$$\text{ความหนาแน่นรวมของดิน (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)} = \frac{m2 - m1}{V}$$

โดย m1 คือ ภาชนะเปล่าอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก (กรัม)

m2 คือ ภาชนะที่ได้ใส่วัสดุแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก (กรัม)

V คือ ปริมาตรของภาชนะ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1.3 ความพรุนทั้งหมด (Total porosity)

วิธีวิเคราะห์โดย Danielson and Sutherland (นำภาชนะเดียวกันกับข้อ 1.2) ปิดรูด้านล่างของภาชนะ จากนั้นจึงใส่วัสดุลงไป โดยค่าความพรุนทั้งหมดสามารถอธิบายการวิเคราะห์โดยสมการดังนี้

$$\text{ความพรุนทั้งหมด (\%)} = \frac{(m3 - m2) \times 100}{V}$$

โดย m3 คือ ภาชนะที่ใส่วัสดุให้แน่นพอสมควร จากนั้นเทน้ำจากกระบอกตวงที่ทราบปริมาตรลงไปจนอิ่มตัว แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก (กรัม)

1.4 ค่าช่องว่างขนาดใหญ่ (Air-filled porosity)

วิธีวิเคราะห์โดย Danielson and Sutherland ภาชนะ (ข้อ 1.3) ที่ใส่วัสดุและน้ำลงไป

$$\text{ค่าช่องว่างขนาดใหญ่ (\%)} = \frac{(m5)\times 100}{V}$$

โดย m4 คือ ภาชนะที่มีวัสดุและน้ำจากการปิดรูด้านล่าง (จากข้อ 1.3) จากนั้นจึงระบายน้ำออกจากภาชนะ (กรัม)

m5 คือ m3-m4 (กรัม)

1.5 ค่าช่องว่างขนาดเล็ก (Water-filled porosity)

วิธีวิเคราะห์โดย Danielson and Sutherland

$$\text{ค่าช่องว่างขนาดเล็ก (\%)} = \frac{m6\times 100}{V}$$

โดย m6 คือ m4-m2 (กรัม)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ข
ไฮโดรชาร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

 รูปที่ 1 อุณหภูมิ 160 ℃ เวลา 1 ชั่วโมง BTW 1:5	 **รูปที่ 2** อุณหภูมิ 160 ℃ เวลา 1 ชั่วโมง BTW 1:10	 **รูปที่ 3** อุณหภูมิ 160 ℃ เวลา 1 ชั่วโมง BTW 1:15
 รูปที่ 4 อุณหภูมิ 160 ℃ เวลา 2 ชั่วโมง BTW 1:5	 **รูปที่ 5** อุณหภูมิ 160 ℃ เวลา 2 ชั่วโมง BTW 1:10	 **รูปที่ 6** อุณหภูมิ 160 ℃ เวลา 2 ชั่วโมง BTW 1:15
 รูปที่ 7 อุณหภูมิ 160 ℃ เวลา 3 ชั่วโมง BTW 1:15	 **รูปที่ 8** อุณหภูมิ 160 ℃ เวลา 3 ชั่วโมง BTW 1:15	 **รูปที่ 9** อุณหภูมิ 160 ℃ เวลา 3 ชั่วโมง BTW 1:15
 รูปที่ 10 อุณหภูมิ 180 ℃ เวลา 1 ชั่วโมง BTW 1:5	 **รูปที่ 11** อุณหภูมิ 180 ℃ เวลา 1 ชั่วโมง BTW 1:10	 **รูปที่ 12** อุณหภูมิ 180 ℃ เวลา 1 ชั่วโมง BTW 1:15

*** BTW อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำ**

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

 รูปที่ 13 อุณหภูมิ 180 ℃ เวลา 2 ชั่วโมง BTW 1:5	 **รูปที่ 14** อุณหภูมิ 180 ℃ เวลา 2 ชั่วโมง BTW 1:10	 **รูปที่ 15** อุณหภูมิ 180 ℃ เวลา 2 ชั่วโมง BTW 1:15
 รูปที่ 16 อุณหภูมิ 180 ℃ เวลา 3 ชั่วโมง BTW 1:5	 **รูปที่ 17** อุณหภูมิ 180 ℃ เวลา 3 ชั่วโมง BTW 1:10	 **รูปที่ 18** อุณหภูมิ 180 ℃ เวลา 3 ชั่วโมง BTW 1:15
 รูปที่ 19 อุณหภูมิ 200 ℃ เวลา 1 ชั่วโมง BTW 1:5	 **รูปที่ 20** อุณหภูมิ 200 ℃ เวลา 1 ชั่วโมง BTW 1:10	 **รูปที่ 21** อุณหภูมิ 200 ℃ เวลา 1 ชั่วโมง BTW 1:15
 รูปที่ 22 อุณหภูมิ 200 ℃ เวลา 2 ชั่วโมง BTW 1:5	 **รูปที่ 23** อุณหภูมิ 200 ℃ เวลา 2 ชั่วโมง BTW 1:10	 **รูปที่ 24** อุณหภูมิ 200 ℃ เวลา 2 ชั่วโมง BTW 1:15

*** BTW อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำ**

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 25 อุณหภูมิ 200 ℃ เวลา 3 ชั่วโมง BTW 1:5	**รูปที่ 26** อุณหภูมิ 200 ℃ เวลา 3 ชั่วโมง BTW 1:10	**รูปที่ 27** อุณหภูมิ 200 ℃ เวลา 3 ชั่วโมง BTW 1:15

*** BTW อัตราส่วนกากหม้อกรองต่อน้ำ**

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ค
อัตราการเจริญเติบโตของพืช (สถิติ)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 1 วิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way Analysis) (N=8) ของวัสดุเพาะเมล็ดต่อเปอร์เซ็นต์การงอกของต้นอ่อนทานตะวัน

สถิติ	เปอร์เซ็นต์การงอก	N	Subset for alpha = 0.05	
			1	2
Duncan	กากหม้อกรอง	8	76.5625	
	พีทมอส	8		90.6250
	ไฮโดรชาร์	8		95.3125
	Sig.		1.000	.373

ตารางที่ 2 วิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way Analysis) (N=64) ต่อวัสดุเพาะเมล็ดต่อความสูงต้นอ่อนทานตะวัน ในวันที่ 7

สถิติ	ความสูงต้น	N	Subset for alpha = 0.05	
			1	2
Duncan	กากหม้อกรอง	64	4.3656	
	พีทมอส	64		6.2781
	ไฮโดรชาร์	64		7.0234
	Sig.		1.000	.142

ตารางที่ 3 วิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way Analysis) (N=64) ของวัสดุเพาะเมล็ดต่อความยาวรากของต้นอ่อนทานตะวัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สถิติ	ความยาวต้น	N	Subset for alpha = 0.05	
			1	2
Duncan	กากหม้อกรอง	64	5.9078	
	พีทมอส	64		7.8234
	ไฮโดรชาร์	64		8.0391
	Sig.		1.000	.744

ตารางที่ 4 วิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way Analysis) (N=64) ของวัสดุเพาะเมล็ดต่อน้ำหนักผลผลิตสดต้นอ่อนทานตะวัน

สถิติ	น้ำหนักผลผลิตสด	N	Subset for alpha = 0.05	
			1	2
Duncan	กากหม้อกรอง	64	0.4317	
	ไฮโดรชาร์	64		0.5539
	พีทมอส	64		0.5563
	Sig.		1.000	0.418

ตารางที่ 5 วิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way Analysis) (N=64) ของวัสดุเพาะเมล็ดต่อน้ำหนักผลผลิตแห้งต้นอ่อนทานตะวัน

สถิติ	น้ำหนักผลผลิตแห้ง	N	Subset for alpha = 0.05
			1
Duncan	กากหม้อกรอง	64	0.0402
	พีทมอส	64	0.0413
	ไฮโดรชาร์	64	0.0415
	Sig.		.857

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 6 วิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way Analysis) (N=64) ของวัสดุเพาะเมล็ดต่อเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นต้นอ่อนทานตะวัน

สถิติ	เส้นผ่านศูนย์กลาง	N	Subset for alpha = 0.05	
			1	2
Duncan	กากหม้อกรอง	64	0.1192	
	พีทมอส	64		0.1609
	ไฮโดรชาร์	64		0.1647
	Sig.		1.000	0.680

ตารางที่ 7 วิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way Analysis) (N=8) ของวัสดุเพาะเมล็ดต่อเปอร์เซ็นต์การงอกของผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊ค

สถิติ	เปอร์เซ็นต์การงอก	N	Subset for alpha = 0.05	
			1	2
Duncan	กากหม้อกรอง	8	34.3750	
	พีทมอส	8		87.5000
	ไฮโดรชาร์	8		89.0625
	Sig.		1.000	.901

ตารางที่ 8 วิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way Analysis) (N=64) ของวัสดุเพาะเมล็ดต่อความสูงของผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊คในวันที่ 7

สถิติ	ความสูงของต้น	N	Subset for alpha = 0.05	
			1	2
Duncan	กากหม้อกรอง	64	0.2750	
	ไฮโดรชาร์	64		1.4109
	พีทมอส	64		1.6297
	Sig.		1.000	0.205

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 9 วิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way Analysis) (N=64) ของวัสดุเพาะเมล็ดต่อความยาวรากของผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊ค

สถิติ	ความยาวราก	N	Subset for alpha = 0.05	
			1	2
Duncan	กากหม้อกรอง	64	0.6422	
	พีทมอส	64		2.9094
	ไฮโดรชาร์	64		2.9422
	Sig.		1.000	0.904

ตารางที่ 10 วิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way Analysis) (N=64) ของวัสดุเพาะเมล็ดต่อความกว้างของผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊ค ในวันที่ 7

สถิติ	ความกว้าง	N	Subset for alpha = 0.05	
			1	2
Duncan	กากหม้อกรอง	64	0.3422	
	ไฮโดรชาร์	64		1.7484
	พีทมอส	64		2.0266
	Sig.		1.000	0.055

ตารางที่ 11 วิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way Analysis) (N=64) ของวัสดุเพาะเมล็ดต่อจำนวนใบของผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊ค

สถิติ	จำนวนใบ	N	Subset for alpha = 0.05	
			1	2
Duncan	กากหม้อกรอง	64	0.9375	
	ไฮโดรชาร์	64		2.9063
	พีทมอส	64		2.9688
	Sig.		1.000	0.778

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 12 วิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way Analysis) (N=64) ของวัสดุเพาะเมล็ดต่อน้ำหนักผลผลิตสดของผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊ค

สถิติ	น้ำหนักผลผลิตสด	N	Subset for alpha = 0.05	
			1	2
Duncan	กากหม้อกรอง	64	0.0029	
	ไฮโดรชาร์	64		0.0159
	พีทมอส	64		0.0180
	Sig.		1.000	0.360

ตารางที่ 13 วิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way Analysis) (N=6) ของวัสดุเพาะเมล็ดต่อน้ำหนักผลผลิตแห้งของผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊ค

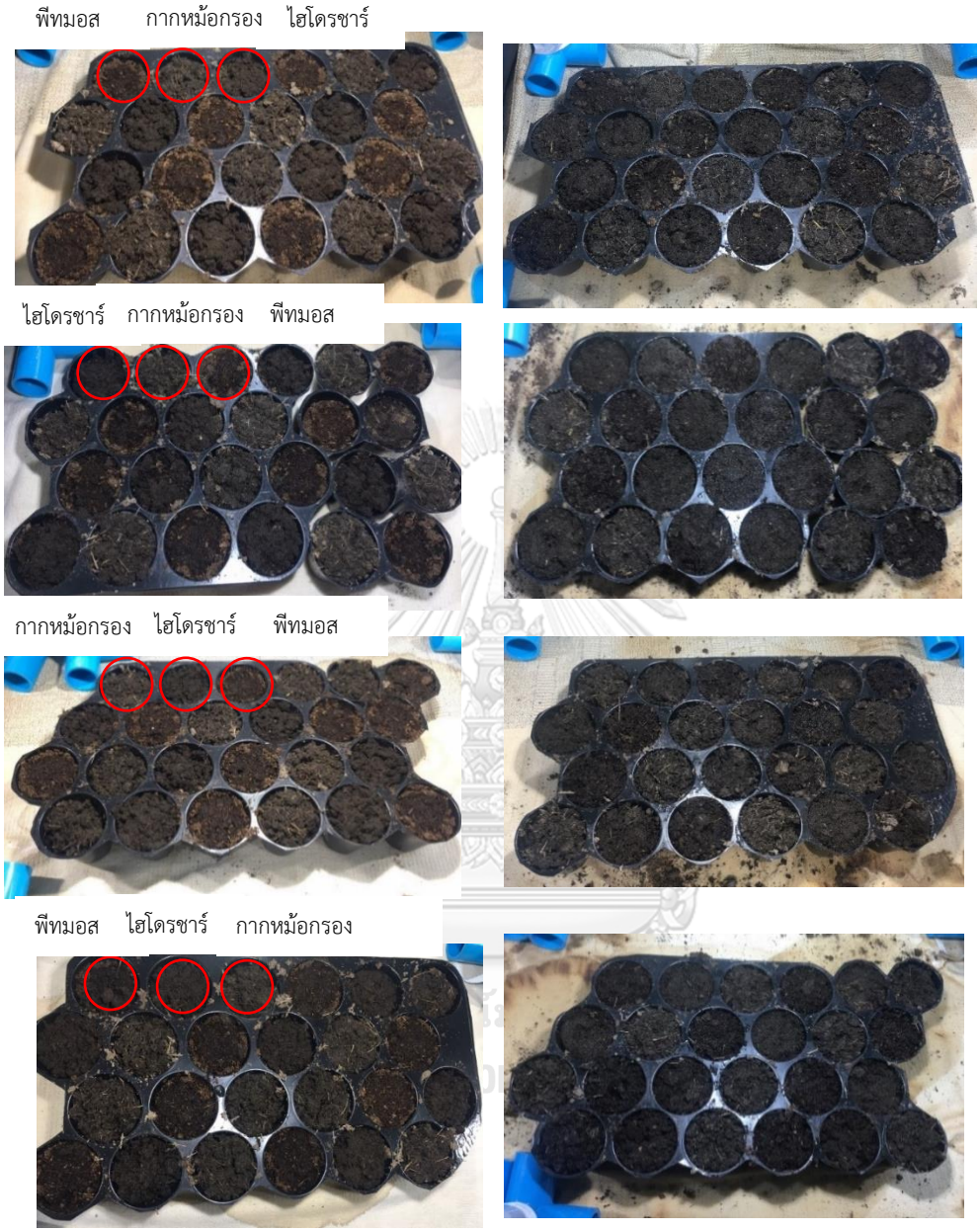
สถิติ	น้ำหนักผลผลิตแห้ง	N	Subset for alpha = 0.05	
			1	2
Duncan	กากหม้อกรอง	64	0.00028	
	ไฮโดรชาร์	64		0.0015
	พีทมอส	64		0.0016
	Sig.		1.000	0.296

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ง

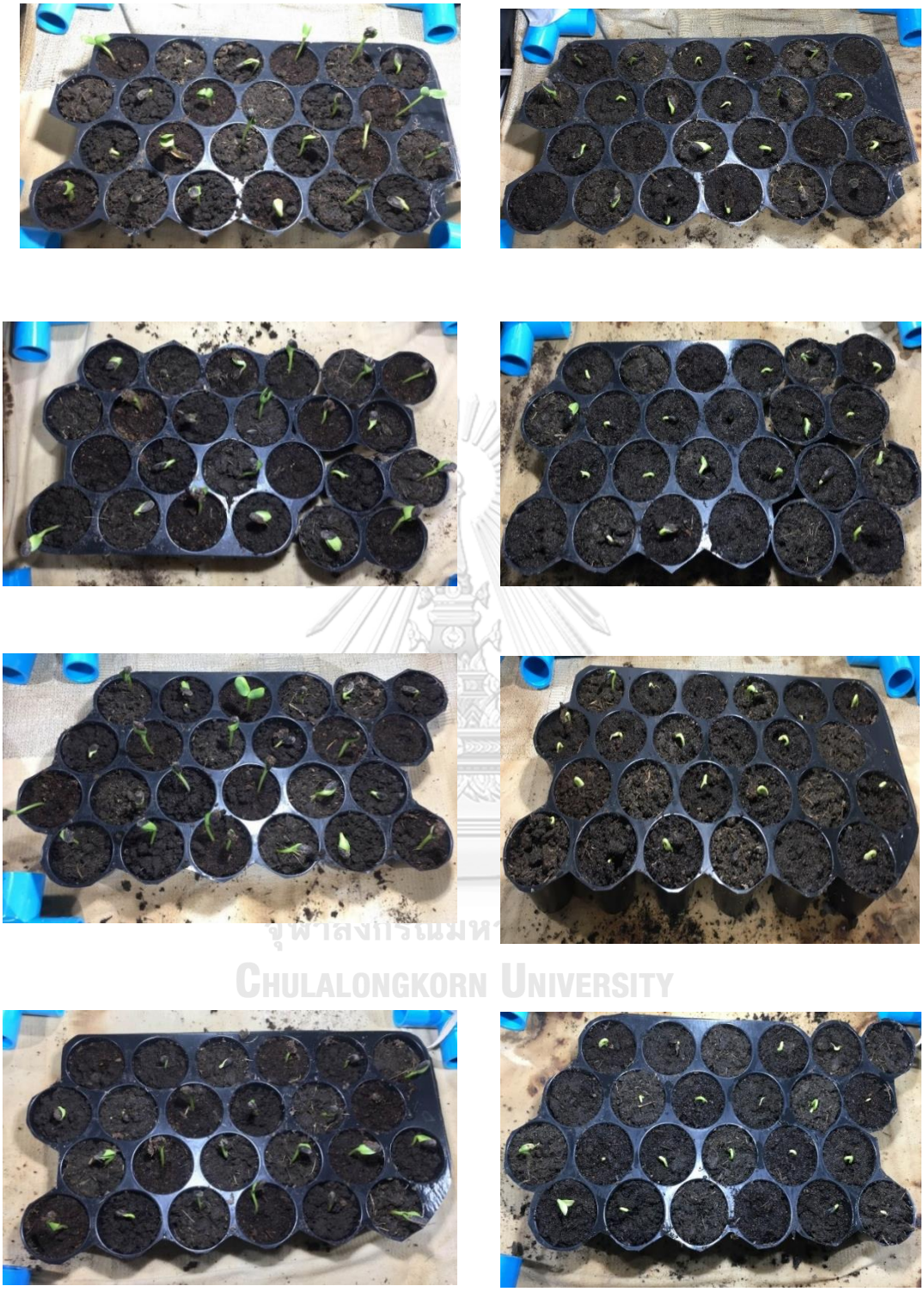
การเจริญเติบโตของพืช

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



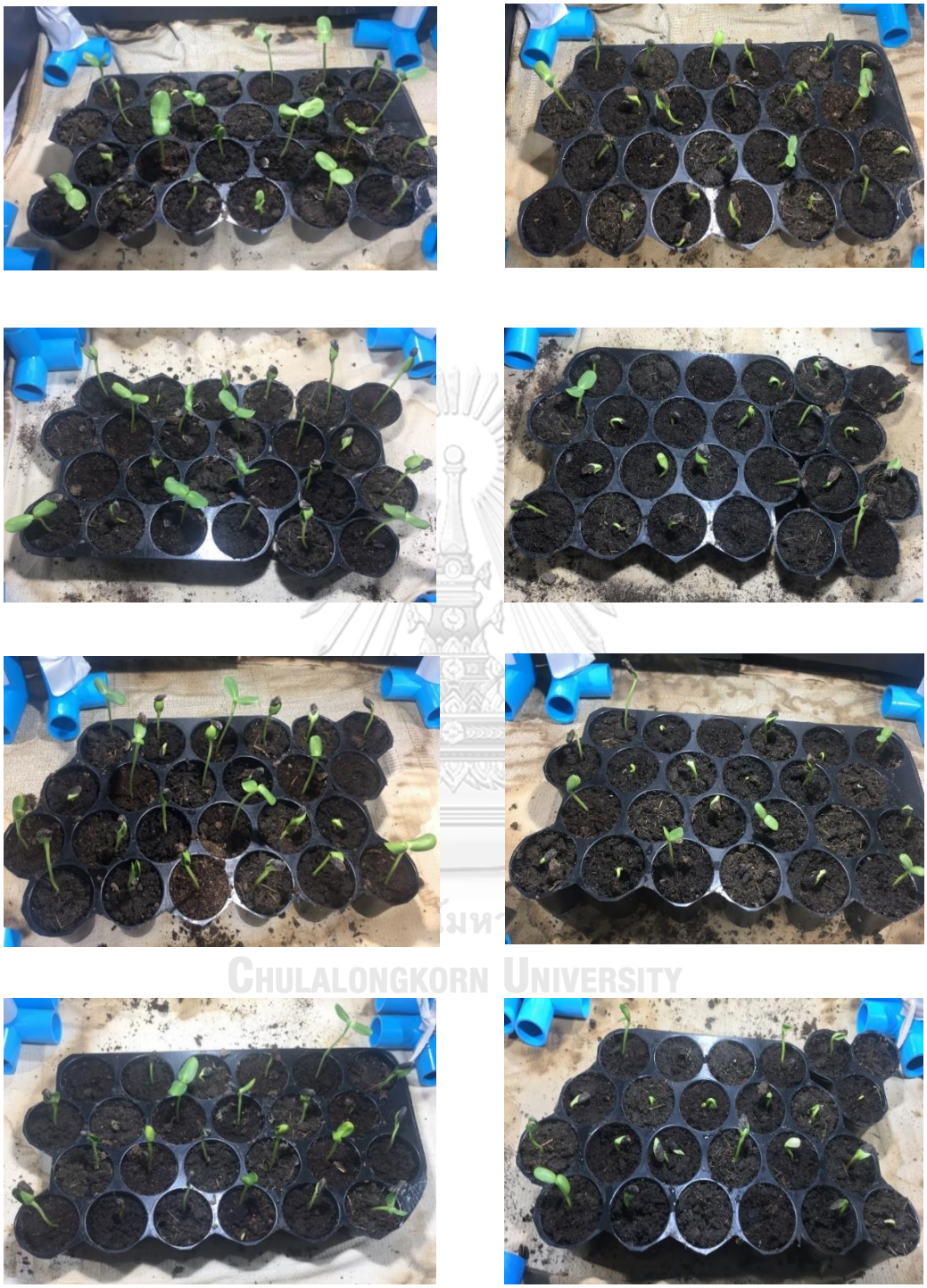
รูปที่ 1 วัดสุเพาะเมล็ดทั้ง 3 ชนิด (พีทมอส ไฮโดรชาร์และกากหม้อกรอง) ทดสอบปลูกกับต้นอ่อนทานตะวันในวันที่ 1

รูปที่ 2 วัดสุเพาะเมล็ดทั้ง 3 ชนิด (พีทมอส ไฮโดรชาร์และกากหม้อกรอง) ทดสอบปลูกกับต้นอ่อนทานตะวันในวันที่ 2



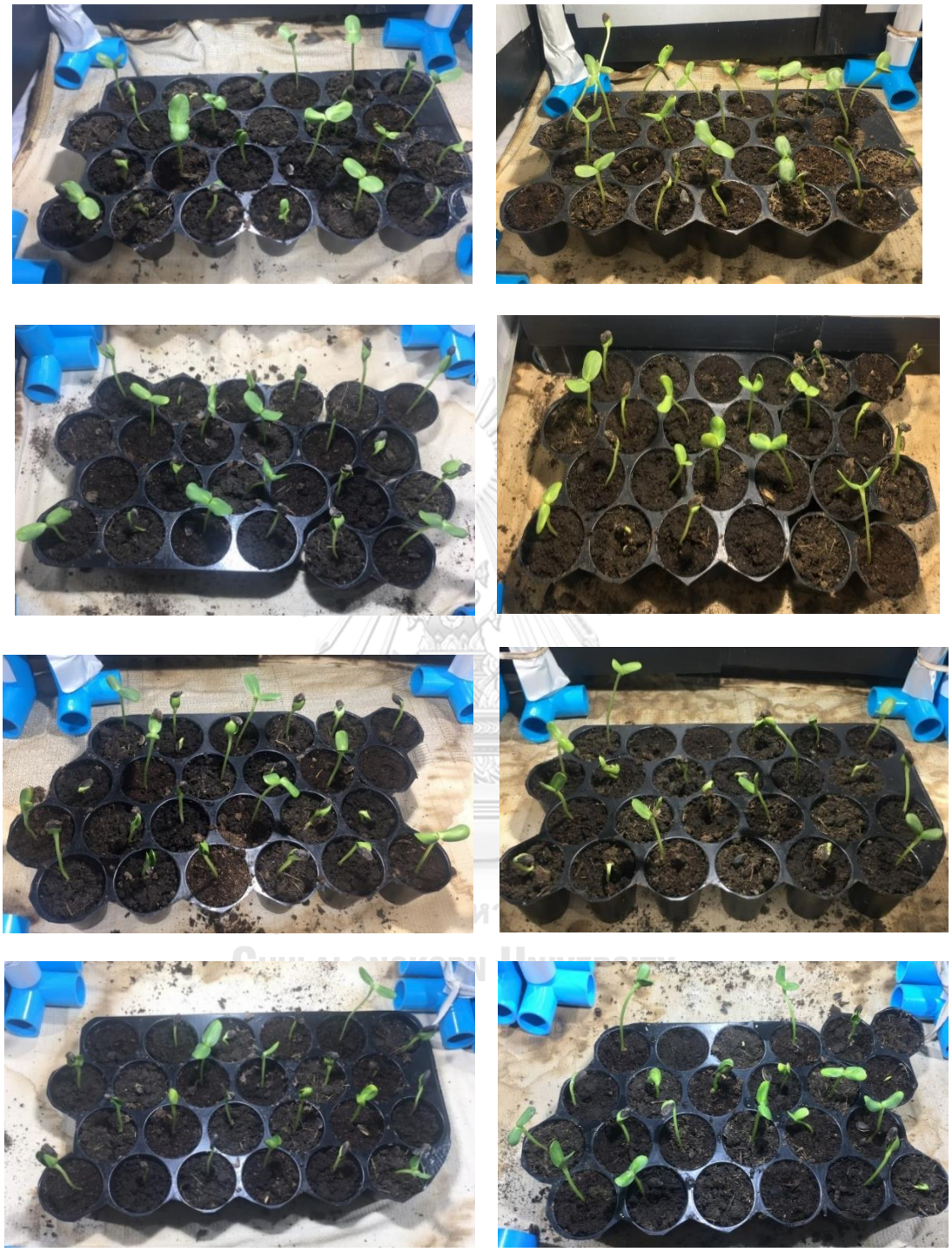
รูปที่ 3 วัดสุเพาะเมล็ดทั้ง 3 ชนิด (พีทมอส ไฮโดรชาร์และกากหม้อกรอง) ทดสอบปลูกกับต้นอ่อนทานตะวันในวันที่ 3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

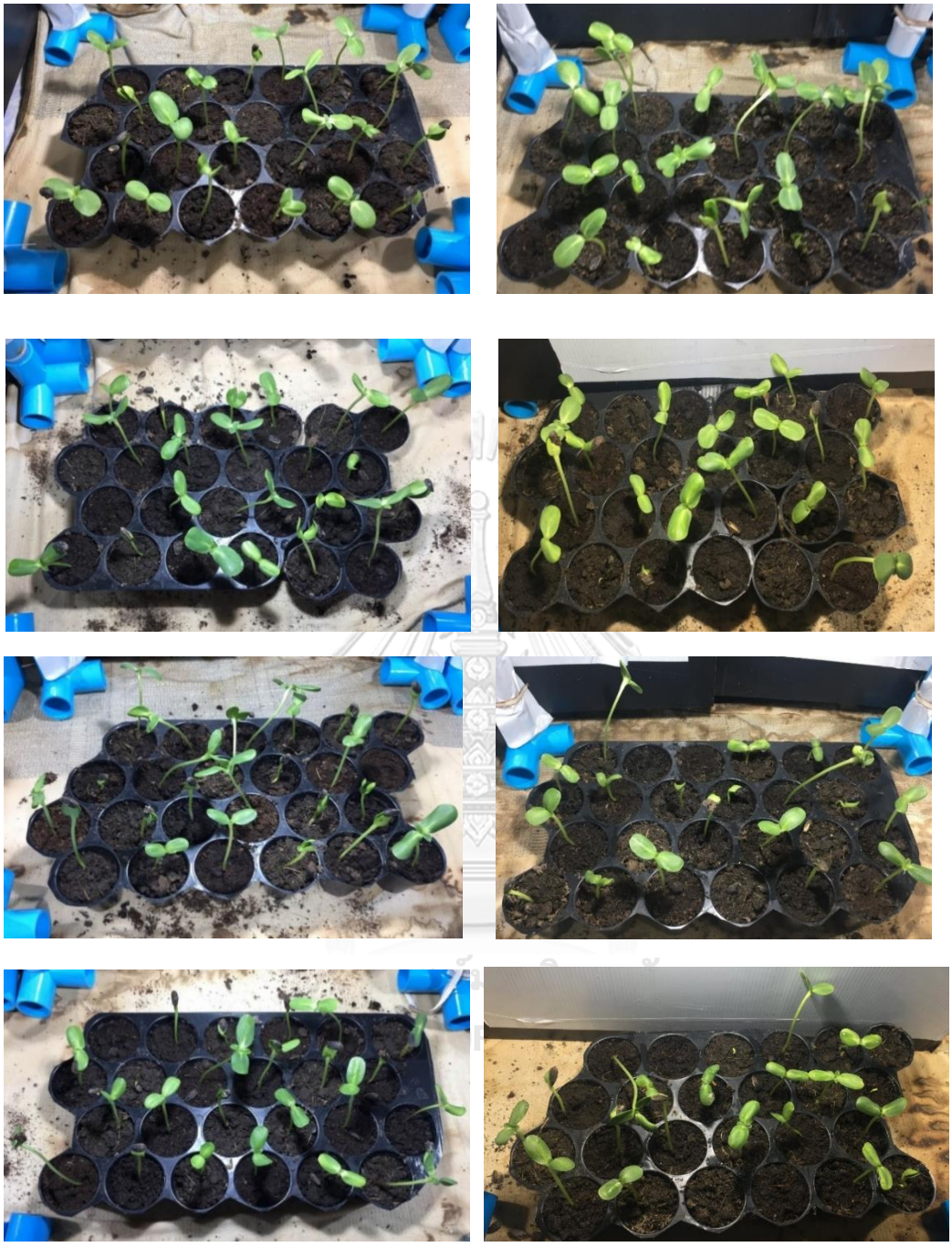


รูปที่ 4 วัดสุเพาะเมล็ดทั้ง 3 ชนิด (พีทมอส ไฮโดรชาร์และกากหม้อกรอง) ทดสอบปลูกกับต้นอ่อนทานตะวันในวันที่ 4

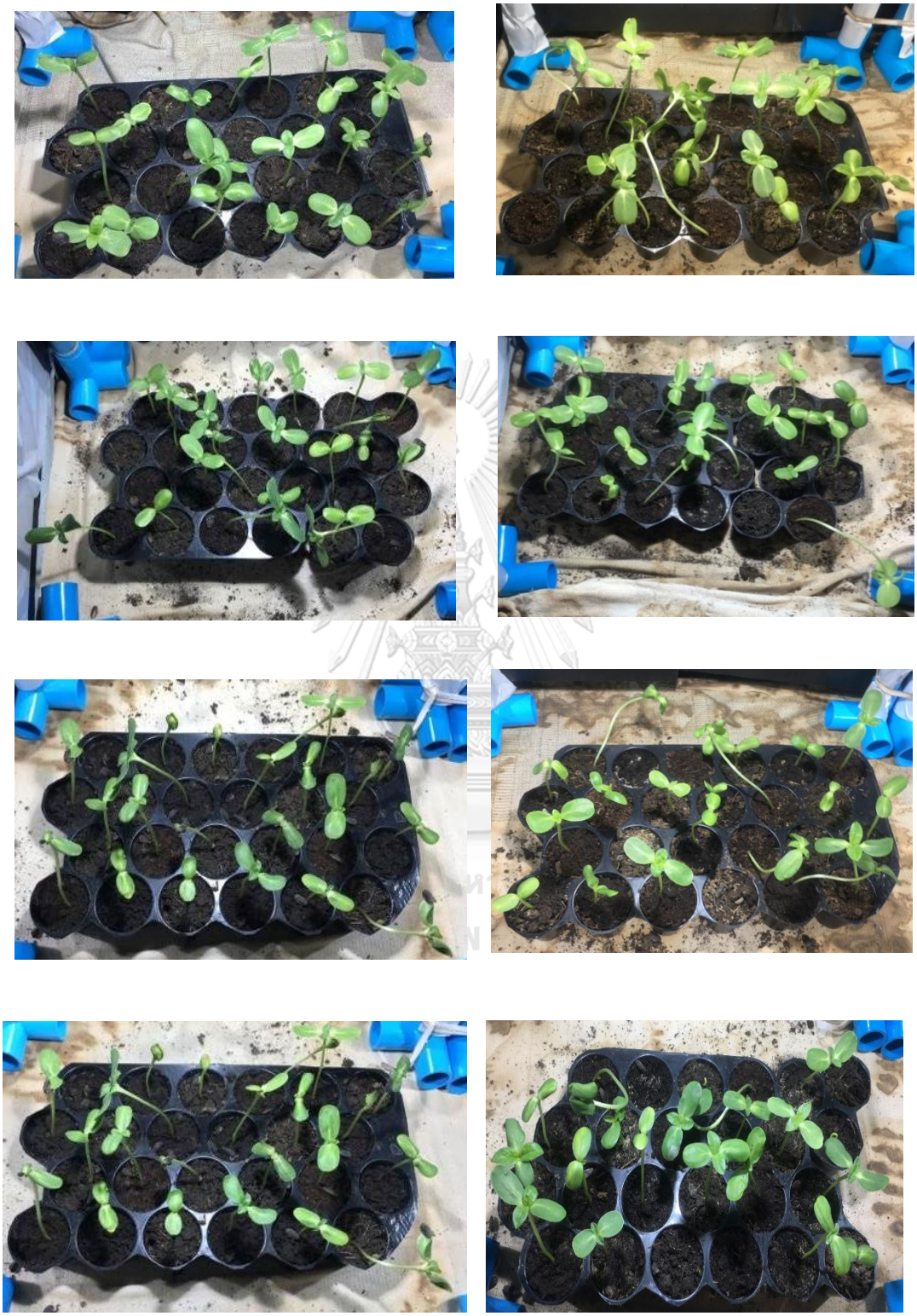
Chulalongkorn University



รูปที่ 5 วัดสุเพาะเมล็ดทั้ง 3 ชนิด (พีทมอส ไฮโดรชาร์และกากหม้อกรอง) ทดสอบปลูกกับต้นอ่อนทานตะวันในวันที่ 5



รูปที่ 6 วัดสุเพาะเมล็ดทั้ง 3 ชนิด (พีทมอส ไฮโดรชาร์และกากหม้อกรอง) ทดสอบปลูกกับต้นอ่อนทานตะวันในวันที่ 6



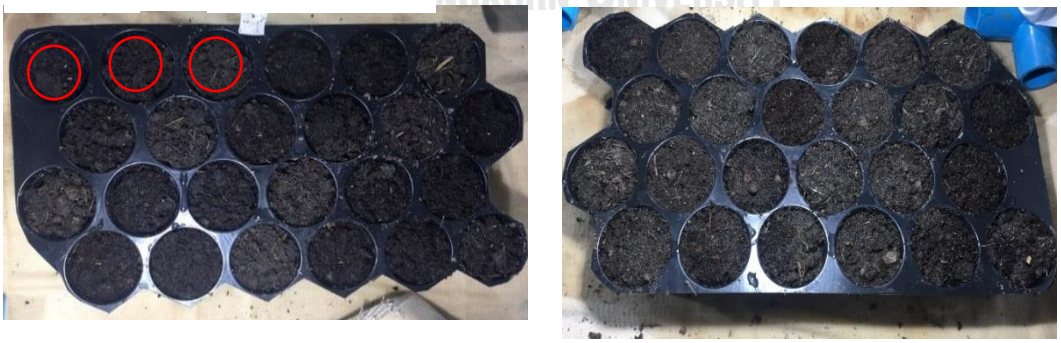
รูปที่ 7 วัดสุเพาะเมล็ดทั้ง 3 ชนิด (พีทมอส ไฮโดรชาร์และกากหม้อกรอง) ทดสอบปลูกกับต้นอ่อนทานตะวันในวันที่ 7

พีทมอส กากหม้อกรอง ไฮโดรชาร์

ไฮโดรชาร์ กากหม้อกรอง พีทมอส

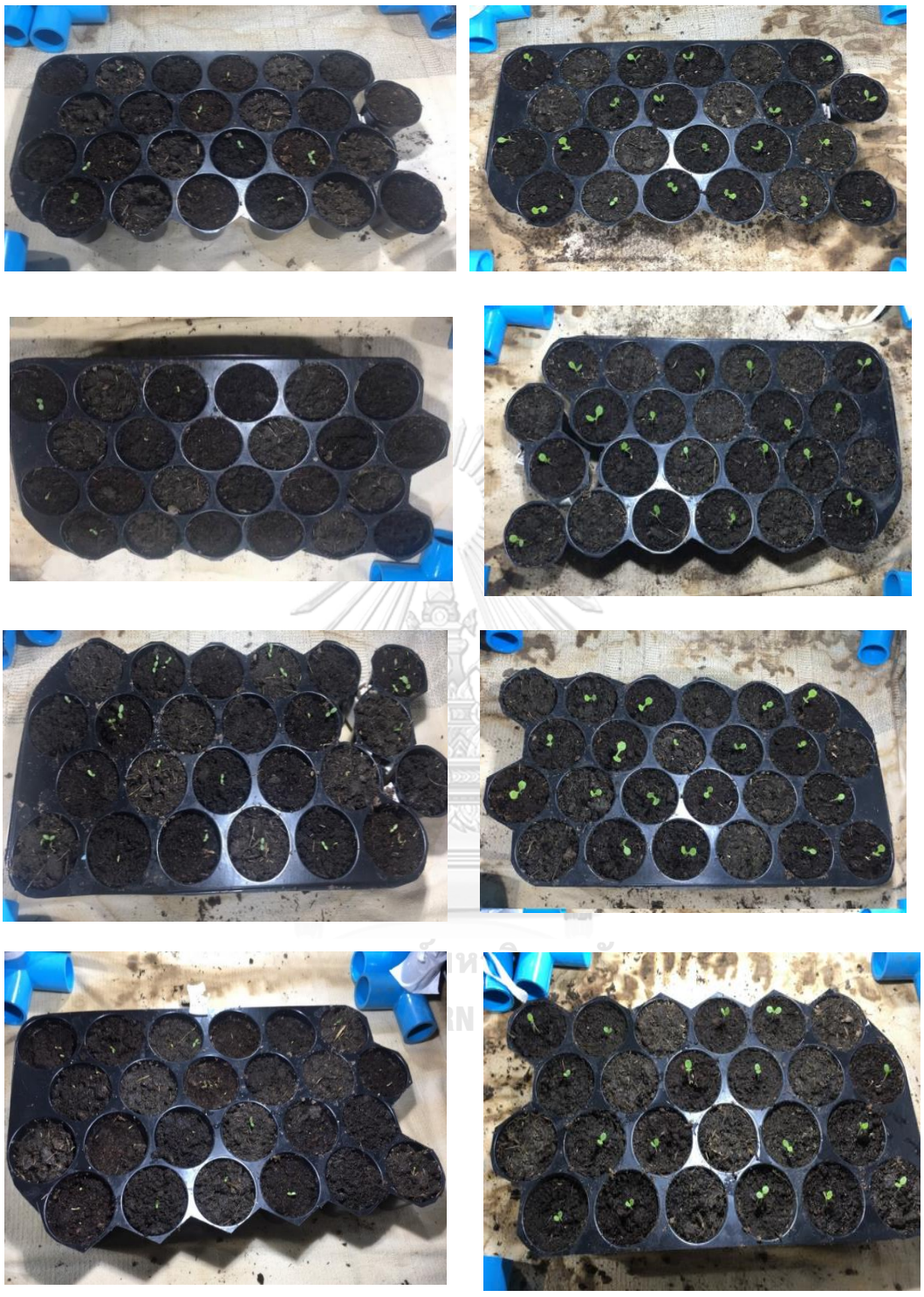
กากหม้อกรอง ไฮโดรชาร์ พีทมอส

พีทมอส ไฮโดรชาร์ กากหม้อกรอง

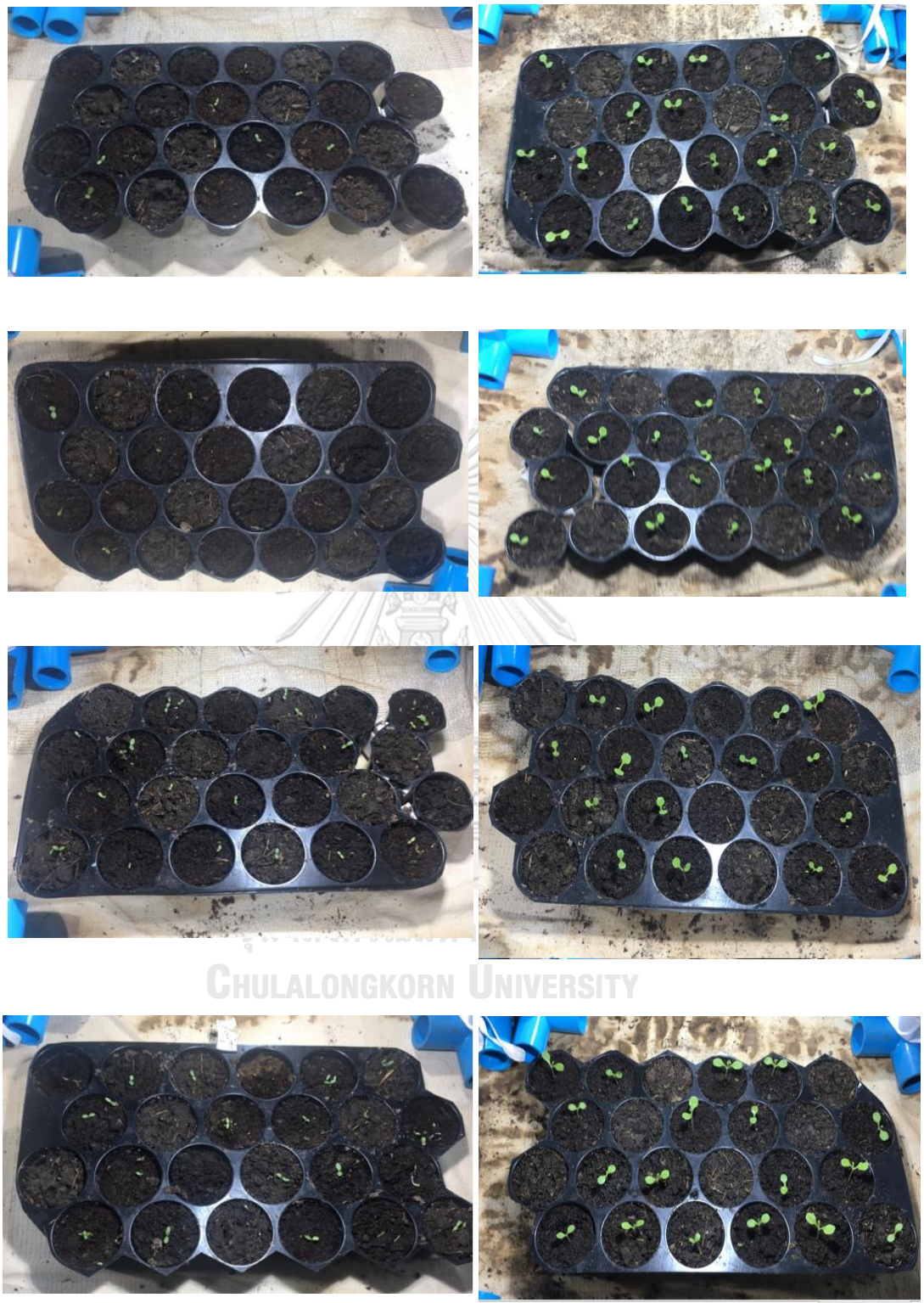


รูปที่ 8 วัดสุเพาะเมล็ดทั้ง 3 ชนิด (พีทมอส ไฮโดรชาร์และกากหม้อกรอง) ทดสอบปลูกกับผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊คในวันที่ 1

รูปที่ 9 วัดสุเพาะเมล็ดทั้ง 3 ชนิด (พีทมอส ไฮโดรชาร์และกากหม้อกรอง) ทดสอบปลูกกับผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊คในวันที่ 2

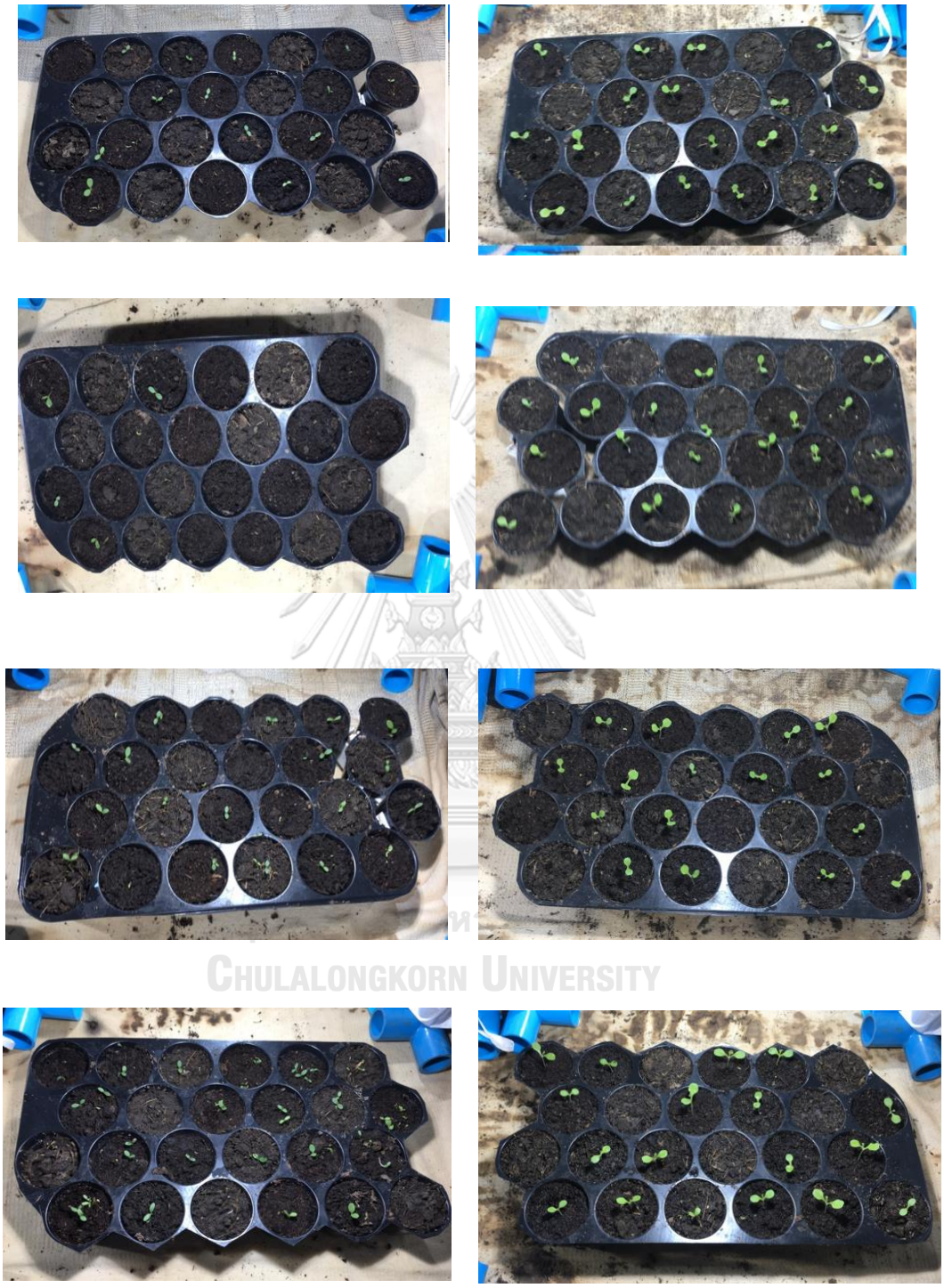


รูปที่ 10 วัดสุเพาะเมล็ดทั้ง 3 ชนิด (พีทมอส ไฮโดรชาร์และกากหม้อกรอง) ทดสอบปลูกกับผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊คในวันที่ 3



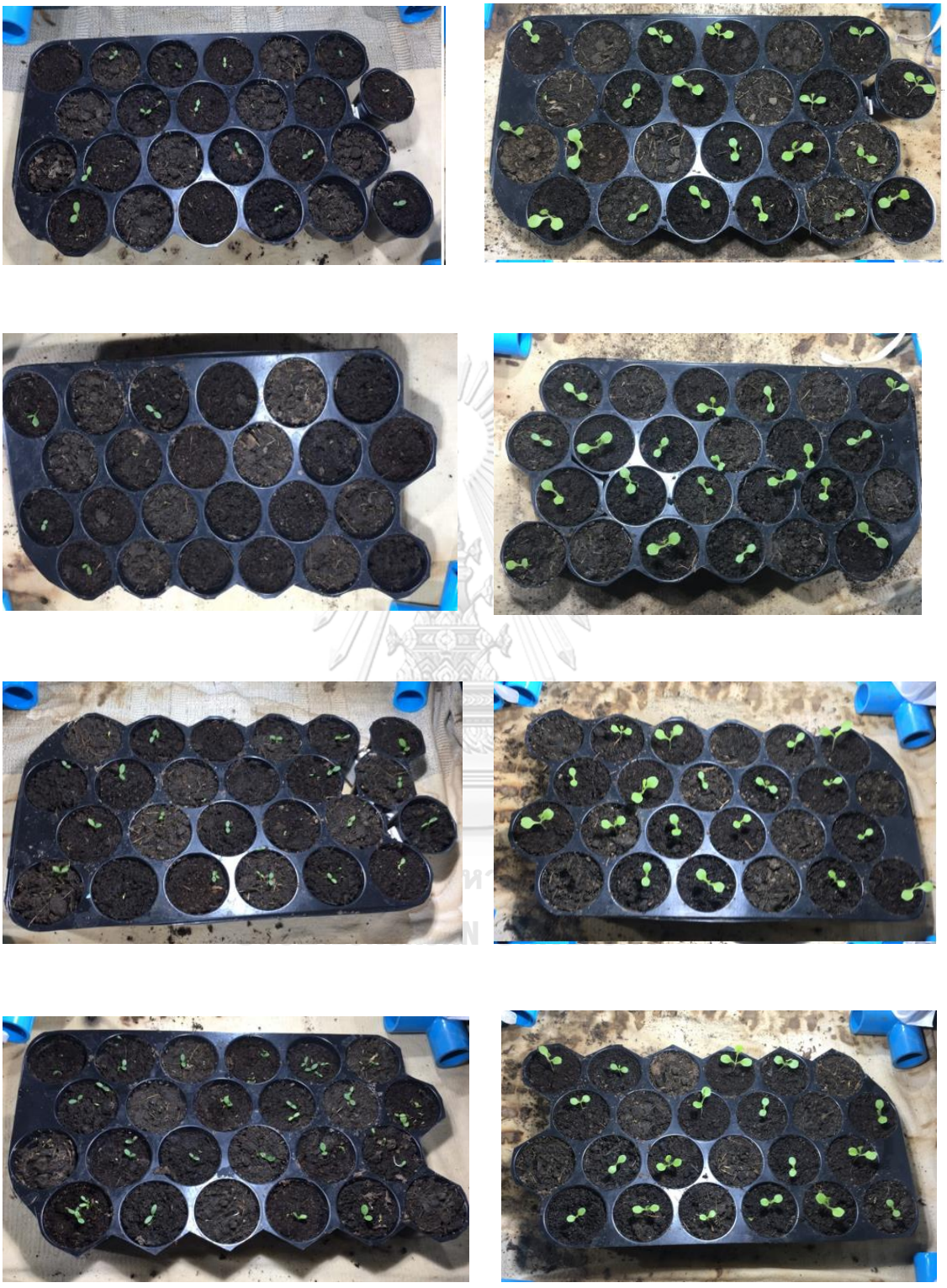
Chulalongkorn University

รูปที่ 11 วัดสุเพาะเมล็ดทั้ง 3 ชนิด (พีทมอส ไฮโดรชาร์และกากหม้อกรอง) ทดสอบปลูกกับผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊คในวันที่ 4

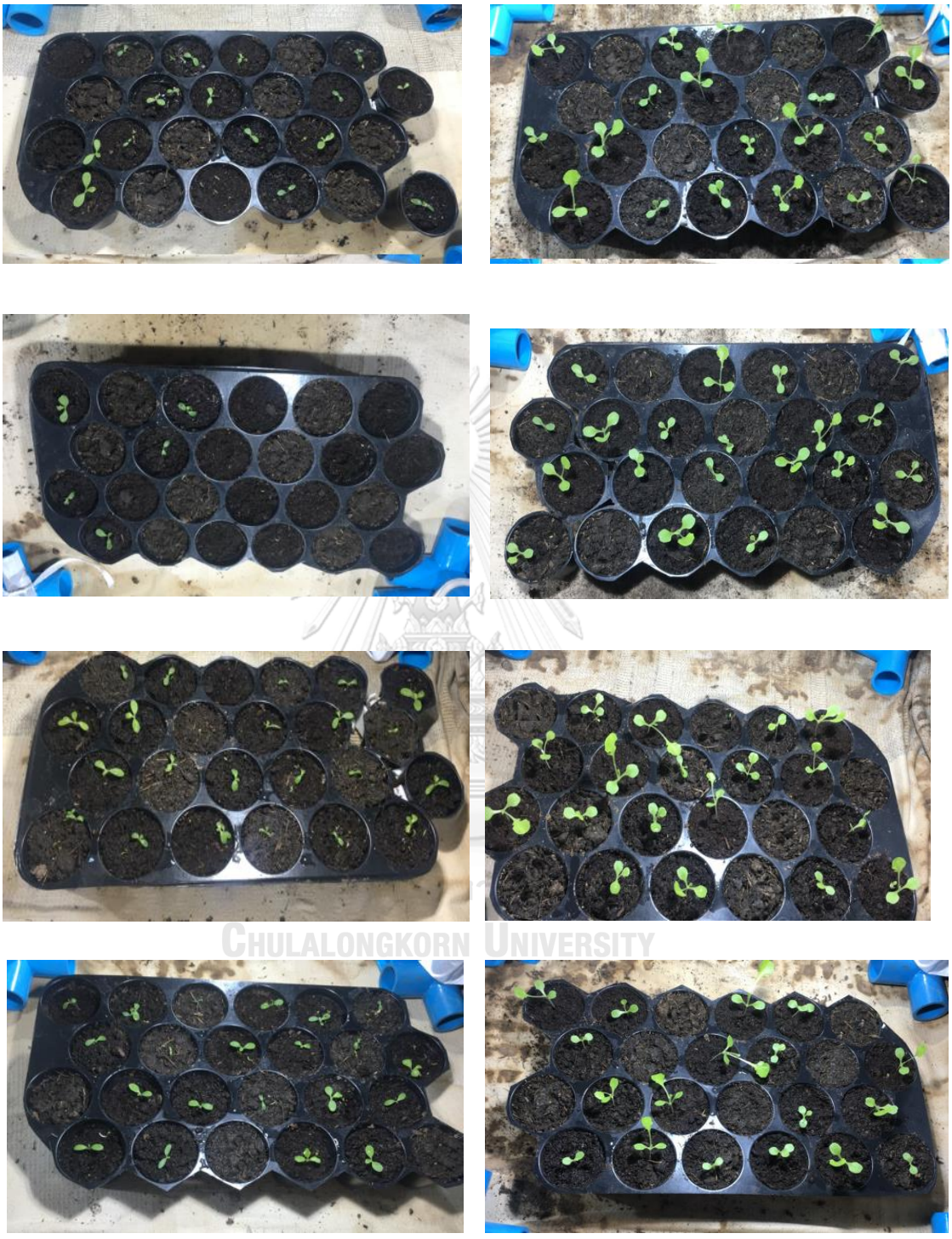


รูปที่ 12 วัดสุเพาะเมล็ดทั้ง 3 ชนิด (พีทมอส ไฮโดรชาร์และกากหม้อกรอง) ทดสอบปลูกกับผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊คในวันที่ 5

Chulalongkorn University



รูปที่ 13 วัดสุเพาะเมล็ดทั้ง 3 ชนิด (พีทมอส ไฮโดรชาร์และกากหม้อกรอง) ทดสอบปลูกกับผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊คในวันที่ 6



รูปที่ 14 วัดสุเพาะเมล็ดทั้ง 3 ชนิด (พีทมอส ไฮโดรชาร์และกากหม้อกรอง) ทดสอบปลูกกับผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊คในวันที่ 7

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ชนิตสิรี สุเมธี
วัน เดือน ปี เกิด	20 มีนาคม 2536
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลตากสินมหาราช
วุฒิการศึกษา	ปัจจุบันศึกษาระดับปริญญาโท หลักสูตรสหสาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขต พระราชวังสนามจันทร์ ปีการศึกษา 2558
ที่อยู่ปัจจุบัน	80 หมู่บ้านประสิทธิ์ ซอยภาวนา แขวงสามเสนนอก เขตห้วยขวาง กรุงเทพ 10310
ผลงานตีพิมพ์	การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต กำแพงแสน ครั้งที่ 16 เรื่อง "การประยุกต์ใช้กากหม้อกรองจากอุตสาหกรรมน้ำตาลเพื่อเป็นวัสดุเพาะเมล็ดคุณภาพสูงโดยผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอไนเซชัน" ณ วันที่ 4 ธันวาคม 2562

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University