



รายงานผลการวิจัย

เรื่อง

การศึกษาการนำผักตบชวามาผลิตเป็นพลังงานทดแทนแบบ 3 มิติ
ด้านพลังงาน ด้านเศรษฐศาสตร์ และด้านสิ่งแวดล้อมด้วยรอยเท้าคาร์บอน
**Study of Using Water Hyacinth to Renewable Energy in 3-Model of
Energy Economics and Environment by Carbon Footprint**

โดย

อัครินทร์ อินทนิเวศน์ และคณะ

มหาวิทยาลัยแม่โจ้

2560



รายงานผลการวิจัย

เรื่อง การศึกษาการนำผักตบชวามาผลิตเป็นพลังงานทดแทน แบบ 3 มิติ ด้านพลังงาน
ด้านเศรษฐศาสตร์ และด้านสิ่งแวดล้อมด้วยรอยเท้าคาร์บอน
Study of Using Water Hyacinth to Renewable Energy in 3-Model of Energy
Economics and Environment by Carbon Footprint

ได้รับการจัดสรรงบประมาณวิจัย ประจำปี 2559
จำนวน 270,000 บาท

หัวหน้าโครงการ นาย อัครินทร์ อินทนิเวศน์
ผู้ร่วมโครงการ นาย นัฐพร ไชยญาติ
นางสาว ณหทัย มหาเทพ
นางสาว รินรดา แซ่ว่าง

สารบัญ

	หน้า
สารบัญตาราง	ก
สารบัญรูปภาพ	ง
บทคัดย่อ.....	ณ
Abstract.....	ช
คำนำ.....	1
วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
ขอบเขตโครงการวิจัย	4
การตรวจเอกสาร	5
ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย	5
ผักตบชวา.....	5
การนำชีวมวลมาผลิตเป็นพลังงาน	5
รอยเท้าคาร์บอน (Carbon Footprint).....	7
วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ (Organic Rankine Cycle).....	9
ค่าต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วย (Levelized Electricity Cost, LEC).....	10
ต้นทุนพลังงานต่อปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ (Energy Costing per Carbon Dioxide Intensity)	11
กรอบแนวคิดของงานวิจัย	11
การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (Information) ที่เกี่ยวข้อง	12
สาระสำคัญจากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	16
อุปกรณ์และวิธีการวิจัย.....	17
ผลการวิจัย.....	18
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้านสิ่งแวดล้อมของรอยเท้าคาร์บอน สำหรับเทคโนโลยีการผลิตพลังงาน ทดแทนด้วยผักตบชวา	18

การนำผักตบชวามาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง	18
การนำเชื้อเพลิงอัดแท่งจากผักตบชวามาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงแก๊ส	21
การผลิตเชื้อเพลิงแก๊สจากเตาแบบไหลขึ้นและไหลลงโดยใช้ผักตบชวอัดแท่งเป็นเชื้อเพลิง	24
การผลิตเอทานอลจากน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการปรับสภาพผักตบชวาโดยใช้เชื้อราไตรโคเดอร์มา ฮาร์เซียนัม	29
การผลิตน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วของผักตบชวาในเครื่องปฏิกรณ์ แบบต่อเนื่อง	32
การผลิตแก๊สชีวภาพด้วยระบบหมักย่อยร่วมระหว่างผักตบชวากับมูลสุกร	35
การผลิตเชื้อเพลิงผักตบชวอบแห้ง	37
การเปรียบเทียบผลการศึกษาด้านสิ่งแวดล้อมและพลังงานของเทคโนโลยีการผลิตพลังงานทดแทน ด้วยผักตบชวา	42
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้านพลังงานและเศรษฐศาสตร์ของการผลิตไฟฟ้า โดยวัฏจักรแรงคิน สารอินทรีย์จากเชื้อเพลิงผักตบชวอบแห้ง	44
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้านพลังงาน ด้านเศรษฐศาสตร์ และด้านสิ่งแวดล้อมโดยวิธีรอยเท้า คาร์บอนของการผลิตไฟฟ้า โดยวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์จากเชื้อเพลิงผักตบชวอบแห้ง	49
แนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าโดยวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์จากเชื้อเพลิง ผักตบชวอบแห้ง	53
สรุปผลการวิจัย.....	55
เอกสารอ้างอิง.....	56
ภาคผนวก	58
ภาคผนวก ก. ผลการทดสอบคุณสมบัติของเชื้อเพลิงผักตบชวอบแห้ง.....	58
ภาคผนวก ข. ผลการทดสอบคุณสมบัติของเชื้อเพลิงผักตบชวอบแห้งและขยะโดยสัดส่วน 50:50 %wt	59
ภาคผนวก ค. ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซไอเสียของเชื้อเพลิงผักตบชวอบแห้ง	60
สัญลักษณ์และตัวย่อ	61
ลายเซ็นผู้วิจัย.....	62
ความเห็นของผู้บังคับบัญชาต้นสังกัด	62

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 พืชน้ำในกว๊านพะเยา [ศูนย์วิจัยและพัฒนาประมงน้ำจืด, 2557]	1
ตารางที่ 2 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของเชื้อเพลิงผักตบชวาอบแห้ง	39
ตารางที่ 3 เปรียบเทียบปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของกระบวนการผลิตพลังงานทดแทนชนิด ต่างๆ	42
ตารางที่ 4 การประเมินราคาต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วย	47
ตารางที่ 5 อัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซในการเผาเชื้อเพลิงผักตบชวาอบแห้ง	50
ตารางที่ 6 ปริมาณมวลทั้งหมดของก๊าซในการเผาเชื้อเพลิงผักตบชวาอบแห้ง	50
ตารางที่ 7 องค์ประกอบของก๊าซจากไอเสียการเผาเชื้อเพลิงผักตบชวาอบแห้ง	51
ตารางที่ 8 ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในการเผาเชื้อเพลิง	51
ตารางที่ 9 การประเมินราคาต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วย	53

สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 กระบวนการที่เหมาะสมกับความชื้นของชีวมวลและผลิตภัณฑ์ที่ได้	6
ภาพที่ 2 การประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ [ธำรงรัตน์, 2550]	7
ภาพที่ 3 ขั้นตอนการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ ตามหลัก ISO 14040 [Sate et al., 2011]	7
ภาพที่ 4 แผนผังการประเมินรอยเท้าคาร์บอน [นัฐพร, 2559]	8
ภาพที่ 5 แผนภาพการทำงานวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ [นัฐพร, 2559]	10
ภาพที่ 6 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแก๊ส [มหาวิทยาลัยแม่โจ้, 2553]	12
ภาพที่ 7 เตาผลิตแก๊สชนิดไหลลง (Downdraft gasification) [สุรพงษ์, 2545]	13
ภาพที่ 8 เตาผลิตแก๊สชนิดไหลขึ้น (Updraft gasification) [สุรพงษ์, 2545]	14
ภาพที่ 9 แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง [สุพจน์, 2552]	15
ภาพที่ 10 แผนภาพกระบวนการนำผักตบชวาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง	19
ภาพที่ 11 แบบจำลองด้านสิ่งแวดล้อมกระบวนการนำผักตบชวาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง	20
ภาพที่ 12 แผนภาพกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงแก๊ส	22
ภาพที่ 13 แบบจำลองด้านสิ่งแวดล้อมกระบวนการนำผักตบชวาผลิตเป็นเชื้อเพลิงแก๊ส	23
ภาพที่ 14 แผนภาพกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงแก๊สจากเตาแบบไหลขึ้นจากเชื้อเพลิงอัดแท่งผักตบชวา	25
ภาพที่ 15 แบบจำลองด้านสิ่งแวดล้อมการผลิตเชื้อเพลิงแก๊สจากเตาแบบไหลขึ้น	26
ภาพที่ 16 แผนภาพกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพแบบไหลลง จากเชื้อเพลิงอัดแท่งผักตบชวา	27
ภาพที่ 17 แบบจำลองด้านสิ่งแวดล้อมของการผลิตแก๊สชีวภาพแบบไหลลงจาก	28
ภาพที่ 18 แผนภาพกระบวนการผลิตเอทานอลจากผักตบชวา	30
ภาพที่ 19 แบบจำลองด้านสิ่งแวดล้อมของการผลิตเอทานอล	31
ภาพที่ 20 แผนภาพกระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วของผักตบชวา ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง	33
ภาพที่ 21 แบบจำลองด้านสิ่งแวดล้อมของการผลิตน้ำมันชีวภาพ	34
ภาพที่ 22 แผนภาพกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพด้วยระบบหมักย่อย แบบ CSTR ร่วมระหว่างผักตบชวา กับมูลสุกร	35
ภาพที่ 23 แบบจำลองด้านสิ่งแวดล้อมของกระบวนการการผลิตแก๊สชีวภาพด้วยระบบหมักย่อย	36
ภาพที่ 24 ผักตบชวาจากแหล่งน้ำและการชั่งน้ำหนักผักตบชวาสด	37
ภาพที่ 25 ผักตบชวาในห้องอบแห้งและการชั่งน้ำหนักผักตบชวาอบแห้ง	38

ภาพที่ 26 ค่ารังสีอาทิตย์ในมุมเอียงกับแนวระนาบพื้นดินประมาณ 18.78° ในเดือนมกราคม ของจังหวัด เชียงใหม่.....	38
ภาพที่ 27 การชั่งน้ำหนักเชื้อเพลิงฝักตบชาวอบแห้ง	39
ภาพที่ 28 แผนภาพกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลจากฝักตบชาว	40
ภาพที่ 29 แบบจำลองด้านสิ่งแวดล้อมของกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลจากฝักตบชาว	41
ภาพที่ 30 เปรียบเทียบปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของกระบวนการผลิตพลังงานทดแทนชนิด ต่างๆ.....	43
ภาพที่ 31 แผนภาพการทำงานของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์โดยใช้เชื้อเพลิงฝักตบชาวอบแห้ง.....	44
ภาพที่ 32 ต้นแบบวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ ของวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้.....	45
ภาพที่ 33 โรงเรือนพลาสติกของวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้	46
ภาพที่ 34 เตาเผาของวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้.....	46
ภาพที่ 35 การตรวจวัดก๊าซไอเสีย	49

**การศึกษาการนำผักตบชวามาผลิตเป็นพลังงานทดแทนแบบ 3 มิติ
ด้านพลังงาน ด้านเศรษฐศาสตร์ และด้านสิ่งแวดล้อมด้วยรอยเท้าคาร์บอน**

**Study of Using Water Hyacinth to Renewable Energy in
3-Model of Energy Economics and Environment by Carbon Footprint**

อักรินทร์ อินทนิเวศน์¹ นัฐพร ไชยญาติ¹ ณัททัย มหาเทพ¹ และรินรดา แซ่หว่าง¹
Akarin Intaniwet¹, Nattaporn Chaiyat¹, Nahatai Mahatep¹ and Rinrada Seawang¹

¹ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จ.เชียงใหม่ 50290

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษา เทคโนโลยีการผลิตพลังงานทดแทนจากผักตบชวาแบบ 3 มิติ ด้านพลังงาน ด้านเศรษฐศาสตร์ และด้านสิ่งแวดล้อมด้วยรอยเท้าคาร์บอน โดยในปัจจุบันมีเทคโนโลยีหลากหลายในการผลิตพลังงานจากผักตบชวา อันประกอบไปด้วย การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง การผลิตโปรตีนเคียวแก๊สจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน การผลิตเอทานอล การผลิตน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว การผลิตแก๊สชีวภาพ และการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลจากผักตบชวา ผลการศึกษาพบว่า การผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลจากผักตบชวาเป็นเทคโนโลยีที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด โดยมีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเท่ากับ 0.380 kg CO₂-eq ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกเทคนิคการผลิตเชื้อเพลิงผักตบชวาอบแห้งไปใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อนร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ 20 kW_e ซึ่งผลจากการศึกษาด้านพลังงานและเศรษฐศาสตร์ พบว่า ต้องใช้ปริมาณเชื้อเพลิงผักตบชวาอบแห้งประมาณ 270 kg/h และมีต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วย 2.43 Baht/kWh ซึ่งมีค่าน้อยกว่าอัตราการรับซื้อไฟฟ้าของรัฐบาลสำหรับพลังงานชีวมวลที่มีค่าเท่ากับ 5.34 Baht/kWh ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม พบว่า การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลจากผักตบชวาอบแห้งมีการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า 0.168 kg CO₂-eq/kg fuel และเมื่อนำไปคิดรวมกับการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอบแห้งผักตบชวา มีการปลดปล่อยรวมทั้งสิ้น 0.548 CO₂-eq/kg fuel ทำให้ระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ขนาด 20 kW_e มีการปลดปล่อยปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าประมาณ 148.62 kg CO₂-eq หรือคิดเป็น 7.432 kg CO₂-eq ต่อการผลิตไฟฟ้า 1 kWh และมีผลการวิเคราะห์ในด้านพลังงาน เศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อม พบว่า ปริมาณต้นทุนพลังงานต่อปริมาณรอยเท้าคาร์บอนเท่ากับ 18.08 Baht-kg CO₂-eq/kWh²

คำสำคัญ: พลังงานทดแทน, ผักตบชวา, เทคโนโลยีด้านพลังงาน, รอยเท้าคาร์บอน, แบบจำลอง 3 มิติ

Abstract

This research studies technologies to transfer a Water Hyacinth to renewable energy in terms of energy, economics and environment by carbon footprint impacts (3E model). In the present, the several research works present the various techniques for producing energy, which 5 techniques of fuel briquette, producer gas from gasification processes, ethanol, bio-oil from pyrolysis process and biomass fuel were selected. It could be found that the last technique is the best environmental solution in term of carbon footprint, which releases greenhouse gages about 0.617 kg CO₂-eq. Thus in this work, biomass fuel from the Water Hyacinth is used to analyze the 3E model combined with a 20 kW_e organic Rankine cycle (ORC) unit. In the energy-economic impacts, it could be seen that the ORC system required the dried Water Hyacinth fuel at around 270 kg/h. The levelized electricity cost (LEC) was 2.43 Baht/kWh, which was lower than a Feed-in Tariff (FiT) for renewable energy of biomass energy at 5.34 Baht/kWh. In the environment impact, it could be seen that a carbon dioxide equivalent from combustion process of the dried Water Hyacinth fuel at 0.168 kg CO₂-eq/kg fuel. When the carbon dioxide equivalent from preparation process was included, the total carbon dioxide intensity was around 0.548 CO₂-eq/kg fuel. Thus, the 20 kW_e ORC system released the carbon dioxide intensity at 148.62 kg CO₂-eq or around 7.432 kg CO₂-eq/kWh. In the 3E model, it could be concluded that an energy costing per carbon dioxide intensity (ECCF) of the power generation unit was 18.08 Baht·kg CO₂-eq/kWh².

Keywords: Renewable Energy, Water Hyacinth, Energy Technology, Carbon Footprint, 3 E Model

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัย เรื่อง การศึกษาการนำผักตบชวามาผลิตเป็นพลังงานทดแทนแบบ 3 มิติ ด้านพลังงาน ด้านเศรษฐศาสตร์ และด้านสิ่งแวดล้อมด้วยรอยเท้าคาร์บอน (Study of Using Water Hyacinth to Renewable Energy in 3-Model of Energy Economics and Environment by Carbon Footprint) ได้สำเร็จลุล่วง โดยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย จากสำนักวิจัยและส่งเสริมวิชาการการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ประจำปีงบประมาณ 2559 และขอขอบคุณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่สนับสนุนการดำเนินการวิจัยนี้จนเสร็จสิ้นสมบูรณ์

คณะผู้วิจัย

คำนำ

จากข้อมูลพืชน้ำในกว๊านพะเยา [ศูนย์วิจัยและพัฒนาประมงน้ำจืด, 2557] พบว่า ผักตบชวาเป็นพืชที่มีปริมาณค่อนข้างสูง คิดเป็น 75% ของพืชน้ำทั้งหมดที่พบในกว๊านพะเยา ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยผักตบชวามีการนำไปใช้ประโยชน์ในหลากหลายวิธี เช่น นำไปทำเครื่องจักสาน การเพาะเห็ดฟาง และทำปุ๋ยอินทรีย์ เป็นต้น แต่เนื่องด้วยผักตบชวาเป็นพืชที่มีการเจริญเติบโตค่อนข้างเร็ว ทำให้กลายเป็นปัญหาจากการเน่าและเกิดเป็นน้ำเสียภายในกว๊านพะเยาตามมา ด้วยปัญหาดังกล่าวทางคณะผู้วิจัย จึงได้เล็งเห็นความสำคัญและเป็นที่มาของโครงการวิจัย การนำผักตบชวามาผลิตเป็นพลังงานทดแทน แก้ปัญหาการกำจัดผักตบชวาในกว๊านพะเยา รวมทั้งเพิ่มรายได้ให้แก่ชาวบ้านในพื้นที่รอบกว๊านพะเยาอีกด้วย

ตารางที่ 1 พืชน้ำในกว๊านพะเยา [ศูนย์วิจัยและพัฒนาประมงน้ำจืด, 2557]

ลำดับที่	ชื่อไทย	ประเภท	ปริมาณและบริเวณที่พบ
1	ผักตบชวา	พืชลอยน้ำ	พบกระจายทั่วไป ประมาณ 20% ของพื้นที่ (2,000 ไร่) คิดเป็น 75% ของพืชน้ำทั้งหมด
2	จอกหูหนู	พืชลอยน้ำ ขนาดเล็ก	พบบริเวณน้ำตื้นและนิ่งปริมาณ 200 ไร่
3	ผักบุ้ง	พืชลอยน้ำ	พบกระจายริมฝั่ง พบปริมาณน้อย
4	กระเจ็บ	พืชลอยน้ำ	พบกระจายริมฝั่ง พบปริมาณน้อย
5	คิปลี่น้ำ	พืชลอยน้ำ	พบกระจายทั่วไป บริเวณน้ำตื้น เป็นสาเหตุทำให้เกิดการทับถมของตะกอน
6	แห่นแดง	พืชลอยน้ำ ขนาดเล็ก	พบกระจายริมฝั่ง ปริมาณน้อย
7	แห่นเป็ด	พืชลอยน้ำ ขนาดเล็ก	พบกระจายริมฝั่ง ปริมาณน้อย
8	จอก	พืชลอยน้ำ	พบกระจายริมฝั่ง ปริมาณน้อย
9	แพงพวยน้ำ	พืชไหลเหนือน้ำ	พบกระจายริมฝั่ง ปริมาณน้อย
10	บัวสาย	พืชใล่พื้นน้ำ	พบบริเวณสะพานขุนเดช ประมาณ 100 ไร่
11	บัวหลวง	พืชใล่พื้นน้ำ	บริเวณบ้านร่องไฮ เนื่องจากการทำสวนบัว

ลำดับที่	ชื่อไทย	ประเภท	ปริมาณและบริเวณที่พบ
12	สาหร่ายหางกระรอก	พืชใต้น้ำ	พบมากบริเวณน้ำตื้นความลึก 50-80 cm ประมาณ 200 ไร่ เป็นสาเหตุทำให้เกิดไข้แดงมาก
13	สาหร่ายพวงกะโศ	พืชใต้น้ำ	พบกระจายทั่วไป ปริมาณมาก บริเวณน้ำตื้น เป็นสาเหตุทำให้เกิดการทับถมของตะกอน
14	สาหร่ายนา	พืชใต้น้ำ	พบกระจายทั่วไป ปริมาณเล็กน้อย
15	เตา	พืชใต้น้ำ	พบปริมาณน้อย ปริมาณเล็กน้อย
16	สาหร่ายข้าวเหนียว	พืชใต้น้ำ	พบกระจายริมฝั่ง ปริมาณเล็กน้อย
17	สาหร่ายญี่ปุ่น	พืชใต้น้ำ	พบกระจายริมฝั่ง ปริมาณเล็กน้อย
18	กกคุ้มหู	พืชชายน้ำ	พบกระจายริมฝั่ง ปริมาณเล็กน้อย
19	หญ้าใบคม	พืชชายน้ำ	พบกระจายริมฝั่ง ปริมาณเล็กน้อย
20	หญ้าขน	พืชชายน้ำ	พบกระจายริมฝั่ง ปริมาณเล็กน้อย
21	ผักไผ่น้ำ	พืชชายน้ำ	พบกระจายริมฝั่ง ปริมาณเล็กน้อย
22	แฉม	พืชชายน้ำ	พบกระจายริมฝั่ง ปริมาณเล็กน้อย
23	หญ้าปล้อง	พืชชายน้ำ	พบกระจายริมฝั่ง ปริมาณเล็กน้อย
24	ไมยราบ	พืชชายน้ำ	พบกระจายริมฝั่ง ปริมาณเล็กน้อย
25	หญ้าแห้วหมู	พืชชายน้ำ	พบทั่วไปปะปนกับจอกหูหนู
26	ผักปราบช้าง	พืชชายน้ำ	พบกระจายริมฝั่ง ปริมาณเล็กน้อย
27	แว่นแก้ว	พืชชายน้ำ	พบกระจายริมฝั่ง ปริมาณเล็กน้อย
28	รูปฤาษี	พืชชายน้ำ	พบปริมาณน้อย ปริมาณเล็กน้อย
29	ผักนึ่งรุ่ม หรือ ผักนึ่งปลิง	พืชชายน้ำ	พบกระจายริมฝั่ง ปริมาณเล็กน้อย
30	หญ้าไซ	พืชชายน้ำ	พบกระจายริมฝั่ง ปริมาณเล็กน้อย
31	กกขนาก	พืชชายน้ำ	พบกระจายริมฝั่ง ปริมาณเล็กน้อย
32	บอน	พืชชายน้ำ	พบกระจายริมฝั่ง ปริมาณเล็กน้อย
33	ผักเป็ดน้ำ	พืชชายน้ำ	พบกระจายริมฝั่ง ปริมาณเล็กน้อย

แนวทางการผลิตพลังงานทดแทนจากผักตบชวา มีการศึกษาในหลากหลายรูปแบบอย่างกว้างขวาง เช่น การนำมาผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง (Refuse Derived Fuel, RDF) การผลิตน้ำมันชีวภาพจาก

กระบวนการไพโรไลซิส การนำผักตบชวามาหมักด้วยยีสต์เพื่อผลิตเอทานอล และการผลิตแก๊สชีวภาพ จากผักตบชวาร่วมกับมูลสุกร เป็นต้น

จากงานวิจัยต่างๆ ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น จะเห็นว่าการนำผักตบชวามาผลิตเป็นพลังงานทดแทนนั้นมีหลากหลายวิธี ซึ่งแต่ละเทคโนโลยีด้านพลังงานจะมีกระบวนการที่แตกต่างกันไปเพื่อผลิตพลังงานทดแทน แต่ยังไม่มียานวิจัยใดที่นำเสนอความเหมาะสมด้านพลังงาน ความคุ้มค่าการลงทุนด้านเศรษฐศาสตร์ของแต่ละเทคโนโลยี รวมไปถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดการกระบวนการผลิต อนึ่ง “การผลิตพลังงานทดแทนได้นั้น ไม่ได้หมายรวมถึงการผลิตที่เหมาะสม” บางครั้งการผลิตพลังงานทดแทนอาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าการใช้พลังงานฟอสซิล รวมถึงอาจมีค่าใช้จ่ายในการผลิตที่มากกว่าอีกด้วย จากเหตุผลดังกล่าวจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ ที่ต้องการศึกษาและวิเคราะห์เทคโนโลยีการนำผักตบชวามาผลิตเป็นพลังงานทดแทนแบบ 3 มิติ ด้านพลังงาน ด้านเศรษฐศาสตร์ และด้านสิ่งแวดล้อมด้วยรอยเท้าคาร์บอน

ทั้งนี้แนวทางการศึกษาของงานวิจัยนี้ ยังตอบสนองต่อนโยบายของรัฐบาลที่ส่งเสริมและสนับสนุนการใช้พลังงานหมุนเวียนและลดการใช้พลังงานฟอสซิล อีกทั้งสอดคล้องกับยุทธศาสตร์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ต้องการก้าวไปสู่ “Organic, Green and Eco University” ต่อไปในอนาคตอีกด้วย

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อหาแนวทางการผลิตพลังงานทดแทนจากผักตบชวาที่เหมาะสมต่อด้านพลังงาน ด้านสิ่งแวดล้อม และด้านเศรษฐศาสตร์
2. เพื่อหาแนวทางการจัดการผักตบชวาในกว๊านพะเยาและแหล่งน้ำจืดทั่วไป
3. เพื่อวิเคราะห์หารอยเท้าคาร์บอนของการผลิตพลังงานทดแทนจากผักตบชวา
4. เพื่อหาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตพลังงานทดแทนจากผักตบชวา

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้แนวทางในการจัดการด้านพลังงาน ด้านเศรษฐศาสตร์ และด้านสิ่งแวดล้อมโดยวิธีรอยเท้าคาร์บอน ในกระบวนการผลิตพลังงานทดแทนจากผักตบชวาที่เหมาะสม
2. ได้แบบจำลองแบบ 3 มิติ (3E Model) ด้านพลังงาน ด้านเศรษฐศาสตร์ และด้านสิ่งแวดล้อม ของกระบวนการผลิตพลังงานทดแทนจากผักตบชวา
3. เผยแพร่ผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการ วารสาร และบทความทั่วไป เพื่อนำไปใช้ประโยชน์สำหรับผู้สนใจต่อไป
4. เกิดพระเกียรติพระอัจฉริยภาพของพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว โดยขยายผลงานวิจัยตามแนวพระราชดำรินงานด้านการอนุรักษ์พลังงานและส่งเสริมพลังงานทดแทน

ขอบเขตโครงการวิจัย

1. ชีวมวลที่ทำการศึกษาคือ ผักตบชวา
2. เทคโนโลยีการผลิตพลังงานทดแทนจากชีวมวลที่ทำการศึกษประกอบด้วย ถ่านอัดแท่ง การผลิตน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิส การผลิตเอทานอล การผลิตแก๊สชีวภาพ และการผลิตเชื้อเพลิงผักตบชวอบแห้ง
3. แหล่งน้ำจืดที่ทำการศึกษาคือ กว๊านพะเยา
4. ผลด้านสิ่งแวดล้อมใช้เทคนิค คือ รอยเท้าคาร์บอน (Carbon footprint)

การตรวจเอกสาร

ทฤษฎี สมมุติฐาน และกรอบแนวคิดของโครงการวิจัย

ผักตบชวา

ผักตบชวา (Water hyacinth) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Eichhornia Crassipes* (Mart.) Solm อยู่ในตระกูล Pontederiaceae เป็นพืชหลายฤดูที่มีอายุยืน (Perennial) อยู่ได้ทั้งในน้ำนิ่ง น้ำไหลลึก และน้ำตื้น ในกรณีที่เจริญเติบโตในน้ำลึก เช่น แม่น้ำ ผักตบชวาจะลอยอยู่อย่างอิสระ โดยมีทุ่นลอย (Floating structure) ซึ่งจะประกอบด้วยหัวรากลอย (Floating structure) และที่ฐานใบจะมีกระเปาะลอยภายในมีลักษณะเป็นรูปฟองน้ำ ลำต้นมีสีเขียว สูงประมาณ 5-10 cm แต่ถ้าอยู่ในดินโคลนจะสูงถึง 50 cm ผักตบชวามีการเจริญเติบโตแบบแตกกอ (Sympodial) ใบมีการจัดเรียงในลักษณะแบ่งเป็นรัศมีออกจากจุดเดียวกัน สำหรับการขยายพันธุ์มี 2 แบบคือ แบบอาศัยเพศโดยใช้ดอกและแบบที่ไม่อาศัยเพศโดยใช้หน่อ ซึ่งการแตกหน่อนั้นเป็นวิธีสำคัญในการเพิ่มจำนวนผักตบชวาอย่างรวดเร็ว โดยพบว่า ผักตบชวาเพียง 2 ต้น สามารถแตกหน่อได้ถึง 30 ต้นภายใน 23 วัน ผักตบชวามีคุณสมบัติในการดูดความชื้นในอากาศได้ดีและสามารถดูดซึมน้ำได้สูง ทำให้ในผักตบชวามีน้ำเฉลี่ยประมาณ 95% ประกอบด้วยน้ำในใบ 89% และในก้านใบ 96.7%

การนำชีวมวลมาผลิตเป็นพลังงาน

การนำชีวมวลมาผลิตเป็นพลังงาน ควรจะต้องมีการเลือกใช้วิธีที่มีประสิทธิภาพ และเหมาะสมกับชนิดของชีวมวล โดยอาศัยตัวแปรต่างๆ เช่น ความชื้นของชีวมวล นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงความต้องการหรือลักษณะเฉพาะในแต่ละท้องถิ่นๆ ดังแสดงในภาพที่ 1 ซึ่งการนำพลังงานออกมาจากชีวมวล สามารถทำได้หลายวิธี คือ

1. การเผาไหม้โดยตรง (Direct combustion) เมื่อนำชีวมวลมาเผา จะได้รับความร้อนออกมาตามค่าความร้อนของชนิดชีวมวล ความร้อนที่ได้จากการเผาสามารถนำไปใช้ในการผลิตไอน้ำที่มีอุณหภูมิและความดันสูง ไอน้ำนี้จะถูกนำไปขับเคลื่อนกังหันไอน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้าต่อไป ตัวอย่างชีวมวลประเภทนี้คือ เศษวัสดุทางการเกษตร และเศษไม้
2. การใช้ความร้อนสลายโมเลกุล (Thermochemical conversion) ซึ่งสามารถแบ่งตามกระบวนการได้หลายวิธี คือ
 - a. กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis)
 - b. กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) เป็นกระบวนการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งหรือชีวมวลให้เป็นแก๊สเชื้อเพลิง เรียกว่าแก๊สชีวภาพ (Biogas) มีองค์ประกอบของ

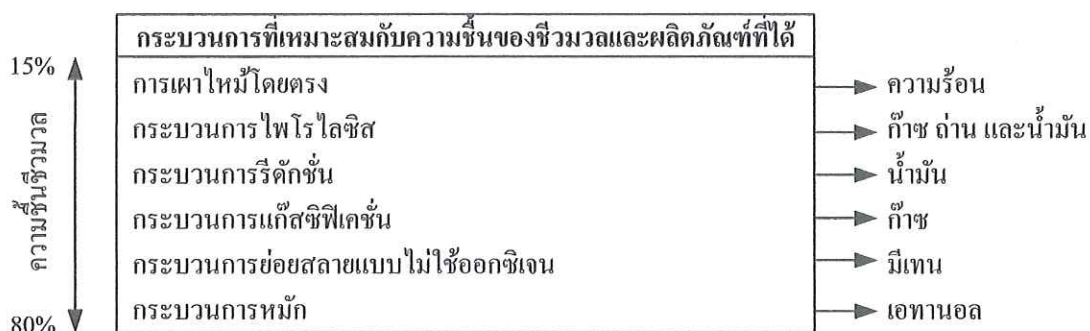
แก๊สมีเทน ไฮโดรเจน และ คาร์บอนมอนอกไซด์ สามารถนำไปใช้กับกังหันแก๊ส (Gas turbine)

c. กระบวนการลิกวิเฟกชัน (Liquefaction)

3. การใช้ชีวเคมีสลายโมเลกุล (Biochemical conversion) ซึ่งสามารถแบ่งตามกระบวนการได้หลายวิธี คือ

a. การหมัก (Yeast fermentation)

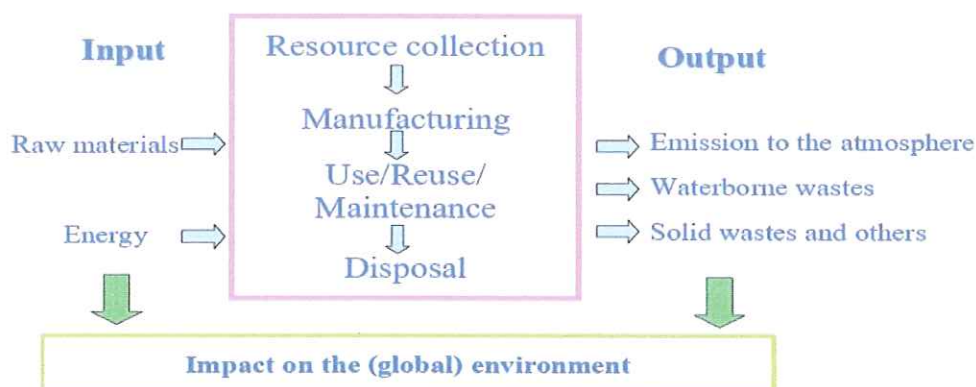
b. กระบวนการย่อยสลายโดยไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic digestion)



ภาพที่ 1 กระบวนการที่เหมาะสมกับความชื้นของชีวมวลและผลิตภัณฑ์ที่ได้

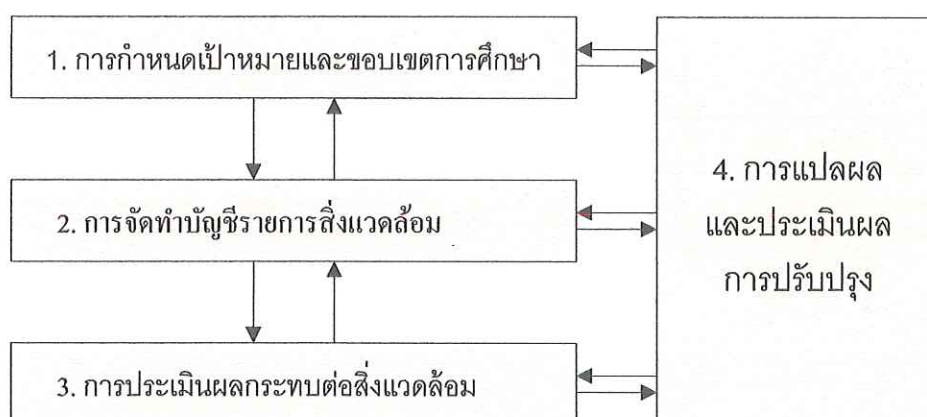
การประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ (Life Cycle Assessment: LCA)

การประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการหรือผลิตภัณฑ์ใดๆ เป็นวิธีการรวบรวมและประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ตลอดวัฏจักรชีวิตตั้งแต่เกิดจนตาย (From cradle to grave) เริ่มจากการใช้วัตถุดิบและพลังงานในกระบวนการผลิต การขนส่ง การเก็บรักษา การใช้ การทิ้ง และการจัดการของเสียที่เกิดจากกระบวนการ แสดงดังภาพที่ 2 โดยระบุถึงปริมาณพลังงานและวัสดุทั้งหมดที่ใช้ รวมทั้งของเสียทั้งหมดที่มีการปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมภายใต้ขอบเขตที่กำหนด นำข้อมูลที่ได้มาพิจารณาหาวิธีปรับปรุงผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการ เพื่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด โดยแนวความคิดดังกล่าวนี้จะสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการประเมินทั้งในด้านของปริมาณและรูปแบบการใช้พลังงาน (Life cycle energy analysis) การใช้วัสดุ (Life cycle material analysis) และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Life cycle impact assessment)



ภาพที่ 2 การประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ [ธารรัตน์, 2550]

วิธีการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์มีวิธีการดำเนินการหลายวิธี แต่ปัจจุบันวิธีหลักๆ เริ่มมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยนิยมใช้วิธีการและขั้นตอนการศึกษาตามกรอบของอนุกรมมาตรฐาน ISO 14040 ซึ่งแบ่งขั้นตอนการดำเนินงาน LCA ออกเป็น 4 ขั้นตอน [ธารรัตน์, 2550] แสดงดังภาพที่ 3 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

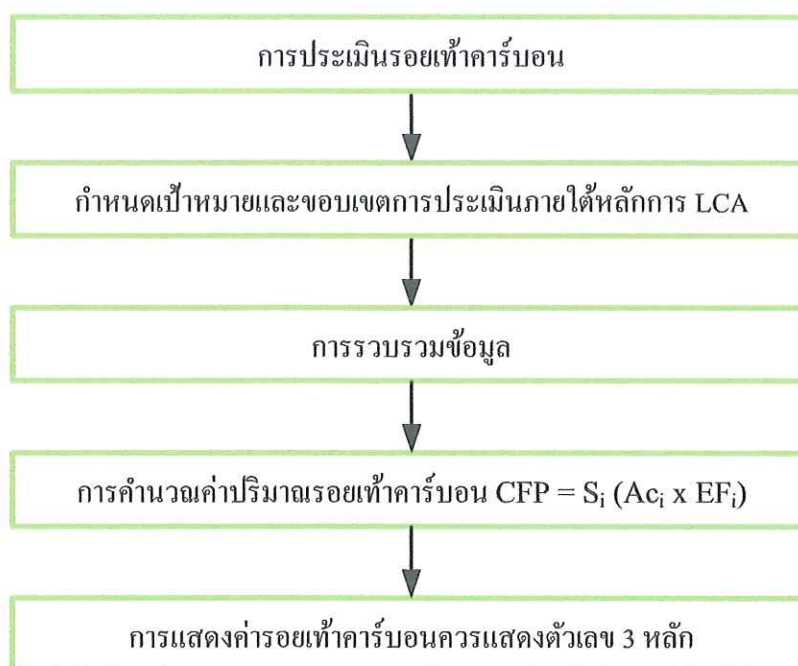


ภาพที่ 3 ขั้นตอนการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ ตามหลัก ISO 14040 [Sate et al., 2011]

รอยเท้าคาร์บอน (Carbon Footprint)

การประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกหรือรอยเท้าคาร์บอนของผลิตภัณฑ์ หมายถึง ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ปล่อยออกมาจากผลิตภัณฑ์แต่ละหน่วยตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ โดยใช้หลักการประเมินผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อมตลอดช่วงชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) ตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบ การขนส่ง การประกอบชิ้นส่วน การใช้งาน และการจัดการซากหลังใช้งาน โดยคำนวณออกมาในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า พร้อมทั้งมีการแสดงข้อมูลปริมาณรอยเท้าคาร์บอนไว้บนสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ต่างๆ [คณะกรรมการเทคนิคด้านรอยเท้าคาร์บอนของผลิตภัณฑ์, 2558]

การประเมินรอยเท้าคาร์บอนของผลิตภัณฑ์ จะดำเนินการ 4 ขั้นตอนตามหลักการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ การกำหนดเป้าหมายและขอบเขตการศึกษา การวิเคราะห์บัญชีรายการ การประเมินผลกระทบ และการแปลผล โดยต้องวิเคราะห์ตามขั้นตอนวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ คือ การได้มาซึ่งวัตถุดิบ กระบวนการผลิต การใช้งาน และการจัดการซากหลังจากการใช้งาน [คณะกรรมการเทคนิคด้านรอยเท้าคาร์บอนของผลิตภัณฑ์, 2558] ดังแสดงในภาพที่ 4

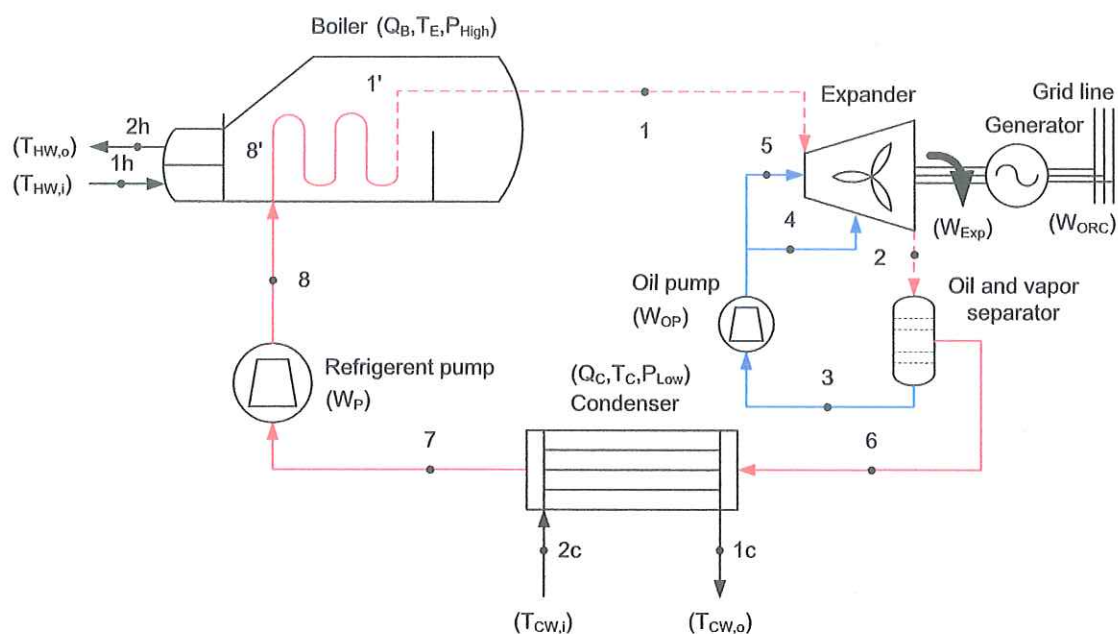


ภาพที่ 4 แผนผังการประเมินรอยเท้าคาร์บอน [นัฐพร, 2559]

วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ (Organic Rankine Cycle)

วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ หรือ Organic Rankine Cycle (ORC) เป็นระบบการทำงานที่ใช้หลักการของวัฏจักรแรงคิน (Rankin cycle) แต่ใช้สารทำงานเป็นสารในกลุ่มอินทรีย์ (Organic) ที่มีมวลโมเลกุลสูง สามารถเปลี่ยนเฟสจากของเหลวเป็นไอที่อุณหภูมิต่ำหรือมีจุดเดือดต่ำ (Boiling point) เมื่อเปรียบเทียบกับจุดเดือดของน้ำที่ใช้เป็นสารทำงานในระบบแรงคินโดยทั่วไป ทำให้วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์สามารถทำให้สารทำงานกลายสถานะจากของเหลวเป็นไอ เพื่อใช้ขับเคลื่อนกังหันให้สร้างสนามไฟฟ้าตัดกับสนามแม่เหล็กและผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาได้ โดยใช้แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ (น้อยกว่า 100 °C) [นัฐพร, 2558]

วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ดังแสดงในภาพที่ 5 มีหลักการทำงานดังนี้ คือ สารทำงานในสถานะของเหลว (จุดที่ 7) จะถูกส่งมารับความร้อนที่เครื่องระเหย (Boiler) (จุดที่ 8) โดยปั๊มสารทำงาน (Refrigerant pump) จากนั้นสารทำงานจะรับความร้อนจากน้ำร้อนภายใต้ความดันคงที่ (P_H) จนกระทั่งเข้าสู่สถานะของเหลวอิ่มตัวที่สภาวะ (จุดที่ 8') กลายเป็นไ้อิ่มตัวที่สภาวะ (จุดที่ 1') และเป็นไอร้อนยวดยิ่งที่สภาวะ (จุดที่ 1) ในที่สุด ไอร้อนยวดยิ่งจะเข้าสู่กังหัน (Turbine) ขยายตัวและขับเคลื่อนที่ต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า จากนั้นความดันและอุณหภูมิของไอของสารทำงานที่ทางออกของกังหันจะลดลง (จุดที่ 2) และอยู่ในสถานะของผสมระหว่างไอสารทำงานและน้ำมันหล่อลื่น ทั้งนี้ภายในกังหันจะมีการใช้น้ำมันหล่อลื่นฉีดเข้าสู่ภายในของกังหัน เพื่อลดความเสียหายระหว่างการสัมผัสกันของโลหะที่ใช้ทำกังหัน (จุดที่ 3-5) ซึ่งวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ได้นำหลักการกลับทางหมุนของเครื่องอัดไอ (Revert compressor) มาใช้ในกระบวนการเปลี่ยนพลังงานกลให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยเครื่องอัดไอที่ใช้ในระบบผลิตกระแสไฟฟ้าแบบ ORC เป็นแบบสกรู (Screw compressor) หรือเรียกว่า เครื่องขยายตัว (Expander) ซึ่งมีการใช้ระบบน้ำมันหล่อลื่นภายในเครื่องอัดไอยุ่ก่อนแล้วนั่นเอง จากนั้นไอสารทำงาน (จุดที่ 6) จะแยกตัวออกจากน้ำมันหล่อลื่นโดยตัวแยกของไหล (Oil and vapor separator) เข้าสู่เครื่องควบแน่น (Condenser) ภายใต้ความดันคงที่ (P_L) กลายเป็นของเหลวอิ่มตัว (จุดที่ 7) อีกครั้ง



ภาพที่ 5 แผนภาพการทำงานของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ [นัฐพร, 2559]

ค่าต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วย (Levelized Electricity Cost, LEC)

การหาค่าต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วย คือ การพิจารณามูลค่าการลงทุนเบื้องต้นทั้งหมดเปรียบเทียบกับมูลค่าผลตอบแทนที่ได้จากการลงทุนต่อปี โดยสมการดังต่อไปนี้ [นัฐพร, 2558]

$$LEC = \frac{Inv + \sum_{i=1}^n \frac{PEC}{(1+r)^i}}{\sum_{i=1}^n \frac{W_{ORC} t_{OP}}{(1+r)^i}}$$

สมการที่ 1

เมื่อ	n	อายุการใช้งานของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ (y)
	r	อัตราส่วนลด (%)
	Inv	ค่าใช้จ่ายการลงทุนของโครงการ ORC (Baht)
	PEC	ค่าใช้จ่ายในการผลิตพลังงานไฟฟ้าต่อปี (Baht/y)
	W_{ORC}	ปริมาณการผลิตพลังงานไฟฟ้าสุทธิของระบบ ORC (kW _e)
	t_{OP}	เวลาการทำงานต่อปี (h/y)

ต้นทุนพลังงานต่อปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ (Energy Costing per Carbon Dioxide Intensity)

ต้นทุนพลังงานต่อปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ (Energy Costing per Carbon Dioxide Intensity, ECCF) คือ ตัวแปรที่แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณพลังงานที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าและต้นทุนการผลิตไฟฟ้า ต่อผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยพิจารณาบนพื้นฐานของการปลดปล่อยปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังแสดงวิธีการคำนวณในสมการดังต่อไปนี้ [รัฐพร, 2559]

$$\text{ECCF} = \text{LEC}_{\text{Pd}} \text{ CFP}_{\text{Pd}} \quad \text{สมการที่ 2}$$

เมื่อ ECCF ค่าต้นทุนพลังงานต่อปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ (Baht·kg CO₂-eq/Unit²)

LEC_{Pd} ค่าต้นทุนต่อหน่วยการผลิตไฟฟ้า (Baht/Unit)

CFP_{Pd} ปริมาณรอยเท้าคาร์บอนจากระบวนการผลิตทั้งหมดต่อปริมาณผลผลิตสุทธิ (kg CO₂-eq/Unit)

กรอบแนวคิดของงานวิจัย

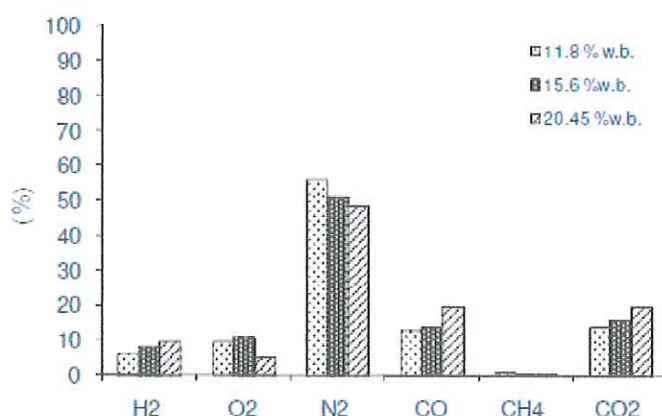
งานวิจัยนี้มีกรอบแนวคิด คือ การนำผักตบชวาซึ่งเป็นวัชพืชที่มีจำนวนมากและมีปัญหาในการจัดการในบริเวณพื้นที่ของกว๊านพะเยา จังหวัดพะเยา โดยทำการศึกษาข้อมูลพื้นฐาน วิเคราะห์ค่าความชื้น และองค์ประกอบของผักตบชวาค้างล่าว เพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลประกอบในการคัดเลือกเทคโนโลยีการผลิตพลังงานทดแทนจากชีวมวลที่ทำการศึกษา ประกอบด้วย ถ่านอัดแท่ง การผลิตเชื้อเพลิงแก๊ส การผลิตน้ำมันชีวภาพจากระบวนการไพโรไลซิส การผลิตเอทานอล การผลิตแก๊สชีวภาพ และการผลิตเชื้อเพลิงผักตบชวอบแห้ง ว่าเทคโนโลยีใดที่มีความเหมาะสมที่ทำการศึกษา โดยทำการคัดเลือกความเหมาะสมทั้งในด้านพลังงาน ด้านสิ่งแวดล้อม และด้านเศรษฐศาสตร์ เพื่อหาแนวทางการจัดการผักตบชวาในกว๊านพะเยาและแหล่งน้ำจืดทั่วไป รวมไปถึงการหาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตพลังงานทดแทนจากผักตบชวาอีกด้วย

การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (Information) ที่เกี่ยวข้อง

แนวทางการผลิตพลังงานทดแทนจากผักตบชวา เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่จะเป็นการนำวัชพืชหรือชีวมวลที่มีจำนวนมากและไม่ได้ถูกนำไปใช้ประโยชน์ นำกลับมาใช้ประโยชน์ โดยการนำชีวมวลเหล่านี้มาเพิ่มมูลค่าและทำประโยชน์ให้เพิ่มสูงขึ้น มีการศึกษาดังรายละเอียดดังต่อไปนี้

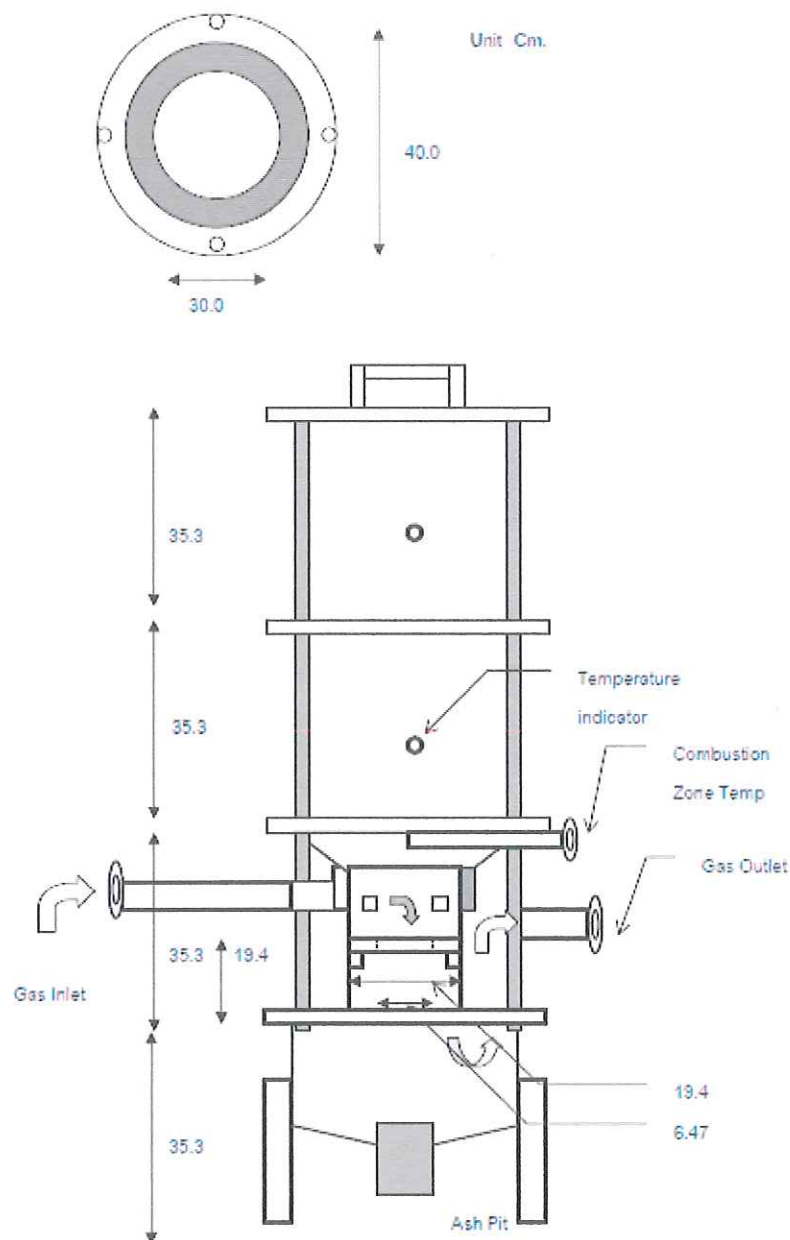
การนำผักตบชวามาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง (Refuse Derived Fuel, RDF) ที่ทำการศึกษาโดยมหาวิทยาลัยแม่โจ้ [มหาวิทยาลัยแม่โจ้, 2553] มีกระบวนการเริ่มจากการนำผักตบชวาที่เก็บได้มาสับละเอียดหรือนำเข้าเครื่องย่อยปุ๋ยพืชสด จากนั้นจึงนำผักตบชวาที่ย่อยแล้วไปตากแห้งในระยะเวลา 5-10 วัน เมื่อได้ผักตบชวาที่แห้งสนิทแล้ว ต่อไปจะเป็นขั้นตอนการผสมส่วนประกอบต่างๆ ในการผลิตอัดแท่ง โดยมีส่วนประกอบ คือ ผักตบชวา 10 kg แป้งมันสำปะหลัง 1 kg และน้ำ 1 kg ผสมส่วนประกอบทั้งหมดให้เข้ากัน จากนั้นนำผักตบชวาที่ผสมแล้วมาอัดลงในท่อพีวีซี แล้วจึงนำไปตากแห้งประมาณ 1-2 วัน หลังจากนั้นจะนำไปตากแห้ง เป็นเวลาประมาณ 1 วัน เพื่อให้ได้เป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งจากผักตบชวา

หลังจากที่ได้ทำการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากผักตบชวาแล้วมหาวิทยาลัยแม่โจ้ [มหาวิทยาลัยแม่โจ้, 2553] เสนอทางเลือกของการนำเชื้อเพลิงอัดแท่งจากผักตบชวามาแปรรูปเป็นพลังงานเชื้อเพลิงแก๊ส โดยนำมาทดสอบกับเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน ผลการศึกษาพบว่า สัดส่วนของผักตบชวาต่อแป้งมันที่เหมาะสมต่อการทำแท่งเชื้อเพลิงเท่ากับ 10:1 มีความหนาแน่นสูงสุด $1,143 \text{ kg/m}^3$ และให้ค่าความร้อน $12,586 \text{ kJ/kg}$ สำหรับการผลิตเชื้อเพลิงแก๊สจากผักตบชวามีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ 19.7% ไฮโดรเจน 10.01% มีเทน 0.37% ไนโตรเจน 49% คาร์บอนไดออกไซด์ 20% ออกซิเจน 9.78% ดังแสดงในภาพที่ 6 โดยมีค่าความร้อนของแก๊สชีวภาพ $3,583 \text{ kJ/m}^3$ ในส่วนของต้นทุนการผลิตผักตบชวาอัดแท่ง 2.48 Baht/kg และในกรณีไม่คิดค่าการนำเข้าน้ำจากฝักรและหีบน้ำ ต้นทุนการผลิตจะลดลงประมาณ 60%

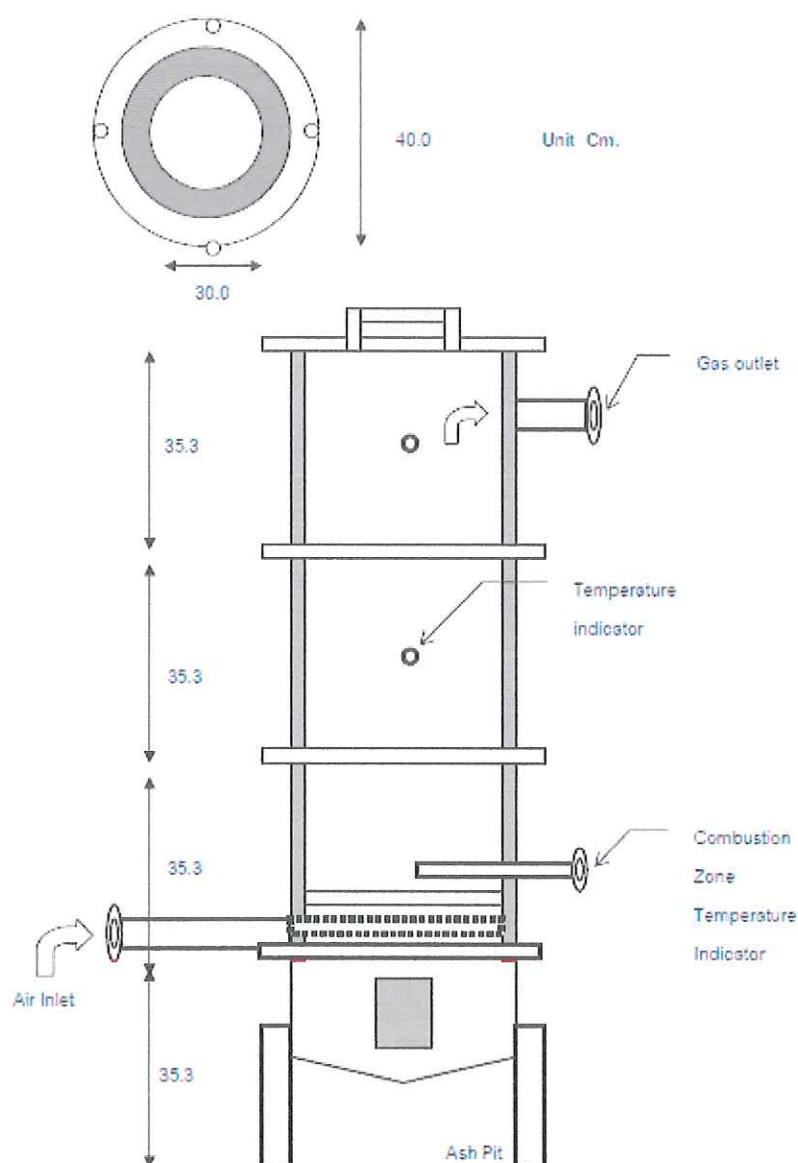


ภาพที่ 6 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแก๊ส [มหาวิทยาลัยแม่โจ้, 2553]

สุรพงษ์ (2545) ทำการศึกษาเปรียบเทียบการผลิตโปรดิวเซอร์แก๊สจากเตาผลิตแก๊สแบบไหลขึ้นและไหลลงโดยใช้ผักตบชวาอัดแท่งเป็นเชื้อเพลิง โดยใช้เตาแบบไหลขึ้นและไหลลง แสดงดังภาพที่ 7 และภาพที่ 8 ตามลำดับ และใช้ผักตบชวาอัดแท่งเป็นเชื้อเพลิง โดยทำการศึกษาที่อัตราการไหลของอากาศต่างๆ กัน



ภาพที่ 7 เตาผลิตแก๊สชนิดไหลลง (Downdraft gasification) [สุรพงษ์, 2545]

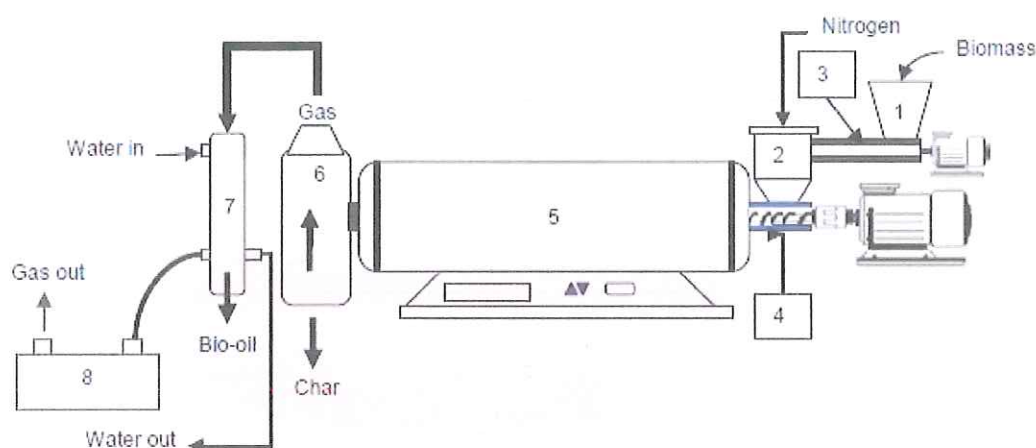


ภาพที่ 8 เตาผลิตแก๊สชนิดไหลขึ้น (Updraft gasification) [สุรพงษ์, 2545]

ผลการทดลองในการผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สเปรียบเทียบระหว่างจากเตาแบบไหลลงและไหลขึ้น พบว่าในการทดลองเตาผลิตแก๊สแบบไหลลงนี้มีระยะเวลาในการทดลองประมาณ 120 min โดยใช้ ผักตบชวาอัดแท่งเป็นเชื้อเพลิง 12 kg และได้ทำการหาอัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสมที่สุด โดยผลการวิเคราะห์แก๊ส พบว่า ที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ $3.42 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{sec}$ นั้น มีค่าความร้อนสูง (High Heating Value, HHV) เฉลี่ยเท่ากับ 2,135.76 kJ/m³ ส่วนในการทดลองผลิตแก๊สแบบไหลขึ้นนั้น ได้ทดลองโดยใช้เชื้อเพลิงชนิดเดียวกัน จำนวนเท่ากัน และระยะเวลาเท่ากัน ผลการทดลองพบว่าที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ $4.31 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{sec}$ มีค่าความร้อนสูงเฉลี่ยเท่ากับ 4,545.96 kJ/m³ ซึ่งเป็นผลมา

จากอัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสมทำให้ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาในชั้นต่างๆเหมาะสม โปรตีนเซลล์ที่ผลิตได้จึงมีองค์ประกอบของแก๊สที่สามารถเผาไหม้ได้สูง

สุพจน์ (2552) ทำการผลิตน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วของผักตบชวาในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ดังแสดงในภาพที่ 9 โดยศึกษาถึงตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละผลได้น้ำมันชีวภาพ องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของน้ำมันชีวภาพโดยตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ อุณหภูมิ ขนาดอนุภาค อัตราการป้อน อัตราการไหลของแก๊สตัวพา ซึ่งก่อนทำการทดลองได้ทำการวิเคราะห์สมบัติของผักตบชวา พบว่า ประกอบไปด้วยสารระเหย 60.10% ความชื้น 0.60% คาร์บอนคงตัว 20.30% และเถ้า 19.00% และจากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุแสดงให้เห็นว่าผักตบชวาแห้งจะประกอบไปด้วยคาร์บอน 23.59% ไฮโดรเจน 4.62% กำมะถัน 0.10% และออกซิเจน 52.11% และมีค่าความร้อน 13.10 MJ/kg



ภาพที่ 9 แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง [สุพจน์, 2552]

ผลลัพธ์ที่ได้การทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง พบว่าที่อุณหภูมิ 450 °C ขนาดอนุภาคที่ 425-600 μm อัตราการป้อนที่ 1.5 kg/h และอัตราการไหลของไนโตรเจน 200 mg/min เป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการไพโรไลซิสแบบเร็ว ผลผลิตหลักที่ได้แบ่งออกได้ 3 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นผลิตภัณฑ์เหลว 38.23% แก๊ส 43.36% และถ่านชาร์ 21.10% โดยส่วนที่เป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวนั้น สามารถแบ่งได้ 2 ส่วน คือ น้ำมันเบา 22.98% และน้ำมันหนัก 15.25% โดยค่าความร้อนของน้ำมันเบาและน้ำมันหนัก มีค่า 41.05 และ 31.00 MJ/kg ตามลำดับ คุณสมบัติทางเคมีของไบโออยล์ พบว่า มีปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจนในน้ำมันเบามากกว่าในน้ำมันหนัก และน้ำมันทั้งสองมีสภาพเป็นกรดและมีขี้ที่สามารละลายในอะซิโตนและไฮโดรฟลูอเรนได้ดี

มนิษา (2555) ทำการศึกษาการผลิตเอทานอลจากน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการปรับสภาพผักตบชวาโดยใช้เชื้อราไตรโคเดอร์มาสายพันธุ์เหียนัม โดยเริ่มศึกษาจากการนำตัวอย่างของผักตบชวาที่ผ่าน

กระบวนการปั่นและอบแห้งที่อุณหภูมิ 65 °C เป็นเวลา 24 h มาทำการปรับสภาพด้วยการนำไปต้มกับกรดซัลฟูริกเข้มข้นร้อยละ 0.25 ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 60 min จากนั้นทำการอบแห้งและปรับค่าพีเอชในช่วง 4.5-5.5 ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ พบว่า ที่ระยะเวลาหมัก 10 วัน อุณหภูมิ 30 °C และความเข้มข้นของสารละลายสปอร์ที่ 1.09×10^8 CFU/mL โดยใช้อัตราส่วนผักตบชวาแห้งต่อสารละลายสปอร์เท่ากับ 5 g ต่อ 12 mL สามารถผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ได้จากผักตบชวาเท่ากับ 12.99 ± 0.55 mg/g จากนั้นนำน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผ่านการปรับสภาพมาผลิตเอทานอล ในสภาวะไร้ออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 30 °C เป็นเวลา 72 h พบว่า สามารถผลิตเอทานอลความเข้มข้น 4.023 g/L คิดเป็น $0.414 \frac{\text{gEthanol}}{\text{gReduce sugar}}$ หรือ $0.0362 \frac{\text{gEthanol}}{\text{gWater hyacinth}}$

นิลวรรณ และอัจฉรา (2556) ได้ศึกษาถึงระบบการผลิตแก๊สชีวภาพด้วยระบบหมักร่วมระหว่างผักตบชวากับมูลสุกร โดยแบ่งการทดลองเป็นถึงหมัก 2 แบบ คือ ถึงหมักแบบราง (Channel digester) และ ถึงหมักแบบกวนต่อเนื่อง (Continuously Stirred Tank Reactor: CSTR) แบบละ 2 การทดลองคือ การทดลองที่ 1 การผลิตแก๊สชีวภาพจากผักตบชวาแช่น้ำ:มูลสุกร และการทดลองที่ 2 การผลิตแก๊สชีวภาพจากผักตบชวาแช่สารละลายต่าง 3%w/w:มูลสุกร ที่สัดส่วนความเข้มข้น 2%TS และระยะเวลากักเก็บ 5 วัน ในช่วงอุณหภูมิ Mesophilic โดยดูผลที่ได้จากการเกิดปริมาณแก๊สชีวภาพในแต่ละวันเป็นหลัก สามารถสรุปผลได้ว่า กระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพด้วยระบบหมักย่อยรวมระหว่างผักตบชวากับมูลสุกร จากการทดลองที่ 1 การผลิตแก๊สชีวภาพจากผักตบชวาแช่น้ำ:มูลสุกร สำหรับการหมักในบ่อ CSTR มีความเหมาะสมต่อกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพที่ดี เนื่องจากผลิตแก๊สชีวภาพได้มากกว่า การทดลองที่ 2 ที่ผลิตแก๊สชีวภาพจากผักตบชวาแช่สารละลายต่าง:มูลสุกร อีกทั้งมีประสิทธิภาพในการหมักย่อยทั้งปริมาณของแข็งและค่า Chemical Oxygen Demand (COD) ที่ดีกว่าตลอดการทดลอง

สาระสำคัญจากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยต่างๆ ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น จะเห็นว่ามีมีการนำผักตบชวามาผลิตเป็นพลังงานทดแทนหลากหลายวิธี ซึ่งแต่ละเทคโนโลยีด้านพลังงานจะมีกระบวนการที่แตกต่างกันไป แต่ยังไม่มียานวิจัยใดที่นำเสนอความเหมาะสมของเทคโนโลยี ดังนั้นงานวิจัยจึงต้องการวิเคราะห์หาเทคโนโลยีที่เหมาะสมต่อการผลิตพลังงานทดแทนในด้านพลังงาน ด้านเศรษฐศาสตร์ และด้านสิ่งแวดล้อม

อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

ขั้นตอนที่ 1: ศึกษาหลักการ ทฤษฎี และสาระสำคัญที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย เพื่อทำการทบทวนองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ ในการจัดทำแนวคิดและระเบียบวิธีขั้นตอนในการวิจัยทั้งหมดภายใต้หัวข้อ การศึกษาแบบจำลองด้านพลังงาน ด้านเศรษฐศาสตร์ และด้านสิ่งแวดล้อมโดยวิธีรอยเท้าคาร์บอน ในกระบวนการผลิตพลังงานทดแทนด้วยผักตบชวา

ขั้นตอนที่ 2: จัดทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้านพลังงานของกระบวนการผลิตพลังงานทดแทนด้วยผักตบชวา เพื่อวิเคราะห์ความเหมาะสมทางด้านพลังงานของแต่ละเทคโนโลยี

ขั้นตอนที่ 3: รวบรวมข้อมูลในขอบเขตงานวิจัยที่กำหนด โดยมีการจัดทำตามแนวทางการเก็บข้อมูลบัญชีรายการทางสิ่งแวดล้อมตามหลักการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) นำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์ค่ารอยเท้าคาร์บอน

ขั้นตอนที่ 4: คัดเลือกเทคโนโลยีที่เหมาะสมจากการประเมินวัฏจักรชีวิตของรอยเท้าคาร์บอน เพื่อนำมาวิเคราะห์ร่วมกับแบบจำลองด้านพลังงานและด้านเศรษฐศาสตร์

ขั้นตอนที่ 5: นำตัวอย่างผักตบชวามาผลิตพลังงานทดแทนจากเทคโนโลยีที่ได้คัดเลือก เพื่อหาแนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิต ที่เหมาะสมต่อการใช้งานของชุมชนมากขึ้น รวมทั้งหาแนวทางการลดพลังงานฟอสซิลของกระบวนการผลิต

ขั้นตอนที่ 6: จัดทำผลงานทางวิชาการเพื่อนำเสนอต่อการประชุมวิชาการและตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับชาติไม่น้อยกว่า 1 บทความ

ขั้นตอนที่ 7: จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์

ผลการวิจัย

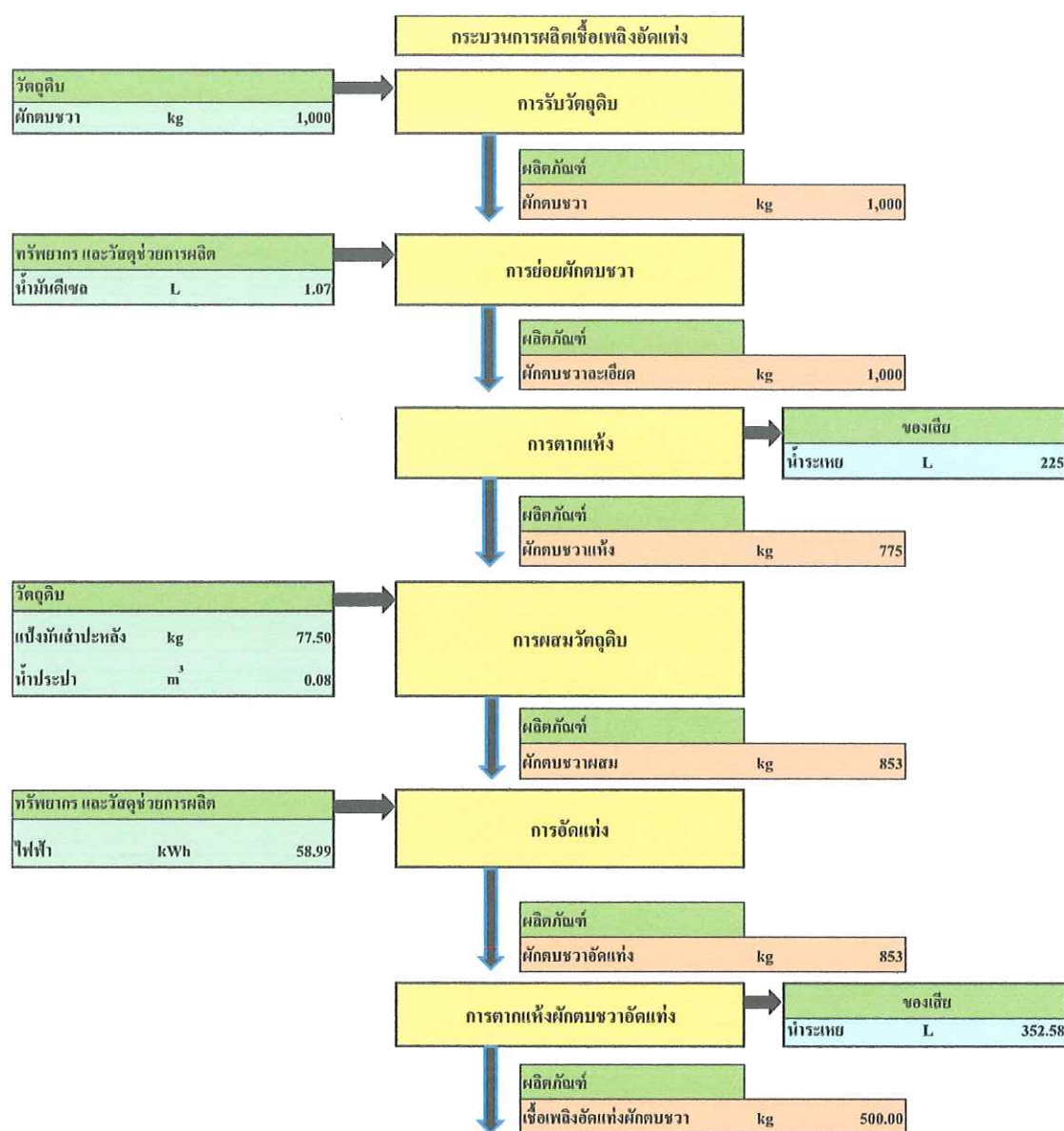
ผลการดำเนินงานวิจัย โครงการ การศึกษาการนำผักตบชวามาผลิตเป็นพลังงานทดแทนแบบ 3 มิติ ด้านพลังงาน ด้านเศรษฐศาสตร์ และด้านสิ่งแวดล้อมด้วยรอยเท้าคาร์บอน มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้านสิ่งแวดล้อมของรอยเท้าคาร์บอน สำหรับเทคโนโลยีการผลิตพลังงานทดแทนด้วยผักตบชวา

การนำผักตบชวามาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง

จากการศึกษางานวิจัยของมหาวิทยาลัยแม่โจ้ (2553) ทำการแปรรูปผักตบชวาเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง สามารถแสดงออกมาในรูปของแผนภาพกระบวนการผลิต และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้านสิ่งแวดล้อมได้ดังภาพที่ 10 และภาพที่ 11 ตามลำดับ

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้านสิ่งแวดล้อมการแปรรูปผักตบชวาข้างต้น แสดงถึงค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของกระบวนการนำผักตบชวา 1 kg มาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง พบว่า ได้เชื้อเพลิงอัดแท่งปริมาณ 0.5 kg มีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เท่ากับ 0.481 kg CO₂-eq



ภาพที่ 10 แผนภาพกระบวนการนำฟักตบขาวผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง

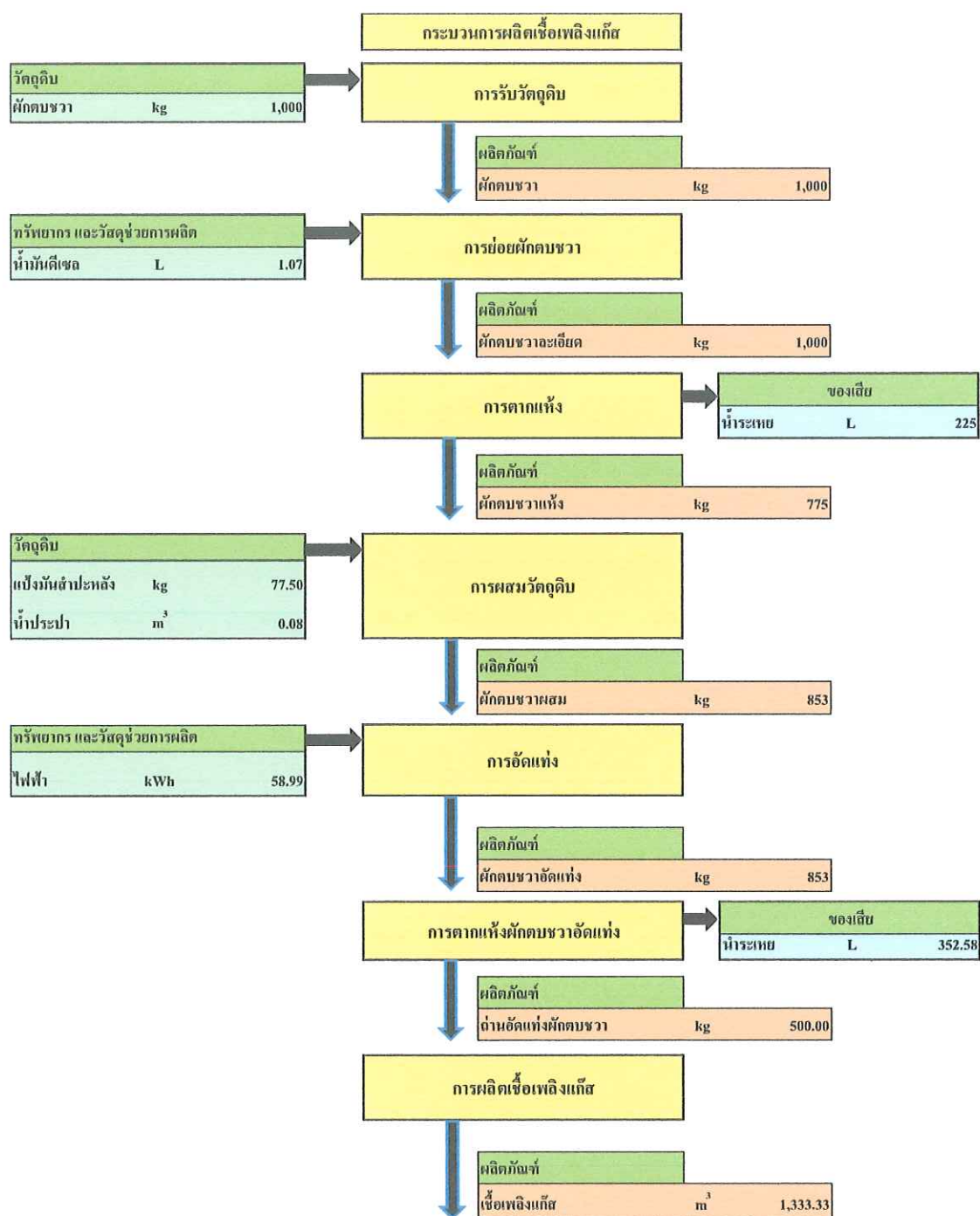
ช่วงวัฏจักรชีวิต	รายการ	ค่า LCI			ค่า EF (kg CO ₂ -eq/Unit)	ที่มา					แหล่งอ้างอิง EF	การมีส่วน (%)	ผลคูณ (kg CO ₂ eq)	สัดส่วน (%)	
		หน่วย	ปริมาณ	ปริมาณ/ FU		Self collect	Supplier	PCR Gen.	TGO EF	Int. DB					Others
การผลิต	การทำเชื้อเพลิงอัดแท่ง														
	สารขาเข้า														
	วัตถุดิบ														
	ผักตบชวา	kg	1000.000	1.00000	0.380				✓			100.00%	0.380	79.00%	
	น้ำ	m ³	0.080	0.0001	0.704				✓			100.00%	0.000	0.01%	
	แฉ่งในส่วเพลิง	kg	77.500	0.0775	0.801				✓			100.00%	0.062	12.91%	
	ทรัพยากรและวัตถุดิบในการผลิต														
	ไฟฟ้า	kWh	58.990	0.0590	0.609				✓			100.00%	0.036	7.47%	
	น้ำมันดีเซล	L	1.070	0.0011	2.745				✓			100.00%	0.003	0.61%	
	สารขาออก														
การบริโภค	ผลิตภัณฑ์														
	ถ่านอัดแท่ง	kg	500.000	0.5000											
	ของเสีย														
	น้ำประปา	m ³	0.660	0.0007											
รวม		รวม		1.5383									0.481	100.00%	
		รวมทั้งหมด												0.481	

ภาพที่ 11 แบบจำลองด้านสิ่งแวดล้อมกระบวนการนำผักตบชวาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง

การนำเชื้อเพลิงอัดแท่งจากผักตบชวามาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงแก๊ส

จากการศึกษาวิจัยของมหาวิทยาลัยแม่โจ้ (2553) ที่นำเอาเชื้อเพลิงอัดแท่งจากผักตบชวามาเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน เพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงแก๊ส สามารถแสดงออกมาในรูปแบบของแผนภาพกระบวนการผลิต และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้านสิ่งแวดล้อมได้ดังภาพที่ 12 และภาพที่ 13 ตามลำดับ

เมื่อทำการประเมินด้านสิ่งแวดล้อม ด้วยวิธีการคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจากผักตบชวา 1 kg พบว่า ได้ผลิตก๊าซออกมาเป็นเชื้อเพลิงแก๊ส 1.33 m³ มีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเท่ากับ 0.828 kg CO₂-eq



ภาพที่ 12 แผนภาพกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงแก๊ส

ช่วงวัฏจักรชีวิต	รายการ	ค่า LCI		ค่า EF (kg CO ₂ -eq/Unit)	ที่มา					แหล่งอ้างอิง EF	การขึ้น ส่วน (%)	ผลคูณ (kg CO ₂ eq)	สัดส่วน (%)		
		หน่วย	ปริมาณ		ปริมาณ/ FU	Self collect	Supplier	PCR Gen.	TGO EF					Int. DB	Others
ข้อมูล	การนำเข้าเชื้อเพลิงแข็งแห้ง														
	สารฆ่าเห็บ														
	วัตถุดิบ														
	ผักกบชา	kg	1000.000	1.000	0.380			✓			100.00%	0.380	79.00%		
	น้ำ	m ³	0.080	0.0001	0.704			✓			100.00%	0.000	0.01%		
	แป้งมันสำปะหลัง	kg	77.500	0.0775	0.801			✓			100.00%	0.062	12.91%		
	หน่วยการและวัตถุดิบในการผลิต														
	ไฟฟ้า	kWh	58.990	0.0590	0.609			✓			100.00%	0.036	7.47%		
	น้ำมันดีเซล	L	1.070	0.0011	2.745			✓			100.00%	0.003	0.61%		
	สารฆ่าแมลง														
	ผลิตภัณฑ์														
	ถ่านอัดแห้ง	kg	500.000	0.5000											
	ของแข็ง	m ³	0.660	0.0007											
ประเพณี															
รวม				1.6383								0.481	100.00%		
การขนส่งเชื้อเพลิงแข็งแห้ง	การนำเข้าเชื้อเพลิงแข็งแห้ง														
	สารฆ่าเห็บ														
	ผลิตภัณฑ์														
	ถ่านอัดแห้ง (การเผาไหม้)	kg	37.800	0.5000	0.6930			✓			100.00%	0.347	100.00%		
	สารฆ่าแมลง														
เชื้อเพลิงแข็งแห้ง	ผลิตภัณฑ์														
	เชื้อเพลิงแข็งแห้ง	m ³	100.800	1.3333											
รวม				1.8333								0.347	100.00%		
รวมทั้งหมด													0.828		

ภาพที่ 13 แบบจำลองด้านสิ่งแวดล้อมกระบวนการนำผักกบชาผลิตเป็นเชื้อเพลิงแข็งแห้ง

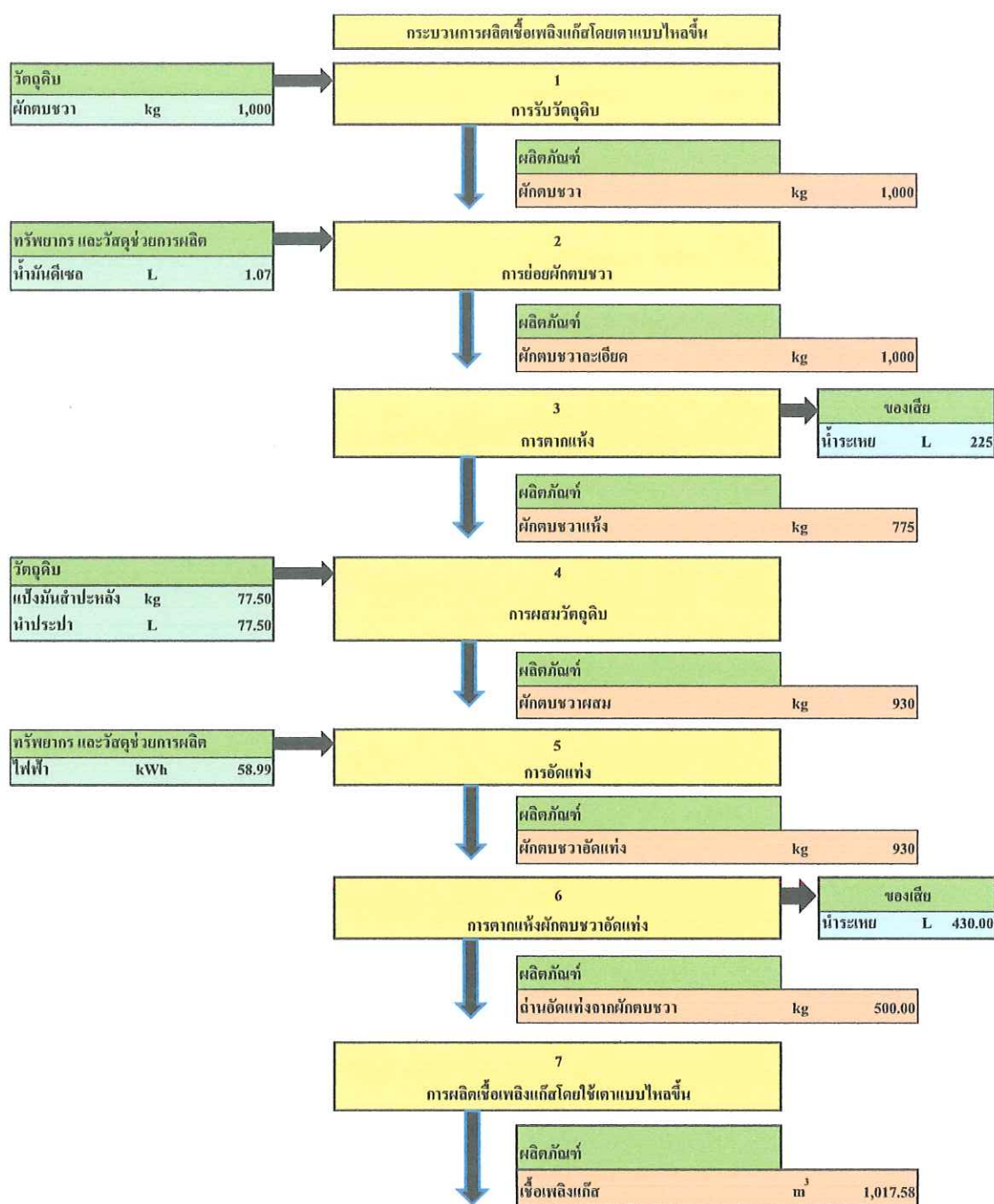
การผลิตเชื้อเพลิงแก๊สจากเตาแบบไหลขึ้นและไหลลงโดยใช้ผักตบชวาอัดแท่งเป็นเชื้อเพลิง

จากการศึกษางานวิจัยของสุรพงษ์ (2545) สามารถสรุปขั้นตอนของกระบวนการและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้านสิ่งแวดล้อม ของการผลิตเชื้อเพลิงแก๊สโดยเตาแบบไหลขึ้นจากเชื้อเพลิงอัดแท่งผักตบชวาได้ดังแสดงในภาพที่ 14 และภาพที่ 15 ตามลำดับ

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้านสิ่งแวดล้อมการผลิตเชื้อเพลิงแก๊สจากเตาแบบไหลขึ้นจากเชื้อเพลิงอัดแท่งผักตบชวา 1 kg พบว่า สามารถผลิตเชื้อเพลิงแก๊สได้ปริมาตร 1.0176 m³ โดยมีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งเท่ากับ 0.481 kg CO₂-eq กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงแก๊สจากเชื้อเพลิงอัดแท่งปริมาณ 0.347 kg CO₂-eq รวมการปล่อยก๊าซเรือนกระจกออกมาทั้งหมด 0.828 kg CO₂-eq

สำหรับการผลิตเชื้อเพลิงแก๊สจากเตาแบบไหลลง โดยใช้ผักตบชวาอัดแท่งเป็นเชื้อเพลิงนั้น สามารถเขียนเป็นแผนภาพกระบวนการ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้านสิ่งแวดล้อมได้ ดังแสดงในภาพที่ 16 และภาพที่ 17 ตามลำดับ

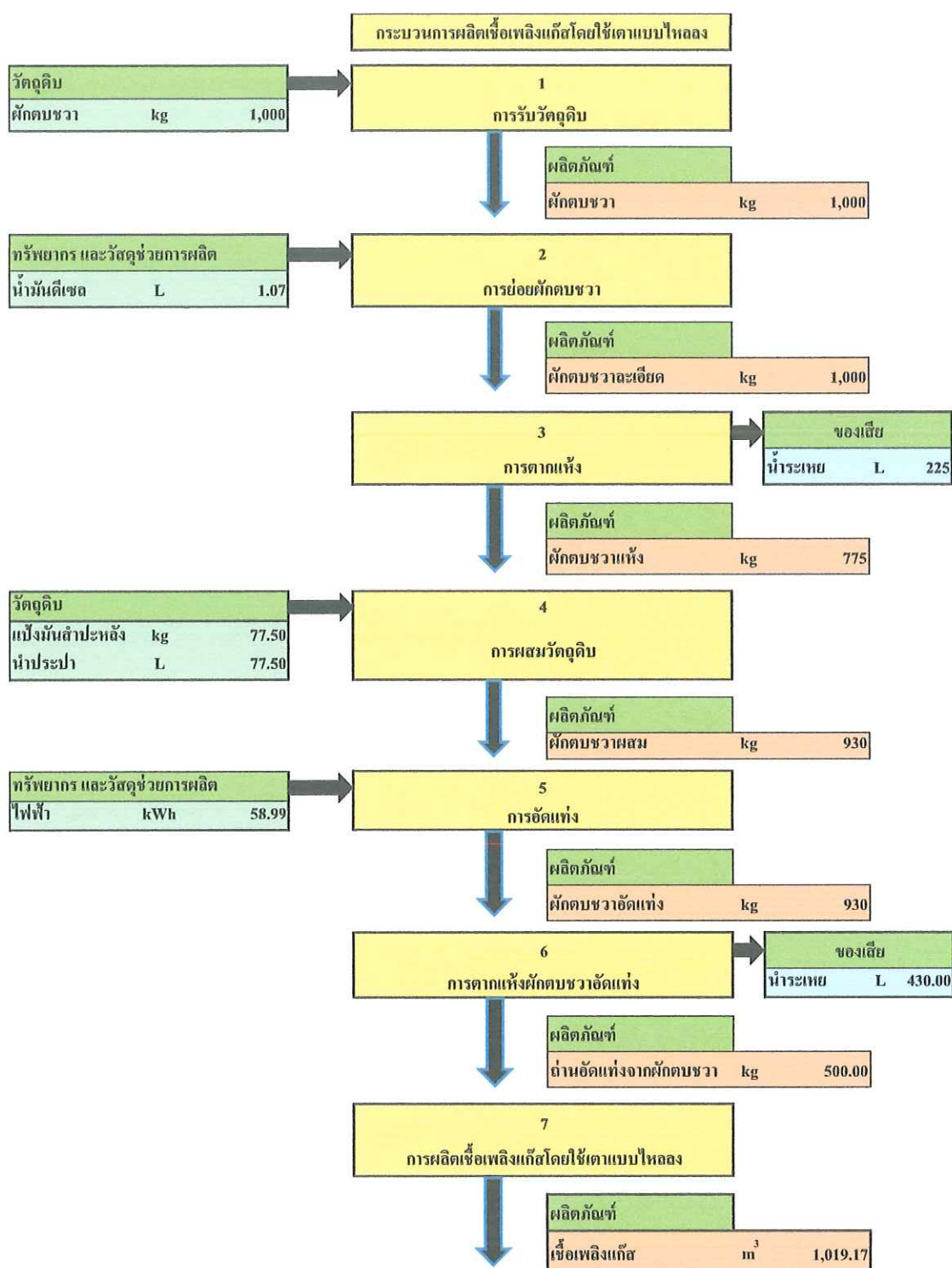
จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้านสิ่งแวดล้อมการผลิตเชื้อเพลิงแก๊สจากเตาแบบไหลลงจากเชื้อเพลิงอัดแท่งผักตบชวา 1 kg พบว่า สามารถผลิตเชื้อเพลิงแก๊สได้ปริมาตร 1.0192 m³ โดยมีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งเท่ากับ 0.481 kg CO₂-eq กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงแก๊สจากเชื้อเพลิงอัดแท่งปริมาณ 0.347 kg CO₂-eq รวมการปล่อยก๊าซเรือนกระจกออกมาทั้งหมด 0.828 kg CO₂-eq ซึ่งมีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ใกล้เคียงกับการผลิตเชื้อเพลิงแก๊สจากเตาแบบไหล รวมทั้งได้ปริมาณเชื้อเพลิงแก๊สใกล้เคียงกันอีกด้วย



ภาพที่ 14 แผนภาพกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงแก๊สจากเตาแบบไหลขึ้นจากเชื้อเพลิงอัดแห้งฟักตบขวา

ช่วงวัฏจักรชีวิต	รายการ	ค่า LCI			ค่า EF (kg CO ₂ -eq/Unit)	ที่มา					แหล่งอ้างอิง EF	การปันส่วน (%)	ผลคูณ (kg CO ₂ eq)	สัดส่วน (%)	
		ปริมาณ		ปริมาณ/ FU		Self collect	Supplier	PCR Gen.	TGO EF	Int. DB					Others
		หน่วย	ปริมาณ												
ข้อมูล	การทำเชื้อเพลิงอัดแท่ง														
	สารเข้า														
	วัตถุดิบ														
	สีกอมขาว	kg	1000.00	1.0000	0.3800				✓			100.00%	0.380	79.00%	
	น้ำ	m ³	0.08	0.0001	0.7043				✓			100.00%	0.000	0.01%	
	แบริ่งในสายโซ่	kg	77.50	0.0775	0.8010				✓			100.00%	0.062	12.91%	
	ทรัพยากรและวัสดุช่วยในการผลิต														
	ไฟฟ้า	kWh	58.99	0.0590	0.6093				✓			100.00%	0.036	7.47%	
	น้ำมันดีเซล	L	1.07	0.0011	2.7446				✓			100.00%	0.003	0.61%	
	สารออก														
	ผลิตภัณฑ์														
	ถ่านอัดแท่ง	kg	500	0.5000											
	ของเสีย														
	น้ำระเหย	m ³	0.66	0.0007											
		รวม			1.6383									0.481	100.00%
การผลิตโปรตีนเคซีนโดยใช้เตาแบบไอลง	สารเข้า														
	ผลิตภัณฑ์														
	ถ่านอัดแท่ง (การเผาไหม้)	kg	12.00	0.5000	0.6930				✓			100.00%	0.347	100.00%	
	สารออก														
	ผลิตภัณฑ์														
	ไบโอแก๊ส	m ³	24.42	1.0176											
	รวม			1.5176									0.347	100.00%	
รวมทั้งหมด															0.828

ภาพที่ 15 แบบจำลองด้านสิ่งแวดล้อมการผลิตเชื้อเพลิงแก๊สจากเตาแบบไอลง



ภาพที่ 16 แผนภาพกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพแบบไหลลง จากเชื้อเพลิงอัดแท่งฟักคบขาว

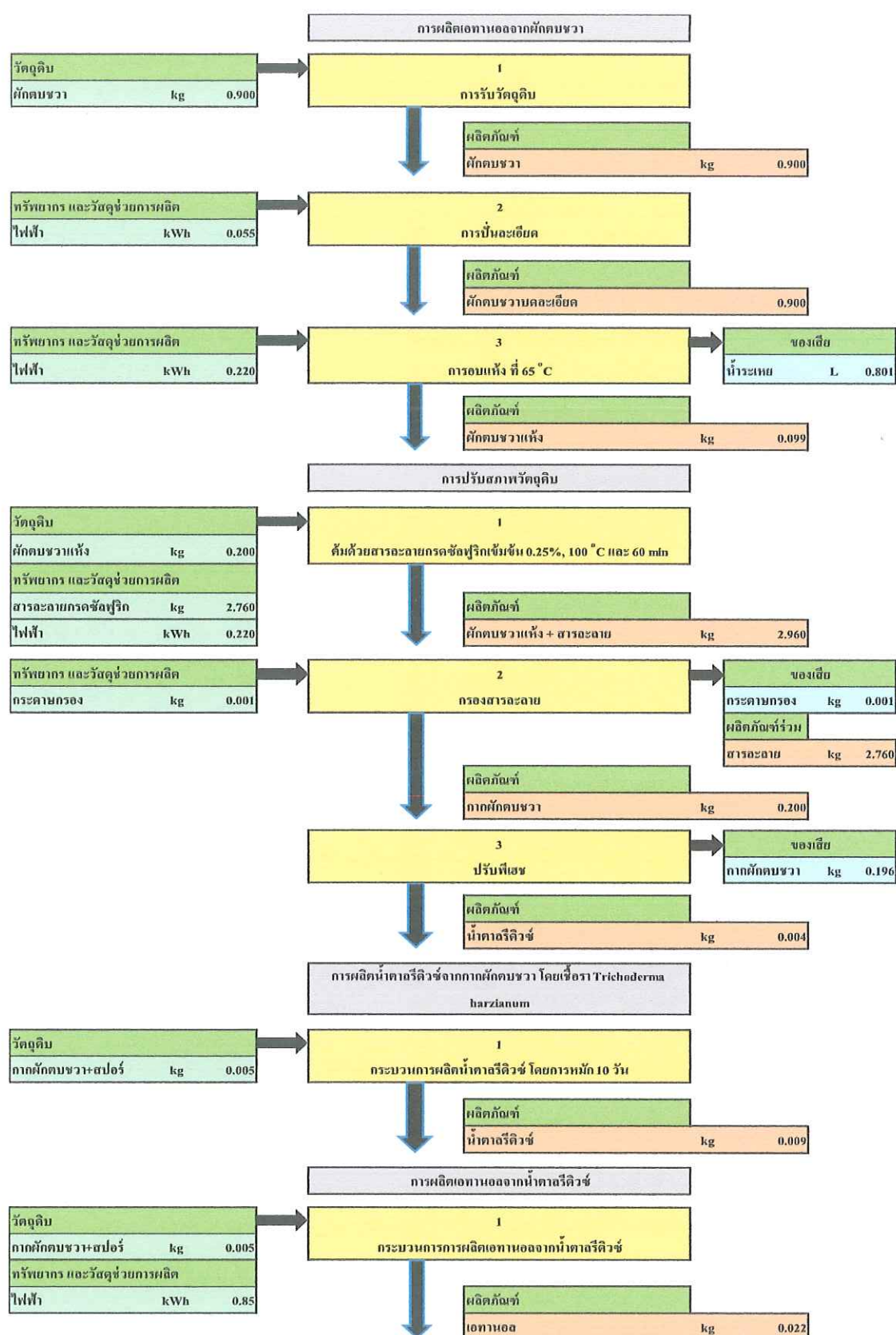
ช่วงวัฏจักรชีวิต	รายการ	ค่า LCI		ค่า EF (kg CO ₂ -eq/Unit)	ที่มา						แหล่งอ้างอิง EF	การปันส่วน (%)	ผลคูณ (kg CO ₂ eq)	สัดส่วน (%)		
		ปริมาณ			ปริมาณ/ FU	Primary			Secondary	Substitute						
		หน่วย	ปริมาณ			Self collect	Supplier	PCR Gen.							TGO EF	Int. DB
การผลิต	การทำงานเพื่อผลิตแ่ง															
	สารละลาย															
	วัตถุดิบ															
	ผักกาดขาว	kg	1000.00	1.0000	0.3800				✓				0.380	100.00%	79.00%	
	น้ำ	m ³	0.08	0.0001	0.7043				✓				0.000	100.00%	0.01%	
	แ่งในถังประหลัง	kg	77.50	0.0775	0.8010				✓				0.062	100.00%	12.91%	
	ทรัพยากรและการใช้พลังงานในการผลิต															
	ไฟฟ้า	kWh	58.99	0.0590	0.6093				✓				0.036	100.00%	7.47%	
	น้ำมันดีเซล	L	1.07	0.0011	2.7446				✓				0.003	100.00%	0.61%	
	สารละลาย															
	ผลิตภัณฑ์															
	ถ่านแ่ง	kg	500	0.5000												
	ของเสีย															
	น้ำประปา	m ³	0.66	0.0007												
	รวม			1.6383									0.481		100.00%	
การผลิตโปรตีนเพื่อใช้โดยแบบไหลลง	การผลิตโปรตีนเพื่อใช้โดยแบบไหลลง															
	สารละลาย															
	ผลิตภัณฑ์															
	ถ่านแ่ง (การเผาไหม้)	kg	12.00	0.5000	0.6930				✓				0.347	100.00%	100.00%	
	สารละลาย															
	ผลิตภัณฑ์															
	เชื้อเพลิงแก๊ส	m ³	24.46	1.0192												
	รวม			1.5192									0.347		100.00%	
รวมทั้งหมด																
รวมทั้งหมด																

ภาพที่ 17 แบบจำลองด้านสิ่งแวดล้อมของการผลิตแก๊สชีวภาพแบบไหลลงจาก

การผลิตเอทานอลจากน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการปรับสภาพผักตบชวาโดยใช้เชื้อราไตรโคเดอร์มา ฮาร์เซียนัม

ในงานวิจัยของมณีนษา (2555) ได้อธิบายขั้นตอนการดำเนินตั้งแต่การเตรียมชีวมวลผักตบชวา การปรับสภาพชีวมวล การผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ จนกระทั่งได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นเอทานอล ซึ่งสามารถแสดงเป็นแผนภาพกระบวนการ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้านสิ่งแวดล้อมได้ ดังแสดงในภาพที่ 18 และภาพที่ 19 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาถึงค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของกระบวนการผลิตเอทานอลจากน้ำตาลรีดิวซ์เป็นเอทานอล ด้วยผักตบชวา 1 kg โดยเริ่มจากกระบวนการเตรียมชีวมวลผักตบชวา การปรับสภาพชีวมวล การผลิตน้ำตาลรีดิวซ์เป็นเอทานอล พบว่า การปรับสภาพชีวมวลมีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุดเท่ากับ 0.566 kg CO₂-eq เนื่องจากมีการใช้สารละลายกรดซัลฟูริก ซึ่งเป็นสารเคมีที่มีค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูง รองลงมาเป็นการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ให้เป็นเอทานอล และกระบวนการเตรียมชีวมวลผักตบชวา มีปริมาณ 0.285 kg CO₂-eq และ 0.229 kg CO₂-eq ตามลำดับ รวมมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกออกมาทั้งหมด 1.080 kg CO₂-eq



ภาพที่ 18 แผนภาพกระบวนการผลิตเอทานอลจากฟักตบขาว

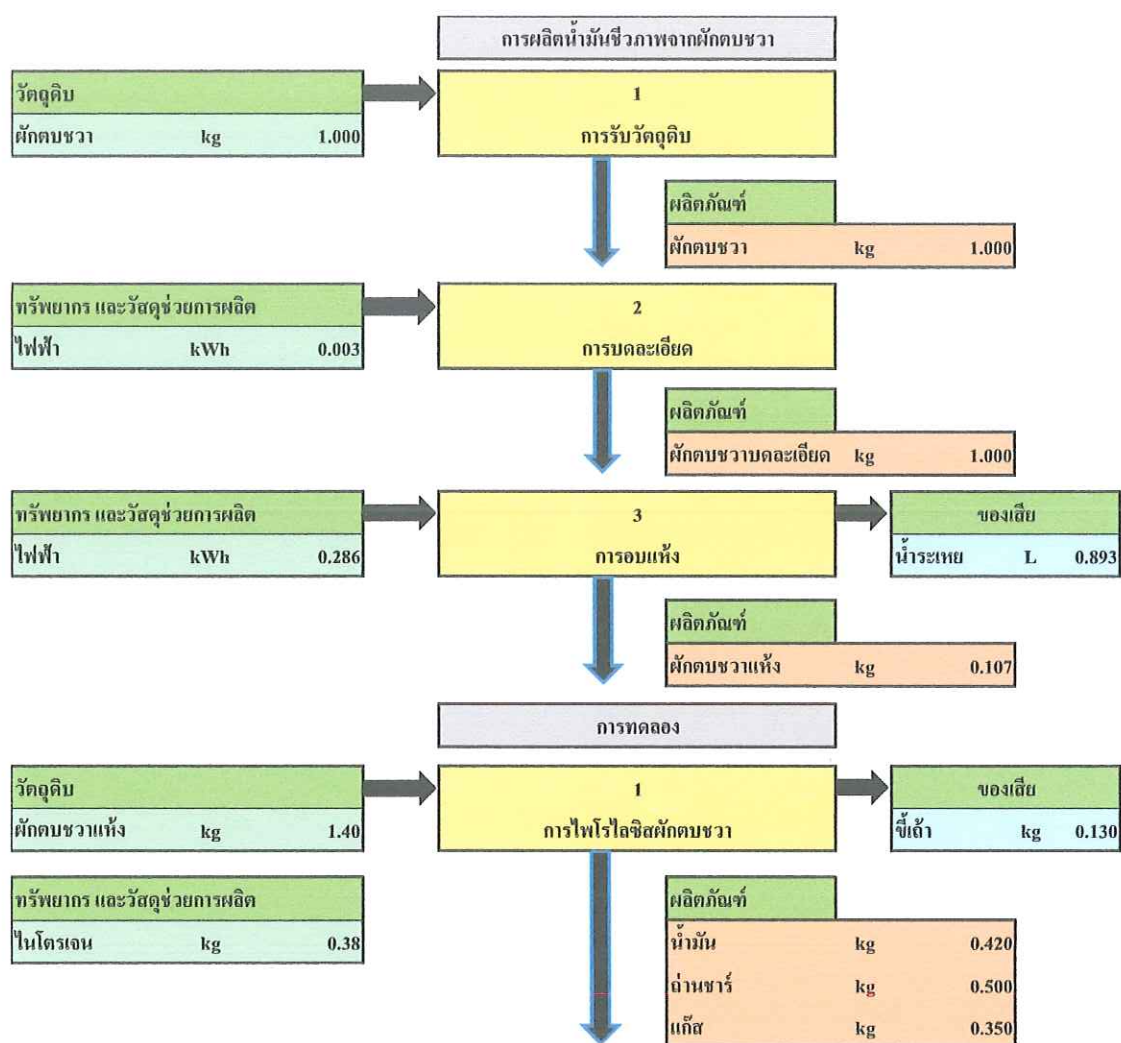
ช่วงวัฏจักรชีวิต	รายการ	ค่า LCI			ค่า EF (kg CO ₂ -eq/Unit)	ที่มา					แหล่งอ้างอิง EF	การนับส่วน (%)	ผลคูณ (kg CO ₂ eq)	สัดส่วน (%)	
						Self collect	Supplier	Secondary		Others					
		หน่วย	ปริมาณ	ปริมาณ/ FU				PCR Gen.	TGO EF						Int. DB
วัตถุดิบ	การเตรียมชีวมวล														
		สารอาหารสัตว์													
		วัตถุดิบ													
		ผักต้ม	kg	0.900	1.000				✓		100.00%	0.380	67.12%		
		ทรัพยากรและวัสดุส่วนในการผลิตไฟฟ้า	kWh	0.275	0.306				✓		100.00%	0.186	32.88%		
		ไฟฟ้า													
	การเพาะปลูก	สารอาหาร													
		เมล็ดพันธุ์													
		ผักต้ม	kg	0.099	0.110										
		การเพาะและเลี้ยงสัตว์ในการผลิตไฟฟ้า	L	0.801	0.890										
		น้ำประปา													
		รวม			2.306								0.566	100.00%	
	การปรับปรุงสภาพที่ดิน	สารอาหาร													
		วัตถุดิบ													
		ผักต้ม	kg	0.200	0.1100	✓									
		กรดซัลฟิวริก	kg	2.760	1.5120				✓		100.00%	0.062	21.83%		
กระดาษกรอง		kg	0.001	0.0006				✓		100.00%	0.185	64.89%			
ทรัพยากรและวัสดุส่วนในการผลิตไฟฟ้า		kWh	0.110	0.0605				✓		100.00%	0.001	0.37%			
การเพาะปลูก	สารอาหาร														
	เมล็ดพันธุ์														
	ผักต้ม	kg	0.004	0.0022											
	น้ำประปา														
	รวม			4.8868								0.285	100.00%		
	กระบวนการผลิตเอทานอล	สารอาหาร													
เมล็ดพันธุ์															
น้ำตาลรีดิวซ์		kg	0.005	0.0022	✓					100.00%	0.001	0.22%			
ทรัพยากรและวัสดุส่วนในการผลิตไฟฟ้า		kWh	0.850	0.3740				✓		100.00%	0.228	99.73%			
ไฟฟ้า															
สารอาหาร															
เอทานอล	เมล็ดพันธุ์														
	รวม			0.3857								0.229	99.95%		
รวมทั้งหมด														1.080	

ภาพที่ 19 แบบจำลองด้านสิ่งแวดล้อมของการผลิตเอทานอล

การผลิตน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วของผักตบชวาในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

จากงานวิจัยของสุพจน์ (2552) ได้อธิบายถึงขั้นตอนการเตรียมชีวมวล จนกระทั่งเข้าสู่กระบวนการไพโรไลซิสได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำมันชีวภาพ ซึ่งสามารถแสดงเป็นแผนภาพกระบวนการและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้านสิ่งแวดล้อมได้ ดังแสดงในภาพที่ 20 และภาพที่ 21 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาถึงค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของกระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพ จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วของผักตบชวา 1 kg ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง พบว่า ขั้นตอนของกระบวนการไพโรไลซิสผักตบชวา มีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุด เท่ากับ 0.556 kg CO₂-eq รองลงมาเป็นกระบวนการเตรียมชีวมวลผักตบชวา มีปริมาณ 0.148 kg CO₂-eq ดังนั้นมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกออกมาทั้งหมด 0.704 kg CO₂-eq

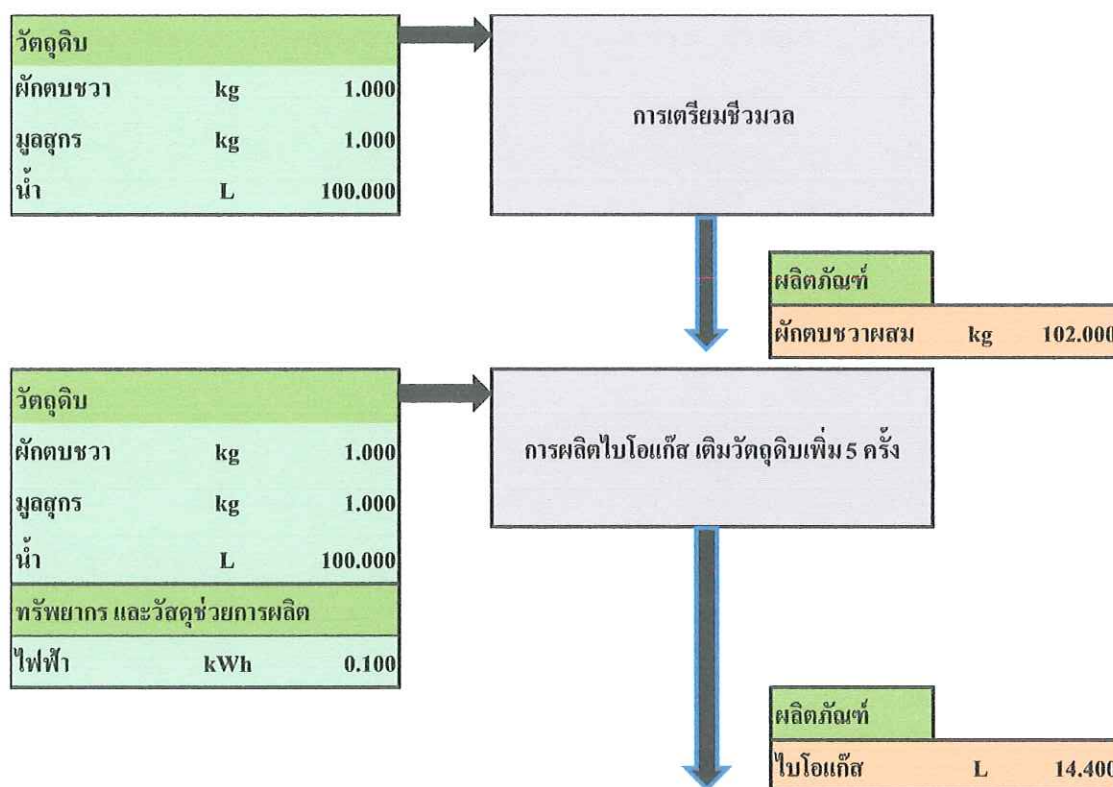


ภาพที่ 20 แผนภาพกระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วของผักตบชวา
ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

การผลิตแก๊สชีวภาพด้วยระบบหมักย่อยร่วมระหว่างผักตบชวากับมูลสุกร

จากการศึกษางานวิจัยของนิลวรรณ และอัจฉรา (2556) พบว่า กระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพด้วยระบบหมักย่อยร่วมระหว่างผักตบชวากับมูลสุกร จากการทดลองการผลิตแก๊สชีวภาพจากผักตบชวาและน้ำ : มูลสุกร สำหรับการหมักในถังปฏิกรณ์แบบกวนต่อเนื่อง (Continuous Stirred Tank Reactor, CSTR) มีความเหมาะสมต่อกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพที่ดี เนื่องจากสามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้ในปริมาณมาก อีกทั้งมีประสิทธิภาพในการหมักย่อยทั้งปริมาณของแข็งและค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD) อยู่ในเกณฑ์ที่ดีตลอดการทดลอง ซึ่งสามารถแสดงเป็นแผนภาพกระบวนการ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้านสิ่งแวดล้อมได้ ดังแสดงในภาพที่ 22 และภาพที่ 23 ตามลำดับ

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้านสิ่งแวดล้อมของกระบวนการการผลิตแก๊สชีวภาพระบบหมักย่อยแบบ CSTR ร่วมระหว่างผักตบชวา 1 kg กับมูลสุกรข้างต้น พบว่า กระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพด้วยระบบหมักย่อยแบบ CSTR ร่วมระหว่างผักตบชวากับมูลสุกร มีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกรวมทั้งสิ้น 2.672 kg CO₂-eq



ภาพที่ 22 แผนภาพกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพด้วยระบบหมักย่อย แบบ CSTR ร่วมระหว่างผักตบชวากับมูลสุกร

ช่วงวัฏจักรชีวิต	รายการ	ค่า LCI			ค่า EF (kg CO ₂ -eq/Unit)	ที่มา EF					แหล่งอ้างอิง EF	การเป็น ส่วน (%)	ผลคูณ (kg CO ₂ eq)	สัดส่วน (%)			
		หน่วย	ปริมาณ	ปริมาณ/ FU		Primary		Secondary							Substitute		
						Self collect	Supplier	PCR Gen.	TGO EF	Int. DB						Others	
ข้อมูล	การเตรียมส่วนผสม																
	สารซาเห็บ																
	วัตถุดิบ																
	ผลิตภัณฑ์																
	ผลิตภัณฑ์																
	ผลิตภัณฑ์																
	ผลิตภัณฑ์																
	ผลิตภัณฑ์																
	ผลิตภัณฑ์																
	ผลิตภัณฑ์																
	ผลิตภัณฑ์																
	ผลิตภัณฑ์																
รวม															2.269	1.366	100.00%
รวมทั้งหมด															2.672	2.672	100.00%

ภาพที่ 23 แบบจำลองด้านสิ่งแวดล้อมของกระบวนการการผลิตแก๊สชีวภาพด้วยระบบหมักย่อย

การผลิตเชื้อเพลิงผักตบชวาอบแห้ง

จากการศึกษางานวิจัยข้างต้นที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีในการนำผักตบชวามาใช้เป็นชีวมวลตั้งต้น ในการผลิตเป็นพลังงานทดแทนในรูปแบบต่างๆ นั้น คณะผู้วิจัยจึงได้นำองค์ความรู้ที่ได้มาต่อยอด และประยุกต์กระบวนการในการผลิตพลังงานทดแทนจากผักตบชวาอบแห้ง โดยห้องอบแห้ง โรงเรือนพลาสติก (Greenhouse) เพื่อศึกษาผลด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมโดยวิธีร่อยเท้าคาร์บอน ที่แตกต่างจากงานวิจัยต่างๆ ที่เคยศึกษามาก่อน โดยแนวทางการดำเนินงานในแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การเก็บข้อมูลการเตรียมชีวมวลผักตบชวา

เก็บผักตบชวาจากแหล่งน้ำจืดที่ทำการศึกษา (กว๊านพะเยา) ทำความสะอาดและชั่งน้ำหนักผักตบชวาสด ดังแสดงในภาพที่ 24

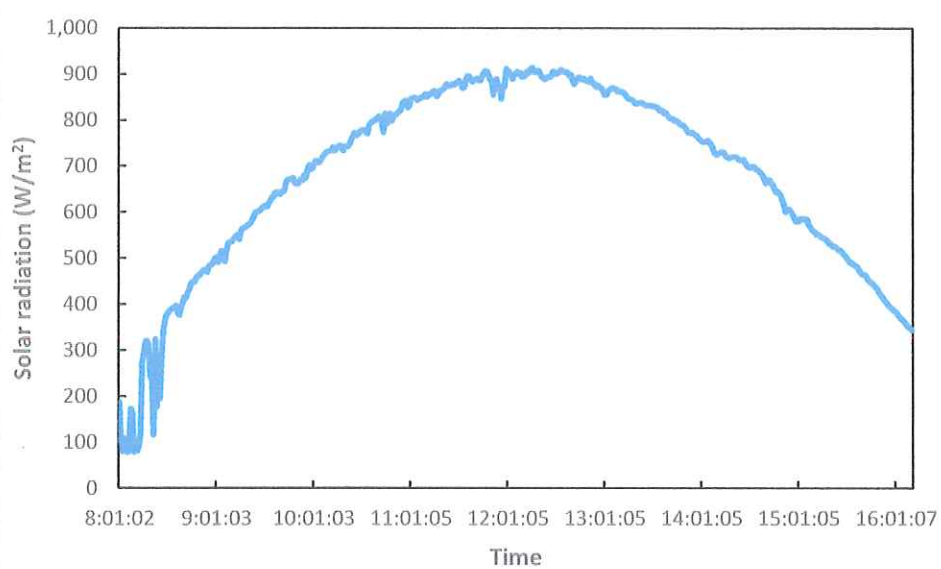


ภาพที่ 24 ผักตบชวาจากแหล่งน้ำและการชั่งน้ำหนักผักตบชวาสด

2. นำผักตบชวาที่ชั่งน้ำหนักแล้วไปทำการอบแห้งไว้ในห้องอบ โรงเรือนพลาสติก มีพัดลมระบายความชื้นภายในโรงเรือนขนาด 3.6 W จำนวน 3 ตัว ใช้เวลาการอบแห้งเป็นระยะเวลา 24 h เป็นระยะเวลา 2 d ดังแสดงในภาพที่ 25 ทั้งนี้การอบแห้งดังกล่าวทดสอบในเดือนมกราคม พ.ศ.2559 ซึ่งมีค่ารังสีอาทิตย์ในมุมเอียงกับแนวระนาบพื้นดินประมาณ 18.78° ตามมุมละติจูด (Latitude) ของจังหวัดเชียงใหม่ ดังแสดงในภาพที่ 26 และเมื่อทำการอบแห้งผักตบชวาแล้วเสร็จ ทำการชั่งน้ำหนักเชื้อเพลิงผักตบชวาอบแห้งอีกครั้ง ดังแสดงในภาพที่ 27



ภาพที่ 25 ผักตบชวาในห้องอบแห้งและการชั่งน้ำหนักผักตบชวาอบแห้ง



ภาพที่ 26 ค่ารังสีอาทิตย์ในมุมเอียงกับแนวระนาบพื้นดินประมาณ 18.78° ในเดือนมกราคม ของจังหวัด
เชียงใหม่



ภาพที่ 27 การชั่งน้ำหนักเชื้อเพลิงผักตบชวาอบแห้ง

3. วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงผักตบชวาอบแห้ง

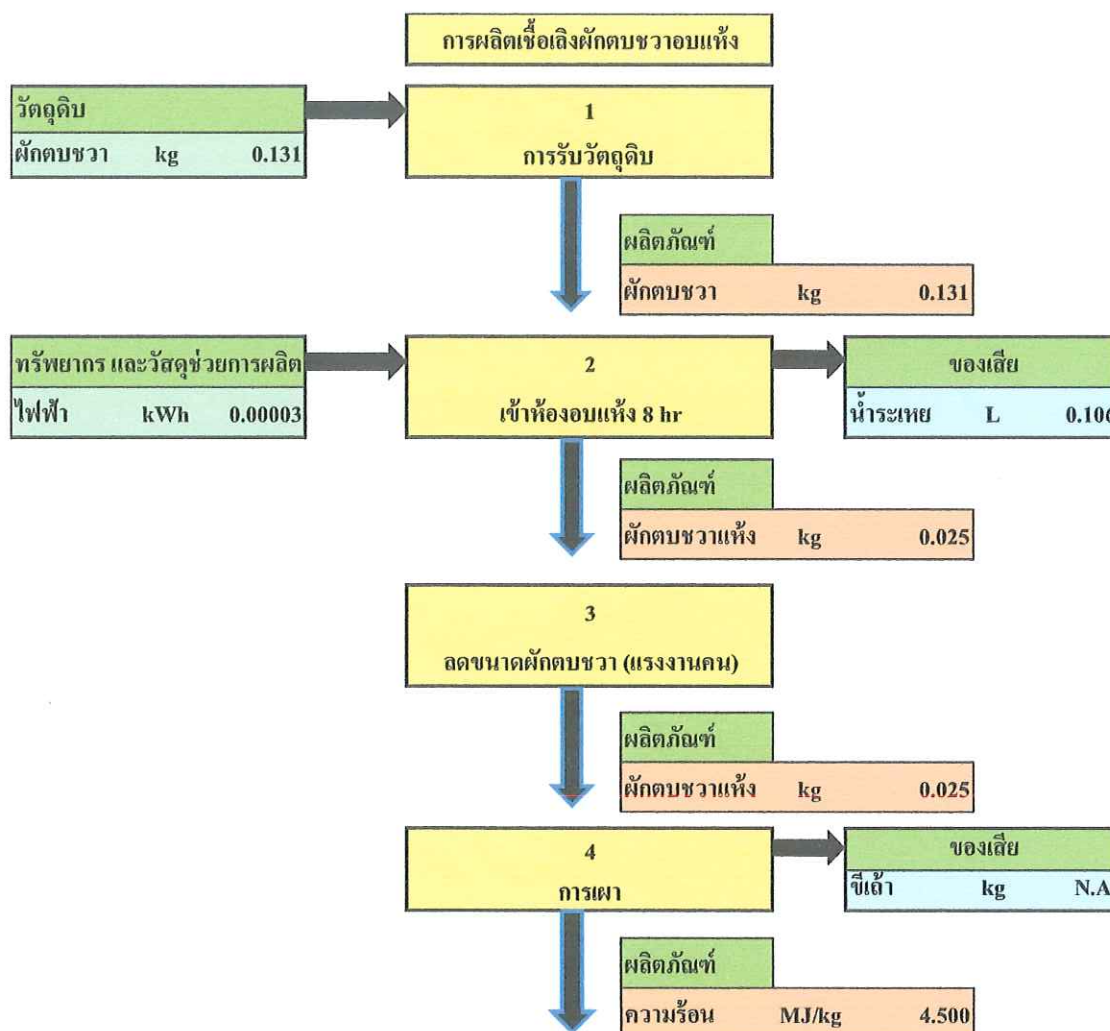
นำเชื้อเพลิงผักตบชวาอบแห้งในขั้นตอนที่ผ่านมา ไปทำการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพด้วยวิธี Proximate analysis หรือบางครั้งเรียกว่า Element analysis เพื่อหาค่าต่างๆ ดังนี้ คือ ปริมาณคาร์บอนเสถียร (Fixed carbon) ปริมาณสารระเหย (Volatile matter) ปริมาณเถ้า (Ash content) ปริมาณความร้อน (Heat content) ปริมาณความชื้น (Moisture content) โดยผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 2 (รายละเอียดผลการทดสอบแสดงในภาคผนวก ก)

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของเชื้อเพลิงผักตบชวาอบแห้ง

คุณสมบัติ	หน่วย	วิธีการทดสอบ	ผลการทดสอบ
ปริมาณความร้อน	cal/g	ASTM D 5865	967.7 ± 21.5
ปริมาณความชื้นทั้งหมด	%wt	ASTM D 7582	26.835
ปริมาณเถ้า	%	ASTM D 7582	43.470
ปริมาณสารระเหย	%	ASTM D 7582	27.060
ปริมาณคาร์บอนเสถียร	%	ASTM D 7582	2.635

3. การประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นการเก็บรวบรวมและประเมินค่าของสารขาเข้าและสารขาออก สำหรับการศึกษาสามารถแสดงเป็นแผนภาพกระบวนการ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้านสิ่งแวดล้อมได้ ดังแสดงในภาพที่ 28 และภาพที่ 29 ตามลำดับ

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ข้างต้น แสดงถึงค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงฟักตบขาวอบแห้งจากฟักตบขาว 1 kg พบว่า กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงฟักตบขาวอบแห้งมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกออกมาทั้งหมด 0.617 kg CO₂-eq



ภาพที่ 28 แผนภาพกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลจากฟักตบขาว

ช่วงวัฏจักรชีวิต	รายการ	ค่า LCI			ค่า EF (kg CO ₂ -eq/Unit)	ที่มา EF					แหล่งอ้างอิง EF	การปรับส่วน (%)	ผลคูณ (kg CO ₂ eq)	สัดส่วน (%)
		หน่วย	ปริมาณ	ปริมาณ/ FU		Primary								
						Self collect	Supplier	PCR Gen.	TGO EF	Int. DB				
ข้อมูลระบบ	การเติมน้ำมันเชื้อเพลิงจากผักตบชวา													
	สารชีวชีว วัตถุดิบ													
	ผักตบชวา	kg	0.131	1.0000	0.380				✓			100.00%	0.3800	99.96%
	ไฟฟ้า	kWh	0.00003	0.0002	0.609				✓			100.00%	0.0001	0.04%
	สารชีวชีว ผลิตภัณฑ์													
ข้อมูลระบบ	ผักตบชวาแห้ง	kg	0.025	0.1908										
	ของเสีย													
	ปุ๋ยหมัก	m ³	0.001	0.0076										
รวม				1.1987									0.3801	100.00%
รวมทั้งหมด														0.3801

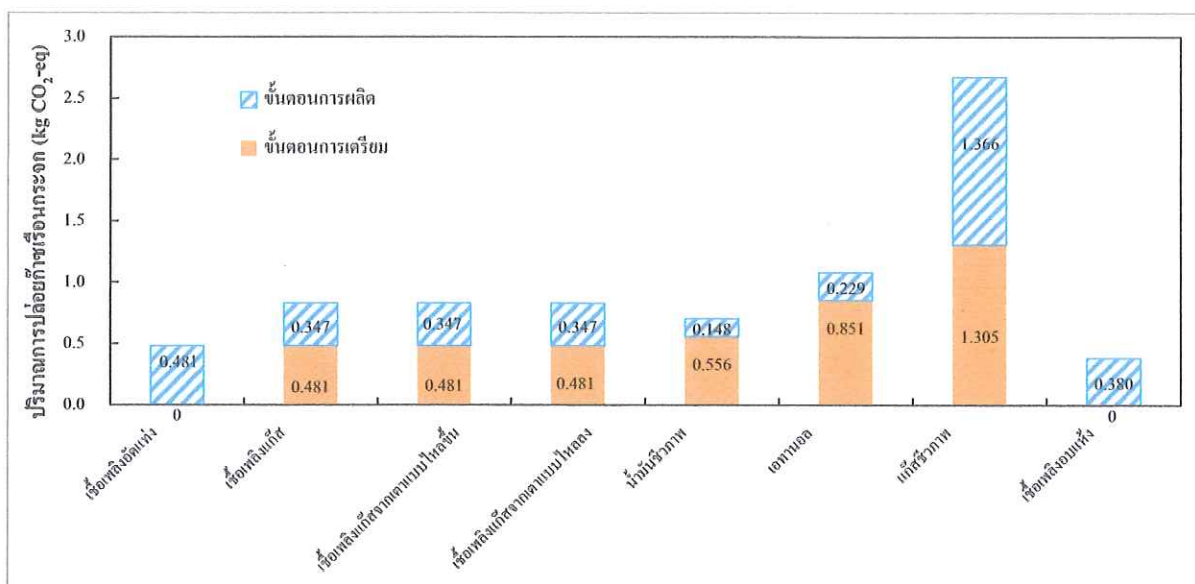
ภาพที่ 29 แบบจำลองด้านสิ่งแวดล้อมของกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลจากผักตบชวา

การเปรียบเทียบผลการศึกษาด้านสิ่งแวดล้อมและพลังงานของเทคโนโลยีการผลิตพลังงานทดแทนด้วยผักตบชวา

จากผลการศึกษาสามารถสรุปปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก จากเทคโนโลยีการผลิตพลังงานทดแทนในแต่ละประเภทได้ดังตารางที่ 3 และภาพที่ 30 ซึ่งพบว่า การผลิตเชื้อเพลิงผักตบชวาอบแห้งมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกน้อยที่สุด คือ 0.380 kg CO₂-eq โดยมาจากตัวของผักตบชวาเองเป็นส่วนใหญ่ รวมทั้งมาจากอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าของพัดลมระบายความชื้นในโรงเรือนอบแห้ง

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของกระบวนการผลิตพลังงานทดแทนชนิดต่างๆ

กระบวนการผลิตพลังงานทดแทนจากผักตบชวา	ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (kg CO ₂ -eq)		
	ขั้นตอนการเตรียม	ขั้นตอนการผลิต	รวม
การนำผักตบชวามาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง	-	0.481	0.481
การนำเชื้อเพลิงอัดแท่งจากผักตบชวามาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงแก๊ส	0.481	0.347	0.828
การผลิตแก๊สแบบไหลขึ้นจากเชื้อเพลิงอัดแท่งผักตบชวา	0.481	0.347	0.828
การผลิตแก๊สแบบไหลลงจากเชื้อเพลิงอัดแท่งผักตบชวา	0.481	0.347	0.828
การผลิตน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วของผักตบชวา	0.556	0.148	0.704
การผลิตเอทานอลจากน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากผักตบชวาโดยใช้เชื้อราไตรโคเดอร์มา ฮาร์เซียนัม	0.851	0.229	1.080
การผลิตแก๊สชีวภาพด้วยระบบหมักย่อย แบบ CSTR ร่วมระหว่างผักตบชวากับมูลสุกร	1.305	1.366	2.672
การผลิตเชื้อเพลิงผักตบชวาอบแห้ง	-	0.380	0.380

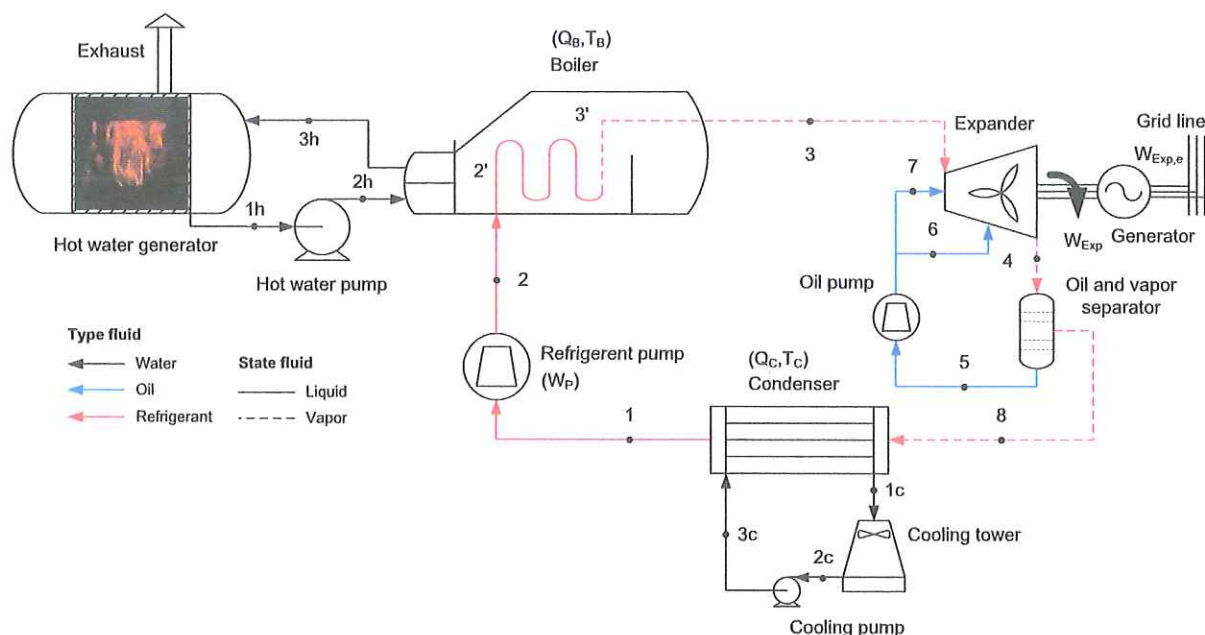


ภาพที่ 30 เปรียบเทียบปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของกระบวนการผลิตพลังงานทดแทนชนิดต่างๆ

จากผลการวิเคราะห์ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการแปลงผักตบชวาเป็นพลังงานทดแทนพบว่า การผลิตเชื้อเพลิงผักตบชวาอบแห้ง เป็นแนวทางที่ง่ายในการผลิตและจัดเตรียมเชื้อเพลิงผักตบชวาอบแห้ง และมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด รวมทั้งสามารถนำไปประยุกต์สำหรับผลิตไฟฟ้าได้ค่อนข้างง่าย โดยงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นการผลิตไฟฟ้าจากผักตบชวาอบแห้งโดยวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์ สำหรับผลทางด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม ดังแสดงรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้านพลังงานและเศรษฐศาสตร์ของการผลิตไฟฟ้า โดยวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์จากเชื้อเพลิงผักตบชวาอบแห้ง

การประยุกต์พลังงานชีวมวลร่วมกับวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ มีหลักการทำงาน คือ นำเชื้อเพลิงชีวมวลจากผักตบชวาอบแห้งมาเผา เพื่อผลิตน้ำร้อนอุณหภูมิประมาณ $90-110\text{ }^{\circ}\text{C}$ และนำมาขับเคลื่อนวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์เพื่อผลิตไฟฟ้า ดังแสดงใน Error! Reference source not found.



ภาพที่ 31 แผนภาพการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์โดยใช้เชื้อเพลิงผักตบชวาอบแห้ง

การประเมินทางด้านพลังงานและเศรษฐศาสตร์ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์โดยใช้เชื้อเพลิงผักตบชวาอบแห้ง เพื่อวิเคราะห์หาต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วย มีเงื่อนไขเริ่มต้นในการพิจารณาดังต่อไปนี้

ด้านพลังงาน

1. ระบบผลิตไฟฟ้า คือ วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ขนาดกำลังการผลิตไฟฟ้า 20 kW_e (W_{ORC}) โดยอ้างอิงขนาดความสามารถการผลิตไฟฟ้าของต้นแบบวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ของวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ดังแสดงในภาพที่ 32
2. ประสิทธิภาพวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ (η_{ORC}) เท่ากับ 10% [นัฐพร, 2558]
3. อายุการใช้งานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ (n) คิดที่ 20 y [Industrial Technology Research Institute, 2012]
4. คิการผลิตพลังงานไฟฟ้า ($t_{OP,h}$) 24 h/d ทำงานต่อเนื่อง ($t_{OP,d}$) 350 d/y
5. ประสิทธิภาพของหม้อต้มน้ำร้อน ($\eta_{HW,Generator}$) มีค่า 90%

6. โรงเรือนพลาสติกมีกำลังไฟฟ้าของพัดลมระบายอากาศ ($W_{\text{Blower, Unit}}$) เท่ากับ 3.6 W จำนวน (N_{Blower}) 3 Set ต่อโรงเรือนพลาสติก 1 Unit
7. โรงเรือนพลาสติกมีความจุ (MV_{Drying}) ในการอบแห้ง 3,000 kg/Unit
8. เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (t_{Drying}) เท่ากับ 2 d
9. กำลังไฟฟ้าของปั๊มน้ำร้อน (Hot water pump, $W_{\text{p, HW}}$) มีค่า 2.3 kW_e [นัฐพร, 2558]

ด้านเศรษฐศาสตร์

1. ค่าอัตราส่วนลด (Discount rate, r) ใช้ค่าดอกเบี้ยของธนาคารกรุงไทย 7.62% (วันที่ 22 กรกฎาคม พ.ศ. 2559)
2. ราคาวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ($Z_{\text{ORC, Unit}}$) คิดที่ 1,750 USD โดยอ้างอิงราคาระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ของวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ดังแสดงในภาพที่ 32
3. ราคาโรงเรือนพลาสติก ($Z_{\text{Greenhouse}}$) ขนาดความจุการอบแห้ง 3,000 kg คิดที่ 200,000 Baht/Unit โดยอ้างอิงราคาโรงเรือนพลาสติกของวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ดังแสดงในภาพที่ 33
4. ราคาค่าเตาเผาชีวมวล (Z_{Boiler}) ค่าโรงเรือน (Z_{Building}) และค่าท่อน้ำร้อน (Z_{Piping}) คิดรวมที่ 1,500,000 Baht โดยอ้างอิงราคาชุดอุปกรณ์ของวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ดังแสดงในภาพที่ 34
5. มูลค่าการลงทุนโครงการ (Inv) = ราคาวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ (Z_{ORC}) + ราคาค่าเตาเผาชีวมวล (Z_{Boiler}) ค่าโรงเรือน (Z_{Building}) และค่าท่อน้ำร้อน (Z_{Piping})



ภาพที่ 32 ต้นแบบวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ของวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้



ภาพที่ 33 โรงเรือนพลาสติกของวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้



ภาพที่ 34 เตาเผาของวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

จากผลการศึกษานำเชื้อเพลิงชีวมวลจากผักตบชวาอบแห้ง มาใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อนร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ ต้องใช้ปริมาณเชื้อเพลิงประมาณ 270 kg/h และมีค่าต้นทุนต่อหน่วยของผักตบชวาอบแห้งเท่ากับ 2.43 Baht/kWh ดังแสดงในตารางที่ 4 ซึ่งอัตราการใช้

ซื้อไฟฟ้าของรัฐบาลสำหรับพลังงานชีวมวลที่มีขนาดน้อยกว่า 1 MW เป็นแบบ FiT มีค่าเท่ากับ 5.34 Baht/kWh [สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2559]

จากผลการคำนวณดังกล่าวจะเห็นได้ว่าการนำผักตบชวามาทำกรอบแห้งเป็นระยะเวลา 2 d จากนั้นจึงนำมาเผาเพื่อผลิตน้ำร้อน และจ่ายให้แก่ระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ขนาด 20 kW_e มีต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าค่อนข้างน้อย เนื่องจากผักตบชวาถือเป็นวัชพืช ไม่มีต้นทุนในการได้มาของผักตบชวา มีเพียงค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าของพัดลมที่ใช้ในการอบแห้ง แต่ถือว่าค่อนข้างน้อย ประมาณ 4.8 W ต่อโรงเรือนพลาสติก 1 ห้อง แต่ทั้งนี้จะเห็นว่าค่าความร้อนของผักตบชวามีค่าค่อนข้างน้อยประมาณ 4.06 MJ/kg (ดังแสดงในภาคผนวก ก. ผลการทดสอบคุณสมบัติของเชื้อเพลิงผักตบชวาอบแห้ง) ทำให้ต้องใช้โรงเรือนพลาสติกจำนวน 4 โรงเรือน ดังนั้นจึงควรหาแนวทางการปรับปรุงการนำผักตบชวามาใช้ในการผลิตไฟฟ้า อนึ่งในงานวิจัยนี้จึงนำเสนอในทางการนำเชื้อเพลิงผักตบชวาอบแห้งและขยะชุมชน มาผสมกันในสัดส่วน 50:50 %wt (โดยน้ำหนัก) ซึ่งจะนำเสนอในหัวข้อถัดไป

ตารางที่ 4 การประเมินราคาต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วย

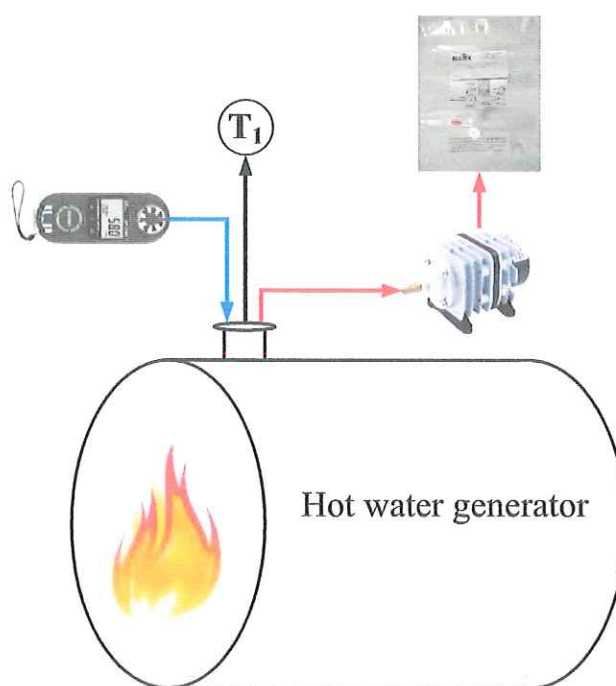
รายละเอียด	ผักตบชวา
แหล่งความร้อนจากเชื้อเพลิงชีวมวล ($Q_B = W_{ORC} / \eta_{ORC}$, kW)	200
ค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงชีวมวล ($HHV_{Biomass}$, MJ/kg)	4.06
ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงชีวมวล ($LHV_{Biomass} = HHV_{Biomass} [1 - (MC / 100)]$, MJ/kg) [University of Washington, 2016]	2.96
อัตราการใช้เชื้อเพลิงชีวมวล ($\dot{m}_{Biomass} = [3,600 Q_B] / [\eta_{HW,Generator} LHV_{Biomass}]$, kg/h)	270
อัตราการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลต่อวัน ($M_{Biomass} = \dot{m}_{Biomass} t_{OP,h}$, kg/d)	6,481
จำนวนโรงเรือนที่ต้องใช้ในการอบแห้ง ($N_{Greenhouse} = M_{Biomass} t_{Drying} / MV_{Drying}$; ทั้งนี้ทำการปัดเศษขึ้น, Unit)	5
กำลังไฟฟ้าของโรงเรือนพลาสติกต่อ 1 โรงเรือน ($W_{Blower} = W_{Blower,Unit} N_{Blower}$, W/Unit)	10.80
กำลังไฟฟ้าทั้งหมดของโรงเรือนพลาสติกต่อ 1 วัน ($P_{Blower,Total} = [W_{Blower,Unit} N_{Blower} N_{Greenhouse} / 1,000]$, kW/Unit)	0.054
กำลังไฟฟ้าทั้งหมดของโรงเรือนพลาสติก ($Pw_{Greenhouse} = [(W_{P,HW} + W_{Blower,Total}) t_{OP,d}]$, kWh/y)	19,773
ค่าระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ ($Z_{ORC} = Z_{ORC,Unit} W_{ORC}$, Baht)	1,143,380

รายละเอียด	ผักตบชวา
ค่าเตาเผาชีวมวล (Z_{Boiler}) ค่าโรงเรือน ($Z_{Building}$) และค่าท่อน้ำร้อน (Z_{Piping}) (Baht)	1,500,000
ค่าโรงเรือนพลาสติก ($Z_{Greenhouse} = Z_{Greenhouse, Unit} N_{Greenhouse}$, Baht)	1,000,000
เงินลงทุนโครงการ ($Inv = Z_{ORC} + Z_{Greenhouse} + [Z_{Boiler} + Z_{Building} + Z_{Piping}]$, Baht)	3,643,380
อัตราการผลิตพลังงานไฟฟ้าของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ทั้งหมด ($Pw_{ORC, Total} = W_{ORC} t_{OP}$, kWh/y)	168,000
อัตราการผลิตพลังงานไฟฟ้าของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์สุทธิ ($Pw_{ORC} = Pw_{ORC, Total} - Pw_{Greenhouse}$, kWh/y)	148,226
ค่าต้นทุนเชื้อเพลิงชีวมวลตลอดระยะเวลา 20 y $(\sum_{t=1}^n \frac{PEC}{(1+r)^t})$, Baht)	0
ค่าผลรวมอัตราการผลิตไฟฟ้าตลอดระยะเวลา 20 y $(\sum_{t=1}^n \frac{W_{ORC} t_{OP}}{(1+r)^t})$, kWh)	1,497,400
ค่าต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยของการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานชีวมวล $(LEC = \frac{Inv + \sum_{t=1}^n \frac{PEC}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{W_{ORC} t_{OP}}{(1+r)^t}})$, Baht/kWh)	2.43

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้านพลังงาน ด้านเศรษฐศาสตร์ และด้านสิ่งแวดล้อมโดยวิธีรอยเท้าคาร์บอนของการผลิตไฟฟ้า โดยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์จากเชื้อเพลิงผักตบชวาอบแห้ง

เนื่องจากการเผาไหม้ผักตบชวาไม่มีค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission factor, EF) ในฐานะข้อมูลด้าน LCA ดังนั้น จึงต้องทำการตรวจวัดส่วนประกอบของไอเสีย จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผักตบชวาอบแห้ง เพื่อนำมาวิเคราะห์ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่อไป โดยมีขั้นตอนต่างๆ ดังต่อไปนี้

การหาอัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซ (Mass flow rate) คือ ค่าที่ใช้ในการหาค่าการไหลของมวลผ่านจุดตรวจวัดต่อหน่วยเวลา โดยทำการวัดอัตราการไหลของก๊าซไอเสียและพื้นที่หน้าตัดที่ไอเสียเคลื่อนที่ผ่าน ดังแสดงในภาพที่ 35 ซึ่งสามารถประเมินอัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซ ได้จากสมการต่อไปนี้



ภาพที่ 35 การตรวจวัดก๊าซไอเสีย

$$\dot{m} = \rho v A$$

สมการที่ 3

โดยที่ $\dot{m}$ อัตราการไหลเชิงมวล (kg/s)
 ρ ความหนาแน่น (kg/m³)
 v ความเร็วของก๊าซไอเสีย (m/s)
 A พื้นที่หน้าตัดของท่อ (m²)

ทำการหาอัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซทำได้จากการทำการทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล และทำการเก็บข้อมูลของอุณหภูมิ ความเร็วของก๊าซ และขนาดพื้นที่หน้าตัดท่อ จากนั้นจึงนำไปคำนวณตามสมการข้างต้น โดยผลการเก็บข้อมูลและการคำนวณอัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซไอเสีย แสดงได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 อัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซในการเผาเชื้อเพลิงผักตบชวาอบแห้ง

สัดส่วนก๊าซ ไอเสียที่ เกิดขึ้น	ρ_1 (kg/m ³)	T_{st} (25 °C) (K)	T_1 (K)	$\rho_1 = \rho_{st} T_{st} / T_1$ (kg/m ³)	v (m/s)	A (m ²)	$\dot{m} = \rho v A$ (kg/s)
CH ₄	1.2505	298	313.5	1.1887	0.9	0.00071	0.00075
N ₂ O	1.429	298	313.5	1.3583	0.9	0.00071	0.00086
CO	1.13	298	313.5	1.0741	0.9	0.00071	0.00068
O ₂	1.9769	298	313.5	1.8792	0.9	0.00071	0.00119

การหามวลของก๊าซ (Mass) คือ ปริมาณมวลทั้งหมดของก๊าซที่ออกมาในช่วงเวลานั้นๆ สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$M = \dot{m} t \quad \text{สมการที่ 4}$$

โดยที่ M มวลของก๊าซ (kg)
 t เวลา (s)

จากข้อมูลอัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซข้างต้น สามารถคำนวณหาปริมาณมวลทั้งหมดของก๊าซไอเสีย แสดงได้ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ปริมาณมวลทั้งหมดของก๊าซในการเผาเชื้อเพลิงผักตบชวาอบแห้ง

องค์ประกอบ ของก๊าซไอเสีย	$\dot{m}$ (kg/s)	t (s)	M (kg)
CH ₄	0.00075	3600	2.71
N ₂ O	0.00086	3600	3.10
CO	0.00068	3600	2.45
O ₂	0.00119	3600	4.29
ผลรวม			12.56

นอกจากการวัดความเร็วลมของไอเสีย ต้องทำการเก็บตัวอย่างก๊าซไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลของแข็ง ดังแสดงในภาพที่ 35 เพื่อนำมาวิเคราะห์หาส่วนประกอบ ซึ่งจากการทดสอบนำไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงฟอสซิลของแข็ง พบว่า ประกอบไปด้วยองค์ประกอบของก๊าซ 4 ตัว คือ Methane (CH_4) Carbon monoxide (CO) Oxygen (O_2) และ Nitrogen (N_2) ดังแสดงผลในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 องค์ประกอบของก๊าซจากไอเสียการเผาเชื้อเพลิงฟอสซิลของแข็ง

Flue gas compositions	Mole ratio (% mole)
Methane (CH_4)	0.2
Carbon monoxide (CO)	2.0
Oxygen (O_2)	8.3
Nitrogen (N_2)	45.0

ซึ่งมวลของก๊าซที่เกิดขึ้น ถูกนำไปคำนวณร่วมกับสัดส่วนปริมาณก๊าซที่ทำการทดสอบโดย Gas Chromatography (GC) และนำไปวิเคราะห์เป็นปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ จากการทดสอบด้วยวิธี GC สำหรับกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลของแข็งจำนวน 1 kg จะเกิดมลภาวะจากก๊าซเรือนกระจก 2 ชนิด อันประกอบด้วย ก๊าซมีเทน (CH_4) และก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N_2O) โดยปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อเชื้อเพลิงชีวมวล 1 kg แสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในการเผาเชื้อเพลิง

องค์ประกอบ ของก๊าซไอเสีย	สัดส่วน มลภาวะจาก GC (% mole)	ปริมาณการปล่อย ก๊าซเรือนกระจก แต่ละชนิด (mg CO_2 /kg fuel)	ค่าศักยภาพในการ ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน ¹ (CO_2 -eq)	ปริมาณการปล่อยก๊าซ เรือนกระจกต่อ เชื้อเพลิง 1 kg (kg CO_2 -eq/kg fuel)
CH_4	0.2	2.51	25	0.00006
N_2O	45.0	104.28	298	0.16849
ผลรวมค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก				0.16856

หมายเหตุ: ¹ IPCC Fourth Assessment Report (2007)

จากข้อมูลการวิเคราะห์ในตารางที่ 8 พบว่า การเผาไหม้ก๊าซจะปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ เทียบเท่าประมาณ 0.168 kg CO₂-eq ต่อเชื้อเพลิงชีวมวลผักตบชวาอบแห้ง 1 kg และเมื่อนำไปคิดรวมกับการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอบแห้งผักตบชวาที่ประมาณ 0.380 kg CO₂-eq พบว่า มีการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์รวมทั้งสิ้น ดังนั้นระบบผลิตไฟฟ้าร่วมกับวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ขนาด 20 kW_e จะปลดปล่อยปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าประมาณ 148.62 kg CO₂-eq หรือคิดเป็น 7.432 kg CO₂-eq ต่อการผลิตไฟฟ้า 1 kWh ดังนั้นปริมาณต้นทุนพลังงานต่อค่าต้นทุนพลังงานต่อปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ มีค่าเท่ากับ 18.08 Baht·kg CO₂-eq/kWh²

แนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าโดยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์จากเชื้อเพลิงผักตบชวาอบแห้ง

การนำเชื้อเพลิงผักตบชวามาทำการอบแห้งโดยโรงเรือนพลาสติกเป็นระยะเวลา 2 d จากนั้นนำมาผสมกับขยะชุมชนในสัดส่วนโดยน้ำหนัก 50:50 %wt พบว่า ทำให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 5 เท่า หรือประมาณ 21.17 MJ/kg (ดังแสดงในภาคผนวก ข. ผลการทดสอบคุณสมบัติของเชื้อเพลิงผักตบชวาอบแห้งและขยะโดยสัดส่วน 50:50 %wt) ดังนั้นจากปริมาณเชื้อเพลิงผักตบชวาอบแห้งและขยะชุมชน 270 kg/h สามารถผลิตไฟฟ้าได้ เพิ่มขึ้นเป็น 121.5 kW_e และทำให้ค่าต้นทุนต่อหน่วยมีค่าเท่ากับ 0.93 Baht/kWh

แต่ทั้งนี้ผลจากการศึกษาในหัวข้อนี้เป็นเพียงการคำนวณโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งต้องทำการศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่างๆ ต่อไป

ตารางที่ 9 การประเมินราคาต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วย

รายละเอียด	ปริมาณ
ค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงชีวมวล ($HHV_{Biomass}$, MJ/kg)	21.17
ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงชีวมวล ($LHV_{MSW} = HHV_{MSW} (VM + FC) - 2.445 MC$, MJ/kg) [Adisa et al., 2016]	17.99
อัตราการใช้เชื้อเพลิงชีวมวล ($\dot{m}_{Biomass}$, kg/h)	44.47
อัตราการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลต่อวัน ($M_{Biomass} = \dot{m}_{Biomass} t_{OP,h}$, kg/d)	1,067
จำนวนโรงเรือนที่ต้องใช้ในการอบแห้ง ($N_{Greenhouse} = M_{Biomass} t_{Drying} / MV_{Drying}$; ทั้งนี้ทำการปัดเศษขึ้น, Unit)	1
กำลังไฟฟ้าของโรงเรือนพลาสติกต่อ 1 โรงเรือน ($W_{Blower} = W_{Blower,Unit} N_{Blower}$, W/Unit)	10.80
กำลังไฟฟ้าทั้งหมดของโรงเรือนพลาสติกต่อ 1 วัน ($P_{Blower,Total} = [W_{Blower,Unit} N_{Blower} N_{Greenhouse} / 1,000]$, kW/Unit)	0.0108
กำลังไฟฟ้าทั้งหมดของโรงเรือนพลาสติก ($P_{W_{Greenhouse}} = [(W_{P,HW} + W_{Blower,Total}) t_{OP,d}]$, kWh/y)	19,411
ค่าระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ ($Z_{ORC} = Z_{ORC,Unit} W_{ORC}$, Baht)	1,143,380
ค่าเตาเผาชีวมวล (Z_{Boiler}) ค่าโรงเรือน ($Z_{Building}$) และค่าท่อน้ำร้อน (Z_{Piping}) (Baht)	1,500,000
ค่าโรงเรือนพลาสติก ($Z_{Greenhouse} = Z_{Greenhouse,Unit} N_{Greenhouse}$, Baht)	200,000
เงินลงทุนโครงการ ($Inv = Z_{ORC} + Z_{Greenhouse} + [Z_{Boiler} + Z_{Building} + Z_{Piping}]$, Baht)	2,843,380
อัตราการผลิตพลังงานไฟฟ้าของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ทั้งหมด	168,000

รายละเอียด	ปริมาณ
$(Pw_{ORC,Total} = W_{ORC} t_{OP}, \text{ kWh/y})$	
อัตราการผลิตพลังงานไฟฟ้าของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์สุทธิ $(Pw_{ORC} = Pw_{ORC,Total} - Pw_{Greenhouse}, \text{ kWh/y})$	148,589
ค่าต้นทุนเชื้อเพลิงชีวมวลตลอดระยะเวลา 20 y $(\sum_{t=1}^n \frac{PEC}{(1+r)^t}, \text{ Baht})$	0
ค่าผลรวมอัตราการผลิตไฟฟ้าตลอดระยะเวลา 20 y $(\sum_{t=1}^n \frac{W_{ORC} t_{OP}}{(1+r)^t}, \text{ kWh})$	1,501,067
ค่าต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยของการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานชีวมวล $(LEC = \frac{Inv + \sum_{t=1}^n \frac{PEC}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{W_{ORC} t_{OP}}{(1+r)^t}}, \text{ Baht/kWh})$	1.89

สรุปผลการวิจัย

จากผลการศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับเทคโนโลยีการผลิตพลังงานทดแทนจากผักตบชวาสามารถสรุปเนื้อหาสำคัญได้ ดังต่อไปนี้

- การผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลจากผักตบชวาถือว่าเป็นเทคโนโลยีที่มีผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าเทคโนโลยีในงานวิจัยอื่นๆ ที่ได้ทำการศึกษางานข้างต้น โดยมีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เท่ากับ $0.380 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$ ดังนั้นจึงถือได้ว่าเป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมที่จะนำไปศึกษาในด้านพลังงาน และด้านเศรษฐศาสตร์ต่อไป
- การนำเชื้อเพลิงชีวมวลจากผักตบชวอบแห้ง มาใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อนร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ ต้องใช้ปริมาณเชื้อเพลิงประมาณ 270 kg/h และมีค่าต้นทุนต่อหน่วยของผักตบชวอบแห้งเท่ากับ 2.43 Baht/kWh ซึ่งมีค่าน้อยกว่าอัตราการรับซื้อไฟฟ้าของรัฐบาลสำหรับพลังงานชีวมวลที่มีค่าเท่ากับ 5.34 Baht/kWh
- การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลจากผักตบชวอบแห้งมีการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าประมาณ $0.168 \text{ kg CO}_2\text{-eq/kg fuel}$ และเมื่อนำไปคิดรวมกับการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอบแห้งผักตบชวาที่ประมาณ $0.380 \text{ kg CO}_2\text{-eq/kg fuel}$ ทำให้มีการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์รวมทั้งสิ้น $0.548 \text{ CO}_2\text{-eq/kg fuel}$
- ระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ขนาด 20 kW_e มีการปลดปล่อยปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าประมาณ $148.62 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$ หรือคิดเป็น $7.432 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$ ต่อการผลิตไฟฟ้า 1 kWh และมีปริมาณต้นทุนพลังงานต่อค่าต้นทุนพลังงานต่อปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ $18.08 \text{ Baht-kg CO}_2\text{-eq/kWh}^2$
- การนำเชื้อเพลิงผักตบชวอบแห้งมาผสมกับขยะชุมชนในสัดส่วนโดยน้ำหนัก 50:50 %wt พบว่า ทำให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 5 เท่า หรือประมาณ 21.17 MJ/kg และทำให้ค่าต้นทุนต่อหน่วยมีค่าลดลงเหลือประมาณ 0.93 Baht/kWh

เอกสารอ้างอิง

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. แผนพลังงานทดแทนและพลังงาน
ทางเลือก พ.ศ. 2558 - 2579 , ระบบออนไลน์ :
http://www.dede.go.th/download/files/PPT_AEDP2015.pdf, เข้าถึงเมื่อ: 14 มีนาคม 2558.
- คณะกรรมการเทคนิคด้านรอยเท้าคาร์บอนของผลิตภัณฑ์. Carbon footprint (รอยเท้าคาร์บอน), ระบบ
ออนไลน์: <http://203.155.220.174/pdf/cmc/carbonfootprint.pdf>, เข้าถึงเมื่อ: 3 ธันวาคม 2558.
- ธนาคารแห่งประเทศไทย. อัตราแลกเปลี่ยนเงินตราต่างประเทศ, ระบบออนไลน์:
[https://www.bot.or.th/thai/statistics/financialmarkets/exchangerate/_layouts/application/exchan
gerate/exchangerate.aspx](https://www.bot.or.th/thai/statistics/financialmarkets/exchangerate/_layouts/application/exchangerate/exchangerate.aspx), เข้าถึงเมื่อ: 14 เมษายน 2559.
- ธารรัตน์ มุ่งเจริญ. 2550. การประเมินวัฏจักรชีวิต: เครื่องมือสำหรับ CDM (Life Cycle Assessment,
LCA; Tool for CDM). สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.
- นัฐพร ไชยญาติ. การนำความร้อนทิ้งกลับคืน (Waste Heat Recovery), วิทยาลัยพลังงานทดแทน,
มหาวิทยาลัยแม่โจ้, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยแม่โจ้, พิมพ์ครั้งที่ 1 มกราคม พ.ศ.2558, 324 หน้า.
- นัฐพร ไชยญาติ. การออกแบบระบบด้านพลังงานทดแทน (Renewable Energy System Design),
วิทยาลัยพลังงานทดแทน, มหาวิทยาลัยแม่โจ้, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยแม่โจ้, พิมพ์ครั้งที่ 2
สิงหาคม พ.ศ.2559, 315 หน้า.
- นิลวรรณ ไชยทนต์ และ อัจฉรา จันทร์ผง. 2556. รายงานการวิจัยเรื่องการศึกษาศักยภาพของการผลิต
แก๊สชีวภาพด้วยระบบหมักย่อยร่วมระหว่างผักตบชวากับมูลสุกร, ทุนอุดหนุนจากมหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาควิชาชีพ เชียงใหม่.
- มนิษา ปุลววัน. 2555. การผลิตเอทานอลจากน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการปรับสภาพผักตบชวาโดยใช้เชื้อรา
ไตรโคเดอร์มา ฮาร์เซียนัม, วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม, คณะวิทยาศาสตร์,
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- มหาวิทยาลัยแม่โจ้. 2553. โครงการการศึกษาศักยภาพการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงผักตบชวา โดยใช้
เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน.
- ศูนย์วิจัยและพัฒนาประมงน้ำจืด. ข้อมูลพื้นฐาน, ระบบออนไลน์: <http://www.fisheries.go.th/if-phayao/>,
เข้าถึงเมื่อ: 3 สิงหาคม 2557.
- สุพจน์ แหวนเพ็ชร. 2552. การผลิตไบโอดีเซลจากผักตบชวาโดยการไฟโรไลซิสแบบเร็ว, วิทยาศาสตร
มหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค, คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุรพงษ์ คล้ายมุข. 2545. การศึกษาเปรียบเทียบการผลิตโปรตีนเชอร์แก๊สจากเตาผลิตแก๊สแบบไหลขึ้นและไหลลงโดยใช้ผักตบชวาอัดแท่งเป็นเชื้อเพลิง, วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพลังงาน, คณะพลังงานและวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. นโยบายการรับซื้อไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนในรูปแบบ Feed-in Tariff, ระบบออนไลน์: http://www.eppo.go.th/power/fit-seminar/FiT_2558.pdf, เข้าถึงเมื่อ: 1 พฤษภาคม 2559.

Adisa Azapagic, Slobodan Perdan and Roland Clift. **Sustainable Development in Practice: Case Studies for Engineers and Scientists**, Online: https://books.google.co.th/books?id=o09IB0iObbkC&pg=PA135&lpg=PA135&dq=Kiely,+1996+heating+value&source=bl&ots=pDnMNQ9Nwf&sig=ulbxQNQOUjtx2GU7QQZQuylMmes&hl=th&sa=X&ved=0ahUKEwi_7oSfzdXPAhXLv18KHWWUnD94Q6AEIGjAA#v=onepage&q&f=false, Accessed: 12 October 2016.

HanPower Energy Technology Co., LTD. **Cost of Organic Rankine Cycle Set**, Tao-Yuan Hsien, Taiwan; 2014.

Sate Sampattagul, Pranee Nutongkaewb and Tanongkiat Kiatsiriroat. 2011. **Life cycle assessment of palm oil Biodiesel Production in Thailand**, International Journal of Renewable Energy, Vol.6, No.1, January 2011.

Tongsopit S, Greacen C. 2012. **Thailand's Renewable Energy Policy: FiTs and Opportunities for International Support**. WRI-ADB Workshop on Feed-in Tariffs. Manila: Philippines.

University of Washington. **Energy**, Online: http://www.ruraltech.org/projects/conversions/briggs_conversions/briggs_ch09/chapter09_combined.pdf, Accessed: 12 October 2016.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. ผลการทดสอบคุณสมบัติของเชื้อเพลิงฟักตบขาวอบแห้ง



ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110

โทรศัพท์ 074-286904-7 โทรสาร 074-212813 อีเมล sec-all@group.psu.ac.th เว็บไซต์ <http://www.sec.psu.ac.th>

วิสัยทัศน์: เป็นองค์กรภาครัฐที่เติบโตด้วยความมุ่งมั่นสู่การเป็นองค์กรที่มีสมรรถนะสูง

และยั่งยืนจากการให้บริการทดสอบด้วยเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

F-RES-033 ฉบับที่ 2 วันที่ 05/06/2558

รายงานผลการทดสอบ

เลขที่รายงาน:	C0042/59	หน้า:	1/1
เลขที่ใบขอใช้บริการ:	0092/59	วันที่รับตัวอย่าง:	11 มกราคม 2559
ชื่อและที่อยู่ลูกค้า:	วิทยาลัยสงขลานครินทร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ 63 ม.4 ต.หนองหาร อ.สันทราย จ.เชียงใหม่ 50290		
ชื่อตัวอย่าง:	A ผักตบชวา		
รายละเอียดตัวอย่าง:	A ผักตบชวา		

ผลการทดสอบ:

ลำดับที่	พารามิเตอร์	หน่วย	เครื่องมือ/วิธีการทดสอบ	ผลการทดสอบ $\pm$ SD
1.	ค่าความร้อน (H.H.V)	cal/g	ASTM D 5865	967.7 $\pm$ 21.5
2.	ความชื้นทั้งหมด	% w.t.	ASTM D 7582	26.835
3.	เถ้า	%	ASTM D 7582	43.470
4.	Volatile matter	%	ASTM D 7582	27.060
5.	Fixed Carbon	%	ASTM D 7582	2.635

- ผลการทดสอบอ้างอิงใบขอใช้บริการ (F-ASO-054) เลขที่ 0092/59

- SD = Standard Deviation

- H.H.V = Higher Heating Value

- ตัวอย่างทดสอบแบบ as received basis

(นางรุสมี กุทวิจิตร)

หัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

18 มกราคม 2559

ภาคผนวก ข. ผลการทดสอบคุณสมบัติของเชื้อเพลิงฟักตบขาวอบแห้งและขยะโดยสัดส่วน 50:50 %wt



ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ชั้น 1 อาคารบริหารวิชาการรวม อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110

โทรศัพท์ 074-286904-7 โทรสาร 074-212813 อีเมล sec-all@group.psu.ac.th เว็บไซต์ <https://www.sec.psu.ac.th>

วิสัยทัศน์: เป็นองค์กรภาครัฐที่เติบโตด้วยความมุ่งมั่นสู่การเป็นองค์กรที่มีสมรรถนะสูง
และยั่งยืนจากผลการให้บริการทดสอบด้วยเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

F-RES-033 ฉบับที่ 2 บังคับใช้ 05/06/2558

รายงานผลการทดสอบ

เลขที่รายงาน:	C0043/59	หน้า:	1/1
เลขที่ใบขอใช้บริการ:	0092/59	วันที่รับตัวอย่าง:	11 มกราคม 2559
ชื่อและที่อยู่ลูกค้า:	วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ 63 ม.4 ต.หนองหาร อ.สันทราย จ.เชียงใหม่ 50290		
ชื่อตัวอย่าง:	B ผักตบชวา : ขยะ		
รายละเอียดตัวอย่าง:	B ผักตบชวา (สัดส่วน 50:50 %wt)		

ผลการทดสอบ:

ลำดับที่	พารามิเตอร์	หน่วย	เครื่องมือ/วิธีการทดสอบ	ผลการทดสอบ ± SD
1.	ค่าความร้อน (H.H.V)	cal/g	ASTM D 5865	5,060.3 ± 264.8
2.	ความชื้นทั้งหมด	% wt.	ASTM D 3302 และ ASTM D 7582	3.932
3.	เถ้า	%	ASTM D 7582	10.646
4.	Volatile matter	%	ASTM D 7582	79.536
5.	Fixed Carbon	%	ASTM D 7582	5.886

- ผลการทดสอบอ้างอิงใบขอใช้บริการ (F-AQ-054) เลขที่ 0092/59

- SD = Standard Deviation

- H.H.V = Higher Heating Value

- ตัวอย่างทดสอบบน as received basis

(นางรุณี กุลวิจิตร)

หัวหน้าฝ่ายบริการเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์

11 มกราคม 2559

ภาคผนวก ก. ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซไอเสียของเชื้อเพลิงผักตบชวาอบแห้ง



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

Page 59 of 104
Date: 2019-03-08 10:00:00

ใบรายงานผลการทดสอบ

เลขที่รายงาน ERDI 59/228 : หน้า 1/1

ชื่อผู้รับบริการ : มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ที่อยู่ : 63 ถ. เชียงใหม่ - พะริ้ว ต.หนองหาร อ.สันทราย จ. เชียงใหม่ 50200
รายละเอียดตัวอย่าง : ผักตบ 100 % / เก็บตัวอย่างวันที่ 6 มีนาคม 2559
ลักษณะ/สภาพตัวอย่าง : เก็บใส่ถุงเก็บแก๊ส สภาพตัวอย่างปกติ
วันที่รับตัวอย่าง : 8 มีนาคม 2559 (รหัสตัวอย่าง 59/3/8 1288)
วันที่ทดสอบ : 8 - 10 มีนาคม 2559
ผลการทดสอบ :

รายการทดสอบ	ผลการทดสอบ	หน่วย	วิธีทดสอบ / เทคนิคที่ใช้
1. Methane (CH ₄)	0.2	% mole	*part 2720 C. **part D 1945
2. Carbonmonoxide (CO)	2.0	% mole	
3. Oxygen (O ₂)	8.3	% mole	
4. Nitrogen (N ₂)	45	% mole	
5. Hydrogen (H ₂)	NF.	% mole	

หมายเหตุ : NF. = Not Found

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

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

ลงชื่อ.....วิรัช มณีศิริ.....

(นางสาววิรัช มณีศิริ)

ผู้จัดการวิชาการ

ลงชื่อ.....อนุเมตต์ ผลโดย.....

(นางสาวพรสวรรค์ ขัติยส)

หัวหน้างานห้องปฏิบัติการ

อนุมัติผลโดย

.....ดร.พฤษ อักกะรังสี.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พฤษ อักกะรังสี)

ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

วันที่รายงาน (.....11.....) มีนาคม 2559.....)

รายงานฉบับนี้เป็นเอกสารวิจัยฉบับนำสำหรับการทดสอบเท่านั้น รายงานผลการทดสอบนี้ ไม่สามารถนำผลไปใช้ในการอื่นใดได้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ ม.

สภาวิศวกรและสภาวิชาชีพพลังงานและพลังงานทดแทนแห่งประเทศไทย

สัญลักษณ์และตัวย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
A	Activity	Unit
CFP	Carbon footprint	kg CO ₂ -eq
ECCF	Energy costing per carbon footprint	Baht·kg CO ₂ -eq/Unit ²
EF	Emission factor	kg CO ₂ -eq/Unit
FC	Fixed carbon	%wt
HHV	High heating value	kJ/kg
LHV	Low heating value	kJ/kg
MC	Moisture content	%wt
Q	Heat capacity	kW
T	Temperature	°C
v	Velocity	m/s
VM	Volatile matter	%wt
W	Work	kW _e
ตัวกรีก	ความหมาย	หน่วย
ρ	Density	kg/m ³
ตัวย่อ	ความหมาย	
COD	Chemical Oxygen Demand	
CW	Cooling water	
Exp	Expander	
HW	Hot water	
i	Input/Inlet	
LCA	Life Cycle Assessment	
max	Maximum	
MSW	Municipal solid waste	
P	Pump	
o	Outlet	
OP	Oil pump	
St	Standard	