

การประเมินความเหมาะสมของวัตถุประสงค์ชีวมวลในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดตามแนวคิดผลิตภาพสีเขียว



นางสาวเลิศทัศนีย์ อยู่วัฒนา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

BIOMASS RAW MATERIAL SUITABILITY ASSESSMENT USED IN FUEL PELLETT PRODUCTION
AGAINST GREEN PRODUCTIVITY PRINCIPLE

Miss Lerttasanee Yoovatana



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Industrial Engineering

Department of Industrial Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินความเหมาะสมของวัตถุดิบชีวมวลในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดตามแนวคิดผลิตภาพสีเขียว
โดย	นางสาวเลิศทัศน์ย์ อยู่วัฒนา
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์จรัสพัฒน์ เงามประเสริฐวงศ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ทรงกลด จารุสมบัติ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชูตีมา)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์จรัสพัฒน์ เงามประเสริฐวงศ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ทรงกลด จารุสมบัติ)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ริจิรวนิช)



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
รายการอ้างอิง.....	187
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	191



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	2
1.1.1 แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558-2579.....	2
(Alternative Energy Development Plan : AEDP2015).....	
1.1.2 อุตสาหกรรมพลังงานทดแทน:เชื้อเพลิงอัดเม็ด.....	5
1.1.3 ศักยภาพการนำชีวมวลไปใช้เป็นพลังงานทดแทน.....	11
1.1.4 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากเชื้อเพลิงอัดเม็ด.....	26
1.1.5 ผลผลิตภาพสีเขียว.....	28
1.2 วัตถุประสงค์.....	33
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	33
1.4 วิธีและเทคนิคที่ใช้ในงานวิจัย.....	33
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	34
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	35
2.1 การศึกษาการใช้พลังงานในภาคอุตสาหกรรม.....	35
2.2 ประสิทธิภาพด้านพลังงาน (Energy Efficiency).....	38
2.3 ประสิทธิภาพ ประสิทธิภาพ และผลผลิตภาพ.....	38
2.4 การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม (Mixture Design).....	40
2.4.1 การออกแบบแบบเชฟเฟิมเพล็กซ์ซิมเพล็กซ์แลกทิส (Scheffe' simplex. 42	
Lattice).....	
2.4.2 การออกแบบแบบเชฟเฟิมเพล็กซ์เซนทรอยด์ (Scheffe' Simplex Centroid) 43	
2.4.3 การออกแบบแบบซิมเพล็กซ์แอกเซียล (Simplex Axial).....	44
2.4.4 การออกแบบแบบเอ็กซ์ทรีมเวอร์ทิส (Extreme Vertice).....	44

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 การวิเคราะห์ถดถอยและสหสัมพันธ์	45
2.6 การวิเคราะห์สมการถดถอยชนิดหลายตัวแปร	45
2.6.1 วิธีการคัดเลือกตัวแปร.....	45
2.6.2 การตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม.....	47
2.6.3 แบบจำลองการถดถอยสำหรับการทดลองส่วนผสม (Mixture Design)	48
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	49
2.7.1 การใช้พลังงานต่อหนึ่งหน่วยการผลิต (Specific Energy Consumption)	49
2.7.2 การผลิตเชื้อเพลิงจากวัตถุดิบชีวมวล.....	53
2.7.3 การศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด.....	56
2.7.3.1 กระบวนการทำให้แห้ง (Drying)	56
2.7.3.2 กระบวนการบดย่อย (Grinding).....	58
2.7.3.3 กระบวนการอัดเม็ด (Pelletizing)	61
2.7.4 การประเมินต้นทุนการผลิตในการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด.....	67
2.7.5 การศึกษาการปล่อยมลสารสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ในการผลิต.....	71
เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด.....	73
2.7.6 ผลิตภาพสีเขียวในภาคอุตสาหกรรม.....	73
2.7.7 มาตรฐานของชีวมวลอัดเม็ดของประเทศไทย.....	74
2.7.8 การใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม.....	79
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	81
3.1 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง (Design of experiment).....	81
3.2 วิเคราะห์การใช้พลังงานของการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด.....	86
3.3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	88
3.3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาทดลอง	88
3.3.2 สถานที่ปฏิบัติการ.....	89
3.3.3 การผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด	89
3.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของแท่งเชื้อเพลิง.....	96
3.4.1 การหาค่าความร้อน (Heating Value)	96

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.2 การหาปริมาณสารระเหย (Volatile Matter).....	97
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย.....	98
4.1 การศึกษาการใช้พลังงานในขั้นตอนการผลิต.....	98
4.1.1 ขั้นตอนการบดย่อยชีวมวล (Grinding).....	98
4.1.2 ขั้นตอนการอัดเม็ด (Pelletizing).....	99
4.2 ต้นทุนการผลิตรวมของตัวอย่างชีวมวลอัดเม็ด.....	104
4.3 การศึกษา Mixture Design แบบ Simplex Centroid.....	107
4.3.1 การประเมินผลต่อต้นทุนในการผลิต (บาท/ตัน).....	107
4.3.2 การประเมินผลต่อค่าความร้อนของชีวมวลอัดเม็ด (GHV).....	111
4.3.3 การประเมินผลต่อค่า VOCs.....	117
4.4 การประเมินความเหมาะสมของวัตถุดิบตามแนวคิดผลิตภาพสีเขียว.....	126
4.5 การพิจารณาค่าความร้อนชีวมวลต่อต้นทุนการผลิต (MJ/บาท/ตัน)	131
4.6 การวิเคราะห์ความไวเมื่อราคาวัตถุดิบชีวมวลมีการเปลี่ยนแปลง (Sensitivity.....	130
Analysis)	
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	137
5.1 ผลของสัดส่วนวัตถุดิบชีวมวลต่าง ที่มีต่อคุณสมบัติต่างๆ	137
5.1.1 ต้นทุนวัตถุดิบ.....	137
5.1.2 ค่าความร้อน	139
5.1.3 ค่า VOCs	140
5.2 การประเมินความเหมาะสมของวัตถุดิบชีวมวลตามแนวคิดผลิตภาพสีเขียว.....	139
ข้อเสนอแนะ.....	142
รายการอ้างอิง.....	142
ภาคผนวก.....	143
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	189

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1	ผลการดำเนินงานด้านพลังงานทดแทน ปี 2555 – 2557.....	3
ตารางที่ 1.2	สัดส่วนการใช้ประโยชน์ชีวมวลด้านพลังงาน	11
ตารางที่ 1.3	องค์ประกอบของแกลบ	14
ตารางที่ 1.4	พื้นที่เพาะปลูกและผลผลิตอ้อยปี การผลิต 2557/58.....	16
ตารางที่ 1.5	องค์ประกอบทางเคมีเถ้าอ้อย	16
ตารางที่ 1.6	น้ำหนักสดต่อไร่ของกระถินยักษ์ (<i>L.leucocephala</i>) ยูคาลิปตัส (<i>E. cama</i> <i>dulensis</i>) กระถินเทพา (<i>A. mangium</i>) กระถินณรงค์ ที่อายุ 24 เดือน	.21
ตารางที่ 1.7	การวิเคราะห์คุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบประมาณ (Proximate Value) และแบบแยกธาตุ (Ultimate Value)	22
ตารางที่ 1.8	ผลผลิตต่อไร่ ในรูปของน้ำหนักสด มวลชีวภาพของลำต้น และค่า ความร้อนต่อไร่.. ของ <i>L. leucocephala</i> , <i>E. camaldulensis</i> , <i>A. mangium</i> and <i>A. spp.</i> ที่อายุ 24 เดือน	23
ตารางที่ 2.1	แสดงตัวอย่างหน่วยต่างๆ ของค่าการใช้พลังงานจำเพาะ SEC.....	36
ตารางที่ 2.2	ส่วนผสมของส่วนประกอบแต่ละชนิดในแต่ละสิ่งทดลองของแผนการทดลองแบบ..... Mixture design ที่มีส่วนประกอบ 3 ชนิด	42
ตารางที่ 2.3	แสดงการใช้พลังงานจำเพาะในการบดหยาบอัลฟาฟาสับ.....	60
ตารางที่ 2.4	ค่าขนาดอนุภาคตามสมการในแบบจำลองต่างๆ.....	61
ตารางที่ 2.5	ความแตกต่างหลักของแต่ละพารามิเตอร์ที่กำหนดในแต่ละรูปแบบการผลิต.....	67
ตารางที่ 2.6	ความแตกต่างของต้นทุนการผลิตในแต่ละรูปแบบการผลิต.....	68
ตารางที่ 2.7	คุณลักษณะที่ต้องการของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดที่กำหนดไว้ในร่างมาตรฐานของ.... เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด.....	78
ตารางที่ 3.1	จำนวนตัวอย่างการออกแบบการทดลอง แบบ Simplex Centroid.....	83
ตารางที่ 3.2	รูปแบบและอัตราส่วนผสมของวัตถุดิบ	85

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4.1 ปริมาณกระแสไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ในขั้นตอนการบดย่อยชีวมวล.....	99
ตารางที่ 4.2 ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในขั้นตอนการบดย่อยชีวมวล (kWh ต่อตันชีวมวล).....	100
ตารางที่ 4.3 ปริมาณกระแสไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ในขั้นตอนการอัดเม็ดชีวมวล.....	100
ตารางที่ 4.4 ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในขั้นตอนการอัดเม็ดชีวมวล (kWh ต่อตันชีวมวล).....	101
ตารางที่ 4.5 ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในขั้นตอนการผลิตชีวมวลอัดเม็ด.....	102
ตารางที่ 4.6 ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาท/หน่วย).....	104
ตารางที่ 4.7 ราคาวัตถุดิบชีวมวล.....	105
ตารางที่ 4.8 ต้นทุนการผลิตรวมของตัวอย่างชีวมวลอัดเม็ด.....	105
ตารางที่ 4.9 การวิเคราะห์สมการถดถอยของต้นทุนการผลิต.....	107
ตารางที่ 4.10 ค่าความร้อนชีวมวลอัดเม็ด (MJ/Kg).....	112
ตารางที่ 4.11 การวิเคราะห์สมการถดถอยของค่าความร้อนชีวมวลอัดเม็ด.....	113
ตารางที่ 4.12 ค่าปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่าย VOCs (%).....	118
ตารางที่ 4.13 การวิเคราะห์สมการถดถอยของปริมาณ VOCs.....	119
ตารางที่ 4.14 สัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน (Coefficient of Variation:C.V.) ของข้อมูล.....	125
ตารางที่ 4.15 ค่าคุณสมบัติของชีวมวลอัดเม็ดตามแนวคิด ผลิตภาพสีเขียว.....	126
ตารางที่ 4.16 ค่าตัวแปรตอบสนอง 3 ตัวแปรจากสมการถดถอย.....	129
ตารางที่ 4.17 ค่าความร้อนชีวมวลต่อต้นทุนการผลิต (MJ/บาท/ตัน).....	130
ตารางที่ 4.18 การเปลี่ยนแปลงราคาวัตถุดิบ กระจินและเถ้าชานอ้อย.....	131
ตารางที่ 4.19 การเปลี่ยนแปลงราคาวัตถุดิบ ยูคาลิปตัสและเถ้าชานอ้อย.....	132
ตารางที่ 4.20 การเปลี่ยนแปลงราคาวัตถุดิบ ยูคาลิปตัสและแกลบ.....	132
ตารางที่ 4.21 การเปลี่ยนแปลงราคา ยูคาลิปตัสและเถ้าชานอ้อย.....	133
ตารางที่ 4.22 การเปลี่ยนแปลงราคา แกลบและเถ้าชานอ้อย	133

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 ตัวอย่างเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากเศษวัสดุทางการเกษตร	6
รูปที่ 1.2 ชนิดและคุณสมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ด.....	6
รูปที่ 1.3 กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด.....	8
รูปที่ 1.4 เครื่องจักรที่ใช้ในแต่ละกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด.....	9
รูปที่ 1.5 ปริมาณชีวมวลในปี 2556.....	13
รูปที่ 1.6 กราฟเปรียบเทียบพื้นที่ปลูกอ้อยปีการผลิต 2549/2550 – 2557/2558.....	17
รูปที่ 1.7 กราฟเปรียบเทียบปริมาณอ้อยเข้าหีบ ปีการผลิต 2548/2549 – 2557/2558.....	18
รูปที่ 1.8 ชีวมวลที่นำมาศึกษา 2 ประเภท.....	24
รูปที่ 1.9 จำนวนผู้จัดจำหน่ายเชื้อเพลิงอัดเม็ดรายภูมิภาค.....	25
รูปที่ 1.10 การกระจายของผู้จัดจำหน่ายเชื้อเพลิงอัดเม็ดรายภูมิภาค.....	26
รูปที่ 1.11 ตัวอย่างมลสาร VOCs ที่เกิดจากอุตสาหกรรมไม้.....	27
รูปที่ 1.12 แนวคิดผลิตภาพสีเขียว (Green Productivity).....	32
รูปที่ 2.1 บริเวณที่เป็น Mixture design ที่มีส่วนประกอบ 2 และ 3 ชนิดตามลำดับ.....	41
รูปที่ 2.2 ตำแหน่งของสิ่งทดลองทั้งหมดในแผนการทดลองแบบ Mixture design ที่มี ส่วนประกอบ 3 ชนิด	41
รูปที่ 2.3 สิ่งทดลองสำหรับแผนการทดลองแบบเซฟเฟอิมเพล็กซ์แลคทิส ที่มี 3 ตัวแปร.....	43
แต่ละตัวแปร มี 2 ระดับ และ 3 ระดับ.....	
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างของสิ่งทดลองต่างๆ สำหรับ 3 ปัจจัย และ 4 ปัจจัยของการออกแบบ แบบเซฟเฟอิมเพล็กซ์เซนทรอยด์.....	44
รูปที่ 2.5 กราฟ Biplot แสดงความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบของวัตถุดิบและปัจจัย.....	55
ของการทำการอัดเม็ด โดยการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก(Principal Component)	
รูปที่ 2.6 การใช้พลังงานจำเพาะที่มีต่อปริมาณความชื้นของเม็ดอัดที่ลดลง.....	58

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.7 รูปแสดงการวัดพลังงานไฟฟ้าระหว่างกระบวนการบดอัดโดยใช้แฮมเมอร์มิล (Hammermill).....	59
รูปที่ 2.8 การบริโภคพลังงานจำเพาะ (ESC) สำหรับการบดอัดไม้สับ 3 ขนาดที่ขนาดรูกorong....	.61
ต่างๆ ได้แก่ 18 mm 15 mm และ 12 mm โดยมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 0.1%	
รูปที่ 2.9 (a)หลักการทำงานของตัวอัดเม็ดแบบวงแหวน (b) ภาพขยายของช่องอัดซึ่งแสดงว่า... ชีวมวลถูกกดอัดอย่างไร	64
รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน (P) และอัตราส่วนการอัดเม็ด (compression ratio)	64
รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างแรงดันการอัดเม็ดและอัตราส่วนการอัดสำหรับไม้ปืช ที่ 20 °C.....	66
รูปที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ของเวลาและความเข้มข้นของ VOCs ที่พบในไม้เนื้อแข็ง (Hard Wood) ไม้เนื้ออ่อน (Soft Wood) และทั้งสองเนื้อไม้ (Blended)	72
รูปที่ 2.13 ขั้นตอนการดำเนินงานโครงการสำหรับผลการดำเนินงานของโครงการศึกษากำหนด มาตรฐานของชีวมวลอัดเม็ดเพื่อพัฒนาเป็นเชื้อเพลิงชีวมวล.....	74
รูปที่ 3.1 การเลือกการออกแบบการทดลองแบบ Mixture Design.....	82
รูปที่ 3.2 การเลือกการออกแบบการทดลองแบบ Simplex Centroid.....	.82
รูปที่ 3.3 การวิเคราะห์ผลจากการออกแบบการทดลองแบบ Mixture Design.....	86
รูปที่ 3.4 ประเภทของเครื่องอัดเม็ด : เครื่องอัดแบบแม่พิมพ์แผ่นกลมเครื่องอัดแบบ..... แม่พิมพ์วงแหวน.....	87
รูปที่ 3.5 การประเมินการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตชีวมวลอัดเม็ด.....	87
รูปที่ 3.6 กระถินที่ผ่านการสับหยาบ.....	89
รูปที่ 3.7 ยูคาลิปตัสที่ผ่านการสับหยาบ.....	90
รูปที่ 3.8 เครื่องบดหยาบและบดย่อยชีวมวล (Hammermill).....	91
รูปที่ 3.9 การวัดพลังงานไฟฟ้าจากการใช้เครื่องบดชีวมวล.....	92
รูปที่ 3.10 กระถินบดหยาบ.....	93

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.11 ยูคาลิปต์สดหยาบ.....	93
รูปที่ 3.12 กระถินบดย่อย.....	94
รูปที่ 3.13 ยูคาลิปต์สดย่อย.....	94
รูปที่ 3.14 เครื่องอัดเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล (Flat die).....	95
รูปที่ 4.1 Mixture design ของต้นทุนการผลิตรวมของชีวมวลอัดเม็ด.....	109
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงการกระจายตัวของ residual ของ ต้นทุนการผลิต.....	110
รูปที่ 4.3 กราฟการกระจายตัว Residual และค่า Fitted value ของต้นทุนการผลิต.....	111
รูปที่ 4.4 การหาระดับที่ต่ำที่สุดของต้นทุนการผลิตชีวมวลอัดเม็ด.....	111
รูปที่ 4.5 Mixture design ของค่าความร้อนของชีวมวลอัดเม็ด.....	115
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงการกระจายตัวของ residual ของค่าความร้อนชีวมวลอัดเม็ด.....	116
รูปที่ 4.7 กราฟการกระจายตัว Residual และค่า Fitted value ของค่าความร้อน.....	116
รูปที่ 4.8 การหาระดับที่สูงที่สุดของค่าความร้อนชีวมวลอัดเม็ด.....	117
รูปที่ 4.9 Mixture design ของปริมาณ VOCs.....	121
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงการกระจายตัวของ residual ของปริมาณ VOCs.....	122
รูปที่ 4.11 กราฟการกระจายตัว Residual และค่า Fitted value ของปริมาณ VOCs.....	123
รูปที่ 4.12 การหาระดับที่ต่ำที่สุดของปริมาณ VOCs.....	124
รูปที่ 4.13 กราฟคอนทัวร์ซ้อนทับทั้ง 3ค่าตัวแปรตามแนวคิดผลิตภาพสีเขียวของชีวมวลกระถิน ยูคาลิปต์ส และเถาขานอ้อย	125
รูปที่ 4.14 กราฟคอนทัวร์ซ้อนทับทั้ง 3ค่าตัวแปรตามแนวคิดผลิตภาพสีเขียวของชีวมวลกระถิน แกลบ และเถาขานอ้อย	126
รูปที่ 4.15 การวิเคราะห์ความไวเมื่อราคาวัตถุดิบชีวมวลเปลี่ยนแปลงใน Scenario 1.....	134
รูปที่ 4.16 การวิเคราะห์ความไวเมื่อราคาวัตถุดิบชีวมวลเปลี่ยนแปลงใน Scenario 2.....	134
รูปที่ 4.17 การวิเคราะห์ความไวเมื่อราคาวัตถุดิบชีวมวลเปลี่ยนแปลงใน Scenario 3.....	135

บทที่ 1

บทนำ

พลังงานเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญกับการดำเนินชีวิตในปัจจุบัน ประเทศไทยมีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในปี พ.ศ. 2557 ประเทศไทยมีการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายทั้งสิ้น 75,804 ktoe โดยในปีนี้ประกอบด้วยการใช้พลังงานจากพลังงานทดแทนดั้งเดิม (ฟืนไม้และแกลบ) รวมทั้งสิ้นประมาณร้อยละ 10.1 ของปริมาณการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายทั้งหมด ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องหาแหล่งพลังงานอย่างอื่นมาใช้ทดแทนเพื่อลดปัญหาดังกล่าว ซึ่งแหล่งพลังงานทดแทนที่หาได้ง่ายและมีศักยภาพสูงในประเทศไทย คือพลังงานชีวมวล โดยการนำเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาผลิตเป็นพลังงานชีวมวลสามารถช่วยลดการใช้เชื้อเพลิงฟืนไม้ได้ โดยเชื้อเพลิงอัดเม็ดเป็นรูปแบบการแปรรูปวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่เป็นที่นิยมรูปแบบหนึ่ง เนื่องจากขั้นตอนการผลิตชีวมวลอัดเม็ดนั้น มีขั้นตอนที่ไม่ยุ่งยากและสามารถทำได้ง่ายและยังช่วยแก้ปัญหาการกำจัดของเสียและวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรได้ในเวลาเดียวกัน นอกจากนี้ การใช้พลังงานจากชีวมวลยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมโดยไม่ส่งผลกระทบต่อภาวะโลกร้อน (global warming) เนื่องจากปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สุทธิตลอดวัฏจักรชีวิตของมันมีค่าเท่ากับศูนย์ (carbon neutral) ชีวมวลจึงเป็นแหล่งพลังงานที่เหมาะสมในการใช้งานตามแนวทางการพัฒนาอย่างยั่งยืน

สำหรับการพัฒนาอย่างยั่งยืนในภาคอุตสาหกรรมนั้น แนวคิดเรื่องการจัดทำผลิตภาพสีเขียว (Green GDP) ซึ่งก่อให้เกิดการลดต้นทุนและเพิ่มผลิตภาพเพื่อจะนำไปสู่ผลกำไรสูงสุด ในขณะที่ต้องตระหนักถึงปัจจัยด้านสังคมและสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้เพื่อปรับตัวให้สอดคล้องกับความต้องการของลูกค้าและตลาดที่ให้ความสำคัญกับสินค้าที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental-friendly Products) มากขึ้น อีกทั้งยังเป็นการเสริมสร้างความแตกต่างในเชิงนวัตกรรมและจุดแข็งให้แก่ธุรกิจโดยมีจุดเน้นใน 3 ประเด็น ที่เรียกว่า GP's Triple Focus ได้แก่ สิ่งแวดล้อม (Environment) แสดงให้เห็นถึงการพัฒนาอย่างยั่งยืน ความสามารถในการทำกำไร (Profitability) พิจารณาจากปัจจัยนำเข้า (Factor Inputs) และด้านคุณภาพ (Quality)

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

1.1.1 แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558-2579 (Alternative Energy Development Plan : AEDP2015)

กระทรวงพลังงาน ได้วางกรอบแผนบูรณาการพลังงานแห่งชาติ ที่ให้ความสำคัญใน 3 ด้าน ประกอบด้วย 1) ด้านความมั่นคงทางพลังงาน (Security) ในการตอบสนองต่อปริมาณความต้องการพลังงาน ที่สอดคล้องกับอัตราการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ อัตราการเพิ่มของประชากร และอัตราการขยายตัวของเขตเมือง รวมถึงการกระจายสัดส่วนของเชื้อเพลิงให้มีความเหมาะสม 2) ด้านเศรษฐกิจ (Economy) ที่ต้อง คำนึงถึงต้นทุนพลังงานที่มีความเหมาะสมและไม่เป็นอุปสรรคต่อการพัฒนาทางเศรษฐกิจและสังคมของประเทศในระยะยาว การปฏิรูปโครงสร้างราคาเชื้อเพลิงประเภทต่างๆ ให้สอดคล้องกับต้นทุน และให้มีภาวะภาษีที่เหมาะสม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานของประเทศไม่ให้เกิดการใช้พลังงานอย่างฟุ่มเฟือยรวมถึงส่งเสริมการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ และ 3) ด้านสิ่งแวดล้อม (Ecology) เพิ่มสัดส่วนการผลิตพลังงานหมุนเวียนภายในประเทศ และการผลิตพลังงานด้วยเทคโนโลยีประสิทธิภาพสูง เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและชุมชน

ในแผนบูรณาการพลังงานแห่งชาติ กระทรวงพลังงานได้ทบทวนการจัดทำแผนพลังงาน 5 แผนหลักในช่วงปี พ.ศ. 2558 - 2579 ที่สอดคล้องกับรอบของการจัดทำแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติได้แก่ แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย แผนอนุรักษ์พลังงาน แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก แผนการจัดหาก๊าซธรรมชาติของไทย และแผนบริหารจัดการน้ำมันเชื้อเพลิง โดยในการจัดทำแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก (Alternative Energy Development Plan : AEDP2015) จะให้ความสำคัญในการส่งเสริมการผลิตพลังงานจากวัตถุดิบพลังงานทดแทนที่มีอยู่ภายในประเทศให้ได้เต็ม ตามศักยภาพ การพัฒนาศักยภาพการผลิตพลังงานทดแทนด้วยเทคโนโลยีที่มีความเหมาะสม และการพัฒนาพลังงานทดแทนเพื่อผลประโยชน์ร่วมในมิติด้านสังคมและสิ่งแวดล้อมแก่ชุมชน

การพัฒนาพลังงานทดแทนในประเทศไทยเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เป็นผลมาจากนโยบายส่งเสริมการผลิตการใช้พลังงานทดแทน โดยการใช้งานจะอยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้า พลังงานความร้อน และเชื้อเพลิงชีวภาพ โดยในปี 2557 ประเทศไทยมีการใช้พลังงานทดแทนทั้งสิ้น 9,025 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ (ktoe) เพิ่มขึ้นจากปีก่อนร้อยละ 9.6 หรือคิดเป็นร้อยละ 11.9 ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้าย

การใช้ชีวมวลในโรงไฟฟ้าชีวมวล ผลการดำเนินการโรงไฟฟ้าชีวมวลปี 2555-2557 ใช้ชีวมวล 2,451.82 เมกะวัตต์ คิดเป็น ร้อยละ 54.56 ของการใช้พลังงานทดแทนในการผลิตไฟฟ้าทั้งหมด ตามเป้าหมายที่กำหนดไว้ในแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก หรือ AEDP (Alternative Energy Development Plan 2558-2579) ในส่วนของการผลิตไฟฟ้าชีวมวลมีเป้าหมายอยู่ที่ 5,570 เมกะวัตต์ ซึ่งปัจจุบันมีการผลิตไฟฟ้าเข้าระบบแล้วประมาณ 3,638 เมกะวัตต์ ยังเหลือจำนวนที่จะรับซื้ออีกประมาณ 1,932 เมกะวัตต์ [1]

ตารางที่ 1.1 ผลการดำเนินงานด้านพลังงานทดแทน ปี 2555 – 2557

พลังงานทดแทน	หน่วย	ผลการดำเนินงาน		
		2555	2556	2557
ไฟฟ้า*	เมกะวัตต์	2,786	3,788	4,494
	พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ	1,138	1,341	1,467
1. แสงอาทิตย์	เมกะวัตต์	376.72	823.46	1,298.51
2. พลังงานลม	เมกะวัตต์	111.73	222.71	224.47
3. พลังน้ำขนาดเล็ก	เมกะวัตต์	101.75	108.80	142.01
4. ชีวมวล	เมกะวัตต์	1,959.95	2,320.78	2,451.82
5. ก๊าซชีวภาพ	เมกะวัตต์	193.40	265.23	311.50
6. ชยะชุมชน	เมกะวัตต์	42.72	47.48	65.72
ความร้อน	พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ	4,886	5,279	5,775
1. แสงอาทิตย์	พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ	3.50	4.50	5.10
2. ชีวมวล	พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ	4,346.00	4,694.00	5,144.00
3. ก๊าซชีวภาพ	พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ	458.00	495.00	528.00
4. พลังงานชยะ	พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ	78.20	85.00	98.10
เชื้อเพลิงชีวภาพ	ล้านลิตร/วัน	4.20	5.50	6.10
	พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ	1,270	1,612	1,783
1. เอทานอล	ล้านลิตร/วัน	1.40	2.60	3.21
2. ไบโอดีเซล	ล้านลิตร/วัน	2.80	2.90	2.89
การใช้พลังงานทดแทน (พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ)		7,294	8,232	9,025
การใช้พลังงานขั้นสุดท้าย (พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ)		73,316	75,214	75,804
สัดส่วนพลังงานทดแทนต่อการใช้พลังงานขั้นสุดท้าย (%)		9.95	10.94	11.91

*รวมการผลิตไฟฟ้าจากระบบ (Including off grid power generation) และไม่รวมการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานขนาดใหญ่

จากการศึกษาและรวบรวมข้อมูลพืชเศรษฐกิจหลักของประเทศระหว่างปี 2556 จำนวน 6 ชนิด ได้แก่ ข้าว ข้าวโพด อ้อย มันสำปะหลัง ปาล์มน้ำมัน และยางพารา เพื่อประเมิน ศักยภาพของชีวมวลในประเทศไทยที่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลในภาคอุตสาหกรรม จะเห็นได้ว่าในแต่ละปี ยังคงมีชีวมวลปริมาณมากที่ไม่ได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ ซึ่งชีวมวลจากปาล์ม น้ำมัน อ้อย และข้าว เป็น ชีวมวลที่มีศักยภาพสูงที่สุด โดยที่ แกลบ ชานอ้อย ใบปาล์ม กะลาปาล์มและเศษไม้อื่นๆ จะถูกใช้ประโยชน์จนหมด โดยส่วนใหญ่ใช้ประโยชน์ด้านพลังงาน ส่วนที่เหลือและทางมะพร้าว

มีการใช้ประโยชน์น้อยที่สุด รองลงมาได้แก่ ทางปาล์มและรากไม้ยางพารา ทั้งนี้ ชีวมวลที่ไม่มีการใช้ประโยชน์ในด้านพลังงานเลย ได้แก่ ฟางข้าว ใบและยอดอ้อย ลำต้นข้าวโพด ลำต้นมันสำปะหลัง และทางปาล์ม โดยแกลบ ถูกใช้ประโยชน์ในโรงไฟฟ้าร้อยละ 37.8% ชานอ้อย 23.3% และเศษไม้ 43.0% ของการใช้ประโยชน์ด้านพลังงานในโรงไฟฟ้า

โดยปัญหาอย่างหนึ่งของการใช้ชีวมวลในโรงไฟฟ้าคือวัตถุดิบชีวมวลที่ใช้เพื่อผลิตชีวมวล คือ การขาดแคลนวัตถุดิบ เช่น แกลบ ซึ่งขณะนี้ปริมาณอยู่ที่ 7 ล้านตันต่อปีเท่านั้น แต่ยังมีการอนุมัติโครงการใหม่ๆเข้ามาในพื้นที่มากขึ้น ทำให้แกลบราคาสูงขึ้น และโรงไฟฟ้าชีวมวลในพื้นที่อีสานใช้ถ่านหินเกินกำหนด บางโรงใช้สูงถึง 80% โดยหวังคุ้มต้นทุนผลิตไฟไว้ที่ไม่เกินราคา 2 บาท/หน่วย ซึ่งพบว่าโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กมาก (VSPP) ในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่ใช้เชื้อเพลิงประเภทแกลบ เศษไม้ ฯลฯ หันมาใช้ถ่านหินมากกว่าที่มีการกำหนดไว้ในสัญญาซื้อขายไฟฟ้ากับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) ที่ร้อยละ 25 โดยผู้ประกอบการบางรายได้ออกแบบระบบสตรีมเทอร์ไบน์โรงไฟฟ้าให้สามารถใช้ถ่านหินได้สูงสุดถึงร้อยละ 80 เนื่องจากถ่านหินให้ค่าความร้อนได้มากกว่าการใช้เศษไม้ ทำให้สามารถคุ้มต้นทุนค่าไฟฟ้าให้อยู่ที่ไม่เกิน 2 บาท/หน่วยได้ แม้ราคาแกลบ เศษไม้หรือไม้สับ ปัจจุบันอยู่ที่ราคา 800 บาท/ตัน แต่เนื่องจากค่อนข้างผันผวนตามฤดูกาล รวมถึงบางช่วงราคาปรับสูงขึ้นถึง 1,200 บาท/ตัน เว้นแต่บางช่วงที่ปริมาณเศษไม้ล้นตลาด ราคาตกมาอยู่ที่ 300-400 บาท/ตัน ซึ่งเกิดขึ้นเพียงช่วงเวลาสั้น ๆ ส่งผลให้บริหารต้นทุนยาก โดยการใช้ถ่านหินยังอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยตรง เพราะโรงไฟฟ้าชีวมวลจะไม่มีระบบกำจัดสารซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และสารอื่น ๆ ที่อาจจะปนเปื้อนมาในอากาศและอาจกระทบต่อประชาชนในพื้นที่รอบโรงไฟฟ้าด้วย ทั้งนี้ ราคาถ่านหินเมื่อเทียบกับราคาแกลบชานอ้อยไม้สับมีราคาใกล้เคียงกันแต่ถ่านหินให้ค่าความร้อนที่สูงมาก

ดังนั้น ในการเพิ่มความร้อนของวัตถุดิบชีวมวลได้แก่ วัตถุเหลือใช้ทางการเกษตรและวัตถุดิบประเภทเนื้อไม้ ที่ใช้มากในโรงไฟฟ้า ได้แก่ แกลบ เถ้าชานอ้อย และไม้โตเร็ว เช่น กระถินและยูคาลิปตัส จึงต้องการแปรรูปวัตถุดิบชีวมวลดังกล่าวให้อยู่ในรูปเชื้อเพลิงอัดเม็ด เพื่อเพิ่มค่า ความร้อนให้แก่เชื้อเพลิงชีวมวลดังกล่าว

โดยในการแปรรูปวัตถุดิบชีวมวลที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ดในโรงไฟฟ้า ดังกล่าว จะศึกษาในวัตถุดิบเหลือใช้ทางการเกษตร วัตถุดิบประเภทเนื้อไม้จากไม้โตเร็ว และวัตถุดิบเหลือใช้ทางการเกษตรที่ผสมกับวัตถุดิบประเภทเนื้อไม้จากไม้โตเร็ว เพื่อศึกษาความเหมาะสมของการนำวัตถุดิบแต่ละประเภทมาใช้ผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด

1.1.2 อุตสาหกรรมพลังงานทดแทน:เชื้อเพลิงอัดเม็ด

ในปัจจุบัน ปัญหาผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมและพลังงาน เป็นเรื่องที่ทั่วโลกให้ความสนใจ เนื่องจากมีผลกระทบต่อการดำเนินชีวิตประจำวันในทุกด้าน โดยในภาคอุตสาหกรรมเป็นภาคส่วนที่ส่งผลต่อทั้งด้านสิ่งแวดล้อมและการใช้พลังงานมากที่สุด เนื่องจากมีการใช้ทรัพยากรที่เป็นทั้งวัตถุดิบในอุตสาหกรรมและพลังงานเพื่อใช้ในการผลิตปริมาณมาก รวมถึงการปลดปล่อยมลพิษต่างๆ ซึ่งมีผลต่อสิ่งแวดล้อม

อุตสาหกรรมพลังงานทดแทนเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่กำลังมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง สอดคล้องกับการที่ทั่วโลกให้ความสนใจในด้านสิ่งแวดล้อมและพลังงานโดยประเทศไทยมุ่งสู่การพัฒนาที่ยั่งยืนประเทศไทยมุ่งสู่การพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development) ตามที่ได้ให้สัตยาบันรับรองปฏิญญาโจฮันเนสเบิร์กว่าด้วยการพัฒนาที่ยั่งยืน (Johannesburg Declaration on Sustainable Development – JSD) เมื่อปี พ.ศ. 2545 และปฏิญญามะนิลาว่าด้วยอุตสาหกรรมสีเขียว (Manila Declaration) เมื่อปี พ.ศ. 2552 ในการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศไทย จึงได้กำหนดยุทธศาสตร์ในการพัฒนาอุตสาหกรรมเพื่อสิ่งแวดล้อมและสังคม และมีแผนพัฒนาพลังงานทดแทน โดยกรมพัฒนาพลังงานทดแทน ซึ่งมีเป้าหมายเพื่อเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนให้เป็นร้อยละ 20 ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายของประเทศ ภายในปี 2565 จึงมีการส่งเสริมจากหน่วยงานภาครัฐในการให้การสนับสนุนและส่งเสริมภาคอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นภาคส่วนที่มีการใช้พลังงานมากที่สุดโดยพัฒนาโรงงานต้นแบบเพื่อใช้พลังงานทดแทนแทนพลังงานที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรมปัจจุบัน น้ำมันเตา และผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมอื่นๆ ซึ่งมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยพลังงานทดแทนที่มีการใช้ปัจจุบัน ได้แก่ พลังงานจากชีวมวล เช่น ก๊าซชีวภาพ เชื้อเพลิงอัดเม็ด เป็นต้น

ชีวมวล (Biomass) เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติที่อยู่ในรูปของสารอินทรีย์ และสามารถนำพลังงานที่กักเก็บไว้เหล่านั้นมาใช้ผลิตพลังงานได้แก่เศษไม้ขยะวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเป็นต้นการผลิตพลังงานจากชีวมวลอาจทำได้โดยการนำมาเผาเพื่อนำความร้อนไปผลิตกระแสไฟฟ้าแทนการใช้พลังงานจากฟอสซิลซึ่งเป็นพลังงานที่มีอยู่อย่างจำกัดตัวอย่างชีวมวลในประเทศไทยเช่นแกลบชานอ้อยเศษไม้กากปาล์มกากมันซังข้าวโพดเป็นต้นโดยการผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงชีวมวลสามารถทำได้โดยการเผาไหม้ชีวมวลโดยตรง (Direct Combustion) และกระบวนการเคมีความร้อน (Thermochemical Conversion)



รูปที่ 1.1 ตัวอย่างเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากเศษวัสดุทางการเกษตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



Net Calorific Value
Ash Content
Moisture Content

A1
> 4,040 Kcal/Kg
≤ 0.7%
≤ 10%

A2
> 4,040 Kcal/Kg
≤ 1.5%
≤ 10%

B
> 4,040 Kcal/Kg
≤ 3%
≤ 10%

รูปที่ 1.2 ชนิดและคุณสมบัติของเชื้อเพลิงอัดเม็ด

เชื้อเพลิงอัดเม็ด จัดเป็นประเภทหนึ่งของเชื้อเพลิงที่ทำจากไม้ ซึ่งโดยทั่วไปจะผลิตจากขี้เลื่อยหรือเศษวัสดุจากการผลิตไม้แปรรูป หรือเศษไม้ที่เหลือใช้จากโรงงานผลิตเฟอร์นิเจอร์ และยังรวมถึงไม้จากการโค่นต้นไม้ที่ไม่จำเป็นหรือยืนต้นตาย การตัดแต่งกิ่งไม้ เป็นต้น เชื้อเพลิงอัดเม็ดมีการผลิตในหลากหลายรูปแบบและยังมีคุณภาพสินค้าที่หลากหลายขึ้นอยู่กับการนำไปใช้ ทั้งที่เป็นเชื้อเพลิงสำหรับโรงไฟฟ้าการให้ความร้อนกับที่อยู่อาศัยและการใช้งานประเภทอื่นๆ เชื้อเพลิงอัดเม็ดมีความหนาแน่นสูงมากจากกระบวนการผลิต และจากกระบวนการให้ความร้อนสูงทำให้มีความชื้นต่ำ (ต่ำกว่า 10%) ซึ่งช่วยให้เชื้อเพลิงอัดเม็ด สามารถที่จะก่อให้เกิดประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่สูงมาก นอกจากนี้รูปร่างของตัวเชื้อเพลิงที่เป็นรูปทรงกระบอกมีขนาดค่อนข้างเท่ากันทุกชิ้น และมีขนาดเล็กทำให้สามารถที่จะนำระบบการป้อนเชื้อเพลิงอัตโนมัติมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถกำหนดปริมาณของเชื้อเพลิงได้อย่างแม่นยำ โดยสามารถใช้ระบบการปล่อยเชื้อเพลิงแบบกรวย หรือระบบสายพานแบบนิวเมตริกก็ได้

เชื้อเพลิงอัดเม็ดมีความหนาแน่นสูงมาก (650-700 Kg/CBM) ทำให้ได้เปรียบเชื้อเพลิงชีวมวลประเภทอื่นทั้งในด้านของพื้นที่ในการจัดเก็บและด้านการขนส่งในระยะทางที่ค่อนข้างไกลก็สามารถขนได้ในปริมาณที่มากเชื้อเพลิงอัดเม็ดสามารถที่จะขนถ่ายจากที่เก็บขนาดใหญ่ให้กับรถขนส่งหรือไซโล (Silo) ตามความต้องการของลูกค้าได้โดยสะดวก โดยเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด มีข้อดีดังนี้

1. สะดวกในการขนส่ง และประหยัดค่าขนส่งเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดอื่นเนื่องจากมีความหนาแน่นสูง (Bulk Density) ประมาณ 650-700 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ในขณะที่ขี้เลื่อยจะมีความหนาแน่นอยู่ที่ประมาณ 300 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร และขี้เลื่อยความหนาแน่นที่ 200 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร
2. สามารถควบคุมปริมาณการใช้ได้ง่ายเพราะมีขนาดที่เท่าๆกัน มีน้ำหนักที่ค่อนข้างแน่นอน ประสิทธิภาพของอัตราการเผาไหม้อยู่ที่มากกว่า 80% ของเตาเผา ซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญมากสำหรับผู้ประกอบการที่ใช้เตาเผาที่ต้องการอัตราการเผาไหม้ที่สม่ำเสมอ และมีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์
3. มีขี้เถ้าน้อยกว่าชีวมวลประเภทอื่น (3%) การจัดการขี้เถ้ามักจะเป็นปัญหาสำคัญของผู้ใช้เชื้อเพลิงชีวมวล โดยเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวลประเภทอื่นนั้น เชื้อเพลิงอัดเม็ดมีขี้เถ้าที่น้อยกว่าคือไม่เกิน 3% ทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดขี้เถ้าส่วนเกินได้อีกทางหนึ่ง
4. ให้พลังงานความร้อนมากกว่าชีวมวลประเภทอื่น (High Heating Value) โดยมีค่า Net Calorific Value มากกว่า 16.5 MJ/kg แต่ถ้าเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลที่ไม่ได้มีการอัดและลดความชื้นค่าพลังงานจะ

อยู่ที่ประมาณ 10.9 MJ/kg เช่นไม้ฟืน ไม้สับ ขี้เลื่อย ขี้กบ สาเหตุที่เชื้อเพลิงอัดเม็ดมีค่าพลังงานมากกว่าเป็นเพราะมีความชื้นน้อยกว่า 10% และเชื้อเพลิงอัดเม็ดถือว่าเป็นแหล่งพลังงานที่มีค่าพลังงานสูง โดยเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าพลังงานกับน้ำมันเบนซิน เชื้อเพลิงอัดเม็ด 2 กิโลกรัม จะเท่ากับน้ำมันเบนซิน 1 ลิตร ในขณะที่มีต้นทุนที่ต่ำกว่ามาก

5. ค่าความชื้นต่ำ (น้อยกว่า10%) ซึ่งจากผลวิจัยพบว่าค่าความชื้นของเชื้อเพลิงอัดเม็ดแปรผกผันกับค่าพลังงาน ยิ่งเชื้อเพลิงมีความชื้นมาก ค่าพลังงานก็จะลดลง

6. เป็นการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) หนึ่งในก๊าซเรือนกระจก (Green House Gas) ซึ่งเป็นสาเหตุของภาวะโลกร้อน(Global Warming) เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาชีวมวลจะถูกหมุนเวียนกลับไปใช้โดยพืชเพื่อสังเคราะห์แสง (Carbon Offset)

การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดเป็นการนำเอาวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมไม้ เช่น ขี้กบ (Wood Shaving) ขี้เลื่อย (Wood Saw Dust) ปีกไม้ (Wood Slab) หรือ วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น ฟางข้าว แกลบ ชานอ้อย ยอดและใบอ้อย ทลายปาล์ม และอื่นๆ มาผ่านกระบวนการย่อย (Grinding Process) กระบวนการอบลดความชื้น (Drying Process) กระบวนการอัดเม็ด (Pelleting Process) กระบวนการลดอุณหภูมิและบรรจุ (Cooling and Packing Process) ทั้งนี้กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด (Biomass Pellet) อาจแตกต่างกันขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้



รูปที่ 1. 3 กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด



รูปที่ 1. 4 เครื่องจักรที่ใช้ในแต่ละกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด

ปัจจุบัน เชื้อเพลิงอัดเม็ด จึงเป็นที่ต้องการอย่างมากในหลายประเทศทั่วโลก ยกตัวอย่างเช่น ในประเทศเกาหลี ได้มีการกำหนดนโยบายทางด้านพลังงานจากทางภาครัฐในเรื่องของการสนับสนุน ให้มีการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลทดแทนเชื้อเพลิงจากฟอสซิลทั้งในส่วนของภาคการผลิตไฟฟ้าและในส่วนของภาคอุตสาหกรรมเช่นเดียวกับในประเทศญี่ปุ่นได้มีการวางแผนลดการผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์เปลี่ยนเป็นโรงไฟฟ้าเชื้อเพลิงชีวมวล

ในปี 2005 การปรับขึ้นราคาอย่างรวดเร็วของเชื้อเพลิงฟอสซิล ทำให้ความต้องการเชื้อเพลิงอัดเม็ดเพิ่มขึ้นทั้งในทวีปยุโรปและอเมริกา ทำให้เชื้อเพลิงอัดเม็ดมีการผลิตในระดับที่เป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ตามข้อมูลของ International Energy Agency Task 40 ระบุว่า การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดได้เพิ่มขึ้นเป็นเท่าตัวในช่วงระหว่างปี 2006 ถึง 2010 โดยมีปริมาณการผลิตมากกว่า 14 ล้านตัน และในรายงานปี 2012 ของ Biomass Energy Resource Center ระบุว่า ปริมาณการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดในทวีปอเมริกาเหนือจะยังคงเพิ่มขึ้นอีกเท่าตัว

มีการศึกษาโดยกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน [2] ในการส่งเสริมการเปลี่ยนหัวเผาหม้อไอน้ำจากเดิมใช้น้ำมันเตาให้ปรับมาใช้หัวเผาที่สามารถใช้เชื้อเพลิงอัดเม็ด (Wood pellets) แทนเพื่อลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงที่มีต้นทุนสูงและส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนในประเทศมากยิ่งขึ้นจากการศึกษาพบว่า หากเปลี่ยนมาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีเลื้อยอัดเม็ดจะมีความคุ้มค่าสูงสุดคิดเป็นค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิงที่ลดลง 60% หรือเฉลี่ย 2.5 ล้านบาทต่อปี รองลงมาได้แก่ เชื้อเพลิงจากหญ้าเนเปียร์อัดเม็ดคิดเป็นค่าใช้จ่ายที่ลดลง 51% หรือเฉลี่ย 2.2 ล้านบาทต่อปีและเชื้อเพลิงจากแกลบอัดเม็ด คิดเป็นค่าใช้จ่ายที่ลดลง 49% หรือเฉลี่ย 2.1 ล้านบาทต่อปี

สำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ดหรือ Wood pellets ปัจจุบันประเทศไทยเริ่มมีการผลิต อยู่แล้ว แต่ผู้ผลิตส่วนใหญ่เน้นทำตลาดส่งออกเกือบทั้งหมดเนื่องจากปริมาณการใช้ในประเทศยังไม่เป็นที่นิยม อย่างแพร่หลาย โดยเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตจากวัตถุดิบที่หาได้ในประเทศไทย เช่น เปลือกไม้ยูคา ชี เลื้อย ชังข้าวโพดและหญ้าเนเปียร์ เป็นต้น คุณสมบัติเบื้องต้นจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8-10 มิลลิเมตร และยาว 20-50 มิลลิเมตร มีค่าความร้อน (Heat value) สูงประมาณ 4,000-4,500 kcal/kg (กิโลแคลอรี) มีค่าความชื้นต่ำ (Moister content) 8-15% มีขี้เถ้าเพียง 3-5% ที่สำคัญ จะมีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์จึงทำให้การเผาเชื้อเพลิงอัดเม็ดนี้สามารถช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ได้อย่างดีนอกจากนี้ยังพบว่ามียาราคาต่ำกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลอื่นๆ เช่น ก๊าซ LPG หรือน้ำมันเตา โดยเชื้อเพลิงอัดเม็ด 2-3 กิโลกรัมให้ค่าความร้อนเท่ากับน้ำมันเตา ปริมาณ 1 ลิตร

การใช้เชื้อเพลิงอัดเม็ดสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายได้มากกว่ากรณีการใช้น้ำมันเตาประมาณ 50% แต่ทั้งนี้ก็จำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงระบบเตาเผาจากเตาเผาแบบน้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ด แต่ การคืนทุนปกติก็จะไม่เกิน 3 ปี

เนื่องจากวัตถุดิบในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด มีหลากหลายชนิดทั้งที่เป็นประเภทเนื้อไม้ เช่น จากเศษไม้ยางพารา ไม้ไผ่ ไม้ยูคาลิปตัส เป็นต้น และเชื้อเพลิงที่ไม่ใช่เนื้อไม้ เช่น วัสดุทางการเกษตร ต่างๆ ได้แก่ เศษอ้อย ฟางข้าว แกลบ ชานอ้อย ซึ่งชีวมวลแต่ละชนิดก็จะมีคุณสมบัติและการใช้ พลังงานในขั้นตอนการผลิตและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมแตกต่างกัน/ เนื่องจากคุณลักษณะ องค์ประกอบและความชื้นในชีวมวลแต่ละชนิดแตกต่างกันทั้งนี้ ในการเลือกวัตถุดิบในการผลิต เชื้อเพลิงอัดเม็ด มักเลือกวัตถุดิบที่อยู่ใกล้โรงงานผลิต ซึ่งถือเป็นชีวมวลที่หาได้ในท้องถิ่น เพื่อเป็นการ ลดค่าใช้จ่ายในการขนส่งวัตถุดิบจากแหล่งอื่นๆ

ในการส่งเสริมการผลิตและการใช้เชื้อเพลิงอัดเม็ดในภาคอุตสาหกรรมของภาครัฐ จำเป็นต้องศึกษาต้นทุนการผลิตชีวมวลอัดเม็ด ในเรื่องของพลังงานที่ใช้ในการผลิตและผลกระทบต่อ สิ่งแวดล้อมของชีวมวลที่นำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ด ตลอดจนค่าความร้อนที่ได้และต้นทุนของ วัตถุดิบนั้น เพื่อเป็นแนวทางให้ผู้ประกอบการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดสามารถเลือกใช้วัตถุดิบที่มีความ เหมาะสมในการประกอบธุรกิจได้

1.1.3 คักยภาพการนำชีวมวลไปใช้เป็นพลังงานทดแทน

ตารางที่ 1.2 สัดส่วนการใช้ประโยชน์ชีวมวลด้านพลังงาน

ชีวมวล	สัดส่วนการใช้ประโยชน์ชีวมวล					สัดส่วน ชีวมวล คงเหลือ
	สัดส่วนการใช้ประโยชน์ด้านพลังงาน (Energy Use)				สัดส่วนการใช้ ประโยชน์ด้าน อื่นๆ (Non- energy Use)	
	ใช้เอง	ภาค อุตสาหกรรม	โรงไฟฟ้า	ครัวเรือนและ อุตสาหกรรม โมคครัวเรือน		
แกลบ	21.8%	12.3%	37.8%	9.9%	18.2%	0.0%
ฟางข้าว	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	72.3%	27.7%
ใบและยอดอ้อย	0.0%	0.3%	0.0%	0.0%	40.5%	59.2%
ขานอ้อย	76.7%	0.0%	23.3%	0.0%	0.0%	0.0%
ซังข้าวโพด	20.3%	18.5%	0.4%	3.1%	48.0%	9.8%
ลำต้นข้าวโพด	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	46.9%	53.1%
เหง้ามันสำปะหลัง	0.0%	1.2%	4.2%	0.0%	38.8%	55.8%
ลำต้นมันสำปะหลัง	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	54.0%	46.0%
ทางปาล์ม	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	10.2%	89.8%
โยปาล์ม	74.7%	23.8%	0.7%	0.0%	0.7%	0.0%
กะลาปาล์ม	8.9%	89.5%	0.4%	0.0%	1.2%	0.0%
ทะลายปาล์มเปล่า	1.3%	2.0%	2.0%	0.0%	78.8%	15.9%
รากไม้อย่างพารา	4.0%	23.1%	4.1%	0.0%	0.0%	68.8%
ซีเส้อย่างพารา	40.9%	4.9%	0.0%	0.0%	54.1%	0.1%
เศษไม้อย่างพารา	0.9%	43.9%	1.9%	4.3%	48.9%	0.1%
เศษไม้ชิ้น	6.0%	41.6%	43.0%	0.4%	9.1%	0.0%
กะลามะพร้าว	3.5%	0.0%	0.0%	15.2%	50.0%	31.3%
เปลือกมะพร้าว	1.0%	0.0%	4.5%	0.0%	72.1%	22.4%
ทะลายและ ทางมะพร้าว	2.2%	0.0%	2.2%	0.0%	5.3%	90.2%

CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากสถานการณ์ด้านพลังงานในปัจจุบัน ซึ่งมีแนวโน้มที่จะประสบปัญหาการขาดแคลนแหล่ง พลังงานในอนาคต อันเนื่องมาจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น น้ำมัน ถ่านหิน และ ก๊าซ ธรรมชาติที่เพิ่มขึ้นตลอดเวลา ซึ่งแหล่งเชื้อเพลิงฟอสซิล มีปริมาณจำกัดและต้องใช้เวลาานมากกว่าธรรมชาติจะสร้างขึ้นมาได้ใหม่ รวมทั้งเกิดปัญหาภาวะโลกร้อนจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเนื่องจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงดังกล่าว ส่งผลให้ภาครัฐมีนโยบายส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนให้มากขึ้น เช่น พลังงานจากแสงอาทิตย์พลังงานลมแบบทุ้งกังหันลม พลังงานน้ำขนาดเล็ก ก๊าซชีวภาพ ชีวมวล

เมื่อพิจารณาถึงความเหมาะสมกับทรัพยากรที่มีอยู่ของประเทศไทย พบว่าการนำวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรมาใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงนับเป็นทางเลือกที่สอดคล้องกับจุดเด่นของประเทศไทยที่มีผลผลิตการเกษตรเป็นจำนวนมาก ผลผลิตที่สำคัญของไทย เช่น ข้าว ข้าวโพด อ้อย มันสำปะหลัง ปาล์ม น้ำมัน ยางพารา มีการเพาะปลูกอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งภายหลังจากการเก็บเกี่ยวผลผลิตหรือการแปรรูปผลผลิต จะมีวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก อาทิเช่น แกลบ ฟางข้าว ชังข้าวโพด ใบอ้อย กากอ้อย ใบและทะลายปาล์ม เป็นต้น โดยวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเหล่านี้สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล เพื่อทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลได้เป็นอย่างดีในปัจจุบัน อุตสาหกรรมได้หันมาใช้เชื้อเพลิงชีวมวลกันมากขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาเป็นเชื้อเพลิงสำหรับระบบความร้อน ซึ่งวารสารเครือข่ายชีวมวล และถ่านหินสะอาด ฉบับที่ 2/2551 (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.), 2551) ได้นำเสนอตัวเลขจากรายงานการสำรวจศักยภาพชีวมวลของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ซึ่งระบุว่าประเทศไทยมีชีวมวลที่มีศักยภาพในการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงจำนวน 9 ชนิด เท่ากับ 9,800 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ(ktoe) หรือคิดเป็นการผลิตไฟฟ้า 2,600 เมกะวัตต์ โดยชีวมวลที่ ด้มาจากอ้อย (กาก ยอดและใบ) ข้าว (ฟางข้าวและแกลบ) รวมทั้งปาล์มน้ำมัน (ใบและทะลายปาล์ม) เป็นชีวมวลที่มีสัดส่วนสูงที่สุดในปริมาณชีวมวลทั้งหมด โดยคิดเป็น 80-85 เปอร์เซ็นต์ของชีวมวลที่มีภายในประเทศ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2559) [3]

ศักยภาพชีวมวลของประเทศไทยในปัจจุบัน สำหรับการศึกษเกี่ยวกับศักยภาพชีวมวลภายในประเทศเพื่อนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทน สิ่งหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่งที่ต้องพิจารณาคือ ปริมาณชีวมวลแต่ละประเภทที่มีอยู่ทั้งหมด เพื่อให้ทราบถึงปริมาณชีวมวลที่มีภายในประเทศ และปริมาณชีวมวลที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ ได้ ซึ่งข้อมูลดังกล่าว เป็นส่วนสำคัญในการนำมาพิจารณาว่าชีวมวลชนิดใดบ้าง มีศักยภาพที่ควร ได้รับการส่งเสริมให้มีการนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทน โดยการประเมินศักยภาพชีวมวลแต่ละชนิด ในงานวิจัยนี้ ใช้แนวทางการประเมิน จากค่าอัตราส่วนชีวมวลต่อผลผลิต (Residue to Product Ratio) หรือ RPR และค่าอัตราส่วนชีวมวลที่เหลือจากการใช้ประโยชน์ (Surplus Availability Factor) หรือ SAF เนื่องจากเป็นวิธีที่สะดวกและมีมาตรฐาน ซึ่งรายละเอียดของทั้ง 2 ค่า มีดังต่อไปนี้ ค่าอัตราส่วนชีวมวลต่อผลผลิต (Residue to Product Ratio) (RPR) ค่า RPR เป็นค่าที่แสดงอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงจากผลผลิตไปเป็นชีวมวล โดยแสดงอยู่ในรูปร้อยละของผลผลิต ซึ่งสามารถคำนวณหาปริมาณชีวมวลได้จาก

$$\text{ปริมาณชีวมวลที่เกิดขึ้น} = \text{RPR} \times \text{ปริมาณผลผลิต}$$

ค่าอัตราส่วนชีวมวลที่เหลือจากการใช้ประโยชน์ (Surplus Availability Factor) (SAF) สำหรับค่า SAF เป็นค่าที่แสดงอัตราส่วนของชีวมวลที่เหลือจากการใช้ประโยชน์จากปริมาณชีวมวลที่เกิดขึ้นทั้งหมด โดยชีวมวลส่วนนี้จะเป็นส่วนที่สามารถนำไปผลิตพลังงานได้ คำนวณได้จาก

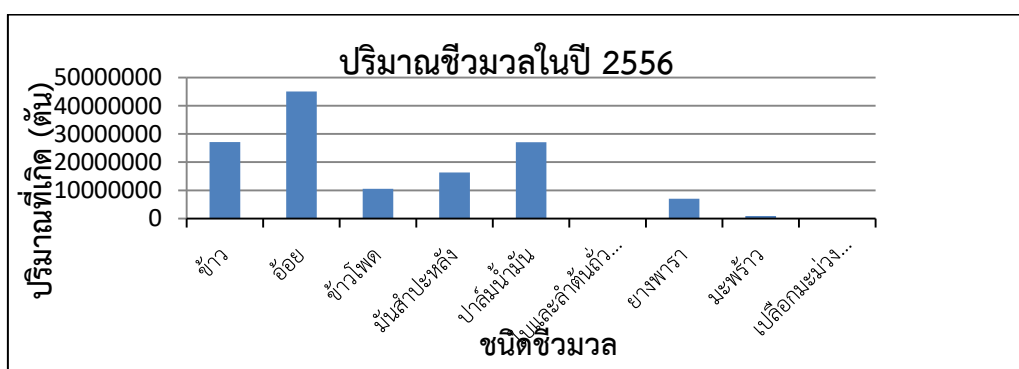
$$\text{ปริมาณชีวมวลเพื่อการผลิตพลังงาน} = \text{SAF} \times [\text{RPR} \times \text{ปริมาณผลผลิต}]$$

จากการศึกษาและค้นคว้าข้อมูลจากเอกสาร รายงานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับศักยภาพชีวมวลที่เกิดขึ้นจากพืชเศรษฐกิจหลักของประเทศไทยพบว่า พืชที่มีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นพลังงานชีวมวล ประกอบไปด้วยข้าว ข้าวโพด อ้อย มันสำปะหลัง ปาล์มน้ำมัน ยางพารา ถั่วเหลือง ข้าวฟ่าง มะพร้าว และฝ้าย ซึ่งมีปริมาณชีวมวลที่เกิดจากพืชดังกล่าวมีศักยภาพเทียบเท่ากับพลังงานสูงถึง 997.78 PJ

1.1.3.1 ประเภทวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร

เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม จึงมีผลผลิตทางการเกษตรในแต่ละปีจำนวนมาก โดยในการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรจะให้วัสดุเหลือทิ้ง ได้แก่ เศษพืชหรือวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรเป็นสิ่งที่ได้จากการคัดหรือจำแนกเอาส่วนที่ใช้ประโยชน์ไปใช้แล้วเอาส่วนที่ไม่ใช่ไปทิ้ง ซึ่งพบได้ทั่วไปตามไร่นา สวน ป่า และโรงงานต่างๆ เช่น แกลบ ชี้อ้อย กิ่งไม้ และเศษวัสดุที่เหลือใช้จากการเก็บเกี่ยว (Crop residues) อาทิเช่น ฟางข้าว เปลือกถั่ว ต้นข้าว ต้นมันสำปะหลัง เป็นต้น

ในการศึกษานี้ สนใจศึกษาชีวมวลประเภทวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร 2 ชนิด ได้แก่ แกลบและเถ้าขานอ้อย เนื่องจากเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีปริมาณจำนวนมาก



รูปที่ 1.5 ปริมาณชีวมวลในปี 2556 (ที่มา : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานรายงานพลังงานของประเทศไทย 2556)

- แกลบ

ข้าวเป็นผลิตผลทางการเกษตรที่สำคัญมาก ในปีหนึ่งจะมีการเก็บเกี่ยวข้าวได้ทั่วโลกประมาณ 600 ล้านตัน ประเทศไทยเป็นประเทศที่ส่งออกข้าวมากที่สุด มีกำลังการผลิตข้าวปีละประมาณ 25 ล้านตัน ในปีหนึ่งๆ ประเทศไทยได้แกลบจากการสีข้าวประมาณ 5 ล้านตัน ในแต่ละตัน (1000 กิโลกรัม) ของข้าวเปลือกเมื่อสีแล้วจะมีแกลบอยู่ประมาณ 200 กิโลกรัม และเมื่อนำแกลบไปเผาจะได้เถ้าแกลบ (rice husk ash) ประมาณร้อยละ 20 ของน้ำหนักของแกลบหรือประมาณ 40 กิโลกรัม

แกลบมีน้ำหนัก 20 % ของเมล็ดข้าวได้จากการขัดสี แกลบประกอบด้วยสารอินทรีย์ และซิลิกา ปริมาณสารอินทรีย์จะประกอบด้วยธาตุคาร์บอนประมาณร้อยละ 51 ออกซิเจนร้อยละ 42 ส่วนที่เหลือจะเป็นไฮโดรเจน และไนโตรเจน ส่วนซิลิกาจะพบมากบริเวณผิวนอกของแกลบจึงทำให้แกลบมีความแข็งสูงสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุขัดผิวได้ โดยปกติแล้วองค์ประกอบของแกลบข้าวจะประกอบไปด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) หรือซิลิกาประมาณ 20-25% สารอินทรีย์ประเภทเซลลูโลส 75-80 % และสิ่งเจือปนพวกโลหะออกไซด์อีกเล็กน้อย โดยองค์ประกอบของแกลบประกอบด้วยธาตุต่างๆ ได้แก่ C, H, O, N และ S

ตารางที่ 1.3 แสดงองค์ประกอบของแกลบ

Parameter	Result	Std. Dev.	Basis
C	42.2%	0.99	Dry
H	5%	0.06	Dry
O	36%	2.16	Dry
N	0.7%	0.15	Dry
S		-	Dry
Total moisture	11%	1.11	As Received
Heating Value	13.78 MJ/kg	0.07	Dry

แกลบที่ได้จากการสีข้าวเปลือกจะมีประมาณร้อยละ 22-25 โดยน้ำหนักจากเมล็ดข้าวเปลือก ทำให้การสีข้าวเปลือกแต่ละครั้งจะเกิดแกลบจำนวนมาก ซึ่งปัจจุบันมีการนำแกลบมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในหลายด้านด้วยกัน ได้แก่

1. เป็นเชื้อเพลิงหุงต้มในภาคครัวเรือน เช่น เชื้อเพลิงในเตาประหยัดพลังงาน เชื้อเพลิงอัดแท่ง โดย แกลบ 1 กิโลกรัม สามารถให้พลังงานจากการเผาไหม้ได้สูงถึง 3,800 กิโลแคลอรี ซึ่งใกล้เคียงกับไม้ และถ่านไม้ที่ 4,000 – 5,000 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม จึงสามารถนำมาทดแทนเชื้อเพลิงจากไม้ได้เป็นอย่างดี
2. เป็นเชื้อเพลิงในภาคอุตสาหกรรม เช่น โรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า ชีวมวล เชื้อเพลิงสำหรับ เครื่องจักรไอน้ำของโรงสีข้าว เชื้อเพลิงโรงงานเครื่องปั้นดินเผา โรงงานผลิตปูนซีเมนต์ เป็นต้น
3. ใช้เป็นวัสดุขัดผิวทั้งในภาคครัวเรือน และอุตสาหกรรม
4. ใช้ในการเผาถ่านเพื่อลด และควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสมสำหรับการเผาถ่าน ป้องกันการลุกไหม้ เป็นเปลวไฟ
5. เป็นส่วนผสมของวัสดุก่อสร้าง เช่น อิฐบล็อก อิฐมอญ รวมถึงผสม ดินเหนียวสำหรับงานก่อสร้าง
6. ใช้ในการปรับปรุงดินในหลายด้าน อาทิ การปรับปรุงดินเค็มการเพิ่มความร่วนซุยของดิน การเพิ่ม อินทรีย์วัตถุ และแร่ธาตุอาหารในดิน เป็นต้น
7. การใช้ประโยชน์ในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ เช่น ใช้รองพื้นสำหรับฟาร์มไก่หรือสุกร
8. ใช้ทำขบวนการเคลือบก้อนน้ำแข็งป้องกันน้ำแข็งละลาย

- เก้าอ้อย

อ้อย เป็นพืชชนิดหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสง ไปเป็นพลังงานชีวภาพได้ในอัตราสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับพืชชนิดอื่น พลังงานที่ผลิตได้จากชีวมวล ของอ้อยจำนวน 1 ตัน มีปริมาณเทียบเท่ากับพลังงานที่ได้จากน้ำมันดิบ 1 บาร์เรลในกระบวนการ ผลิตน้ำตาล ด้วยอ้อยจำนวน 1 ตัน เมื่อผ่านกระบวนการแปรรูปต่าง ๆ จะใช้พลังงานทั้งสิ้น 25-30 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง ใช้ไอน้ำ 0.4 ตัน เพื่อให้ได้น้ำตาล ที่เหลือจะเป็นกากหรือขานอ้อย เป็นวัสดุ เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตประมาณ 290 กิโลกรัม ที่มีค่าเทียบเท่ากับพลังงานไฟฟ้าถึง 100 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง ทำให้มีการนำขานอ้อยมาใช้เป็นเชื้อเพลิง เพื่อผลิตพลังงานความร้อน สำหรับ ต้มน้ำให้เดือดจนกลายเป็นไอน้ำ และสามารถนำพลังงานจากไอน้ำดังกล่าว หมุนเวียนกลับมาใช้ในการ ผลิตไฟฟ้าได้ใหม่อีกครั้ง

จากการศึกษาสำรวจพื้นที่ปลูกอ้อยในปี การผลิต 2557/58 โดยอาศัย ข้อมูลจากดาวเทียมประกอบกับการเก็บรายละเอียดข้อมูลทางภาคพื้นดิน เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูล ว่าด้วยพื้นที่ปลูกอ้อยทั่วประเทศ จำนวน 10,530,927 ไร่ พื้นที่อ้อยส่งโรงงาน 9,591,448 ไร่ แบ่งเป็นรายจังหวัดดังต่อไปนี้ตารางพื้นที่เพาะปลูกและผลผลิตอ้อยปี การผลิต 2557/58

ตารางที่ 1.4 แสดงพื้นที่เพาะปลูกและผลผลิตอ้อยปี การผลิต 2557/58

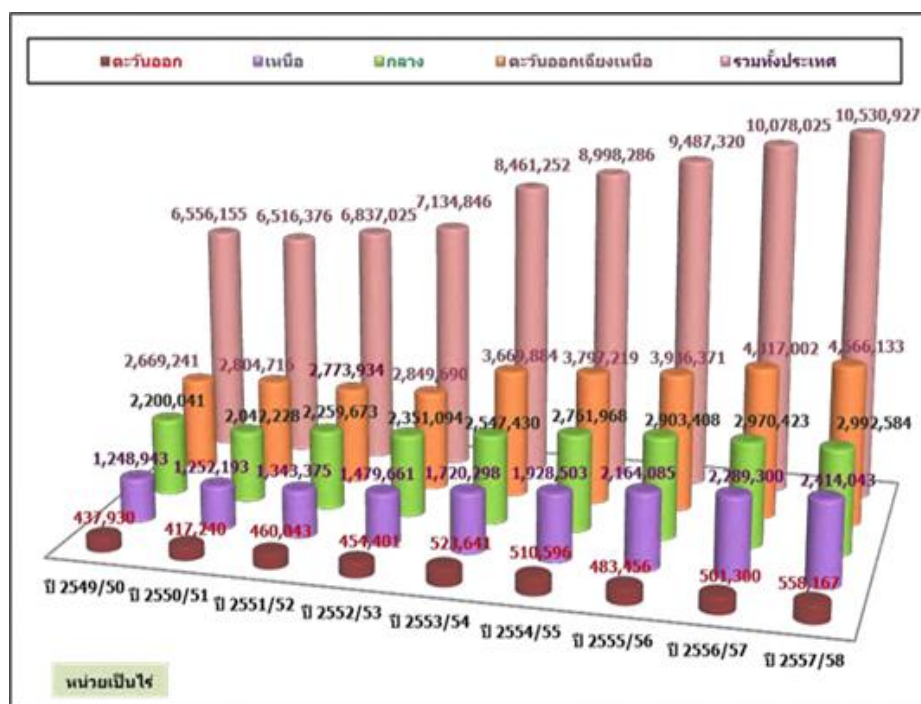
ที่	พื้นที่ปลูก อ้อย (ไร่)	ปริมาณอ้อย ทั้งหมด (ตัน)	พื้นที่อ้อยส่ง โรงงาน (ไร่)	ปริมาณอ้อย ส่งเข้าหีบ (ตัน)	ผลผลิต เฉลี่ย (ตัน/ไร่)
รวมภาคเหนือ	2,414,043	26,914,150	2,255,687	25,148,802	11.15
รวมภาคกลาง	2,992,584	32,570,065	2,624,481	28,568,266	10.89
รวมภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	4,566,133	50,998,403	4,242,194	47,380,529	11.17
รวมภาคตะวันออก	558,167	6,230,159	469,086	5,235,854	11.16
รวมทั้งประเทศ	10,530,927	116,712,776	9,591,448	106,333,451	11.08

ปัจจุบันมีการใช้ชานอ้อยเป็นแหล่งพลังงาน นับว่าเป็นผลพลอยได้ที่โรงงานน้ำตาลไม่ต้องลงทุนซื้อหาแหล่งพลังงานความร้อน แต่เกิดปัญหาในการกำจัดขี้เถ้าชานอ้อยยากที่จะทำลายให้หมดไปจากบริเวณโรงงานจากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของขี้เถ้าชานอ้อยพบว่า ขี้เถ้าชานอ้อยมีปริมาณซิลิกาสูงมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์เหมาะแก่การนำมาใช้เป็นแหล่งซิลิกาในการสังเคราะห์วัสดุที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ เช่น ซิลิกาเจล ซีโอไลท์ ซิลิกอนคาร์ไบด์ เป็นต้น ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้แตกต่างกันไปตามแต่คุณสมบัติคุณสมบัติของซิลิกาซิลิกา เป็นผลึกของแข็งสีขาวที่ไม่ละลายน้ำ เกิดจากสารประกอบทางเคมี ระหว่างธาตุซิลิกอนกับธาตุออกซิเจนมีสูตรทางเคมี คือ SiO_2 เกิดขึ้นในหลายลักษณะ เช่น ในลักษณะของหินเหล็กไฟ และ ควอตซ์ (quartz)

ตารางที่ 1.5 แสดงองค์ประกอบทางเคมีเถ้าอ้อย

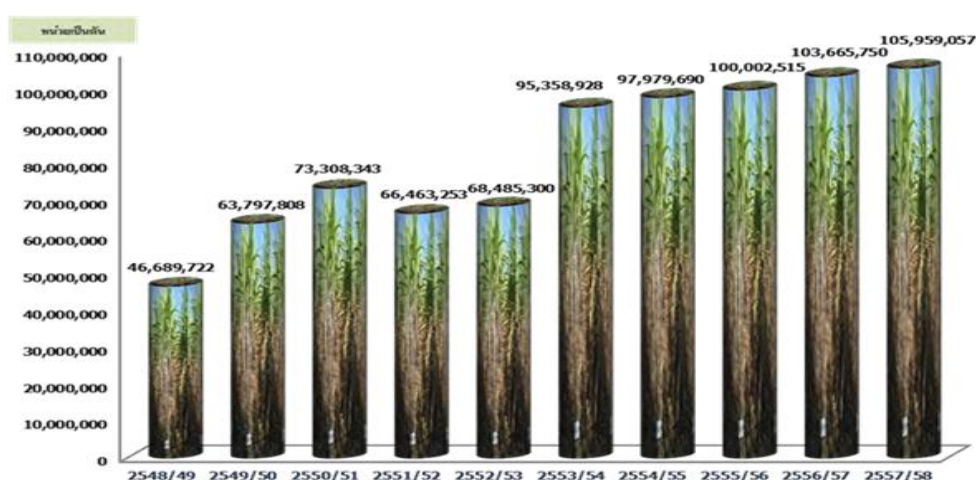
องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	เถ้าชานอ้อยบดละเอียด
Silicon Dioxide (SiO_2)	55.0
Aluminium Oxide (Al_2O_3)	5.1
Ferric Oxide (Fe_2O_3)	4.1
Calcium Oxide (CaO)	11.0
Magnesium Oxide (MgO)	0.9
Sodium Oxide (Na_2O)	0.2
Potassium Oxide (K_2O)	1.2
Sulphur trioxide (SO_3)	2.2
Loss on Ignition	19.6

จากรายงานผลการสำรวจพื้นที่ปลูกอ้อยของสำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย โดยอาศัยข้อมูลจากภาพถ่ายดาวเทียม พบว่า ตั้งแต่ปีการผลิต 2549/2550 ถึง 2557/2558 พื้นที่ปลูกอ้อยในประเทศไทยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และผลการสำรวจพื้นที่ปลูกอ้อยประจำปีการผลิต 2557/2558 ของสำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย โดยอาศัยข้อมูลจากดาวเทียมและการสำรวจจัดเก็บข้อมูลภาคสนาม พบว่า ประเทศไทยมีพื้นที่เพาะปลูกอ้อยในเขตพื้นที่สำรวจรวม 47 จังหวัด จำนวน 10,530,927 ไร่ แบ่งเป็นพื้นที่ปลูกอ้อยส่งโรงงาน 9,591,448 ไร่ และพื้นที่ปลูกอ้อยสำหรับทำพันธุ์ 939,479 ไร่ โดยมีพื้นที่เพิ่มจากปีการผลิต 2556/2557 จำนวน 455,784 ไร่ หรือร้อยละ 4.52 เนื่องจากรัฐบาลมีนโยบายปรับเปลี่ยนพื้นที่ปลูกข้าวในเขตไม่เหมาะสมมาเป็นพื้นที่ปลูกอ้อย ทำให้มีพื้นที่ที่มีศักยภาพสำหรับปลูกอ้อยเพิ่มขึ้น จังหวัดที่ปลูกอ้อยมากที่สุด คือ กาญจนบุรี นครสวรรค์ อุตรธานี นครราชสีมา ลพบุรี และขอนแก่น ตามลำดับ ซึ่งในแต่ละจังหวัดมีพื้นที่ปลูกอ้อยมากกว่า 6 แสนไร่ สำหรับปีการผลิต 2557/2558 ทั้งประเทศผลิตอ้อยได้ 116,712,776 ตัน โดยเป็นอ้อยส่งโรงงาน 105,959,057.985 ตัน (กลุ่มวิชาการเกษตรและสารสนเทศ, 2558)



รูปที่ 1.6 กราฟเปรียบเทียบพื้นที่ปลูกอ้อยปีการผลิต 2549/2550 – 2557/2558 แปลจากภาพถ่ายดาวเทียม ที่มา: กลุ่มวิชาการเกษตรและสารสนเทศ (2558)

จากรายงานพยากรณ์พื้นที่เพาะปลูกอ้อยและผลผลิตปีการผลิต 2558/2559 ครั้งที่ 1 ณ วันที่ 21 พฤษภาคม 2558 ของสำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย คาดว่าประเทศไทยมีพื้นที่เพาะปลูกอ้อยในเขตพื้นที่สำรวจรวม 47 จังหวัด จำนวน 11,033,736 ไร่ แบ่งเป็นพื้นที่ปลูกอ้อยส่งโรงงาน 10,003,430 ไร่ และพื้นที่ปลูกอ้อยสำหรับทำพันธุ์ 1,030,306 ไร่ โดยมีพื้นที่เพิ่มจากปีการผลิต 2557/2558 จำนวน 502,809 ไร่ หรือร้อยละ 4.78 และมีอ้อยส่งโรงงานน้ำตาล 111,052,085 ตัน



รูปที่ 1.7 กราฟเปรียบเทียบปริมาณอ้อยเข้าหีบ ปีการผลิต 2548/2549 – 2557/2558 (รายงาน ณ วันที่ 9 พฤษภาคม 2558)

ที่มา: กลุ่มวิชาการเกษตรและสารสนเทศ (2558)

ชานอ้อย (bagasse) เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการหีบอ้อยเพื่อผลิตน้ำตาลทรายจากอ้อย ซึ่งจากการรวบรวมข้อมูลของสถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ แสดงให้เห็นว่าชานอ้อยเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมแปรรูปที่มีศักยภาพในปัจจุบันสำหรับประเทศไทยที่จะนำมาพัฒนาเข้าสู่อุตสาหกรรมสิ่งทอ เนื่องจากเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมที่มีปริมาณมากและสม่ำเสมอ เป็นวัสดุเหลือทิ้งที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมในประเทศ เป็นวัสดุที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ด้วยกระบวนการหรือเทคโนโลยีที่มีอยู่แล้วในประเทศ และมีความคุ้มค่าในกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ โดยต้นทุนของการนำกลับมาใช้ใหม่ถูกกว่าการใช้ของใหม่

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของชานอ้อย พบว่า ชานอ้อยมีปริมาณความชื้นประมาณร้อยละ 49 เส้นใยประมาณร้อยละ 49 และของแข็งที่ละลายได้ (soluble solid) ประมาณร้อยละ 2 (Chiparus, 2004) และจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยชานอ้อย

แห้ง พบว่า ประกอบด้วยอัลฟาเซลลูโลส ประมาณร้อยละ 45.5 เฮมิเซลลูโลสประมาณร้อยละ 27 ลิกนิน ประมาณร้อยละ 21.1 และอื่นๆ ประมาณร้อยละ 6.9 (Rocha *et al.*, 2011) ชานอ้อยเป็น แหล่งเซลลูโลสสำหรับการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ (reducing sugar) ด้วยกระบวนการไฮโดรไลซิส เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตเอทานอล (Guo *et al.*, 2013) สำหรับผสมในน้ำมันเชื้อเพลิงรถยนต์ นอกจากนี้เส้นใยเซลลูโลสจากชานอ้อยยังได้รับความสนใจในการนำมาประยุกต์ใช้ทางด้านสิ่งทอทั้งที่เป็นเส้นใยธรรมชาติ (natural fiber) จากชานอ้อย (Chiparus, 2004) และเส้นใยเซลลูโลสประดิษฐ์ (regenerated cellulosic fiber) จากชานอ้อย (Uddin *et al.*, 2010; Jiang *et al.*, 2011)

1.1.3.2 ประเภทเนื้อไม้

ในการศึกษานี้ สนใจศึกษาชีวมวลประเภทเนื้อไม้ 2 ชนิด ได้แก่ ไม้กระถินและ ไม้ยูคาลิปตัส เนื่องจากเป็นไม้ที่นิยมนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ด เนื่องจากโตเร็วและให้ค่าความร้อนสูง โดยพบว่ายูคาลิปตัสมีการเจริญเติบโตโดยรวมดีที่สุด และมีมวลชีวภาพของลำต้นและน้ำหนักรากของส่วนที่เป็นสินค้าได้ต่อเมื่อตัดที่อายุ 24 เดือน นอกจากนี้ยังให้ค่าพลังงานความร้อนสูง โดยเป็นไม้เศรษฐกิจที่สร้างรายได้ให้เกษตรกร โดยการผลิตเชื้อเพลิงก้อนพลังงานอัดเม็ดหรือ Wood Pellet ป้อนโรงไฟฟ้าชีวมวล ทั้งยังเพิ่มพื้นที่ป่าและเก็บกักคาร์บอนเพื่อช่วยลดโลกร้อน ซึ่งสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ให้การสนับสนุนมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ [4] ดำเนินโครงการวิจัยด้านพลังงานชีวมวล ทั้งการบริหารจัดการวัตถุดิบ การจัดทำฐานข้อมูลพื้นที่ที่มีศักยภาพในการปลูกพืชพลังงาน ทั้งในส่วนของไม้โตเร็วและหญ้าพลังงาน เพื่อเป็นข้อมูลสนับสนุนการวางแผนเชิงนโยบายและเชิงพาณิชย์แก่ภาครัฐและภาคเอกชน โดยมีการร่วมกันสนับสนุนการปลูกพันธุ์ไม้โตเร็วในสวนยางพารา ภาคอีสาน 30-40 ไร่ และจะเพิ่มเป็น 6,500 ไร่ เพื่อเตรียมป้อนโรงไฟฟ้าชีวมวลประชารัฐวิสาหกิจชุมชน กฟผ. ในปี 2563 เริ่มจากกำลังการผลิต 10 เมกะวัตต์ ใช้วัตถุดิบชีวมวล 1.5 แสนตันต่อปี

จากการศึกษาพบว่า วัตถุดิบชีวมวล 9 ล้านตันต่อปี เพียงพอต่อการผลิตไฟฟ้า 600 เมกะวัตต์ ทั้งนี้ ผลการศึกษาพบว่าไม้ที่เหมาะสม คือ กระถินยักษ์ กระถินณรงค์ กระถินเทพา ไม้สะแก สะแกนา รวมถึงไม้มะม่วง มะขาม ส่วนยูคาลิปตัส แม้จะเป็นวัตถุดิบที่ดีแต่อาจเกิดปัญหาการแย่งวัตถุดิบที่ปัจจุบันปลูกเพื่อนำไปทำกระดาษ

นอกจากนี้ โรงไฟฟ้าชีวมวลประชารัฐจะเป็นรูปแบบใหม่ ที่เกษตรกรมีส่วนร่วมเป็นเจ้าของและผลิตวัตถุดิบชีวมวลขายเข้าโรงไฟฟ้าได้ด้วย โดยราคาไม้ท่อนเฉลี่ย 600 บาทต่อตัน ส่วนไม้สับ 900-1,300 บาทต่อตัน วิธีนี้จะช่วยแก้ปัญหาการต่อต้านโรงไฟฟ้าพลังงานทดแทนได้ ซึ่งต่างจากรูปแบบปัจจุบันที่เอกชนเป็นเจ้าของเพียงคนเดียว และเกษตรกรก็เป็นเพียงผู้ขายวัตถุดิบให้เท่านั้น

- กระถินยักษ์ (Leucaena leucocephala (Lam.))

ลักษณะทั่วไป

กระถินยักษ์จัดเป็นไม้กลุ่มเนื้อแข็งปานกลาง (Medium Hardwood) มีถิ่นกำเนิดในอเมริกากลาง และแพร่กระจายไปทั่วโลกโดยเฉพาะในประเทศเขตร้อน ไม้สามารถนำไปใช้งานได้กว้างขวาง เป็นเชื้อเพลิงที่มีปริมาณขี้เถ้าและควันน้อยทำเยื่อกระดาษ เฟอร์นิเจอร์ ใบบอ่อนและฝักอ่อนสามารถใช้เป็นอาหารมนุษย์ได้ หรือจะนำไป กิ่งและก้านไปทำปุ๋ยชีวภาพช่วยปรับปรุงสภาพดินก็ได้ และใบสามารถใช้เป็นแหล่งโปรตีนชั้นดีในการผลิตอาหารสัตว์

ไม้กระถินยักษ์ เป็นไม้ตระกูลถั่วที่มีความสามารถตรึงไนโตรเจนจากอากาศได้โดยปมของไรโซเบียม ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5-2.5 มิลลิเมตร โดยในรากขนาดเล็กหรือรากฝอย จะมีเชื้อราไมโครไรซาอยู่ร่วมกับระบบราก ช่วยให้ต้นกระถินยักษ์ได้ฟอสฟอรัสและธาตุอาหารอื่น ๆ ที่จำเป็นได้มากขึ้น

- ยูคาลิปตัส

ลักษณะทั่วไป

ยูคาลิปตัส เป็นไม้เศรษฐกิจของโลก เป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการผลิตเยื่อกระดาษ และเป็นพืชพลังงานที่สำคัญ ส่วนใบและก้านอุดมด้วยน้ำมัน นอกจากนำไปสกัดเป็นน้ำมันยูคาลิปตัสที่มีสรรพคุณทางการแพทย์แล้ว ยังใช้เพื่อการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพได้อีกด้วย นอกจากนั้น ไม้ยูคาลิปตัสเอง เมื่อเผาแล้วก็ใช้เป็นถ่านได้ด้วยเช่นกัน ไม้ยูคาลิปตัสยังเป็นที่ต้องการอย่างมาก จากข้อมูลของฝ่ายวิจัยธนาคารนครหลวงไทย มูลค่าการส่งออกเยื่อกระดาษของประเทศไทยในช่วง 9 เดือนแรกของปี 2550 มีมูลค่า 4,234.4 ล้านบาท เพิ่มขึ้นร้อยละ 17.5 จากช่วงเดียวกันของปี 2549 สำหรับแนวโน้มของอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษในปี 2551 คาดว่าจะเพิ่มขึ้นร้อยละ 5 เมื่อเทียบกับปีที่ผ่านมา

ตารางที่ 1.6 น้ำหนักสดต่อไร่ของกระถินยักษ์ (L.leucocephala) ยูคาลิปตัส (E. camadulensis) กระถินเทพา (A. mangium) กระถินณรงค์ ที่อายุ 24 เดือน

Species	Biomass (Dry Basis) (kg/Rai)				Fresh weight stem (energy product) (kg/rai)	Moisture Content (%)	HHV as dry Basis (kcal/kg)
	stem	leaves	Twig	Total			
eucaena	3,288	383	567	4,238	5,656	42	4,652
Eucalypt	5,916	284	165	6,365	12,857	54	4,602
A.mangium	4,044	903	762	5,708	6,784	40	4,798
A. spp.	4,208	1,188	815	6,212	6,771	38	4,734

ไม้ยูคาลิปตัสจัดว่าเป็นไม้โตเร็วเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศเนื่องจากสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ หลากหลาย และเป็นวัตถุดิบในการผลิตเยื่อกระดาษ จากรายงานของกรมพัฒนาที่ดินในปี พ.ศ. 2544 พบว่ามี พื้นที่ปลูกยูคาลิปตัสทั้งสิ้น 2,408,780 ไร่ แยกเป็นสวนป่าในเขตป่าสงวน 754,332 ไร่และสวนป่าเอกชนจำนวน 1,654,448 ไร่ ซึ่งสามารถผลิตไม้ยูคาลิปตัสประมาณ 6 ล้านตัน โดยนำมาใช้ผลิตเป็นเยื่อกระดาษ 60 % และเป็น เชื้อเพลิง 30 % ทำให้บริษัทเอกชน กลุ่มอุตสาหกรรมกระดาษใช้ไม้ยูคาฯ เพื่อผลิตเยื่อกระดาษได้มีโครงการส่งเสริมการปลูกไม้ยูคาลิปตัสออกมอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ปัจจุบัน ปี 2553 เกิดการขยายพื้นที่การเพาะปลูกยูคาลิปตัส อย่างรวดเร็ว จากเดิม 5 ล้านไร่ เป็น 10 ล้านไร่ โดยปัจจุบันสามารถผลิตยูคาลิปตัสได้มากถึงปีละ 25 ล้านตันเพียงพอและรองรับต่อการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมได้อย่างเต็มที่โดยจะมีเปลือกไม้อยู่ 20 % ของไม้สด หรือ ปริมาณเปลือกไม้ยูคาลิปตัส 4.3 ล้านตัน/ปี คิดเป็นพลังงานเทียบเท่าน้ำมันดิบ 1,120 ktoe โดยจังหวัดภาคตะวันออกเฉียงเหนือ พบว่า มีโรงงานสับยูคาลิปตัส 64 โรง เป็น โรงงานที่สับเฉพาะไม้ยูคาลิปตัส จำนวน 44 โรงงาน และโรงงานที่สับไม้ที่ปลูกขึ้นเฉพาะ 13 ชนิด 20 โรงงาน จำนวนยูคาลิปตัส โรงงานรับซื้อไม้ปีละละ 5,092,392 ตัน จะมียูคาลิปตัสประมาณ 1,043,940 ตันต่อปี และจากการประเมินพบว่า จำหน่ายให้โรงไฟฟ้าเพื่อเป็นเชื้อเพลิง 49.82 % หรือ 520,130 ตัน/ปี และจำหน่ายให้แก่เกษตรกรแต่เป็นจำนวนที่น้อยมาก โดยยังมีปริมาณเปลือกไม้ยูคาลิปตัส เหลือ 50.18 % หรือ 523,810.18 ตันต่อปี โดยต้นทุนการแปรรูปแบบการสับและอบราคา 1.180 บาท/กิโลกรัม และแบบอัดเม็ด 1.525 บาท/กิโลกรัม

ตารางที่ 1.7 การวิเคราะห์คุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบประมาณ (Proximate Value) และแบบแยกธาตุ (Ultimate Value)

คุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิง		
ร้อยละของความชื้นเริ่มต้น (Wet basis)		48.27
องค์ประกอบแบบประมาณ (Dry Basis)	ร้อยละของสารระเหย (VM)	69.79
	ร้อยละของเถ้า (Ash)	8.94
	ร้อยละของคาร์บอนคงตัว(FC)	21.27

ตารางที่ 1.7 การวิเคราะห์คุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบประมาณ (Proximate Value) และแบบแยกธาตุ (Ultimate Value) (ต่อ)

คุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิง		
องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Dry Basis)	ร้อยละของไนโตรเจน(N)	0.51
	ร้อยละของซัลเฟอร์ (S)	0.31
	ร้อยละของออกซิเจน (O)	47.81
ค่าความร้อนสูง HHV (MJ/kg)		16.81
ร้อยละของคลอรีน (Dry Basis)		0.98

จากการศึกษาศักยภาพของกระถินยักษ์ ยูคาลิปตัส กระถินเทพา และกระถินเทพณรงค์ ในการปลูกเป็น สวนป่าพืชพลังงาน โดยวางแผนการทดลองแบบ CRD เพื่อปลูกเปรียบเทียบศักยภาพในการเป็นไม้พลังงานของไม้โตเร็ว 4 ชนิด ได้แก่ กระถินยักษ์ ยูคาลิปตัส กระถินเทพา และกระถินเทพณรงค์ ปลูกในพื้นที่บริษัทสหโคเจน กรีน จำกัด อำเภอกบินทร์บุรี จังหวัดปราจีนบุรี เมื่อเดือนมีนาคม 2550 โดยใช้ระยะปลูก 1x1 ม. พบว่า ยูคาลิปตัสมีการ

เจริญเติบโตโดยรวมดีที่สุด และมีมวลชีวภาพของลำต้นและน้ำหนักรากของส่วนที่เป็นสินค้าได้ต่อไร่ เมื่อตัดที่อายุ 24 เดือน สูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ เท่ากับ 5,916 และ 12,857 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังให้ค่า พลังงานความร้อนสูงที่สุดเท่ากับ 27,225,432 kcal/ไร่ ในรอบการตัดฟันแรกอายุ 24 เดือน รองลงมาได้แก่ กระจินเทพนรงค์ กระจินเทพา และกระจินยักษ์ มีค่าเท่ากับ 19,920,672, 19,401,571 และ 15,297,132 kcal/ไร่ ตามลำดับ

ผลงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของไม้โตเร็ว 4 ชนิด ได้แก่ กระจินยักษ์ ยูคาลิปตัส กระจินเทพา และกระจินเทพนรงค์ ที่สามารถใช้ปลูกเป็นสวนป่าพลังงานได้ เนื่องจากผลผลิตที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับไม้โตเร็วอีก หลายชนิดที่เคยมีการศึกษามา เช่น *Cassia siamea*, *Acacia nilotica*, *A. farnesiana*, *Erythrina variata*, *Gliricidia sepium* (Goel and Behl, 2004, Ngo and Nguyen, 1993) โดยเฉพาะยูคาลิปตัสที่มีศักยภาพสูง ที่สุดเนื่องจากให้ผลผลิตส่วนที่เป็นสินค้าได้สูงที่สุด และเมื่อคำนวณออกมาเป็นค่าพลังงานความร้อนต่อพื้นที่ ก็มีค่ามากที่สุดถึง 27,225,432 kcal/ไร่ รองลงมา ได้แก่ กระจินเทพนรงค์ กระจินเทพา และกระจินยักษ์ มีค่าเท่ากับ 19,920,672, 19,401,571 และ 15,297,132 kcal/ไร่ ตามลำดับ

ตารางที่ 1.8 ผลผลิตต่อไร่ ในรูปของน้ำหนักรากมวลชีวภาพของลำต้น และค่าความร้อนต่อไร่ ของ *L. leucocephala*, *E. camaldulensis*, *A. mangium* and *A. spp.* ที่อายุ 24 เดือน

Species	Biomass (Dry Basis) (kg/Rai)				Fresh weight stem (energy product) (kg/Rai)	Moisture content (%)	HHV as Dry Basis ^{2/} (kcal/kg)
	Stem	Leaves	Twig	Total ^{ns3/}			
<i>Leucaena</i>	3,288 ^{a1/}	383 ^a	567 ^b	4,238	5,656 ^a	42	4,652
<i>Eucalypt</i>	5,916 ^b	284 ^a	165 ^a	6,365	12,857 ^b	54	4,602
<i>A.mangium</i>	4,044 ^a	903 ^b	762 ^{bc}	5,708	6,784 ^a	40	4,798
<i>A.spp.</i>	4,208 ^a	1,188 ^c	815 ^c	6,212	6,771 ^a	38	4,734



1.1 แกลบ



1.2 ถ้ำซานอ้อย



2.1 กระจิน



2.2 ยูคาลิปตัส

รูปที่ 1.8 ชีวมวลที่นำมาศึกษา 2 ประเภท ได้แก่ 1. ชีวมวลประเภทวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร (1.1 ข้าวและ 1.2. ถ้ำซานอ้อย) และ 2. ชีวมวลประเภทเนื้อไม้ (2.1. กระจิน และ 2.2 . ยูคาลิปตัส)

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ซึ่งศึกษาการผลิตชีวมวลอัดเม็ดจากวัตถุดิบชีวมวล จะศึกษาชีวมวลจากประเภทวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ แกลบ และ ถ้ำซานอ้อย และวัตถุดิบประเภทเนื้อไม้ ได้แก่ กระจิน และยูคาลิปตัส เนื่องจากเป็นชีวมวลที่มีปริมาณมาก และใช้ในโรงไฟฟ้าจำนวนมาก เพื่อแปรรูปวัตถุดิบชีวมวลดังกล่าวให้อยู่ในรูปชีวมวลอัดเม็ด เพื่อเพิ่มความร้อนและมูลค่าในการเป็นเชื้อเพลิงให้กับโรงไฟฟ้าหรือโรงงานที่ต้องการใช้ความร้อนจากชีวมวลอัดเม็ด โดยข้อมูลผู้ผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ผลิตและจัดจำหน่ายในประเทศ สามารถสรุปจำนวนผู้จัดจำหน่ายเชื้อเพลิงอัดเม็ดทั่วประเทศมีทั้งหมด 82 ราย โดยแบ่งจำนวนเป็นรายภูมิภาคได้ ดังนี้ (อ้างอิงจากฐานข้อมูลกรมโรงงานอุตสาหกรรม www.diw.go.th)

ภาคเหนือ 6 แห่ง

ลำปาง	1 แห่ง
นครสวรรค์	1 แห่ง
เชียงราย	1 แห่ง
แพร่	2 แห่ง
พิษณุโลก	1 แห่ง
อุดรธานี	1 แห่ง

ภาคกลาง 3 แห่ง

ลพบุรี	2 แห่ง
อุทัยธานี	1 แห่ง

ภาคตะวันออก 15 แห่ง

ชลบุรี	6 แห่ง
ระยอง	5 แห่ง
ตราด	2 แห่ง
สระแก้ว	1 แห่ง
ฉะเชิงเทรา	1 แห่ง

ภาคตะวันตก 4 แห่ง

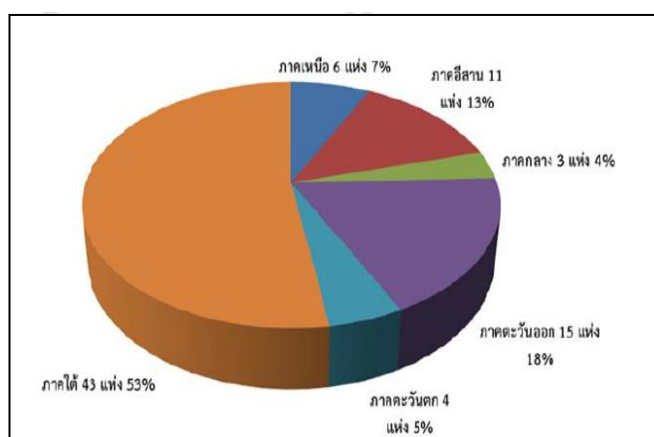
กาญจนบุรี	2 แห่ง
นครปฐม	2 แห่ง

ภาคอีสาน 11 แห่ง

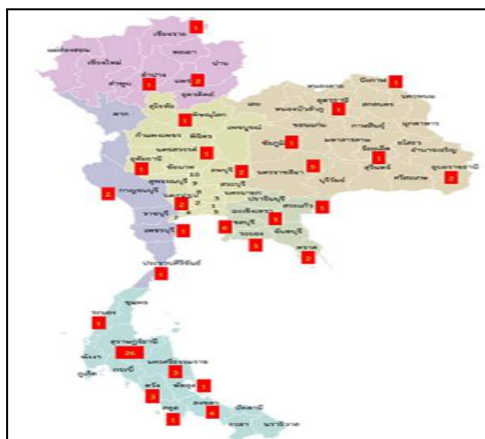
ร้อยเอ็ด	1 แห่ง
อุบลราชธานี	2 แห่ง
นครราชสีมา	5 แห่ง
บึงกาฬ	1 แห่ง
ชัยภูมิ	1 แห่ง

ภาคใต้ 43 แห่ง

สงขลา	6 แห่ง
สุราษฎร์ธานี	26 แห่ง
เพชรบุรี	1 แห่ง
สตูล	1 แห่ง
นครศรีธรรมราช	3 แห่ง
ระนอง	1 แห่ง
ประจวบคีรีขันธ์	1 แห่ง
ตรัง	3 แห่ง
พัทลุง	1 แห่ง



รูปที่ 1.9 จำนวนผู้จัดจำหน่ายเชื้อเพลิงอัดเม็ดรายภูมิภาค



รูปที่ 1.10 การกระจายของผู้จัดจำหน่ายเชื้อเพลิงอัดเม็ดรายภูมิภาค

1.1.4 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากเชื้อเพลิงอัดเม็ด

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากกระบวนการแปรรูปและการใช้ชีวมวลที่ใช้อุณหภูมิสูงที่สำคัญอย่างหนึ่งคือ สารอินทรีย์ไอระเหย (Volatile Organic Compounds, VOCs) ซึ่งเป็นกลุ่มสารประกอบอินทรีย์ที่ระเหยเป็นไอกระจายตัวไปในอากาศ ได้ในที่อุณหภูมิและความดันปกติ โมเลกุลส่วนใหญ่ประกอบด้วยอะตอมคาร์บอนและไฮโดรเจน อาจมีออกซิเจนหรือ คลอรีนร่วมด้วย สามารถระเหยเป็นไอได้ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งเป็นสารที่เกิดจากเผาไหม้ และปะปนในอากาศ น้ำดื่ม เครื่องดื่ม อาหาร สารอินทรีย์ ไอระเหยที่สะสมไว้นาน ๆ จะมีผลกระทบทางชีวภาพและเป็นอันตรายต่อสุขภาพ นอกจากนี้ VOCs เป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยา photochemical smog และทำปฏิกิริยากับ NO_x ทำให้เกิดก๊าซโอโซนและสารอื่น ซึ่งเป็นสารมลพิษทางอากาศหุดยภูมิ สาร VOCs ในรูปของเหลวหรือ สารละลาย ส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำ น้ำใต้ดิน และดิน และมีผลกระทบเสียหายต่อสุขภาพด้านอื่น ๆ ได้แก่ ระบบพันธุกรรม ระบบฮอร์โมน ระบบสืบพันธุ์ และระบบประสาท อาจทำให้เกิดโรคมะเร็งบางชนิดได้ และโรคทางระบบสืบพันธุ์ เช่น เป็นหมัน ความพิการของเด็กก็มีการกลายเพศเป็นต้น [5]

1.1.4.1 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด

ในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นคือปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) เนื่องจากกระบวนการในการผลิตที่ใช้อุณหภูมิสูงในการผลิต ได้แก่ กระบวนการทำให้แห้ง และกระบวนการอัดเม็ด รวมถึงกระบวนการอื่นๆ ในการผลิต ได้แก่ การสับย่อยและการบดย่อย และการเก็บวัตถุดิบ โดยในระหว่างกระบวนการทำให้แห้ง น้ำในไม้จะ

ถูกขับออกและเมื่อความร้อนถูกใช้ต่อเนื่องหลังจากที่น้ำออกไป อุณหภูมิของไม้จะเพิ่มขึ้น และ VOCs จะถูกขับออกมา เครื่องทำให้แห้งจะเกี่ยวข้องกับการระเหยความชื้น ในขณะเดียวกันก็ลดการปลดปล่อย VOCs

มีการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและการปลดปล่อย VOCs ซึ่งพบว่า อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นระหว่าง 175°C ถึง 275°C, การปลดปล่อย VOC จะเพิ่มขึ้นจากเดิมที่น้อยกว่า 1 kg/tonne ถึง ~40 kg/tonne ของไม้ ที่อุณหภูมิที่สูงกว่า 275°C การปล่อย VOC จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (exponentially) จนกระทั่ง VOCs ทั้งหมดถูกปล่อยออกไป [6]

1.1.4.2 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการใช้เชื้อเพลิงอัดเม็ด

เป็นผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมซึ่งเกิดจากการนำเชื้อเพลิงอัดเม็ดนั้นไปผ่านกระบวนการเผาไหม้เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานต่างๆ เช่น โรงไฟฟ้าชีวมวล โรงงานที่มีหม้อต้มไอน้ำ เป็นต้น

ในการศึกษานี้ จะศึกษาปริมาณ VOCs ของชีวมวลอัดเม็ดจากวัตถุดิบชีวมวลชนิดต่างๆ เพื่อประเมินความเหมาะสมในการใช้วัตถุดิบชีวมวลที่เหมาะสมในการผลิตชีวมวลอัดเม็ดเพื่อนำไปใช้งานต่อไป

Uncontrolled Emissions from Rotary Dyers Direct Fired Softwood (SCC3-07-006-07)		Emission Factor	Fraction of VOC	Est. Source Conc.
CASRN	Pollutant	kg/t	%	µg/m ³
64-82-8	Methane	0.13	24.04%	52,000
50-00-0	Formaldehyde *	0.013	2.31%	5,200
75-07-0	Acetaldehyde *	0.007	1.20%	2,800
108-95-2	Phenol	0.0033	0.61%	1,320
107-02-8	Acrolein *	0.0023	0.42%	920

รูปที่ 1.11 ตัวอย่างมลสาร VOCs ที่เกิดจากอุตสาหกรรมไม้

□ นอกจากนี้ ยังมีการคำนวณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยใช้วิธีการตาม IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (Revised 1996) ซึ่งจัดทำโดย IPCC และใช้ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (emission factor) ตามค่าสัมประสิทธิ์กลาง (default value) ที่ IPCC กำหนดไว้ ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และนอนคาร์บอนไดออกไซด์ ได้แก่ ก๊าซมีเทน (CH₄) ก๊าซไนโตรสออกไซด์ (N₂O) ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และนอนมีเทนโวลาทิลอ็อกซานิกคาร์บอน (NMVOC)

1.1.5 ผลผลิตสีเขียว



Green Productivity (GP) คือ ผลผลิตสีเขียว กล่าวโดยสรุป คือ การเพิ่มอัตราผลิตภาพโดยคำนึงถึงสิ่งแวดล้อมด้วย ในรอบหลายปีที่ผ่านมาแนวคิดของการเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเป็นเรื่องสำคัญระดับโลก เพราะกิจกรรมต่างๆ ล้วนส่งผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนทั้งสิ้น ในอดีตภาคอุตสาหกรรมหรือบริการจะดำเนินธุรกิจโดยมุ่งเน้นที่การลดต้นทุนเป็นหลัก แต่ในโลกอนาคตจำเป็นต้องคำนึงถึงสิ่งแวดล้อมด้วย โดยแนวทางการเพิ่มผลผลิตสีเขียว (Green Productivity : GP) จึงนับว่าเป็นประเด็นหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจจากผู้ประกอบการ นักวิชาการ และบุคลากรผู้เชี่ยวชาญด้านการพัฒนาอุตสาหกรรมในการนำแนวคิดดังกล่าวมาประยุกต์ใช้เพื่อผลักดัน “การพัฒนาภาคอุตสาหกรรมให้มีขีดความสามารถในการแข่งขัน ควบคู่ไปกับการจัดการปัญหาสังคมและสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน”

ปัจจุบันก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศเพิ่มปริมาณสูงขึ้นจนก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global Warming) ซึ่งทวีความรุนแรงมากขึ้นเรื่อยๆ มีแนวโน้มที่ในอนาคตอันใกล้หลายประเทศทั่วโลกจะประสบกับภาวะขาดแคลนอาหารและน้ำ ตลอดจนพื้นที่ทำกินที่มีความอุดมสมบูรณ์ก็ลดขนาดลงตามไปด้วย ดังนั้น ความตระหนักและมีจิตสำนึกร่วมกันในการแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อม จึงเป็นสิ่งสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่ง

ภาคอุตสาหกรรมได้รับการกล่าวถึงมากที่สุดในฐานะตัวการสำคัญที่ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม ที่ผ่านมาได้มีความพยายามอย่างต่อเนื่องที่จะสรรหาแนวคิด วิธีการ รวมทั้งเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพเพื่อจัดการกับความรุนแรงของปัญหาสิ่งแวดล้อมต่างๆ ในขณะเดียวกันภาคอุตสาหกรรมซึ่งถือเป็นกลไกหลักที่สนับสนุนการเจริญเติบโตของประเทศ ก็จำเป็นต้องพัฒนาตัวเองให้สามารถแข่งขันได้ในเวทีโลก ดังนั้นแนวคิดการเพิ่มผลผลิตสีเขียว (Green Productivity :

GP) จึงเป็นสิ่งที่ได้รับความสนใจจากผู้ประกอบการ นักวิชาการ และบุคลากรผู้เชี่ยวชาญด้านการพัฒนาอุตสาหกรรม ในการนำแนวคิดดังกล่าวมาประยุกต์ใช้เพื่อผลักดันการพัฒนาภาคอุตสาหกรรมให้มีขีดความสามารถในการแข่งขัน ควบคู่ไปกับการจัดการปัญหาสังคมและสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน

การดำเนินกิจการของสถานประกอบการอุตสาหกรรมในยุคปัจจุบัน จำเป็นต้องคำนึงถึงกระบวนการปรับปรุงในเชิงธุรกิจและการบริหารจัดการ ซึ่งก่อให้เกิดการลดต้นทุนและเพิ่มผลิตภาพเพื่อจะนำไปสู่ผลกำไรสูงสุด ในขณะที่ต้องตระหนักถึงปัจจัยด้านสังคมและสิ่งแวดล้อม พร้อมทั้งสร้างความเชื่อมั่นในความปลอดภัยและสภาพแวดล้อมในการทำงานของบุคลากรภายในสถานประกอบการ ทั้งนี้เพื่อปรับตัวให้สอดคล้องกับความต้องการของลูกค้าและตลาดที่ให้ความสำคัญกับสินค้าที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental-friendly Products) มากขึ้น อีกทั้งยังเป็นการเสริมสร้างความแตกต่างในเชิงนวัตกรรมและจุดแข็งให้แก่ธุรกิจในเวทีโลกด้วยโดย Asian Productivity Organization (APO) ได้ให้คำจำกัดความว่า “Green Productivity is ...a strategy for enhancing productivity and environmental performance for overall socio-economic development. It is the application of appropriate techniques, technologies, and management systems to produce environmentally compatible goods and services. Green Productivity can be applied in manufacturing, service, agriculture, and communities.” จึงสามารถสรุปได้ว่า GP เป็น “ยุทธศาสตร์” เพื่อเสริมสร้าง “สมรรถนะด้านการเพิ่มผลิตภาพและด้านการดูแลรักษาสิ่งแวดล้อม” โดยการประยุกต์ใช้อย่างถูกต้องจะส่งผลให้เกิด “การพัฒนาเศรษฐกิจและสังคม” ในองค์รวมให้ดีขึ้นควบคู่กันไป และช่วยลดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม (Environmental Impact) ที่เกิดจากกิจกรรมที่เกิดขึ้นภายในองค์กร ตลอดจนจากการผลิตสินค้าและบริการ นอกจากนี้ GP ยังเป็นเครื่องมือที่ประกอบไปด้วยเทคนิค เทคโนโลยีและระบบบริหารจัดการต่างๆ ที่เหมาะสมในการสรรค์สร้างสินค้าและบริการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับทุกภาคส่วน ทั้งภาคอุตสาหกรรม บริการ เกษตรกรรม และชุมชนต่างๆทั้งนี้การดำเนินงานตามแนวคิด GP ให้ประสบความสำเร็จตามเป้าหมายจำเป็นต้องอาศัยบุคลากรซึ่งมีวิสัยทัศน์เปิดรับการเปลี่ยนแปลงและเข้าใจอย่างถ่องแท้ถึงความจำเป็นในการปรับตัวให้ก้าวทันต่อสถานการณ์รวมทั้งการดำเนินการตามแนวคิด GP เป็นการปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง (Continuous Improvement) เพื่อให้ผลลัพธ์ที่เกิดจากการดำเนินการคงอยู่กับองค์กรอย่างยั่งยืนที่สุดการพัฒนาตามแนวคิด GP จำเป็นต้องมีความตระหนักถึงความสำคัญของการพึ่งพาอาศัยกันของระบบเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม (Interdependency of Economic, Social, and Environmental Systems)” โดยมีจุดเน้นใน 3 ประเด็น ที่เรียกว่า GP’s Triple Focus ได้แก่

- 1) สิ่งแวดล้อม (Environment) แสดงให้เห็นถึงการพัฒนาย่างยั่งยืน
- 2) ความสามารถในการทำกำไร (Profitability) พิจารณาจากปัจจัยนำเข้า (Factor Inputs)
- 3) คุณภาพ (Quality)

GP เป็นการใช้ประโยชน์การจัดการคุณภาพโดยสนับสนุนการใช้วัตถุดิบที่ใหม่และปลอดภัยกว่า เพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการและการผลิต รวมทั้งปรับปรุงสภาพแวดล้อมในการทำงาน การพัฒนาตามแนวคิด GP ช่วยเสริมสร้างความมั่นใจทั้งในเรื่องสมรรถนะในการปฏิบัติงานที่สูงขึ้น และการเพิ่มมูลค่าโดยใช้ทรัพยากรน้อยลง ทั้งลดการใช้พลังงานและลดปริมาณของเสีย ดังแนวคิดที่ว่า ผลผลิตเกิดจาก “การทำให้ดีขึ้นโดยใช้ให้น้อยลง” (Doing Better with Less) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง GP ส่งผลให้การใช้ทรัพยากร/วัตถุดิบต่างๆ และพลังงานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืนมากยิ่งขึ้น ก่อให้เกิดการลดต้นทุนโดยตรงให้กับธุรกิจควบคู่ไปกับการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติอย่างแท้จริง ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่า GP เป็น Win-Win situation ระหว่างเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อมซึ่งสามารถเห็นภาพได้อย่างชัดเจน

หลักการ ยุทธศาสตร์และกรอบแนวคิด GP (Principles and Framework of GP) การดำเนินการตามแนวคิด GP ให้ความสำคัญกับยุทธศาสตร์การบูรณาการ (Integrated Strategy) การทำงานภายใต้หลักการ 2 ด้าน คือ หลักการด้านนิเวศวิทยา และหลักการด้านผลิตภาพ โดยการประยุกต์ใช้ในการปฏิบัติงานจริง ต้องเลือกและปรับใช้ให้มีความเหมาะสม สอดคล้องกับสภาพที่แท้จริงขององค์กร จึงจะสร้างความเข้มแข็งและความยั่งยืนในการพัฒนาทั้งสองด้านไปพร้อมๆ กันได้อย่างสมดุล

1. หลักการด้านนิเวศวิทยา (Ecological Principles) มุ่งเน้นไปที่ 3 แนวคิดหลัก ได้แก่ ภาระความรับผิดชอบ (Accountability) ของธุรกิจต่อกลุ่มคนทั้งระบบ ไม่เฉพาะเจาะจงแต่ผู้มีส่วนได้ส่วนเสียเท่านั้น ซึ่งมีหลายธุรกิจที่มีการนำหลักการนี้ไปใช้ในทางปฏิบัติทั้งนี้เพื่อเสริมสร้างภาพลักษณ์ทางการตลาด และเพิ่มความเชื่อมั่นให้แก่ผู้บริโภค ตลอดจนผู้ออกกฎระเบียบที่เกี่ยวข้องการเก็บภาษี/เสียค่าใช้จ่ายของผู้ก่อมลพิษ (Polluter Pays) ซึ่งเป็นความรับผิดชอบต่อต้นทุนค่าใช้จ่ายสำหรับการจัดการผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Clean-up) ที่เกิดขึ้นจากผู้ก่อมลพิษ ค่าใช้จ่ายดังกล่าวสามารถเป็นไปในรูปแบบระบบการจัดการที่ปลายท่อ (End-of-pipe Systems) การจัดหา

เทคโนโลยีใหม่ในการลดแหล่งก่อมลพิษ (Source Reduction) หรือแม้แต่การปลูกต้นไม้และสร้างสิ่งแวดล้อมสีเขียวในองค์กรการระมัดระวัง/ป้องกันไว้ก่อน (Precautionary Approach) เป็นการเตรียมพร้อมรับมือกับปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้นอยู่เสมอและหลีกเลี่ยงผลกระทบเชิงลบ ดังนั้น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้เครื่องมือที่ช่วยในการป้องกันอย่างต่อเนื่อง เช่น การป้องกันการเกิดมลพิษ การผลิตที่สะอาด (Cleaner Production) การลดแหล่งก่อมลพิษ

2. หลักการด้านผลิตภาพ (Productivity Principles) มุ่งเน้นไปที่ 3 แนวคิดหลัก ได้แก่ ความสามารถในการทำกำไร (Profitability) เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปว่าเป็นรากฐานสำคัญในการดำเนินธุรกิจ ซึ่ง GP มีเป้าหมายหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิผลด้านต้นทุน (Cost Effectiveness) เพื่อวัดความคุ้มค่าในการดำเนินการด้วยการประหยัด/ลดต้นทุนด้านวัตถุดิบต่างๆ ผ่านกระบวนการจัดการทรัพยากร ย่อมสนับสนุนความสามารถในการทำกำไรให้ดีขึ้นด้วยความได้เปรียบเชิงเปรียบเทียบ (Competitive Advantage) เป็นสิ่งจำเป็นในการรักษาตำแหน่งของธุรกิจในตลาด ซึ่งนำไปสู่โอกาสการแสวงหากำไรและการเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขัน ทั้งในด้านราคาและคุณภาพ โดยในกรณีของ GP หมายถึง “ความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Eco-friendliness)” ของสินค้าและบริการ ที่ก่อให้เกิดโอกาสในการดำเนินธุรกิจในรูปแบบใหม่การสร้างคน (People-Building) มุ่งให้ความสำคัญกับบุคลากรใน 2 ระดับ คือ 1) การกระตุ้นและสร้างความเชื่อมั่นให้แก่พนักงาน/เจ้าหน้าที่ระดับปฏิบัติงาน และ 2) การสร้างพันธสัญญาเพื่อให้ผู้บริหารองค์กรให้ความสำคัญต่อการดำเนินงานบุคลากรทั้งสองระดับจำเป็นต้องเข้าใจถึงประโยชน์ที่จะได้รับจาก GP และความเสี่ยงตลอดจนความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นหากไม่มีการดำเนินการตามแนวคิด GP 2 เทคนิคปลายท่อ (End-of-pipe Techniques) หมายถึง วิธีการกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่แปลงสภาพแล้ว ออกจากอากาศ น้ำ ของเสียผลิตภัณฑ์หรือสิ่งอื่นในรูปแบบเดียวกัน เทคนิคนี้เรียกว่าปลายท่อเนื่องจากโดยทั่วไปมักมีการนำไปใช้ในทางปฏิบัติในช่วงขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการ ก่อนที่สินค้าและบริการจะถูกจำหน่ายออกไป หรือส่งถึงมือผู้บริโภค (source: <http://www.greenfacts.org/glossary/def/end-of-pipe-techniques.htm>) 3 การลดแหล่งก่อมลพิษ (Source Reduction) หมายถึง การลดจำนวนสารพิษ มลพิษ หรือสิ่งปนเปื้อนใดๆ ในของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตหรือถูกปล่อย/แพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม โดยกระบวนการรีไซเคิล การบำรุงรักษา (Treatment) หรือการกำจัด (Disposal) รวมทั้งลดความเสี่ยงอันตรายต่อสุขภาพและสภาพแวดล้อม ที่เกี่ยวข้องกับการปล่อยสารพิษ มลพิษ และสิ่งปนเปื้อนต่างๆ (source: <http://www.epa.gov/p2/pubs/p2policy/definitions.htm>)

(Handbook on Green Productivity และ Green Productivity and Supply Chain Management Manual จัดทำโดย Asian Productivity Organization (APO) Download ได้ที่ Website: [www.http://www.apo-tokyo.org/00e-books/00list_gp.htm](http://www.apo-tokyo.org/00e-books/00list_gp.htm)) [7]



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 1.12 แนวคิดผลิตภาพสีเขียว (Green Productivity)

แนวคิดผลิตภาพสีเขียว (Green Productivity) GP เป็นการปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง (Continuous Improvement) เพื่อให้ผลลัพธ์ที่เกิดจากการดำเนินการคงอยู่กับองค์กรอย่างยั่งยืน ที่สุดการพัฒนาตามแนวคิด GP จำเป็นต้องมีความตระหนักถึงความสำคัญของ “การพึ่งพาอาศัยกันของระบบเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม (Interdependency of Economic, Social, and Environmental Systems)” โดยมีจุดเน้นใน 3 ประเด็น ที่เรียกว่า GP’s Triple Focus ได้แก่

1. สิ่งแวดล้อม (Environment) แสดงให้เห็นถึงการพัฒนาอย่างยั่งยืน
2. ความสามารถในการทำกำไร (Profitability) พิจารณาจากปัจจัยนำเข้า (Factor Inputs)

3. คุณภาพ (Quality) ผ่านเสียงสะท้อนจากลูกค้าทั้งต่อสินค้าและบริการ โดยไม่เพียงแต่รับฟังความคิดเห็นของลูกค้าเท่านั้น แต่ทำความเข้าใจสาเหตุและที่มาของความเชื่อ/ความคิดเหล่านั้น และหาแนวทางที่จะพัฒนาสินค้าและบริการให้เกินกว่าความคาดหวังของลูกค้า

ดังนั้น จึงต้องการศึกษาแนวทางการเพิ่มผลิตภาพสีเขียวในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดโดยประเมินความเหมาะสมในการใช้วัตถุดิบตามแนวคิดผลิตภาพสีเขียว ตามแนวคิดหลักของการเพิ่มผลิตภาพสีเขียวซึ่งพิจารณาใน 3 ด้าน ดังนี้

1) ด้านความสามารถในการทำกำไร (Profitability)

พิจารณาจากปัจจัยนำเข้า (Factor Inputs) ได้แก่ ต้นทุนการผลิต คือ ราคาวัตถุดิบ และ การใช้พลังงานในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดของแต่ละวัตถุดิบ

2) ด้านคุณภาพ (Quality) พิจารณาจากค่ามาตรฐานการผลิตชีวมวลอัดเม็ด

ได้แก่ ค่าความร้อน

3) ด้านสิ่งแวดล้อม (Environment) ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมซึ่งพิจารณาจากสารอินทรีย์

ระเหยง่ายจากวัตถุดิบที่ใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความเหมาะสมของวัตถุดิบชีวมวลในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบชีวมวลประเภทเนื้อไม้ และวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ตามแนวคิดผลิตภาพสีเขียว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ศึกษาชีวมวล 2 ประเภท ได้แก่ ชีวมวลประเภทวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร คือ แกลบและ เถ้าขานอ้อย และประเภทเนื้อไม้ คือ กระจินและยูคาลิปตัส

1.3.2 ประเมินการใช้พลังงานในขั้นตอนการผลิตชีวมวลอัดเม็ด ได้แก่ กระบวนการบดอัด และ กระบวนการอัดเม็ด

1.4 วิธีและเทคนิคที่ใช้ในงานวิจัย

1.4.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับอุตสาหกรรมเชื้อเพลิงอัดเม็ด และวัตถุดิบชีวมวลที่จะนำมาศึกษา

1.4.2 ประเมินการใช้พลังงานในขั้นตอนการผลิตชีวมวลอัดเม็ด

- 1.4.3 วิเคราะห์ค่าความร้อนที่ได้ต่อราคาวัตถุดิบของชีวมวลที่ใช้ในการผลิต
- 1.4.4 วิเคราะห์ปริมาณ VOCs ของชีวมวลอัดเม็ดจากวัตถุดิบประเภทต่างๆ
- 1.4.5 วิเคราะห์การใช้วัตถุดิบชีวมวลที่มีความเหมาะสม
- 1.4.6 ศึกษาแนวทางการเพิ่มผลิตภาพสีเขียวในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ทราบถึงชนิดวัตถุดิบชีวมวลที่เหมาะสมคือมีการใช้พลังงานในการผลิตและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย และมีค่าความร้อนที่ดี เพื่อนำมาเป็นแนวทางในการดำเนินธุรกิจในอนาคตต่อไป
- 1.5.2 ทราบแนวทางการผลิตชีวมวลอัดเม็ดในประเทศไทยตามแนวคิดการเพิ่มผลิตผลิตภาพสีเขียว
- 1.5.3 สามารถนำแนวทางการเพิ่มผลิตภาพสีเขียวในการผลิตชีวมวลอัดเม็ดไปปรับใช้กับแผนพัฒนาพลังงานทางเลือกในอนาคตได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ตามวัตถุประสงค์ของการศึกษานี้ โดยศึกษาเกี่ยวกับการประเมินการใช้พลังงานในภาคอุตสาหกรรม แนวคิดประสิทธิภาพ ประสิทธิภาพ และผลผลิตภาพ วิธีการดำเนินการในการศึกษานี้ ได้แก่ การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม การวิเคราะห์สมการถดถอย และการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด ดังนี้

- 2.1 การศึกษาการใช้พลังงานในภาคอุตสาหกรรม
- 2.2 ประสิทธิภาพด้านพลังงาน (Energy Efficiency)
- 2.3 ประสิทธิภาพ ประสิทธิภาพ และผลผลิตภาพ
- 2.4 การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม (Mixture Design)
- 2.5 การวิเคราะห์ถดถอยและสหสัมพันธ์
- 2.6 การวิเคราะห์สมการถดถอยชนิดหลายตัวแปร
- 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
 - 2.7.1 การใช้พลังงานต่อหนึ่งหน่วยการผลิต (Specific Energy Consumption)
 - 2.7.2 การผลิตเชื้อเพลิงจากวัตถุดิบชีวมวล
 - 2.7.3 การศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด
 - 2.7.3.1 กระบวนการทำให้แห้ง (Drying)
 - 2.7.3.2 กระบวนการบดย่อย (Grinding)
 - 2.7.3.3 กระบวนการอัดเม็ด (Pelletizing)
 - 2.7.4 การประเมินต้นทุนการผลิตในการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด
 - 2.7.5 การศึกษาการปล่อยมลสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ในการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด
 - 2.7.6 ผลผลิตภาพสีเขียวในภาคอุตสาหกรรม
 - 2.7.7 การใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม

2.1 การศึกษาการใช้พลังงานในภาคอุตสาหกรรม

ภาคอุตสาหกรรมเริ่มตระหนักถึงการผลิตที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและการใช้พลังงานน้อยที่สุดโดยมีการศึกษาผลกระทบของผลิตภัณฑ์ต่อสิ่งแวดล้อมและพลังงาน ในส่วนของการใช้

พลังงาน ภาคอุตสาหกรรมได้มีการกำหนดดัชนีชี้วัดการใช้พลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption: SEC) โดยการวิเคราะห์การใช้พลังงานต่อหน่วยผลผลิต เพื่อให้ทราบถึงการใช้พลังงานของการผลิต สู่มาตรการการอนุรักษ์พลังงานในโรงงานต่อไป รวมถึงการนำไปสู่การปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อให้มีการใช้พลังงานลดลง ทำให้ลดต้นทุนด้านพลังงานได้

- ดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะ (SEC)

$SEC = \Sigma E / \Sigma Q$ โดยที่ E คือ พลังงานที่ใช้ Q คือ ปริมาณ(หน่วย)

ซึ่ง Q ในที่นี้ เป็นหน่วยที่โรงงานกำหนด เช่น พื้นที่การผลิต หน่วยผลผลิต เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 แสดงตัวอย่างหน่วยต่างๆ ของค่าการใช้พลังงานจำเพาะ SEC

รายการ (ค่าการใช้พลังงานจำเพาะ SEC)	หน่วย
ระบบปรับอากาศ	kWh/m ² /month
ระบบอัดอากาศ	kWh/Units
ระบบแสงสว่าง	kWh/m ² /month
ค่าดัชนีการใช้พลังงานรวมต่อหน่วยผลผลิต	kWh/Units

SEC หรือ Specific Energy Consumption คือค่าดัชนีการใช้พลังงานต่อหน่วยการผลิตของโรงงาน หมายถึงว่าโรงงานหนึ่งๆใช้พลังงานเฉลี่ยเท่าใดในการผลิตสินค้า 1 หน่วย ซึ่งการติดตามและควบคุมค่า SEC ของโรงงาน เป็นวิธีการหนึ่งในการจัดการการอนุรักษ์พลังงาน

- การคำนวณค่า SEC

ค่า SEC หาได้ โดยการเอาพลังงานที่โรงงานใช้ ในช่วงเวลาที่สนใจซึ่งมักจะเป็นเดือนหารด้วยผลผลิตในเดือน เช่น โรงงานแห่งหนึ่งมีการใช้พลังงานไฟฟ้าในเดือนหนึ่ง 1,000,000 หน่วย (kWh) และความร้อนที่ใช้ได้จากน้ำมันเตา ปริมาณ 5,000 ลิตรต่อเดือน ผู้ผลิตแจ้งค่าความร้อนเท่ากับ 39.77 MJ/kg และผลิตสินค้า 1,000,000 kg ดังนั้น SEC พลังงานไฟฟ้า (SEC_E) และ SEC พลังงานความร้อน (SEC_F)

$$SEC_E = 1,000,000 \text{ kWh} / 1,000,000 \text{ kg} = 1 \text{ kWh/kg}$$

$$SEC_F = 5,000 \times 39.77 \text{ MJ} / 1,000,000 \text{ kg} = 0.198 \text{ MJ/kg}$$

$$SEC_{\text{รวม}} = (1,000,000 \times 3.6 + 5,000 \times 39.77) / 1,000,000 = 1.198 \text{ MJ/kg}$$

ในกรณีที่หาค่า SEC รวมให้แปลงพลังงานไฟฟ้าในหน่วย kWh ให้เป็น MJ โดยคูณด้วย 3.6 และนำมารวมกับ MJ ของพลังงานความร้อนซึ่งได้จากปริมาณการใช้เชื้อเพลิงคูณค่าความร้อนของเชื้อเพลิงนั้นๆ

หน่วยพลังงานที่นิยมใช้ในการคำนวณค่า SEC มักจะเป็น MJ หรือ GJ ในขณะที่ปริมาณผลผลิตขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของผลผลิตที่นิยมใช้มักเป็นหน่วยน้ำหนัก เช่น ตัน เป็นต้น

ทั้งนี้ โรงงานที่มีมากกว่าหนึ่งกระบวนการผลิตแม้ว่าจะมีข้อมูลการใช้พลังงานรวมแต่จะไม่มีข้อมูลปริมาณการใช้พลังงานแยกตามกระบวนการผลิตข้อมูล SEC ของโรงงานซึ่งประเมินจากปริมาณการใช้พลังงานของโรงงานรายวันหรือรายเดือนหรือรายปีหารด้วยปริมาณผลผลิตของช่วงระยะเวลาเดียวกันจึงเป็น SEC ของผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจากการผลิตหลายกระบวนการและหลากหลายผลิตภัณฑ์ซึ่งทำให้ไม่สามารถนำข้อมูลที่ได้นั้นๆไปเปรียบเทียบกับค่า SEC ของแต่ละกระบวนการผลิตได้

ดังนั้นเมื่อนำข้อมูล SEC ที่ประเมินโดยวิธีที่กล่าวข้างต้นไปเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงจึงประเมินไม่ได้ว่ากระบวนการผลิตของโรงงานมีประสิทธิภาพดีหรือแย่กว่าค่าอ้างอิงมากน้อยเท่าใดเนื่องจากค่าเปรียบเทียบอ้างอิงนั้นจัดทำขึ้นจากกระบวนการผลิตใดประเภทหนึ่งเพียงอย่างเดียวและกำลังการผลิตเฉลี่ยค่าหนึ่งเท่านั้นดังนั้นในกรณีที่โรงงานที่มีกระบวนการผลิตหลายกระบวนการผลิตการประเมิน SEC ให้แยกผลผลิตของแต่ละกระบวนการผลิตและปริมาณพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิตนั้น

ดังนั้น จึงต้องการวิเคราะห์การใช้พลังงานในแต่ละขั้นตอนการผลิตต้องทราบการใช้พลังงานในแต่ละขั้นตอนการผลิต เพื่อทราบประสิทธิภาพการใช้พลังงานในแต่ละขั้นตอนการผลิต เพื่อทราบว่าขั้นตอนใดของการผลิตนั้นใช้พลังงานมากที่สุด และเป็นขั้นตอนที่ต้องมีการควบคุมการใช้พลังงานมากเป็นพิเศษ

ดังนั้น ในการหาค่าพลังงานในการผลิตแต่ละขั้นตอนจำเป็นต้องทราบกระบวนการผลิตทุกขั้นตอนของผลิตภัณฑ์ และทราบถึงสารขาเข้า (Inputs) ที่เป็นพลังงานทั้งหมด ได้แก่ พลังงานความร้อน และพลังงานไฟฟ้า ในการผลิต จนได้สารขาออก (Output) ในแต่ละขั้นตอน เป็นหน่วยผลิตภัณฑ์ที่กำหนด เช่น ต่อผลิตภัณฑ์ 100 กิโลกรัม เป็นต้น

2.2 ประสิทธิภาพด้านพลังงาน (Energy Efficiency)

ภาคอุตสาหกรรมให้ความสำคัญเกี่ยวกับการใช้พลังงาน เนื่องจากต้นทุนด้านพลังงานเป็นส่วนหนึ่งของต้นทุนการผลิต ซึ่งการเพิ่มขึ้นของราคาพลังงานจะเป็นเหตุให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้น จึงจำเป็นต้องใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพเพื่อให้มีการลดการบริโภคพลังงาน แต่ไม่ส่งผลกระทบต่อผลผลิตของการผลิตจึงจำเป็นต้องมีการกำหนดตัวชี้วัด (Indicators) เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลสำหรับการเปรียบเทียบ ซึ่งเรียกว่า ตัวชี้วัดประสิทธิภาพพลังงาน (Energy Efficiency)

- การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน

ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้พลังงานในภาคอุตสาหกรรม นั้น พบปัญหาเนื่องจากการใช้พลังงานหลากหลายชนิด มีคุณภาพพลังงาน (Energy Quality) ที่แตกต่างกันในการใช้พลังงานในหน่วยงาน ซึ่งได้แก่ ชนิดพลังงานที่ใช้ โดยเฉพาะในอุตสาหกรรม ผลผลิตมีความหลากหลายและไม่คงที่ จึงจำเป็นต้องหาวิธีในการคำนวณ เพื่อวิเคราะห์การใช้พลังงานที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตและเทคโนโลยีการผลิตที่ความแตกต่างกัน ซึ่งวิธีที่นิยมใช้คือ การแยกองค์ประกอบการใช้พลังงาน (Decompositivity of Energy Consumption) ในการอธิบายการใช้พลังงานในภาคอุตสาหกรรม ซึ่งจะอธิบายในเรื่องการบริโภคพลังงาน (Energy Consumption) ความเข้มพลังงาน (Energy Intensity) และความยืดหยุ่น/สัมประสิทธิ์พลังงาน (Energy Elasticity/Coefficient) ดังนี้

การบริโภคพลังงาน อธิบายถึงการใช้พลังงานในโรงงาน/อุตสาหกรรม/กลุ่มอุตสาหกรรมที่ใช้พลังงานไปเท่าไร ทั้งการผลิตและด้านอื่นๆ หน่วย คือ หน่วยของพลังงานหรือพลังงานเทียบเท่า

ความเข้มของพลังงาน อธิบายถึงพลังงานที่ใส่ในกระบวนการผลิต ว่าทำให้ได้ผลผลิต/ปริมาณ/มูลค่าเท่าใด

ความยืดหยุ่น/สัมประสิทธิ์พลังงาน อธิบายถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงการใช้พลังงานต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงผลผลิต

2.3 ประสิทธิภาพ ประสิทธิผล และผลผลิตภาพ

การบริหารงานอุตสาหกรรมจำเป็นต้องมีเครื่องมือในการวัดผลการดำเนินงาน ส่วนใหญ่ผู้บริหารจะใช้เฉพาะผลผลิตที่ได้เป็นตัววัดผลการดำเนินงาน หรืออาจจะดูจากผลสุดท้าย คือ กำไร โดยไม่รู้ว่าตัวเลขกำไรหรือขาดทุนอย่างไร บ่อยครั้งก็เกิดจากการไม่สามารถกำหนดต้นทุนผลิตภัณฑ์ได้ อย่างไรก็ตาม

ก็ตาม การวัดผลการดำเนินงานทางอุตสาหกรรม จะมองแต่เพียงผลผลิตเพียงอย่างเดียวไม่ได้ คงจะต้องรับรู้ว่ามีผลผลิตเหล่านั้น เกิดขึ้น โดยการลงทุนใช้ทรัพยากรไปเท่าไร ดังนั้น หน่วยวัดผลการดำเนินงานที่ดี จึงน่าจะใช้ค่าดัชนีผลิตภาพ ซึ่งมีความหมายกับอัตราผลิตภาพ หรือจะใช้คำว่าผลิตภาพก็ได้ ในการจัดการทางการผลิต ถ้าผู้บริหารสามารถรับรู้ผลการดำเนินงานอย่างต่อเนื่อง ก็จะสามารถปรับปรุงกระบวนการผลิตให้เกิดผลผลิตที่สูงขึ้น ตามลำดับ ซึ่งความจริงแล้ว จะมีหน่วยวัดที่คล้ายๆกัน อยู่ 3 หน่วย คือ ประสิทธิภาพ (Efficiency) ประสิทธิผล (Effectiveness) และผลิตภาพ (Productivity) จึงเป็นการน่าสนใจ ในการแยกแยะความหมายของตัววัดดังกล่าว เพื่อใช้เป็นหน่วยวัดผลการดำเนินงานอย่างได้ผลตามเป้าหมายในการดำเนินงาน

- ประสิทธิภาพ (Efficiency)

ประสิทธิภาพ เป็นคำที่คุ้นเคยอย่างมากในทางวิศวกรรม เพราะงานออกแบบทางวิศวกรรม จะใช้เกณฑ์ประสิทธิภาพเป็นหัวใจในการออกแบบ โดยให้ความสูญเสียของทรัพยากรที่เข้าไปในระบบ มีความสูญเสียน้อยที่สุด

ประสิทธิภาพในทางวิศวกรรม

$$\text{Efficiency} = \text{Output} / \text{Input}$$

โดยความหมาย Output จะอยู่ในรูปพลังงานหรืองานที่ได้ ส่วน Input จะอยู่ในรูปของพลังงานหรืองานที่ป้อนเข้าไปด้วยเช่นกัน การออกแบบทางวิศวกรรมที่ดี จึงเป็นการออกแบบที่ Input ต้องใกล้เคียงกับ Output มากที่สุด คือ เกิด Lost ในระบบน้อยที่สุด ค่าที่วัดประสิทธิภาพจะมีค่าต่ำกว่า 100 % เสมอ

- ประสิทธิผล (Effectiveness)

ประสิทธิผล เป็นองค์ของการวัดความสำเร็จในการบรรลุเป้าหมาย ในทางบัญชีมักจะเข้าใจในเชิงต้นทุน ส่วนในทางวิศวกรรมมักจะเข้าใจในเชิงประสิทธิภาพ ทำให้เกิดความขัดแย้งในแนวคิดเสมอ ต่อเมื่อความเข้าใจด้านประสิทธิผลเป็นที่ยอมรับของทั้งสองหน่วยงาน การดำเนินงาน เพื่อให้เกิดประสิทธิผล จึงเป็นความสำเร็จขององค์กรในการเพิ่มผลผลิต ดังนั้น ประสิทธิภาพและประสิทธิผลจึงไม่จำเป็นต้องเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ผลงานที่มีประสิทธิภาพสูงอาจมีประสิทธิผลต่ำ เพราะประสิทธิภาพมุ่งเรื่องการให้ผลงาน โดยความสูญเสียเชิงทรัพยากรที่ใช้ต่ำ แต่ประสิทธิผลมุ่งผลประโยชน์ที่ได้จากผลผลิตเป้าหมาย โดยที่ประสิทธิภาพอาจต่ำก็ได้ เพราะผลประโยชน์ที่ต้องการให้ได้ตามเป้าหมาย ต่างจากผลประโยชน์ที่เกิดจากการใช้ทรัพยากรน้อยที่สุด ขณะที่ต้องเพิ่ม

ค่าใช้จ่ายเพื่อการนี้สูงขึ้น ตัวอย่างเช่น การเพิ่ม ประสิทธิภาพในการส่งสินค้าถึงผู้บริโภค โดยวิธีที่มี ประสิทธิภาพสูง แต่นำส่งให้ไม่ทันอาจส่งผลกระทบต่อวิธีที่มีประสิทธิภาพต่ำกว่าค่าใช้จ่ายสูงกว่าแต่มี ประสิทธิภาพแน่นอนกว่า หรือในบางกรณี เรายอมจ่ายค่าใช้จ่ายสำหรับระบบที่จัดหามาใช้งานด้วย ต้นทุนที่สูงกว่า แต่ประสิทธิภาพอาจสู้ไม่ได้กับการลงทุนด้วยต้นทุนที่ต่ำกว่า โดยระบบที่มีประสิทธิภาพ ที่ต่ำกว่าแต่ได้ผลประโยชน์จากการใช้งานเท่ากันหรือดีกว่า

- **ผลิตภาพ (Productivity)**

ผลิตภาพ เป็นคำที่มีความหมายตามสูตรที่ใช้ เช่นเดียวกับคำว่า ประสิทธิภาพ กล่าวคือ ผลิต ภาพเป็นดัชนีแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตต่อทรัพยากรที่ใช้ในการก่อเกิดผลผลิตนั้นหรือใน เทอมเดียวกัน เป็นสูตร ดังนี้

$$\text{Productivity} = \text{Output} / \text{Input}$$

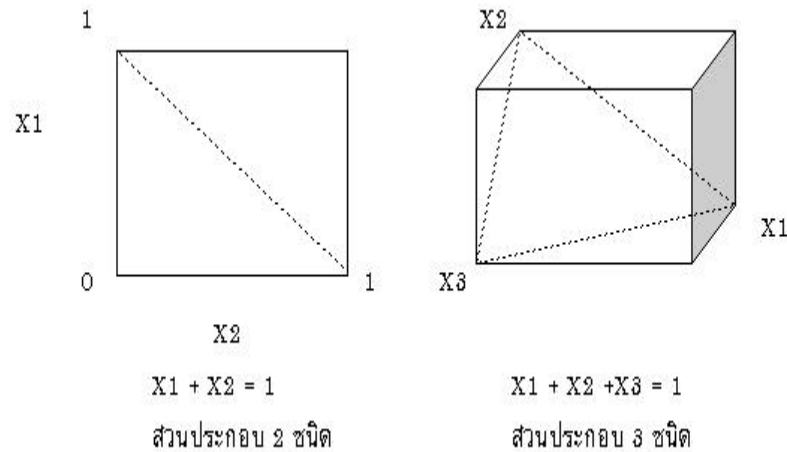
ถึงแม้จะใช้สูตรเดียวกัน แต่ความหมายของผลิตภาพนั้น มีความสัมพันธ์ของผลผลิตต่อ ทรัพยากรที่ใช้ต่างๆ กัน โดยมีการคำนวณค่าเชิงเศรษฐกิจทั้งผลผลิตและทรัพยากรที่ใช้ จึงไม่ได้วัด ออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ แต่จะวัดออกมาเป็นตัวเลข โดยไม่จำเป็นต้องน้อยกว่าหนึ่ง และโดยหลักการที่ ถูกต้องแล้ว จะต้องมากกว่าหนึ่งเสมอ

ในการเปรียบเทียบความหมายของประสิทธิภาพ ประสิทธิภาพ และ ผลิตภาพ กล่าวได้ว่า ประสิทธิภาพแสดงถึงการใช้ทรัพยากรว่าดีระดับใด เพื่อให้ได้ผลผลิตที่ต้องการ ขณะที่ประสิทธิผล แสดงผลผลิตระดับที่ต้องการได้อย่างไรจากทรัพยากรที่ใช้ ความหมายของของผลิตภาพจึงเป็นความ หมายรวมของประสิทธิภาพและประสิทธิผล เนื่องจากประสิทธิภาพมีความสัมพันธ์กับการใช้ ทรัพยากร ขณะที่ประสิทธิผล มีความสัมพันธ์กับผลงานที่ต้องการ แต่ผลิตภาพต้องใช้ความสัมพันธ์ ของทั้งผลผลิตและทรัพยากรที่ใช้ในรูปแบบเชิงเศรษฐกิจ คือ มีค่าเป็นจำนวนเงิน

2.4 การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม (Mixture Design)

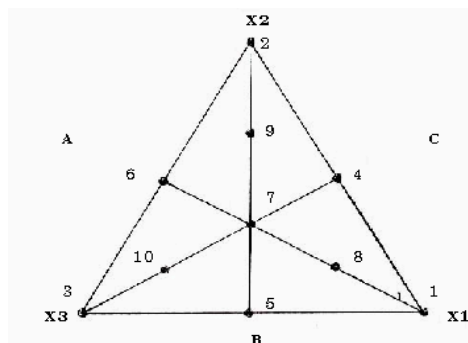
การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม (Mixture Design) เป็นการออกแบบการทดลองเพื่อหา สัดส่วนที่ เหมาะสมของปัจจัยเชิงปริมาณตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป โดยยึดหลักว่าผลรวมปริมาณของ ปัจจัยทั้งหมดจะต้องเป็น 1.0 (หรือ 100%) เสมอ กล่าวคือเมื่อปัจจัยหนึ่งมีปริมาณที่ เพิ่มขึ้น ย่อมทำ ให้ปัจจัยอื่นๆ มีสัดส่วนลดลง ซึ่งแตกต่างจากการ ทดลองที่ไม่ใช่แบบผสม (Mixture) ที่ตัวแปรแต่ละ ตัวเป็นอิสระจากกัน ถ้ามีส่วนประกอบในสูตรเพียง 2 ชนิด คือ X_1 และ X_2 บริเวณที่เป็น Mixture

design ของตัวแปร X_1 และ X_2 จะแสดงเป็นเส้นตรง $X_1 + X_2 = 1$ ในขณะที่ถ้ามีส่วนประกอบในสูตร 3 ชนิด คือ X_1 , X_2 และ X_3 บริเวณที่เป็น Mixture design ของตัวแปร X_1 , X_2 และ X_3 จะแสดงเป็น Equilateral triangle $X_1 + X_2 + X_3 = 1$ แต่หากมีส่วนประกอบตั้งแต่ 4 ชนิดขึ้นไป จะทำให้ยากต่อการแสดงบริเวณที่เป็น Mixture design ในรูปกราฟ



รูปที่ 2.1 บริเวณที่เป็น Mixture design ที่มีส่วนประกอบ 2 และ 3 ชนิด ตามลำดับ (ไพโรจน์, 2536)

สำหรับแผนการทดลองแบบเต็มรูปแบบของ Mixture design ที่มีส่วนประกอบ 3 ชนิด จะมีจำนวนสิ่งทดลองทั้งหมด 10 สิ่งทดลอง คือ ที่จุดยอดของแต่ละมุม (จุดที่ 1 2 และ 3) ที่จุดกึ่งกลางแกน (จุดที่ 4 5 และ 6) จุดศูนย์กลาง (จุดที่ 7) และจุดกึ่งกลางระหว่างจุดศูนย์กลางกับจุดยอด (จุดที่ 8 9 และ 10) แต่อย่างไรก็ตามเราสามารถลดจำนวนสิ่งทดลองในแผนการทดลองแบบ Mixture design ให้เหลือน้อยลงกว่านี้ได้ หากผู้ทดลองจะยอมรับในรายละเอียดที่ต้องการน้อยลง



รูปที่ 2.2 ตำแหน่งของสิ่งทดลองทั้งหมดในแผนการทดลองแบบ Mixture design ที่มีส่วนประกอบ 3 ชนิด (ไพโรจน์, 2536)

ตารางที่ 2.2 ส่วนผสมของส่วนประกอบแต่ละชนิดในแต่ละสิ่งทดลองของแผนการทดลองแบบ Mixture design ที่มีส่วนประกอบ 3 ชนิด

สิ่งทดลองที่	A	B	C
1	1	0	0
2	0	1	0
3	0	0	1
4	1/2	1/2	0
5	1/2	0	1/2
6	0	1/2	1/2
7	1/3	1/3	1/3
8	2/3	1/6	1/6
9	1/6	2/3	1/6
10	1/6	1/6	2/3

การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม เป็นการออกแบบการทดลองเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมของปัจจัยเชิงปริมาณตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป โดยผลรวมของปริมาณทั้งหมดจะต้องเป็น 1.0 หรือ 100% เสมอ กล่าวคือ เมื่อปัจจัยหนึ่งเพิ่มขึ้น ย่อมทำให้ปัจจัยอื่นๆ มีสัดส่วนลดลง ซึ่งแตกต่างจากการทดลองที่ไม่ใช่แบบผสม (Mixture) ที่ตัวแปรแต่ละตัวเป็นอิสระจากกัน การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม มีแบบแผนการย่อยแบ่งได้เป็น 4 แบบ ดังนี้

2.4.1 การออกแบบแบบเชฟเฟ้ซิมเพล็กซ์ซิมเพล็กซ์แลกทิส (Scheffe' simplex Lattice)

การออกแบบแบบเชฟเฟ้ซิมเพล็กซ์ซิมเพล็กซ์แลกทิส (Scheffe' simplex Lattice) พิกัด (Coordinate) ซึ่งเป็นส่วนประกอบต่างๆ ของการทดลอง โดยแต่ละตัวแปรสามารถคำนวณระดับ ได้ดังนี้

$$x_i = 0, \frac{1}{m}, \frac{2}{m}, \dots, 1$$

โดยที่ $i = 1, 2, 3, \dots, q$

$m =$ เป็นสัดส่วนของแต่ละปัจจัยจาก 0-1 (0-100 เปอร์เซ็นต์)

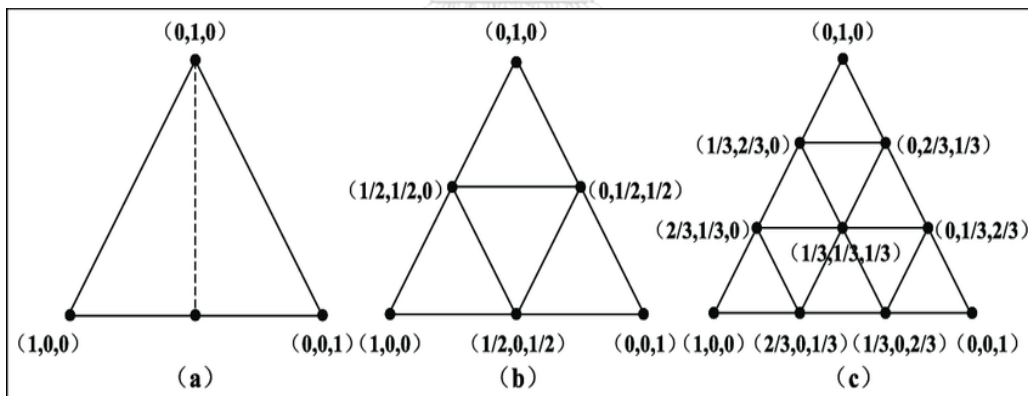
สำหรับในกรณีที่มีจำนวนส่วนผสม (q) เท่ากับ 3 หรือมี 3 ปัจจัย เป็นตัวอย่างที่นิยมใช้ในการออกแบบดังกล่าว หาก $m = 3$ พิกัดที่ได้เป็นส่วนประกอบของ x_1, x_2 , และ x_3 จะเป็น $0, 1/3$ และ $2/3$ ตามลำดับจำนวนของจุดในการทดลองทั้งหมด คำนวณจาก

$$M = (m+q-1)!/m!(q-1)!$$

$$= q(q+1)\dots(q+m-1)/(1)(2)\dots(m)$$

$$M = \frac{3 \times 4 \times 5}{1 \times 2 \times 3} = 10$$

ซึ่งตัวอย่างของสิ่งทดลองที่มีจำนวน q และ m ต่างๆ

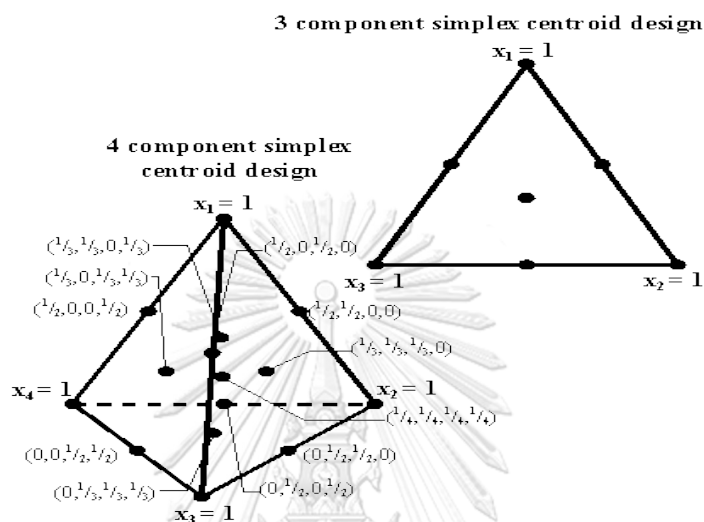


รูปที่ 2.3 สิ่งทดลองสำหรับแผนการทดลองแบบเซฟเฟอิมเพล็กซ์แลคทิส ที่มี 3 ตัวแปร แต่ละตัวแปร มี 2 ระดับ และ 3 ระดับ

2.4.2 การออกแบบแบบเซฟเฟอิมเพล็กซ์เซนทรอยด์ (Scheffe' Simplex Centroid)

การออกแบบแบบเซฟเฟอิมเพล็กซ์เซนทรอยด์ (Scheffe' Simplex Centroid) เป็นการออกแบบการทดลองที่มีสิ่งทดลองเท่ากับ $2^q - 1$ แต่ละปัจจัยมีสัดส่วนที่เท่ากันทุกปัจจัย สิ่งทดลองประกอบด้วยจุดที่เป็นส่วนผสมเดียว (Pure Component) ต่างๆ หมายถึงสิ่งทดลองที่มีส่วนผสมนั้น

100 เปอร์เซ็นต์ หรือเท่ากับ 1.0 และ 0.5, 0.5, 0, ..., 0 เป็นส่วนผสมคู่ (Binary Mixture) และ 1/3, 1/3, 1/3, 0, ..., 0 สำหรับส่วนผสม 3 ชนิด และ 1/q, 1/q, 0, ..., 0 สำหรับส่วนผสมแบบควินารี (q-nary mixtures; centroid) และจุดกึ่งกลาง (1/q, 1/q, ..., 1/q) ตัวอย่างของสิ่งทดลองต่างๆ สำหรับ 3 ปัจจัย และ 4 ปัจจัย ดังนี้



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างของสิ่งทดลองต่างๆ สำหรับ 3 ปัจจัย และ 4 ปัจจัยของการออกแบบแบบซิมเพล็กซ์เซนทรอยด์

2.4.3 การออกแบบแบบซิมเพล็กซ์แอกเซียล (Simplex Axial)

การออกแบบแบบซิมเพล็กซ์แอกเซียล (Simplex Axial) เป็นการออกแบบการทดลองโดยเน้นจุดที่เป็นส่วนประกอบต่างๆ ของทุกปัจจัย ซึ่งจะมีจุดที่มาจากจุดกึ่งกลางของแต่ละส่วนย่อย

2.4.4 การออกแบบแบบเอ็กซ์ทรีมเวอร์ทีส (Extreme Vertice)

การออกแบบแบบเอ็กซ์ทรีมเวอร์ทีส (Extreme Vertice) เป็นการออกแบบการทดลองที่มีข้อจำกัดสัดส่วน (Design with constraints on proportion) หรือแบบที่มีข้อจำกัด (Constrained Mixture Design) โดยแผนการทดลองนี้ ระดับในแต่ละปัจจัย ไม่จำเป็นต้องเป็น 0-100% โดยอาจเป็น 25-50% หรือ 15-40% เป็นต้น เนื่องด้วยข้อจำกัดในความจำเป็นพื้นฐานของการทดสอบนั้นๆ เช่น การกำหนดสูตรพื้นฐานในการทดสอบบางอย่าง เป็นต้น

2.5 การวิเคราะห์ถดถอยและสหสัมพันธ์

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุคูณ มีวัตถุประสงค์ในการพยากรณ์หรือทำนายตัวแปรที่ต้องการ ศึกษา ด้วยการสร้างสมการพยากรณ์ โดยมีตัวแปรเกณฑ์ (Y) ที่เป็นตัวแปรต่อเนื่องเพียง 1 ตัว และตัวแปร พยากรณ์ (X) หลายตัวแปร ซึ่งเป็นข้อมูลในสเกลการวัดระดับมาตราส่วน (Ratio Scale) หรือระดับช่วง (Interval Scale) หรือถ้าบางตัวแปรเป็นข้อมูลในระดับนามบัญญัติ (Nominal Scale) หรือเรียงลำดับ (Ordinal Scales) ต้องปรับให้เป็นตัวแปรหุ่น (Dummy Variable) ก่อนทำการวิเคราะห์ จากหลักการ ของการวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณที่กล่าวมาแล้วว่า ใช้ตัวแปรพยากรณ์หลายตัวในการทำ นายตัวแปรเกณฑ์ ตัวเดียว ทำให้ตัวแปรพยากรณ์บางตัวที่ไม่มีส่วนในการอธิบาย การผันแปรต่อตัวแปรเกณฑ์ไม่มีความสำคัญต่อ สมการพยากรณ์ ดังนั้นวิธีการคัดเลือกตัวแปรพยากรณ์จึงมีความจำ เป็น เพื่อให้ได้สมการพยากรณ์ที่ดีที่สุด

2.6 การวิเคราะห์สมการถดถอยชนิดหลายตัวแปร

2.6.1 วิธีการคัดเลือกตัวแปร

วิธีการคัดเลือกตัวแปรแต่ละแบบรวมทั้งข้อเปรียบเทียบเกี่ยวกับวิธีการคัดเลือก ตัวแปรในแต่ละวิธี เพื่อเป็นหลักในการนำไปใช้ได้อย่างถูกต้อง ดังนี้

1. การเลือกตัวแปรโดยวิธีเพิ่มตัวแปร (Forward Selection)

เป็นวิธีการที่ต้องการได้โมเดลประหยัดนั้นคือจะเลือกเฉพาะตัวแปรพยากรณ์ที่ดีที่สุดที่สามารถ พยากรณ์ตัวแปรเกณฑ์ได้เท่านั้น โดยจะคัดเลือกตัวแปรพยากรณ์เข้ามาในสมการทีละตัว และทำการทดสอบว่า ตัวแปรที่เข้ามานั้นสามารถพยากรณ์ตัวแปรเกณฑ์ได้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ต่อจากนั้นทำการคัดเลือก ตัวแปรที่สำคัญรองลงมาต่อไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งไม่มีตัวแปรพยากรณ์เหลือ วิธีการเพิ่มตัวแปรก็จะสิ้นสุด วิธีนี้ในแต่ละขั้นตอนที่นำตัวแปร พยากรณ์เข้าสมการ เป็นการพิจารณาเฉพาะตัวแปรที่เข้าไปใหม่จะสามารถพยากรณ์ตัวแปรเกณฑ์ได้เพิ่มมากขึ้น หรือไม่ จุดบกพร่องของวิธีนี้คือไม่ได้ตรวจสอบผลกระทบที่เกิดเนื่องจากตัวแปรพยากรณ์ตัวใหม่ที่เข้าไปในรูปแบบต่อตัวแปรพยากรณ์ที่เข้าไปในรูปแบบก่อนหน้านี้แล้ว

2. การเลือกตัวแปรโดยวิธีลดตัวแปร (Backward Elimination)

เป็นวิธีที่พยายามคัดเลือกตัวแปรที่ดีที่สุดและได้โมเดลประหยัด ในการพยากรณ์ เช่นเดียวกัน แต่เป็นวิธีที่ตรงข้ามกับวิธี Forward นั้น คือตอนแรกจะนำตัวแปรพยากรณ์ทุกตัวเข้ามาในสมการและดำเนิน การพิจารณาตัวแปรพยากรณ์ที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์บางส่วน (Partial

Correlation) กับตัวแปรเกณฑ์ โดยควบคุมอิทธิพลของตัวแปรพยากรณ์อื่น ๆ ซึ่งมีค่าต่ำที่สุดออกจากสมการ แล้วจึงดำเนินการทดสอบว่า ค่า R^2 ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ ถ้าพบว่าลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติแสดงว่าตัวแปร ดังกล่าวไม่ได้มีส่วนทำให้การพยากรณ์ตัวแปรเกณฑ์เพิ่มขึ้นเลย แสดงว่าสามารถจัดออกจากสมการได้ จากนั้นจึงดำเนินการขจัดตัวแปรพยากรณ์ที่มีความสำคัญน้อยรองลงมาออกไปอีก โดยใช้วิธีพิจารณา เช่น เดียวกัน ซึ่งการขจัดตัวแปรพยากรณ์จะสิ้นสุด เมื่อพบว่ามิผลทำให้ค่า R^2 ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ หมายความว่า ตัวแปรดังกล่าวมีความสำคัญต่อการพยากรณ์ตัวแปรตาม หากขจัดตัวแปรดังกล่าวออกจาก สมการจะทำให้อำนาจการพยากรณ์ตัวแปรเกณฑ์ลดลง จึงต้องคงตัวแปรพยากรณ์ดังกล่าวไว้ในสมการพยากรณ์ ต่อไป

3. การเลือกตัวแปรโดยวิธีเพิ่มตัวแปรอิสระแบบขั้นตอน (Stepwise Regression)

เป็นวิธีที่มีความเหมาะสมในการพิจารณาคัดเลือกตัวแปรพยากรณ์ที่ดีที่สุดและได้โมเดลที่ ประหยัดที่สุด ซึ่งลำดับขั้นตอนจะคล้ายกับวิธี Forward เพียงแต่การวิเคราะห์ด้วยวิธี Stepwise จะทำการ ทดสอบตัวแปรพยากรณ์ที่เข้าสมการไปแล้วทุกครั้งที่มีการนำตัวแปรใหม่เข้าในสมการหมายความว่าตัวแปร พยากรณ์บางตัวที่เข้าไปในสมการแล้วก็สามารถถูกขจัดออกจากสมการได้ หากพบว่าตัวแปรพยากรณ์ตัวนั้นไม่ได้ส่งผลให้ค่า R^2 เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ไม่ได้มีส่วนทำให้การ พยากรณ์ต่อตัวแปรเกณฑ์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ) ซึ่งวิธี Forward ไม่ได้ทดสอบในส่วนนี้

4. การเลือกตัวแปรโดยวิธีนำตัวแปรเข้าทั้งหมด (Enter Regression)

วิธีนี้เป็นการคัดเลือกตัวพยากรณ์เข้าสมการด้วยการวิเคราะห์เพียงขั้นตอนเดียว เริ่มต้น การวิเคราะห์โดยใช้ตัวแปรพยากรณ์ที่ศึกษานำเข้าไปในสมการพยากรณ์พร้อมกันทุกตัว ถึงแม้ว่าตัวแปรพยากรณ์ บางตัวจะพยากรณ์ตัวแปรเกณฑ์ได้หรือไม่ก็ตาม วิธีนี้มักจะใช้ในกรณีที่ต้องการทราบว่าตัวแปรแต่ละตัวที่ทำ การศึกษาจะสามารถพยากรณ์ตัวแปรเกณฑ์ได้หรือไม่มากน้อยเพียงใด ซึ่งจะมีประโยชน์สำหรับวิธีการ ทางสถิติอื่น ๆ เช่น การวิเคราะห์เส้นทาง (Path Analysis) ข้อด้อย คือ เป็นการวิเคราะห์ที่ไม่ได้คัดเลือกตัวแปรเข้าสู่สมการถดถอยที่เหมาะสมให้ ทำให้ได้โมเดลที่ไม่ประหยัด

2.6.2 การตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามและตัวแปรอิสระ

โดยมีการตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามและตัวแปรอิสระ ดังนี้

1. การตรวจสอบลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามและตัวแปรอิสระ พิจารณาได้จากกราฟ การกระจายระหว่างตัวแปรตามและตัวแปรอิสระแต่ละตัวแปร หากกราฟที่ได้มีลักษณะการกระจายใกล้เคียง เส้นตรง แสดงว่าตัวแปรตามและตัวแปรอิสระมีความสัมพันธ์กันในเชิงเส้นตรง
2. การตรวจสอบการแจกแจงปกติของค่าคลาดเคลื่อน พิจารณาได้จาก Normal Probability Plot ของค่าส่วนตกค้าง (Residual) หากกราฟมีการกระจายใกล้เคียงเส้นตรง แสดงว่าค่าคลาดเคลื่อนมีการแจกแจง ปกตินอกจากนั้น ยังสามารถใช้วิธีการทดสอบทางสถิติ เช่น การทดสอบ Kolmogorov-Smirnov ในการตรวจสอบข้อสมมุติ
3. การตรวจสอบความคงที่ของความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อน พิจารณาได้จากกราฟ การกระจาย ระหว่างค่าส่วนตกค้างและค่าพยากรณ์ (Predicted Value, \hat{y}_i) หรือกราฟ การกระจายระหว่างค่าส่วนตกค้าง และตัวแปรอิสระแต่ละตัวแปร หากความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อนมีค่าคงที่กราฟที่ได้จะมีการกระจาย แบบสุ่มรอบศูนย์แต่หากความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อนไม่คงที่กราฟจะมีการกระจายเป็นรูปกรวย นอกจากนี้ ยังสามารถใช้วิธีการทดสอบทางสถิติ เช่น การทดสอบ Breusch-Pagan ตรวจสอบข้อสมมุติ
4. การตรวจสอบการเป็นอิสระกันของค่าคลาดเคลื่อน ในกรณีที่มีการเก็บรวบรวมข้อมูล เป็นไป ตามลำดับของเวลา หรือลำดับใด ๆ อาจทำให้ค่าคลาดเคลื่อนไม่เป็นอิสระกัน ซึ่งเรียกว่า การเกิดอัตสหสัมพันธ์ (Autocorrelation) การตรวจสอบข้อสมมุติพิจารณาได้จากกราฟการกระจายระหว่างค่าส่วน ตกค้างและลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล หากค่าคลาดเคลื่อนเป็นอิสระกัน กราฟจะมีการกระจายโดยสุ่มรอบ ศูนย์แต่หากกราฟมีลักษณะการกระจายมีรูปแบบ เช่น มีลักษณะเป็นเส้นโค้งวัฏจักร (Cycle) แสดงให้เห็นว่าค่าคลาดเคลื่อนไม่เป็นอิสระกัน หรือเกิดปัญหา อัตสหสัมพันธ์นอกจากนั้น ยังสามารถใช้สถิติทดสอบ Durbin - Watson ในการตรวจสอบข้อสมมุติ ได้ด้วย

5. การตรวจสอบความเป็นอิสระกันของตัวแปรอิสระในตัวแบบการถดถอย ในกรณีที่ตัวแปรอิสระ มากกว่าหนึ่งตัวแปรในตัวแบบการถดถอย อาจก่อให้เกิดปัญหาที่ตัวแปรอิสระเหล่านี้มีความสัมพันธ์กันเอง ซึ่ง เรียกว่าการเกิดพหุสัมพันธ์ (Multicollinearity) ความรุนแรงของปัญหาที่เกิดขึ้น ๆ อยู่กับขนาดของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระเหล่านี้ หากความสัมพันธ์อยู่ในระดับต่ำ ปัญหาจะไม่รุนแรงมากนัก แต่ถ้า ความสัมพันธ์อยู่ในระดับสูงจะส่งผลกระทบต่อตัวประมาณค่าของสัมประสิทธิ์การถดถอยในตัว แบบการถดถอย ซึ่งปัญหานี้สามารถตรวจสอบได้โดยพิจารณาจากกราฟการกระจายระหว่างตัวแปรอิสระแต่ละคู่และพิจารณาจากค่า Variance Inflation Factor (VIF) หากค่า VIF มีค่ามากกว่า 10 ซึ่งให้เห็นว่าเกิด ปัญหาพหุสัมพันธ์อย่างรุนแรง

6 . การคัดเลือกตัวแปรหลังจากที่ได้สร้างตัวแบบการถดถอยในเบื้องต้น และตรวจสอบข้อสมมุติแล้ว จะพบว่าตัวแปรอิสระ บางตัวแปรที่อาจจะไม่มีความสำคัญ และไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม จึงต้องทำการคัดเลือกตัวแปรอิสระ เพื่อให้ได้ตัวแบบที่เหมาะสมที่ประกอบด้วยตัวแปรอิสระที่สำคัญ และมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามเท่านั้น ซึ่ง วิธีการคัดเลือกตัวแปรที่เหมาะสมนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายวิธีได้แก่การเลือกตัวแปรโดยวิธีเพิ่มตัวแปร (Forward Selection) การเลือกตัวแปรโดยวิธีลดตัวแปร (Backward Elimination) และการเลือกตัวแปรโดยวิธีเพิ่มตัว แปรอิสระแบบขั้นตอน (Stepwise Regression)

2.6.3 แบบจำลองการถดถอยสำหรับการทดลองส่วนผสม (Mixture Design)

เนื่องจากตัวแปรทุกตัวรวมกันได้ 1 หรือ 100 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นแบบจำลองการถดถอย สำหรับการทดลองส่วนผสม (Mixture Design) จึงไม่มีค่าคงที่ หรือเทอม β_0 และ β_{ij} โดยแบบจำลองที่ใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามและตัวแปรอิสระมีดังนี้

1) รูปแบบสมการเชิงเส้น (Linear Model)

$$E(y) = \sum_{i=1}^p \beta_i X_i$$

2) รูปแบบสมการกำลังสอง (Quadratic Model)

$$E(y) = \sum_{i=1}^p \beta_i X_i + \sum_{i < j} \sum_{i < j}^p \beta_{ij} X_i X_j$$

3) รูปแบบสมการกำลังสามแบบพิเศษ (Special Cubic Model)

$$E(y) = \sum_{i=1}^p \beta_i X_i + \sum_{i < j} \sum_{i < j}^p \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{i < j < k} \sum_{i < j < k}^p \beta_{ijk} X_i X_j X_k$$

4) รูปแบบสมการกำลังสามทั้งหมด (Full Cubic Model)

$$E(y) = \sum_{i=1}^p \beta_i X_i + \sum_{i < j} \sum_{i < j}^p \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{i < j} \sum_{i < j}^p \delta_{ij} X_i X_j (X_i - X_j) \\ + \sum_{i < j < k} \sum_{i < j < k}^p \beta_{ijk} X_i X_j X_k$$

ที่มา : Raymond H. Myers and Douglas C. Montgomery (1995)

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 การใช้พลังงานต่อหนึ่งหน่วยการผลิต (Specific Energy Consumption)

พิรพงษ์ แก้ววิมลรัตน์ (2552) [8] พัฒนาแบบจำลองดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะด้วยเทคนิค เพื่อใช้เป็นแนวทางการใช้พลังงานมาตรฐาน (Benchmark) ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์เนื่องจากในปัจจุบันจะคิดคำนวณหาค่าการใช้พลังงาน โดยวิเคราะห์การใช้พลังงานต่อหน่วยผลผลิต (Specific Energy Consumption) ซึ่งหาได้จากการนำเอาค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมดหารด้วยปริมาณผลผลิตที่ได้ และจากการที่โรงงานแต่ละโรงมีผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย ส่งผลให้หน่วย

ผลผลิตที่ได้มีความแตกต่างกัน ทำให้ค่าการใช้พลังงานต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ที่คำนวณได้เกิดขึ้นจากหน่วยของผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกันไม่ถูกต้อง เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้แต่ละชนิดอาจมีขนาดและความยากง่ายการผลิตแตกต่างกันส่งผลให้การหาค่าต้นทุนพลังงานต่อผลผลิต (Unit Cost) ที่ได้ไม่ถูกต้อง นักงานวิจัยนี้จึงได้หาวิธีในการปรับเทียบให้เป็นหน่วยเดียวกัน โดยในการศึกษาจะทำการหากิจกรรมกระบวนการผลิตของโรงงานเพื่อนำมาวิเคราะห์หาหน่วยเทียบผลิตภัณฑ์เท่ากับผลิตภัณฑ์ต่างๆที่ผลิตออกมาได้ คำนวณหาเวลามาตรฐานในการผลิตแต่ละผลิตภัณฑ์ แล้วทำการคิดคำนวณต้นทุนการใช้พลังงานต่อหน่วยผลผลิตตามค่าหน่วยเทียบสำเร็จรูปเพื่อให้สามารถนำค่าการใช้พลังงานต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ที่คำนวณได้ มาวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดได้ซึ่งจะได้ค่าการใช้พลังงานต่อหน่วยผลผลิตใหม่ ที่มีการเปลี่ยนแปลงจากเดิมตั้งแต่ไม่ถึง 1% จนถึง 74 % แล้ววิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการใช้พลังงาน ด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบถดถอยพหุคูณจากนั้นจึงข้อมูลที่ได้มาทำแบบจำลองการใช้เกณฑ์ดัชนีชี้วัดการใช้พลังงาน โดยทำการรวบรวมตัวแปรที่ส่งผลต่อใช้

อัครพันธ์ ธรรมไพศาล (2554) [9] ศึกษาเกณฑ์การใช้พลังงานไฟฟ้าในโรงไฟฟ้าประเภทโคเจนเนอเรชัน โดยหาปริมาณการใช้พลังงานต่อหนึ่งหน่วยการผลิต (Specific Energy Consumption) ของโรงงานผลิตไฟฟ้าประเภทโคเจนเนอเรชัน หรือในทางการผลิตไฟฟ้าจะเรียกว่า Heat Rate ซึ่งจะเป็นดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้านั้นๆ หรือเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณผลผลิต(ไฟฟ้า+ไอน้ำ) ต่อปริมาณก๊าซธรรมชาติที่ใช้ รวมถึงการหาดัชนีต้นทุนค่าก๊าซธรรมชาติต่อหน่วยการผลิตและได้มีการนำเสนอแนวทางการปรับปรุงให้ดีขึ้นจากการใช้การจัดการในการเพิ่มผลผลิตและการประหยัดพลังงาน ทำให้สามารถลดค่า Heat Rate ของโรงไฟฟ้าตัวอย่างกำลังการผลิตตามสัญญาซื้อขายทั้งน้ำและไฟฟ้าจาก 7397.13 BTU/kWh มีต้นทุน 2.24 บาทเป็น 6691.67 BTU/kWh ต้นทุนลดลง 0.21 BTU/kWh

จักรภพ นาคฤทธิ์ (2546) [10] ศึกษาเปรียบเทียบวัฏจักรพลังงานและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตลอดวงจรชีวิตระหว่างการใช้ดีเซลผสมเอทานอลชนิด 95 % และ 99.5 % ในภาคการขนส่งของประเทศไทยโดยประเมินผลด้านพลังงานและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตลอดวงจรชีวิต โดยเปรียบเทียบระหว่างการใช้เอทานอล 95 % ผสมกับน้ำมันดีเซลและเอทานอล 99.5 % ผสมกับน้ำมันดีเซล พิเคราะห์เฉพาะการผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาลในประเทศไทย โดยวงจรชีวิตของ

เชื้อเพลิงแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการผลิตเชื้อเพลิง (FTT) ซึ่งสนใจขั้นตอนย่อย การผลิตอ้อย การผลิตน้ำตาล การผลิตเอทานอลและการขนส่งเชื้อเพลิงและวัตถุดิบซึ่งพิจารณาแบ่งตามภาคเป็นหลัก และขั้นตอนการใช้เชื้อเพลิงในรถยนต์ (TTW) ข้อมูลที่ใช้ในการวิจัยจะพิจารณาจากข้อมูลในระดับทุติยภูมิที่มีการเก็บรวบรวมและเผยแพร่โดยหน่วยงานต่างๆ ซึ่งได้ดำเนินการตรวจสอบกับข้อมูลในภาคสนาม การวิเคราะห์และประเมินผลข้อมูลดำเนินการตามแนวทางที่ใช้ใน GREET Model และจากงานวิจัยอื่นในเรื่อง LCA ที่เกี่ยวข้องเป็นหลัก

เมื่อพิจารณาแต่ละขั้นตอนตลอดวัฏจักรชีวิตของเอทานอลพบว่า การผลิตเอทานอล 95% ต้องใช้พลังงานส่วนใหญ่ในขั้นตอนการกลั่นและการผลิตกากน้ำตาล ส่วนการผลิตเอทานอล 99.5% นั้น ต้องใช้พลังงานส่วนใหญ่ในขั้นตอนการกำจัดน้ำ การกลั่น และการผลิตกากน้ำตาล ตามลำดับ โดยการใช้พลังงานในขั้นตอนการทำอ้อยมีปริมาณเล็กน้อยและพลังงานในขั้นตอนการขนส่งอ้อย และขั้นตอนการขนส่งกากน้ำตาลมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับขั้นตอนอื่นๆ ซึ่งเป็นผลมาจากเงื่อนไขที่กำหนดให้มีการนำวัตถุดิบในท้องถิ่นมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงดีเซลสำหรับท้องถิ่นนั้นๆ เท่านั้น

สุทธิ เหลืองรัตนเจริญ (2552) [11] ทำการลดต้นทุนพลังงานในกระบวนการผลิตของโรงงานประเภทการฉีดขึ้นรูปเพื่อดำเนินการลดต้นทุนการผลิตให้อยู่ในระดับต่ำที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมที่มีการใช้พลังงานสูง เช่น โรงงานประเภทฉีดขึ้นรูปโดยทำการประเมินการใช้พลังงานเบื้องต้นของทางโรงงานเบื้องต้น โดยสร้างแผนภูมิการใช้พลังงานเป็นเครื่องมือเพื่อช่วยในการวิเคราะห์การใช้พลังงานทั้งระบบ เพื่อให้รู้ว่าการใช้พลังงานของโรงงานในขณะนั้นมีประสิทธิภาพดีแล้วหรือไม่ ซึ่งจากการประเมินการใช้พลังงานเบื้องต้น ทางโรงงานตัวอย่างมีค่าดัชนีชี้วัดการใช้พลังงานจำเพาะของผลิตภัณฑ์อะลูมิเนียมอัลลอยด์เท่ากับ 13.79 MJ/kg และมีค่าดัชนีชี้วัดการใช้พลังงานจำเพาะของผลิตภัณฑ์สังกะสีอัลลอยด์เท่ากับ 7.86 MJ/kg หลังจากทำการศึกษาการลดต้นทุนพลังงานของโรงงานประเภทฉีดขึ้นรูปโลหะโดยการนำแผนภูมิการใช้พลังงานเข้ามาวิเคราะห์การใช้พลังงานและสร้างมาตรการปรับปรุงซึ่งประกอบด้วยมาตรการระยะสั้น ได้แก่ มาตรการลดการใช้พลังงานจากเตาหลอมศูนย์กลาง มาตรการลดการใช้พลังงานจาปั๊มลมปรับปรุงการรั่วของระบบลม มาตรการลดการใช้พลังงานจาก Cooling Tower โดยจัดระบบการเปิด ปิด Cooling Tower ที่เหมาะสม มาตรการลดการใช้พลังงานจากเตาอุ่นประจำเครื่อง และมาตรการลดใช้แสงสว่าง หลังจากนำมาตราปรับปรุงมาใช้แล้ว จะได้ค่าดัชนีชี้วัดการใช้พลังงานจำเพาะของผลิตภัณฑ์อะลูมิเนียมอัลลอยด์

เท่ากับ 12.89 MJ/kg และมีค่าดัชนีชี้วัดการใช้พลังงานจำเพาะของผลิตภัณฑ์สังกะสีอัลลอยด์เท่ากับ 7.54 MJ/kg และคาดว่าจะสามารถลดต้นทุนพลังงานลงได้ร้อยละ 5.13 จากเดิม

ธิดา ทศนธราพันธ์ (2543) [12] ทำการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก คือ ขั้นตอนการรวบรวมข้อมูล ขั้นตอนการประเมินผลกระทบ และขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการ ในงานวิจัยนี้ทำการประเมินวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์โดยใช้หลักการ Cradle to gate ซึ่งมีขอบเขตเฉพาะขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบ ได้แก่ การผลิตไฟฟ้า การทำเหมืองหิน และการทำเหมืองถ่านหิน และขั้นตอนการผลิตปูนซีเมนต์ ซึ่งข้อมูลส่วนใหญ่ในงานวิจัยนี้ เป็นข้อมูลทุติยภูมิที่ได้จากรายงานการวิเคราะห์ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม และรายงานการติดตามตรวจสอบคุณภาพสิ่งแวดล้อม จากการประเมินพบว่า ประเด็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่มีนัยสำคัญ คือ สารมลพิษที่ปล่อยสู่อากาศ คือ มีฝุ่นแขวนลอย ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ รวมทั้งการใช้เชื้อเพลิง ซึ่งเป็นดัชนีสิ่งแวดล้อมที่แสดงถึงคุณภาพของอากาศและบ่งบอกถึงความรุนแรงของผลกระทบ

การบดวัตถุดิบในส่วนของการผลิตปูนซีเมนต์เป็นขั้นตอนที่เกิดฝุ่นแขวนลอยมาก และเป็นขั้นตอนที่ใช้พลังงานไฟฟ้ามากที่สุดในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ ส่วนการเผาไหม้เชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตไฟฟ้าเป็นขั้นตอนที่ก่อให้เกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจนออกไซด์มาก เนื่องจากการผลิตไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่ใช้เชื้อเพลิงปริมาณมาก ดังนั้น ในส่วนของ การปรับปรุงกระบวนการผลิตจึงพยายามลดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ให้น้อยลง โดยทำการเปลี่ยนชนิดของอุปกรณ์และหาขนาดของวัตถุดิบที่เหมาะสมที่ใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยที่สุด ซึ่งในงานวิจัยนี้ ได้สร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยใช้ภาษา Visual Basic เพื่อช่วยในการคำนวณหาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการผลิตปูนซีเมนต์ และหาขนาดของวัตถุดิบที่ออกจากหม้อบด ปฐมภูมิและหม้อบดทุติยภูมิที่เหมาะสม สำหรับการหาขนาดของวัตถุดิบที่เหมาะสม พบว่าถ้าพิจารณาผลกระทบเฉพาะปูนซีเมนต์ การเปลี่ยนขนาดของวัตถุดิบไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลกระทบ แต่เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัตถุดิบใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยลงจึงทำให้เกิดผลกระทบจากการประเมินวัฏจักรชีวิตน้อยลง

2.7.2 การผลิตเชื้อเพลิงจากวัตถุดิบชีวมวล

ปรีชา เกียรติกระจาย (2545) [13] ศึกษาการทำถ่านอัดก้อนจากไม้ต่างถิ่น คือ *Acacia confuse*, *Cinnamomum camphora*, *Fraxinus giffithil* และ *Liquidambar Fomosanar* โดยประเมินคุณสมบัติของกิ่งไม้ดิบ และกิ่งไม้อบเป็นถ่านที่ 450 องศาเซลเซียส พบว่า ค่าเฉลี่ยของสมบัติด้านพลังงานของกิ่งไม้มีปริมาณสารระเหยร้อยละ 81 ปริมาณคาร์บอนคงตัวร้อยละ 12 ปริมาณซีไกร้อยละ 0.5 และค่าความร้อนของสันดาป 4,400 แคลอรีต่อกรัม และผงถ่านมีปริมาณสารระเหยร้อยละ 19 ปริมาณคาร์บอนคงตัวร้อยละ 67 ปริมาณซีไกร้อยละ 2.0 ค่าความร้อนของสันดาป 6,500 แคลอรีต่อกรัมตามลำดับ

ธีรพจน์ พุทธิกิกวิวงศ์ (2549) [14] ศึกษาการผลิตถ่านอัดแท่งจากต้นถั่วเหลือง เป็นเศษวัสดุเหลือใช้ทางเกษตรมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในรูปของเชื้อเพลิง โดยนำต้นถั่วเหลืองไปเผาให้เป็นถ่านมาบด อัดเป็นแท่ง และใช้มันสำปะหลังสดเป็นตัวประสาน โดยพบว่าอัตราส่วนตัวประสานต่อถ่านที่ดีที่สุด คืออัตราส่วน 1:8 โดยน้ำหนัก มีค่าความร้อน 21.30 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งมีค่าความร้อนน้อยกว่าถ่านไม้ยูคาลิปตัสประมาณร้อยละ 26 มีปริมาณคาร์บอนเสถียรและสารระเหยน้อยกว่า แต่มีปริมาณเถ้ามากกว่าถ่านไม้ยูคาลิปตัส

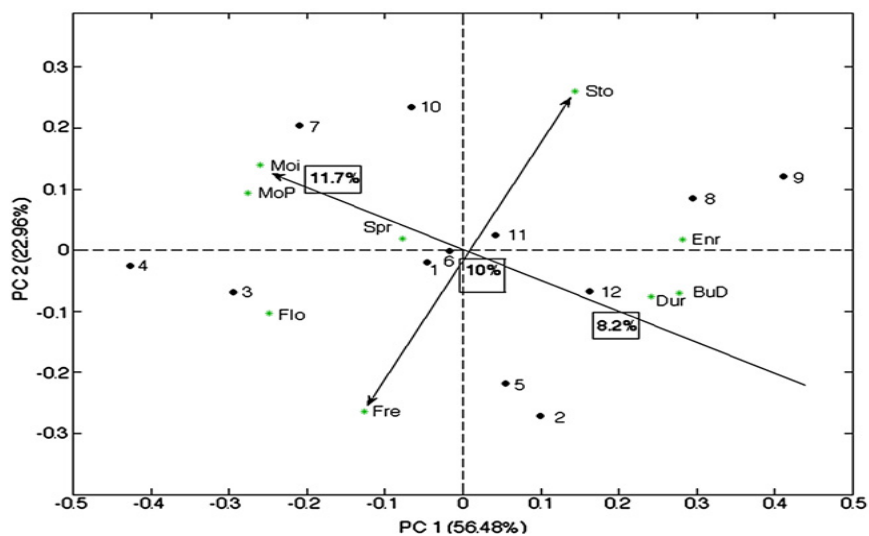
อภิรักษ์ สวัสดิ์กิจ (2551) [15] การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากซีไกล้าผสมผงซังข้าวโพดและกะลามะพร้าวด้วยเทคนิคเอ็กซ์ทรูชันโดยใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสาน โดยมีสัดส่วนการผสมอยู่ที่ 30 : 70, 40 : 60 และ 50 : 50 ตามลำดับ สัดส่วนการผสมแป้งมันต่อน้ำหนักวัตถุดิบเท่ากับ 1 : 10 จากการศึกษาพบว่าค่าความหนาแน่นและความต้านทานแรงกดจะแปรผันตามสัดส่วนการผสมของผงซังข้าวโพดและผงกะลามะพร้าว แต่แตกต่างกันไม่มาก การทดสอบค่าความร้อนเชื้อเพลิงพบว่าโดยเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6,000 – 6,900 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ความชื้นอยู่ระหว่าง 5.7 – 5.8 % โดยน้ำหนัก อัตราการผลิตแท่งเชื้อเพลิงเฉลี่ย 2.5 กิโลกรัมต่อนาที ความหนาแน่นอยู่ในช่วง 800 – 830 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าความต้านทานแรงกดของแท่งเชื้อเพลิงจะอยู่ในช่วง 1.0 – 1.2 เมกะปาสคัล ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าที่ยอมรับได้ในเชิงพาณิชย์จุดคุ้มทุนของการผลิตถ่านเชื้อเพลิงประมาณ 9,500 กิโลกรัม

Teresa Miranda และคณะ(2015) [16] ศึกษาชีวมวล 10 ชนิด โดยอ้างอิงเทียบกับ ISO 17225มาตรฐาน สำหรับชีวมวลอัดเม็ดประเภทเนื้อไม้ ในการทำชีวมวลอัดเม็ดโดยสนใจศึกษาปัจจัยสำหรับมาตรฐานคุณภาพซึ่งเหมาะสมกับตลาดชีวมวล ซึ่งกำหนดเรื่องเถ้า N และ S ซึ่งตามมาตรฐาน ISO 170225 กำหนดแบ่งเป็นชีวมวลอัดเม็ดประเภทต่างๆ ได้แก่ เนื้อไม้

(Woody), พืชล้มลุก (Herbaceous), ไม้ผล (Fruit) และ พืชน้ำ (Aquatic biomass) โดยศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ ความชื้น ความหนาแน่น อายุการใช้งาน องค์ประกอบธาตุต่างๆ (C H N S) ปริมาณเถ้า และ High Heating Value (HHV) และ Low Heating Value (LHV) และความเข้มข้นพลังงาน (Energy Density) โดยความชื้นมีผลต่อคุณสมบัติการเผาไหม้ของชีวมวล และความหนาแน่นลดลงแปรผกผันตามขนาดของชีวมวล ดังนั้น ขั้นตอนการทำให้ชีวมวลมีอนุภาคเล็กลงในกระบวนการบดย่อย (Grinding) จึงสำคัญและอายุการใช้งานเกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพการอัดแน่น โดยอายุการใช้งานแปรตามความชื้น ซึ่งมีผลต่อการจับตัวกันของชีวมวลอัดเม็ด

M Arshadi และคณะ (2008) [17] ทำการออกแบบการทดลองการอัดเม็ดขี้เลื่อย โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ความชื้นขี้เลื่อย อัตราส่วนของสนสด ซึ่งตัวแปรตามที่น่าสนใจคือ พลังงานที่ใช้ อัตราการไหลของเม็ด ความหนาแน่นของเม็ด อายุการใช้งาน และปริมาณความชื้นโดยชนิดวัตถุดิบมีผลต่อการอัดเม็ด คือ ขี้เลื่อยไม้สปรูสอัดขึ้นเม็ดได้ง่ายกว่าขี้เลื่อยสน เนื่องจากปริมาณความชื้นและการเป็นไม้เนื้ออ่อน เนื้อแข็ง ขนาดอนุภาค ก็จะมีผลต่อการอัดเม็ด โดยอนุภาคใหญ่จะทำให้มีความหนาแน่นต่ำ

โดยสรุป คุณสมบัติของการอัดเม็ดขึ้นกับความชื้น ความหนาแน่น แรงอัด (compression strength) อายุการใช้งาน ขึ้นกับองค์ประกอบของวัตถุดิบและตัวแปรกระบวนการอัดเม็ดต่างๆ ซึ่งในการออกแบบกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดต้องศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบของวัตถุดิบ และปัจจัยของการทำการอัดเม็ด ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กราฟ Biplot แสดงความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบของวัตถุดิบและปัจจัยของการทำการอัดเม็ด โดยการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก(Principal Component) โดยจุดสีดำแสดงตัวแปรต้นคือตัวอย่างที่ทำการทดลองและดอกจันแสดงตัวแปรตามที่สนใจศึกษา ดังนี้ (Moi = ปริมาณความชื้นที่เหลือ , Fre = อัตราส่วนของสนสด, Sto = อัตราส่วนของสนที่เก็บบรรจุ, Dur = อายุการใช้งาน, BuD = ความหนาแน่น, Enr = พลังงานที่ใช้, Flo = อัตราการไหลของเม็ดเชื้อเพลิง, MoP = ปริมาณความชื้นของเม็ด) (M Arshadi และคณะ , 2008)

2.7.3 การศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด

2.7.3.1 กระบวนการทำให้แห้ง (Drying)

Jevgenijs ,Dagnija [18] และคณะ (2012) ศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องในขั้นตอนที่เกี่ยวข้องกับการทำให้ชีวมวลเพื่อเข้าสู่กระบวนการในการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ชีวมวลอื่นๆต่อไป ซึ่งได้ทำการศึกษาระบวนการ Drying ชีวมวล และกล่าวว่าคุณภาพของชีวมวลอัดเม็ดนั้นขึ้นกับเทคโนโลยีและในการ Drying ชีวมวล ซึ่งพารามิเตอร์จะสามารถนำความชื้นจากผลิตภัณฑ์ไปสู่อากาศหรือสถานะแวดล้อมนั้น ได้แก่ ปริมาณความชื้น ณ จุดสมดุล (moisture content at the equilibrium) ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (heat latent of water vaporization)

- สมการการทำให้แห้ง

สมการการทำให้แห้งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงความชื้นของผลิตภัณฑ์ต่อหน่วยเวลา ซึ่งเป็นตัวแปรทางกายภาพซึ่งส่งผลต่อระบบการทำให้แห้งที่ใช้ โดยตามสมการการทำให้แห้งทางทฤษฎี ROA (1974) เสนอเป็น สมการเอมพิริคัลซึ่งเป็นสหสัมพันธ์ที่ง่าย โดยสมการนี้ได้นำไปใช้ในการกระบวนการทำให้แห้งของแป้งอัดเม็ดโดยใช้ระบบสัมผัสอากาศแบบไหลผ่าน

$$\frac{dM}{dt} = (M-M_e)(a_0+a_1v+a_2Pvs(1-HR))^* M + a_3Pvs (1-HR)) (a_4+a_C) (a_6+a_7P+a_8S)$$

โดยที่

$$\frac{dM}{dt} = \text{การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ต่อหน่วยเวลา (min}^{-1}\text{);}$$

M: ปริมาณความชื้นของของแข็ง (หรือผลิตภัณฑ์) ที่ค่าคงที่หนึ่ง (db);

Me: ปริมาณความชื้น ณ จุดสมดุล (db);

RH: ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ (decimal);

T: อุณหภูมิอากาศ (° C);

Pvs: ความดันไอน้ำอิ่มตัว (Pa);

v: ความเร็วอากาศ (m s⁻¹);

C: ประจุเริ่มต้นของของแข็ง (kg m⁻²);

P: สัดส่วนของช่องว่างหรือรูพรุนของผลิตภัณฑ์ (decimal);

S: ตัวแปรด้านรูปทรงของของแข็ง : $S = 1 / L_2 + 1 / w_1 + 1 / w_2$;

L , w_1 and w_2 : ทิศทางของของแข็ง (ความยาว, ความกว้างและความสูง ตามลำดับ) (m);

$a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7$ และ a_8 : ค่าคงที่ของผลิตภัณฑ์โดยไม่คำนึงถึงนัยสำคัญทางกายภาพซึ่งได้ค่าโดยวิธี least squares fitting.

- การบริโภคเชื้อเพลิงจำเพาะ (Specific fuel consumption) (Jevgenjis , Dagnija และคณะ 2012)

$$b = B M2Prod$$

โดยที่

b – การบริโภคเชื้อเพลิงจำเพาะ kg/tprod;

$M2prod$ – ปริมาณวัตถุดิบที่แห่งสำหรับการผลิตเม็ดอัด, kg/h;

B – การบริโภคเชื้อเพลิง kg/h

การบริโภคเชื้อเพลิงหรือปริมาณที่จำเป็นของวัตถุที่แห่งสำหรับการทำให้เกิดการเผาไหม้จะต้องการความจุความร้อนที่ต้องการสำหรับกระบวนการทำให้แห้ง ดังนี้

$$B = \frac{Qd}{LHV \cdot \eta_f}$$

โดยที่

LHV – ค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่ต่ำกว่า MWh/t;

Qd – ความจุความร้อนที่ต้องการสำหรับกระบวนการทำให้แห้ง MW;

η_f – สัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพเตาเผา

กระบวนการทำให้แห้งจะเกี่ยวข้องกับปริมาณวัตถุ ปริมาณความชื้นของวัตถุดิบ อุณหภูมิและปัจจัยขาเข้าต่างๆ และพารามิเตอร์อื่นๆ ได้แก่ ค่าปริมาณความชื้นแห้ง น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของวัตถุดิบระหว่างกระบวนการทำให้แห้งการใช้สารตัวทำให้แห้ง และการบริโภคความร้อน ค่าเหล่านี้ได้จากวัตถุดิบและสมดุลความร้อนจากกระบวนการทำให้แห้ง ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์โดยใช้สมการ

$$M2 = M2 prod + B$$

โดยที่

$M2$ – ปริมาณวัตถุดิบแห่งหลังจากผ่านเครื่องอบแห้งทั้งหมด kg/h โดยความชื้นแห้ง วัตถุโดยสมการดังนี้

$$W = M2 \frac{W1 - W2}{100 - W1} = M1 \frac{W1 - W2}{100 - W2}$$

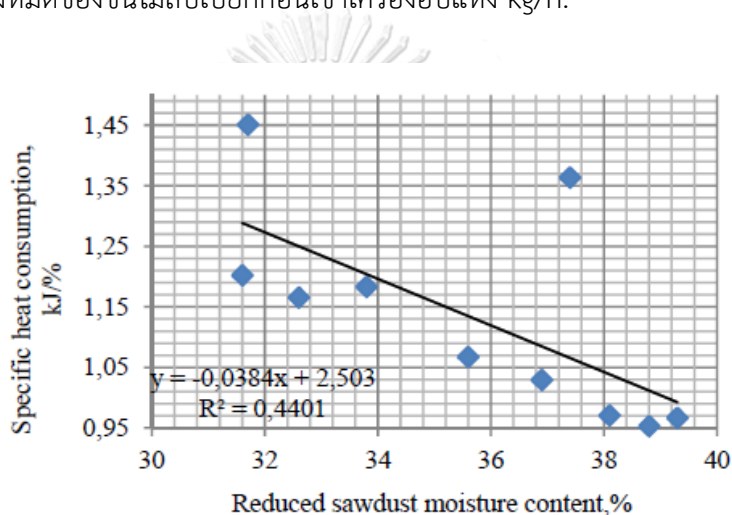
โดยที่

W – ความชื้นแห้ง kg water;

W1 – ปริมาณความชื้นเฉลี่ยของซังไม้สับก่อนผ่านเครื่องอบแห้ง %;

W2 – ปริมาณความชื้นเฉลี่ยของซังไม้สับหลังผ่านเครื่องอบแห้ง %;

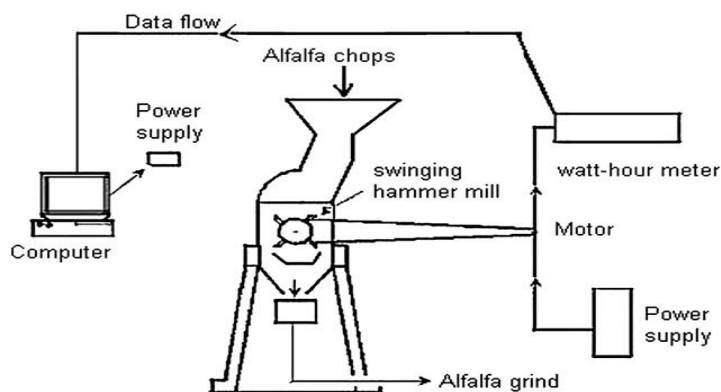
M1 – ปริมาณทั้งหมดของซังไม้สับเปียกก่อนเข้าเครื่องอบแห้ง kg/h.



รูปที่ 2.6 การใช้พลังงานจำเพาะที่มีต่อปริมาณความชื้นของเม็ดอัดที่ลดลง (Jevgenjis , Dagnija และคณะ , 2012)

2.7.3.2 กระบวนการบด (Grinding)

Z.Ghorbun , AA. Masoum (2010) [19] ศึกษาการวัดพลังงานที่ใช้ในการลดขนาดอนุภาคสำคัญมากในขั้นตอนปลายน้ำ โดยวัตถุดิบจะผ่านช่องกรองขนาด โดยจะถูกบดอัดโดยใช้แฮมเมอร์มิล (Hammermill)



รูปที่ 2.7 รูปแสดงการวัดพลังงานไฟฟ้าระหว่างกระบวนการบดอัดโดยใช้แฮมเมอร์มิล (Hammermill) (Z.Ghorbani , AA. Masoum ,2010)

แฮมเมอร์มิลและขนาดตัวกรองต่างๆ โดยเวลาที่ใช้สำหรับการบดกับพลังงานที่ใช้กับแฮมเมอร์มิลกับมอเตอร์วัดได้ ดังนี้

- การบริโภคพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption (Esc))
Esc = พลังงานไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่สุทธิ(kJ)/น้ำหนักของหญ้าอัลฟาฟาสับ(kg)
- พลังงานที่จำเป็นสำหรับการลดขนาดอนุภาค

$$E = C \int_1^2 \frac{1}{Ln} dL$$

เมื่อ E เป็นพลังงานที่ใช้จำเพาะ (kJkg⁻¹)

DL เป็นขนาดต่างๆ

L เป็นขนาดของตัวกรอง

โดยแบบจำลองของ Kick ประมาณพลังงานที่ใช้ขึ้นกับทิศทางปกติของวัตถุบด ดังนั้น ค่าของ n ควรเป็น 1 ซึ่งในแบบจำลองของ Rittinger นั้น Rittinger ประมาณว่าการลดขนาดเป็นขั้นตอนการฉีกโดยพลังงานที่ต้องการจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิวสัมผัสใหม่ที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นสัดส่วน n ควรมีค่าเป็น 3/2

ดังนั้น แบบจำลองทั้ง 3 จึงเป็น

$$E = CR (L_1/L_2)$$

$$E = CR (1/L_2 - 1/L_1)$$

$$E = CR (10/L_2 - 10/L_1)$$

โดยที่

L_1 ขนาดของรูคัดกรองที่เปิดเริ่มต้น

L_2 ขนาดของรูคัดกรองที่เปิดสุดท้าย

ผลของขนาดของรูคัดกรองที่เปิดที่มีต่อการบริโภคพลังงานจำเพาะ แสดงดัง

ตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงการใช้พลังงานจำเพาะในการบดหญ้าอัลฟาฟาสับ

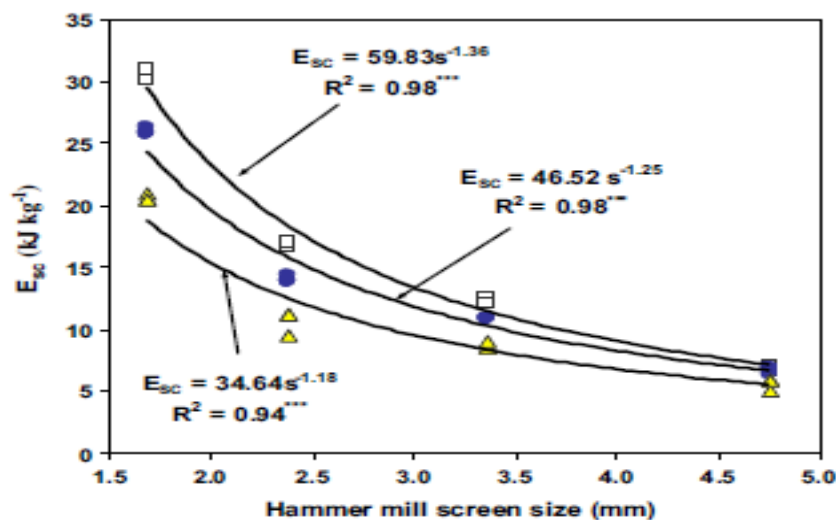
Sieve opening size (mm)	Geometric mean of chopped sample (mm)	Screen opening size of hammer mill (mm)	Geometric mean of grind sample (mm)	Average E_{sc} (kJ kg^{-1})
18	1.96	1.68	0.317	30.51 ^a ± (1.83)
		2.38	0.336	16.71 ^d ± (0.56)
		3.36	0.402	12.36 ^e ± (0.99)
		4.76	0.422	6.96 ^h ± (0.56)
15	1.68	1.68	0.317	25.89 ^b ± (0.55)
		2.38	0.336	14.01 ^e ± (0.97)
		3.36	0.402	10.78 ^f ± (0.22)
		4.76	0.422	6.67 ^{hi} ± (0.62)
12	1.53	1.68	0.317	20.61 ^c ± (0.42)
		2.38	0.336	10.63 ^f ± (1.15)
		3.36	0.402	8.73 ^g ± (0.42)
		4.76	0.422	5.65 ⁱ ± (0.71)

Numbers in the parentheses are standard deviations; in final column, means with different letters are statistically different at 5% probability level.

เมื่อพลังงานที่ต้องการสำหรับกระบวนการบดอัด ขนาดตัวกรองใหญ่เป็นสาเหตุของ SEC และ E_{sc} สูงขึ้น จะเป็นสาเหตุจากการที่มีขนาดของชิ้นที่ถูกสับใหญ่และปริมาณเส้นใยมาก แสมเมอร์มีลกับขนาดกรองที่เล็กจะใช้พลังงานที่สูงกว่า คือ การบดอย่างละเอียดจะต้องการ E_{sc} สูง ทำให้การบริโภคพลังงานจำเพาะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของตัวคัดกรองลดลง โดย SEC จะขึ้นกับอัตราส่วนของขนาดตัวกรองหลังสุด ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งจะเข้ากับแบบจำลองเชิงเส้นกับ coefficient (R^2) ซึ่งเข้ากับแบบจำลองแบบ Rittinger ดีที่สุด (least mean square of error 6.54) และ R^2 value > 0.90 เข้ากับพลังงานจำเพาะดีที่สุด อย่างไรก็ตาม แบบจำลองเชิงเส้นระหว่างพลังงานจำเพาะและอัตราส่วนระหว่างขนาดของรูคัดกรองที่เปิดเริ่มต้น และขนาดของรูคัดกรองที่เปิดสุดท้าย จะกำหนดค่าพลังงานจำเพาะได้ถูกต้อง ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ค่าขนาดอนุภาคตามสมการในแบบจำลองต่างๆ

Model	Chops size (mm)			
	18	15	12	Combined data
Bond				
C_B (kJ kg^{-1})	4.74	4.30	3.71	4.30
R^2	0.95	0.94	0.91	0.90
MSE	14.40	7.78	4.52	10.78
Rittinger				
C_R ($\text{kJ/kg}^{-1} \text{m}^{-1}$)	52.55	46.16	38.2	46
R^2	0.97	0.96	0.94	0.90
MSE	3.37	2.1	2.17	6.54
Kick				
C_K (kJ/kg^{-1})	9.51	9.05	8.26	9.04
R^2	0.92	0.90	0.87	0.87
MSE	31.45	17.85	9.44	19.20



รูปที่ 2.8 การบริโภคพลังงานจำเพาะ (E_{sc}) สำหรับการบดอัดไม้สับ 3 ขนาดที่ขนาดรูกรองต่างๆ ได้แก่ 18 mm 15 mm และ 12 mm โดยมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 0.1% (Z.Ghorbani , AA. Masoum ,2010)

2.7.3.3 กระบวนการอัดเม็ด (Pelletizing)

Jens K.Holm, Wolfgang Stelte (2011) [20] ศึกษาความสำคัญของแรงดันในการอัดเม็ดชีวมวลและสภาวะต่างๆในกระบวนการ ปัจจัยที่สำคัญต่างๆ ที่มีผลต่อแรงอัดเม็ดในกระบวนการอัดเม็ด ได้แก่ ชนิดของวัตถุดิบ ความยาวเม็ดชีวมวล อุณหภูมิ ปริมาณความชื้น และขนาดอนุภาคที่ผ่านแรงดันในช่องอัดของตัวบดเม็ด (pellet mill) โดรศึกษาโดยใช้ผ่านเครื่องอัดเม็ดแบบหน่วยเดียว (single pellet press unit) โดยพบว่าแรงดันในการขึ้นรูปเม็ดอัดเพิ่มขึ้นแบบ

เอกซ์โปเนนเชียล (exponential) สัมพันธ์กับความยาวของเม็ดอัด โดยอัตราที่เพิ่มขึ้นนี้ ขึ้นกับชนิดชีวมวล อุณหภูมิ ปริมาณความชื้น และขนาดอนุภาค โดยแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างมาจะทำนายแรงดันการอัดเม็ดซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลจากการทดลอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มอุณหภูมิ จะทำให้แรงอัดที่ใช้ในการอัดเม็ดลดลง

การใช้สเปกตรารอินฟราเรด (Infrared spectra) จากพื้นผิวชีวมวลอัดเม็ด ระบุว่า ส่วนที่ไม่ชอบน้ำของพื้นที่ผิวสัมผัสของชีวมวลสำหรับเม็ดอัดที่อุณหภูมิสูง การเติมสารพิเศษ เช่น สารหล่อลื่น จะทำให้ลดแรงเสียดทานระหว่างชีวมวลและผนังช่องอัด

ผลของปริมาณความชื้นต่อแรงอัดเม็ดขึ้นกับชนิดของชีวมวล โดยสัดส่วนของขนาดอนุภาคต่างๆ ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 0.5 mm-2.8 mm. โดยพบว่าแรงดันการอัดชีวมวลเพิ่มขึ้นและทำให้อนุภาคลดลง ผลของแรงดันอัดเม็ดต่อความหนาแน่นเม็ดอัด แสดงให้เห็นว่าความดัน > 200 MPa จะทำให้ความหนาแน่นชีวมวลเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ไม้และวัตถุดิบจากพืช โดยทั่วไปจะมีความหนาแน่นต่ำ เนื่องจากโครงสร้างจะมีช่องว่างอยู่เยอะ ซึ่งถ้าเป็นพืชประเภทหญ้าจะมีความหนาแน่นประมาณ 40-150 kg/m³ และ 320-720 kg/m³ สำหรับเนื้อไม้แข็งและเนื้อไม้อ่อนโดยความหนาแน่นของชิ้นไม้สับในเชิงพาณิชย์ จะอยู่ระหว่าง 150-200 kg/m³ ซึ่งจะน้อยกว่าไม้เนื้อแข็ง ดังนั้น ในการเพิ่มความหนาแน่นชีวมวล จะอัดแน่นชีวมวลเป็นเม็ดผ่านกระบวนการเชิงกลโดยใช้แรงดัน เพื่อทำให้เกิดการบดอัดในระดับโครงสร้างเซลล์ของชีวมวลและการเพิ่มความหนาแน่นขึ้น

โดยทั่วไปความหนาแน่นของเม็ดชีวมวลที่ได้จะอยู่ประมาณ 1000-1400 kg/m³ ซึ่งประโยชน์จากชีวมวลที่ผ่านการอัดเม็ดคือ จะมีความหนาแน่นพลังงานสูงขึ้น ทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการขนส่งได้ขนาดและองค์ประกอบที่มีมาตรฐาน ซึ่งทำให้สามารถป้อนเป็นเชื้อเพลิงในหม้อต้มในโรงงานอุตสาหกรรมได้ ซึ่งวัตถุดิบหลักที่ใช้ ได้แก่ เศษเนื้อไม้ ชี้เลื้อย ชิ้นไม้สับ หรือเป็นฟางข้าวของเสียต่างๆในโรงงานอุตสาหกรรมอาหาร

เม็ดอัดจากชีวมวลปัจจุบัน ถูกอัดโดยตัวอัดเม็ดประเภทเครื่องอัดพิมพ์แบบวงแหวนโดยแรงกระทำในช่องอัดเม็ดประเภทนี้ภายใต้สภาวะ steady state แรงอัดเม็ด (P_x) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$P_x = P_{N0} (e^{4uVLCR} - 1) \quad \text{สมการที่ 1}$$

โดย C เป็น compression ratio (สัดส่วนแรงอัด)

$$c = \frac{x}{2r} \quad \text{สมการที่ 2}$$

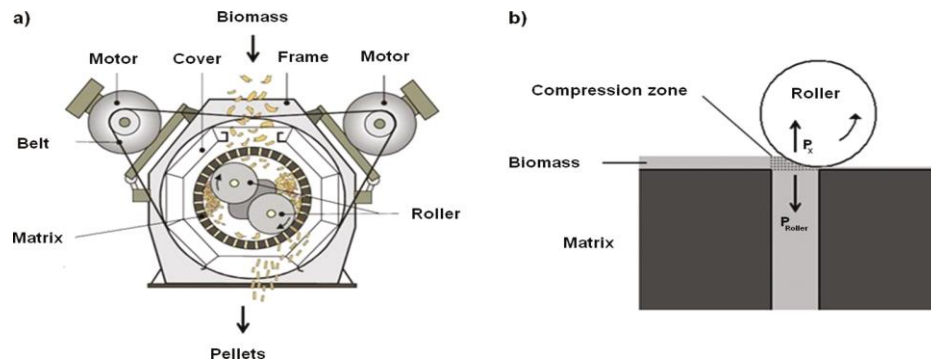
P_{No} เป็นแรงดันก่อนกดอัด (pre stressing pressure) ซึ่งเกี่ยวกับความยืดหยุ่น

VLR เป็นอัตราส่วนปัวส์ซอง โดย L หมายถึงทิศทางที่ใส่แรงดันไป (L คือแนวตั้งของเส้นใย) และ R หมายถึง ทิศทางของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ($R =$ แนวขวางของเส้นใย) $u =$ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และ c คืออัตราส่วนแรงกดอัด ซึ่งกำหนดให้เป็นอัตราส่วนระหว่างความยาวของเม็ดอัดในรูอัด (x) และเส้นผ่านศูนย์กลาง ($2r$)

ในสมการที่ 1 แสดงให้เห็นว่า P_x เพิ่มขึ้นแบบเอ็กซีโปเนนเชียลกับความยาวเม็ดอัด ในขณะที่ตัวแปรอื่นๆที่ แบบจำลองที่ใช้ในการทำหา P_x ในการอัดเม็ดไม้ปืชและไม้สนโดยใช้วิธี least square กับแบบจำลองใน Eq 1 อย่างไรก็ดี ในแบบจำลองไม่รวมปัจจัยในกระบวนการสำคัญอื่นๆ เช่น อุณหภูมิ ปริมาณความชื้นของวัสดุดิบและอนุภาค

ในการเปลี่ยนปัจจัยในกระบวนการใดๆนั้น จะมีผลต่อ P_x และแรงดันที่จำเป็นที่ใส่เข้าไปโดยลูกกลิ้ง (roller) ในช่วงค่าที่ แรงดันจะสามารถปรับให้มีค่าเท่ากับ P_x โดยหาก P_x เกินค่าระดับนี้และมีค่าสูงเกินไป เม็ดอัดจะติดกันแน่น และลูกกลิ้งจะไม่สามารถมีแรงดันที่เหมาะสมในการดันให้วัสดุดิบออกมาได้โดย P_x ที่มีค่าสูงไม่เพียงแต่มีความเสี่ยงที่จะทำให้เกิดไฟไหม้ เนื่องจากแรงดันที่สูง ซึ่งอาจทำให้เกิดแรงเสียดทานสูง ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่เป็นผลในการใช้พลังงานที่สูงเกินไปของตัวบดเม็ดหากกรณี P_x ต่ำเกินไป จะไม่สามารถทำให้เม็ดอัดที่มีคุณภาพที่ยอมรับได้

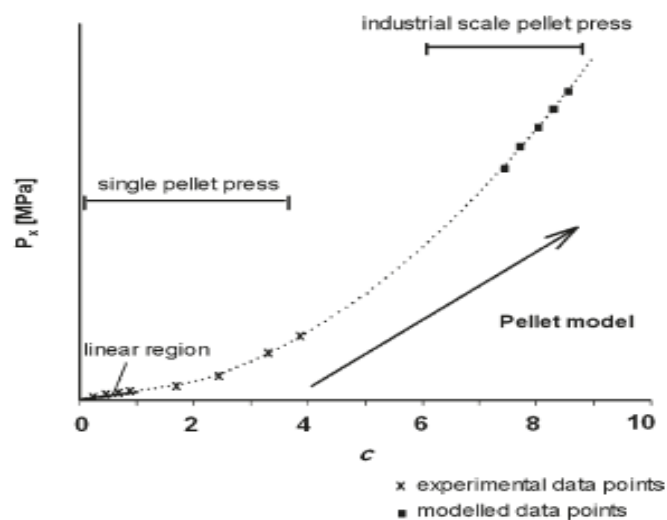
ในการอัดเม็ดชีวมวล สิ่งสำคัญคือการรักษาความดันในระยะที่ยังสามารถทำให้เม็ดอัดมีคุณภาพโดยใช้พลังงานอย่างน้อยที่สุด และตัวบดอัดมีประสิทธิภาพสูง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาพารามิเตอร์ที่ควบคุมได้ ที่ส่งผลต่อ P_x ผลกระทบของอุณหภูมิ ปริมาณความชื้น และขนาดอนุภาคที่สัดส่วนแรงอัด (c) จำเป็น ซึ่งเป็นข้อมูลที่สำคัญในการอัดเม็ด โดยใช้ซึ่งจะช่วยให้สามารถเลือกสภาวะในการอัดเม็ดที่เหมาะสมได้



รูปที่ 2.9 (a) หลักการทำงานของตัวอัดเม็ดแบบวงแหวน (b) ภาพขยายของช่องอัดซึ่งแสดงว่าชีวมวลถูกกดอัดอย่างไร

โดยลูกกลิ้งในช่องอัดและผ่านลงในช่องอัดอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะถูกอัดขึ้นกับแรงเสียดทานสูงระหว่างชีวมวลของผนังของช่องอัดเม็ด ดังแสดงในรูปที่ 2.9

ความสัมพันธ์แบบเอกซ์โปเนนเชียลระหว่าง P_x และ c โดยแบบจำลองแสดงว่าเอกซ์โปเนนเชียลขึ้นในแรงดันอัดสัมพันธ์กับอัตราส่วนแรงอัด ด้วยสหสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทั้งสาม โดยสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะอยู่ที่ $u=0.5$ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ที่เลือกมาเป็นค่าทั่วไปสำหรับไม้แห้งบนพื้นผิวเรียบแข็ง ซึ่งการทดสอบกับ single pellet press (SPP) จะให้ผลสอดคล้องกับแบบตัวอัดที่ใช้ในอุตสาหกรรม ซึ่งจะแพงและใช้เวลามากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.10



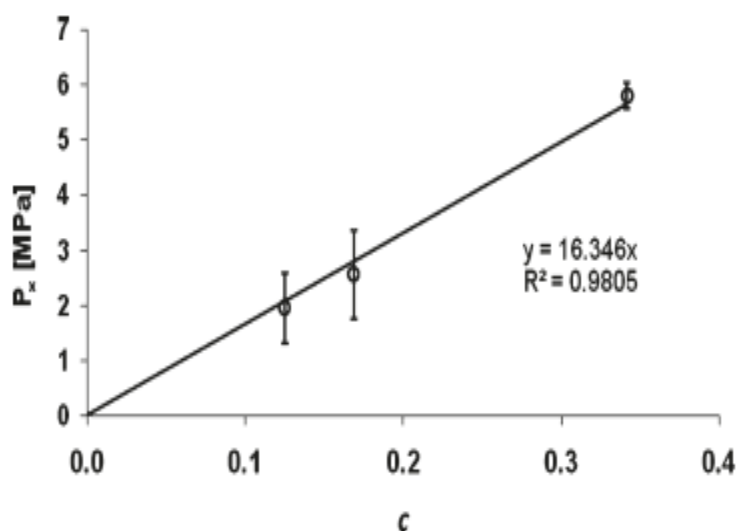
รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน (P) และอัตราส่วนการอัดเม็ด (compression ratio) (Wolfgang Stelte ,2011)

โดย Px ลดลง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของรู้อัด สำหรับวัตถุดิบ โดย Px สำหรับพีชจะเยอะกว่าสปรูชโดยงานของ Nielsen พบว่า เมื่อแรงเสียดทานลดลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ได้มีการแนะนำถึงสารประกอบทางเคมี เช่น เรซิน กรดไขมัน และ สเตอรอลซึ่งเป็นสารหล่อลื่นช่วยให้เม็ดผ่านช่องลดแรงเสียดทาน โดยไนไม้นิ่มอ่อนจะมีปริมาณสารสกัดมากกว่าไม้เนื้อแข็ง โดยยังมีปริมาณสารสกัดมากจะลดอุณหภูมิลงซึ่งขึ้นกับแรงดันอัดเม็ด โดยวัตถุดิบเนื้อไม้แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงความขึ้น ณ 100 °C สำหรับไม้พีชและมากกว่า 70 °C สำหรับไม้สปรูช ซึ่งเป็นตัวชี้ถึงการอ่อนตัวตามอุณหภูมิ การยืดหยุ่นตัว (Plasticity) และความสามารถในการไหลและการไหลออกผิวสัมผัส ซึ่งเป็นไปได้ว่าการเป็นเม็ดของโพลีเมอร์เนื้อไม้อ่อนตัวลง เช่น เฮมิเซลลูโลสและลิกนินเป็นผลให้ความดันในการอัดเม็ดลดลง โดยอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะ (transition temperature) ซึ่งอยู่ในโพลีเมอร์เทอร์โมพลาสติกจากสถานะ glassy เข้าสู่สถานะ plastic จะเรียกว่าจุดอ่อนตัว (softening point) โดยอุณหภูมิ ณ จุดอ่อนตัวคือ Tg(glass transition temperature) จะถูกวัดสำหรับเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน

Chow และ Goring แสดงลิกนินและเฮมิเซลลูโลสค่า Tg ระหว่าง 77-128 °C สำหรับลิกนิน และ 54-142 °C สำหรับเฮมิเซลลูโลส ขึ้นกับปริมาณความขึ้นเนื้อไม้ โดย Tgของลิกนินขึ้นกับชนิดของไม้และปริมาณความขึ้น และค่าอยู่ระหว่าง 50-100 °C ในกรณีของลิกนิน ซึ่งแสดงว่า Tg ขึ้นกับชนิดของไม้ โดยไม้เนื้อแข็งลิกนินจะมีปริมาณของกลุ่ม phenolic hydroxyl ต่ำ และมีปริมาณกลุ่ม methoxylสูง ซึ่งความแตกต่างขององค์ประกอบด้านเคมีนี้ จะมีผลอย่างมีนัยสำคัญที่ลิกนินมีค่า Tg ต่ำ ของ ที่เป็นไม้เนื้อแข็งและเนื้ออ่อน ซึ่งหากลิกนินผ่านจุดอ่อนตัวแล้ว จะทำให้ค่า Pc ต่ำ จากนั้นพีช ซึ่งมีค่า Tgต่ำ (ไม้เนื้อแข็ง) จะแสดงการลดลงอย่างรวดเร็ว (sharp drop) ที่อุณหภูมิต่ำกว่าไม้สปรูชซึ่งมี Tg สูงกว่า (ไม้เนื้ออ่อน) อย่างไรก็ตามการลดลงของ Pxอุณหภูมิต่ำสำหรับสปรูช (70°C) และมากกว่าสำหรับในพีช (~ 100 °C) ดังนั้น การอ่อนตัวลงของลิกนินจะเป็นปัจจัยให้เกิดการลดลงอย่างรวดเร็วของ Px

สปรูชมีไขมันชนิดยาวซึ่งมีองค์ประกอบของ เรซินสเตอรอลไม่อิ่มตัว กรดเรซินกรดไขมัน แอลกอฮอล์และอัลคิลไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น มีแนวโน้มที่สารเหล่านี้จะออกจากผิวหน้า โดยการเคลื่อนตัวของโมเลกุลที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะเป็นปัญหาที่พบโดยทั่วไปในกระบวนการผลิตของไม้โดยทั่วไป ซึ่งมีพอร์มัลดีไฮด์เป็นองค์ประกอบ เมื่อผ่านกระบวนการความร้อนในชั้นของสารที่เป็นส่วนไม่ชอบน้ำบนพื้นผิวของเส้นใยซึ่งเกี่ยวข้องกับกลไกการเกิดแรงยึดเหนี่ยว (adhesion) และลดการเชื่อมกัน (bonding) โดยสปรูชจะมีปริมาณสารสกัดมาก จากนั้นจะเคลื่อนตัว

จากพื้นผิวซึ่งเป็นเหตุผลในการลดลงของ P_x ที่อุณหภูมิประมาณ 70°C โดยใช้ FTIR-ATR Spectra พบว่า แวกซ์และน้ำมันเคลื่อนตัวจากพื้นผิวที่อุณหภูมิที่สูงขึ้น



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างแรงดันการอัดเม็ดและอัตราส่วนการอัดสำหรับไม้บีช ที่ 20°C (Jens K.Holm, Wolfgang Stelte, 2011)

ความหนาแน่นของเม็ดอัดเพิ่มขึ้น โดยที่แรงดันเพิ่มขึ้น โดยความหนาแน่นที่เป็นไปได้ของเม็ดอัดที่ทำจากวัสดุชีวมวล จะคล้ายกับความหนาแน่นของผนังเซลล์ของพืช ซึ่งมีค่าระหว่าง $1420\text{--}1500\text{ kg/m}^3$ ดังนั้น จึงมีการกำหนดคุณสมบัติของชีวมวลว่า จะสามารถรับแรงกดอัดได้เท่าไร และเพิ่มแรงดันซึ่งไม่เป็นผลให้ความหนาแน่นของเม็ดอัดสูงขึ้น โดยที่ทำให้ปริมาตรลดลงที่แรงดันต่ำกว่า 50 MPa ในขณะที่ค่าระหว่าง $200\text{--}600\text{ MPa}$ มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในความหนาแน่นของเม็ดอัด

ดังนั้น จากการศึกษาผลของความยาวเม็ดอัด อุณหภูมิของรูอัด ปริมาณความชื้นชีวมวล และขนาดอนุภาคที่มีต่อแรงดันในการอัดระหว่างการอัดเม็ดชีวมวล พบว่าแรงดันการอัดนั้นเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โปเนนเชียล โดยแรงดันการอัดขึ้นกับชนิดชีวมวล อุณหภูมิ ปริมาณความชื้นและขนาดอนุภาค ในการเพิ่มอุณหภูมิของรูอัดระหว่างการอัดเม็ดลดแรงดันการอัดและ IR Spectra ของพื้นผิวเม็ดอัดระบุว่าส่วนสารที่ไม่ชอบน้ำของเม็ดอัดที่อุณหภูมิสูง จะทำตัวเหมือนสารหล่อลื่น ซึ่งเป็นการลดแรงเสียดทานระหว่างชีวมวลและพื้นผิวเหล็กของช่องอัด อิทธิพลของปริมาณความชื้นชีวมวลขึ้นกับชนิดชีวมวลสำหรับเนื้อไม้ตัวอย่าง แรงอัดเม็ดจะลดลงและเพิ่มปริมาณความชื้น ซึ่งเพิ่มสำหรับฟางข้าว

ผลของขนาดอนุภาคของความดันอัดเม็ด แสดงให้เห็นถึงแรงดันอัดเม็ดเพิ่มโดยที่ลดขนาดอนุภาค การเพิ่มความดันแรงอัด เป็นผลให้เกิดการเพิ่มความหนาแน่นเม็ดอัด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความดันมากกว่า 250 MPa ส่งผลเฉพาะการเพิ่มความหนาแน่นเม็ดอัดเล็กน้อย

2.7.4 การประเมินต้นทุนการผลิตในการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด

Augusto Uasaf, Gero Becker (2011) [21] ศึกษาปริมาณพลังงานไฟฟ้า พลังงานความร้อน และพลังงานเชื้อเพลิง โดยพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมด จะเป็นพลังงานไฟฟ้าจากบดอัดย่อย (hammer mill) เครื่องยนต์ทำให้แห้ง (dryer motor) ตัวบดอัด (pellet mill) เครื่องทำให้เย็น (cooler) และอุปกรณ์อื่นๆ โดยปริมาณความร้อน คือปริมาณความร้อนทั้งหมดที่ใช้ในการระเหยน้ำ จากวัตถุดิบและพลังงานเชื้อเพลิงดีเซลที่ใช้คำนวณจากค่าความร้อน (High Heating Value: HHV) ของดีเซล 38.6 MJ/l โดยการใช้พลังงานดีเซลต่อปี (ลิตร/ปี) ซึ่งการใช้พลังงานทั้งหมดคำนวณจากผลรวมของพลังงานต่างๆที่ใช้ในการอัดเม็ด และคำนวณเป็น GJ/ปี และการใช้พลังงานจำเพาะคำนวณเป็น MJ/Mgpellet โดยวิเคราะห์หาต้นทุนการผลิตชีวมวลอัดเม็ดและพลังงานที่ใช้ในรูปแบบต่างๆ ซึ่งมีอยู่ 4 แบบจำลอง โดยมีพารามิเตอร์ที่ศึกษา ได้แก่ สัดส่วนของวัตถุดิบป้อนเข้า (%) อัตราการผลิต (ปริมาณชีวมวลอัดเม็ดตันต่อชั่วโมง) และการผลิตชีวมวลอัดเม็ดต่อปี ตามตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ความแตกต่างหลักของแต่ละพารามิเตอร์ที่กำหนดในแต่ละรูปแบบการผลิต

Parameter	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4
Proportion of raw material input (%)	100% wet sawdust	50% wet sawdust; 50% wood shavings	100% wet sawdust	50% wet sawdust; 50% wood shavings
Pellets production rate t/h ^a	3	3	6	6
Annual operating hours	7884	7884	7884	7884
Annual pellet production t/p.a. ^b	23652	23652	47304	47304

a Refers to metric tons per hour.
b Refers to metric tons per annum.

การดำเนินงานในการศึกษานี้ วัตถุดิบที่ใช้ผลิตชีวมวลอัดเม็ดคือความชื้นเลื้อยโดยจะมีความหนาแน่นประมาณ 260 kg/m³ และปริมาณความชื้นประมาณ 50% ในการศึกษา ความหนาแน่นของชีเลื้อยจะอยู่ที่ 260 kg/m³ และปริมาณความชื้น 55% และชีเลื้อยไม่มีความหนาแน่น 80 kg/m³ และปริมาณความชื้น 10% MC และราคาวัตถุดิบจะอยู่ที่ 8€/Mg และ 12€/Mg โดยต้นทุนในแต่ละรูปแบบจะแตกต่างกันจากเครื่องจักรที่ใช้ กำลังการผลิต ตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ความแตกต่างของต้นทุนการผลิตในแต่ละรูปแบบการผลิต

Different costs	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4
Annual capital costs €/p.a.	286.055	255.540	403.835	367.092
Maintenance costs €/p.a.	87.030	81.130	138.718	130.990
Operating costs €/p.a.	675.509	598.730	1.222.072	1.060.653
Total production costs €/p.a.	1.048.594	935.399	1.764.625	1.558.735

- การศึกษาขั้นตอนการผลิตต่างๆ ในแต่ละรูปแบบการผลิต

กระบวนการทำให้แห้ง

ระบบการทำให้แห้งในการศึกษานี้ จะใช้ระบบแบบdrum dryer โดยตัวเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งจะเป็นตัวที่ทำให้เกิดความร้อน(flue gase)โดยการลงทุน solid biofuel burner และ drum dryer จะแปรตามปริมาณวัตถุดิบที่จะนำมาอบแห้ง โดยการลงทุน solid fuel burner ในแบบจำลองที่1 และ 4 อยู่ที่ 90,000 €สำหรับแบบจำลองจะอยู่ที่ 65,000€ โดยประมาณเวลาการใช้ที่ 10 ปี และค่าบำรุงรักษาอยู่ที่ 2% โดยต้นทุนกระบวนการทำให้แห้งในแบบจำลองที่1 และ 4 เป็น 502,000€แบบจำลองที่2 เป็น 250,000€และแบบจำลองที่3 เป็น 770,000€โดยระยะเวลาการใช้ที่ 15 ปีและค่าบำรุงรักษา 2.5%ซึ่งพบว่าในแบบจำลองที่ 1 และ 4 ต้องการพลังงานไฟฟ้า 172 kw สำหรับแบบจำลอง2 ต้องการพลังงานไฟฟ้า 141 kw และ scenario 3 ต้องการพลังงานไฟฟ้า 280 kwความร้อนที่ต้องการในการระเหย 1 Mg ของน้ำจะอยู่ที่ 1000 kwh หรือ 3600 MJ รวมถึง 10% ความร้อนของการ conversion โดยค่าความร้อนของชี้เลี้ยงที่ใช้ในการศึกษาจะอยู่ที่ 12 MJ/ Kg ซึ่งปริมาณของชี้เลี้ยงที่จำเป็นในการสร้างตัวสร้างความร้อน 300 kg/Mgev.w.

กระบวนการบดอัดเม็ด

ในกระบวนการบดอัดจะใช้ hammer mill ก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการปรับสภาพ ซึ่งต้นทุนและการใช้ไฟฟ้าจะขึ้นกับประสิทธิภาพของ hammer mill สำหรับรูปแบบที่1 hammer mill จะมีความต้องการใช้ไฟฟ้า 110 kw และเงินลงทุนอยู่ที่ 85,000€ สำหรับรูปแบบ2 hammer mill จะต้องการพลังงานไฟฟ้าที่ 55 kw และเงินลงทุน 90,000€ สำหรับรูปแบบ3 และ 4 hammer mill แต่ละรูปแบบจะใช้พลังงานไฟฟ้า 110 kw และมีเงินลงทุน 170,000 € แต่ละรูปแบบมีอายุการใช้งาน 10 ปี และค่าบำรุงรักษาคิดเป็น 18% ของต้นทุนการลงทุน

การอัดเม็ด การปรับสภาพและการทำให้เย็น

การปรับสภาพใช้แรงดันน้ำ และพลังงานไฟฟ้าใช้ 30 kw ต้นทุนการลงทุนสำหรับเครื่องปรับสภาพจะรวมอยู่ในต้นทุนการลงทุนของเครื่องอัดเม็ด (200,000€) รูปแบบของอัตราการการผลิตชีวมวลอัดเม็ดอยู่ที่ 6 Mg/h นั้น มีเครื่องอัดเม็ด 2 ตัว รวมถึงความต้องการใช้พลังงานสำหรับการปรับสภาพโดยมีอายุการใช้งาน 10 ปี และต้นทุนการบำรุงรักษา คิดเป็น 10% จากเงินลงทุน

การทำให้เย็นของชีวมวลอัดเม็ดจะเป็นแบบการไหลสวนทาง(counter flow)ตามอัตราการผลิต ซึ่งเครื่องทำให้เย็นที่ต้องการพลังงาน 18 kw สำหรับ scenario 1 และ 2 ในขณะที่ scenario 3 และ 4 เป็น 30 kw ในการประมาณการต้นทุนการลงทุนของระบบทำให้เย็นนั้น ในรูปแบบที่ 1 และ 2 จะเป็น 20,000€ และรูปแบบ 3 และ 4 จะเป็น 28,000€ โดยอายุการใช้งานเป็น 15 ปี โดยมีต้นทุนการบำรุงรักษาที่ 27% ของต้นทุนการลงทุน

อุปกรณ์ช่วยอื่นๆ ได้แก่ สายพานลำเลียง พัดลมและตัวกรองขนาดอนุภาค โดยรูปแบบ 1 และ 2 ต้นทุนการลงทุนเป็น 195,000€ และรูปแบบ 3 และ 4 เป็น 250,000€ โดยอนุภาคการใช้งานเป็น 10 ปี และต้นทุนการบำรุงรักษาเป็น 2% โดยพลังงานไฟฟ้าสำหรับอุปกรณ์เหล่านี้ที่กำลังการผลิต 3 Mg/h จะเป็น 90 kw ในการผลิตชีวมวลอัดเม็ดจะใช้ 6 Mg/h และใช้พลังงาน 115 kw

- การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity analysis)

ในการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแต่ละรูปแบบเป็นการประเมินผลกระทบของปัจจัยต้นทุนหลักที่มีต่อต้นทุนการผลิต โดยปัจจัยสำคัญได้แก่ ราคาวัตถุดิบชีวมวลที่ใช้ และราคาไฟฟ้า โดยประมาณให้ราคาวัตถุดิบเพิ่มจากราคาในปัจจุบัน 50% และ 100% ขึ้นกับความจริงว่า ช่วงที่มีการแข่งขันของราคาวัตถุดิบสูง โดยให้ราคาไฟฟ้าเพิ่มเป็น 50% (40.8€ /MWh)

ผลการวิเคราะห์แต่ละรูปแบบ

ต้นทุนการผลิต

ต้นทุนการผลิตของรูปแบบ 1 และ 2 จะไม่มีความแตกต่างกัน แต่จะแตกต่างกับรูปแบบ 3 และ 4 เนื่องจากอัตราการผลิตต่างกัน โดยรูปแบบ 3 และ 4 จะสูงกว่า (6 Mgkh) ซึ่งรูปแบบที่ 4 จะมีต้นทุนการผลิตต่ำกว่าเมื่อเทียบกับรูปแบบที่ 3

ถึงแม้ว่าต้นทุนการผลิตประจำปีของรูปแบบที่ 3 และ 4 จะสูงกว่ารูปแบบ 1 และ 2 แต่มีต้นทุนจำเพาะ (€ /Mg pellet) ต่ำกว่ารูปแบบ 1 และ 2 และรูปแบบ 4 จะมีต้นทุนจำเพาะต่ำที่สุด ซึ่งรูปแบบที่ 1 จะมีต้นทุนจำเพาะสูงที่สุด โดยมีค่า 46.9€ /Mg pellet ซึ่งหากอัตราการผลิตเพิ่มขึ้น (รูปแบบที่ 3 และ 4) ต้นทุนการผลิตจำเพาะจะลดลง

ต้นทุนการดูแลรักษาจำเพาะจะมีความแตกต่างเล็กน้อยระหว่างรูปแบบต่างๆ สำหรับรูปแบบที่มีอัตราการผลิตที่ 3 Mg/h ต้นทุนการดำเนินงานจำเพาะในรูปแบบ 2 จะต่ำลงคือ 56.8€

/mgpellet โดยรูปแบบ 4 แสดงให้เห็นต้นทุนการดำเนินงานจำเพาะต่ำที่สุดคือ 23.7€ /mgpellet โดยมีอัตราการผลิต 6 Mg/h โดยปัจจัยต้นทุนในรูปแบบทั้ง 4 มีค่าระหว่าง 33-41% ของต้นทุนจำเพาะทั้งหมด โดยต้นทุนการลงทุนเป็นต้นทุนที่มากที่สุด โดยต้นทุนในการทำให้แห้ง สำหรับรูปแบบ 1 2 และ 4 มีต้นทุนการทำให้แห้งมากกว่าต้นทุนการลงทุน โดยต้นทุนที่น้อยที่สุดคือ ต้นทุนในส่วนของการบดย่อยอุปกรณ์ช่วยต่างๆ กระบวนการทำให้เย็นและตัวเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล โดยเฉลี่ยจะอยู่ที่ 5% 4% และ 1% ตามลำดับโดยต้นทุนการลงทุนจะลดลงเมื่ออัตราการผลิตเพิ่มขึ้น (รูปแบบที่ 3 และ 4) และในในรูปแบบที่ 2 แสดงให้เห็นถึงการใช้พลังงานต่ำสุดโดยมีความแตกต่างของ พลังงานที่ใช้ทั้งหมดระหว่างรูปแบบต่างๆเทียบกับปริมาณผลผลิตเดียวกัน โดยความแตกต่างสำคัญ คือพลังงานทั้งหมดที่ใช้ไป โดยไฟฟ้าและพลังงานดีเซลจะไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างรูปแบบ ต่างๆ ที่อัตราการผลิตเหมือนกัน

โดยการใช้พลังงานจำเพาะที่มากที่สุดจะเป็นรูปแบบที่ 1 และ 3 โดยมีค่า 4,456 และ 4,323 MJ/Mgpellet ตามลำดับ รูปแบบที่ 2 และ 4 เป็นรูปแบบที่มีการใช้พลังงานจำเพาะต่ำที่สุด ตามที่ใช้ พลังงานน้อยกว่า

จากการวิเคราะห์ความไว แสดงให้เห็นถึงต้นทุนจำเพาะ (€/Mgpellet) เมื่อราคาไฟฟ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่มีการเปลี่ยนแปลงราคาวัตถุดิบ เมื่อราคาวัตถุดิบลด 100 % ต้นทุนจำเพาะของ เม็ดอัดจะลดลงเกือบ 40% ในรูปแบบที่ 1 และ 2 และเห็นถึงการเพิ่มของต้นทุน 20 และ 18% ตามลำดับ ต้นทุนจำเพาะจะสูงที่สุดเมื่อราคาวัตถุดิบเพิ่ม 100% ในรูปแบบที่ 1 (65.3€/Mgpellet) โดยต้นทุนจำเพาะสำหรับรูปแบบที่ 2 และ 3 จะไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อราคาวัตถุดิบเพิ่มเป็น 100%

ผลกระทบที่เกิดขึ้นของการเพิ่มขึ้นของราคาไฟฟ้า และราคาวัตถุดิบต่อต้นทุนจำเพาะนั้น ถึงแม้ว่าราคาไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น ต้นทุนการผลิตจำเพาะจะลดลง เมื่อราคาวัตถุดิบลดลง 100% เมื่อ ราคาวัตถุดิบเพิ่ม 50% จะไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญต่อต้นทุนการผลิตจำเพาะในรูปแบบที่ 2 และ 3 โดยต้นทุนจำเพาะที่สูงที่สุดจะอยู่ในรูปแบบที่ 1 เมื่อราคาวัตถุดิบเพิ่มขึ้นเป็น 100% ในทาง ตรงกันข้ามต้นทุนการผลิตจะต่ำกว่าในรูปแบบที่ 4 เมื่อวัตถุดิบลดลง 100%

ในการศึกษาต้นทุนการผลิตชีวมวลอัดเม็ด และการใช้พลังงานซึ่งต้นทุนทางวัตถุดิบจะเป็น ต้นทุนสำคัญในการผลิต หากวัตถุดิบเป็นชี้เลื่อย 50% ของวัตถุดิบ จะมีต้นทุนการผลิตต่ำ การใช้ ไฟฟ้าจำเพาะต่อเมตริกซ์ตันของเม็ดอัดจะต่ำกว่าโดยมีอัตราการผลิตที่สูงกว่า หากการใช้พลังงานต่ำ จะมีวัตถุดิบผสม ในแง่ของประสิทธิภาพต้นทุนและการใช้พลังงานที่กำลังการผลิต 6 Mg/h กับชี้เลื่อย เป็นวัตถุดิบ อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นของการใช้ไฟฟ้า 50% และราคาวัตถุดิบ 100% จะทำให้ต้นทุน จำเพาะเพิ่มขึ้น 50%

Trek และ bemberger แสดงให้เห็นสหสัมพันธ์แบบลบระหว่างอัตราการผลิตชีวมวลอัดเม็ด และต้นทุนการผลิตชีวมวลจำเพาะ ซึ่งแสดงถึงว่าอัตราการผลิตชีวมวลที่ต่ำ จะทำให้มีต้นทุนจำเพาะที่สูง ใน รูปแบบที่ 1 และ 2 (อัตราการผลิตที่ 3 Mg/h) แสดงให้เห็นต้นทุนจำเพาะที่สูงกว่ารูปแบบการผลิตที่เป็น 6 Mg/h (รูปแบบที่ 3 และ 4) ในการเพิ่มอัตราการผลิตจะลดต้นทุนการผลิตชีวมวลอัดเม็ด ซึ่งเป็นความคุ้มทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์

ต้นทุนวัตถุดิบเป็นปัจจัยต้นทุนหลักในการคำนวณต้นทุนการผลิตชีวมวลอัดเม็ดทั้งหมด โดยต้นทุนของวัตถุดิบจะคิดเป็น 40% ของต้นทุนทั้งหมดตามราคาของชีวมวล อย่างไรก็ตาม ตัวแปรที่สำคัญอย่างหนึ่งคือต้องดูว่าวัตถุดิบนั้นเปียกหรือแห้ง ถึงแม้ว่าวัตถุดิบที่แห้งจะแพงกว่าวัตถุดิบเปียก ต้นทุนการผลิตทั้งหมด สามารถลดได้อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากไม่มีขั้นตอนการทำให้แห้ง

จากรูปแบบทั้งหมด แสดงความแตกต่างในต้นทุนการลงทุน อย่างไรก็ตาม มีความแตกต่างเล็กน้อยในรูปแบบที่มีกำลังการผลิตเหมือนกัน ปริมาณวัตถุดิบที่ถูกทำให้แห้งจะแปรผันตามสัดส่วนของวัตถุดิบป้อนเข้าที่ใส่เข้าไป ดังนั้น ต้นทุนการลงทุนระหว่างรูปแบบที่มีการผลิตเหมือนกัน จะขึ้นกับกำลังการผลิตของตัวทำให้แห้งต่างๆกัน โดยการแปรผันของต้นทุนการลงทุนทั้งหมดระหว่างรูปแบบ ที่มีอัตราการผลิตต่างๆ เป็นส่วนใหญ่จะขึ้นกับเม็ดอัดที่เพิ่มขึ้นมา ขนาดของระบบการทำให้แห้งที่ใหญ่ขึ้น และหน่วยของการบดที่เพิ่มเข้ามาสำหรับรูปแบบ ที่มีอัตราการผลิตเป็น 6 Mg/h

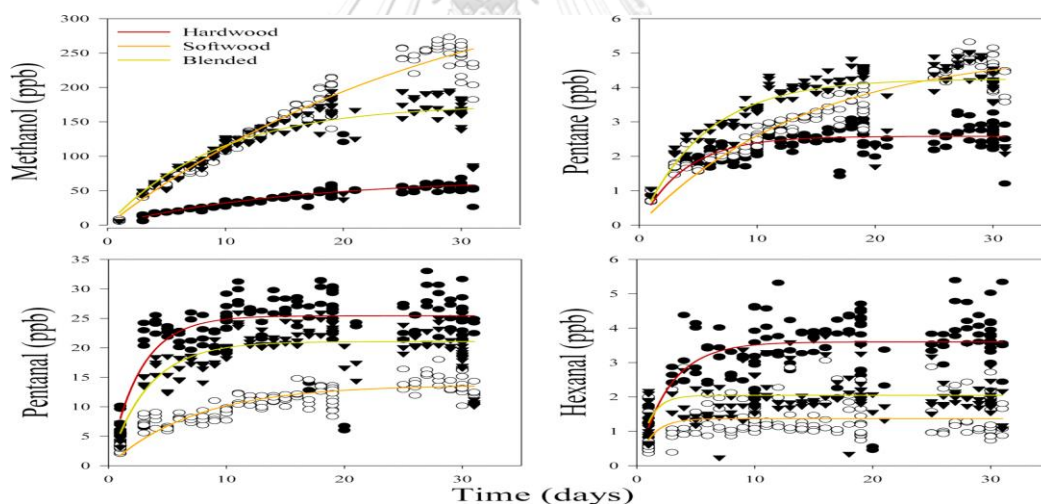
ความแตกต่างของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้กับรูปแบบ ต่างๆ จะขึ้นกับพลังงานที่เพิ่มเข้าไปในกระบวนการบดอัดและกระบวนการทำให้แห้ง โดยการใช้ปริมาณไฟฟ้าจะสูงในรูปแบบ ที่มีกำลังการผลิตที่ 6 Mg/h อย่างไรก็ตาม การใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะต่อเมตริกตันของเม็ดอัดจะต่ำกว่าใน รูปแบบที่ 1 และ 2

จากรูปแบบ ทั้งหมดนั้น การใช้พลังงานจะต่ำกว่าในรูปแบบที่มีการใช้วัตถุดิบผสมกัน ได้แก่ (ฟืนขี้เลื่อย และเศษไม้) เหตุผลเนื่องจากเศษไม้ ไม่จำเป็นต้องผ่านการทำให้แห้งก่อน ก่อนเข้าการอัดเม็ด โดย Mani พบว่า พลังงานความร้อนที่ต่ำกว่าจะใช้สำหรับระบบการอัดเม็ด ซึ่งใช้ทั้งฟืนขี้เลื่อย และเศษไม้เป็นวัตถุดิบ

2.7.5 การศึกษาการปล่อยมลสารสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ในการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด

Lydia Soto-Garcia และคณะ (2015) [21] ศึกษาการเก็บชีวมวลอัดเม็ดอัดเม็ดสำหรับการนำมาเป็นแหล่งพลังงานทดแทน เมื่อชีวมวลเหล่านั้นเก็บไว้ในที่ที่ร้อน ปริมาณมาก และอากาศถ่ายเทไม่สะดวก จะมีการเกิด VOCs ในการวัดอัตราการปลดปล่อยของการปลดปล่อย VOC โดยศึกษาการใช้ไม้เนื้ออ่อน (SW) ไม้เนื้อแข็ง (HW) และการผสมทั้งไม้ทั้ง 2 ชนิด (Blended) และ

รวบรวมวัดด้วยเครื่อง Evacuated canisters ซึ่งวัดจากถังเก็บ และวิเคราะห์ VOC ด้วยเครื่อง GC/MS และ GC/FID analysis และศึกษาคุณสมบัติและปริมาณของ VOCs 4 ชนิด ได้แก่ methanol pentane pentanal และ hexanal ซึ่งจากผลการศึกษา ค่า VOC รวม หรือ TVOC ในไม้เนื้ออ่อน จะมีค่าสูงกว่าแบบที่ผสมทั้งไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้ออ่อน (Blended) ทางสถิติ ($p < 0.02$) (SW: 412+25, blended:203+4, HW:99+8 ppb) โดยอัตราของการเกิด VOC ของไม้เนื้อแข็งจะเร็วที่สุด ตามด้วยแบบที่ผสมทั้งไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้ออ่อน และของไม้เนื้ออ่อน ตามลำดับ โดยที่อัตราการปลดปล่อยจะอยู่ในช่วง 10^{-1} ถึง 10^{-5} หน่วย ขึ้นกับปัจจัยต่างๆ ด้านสิ่งแวดล้อม โดยการวัดพบว่า ความเข้มข้นในอากาศจะอยู่ในช่วง 67 + 8 ถึง 5000 + 3000 ppb ของ TVOC และ 12 ถึง 1500 ppb ของ Aldehydes ซึ่งพบในการขนส่งเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่มีความสด ผลจากการศึกษานี้ เสนอว่าการเก็บเชื้อเพลิงอัดเม็ดในอุณหภูมิขนาดใหญ่จะปลดปล่อยสาร VOC ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพและการสัมผัสเมื่อมีการขนส่งชีวมวลอัดเม็ด



รูปที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ของเวลาและความเข้มข้นของ VOCs ที่พบในไม้เนื้อแข็ง (Hard Wood) ไม้เนื้ออ่อน (Soft Wood) และทั้งสองเนื้อไม้ (Blended) ภายใต้อุณหภูมิห้อง ($\sim 30^{\circ}\text{C}$)

Ross A.B. และคณะ (2009) [22] ศึกษาหาปัจจัยการปลดปล่อย (Emission Factors, EF) ของมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ในเตาเผาแบบฟลักซ์เบดโดยทำการทดสอบเผาเดี่ยว โดยเชื้อเพลิงที่ใช้คือถ่านหิน ไม้และขี้เลื่อยอัดแท่ง (Briquette) และการเผาพร้อมระหว่างถ่านหินกับขี้เลื่อย โดยมลพิษที่สนใจคือ สารประกอบอินทรีย์ที่ระเหยได้ (Volatile Organic Compounds, VOCs) และสารอินทรีย์

ในรูปอื่น ๆ รวมทั้งก๊าซมลพิษหลักเช่น CO, SO_x, NO_x เป็นต้น ผลการทดลองพบว่า EF ของ VOCs จากการเผาไม้จะสูงกว่าถ่านหิน ในขณะที่ EF ของมลพิษตัวอื่นทั้งหมดจะน้อยกว่าที่ได้จากการเผาถ่านหิน สำหรับ EF ของสาร CO, Dust, VOC จากการเผาไม้จะน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการเผาไม้ ข้อดีที่พบจากการเผาถ่านหินกับชีวมวล หรือแทนที่ถ่านหินโดยใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงหลัก คือการลดลงของการปลดปล่อยพวก SO_x, NO_x, Toxic Metals แต่อย่างไรก็ตามการปลดปล่อย VOCs ยังสูงอยู่ทั้งนี้ขึ้นกับการเตรียมเชื้อเพลิงในตอนแรกด้วย

2.7.6 ผลผลิตภาพสีเขียวในภาคอุตสาหกรรม

จิรายุ กุลกฤตพงษ์ (2555) ผลผลิตภาพสีเขียวสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตกระจกรถยนต์ ศึกษาแนวความคิดของการประยุกต์ใช้แนวทางผลิตภาพสีเขียวในการผลิต กระจกรถยนต์ ประเภทลามิเนต โดยเน้นในส่วนของการกระบวนการพิมพ์สีเซรามิกเป็นหลัก และได้ทำการทดสอบวัตถุดิบที่ปราศจากสารโลหะหนัก โดยยึดคุณภาพของกระจกหลังพิมพ์สีเซรามิกเป็นสิ่งสำคัญ โดยใช้หลักการ ออกแบบการทดลอง (DOE) นอกจากนี้ยังพิจารณาถึงกระบวนการกำจัดกากผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเสีย (Waste) เพื่อลดปัญหาการฝังกลบซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยใช้หลักการ 3R ผลจากการใช้แนวทางผลิตภาพสีเขียวพบว่า ลำดับความสำคัญในการคัดเลือกผู้ส่งมอบจากมากไปน้อย ได้แก่ (1) สิ่งแวดล้อม (2) คุณภาพ (3) ราคา (4) การส่งมอบ และ (5) ความเชื่อมั่น และสีเซรามิกที่ส่งมอบที่ปราศจากสารโลหะหนัก เมื่อทดลองใช้ในการผลิต พบว่ายังสามารถรักษาระดับคุณภาพการพิมพ์สีเซรามิกของกระจกลามิเนตได้ในระดับที่น่าพอใจ โดยวัด ประสิทธิภาพจากของเสียที่เกี่ยวข้องกับสีเซรามิกในกระบวนการผลิตลดลง 90 เปอร์เซ็นต์ การใช้อุณหภูมิในการอบ สีเซรามิกลดลงเฉลี่ย 15 องศาเซลเซียส ส่งผลให้การใช้พลังงานไฟฟ้าลดลงได้ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ ลดการ ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศได้ประมาณ 8,000 kg CO₂e สุดท้ายซากผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเสียสามารถนำไปแยกชิ้นส่วนแล้วนำส่วนที่เป็นกระจกใสไปหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ ส่วนที่เป็นกระจกพิมพ์สีเซรามิก สามารถนำไปทำเป็นส่วนผสมของอิฐมวลเบาก่อให้เกิดประโยชน์ขึ้นอีกทาง

2.7.7 มาตรฐานของชีวมวลอัดเม็ดของประเทศไทย

การศึกษาเพื่อกำหนดมาตรฐานของชีวมวลอัดเม็ดเพื่อใช้เป็นมาตรฐานในการผลิตส่งออก และส่งเสริมการใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล สำหรับอนาคตของภาคอุตสาหกรรม นอกจากนี้ยังเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาเทคโนโลยีชีวมวลในภาพรวมอีกด้วย โดยสามารถออกแบบและผลิตเทคโนโลยีชีวมวลให้เหมาะสมกับมาตรฐานของเชื้อเพลิงอัดเม็ดต่อไปโดยในประเทศไทยได้มีการกำหนดมาตรฐานของชีวมวลอัดเม็ดเพื่อพัฒนาเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับอนาคตของประเทศไทยซึ่งมีการดำเนินงานโครงการศึกษากำหนดมาตรฐานเพื่อพัฒนาเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลในอนาคต ดังนี้ [23]



รูปที่ 2.13 ขั้นตอนการดำเนินงานโครงการสำหรับผลการดำเนินงานของโครงการศึกษากำหนดมาตรฐานของชีวมวลอัดเม็ดเพื่อพัฒนาเป็นเชื้อเพลิงชีวมวล

ขั้นตอนการดำเนินงานโครงการฯ สำหรับผลการดำเนินงานของโครงการศึกษากำหนดมาตรฐานของชีวมวลอัดเม็ดเพื่อพัฒนาเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับอนาคต ดังรูปที่ 2.13 มีดังนี้

1. การศึกษาและทบทวนมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับเชื้อเพลิงอัดเม็ดสำหรับผลการศึกษเกี่ยวกับมาตรฐานของเชื้อเพลิงอัดเม็ดพบว่า ประเทศในยุโรปส่วนใหญ่ไม่ได้มีการกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงอัดเม็ดของตนเองไว้ ในปัจจุบันมาตรฐานเชื้อเพลิงอัดเม็ดของบางประเทศในยุโรปจะมีรายละเอียดแตกต่างกันบางประการ โดยเนื้อหาหลักส่วนใหญ่จะอ้างอิงกับมาตรฐานล่าสุดคือ EN 14961-1:2010 : Solid biofuels. Fuel specifications and classes. General requirements และ EN 14961-2:2011 : Solid biofuels. Fuel specifications and classes. Wood pellets for non-industrial use โดยมาตรฐาน EN 14961-1: 2010 จะกล่าวถึงความต้องการทั่วไปของเชื้อเพลิงชีวมวลที่เป็นของแข็ง ส่วน EN 14961-2:2011 จะกล่าวถึงเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ไม่ได้ใช้ในภาคอุตสาหกรรม นอกจากนี้ยังมีการรับรองคุณภาพผลิตภัณฑ์การศึกษาและทบทวนมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับเชื้อเพลิงอัดเม็ดการศึกษา ทบทวน ปริมาณและสัดส่วนของชีวมวลที่มีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบเชื้อเพลิงอัดเม็ดการประชุมรับฟังความคิดเห็นที่มีต่อร่างมาตรฐานชีวมวลอัดเม็ดจากผู้เกี่ยวข้อง และผู้มีส่วนได้ส่วนเสียการปรับปรุงร่างมาตรฐานสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ดการตรวจสอบสมบัติของตัวอย่างเชื้อเพลิงอัดเม็ดการจัดทำร่างมาตรฐานเชื้อเพลิงอัดเม็ดเชื้อเพลิงอัดเม็ด ENplus ซึ่งผู้ผลิตในหลายประเทศได้นำการรับรองคุณภาพนี้ไปใช้กับผลิตภัณฑ์ของตนเอง สำหรับประเทศสหรัฐอเมริกาได้มีการกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงอัดเม็ดโดยสถาบัน Pellet Fuels Institute (PFI)

โดยมาตรฐานได้แบ่งเชื้อเพลิงอัดเม็ดไว้ 3 เกรด คือ เกรดพรีเมียม เกรดมาตรฐาน และเกรดใช้งานทั่วไป คุณสมบัติที่แตกต่างของแต่ละเกรดคือช่วงของความหนาแน่น เเปอร์เซ็นต์เถ้า และความชื้นที่มีในเชื้อเพลิงอัดเม็ด และสำหรับประเทศในเอเชียยังไม่มีมาตรฐานผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงอัดเม็ด การนำเข้าและส่งออกจะใช้มาตรฐานของต่างประเทศหรือประเทศคู่ค้าเป็นหลัก คือมาตรฐานยุโรป (EN 14961 และ ENplus) และมาตรฐานอเมริกา (PFI) ในส่วนของผลการศึกษารื่องการใช้งานผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงอัดเม็ดในต่างประเทศ พบว่าการใช้งานผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงอัดเม็ดในต่างประเทศส่วนใหญ่จะใช้เพื่อให้ความร้อนในครัวเรือนจากข้อมูลปี ค.ศ. 2010 ประเทศที่ใช้งานมากที่สุดในโลกคือประเทศสวีเดน เดนมาร์ก และสหรัฐอเมริกาตามลำดับ และประเทศที่ผลิตได้มากที่สุด คือ สหรัฐอเมริกา แคนาดา และเยอรมันนีตามลำดับ

จากข้อมูลการใช้งานเชื้อเพลิงอัดเม็ดในยุโรปตั้งแต่ปี ค.ศ. 2008 – 2010 จะเห็นได้ว่ามีอัตราการใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในปี ค.ศ. 2010 ความต้องการใช้งานเฉพาะในยุโรปเทียบได้เป็น 85% ของความต้องการใช้งานในโลก ในขณะที่ยุโรปมีกำลังการผลิตเพียง 61% ของกำลังการผลิตใน

โลก ทำให้ยุโรปต้องนำเข้าเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากประเทศนอกกลุ่มยุโรปถึงกว่า 2 ล้านตัน สาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการใช้งานที่เพิ่มขึ้นนี้เนื่องจากราคาของเชื้อเพลิงอัดเม็ดถูกกว่าการใช้เชื้อเพลิงชนิดอื่น เช่น ก๊าซ LPG, ก๊าซธรรมชาติ หรือถ่านหิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่อยู่นอกเขตที่ท่อส่งก๊าซเข้าไปถึงได้และสำหรับผลการศึกษารื่องข้อกำหนดและกฎหมายที่เกี่ยวกับการผลิตและการใช้งานในต่างประเทศ พบว่ามาตรฐานต่างๆ ที่มีในต่างประเทศ เป็นมาตรฐานเพื่อใช้ในการกำหนดคุณภาพผลผลิตและเป็นการแยกคุณภาพเพื่อจำหน่ายเป็นหลัก ซึ่งยังไม่มีประเทศไหนกำหนดข้อกำหนดและกฎหมายที่จะบังคับใช้ โดยเฉพาะแต่หลายๆ ประเทศในยุโรปเริ่มมีการวางข้อกำหนดเกี่ยวกับชีวมวลให้ครอบคลุมห่วงโซ่อุปทาน ซึ่งครอบคลุมเกือบทุกด้านที่มีส่วนเกี่ยวข้อง เช่น ข้อกำหนดเกี่ยวกับพลังงานทดแทน การปล่อยก๊าซเรือนกระจก ป่าไม้ อาหาร สิ่งแวดล้อม สังคม เป็นต้น (ข้อมูลถึงเดือนธันวาคม ค.ศ. 2011) ยกเว้นประเทศเดนมาร์กที่มีข้อกำหนดสำหรับชีวมวล Biomass regulation (BEK nr 638 af 03/07/1997) ซึ่งกำหนดให้เชื้อเพลิงอัดเม็ดต้องผลิตจากไม้ที่สะอาดปราศจากสิ่งปนเปื้อนใดๆ มีกาวหลงเหลือได้ไม่เกิน 1%

2. การศึกษา ทบทวน ปริมาณและสัดส่วนของชีวมวลที่มีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากการศึกษาพบว่า ในต่างประเทศ เช่น ประเทศสหรัฐอเมริกา แคนาดา และประเทศในโซนิยุโรป ได้มีการนำวัสดุชนิดต่างๆ มาใช้เป็นวัตถุดิบผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด อาทิ ไม้ทั้งต้น (wood) เศษไม้จากขบวนการแปรรูปไม้และเฟอร์นิเจอร์ เช่น ชักบ (Shaving) ขี้เลื่อย (Saw dust) เปลือกไม้ (Bark) รวมทั้งวัสดุเหลือทิ้งจากไม้ และจากพืชต่างๆ การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดในต่างประเทศมักจะใช้วัสดุจากไม้ในการผลิตเนื่องจาก มีอุตสาหกรรมไม้ขนาดใหญ่ และมีเศษวัสดุจากอุตสาหกรรมนี้มาก (โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุขี้เลื่อย) รวมทั้งมีความต้องการเชื้อเพลิงทดแทนสำหรับให้ความร้อนกับที่พักอาศัยและนำไปใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า ทำให้การนำวัตถุดิบจากไม้ไปผลิตสามารถผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่มีคุณภาพตามมาตรฐานได้ดีกว่าใช้ชีวมวลอื่น นอกจากนี้นโยบายของรัฐบาลในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทน รวมทั้งการดูดซับคาร์บอนโดยป่าไม้ ทำให้มีการเพิ่มพื้นที่ป่าไม้เพื่อให้ได้ไม้และยังได้ผลพลอยได้ คือการดูดซับคาร์บอน ทำให้ไม้กลายเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลในต่างประเทศสำหรับประเทศไทยได้มีการใช้วัตถุดิบซึ่งเหลือจากขบวนการผลิตอื่นๆ เช่น เปลือกไม้ยูคาลิปตัส แกลบ ขี้เลื่อย ทะลายปาล์ม กะลาปาล์ม เป็นวัตถุดิบในการผลิต และสำหรับศักยภาพพลังงานชีวมวลของประเทศไทย จากผลการศึกษาศักยภาพของชีวมวลของประเทศไทย ของ โครงการศึกษากำหนดแนวทางส่งเสริมการใช้ชีวมวลแบบผลิตพลังงานความร้อนตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทน 15 ปี ซึ่งได้มีการประเมินศักยภาพพลังงานชีวมวลของประเทศไทย โดยเป็นการประเมินศักยภาพพลังงานชีวมวลเชิงพื้นที่ พบว่า ชีวมวลที่มีศักยภาพสูงในการนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ดคือ ยอดและใบอ้อย ฟางข้าว ชีวมวลจากมันสำปะหลัง ชีวมวลจากปาล์มน้ำมัน

3. การตรวจสอบคุณสมบัติของตัวอย่างเชื้อเพลิงอัดเม็ดสำหรับผลการศึกษาค้นคว้าข้อมูลเอกสาร มาตรฐานและวิธีการทดสอบเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากทั่วโลกที่สามารถค้นคว้าได้ ได้นำมาศึกษาและทำความเข้าใจเกี่ยวกับรายละเอียดของมาตรฐานเชื้อเพลิงอัดเม็ดแต่ละมาตรฐาน จากนั้นจึงนำข้อมูลของแต่ละมาตรฐานเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ได้มาเปรียบเทียบกับว่ามีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน และสำหรับวิธีการทดสอบเชื้อเพลิงอัดเม็ด ที่ได้ทำการทดสอบในโครงการได้ใช้การทดสอบตามวิธีทดสอบเชื้อเพลิงอัดเม็ดของประเทศสหรัฐอเมริกา (PFI Standard) ในการทดสอบคุณสมบัติของตัวอย่างเชื้อเพลิงอัดเม็ดได้ทำการทดสอบชีวมวลอัดเม็ดจำนวน 10 ตัวอย่าง จากผู้ผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดภายในประเทศ โดยได้ทำการทดสอบหาค่าคุณสมบัติของชีวมวลอัดเม็ดคือ ความหนาแน่นรวม (Bulk Density) เส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter) ดัชนีความคงทน (Pellet durability index) ฝุ่น (Fines) เถ้า (Ash) จำนวนที่มีความยาวเกิน 40 mm (Length, % greater than 1.50 inches) ความชื้น (Moisture) คลอไรด์ (Chloride) และ ค่าความร้อน (Heating value) จากการทดสอบพบว่าชีวมวลอัดเม็ดที่ผลิตขึ้นมาจากวัตถุดิบต่างกันจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน โดยได้คุณลักษณะที่ต้องการ ของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดที่กำหนดไว้ในร่างมาตรฐานของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด ดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 คุณสมบัติที่ต้องการ ของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดที่กำหนดไว้ในร่างมาตรฐานของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด

คุณสมบัติ	เกรดธรรมดา	เกรดคุณภาพสูง
ความหนาแน่นรวม	ไม่น้อยกว่า 600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	ไม่น้อยกว่า 600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
เส้นผ่านศูนย์กลาง	ไม่น้อยกว่า 6 มิลลิเมตร และไม่เกิน 12 มิลลิเมตร	ไม่น้อยกว่า 6 มิลลิเมตร และไม่เกิน 12 มิลลิเมตร
ดัชนีความคงทน	ไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 ของน้ำหนัก	ไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 ของน้ำหนัก
ฝุ่น	ไม่น้อยกว่าร้อยละ 3 ของน้ำหนัก	ไม่น้อยกว่าร้อยละ 3 ของน้ำหนัก
ความยาว	ไม่น้อยกว่า 3.15 มิลลิเมตร และไม่เกิน 40 มิลลิเมตร	ไม่น้อยกว่า 3.15 มิลลิเมตร และไม่เกิน 40 มิลลิเมตร
ความยาวที่เกินกว่า 40 มิลลิเมตร	ไม่เกินกว่าร้อยละ 1 ของน้ำหนัก	ไม่เกินกว่าร้อยละ 1 ของน้ำหนัก
ความชื้น	ไม่เกินกว่าร้อยละ 10 ของน้ำหนัก	ไม่เกินกว่าร้อยละ 10 ของน้ำหนัก
ค่าความร้อน	ไม่น้อยกว่า 14.6 เมกะจูลต่อกิโลกรัม (3,500 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม)	ไม่น้อยกว่า 16.7 เมกะจูลต่อกิโลกรัม (4,000 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม)
ซีเถ้า	ไม่เกินกว่าร้อยละ 20 ของน้ำหนัก	ไม่เกินกว่าร้อยละ 10 ของน้ำหนัก
ส่วนประกอบของสารคลอรีน	ไม่เกินกว่าร้อยละ 0.02 ของน้ำหนัก	ไม่เกินกว่าร้อยละ 0.02 ของน้ำหนัก
ส่วนประกอบของสารกำมะถัน	ไม่เกินกว่าร้อยละ 0.08 ของน้ำหนัก	ไม่เกินกว่าร้อยละ 0.08 ของน้ำหนัก
ส่วนประกอบของสารไนโตรเจน	ไม่เกินกว่าร้อยละ 0.3 ของน้ำหนัก	ไม่เกินกว่าร้อยละ 0.3 ของน้ำหนัก

2.7.8 การใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม

สมศักดิ์ แก้วพลอย (2557) [24] พัฒนาสูตรที่เหมาะสมสำหรับลูกชิ้นเอ็นไก่ผสม ผักพื้นบ้านโดยวิธีการออกแบบการทดลอง ศึกษาสูตรลูกชิ้นเอ็น ไก่ที่เหมาะสม เพื่อนำไปพัฒนาเป็น ลูกชิ้นเอ็นไก่ผสมผักพื้นบ้าน โดยการออกแบบการทดลองแบบผสม กำหนดปัจจัยที่ทำการศึกษามีกำหนดช่วงศึกษา 3 ปัจจัย คือ สาหร่าย (10-100%) ฟักทอง (10-100%) และตำลึง (10-100%) ได้สูตรการทดลองทั้งหมด 10 สูตร และวิเคราะห์ผลโดยวิธีการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง พบว่า ปัจจัยทั้ง 3 มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าคะแนนความชอบ โดยรวมทางประสาทสัมผัส มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบผสม โดย นำลูกชิ้นเอ็นไก่ผสมผักพื้นบ้านที่คัดเลือกได้จากการทดลอง มาหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมด้วยวิธีการใช้เทคนิคการ ออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture Design) แบบย่อย เอ็ก ทริมเวอร์ทิส (Extreme Vertices) โดยกำหนดอัตราส่วนผสมของ ผักพื้นบ้านทั้ง 3 ชนิดที่คัดเลือกได้รวมกันแล้วเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ จากการทดลองพัฒนาสูตรลูกชิ้นเอ็นไก่ผสมผักพื้นบ้าน และวัดค่าความชอบโดยรวมโดยการทดสอบชิม เมื่อนำผลการ ทดลองมาวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางสถิติ สามารถสรุปได้ว่าปัจจัยที่มี ผลต่อความชอบโดยรวมของลูกชิ้นเอ็นไก่ผสมผักพื้นบ้านคือ สาหร่าย ฟักทองและตำลึง ซึ่งสูตรที่เหมาะสมของลูกชิ้นเอ็นไก่ผสม ผักพื้นบ้านคือสาหร่ายเท่ากับร้อยละ 22.80 ฟักทองเท่ากับร้อยละ 38.99 และตำลึงเท่ากับร้อยละ 38.21 ตามลำดับ และสามารถ สร้างสมการถดถอยประมาณค่าความชอบโดยรวมและวิเคราะห์ ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ คือ

$$Y = 0.009A + 0.008B - 0.026C + 0.002AB + 0.003AC + 0.004BC$$

Surapong Bangphan และคณะ (2008) [25] ศึกษาการใช้เทคนิคการ ออกแบบการทดลองแบบผสมในการสร้างส่วนผสมที่ดีที่สุดของ rice mill cylinder เมื่อใช้วัตถุดิบ ใหม่ ซึ่งมีอยู่ 3 วัตถุดิบที่นำมาศึกษาได้แก่ ควอตซ์ Emery ควอตซ์ แร่ธรรมชาติ ในเขตพื้นที่จังหวัด ลำปาง จังหวัดกาญจนบุรี และจังหวัดเชียงราย โดย DOE ใช้เป็นเครื่องมือหนึ่งในการสร้างสูตรที่ เหมาะสม ซึ่งได้การออกแบบส่วนผสม 10 แบบ โดยการใช้ Simplex Centroid Design และการ วิเคราะห์ ANOVA และสมการถดถอย โดยในการออกแบบการทดลองนี้มีปัจจัยควบคุม 3 ตัว ได้แก่ X1 X2 และ X3 แทน ควอตซ์ no16,no 18 และ siliconcarbide ใช้แล้ว no 18 ตามลำดับ โดยตัวแปรกระบวนการได้แก่ อุณหภูมิ และปริมาณความชื้น paddy โดยทดสอบการสีข้าวของดอกมะลิ

105 โดยวัดร้อยละของข้าวดีที่ได้และอัตรา wear ของ polishing cylinder คำนวณและวิเคราะห์ โดยใช้การวิเคราะห์ถดถอยและวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) โดยผลที่ดีที่สุดคือการใช้ควอตซ์ จากจังหวัดลำปาง ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ $R^2(\text{adj}) = 78.62\%$ และ $R^2(\text{adj}) = 70.67\%$ โดยให้ ร้อยละข้าวดี 92.14% และ wear rate 1.887 g/hr โดยวิเคราะห์โปรแกรม Minitab 14.00

Lamia Ayed และคณะ (2011) [26] งานวิจัยนี้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากสิ่งทอ โดยใช้ตู้ปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง (continuous stirred bed reactor:SBR) โดยศึกษาการใช้แบคทีเรีย 3 สายพันธุ์ในระบบใช้อากาศที่อุณหภูมิคงที่ และใส่น้ำเสียจากสิ่งทอที่ pH 7 และมีค่า COD 1700 mg/l) โดยแบคทีเรียที่ใช้คือ *Sphingomonas paucimobillis* *Bacillus* sp. และ filamentous bacillus โดยวัดค่าสีที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีและค่า COD ที่ลดลง โดยใช้ Minitab 14 โดยผลการทดลองพบว่าการใช้แบคทีเรียเป็นสายพันธุ์ชนิดเดียวจะให้ผลต่ออัตราการเกิดสีและค่าการลดลงของ COD ดีที่สุดคือ 86.72% และ 75.60% ตามลำดับ โดย Regression Coefficient ระหว่างตัวแปร การเปลี่ยนสีและการลดลงของ COD เป็น $R^2 = 72.48\%$ และ 54.28% กระบวนการเปลี่ยนสี *Sphingomonas paucimobillis* จะมีบทบาทสำคัญในขณะที่ *Bacillus* sp. จะมีผลต่อการลดลง COD วิธีการใช้ Mixture design จะนำไปพัฒนาในการหาสายพันธุ์แบคทีเรียที่เหมาะสมได้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการวิเคราะห์หาชนิดวัตถุและลักษณะการนำมาใช้ของวัตถุดิบชีวมวลที่ควรนำมาใช้โดยประเมินการใช้พลังงานและปริมาณ VOCs ของเชื้อเพลิงอัดเม็ด รวมถึงค่าความร้อนที่ได้เทียบกับราคาวัตถุดิบ และทำการศึกษาแนวทางการเพิ่มผลิตภาพสีเขียวในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดในประเทศไทย โดยมีวิธีการดำเนินการวิจัย ดังนี้

- 3.1 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง (Design of experiment)
- 3.2 วิเคราะห์การใช้พลังงานของการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด
- 3.3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง
- 3.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของแท่งเชื้อเพลิง

3.1 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง (Design of experiment)

จากการศึกษาข้อมูลและผลการทดลอง โดยใช้ทฤษฎีการออกแบบการทดลอง (Design of experiment) ซึ่งเป็นการออกแบบการทดลองเชิงสถิติ หมายถึงกระบวนการวางแผนการทดลอง เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติ โดยหลักการและขั้นตอนในการออกแบบการทดลองและการใช้วิธีเชิงสถิติในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง มีขั้นตอน ดังนี้

3.1.1 เลือกปัจจัยและค่าปัจจัยที่ทำการทดลอง

โดยปัจจัยที่ศึกษาคืออัตราส่วนผสมตามการออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture Design) ของชีวมวล 4 ชนิด ได้แก่ แกลบ ถั่วเขียว ถั่วเหลือง และยูคาลิปตัส

3.1.2 เลือกตัวแปรตอบสนอง

โดยตัวแปรตอบสนองที่กำหนดคือ ตัวแปรที่เป็นไปตามแนวคิดผลิตภาพสีเขียว ได้แก่ ต้นทุนการผลิตชีวมวลอัดเม็ด (บาท/ตันชีวมวล) ค่าความร้อนของชีวมวลอัดเม็ดที่ได้ (MJ/Kg) และ ปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) (%)

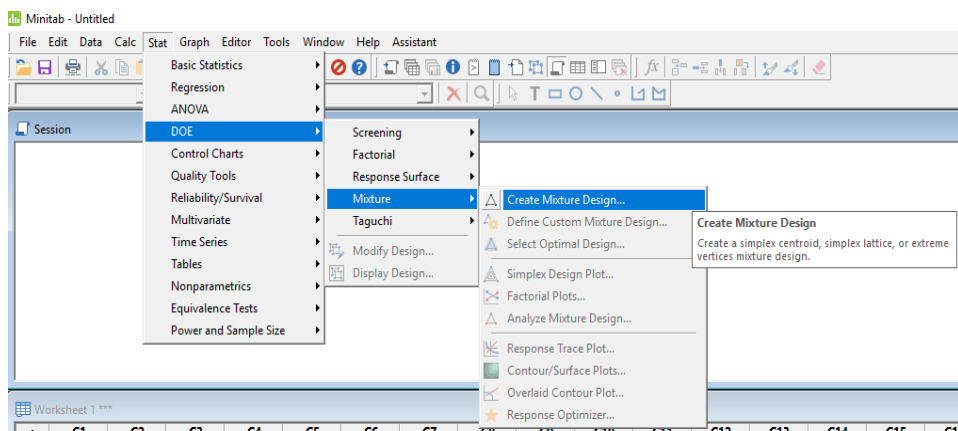
3.1.3 เลือกวิธีการออกแบบการทดลอง

ดังนี้

กำหนดรูปแบบการออกแบบทดลองแบบ Mixture Design โดยใช้โปรแกรม Minitab

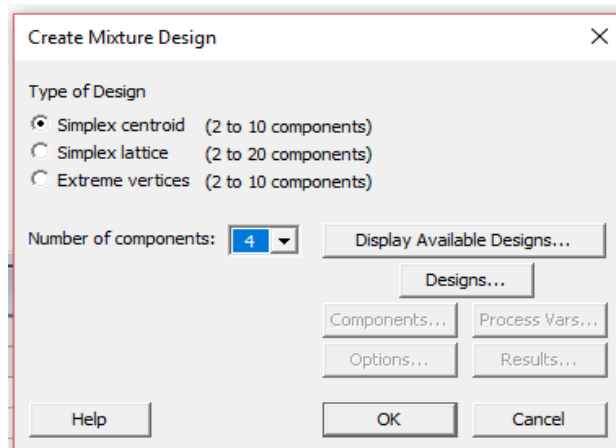
1) เปิดโปรแกรม Minitab 18 จากนั้นเลือกเมนู

“Stat” เลือก “DOE” จากนั้นเลือกการออกแบบการทดลองแบบ “Mixture”
เลือก “Create Mixture Design”



รูปที่ 3.1 การเลือกการออกแบบการทดลองแบบ Mixture Design

2) เลือกการออกแบบแบบ “Simplex centroid”
และเลือก “Number of component” เท่ากับ 4



รูปที่ 3.2 การเลือกการออกแบบการทดลองแบบ Simplex Centroid

จากนั้น จะได้รูปแบบการทดลองทั้งหมด (Run Order) โดยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ดังแสดง
ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 จำนวนตัวอย่างการออกแบบการทดลอง แบบ Simplex Centroid

StdOrder	A	B	C	D
4	0	0	0	1
10	0	0	0.5	0.5
25	0.5	0.5	0	0
2	0	1	0	0
30	0	0.5	0.5	0
22	0	0	0	1
42	0	0.333333	0.333333	0.333333
40	0.333333	0	0.333333	0.333333
3	0	0	1	0
41	0.333333	0	0.333333	0.333333
29	0.5	0	0	0.5
5	0.5	0.5	0	0
36	0.333333	0.333333	0.333333	0
35	0	0	0.5	0.5
24	0.5	0	0	0
38	0.333333	0.333333	0	0.333333
19	0	1	0	0
43	0	0.333333	0.333333	0.333333
12	0.333333	0.333333	0	0.333333
9	0	0.5	0	0.5
45	0.25	0.25	0.25	0.25
39	0.333333	0.333333	0	0.333333
28	0.5	0	0	0.5
11	0.333333	0.333333	0.333333	0
20	0	0	1	0

ตารางที่ 3.1 จำนวนตัวอย่างการออกแบบการทดลอง แบบ Simplex Centroid (ต่อ)

StdOrder	A	B	C	D
16	1	0	0	0
18	0	1	0	0
1	1	0	0	0
21	0	0	1	0
33	0	0.5	0	0.5
32	0	0.5	0	0.5
8	0	0.5	0.5	0
34	0	0	0.5	0.5
13	0.333333	0	0.333333	0.333333
31	0	0.5	0.5	0
23	0	0	0	1
17	1	0	0	0
44	0.25	0.25	0.25	0.25
37	0.333333	0.333333	0.333333	0
27	0.5	0	0.5	0
6	0.5	0	0.5	0
15	0.25	0.25	0.25	0.25
7	0.5	0	0	0.5
26	0.5	0	0.5	0
14	0	0.333333	0.333333	0.333333

ตารางที่ 3.2 รูปแบบและอัตราส่วนผสมของวัตถุดิบ

ตัวอย่าง ที่	องค์ประกอบ			
	กระถิน	ยูคาลิปตัส	แกลบ	เถาขานอ้อย
1	1	0	0	0
2	0	1	0	0
3	0	0	1	0
4	0	0	0	1
5	0	0	0.5	0.5
6	0	0.5	0	0.5
7	0	0.5	0.5	0
8	0.5	0	0	0.5
9	0.5	0	0.5	0
10	0.5	0.5	0	0
11	0	1/3	1/3	1/3
12	1/3	0	1/3	1/3
13	1/3	1/3	0	1/3
14	1/3	1/3	1/3	0
15	1/4	1/4	1/4	1/4

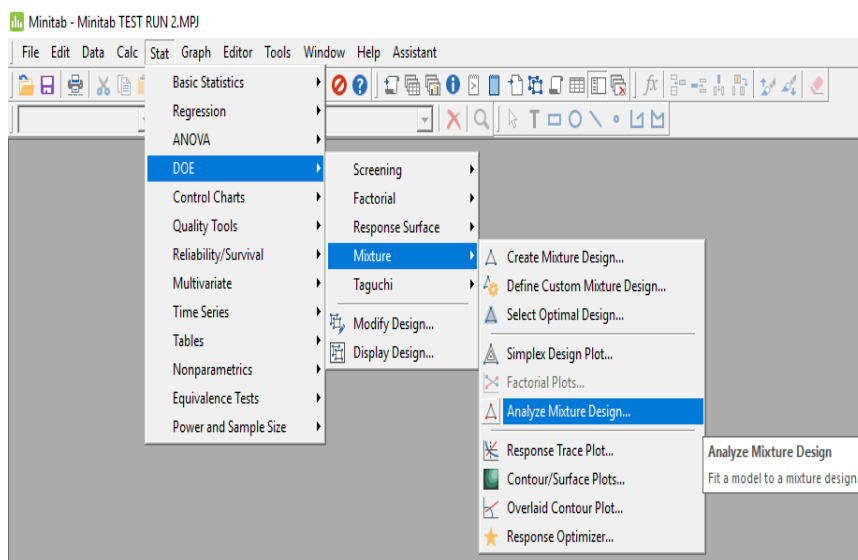
3) ทำการทดลองและติดตามผล

วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้หลักการทางสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อหาข้อมูลสรุปว่าเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลองหรือไม่ โดยเครื่องมือที่ใช้คือวิเคราะห์การถดถอย และการหาค่าที่ดีที่สุดด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป ทางสถิติ Minitab 18 ดังนี้

- เมื่อทำการป้อนข้อมูลของตัวแปรวัดผลลงไปใน

โปรแกรม Minitab 18 แล้ว จากนั้นเลือกเมนู Stat จากนั้นเลือก DOE

จากนั้นเลือก Mixture จากนั้นเลือก Analyze Mixture Design



รูปที่ 3.3 การวิเคราะห์ผลจากการออกแบบการทดลองแบบ Mixture Design

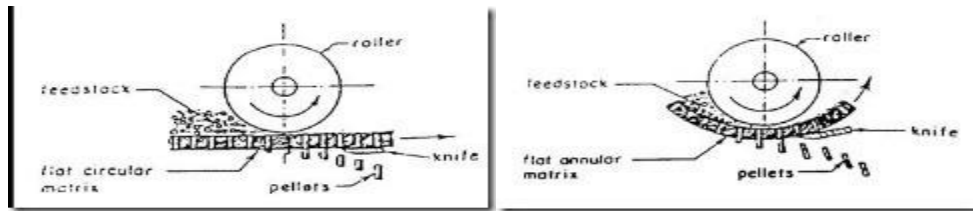
- เลือก Response ที่ต้องการทำ และเลือกกราฟที่ต้องการแสดง เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกัน จากนั้นกด “OK” จะได้ความสัมพันธ์แต่ละตัวแปรออกมา เป็นสมการ จากนั้น สรุปผล

3.2 วิเคราะห์การใช้พลังงานของการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด

ทำการออกแบบการทดลองโดยทำเชื้อเพลิงอัดเม็ดประเภทวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรประเภทเนื้อไม้ และการทำชีวมวลอัดเม็ดประเภทวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและประเภทเนื้อไม้ซึ่งปัจจัยที่ทำการศึกษการอัดขึ้นรูปของเม็ดชีวมวลนั้น คือความชื้น ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดวัตถุดิบที่ใช้จะมีความชื้นประมาณ 20% และในงานนี้ ศึกษาตัวแปรต้น 2 ชนิด ได้แก่ วัตถุดิบชีวมวลประเภทเนื้อไม้ ได้แก่ กระจิน และยูคาลิปตัส และวัตถุดิบชีวมวลประเภทวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ แกลบ และเถ้าขานอ้อย

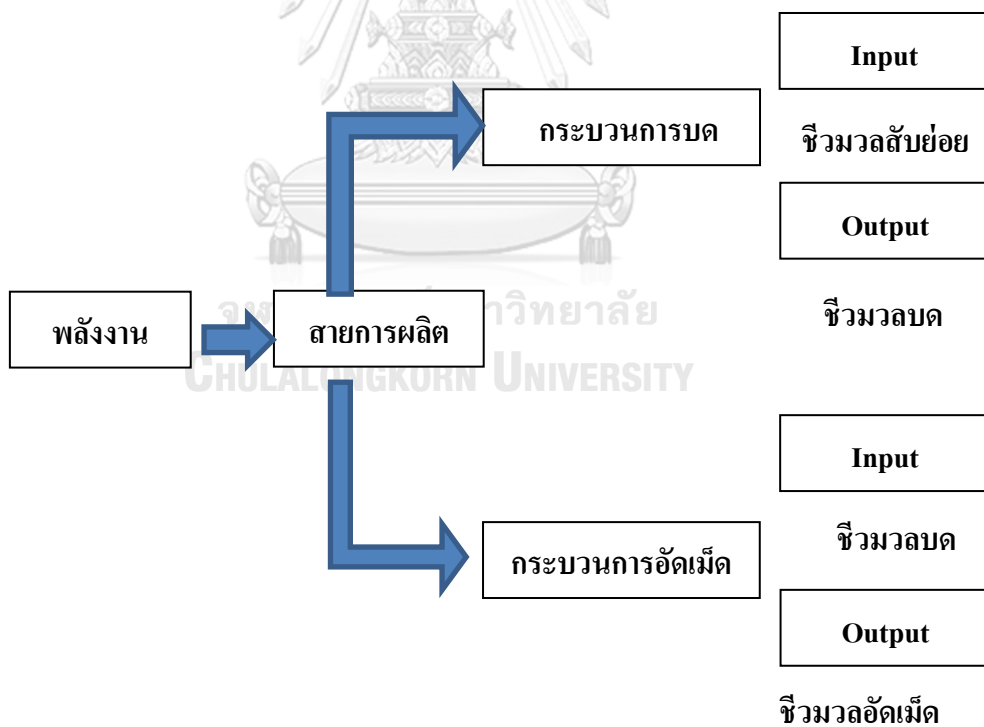
โดยศึกษาพลังงานที่ใช้ในขั้นตอนการผลิตชีวมวลอัดเม็ด ได้แก่ ขั้นตอนการสับย่อยและขั้นตอนการอัดเม็ดในขั้นตอนการอัดเม็ดยังนั้น ชีวมวลที่ได้จากการสับย่อยแล้วจะถูกส่งเข้าเครื่องอัดเม็ดหรืออัดเป็นแท่งเล็ก ๆ (Pelletizing press) เครื่องอัดแบบนี้ประกอบด้วยแม่พิมพ์ (Matrix) และลูกกลิ้ง (Roller) ซึ่งแรงอัดระหว่างแม่พิมพ์กับลูกกลิ้งทำให้เกิดความร้อนจากแรงเสียดสีและทำการอัดวัตถุดิบผ่านแม่พิมพ์ที่เจาะเป็นรูซึ่งมี 2 แบบคือ เครื่องอัดแบบแม่พิมพ์แผ่นกลม (Disk matrix press) และเครื่องอัดแม่พิมพ์วงแหวน (Ring matrix press) แท่งอัดเม็ดที่ถูกอัดออกมาแล้วจะถูกตัดด้วยใบมีดตามขนาดความยาวที่กำหนดให้ ซึ่งปกติจะมีความยาวน้อยกว่า 30 มิลลิเมตร และมี

เส้นผ่าศูนย์กลาง 5-15 มิลลิเมตร ถ้าแห้งอัดมีขนาดใหญ่กว่านี้แล้วจะใช้การอัดเป็นลูกบาศก์ (Cubing) แทนการอัดเม็ด



รูปที่ 3.4 ประเภทของเครื่องอัดเม็ด : เครื่องอัดแบบแม่พิมพ์แผ่นกลมและเครื่องอัดแบบแม่พิมพ์วงแหวน

จากนั้นทำการประเมินพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในขั้นตอนการผลิตชีวมวลอัดเม็ด ในขั้นตอนกระบวนการบดและกระบวนการอัดเม็ด ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การประเมินการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตชีวมวลอัดเม็ด

3.3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

เมื่อดำเนินการออกแบบการทดลองได้รูปแบบส่วนผสมของชีวมวลอัดเม็ดแล้ว จึงดำเนินการเตรียมตัวอย่างชีวมวลอัดเม็ดเพื่อทำการศึกษาต่อไป ดังนี้

(1) เก็บและเตรียมวัสดุที่ใช้ทดลองคือ ไม้กระถิน และไม้ยูคาลิปตัส และจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรได้แก่ แกลบ และเถ้าชานอ้อย อย่างละ 50 กิโลกรัม

(2) การทดลองครั้งนี้เป็นการอัดเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจากไม้กระถิน และไม้ยูคาลิปตัส และจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรได้แก่ แกลบ และเถ้าชานอ้อยโดยการใช้เครื่องอัดแบบแม่พิมพ์แผ่นกลม (Flat die)

(3) ก่อนกระบวนการอัดเม็ดชีวมวล จะวัดปริมาณความชื้นของวัตถุดิบให้มีความชื้นที่เหมาะสมคือประมาณ 20 % ในกระบวนการลดทำชีวมวลให้แห้ง หากความชื้นของวัตถุดิบมีมากเกินไป จะทิ้งระยะเวลาการเก็บวัตถุดิบให้มีระยะเวลานานขึ้น เพื่อให้มีความชื้นลดลง และเหมาะสมกับการอัดเม็ดต่อไป

3.3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาทดลอง

- 1) เครื่องย่อยเศษวัสดุ (hammer mill)
- 2) เครื่องอัดเม็ดเชื้อเพลิงแบบ (Flat die pellet)
- 3) ตู้อบไฟฟ้า (Dry oven)
- 4) ถ้วยทนไฟ (Crucible)
- 5) เครื่องชั่งดิจิตอลและตราชั่ง
- 6) เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิ
- 7) เครื่องวัดความร้อน (Bomb calorimeter)
- 8) ตัวเชื้อเพลิง ได้แก่ ชีวมวลไม้ ได้แก่ ไม้กระถิน และไม้ยูคาลิปตัส ที่มีอัตราส่วนของชีวมวล และจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ แกลบ และเถ้าชานอ้อย
- 9) กระสอบ ถุงพลาสติกและหนังกาย
- 10) อุปกรณ์สำนักงาน เช่น กรรไกร ปากกา ไม้บรรทัด

3.3.2 สถานที่ปฏิบัติการ

- 1) อาคารปฏิบัติการภาควิชาวนผลิตภัณฑ์ คณะวนศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ดำเนินการบดหยาบและบดย่อยชีวมวล และวัดปริมาณพลังงานไฟฟ้าในขั้นตอน
ดังกล่าว
- 2) ศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวลจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สระบุรี
ดำเนินการอัดเม็ดตัวอย่างชีวมวลโดยเครื่องอัดเม็ดแบบ Flat Die

3.3.3 การผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด

1) การสับหยาบชีวมวล

ทำการสับหยาบชีวมวลประเภทเนื้อไม้ ได้แก่ กระจิน และยูคาลิปตัส ทั้งนี้ แกลบ และเถ่าซานอ้อยไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการดังกล่าว เนื่องจากมีอนุภาคเล็กอยู่แล้ว โดยรูปที่ 3.5 และ รูปที่ 3.6 แสดงตัวอย่างชีวมวลประเภทเนื้อไม้ ได้แก่ กระจิน และ ยูคาลิปตัสที่ผ่านการสับหยาบ จากนั้นนำชีวมวลที่ผ่านการสับหยาบดังกล่าว เข้าสู่กระบวนการบดหยาบและบดย่อย ต่อไป



รูปที่ 3.6 กระจินที่ผ่านการสับหยาบ



รูปที่ 3.7 ยูคาลิปตัสที่ผ่านการสับหยาบ

2) บดหยาบและบดย่อยชีวมวล

□ ทำการบดหยาบชีวมวลประเภทเนื้อไม้ที่ผ่านการสับหยาบแล้ว ได้แก่ กระจิน และ ยูคาลิปตัส โดยเครื่องบดชีวมวล (Hammermill) ซึ่งมีรูกรองอนุภาคที่ขนาดหยาบและย่อย โดยเครื่องบดย่อยชีวมวลนี้ ใช้สำหรับบดย่อยชีวมวลให้เป็นเม็ด โดยเครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงชนิดนี้มีแรงดันไฟฟ้า ไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 2.33 Volt 5.0 Hz 1.35 Ampere และ 0.55 kw ดังแสดงในรูปที่ 3.8 โดยวัดปริมาณกระแสไฟฟ้าจากการบดหยาบและบดย่อยชีวมวลครั้งละ 5 กิโลกรัม จำนวน 2 ครั้ง โดยการใช้เครื่องแอมป์มิเตอร์วัดกระแสไฟฟ้า และจับเวลาที่ใช้ ดังแสดงในรูปที่ 3.9 และจะได้ตัวอย่างชีวมวลที่ผ่านการบดหยาบและบดย่อยแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 3.10 – 3.13



รูปที่ 3.8 เครื่องบดหยาบและบดย่อยซีเมนต์ (Hammermill)



รูปที่ 3.9 การวัดพลังงานไฟฟ้าจากการใช้เครื่องบดซีเมนต์



รูปที่ 3.10 กระถินบดหยาบ



รูปที่ 3.11 ยูคาลิปตัสบดหยาบ



รูปที่ 3.12 กระถินบดย่อย



รูปที่ 3.13 ยูคาลิปตัสบดย่อย

3) การอัดเม็ดชีวมวล

เตรียมตัวอย่างชีวมวลที่จะทำการอัดเม็ดทั้ง 15 ตัวอย่าง ตามรูปแบบการทดลองที่ออกแบบไว้ตัวอย่างละ 10 กิโลกรัม ครั้งละ 5 กิโลกรัม จำนวน 2 ครั้ง และใช้เครื่องแอมป์มิเตอร์วัดกระแสไฟฟ้า และจับเวลาที่ใช้

จากนั้นนำตัวอย่างเข้าเครื่องอัดเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล (Flat die) โดยเครื่องอัดเม็ดมีความเร็วรอบ 245 รอบ/นาที 22 kw และ อัตราการผลิต 0.1-0.2 ตันต่อชั่วโมง



รูปที่ 3.14 เครื่องอัดเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล (Flat die)

3.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของแท่งเชื้อเพลิง

ในการอัดเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลตามอัตราส่วนในแต่ละชนิด อาจทำให้คุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงแตกต่างกันได้ จึงจำเป็นต้องนำเชื้อเพลิงชีวมวลจากวัตถุดิบต่างๆ ไปวิเคราะห์หาคุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิง ซึ่งได้ทำการศึกษาค่าความร้อนตามวิธีมาตรฐาน ASTM และปริมาณสารระเหย โดยมีวิธีการทดสอบดังนี้

3.4.1 การหาค่าความร้อน (Heating Value)

ทำการวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3286 โดยนำตัวอย่างของสาร มาทำการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ในเครื่อง Bomb ที่มีออกซิเจนอยู่ปริมาณมากเกินพอ ความร้อนของการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นเป็นผลให้อุณหภูมิของ Jacket สูงขึ้น และสามารถคำนวณค่าความร้อนที่เกิดขึ้นได้และทำการหาค่าที่ได้ โดยมีเครื่องพิมพ์ผลออกมาให้เห็นหน้ากระดาษ และสามารถนำเจ้าหน้าที่เหลือจากการหาค่าความร้อนไปหาค่าปริมาณแล้วได้

เครื่องมือ เครื่อง Bomb calorimeter, ถังออกซิเจน, เครื่องอัดเม็ด (Pellet press), ถ้วยโลหะ (Combustion capsules), Oxygen Bomb, Bomb heat stand, Oxygen filling connection, ลวดเส้นเล็ก

วิธีการ

1. บดตัวอย่างเชื้อเพลิงจนละเอียด และต้องไม่มีความชื้น นำไปชั่งตวงปริมาณ 1 กรัม โดยใช้กระดาษชั่งสารรองตัวอย่าง
2. ชั่งน้ำหนักถ้วย และนำตัวอย่างมาอัดเป็นเม็ดด้วยเครื่องอัดเม็ด (Pellet press) ใส่ลงไปในถ้วยแล้ว ชั่งรวมกัน
3. นำแท่นสำหรับผูกลวดมา แล้วนำลวดยาว 10 เซนติเมตร มาผูกให้ตัวอย่างที่อยู่ในถ้วยสัมผัสกับลวด เพื่อจะได้เผาไหม้ได้
4. อัดออกซิเจนใน Bomb ให้มีความดัน 28-30 บรรยากาศ
5. ใส่น้ำลงใน Jacket ในปริมาตร 2,000 มิลลิเมตร
6. นำ Bomb ใส่ลงใน Jacket ปิดฝาเครื่องแล้วเปิดเครื่องกวน
7. กดปุ่ม Ignite เพื่อเริ่มทำงาน ป้อนข้อมูลน้ำหนักลวดและเชื้อเพลิง แล้วกดตกลง รอจนการเผาไหม้สมบูรณ์ จะมีเสียงสัญญาณดังขึ้นมา
8. ปิดเครื่อง แล้วนำลูก Oxygen Bomb มาปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกทั้งหมด วัดความยาวของเส้นลวดที่เหลือ แล้วนำ Oxygen Bomb ไปล้างเพื่อทำการทดสอบตัวอย่างต่อไป

3.4.2 การหาปริมาณสารระเหย (Volatile Matter)

ทำการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน SATM D3175 โดยนำตัวอย่างมาเผาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที แล้วนำมาคำนวณหาปริมาณสารระเหยจากการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่าง

เครื่องมือ

1. ชั่งตัวอย่างทดลองประมาณ 1 กรัม ลงในถ้วยทนไฟที่ทราบน้ำหนัก
2. นำถ้วยทนไฟพร้อมตัวอย่างเข้าเตาเผา โดยเผาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส นาน 7 นาที แล้วจึงนำออกมาจากเตาเผา ทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น
3. ชั่งน้ำหนักของถ้วยทนไฟและตัวอย่างที่เหลืออยู่

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

1. คำนวมน้ำหนักที่หายไป

$$\text{Weight Loss (\%)} = (A-B)/A \times 100$$

เมื่อ A = น้ำหนักตัวอย่างทดลอง (กรัม)

B = น้ำหนักตัวอย่างทดลองหลังเผา (กรัม)

2. คำนวณหาปริมาณสารระเหย

$$\text{Volatile Matter} = C-D$$

เมื่อ C = Weight Loss (%)

D = ความชื้น (%)

D = ความชื้น (%) ของแท่งเชื้อเพลิงหลังอัดแท่ง

บทที่ 4

ผลการดำเนินการวิจัย

จากการศึกษาเพื่อประเมินความเหมาะสมของวัตถุดิบชีวมวลในการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวล โดยขั้นตอนการออกแบบการทดลอง (Design of experiment) วิเคราะห์การใช้พลังงานของการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด ดำเนินการทดลองอัดเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล และวิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของแท่งเชื้อเพลิงตามแนวคิดผลิตภาพสี่เหลี่ยม ซึ่งพิจารณาในด้านต้นทุนการผลิต พิจารณาปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้การผลิตชีวมวลอัดเม็ดจากกระบวนการบดหยาบและบดย่อย และกระบวนการอัดเม็ด วิเคราะห์ด้านคุณภาพของค่าความร้อนชีวมวลอัดเม็ดที่ได้จากการเปรียบเทียบกับค่าความร้อนชีวมวลของร่างมาตรฐานชีวมวลอัดเม็ดของประเทศไทย และวิเคราะห์ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมจากปริมาณ VOCs ของตัวอย่างชีวมวลอัดเม็ด ได้ผลการดำเนินการวิจัยในประเด็นต่างๆ ดังนี้

- 4.1 การศึกษาการใช้พลังงานในขั้นตอนการผลิต
- 4.2 ต้นทุนการผลิตรวมของตัวอย่างชีวมวลอัดเม็ด
- 4.3 การศึกษา Mixture Design แบบ Simplex Centroid
 - 4.3.1 การประเมินผลต่อต้นทุนในการผลิต (บาท/ตัน)
 - 4.3.2 การประเมินผลต่อค่าความร้อนของชีวมวลอัดเม็ด (GHV)
 - 4.3.3 การประเมินผลต่อค่า VOCs
- 4.4 การประเมินความเหมาะสมของวัตถุดิบตามแนวคิดผลิตภาพสี่เหลี่ยม
- 4.5 การพิจารณาค่าความร้อนชีวมวลต่อต้นทุนการผลิต (MJ/บาท/ตัน)
- 4.6 การวิเคราะห์ความไวเมื่อราคาวัตถุดิบชีวมวลมีการเปลี่ยนแปลง (Sensitivity Analysis)

4.1 การศึกษาการใช้พลังงานในขั้นตอนการผลิต

4.1.1 ขั้นตอนการบดชีวมวล (Grinding)

ทำการวัดปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้การบดชีวมวลเนื้อไม้ ได้แก่ กระถิน และยูคาลิปตัส โดยเครื่องแอมป์มิเตอร์ จับเวลาการผลิตและคำนวณเป็นปริมาณพลังงานไฟฟ้า ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.1 ปริมาณกระแสไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ในขั้นตอนการบดย่อยชีวมวล

ลำดับที่	ตัวอย่าง	ปริมาณกระแสไฟฟ้าและเวลาที่ใช้เฉลี่ยต่อชีวมวลอัดเม็ด 5 กิโลกรัม			
		บดหยาบ		บดย่อย	
		กระแสไฟฟ้า(A) (เฉลี่ย)	เวลา(นาท) (เฉลี่ย)	กระแสไฟฟ้า(A) (เฉลี่ย)	เวลา (นาท) (เฉลี่ย)
1	กระถิน 100	4.77	19	5.01	21.5
2	ยูคา 100	2.1	10.5	4.77	13.5

จากนั้นนำมาคำนวณเพื่อหาปริมาณพลังงานไฟฟ้า ในหน่วย kWh ต่อตันชีวมวล โดยใช้สูตร

$$P(\text{watt}) = IV \cos \theta$$

ตารางที่ 4.2 ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในขั้นตอนการบดย่อยชีวมวล (kWh ต่อตันชีวมวล)

ลำดับที่	ตัวอย่าง	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อตันชีวมวล)	
		บดหยาบ	บดย่อย
1	กระถิน 100	26.58	31.60
2	ยูคา 100	8.35	18.89

4.1.2 ขั้นตอนการอัดเม็ด (Pelletizing)

วัดเครื่องปริมาณพลังงานไฟฟ้า (หน่วย:ยูนิต) โดยใช้เครื่องวัดปริมาณกระแสไฟฟ้า (A : แอมแปร์) (แอมมิเตอร์) ที่เวลาทุก 30 วินาที เพื่อหาปริมาณกระแสไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ในการผลิตทั้งหมด แล้วนำมาคำนวณเพื่อหาปริมาณพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในการผลิตชีวมวลอัดเม็ด 5 กิโลกรัม โดยทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ดังนี้

ตารางที่ 4.3 ปริมาณกระแสไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ในขั้นตอนการอัดเม็ดชีวมวล

ลำดับ ที่	ตัวอย่าง	ปริมาณกระแสไฟฟ้าและเวลาที่ใช้เฉลี่ยต่อชีวมวลอัดเม็ด 5 กิโลกรัม			
		ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2	
		กระแสไฟฟ้า (A) (เฉลี่ย)	เวลา(นาท) (เฉลี่ย)	กระแสไฟฟ้า (A) (เฉลี่ย)	เวลา(นาท) (เฉลี่ย)
1	กระถิน 100	24.03	7.5	25.09	7
2	ยูคา 100	24.29	7.5	23.79	8
3	แกลบ 100	26.3	7	25	7
4	เจ้าชานอ้อย 100	24.47	11	25.42	9
5	กระถิน 50 ยูคา 50	25.48	13	24.96	12
6	กระถิน 50 แกลบ 50	22.31	9	23.01	9
7	กระถิน 50 เจ้าชาน อ้อย 50	22.18	9	23.38	8
8	ยูคา 50 แกลบ 50	28.44	8.5	25.53	10
9	ยูคา 50 เจ้าชานอ้อย 50	23.57	11.5	25.13	10.5
10	แกลบ 50 เจ้าชาน อ้อย 50	23.84	10.5	25.33	10
11	กระถิน 1/3 ยูคา 1/3 แกลบ 1/3	29.68	8	25.42	10.5
12	กระถิน 1/3 ยูคา 1/3 เจ้าชานอ้อย 1/3	24.06	10	23.47	10
13	กระถิน 1/3 แกลบ 1/3 เจ้าชานอ้อย 1/3	24.24	7	26.05	7
14	ยูคา 1/3 แกลบ 1/3 เจ้าชานอ้อย 1/3	25.96	11	25.05	10
15	กระถิน 1/4 ยูคา 1/4 แกลบ 1/4 เจ้าชานอ้อย 1/4	20.79	10.5	22.47	10

จากนั้นนำมาคำนวณเพื่อหาปริมาณพลังงานไฟฟ้า ในหน่วย kWh ต่อตันชีวมวล โดยใช้สูตร

$$P(\text{watt}) = IV \cos \theta$$

ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.4 (รายละเอียดการคำนวณพลังงานไฟฟ้าอยู่ในภาคผนวก)

ตารางที่ 4.4 ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในขั้นตอนการอัดเม็ดชีวมวล (kWh ต่อตันชีวมวล)

ลำดับที่	ตัวอย่าง	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อตันชีวมวล)	
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
1	กระถิน 100	108.39	105.59
2	ยูคา 100	109.56	114.43
3	แกลบ 100	110.71	105.23
4	เถ้าซานอ้อย 100	161.85	137.59
5	กระถิน 50 ยูคา 50	199.16	180.13
6	กระถิน 50 แกลบ 50	120.72	124.54
7	กระถิน 50 เถ้าซานอ้อย 50	120.03	112.48
8	ยูคา 50 แกลบ 50	135.37	142.52
9	ยูคา 50 เถ้าซานอ้อย 50	163.02	158.68
10	แกลบ 50 เถ้าซานอ้อย 50	150.53	152.29
11	กระถิน 1/3 ยูคา 1/3 แกลบ 1/3	142.76	160.52
12	กระถิน 1/3 ยูคา 1/3 เถ้าซานอ้อย 1/3	144.67	141.12
13	กระถิน 1/3 แกลบ 1/3 เถ้าซานอ้อย 1/3	102.07	109.67
14	ยูคา 1/3 แกลบ 1/3 เถ้าซานอ้อย 1/3	171.74	150.63
15	กระถิน 1/4 ยูคา 1/4 แกลบ 1/4 เถ้าซานอ้อย 1/4	131.26	135.13

เมื่อได้ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการผลิตชีวมวลอัดเม็ด จากกระบวนการบดชีวมวลประเภทเนื้อไม้ ได้แก่ กระจิน และยูคาลิปตัส เนื่องจากวัตถุดิบประเภทแกลบและเถ้าชานอ้อยไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการบดก่อนเข้าสู่กระบวนการอัดเม็ด และปริมาณพลังงานไฟฟ้าในขั้นตอนอัดเม็ดชีวมวลแล้ว โดยนำมารวมกันเป็นปริมาณพลังงานไฟฟ้าใช้ในขั้นตอนการผลิตชีวมวลอัดเม็ด (kWh/Ton) ตามสัดส่วนของตัวอย่างชีวมวลที่กำหนด จึงได้ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในขั้นตอนการผลิตชีวมวลอัดเม็ด (kWh ต่อตันชีวมวล) ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในขั้นตอนการผลิตชีวมวลอัดเม็ด

ลำดับที่	ตัวอย่าง	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อตันชีวมวล)		ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในขั้นตอนการอัดเม็ดชีวมวล (kWh ต่อตันชีวมวล)	ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในขั้นตอนการผลิตชีวมวลอัดเม็ด (kWh/Ton)
		บดหยาบ	บดย่อย		
1	กระจิน 100	26.58	31.6	106.99	165.17
2	ยูคา 100	8.35	18.89	111.99	139.24
3	แกลบ 100	-	-	107.97	107.97
4	เถ้าชานอ้อย 100	-	-	149.72	149.72
5	กระจิน 50 ยูคา 50	17.47	25.25	189.65	232.35
6	กระจิน 50 แกลบ 50	13.29	15.8	122.63	151.72
7	กระจิน 50 เถ้าชานอ้อย 50	13.29	15.8	116.26	145.35
8	ยูคา 50 แกลบ 50	4.18	9.45	138.95	152.56

ตารางที่ 4.5 ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในขั้นตอนการผลิตชีวมวลอัดเม็ด (ต่อ)

ลำดับที่	ตัวอย่าง	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อตันชีวมวล)		ปริมาณพลังงาน ไฟฟ้าที่ใช้ใน ขั้นตอนการ อัดเม็ดชีวมวล (kWh ต่อตัน ชีวมวล)	ปริมาณพลังงาน ไฟฟ้าที่ใช้ในขั้นตอน การผลิตชีวมวล อัดเม็ด (kWh/Ton)
		บดหยาบ	บดย่อย		
9	ยูคา 50 เถ้าชาน อ้อย 50	4.18	9.45	160.85	174.47
10	แกลบ 50 เถ้า ชานอ้อย 50	-	-	151.41	151.41
11	กระถิน 1/3 ยูคา 1/3 แกลบ 1/3	19.39	9.08	151.64	180.11
12	กระถิน 1/3 ยูคา 1/3 เถ้า ชานอ้อย 1/3	19.39	9.08	142.90	171.37
13	กระถิน 1/3 แกลบ 1/3 เถ้า ชานอ้อย 1/3	8.86	10.53	105.87	125.26
14	ยูคา 1/3 แกลบ 1/3 เถ้า ชานอ้อย 1/3	2.78	6.29	161.19	170.27
15	กระถิน 1/4 ยู คา 1/4 แกลบ 1/4 เถ้าชาน อ้อย 1/4	8.73	12.62	133.20	154.55

4.2 ต้นทุนการผลิตรวมของตัวอย่างชีวมวลอัดเม็ด

นำค่าปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในขั้นตอนการผลิตชีวมวลอัดเม็ด (kWh/Ton) มาคิดค่าพลังงานไฟฟ้า (บาท/หน่วย) โดยในที่นี้ จะใช้ค่าพลังงานไฟฟ้าจากอัตราค่าไฟฟ้าการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ประเภทที่ 2 กิจการขนาดเล็ก ตามอัตราปกติ ดังแสดงในตารางที่ 4.6 โดยค่าพลังงานไฟฟ้าดังกล่าว จะอยู่ในช่วงค่าพลังงานไฟฟ้า Peak และ Off Peak ตามอัตราตามช่วงเวลาของการใช้ (Time of Use Rate : TOU) โดยที่ ประเภทที่ 2 กิจการขนาดเล็ก สำหรับการไฟฟ้าเพื่อประกอบธุรกิจ ธุรกิจรวมกับบ้านอยู่อาศัย อุตสาหกรรมส่วนราชการที่มีลักษณะเป็นอุตสาหกรรม รัฐวิสาหกิจ หรืออื่นๆ ตลอดจนบริเวณที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีความต้องการพลังไฟฟ้าเฉลี่ยใน 15 นาทีสูงสุดต่ำกว่า 30 กิโลวัตต์ โดยต่อผ่านเครื่องวัดไฟฟ้าเครื่องเดียว โดยที่อัตราตามช่วงเวลาของการใช้ (Time of Use Rate : TOU) เป็นอัตราเลือก เมื่อใช้แล้วจะกลับไปใช้ประเภทอัตราปกติไม่ได้

ตารางที่ 4.6 ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาท/หน่วย)

อัตราปกติ

อัตราค่าไฟฟ้าการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ประเภทที่ 2 กิจการขนาดเล็ก	ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาท/หน่วย)	ค่าบริการ (บาท/เดือน)
แรงดัน 22-33 กิโลโวลท์	2.4649	228.17
แรงดันต่ำกว่า 22 กิโลโวลท์		40.90
- 150 หน่วยแรก (หน่วยที่ 0 - 150)	1.8047	
- 250 หน่วยต่อไป (หน่วยที่ 151 - 400)	2.7781	
- เกิน 400 หน่วยขึ้นไป (หน่วยที่ 401 เป็นต้นไป)	2.9780	

อัตราตามช่วงเวลาของการใช้ (Time of Use Rate : TOU)

	ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาท/หน่วย)		ค่าบริการ (บาท/เดือน)
	Peak	Off Peak	
แรงดัน 22-33 กิโลโวลท์	3.6246	1.1914	228.17
แรงดันต่ำกว่า 22 กิโลโวลท์	4.3093	1.2246	57.95

ในการพิจารณาต้นทุนการผลิตรวมในการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดหนึ่งตัน ปัจจัยหนึ่งที่ต้องพิจารณาคือราคาวัตถุดิบชีวมวล ซึ่งเป็นปัจจัยหลักของต้นทุนการผลิตชีวมวลอัดเม็ด คิดเป็นมากกว่า 40% ของต้นทุนการผลิตรวมทั้งหมด โดยให้ต้นทุนอื่นๆ เช่น ด้านเครื่องจักร มีค่าคงที่ ดังนั้น จึงต้องพิจารณาราคาวัตถุดิบชีวมวลด้วย โดยราคาวัตถุดิบชีวมวลแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ราคาวัตถุดิบชีวมวล

วัตถุดิบชีวมวล	ราคา (บาท/ตัน)	ราคา (บาท/ ตัน)
กระถิน	950 – 1,000	975
ยูคาลิปตัส	950 – 1,000	975
แกลบ	1,200 – 1,500	1,350
เถ้าขานอ้อย	50	50

ข้อมูล มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม ณ 25 สิงหาคม 2560

เมื่อนำปริมาณพลังงานไฟฟ้ามาคำนวณรวมกับราคาวัตถุดิบ จะได้ต้นทุนการผลิตชีวมวลอัดเม็ดในหน่วยบาท/ตัน ดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ต้นทุนการผลิตรวมของตัวอย่างชีวมวลอัดเม็ด

ลำดับที่	ตัวอย่าง	ต้นทุนการผลิต (ค่าใช้จ่ายการใช้พลังงาน (kWh/Ton) + ราคาวัตถุดิบ (บาท/ตัน)
1	กระถิน 100	1287.85
2	ยูคา 100	1245.71
3	แกลบ 100	1620.71
4	เถ้าขานอ้อย 100	337.17
5	กระถิน 50 ยูคา 50	1474.49
6	กระถิน 50 แกลบ 50	1442.39

ตารางที่ 4.8 ต้นทุนการผลิตรวมของตัวอย่างชีวมวลอัดเม็ด (ต่อ)

ลำดับที่	ตัวอย่าง	ต้นทุนการผลิต (ค่าใช้จ่ายการใช้พลังงาน (kWh/Ton) + ราคาวัตถุดิบ (บาท/ตัน)
1	กระถิน 100	1287.85
2	ยูคา 100	1245.71
3	แกลบ 100	1620.71
4	เถ้าซานอ้อย 100	337.17
5	กระถิน 50 ยูคา 50	1474.49
6	กระถิน 50 แกลบ 50	1442.39
7	กระถิน 50 เถ้าซานอ้อย 50	783.21
8	ยูคา 50 แกลบ 50	874.50
9	ยูคา 50 เถ้าซานอ้อย 50	851.18
10	แกลบ 50 เถ้าซานอ้อย 50	974.62
11	กระถิน 1/3 ยูคา 1/3 แกลบ 1/3	1454.37
12	กระถิน 1/3 ยูคา 1/3 เถ้าซานอ้อย 1/3	996.76
13	กระถิน 1/3 แกลบ 1/3 เถ้าซานอ้อย 1/3	1062.37
14	ยูคา 1/3 แกลบ 1/3 เถ้าซานอ้อย 1/3	1118.67
15	กระถิน 1/4 ยูคา 1/4 แกลบ 1/4 เถ้าซานอ้อย 1/4	1120.86

4.3 การศึกษา Mixture Design แบบ Simplex Centroid

4.3.1 การประเมินผลต่อต้นทุนในการผลิต (บาท/ตัน)

ความมีอิทธิพลของแต่ละส่วนผสม

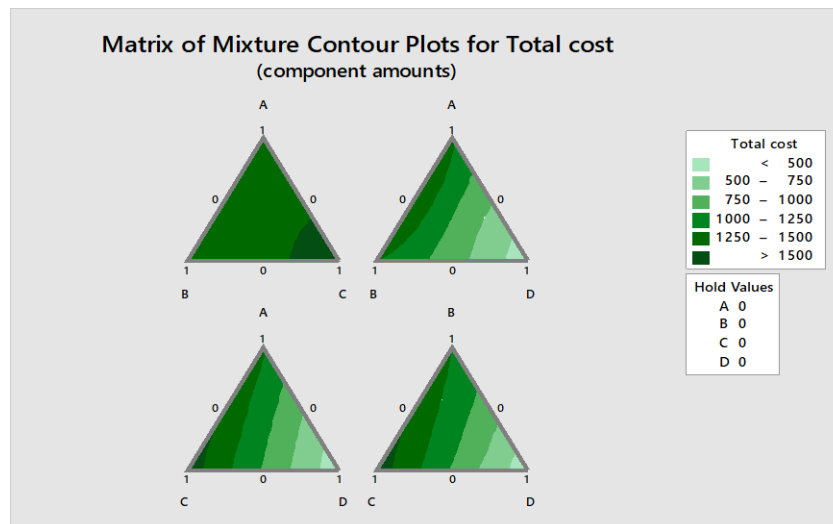
นำผลการทดลองมาวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ประมวลผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ โดยเลือกการนำเข้าตัวแปรเข้าสมการถดถอยพหุคูณ (Regression Analysis) แบบ Backward Elimination โดยใช้แบบจำลองรูปแบบ Special Cubic พบว่าตัวแปรที่สามารถนำมาคำนวณหาสมการถดถอย อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 และมีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R - Square) เท่ากับ 99.75% ดังแสดงในตารางที่ 4.9 ตารางที่ 4.9 การวิเคราะห์สมการถดถอยของต้นทุนการผลิต

Estimated Regression Coefficients for Total cost (component proportions)						
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF	
A	1282.7	12.5	*	*	1.76	
B	1251.4	12.5	*	*	1.76	
C	1620.9	10.4	*	*	1.23	
D	336.1	12.4	*	*	1.76	
A*B	838.7	65.4	12.82	0	2.06	
A*D	-117.2	62.7	-1.87	0.076	1.9	
B*D	261	62.7	4.16	0	1.9	
A*B*C	-845	391	-2.16	0.042	1.31	
A*B*D	-2070	444	-4.66	0	1.69	
Model Summary						
S	R-sq	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)		
19.4316	99.75%	99.65%	18175.4	99.42%		
Analysis of Variance for Total cost (component proportions)						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	8	3132244	3132244	391531	1036.93	0

ตารางที่ 4.9 การวิเคราะห์สมการถดถอยของต้นทุนการผลิต (ต่อ)

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF	
Linear	3	3059860	2211096	737032	1951.95	0
Quadratic	3	62571	71189	23730	62.85	0
A*B	1	53968	62095	62095	164.45	0
A*D	1	5893	1319	1319	3.49	0.076
B*D	1	2709	6539	6539	17.32	0
Special Cubic	2	9813	9813	4907	12.99	0
A*B*C	1	1616	1768	1768	4.68	0.042
A*B*D	1	8197	8197	8197	21.71	0
Residual Error	21	7929	7929	378		
Lack-of-Fit	6	2290	2290	382	1.02	0.452
Pure Error	15	5639	5639	376		
Total	29	3140174				

ได้ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของส่วนผสมต่างๆ ดังตารางที่ และพบว่า ค่า Lack - of -fit มีค่า 0.452 ซึ่งมีค่ามากกว่าค่า p-value ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่ารูปแบบสมการที่ได้มีความเหมาะสมเพียงพอในการนำมาพยากรณ์ค่าต้นทุนการผลิตของชีวมวลอัดเม็ด



รูปที่ 4.1 Mixture design ของต้นทุนการผลิตรวมของชีวมวลอัดเม็ด

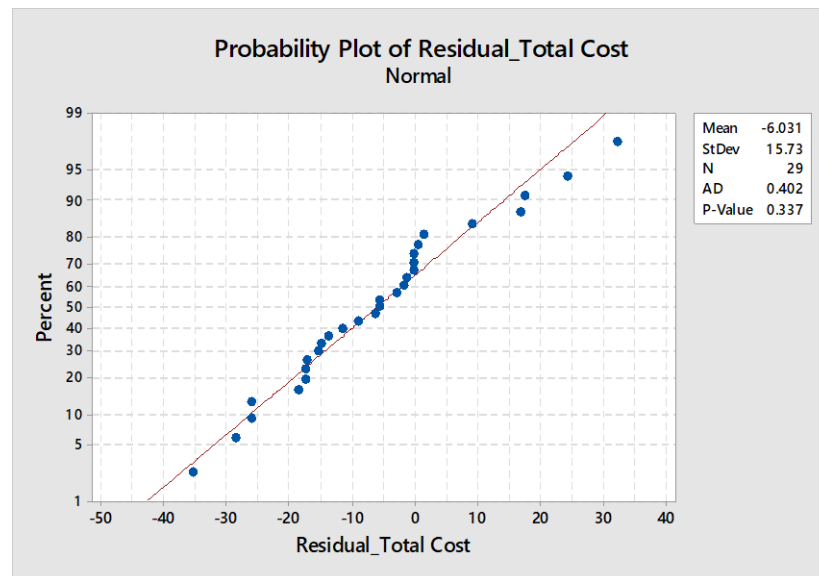
สมการถดถอยเพื่อทำนายค่าต้นทุนการผลิตชีวมวลอัดเม็ด

$$y \text{ (Total Cost/Ton)} = 1282.7*A + 1251.4*B + 1620.9*C + 336.1*D + 838.7*A*B + 261*B*D - 845*A*B*C - 2070*A*B*D$$

ตรวจสอบความพอเพียงของตัวแบบ

วิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน (Residual Analysis) ความคลาดเคลื่อน หมายถึง ค่าความต่างระหว่างข้อมูลที่เก็บมาได้จริง กับค่าที่คำนวณได้จากสมการถดถอย ซึ่งการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนจะแบ่งตามสมมติฐาน ดังนี้

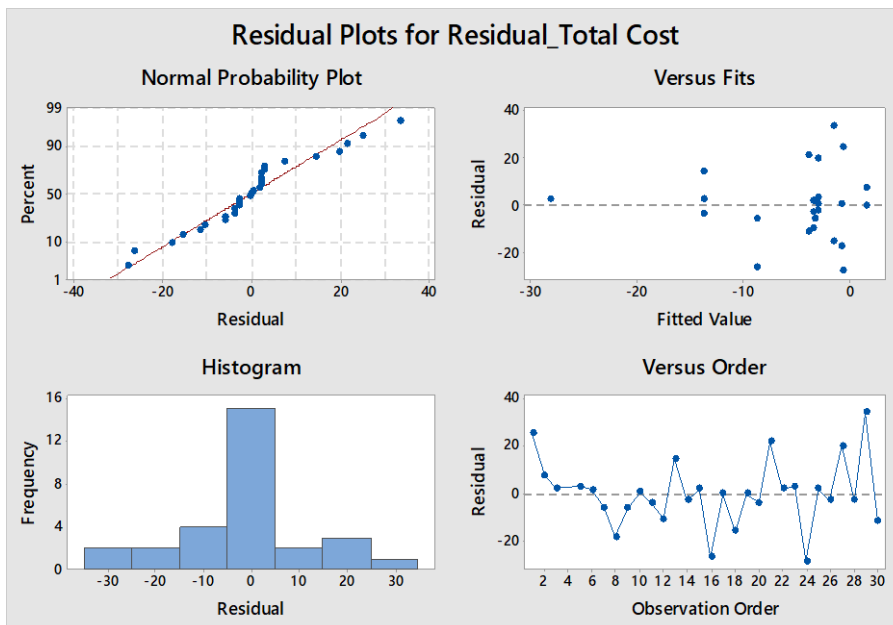
สมมติฐานของข้อมูลมีการแจกแจงปกติ สมมูลกับค่าความคลาดเคลื่อนต้องมีการแจกแจงแบบปกติสามารถตรวจสอบได้ด้วย การนำค่าความคลาดเคลื่อนมาทำ Normal Probability Plot เมื่อพิจารณาจากกราฟ จุดที่เขียนอยู่บนกราฟส่วนใหญ่มีการกระจายตัวอยู่บนเส้นตรง จึงสรุปได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวแบบปกติ ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงการกระจายตัวของ residual ของ ต้นทุนการผลิต

สมมติฐานของค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน ภายใต้สมมติฐานที่ว่า ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อน มีค่าเท่ากับศูนย์ และมีความแปรปรวนเท่ากับค่าคงที่ ถ้าหากแบบจำลองการถดถอยมีความเหมาะสมกับข้อมูลแล้ว ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นต้องไม่เกิดรูปแบบใดๆ ตรวจสอบได้จากการพล็อตค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) เทียบกับค่าที่คำนวณได้จากสมการถดถอย

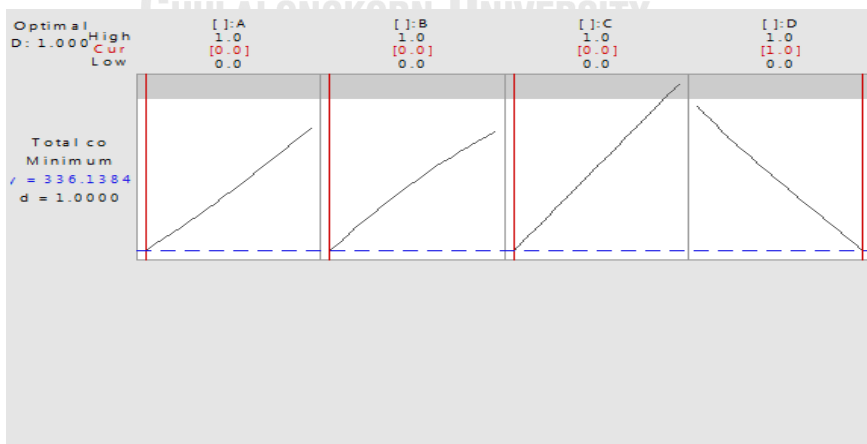
สมมติฐานของความเป็นอิสระภายใต้สมมติฐานว่า ค่าความคลาดเคลื่อนแต่ละเป็นอิสระต่อกัน ตรวจสอบได้จากการพล็อตค่าความคลาดเคลื่อน ซึ่งค่า Standardize Residual ที่ใช้ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานที่คำนวณจากข้อมูลทุกตัว ลักษณะการกระจายของกราฟต้องไม่มีแนวโน้มหรือรูปแบบ จึงจะเป็นแสดงว่าข้อมูลแต่ละค่ามีความเป็นอิสระต่อกัน และไม่ขึ้นอยู่กับลำดับการเก็บข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 กราฟการกระจายตัว Residual และค่า Fitted value ของต้นทุนการผลิต

การหาระดับที่ดีที่สุดในการใช้ปริมาณพลังงานไฟฟ้าในการผลิต

สมการถดถอยมีประโยชน์เพื่อใช้ในการทำนายผลตอบ โดยผลตอบในการหาระดับที่ดีที่สุดในการใช้ปริมาณพลังงานไฟฟ้าในการผลิต คือการใช้ปริมาณพลังงานไฟฟ้าในการผลิตน้อยที่สุด พบว่า การผลิตชีวมวลจากเถาขานอ้อย 100% จะมีต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 การหาระดับที่ต่ำที่สุดของต้นทุนการผลิตชีวมวลอัดเม็ด

4.3.2 การประเมินผลต่อค่าความร้อนของชีวมวลอัดเม็ด (GHV)

ค่าความร้อนชีวมวลอัดเม็ด (MJ/Kg) แสดงในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ค่าความร้อนชีวมวลอัดเม็ด (MJ/Kg)

ลำดับ	ส่วนผสม	ประเภท	องค์ประกอบ				GHV (MJ/Kg)
			กระถิน (A)	ยูคา ลิปตัส (B)	แกลบ (C)	เถ้าขาน อ้อย (D)	
1	Pure	Vertex	1	0	0	0	18.44
2	Pure	Vertex	0	1	0	0	18.68
3	Pure	Vertex	0	0	1	0	14.3
4	Pure	Vertex	0	0	0	1	4.56
5	Binary	Edge Centroid	0	0	0.5	0.5	8.91
6	Binary	Edge Centroid	0	0.5	0	0.5	9.87
7	Binary	Edge Centroid	0	0.5	0.5	0	16.18
8	Binary	Edge Centroid	0.5	0	0	0.5	10.11
9	Binary	Edge Centroid	0.5	0	0.5	0	15.30
10	Binary	Edge Centroid	0.5	0.5	0	0	18.39
11	Ternary	Face Centroid	0	1/3	1/3	1/3	12.16
12	Ternary	Face Centroid	1/3	0	1/3	1/3	9.92
13	Ternary	Face Centroid	1/3	1/3	0	1/3	10.08
14	Ternary	Face Centroid	1/3	1/3	1/3	0	17.20
15	All	Overall Centroid	1/4	1/4	1/4	1/4	11.47

ความมีอิทธิพลของแต่ละส่วนผสม

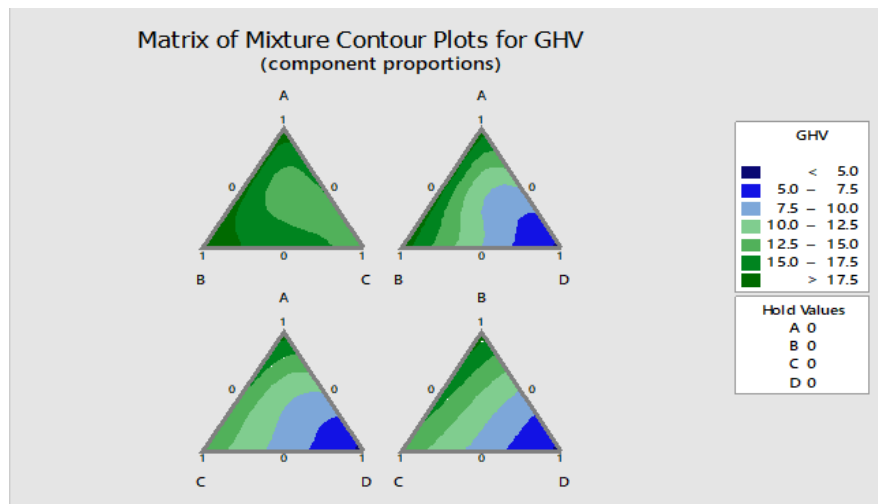
นำผลการทดลองมาวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ประมวลผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ โดยเลือกการนำเข้าตัวแปรเข้าสมการถดถอยพหุคูณ (Regression Analysis) แบบ Backward Elimination โดยใช้แบบจำลองรูปแบบ Special Cubic พบว่าตัวแปรที่สามารถนำมาคำนวณหาสมการถดถอย อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 และมีสัมประสิทธิ์การตัดสิ้นใจ (R - Square) เท่ากับ 99.68% ดังแสดงในตารางที่ 4.10 ตารางที่ 4.11 การวิเคราะห์สมการถดถอยของค่าความร้อนชีวมวลอัดเม็ด

Estimated Regression Coefficients for GHV (component proportions)						
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF	
A	18.404	0.142	*	*	1.78	
B	18.555	0.132	*	*	1.53	
C	14.207	0.142	*	*	1.78	
D	4.564	0.156	*	*	2.15	
A*C	-3.938	0.744	-5.29	0	2.07	
A*D	-5.397	0.751	-7.19	0	2.11	
B*D	-6.644	0.744	-8.93	0	2.07	
C*D	-1.803	0.751	-2.4	0.022	2.11	
A*B*C	13.55	4.49	3.02	0.005	1.34	
A*B*D	-67.58	4.72	-14.31	0	1.48	
A*C*D	-35.49	5.04	-7.03	0	1.69	
B*C*D	15.48	4.72	3.28	0.002	1.48	
Model Summary						
	S	R-sq	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)	
	0.270217	99.68%	99.58%	4.39317	99.42%	

ตารางที่ 4.11 การวิเคราะห์สมการถดถอยของค่าความร้อนชีวมวลอัดเม็ด (ต่อ)

Analysis of Variance for GHV (component proportions)						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	11	757.415	757.415	68.856	943.01	0
Linear	3	702.527	443.916	147.972	2026.53	0
Quadratic	4	35.122	10.193	2.548	34.9	0
A*C	1	3.341	2.043	2.043	27.98	0
A*D	1	16.564	3.769	3.769	51.62	0
B*D	1	13.816	5.817	5.817	79.67	0
C*D	1	1.401	0.42	0.42	5.76	0.022
Special Cubic	4	19.767	19.767	4.942	67.68	0
A*B*C	1	0.312	0.667	0.667	9.13	0.005
A*B*D	1	14.995	14.957	14.957	204.84	0
A*C*D	1	3.675	3.613	3.613	49.48	0
B*C*D	1	0.785	0.785	0.785	10.75	0.002
Residual Error	33	2.41	2.41	0.073		
Lack-of-Fit	3	0.434	0.434	0.145	2.2	0.109
Pure Error	30	1.976	1.976	0.066		
Total	44	759.825				

ได้ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของส่วนผสมต่างๆ ดังตารางที่ และพบว่า ค่า Lack - of -fit มีค่า 0.109 ซึ่งมีค่ามากกว่าค่า p-value ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่ารูปแบบสมการที่ได้มีความเหมาะสมเพียงพอในการนำมาพยากรณ์ค่าความร้อนของชีวมวลอัดเม็ด



รูปที่ 4.5 Mixture design ของค่าความร้อนของชีวมวลอัดเม็ด

สมการถดถอยเพื่อทำนายค่าปริมาณค่าความร้อนของชีวมวลอัดเม็ด

$$y \text{ (GHV)} = 18.404*A + 18.555*B + 14.207*C + 4.564*D - 3.938 *A*C - 5.397* A*D - 6.644* B*D -$$

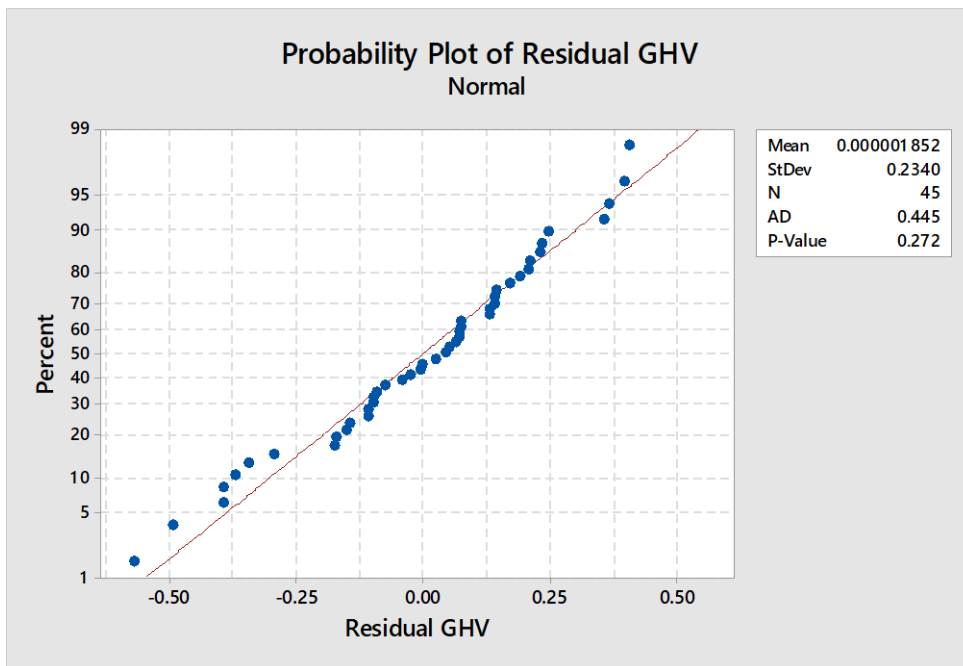
$$1.803* C*D + 13.55 *A*B*C - 67.58 *A*B*D - 35.49 *A*C*D + 15.48 *B*C*D \text{ โดยมีสัมประสิทธิ์ของ}$$

การตัดสินใจ $R^2 = 99.68\%$

ตรวจสอบความพอเพียงของตัวแบบ

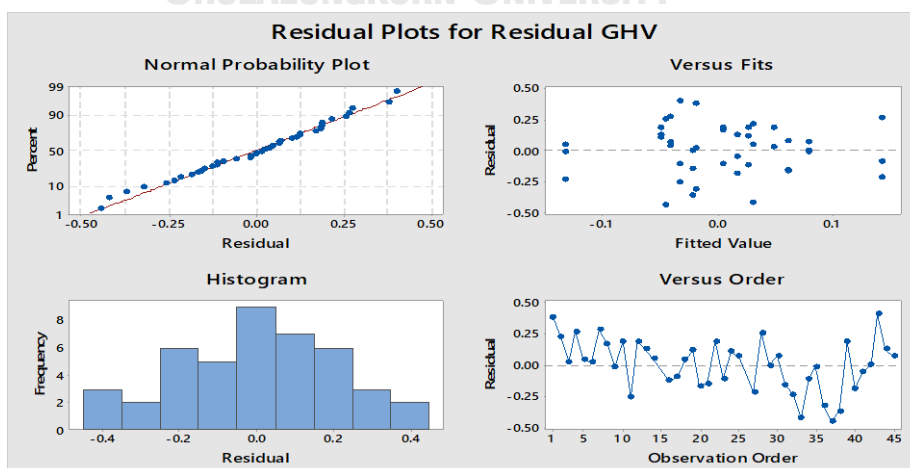
วิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน (Residual Analysis) ความคลาดเคลื่อน หมายถึง ค่าความต่างระหว่างข้อมูลที่เก็บมาได้จริง กับค่าที่คำนวณได้จากสมการถดถอย ซึ่งการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนจะแบ่งตามสมมติฐาน ดังนี้

สมมติฐานของข้อมูลมีการแจกแจงปกติ สมมูลกับค่าความคลาดเคลื่อนต้องมีการแจกแจงแบบปกติสามารถตรวจสอบได้ด้วยการนำค่าความคลาดเคลื่อนมาทำ Normal Probability Plot เมื่อพิจารณาจากกราฟ จุดที่เขียนอยู่บนกราฟส่วนใหญ่มีการกระจายตัวอยู่บนเส้นตรง จึงสรุปได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวแบบปกติ ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงการกระจายตัวของ residual ของค่าความร้อนชีวมวลอัดเม็ด

สมมติฐานของค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน ภายใต้สมมติฐานที่ว่า ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อน มีค่าเท่ากับศูนย์ และมีความแปรปรวนเท่ากับค่าคงที่ ถ้าหากแบบจำลองการถดถอยมีความเหมาะสมกับข้อมูลแล้ว ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นต้องไม่เกิดรูปแบบใดๆ ตรวจสอบได้จากการพล็อตค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) เทียบกับค่าที่คำนวณได้จากสมการถดถอย

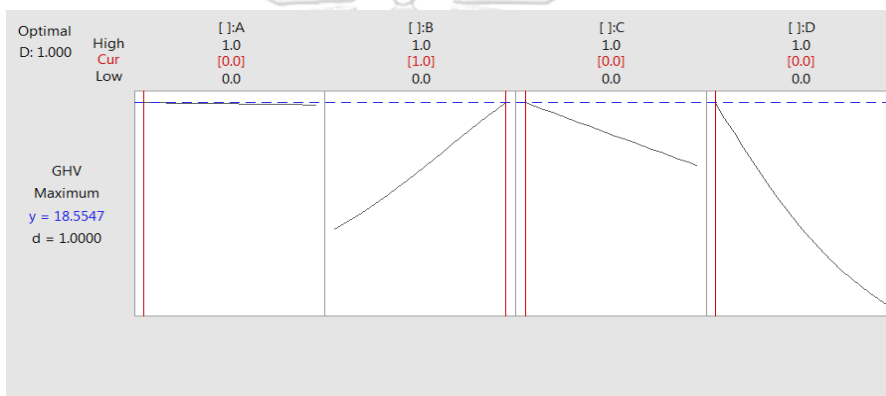


รูปที่ 4.7 กราฟการกระจายตัว Residual และค่า Fitted value ของค่าความร้อน

สมมติฐานของความเป็นอิสระภายใต้สมมติฐานว่า ค่าความคลาดเคลื่อนแต่ละเป็นอิสระต่อกัน ตรวจสอบได้จากการพล็อตค่าความคลาดเคลื่อน ซึ่งค่า Standadize Residual ที่ใช้ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานที่คำนวณจากข้อมูลทุกตัว ลักษณะการกระจายของกราฟต้องไม่มีแนวโน้มหรือรูปแบบ จึงจะเป็นแสดงว่าข้อมูลแต่ละค่ามีความเป็นอิสระต่อกัน และไม่ขึ้นอยู่กับลำดับการเก็บข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 4.7

การหาระดับที่ดีที่สุดของค่าความร้อนชีวมวลอัดเม็ด

สมการถดถอยมีประโยชน์เพื่อใช้การทำนายผลตอบ โดยผลตอบในการหาระดับที่ดีที่สุดคือค่าความร้อนชีวมวลอัดเม็ดสูงที่สุด ได้แก่ การผลิตชีวมวลจากยูกาลิปตัส 100% ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 การหาระดับที่ดีที่สุดของค่าความร้อนชีวมวลอัดเม็ด

4.3.3 การประเมินผลต่อค่า VOCs

ค่าปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่าย VOCs (%) แสดงในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.12 ค่าปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่าย VOCs (%)

ลำดับ	ส่วนผสม	ประเภท	องค์ประกอบ				VOCs (%)
			กระถิน (A)	ยูคา ลิปตัส (B)	เกลบ (C)	เถ้าขาน อ้อย (D)	
1	Pure	Vertex	1	0	0	0	76.76
2	Pure	Vertex	0	1	0	0	77.02
3	Pure	Vertex	0	0	1	0	59.03
4	Pure	Vertex	0	0	0	1	14.31
5	Binary	Edge Centroid	0	0	0.5	0.5	29.28
6	Binary	Edge Centroid	0	0.5	0	0.5	35.16
7	Binary	Edge Centroid	0	0.5	0.5	0	52.07
8	Binary	Edge Centroid	0.5	0	0	0.5	41.49
9	Binary	Edge Centroid	0.5	0	0.5	0	58.17
10	Binary	Edge Centroid	0.5	0.5	0	0	77.00
11	Ternary	Face Centroid	0	1/3	1/3	1/3	36.48
12	Ternary	Face Centroid	1/3	0	1/3	1/3	35.62
13	Ternary	Face Centroid	1/3	1/3	0	1/3	36.04
14	Ternary	Face Centroid	1/3	1/3	1/3	0	64.36
15	All	Overall Centroid	1/4	1/4	1/4	1/4	37.24

ความมีอิทธิพลของแต่ละส่วนผสม

นำผลการทดลองมาวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ประมวลผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ โดยเลือกการนำเข้าตัวแปรเข้าสมการถดถอยพหุคูณ (Regression Analysis) แบบ Backward Elimination โดยใช้แบบจำลองรูปแบบ Special Cubic พบว่าตัวแปรที่สามารถนำมาคำนวณหาสมการถดถอย อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 และมีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R - Square) เท่ากับ 99.64% ดังแสดงในตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 การวิเคราะห์สมการถดถอยของปริมาณ VOCs

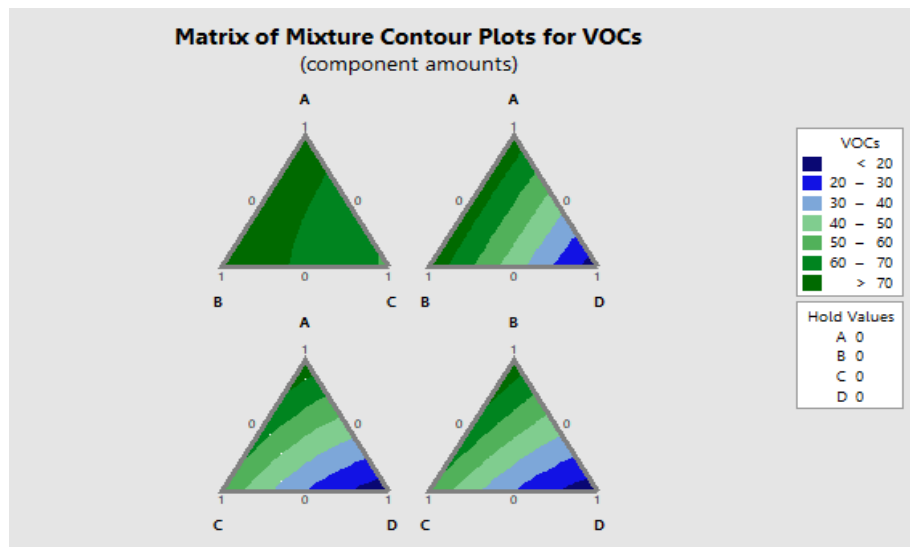
Estimated Regression Coefficients for VOCs (component proportions)						
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF	
A	76.838	0.689	*	*	1.79	
B	77.058	0.685	*	*	1.77	
C	58.964	0.751	*	*	2.13	
D	14.244	0.751	*	*	2.13	
A*C	-38.31	3.63	-10.54	0	2.11	
A*D	-15.6	3.63	-4.29	0	2.11	
B*C	-62.41	3.4	-18.34	0	1.85	
B*D	-40.58	3.4	-11.93	0	1.85	
C*D	-27.93	3.45	-8.09	0	1.91	
A*B*C	110.1	22.9	4.81	0	1.48	
A*B*D	-385.6	22.9	-16.86	0	1.48	
A*C*D	-157	24.4	-6.44	0	1.69	
Model Summary						
	S	R-sq	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)	
	1.30683	99.64%	99.52%	104.635	99.34%	
Analysis of Variance for VOCs (component proportions)						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	11	15739	15739	1430.82	837.82	0

ตารางที่ 4.13 การวิเคราะห์สมการถดถอยของปริมาณ VOCs (ต่อ)

Estimated Regression Coefficients for VOCs (component proportions)						
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF	
Linear	3	13529.1	8885.1	2961.69	1734.22	0
Quadratic	5	1644.5	978.9	195.77	114.64	0
A*C	1	193.9	189.7	189.7	111.08	0
A*D	1	255.2	31.5	31.47	18.43	0
B*C	1	427.9	574.6	574.65	336.49	0
B*D	1	554.3	243	242.99	142.28	0
C*D	1	213.2	111.8	111.8	65.47	0
Special Cubic	3	565.3	565.3	188.44	110.34	0
A*B*C	1	15.2	39.6	39.57	23.17	0
A*B*D	1	479.4	485.7	485.69	284.4	0
A*C*D	1	70.8	70.8	70.78	41.44	0
Residual Error	33	56.4	56.4	1.71		
Lack-of-Fit	3	10.8	10.8	3.62	2.38	0.089
Pure Error	30	45.5	45.5	1.52		
Total	44	15795.3				

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ได้ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนของส่วนผสมต่างๆ ดังตารางที่ และพบว่า ค่า Lack - of -fit มีค่า 0.089 ซึ่งมีค่ามากกว่าค่า p-value ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่ารูปแบบสมการที่ได้มีความเหมาะสมเพียงพอในการนำมาพยากรณ์ค่าความร้อนของชีวมวลอัดเม็ด



รูปที่ 4.9 Mixture design ของปริมาณ VOCs

สมการถดถอยเพื่อทำนายค่าปริมาณ VOCs

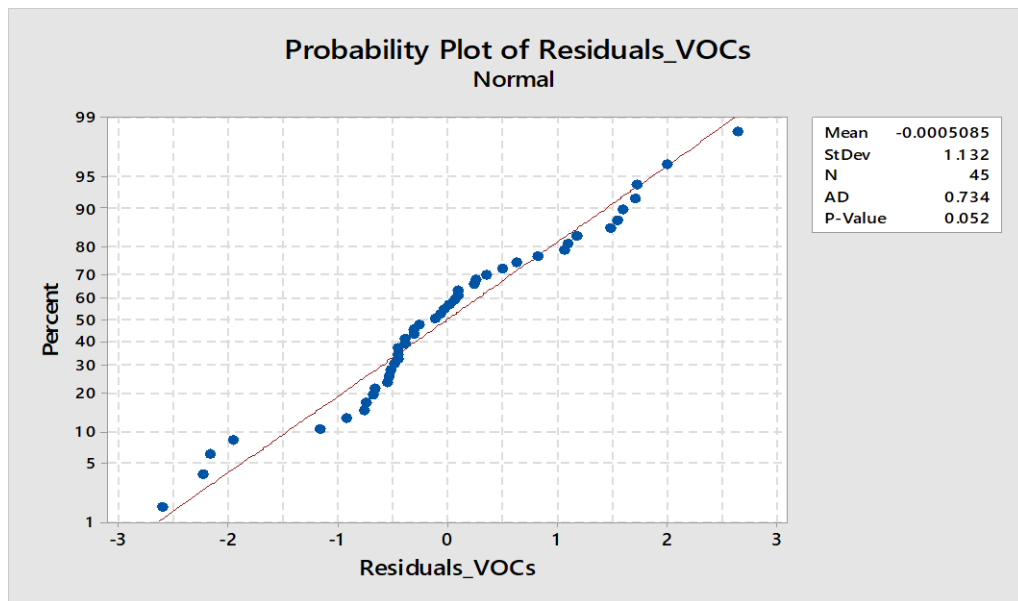
$$y(\text{VOCs}) = 76.838 \cdot A + 77.058 \cdot B + 58.964 \cdot C + 14.244 \cdot D - 38.31 \cdot A \cdot C - 15.6 \cdot A \cdot D - 62.41 \cdot B \cdot C - 40.58 \cdot B \cdot D - 27.93 \cdot C \cdot D + 110.1 \cdot A \cdot B \cdot C - 385.6 \cdot A \cdot B \cdot D - 157 \cdot A \cdot C \cdot D$$

โดยมีสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ $R^2 = 99.64\%$

ตรวจสอบความพอเพียงของตัวแบบ

วิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน (Residual Analysis) ความคลาดเคลื่อน หมายถึง ค่าความต่างระหว่างข้อมูลที่เก็บมาได้จริง กับค่าที่คำนวณได้จากสมการถดถอย ซึ่งการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนจะแบ่งตามสมมติฐาน ดังนี้

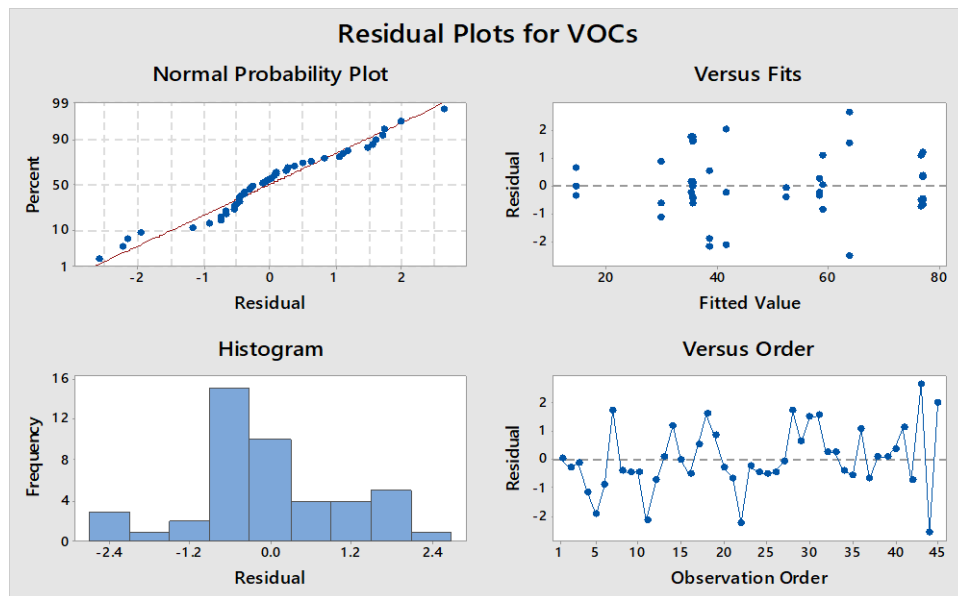
สมมติฐานของข้อมูลมีการแจกแจงปกติ สมมูลกับค่าความคลาดเคลื่อนต้องมีการแจกแจงแบบปกติสามารถตรวจสอบได้ด้วยการนำค่าความคลาดเคลื่อนมาทำ Normal Probability Plot เมื่อพิจารณาจากกราฟ จุดที่เขียนอยู่บนกราฟส่วนใหญ่มีการกระจายตัวอยู่บนเส้นตรง จึงสรุปได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวแบบปกติ ดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงการกระจายตัวของ residual ของปริมาณ VOCs

สมมติฐานของค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน ภายใต้สมมติฐานที่ว่า ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อน มีค่าเท่ากับศูนย์ และมีความแปรปรวนเท่ากับค่าคงที่ ถ้าหากแบบจำลองการถดถอยมีความเหมาะสมกับข้อมูลแล้ว ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นต้องไม่เกิดรูปแบบใดๆ ตรวจสอบได้จากการพล็อตค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) เทียบกับค่าที่คำนวณได้จากสมการถดถอย

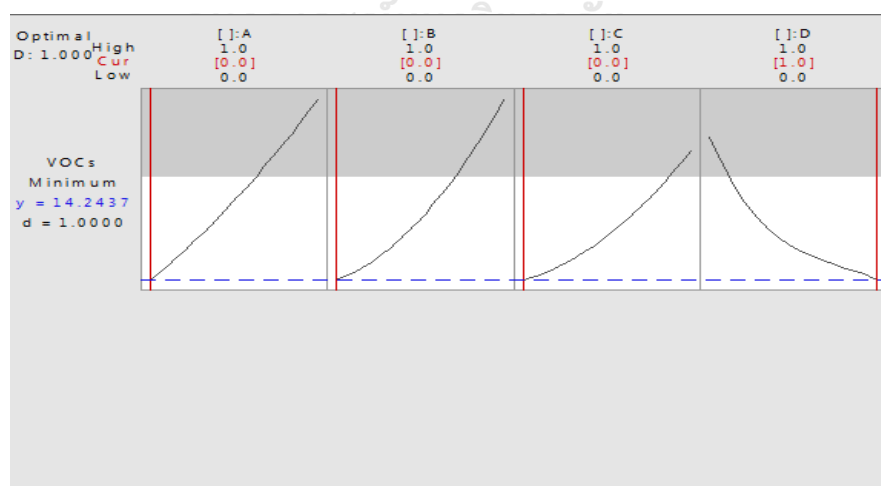
สมมติฐานของความเป็นอิสระภายใต้สมมติฐานว่า ค่าความคลาดเคลื่อนแต่ละเป็นอิสระต่อกัน ตรวจสอบได้จากการพล็อตค่าความคลาดเคลื่อน ซึ่งค่า Standadize Residual ที่ใช้ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานที่คำนวณจากข้อมูลทุกตัว ลักษณะการกระจายของกราฟต้องไม่มีแนวโน้มหรือรูปแบบ จึงจะเป็นแสดงว่าข้อมูลแต่ละค่ามีความเป็นอิสระต่อกัน และไม่ขึ้นอยู่กับลำดับการเก็บข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 กราฟการกระจายตัว Residual และค่า Fitted value ของปริมาณ VOCs

การหาระดับที่ดีที่สุดของปริมาณ VOCs

สมการถดถอยมีประโยชน์เพื่อใช้การทำนายผลตอบ โดยผลตอบในการหาระดับที่ดีที่สุดในการหาปริมาณ VOCs คือปริมาณ VOCs น้อยที่สุด ได้แก่ การผลิตชีวมวลจากเห็ดขานอ้อย 100% ดังแสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 การหาระดับที่ต่ำที่สุดของค่าความร้อนชีวมวลอัดเม็ด

การพิจารณาสมการถดถอยที่ได้

เมื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรต้นทุนการผลิต ค่าความร้อนชีวมวลอัดเม็ด และปริมาณ VOCs โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ประมวลผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ โดยเลือกการนำเข้าตัวแปรเข้าสมการถดถอยพหุคูณ (Regression Analysis) แบบ Backward Elimination โดยใช้แบบจำลองรูปแบบ Special Cubic พบว่ามีตัวแปรที่สามารถนำมาคำนวณหาสมการถดถอย อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 และมีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R - Square) มากกว่า 99% อีกทั้งมีค่า lack-of-fit มากกว่า 0.05 แสดงว่าสมการที่ได้มีความเหมาะสมเพียงพอในการพยากรณ์ค่าตัวแปรต่างๆ ดังกล่าว

ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาค่า T - Value และ P - Value ที่ไม่ปรากฏค่า (ปรากฏเป็นสัญลักษณ์ *) เนื่องจากในโปรแกรม MINITAB จะกำหนดให้แสดงค่าดังกล่าว โดยที่ตัวแปรใน Linear term ได้แก่ A (กระถิน) B (ยูคาลิปตัส) C (แกลบ) และ D (เถาขานอ้อย) ดังกล่าวอยู่ในสมการเชิงเส้น (Linear term) โดยที่ สมมติฐาน ของสมการเชิงเส้นคือ $H_0 : \beta_i = 0$ ซึ่งค่า $\bar{y} = 0$ แต่สำหรับการออกแบบแบบ Mixture design $\hat{y} = \bar{y}$ ซึ่งโดยปกติแล้วสมการเชิงเส้นจะคงอยู่ในรูปแบบการทดลองแบบส่วนผสมตามแบบของ Scheff'e ดังนั้น ค่า T - Value และ P - Value จึงไม่ปรากฏค่า (Experimental Design for Formulation 2005 Wendell F. Smith) โดยพบว่ามีการวิจัยที่มีค่า T - Value และ P - Value ไม่ปรากฏค่าเช่นกัน (สมศักดิ์ แก้วพลอย, 2557) โดยเมื่อทดสอบสมมติฐานของข้อมูลมีการแจกแจงปกติ สมมูลกับค่าความคลาดเคลื่อนต้องมีการแจกแจงแบบปกติ สามารถตรวจสอบได้ด้วยการนำค่าความคลาดเคลื่อนมาทำ Normal Probability Plot พบว่า ข้อมูลของทั้งสามตัวแปรมีการกระจายตัวแบบปกติ ดังนั้น แสดงว่ารูปแบบสมการที่ได้มีความเหมาะสมกับข้อมูล

นอกจากนั้น ในการวิเคราะห์แปรปรวนของข้อมูลสามารถพิจารณาได้ค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน ซึ่งเป็นค่าร้อยละส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเทียบกับค่าเฉลี่ยของข้อมูล ดังนี้

สัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน (*Coefficient of Variation: C.V.*)

$$= \frac{\text{ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard of deviation: S.D.)}}{\text{ค่าเฉลี่ย (mean: } \bar{x} \text{)}}$$

ตารางที่ 4.14 สัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน (Coefficient of Variation:C.V.) ของข้อมูล

ตัวอย่าง	ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ ในขั้นตอนการอัดเม็ด			GHV			VOCs		
	ค่าเฉลี่ย	S.D.	C.V.	ค่าเฉลี่ย	S.D.	C.V.	ค่าเฉลี่ย	S.D.	C.V.
กระถิน 100	106.99	1.98	2%	18.44	0.47	3%	76.76	1.00	1%
ยูคา 100	112.00	3.44	3%	18.68	0.25	1%	77.02	1.06	1%
แกลบ 100	107.97	3.87	4%	14.30	0.04	0%	59.03	1.01	2%
เจ้าชานอ้อย 100	149.72	17.15	11%	4.57	0.35	8%	14.31	0.52	4%
กระถิน 50									
ยูคา 50	189.65	13.46	7%	18.39	0.42	2%	77.00	0.46	1%
กระถิน 50									
แกลบ 50	147.63	14.29	10%	15.30	0.16	1%	58.17	0.34	1%
กระถิน 50									
เจ้าชานอ้อย 50	124.75	7.79	6%	10.11	0.35	3%	41.49	2.08	5%
ยูคา 50									
แกลบ 50	138.95	5.06	4%	16.18	0.15	1%	52.07	0.19	0%
ยูคา 50 เจ้า ชานอ้อย 50	160.85	3.07	2%	9.87	0.14	1%	35.16	0.39	1%
แกลบ 50									
เจ้าชานอ้อย 50	151.41	1.24	1%	8.91	0.33	4%	29.28	1.04	4%
กระถิน 1/3									
ยูคา 1/3									
แกลบ 1/3	151.64	12.56	8%	17.20	0.04	0%	64.36	2.76	4%
กระถิน 1/3									
ยูคา 1/3									
เจ้าชานอ้อย 1/3	112.91	3.06	3%	10.08	0.16	2%	36.04	0.89	2%

ตารางที่ 4.14 สัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน (Coefficient of Variation:C.V.) ของข้อมูล (ต่อ)

ตัวอย่าง	ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ ในขั้นตอนการอัดเม็ด			GHV			VOCs		
	ค่าเฉลี่ย	S.D.	C.V.	ค่าเฉลี่ย	S.D.	C.V.	ค่าเฉลี่ย	S.D.	C.V.
กระถิน 1/3 ยูคา 1/3 เถาขานอ้อย 1/3	112.91	3.06	3%	10.08	0.16	2%	36.04	0.89	2%
กระถิน 1/3 แกลบ 1/3 เถาขานอ้อย 1/3	105.87	5.37	5%	9.92	0.17	2%	35.62	1.05	3%
ยูคา 1/3 แกลบ 1/3 เถาขานอ้อย 1/3	161.19	14.93	9%	12.16	0.13	1%	36.48	1.27	3%
กระถิน 1/4 ยูคา 1/4 แกลบ 1/4 เถาขานอ้อย 1/4	148.20	1.87	1%	11.47	0.19	2%	37.24	1.51	4%

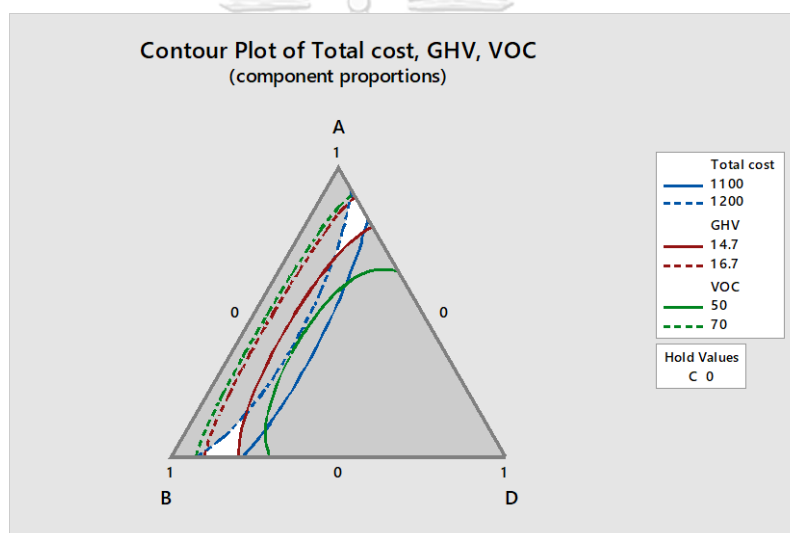
เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวนพบว่าไม่ไม่ถึง 10% แสดงว่าข้อมูลมีค่าเบี่ยงเบนน้อย เป็นที่ยอมรับได้

4.4 การประเมินความเหมาะสมของวัตถุดิบตามแนวคิดผลิตภาพสีเขียว

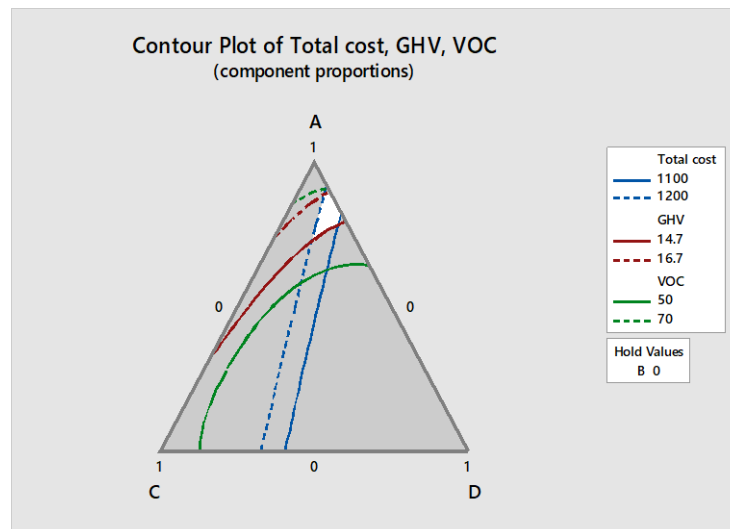
เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าตัวแปรตอบสนองต่างๆ ที่กำหนดตามแนวคิดผลิตภาพสีเขียว ทั้ง 3 ตัวแปร ได้แก่ ด้านต้นทุนการผลิต ด้านคุณภาพโดย ศึกษาคุณสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด ได้แก่ ค่าความร้อน ซึ่งอ้างอิงจากค่ามาตรฐานชีวมวลอัดเม็ดของประเทศไทย ซึ่งมีค่าอยู่ที่ 14.7 – 16.7 MJ/Kg และด้านสิ่งแวดล้อมจากปริมาณ VOCs พบว่าค่าตัวแปรต่างๆ ที่เป็นไปได้ตามแนวคิดผลิตภาพสีเขียว จากการทำกราฟคอนทัวร์ซ้อนทับ (Overlaid Contour Plot) ซึ่งจะเกิดเป็นบริเวณพื้นที่สีขาว ซึ่งเป็นพื้นที่ที่การผลิตตัวอย่างชีวมวลอัดเม็ดนั้น เป็นไปได้ทั้ง 3 ค่า ตามแนวคิดผลิตภาพสีเขียว ดังตารางที่ 4.13 และรูปที่ 4.13 – 4.14

ตารางที่ 4.15 ค่าคุณสมบัติของชีวมวลอัดเม็ดตามแนวคิด ผลิตภาพสีเขียว

หัวข้อการพิจารณา	ค่าที่กำหนด	
	ต่ำสุด	สูงสุด
ต้นทุนการผลิต (ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในการผลิตและราคาวัตถุดิบ: บาทต่อตัน) (Total Cost/Ton)	1100	1200
ค่าความร้อนชีวมวลอัดเม็ด (MJ/kg)	14.7	16.7
ปริมาณ VOCs (ร้อยละ)	50	70



รูปที่ 4.13 กราฟคอนทัวร์ซ้อนทับทั้ง 3 ค่าตัวแปรตามแนวคิดผลิตภาพสีเขียวของชีวมวล กระถิน ยูคาลิปตัส และเถ้าขาน้อย



รูปที่ 4.14 กราฟคอนทัวร์ซ้อนทับทั้ง 3 ค่าตัวแปรตามแนวคิดผลิตภาพสีเขียวของชีวมวลกระถิน แกลบ และเถ้าชานอ้อย

เมื่อนำสมการถดถอย มาวิเคราะห์ เพื่อหาค่าตัวแปรทั้ง 3 ตามแนวคิดผลิตภาพสีเขียว พบว่าได้ค่าตัวแปรดังแสดงในตาราง ที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 ค่าตัวแปรตอบสนอง 3 ตัวแปรจากสมการถดถอย

ตัวอย่าง ที่	อัตราส่วนชีวมวล				ต้นทุนการ ผลิต (ราคา พลังงานไฟฟ้า ในการผลิต + ราคาวัตถุดิบ) บาท/ตัน	ค่าความ ร้อน (MJ/kg)	ปริมาณ VOCs (ร้อยละ)
	กระถิน	ยูคาลิปตัส	แกลบ	เถ้าชาน อ้อย			
1	1.00	0.00	0.00	0.00	1282.70	18.40	76.84
2	0.00	1.00	0.00	0.00	1251.40	18.56	77.06
3	0.00	0.00	1.00	0.00	1620.90	14.21	58.96
4	0.00	0.00	0.00	1.00	336.10	4.56	14.24

ตารางที่ 4.16 ค่าตัวแปรตอบสนอง 3 ตัวแปรจากสมการถดถอย (ต่อ)

ตัวอย่าง ที่	อัตราส่วนชีวมวล				ต้นทุนการ ผลิต (ราคา พลังงานไฟฟ้า ในการผลิต + ราคาวัตถุดิบ) บาท/ตัน	ค่าความ ร้อน (MJ/kg)	ปริมาณ VOCs (ร้อยละ)
	กระถิน	ยูคาลิปตัส	แกลบ	เถ้าขาน อ้อย			
5	0.00	0.00	0.50	0.50	978.50	8.93	29.62
6	0.00	0.50	0.00	0.50	859.00	9.90	35.51
7	0.00	0.50	0.50	0.00	1436.15	16.38	52.41
8	0.50	0.00	0.00	0.50	809.40	10.13	41.64
9	0.50	0.00	0.50	0.00	1451.80	15.32	58.32
10	0.50	0.50	0.00	0.00	1476.73	18.48	76.95
11	0.00	0.33	0.33	0.33	1098.47	12.08	35.54
12	0.33	0.00	0.33	0.33	1079.90	9.84	35.11
13	0.33	0.33	0.00	0.33	1002.26	10.00	35.52
14	0.33	0.33	0.33	0.00	1446.89	17.12	63.84
15	0.25	0.25	0.25	0.25	1145.96	11.66	38.47
16	0.8			0.2	1093.38	14.77	61.82
17		0.8		0.2	1110.10	14.69	58.00
18		0.7	0.15	0.15	1196.94	15.31	53.48

ดังนั้น เมื่อพิจารณารูปแบบการผสมที่เป็นไปตามแนวคิดผลิตภาพสีเขียวที่เป็นไปได้ คือ มีต้นทุนการผลิต 1,100 – 1,200 บาท /ตัน ค่าความร้อนชีวมวลอัดเม็ด 14.7 – 16.7 MJ/kg และ ปริมาณ VOCs ร้อยละ 50 – 70 พบว่า มีรูปแบบการผลิตที่เหมาะสมตามแนวคิดผลิตภาพสีเขียวซึ่งมี 3 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบที่ 1 (Scenario 1) กระจิน 80 : เล้าซานอ้อย 20 รูปแบบที่ 2 (Scenario 2) ยูคาลิปตัส 80: เล้าซานอ้อย 20 และรูปแบบที่ 3 (Scenario 3) ยูคาลิปตัส 70 : แกลบ 15 : เล้าซานอ้อย 15

4.5 การพิจารณาค่าความร้อนชีวมวลต่อต้นทุนการผลิต (MJ/บาท/ตัน)

ทำการวิเคราะห์หาค่าความร้อนชีวมวลต่อต้นทุนการผลิต (MJ/บาท/ตัน) ของชีวมวลอัดเม็ด ตัวอย่างที่ได้จากผลงานวิจัย เปรียบเทียบกับร่างมาตรฐานชีวมวลอัดเม็ดของประเทศไทย และเกรดส่งออก พบว่าค่าความร้อนชีวมวลอัดเม็ดมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ต้นทุนการผลิต (บาท/ตัน) ของ ผลงานวิจัยรูปแบบชีวมวลอัดเม็ด 3 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบที่ 1 (Scenario 1) กระจิน 80 : เล้าซานอ้อย 20 รูปแบบที่ 2 (Scenario 2) ยูคาลิปตัส 80: เล้าซานอ้อย 20 และรูปแบบที่ 3 (Scenario 3) ยูคาลิปตัส 70 : แกลบ 15 : เล้าซานอ้อย 15 จะต่ำกว่าของมาตรฐานและเกรดส่งออก เนื่องจาก สัดส่วนของชีวมวลประเภทเนื้อไม้ ได้แก่ กระจิน และยูคาลิปตัสที่น้อยกว่า ดังตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 ค่าความร้อนชีวมวลต่อต้นทุนการผลิต (MJ/บาท/ตัน)

คุณภาพชีวมวลอัดเม็ด	ค่าความร้อนชีวมวล(MJ/kg)	ต้นทุนการผลิต (บาท/ตัน)	ค่าความร้อนชีวมวลต่อต้นทุนการผลิต (MJ/บาท/ตัน)
ผลงานวิจัยที่ได้	14.69 – 16.7	1093.38 - 1196.94	12.80 - 13.44
มาตรฐาน	14.65 – 16.75	1266.78	11.56 – 13.22
เกรดส่งออก	16.9	1266.78	13.34

4.6 การวิเคราะห์ความไวเมื่อราคาวัตถุดิบชีวมวลมีการเปลี่ยนแปลง (Sensitivity Analysis)

จากการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตชีวมวลอัดเม็ด ซึ่งพิจารณาจากต้นทุนราคาไฟฟ้าจากการใช้พลังงานไฟฟ้าในกระบวนการผลิตขั้นตอนต่างๆ และต้นทุนราคาวัตถุดิบ พบว่า ต้นทุนราคาวัตถุดิบคิดเป็น % ของต้นทุนทั้งหมด ดังนั้น เมื่อพิจารณาต้นทุนทั้งหมดในการผลิตจากรูปแบบการผลิตที่เหมาะสมตามแนวคิดผลิตภาพสีเขียวซึ่งมี 3 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบที่ 1 (Scenario 1) ภาระเงิน 80 : เจ้าชานอ้อย 20 รูปแบบที่ 2 (Scenario 2) ยูคาลิปตัส 80 : เจ้าชานอ้อย 20 และรูปแบบที่ 3 (Scenario 3) ยูคาลิปตัส 70 : แกลบ 15 : เจ้าชานอ้อย 15 เมื่อกำหนดให้ราคาไฟฟ้าคงที่ แต่ราคาวัตถุดิบชีวมวลมีการเปลี่ยนแปลง ได้แก่ ราคาภาระเงินยูคาลิปตัส แกลบ และเจ้าชานอ้อย โดยพิจารณากรณีที่ราคาวัตถุดิบมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น 100% และลดลง 50% ซึ่งพบว่ามิผลกระทบต่อรูปแบบการผลิตชีวมวลต่างๆ ดังนี้

ตารางที่ 4.18 การเปลี่ยนแปลงราคาวัตถุดิบ ภาระเงินและเจ้าชานอ้อย

การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของราคาวัตถุดิบต่อต้นทุนการผลิต (บาท/ตัน)	การเปลี่ยนแปลงราคาภาระเงิน					
		% ต้นทุนการผลิตที่เปลี่ยน	0%	% ต้นทุนการผลิตที่เปลี่ยน	100%	% ต้นทุนการผลิตที่เปลี่ยน
การเปลี่ยนแปลงราคาเจ้าชานอ้อย	-50%	-36.13	1088.38	-0.46	1868.38	142.22
	698.38				8	
	0%	-35.67	1093.38	0	1873.38	142.68
	703.38				8	
	100%	-34.75	1103.38	0.91	1883.38	143.59
	713.38				8	

ตารางที่ 4.19 การเปลี่ยนแปลงราคาวัตถุดิบ ยูคาลิปตัสและเถาขานอ้อย

การวิเคราะห์ ความอ่อนไหว ของราคาวัตถุดิบ ต่อต้นทุนการผลิต (บาท/ตัน)	การเปลี่ยนแปลงราคา ยูคาลิปตัส					
		% ต้นทุน การผลิต ที่เปลี่ยน	0%	% ต้นทุน การผลิต ที่เปลี่ยน	100%	% ต้นทุน การผลิต ที่เปลี่ยน
การเปลี่ยนแปลง ราคาเถาขานอ้อย	-50%					
-50%	715.1	-35.58	1105.1	-0.45	1885.1	69.81
0%	720.1	-35.13	1110.1	0	1890.1	70.26
100%	730.1	-34.23	1120.1	0.90	1900.1	71.16

ตารางที่ 4.20 การเปลี่ยนแปลงราคาวัตถุดิบ ยูคาลิปตัสและแกลบ

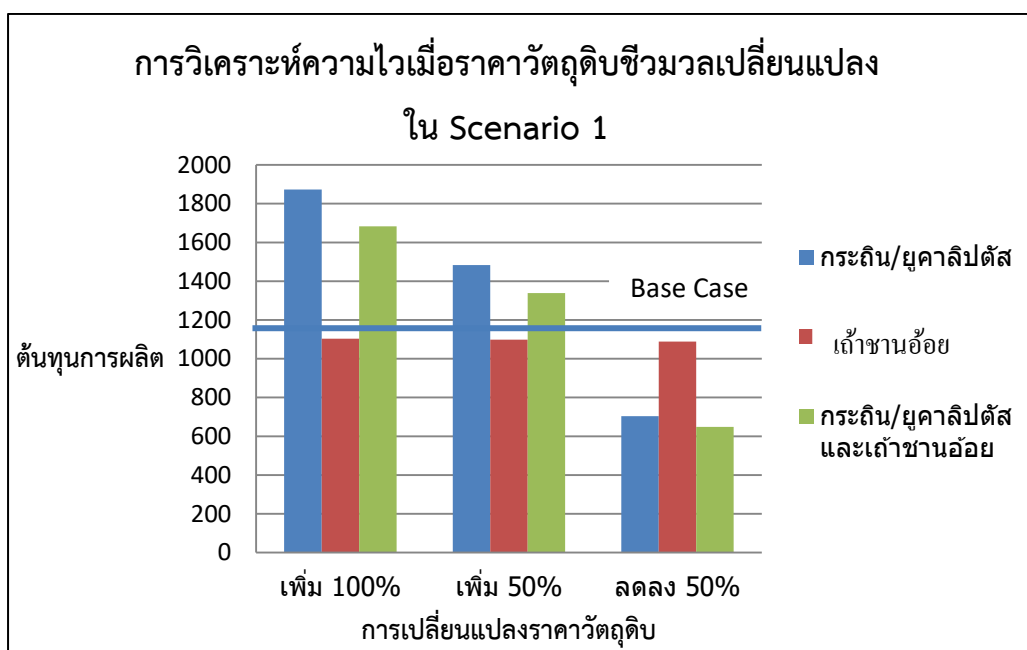
การวิเคราะห์ ความอ่อนไหว ของราคาวัตถุดิบ ต่อต้นทุนการผลิต (บาท/ตัน)	การเปลี่ยนแปลงราคา ยูคาลิปตัส					
		% ต้นทุน การผลิต ที่เปลี่ยน	0%	% ต้นทุน การผลิต ที่เปลี่ยน	100%	% ต้นทุน การผลิต ที่เปลี่ยน
การเปลี่ยนแปลง ราคาแกลบ	-50%					
-50%	754.44	-41.20	1095.69	-8.46	1778.19	105.58
0%	855.69	-36.97	1196.94	0	1879.44	114.04
100%	1058.19	-28.51	1399.44	16.92	2081.94	130.96

ตารางที่ 4.21 การเปลี่ยนแปลงราคา ยูคาลิปตัสและเจ้าชานอ้อย

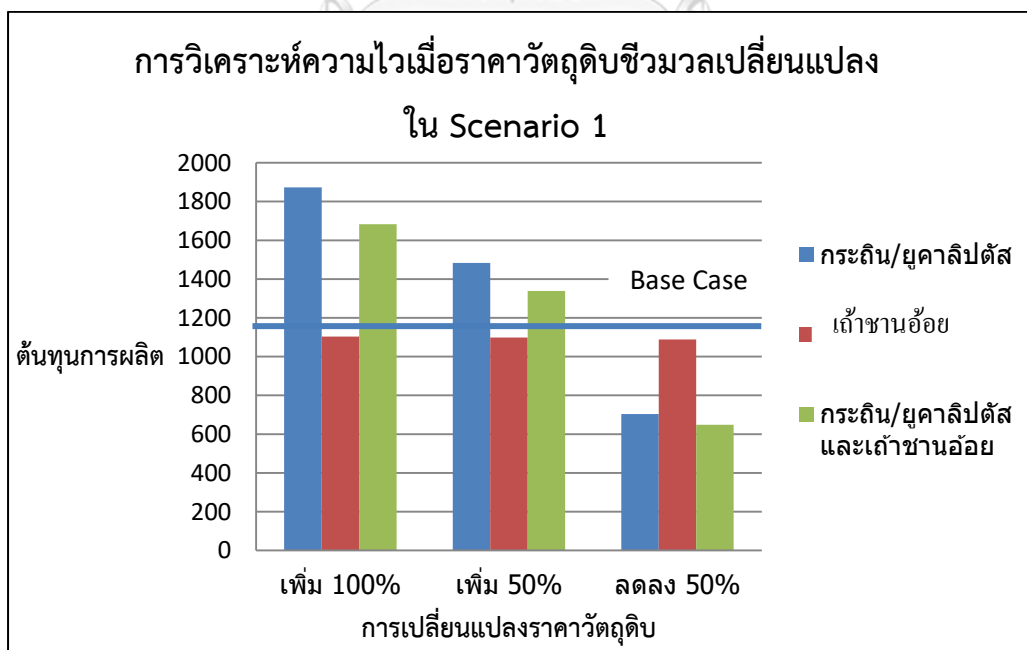
การวิเคราะห์ ความอ่อนไหว ของราคาวัตถุดิบ ต่อต้นทุนการผลิต (บาท/ตัน)	การเปลี่ยนแปลงราคา ยูคาลิปตัส						
	การเปลี่ยนแปลง ราคาเจ้าชานอ้อย		% ต้นทุน การผลิต ที่เปลี่ยน		% ต้นทุน การผลิต ที่เปลี่ยน		% ต้นทุน การผลิต ที่เปลี่ยน
	-50%			0%		100%	
	-50%	851.94	-28.82	1193.19	-0.31	1875.69	56.70
	0%	855.69	-28.51	1196.94	0	1879.44	57.02
	100%	863.19	-27.88	1204.44	0.63	1886.94	57.65

ตารางที่ 4.22 การเปลี่ยนแปลงราคา แกลบและเจ้าชานอ้อย

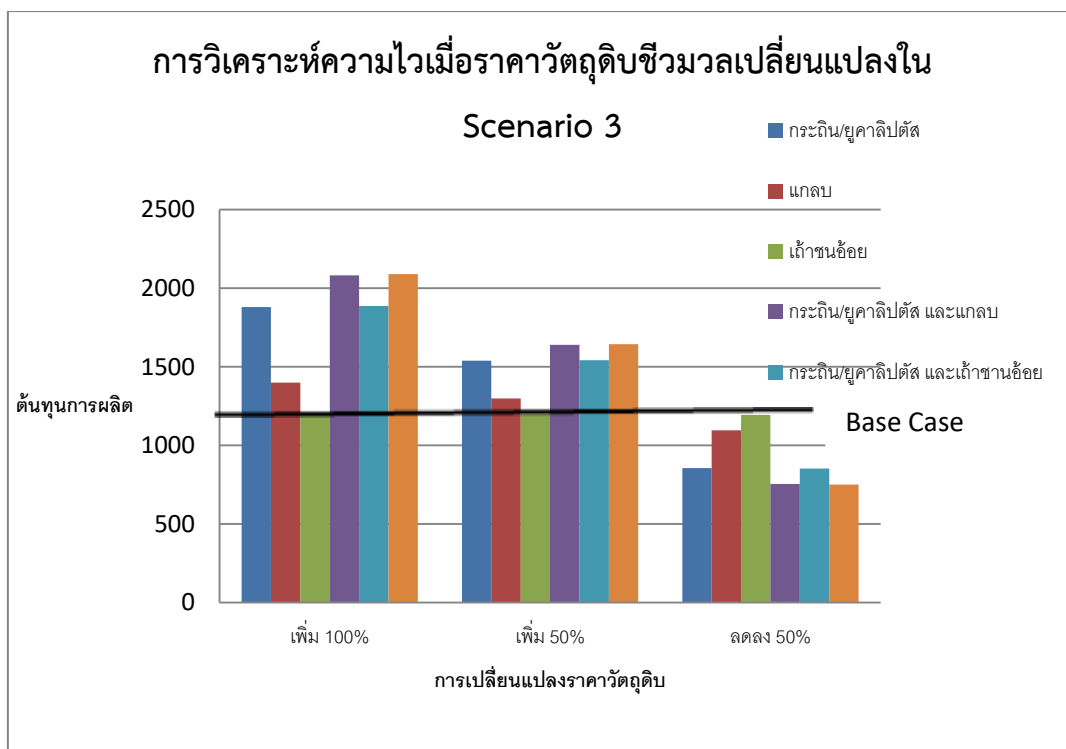
การวิเคราะห์ ความอ่อนไหว ของราคาวัตถุดิบ ต่อต้นทุนการ ผลิต(บาท/ตัน)	การเปลี่ยนแปลงราคา แกลบ						
	การเปลี่ยนแปลง ราคาเจ้าชานอ้อย		% ต้นทุน การผลิต ที่เปลี่ยน		% ต้นทุน การผลิต ที่เปลี่ยน		% ต้นทุน การผลิต ที่เปลี่ยน
	-50%			0%		100%	
	-50%	1091.94	-8.77	1193.19	16.60	1395.69	33.52
	0%	1095.69	-8.46	1196.94	16.92	1399.44	33.84
	100%	1103.19	-7.83	1204.44	17.54	1406.94	34.46



รูปที่ 4.15 การวิเคราะห์ความไวเมื่อราคาวัตถุดิบชีวมวลเปลี่ยนแปลงใน Scenario 1



รูปที่ 4.16 การวิเคราะห์ความไวเมื่อราคาวัตถุดิบชีวมวลเปลี่ยนแปลงใน Scenario 2



รูปที่ 4.17 การวิเคราะห์ความไวเมื่อราคาวัตถุดิบชีวมวลเปลี่ยนแปลงใน Scenario 3

- Scenario 1 กระถิน 80% ถั่วเขียว 20% และ Scenario 2 ยูคาลิปตัส 80% ถั่วเขียว 20%

เมื่อราคากระถิน/ยูคาลิปตัส เพิ่มขึ้น 100% ต้นทุนการผลิตรวมจะเพิ่มขึ้น 70.26 – 71.34 % และเมื่อราคากระถินเพิ่มขึ้น/ ลดลง 50% ต้นทุนการผลิตรวมจะเพิ่มขึ้น/ลดลง 35.13 – 35.67 % และเมื่อราคาถั่วเขียว เพิ่มขึ้น 100% ต้นทุนการผลิตรวมจะเพิ่มขึ้น 0.90 – 0.91% และเมื่อราคาถั่วเขียว เพิ่มขึ้น/ ลดลง 50% ต้นทุนการผลิตรวมจะเพิ่มขึ้น/ลดลง 0.45 – 0.46 %

- Scenario 3 ยูคาลิปตัส 70% แกลบ 15% ถั่วเขียว 15 %

เมื่อราคา ยูคาลิปตัส แกลบ และถั่วเขียว เพิ่มขึ้น 100% ต้นทุนการผลิตรวมจะเพิ่มขึ้น 57.02 % 16.92% และ 0.63% ตามลำดับ และเมื่อราคา ยูคาลิปตัส แกลบ และถั่วเขียว เพิ่มขึ้น/ ลดลง 50% ต้นทุนการผลิตรวมจะเพิ่มขึ้น/ลดลง 28.51% 8.46% และ 0.31 % ตามลำดับ

เมื่อพิจารณากรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงของราคาวัตถุดิบตั้งแต่ 2 ชนิด ขึ้นไป พร้อมกัน ดังนี้

กระถิน/ยูคาลิปตัส และแกลบ เพิ่มขึ้น 100 % ต้นทุนการผลิตรวมจะเพิ่มขึ้น 73.94 %

กระถิน/ยูคาลิปตัส และเถ้าขานอ้อย เพิ่มขึ้น 100 % ต้นทุนการผลิตรวมจะเพิ่มขึ้น

57.65%

กระถิน/ยูคาลิปตัส แกลบและเถ้าขานอ้อยเพิ่มขึ้น 50% ต้นทุนการผลิตรวมจะเพิ่มขึ้น 74.57 %

กระถิน/ยูคาลิปตัส และแกลบเพิ่มขึ้น /ลดลง 50 % ต้นทุนการผลิตรวมจะเพิ่มขึ้น/ลดลง

36.97%

กระถิน/ยูคาลิปตัส และเถ้าขานอ้อย เพิ่มขึ้น/ลดลง 50 % ต้นทุนการผลิตรวมจะเพิ่มขึ้น/

ลดลง 28.82%

กระถิน/ยูคาลิปตัส แกลบและเถ้าขานอ้อยเพิ่มขึ้น/ลดลง ลดลง 50% ต้นทุนการผลิตรวมจะ

เพิ่มขึ้น/ลดลง 37.28 %

ดังนั้น เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของราคาวัตถุดิบ จะพบว่า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของราคาดิบกระถินและยูคาลิปตัส จะส่งผลต่อต้นทุนรวมการผลิตมากที่สุด รองลงมาคือการเปลี่ยนแปลงราคาแกลบ และการเปลี่ยนแปลงราคาวัตถุดิบเถ้าขานอ้อย จะส่งผลต่อต้นทุนรวมการผลิตน้อยที่สุด

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ศึกษาแนวทางการเพิ่มผลิตภาพสีเขียวในการผลิตชีวมวลอัดเม็ด โดยศึกษาใน 3 ประเด็นหลักของการเพิ่มผลิตภาพสีเขียวดังกล่าว ดังนี้

- ด้านต้นทุน ศึกษาปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในขั้นตอนการผลิตชีวมวลอัดเม็ด ได้แก่ ขั้นตอนการบดหยาบ ขั้นตอนการบดย่อย และขั้นตอนการอัดเม็ด
- ด้านคุณภาพ ศึกษาคุณสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด ได้แก่ ค่าความร้อน (High Heating Value: HHV)
- ด้านสิ่งแวดล้อม ศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากปริมาณสารอินทรีย์ระเหยของชีวมวลอัดเม็ด

โดยศึกษาการผลิตชีวมวลอัดเม็ดจากวัตถุดิบประเภทเนื้อไม้ ได้แก่ กระจินและยูคาลิปตัสและวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ แกลบและเถ้าชานอ้อย โดยการใช้เทคนิคการออกแบบส่วนผสม (Mixture Design) ในการหาส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัตถุดิบชีวมวล 4 ชนิด ได้แก่ เศษไม้กระจิน เศษไม้ยูคาลิปตัส แกลบ และเถ้าชานอ้อย โดยการออกแบบแบบซิมเพล็กซ์เซนทรอยด์ (Simplex Centroid Design) และวิเคราะห์ผลโดยวิธีวิเคราะห์ถดถอย (Regression Analysis) โดยส่วนผสมทั้ง 4 ของชีวมวลอัดเม็ด ได้แก่ กระจิน (A) ยูคาลิปตัส (B) แกลบ (C) และเถ้าชานอ้อย (D) โดยตัวแปรการทดลอง คือปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ ค่าความร้อนและปริมาณ VOCs เพื่อประเมินความเหมาะสมของวัตถุดิบชีวมวลในการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด ดังนี้

5.1 ผลของสัดส่วนวัตถุดิบชีวมวลต่างที่มีต่อคุณสมบัติต่างๆ

5.2 การประเมินความเหมาะสมของวัตถุดิบชีวมวลตามแนวคิดผลิตภาพสีเขียว

5.1 ผลของสัดส่วนวัตถุดิบชีวมวลต่าง ที่มีต่อคุณสมบัติต่างๆ

5.1.1 ต้นทุนการผลิต

5.1.1.1 ปริมาณการใช้พลังงาน

พบว่า ในการผลิตชีวมวลอัดเม็ดจากกระจินและยูคาลิปตัส ซึ่งเป็น วัตถุดิบชีวมวลประเภทเนื้อไม้ จะมีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการผลิตสูง (139.23– 165.17 kWh / Ton) เนื่องจาก วัตถุดิบชีวมวลประเภทเนื้อไม้ จะต้องผ่านขั้นตอนการบดหยาบและขั้นตอนการบดย่อย ซึ่งจะทำให้มีปริมาณพลังงานไฟฟ้าในการผลิตมากขึ้น และหากเป็นการผลิตชีวมวลอัดเม็ดจากกระจินและยูคา

ลิปตัส อย่างละเท่ากัน (อัตราส่วน 50:50) (232.35 kWh / Ton) จะใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากขั้นตอนการอัดเม็ดระหว่าง กระจกและยูคาลิปตัสใช้พลังงานมากกว่าการผลิตชีวมวลอัดเม็ดจากกระจกและยูคาลิปตัสเพียงชนิดใดชนิดหนึ่ง ทั้งนี้อาจจะเนื่องจากความแตกต่างของลักษณะเนื้อไม้ และความชื้นของเนื้อไม้ที่ต่างกัน ทำให้ต้องใช้เวลาในการทำให้เกิดความร้อนที่เหมาะสมในการหลอมเนื้อไม้เพื่ออัดเป็นเม็ดมากขึ้น

สำหรับการผลิตชีวมวลอัดเม็ดจากวัตถุดิบประเภทของเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ แกลบ และเถ้าชานอ้อย พบว่า ชีวมวลอัดเม็ดจากแกลบอย่างเดียว (107.97 kWh / Ton) จะใช้พลังงานในการอัดเม็ดย่นกว่าเถ้าชานอ้อยเพียงอย่างเดียว (149.72 kWh / Ton) เนื่องจากแกลบมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ ซึ่งช่วยในการอัดเม็ดได้ดี ส่วนเถ้าชานอ้อยมีลักษณะเป็นเถ้าละเอียดและร่วน ทำให้ต้องใช้พลังงานมากในการหลอมให้เกิดเป็นเม็ดอัดได้ และเมื่อนำแกลบและเถ้าชานอ้อยมาผสมกันอย่างละเท่ากัน (อัตราส่วน 50:50) (151.41 kWh / Ton) พบว่าการใช้พลังงานจะอยู่ระหว่างการผลิตชีวมวลอัดเม็ดจากแกลบและเถ้าชานอ้อยเพียงชนิดเดียว

สำหรับการผลิตชีวมวลอัดเม็ดจากวัตถุดิบ 3 ชนิดอย่างละเท่ากัน (อัตราส่วน 0.33:0.33:0.33) พบว่า การผลิตชีวมวลอัดเม็ดจาก กระจก แกลบ เถ้าชานอ้อย (125.23 kWh / Ton) จะใช้พลังงานน้อยที่สุด และกระจก ยูคาลิปตัส แกลบ จะใช้พลังงานมากที่สุด (180.12 kWh / Ton)

และในการผลิตชีวมวลอัดเม็ดจากวัตถุดิบ 4 ชนิดอย่างละเท่ากัน (อัตราส่วน 0.25:0.25: 0.25:0.25) พบว่าการใช้พลังงานมีค่าค่อนข้างสูง (154.55 kWh / Ton) เนื่องจากความแตกต่างของลักษณะวัตถุดิบ แต่ละประเภท ทำให้ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าสูงในการทำให้เกิดการอัดเม็ด

5.1.1.2 ราคาวัตถุดิบ

ชีวมวลที่มีราคาสูงที่สุดคือแกลบ ซึ่งมีราคา รองลงมาคือเศษไม้กระจก และ ยูคาลิปตัส และเถ้าชานอ้อย มีราคาน้อยที่สุด

เมื่อพิจารณาต้นทุนการผลิตชีวมวลอัดเม็ดจากรูปแบบตัวอย่างชีวมวลอัดเม็ด จากการใช้ปริมาณไฟฟ้าในการผลิตและราคาวัตถุดิบชีวมวล พบว่าราคาชีวมวลอัดเม็ดเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อต้นทุนการผลิต โดยพบว่าการผลิตชีวมวลอัดเม็ดจากแกลบ 100% จะมีต้นทุนการผลิตมากที่สุด คือ 1620.90 บาท/ตัน รองลงมาคือ กระจิน 50% และยูคาลิปตัส 50% 1476.73 บาท/ตัน และการผลิตชีวมวลอัดเม็ดจากหญ้าอ้อย 100% จะมีต้นทุนการผลิตที่น้อยที่สุด 336.10 บาท/ตัน และพบว่าการมีส่วนผสมของหญ้าอ้อยในการผลิตชีวมวลอัดเม็ด จะทำให้มีต้นทุนการผลิตลดลง

5.1.2 ปริมาณค่าความร้อน

พบว่า ในการผลิตชีวมวลอัดเม็ดจากกระจินและยูคาลิปตัส ซึ่งเป็น วัตถุดิบชีวมวลประเภทเนื้อไม้ จะมีค่าความร้อนสูง (18.40– 18.56 MJ/kg) และชีวมวลอัดเม็ดจากกระจินและยูคาลิปตัส อย่างละเท่ากัน (อัตราส่วน 50:50) จะมีค่าความร้อนใกล้เคียงกับชีวมวลอัดเม็ดจากกระจินและยูคาลิปตัส (18.48 MJ/kg)

สำหรับการผลิตชีวมวลอัดเม็ดจากวัตถุดิบประเภทของเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ แกลบ และหญ้าอ้อย พบว่ามีค่าความร้อน 14.21 MJ/kg และ 4.56 MJ/kg ตามลำดับ และเมื่อนำแกลบและหญ้าอ้อยมาผสมกันอย่างละเท่ากัน (อัตราส่วน 50:50) พบว่ามีค่าความร้อน อยู่ระหว่างชีวมวลอัดเม็ดจากแกลบและหญ้าอ้อยเพียงอย่างเดียวอย่างใดอย่างหนึ่ง คือ 8.93 MJ/kg

สำหรับการผลิตชีวมวลอัดเม็ดจากวัตถุดิบ 3 ชนิดอย่างละเท่ากัน (อัตราส่วน 0.33:0.33:0.33) พบว่าชีวมวลอัดเม็ดจากกระจิน ยูคาลิปตัสและแกลบ จะมีค่าความร้อนมากที่สุด คือมีค่า 17.12 MJ/kg รองลงมาคือ ยูคาลิปตัส แกลบ และหญ้าอ้อย มีค่าความร้อน 12.08 MJ/kg ส่วนชีวมวลอัดเม็ดจากกระจิน แกลบ หญ้าอ้อย และกระจิน ยูคาลิปตัส และหญ้าอ้อย มีค่าใกล้เคียงกัน คือ 9.84 – 10.00 MJ/kg

และในการผลิตชีวมวลอัดเม็ดจากวัตถุดิบ 4 ชนิดอย่างละเท่ากัน (อัตราส่วน 0.25:0.25:0.25:0.25) พบว่า มีค่าความร้อน 13.98 MJ/kg

5.1.3 ปริมาณ VOCs

พบว่า ในการผลิตชีวมวลอัดเม็ดจากกระถินและยูคาลิปตัส ซึ่งเป็น วัสดุดิบชีวมวลประเภทเนื้อไม้ จะมีปริมาณ VOCs สูง (76.84 – 77.06) และหากเป็นการผลิตชีวมวลอัดเม็ดจากกระถินและยูคาลิปตัส อย่างละเท่ากัน (อัตราส่วน 50:50) จะมีค่า VOCs ใกล้เคียงกับชีวมวลอัดเม็ดจากกระถินและยูคาลิปตัสเพียงชนิดเดียว

สำหรับการผลิตชีวมวลอัดเม็ดจากวัสดุดิบประเภทของเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ แกลบ และเถ้าชานอ้อย พบว่ามีค่า VOCs 58.96 MJ/kg และ 14.24 MJ/kg ตามลำดับ และเมื่อนำแกลบและเถ้าชานอ้อยมาผสมกันอย่างละเท่ากัน (อัตราส่วน 50:50) พบว่ามีค่า VOCs อยู่ระหว่างคือ 29.62 MJ/kg

สำหรับการผลิตชีวมวลอัดเม็ดจากวัสดุดิบ 3 ชนิดอย่างละเท่ากัน (อัตราส่วน 0.33:0.33:0.33) พบว่ามีชีวมวลอัดเม็ดจาก 1) กระถิน แกลบ และเถ้าชานอ้อย 2) ยูคาลิปตัส แกลบ และเถ้าชานอ้อย และ 1) กระถิน ยูคาลิปตัส และเถ้าชานอ้อย มีค่า VOCs ใกล้เคียงกัน คือมีค่าเท่ากับ 35.11 35.54 และ 35.52% ตามลำดับ สำหรับชีวมวลอัดเม็ดกระถิน ยูคาลิปตัส และแกลบ จะมีค่า VOCs เท่ากับ 63.84%

และในการผลิตชีวมวลอัดเม็ดจากวัสดุดิบ 4 ชนิดอย่างละเท่ากัน (อัตราส่วน 0.25:0.25:0.25:0.25) พบว่า VOCs เท่ากับ 38.47%

5.2 การประเมินความเหมาะสมของวัสดุดิบชีวมวลตามแนวคิดผลิตภาพสีเขียว

จากการศึกษาส่วนผสมของชีวมวลอัดเม็ดต่างๆ ตามการออกแบบแบบผสมเชิงซ้อนแบบแฟกทอเรียลได้แก่ นั้น พบว่า อัตราส่วนของชีวมวลมีผลต่อค่าตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องตามแนวคิดผลิตภาพสีเขียว ได้แก่ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตชีวมวลอัดเม็ด ค่าความร้อนชีวมวลอัดเม็ด ค่าปริมาณ VOCs ที่ศึกษา ดังนี้

5.2.1 ต้นทุนการผลิตชีวมวลอัดเม็ด (บาท/ตัน)

$$y = 1282.7*A + 1251.4*B + 1620.9*C + 336.1*D + 838.7*A*B + 261*B*D - 845*A*B*C - 2070*A*B*D \quad R^2 = 99.47\%$$

5.2.2 ค่าความร้อน (MJ/kg)

$$y = 18.404*A + 18.555*B + 14.207*C + 4.564*D - 3.938*A*C - 5.397*A*D - 6.644*B*D - 1.803*C*D + 13.55*A*B*C - 67.58*A*B*D - 35.49*A*C*D + 15.48*B*C*D \quad \text{และ} \quad R^2 = 99.68$$

5.2.3 VOCs ปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่าย

$$y = (76.838*A+77.058*B+58.964*C+14.244*D-38.31*A*C-15.6*A*D-62.41*B*C-40.58*B*D-27.93*C*D+110.1 *A*B*C-385.6 *A*B*D-157* A*C*D \text{ และ } R^2 = 99.64$$

โดยเมื่อนำสมการแต่ละค่ามาพิจารณาตามแนวคิดผลิตภาพสีเขียว ซึ่งพิจารณาใน 3 ด้าน ได้แก่

- ด้านต้นทุน ศึกษาปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในขั้นตอนการผลิตชีวมวลอัดเม็ด ได้แก่ ขั้นตอนการบดหยาบ ขั้นตอนการบดย่อย และขั้นตอนการอัดเม็ด
- ด้านคุณภาพ ศึกษาคุณสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด ได้แก่ ค่าความร้อน (High Heating Value: HHV)
- ด้านสิ่งแวดล้อม ศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากปริมาณสารอินทรีย์ระเหยของชีวมวลอัดเม็ด

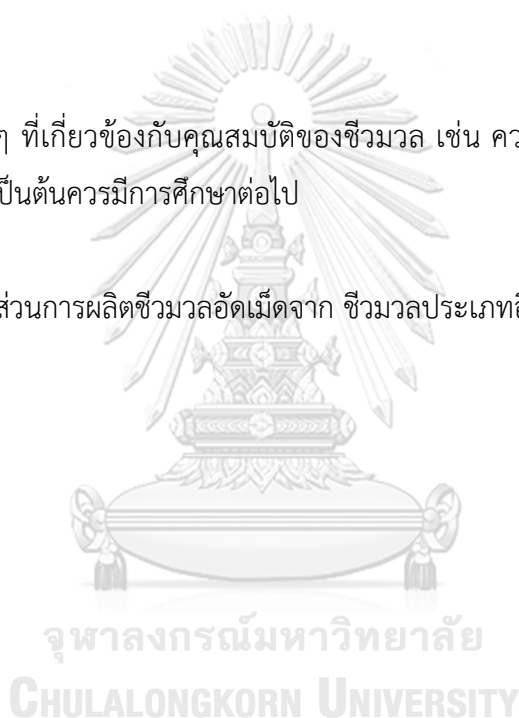
โดยกำหนดค่าการผลิตชีวมวลอัดเม็ดที่เหมาะสม ที่สามารถผลิตชีวมวลอัดเม็ดแล้วเป็นไปตามแนวคิดผลิตภาพสีเขียว พบว่าในการผลิตชีวมวลอัดเม็ดที่มีส่วนผสมเป็นเศษไม้กระถิน และยูคาลิปตัส อย่างไม่อย่างหนึ่ง หรือทั้งสองอย่างผสมกันในอัตราส่วนที่เท่ากัน ชีวมวลอัดเม็ดที่ได้จะมีค่าความร้อนสูงสุด แต่มีการใช้พลังงาน และปริมาณ VOCs ปริมาณมากเช่นกัน ในขณะที่ชีวมวลอัดเม็ดที่มีส่วนผสมเป็นเกล็ด และเถาซอฮ้อย อย่างไม่อย่างหนึ่ง หรือทั้งสองอย่างผสมกันในอัตราส่วนที่เท่ากัน ชีวมวลอัดเม็ดที่ได้จะมีค่าความร้อนที่ต่ำกว่า และมีการใช้พลังงานการผลิตและปริมาณ VOCs น้อยกว่าเช่นกัน ทั้งนี้ ในการผลิตชีวมวลอัดเม็ดตามแนวคิดผลิตภาพสีเขียว การผลิตชีวมวลอัดเม็ดที่มีส่วนผสมระหว่างวัตถุดิบชีวมวลที่เป็นเศษไม้ กับวัตถุดิบชีวมวลที่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร พบว่า จะมีค่าความร้อนเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด ทั้งยังมีปริมาณการใช้พลังงานที่ต่ำกว่า และปริมาณ VOCs ที่ลดลง

ดังนั้น เมื่อประเมินความเหมาะสมของวัตถุดิบชีวมวล ตามแนวคิดผลิตภาพสีเขียว ซึ่งพิจารณาทั้ง 3 ด้าน ได้แก่ ด้านต้นทุนการผลิต จากปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตชีวมวลอัดเม็ด และราคาวัตถุดิบ ค่าความร้อนและปริมาณ VOCs ของชีวมวลอัดเม็ด พบว่าการผลิตชีวมวลอัดเม็ดที่เป็นไปได้ตามแนวคิดดังกล่าวที่เหมาะสมที่สุด จากผลการทดลองแบบ Mixture Design จากกราฟ contour plot จะมีต้นทุนการผลิตทั้งหมดเป็น 1,100 – 1,200 บาท มีค่าความร้อนของชีวมวลอัดเม็ด ระหว่าง 14.7 - 16.7 MJ/kg และค่าปริมาณ VOCs เท่ากับ 50 – 70 % พบว่าวัตถุดิบที่เหมาะสมในการทำชีวมวลอัดเม็ด ได้แก่ ยูคาลิปตัส : เถาซอฮ้อย 80%:20% กระถิน : เถาซอฮ้อย 80%:20% และ กระถิน : เถาซอฮ้อย 70%:30% ตามลำดับ ทั้งนี้ การผลิตชีวมวล

อัดเม็ดจากวัตถุดิบเหลือใช้ทางการเกษตร คือ เถ้าขานอ้อย จะทำให้มีต้นทุนในการผลิตชีวมวลอัดเม็ดน้อยกว่าการผลิตชีวมวลอัดเม็ด ที่มาจากวัตถุดิบประเภทเนื้อไม้ และแกลบ เนื่องจากราคาต้นทุนวัตถุดิบของเถ้าขานอ้อย จะน้อยกว่าราคากระถิน ยูคาลิปตัส และแกลบ และการผลิตชีวมวลอัดเม็ดจากแกลบและเถ้าขานอ้อย จะไม่มีขั้นตอนการบดหยาบ และบดย่อย ดังนั้น การผลิตชีวมวลอัดเม็ดที่มีส่วนผสมจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรจะมีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการผลิตชีวมวลอัดเม็ดลดลง โดยค่าความร้อนชีวมวลต่อต้นทุนการผลิต (MJ/บาท/ตัน) ของชีวมวลอัดเม็ดที่ได้จากงานวิจัยนี้ มีค่าใกล้เคียงค่ามาตรฐานชีวมวลอัดเม็ด

ข้อเสนอแนะ

1. ตัวแปรตามอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของชีวมวล เช่น ความหนาแน่น ความคงทนของชีวมวลอัดเม็ด เป็นต้นควรมีการศึกษาต่อไป
2. ควรมีการศึกษาสัดส่วนการผลิตชีวมวลอัดเม็ดจาก ชีวมวลประเภทอื่นๆ เพื่อเปรียบเทียบการศึกษาครั้งนี้



ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ชีวมวลอัดเม็ดที่ได้จากงานวิจัย

ชีวมวลอัดเม็ดที่ได้จากงานวิจัย ได้แก่ ชีวมวลอัดเม็ดจากวัตถุดิบประเภทเนื้อไม้ ได้แก่ ไม้กระถิน และยูคาลิปตัส และชีวมวลอัดเม็ดจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ แกลบ และ ถั่วเขียว โดยแต่ละประเภทจะศึกษาเปรียบเทียบอัตราส่วนชีวมวลในการอัดเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล ดังนี้

1. Mixture: Pure Type: Vertex



รูปที่ 1.1 ตัวอย่างชีวมวลอัดเม็ดจากกระถิน 100%



รูปที่ 1.2 ตัวอย่างชีวมวลอัดเม็ดจากยูคาลิปตัส 100%



รูปที่ 1.3 ตัวอย่างชีวมวลอัดเม็ดจากกลบ 100%



รูปที่ 1.4 ตัวอย่างชีวมวลอัดเม็ดจากไม้ขานอ้อย 100%

2 . Mixture: Binary Type: Edge Centroid



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างชีวมวลอัดเม็ดจากกระถิน 50% : เถ้าชานอ้อย 50%



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างชีวมวลอัดเม็ดจากกระถิน 50% : แกลบ 50%



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างชีวมวลอัดเม็ดจากกระถิน 50% : เก้าชานอ้อย 50%



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างชีวมวลอัดเม็ดจากแกลบ 50% : เก้าชานอ้อย 50%



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างชีวมวลอัดเม็ดจากยูกาลิปตัส 50% : แกลบ 50%



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างชีวมวลอัดเม็ดจากยูกาลิปตัส 50% : เก้าชานอ้อย 50%

3. Mixture: Ternary Type: Face Centroid



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างชีวมวลอัดเม็ดจาก กระถิน 33.33% : ยูคาลิปตัส 33.33% : แกลบ 33.33%



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างชีวมวลอัดเม็ดจาก กระถิน 33.33% : ยูคาลิปตัส 33.33% : เล้าชานฮ้อย 33.33%



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างชีวมวลอัดเม็ดจากยูคาลิปตัส 33.33% : แกลบ 33.33 % : เถ้าชานอ้อย 33.33%



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างชีวมวลอัดเม็ดจากกระถิน 33.33% : แกลบ 33.33 % : เถ้าชานอ้อย 33.33%

4. Mixture: All Type: Overall Centroid



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างซีมวลอัดเม็ดจาก กระถิน 25% : ยูคาลิปตัส 25% : แกลบ 25% : ถั่วขนอ้อย 25%



ภาคผนวก ข การวิเคราะห์สมการถดถอยจากโปรแกรม MINITAB 18

Regression for Mixtures: Total cost versus A, B, C, D

Backward Elimination of Terms

Candidate terms: A, B, C, D, A*B, A*C, A*D, B*C, B*D, C*D, A*B*C, A*B*D, A*C*D, B*C*D

	----Step 1----		----Step 2----		----Step 3----		----Step 4----	
	Coef	P	Coef	P	Coef	P	Coef	P
A	1287.6	*	1287.6	*	1284.4	*	1284.3	*
B	1245.4	*	1245.4	*	1245.4	*	1244.5	*
C	1620.4	*	1619.8	*	1617.2	*	1617.6	*
D	336.9	*	336.3	*	336.8	*	337.4	*
A*B	840.9	0	840.9	0	846.9	0	847.8	0
A*C	-37.5	0.606	-36.3	0.601				
A*D	-107.1	0.152	-106	0.138	-101	0.144	-103.1	0.13
B*C	49.7	0.495	50.9	0.465	55.9	0.409	71.2	0.263
B*D	249.1	0.003	250.2	0.002	249	0.002	263.8	0
C*D	-7.2	0.921						
A*B*C	-877	0.081	-877	0.072	-963	0.034	-974	0.029
A*B*D	-2069	0	-2070	0	-2071	0	-2077	0
A*C*D	-269	0.576	-285	0.515	-358	0.381	-328	0.412
B*C*D	300	0.533	284	0.517	296	0.49		
S	20.6166		20.0074		19.6055		19.3444	
R-sq	99.78%		99.78%		99.78%		99.77%	
R-sq(adj)	99.61%		99.63%		99.65%		99.65%	
R-sq(pred)	99.28%		99.30%		99.31%		99.43%	
Mallows' Cp	14		12.01		10.28		8.73	

	----Step 5----		----Step 6----	
	Coef	P	Coef	P
A	1283.9	*	1282.7	*
B	1244.6	*	1251.4	*
C	1615.5	*	1620.9	*
D	336.9	*	336.1	*
A*B	850.2	0	838.7	0
A*C				
A*D	-118.8	0.07	-117.2	0.076
B*C	75	0.234		
B*D	264.5	0	261	0
C*D				
A*B*C	-1010	0.023	-845	0.042
A*B*D	-2070	0	-2070	0
A*C*D				
B*C*D				
S	19.2003		19.4316	
R-sq	99.77%		99.75%	
R-sq(adj)	99.66%		99.65%	
R-sq(pred)	99.43%		99.42%	
Mallows' Cp	7.35		6.66	

Estimated Regression Coefficients for Total cost (component proportions)

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
A	1282.7	12.5	*	*	1.76
B	1251.4	12.5	*	*	1.76
C	1620.9	10.4	*	*	1.23
D	336.1	12.4	*	*	1.76
A*B	838.7	65.4	12.82	0	2.06
A*D	-117.2	62.7	-1.87	0.076	1.9
B*D	261	62.7	4.16	0	1.9
A*B*C	-845	391	-2.16	0.042	1.31
A*B*D	-2070	444	-4.66	0	1.69

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)
19.4316	99.75%	99.65%	18175.4	99.42%

Analysis of Variance for Total cost (component proportions)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	8	3132244	3132244	391531	1036.93	0
Linear	3	3059860	2211096	737032	1951.95	0
Quadratic	3	62571	71189	23730	62.85	0
A*B	1	53968	62095	62095	164.45	0
A*D	1	5893	1319	1319	3.49	0.076
B*D	1	2709	6539	6539	17.32	0
Special Cubic	2	9813	9813	4907	12.99	0
A*B*C	1	1616	1768	1768	4.68	0.042

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
A*B*D	1	8197	8197	8197	21.71	0
Residual Error	21	7929	7929	378		
Lack-of-Fit	6	2290	2290	382	1.02	0.452
Pure Error	15	5639	5639	376		
Total	29	3140174				

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

Obs	StdOrder	Total cost	Fit	SE Fit	Resid	Std Resid	
4	14	1147.99	1098.48	6.29	49.51	2.69	R
24	20	1448.06	1476.71	13.66	-28.66	-2.07	R
29	11	1479.06	1446.87	12.83	32.18	2.2	R

R Large residual

การวิเคราะห์สมการถดถอยของค่าความร้อน (GHV) ของซีมวลอัดเม็ด

Regression for Mixtures: GHV versus A, B, C, D

Backward Elimination of Terms

Candidate terms: A, B, C, D, A*B, A*C, A*D, B*C, B*D, C*D, A*B*C, A*B*D, A*C*D, B*C*D

	----Step 1----		----Step 2----		----Step 3----	
	Coef	P	Coef	P	Coef	P
A	18.437	*	18.39	*	18.404	*
B	18.677	*	18.63	*	18.555	*
C	14.297	*	14.297	*	14.207	*
D	4.563	*	4.563	*	4.564	*
A*B	-0.558	0.466				
A*C	-4.171	0	-4.082	0	-3.938	0
A*D	-5.451	0	-5.362	0	-5.397	0
B*C	-1.131	0.145	-1.042	0.169		
B*D	-6.878	0	-6.789	0	-6.644	0
C*D	-1.971	0.014	-1.976	0.013	-1.803	0.022
A*B*C	16.92	0.002	15.63	0.002	13.55	0.005
A*B*D	-66.64	0	-67.93	0	-67.58	0
A*C*D	-35.42	0	-35.45	0	-35.49	0
B*C*D	17.97	0.001	17.94	0.001	15.48	0.002
S	0.268212		0.266299		0.270217	
R-sq	99.71%		99.70%		99.68%	
R-sq(adj)	99.58%		99.59%		99.58%	
R-sq(pred)	99.37%		99.44%		99.42%	
Mallows'	14		12.55		12.5	
Cp						

α to remove = 0.1

Estimated Regression Coefficients for GHV (component proportions)

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
A	18.404	0.142	*	*	1.78
B	18.555	0.132	*	*	1.53
C	14.207	0.142	*	*	1.78
D	4.564	0.156	*	*	2.15
A*C	-3.938	0.744	-5.29	0	2.07
A*D	-5.397	0.751	-7.19	0	2.11
B*D	-6.644	0.744	-8.93	0	2.07
C*D	-1.803	0.751	-2.4	0.022	2.11
A*B*C	13.55	4.49	3.02	0.005	1.34
A*B*D	-67.58	4.72	-14.31	0	1.48
A*C*D	-35.49	5.04	-7.03	0	1.69
B*C*D	15.48	4.72	3.28	0.002	1.48

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)
0.270217	99.68%	99.58%	4.39317	99.42%

Analysis of Variance for GHV (component proportions)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	11	757.415	757.415	68.856	943.01	0
Linear	3	702.527	443.916	147.972	2026.53	0
Quadratic	4	35.122	10.193	2.548	34.9	0
A*C	1	3.341	2.043	2.043	27.98	0
A*D	1	16.564	3.769	3.769	51.62	0
B*D	1	13.816	5.817	5.817	79.67	0
C*D	1	1.401	0.42	0.42	5.76	0.022

Special Cubic	4	19.767	19.767	4.942	67.68	0
A*B*C	1	0.312	0.667	0.667	9.13	0.005
A*B*D	1	14.995	14.957	14.957	204.84	0
A*C*D	1	3.675	3.613	3.613	49.48	0
B*C*D	1	0.785	0.785	0.785	10.75	0.002
Residual Error	33	2.41	2.41	0.073		
Lack-of-Fit	3	0.434	0.434	0.145	2.2	0.109
Pure Error	30	1.976	1.976	0.066		
Total	44	759.825				

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

Obs	StdOrder	GHV_1	Fit	SE Fit	Resid	Std Resid	
15	24	17.91	18.48	0.087	-0.57	-2.23	R
37	17	17.91	18.404	0.142	-0.494	-2.15	R

R Large residual

การวิเคราะห์สมการถดถอยของปริมาณ (VOCs) ของซีมวลอัดเม็ด

Regression for Mixtures: VOCs versus A, B, C, D

Backward Elimination of Terms

Candidate terms: A, B, C, D, A*B, A*C, A*D, B*C, B*D, C*D, A*B*C,

A*B*D, A*C*D, B*C*D

	----Step 1----		----Step 2----		----Step 3----	
	Coef	P	Coef	P	Coef	P
A	76.736	*	76.835	*	76.838	*
B	77.002	*	77.102	*	77.058	*
C	59.009	*	59.009	*	58.964	*
D	14.289	*	14.289	*	14.244	*
A*B	1.19	0.755				
A*C	-38.13	0	-38.32	0	-38.31	0
A*D	-15.43	0	-15.62	0	-15.6	0
B*C	-63.08	0	-63.27	0	-62.41	0
B*D	-41.25	0	-41.44	0	-40.58	0
C*D	-28.8	0	-28.79	0	-27.93	0
A*B*C	107.6	0	110.3	0	110.1	0
A*B*D	-388.1	0	-385.3	0	-385.6	0
A*C*D	-156.8	0	-156.7	0	-157	0
B*C*D	16.4	0.517	16.4	0.51		
S		1.33692		1.31797		1.30683
R-sq		99.65%		99.65%		99.64%
R-sq(adj)		99.50%		99.52%		99.52%
R-sq(pred)		99.30%		99.31%		99.34%
Mallows' Cp		14		12.1		10.53

α to remove = 0.1

Estimated Regression Coefficients for VOCs (component proportions)

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
A	76.838	0.689	*	*	1.79
B	77.058	0.685	*	*	1.77
C	58.964	0.751	*	*	2.13
D	14.244	0.751	*	*	2.13
A*C	-38.31	3.63	-10.54	0	2.11
A*D	-15.6	3.63	-4.29	0	2.11
B*C	-62.41	3.4	-18.34	0	1.85
B*D	-40.58	3.4	-11.93	0	1.85
C*D	-27.93	3.45	-8.09	0	1.91
A*B*C	110.1	22.9	4.81	0	1.48
A*B*D	-385.6	22.9	-16.86	0	1.48
A*C*D	-157	24.4	-6.44	0	1.69

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)
1.30683	99.64%	99.52%	104.635	99.34%

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Analysis of Variance for VOCs (component proportions)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	11	15739	15739	1430.82	837.82	0
Linear	3	13529.1	8885.1	2961.69	1734.22	0
Quadratic	5	1644.5	978.9	195.77	114.64	0
A*C	1	193.9	189.7	189.7	111.08	0
A*D	1	255.2	31.5	31.47	18.43	0
B*C	1	427.9	574.6	574.65	336.49	0
B*D	1	554.3	243	242.99	142.28	0
C*D	1	213.2	111.8	111.8	65.47	0

Special Cubic	3	565.3	565.3	188.44	110.34	0
A*B*C	1	15.2	39.6	39.57	23.17	0
A*B*D	1	479.4	485.7	485.69	284.4	0
A*C*D	1	70.8	70.8	70.78	41.44	0
Residual Error	33	56.4	56.4	1.71		
Lack-of- Fit	3	10.8	10.8	3.62	2.38	0.089
Pure Error	30	45.5	45.5	1.52		
Total	44	15795.3				

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

Obs	StdOrder	VOCs	Fit	SE Fit	Resid	Std Resid	
11	37	39.48	41.64	0.751	-2.16	-2.02	R
43	11	66.5	63.839	0.711	2.661	2.43	R
44	41	61.24	63.839	0.711	-2.599	-2.37	R

R Large residual

ภาคผนวก ค

การวัดปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ขั้นตอนการผลิต

การวัดปริมาณพลังงานไฟฟ้าและคำนวณปริมาณพลังงานไฟฟ้า โดยใช้สูตร

$$\text{โดยที่ } P = IV \cos\theta$$

I = ปริมาณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย (แอมแปร์)

v = 200 volt

และ $\cos\theta$ เครื่องอัดเม็ด = 0.82

และคำนวณเป็นปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อตันชีวมวล) โดยมีข้อมูล ดังนี้

1. กระถิน 100

กระถิน 100					
ครั้งที่ 1 5 กก.			ครั้งที่ 2 5 กก.		
เวลา	ปริมาณ กระแส ไฟฟ้าที่ใช้	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อตันชีวมวล)	เวลา	ปริมาณ กระแส ไฟฟ้าที่ใช้	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อตันชีวมวล)
0.5	20	= 24.03*(7.5/60)* 220*0.82*200)/1000 =108.39	0.5	21.6	= 25.09*(7/60)* 220*0.82*200)/1000 = 105.59
1	21		1	21.1	
1.5	21.1		1.5	23.5	
2	21.8		2	23.8	
2.5	23.1		2.5	24.5	
3	23.7		3	25.5	
3.5	24.3		3.5	26	
4	24.8		4	26.6	
4.5	25.4		4.5	26.2	
5	24.1		5	28	

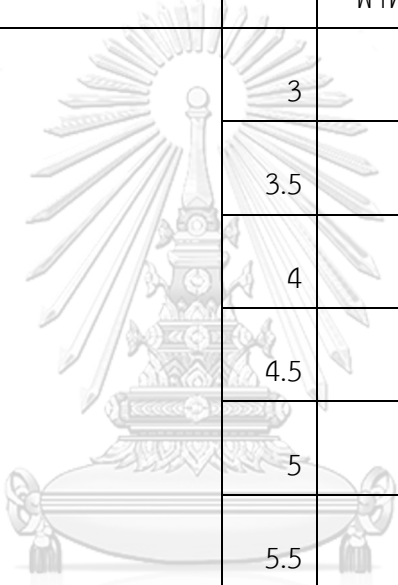
1. กระถิน 100 (ต่อ)

กระถิน 100					
ครั้งที่ 1 5 กก.			ครั้งที่ 2 5 กก.		
เวลา	ปริมาณ กระแส ไฟฟ้าที่ใช้	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อต้นซีวมวล)	เวลา	ปริมาณ กระแส ไฟฟ้าที่ใช้	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อต้นซีวมวล)
5.5	25.2		5.5	27.5	
6	25.8		6	26.5	
6.5	26.6		6.5	25.9	
7	27.7		7	24.5	
7.5	25.9		7.5		

2. ยูคา 100

ยูคา 100					
ครั้งที่ 1 5 กก.			ครั้งที่ 2 5 กก.		
เวลา	ปริมาณ กระแสไฟ ฟ้าที่ใช้	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อต้นซีวมวล)	เวลา	ปริมาณ กระแสไฟ ฟ้าที่ใช้	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อต้นซีวมวล)
0.5	21.4	$= 24.29 \cdot (7.5/60) \cdot$	0.5	20.4	$= 23.79 \cdot (8/60) \cdot$
1	22	$220 \cdot 0.82 \cdot 200) / 1000$	1	21.1	$220 \cdot 0.82 \cdot 200) / 1000$
1.5	22.3	$= 109.56$	1.5	22.9	$= 114.43$
2	22.4		2	22.1	
2.5	24.4		2.5	23.6	

2. ยูกา 100 (ต่อ)

ยูกา 100					
ครั้งที่ 1 5 กก.			ครั้งที่ 2 5 กก.		
เวลา	ปริมาณ กระแสไฟ ฟ้าที่ใช้	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อต้นซีมวล)	เวลา	ปริมาณ กระแสไฟ ฟ้าที่ใช้	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อต้นซีมวล)
3	23.9		3	22.7	
3.5	26.5		3.5	25.7	
4	24.4		4	25.4	
4.5	23.7		4.5	24.2	
5	26.7		5	26.2	
5.5	27.1		5.5	26.7	
6	26.5		6	24.3	
6.5	25.3		6.5	23.6	
7	24.1		7	23.7	
7.5	23.7		7.5	24.9	
8			8	23.1	

3. แกลบ 100

แกลบ 100					
ครั้งที่ 1 5 กก.			ครั้งที่ 2 5 กก.		
เวลา	ปริมาณ กระแส ไฟฟ้าที่ใช้	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อตันซีวมวล)	เวลา	ปริมาณ กระแสไฟ ฟ้าที่ใช้	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อตันซีวมวล)
0.5	20.7	= $26.3*(7/60)*$	0.5	23.1	= $25*(7/60)*$
1	21.7	$220*0.82*200)/1000$	1	23.2	$220*0.82*200)/1000$
1.5	24.3	= 110.71	1.5	24.6	= 105.23
2	26.9		2	24.7	
2.5	26.1		2.5	23.6	
3	27.2		3	24.1	
3.5	28.8		3.5	25.7	
4	29.1		4	25.2	
4.5	31		4.5	29.1	
5	23.9		5	34.3	
5.5	25.9		5.5	25.9	
6	28.8		6	23	
6.5	27.5		6.5	24.1	

7	26.3	7	19.4
---	------	---	------

4. ถ้ำชานอ้อย 100

ถ้ำชานอ้อย 100					
ครั้งที่ 1 5 กก.			ครั้งที่ 2 5 กก.		
เวลา	ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อตันชีวมวล)	เวลา	ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อตันชีวมวล)
0.5	19.3	$= 24.47 \cdot (11/60)^*$	0.5	21.4	$= 25.42 \cdot (9/60)^*$
1	20.3	$220 \cdot 0.82 \cdot 200 / 1000$	1	20.2	$220 \cdot 0.82 \cdot 200 / 1000$
1.5	21.2	$= 110.71$	1.5	25.4	$= 105.23$
2	20		2	23.7	
2.5	23.6		2.5	25.3	
3	23		3	27.3	
3.5	24.6		3.5	26.6	
4	24.2		4	29.8	
4.5	21.9		4.5	29.4	
5	25.4		5	25.3	
5.5	24.8		5.5	24.5	
6	28.4		6	26.3	
6.5	27.3		6.5	26.7	

7	27.2		7	23
---	------	--	---	----

4. ถ้ำชานอ้อย 100 (ต่อ)

ถ้ำชานอ้อย 100					
ครั้งที่ 1 5 กก.			ครั้งที่ 2 5 กก.		
เวลา	ปริมาณ กระแสไฟ ฟ้าที่ใช้	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อตันชีวมวล)	เวลา	ปริมาณ กระแสไฟ ฟ้าที่ใช้	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อตันชีวมวล)
7.5	28.9	$= 24.47 \cdot (11/60)^*$	7.5	21.9	$= 25.42 \cdot (9/60)^*$
8	27.1	$220 \cdot 0.82 \cdot 200 / 1000$	8	28.6	$220 \cdot 0.82 \cdot 200 / 1000$
8.5	26.7	$= 110.71$	8.5	27	$= 105.23$
9	25.3		9	25.2	
9.5	23.5		9.5		
10	24.3		10		
10.5	25.5		10.5		
11	25.8		11		

4. กระถิน 50 ยูคา 50

กระถิน 50 ยูคา 50					
ครั้งที่ 1 5 กก.			ครั้งที่ 2 5 กก.		
เวลา	ปริมาณ กระแส ไฟฟ้าที่ใช้	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อต้นซีวมวล)	เวลา	ปริมาณ กระแสไฟ ฟ้าที่ใช้	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อต้นซีวมวล)
0.5	21.1	= 25.48*(13/60)*	0.5	21	= 24.96*(12/60)*
1	23.6	220*0.82*200)/1000	1	21.3	220*0.82*200)/1000
1.5	23.1	= 199.16	1.5	24.1	= 180.13
2	23.3		2	21.2	
2.5	24.6		2.5	24.1	
3	24.3		3	23.4	
3.5	24.4		3.5	23.8	
4	23.9		4	24.1	
4.5	26.2		4.5	24.9	
5	26.4		5	28.3	
5.5	27.1		5.5	27	
6	26.4		6	26.1	
6.5	28		6.5	27.1	
7	27.7		7	26.7	

5. กระถิน 50 ยูคา 50 (ต่อ)

กระถิน 50 ยูคา 50					
ครั้งที่ 1 5 กก.			ครั้งที่ 2 5 กก.		
เวลา	ปริมาณ กระแส ไฟฟ้าที่ใช้	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อต้นซีวมวล)	เวลา	ปริมาณ กระแสไฟ ฟ้าที่ใช้	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อต้นซีวมวล)
7.5	33.3		7.5	27	
8	26.1		8	26.4	
8.5	27		8.5	25.4	
9	25.2		9	21.9	
9.5	25.4		9.5	24.2	
10	24.8		10	22.3	
10.5	23.4		10.5	26.3	
11	24.1		11	29.5	
11.5	27.4		11.5	26.7	
12	25.6		12	26.3	
12.5	25.2				
13	24.8				

6. กระถิน 50 แกลบ 50

กระถิน 50 แกลบ 50					
ครั้งที่ 1 5 กก.			ครั้งที่ 2 5 กก.		
เวลา	ปริมาณ กระแส ไฟฟ้าที่ใช้	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อตันชีวมวล)	เวลา	ปริมาณ กระแส ไฟฟ้าที่ใช้	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อตันชีวมวล)
0.5	19.5	$= 22.30*(9/60)*$	0.5	19.1	$= 23.01*(9/60)*$
1	19.3	$220*0.82*200)/1000$	1	19.8	$220*0.82*200)/1000$
1.5	21	$= 120.72$	1.5	23.4	$= 124.54$
2	22.1		2	23.6	
2.5	22.2		2.5	22.9	
3	23.3		3	23.3	
3.5	24.4		3.5	24.4	
4	22.2		4	24.4	
4.5	22.8		4.5	23.8	
5	20.3		5	23.5	
5.5	24.7		5.5	24.3	
6	24		6	24.2	
6.5	22.6		6.5	24.7	
7	21.3		7	23.5	

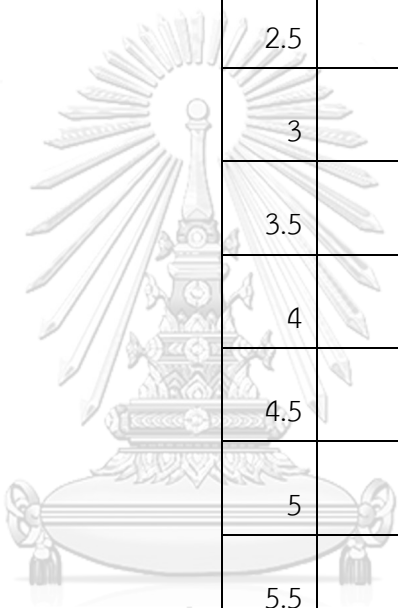
6. กระถิน 50 แกลบ 50 (ต่อ)

กระถิน 50 แกลบ 50					
ครั้งที่ 1 5 กก.			ครั้งที่ 2 5 กก.		
เวลา	ปริมาณ กระแส ไฟฟ้าที่ใช้	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อตันชีวมวล)	เวลา	ปริมาณ กระแส ไฟฟ้าที่ใช้	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อตันชีวมวล)
7.5	20.5	$= 22.30*(9/60)*$	7.5	23.9	$= 23.01*(9/60)*$
8	23	$220*0.82*200)/1000$	8	23.3	$220*0.82*200)/1000$
8.5	24.1	$= 120.72$	8.5	20.6	$= 124.54$
9	24.2		9	21.5	

7. กระถิน 50 แก้วชานอ้อย 50

กระถิน 50 แก้วชานอ้อย 50					
ครั้งที่ 1 5 กก.			ครั้งที่ 2 5 กก.		
เวลา	ปริมาณ กระแส ไฟฟ้าที่ใช้	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อตันชีวมวล)	เวลา	ปริมาณ กระแสไฟ ฟ้าที่ใช้	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อตันชีวมวล)
0.5	19.1	$= 22.18*(9/60)*$	0.5	19.4	$= 23.38*(8/60)*220*$
1	20.1	$220*0.82*200)/1000$	1	21.3	$0.82*200)/1000$
1.5	20.4	$= 120.03$	1.5	22.6	$= 112.48$
2	22.2		2	24.2	

7. กระถิน 50 เล้าชานอ้อย 50 (ต่อ)

กระถิน 50 เล้าชานอ้อย 50					
ครั้งที่ 1 5 กก.			ครั้งที่ 2 5 กก.		
เวลา	ปริมาณ กระแส ไฟฟ้าที่ใช้	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อตันชีวมวล)	เวลา	ปริมาณ กระแสไฟ ฟ้าที่ใช้	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อตันชีวมวล)
2.5	22.6	 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย CHULALONGKORN UNIVERSITY	2.5	24.7	
3	21.8		3	23.1	
3.5	24.4		3.5	23.8	
4	24.4		4	23.2	
4.5	23.5		4.5	23.9	
5	23.6		5	25.6	
5.5	23.4		5.5	25.3	
6	22.3		6	25.4	
6.5	22.1		6.5	24.9	
7	22.9		7	22.3	
7.5	22.9		7.5	22.3	
8	21.1		8	22.1	
8.5	20.1		8.5		
9	22.3		9		

8. ยูคา 50 แกลบ 50

ยูคา 50 แกลบ 50					
ครั้งที่ 1 5 กก.			ครั้งที่ 2 5 กก.		
เวลา	ปริมาณ กระแส ไฟฟ้าที่ใช้	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อตันชีวมวล)	เวลา	ปริมาณ กระแส ไฟฟ้าที่ใช้	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อตันชีวมวล)
0.5	20.4	$= 24.41*(10.5/60)*$	0.5	20.1	$= 24.86*(10/60)*$
1	24.6	$220*0.82*200)/1000$	1	22.1	$220*0.82*200)/1000$
1.5	24	$= 146.88$	1.5	21.2	$= 149.52$
2	25.6		2	23.1	
2.5	25.7		2.5	23.2	
3	25.5		3	24.3	
3.5	24.6		3.5	24.5	
4	23.6		4	25.4	
4.5	23.9		4.5	27	
5	24		5	28.5	
5.5	23.7		5.5	28.1	
6	23.5		6	27.5	
6.5	24.8		6.5	28.3	
7	24.3		7	26.2	

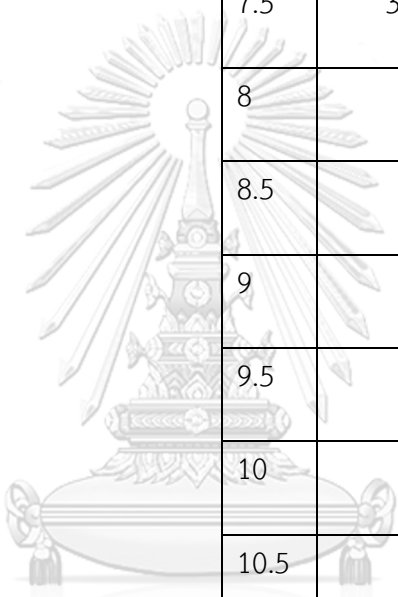
8. ยูคา 50 แกลบ 50 (ต่อ)

ยูคา 50 แกลบ 50					
ครั้งที่ 1 5 กก.			ครั้งที่ 2 5 กก.		
เวลา	ปริมาณ กระแส ไฟฟ้าที่ใช้	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อตันชีวมวล)	เวลา	ปริมาณ กระแส ไฟฟ้าที่ใช้	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อตันชีวมวล)
7.5	24.5	$= 24.41 \cdot (10.5/60) \cdot$	7.5	27.1	$= 24.86 \cdot (10/60) \cdot$
8	23.8	$220 \cdot 0.82 \cdot 200) / 1000$	8	27.1	$220 \cdot 0.82 \cdot 200) / 1000$
8.5	26.5	$= 146.88$	8.5	23.9	$= 149.52$
9	25.6		9	24	
9.5	25.7		9.5	23.4	
10	24.2		10	22.3	
10.5	24.1				

9. ยูกา 50 ถ้ำชานอ้อย 50

ยูกา 50 ถ้ำชานอ้อย 50					
ครั้งที่ 1 5 กก.			ครั้งที่ 2 5 กก.		
เวลา	ปริมาณ กระแสไฟ ฟ้าที่ใช้	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อตันชีวมวล)	เวลา	ปริมาณ กระแสไฟ ฟ้าที่ใช้	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อตันชีวมวล)
0.5	19.7	$= 23.57*(11.5/60)*$	0.5	24.9	$= 25.07*(12/60)*$
1	20.3	$220*0.82*200/1000$	1	22.3	$220*0.82*200/1000$
1.5	21.9	$= 163.02$	1.5	22.5	$= 158.68$
2	26.2		2	26	
2.5	24		2.5	19.9	
3	23.4		3	24.3	
3.5	22.4		3.5	23.15	
4	23.1		4	23.05	
4.5	21.4		4.5	25.2	
5	25.1		5	23.7	
5.5	20.6		5.5	26.1	
6	27.9		6	23.3	
6.5	28.3		6.5	23.5	
7	26.6		7	25.6	

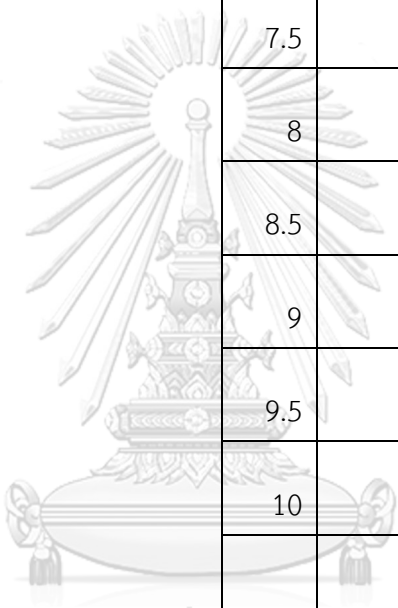
9. ยูคา 50 ถ้ำซานอ้อย 50 (ต่อ)

ยูคา 50 ถ้ำซานอ้อย 50						
ครั้งที่ 1 5 กก.			ครั้งที่ 2 5 กก.			
เวลา	ปริมาณ กระแสไฟ ฟ้าที่ใช้	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อตันชีวมวล)	เวลา	ปริมาณ กระแสไฟ ฟ้าที่ใช้	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อตันชีวมวล)	
7.5	26.3		7.5	31.05		
8	25.4		8	23		
8.5	21.4		8.5	30.7		
9	26.3		9	27.4		
9.5	25		9.5	28.1		
10	22.2		10	28.3		
10.5	22.1		10.5	25.7		
11	21.6		11	23.1		
11.5	21		11.5	25.6		
				12		25.2

10. แกลบ 50 เก้าชานอ้อย 50

แกลบ 50 เก้าชานอ้อย 50					
ครั้งที่ 1 5 กก.			ครั้งที่ 2 5 กก.		
เวลา	ปริมาณ กระแส ไฟฟ้าที่ใช้	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อตันชีวมวล)	เวลา	ปริมาณ กระแส ไฟฟ้าที่ใช้	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อตันชีวมวล)
0.5	20.5	$= 23.84*(10.5/60)*$	0.5	24.4	$= 25.32*(10/60)*$
1	18.7	$220*0.82*200)/1000$	1	23.8	$220*0.82*200)/1000$
1.5	23.1	$= 150.53$	1.5	22.5	$= 152.29$
2	24.4		2	26.6	
2.5	20.7		2.5	25.7	
3	22.6		3	25.2	
3.5	23.9		3.5	23.9	
4	23.5		4	24.4	
4.5	23.3		4.5	25.4	
5	25.9		5	34.3	
5.5	26.4		5.5	31.2	
6	23.5		6	27.4	
6.5	25.7		6.5	26.1	
7	25.1		7	22.6	

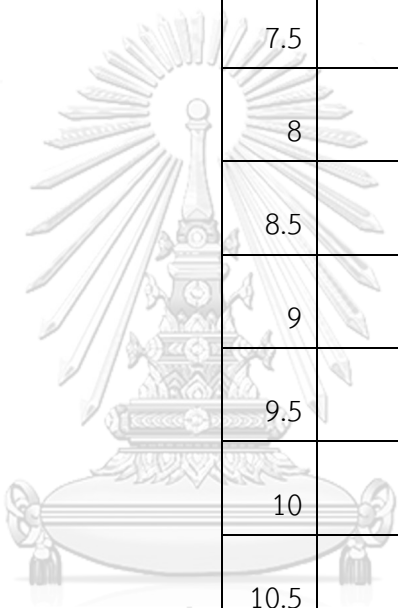
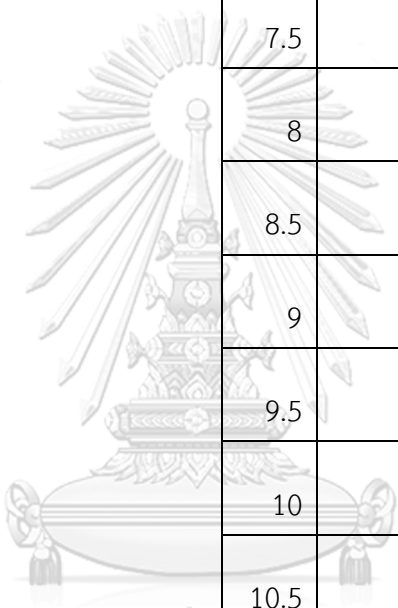
10. แกลบ 50 เก้าชานอ้อย 50 (ต่อ)

แกลบ 50 เก้าชานอ้อย 50					
ครั้งที่ 1 5 กก.			ครั้งที่ 2 5 กก.		
เวลา	ปริมาณ กระแสไฟฟ้า ที่ใช้	ปริมาณพลังงาน ไฟฟ้า (kWh ต่อตัน ชีวมวล)	เวลา	ปริมาณ กระแสไฟ ฟ้าที่ใช้	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อตันชีวมวล)
7.5	26.1		7.5	21.6	
8	25.9		8	26	
8.5	23.7		8.5	25.4	
9	24		9	23.3	
9.5	23.15		9.5	23.4	
10	23.5		10	23.3	
10.5	27				

11. ภาระดิน 1/3 ยูคา 1/3 แกลบ 1/3

ภาระดิน 1/3 ยูคา 1/3 แกลบ 1/3					
ครั้งที่ 1 5 กก.			ครั้งที่ 2 5 กก.		
เวลา	ปริมาณ กระแสไฟ ฟ้าที่ใช้	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อตันชีวมวล)	เวลา	ปริมาณ กระแสไฟ ฟ้าที่ใช้	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อตันชีวมวล)
0.5	28.3	$= 29.68*(8/60)*$	0.5	23.5	$= 25.42*(10.5/60)*$
1	26.4	$220*0.82*200)/1000$	1	26.6	$220*0.82*200)/1000$
1.5	19.8	$= 142.76$	1.5	27.3	$= 160.52$
2	31		2	23.6	
2.5	29		2.5	22.5	
3	19.6		3	25.9	
3.5	31.1		3.5	21.2	
4	30		4	21.7	
4.5	32.7		4.5	24.2	
5	41		5	28.7	
5.5	35.4		5.5	23.6	
6	34.5		6	35.3	
6.5	31.5		6.5	32.7	
7	31.6		7	27.6	

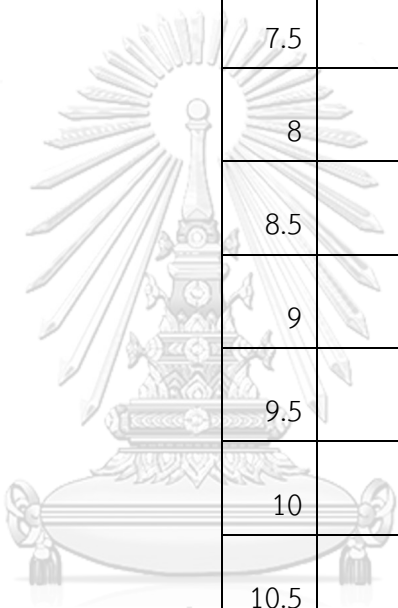
11. ภาระดิน 1/3 ยูคา 1/3 แกลบ 1/3 (ต่อ)

ภาระดิน 1/3 ยูคา 1/3 แกลบ 1/3					
ครั้งที่ 1 5 กก.			ครั้งที่ 2 5 กก.		
เวลา	ปริมาณ กระแสไฟ ฟ้าที่ใช้	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อตันชีวมวล)	เวลา	ปริมาณ กระแสไฟ ฟ้าที่ใช้	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อตันชีวมวล)
7.5	25.9		7.5	22.5	
8	27		8	25.7	
8.5			8.5	22.3	
9			9	24.1	
9.5			9.5	26.3	
10			10	26.3	
10.5			10.5	22.3	

12. กระถิน 1/3 ยูคา 1/3 เล้าชานอ้อย 1/3

กระถิน 1/3 ยูคา 1/3 เล้าชานอ้อย 1/3					
ครั้งที่ 1 5 กก.			ครั้งที่ 2 5 กก.		
เวลา	ปริมาณ กระแส ไฟฟ้าที่ใช้	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อตันชีวมวล)	เวลา	ปริมาณ กระแส ไฟฟ้าที่ใช้	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อตันชีวมวล)
0.5	19.7	= 24.06*(10/60)*	0.5	20.4	= 23.47*(10/60)*
1	23.8	220*0.82*200)/1000	1	25.5	220* 0.82*200)/1000
1.5	23.5	= 144.68	1.5	25.1	= 141.10
2	26.7		2	26.3	
2.5	24.9		2.5	26.1	
3	24.7		3	25.6	
3.5	24.4		3.5	24.2	
4	25.1		4	25.3	
4.5	24.1		4.5	24.4	
5	24.7		5	21.1	
5.5	24.2		5.5	23.5	
6	25.6		6	22.3	
6.5	24.6		6.5	24.7	
7	24.7		7	24.1	

12. ภาระดิน 1/3 ยูคา 1/3 เล้าชานอ้อย 1/3 (ต่อ)

ภาระดิน 1/3 ยูคา 1/3 เล้าชานอ้อย 1/3					
ครั้งที่ 1 5 กก.			ครั้งที่ 2 5 กก.		
เวลา	ปริมาณ กระแส ไฟฟ้าที่ใช้	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อตันชีวมวล)	เวลา	ปริมาณ กระแส ไฟฟ้าที่ใช้	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อตันชีวมวล)
7.5	24.6		7.5	23.4	
8	24.6		8	23.1	
8.5	22.3		8.5	22	
9	23.5		9	20.4	
9.5	23.2		9.5	21	
10	22.3		10	20.8	
10.5			10.5		

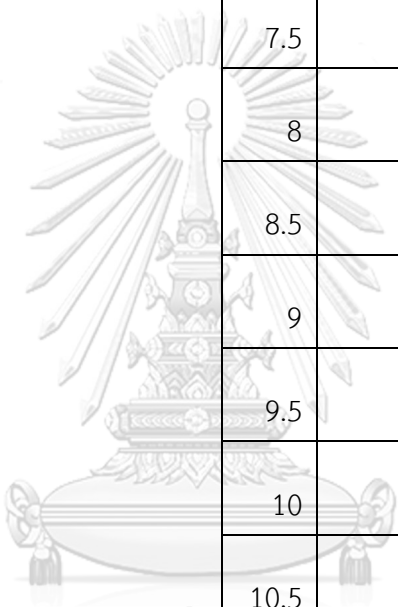
13. กระถิน 1/3 แกลบ 1/3 ถั่วซ่านอ้อย 1/3

กระถิน 1/3 แกลบ 1/3 ถั่วซ่านอ้อย 1/3					
ครั้งที่ 1 5 กก.			ครั้งที่ 2 5 กก.		
เวลา	ปริมาณ กระแส ไฟฟ้าที่ใช้	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อตันชีวมวล)	เวลา	ปริมาณ กระแส ไฟฟ้าที่ใช้	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อตันชีวมวล)
0.5	19.5	$= 24.25*(7/60)*$	0.5	22.5	$= 26.05*(7/60)*$
1	21.2	$220*0.82*200)/1000$	1	24.6	$220*0.82*200)/1000$
1.5	23.6	$= 102.07$	1.5	22.7	$= 109.67$
2	22.6		2	22.4	
2.5	23.4		2.5	29.4	
3	24.9		3	26.2	
3.5	23.5		3.5	25.1	
4	25.9		4	32.2	
4.5	25.5		4.5	28.1	
5	25.2		5	23.3	
5.5	24.8		5.5	25.7	
6	26.4		6	27.4	
6.5	26.5		6.5	28.1	
7	26.5		7	27.1	

14 . ยูคา 1/3 แกลบ 1/3 ถ้ำชานอ้อย 1/3

ยูคา 1/3 แกลบ 1/3 ถ้ำชานอ้อย 1/3					
ครั้งที่ 1 5 กก.			ครั้งที่ 2 5 กก.		
เวลา	ปริมาณ กระแสไฟฟ้า ที่ใช้	ปริมาณพลังงาน ไฟฟ้า (kWh ต่อตัน ชีวมวล)	เวลา	ปริมาณ กระแส ไฟฟ้าที่ใช้	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อตันชีวมวล)
0.5	23.7	$= 25.96 \cdot (11/60)^*$	0.5	25.3	$= 25.05 \cdot (10/60)^*$
1	20.2	$220 \cdot 0.82 \cdot 200)$	1	30.8	$220 \cdot 0.82 \cdot 200) / 1000$
1.5	23.7	$/1000$	1.5	22.8	$= 150.63$
2	27.2	$= 171.74$	2	29.2	
2.5	21.7		2.5	23.6	
3	24.5		3	24.9	
3.5	28		3.5	23.7	
4	30.6		4	24.3	
4.5	33.7		4.5	23.2	
5	34.3		5	23.9	
5.5	32.5		5.5	22.6	
6	25.9		6	31.3	
6.5	19.4		6.5	25.8	
7	19.6		7	22.6	

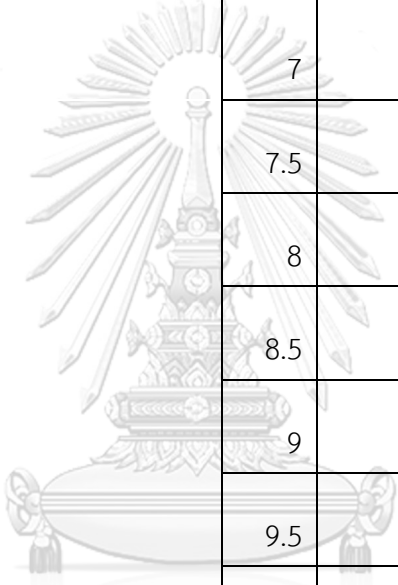
14 . ยูกา 1/3 แกลบ 1/3 ถั่วเขียว 1/3 (ต่อ)

ยูกา 1/3 แกลบ 1/3 ถั่วเขียว 1/3					
ครั้งที่ 1 5 กก.			ครั้งที่ 2 5 กก.		
เวลา	ปริมาณ กระแสไฟฟ้า ที่ใช้	ปริมาณพลังงาน ไฟฟ้า (kWh ต่อตัน ชีวมวล)	เวลา	ปริมาณ กระแส ไฟฟ้าที่ใช้	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อตันชีวมวล)
7.5	30.5		7.5	22.4	
8	20.7		8	24	
8.5	25		8.5	27.5	
9	24.1		9	22.4	
9.5	23.7		9.5	25	
10	22.7		10	25.7	
10.5	33.1		10.5		
11	26.4		11		

15. กระถิน 1/4 ยูคา 1/4 แกลบ 1/4 เล้าชานอ้อย 1/4

กระถิน 1/4 ยูคา 1/4 แกลบ 1/4 เล้าชานอ้อย 1/4					
ครั้งที่ 1 5 กก.			ครั้งที่ 2 5 กก.		
เวลา	ปริมาณ กระแสไฟฟ้า ที่ใช้	ปริมาณพลังงาน ไฟฟ้า (kWh ต่อตัน ชีวมวล)	เวลา	ปริมาณ กระแสไฟ ฟ้าที่ใช้	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อตันชีวมวล)
0.5	19.4	=	0.5	19.1	=
1	19.6	$20.79 \times (10.5/60) \times$	1	20.1	$25.05 \times (7/60) \times 220 \times 0.8$
1.5	19.4	$220 \times 0.82 \times 200) /$	1.5	20.2	$2 \times 200) / 1000$
2	19.6	1000	2	21.1	= 135.12
2.5	20.7	= 131.27	2.5	21.2	
3	20.5		3	22.3	
3.5	21.1		3.5	22.5	
4	21.6		4	22.4	
4.5	21.9		4.5	23	
5	21.3		5	24.5	
5.5	21.7		5.5	23.2	
6	21.5		6	23.5	
6.5	21.8		6.5	24.3	

15. กระถิน 1/4 ยูคา 1/4 แกลบ 1/4 เล้าชานอ้อย 1/4 (ต่อ)

กระถิน 1/4 ยูคา 1/4 แกลบ 1/4 เล้าชานอ้อย 1/4					
ครั้งที่ 1 5 กก.			ครั้งที่ 2 5 กก.		
เวลา	ปริมาณ กระแสไฟฟ้า ที่ใช้	ปริมาณพลังงาน ไฟฟ้า (kWh ต่อตัน ชีวมวล)	เวลา	ปริมาณ กระแสไฟ ฟ้าที่ใช้	ปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kWh ต่อตันชีวมวล)
7	20.3		7	24.2	
7.5	20.5		7.5	24.1	
8	20.8		8	23.1	
8.5	20.5		8.5	23.9	
9	21.6		9	22	
9.5	21.5		9.5	22.4	
10	21.2		10	22.3	
10.5	20.1				

รายการอ้างอิง

1. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, คู่มือฝึกอบรมภาคปฏิบัติด้านพลังงานทดแทน (แก๊สซิพี เคชั่นจากชีวมวล ภาคทฤษฎี). 2559.
2. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, โครงการสาธิตการใช้เชื้อเพลิงอัดเม็ดในหม้อน้ำขนาด เล็กเพื่อทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในภาคอุตสาหกรรม. 2558.
3. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, ฐานข้อมูลศักยภาพชีวมวลในประเทศไทย ประจำปีเพาะ ปลูก พ.ศ. 2556.
4. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, ก., การพัฒนาไม้โตเร็วสกุล *Acacia* เพื่อปลูกบนพื้นที่เสื่อมโทรมสำหรับเป็น เชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า. 2554.
5. สำนักอนามัยสิ่งแวดล้อม, ก., กระทรวงสาธารณสุข, สารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศ (*Volatile Organic Compounds: VOCs*). คู่มือวิชาการ, 2555.
6. Soto-Garcia, L., et al., *VOCs emissions from Multiple Wood Pellet Types and Concentrations in Indoor Air*. *Energy & Fuels*, 2015. 29(10).
7. (APO), A.P.O., *Green Productivity and Green Supply Chain Manual*. 2008.
8. พีรพงษ์ แก้ววิมลรัตน์, การพัฒนาแบบจำลองดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะด้วยเทคนิค เพื่อใช้เป็นแนว ทางการใช้พลังงานมาตรฐาน (*Benchmark*) ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
9. อัครพันธ์ ธรรมไพศาล, เกณฑ์การใช้พลังงานไฟฟ้าในโรงไฟฟ้าประเภทโคเจเนอเรชัน. วิทยานิพนธ์ ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.
10. จักรภพ นาคฤทธิ์, การศึกษาเปรียบเทียบวัฏจักรพลังงานและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตลอดวงจรชีวิต ระหว่างการใช้ดีเซลผสมทานอล ชนิด 95% และ 99.5% ในภาคการขนส่งของประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
11. สุธี เหลืองรัตนเจริญ, การลดต้นทุนพลังงานในกระบวนการผลิตของโรงงานประเภทการฉีดขึ้นรูป. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย, 2552.
12. ธิดา ทศนารธาพันธ์, การประเมินวัฏจักรของการผลิตปูนซีเมนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
13. ปรีชา เกียรติกำจาย, การผลิตถ่านอัดก้อนจากกิ่งไม้ต่างถิ่นสี่ชนิด. *Thai Journal of Forestry*, 2539.

14. อีรพจน์ พุทธิกัญญ์วิวงศ์, การศึกษาการผลิตถ่านอัดแท่งจากต้นถั่วเหลือง ซึ่งเป็นเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในรูปของเชื้อเพลิงทางการเกษตรมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในรูปของเชื้อเพลิง. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, 2549.
15. อภิรักษ์ สวัสดิ์กิจ, การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากกากตะกอนน้ำเสียอุตสาหกรรมเพื่อเป็นพลังงานทดแทน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2551.
16. Miranda, T., et al., *A Review of Pellets from Different Sources*. Materials, 2015. 8.
17. Arshadi, M., et al., *The influence raw material characteristics on the industrial pelletizing process and pellet quality*. 2008, 2008. 89(12).
18. Selivanovs, J., et al., *Research of Woody Biomass Drying Process in Pellet Production*. 2012.
19. z.Ghorbani, A.A.Masoumi, and A.Hemmat, *Specific energy consumption for reducing the size of alfafa chops using a hammer mill*. Biosystems Engineering, 2010. 90(11).
20. Holm, J.K., et al., *Optimization of a Multiparameter Model for Biomass Pelletization to Investigate Temperature Dependence and to Facilitate Fast Testing of Pelletization Behavior*. Energy & Fuels, 2011.
21. Uasuf, A. and G. Becker, *Wood pellets production costs and energy consumption under different framework conditions in Northeast Argentina*. Biomass and Bioenergy, 2011. 35(3).
22. A.B.Ross, et al., *Measurement and prediction of the emission of pollutants from the combustion of coal and biomass in a fixed bed furnace*. Fuel, 2002. 81.
23. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, รายงานฉบับสุดท้ายโครงการศึกษากำหนดมาตรฐานของ *Biomass Pellet* เพื่อพัฒนาเป็นเชื้อเพลิงสำหรับอนาคต.
24. สมศักดิ์ แก้วพลอย, การพัฒนาสูตรที่เหมาะสมสำหรับลูกชิ้นเอ็นไก่ผสมผักพื้นบ้านโดยวิธีการออกแบบการทดลอง. การประชุมวิชาการ การพัฒนาชนบทที่ยั่งยืน, 2557.

25. Bangphan, S., S. Lee, and S. Jomjunyong, *The statistical Mixture Design of Rice Polishing Cylinder*. Proceedings of the World Congress on Engineering 2008, 2008. 2.
26. Ayed, L., S. Achour, and A. Bakhrouf, *Application of the mixture design to decolorize effluent textile wastewater using continuous stirred bed reactor*. 2010.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY