



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย อิทธิพลของขนาดบดผงอนุภาคเศษพืชเหลือใช้จากงานเกษตรกรรมสำหรับอัด
ขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล

โดย ดร.อนินท์ มีมนต์ และคณะ

25 พฤศจิกายน 2558

สัญญาเลขที่ RDG5750049

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย อิทธิพลของขนาดบดผงอนุภาคเศษพืชเหลือใช้จากงานเกษตรกรรมสำหรับอัดขึ้น
รูปเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล

คณะผู้วิจัย	สังกัด
1 ดร.อนินท์ มีมนต์ Dr. Anin Memon	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
2 ผศ.ศุภเอก ประมูลมาก Asst. Prof. Supaaek Pramoonmak	ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
3 นายจิรววัฒน์ ใจอู่ Mr. Jirawat Jai-u	ภาควิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ชุดโครงการ การวิจัยด้านวิสาหกิจชุมชน และวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม (SMEs)
สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)
และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย วช.-สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

แบบสรุปผลการดำเนินงาน

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

ความเป็นมา

เป็นที่ทราบกันดีว่าประเทศไทยเป็นประเทศกสิกรรม ประชากรส่วนใหญ่ของประเทศประกอบอาชีพเกษตรกร ผลผลิตมวลรวมของเกษตรกรในแต่ละฤดูการเก็บเกี่ยวจะมีเศษเหลือใช้ในอัตราส่วน 1-1.5 ตัน ต่อตันของผลผลิตที่ได้ นั้นหมายถึงว่าในแต่ละช่วงของการเก็บเกี่ยวพืชผลทางการเกษตรจะมีปริมาณมาก และชีวมวลเหล่านี้มีปริมาณที่มากเพียงพอต่อการนำมาผลิตใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับการผลิตพลังงานทดแทน โดยทั่วไปการใช้พลังงานจากชีวมวลสามารถทำได้โดยการเผาโดยตรง ซึ่งในปัจจุบันพบว่าเชื้อเพลิงชีวมวลถูกนำไปใช้ในกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภท เช่น โรงงานเซรามิก โรงงานอบแห้ง และที่สำคัญโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าจากชีวมวล และยังมีแนวโน้มถึงการพัฒนาใช้งานไปอย่างต่อเนื่อง เพื่อเป็นการใช้พลังงานจากพืชหมุนเวียนที่มีการเพาะปลูกตลอดปี ช่วยลดปัญหาการปล่อยก๊าซที่มีผลกระทบต่อภาวะ โลกร้อน แต่การนำเชื้อเพลิงชีวมวลที่เป็นเศษพืชเหลือใช้จากงานเกษตรกรรมมาใช้ประโยชน์โดยตรงนั้นสามารถทำได้ยาก เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ไม่เหมาะสมกับการใช้งาน คือ มีขนาดไม่สม่ำเสมอ มีความชื้นสูง และมีความหนาแน่นต่ำทำให้ต้องใช้พื้นที่ในการจัดเก็บและขนส่งมาก สิ้นเปลืองพลังงานและค่าใช้จ่าย ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่จะแก้ปัญหาดังกล่าว โดยการแปรรูปเป็นเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่ผ่านกระบวนการอัดด้วยแรงดันสูงทำให้มีความหนาแน่นสูง และมีขนาดเล็กทำให้สามารถนำระบบการป้อนเชื้อเพลิงอัตโนมัติมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลมีข้อดีหลายประการ เช่น สะดวกในการขนส่ง และประหยัดค่าขนส่งเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดอื่น เนื่องจากมีความหนาแน่นสูง สามารถควบคุมปริมาณการใช้ได้ง่าย เพราะมีขนาดที่เท่าๆกัน มีน้ำหนักที่ค่อนข้างแน่นอน ประสิทธิภาพของอัตราการเผาไหม้สามารถควบคุมได้ มีชี้อุ่นน้อยกว่า ชีวมวลประเภทอื่น ให้พลังงานความร้อนมากกว่าชีวมวลประเภทอื่น และค่าความชื้นต่ำ ซึ่งความชื้นของเชื้อเพลิงมีอัตราแปรผกผันกับค่าพลังความร้อนของการเผาไหม้ ขั้นตอนของการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลประกอบด้วย ขั้นตอนการบดย่อย ขั้นตอนการอบแห้ง วัตถุดิบเพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมสำหรับอัดเป็นเม็ด กระบวนการบดย่อยเป็นอีกกระบวนการที่สำคัญที่ทำให้วัตถุดิบมีขนาดอนุภาคที่เท่ากัน และมีขนาดเล็กจะช่วยให้เม็ดเชื้อเพลิงมีค่าความหนาแน่นที่สม่ำเสมอ ลดแรงในการอัดขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล

โครงการวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาอิทธิพลของขนาดบดผงอนุภาคเศษพืชเหลือใช้จากงานเกษตรกรรมสำหรับอัดขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล ซึ่งเป็นโครงการย่อยของแผนงานวิจัยกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลจากเศษพืชเหลือใช้จากงานเกษตรกรรม ที่บูรณาการกระบวนการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล โดยทำการออกแบบและสร้างเครื่องบดย่อยชีวมวล และศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการบดย่อยชีวมวลจากเศษพืชเหลือใช้จากงานเกษตรกรรม เพื่อนำไปสู่กระบวนการอัดขึ้นรูปที่มีประสิทธิภาพ ทำให้ความหนาแน่นของเม็ดเชื้อเพลิงมีความสม่ำเสมอ

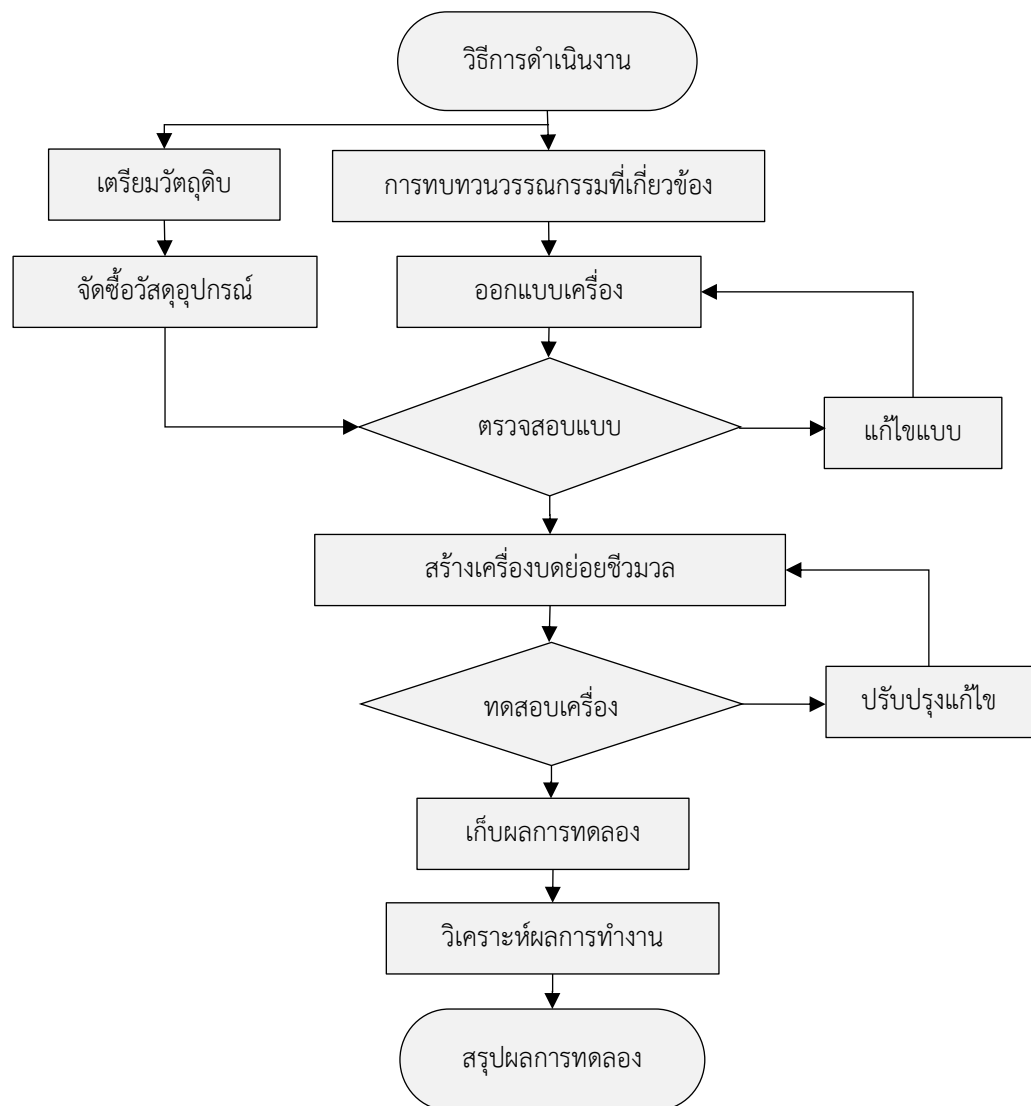
วัตถุประสงค์

1. เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องบดย่อยชีวมวล ที่สามารถบดได้ผงอนุภาคขนาด 40, 60, และ 80 Mesh จากฟางข้าว, ชังข้าวโพด, เปลือกถั่วเหลือง และขี้เลื่อย สำหรับผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล

2. เพื่อศึกษากระบวนการบดย่อยชีวมวลที่เป็นผลสัมฤทธิ์จากโครงการวิจัยย่อยที่ 1 และศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคสำหรับขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล
3. เพื่อถ่ายทอดองค์ความรู้ ถ่ายทอดเทคโนโลยี และนวัตกรรม ของกระบวนการผลิตเม็ดเชื้อเพลิง ชีวมวล ให้กับกลุ่มเกษตรกรเป้าหมาย

วิธีดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินโครงการวิจัยเพื่อออกแบบและสร้างเครื่องบดย่อยชีวมวลจากเศษพืชเหลือใช้จากงานเกษตรกรรม สำหรับผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลนั้น ผู้วิจัยได้เริ่มจากการศึกษาข้อมูลรายละเอียดต่างๆ เกี่ยวกับกระบวนการบดย่อย และดำเนินการออกแบบสร้างเครื่องบดย่อยชีวมวล โดยมีแนวทางในการออกแบบให้สามารถใช้งานได้ง่าย มีความปลอดภัย มีราคาไม่สูงมาก สะดวกต่อการปฏิบัติงาน ชุมชนสามารถซ่อมและบำรุงรักษาได้ ซึ่งสามารถสรุปวิธีการดำเนินงานวิจัยมีขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 1 แผนภาพแสดงวิธีการดำเนินงาน

ผลการค้นพบตามวัตถุประสงค์ของโครงการ

1. การออกแบบและสร้างเครื่องบดย่อยชีวมวล

โครงการนี้มุ่งเน้น ออกแบบและสร้างเครื่องบดย่อยชีวมวลสำหรับผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจากเศษพืชเหลือใช้จากงานเกษตรกรรม เพื่อเป็นโครงการนำร่องโรงงานผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับกลุ่มวิสาหกิจชุมชน กลุ่มธุรกิจขนาดเล็ก โดยผู้วิจัยได้ดำเนินการออกแบบเครื่องบดย่อยชีวมวล ประกอบด้วย ชุดของค้อนหรือใบตี (hammer) จำนวน 64 ใบ ใช้มอเตอร์ไฟฟ้า 10 แรงม้าเป็นเครื่องต้นกำลัง ทำการขับเคลื่อนให้เพลารอเตอร์หมุนด้วยความเร็วประมาณ 1,000 รอบต่อนาที มีพัดลมดูดอากาศสำหรับดูดวัตถุติดออกจากห้องบดเพื่อบรรจุลงในถุงกระสอบ และชุดใบมีดตัดหญ้าเพื่อรองรับวัตถุดิบที่มีขนาดใหญ่เช่น ชังข้าวโพด เป็นต้น

2. การทดลองบดย่อย

พบว่าปริมาณความชื้นในวัตถุดิบส่งผลต่อการบดย่อย ปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณการบดย่อยลดลง เนื่องจากความชื้นทำให้วัตถุดิบมีความเหนียวขึ้นทำให้การบดย่อยได้ยากขึ้น และพบว่าชนิดของวัตถุดิบมีผลต่อการบดย่อย โดยเฉพาะฟางข้าว เนื่องจากลักษณะของฟางข้าวเป็นเส้นยาวมีความเหนียวทำให้การบดย่อยทำได้ยาก และส่งผลให้ปริมาณการบดย่อยต่ำ ในส่วนของชังข้าวโพดมีปริมาณการผลิตสูงกว่าฟางข้าวแต่ยังน้อยกว่าเปลือกถั่วเหลืองและซีเลื่อย เนื่องจากชังข้าวโพดมีความเปราะทำให้ง่ายต่อการบดย่อยด้วยการทุบหรือตี เปลือกถั่วเหลืองมีปริมาณการบดย่อยมากกว่าฟางข้าวและชังข้าวโพด เพราะลักษณะของเปลือกถั่วเหลืองมีขนาดเล็กและเปราะทำให้บดย่อยได้ง่ายกว่า และซีเลื่อยมีปริมาณการบดย่อยสูงที่สุด เนื่องจากซีเลื่อยมีขนาดเล็ก หรือบางส่วนอาจมีขนาดเล็กกว่ารูตะแกรงทำให้ใช้เวลาในการบดย่อยน้อย

3. การทดลองอัดขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล

พบว่าไม่สามารถอัดขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงภายใต้ตัวแปรที่กำหนดได้ทุกตัวแปร โดยฟางข้าวสามารถนำมาอัดเป็นเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลได้ที่ขนาดอนุภาค 60 และ 80 Mesh ชังข้าวโพดสามารถนำมาอัดเป็นเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลได้ที่ขนาดอนุภาค 80 Mesh เปลือกถั่วเหลืองและซีเลื่อยสามารถนำมาอัดเป็นเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลได้ทั้ง 4 ขนาดอนุภาค สาเหตุที่ทำให้ไม่สามารถอัดเม็ดเชื้อเพลิงได้นั้น เกิดจากปริมาณลิกนินในฟางข้าว และชังข้าวโพด มีน้อย นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอีกหลายอย่างที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการอัดเม็ดเช่น ความชื้นในวัตถุดิบ ความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการอัด และอัตราการป้อน

4. ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ

4.1 การทดสอบความหนาแน่นเม็ด (Pellet Density) - พบว่าเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจากฟางข้าว เปลือกถั่วเหลือง และซีเลื่อย มีค่าความหนาแน่นเม็ดตามมาตรฐาน DIN 51731 (Density Pellet: $\geq 1,000 \text{ kg/m}^3$) กำหนด โดยเม็ดฟางข้าวมีค่าความหนาแน่นเม็ดอยู่ระหว่าง $1,221 - 1,252 \text{ kg/m}^3$ เม็ดเปลือกถั่วเหลืองมีค่าความหนาแน่นเม็ดอยู่ระหว่าง $1,200 - 1,301 \text{ kg/m}^3$ และเม็ดซีเลื่อยมีค่าความหนาแน่นเม็ดอยู่ระหว่าง $1,098 - 1,233 \text{ kg/m}^3$ ในส่วนของเม็ดชังข้าวโพดความหนาแน่นเม็ด 996 kg/m^3 ต่ำกว่ามาตรฐานกำหนดเล็กน้อย

4.2 การทดสอบความหนาแน่นรวม (Bulk Density) - พบว่าเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจากฟางข้าว เปลือกถั่วเหลือง และซีเลื่อย มีค่าความหนาแน่นรวมตามมาตรฐาน DIN EN 14961-2 (Bulk Density: $\geq 600 \text{ kg/m}^3$) กำหนด โดยเม็ดฟางข้าวมีค่าความหนาแน่นรวมอยู่ระหว่าง $618 - 628 \text{ kg/m}^3$ เม็ดเปลือกถั่วเหลืองมีค่าความหนาแน่นรวมอยู่ระหว่าง $601 - 626 \text{ kg/m}^3$ และเม็ดซีเลื่อยมี

ค่าความหนาแน่นรวมอยู่ระหว่าง 608 - 630 kg/m³ เม็ดซึ่งข้าวโพดมีค่าความหนาแน่นรวม 508 kg/m³ ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐานกำหนดไว้ และผลการทดสอบความหนาแน่นรวมมีความสอดคล้องกับความหนาแน่นเม็ด กล่าวคือความหนาแน่นเม็ดสูงส่งผลให้ความหนาแน่นรวมสูงขึ้นตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ดีความหนาแน่นรวมไม่ได้ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นเม็ดเพียงอย่างเดียว ความยาวของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลมีผลต่อความหนาแน่นเม็ดด้วยเช่นกัน หากความยาวโดยเฉลี่ยมีค่าสูงก็จะส่งผลให้ความหนาแน่นรวมลดลง ดังนั้นในการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลควรมีการควบคุมความยาวของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลไม่ให้สูงกว่ามาตรฐานกำหนด (3.15 – 40 มิลลิเมตร)

4.3 การทดสอบความทนทาน (Durability) - พบว่าค่าความทนทานของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลมีค่าอยู่ระหว่าง 92% - 98% และผลการทดลองส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน DIN EN 14961-2 (Durability: 96.5% ≥ 97.5%) มีเพียงเม็ดเปลือกถั่วเหลือง และซีเลื้อย ที่ขนาดอนุภาค 40 และ 60 Mesh มีค่าตามมาตรฐานกำหนด ซึ่งค่าความทนทานที่ต่างกันนั้น มีผลมาจากสัดส่วนปริมาณของลิกนินในวัตถุดิบ ความชื้นในวัตถุดิบ ความร้อน อัตราการป้อน และแรงที่ใช้ในการอัด

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการพัฒนาเครื่องบดย่อยชีวมวลให้สามารถบดย่อยซึ่งข้าวโพดให้มีขนาดอนุภาค 80 Mesh
2. วัตถุดิบที่จะนำมาบดย่อย ด้วยเครื่องบดย่อยชีวมวล ควรเป็นวัตถุดิบที่มีขนาดเล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 30 มิลลิเมตร ไม่เป็นวัตถุดิบที่มีความแข็งสูง เช่น กิ่งไม้ กะลามะพร้าว
3. หากต้องการให้มีคุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐานกำหนด จำเป็นต้องมีการพัฒนาสัดส่วนชีวมวลขึ้น หรือมีการผสมกันระหว่างชีวมวล เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติให้เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน
4. การนำวัตถุดิบหลังการบดย่อยไปคัดแยกขนาดเพื่อนำไปอัดขึ้นรูปเป็นเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลนั้น เป็นการเพิ่มขั้นตอนการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล และเพิ่มต้นทุนในการผลิต ดังนั้นหากต้องการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลในจำนวนมากๆเพื่อจำหน่าย ควรเลือกชีวมวลที่สามารถนำไปอัดเป็นเม็ดเชื้อเพลิงได้โดยไม่ต้องนำไปคัดแยกขนาดอนุภาค

การนำไปใช้ประโยชน์

1. ได้ถ่ายทอดองค์ความรู้ และกระบวนการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล ให้กับกลุ่มเกษตรกร องค์กรการบริหารส่วนตำบลน้ำเลา อำเภอร่องขวาง จังหวัดแพร่ ให้มีความเข้าใจและเห็นถึงศักยภาพของเศษชีวมวล เพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีคุณภาพ และได้เล็งเห็นถึงช่องทางการเพิ่มรายได้
2. เผยแพร่ผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 8, 4-6 พฤศจิกายน 2558

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการออกแบบและสร้างเครื่องบดย่อยชีวมวล เพื่อทำการบดย่อย ฟางข้าว ชังข้าวโพด เปลือกถั่วเหลือง และขี้เลื่อย ด้วยตะแกรงขนาด 3 มิลลิเมตร และนำไปคัดแยก ขนาดอนุภาค 40, 60 และ 80 Mesh เพื่อศึกษาขนาดอนุภาคผงบดที่มีผลต่อการอัดขึ้นรูปเม็ด เชื้อเพลิงชีวมวล โดยทำการทดสอบความหนาแน่นเม็ด (Pellet Density) ความหนาแน่นรวม (Bulk Density) และความทนทาน (Durability) จากการทดลองอัดขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลพบว่า ที่ขนาด อนุภาคผงบดที่ผ่านการบดย่อยด้วยตะแกรง 3 มิลลิเมตร ไม่สามารถอัดขึ้นรูปฟางข้าว และชัง ข้าวโพดได้สมบูรณ์ ที่ขนาดอนุภาค 40 Mesh ไม่สามารถอัดขึ้นรูปฟางข้าว และชังข้าวโพดได้สมบูรณ์ และที่ขนาดอนุภาค 60 Mesh ไม่สามารถอัดขึ้นรูปชังข้าวโพดได้สมบูรณ์ โดยเม็ดเชื้อเพลิงที่ได้ไม่มีความแข็งแรงหักแตกง่าย ในส่วนของขนาดอนุภาค 80 Mesh สามารถอัดขึ้นรูปวัตถุดิบได้ทุกชนิด และจากการทดสอบความหนาแน่นเม็ดและความหนาแน่นรวม พบว่าเม็ดฟางข้าว มีค่าความหนาแน่นเม็ด $1,252 - 1,221 \text{ kg/m}^3$ และค่าความหนาแน่นรวม $618 - 628 \text{ kg/m}^3$, เม็ดเปลือกถั่วเหลือง มีค่าความหนาแน่นเม็ด $1,200 - 1,301 \text{ kg/m}^3$ และค่าความหนาแน่นรวม $601 - 626 \text{ kg/m}^3$ และเม็ดขี้เลื่อยมีค่าความหนาแน่นเม็ด $1,098 - 1,233 \text{ kg/m}^3$ และค่าความหนาแน่นรวม $608 - 630 \text{ kg/m}^3$ ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน DIN 51731 ($<1,000 \text{ kg/m}^3$) และ DIN EN 14961-2 ($<600 \text{ kg/m}^3$) กำหนด ในส่วนของชังข้าวโพดมีความหนาแน่นเม็ดและความหนาแน่นรวมต่ำกว่ามาตรฐานเล็กน้อย คือ 996 kg/m^3 และ 508 kg/m^3 ตามลำดับ ผลการทดสอบความทนทาน (Durability) พบว่าค่าความทนทานของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลมีค่าอยู่ระหว่าง 92% - 98% และผลการทดสอบส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน DIN EN 14961-2 (Durability: $96.5\% \geq 97.5\%$) มีเพียงเม็ดเปลือกถั่วเหลือง และขี้เลื่อยที่ขนาดอนุภาค 40 และ 60 Mesh มีค่าตามมาตรฐานกำหนด

คำสำคัญ : ค่าความหนาแน่นเม็ด, ความหนาแน่นรวม และ ความทนทาน

Abstract

The purpose of this analysis is to design and build biomass grinding machine to grind rice straw, corn cob, soybean hull and sawdust with 3ml sieve. The process then selects particle size of 40, 60, 80 Mesh to study the best size for pelletization of biomass fuel pellet. Pellet density, bulk density, and durability are the factor within this analysis. The pelletization reveals that particle size strained by 3 ml sieve cannot perfectly be formed into pellet using rice straw and corn cob. Particle size at 40 Mesh of rice straw and corn cob is not perfect for pelletization. Particle size of 60 Mesh using corn cob is also not perfect due to fragility and low durability. However, testing particle size at 80 using all 4 type of raw materials produces a different result. The analysis reveals that at 80 Mesh, pellet density of rice straw is at 1,252-1,221 kg/m^3 and bulk density is at 618-628 kg/m^3 . Soybean hull pellet density is 1,200-1,301 kg/m^3 with bulk density of 601-626 kg/m^3 . Sawdust pellet density is 1,098-1,233 kg/m^3 with bulk density of 608-630 kg/m^3 . All fall within standard DIN 51731 ($<1,000 \text{ kg/m}^3$) and DIN EN 14961-2 ($<600 \text{ kg/m}^3$). In regard to corn cob, it has both pellet and bulk density at 996 kg/m^3 and 508 kg/m^3 respectively, which both are slightly less than standard. The analysis reveals that biomass pellet durability value falls between 92% - 98% -- which is less than the determined standard of DIN EN 14961-2 (Durability: $96.5\% \geq 97.5\%$). Only soybean hull and sawdust at particle size of 40 and 60 Mesh meet the standard.

Keyword: Pellet Density, Bulk Density, Durability

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยประจำปี 2557 ทำให้งานวิจัยชิ้นนี้สามารถดำเนินการ และบรรลุวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ และภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่ให้อำนวยความสะดวกในการใช้สถานที่ในการทดลอง และให้เครื่องมือสำหรับเก็บผลการทดลอง

สุดท้าย คณะผู้วิจัย ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครูบาอาจารย์ ที่อบรมสั่งสอน จนทำให้คณะผู้วิจัยมีโอกาสดำเนินการวิจัยนี้ นอกจากนี้ขอกราบขอบพระคุณทุกท่านที่มีความเกี่ยวข้องกับงานวิจัยชิ้นนี้ ซึ่งคณะผู้วิจัยไม่ได้เอ่ยนามถึง ประโยชน์อันใดที่เกิดจากงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยขอขอบแต่ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือจนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คณะผู้วิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญตาราง	จ
สารบัญรูป	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการดำเนินการ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและการทบทวนวรรณกรรม	3
2.1 ทบทวนวรรณกรรม	3
2.2 เครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์	6
2.3 การออกแบบทางวิศวกรรม	9
2.4 เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon Steels)	10
2.5 เพลลา	11
2.6 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	13
2.7 การออกแบบสายพาน	17
2.8 การปรับปรุงคุณสมบัติทางกล	19
2.9 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับระบบไฟฟ้า	21
บทที่ 3 วิธีดำเนินการ	26
3.1 ขั้นตอนการดำเนินการ	26
3.2 การออกแบบและสร้างเครื่องบดย่อยชีวมวล	27
3.3 การทดลอง	33
3.4 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล	36
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์	40
4.1 ผลการทดลองบดย่อยชีวมวล	40
4.2 ผลการทดลองอัดเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล	43
4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ	44
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	48
5.1 สรุป	48
5.2 ข้อเสนอแนะ	49
บรรณานุกรม	50
ภาคผนวก ก คู่มือการใช้งาน	53
ภาคผนวก ข กิจกรรมการดำเนินงาน	57

สารบัญ (ต่อ)

ภาคผนวก ค ผลการทดสอบ	70
ภาคผนวก ง ผลการทดสอบสถิติ การวิเคราะห์ต้นทุน	75
ภาคผนวก จ การวิเคราะห์ต้นทุน แบบชิ้นส่วนเครื่องอบแห้งชีวมวล	91
ภาคผนวก ฉ ตารางเปรียบเทียบวัตถุดิบประสมค์ และกิจกรรมที่วางแผนไว้	93
ภาคผนวก ช แบบชิ้นส่วนเครื่องอบแห้งชีวมวล	95
ภาคผนวก ซ การเผยแพร่ผลงานวิจัย	131

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	ชิ้นส่วนเครื่องบดย่อยชีวมวล	28
3.2	คุณลักษณะเฉพาะของเครื่องบดย่อยชีวมวล	30
3.3	บันทึกผลการทดสอบบดย่อยฟางข้าว, ชังข้าวโพด, เปลือกถั่วเหลือง, ชี้เลื่อย ที่ผ่านการบดย่อยด้วยตะแกรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ที่ความชื้น แต่ละระดับ และที่ผ่านการคัดแยกขนาดอนุภาค 40, 60 และ 80 Mesh	35
3.4	ตารางบันทึกผลการทดสอบความหนาแน่นเม็ด (Pellet Density)	37
3.5	ตารางบันทึกผลการทดสอบความหนาแน่นรวม (Bulk Density)	38
3.6	ตารางบันทึกผลการทดสอบความทนทาน (Durability)	39
4.1	ผลการทดสอบความหนาแน่นเม็ด (ค่าเฉลี่ย)	44
4.2	ผลการทดสอบความหนาแน่นรวมของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล (ค่าเฉลี่ย)	45
4.3	ผลการทดสอบความทนทานของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล (ค่าเฉลี่ย)	46

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	เครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ (Hammer Mill)	6
2.2	หัวค้อนของเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ที่ผ่านการใช้งานและเกิดการสึกหรอ	8
2.3	ตะแกรงบดแฮมเมอร์มิลล์	8
2.4	มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	13
2.5	โครงมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	14
2.6	แกนเหล็กสเตเตอร์และขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	14
2.7	การพันขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบแลป (Lap Winding)	14
2.8	ฝาปิดหัวท้าย	15
2.9	การเกิดแรงบิดที่ตัวนำของโรเตอร์	16
2.10	การเริ่มเดินมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบโรเตอร์พันขดลวด	16
2.11	สายพาน	17
2.12	หน้าตัดสายพานลิ่มและล้อสายพาน	18
2.13	ควบคุมระบบแมกเนติกคอนแทคเตอร์ (Control using Magnetic Contractor)	22
2.14	โครงสร้างภายในของสวิตช์แบบกดติดปล่อยดับและการเคลื่อนที่ของหน้าสัมผัส	22
2.15	สวิตช์แบบกดติดปล่อยดับแบบต่างๆและสัญลักษณ์ทางไฟฟ้า	23
2.16	สวิตช์แบบเลือกและสัญลักษณ์ทางไฟฟ้า	23
2.17	หลอดไฟสัญญาณและสัญลักษณ์ทางไฟฟ้า	23
2.18	ส่วนประกอบและสัญลักษณ์ของแมกเนติกคอนแทคเตอร์	24
2.19	การทำงานของแมกเนติกคอนแทคเตอร์	24
2.20	โอเวอร์โหลดแบบอาศัยความร้อนและสัญลักษณ์	25
2.21	อุปกรณ์ป้องกันการลัดวงจร	25
3.1	แผนภาพขั้นตอนการดำเนินงาน	26
3.2	โครงสร้างเครื่องบดย่อยชีวมวล	27
3.3	เครื่องบดย่อยชีวมวล	33
3.4	วัตถุดิบ ฟางข้าว ก), ชังข้าวโพด ข), เปลือกถั่วเหลือง ค), และขี้เลื่อย ง)	34
3.5	การทดลองบดย่อยวัตถุดิบ	34
3.6	แสดงขนาดอนุภาคชีวมวลที่ผ่านการบดย่อยโดยใช้ตะแกรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร, 5 มิลลิเมตร, และ 7 มิลลิเมตร	35
3.7	แสดงเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล	36
3.8	กล่องสี่เหลี่ยมสำหรับทดสอบความทนทาน	39
4.1	กราฟเปรียบเทียบปริมาณการบดย่อยวัตถุดิบทั้ง 4 ชนิด ที่ผ่านการบดย่อยด้วยตะแกรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ที่มีปริมาณความชื้นแต่ละระดับ	40
4.2	กราฟเปรียบเทียบปริมาณการคัดแยกขนาดอนุภาคหลังการบดย่อยที่มีปริมาณความชื้นไม่เกิน 15% ก), ปริมาณความชื้น 16% – 22% ข), ปริมาณความชื้น 23% - 30% ค)	42

สารบัญรูป (ต่อ)

4.3	แสดงเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลหลังการอัดขึ้นรูปด้วยขนาดอนุภาคต่างๆ	43
4.4	กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลทดสอบความหนาแน่นเม็ดของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลทั้ง 4 ชนิด ที่อัดขึ้นรูปที่ขนาดอนุภาคแต่ละขนาด	44
4.5	กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลทดสอบความหนาแน่นรวมของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลทั้ง 4 ชนิด ที่อัดขึ้นรูปที่ขนาดอนุภาคแต่ละขนาด	45
4.6	กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลทดสอบความทนทานของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลทั้ง 4 ชนิด ที่อัดขึ้นรูปที่ขนาดอนุภาคแต่ละขนาด	47

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

τ_y	ความเค้นเฉือนที่จุดคราก (N/mm^2)
σ_y	ความต้านทานแรงดัดคราก (N/mm^2)
τ_d	ความต้านทานแรงเฉือนคราก (N/mm^2)
N_y	ค่าความปลอดภัย
τ	ความเค้นเฉือนในเพลลา (N/mm^2)
J	ค่า Polar Second Moment Of Area (m^4)
D	เส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องบิด (m)
r	รัศมีเพลลา (mm)
F	ความถี่ (Hz)
P	กำลังมอเตอร์ มีหน่วยเป็นวัตต์ (w) หรือ กิโลวัตต์ (kw)
T	โมเมนต์แรงบิด (N.m)
n	ความเร็วรอบ (rpm)
L_p	ความยาวโดยประมาณของสายพานลิ้ม
C	ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของเพลลา
D_p	เส้นผ่านศูนย์กลางของ Pulleys ตัวใหญ่
d_p	เส้นผ่านศูนย์กลางของ Pulleys ตัวเล็ก
Z	จำนวนสายพาน
W_p	กำลังที่ต้องการส่ง
N	ตัวประกอบชิ้นงาน
N_a	ตัวประกอบแก้ไขส่วนโค้ง
N_1	ตัวประกอบแก้ไขความยาวสายพาน
P_R	กำลังที่ส่งสายพานต่อเส้น
M_w	ความขึ้นมาตรฐานเปียก ,เศษส่วน
w	มวลของวัสดุ มีหน่วยเป็น (kg)
d	มวลของวัสดุแห้งที่ไม่มีความชื้น
M	ความขึ้นมาตรฐานแห้ง ,เศษส่วน

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

เป็นที่ทราบกันดีว่าประเทศไทยเป็นประเทศกสิกรรม ประชากรส่วนใหญ่ของประเทศประกอบอาชีพเกษตรกร ผลผลิตมวลรวมของเกษตรกรในแต่ละฤดูการเก็บเกี่ยวจะมีเศษเหลือใช้ในอัตราส่วน 1-1.5 ตันต่อตันของผลผลิตที่ได้ [1] นั้นหมายถึงว่าในแต่ละช่วงของการเก็บเกี่ยวพืชผลทางการเกษตรจะมีปริมาณมาก และชีวมวลเหล่านี้มีปริมาณที่มากเพียงพอต่อการนำมาผลิตใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับการผลิตพลังงานทดแทน โดยทั่วไปการใช้พลังงานจากชีวมวลสามารถทำได้โดยการเผาโดยตรง ซึ่งในปัจจุบันพบว่าเชื้อเพลิงชีวมวลถูกนำไปใช้ในกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภท เช่น โรงงานเซรามิก โรงงานอบแห้ง และที่สำคัญโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าจากชีวมวล และยังมีแนวโน้มถึงการพัฒนาใช้งานไปอย่างต่อเนื่อง เพื่อเป็นการใช้พลังงานจากพืชหมุนเวียนที่มีการเพาะปลูกตลอดปี ช่วยลดปัญหาการปล่อยก๊าซที่มีผลกระทบต่อภาวะโลกร้อน แต่การนำเชื้อเพลิงชีวมวลที่เป็นเศษพืชเหลือใช้จากงานเกษตรกรรมมาใช้ประโยชน์โดยตรงนั้นสามารถทำได้ยาก เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ไม่เหมาะสมกับการใช้งาน คือ มีขนาดไม่สม่ำเสมอ มีความชื้นสูง และมีความหนาแน่นต่ำทำให้ต้องใช้พื้นที่ในการจัดเก็บและขนส่งมาก สิ้นเปลืองพลังงานและค่าใช้จ่าย ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่จะแก้ปัญหาดังกล่าว โดยการแปรรูปเป็นเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่ผ่านกระบวนการอัดด้วยแรงดันสูงทำให้มีความหนาแน่นสูง [2] และมีขนาดเล็กทำให้สามารถนำระบบการป้อนเชื้อเพลิงอัตโนมัติมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลมีข้อดีหลายประการ เช่น สะดวกในการขนส่ง และประหยัดค่าขนส่งเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดอื่น เนื่องจากมีความหนาแน่นสูง สามารถควบคุมปริมาณการใช้ได้ง่าย เพราะมีขนาดที่เท่าๆกัน มีน้ำหนักที่ค่อนข้างแน่นอน ประสิทธิภาพของอัตราการเผาไหม้สามารถควบคุมได้ มีขี้เถ้าน้อยกว่าชีวมวลประเภทอื่น ให้พลังงานความร้อนมากกว่าชีวมวลประเภทอื่น และค่าความชื้นต่ำ ซึ่งความชื้นของเชื้อเพลิงมีอัตราแปรผกผันกับค่าพลังงานความร้อนของการเผาไหม้ ขั้นตอนของการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลประกอบด้วย ขั้นตอนการบดย่อย ขั้นตอนการอบแห้ง วัตถุดิบเพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมสำหรับอัดเป็นเม็ด กระบวนการบดย่อยเป็นอีกกระบวนการที่สำคัญที่ทำให้วัตถุดิบมีขนาดอนุภาคที่เท่ากัน และมีขนาดเล็กจะช่วยให้เม็ดเชื้อเพลิงมีค่าความหนาแน่นที่สม่ำเสมอ ลดแรงในการอัดขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล

โครงการวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาอิทธิพลของขนาดบดผงอนุภาคเศษพืชเหลือใช้จากงานเกษตรกรรมสำหรับอัดขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล ซึ่งเป็นโครงการย่อยของแผนงานวิจัยกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลจากเศษพืชเหลือใช้จากงานเกษตรกรรม ที่บูรณาการกระบวนการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล โดยทำการออกแบบและสร้างเครื่องบดย่อยชีวมวล และศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการบดย่อยชีวมวลจากเศษพืชเหลือใช้จากงานเกษตรกรรม เพื่อนำไปสู่กระบวนการอัดขึ้นรูปที่มีประสิทธิภาพ ทำให้ความหนาแน่นของเม็ดเชื้อเพลิงมีความสม่ำเสมอ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องบดย่อยชีวมวล ที่สามารถบดได้ผงอนุภาคขนาด 40, 60, 80 Mesh จากฟางข้าว, ชังข้าวโพด, เปลือกถั่วเหลือง และขี้เลื่อย สำหรับผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล

1.2.2 เพื่อศึกษากระบวนการบดย่อยชีวมวลที่เป็นผลสัมฤทธิ์จากโครงการวิจัยย่อยที่ 1 และศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคสำหรับขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล

1.2.3 เพื่อถ่ายทอดองค์ความรู้ ถ่ายทอดเทคโนโลยี และนวัตกรรม ของกระบวนการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล ให้กับกลุ่มเกษตรกรเป้าหมาย

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการดำเนินการ

1.3.1 เครื่องบดย่อยชีวมวล ฟางข้าว ชังข้าวโพด เปลือกถั่วเหลือง และขี้เลื่อย เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการอัดเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล

1.3.2 ได้เม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจากฟางข้าว ชังข้าวโพด เปลือกถั่วเหลือง และขี้เลื่อย ที่อัดขึ้นรูปจากขนาดของผงอนุภาคชีวมวล โดยแต่ละประเภทของเม็ดเชื้อเพลิงจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร และยาว 30 - 40 มิลลิเมตร

1.3.3 ทราบอิทธิพลของขนาดผงอนุภาคเศษพืชเหลือใช้จากงานเกษตรกรรมจำพวก ฟางข้าว ชังข้าวโพด เปลือกถั่วเหลือง และขี้เลื่อย สำหรับอัดขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล โดยทดสอบสมบัติทางด้านกายภาพของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล เช่น ความหนาแน่นรวม ความหนาแน่นของเม็ดเชื้อเพลิงและความทนทาน

1.3.4 ได้แนวทางในการสร้างมาตรฐานของการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล และแนวทางการกำหนดระดับคุณภาพของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลให้เป็นเกรด Premium, Standards และ Utility โดยอ้างอิงจากมาตรฐานในกลุ่มประเทศโซนยุโรป

บทที่ 2

ทฤษฎีและการทบทวนวรรณกรรม

ในการออกแบบและสร้างเครื่องบดย่อยชีวมวล จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องอาศัยหลักทฤษฎีและวรรณกรรมต่างๆที่เกี่ยวข้อง เพื่อใช้ตัดสินใจในการออกแบบวัสดุ, การคำนวณหาค่าต่างๆ รวมถึงขนาดของชิ้นส่วนที่ต้องรับแรงที่เกิดขึ้น รวมถึงการมองเห็นจุดด้อยของเครื่อง เพื่อจะช่วยลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นภายหลัง และเป็นการบำรุงรักษาในระยะยาว

2.1 ทบทวนวรรณกรรม

2.1.1 Deniel Ciolkosz, 2009 [3] ได้เขียนอธิบายกระบวนการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล ประกอบด้วยขั้นตอนของการบดชีวมวล จากนั้นอัดขึ้นรูปชีวมวลผ่านแม่พิมพ์ที่เรียกว่า ดายน์ ทำการอัดชีวมวลให้หลอมละลายประสานกันเป็นเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล กระบวนการนี้เรียกว่า การอัดรีดขึ้นรูป (Extrusion) ชีวมวลธรรมชาติบางประเภท เช่น ไม้ จะสามารถนำมาผลิตเป็นเม็ดเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพสูงได้ นอกจากนี้เม็ดชีวมวลบางชนิดสามารถผลิตด้วยการผสมตัวประสานลงเพื่อช่วยให้ชีวมวลเกาะรวมตัวเป็นเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล กระบวนการอัดเม็ดเป็นเพียงขั้นตอนย่อยหนึ่งของการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล ซึ่งกระบวนการทั้งหมดในการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงประกอบด้วย การบดวัตถุดิบ การควบคุมความชื้น การอัดขึ้นรูป การระบายความร้อนเม็ดชีวมวลที่ผ่านการอัด และขั้นตอนการบรรจุเพื่อส่งให้ลูกค้า ในขณะที่ขั้นตอนของการบดต้องทำการบดชีวมวลให้มีขนาดต่ำกว่า 3 มิลลิเมตร ความชื้นของวัตถุดิบเป็นตัวแปรหลักที่จะควบคุมคุณภาพของเม็ดเชื้อเพลิง กรณีวัตถุดิบเป็นไม้ ต้องควบคุมความชื้นไม่ให้สูงกว่า 15 เปอร์เซ็นต์ สำหรับวัสดุชนิดอื่นต้องทำการทดลองหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสม สำหรับการอัดขึ้นรูป ความชื้นสามารถจัดออกได้ด้วยการอบแห้งด้วยการเป่าลมร้อนผ่านวัตถุดิบ สำหรับการอัดขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิง กรณีที่วัตถุดิบมีความแห้งเกินไปสามารถเพิ่มความชื้นโดยการ พ่นน้ำหรืออบด้วยไอน้ำ สำหรับกระบวนการอัดชีวมวลจะถูกอัดด้วยแรงดันสูงและความร้อน ผ่านดายน์ที่ประกอบไปด้วยรูขนาดเล็ก ถ้ามีกระบวนการอัดที่เหมาะสมแล้วชีวมวลจะหลอมละลายเกาะกันเป็นเม็ดชีวมวล ใบมีดตัดจะหมุนตัดเพื่อให้ได้ขนาดของเม็ดชีวมวลตามความยาวที่ต้องการ ชี้เลื่อยเป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับอัดเป็นเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลเพราะลักษณะที่มีอยู่ตามธรรมชาติจะทำหน้าที่เป็นตัวประสานคล้ายกับกาว ส่งผลให้ชีวมวลเกาะยึดตัวเป็นเม็ดได้ดี สำหรับเศษหญ้าจะเกาะตัวกันยากกว่าชี้เลื่อยไม้ ทำให้เม็ดชีวมวลที่ได้มีความหนาแน่นต่ำกว่าและมีแนวโน้มเกิดการแตกหักของเม็ดเชื้อเพลิงได้ง่าย ดังนั้นการใช้วัสดุประสานหรือผสมด้วยชีวมวลที่มีส่วนผสมของลิกนินสูงจะแก้ไขปัญหาการอัดเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลได้ ในขั้นตอนของการอัดเม็ดจะมีความร้อนสูงประมาณ 150 องศาเซลเซียสในกระบวนการผลิต และเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจะมีลักษณะอ่อนตัว ซึ่งต้องทำการระบายความร้อนและอบแห้งเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลหลังจากผ่านกระบวนการอัดมาแล้ว ซึ่งทำได้ด้วยการเป่าลมเพื่อระบายความร้อนและทำให้แห้งกับเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล ซึ่งจะต้องมีความชื้นตกค้างไม่น้อยกว่า 8 เปอร์เซ็นต์ หลังจากนั้นเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจะถูกนำไปบรรจุลงในถุงให้มีขนาด 18 กิโลกรัม เพื่อสะดวกต่อการเติมลงในเตาเผาไหม้ของระบบผลิตพลังงานรูปแบบต่างๆ โดยถุงของบรรจุภัณฑ์ควรจะมีลักษณะใส และติดฉลากคำอธิบายชนิดของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล เช่น ชนิดของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล ระดับเกรด และค่าพลังงานความร้อน เป็นต้น

2.1.2 Sudhagar Mani, Lope G. Tabil and Shahab Sokhansanj, 2006 [4] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจาก ฟางข้าวสาเล่ ฟางข้าวบาร์เลย์ ใบและชังข้าวโพด และหญ้า สวิตซ์ โดยชีวมวลเหล่านี้ถูกอัดด้วยแรงอัดที่แตกต่างกัน และขนาดของผงบดที่ใช้ในการขึ้นรูป 3.2, 1.6 และ 0.8 มิลลิเมตร ระดับความชื้นถูกควบคุมที่ 12 และ 15 เปอร์เซ็นต์ เพื่อทดสอบหาสภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสม เม็ดชีวมวลที่อัดได้ถูกวัดขนาดและคำนวณค่าความหนาแน่น พบว่าเศษใบ และชังข้าวโพดมีค่าความหนาแน่นสูงสุดในขณะที่อัดด้วยแรงอัดในระดับต่ำ โดยที่แรงอัด ขนาดผง อนุภาค และปริมาณความชื้น เป็นตัวแปรที่สำคัญต่อความหนาแน่นของการอัดขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจากฟางข้าวบาร์เลย์ ใบและชังข้าวโพด และหญ้าสวิตซ์ ในขณะที่ขนาดผงอนุภาคของฟางข้าวสาเล่ไม่มีผลต่อความหนาแน่นของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล ข้อมูลต่างจากการทดลองถูกวิเคราะห์ถึงโมดูลัสของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล ฟางข้าวบาร์เลย์มีค่าโมดูลัสสูงสุด มีความแข็งแรงมากกว่าเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดอื่นๆ ค่าโมดูลัสของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของแรงอัด

2.1.3 รัฐศักดิ์ พรหมมาศ, อุดมวิทย์ กาญจนวรรค์ และกิตติพงษ์ พุ่มโกษนา, 2551 [5] ได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องย่อยเปลือกมะพร้าวเพื่อนำไปผลิตแผ่นกระดานอัดที่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เพื่อให้ได้คุณภาพเฉลี่ย 3.5 ขึ้นไป จากเกณฑ์การประเมิน 5 ระดับ และให้มีประสิทธิภาพการย่อยเปลือกมะพร้าวเทียบกับสมมติฐานที่ตั้งไว้ 120 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยเครื่องย่อยเปลือกมะพร้าวที่สร้างขึ้นมีลักษณะเด่น 3 ลักษณะ คือ 1.มีใบมีดกึ่งไม้สองใบ 2.ใบมีดย่อยสามารถหมุนรอบตัวเอง 3.ขนาดรูตะแกรงมีขนาด 12 มิลลิเมตร จากการประเมินคุณภาพของผู้เชี่ยวชาญจำนวน 10 ท่าน ผลปรากฏว่าเครื่องมีคุณภาพด้านกายภาพเฉลี่ยอยู่ที่ระดับ 4.3 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.43 คุณภาพเชิงวิศวกรรมเฉลี่ย 4.54 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.44 และคุณภาพด้านความสามารถในการทำงานของเครื่องย่อยเปลือกมะพร้าว มีคุณภาพเฉลี่ยอยู่ในระดับ 4.7 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.43 คุณภาพรวมเฉลี่ย อยู่ในระดับ 4.51 อยู่ในระดับความหมายมากที่สุด ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.43 แสดงให้เห็นว่าผู้เชี่ยวชาญมีความเห็นสอดคล้องกันและได้ทดลองหาประสิทธิภาพของเครื่องโดยนำกิ่งไม้-ใบไม้ 20 กิโลกรัม แยกเป็น กิ่งไม้สด 5 กิโลกรัม กิ่งไม้แห้ง 5 กิโลกรัม ใบไม้สด 5 กิโลกรัม และใบไม้แห้ง 5 กิโลกรัม และจับเวลาการย่อยวัสดุดังกล่าวครั้งละ 1 กิโลกรัม แล้วบันทึกผลการทดลอง ผลปรากฏว่าเครื่องย่อยเปลือกมะพร้าวที่สร้างขึ้นสามารถย่อยได้ปริมาณถึง 123.96 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

2.1.4 สุมศ ศรีชู, วิเชษฐ์ สุวรรณศ, 2551 [6] ได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องย่อยขวดพลาสติกสำหรับขวดน้ำดื่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 80 มิลลิเมตร เพื่อใช้ในการลดขนาดของขวดพลาสติกให้ง่ายและสะดวกในการขนถ่าย เครื่องย่อยขวดพลาสติกนี้มีระบบการทำงานด้วยชุดใบมีดหมุนตัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร หนา 3 มิลลิเมตร จำนวน 15 ใบ โดยใช้มอเตอร์กระแสสลับ 220 โวลต์ ขนาด 1 แรงม้า เป็นต้นกำลังขับเคลื่อนใบมีด ส่งถ่ายกำลังด้วยระบบสายพาน ซึ่งขณะทำงานใบมีดหมุนด้วยความเร็ว 1,250 รอบต่อนาที

2.1.5 อุดมวิทย์ กาญจนวรรค์, 2551 [7] ได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องย่อยกิ่งไม้ เพื่อใช้ในการตัดกิ่งไม้สด ซึ่งมีส่วนประกอบและลักษณะการทำงานที่สำคัญคือภายในห้องย่อยประกอบด้วยใบมีดตัด 2 ใบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 95 มิลลิเมตร หนา 7 มิลลิเมตร มุมคมตัด 30 องศา ด้านข้างของผนังห้องย่อยติดตั้งใบมีด รับระยะ 30 X 250 X 10 มิลลิเมตร ลักษณะช่องห่างกันเป็นระยะช่องละ 13 มิลลิเมตร ทำมุม 85 องศา เพื่อกายเศษ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 137 มิลลิเมตร หนา 33 มิลลิเมตร มุมคมตัด 70 องศา หมุนด้วยความเร็วรอบ 720 รอบต่อนาที ส่วนทางด้านบนของเครื่องเป็นช่องป้อนกิ่งไม้ ซึ่งชุดใบมีดจะขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์ดีเซลขนาด 10.5 แรงม้า

2.1.6 รัฐศักดิ์ พรหมมาศ, อุดมวิทย์ กาญจนวงศ์ และกิติพงษ์ พุ่มโกชนา, 2551 [8] ได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องบดผงถ่านแบบใบพัดหมุนตีสำหรับผลิตถ่านอัดแท่งโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อบดถ่านจากกะลามะพร้าวที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เพื่อลดการใช้ไม้ฟืน ซึ่งเป็นการทำลายสิ่งแวดล้อม เครื่องบดผงถ่านที่สร้างขึ้นมานี้ส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วน ด้วยกันคือ ชุดต้นกำลังขับเคลื่อน 220 โวลต์ 2 แรงม้า ชุดบดผงถ่านระบบใบพัดหมุนตีจำนวน 30 ใบ หมุนอิสระด้วยความเร็ว 334 รอบต่อนาที และชุดรองรับผงถ่านแบบตะแกรงที่มีรูขนาดต่างๆ คือ 10 มิลลิเมตร 8 มิลลิเมตร และ 5 มิลลิเมตร ตามลำดับ เครื่องบดผงถ่านแบบใบพัดหมุนตีนี้มีความสามารถในการบดผงถ่านได้สูงสุด 500 กรัมต่อนาที และสามารถบดถ่านชนิดต่างๆให้มีขนาดโตกว่า 10 มิลลิเมตร.และขนาดเล็กกว่า 10 มิลลิเมตร โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ 3 และ 97เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

2.1.7 ปฏิพงษ์ จักรกลเกษตร [9] ได้ออกแบบและสร้างเครื่องบดย่อยกิ่งไม้ รุ่น P8055 โดยสามารถติดตั้งได้ทั้งเครื่องยนต์เบนซินตั้งแต่ 13 - 20 แรงม้า, เครื่องยนต์ดีเซลขนาด 14 แรงม้า หรือมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 10 - 15 แรงม้า 380 โวลต์ มีใบมีด 2 ใบใหญ่ที่ช่องย่อย และ 10 ใบที่ช่องสับท่อนทานต่องานหนัก ทำงานต่อเนื่องได้ การวางใบมีดและช่องคล้ายชิ้นงานใต้ใบมีดมีลักษณะเอียงองศา ที่เป็นลิขสิทธิ์เฉพาะของปฏิพงษ์จักรกลการเกษตร มีตะแกรงสำหรับย่อยหยาบหรือละเอียดตามความต้องการ สามารถเปลี่ยนได้เอง ง่ายและไม่ต้องใช้เครื่องมือ สามารถสับย่อยได้ทั้งสดและแห้ง หรือกิ่งไม้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 3.5 นิ้ว และวัสดุอื่นๆ เช่น ไม้กระถิน, หล้า ฟาง, ข้าวโพด, ทะลายปาล์ม, ทางปาล์ม, ทางสละ, ทางมะพร้าว, กาบมะพร้าว(แยกใยได้), กะลา, ต้นกล้วย, ผักสด, ผลไม้, ผักตบชวา, หอยเชอรี่, สมุนไพร, อาหารสัตว์, ดินผสมปุ๋ย, โฟม, กระดาษ ฯลฯ ความสามารถในการย่อย 500 - 1,200 กิโลกรัมต่อชั่วโมง (ขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำมาย่อย) ขนาด 117 X 206 X 125 เซนติเมตร น้ำหนักโดยประมาณ 250 กิโลกรัม. เคลื่อนย้ายง่ายมี 4 ล้อยาง

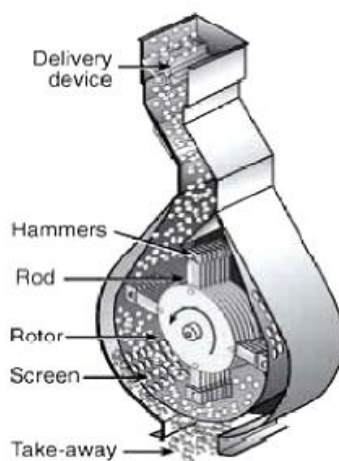
2.1.8 อรรถพล ม่วงศรีจันทร์ และคณะ [7] ได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องสับย่อยวัสดุทางการเกษตรเพื่อเป็นเครื่องจักรสำหรับใช้ในการย่อยวัสดุทางการเกษตร เพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับเศษวัสดุ โดยมีขนาดเครื่อง 115 X 165 X 80 เซนติเมตร ใช้มอเตอร์ไฟฟ้า 1 เฟส ขนาด 3 แรงม้า 220 โวลต์ ที่ความเร็วรอบ 906 รอบต่อนาที ออกแบบมีดตัดให้มีขนาด 8 X 25 X 1 เซนติเมตร ใช้สายพาน 2 เส้น เป็นตัวส่งกำลังจากมอเตอร์ไปยังเพลลาของเครื่องย่อย สามารถสับย่อยต้นกล้วยมีขนาดความโต 10 เซนติเมตร ได้อัตราการสับ 175 กิโลกรัมต่อชั่วโมง สามารถที่จะย่อยต้นกระถินมีขนาดความโต 5 เซนติเมตร ได้อัตราการสับ 220 กิโลกรัมต่อชั่วโมง สามารถย่อยผักตบชวา ได้อัตราการสับ 193 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และสามารถย่อยกาบมะพร้าว ได้อัตราการสับ 167 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ขนาดของเศษวัสดุ ทั้งหมดที่ทำการย่อยมีขนาดน้อยกว่า 1 เซนติเมตร

จากการศึกษาและทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับการออกแบบและสร้างเครื่องบดย่อยวัสดุทางการเกษตร พบว่าวิธีการบดหรือลดขนาดนั้นมี 2 วิธี ที่ถูกนำมาใช้ในกระบวนการบดย่อยวัสดุทางการเกษตร ได้แก่วิธีการตัดเฉือน และการตี การควบคุมขนาดของวัสดุหลังการบดนั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดตะแกรงที่กำหนด ดังนั้นผู้วิจัยได้ดำเนินการออกแบบเครื่องบดย่อยชีวมวล ตามรูปแบบของเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ ที่ประกอบด้วย ชุดของค้อนหรือใบตี และเพิ่มเติมในส่วนของชุดใบมีดตัดหยาบเพื่อรองรับวัตถุดิบที่มีขนาดใหญ่ สามารถเปลี่ยนขนาดตะแกรงได้ (1 mm - 10 mm) ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นเครื่องต้นกำลัง โดยเลือกใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 10 แรงม้า [9,7] ความเร็วรอบประมาณ 900 rpm [10]

2.2 เครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ [11]

2.2.1 หลักการทำงานของเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์

เครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ ดังรูปที่ 2.1 ประกอบด้วย ชุดของค้อนหรือใบตี (Hammer) ติดตั้งโดยห้อยอยู่กับโรเตอร์ (Rotor) ซึ่งติดกับเพลาชับ (Drive Shaft) ชุดใบตีจะหมุนอยู่ในห้องบด (Grinding Chamber) ซึ่งมีตะแกรง (Screen) ห่อหุ้มหรือล้อมรอบอยู่ ขณะที่เครื่องบดทำงานอยู่ เครื่องต้นกำลัง (Power Source) ซึ่งอาจจะเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าหรือเครื่องยนต์ จะทำการขับเคลื่อนให้เพลาชับหมุนด้วยความเร็วประมาณ 3,000 รอบต่อนาที [12] ขณะที่ Herrman [13] รายงานว่า ความเร็วรอบต่ำสุดที่ 4,800 รอบต่อนาทีและสูงสุดที่ 7,000 รอบต่อนาที และเมื่อเพลาชับหมุน ชุดโรเตอร์จะหมุนด้วยทำให้ใบตีที่ห้อยอยู่สวิง (Swing) หรือกางออกตีเป็นมุมฉากกับโรเตอร์ และพร้อมที่จะตีหรือทุบวัตถุดิบอาหารที่เข้ามาในห้องบดให้แตกออกหรือมีขนาดลดลง ญัฐชนก [14] รายงานว่าการบดวัตถุดิบอาหารโดยใช้เครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์เป็นการใช้แรงกระแทกที่เกิดขึ้นระหว่างหัวค้อนกับวัตถุดิบ โดยวัตถุดิบที่ต้องการบดจะถูกลำเลียงเข้าสู่เครื่องบดและตกลงด้วยแรงโน้มถ่วง จากนั้นวัตถุดิบจะถูกหัวค้อนพาเข้าสู่บริเวณเพิ่มความเร่ง (Acceleration Zone) เพื่อให้ความเร็วของวัตถุดิบเพิ่มขึ้นจนเท่ากับความเร็วรอบ (Tip Speed) ของเครื่องบด ขณะที่วัตถุดิบไปตามการเหวี่ยงของหัวค้อน จะถูกทำให้เล็กลงเนื่องจากการกระแทกกันระหว่างวัตถุดิบกับวัตถุดิบ และการกระแทกระหว่างวัตถุดิบกับหัวค้อน ขนาดของวัตถุดิบที่เท่ากับหรือเล็กกว่าขนาดของรูตะแกรงจะลอดผ่านรูตะแกรงออกไปได้ ซึ่งในระหว่างที่วัตถุดิบลอดผ่านรูตะแกรงจะเกิดการขัดสี ทำให้รูปร่างของวัตถุดิบที่ลอดผ่านรูตะแกรงมีลักษณะเป็นทรงกลมผิวเรียบ การลดขนาดจะเกิดขึ้นในช่วงแรกบนตะแกรงไม่มากนักที่สุด และเรียกช่วงดังกล่าวว่า บริเวณการบดขั้นแรก (Primary Destruction Zone) ส่วนของวัตถุดิบอาหารที่ยังมีขนาดใหญ่กว่ารูตะแกรงและยังไม่สามารถลอดผ่านรูตะแกรงออกมาได้ ก็จะถูกตีหรือทุบไปจนกระทั่งมีขนาดเล็กลง จนสามารถลอดผ่านรูตะแกรงออกมาได้ ดังนั้นจึงสามารถกำหนดขนาดชิ้นของวัตถุดิบอาหารที่ต้องการบดหรือความละเอียดของการบดด้วยการกำหนดขนาดของรูตะแกรงบดเป็นหลัก [12]



รูปที่ 2.1 เครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ (Hammer Mill) [11]

จากคุณสมบัติดังกล่าวเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์จึงถือได้ว่าเป็นเครื่องบดอาหารอเนกประสงค์ บดวัตถุดิบได้หลากหลาย สามารถใช้ได้ทั้งวัตถุดิบที่แข็ง พืชต่างๆ และวัตถุดิบที่มีความเหนียวนุ่ม เครื่องบดอาจมีอุปกรณ์อื่นๆ ที่ช่วยเสริมประสิทธิภาพการทำงาน หรือเพื่อช่วยให้

ปฏิบัติงานได้สะดวกขึ้น และอุปกรณ์ที่มักใช้กันทั่วไปได้แก่ อุปกรณ์การป้อนวัตถุดิบอาหารเข้าสู่เครื่องบด เพื่อให้วัตถุดิบเข้าเครื่องบดได้อย่างสม่ำเสมอ ระบบให้ความเย็น (Cooling) ช่วยลดอุณหภูมิของวัตถุดิบอาหารหลังการบด ที่เป็นสาเหตุของการเกิดเชื้อราและการเสื่อมสภาพของสารอาหารในวัตถุดิบ อุปกรณ์ดักฝุ่น อุปกรณ์ดักเหล็กหรือแยกสิ่งเจือปนที่อาจก่อความเสียหายแก่เครื่องบดอาหารได้

2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการบดแฮมเมอร์มิลล์

ประสิทธิภาพของการบดวัตถุดิบอาหารสัตว์ในแง่ความยากง่ายในการบด การสูญเสียระหว่างการบด ความสม่ำเสมอของวัตถุดิบที่ผ่านการบด และอื่นๆ อาจผันแปรได้จากปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้

1) อัตราการป้อนวัตถุดิบ ควรที่จะต้องมีอัตราการป้อนวัตถุดิบอย่างสม่ำเสมอ เข้าสู่ห้องบดซึ่งอุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในการป้อนลำเลียงวัตถุดิบ ได้แก่ ระบบลำเลียงชนิดสั่น (Vibratory Feeder) ระบบลำเลียงชนิดปล่องหมุน (Rotary Feeder) เป็นต้น

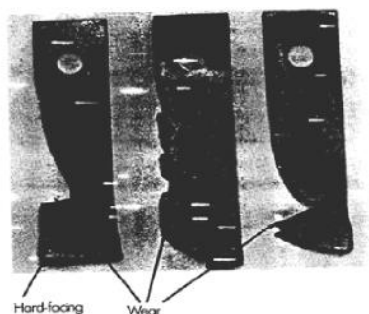
2) ความเร็วรอบของการบด มีความสัมพันธ์ต่อขนาดอนุภาคของวัตถุดิบอาหารที่ผ่านการบด (ความเร็วรอบของการบดสูงส่งผลให้ได้ขนาดอนุภาคอาหารที่มีขนาดเล็กมากยิ่งขึ้น) ญัฐชนก [11] รายงานว่า ความเร็วรอบของเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ ส่วนใหญ่อยู่ที่ประมาณ 5,300 - 7,700 รอบต่อนาที หรือ 13,000 - 18,000 ฟุตต่อนาที ถ้าความเร็วรอบช้าเกินไปเป็นผลให้การกระทบระหว่างหัวค้อนกับวัตถุดิบลดลง แต่ถ้าความเร็วรอบเร็วเกินไปจะทำให้สิ้นเปลืองพลังงานในการขับเคลื่อนโดยไม่จำเป็น ความเร็วรอบของการบดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1

$$\text{ความเร็วรอบ (เมตร/นาที)} = 2\pi D \times n \quad (2.1)$$

เมื่อ D = เส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องบด (เมตร)

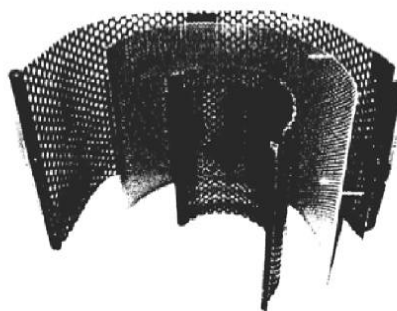
n = รอบต่อนาทีของเครื่องบด (รอบต่อนาที) (Herrman, n.d.)

3) จำนวนและลักษณะของหัวค้อน หัวค้อนเป็นส่วนที่สร้างแรงดัน และแรงกระทบระหว่างวัตถุดิบกับวัตถุดิบ หรือวัตถุดิบกับหัวค้อน เครื่องบดที่มีจำนวนหัวค้อนมากจะเพิ่มพื้นที่ให้วัตถุดิบตีกระทบกับหัวค้อนมากขึ้น เครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ที่มีจำนวนหัวค้อน 8 แถว มีประสิทธิภาพการบดดีกว่าเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ที่มีหัวค้อนเพียง 4 แถว สำหรับวัตถุดิบที่กรอบหรือแตกง่ายอย่างข้าวโพด ควรมีจำนวนแรงม้าต่อจำนวนค้อนที่ 1 - 1.5 หรือ 2.5 - 3.5 การพิจารณาใช้หัวค้อนควรคำนึงถึงความเร็วรอบของเครื่องบดประกอบด้วย Koch [15] รายงานว่าเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ที่มีความเร็วรอบ 1,800 rpm หัวค้อนควรมีขนาด กว้าง X ยาว X สูง เท่ากับ 10 X 2.5 X 0.25 นิ้ว และเครื่องบดที่มีความเร็วรอบ 3,600 rpm หัวค้อนควรมีขนาด 2 X 8 X 0.25 นิ้ว ตามลำดับ เครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ทำงานโดยหมุนตามเข็มนาฬิกา หัวค้อนหมุนขวาก็เกิดการสึกกร่อนเดียว ดังรูปที่ 2.2 จึงนิยมทำการกลับหัวค้อนเพื่อให้สามารถใช้งานได้อีกครั้งเมื่อผ่านการใช้งาน หัวค้อนตีจะเกิดการสึกอย่างสมบูรณ์ ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดันหรือแรงกระทบตกลงไม่สามารถบดวัตถุดิบอาหารได้ละเอียดเท่าเดิม ประสิทธิภาพการบดจะลดลง การสึกของหัวค้อนจะทำให้เม็ดอาหารหลุดติดไปอยู่บริเวณตะแกรงและหัวค้อนเป็นจำนวนมาก ทำให้หัวค้อนเกิดแรงเสียดสีมากขึ้นเปื้อดเม็ดอาหารไปติดกับตะแกรง ส่งผลให้ตะแกรงเกิดการแตกหักเสียหายเร็วยิ่งขึ้น



รูปที่ 2.2 หัวค้อนของเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ที่ผ่านการใช้งานและเกิดการสึกหรอ [11]

4) ลักษณะตะแกรงและขนาดของรูเปิดบนตะแกรง ตะแกรงที่นิยมใช้กับเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ 3 ชนิด คือ ตะแกรงแบบเต็มวง (Full Circle Screen) ตะแกรงบดครึ่งวง (Half Circle Screen) และตะแกรงบดแยก ดังรูปที่ 2.3 ในการบดวัตถุดิบอาหารสัตว์นิยมใช้ตะแกรงแบบชนิดแยก เนื่องจากง่ายต่อการจัดการ การเปลี่ยนตะแกรงและได้ขนาดอนุภาคที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันได้ดี และระยะระหว่างหัวค้อน และตะแกรงไม่สำหรับข้าวโพดควรอยู่ที่ประมาณ 10 - 12 มิลลิเมตร



รูปที่ 2.3 ตะแกรงบดแฮมเมอร์มิลล์ [11]

5) ขนาดของรูตะแกรง มีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการบด อัตราการผลิต ขนาดอนุภาคที่ได้จากการบด อัตราส่วนที่แนะนำระหว่างรูเปิดของตะแกรงมีค่าประมาณ 55 ตารางเซนติเมตรต่อแรงม้าเครื่องบด หากพื้นที่เปิดของรูตะแกรงต่อแรงม้าของเครื่องบดไม่เพียงพอ จะส่งผลให้เกิดความร้อนระหว่างการบด และเมื่อความร้อนเพิ่มสูงขึ้นมากกว่า 45 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบดลดลงมากกว่า 50% การเลือกขนาดรูเปิดของตะแกรงบดขึ้นอยู่กับชนิดของสัตว์ ลักษณะของเมล็ดธัญพืชและความชื้นในวัตถุดิบ

6) ระบบดูดอากาศ ระบบดูดอากาศเป็นระบบที่ช่วยในการปรับปรุงประสิทธิภาพการบดและขนาดอนุภาคของวัตถุดิบให้ดีขึ้น เนื่องจากจะช่วยลดแรงดันภายในห้องบดให้ลดลง ระบบดูดอากาศเป็นระบบที่ช่วยดึงและดูดอากาศ รวมทั้งอนุภาคให้ลอดผ่านตะแกรงบด ป้องกันการเกิดชั้นของอนุภาควัตถุดิบที่เกาะอยู่บนรูเปิดของตะแกรงบด (Fluidized Bed of Material) การเกิดชั้นดังกล่าวจะขัดขวางการลอดผ่านรูเปิดของอนุภาค ทำให้วัตถุดิบสะสมอยู่บนชั้นของตะแกรง และเป็นผลทำให้มอเตอร์ทำงานหนัก โดยการหมุนเหวี่ยงหัวค้อนให้เร็วขึ้น เพื่อดันให้อนุภาคที่ขวางอยู่ลอดผ่านรูตะแกรงออกไปได้ นอกจากนี้อนุภาคชั้นที่ขวางยังทำให้เกิดการลดขนาดอนุภาค [11]

2.3 การออกแบบทางวิศวกรรม [16]

ในการออกแบบทางวิศวกรรมต้องทำอย่างละเอียดมีการแก้ปัญหา หลักการระหว่างขั้นตอนของความคิดผู้ออกแบบต้องตัดสินใจออกแบบโครงการ (การเตรียมโดยเข้าใจขั้นตอนของงาน) การออกแบบรูปแบบเบื้องต้น (รูปร่างส่วนประกอบและวัตถุดิบ) และกระบวนการผลิต การแก้ไขปัญหาทางด้านเทคโนโลยี และทางด้านเศรษฐศาสตร์เป็นของสำคัญ การออกแบบต้องอาศัยการจำลองโครงสร้างเข้ามาช่วย เพื่อให้การออกแบบมีประสิทธิภาพ สามารถสื่อถึงความคิดของผู้ที่ออกแบบสิ่งนั้นๆให้ผู้อื่นได้เข้าใจได้

กล่าวอีกในหนึ่ง โครงการซึ่งถูกพัฒนาต้องตรวจสอบความทนทาน, การผลิต, การประกอบ, ราคา และรวมไปถึงการเตรียมการผลิตในขั้นสุดท้าย

ไม่เหมือนการออกแบบเกี่ยวกับแนวคิด การออกแบบเกี่ยวกับจำนวน ซึ่งเป็นการแก้ไขการวิเคราะห์และการสังเคราะห์อย่างต่อเนื่องและส่วนประกอบซึ่งกันและกัน ซึ่งอธิบายได้ว่าทำไมวิธีการค้นหาปัญหาและการประเมินค่าต้องสัมพันธ์กับวิธีการทำให้ลักษณะความผิดพลาดนั้นเห็นได้ง่ายขึ้น (ความผิดพลาดในการออกแบบ) การสะสมของสิ่งแปลกปลอมบนวัตถุดิบ กระบวนการผลิต มาตรฐานที่มีความเกี่ยวข้องต่างๆมากมาย ดังนี้

2.3.1 แนวคิดในการออกแบบรูปร่างของงาน

การออกแบบเป็นการถ่ายทอดความคิดออกมาเป็นรูปร่าง คือ ความพยายามที่จะทำให้บรรลุผลของความคิดนั้นปรากฏเป็นรูปร่างที่มีความเหมาะสม และกระบวนการในการออกแบบ การวิเคราะห์งาน ความปลอดภัย การผลิต การประกอบ การคำนวณ การบำรุงรักษา การคืนสภาพ และราคา

เกี่ยวกับปัจจัยเหล่านี้ ผู้ออกแบบต้องคิดถึงความสัมพันธ์ในหลายๆด้าน เพราะผู้ออกแบบต้องเผชิญกับปัญหาต่างๆมากมาย (การพิสูจน์ความจริงและการตรวจสอบแก้ไข) ปัญหาต่างๆต้องได้รับการแก้ไขอย่างต่อเนื่องและรวดเร็วโดยไม่คำนึงถึงว่าจะต้องทำการแก้ไขสักกี่ครั้ง แต่ต้องทำการแก้ไขอย่างต่อเนื่องจนปัญหานั้นสามารถแก้ไขได้สำเร็จ เพราะนั่นคือสิ่งที่มีความจำเป็นต่อการออกแบบในลำดับแรกๆเลยก็ว่าได้ เพราะถ้าปัญหาไม่ถูกแก้ไขการที่จะดำเนินการต่อไปก็จะทำไม่ได้ ทำให้งานขาดตอนไม่ต่อเนื่อง การออกแบบก็จะประสบกับปัญหาต่างๆมากมาย

2.3.2 กฎพื้นฐานของการออกแบบ

กฎพื้นฐานที่ใช้ในการออกแบบการทำให้เป็นรูปร่างขึ้นมานั้น ถ้าปัญหานั้นไม่ได้รับการแก้ไข ปัญหานั้นก็จะเกิดขึ้นบ่อยครั้ง และอาจทำให้งานมีปัญหาจนไม่สามารถแก้ไขได้ในเวลาอันสั้น จนอาจทำให้งานที่ทำอยู่นั้นเกิดความล้มเหลวได้

1) ความชัดเจน (Clarity) คือ ความชัดเจนของฟังก์ชันหรือปราศจากความหมายที่คลุมเครือในการออกแบบ ทำให้สะดวกในการคาดการณ์ว่าผลิตภัณฑ์จะออกมาอย่างไร มีราคาสูงหรือไม่

2) ความเรียบง่าย (Simplicity) เกี่ยวกับเศรษฐศาสตร์ ส่วนประกอบจำนวนมากมาย และรูปร่างสิ่งที่เรียบง่ายถูกผลิตขึ้นอย่างมากมายและรวดเร็ว

3) ความปลอดภัย (Safety) ปัญหาของความแข็งแรง ความเชื่อถือได้ การป้องกันอุบัติเหตุ การป้องกันจากสภาพแวดล้อม

2.3.3 การออกแบบเพื่อความสะดวก

การรวมเข้าด้วยกันของส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์และงานที่ต้องการ ราคา และคุณภาพ

ของการประกอบ ขึ้นอยู่กับชนิดและการคำนวณโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ และชนิดของการผลิต

2.3.4 การออกแบบโครงสร้าง

การออกแบบชิ้นงานที่ต้องพิจารณาคือ โครงสร้าง การลดปริมาณวัสดุ การทำให้ได้มาตรฐาน

2.3.5 การออกแบบส่วนประกอบ

ลักษณะสำคัญของการประกอบที่ต้องปรับปรุงคือ การออกแบบข้อต่อของชิ้นส่วนต่างๆ รวมถึง การลดขนาด ทำให้ได้มาตรฐาน

2.3.6 การเลือกวัสดุที่จะนำมาประกอบ

การเลือกวัสดุต้องคำนึงถึงองค์ประกอบต่อไปนี้ สามารถใช้งานได้ สามารถทำได้อย่างไม่ยุ่งยาก

2.4 เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon Steels) [17]

2.4.1 เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel)

เป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนไม่เกิน 0.25% นอกจากคาร์บอนแล้ว ยังมีธาตุอื่นผสมอยู่ด้วย เช่น แมงกานีส ซิลิคอน ฟอสฟอรัส และกำมะถัน แต่มีปริมาณน้อยเนื่องจาก หลงเหลือมาจากการบวนการผลิต เหล็กประเภทนี้ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรม และในชีวิตประจำวันไม่ต่ำกว่า 90% เนื่องจากขึ้นรูปง่าย เชื่อมง่าย และราคาไม่แพง โดยเฉพาะเหล็กแผ่นมีการนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น ตัวถังรถยนต์ ชิ้นส่วนยานยนต์ต่างๆ กระป๋องบรรจุอาหาร สังกะสีมุงหลังคา เครื่องใช้ในครัวเรือน และในสำนักงาน เป็นเหล็กกล้าที่นำมาใช้งานทั่วไป จึงมีการนำมาใช้มากที่สุด คาร์บอนที่ผสมอยู่ในเนื้อเหล็กมีผสมอยู่ประมาณ 0.05% - 0.35% เมื่อธาตุคาร์บอนมีผสมอยู่น้อย ทำให้มันมีความแข็ง และความแข็งแรงแรงไม่มาก ตัวเหล็กกล้าสามารถนำมาแปรรูปด้วยเครื่องมือกล เช่น กลึง, กัด, ไส ได้ง่าย

คุณสมบัติของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำมีดังนี้

- 1) มีคาร์บอนผสมอยู่ประมาณ 0.05% - 0.35%
- 2) มีความแข็งแรงแรงน้อยเมื่อเทียบกับเหล็กกล้าอื่นๆ
- 3) มีความแข็งน้อยเมื่อเทียบกับเหล็กกล้าอื่นๆ
- 4) แปรรูป และขึ้นรูปผ่านเครื่องมือกลได้ง่าย
- 5) ราคาถูกกว่าเหล็กกล้าอื่นๆ
- 6) ผลิตออกมาใช้งานมากที่สุด

เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเป็นเหล็กที่มีราคาไม่แพง ทำให้เป็นที่นิยมนำมาใช้มาก ตัวอย่างการนำมาใช้งานเช่น ลวด ส่วนประกอบยานยนต์ แผ่นเหล็กกัลวาไนซ์ (Galvanized Sheet: เหล็กที่เคลือบสังกะสีเพื่อกันสนิม) ถังเก็บน้ำ ท่อเหล็กขนาดใหญ่ เหล็กโครงสร้างอาคาร และชิ้นส่วนโครงสร้างภายในเรือ หรือยานพาหนะต่างๆ ฯลฯ

เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำมีความแข็ง และความแข็งแรงแรงน้อย (แต่ก็มีมากพอที่จะนำมาทำงานได้) เมื่อเทียบกับเหล็กกล้าอื่นๆ การนำมาใช้งานถ้าไม่ต้องการความแข็ง และความแข็งแรงแรงมาก เหล็กกล้าชนิดนี้สามารถนำมาใช้งานได้เป็นอย่างดี การที่ต้องการให้รับภาระได้มากขึ้น ก็ขึ้นอยู่กับ การออกแบบทางโครงสร้างก็จะมีส่วนช่วยได้มาก

2.4.2 เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium Carbon Steel)

เป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอน 0.2% - 0.5% มีความแข็งแรงและความเค้นแรงดึงมากกว่า เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ แต่จะมีความเหนียวน้อยกว่า สามารถนำไปชุบแข็งได้ เหมาะกับงานทำชิ้นส่วนเครื่องจักรกล รางรถไฟ เฟือง ก้านสูบ ท่อเหล็ก ไขควง เป็นต้น

เป็นเหล็กกล้าที่มีความแข็ง และความแข็งแรงเพิ่มขึ้นกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางมีส่วนผสมของคาร์บอนอยู่ในเนื้อเหล็กประมาณ 0.35% - 0.50% เมื่อเหล็กกล้าชนิดนี้ผ่านการปรับสภาพทางความร้อน (Heat treatment) แล้ว มันค่อนข้างจะแข็ง และแกร่ง เหล็กกล้าชนิดนี้มักจะนำไปทำการการตีขึ้นรูป (Forgings) ตัวอย่างการนำไปใช้งานอาทิเช่น ประแจขันสลักเกลียวต่างๆ, แกนล้อ, แกนเพลลา, เพลาข้อเหวี่ยง (Crankshafts) และเฟือง ฯลฯ

คุณสมบัติของเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางมีดังนี้

- 1) มีคาร์บอนผสมอยู่ประมาณ 0.35% - 0.50%
- 2) มีความแข็ง และความแข็งแรงเพิ่มขึ้นหลังจากผ่านการปรับสภาพทางความร้อน
- 3) มีราคาที่สูงกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

2.4.3 เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High Carbon Steel)

เป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอน 0.5% - 1.5% มีความแข็ง ความแข็งแรง และความเค้นแรงดึงสูง เมื่อชุบแข็งแล้วจะเปราะ เหมาะสำหรับงานที่ทนต่อการสึกหรอ ใช้ในการทำเครื่องมือ สปริงแหนบ ลูกปืน เป็นต้น เป็นเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนผสมอยู่สูง คือมีคาร์บอนอยู่ในเนื้อเหล็กมากกว่า 0.50% หรืออาจมีมากกว่า 1% เลยก็ได้ (แต่ไม่เกิน 2% เพราะเหล็กจะกลายสภาพเป็นเหล็กหล่อ) ถ้าเหล็กกล้าชนิดนี้ผ่านการปรับสภาพทางความร้อนจะทำให้มีความแข็ง และความแข็งแรงที่สูงมาก ข้อเสียของความแข็งที่มีมากในเหล็กกล้าชนิดนี้ก็คือ เมื่อเหล็กถูกแรงกระทำ ค่าหนึ่งจนเสียรูปไป การแตกร้าว และการพังเสียหายก็จะเกิดขึ้นในเนื้อเหล็กได้ง่าย หรือกลายเป็นวัสดุที่เปราะไปเลย เหล็กกล้าคาร์บอนสูงนี้นิยมนำมาใช้งาน เช่น นำมาทำเครื่องมือ, ทำแม่พิมพ์(Dies), มีด ตัดงานบางอย่างของเครื่องมือกล, ล้อ กับรางรถไฟ และอุปกรณ์ต่างๆ ที่ต้องการความแข็งแรงสูง

คุณสมบัติของเหล็กกล้าคาร์บอนสูงมีดังนี้

- 1) มีคาร์บอนผสมอยู่ในเนื้อเหล็ก 0.50% - 1.00%
- 2) ให้ความแข็ง และความแข็งแรงสูงมากหลังจากผ่านการปรับสภาพทางความร้อน
- 3) มีราคาที่สูงที่สุดในบรรดาเหล็กกล้าคาร์บอน

2.5 เพลา [18]

เพลาคือชิ้นส่วนที่หมุนหรือไม่หมุน ซึ่งลักษณะทั่วไปจะมีหน้าตัดกลม (Circular Cross Section) บนเพลามีส่วนอื่นๆประกอบอยู่เช่น เฟือง (Gear), ล้อสายพาน (Pulley), พูเลย์ (Flywheels), ข้อเหวี่ยง (Crank), จานโซ่ (Sprockets) และชิ้นส่วนส่งกำลังอื่นๆ เพลาอาจจะต้องรองรับภาระต่างๆ ได้แก่ Bending Loads, Tension Loads, Compression Loads หรือ Torsion Loads ซึ่งภาระเหล่านี้อาจจะกระทำเพียงอย่างใดอย่างหนึ่งเพียงอย่างเดียว หรือกระทำพร้อมๆกันในขณะเดียวกันในการออกแบบเพลาส่งสำคัญที่จะต้องพิจารณาคือ ความแข็งแรงสถิต (Static Strength) และความแข็งแรงทางด้านความล้า เพลาอันหนึ่งอาจจะอยู่ภายใต้ความเค้นที่คงที่ ความเค้นแบบสลับ และความเค้นแบบซ้ำในเวลาเดียวกัน

การออกแบบเพลาก็ต้องรักษาระยะโค้งงอของเพลาให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนด ในการให้ขนาดเพลานั้นจะพิจารณาถึงระยะโค้งงอแล้วจึงทำการวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นเหตุผลก็เพราะว่าถ้า

เพลลาที่ทำมามีความแข็งแรงพอที่จะไม่ให้เกิดระยะโก่งมากแล้ว ความเค้นที่เกิดขึ้นก็จะอยู่ในช่วงที่มีความปลอดภัยแต่ก็ไม่ได้หมายความว่าผู้ออกแบบจะสมมุติว่ามีความปลอดภัยแล้วเสมอไป ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการคำนวณ ตรวจสอบเพื่อให้รู้ว่าการออกแบบนั้นมีความถูกต้องอยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้จริงๆ เมื่อชิ้นส่วนที่ใช้ส่งถ่ายกำลังซึ่งประกอบติดกับเพลลา และสามารถออกแบบให้อยู่ในตำแหน่งที่ใกล้จุดรองรับเพลลาได้ด้วยแล้ว ก็จะช่วยให้โมเมนต์ดัด (Bending Moment) ซึ่งก็ส่งผลให้ระยะโก่งและความเค้นดัด (Bending Stress) ลดลงตามไปด้วย

2.5.1 การออกแบบและการคำนวณหาขนาดของเพลลา

การออกแบบเพลลาจะต้องพิจารณาความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นแล้วสิ่งที่สำคัญที่ต้องพิจารณาอีกอย่างหนึ่งคือ ความแข็งแรงของเพลลาที่รับ โมเมนต์บิดได้หมายถึง เพลลาต้องบิดไปโดยมุมบิดของเพลลาที่เกิดขึ้นในขณะที่ใช้งานต้องมีค่าไม่เกินที่กำหนดไว้ เพราะถ้ามุมบิดมากไปทำให้เสียความเที่ยงตรงทำให้เกิดการสั่นสะเทือน และมีผลทำให้ชิ้นส่วนอื่นเกิดความเสียหายได้ สำหรับการออกแบบเพลลาได้มีการกำหนดกฎเกณฑ์สำหรับค่ามุมบิดดังนี้

1) เพลลาเครื่องกลทั่วไป ให้มีมุมบิดได้ไม่เกิน 0.25 องศา ต่อความยาว 1 เมตร

2) เพลลาส่งกำลังทั่วไปให้มีมุมบิดได้ไม่เกิน 1 องศา ต่อความยาว 300 มิลลิเมตร หรือ ความยาว 20 เท่าของความโตเส้นผ่านศูนย์กลางเพลลา

ชิ้นส่วนเครื่องจักรที่มีพื้นที่หน้าตัดกลมอยู่ภายใต้โมเมนต์บิด ความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นจากการบิดและมีค่าสูงสุดที่ผิวนอกของเพลลากลม ซึ่งสามารถคำนวณหาโมเมนต์บิดที่เกิดขึ้นกับเพลลากลม คุณสมบัติอีกอย่างหนึ่งคือ ความต้านแรงเฉือนคราก (Yield Strength In Shear) ซึ่งใช้ในการออกแบบเสมอ ค่าความต้านแรงดัดคราก (Yield Strength) ซึ่งสามารถหาค่าได้จากตารางวัสดุจากผู้ผลิต หรือจากหนังสือออกแบบเครื่องจักรกลทั่วไป

คุณสมบัติอย่างหนึ่ง คือ ความต้านทานแรงเฉือนที่จุดคราก ซึ่งใช้ในการออกแบบสามารถใช้ค่าประมาณ ได้จากสมการ ที่ 2.2

$$\tau_y = 0.6\sigma_y \quad (2.2)$$

เมื่อ τ_y = ความเค้นเฉือนที่จุดคราก (N/mm^2)

σ_y = ความต้านทานแรงดัดคราก (N/mm^2)

ความเค้นเฉือนออกแบบ ดังสมการที่ 2.3

$$\tau_d = \frac{\tau_y}{N_y} \quad (2.3)$$

เมื่อ τ_d = ความต้านทานแรงเฉือนคราก (N/mm^2)

τ_y = ความต้านทานแรงเฉือนคราก (N/mm^2)

N_y = ค่าความปลอดภัย

ความเค้นเฉือนสูงสุด ดังสมการที่ 2.4

$$\tau = \frac{Tr}{J} = \frac{16T}{\pi d^3} \quad (2.4)$$

เมื่อ	τ	=	ความเค้นเฉือนในเพลลา มีหน่วยเป็น(N/mm ²)
	τ_y	=	ค่า Polar Second Moment Of Area (m ⁴)
	T	=	แรงบิด (N.m)
	r	=	รัศมีเพลลา (mm)

2.6 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส [19]

มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เป็นมอเตอร์ที่นิยมใช้งานกันทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรม แสดงดังรูปที่ 2.4 โดยเฉพาะมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ชนิดที่มีโรเตอร์แบบกรงกระรอก มีข้อดี คือ ไม่มีแปรงถ่าน ทำให้การสูญเสียเนื่องจากความฝืดมีค่าน้อย มีตัวประกอบกำลังสูง การบำรุงรักษาต่ำ การเริ่มเดินทำได้ไม่ยาก ความเร็วรอบค่อนข้างคงที่ สร้างง่าย ทนทาน ราคาถูก และมีประสิทธิภาพสูง แต่มีข้อเสีย ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของมอเตอร์ทำได้ยาก ปัจจุบันได้มีการพัฒนาชุดควบคุมอินเวอร์เตอร์ใช้สำหรับปรับความเร็วรอบของมอเตอร์และเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นเครื่องกลไฟฟ้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล ในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกลนี้ พลังงานไฟฟ้าไม่ได้นำเข้าสู่อะไรโดยตรง แต่ได้จากการเหนี่ยวนำ (Induction) จึงนิยมเรียกมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับว่า มอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor)

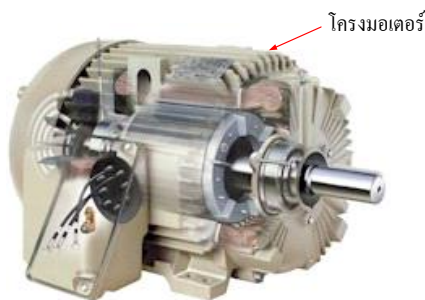
มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส แบ่งออกได้ 2 แบบ ได้แก่ แบบโรเตอร์กรงกระรอก (Squirrel Cage Rotor) และโรเตอร์แบบพันขดลวด (Wound Rotor) มอเตอร์ทั้งสองแบบนี้จะมีส่วนประกอบที่เหมือนกัน คือ ส่วนที่อยู่กับที่ แต่จะแตกต่างกันเฉพาะส่วนที่เคลื่อนที่เท่านั้น



รูปที่ 2.4 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส [19]

2.6.1 ส่วนที่อยู่กับที่ ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

1) โครงมอเตอร์ (Frame) ทำจากเหล็กหล่อเหนียว หรือเหล็กเหนียวเป็นรูปทรงกระบอกกลวงมีฐานเป็นขาตั้ง ด้านข้างตัวมอเตอร์จะมีกล่องสำหรับต่อสายไฟ (Terminal Box) โครงทำหน้าที่จับยึดแกนเหล็กที่พันขดลวดให้แน่นอยู่กับที่ และรองรับน้ำหนักทั้งหมดของมอเตอร์ที่ผิวด้านนอกของโครงจะออกแบบให้มีครีบกั้น เพื่อช่วยในการระบายความร้อนของมอเตอร์ ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส [19]

2) แกนเหล็กสเตเตอร์ (Stator Core) ทำมาจากแผ่นเหล็กบางๆ อัดซ้อนกันและยึดติดเข้ากับโครงของมอเตอร์ มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก และด้านในทำเป็นสล็อต ไว้สำหรับพันขดลวด นอกจากนี้แกนเหล็กยังทำหน้าที่เป็นทางเดินของวงจรแม่เหล็ก ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แกนเหล็กสเตเตอร์และขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส [19]

3) ขดลวดสเตเตอร์ (Stator Winding) ซึ่งเป็นขดลวดทองแดงที่พันอยู่ในสล็อตของแกนเหล็กสเตเตอร์ และเป็นลวดทองแดงที่เคลือบด้วยฉนวนไฟฟ้าอย่างดี เมื่อพันเสร็จแล้วจะอาบด้วยน้ำมันวานิช และอบให้แห้งอีกครั้งหนึ่ง

มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่สเตเตอร์มีขดลวดพันอยู่ 3 ชุด หรือ 3 เฟส ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งแต่ละเฟสจะทำมุมห่างกัน 120 องศาไฟฟ้า และขดลวดแต่ละเฟสจะต่ออนุกรมกันเหมือนกับขดลวดอาร์เมเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ แต่ละเฟสมีกลุ่มของขดลวดอีก เช่น มอเตอร์ที่มี 36 สล็อต 4 ขั้วแม่เหล็ก (Pole) 3 เฟส (Phase) จำนวนสล็อตต่อขั้ว (Slot/Pole) จะมีค่าเท่ากับ 9 สล็อต ดังนั้นจำนวนกลุ่มของขดลวดในหนึ่งขั้วแม่เหล็กต้องเท่ากับ 9 ขด และแบ่งจำนวนกลุ่มของขดลวดต่อหนึ่งเฟสจะมีค่าเป็น 3 ขด ในการพันขดลวดทั้งสามชุดของแต่ละเฟสนี้จะพันลงสล็อตเรียงกันไป 3 สล็อต และการพันขดลวดทั้ง 9 ขดในหนึ่งขั้วจะพันเรียงกันไป 9 สล็อต



ก) กลุ่มของขดลวดต่อเฟส

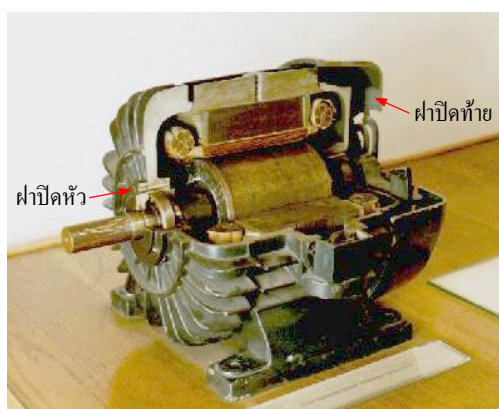
ข) กลุ่มของขดลวด 3 เฟสต่อหนึ่งขั้ว

รูปที่ 2.7 การพันขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบแลป (Lap Winding) [19]

เมื่อพันขดลวดจนครบทั้ง 36 ขดแล้ว จะสังเกตเห็นว่าในหนึ่งสล็อตจะมีขดลวด 2 ขด ซึ่งเป็นด้านของขดลวดที่ต่างกัน เรียกว่า การพันขดลวดแบบสองชั้น (Two Layer) เป็นที่นิยมพันกันโดยทั่วไป

เนื่องจากลักษณะการพันขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์จะเหมือนกับขดลวด อาร์เมเจอร์ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งระยะพิตช์ (Pitch) ของขดลวดสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ ได้แก่ ขดลวดที่มีระยะพิตช์เต็ม (Full Pitch) และระยะพิตช์เศษส่วน (Fractional Pitch or Short Pitch)

4) ฝาปิดหัวท้าย (End Plate) ทำจากเหล็กหล่อเหนียวหรือเหล็กเหนียว ฝาปิดนี้จะถูกยึดติดอยู่กับโครงมอเตอร์ด้วยสลักเกลียว มีแปรงอยู่ตรงกลางสำหรับรองรับเพลลา เพื่อให้โรเตอร์หมุนอยู่ในแนวศูนย์กลางพอดี ดังรูปที่ 2.8

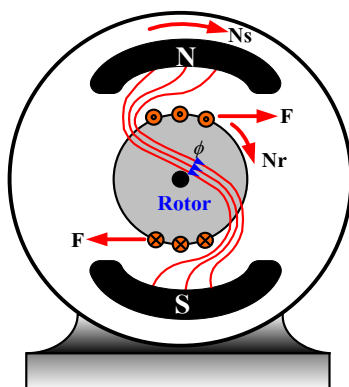


รูปที่ 2.8 ฝาปิดหัวท้าย [19]

2.6.2 หลักการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

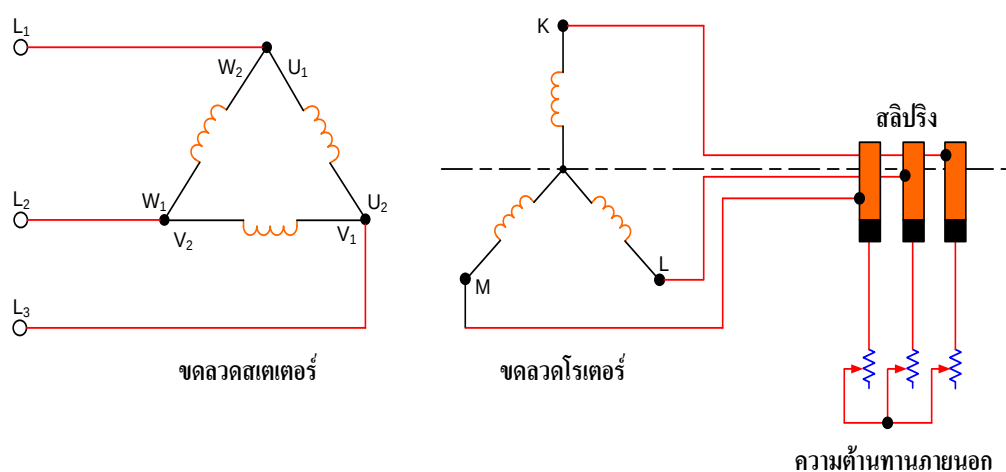
เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ให้กับขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์ โดยจะหมุนติดกับตัวนำโรเตอร์ที่วางอยู่ในสล็อตที่โรเตอร์ ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในตัวนำของโรเตอร์ ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นที่โรเตอร์ผลรวมของเส้นแรงแม่เหล็กที่สเตเตอร์กับเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำที่โรเตอร์ทำให้เกิดแรงบิดขึ้นที่ตัวนำ และทำให้โรเตอร์หมุนไปตามทิศทางของสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์ ซึ่งการเกิดสนามแม่เหล็กหมุนและการเกิดแรงบิดที่โรเตอร์ ดังรูปที่ 2.9

1) การทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โรเตอร์แบบกรงกระรอก เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ให้กับขดลวดสเตเตอร์จะเกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นที่สเตเตอร์ด้วยความเร็วเชิงโคจร (N_s) สนามแม่เหล็กหมุนนี้จะเคลื่อนที่ตัดขดลวดที่โรเตอร์ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นที่ตัวนำบนโรเตอร์ แต่ตัวนำบนโรเตอร์นี้ได้ถูกลัดวงจรไว้ ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลที่ตัวนำนี้ ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์เกิดชั่วเหวและชั่วไต้ขึ้นในโรเตอร์เช่นเดียวกับที่เกิดขึ้นที่สเตเตอร์ ผลรวมของเส้นแรงแม่เหล็กที่สเตเตอร์กับเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำที่โรเตอร์ทำให้เกิดแรงบิดขึ้นที่โรเตอร์ และทำให้โรเตอร์หมุนไปได้และมีทิศทางตามทิศทางของสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์



รูปที่ 2.9 การเกิดแรงบิดที่ตัวนำของโรเตอร์ [19]

2) การทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โรเตอร์แบบพันขดลวด ดังรูปที่ 2.10 อาศัยหลักการเกิดสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์ และทำให้โรเตอร์หมุนไปได้นั้นจะเหมือนกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบโรเตอร์กรงกระรอก จะแตกต่างกันเฉพาะตอนเริ่มเดินมอเตอร์เท่านั้น



รูปที่ 2.10 การเริ่มเดินมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสแบบโรเตอร์พันขดลวด [19]

2.6.3 การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

เมื่อพิจารณาจากสมการของความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนจะได้

$$N_s = \frac{120f}{P} \quad (2.5)$$

เมื่อ P = จำนวนขั้วแม่เหล็ก
 f = ความถี่

จะเห็นได้ว่ามีตัวแปรอยู่ 2 ตัว ที่ทำให้ความเร็วรอบของสนามแม่เหล็กหมุนหรือความเร็วเชิงโคโรนัสเปลี่ยนแปลงได้ คือจำนวนขั้วแม่เหล็ก (P) และความถี่ (f) ของแหล่งจ่ายที่ป้อนให้กับมอเตอร์

สำหรับจำนวนขั้วแม่เหล็ก จะเป็นปฏิภาคผกผันกับความเร็วซิงโครนัส คือ เมื่อจำนวนขั้วแม่เหล็กมากความเร็วซิงโครนัสจะน้อย แต่เมื่อจำนวนขั้วแม่เหล็กลดความเร็วซิงโครนัสจะมาก การปรับความเร็วรอบด้วยวิธีนี้มี 2 แบบคือ แบบคอนซีควเอนโพล กับแบบใช้ขดลวดหลายชุด การเปลี่ยนแปลงจำนวนขั้วแม่เหล็ก ความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ได้จะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นขั้นๆ ไม่เรียบสม่ำเสมอ

ส่วนความถี่จะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับความเร็วซิงโครนัส เมื่อความถี่มากความเร็วซิงโครนัสจะมากตาม ในทางตรงกันข้ามถ้าความถี่ลดลงความเร็วซิงโครนัสก็จะลดลงด้วย การปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ด้วยวิธีนี้ โดยการใช้อินเวอร์เตอร์ในการเริ่มเดินมอเตอร์ สามารถปรับความถี่หรืออัตราส่วน $\frac{V}{f}$ ได้ตามต้องการ ความเร็วของมอเตอร์จะเปลี่ยนแปลงอย่างสม่ำเสมอ และสามารถปรับเพิ่ม – ลดแรงบิดได้อีกด้วย ซึ่งอินเวอร์เตอร์ที่นิยมใช้งานในปัจจุบันจะเป็นแบบ PWM (Pulse Width Modulation)

2.6.4 การคำนวณกำลังของมอเตอร์

เมื่อต้องการจะคำนวณหามอเตอร์จะได้ P นิวตัน ที่กระทำสัมผัสกับเพลลา ทำให้เพลลาหมุนด้วยความเร็วรอบ n รอบต่อนาที ขณะที่เพลลาหมุนไป 1 รอบสามารถหาค่าต่างๆ ได้ดังนี้

$$P = \frac{2\pi Tn}{60} \quad (2.6)$$

เมื่อ	P	=	กำลังงานมอเตอร์ มีหน่วยเป็นวัตต์ (w) หรือกิโลวัตต์ (KW)
	T	=	โมเมนต์แรงบิด มีหน่วยเป็นนิวตันเมตร
	n	=	ความเร็วรอบ มีหน่วยเป็นรอบต่อนาที rpm

2.7 การออกแบบสายพาน [20]

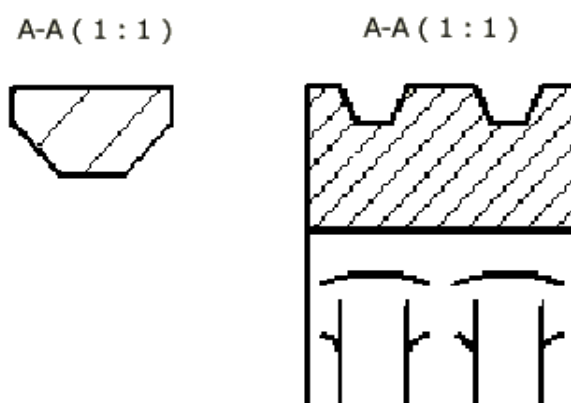
สายพานดังรูปที่ 2.11 และล้อสายพานดังรูปที่ 2.12 ทำหน้าที่ส่งถ่ายกำลังจากเครื่องยนต์ต้นกำลังไปยังเครื่องย่อยกากบะป๊าวและเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ที่มอเตอร์เป็นต้นกำลังจะติดตั้งล้อสายพานขนาดเล็กส่วนที่เพลลาของเครื่องจะใช้ล้อสายพานขนาดใหญ่เพื่อเป็นการทดรอบให้ต่ำลงและยังเป็นการเพิ่มแรงบิดอีกด้วย



รูปที่ 2.11 สายพาน [20]

สายพานที่ส่งกำลังจากมอเตอร์ไปยังเพลาหมุนของชุดคมตัดใช้สายพานลิ่ม ซึ่งส่งกำลังได้มาก โดยต้องการแรงดึงขั้นต่ำน้อย เนื่องจากการเกาะยึดตัวกันระหว่างด้านข้างของสายพานที่เรียกว่าร่องลิ่มของล้อสายพาน (Pulleys) ทำให้เกิดแรงเสียดทานสูงเป็นผลทำให้การทำงานของสายพานมีประสิทธิภาพดีขึ้น แม้ว่ามีส่วนโค้งสัมผัสเล็กน้อยและมีแรงดึงขั้นต่ำต่ำ สามารถรับแรงกระตุกได้ดีมีขนาดกะทัดรัด และเงื่อนไขการทำงานแบริงของเพลไม่ต้องรับแรงมากเกินไป

การกำหนดขนาดของสายพานลิ่มจะกำหนดโดยใช้ความกว้างของพิตช์ (Pitch Width) และความหนาของสายพานโดยใช้ตัวอักษรแทน ซึ่งแบ่งออกเป็นสายพานลิ่มแบบแคบ (Narrow V Belt) มีขนาด SPZSPB และสายพานลิ่มแบบธรรมดา Y Z A B C D E ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 หน้าตัดสายพานลิ่มและล้อสายพาน [20]

2.7.1 การคำนวณหาขนาดของสายพาน

การหาขนาดหน้าตัดโดยประมาณอาจหาจากการใช้รูป ส่วนการหาขนาดส่วนอื่นๆของสายพานลิ่ม คือ ความยาวพิตช์ของสายพานลิ่ม จำนวนสายพานลิ่ม และระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของเพลลา สามารถคำนวณได้จากสูตรต่อไปนี้

ความยาวพิตช์โดยประมาณของสายพานลิ่ม

$$L_p = 2C + 1.75(D_p + d_p) + \frac{(D_p + d_p)^2}{4C} \quad (2.7)$$

เมื่อ	L_p	=	ความยาวโดยประมาณของสายพานลิ่ม
	C	=	ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลาง
	D_p	=	เส้นผ่านศูนย์กลาง Pulleys ตัวที่ 1
	d_p	=	เส้นผ่านศูนย์กลาง Pulleys ตัวที่ 2

ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของเพลลา

$$C = p + \sqrt{p^2 - q} \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned}
 \text{เมื่อ } C &= \text{ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของเฟลลา} \\
 p &= 0.25L_p - 0.393 (D_p + d_p) \\
 q &= 0.125 (D_p + d_p)
 \end{aligned}$$

จำนวนเส้นของสายพานลิ่มที่ต้องใช้หาได้จากสมการ

$$Z = \frac{(W_p N_s)}{(P_R N_a N_1)} \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned}
 \text{เมื่อ } Z &= \text{จำนวนสายพาน} \\
 W_p &= \text{กำลังที่ต้องการส่ง} \\
 N_s &= \text{ตัวประกอบชิ้นงาน} \\
 N_a &= \text{ตัวประกอบแก้ไขส่วนโค้ง} \\
 N_1 &= \text{ตัวประกอบแก้ไขความยาวสายพาน} \\
 P_R &= \text{กำลังที่ส่งสายพานต่อเส้น}
 \end{aligned}$$

2.8 การปรับปรุงคุณสมบัติทางกล [21]

การปรับปรุงคุณสมบัติของเหล็กกล้าโดยการใช้กรรมวิธีทางความร้อนได้แก่ การอบปกติ (Normalizing) การชุบแข็ง (Hardening) การอบคืนตัว (Martempering) ในงานวิจัยนี้จะกล่าวเพียงการชุบแข็งและการอบคืนตัว

2.8.1 การชุบแข็ง (Hardening)

คือ การอบชุบความร้อนเพื่อต้องการให้เหล็กภายหลังการชุบมีความแข็งเพิ่มขึ้น เพื่อทนต่อการเสียดสีในขณะใช้งาน การชุบแข็งเป็นวิธีเพื่อให้ได้โครงสร้างของเหล็กสุดท้ายเป็น Martensite หรือ Bainite ขึ้นอยู่กับความแข็งสุดท้ายที่ต้องการ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจาก Austenite ไปเป็น Martensite หรือ Bainite ซึ่งจะได้เหล็กที่มีความแข็งสูงจะต้องมีองค์ประกอบที่สำคัญอย่างน้อย 3 ประการคือ

1) ปริมาณคาร์บอน ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ เพราะการที่ Austenite จะเปลี่ยนไปเป็น Martensite ในลักษณะการชุบแข็งธรรมดาดังนี้ เหล็กควรจะมีคาร์บอนมากกว่า 0.3% ส่วนธาตุที่ผสมในเหล็กอื่นๆ เช่น นิกเกิล โครเมียม และโมลิบดีนัม จะทำหน้าที่เพียงช่วยให้การชุบแข็งได้ผลดีขึ้นเท่านั้น ความแข็งของ Martensite จะขึ้นอยู่กับปริมาณของคาร์บอน ดังตัวอย่างเช่น เหล็กคาร์บอน 0.35% สามารถชุบแข็งได้ความแข็งประมาณ 50 HRC ตรงกันข้ามกับเหล็ก 0.02%C, 10%Cr ได้ความแข็งภายหลังการชุบแข็งเพียง 35 HRC

2) อุณหภูมิก่อนการชุบ คือ อุณหภูมิที่เหล็กจะต้องเปลี่ยนเป็น Austenite ก่อนการชุบน้ำหรือน้ำมัน อุณหภูมิของเหล็กไม่สูงพอจนโครงสร้างเปลี่ยนเป็น Austenite หมด เราจะชุบในน้ำหรือน้ำเกลือ น้ำต่าง ความแข็งที่ได้จะไม่สูงเท่าที่ควรเพราะ Martensite ที่ได้จะต้องมาจาก Austenite เท่านั้น และเป็นการเปลี่ยนโครงสร้างโดยปราศจากการกำเนิดนิวเคลียสไม่เหมือนอย่างเช่น Ferrite หรือ Cementite

3) อัตราการเย็นตัว เป็นองค์ประกอบที่สำคัญอีกประการหนึ่งที่ Austenite จะเปลี่ยนไปเป็น Martensite หรือ Bainite จะต้องเป็นอัตราการเย็นตัวที่สูงพอ ซึ่งจะปรากฏคำว่า

“อัตราการเย็นตัววิกฤติ (Critical cooling rate)” หมายถึง อัตราการเย็นตัวที่ Austenite เปลี่ยนไปเป็น Martensite หรือ Bainite ถ้าอัตราการเย็นตัวช้ากว่านี้ Austenite จะไม่มีโอกาสเปลี่ยนเป็น Martensite หรือ Bainite แต่จะได้ Pearlite หรือ Sorbite แทน

2.8.2 การอบคืนตัว (Tempering)

เหล็กหลังจากการชุบแข็งจะมีโครงสร้างส่วนใหญ่ประกอบด้วย Martensite และ Austenite เหลือค้าง (Residual Austenite) ถ้าเป็นเหล็กคาร์บอนสูง จะมี Proeutectoid Cementite กระจุกกระจายอยู่ทั่วไป นอกจากนี้เหล็กที่ผ่านการชุบแข็งจะเกิดความเครียดภายใน อันเนื่องมาจากอัตราการเย็นตัวที่เร็วจากอุณหภูมิสูง คุณสมบัติของเหล็กตามลักษณะที่กล่าวจะมีความแข็งแรงสูง แต่จะขาดคุณสมบัติด้านความเหนียวไม่ทนต่อแรงกระแทก (Poor Impact Strength) และความเครียดภายในที่เกิดขึ้นจะมีส่วนทำให้ชิ้นงานบิดงอ หรืออาจเกิดการแตกร้าวในขณะที่ใช้งานได้ ดังนั้นเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งก่อนนำไปใช้งานควรจะต้องนำมาทำการอบคืนตัว เพื่อคลายความเครียดภายในให้หมดไป หรือเหลืออยู่น้อยที่สุด และในขณะเดียวกันจะทำให้ Martensite แตกตัวให้โครงสร้างกึ่งสมดุล (Tempered Martensite) ซึ่งจะมีผลอย่างกว้างขวางต่อคุณสมบัติของเหล็ก ดังเช่น ความแข็งแรงจะลดลง แต่ความเหนียวจะกลับสูงขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับช่วงอุณหภูมิของการอบคืนตัว และเวลาที่ใช้

การอบคืนตัว เป็นวิธีการเผาเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่าเส้น A1 ภายหลังเมื่อทิ้งไว้เป็นเวลานานพอสมควรแล้วจะปล่อยให้เย็นช้าๆภายในเตา การเปลี่ยนแปลงของ Martensite และ Austenite เหลือค้างไปสู่โครงสร้างกึ่งสมดุลจะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิต่างๆกันดังนี้

อุณหภูมิช่วงแรก ($80 - 200^{\circ}\text{C}$) โครงสร้าง Martensite จะแตกตัวให้โครงสร้าง Ferrite ชนิดที่ใกล้เคียงจะเป็นระบบลูกบาศก์ (Pseudo cubic) ซึ่งมีคาร์บอนละลายอยู่ 0.25% คาร์ไบด์ ชนิดเอฟซีลอน (ϵ carbide) มีสูตร Fe_2C หรือ Fe_2C_4 และมีคาร์บอนประมาณ 8.20% ทั้งคาร์ไบด์ และ Ferrite (0.25% C) จะตกผลึกชนิดละเอียดและกระจุกกระจายอยู่ทั่วไปในโครงสร้าง สามารถศึกษาได้โดยกล้องขยายอิเล็กตรอนเท่านั้น การอบคืนตัวในช่วงอุณหภูมินี้ความแข็งแรงจะลดลงเล็กน้อย แต่ความเครียดภายในจะถูกทำลายไปเกือบหมด

อุณหภูมิช่วงที่สอง ($200^{\circ}\text{C} - 280^{\circ}\text{C}$) โครงสร้าง Austenite ที่ไม่สามารถเปลี่ยนเป็น Martensite ได้ทันในขณะที่ชุบแข็ง (Retained austenite) จะแตกตัวให้โครงสร้าง Ferrite (0.025% C) และ Cementite (Fe_3C) ที่มีความละเอียดและกระจุกกระจายโครงสร้างที่ปรากฏจะคล้ายคลึงกับ Bainite ความแข็งแรงจะลดลงมาก แต่ความเหนียวจะเพิ่มขึ้น

อุณหภูมิช่วงที่สาม ($300^{\circ}\text{C} - 500^{\circ}\text{C}$) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงโดย Ferrite (Pseudo cubic) จะแตกตัวให้ Ferrite (Cubic) ที่มีคาร์บอน 0.025% และ Cementite ส่วน ϵ -Carbide จะเปลี่ยนเป็น Cementite (Fe_3C) โครงสร้างที่จะได้จะยังอยู่ในลักษณะละเอียด และกระจุกกระจายมีลักษณะคล้าย Sorbite

อุณหภูมิช่วงที่สี่ (สูงกว่า 500°C ขึ้นไปจนถึง A1) โครงสร้างที่เกิดขึ้นจะปรับตัวเข้ากับสภาพสมดุล และมีการขยายตัวของ Ferrite และ Cementite โตขึ้น ความแข็งแรงจะลดลงมากโดยความเหนียวจะเพิ่มขึ้นในลักษณะคล้ายคลึงกับเหล็กที่ผ่านการทำสเฟอไรไรไดซ์ซิง (Incomplete Annealing)

จากการทดลองอบคืนตัวเหล็ก Eutectoid (0.80% C) ที่ช่วงอุณหภูมิต่างๆปรากฏได้ ความแข็งแรงลดลงจากความแข็งแรงภายหลังการชุบแข็ง (64 HRC) อบคืนตัวอุณหภูมิช่วงแรก 1 ชั่วโมง ได้

ความแข็ง 60 – 64 HRC ช่วงที่สองได้ความแข็ง 40 – 60 HRC ช่วงที่สามความแข็ง 20 – 40 HRC และช่วงที่สี่เหลือความแข็ง 5 – 10 HRC ในทางปฏิบัติแบ่งช่วงอุณหภูมิสำหรับการอบคืนตัวออกเป็น 3 ช่วงคือ

การอบคืนตัวที่อุณหภูมิต่ำ (150°C – 250°C) มีวัตถุประสงค์เพื่อลดความเครียดภายในและปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านความเหนียว โดยพยายามรักษาระดับความแข็งไว้ในระดับใกล้เคียงกับความแข็งที่ได้ภายหลังการชุบแข็ง เวลาที่ใช้ประมาณ 1 – 2 ชั่วโมง โครงสร้างของเหล็กจะเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

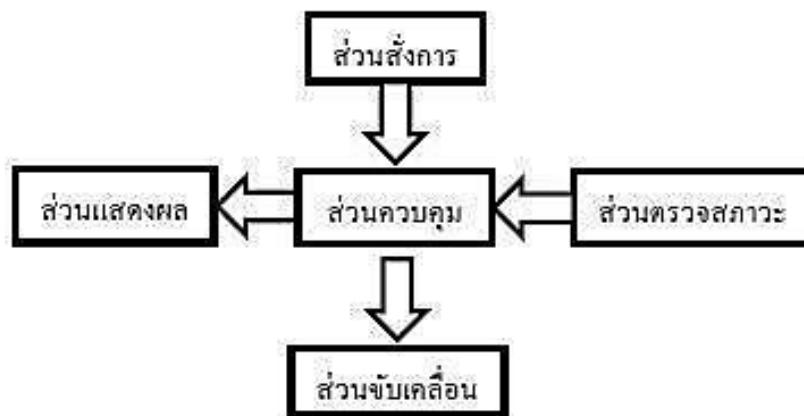
การอบคืนตัวที่อุณหภูมิปานกลาง (350°C – 450°C) มีวัตถุประสงค์เพื่อให้เหล็กมีความเหนียวสูงและมีคุณสมบัติทางด้านยืดหยุ่นสูง ส่วนใหญ่ใช้สำหรับเหล็กทำหมอบสปริงโครงสร้างของเหล็กจะใกล้เคียงกับ Bainite หรือ Troostite

การอบคืนตัวที่อุณหภูมิสูง (500°C – 650°C) จะกระทำเมื่อต้องการทำลายความเครียดภายในให้หมดไป และเพื่อให้เหล็กมีคุณสมบัติทางด้านความเหนียวสูง โดยมีความแข็งอยู่ในเกณฑ์สูงด้วย โครงสร้างของเหล็กจะมีลักษณะเป็น Pearlite ละเอียดใกล้เคียงกับโครงสร้าง Sorbite

2.9 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับระบบไฟฟ้า [22]

ปัจจุบันนี้ขบวนการผลิตในโรงงานหรือการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนในเครื่องจักรกลต่างๆ จะใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นตัวขับเคลื่อนเป็นส่วนใหญ่ เพราะพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานที่หาง่ายมีความสะดวกในการใช้งาน ฉะนั้นการออกแบบเพื่อควบคุมมอเตอร์ให้เป็นไปตามขบวนการหรือการเคลื่อนที่ของงานที่คิดไว้จึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องเรียนรู้ สำหรับความหมายของการควบคุมมอเตอร์ (Motor Control) คือการบังคับให้มอเตอร์ทำงานให้ได้ตามจุดมุ่งหมายที่ตั้งไว้ องค์ประกอบของการควบคุมจะประกอบด้วย 5 องค์ประกอบ แสดงดังรูปที่ 2.13 โดยแต่ละส่วนมีหน้าที่และอุปกรณ์ประกอบดังนี้

- 1) ส่วนสั่งการเป็นส่วนที่จะสั่งให้เกิดการทำงานโดยอุปกรณ์ในส่วนนี้ได้แก่สวิตช์
- 2) ส่วนตรวจสอบสถานะเป็นส่วนที่บอกถึงสถานะการทำงานเพื่อส่งข้อมูลให้กับส่วนควบคุมอุปกรณ์ในส่วนนี้ได้แก่ลิมิตสวิตช์สวิตช์ลําแสงหรือรีเลย์สัมผัสสวิตช์ เป็นต้น
- 3) ส่วนขับเคลื่อนเป็นส่วนที่จะทำให้การทำงานที่ต้องการเช่นมอเตอร์ขับเคลื่อน
- 4) ส่วนแสดงผลเป็นส่วนที่แสดงสถานะการทำงานโดยอุปกรณ์ในส่วนนี้ได้แก่หลอดแสดงผลตัวเลขแสดงผลและหน้าจอแสดงผล เป็นต้น
- 5) ส่วนควบคุมเป็นส่วนหัวใจหลักที่จะให้การทำงานเป็นไปตามที่ต้องการโดยรับข้อมูลจากส่วนสั่งการและส่วนตรวจสอบสถานะและสั่งให้ส่วนขับเคลื่อนให้ทำงานตามที่ออกแบบไว้พร้อมทั้งแสดงการทำงานที่ส่วนแสดงผลในส่วนควบคุมจะกล่าวเฉพาะการควบคุมแบบที่ใช้แม่เหล็กคอนแทคเตอร์ (Magnetic Contactor) และแบบที่ใช้ PLC (Programmable Logic Control)



รูปที่ 2.13 ควบคุมระบบแมกเนติกคอนแทคเตอร์ (Control using Magnetic Contractor) [22]

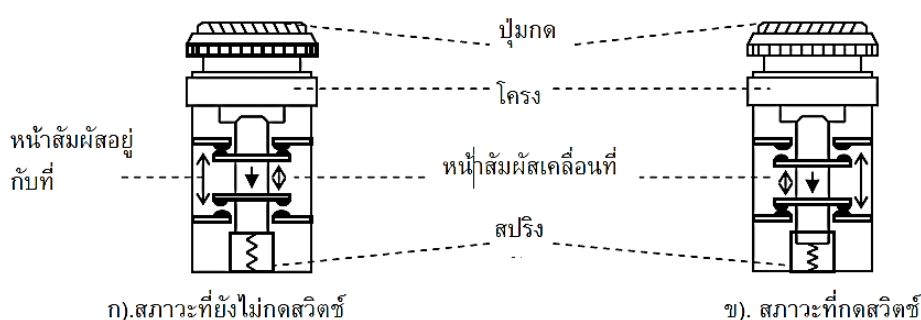
การควบคุมโดยใช้แมกเนติกคอนแทคเตอร์ จะเป็นการควบคุมมอเตอร์จำนวนไม่มาก เพราะถ้าใช้ควบคุมมอเตอร์หลายๆตัว การต่อจะค่อนข้างยุ่งยาก การควบคุมที่จะกล่าวต่อไปนี้เป็น การควบคุมมอเตอร์กระแสสลับ 3 เฟส ซึ่งจะกล่าวถึงอุปกรณ์และสัญลักษณ์ของอุปกรณ์ในการควบคุมมอเตอร์ตัวอย่างวงจรการควบคุม

2.9.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมมอเตอร์ (Control Devices of Motor Control) [8]

1) สวิตช์ (Switch) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมการ Start และ Stop หรือการเปลี่ยนเงื่อนไขการทำงานของวงจร ตัวอย่างชนิดของสวิตช์ที่ใช้ในงานควบคุมมีดังนี้

สวิตช์แบบกดติดปล่อยดับ (Pushbutton Switch) เมื่อกดสวิตช์หน้าสัมผัส (Contact) จะเปลี่ยนสถานะและเมื่อปล่อยมือหน้าสัมผัสจะกลับสู่สถานะเดิม ภายในตัวสวิตช์จะมีหน้าสัมผัสที่เป็นแบบปกติเปิด (Normally Open: N.O.) และปกติปิด (Normally Closed: N.C.) แสดงดังรูปที่ 2.14 และแบ่งสวิตช์แบบกดติดปล่อยดับตามลักษณะการใช้งานดังนี้

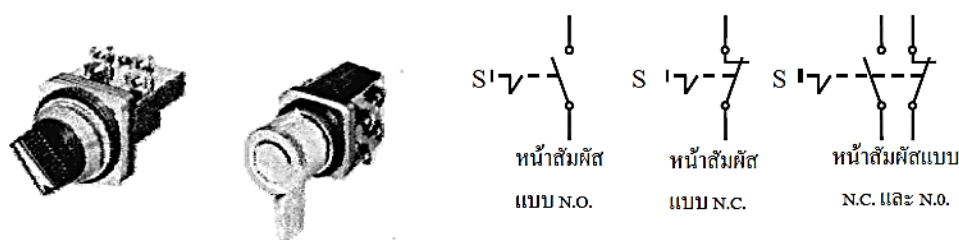
- แบบธรรมดา ปุ่มกดมีลักษณะเป็นหัวกลมมีสีที่ปุ่มเพื่อต่อการสังเกต
- แบบ Giant Head มีหัวใหญ่เหมาะสำหรับใช้เป็นสวิตช์ฉุกเฉิน (Emergency Switch)
- แบบ I Luminated Pushbutton มีหลอดสัญญาณเพื่อแสดงให้ทราบว่าวงจรกำลังทำงานอยู่ แสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.14 โครงสร้างภายในของสวิตช์แบบกดติดปล่อยดับและการเคลื่อนที่ของหน้าสัมผัส [22]



รูปที่ 2.15 สวิตช์แบบกดติดปล่อยดับแบบต่างๆและสัญลักษณ์ทางไฟฟ้า [22]



รูปที่ 2.16 สวิตช์แบบเลือกและสัญลักษณ์ทางไฟฟ้า [22]

- สวิตช์แบบเลือก (Selector Switch) เมื่อปิดสวิตช์หน้าสัมผัสจะเปลี่ยนสถานะและถ้าต้องการให้หน้าสัมผัสกลับสู่สถานะเดิมต้องปิดกลับ แสดงดังรูปที่ 2.16

2.9.2 หลอดไฟสัญญาณ (Pilot Light)

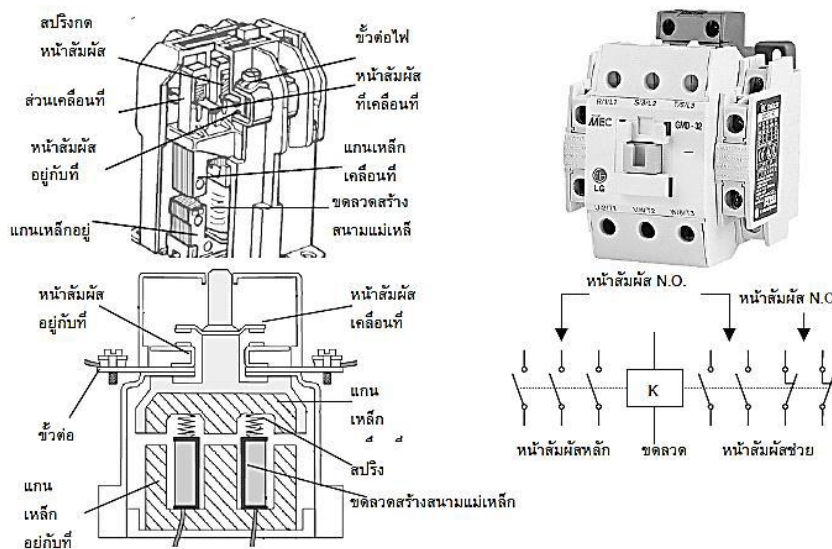
หลอดไฟสัญญาณ เป็นหลอดที่ใช้บอกสถานะในการทำงาน การเลือกใช้อาจดูที่สีเพื่อแสดงสถานะที่ต่างกัน เช่นหลอดสีเขียวแสดงมอเตอร์ทำงาน หลอดสีแดงแสดงมอเตอร์หยุด แสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 หลอดไฟสัญญาณและสัญลักษณ์ทางไฟฟ้า [22]

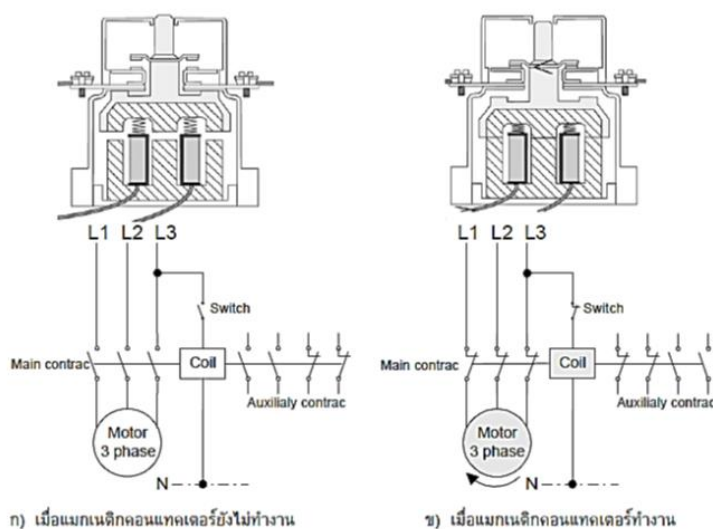
2.9.3 แมกเนติกคอนแทคเตอร์ (Magnetic Contactor)

แมกเนติกคอนแทคเตอร์หรือเรียกว่าคอนแทคเตอร์ เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ตัดหรือต่อวงจรเหมือนกับสวิตช์ทั่วไป แต่การตัดหรือต่อวงจรจะอาศัยอำนาจแม่เหล็กในการทำให้หน้าสัมผัสเคลื่อนที่ โดยส่วนประกอบและสัญลักษณ์ของคอนแทคเตอร์ แสดงดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ส่วนประกอบและสัญลักษณ์ของแมกเนติกคอนแทคเตอร์ [22]

จากรูปคอนแทคเตอร์ จะประกอบด้วยส่วนที่เคลื่อนที่กับส่วนที่อยู่กับที่ โดยมีหน้าสัมผัสติดอยู่ ซึ่งหน้าสัมผัสจะมีทั้งที่เป็นปกติเปิดและปกติปิด และอีกส่วนคือขดลวดที่จะสร้างสนามแม่เหล็กสำหรับการทำงาน แสดงดังรูปที่ 2.19 เมื่อมีกระแสไหลผ่านขดลวดจะเกิดสนามแม่เหล็กไหลล่อแกนเหล็ก ส่วนที่อยู่กับที่ไปดูดแกนเหล็กอีกส่วนให้เคลื่อนที่มาติดเป็นผลทำให้หน้าสัมผัสเปลี่ยนสถานะพร้อมๆกันทั้งหมด หน้าสัมผัสจะประกอบด้วยหน้าสัมผัสหลักและหน้าสัมผัสช่วย



รูปที่ 2.19 การทำงานของแมกเนติกคอนแทคเตอร์ [22]

- 1) หน้าสัมผัสหลัก (Main Contact) เป็นหน้าสัมผัสที่ใช้เปิดและปิดการไหลผ่านของกระแสจากแหล่งจ่ายไปที่มอเตอร์ หรือในส่วนที่มีกระแสในปริมาณมากหน้าสัมผัสหลักเป็นตัวควบคุมการเปิด - ปิดวงจรหลัก (Main Circuit) โดยหน้าสัมผัสส่วนใหญ่เป็นแบบปกติเปิด (N.O)
- 2) หน้าสัมผัสช่วย (Auxiliary Contact) เป็นหน้าสัมผัสที่ใช้เปิด - ปิดวงจรที่มีปริมาณกระแสน้อยกว่าหน้าสัมผัสหลัก หน้าสัมผัสช่วยใช้ในการควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับ

ขดลวดของคอนแทคเตอร์เพื่อควบคุมการทำงานของคอนแทคเตอร์ในวงจรควบคุม (Control Circuit) โดยที่หน้าสัมผัสช่วยจะมีทั้งแบบปกติเปิดและแบบปกติปิด

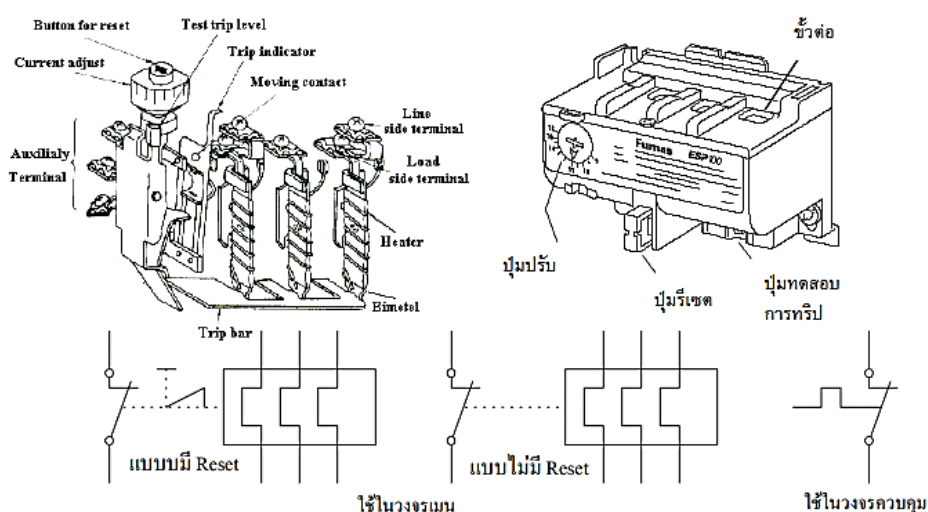
2.9.4 อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกิน (Overload Protection)

มอเตอร์ที่ใช้งานอาจเกิดกระแสไหลเกินกว่าอัตรากระแสพิกัด (Full Load Current) อันเนื่องมาจากโหลดที่ใช้มอเตอร์นั้นมีมากเกินไปกำลังของตัวมอเตอร์แรงดันไฟฟ้ามาไม่ครบเฟสทำให้มอเตอร์ต้องดึงกระแสมากขึ้น เมื่อกระแสไหลในปริมาณมากจะเป็นสาเหตุทำให้ขดลวดมอเตอร์ร้อนและไหม้ในที่สุด เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายต้องมีการต่ออุปกรณ์ที่จะป้องกันกระแสเกินไว้ โดยถ้ามีกระแสเกินมอเตอร์ต้องหยุดการทำงานทันทีและทำการตรวจสอบก่อนที่จะสั่งให้มอเตอร์ทำงานอีกครั้งสำหรับอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินหรือเรียกว่าโอเวอร์โหลด

โอเวอร์โหลดมีหลายชนิดในที่นี้จะกล่าวถึงแบบที่ใช้แผ่น Bimetal ซึ่งอาศัยความร้อนจากกระแสไหลผ่านโลหะ 2 ชนิด หรือใช้ขดลวดความร้อนที่ต่ออนุกรมกับโหลดพันอยู่กับแผ่นไบเมทัล เมื่อมีกระแสไหลในปริมาณมากจะทำให้แผ่นไบเมทัลร้อนและโก่งตัวไปดันให้คันส่งเคลื่อนที่ไปดันหน้าสัมผัสควบคุมให้จากออกดังแสดงในรูปที่ 2.20

โอเวอร์โหลดแบ่งตามการคืนสภาวะได้เป็น 2 ชนิดดังนี้คือ

- 1) แบบไม่มี Reset แบบนี้เวลาไบเมทัลเย็นตัวลงหน้าสัมผัสจะกลับมาอยู่ที่เดิม
- 2) แบบมี Reset แบบนี้ถ้าต้องการให้หน้าสัมผัสกลับที่เดิมต้องกดปุ่ม Reset ก่อน



รูปที่ 2.20 โอเวอร์โหลดแบบอาศัยความร้อนและสัญลักษณ์ [22]

2.9.5 อุปกรณ์ป้องกันการลัดวงจร

เป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งไว้เพื่อป้องกันการลัดวงจรอาจจะใช้ฟิวส์หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์โดยมีโครงสร้างและสัญลักษณ์ทางไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 2.21



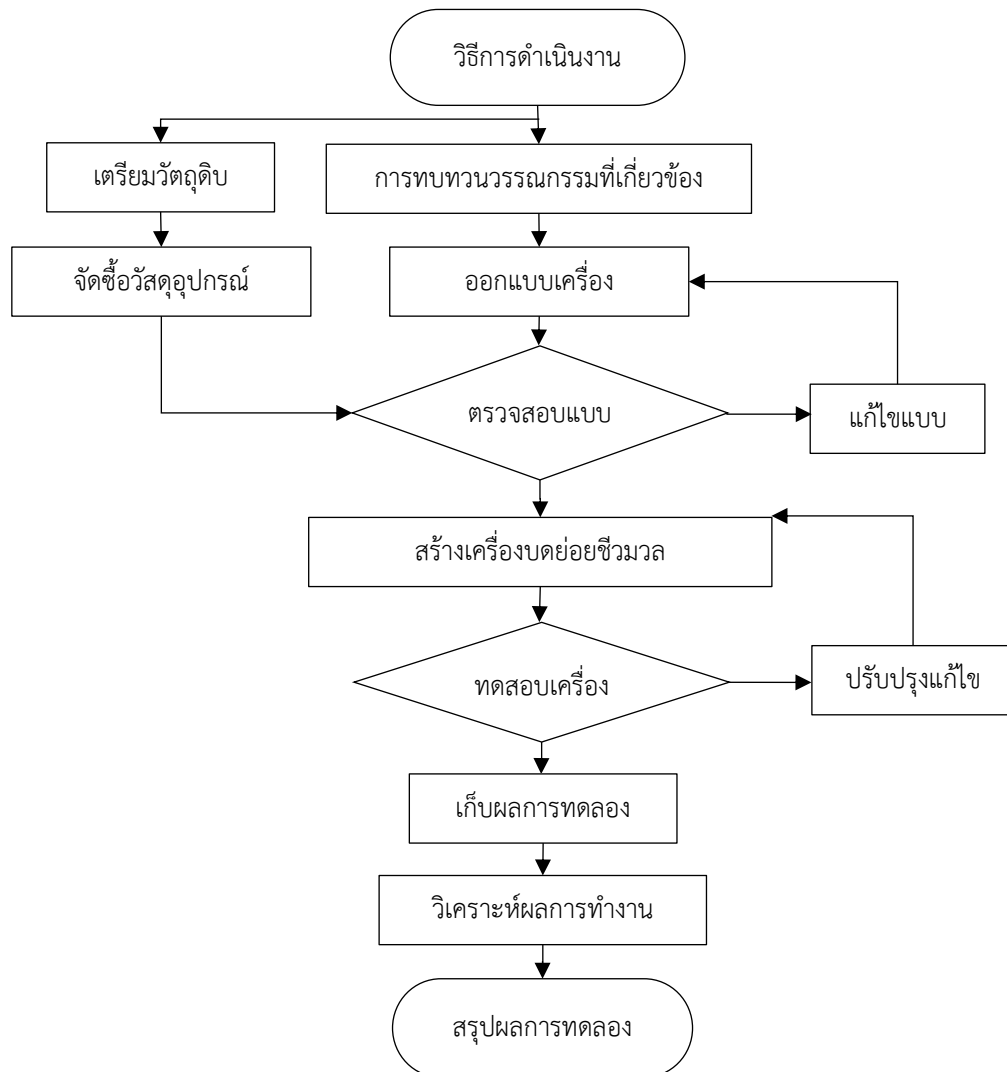
รูปที่ 2.21 อุปกรณ์ป้องกันการลัดวงจร [22]

บทที่ 3 วิธีดำเนินการ

การดำเนินโครงการวิจัยได้มีการวางแผนกำหนดขั้นตอนและวิธีดำเนินการ เพื่อป้องกันความผิดพลาดที่อาจจะเกิดขึ้น รวมทั้งผลกระทบที่อาจจะทำให้โครงการนั้นเกิดความเสียหายได้ และเป็นแนวทางในการนำไปปฏิบัติ

3.1 ขั้นตอนการดำเนินการ

ขั้นตอนการดำเนินโครงการวิจัยเพื่อออกแบบและสร้างเครื่องบดย่อยชีวมวลจากเศษพืชเหลือใช้จากงานเกษตรกรรม สำหรับผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลนั้น ผู้วิจัยได้เริ่มจากการศึกษาข้อมูลรายละเอียดต่างๆ เกี่ยวกับกระบวนการบดย่อย และดำเนินการออกแบบสร้างเครื่องบดย่อยชีวมวล โดยมีแนวทางในการออกแบบให้สามารถใช้งานได้ง่าย มีความปลอดภัย มีราคาไม่สูงมาก สะดวกต่อการปฏิบัติงาน ชุมชนสามารถซ่อมและบำรุงรักษาได้ ซึ่งสามารถสรุปวิธีการดำเนินงานวิจัยมีขั้นตอนดังนี้



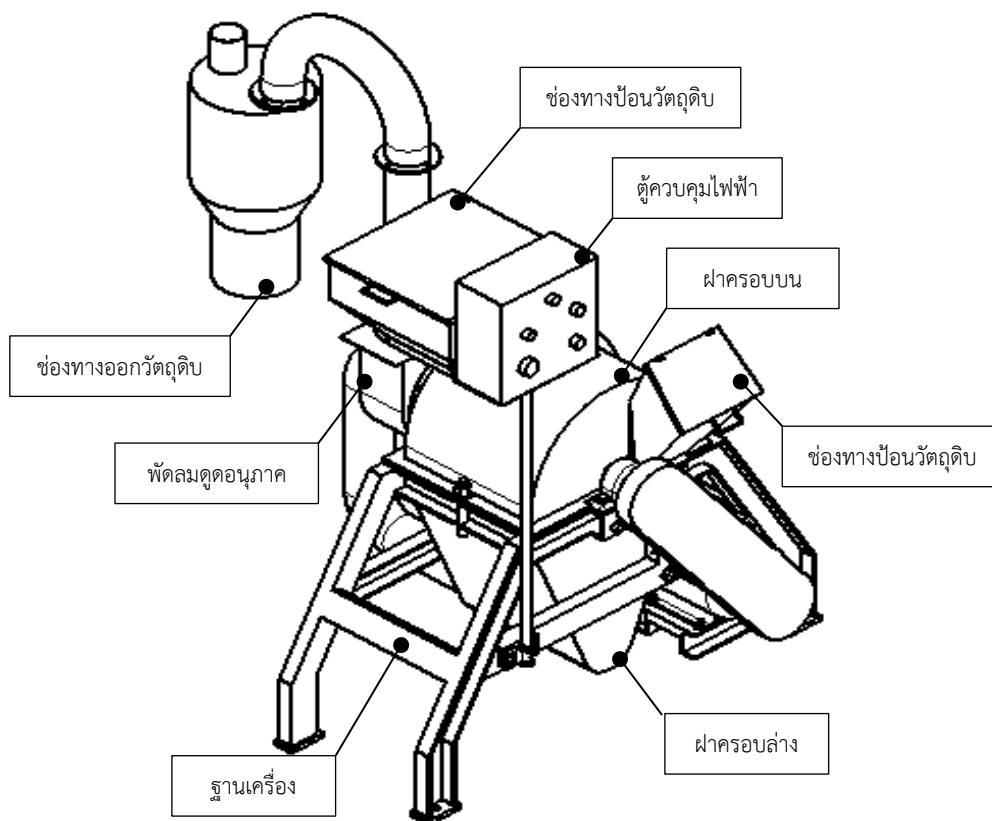
รูปที่ 3.1 แผนภาพขั้นตอนการดำเนินงาน

3.2 การออกแบบและสร้างเครื่องบดย่อยชีวมวล

ผู้วิจัยได้ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และศึกษาข้อมูลรายละเอียดต่างๆ ที่เกี่ยวกับกระบวนการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล เพื่อให้ได้เครื่องบดย่อยชีวมวลที่ใช้งานได้ง่าย มีความปลอดภัย มีราคาไม่สูงมาก สะดวกต่อการปฏิบัติงาน และชุมชนสามารถซ่อมบำรุงรักษาได้ เหมาะสมสำหรับเป็นโครงการนำร่องโรงงานผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับกลุ่มวิสาหกิจชุมชน กลุ่มธุรกิจขนาดเล็ก

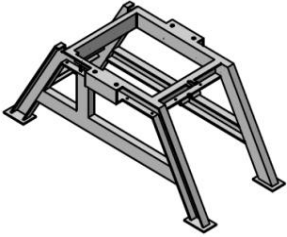
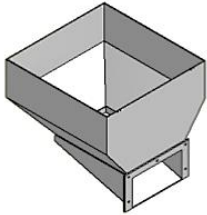
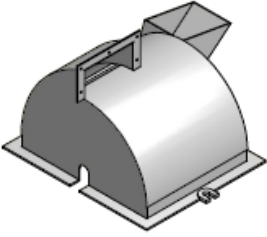
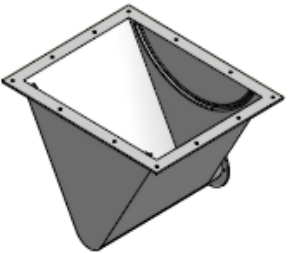
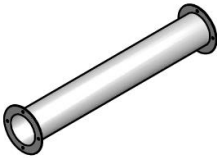
3.2.1 การออกแบบ

ผู้วิจัยได้ดำเนินการออกแบบเครื่องบดย่อยชีวมวล ตามรูปแบบของเครื่องบดแฮมเมอร์ มิลล์ ดังรูปที่ 3.2 ประกอบด้วย ชุดของค้อนหรือใบตี (hammer) จำนวน 64 ใบ ติดตั้งโดยห้อยอยู่กับโรเตอร์ (rotor) ซึ่งติดกับเพลาลำ (drive shaft) ชุดค้อนตีจะหมุนอยู่ในห้องบด (grinding chamber) ซึ่งมีตะแกรง (screen) ห่อหุ้มหรือล้อมรอบอยู่ เครื่องต้นกำลัง (power source) (ในที่นี้ผู้วิจัยได้เลือกใช้มอเตอร์ไฟฟ้า 10 แรงม้า [9,7]) จะทำการขับเคลื่อนให้เพลารอเตอร์หมุนด้วยความเร็วประมาณ 1,000 รอบต่อนาที เมื่อชุดโรเตอร์หมุน ทำให้ใบตีที่ห้อยอยู่สวิง (swing) หรือแกว่ง ออกตีเป็นมุมฉากกับโรเตอร์ และพร้อมที่จะตีหรือทุบวัตถุดิบที่เข้ามาในห้องบดให้แตกออกหรือมีขนาดลดลง เมื่อขนาดของวัตถุดิบที่เท่ากับหรือเล็กกว่าขนาดของรูตะแกรงวัตถุดิบก็จะลอดผ่านรูตะแกรง จากนั้นวัตถุดิบจะถูกดูดออกด้วยชุดพัดลมดูดอากาศ เพื่อบรรจุลงในถุงกระสอบที่เตรียมไว้ นอกจากนี้ผู้วิจัยได้เพิ่มเติมชุดใบมีดตัดหญ้า เพื่อรองรับวัตถุดิบที่มีขนาดใหญ่เช่น ชังข้าวโพด เป็นต้น ชุดใบมีดตัดหญ้าประกอบไปด้วยใบมีดสองตัวมีมุมคมตัดที่ 45 องศา ซึ่งชิ้นส่วนและคุณลักษณะเฉพาะของเครื่องบดย่อยชีวมวลแสดงดังตารางที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ

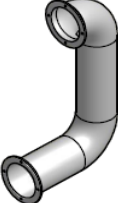
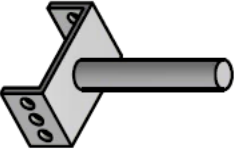
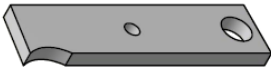
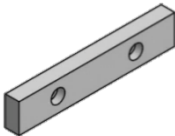
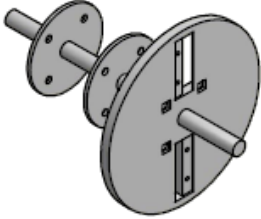


รูปที่ 3.2 โครงสร้างเครื่องบดย่อยชีวมวล

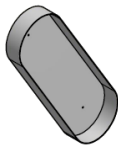
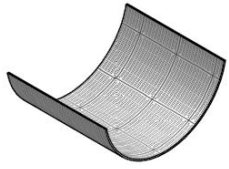
ตารางที่ 3.1 ชิ้นส่วนเครื่องบดย่อยชีวมวล

ชิ้นที่	รูปชิ้นส่วน	ชื่อชิ้นส่วน	ขนาดชิ้นส่วน (mm)	วัสดุ	หน้าที่การใช้ งาน
1		ฐานเครื่อง	1284X520 X495	St 37	ทำหน้าที่เป็น ฐานรองรับ ชิ้นส่วนอื่น ๆ
2		ถังป้อน วัตถุดิบ	400X390 X255	SS400	ทางเข้าสำหรับ ป้อนวัตถุดิบ
3		ฝาครอบบน	580X470 X420	SS400	ปิดด้านบนของ ชุดใบมีดและ ป้องกันไม่ให้ เศษวัตถุดิบ พุ่ง กระจายออก จากระบบ
4		ฝาครอบล่าง	585X480 X430	SS400	ปิดด้านล่างของ ชุดใบมีดและ ป้องกันไม่ให้ เศษวัตถุดิบพุ่ง กระจายออก จากระบบ
5		ท่อลม A	Ø150X400	St 37	ทำหน้าที่ ลำเลียงเศษ วัตถุดิบ
6		ท่อลม B	Ø150X700	St 37	ทำหน้าที่ ลำเลียงเศษ วัตถุดิบ

ตารางที่ 3.1 ชิ้นส่วนเครื่องบดย่อยชีวมวล (ต่อ)

ชั้นที่	รูปชิ้นส่วน	ชื่อชิ้นส่วน	ขนาดชิ้นส่วน (mm)	วัสดุ	หน้าที่การใช้งาน
7		ทางออกเศษ	Ø300X600	SS 400	ทำหน้าที่กรองอากาศ และลำเลียงวัตถุดิบเข้าสู่บรรจุ
8		ท่อลม C	Ø150X467	St 37	ทำหน้าที่ลำเลียงเศษวัตถุดิบ
9		ตัวปรับสายพาน	85x50 X170	St 37	ทำหน้าที่เป็นตัวปรับสายพานให้ตึง
10		ค้อนตี	173X40 X10	S50C	ทำหน้าที่เป็นตัวตีเศษวัตถุดิบให้มีขนาดเล็กลง
11		ใบมีดตัดหลัก	160X40 X15	S50C	ทำหน้าที่เป็นตัวตัดเศษสำหรับวัตถุดิบแข็ง
12		ใบมีดตัดรอง	170X32 X15	S50C	ทำหน้าที่เป็นใบมีดตัดรอง
13		ชุดโรเตอร์	Ø40X725	S40C	ทำหน้าที่เป็นตัวรับกำลังจากมอเตอร์

ตารางที่ 3.1 ชิ้นส่วนเครื่องบดย่อยชีวมวล (ต่อ)

ชิ้นที่	รูปชิ้นส่วน	ชื่อชิ้นส่วน	ขนาดชิ้นส่วน (mm)	วัสดุ	หน้าที่การใช้งาน
14		เพลาค้อนตี	25X25 X382	S40C	ทำหน้าที่เป็นตัว รองรับค้อนตี
15		ฝาครอบ สายพาน	483X200 X3	SS400	ทำหน้าที่เป็นตัว ป้องกันสายพาน ขณะเครื่อง ทำงาน
16		แหวนรอง ค้อนตี	Ø30X10	S40C	ทำหน้าที่เป็นตัว คั่นค้อนตี
17		ตะแกรง	500X500 X1.2	Stainless Steel	ทำหน้าที่เป็นตัว คัดกรองเศษที่ ผ่านรูตะแกรง

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติเฉพาะของเครื่องบดย่อยชีวมวล

รายละเอียด	คุณลักษณะ
Capacity	70-150 kg/hr
Motor.	10 HP 50 Hz 380 V
Speed	1,000 rpm
Dimension (W x L x H)	100 X 180 X 180 cm.
Weight	450 kg.

3.2.2 การคำนวณ

1) คำนวณความเร็วรอบ

การคำนวณความเร็วรอบของเครื่องบดย่อยชีวมวล จากการศึกษางานวิจัยของ นายอรรถพล ม่วงศรีจันทร์ และคณะ [10] ที่ทำการออกแบบและสร้างเครื่องบดย่อยวัสดุทางการเกษตร โดยใช้ความเร็วรอบใบมีดเท่ากับ 906 rpm ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้ความเร็วรอบที่ประมาณ 900 rpm และจากการออกแบบเครื่องบดย่อยชีวมวลใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 10 Hp 380v / 50Hz / 6P เป็นเครื่องต้นกำลัง

$$\text{จากสมการ } N = (120 \times f) / P$$

เมื่อ N คือ ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้า (rpm)

f คือ ความถี่ (Hz)

P คือ จำนวนขั้วแม่เหล็ก (Pole)

$$\text{เนื่องจาก } f = 50 \text{ Hz}$$

$$P = 6 \text{ Pole}$$

$$\therefore N = 1,000 \text{ rpm}$$

จากการคำนวณพบว่า ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าคือ 1,000 rpm ซึ่งใกล้เคียงกับความเร็วรอบที่ต้องการ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้ความเร็วของเครื่องบดย่อยชีวมวลที่ 1,000 rpm และใช้อัตราทดระหว่างมอเตอร์กับชุดใบมีดที่ 1/1 ของความเร็วรอบ

2) การคำนวณหาขนาดเพลาชุดโรเตอร์

เนื่องจากการออกแบบเพลาทงผู้วิจัยได้เลือกใช้วัสดุเหล็ก S40C นำมาผ่านกระบวนการชุบแข็งแบบอินดักชัน (Induction) และทำการอบคืนตัว (Tempering) พบว่ามีค่าความต้านทานแรงดึงครากเท่ากับ 593 MPa [23] และแรงที่กระทำต่อเพลาชุดโรเตอร์มาจากมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 10 Hp โดยตรงที่อัตราทด 1/1 ดังนั้นสามารถคำนวณได้ดังนี้

● การคำนวณโมเมนต์แรงบิดที่กระทำต่อเพลาชุดโรเตอร์

$$\text{จากสมการ } P = (2 \times \pi \times T \times n) / 60$$

$$\text{หรือ } T = (P \times 60) / (2 \times \pi \times n)$$

เมื่อ T คือ โมเมนต์แรงบิดที่กระทำต่อเพลาชุดโรเตอร์ (N.m)

P คือ ขนาดมอเตอร์ (Hp)

n คือ ความเร็วรอบของชุดโรเตอร์ (rpm)

$$\text{เนื่องจาก } P = 10 \text{ Hp}$$

$$n = 1,000 \text{ rpm}$$

$$\therefore T = 679.997 \text{ N.m}$$

- การคำนวณความเค้นเครียดเฉือนสูงสุด

$$\text{จากสมการ } \tau_{\max} = S_y / 2N_y$$

เมื่อ $\tau_{\max}$ คือ ความเค้นเครียดเฉือนสูงสุด (MPa)

S_y คือ ความต้านทานแรงดึงคราก (MPa)

N_y คือ ค่าความปลอดภัย

$$\text{เนื่องจาก } S_y = 593 \text{ MPa}$$

$$N_y = 2$$

$$\therefore \tau_{\max} = 148.25 \text{ MPa}$$

- คำนวณขนาดเพลาชุดโรเตอร์ได้ดังนี้

$$\text{จากสมการ } d^3 = (16 \times T) / (\pi \times \tau_{\max})$$

$$\text{หรือ } d = [(16 \times T) / (\pi \times \tau_{\max})]^{1/3}$$

$$\therefore d = 28.586 \text{ mm}$$

ดังนั้นจากการคำนวณที่ผ่านมาข้างต้นจึงควรเลือกใช้เพลาส่งกำลังเหล็กเหนียวเกรด S40C ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 28.586 มิลลิเมตร จึงจะสามารถรองรับภาระที่เกิดขึ้นกับเพลาชุดโรเตอร์

3) การคำนวณความยาวสายพานลิ้ม

การคำนวณความยาวของสายพานลิ้ม สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{จากสมการ } L_p = (2 \times C) + (1.57 \times (D_p + d_p)) + ((D_p + d_p)^2 / 4C)$$

เมื่อ L_p คือ ความยาวโดยประมาณของสายพานลิ้ม

C คือ ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของ Pulleys

D_p คือ เส้นผ่านศูนย์กลาง Pulleys ตัวที่ 1

d_p คือ เส้นผ่านศูนย์กลาง Pulleys ตัวที่ 2

$$\text{เนื่องจาก } C = 533.5 \text{ mm}$$

$$D_p = 5 \text{ in}$$

$$d_p = 5 \text{ in}$$

$$\begin{aligned} \therefore L_p &= (2 \times 533.5 \text{ mm}) + (1.57 \times (5 \text{ in} + 5 \text{ in})) + \\ &\quad ((5 \text{ in} + 5 \text{ in})^2 / (4 \times 533.5 \text{ mm})) \\ &= 1496 \text{ mm} \\ &= 58.98 \text{ in} \end{aligned}$$

ซึ่งสายพานขนาด 58.89 นิ้ว ไม่มีขาย ดังนั้นจึงเลือกสายพานลิ้มขนาด 63 นิ้ว เพื่อให้สะดวกและง่ายต่อการปรับตั้งสายพาน โดยมีตัวปรับสายพานรองรับ ซึ่งหาซื้อได้ทั่วไปตามท้องตลาด

3.2.3 การสร้างเครื่อง

หลังจากทำการออกแบบเครื่องเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ผู้วิจัยได้ทำการสั่งซื้อวัสดุ อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างเครื่องบดย่อยชีวมวล จากนั้นดำเนินการสร้างเครื่องตามที่ได้ออกแบบไว้ และทำการติดตั้งมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 10 แรงม้า และตู้ควบคุมไฟฟ้า เป็นอุปกรณ์ควบคุมการทำงานของเครื่องบดย่อยชีวมวลได้แก่ แมกเนติกคอนแทคเตอร์ อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกิน สวิตช์เปิดและปิดเครื่อง ปุ่มกดฉุกเฉิน หลอดไฟแสดงการทำงาน ดังรูปที่ 3.3

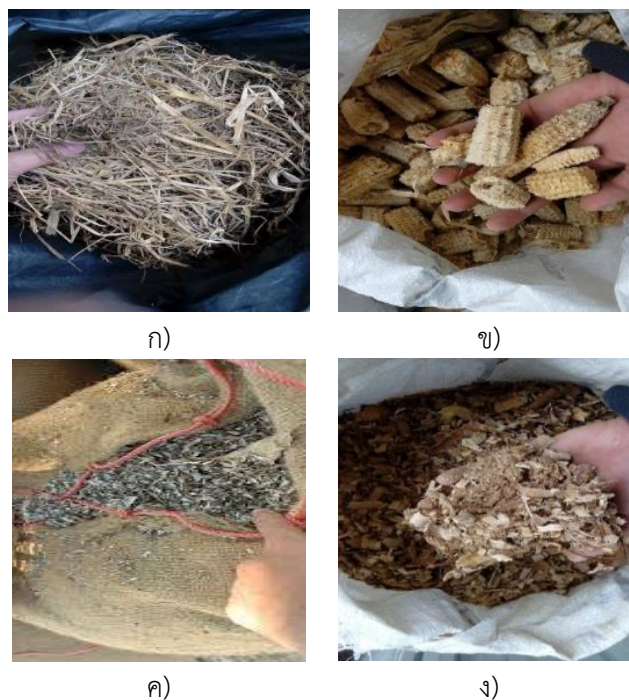


รูปที่ 3.3 เครื่องบดย่อยชีวมวล

3.3 การทดลอง

3.3.1 การทดลองบดย่อยชีวมวล

วัตถุดิบที่ใช้ทดสอบบดย่อยได้แก่ ฟางข้าว ชังข้าวโพด เปลือกถั่วเหลือง และขี้เลื่อย ดังรูปที่ 3.4 จากการลงพื้นที่เก็บตัวอย่างในพื้นที่ตำบลน้ำเลา อำเภอร่องขวาง จังหวัดแพร่ พบว่าวัตถุดิบมีปริมาณความชื้นแตกต่างกัน ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ได้ดังนี้วัตถุดิบที่ปริมาณความชื้นไม่เกิน 15% ซึ่งสามารถนำไปอัดขึ้นรูปโดยไม่ต้องผ่านขั้นตอนการอบแห้ง และวัตถุดิบที่มีปริมาณความชื้นอยู่ระหว่าง 16% – 30% ซึ่งต้องผ่านการอบแห้งเพื่อลดปริมาณความชื้นก่อนนำไปอัดขึ้นรูป ทำให้น้ำหนักวัตถุดิบลดลงหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ปริมาณการผลิตจริงลดลง ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการทดสอบบดย่อยวัตถุดิบที่ปริมาณความชื้นไม่เกิน 15%, ปริมาณความชื้น 16% – 22%, ที่ปริมาณความชื้น 23% – 30% เพื่อให้ได้ปริมาณการผลิตจริงของเครื่องบดย่อยชีวมวล โดยใช้ตะแกรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร, 5 มิลลิเมตร, และ 7 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการทดสอบ 1 ชั่วโมงต่อการทดสอบ 1 ตัวแปร จากนั้นนำไปคัดแยกขนาดด้วยเครื่องเขย่าเพื่อให้ได้ขนาดอนุภาคที่ 40, 60 และ 80 Mesh

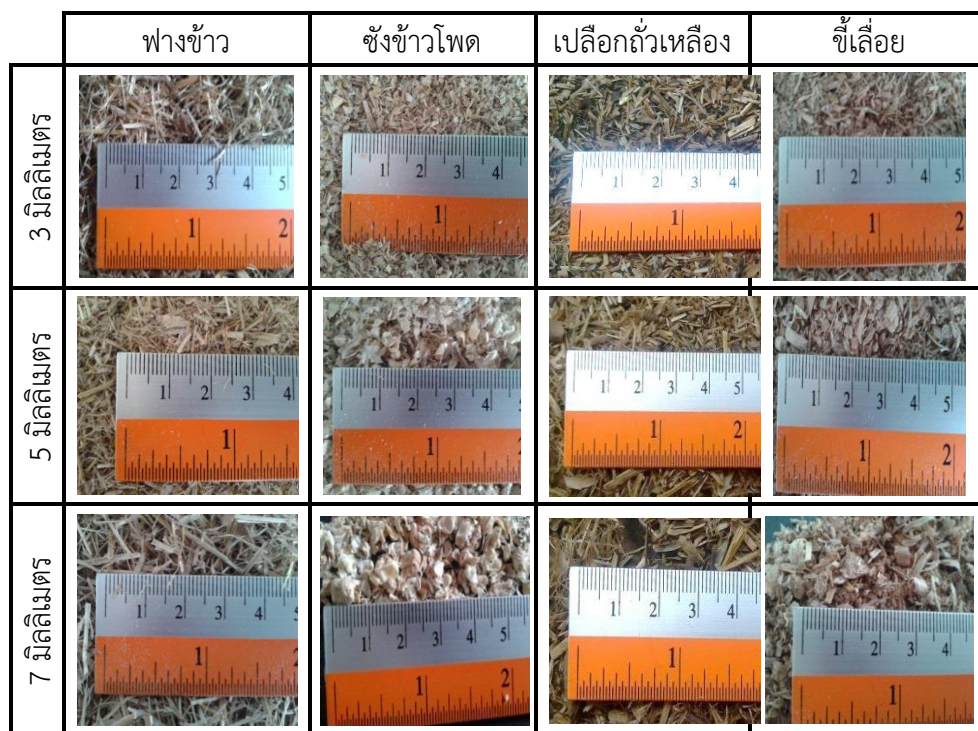


รูปที่ 3.4 วัตถุดิบ ฟางข้าว ก), ซังข้าวโพด ข), เปลือกข้าวเหลือง ค), และขี้เลื่อย ง)



รูปที่ 3.5 การทดลองบดย่อยวัตถุดิบ

จากการทดสอบบดย่อย ฟางข้าว ซังข้าวโพด เปลือกข้าวเหลือง และขี้เลื่อย ที่ปริมาณความชื้นไม่เกิน 15% ในเบื้องต้นมีลักษณะอนุภาค ดังรูปที่ 3.5 เมื่อนำไปแยกขนาดอนุภาคชีวมวลพบว่า ที่ตะแกรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 และ 7 มิลลิเมตร ไม่สามารถคัดแยกขนาดอนุภาค 40, 60 และ 80 Mesh ได้ มีเพียงตะแกรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ที่สามารถนำเศษวัตถุดิบมาแยกขนาดอนุภาค 40, 60 และ 80 Mesh ได้ ดังรูปที่ 3.6 ดังนั้นการทดสอบนี้จึงเลือกใช้ตะแกรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ในการทดสอบบดย่อยชีวมวลทั้ง 4 ชนิด ผลการทดสอบบดย่อยและผลการคัดแยกขนาดบันทึก ดังตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.6 แสดงขนาดอนุภาคชีวมวลที่ผ่านการบดย่อยโดยใช้ตะแกรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร, 5 มิลลิเมตร, และ 7 มิลลิเมตร

ตารางที่ 3.3 บันทึกผลการทดสอบบดย่อยฟางข้าว, ช้างข้าวโพด, เปลือกถั่วเหลือง, ขี้เลื่อย ที่ผ่านการบดย่อยด้วยตะแกรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ที่ความชื้นแต่ละระดับ และที่ผ่านการคัดแยกขนาดอนุภาค 40, 60 และ 80 Mesh

วัตถุดิบ	ปริมาณความชื้น (%)	น้ำหนักวัตถุดิบหลังการบดย่อยและการคัดแยก (kg)			
		3 mm	40 Mesh	60 Mesh	80 Mesh
ฟางข้าว	≤ 15	x	x	x	x
	16 - 22	x	x	x	x
	23 - 30	x	x	x	x
ช้างข้าวโพด	8 - 15	x	x	x	x
	16 - 22	x	x	x	x
	23 - 30	x	x	x	x
เปลือกถั่วเหลือง	≤ 15	x	x	x	x
	16 - 22	x	x	x	x
	23 - 30	x	x	x	x
ขี้เลื่อย	≤ 15	x	x	x	x
	16 - 22	x	x	x	x
	23 - 30	x	x	x	x

3.3.2 การทดลองอัดขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล

นำวัตถุดิบทั้ง 4 ชนิด ที่ผ่านการบดย่อยด้วยตะแกรง 3 มิลลิเมตร และที่ผ่านการคัดแยกขนาดอนุภาค 40, 60, 80 Mesh มาทำการอัดขึ้นรูปเป็นเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล กำหนดให้เม็ดเชื้อเพลิงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm ความยาวไม่เกิน 40 mm ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล

3.4 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล

การทดสอบสมบัติทางด้านกายภาพของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล เป็นไปตามจุดประสงค์ของโครงการ โดยมีขั้นตอน ดังนี้

3.4.1 การทดสอบความหนาแน่นเม็ด (Pellet Density)

1) เครื่องมือ

- เครื่องหาค่าความหนาแน่น (Density Determination Kit)
- ปีกเกอร์
- น้ำ

2) วิธีการทดสอบ

ใช้เครื่องหาความหนาแน่นแบบซึ่งวัดจุ่มกับน้ำ นำตัวอย่างมาทำการเคลือบด้วย Petroleum Jelly เพื่อไม่ให้น้ำซึมเข้าไปในตัวอย่าง นำตัวอย่างไปชั่งน้ำหนักในอากาศ (A) และซึ่งในน้ำ (B)

3) คำนวณหาปริมาตรของวัตถุได้จากสมการที่ 3.1 และนำผลการทดสอบไปบันทึกดังตารางที่ 3.4

$$Q = \frac{A}{A - B} \times d \quad (3.1)$$

เมื่อ A คือ น้ำหนักในอากาศ (g)

B คือ น้ำหนักในสารละลาย (g)

d คือ ความหนาแน่นของน้ำ (g/cm^3)

Q คือ ความหนาแน่น (g/cm^3)

ตารางที่ 3.4 ตารางบันทึกผลการทดสอบความหนาแน่นเม็ด (Pellet Density)

ชนิดของวัตถุดิบ	ขนาดอนุภาค	ความหนาแน่นเม็ด (kg/m ³)			เฉลี่ย (kg/m ³)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
ฟางข้าว	3 mm	x	x	x	x
	40 Mesh	x	x	x	x
	60 Mesh	x	x	x	x
	80 Mesh	x	x	x	x
ซังข้าวโพด	3 mm	x	x	x	x
	40 Mesh	x	x	x	x
	60 Mesh	x	x	x	x
	80 Mesh	x	x	x	x
เปลือกถั่วเหลือง	3 mm	x	x	x	x
	40 Mesh	x	x	x	x
	60 Mesh	x	x	x	x
	80 Mesh	x	x	x	x
ซีลี้อย	3 mm	x	x	x	x
	40 Mesh	x	x	x	x
	60 Mesh	x	x	x	x
	80 Mesh	x	x	x	x

3.4.2 การทดสอบความหนาแน่นรวม (Bulk Density)

การทดสอบความหนาแน่นรวมของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล โดยใช้มาตรฐาน ASTM E 873-82 ในการทดสอบ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) เครื่องมือ

- ภาชนะ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 78 mm สูง 60 mm
- เครื่องชั่งน้ำหนัก

2) วิธีการทดสอบ

- ชั่งน้ำหนักและบันทึกผลของภาชนะ จากนั้นใส่เม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลลงในภาชนะ โดยเทจากความสูง 150 mm จากขอบภาชนะ
- ทำการเคาะ 5 ครั้งจากความสูง 150 mm เพิ่มเม็ดเชื้อเพลิงลงไป ถ้าเกินจากขอบภาชนะให้เอาออก
- ชั่งน้ำหนักรวมของภาชนะและเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลและบันทึกผล

3) คำนวณค่าความหนาแน่นรวมจากสมการที่ 3.2 และบันทึกผลลงในตารางที่ 3.5

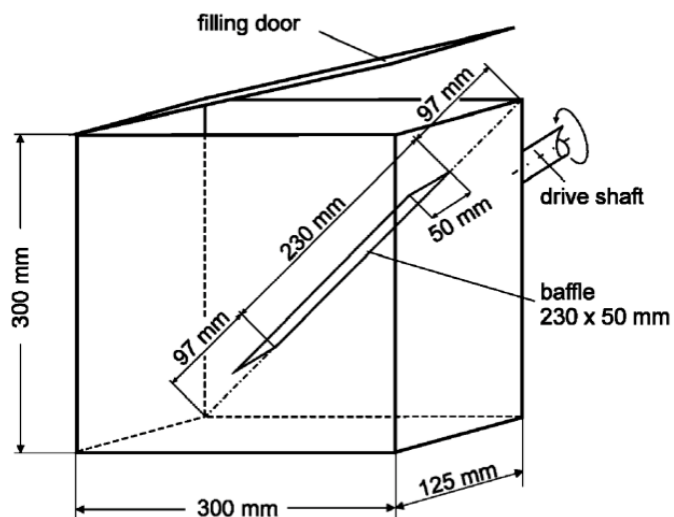
$$\text{Bulk density (g/cm}^3\text{)} = \frac{(\text{weigh of box and sample}) - (\text{weigh of box})}{(\text{volume of box})} \quad (3.2)$$

ตารางที่ 3.5 ตารางบันทึกผลการทดสอบความหนาแน่นรวม (Bulk Density)

ชนิดของวัสดุดิบ	ขนาดอนุภาค	ความหนาแน่นรวม (kg/ m ³)			เฉลี่ย (kg/ m ³)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
ฟางข้าว	3 mm	x	x	x	x
	40 Mesh	x	x	x	x
	60 Mesh	x	x	x	x
	80 Mesh	x	x	x	x
ซังข้าวโพด	3 mm	x	x	x	x
	40 Mesh	x	x	x	x
	60 Mesh	x	x	x	x
	80 Mesh	x	x	x	x
เปลือกถั่วเหลือง	3 mm	x	x	x	x
	40 Mesh	x	x	x	x
	60 Mesh	x	x	x	x
	80 Mesh	x	x	x	x
ซีเมนต์	3 mm	x	x	x	x
	40 Mesh	x	x	x	x
	60 Mesh	x	x	x	x
	80 Mesh	x	x	x	x

3.4.3 การทดสอบความทนทาน (Durability)

ความทนทานของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล คือ การทดสอบเปอร์เซ็นต์การแตกหัก ซึ่งมีผลกระทบต่อการเก็บรักษา การขนส่งรวมถึงประสิทธิภาพการเผาไหม้ของวัสดุ การทดสอบโดยการใส่เม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจำนวน 500 กรัม ลงในกล่องสี่เหลี่ยมที่มีขนาด (300 X 300 X 125) มิลลิเมตร ด้านในมีใบกวนขนาด 230 มิลลิเมตร กว้าง 50 มิลลิเมตร มีแกนหมุนด้านข้าง ดังแสดงในรูปที่ 3.8 หมุนที่ความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ตามมาตรฐานทดสอบ DIN EN 15210-1 ต่อจากนั้นนำมาร้อนผ่านตะแกรงขนาด 3.15 มิลลิเมตร และนำมาชั่งน้ำหนักเพื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์น้ำหนักหลังการร้อน ค่าที่ได้บันทึกผลลงในตารางที่ 3.6



รูปที่ 3.8 กล่องสีเหลี่ยมสำหรับทดสอบความทนทาน [24]

ตารางที่ 3.6 ตารางบันทึกผลการทดสอบความทนทาน (Durability)

ชนิดของวัสดุดิบ	ขนาดอนุภาค	ความทนทาน (%)			เฉลี่ย (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
ฟางข้าว	3 mm	x	x	x	x
	40 Mesh	x	x	x	x
	60 Mesh	x	x	x	x
	80 Mesh	x	x	x	x
ซังข้าวโพด	3 mm	x	x	x	x
	40 Mesh	x	x	x	x
	60 Mesh	x	x	x	x
	80 Mesh	x	x	x	x
เปลือกถั่วเหลือง	3 mm	x	x	x	x
	40 Mesh	x	x	x	x
	60 Mesh	x	x	x	x
	80 Mesh	x	x	x	x
ซีเมนต์	3 mm	x	x	x	x
	40 Mesh	x	x	x	x
	60 Mesh	x	x	x	x
	80 Mesh	x	x	x	x

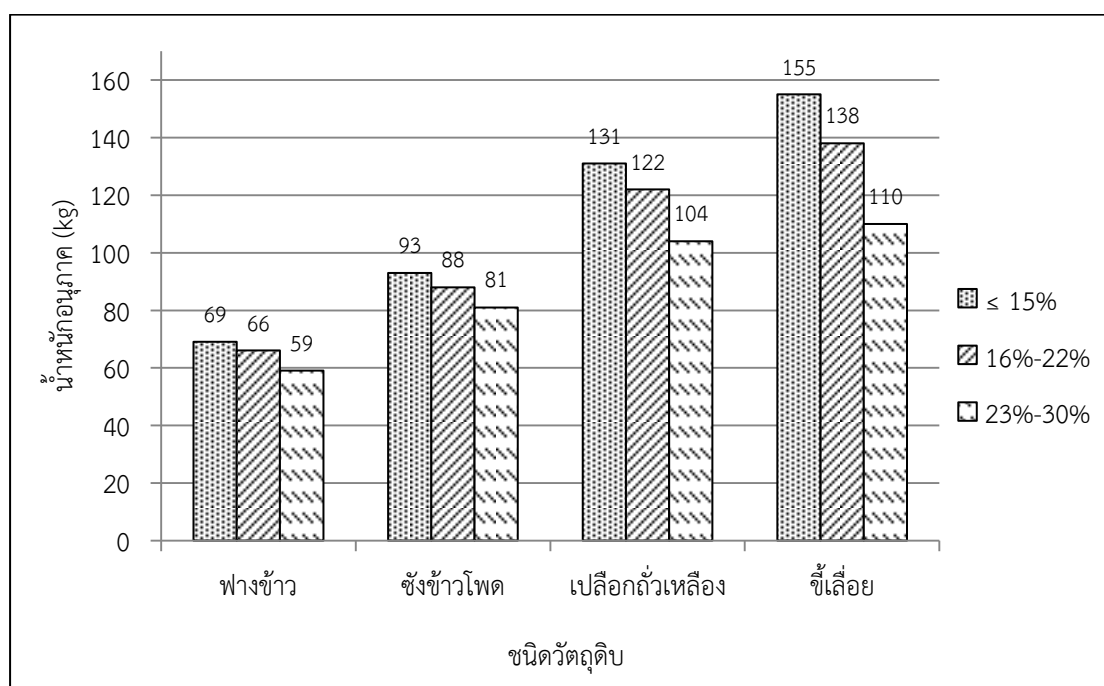
บทที่ 4

ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์

จากขั้นตอนการดำเนินงานที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.1 เมื่อดำเนินการสร้างเครื่องบดย่อยชีวมวลจนเสร็จสิ้นแล้วนั้น จำเป็นต้องมีการดำเนินการทดสอบเครื่องบดแห้งชีวมวล ซึ่งรายละเอียดและเงื่อนไขการทดสอบแสดงไว้ในหัวข้อที่ 3.3 ซึ่งผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบแสดงดังต่อไปนี้

4.1 ผลการทดลองบดย่อยชีวมวล

จากการทดสอบบดย่อย ฟางข้าว ชังข้าวโพด เปลือกถั่วเหลือง และซีเลื่อย ที่มีปริมาณความชื้นในวัตถุดิบแต่ละระดับ โดยใช้ตะแกรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปคัดแยกขนาดด้วยเครื่องเขย่าเพื่อให้ได้ ขนาดอนุภาคที่ 40, 60 และ 80 Mesh ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างกันระหว่างวัตถุดิบแต่ละชนิด



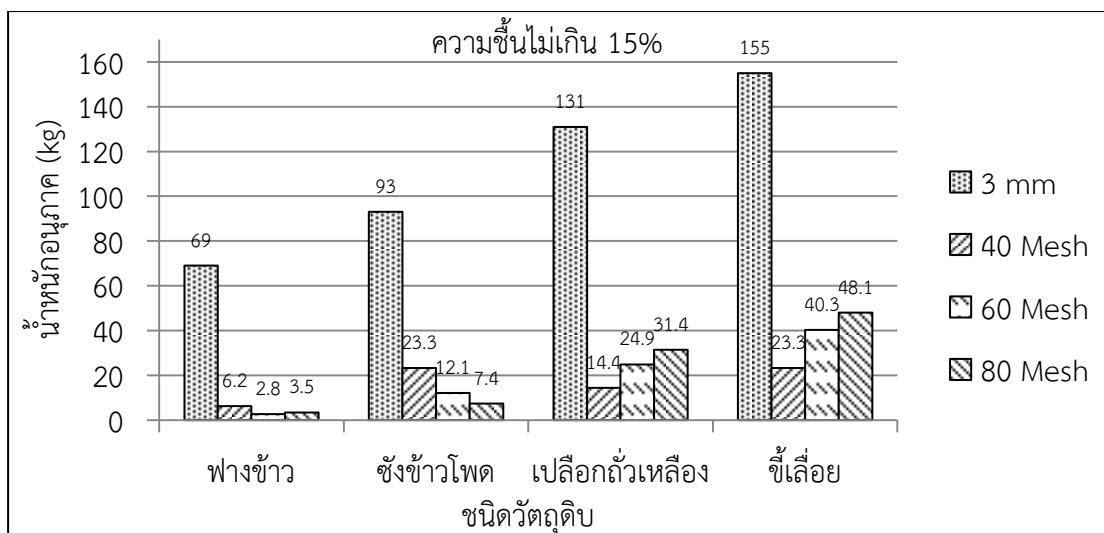
รูปที่ 4.1 กราฟเปรียบเทียบปริมาณการบดย่อยวัตถุดิบทั้ง 4 ชนิด ที่ผ่านการบดย่อยด้วยตะแกรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ที่มีปริมาณความชื้นแต่ละระดับ

จากรูปที่ 4.1 เมื่อนำมาเปรียบเทียบปริมาณการบดย่อยวัตถุดิบทั้ง 4 ชนิด ภายใต้การทดสอบตามตัวแปรที่กำหนดพบว่า ฟางข้าวมีปริมาณการบดต่ำที่สุด เนื่องจากลักษณะของฟางข้าวเป็นเส้นยาวมีความเหนียวทำให้การบดย่อยทำได้ยาก ในส่วนของชังข้าวโพดมีปริมาณการผลิตสูงกว่าฟางข้าว

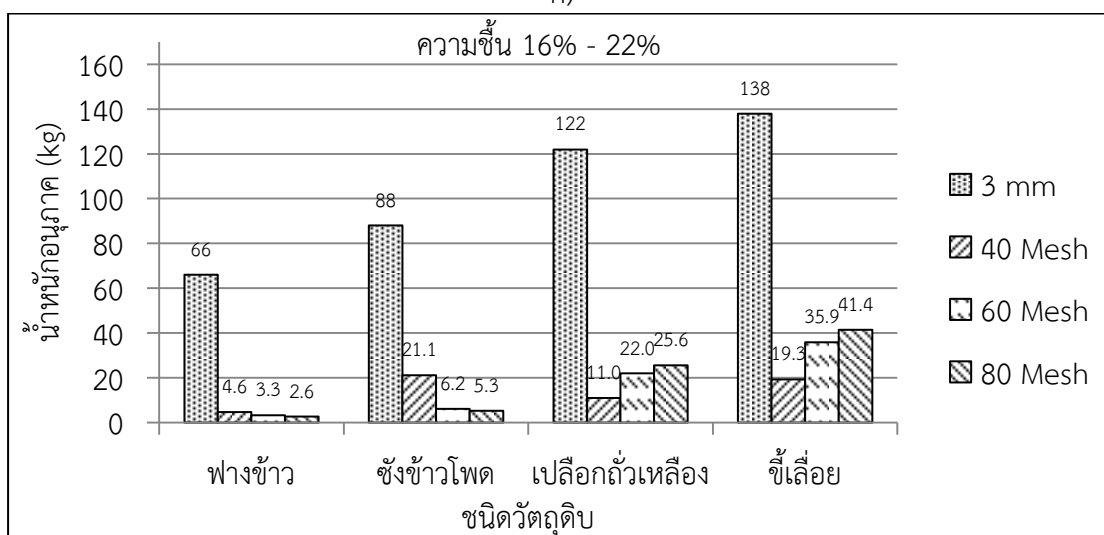
แต่ยังน้อยกว่าเปลือกถั่วเหลืองและซีเลื่อย เนื่องจากซังข้าวโพดมีความเปราะ ทำให้ง่ายต่อการบดย่อย ด้วยการทุบหรือตี แต่ขนาดซังข้าวโพดยังมีขนาดใหญ่กว่าเปลือกถั่วเหลืองและซีเลื่อย ทำให้ใช้เวลาในการบดย่อยมากกว่า ในส่วนของเปลือกถั่วเหลืองมีปริมาณการบดย่อยมากกว่าฟางข้าวและซังข้าวโพด เพราะลักษณะของเปลือกถั่วเหลือง มีขนาดเล็กและเปราะทำให้บดย่อยง่ายกว่า และซีเลื่อยมีปริมาณการบดย่อยสูงที่สุด เนื่องจากซีเลื่อยมีขนาดเล็ก หรือบางส่วนอาจมีขนาดเล็กกว่ารูตะแกรงทำให้ใช้เวลาในการบดย่อยน้อย

นอกจากนี้ปัจจัยที่ส่งผลต่อการบดย่อยไม่ได้มีเพียงลักษณะของวัตถุดิบเพียงอย่างเดียว ปริมาณความชื้นในวัตถุดิบยังส่งผลต่อการบดย่อย เมื่อเปรียบเทียบปริมาณการบดย่อยที่ระดับความชื้นแต่ละระดับ พบว่าระดับความชื้นมีผลต่อปริมาณการบดย่อย จากผลการทดลองพบเปลือกถั่วเหลืองสามารถบดย่อยที่ความชื้นไม่เกิน 15% ได้ปริมาณการบดย่อย 131 กิโลกรัม และลดลงเหลือ 122 กิโลกรัม ที่ระดับความชื้น 16% - 22% ปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณการบดย่อยลดลง เนื่องจากความชื้นทำให้วัตถุดิบมีความเหนียวขึ้นทำให้การบดย่อยได้ยากขึ้น ประกอบกับเครื่องบดย่อยชีวมวลนี้เป็นการบดย่อยแบบทุบหรือตี ซึ่งเหมาะกับวัตถุดิบที่มีความเปราะ

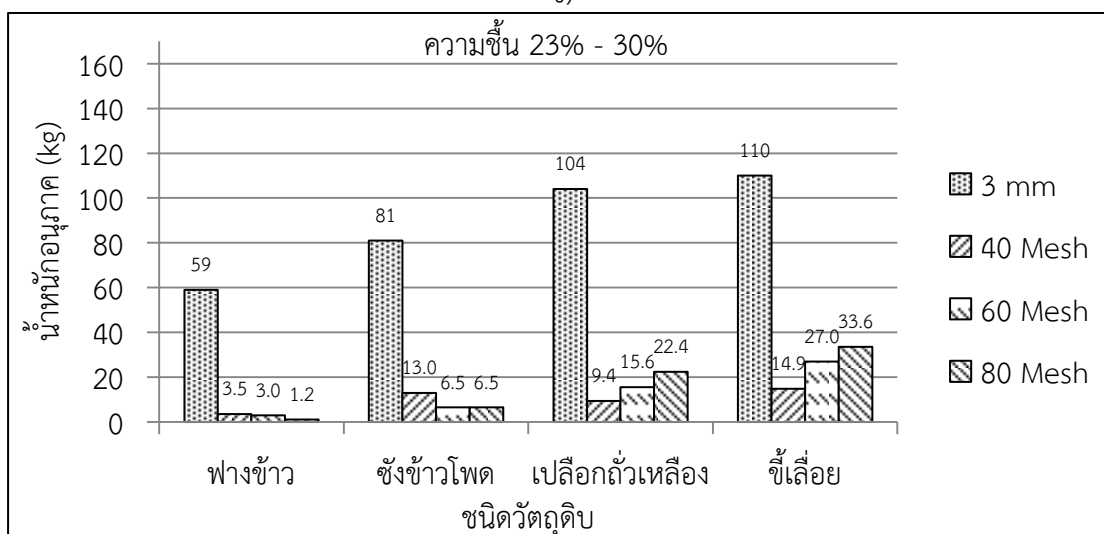
จากผลการทดสอบการบดย่อยในข้างต้น เมื่อนำมาคัดแยกขนาดอนุภาค 40, 60 และ 80 Mesh พบว่าได้ปริมาณหลังการคัดแยกน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณการบดย่อย จากรูปที่ 4.2 ก) แสดงปริมาณการคัดแยกขนาดอนุภาคหลังการบดย่อย ที่มีปริมาณความชื้นไม่เกิน 15% ซึ่งเป็นระดับความชื้นที่เหมาะสมในการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล พบว่าฟางข้าวมีปริมาณหลังการคัดแยกน้อยมากเมื่อเทียบกับวัตถุดิบชนิดอื่น เนื่องจากฟางข้าวหลังการบดย่อยมีขนาดใหญ่และเป็นเส้นยาว ซังข้าวโพดมีปริมาณหลังการคัดแยกมากกว่าฟางข้าว เพราะซังข้าวโพดมีความเปราะทำให้บดเป็นอนุภาคได้ง่ายกว่า แต่ก็ยังน้อยกว่าเปลือกถั่วเหลืองและซีเลื่อย ซึ่งเปลือกถั่วเหลืองนั้นสามารถนำมาแยกขนาดได้มากกว่าฟางข้าว และซังข้าวโพด เนื่องจากเปลือกถั่วเหลืองมีขนาดเล็ก ลักษณะเป็นเปลือกบาง มีความเปราะทำให้บดเป็นอนุภาคได้มากกว่า ในส่วนของซีเลื่อยมีปริมาณการบดย่อยสูงที่สุดและสามารถนำมาแยกขนาดได้มากที่สุด เนื่องจากซีเลื่อยมีขนาดเล็ก หรือบางส่วนอาจมีขนาดเล็กกว่ารูตะแกรงทำให้สามารถนำมาแยกขนาดอนุภาคได้มากกว่า และจากผลการทดลองบดย่อยวัตถุดิบที่มีปริมาณความชื้น 16% - 22% และ 23% - 30% ดังรูปที่ 4.2 ข) และ ค) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับปริมาณการคัดแยกขนาดอนุภาคหลังการบดย่อย ที่มีปริมาณความชื้นไม่เกิน 15%



ก)



ข)



ค)

รูปที่ 4.2 กราฟเปรียบเทียบปริมาณการคัดแยกขนาดอนุภาคหลังการบดย่อย ที่มีปริมาณความชื้นไม่เกิน 15% ก), ปริมาณความชื้น 16% - 22% ข), ปริมาณความชื้น 23% - 30% ค)

4.2 ผลการทดลองอัดเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล

จากการทดลองอัดเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลตามตัวแปรที่กำหนด พบว่าไม่สามารถอัดขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงภายใต้ตัวแปรที่กำหนดได้ทุกตัวแปร ดังรูปที่ 4.3 แสดงเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลหลังการทดลองพบว่าที่ขนาดอนุภาคที่ผ่านการบดย่อยด้วยตะแกรง 3 มิลลิเมตร ไม่สามารถอัดขึ้นรูปฟางข้าว และซังข้าวโพดได้สมบูรณ์ ขนาดอนุภาคที่ 40 Mesh ไม่สามารถอัดขึ้นรูป ฟางข้าว และซังข้าวโพด ได้สมบูรณ์ และขนาดอนุภาคที่ 60 Mesh ไม่สามารถอัดขึ้นรูปซังข้าวโพดได้ เนื่องจากเม็ดเชื้อเพลิงที่ได้ไม่มีความแข็งแรงหักแตกง่าย ในส่วนของขนาดอนุภาค 80 Mesh สามารถอัดขึ้นรูปวัตถุดิบได้ทุกชนิด

สาเหตุที่ทำให้ไม่สามารถอัดเม็ดเชื้อเพลิงได้นั้น เกิดจากหลายปัจจัยด้วยกัน ได้แก่ ขนาดอนุภาค เนื่องจากอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะใช้แรงในการอัดต่ำกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ แต่อย่างไรก็ดี เปลือกถั่วเหลือง และซีลี้อย สามารถนำมาอัดเป็นเม็ดเชื้อเพลิงได้ทุกขนาดอนุภาค เนื่องจากสัดส่วนของลิกนินมีปริมาณมากกว่าฟางข้าว และซังข้าวโพด ในกระบวนการอัดเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล จะเกิดแรงเสียดทานระหว่าง วัตถุดิบ, ดายนัด, และลูกกลิ้งอัด ทำให้เกิดความร้อนสูง ซึ่งความร้อนนี้จะทำให้ลิกนินที่มีอยู่ในชีวมวล เกิดการอ่อนตัวและกลายเป็นตัวประสาน ทำให้ชีวมวลจับตัวกันเป็นเม็ดเชื้อเพลิงที่แข็งแรง [25,26] โดยปริมาณลิกนินในฟางข้าว และซังข้าวโพด มีปริมาณเพียง 15% ในขณะที่เปลือกถั่วเหลืองมีปริมาณ 30% - 40% และซีลี้อยมีปริมาณ 18% - 35% [27] นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอีกหลายอย่างที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการอัดเม็ดเช่น ความชื้นในวัตถุดิบ ความร้อน อัตราการป้อน

	3 mm	40 Mesh	60 Mesh	80 Mesh
ฟางข้าว				
ซังข้าวโพด				
เปลือกถั่วเหลือง				
ซีลี้อย				

รูปที่ 4.3 แสดงเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลหลังการอัดขึ้นรูปด้วยขนาดอนุภาคต่างๆ

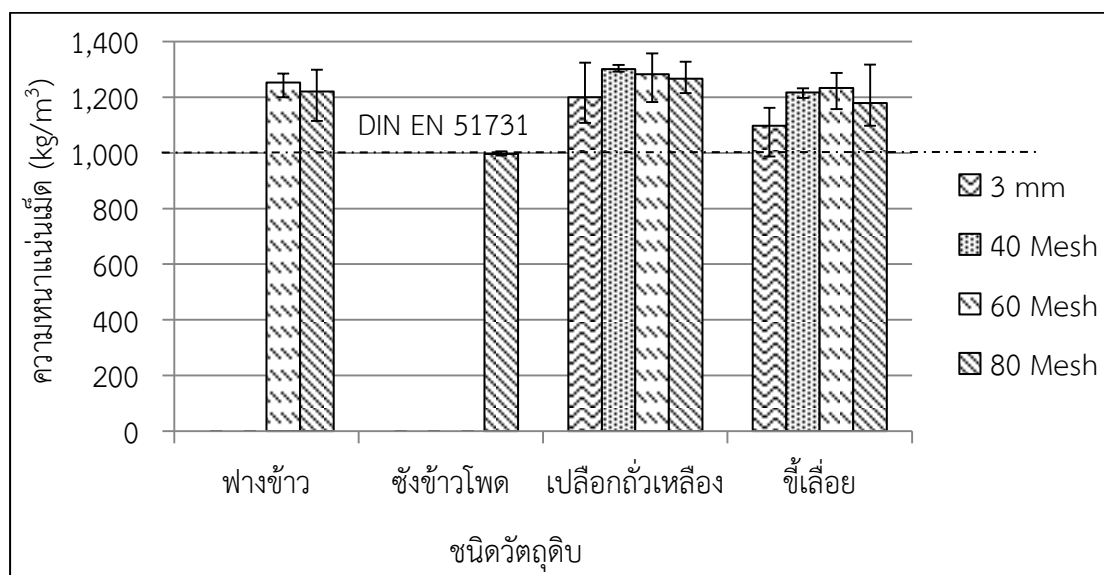
4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ

4.3.1 ผลการทดสอบความหนาแน่นเม็ดของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล (Pellet Density)

การทดสอบความหนาแน่นเม็ดเป็นการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นของเม็ดเชื้อเพลิงจากวัตถุดิบทั้ง 4 ชนิด และขนาดอนุภาคทั้ง 4 ขนาด ซึ่งค่าความหนาแน่นของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้ทำการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบความหนาแน่นเม็ด (ค่าเฉลี่ย)

วัตถุดิบ	ความหนาแน่นเม็ด (kg/m^3)			
	3 mm	40 Mesh	60 Mesh	80 Mesh
ฟางข้าว	-	-	1,252	1,221
ซังข้าวโพด	-	-	-	996
เปลือกถั่วเหลือง	1,200	1,301	1,282	1,267
ขี้เลื่อย	1,098	1,217	1,233	1,180



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลทดสอบความหนาแน่นเม็ดของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลทั้ง 4 ชนิดที่อัดขึ้นรูปที่ขนาดอนุภาคแต่ละขนาด

จากรูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นเม็ดของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล พบว่าค่าความหนาแน่นเม็ดแต่ละขนาดอนุภาคมีค่าต่างกันเล็กน้อย แต่จากการทดสอบทางสถิติ ด้วยวิธี One-Way ANOVA โดยใช้โปรแกรม Minitab ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าค่าความหนาแน่นเม็ดแต่ละขนาดอนุภาคมีค่าไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อนำค่าความหนาแน่นเม็ดของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลทั้ง 4 ชนิด มาเปรียบเทียบกัน พบว่าค่าความหนาแน่นเม็ดมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อนำผลการทดลองของเม็ดเชื้อเพลิงแต่ละชนิดที่ขนาดอนุภาค 80 Mesh มาทำการสอบทางสถิติ ด้วยวิธี One-Way ANOVA ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าค่าความหนาแน่นของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลแต่ละชนิดมีค่าต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าความหนาแน่นของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจากเปลือกถั่วเหลืองมี

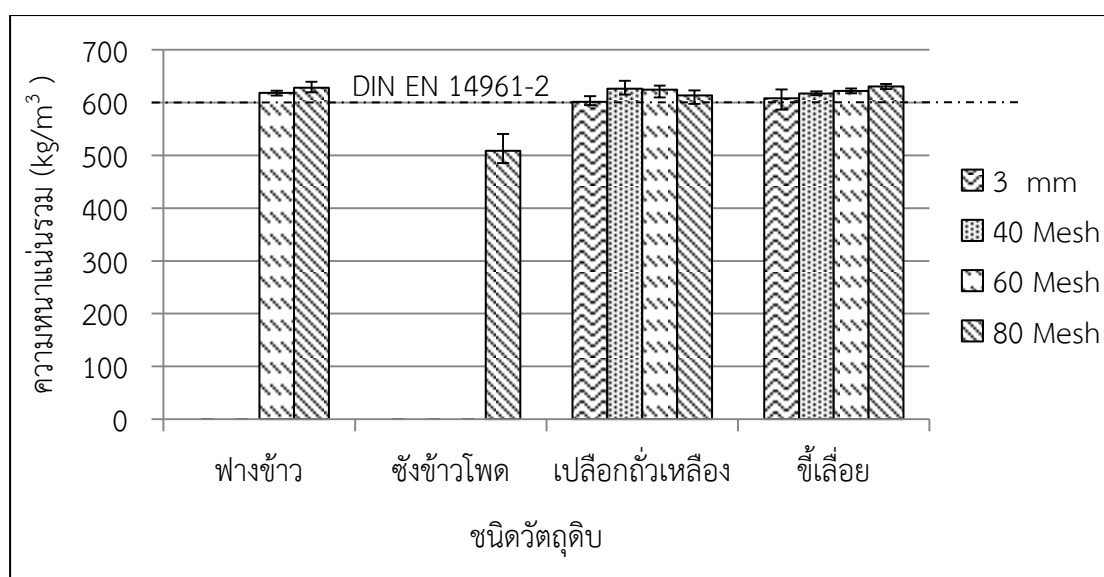
ค่าความหนาแน่นสูงสุด $1,301 \text{ kg/m}^3$ ที่ขนาดอนุภาค 40 Mesh รองลงมาคือเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจากฟางข้าวมีค่าความหนาแน่น $1,252 \text{ kg/m}^3$ ที่ขนาดอนุภาค 60 Mesh เม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจากขี้เลื่อยมีค่าความหนาแน่น $1,233 \text{ kg/m}^3$ ที่ขนาดอนุภาค 60 Mesh และเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจากซังข้าวโพดมีค่าความหนาแน่นน้อยสุด 996 kg/m^3 ที่ขนาดอนุภาค 80 Mesh ตามลำดับ ซึ่งความหนาแน่นเม็ดที่ต่างกันอาจมีอิทธิพลจากชนิดของวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบทางโครงสร้างที่ต่างกัน และอัตราการป้อนวัตถุดิบขณะทำการทดสอบอัดเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล เนื่องจากการทดสอบใช้คนในการป้อนวัตถุดิบทำให้อัตราการป้อนไม่คงที่ และเมื่อเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลทั้ง 4 ชนิด กับมาตรฐาน DIN EN 51731 ที่กำหนดมาตรฐานคุณภาพเม็ดเชื้อเพลิงในโซลียูโรป ซึ่งกำหนดความหนาแน่นเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลควรมีค่ามากกว่า $1,000 \text{ kg/m}^3$ [28] พบว่าเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจากซังข้าวโพดมีความหนาแน่นต่ำกว่ามาตรฐานกำหนดเล็กน้อย ในส่วนของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจากฟางข้าว เปลือกถั่วเหลือง และขี้เลื่อยมีความหนาแน่นตามมาตรฐานกำหนด

4.3.2 ผลการทดสอบความหนาแน่นรวม (Bulk Density)

การทดสอบความหนาแน่นรวมเป็นการทดสอบเพื่อใช้ในการออกแบบขนาดของบรรจุภัณฑ์ให้เหมาะสม เพื่อสะดวกและประหยัดในการขนส่ง โดยการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E 873-82 ซึ่งค่าความหนาแน่นรวมของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบความหนาแน่นรวมของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล (ค่าเฉลี่ย)

วัตถุดิบ	ความหนาแน่นรวม (kg/m^3)			
	3 mm	40 Mesh	60 Mesh	80 Mesh
ฟางข้าว	-	-	618	628
ซังข้าวโพด	-	-	-	508
เปลือกถั่วเหลือง	601	626	624	613
ขี้เลื่อย	608	617	622	630



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลทดสอบความหนาแน่นรวมของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลทั้ง 4 ชนิดที่อัดขึ้นรูปที่ขนาดอนุภาคแต่ละขนาด

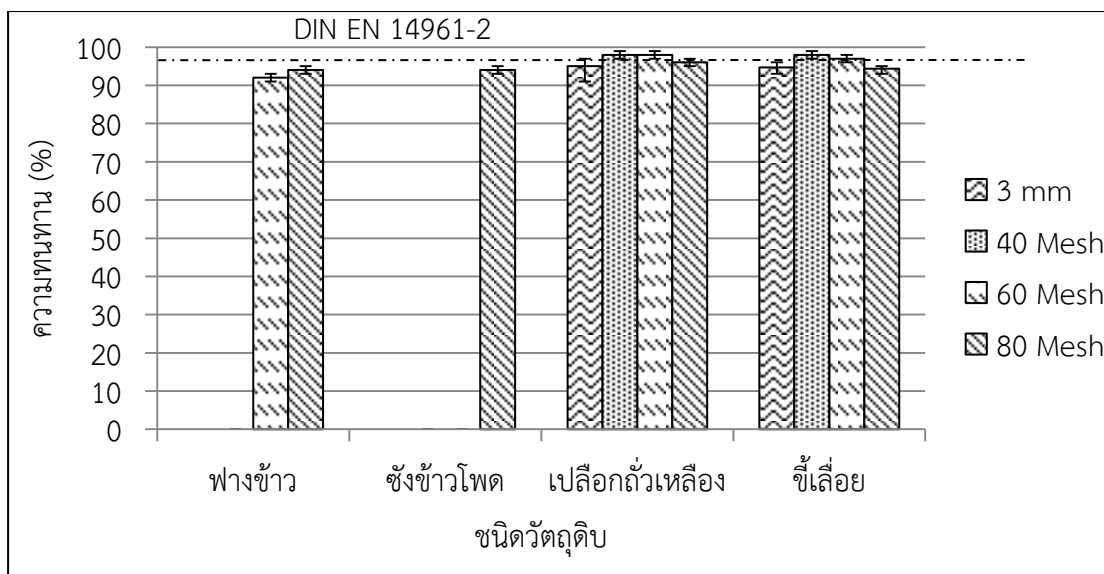
จากรูปที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นรวมของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล พบว่าค่าความหนาแน่นรวมแต่ละขนาดอนุภาคมีค่าต่างกันเล็กน้อย เช่นเดียวกับค่าความหนาแน่นเม็ด และเมื่อทำการทดสอบทางสถิติ ด้วยวิธี One-Way ANOVA โดยใช้โปรแกรม Minitab ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าค่าความหนาแน่นรวมของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลแต่ละขนาดอนุภาคมีค่าไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จากผลการทดลองเมื่อนำค่าความหนาแน่นรวมของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลทั้ง 4 ชนิด มาเปรียบเทียบกัน พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อนำผลการทดลองค่าความหนาแน่นรวมของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลแต่ละชนิดที่ขนาดอนุภาค 80 Mesh มาทำการทดสอบทางสถิติ ด้วยวิธี One-Way ANOVA ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าค่าความหนาแน่นรวมมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าความหนาแน่นรวมของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจากขี้เลื่อยมีค่าความหนาแน่นรวมสูงสุด 630 kg/m^3 รองลงมาคือเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจากฟางข้าวมีค่าเท่ากับ 628 kg/m^3 เม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจากเปลือกถั่วเหลืองมีค่าเท่ากับ 626 kg/m^3 และเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจากซังข้าวโพดมีค่าน้อยสุดเท่ากับ 508 kg/m^3 ซึ่งความหนาแน่นที่ต่างกันมีอิทธิพลจากชนิดของวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบทางโครงสร้างที่ต่างกัน ความหนาแน่นเม็ดที่ต่างกัน และขนาดความยาวของเม็ดเชื้อเพลิง และเมื่อเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นรวมกับมาตรฐาน DIN EN 14961-2 ที่กำหนดมาตรฐานคุณภาพเม็ดเชื้อเพลิงในโซนิยุโรป ซึ่งกำหนดความหนาแน่นรวมของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลควรมีค่ามากกว่า 600 kg/m^3 [29] พบว่าเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจากซังข้าวโพดมีค่าความหนาแน่นรวมต่ำกว่ามาตรฐานกำหนด ในส่วนของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจากฟางข้าว เปลือกถั่วเหลือง และขี้เลื่อยมีค่าความหนาแน่นรวมตามมาตรฐานกำหนด

4.3.3 ผลการทดสอบความทนทานของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล (Durability)

การทดสอบความทนทานของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลเป็นการทดสอบเพื่อทดสอบเปอร์เซ็นต์การแตกหักของวัตถุดิบทั้ง 4 ชนิด และขนาดอนุภาคทั้ง 4 ขนาด จากค่าความทนทานของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบความทนทานของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล (ค่าเฉลี่ย)

วัตถุดิบ	ความทนทาน (%)			
	3 mm	40 Mesh	60 Mesh	80 Mesh
ฟางข้าว	-	-	92	94
ซังข้าวโพด	-	-	-	94
เปลือกถั่วเหลือง	95	98	98	96
ขี้เลื่อย	95	98	97	94



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลทดสอบความทนทานของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลทั้ง 4 ชนิด ที่อัดขึ้นรูปที่ขนาดอนุภาคแต่ละขนาด

จากรูปที่ 4.6 แสดงถึงค่าความทนทานของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจากฟางข้าว ชังข้าวโพด เปลือกถั่วเหลือง และขี้เลื่อย อัดขึ้นรูปที่ขนาดอนุภาคแต่ละขนาดพบว่า ค่าความทนทานมีค่าอยู่ระหว่าง 92% - 98% ซึ่งผลการทดลองส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน DIN EN 14961-2 ที่กำหนดมาตรฐานคุณภาพเม็ดเชื้อเพลิงในโซนิยุโรป ซึ่งกำหนดความทนทานของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลควรมีค่าอยู่ระหว่าง 96.5% - 97.5% [29] แต่ค่าความทนทานของเม็ดเชื้อเพลิงจากเปลือกถั่วเหลือง และขี้เลื่อย ที่ขนาดอนุภาค 40, และ 60 Mesh มีค่าตามมาตรฐานกำหนด ซึ่งค่าความทนทานที่ต่างกันนั้นมีอิทธิพลจากชนิดของวัสดุฉนวนที่มีส่วนประกอบทางโครงสร้างที่ต่างกัน เช่นปริมาณลิกนิน ที่กลายเป็นตัวผสานเมื่อได้รับความร้อนระหว่างกระบวนการอัดเม็ด ทำให้ชีวมวลจับตัวกันเป็นเม็ดเชื้อเพลิงที่แข็งแรง [25,26] นอกจากนี้ยังเกิดจากปัจจัยอีกหลายอย่างที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการอัดเม็ดเช่น ความชื้นในวัสดุฉนวน ความร้อน อัตราการป้อน และแรงที่ใช้ในการอัด

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

การดำเนินโครงการเริ่มจากการวางแผนต่างๆ การออกแบบดำเนินการสร้างเครื่องบดย่อยชีวมวลจนถึงการทดสอบ และวิเคราะห์ผลการทดสอบเพื่อให้เป็นไปตามขอบเขตและวัตถุประสงค์ของโครงการ และเพื่อเป็นการเข้าใจถึงผลการดำเนินการต่างๆ ดังนั้นเพื่อประมวลสรุปผลการดำเนินโครงการ และข้อเสนอแนะในการดำเนินงานต่อ ยอดเพิ่มเติมไว้หลายประการดังนี้

5.1 สรุป

5.1.1 การออกแบบและสร้างเครื่องบดย่อยชีวมวล

โครงการนี้มุ่งเน้น ออกแบบและสร้างเครื่องบดย่อยชีวมวลสำหรับผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจากเศษพืชเหลือใช้จากงานเกษตรกรรม เพื่อเป็นโครงการนำร่องโรงงานผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับกลุ่มวิสาหกิจชุมชน กลุ่มธุรกิจขนาดเล็ก โดยผู้วิจัยได้ดำเนินการออกแบบเครื่องบดย่อยชีวมวล ประกอบด้วย ชุดของค้อนหรือใบตี (hammer) จำนวน 64 ใบ ไซมอเตอร์ไฟฟ้า 10 แรงม้าเป็นเครื่องต้นกำลัง ทำการขับเคลื่อนให้เพลารอเตอร์หมุนด้วยความเร็วประมาณ 1,000 รอบต่อนาที มีพัดลมดูดอากาศสำหรับดูดวัตถุติดออกจากห้องบดเพื่อบรรจุลงในถุงกระสอบ และชุดใบมีดตัดหญ้าเพื่อรองรับวัตถุดิบที่มีขนาดใหญ่เช่น ชังข้าวโพด เป็นต้น

5.1.2 การทดลองบดย่อย พบว่าปริมาณความชื้นในวัตถุดิบส่งผลต่อการบดย่อย ปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณการบดย่อยลดลง เนื่องจากความชื้นทำให้วัตถุดิบมีความเหนียวขึ้น ทำให้การบดย่อยได้ยากขึ้น และพบว่าชนิดของวัตถุดิบมีผลต่อการบดย่อย โดยเฉพาะฟางข้าวเนื่องจากลักษณะของฟางข้าวเป็นเส้นยาวมีความเหนียวทำให้การบดย่อยทำได้ยาก และส่งผลให้ปริมาณการบดย่อยต่ำ ในส่วนของชังข้าวโพดมีปริมาณการผลิตสูงกว่าฟางข้าวแต่ยังน้อยกว่าเปลือกถั่วเหลืองและซีเลื่อย เนื่องจากชังข้าวโพดมีความเปราะทำให้ง่ายต่อการบดย่อยด้วยการทุบหรือตีเปลือกถั่วเหลืองมีปริมาณการบดย่อยมากกว่าฟางข้าวและชังข้าวโพด เพราะลักษณะของเปลือกถั่วเหลืองมีขนาดเล็กและเปราะทำให้บดย่อยได้ง่ายกว่า และซีเลื่อยมีปริมาณการบดย่อยสูงที่สุด เนื่องจากซีเลื่อยมีขนาดเล็ก หรือบางส่วนอาจมีขนาดเล็กกว่ารูตะแกรงทำให้ใช้เวลาในการบดย่อยน้อย

5.1.3 การทดลองอัดขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล พบว่าไม่สามารถอัดขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงภายใต้ตัวแปรที่กำหนดได้ทุกตัวแปร โดยฟางข้าวสามารถนำมาอัดเป็นเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลได้ที่ขนาดอนุภาค 60 และ 80 Mesh ชังข้าวโพดสามารถนำมาอัดเป็นเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลได้ที่ขนาดอนุภาค 80 Mesh เปลือกถั่วเหลืองและซีเลื่อยสามารถนำมาอัดเป็นเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลได้ทั้ง 4 ขนาดอนุภาค สาเหตุที่ทำให้ไม่สามารถอัดเม็ดเชื้อเพลิงได้นั้น เกิดจากปริมาณลิกนินในฟางข้าว และชังข้าวโพด มีน้อย นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอีกหลายอย่างที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการอัดเม็ดเช่น ความชื้นในวัตถุดิบ ความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการอัด และอัตราการป้อน

5.1.4 การทดสอบความหนาแน่นเม็ด (Pellet Density) พบว่าเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจากฟางข้าว เปลือกถั่วเหลือง และซีเลื่อย มีค่าความหนาแน่นเม็ดตามมาตรฐาน DIN 51731 (Density Pellet: $\geq 1,000 \text{ kg/m}^3$) กำหนด โดยเม็ดฟางข้าวมีค่าความหนาแน่นเม็ดอยู่ระหว่าง $1,221 - 1,252 \text{ kg/m}^3$ เม็ดเปลือกถั่วเหลืองมีค่าความหนาแน่นเม็ดอยู่ระหว่าง $1,200 - 1,301 \text{ kg/m}^3$ และเม็ด

ซีเลื่อยมีค่าความหนาแน่นเม็ดอยู่ระหว่าง $1,098 - 1,233 \text{ kg/m}^3$ ในส่วนของเม็ดซึ่งข้าวโพดความหนาแน่นเม็ด 996 kg/m^3 ต่ำกว่ามาตรฐานกำหนดเล็กน้อย

5.1.5 การทดสอบความหนาแน่นรวม (Bulk Density) พบว่าเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจากฟางข้าวเปลือกข้าวเหลือง และซีเลื่อย มีค่าความหนาแน่นรวมตามมาตรฐาน DIN EN 14961-2 (Bulk Density: $\geq 600 \text{ kg/m}^3$) กำหนด โดยเม็ดฟางข้าวมีค่าความหนาแน่นรวมอยู่ระหว่าง $618 - 628 \text{ kg/m}^3$ เม็ดเปลือกข้าวเหลืองมีค่าความหนาแน่นรวมอยู่ระหว่าง $601 - 626 \text{ kg/m}^3$ และเม็ดซีเลื่อยมีค่าความหนาแน่นรวมอยู่ระหว่าง $608 - 630 \text{ kg/m}^3$ เม็ดซึ่งข้าวโพดมีค่าความหนาแน่นรวม 508 kg/m^3 ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐานกำหนดไว้ และผลการทดสอบความหนาแน่นรวมมีความสอดคล้องกับความหนาแน่นเม็ด กล่าวคือความหนาแน่นเม็ดสูงส่งผลให้ความหนาแน่นรวมสูงขึ้นตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ดีความหนาแน่นรวมไม่ได้ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นเม็ดเพียงอย่างเดียว ความยาวของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลมีผลต่อความหนาแน่นเม็ดด้วยเช่นกัน หากความยาวโดยเฉลี่ยมีค่าสูงก็จะส่งผลให้ความหนาแน่นรวมลดลง ดังนั้นในการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลควรมีการควบคุมความยาวของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลไม่ให้สูงกว่ามาตรฐานกำหนด ($3.15 - 40$ มิลลิเมตร)

5.1.6 การทดสอบความทนทาน (Durability) พบว่าค่าความทนทานของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลมีค่าอยู่ระหว่าง $92\% - 98\%$ และผลการทดลองส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน DIN EN 14961-2 (Durability: $96.5\% \geq 97.5\%$) มีเพียงเม็ดเปลือกข้าวเหลือง และซีเลื่อย ที่ขนาดอนุภาค 40 และ 60 Mesh มีค่าตามมาตรฐานกำหนด ซึ่งค่าความทนทานที่ต่างกันนั้น มีผลมาจากสัดส่วนปริมาณของลิกนินในวัตถุดิบ ความชื้นในวัตถุดิบ ความร้อน อัตราการป้อน และแรงที่ใช้ในการอัด

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรมีการตรวจสอบสภาพเครื่องบดย่อยชีวมวลก่อนใช้งานทุกครั้ง

5.2.2 วัตถุดิบที่จะนำมาบดย่อย ด้วยเครื่องบดย่อยชีวมวล ควรเป็นวัตถุดิบที่มีขนาดเล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 30 มิลลิเมตร ไม่เป็นวัตถุดิบที่มีความแข็งสูง เช่น กิ่งไม้ กะลามะพร้าว

5.2.3 หากต้องการให้เม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลมีคุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐานกำหนด จำเป็นต้องมีการพัฒนาสัดส่วนชีวมวลขึ้น หรือมีการผสมกันระหว่างชีวมวล เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติให้เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน

5.2.4 การนำวัตถุดิบหลังการบดย่อยไปคัดแยกขนาดเพื่อนำไปอัดขึ้นรูปเป็นเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลนั้น เป็นการเพิ่มขั้นตอนการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล และเพิ่มต้นทุนในการผลิต ดังนั้นหากต้องการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลในจำนวนมากๆเพื่อจำหน่าย ควรเลือกชีวมวลที่สามารถนำไปอัดเป็นเม็ดเชื้อเพลิงได้โดยไม่ต้องนำไปคัดแยกขนาดอนุภาค

บรรณานุกรม

- [1] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน, “ชีวมวล”, www.eppo.go.th/eng/Load/ET08.pdf, สืบค้นเมื่อ 9 กันยายน 2556
- [2] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน,กระทรวงพลังงาน. นโยบายพลังงาน. วารสาร. ออนไลน์. เข้าถึงได้จาก <http://www.eppo.go.th/vrs/VRS102.pdf>
- [3] Deniel Ciolkosz, 2009. “Manufacturing Fuel Pellets from Biomass”, Renewable and alternative energy fact sheet, College of Agricultural Science, Agriculture Research and Cooperative Extension, Department of Agriculture and Biological Engineering, Penn state, USA, pp 1-4
- [4] Sudhagar Mani, Lope G. Tabil and Shahab Sokhansanj. 2006. “Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses”, Biomass and Bioenergy, 30, pp 648–654.
- [5] รัฐศักดิ์. 2551. เครื่องย่อยเปลือกมะพร้าวเพื่อการผลิตแผ่นกระดานอัด. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <http://km.rmutr.ac.th/scholar/%E0%B8%9B%E0%B8%B5-2551/> (15 ธันวาคม 2557).
- [6] สุเมษ. 2551. เครื่องย่อยขวดพลาสติก. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <http://km.rmutr.ac.th/scholar/%E0%B8%9B%E0%B8%B5-2551/> (15 ธันวาคม 2557).
- [7] อุดมวิทย์. 2551. เครื่องย่อยกิ่งไม้. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : [http:// km.rmutr.ac.th/scholar/%E0%B8%9B%E0%B8%B5-2551/](http://km.rmutr.ac.th/scholar/%E0%B8%9B%E0%B8%B5-2551/) (15 ธันวาคม 2557).
- [8] รัฐศักดิ์. 2551. เครื่องบดผงถ่านจากกะลามะพร้าวเพื่อผลิตถ่านอัดแท่ง. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <http://km.rmutr.ac.th/scholar/%E0%B8%9B%E0%B8%B5-2551/> (15 ธันวาคม 2557).
- [9] ปฏิพงษ์. 2545. เครื่องบดย่อยซากพืช. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <http://www.patipongmachine.com> (15 ธันวาคม 2557).
- [10] อรรถพล ม่วงศรีจันทร์, ธวัชชัย แสงฟ้า, นพพล นพศิริ, กมล ป้อมประสาร, 2554.การออกแบบและสร้างเครื่องสับย่อยวัสดุทางการเกษตร. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [11] ณัฐชนก อมรเทวภัทร. 2548. เทคโนโลยีการผลิตอาหารสัตว์. โครงการจัดตั้งภาควิชาเทคโนโลยีทางกระบวนการเคมีและฟลิกสคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- [12] อุทัย คันโร(ม.ป.ป.) เอกสารการเรียนการสอนวิชาการกระบวนการผลิตอาหารสัตว์และวัตถุดิบอาหารสัตว์ขั้นสูง ภาควิชาสัตวบาล คณะเกษตร กำแพงแสน นครปฐม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [13] Herrman, T.J. 1997 Feed Quality Assurance. American Soybean Association, Singapore.
- [14] ณัฐชนก อมรเทวภัทร (2548) เทคโนโลยีการผลิตอาหารสัตว์ โครงการจัดตั้งภาควิชาเทคโนโลยี ทางกระบวนการเคมีและฟิสิกส์ กรุงเทพฯ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [15] Koch, K. (2002) Hammermill and Roller Mill. Kansas State University. Agricultural Experiment Station and Cooperative Extension Service, MF-2048
- [16] บัญชา เกิดมณี. 2545. “การออกแบบทางวิศวกรรม.” วารสารเทคโนโลยีธนบุรี. ปีที่ 1 ฉบับที่ 2. (มิถุนายน 2545).
- [17] นิรนาม. 2557. เหล็กกล้าคาร์บอน. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : http://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?bookID=1818&pageid=33&read=true&count=true (25 ธันวาคม 2557).
- [18] วรวิทย์ อึ้งภากรณ์ และชาญ ฤณรงค์. 2548. การออกแบบเครื่องจักรกลเล่ม 1. กรุงเทพฯ : บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด.
- [19] มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <http://research.crma.ac.th/2549/index.php> (10 ธันวาคม 2557).
- [20] วินิจ เสริมสิริกุล. 2545. สายพาน เข้าถึงได้จาก : http://www.gmcworkshop.com/new_bosch/bosch13.asp
- [21] อรรถพล ไชยรา, 2555. การศึกษาอิทธิพลการปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อนต่อขีดจำกัดความทนทานของวัสดุ. ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [22] หลักมูลทางวิศวกรรมไฟฟ้า Fundameutal of Electnical Engineering คณะวิศวกรรมศาสตร์เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- [23] Richard Gordon Budynas, J. Keith Nisbett. 2008. Shigley's Mechanical Engineering Design. McGraw-Hill
- [24] ณัฐพงษ์ ประภาการ และคณะ. 2555. คุณสมบัติของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากเปลือกไม้หุคาลิปตัส ฟางข้าว เศษวัสดุเหลือใช้จากข้าวโพด และเหง้ามันสำปะหลัง. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26. ตุลาคม 2555
- [25] Tirinthong, V., Duangfoo, N., and Chummanee , P. (2013). Production of Biomass Fuel Pellets from Rice Straw and Sugarcane Leaves. Agricultural Sci 44 : 3 (Suppl.). pp. 518-52
- [26] Lehmann, B., Schroder H.W., Wollenberg, R. and Repke, J.U. (2012). Effect of miscanthus addition and different grinding processes on the quality of wood pellets. Biomass and Bioenergy 44 pp. 150-159
- [27] สุขใจ ชูจันทร์. 2554. การผลิตกรดอินทรีย์จากวัสดุเหลือใช้มวลชีวภาพ. กรุงเทพฯ.: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.4-6.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [28] DIN (Deutsches Institut für Normung e.V.). 1996. Din 51731: testing of solid fuels and compressed untreated wood and requirements and testing (German version).
- [29] EN 14961-2. (2012). Solid biofuels – Fuel specification and classes – Part 2: Wood pellets for non-industrial use.
- [30] อัตราค่าไฟฟ้า – การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, [ออนไลน์] <https://www.pea.co.th/Documents/Rate2012.pdf> (เข้าถึงเมื่อ 1 สิงหาคม 2558)

ภาคผนวก ก
คู่มือการใช้งาน

คู่มือการใช้งาน

การออกแบบและสร้างเครื่องบดย่อยชีวมวล

DESIGN AND CONSTRUCTION BIOMASS SHREDDERS MACHINES

เครื่องบดย่อยชีวมวล ประกอบด้วย ชุดของค้อนหรือใบตี จำนวน 64 ใบ ติดตั้งโดยห้อยอยู่กับโรเตอร์ ซึ่งติดกับเพลาชับ ชุดค้อนตีจะหมุนอยู่ในห้องบด ซึ่งมีตะแกรงห่อหุ้มหรือล้อมรอบอยู่ เครื่องต้นมอเตอร์ไฟฟ้า 10 แรงม้า จะทำการขับเคลื่อนให้เพลาชับหมุนด้วยความเร็วประมาณ 1,000 รอบต่อนาที และ ชุดโรเตอร์จะหมุนทำให้ใบตีที่ห้อยอยู่สวิงหรือกางออกตีเป็นมุมฉากกับโรเตอร์ และพร้อมที่จะตีหรือทุบวัตถุดิบที่เข้ามาในห้องบดให้แตกออกหรือมีขนาดลดลง เมื่อขนาดของวัตถุดิบที่เท่ากับหรือเล็กกว่าขนาดของรูตะแกรง จากนั้นวัตถุดิบจะถูกดูดออกด้วยชุดพัดลมดูดอากาศ เพื่อบรรจุลงในถุงกระสอบที่เตรียมไว้ นอกจากนี้ผู้วิจัยได้เพิ่มเติมชุดใบมีดตัดหญ้า เพื่อรองรับวัตถุดิบที่มีขนาดใหญ่ เช่น ช้างข้าวโพด เป็นต้น ชุดใบมีดตัดหญ้าประกอบไปด้วยใบมีดสองตัวมีมุมคมตัดที่ 45 องศา เครื่องบดย่อยชีวมวลมีขนาด 1,000 X 1,800 X 1,800 มิลลิเมตร ลักษณะเครื่องบดย่อยชีวมวลและส่วนประกอบต่างๆ ดังรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 เครื่องบดย่อยชีวมวล

ตู้ควบคุมไฟฟ้า

หมายเลข 1 ไฟแสดงพร้อมทำงานของเครื่อง (ขณะที่สับเบรกเกอร์ขึ้นแล้ว)

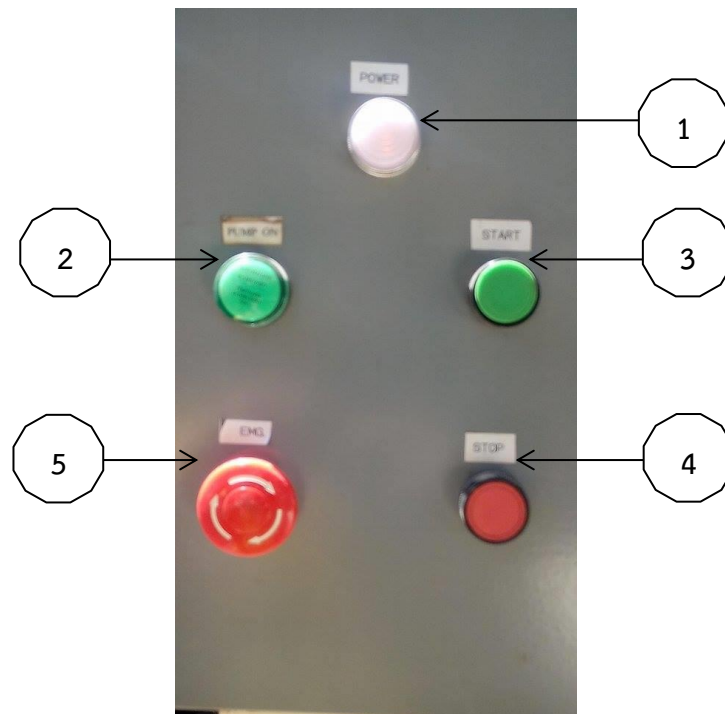
หมายเลข 2 แสดงสถานะการทำงานของ

หมายเลข 3 ปุ่มแสดงเริ่มการทำงานของเครื่อง (Start)

หมายเลข 4 ไฟแสดงหยุดการทำงานของเครื่อง (Stop)

หมายเลข 5 ปุ่มหยุดฉุกเฉิน (Emergency Stop)

หมายเลข 6 สวิตช์เบรกเกอร์



รูปที่ ก.2 ตู้ควบคุมไฟฟ้า

ขั้นตอนการทำงาน

1. เสียบสายไฟ 3 เฟส
2. ทำการยกเบรกเกอร์ภายในตู้ควบคุมไฟฟ้า
3. กดปุ่ม START (เริ่มการทำงาน)
4. รอรอบเครื่องทำงานคงที่
5. ทำการป้อนวัตถุดิบที่ต้องการบดย่อย
6. เมื่อต้องการเลิกใช้งานให้กด STOP (หยุดการทำงาน)
7. ในกรณีที่เกิดเครื่องจักรขัดข้องให้กด EMG. (ปุ่มกดฉุกเฉิน)

ข้อควรระวัง และคำแนะนำในการใช้เครื่อง

1. ก่อนการเริ่มใช้งานเครื่องทุกครั้งต้องทำการตรวจสอบตู้ควบคุมไฟฟ้าว่า สายไฟมีการชำรุดหรือไม่ การต่อวงจรถูกต้อง เพื่อเป็นการป้องกันอันตรายที่เกิดจากไฟฟ้า
2. ในการป้อนวัตถุดิบด้านบนควรมีฐานสำหรับยืนเพื่อทำการป้อนวัตถุดิบ เพื่อความสะดวกมากขึ้น
3. ในกรณีที่เกิดเสียงหรือสิ่งผิดปกติเกิดขึ้นให้ทำการกดปุ่มหยุดฉุกเฉินทันที เพื่อป้องกันอุบัติเหตุที่จะเกิดขึ้น จากนั้นตรวจสอบหาสาเหตุและทำการแก้ไข
4. ไม่ควรนำมือ หรือสิ่งของหย่อนไปในช่องป้อนวัตถุดิบในกรณีที่เครื่องยังทำงานอยู่
5. หลังจากเลิกใช้งานเครื่องทุกครั้ง ควรทำการตรวจสอบและทำการซ่อมแซมในส่วนที่ชำรุด เพื่อเป็นการยืดอายุการใช้งาน เช่น เพลาหรือแบริ่งควรมีการอัดจารบี หรือสารหล่อลื่น

ภาคผนวก ข
กิจกรรมการดำเนินงาน

1. การสร้างเครื่อง

1.1 โครงเครื่อง หรือฐานเครื่อง ทำจากเหล็กทรงน้ำขนาด 75 X 40 X 6 มิลลิเมตร โดยทำการตัดให้ได้ความยาวตามขนาดที่ออกแบบไว้ แล้วนำมาเชื่อมประกอบเป็นโครงเครื่องดังรูปที่ ข.1 เพื่อรับน้ำหนักของเครื่องทั้งหมด เช่น ฝาดรอบบน, ฝาดรอบล่าง, ชุดใบมีด และพัดลมดูดอากาศ



รูปที่ ข.1 โครงเครื่อง

1.2 ฝาดรอบบน นำเหล็กแผ่นบาง SS400 ความหนา 2.5 มิลลิเมตร มาตัดให้ได้ขนาดตามแบบที่กำหนดแล้วทำการตัดโค้งเป็นครึ่งวงกลมและเชื่อมประกอบเข้าด้วยกัน จากนั้นทำการเจาะรูด้านข้างและด้านบนเพื่อทำช่องทางสำหรับบ่อนวัตถุดิบ ดังรูปที่ ข.2



รูปที่ ข.2 ฝาดรอบบน

1.3 ฝาดรอบล่าง นำเหล็กแผ่นบาง SS400 ความหนา 2.5 มิลลิเมตร มาตัดให้ได้ขนาดตามแบบที่กำหนดแล้วทำการตัดโค้งและเชื่อมประกอบเข้าด้วยกัน จากนั้นทำการเจาะรูด้านข้างเพื่อทำช่องทางออกของวัตถุดิบ ดังรูปที่ ข.3 ด้านในของฝาดรอบล่างมีร่อง Slot สำหรับติดตั้งตะแกรง ซึ่งทำจากเหล็กเส้นสี่เหลี่ยมขนาด 8x8 มิลลิเมตร ที่ถูกตัดโค้งตามรัศมีการหมุนของชุดใบมีด



รูปที่ ข.3 ฝาดรอบล่าง

1.4 ถังป้อนวัตถุดิบ เพื่อช่วยง่ายในการป้อนวัตถุดิบให้ไหลเข้าไปในห้องบด โดยการนำเหล็กแผ่นบาง SS400 ความหนา 3 มิลลิเมตร มาตัดและพับตามขนาดที่กำหนด จากนั้นนำมาเชื่อมประกอบเข้าด้วยกัน ดังรูปที่ ข.4 ด้านบนของถังป้อนมีฝาปิดเปิดเพื่อป้องกันการตีกลับของอากาศและเศษวัตถุดิบ



รูปที่ ข.4 ถังป้อนวัตถุดิบ

1.5 ทางออกเศษวัตถุดิบ ประกอบไปด้วยชุดท่อดังรูปที่ ข.5 ก) โดยนำเหล็กท่อ st37 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร มาตัดให้ได้ความยาวตามแบบที่กำหนด ส่วนที่โค้งก็นำมาดัดขึ้นรูปและเชื่อมประกอบเข้าด้วยกัน ทางออกเศษวัตถุดิบดังรูปที่ ข.5 ข) นำเหล็กแผ่นบาง SS400 ความหนา 2.5 มิลลิเมตร มาตัดและม้วนเป็นทรงกระบอกจากนั้นเชื่อมปิดด้านบนพร้อมทั้งเจาะรูสำหรับให้อากาศไหลออกได้เพื่อลดแรงดันในระบบ



ก)



ข)

รูปที่ ข.5 ทางออกเศษวัตถุดิบ และท่อลม

1.6 ชุดใบมีด ประกอบไปด้วย เฟลาขับ ค้อนตี, ใบมีดตัดหยาบ, เฟลาค้อนตี, โรเตอร์และแหวนรองค้อนตี

1) ค้อนตี มีหน้าที่บดหรือตีวัตถุดิบให้แตกออกหรือมีขนาดลดลง ผู้วิจัยได้เลือกใช้เหล็ก S50C ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของเหล็กคาร์บอนปานกลางมีความเหนียวและความแข็งแรงสูง ทนต่อแรงต่างๆได้ดี ในกระบวนการสร้างค้อนตีผู้วิจัยได้เลือกใช้เครื่องกัดอัตโนมัติ ดังรูปที่ ข.6 ก) ในการกัดขึ้นรูป และทำการเจาะรูเพื่อจับยึดชิ้นงาน หลังจากนั้นนำมาชุบแข็งพร้อมกับอบคืนตัวให้ได้ค่าความแข็งที่ 45 HRC โดยประมาณ เพื่อให้มีความแข็งแรงทนต่อการเสียดสีจากการบดย่อย ดังรูปที่ ข.6 ข)



ก)

ข)

รูปที่ ข.6 ค้อนตี

2) ใบมีดตัดหยาบ ประกอบไปด้วยใบมีดตัดหลัก ดังรูปที่ ข.7 ก) และใบมีดตัดรอง ดังรูปที่ ข.7 ข) สำหรับตัดวัสดุที่มีขนาดใหญ่ เช่น ชั่งข้าวโพด ซึ่งทางผู้วิจัยได้เลือกใช้วัสดุเหล็ก S50C โดยนำมากัดขึ้นรูปให้ได้รูปทรงและขนาดตามแบบที่กำหนด จากนั้นทำการเจาะรูตามเกลียว ดังรูปที่ 3.9 นำไปชุบแข็งพร้อมอบคืนตัวให้ได้ค่าความแข็งที่ 45 HRC โดยประมาณ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงในการรองรับแรงปะทะระหว่างใบมีดจากการตัดเนืองวัสดุ



ก)

ข)

รูปที่ ข.7 ใบมีดตัดหยาบ

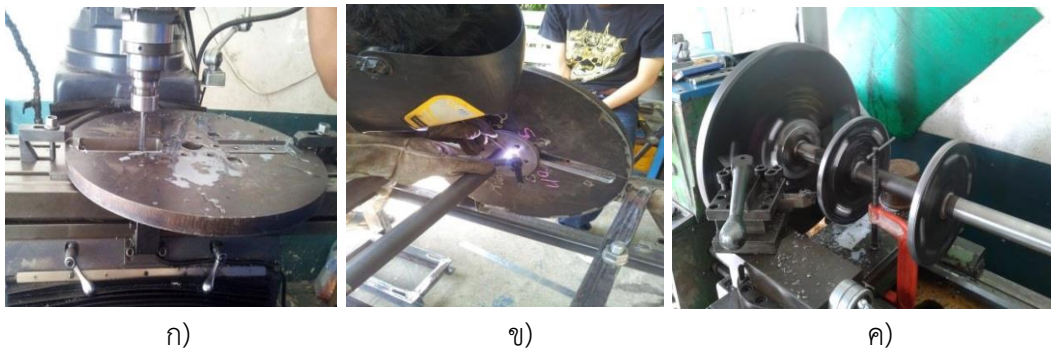
3) เฟลาค้อนตี มีหน้าที่จับยึดค้อนตีเข้ากับโรเตอร์ โดยการร้อยผ่านค้อนตี และโรเตอร์ ซึ่งผู้วิจัยได้เลือกใช้เหล็ก S45C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 มิลลิเมตร มาตัดและกลึงให้ได้เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร ความยาว 470 มิลลิเมตร และทำการตีเกลียว M12 สำหรับยึดเข้ากับโรเตอร์ ดังรูปที่ ข.8



รูปที่ ข.8 เฟลาค้อนตี

4) โรเตอร์ เพื่อรองรับในส่วนของค้อนตีทั้งหมด โดยทางผู้วิจัยได้เลือกใช้เหล็ก S50C จำนวน 3 ชิ้น แผ่นโรเตอร์ที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 480 มิลลิเมตร หนา 25 มิลลิเมตร จำนวน 1 ชิ้น และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 250 มิลลิเมตร หนา 10 มิลลิเมตร จำนวน 2 ชิ้น ในการสร้าง

แผ่นโรเตอร์ผู้วิจัยได้นำมากัดขึ้นรูปด้วยเครื่องกัดอัตโนมัติ ดังรูปที่ ข.9 ก) จากนั้นนำเพลาชับและแผ่นโรเตอร์มาประกอบกัน โดยทั้งสองส่วนนี้ถูกยึดด้วยสลักและทำการเชื่อมประกอบ ดังรูปที่ ข.9 ข) และทำการกลึงร่วมศูนย์ในขั้นตอนสุดท้าย ดังรูปที่ ข.9 ค)



รูปที่ ข.9 โรเตอร์

5) แหวนรองค้อนตี มีหน้าที่เป็นตัวคั่นหรือรองเพื่อให้เกิดช่องว่างระหว่างค้อนตี ผู้วิจัยได้เลือกใช้คือเหล็กเพลากลม St37 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร นำมาเจาะรูขนาด 21 มิลลิเมตร และตัดให้มีความหนา 10 มิลลิเมตร ดังรูปที่ ข.10



รูปที่ ข.10 แหวนรองค้อนตี

6) ตะแกรง ซึ่งเศษวัตถุบดที่มีขนาดใหญ่ก็จะถูกตีภายในห้องตีไปเรื่อยๆ จนกว่าเศษที่ได้จะมีขนาดเล็กพอที่สามารถลอดผ่านรูตะแกรงได้ ใช้เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) ขนาด 500 X 500 มิลลิเมตร หนา 2 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ดังรูปที่ ข.11



รูปที่ ข.11 ตะแกรงขนาด 3 มิลลิเมตร

2. ขั้นตอนการประกอบ

2.1 ประกอบชุดโรเตอร์ โดยเริ่มจากการนำค้อนตีประกอบเข้ากับโรเตอร์ โดยนำค้อนตีมา ร้อยสลับฟันปลากับแหวนรองค้อนตี จำนวน 64 ชิ้น ดังรูปที่ ข.12 จากนั้นนำไปติดตั้งเข้ากับฐาน เครื่อง และประกอบฝาครอบบนและฝาครอบล่างดังรูปที่ ข.13



รูปที่ ข.12 การประกอบชุดโรเตอร์



รูปที่ ข.13 การประกอบชุดฝาครอบ

2.2 ติดตั้งพัดลมดูดอากาศพัดลมดูดเศษอนุภาค โดยต่อเข้ากับแกนเพลลาที่ยื่นออกมา จากนั้นทำการจับยึดด้วยสกรูหกเหลี่ยมในตำแหน่ง ดังรูปที่ ข.14

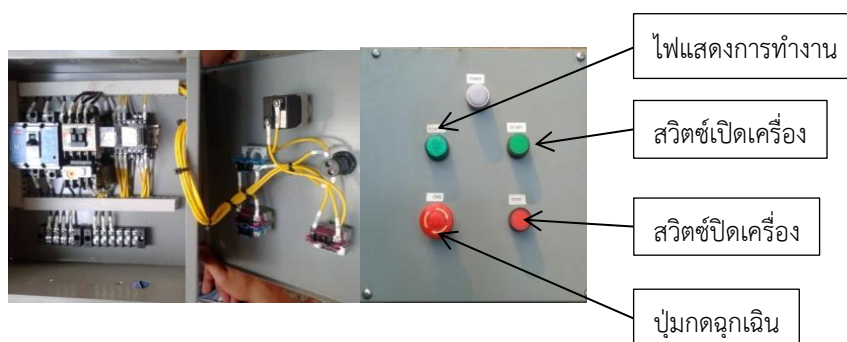


รูปที่ ข.14 การประกอบพัดลมดูดอากาศ

2.3 ติดตั้งมอเตอร์ไฟฟ้า และตู้ควบคุมไฟฟ้า นำมอเตอร์ขนาด 10 แรงม้า 3 เฟส ยึดเข้ากับฐานเครื่อง จากนั้นประกอบล้อสายพานเข้าเฟลามอเตอร์และเฟลาโรเตอร์ ดังรูปที่ ข.15 ในส่วนของตู้ควบคุมเป็นอุปกรณ์ควบคุมการทำงานของเครื่องบดย่อยชีวมวลได้แก่ แมกเนติกคอนแทคเตอร์ อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกิน สวิตช์เปิดและปิดเครื่อง ปุ่มกดฉุกเฉิน หลอดไฟแสดงการทำงาน ดังรูปที่ ข.16 สุดท้ายจะได้เครื่องบดย่อยชีวมวล ดังรูปที่ ข.17



รูปที่ ข.15 การติดตั้งมอเตอร์



รูปที่ ข.16 ตู้ควบคุมไฟฟ้า



รูปที่ ข.17 เครื่องบดย่อยชีวมวล

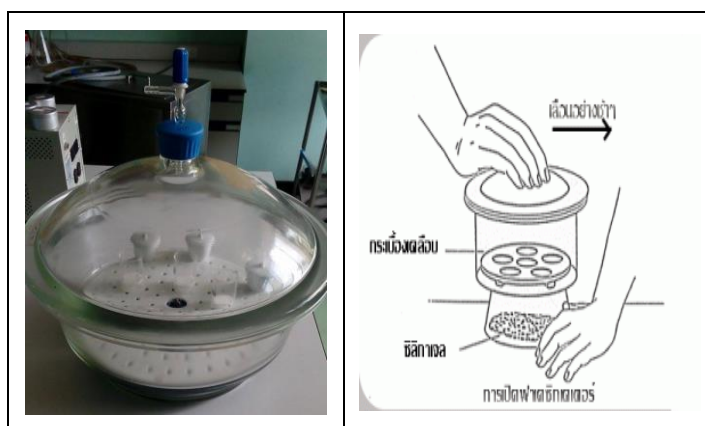
3. การทดสอบความชื้นในวัตถุดิบก่อนการบดย่อย

3.1 อุปกรณ์และการใช้งาน

1) โถดูดความชื้น (Desiccators) [23]

โถดูดความชื้น ดังรูปที่ ข.18 ใช้สำหรับดูดความชื้นออกจากสารเคมีต่างๆ ให้เหลือเฉพาะสารเคมีไม่มีความชื้นหรือน้ำอยู่ในโมเลกุลของสาร โดยโถดูดความชื้นจะต้องใส่สารที่ใช้ดูดความชื้นลงไปด้วย (ด้านล่างโถ) สารที่ใช้ดูดความชื้นโดยมากแล้วจะใช้ซิลิกาเจล (Silica Gel) หรือสารจำพวกสารกรองโมเลกุล (Molecular Sieve) ซึ่งถ้าสารซิลิกาเจลดูดความชื้นไวจนเต็ม สังเกตได้จากสีของซิลิกาเจล จะเปลี่ยนจากสีฟ้าเป็นสีชมพู

การใช้งานโถดูดความชื้น จะต้องทาวาสลินที่ฝา ส่วนที่สัมผัสกับตัวของเดซิเคเตอร์ เพื่อให้เปิดปิดได้ง่าย การเปิดทำได้โดยเลื่อนฝาดังออกอย่างช้าๆ หากดึงฝาดังขึ้นจะเปิดไม่ออก จากนั้นนำสารที่ต้องการดูดความชื้นวางลงบนแผ่นกระเบื้องเคลือบ และเลื่อนฝาดังกลับคืนที่เดิม หากไม่สามารถเลื่อนเพื่อเปิดเดซิเคเตอร์ได้ อาจเนื่องมาจากความดันภายในและภายนอกมีความแตกต่างกันมาก จะต้องเปิดจุดด้านบนเพื่อทำให้ความดันภายในและภายนอกเท่ากันเสียก่อนจึงจะสามารถเปิดได้ ทั้งนี้จะต้องทำด้วยความรวดเร็วเพื่อป้องกันความชื้นจากภายนอกเข้าไปภายในเดซิเคเตอร์



รูปที่ ข.18 โถดูดความชื้น [23]

2) เตาอบ (Oven) รุ่น ED/FD ดังรูปที่ ข.19



รูปที่ ข.19 เตาอบ

3) คู่มือการใช้งานเตาอบ

BINDER
Best conditions for your success

การใช้งานตู้อบ (OVEN) รุ่น ED/FD



1. DISPLAY เมื่อเสียบปลั๊ก จะมีไฟสีเขียวแสดงที่มุมบนซ้ายของจอแสดงผล หมายเลข (1) เพื่อมีกระแสไฟที่เข้าสู่ตู้ด้วยความร้อน
2. กดปุ่ม  หมายเลข (6) ค้างไว้ 3 วินาที เพื่อทำการเปิดเครื่องหน้าปัทมของเครื่องจะแสดงค่าอุณหภูมิภายในเครื่องมีหน่วยเป็น °C
3. กดปุ่ม  หมายเลข (2) เพื่อตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการใช้งาน โดยหน้าจอแสดงผล (1) จะแสดง **150** ซึ่งสามารถปรับเพิ่ม-ลด อุณหภูมิ ได้ตามต้องการ โดยกดปุ่ม  หมายเลข (3) และ  หมายเลข (4) ตามลำดับ เมื่อได้อุณหภูมิที่ต้องการให้กดปุ่มหมายเลข (2) อีกครั้ง หน้าจอแสดงผลจะกลับมาแสดงค่าอุณหภูมิจริง
4. การตั้งค่าเวลาในการใช้งานให้กดปุ่ม  หมายเลข (5) 1 ครั้ง หน้าจอจะแสดง **1:00** สลับกับ **1:00** ซึ่งหมายถึงตู้อบได้ตั้ง ค่าการทำงานอย่างค่อเนื่อง ถ้าต้องการเปลี่ยน ไปยังคั้งเวลาใดกดปุ่ม  ค้างไว้ 3 วินาที หน้าจอแสดง **EOFF** ซึ่งสามารถตั้งเวลา การทำงานของตู้อบได้โดย ปรับ เพิ่ม-ลดอุณหภูมิ ได้ตามต้องการ โดยกดปุ่ม  หมายเลข (3) และ  หมายเลข (4) ตามลำดับ โดยมีหน่วยเป็นชั่วโมงและนาที ถ้าต้องการออกจาก การตั้งค่าเวลาการทำงานของเครื่อง ให้กดปุ่ม  หมายเลข (4) จนหน้าจอแสดง **EOFF** แล้วกดปุ่ม  หมายเลข (4) ค้างไว้ 3 วินาที หน้าจอจะแสดงผลกลับมาเป็น **1:00** ซึ่งตู้อบ จะทำงานค่อเนื่องตามปกติ
5. การตั้งค่าความปลอดภัย (Safety Device) หมายเลข (7) เพื่อป้องกันอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิที่ตั้งค่าการใช้งานไว้ สามารถทำได้ดังนี้ ก่อนการตั้งค่าความปลอดภัย อุณหภูมิภายในตู้อบในขณะนั้นจะต้องมีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่มีการตั้งค่าไว้ใช้งาน ใช้แผ่นอุณหภูมิแนบแบบ  ที่ให้มากับตู้อบ ใส่ไปในช่องของ Safety แล้วหมุนทวนเข็มนาฬิกาจนหน้าจอแสดงผลดับไฟ Alarm ปรากฏขึ้นที่ Safety แล้วหมุน Safety ตามเข็มนาฬิกาจนปุ่มเล็กน้อยและกดปุ่ม Reset หากกดปุ่ม Reset แล้วยังไม่คิดให้หมุนย้อนตามเข็มนาฬิกาจนกว่าจะ Reset แล้วไฟ Alarm จะดับและหน้าจอจะติดใหม่อีกครั้งซึ่งหมายถึงได้ทำการตั้งค่าป้องกันการเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิที่ตั้งค่าการใช้งานไว้แล้ว ซึ่งระบบการป้องกันจะทำงานโดยอัตโนมัติที่ช่วยให้Control และHeaterเพื่อไม่ให้เครื่องเสียหาย หากมีการใช้งานหลายอุณหภูมิใช้งานแล้วไม่สะดวกที่จะปรับค่า Safety ทุกครั้งที่ใช้งานแนะนำให้ปรับSafety ที่อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ และถ้า Safety อยู่ที่ตำแหน่งสูงสุดหมายเลข 10 เครื่องจะลดการทำงานที่ 320 °C โดยประมาณ

ที่มา : ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร

4) เครื่องชั่งมวลสาร 3 ตำแหน่ง ดังรูปที่ ข.20



รูปที่ ข.20 เครื่องชั่งมวลสาร 3 ตำแหน่ง

5) เครื่องชั่งมวลสาร 4 ตำแหน่ง ดังรูปที่ ข.21



รูปที่ ข.21 เครื่องชั่งมวลสาร 4 ตำแหน่ง

3.2 ขั้นตอนการทดสอบ



รูปที่ ข.22 นำฟอยล์มาพับเป็นถ้วย แล้วนำเข้าเตาอบ 30 นาที ที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส



รูปที่ ข.23 นำถ้วยฟอยล์ใส่ในโถดูดความชื้นทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ ข.24 นำฟอยล์ไปชั่งน้ำหนักพร้อมบันทึกผล



รูปที่ ข.25 นำตัวอย่างวัตถุดิบใส่ลงในถ้วยฟอยล์ พร้อมทำการชั่งน้ำหนักก่อนอบและบันทึกผล



รูปที่ ข.26 นำไปอบทิ้งไว้เป็นเวลา 16 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส



รูปที่ ข.27 นำออกจากเตาอบ และทิ้งไว้ในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ ข.28 เมื่อครบ 30 นาทีแล้ว นำตัวอย่างไปทำการชั่งน้ำหนักหลังการอบพร้อมบันทึกผล

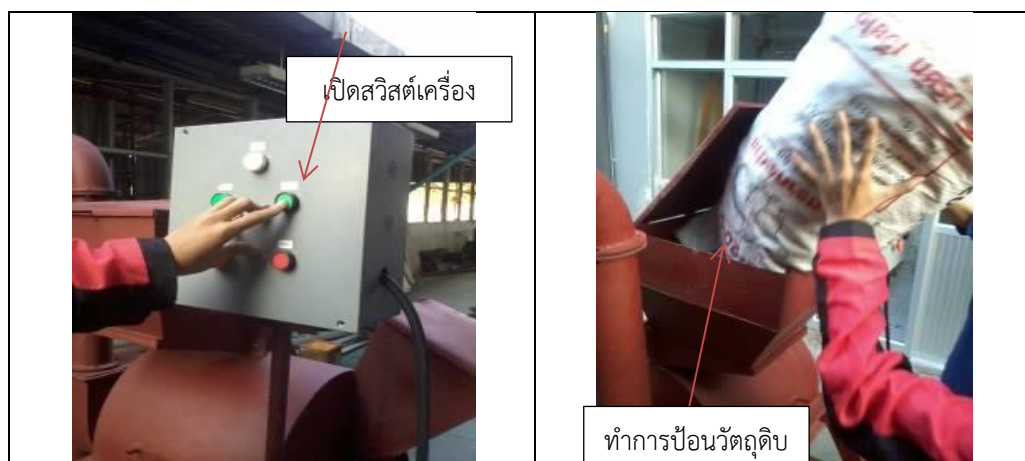
4. การทดลองบดย่อย



รูปที่ ข.29 เตรียมวัตถุดิบสำหรับทดสอบ



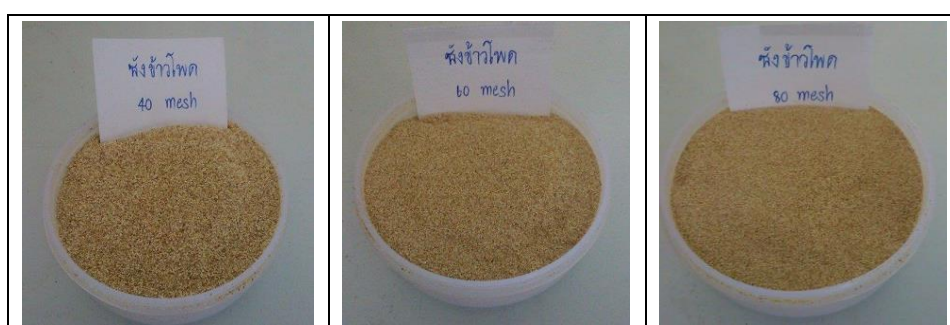
รูปที่ ข.30 ทำการเพิ่มความชื้นวัตถุดิบ โดยวัดตามสัดส่วนน้ำที่เดิมและวัตถุดิบ



รูปที่ ข.31 ทำการบดย่อยและชั่งน้ำหนักวัตถุดิบหลังการบด



รูปที่ ข.32 ทำการแยกขนาดอนุภาคของชีวมวล โดยใช้เครื่องเขย่า และใช้ตะแกรงขนาด 40, 60 และ 80 Mesh



รูปที่ ข.33 ตัวอย่างชีวมวลจากหังข้าวโพด ขนาด 40, 60 และ 80 Mesh

ภาคผนวก ค
ผลการทดสอบ

ตารางที่ ค.1 ผลการทดสอบบดย่อยฟางข้าว, ช้างข้าวโพด, เปลือกถั่วเหลือง, ชี้เลื่อย ที่ผ่านการบดย่อยด้วยตะแกรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ที่ความชื้นแต่ละระดับ และที่ผ่านคัดแยกขนาดอนุภาค 40, 60 และ 80 Mesh

วัตถุดิบ	ปริมาณความชื้น (%)	น้ำหนักวัตถุดิบหลังการบดย่อยและการคัดแยก (kg)			
		3 mm	40 Mesh	60 Mesh	80 Mesh
ฟางข้าว	≤ 15	69	6.2	2.8	3.5
	16 - 22	66	4.6	3.3	2.6
	23 - 30	59	3.5	3.0	1.2
ช้างข้าวโพด	≤ 15	93	23.3	12.1	7.4
	16 - 22	88	21.1	6.2	5.3
	23 - 30	81	13.0	6.5	6.5
เปลือกถั่วเหลือง	≤ 15	131	14.4	24.9	31.4
	16 - 22	122	11.0	22.0	25.6
	23 - 30	104	9.4	15.6	22.4
ชี้เลื่อย	≤ 15	155	23.3	40.3	48.1
	16 - 22	138	19.3	35.9	41.4
	23 - 30	110	14.9	27.0	33.6

ตารางที่ ค.2 ผลการทดสอบความหนาแน่นเม็ด (Pellet Density)

ชนิด	ขนาด อนุภาค	ความหนาแน่นเม็ด (kg/m ³)			เฉลี่ย (kg/m ³)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
ฟางข้าว	3 mm	-	-	-	0
	40 Mesh	-	-	-	0
	60 Mesh	1,254	1,168	1,241	1,221
	80 Mesh	1,036	1,170	1,220	1,142
ซังข้าวโพด	3 mm	-	-	-	0
	40 Mesh	-	-	-	0
	60 Mesh	-	-	-	0
	80 Mesh	991	993	1,005	996
เปลือกถั่วเหลือง	3 mm	1,108	1,324	1,168	1,200
	40 Mesh	1,296	1316	1292	1301
	60 Mesh	1306	1358	1183	1282
	80 Mesh	1215	1257	1328	1267
ขี้เลื่อย	3 mm	1162	1145	987	1098
	40 Mesh	1198	1222	1232	1217
	60 Mesh	1254	1287	1157	1233
	80 Mesh	1317	1097	1125	1180

*อุณหภูมิของน้ำ 27.5 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ค.3 ผลการทดสอบความหนาแน่นรวม (Bulk Density)

ชนิด	ขนาด อนุภาค	ความหนาแน่นรวม (kg/m ³)			เฉลี่ย (kg/m ³)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
ฟางข้าว	3 mm	-	-	-	0
	40 Mesh	-	-	-	0
	60 Mesh	613	622	620	618
	80 Mesh	620	640	623	628
ซังข้าวโพด	3 mm	-	-	-	0
	40 Mesh	-	-	-	0
	60 Mesh	-	-	-	0
	80 Mesh	500	540	485	508
เปลือกถั่วเหลือง	3 mm	597	595	612	601
	40 Mesh	615	641	622	626
	60 Mesh	630	632	610	624
	80 Mesh	620	623	597	613
ขี้เลื่อย	3 mm	611	587	625	608
	40 Mesh	616	621	614	617
	60 Mesh	620	618	627	622
	80 Mesh	625	631	635	630

ตารางที่ ค.4 ผลการทดสอบความทนทาน (Durability)

ชนิด	ขนาด อนุภาค	ความทนทาน (%)			เฉลี่ย (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
ฟางข้าว	3 mm	-	-	-	0
	40 Mesh	-	-	-	0
	60 Mesh	93	92	91	92
	80 Mesh	94	93	95	94
ซังข้าวโพด	3 mm	-	-	-	0
	40 Mesh	-	-	-	0
	60 Mesh	-	-	-	0
	80 Mesh	94	93	95	94
เปลือกถั่วเหลือง	3 mm	91	97	97	95
	40 Mesh	98	97	99	98
	60 Mesh	97	98	99	98
	80 Mesh	95	96	97	96
ขี้เลื่อย	3 mm	96	93	95	95
	40 Mesh	99	97	98	98
	60 Mesh	98	96	97	97
	80 Mesh	95	95	93	94

ภาคผนวก ง
ผลการทดสอบสถิติ

1. การทดสอบความหนาแน่นเม็ด

โดยนำผลการทดสอบความหนาแน่นเม็ดดังตารางที่ ข.2 มาทำการทดสอบทางสถิติว่ามีค่าไม่ต่างกันที่ขนาดอนุภาคที่ต่างกันหรือไม่

$$\begin{aligned} H_0 : \mu_1 &= \mu_2 = \mu_3 = \mu_a \\ H_1 : \mu_i &\neq \mu_j \end{aligned}$$

สมมติฐาน

1.1 ความหนาแน่นเม็ดของฟางข้าว

One-way ANOVA: Pellet Density versus Particle Size

Source	DF	SS	MS	F	P
Particle Size	1	9362	9362	1.67	0.266
Error	4	22402	5601		
Total	5	31764			

S = 74.84 R-Sq = 29.47% R-Sq(adj) = 11.84%

Level	N	Mean	StDev	Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev
60	3	1221.0	46.4	(-----*-----)
80	3	1142.0	95.1	(-----*-----)

-----+-----+-----+-----
1040 1120 1200 1280

Pooled StDev = 74.8

Grouping Information Using Tukey Method

Particle Size	N	Mean	Grouping
60	3	1221.00	A
80	3	1142.00	A

Means that do not share a letter are significantly different.

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals
All Pairwise Comparisons among Levels of Particle Size

Individual confidence level = 95.00%

Particle Size = 60 subtracted from:

Particle Size	Lower	Center	Upper	
80	-248.65	-79.00	90.65	(-----*-----)

-----+-----+-----+-----
-240 -120 0 120

Individual Value Plot of Pellet Density vs Particle Size

Boxplot of Pellet Density

Residual Plots for Pellet Density of rice straw

จากผลการทดสอบพบว่า ค่า P-value มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ ($0.266 > 0.05$) :ซึ่งหมายความว่ายอมรับ H_0 ปฏิเสธ H_1 กล่าวคือความหนาแน่นเม็ดของเม็ดฟางข้าวที่อัดขึ้นรูปด้วยขนาดอนุภาคต่างๆ มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (α) ที่ 0.05

1.2 ความหนาแน่นเม็ดของเปลือกถั่วเหลือง

One-way ANOVA: Pellet Density versus Particle Size

Source	DF	SS	MS	F	P
Particle Size	3	17475	5825	0.97	0.452
Error	8	47872	5984		
Total	11	65347			

S = 77.36 R-Sq = 26.74% R-Sq(adj) = 0.00%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
3	3	1200.0	111.5
40	3	1301.3	12.9
60	3	1282.3	89.9
80	3	1266.7	57.1

-----+-----+-----+-----+-----
 (-----*-----)
 (-----*-----)
 (-----*-----)
 (-----*-----)
 -----+-----+-----+-----+-----
 1120 1200 1280 1360

Pooled StDev = 77.4

Grouping Information Using Tukey Method

Particle Size	N	Mean	Grouping
40	3	1301.33	A
60	3	1282.33	A
80	3	1266.67	A
3	3	1200.00	A

Means that do not share a letter are significantly different.

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals
 All Pairwise Comparisons among Levels of Particle Size

Individual confidence level = 98.74%

Particle Size = 3 subtracted from:

Particle Size	Lower	Center	Upper
40	-100.98	101.33	303.65
60	-119.98	82.33	284.65
80	-135.65	66.67	268.98

-----+-----+-----+-----+-----
 (-----*-----)
 (-----*-----)
 (-----*-----)
 -----+-----+-----+-----+-----
 -150 0 150 300

Particle Size = 40 subtracted from:

Particle Size	Lower	Center	Upper
60	-221.32	-19.00	183.32
80	-236.98	-34.67	167.65

-----+-----+-----+-----+-----
 (-----*-----)
 (-----*-----)
 -----+-----+-----+-----+-----
 -150 0 150 300

Particle Size = 60 subtracted from:

Particle Size	Lower	Center	Upper
80	-217.98	-15.67	186.65

-----+-----+-----+-----+-----
 (-----*-----)
 -----+-----+-----+-----+-----
 -150 0 150 300

Particle Size = 60 subtracted from:

Particle Size	Lower	Center	Upper	
80	-273.87	-53.00	167.87	(-----*-----)
				-----+-----+-----+-----+-----
				-160 0 160 320

Individual Value Plot of Pellet Density vs Particle Size

Boxplot of Pellet Density

Residual Plots for Pellet Density of sawdust

จากผลการทดสอบพบว่า ค่า P-value มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ ($0.281 > 0.05$) :ซึ่งหมายความว่ายอมรับ H_0 ปฏิเสธ H_1 กล่าวคือความหนาแน่นเม็ดของเม็ดเชื้อเพลิงที่อัดขึ้นรูปด้วยขนาดอนุภาคต่างๆ มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (α) ที่ 0.05

1.4 ความหนาแน่นเม็ดของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลทั้ง 4 ชนิด ที่อัดขึ้นรูปที่ขนาดอนุภาค 80 Mesh

One-way ANOVA: Pellet Density versus Particle Size

Source	DF	SS	MS	F	P
Particle Size	3	114330	38110	5.71	0.022
Error	8	53426	6678		
Total	11	167756			

S = 81.72 R-Sq = 68.15% R-Sq(adj) = 56.21%

Level	N	Mean	StDev	Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev
ขี้เลื่อย	3	1179.7	119.8	(-----*-----)
ขี้ข้าวโพด	3	996.3	7.6	(-----*-----)
เปลือกถั่วเหลือง	3	1266.7	57.1	(-----*-----)
ฟางข้าว	3	1142.0	95.1	(-----*-----)
				-----+-----+-----+-----+-----
				900 1050 1200 1350

Pooled StDev = 81.7

Grouping Information Using Tukey Method

Particle Size	N	Mean	Grouping
เปลือกถั่วเหลือง	3	1266.67	A
ขี้เลื่อย	3	1179.67	A B
ฟางข้าว	3	1142.00	A B
ขี้ข้าวโพด	3	996.33	B

Means that do not share a letter are significantly different.

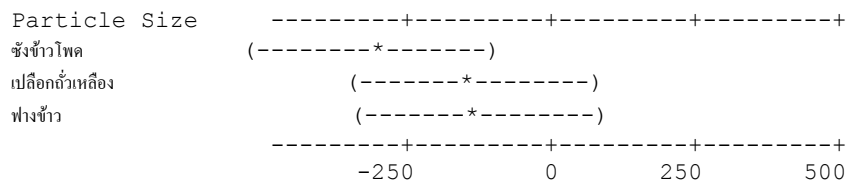
Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals

All Pairwise Comparisons among Levels of Particle Size

Individual confidence level = 98.74%

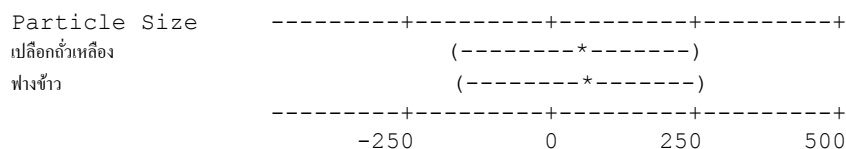
Particle Size = ขี้เลื่อย subtracted from:

Particle Size	Lower	Center	Upper
ขี้ข้าวโพด	-397.07	-183.33	30.40
เปลือกถั่วเหลือง	-126.73	87.00	300.73
ฟางข้าว	-251.40	-37.67	176.07



Particle Size = ซิงค์ออกไซด์ subtracted from:

Particle Size	Lower	Center	Upper
เปลือกถั่วเหลือง	56.60	270.33	484.07
ฟางข้าว	-68.07	145.67	359.40



Particle Size = เปลือกถั่วเหลือง subtracted from:

Particle Size	Lower	Center	Upper	-----+-----+-----+-----+
ฟางข้าว	-338.40	-124.67	89.07	(-----*-----)
				-----+-----+-----+-----+
				-250 0 250 500

Individual Value Plot of Pellet Density vs Particle Size

Boxplot of Pellet Density

Residual Plots for Pellet Density

จากผลการทดสอบพบว่า ค่า P-value มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ ($0.022 < 0.05$) :ซึ่งหมายความว่าปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1 กล่าวคือความหนาแน่นของเม็ดเชื้อเพลิงแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (α) ที่ 0.05

2. การทดสอบความหนาแน่นรวม

โดยนำผลการทดสอบความหนาแน่นรวมดังตารางที่ ข.3 มาทำการทดสอบทางสถิติว่ามีค่าไม่ต่างกันที่ขนาดอนุภาคที่ต่างกันหรือไม่

$$\begin{aligned} \text{สมมติฐาน} \quad H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_a \\ H_1 : \mu_i \neq \mu_j \end{aligned}$$

2.1 ความหนาแน่นรวมของเม็ดฟางข้าว

One-way ANOVA: C2 versus C1

Source	DF	SS	MS	F	P
C1	1	130.7	130.7	1.88	0.242
Error	4	277.3	69.3		
Total	5	408.0			

S = 8.327 R-Sq = 32.03% R-Sq(adj) = 15.03%

				Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev	
Level	N	Mean	StDev	-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----	
60	3	618.33	4.73	(-----*-----)	
80	3	627.67	10.79	(-----*-----)	
				-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----	
				610 620 630 640	

Pooled StDev = 8.33

Grouping Information Using Tukey Method

C1	N	Mean	Grouping
80	3	627.667	A
60	3	618.333	A

Means that do not share a letter are significantly different.

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals
All Pairwise Comparisons among Levels of C1

Individual confidence level = 95.00%

C1 = 60 subtracted from:

C1	Lower	Center	Upper	-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----
80	-9.543	9.333	28.210	(-----*-----)
				-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----
				-12 0 12 24

Individual Value Plot of C2 vs C1

Boxplot of C2

Residual Plots for C2

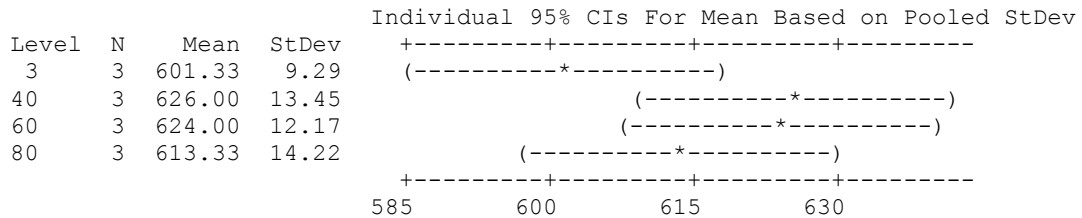
จากผลการทดสอบพบว่า ค่า P-value มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ ($0.242 > 0.05$) :ซึ่งหมายความว่ายอมรับ H_0 ปฏิเสธ H_1 กล่าวคือความหนาแน่นรวมของเม็ดฟางข้าวที่อัดขึ้นรูปด้วยขนาดอนุภาคต่างๆ มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (α) ที่ 0.05

2.2 ความหนาแน่นรวมของเม็ดเปลือกถั่วเหลือง

One-way ANOVA: Durability versus Particle Size

Source	DF	SS	MS	F	P
Particle Size	3	1158	386	2.50	0.133
Error	8	1235	154		
Total	11	2394			

S = 12.43 R-Sq = 48.39% R-Sq(adj) = 29.04%



Pooled StDev = 12.43

Grouping Information Using Tukey Method

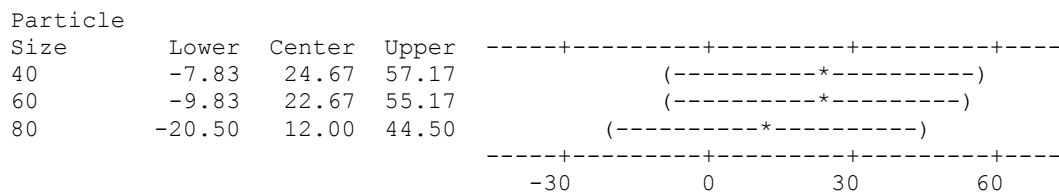
Particle Size	N	Mean	Grouping
40	3	626.00	A
60	3	624.00	A
80	3	613.33	A
3	3	601.33	A

Means that do not share a letter are significantly different.

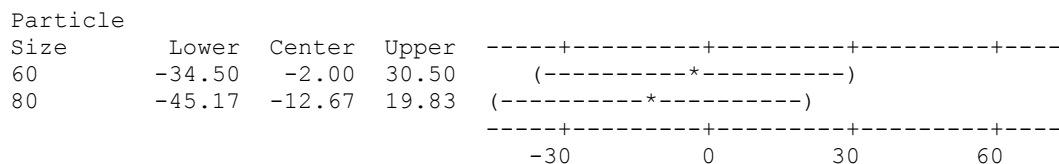
Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals
All Pairwise Comparisons among Levels of Particle Size

Individual confidence level = 98.74%

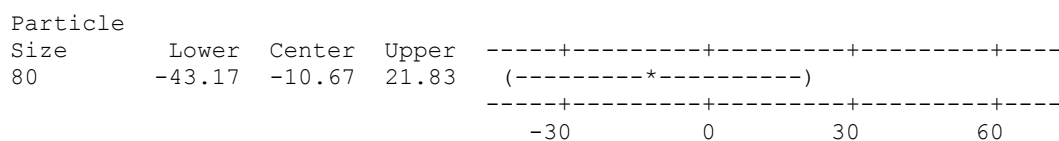
Particle Size = 3 subtracted from:



Particle Size = 40 subtracted from:



Particle Size = 60 subtracted from:



Individual Value Plot of Durability vs Particle Size

Boxplot of Durability

Residual Plots for Durability

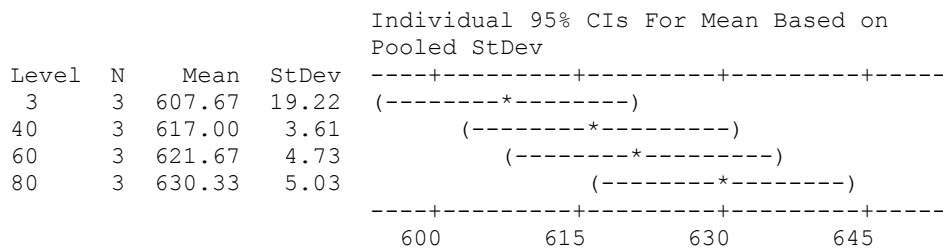
จากผลการทดสอบพบว่า ค่า P-value มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ ($0.133 > 0.05$) :ซึ่งหมายความว่ายอมรับ H_0 ปฏิเสธ H_1 กล่าวคือความหนาแน่นรวมของเม็ดเปลือกกล้วยเหลืองที่อัดขึ้นรูปด้วยขนาดอนุภาคต่างๆ มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (α) ที่ 0.05

2.3 ความหนาแน่นรวมของเม็ดซีลี้อย

One-way ANOVA: Durability versus Particle Size

Source	DF	SS	MS	F	P
Particle Size	3	804	268	2.49	0.134
Error	8	860	108		
Total	11	1664			

S = 10.37 R-Sq = 48.31% R-Sq(adj) = 28.92%



Pooled StDev = 10.37

Grouping Information Using Tukey Method

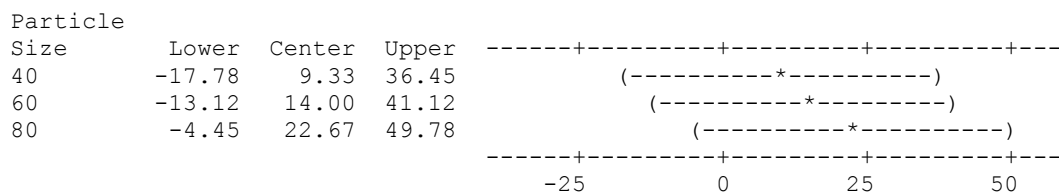
Particle Size	N	Mean	Grouping
80	3	630.33	A
60	3	621.67	A
40	3	617.00	A
3	3	607.67	A

Means that do not share a letter are significantly different.

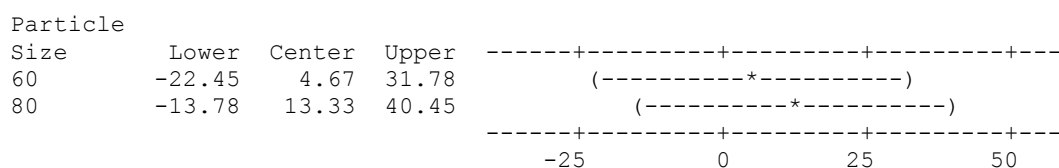
Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals
All Pairwise Comparisons among Levels of Particle Size

Individual confidence level = 98.74%

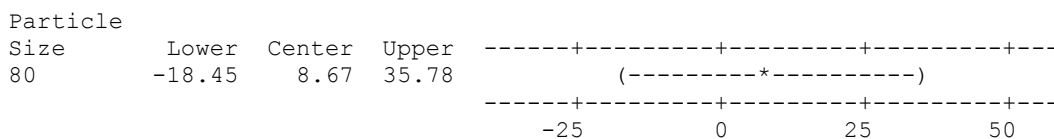
Particle Size = 3 subtracted from:



Particle Size = 40 subtracted from:



Particle Size = 60 subtracted from:



Individual Value Plot of Durability vs Particle Size

Boxplot of Durability

Residual Plots for Durability

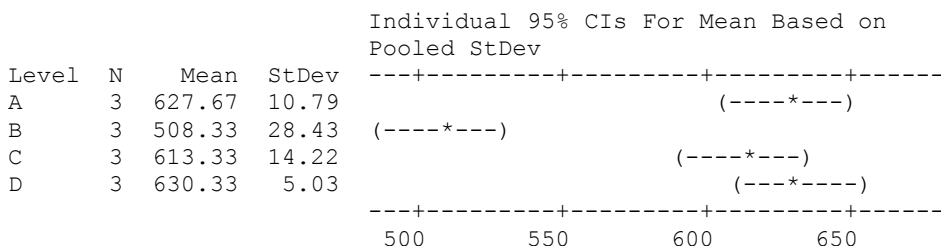
จากผลการทดสอบพบว่า ค่า P-value มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ ($0.134 > 0.05$) :ซึ่งหมายความว่ายอมรับ H_0 ปฏิเสธ H_1 กล่าวคือความหนาแน่นรวมของเม็ดซีเมนต์ที่อัดขึ้นรูปด้วยขนาดอนุภาคต่างๆ มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (α) ที่ 0.05

2.4 ความหนาแน่นรวมของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลทั้ง 4 ชนิด ที่อัดขึ้นรูปที่ขนาดอนุภาค 80 Mesh

One-way ANOVA: Durability versus Material type

Source	DF	SS	MS	F	P
Material type	3	30488	10163	35.28	0.000
Error	8	2305	288		
Total	11	32793			

S = 16.97 R-Sq = 92.97% R-Sq(adj) = 90.34%



Pooled StDev = 16.97

Grouping Information Using Tukey Method

Material type	N	Mean	Grouping
D	3	630.33	A
A	3	627.67	A
C	3	613.33	A
B	3	508.33	B

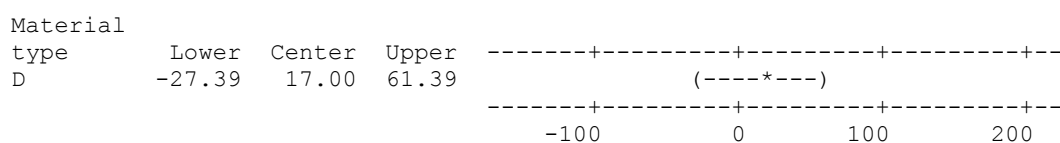
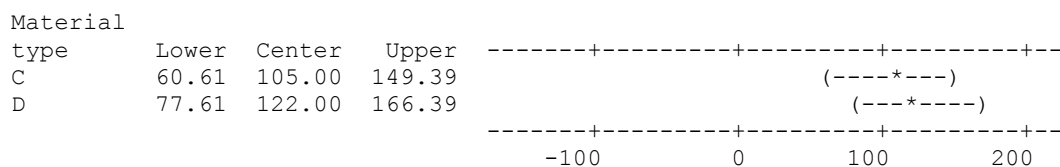
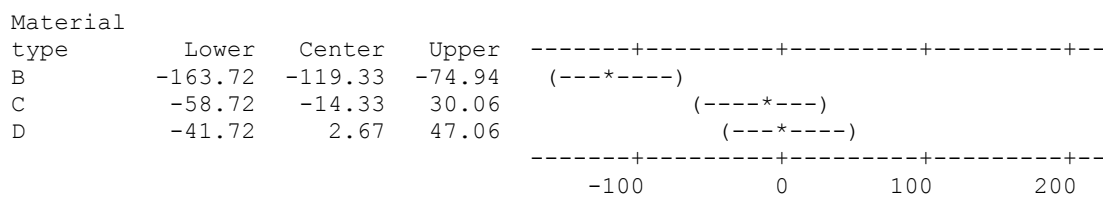
Means that do not share a letter are significantly different.

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals

All Pairwise Comparisons among Levels of Material type

Individual confidence level = 98.74%

Material type = A subtracted from:



Individual Value Plot of Durability vs Material type

Boxplot of Durability

Residual Plots for Durability

จากการทดสอบพบว่า ค่า P-value มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ ($0.000 < 0.05$) :ซึ่งหมายความว่าปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1 กล่าวคือความหนาแน่นรวมของเม็ดเชื้อเพลิงแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (α) ที่ 0.05

3. การทดสอบความทนทาน

โดยนำผลการทดสอบความทนทานดังตารางที่ ข.4 มาทำการทดสอบทางสถิติว่ามีค่าไม่ต่างกันที่ขนาดอนุภาคที่ต่างกันหรือไม่

$$\begin{aligned} H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_a \\ H_1 : \mu_i \neq \mu_j \end{aligned}$$

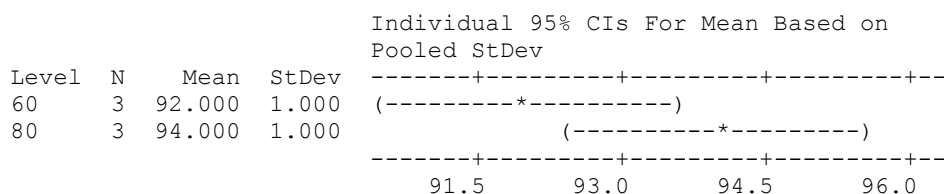
สมมติฐาน

3.1 ความทนทานของเม็ดฟางข้าว

One-way ANOVA: Durability versus Particle Size

Source	DF	SS	MS	F	P
Particle Size	1	6.00	6.00	6.00	0.070
Error	4	4.00	1.00		
Total	5	10.00			

S = 1 R-Sq = 60.00% R-Sq(adj) = 50.00%



Pooled StDev = 1.000

Grouping Information Using Tukey Method

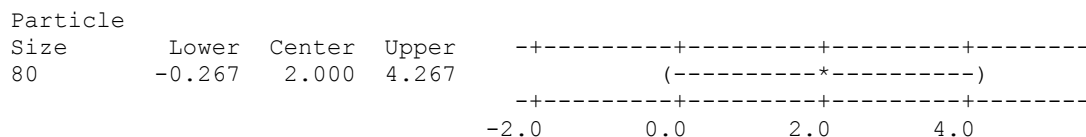
Particle Size	N	Mean	Grouping
80	3	94.000	A
60	3	92.000	A

Means that do not share a letter are significantly different.

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals
All Pairwise Comparisons among Levels of Particle Size

Individual confidence level = 95.00%

Particle Size = 60 subtracted from:



Individual Value Plot of Durability vs Particle Size

Boxplot of Durability

Residual Plots for Durability

จากผลการทดสอบพบว่า ค่า P-value มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ ($0.070 > 0.05$) :ซึ่งหมายความว่ายอมรับ H_0 ปฏิเสธ H_1 กล่าวคือความทนทานของเม็ดฟางข้าวที่อัดขึ้นรูปด้วยขนาดอนุภาคต่างๆ มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (α) ที่ 0.05

Boxplot of Durability

Residual Plots for Durability

จากผลการทดสอบพบว่า ค่า P-value มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ ($0.225 > 0.05$) :ซึ่งหมายความว่ายอมรับ H_0 ปฏิเสธ H_1 กล่าวคือความทนทานของเม็ดเปลือกแก้วเหลืองที่อัดขึ้นรูปด้วยขนาดอนุภาคต่างๆ มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (α) ที่ 0.05

3.3 ความทนทานของเม็ดขี้เลื่อย

One-way ANOVA: Durability versus Particle Size

Source	DF	SS	MS	F	P
Particle Size	3	28.67	9.56	6.75	0.014
Error	8	11.33	1.42		
Total	11	40.00			

S = 1.190 R-Sq = 71.67% R-Sq(adj) = 61.04%

				Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev	
Level	N	Mean	StDev	-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----	
3	3	94.667	1.528	(-----*-----)	
40	3	98.000	1.000		(-----*-----)
60	3	97.000	1.000		(-----*-----)
80	3	94.333	1.155	(-----*-----)	
				-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----	
				94.0 96.0 98.0 100.0	

Pooled StDev = 1.190

Grouping Information Using Tukey Method

Particle Size	N	Mean	Grouping
40	3	98.000	A
60	3	97.000	A B
3	3	94.667	B
80	3	94.333	B

Means that do not share a letter are significantly different.

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals
All Pairwise Comparisons among Levels of Particle Size

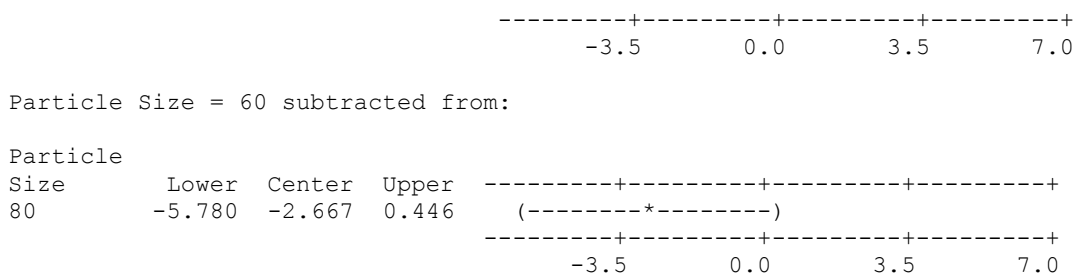
Individual confidence level = 98.74%

Particle Size = 3 subtracted from:

Particle Size	Lower	Center	Upper	-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----
40	0.220	3.333	6.446	(-----*-----)
60	-0.780	2.333	5.446	(-----*-----)
80	-3.446	-0.333	2.780	(-----*-----)
				-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----
				-3.5 0.0 3.5 7.0

Particle Size = 40 subtracted from:

Particle Size	Lower	Center	Upper	-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----
60	-4.113	-1.000	2.113	(-----*-----)
80	-6.780	-3.667	-0.554	(-----*-----)



Individual Value Plot of Durability vs Particle Size

Boxplot of Durability

Residual Plots for Durability

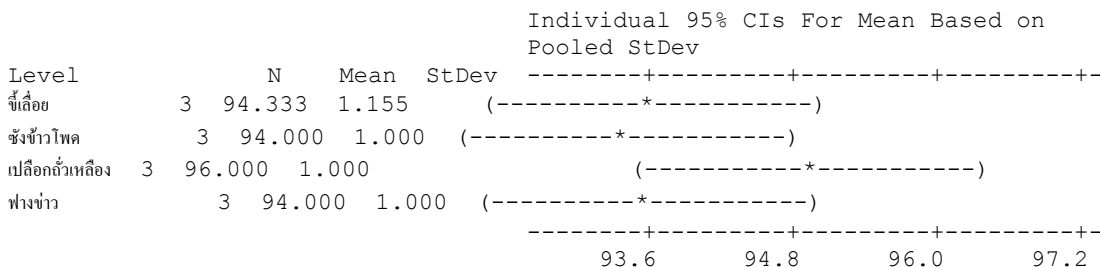
จากผลการทดสอบพบว่า ค่า P-value มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ ($0.014 > 0.05$) :ซึ่งหมายความว่าปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1 กล่าวคือความทนทานของเม็ดซีเมนต์ที่อัดขึ้นรูปด้วยขนาดอนุภาคต่างๆ มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (α) ที่ 0.05

3.4 ความทนทานของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลทั้ง 4 ชนิด ที่อัดขึ้นรูปที่ขนาดอนุภาค 80 Mesh

One-way ANOVA: Durability versus Material type

Source	DF	SS	MS	F	P
Material type	3	8.25	2.75	2.54	0.130
Error	8	8.67	1.08		
Total	11	16.92			

S = 1.041 R-Sq = 48.77% R-Sq(adj) = 29.56%



Pooled StDev = 1.041

Grouping Information Using Tukey Method

Material type	N	Mean	Grouping
เปลือกถั่วเหลือง	3	96.000	A
ซีเมนต์	3	94.333	A
ฟางข้าว	3	94.000	A
ช้างข้าวโพด	3	94.000	A

Means that do not share a letter are significantly different.

Tukey 95% Simultaneous Confidence Intervals
All Pairwise Comparisons among Levels of Material type

Individual confidence level = 98.74%

Material type = ซีเมนต์ subtracted from:

Material type	Lower	Center	Upper
ขังข้าวโพด	-3.056	-0.333	2.389
เปลือกถั่วเหลือง	-1.056	1.667	4.389
ฟางข้าว	-3.056	-0.333	2.389

Material type	-----+-----+-----+-----+
ขังข้าวโพด	(-----*-----)
เปลือกถั่วเหลือง	(-----*-----)
ฟางข้าว	(-----*-----)
	-----+-----+-----+-----+
	-2.5 0.0 2.5 5.0

Material type = ขังข้าวโพด subtracted from:

Material type	Lower	Center	Upper
เปลือกถั่วเหลือง	-0.722	2.000	4.722
ฟางข้าว	-2.722	0.000	2.722

Material type	-----+-----+-----+-----+
เปลือกถั่วเหลือง	(-----*-----)
ฟางข้าว	(-----*-----)
	-----+-----+-----+-----+
	-2.5 0.0 2.5 5.0

Material type = เปลือกถั่วเหลือง subtracted from:

Material type	Lower	Center	Upper	-----+-----+-----+-----+
ฟางข้าว	-4.722	-2.000	0.722	(-----*-----)
				-----+-----+-----+-----+
				-2.5 0.0 2.5 5.0

Individual Value Plot of Durability vs Material type

Boxplot of Durability

Residual Plots for Durability

จากผลการทดสอบพบว่า ค่า P-value มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ ($0.130 > 0.05$) :ซึ่งหมายความว่ายอมรับ H_0 ปฏิเสธ H_1 กล่าวคือความทนทานของเม็ดเชื้อเพลิงแต่ละชนิดมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (α) ที่ 0.05

ภาคผนวก จ
การวิเคราะห์ต้นทุน

การวิเคราะห์ต้นทุน

การวิเคราะห์ต้นทุนนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อใช้เป็นแนวทางในการลงทุน และการบริหารจัดการด้านกระบวนการผลิต ซึ่งรายละเอียดการวิเคราะห์สามารถอธิบายได้ดังนี้

ต้นทุนการสร้างเครื่องบดย่อย

ต้นทุนการสร้างเครื่องบดย่อยชีวมวล สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้ดังนี้

1) ราคาทำเครื่อง และส่วนประกอบต่างๆ

● ค่าฐานเครื่อง ถังป้อนวัตถุดิบ ฝาครอบบน ฝาครอบล่าง	55,000	บาท
● ค่าค้อนตี	11,500	บาท
● ค่าใบมีดตัดหลัก ใบมีดตัดรอง	5,000	บาท
● ค่าโรเตอร์	20,000	บาท
● ค่าชุดทางออกวัตถุดิบ	7,000	บาท

2) อุปกรณ์ประกอบเครื่อง

● ค่าพัดลมดูดอากาศ	3,000	บาท
● ค่าตะแกรงขนาด 3, 5, 7 มิลลิเมตร	3,000	บาท
● ค่ามอเตอร์ 3 เฟส 5 แรงม้า	13,000	บาท
● ค่าตู้ควบคุมไฟฟ้า	12,000	บาท
● ค่าสี	2,000	บาท

รวม 131,500 บาท

ต้นทุนในการผลิต

1) อัตราค่าไฟฟ้า

การคำนวณค่าไฟฟ้าคิดจากอัตราค่าไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ประเภทกิจการขนาดเล็ก ที่อัตราปกติ โดยมีแรงดันไฟฟ้าในโรงงานอยู่ระหว่าง 22-33 กิโลโวลต์ มีอัตราค่าพลังงานไฟฟ้า 3.4230 บาท/หน่วย [30] เนื่องจากเครื่องบดย่อยชีวมวลใช้มอเตอร์ขนาด 10 แรงม้า เป็นเครื่องต้นกำลังการคำนวณหาอัตราการใช้ไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{มอเตอร์ขนาด 10 แรงม้า} &= 10 \times 746 = 7,460 \text{ วัตต์} \\
 \text{ไฟฟ้า 1 หน่วย} &= \text{ไฟฟ้าขนาด 1,000 วัตต์ ใน 1 ชั่วโมง} \\
 \text{ดังนั้น ค่าไฟฟ้าในการทำงาน 1 ชั่วโมง} &= (7,460 \text{ วัตต์} / 1,000 \text{ วัตต์}) \times 3.4230 \text{ บาท/หน่วย} \\
 \therefore &= 25.54 \text{ บาท/ชั่วโมง}
 \end{aligned}$$

2) ค่าแรงงาน

ในกระบวนการบดย่อยชีวมวล ใช้คนงานในการควบคุมเครื่องบดย่อยชีวมวล 1 คน มีค่าแรงงาน 300 บาท/วัน ตามอัตราค่าจ้างขั้นต่ำ

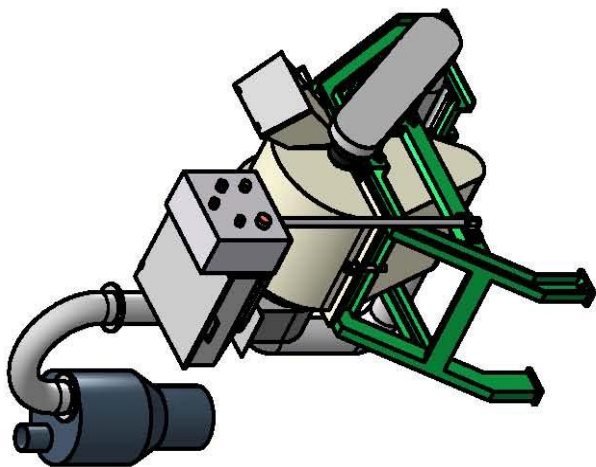
ภาคผนวก ฉ

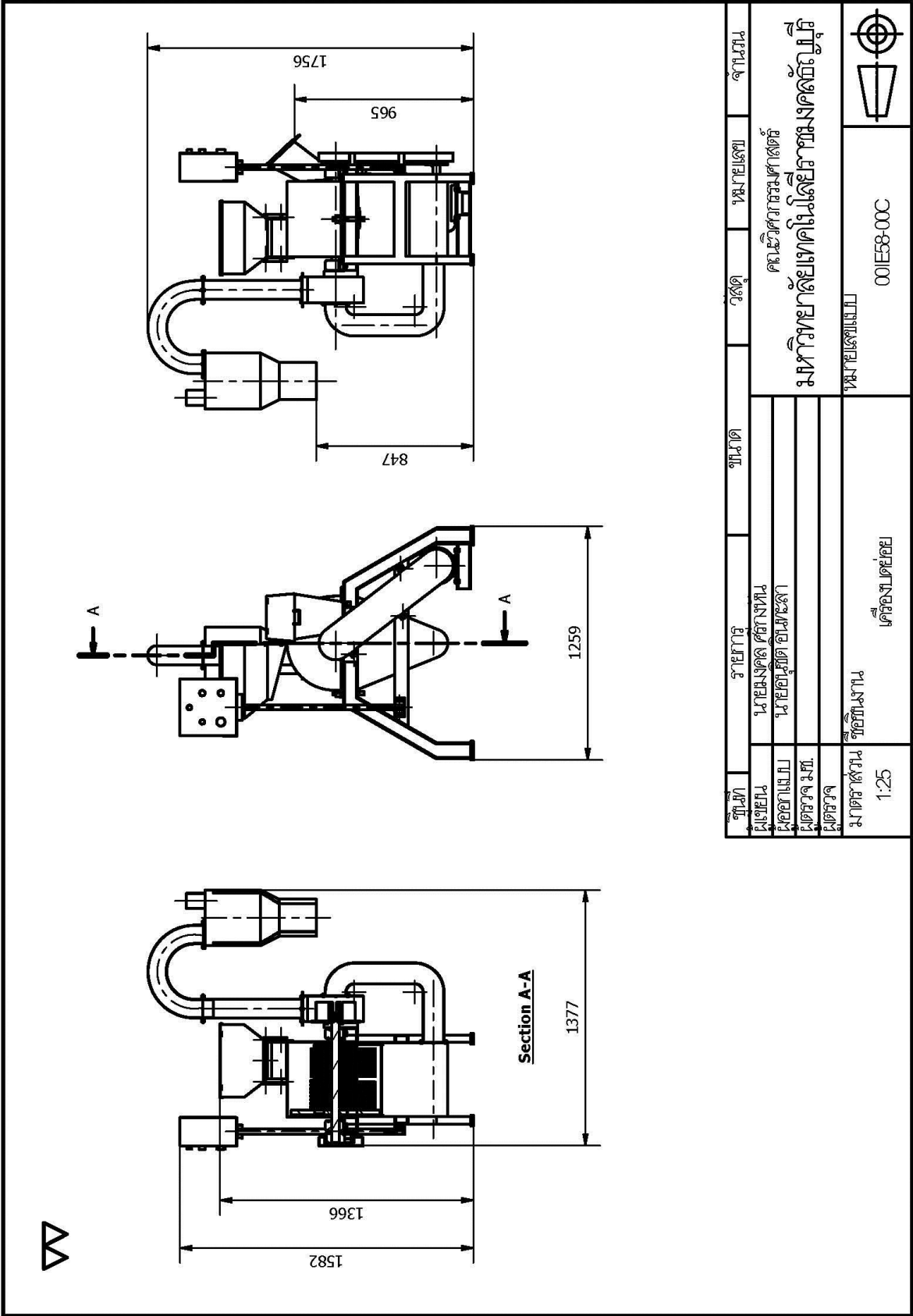
ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ และกิจกรรมที่วางแผนไว้

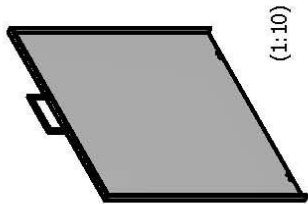
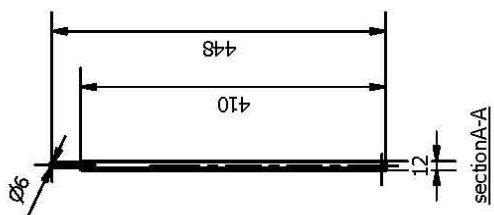
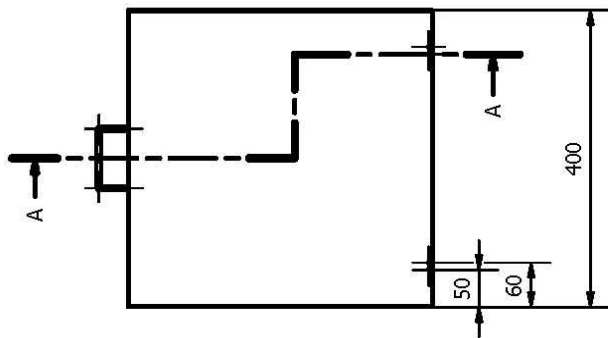
ตารางที่ ๑.1 เปรียบเทียบวัตถุประสงค์ และกิจกรรมที่วางแผนไว้

ระยะ เวลา	กิจกรรมในข้อเสนอโครงการ	ผลสำเร็จ (%)	ผลที่ได้
เดือน 1-2	- ศึกษากระบวนการบดย่อยและคัดขนาดของผงอนุภาคชีวมวลตามมาตรฐาน - ออกแบบและเขียนแบบเครื่องบดย่อยชีวมวลสำหรับบดย่อยชีวมวลที่เป็นผลสัมฤทธิ์จากโครงการที่ 1 ทำการจำลองการออกแบบเครื่องด้วยโปรแกรมช่วยในการออกแบบและเขียนแบบเพื่อเตรียมพร้อมสำหรับดำเนินการสร้างเครื่องบดย่อย	100 (%)	- ทราบข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการบดย่อยและการคัดขนาดของผงบด - ได้แบบเครื่องบดย่อยชีวมวล
เดือน 3-6	- จัดเตรียมวัสดุ และดำเนินการสร้างเครื่องบดย่อยชีวมวล - ทดลองบดย่อย และทำการคัดแยกขนาดผงอนุภาคเพื่อเตรียมพร้อมสำหรับอัดขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล - ดำเนินการอัดขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลตามชนิดของชีวมวล โดยควบคุมขนาดของผงอนุภาค ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง	100 (%)	- ได้เครื่องบดย่อยชีวมวล - ได้ผลการทดลองบดย่อยและคัดขนาดชีวมวลจากฟางข้าว ซึ่งข้าวโพด เปลือกถั่วเหลือง และซีลี้อย - ได้เม็ดเชื้อเพลิงจากฟางข้าว ซึ่งข้าวโพด เปลือกถั่วเหลือง และซีลี้อยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ความยาว 20-40 มิลลิเมตร
เดือน 7-12	- ดำเนินการทดสอบสมบัติทางด้านกายภาพ เชิงกล ของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล - วิเคราะห์ผลการทดสอบ และสรุปผลการทดลอง - เผยแพร่ผลงานวิจัย โดยการจัดสัมมนาให้กับกลุ่มเป้าหมาย และดำเนินการจัดทำบทความวิชาการเพื่อเผยแพร่ในงานประชุมวิชาการ/วารสารทาง วิชาการ	100 (%)	- ทราบถึงอิทธิพลของขนาดอนุภาคที่มีผลต่อการอัดขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล - ทราบถึงประสิทธิภาพของเครื่องบดย่อยชีวมวล - ได้บทสรุปจากการวิเคราะห์ผลการทดลอง - เผยแพร่ผลงานงานวิจัย ในการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8

ภาคผนวก ข
แบบขึ้นส่วนเครื่องอบแห้งซีมวล

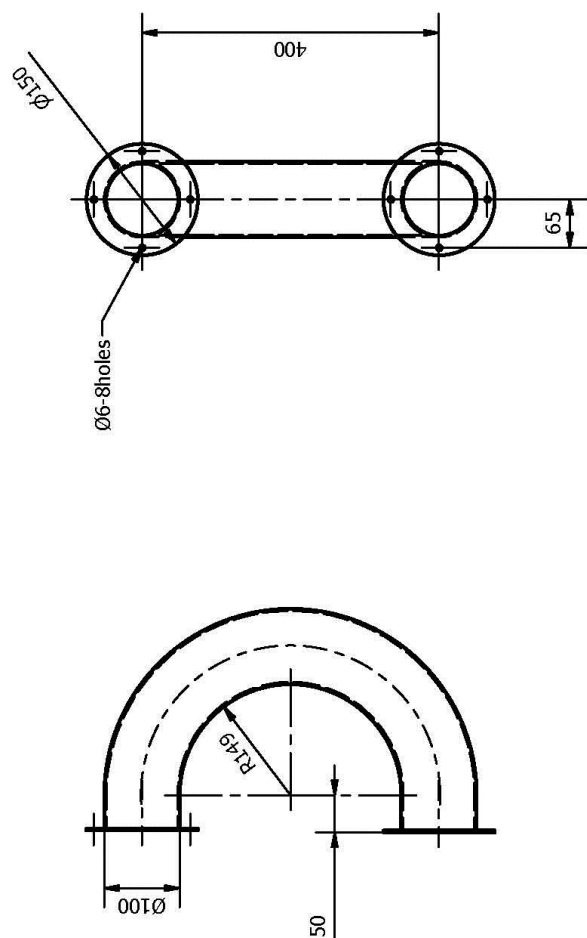






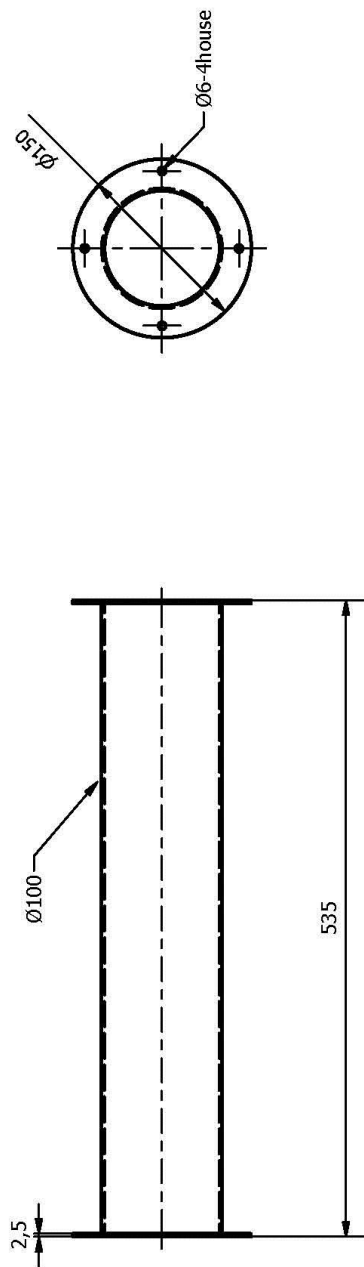
Note
t=2mm

1	แผ่นยึดยึด	400x448x12	SS400	00IE58-001	1
ชื่อผู้จัดทำ	วิชาช่าง	วิชาช่าง	วิชาช่าง	วิชาช่าง	วิชาช่าง
ชื่อผู้สอน	นายสมชาย ใจดี	นายสมชาย ใจดี	นายสมชาย ใจดี	นายสมชาย ใจดี	นายสมชาย ใจดี
ชื่อผู้เรียน	นายสมชาย ใจดี	นายสมชาย ใจดี	นายสมชาย ใจดี	นายสมชาย ใจดี	นายสมชาย ใจดี
ชื่อผู้ตรวจ	นายสมชาย ใจดี	นายสมชาย ใจดี	นายสมชาย ใจดี	นายสมชาย ใจดี	นายสมชาย ใจดี
ขนาดกระดาษ	1:8	1:8	1:8	1:8	1:8
ชื่อผู้จัดทำ	นายสมชาย ใจดี	นายสมชาย ใจดี	นายสมชาย ใจดี	นายสมชาย ใจดี	นายสมชาย ใจดี
ชื่อผู้สอน	นายสมชาย ใจดี	นายสมชาย ใจดี	นายสมชาย ใจดี	นายสมชาย ใจดี	นายสมชาย ใจดี
ชื่อผู้เรียน	นายสมชาย ใจดี	นายสมชาย ใจดี	นายสมชาย ใจดี	นายสมชาย ใจดี	นายสมชาย ใจดี
ชื่อผู้ตรวจ	นายสมชาย ใจดี	นายสมชาย ใจดี	นายสมชาย ใจดี	นายสมชาย ใจดี	นายสมชาย ใจดี



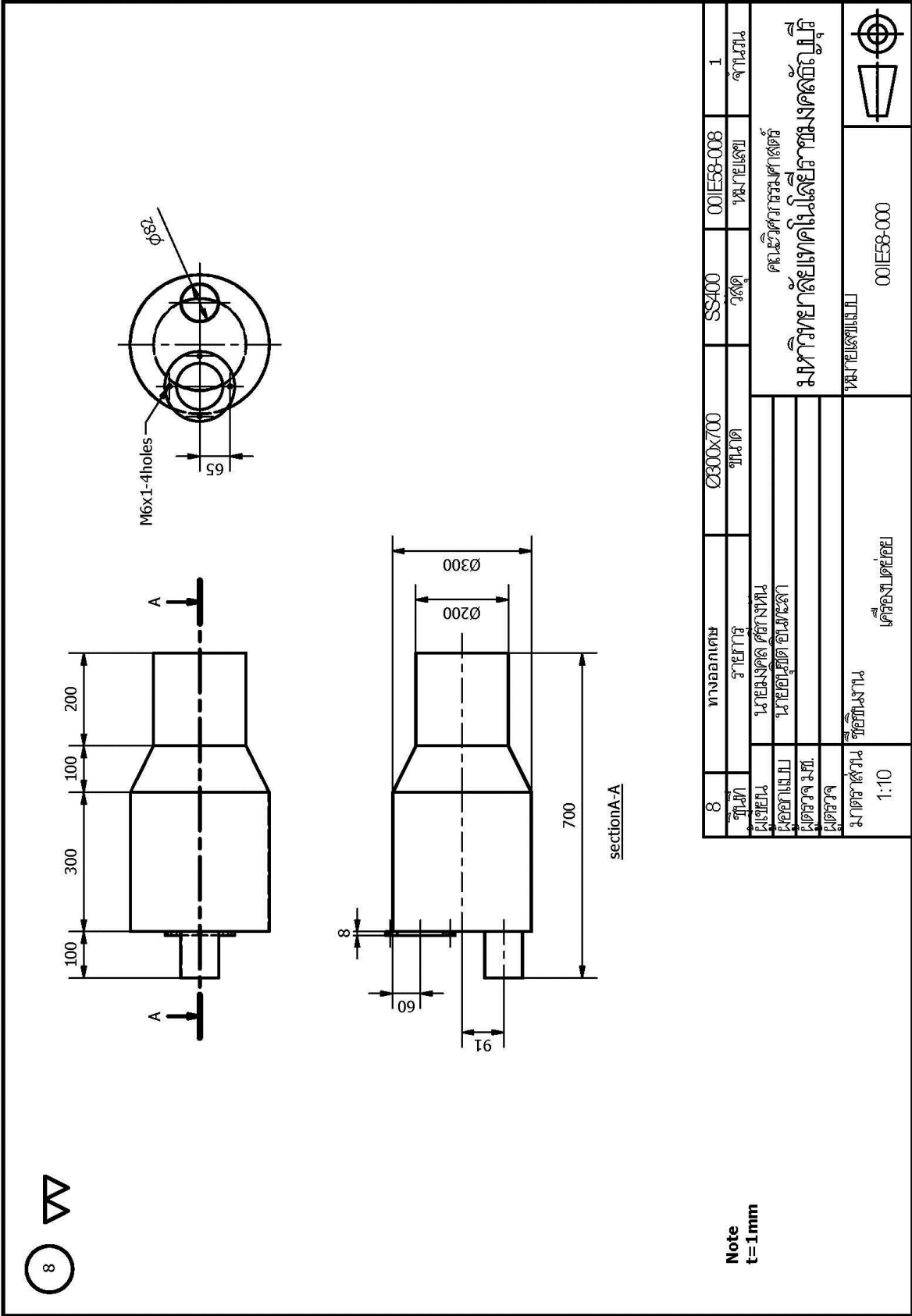
6	ทอผ. A	๑15๐414	SI-37	๐๐1E58-006	1
ฐาน	รายการ	ชนิด	วัสดุ	หมายเลข	จำนวน
เนื้อเยื่อ	รายละเอียด สัณนิษาน				
เนื้อเยื่อแบบ	รายละเอียด ขนาด				
เนื้อเยื่อจ. ม.ท.					
เนื้อเยื่อจ.					
มาตราส่วน 1:8	ชุดงาน		หมายเลขแบบ	๐๐1E58-000	
	เครื่องหมาย				

7 ~ (W)

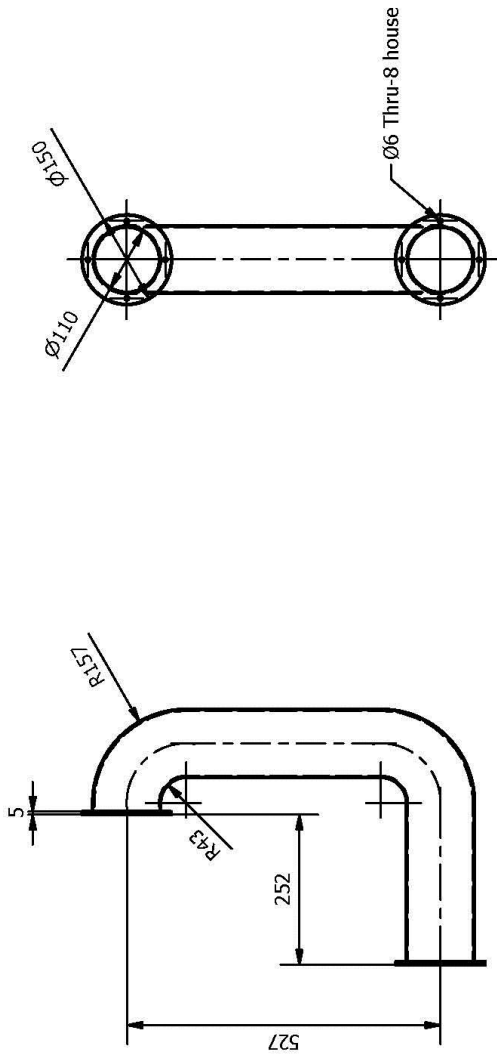


7	วอลุ่ม B	Ø150x535	SF-37	00IE58-007	1
ผู้จัดทำ	รายการ	ขนาด	วัสดุ	หมายเลข	จำนวน
ผู้เขียน	นายเมฆังคณ ด้วงงทน				
ผู้ออกแบบ	นายอนุชิต วัฒนสุภา				
ผู้ตรวจงาน					
ผู้ตรวจ					
มาตราส่วน	ข้อเขียนงาน	เครื่องมิต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี		
1:5			หมายเลขแบบ	00IE58-000	





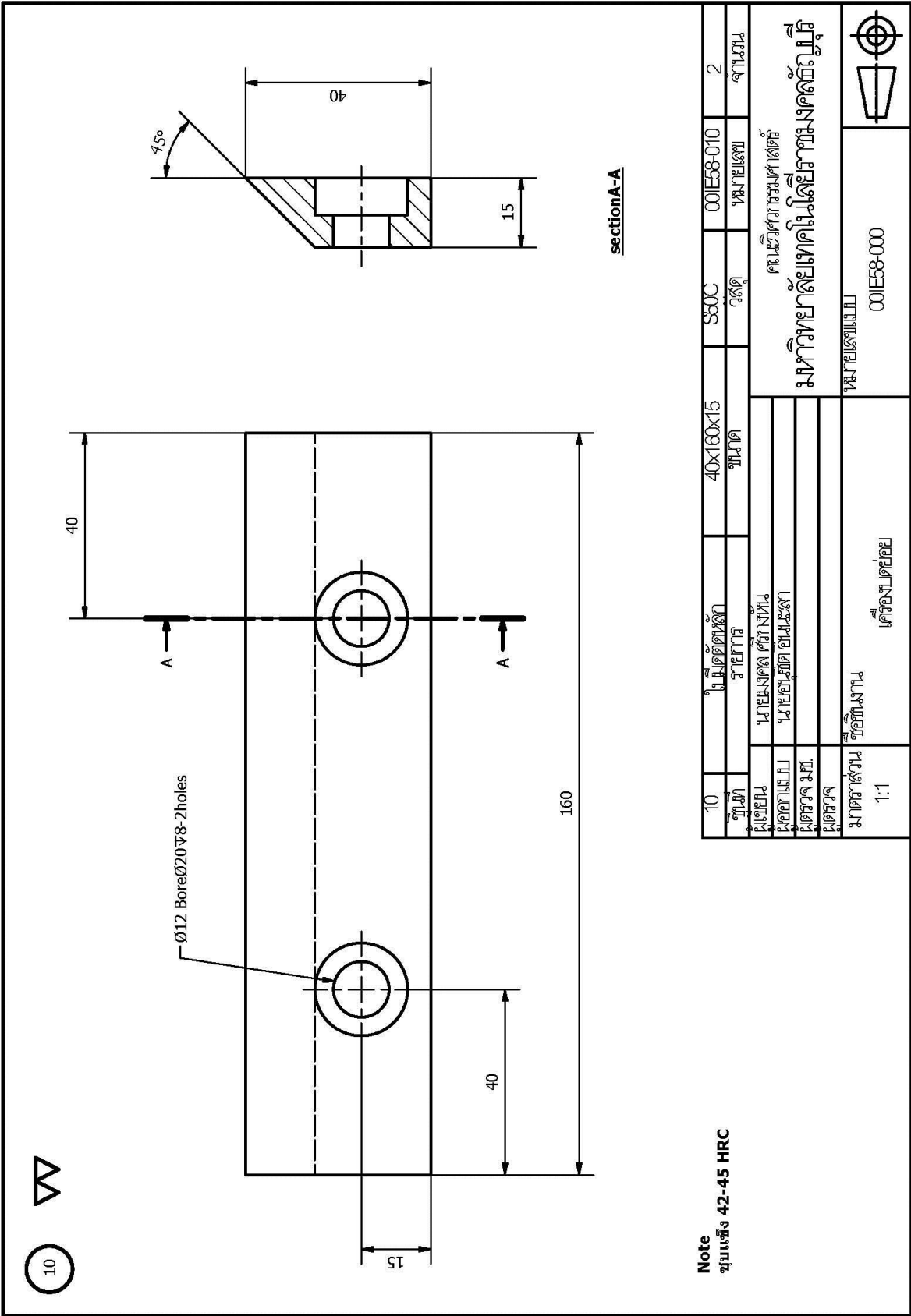
9 ~ (W)

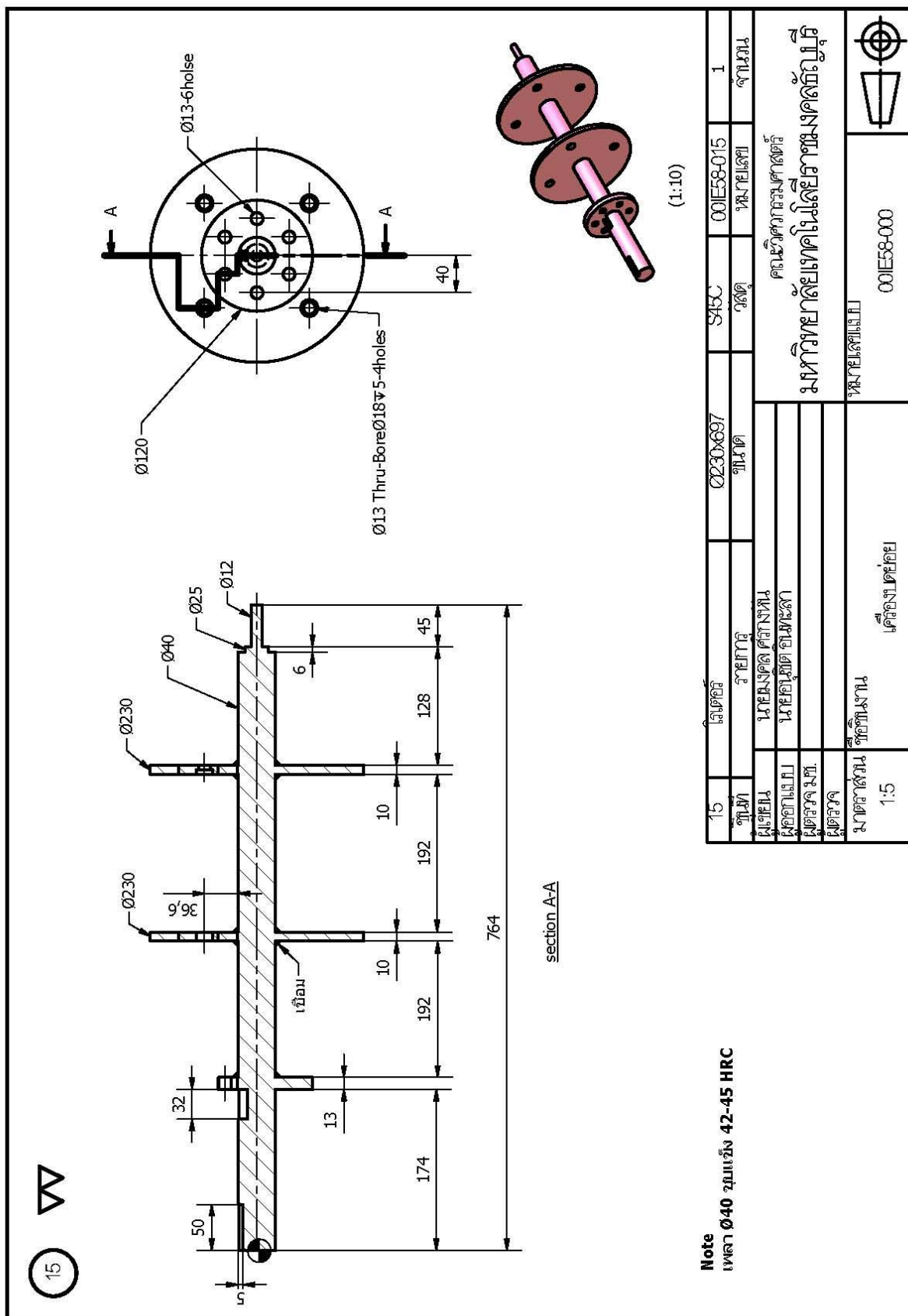


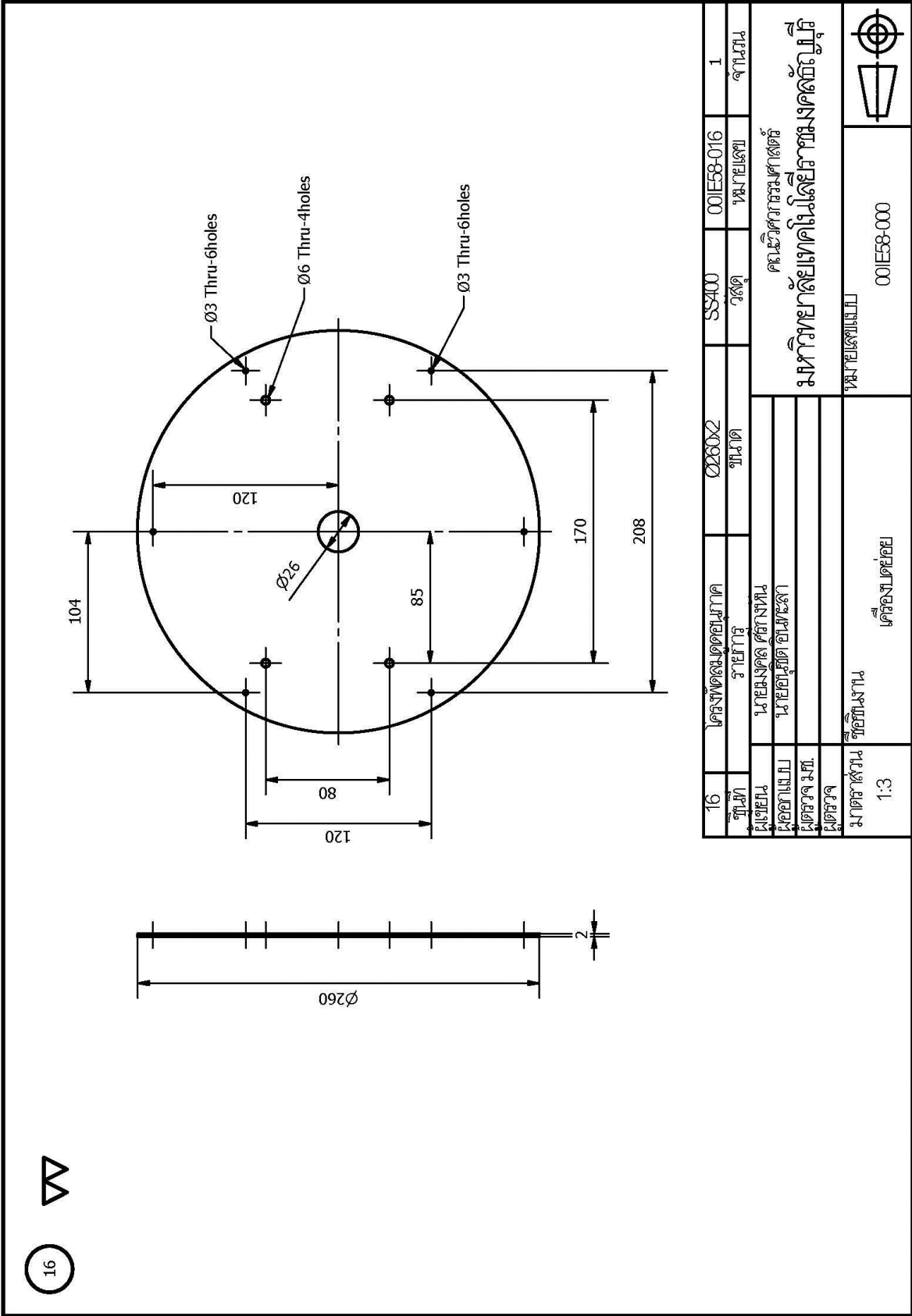
9	พอลม C	Ø150x914	SI-37	00IE58-009	1
ผู้จัดทำ	รายการ	ขนาด	วัสดุ	หมายเลข	จำนวน
ผู้เขียน	นายมงคล ศิริภักดิ์				
ผู้ออกแบบ	นายอนุชิต งามะเสลา				
ผู้ตรวจงาน					
ผู้ตรวจ					
มาตรฐาน	ท้องถิ่นงาน				
1:10	เครื่องบดย่อย			00IE58-000	

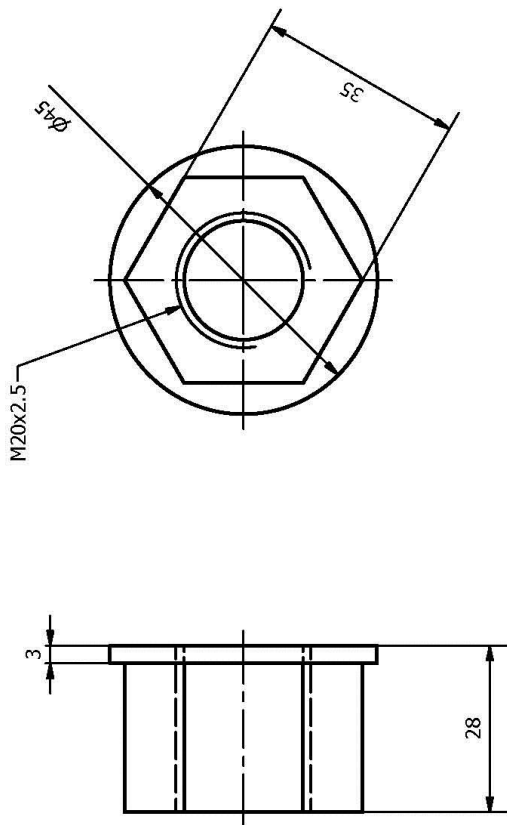
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี





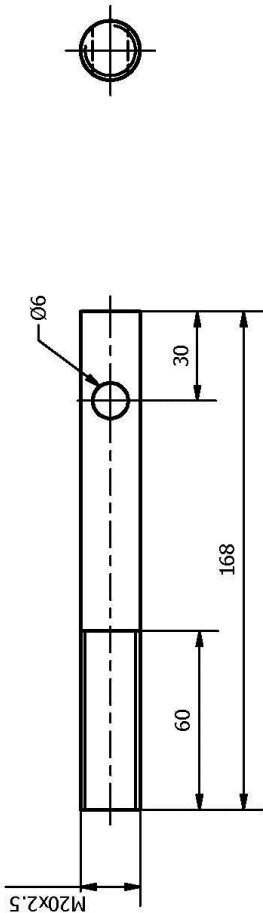






18	ในชุดข้อสอบ	045x18	SI-3/	00IE58-018	1
ผู้จัดทำ	รายวิชา	ขนาด	วัสดุ	หมายเลข	จำนวน
ผู้เขียน	นายมงคล ศิริภักดิ์				
ผู้ออกแบบ	นายอนุชิต วัฒนสุภา				
ผู้ตรวจ					
ผู้ตรวจ					
มาตรฐาน	ข้อเขียน	เครื่องโดย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี		
1:1			หมายเลข	00IE58-000	





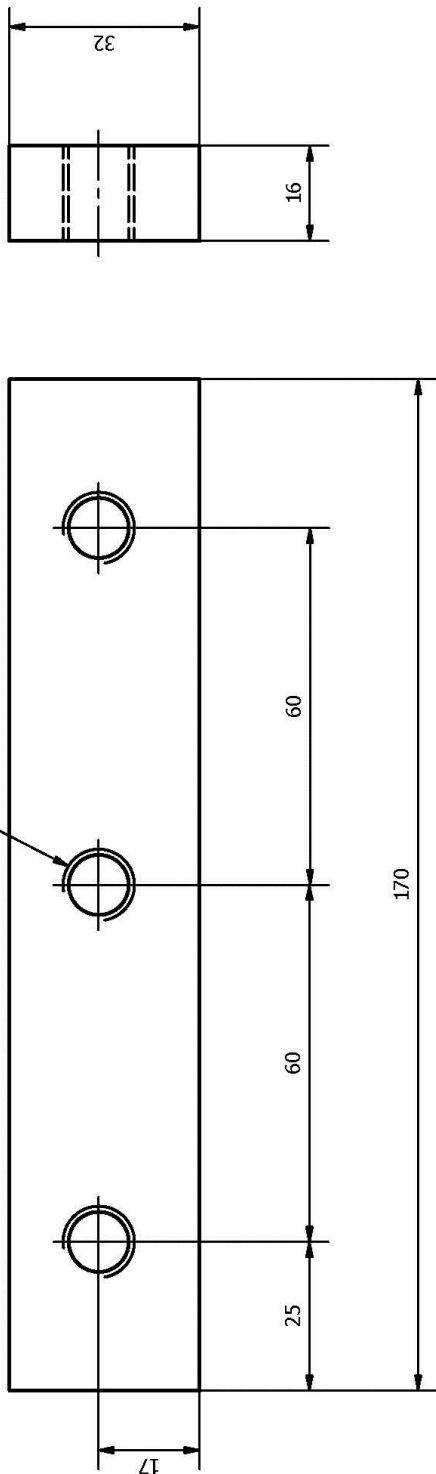
19	ตัวล็อคตั้ง	Ø20x168	SI-37	00IE58-019	1
ผู้จัดทำ	รายการ	ขนาด	วัสดุ	หมายเลข	จำนวน
ผู้เขียน	นายมงคล ศิริวงษ์				
ผู้ออกแบบ	นายอนุชิต วัฒนสุภา				
ผู้ตรวจงาน					
ผู้ตรวจ					
มาตรฐาน	ท้องถิ่นงาน	เครื่องบดย่อย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี		
1:2			หมายเลขแบบ	00IE58-000	



23



M10x1.5-3holes

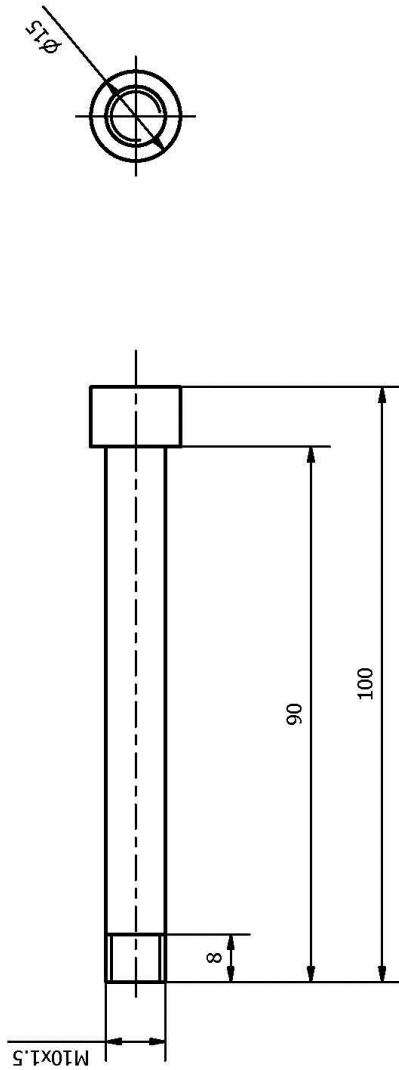


Note
ขบแข็ง 42-45 HRC

23	ไม่ตัดต่อ	3x170x6	SS0C	00IE58-023	1
ชื่อ	รายการ	ขนาด	วัสดุ	หมายเลข	จำนวน
ผู้เขียน	นายสมเจตต์ ศักดิ์สิน				
ผู้ออกแบบ	นายอนุชิต วัฒนะลา				
ผู้ตรวจ					
ผู้ตรวจ					
มาตราส่วน	ชื่อชิ้นงาน	เครื่องโดย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี		
1:1			หมายเลขแบบ	00IE58-000	

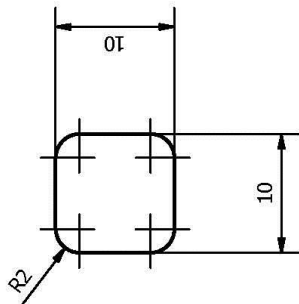
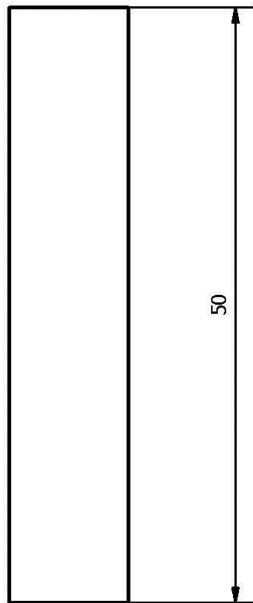


24

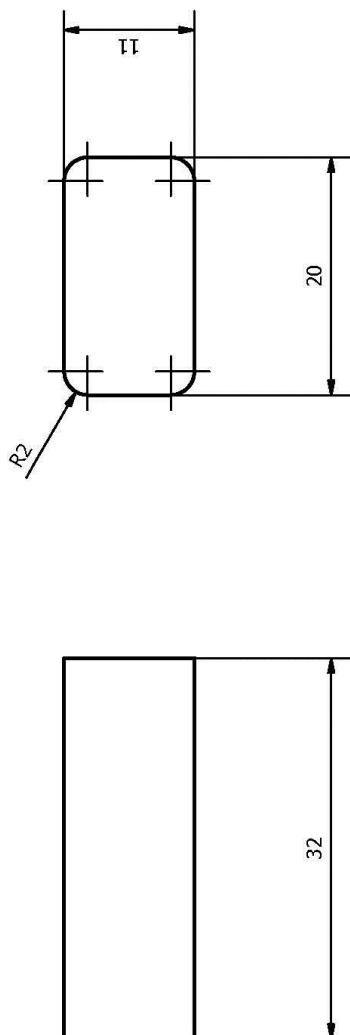


24	ตัวยึดตัวปั๊ม	Ø15x100	SI-37	00IE58-024	1
ผู้จัดทำ	รายงาน	ขนาด	วัสดุ	หมายเลข	จำนวน
ผู้เขียน	นายสมคิด ศรีภักดิ์				
ผู้ออกแบบ	นายสมคิด ศรีภักดิ์				
ผู้ตรวจงาน					
ผู้ตรวจ					
มาตรฐาน	ท้องถิ่นงาน	เครื่องบดย่อย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี		
1:1			หมายเลขแบบ	00IE58-000	

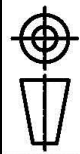
25

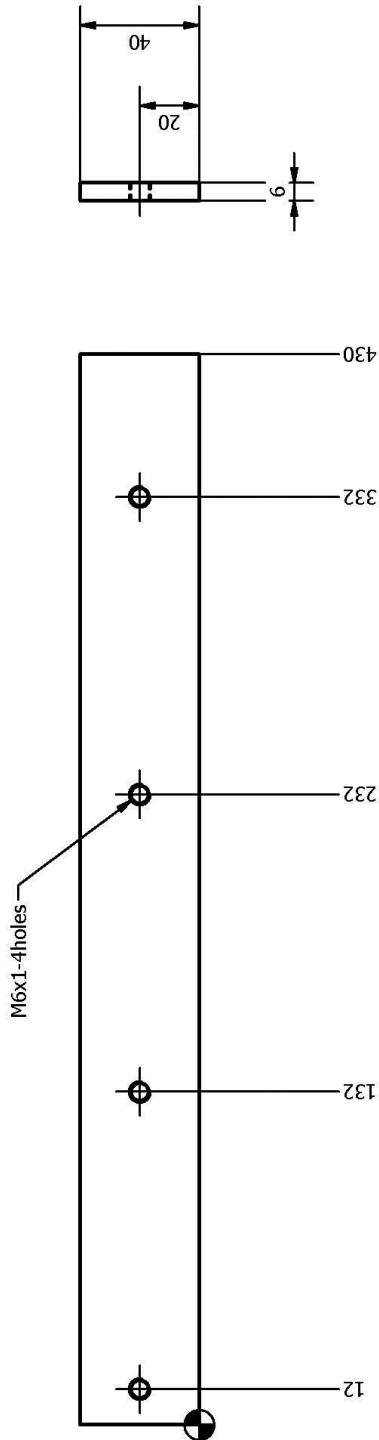


25	แผ่นรอง	10x10x50	SI-3/	00IE58-025	1
ผู้จัดทำ	รายงาน	ขนาด	วัสดุ	หมายเลข	จำนวน
ผู้เขียน	นายสมชาย คุ้มกัน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล			
ผู้ออกแบบ	นายสมชาย คุ้มกัน				
ผู้ตรวจ					
ผู้ตรวจ					
มาตรฐาน	ท้องถิ่น	หมายเลขแบบ 00IE58-000			
2.1	เครื่องประกอบ				



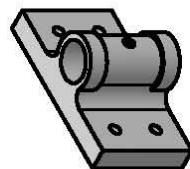
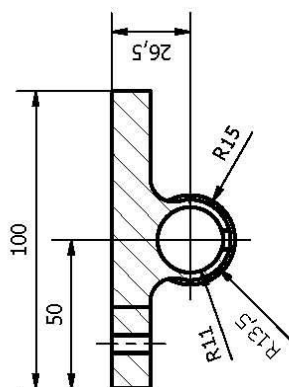
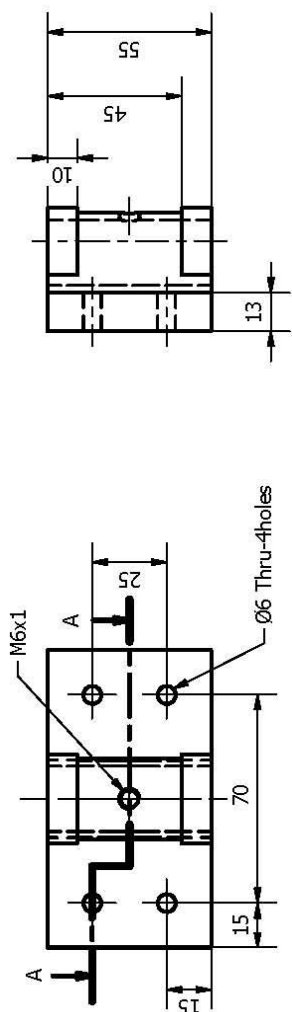
26	เลขชุดใหม่	10x20x50	SI-37	001E58-026	1
ฐาน	รายการ	ขนาด	วัสดุ	หมายเลข	จำนวน
เนื้อเยื่อ	นายมงคล ศรีวงษ์				
เนื้อเยื่อแบบ	นายอัมรินทร์ อิ่มะเสง				
เนื้อผิวจ.มท.					
เนื้อผิวจ.					
มาตรฐาน	ชุดทำงาน				
2-1	เครื่องขุดเยื่อ			001E58-000	





Note
ชุบแข็ง 42-45 HRC

29	แผ่นยึด	40x360x6	S50C	00IE58-029	1
ผู้จัดทำ	รายการ	ขนาด	วัสดุ	หมายเลข	จำนวน
ผู้เขียน	นายมงคล ศิขานนท์				
ผู้ออกแบบ	นายอนุชิต วัฒนธรรมา				
ผู้ตรวจร่าง					
ผู้ตรวจ					
มาตรฐาน	ท้องถิ่นงาน	เครื่องบดย่อย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี		
มาตราส่วน	1:2		คณะวิศวกรรมศาสตร์		
			มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี		
			หมายเลขแบบ		
			00IE58-000		



section A-A

[illegible]

ภาคผนวก ซ

การเผยแพร่ผลงานงานวิจัย



การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการ รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 8

4-6 พฤศจิกายน 2558

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

T R E C 8

บ้านสินทรัพย์
โครงการ 3
ตำบลกาดทอง 4 (ตลาดลาดพร้าว)

ธอส
O.H. BANK
ธนาคารออมทรัพย์สหกรณ์

ptt
Group

IRPC
IRPC Public Company Limited

Thunya
Power Co., Ltd.
RMUTT
IRO



9. คณะกรรมการฝ่ายประเมินผล

9.1 ผู้ช่วยศาสตราจารย์อภิชาติ	สนธิสมบัติ	ประธานกรรมการ
9.2 นายพัฒนพงศ์	สุนันทพจน์	กรรมการ
9.3 นายวินัย	จันทร์เพ็ญ	กรรมการและเลขานุการ
9.4 นางสาวอัญชลี	สีมอ	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

10. คณะกรรมการฝ่ายการเงินและบัญชี

10.1 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปราชญ์	อัศวนรากุล	ประธานกรรมการ
10.2 นางสาวเมธธีรญา	เจตน์คุณาวังษ์	กรรมการ
10.3 นางสาวกานต์ศรีฐา	โพธิ์ศรี	กรรมการ
10.4 นางสาวนงนุช	เทียมวรรณ	กรรมการ
10.5 นางรัศมีภัส	อัศวนรากุล	กรรมการ
10.6 นางสาวฐิตาภัสร์	สิทธิอัมพลวุฒิ	กรรมการและเลขานุการ

11. คณะกรรมการพิจารณาบทความ

11.1 ศ.ดร.ทงเกียรติ	เกียรติศิริโรจน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
11.2 ศ.ดร.ผดุงศักดิ์	รัตนเดโช	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
11.3 ศ.ดร.สัมพันธ์	ฤทธิเดช	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
11.4 รศ.ดร.สิงห์ทอง	พัฒนเศรษฐานนท์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
11.5 รศ.ดร.กฤษณ์ชนม์	ภูมิภักดิพิชญ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
11.6 ผศ.ดร.กษศร	หัสโรค์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
11.7 ผศ.ดร.จักรี	ศรีนันท์ฉัตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
11.8 ผศ.ดร.เจนศักดิ์	เอกบุรณะวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
11.9 ผศ.ดร.นัฐพร	ไชยญาติ	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
11.10 ผศ.ดร.บุญยัง	ปลั่งกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
11.11 ผศ.ดร.บุญฤทธิ	ประสาทแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
11.12 ผศ.ดร.พัฒนาพล	มีนา	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
11.13 ผศ.ดร. ยุทธนา	ทองท่วม	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
11.14 ผศ.ดร.วิรัช	โรยรินทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
11.15 ผศ.ดร.วารุณี	อริยวิริยะนันท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
11.16 ผศ.ดร.สรพงษ์	ภาสุปรีย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
11.17 ผศ.ดร.โสรัตน์	มงคลมะไฟ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
11.18 ผศ.ดร.อำนาจ	เรืองวารี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
11.19 ดร.ชาญวิทย์	บุญช่วย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
11.20 ดร.ธนิช	เรืองรุ่งชัยกุล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
11.21 ดร.ประจวบ	อินระวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
11.22 ดร.ประสพโชค	โพทองคำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
11.23 ดร.พิสิษฐ์	มณีโชติ	มหาวิทยาลัยนเรศวร
11.24 ดร.มนต์ชัย	พินิจจิตรสมุทร	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
11.25 ดร.มนตรี	สมดุยกนก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
11.26 ดร.รัฐศักดิ์	พรหมมาศ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
11.27 ดร.รวิภา	ยังประยูร	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
11.28 ดร.วิเชียร	อุปแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



11.29 ดร.วรจิตต์	เศรษฐพงศ์	มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
11.30 ดร.ศักดิ์ชัย	เพ็ชรตรา	มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ
11.31 ดร.ศุภกิจ	วรศิลป์ชัย	ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ
11.32 ดร.สันติ	ไทยยืนวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
11.33 ดร.สำเนียง	องสุพันธุ์กุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
11.34 ดร.สุบิน	หินจันทร์	มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
11.35 ดร.สหัสยา	ทองสาร	มหาวิทยาลัยนเรศวร
11.36 ดร.หทัยทิพย์	นิลสนธิ	มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
11.37 ดร.อนันต์	พงษ์ธฤตพานิช	มหาวิทยาลัยนเรศวร
11.38 ดร.อนุสรณ์	แสงประจักษ์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
11.39 ดร.อำพล	อาภาณกร	สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ (องค์การมหาชน)
11.40 ผศ.ปัญญาธิ	นิยมवास	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
11.41 อาจารย์วราคม	วงศ์ชัย	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
11.42 อาจารย์ยอติศร	ถมยา	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
11.43 อาจารย์พุดพิงค์	เกิตพิพัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

12.คณะกรรมการพิจารณานวัตกรรมด้านพลังงานสู่ชุมชน

12.1 คุณโกศล	แสงทอง	ประธานกลุ่มรวมใจตามรอยพ่อ จ.เพชรบุรี
12.2 คุณดรุณพร	กมลพัส	นักวิชาการอิสระ
12.3 คุณพุทธพร	ประवालพฤกษ์	นักวิชาการอิสระ
12.4 คุณพิสาร	หมื่นไกร	นักวิชาการอิสระ
12.5 คุณวิสูตร	ยังพลพันธ์	นักวิชาการอิสระ
12.6 คุณสุภรัตน์	ฤทธิชัย	นักวิชาการอิสระ
12.7 นายวสัน	ดอนชัย	นายก อบต.ท่ามะนาว จ.ลพบุรี

สารบัญ

CF 012	อิทธิพลของขนาดบดผงอนุภาคเศษพืชเหลือใช้จากงานเกษตรกรรมสำหรับอัดขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล อนันท์ มีมนต์, ศุภเอก ประมูลมาก และ นายจิรวัฒน์ ใจอู่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	95-98
CF 013	การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษเหลือทิ้งนมหวาน จินตนา ทองเอี้ยว, บุญญฤทธิ์ เผ่าเพ็ง และ พงษ์ศักดิ์ นพรัตน์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี	99-102



อิทธิพลของขนาดบดผงอนุภาคเศษพืชเหลือใช้จากงานเกษตรกรรมสำหรับอัดขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล The effect of grounded powder particle of residues from agriculture for compressing the biomass fuel pellets

CF012

ดร.อนันท์ มิมันต์^{1,*}, ผศ.ศุภเอก ประมูลมา¹, และ นายจิรวัฒน์ ใจอยู่²

¹ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

²ภาควิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรม, คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

*Email : anin.memon@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการออกแบบและสร้างเครื่องบดย่อยชีวมวล เพื่อทำการบดย่อย ฟางข้าว ชังข้าวโพด เปลือกถั่วเหลือง และที่เหลือด้วยตะแกรงขนาด 3 มิลลิเมตร และนำมาคัดแยกผงบดให้ได้ขนาด 40, 60 และ 80 Mesh เพื่อศึกษาขนาดผงบดที่มีผลต่อการอัดขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล โดยทำการทดสอบความหนาแน่นเม็ด (Density Pellet) และความหนาแน่นรวม (Bulk density) จากการทดลองอัดขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่พบว่าที่ขนาดผงบดที่ผ่านการบดย่อยด้วยตะแกรง 3 มิลลิเมตร ไม่สามารถอัดขึ้นรูป ฟางข้าว และชังข้าวโพดได้ ที่ขนาดอนุภาค 40 Mesh ไม่สามารถอัดขึ้นรูป ฟางข้าว และชังข้าวโพด ได้สมบูรณ์ และที่ขนาดอนุภาค 60 Mesh ไม่สามารถอัดขึ้นรูปชังข้าวโพดได้ โดยเม็ดเชื้อเพลิงที่ได้ไม่มีความแข็งแรงหักแตกง่าย ในส่วนของขนาดอนุภาค 80 Mesh สามารถอัดขึ้นรูปได้ดีทุกชนิด และจากการทดสอบความหนาแน่นเม็ดและความหนาแน่นรวม พบว่าเม็ดฟางข้าว มีค่าความหนาแน่นเม็ด 1,252 – 1,221 kg/m³ และค่าความหนาแน่นรวม 618 – 628 kg/m³, เม็ดเปลือกถั่วเหลือง มีค่าความหนาแน่นเม็ด 1,200 – 1,301 kg/m³ และค่าความหนาแน่นรวม 601 – 626 kg/m³ และเม็ดที่เหลือมีค่าความหนาแน่นเม็ด 1,098 – 1,233 kg/m³ และค่าความหนาแน่นรวม 608 – 630 kg/m³ ซึ่งเกินไปตามมาตรฐาน DIN 51731 (<1,000 kg/m³) และ DIN EN 14961-2 (<600 kg/m³) กำหนด ในส่วนของชังข้าวโพดมีความหนาแน่นเม็ดและความหนาแน่นรวมต่ำกว่ามาตรฐานเล็กน้อย 996 kg/m³ และ 508 kg/m³ ตามลำดับ

คำสำคัญ: ความหนาแน่นเม็ด, ความหนาแน่นรวม,

Abstract

The purpose of this analysis is to design, and build biomass grinding machine for the grinding of rice straw, corn cob, soybean hull and sawdust with 3 mm sieve. After that, powder sizes were separated according to 40, 60, and 80 Mesh to study the affect in single and bulk density of biomass fuel pellet compression. The test reveals that powder size that go through compression with 3mm sieve cannot be used for the production of pellets made from rice straw, and corn cob. Powder size of 40 Mesh cannot be used for the production of pellets made from rice straw, and corn cob due to imperfection. Powder size at of 60 Mesh cannot be used for the production of pellets made from corn cob due to lack of durability (easily breakdown). However, powder size of 80

mesh can be used for the compression of any raw materials. From the test of single and bulk density, the test reveals that pellet made from rice straw has single density of 1,252-1,221 kg/m³ and bulk density of 618 – 628 kg/m³. Soybean hull pellet has a single density of 1,200 – 1,301 kg/m³ and bulk density of 601 – 626 kg/m³.Sawdust pellet has a single density of 1,098 – 1,233 kg/m³ and bulk density of 608 – 630 kg/m³. All met the standard of DIN 51731 (<1,000 kg/m³) and DIN EN 14961-2 (<600 kg/m³). Corn cob pellet however, has the single and bulk density slightly lower than standard of 996 kg/m³ and 508 kg/m³ accordingly.

Keywords: pellet density, bulk density

1. บทนำ

ชีวมวล (Biomass) เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติที่อยู่ในรูปของสารอินทรีย์และสามารถนำพลังงานที่กักเก็บไว้มานำมาใช้ผลิตพลังงานได้ เช่นเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรือหรือจากจากการกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมการเกษตร [1] แหล่งพลังงานชีวมวลจัดว่าเป็นแหล่งพลังงานที่สามารถใช้ได้โดยไม่หมดถ้านำมาจัดการรักษาสถิตระหว่างการนำมาใช้ และการสร้างคืนให้แก่ธรรมชาติ ประเทศไทยขึ้นชื่อว่าเป็นประเทศเกษตรกรรม และประชากรส่วนใหญ่ประกอบอาชีพการเกษตร มีการเพาะปลูกพืชเกษตรกรรมเชิงพาณิชย์ที่หลากหลาย เช่น ข้าว ข้าวโพด และถั่วเหลือง และจากข้อมูลการพยากรณ์ผลผลิตจากสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ได้พยากรณ์ผลผลิตข้าวในปี 2557/58 จะมีปริมาณ 33,805 ล้านตัน ข้าวโพดจะมีผลผลิต 5.01 ล้านตัน และถั่วเหลือง 51,740 ตัน [2] ซึ่งการเก็บเกี่ยวผลผลิตของพืชเศรษฐกิจกลุ่มนี้จะมีเศษเหลือใช้ปริมาณที่เพียงพอต่อการนำมาผลิตใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับการผลิตพลังงานทดแทนได้

อย่างไรก็ดีการนำเชื้อเพลิงชีวมวลที่เป็นเศษพืชเหลือใช้จากงานเกษตรกรรมมาใช้ประโยชน์โดยตรงนั้นสามารถทำได้ยาก เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ไม่เหมาะสมกับการใช้งาน คือ มีขนาดไม่สม่ำเสมอ มีความชื้นสูงและมีความหนาแน่นต่ำทำให้ต้องใช้พื้นที่ในการจัดเก็บและขนส่งมาก สิ้นเปลืองพลังงานและค่าใช้จ่าย ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่จะแก้ปัญหาดังกล่าวโดยการแปรรูปเป็นเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่ผ่านกระบวนการอัดด้วยแรงดันสูงทำให้มีความหนาแน่นสูง [3,4] และมีขนาดเล็กทำให้สามารถที่จะนำระบบการป้อนเชื้อเพลิงอัตโนมัติมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถกำหนดปริมาณของเชื้อเพลิงได้อย่างแม่นยำ ก่อให้เกิดประสิทธิภาพการ



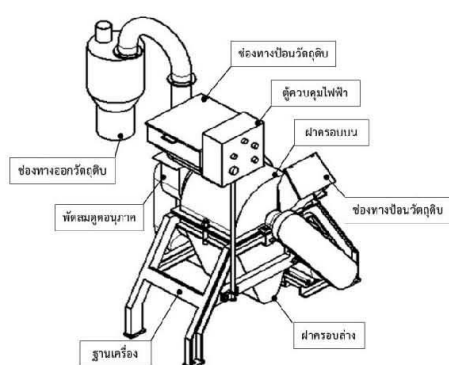
เผาไหม้ที่สูง และสามารถควบคุมได้ ขั้นตอนของการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลประกอบด้วย ขั้นตอนการบดย่อย ขั้นตอนการอบแห้งวัตถุดิบเพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมสำหรับอัดเป็นเม็ด กระบวนการบดย่อยเป็นอีกกระบวนการที่สำคัญที่ทำให้วัตถุดิบมีขนาดอนุภาคที่เท่ากัน และมีขนาดเล็กจะช่วยให้เม็ดเชื้อเพลิงมีความหนาแน่นที่สม่ำเสมอ ลดแรงในการอัดขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นทำการออกแบบและสร้างเครื่องบดย่อยชีวมวล เพื่อทำการบดย่อย ฟางข้าว ชังข้าวโพด เปลือกถั่วเหลือง และซีลี้อย โดยมีแนวทางในการออกแบบให้เหมาะสมสำหรับเป็นโครงการนำร่องโรงงานผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับกลุ่มวิสาหกิจชุมชน กลุ่มธุรกิจขนาดเล็ก และศึกษานาตดงบดที่มีผลต่อการอัดขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล เพื่อนำไปสู่กระบวนการอัดขึ้นรูปที่มีประสิทธิภาพ ทำให้ความหนาแน่นของเม็ดเชื้อเพลิงมีความสม่ำเสมอ และได้มาตรฐาน

2. การออกแบบและการดำเนินงาน

2.1 การออกแบบเครื่องบดย่อยชีวมวล

เพื่อให้เหมาะสมสำหรับเป็นโครงการนำร่องโรงงานผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับกลุ่มวิสาหกิจชุมชน กลุ่มธุรกิจขนาดเล็ก ดังนั้นการออกแบบเครื่องบดย่อยชีวมวล จึงออกแบบตามรูปแบบของเครื่องบดแอมเมอร์มิลล์ ดังรูปที่ 1 ประกอบด้วย ชุดของค้อนหรือใบตี (hammer) จำนวน 64 ใบ ติดตั้งโดยห้อยอยู่กับโรเตอร์ (rotor) ซึ่งติดกับเพลลาขับ (drive shaft) ชุดค้อนตั้งอยู่บนห้องบด (grinding chamber) ซึ่งมีตะแกรง (screen) ห้อยหรือล้อมรอบอยู่ ใช้เครื่องต้นกำลังมอเตอร์ไฟฟ้า 10 แรงม้า ทำการขับเคลื่อนให้เพลลาโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วประมาณ 1,000 รอบต่อนาที เมื่อชุดโรเตอร์หมุน ทำให้ใบตีที่ห้อยอยู่สวิง (swing) หรือกางออกตีเป็นมุมฉากกับโรเตอร์ และพร้อมที่จะตีหรือทุบวัตถุดิบที่เข้ามาในห้องบดให้แตกออกหรือมีขนาดลดลง เมื่อขนาดของวัตถุดิบเท่ากับหรือเล็กกว่าขนาดของรูตะแกรงวัตถุดิบก็จะลอดผ่านรูตะแกรง จากนั้นวัตถุดิบจะถูกดูดออกด้วยชุดพัดลมดูดผง เพื่อบรรจลงในถุงกระสอบที่เตรียมไว้ นอกจากนี้ผู้วิจัยได้เพิ่มเติมชุดใบมีดตัดหญ้า เพื่อรองรับวัตถุดิบที่มีขนาดใหญ่เช่น ชังข้าวโพด เป็นต้น ชุดใบมีดตัดหญ้าประกอบไปด้วยใบมีดสองตัวมีมุมตัดที่ 45 องศา



รูปที่ 1 ลักษณะโครงสร้างเครื่องบดย่อยชีวมวล

2.2 การสร้างเครื่องอบแห้งชีวมวล

ดำเนินการตามทีออกแบบไว้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 เครื่องบดย่อยชีวมวล

3 ขั้นตอนและวิธีการทดสอบ

3.1 การทดสอบ

วัตถุดิบที่ใช้ทดสอบบดย่อยได้แก่ ฟางข้าว ชังข้าวโพด เปลือกถั่วเหลือง และซีลี้อย ที่ได้จากการลงพื้นที่เก็บตัวอย่างจาก ตำบลน้ำเลา อำเภอร่องขวาง จังหวัดแพร่ โดยนำมาทดสอบบดย่อยด้วยตะแกรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการทดสอบ 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปคัดแยกขนาดด้วยเครื่องเขย่าเพื่อให้ได้ขนาดผงบดที่ 40, 60 และ 80 Mesh เพื่อนำไปอัดขึ้นรูปเป็นเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล

3.2 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ

3.2.1 การทดสอบความหนาแน่นของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล (Pellet Density)

โดยใช้เครื่องหาความหนาแน่นแบบชั่งวัตถุรวมกับน้ำ นำตัวอย่างมาทำการเคลือบด้วย Petroleum Jelly เพื่อไม่ให้น้ำซึมเข้าไปในตัวอยาง จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักในอากาศ (A) และชั่งในน้ำ (B) จากนั้นคำนวณหาความหนาแน่นของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล ดังสมการที่ 1

$$Q = \frac{A}{A-B} \times d \quad (1)$$

เมื่อ	A	คือ	น้ำหนักในอากาศ (g)
	B	คือ	น้ำหนักในสารละลาย (g)
	D	คือ	ความหนาแน่นของน้ำ (g/cm ³)
	Q	คือ	ความหนาแน่น (g/cm ³)

3.2.2 ทดสอบความหนาแน่นรวม (Bulk density)

โดยนำภาชนะ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 78 mm สูง 60 mm ที่มีน้ำหนักไม่เกิน 100 g มาชั่งน้ำหนักและบันทึกผลของภาชนะ จากนั้นใส่เม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลลงในภาชนะโดยเทจากความสูง 150 mm จากขอบภาชนะ ทำการเคาะ 5 ครั้งจากความสูง 150 mm เพิ่มเม็ดเชื้อเพลิงลงไป ถ้าเกินจากขอบภาชนะให้เอากออก ซึ่งน้ำหนักรวมของภาชนะและเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล จากนั้นคำนวณค่าความหนาแน่นรวม ดังสมการที่ 2

$$\text{Bulk density (kg/m}^3\text{)} = \frac{(\text{weigh of box and sample}) - (\text{weigh of box})}{(\text{volume of box})} \quad (2)$$



4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์

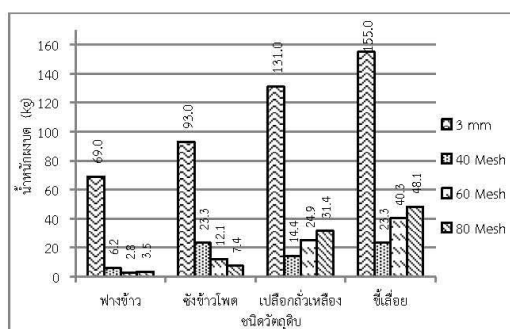
4.1 ผลการทดลองบดย่อย

จากผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบปริมาณการบดย่อยวัตถุดิบทั้ง 4 ชนิด ภายใต้การทดสอบตามตัวแปรที่กำหนด ดังรูปที่ 3 พบว่าชนิดของวัตถุดิบมีผลต่อการบดย่อย โดยเฉพาะ ฟางข้าว ซึ่งมีปริมาณการบดย่อยต่ำที่สุดเนื่องจากลักษณะของฟางข้าวเป็นเส้นยาวมีความเหนียวทำให้การบดย่อยทำได้ยาก นอกจากนี้ฟางข้าวยังมีความหนาแน่นต่ำทำให้การบดวัตถุดิบทำได้ช้า เมื่อพิจารณาน้ำหนักบดหลังการคัดแยก พบว่าได้ปริมาณหลังการคัดแยกน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณการบดย่อย (18% ของปริมาณการบดย่อย)

ในส่วนของซึ่งข้าวโพดมีปริมาณการบดย่อยสูงกว่าฟางข้าวแต่น้อยกว่าเปลือกถั่วเหลืองและซีลี้อย เมื่อพิจารณาน้ำหนักอนุภาคหลังการคัดแยก พบว่าได้ปริมาณหลังการคัดแยกน้อยมาก โดยเฉพาะที่ขนาด 80 Mesh มีปริมาณน้อยที่สุด เนื่องจากซึ่งข้าวโพดมีขนาดใหญ่และมีความแข็งทำให้การลดขนาดทำได้ยาก ส่งผลให้สามารถคัดแยกขนาดผงที่ 40, 60 และ 80 Mesh ได้น้อย (46% ของปริมาณการบดย่อย) เนื่องจากซึ่งข้าวโพดมีความเปราะทำให้ง่ายต่อการบดย่อยด้วยการทุบหรือตี แต่ขนาดซึ่งข้าวโพดยังมีขนาดใหญ่กว่าเปลือกถั่วเหลืองและซีลี้อยทำให้ใช้เวลาในการบดย่อยมากกว่า

ในส่วนของเปลือกถั่วเหลืองมีปริมาณการบดย่อยมากกว่าฟางข้าว และซึ่งข้าวโพด เพราะลักษณะของเปลือกถั่วเหลืองมีขนาดเล็กและเปราะทำให้บดย่อยได้ง่ายกว่า เมื่อนำไปคัดแยกขนาดสามารถแยกขนาดผงพบว่าได้ปริมาณหลังการคัดแยกมากกว่า ฟางข้าว และซึ่งข้าวโพด (54% ของปริมาณการบดย่อย) เนื่องจากเปลือกถั่วเหลืองมีขนาดเล็ก ลักษณะเป็นเปลือกบาง มีความเปราะ ทำให้เปลือกถั่วเหลืองสามารถบดย่อยได้ง่าย โดยเฉพาะวิธีการทุบหรือตี

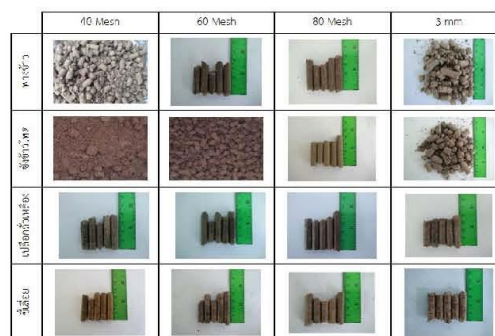
ซีลี้อยมีปริมาณการบดย่อยสูงที่สุดและสามารถนำมาคัดแยกขนาดผงที่ 40, 60 และ 80 Mesh ได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับวัตถุดิบทั้ง 4 ชนิด (72% ของปริมาณการบดย่อย) เนื่องจากซีลี้อยมีขนาดเล็ก หรือบางส่วนอาจมีขนาดเล็กกว่ารูตะแกรงทำให้ใช้เวลาในการบดย่อยน้อย



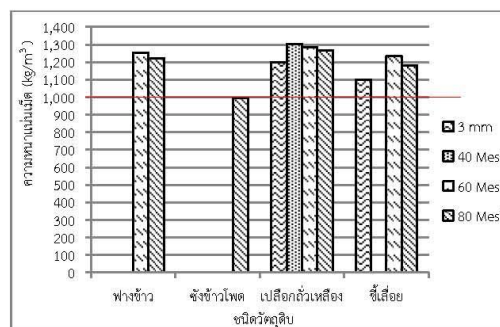
รูปที่ 3 กราฟเปรียบเทียบปริมาณการบดย่อยวัตถุดิบทั้ง 4 ชนิด และผลการคัดแยกขนาดผง 40, 60 และ 80 Mesh

เมื่อนำผงบดที่ทำการบดย่อยและคัดแยกขนาดมาอัดเม็ดเป็นเชื้อเพลิงชีวมวล พบว่าไม่สามารถอัดขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงภายใต้ตัวแปรที่กำหนดได้ทุกตัวแปร ดังรูปที่ 4 ขนาดผงบดที่ผ่านการบดย่อยด้วยตะแกรงขนาด 3 mm ไม่สามารถอัดขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงจากฟางข้าว และซึ่งข้าวโพดได้ ที่ขนาดผงบด 40 Mesh ไม่สามารถอัดขึ้นรูป ฟางข้าว และซึ่ง

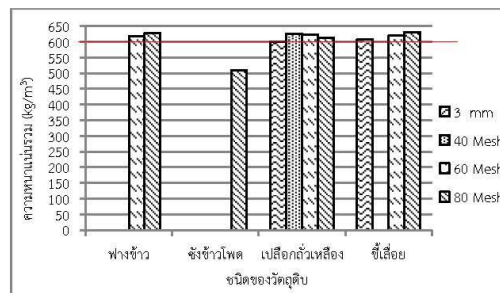
ข้าวโพดได้สมบูรณ์ และที่ขนาดผงบด 60 Mesh ไม่สามารถอัดขึ้นรูปซึ่งข้าวโพดได้ เนื่องจากเม็ดเชื้อเพลิงที่ได้ไม่มีความแข็งแรงหักแตกง่าย ที่ขนาดผงบด 80 Mesh สามารถอัดขึ้นรูปวัตถุดิบได้ทุกชนิด และพบว่าความยาวของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลมีความยาวอยู่ระหว่าง 20 - 40 มิลลิเมตร



รูปที่ 4 แสดงเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลหลังการอัดขึ้นรูปด้วยขนาดอนุภาคต่างๆ



รูปที่ 5 กราฟแสดงผลการทดสอบความหนาแน่นของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลของขนาดผงต่างๆจากชีวมวลทั้ง 4 ชนิด



รูปที่ 6 กราฟแสดงผลการทดสอบความหนาแน่นรวมของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลของขนาดผงต่างๆ จากชีวมวลทั้ง 4 ชนิด

ผลการทดสอบความหนาแน่นของเม็ดเชื้อเพลิงแสดงดังรูปที่ 5 พบว่าค่าความหนาแน่นแต่ละขนาดผงบดมีค่าต่างกันเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลทั้ง 4 ชนิด กับมาตรฐาน DIN 51731 ที่กำหนดมาตรฐานคุณภาพเม็ดเชื้อเพลิงในโซนยุโรป ซึ่งกำหนดความหนาแน่นเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลควรมีค่ามากกว่า 1,000 kg/m³ [5]



พบว่าเม็ดซังข้าวโพดมีความหนาแน่นต่ำกว่ามาตรฐานกำหนดเล็กน้อย (996 kg/m^3) ในส่วนของเม็ดฟางข้าว เม็ดเปลือกข้าวเหลือง และเม็ดซีลี้อยมีความหนาแน่นเม็ดตามมาตรฐานกำหนด

ในการทดสอบความหนาแน่นรวมของเม็ดเชื้อเพลิงแสดงดังรูปที่ 6 พบว่าค่าความหนาแน่นรวมของแต่ละขนาดผงบดมีค่าต่างกันเล็กน้อย เช่นเดียวกับความหนาแน่นของเม็ดเชื้อเพลิงซีลี้อย และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นของเม็ดเชื้อเพลิงซีลี้อยทั้ง 4 ชนิด กับมาตรฐาน DIN EN 14961-2 ซึ่งกำหนดความหนาแน่นรวมของเม็ดเชื้อเพลิงซีลี้อยควรมีค่ามากกว่า 600 kg/m^3 [6] พบว่าเม็ดซังข้าวโพดมีความหนาแน่นรวมต่ำกว่ามาตรฐานกำหนด ในส่วนของเม็ดฟางข้าว เม็ดเปลือกข้าวเหลือง และเม็ดซีลี้อยมีความหนาแน่นรวมตามมาตรฐานกำหนด

5 สรุปผล

จากการทดสอบบดย่อยฟางข้าว ซังข้าวโพด เปลือกข้าวเหลือง และซีลี้อย ด้วยตะแกรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร และนำไปคัดแยกขนาดผงบดที่ 40, 60 และ 80 Mesh พบว่าชนิดของวัตถุดิบมีผลต่อการบดย่อย โดยเฉพาะ ฟางข้าว ซึ่งมีปริมาณการบดย่อยต่ำที่สุดเนื่องจากลักษณะของฟางข้าวเป็นเส้นยาวมีความเหนียวทำให้การบดย่อยทำได้ยาก จากการแยกขนาดผงบดพบว่าได้ปริมาณหลังการคัดแยกน้อยมากคิดเป็น 18% ของปริมาณการบดย่อย ในส่วนของซังข้าวโพดมีปริมาณการบดย่อยสูงกว่าฟางข้าว เนื่องจากซังข้าวโพดมีความเปราะทำให้ง่ายต่อการบดย่อย เมื่อนำมาแยกขนาดผงบดพบว่าได้ปริมาณหลังการคัดแยกคิดเป็น 46% ของปริมาณการบดย่อย ในส่วนของเปลือกข้าวเหลืองมีปริมาณการบดย่อยมากกว่าฟางข้าวและซังข้าวโพด เพราะลักษณะของเปลือกข้าวเหลืองมีขนาดเล็กและเปราะทำให้บดย่อยได้ง่ายกว่า เมื่อนำไปคัดแยกขนาดสามารแยกขนาดผงบดพบว่าได้ปริมาณหลังการคัดแยกมากกว่า ฟางข้าว และซังข้าวโพด คิดเป็น 54% ของปริมาณการบดย่อย และซีลี้อยมีปริมาณการบดย่อยสูงที่สุดและสามารถนำมาคัดแยกขนาดผงบดได้มากที่สุดคิดเป็น 72% ของปริมาณการบดย่อย

เมื่อนำผงบดไปอัดเป็นเม็ดเชื้อเพลิงซีลี้อยตามตัวแปรที่กำหนด พบว่าไม่สามารถอัดขึ้นรูปได้ทุกตัวแปร โดยที่ขนาดผงบดที่ผ่านการบดย่อยด้วยตะแกรง 3 มิลลิเมตร ไม่สามารถอัดขึ้นรูปฟางข้าว และซังข้าวโพดได้ สมบูรณ์ ที่ขนาดอนุภาค 40 Mesh ไม่สามารถอัดขึ้นรูป ฟางข้าว และซังข้าวโพด ได้สมบูรณ์ และที่ขนาดอนุภาค 60 Mesh ไม่สามารถอัดขึ้นรูปซังข้าวโพดได้ เนื่องจากเม็ดเชื้อเพลิงที่ได้ไม่มีความแข็งแรงหักแตกง่าย ในส่วนของขนาดอนุภาค 80 Mesh สามารถอัดขึ้นรูปวัตถุดิบได้ทุกชนิด นอกจากนี้ยังพบว่าความยาวของเม็ดเชื้อเพลิงซีลี้อยมีความยาวเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 20 - 40 มิลลิเมตร

จากการทดสอบความหนาแน่นเม็ด (Density Pellet) และความหนาแน่นรวม (Bulk density) พบว่าเม็ดเชื้อเพลิงซีลี้อยจากฟางข้าว เปลือกข้าวเหลือง และซีลี้อยมีความหนาแน่นเม็ด และค่าความหนาแน่นรวม ตามมาตรฐาน DIN EN 51731 และ มาตรฐาน European Standard EN 14961-2 กำหนด (Density Pellet: $\geq 1,000 \text{ kg/m}^3$, Bulk density: $\geq 600 \text{ kg/m}^3$) โดยเม็ดฟางข้าว มีค่าความหนาแน่นเม็ด $1,252 - 1,221 \text{ kg/m}^3$ และค่าความหนาแน่นรวม $618 - 628 \text{ kg/m}^3$ เม็ดเปลือกข้าวเหลือง มีค่าความหนาแน่นเม็ด $1,200 - 1,301 \text{ kg/m}^3$ และค่าความหนาแน่นรวม $601 - 626 \text{ kg/m}^3$ และเม็ดซีลี้อยมีความหนาแน่นเม็ด $1,098 - 1,233 \text{ kg/m}^3$ และค่าความหนาแน่นรวม $608 - 630 \text{ kg/m}^3$ ในส่วนของซังข้าวโพดมีความหนาแน่นเม็ดและความหนาแน่นรวมต่ำกว่ามาตรฐานเล็กน้อย 996 kg/m^3 และ 508 kg/m^3 ตามลำดับ

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย

- [1] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน, "ชีวมวล", [ออนไลน์] สืบค้นจาก www.eppo.go.th/engy/Load/ET08.pdf,
- [2] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2558. สถานการณ์สินค้าเกษตรที่สำคัญและแนวโน้ม ปี 2558 [ออนไลน์] สืบค้นจาก http://www.oae.go.th/download/document_tendency/journalofecon2558.pdf
- [3] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน,กระทรวงพลังงาน. นโยบายพลังงาน. วรสาร. ออนไลน์. เข้าถึงได้จาก <http://www.eppo.go.th/vrs/VRS102.pdf>
- [4] ณัฐพงษ์ ประภากร และคณะ. 2555. คุณสมบัติของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากเปลือกทุเรียนปัดส ฟางข้าว เศษพืชเหลือใช้จากข้าวโพด และเหล้ามันสำหรับผลิต. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26 ตุลาคม 2555 จังหวัดเชียงราย
- [5] DIN (Deutsches Institut für Normung e.V.). 1996. Din 51731: testing of solid fuels e compressed untreated wood e requirements and testing (German version);.
- [6] DIN (Deutsches Institut für Normung e.V.). 2010. Din 14961-14962: solid biofuels - fuel specifications and classes - part 2: wood pellets for non-industrial use (draft, German version);.



ดร.อนันต์ มีมนต์
อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี