

บทที่ 3
การออกแบบเครื่องลอกเมือกกาแฟอาราบิก้า

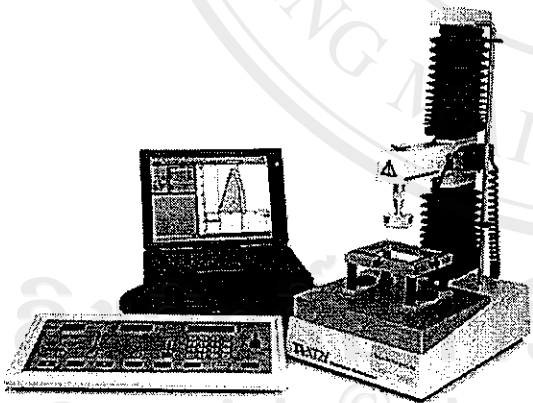
3.1 หลักการออกแบบ

การวิจัยและพัฒนาเครื่องจักรกลสำหรับการลอกเมือกกาแฟเพื่อทดแทนวิธีการหมักธรรมชาตินั้น ในต่างประเทศได้มีการพัฒนาขึ้นหลายรูปแบบ ซึ่งแต่ละแบบมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป สำหรับประเทศไทยเกษตรกรส่วนใหญ่ยังใช้วิธีการลอกเมือกกาแฟแบบเดิมอยู่ และยังไม่มียางงานการศึกษาเครื่องจักรกลสำหรับการลอกเมือกกาแฟ งานวิจัยนี้ในส่วนของ การออกแบบเครื่อง ได้มีการตรวจเอกสารรวบรวมลักษณะการทำงานของเครื่องลอกเมือกกาแฟแบบต่างๆ และได้ทำการสรุปข้อดีและข้อเสีย เพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการออกแบบ โดยแสดงไว้ในตารางที่ 3.1

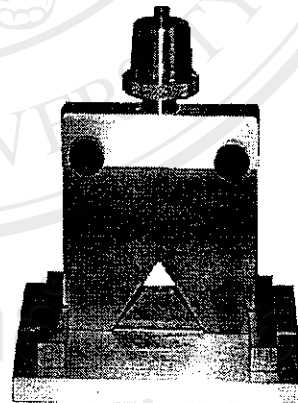
ตารางที่ 3.1 ข้อดีและข้อเสียของเครื่องลอกเมือกกาแฟแบบต่างๆ

ชนิดของเครื่องลอกเมือกกาแฟ	ข้อดี	ข้อเสีย
1.Cafepro	ใช้ต้นกำลังต่ำ (3 แรงม้า) และปริมาณน้ำน้อย เนื่องจากใช้สารเคมีช่วยในการย่อยสลายเมือกกาแฟ	คุณภาพของเมล็ดกาแฟที่ได้มีคุณภาพต่ำและมีต้นทุนค่าใช้จ่ายเพิ่มในส่วนของสารเคมีที่ใช้
2.Hess Washer ชนิด Standard Type และ Screw Type	ใช้ต้นกำลังต่ำ (3 แรงม้า) และปริมาณน้ำน้อย ช่วยในการล้างเมือกกาแฟที่หลุดออกจากเมล็ด	ใช้พื้นที่ในการติดตั้งมาก เนื่องจากลักษณะของเครื่องมีรูปร่างเป็นรางยาว
3. Haes Washer	ใช้ต้นกำลังต่ำ (1 แรงม้า) ประหยัดเนื้อที่ในการติดตั้ง เนื่องจากเครื่องมีลักษณะทรงแนวตั้ง	การลอกเมือกจากเมล็ดกาแฟไม่สมบูรณ์ ความสามารถในการผลิตต่ำและใช้ปริมาณน้ำมากในการทำงาน
4.Aquapulper	สามารถปอกเปลือกนอกและลอกเมือกกาแฟได้ในเวลาเดียวกัน	คุณภาพของเมล็ดกาแฟที่ได้ไม่ดี มีเมล็ดแตกและเกิดบาดแผลขึ้นที่ผิวของเมล็ดซึ่งมีผลต่อคุณภาพของสารกาแฟและเครื่องใช้ต้นกำลังสูง

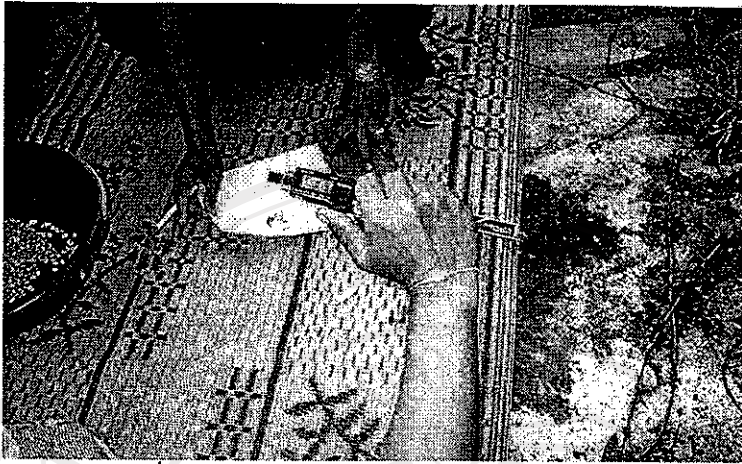
เนื่องจากการผลิตสารกาแฟอาราบิก้าใช้การผลิตแบบวิธีเปียก (Wet Method) ซึ่งมีการผลิตหลายขั้นตอน ตั้งแต่การปอกเปลือกนอก การลอกเมือก การลดความชื้น การสีเปลือกชั้นใน หรือการสีกาแฟกะลา การคั่วกาแฟและการบดกาแฟ พร้อมทั้งจะจำหน่ายต่อไป ดังนั้นในการออกแบบเครื่องจักรพิจารณารูปทรงที่ประหยัดเนื้อที่ในการติดตั้ง สามารถทำงานร่วมกับเครื่องจักรกลในขั้นตอนอื่นได้เป็นขบวนการผลิต และจากการตรวจเอกสารทำให้สรุปได้ว่าการลอกเมือกกาแฟด้วยวิธีให้เมล็ดกาแฟเกิดการขัดสีกัน จะช่วยลดปริมาณการใช้น้ำลงและใช้เวลาน้อยกว่าวิธีการหมักธรรมชาติ (Silvetz and Desrosier, 1979) ดังนั้นจึงพิจารณาออกแบบวิธีการลอกเมือกกาแฟโดยให้หลักการให้เกิดการขัดสีที่ผิวของเมล็ดกาแฟทำให้เมือกที่หุ้มรอบเมล็ดหลุดออก ใช้สกรูลำเลียงเมล็ดกาแฟขึ้นในแนวตั้งเพื่อเป็นการประหยัดเนื้อที่ในการทำงาน และทำให้เมล็ดกาแฟถูกขัดสีอย่างทั่วถึงส่งผลให้เมือกกาแฟหลุดออกอย่างสม่ำเสมอ ใช้น้ำเป็นตัวหล่อลื่นเมล็ดกาแฟขณะเคลื่อนที่และพาเศษเมือกกาแฟรวมถึงวัสดุอื่นออกจากเมล็ดอย่างทั่วถึงทางรอบๆ ผนังห้องลอกเมือกกาแฟ ในขั้นต้นได้มีการนำตัวอย่างเมล็ดกาแฟมาทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อหาค่า Bulk density ของกาแฟอาราบิก้า หาค่าแรงเฉือนที่ทำให้เมือกกาแฟฉีกขาดและค่าแรงเฉือนที่ทำให้เมล็ดกาแฟแตกหักโดยใช้เครื่อง Texture analysers รุ่นTA-XT2I พิกัด 25 ก.ก. ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 3.1 และ 3.2 หาขนาดเฉลี่ยของเมล็ดกาแฟอาราบิก้าโดยโดยใช้เวอร์เนียร์คาลิเปอร์ดิจิตอลดังรูปที่ 3.3 เพื่อนำข้อมูลไปใช้ในการออกแบบเครื่อง



รูปที่ 3.1 เครื่อง Texture analysers รุ่นTA-XT2I



รูปที่ 3.2 หัวกดเมล็ดกาแฟ
ทำมุมเอียงกับแนวราบ 52°



รูปที่ 3.3 การวัดขนาดเมล็ดกาแฟอาราบิก้า

3.2 การออกแบบ

เครื่องลอกเมือกกาแฟอาราบิก้าที่ได้ออกแบบขึ้นมีขนาด $1.20 \times 1.325 \times 0.90$ เมตร (รวมชุดโครงสร้าง) ซึ่งได้แสดงภาพตัดแบบเครื่องลอกเมือกกาแฟอาราบิก้าไว้ในรูปที่ 3.4 โดยมีส่วนประกอบและหน้าที่ดังนี้

3.2.1 ห้องสกรูลำเลียงกาแฟ (A) ทำหน้าที่ลำเลียงเมล็ดกาแฟที่ป้อนเข้าเครื่องเข้าสู่ห้องลอกเมือกกาแฟในแนวตั้ง

- ห้องสกรูลำเลียง ทำจากท่อเหล็กขนาดความหนา 4.5 มม. เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 156.2 มม. สูง 230 มม. (รูปที่ 3.5)

- ชุดสกรูลำเลียง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบสกรู 150 มม. ซึ่งเป็นขนาดที่ทำให้ระยะช่องว่างระหว่างปลายใบสกรูกับผนังห้องน้อยกว่าขนาดของเมล็ดกาแฟอาราบิก้า (เฉลี่ย $5.34 \times 8.78 \times 12.45$ มม.) เพื่อป้องกันการไหลลงของเมล็ด (รูปที่ 3.6) จากทฤษฎีการลำเลียงโดยสกรูลำเลียงในแนวเอียงที่มากกว่า 20° ระยะพิตช์ที่ใช้ต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับครึ่งหนึ่งของเส้นผ่าศูนย์กลางใบสกรูลำเลียง ดังนั้นในการออกแบบใช้ระยะพิตช์ของใบสกรูเท่ากับ 57.5 มม. (ประมาณ 38% ของเส้นผ่าศูนย์กลางใบสกรูลำเลียง)

3.2.2 ห้องลอกเมือกกาแฟ (B) ออกแบบให้มีขนาดห้องเท่ากับห้องสกรูลำเลียง เมล็ดกาแฟที่เข้าสู่ห้องลอกจะถูกแกนเหล็กซึ่งมีชุดครีบริบคุมเหล็กติดอยู่พาหมุนวน เกิดการขัดสีกันระหว่างเมล็ดกาแฟกับผนังห้องและเมล็ดกาแฟด้วยกันทำให้เมือกหลุดออก โดยแกนเหล็กที่ใช้เป็นท่อกลวงซึ่งออกแบบให้น้ำผ่าน ทำการเจาะรูที่ปลายครีบริบคุมเหล็กเพื่อนำออกทำการหล่อลื่น เมล็ดขณะถูกหมุนวนและพาเมือกกาแฟรวมทั้งเศษวัสดุอื่นออกจากเมล็ดทางผนังห้องลอก

- แกนเหล็ก ทำจากท่อกลวงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.8 มม. ยาว 1.1 เมตร (รูปที่ 3.6)

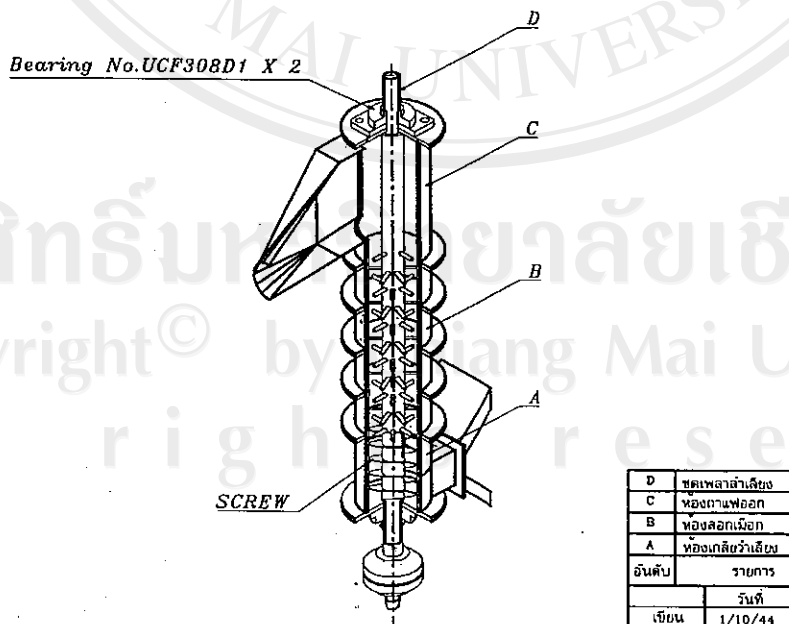
- คุกกี้มดุม ทำจากเพลลาเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.5 ม.ม. ยาว 45 ม.ม. เชื่อมติดอยู่รอบแกนเหล็กทั้งหมด 11 แถว แถวละ 6 คุกกี้มดุม มีระยะห่างระหว่างแถว 48 ม.ม. ที่แกนของคุกกี้มดุมเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 ม.ม. จำนวน 3 คุกกี้มดุม/แถว เพื่อเป็นทางให้น้ำที่ผ่านมาจากแกนเหล็กถูกฉีดออก (รูปที่ 3.6)

- ผนังห้องลอกเมือกกาแฟ ออกแบบให้มีลักษณะเป็นทรงเหล็กทรงกระบอก ทำจากเหล็กเส้นหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 6.35 ม.ม. × 6.35 ม.ม. × ยาว 0.5 เมตร มีระยะห่างระหว่างเหล็กแต่ละเส้น 3.5 ม.ม. เพื่อเป็นช่องว่างให้น้ำพาเศษเมือกกาแฟและวัสดุเจือปนอื่นไหลออก โดยเมล็ดกาแฟไม่สามารถลอดออกได้ (รูปที่ 3.5)

3.2.3 ห้องกาแฟออก (C) เมล็ดกาแฟที่ผ่านห้องลอกเมือกจะเคลื่อนที่เข้าห้องกาแฟออกและไหลออกที่ปลายท่อทางออก โดยมีใบปรับทิศทาง 3 ระดับ ทำหน้าที่ควบคุมการไหลออกของเมล็ด ทำการออกแบบห้องให้มีขนาดเท่ากับสองห้องที่ผ่านมา โดยมีระยะทางจากปลายห้องลอกเมือกถึงปากทางออก 180 ม.ม. ช่องทางออกมีลักษณะเป็นท่อกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 ม.ม. เอียงทำมุม 50° กับแนวตั้ง เพื่อความสะดวกในการลำเลียงเมล็ดกาแฟออกจากเครื่อง (รูปที่ 3.5)

3.2.4 แกนเพลาลำเลียง (D) ทำจากเพลลาเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 ม.ม. เชื่อมติดกับแกนเหล็กด้านบนและด้านล่าง เจาะรูที่ด้านล่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19 ม.ม. เพื่อให้น้ำจากภายนอกผ่านเข้าสู่แกนเหล็กต่อไป (รูปที่ 3.6)

หมายเหตุ รายละเอียดแบบของเครื่องแสดงไว้ในภาคผนวก ค. , การประกอบส่วนต่างๆของเครื่องเข้าด้วยกันและวิธีการป้อนเมล็ดกาแฟเข้าเครื่องแสดงไว้ในรูปที่ 3.7-3.10

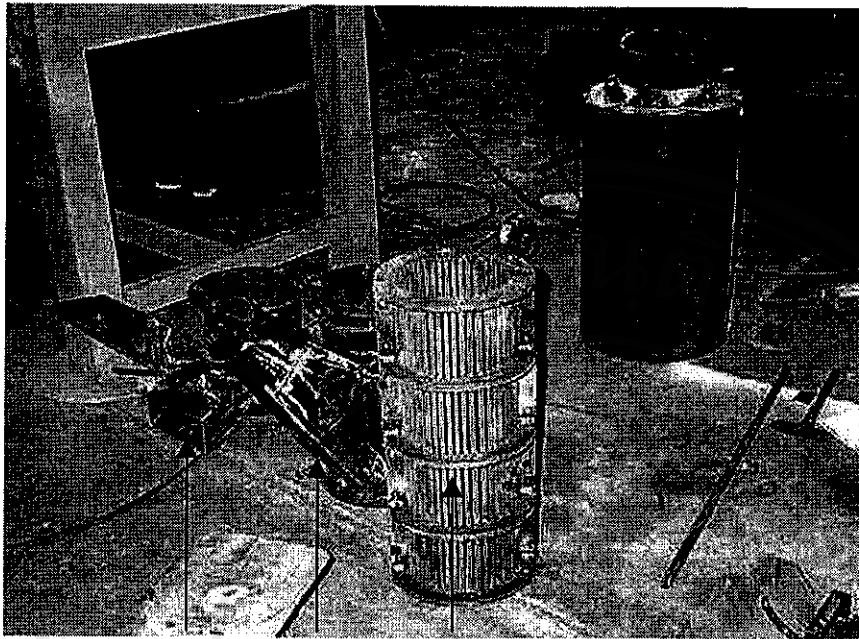


รูปที่ 3.4 ภาพตัดแบบเครื่องลอกเมือกกาแฟอาราบิก้า

เครื่องลอกเมือกกาแฟอาราบิก้ามีความจำเป็นต้องใช้น้ำในการหล่อลื่นเมล็ด และพาเศษเมือกกาแฟรวมทั้งวัสดุอื่นนอกจากเมล็ดทางผนังห้องลอกเมือกกาแฟ โดยน้ำที่ใช้จะถูกดันขึ้นจากทางด้านล่างของเครื่องเข้าสู่แกนเหล็กซึ่งเป็นท่อกลวง ก่อนจะถูกฉีดออกที่ปลายคิริบคุมซึ่งติดอยู่ที่ผนังของแกนเหล็ก ห้องลอกเมือกกาแฟจะมีชุดครอบและท่อทางออกสำหรับให้น้ำที่มีเศษเมือกกาแฟและวัสดุอื่นปะปนอยู่ไหลออกสู่ภายนอก ที่ด้านล่างของเครื่องติดตั้งวาล์วควบคุมแรงดันน้ำเพื่อควบคุมให้น้ำมีแรงดันน้ำที่เหมาะสมกับการทำงานของเครื่อง และมีเกจวัดปริมาณน้ำที่เข้าเครื่องเพื่อเก็บข้อมูลปริมาณการใช้น้ำ

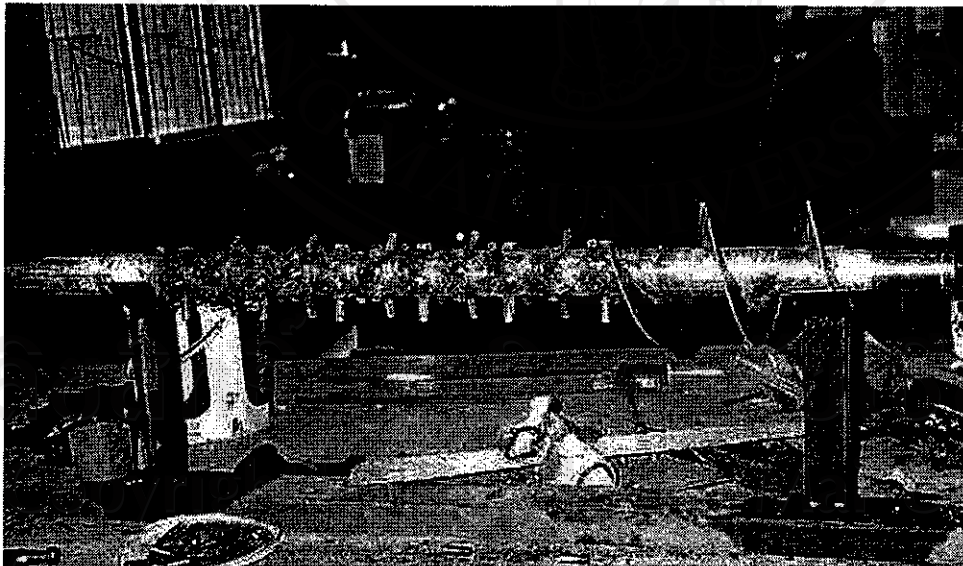


ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 Copyright© by Chiang Mai University
 All rights reserved

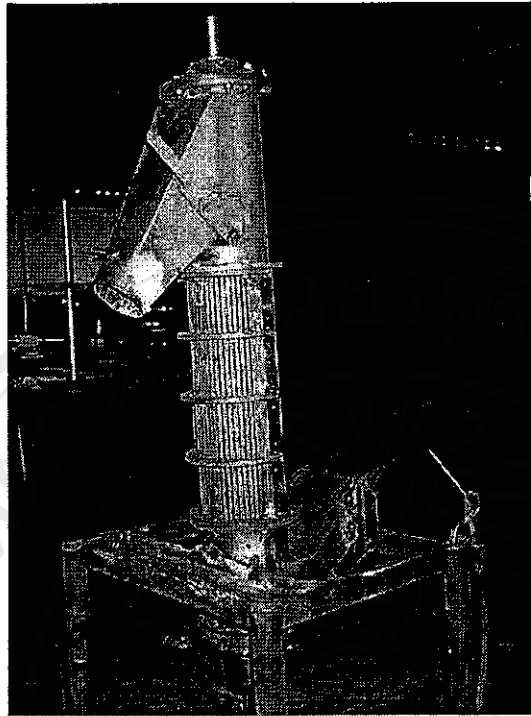


(1) (3) (2)

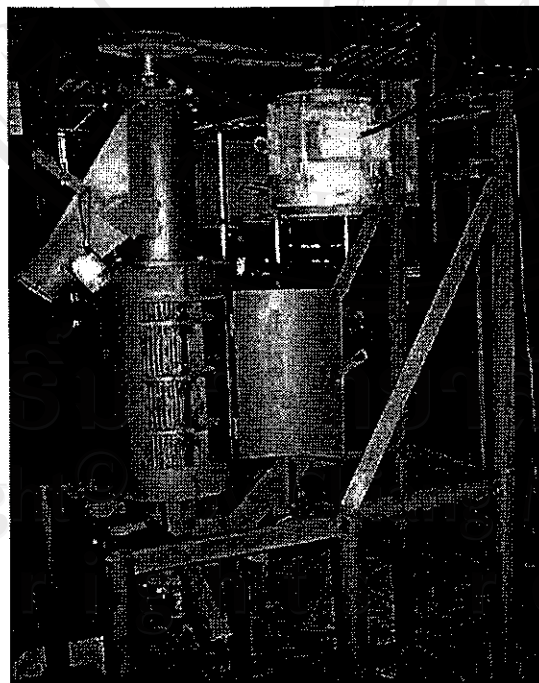
รูปที่ 3.5 ชุดห้องสกรูล้ำเสียง (1), ห้องลอกเมือกกาแฟ (2) และห้องกาแฟออก (3)



รูปที่ 3.6 แกนเพลลาเครื่องลอกเมือกกาแฟอาราบิก้า



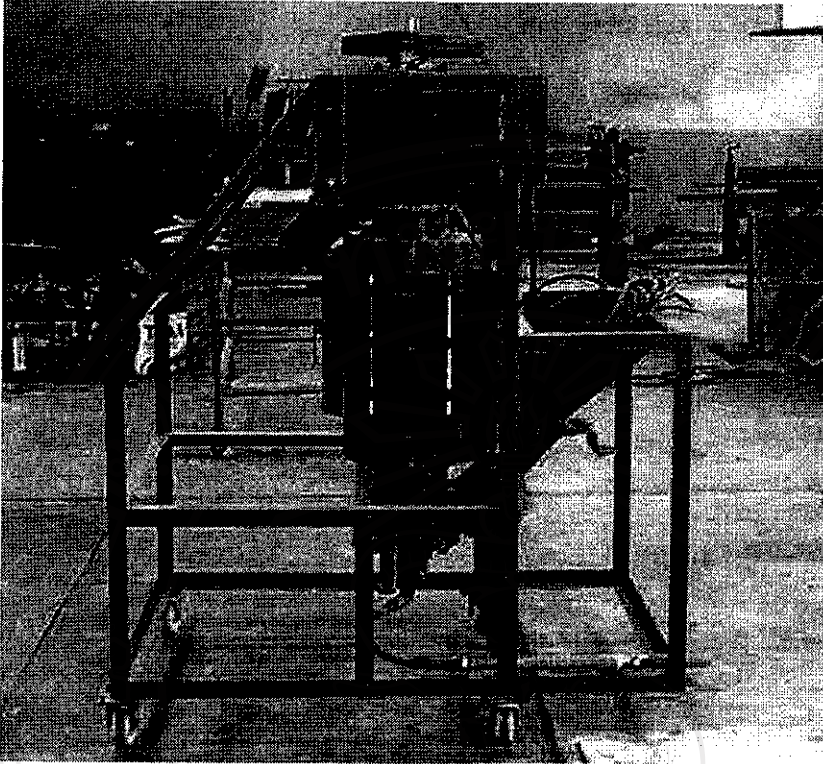
รูปที่ 3.7 ประกอบส่วนต่างๆของเครื่องเข้าด้วยกัน



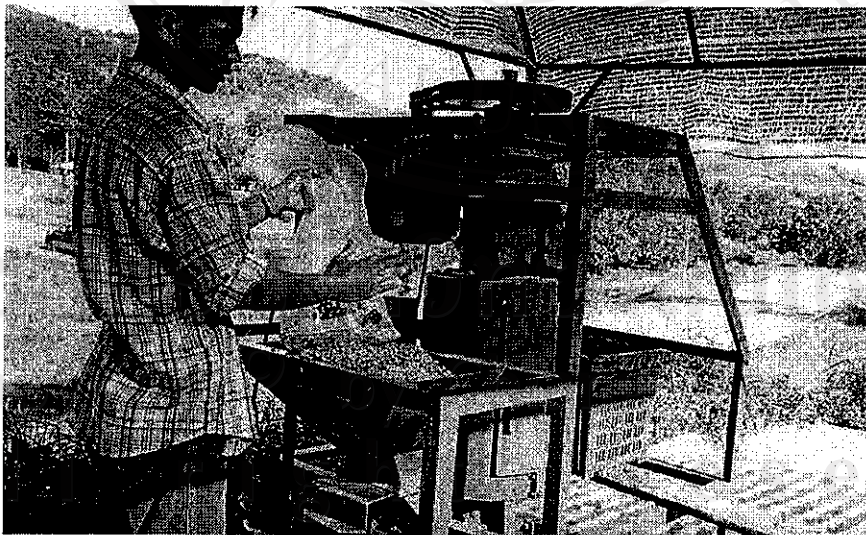
รูปที่ 3.8 ประกอบชุดครอบและติดตั้งมอเตอร์

ลิขสิทธิ์
Copyright
All

มหาวิทยาลัย
Mahachulalongkornrajavidyalaya
University
reserved



รูปที่ 3.9 เครื่องลอกเปลือกกาแฟอาราบิก้าพร้อมทำการทดสอบ



รูปที่ 3.10 การป้อนเมล็ดกาแฟเข้าเครื่อง

3.3 การคำนวณกำลังขับ

3.3.1 กำลังขับชุดสกรูลำเลียง (P₁)

กำหนดให้ - ความเร็วรอบแกนเพลลาของเครื่องลอกเมื่อกาแพะขณะทำงาน 750 rpm

- เส้นผ่านศูนย์กลางใบสกรูลำเลียง 150 ม.ม.

จากกราฟประสิทธิภาพของ Regan and Henderson (1959) ซึ่งได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก.3 ได้ว่า

$$\text{กำลังขับที่ต้องการ } (P_1) \approx 1.7 \text{ hp} \quad \text{-----}(1)$$

3.3.2 กำลังขับในการลำเลียงเมล็ดกาแพะตั้งแต่ห้องลอกเมื่อจนกระทั่งออกจากเครื่อง(P₂)

จากความสัมพันธ์

$$P_2 = F_2 V_2$$

เมื่อ

P_2 = กำลังที่ต้องการในการลำเลียงกาแพะขึ้น, วัตต์

F_2 = แรงยกเมล็ดกาแพะขึ้นมีค่าเท่ากับน้ำหนักเมล็ดกาแพะและน้ำ, นิวตัน

V_2 = อัตราการเคลื่อนที่ของเมล็ดกาแพะ, เมตร/วินาที

คิดปริมาตรรวมห้องลอกเมื่อกาแพะและห้องชุดกาแพะออกจากความสัมพันธ์

$$\pi/4 \times (D_2^2 - d_2^2) \times h_2$$

เมื่อ

D_2 = เส้นผ่านศูนย์กลางห้องลอกเมื่อกาแพะและห้องกาแพะออก = 156.2 ม.ม.

d_2 = เส้นผ่านศูนย์กลางแกนเพลลา = 50.8 ม.ม.

h_2 = ความสูงห้องลอกเมื่อกาแพะและห้องกาแพะออก

$$= 500 + 180 = 680 \text{ ม.ม.}$$

$$\text{ดังนั้นปริมาตรรวม} = \pi/4 \times (156.2^2 - 50.8^2) \times 680 \text{ ม.ม.}^3$$

$$= 1.165 \times 10^7 \text{ ม.ม.}^3$$

$$= 11.65 \times 10^{-3} \text{ ม}^3$$

จากการทดลองในห้องปฏิบัติการค่า Bulk density ของกาแพะดิบคือ 862.34 ก.ก./ม³

$$\text{ดังนั้น น้ำหนักของกาแพะทั้งหมด} = 11.65 \times 10^{-3} \text{ ม}^3 \times 862.34 \text{ ก.ก./ม}^3$$

$$= 10.05 \text{ ก.ก.}$$

คิด Safety factor เนื่องจากน้ำหนักและเศษวัสดุเจือปน 50% ของน้ำหนักกาแพะทั้งหมด

$$\text{ดังนั้น น้ำหนักกาแพะรวมน้ำและเศษวัสดุเจือปน} = 10.05 + (0.5 \times 10.05) \text{ ก.ก.}$$

$$= 15.075 \text{ ก.ก.}$$

หาความเร็วในการเคลื่อนที่ของเมล็ดกาแพะได้จากระยะพิทช์ของใบสกรูลำเลียง

$$\text{ระยะพิทช์ของใบสกรู} = 57.5 \text{ ม.ม.}$$

$$= 57.5 \times 10^{-3} \text{ ม.}$$

$$\text{นั่นคือ สกรูลำเลียงเคลื่อนที่ 1 รอบ} \quad \text{ได้ระยะทาง} = 57.5 \times 10^{-3} \text{ ม.}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น สกรุลำเลียงเคลื่อนที่ 750 รอบ/นาที ได้ระยะทาง} &= 57.5 \times 10^{-3} \text{ ม.} \times 750 \text{ รอบ/นาที} \\ &= 43.125 \text{ ม./นาที} \\ &= 0.72 \text{ ม./วินาที} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น กำลังขับที่ต้องการ (P}_2\text{)} &= 15.075 \text{ ก.ก.} \times 10 \text{ นิวตัน/ก.ก.} \times 0.72 \text{ ม./วินาที} \\ &= 180.54 \text{ วัตต์} \\ &= 0.15 \text{ แรงม้า} \end{aligned} \quad \text{_____ (2)}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น กำลังขับที่ต้องการทั้งหมด} &= 1.7 + 0.15 \text{ แรงม้า} \\ &= 1.85 \text{ แรงม้า} \end{aligned}$$

คิด Safety factor เนื่องจากปัจจัยอื่น ๆ เช่น แรงเสียดทานระหว่างเมล็ดกาแฟกับผนังเครื่องและ เมล็ดกาแฟด้วยกัน การฉีกของเมล็ดกาแฟซึ่งเกิดจากครีบกวนเมล็ด เป็นต้น 70% ของ กำลังขับทั้งหมด

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น กำลังขับที่ต้องการทั้งหมด} &= 1.85 + (0.7 \times 1.85) \text{ แรงม้า} \\ &= 3.145 \text{ แรงม้า} \end{aligned} \quad \text{_____ (3)}$$

3.4 การคำนวณขนาดของแรงบิดเพลลาและกำลังที่ทำให้เมือกกาแฟฉีกขาด

จากการทดลองในห้องปฏิบัติการเกี่ยวกับคุณสมบัติของเมล็ดกาแฟพร้อมเมือก พบว่า ต้องใช้แรงเฉือนเพื่อให้เมือกกาแฟฉีกขาดประมาณ 25 นิวตัน อุปกรณ์หั่วกตมีมุมเอียงทำมุมกับ แนวราบ 52° (ขนาดของแรงเฉือนที่กระทำกับเมล็ดกาแฟอาราบิก้าสัมพันธ์กับระยะการเคลื่อนที่ ของหั่วกตแสดงไว้ในภาคผนวก ก.2 และนำไปสร้างกราฟได้ดังรูป 3.11-3.12)

$$\text{หาค่าความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นจากความสัมพันธ์} \quad \tau = F/A$$

ขนาดของเมล็ดกาแฟอาราบิก้าโดยเฉลี่ย = $5.34 \times 8.78 \times 12.45$ ม.ม. (ขนาดของเมล็ดกาแฟอาราบิก้าที่ทำการสุ่มวัดแสดงไว้ใน ภาคผนวก ก.1)

$$\text{คิดพื้นที่หน้าตัดด้านที่แคบที่สุดเพื่อให้เกิดความเค้นเฉือนมากที่สุด} = 5.34 \times 8.78 \text{ ม.ม.}^2$$

$$= 4.69 \times 10^{-5} \text{ ม.}^2$$

$$\text{ดังนั้น ความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้น} = 25 / (4.69 \times 10^{-5}) \text{ นิวตัน/ม.}^2$$

$$= 5.33 \times 10^5 \text{ นิวตัน/ม.}^2$$

$$\text{หาค่าแรงบิดจากความสัมพันธ์} \quad T = \tau J / r$$

$$\text{โดยที่} \quad r \text{ คือ รัศมีภายนอกของแกนเพลลา} = 50.8 / 2 \quad \text{ม.ม.}$$

$$= 25.4 \quad \text{ม.ม.}$$

$$= 0.0254 \quad \text{ม.}$$

$$\text{เพราะเหตุว่า เพลลากลม} \quad J = [\pi \times (D^4 - d^4)] / 32 \quad \text{ม.}^4$$

โดยที่ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเพลลา, เมตร

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในเพลลา, เมตร

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad J &= [\pi \times \{(50.8 \times 10^{-3})^4 - (47.8 \times 10^{-3})^4\}] / 32 \\ &= 1.413 \times 10^{-7} \quad \text{ม}^4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad T &= (5.33 \times 10^5 \text{ นิวตัน/ม}^2 \times 1.413 \times 10^{-7} \text{ ม}^4) / 0.0254 \text{ ม.} \\ &= 2.965 \quad \text{นิวตัน*ม.} \end{aligned}$$

$$\text{แรงบิดเพลลาที่ต้องการเพื่อให้เมือกกาแฟฉีกขาด} = 2.965 \quad \text{นิวตัน*ม.}$$

$$\begin{aligned} \text{คิดกำลังที่ใช้จากความสัมพันธ์} \quad P &= 2\pi NT/60 \quad \text{วัตต์} \\ &= (2 \times 3.14 \times 750 \times 2.965) / 60 \quad \text{วัตต์} \\ &= 232.76 \quad \text{วัตต์} \\ &= 0.312 \quad \text{แรงแม่} \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \text{กำลังขับเพลลาที่ใช้เพื่อให้เมือกกาแฟฉีกขาด} \quad 0.312 \quad \text{แรงแม่} \quad \text{_____ (4)}$$

3.5 การคำนวณขนาดของแรงบิดเพลลาและกำลังที่ทำให้เมล็ดกาแฟเกิดการแตกหัก

จากผลการทดลองในห้องปฏิบัติการได้ว่า ต้องใช้แรงเฉือนเพื่อให้เมล็ดกาแฟเกิดการแตกหักประมาณ 350 นิวตัน อุณหภูมิหั่วคดมีมุมเฉียงทำมุมกับแนวราบ 52° (ขนาดของแรงเฉือนที่กระทำกับเมล็ดกาแฟอาราบิก้าสัมพันธ์กับระยะการเคลื่อนที่ของหั่วคดแสดงไว้ในภาคผนวก ก.2 และนำไปสร้างกราฟได้ดังรูป 3.13-3.14)

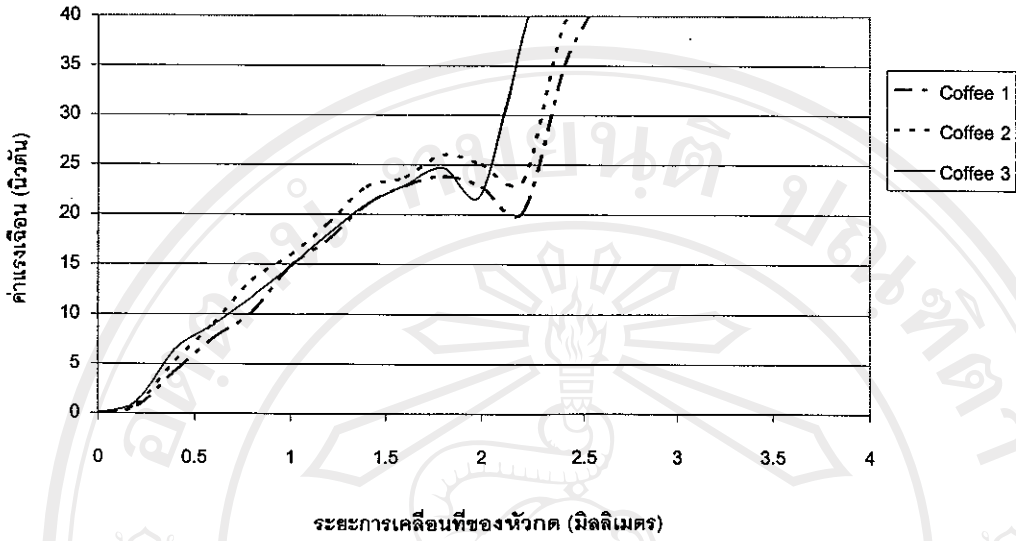
$$\begin{aligned} \text{หาค่าความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นจากความสัมพันธ์} \quad \tau &= F/A \quad \text{นิวตัน/ม}^2 \\ &= 350 / (4.69 \times 10^{-5}) \quad \text{นิวตัน/ม}^2 \\ &= 74.63 \times 10^5 \quad \text{นิวตัน/ม}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{หาค่าแรงบิดจากความสัมพันธ์} \quad T &= \tau J/r \\ &= (74.63 \times 10^5 \text{ นิวตัน/ม}^2 \times 1.413 \times 10^{-7} \text{ ม}^4) / 0.0254 \text{ ม.} \\ &= 41.52 \quad \text{นิวตัน} \times \text{ม.} \end{aligned}$$

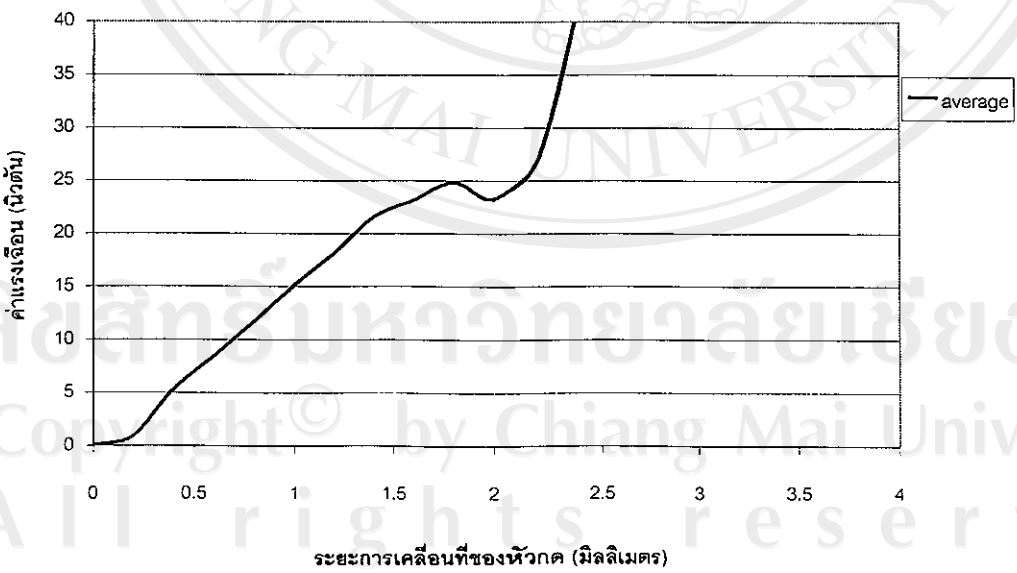
$$\text{ดังนั้น} \quad \text{แรงบิดเพลลาที่ทำให้เมล็ดกาแฟเกิดการแตกหัก} \quad 41.52 \quad \text{นิวตัน} \times \text{ม.}$$

$$\begin{aligned} \text{คิดกำลังที่ใช้จากความสัมพันธ์} \quad P &= 2\pi NT/60 \quad \text{วัตต์} \\ &= (2 \times 3.14 \times 750 \times 41.52) / 60 \quad \text{วัตต์} \\ &= 3,259.32 \quad \text{วัตต์} \\ &= 4.37 \quad \text{แรงแม่} \end{aligned}$$

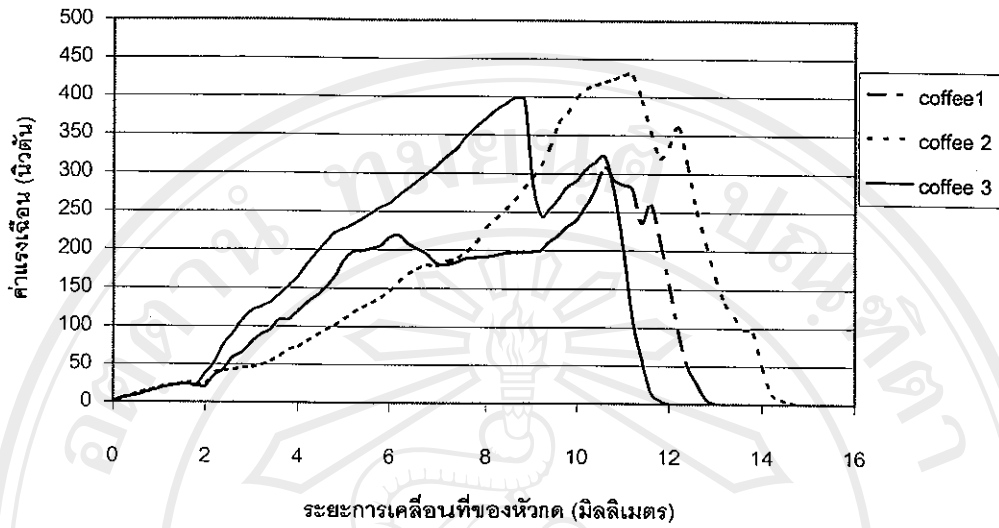
$$\text{ดังนั้น} \quad \text{กำลังขับเพลลาที่ทำให้เมล็ดกาแฟแตกหัก} \quad 4.37 \quad \text{แรงแม่} \quad \text{_____ (5)}$$



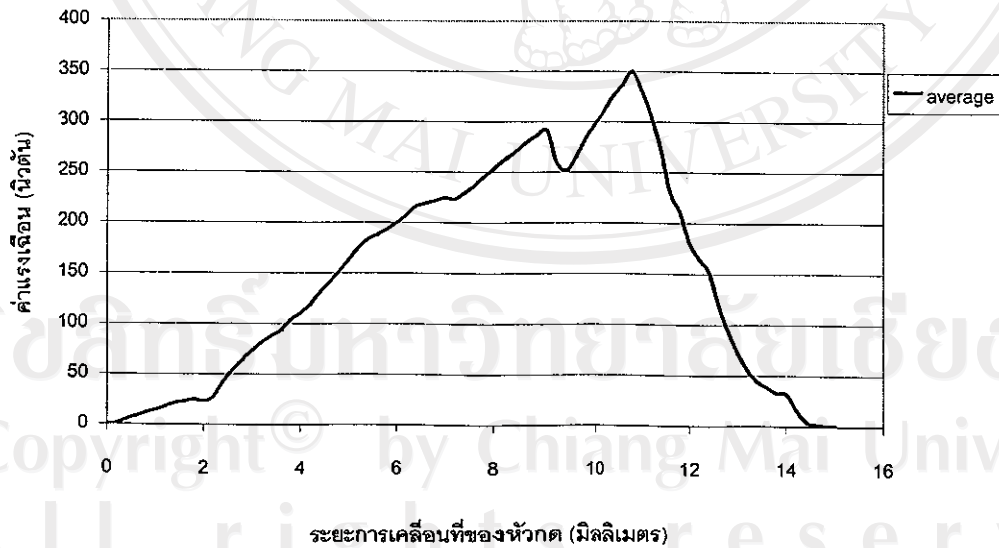
รูปที่ 3.11 กราฟแสดงค่าแรงเฉือนที่ทำให้เมือกกาแฟจืดขาด



รูปที่ 3.12 กราฟแสดงค่าแรงเฉือนเฉลี่ยที่ทำให้เมือกกาแฟจืดขาด



รูปที่ 3.13 กราฟแสดงค่าแรงเจือจางที่ทำให้เมล็ดกาแฟเกิดการแตกหัก



รูปที่ 3.14 กราฟแสดงค่าแรงเจือจางเฉลี่ยที่ทำให้เมล็ดกาแฟเกิดการแตกหัก