



การหาแรงที่ใช้ในการตัดผลผลิตทางการเกษตร Determining the Cutting Force of Agricultural Products

สุนทร สืบคำ¹, บัณฑิต หิรัญสถิตย์พร¹, เสมอขวัญ ตันติกุล¹ และ ระวิน สืบคำ²

Sunate Surbkar¹, Bandit Hiruansthiporn¹, Samerkhwan Tantikul¹ and Rawin Surbkar²

¹คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ถ.เชียงใหม่-พร้าว ต.หนองหาร อ.สันทราย จ.เชียงใหม่ 50290

²คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110

¹Faculty of Engineering and Agro-industry, Maejo University,
Maejo-Phrao Road, Nongharn, Sansai, Chiang Mai 50290 Thailand

²Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Tawan-ok,
Bangpra, Sriracha, Chonburi 20110 Thailand

*E-mail: sunate@mju.ac.th Tel: 6653-878123 Fax: 6653-498902

บทคัดย่อ

การหาค่าแรงตัด พลังงานตัด และกำลังเฉือนของผลผลิตทางการเกษตรสามารถหาได้ทั้งทางอ้อมและทางตรง การหาค่าทางอ้อมมี 3 วิธี ได้แก่ วิธีสถิตย์โดยใช้ความเร็วการตัดเข้าใกล้ศูนย์ หลักการนี้เป็นการเพิ่มแรงลงบนใบมีดที่วางอยู่บนวัสดุไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งวัสดุขาด วิธีกึ่งสถิตย์ใช้ความเร็วการตัดต่ำด้วยการใช้เครื่องทดสอบเอนกประสงค์หรืออุปกรณ์ที่มีหลักการคล้ายกัน และวิธีจลน์โดยใช้ความเร็วการตัดเข้าใกล้ความเร็วที่ตัดจริง เป็นการหาแรงตัดด้วยหลักการเพนดูลัม โดยใช้หลักการแรงกระแทก จากการศึกษาพบว่างานวิจัยส่วนมากใช้วิธีสถิตย์และวิธีกึ่งสถิตย์เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ของใบมีดที่มีผลต่อการตัด และพบว่าวิธีกึ่งสถิตย์เป็นที่นิยมมากกว่าวิธีสถิตย์ ในส่วนของการหาค่าทางตรงนั้นใช้การวัดค่าแรงบิดและความเร็วรอบด้วยเซนเซอร์จากเพลานะตวัดวัสดุจริง ซึ่งจะได้ค่าที่ถูกต้อง เทียบตรง และเสมือนการตัดที่แท้จริง แต่การใช้และปรับตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์มีความยุ่งยาก ต้องอาศัยความชำนาญในการปฏิบัติเป็นอย่างมาก

คำสำคัญ: แรงตัด พลังงานตัด กำลังเฉือน ผลผลิตทางการเกษตร

ABSTRACT

Determining the cutting force, cutting energy and shear strength of agricultural products can be done by indirect and direct method. For the indirect method, there are 3 different methods which are a Static Method, a Quasi-static Method and a Dynamic Method. The cutting speed from the Static Method approaches zero by means of gradually adding known weight on cutting blade placed over the material. The Quasi-static Method, on the other hand, performs by using low but constant cutting speed via the Universal Testing Machine (UTM) or likewise principle device. While the Dynamic Method bases on approaching the speed of the actual cutting by means of the Pendulum principle with impact forces against the material. As can be seen from reviews, the Static and Quasi-static Methods are more popular in the use of investigating the knife design parameters. However, we found the use of the Quasi-static Method more popular than that of the Static Method. As for the direct method performed by measuring torque and rotational speed of cutting shaft while cutting an actual material which results more precise, more accuracy and more virtual real cuts. However, usage and installation of measuring devices are quite complicated and difficult, requiring expertise in practice.

Keywords: Cutting force, cutting energy, shear strength, agricultural product

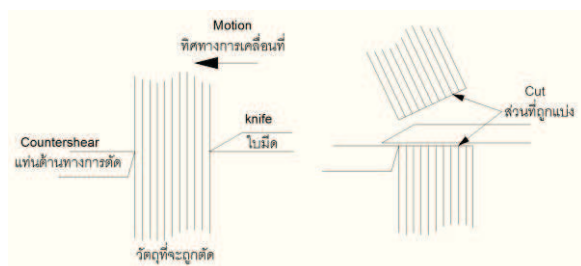
1. บทนำ

ผลผลิตทางการเกษตร (Agricultural products) หมายถึง สิ่งที่ได้จากการเพาะปลูกพืชต่าง ๆ รวมทั้งการเลี้ยงสัตว์และการประมง เพื่อเป็นอาหารของมนุษย์หรือสัตว์ เส้นใย เชื้อเพลิงชีวภาพ ยารักษาโรค และผลิตภัณฑ์อื่น ๆ โดยส่วนใหญ่เป็นวัสดุที่มีความชื้นเป็นองค์ประกอบ ซึ่งอาจมีปริมาณมากถึงร้อยละ 50-80 ของน้ำหนักของวัสดุ ขึ้นอยู่กับชนิดและโครงสร้างของเซลล์ ความชื้นบางส่วนสามารถระเหยสู่บรรยากาศได้ ในขณะที่ผิวของวัสดุที่แห้งมากก็สามารถดูดซับความชื้นจากบรรยากาศได้เช่นกัน บางครั้งจึงเรียกผลผลิตทางการเกษตรว่า “วัสดุที่แลกเปลี่ยนความชื้นได้ดี (Hygroscopic material)” เนื่องจากวัสดุดังกล่าวเป็นวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงความชื้นตามสภาวะแวดล้อมตลอดเวลา

การตัด (Cutting) เป็นวิธีการหนึ่งในการลดขนาดวัสดุ โดยเป็นขบวนการทางกลที่ใช้แบ่งวัสดุออกในแนวเส้น ภายหลังจากที่ทำการตัดวัสดุแล้วต้องการได้วัสดุที่มีขนาดและรูปร่างที่สม่ำเสมอ ส่วนประกอบพื้นฐานของการลดขนาดโดยการตัดได้แก่ ใบมีด (Knife) แท่นด้านทานการตัด (Countershear) และวัสดุที่จะตัด (รูปที่ 1) ในงานวิศวกรรมเกษตรการตัดแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ

1. การตัดแบบกรรไกร (Scissors cut) คือ การตัดที่ทั้งใบมีดและแท่นด้านทานการตัดเคลื่อนที่สวนทางเข้าหาวัสดุที่จะตัด

2. การตัดแบบใบมีด (Knife cut) คือ การตัดที่ใบมีดเคลื่อนที่หาวัสดุที่จะตัดฝ่ายเดียว โดยแท่นด้านทานการตัดจะอยู่กับที่

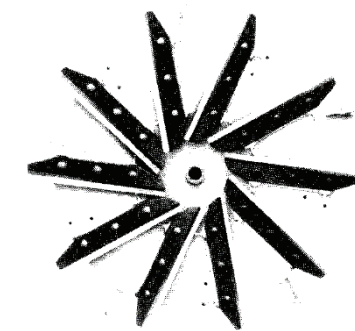


รูปที่ 1 ส่วนประกอบพื้นฐานและหลักการการตัด
(ดัดแปลงจาก [1])

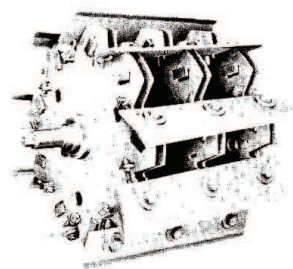
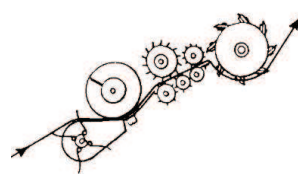
ในการตัดผลผลิตทางการเกษตรกลไกสำคัญที่ทำให้เกิดการตัดไม่ว่าผลผลิตทางการเกษตรจะมีลักษณะเป็นหัวเป็นเส้นใย พืชอาหารสัตว์ หรือผลพลอยได้ทางการเกษตรคือหัวสับ (Cutter head) ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. หัวสับชนิดจานกลม (Flywheel type) หัวสับแบบนี้ (รูปที่ 2 ก) เป็นจานกลมมีใบมีดติดอยู่ในแนวรัศมีทำหน้าที่หลักคือการตัด และยังกวาดส่งวัสดุที่ตัดแล้วส่งออกจากช่องทางออก

2. หัวสับชนิดทรงกระบอก (Cylinder type) หัวสับแบบนี้ (รูปที่ 2 ข) มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกติดใบมีดโดยรอบ จำนวนใบมีดและเส้นผ่านศูนย์กลางจะกำหนดขนาดของวัสดุที่ต้องการ ใบมีดควรติดตั้งในแนวตรงหรือเอียงทำมุมกับแนวแกนก็ได้เพื่อลดแรงบิดที่เพลาลูกกลิ้ง



(ก)



(ข)

รูปที่ 2 ชนิดของการตัดวัสดุเส้นใย (ก) แบบทรงกระบอก และ (ข) แบบจานกลม [1]

2. การหาแรงที่ใช้ในการตัดผลผลิตทางการเกษตร

แรงตัดผลผลิตทางการเกษตรเป็นประโยชน์สำหรับนำไปหาพารามิเตอร์ที่สำคัญคือกำลังงานที่ใช้ในการตัด เพื่อนำค่าไปออกแบบต้นกำลังในเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในการตัดดังสมการ

$$P = \frac{2\pi Tn}{60} \quad (1)$$

โดย P = กำลังที่ใช้ในการตัด (W)

T = แรงบิด (N-m)

n = ความเร็วรอบในการหมุน (rpm)

แรงบิด (Torque) คือแรงที่พยายามในการบิดหรือหมุนมวล หรือพูดง่าย ๆ ก็คือแรงพยายามที่จะเอาชนะการหมุน เช่น การใช้ประแจขันแป้นเกิลยว ค่าแรงบิดหาได้จากแรงที่กระทำกับค้ำจับคู่กับระยะจากแรงถึงจุดศูนย์กลางของแป้นเกิลยวนั่นเอง ดังนั้นค่าแรงบิดสามารถหาได้จากสมการ

$$T = F \cdot r \quad (2)$$

โดย F = ค่าของแรงกระทำ (N)

r = ระยะทางจากจุดหมุนไปยังแรงที่กระทำโดยแนวแรงกับระยะมีทางทิศทางตั้งฉากกัน (m)

เมื่อทราบค่าแรงที่ใช้ในการตัดเราก็สามารถคำนวณหาแรงบิดได้โดยใช้สมการ (2) และคำนวณหา กำลังที่ใช้ในการตัดโดยใช้สมการ (1) ตามลำดับ แต่เนื่องจากแรงที่ใช้ในการตัดขึ้นอยู่กับขนาดของวัสดุที่นำมาตัด ดังนั้นเพื่อให้ง่ายสำหรับการเปรียบเทียบจึงนิยมใช้พลังงานตัดจำเพาะ

พลังงานตัดจำเพาะ (Specific cutting energy) คือพลังงานที่ใช้สำหรับการตัดวัสดุต่อพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ ซึ่งสามารถหาได้หลายวิธีดังที่ [2] ได้รายงานไว้ พลังงานตัดจำเพาะนี้เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$E_{ca} = \frac{E_c}{A_m} \quad (3)$$

เมื่อ E_{ca} = พลังงานตัดจำเพาะ (J/m^2)

E_c = พลังงานที่ใช้สำหรับการตัดวัสดุ (J)

A_m = พื้นที่หน้าตัดของวัสดุ (m^2)

กำลังเฉือน (Shear strength) คืออัตราส่วนของแรงเฉือนสูงสุด (Maximum shear force) ต่อพื้นที่หน้าตัดของวัสดุที่ถูกเฉือนซึ่งทั้ง 2 พารามิเตอร์ดังกล่าวนี้สามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและระยะที่ใบมีดกดผ่านวัสดุ (Shear force vs. Displacement curve) ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการดังนี้ [3]

$$\tau_s = \frac{F_{max}}{A_m} \quad (4)$$

เมื่อ τ_s = กำลังเฉือนสูงสุด (Pa)

F_{max} = แรงเฉือนสูงสุด (N)

พลังงานตัดจำเพาะหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟระหว่างแรงเฉือนและระยะที่ใบมีดกดผ่านวัสดุดังสมการ [3]

$$E = \frac{1}{A_m} \int F dx = n \times \frac{f}{A_m} \quad (5)$$

เมื่อ E = พลังงานตัดจำเพาะ (J/m^2)

F = แรงเฉือน (N)

x = ระยะกดของใบมีด (m)

n = จำนวนช่องใต้กราฟของแรงเฉือนและระยะกด

f = มาตรการส่วนของช่องใต้กราฟ (N-m/ช่อง)

ในการออกแบบต้นกำลังที่จะใช้ในการตัดหากทราบค่าแรงบิดและพารามิเตอร์อื่น ๆ ในสมการ (1) ก็สามารถคำนวณต้นกำลังที่จะต้องใช้ในการตัดได้เลย แต่การวัดค่าแรงบิดต้องใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ซับซ้อนและมีราคาแพง แต่หากไม่มีเครื่องมือหรืออุปกรณ์เพื่อวัดค่าแรงบิด อาจหาแรงที่ใช้ในการตัดวัสดุทางอ้อม หรือหาจากกำลังเฉือนวัสดุแล้วคำนวณหาแรงบิดดังสมการ (2) ดังนั้นบทความฉบับนี้จึงจะนำเสนอวิธีการหาค่าแรงในการตัดผลผลิตทางการเกษตรด้วยใบมีดโดยวิธีอ้อมและวิธีตรง

2.1 วิธีทางอ้อม (Indirect method)

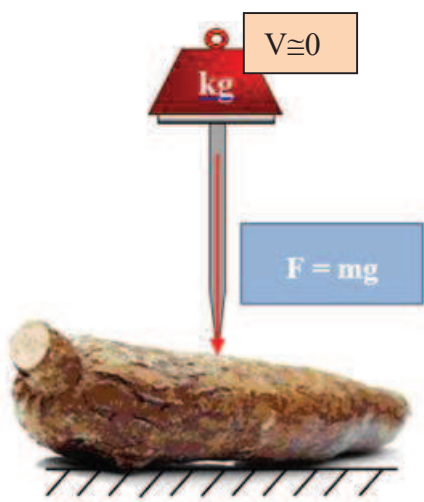
วิธีการหาค่าแรงในการตัดผลผลิตทางการเกษตรด้วยวิธีทางอ้อมไม่ใช่การวัดค่าแรงโดยตรงในขณะที่ทำงานตามสภาพจริงแต่อย่างใด แต่เป็นการวัดค่าโดยการจัดสภาพแวดล้อมการวัดให้ใกล้เคียงสภาพจริงมากที่สุด แบ่งได้ 3 วิธีดังนี้

2.1.1 วิธีสถิตย์ (Static method)

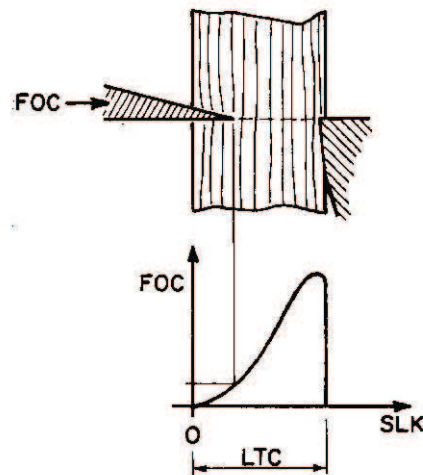
หลักการของวิธีการสถิตย์แสดงในรูปที่ 3 โดยจะมีใบมีดตัดวางอยู่บนวัสดุที่ต้องการตัด แล้วทำการเพิ่มมวลขึ้นไปเรื่อย ๆ จนกว่าแรงที่ใช้ในการตัด (F) จะมีค่ามากพอสำหรับตัดวัสดุให้ขาดออกจากกัน ด้วยความเร็วการตัดเข้าใกล้ศูนย์ โดยแรงตัดที่ได้จะหาได้จากมวลของวัสดุ (m) คูณกับความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก (g) ทั้งนี้แรงทดสอบที่กระทำต่อวัสดุด้วยวิธีนี้มีค่าไม่คงที่ [1] รายงาน

พฤติกรรมของแรงตัดที่กระทำกับวัสดุว่า “แรงตัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จากจุดเริ่มต้นที่ใบมีดสัมผัสวัสดุจนกระทั่งมีค่าสูงสุดเมื่อใบมีดตัดวัสดุเกือบขาด และเมื่อวัสดุขาดออกจากกันแรงตัดจะลดลงมีค่าเป็นศูนย์โดยจับพลันเนื่องจากไม่มีวัสดุมาต้านทานการเคลื่อนที่ของใบมีด” (รูปที่ 4)

[4] ประยุกต์ใช้เครื่องมือทดสอบแรงเฉือนของดินเพื่อวัดกำลังเฉือนฟางข้าวสาลี ความเร็วการเฉือน 1.2 มิลลิเมตรต่อวินาที (2×10^{-5} เมตรต่อวินาที) ต่อมา [5] ได้ใช้หลักการนี้ในการทดสอบวัดกำลังเฉือนเส้นใยถั่วเหลืองด้วยความเร็วการเฉือน 0.003 มิลลิเมตรต่อวินาที (3.333×10^{-6} เมตรต่อวินาที) นอกจากนี้ยังพบงานของ [6] ให้หลักการเดียวกันนี้ในการหาแรงตัดต้นข้าวด้วยอุปกรณ์ทดสอบแรงเฉือนแบบสถิตย์ (Static shear test) ซึ่งประกอบด้วยชุดใบมีดตัดแบบติดตั้งเป็นแถบ (Cutter bar) พลูล์ย ถึงพักน้ำ วาล์วปรับปริมาณน้ำ และจุดยึดต้นข้าว เมื่อค่อย ๆ ปล่อยน้ำในอัตรา 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที น้ำหนักของน้ำจะดึงให้ชุดใบมีดตัดที่มีใบมีดตัดยึดอยู่เคลื่อนที่ตัดต้นข้าวที่ถูกยึดอยู่กับที่จนขาด แล้วจึงคำนวณหาแรงตัด และกำลังเฉือน โดยการหารแรงตัดด้วยพื้นที่หน้าตัดของต้นข้าว



รูปที่ 3 แรงในขณะวัสดุอยู่นิ่ง (แบบสถิตย์)



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดกับระยะทางของใบมีดที่ตัดผ่านวัสดุ [1]

จากรูปที่ 5 พลังงานในการตัดวัสดุหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟของเส้นโค้ง (รูปที่คล้ายสามเหลี่ยมมุมฉาก) ซึ่งเป็นรูปกราฟที่ได้จากการบันทึกข้อมูลแรงตัดกับระยะทางของใบมีดที่ตัดผ่านวัสดุ ถ้าให้พื้นที่ของรูปสี่เหลี่ยม (รูปที่เป็นเส้นประ) มีพื้นที่เท่ากับพื้นที่ใต้กราฟของพลังงานในการตัด แสดงว่าพื้นที่ของรูปสี่เหลี่ยมนี้จะมีค่าเท่ากับพลังงานในการตัด ดังนั้นแรงตัดเฉลี่ยจะสามารถหาได้จาก

$$(FOCAV)(LTC) = (ENC1) \quad (6)$$

$$(FOCAV) = \frac{(ENC1)}{(LTC)} \quad (7)$$

โดย $ENC1$ = พื้นที่ใต้กราฟของรูป (รูปที่คล้ายสามเหลี่ยม) (N-mm)

จากพฤติกรรมของแรงตัดดังกล่าวข้างต้นจะเห็นว่า มีรูปกราฟคล้ายสามเหลี่ยม ดังนั้นในการออกแบบทางวิศวกรรม เราสามารถสมมติรูปดังกล่าวเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก เพื่อให้ง่ายต่อการหาค่าพลังงานและหาค่าแรงตัดเฉลี่ย จากการสมมติดังกล่าวจึงหาค่าแรงตัดเฉลี่ยโดยประมาณได้จาก

$$ENC1 = \frac{1}{2} (FOC)(LTC) \quad (8)$$

แต่สมการ (7) $(FOCAV) = (ENC1)/(LTC)$

เพราะฉะนั้น

$$(FOCAV) = \frac{1}{2} \frac{(FOC)(LTC)}{LTC} = \frac{1}{2} (FOC) \quad (9)$$

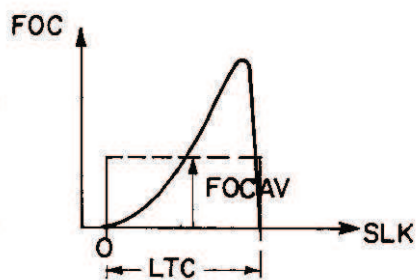
โดยสรุปแรงตัดวัสดุเฉลี่ยมีค่าโดยประมาณครึ่งหนึ่งของแรงตัดสูงสุด

FOC = แรงตัดวัตถุ (N)

SLK = พิกัดที่ใบมีดเคลื่อนที่ (mm)

LTC = ความหนาของวัตถุที่ระนาบที่ถูกใบมีดตัดผ่าน (mm)

FOCAV = แรงตัดวัตถุเฉลี่ย (N)



รูปที่ 5 การหาค่าแรงตัดวัตถุเฉลี่ย [1]

2.1.2 วิธีกึ่งสถิตย์ (Quasi-static method)

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดกับระยะทางของใบมีดที่ตัดผ่านวัสดุคงแสดงในหัวข้อ 2.1.1 สามารถหาได้โดยใช้การทดสอบการเฉือน (Shearing test) อย่างง่าย ๆ โดยใช้อุปกรณ์อ่านค่าแรงชนิดโหลดเซลล์ (Load cell) [7]

เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine, UTM) (รูปที่ 6) จัดเป็นเครื่องทดสอบแรงประเภทความเร็วคงที่ (Static load test) โดยจะให้แรงทดสอบคงที่กระทำต่อชิ้นทดสอบ เมื่อนำชิ้นทดสอบมาติดตั้งกับเครื่องทดสอบและให้โหลดเซลล์ออกแรงกระทำต่อชิ้นทดสอบสเตรนเกจ (Strain gauge) ในโหลดเซลล์จะเปลี่ยนแปลงรูปร่างและแปลงค่าเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อประมวลผลเป็นภาระการทำงาน (Load) กับระยะการบิด (Deformation) ที่กระทำต่อชิ้นทดสอบ หรือระยะเวลา (Time) นอกจากนี้ยังสามารถแสดงในรูประยะการบิดกับระยะเวลาได้อีกด้วย จึงจัดเป็นวิธีการหาพารามิเตอร์เชิงกลของวัสดุแบบกึ่งสถิตย์ (Quasi-static)



รูปที่ 6 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine, UTM)

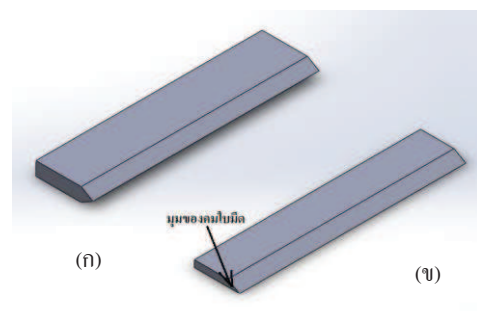
เครื่อง UTM มีส่วนประกอบสำคัญ 4 ส่วน คือ ตัวเครื่อง (Frame) ส่วนวัดแรงหรือโหลดเซลล์ อุปกรณ์จับชิ้นทดสอบ และคอมพิวเตอร์ควบคุมการทดสอบ การเลือกใช้ส่วนวัดแรงที่ถูกต่อนั้น ขนาดของแรงที่ใช้ในการทดสอบจะต้องมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 2 ของส่วนวัดแรงและไม่ควรเกินร้อยละ 95 ของส่วนวัดแรงเพื่อให้เกิดความความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด นอกจากนี้ควรมีการเตรียมชิ้นทดสอบและติดตั้งกับตัวจับที่เหมาะสมรวมถึงการเลือกวิธีการทดสอบที่เหมาะสมกับชิ้นทดสอบ

การหาสมบัติเชิงกลของวัสดุด้วยเครื่อง UTM นอกจากสามารถหาแรงตัดได้แล้ว ยังสามารถหาพารามิเตอร์อื่น ๆ ได้ด้วยเช่น กำลังเฉือนสูงสุด (Maximum shear strength) และพลังงานตัดจำเพาะ (Specific cutting energy) เมื่อตั้งการทดสอบเป็นการเฉือน (Shear) โมดูลัสของความยืดหยุ่นแบบอัด (Modulus of elasticity in compression) และพลังงานอัด (Compression energy) เมื่อตั้งการทดสอบเป็นการอัด (Compression) ความเค้นวิบัติแบบคาน (Beam failure stress) โมดูลัสของความยืดหยุ่นแบบดัด (Modulus of elasticity in bending) และพลังงานดัด

(Bending energy) เมื่อตั้งการทดสอบเป็นการดัด (Bending) ทั้งนี้ชุดสมการที่ใช้ในการคำนวณสามารถศึกษาได้จาก [3] หรือตำราหรือหนังสือที่เกี่ยวข้อง

[8] ศึกษากำลังเฉือนต้นข้าวสาลี (var. Mercia) 4 ระยะจากความบริสุทธิ์ตั้งแต่ระยะเริ่มแรกของความเป็นน้ำนมไปจนถึงระยะที่เมล็ดสุกแก่เต็มที่พร้อมเก็บเกี่ยวโดยใช้หลักการเดียวกับหลักการของเครื่อง UTM ด้วยความเร็วหัวกด 10 มิลลิเมตรต่อวินาที (1.67×10^{-4} เมตรต่อวินาที) พบว่ากำลังเฉือนของต้นข้าวสาลีมีค่าอยู่ในช่วง 7.26 MPa ในระยะเริ่มแรกไปจนถึง 6.42 MPa ในระยะสุกแก่บริสุทธิ์ ต่อมา [3] ใช้เครื่อง UTM ศึกษาสมบัติเชิงกลของต้นข้าวโพด (S. bicolor) ด้วยความเร็วหัวกดเดียวกันนี้ พบว่า พลังงานตัดจำเพาะเพิ่มขึ้นจาก 34.1 เป็น 101.1 mJ/mm² ในระยะการเป็นหญ้าหมัก และเพิ่มขึ้นจาก 36.5 เป็น 142.7 mJ/mm² ในระยะสร้างเมล็ดโดยใช้มุมปลายใบมีด (Blade bevel or edge angle) เพิ่มขึ้นจาก 30 เป็น 70 องศา [9] ได้ใช้เครื่อง UTM ในการตัดต้นข้าวโพดโดยใช้มีดแบบกริด (Linear knife grid system) เพื่อหั่นต้นข้าวโพดให้เป็นชิ้นขนาดต่าง ๆ ได้แก่ 25.4, 58.8 และ 101.6 มิลลิเมตร ด้วยความเร็วหัวกด 50.8 มิลลิเมตรต่อวินาที (8.47×10^{-4} เมตรต่อวินาที) [10] ใช้เครื่อง UTM ยี่ห้อ Instron ด้วยความเร็วหัวกด 1000 มิลลิเมตรต่อวินาที (0.001 เมตรต่อวินาที) วัดแรงและพลังงานในการตัดทลายปาล์มเปล่าโดยใช้ใบมีดที่มีมุมปลายใบมีด 15-40 องศา ต่อมาก็ใช้เครื่องมือชนิดเดียวกันนี้วัดแรงตัดต้นปอ (var. V36) [11] ต่อมา [7] ใช้อุปกรณ์ที่มีหลักการเช่นเดียวกับเครื่อง UTM วัดกำลังเฉือนฟางต้นข้าวบาร์เลย์โดยใช้ความเร็วหัวกด 10 มิลลิเมตรต่อวินาที (1.67×10^{-4} เมตรต่อวินาที) [9] ประยุกต์ใช้หัววัดแบบ Warner-Bratzler Blade ในการศึกษาการตัดต้นข้าวโพดด้วยใบมีดที่มีมุมปลายใบมีด 30 องศาด้วยความเร็วหัวกด 25.4 มิลลิเมตรต่อวินาที (4.23×10^{-4} เมตรต่อวินาที) [12] ใช้หลักการนี้วัดพลังงานในการตัดกิ่งข้อผลลั่นจี่ด้วยใบมีดมุมแหลม (V-cutters) และมุมเอียงด้านเดียว (Unilateral

V-cutters) ด้วยอุปกรณ์ที่มีหลักการเช่นเดียวกับเครื่อง UTM โดยใช้ความเร็วหัวกด 30 มิลลิเมตรต่อวินาที (5.000×10^{-4} เมตรต่อวินาที) [13] ใช้หลักการเดียวกันนี้ศึกษาแรงในการตัดชิ้นสับประดด้วยใบมีดมุมแหลม (รูปที่ 7) ซึ่งกว้าง 40 มิลลิเมตร หนา 2 มิลลิเมตร และมุมของปลายใบมีด 30 องศาเท่ากันทั้ง 2 แบบ โดยใช้ความเร็วหัวกด 500 มิลลิเมตรต่อวินาที (8.33×10^{-3} เมตรต่อวินาที) พบว่า ใบมีดแบบมุมเอียงด้านเดียวใช้แรงตัดผลสับประदन้อยกว่า (31.8 นิวตัน) ใบมีดแบบมุมแหลม (50.94 นิวตัน) อย่างมีนัยสำคัญยิ่ง อย่างไรก็ตามเราพบงานของ [14] ที่ใช้เครื่อง UTM (ยี่ห้อ Instron รุ่น Instron 1122, Instron Corporation, Canton, MA) ศึกษาแรงตัดฟางข้าวโดยใช้ใบมีดแบบติดตั้งเป็นแถบด้วยความเร็วหัวกดที่สูงถึง 12,600 มิลลิเมตรต่อวินาที (0.21 เมตรต่อวินาที)



รูปที่ 7 ลักษณะมุมปลายใบมีดหั่นแวนสับประด

(ก) แบบมุมแหลม และ (ข) แบบมุมเอียงด้านเดียว [13]

2.1.3 วิธีจลน์ (Dynamic method)

วิธีนี้เป็น การหาแรงตัดด้วยหลักการเพนดูลัม (Pendulum principle) โดยใช้หลักการแรงกระแทก ทั้งนี้เพนดูลัมคือ อุปกรณ์หาพลังงานตัดที่ใช้หลักการของลูกตุ้ม โดยพลังงานที่ใช้ทดสอบจะขึ้นอยู่กับมวลของก้อนน้ำหนักที่ติดตั้งอยู่บนแขนเพนดูลัม ยิ่งมวลมากพลังงานที่ได้ก็จะมีค่ามาก อีกทั้งความสูงของแขนเพนดูลัมก็มีผลกับพลังงาน คือ ยิ่งยกแขนเพนดูลัมขึ้นสูงก็จะมีค่าพลังงานศักย์มาก เมื่อแขนเพนดูลัมอยู่ในตำแหน่งสมดุลจะมีพลังงานศักย์เป็นศูนย์ (อยู่นิ่ง) แต่เมื่อถูกยกขึ้นไปที่มีมุม θ

กับตำแหน่งสมดุลดังแสดงในรูปที่ 8 ค่าพลังงานจะหาได้จาก [15]

$$E_s = Mgh = MgR(1 - \cos \theta) \quad (10)$$

เมื่อ E_s = พลังงานที่อยู่ในแขนของเพนดูลัมเมื่อทำมุม θ องศา (J)

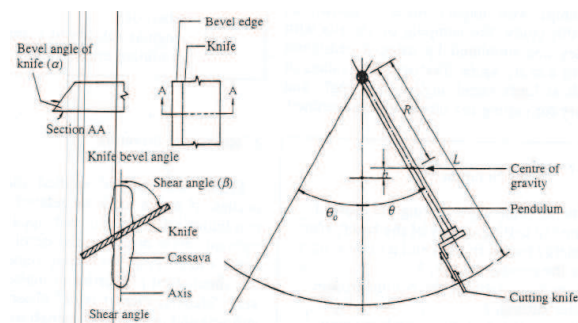
M = มวลของแขนเพนดูลัม (kg)

g = ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก (m/s^2)

h = ระยะความสูงของจุดศูนย์กลางถ่วงที่เปลี่ยนไปเมื่อเทียบตำแหน่ง 0 องศา (m)

R = ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของการหมุนและศูนย์กลางของแรงโน้มถ่วงของแขนเพนดูลัม (m)

θ = มุมของแขนเพนดูลัมที่ทำมุมกับตำแหน่งสมดุล (degree)



รูปที่ 8 ระบบการทำงานของแขนเพนดูลัม [15]

จากรูปที่ 8 ถ้าแขนเพนดูลัมถูกปล่อยออกจาก θ โดยไม่มีการตัดผ่านวัสดุ แขนเพนดูลัมจะเคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งสมดุลทำมุม θ_0 ในทิศทางตรงกันกับมุม θ ดังนั้นพลังงานเนื่องจากความเสียดทานและความต้านทานของอากาศต่อแขนเพนดูลัมหาได้จาก

$$E_f = MgR[(1 - \cos \theta) - (1 - \cos \theta_0)] \quad (11)$$

$$E_f = MgR(\cos \theta_0 - \cos \theta) \quad (12)$$

เมื่อ E_f = พลังงานที่สูญเสียไปกับแรงเสียดทานและแรงต้านของอากาศของเพนดูลัม (J)

θ_0 = การกระจัดเชิงมุมของแขนเพนดูลัมหลังจากตำแหน่งการตัดโดยที่ไม่มีการตัด (degree)

เมื่อติดใบมีดตัดเข้ากับแขนเพนดูลัมและวางวัสดุที่ต้องการตัดไว้ตรงจุดสมดุล แล้วปล่อยชุดใบมีดจากจุดใดจุดหนึ่งซึ่งทำมุม θ ใบมีดจะตัดผ่านชิ้นวัสดุที่วางอยู่ระหว่างจุดสมดุลและเคลื่อนที่ผ่านไปอีกด้านทำมุม θ_c (น้อยกว่า θ_0) ดังนั้น พลังงานที่ใช้ในการตัดชิ้นวัสดุ E_c คือผลต่างของพลังงานศักย์ (E_s) กับพลังงานศักย์ในแขนเพนดูลัมในขณะที่ไม่มีการตัด (E_0) และพลังงานสูญเสียจากความเสียดทานและความต้านทานของอากาศ (E_f) ดังสมการ

$$E_c = E_s - (E_f + E_0) \quad (13)$$

$$E_c = MgR[(1 - \cos \theta) - \{(\cos \theta_0 - \cos \theta) + (1 - \cos \theta_c)\}] \quad (14)$$

$$E_c = MgR(\cos \theta_c - \cos \theta_0) \quad (15)$$

เมื่อ E_c = พลังงานที่ใช้สำหรับการตัดวัสดุ (J)

E_0 = พลังงานที่อยู่ในแขนเพนดูลัมหลังจากการตัด (J)

ความเร็วของใบมีดที่ติดตั้งมากับแขนเพนดูลัมที่ตำแหน่งสมดุลสามารถคำนวณได้จาก

$$Mgh = \frac{I\Omega^2}{2} = MgR(1 - \cos \theta) \quad (16)$$

$$\Omega^2 = \frac{2MgR(1 - \cos \theta)}{I} \quad (17)$$

เมื่อ Ω = ความเร็วเชิงมุมของการแกว่งแขนของเพนดูลัม (rad/s)

I = โมเมนต์ความเฉื่อยของแขนเพนดูลัม ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)

โมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of inertia, I) ของพื้นที่รอบแกนในแนวระนาบ คือ ผลรวมโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่เล็ก ๆ รอบแกนหมุน ซึ่งสามารถหาได้จากการอินทิเกรต (Integration) พื้นที่รอบแกนกลางที่อยู่บนจุดเดียวกับจุดศูนย์กลางถ่วงของวัสดุ (Centroid) ของหน้าตัดวัสดุนั้น ๆ โดยพิจารณาบนระนาบสองมิติที่ X และ Y ซึ่งโมเมนต์ความเฉื่อยที่ใช้นั้น พิจารณาจากจุดรอบแกนกลาง

ซึ่งค่าความเค้นบนแกนกลางนี้จะมีค่าเท่ากับศูนย์เมื่อหน้าตัดวัสดุเป็นชนิดเดียวกันโดยจะหาได้จาก

$$I_{xc} = \int y^2 dA \quad (18)$$

หลักการหาพลังงานในการตัดแบบนี้ สามารถศึกษาความเร็วที่เหมาะสมในการตัดได้ด้วย โดยการพิจารณาจากพลังงานในการตัดจำเพาะที่ต่ำที่สุดถ้า L เป็นระยะห่างระหว่างกึ่งกลางของใบมีดและจุดศูนย์กลางของการหมุนของแขนเพนดูลัม ความเร็วของใบมีด V_c ที่ตำแหน่งต่ำสุดจะหาได้จาก

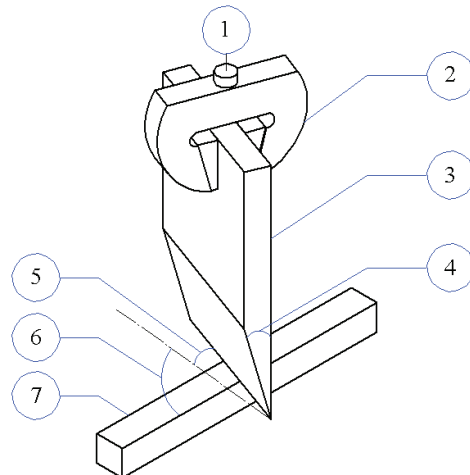
$$V_c = \Omega L = \sqrt{\frac{2MgR(1-\cos\theta)}{I}} L \quad (19)$$

เมื่อ V_c = ความเร็วการตัด (m/s)

L = ความยาวทั้งหมดของแขนเพนดูลัมจากจุดหมุนถึงกึ่งกลางใบมีดตัด (m)

[15] ใช้หลักการนี้ในการศึกษาพลังงานที่ใช้ตัดหัวมันสำปะหลังโดยใช้หลักการเพนดูลัม โดยมีใบมีดติดไว้กับแขนเพนดูลัมและทดสอบโดยการปล่อยแขนเพนดูลัมจากความสูงต่าง ๆ โดยจะมีสปริงบอกขนาดของโหลดซึ่งไว้ที่ตำแหน่งแกนหมุนของแขนเพนดูลัม เพื่อบอกถึงการกระจัดเชิงมุมบนแผ่นดิสก์วัดมุมหลังจากการทดสอบ เพื่อให้ทราบความเร็วในการตัดที่แตกต่างกันของใบมีด ซึ่งความแม่นยำในการระบุแรงหรือพลังงานที่ใช้ในการตัดขึ้นอยู่กับความละเอียดของเครื่องมือ และวิธีการหาขนาดพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ [16] ใช้หลักการเดียวกันนี้ในการหาพลังงานในการตัดต้นข้าว (var. Sepidrood) พบว่ามุมปลายใบมีด (Blade bevel or edge angle) 28 องศา มุมเฉียงใบมีด (Oblique angle) 30 องศา และมุมการตัด (Tilt or shear angle) 35 องศาจะได้ความเร็วการตัดที่เหมาะสมคือ 2.24 เมตรต่อวินาที ส่วน [10] ศึกษาผลของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบใบมีดตัดต่อแรงตัดและพลังงานตัดถึงทะเลสาปน้ำมันเปล่า

จำเพาะ (รูปที่ 9) พบว่า มุมปลายใบมีดตัดที่ใช้แรงตัดจำเพาะน้อยที่สุด (20.257 N/cm^2) คือมุม 15 องศา อย่างไรก็ตามมุมเฉียงใบมีดในช่วง 0-30 องศา กับมุมการตัดในช่วง 20-90 องศาไม่มีผลต่อแรงตัดและพลังงานตัดจำเพาะ



รูปที่ 9 ลักษณะใบมีดที่ใช้ศึกษาแรงตัดและพลังงานถึงทะเลสาปน้ำมันเปล่าจำเพาะ (1) โหลดเซลล์ (2) จุดจับยึด (3) ใบมีดตัด (4) มุมปลายใบมีด (5) มุมเฉียงใบมีด (6) มุมการตัด และ (7) ชั้นกึ่งทะเลสาปน้ำมันเปล่า [10]

โดยสรุปแล้ว การหาแรงตัด พลังงานตัด หรือกำลังเฉือนผลผลิตทางการเกษตรนิยมใช้วิธีทางอ้อมด้วยวิธีสถิติและกึ่งสถิติเพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการตัด เช่น มุมปลายใบมีด มุมเฉียงใบมีด หรือมุมการตัด เพื่อนำไปออกแบบใบมีดตัดที่เหมาะสม โดยวิธีกึ่งสถิติด้วยการใช้เครื่อง UTM หรืออุปกรณ์ที่มีหลักการคล้ายกันนี้เป็นที่นิยมมากสังเกตได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เนื่องจากวิธีนี้ให้ข้อมูลที่ง่ายต่อการวิเคราะห์ รวมทั้งสามารถศึกษาพารามิเตอร์เชิงกลของวัสดุได้อีกหลากหลาย จึงเป็นเครื่องมือหลักที่ต้องมีในห้องปฏิบัติการทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเกือบทุกที่ ทั้งนี้ได้แสดงการเปรียบเทียบทั้ง 3 วิธีในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบการหาแรงตัด พลังงานตัด หรือกำลังเฉือนผลผลิตทางการเกษตรด้วยวิธีทางอ้อม 3 วิธี

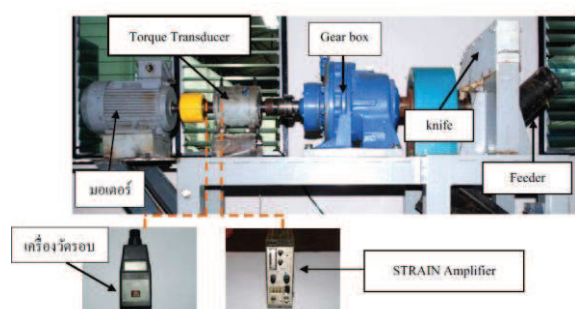
วิธีการวัดแรงตัด พลังงานตัด หรือกำลังเฉือนผลผลิตทางการเกษตร	หลักการ	ข้อดี	ข้อเสีย
วิธีสถิติ	- ความเร็วการตัดเข้าใกล้ศูนย์ - แรงทดสอบที่ไม่คงที่กระทำต่อชิ้นทดสอบ	- วัสดุอุปกรณ์ง่าย ราคาประหยัด และไม่ซับซ้อน	- ค่าแรงตัดที่ได้เป็นแรงสถิติซึ่งไม่ใช่แรงที่จะใช้ในการตัดวัสดุที่แท้จริง - วัดได้เฉพาะแรงตัด
วิธีกึ่งสถิติ	- ความเร็วการตัดต่ำแต่คงที่ - แรงทดสอบคงที่กระทำต่อชิ้นทดสอบ	- วัดได้ด้วยเครื่อง UTM หรืออุปกรณ์ที่มีหลักการคล้ายกัน เป็นการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างคุ้มค่า - วัดได้ทั้งแรงเฉือน พลังงานตัด และกำลังเฉือน - เหมาะสำหรับศึกษาตัวแปรทางด้านลักษณะของใบมีดตัด	- เครื่อง UTM หรืออุปกรณ์ที่มีหลักการเดียวกันมีราคาแพงในกรณีซื้อใหม่ - ค่าแรงตัดและกำลังเฉือนที่ได้เป็นแรงกึ่งสถิติซึ่งไม่ใช่แรงที่จะใช้ในการตัดวัสดุที่แท้จริง แต่ก็ดีกว่าวิธีสถิติ
วิธีจลน์	- ความเร็วการตัดเข้าใกล้ความเร็วที่แท้จริงในการตัด - แรงทดสอบคงที่กระทำต่อชิ้นทดสอบ แต่ไม่มีความหน่วงอันเกิดจากการเคลื่อนที่ของชุดใบมีดตัด	- สามารถประยุกต์ใช้ได้จากอุปกรณ์ทดสอบแรงตัดด้วยหลักการเพนดูลัม - วัดได้ทั้งพลังงานในการตัดและความเร็วในการตัด	- ค่าพลังงานที่ใช้ในการตัดใกล้เคียงค่าที่แท้จริง แต่ก็ยังไม่เหมือนค่าที่ได้จากการวัดด้วยวิธีตรง

2.2 วิธีทางตรง (Direct method)

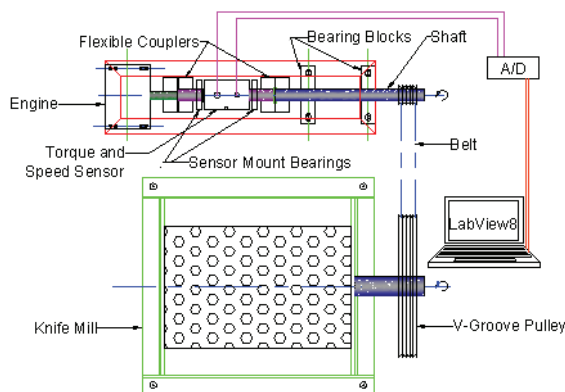
การหาแรงตัด หรือพลังงานในการตัดด้วยวิธีนี้จะให้ข้อมูลที่ถูกต้อง เที่ยงตรง และเสมือนการตัดจริงแต่เครื่องมือและอุปกรณ์มีความยุ่งยาก และต้องอาศัยความชำนาญในการปฏิบัติงาน เนื่องจากการวัดค่าแรงบิดด้วยเซนเซอร์แรงบิด (Torque transducer) หรือโหลดเซลล์เพื่อวัดค่าแรงตัด (รูปที่ 10) ในการทดสอบจริงทำได้โดยติดตั้งเซนเซอร์ทั้งสองเพื่ออ่านสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงผ่านเครื่องขยายสัญญาณ (Strain amplifier) เพื่อเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน (Calibration curve)

ของเซนเซอร์วัดแรงบิดหรือโหลดเซลล์ กับแรงดันไฟฟ้า แล้วคำนวณหาแรงบิด หรือแรงที่ใช้ในการตัด ตามลำดับ [17] ใช้หลักการนี้วัดแรงบิดในเครื่องตัดต้นอ้อยแบบใบมีดหมุนเหวี่ยงโดยใช้โหลดเซลล์ขนาด 981 N (100 kgf) ติดตั้งร่วมกับเครื่องขยายสัญญาณไปยังเครื่องบันทึกค่าแรง และใช้เซนเซอร์วัดแรงบิดขนาด 100 Nm ติดตั้งบริเวณใบมีดเชื่อมสัญญาณไปยังเครื่องขยายสัญญาณผ่านไปยังเครื่องบันทึกค่าแรงบิด [10] ใช้หลักการนี้วัดแรงบิดต่อพื้นที่หน้าตัดในการตัดทาลายปาล์มที่แยกเมล็ดออกแล้ว ด้วยใบมีดแบบมุมแหลมที่มีมุมปลายใบมีด 20

องศาโดยใช้ระบบการเก็บข้อมูลเชิงตัวเลขแบบต่อเนื่อง (Real-time or online digital data acquisition system) (Dewetron DEWE-2020) เชื่อมต่อให้แสดงผลทางสเปรดชีตโดยใช้โปรแกรม Daisy Lab Software ส่วน [18] วัดกำลังเชิงกลของเครื่องบดแบบค้อน (Hammer mill) โดยตรงด้วยการใช้เซนเซอร์แรงบิดและเซนเซอร์ความเร็วและใช้โปรแกรม Lab View เพื่อแปลงข้อมูลจากอนาล็อกเป็นดิจิทัล (รูปที่ 11) ซึ่งลักษณะเครื่องมือวัดก็พัฒนามาจาก [19]



รูปที่ 10 การติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงบิด และกำลังที่ใช้ในการตัดผลผลิตทางการเกษตร [20]



รูปที่ 11 การติดตั้งอุปกรณ์วัดกำลังเชิงกลในเครื่องบดแบบค้อน [18]

3. ปัจจัยที่มีผลต่อแรงตัด

จากงานวิจัยทั้งหมดที่กล่าวมา ซึ่งชี้ให้เห็นว่าความเร็วที่ใช้ในการทดสอบหาแรงตัดเป็นความเร็วที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับความเร็วในการตัดผลผลิตทางการเกษตรที่แท้จริง โดยความเร็วที่ใช้ทดสอบหาแรงตัดโดยวิธีกึ่งสถิติมีค่าอยู่

ในช่วง 1.67×10^{-4} -0.21 เมตรต่อวินาที ในขณะที่ผลการศึกษาของ [15] พบว่าความเร็วในการตัดหัวมันสำปะหลังมีค่า 1.81-4.90 เมตรต่อวินาที ทำให้การหาแรงหรือพลังงานในการตัดด้วยวิธีกึ่งสถิตยนี้ยังไม่ค่อยสอดคล้องกับความเป็นจริงมากนัก และจากผลการศึกษาของ [6] ซึ่งทดสอบตัดต้นข้าวพันธุ์ Khazar เปรียบเทียบกับการตัดด้วยวิธีตรงโดยใช้เซนเซอร์แรงบิดที่ความเร็วใบมีด 0.6 เมตรต่อวินาทีพบว่า การตัดการวิธีสถิตยมีค่ากำลังเฉือน 1,629 kPa ที่ความชื้นร้อยละ 78 มาตรฐานเปียก ในขณะที่การวัดกำลังเฉือนด้วยวิธีทางตรงโดยใช้มุมปลายใบมีด 35 องศาพบว่ามีความอยู่ในช่วง 220-268 kPa ที่ความชื้นร้อยละ 84-36 มาตรฐานเปียก ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่ากำลังเฉือนที่วัดด้วยวิธีสถิตยมีค่ามากกว่าถึงร้อยละ 86

จากการศึกษาของเราจึงสามารถสรุปปัจจัยที่มีผลต่อแรงตัด พลังงานตัด และกำลังเฉือนผลผลิตทางการเกษตรชนิดหนึ่ง ๆ ได้ดังนี้

1. วิธีการวัดแรงตัด
2. คุณลักษณะของใบมีดตัด เช่น มุมปลายใบมีด มุมเฉียงใบมีด และมุมการตัด
3. ความเร็วที่ใช้ในการตัด

4. สรุป

การหาค่าแรงตัด พลังงานตัด และกำลังเฉือนของผลผลิตทางการเกษตรสามารถหาได้ทั้งทางอ้อมและทางตรง การหาค่าทางอ้อมมี 3 วิธี ได้แก่ วิธีสถิตยโดยใช้ความเร็วการตัดเข้าใกล้ศูนย์ วิธีกึ่งสถิตยใช้ความเร็วการตัดต่ำแต่คงที่ และวิธีจลนโดยใช้ความเร็วการตัดเข้าใกล้ความเร็วตัดที่แท้จริง การหาค่าโดยวิธีสถิตยใช้การวางใบมีดลงบนวัสดุแล้วทำการเพิ่มแรงไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งวัสดุขาด สำหรับการหาค่าโดยใช้วิธีกึ่งสถิตยใช้เครื่อง UTM หรืออุปกรณ์ที่มีหลักการคล้ายกัน ส่วนการหาค่าโดยวิธีจลนใช้หลักการเพนดูลัม จากการศึกษาพบว่างานวิจัยส่วนมากใช้วิธีสถิตยและวิธีกึ่งสถิตยเพื่อศึกษาพารามิเตอร์ของใบมีดที่มีผลต่อการตัด อาทิ มุมปลาย

ใบมีด มุมเฉียงใบมีด หรือมุมการตัด ส่วนการหาแรงตัด ด้วยวิธีจลน์โดยใช้หลักการเพนดูลัม เราพบว่าสามารถศึกษาความเร็วที่เหมาะสมในการตัดได้ด้วย โดยการพิจารณาจากพลังงานในการตัดจำเพาะที่ต่ำที่สุด ในส่วนของการหาค่าทางตรงนั้นใช้การวัดค่าแรงบิดและความเร็วรอบด้วยเซนเซอร์จากเพลาคณะตัดวัสดุจริง ซึ่งจะได้ค่าที่ถูกต้อง เทียบตรง และเสมือนการตัดจริง แต่การใช้และปรับตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์มีความยุ่งยาก ต้องอาศัยความชำนาญในการปฏิบัติเป็นอย่างมาก นอกจากนี้ยัง

พบว่า การหาค่ากำลังเฉือนด้วยวิธีสถิตยันั้นค่าที่ได้จะมีค่ามากกว่าค่าที่วัดได้จากวิธีทางตรงถึงร้อยละ 86

5. กิตติกรรมประกาศ

ฉุอุปการจากบทความฉบับนี้ ขอมอบให้คณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ให้ผู้เขียน ขอขอบคุณนักวิจัยทุกท่านที่ผู้เขียนใช้ผลงานอ้างอิงในการเขียนบทความฉบับนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Persson, S. Mechanics of cutting plant material. *St. Joseph, Mich.: ASAE*, 1987; 288.
- [2] สุนทร สืบคำ โชติพงศ์ กาญจนประโชติ และ ระวิน สืบคำ. การหาพื้นที่หน้าตัดประสิทธิภาพของชิ้นวัสดุทางการเกษตรที่มีรูปร่างไม่แน่นอน. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 2558; 22(3): 77-87.
- [3] Chattopadhyay, P.S. and Pandey, K.P. Mechanical Properties of Sorghum Stalk in Relation to Quasi Static Deformation. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1999. 73: 199-206.
- [4] Kushwaha, R.L., Vaishnav, A.S. and Zoerb, G.C. Shear Strength of Wheat Straw. *Canadian Agricultural Engineering*, 1983; 25(2): 163-166.
- [5] Sadek, M. Al-Amin and Chen, Y. Characterization of the Shear Properties of Hemp Using Discrete Element Method. *St. Joseph, Mich.: ASABE*, 2009.
- [6] Kooroor, R.T. and Borgheie, A. Measuring the Static and Dynamic Cutting Force of Stems for Iranian Rice Varieties. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2006; 8: 193-198.
- [7] Tavakoli, S., Mohtasebi, S., Jafari, A. and Nazari Galedar, M. Some Engineering Properties of Barley Straw. *Applied Engineering in Agriculture*, 2009; 25(4): 627-633.
- [8] O' Dogherty, M.J., Huber, J.A., Dyson, J. and Marshall, C.J. A Study of The Physical and Mechanical Properties of Wheat Straw. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1995; 62: 133-142.
- [9] Igathinathane, C., Womac, A.R. and Sokhansanj, S. Effect of Angle of Cut on Corn Stalks Mechanical Cutting Strength and Energy. *St. Joseph, Mich.: ASABE*, 2010.
- [10] Suryanto, H., Ahmad, D., Yahya, A., Akande, F.B. and Syahrta, K. Cutting Tests of Oil Palm Empty Fruit Bunches. *Trans. ASABE*, 2009; 52(3): 723-726.
- [11] Ghahraei, O., Ahmad, D., Khalina, A., Suryanto, H. and Othman, J. Cutting Tests of Kenaf Stems. *Trans. ASABE*, 2011; 54(1): 51-56.
- [12] Liu, T.H., Liang, Z.H. and Guo, J.D. Experimental Comparison of Litchi Fruit Stalk Cutting Force. *Applied Engineering in Agriculture*, 2012; 28(2): 297-302.
- [13] สุนทร โม่งปราณีต นิคม สุวรรณบดินทร์ และพินันชัย สมโพธิ์. การออกแบบและปรับปรุงชุดใบมีดหั่นแฉ้นสับประรด. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 5 เรื่องนวัตกรรมทางวิศวกรรมเกษตรเพื่อเพิ่มผลผลิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 26-27 เมษายน 2554.
- [14] Yore, M.W., Jenkins, B.M. and Summers, M.D. Cutting Properties of Rice Straw. *St. Joseph, Mich.: ASABE*, 2002.
- [15] Visvanathan, R., Sree, V. V. and Swam, K. R. Effect of Knife Angle and Velocity on the Energy Required to Cut Cassava Tubers. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1996; 64: 99-102.

- [16] Reza, T.K. Paddy Stems Cutting Energy and Suggested Blade Optimum Parameters. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 2007; 10(24): 4523-4526.
- [17] Gupta, C. P. and Oduori, M. F. Design of the Revolving Knife-Type Sugarcane Basecutter. *Trans. ASAE*, 1992; 35(6): 1747-1752.
- [18] Bitra, V. S. P., Womac, A. R., Igathinathane, C. and Sokhansanj, S. Knife Mill Comminution Energy Analysis of Switchgrass, Wheat Straw, and Corn Stover and Characterization of Particle Size Distributions. *Trans ASABE*, 2010; 53(5): 1639-1651.
- [19] Bitra, V.S.P., Womac, A.R., Chevanan, N., Miu, P.I., Igathinathane, C., Sokhansanj, S. and Smith, D. R. Direct Mechanical Energy Measures of Hammer Mill Comminution of Switchgrass, Wheat Straw, and Corn Stover and Analysis of Their Particle Size Distributions. *Powder Technology*, 2009; 193: 32–45.
- [20] ณัฐพงษ์ ประภากร. การศึกษาพารามิเตอร์เบื้องต้นที่ใช้ในการออกแบบเครื่องตัดเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับเป็นวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าโดยใช้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน. วิทยานิพนธ์, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2551; 100.