



ผลเนื่องจากมุมหลบที่ส่วนตรงใบมีดจอบหมุนที่มีต่อลักษณะทอร์กและพลังงานการไถพรวนจำเพาะ Effect of Relief-angle at Straight portion of Rotary Blade on Torque Characteristic and Specific Tilling Energy

ศิริศักดิ์ เชิดเกียรติพล^{1*}, ประเทือง อุษาบริสุทธิ์¹, จิรายุ แยมพรายดี¹

Sirisak Choedkiatphon^{1*}, Prathuang Usaborisut¹, Jirayu Yampraydee¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, นครปฐม, 73140

¹Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering at Kampeang Sean, Kasetsart University, NakornPhatom, 73140

*Corresponding author: Tel: +66-8-1600-0688, Fax: +66-34-351-896, E-mail: fengsrcp@ku.ac.th

บทคัดย่อ

ใบมีดจอบหมุนต้นแบบที่ส่วนตรงมีมุมหลบ 1° (rotary blade B2) และ 3° (rotary blade B3) ถูกสร้างขึ้นเพื่อศึกษาผลเนื่องจากมุมหลบบริเวณส่วนตรงใบมีดจอบหมุนที่มีต่อลักษณะทอร์กและปริมาณพลังงานไถพรวนจำเพาะเพื่อลดกำลังที่ใช้ในการไถพรวนดินของอุปกรณ์ไถจอบหมุนโดยทดสอบเปรียบเทียบกับใบมีดจอบหมุนยุโรปตัวซี (rotary blade B1) การทดลองทำในกระบะดินที่ห้องปฏิบัติการพลศาสตร์ทางดินและการประยุกต์ ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ทดสอบในดินเหนียวและดินร่วนปนทรายที่มีความหนาแน่นมวลรวมสภาพแห้ง 1.67 และ 1.49 g cm⁻³ ตามลำดับ ความชื้นดิน 11.2% (db) ทดสอบที่ความเร็วการเดินทาง 0.069 และ 0.142 m s⁻¹ ความเร็วรอบหมุน 150 220 และ 280 rpm ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการไถพรวนดินด้วยใบมีดจอบหมุนที่ส่วนตรงมีมุมหลบ 1° และ 3° (B2 และ B3) ทอร์กมีลักษณะสอดคล้องกับลักษณะทอร์กของใบมีดจอบหมุนยุโรปตัวซี (B1) และแสดงให้เห็นว่ามุมหลบที่ส่วนตรงของใบมีดจอบหมุนเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ใบมีดจอบหมุนใช้พลังงานไถพรวนจำเพาะลดลงในการไถพรวนดิน โดยพบว่าในกระบวนการไถพรวนดินใบมีดจอบหมุนที่ส่วนตรงมีมุมหลบ 1° (B2) ใช้พลังงานการไถพรวนจำเพาะน้อยที่สุด ขณะที่ใบมีดจอบหมุนยุโรปตัวซี (B1) ใช้พลังงานการไถพรวนจำเพาะสูงสุด

คำสำคัญ: อุปกรณ์ไถจอบหมุน, ใบมีดจอบหมุน, ทอร์ก, พลังงานไถพรวนจำเพาะ

Abstract

The prototype rotary blade with relief angle at the straight blade portion 1° (rotary blade B2) and 3° (rotary blade B3) were fabricated to study on the effect of the relief angle at a straight portion of rotary blade on the torque characteristic and the specific tilling energy to reduce the power used by rotary tiller for soil preparation, comparing with the European C-shaped blade (rotary blade B1). The experiments were tested at the soil dynamics and it is application laboratory, Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering at Kampeang Sean, Kasetsart University. The research works was conducted in soil bin at forward speed of 0.069 and 0.142 m s⁻¹, rotational speeds of 150, 220 and 280 rpm in clay and sandy loam soils. The results showed that the torque characteristics of the rotary blades with relief angle at the straight blade portion 1° (B2) and 3° (B3) are such as the European C-shaped blade (B1). Besides, it showed that the relief angle at straight blade portion is the important parameter that cause the tilling energy decreased. The investigations showed that the specific tilling energy of the rotary blade with 1° relief angle at straight blade portion (B2) was the lowest while the specific tilling energy of the European C-shaped blade (B1) was the highest.

Keywords: Rotary tiller, rotary blade, torque, specific tilling energy

Received: August 31, 2018

Revised: October 26, 2018

Accepted: November 19, 2018

Available online: February 7, 2019

1 บทนำ

อุปกรณ์ไถจอบหมุนเป็นอุปกรณ์ไถเตรียมดินประเภท active tillage machinery ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สามารถนำมาใช้ไถเตรียมดินทั้งไถตะและไถแปร หรือเรียกว่า ไถเตรียมดินขั้นที่ 1 (Primary tillage) และ ไถเตรียมดินขั้นที่ 2 (Secondary tillage) ตามลำดับ ด้วยเหตุนี้เกษตรกรไทยจึงนิยมใช้อุปกรณ์ไถจอบหมุนไถเตรียมดินแปลงเพาะปลูกพืชไร่ทั้งในสภาพดินไร่และดินนา ปัจจุบันมีหลายบริษัทในกรุงเทพฯ ที่ผลิตไถมีดจอบหมุน (Rotary blade) สำหรับจำหน่าย โดยไถมีดจอบหมุนมีลักษณะเหมือนไถมีดจอบหมุนยุโรปรูปตัวซีซึ่งรูปร่างไถมีดจอบหมุนนี้ถูกออกแบบโดยนักวิจัยต่างประเทศเพื่อใช้สำหรับการไถเตรียมดินของประเทศนั้นๆ สิ่งเหล่านี้แสดงให้เห็นว่ายังคงมีการใช้อุปกรณ์ไถจอบหมุนสำหรับการไถเตรียมดินอย่างแพร่หลายในการทำเกษตรกรรมแต่ก็ยังขาดการวิจัยและพัฒนาไถมีดจอบหมุนให้เหมาะสมกับการเตรียมดินเพื่อการทำเกษตรกรรมของประเทศไทย

แม้ว่าการไถพรวนดินเตรียมแปลงเพาะปลูกด้วยอุปกรณ์ไถจอบหมุนใช้กำลังมากกว่าอุปกรณ์ไถทั่วไปที่เกษตรกรไทยนิยมใช้ (ไถหัวหมูและไถจาน) แต่อุปกรณ์ไถจอบหมุนจัดเป็นอุปกรณ์ไถที่มีประสิทธิภาพสูงในการไถพรวนดิน อีกทั้งยังลดจำนวนเที่ยวการไถพรวนดินเนื่องด้วยเป็นอุปกรณ์ที่สามารถพรวนย่อยดินและวัชพืช พร้อมทั้งผสมซากพืชกับดินได้อย่างสมบูรณ์เพื่อส่งเสริมการย่อยสลายของซากพืช (Salokhe et al., 1999) ด้วยเหตุนี้จึงมีงานวิจัยที่พยายามศึกษาแนวทางการลดกำลังที่ใช้ในการไถพรวนดินของอุปกรณ์ไถจอบหมุน Sakai (1978) นำเสนอหลักการออกแบบมุมหลบ (Relief angle) บริเวณด้านหลังที่ส่วนปลายของไถมีดจอบหมุนญี่ปุ่นรูปตัวซีเพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างไถมีดจอบหมุนกับดินชนิดต่าง ๆ Salokhe et al. (1993) ศึกษาการใช้สารเคลือบผิวอุปกรณ์การเกษตรเพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างดินและผิวอุปกรณ์เกษตร และ Salokhe et al. (1999) ทดสอบสมรรถนะอุปกรณ์ไถจอบหมุนที่ติดตั้งไถมีดจอบหมุนที่ชุบผิวด้วยสารเคลือบลดแรงเสียดทานโดยพบว่ารถแทรกเตอร์ใช้กำลังลดลงโดยเฉลี่ย 22% กรณีไถดินเที่ยวแรกด้วยความเร็วการเดินทาง 1.5 km h^{-1} แม้ว่าการชุบสารเคลือบผิวลดแรงเสียดทานจะช่วยให้ความต้องการกำลังในการไถเตรียมดินด้วยอุปกรณ์ไถจอบหมุนลดลงแต่ก็ยังไม่พบว่ามีการผลิตจำหน่ายไถมีดจอบหมุนชุบสารเคลือบผิวลดแรงเสียดทานในท้องตลาด

Hendrick และ Gill (1971) รวบรวมผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยการออกแบบอุปกรณ์ไถจอบหมุน ได้แก่ทิศทางการหมุนของไถมีดจอบหมุน อัตราส่วนระหว่างความเร็วการเดินทาง (Forward speed) และความเร็วปลายไถมีดจอบหมุน (Peripheral speed) ขณะหมุนรอบเพลลาอุปกรณ์ไถจอบหมุน และมุม clearance angle ของไถมีดจอบหมุน และนำเสนอเทคนิคการหามุม Clearance angle ที่ตำแหน่งปลายไถมีดจอบหมุน Sakai (1977) นำเสนอสมการที่ใช้สำหรับออกแบบขอบโค้ง (Edge-

curve) ของไถมีดจอบหมุนญี่ปุ่นรูปตัวซี เพื่อลดการพันของตอซังข้าว และวัชพืชกับเพลลาของอุปกรณ์ไถจอบหมุน นอกจากนี้มีนักวิจัยบางกลุ่มศึกษาเกี่ยวกับพลศาสตร์ระหว่างไถมีดจอบหมุนและดิน (Soil-blade dynamics) Thakur และ Godwin (1990) ศึกษาพลศาสตร์การตัดดิน (Mechanics of soil cutting) ของเส้นลวดที่ความเร็วรอบหมุนต่างๆ กัน โดยพิจารณาให้การตัดดินของเส้นลวดเสมือนเป็นการไถดินที่ตำแหน่งปลายไถมีดจอบหมุน Kataoka and Shibusawa (2002) ศึกษาพลศาสตร์การไถพรวน (Dynamics of tillage) ระหว่างดินกับไถมีดจอบหมุนญี่ปุ่น Sukui-zume หรือ Scooping blade โดยที่ไถมีดจอบหมุนหมุนพรวนดินในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางการหมุนของล้อรถแทรกเตอร์ (Up-cut หรือ reverse rotation) Phongsupasamit et al. (2004) ศึกษาลักษณะแรงลัพท์ที่กระทำบนไถมีดจอบหมุนญี่ปุ่นรูปตัวซี (Japanese C-shaped blade) และไถมีดจอบหมุนยุโรปรูปตัวแอล (European L-shaped blade) จากการตรวจเอกสารไม่พบว่ามีงานวิจัยผลกระทบเนื่องจากมุมหลบบริเวณส่วนตรงของไถมีดจอบหมุนที่มีต่อความต้องการกำลังในการไถพรวนดิน

ในปี พ.ศ. 2553 ศิริศักดิ์ และ ธัญญา (Chertkiattipol et al., 2010 และ Niyamapa et al., 2010) ดำเนินการวิจัยและพัฒนาไถมีดจอบหมุนต้นแบบสำหรับติดตั้งในอุปกรณ์ไถจอบหมุนต่อพ่วงรถไถเดินตามโดยศึกษาการลักษณะทอร์กขณะไถมีดจอบหมุนหนึ่งใบกำลังไถพรวนดินโดยศึกษาเปรียบเทียบกับไถมีดจอบหมุน 3 แบบ ได้แก่ ไถมีดจอบหมุนญี่ปุ่นรูปตัวซี ไถมีดจอบหมุนยุโรปรูปตัวแอล และไถมีดจอบหมุนยุโรปรูปตัวซี ผลการศึกษาแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะทอร์กกับการไถพรวนดินของไถมีดจอบหมุนในแต่ละช่วงมุมการหมุน การไถพรวนดินในลักษณะกระแทกขณะส่วนปลายของไถมีดจอบหมุนยุโรปทั้งสองแบบส่งผลให้ทอร์กที่กระทำบนเพลลาเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดอันเป็นสาเหตุของการสั่นสะเทือนขณะอุปกรณ์ไถจอบหมุนกำลังไถพรวนดิน แต่พบว่าไถมีดจอบหมุนญี่ปุ่นรูปตัวซีใช้พลังงานไถพรวนดินจำเพาะมากที่สุดเนื่องด้วยส่วนตรงของไถมีดจอบหมุนญี่ปุ่นรูปตัวซีมีลักษณะโค้งก่อให้เกิดแนวสัมผัสดินมากกว่าไถมีดจอบหมุนยุโรป และพบว่าไถมีดจอบหมุนยุโรปรูปตัวแอลใช้พลังงานไถพรวนดินจำเพาะน้อยที่สุด จากนั้นจึงพัฒนาไถมีดจอบหมุนต้นแบบสำหรับติดตั้งกับอุปกรณ์ไถจอบหมุนสำหรับต่อพ่วงรถไถเดินตาม โดยออกแบบให้ส่วนตรงของไถมีดจอบหมุนเป็นส่วนแรกๆ ที่เริ่มไถพรวนดินเพื่อลดแรงกระแทกและออกแบบให้ไถมีดจอบหมุนมีความกว้างการไถพรวนดิน 6.5 cm เพื่อลดปริมาณพลังงานไถพรวนดินจำเพาะ อย่างไรก็ตาม ในปี พ.ศ. 2559 ไชยพลและคณะ พัฒนาไถมีดจอบหมุนสำหรับติดตั้งในอุปกรณ์ไถจอบหมุนต่อพ่วงรถแทรกเตอร์โดยใช้แนวคิดการพัฒนาไถมีดจอบหมุนต้นแบบของ Niyamapa et al. (2010) ซึ่งพบว่าการออกแบบให้ส่วนตรงเริ่มไถพรวนดินเป็นส่วนแรกจะส่งผลทำให้ขนาดพื้นที่สัมผัสระหว่างดินกับพื้นที่ผิวด้านหลังไถมีดจอบหมุนบริเวณส่วนตรงและส่งผลทำให้ปริมาณกำลังที่ต้องการ

จากรถแทรกเตอร์เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีใบมีดจอบหมุนยุโรปตัวซี เหตุผลเพราะเมื่อผิวสัมผัสระหว่างดินกับใบมีดจอบหมุนเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้แรงเสียดทานเพิ่มขึ้นขณะใบมีดจอบหมุนไถพรวนดิน ดังนั้นเพื่อพัฒนาใบมีดจอบหมุนที่ใช้กำลังต่ำ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลเนื่องจากมุมหลบบริเวณส่วนตรงใบมีดจอบหมุนที่มีต่อลักษณะทอร์คและพลังงานการไถพรวนจำเพาะเปรียบเทียบกับใบมีดจอบหมุนยุโรปตัวซี

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 แผนการทดลอง

ใบมีดจอบหมุนที่มีมุมหลบ (Relief angle) บริเวณส่วนตรง 1° และ 3° ถูกสร้างและทดสอบในกระบะดินเปรียบเทียบกับใบมีดจอบหมุนยุโรปตัวซี (European C-shaped blade) มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาผลเนื่องจากมุมหลบบริเวณส่วนตรงของใบมีดจอบหมุนที่ส่งผลต่อลักษณะทอร์คและค่าพลังงานการไถพรวนจำเพาะขณะใบมีดจอบหมุนไถพรวนดิน มุมหลบ (relief angle) บริเวณส่วนตรงใบมีดจอบหมุนดังแสดงใน Figure 1

ทดสอบที่ความเร็วการเดินทาง 0.069 และ 0.142 m s^{-1} และความเร็วรอบหมุนการไถพรวนดิน 150 220 และ 280 rpm ความลึกการไถดิน 13 cm และรัศมีใบมีดจอบหมุน 22 cm โดยวัดจากจุดศูนย์กลางเพลาจอบหมุนถึงปลายใบมีดจอบหมุน ทดสอบในกระบะดินร่วนปนทราย (Sandy loam) และดินเหนียว (Clay) ทดสอบ 3 ซ้ำ

2.2 เครื่องมือทดสอบและอุปกรณ์วัด

งานวิจัยทั้งหมดทำการทดลองในกระบะดิน (soil bin) กว้าง 50 cm ยาว 250 cm และสูง 30 cm ชุดทดลองสามารถเคลื่อนที่ในแนวระนาบ โดยวิ่งบนราวเหล็กด้านข้างกระบะดิน (Figure 2) ชุดทดลองประกอบด้วยระบบชุดส่งกำลังด้วยกลไกเฟืองโซ่ เพลาจอบหมุน และใบมีดจอบหมุน โดยที่มอเตอร์ไฟฟ้า 7 kW ถูกติดตั้งไว้ที่ส่วนบนของชุดทดลอง เพื่อใช้เป็นต้นกำลังสำหรับเพลาจอบหมุน และมอเตอร์ไฟฟ้า 0.746 kW ใช้เป็นต้นกำลังสำหรับขับเคลื่อนชุดทดลอง magnetic pick up เป็นเซนเซอร์ใช้สำหรับวัดความเร็วการหมุนรอบของใบมีดจอบหมุน อินเวอร์เตอร์

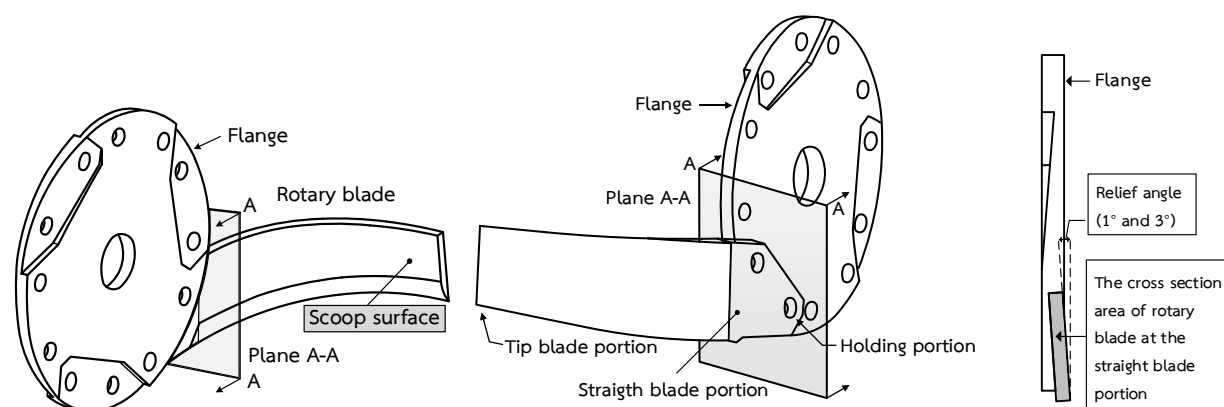


Figure 1 The rotary blade diagrams exhibit the relief angle at straight blade portion.

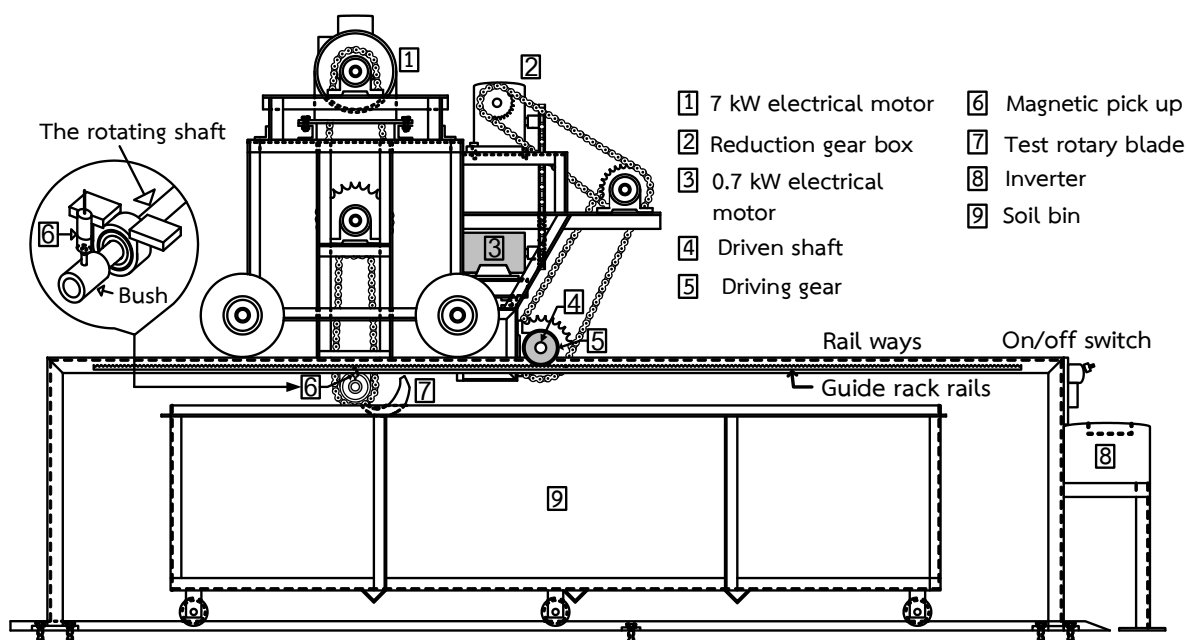


Figure 2 Schematic diagram of laboratory soil bin.

2.3 การวัดทอร์กและความเร็วการเดินทาง

Cross-strain gauge ถูกนำมาใช้สำหรับวัดทอร์กที่กระทำบนเพลาลอยหมุน โดยติด Cross-strain gauge จำนวน 2 อัน บนเพลาลอยหมุนในตำแหน่งตรงกันข้ามกัน ลวดนำสัญญาณของ Cross-strain gauge แต่ละอันถูกเชื่อมต่อเข้าด้วยกันในลักษณะวงจร Wheatstone bridge (Figure 3) การสอบเทียบปริมาณความเครียดของวงจร Strain gauges ที่แปรผันตามขนาดทอร์กที่กระทำกับบนเพลาลอยซึ่งได้จากการแขวนน้ำหนัก (Load) ที่ปลายใบมีดจอบหมุนในสภาวะสถิต (Static) ตำแหน่งแขวนน้ำหนักอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางเพลาลอยหมุนเป็นระยะทาง 18.2 cm น้ำหนักที่ใช้ในการสอบเทียบอยู่ในช่วง 0 ถึง 625.94 N ภายหลังการสอบเทียบทำให้ได้สมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างทอร์ก (y) หน่วย Nm และความเครียด (x) หน่วย $\mu\epsilon$ ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$y = 0.3756 \cdot x + 2.0675, R^2 = 0.9965 \quad (1)$$

ความเร็วในการเดินทางของชุดทดสอบวัดได้โดยการกำหนดตำแหน่ง A และ B บนราวเหล็กที่มีระยะทางระหว่างตำแหน่งทั้งสอง 120 cm ซึ่งเป็นระยะทางระหว่างแนวการเคลื่อนที่ของชุดทดสอบ บันทึกเวลาที่ชุดทดสอบใช้ในการเคลื่อนที่เพื่อคำนวณความเร็วการเดินทาง

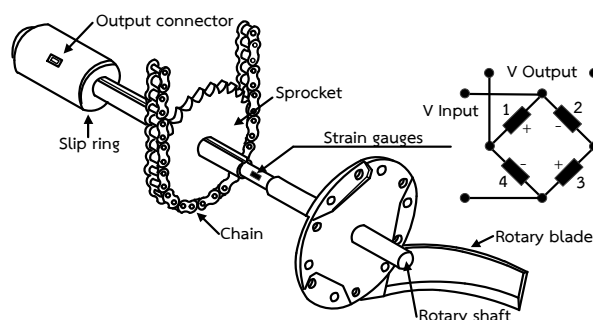


Figure 3 Schematic diagram of two cross-strain gauges boned on shaft surface.

2.4 การบันทึกสัญญาณ

ในระหว่างการไถพรวนดินของใบมีดจอบหมุน สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเนื่องจากทอร์กของ Cross-strain gauge รุ่น KFG-5-350-D16-11 และสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของความเร็วการหมุนรอบจาก Magnetic pick up จะถูกส่งไปยังเครื่องบันทึกเอนกประสงค์ (Universal recorder) ยี่ห้อ KYOWA รุ่น EDX-200A ซึ่งจะทำหน้าที่แปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นข้อมูลตัวเลข ข้อมูลจะถูกถ่ายโอนและบันทึกลงในคอมพิวเตอร์

2.5 การกำหนดตำแหน่งมุมการหมุนใบมีดจอบหมุน

การอ้างอิงตำแหน่งปลายใบมีดจอบหมุนในกระบวนการไถพรวนดินของใบมีดจอบหมุน (Figure 4) ใช้วิธีการกำหนดให้มุมเริ่มต้นการไถพรวนดินของใบมีดจอบหมุน ($\theta = 0^\circ$) เป็นตำแหน่งที่ปลายใบมีดจอบหมุนอยู่ในระนาบแนวตั้งเดียวกันกับจุดศูนย์กลางของเพลาลอยหมุนดังแสดงใน Figure 4(1) ที่ตำแหน่ง

(A) ขณะที่ Figure 4(2) 4(3) และ 4(4) แสดงตำแหน่งของปลายใบมีดจอบหมุนที่ตำแหน่ง (B) (C) (D) และ (E) ซึ่งแสดงตำแหน่งมุมการหมุน 90° 180° 270° และ 360° ตามลำดับ กำหนดให้ช่วงมุมการหมุนในควอดแรนท์ที่ 1 (the first quadrant, Q1) ควอดแรนท์ที่ 2 (the second quadrant, Q2) ควอดแรนท์ที่ 3 (the third quadrant, Q3) และ ควอดแรนท์ที่ 4 (the fourth quadrant, Q4) หมายถึง ช่วงมุมการหมุน $0 - 90^\circ$, $90 - 180^\circ$, $180 - 270^\circ$ และ $270 - 360^\circ$ ตามลำดับ

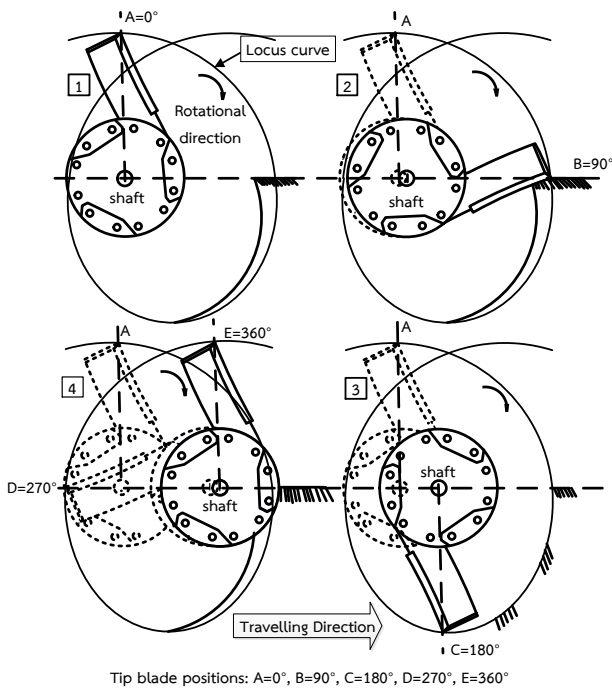


Figure 4 Diagrams of the tilling process and the position of blade tip.

2.6 การคำนวณค่าพลังงานการไถพรวน และค่าพลังงานการไถพรวนจำเพาะ

Chertkiattipol et al. (2009) อธิบายว่า พลังงานการไถพรวน คือพลังงานที่ใบมีดจอบหมุนใช้ในการตัดดิน คำนวณโดยทฤษฎีการหาปริมาณงานของแรงที่กระทำบนวัสดุ ในการทดลองนี้ปริมาณที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากโมเมนต์คู่ควบ ดังนั้นพลังงานการไถพรวน คือปริมาณงานเนื่องจากทอร์กที่กระทำบนเพลลาไถจอบหมุน โดยคำนวณได้จากการอินทิเกรตฟังก์ชันทอร์กจากตำแหน่งมุมการหมุนที่ (θ_1) ไปยังตำแหน่งมุมการหมุนที่ (θ_2) ดังสมการที่ (2)

$$W_{1 \rightarrow 2} = \int_{\theta_1}^{\theta_2} M d\theta \quad (2)$$

โดยที่ $W_{1 \rightarrow 2}$ คือ งานที่เกิดจากทอร์กกระทำกับวัตถุ (N m)
 M คือ ฟังก์ชันทอร์ก (N m)

$d\theta$ คือ มุมการหมุนที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีทอร์กมากระทำ (rad)

Beeny และ Khoo (1970) อธิบายว่า พลังงานการไถพรวนจำเพาะของไถจอบหมุนคือ พลังงานเนื่องจากการไถพรวนของใบมีดจอบหมุนต่อปริมาตรของดินในหนึ่งรอบการไถพรวนแสดงในสมการที่ (3)

$$\text{พลังงานการไถพรวน} = \frac{\text{พลังงานการไถพรวนดิน}}{\text{ปริมาตรดินที่ถูกไถในหนึ่งรอบหมุน}} \quad (3)$$

2.7 การเตรียมดินในกระบะดิน

ดินที่ใช้ในการทดลองเป็นดินร่วนปนทรายที่ประกอบด้วยอนุภาคทราย (sand) 59.83% อนุภาคตะกอน (silt) 25.14% อนุภาคดินเหนียว (clay) 15.03% ซึ่งมีค่าพิกัดพลาสติก (plastic limit) และขีดจำกัดเหลว (liquid limit) 12.89 และ 16.01% (dry basis) ตามลำดับ และดินเหนียวที่ประกอบด้วยอนุภาคทราย 5.25% อนุภาคตะกอน 32.67% อนุภาคดินเหนียว 62.08% ซึ่งมีค่าพิกัดพลาสติกและขีดจำกัดเหลว 23.20 และ 44.30% (dry basis) ตามลำดับ โดยดินที่ใช้ในการทดลองถูกนำมาร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานที่มีขนาดรูตะแกรง 2 mm ทดสอบที่ความชื้นดิน 11.2% (dry basis) โดยกรรมวิธีดินร่วนปนทรายทดลองที่ความหนาแน่นมวลรวมสภาพแห้ง (Dry bulk density) 1.49 g cm^{-3} ความต้านทานการแทงทะลุ (Cone penetration resistance) 1.07 MPa และกรรมวิธีดินเหนียวทดลองที่ความหนาแน่นมวลรวมสภาพแห้ง 1.67 g cm^{-3} ความต้านทานการแทงทะลุ 1.8 MPa โดยอ้างอิงวิธีการเตรียมดินจาก Chertkiattipol et al. (2010)

3 ผลและวิจารณ์

3.1 กระบวนการไถพรวนดิน

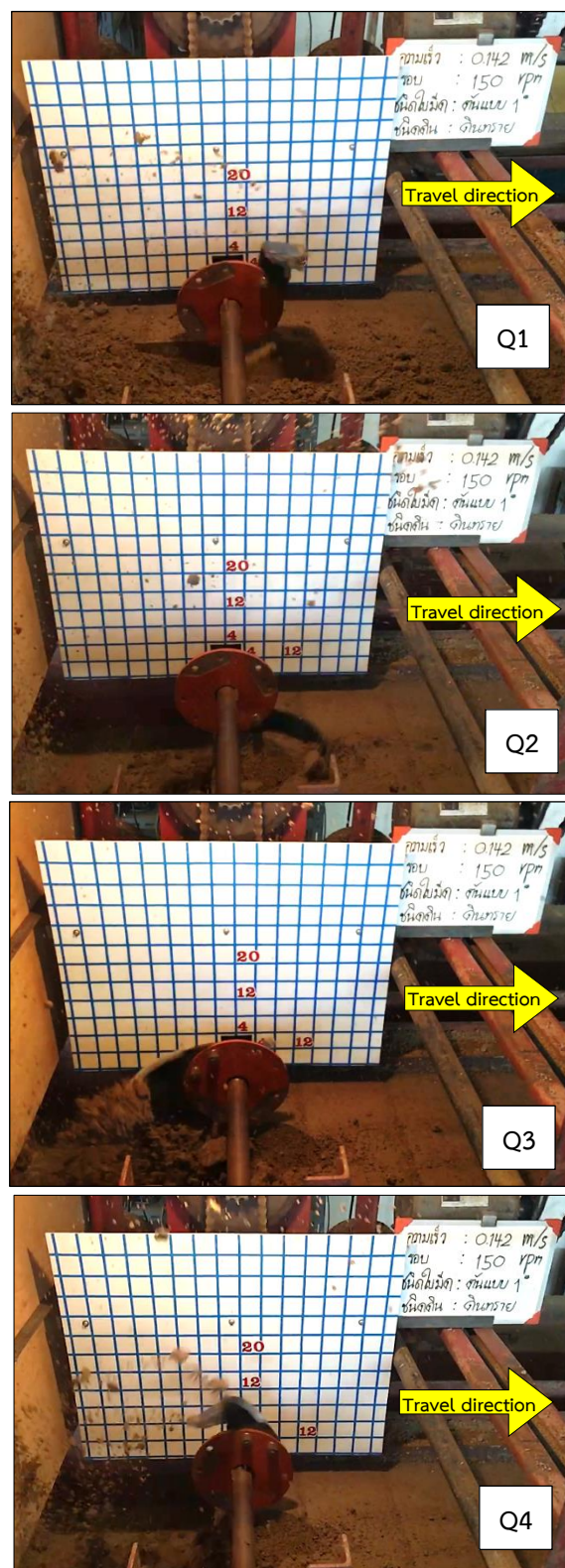
รูปถ่ายบันทึกการทดลองในกระบะดิน (Figure 5) แสดงให้เห็นถึงกระบวนการไถพรวนดินในแต่ละควอดแรนท์ ทอร์กในกระบวนการไถพรวนดินในหนึ่งรอบการหมุนของใบมีดจอบหมุนทั้ง 3 แบบ ได้แก่ ใบมีดจอบหมุนยูโรรูปตัวซี (B1) ใบมีดจอบหมุนที่ส่วนตรงมีมุมหลบ 1° (B2) และใบมีดจอบหมุนจอบหมุนที่ส่วนตรงมีมุมหลบ 3° (B3) โดยที่รูปถ่ายการไถพรวนดินใบมีดจอบหมุน B1 กำลังไถพรวนดินที่เงื่อนไขความเร็วรอบหมุน 150 รอบต่อนาที และความเร็วการเดินทาง 0.142 m s^{-1} ถูกแสดงใน Figure 6 แสดงให้เห็นลักษณะทอร์กที่สัมพันธ์กับการไถพรวนดินในแต่ละควอดแรนท์ ลักษณะทอร์กที่วัดได้สอดคล้องกับผลการวิจัยของ Phongsupasamit et al. (2004) และ Chertkiattipol et al. (2010) โดยพบว่าใน Q1 ถึงแม้ว่าใบมีดจอบหมุนยังไม่ได้ไถพรวนดิน แต่มีดินบางส่วนกำลังถูกโยนออกจาก Scoop surface ของใบมีดจอบหมุนไปทางด้านหลังชุดทดลอง ซึ่งเป็นดินจากรอบการไถพรวนก่อนหน้านี้ Q2 แสดงช่วงมุมการหมุนที่ใบมีดจอบหมุนแต่ละแบบกำลังไถพรวนดิน และ Q3 และ Q4 แสดงลักษณะการโยนดินของใบมีดจอบหมุนแต่ละแบบ และ

ในคอแตรนทั้งสี่ยังมีดินบางส่วนค้างอยู่บน scoop surface ของใบมีดจอบหมุน วิธีโอบันทึกผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าในระหว่างที่ใบมีดจอบหมุนกำลังหมุนใน Q3 และ Q4 ดินที่ถูกไถจาก Q2 จะเลื่อนไถจากส่วนหน้าไปยังส่วนท้ายของ Scoop surface และเห็นได้อย่างชัดเจนว่าก้อนดินบางส่วนถูกโยนออกจากส่วนหน้า Scoop surface ซึ่งมีสาเหตุมาจากเกิดลิ่มดิน (soil wedge) เกาะยึดบน Scoop surface ของใบมีดจอบหมุนขณะกำลังไถพรวนดินซึ่งกีดขวางการเลื่อนไถของก้อนดินบน Scoop surface ปรากฏการณ์นี้ถูกอธิบายไว้โดย Chertkiatipol et al (2010) อย่างไรก็ดีตามยังคงมีดินบางส่วนที่ถูกโยนออกไปทางส่วนหลังของ Scoop surface

3.2 ลักษณะทอร์กที่กระทำบนเพลาจอบหมุน

การไถพรวนดินทั้งกรณีใบมีดจอบหมุนที่ส่วนตรงใบมีดจอบหมุนมีมุมหลบ 1° (B2) และ 3° (B3) แสดงให้เห็นว่าทอร์กที่กระทำบนเพลาจอบหมุนมีลักษณะเดียวกันกับกรณีใบมีดจอบหมุนยุโรปตัวซี (B1) ดังแสดงใน Figure 6

ใน Q1 ถึงแม้ว่าส่วนปลายของใบมีดจอบหมุนทั้ง 3 แบบ ยังไม่ไถพรวนดิน แต่พบว่ามีการกระทำบนเพลาจอบหมุน ทอร์กดังกล่าวเกิดขึ้นจากโมเมนต์เฉื่อย (Moment of inertia) ที่เกิดจากการหมุนรอบเพลากลางของใบมีดจอบหมุน เมื่อพิจารณาลักษณะทอร์กใน Q2 ซึ่งเป็นช่วงมุมการหมุนที่ใบมีดจอบหมุนแต่ละแบบกำลังไถพรวนดิน ซึ่งเรียกว่า Tillage stage กราฟทอร์กแสดงให้เห็นว่ากรณีใบมีดจอบหมุนทั้ง 3 แบบ ทอร์กจะเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันซึ่งปรากฏขึ้นที่ตำแหน่งช่วงมุมการหมุน $115-117^\circ$ $117-119^\circ$ และ $111-113^\circ$ สำหรับกรณีใบมีดจอบหมุน B1 B2 และ B3 ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากส่วนปลายใบมีดจอบหมุนเริ่มไถพรวนดินในลักษณะกระแทก ต่อจากนั้นทอร์กจะเพิ่มขึ้นและลดลงสลับไปมาในลักษณะ Sinusoidal curve ปรากฏการณ์ดังกล่าวเรียกว่า Cyclicity ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับแรงปฏิกริยาระหว่างดินกับใบมีดจอบหมุน โดยสามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนที่เงื่อนไขดินเหนียว เหตุผลเนื่องจากอนุภาคดินของดินเหนียวมีขนาดเล็กกว่าอนุภาคดินของดินร่วนปนทราย ดังนั้นอนุภาคดินของดินเหนียวจะจัดเรียงใกล้กันมากกว่าอนุภาคดินของดินร่วนปนทรายซึ่งส่งผลทำให้แรงดึงดูดระหว่างอนุภาคดิน (Cohesive force) ของดินเหนียวสูงกว่าแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคดินของดินร่วนปนทราย เป็นสาเหตุทำให้แรงที่ใช้เพื่อทำให้ดินเหนียวแตกตัวเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งส่งผลทำให้ทอร์กที่เงื่อนไขดินเหนียวสูงกว่าเงื่อนไขดินร่วนปนทราย (Yong and Warkentin, 1975) ขณะที่ Makanga et al. (1997) และ Kataoka และ Shibusawa (2002) อธิบายว่า Cyclicity เป็นปรากฏการณ์ของ



Q1: the first quadrant

Q2: the second quadrant

Q3: the third quadrant

Q4: the forth quadrant

Figure 5 Tilling process of the rotary blade with 1° relief angle at the straight blade portion.

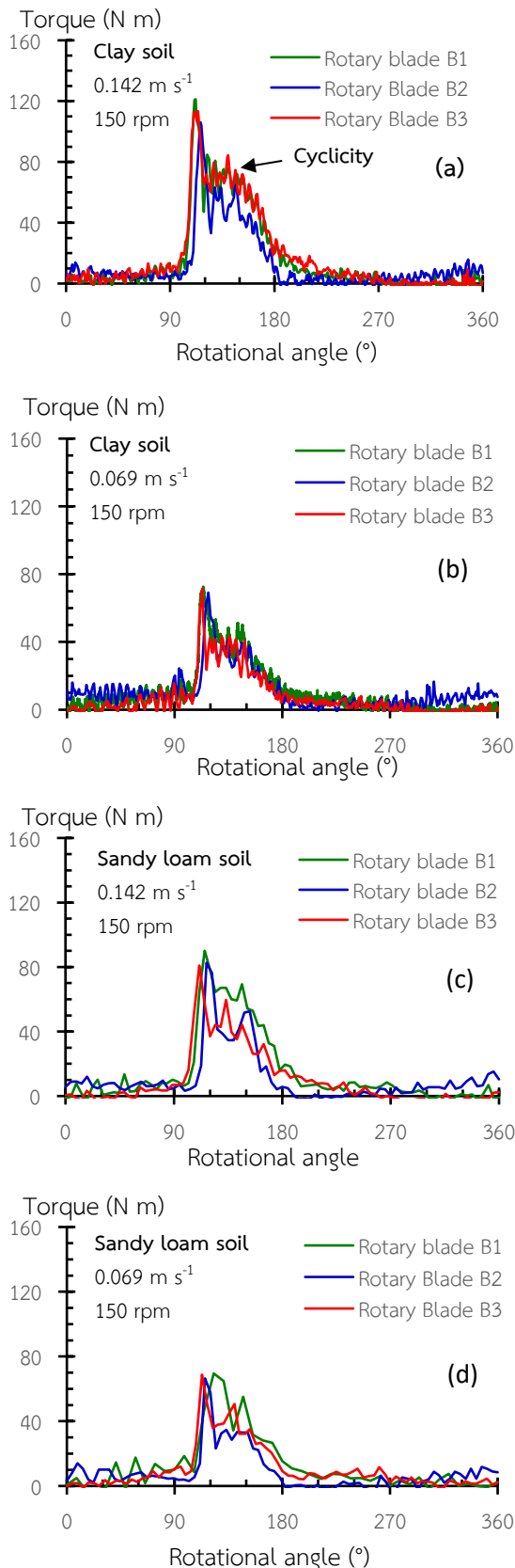
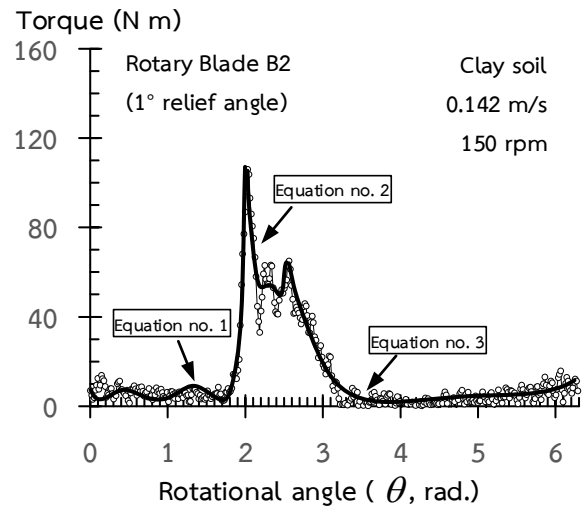


Figure 6 Torque characteristics of European C-shaped blade (B1), Rotary Blade with 1° relief angle (B2) and Rotary Blade with 3° relief angle (B3) at the rotational speed of 150 rpm.

แรงปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับรูปแบบการวัดของดิน (Soil failure) ที่เกิดขึ้นกับเครื่องมือไถเตรียมดิน และเมื่อพิจารณาลักษณะทอร์กใน Q3 และ Q4 ของใบมีดจอบหมุนทั้ง 3 แบบ แสดงให้เห็นว่าทอร์กใน Q3 และ Q4 มีขนาดมากกว่าเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดทอร์กใน Q1 เหตุผลเพราะการยึดเกาะของลิ่มดินบน Scoop surface และปริมาณดินที่ยังคงเลื่อนไถลอยอยู่บน Scoop surface ของใบมีดจอบหมุน

3.3 ทอร์กฟังก์ชันและพลังงานการไถพรวนดิน

Figure 7 แสดงตัวอย่างฟังก์ชันทอร์กขณะใบมีดจอบหมุน B2 ไถพรวนดิน 1 รอบไถ ที่เงื่อนไขดินเหนียว ความเร็วการเดินทาง 0.142 m s⁻¹ ความเร็วรอบการหมุน 150 rpm พลังงานการไถพรวนดิน (Tilling energy) ต่อรอบการไถพรวนของใบมีดจอบหมุน B1 (European C-haped Blade) ใบมีดจอบหมุน B2



Remark:

Torque function		
Equation no.	When	$y = \text{torque (N} \cdot \text{m)}$ $X = \text{rotational angle (rad.)}$
1	$y = 151.9x^6 - 807.93x^5 + 1583.5x^4 - 1392.8x^3 + 528.23x^2 - 66.658x + 8.4301$	$r^2 = 0.9438$
$\theta_1 = 0$ rad		
$\theta_2 = 2.026$ rad		
2	$y = -3273.2x^4 + 30472x^3 - 105671x^2 + 161692x - 92020$	$r^2 = 0.8170$
$\theta_1 = 2.026$ rad		
$\theta_2 = 2.560$ rad		
3	$y = -0.8209x^6 + 21.016x^5 - 217.2x^4 + 1149.8x^3 - 3238.5x^2 + 4467.4x - 2196$	$r^2 = 0.9258$
$\theta_1 = 2.560$ rad		
$\theta_2 = 6.866$ rad		

Figure 7 Example of torque functions for calculating tilling energy used by the rotary blade with 1° relief angle (B2).

(Rotary blade with 1° relief angle) และใบมีดจอบหมุน B3 (Rotary blade with 3° relief angle) คือ ขนาดพื้นที่ใต้กราฟของฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างทอร์ก (y) และมุมการหมุน (x) ซึ่งคำนวณหาได้จากผลรวมของการอินทิเกรตฟังก์ชันทอร์กในแต่ละช่วงมุมการหมุนโดยการแบ่งช่วงมุมการหมุนสำหรับฟังก์ชันทอร์กภายในหนึ่งรอบการไถพรวนขึ้นอยู่กับลักษณะทอร์กของใบมีดจอบหมุนแต่ละแบบ เนื่องจากทอร์กมีลักษณะเป็น sinusoidal ดังนั้นสมการโพลิโนเมียล (Polynomial regression) จึงถูกนำมาใช้แสดงฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างทอร์กและช่วงมุมการหมุน โดยพิจารณาความสอดคล้องระหว่างสมการโพลิโนเมียลกับลักษณะทอร์กจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient; r)

Figure 8 แสดงปริมาณพลังงานไถพรวนดินของใบมีดจอบหมุนยุโรปตัวซี (Rotary blade B1), ใบมีดจอบหมุนที่มีมุมหลบ 1° (Rotary blade B2) และ ใบมีดจอบหมุนที่มีมุมหลบ 3° (Rotary blade B3) ที่ใช้ในการไถพรวนดินหนึ่งรอบ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าไม่มีแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณพลังงานการไถพรวนดิน ความเร็วการเดินทางและความเร็วรอบหมุนของใบมีดจอบหมุน และไม่สามารถหาข้อสรุปผลเนื่องจากชนิดดินที่มีต่อปริมาณพลังงานการไถพรวนดินของใบมีดจอบหมุนแต่ละแบบ

3.4 พลังงานการไถพรวนจำเพาะ

การพิจารณาเปรียบเทียบค่าพลังงานการไถพรวนจำเพาะของใบมีดจอบหมุนยุโรปตัวซี (B1) ใบมีดจอบหมุนที่มีมุมหลบ 1° (B2) และใบมีดจอบหมุนที่มีมุมหลบ 3° (B3) ดังแสดงใน Figure 9a 9b และ 9c ตามลำดับ ผลการทดลองทั้งกรณีชนิดดินร่วนปนทรายและดินเหนียวแสดงให้เห็นว่าเมื่อความเร็วรอบหมุนเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้พลังงานการไถพรวนดินจำเพาะเพิ่มขึ้น และเมื่อความเร็วการเดินทางเพิ่มขึ้นจาก 0.069 m s^{-1} เป็น 0.142 m s^{-1} ในเงื่อนไขดินเหนียว ใบมีดจอบหมุนยุโรปตัวซี (B1) ใบมีดจอบหมุนที่มีมุมหลบ 1° (B2) และใบมีดจอบหมุนที่มีมุมหลบ 3° (B3) ใช้พลังงานการไถพรวนจำเพาะลดลง 42.46 – 56.03%, 51.82 – 68.78% และ 41.19 – 71.71% ตามลำดับ กรณีเงื่อนไขดินร่วนปนทราย ใบมีดจอบหมุนยุโรปตัวซี (B1) ใบมีดจอบหมุนที่มีมุมหลบ 1° (B2) และใบมีดจอบหมุนที่มีมุมหลบ 3° (B3) ใช้พลังงานการไถพรวนจำเพาะลดลง 25.95 – 35.85%, 29.89 – 46.55% และ 27.29 – 37.20% ตามลำดับ ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Beeny and Greig (1965) และ Chertkiattipol et al. (2010)

กรณีการทดลองในชนิดดินเหนียว เมื่อเปรียบเทียบค่าพลังงานการไถพรวนจำเพาะของใบมีดจอบหมุนทั้งสามแบบพบว่าที่ความเร็วการเดินทาง 0.069 m s^{-1} ใบมีดจอบหมุนที่มีมุมหลบ 1° (B2) ใช้พลังงานลดลง 12.78 – 14.75% และ 5.58 – 8.97% เมื่อเปรียบเทียบกับใบมีดจอบหมุนยุโรปตัวซี (B1)

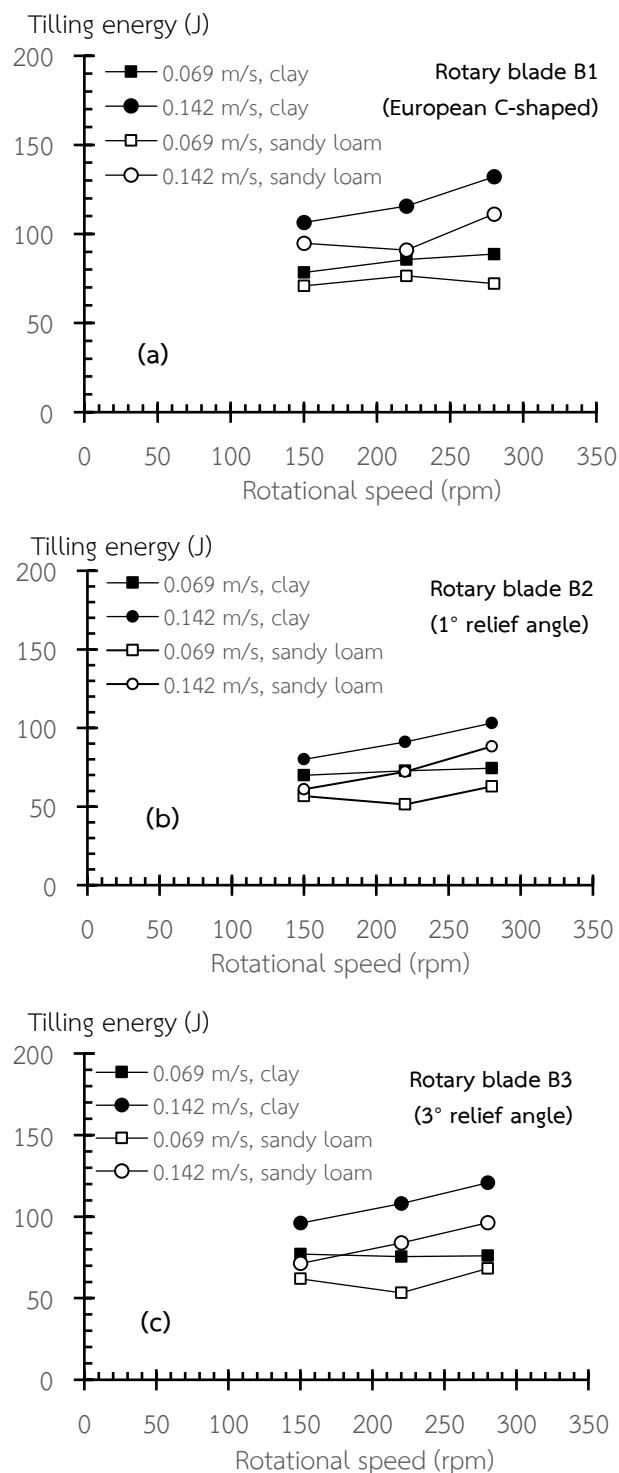


Figure 8 Tilling energies were used by rotary blade per a tillage round.

และใบมีดจอบหมุนที่มีมุมหลบ 3° (B3) ตามลำดับ และที่ความเร็วการเดินทาง 0.142 m s^{-1} ใบมีดจอบหมุนที่มีมุมหลบ 1° (B2) ใช้พลังงานลดลง 17.85 – 21.99% และ 7.39 – 12.19% เมื่อเปรียบเทียบกับใบมีดจอบหมุนยุโรปตัวซี (B1) และใบมีดจอบหมุนที่มีมุมหลบ 3° (B3) ตามลำดับ

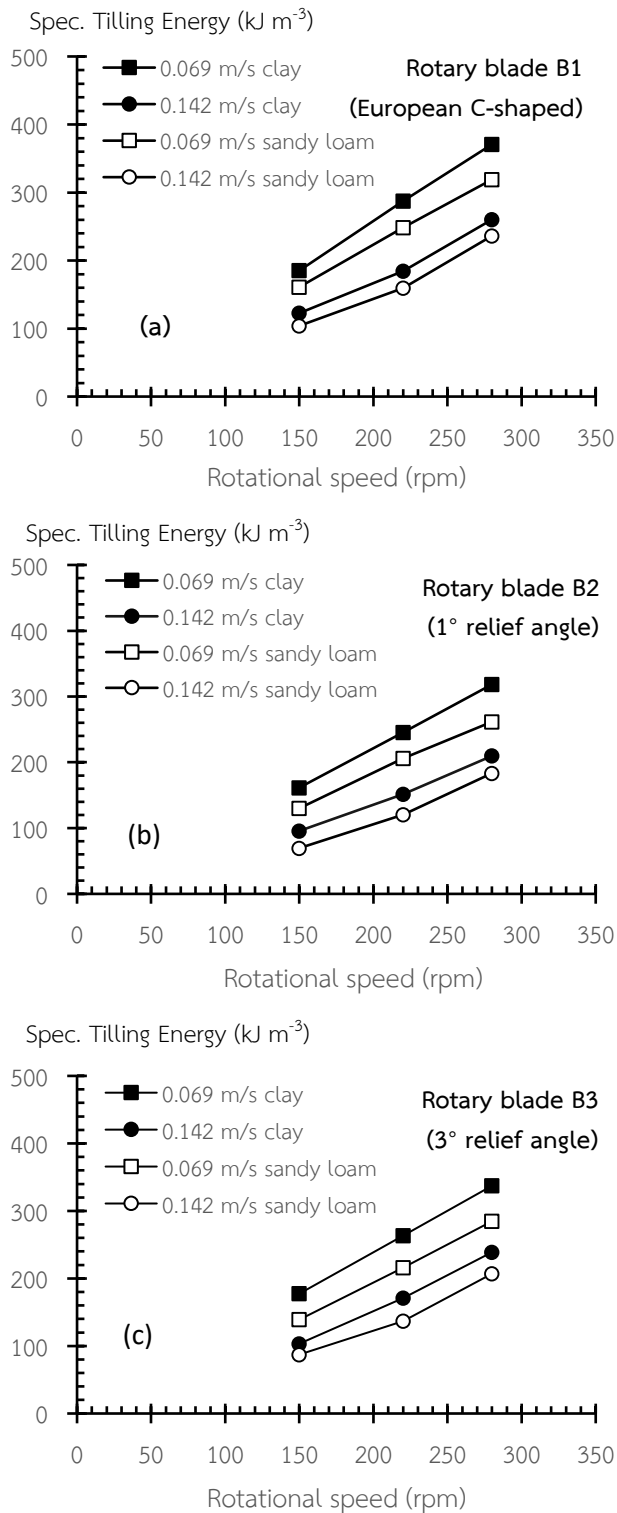


Figure 9 Graphs of specific tilling energy per a tillage round of tested rotary blade.

กรณีการทดลองในดินร่วนปนทราย ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าที่ความเร็วการเดินทาง 0.069 m s^{-1} ใบมีดจอบหมุนที่มีมุมหลบ 1° (B2) ใช้พลังงานลดลง 17.13 - 19.20% และ 4.63 - 8.11% เมื่อเปรียบเทียบกับใบมีดจอบหมุนยุโรปตัวซี (B1) และใบมีดจอบหมุนที่มีมุมหลบ 3° (B3) ตามลำดับ และที่ความเร็วการเดินทาง 0.142 m s^{-1} ใบมีดจอบหมุนที่มีมุมหลบ 1°

(B2) ใช้พลังงานลดลง 22.38 - 33.12% และ 11.39 - 20.32 % เมื่อเปรียบเทียบกับใบมีดจอบหมุนยุโรปตัวซี (B1) และใบมีดจอบหมุนที่มีมุมหลบ 3° (B3) ตามลำดับ

จากผลการศึกษาดังแสดงใน Figure 9 แสดงให้เห็นว่าในกรณีดินเหนียว ใบมีดจอบหมุนยุโรปตัวซี (B1) และใบมีดจอบหมุนที่มีมุมหลบ 3° (B3) ใช้พลังงานไถพรวนจำเพาะสูงกว่าใบมีดจอบหมุนที่มีมุมหลบ 1° (B2) โดยประมาณ 1.1 - 1.3 เท่า และ 1.1 เท่า ตามลำดับ สำหรับกรณีดินร่วนปนทราย ใบมีดจอบหมุนยุโรปตัวซี (B1) และใบมีดจอบหมุนที่มีมุมหลบ 3° (B3) ใช้พลังงานไถพรวนจำเพาะสูงกว่าใบมีดจอบหมุนที่มีมุมหลบ 1° (B2) โดยประมาณ 1.2 - 1.5 เท่า และ 1.1 - 1.3 เท่า ตามลำดับ

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ามุมหลบบริเวณด้านหลังของส่วนตรงใบมีดจอบหมุน B1 และ B2 เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลทำให้ใบมีดจอบหมุนใช้พลังงานการไถพรวนจำเพาะลดลง เนื่องด้วยมุมหลบดังกล่าวเป็นสาเหตุทำให้ผิวด้านหลังใบมีดจอบหมุนบริเวณส่วนตรงสัมผัสกับผิวดินลดลงซึ่งทำให้แรงเสียดทานระหว่างผิวใบมีดจอบหมุนบริเวณด้านหลังกับผิวดินลดลง อย่างไรก็ตามพบว่าใบมีดจอบหมุนที่มีมุมหลบ 3° (B3) ใช้พลังงานไถพรวนจำเพาะมากกว่าใบมีดจอบหมุนที่มีมุมหลบ 1° (B2) เนื่องด้วยขนาดมุมหลบที่มากเกินไปเป็นสาเหตุทำให้พื้นที่ผิวใบมีดจอบหมุนบริเวณด้านหน้าของส่วนตรงสัมผัสดินเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้แรงต้านขณะใบมีดจอบหมุนไถพรวนดินเพิ่มขึ้น

4 สรุป

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ลักษณะทอร์กของใบมีดจอบหมุนที่มีมุมหลบด้านหลังบริเวณส่วนตรงใบมีดจอบหมุน 1° (B2) และ 3° (B3) มีลักษณะเดียวกันกับใบมีดจอบหมุนยุโรปตัวซี (B1) ลักษณะทอร์กแสดงให้เห็นปรากฏการณ์ cyclicity นอกจากนั้นทอร์กที่กระทำบนเพลาจอบหมุนเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วการเดินทางเพิ่มขึ้น

จากการศึกษาค่าพลังงานการไถพรวนจำเพาะของใบมีดจอบหมุนยุโรปตัวซี (B1) ใบมีดจอบหมุนที่ส่วนตรงมีมุมหลบ 1° (B2) และใบมีดจอบหมุนที่ส่วนตรงมีมุมหลบ 3° (B3) พบว่าเมื่อความเร็วการหมุนรอบของใบมีดจอบหมุนเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้พลังงานการไถพรวนจำเพาะเพิ่มขึ้น และเมื่อความเร็วการเดินทางเพิ่มขึ้น จาก 0.069 m s^{-1} เป็น 0.142 m s^{-1} ค่าพลังงานการไถพรวนจำเพาะของใบมีดจอบหมุนลดลง และเมื่อเปรียบเทียบค่าพลังงานการไถพรวนจำเพาะระหว่างใบมีดจอบหมุนทั้งสามแบบพบว่ามุมหลบด้านหลังบริเวณส่วนตรงของใบมีดจอบหมุนเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อค่าพลังงานการไถพรวนจำเพาะ โดยที่พลังงานการไถพรวนจำเพาะต่อการไถพรวนของใบมีดจอบหมุนยุโรปตัวซี (B1) มีค่าสูงสุด ขณะที่ค่าพลังงานการไถพรวนจำเพาะต่อการไถพรวนของใบมีดจอบหมุนที่ส่วนตรงมุมหลบ 1° (B2) มีค่าน้อยที่สุด

5 กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ และคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์วัดและสถานที่ทำวิจัย

6 เอกสารอ้างอิง

Beeny, J.M., D.C. Khoo. 1970. Preliminary Investigations into the Performance of Different Shaped Blades for the Rotary Tillage of Wet Rice Soil. *Journal of Agricultural Engineering Research* 15(1), 27-33.

Chertkiattipol, S., T. Niyamapa., Vilas, M.S. 2009. Study on the characteristics of torque acting on rotary shaft of three types of the rotary blades. *Thai Agricultural Research Journal* 26(2), 146-163. (In Thai)

Chertkiattipol, S., Niyamapa, T., Vilas, M.S., 2009. Study on the specific tilling energy of three types of the rotary blades. *Thai Agricultural Research Journal* 27(3), 316-331. (In Thai)

Chertkiattipol, S., Niyamapa, T. 2010. Variations of torque and specific tilling energy for different rotary blades. *International Agricultural Engineering Journal* 19(3), 1-14.

Hendrick, J.G., W.R. Gill. 1971a. Rotary Tiller Design Parameters Part I: Direction of Rotation. *Trans ASAE* 14(4), 669-674, 683.

Hendrick, J.G., W.R. Gill. 1971b. Rotary Tiller Design Parameters Part II: Depth of Tillage. *Trans. ASAE* 14(4), 675-678.

Hendrick, J.G., W.R. Gill. 1971c. Rotary Tiller Design Parameters Part III: Ratio of Peripheral and Forward Velocities. *Trans. ASAE*. 14(4): 679-683.

Hendrick, J.G., W.R. Gill. 1971d. Rotary Tiller Design Parameters Part IV: Blade Clearance Angle. *Trans ASAE* 17(1), 4-7.

Kataoka, K.T., S. Shibusawa. 2002. Soil-blade dynamics in reverse-rotational rotary tillage. *Journal of Terramechanics* 39(2), 95-113.

Makanga, J.T., V.M. Salokhe., GeeClough, D. 1997. Effects of the rake angle and aspect ratio on soil reactions in dry loam soil. *Journal of Terramechanics* 34(4), 235-250.

Mongkol, C. 2016. Development of the prototype rotary blades attached to rotary tiller for tractor. Master

Thesis. Bangkok: Graduated School, Kasetsart University, Thailand. (In Thai)

Phongsupasamit, S., Laophongsawat, S. 2004. Characteristics of Resultant Forces Acting on Two Types of Rotary Blades. Pages 15-18. *Proceeding of the 2nd International Symposium on Machinery and Mechatronics for Agriculture and Bio-systems Engineering*, Sept. 21-23, Kobe University, Japan.

Sakai, J. 1977. Some Design Know-hows of Edge-curve Angle of Rotary Blades for Paddy Rice Cultivation. *Agriculture Machinery Asia Africa and Latin America* (spring), 49-57.

Sakai J. 1978. Designing process and theories of rotary blades for better rotary tillage (Part I). *Japanese Agricultural Research Quarterly* 12(2), 86-93.

Salokhe, V.M., Chuenpakaranant, W., Niyamapa, T. 1999. Effect of enamel coating on the performance of tractor drawn rotavator. *Journal of Terramechanics* 36, 127-138.

Salokhe, V.M., Hoki. M., Sato K. 1993. Why soil does not stick to enamel coating. *Journal of Terramechanics* 30(4), 275-83.

Thakur, T.C., Godwin, R.J. 1990. The Mechanics of Soil Cutting by a Rotating Wire. *Journal of Terramechanics* 27(4), 291-305.

Yong, R.N., Warkentin, B.P. 1975. *Soil Properties and Behaviour* (p. 448). Amsterdam, Oxford, New York: Elsevier Scientific Publishing Company.