

ค่าพลังงานการไถพรวนจำเพาะของใบมีดจอบหมุน 3 แบบ
Study on the Specic Tilling Energy of Three Types of the Rotary Blades

ศิริศักดิ์ เชิดเกียรติพล^{1/}

ธัญญา นียมาภา^{1/}

วิลาส สโลเก^{2/}

Sirisak Chertkiattipol^{1/}

Tanya Niyamapa^{1/}

Vilas Salokhe^{2/}

ABSTRACT

The aim of the study was to compare the specific tilling energy of blade namely the Japanese C-shaped blade, the European L-shaped and the European C-shaped. The experiments were carried out in laboratory using soil bin with sandy loam and clay soils at forward speeds of 0.034, and 0.069 m/s and rotational speeds of 150, 218, 278, and 348 rpm at 11.3% (d.b.) moisture content of soil under down-cut process. Moreover, the effects of rotational speed of rotary blades, forward speed, tilling depth and dry bulk density of soil were also studied. For all tested rotary blades, the tilling energy in clay soil was higher than in sandy loam soil. For the Japanese C-shaped blade in sandy loam soil, the specific tilling energy at 1.19 g/cm³ dry bulk density of soil was 2.6-11.3% higher than at 1.01 g/cm³ dry bulk density of soil. The tests of all rotary blades in clay soil showed that the specific tilling energy increased with increase in the tilling depth from 12 to 14 cm. In case of the tests in sandy loam soil at 1.01 g/cm³ dry bulk density of soil, the average of specific tilling energy requirement of Japanese C-shaped blade was 2.0–4.0 and 1.0–1.9 times higher than the European L-shaped and European C-shaped blades, respectively. For the experiments in clay soil at 1.01 g/cm³ dry bulk density of soil, the specific tilling energy requirement of the Japanese C-shaped blade was 2.8–2.9 times and 1.4–1.6 times higher than the European L-shaped and the European C-shaped blades, respectively.

^{1/} ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม 73140

^{1/} Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University, Kamphaengsaen Campus, Kamphaengsaen district Nakhon Pathom province, 73140

^{2/} โครงการเกษตรและวิศวกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

^{2/} Agricultural and Food Engineering Program, Asian Institute of Technology (AIT), Klong Luang district, Pathum Thani province 12120

Key words: specific tilling energy, Japanese C-shaped blade, European L-shaped blade, European C-shaped blade, sandy loam soil, clay soil

บทคัดย่อ

เปรียบเทียบค่าพลังงานการไถพรวนจำเพาะ (specific tilling energy) ของใบมีดจอบหมุน 3 ชนิดคือ ใบมีดจอบหมุนญี่ปุ่นรูปตัวซี (Japanese C-shaped blade) ยุโรปรูปตัวแอล (European L-shaped blade) และยุโรปรูปตัวซี (European C-shaped blade) โดยทำการทดลองในกระบะดิน (soil bin) ที่ความเร็วการเดินทาง (forward speed) 0.034 และ 0.069 ม./วินาที ความเร็วการหมุนรอบ (rotational speed) 150, 218, 278 และ 348 รอบ/นาที ใบมีดจอบหมุนไถพรวนดินในลักษณะหมุนในทิศทางเดียวกัน กับทิศทางการหมุนของล้อรถแทรกเตอร์ (down cut) ดินที่ใช้ทดลองเป็นดินชนิดดินร่วนปนทราย (sandy loam soil) และดินเหนียว (clay soil) ความชื้นดินในการทดลอง 11.3% (dry basis) งานวิจัยนี้ยังแสดงผลกระทบเนื่องจากความเร็วการหมุนรอบ ความเร็วการเดินทาง ความลึกการไถพรวน และความหนาแน่นมวลรวมสภาพแห้ง (dry bulk density) ของดิน ที่มีต่อค่าพลังงานการไถพรวนจำเพาะของใบมีดจอบหมุน และพบว่าค่าพลังงานการไถพรวนจำเพาะต่อการไถพรวนของใบมีดจอบหมุนขณะไถพรวนดินเหนียวสูง

กว่าดินร่วนปนทราย กรณีใบมีดจอบหมุนญี่ปุ่นรูปตัวซี ค่าพลังงานการไถพรวนจำเพาะต่อการไถพรวนในดินร่วนปนทราย ที่ความหนาแน่นมวลรวมสภาพแห้ง 1.19 ก./ลบ.ซม. สูงกว่าที่ความหนาแน่นมวลรวมสภาพแห้ง 1.01 ก./ลบ.ซม. ประมาณ 2.6–11.3% ขณะที่การไถพรวนดินเหนียวของใบมีดจอบหมุนทุกแบบแสดงว่าค่าพลังงานการไถพรวนจำเพาะที่เงื่อนไขความลึกการไถพรวน 14 ซม. สูงกว่าที่เงื่อนไขความลึกการไถพรวน 12 ซม. และพบว่าในการไถพรวนดินร่วนปนทรายที่เงื่อนไขความหนาแน่นมวลรวมสภาพแห้ง 1.01 ก./ลบ.ซม. ค่าพลังงานการไถพรวนจำเพาะต่อการไถพรวนของใบมีดจอบหมุนญี่ปุ่นรูปตัวซี สูงกว่าใบมีดจอบหมุนยุโรปรูปตัวแอล และใบมีดจอบหมุนยุโรปรูปตัวซี ประมาณ 2.0–4.0 เท่า และ 1.0–1.9 เท่า ตามลำดับ และในการไถพรวนดินเหนียวที่ความหนาแน่นมวลรวมสภาพแห้ง 1.01 ก./ลบ.ซม. ค่าพลังงานการไถพรวนจำเพาะต่อการไถพรวนของใบมีดจอบหมุนญี่ปุ่นรูปตัวซี สูงกว่าค่าพลังงานการไถพรวนจำเพาะของใบมีดจอบหมุนยุโรปรูปตัวแอล และใบมีดจอบหมุนยุโรปรูปตัวซีประมาณ 2.8–2.9 เท่า และ 1.4–1.6 เท่า ตามลำดับ

คำหลัก: พลังงานการไถพรวนจำเพาะ ใบมีดจอบหมุนญี่ปุ่นรูปตัวซี ใบมีดจอบหมุนยุโรปรูปตัวแอล ใบมีดจอบหมุนยุโรปรูปตัวซี ดินร่วนปนทราย ดินเหนียว

คำนำ

เครื่องพรวนจอบหมุน (rotary tiller) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับไถพรวนดิน เพื่อใช้เตรียมสภาพดินในแปลงเกษตรกรรมให้เหมาะกับการเพาะปลูกด้วยการไถพรวนเพียงหนึ่งหรือสองรอบการไถพรวน และเครื่องพรวนจอบหมุนยังเป็นอุปกรณ์ไถเตรียมดินที่ก่อให้เกิดแรงจุดลากน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับไถกระทะ (disk plow) และไถหัวหมู (mouldboard plow) (Gill and Berg; 1967; Sakai, 1993; Bukhari *et al.* 1996) ด้วยเหตุผลเหล่านี้จึงส่งผลให้ การใช้เครื่องพรวนจอบหมุน (rotary tiller) ต่อพ่วงกับรถฟาร์มแทรกเตอร์ (farm tractor) เพื่อเตรียมดินในแปลงเกษตรกรรมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จากข้อมูลการสำรวจของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (นिरนาม, 2550) แสดงว่าการใช้รถไถเดินตาม (walking tractor) ของเกษตรกรทั่วประเทศมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ข้อมูลการสำรวจในปี พ.ศ. 2548 พบว่ามีจำนวนรถไถเดินตาม 2,115,782 คัน นำมาใช้เป็นเครื่องมือทุ่นแรงเกษตรคือ รถไถเดินตามถูกใช้เป็นต้นกำลังเพื่อการซุดลากอุปกรณ์ไถสำหรับเตรียมดิน ทำนา การสูบน้ำและงานขนส่ง กรณีอุปกรณ์ไถเตรียมดินที่ใช้ร่วมกับรถไถเดินตามก็ยังคงจำกัดแต่เฉพาะไถกระทะและไถหัวหมู การสำรวจข้อมูลของของ Ruangrunghchaikul (1996) พบว่าการนำเข้ารถฟาร์มแทรกเตอร์ที่ติดตั้งเครื่องพรวนจอบหมุนเข้ามาในประเทศไทยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้การนำเครื่องพรวนจอบหมุนมาใช้เพื่อการไถพรวนเตรียมดินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย สุภษิต

และอัคคพล (2537) พัฒนารถไถเดินตามติดจอบหมุนสำหรับใช้พรวนดินในงานไร่โดยใช้สายพานถ่ายทอดกำลังจากเพลลาอำนวยการกำลังมายังเพลลาของเครื่องพรวนจอบหมุน ธีัญญาและชัยรัตน์ (2540) พัฒนาเครื่องพรวนจอบหมุนติดรถไถเดินตาม (rotary power tiller) สำหรับการเตรียมดินในแปลงปลูกผักโดยใช้ใบมีดจอบหมุนญี่ปุ่นรูปตัวซี (Japanese C-shaped blade) เพื่อเป็นการเพิ่มขอบเขตการใช้งานของรถไถเดินตามสำหรับการเตรียมดินในแปลงปลูกผักโดยใช้ใบมีดจอบหมุนญี่ปุ่นรูปตัวซี อัคคพลและคณะ (2548) พัฒนาเครื่องพรวนจอบหมุนที่ติดตั้งใบมีดจอบหมุนยุโรปรูปตัวซี (European C-shaped blade) เพื่อการผลิตข้าวอินทรีย์ และเครื่องพรวนจอบหมุนสำหรับการพรวนดินในสวนผลไม้ซึ่งใบมีดจอบหมุน (rotary blade) ที่นำมาใช้สำหรับการไถพรวนดินยังเป็นใบมีดจอบหมุนที่ถูกออกแบบโดยนักวิจัยต่างประเทศ ดังนั้นการพัฒนาใบมีดจอบหมุนให้เหมาะสมกับสภาพดินและรูปแบบการทำเกษตรกรรมของประเทศไทยจึงมีความจำเป็น การวิจัยควรจะเริ่มต้นจากการศึกษาใบมีดจอบหมุนที่เป็นที่นิยมใช้ในประเทศไทย

Beeny และ Greig (1965) ศึกษาสมรรถนะของเครื่องพรวนจอบหมุนติดรถแทรกเตอร์ในแปลงเกษตรกรรม โดยศึกษาผลกระทบเนื่องจากความลึกการไถพรวน ความเร็วการเดินทาง (forward speed) และความเร็วการหมุนรอบ (rotational speed) ของเครื่องพรวนจอบหมุน โดยพิจารณาจากปริมาณงานจำเพาะ (specific work) Beeny และ Khoo

(1970) ศึกษาสมรรถนะเครื่องพรวนจอบหมุนที่ติดตั้งใบมีดจอบหมุนมีรูปร่างแตกต่างกัน ได้แก่ ใบมีดจอบหมุนยุโรปรูปตัวแอล (European L-shaped blade) ใบมีดจอบหมุนยุโรปรูปตัวไอ (European I-shaped blade) และใบมีดจอบหมุนยุโรปรูปตัวซี โดยทดลองในแปลงเกษตรกรกรมสภาพดินนา Hendrick และ Gill (1971a, 1971b, 1971c และ 1971d) รวบรวมผลงานวิจัยที่เกี่ยวกับปัจจัยการออกแบบเครื่องพรวนจอบหมุน ได้แก่ทิศทางการหมุนของใบมีดจอบหมุน อัตราส่วนระหว่างความเร็วการเดินทางและความเร็วปลายใบมีดจอบหมุน (peripheral speed) ขณะหมุนรอบเพลาเครื่องพรวนจอบหมุนและมุม clearance angle ของใบมีดจอบหมุน และนำเสนอเทคนิคการหามุม clearance angle ที่ตำแหน่งปลายใบมีดจอบหมุน Gupta และ Pandey (1996) ศึกษาสมรรถนะของใบมีดจอบหมุนที่มีรูปร่างแตกต่างกัน 4 แบบ ได้แก่ logarithmic spiral tyne, archimedean spiral tyne, circular curvature tyne และ straight edge tyne โดยทำการทดลองในกระบะดิน(soil bin) ที่เงื่อนไขสภาพดินนา ศิริศักดิ์และคณะ (2551) พบว่ารูปร่างของใบมีดจอบหมุนเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อลักษณะทอรั๊กที่กระทำบนเพลาจอบหมุน จึงมีความจำเป็นสำหรับการศึกษาสมรรถนะการไถพรวนดินของใบมีดจอบหมุนที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศไทย เพื่อให้เกษตรกรสามารถใช้ใบมีดจอบหมุนได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด และเป็นข้อมูลด้านวิจัยที่ทำให้เข้าใจผลกระทบของรูปร่างใบมีดจอบหมุน

ที่มีต่อสมรรถนะการไถพรวนดิน ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ ศึกษาค่าพลังงานการไถพรวน (tilling energy) และค่าพลังงานการไถพรวนจำเพาะ (specific tilling energy) ของใบมีดจอบหมุน 3 แบบ ใบมีดจอบหมุนญี่ปุ่นรูปตัวซี ใบมีดจอบหมุนยุโรปรูปตัวแอล และใบมีดจอบหมุนยุโรปรูปตัวซี ในสภาพดินแห้ง (dry land)

อุปกรณ์และวิธีการ

1. เครื่องมือทดลอง

งานวิจัยทั้งหมดทำการทดลองในกระบะดิน กว้าง ยาวและสูง 50×250×30 ซม. ชุดทดลองสามารถเคลื่อนที่ในแนวระนาบ โดยวิ่งบนราวเหล็กด้านข้างกระบะดิน (Figure 1) ชุดทดลองประกอบด้วยระบบชุดส่งกำลังด้วยกลไกเฟืองโซ่ เพลาจอบหมุน และใบมีดจอบหมุน โดยที่มอเตอร์ไฟฟ้า 7 กิโลวัตต์ ถูกติดตั้งไว้ที่ส่วนบนของชุดทดลอง เพื่อใช้เป็นต้นกำลังสำหรับหมุนเพลาจอบหมุน และมอเตอร์ไฟฟ้า 0.746 กิโลวัตต์ ใช้เป็นต้นกำลังสำหรับขับเคลื่อนชุดทดลอง magnetic pick up เป็นเซนเซอร์ (sensor) ใช้สำหรับวัดความเร็วการหมุนรอบของใบมีดจอบหมุน อินเวอร์เตอร์ (inverter) ใช้สำหรับควบคุมความเร็วรอบการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้า 7 กิโลวัตต์ ใบมีดจอบหมุนที่ใช้ในการทดลองมีทั้งหมด 3 แบบ ได้แก่ ใบมีดจอบหมุนญี่ปุ่นรูปตัวซี ใบมีดจอบหมุนยุโรปรูปตัวแอล และใบมีดจอบหมุนยุโรปรูปตัวซี (Figure 2)

การศึกษาพลังงานการไถพรวนจำเพาะ

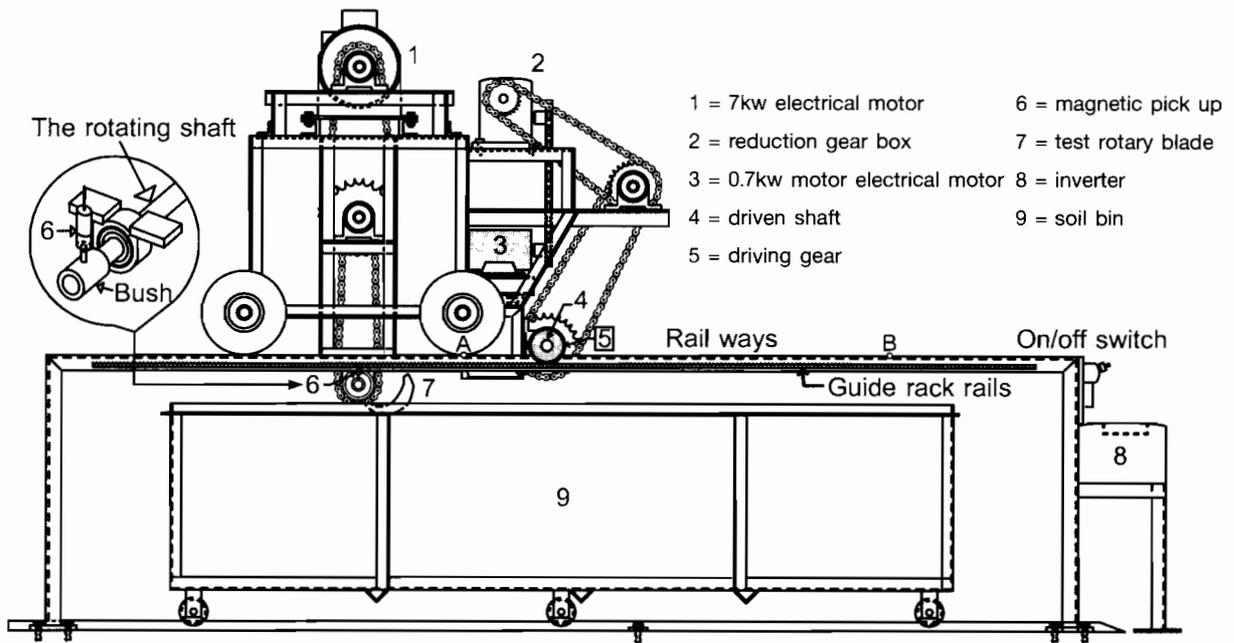


Figure 1. Schematic diagram of laboratory soil bin

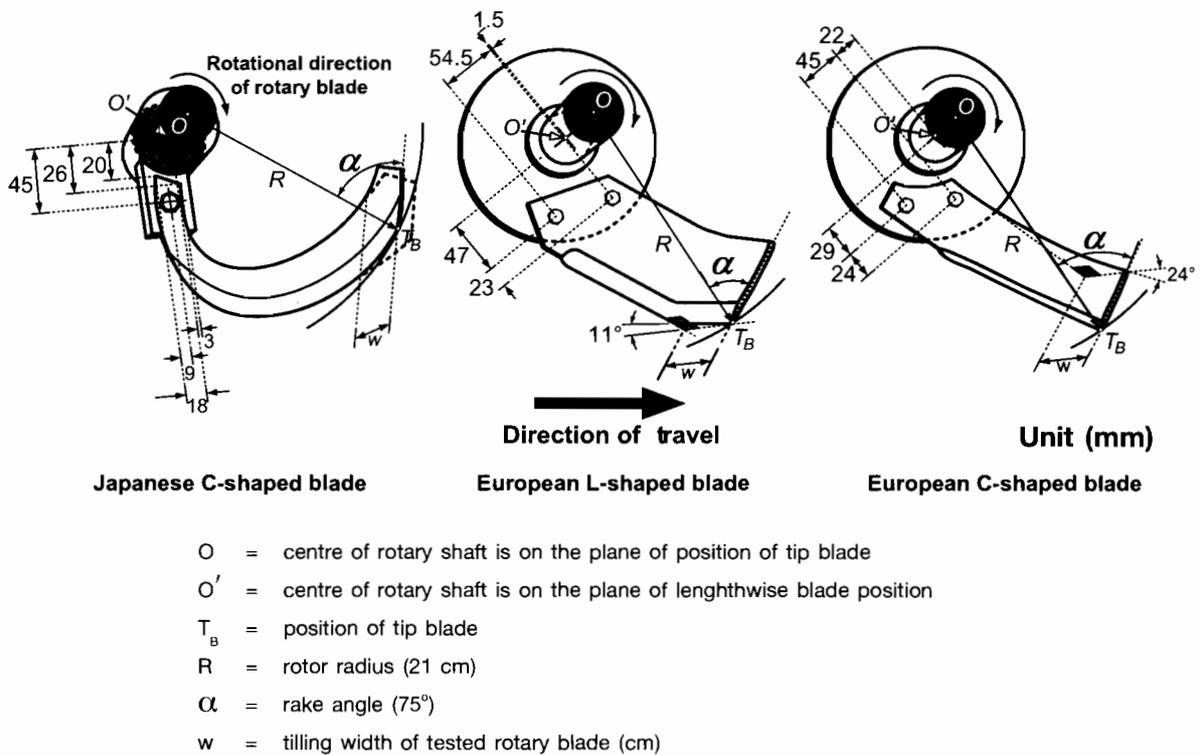


Figure 2. Rake angle and the installation of rotary blades on rotary shaft

ของใบมีดจอบหมุน ดำเนินการทดลองที่ความหนาแน่นมวลรวมสภาพแห้ง 1.01 ก./ลบ.ซม. ที่เงื่อนไขดินร่วนปนทรายและดินเหนียว ความลึกการไถพรวนดิน 12 และ 14 ซม. เพื่อศึกษาผลกระทบเนื่องจากความหนาแน่นมวลรวมสภาพแห้งของดินที่มีต่อปริมาณพลังงานไถพรวนจำเพาะ ดังนั้นจึงดำเนินการทดลองภายใต้เงื่อนไขดินร่วนปนทรายที่ความหนาแน่นมวลรวมสภาพแห้ง 1.19 ก./ลบ.ซม. ความลึกการไถพรวนดิน 12 ซม. การศึกษาทดลองที่ความเร็วการเดินทาง 0.034 และ 0.069 ม./วินาที ความเร็วการหมุนรอบของใบมีดจอบหมุน 150 218 278 และ 348 รอบ/นาที ซึ่งเป็นความเร็วการหมุนรอบที่เหมาะสมสำหรับการไถพรวนในสภาพดินที่แตกต่างกัน (Sakai, 1999)

2. การวัดทอร์กและความเร็วการเดินทาง

Cross-strain gauge ถูกนำมาใช้สำหรับวัดทอร์กที่กระทำบนเพลลาจอบหมุน โดยติด cross-strain gauge จำนวน 2 อัน บนเพลลาจอบหมุนในตำแหน่งตรงกันข้ามกัน ลวดนำสัญญาณของ cross-strain gauge แต่ละอันถูกเชื่อมต่อเข้าด้วยกันในลักษณะวงจร Wheatstone bridge (Figure 3) ความเร็วในการเดินทางของชุดทดสอบวัดได้โดยการกำหนดตำแหน่ง A และ B บนราวเหล็กที่มีระยะทางระหว่างตำแหน่งทั้งสอง 120 ซม. ซึ่งเป็นระยะทางระหว่างแนวการเคลื่อนที่ของชุดทดสอบ เวลาที่ชุดทดสอบใช้สำหรับเคลื่อนที่ผ่านระยะทางระหว่างตำแหน่ง A

และ B จะถูกบันทึก จากนั้นคำนวณหาความเร็วการเคลื่อนที่ของชุดทดลอง

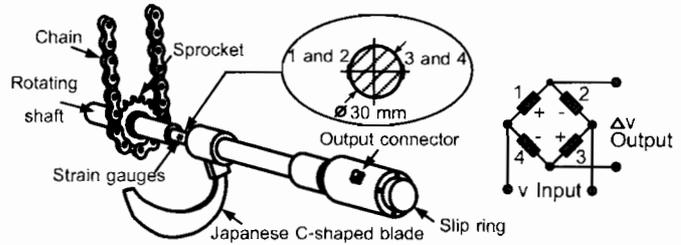


Figure 3. Schematic diagram of two cross-strain gauges bonded on shaft surface

3. กระบวนการจัดเก็บข้อมูล

ในระหว่างการไถพรวนดินของใบมีดจอบหมุนสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเนื่องจากทอร์กจาก cross-strain gauge รุ่น KFG-5-350-D16-11 และสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของความเร็วการหมุนรอบของใบมีดจอบหมุนจาก magnetic pick up ถูกบันทึกใน instrumentation tape รุ่น TEAC CT-90 Type II โดยเครื่อง cassette data recorder รุ่น TEAC MR-30 จากนั้นถ่ายโอนสัญญาณแรงดันไฟฟ้าอะนาล็อก (analog) จาก instrumentation tape ไปยังเครื่อง analyzing recorder รุ่น AR 1200 เพื่อแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นข้อมูลตัวเลข

4. การกำหนดตำแหน่งมุมการหมุนของใบมีดจอบหมุน

การอ้างอิงตำแหน่งปลายใบมีดจอบหมุนในกระบวนการไถพรวนดินของใบมีดจอบหมุน

(Figure 4) ใช้วิธีการกำหนดให้มุมเริ่มต้นการไถพรวนดินของใบมีดจอบหมุน ($\theta = 0$) เป็นตำแหน่งที่ปลายใบมีดจอบหมุนอยู่ในระนาบแนวตั้งเดียวกันกับจุดศูนย์กลางของเพลาดังแสดงใน I ที่ตำแหน่ง a Figure 4 ขณะที II, III และ IV

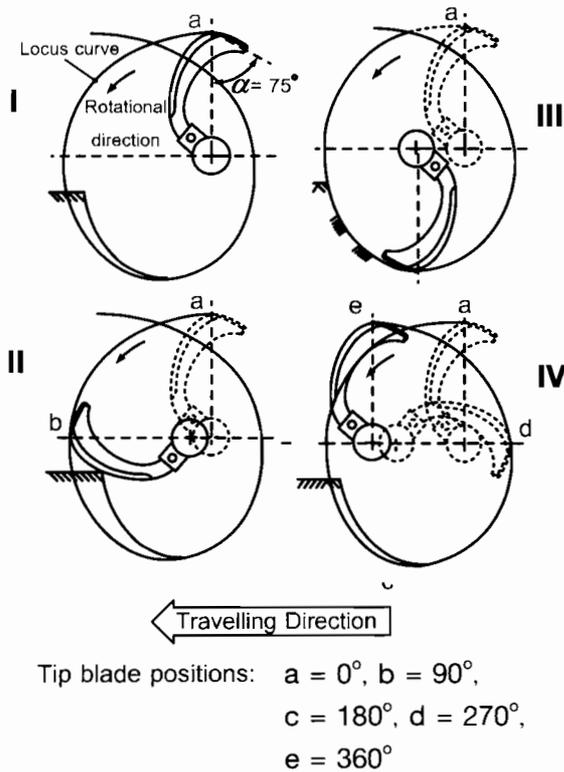


Figure 4. Diagrams of the tilling process and the position of blade tip

Remark: In case of the European L-shaped blade and the European C-shaped blade, the rake angles at tip of blades (α) were also maintain to be 75

แสดงตำแหน่งปลายใบมีดจอบหมุนที่ตำแหน่ง b c d และ e (Figure 4) ซึ่งเป็นตำแหน่งมุมการหมุนเท่ากับ 90 180 270 และ 360° ตามลำดับในการทดลองรัศมีของใบมีดจอบหมุนเท่ากับ

21 ซม. และมีมุม rake angle (α) 75 ซึ่งเป็นมุมระหว่างเส้นแนวรัศมีและเส้นสัมผัสผิวด้านในของ scoop surface ที่ตำแหน่งปลายใบมีดจอบหมุน

5. การคำนวณค่าพลังงานการไถพรวน และค่าพลังงานการไถพรวนจำเพาะ

พลังงานการไถพรวน หมายถึงพลังงานที่ใบมีดจอบหมุนใช้ในการตัดดินและการโยนดินในหนึ่งรอบการไถพรวน ซึ่งคำนวณโดยอาศัยทฤษฎีการคำนวณหาปริมาณงานของแรงที่กระทำบนวัตถุ ในกรณีนี้ปริมาณงานที่เกิดขึ้นจะเป็นผลเนื่องมาจากโมเมนต์คู่ควบ (couple moment) ดังนั้นพลังงานการไถพรวนของใบมีดจอบหมุนคือ ปริมาณงานเนื่องจากทอร์กที่กระทำบนเพลาดิจอบหมุน ซึ่งคำนวณโดยการอินทิเกรตฟังก์ชันจากตำแหน่งมุมการหมุนที่ 1 (θ_1) ไปยังตำแหน่งมุมการหมุนที่ 2 (θ_2) ดังสมการที่ (1)

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

โดยที่ $U_{1 \rightarrow 2}$ = งานที่เกิดจากทอร์กกระทำกับวัตถุ

M = ฟังก์ชันของทอร์ก

$d\theta$ = มุมการหมุนที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อทอร์กมากระทำ

Beeny และ Khoo (1970) อธิบายว่าพลังงานการไถพรวนจำเพาะของไถจอบหมุนคือ ปริมาณงานเนื่องจากการไถพรวนของใบมีดจอบหมุนต่อปริมาตรของดินในหนึ่งรอบการไถพรวน

$$\text{พลังงานการไถพรวนจำเพาะ} = \frac{\text{พลังงานต่อรอบการไถพรวน (tilling energy/tillage round)}}{\text{ปริมาณดินถูกตัดในหนึ่งรอบการไถพรวน (volume of soil/tillage round)}} \dots(2)$$

ดังแสดงในสมการที่ (2) และพิจารณาใช้ค่าพลังงานการไถพรวนจำเพาะเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของไบบีมัดจอบหมุนที่มีรูปร่างแตกต่างกัน

6. การเตรียมดินในกระบะดิน

ดินที่ใช้สำหรับทดลองเป็นดินในแปลงเกษตรกรรม ที่นำมาจากจ.ศรีสะเกษและนครปฐม จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรมิเตอร์ (hydrometer) พบว่าดิน จ.ศรีสะเกษประกอบด้วยอนุภาคทราย (sand) 59.83% อนุภาคตะกอน (silt) 25.14% อนุภาคดินเหนียว 15.03% จัดอยู่ในชนิดดินร่วนปนทราย มีพิกัดพลาสติก (plastic limit) และขีดจำกัดเหลว (liquid limit) 12.89 และ 16.01% dry basis ตามลำดับ และดินจ.นครปฐมประกอบด้วยอนุภาคทราย 5.25% อนุภาคดินตะกอน 32.67% อนุภาคดินเหนียว 62.08% จัดอยู่ในชนิดดินเหนียว ซึ่งมีค่าพิกัดพลาสติก และขีดจำกัดเหลว 23.20 และ 44.30% dry basis ตามลำดับ ดินที่ใช้สำหรับการทดลองถูกนำมา ร่อนผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานที่มีขนาดรูตะแกรง 2 มม. และนำมาปรับความชื้น ความชื้นเฉลี่ยของดินสำหรับการทดลองคือ 11.3% (dry basis) บรรจุดินที่ผ่านการปรับความชื้นลงในถุงพลาสติก บ่มดินไว้ในถุงพลาสติกอย่างน้อย 24 ชม. เพื่อให้ความชื้นในดินสม่ำเสมอ ดินที่ผ่านขั้นตอนการปรับความชื้นจะถูกนำมาเทลงในกระบะดินชั้นละ 15 ซม. จากนั้นทำการอัดแน่นดินในกระบะดินด้วยเครื่อง

มืออัดดิน (compactor) เพื่อเตรียมสภาพดินก่อนการทดลองให้อยู่ในสภาพดินแห้ง โดยในการศึกษานี้กรณีดินร่วนปนทรายทำการทดลองที่เงื่อนไขความหนาแน่นมวลรวมสภาพแห้งของดิน (dry bulk density of soil) 1.01 และ 1.19 ก./ลบ.ซม. ซึ่งมีความต้านทานการแทงทะลุ (penetration resistance) 250 และ 330 กิโลปาสคาลตามลำดับ กรณีดินเหนียวทดลองที่ความหนาแน่นมวลรวมสภาพแห้ง 1.01 ก./ลบ.ซม. ซึ่งมีความต้านทานการแทงทะลุ 1.150 กิโลปาสคาล

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. ทอรั๊กในกระบวนการไถพรวนดินของไบบีมัดจอบหมุน

การไถพรวนดินของไบบีมัดจอบหมุนญี่ปุ่นรูปตัวซี ไบบีมัดจอบหมุนยุโรปรูปตัวแอล และไบบีมัดจอบหมุนยุโรปรูปตัวซี (Figure 5a, 5b and 5c) ตามลำดับ ซึ่งแสดงตำแหน่งปลายไบบีมัดจอบหมุนกำลังหมุนอยู่ในช่วงมุมการหมุน 270-360 ° โดยที่ไบบีมัดจอบหมุนแต่ละแบบกำลังหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาพร้อมกันกับที่ชุดทดลองกำลังเคลื่อนที่จากขวาไปซ้าย แสดงลักษณะการโยนดินไปทางด้านหลังชุดทดลองของไบบีมัดจอบหมุนแต่ละแบบ และเมื่อพิจารณาร่วมกับลักษณะทอรั๊กที่กระทำบนเพลาจอบหมุน แสดงความชัดเจนว่า ขณะที่ไบบีมัดจอบหมุนแต่ละแบบทำการไถพรวนดิน (ช่วงมุมการหมุน 90-180 ° โดยประมาณ) ทอรั๊กที่กระทำบนเพล

จอบหมุนเพิ่มสูงขึ้น (Figure 6)

การไถพรวนดินร่วนปนทรายและดินเหนียวของใบมีดจอบหมุนญี่ปุ่นรูปตัวซี ใบมีดจอบหมุนยุโรปรูปตัวแอล และใบมีดจอบหมุนยุโรปรูปตัวซี ที่เงื่อนไขความลึกการไถพรวน 12 และ 14 ซม. ความหนาแน่นมวลรวมสภาพแห้ง 1.01 และ 1.19 ก./ลบ.ซม. แสดงว่าลักษณะทอร์กของใบมีดจอบหมุนญี่ปุ่นรูปตัวซีแตกต่างจากลักษณะทอร์กของใบมีดจอบหมุนยุโรปรูปตัวแอลและใบมีดจอบหมุนยุโรปรูปตัวซี (Figure 6) กรณีใบมีดจอบหมุนญี่ปุ่นรูปตัวซี ทอร์กเริ่มมีขนาดเพิ่มขึ้นในช่วงมุมการหมุน 75-87° ทอร์กเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งมีขนาดสูงสุดในช่วงมุมการหมุน 108-125° จากนั้นทอร์กจะลดลงกรณีใบมีดจอบหมุนยุโรปรูปตัวแอลและใบมีดจอบหมุนยุโรปรูปตัวซี ทอร์กเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างทันทีทันใดในช่วงมุมการหมุน 111-120° และ 102-120° ตามลำดับ จากนั้นทอร์กมีลักษณะเพิ่มขึ้นและลดลงสลับไปมา ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวถูกเรียกว่า cyclicity

(Makanga *et al.*, 1997; Kataoka and Shibusawa, 2002) การที่ทอร์กเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดในกรณีใบมีดจอบหมุนยุโรปเป็นผลเนื่องมาจากการไถพรวนดินในลักษณะกระแทกของใบมีดจอบหมุนยุโรปขณะเริ่มต้นไถพรวนดิน (ศิริศักดิ์และคณะ, 2551)

ทอร์กกระทำบนเพลาจอบหมุนที่ความเร็วการเดินทาง 0.069 ม./วินาที มีขนาดสูงกว่าทอร์กที่ความเร็วการเดินทาง 0.034 ม./วินาที (Figure 6) ซึ่งแสดงด้วยตัวอย่างผลการทดลองกรณีใบมีดจอบหมุนญี่ปุ่นรูปตัวซี เพราะว่าเมื่อความเร็วการเดินทางเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาตรดินต่อรอบการไถพรวนเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อปริมาตรดินเพิ่มขึ้นส่งผลให้แรงเสียดทานภายใน (angle of internal friction) และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคดิน (cohesion) เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังส่งผลให้แรงดึงดูดระหว่างอนุภาคดินและผิวใบมีดจอบหมุน (adhesive force) เพิ่มขึ้น เพราะเมื่อปริมาตรดินเพิ่มขึ้นเป็นผลทำให้ผิวสัมผัสระหว่างใบมีดจอบหมุนกับดินเพิ่มขึ้น ผล

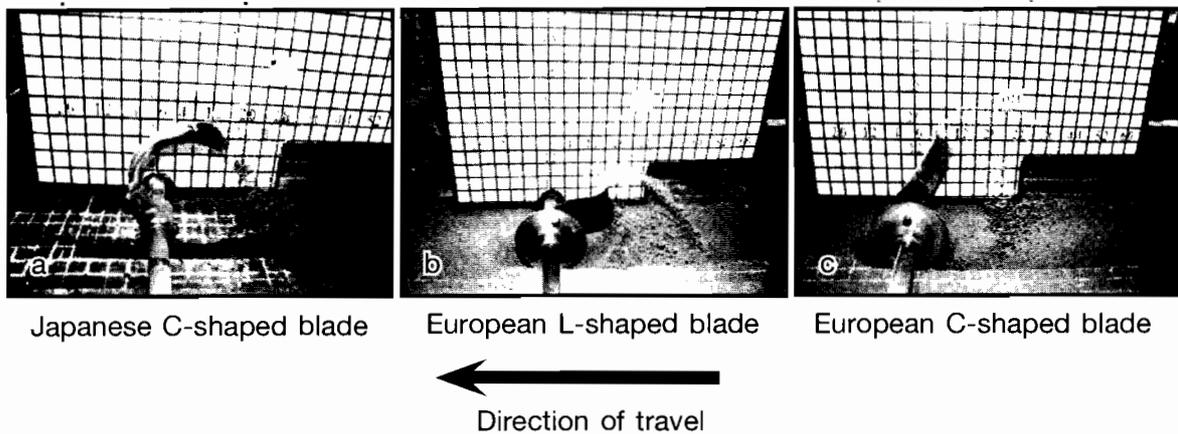
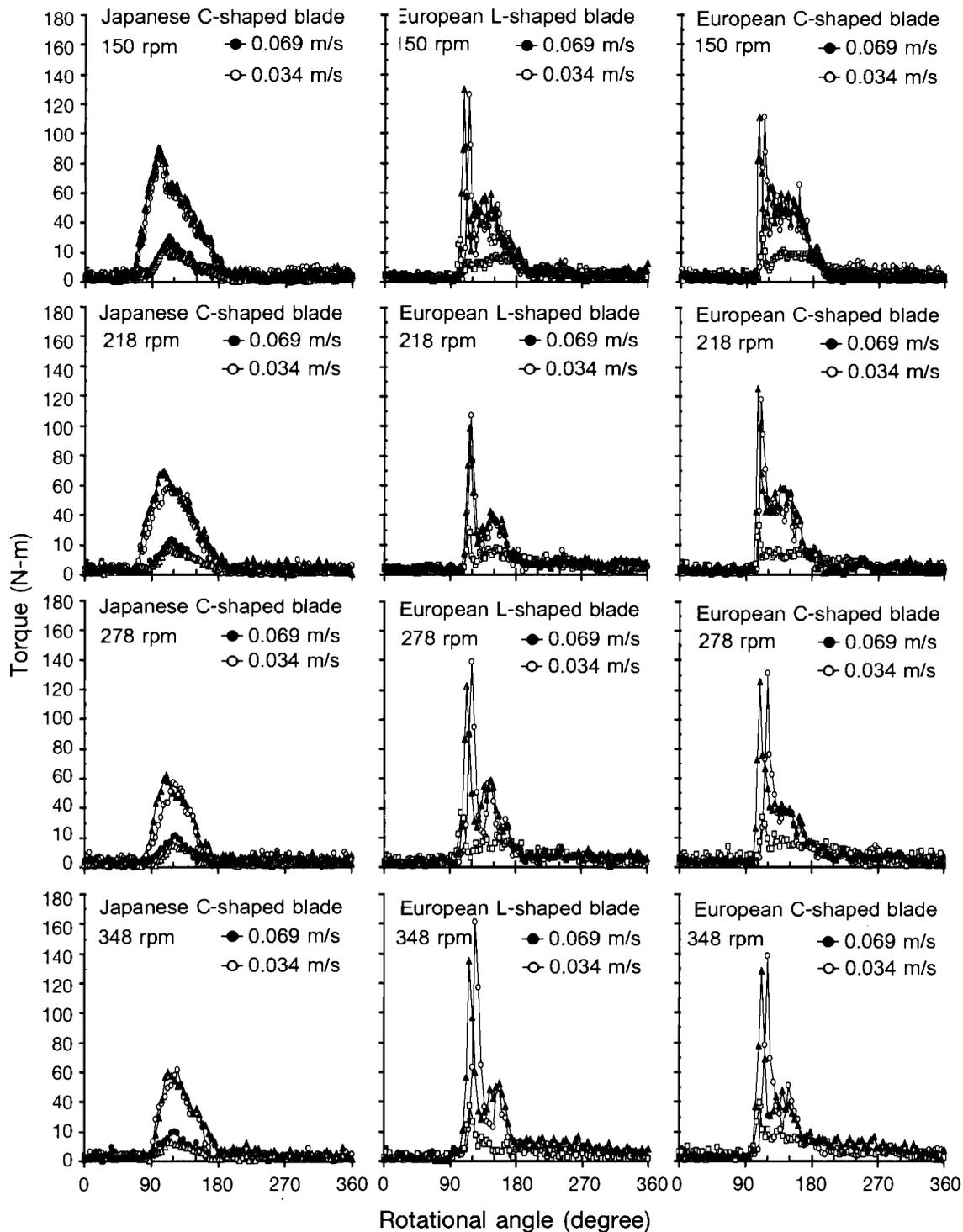


Figure 5. The photographs of tested rotary blades in tilling process



- ▲ Clay, 1.01 g/cm³, 14 cm tilling depth, 0.069 m/s
- Clay, 1.01 g/cm³, 12 cm tilling depth, 0.069 m/s
- Clay, 1.01 g/cm³, 12 cm tilling depth, 0.034 m/s
- △ Sandy loam, 1.19 g/cm³, 12 cm tilling depth, 0.069 m/s
- Sandy loam, 1.19 g/cm³, 12 cm tilling depth, 0.069 m/s

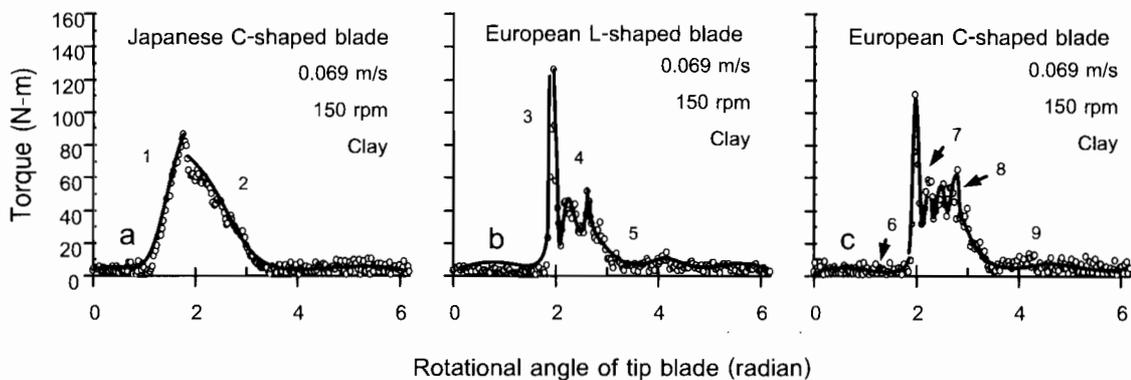
Figure 6. Characteristics of torque acting on a rotary shaft of Japanese C-shaped, European L-shaped and European C-shaped blades

การทดลองยังแสดงว่าในช่วงมุมการหมุนที่ใบมีด
จอบหมุนแต่ละแบบกำลังไถพรวนดินที่ความลึก
การไถพรวนดิน 14 ซม. ขนาดทอร์กที่ที่กระทำ
บนเพลาจอบหมุนไม่แตกต่างเมื่อเปรียบเทียบกับ
ทอร์กที่เงื่อนไขความลึกการไถพรวน 12 ซม.

2. ฟังก์ชันทอร์ก

พลังงานการไถพรวนต่อรอบการไถ
พรวนของใบมีดจอบหมุนญี่ปุ่นรูปตัวซี ใบมีดจอบ
หมุนยุโรปรูปตัวแอล และใบมีดจอบหมุนยุโรปรูป

ตัวซีคือ ขนาดพื้นที่ใต้กราฟของฟังก์ชันความ
สัมพันธ์ระหว่างทอร์ก (y) และมุมการหมุน (x)
ซึ่งคำนวณได้จากผลรวมของการอินทิเกรต
ฟังก์ชันทอร์กในแต่ละช่วงมุมการหมุน โดยที่การ
แบ่งช่วงมุมการหมุนสำหรับฟังก์ชันทอร์กภายใน
หนึ่งรอบการไถพรวนขึ้นอยู่กับลักษณะทอร์กของ
ใบมีดจอบหมุนแต่ละแบบ ผลการทดลองที่ความ
ลึกการไถพรวน 12 ซม. และความหนาแน่นมวล
รวมสภาพแห้ง 1.01 ก./ลบ.ซม. (Figure 7a 7b
and 7c) เนื่องจากทอร์กมีลักษณะเป็น sinusoidal



Where as;

$$1 \quad y = 42.912x^3 - 56.396x^2 + 15.986x + 3.3012; r^2 = 0.97$$

$$2 \quad y = -0.4834x^4 + 5.0978x^3 - 4.6814x^2 - 88.123x + 227.34; r^2 = 0.96$$

$$3 \quad y = 2,524.84x^3 - 17,526.27x^2 + 40,278.25x - 30,581.57; r^2 = 0.89$$

$$4 \quad y = -2,671.46x^4 + 46,379.87x^3 - 300,680.79x^2 + 863,133.83x - 926,051.12; r^2 = 0.91$$

$$5 \quad y = 1,859.80x^4 - 26,011.47x^3 + 136,344.69x^2 - 317,448.96x + 277,009.58; r^2 = 0.86$$

$$6 \quad y = 4.73x^4 - 16.06x^3 + 18.07x^2 - 7.51x + 4.30; r^2 = 0.76$$

$$7 \quad y = -20,593.09x^4 + 167,183.40x^3 - 504,977.58x^2 + 671,737.92x - 331,448.51; r^2 = 0.97$$

$$8 \quad y = 18,661.32x^4 - 184,961.85x^3 + 686,570.87x^2 - 1,131,151.21x + 697,931.19; r^2 = 0.85$$

$$9 \quad y = 3.92x^4 - 76.11x^3 + 546.75x^2 - 1,722.05x + 2,013.15; r^2 = 0.82$$

1-9 = torque function

y = torque (N·m)

x = rotational angle (radian)

Figure 7. The torque functions of Japanese C-shaped blade (a), European L-shaped blade (b) and European C-shaped blade (c) for calculating tilling energy

ดังนั้นสมการโพลิโนเมียล (polynomial regression) จึงถูกนำมาใช้แสดงฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่าง ทอร์กและมุมการหมุน โดยพิจารณาความ สอดคล้องระหว่างสมการโพลิโนเมียลกับ ลักษณะทอร์กจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient, r)

3. พลังงานการไถพรวน และพลังงานการไถ พรวนจำเพาะ

พลังงานการไถพรวนของใบมีดจอบหมุน ฎีปุ๋นรูปตัวซี ใบมีดจอบหมุนยูโรปรูปตัวแอล และใบมีดจอบหมุนยูโรปรูปตัวซี (Figure 8a, 8b and 8c) ที่ได้จากการคำนวณจากสมการที่ 1 และ 2 ภายใต้เงื่อนไขดินร่วนปนทรายและดิน เหนียว แสดงว่าไม่ปรากฏแนวโน้มที่ชัดเจน ระหว่างพลังงานการไถพรวน ความเร็วการหมุน รอบ และความเร็วการเดินทางของใบมีดจอบ หมุน แต่พบว่าพลังงานการไถพรวนดินต่อรอบ การไถพรวนในดินเหนียวสูงกว่าในดินร่วนปน ทราย เพราะขนาดของอนุภาคดินของดินเหนียว มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 0.002 มม. ส่งผลให้อนุภาคดินของดินเหนียวจัดเรียงตัวใกล้ ชิดกันมากกว่าอนุภาคดินของดินร่วนปนทราย จึงทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคดินของดิน เหนียวมากกว่าพื้นที่สัมผัสระหว่างอนุภาคดิน ของดินร่วนปนทราย ผลที่ตามมาคือ แรงดึงดูด ระหว่างอนุภาคดิน (cohesive force) ในดิน เหนียวสูงกว่าดินร่วนปนทราย เนื่องจาก แรงดึงดูดระหว่างอนุภาคดินเป็นแรงที่เกิดขึ้น จากแรงดึงผิวของน้ำบนผิวอนุภาคดิน (Yong

and Warkentin, 1975)

อย่างไรก็ตามผลการเปรียบเทียบค่า พลังงานการไถพรวนจำเพาะของใบมีดจอบหมุน ฎีปุ๋นรูปตัวซี (Figure 9a and 9b) ใบมีดจอบ หมุนยูโรปรูปตัวแอล (Figure 9b and 9e) และ ใบมีดจอบหมุนยูโรปรูปตัวซี (Figure 9c and 9f) แสดงว่าเมื่อความเร็วการหมุนรอบของใบมีด จอบหมุนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้พลังงานการไถพรวน จำเพาะเพิ่มขึ้น และเมื่อความเร็วการเดินทาง เพิ่มขึ้นจาก 0.034 เป็น 0.069 ม./วินาที ค่า พลังงานการไถพรวนจำเพาะของใบมีดจอบหมุน ลดลง ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับผล การทดลองของ Beeny และ Greig (1965) การศึกษาผลกระทบเนื่องจากความหนาแน่นมวล รวมสภาพแห้งของดิน (Figure 9a and 9d) เฉพาะกรณีใบมีดจอบหมุนฎีปุ๋นรูปตัวซี ที่ เงื่อนไขดินร่วนปนทรายและความลึกการไถ พรวน 12 ซม. แสดงว่าการไถพรวนดินของใบ มีดจอบหมุนฎีปุ๋นรูปตัวซีที่ความหนาแน่นมวล รวมสภาพแห้งของดิน 1.19 ก./ลบ.ซม. ค่า พลังงานการไถพรวนจำเพาะเพิ่มขึ้น 2.6–11.3 % เมื่อเปรียบเทียบกับค่าพลังงานการไถพรวน จำเพาะที่ความหนาแน่นมวลรวมสภาพแห้งของ ดิน 1.01 ก./ลบ.ซม. การทดลองไถพรวนดินของ ใบมีดจอบหมุนในดินเหนียวที่ระดับความลึกการ ไถพรวน 12 และ 14 ซม. (Figures 9a-9f) แสดงว่าที่ระดับความลึกการไถพรวน 14 ซม. (Figures 9d, 9e and 9f) ค่าพลังงานการไถ พรวนจำเพาะของใบมีดจอบหมุนฎีปุ๋นรูปตัวซี ใบมีดจอบหมุนยูโรปรูปตัวแอล และใบมีดจอบ

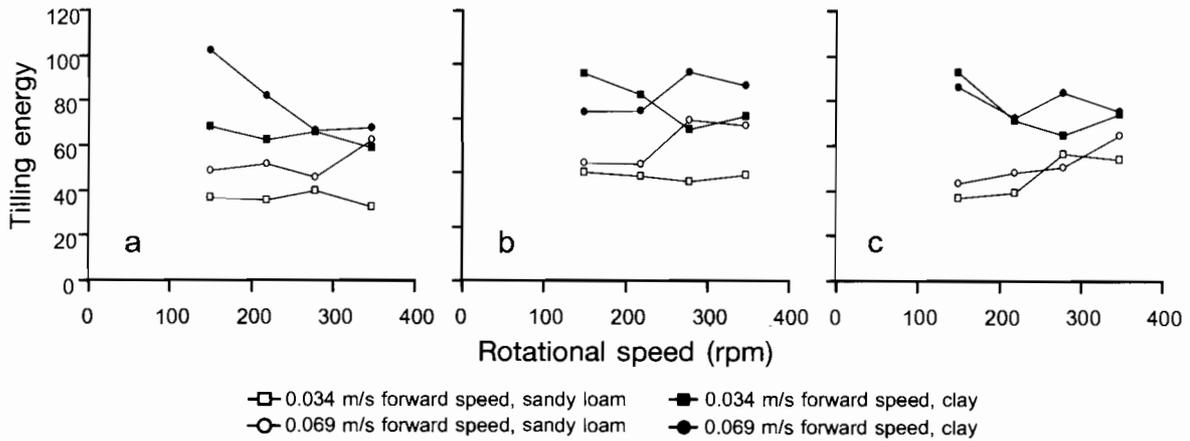


Figure 8. Tilling energy used by Japanese C-shaped blade (a), European L-shaped blade (b), and European C-shaped blade (c) at 12 cm tilling depth and 1.01 g/cm³ dry bulk density of soil

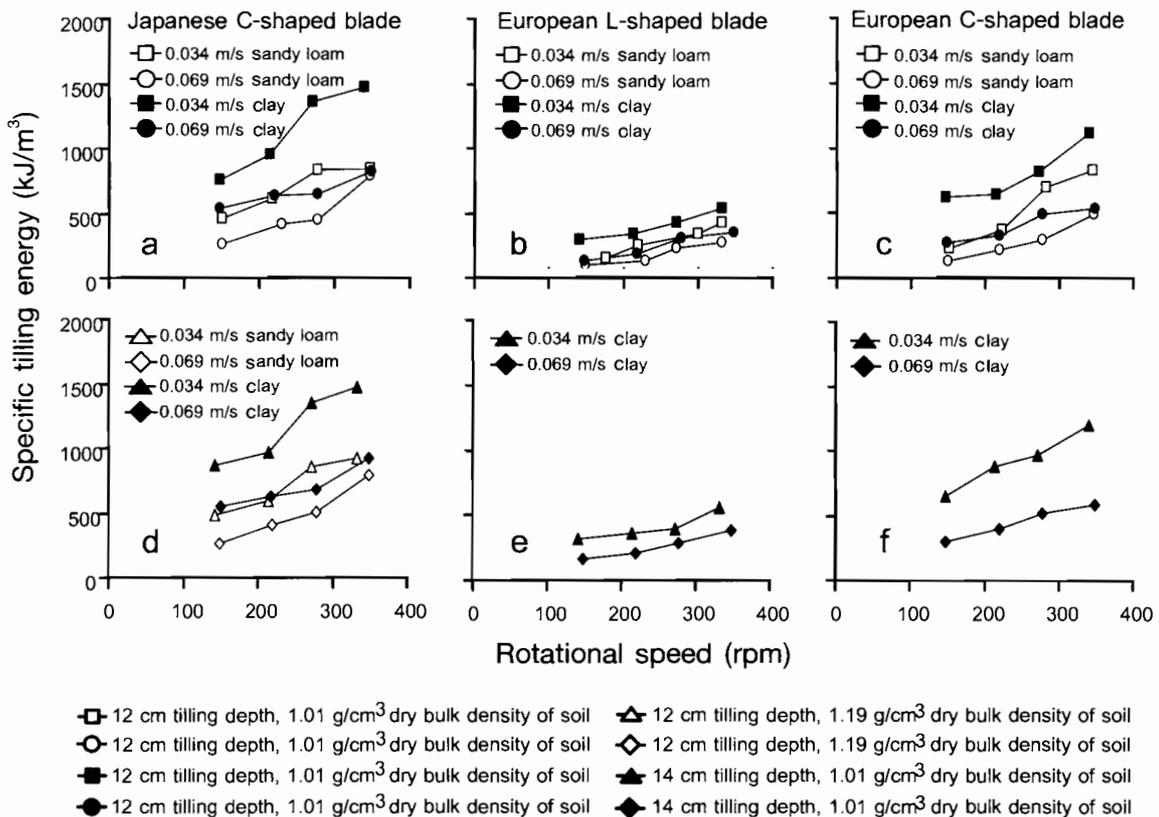


Figure 9. Gras of specific tilling energy per a tillage round of tested rotary blade

หมุนยุโรปรูปตัวซีเพิ่มขึ้น 0.5–13.3%, 3.5–22.6% และ 3.7–25.0% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าพลังงานการไถพรวนจำเพาะที่เงื่อนไข 12 ซม (Figures 9a, 9b and 9c) นอกจากนี้ยังพบว่าในหนึ่งรอบการไถพรวนค่าพลังงานการไถพรวนจำเพาะของใบมีดจอบหมุนญี่ปุ่นรูปตัวซี สูงกว่าพลังงานการไถพรวนจำเพาะของใบมีดจอบหมุนยุโรปรูปตัวแอล และใบมีดจอบหมุนยุโรปรูปตัวซี นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาผลการทดลองการไถพรวนในดินร่วนปนทรายที่ความหนาแน่นมวลรวมสภาพแห้ง 1.01 ก./ลบ.ซม. ความลึกการไถพรวน 12 ซม. (Figure 9a, 9b and 9c) พบว่าพลังงานการไถพรวนจำเพาะต่อรอบการไถพรวนของใบมีดจอบหมุนญี่ปุ่นรูปตัวซีสูงกว่าใบมีดจอบหมุนยุโรปรูปตัวแอล และใบมีดจอบหมุนยุโรปรูปตัวซีโดยเฉลี่ยประมาณ 2.0–4.0 เท่า และ 1.0–1.9 เท่า ตามลำดับ ขณะที่การเปรียบเทียบค่าพลังงานการไถพรวนจำเพาะสำหรับกระบวนการไถพรวนดินของใบมีดจอบหมุนในดินเหนียวที่ความหนาแน่นมวลรวมสภาพแห้ง 1.01 ก./ลบ.ซม. ความลึกการไถพรวน 12 และ 14 ซม. (Figure 9a - 9f) ผลการทดลองแสดงว่าค่าพลังงานการไถพรวนจำเพาะต่อรอบการไถพรวนของใบมีดจอบหมุนญี่ปุ่นรูปตัวซี สูงกว่าค่าพลังงานการไถพรวนจำเพาะต่อรอบการไถพรวนของใบมีดจอบหมุนยุโรปรูปตัวแอล และสูงกว่าใบมีดจอบหมุนยุโรปรูปตัวซี โดยเฉลี่ยประมาณ 2.8-2.9 เท่า และ 1.4-1.6 เท่า ตามลำดับ (Figure 9a - 9f)

แม้ว่าใบมีดจอบหมุนยุโรปใช้พลังงานการไถพรวนจำเพาะต่อรอบการไถพรวนน้อยกว่าใบมีด

จอบหมุนญี่ปุ่นรูปตัวซี แต่สำหรับการนำใบมีดจอบหมุนยุโรปมาใช้งานร่วมกับรถไถเดินตามอาจไม่เหมาะสม เนื่องจากใบมีดจอบหมุนยุโรปก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนที่มากกว่าในกระบวนการไถพรวนดิน ซึ่งส่งผลทำให้ความสามารถทำงานของเกษตรกรลดลง อย่างไรก็ตามข้อสังเกตจากการที่ค่าพลังงานการไถพรวนจำเพาะของใบมีดจอบหมุนยุโรปน้อยกว่าใบมีดจอบหมุนญี่ปุ่นรูปตัวซี จะถูกนำมาใช้พิจารณาเพื่อพัฒนาใบมีดจอบหมุนชนิดใหม่สำหรับใช้งานร่วมกับรถไถเดินตามที่เหมาะสมกับสภาพการทำเกษตรกรรมของประเทศไทยในลำดับต่อไป

สรุปผลการทดลอง

ลักษณะทอร์คของใบมีดจอบหมุนญี่ปุ่นรูปตัวซีแตกต่างจากลักษณะทอร์คของใบมีดจอบหมุนยุโรปรูปตัวแอล และใบมีดจอบหมุนยุโรปรูปตัวซี ขณะที่ปรากฏการณ์ cyclicity แสดงความชัดเจนในกรณีใบมีดจอบหมุนยุโรปทั้งสองแบบ นอกจากนั้นทอร์คที่กระทำบนเพลาจอบหมุนเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วการเดินทางเพิ่มขึ้น

ค่าพลังงานการไถพรวนจำเพาะของใบมีดจอบหมุนญี่ปุ่นรูปตัวซี ใบมีดจอบหมุนยุโรปรูปตัวแอล และใบมีดจอบหมุนยุโรปรูปตัวซีเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วการหมุนรอบของใบมีดจอบหมุนเพิ่มขึ้น และค่าพลังงานการไถพรวนจำเพาะลดลงเมื่อความเร็วการเดินทางเพิ่มขึ้น จาก 0.034 เป็น 0.069 ม./วินาที อีกทั้งยังพบว่าค่าพลังงานการไถพรวนจำเพาะต่อรอบการไถพรวนของใบมีดจอบหมุนเพิ่มขึ้น เมื่อความลึกการไถ

พรวนเพิ่มขึ้นจาก 12 ซม. เป็น 14 ซม. และเมื่อความหนาแน่นมวลรวมสภาพแห้งเพิ่มขึ้นจาก 1.01 เป็น 1.19 ก./ลบ.ซม. นอกจากนี้ค่าพลังงานการไถพรวนจำเพาะต่อรอบการไถพรวนในดินเหนียวสูงกว่าการไถพรวนในดินร่วนปนทราย และเมื่อเปรียบเทียบค่าพลังงานการไถพรวนจำเพาะระหว่างไบบีมัดจอบหมุนทั้งสามแบบพบว่าพลังงานการไถพรวนจำเพาะต่อรอบการไถพรวนของไบบีมัดจอบหมุนญี่ปุ่นรูปตัวซีมีค่าสูงสุดขณะที่ค่าพลังงานการไถพรวนจำเพาะต่อรอบการไถพรวนของไบบีมัดจอบหมุนยุโรปรูปตัวแอลมีค่าน้อยที่สุด

คำขอบคุณ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัยและคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสนที่สนับสนุนให้ทุนอุดหนุนวิจัย และภาควิชาวิศวกรรมเกษตรที่ให้ความช่วยเหลือสนับสนุนด้านเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์และสถานที่ทำการทดลองห้องปฏิบัติการพลศาสตร์ทางดินและการประยุกต์

เอกสารอ้างอิง

ธัญญา นิยมภา และชัยรัตน์ รางแดง. 2540. รายงานการวิจัยและพัฒนาฉบับสมบูรณ์: ไถจอบหมุนติตรถไถเดินตาม เสนอศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 185 หน้า.

นิรนาม. 2550. *ปัจจัยการผลิตทางการเกษตร ตัวชี้วัดทางเศรษฐกิจการเกษตรของประเทศ ไทย 2548*. สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2550. http://www.oae.go.th/indicator/indicator48/07__chapter%205.pdf, 5 /4/ 2550.

สุภาชิต เสงี่ยมพงศ์ และอัคคพล เสนานรงค์. 2537. *การพัฒนารถไถเดินตามติตรถจอบหมุน*. สถาบันวิจัยวิศวกรรมเกษตร กรมวิชาการเกษตร. 25 หน้า.

ศิริศักดิ์ เชิดเกียรติพล ธัญญา นิยมภา และ Vilash Salokhe. 2551. การศึกษา ลักษณะทอร์กที่กระทำบนเพลาจอบหมุนของไบบีมัดจอบหมุน 3 แบบ. *ว.วิชาการเกษตร* 26(2): 146-163.

อัคคพล เสนานรงค์ ยุทธนา เครือหาญชาญพงศ์ ชนิษฐ์ หว่านณรงค์ สุภาชิต เสงี่ยมพงศ์ และอนุชิตจำสึงห์. 2548. หน้า 44-57. ใน : *จอบหมุนติตรถไถเดินตามเพื่อการผลิตข้าวอินทรีย์*. สถาบันวิจัยวิศวกรรมเกษตร กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

Beeny, J.M. and D.J. Greig. 1965. The efficiency of a rotary cultivator. *J. Agric. Engng. Res.* 10(1): 5-9.

Beeny, J.M. and D.C. Khoo. 1970. Preliminary Investigations into the performance of different saped blades for the rotary tillage of wet

- rice soil. *J. Agric. Engng. Res.* 15(1): 27-33.
- Bukhari, K.H.; S. Bukhari; M.M. Leghari and M.S. Memon. 1996. Effect of forward speed and rear shield on the performance of rotary Tiller. *Agric. Mech. Asia Afri. and Latin Amer.* 27(2): 9-14.
- Gill, W.R. and G.E.V. Berg. 1967. *Soil Dynamics in Tillage and Traction*. Agricultural Research Service, United States Department of Agriculture, Washington. 511 p.
- Gupta, J.P. and K.P. Pandey. 1996. Performance of rotary tiller tynes under wet land condition. *Agric. Mech. Asia Afri. and Latin Amer.* 27(1), 16-20.
- Hendrick, J.G. and W.R. Gill. 1971a. Rotary tiller design parameters part I: direction of rotation. *Trans. ASAE.* 14(4): 669-674 and 683.
- _____. 1971b. Rotary tiller design parameters part II: depth of tillage. *Trans. ASAE.* 14(4): 675-678.
- _____. 1971c. Rotary tiller design parameters part III: ratio of peripheral and forward velocities. *Trans. ASAE.* 14(4): 679-683.
- _____. 1971d. Rotary tiller design parameters part IV: blade clearance angle. *Trans. ASAE.* 17(1): 4-7.
- Kataoka, K.T. and S. Shibusawa. 2002. Soil-blade dynamics in reverse-rotational rotary tillage. *J. Terramech.* 39(2): 95-113.
- Makanga, J.T. V.M. Salokhe and D. Gee-Clough. 1997. Effects of tine rake angle and aspect ratio on soil reactions in dry loam soil. *J. Terramech.* 34(4): 235-250.
- Ruangrunghaikul, T. 1996. *The Utilization of Second-hand Tractors in Lopburi Province, Thailand*. M.S. Thesis No. AE-96-7, Asian Institute of Technology, Bangkok. 137 p.
- Sakai, J. 1993. *Design-Theories and Production Technology of Japanese Rotary Tillage Blades*. Farm Machinery Section Tsukuba International Agricultural Training Centre Japan International Cooperation Agency (JICA). 81 p.
- Sakai, J. 1999. *Two-wheel Tractor Engineering for Asian Wet Land Farming*. Shin-norinsha Co., Ltd., Tokyo. 311 p.
- Yong, N. Y. and B. P. Warkentin. 1975. *Soil Properties and Behaviour*. Elsevier Scientific Publishing Company, New York. 449 p.