



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร)

ปริญญา

วิศวกรรมเกษตร

วิศวกรรมเกษตร

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของไถดินดานชนิดสันทั้งโครง

The Study on Factors Affecting Performance of Soil Shakerator

นามผู้วิจัย นายกิตติคุณ ประเสริฐกาญจน์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ประเทือง อุษาบริสุทธิ์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์หทัยเทพ วงศ์สุวรรณ, วศ.ด.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวลักษณ์ ปฐวิรัตน์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของไถดินดานชนิดสั้นทั้งโครง

The Study on Factors Affecting Performance of Soil Shakerator

โดย

นายกิตติคุณ ประเสริฐกาญจน์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร)

พ.ศ. 2552

กิตติคุณ ประเสริฐกาญจน์ 2552: การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของไถดินดานชนิดสัน
ทั้งโครง ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร) สาขาวิศวกรรมเกษตร
ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์
ประเทือง อุษาบริสุทธิ์, Ph.D. 114 หน้า

ในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของไถระเบิดดินดานชนิดสันทั้งโครง ใช้ชุดไถที่
ประกอบด้วยขาไถจำนวน 3 ขา ยึดติดกับโครงและชุดลูกตุ้มไม่สมดุลยึดติดกับเพลลา ซึ่งได้รับกำลัง
ขับเคลื่อนจากเพลลาอำนาจกำลังของรถแทรกเตอร์ขนาด 87 แรงม้า การทดลองทำในพื้นที่ดินร่วน
เหนียวปนทราย ความชื้นดิน 12.32 % (db) ความหนาแน่นดินสถานะแห้งเฉลี่ย 1.62 g/cm^3 และค่า
ความต้านทานการแทงทะลุของดินเฉลี่ย 2.5 MPa ที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ 3 ระดับ (1.39, 2.09
และ 3.43 กม./ชม.) ความถี่ในการสั่น 4 ระดับ (0, 9, 11 และ 13 เฮริทซ์) และความกว้างในการสั่น 2
ระดับ ($y=6.17, z=5.47$ มม.) และ ($y=10.07, z=8.13$ มม.) การทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับไถ
ระเบิดดินดานแบบไม่สัน พบว่า การสั่นสามารถลดแรงฉุดลากมากที่สุด 19.26% และเมื่อสั่นที่
ความถี่ 13 Hz จะเพิ่มพื้นที่การแตกตัวของดิน 28.8% เมื่อความเร็วในการเคลื่อนที่เพิ่มมากขึ้นจะทำ
ให้แรงฉุดลากและกำลังรวมเพิ่มขึ้น โดยสรุปพบว่าความเร็วรถแทรกเตอร์ส่งผลกระทบต่อแรงฉุด
ลากและกำลังรวม ส่วนความถี่และความกว้างในการสั่นนั้นส่งผลกระทบต่อแรงฉุดลากและพื้นที่
การแตกตัวของดิน

Kittikhun Prahsertkan 2009: The Study on Factors Affecting Performance of Soil Shakerator. Master of Engineering (Agricultural Engineering), Major Field: Agricultural Engineering, Department of Agricultural Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Prathuang Usaborisut, Ph.D. 114 pages.

In the study on factor affecting performance of a shakerator, the shakerator consists of three blades attached to a main frame and an unbalanced mass shaft, which was driven by PTO of a 87 Hp tractor. The experiment were conducted under field conditions in a sandy clay loam soil with a moisture content of 12.32%(db), dry bulk density of 1.62 g/cm³ and cone penetration resistance of 2.5 MPa, at three forward speeds (1.39, 2.09 and 3.43 km/h), four frequencies of oscillatory (0, 9, 11 and 13 Hz), and two amplitudes of oscillatory (y=6.17, z=5.47 mm) and (y=10.07, z=8.13 mm). By comparing to the non-oscillatory mode of the subsoiler, it was found that a maximum reduction of drawbar pull was by 19.26% and, at a frequency of 13 Hz, maximum soil disturbance increased by about 28.8%. Drawbar pull and total power increased with increase of forward speed. As a conclusion, forward speed significantly. Affected drawbar pull and total power while frequency of oscillatory and amplitude of oscillatory significantly affected drawbar pull and soil disturbance.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

/ /

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ประเทือง อุษาบริสุทธิ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และ ดร.หทัยเทพ วงศ์สุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษาและแนะนำในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ปานมนัส ศิริสมบูรณ์ ผู้ทรงคุณวุฒิ และรองศาสตราจารย์ มงคล กวางวโรภาส ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำเพิ่มเติมในขั้นสุดท้าย ขอกราบขอบพระคุณ ห้างหุ้นส่วนจำกัด ศรีกำแพงแสมมอเตอร์ และ ศูนย์เครื่องจักรกลการเกษตรแห่งชาติ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือพร้อมทั้งอุปกรณ์ทดลองต่างๆ ในครั้งนี้ด้วย

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมเกษตรทุกท่าน ซึ่งได้ให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน เป็นอย่างดี และขอขอบคุณน้องๆ ปริญญาตรีภาควิชาวิศวกรรมเกษตรที่ได้ช่วยเหลือในการทดลองในด้านต่างๆ จนสำเร็จลุล่วงไปได้

ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง คุณแม่ ผู้บังคับบัญชา และพี่ๆ ทุกคน ที่ให้โอกาสและเวลาในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้

กิตติคุณ ประเสริฐกาญจน์

มีนาคม 2552

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	22
อุปกรณ์	22
วิธีการ	23
ผลและวิจารณ์	45
สรุปและข้อเสนอแนะ	65
สรุป	65
ข้อเสนอแนะ	66
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	67
ภาคผนวก	70
ภาคผนวก ก การ Calibration transducers	71
ภาคผนวก ข ข้อมูลการทดลอง	79
ภาคผนวก ค วิธีการคำนวณผลการทดลอง	86

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ความกว้างในการสั้นของลูกตุ้มน้ำหนักไม่สมดุลทั้ง 2 แบบ	28
2	สมบัติของดินในแปลงทดลองที่ระดับความลึก 0-60 ซม.	45
3	แรงจูงลากในแนวระดับและกำลังรวมที่สภาวะทดลองต่างๆ	47
4	ผลทางสถิติของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อแรงจูงลาก (Drawbar pull)	53
5	ผลทางสถิติของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกำลังรวม (Total power)	54
6	ความยาวในการแตกตัวและพื้นที่การแตกตัวที่สภาวะทดลองต่างๆ	56
7	ผลทางสถิติของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อพื้นที่การแตกตัว ของดิน (Soil disturbance)	58
8	ผลทางสถิติของปัจจัยที่มีผลต่อแรงจูงลากต่อพื้นที่การแตกตัว ของดิน (Specific draft)	59
9	ผลทางสถิติของปัจจัยที่มีผลต่อกำลังรวมต่อพื้นที่การแตกตัว ของดิน (Specific energy)	60
10	อัตราการลื่นไถล (Slip), Specific draft และ Specific energy ที่สภาวะการทดลอง ต่างๆ	61
11	ผลทางสถิติของปัจจัยที่มีผลกระทบต่ออัตราการลื่นไถล (Slip)	62
12	acceleration และ Weighted 3D seat acceleration ที่สภาวะทดลองต่างๆ	63
13	ผลทางสถิติของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการสะเทือนที่ที่นั่งคนขับ (Tractor seat vibration)	64
ตารางผนวกที่		
ข1	ค่าสัญญาณจากเครื่อง Strain Amplifier จากการ calibration	80
ข2	ค่าสัญญาณที่ได้จากการปรับแก้ของตัว Transducers	83
ค1	ค่าสมการที่ได้จากการ Calibration transducers	87
ค2	สภาพดินที่ทำการทดลองที่ 3 ระดับความลึก 0-60 ซม.	92

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
ค3	ค่าที่ได้จากพื้นที่การแตกตัวของดินรวม	100
ค4	ค่าที่ได้จากการลื่นไถล (Slip)	103
ค5	ค่าแรงกดคลากในแนวระดับและแรงยกตัวในแนวตั้ง	106
ค6	ค่ากำลังรวม (Total power)	109
ค7	ค่า Weighted 3D seat acceleration	112

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	เปรียบเทียบให้เห็นผลของการทำลายและไม่ทำลายชั้นดินดาน	5
2	ไถดินดานแบบโครงไถรูปตัววี	9
3	ไถดินดานแบบก้านไถเอียงมุมไปด้านหน้า	9
4	ไถดินดานแบบก้านไถโค้ง	10
5	ไถดินดานแบบระยะขาไถในแนวโค้งมาก	10
6	ไถดินดานแบบสั้น	10
7	ลักษณะทิศทางการสั่นแบบพื้นฐาน (Basic types of oscillatory)	11
8	การตัดดินโดยเครื่องมือ a. การเคลื่อนที่ของดินรอบๆเครื่องมือ b. การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินหลังจากตัดดิน c. รูปหน้าตัดที่ การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดิน	12
9	พารามิเตอร์ที่ใช้ออกแบบเครื่องมือรูปร่างแบน มุมเอียง α อัตราส่วน d/w เป็นความสัมพันธ์สำหรับการเพิ่มปริมาตรการตัดดิน การร่วนตัวของดินและประสิทธิภาพการแตกตัวเป็นก้อนเล็กของดิน	12
10	ภาพหน้าตัดของดินที่ถูกไถ เพื่อใช้ทำนายพื้นที่ที่ถูกไถระหว่าง ขาไถ 2 อัน	13
11	พื้นที่การแตกตัวของดินจากไถดินดานแบบติดปีก	14
12	พื้นที่การแตกตัวของดินจากไถดินดานแบบชนิดธรรมดา (หัวเจาะหน้าแคบ)	14
13	ความแตกต่างของการแตกตัวของก้อนดินซึ่งขึ้นอยู่กับการยึด เกาะตัวของเม็ดดินและความเร็วในการทำงานแบ่งออกเป็น 4 กรณี คือ กรณีที่ 1 ถึง กรณีที่ 3 เมื่อใช้ความเร็วค่อนข้างต่ำ กรณีที่ 4 เมื่อใช้ความเร็วค่อนข้างสูง	15
14	(รูปบน) การเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว $1x$ (รูปกลาง) เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว $0.5x$ และ (รูปล่าง) เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว $2x$ ที่การสั่นที่เหมือนกัน	15
15	ขนาดของร่องดินที่อุปกรณ์ไถเคลื่อนที่ผ่านด้วยความเร็วสูงและต่ำ	16

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
16	การกระจายตัวของดินของการไถที่ระดับความลึกวิกฤติ และการไถต่ำกว่าระดับความลึกวิกฤติ	16
17	การเคลื่อนที่ของดินผ่านขาไถที่ต่ำกว่าความลึกวิกฤติ	17
18	แรงที่กระทำต่อขาไถที่การไถต่ำกว่าความลึกวิกฤติ	18
19	รถแทรกเตอร์ MASSEY-FERGUSON รุ่น 390 เกียร์ 12 Speed ขับเคลื่อน 4 ล้อ	25
20	ส่วนประกอบของเครื่องมือไถดินดานชนิดสั้นทั้งโครง	26
21	ภาพ Isometric ส่วนประกอบของชุดไถดินดานชนิดสั้นทั้งโครง	26
22	การถ่ายทอดกำลังจากเพลลาำนวยกำลังมายังชุดไถดินดานชนิดสั้นทั้งโครง	27
23	ลักษณะของลูกตุ้มน้ำหนักไม่สมดุลทั้ง 2 แบบ	27
24	Lower link pins transducer ต่อเป็นวงจร Wheatstone bridge ผ่าน Bridge boxes	29
25	การติด Strain gage รุ่น KFG-2-350-C1-11L1M2R ชนิดทางเดียวที่ Lower link pins transducer	30
26	Top link transducer ต่อเป็นวงจร Wheatstone bridge ผ่าน Bridge box	31
27	การติด Strain gage รุ่น KFG-5-120-D16-11L1M2S ชนิดสองทางสองตัวในตำแหน่งตรงข้ามกันที่ Top link transducer	31
28	การติดตั้ง Torque transducer และ Magnetic pick-up	32
29	ตัว Switching ค่าสัญญาณจาก Input 2 channels ให้ Output 1 channel	32
30	แผนภูมิการรับส่งสัญญาณข้อมูลจากชุด Transducers	33
31	แผนภูมิการรับส่งสัญญาณข้อมูลการสั้นสะเทือน	34
32	การวัดพื้นผิวก่อนไถโดยใช้ Profile meter	35

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
33	ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนประกอบทางปริมาตรและความสัมพันธ์ทางมวล(a) ส่วนประกอบของดินตามธรรมชาติ (b) ส่วนประกอบของดินแยกตามสถานะ	36
34	ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเร่งที่เบาคนขับ	41
35	ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดความกว้างในการสั่นที่ชุดไถดินดาน	42
36	การวัดพื้นที่การตัวของดินส่วนที่ถูกยกตัวขึ้น	42
37	การวัดพื้นที่การแตกตัวของดินส่วนที่เป็นหลุม	43
38	พื้นที่แปลงดินก่อนทำการทดลอง	44
39	สมบัติของดินในแปลงทดลองที่ระดับความลึก 0-60 ซม.	46
40	ความเร็วแทรกเตอร์ที่ส่งผลต่อค่าเฉลี่ยแรงจูงลาก (Drawbar pull)	48
41	ความถี่ในการสั่นที่ส่งผลต่อค่าเฉลี่ยแรงจูงลาก (Drawbar pull)	49
42	ความกว้างในการสั่นที่ส่งผลต่อค่าเฉลี่ยแรงจูงลาก (Drawbar pull)	50
43	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงจูงลาก (Drawbar pull) กับกำลังจากเพลาอำนาจกำลัง (PTO power)	51
44	ค่าเฉลี่ยกำลังรวม (Total power) จากการทดลองไถดินดานชนิดสั้นทั้งโครง	52
45	พื้นที่หน้าตัดการแตกตัวของดินรวมขณะไม่สั่นที่ความเร็วแทรกเตอร์ 1.39 km/h	55
46	พื้นที่หน้าตัดการแตกตัวของดินรวม ขณะสั่นที่ความถี่ในการสั่น 13 Hz และความกว้างในการสั่น $A_1(y=6.16, z=5.46 \text{ mm})$ ที่ความเร็วแทรกเตอร์ 1.39 km/h	55
47	ค่าแรงจูงลากต่อพื้นที่การแตกตัวของดิน (Specific draft) และกำลังรวมต่อพื้นที่การแตกตัวของดิน (Specific energy)	57

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ก1	การ Calibration ชุด Lower link pins transducer	73
ก2	การ Calibration ชุด Top link transducer	73
ก3	การ Calibration ชุด Torque transducer	74
ก4	อุปกรณ์ที่ใช้ในการ calibration ชุด transducers (a) เครื่อง Universal Testing Machine (b) เครื่อง Strain amplifier, Analyzing recorder และ notebook	74
ก5	ความสัมพันธ์ระหว่าง load (kN) ในแนวระดับ กับ voltage (V) ของ Lower link pins transducer (a) ด้านขวามือและ (b) ด้านซ้ายมือ	75
ก6	ความสัมพันธ์ระหว่าง load (kN) ในแนวตั้ง กับ voltage (V) ของ Lower link pins transducer (a) ด้านขวามือและ (b) ด้านซ้ายมือ	76
ก7	ความสัมพันธ์ระหว่าง load (kN) กับ voltage (V) ของ Top link transducer	77
ก8	ความสัมพันธ์ระหว่าง load (N-m) กับ voltage (V) ของ Torque transducer	77
ก9	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่าง (cm.) กับ ความต้านทาน (Ω) ของ VR-Slice	78
ข1	ตัวอย่างค่าสัญญาณจาก Torque transducer	81
ข2	ตัวอย่างค่าสัญญาณจาก Lower link pins transducer (Horizontal)	81
ข3	ตัวอย่างค่าสัญญาณจาก Lower link pins transducer (Vertical)	82
ข4	ตัวอย่างค่าสัญญาณจาก Top link transducer	82
ค1	Diagram การหามุมของ Top link transducer	88
ค2	Diagram แรงกระทำที่ Top link transducer และ Lower link pins transducer	89

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของไถดินดานชนิดสันทั้งโครง

The Study on Factors Affecting Performance of Soil Shakerator

คำนำ

อ้อยเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย เนื่องจากเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตน้ำตาล ซึ่งมีความจำเป็นในการใช้บริโภคภายในประเทศ และยังเป็นสินค้าส่งออกที่สามารถนำรายได้เข้าประเทศได้ปีละหลายหมื่นล้านบาท แต่ในขณะที่ผลผลิตต่อไร่มีแนวโน้มค่อนข้างลดลง และปัจจุบันค่าจ้างคนงานสูงขึ้นรวมถึงแรงงานขาดแคลนในฤดูกาลตัดอ้อย จึงมีการนำเครื่องจักรกลการเกษตรมาช่วยในการทำงานมากขึ้น เช่น รถตัดอ้อย รถคืบอ้อย และรถแทรกเตอร์ เป็นต้น Kasisiara และ Plessis (2006) กล่าวว่า น้ำหนักเครื่องจักรกลเกษตรขนาดใหญ่เหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อ การเพิ่มการอัดแน่นของชั้นดิน ซึ่งจากสาเหตุนี้จึงทำให้การไถนั้นต้องใช้แรงจุดลากสูงขึ้น และส่งผลทำให้ต้องใช้กำลังจากเครื่องยนต์เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย จึงทำให้มีนักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆที่สามารถช่วยลดแรงจุดลากลง Verma (1971), Raper และ Sharma (2004) รายงานว่า จากปัจจัย ความเร็ว ความถี่และความกว้างในการสัน ความชื้นของดิน ชนิดของดิน ความลึกในการไถ ลักษณะของขาไถ และทิศทางในการสันของเครื่องมือไถนั้นมีอิทธิพลโดยตรงต่อแรงจุดลาก และในการสันของเครื่องมือไถ Saqib และ Wright (1986) กล่าวว่า การสันนั้นยังช่วยทำให้ขนาดของก้อนดินมีขนาดเล็กกว่าแบบไม่สัน และช่วยให้ความหนาแน่นของดินลดลงด้วยซึ่งส่งผลทำให้รากพืชอาหารได้ดีขึ้น สำหรับการสันที่สามารถลดแรงจุดลากลงได้นั้นจะส่งผลทำให้ใช้อัตราการกินน้ำมันลดลงซึ่งจะส่งผลดีต่อเกษตรกร

เกษตรกรส่วนใหญ่ทราบถึงปัญหาจากการเกิดชั้นดินดานที่ส่งผลกระทบต่อ การเจริญเติบโตของอ้อย และผลผลิตที่ได้จึงทำให้เกษตรกรรายใหญ่มักจะไถดินดาน 3-5 ปีต่อครั้ง ซึ่งปรกติการไถที่ระดับความลึกประมาณ 40-50 ซม. แต่ในการไถระเบิดดินดานนั้นจะต้องใช้แรงจุดลากค่อนข้างสูงทำให้ต้องใช้รถแทรกเตอร์ที่มีต้นกำลังขนาดใหญ่ จึงทำให้มีการพัฒนาไถระเบิดดินดานแบบสัน เพื่อที่จะลดแรงจุดลากซึ่งจากการวิจัยของนักวิจัยหลายท่านเช่น Hendrick และ Buchele (1963), Sakai และคณะ (1988), Bandalan และคณะ (1999), Sahay และคณะ (2007) พบว่าการสันของอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมดินจะสามารถลดแรงจุดลากลงได้ประมาณ 30-60% เมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ชนิดเดียวกันที่ไม่ได้สัน

การสันของอุปกรณ์ไถที่ใช้ในการเตรียมดินนั้นมีทั้งแบบสันที่ขาไถและแบบสันทั้งโครง ซึ่งทั้ง 2 แบบใช้ต้นกำลังจากเพลลาอำนาจกำลังของรถแทรกเตอร์ทำให้เกิดการสัน เป็นที่รู้กันดีว่าการสันจะ

ส่งผลให้ใช้แรงฉุดลากของรถแทรกเตอร์น้อยลง และยังเป็นแนวทางหนึ่งของการเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้กำลังของรถแทรกเตอร์ เนื่องจากกำลังของเพลลาอำนาจกำลังของรถแทรกเตอร์ (PTO power) มีค่าประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้กำลังจากแรงฉุดลาก (Drawbar power) จึงได้มีการพัฒนาออกแบบกลไกการเหวี่ยงของตุ้มน้ำหนักไม่สมดุล (Unbalanced mass) โดยใช้ต้นกำลังจากเพลลาอำนาจกำลังของรถแทรกเตอร์ (PTO power) ทำให้เกิดการสั่นของชุดไถดินดาน วัตถุประสงค์ของการวิจัยเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของไถดินดานชนิดสันทั้งโครง ซึ่งค่าที่ใช้ในการบ่งบอกสมรรถนะในงานวิจัยครั้งนี้ประกอบไปด้วยแรงฉุดลาก (Drawbar pull) กำลังรวม (Total power) และพื้นที่การแตกตัวของดิน (Soil disturbance)

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของไถดินดานชนิดสันทั้งโครง

ขอบเขตของการวิจัย

1. ออกแบบและสร้างชุดตุ้มน้ำหนักไม่สมดุล (Unbalanced mass) ที่สามารถเพิ่มน้ำหนักได้ สำหรับใช้ในการเพิ่มความกว้างในการสั่นของชุดไถระเบิดดินดานแบบสันทั้งโครง
2. ออกแบบและสร้างชุดเครื่องมือสำหรับวัดแรงจุดลากในแนวระดับและแรงยกตัวในแนวตั้ง จากชุดไถดินดานแบบสันทั้งโครง เก็บค่าแรงบิดจากเพลลาอำนาจกำลัง ตลอดจนความเร็วรอบหมุนของเพลลาอำนาจกำลัง และความเร็วในการเคลื่อนที่เพื่อในการหาค่ากำลังจุดลาก (Drawbar power) กำลังจากเพลลาอำนาจกำลัง (PTO power) และกำลังรวม (Total power)
3. ทดสอบเครื่องมือไถดินดานแบบสันทั้งโครง (Shakerator) โดยทำการทดลองในแปลงทดลองของห้างหุ้นส่วนจำกัด ศรีกำแพงแสนมอเตอร์ อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม ซึ่งจะเก็บตัวอย่างของดินจากแปลงทดลองมาเพื่อศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของดิน และทำการทดลองจาก 3 ปัจจัย คือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ (Forward speed) ความถี่ในการสั่น (Frequency of oscillatory) และความกว้างในการสั่น (Amplitude of oscillatory) ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของไถดินดานชนิดสันทั้งโครง

การตรวจเอกสาร

การเขตรกรรมเกี่ยวกับการเจริญเติบโตของรากอ้อย

กรมวิชาการเกษตร (2523) รายงานว่าอ้อยที่ปลูกในดินที่มีการระเบิดดินดาน (subsoiling) ก่อนจะมีระบบรากดีกว่าแบบที่ไม่ทำการไถระเบิดดินดาน ทั้งในด้านการแพร่กระจายของรากรวมทั้งจำนวนรากที่เจริญในดินนั้นด้วย และการไถระเบิดดินดานจะส่งผลดีต่อเมื่อกระทำในขณะที่ความชื้นของดินไม่มากเกินไป นอกจากนี้ยังชี้ให้เห็นผลเสียหายของการไถดินดานให้ลึกมากเกินไป โดยเฉพาะเมื่อดินมีความชื้นมากจนถึงเปียก ซึ่งจะส่งผลให้การกำลังในการไถมากกว่ารวมทั้งการแตกตัวของดินค่อนข้างน้อย

สาเหตุที่ทำให้เกิดชั้นดินดาน

กรมวิชาการเกษตร (2523) รายงานว่า สาเหตุที่ทำให้เกิดชั้นดินดานนั้นเกิดจาก 3 สาเหตุหลักคือ

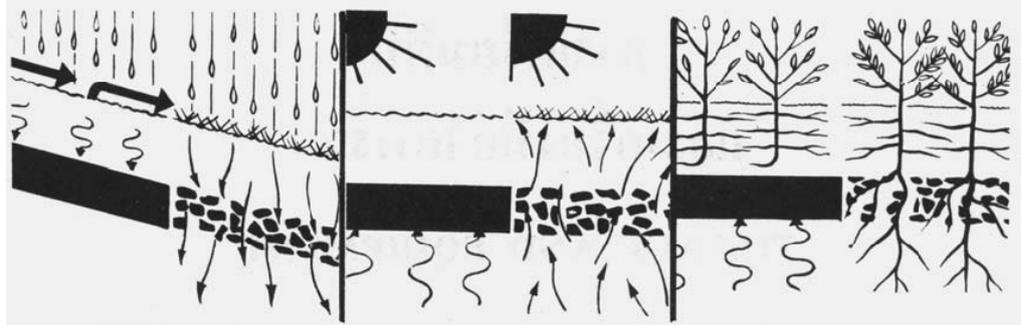
1. การไถพรวนในระดับเดียวกันเป็นระยะเวลานานทำให้เกิดดินดานใต้รอยไถ
2. น้ำหนักของรถแทรกเตอร์และเครื่องมือกลกรรมอื่น ๆ ซึ่งก็เป็นปัจจัยหนึ่งทำให้ดินอัดแน่นเกิดชั้นดินดานได้
3. การใช้รถบรรทุกขนาดใหญ่เข้าไปขนผลผลิตในแปลงทำให้ดินอัดแน่นและทำให้โครงสร้างของดินเสีย

ปัญหาของการไม่ทำลายชั้นดินดาน

กรมวิชาการเกษตร (2523) เปรียบเทียบให้เห็นผลของการทำลายและไม่ทำลายชั้นดินดาน

1. ทำให้น้ำที่อยู่ในดินบริเวณรากอ้อยไม่สามารถซึมลงไปดินส่วนลึกได้ จึงเป็นสาเหตุให้รากอ้อยเปียกชุ่มตลอดเวลาไม่สามารถหายใจได้ และยังเป็นสาเหตุให้เกิดโรครากเน่าด้วย
2. ในฤดูแล้ง ดินดานจะป้องกันไม่ให้ความชื้นในดินชั้นล่างระเหยขึ้นมาหล่อเลี้ยงให้รากพืชชุ่มชื้นได้ ทำให้อ้อยชะงักการเจริญเติบโต และมีปริมาณน้ำตาลน้อยลง เนื่องจากไม่สามารถดึงอาหารในดินมาใช้ประโยชน์ได้อย่างเต็มที่

3. ดินดานจะสั้กั้กัน ไม่ให้รากอ้อยงอกลึกกลงไปในดินชั้นล่าง แต่จะแผ่ไปตามชั้นของดินด้านบนทำให้ได้รับอาหารไม่เต็มที่และลำต้นเติบโตไม่ดีเท่าที่ควรดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 เปรียบเทียบให้เห็นผลของการทำลายและไม่ทำลายชั้นดินดาน
ที่มา : กรมวิชาการเกษตร (2523)

เครื่องมือเขตกรรมในไร่อ้อย

เครื่องมือที่ใช้ในเขตกรรมอ้อยแบ่งออกได้หลายชนิดตามลักษณะของการทำงาน เช่น การทำลายดินดาน การเตรียมดินและการย่อยขนาดดิน การปลูก การกลบตออ้อย การใส่ปุ๋ย การกำจัดวัชพืช การตัดอ้อย การกำจัดใบและยอดอ้อย ดังนี้

1. เครื่องมือทำลายดินดาน

ดินดานที่เกิดขึ้นในไร่อ้อยอาจเกิดจากหลายๆสาเหตุ ซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาตามทั้งทางตรงและทางอ้อม ทำให้เกิดผลเสียต่อการเจริญเติบโตของอ้อย จึงมีเครื่องมือการระเบิดดินดานหรือการทำลายชั้นดินดานนั้นใช้เครื่องมือที่เรียกว่า "ไถระเบิดดินดาน" (Subsoiler) ปัจจุบันมีลักษณะการทำงานอยู่ 2 แบบคือ

1.1 Subsoiler หรือ Ripper เป็นแบบที่ไม่มีระบบสั่นสะเทือน ขาของไถยึดติดกับโครง ลักษณะเป็นแผ่นตรงมีทั้งแบบ 2 ขา 3 ขา และ 5 ขา

1.2 Vibratory subsoiler เป็นแบบที่มีระบบสั่นสะเทือนที่เรียกกันว่า ไถระเบิดดินดานแบบ

สั้น โดยใช้เพลอาอานวยกำลังจากรถแทรกเตอร์ เป็นตัวขับเคลื่อนทำให้เกิดการสั้น สะเทือนที่ขาไถ ข้อดีของการสั้นคือทำให้ดินดานแตกร้าวไปทั่วและกินกำลังรถแทรกเตอร์น้อยและไม่ทำให้ดินชั้นล่างถูกขุดขึ้นมาปนกับดินชั้นบน

2. เครื่องมือเตรียมดินและย่อยขนาดดิน

2.1 ไถบุกเบิกชนิดไถงาน 3 ผาน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางงาน 26 นิ้ว ถึง 28 นิ้ว ใช้ไถลึกไม่ต่ำกว่า 20 เซนติเมตร ใช้ไถได้ทุกสภาพพื้นที่ จัดเป็นเครื่องมือเตรียมดินขั้นต้น (Primary tillage equipment)

2.2 ไถหัวหมูชนิด 3 ผาน เป็นเครื่องมือเตรียมดินขั้นต้นใช้ไถในพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางทั้งบนดินและใต้ดิน เช่น หิน รากไม้ และพื้นที่ค่อนข้างราบเรียบก็สามารถใช้แทนไถงานได้

2.3 งานพรวนชนิด double action disk harrow ใช้พรวนย่อยซี่ไถขณะทำงานต้องย่อยซี่ไถตามแนวการไถ (บางคนนิยมใช้ตามขวางการไถ)

2.4 พรวนซี่สปริง ใช้ย่อยซี่ไถเหมาะสำหรับดินที่มีความชื้นต่ำและค่อนข้างร่วน และสามารถใช้ในการกำจัดวัชพืชได้ด้วย

2.5 ไถพรวน 7 งาน (disk tillage) สามารถใช้ในการย่อยซี่ไถและใช้แทนงานพรวนได้แต่คุณภาพงานจะไม่ดีเท่างานพรวน

2.6 เครื่องยกร่องแบบผานคู่ หลังจากพรวนย่อยซี่ไถแล้วจึงใช้เครื่องยกร่อง เพื่อยกร่องปลูก โดยการใส่แรงงานคนวางท่อนพันธุ์อ้อยลงในร่องตามแนวยาวแล้วกลบด้วยดิน แต่ถ้าปลูกโดยใช้เครื่องปลูกก็ไม่ต้องยกร่อง

2.7 พรวนกำจัดวัชพืชระหว่างร่องอ้อยแบบพรวนเอนกประสงค์ 12 งาน สามารถพรวนได้ครั้งละ 2 ร่อง สามารถทำงานได้อย่างรวดเร็วทั้งสับและคลุกเศษวัชพืชให้เข้ากับดิน การพรวนแต่ละร่องจะมีงาน 6 ลูก โดย 3 ลูกในแถวหน้าเป็นงานขอบจักร (Cutted edge disk) ส่วน 3 ลูกในแถวหลังเป็นงานขอบเรียบตลอดตั้งในลักษณะ double action

3. เครื่องมือปลูกอ้อย

เครื่องมือปลูกอ้อยที่ใช้กันทั่วไป ใช้เป็นแบบพ่วงท้ายรถแทรกเตอร์ โดยมีกลไกซึ่งทำงานได้โดยการส่งกำลังมาที่ล้อของเครื่องมือ ซึ่งหมุนไปตามทิศทางเคลื่อนที่ขณะปฏิบัติงานกลไกที่สำคัญในการปลูกของเครื่องประกอบด้วย

3.1 ส่วนรับท่อนพันธุ์อ้อย ป้อนเข้าเครื่อง

3.2 ส่วนตัดท่อนพันธุ์ให้มีความยาวเท่ากัน

3.3 ส่วนปลุกทำหน้าที่ส่งท่อนพันธุ์ลงในร่อง

3.4 ส่วนกลบทำหน้าที่ปิดดินบนร่องทั้งสองข้าง ให้กลบท่อนพันธุ์

4. เครื่องมือใส่ปุ๋ย

การใส่ปุ๋ยอ้อยนิยมใส่ลึกกลงไปในดิน เพื่อให้ปุ๋ยถูกใช้เป็นอาหารอ้อยอย่างมีประสิทธิภาพ- ภาพที่แสดงเครื่องมือใส่ปุ๋ยมีส่วนประกอบสำคัญดังนี้ คือ

4.1 กรวยรองรับปุ๋ยที่ใช้

4.2 กลไกในการปล่อยปุ๋ย ซึ่งติดอยู่กับฐานของกรวย ทำหน้าที่จัดจำนวนปุ๋ยให้ลงไปในดินให้ เป็นสัดส่วนที่พอเหมาะกับการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ที่ใช้ลาก

4.3 ท่อส่งปุ๋ยลงในดินบริเวณโคนอ้อย

5. เครื่องมือกำจัดวัชพืช

หลังจากการปลูกอ้อยแล้ว การกำจัดวัชพืชเป็นสิ่งควรที่จะรีบทำในขณะที่วัชพืชยังไม่เติบโตเต็มที่ หรือที่เรียกว่าลูกหญ้า เครื่องมือที่ใช้ในการกำจัดวัชพืชประกอบด้วยซี่เหล็กเส้นกลมคดให้โค้งงอ เข้าหาทิศทางการเคลื่อนที่ เกิดการสั่นสะเทือนตลอดเวลาที่ใช้งาน ในขณะที่ปฏิบัติงาน โดยวิธีนี้อาศัย การสั่นสะเทือนของซี่เหล็กตะกั่วให้ต้นวัชพืชหลุดจากผิวดินและแห้งตายไปในที่สุด นอกจากนี้ยังทำให้ หน้าดินร่วนซุยอีกด้วย

6. เครื่องตัดอ้อย

สำหรับอ้อยที่เติบโตเต็มที่แล้วก็จะทำการตัด แต่ปัจจุบันมีปัญหาด้านค่าแรงงานสูงขึ้น และ แรงงานคนตัดอ้อยขาดแคลนในฤดูตัดอ้อย จึงมีการนำเครื่องจักรตัดอ้อยมาใช้กันมากขึ้น เครื่องจักร ที่ใช้ตัดอ้อยโดยทั่วไปจะปฏิบัติงานได้ดังนี้

6.1 ตัดส่วนยอดซึ่งส่วนใหญ่เป็นใบและยอดอ่อน ซึ่งมีน้ำตาลน้อยทิ้ง

6.2 แยกใบและกาบอ้อยออกจากลำต้น

6.3 ตัดลำต้นอ้อยชิดกับพื้นได้มากที่สุด

6.4 จัดกองลำคั่นอ้อยไว้ที่พื้นอย่างเป็นระเบียบ หรือตัดเป็นท่อนเล็กส่งไปยังรถพ่วงที่ตามหลังเครื่องตัดอ้อย

7. เครื่องมือคราดใบและยอดอ้อย

หลังจากเก็บเกี่ยวอ้อยแล้วจะมีชิ้นส่วนของอ้อยตกอยู่ทั่วไปในบริเวณไร่อ้อย คือ ส่วนของใบ กาบอ้อย และยอดอ้อย โดยใช้เครื่องมือติดตั้งท้ายรถแทรกเตอร์ที่เรียกว่า คราด ซึ่งประกอบด้วยแถวของซี่เหล็กที่โค้งงอเป็นครึ่งวงกลม เกี่ยวรวบรวมไปกองไว้ที่เดียวกัน เพื่อสะดวกในการใช้เครื่องมือสำหรับแต่งต่ออ้อยต่อไป

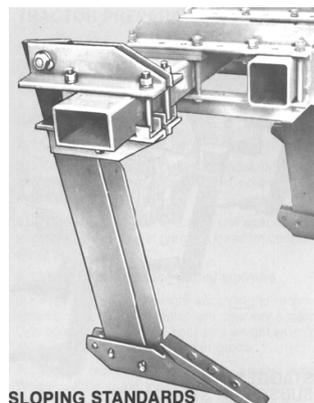
ชนิดและลักษณะของไถดินดาน

(<http://coursewares.mju.ac.th/2006/Farmmachinery/index.html>, 13 กันยายน 2006) สำหรับไถดินดานที่ตัวโครงไถออกแบบให้เป็นรูปตัววี (V-shape) ดังภาพที่ 2 โดยปกติเป็นเครื่องมือไถที่ใช้หลายชั้นดินดาน ที่ระดับความลึก 41 ซม. และมีระยะห่างของก้านไถประมาณ 46 ซม. อย่างไรก็ตามไถดินดานจะทำงานได้ดีเมื่อเป็นดินค่อนข้างแห้งและหากชั้นดินดานอยู่ในระดับที่ลึกกว่าความลึกในการทำงานของไถหรือดินเปียกเกินไป การใช้ไถดินดานก็ไม่เกิดประโยชน์มากนัก

ความเอียงของแขนไถและปลายไถมีผลต่อแรงฉุดลากและการแตกทลายของชั้นดินโดยทั่วไป ไถดินดานแบบมาตรฐานแขนไถ (ก้านไถ) จะออกแบบให้โน้มเอียงไปทางด้านหน้า ดังภาพที่ 3 ซึ่งจะทำให้ไถยกดินและดินแตกทลายได้ดีกว่าแขนไถที่วางตำแหน่งในแนวตั้ง และสำหรับการออกแบบแขนไถหรือก้านไถให้มีลักษณะโค้ง ดังภาพที่ 4 จะเป็นชุดไถที่เหมาะสมสำหรับไถได้ระดับชั้นดินดาน จะทำให้เกิดการยกและแตกทลายของชั้นดินดานบริเวณด้านบนไถ และบริเวณด้านหน้าไถได้ดี



ภาพที่ 2 ไถดินดานแบบ
โครงไถรูปตัววี

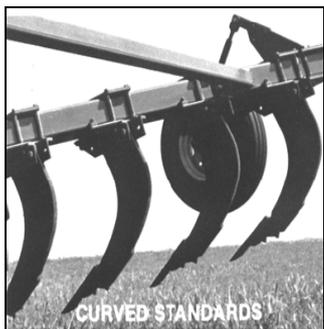


ภาพที่ 3 ไถดินดานแบบก้านไถเอียง
มุมไปด้านหน้า

ที่มา : <http://coursewares.mju.ac.th/2006/Farmmachinery/index.html>, 13 กันยายน 2006

สำหรับไถดินดานบางชนิด ออกแบบให้มีระยะไถในแนวตั้งค่อนข้างมาก เพื่อใช้สำหรับชั้นดินดานที่ค่อนข้างลึก นอกจากนั้นการติดตั้งก้านไถสามารถติดตั้งเป็นสองแถว ซึ่งชุดไถแถวแรก จะทำหน้าที่ช่วยให้ชั้นดินดานแตกออกจากกัน ส่วนไถแถวที่สองจะทำให้เกิดการแตกร่วนมากยิ่งขึ้น ดังภาพที่ 5

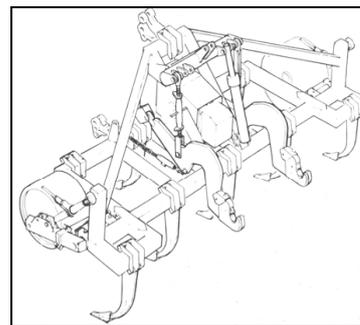
สำหรับชั้นดินดานที่อัดแน่นมากๆ อันเนื่องมาจากขาดการจัดการที่ดีของเกษตรกรการใช้ไถดินดานแบบธรรมดาทั่วไป อาจไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควรหรือต้องใช้แรงจูงลากค่อนข้างมาก การแตกทลายของชั้นดินยังไม่เหมาะสม เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงได้มีไถดินดานแบบสั่น (Vibratory subsoiler) โดยการสั่นเกิดจากระบบกลไกกำเนิดการสั่น ซึ่งรับกำลังผ่านทางเพลาอำนาจกำลัง (PTO) ของรถแทรกเตอร์ ทำให้ขณะลากชุดไถ ก้านไถและปลายไถก็จะขยับไปด้วย ทำให้ชั้นดินดานแตกทลายได้ดีมากขึ้น อีกทั้งยังลดแรงจูงลากลงได้มาก ดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 4 ไถดินดานแบบก้าน
ไถโค้ง



ภาพที่ 5 ไถดินดานแบบระยะ
ขาไถในแนวคิ่งมาก



ภาพที่ 6 ไถดินดานแบบสั้น

ที่มา : <http://coursewares.mju.ac.th/2006/Farmmachinery/index.html>, 13 กันยายน 2006

ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อเครื่องมือไถ

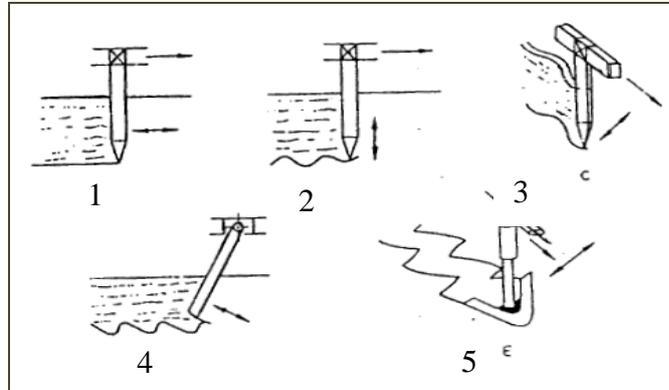
Johnson และ Buchele (1969) พิจารณาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อเครื่องมือไถจะแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

1. ตัวแปรจากเครื่องมือไถ ซึ่งตัวแปรจากเครื่องมือไถที่เกี่ยวข้องมีทั้ง รูปร่างขาไถ และลักษณะการสั่นของเครื่องมือ โดยที่การสั่นของเครื่องมือกำหนดโดย ความถี่ในการสั่น ความกว้างในการสั่น และทิศทางของการสั่น
2. ตัวแปรจากดิน ซึ่งตัวแปรจากดินที่พิจารณามีทั้ง ความหนาแน่นของดิน ความชื้นของดิน การยึดเกาะตัวของดิน และชนิดของดิน
3. ตัวแปรภายนอก ซึ่งตัวแปรภายนอกที่พิจารณาคือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของเครื่องมือไถ และความลึกในการไถ

Kofoed (1969) กล่าวว่าทิศทางการสั่นนั้นส่งผลกระทบต่อแรงฉุดลาก โดยแสดงลักษณะทิศทางการสั่นแบบพื้นฐาน (Basic types of oscillatory) 5 แบบ ดังภาพที่ 7

1. การสั่นในทิศทางแกน X
2. การสั่นในทิศทางแกน Y

3. การสั่นในทิศทางแกน Z
4. การสั่นในระนาบ X-Y (ระบบ Eggenmüller)
5. การสั่นในระนาบ X-Z (ระบบ Vernyaev)



ภาพที่ 7 ลักษณะทิศทางการสั่นแบบพื้นฐาน (Basic types of oscillatory)

ที่มา : Kofoed (1969)

ประโยชน์ของการสั่นในเครื่องมือไถ

1. ลดแรงฉุดลาก

1.1 ลดการอัดแน่นของดินเนื่องจากใช้น้ำหนักถ่วงล้อลดลง ซึ่งมีผลโดยตรงจากความ ต้องการแรงฉุดลาก (Drawbar Pull) ที่ลดลง เนื่องจากการสั่นสามารถลดแรงฉุดลากลงได้ ทำให้น้ำหนักที่ ใช้ในการถ่วงล้อลดลง ส่งผลให้การอัดแน่นของดินลดลงด้วย

1.2 สำหรับเครื่องมือไถที่ไม่สั่น การไถที่ระดับความลึกค่อนข้างมากนั้น จะต้องใช้แรงฉุด ลากค่อนข้างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือไถที่สั่นขณะปฏิบัติงาน

2. พัฒนาการแตกตัวของดิน

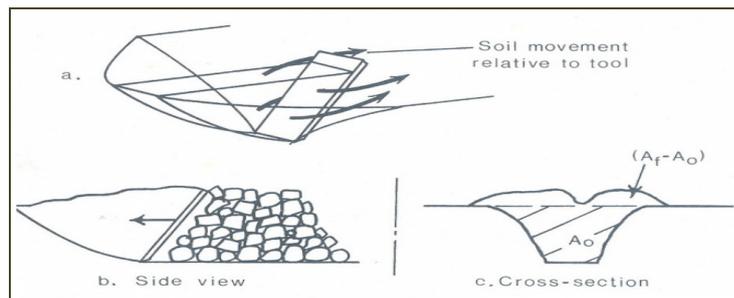
2.1 การควบคุมขนาดของก้อนดิน สามารถปฏิบัติโดยการกำหนดความถี่ในการสั่นความ กว้างในการสั่นและความเร็วในการเคลื่อนที่

3. การใช้แรงให้ได้ประสิทธิภาพมากขึ้น

3.1 การสั่นของเครื่องมือไถทำให้ความต้องการแรงฉุดลาก (Draft force) ของเครื่องมือ ไถ น้อย ส่งผลให้ใช้น้ำหนักถ่วงล้อลดลงเนื่องจากมีความต้องการใช้แรงฉุดลาก (Drawbar Pull) จากรถ แแทรกเตอร์น้อยลง (Larson, 1967)

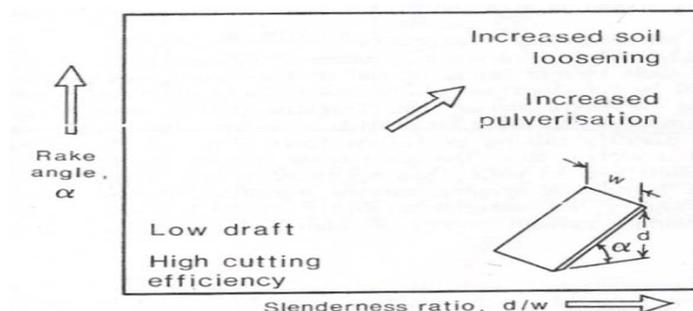
การร่วนของดิน (Soil loosening)

Mckyes (1985) จากพฤติกรรมค่าความเค้นและความเครียดของดินนั้น จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มค่าแรงดึงและแรงเฉือนของดิน เป็นสาเหตุที่ทำให้เปลี่ยน โครงสร้างและความหนาแน่นของดิน ซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรช่องว่างของอากาศ ตามภาพที่ 8 แสดงให้เห็นว่าผลกระทบขนาดของเม็ดดินจะเปลี่ยนไปตามสถานการณ์และความเครียดเล็กน้อยที่เกิดขึ้น



ภาพที่ 8 การตัดดินโดยเครื่องมือ a. การเคลื่อนที่ของดินรอบๆเครื่องมือ b. การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินหลังจากตัดดิน c. รูปหน้าตัดที่การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดิน
ที่มา : Mckyes (1985)

เมื่อพิจารณาด้านการร่วนตัวของดิน จะต้องมีการพิจารณารูปร่างของเครื่องมือ โดยพิจารณาค่าอัตราส่วนค่าความลึกต่อความกว้าง (d/w) จากภาพที่ 9 แสดงให้เห็นถึงแนวทางในการออกแบบ ซึ่งจะช่วยให้ทราบขนาดรูปร่างของเครื่องมือในการตัดดินและสมรรถนะการทำงานที่ต้องการ (Mckyes, 1985)



ภาพที่ 9 พารามิเตอร์ที่ใช้ออกแบบเครื่องมือรูปร่างแบน มุมเอียง α อัตราส่วน d/w เป็นความสัมพันธ์สำหรับการเพิ่มปริมาตรการตัดดิน การร่วนตัวของดิน และประสิทธิภาพการแตกตัวเป็นก้อนเล็กของดิน

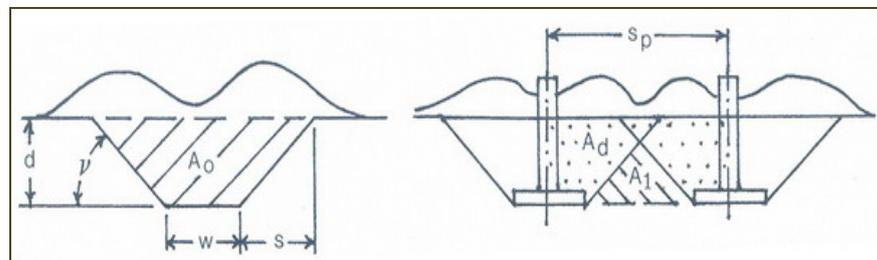
ที่มา : Mckyes (1985)

ระยะห่างของเครื่องมือที่ส่งผลต่อพื้นที่การแตกตัวของดิน

Mckyes (1985) กล่าวว่าพื้นที่หลังการไถจะมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมคางหมู โดยมีมุม V ดังแสดงในภาพที่ 10 เมื่อระยะของขาไถจากอันหนึ่งไปยังอีกอันหนึ่ง (s_p) และความลึกในการไถ (d) หลังจากการไถโดยปรกติแล้วจะมีพื้นที่ซึ่งไม่ถูกระทำ (A_1) ส่วนพื้นที่ที่ถูกกระทำ (A_d) ซึ่งสามารถหาได้จากสูตร

$$\text{เมื่อ } A_d = (d \cdot s_p) - A_1$$

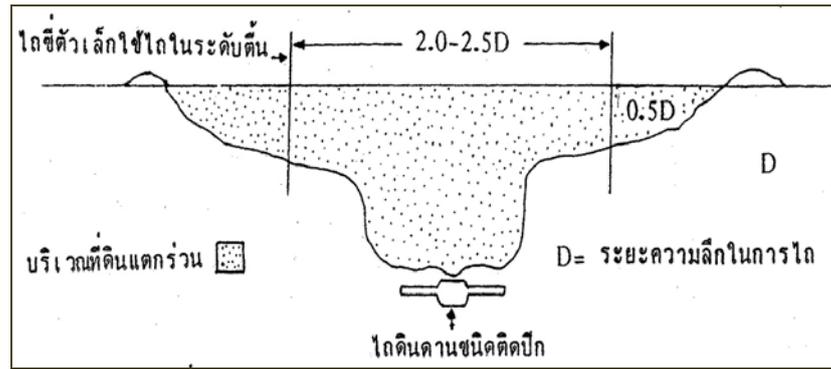
$$A_d = (d \cdot s_p) - \frac{1}{4} (s_p - w)^2 \tan V \quad \text{เมื่อ } \tan V = d/s$$



ภาพที่ 10 ภาพหน้าตัดของดินที่ถูกไถ เพื่อใช้ทำนายพื้นที่ที่ถูกไถระหว่างขาไถ 2 อัน
ที่มา : Mckyes (1985)

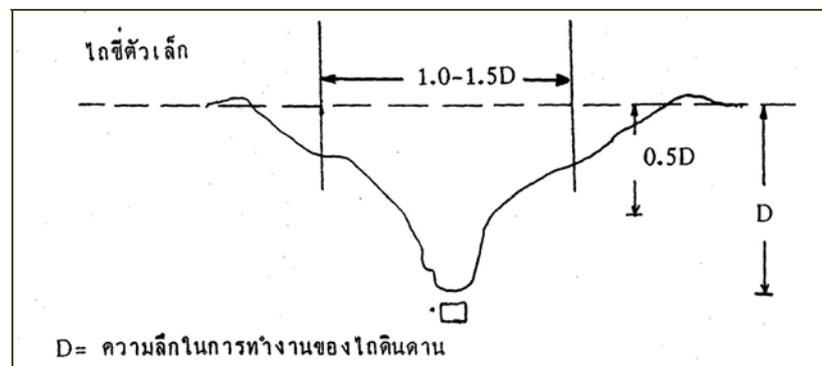
มงคล (2530) จากการวิจัยพบว่า อัตราส่วนระหว่างความลึกในการทำงานต่อระยะห่างระหว่างซี่จะมีลักษณะการแตกตัวต่างกันไป ดังนี้คือ

1. สำหรับไถดินดานแบบตึกปีก หากต้องการให้ผิวหน้าดินพูนสม่ำเสมอ ระยะห่างระหว่างซี่จะต้องไม่เกิน 2-2.5 เท่าของความลึกในการไถ ดังภาพที่ 11
2. สำหรับไถดินดานชนิดธรรมดา (หัวเจาะหน้าแคบ) หากต้องการให้ผิวหน้าดินพูนสม่ำเสมอ ระยะห่างซี่จะต้องไม่เกิน 1.5 เท่าของความลึกในการไถดังภาพที่ 12 ซึ่งถ้าระยะระหว่างซี่มากเกินไป จะทำให้ดินพูนขึ้นมาเป็นสันคลื่นตามแนวการไถ
3. การไถที่ระดับลึกเกินไปจะทำให้การแตก่วนของดินเกิดขึ้นได้น้อยและสำหรับสภาพดินแห้งควรไถที่ระดับ 350-450 มม. ถ้าดินชื้นควรไถตื้นกว่าที่ระดับ 300-400 มม.



ภาพที่ 11 พื้นที่การแตกตัวของดินจากโถดินดานแบบตึบปัก

ที่มา : มงคล (2530)

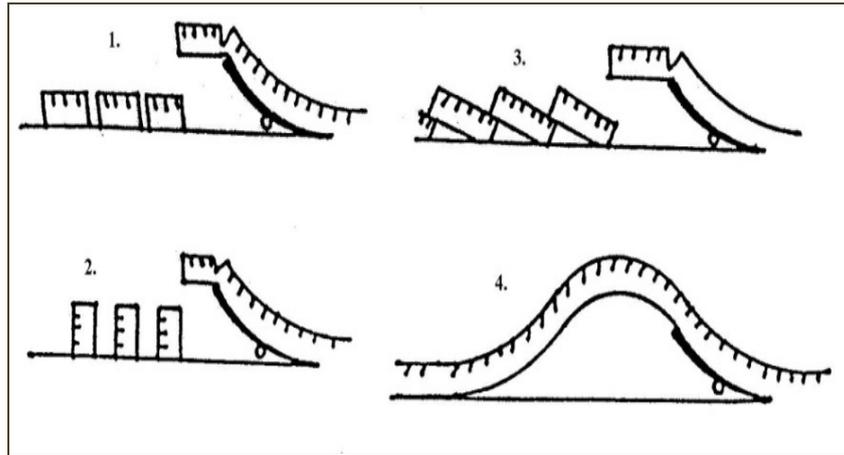


ภาพที่ 12 พื้นที่การแตกตัวของโถดินดานแบบชนิดธรรมดา (หัวเจาะหน้าแคบ)

ที่มา : มงคล (2530)

ผลกระทบจากความเร็ว (Effect of Speed)

จากความเร็วของเครื่องมือโถที่ใช้ในการตัดดินและความเร็วในการเคลื่อนที่ของเครื่องมือซึ่งจะเป็นตัวกำหนดอัตราในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเชิงมุม (Rate of Angular Deformation) ของดินที่มีแรงยึดเหนี่ยวค่อนข้างสูงมาก ดังภาพที่ 13 กรณีที่ 1 ถึง กรณีที่ 3 เมื่อใช้ความเร็วค่อนข้างต่ำ ขนาดของมุมและตำแหน่งการตกของดินด้านหลังเครื่องมือโถซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วของเม็ดดินด้วย กรณีที่ 4 เมื่อใช้ความเร็วค่อนข้างสูง (Mckyes, 1985)

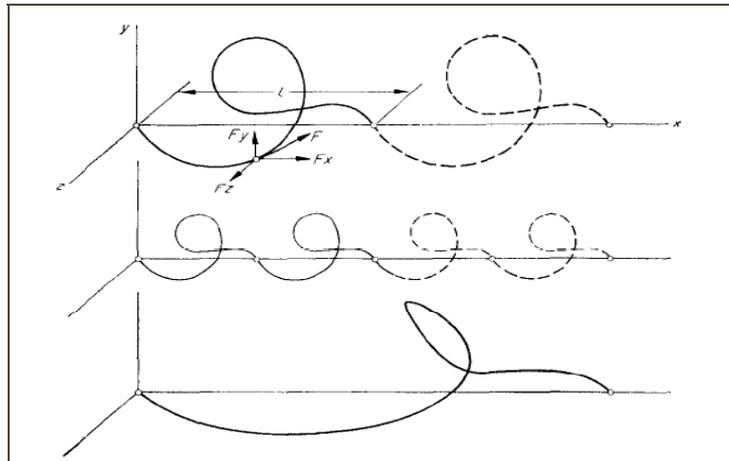


ภาพที่ 13 ความแตกต่างของการแตกตัวของก้อนดินซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราการยึดเกาะตัวของเม็ดดินและความเร็วในการทำงานแบ่งออกเป็น 4 กรณี คือ กรณีที่ 1 ถึง กรณีที่ 3 เมื่อใช้ความเร็วค่อนข้างต่ำ กรณีที่ 4 เมื่อใช้ความเร็วค่อนข้างสูง

ที่มา : Mckyes (1985)

Kofoed (1969) แสดงผลจากความเร็วในการเคลื่อนที่ที่ส่งผลต่อลักษณะการสั่น ที่ความเร็ว $1x$, $0.5x$, $2x$ (x คือค่าของความเร็ว) โดยใช้ความกว้างและความถี่ในการสั่นที่เหมือนกัน ดังแสดงในภาพที่

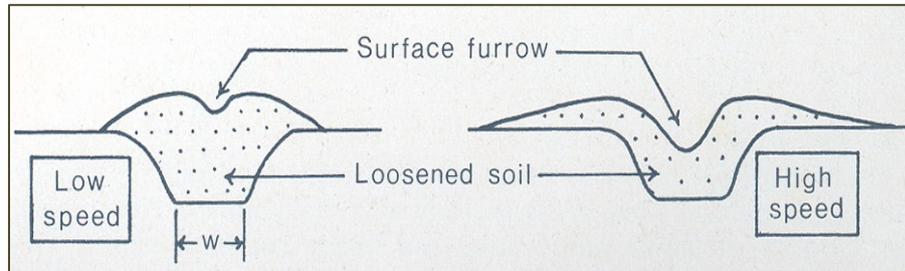
14



ภาพที่ 14 (รูปบน) การเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว $1x$ (รูปกลาง) เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว $0.5x$ และ (รูปล่าง) เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว $2x$ ที่การสั่นที่เหมือนกัน

ที่มา : Kofoed (1969)

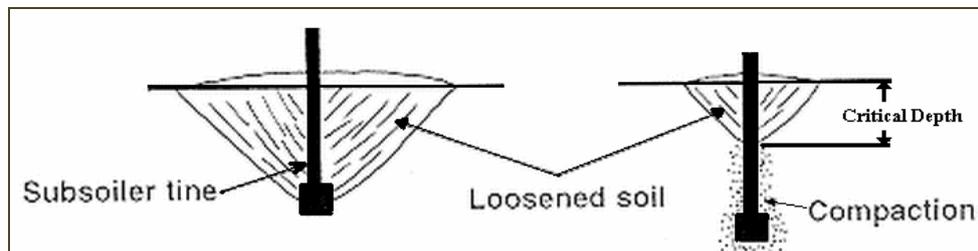
ภาพที่ 15 แสดงการกระจายของดินเมื่ออุปกรณ์ไถเคลื่อนที่ผ่าน ทางด้านขวามือแสดงการเคลื่อนที่ผ่านที่ความเร็วสูง ซึ่งจะทำให้อุ้งดินกว้างและลึก ส่วนด้านซ้ายมือเป็นการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ ส่งผลให้การคลุกตัวของเม็ดดินได้ไม่ดีและขนาดร่องดินไม่ลึก



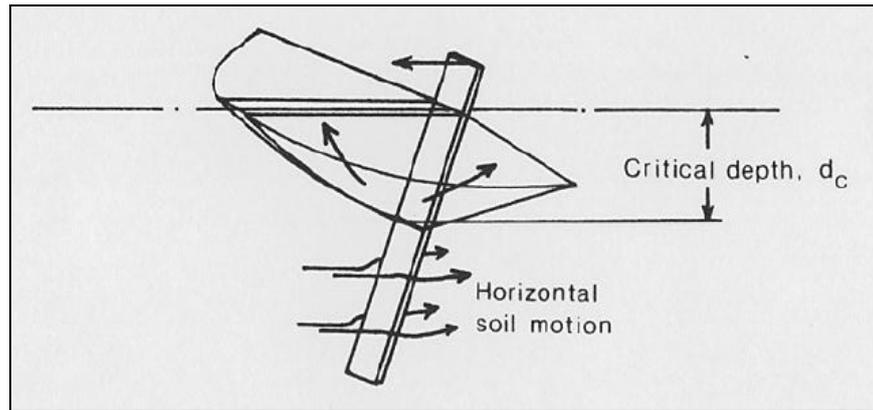
ภาพที่ 15 ขนาดของร่องดินที่อุปกรณ์ไถเคลื่อนที่ผ่านด้วยความเร็วสูงและต่ำ
ที่มา : Mckyes (1985)

ความลึกวิกฤติ (Critical depth)

(<http://www.maf.govt.nz/mafnet/rural-nz/sustainable-resource-use/land-management/soil-structure/soilcom9.htm>, 18 เมษายน 2008) แสดงการไถระเบิดดินดานที่ระดับความลึกวิกฤติ ดังแสดงในภาพที่ 16 ถ้าไถตื้นกว่าระดับความลึกวิกฤติจะทำให้การร่วนตัวของดินน้อยและทำให้ดินที่ขาไถเคลื่อนที่ผ่านบริเวณที่ตื้นกว่าระดับความลึกวิกฤติก็สามารถเกิดการอัดแน่นทางด้านข้างของขาไถ และดินที่เคลื่อนที่ผ่านขาไถจะไม่ถูกยกตัวขึ้นมอดังภาพที่ 17 ส่วนการไถดินดานที่สัมฤทธิ์ผลนั้นการแตกกระจายตัวของดินจะมีลักษณะเป็นเส้น ซึ่งสามารถวัดได้โดยการขุดเป็นหลุมดูหลังจากการไถ



ภาพที่ 16 การกระจายตัวของดินของการไถที่ระดับความลึกวิกฤติและการไถตื้นกว่าระดับความลึกวิกฤติ
ที่มา : <http://www.maf.govt.nz/mafnet/rural-nz/sustainable-resource-use/land-management/soil-structure/soilcom9.htm>, 18 เมษายน 2008



ภาพที่ 17 การเคลื่อนที่ของดินผ่านขาคู่ที่ต่ำกว่าความลึกวิกฤติ

ที่มา : Mckyes (1989)

Mckyes (1989) กล่าวว่า แรงที่กระทำต่อขาคู่ที่ต่ำกว่าระดับความลึกวิกฤตินั้นจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ แรงที่กระทำต่อขาคู่ในระดับความลึกวิกฤติ (P) และแรงที่กระทำต่อขาคู่ที่ระดับต่ำกว่าความลึกวิกฤติ (Q) ดังภาพที่ 18 ซึ่งสามารถคำนวณแรงจุดลาก (H) ที่ต้องใช้ในการลากขาคู่ได้จากสูตร

$$\begin{aligned}
 H &= Q + H_1 \\
 \text{เมื่อ } Q &= \text{แรงที่ต้องใช้ขาคู่ที่ต่ำกว่าระดับความลึกวิกฤติ (kN)} \\
 H_1 &= \text{แรงที่ต้องใช้ขาคู่ที่ระดับความลึกวิกฤติ (kN)} \\
 P &= \text{แรงที่กระทำต่อขาคู่ในระดับความลึกวิกฤติ (kN)}
 \end{aligned}$$

$$Q = \left[cN'_c(d - d_c) + \frac{\gamma}{2} K_0 N'_q (d^2 - d_c^2) \right] w$$

$$H_1 = P \sin(\alpha + \delta) + c_a d_c w \cot \alpha$$

$$N'_c = \cot \phi \left[\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \right] e^{2(\pi/2 + \phi) \tan \phi} - 1$$

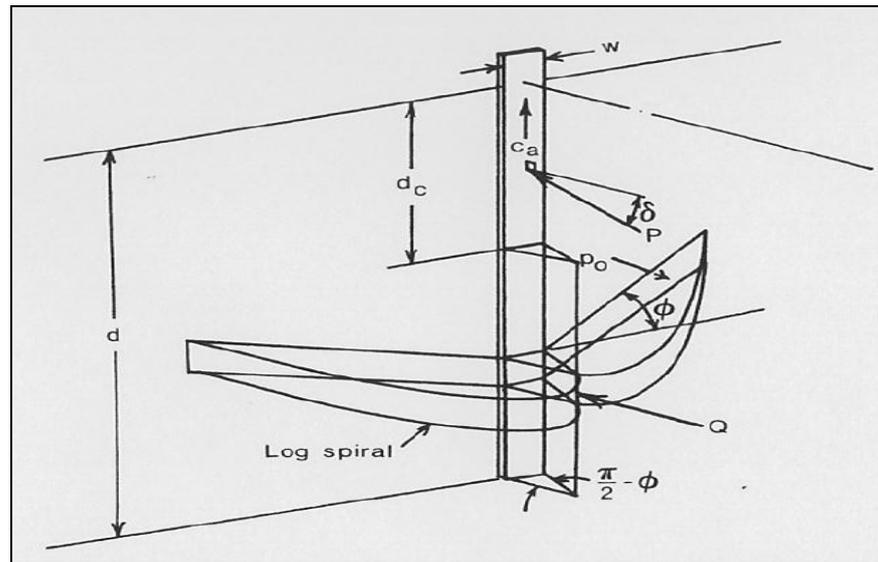
$$N'_q = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} e^{2(\pi/2 + \phi) \tan \phi}$$

$$d = \text{ความลึกในการไถ (เมตร)}$$

$$d_c = \text{ระยะความลึกวิกฤติ (เมตร)}$$

$$w = \text{ความกว้างของขาคู่ (เมตร)}$$

K_0	=	coefficient of passive earthpressure
γ	=	Dry bulk density (kN/m^3)
α	=	rake angle (degree)
ϕ	=	soil internal friction angle (degree)
c_a	=	adhesion (kPa)
c	=	soil cohesion (kPa)
δ	=	soil metal friction angle (degree)



ภาพที่ 18 แรงที่กระทำต่อขาคีการไถต่ำกว่าความลึกวิกฤติ
ที่มา : Mckyes (1989)

ผลการศึกษาที่ผ่านมา

Verma (1971) เสนอบทความเรื่องการสั่นของอุปกรณ์ไถ กล่าวว่า การสั่นอุปกรณ์ไถมีผลต่อการลดลงของกำลังที่ใช้แต่อย่างไรก็ตามก็ขึ้นอยู่กับสมบัติของดินด้วย ส่วนการเพิ่มความถี่ในการสั่นของอุปกรณ์จะสามารถลดแรงจุดลากลงได้ แต่การเพิ่มความเร็วในการเคลื่อนที่จะส่งผลให้เพิ่มแรงจุดลาก อย่างไรก็ตาม การเพิ่มความถี่ในการสั่นของอุปกรณ์จะส่งผลทำให้กำลังรวมที่ใช้เพิ่มมากขึ้นด้วย และยังกล่าวถึงทิศทางการสั่นของอุปกรณ์ ถือเป็นตัวแปรที่สำคัญตัวหนึ่งที่ส่งผลต่อแรงจุดลากเช่นกัน

Smith และคณะ (1972a) กล่าวถึงทฤษฎีของเครื่องมือไถแบบสั่น โดยศึกษาลักษณะของการสั่นทั้งหมด 3 แบบ คือ harmonic motion, saw motion, modified square motion เมื่อเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเดียวกัน จากผลการคำนวณเพื่อทำนายอัตราส่วนกำลัง (power ratio) พบว่า อัตราส่วนกำลังของ harmonic motion และ modified square motion มีค่ามากกว่า saw motion และจากการสั่นของอุปกรณ์ไถนั้นไม่สามารถลดกำลังรวมที่ต้องใช้ในการไถได้

Smith และคณะ (1972b) ได้ทำการทดลองทฤษฎีของเครื่องมือไถแบบสั่น โดยทำการศึกษาทั้งหมด 4 ตัวแปร คือ มุมของใบมีดกระทำกับแนวคิ่ง ความเร็วในการเคลื่อนที่ ความถี่ในการสั่นและความแตกต่างของการสั่น พบว่าการสั่นจะทำให้ต้องใช้อัตราส่วนกำลัง (power ratio) เพิ่มมากขึ้นประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ สาเหตุจากการต้องทำให้เกิดการแตกตัวของดิน ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างแรงจุดลาก กับมุมของใบมีดและความเร็วแทรกเตอร์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างขณะที่สั่นและแบบไม่สั่น จากผลพบว่าที่มุมของใบมีดเดียวกันเมื่อความเร็วเพิ่มมากขึ้น ขณะที่สั่น (Vibratory test) จะใช้แรงจุดลากมากกว่าแบบไม่สั่น (Non-Vibratory test)

Butson และ Macintyre (1981) ได้ศึกษาการสั่นในการตัดดินที่ส่งผลต่อแรงจุดลากและกำลังรวม พบว่า ถ้าอัตราส่วนความเร็ว (ความเร็วในการสั่นต่อความเร็วในการเคลื่อนที่) น้อยกว่า 1 จะไม่ส่งผลกระทบต่อแรงจุดลาก แต่ถ้ามากกว่า 1 สามารถลดแรงจุดลากลงได้มากกว่า 50% แต่จะใช้กำลังรวมเพิ่มมากขึ้น ซึ่งพบว่าการสั่นจะส่งผลต่อแรงจุดลากเมื่อใช้ความเร็วในการเคลื่อนที่ช้าหรือที่ค่าอัตราส่วนความเร็วมากกว่า 1

Niyamapa และ Salokhe (1993) ได้ทดลองการสั่นของอุปกรณ์ไถที่ส่งผลต่อการวิบัติของดินในกระบะดิน พบว่า การแตกตัวของดินแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ชั้นดินส่วนลึก (Deep layer zone) และ

บริเวณใกล้ชั้นผิวดิน (Near surface zone) ส่วนการแตกกระจายของดิน (Soil fragments) นั้นจะมีค่ามากขึ้นเมื่อเพิ่มความถี่ในการสั่นให้สูงขึ้น และการแตกกระจายของดินยังขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความเร็ว

Sakai และคณะ (1993) ได้ทดลองไถระเบิดดินดานแบบสั้น 4 ขา โดยกำหนดตัวแปรในการทดลองคือ มุมในการสั่น ความถี่และความกว้างในการสั่น พบว่า เมื่อความกว้างในการสั่น 50 มม. ความถี่ในการสั่น 3.4 Hz และมุมในการสั่น 30 องศา จะสามารถลดแรงฉุดลากได้ 60% และใช้กำลังรวมมากขึ้น 2% เมื่อเปรียบเทียบกับแบบไม่สั่น และสำหรับค่าอัตราส่วนแรงฉุดลาก อัตราส่วนกำลังฉุดลาก และอัตราส่วนกำลังฉุดลากสุทธิ จะมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเร็วเพิ่มมากขึ้น

Dawellbeit และ Wright (1999) ได้ออกแบบและทดลองเครื่องขุดถั่วลิสงแบบสั้น โดยศึกษาทั้งหมด 3 ตัวแปร (ความเร็วรถแทรกเตอร์ ความกว้างในการสั่น และความถี่ในการสั่น) พบว่า สำหรับขาขุดถั่วลิสงแบบสั้นจะลดแรงฉุดลากลงได้เมื่อเปรียบเทียบกับแบบไม่สั่นขณะทำงาน โดยปัจจัยจากการสั่นทั้งความกว้างในการสั่นและความถี่ในการสั่นเพิ่มมากขึ้นนั้น จะทำให้ลดแรงฉุดลากลง รวมทั้งปัจจัยจากความเร็วรถแทรกเตอร์ที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ลดแรงฉุดลากลงเช่นกัน

Bandalan และคณะ (1999) ได้ทำการวิจัยประสิทธิภาพของไถระเบิดดินดานแบบสั้นในการทำลายชั้นดินดาน โดยหาค่าแรงฉุดลากและกำลังทั้งหมดที่ใช้ทำลายชั้นดินดานของไถระเบิดดินดานแบบสั้น ศึกษาทั้งหมด 3 ตัวแปร คือ ความถี่ในการสั่น ความกว้างในการสั่น และความเร็วรถแทรกเตอร์ พบว่า ไถระเบิดดินดานแบบสั้นจะใช้แรงฉุดลากน้อยกว่าแต่กำลังรวมทั้งหมดที่ใช้มากกว่าไถระเบิดดินดานแบบไม่สั่นขณะทำงาน จากปัจจัยการสั่นทั้งความถี่ในการสั่นและความกว้างในการสั่นเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้อัตราส่วนแรงฉุดลาก (draft ratio) ลดลง แต่ที่ความเร็วในการเคลื่อนที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้อัตราส่วนแรงฉุดลาก (draft ratio) เพิ่มมากขึ้น

Niyamapa และ Salokhe (2000) รายงานการวิจัยการแตกตัวของดินและแรงกระทำจากการสั่นของขาไถแบบไม่มีปีกข้าง พบว่า การสั่นของอุปกรณ์ส่งผลต่อแรงฉุดลากเมื่อความเร็วเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้แรงฉุดลากจะเพิ่มมากขึ้นจนถึงความเร็วระดับหนึ่งแรงฉุดลากจะลดลง ส่วนไถแบบไม่สั่นเมื่อความเร็วเพิ่มมากขึ้นแรงฉุดลากจะเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง และยังพบว่า อัตราส่วนแรงฉุดลาก (ระหว่างแบบสั้นต่อแบบไม่สั่น) มีค่า 0.63 ถึง 0.93 ส่วนกำลังรวมจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น 41-45% เมื่อเทียบกับแบบไม่สั่น และการสั่นของอุปกรณ์ไถจะลดความหนาแน่นของดินในสภาวะแห้งประมาณ 70-270% เมื่อเทียบกับแบบไม่สั่น

พิพัฒน์ (2542) ได้ศึกษาพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของดินร่วนที่มีผลต่อไถระเบิดดินดานชนิดสั้น พบว่า อัตราส่วนแรงฉุดลาก (draft ratio) จะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนความเร็ว (velocity ratio) เพิ่มสูงขึ้น ที่อัตราส่วนความเร็ว 4.33 (ความเร็วรถแทรกเตอร์ 1.79 km/hr) แรงฉุดลากในแนวระดับลดลงสูงสุด 47% และ อัตราส่วนกำลัง (power ratio) จะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนความเร็วเพิ่มสูงขึ้น และที่อัตราส่วนความเร็ว 4.33 ส่งผลให้กำลังรวมเพิ่มสูงสุดเท่ากับ 41% ยังพบอีกว่า เส้นทางเคลื่อนที่ของปลายขาไถ ที่ความเร็วรถแทรกเตอร์ 1.79 km/hr มีระยะในการถอยกลับมากที่สุด มีผลต่อการลดลงของแรงฉุดลากในแนวระดับสูงสุด

Sahay และคณะ (2007) ได้พัฒนากระบวนการสั้นของชุดไถโดยศึกษาผลกระทบที่เกิดจากความกว้างในการสั้นและความถี่ในการสั้น ที่มีผลต่อแรงฉุดลากและกำลังในการสั้นของชุดไถ พบว่า กำลังที่ต้องใช้ทั้งหมดสำหรับชุดไถแบบสั้นจะมีค่ามากกว่าแบบไม่สั้นขณะทำงานซึ่งมีค่ามากกว่า 54.9 เปอร์เซ็นต์ และอัตราส่วนแรงฉุดลาก (draft ratio) จะมีค่ามากขึ้นถ้าความเร็วในการทำงานเพิ่มมากขึ้น และยังพบอีกว่า การสั้นที่ความถี่สูงสามารถลดแรงฉุดลากลงได้ 46 ถึง 48 เปอร์เซ็นต์ ที่ความถี่ในการสั้น (14 Hz และ 15 Hz) ทำงานคู่กับความกว้างในการสั้น 7.9 มิลลิเมตร และสำหรับการสั้นที่ความถี่ในการสั้นต่ำ (7 Hz และ 8 Hz) ทำงานคู่กับความกว้างในการสั้น 14.2 มิลลิเมตร ก็สามารถลดแรงฉุดลากได้ 42 ถึง 44 เปอร์เซ็นต์

Karoonboonyanan และคณะ (2007) ศึกษาประสิทธิภาพของไถระเบิดดินดาน 1 ขา ที่ส่งผลต่อแรงฉุดลากในแนวระดับและแนวตั้ง กำลังรวม แรงฉุดลากต่อพื้นที่การแตกตัว เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสั้นกับไม่สั้นขณะทำงาน พบว่า แบบสั้นสามารถลดแรงฉุดลากในแนวระดับ 29% และ 34% แต่จะทำให้แรงยกตัวในแนวตั้งเพิ่มขึ้น 227% และ 400% ที่ความเร็ว 2.5 และ 3.0 km/h ตามลำดับ สำหรับกำลังรวมของไถระเบิดดินดานแบบสั้นจะใช้มากกว่าแบบไม่สั้นถึง 100% และ 66% เมื่อเปรียบเทียบที่กำลังรวมต่อพื้นที่การแตกตัวของดินจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น 127% และ 112% ที่ความเร็ว 2.5 และ 3.0 km/h ตามลำดับ

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. ไถดินดานชนิดสั้นทั้ง โครง (Shakerator) 3 ขา
2. Tractor (MASSEY-FERGUSON รุ่น 390 เกียร์ 12 speed ขับเคลื่อน 4 ล้อ)
3. กระบอกลูกสูบตัวอย่างดิน (Core sampling)
4. กระจับอบดิน
5. ตลับเมตร
6. นาฬิกาจับเวลา
7. หลังกบักวัดระยะ
8. ตาชั่ง (ความละเอียด 0.01 กรัม)
9. ชุดตะแกรงมาตรฐาน เบอร์ 10, 20, 30, 40 และ 50
10. ถาดใส่ดินตัวอย่าง
11. เครื่องเขย่าตะแกรงแบบใช้มอเตอร์
12. ค้อนยางสำหรับทุบดิน
13. เครื่องมือทดสอบหา Liquid Limit
14. ขวดชนิดน้ำ
15. แผ่นกระจกรองสำหรับปั้นดิน
16. กระจับอบดิน
17. ตู้บที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้
18. กล้องถ่ายรูป
19. ปูนขาว
20. Profile meter
21. Universal testing machine (Instron 5569)
22. Cone penetrometer
23. กระดาษบันทึกข้อมูลขนาดมาตรฐาน (Units in MPa)
24. Annulus shear ring
25. Voltmeter
26. Strain gage (ยี่ห้อ KYOWA)
 - 26.1 ติดตั้งที่ Top link รุ่น KFG-5-120-D16-11L1M2S

26.2 ติดตั้งที่ Lower link Pins รุ่น KFG-2-350-C1-11L1M2R

27. Lower link pins transducer
28. Top link transducer
29. PTO torque transducer (ยี่ห้อ KYOWA)
 - 29.1 Type TP-50 KM AB
30. Magnetic pick-up
31. Strain amplifier (รุ่น DPM-713B)
32. Analyzing recorder (รุ่น Model 6355E)
33. VR-slice (รุ่น B10K)
34. สายนำสัญญาณ (Bridge box)
35. เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Power supply 220 AC)
36. อุปกรณ์วัดความเร่ง (ADXL202)
37. อุปกรณ์แปลงสัญญาณต่อเนื่องเป็นดิจิทัล (USB NI-6210)
38. Notebook

วิธีการ

1. ศึกษาค้นคว้าปัจจัยที่มีผลกระทบต่อไถดินดานชนิดสั้นทั้งโครง
2. ออกแบบและสร้างกลไกการสั้น โดยออกแบบให้ลูกตุ้มน้ำหนักไม่สมดุล (Unbalanced mass) ที่มีรูปทรงแตกต่างกัน 2 แบบ โดยแต่ละแบบมีน้ำหนักและจุดศูนย์กลางถ่วง (center of gravity, CG) ที่แตกต่างกัน
3. สร้างตัว Lower link pins transducer และ Top link transducer สำหรับวัดแรงจูงลาก (Drawbar pull) และนำตัว transducer ทั้ง 2 ไป calibration หาค่าความสัมพันธ์ระหว่าง load (kN) กับค่าแรงดันไฟฟ้า (voltage)
4. ติดตั้งอุปกรณ์ชุดไถดินดานแบบสั้นเข้ากับรถแทรกเตอร์ แล้วนำไป Pre-test เพื่อดูค่าระดับความลึกที่สามารถทดลองได้จริง
5. เตรียมแปลงสำหรับการทดลอง ทั้งหมด 63 แปลง แต่ละแปลงมีขนาด 7x3 เมตร

แผนการทดลอง

การทดลองไถดินดานชนิดสั้นทั้งโครงโดยทำการทดลองที่เงื่อนไขต่างดังนี้

1. ใช้ลูกเบี้ยวในการทดลอง 2 แบบ

แบบที่ 1 ทำให้เกิดความกว้างในแนวแกน $y=6.17$ และ แกน $z=5.47$ mm

แบบที่ 2 ทำให้เกิดความกว้างในแนวแกน $y=10.07$ และ แกน $z=8.13$ mm

2. ความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ 3 ระดับ คือ

เกียร์ Low1 (1.39 km/h), Low2 (2.09 km/h), Low3 (3.43 km/h)

3. ความถี่ในการสั่น 4 ระดับ คือ 0 Hz (ขณะไม่สั่น), 9 Hz, 11 Hz, 13 Hz

4. ความลึกในการไถเฉลี่ย 45 cm

การทดลองทั้งหมดมี 21 Treatments แต่ละ Treatment ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

รถแทรกเตอร์และเครื่องมือไถดินดานชนิดสั้นทั้งโครง

รถแทรกเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

รถแทรกเตอร์ ยี่ห้อ MASSEY-FERGUSON รุ่น 390 เกียร์ 12 Speed ขับเคลื่อน 4 ล้อ ให้แรงม้าสูงสุด 86 แรงม้า ที่รอบเครื่องยนต์ 2,200 รอบ/นาที และที่ความเร็วรอบเพลาอำนาจกำลัง 540 รอบ/นาที เมื่อเครื่องยนต์หมุน 1,789 รอบ/นาที จะให้แรงม้าสูงสุดที่เพลาอำนาจกำลัง 73 แรงม้า โดยในการทดลองได้ติดตั้งผานไถไว้ด้านหน้าดังแสดงในภาพที่ 19 เพื่อให้ขณะทำการทดลองจะไม่เกิดการยกล้อเนื่องจากแรงฉุดลากที่เกิดจากชุดไถระเบิดดินดาน



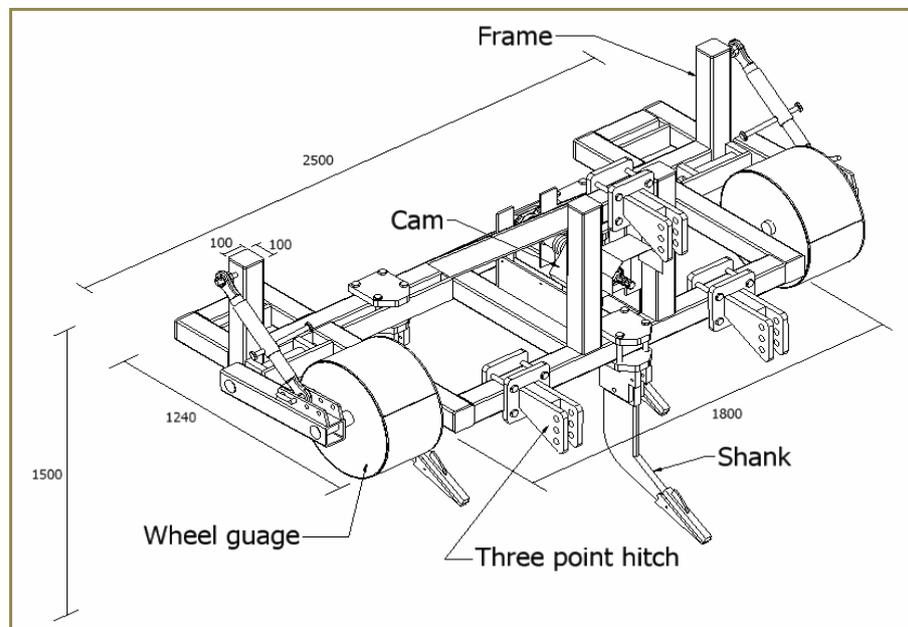
ภาพที่ 19 รถแทรกเตอร์ MASSEY-FERGUSON รุ่น 390 เกียร์ 12 Speed ขับเคลื่อน 4 ล้อ

เครื่องมือไถดินดานชนิดสันทั้งโครง (Shakerator)

เครื่องมือไถดินดานชนิดสันทั้งโครง (Shakerator) ติดตั้งขาไถทั้งหมด 3 ขา โดยขาไถแต่ละขามีระยะห่างกัน 45 ซม. ของห้างหุ้นส่วนจำกัด ศรีกำแพงแสมมอเตอร์ ดังแสดงในภาพที่ 20 และแสดงภาพ Isometric ส่วนประกอบของชุดไถดินดานชนิดสันทั้งโครงดังภาพที่ 21 สำหรับการสันของชุดไถได้รับกำลังจากเพลลาอานวยกำลังของรถแทรกเตอร์ถ่ายทอดกำลังมายังชุดลูกเบี้ยวที่ติดตั้งอยู่กับชุดไถดินดานชนิดสันทั้งโครง ดังภาพที่ 22 โดยการหมุนของลูกค้อนน้ำหนักระหว่าง 1.5-2 กก. จะทำให้สันในแนวแกน y (แนวขวางการเคลื่อนที่) และแกน z (แนวตั้ง) ซึ่งลูกค้อนน้ำหนักระหว่าง 1.5-2 กก. ที่ใช้ในการทดลองมี 2 ชุด ดังภาพที่ 23 จากลูกค้อนน้ำหนักระหว่าง 1.5-2 กก. ที่แตกต่างกันทำให้เกิดความกว้างในการสันที่แตกต่างกัน ดังแสดงข้อมูลในตารางที่ 1



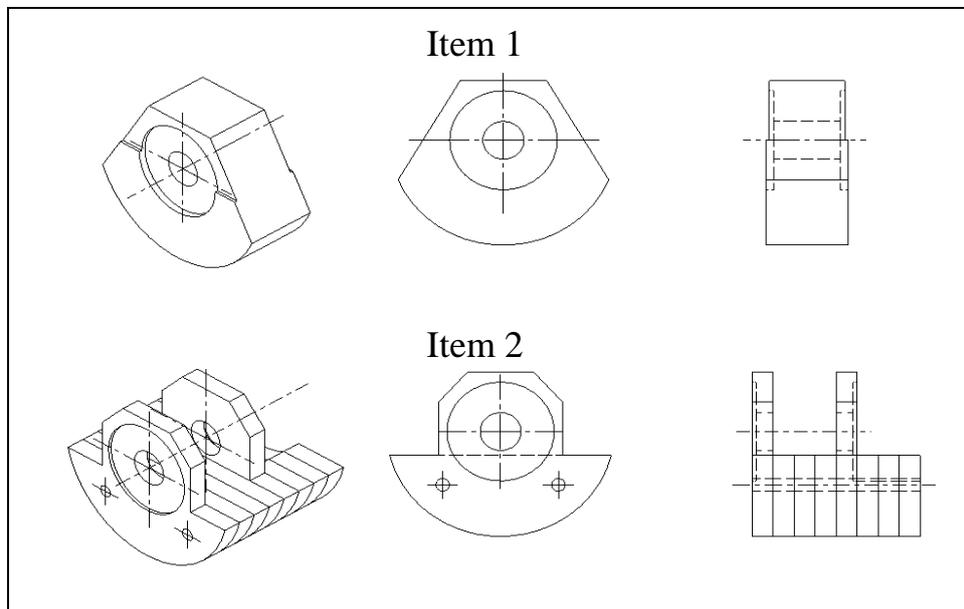
ภาพที่ 20 ส่วนประกอบของเครื่องมือไถดินดานชนิดสันตั้งโค้ง



ภาพที่ 21 ภาพ Isometric ส่วนประกอบของชุดไถดินดานชนิดสันตั้งโค้ง



ภาพที่ 22 การถ่ายทอดกำลังจากเพลลาอานวยกำลังมายังชุดไถดินดานชนิดสั้นทั้ง โครง



ภาพที่ 23 ลักษณะของลูกค้ำน้ำหนักไม่สมดุลทั้ง 2 แบบ

ตารางที่ 1 ความกว้างในการสั้นของลูกตุ้มน้ำหนักไม่สมดุลทั้ง 2 แบบ

คุณลักษณะ	น้ำหนักลูกตุ้มน้ำหนัก	ความกว้างในการสั้น	ความกว้างในการสั้น
	ไม่สมดุล (kg)	แกน y (mm)	แกน z (mm)
1	29.1	6.17	5.47
2	29.5	10.07	8.13

วิธีการทดลองทำตามลำดับขั้นตอนดังนี้

1. ตรวจสอบสภาพของเครื่องมือ

ก่อนทำการทดลองจะต้องมีการตรวจสอบสภาพของเครื่องมืออยู่ในสภาพพร้อมทดลองและค่าสัญญาณที่ได้จากตัว transducer ที่ผ่านการปรับเทียบค่าสัญญาณหาค่าความสัมพันธ์ระหว่าง load (kN) กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (voltage) ดังแสดงในภาคผนวกที่ 1

2. การติดตั้งเครื่องมือในการทดลอง

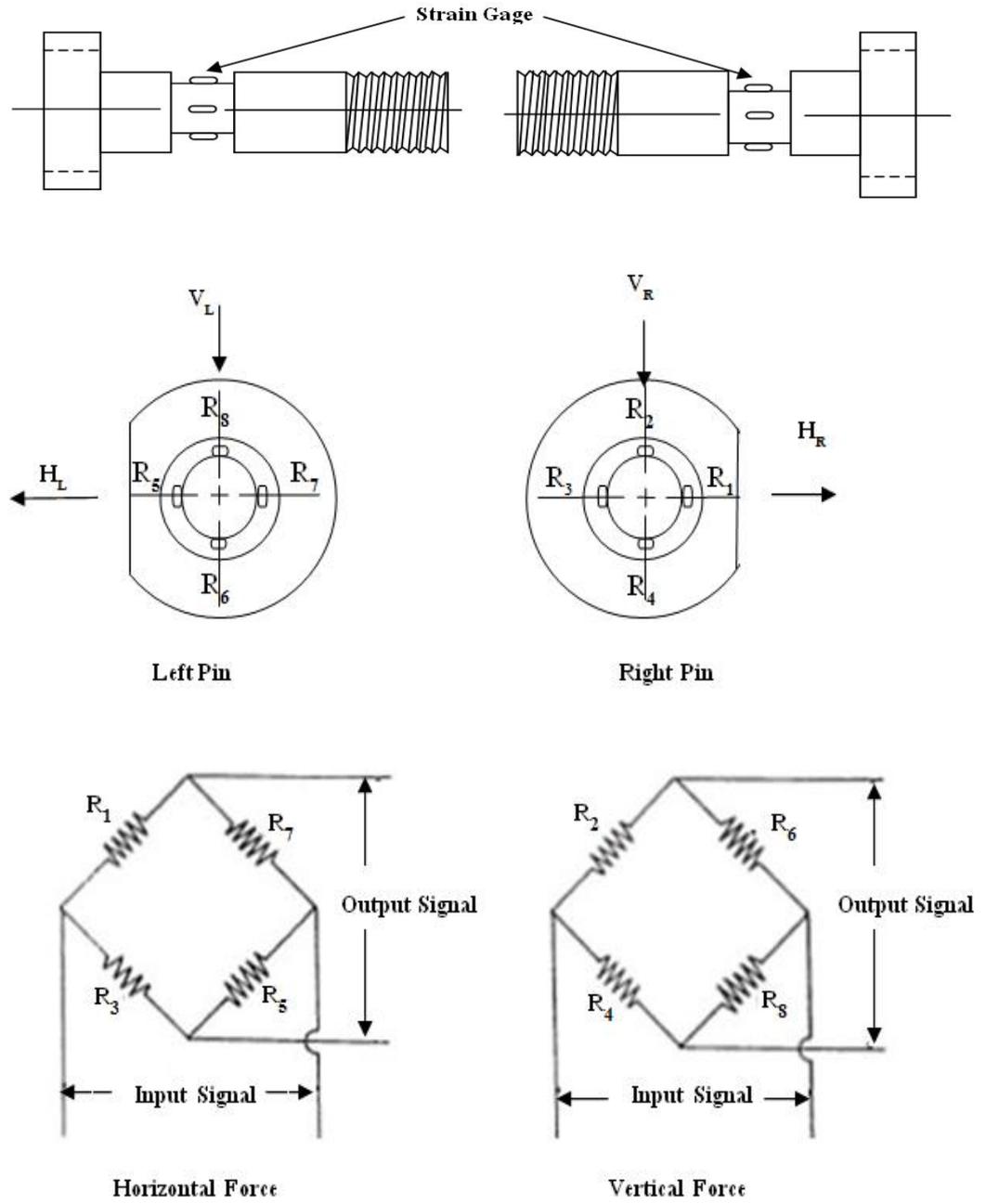
สำหรับการติดตั้งเครื่องมือไถระเบิดดินดานชนิดสั้นทั้งโครงกับรถแทรกเตอร์ และการติดตั้งอุปกรณ์เครื่องมือวัดค่าต่างๆ โดยติด Power supply AC 220v ไว้ด้านบนของเครื่องยนต์เป็นต้นกำเนิดไฟฟ้า ส่วนในการหาค่าแรงฉุดลาก (Drawbar pull) แรงบิดที่เพลลาอำนาจกำลัง (PTO torque) ความเร็วรอบของเพลลาอำนาจกำลัง (PTO speed) เพื่อนำค่าที่ได้มาคำนวณกำลังฉุดลาก (Drawbar power) กำลังที่ใช้ในการสั้น (Oscillatory power) และกำลังทั้งหมด (Total power) ของไถดินดานชนิดสั้นทั้งโครง ซึ่งค่าแรงฉุดลาก (Drawbar pull) และแรงยกตัวในแนวตั้ง (Vertical force) วัดได้จาก Lower link pins transducer และ Top link transducer โดยส่งสัญญาณในรูปแบบแรงดันไฟฟ้า (Voltage) และเมื่อนำค่าที่ได้นี้มาเทียบกับสมการที่ได้จากการปรับเทียบจะได้เป็นแรงกระทำในหน่วยนิวตัน (kN) ซึ่งค่าสัญญาณที่ได้มาจาก Lower link pins transducer จากการติด Strain gage แบบทางเดียว 4 ตัวที่ Lower link pins transducer ทั้งสองข้างดังภาพที่ 24 และแสดงวงจรการติดตั้งในภาพที่ 25 ขณะที่ Top link transducer ใช้วิธีการติด Strain Gage แบบสองทาง 2 ตัว ดังภาพที่ 26 และแสดงวงจรการติดตั้งในภาพที่ 27 และติดตั้ง torque transducer เพื่อใช้วัดแรงบิดที่เพลลาอำนาจกำลังและ Magnetic pick-up วัดความเร็วรอบหมุนของเพลลาอำนาจกำลัง ดังแสดงในภาพที่ 28

ค่าสัญญาณ Lower link pins transducer, Top link transducer, Torque transducer และ Magnetic pick-up จะส่งมายังเครื่อง Strain amplifier แบบ 6 channels ซึ่งทำหน้าที่รับและขยายสัญญาณค่าแรงดันไฟฟ้า (Voltage) เหล่านี้ และจะถูกส่งมาบันทึกค่าไว้ที่ตัว Analyzing recorder ชนิด 4 channels เนื่องจากค่าสัญญาณที่ส่งมาจาก Strain amplifier ใช้ทั้งหมด 5 channels แต่ Analyzing recorder มีเพียง 4 channels จึงต้องใช้ตัว Switching ดังแสดงในภาพที่ 29 เพื่อสลับค่าสัญญาณ Input 2 channels ให้ออกมา 1 channel ส่วนค่าที่ได้จากเครื่อง Analyzing recorder จะถูกส่งมายังคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม Qbasic สำหรับการวัดมุมของ Top link transducer กับแนวระดับใช้ตัว VR-slice โดยค่าที่ได้จะอ่านได้จาก Voltmeter โดยตรงและนำค่าสัญญาณทั้งหมดมาวิเคราะห์ในคอมพิวเตอร์ต่อไป ดังแสดงแผนภูมิการรับส่งสัญญาณข้อมูลจากชุด Transducers ในภาพที่ 30

สำหรับการวัดการสั่นสะเทือนที่เหมาะสมที่เบาคนขับทำได้โดยใช้อุปกรณ์วัดความเร่ง ADXL202 วัดค่าอัตราเร่ง 3 แกน คือ แกน X (แนวการเคลื่อนที่) แกน Y (แนวขวางการเคลื่อนที่) และ แกน Z (แนวตั้ง) และสำหรับการวัดความกว้างในการสั่นของชุดไถระเบิดดินดาน 2 แกน คือ แกน y (แนวขวางการเคลื่อนที่) และ แกน z (แนวตั้ง) ซึ่งค่าสัญญาณที่ได้จากตัววัดความเร่งจะส่งมาที่อุปกรณ์แปลงสัญญาณต่อเนื่องเป็นดิจิทัล (Analog to Digital Interface card) รุ่น NI USB-6210 และส่งสัญญาณมายังคอมพิวเตอร์โดยใช้ โปรแกรม LabVIEW SignalExpress บันทึกค่าสัญญาณเป็น Duty cycle และนำค่าสัญญาณทั้งหมดมาวิเคราะห์ต่อไป ดังแสดงแผนภูมิการรับส่งสัญญาณข้อมูลการสั่นสะเทือนในภาพที่ 31



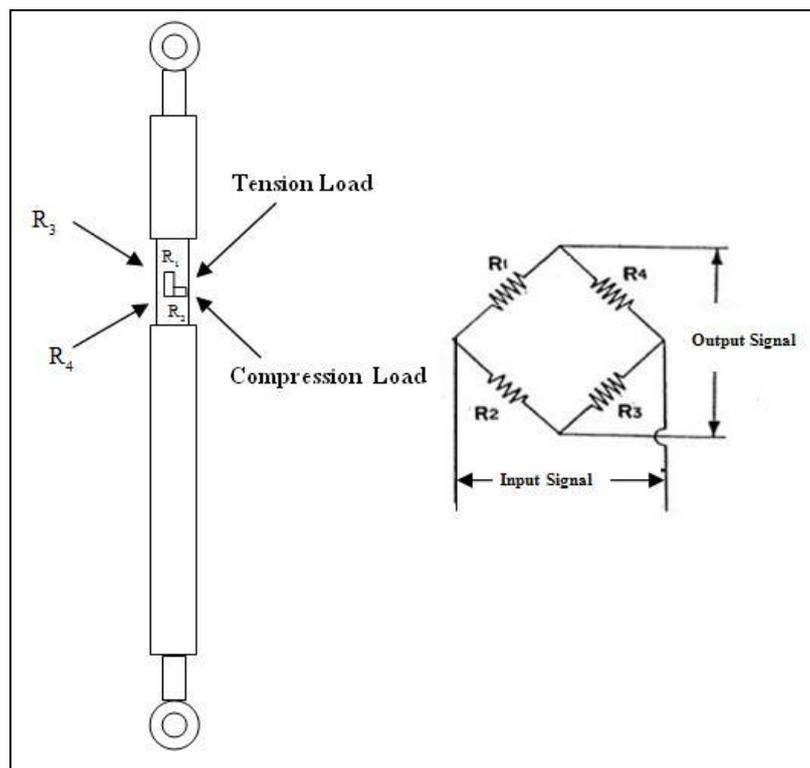
ภาพที่ 24 Lower link pins transducer ต่อเป็นวงจร Wheatstone bridge ผ่าน Bridge boxes



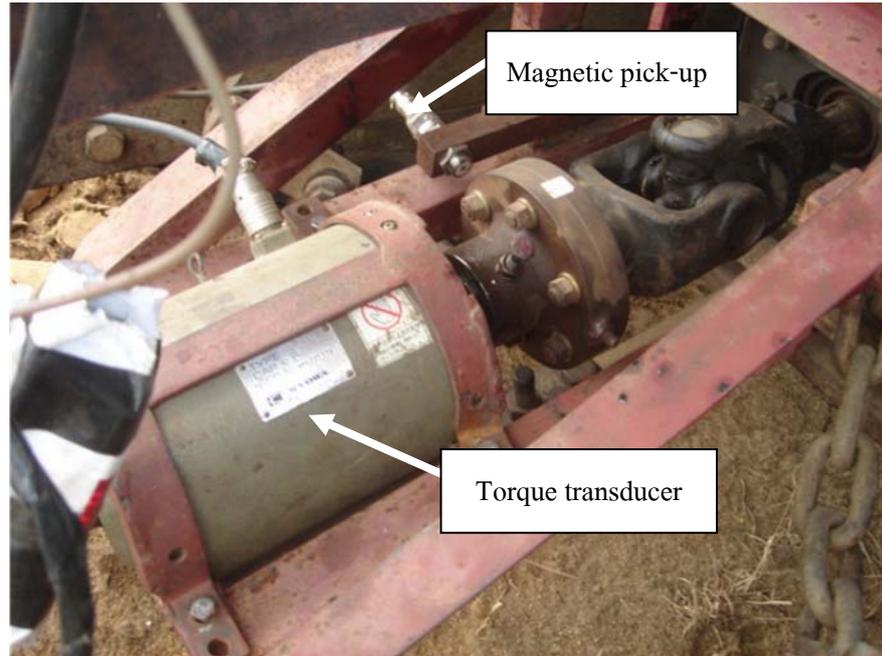
ภาพที่ 25 การติด Strain gage รุ่น KFG-2-350-C1-11L1M2R ชนิดทางเดียวที่ Lower link pins transducer



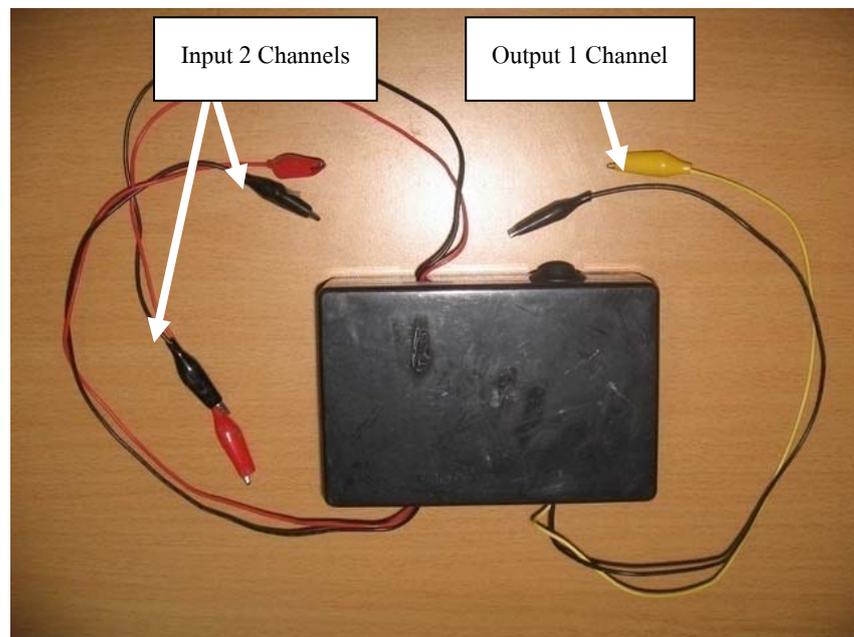
ภาพที่ 26 Top link transducer ต่อเป็นวงจร Wheatstone bridge ผ่าน Bridge box



ภาพที่ 27 การติด Strain gage รุ่น KFG-5-120-D16-11L1M2S สองทางสองตัวในตำแหน่งตรงข้ามกันที่ Top link transducer

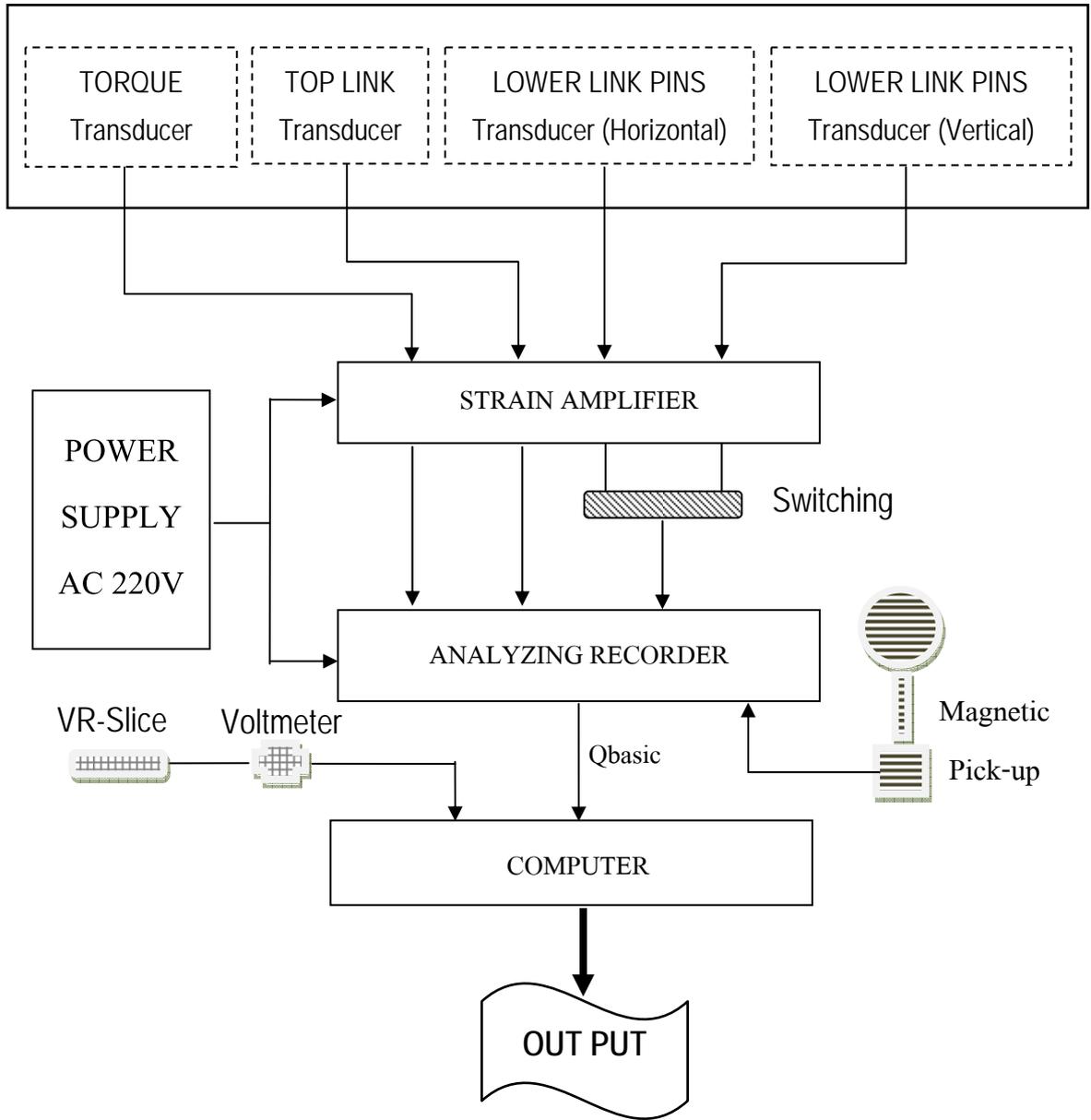


ภาพที่ 28 การติดตั้ง Torque transducer และ Magnetic pick-up

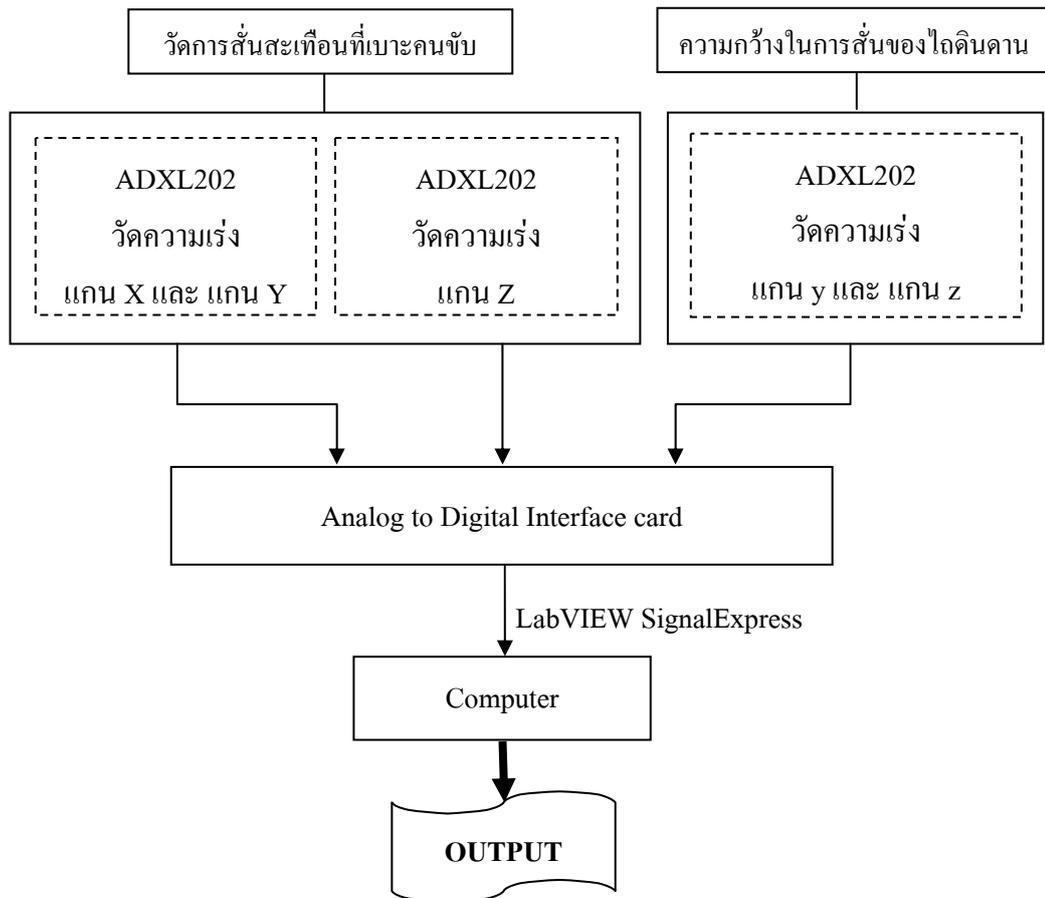


ภาพที่ 29 ตัว Switching ค่าสัญญาณจาก Input 2 channels ให้ Output 1 channel

TRANSDUCERS



ภาพที่ 30 แผนภูมิการรับส่งสัญญาณข้อมูลจากชุด Transducers



ภาพที่ 31 แผนภูมิการรับส่งสัญญาณข้อมูลการสั่นสะเทือน

3. การเก็บข้อมูลในการทดลอง

การเก็บข้อมูลในการทดลอง แบ่งออกเป็น 3 ส่วน

- 3.1 การเก็บข้อมูลก่อนการทดลอง
- 3.2 การเก็บข้อมูลระหว่างการทดลอง
- 3.3 การเก็บข้อมูลหลังการทดลอง

- 3.1 การเก็บข้อมูลก่อนการทดลอง
 - ตรวจหาสมบัติของดินในแปลงทดลอง

3.1.1 การเก็บค่าความชื้นดิน (Moisture Content) เก็บตัวอย่างดินในแปลงทดลองเพื่อหาค่าความชื้นที่ระดับความลึก 3 ระดับ 0-20, 21-40, 41-60 ซม. จากผิวดินตามลำดับ และนำดินที่ได้มาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศา เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนน้ำหนักคงที่ ซึ่งสามารถหาค่าความชื้นได้จากสูตร

$$MC = \frac{(W_w - W_d)}{W_d} \times 100\%$$

เมื่อ MC = Moisture Content % (db)
 W_w = น้ำหนักของดินเปียก (กรัม)
 W_d = น้ำหนักของดินแห้ง (กรัม)

3.1.2 ค่าความต้านทานการแทงทะลุของดิน (Cone index, C.I.) ซึ่งการอัดแน่นของดินนั้น นิยมวัดออกมาในรูปของค่า Cone penetrometer resistance โดยใช้ Cone penetrometer ซึ่งมีค่าตามมาตรฐานของ ASAE ขนาด Cone ที่ใช้ คือ Cone apex angle 30 degree พื้นที่หน้าตัดของฐาน 2 cm^2 ทำการสุ่มวัดค่า 3 ตำแหน่งต่อ 1 การทดลอง นำค่าที่ได้มาเฉลี่ยที่ระดับความลึก 3 ระดับ 0-20, 21-40, 41-60 ซม. จากผิวดินตามลำดับ

3.1.3 วัดพื้นผิวก่อนการไถโดยใช้ Profile meter เพื่อใช้ในการแบ่งพื้นที่การแตกตัวของดินส่วนที่ยกตัวขึ้นและพื้นที่การแตกตัวของดินส่วนที่เป็นหลุม ดังแสดงวิธีการวัดในภาพที่ 32



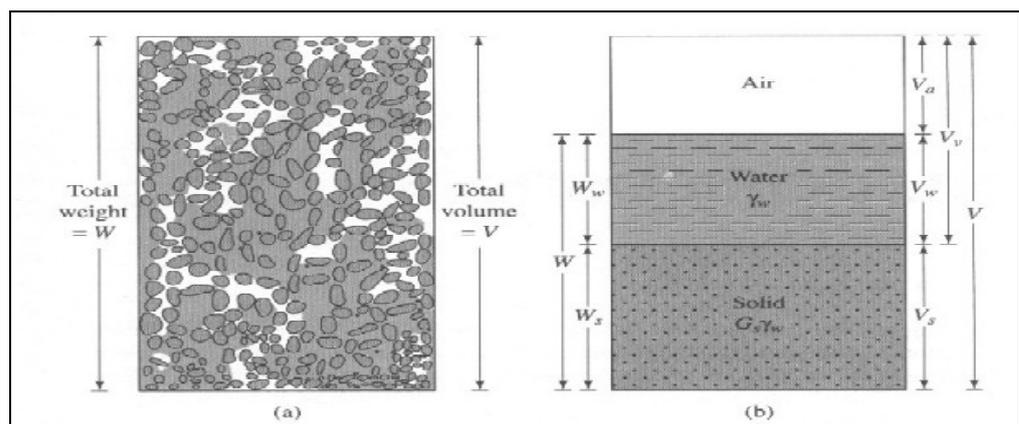
ภาพที่ 32 การวัดพื้นผิวก่อนการไถโดยใช้ Profile Meter

3.1.4 Particle size distribution ทำการสุ่มเก็บตัวอย่างดินมาหาค่าขนาดของเม็ดดินและ ส่วนประกอบของดิน เพื่อบอกสมบัติที่แตกต่างกันของดินแต่ละประเภท โดยนำมาทดลองด้วยวิธีการ ร่อนด้วยตะแกรง (Sieve Analysis) ตามมาตรฐาน ASTM D-422

3.1.5 ความหนาแน่นดินสภาพแห้ง (Dry bulk density) ทำการสุ่มเก็บตัวอย่างดินในแปลง ทดลองจาก 3 ระดับความลึก 0-20, 21-40, 41-60 ซม. จากผิวดินตามลำดับ โดยใช้ Standard core sampling นำดินที่ได้มาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศา เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนน้ำหนักคงที่ จะได้มวล ดินสภาวะแห้ง (M_s) ดังภาพที่ 33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนประกอบทางปริมาตรและ ความสัมพันธ์ทางมวล ซึ่งสามารถหาค่าความหนาแน่นมวลรวมสภาพแห้งได้จากสูตร

$$\rho_b = \frac{M_s}{V} ; V = V_w + V_s + V_a$$

เมื่อ	ρ_b	=	ความหนาแน่นมวลรวมสภาพแห้ง (g/cm ³)
	M_s	=	มวลดินแห้ง (g)
	V	=	ปริมาตรทั้งหมดของดิน (cm ³)
	V_w	=	ปริมาตรของน้ำ (cm ³)
	V_s	=	ปริมาตรของดิน (cm ³)
	V_a	=	ปริมาตรของอากาศ (cm ³)



ภาพที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนประกอบทางปริมาตรและความสัมพันธ์ทางมวล

(a) ส่วนประกอบของดินตามธรรมชาติ (b) ส่วนประกอบของดินแยกตามสถานะ

ที่มา : <http://www.up.ac.za/academic/civil/divisions/geotechnical/pgcourses/sgm782/themes/theme2/>

images/soilphases.jpg, 10 พฤศจิกายน 2008

3.1.6 Consistency limits ซึ่งประกอบไปด้วย

Liquid limit คือ ปริมาณความชื้นที่น้อยที่สุดในดินที่ทำให้ดินสามารถไหลตัวได้ด้วยน้ำหนักของตัวเอง หรือ ความชื้นในมวลดินขณะที่มวลดินเริ่มเปลี่ยนแปลงสถานะจากสารหนืดตัว (Viscous fluid) ไปเป็นสถานะภาพพลาสติก (Plastic state) โดยทำการทดลองตามมาตรฐาน ASTM D 4318-93

Plastic limit คือ ปริมาณความชื้นที่น้อยที่สุดในดินที่ทำให้ดินมีสภาพเหนียวหนืดมากขึ้นหรือความชื้นในมวลดินขณะที่มวลดินเริ่มเปลี่ยนแปลงสถานะจากพลาสติก (Plastic state) เป็นกึ่งของแข็ง (Semi-solid state) โดยทำการทดลองตามมาตรฐาน ASTM D 4318-93

Plasticity index (P.I) คือค่าความชื้นในสถานะภาพพลาสติกของดิน หาค่าผลต่างของค่า Liquid limit และ Plastic limit

3.1.7 Soil strength parameters ประกอบด้วยพารามิเตอร์ soil cohesion และ Angle of internal friction ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้หาค่าจากเครื่องมือ Shear annulus ทั้งนี้ค่า Maximum shear stress และค่า normal stress ถูกคำนวณโดยใช้สมการดังนี้

$$\tau_{\max} = \frac{3T_{\max}}{2\pi(r_o^3 - r_i^3)} \quad \text{และ} \quad \sigma = \frac{W}{\pi(r_o^2 - r_i^2)}$$

เมื่อ	τ_{\max}	=	maximum shear stress (kPa)
	σ	=	normal stress (kPa)
	T_{\max}	=	maximum torque (kN-m)
	W	=	vertical load applied (kN)
	r_o	=	outside radius of the shear ring (m)
	r_i	=	inside radius of the shear ring (m)

Plot ค่า shear stress และ normal stress เป็นเส้น Coulomb's Failure ใช้ทฤษฎี Coulomb เพื่อหาค่า soil cohesion และ soil internal friction angle

$$\tau_{\max} = \sigma \tan \phi + C$$

เมื่อ	τ_{\max}	=	maximum shear stress (kPa)
	C	=	soil cohesion (kPa)
	ϕ	=	soil internal friction angle (degree)
	σ	=	normal stress (kPa)

3.1.8 Adhesion parameters ประกอบด้วยพารามิเตอร์ adhesion และ soil metal friction angle ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้หาค่าจากเครื่องมือ shear annulus

	τ_{\max}	=	$\sigma \tan \delta + C_a$
เมื่อ	τ_{\max}	=	maximum sliding stress (kPa)
	C_a	=	adhesion (kPa)
	δ	=	soil metal friction angle (degree)
	σ	=	normal stress of friction surface (kPa)

3.2 การเก็บข้อมูลระหว่างการทดลอง

3.2.1 ความเร็วจริงในการเคลื่อนที่ (Actual speed, V_t) การหาความเร็วจริงในการทำงาน โดยการกำหนดระยะในการไถ 7 เมตร แล้วโรยปูนขาวที่จุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุด ควรให้รถแทรกเตอร์เริ่มเคลื่อนที่ก่อนจุดเริ่มต้นประมาณ 1 เมตร เพื่อให้ความเร็วคงที่ แล้วทำการจับเวลาเมื่อรถแทรกเตอร์เริ่มเข้าจุดเริ่มต้นและสิ้นสุดการจับเวลาที่จุดสุดท้าย

3.2.2 อัตราการลื่นไถล (Slip) ทำโดยการนับจำนวนรอบการหมุนที่ล้อหลังของรถแทรกเตอร์แล้วคำนวณเป็นระยะทางที่ล้อเคลื่อนที่ที่ทฤษฎี (S_T) เปรียบเทียบกับอัตราการลื่นไถลได้จากสูตร

$$\text{Slip (\%)} = \frac{(S_T - S_A)}{S_T} \times 100$$

เมื่อ	Slip	=	อัตราการลื่นไถล (%)
	S_T	=	ระยะทางที่ล้อเคลื่อนที่ทางทฤษฎี (เมตร)
	S_A	=	ระยะในการเคลื่อนที่จริง (เมตร)

3.2.3 แรงฉุดลาก (Drawbar pull) และกำลังฉุดลาก (Drawbar Power) นำค่าแรงฉุดลาก ในแนวระดับที่ได้จากการ Lower link pins transducer และ Top link transducer จะเอามาคำนวณหา กำลังฉุดลาก (Drawbar power) โดยแสดงวิธีการคำนวณในภาคผนวก ค ซึ่งกำลังสามารถหาแรงฉุดลาก (Drawbar power) ได้จากสูตร

$$\text{Drawbar power} = F \times V$$

เมื่อ

Drawbar power	=	กำลังฉุดลาก (kW)
F	=	แรงฉุดลากในแนวระดับ (kN)
V	=	ความเร็วในการเคลื่อนที่ (m/s)

3.2.4 แรงบิดที่เพลลาอานวยกำลัง (PTO torque) ทำการวัดโดยติดตั้งเครื่องมือ Torque transducer เพื่อใช้วัดแรงบิดที่เพลลาอานวยกำลัง และนำค่าที่ได้ไปใช้ในการคำนวณค่ากำลังจากเพลลา อานวยกำลัง (PTO power)

3.2.5 ความเร็วรอบของเพลลาอานวยกำลัง (PTO speed) ทำการวัดโดยติดตั้งเครื่องมือ Magnetic pick-up เพื่อใช้วัดความเร็วรอบของเพลลาอานวยกำลัง และนำไปใช้ในการคำนวณค่ากำลังจาก เพลลาอานวยกำลัง (PTO power) สามารถหาได้จากสูตร

$$\text{PTO power} = \frac{2\pi NT}{60,000}$$

เมื่อ

PTO power	=	กำลังของเพลลาอานวยกำลัง (kW)
N	=	ความเร็วรอบของเพลลาอานวยกำลัง (rpm)
T	=	แรงบิดที่เพลลาอานวยกำลัง (N-m)

นำค่าที่ได้มาคำนวณกำลังรวม (Total power) ซึ่งสามารถหาได้จาก

Total power	=	Drawbar power + PTO power
เมื่อ Total power	=	กำลังรวม (kW)
PTO power	=	กำลังของเพลลาอานวยกำลัง (kW)
Drawbar power	=	กำลังฉุดลาก (kW)

3.2.6 มุมของ Top link transducer (Inclination of the top link transducer) สามารถทำได้โดยการอ่านค่าจาก Voltmeter ซึ่งได้จากค่า VR-Slice เพื่อนำค่าที่ได้ไปแตกแรงคำนวณแรงจุดลากในแนวระดับและแนวตั้งต่อไป

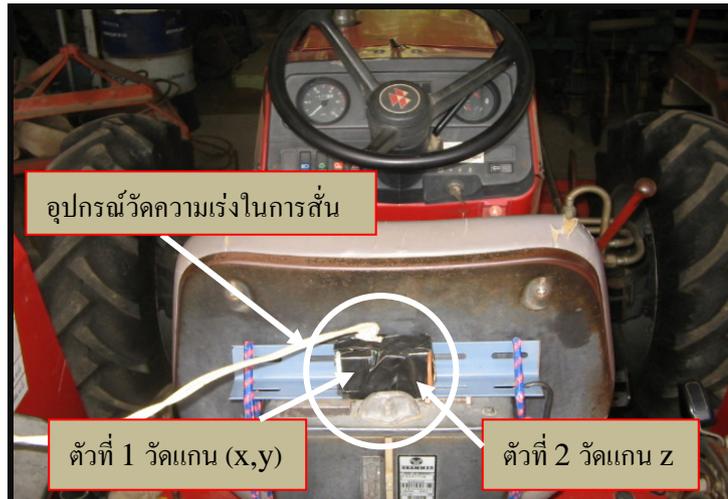
3.2.7 ความเร่งในการสั่น (Acceleration of vibration) ติดตั้งตัววัดสัญญาณไว้ที่เบาะคนขับจำนวน 2 ตัว คือตัวที่ 1 ใช้ในการวัดความเร่งแกน X และแกน Y ตัวที่ 2 ใช้ในการวัดความเร่งแกน Z ดังภาพที่ 34 ซึ่งค่าสัญญาณที่ได้จาก ADXL202 นี้เป็นสัญญาณ output แบบ ดิจิตอลพัลส์วิดท์โมดูเลชัน (Pulse Width Modulation, PWM) ซึ่งบันทึกค่าสัญญาณเป็น Duty cycle และนำค่าสัญญาณที่ได้มาหาค่าความเร่งในแต่ละแกนดังสมการต่อไปนี้

$$A_x(g) = \frac{\frac{T_{1x} - 50\%}{T_{2x}}}{12.5\%}$$

$$A_y(g) = \frac{\frac{T_{1y} - 50\%}{T_{2y}}}{12.5\%}$$

$$A_z(g) = \frac{\frac{T_{1z} - 50\%}{T_{2z}}}{12.5\%}$$

เมื่อ	A_x	=	ค่าความเร่งทางแกน x หน่วยเป็น g
	A_y	=	ค่าความเร่งทางแกน y หน่วยเป็น g
	A_z	=	ค่าความเร่งทางแกน z หน่วยเป็น g
	T_{1x}	=	ความกว้างพัลส์ ของขาสัญญาณ X_{out}
	T_{1y}	=	ความกว้างพัลส์ ของขาสัญญาณ Y_{out}
	T_{1z}	=	ความกว้างพัลส์ ของขาสัญญาณ Z_{out}
	T_{2x}	=	ความกว้างคาบสัญญาณของ X_{out}
	T_{2y}	=	ความกว้างคาบสัญญาณของ Y_{out}
	T_{2z}	=	ความกว้างคาบสัญญาณของ Z_{out}



ภาพที่ 34 แสดงตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเร่งที่เบาะคนขับ

3.2.8 ทิศทางในการสั่นของชุดไถดินดาน โดยติดตั้งอุปกรณ์วัดความเร่ง ADXL202 ที่ชุดไถดินดาน ซึ่งวัดค่าในแนวแกน y และ แกน z ดังภาพที่ 35 โดยบันทึกค่าสัญญาณเป็น Duty cycle และนำค่าสัญญาณที่ได้มาหาค่าความเร่งในแต่ละแกนดังสมการต่อไปนี้

$$A_y(g) = \frac{\frac{T_{1y} - 50\%}{T_{2y}}}{12.5\%}$$

$$A_z(g) = \frac{\frac{T_{1z} - 50\%}{T_{2z}}}{12.5\%}$$

เมื่อ A_y = ค่าความเร่งทางแกน y หน่วยเป็น g

A_z = ค่าความเร่งทางแกน z หน่วยเป็น g

นำค่าความเร่งที่ได้ในแต่ละแกนมาหาค่าความกว้างในการสั่น (Amplitude of oscillatory) ได้จาก

สูตร

$$d = \frac{a}{2\pi f^2}$$

เมื่อ d = ความกว้างในการสั่น (m)

a = ความเร่งในการสั่น (m/s^2)

f = ความถี่ในการสั่น (Hz)



ภาพที่ 35 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดความกว้างในการสั่นที่ชุดไถดินดาน

3.3 การเก็บข้อมูลหลังการทดลอง

3.3.1 พื้นที่การแตกตัวของดิน (Soil disturbance) สำหรับการแตกตัวของดินจะบันทึกค่าความยาวของการแตกตัวและขนาดของพื้นที่การแตกตัวของดิน ซึ่งการแตกตัวของดินหลังไถจะใช้ Profile meter วัดทั้งก่อนไถดินออก เพื่อดูพื้นที่ที่ถูกยกตัวขึ้นดังแสดงการวัดในภาพที่ 36 แล้วทำการไถดินออกและใช้ Profile meter วัดพื้นที่การแตกตัวของดินส่วนที่เป็นหลุมดังแสดงในภาพที่ 37



ภาพที่ 36 การวัดพื้นที่การแตกตัวของดินส่วนที่ถูกยกตัวขึ้น



ภาพที่ 37 การวัดพื้นที่การแตกตัวของดินส่วนที่เป็นหลุม

4. การวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 กำหนดหาแรงฉุดลาก (Drawbar pull) กำลังฉุดลากของรถแทรกเตอร์ (Drawbar power) และกำลังจากเพลาอำนาจกำลัง (PTO power)

4.2 กำหนดหาค่ากำลังรวม (Total power)

4.3 กำหนดหาพื้นที่การแตกตัวของดิน (Soil disturbance)

4.4 กำหนดหาอัตราการลื่นไถล (Slip) แรงฉุดลากต่อพื้นที่การแตกตัวของดิน (Specific draft) และกำลังรวมต่อพื้นที่การแตกตัวของดิน (Specific energy)

4.5 การสั่นสะเทือนที่ส่งผลกระทบต่อคนขับ (Tractor seat vibration)

5. ลักษณะและรูปแบบแปลงทดลอง

แปลงที่ใช้ในการทดลองสมรรถนะของไถดินดานชนิดสั้นทั้งโครง โดยแบ่งแปลงทดลองออกเป็น 63 แปลง แต่ละแปลงมีขนาด 7 X 3 เมตร ดังแสดงพื้นที่ก่อนการทดลองในภาพที่ 38



ภาพที่ 38 พื้นที่แปลงดินก่อนทำการทดลอง

6. สถานที่และเวลาในการทำวิจัย

สถานที่ในการทำวิจัย พื้นที่ของห้างหุ้นส่วนจำกัด ศรีกำแพงแสนมอเตอร์ อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม

เวลาในการทำวิจัย เริ่มดำเนินงานตั้งแต่เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2550 ถึง เดือน มีนาคม พ.ศ. 2552

ผลและวิจารณ์

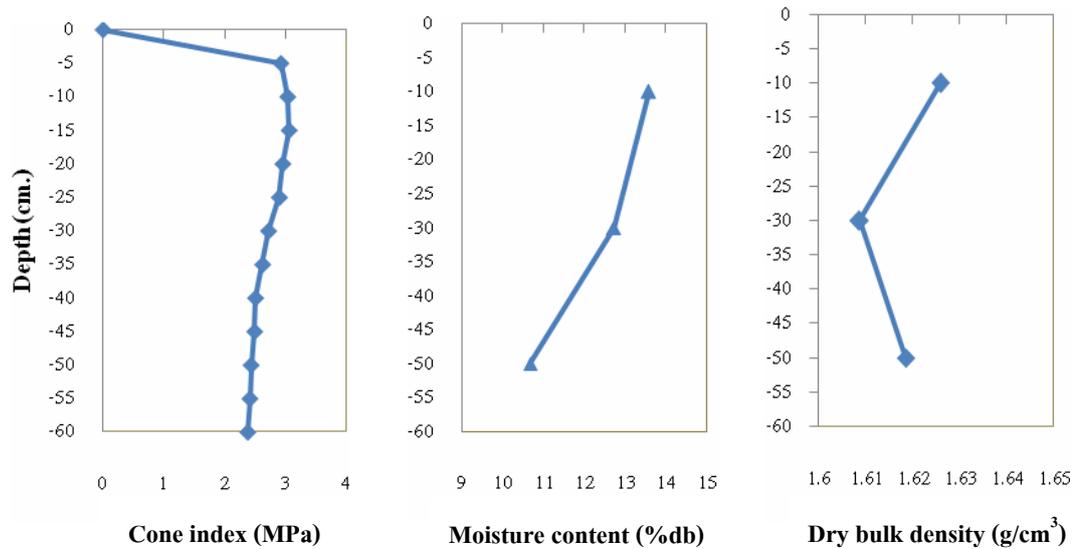
ผล

1. สภาพพื้นที่ในแปลงทดลอง

พื้นที่ทำการทดลองเป็นพื้นที่ของห้างหุ้นส่วนจำกัด ศรีกำแพงแสมมอเตอร์ อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม ชนิดของดินเป็นดินร่วนเหนียวปนทราย ดังแสดงในตารางที่ 2 สมบัติของดินในแปลงทดลองที่ระดับความลึก 0-60 ซม. มีค่าความชื้นของดินเฉลี่ย 12.32 % db ความหนาแน่นมวลรวมสภาวะแห้งของดินเฉลี่ย 1.62 g/cm^3 ดังแสดงรายละเอียดในภาพที่ 39

ตารางที่ 2 สมบัติของดินในแปลงทดลองที่ระดับความลึก 0-60 ซม.

Items	Soil properties	
	Proportion retained (%)	Size (mm)
1. Texture and particle size distribution	Clay = 25%	(2-0.42 mm)
	Silt = 14%	(0.42-0.074 mm)
	Sand = 61%	(0.074-0.005 mm)
2. Moisture content (% db)	12.32	
3. Dry bulk density (g/cm^3)	1.62	
4. Cone index (MPa)	2.5	
5. Strength parameters		
Cohesion, C (kPa)	12.03	
Internal friction, ϕ (deg)	28.04	
6. Adhesion parameters		
Soil adhesion, C_a (kPa)	4.14	
Soil tool friction, δ (deg)	8.36	
7. Consistency Limit		
Liquid limit (% db)	38.25	
Plastic limit (% db)	21.37	
Plastic index (% db)	18.89	



ภาพที่ 39 สมบัติของดินในแปลงทดลองที่ระดับความลึก 0-60 ซม.

2. ผลกระทบต่อแรงจูงลาก (Drawbar pull)

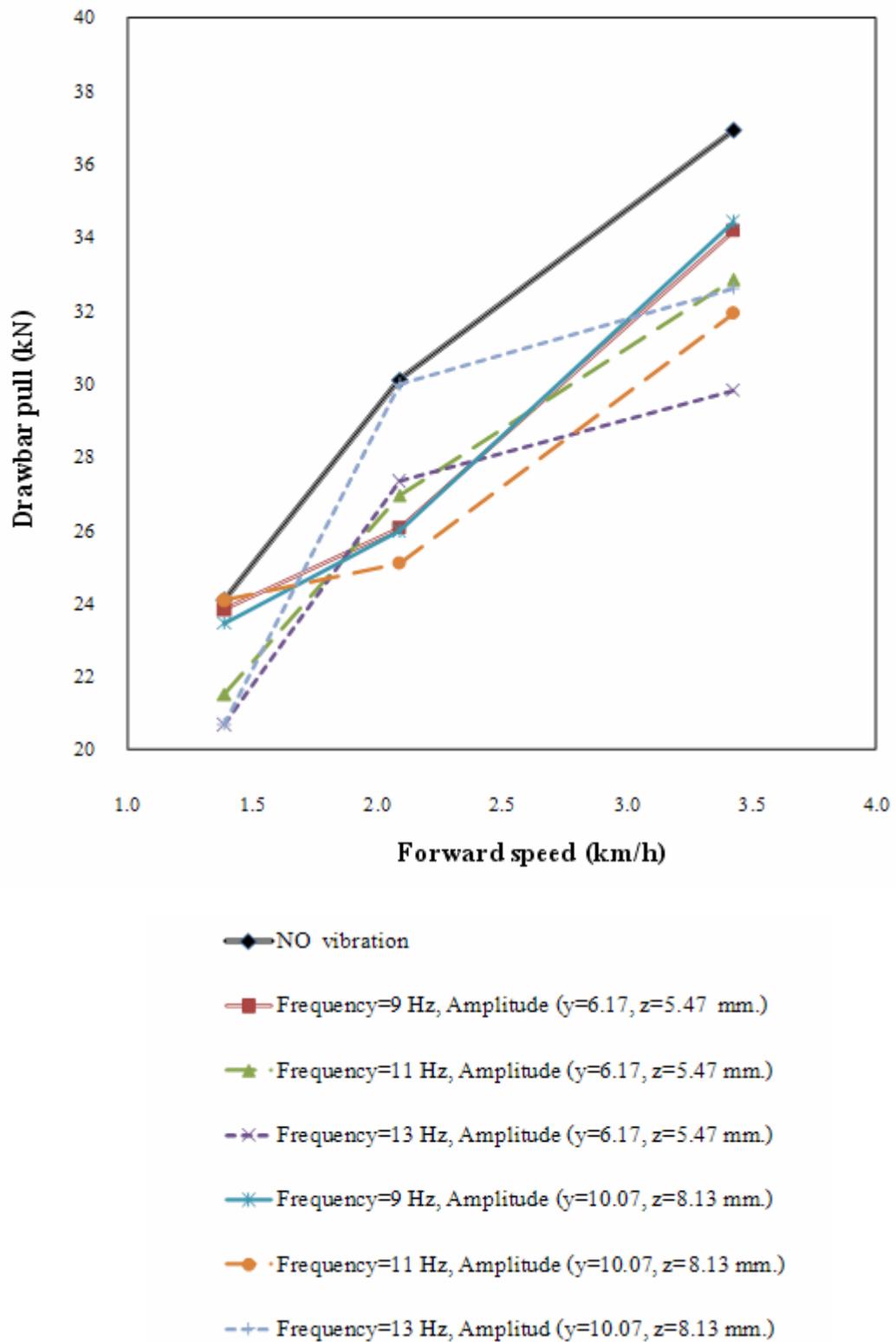
แรงจูงลาก (Drawbar pull) และกำลังรวม (Total power) ถือว่าตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการบ่งบอกสมรรถนะของไถดินดานชนิดสั้นทั้งโครง ดังตารางที่ 3 แสดงผลการทดสอบสมรรถนะของไถดินดานทั้งหมด 21 treatments เฉลี่ย 3 ชั่วโมง จาก 3 ปีวิจัยที่ส่งผลต่อสมรรถนะของไถดินดานชนิดสั้นทั้งโครง (Shakerator) พบว่า จากปัจจัยความเร็วในการเคลื่อนที่ (Forward speed) เมื่อเพิ่มความเร็วมากขึ้นจาก 1.39 ถึง 3.43 km/h จะส่งผลให้ค่าเฉลี่ยแรงจูงลาก (Drawbar pull) ของการไถเพิ่มมากขึ้นทั้งที่สั้นและไม่สั้นขณะทำงาน ซึ่งมีค่าเฉลี่ยแรงจูงลากเพิ่มขึ้นจาก 22.67 kN เป็น 33.21 kN ที่ความลึกในการไถเฉลี่ยเดียวกัน ดังแสดงในภาพที่ 40 เมื่อใช้ความเร็ว 3.43 km/h และไม่สั้นขณะทำงาน จะทำให้เกิดแรงจูงลากในแนวระดับมากที่สุด 36.9 kN

การสั้นที่ส่งผลต่อแรงจูงลาก (Drawbar pull) จากปัจจัยความถี่ในการสั้น (Frequency of oscillatory) และความกว้างในการสั้น (Amplitude of oscillatory) พบว่า การสั้นที่ความถี่ในการสั้น 13 Hz และความกว้างในการสั้น ($y=6.17, z=5.47$ mm) ใช้ความเร็วในการเคลื่อนที่ Low1 (1.39 km/h) จะใช้แรงจูงลาก (Drawbar pull) น้อยที่สุด 20.67 kN และเมื่อเปรียบเทียบกับแบบไม่สั้นที่ความเร็วเดียวกันสามารถลดแรงจูงลาก (Drawbar pull) มากที่สุด 19.26% และจากการสังเกต พบว่าความถี่ในการสั้นเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของแรงจูงลาก (Drawbar pull) มีค่าลดลงดังแสดงในภาพที่ 41 เมื่อเปรียบเทียบกับแบบไม่สั้นนั้นที่ค่าเฉลี่ยของความถี่ในการสั้น 9 ถึง 13 Hz จะสามารถลดแรงจูงลาก (Drawbar pull) ลงได้ 7.86-11.43 % และสำหรับความกว้างในการสั้น (Amplitude of oscillatory) ทั้ง 2

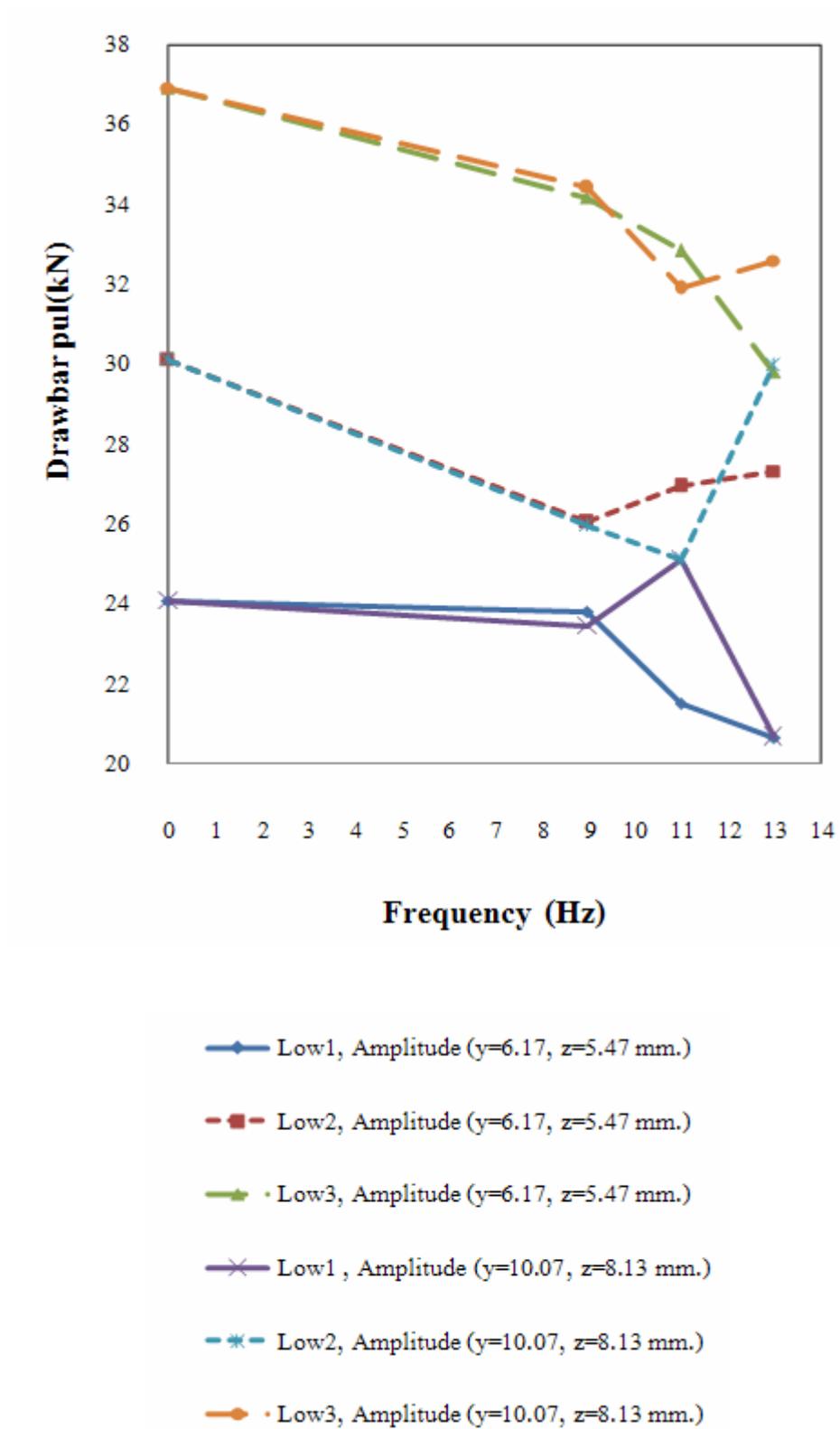
ระดับเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับแบบไม่สั่น พบว่าที่ความกว้างในการสั่น A1(y=6.17, z=5.47 mm) และ A2(y=10.07, z=8.13 mm) จะสามารถลดแรงฉุดลาก (Drawbar pull) ลงได้ 10.9 % และ 9.2 % ตามลำดับ ดังแสดงรายละเอียดในภาพที่ 42

ตารางที่ 3 แรงฉุดลากในแนวระดับและกำลังรวมที่สภาวะทดลองต่างๆ

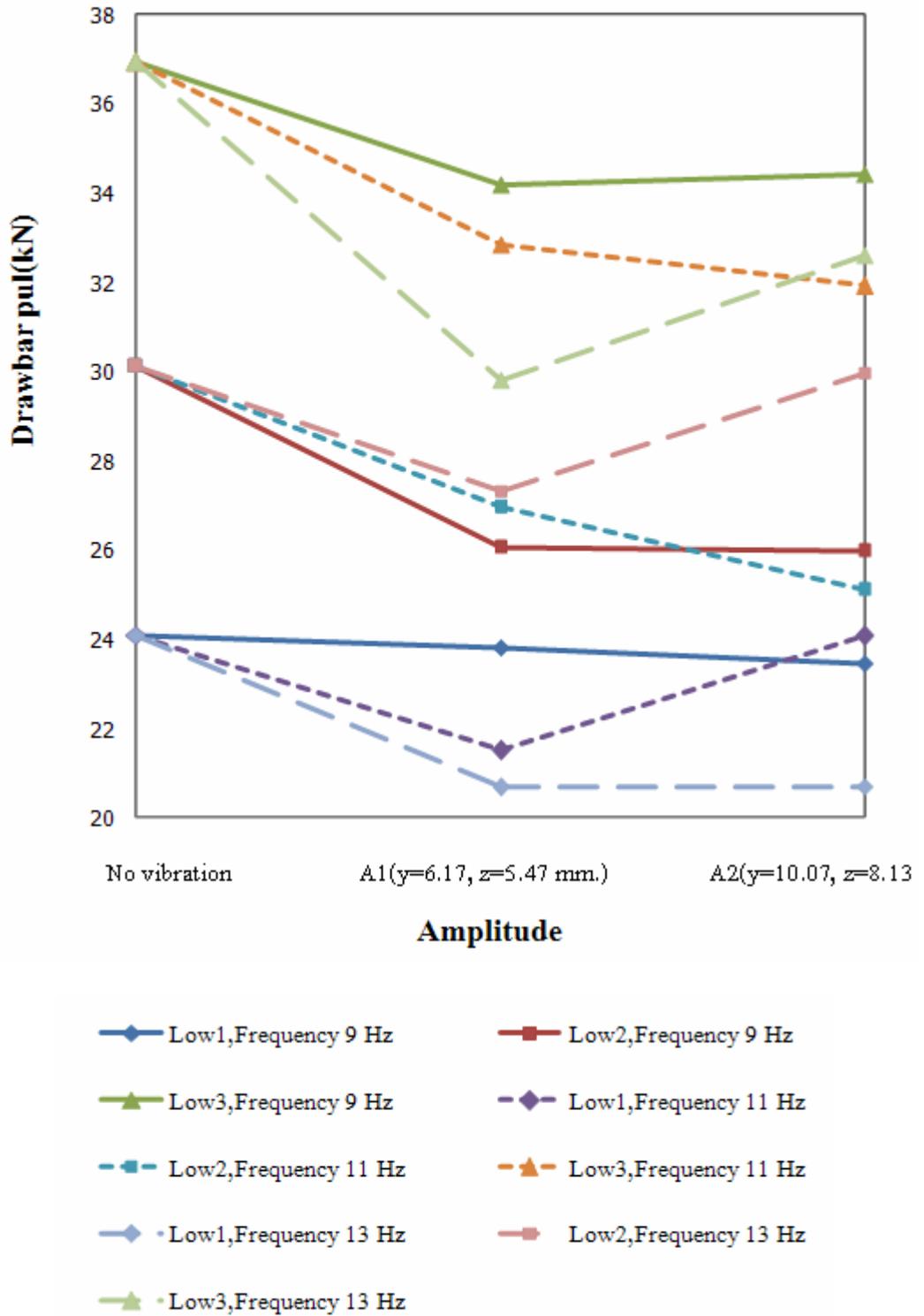
Forward speed (km/h)	Frequency (Hz)	Amplitude (mm)	Drawbar pull (kN)	Drawbar power (kW)	PTO power (kW)	Total power (kW)
1.39(Low1)	0	0	24.08	9.27	0	9.27
2.09(Low2)	0	0	30.09	17.48	0	17.48
3.43(Low3)	0	0	36.92	35.14	0	35.14
1.39(Low1)	9	(y=6.17, z=5.47)	23.81	9.17	0.72	9.89
2.09(Low2)	9	(y=6.17, z=5.47)	26.05	15.13	0.64	15.78
3.43(Low3)	9	(y=6.17, z=5.47)	34.17	32.53	0.57	33.10
1.39(Low1)	11	(y=6.17, z=5.47)	21.51	8.28	0.99	9.27
2.09(Low2)	11	(y=6.17, z=5.47)	26.94	15.65	0.88	16.53
3.43(Low3)	11	(y=6.17, z=5.47)	32.84	31.26	0.74	32.00
1.39(Low1)	13	(y=6.17, z=5.47)	21.14	8.14	1.38	9.52
2.09(Low2)	13	(y=6.17, z=5.47)	27.32	15.87	0.95	16.82
3.43(Low3)	13	(y=6.17, z=5.47)	29.81	28.24	1.02	29.26
1.39(Low1)	9	(y=10.07, z=8.13)	23.44	9.02	1.26	10.28
2.09(Low2)	9	(y=10.07, z=8.13)	25.96	15.08	1.12	16.20
3.43(Low3)	9	(y=10.07, z=8.13)	34.41	32.76	0.84	33.60
1.39(Low1)	11	(y=10.07, z=8.13)	24.07	9.27	1.57	10.84
2.09(Low2)	11	(y=10.07, z=8.13)	25.09	14.58	1.47	16.04
3.43(Low3)	11	(y=10.07, z=8.13)	31.90	30.37	1.38	31.75
1.39(Low1)	13	(y=10.07, z=8.13)	20.68	7.96	1.91	9.87
2.09(Low2)	13	(y=10.07, z=8.13)	29.96	17.41	1.72	19.13
3.43(Low3)	13	(y=10.07, z=8.13)	32.59	31.02	1.49	32.51



ภาพที่ 40 ความเร็วแทรกเตอร์ที่ส่งผลต่อค่าเฉลี่ยแรงฉุดลาก (Drawbar pull)



ภาพที่ 41 ความถี่ในการสั่นที่ส่งผลต่อค่าเฉลี่ยแรงจูงลาก (Drawbar pull)

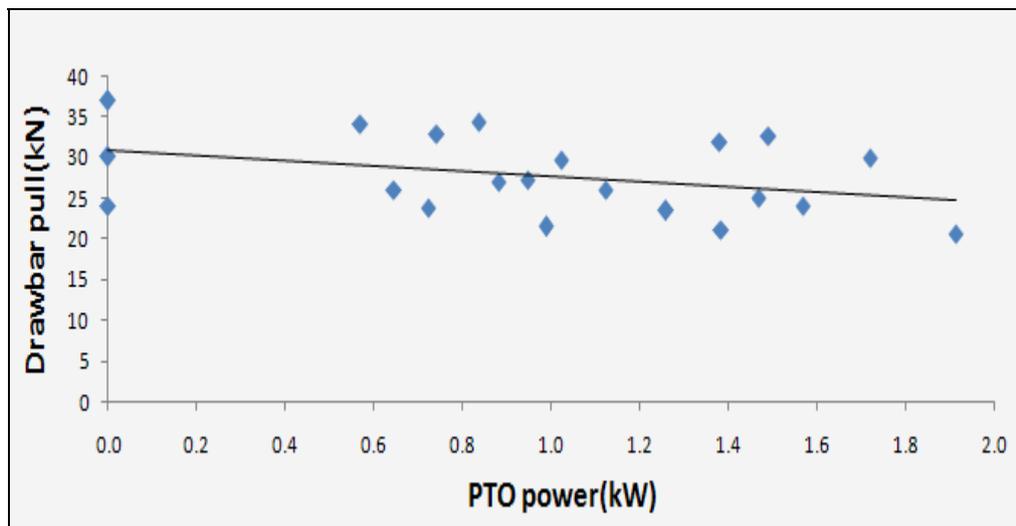


ภาพที่ 42 ความกว้างในการสั่นที่ส่งผลต่อค่าเฉลี่ยแรงฉุดลาก (Drawbar pull)

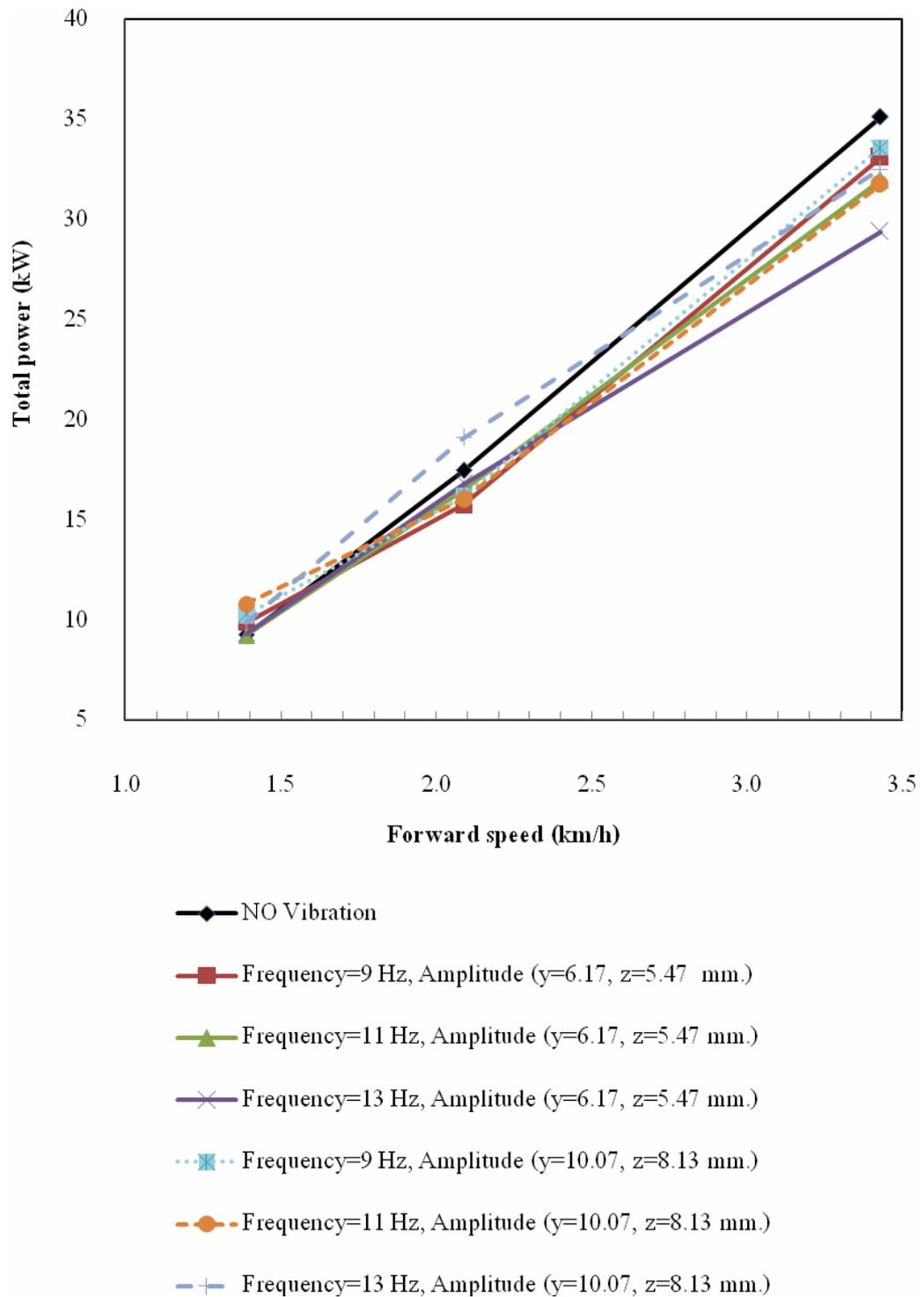
3. ผลกระทบต่อกำลังรวม (Total power) และกำลังจากเพลาอำนาจกำลัง (PTO power)

กำลังจากเพลาอำนาจกำลังนั้นเป็นกำลังที่เกิดจากปัจจัยความถี่ในการสั่นและความกว้างในการสั่น เมื่อเพิ่มความถี่ในการสั่น 9 Hz, 11 Hz และ 13 Hz ของความกว้างในการสั่น A1(y=6.17, z=5.47 mm) จะทำให้ใช้กำลังจากเพลาอำนาจกำลังเฉลี่ยมีค่าระหว่าง 0.57-1.38 kW ส่วนที่ความกว้างในการสั่น A2(y=10.07, z=8.13 mm) จะทำให้ใช้กำลังจากเพลาอำนาจกำลังเฉลี่ยระหว่าง 0.84-1.91 kW จากผลการทดลองพบว่า กำลังที่ใช้ในการสั่นนี้ช่วยลดแรงฉุดลากของรถแทรกเตอร์ลง เมื่อใช้กำลังในการสั่นมากที่สุด 1.91 kW ส่งผลทำให้ใช้แรงฉุดลากน้อยที่สุด 20.67 kN ดังภาพ ที่ 43 แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้กำลังในการสั่นมากขึ้นมีแนวโน้มทำให้ใช้แรงฉุดลาก (Drawbar pull) ลดลง

จากภาพที่ 44 แสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยกำลังรวม (Total power) จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเร็วแทรกเตอร์เพิ่มขึ้นจาก 1.39 ถึง 3.43 km/h ทั้งที่มีการสั่นและไม่สั่นขณะทำงานส่งผลให้ค่าเฉลี่ยกำลังรวมเพิ่มขึ้นจาก 9.8 kW เป็น 32.5 kW และยังพบว่าเมื่อขณะไม่สั่นที่ความเร็ว 3.43 km/h จะใช้กำลังรวมมากที่สุด 35.14 kW



ภาพที่ 43 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงฉุดลาก (Drawbar pull) กับกำลังจากเพลาอำนาจกำลัง (PTO power)



ภาพที่ 44 ค่าเฉลี่ยกำลังรวม (Total power) จากการทดลองไถดินดานชนิดสั้นทั้งโครง

ตารางที่ 4 ผลทางสถิติของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อแรงฉุดลาก (Drawbar pull)

Source of variation	Sum of squares	df	Mean square	F
Speed	1430.872	2	715.436	32.329 **
Amplitude	4.162	1	4.162	0.188 ^{NS}
Frequency	13.085	2	6.543	0.296 ^{NS}
Speed x Amplitude	0.700	2	0.350	0.016 ^{NS}
Speed x Frequency	71.766	4	17.942	0.811 ^{NS}
Amplitude x Frequency	10.659	2	5.330	0.241 ^{NS}
Speed x Amplitude x Frequency	23.175	4	5.794	0.262 ^{NS}
Error	1128.629	51	22.130	
Total	59505.832	72		

หมายเหตุ: * แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%, ** แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%, NS ไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

เมื่อวิเคราะห์ทางสถิติจากอิทธิพลหลัก 3 ปัจจัยนั้นพบว่า ความเร็วการเคลื่อนที่ 3 ระดับ คือ Low1, Low2 และ Low3 นั้นส่งผลกระทบต่อแรงฉุดลากในแนวระดับที่ระดับความเชื่อมั่น 99% เมื่อเปรียบเทียบภายในกลุ่มโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test พบว่าสามารถแบ่งออกได้ 3 กลุ่ม คือ กลุ่มที่1 Low1 กลุ่มที่2 Low2 และ กลุ่มที่3 Low3 ส่วนความถี่ในการสั้น 3 ระดับ คือ 9 Hz, 11 Hz และ 13 Hz และความกว้างในการสั้น 2 ระดับ A1(y=6.17, z=5.47 mm) และ A2(y=10.07, z=8.13 mm) ไม่ส่งผลกระทบต่อแรงฉุดลากในแนวระดับที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อเปรียบเทียบภายในกลุ่มโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test และนำค่าขณะไม่สั้นเข้ามาเปรียบเทียบ พบว่าความถี่ในการสั้นสามารถแบ่งออกได้ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่1 (ขณะไม่สั้น, สั้นที่ความถี่ 9 Hz และ 11 Hz) กลุ่มที่2 สั้นที่ความถี่ 9 Hz, 11 Hz และ 13 Hz และความกว้างในการสั้นสามารถแบ่งออกได้ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่1 ขณะไม่สั้น กลุ่มที่2 A1(y=6.17, z=5.47 mm) และ A2(y=10.07, z=8.13 mm)

เมื่อวิเคราะห์ผลกระทบของอิทธิพลร่วม 2 ปัจจัย และอิทธิพลร่วม 3 ปัจจัย พบว่า ไม่มีปัจจัยร่วมใดที่ส่งผลกระทบต่อแรงฉุดลากในแนวระดับที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 5 ผลทางสถิติของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกำลังรวม (Total power)

Source of variation	Sum of squares	df	Mean square	F
Speed	6683.298	2	3341.649	229.653 **
Amplitude	10.980	1	10.980	0.755 NS
Frequency	1.582	2	0.791	0.054 NS
Speed x Amplitude	0.341	2	0.171	0.012 NS
Speed x Frequency	30.532	4	7.633	0.525 NS
Amplitude x Frequency	8.017	2	4.009	0.275 NS
Speed x Amplitude x Frequency	8.661	4	2.165	0.149 NS
Error	742.094	51	14.551	
Total	36113.190	72		

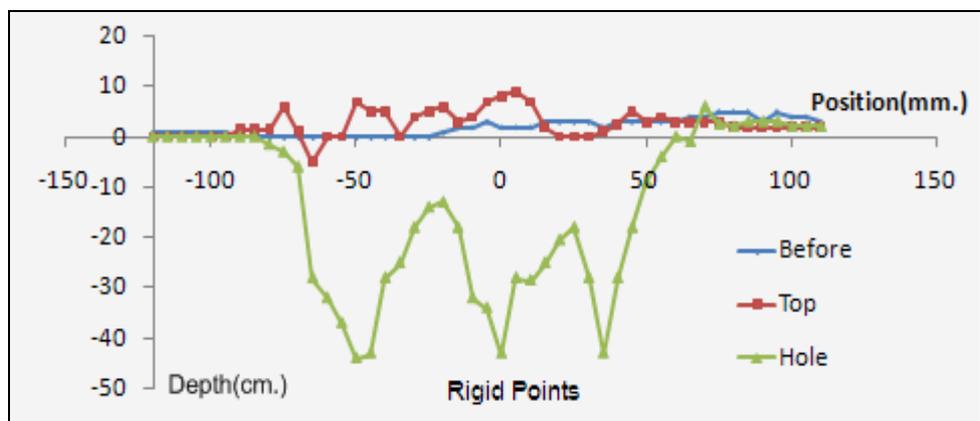
หมายเหตุ: * แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%, ** แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%, NS ไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

เมื่อวิเคราะห์ทางสถิติจากอิทธิพลหลัก 3 ปัจจัยนั้นพบว่า ความเร็วการเคลื่อนที่ 3 ระดับ คือ Low1, Low2 และ Low3 นั้นส่งผลกระทบต่อกำลังรวมที่ระดับความเชื่อมั่น 99% เมื่อเปรียบเทียบภายในกลุ่ม โดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test พบว่าสามารถแบ่งออกได้ 3 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 Low1 กลุ่มที่ 2 Low2 และ กลุ่มที่ 3 Low3 ส่วนความถี่ในการสั่น 3 ระดับ คือ 9 Hz, 11 Hz และ 13 Hz และความกว้างในการสั่น 2 ระดับ คือ A1(y=6.17, z=5.47 mm) และ A2(y=10.07, z=8.13 mm) ไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังรวมที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อเปรียบเทียบภายในกลุ่ม โดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test และนำค่าขณะไม่สั่นเข้ามาเปรียบเทียบ พบว่าขณะไม่สั่นก็ไม่ส่งผลทำให้เกิดความแตกต่างต่อกำลังรวมที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

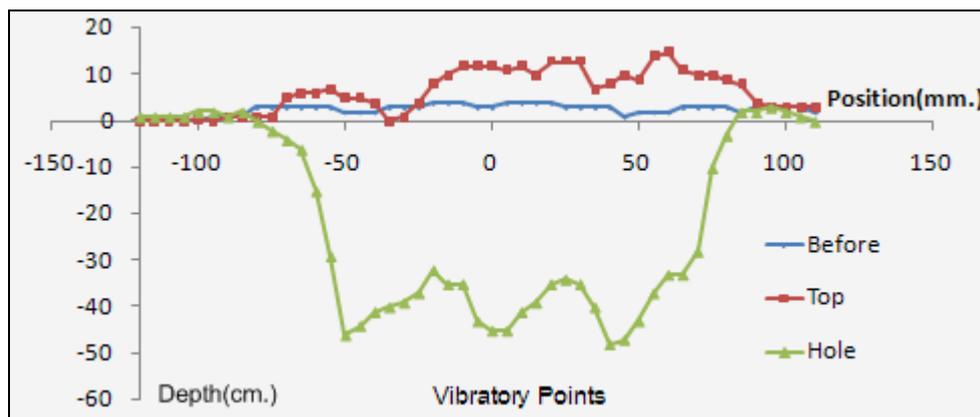
เมื่อวิเคราะห์ผลกระทบของอิทธิพลร่วม 2 ปัจจัย และอิทธิพลร่วม 3 ปัจจัย พบว่า ไม่มีปัจจัยร่วมใดที่ส่งผลกระทบต่อกำลังรวมที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังแสดงในตารางที่ 5

4. ผลกระทบต่อพื้นที่การแตกตัวของดิน (Soil disturbance)

การแตกตัวของดินเป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการบ่งบอกสมรรถนะของไถระเบิดดินดานชนิดสั้น ทั้งโครง ซึ่งการแตกตัวของดินนั้นจะวัดออกมาเป็น 2 ส่วน คือ พื้นที่การแตกตัวรวมและความยาวในการแตกตัวของดิน จากการศึกษาทั้งหมด 3 ปีวิจัย ความเร็วรถแทรกเตอร์ ความถี่ในการสั่น และความกว้างในการสั่น พบว่า ในขณะที่ใช้ความเร็ว Low2 กับความถี่ในการสั่น 13 Hz และความกว้างในการสั่น A1(y=6.17, z=5.47 mm) ทำให้ได้พื้นที่การแตกตัวของดินมากที่สุด 3525.6 cm² และเมื่อเปรียบเทียบกับแบบไม่สั่นพื้นที่การแตกตัวของดินเพิ่มมากที่สุด 49.1% และ ดังสรุปรายละเอียดข้อมูลในตารางที่ 6



ภาพที่ 45 พื้นที่หน้าตัดการแตกตัวของดินรวมขณะไม่สั่นที่ความเร็วแทรกเตอร์ 1.39 km/h



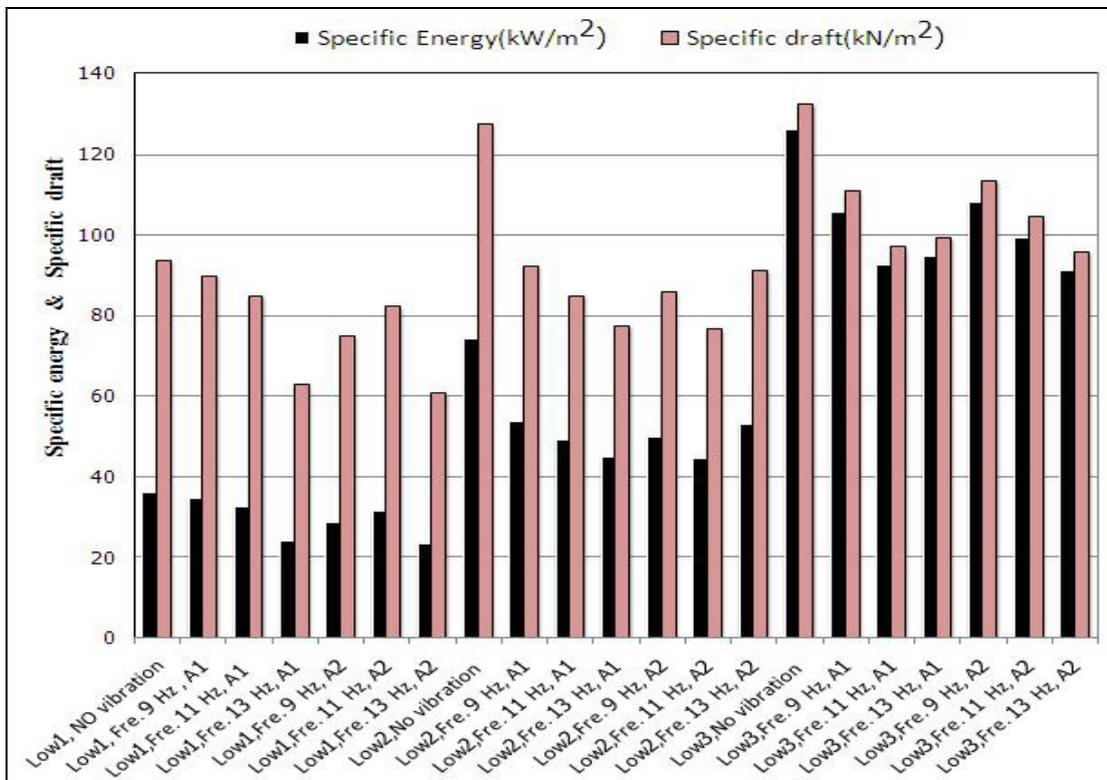
ภาพที่ 46 พื้นที่หน้าตัดการแตกตัวของดินรวมขณะสั่นที่ความถี่ในการสั่น 13 Hz และความกว้างในการสั่น A1(y=6.17, z=5.47 mm) ที่ความเร็วแทรกเตอร์ 1.39 km/h

ตารางที่ 6 ความยาวในการแตกตัวและพื้นที่การแตกตัวที่สภาวะทดลองต่างๆ

Forward speed (Km/h)	Frequency (Hz)	Amplitude (mm)	พื้นที่การแตกตัว (cm ²)			
			ความยาวการแตกตัว (cm)	ส่วนที่ถูกยกตัวขึ้น	ส่วนที่เป็นหลุม	พื้นที่รวม
1.39(Low1)	0	0	143.17	622.92	1948.33	2571.25
2.09(Low2)	0	0	141.83	575.83	1783.33	2359.17
3.43(Low3)	0	0	138.17	721.25	2068.33	2789.58
1.39(Low1)	9	(y=6.17, z=5.47)	141.00	466.25	2183.13	2649.38
2.09(Low2)	9	(y=6.17, z=5.47)	143.25	623.75	2195.63	2819.38
3.43(Low3)	9	(y=6.17, z=5.47)	144.67	582.50	2498.75	3081.25
1.39(Low1)	11	(y=6.17, z=5.47)	139.00	497.08	2041.25	2538.33
2.09(Low2)	11	(y=6.17, z=5.47)	139.33	654.17	2518.33	3172.50
3.43(Low3)	11	(y=6.17, z=5.47)	153.00	701.25	2680.00	3381.25
1.39(Low1)	13	(y=6.17, z=5.47)	152.17	716.67	2558.75	3275.42
2.09(Low2)	13	(y=6.17, z=5.47)	149.50	778.13	2747.50	3525.63
3.43(Low3)	13	(y=6.17, z=5.47)	157.65	641.88	2360.00	3001.88
1.39(Low1)	9	(y=10.07, z=8.13)	152.23	749.58	2383.33	3132.92
2.09(Low2)	9	(y=10.07, z=8.13)	155.17	592.92	2424.58	3017.50
3.43(Low3)	9	(y=10.07, z=8.13)	147.50	684.58	2348.33	3032.92
1.39(Low1)	11	(y=10.07, z=8.13)	147.50	822.92	2101.67	2924.58
2.09(Low2)	11	(y=10.07, z=8.13)	154.50	652.08	2625.00	3277.08
3.43(Low3)	11	(y=10.07, z=8.13)	148.17	642.50	2412.92	3055.42
1.39(Low1)	13	(y=10.07, z=8.13)	150.50	760.42	2641.25	3401.67
2.09(Low2)	13	(y=10.07, z=8.13)	151.33	717.50	2567.08	3284.58
3.43(Low3)	13	(y=10.07, z=8.13)	155.50	848.75	2553.75	3402.50

จากภาพที่ 45 และภาพที่ 46 แสดงลักษณะพื้นที่หน้าตัดการแตกตัวของดินรวม แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือพื้นที่หน้าตัดการแตกตัวของดินส่วนที่ยกตัวขึ้นและพื้นที่หน้าตัดของดินส่วนที่เป็นหลุม ขณะที่สั้นและไม่สั้นของชุดไถขณะทำงาน พบว่า ถ้าความถี่ในการสั่นเพิ่มขึ้นจาก 9 Hz เป็น 13 Hz จะทำให้ค่าเฉลี่ยพื้นที่การแตกตัวของดินรวมจะเพิ่มมากขึ้น 14.8-28.8% จากการสังเกตพบว่าพื้นที่การแตกตัวของดินรวมเพิ่มมากขึ้นเมื่อความถี่ในการสั่นเพิ่มมากขึ้นและการสั่นที่ความถี่ 13 Hz ความกว้างในการสั่น A1(y=6.17, z=5.47 mm) และความเร็วแทรกเตอร์ 1.39 km/h จะมีลักษณะการแตกตัวของดินเป็นรูปตัวยู (u) เล็กมาต่อกัน 3 ตัว และมีความยาวในการแตกตัว 157.65 ซม. ส่วนการแตกตัวของดินขณะไม่สั้น

ที่ความเร็วเดียวกันมีลักษณะเป็นรูปตัววี (V) ใหญ่มาต่อกัน 3 ตัวและมีความยาวในการแตกตัวเพียง 143.16 ซม.



ภาพที่ 47 แสดงค่าแรงฉุดลากต่อพื้นที่การแตกตัวของดิน (Specific draft) และกำลังรวมต่อพื้นที่การแตกตัวของดิน (Specific energy)

จากภาพที่ 47 แสดงการสั้นของชุดไถส่งผลกระทบให้ค่าแรงฉุดลากต่อพื้นที่การแตกตัวของดิน (Specific draft) และกำลังรวมต่อพื้นที่การแตกตัวของดิน (Specific energy) ซึ่งเห็นได้ว่าการสั้นนั้นมีแนวโน้มทำให้ค่าแรงฉุดลากต่อพื้นที่การแตกตัวของดิน (Specific draft) และกำลังรวมต่อพื้นที่การแตกตัวของดิน (Specific energy) มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับแบบไม่สั้น และเมื่อใช้ความเร็ว Low 1 ความถี่ในการสั้น 13 Hz และความกว้างในการสั้น A2(y=10.07, z=8.13 mm) ส่งผลให้แรงฉุดลากต่อพื้นที่การแตกตัวของดินมีค่าน้อยที่สุด 60.78 kN/m² และส่งผลให้ค่ากำลังรวมที่ใช้ต่อพื้นที่การแตกตัวรวมของดินมีค่าน้อยที่สุด 23.4 kW/m² เนื่องจากความเร็วแทรกเตอร์นั้นไม่ส่งผลต่อพื้นที่การแตกตัวของดิน จึงทำให้ที่ความเร็ว Low1 มีค่าสมรรถนะการทำให้กำลังรวมที่ใช้ต่อพื้นที่การแตกตัวรวมของดินสูงกว่าที่ความเร็ว Low2 และ Low3

ตารางที่ 7 ผลทางสถิติของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อพื้นที่การแตกตัวของดิน (Soil disturbance)

Source of variation	Sum of squares	df	Mean square	F
Speed	404998.526	2	202499.263	1.102 ^{NS}
Amplitude	195900.484	1	195900.484	1.066 ^{NS}
Frequency	1236160.983	2	618080.492	3.362 [*]
Speed x Amplitude	302398.517	2	151199.259	0.822 ^{NS}
Speed x Frequency	773319.448	4	193329.862	1.052 ^{NS}
Amplitude x Frequency	59114.855	2	29557.427	0.161 ^{NS}
Speed x Amplitude x Frequency	606937.146	4	151734.286	0.825 ^{NS}
Error	9375426.042	51	183831.883	
Total	654897566.838	72		

หมายเหตุ: * แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%, ** แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%, NS ไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

เมื่อวิเคราะห์ทางสถิติจากอิทธิพลหลัก 3 ปัจจัยนั้นพบว่า ความถี่ในการสั่น 3 ระดับ คือ 9 Hz, 11 Hz และ 13 Hz ส่งผลกระทบต่อพื้นที่การแตกตัวของดินที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อเปรียบเทียบภายในกลุ่มโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test และนำค่าเฉลี่ยไม่สั่นเข้ามาเปรียบเทียบ พบว่าความถี่ในการสั่นสามารถแบ่งออกได้ 3 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 ขณะไม่สั่น กลุ่มที่ 2 สั่นที่ความถี่ 9 Hz และ 11 Hz และกลุ่มที่ 3 สั่นที่ความถี่ 11 Hz และ 13 Hz ส่วนความเร็วในการเคลื่อนที่นั้นไม่ส่งผลกระทบต่อพื้นที่การแตกตัวของดินที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และสำหรับความกว้างในการสั่นเมื่อเปรียบเทียบภายในกลุ่มโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test และนำค่าเฉลี่ยไม่สั่นเข้ามาเปรียบเทียบ พบว่าความกว้างในการสั่นสามารถแบ่งออกได้ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 ขณะไม่สั่น และ กลุ่มที่ 2 A1(y=6.17, z=5.47 mm) และ A2(y=10.07, z=8.13 mm)

เมื่อวิเคราะห์ผลกระทบของอิทธิพลร่วม 2 ปัจจัย และอิทธิพลร่วม 3 ปัจจัย พบว่า ไม่มีปัจจัยร่วมใดที่ส่งผลกระทบต่อพื้นที่การแตกตัวของดินที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 8 ผลทางสถิติของปัจจัยที่มีผลต่อแรงกดลากต่อพื้นที่การแตกตัวของดิน (Specific draft)

Source of variation	Sum of squares	df	Mean square	F
Speed	11478.812	2	5739.406	9.937 **
Amplitude	113.045	1	113.045	0.196 ^{NS}
Frequency	1595.835	2	797.917	1.381 ^{NS}
Speed x Amplitude	572.072	2	286.036	0.495 ^{NS}
Speed x Frequency	1719.441	4	429.860	0.744 ^{NS}
Amplitude x Frequency	298.590	2	149.295	0.258 ^{NS}
Speed x Amplitude x Frequency	452.709	4	113.177	0.196 ^{NS}
Error	29457.903	51	577.606	
Total	742024.193	72		

หมายเหตุ: * แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%, ** แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%, NS ไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

เมื่อวิเคราะห์ทางสถิติจากอิทธิพลหลัก 3 ปัจจัยนั้นพบว่า ความเร็วการเคลื่อนที่ 3 ระดับ คือ Low1, Low2 และ Low3 นั้นส่งผลกระทบต่อแรงกดลากต่อพื้นที่การแตกตัวของดินที่ระดับความเชื่อมั่น 99% เมื่อเปรียบเทียบภายในกลุ่มโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test พบว่าสามารถแบ่งออกได้ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 Low1 และ Low2 และ กลุ่มที่ 2 Low3 ส่วนความถี่ในการสั่น 3 ระดับ คือ 9 Hz, 11 Hz และ 13 Hz และความกว้างในการสั่น 2 ระดับ A1(y=6.17, z=5.47 mm) และ A2(y=10.07, z=8.13 mm) ไม่ส่งผลกระทบต่อแรงกดลากต่อพื้นที่การแตกตัวของดินที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อเปรียบเทียบภายในกลุ่มโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test และนำค่าขณะไม่สั่นเข้ามาเปรียบเทียบ พบว่าความกว้างในการสั่นสามารถแบ่งออกได้ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 ขณะไม่สั่น และ กลุ่มที่ 2 A1(y=6.17, z=5.47 mm) และ A2(y=10.07, z=8.13 mm) สำหรับความถี่ในการสั่นสามารถแบ่งออกได้ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 ขณะไม่สั่น กลุ่มที่ 2 สั่นที่ความถี่ 9 Hz, 11 Hz และ 13 Hz

เมื่อวิเคราะห์ผลกระทบของอิทธิพลร่วม 2 ปัจจัย และอิทธิพลร่วม 3 ปัจจัย พบว่า ไม่มีปัจจัยร่วมใดที่ส่งผลกระทบต่อแรงกดลากต่อพื้นที่การแตกตัวของดินที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 9 ผลทางสถิติของปัจจัยที่มีผลต่อกำลังรวมต่อพื้นที่การแตกตัวของดิน (Specific energy)

Source of variation	Sum of squares	df	Mean square	F
Speed	71112.066	2	35556.033	96.547 ^{**}
Amplitude	16.024	1	16.024	0.044 ^{NS}
Frequency	361.972	2	180.986	0.491 ^{NS}
Speed x Amplitude	162.359	2	81.179	0.220 ^{NS}
Speed x Frequency	407.322	4	101.830	0.277 ^{NS}
Amplitude x Frequency	60.121	2	30.061	0.082 ^{NS}
Speed x Amplitude x Frequency	238.741	4	59.685	0.162 ^{NS}
Error	18782.183	51	368.278	
Total	432863.914879	72		

หมายเหตุ: * แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%, ** แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%, NS ไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

เมื่อวิเคราะห์ทางสถิติจากอิทธิพลหลัก 3 ปัจจัยนั้นพบว่า ความเร็วการเคลื่อนที่ 3 ระดับ คือ Low1, Low2 และ Low3 นั้นส่งผลกระทบต่อกำลังรวมต่อพื้นที่การแตกตัวของดิน ที่ระดับความเชื่อมั่น 99% เมื่อเปรียบเทียบภายในกลุ่มโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test พบว่าสามารถแบ่งออกได้ 3 กลุ่ม คือ กลุ่มที่1 Low1 กลุ่มที่2 Low2 และ กลุ่มที่3 Low3 ส่วนความถี่ในการสั่น 3 ระดับ คือ 9 Hz, 11 Hz และ 13 Hz และความกว้างในการสั่น 2 ระดับ คือ A1(y=6.17, z=5.47mm) และ A2(y=10.07, z=8.13 mm) ไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังรวมต่อพื้นที่การแตกตัวของดิน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อเปรียบเทียบภายในกลุ่มโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test และนำค่าขณะไม่สั่นเข้ามาเปรียบเทียบ พบว่าความกว้างในการสั่นสามารถแบ่งออกได้ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่1 ขณะไม่สั่น และ กลุ่มที่2 A1(y=6.17, z=5.47mm) และ A2(y=10.07, z=8.13 mm) สำหรับความถี่ในการสั่นสามารถแบ่งออกได้ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่1 ขณะไม่สั่น กลุ่มที่2 สั่นที่ความถี่ 9 Hz, 11 Hz และ 13 Hz

เมื่อวิเคราะห์ผลกระทบของอิทธิพลร่วม 2 ปัจจัย และอิทธิพลร่วม 3 ปัจจัย พบว่า ไม่มีปัจจัยร่วมใดที่ส่งผลกระทบต่อกำลังรวมต่อพื้นที่การแตกตัวของดิน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังแสดงในตารางที่ 9

5. การลื่นไถล (Slip)

จากทั้ง 3 ปัจจัย คือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ ความถี่และความกว้างในการสั่น พบว่า เมื่อใช้ความเร็วในการเคลื่อนที่เพิ่มมากขึ้นนั้นจะมีแนวโน้มทำให้การลื่นไถลลดลง ส่วน Specific draft และ Specific energy จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเร็วในการเคลื่อนที่สูงขึ้น และสำหรับปัจจัยจากความถี่และความกว้างในการสั่นนั้นไม่ส่งผลให้การลื่นไถล (Slip), Specific draft และ Specific energy เพิ่มขึ้นหรือลดลงในทางสถิติ ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 10

ตารางที่ 10 อัตราการลื่นไถล (Slip), Specific draft และ Specific energy ที่สภาวะการทดลองต่างๆ

Forward speed (Km/h)	Frequency (Hz)	Amplitude (mm)	Slip (%)	Specific draft (kN/m ²)	Specific energy (kW/m ²)
1.39(Low1)	0	0	17.92	93.998	38.542
2.09(Low2)	0	0	15.63	129.228	65.046
3.43(Low3)	0	0	10.16	134.799	127.173
1.39(Low1)	9	(y=6.17, z=5.47)	17.67	90.197	32.219
2.09(Low2)	9	(y=6.17, z=5.47)	15.13	93.153	69.236
3.43(Low3)	9	(y=6.17, z=5.47)	13.42	111.198	93.325
1.39(Low1)	11	(y=6.17, z=5.47)	17.24	100.032	24.902
2.09(Low2)	11	(y=6.17, z=5.47)	13.98	85.738	41.613
3.43(Low3)	11	(y=6.17, z=5.47)	15.79	101.430	82.317
1.39(Low1)	13	(y=6.17, z=5.47)	15.67	63.671	28.004
2.09(Low2)	13	(y=6.17, z=5.47)	12.60	77.672	48.192
3.43(Low3)	13	(y=6.17, z=5.47)	15.07	100.568	112.902
1.39(Low1)	9	(y=10.07, z=8.13)	16.01	75.143	28.437
2.09(Low2)	9	(y=10.07, z=8.13)	15.56	85.433	48.078
3.43(Low3)	9	(y=10.07, z=8.13)	13.81	115.356	120.622
1.39(Low1)	11	(y=10.07, z=8.13)	16.24	82.394	37.090
2.09(Low2)	11	(y=10.07, z=8.13)	13.00	76.885	47.733
3.43(Low3)	11	(y=10.07, z=8.13)	15.23	109.221	69.150
1.39(Low1)	13	(y=10.07, z=8.13)	18.54	61.278	32.234
2.09(Low2)	13	(y=10.07, z=8.13)	12.05	91.746	54.076
3.43(Low3)	13	(y=10.07, z=8.13)	15.92	100.158	71.761

ตารางที่ 11 ผลทางสถิติของสรุปปัจจัยที่มีผลกระทบต่ออัตราการลื่นไถล (Slip)

Source of variation	Sum of squares	df	Mean square	F
Speed	167.303	2	83.652	17.853**
Amplitude	0.008	1	0.008	0.002 ^{NS}
Frequency	0.969	2	0.484	0.103 ^{NS}
Speed x Amplitude	0.847	2	0.423	0.090 ^{NS}
Speed x Frequency	41.595	4	10.399	2.219 ^{NS}
Amplitude x Frequency	8.577	2	4.288	0.915 ^{NS}
Speed x Amplitude x Frequency	12.466	4	3.117	0.665 ^{NS}
Error	238.961	51	4.686	
Total	16820.570	72		

หมายเหตุ: * แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%, ** แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%, NS ไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 11 แสดงผลการวิเคราะห์ทางสถิติจากอิทธิพลหลัก 3 ปัจจัย คือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ ความถี่ในการสั่นและความกว้างในการสั่น ของผลการทดสอบของไถดินดานชนิดสั้นทั้งโครง พบว่า ความเร็วในการเคลื่อนที่เป็นปัจจัยเดียวที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการลื่นไถลที่ระดับความเชื่อมั่น 99 % เมื่อเปรียบเทียบภายในกลุ่มโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test พบว่าสามารถแบ่งออกได้ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 Low1 กลุ่มที่ 2 Low2 และ Low3 ส่วนความถี่และความกว้างในการสั่นนั้นไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราการลื่นไถลที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

เมื่อวิเคราะห์ผลกระทบของอิทธิพลร่วม 2 ปัจจัย และอิทธิพลร่วม 3 ปัจจัย พบว่า ไม่มีปัจจัยร่วมใดที่ส่งผลกระทบต่อพื้นที่การแตกตัวของดินที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

6. การสั่นสะเทือนต่อคนขับ (Tractor seat vibration)

การสั่นสะเทือนที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพคนขับนั้น พบว่าปัจจัยทั้ง ความเร็วแทรกเตอร์ ความถี่ในการสั่น และความกว้างในการสั่น ที่ทำให้เกิดการสั่นทั้ง 3 แกน (Longitudinal (A_x), Lateral (A_y), Vertical (A_z)) นั้นไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติไม่ว่าจะสั่นหรือไม่สั่นขณะทำงาน แต่สำหรับค่า 3D Weighted

seat acceleration สูงสุด 3.83 m/s^2 เมื่อใช้ความกว้างในการสั่น $A1(y=6.17, z=5.47 \text{ mm})$ ความถี่ในการสั่น 9 Hz และความเร็ว Low2 ดังแสดงในตารางที่ 12

ตารางที่ 12 acceleration และ Weighted 3D seat acceleration ที่สภาวะทดลองต่างๆ

Speed	Frequency (Hz)	Amplitude (mm)	Longitudinal acceleration (A_x) (m/s^2)	Lateral acceleration (A_y) (m/s^2)	Vertical acceleration (A_z) (m/s^2)	Weighted 3D seat acceleration (m/s^2)
low1	0	0	1.753	1.243	1.894	3.564
low2	0	0	1.726	1.127	2.066	3.563
low3	0	0	1.799	1.221	1.701	3.492
low1	9	(y=6.17, z=5.47)	1.815	1.204	1.939	3.635
low2	9	(y=6.17, z=5.47)	1.902	1.332	2.010	3.826
low3	9	(y=6.17, z=5.47)	1.725	1.130	1.960	3.495
low1	11	(y=6.17, z=5.47)	1.817	1.190	2.040	3.672
low2	11	(y=6.17, z=5.47)	1.828	1.102	2.023	3.611
low3	11	(y=6.17, z=5.47)	1.766	1.143	1.801	3.465
low1	13	(y=6.17, z=5.47)	1.885	1.182	1.914	3.660
low2	13	(y=6.17, z=5.47)	1.861	1.175	1.676	3.531
low3	13	(y=6.17, z=5.47)	1.823	1.272	1.972	3.714
low1	9	(y=10.07, z=8.13)	1.812	1.216	1.991	3.647
low2	9	(y=10.07, z=8.13)	1.753	1.232	1.921	3.562
low3	9	(y=10.07, z=8.13)	1.845	1.193	1.947	3.645
low1	11	(y=10.07, z=8.13)	1.827	1.189	1.964	3.631
low2	11	(y=10.07, z=8.13)	1.818	1.154	1.743	3.496
low3	11	(y=10.07, z=8.13)	1.785	1.226	2.185	3.742
low1	13	(y=10.07, z=8.13)	1.749	1.255	1.988	3.613
low2	13	(y=10.07, z=8.13)	1.790	1.213	1.877	3.564
low3	13	(y=10.07, z=8.13)	1.802	1.184	1.860	3.547

ตารางที่ 13 ผลทางสถิติของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการสะเทือนที่ที่นั่งคนขับ (Tractor seat vibration)

Source of variation	Sum of squares	df	Mean square	F
Speed	0.030	2	0.015	0.429 ^{NS}
Amplitude	0.004	1	0.004	0.122 ^{NS}
Frequency	0.012	2	0.006	0.164 ^{NS}
Speed x Amplitude	0.092	2	0.046	1.305 ^{NS}
Speed x Frequency	0.083	4	0.021	0.583 ^{NS}
Amplitude x Frequency	0.025	2	0.012	0.347 ^{NS}
Speed x Amplitude x Frequency	0.201	4	0.050	1.420 ^{NS}
Error	1.805	51	0.035	
Total	933.186	72		

หมายเหตุ: * แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%, ** แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%, NS ไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 13 แสดงผลการวิเคราะห์ทางสถิติจากอิทธิพลหลัก 3 ปัจจัย คือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ ความถี่ในการสั่นและความกว้างในการสั่น ของผลการทดสอบของไถดินดานชนิดสั้นทั้งโครง พบว่า ปัจจัยทั้งหมดส่งผลกระทบต่อการสะเทือนที่ที่นั่งคนขับไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และสำหรับผลกระทบจากอิทธิพลร่วม 2 ปัจจัย และอิทธิพลร่วม 3 ปัจจัย นั้นพบว่า ไม่มีปัจจัยร่วมใดที่ส่งผลกระทบต่อการสะเทือนที่ที่นั่งคนขับที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

ความเร็วในการเคลื่อนที่ส่งผลกระทบต่อแรงฉุดลากในแนวระดับและกำลังรวมที่ระดับความเชื่อมั่น 99% เมื่อความเร็วเพิ่มมากขึ้นทำให้แรงฉุดลากในแนวระดับและกำลังรวมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่ความเร็วในการเคลื่อนที่ไม่ส่งผลกระทบต่อพื้นที่การแตกตัวของดินที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

การสั่นส่งผลกระทบต่อแรงฉุดลากที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยที่ความถี่ในการสั่น 13 Hz ทำงานคู่กับความกว้างในการสั่น $A1(y=6.17, z=5.47 \text{ mm})$ และใช้ความเร็ว Low1 ทำให้ใช้แรงฉุดลากในแนวระดับน้อยที่สุด 20.67 kN เมื่อเปรียบเทียบกับแบบไม่สั่นที่ความเร็วเดียวกัน พบว่าสามารถลดแรงฉุดลากได้มากที่สุด 19.26%

การสั่นที่ความถี่ในการสั่น 13 Hz ความกว้างในการสั่น $A2(y=10.07, z=8.13 \text{ mm})$ และความเร็ว Low2 ทำให้พื้นที่การแตกตัวของดินนั้นจะมีค่ามากที่สุดถึง 3525.63 cm^2 และเมื่อเปรียบเทียบกับแบบไม่สั่นเพิ่มมากขึ้นถึง 49.1% และจากการสังเกต พบว่าพื้นที่การแตกตัวรวมจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่อใช้ความถี่ในการสั่นสูงขึ้น

การสั่นด้วยความถี่ที่แตกต่างกัน พบว่าความถี่ในการสั่นส่งผลกระทบต่อแรงฉุดลากในแนวระดับและพื้นที่การแตกตัวของดินที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งเมื่อเพิ่มความถี่ในการสั่นมากขึ้นจะมีแนวโน้มทำให้ใช้แรงฉุดลากลดลง เมื่อความถี่ในการสั่นเพิ่มขึ้นจาก 9 Hz เป็น 13 Hz เปรียบเทียบกับแบบไม่สั่นจะลดแรงฉุดลากในแนวระดับลงได้ 7.86-11.43% ส่วนพื้นที่การแตกตัวของดินจะเพิ่มมากขึ้น 14.8-28.8%

การสั่นด้วยความกว้างในการสั่นที่แตกต่างกัน พบว่าความกว้างในการสั่นส่งผลกระทบต่อแรงฉุดลากและพื้นที่การแตกตัวของดินที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อเปรียบเทียบกับแบบไม่สั่น พบว่า ที่ความกว้างในการสั่น $A1(y=6.17, z=5.47 \text{ mm})$ และ $A2(y=10.07, z=8.13 \text{ mm})$ สามารถลดแรงฉุดลากลงได้ 10.9% และ 9.2% และเพิ่มพื้นที่การแตกตัวของดินถึง 15.6% และ 18.8% ตามลำดับ

การสั่นที่เกิดจากความถี่ในการสั่นและความกว้างในการสั่นที่แตกต่างกันไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังรวมที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

กำลังที่ใช้ในการสั่น (Oscillatory power) จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อความถี่และความกว้างในการสั่นเพิ่มมากขึ้นซึ่งกำลังที่ใช้ในส่วนนี้จะช่วยทำให้ใช้แรงฉุดลากในแนวระดับลดลง เมื่อใช้กำลังในการสั่นมากที่สุด 1.91 kW ส่งผลทำให้ใช้แรงฉุดลากในแนวระดับน้อยที่สุด 20.67 kN แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้กำลังในการสั่นมากขึ้นมีแนวโน้มทำให้ใช้แรงฉุดลากลดลง

ปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย คือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ ความถี่ในการสั่นและความกว้างในการสั่น ส่งผลทำให้เกิดการสั่นสะเทือนที่ที่นั่งคนขับนั้นไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากปัจจัยความเร็วในการเคลื่อนที่ พบว่าเมื่อใช้ความเร็วในการเคลื่อนที่สูงขึ้นมีแนวโน้มส่งผลทำให้อัตราการสั่นไถลมีค่าลดลง สำหรับความถี่และความกว้างในการสั่นนั้นไม่ส่งผลต่ออัตราการสั่นไถลที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากปัจจัยความเร็ว Low 1 ความถี่ในการสั่น 13 Hz และความกว้างในการสั่น $A_2(y=10.07, z=8.13 \text{ mm})$ ส่งผลให้แรงฉุดลากต่อพื้นที่การแตกตัวของดินมีค่าน้อยที่สุด 60.78 kN/m^2 และส่งผลให้ค่ากำลังรวมที่ใช้ต่อพื้นที่การแตกตัวรวมของดินมีค่าน้อยที่สุด 23.4 kW/m^2

ข้อเสนอแนะ

ในการทำการวิจัยในครั้งนี้ ไม่ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่ออัตราการกินน้ำมัน และปัจจัยจากระยะห่างระหว่างขาไถที่ส่งผลกระทบต่อแรงฉุดลากของดิน ซึ่งถือว่าเป็นข้อมูลที่สำคัญที่ควรทำการศึกษาต่อไป

เนื่องจากเครื่องมือไถระเบิดดินดานแบบสั่นทั้งโครง เป็นเครื่องมือที่มีการสั่นตลอดเวลาในการทำงานซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความคงทนต่ออุปกรณ์ของรถแทรกเตอร์เช่น ลูกปืนของชุดเพลลาอำนาจกำลัง เป็นต้น ซึ่งควรทำการศึกษาระยะเวลาที่เปลี่ยนหรือซ่อมแซมส่วนที่เสียหายของอุปกรณ์ที่เกิดจากการสั่น โดยนำมาเทียบกับแบบไม่สั่น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- มงคล กวางวโรภาส. 2530. เครื่องพ่นแรงในฟาร์ม. พิมพ์ครั้งที่ 1. บริษัท ประชาชน จำกัด (แผนการพิมพ์), กรุงเทพฯ.
- พิพัฒน์ เหลืองวงษ์วาน. 2542. พฤติกรรมทางพลศาสตร์ของดินร่วนที่มีผลต่อไถดินดานชนิดสั้น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- กรมวิชาการเกษตร. 2523. อ้อย เอกสารวิชาการ เล่มที่ 1. งานทะเบียนและประมวลสถิติ กองสถิติ.
- Larson, L.W. 1967. The future of vibratory tillage. **Transaction of the ASAE**, 10(1): 78-79.
- Niyamapa, T and V.M. Salokhe. 2000b. Soil disturbance and force mechanics of vibrating tillage tool. **Journal of Terramechanics**, 37(3): 151-166.
- E.P. Bandala, V. M. Salokhe , C. P. Gupta, T. Niyamapa 1999. Performance of an oscillating subsoiler in breaking a hardpan. **Journal of Terramechanics**, 36(2): 117-125.
- R. Karoonboonyanan, V.M. Salokhe, T. Niyamapa and Hiroshi Nakashima . Vibration Effects on the Performance of a Single-Shank Subsoiler. **Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal**. Manuscript PM 07 018. Vol. IX. September, 2007.
- Niyamapa, T and V.M. Salokhe. 1993. Laboratory investigations into soil failure under vibratory tillage tools. **Journal of Terramechanics**, 30(6): 395-403.
- Johnson, C. E. and W. F. Buchele. 1969. Energy in clod-size reduction of vibratory tillage. **Transactions of the ASAE**, 12(3): 371-374.
- Hendrick, J.G. and W.F. Buchele. 1963. Tillage energy of a vibrating tillage tool. **Transactions of the ASAE**, 6(3): 213-216.

Smith, J. L., Kermit Hillman and A. M. Flikke. 1972a. Experimental analysis of vibratory tillage. **Transactions of the ASAE**, 15(5): 831-833.

Smith, J. L., J. L. Dais and A. M. Flikke. 1972b. Theoretical analysis of vibratory tillage. **Transactions of the ASAE**, 15(5): 834-837.

Dawelbeit, M. I. and M. E. Wright. 1999. Design and testing of a vibratory peanut digger. **American Society of Agricultural Engineers**, 15(5): 389-392.

Sahay, C.S, E.V.Thomas and K.K.Satapathy. Development of a power tiller operated oscillatory tillage tool using crank and follower mechanism. **In: proceeding of international conference for agricultural, food and biological engineers**, Khon Kaen, Thailand, 21-24 January 2007.

Saqib, G. S. and M. E. Wright. 1986. Vibratory diggers for harvesting sweet potatoes in cloddy soils. **Journal of Agricultural Engineering Research**, 34: 53-61.

Raper, R. L. and A. K. Sharma. 2004. Soil moisture effects on energy requirements and soil disruption of subsoiling a coastal plain soil. **Transactions of the ASAE**, 47(6): 1899-1905.

Sakai, K., S. I. Hata, M. Takai and S. Nambu. 1993. Design parameters of four-shank vibrating subsoiler. **Transactions of the ASAE**, 36(1): 23-26.

Kofoed, S.S. 1969. Kinematic and power requirement of oscillating tillage tools. **Journal of Agricultural Engineering Research**, 14(1): 54-73.

Sakai, K., H. Terao and S. Nambu. 1988. The dynamic behaviour of a tractor-vibrating subsoiler system and the effect of the virtual hitch point. **Journal of Terramechanics**, 25(4): 241-247.

Butson, M.J. and D. MacIntyre. 1981. Vibrating soil cutting. I. Soil tank studies of draught and power requirements. **Journal of Agricultural Engineering Research**, 26(5): 409-418.

Verma, Brahm P. 1991. Oscillating soil tools-A review. **Transactions of the ASAE**, 14(6): 1107-1115, 1121

Kasisira, L.L and H.L.M. du Plessis. 2006. Energy optimization for subsoilers in tandem in a sandy clay loam soil. **Soil & Tillage Research**, 86(2): 185-198.

Mckyes, E. 1985. **Soil Cutting and Tillage**. Elsevier Science, New York.

Mckyes, E. 1989. **Agricultural Engineering Soil Mechanics**. Elsevier Science, New York.

<http://coursewares.mju.ac.th/2006/Farmmachinery/index.html>, 13 กันยายน 2006

<http://www.maf.govt.nz/mafnet/rural-nz/sustainable-resource-use/land-management/soil-structure/soilcom9.html>, 18 เมษายน 2008

<http://www.up.ac.za/academic/civil/divisions/geotechnical/pgcourses/sgm782/themes/theme2/images/soilphases.jpg.html>, 10 พฤศจิกายน 2008

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การ Calibration Transducers

การ Calibration Transducer

การ calibration transducer แบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ

1. Lower link pins transducer การ calibration strain gage ที่ติดตั้งที่ lower link pins ดังแสดงในภาพผนวกที่ ก1 โดยทำการ calibration เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง load (kN) กับค่าแรงดันไฟฟ้า (Voltage) ทั้งหมด 4 ค่า คือ

- 1.1 lower link pin transducer ด้านซ้ายในแนว Horizontal
- 1.2 lower link pin transducer ด้านซ้ายในแนว Vertical
- 1.3 lower link pin transducer ด้านขวาในแนว Horizontal
- 1.4 lower link pin transducer ด้านขวาในแนว Vertical

2. Top link transducer โดยการ calibration strain gage ที่ติดตั้งที่ Top link ดังแสดงในภาพผนวกที่ ก2 โดยทำการ calibration เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง load (kN) กับค่าแรงดันไฟฟ้า (Voltage)

3. Torque transducer โดยการ calibration เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง Torque (N-m) และค่าแรงดันไฟฟ้า (Voltage) ดังแสดงในภาพผนวกที่ ก3

4. VR-Slice โดยการ calibration เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง ระยะห่าง (ซม.) กับค่าความต้านทาน (Ω)

ขั้นตอนการ Calibration Transducer

การ calibration transducer จะใช้เครื่อง Universal Testing Machine (Instron 5569) เป็นตัวให้ภาระกับตัว transducer และใช้เครื่อง Strain amplifier ในการขยายสัญญาณและส่งค่ามาบันทึกไว้ที่เครื่อง Analyzing recorder แล้วส่งข้อมูลมายังคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม Qbasic เพื่อนำค่าที่ได้มาหาความสัมพันธ์ระหว่าง load (kN) กับค่าแรงดันไฟฟ้า (Voltage) อุปกรณ์ที่ใช้ในการ calibration แสดงในภาพผนวกที่ ก4 (a) และ ก4 (b) ก่อนทำการ calibration ต้องปรับตั้งค่าแรงดันไฟฟ้า (Voltage) กับค่า Micro strain ($\mu\epsilon$) ในช่วงที่เหมาะสม และเริ่มการ calibration จากไม่มี load ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ออกมาจากวงจรจะต้องเป็นศูนย์ และทำการเพิ่ม load ขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งค่าสูงสุดที่ต้องการ และทำการ reload จนกระทั่งเป็นศูนย์อีกครั้ง นำค่าที่ได้มาหาความสัมพันธ์ระหว่าง load (kN) กับค่าแรงดันไฟฟ้า (Voltage)

ดังแสดงในภาพผนวกที่ ก5 (a), ก5 (b), ก6 (a), ก6 (b), ก7, ก8, ก9 จากการ calibration ค่า Lower link pins transducer ในแนวระดับ, Lower link pins transducer ในแนวตั้ง, Top link transducer, Torque transducer, VR-slice ตามลำดับ



ภาพผนวกที่ ก1 การ Calibration ชุด Lower link pins transducer



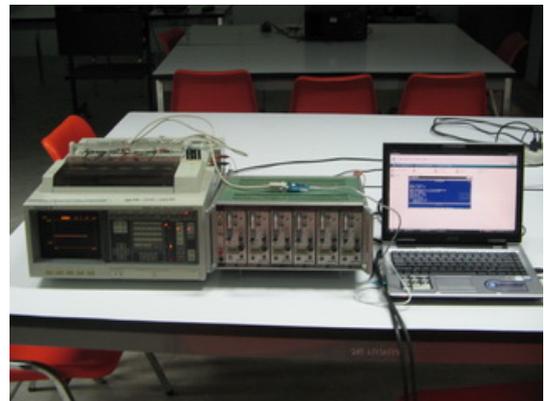
ภาพผนวกที่ ก2 การ Calibration ชุด Top link transducer



ภาพผนวกที่ ก3 การ Calibration ชุด Torque transducer



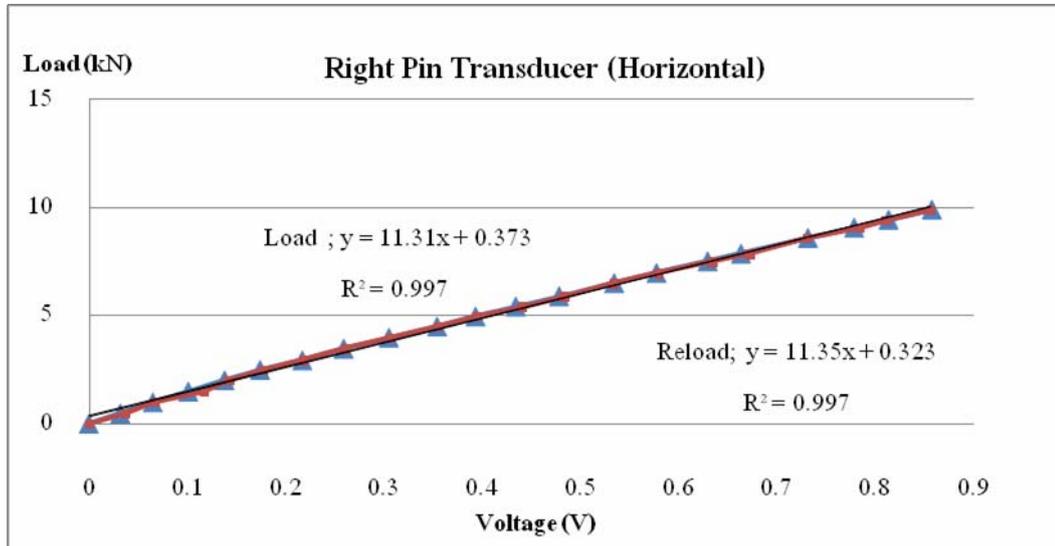
(a)



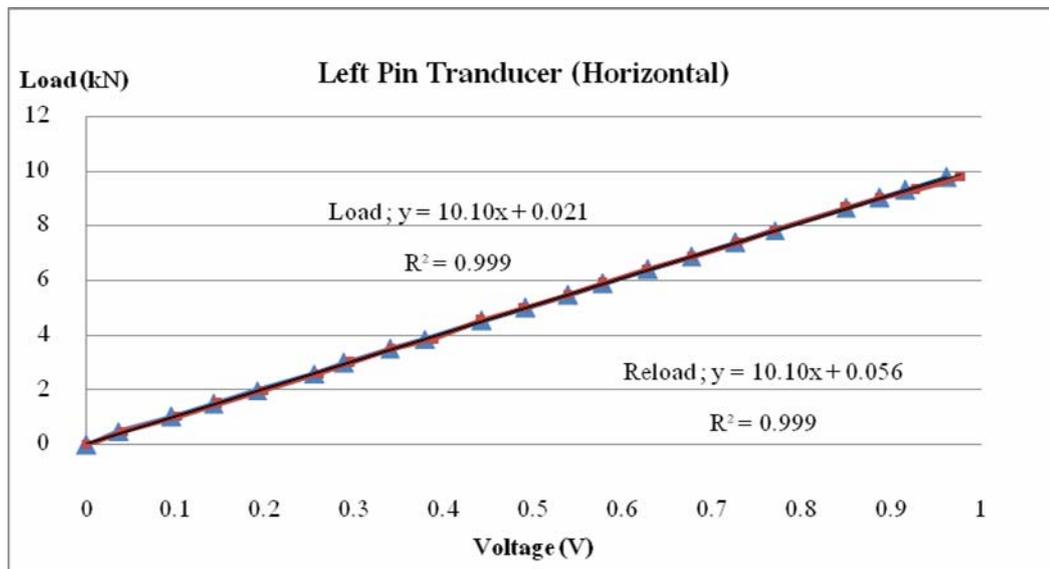
(b)

ภาพผนวกที่ ก4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการ calibration ชุด transducers (a) เครื่อง Universal Testing Machine (b) เครื่อง Strain amplifier, Analyzing recorder และ notebook

จากการเปรียบเทียบ Lower link pin transducer ทั้งด้านขวาและด้านซ้ายในแนวระดับ ดังภาพ
 ผนวกที่ ก5(a) และ ก5(b) แสดงผลการเปรียบเทียบเป็นเชิงเส้น ระหว่าง Load (kN) ในแนวระดับ กับ
 voltage (V)



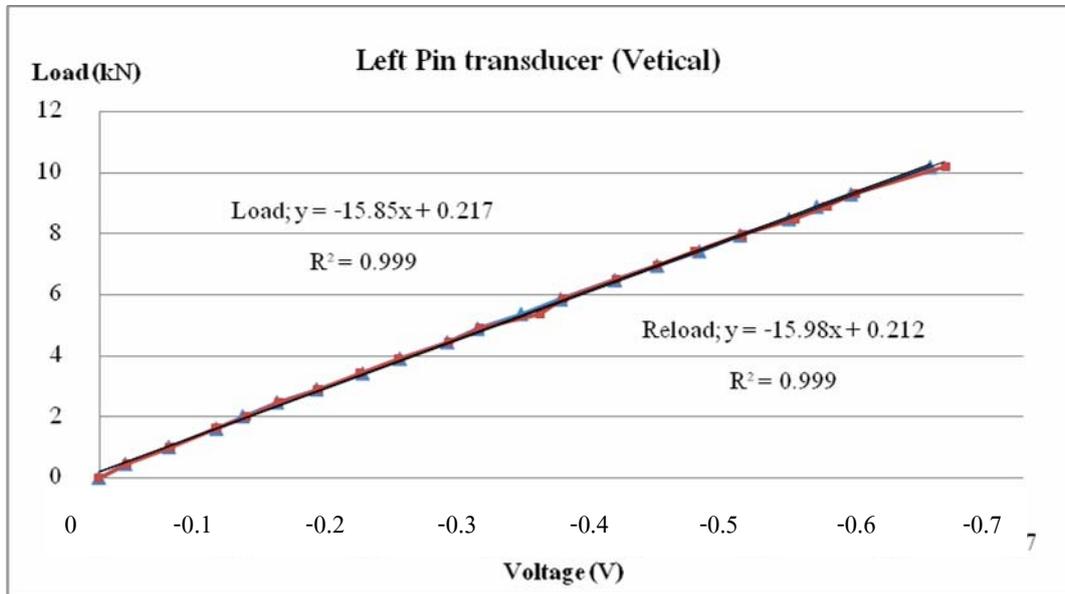
(a)



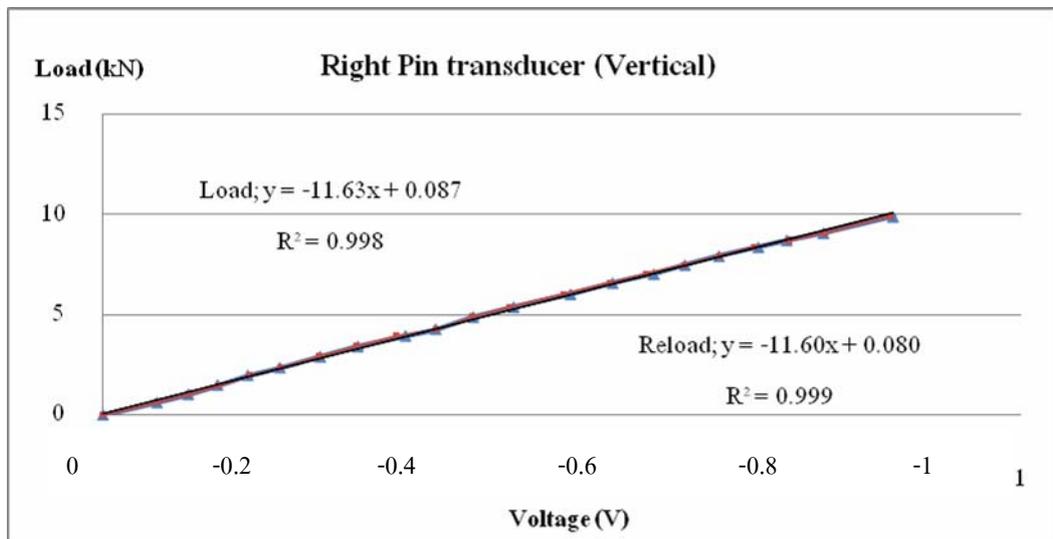
(b)

ภาพผนวกที่ ก5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Load (kN) ในแนวระดับ กับ voltage (V) ของ
 Lower link pin transducer (a) ด้านขวามือและ (b) ด้านซ้ายมือ

จากการเปรียบเทียบ Lower link pin transducer ทั้งด้านขวาและด้านซ้ายในแนวดิ่ง ดังภาพผนวกที่ ก6(a) และ ก6(b) แสดงผลการเปรียบเทียบเป็นเชิงเส้น ระหว่าง load (kN) ในแนวดิ่ง กับ voltage (V)



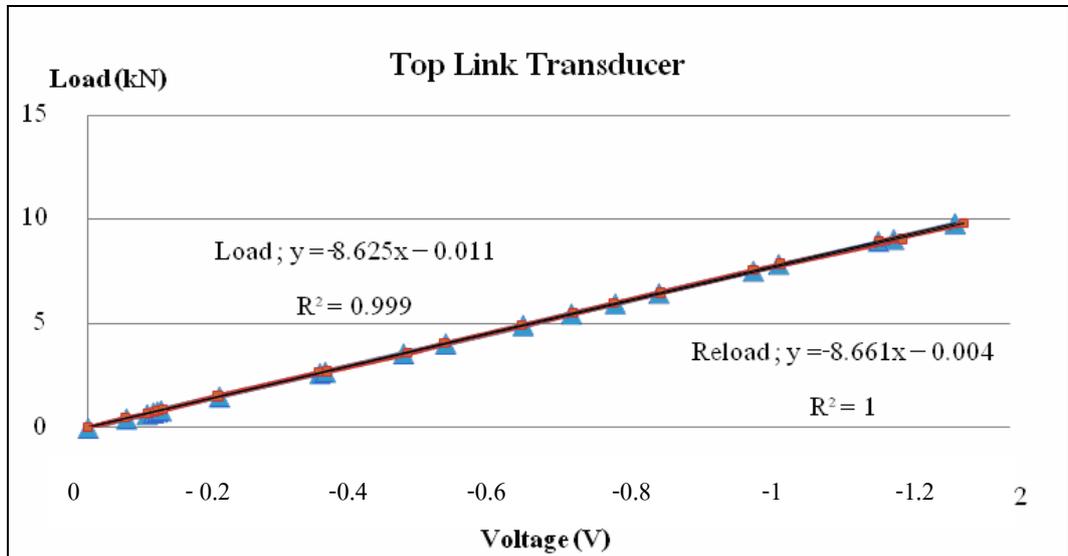
(a)



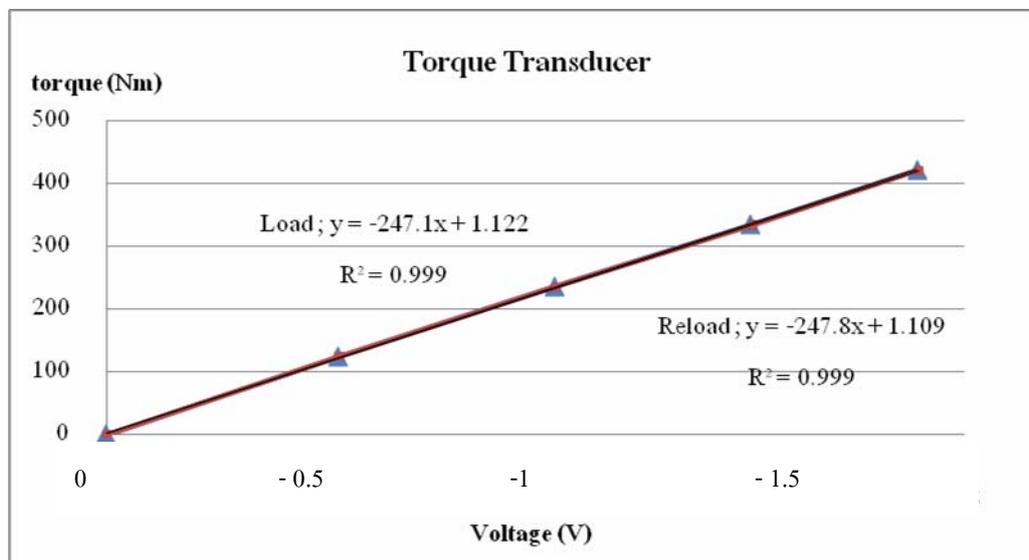
(b)

ภาพผนวกที่ ก6 ความสัมพันธ์ระหว่าง load (kN) ในแนวดิ่ง กับ voltage (V) ของ Lower link pin transducer (a) ด้านขวามือและ (b) ด้านซ้ายมือ

จากการเปรียบเทียบ Top link transducer และ torque transducer ดังภาพผนวกที่ ก7 และ ก8 แสดงผลการเปรียบเทียบเป็นเชิงเส้น ระหว่าง load (kN) กับ voltage (V) ตามลำดับ

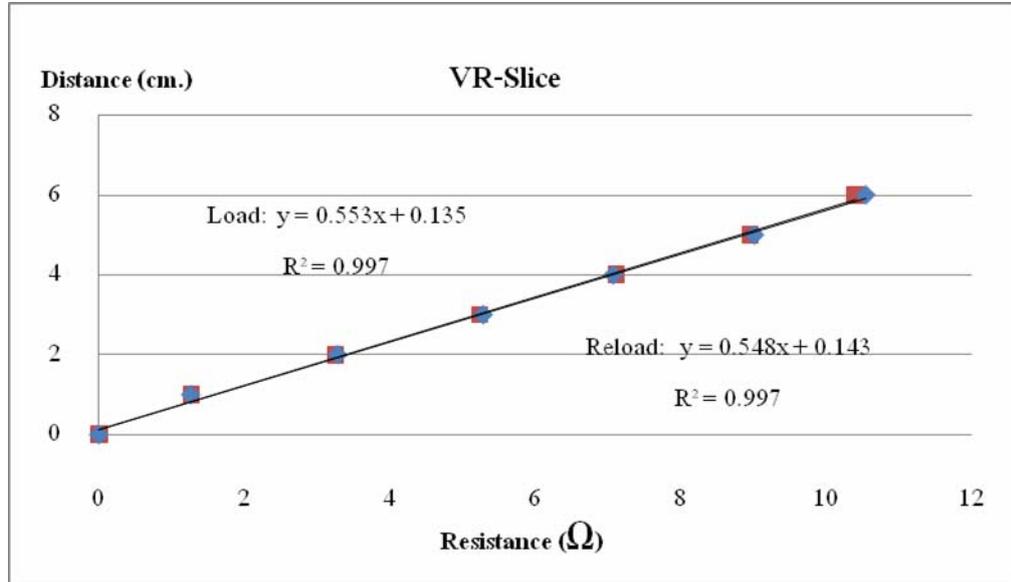


ภาพผนวกที่ ก7 ความสัมพันธ์ระหว่าง load (kN) กับ voltage (V) ของ Top link transducer



ภาพผนวกที่ ก8 ความสัมพันธ์ระหว่าง load (N-m) กับ voltage (V) ของ Torque transducer

จากการเปรียบเทียบ VR-Slice พบว่าผลการเปรียบเทียบเป็นเชิงเส้นระหว่างระยะห่าง (ซม.) กับ ความต้านทาน (Ω)



ภาพผนวกที่ ก9 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่าง (ซม.) กับ ความต้านทาน (Ω) ของ VR-slice

ภาคผนวก ข
ข้อมูลการทดลอง

วิธีการปรับแก้ค่าสัญญาณ โดยก่อนที่จะทำการทดลองในแปลงต้องทำการบันทึกค่าสัญญาณในขณะที่ยังไม่มีโหลดใดๆ กระทำที่ Lower link pins transducer, Top link transducer และ Torque transducer เพื่อเป็นค่าสำหรับการปรับแก้ค่าที่ได้จากการผลการทดลอง การตั้งค่าการขยายสัญญาณจากตัว Strain amplifier ซึ่งค่าที่ใช้ในการ Calibration กับ ค่าที่ใช้ในการทดลอง ทั้งหมด 4 ค่าดังนี้

Torque transducer ค่าที่ตั้งระหว่างการ calibration กับ การทดลองใช้ค่าเดียวกันให้ Strain amplifier ขยายสัญญาณออกมา 100% และบันทึกค่าที่ Analyzing recorder 100% ของค่าสัญญาณ ดังแสดงตัวอย่างค่าสัญญาณในภาพผนวกที่ ข1

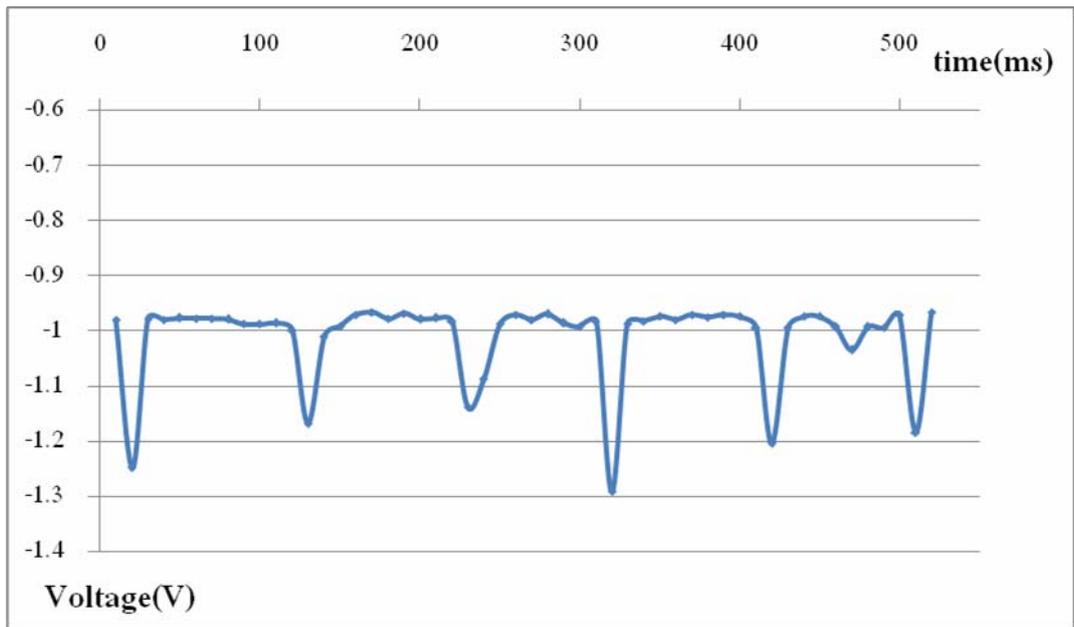
Lower link pins transducer (Horizontal) โดยตั้งค่าระหว่างการ calibration 100% ส่วนค่าตอนทำการทดลองให้ Strain amplifier ขยายสัญญาณออกมา 25% และบันทึกค่าที่ Analyzing recorder 100% ของค่าสัญญาณ ดังนั้นค่าที่ได้จากการทดลองต้องคูณด้วย 4 แล้วจึงมาเทียบกับสมการที่ได้จากการปรับเทียบ ดังแสดงตัวอย่างค่าสัญญาณในภาพผนวกที่ ข2

Lower link pin transducer (Vertical) ค่าที่ตั้งระหว่างการ calibration กับ การทดลองใช้ค่าเดียวกันให้ Strain amplifier ขยายสัญญาณออกมา 100% และบันทึกค่าที่ Analyzing recorder 100% ของค่าสัญญาณ ดังแสดงตัวอย่างค่าสัญญาณในภาพผนวกที่ ข3

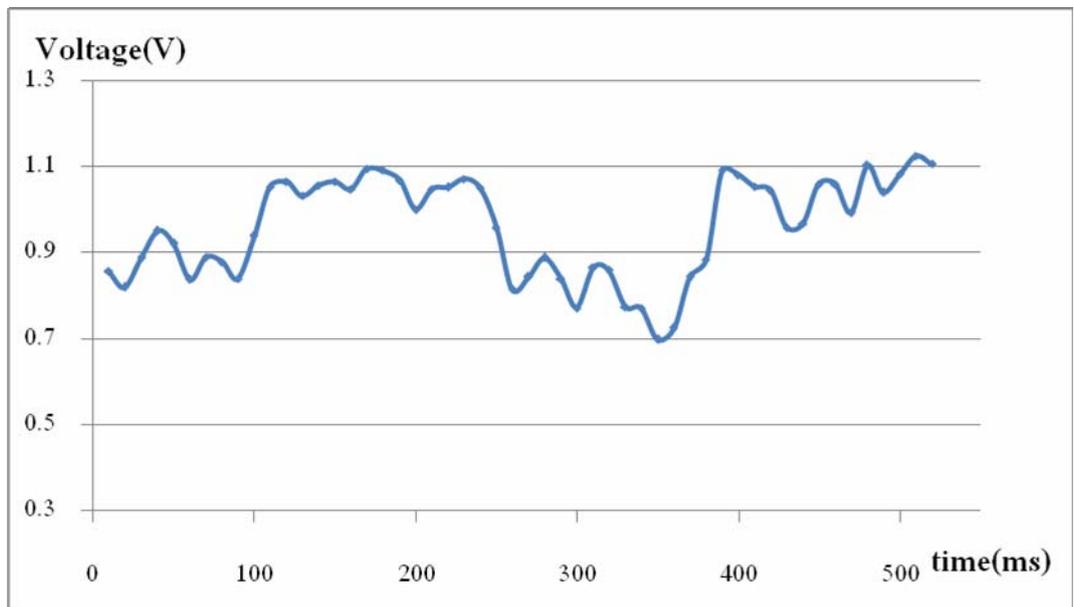
Top link transducer ค่าที่ตั้งระหว่างการ calibration กับ การทดลองใช้ค่าเดียวกันให้ Strain amplifier ขยายสัญญาณออกมา 100% และบันทึกค่าที่ Analyzing recorder 100% ของค่าสัญญาณ ดังแสดงตัวอย่างค่าสัญญาณในภาพผนวกที่ ข4

ตารางผนวกที่ ข1 ค่าสัญญาณจากเครื่อง Strain Amplifier จากการ calibration

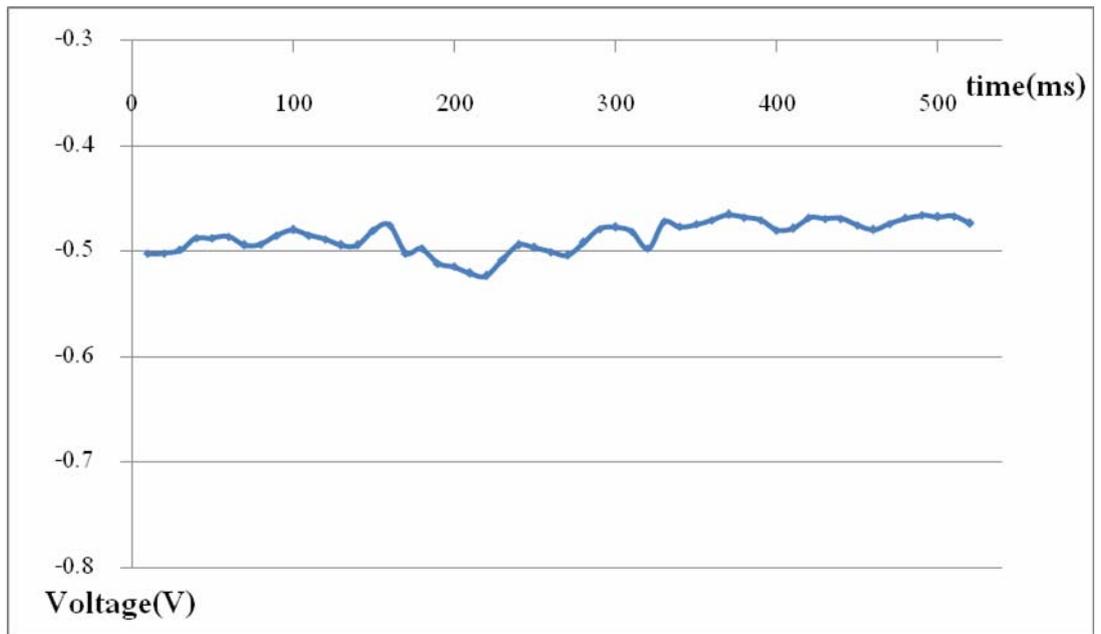
Transducers	ค่าสัญญาณ Voltage		
	0 V	+ max V	-min V
Torque transducer	-0.95	-0.281	-1.605
Lower link pins transducer (Horizontal)	-0.036	3.909	-4.007
Lower link pins transducer (Vertical)	-0.059	1.904	-2.006
Top link transducer	0.002	2.7	-2.7



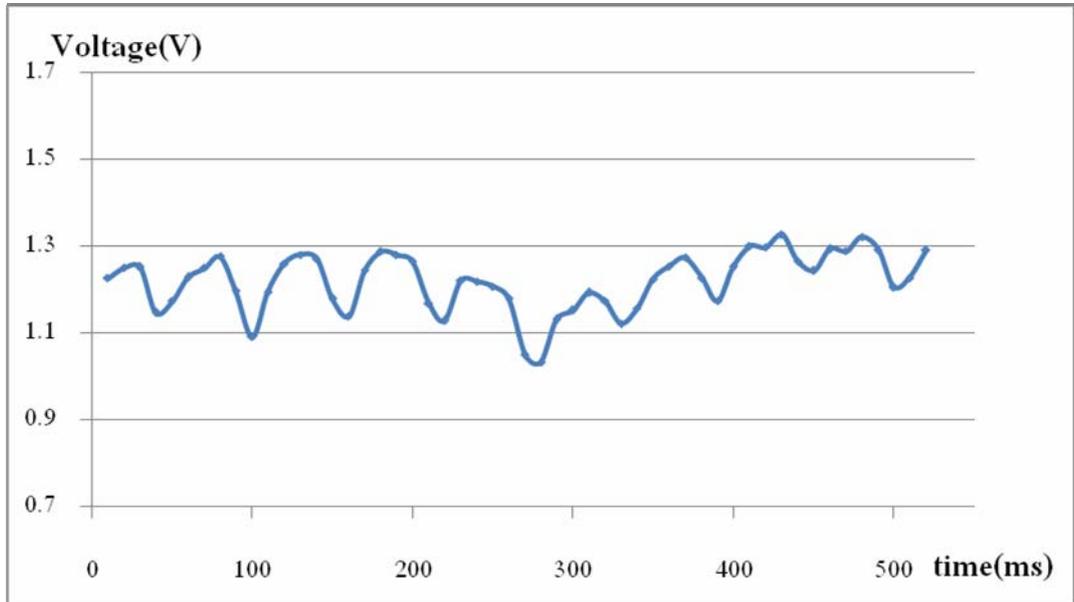
ภาพผนวกที่ ข1 ตัวอย่างค่าสัญญาณจาก Torque transducer



ภาพผนวกที่ ข2 ตัวอย่างค่าสัญญาณจาก Lower link pins transducer (Horizontal)



ภาพผนวกที่ ข3 ตัวอย่างค่าสัญญาณจาก Lower link pins transducer (Vertical)



ภาพผนวกที่ ข4 ตัวอย่างค่าสัญญาณจาก Top link transducer

ตารางผนวกที่ ข2 ค่าสัญญาณที่ได้จากการปรับแก้ของตัว Transducers

No.	Lower link pins transducer (Vertical) (V)	Lower link pins transducer (Horizontal) (V)	Top link transducer (V)	Torque Transducer (V)
1(S1)	-0.483	0.809	1.155	0.000
2(S2)	-0.483	0.948	1.208	0.000
3(S3)	-0.477	1.325	1.402	0.000
4(S1F1A1)	-0.440	0.822	1.289	-0.052
5(S2F1A1)	-0.412	1.006	1.134	-0.049
6(S3F1A1)	-0.460	1.010	1.205	-0.043
7(S1F2A1)	-0.417	0.713	1.114	-0.057
8(S2F2A1)	-0.405	0.787	1.106	-0.052
9(S3F2A1)	-0.397	0.900	1.179	-0.045
10(S1F3A1)	-0.351	0.649	1.098	-0.071
11(S2F3A1)	-0.329	0.976	1.116	-0.059
12(S3F3A1)	-0.328	0.981	1.126	-0.058
13(S1F1A2)	-0.341	0.752	1.091	-0.093
14(S2F1A2)	-0.338	0.643	0.793	-0.086
15(S3F1A2)	-0.337	1.100	1.073	-0.075
16(S1F2A2)	-0.331	0.913	1.171	-0.099
17(S2F2A2)	-0.346	0.919	1.198	-0.088
18(S3F2A2)	-0.354	0.800	1.031	-0.086
19(S1F3A2)	-0.319	0.765	1.122	-0.104
20(S2F3A2)	-0.340	0.682	0.799	-0.091
21(S3F3A2)	-0.365	0.891	1.135	-0.082

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

No.	Lower link pins transducer (Vertical) (V)	Lower link pins transducer (Horizontal) (V)	Top link transducer (V)	Torque transducer (V)
22(S1)	-0.315	0.795	0.927	0.000
23(S2)	-0.309	1.001	1.155	0.000
24(S3)	-0.305	1.183	1.580	0.000
25(S1F1A1)	-0.321	0.715	0.819	-0.058
26(S2F1A1)	-0.320	0.745	1.259	-0.052
27(S3F1A1)	-0.423	1.511	1.524	-0.042
28(S1F2A1)	-0.310	0.833	1.280	-0.068
29(S2F2A1)	-0.303	0.947	1.123	-0.057
30(S3F2A1)	-0.500	0.948	1.128	-0.041
31(S1F3A1)	-0.431	0.907	1.143	-0.056
32(S2F3A1)	-0.407	0.911	1.128	-0.049
33(S3F3A1)	-0.430	0.917	1.078	-0.054
34(S1F1A2)	-0.350	0.901	1.141	-0.108
35(S2F1A2)	-0.337	0.954	0.839	-0.085
36(S3F1A2)	-0.406	0.929	1.158	-0.047
37(S1F2A2)	-0.422	0.849	1.190	-0.095
38(S2F2A2)	-0.524	0.827	0.977	-0.093
39(S3F2A2)	-0.394	1.186	1.205	-0.093
40(S1F3A2)	-0.356	0.654	0.896	-0.097
41(S2F3A2)	-0.357	1.010	1.198	-0.088
42(S3F3A2)	-0.400	1.342	1.245	-0.083

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

No.	Lower link pins transducer (Vertical) (V)	Lower link pins transducer (Horizontal) (V)	Top link transducer (V)	Torque transducer (V)
43(S1)	-0.434	0.824	0.945	0.000
44(S2)	-0.435	1.054	1.276	0.000
45(S3)	-0.427	1.207	1.619	0.000
46(S1F1A1)	-0.391	0.902	1.070	-0.059
47(S2F1A1)	-0.408	0.925	1.120	-0.051
48(S3F1A1)	-0.413	1.123	1.324	-0.051
49(S1F2A1)	-0.325	0.790	1.098	-0.062
50(S2F2A1)	-0.556	0.983	1.154	-0.059
51(S3F2A1)	-0.304	1.337	1.225	-0.057
52(S1F3A1)	-0.340	0.704	1.025	-0.092
53(S2F3A1)	-0.358	0.868	1.193	-0.047
54(S3F3A1)	-0.336	1.019	1.178	-0.056
55(S1F1A2)	-0.371	0.773	1.013	-0.084
56(S2F1A2)	-0.420	0.864	0.889	-0.084
57(S3F1A2)	-0.425	1.272	1.293	-0.071
58(S1F2A2)	-0.387	0.692	0.789	-0.094
59(S2F2A2)	-0.405	0.812	1.106	-0.088
60(S3F2A2)	-0.439	1.104	1.171	-0.074
61(S1F3A2)	-0.373	0.744	0.948	-0.099
62(S2F3A2)	-0.381	1.213	1.219	-0.089
63(S3F3A2)	-0.356	0.902	1.003	-0.072

หมายเหตุ: S1=Low1 (1.39 km/h), S2=Low2 (2.09 km/h) และ S3=Low3 (3.43 km/h)

F1=9 Hz, F2=11 Hz และ F3=13 Hz

A1=(y=6.17, z=5.47 mm) และ A2=(y=10.07, z=8.13 mm)

ภาคผนวก ค
การคำนวณผลการทดลอง

ตารางผนวกที่ ค1 ค่าสมการที่ได้จากการ Calibration transducers

Transducers	สมการ Calibration
Lower link pins transducer (Horizontal)	Load: $y = 10.10x + 0.021$
Lower link pins transducer (Vertical)	Load: $y = -11.63x + 0.087$
Top link transducer	Load: $y = -8.625x - 0.011$
Torque transducer	Load: $y = -247.1x + 1.122$
VR-slice	Load: $y = 0.553x + 0.135$

1. แรงจลุดลาก (Drawbar pull) แรงยกตัวในแนวตั้ง (Vertical force) และ กำลังจลุดลาก (Drawbar power)

1.1 Lower link pins transducer (Horizontal)

ตัวอย่างแสดงค่าแรงจลุดลากในแนวระดับ จาก Treatment ที่ 4 ของตารางผนวกที่ ข ค่าแรงดันไฟฟ้าที่แท้จริงคือ 0.822 V และเมื่อเปรียบเทียบกับ Load (kN) จากตารางผนวกที่ ค1

สมการกราฟ Calibration $y = 10.10x + 0.021$

Load = $10.10(x) + 0.021$ kN ; เมื่อ $x = 0.822 * 4$

Load = 33.22 kN

1.2 Lower link pins transducer (Vertical)

ตัวอย่างแสดงค่าแรงยกตัวในแนวตั้ง จาก Treatment ที่ 4 ของตารางผนวกที่ ข2 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่แท้จริงคือ -0.44 V และเมื่อเปรียบเทียบกับ Load (kN) จากตารางผนวกที่ ค1

สมการกราฟ Calibration $y = -11.63x + 0.087$

Load = $-11.63(x) + 0.087$ kN ; เมื่อ $x = -0.44$

Load = 5.208 kN

1.3 Top link transducer

ตัวอย่างแสดงค่าแรงในแนวแกนของ Top link transducer จาก Treatment ที่ 4 ของ ตารางผนวกที่ ข2 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่แท้จริงคือ 1.289 V และเมื่อเปรียบเทียบกับ Load (kN) จากตาราง ผนวกที่ ค1

สมการกราฟ Calibration $y = -8.625x - 0.011$

Load = $-8.625x - 0.011$ kN ; เมื่อ $x = 1.289$

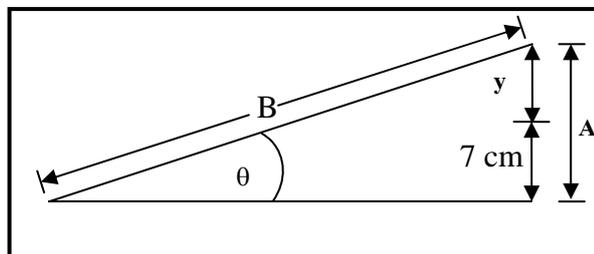
Load = -11.13 kN (แรงอัดในแกน Top link transducer)

ตัวอย่างแสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าจาก VR-Slice จาก Treatment ที่ 4 คือ 8.12 โอห์ม ของตารางผนวกที่ ค3 เมื่อปรับเทียบเป็นระยะทางในแนวตั้งในการทำงาน (y) จากภาพผนวกที่ ก9

สมการกราฟ Calibration คือ $y = 0.553x + 0.135$

$y = 0.553 (8.12) + 0.135$; เมื่อ $x = 8.12$

$y = 4.625$ ซม.



ภาพผนวกที่ ค1 Diagram การหามุมของ Top link transducer

การหามุมในการทำงานของ Top link transducer ดังแสดงในภาพผนวกที่ ค1

แสดง Diagram การหามุมของ Top link transducer จากสูตร $\theta = \sin^{-1} \left(\frac{A}{B} \right)$

เมื่อ θ = มุมของ Top link transducer (องศา)

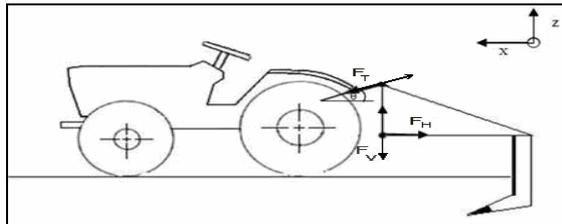
A = ระยะในแนวตั้ง (ซม.) ; $A = 7 + y$

B = ความยาวของ Top link transducer 88 ซม. (ค่าคงที่)

ตัวอย่างการหามุมในการทำงานของ Top link transducer จากค่าที่ได้จากการ

ปรับเทียบระยะทางในแนวดิ่งในการทำงาน (y) ใน Treatment ที่ 4 มีค่า $y = 4.625$ ซม. และ ความยาวของ Top link transducer 88 ซม.

$$\begin{aligned} \text{จากสูตร} \quad \theta &= \sin^{-1} \left(\frac{A}{B} \right) \\ \theta &= \sin^{-1} \left(\frac{11.625}{88} \right) \\ \theta &= 7.59 \text{ องศา} \end{aligned}$$



ภาพผนวกที่ ค2 Diagram แรงกระทำที่ Top link transducer และ Lower link pins transducer

จากภาพผนวกที่ ค2 แสดง Diagram แรงกระทำที่ Top link transducer และ Lower link pins transducer เพื่อหาค่าแรงฉุดลาก (Drawbar pull) และแรงยกตัวในแนวดิ่ง (Vertical force)

$$\begin{aligned} \text{แรงฉุดลาก (Drawbar pull)} &= F_H + F_T \cos\theta \\ \text{แรงยกตัวในแนวดิ่ง (Vertical force)} &= F_V + F_T \sin\theta \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ} \quad F_H &= \text{แรงฉุดลากในแนวระดับ ของ Lower link pins transducer} \\ F_V &= \text{แรงยกตัวในแนวดิ่ง ของ Lower link pins transducer} \\ F_T &= \text{แรงที่กระทำ Top link transducer ในแนวแกน} \end{aligned}$$

แรงฉุดลาก (Drawbar pull) และแรงยกตัวในแนวดิ่ง (Vertical force) ของ Treatment ที่ 4

$$F_H = 33.22 \text{ kN}, F_T \cos\theta = -11.03 \text{ kN}, F_V = 5.208 \text{ kN}, F_T \sin\theta = -1.467 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} \text{แรงฉุดลาก (Drawbar pull)} &= F_H + F_T \cos\theta \\ \text{Drawbar pull} &= 33.22 - 11.03 \\ \text{Drawbar pull} &= 22.19 \text{ kN} \\ \text{แรงยกตัวในแนวดิ่ง (Vertical force)} &= F_V + F_T \sin\theta \\ \text{Vertical force} &= 5.208 - 1.467 \\ \text{Vertical force} &= 3.74 \text{ kN} \end{aligned}$$

ความเร็วในการทดลองของ Treatment ที่ 4 = Low1 (1.386 km/h)
 ความเร็วในการทดลองของ Treatment ที่ 4 = Low1 (0.385 m/s)
 กำลังจุดลาก (Drawbar power) ของ Treatment ที่ 4 = 22.19×0.385 kN•m/s
 กำลังจุดลาก (Drawbar power) = 8.543 kW

2. การคำนวณหาแรงบิด (Torque) ของเพลลาอำนาจกำลัง

2.1 Torque transducer

ตัวอย่างการคำนวณค่าแรงบิด จาก Treatment ที่ 4 จากตารางผนวกที่ ข2 ค่าความต่างศักย์ที่แท้จริงคือ -0.052 V และเมื่อเปรียบเทียบกับ Load (N-m) จากตารางผนวกที่ ค1

จากสมการ Calibration ; $y = -247.1x + 1.122$
 Load = $-247.1(x) + 1.122$ N-m ; เมื่อ $x = -0.052$ V
 Load = 11.642 N-m

รอบหมุนเพลลาอำนาจกำลังจากตารางผนวกที่ ค3 Treatment ที่ 4 มีค่า 544 rpm

$$\text{จากสูตร } P = \frac{2\pi NT}{60,000}$$

เมื่อ $P =$ กำลังขับจากเพลลาอำนาจกำลัง (kW)

$T =$ แรงบิด (N-m)

$N =$ ความเร็วรอบ (rpm)

แทนค่า
$$P = \frac{2 * \pi * 544 * 11.642}{60,000}$$

$$P = 0.663 \text{ kW}$$

กำลังจากเพลลาอำนาจกำลัง (PTO power) ของ Treatment ที่ 4 = 0.663 kW

3. การคำนวณหา กำลังรวม (Total power) นำค่าจากตารางผนวกที่ ค6 Treatment ที่ 4 มาแทนค่า
 ในสูตร

$$\text{Total power} = \text{Drawbar power} + \text{PTO Power}$$

$$\text{Total power} = 8.543 + 0.663 \text{ kW}$$

$$\text{Total power} = 9.206 \text{ kW}$$

4. การสั่นสะเทือนที่ที่นั่งคนขับ (Tractor seat vibration)

ตัวอย่างคำนวณการสั่นสะเทือนที่ที่นั่งคนขับทั้ง 3 แกนคือ (Longitudinal (A_x), Lateral (A_y), Vertical (A_z)) ซึ่งใช้ค่าแฟกเตอร์ถ่วงน้ำหนัก (W) สำหรับการถ่วงน้ำหนักตามความถี่ที่ใช้กับ ผู้ปฏิบัติงานในที่นั่งใช้ค่าแฟกเตอร์ตัวคูณตามมาตรฐาน ISO 2631-1 ดังนี้คือ

แนวแกน x: สำหรับ W_d ค่า $k = 1.4$

แนวแกน y: สำหรับ W_d ค่า $k = 1.4$

แนวแกน z: สำหรับ W_k ค่า $k = 1$

จากตารางผนวกที่ ค7 Treatment ที่ 4 ซึ่งมีค่าการสั่นสะเทือนทั้ง 3 แกนดังนี้

$$A_x = 1.166 \text{ m/s}^2, A_y = 2.029 \text{ m/s}^2, A_z = 1.587 \text{ m/s}^2$$

นำค่ามาแทนค่าในสูตร 3D Weighted seat acceleration = $[(A_x * k)^2 + (A_y * k)^2 + (A_z * k)^2]^{0.5}$

$$3\text{D Weighted seat acceleration} = [(1.166 * 1.4)^2 + (2.029 * 1.4)^2 + (1.587 * 1)^2]^{0.5}$$

$$3\text{D Weighted seat acceleration} = 3.64 \text{ m/s}^2$$

ตารางผนวกที่ ค2 สภาพดินที่ทำการทดลองที่ 3 ระดับความลึก 0-60 ซม.

No.	Depth (cm)	Moisture content (% db)	Dry bulk density (g/cm ³)	Cone Index (MPa)
1(S1)	0-20	12.53	1.64	2.10
	21-40	14.05	1.60	2.08
	41-60	10.51	1.55	1.68
2(S2)	0-20	15.04	1.64	2.01
	21-40	11.25	1.64	2.65
	41-60	9.02	1.63	2.42
3(S3)	0-20	13.24	1.73	2.77
	21-40	9.25	1.61	3.38
	41-60	9.26	1.68	3.23
4(S1F1A1)	0-20	13.20	1.69	2.29
	21-40	12.11	1.62	1.90
	41-60	11.18	1.63	1.57
5(S2F1A1)	0-20	12.60	1.59	2.44
	21-40	13.60	1.59	2.34
	41-60	9.89	1.63	2.57
6(S3F1A1)	0-20	11.63	1.66	2.25
	21-40	11.90	1.69	2.73
	41-60	11.62	1.59	2.00
7(S1F2A1)	0-20	13.80	1.52	1.87
	21-40	12.20	1.62	1.73
	41-60	8.09	1.66	2.08
8(S2F2A1)	0-20	13.17	1.62	1.76
	21-40	11.89	1.53	2.08
	41-60	9.87	1.58	1.80

ตารางผนวกที่ ค2 (ต่อ)

No.	Depth (cm)	Moisture content (% db)	Dry bulk density (g/cm ³)	Cone Index (MPa)
9(S3F2A1)	0-20	11.12	1.58	2.57
	21-40	13.84	1.56	3.02
	41-60	9.46	1.59	2.83
10(S1F3A1)	0-20	12.21	1.58	1.83
	21-40	14.61	1.57	2.08
	41-60	12.12	1.65	1.67
11(S2F3A1)	0-20	14.23	1.66	2.43
	21-40	11.80	1.56	2.93
	41-60	10.83	1.56	2.68
12(S3F3A1)	0-20	12.92	1.72	2.45
	21-40	11.42	1.64	3.17
	41-60	7.60	1.60	3.07
13(S1F1A2)	0-20	18.22	1.65	2.23
	21-40	13.51	1.58	2.98
	41-60	13.45	1.60	3.03
14(S2F1A2)	0-20	12.38	1.70	2.52
	21-40	13.40	1.60	2.68
	41-60	8.23	1.63	2.47
15(S3F1A2)	0-20	14.90	1.62	2.53
	21-40	16.29	1.60	3.37
	41-60	11.12	1.64	3.02
16(S1F2A2)	0-20	11.19	1.63	2.87
	21-40	13.78	1.56	3.20
	41-60	10.80	1.65	3.33

ตารางผนวกที่ ค2 (ต่อ)

No.	Depth (cm)	Moisture content (% db)	Dry bulk density (g/cm ³)	Cone Index (MPa)
17(S2F2A2)	0-20	14.78	1.64	2.70
	21-40	12.88	1.66	3.03
	41-60	10.07	1.61	3.05
18(S3F2A2)	0-20	12.35	1.56	1.80
	21-40	11.51	1.68	2.08
	41-60	11.62	1.62	1.68
19(S1F3A2)	0-20	16.09	1.59	2.65
	21-40	12.51	1.62	3.35
	41-60	9.10	1.61	2.57
20(S2F3A2)	0-20	11.52	1.66	1.51
	21-40	12.40	1.62	1.71
	41-60	10.07	1.60	1.54
21(S3F3A2)	0-20	11.77	1.68	2.59
	21-40	10.71	1.66	2.98
	41-60	11.95	1.70	3.10
22(S1)	0-20	11.35	1.73	2.61
	21-40	13.93	1.60	3.10
	41-60	9.85	1.65	2.93
23(S2)	0-20	14.71	1.61	2.45
	21-40	17.68	1.69	3.33
	41-60	9.62	1.66	3.22
24(S3)	0-20	14.86	1.66	2.89
	21-40	12.58	1.61	3.05
	41-60	8.94	1.62	2.90

ตารางผนวกที่ ค2 (ต่อ)

No.	Depth (cm)	Moisture content (% db)	Dry bulk density (g/cm ³)	Cone Index (MPa)
25(S1F1A1)	0-20	10.45	1.75	2.62
	21-40	14.77	1.56	3.18
	41-60	10.01	1.56	2.63
26(S2F1A1)	0-20	12.74	1.52	2.12
	21-40	9.31	1.66	2.77
	41-60	10.25	1.60	2.58
27(S3F1A1)	0-20	11.42	1.57	2.66
	21-40	14.10	1.58	3.17
	41-60	7.58	1.59	3.06
28(S1F2A1)	0-20	17.40	1.66	2.51
	21-40	15.94	1.61	3.30
	41-60	12.18	1.56	3.08
29(S2F2A1)	0-20	19.26	1.58	2.61
	21-40	16.25	1.56	3.05
	41-60	11.12	1.54	2.97
30(S3F2A1)	0-20	10.01	1.65	2.77
	21-40	9.33	1.61	2.73
	41-60	13.96	1.64	3.00
31(S1F3A1)	0-20	11.60	1.66	2.70
	21-40	14.09	1.56	3.17
	41-60	10.64	1.62	3.28
32(S2F3A1)	0-20	15.90	1.64	2.53
	21-40	15.26	1.67	3.08
	41-60	9.95	1.66	3.45

ตารางผนวกที่ ค2 (ต่อ)

No.	Depth (cm)	Moisture content (% db)	Dry bulk density (g/cm ³)	Cone Index (MPa)
33(S3F3A1)	0-20	12.88	1.61	2.93
	21-40	13.76	1.63	3.24
	41-60	11.40	1.61	3.14
34(S1F1A2)	0-20	14.98	1.58	2.57
	21-40	13.33	1.60	2.83
	41-60	11.90	1.62	2.99
35(S2F1A2)	0-20	18.86	1.61	2.39
	21-40	12.38	1.61	2.98
	41-60	10.25	1.60	2.24
36(S3F1A2)	0-20	12.35	1.66	2.23
	21-40	8.06	1.60	3.08
	41-60	13.12	1.61	2.61
37(S1F2A2)	0-20	8.87	1.52	2.31
	21-40	7.00	1.70	2.93
	41-60	13.09	1.47	2.67
38(S2F2A2)	0-20	8.89	1.64	1.83
	21-40	18.18	1.58	2.50
	41-60	12.09	1.58	2.13
39(S3F2A2)	0-20	9.05	1.61	2.03
	21-40	17.24	1.59	2.53
	41-60	13.45	1.59	2.05
40(S1F3A2)	0-20	13.05	1.61	2.05
	21-40	9.89	1.66	1.98
	41-60	11.45	1.68	1.28

ตารางผนวกที่ ค2 (ต่อ)

No.	Depth (cm)	Moisture content (% db)	Dry bulk density (g/cm ³)	Cone Index (MPa)
41(S2F3A2)	0-20	15.95	1.69	2.88
	21-40	9.71	1.60	3.36
	41-60	10.13	1.61	2.78
42(S3F3A2)	0-20	17.72	1.53	2.28
	21-40	10.85	1.58	3.14
	41-60	11.19	1.55	1.78
43(S1)	0-20	16.59	1.72	2.32
	21-40	16.96	1.58	2.13
	41-60	11.14	1.68	1.67
44(S2)	0-20	15.57	1.60	2.16
	21-40	11.19	1.58	2.62
	41-60	7.45	1.70	2.47
45(S3)	0-20	12.09	1.61	2.30
	21-40	15.69	1.60	3.00
	41-60	11.27	1.68	2.78
46(S1F1A1)	0-20	14.12	1.62	2.47
	21-40	11.20	1.55	2.09
	41-60	11.37	1.63	1.96
47(S2F1A1)	0-20	11.96	1.53	2.53
	21-40	6.28	1.71	2.73
	41-60	12.00	1.63	2.63
48(S3F1A1)	0-20	15.90	1.64	1.95
	21-40	9.03	1.66	2.28
	41-60	11.47	1.66	2.30

ตารางผนวกที่ ค2 (ต่อ)

No.	Depth (cm)	Moisture content (% db)	Dry bulk density (g/cm ³)	Cone Index (MPa)
49(S1F2A1)	0-20	17.86	1.61	1.86
	21-40	16.96	1.54	2.80
	41-60	8.09	1.60	2.53
50(S2F2A1)	0-20	17.30	1.58	1.68
	21-40	12.81	1.62	2.19
	41-60	10.76	1.64	2.21
51(S3F2A1)	0-20	14.92	1.61	2.40
	21-40	11.54	1.59	2.38
	41-60	9.78	1.60	2.05
52(S1F3A1)	0-20	18.46	1.58	1.89
	21-40	10.31	1.64	2.72
	41-60	11.53	1.57	2.45
53(S2F3A1)	0-20	10.15	1.65	2.63
	21-40	11.92	1.55	2.18
	41-60	14.93	1.61	1.75
54(S3F3A1)	0-20	12.76	1.66	2.77
	21-40	11.14	1.66	2.54
	41-60	12.00	1.60	2.33
55(S1F1A2)	0-20	11.90	1.62	2.27
	21-40	13.40	1.60	2.48
	41-60	10.06	1.65	1.91
56(S2F1A2)	0-20	13.74	1.59	2.15
	21-40	16.25	1.56	2.43
	41-60	10.19	1.62	2.17

ตารางผนวกที่ ค2 (ต่อ)

No.	Depth (cm)	Moisture content (% db)	Dry bulk density (g/cm ³)	Cone Index (MPa)
57(S3F1A2)	0-20	14.47	1.53	2.65
	21-40	13.18	1.61	2.32
	41-60	9.89	1.61	2.23
58(S1F2A2)	0-20	13.90	1.62	2.53
	21-40	15.11	1.62	1.95
	41-60	10.63	1.67	1.80
59(S2F2A2)	0-20	13.05	1.55	2.81
	21-40	12.57	1.62	2.47
	41-60	10.48	1.68	1.93
60(S3F2A2)	0-20	12.57	1.70	2.69
	21-40	11.72	1.61	2.47
	41-60	11.63	1.62	2.02
61(S1F3A2)	0-20	11.27	1.61	2.79
	21-40	12.73	1.60	2.66
	41-60	8.35	1.59	2.07
62(S2F3A2)	0-20	13.05	1.64	3.55
	21-40	12.75	1.61	2.50
	41-60	11.58	1.66	1.68
63(S3F3A2)	0-20	11.90	1.69	2.30
	21-40	9.78	1.60	2.37
	41-60	9.37	1.66	1.95

หมายเหตุ: S1=Low1 (1.39 km/h), S2=Low2 (2.09 km/h) และ S3=Low3 (3.43 km/h)

F1=9 Hz, F2=11 Hz และ F3=13 Hz

A1=(y=6.17, z=5.47 mm) และ A2=(y=10.07, z=8.13 mm)

ตารางผนวกที่ ๓3 ค่าที่ได้จากพื้นที่การแตกตัวของดินรวม

No.	ความยาวในการแตกตัว (cm)	พื้นที่การแตกตัวรวม (cm ²)	ค่าจาก VR-Slice (Ω)	รอบ PTO (rpm)	เวลาที่ใช้ (Sec)
1(S1)	144.5	2280	9.15	0	17.97
2(S2)	150.5	2501.25	9.45	0	12.80
3(S3)	130	3108.75	7.58	0	7.22
4(S1F1A1)	130	2857.5	8.12	544	16.67
5(S2F1A1)	135	2688.75	8.77	541	12.81
6(S3F1A1)	140	3172.5	8.86	540	6.62
7(S1F2A1)	148.5	3338.75	9.05	662	23.24
8(S2F2A1)	130	3315	5.89	670	12.04
9(S3F2A1)	150.5	3126.25	8.9	662	9.27
10(S1F3A1)	142	2792.5	7.34	774	16.92
11(S2F3A1)	154	3833.75	8.44	776	13.83
12(S3F3A1)	154.5	2626.25	8.05	774	8.14
13(S1F1A2)	150.5	3280	7.85	534	13.77
14(S2F1A2)	146.5	2556.25	7.56	541	10.88
15(S3F1A2)	147.5	2863.75	7.25	539	8.67
16(S1F2A2)	150.5	3228.75	9.11	662	20.82
17(S2F2A2)	159.5	3573.75	5.87	671	15.50
18(S3F2A2)	147.5	3440	8.75	668	9.90
19(S1F3A2)	149.5	3166.25	8.25	776	17.93
20(S2F3A2)	155.5	2550	9.75	781	14.32
21(S3F3A2)	165.5	3703.75	7.12	780	9.50

ตารางผนวกที่ ค3 (ต่อ)

No.	ความยาวใน การแตกตัว (cm)	พื้นที่การแตก ตัวรวม (cm ²)	ค่าจาก VR-Slice (Ω)	รอบ PTO (rpm)	เวลาที่ใช้ (Sec)
22(S1)	140	2706.25	8.35	0	16.32
23(S2)	135	2006.25	9.56	0	13.49
24(S3)	143.5	2176.25	6.87	0	7.18
25(S1F1A1)	150	2441.25	9.12	542	16.59
26(S2F1A1)	151	2950	9.64	541	10.11
27(S3F1A1)	147.5	2990	8.56	538	7.40
28(S1F2A1)	144.5	1380	8.86	660	26.48
29(S2F2A1)	145	2817.5	5.9	658	14.27
30(S3F2A1)	165	4128.75	8.44	662	8.03
31(S1F3A1)	150	3222.5	9.08	775	21.49
32(S2F3A1)	145	3217.5	8.5	774	13.40
33(S3F3A1)	160.5	3377.5	9.02	770	7.75
34(S1F1A2)	151	3020	9.25	541	20.13
35(S2F1A2)	161	3148.75	8.25	540	13.20
36(S3F1A2)	155	3375	7.14	537	7.79
37(S1F2A2)	137.5	2692.5	5.89	662	23.34
38(S2F2A2)	155.5	3415	6.74	668	13.04
39(S3F2A2)	147	2442.5	4.33	670	8.26
40(S1F3A2)	155.5	3706.25	7.54	778	19.75
41(S2F3A2)	142.5	4042.5	8.52	784	13.26
42(S3F3A2)	160.5	2842.5	7.36	776	8.02

ตารางผนวกที่ ค3 (ต่อ)

No.	ความยาวใน การแตกตัว (cm)	พื้นที่การแตก ตัวรวม (cm ²)	ค่าจาก VR-Slice (Ω)	รอบ PTO (rpm)	เวลาที่ใช้ (Sec)
43(S1)	145	2727.5	8.75	0	19.05
44(S2)	140	2570	9.17	0	14.50
45(S3)	141	3083.75	7.56	0	7.04
46(S1F1A1)	143	2649.375	10.11	540	16.67
47(S2F1A1)	143.75	2819.375	7.2	544	13.61
48(S3F1A1)	146.5	3081.25	6.55	538	6.90
49(S1F2A1)	124	2896.25	7.78	660	23.50
50(S2F2A1)	143	3385	6.08	665	12.38
51(S3F2A1)	143.5	2888.75	7.2	668	9.76
52(S1F3A1)	164.5	3811.25	6.85	782	18.73
53(S2F3A1)	149.5	3525.625	7.44	778	13.31
54(S3F3A1)	158	3001.875	7.65	776	7.75
55(S1F1A2)	155.2	3098.75	8.65	542	20.81
56(S2F1A2)	158	3347.5	6.86	540	13.29
57(S3F1A2)	140	2860	8.65	538	6.52
58(S1F2A2)	154.5	2852.5	4.75	664	20.51
59(S2F2A2)	148.5	2842.5	6.23	658	14.42
60(S3F2A2)	150	3283.75	6.12	668	9.50
61(S1F3A2)	146.5	3332.5	4.86	776	21.61
62(S2F3A2)	156	3261.25	6.58	782	15.54
63(S3F3A2)	140.5	3661.25	8.11	772	9.96

หมายเหตุ: S1=Low1 (1.39 km/h), S2=Low2 (2.09 km/h) และ S3=Low3 (3.43 km/h)

F1=9 Hz, F2=11 Hz และ F3=13 Hz

A1=(y=6.17, z=5.47 mm) และ A2=(y=10.07, z=8.13 mm)

ตารางผนวกที่ ค4 ค่าที่ได้จากการลื่นไถล (Slip)

No.	Speed (m/s)	มุม Top link (θ)	PTO Torque (N-m)	ระยะทางลื้อ เคลื่อนที่ (m)	ระยะทาง เคลื่อนที่จริง (m)	slip (%)
1(S1)	0.401	8.0	0.000	8.852	7.2	18.67
2(S2)	0.586	8.1	0.000	8.962	7.5	16.32
3(S3)	1.095	7.4	0.000	8.572	7.9	7.84
4(S1F1A1)	0.426	7.6	11.642	8.490	7.1	16.37
5(S2F1A1)	0.570	7.8	10.926	8.770	7.3	16.76
6(S3F1A1)	1.104	7.9	9.607	8.188	7.3	10.84
7(S1F2A1)	0.323	7.9	12.858	9.066	7.5	17.28
8(S2F2A1)	0.532	6.8	11.615	7.600	6.4	15.79
9(S3F2A1)	0.874	7.9	9.909	9.671	8.1	16.25
10(S1F3A1)	0.390	7.3	16.449	7.616	6.6	13.34
11(S2F3A1)	0.579	7.7	13.487	8.962	8	10.74
12(S3F3A1)	0.958	7.6	13.112	9.176	7.8	15.00
13(S1F1A2)	0.508	7.5	21.871	8.407	7	16.74
14(S2F1A2)	0.726	7.4	20.042	9.286	7.9	14.93
15(S3F1A2)	0.935	7.3	17.463	9.506	8.1	14.79
16(S1F2A2)	0.365	8.0	23.367	9.402	7.6	19.17
17(S2F2A2)	0.516	6.8	20.642	9.194	8	12.98
18(S3F2A2)	0.788	7.8	20.043	9.644	7.8	19.12
19(S1F3A2)	0.396	7.6	24.573	8.490	7.1	16.37
20(S2F3A2)	0.524	8.2	21.299	8.589	7.5	12.68
21(S3F3A2)	0.874	7.2	19.062	9.864	8.3	15.85

ตารางผนวกที่ ค4 (ต่อ)

No.	Speed (m/s)	มุม Top link (θ)	PTO Torque (N-m)	ระยะทางล้อ เคลื่อนที่ (m)	ระยะทางเคลื่อนที่ จริง (m)	slip (%)
22(S1)	0.435	7.7	0.000	8.407	7.1	15.55
23(S2)	0.638	8.1	0.000	10.083	8.6	14.71
24(S3)	1.100	7.1	0.000	8.589	7.9	8.02
25(S1F1A1)	0.452	8.0	13.152	9.182	7.5	18.32
26(S2F1A1)	0.742	8.1	11.649	8.864	7.5	15.39
27(S3F1A1)	0.987	7.8	9.164	8.699	7.3	16.08
28(S1F2A1)	0.298	7.9	15.728	9.194	7.9	14.07
29(S2F2A1)	0.575	6.8	12.880	9.281	8.2	11.65
30(S3F2A1)	0.847	7.7	9.117	8.188	6.8	16.95
31(S1F3A1)	0.363	7.9	12.801	9.194	7.8	15.16
32(S2F3A1)	0.590	7.7	10.935	9.084	7.9	13.03
33(S3F3A1)	0.891	7.9	12.157	8.078	6.9	14.58
34(S1F1A2)	0.432	8.0	25.540	10.238	8.7	15.02
35(S2F1A2)	0.553	7.6	19.778	8.880	7.3	17.79
36(S3F1A2)	1.078	7.2	10.573	9.688	8.4	13.30
37(S1F2A2)	0.321	6.8	22.443	8.918	7.5	15.90
38(S2F2A2)	0.606	7.1	21.943	9.182	7.9	13.96
39(S3F2A2)	0.884	6.2	21.769	8.270	7.3	11.73
40(S1F3A2)	0.380	7.4	22.725	9.182	7.5	18.32
41(S2F3A2)	0.558	7.7	20.740	8.589	7.4	13.84
42(S3F3A2)	0.861	7.3	19.316	8.407	6.9	17.93

ตารางผนวกที่ ๓4 (ต่อ)

No.	Speed (m/s)	มุม Top link (θ)	PTO Torque (N-m)	ระยะทางล้อ เคลื่อนที่ (m)	ระยะทาง เคลื่อนที่จริง (m)	slip (%)
43(S1)	0.383	7.8	0.000	9.072	7.3	19.53
44(S2)	0.572	8.0	0.000	9.864	8.3	15.85
45(S3)	1.080	7.4	0.000	8.902	7.6	14.62
46(S1F1A1)	0.450	8.3	13.368	9.182	7.5	18.32
47(S2F1A1)	0.573	7.3	11.509	8.990	7.8	13.24
48(S3F1A1)	1.087	7.0	11.497	8.655	7.5	13.34
49(S1F2A1)	0.315	7.5	14.276	9.292	7.4	20.36
50(S2F2A1)	0.565	6.9	13.488	8.188	7	14.50
51(S3F2A1)	0.851	7.3	12.923	9.671	8.3	14.18
52(S1F3A1)	0.358	7.1	21.685	8.223	6.7	18.52
53(S2F3A1)	0.586	7.3	10.539	9.072	7.8	14.02
54(S3F3A1)	0.955	7.4	12.625	8.770	7.4	15.62
55(S1F1A2)	0.375	7.8	19.523	9.314	7.8	16.26
56(S2F1A2)	0.595	7.1	19.734	9.182	7.9	13.96
57(S3F1A2)	1.074	7.8	16.491	8.078	7	13.34
58(S1F2A2)	0.346	6.4	21.986	8.223	7.1	13.65
59(S2F2A2)	0.499	6.9	20.545	8.188	7.2	12.06
60(S3F2A2)	0.884	6.9	17.284	9.864	8.4	14.84
61(S1F3A2)	0.361	6.4	23.269	9.864	7.8	20.92
62(S2F3A2)	0.521	7.0	20.942	8.962	8.1	9.62
63(S3F3A2)	0.783	7.6	16.596	9.066	7.8	13.97

หมายเหตุ: S1=Low1 (1.39 km/h), S2=Low2 (2.09 km/h) และ S3=Low3 (3.43 km/h)

F1=9 Hz, F2=11 Hz และ F3=13 Hz

A1=(y=6.17, z=5.47 mm) และ A2=(y=10.07, z=8.13 mm)

ตารางผนวกที่ ๕ ค่าแรงจุดลากในแนวระดับและแรงยกตัวในแนวดิ่ง

No.	แรงยกตัว Top link แนวดิ่ง (kN)	แรงจุดลาก Top link แนวระดับ (kN)	แรงยกตัว Lower link pins แนวดิ่ง (kN)	แรงจุดลาก Lower link pins แนวระดับ (kN)	แรงจุดลาก แนวระดับ (kN)	แรงยกตัวใน แนวดิ่ง (kN)
1(S1)	1.381	9.876	5.709	32.701	22.825	4.328
2(S2)	1.464	10.328	5.701	38.331	28.003	4.237
3(S3)	1.557	12.006	5.638	53.535	41.528	4.081
4(S1F1A1)	1.467	11.028	5.208	33.218	22.190	3.74
5(S2F1A1)	1.333	9.704	4.883	40.680	30.976	3.550
6(S3F1A1)	1.422	10.309	5.431	40.838	30.529	4.009
7(S1F2A1)	1.326	9.526	4.935	28.806	19.280	3.609
8(S2F2A1)	1.127	9.479	4.794	31.819	22.340	3.668
9(S3F2A1)	1.394	10.084	4.710	36.394	26.310	3.316
10(S1F3A1)	1.205	9.405	4.173	26.253	16.849	2.967
11(S2F3A1)	1.292	9.551	3.912	39.465	29.913	2.620
12(S3F3A1)	1.279	9.637	3.902	39.667	30.030	2.622
13(S1F1A2)	1.228	9.338	4.048	30.388	21.050	2.821
14(S2F1A2)	0.880	6.790	4.016	25.989	19.199	3.136
15(S3F1A2)	1.173	9.194	4.010	44.443	35.249	2.837
16(S1F2A2)	1.398	10.013	3.934	36.910	26.897	2.537
17(S2F2A2)	1.219	10.269	4.114	37.134	26.864	2.895
18(S3F2A2)	1.211	8.823	4.208	32.338	23.514	2.997
19(S1F3A2)	1.287	9.599	3.791	30.921	21.322	2.505
20(S2F3A2)	0.982	6.830	4.039	27.566	20.736	3.058
21(S3F3A2)	1.232	9.721	4.327	36.004	26.283	3.095

ตารางผนวกที่ ๕ (ต่อ)

No.	แรงยกตัว Top link แนวดิ่ง (kN)	แรงกดลาก Top link แนวระดับ (kN)	แรงยกตัว Lower link pins แนวดิ่ง (kN)	แรงกดลาก Lower link pins แนวระดับ (kN)	แรงกดลาก แนวระดับ (kN)	แรงยกตัวใน แนวดิ่ง (kN)
22(S1)	1.068	7.932	3.755	32.131	24.199	2.687
23(S2)	1.407	9.874	3.676	40.446	30.572	2.269
24(S3)	1.694	13.532	3.637	47.809	34.277	1.943
25(S1F1A1)	0.978	7.004	3.820	28.920	21.915	2.842
26(S2F1A1)	1.539	10.758	3.807	30.114	19.356	2.268
27(S3F1A1)	1.774	13.039	5.003	50.969	37.930	3.229
28(S1F2A1)	1.511	10.950	3.692	33.655	22.705	2.181
29(S2F2A1)	1.145	9.629	3.612	38.290	28.662	2.467
30(S3F2A1)	1.306	9.653	5.900	38.302	28.649	4.595
31(S1F3A1)	1.363	9.778	5.099	36.669	26.891	3.736
32(S2F3A1)	1.309	9.652	4.818	36.806	27.154	3.508
33(S3F3A1)	1.282	9.223	5.093	37.078	27.856	3.810
34(S1F1A2)	1.371	9.756	4.156	36.438	26.682	2.785
35(S2F1A2)	0.963	7.182	4.005	38.546	31.363	3.043
36(S3F1A2)	1.259	9.919	4.808	37.566	27.647	3.550
37(S1F2A2)	1.213	10.203	4.998	34.302	24.099	3.785
38(S2F2A2)	1.041	8.376	6.178	33.440	25.064	5.137
39(S3F2A2)	1.126	10.346	4.674	47.951	37.605	3.547
40(S1F3A2)	0.994	7.677	4.224	26.427	18.750	3.230
41(S2F3A2)	1.391	10.247	4.234	40.838	30.591	2.842
42(S3F3A2)	1.368	10.665	4.737	54.252	43.587	3.368

ตารางผนวกที่ 5 (ต่อ)

No.	แรงยกตัวTop link แนวตั้ง (kN)	แรงกดลาก Top link แนวระดับ (kN)	แรงยกตัว Lower link pins แนวตั้ง (kN)	แรงกดลาก Lower link pins แนวระดับ (kN)	แรงกดลาก แนวระดับ (kN)	แรงยกตัวใน แนวตั้ง (kN)
43(S1)	1.110	8.085	5.132	33.305	25.220	4.022
44(S2)	1.528	10.914	5.152	42.613	31.699	3.624
45(S3)	1.796	13.858	5.052	48.799	34.941	3.256
46(S1F1A1)	1.336	9.145	4.639	36.477	27.332	3.303
47(S2F1A1)	1.221	9.592	4.836	37.403	27.811	3.615
48(S3F1A1)	1.397	11.349	4.887	45.398	34.049	3.490
49(S1F2A1)	1.232	9.405	3.864	31.942	22.537	2.631
50(S2F2A1)	1.188	9.897	6.548	39.717	29.820	5.359
51(S3F2A1)	1.335	10.490	3.627	54.036	43.546	2.292
52(S1F3A1)	1.098	8.779	4.041	28.460	19.681	2.943
53(S2F3A1)	1.316	10.212	4.248	35.101	24.889	2.932
54(S3F3A1)	1.312	10.082	3.999	41.194	31.112	2.686
55(S1F1A2)	1.184	8.663	4.408	31.254	22.590	3.224
56(S2F1A2)	0.954	7.623	4.968	34.934	27.311	4.014
57(S3F1A2)	1.511	11.063	5.028	51.407	40.344	3.516
58(S1F2A2)	0.755	6.771	4.584	27.987	21.215	3.829
59(S2F2A2)	1.147	9.477	4.798	32.811	23.335	3.651
60(S3F2A2)	1.208	10.037	5.190	44.631	34.594	3.983
61(S1F3A2)	0.913	8.136	4.422	30.097	21.961	3.509
62(S2F3A2)	1.288	10.443	4.519	49.006	38.564	3.231
63(S3F3A2)	1.143	8.589	4.232	36.476	27.887	3.089

หมายเหตุ: S1=Low1 (1.39 km/h), S2=Low2 (2.09 km/h) และ S3=Low3 (3.43 km/h)

F1=9 Hz, F2=11 Hz และ F3=13 Hz

A1=(y=6.17, z=5.47 mm) และ A2=(y=10.07, z=8.13 mm)

ตารางผนวกที่ ๓๖ ค่ากำลังรวม (Total power)

No.	Drawbar power (kW)	PTO power (kW)	Total power (kW)	Specific draft (kN/m ²)	Specific energy (kW/m ²)
1(S1)	8.788	0.000	8.788	100.109	38.542
2(S2)	16.270	0.000	16.270	111.955	65.046
3(S3)	39.535	0.000	39.535	133.585	127.173
4(S1F1A1)	8.543	0.663	9.21	77.656	32.219
5(S2F1A1)	17.997	0.619	18.616	115.205	69.236
6(S3F1A1)	29.064	0.543	29.607	96.231	93.325
7(S1F2A1)	7.423	0.891	8.314	57.747	24.902
8(S2F2A1)	12.980	0.815	13.795	67.391	41.613
9(S3F2A1)	25.047	0.687	25.734	84.159	82.317
10(S1F3A1)	6.487	1.333	7.820	60.336	28.004
11(S2F3A1)	17.380	1.096	18.476	78.026	48.192
12(S3F3A1)	28.588	1.063	29.651	114.344	112.902
13(S1F1A2)	8.104	1.223	9.327	64.178	28.437
14(S2F1A2)	11.155	1.135	12.290	75.106	48.078
15(S3F1A2)	33.557	0.986	34.543	123.088	120.622
16(S1F2A2)	10.355	1.620	11.975	83.306	37.090
17(S2F2A2)	15.608	1.450	17.059	75.171	47.733
18(S3F2A2)	22.385	1.402	23.788	68.355	69.150
19(S1F3A2)	8.209	1.997	10.206	67.343	32.234
20(S2F3A2)	12.047	1.742	13.789	81.317	54.076
21(S3F3A2)	25.021	1.557	26.578	70.963	71.761

ตารางผนวกที่ ๓๖ (ต่อ)

No.	Drawbar power (kW)	PTO power (kW)	Total power (kW)	Specific draft (kN/m ²)	Specific energy (kW/m ²)
22(S1)	9.317	0.000	9.317	89.419	34.426
23(S2)	17.763	0.000	17.763	152.385	88.536
24(S3)	32.632	0.000	32.632	157.504	149.944
25(S1F1A1)	8.437	0.747	9.184	89.771	37.620
26(S2F1A1)	11.246	0.660	11.906	65.614	40.359
27(S3F1A1)	36.110	0.516	36.626	126.857	122.495
28(S1F2A1)	8.742	1.087	9.829	164.532	71.222
29(S2F2A1)	16.652	0.888	17.540	101.728	62.254
30(S3F2A1)	27.274	0.632	27.906	69.390	67.590
31(S1F3A1)	9.806	1.039	10.845	79.038	33.653
32(S2F3A1)	15.777	0.886	16.663	84.396	51.789
33(S3F3A1)	26.919	0.980	27.899	83.719	82.603
34(S1F1A2)	10.273	1.447	11.719	88.351	38.806
35(S2F1A2)	18.222	1.118	19.341	99.606	61.423
36(S3F1A2)	26.320	0.595	26.914	81.916	79.746
37(S1F2A2)	9.278	1.556	10.834	89.503	40.237
38(S2F2A2)	14.562	1.535	16.097	73.393	47.136
39(S3F2A2)	35.800	1.527	37.327	153.959	152.823
40(S1F3A2)	7.219	1.851	9.070	50.592	24.473
41(S2F3A2)	17.773	1.703	19.476	75.674	48.178
42(S3F3A2)	41.495	1.570	43.065	153.342	151.503

ตารางผนวกที่ ๓๖ (ต่อ)

No.	Drawbar power (kW)	PTO power (kW)	Total power (kW)	Specific draft (kN/m ²)	Specific energy (kW/m ²)
43(S1)	9.710	0.000	9.710	92.464	93.998
44(S2)	18.417	0.000	18.417	123.344	129.228
45(S3)	33.264	0.000	33.264	113.307	134.799
46(S1F1A1)	10.523	0.756	11.279	103.164	90.197
47(S2F1A1)	16.158	0.656	16.814	98.641	93.153
48(S3F1A1)	32.415	0.648	33.063	110.505	111.198
49(S1F2A1)	8.677	0.987	9.664	77.816	100.032
50(S2F2A1)	17.326	0.939	18.265	88.096	85.738
51(S3F2A1)	41.455	0.904	42.359	150.742	101.430
52(S1F3A1)	7.577	1.776	9.353	51.638	63.671
53(S2F3A1)	14.461	0.859	15.319	70.595	77.672
54(S3F3A1)	29.618	1.026	30.644	103.640	100.568
55(S1F1A2)	8.697	1.108	9.805	72.902	75.143
56(S2F1A2)	15.868	1.116	16.984	81.587	85.433
57(S3F1A2)	38.408	0.929	39.337	141.063	115.356
58(S1F2A2)	8.168	1.529	9.697	74.374	82.394
59(S2F2A2)	13.557	1.416	14.973	82.092	76.885
60(S3F2A2)	32.933	1.209	34.142	105.349	109.221
61(S1F3A2)	8.455	1.891	10.346	65.899	61.278
62(S2F3A2)	22.406	1.715	24.121	118.248	91.746
63(S3F3A2)	26.549	1.342	27.890	76.169	100.158

หมายเหตุ: S1=Low1 (1.39 km/h), S2=Low2 (2.09 km/h) และ S3=Low3 (3.43 km/h)

F1=9 Hz, F2=11 Hz และ F3=13 Hz

A1=(y=6.17, z=5.47 mm) และ A2=(y=10.07, z=8.13 mm)

ตารางผนวกที่ ๓7 ค่า Weighted 3D seat acceleration

No.	Longitudinal acceleration (A_x)	Lateral acceleration (A_y)	Vertical acceleration (A_z)	Weighted 3D seat acceleration
1(S1)	1.307	1.713	1.651	3.439
2(S2)	1.088	1.819	2.347	3.784
3(S3)	1.362	1.928	1.924	3.823
4(S1F1A1)	1.166	2.029	1.587	3.640
5(S2F1A1)	1.340	1.992	1.913	3.867
6(S3F1A1)	1.109	1.575	1.889	3.293
7(S1F2A1)	1.087	1.699	2.196	3.578
8(S2F2A1)	1.066	1.824	2.087	3.619
9(S3F2A1)	0.944	1.758	1.605	3.222
10(S1F3A1)	1.161	1.770	1.693	3.412
11(S2F3A1)	1.023	1.925	1.663	3.476
12(S3F3A1)	1.038	1.708	2.367	3.665
13(S1F1A2)	1.205	1.778	1.930	3.572
14(S2F1A2)	1.188	1.734	1.864	3.483
15(S3F1A2)	1.169	1.759	1.983	3.560
16(S1F2A2)	1.209	1.885	2.069	3.756
17(S2F2A2)	1.147	1.782	1.878	3.512
18(S3F2A2)	1.205	1.700	2.376	3.762
19(S1F3A2)	1.219	1.876	1.996	3.714
20(S2F3A2)	1.250	1.716	1.924	3.541
21(S3F3A2)	1.204	1.777	1.679	3.442

ตารางผนวกที่ ๓7 (ต่อ)

No.	Longitudinal acceleration (A _x)	Lateral acceleration (A _y)	Vertical acceleration (A _z)	Weighted 3D seat acceleration
22(S1)	1.386	1.793	1.940	3.719
23(S2)	1.407	1.808	1.863	3.709
24(S3)	1.189	1.795	1.392	3.320
25(S1F1A1)	1.063	1.752	2.280	3.664
26(S2F1A1)	1.370	1.727	1.916	3.632
27(S3F1A1)	0.991	1.858	1.985	3.554
28(S1F2A1)	1.307	1.865	1.722	3.624
29(S2F2A1)	0.983	1.829	1.933	3.491
30(S3F2A1)	1.091	1.697	1.440	3.170
31(S1F3A1)	1.090	2.007	2.157	3.857
32(S2F3A1)	1.058	1.745	2.033	3.506
33(S3F3A1)	1.444	1.913	1.333	3.611
34(S1F1A2)	1.218	1.773	1.992	3.610
35(S2F1A2)	1.286	1.822	1.956	3.685
36(S3F1A2)	1.187	1.964	1.740	3.653
37(S1F2A2)	1.199	1.844	1.776	3.555
38(S2F2A2)	1.130	1.828	2.084	3.660
39(S3F2A2)	1.308	1.883	2.023	3.794
40(S1F3A2)	1.223	1.764	1.985	3.602
41(S2F3A2)	1.140	1.830	1.745	3.487
42(S3F3A2)	1.207	1.871	2.034	3.722

ตารางผนวกที่ ๓๗ (ต่อ)

No.	Longitudinal acceleration (A _x)	Lateral acceleration (A _y)	Vertical acceleration (A _z)	Weighted 3D seat acceleration
43(S1)	1.036	1.752	2.090	3.534
44(S2)	0.886	1.551	1.989	3.195
45(S3)	1.111	1.675	1.787	3.333
46(S1F1A1)	1.382	1.664	1.949	3.601
47(S2F1A1)	1.286	1.988	2.201	3.979
48(S3F1A1)	1.290	1.742	2.007	3.638
49(S1F2A1)	1.175	1.888	2.202	3.813
50(S2F2A1)	1.256	1.832	2.048	3.724
51(S3F2A1)	1.393	1.843	2.359	4.003
52(S1F3A1)	1.294	1.877	1.894	3.712
53(S2F3A1)	1.444	1.913	1.333	3.611
54(S3F3A1)	1.038	1.708	2.367	3.665
55(S1F1A2)	1.226	1.886	2.051	3.758
56(S2F1A2)	1.223	1.702	1.942	3.519
57(S3F1A2)	1.222	1.813	2.117	3.722
58(S1F2A2)	1.159	1.751	2.047	3.582
59(S2F2A2)	1.183	1.843	1.265	3.317
60(S3F2A2)	1.165	1.773	2.157	3.671
61(S1F3A2)	1.321	1.607	1.983	3.524
62(S2F3A2)	1.248	1.823	1.962	3.664
63(S3F3A2)	1.142	1.757	1.868	3.478

หมายเหตุ: S1=Low1 (1.39 km/h), S2=Low2 (2.09 km/h) และ S3=Low3 (3.43 km/h)

F1=9 Hz, F2=11 Hz และ F3=13 Hz

A1=(y=6.17, z=5.47 mm) และ A2=(y=10.07, z=8.13 mm)