Design and Development for a Vibrating Controller of Double Shank Vibrating Subsoiler

Tinnasit Kaisinburasak[1]*, Danai Saratunpithak[1], Anucha Chaochot[1], Niwat Bamrungkit[1], Sonthana Uthensut[1], Adisak Kredbunnirundon[1], Piya Wenuchan[1], Siraprop Poungthong[1], Somnuek Jaidee[1], Mongkol Tunhaw[2], Kolawachara Timinkul[2], Puttinun Jaruwat[3], Peerapong Chaovanapong[4], Anusorn Tiensiriroek[4], Jiravee Mahittithanasak[5], Kunthakorn Khaothong[6]

[1]*Agricultural Engineering Research Institute, Department of Agriculture, Lat Yao, Chatuchak, Bangkok 10900, Thailand.*
[2]*Khon Kean Agricultural Engineering Research Center, Bantum, Muang, Khon Kaen 40000, Thailand.*
[3]*Chanthaburi Agricultural Engineering Research Center, 27 M.1 Plabpha, Muang, Chanthaburi 22000, Thailand.*
[4]*Agricultural Production Sciences Research and Development Office, Department of Agriculture, Lat Yao, Chatuchak, Bangkok 10900, Thailand.*
[5]*Agricultural Regulatory Office, Department of Agriculture, Lat Yao, Chatuchak, Bangkok 10900, Thailand.*
[6]*Department of Mechanical Engineering Facalty of Engineering at Kamphaengsaen Kasetsart University Kamphaengsaen district Nakhonpathom 73140.*

Corresponding author: Tinnasit Kaisinburasak. E-mail: tinnasit@hotmail.co.th

Abstract

The purpose of the design and development for a vibrating controller of Double Shank Vibrating Subsoiler was the stable oscillatory frequency for a tillage and changing the mechanical transmission to hydrostatic power transmission system for the reduction of vibration which caused rider's discomfort and premature failures of tractor's components. The oscillatory frequency was controlled by fuzzy controller. The operation was entered the frequency which was the Input Setpoint into the fuzzy controller. The fuzzy controller will open a proportional valve that the hydraulic oil moves to drive the motor hydraulic which connected the vibration system and using the transducer and sensor was feedback signal. The experiments were conducted in sandy clay loam soil of 20.60%(db) moisture content, 1.66 g/cm^3 dry bulk density and 2.58 MPa cone penetration resistance at two forward speeds (1.39 and 2.09 km/h), four oscillatory frequencies (0, 7, 9 and 11 Hz), two tillage depths (30 and 40 cm) and a constant oscillatory amplitude of 36.5 mm. The optimum operating parameters were evaluated by means of questionnaire. The relative importances of parameters were first determined and later used to calculate the weighted arithmetic mean of user satisfactory index. The maximum value was found to be 3.372 which corresponded to 2.09 km/h forward speed, 30 cm tillage depth and 9 Hz oscillatory frequency. The tractor seat vibration was reduced by 31.74% - 33.95% at the same of forward speed, oscillatory frequency and tillage depth in the hydrostatic power transmission system as compared to the mechanical transmission one. The results of controller showed that the fuzzy based control gives, the delay time, rise time, setting time and response time were found to be 6 msec, 11 msec, 13 msec and 14 msec, respectively which hadn't overshoot. The oscillatory frequency was 9 – 9.05 Hz.

Keywords: Hardpan, Double Shank Vibrating Subsoiler, a vibrating controller of Double Shank Vibrating Subsoiler.

1. บทนำ

การปลูกพืชไร่ที่สำคัญหลายชนิด เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง หรืออ้อย ซึ่งนิยมปลูกบนพื้นที่ขนาดใหญ่มีการใช้แทรกเตอร์เครื่องจักรกล และรถบรรทุกที่มีขนาดใหญ่และน้ำหนักมาก ทำงานบนพื้นที่ในแต่ละรอบการผลิตเป็นจำนวนหลายครั้ง จึงเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดชั้นดินดานใต้ผิวดิน

ปัญหาจากการเกิดชั้นดินดานจะส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชและผลผลิต เกษตรกรจะแก้ปัญหาโดยใช้เครื่องทำลายดินดาน หรือไถระเบิดดินดาน (Subsoiler) พ่วงติดกับแทรกเตอร์ แล้วไถที่ระดับความลึกประมาณ 40-50 cm 3-5 ปีต่อครั้ง การไถระเบิดดินดานต้องใช้แรงฉุดลากสูงด้วยรถแทรกเตอร์ต้นกำลังขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงมีการพัฒนาไถระเบิดดินดานแบบสั่นเพื่อลดแรงฉุดลาก โดยมีแบบสั่นที่ขาไถ (Vibrating Subsoiler) และแบบสั่นทั้งโครง (Shakareator) ทั้ง 2 แบบใช้ต้นกำลังจากเพลาอำนวยกำลังของรถแทรกเตอร์ เมื่อทำการไถ ความถี่ในการสั่นของไถดินดานมีค่าไม่คงที่ เนื่องจากสภาพของดินมีความแข็งไม่เท่ากัน ส่งผลให้การทำงานของไถดินดานมีค่าไม่เต็มสมรรถนะ นอกจากนี้หากต้องการเปลี่ยนความกว้างและความถี่ในการสั่น จะต้องเปลี่ยนชุดเฟือง และเปลี่ยนตุ้มน้ำหนักไม่สมดุล ซึ่งใช้เวลานานและมีค่าใช้จ่ายสูง

Rattana (2009) รายงานว่า การสั่นขณะไถระเบิดดินดานชนิดสั่นที่ขา 2 ขาทำงาน จะส่งผ่านจากขาไถ ชุดเฟืองดอกจอก โครงสำหรับยึดต่อกับรถแทรกเตอร์แบบจุดพ่วง 3 จุดอิสระ เพลาอำนวยกำลัง สู่โครงรถแทรกเตอร์ และที่นั่งคนขับ ธัญญา และคณะ (2549) พบว่า ไถระเบิดดินดานชนิดสั่นที่ขา มีการสั่นตามระนาบขึ้น-ลง เกิดการเสียหายในลักษณะการเฉือนขาด (Shear Failure) ของรอยเชื่อมเพลาต่อกับเฟืองดอกจอก (Bevel Gear) ตัวใหญ่ หรือเฟืองบายศรี นอกจากนี้ยังส่งผลต่ออายุการใช้งานของชิ้นส่วนในชุดถ่ายทอดกำลัง เช่น ลูกปืนของชุดเพลาอำนวยกำลัง และอุปกรณ์ในรถแทรกเตอร์ Mehta *et al.* (2000) รายงานว่าภาระของการสั่นยังทำให้ผู้ขับขี่แทรกเตอร์รู้สึกไม่สบายเพิ่มมากขึ้นจากภาวะปกติ

งานวิจัยนี้แก้ปัญหาที่เกิดจากการสั่นโดยใช้ระบบถ่ายทอดกำลังอุทกสถิตอัตราทดแปรผันต่อเนื่อง ซึ่งใช้น้ำมันไฮดรอลิกเป็นตัวถ่ายทอดกำลัง โดยใช้ต้นกำลังจากเพลาอำนวยกำลัง (PTO) ขับปั๊มไฮดรอลิก เพื่อสร้างความดันให้น้ำมันไฮดรอลิก น้ำมันแรงดันสูงจะถูกส่งผ่านระบบท่อไปขับมอเตอร์ไฮดรอลิกซึ่งต่อเข้ากับชุดสั่นสะเทือนของไถระเบิดดินดานทำให้เกิดการสั่น การส่งกำลังด้วยวิธีนี้ส่งผลดีคือสามารถลดผลกระทบจากการสั่นสะเทือนของไถระเบิดดินดาน ที่มีต่ออุปกรณ์ต่างๆในรถแทรกเตอร์ ชุดถ่ายทอดกำลัง และผู้ขับขี่ นอกจากนี้ได้ออกแบบ และสร้างชุดควบคุมความถี่ในการสั่น เพื่อช่วยให้การสั่นของไถดินดานคงที่ตลอดการไถ ส่งผลให้ไถดินดานมีสมรรถนะการทำงานสูงสุด และง่ายต่อการปรับเปลี่ยนความถี่ในการสั่น การควบคุมจะควบคุมที่วาล์วปรับอัตราการไหล ระบบนี้เรียกว่า Servo Electro-hydraulic System หรือ SEHS (Kwanchai, 2011)

ระบบ SEHS เป็นระบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear) การหาสมการที่แม่นยำเพื่อใช้ในระบบควบคุมค่อนข้างซับซ้อน (Kwanchai, 2011) ดังนั้นระบบควบคุมแบบ Fuzzy ซึ่งเป็นระบบควบคุมที่มีความคงทนต่อสภาวะการเปลี่ยนแปลงของระบบทางพลศาสตร์ และไม่ต้องการข้อมูลที่แม่นยำจึงมีความสะดวก และเหมาะสมกับการนำมาใช้ออกแบบตัวควบคุม

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ 1) เพื่อสร้างไถระเบิดดินดานที่สามารถลดความเสียหายจากการสั่นของการไถด้วยระบบถ่ายทอดกำลังแบบอุทกสถิต 2) เพื่อศึกษาผลของปัจจัยต่างๆที่มีต่อสมรรถนะการทำงานของไถดินดานชนิดสั่นที่ขา 2 ขา

3) วิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยต่างๆสำหรับไถระเบิดดินดาน ในงานวิจัยนี้ใช้ค่าที่แสดงสมรรถนะของไถดินดานประกอบด้วย แรงฉุดลาก (Draft force) กำลังรวม (Total power) พื้นที่การแตกตัวของดิน (Soil disturbance) การสั่นสะเทือนต่อคนขับ (Tractor seat vibration) และความหนาแน่นมวลรวมสภาวะแห้งของดิน (Dry bulk density) และ 4) เพื่อสร้างระบบควบคุมความถี่ในการสั่นให้คงที่ตลอดการไถ

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การติดตั้งระบบถ่ายทอดกำลังแบบอุทกสถิตกับไถระเบิดดินดานชนิดสั่นที่ขา 2 ขา

ไถระเบิดดินดานชนิดสั่นที่ขา 2 ขาที่ใช้ทดลองในงานวิจัยนี้ เป็นไถดินดานที่ออกแบบและสร้างโดยธัญญา และคณะ (2539) ดังแสดงใน Figure 1 ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วนคือ โครงยึดต่อกับรถแทรกเตอร์แบบจุดพ่วง 3 จุดอิสระ โครงเครื่องมือ ขาไถ และชุดกลไกการสั่น โดยโครงยึดต่อกับรถแทรกเตอร์เชื่อมต่อกับโครงเครื่องมือ ขาไถดินดานมี 2 ขา ขนาดพื้นที่หน้าตัด 150 x 38 mm สูง 970 mm ส่วนของเล็บตัดดิน (Share) มีขนาดยาว 400 mm กว้าง 70 mm ยึดทำมุมกับแนวระดับ 30 องศา สามารถถอดเปลี่ยนได้เมื่อสึกหรอ ด้านหน้าของขาไถเป็นมุมแหลมรูปตัววีขนาด 40 องศา ขณะทำงานตัวขาไถสั่นไปมาในระนาบตั้งฉากในแนวดิ่งตามทิศการเคลื่อนที่ของตัวรถ (ระนาบ X-Y) รอบแกนหมุนที่ติดอยู่บนโครงเครื่องมือ ระยะห่างระหว่างขาไถ 750 mm

โครงเครื่องมือติดตั้งชุดเฟืองดอกจอก (Bevel Gear) อัตราทด 1:3.75 และชุดกลไกการสั่นแบบแผ่นเยื้องศูนย์ (Eccentric disc) ที่ระยะเยื้อง 6 mm ติดตั้งที่ส่วนบนของขาไถเพื่อให้ขาไถสั่นลักษณะไป-กลับ กลไกการสั่นถูกขับจากเพลา PTO ของรถแทรกเตอร์ โดยมีความถี่ในการสั่นคงที่ 9.4 Hz ความกว้างในการสั่นที่ปลายขาไถคงที่ 36.5 mm ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1,500 rpm

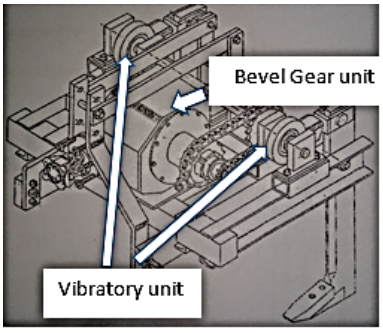

Figure 1 Isometric drawing for Double Shank Vibrating Subsoiler. Source: ธัญญา และคณะ (2539)

โดยเปลี่ยนชุดเฟืองดอกจอก ซึ่งเป็นชุดถ่ายทอดกำลังที่ต่อกับชุดกลไกการสั่นของขาไถออก แล้วติดตั้งระบบไฮดรอลิกดังนี้

- ปั๊มไฮดรอลิกขนาด 55 cc rev^{-1} อัตราการไหล 119 ลิตรต่อนาที ความเร็วรอบสูงสุด 2,500 rpm ที่ความดัน 210 bar โดยต่อกับเพลาอำนวยกำลังเพื่อใช้เป็นต้นกำลัง
- วาล์วควบคุมอัตราการไหลแบบปรับด้วยไฟฟ้า เพื่อควบคุมความเร็วรอบของ มอเตอร์ไฮดรอลิก
- มอเตอร์ไฮดรอลิกขนาด 100 cc rev^{-1} แรงบิดสูงสุด 264 N-m ความเร็วสูงสุด 3,000 rpm ที่ความดัน 172 bar ต่อกับชุดกลไกการสั่นของขาไถ เพื่อสร้างความถี่ในการสั่น

- ถังน้ำมันไฮดรอลิกขนาด 25 liter ติดตั้งบนโครงหลังที่นั่งคนขับ สำหรับส่งน้ำมันไฮดรอลิกไปใช้ในระบบ
- วาล์วลดความดัน ติดตั้งก่อนเข้าวาล์วควบคุมอัตราการไหลแบบปรับด้วยไฟฟ้า เพื่อป้องกันความเสียหายของอุปกรณ์จากความดันเกินในระบบ
- อุปกรณ์ระบายความร้อนด้วยอากาศขนาด 250 kcal h^{-1} ที่อุณหภูมิ 30°C โดยต่อจากมอเตอร์ไฮดรอลิก เพื่อระบายความร้อนของน้ำมันหลังการใช้งาน

Figure 2 แสดงวงจรไฮดรอลิกในการติดตั้ง และ Figure 3 ผลการติดตั้ง

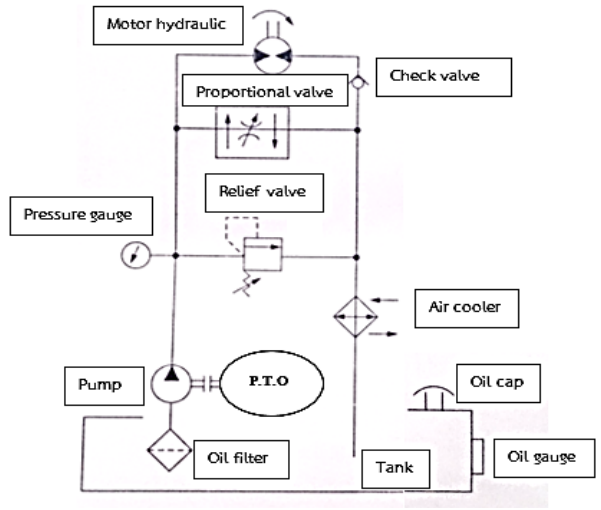

Figure 2 The schematic diagram of hydraulic system for installation on a Double Shank Vibrating Subsoiler.

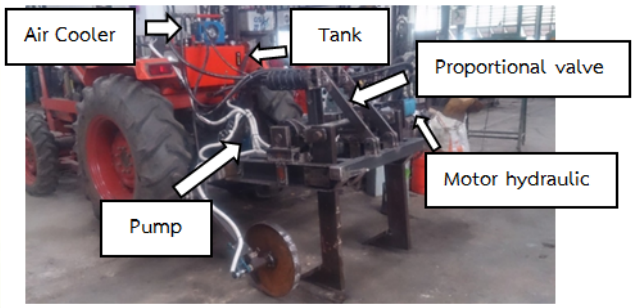

Figure 3 Installation of the hydraulic system on a Double Shank Vibrating Subsoiler.

หลักการทำงานเริ่มจาก เพลาอำนวยกำลังหมุนที่ความเร็วรอบ 540 rpm ส่งกำลังผ่านชุดเฟือง อัตราทด 1:4 ขับปั๊มไฮดรอลิกที่ความเร็วรอบ 2,160 rpm มีอัตราการไหลประมาณ 98 ลิตรต่อนาที มีวาล์วควบคุมความดันที่ 250 bar น้ำมันไฮดรอลิกถูกส่งผ่านระบบท่อไปยังวาล์วควบคุมอัตราการไหลแบบปรับด้วยไฟฟ้า ซึ่งจะ เปิด หรี่ หรือปิดวาล์วด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซี (Fuzzy Controller) และต่อไปยังมอเตอร์ไฮดรอลิก ซึ่งต่อกับชุดกลไกการสั่นของขาไถ น้ำมันที่ผ่านมอเตอร์ไฮดรอลิกจะเกิดความร้อนซึ่งแปรผันกับขนาดของภาระงานจะถูกส่งไปยังตัวระบายความร้อนแบบพัดลมระบายอากาศเพื่อระบายความร้อน และส่งกลับเข้าถังน้ำมันไฮดรอลิกหมุนเวียนตลอดการใช้งาน

2.2 อุปกรณ์ควบคุมความถี่ในการสั่น

การติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมความถี่ในการสั่นของขาไถ แสดงวงจรการติดตั้ง และอธิบายการทำงานใน Figure 4 มอเตอร์ไฮดรอลิกจะขับภาระซึ่งประกอบไปด้วยชุดสั่นสะเทือน และขาไถ โดยรับน้ำมันไฮดรอลิกเพื่อใช้ในการถ่ายทอดกำลังจากวาล์วควบคุมอัตราการไหล การสั่นของขาไถจะถูกวัดที่เพลาขับลูกเบี้ยวโดย Proximity Sensor ในหน่วย rpm ผ่านโปรแกรมประมวลผลซึ่งเขียนด้วยโปรแกรม Arduino 1.6.9 ในหน่วย Hz ไปแสดงผลที่หน้าจอ LCD ที่ตู้ควบคุม และเป็นสัญญาณป้อนกลับ

การควบคุมอัตราการไหลของน้ำมันไฮดรอลิก เพื่อไปควบคุมความเร็วในการหมุนขับภาระของมอเตอร์ไฮดรอลิก กระทำโดยโปรแกรมควบคุมความถี่ด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซี ซึ่งเขียนด้วยโปรแกรม Arduino 1.6.9 ในคอมพิวเตอร์ผ่านบอร์ดควบคุม ซึ่งจะคำนวณสัญญาณควบคุมตามสัญญาณสั่งงานและสัญญาณป้อนกลับ สัญญาณสั่งงานจากบอร์ดควบคุมจะถูกขยายด้วยอุปกรณ์ขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้า (Valve Amplifier) ก่อนส่งไปยังวาล์วควบคุมอัตราการไหล

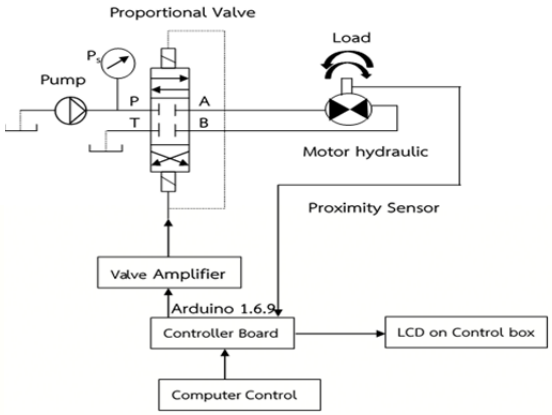

Figure 4 The schematic diagram for installation a Vibrating Controller.

2.3 การออกแบบตัวควบคุมระบบ Servo Electro-hydraulic System หรือ SEHS โดยใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซี (Fuzzy Controller)

การทำงานของระบบมีการทำงานโดยรวมแสดงดัง Figure 5

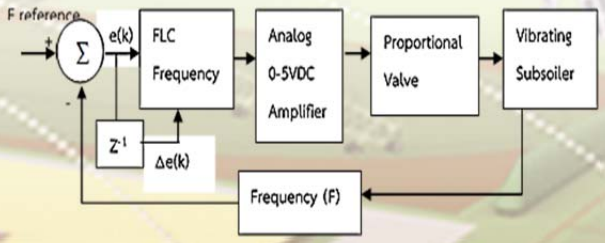

Figure 5 Block Diagram for fuzzy controller with a Proportional valve.

การทำงานของระบบเริ่มจากการกำหนดค่าอินพุตอ้างอิงเป็น Hz ระบบจะสั่งงานตามค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นค่าแรกในขณะที่ยังไม่มีค่าป้อนกลับ เมื่อทำการไถ และขาไถเริ่มสั่น Proximity Sensor จะเป็นตัวส่งค่าป้อนกลับผ่านโปรแกรมประมวลผลในหน่วย Hz มาเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง (F reference) มีค่าตั้งแต่ 0-13 เฮิรตซ์ เพื่อคำนวณหาค่าผิดพลาด (e(k)) และอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าผิดพลาด (Δe(k)) เป็น 2 อินพุต ไปเข้ากฎฟัซซี เพื่อเป็นเอาต์พุตควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้กับวาล์วควบคุมอัตราการไหล ถ้าค่าป้อนกลับมากกว่าค่าอ้างอิงทำให้ค่าผิดพลาดมีค่าเป็นลบ ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจะลดลง ถ้าค่าป้อนกลับน้อยกว่าค่าอ้างอิงจะทำให้ค่าผิดพลาดมีค่าเป็นบวก ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจะเพิ่มขึ้น โดยที่

F reference = ค่าอินพุตอ้างอิง
e(k) = ค่าผิดพลาดของความถี่ในการสั่น
= F reference – F
Δe(k) = อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าผิดพลาดความถี่ในการสั่น
U = เอาต์พุตในการเปิด ปิด Proportional Valve

Figure 6 แสดงการออกแบบฟังก์ชันสมาชิก (membership function) ของอินพุททั้งสองตัว คือค่าความผิดพลาด (e(k)) และค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความผิดพลาด (Δe(k))

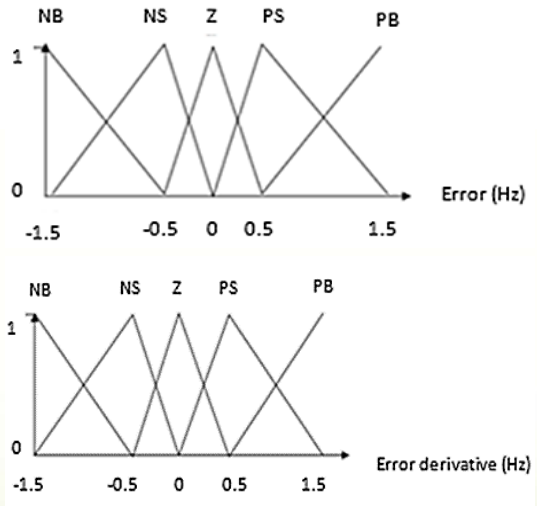

Figure 6 Design the membership function of Input signal in Frequency loop.

Figure 7 แสดงการออกแบบฟังก์ชันสมาชิกเอาท์พุท การแปลงสัญญาณของสมาชิกเอาท์พุทให้เป็นค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณสั่งงาน U โดยใช้ทฤษฎีจุดศูนย์ถ่วง (Center of Gravity; COG)

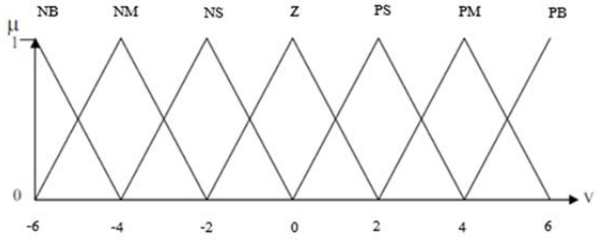

Figure 7 Design the membership function of Output signal in Frequency loop.

กฎที่ใช้ในการควบคุมฟัซซี่ลอจิกของความถี่ และแรงดันไฟฟ้ามีรายละเอียดดังแสดงใน Figure 8

dError / Error	NB	NS	Z	PS	PB
NB	NB	NB	NB	NS	Z
NS	NB	NB	NS	Z	PS
Z	NB	NS	Z	PS	PB
PS	NS	Z	PS	PB	PB
PB	Z	PS	PB	PB	PB

Figure 8 Rules of the fuzzy control in Frequency loop.

2.4 การทดสอบผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อสมรรถนะ

ปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของไถระเบิดดินดานชนิดสั่นที่ขา 2 ขา ประกอบด้วย ความถี่ในการสั่น ความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ และความลึกในการไถ การทดสอบเลือกใช้ความถี่ในการสั่น 4 ระดับคือ 0, 7, 9 และ 11 Hz ความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ 2 ระดับคือ Low 1 (1.39 km h^{-1}) และ Low 2 (2.09 km h^{-1}) และความลึกในการไถ 2 ระดับคือ 30 และ 40 cm โดยมีความกว้างในการสั่นที่ปลายขาไถคงที่ 36.5 mm การทดลองทั้งหมดมี 16 กรรมวิธี ดังแสดงใน Table 1 แต่ละกรรมวิธี ทำการทดลอง 3 ครั้ง ขนาดแปลงทดสอบ 3 x 10 m ต่อกรรมวิธี ทำการทดลองที่ศูนย์วิจัยและพัฒนาการเกษตรนครราชสีมา อ.สีคิ้ว จ.นครราชสีมา ชนิดของดินเป็นดินร่วนเหนียวปนทราย สมบัติของดินในแปลงทดลองที่ระดับความลึก 0-60 cm มีค่าความชื้นของดินเฉลี่ย 20.60 %db ความหนาแน่นมวลรวมสภาวะแห้งของดินเฉลี่ย 1.66 g cm^{-3} รถแทรกเตอร์ที่ใช้ทดสอบเป็นแทรกเตอร์ Kubota รุ่น M 5000 SU ขนาด 50 แรงม้า

Table 1 The treatment combinations for testing the efficacy of Vibrating subsoiler.

Treatments	Forward speed (km/h)	frequency of oscillatory (Hz)	Tillage depth (cm)
1	Low1	0	30
2	Low1	7	30
3	Low1	9	30
4	Low1	11	30
5	Low1	0	40
6	Low1	7	40

Treatments	Forward speed (km/h)	frequency of oscillatory (Hz)	Tillage depth (cm)
7	Low1	9	40
8	Low1	11	40
9	Low2	0	30
10	Low2	7	30
11	Low2	9	30
12	Low2	11	30
13	Low2	0	40
14	Low2	7	40
15	Low2	9	40
16	Low2	11	40

$$\overline{X_t} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i X_{rt_i})}{\sum_{i=1}^{n} X_{rt_i}} \quad (1)$$

เมื่อ

$\overline{X_t}$ = ค่าเฉลี่ยเลขคณิตแบบถ่วงน้ำหนักของกรรมวิธี

S_i = ระดับความพึงพอใจต่อผลการทดสอบ

X_{rt} = ระดับความสำคัญของผลการทดสอบเทียบเป็น 100%

3. ผลและวิจารณ์

3.1 ผลการทดสอบปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของไถระเบิดดินดานชนิดสั่นที่ขา 2 ขา

ผลการทดสอบสมรรถนะของไถระเบิดดินดานชนิดสั่นที่ขา 2 ขา ทั้งหมด 6 ค่าประกอบด้วย แรงฉุดลากในแนวระดับ กำลังรวม พื้นที่การแตกตัวของดิน การสั่นสะเทือนต่อคนขับ ความหนาแน่นมวลรวม สภาวะแห้งของดินหลังการไถ และอัตราการทำงานทางทฤษฎี แสดงใน Table 2

Table 2 Factors which influent the efficacy of Double Shank Vibrating Subsoiler.

Treatment	Draft force (kN)	3D weighted seat acceleration (m s^{-2})	Dry bulk density (g cm^{-3})	Soil disturbance (cm^{-2})	Total power (kW)	Theoretical field capacity (rai h^{-1})
1	13.89	1.769	1.53	3002.13	6.63	0.868
2	12.11	1.901	1.32	2816.20	8.93	0.870
3	11.14	1.862	1.28	2602.74	11.68	0.869
4	10.02	1.791	1.17	2411.02	14.94	0.869
5	17.21	1.821	1.52	3299.41	8.22	0.867
6	15.84	1.962	1.28	3001.66	11.75	0.870
7	14.02	1.894	1.23	2707.43	15.14	0.868
8	12.68	1.878	1.14	2467.44	18.73	0.868
9	16.97	1.546	1.42	3371.13	12.64	1.307
10	14.13	1.703	1.24	3076.84	15.02	1.307
11	13.01	1.612	1.20	2744.73	18.13	1.308
12	11.98	1.541	1.12	2441.65	21.11	1.306
13	19.41	1.577	1.41	3482.15	14.45	1.310
14	18.12	1.710	1.18	3189.23	17.73	1.308
15	17.20	1.641	1.14	2874.77	20.68	1.306
16	16.44	1.566	1.01	2561.64	23.22	1.308

Note: Average of 3 replications.

3.1.1 แรงฉุดลากในแนวระดับ (Draft force) จากผลการทดสอบใน Table 2 พบว่า

เมื่อเพิ่มความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์จาก Low 1 เป็น Low 2 จะส่งผลให้ค่าเฉลี่ยแรงฉุดลากของการไถเพิ่มขึ้นทั้งแบบขาไถสั่นและไม่สั่นขณะทำงาน ที่ความลึกในการไถ 30 cm มีค่าเฉลี่ยแรงฉุดลากเพิ่มขึ้นจาก 11.79 kN เป็น 14.02 kN และที่ความลึกในการไถ 40 cm มีค่าเฉลี่ยแรงฉุดลากเพิ่มขึ้นจาก 14.94 kN เป็น 17.79 kN เมื่อใช้ความเร็ว Low 2 และไม่สั่นขณะทำงาน ที่ความลึกในการไถ 40 cm จะทำให้เกิดแรงฉุดลากในแนวระดับมากที่สุด 19.41 kN

ความลึกในการไถเพิ่มขึ้นจาก 30 cm เป็น 40 cm จะส่งผลให้ค่าเฉลี่ยแรงฉุดลากเพิ่มขึ้นทั้งแบบขาไถสั่นและไม่สั่นขณะทำงาน ที่ความลึกในการไถ 40 cm มีค่าเฉลี่ยแรงฉุดลาก 14.94 kN และ 17.79 kN ที่ความเร็วแทรกเตอร์ Low 1 และ Low 2 มากกว่าความลึกในการไถ 30 cm อยู่ 3.15 kN และ 3.77 kN ตามลำดับ

ความถี่ในการสั่นเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าเฉลี่ยแรงฉุดลากลดลง การสั่นที่ความถี่ 11 Hz ความลึกในการไถ 30 cm และความเร็วรถแทรกเตอร์ Low 1 ใช้แรงฉุดลากในแนวระดับน้อยที่สุด 10.02 kN เมื่อเปรียบเทียบกับแบบไม่สั่นที่ความเร็วเดียวกัน พบว่าสามารถลดแรงฉุดลากได้ 27.86% แต่ที่ความถี่ในการสั่น 11 Hz ความลึกในการไถ 30 cm และความเร็วแทรกเตอร์ Low 2 เมื่อเปรียบเทียบกับแบบ

ไม่สั่นที่ความเร็วเดียวกัน พบว่าสามารถลดแรงฉุดลากได้มากที่สุด 29.40%

ความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ และความลึกในการไถเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าเฉลี่ยแรงฉุดลากของการไถเพิ่มขึ้นทั้งแบบขาไถสั่นและไม่สั่นขณะทำงาน และความถี่ในการสั่นเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าเฉลี่ยแรงฉุดลากลดลง

3.1.2 กำลัง (power)

กำลังจากเพลาอำนวยกำลัง (PTO power) เป็นกำลังจริงที่ใช้ในการขับปั๊มไฮดรอลิกซึ่งใช้รอบคงที่เฉลี่ย 540 rpm กำลังนี้จะสูญเสียในรูปความร้อนและแรงเสียดทานในสายและอุปกรณ์ต่างๆ โดยกำลังจริงที่สูญเสียไปในระบบไฮดรอลิกมีค่าเฉลี่ย 1.91 kW หรือประมาณ 31% กำลังจากเพลาอำนวยกำลังจะถูกนำไปรวมกับกำลังฉุดลากเป็นกำลังรวม (Total power)

จากผลการทดสอบใน Table 2 พบว่า

ค่าเฉลี่ยกำลังรวมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วแทรกเตอร์เพิ่มขึ้นจาก Low 1 เป็น Low 2 ทั้งขาไถสั่นและไม่สั่นขณะทำงานส่งผลให้ค่าเฉลี่ยกำลังรวมเพิ่มขึ้นจาก 12 kW เป็น 17.87 kW

ค่าเฉลี่ยกำลังรวมเพิ่มขึ้นจาก 13.64 kW เป็น 16.24 kW เมื่อความลึกในการไถเพิ่มขึ้นจาก 30 cm เป็น 40 cm

ค่าเฉลี่ยกำลังรวมเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่ในการสั่นเพิ่มขึ้นจาก 0 Hz (ไม่มีการสั่น) จนถึง 11 Hz ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยกำลังรวมเพิ่มขึ้นจาก 10.49 kW เป็น 19.50 kW และยังพบว่าขณะสั่นด้วยความถี่ 11 Hz ระดับความลึก 40 cm ที่ความเร็ว Low 2 ใช้กำลังรวมมากที่สุด 23.22 kW

ความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ และความลึกในการไถเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าเฉลี่ยกำลังรวมเพิ่มขึ้นทั้งแบบขาไถสั่นและไม่สั่นขณะทำงาน และความถี่ในการสั่นเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าเฉลี่ยกำลังรวมเพิ่มขึ้น

3.1.3 พื้นที่การแตกตัวของดิน (Soil disturbance).

จากผลการทดสอบใน Table 2 พบว่า

พื้นที่การแตกตัวของดินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วแทรกเตอร์เพิ่มขึ้นทั้งแบบขาไถสั่นและไม่สั่นขณะทำงาน โดยที่ความเร็วรถแทรกเตอร์เพิ่มขึ้นจาก Low 1 เป็น Low 2 ค่าเฉลี่ยพื้นที่การแตกตัวของดินเพิ่มขึ้น 1.27%-12.29%

ความลึกในการไถเพิ่มขึ้นมีแนวโน้มทำให้พื้นที่การแตกตัวของดินเพิ่มขึ้น โดยที่ความลึกในการไถเพิ่มขึ้นจาก 30 cm เป็น 40 cm ค่าเฉลี่ยพื้นที่การแตกตัวของดินเพิ่มขึ้น 2.34%-9.90% ทั้งแบบขาไถสั่นและไม่สั่นขณะทำงาน

พื้นที่การแตกตัวของดินมีค่าน้อยลง เมื่อความถี่ในการสั่นเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความถี่ในการสั่นจาก 7 Hz เป็น 11 Hz ที่ระดับความลึก 30 cm ค่าเฉลี่ยพื้นที่การแตกตัวของดินลดลง 14.39-20.64% และที่ระดับความลึก 40 cm ค่าเฉลี่ยพื้นที่การแตกตัวของดินลดลง 17.80-19.68% การสั่นที่ความถี่ 11 Hz ความลึกในการไถ 30 cm ความเร็วรถแทรกเตอร์ Low 1 พื้นที่การแตกตัวของดินมีค่าน้อยที่สุด 2,411.02 cm^2 ในขณะที่ความเร็วแทรกเตอร์ Low 2 ขาไถไม่มีการสั่น ที่ความลึกในการไถ 40 cm พื้นที่การแตกตัวของดินมีค่ามากที่สุด 3,482.15 cm^2 นอกจากนี้เมื่อใช้ความเร็วแทรกเตอร์ Low 2 ขาไถไม่มีการสั่น ที่ความลึกในการไถ 30 cm เมื่อเปรียบเทียบกับแบบขาไถสั่นที่ความถี่ 11 Hz ความเร็ว และความลึกระดับเดียวกัน พบว่าพื้นที่การแตกตัวของดินเฉลี่ยเพิ่มมากที่สุด 27.57%

ความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ และความลึกในการไถเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าเฉลี่ยพื้นที่การแตกตัวของดินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทั้งแบบขาไถสั่นและไม่สั่นขณะทำงาน และความถี่ในการสั่นเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าเฉลี่ยพื้นที่การแตกตัวของดินมีค่าลดลง

3.1.4 ความหนาแน่นมวลรวมสภาวะแห้งของดิน (Dry bulk density)

จากผลการทดสอบใน Table 2 พบว่า

เมื่อความเร็วรถแทรกเตอร์เพิ่มขึ้นจาก Low 1 เป็น Low 2 ค่าเฉลี่ย Dry bulk density มีแนวโน้มลดลง ที่ความลึกในการไถ 40 cm ค่าเฉลี่ย Dry bulk density ลดลงมากที่สุด 7.81% ทั้งแบบขาไถสั่นและไม่สั่นขณะทำงาน

เมื่อความลึกในการไถเพิ่มขึ้นจาก 30 cm เป็น 40 cm ค่าเฉลี่ย Dry bulk density มีแนวโน้มลดลง ที่ระดับความลึก 40 cm ค่าเฉลี่ย Dry bulk density ลดลงมากกว่าระดับความลึก 30 cm อยู่ 0.65%-9.82% ทั้งแบบขาไถสั่นและไม่สั่นขณะทำงาน

ความถี่ในการสั่นเพิ่มขึ้นจาก 0 Hz (ไม่มีการสั่น) เป็น 11 Hz ค่าเฉลี่ย Dry bulk density มีค่าลดลง โดยค่าเฉลี่ย Dry bulk density ที่ความลึกในการไถ 40 cm สำหรับการทำงานขณะขาไถสั่นที่ความถี่ 11 Hz ความเร็ว Low 2 มีค่า 1.01 g cm^{-3} ลดลงมากที่สุดจากค่าเฉลี่ย Dry bulk density เดิมก่อนการไถ 40% และลดลงมากกว่าขณะเครื่องมือไม่สั่นที่ความเร็ว และความลึกระดับเดียวกัน 28.37% โดยที่ความถี่ในการสั่นเพิ่มขึ้นจาก 7 Hz เป็น 11 Hz ค่าเฉลี่ย Dry bulk density ลดลง 9.68%-14.41% เมื่อเปรียบเทียบกับแบบขาไถไม่สั่น พบว่าค่าเฉลี่ย Dry bulk density ลดลง 21.13%-28.37% ซึ่งตรงกับผลการวิจัยของ Niyamapa and Salokhe (1993) ที่รายงานว่าเมื่อใช้ไถดินดานแบบสั่นที่ขา ดินมีโอกาสแตกตัวเป็นก้อนเล็กได้มากกว่าเมื่อขาไถไม่สั่น

ความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ และความลึกในการไถเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าเฉลี่ย Dry bulk density มีแนวโน้มลดลงทั้งแบบขาไถสั่นและไม่สั่นขณะทำงาน และความถี่ในการสั่นเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าเฉลี่ย Dry bulk density มีค่าลดลง

3.1.5 การสั่นสะเทือนต่อคนขับ (Tractor seat vibration)

การสั่นสะเทือนต่อคนขับ สามารถดูได้จากค่า 3D weighted seat acceleration จากผลการทดสอบใน Table 2 พบว่า เมื่อความเร็วแทรกเตอร์เพิ่มขึ้นจาก Low 1 เป็น Low 2 การสั่นสะเทือน

ต่อคนขับมีแนวโน้มลดลง 10.42% - 16.61% ทั้งแบบขาไถสั่นและไม่สั่นขณะทำงาน

เมื่อความลึกในการไถเพิ่มขึ้นจาก 30 cm เป็น 40 cm การสั่นสะเทือนต่อคนขับมีแนวโน้มสูงขึ้น 0.41% - 4.86% ทั้งแบบขาไถสั่นและไม่สั่นขณะทำงาน

ความถี่ในการสั่นของขาไถเพิ่มขึ้นจาก 7 Hz เป็น 11 Hz การสั่นสะเทือนต่อคนขับมีแนวโน้มลดลง 4.28%-9.51% และการสั่นที่ความถี่ 11 Hz เมื่อเทียบกับแบบขาไถไม่สั่น พบว่าการสั่นสะเทือนต่อคนขับมีค่าไม่แตกต่างกัน โดยที่ความเร็วแทรกเตอร์ Low 1 ความถี่ในการสั่น 7 Hz และความลึกในการไถ 40 cm ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนต่อคนขับมากที่สุด 1.962 m s^{-2}

เมื่อความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าเฉลี่ยการสั่นสะเทือนต่อคนขับมีแนวโน้มลดลงทั้งแบบขาไถสั่นและไม่สั่นขณะทำงาน ความลึกในการไถเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าเฉลี่ยการสั่นสะเทือนต่อคนขับมีแนวโน้มสูงขึ้นทั้งแบบขาไถสั่นและไม่สั่นขณะทำงาน และความถี่ในการสั่นเพิ่มขึ้นจาก 7 Hz เป็น 11 Hz ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยการสั่นสะเทือนต่อคนขับมีแนวโน้มลดลง โดยการสั่นที่ความถี่ 11 Hz เมื่อเทียบกับแบบขาไถไม่สั่น พบว่าการสั่นสะเทือนต่อคนขับมีค่าไม่แตกต่างกัน

ทำการทดสอบเปรียบเทียบการสั่นสะเทือนต่อคนขับระหว่างไถระเบิดดินดานชนิดสั่นที่ขา 2 ขา แบบใช้ระบบถ่ายทอดกำลังทางกลกับไถระเบิดดินดานชนิดสั่นที่ขา 2 ขา แบบใช้ระบบถ่ายทอดกำลังอุทกสถิต พบว่า การใช้ไถระเบิดดินดานชนิดสั่นที่ขา 2 ขา แบบใช้ระบบถ่ายทอดกำลังอุทกสถิต สามารถลดการสั่นสะเทือนต่อคนขับลงได้มากกว่าไถระเบิดดินดานชนิดสั่นที่ขา 2 ขา แบบใช้ระบบถ่ายทอดกำลังทางกล โดยค่า 3D weighted seat acceleration ลดลง 31.74%-33.95% ทั้งแบบขาไถสั่นและไม่สั่นขณะทำงาน ที่ความถี่ในการสั่น ความลึกในการไถ และความเร็วในการเคลื่อนที่เดียวกันดังแสดงใน Figure 9 โดยที่ความเร็วรถแทรกเตอร์ Low 1 ความถี่ในการสั่นของขาไถ 7 Hz และความลึกในการไถ 40 cm ทำให้เกิดการสั่นต่อคนขับมากที่สุด โดยค่า 3D weighted seat acceleration สูงสุดทั้งไถระเบิดดินดานชนิดสั่นที่ขา 2 ขา แบบใช้ระบบถ่ายทอดกำลังทางกล และแบบที่ใช้ระบบถ่ายทอดกำลังอุทกสถิต

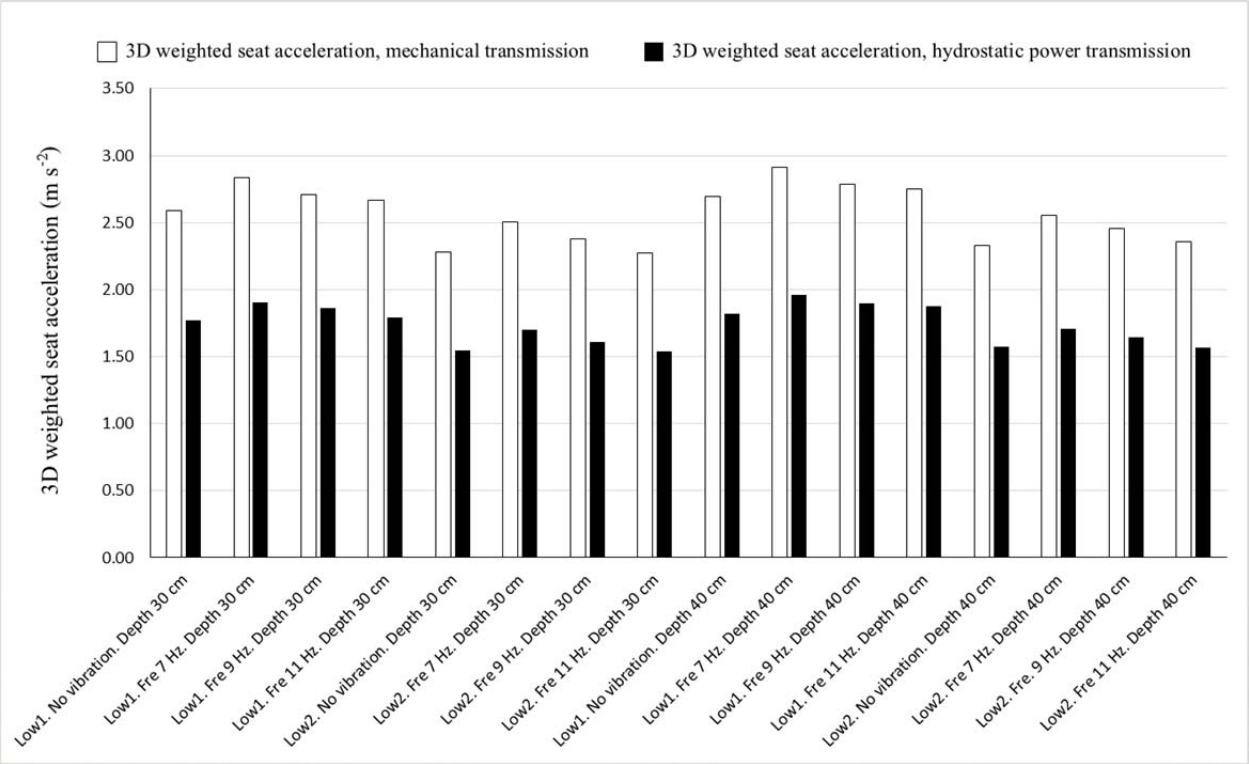

Figure 9 3D weighted seat acceleration of Double Shank Vibrating Subsoiler in the hydrostatic power transmission system as compared to the mechanical transmission.

3.1.6 อัตราการทำงานทางทฤษฎี (Theoretical field capacity)

อัตราการทำงานทางทฤษฎีขึ้นอยู่กับความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ เมื่อความเร็วแทรกเตอร์เพิ่มขึ้นอัตราการทำงานทางทฤษฎีจะเพิ่มขึ้น โดยความเร็วแทรกเตอร์ Low 1 ค่าเฉลี่ยอัตราการทำงานทางทฤษฎี คือ 0.869 ไร่ต่อชั่วโมง และความเร็วแทรกเตอร์ Low 2 ค่าเฉลี่ยอัตราการทำงานทางทฤษฎี คือ 1.308 ไร่ต่อชั่วโมง

3.2 ผลการหาปัจจัยทดสอบที่เหมาะสม (optimum) สำหรับไถระเบิดดินดาน

Table 3 แสดงผลการตอบแบบสอบถามของเกษตรกรจำนวน 35 คน และนักวิชาการเกษตรจำนวน 15 คน เกี่ยวกับระดับความสำคัญของผลการทดสอบ และระดับความพึงพอใจของผลการทดสอบทั้งหมด 5 ค่า ประกอบด้วย ความหนาแน่นมวลรวมสภาวะแห้งของดิน การสั่นสะเทือนต่อคนขับ กำลังรวม หรืออัตราการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง พื้นที่การแตกตัวของดิน และอัตราการทำงานทางทฤษฎี

Table 3 The level of satisfaction and signification of results for testing.

Test results	Level	Level of satisfaction	Level of signification (%)
Dry bulk density	< 1 (g cm^{-3})	4	12.63
	1 – 1.2 (g cm^{-3})	3	
	1.2 – 1.4 (g cm^{-3})	2	
	> 1.4 (g cm^{-3})	1	
Tractor seat vibration	< 1.62 (m s^{-2})	4	28.62
	1.62 - 1.7 (m s^{-2})	3	
	1.7 - 1.83 (m s^{-2})	2	
	> 1.83 (m/s^{-2})	1	
Total power or	< 8 (kW) or < 1.56 (liter/rai)	4	
Fuel consumption	8 – 12 (kW) or 1.56 – 3.0 (liter/rai)	3	25.08
	12 – 19 (kW) or 3.0 – 4.0 (liter/rai)	2	
	> 19 (kW) or > 4.0 (liter/rai)	1	
Soil disturbance	>3,000 (cm2)	4	
	3,000-2,700 (cm2)	3	20.20
	2,700-2,400 (cm2)	2	
	<2,400 (cm2)	1	
Theoretical field capacity	> 1.3 (rai h-1)	4	
	1.3 – 0.85 (rai h-1)	3	13.47
	0.85 – 0.75 (rai h-1)	2	
	< 0.75 (rai h-1)	1	

Note: 4 = very good, 3 = good, 2 = medium and 1 = not good.

เมื่อนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับระดับความพึงพอใจ แล้วหาค่าเฉลี่ยเลขคณิตแบบถ่วงน้ำหนักตามสมการที่ 1 จะได้ค่าเฉลี่ยเลขคณิตแบบถ่วงน้ำหนักแสดงใน Table 4

Table 4 Weighted Arithmetic Mean of experiments.

Treatment	Seat Acceleration		Dry bulk density		Soil disturbance		Total power		Theoretical field capacity		Weighted Arithmetic Mean
	(m s^{-2})	level	(g cm^{-3})	level	(cm^2)	level	(kW)	level	(rai h^{-1})	level	
1	1.769	2	1.53	1	3002.13	4	6.63	4	0.868	3	2.914
2	1.901	1	1.32	2	2816.2	3	8.93	3	0.870	3	2.301
3	1.862	1	1.28	2	2602.74	2	11.68	3	0.869	3	2.099
4	1.791	2	1.17	3	2411.02	2	14.94	2	0.869	3	2.261
5	1.821	2	1.52	1	3299.41	4	8.22	3	0.867	3	2.663
6	1.962	1	1.28	2	3001.66	4	11.75	3	0.870	3	2.503
7	1.894	1	1.23	2	2707.43	3	15.14	2	0.868	3	2.051
8	1.878	1	1.14	3	2467.44	2	18.73	2	0.868	3	1.975
9	1.546	4	1.42	1	3371.13	4	12.64	2	1.307	4	3.120
10	1.703	2	1.24	2	3076.84	4	15.02	2	1.307	4	2.673
11	1.612	4	1.2	3	2744.73	3	18.13	2	1.308	4	3.170
12	1.541	4	1.12	3	2441.65	2	21.11	1	1.306	4	2.717
13	1.577	4	1.41	1	3482.15	4	14.45	2	1.310	4	3.120
14	1.71	2	1.18	3	3189.23	4	17.73	2	1.308	4	2.800
15	1.641	3	1.14	3	2874.77	3	20.68	1	1.306	4	2.633
16	1.566	4	1.01	3	2561.64	2	23.22	1	1.308	4	2.717

Note: 4 = very good, 3 = good, 2 = medium and 1 = not good.

จาก Table 4 พบว่า ค่าเฉลี่ยเลขคณิตแบบถ่วงน้ำหนักในกรรมวิธีที่ 11 ให้ค่าเฉลี่ยเลขคณิตแบบถ่วงน้ำหนักมากที่สุด 3.170 แสดงให้เห็นว่า ความเร็วรถแทรกเตอร์ Low 2 ความถี่ในการสั่น 9 Hz และความลึกในการไถ 30 cm เป็นปัจจัยทดสอบที่เหมาะสม (optimum) และมีสมรรถนะการทำงานสูงสุดสำหรับไถระเบิดดินดานในแปลงทดสอบ

3.3 ประสิทธิภาพของระบบควบคุม

กราฟผลตอบสนองของระบบควบคุมความถี่ในการสั่นแบบฟัซซีที่ความเร็วรถแทรกเตอร์ Low 2 ความถี่ในการสั่น 9 Hzและความลึกในการไถ 30 cm แสดงใน Figure 10

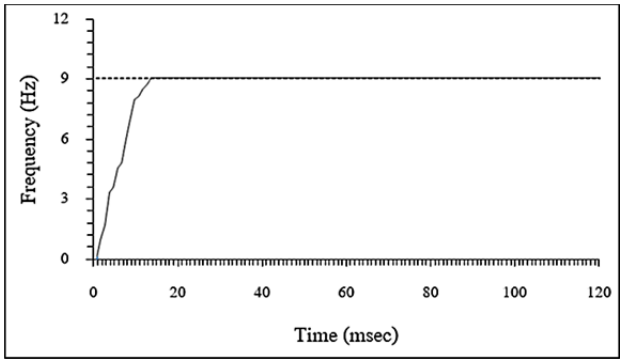

Figure 10 Response for 9 Hz by fuzzy controller compare with the reference signal.

กำหนดให้ความถี่ในการสั่น Input Setpoint ที่ป้อนเข้าไปในโปรแกรมควบคุมแบบฟัซซีคือ 9 Hz โดย Figure 10 แสดงกราฟผลตอบสนองระหว่างความถี่ในการสั่นกับเวลา พบว่า การสั่นของขาไถเริ่มสั่นจาก 0 Hz (ไม่มีการสั่น) จนถึง 9 Hz ใช้ช่วงเวลา Response Time=14 ms ช่วงเวลา Delay Time=6 ms ช่วงเวลา Rise Time=11 ms และช่วงเวลา Setting Time=13 ms ไม่เกิดค่าพุ่งเกิน (Overshoot)

4. สรุป

ไถระเบิดดินดานชนิดสั่นที่ขา 2 ขา แบบใช้ระบบถ่ายทอดกำลังอุทกสถิต สามารถลดการสั่นสะเทือนต่อคนขับ โดยค่า 3D Weighted seat acceleration ลดลง 31.74% - 33.95% ทั้งแบบขาไถสั่นและไม่สั่น ที่ความถี่ในการสั่น ความลึกในการไถ และความเร็วในการเคลื่อนที่เดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบกับไถระเบิดดินดานชนิดสั่นที่ขา 2 ขาแบบที่ใช้ระบบถ่ายทอดกำลังทางกล ส่งผลให้อายุการใช้งานของชิ้นส่วนในชุดถ่ายทอดกำลัง และอุปกรณ์ในรถแทรกเตอร์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ภาระการสั่นที่น้อยลงส่งผลให้ผู้ขับขี่แทรกเตอร์รู้สึกสบายขึ้น

ความเร็วในการเคลื่อนที่ ความถี่ในการสั่น ความลึกในการไถ และไถดินดานชนิดสั่นที่ขา 2 ขาแบบใช้ระบบถ่ายทอดกำลังทางกล กับแบบที่ใช้ระบบถ่ายทอดกำลังอุทกสถิต ส่งผลทำให้เกิดการสั่นสะเทือนต่อคนขับ เมื่อความเร็วเพิ่มมากขึ้น ความถี่ในการสั่นเพิ่มขึ้น ทำให้การสั่นสะเทือนต่อคนขับลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่ความลึกในการไถเพิ่มขึ้น ทำให้การสั่นสะเทือนต่อคนขับเพิ่มขึ้น โดยความเร็วแทรกเตอร์ Low 1 ความถี่ในการสั่น 7 Hz และความลึกในการไถ 40 cm ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนต่อคนขับมากที่สุด ทั้งไถระเบิดดินดานชนิดสั่นที่ขา 2 ขา แบบใช้ระบบถ่ายทอดกำลังทางกลและแบบที่ใช้ระบบถ่ายทอดกำลังอุทกสถิต และพบว่า ความเร็วในการเคลื่อนที่ Low 2 ความถี่ในการสั่น 9 Hz และความลึกในการไถ 30 cm เป็นปัจจัยทดสอบที่เหมาะสม (optimum) และมีสมรรถนะการทำงานสูงสุดสำหรับไถระเบิดดินดาน โดยมีแรงฉุดลาก 13.01 kN ใช้กำลังรวม 18.13 kW มีพื้นที่การแตกตัวของดิน 2,744.73 cm^2 มีค่าความหนาแน่นมวลรวมสภาวะแห้งของดิน 1.2 g cm^{-3} เกิดการสั่นสะเทือนต่อคนขับเพียง 1.612 m s^{-2} มีประสิทธิภาพในการทำงาน 1.308 ไร่ต่อชั่วโมง ผลการควบคุมพบว่า การสั่นของขาไถเริ่มสั่นจาก 0 Hz (ไม่มีการสั่น) จนถึง 9 Hz โดยการควบคุมแบบ ฟัซซีมีผลตอบสนองรวดเร็ว โดยช่วงเวลา Response Time เท่ากับ 14 ms ช่วงเวลา Delay Time เท่ากับ 6 ms ช่วงเวลา Rise Time เท่ากับ 11 ms และช่วงเวลา Setting Time เท่ากับ 13 ms ไม่เกิดค่าพุ่งเกิน เมื่อทำการวัดความเร็วรอบที่เพลาขับลูกเบี้ยวโดยใช้เครื่องวัดความเร็วรอบมีค่า 540-543 rpm หรือ 9-9.05 Hz ตลอดการไถ

5. ข้อเสนอแนะ

การพิจารณาปัจจัยทดสอบที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการไถระเบิดดินดาน เป็นค่าเฉลี่ยเลขคณิตแบบถ่วงน้ำหนักที่ได้จากแบบสอบถามเกษตรกร และนักวิชาการเกษตรในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา จึงเหมาะกับการใช้พิจารณาปัจจัยทดสอบที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการไถระเบิดดินดานในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา และจังหวัดใกล้เคียง ซึ่งมีลักษณะของดินใกล้เคียงกัน ไม่สามารถนำไปพิจารณาในพื้นที่ที่ลักษณะดินมีความแตกต่างกันมากได้

6. เอกสารอ้างอิง

ธัญญา นิยมาภา และชัยรัตน์ รางแดง. 2539. ไถดินดานชนิดสั่น. รายงานการวิจัยและพัฒนาฉบับสมบูรณ์ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ประจำปี 2539, 76–95.

ธัญญา นิยมาภา พินิจ จิรัคคกุล ณรงค์ อุ่นคง วิชัย หมอยาดี ชัยรัตน์ รางแดง ศิริศักดิ์ เชิดเกียรติพล และนฤมล บุญกระจ่าง. 2549. เผยแพร่ไถดินดารชนิดสั่นที่ผลิตในประเทศไทยสู่เกษตรกร. รายงานการวิจัยและพัฒนาฉบับสมบูรณ์ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ประจำปี 2549, 36–78.

Kwanchai Sinthipsomboon, Issaree Hunsacharoonroj, Joseph Khedari, Watcharin Pongaen, and Pornjit Pratumsuwan. 2011. A Hybrid of Fuzzy and Fuzzy self-tuning PID Controller for Servo Electro-hydraulic System. Transactions of the IEEE 6, 220-225.

Mehta, C.R., Shyam, M., Singh, P. and Verma, R.N., 2000. Ride vibration on tractor implement system, Technical note. Applied Ergonomics 31, 323-328.

Niyamapa, T and V.M. Salokhe. 1993. Laboratory investigations into soil failure under vibratory tillage tools. Journal of Terramechanics 30(6), 395-403.

Rattana, Karoonboonyanan. 2009. Development of a vibratory subsoiler. Ph.D. Thesis: Asian Institute of Technology School of Environment Resource and Development Thailand