



การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการไถกลบวัชพืชด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง ร่วมกับวิธีการโมดิฟายวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง

Parameter Optimization for Soil Tillage and Weed Control Using Combined Response Surface Method and Modified Differential Evolution Method

ถนัดกิจ ศรีโชค^{1*}, ไชยา โฉมเฉลา², ระพีพันธุ์ ปีตาเคโส¹, สุรเจษฎ์ ก้อนจันทร์¹
Thanatkij Srichok^{1*}, Chaiya Chomchalao², Rapeepan Pitakaso¹, Surajet Khonjun¹

(Received: September 30, 2020; Revised: December 29, 2020; Accepted: January 13, 2021)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการค้นหาค่าพารามิเตอร์การทำงานที่ดีที่สุดของการไถแบบจานไถให้มีความกว้างของหน้าดินในการไถกลบวัชพืชมากที่สุด เพื่อใช้สำหรับการไถเตรียมดินในการเพาะปลูก วิธีที่ใช้ในการค้นหาค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ประกอบด้วย 4 ขั้นตอนคือ (1) การค้นหาจำนวนพารามิเตอร์และระดับพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของรถแทรกเตอร์ (2) ใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (RSM) ในการกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสม (3) วิธีการพื้นผิวตอบสนองร่วมกับโมดิฟายวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (RSM-MDE) เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม และ (4) ตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอน (3) ผลการทดลองพบว่าวิธีการ RSM-MDE สามารถปรับปรุงพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดของกรณีศึกษาครั้งนี้คือ มุมดิสก์ 45 องศา, มุมเอียง 19.34 องศา และความเร็ว 3 กม./ชม. ความกว้างของหน้าดินในการไถกลบวัชพืชเท่ากับ 139.20 เซนติเมตร ซึ่งมากกว่าวิธี RSM ที่มีความกว้างของหน้าดินในการไถกลบวัชพืช 137.44 เซนติเมตร สามารถแสดงให้เห็นว่าวิธีการ RSM-MDE สามารถปรับปรุงคุณภาพของการแก้ปัญหาได้ถึง 1.28% เมื่อเทียบกับ RSM ดั้งเดิม

คำสำคัญ: การจัดเตรียมที่ดิน จานไถ วิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง วิธีการพื้นผิวตอบสนอง

¹ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

¹Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University

²สาขาเทคโนโลยีอุตสาหการ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม

²Program in Industrial Technology, Faculty of Industrial Technology, Nakhon Phanom University

*Corresponding Author: Chaiya_npu@hotmail.com, thanatkij.s@ubu.ac.th



Abstract

This study presents a method to find the optimal operating parameters of a tractor disk plow that maximizes the width of soil tillage and weed control. The method used to find the parameters comprised of 4 steps including (1) identifying the number of interesting parameters and their levels, (2) determining the appropriate parameters using the RSM method, (3) finding the optimal parameters using RSM-MDE and (4) checking results of the third procedure. The computational results showed that the most effective optimal parameters were improved by the RSM-MDE method with disk angle of 45 degrees, a tilt angle of 19.34 degrees, and speed of 3 km./hr. The width of soil tillage and weed control was 139.20 cm. which was wider than of the RSM method (137.44 cm). This result indicated that the RSM-MDE method can provide better solution by 1.28% than the original RSM.

Keywords: Land preparation, Disk plow, Differential evolution, Response surface method

บทนำ

ประเทศไทยมีพื้นที่การเพาะปลูกข้าวและพืชไร่เฉลี่ย 65% ของเนื้อที่ใช้ประโยชน์ทางการเกษตร (Office of Agricultural Economics, 2017) ประชากรส่วนใหญ่ของประเทศไทยประกอบอาชีพเกี่ยวกับการเกษตร เดิมทีการทำเกษตรของเกษตรกรไทยเป็นการเกษตรเพื่อยังชีพเป็นส่วนใหญ่ คือการเพาะปลูกพืชหรือเลี้ยงสัตว์เพื่อใช้สำหรับบริโภคเป็นหลัก ไม่ได้มุ่งเน้นการผลิตเพื่อจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ ประชากรส่วนใหญ่ไม่ค่อยได้รับความรู้และเทคโนโลยีสมัยใหม่ทางด้านการเกษตร ยังคงทำการเกษตรแบบดั้งเดิมคือใช้แรงงานคน สัตว์และอาศัยธรรมชาติเป็นหลัก ซึ่งมีผลทำให้การทำเกษตรไม่ทันตามฤดูกาล ผลผลิตที่ได้มีปริมาณและคุณภาพค่อนข้างต่ำ อย่างไรก็ตามวิวัฒนาการทางการเกษตรนั้นเกิดขึ้นและได้ดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง ซึ่งก็มีลักษณะที่คล้าย ๆ กันทั่วโลก เริ่มจากการใช้เครื่องทุ่นแรงแบบง่าย ๆ ที่มนุษย์สร้างขึ้นเพื่อรองรับกับการใช้แรงงานของคน เช่น จอบ คราด เป็นต้น จากนั้นได้พัฒนาเครื่องมือหรือเครื่องทุ่นแรงให้ใช้กับสัตว์ทำให้การทำงานมีประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงเกิดการพัฒนาเครื่องทุ่นแรงอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะในยุโรปและทวีปอเมริกา ที่ออกแบบเครื่องมือไถเตรียมดิน สามารถจำแนกได้หลายรูปแบบไม่ว่าจะเป็นจำแนกตามลักษณะการทำงานและลักษณะของเครื่องมือจานไถ (Disk plow) ถือเป็นเครื่องมือไถเตรียมดินชิ้นแรก ที่ใบมีดมีลักษณะเว้าโค้ง สามารถไถพลิกกลบวัชพืชได้ดี ในการศึกษาครั้งนี้เราจะพิจารณาการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ของจานไถให้มีความเหมาะสม โดยปัจจัยในการควบคุมประสิทธิภาพของจานไถขึ้นอยู่กับปัจจัย 1) สภาพของดิน ความหนาแน่นของดิน ความชื้นของดิน 2) มุมจานไถ มุมใบ รัศมีของความโค้งของ



งานไถ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของงานไถ และ 3) การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ ความเร็ว ความลึก และความกว้างของหน้าดิน จากการศึกษาของ Gill & Berg (1967) และ O'Dogherty, Godwin, Hann, & Al-Ghazal (1996) เรื่องผลของรูปร่างงานไถที่ส่งผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างพื้นผิวสัมผัสของงานไถกับดิน ซึ่งส่งผลต่อขนาดแรงกระทำระหว่างดินกับงานไถ ผลการศึกษาพบว่ามุมงานไถ และมุมไถ ขนาดงานไถ และความลึกการทำงาน เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อพื้นที่รับแรงของงานไถ โดยเฉพาะมุมงานไถและความลึกในการทำงาน Ahmadi & Mollazade (2009) ได้ศึกษาความลึกของความชื้นในดินที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของเมล็ดพืช และ Abdalla, Mohamed, El Naim, El Shiekh, & Zaied (2014) ศึกษาผลกระทบของแผ่นดิสก์และมุมเอียงของแผ่นงานไถที่ไถพรวนต่อสมรรถนะของรถแทรกเตอร์ภายใต้ดินเหนียว โดยใช้มุมงานไถและมุมไถโดยศึกษา (1) ผลกระทบของมุมงานไถและมุมเอียงต่อความสามารถในการทำงานเชิงพื้นที่ (2) ผลกระทบของมุมงานไถและเอียงที่มีต่อประสิทธิภาพการทำงานของแทรกเตอร์ (3) ผลกระทบของมุมงานไถและมุมเอียงของล้อหลัง (4) ผลกระทบของงานไถและมุมเอียงต่อการใช้เชื้อเพลิงรถแทรกเตอร์ (5) ผลกระทบของดิสก์และมุมเอียงกับความกว้างของหน้าตัด และ (6) ผลกระทบของงานไถและมุมเอียงต่อความลึกของการไถพรวน Naderloo, Alimadani, Akram, Javadikia, & Khanghah (2009) พยายามศึกษาผลกระทบเครื่องมือไถเตรียมดิน คือ ไถหัวหมู, งานไถ, ไถตัว ต่อความเร็วและความลึกที่มีผลต่อแรงกระทำบนพื้นดิน

สำหรับการเตรียมการเพาะปลูก Ranjbarian, Askari, & Jannatkhah (2017) ได้เลือกเครื่องมือไถเตรียมดินแบบไถงานมาทำการศึกษาด้วยการหาค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการใช้เครื่องมือไถเตรียมดินแบบไถงาน ด้วยการเลือกใช้วิธีการ Response surface methodology (RSM) ในการหาค่าที่เหมาะสม การศึกษาครั้งนี้ใช้อัลกอริทึม Differential evolution algorithm (DE) (Storn & Price, 1997) เป็นหนึ่งในเทคนิคที่มีประสิทธิภาพที่สุดที่นำมาประยุกต์ใช้กับการเพิ่มประสิทธิภาพอย่างต่อเนื่อง จึงถูกนำไปใช้ในการจัดการการผลิต (Pitakaso, 2015; Sethanan & Pitakaso, 2016) กระบวนการผลิต (Gaitonde et al., 2017; Nee, Saad, Nor, Zakaria, & Baharudin, 2018) และการขนส่ง (Pitakaso & Sethanan, 2019) และมีการพัฒนาวิธีการ Modify differential evolution (MDE) มาประยุกต์กับวิธีการพื้นผิวดอปสนอง มีขั้นตอน 5 ขั้นตอน 1) Initial population 2) Mutation process 3) Recombination process 4) Trial vector transition process และ 5) Selection (Srichok, Pitakaso, Sethanan, Sirirak, & Kwangmuang, 2020)

จากวรรณกรรมที่กล่าวถึงข้างต้น ในงานวิจัยนี้จึงใช้วิธีการพื้นผิวดอปสนองร่วมกับโมดิฟายวิวิธนาการโดยใช้ผลต่าง (RSM-MDE) นำมาหาค่าพารามิเตอร์ของมุมงานไถ มุมไถ และความเร็วของรถแทรกเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้เป็นประโยชน์ในการใช้งานเครื่องมือไถเตรียมดินแบบไถงาน ให้มีความกว้างของหน้าดินในการไถกลับวัชพืชมากที่สุด



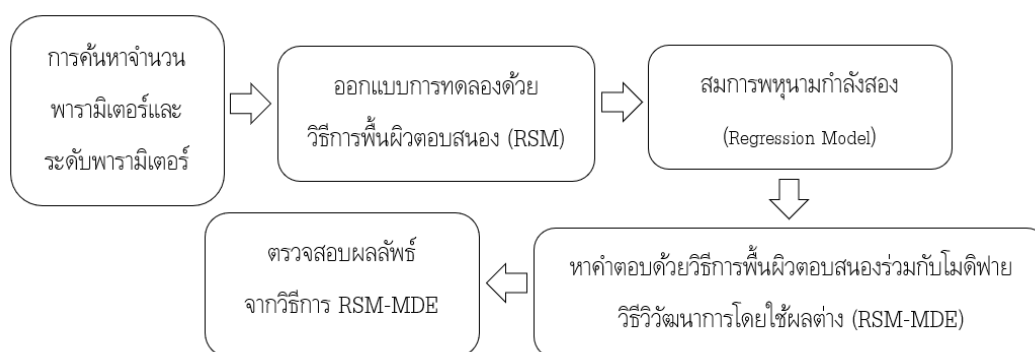
วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและพัฒนาวิธีการพื้นผิวตอบสนองร่วมกับวิธีการโมดิฟายวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างในการหาค่าพารามิเตอร์สำหรับการปรับตั้งมุมจานไถ มุมไถ และความเร็วของรถแทรกเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการไถกลบวัชพืชให้ได้ความกว้างของหน้าดินมากที่สุดในการเพาะปลูกในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

2. เพื่อนำผลการวิจัยที่ได้ไปใช้เป็นข้อมูลในการเลือกใช้ในการปรับตั้งมุมจานไถ มุมไถ และความเร็วของรถแทรกเตอร์ให้เหมาะสมสำหรับเกษตรกรในการไถกลบวัชพืช

วิธีการวิจัย

การวิจัยในนี้จะกล่าวถึงวิธีการดำเนินงานวิจัยเรื่องการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการไถกลบวัชพืชด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนองร่วมกับวิธีการโมดิฟายวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง เพื่อเป็นข้อมูลในการเลือกใช้ในการปรับตั้งมุมจานไถ มุมไถ และความเร็วของรถแทรกเตอร์ให้เหมาะสมสำหรับเกษตรกรในการไถกลบวัชพืช มีวิธีการดำเนินการวิจัยดังนี้ (1) การค้นหาจำนวนพารามิเตอร์และระดับพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของรถแทรกเตอร์ (2) ใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (RSM) ในการกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสม (3) วิธีการพื้นผิวตอบสนองร่วมกับโมดิฟายวิวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (RSM-MDE) เพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม และ (4) ตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอน (3) แสดงกรอบแนวคิดดังภาพที่ 1

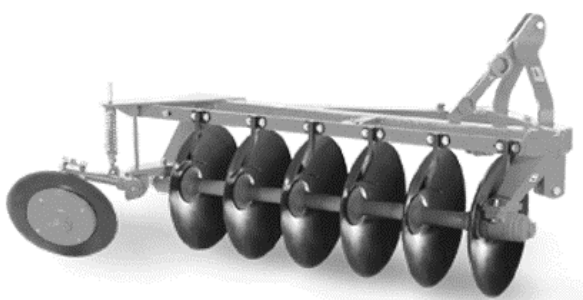


ภาพที่ 1 กรอบแนวคิดการวิจัย



1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ผู้วิจัยเลือกใช้จานไถ (Disk plows) ซึ่งมีจำนวนจานไถ 6 จานไถ เป็นจานไถแบบมาตรฐาน (Standard disk plow) ดังภาพที่ 2 ในประเทศไทยไถนุกเบิกเป็นที่นิยมมากเพราะสามารถไถดินได้ทุกประเภท ในงานวิจัยนี้ได้ใช้จานไถมีขนาดแผ่นจาน 24 นิ้ว (610 มม.) และใช้รถแทรกเตอร์แรงม้า 39 - 57 HP สำหรับการทดสอบเพื่อหาความกว้างของหน้าดินในการไถกลบวัชพืช ในพื้นที่ 1 ไร่ต่อการทดลอง



ภาพที่ 2 จานไถเป็นแบบมาตรฐาน (Standard disk plow)

2. วิธีการหาคำตอบพื้นผิวคำตอบ (Response surface method: RSM)

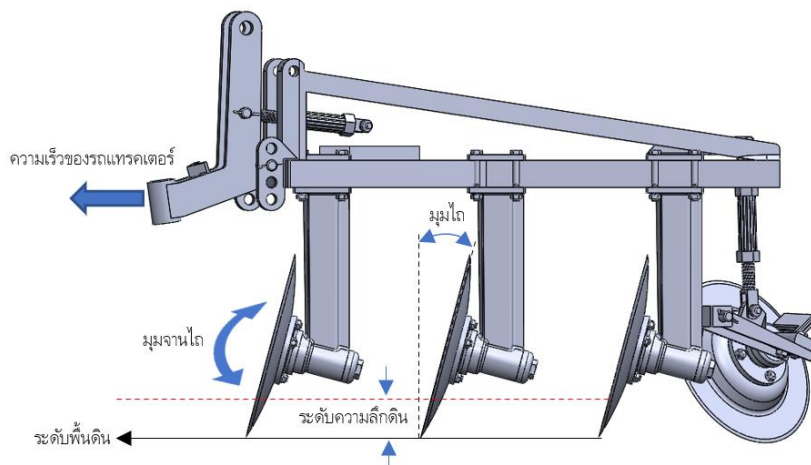
งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง (Response surface method: RSM) ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง (Central composite design: CCD) ซึ่งเป็นการออกแบบที่ทุกระดับของแต่ละปัจจัยอยู่ห่างจากจุดกึ่งกลาง (Center) ของการออกแบบเท่ากัน และทำซ้ำที่จุดกึ่งกลาง แต่ละปัจจัยจะมีระดับการทดลอง 3 ระดับ (-1, 0, +1) นอกจากนี้การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง การวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยวิธีพื้นผิวตอบสนองสมการพหุนามกำลังสอง (Second-order polynomial equation) ซึ่งจะอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลตอบสนอง (ความกว้างของหน้าดินในการไถกลบวัชพืช) ได้จากการทำนายและค่าตัวแปรอิสระของกระบวนการไถกลบวัชพืช โดยที่สมการพหุนามกำลังสองดังกล่าวแสดงดังสมการที่ 1

$$y = b_0 + \sum_i^k b_i x_i + \sum_i^k b_{ii} x_i^2 + \sum_i \sum_j b_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (1)$$

โดย Y คือค่าผลตอบสนอง (ความกว้างของหน้าดินในการไถกลบวัชพืช) b_0, b_i, b_{ii} และ b_{ij} คือ ค่าคงที่, สัมประสิทธิ์ของพจน์ตัวแปรกำลังหนึ่ง, สัมประสิทธิ์ของพจน์, ตัวแปรกำลังสองและสัมประสิทธิ์ของพจน์, ตัวแปรร่วมตามลำดับ x_i และ x_j คือ ตัวแปรอิสระ และ ε คือ ค่าความผิดพลาด (Myers, Montgomery, & Anderson-Cook, 2002) การออกแบบนี้ใช้โปรแกรม Minitab ในการสร้าง



แบบจำลองการทดลองและการวิเคราะห์ปัญหา การออกแบบทดลองมีจำนวนการทดลอง 20 การทดลอง โดยค่าพารามิเตอร์ 3 ปัจจัย ซึ่งปัจจัยประกอบด้วย มุมจานไถ, มุมไถ และความเร็วของรถแทรกเตอร์ แสดงดังภาพที่ 3 และค่าแต่ละปัจจัยที่ใช้แสดงดังตารางที่ 1



ภาพที่ 3 ตำแหน่งค่าพารามิเตอร์ในการทดลอง

ตารางที่ 1 การกำหนดตัวแปรสำหรับการทดลอง RSM แบบ CCD ด้วยโปรแกรม Minitab

ปัจจัย/ระดับ	-1	0	1
มุมจานไถ (องศา)	42	43.5	45
มุมไถ (องศา)	15	20	25
ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	3	5.5	8
ความลึก (เซนติเมตร)		25	

3. วิธีการโมดิฟายวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (Modify differential evolution: MDE)

มีขั้นตอนที่สำคัญอยู่ 5 ขั้นตอน คือ 1) การสร้างคำตอบเริ่มต้น (Number of population: NP) 2) ขบวนการกลายพันธุ์ (Mutation) 3) ขั้นตอนทางพันธุกรรม (Recombination) 4) กระบวนการเปลี่ยนแปลงเวกเตอร์ (Vector transition process) และ 5) การคัดเลือก (Selection) ในแต่ละขั้นตอนสำหรับการแก้ปัญหาการหาให้มีความกว้างของหน้าดินในการไถกลบวัชพืชมากที่สุดในการไถวันออกเฉียงเหนือ มีวิธีการดังนี้

1) การสร้างคำตอบเริ่มต้น (Number of Population: NP)

เป็นการตั้งกลุ่มเริ่มต้นของประชากรที่จะวิวัฒนาการ โดยประชากรที่ได้รับการคัดเลือกมาจะเข้าสู่กระบวนการ Mutation และ Recombination จะได้กลุ่มประชากรที่กลายพันธุ์ออกมา จากนั้นทำการเลือกสายพันธุ์ที่ดีที่สุดเป็นประชากรรุ่นถัดไป ตัวอย่างดังตารางที่ 2



ตารางที่ 2 การสร้างคำตอบเริ่มต้นด้วยตัวเลขสุ่ม

ปัจจัย/ระดับ	NP1	NP2	NP3	NP4	NP5
มุมงานไถ (องศา)	42	43	45	43.5	45
มุมไถ (องศา)	20	18	25	17	16
ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	3	3.8	4	8	7

2) ขบวนการกลายพันธุ์ (Mutation)

เริ่มต้นที่การวิวัฒนาการที่ได้กลายพันธุ์ และรวบรวมเวกเตอร์เป้าหมายเพื่อผลิตเวกเตอร์การกลายพันธุ์ ในเวกเตอร์เป้าหมายแต่ละตัวคือ $X_{i,G}$ ในรุ่น G , เวกเตอร์การกลายพันธุ์ คือ $V_{i,G}$ ได้ถูกสร้างขึ้นตามสมการ โดยทางผู้วิจัยใช้สมการในการหาค่ามิวแทนท์เวกเตอร์ 2 สมการ ดังสมการที่ 2 และ 3

$$DE/rand/1 \ V_{i,G+1} = X_{r1,G} + F(X_{r2,G} - X_{r3,G}) \quad (2)$$

$$DE/best/2 \ V_{i,G+1} = X_{best,G} + F(X_{r1,G} - X_{r2,G}) + F(X_{best2,G} - X_{r3,G}) \quad (3)$$

โดยที่ $X_{i,G}$ คือเวกเตอร์เป้าหมาย $V_{i,G+1}$ คือเวกเตอร์ที่กลายพันธุ์และ $X_{r1,G}, X_{r2,G}, X_{r3,G}$ เป็นเวกเตอร์ที่เราสุ่มเลือกจากเวกเตอร์เป้าหมาย $X_{best,G}$ คือ เวกเตอร์ที่ดีที่สุดที่พบในปัจจุบัน F เป็นปัจจัยในการปรับขนาดซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ปรับเปลี่ยนได้เองโดยมีค่าตั้งแต่ 0-2 ในการทดลองของเราในตอนแรกตั้งค่า F ไว้ที่ 0.8 และมีการเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม โดย ± 0.05 สำหรับเวกเตอร์แต่ละตัว ค่า F ของเวกเตอร์ที่ดีที่สุดในการทำซ้ำปัจจุบันถูกตั้งค่าเป็นค่า F ปัจจุบันซึ่งใช้เป็นค่า F พื้นฐานที่จะปรับโดยเวกเตอร์ในการทำซ้ำครั้งถัดไป ตัวอย่างของ วิธีคำนวณเวกเตอร์กลายพันธุ์โดยใช้สมการ (4) และ (5) แสดงไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ตัวอย่างของ วิธีคำนวณเวกเตอร์กลายพันธุ์ของ NP1

Factor/Vectors	$X_{r1,G}$	$X_{r2,G}$	$X_{r3,G}$	DE/rand/1	DE/best/2
มุมงานไถ (องศา)	42	43	45	45	43
มุมไถ (องศา)	20	18	25	16	20
ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	3	3.8	4	7	7.8



3) ขั้นตอนทางพันธุกรรม (Recombination)

กระบวนการนี้จะสร้างเวกเตอร์การทดลอง ($U_{i,G+1}$) โดยใช้สมการที่ 4 โดยที่ CR เป็นพารามิเตอร์ที่ปรับเปลี่ยนได้เองซึ่งในตอนแรกตั้งค่าเป็น 0.6 และใช้วิธีเดียวกันในการปรับจากค่า CR ปัจจุบันเป็นวิธีการปรับค่า F และ $\text{rand}_{i,j}$ เป็นตัวเลขสุ่ม

$$U_{i,G+1} = \begin{cases} V_{i,j,G+1} & \text{if } \text{rand}_{i,j} \leq \text{CR or } j = I_{\text{rand}} \\ X_{i,j,G} & \text{if } \text{rand}_{i,j} > \text{CR or } j = I_{\text{rand}} \end{cases} \quad (4)$$

หลังจากกระบวนการรวมกันใหม่กระบวนการใหม่จะถูกนำไปใช้กับ DE ดังเดิมและวิธีนี้ใช้เพื่อสร้างเวกเตอร์ทดลองลำดับที่สอง (2nd-Tr) 2nd-Tr จะถูกสร้างขึ้นจากหนึ่งในสองวิธีซึ่งคือกระบวนการเปลี่ยนเวกเตอร์

4) กระบวนการเปลี่ยนแปลงเวกเตอร์ (Trial vector transition process)

กระบวนการเปลี่ยนแปลงเวกเตอร์ (Trial vector transition process) จะเป็นการวนตัวเลข แล้วนำตัวเลขที่ทำการวนไปแทนในตำแหน่งที่ถูกสลับ ดังตัวอย่าง ได้ทำการสุ่มปัจจัย 2 ค่า ได้ค่า มุมจานไถ และ ความเร็วของรถแทรกเตอร์ จากนั้นนำค่าตัวเลขวนตำแหน่งที่โดยค่าที่สุ่ม เช่น มุมจานไถ NP 3 = 45, NP 4 = 43.5 และ NP 5 = 42 ทำการวนในปัจจัย จะได้ NP 3 = 452 NP 4 = 45 และ NP 5 = 43.5 แสดงไว้ในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ตัวอย่างของการเปลี่ยนแปลงเวกเตอร์

Original vector					
Factor	NP1	NP2	NP3	NP4	NP5
มุมจานไถ (องศา)	42	43	45	43.5	42
มุมไถ (องศา)	20	18	25	17	20
ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	3	3.8	4	8	3
New trial vector					
Factor	NP1	NP2	NP3	NP4	NP5
มุมจานไถ (องศา)	42	43	42	45	43.5
มุมไถ (องศา)	20	18	25	17	20
ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	3	8	3.8	4	3



5) การคัดเลือก (Selection)

กระบวนการนี้ใช้เพื่อสร้างเวกเตอร์เป้าหมายสำหรับการทำซ้ำครั้งต่อไปของการจำลอง สมการที่ 5 จะถูกใช้เพื่อดำเนินการตามขั้นตอนนี้ เวกเตอร์เป้าหมายของการทำซ้ำครั้งต่อไปจะเท่ากับเวกเตอร์ทดลองหรือเวกเตอร์เป้าหมายปัจจุบันขึ้นอยู่กับเวกเตอร์ที่ใช้พลังงานต่ำกว่า

$$X_{i,j,G+1} = \begin{cases} U_{i,j,G} & \text{if } f(U_{i,j,G}) \leq f(X_{i,j,G}) \\ X_{i,j,G} & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (5)$$

จากนั้นปรับคำตอบในแต่ละ NP เพื่อโอกาสที่จะได้คำตอบที่ดีขึ้น พบคำตอบ (วัตถุประสงค์) จากการคำนวณเปรียบเทียบและเลือกคำตอบที่ดีที่สุดจากประชากรทั้งหมด

ผลการวิจัย

1. การหาความกว้างของหน้าดินในการไถกลบวัชพืช

ความกว้างในการไถกลบดินมีผลต่อการเพาะปลูก ซึ่งจะทำให้วัชพืชเติบโตได้ ความกว้างในการไถกลบ จึงมีความจำเป็นในการเพาะปลูก ดังนั้นการหาความกว้างหน้าดินในการไถกลบหาได้จากการทดลอง ผู้วิจัยได้เลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจานไถ มีค่าเท่ากับ 61 เซนติเมตร ใช้เป็นค่าการหาความกว้างหน้าดินในการไถกลบ ผลการทดลองดังตารางที่ 5

2. สมการถดถอยและการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน

ผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมของตัวแบบจำลองเพื่อหารูปแบบสมการที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้ได้แสดงข้อมูลการวิเคราะห์ไว้ในตารางที่ 6 พบว่ารูปแบบเชิงเส้น (Linear) กำลังสอง (Quadratic) ได้รับการยอมรับให้เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เนื่องจากค่า P-value ของรูปแบบสมการทั้งมีค่าน้อยกว่า 0.05 ความเหมาะสมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากค่าความสมรูป (Lack of fit) พบว่ามีความเหมาะสมกับรูปแบบเชิงเส้นตรงและเส้นโค้งอย่างมีนัยสำคัญโดยมีค่า P-value มากกว่า 0.05. ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R²) พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจจากอิทธิพลของตัวแปร เท่ากับ 90.73% ส่วนอีก 9.17% เป็นผลมาจากตัวแปรอื่นที่ไม่สามารถควบคุมได้ แสดงว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองสามารถเข้ากันได้กับข้อมูลที่ได้จากการทำนายของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และยังบ่งบอกว่าผลของ ค่าความกว้างของหน้าดินในการไถกลบวัชพืชที่ได้เป็นผลหรือมีอิทธิพลจากตัวแปร ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่สูง แสดงถึงความแม่นยำในการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปใช้ในการทำนายผลลัพธ์ โดยปกติแล้วค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจจะมีค่ามากกว่า 70% (Flynn, 2003) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่มีการปรับแก้ (Adjusted R²) พบว่ามีค่าเท่ากับ 82.38% ส่วนอีก 17.62% มีความผันแปรจำนวนน้อยมากที่ไม่



สามารถอธิบายได้ ซึ่งยืนยันให้เห็นได้ว่ารูปแบบจำลองการถดถอยที่ได้ เป็นรูปแบบที่เหมาะสม
แสดงผลในตารางที่ 6

ตารางที่ 5 ผลการทดลองหาความกว้างหน้าดินในการไถกลบวัชพืช

Std Order	Run Order	มุมจานไถ (องศา)	มุมไถ (องศา)	ความเร็ว (กม/ชม.)	ความลึก (ชม.)	ความกว้าง (ชม.)
1	1	42.0	15	3.0	25	110
2	2	45.0	15	3.0	25	132
3	3	42.0	25	3.0	25	110
4	4	45.0	25	3.0	25	128
5	5	42.0	15	8.0	25	110
6	6	45.0	15	8.0	25	115
7	7	42.0	25	8.0	25	109
8	8	45.0	25	8.0	25	109
9	9	42.0	20	5.5	25	120
10	10	45.0	20	5.5	25	125
11	11	43.5	15	5.5	25	110
12	12	43.5	25	5.5	25	108
13	13	43.5	20	3.0	25	126
14	14	43.5	20	8.0	25	109
15	15	43.5	20	5.5	25	112
16	16	43.5	20	5.5	25	113
17	17	43.5	20	5.5	25	119
18	18	43.5	20	5.5	25	115
19	19	43.5	20	5.5	25	120
20	20	43.5	20	5.5	25	117



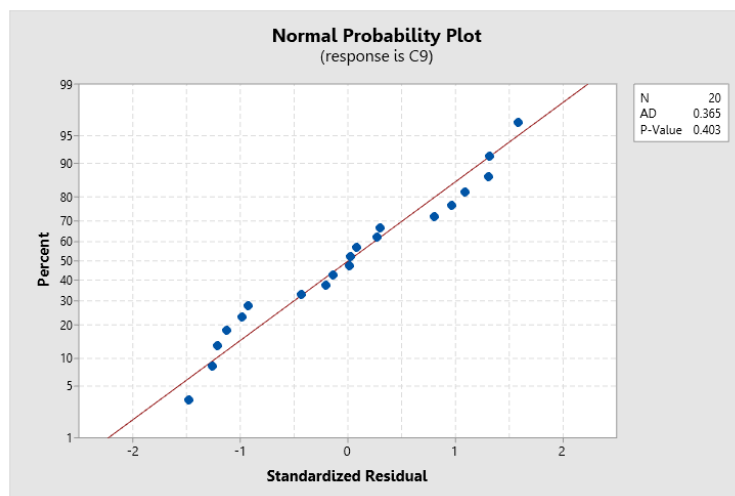
ตารางที่ 6 ค่า ANOVA ผลตอบสนอง ความกว้างของหน้าดินในการไถกลบวัชพืชโดยใช้ซอฟต์แวร์ Minitab

Source of Variation	DF	Sum of Squares	Mean Squares	F-Value	P-Value
Model	9	911.40	101.266	10.87	0.000
Linear	3	558.50	186.167	19.99	0.000
Square	3	188.52	62.841	6.75	0.009
2-Way Interaction	3	164.38	54.792	5.88	0.014
Error	10	93.15	9.315		
Lack-of-Fit	5	41.15	8.230	0.79	0.598
Pure Error	5	52.00	10.400		
Total	19	1004.55			
$R^2 = 90.73\%$; Adjusted $R^2 = 82.38\%$					

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าแบบจำลองแบบกำลังสอง (Quadratic model) ดังแสดงในสมการที่ 1 มีความเหมาะสมสำหรับเป็นตัวแทนจำลองที่จะใช้ในการทำนายค่าความกว้างของหน้าดินในการไถกลบวัชพืช และผลการทดลองในตารางที่ 5 โดยโปรแกรม Minitab สร้างสมการถดถอยเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรต่างๆ กับค่าผลตอบสนองจะได้รูปแบบสมการที่ 6

$$\text{width} = 4428 - 215.7 D + 18.58 T + 47.6 S + 2.626 D^2 - 0.3036 T^2 + 0.145 S^2 - 0.150 D \times T - 1.167 D \times S - 0.0300 T \times S \quad (6)$$

การวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบค่าส่วนตกค้างปกติพบว่าข้อมูลค่าความน่าจะเป็นปกติ (Normal probability) มีลักษณะการกระจายตัวอยู่ในแนวเส้นตรงและใกล้เคียงกับค่าของเส้นตรง จึงสรุปได้ว่าการแจกแจงแบบปกติ เป็นอิสระไม่ขึ้นอยู่กับค่าที่ถูกทำนายและไม่มีชุดการทดลองที่แสดงค่าความผิดพลาดอย่างมีนัยสำคัญ ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความกว้าง (ชม.)

สามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงเป็นแบบปกติ โดยค่า p -Value ที่ได้ 0.403 มีค่ามากกว่า 0.05 ข้อมูลมีความน่าเชื่อถือและมีความพอเพียง

3. การกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในวิธีการพื้นผิวตอบสนองร่วมกับโมดิฟายวิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (RSM-MDE) ด้วยโปรแกรม Dev-C++

ในการหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนองร่วมกับโมดิฟายวิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (RSM-MDE) เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ให้ได้ค่าความกว้างของหน้าดินในการไถกลับวัชพืชมากที่สุด ผู้วิจัยได้พัฒนาเขียนโปรแกรมวิธีการ RSM-MDE โดยใช้โปรแกรม DEV C ++ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมที่สุดภายใต้ข้อจำกัดที่กำหนดในสมการถดถอย (Regression model) ดังนั้นผู้วิจัยจึงกำหนดสมการวัตถุประสงค์และข้อจำกัดที่กำหนดใช้สำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ ดังสมการที่ 7-10

Objective function

$$\text{width} = 4428 - 215.7 X_1 + 18.58 X_2 + 47.6 X_3 + 2.626 X_1^2 - 0.3036 X_2^2 + 0.145 X_3^2 - 0.150 X_1 \times X_2 - 1.167 X_1 \times X_3 - 0.0300 X_2 \times X_3 \quad (7)$$

Constraints

$$42 \text{ Deg} \leq X_1 \leq 45 \text{ Deg} \quad (8)$$

$$15 \text{ Deg} \leq X_2 \leq 25 \text{ Deg} \quad (9)$$

$$3 \text{ km/h} \leq X_3 \leq 8 \text{ km/h} \quad (10)$$



โดย X1 คือ มุมงานไถ (D) หน่วย องศา X2 คือ มุมไถ (T) หน่วย องศา X3 คือ ความเร็ว (S) หน่วย กิโลเมตรต่อชั่วโมง

ในการหาค่าพารามิเตอร์ได้ใช้วิธีการ DE แบบดั้งเดิมร่วมกับขั้นตอน Trial vector transition process จะถูกนำไปใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ โดยรายละเอียดของวิธีการที่เสนอแสดงไว้ในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 วิธีการอัลกอริธึมในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

MDE-1	DE/rand/1
MDE -2	DE/rand/1 and Trial vector transition process
MDE -3	DE/best/2
MDE -4	DE/best/2 and Trial vector transition process

4. ผลการทดลองจากวิธีการฟื้นฟูผิวดินของร่วมกับโมดิฟายวิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (RSM-MDE)

การเพิ่มประสิทธิภาพในการหาคำตอบตามรูปแบบวิธีการฟื้นฟูผิวดินของร่วมกับโมดิฟายวิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (RSM-MDE) ผู้วิจัยออกแบบให้มีการปรับค่า F แบบอัตโนมัติ ซึ่งค่าคงที่ระหว่าง 0.3 ถึง 2 และ ในสมการที่ 2 และ 3 มีการออกแบบให้มีการปรับค่า Cr ซึ่งค่าคงที่ระหว่าง 0.1 ถึง 0.9 ในสมการที่ (4) ทั้งค่า F และ CR มีการเพิ่มลดระดับทีละ 0.05 ในขั้นตอนกระบวนการมีเวตซ์และขั้นตอนการแลกเปลี่ยนค่าในฟังก์ชันฟิต และในส่วนของการกำหนดจำนวนประชากรในการสร้างคำตอบ (NP) และจำนวนการวนซ้ำหาคำตอบ (Iteration) ในการปรับค่าทั้งสองให้มีความเหมาะสมต่อการหาผลลัพธ์คำตอบและการใช้ทรัพยากรจากการประมวลผลของคอมพิวเตอร์ เราได้กำหนดจำนวนประชากรในการสร้างคำตอบเท่ากับ 50 และจำนวนการวนซ้ำหาคำตอบเท่ากับ 100 โดยนำผลการทดลองแสดงค่าความกว้างของหน้าดินในการไถกลบวัชพืช ดังตารางที่ 8 และค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดแสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 8 ผลการทดลองวิธีการแก้ปัญหาด้วยวิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง โดยกำหนดค่า NP 50 Iteration 100 รอบ

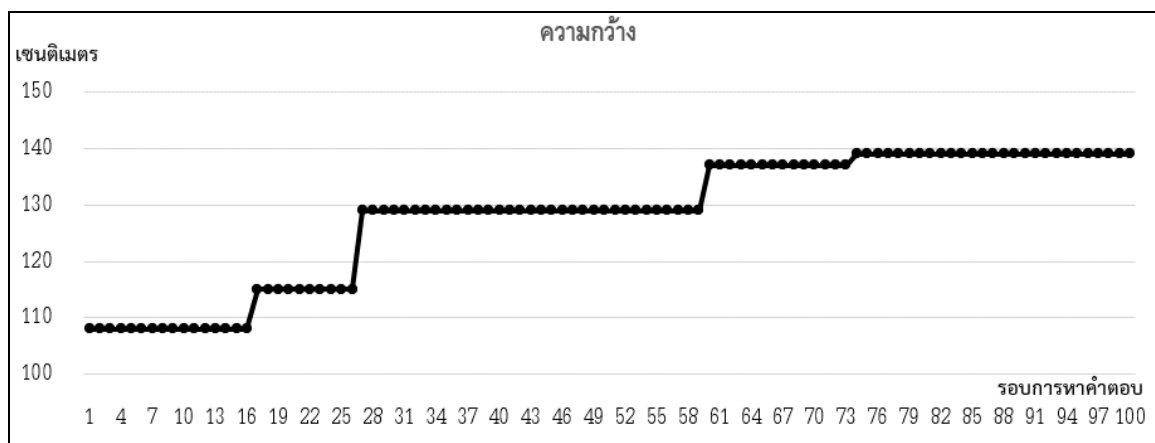
ผลการทดลอง (เซนติเมตร)			
MDE-1	MDE-2	MDE-3	MDE-4
135	137.16	138.70	139.20



ตารางที่ 9 ค่าเอาต์พุตของ RSM-MDE เกี่ยวกับพารามิเตอร์กระบวนการอินพุต

เงื่อนไข		หน่วย	ผล
ค่าพารามิเตอร์	มุมจานไถ	องศา	45
	มุมไถ	องศา	19.34
	ความเร็ว	กิโลเมตร/ชั่วโมง	3
	ความลึก	ซม.	25
ค่าที่สูงที่สุด	ความกว้าง	เซนติเมตร	139.20

จากตารางที่ 8 การหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการ RSM-MDE สามารถค้นหาค่าความกว้างของหน้าดินในการไถกลับวัชพืชมากที่สุดจะแสดงในภาพที่ 5 โดยวิธีการ RSM-MDE สร้างคำตอบที่ดีที่สุดคือ 139.20 เซนติเมตร ในการทำซ้ำที่ 100



ภาพที่ 5 การค้นหาค่าความกว้างของหน้าดินในการไถกลับวัชพืชมากที่สุด

จากตารางที่ 5 ค่าสูงสุดที่ได้จากการทดลอง (แสดงในหัวข้อ 1) คือ 132 เซนติเมตร ค่าการคาดการณ์ คือ 137.44 เซนติเมตร และวิธีการ RSM-MDE เราได้ค่าความกว้างของหน้าดินในการไถกลับวัชพืช คือ 139.20 เซนติเมตร พารามิเตอร์และค่าความกว้างของหน้าดินในการไถกลับวัชพืชแต่ละวิธีแสดงไว้ในตารางที่ 10



ตารางที่ 10 ผลค่าความกว้างของหน้าดินในการไถกลบวัชพืชแต่ละวิธีการ

วิธีการปัจจัย	X1	X2	X3	ความกว้าง (ชม.)
Experimental	45	15	3	132
RMS-optimizer	45	21.74	3	137.44
RSM-MDE	45	19.34	3	139.20

5. ตรวจสอบผลที่ได้รับจากขั้นตอนที่ (3) และ (4) โดยทดสอบกับพื้นที่เพาะปลูก

หลังจากที่เราได้รับพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจาก RSM-DE ในตารางที่ 9 เพื่อตรวจสอบว่าค่าของพารามิเตอร์ที่ RSM-MDE ที่สร้างขึ้นสามารถสร้างค่าความกว้างของหน้าดินในการไถกลบวัชพืชได้เท่ากับที่คำนวณหรือไม่ จึงทำการทดสอบและเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลลัพธ์ RSM-MDE ที่คำนวณได้ โดยทำการทดลอง 12 ครั้งและมีการบันทึกความกว้างไถกลบวัชพืชโดยเฉลี่ยดังแสดงในตารางที่ 11 และภาพที่ 6

ตารางที่ 11 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าการทดลองกับค่า RSM-MDE

ปัจจัย	Result	ความกว้าง (ชม.)		%difference
		Experiment	RSM-MDE	
มุมจานไถ (องศา)	45			
มุมไถ (องศา)	19.34	132	139	5.30
ความเร็ว (กม./ชม.)	3			

$$\%diff = \frac{width^{Exp} - width^{RSM-MDE}}{width^{Exp}} \times 100\% \quad (10)$$

โดย ตัวแปร $width^{Exp}$ คือ ค่าความกว้างจากผลทดลอง และ $width^{RSM-MDE}$ คือ ค่าความกว้างผลวิธีการ RSM-MDE



ภาพที่ 6 ตัวอย่างหลังการทดสอบการไถกลบวัชพืชที่ได้จากการใช้พารามิเตอร์จาก RSM-MDE

อภิปรายผล

การหาค่าความกว้างของหน้าดินในการไถกลบวัชพืชได้ปรับปรุงวิธีพัฒนาการโดยผลต่าง (DE) ซึ่งเป็นหนึ่งในเทคนิคที่มีประสิทธิภาพที่สุดที่นำมาประยุกต์ใช้กับการเพิ่มประสิทธิภาพอย่างต่อเนื่อง โดยวิธีการ DE มีขั้นตอน 4 ขั้นตอน ได้แก่ 1) Initial population 2) Mutation Process 3) Recombination Process และ 4) selection ผู้วิจัยทำการเพิ่มขั้นตอน Trial vector re-production process ซึ่งอยู่ระหว่าง Recombination process กับ selection ดังนั้นจะมีขั้นตอน 5 ขั้นตอน ได้แก่ 1) Initial population 2) Mutation Process 3) Recombination Process 4) Trial vector transition process ทำการปรับปรุงกระบวนการ Recombination ออกแบบให้มีกระบวนการเปลี่ยนเวกเตอร์ และ 5) selection ในการศึกษาวิจัยที่ใช้ในการทดลอง 3 ปัจจัย ได้แก่ มุมจานไถ (องศา) มุมไถ (องศา) และความเร็วของรถแทรกเตอร์ (กิโลเมตร/ชั่วโมง) และค่าความลึกคงที่อยู่ระดับ 25 เซนติเมตร สำหรับการทดลอง การออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง (Central composite design: CCD) ซึ่งเป็นการออกแบบที่ทุกระดับของแต่ละปัจจัยอยู่ห่างจากจุดกึ่งกลาง (Center) ของการออกแบบเท่ากัน และทำซ้ำที่จุดกึ่งกลาง แต่ละปัจจัยจะมีระดับการทดลอง 3 ระดับ (-1, 0, +1) โดยการทดลองมี 20 การทดลอง ผลที่ได้จากการทดลองพบว่ามีความกว้างของหน้าดินในการไถกลบวัชพืชเท่ากับ 132 เซนติเมตร และค่าพารามิเตอร์เท่ากับ 137.44 เซนติเมตร ผลการวิเคราะห์ผลทางสถิติ (ANOVA) พบว่ารูปแบบเชิงเส้น รูปแบบกำลังสอง ได้รับการยอมรับให้เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยมีค่า P-value ของรูปแบบสมการ มีค่าน้อยกว่า 0.05 เมื่อนำสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาใช้ร่วมกับโมดิฟายวิธีพัฒนาการโดยใช้ผลต่าง วิธีการนี้เรียกว่า วิธีการพื้นผิวตอบสนองร่วมกับโมดิฟายวิธีพัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (RSM-MDE) ซึ่งการหาค่าตอบโดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (RSM) จะสร้างคำตอบที่กว้างหรือใกล้เคียง ในขณะที่วิธี RSM-MDE จะทำการหาค่าตอบที่



เหมาะสมที่สุด จากการวนหาคำตอบซ้ำเป็นจำนวน 100 รอบในการหาคำตอบที่ดีที่สุด ดังนั้นวิธีการ RSM-MDE เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการหาคำตอบของการหาค่าความกว้างของหน้าดินในการไถกลบวัชพืชมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีพื้นผิวดูตอบตนเอง

สรุป

งานวิจัยนี้ได้ใช้วิธี RSM-MDE สามารถหาค่าความกว้างของหน้าดินในการไถกลบวัชพืช ในการหาคำตอบใช้การวนหาคำตอบจำนวน 100 รอบ ผลจากวิธีการ RSM-MDE ได้ค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุด คือ มุมจานไถ 45 องศา มุมไถ 19.34 องศา และความเร็วของรถแทรกเตอร์ 3 กิโลเมตร/ชั่วโมง หลังจากได้คำตอบที่ดีที่สุดผู้วิจัยทำการทดลองโดยการนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีการ RSM-MDE มาทำการทดลองซ้ำจำนวน 12 ครั้ง ได้ค่าเฉลี่ยความกว้างของหน้าดินในการไถกลบวัชพืชเท่ากับ 139 เซนติเมตร เมื่อนำผลการทดลองไปเปรียบเทียบกับวิธี RSM พบว่าวิธีการ RSM-MDE มีความกว้างของหน้าดินในการไถกลบวัชพืชมากกว่าคิดเป็นความแตกต่างในการหาคำตอบถึง 5.30%

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้สามารถนำไปเป็นข้อมูลในการเลือกใช้การปรับตั้งมุมจานไถ มุมไถ และความเร็วของรถแทรกเตอร์ ให้เหมาะสมสำหรับเกษตรกรในการไถกลบวัชพืช และสำหรับการทำวิจัยในอนาคต ควรจะมุ่งเน้นการศึกษาพัฒนาและทำการศึกษาในการแก้ปัญหาสำหรับการเลือกใช้เครื่องมือไถเตรียมดินประเภทอื่น เช่น ไถหัวหมู เนื่องจากไถหัวหมูต้องใช้กำลังของเครื่องยนต์สูงและอัตราการสิ้นเปลืองก็สูงไปด้วย ควรนำค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ในการแก้ปัญหาเพื่อลดการใช้พลังงาน สำหรับการทดลองแต่ละพื้นที่และความหนาแน่นของดิน เพื่อพัฒนาในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับพื้นที่และความหนาแน่นของดินชนิดของดินและควรนำวิธีวิธีอื่น ๆ มาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพพัฒนาการสร้างคำตอบและปรับปรุงคำตอบให้ดียิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

โครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก และ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยในการสนับสนุนทุนในงานวิจัยครั้งนี้



รายการอ้างอิง (References)

- Abdalla, O. A., Mohamed, E. A., El Naim, A. M., El Shiekh, M. A., & Zaied, M. B. (2014). Effect of disc and tilt angles of disc plough on tractor performance under clay soil. *Current Research in Agricultural Sciences*, 1(3), 83-94.
- Ahmadi, H., & Mollazade, K. (2009). Effect of plowing depth and soil moisture content on reduced secondary tillage. *Agricultural Engineering International: The CIGR EJournal*, 11, 1-9.
- Flynn, R. H. (2003). *Development of regression equations to estimate flow durations and low-flow-frequency statistics in new hampshire streams*: US Department of the Interior, US Geological Survey.
- Gaitonde, V., Manjaiah, M., Maradi, S., Karnik, S., Petkar, P., & Davim, J. P. (2017). Multiresponse optimization in wire electric discharge machining (WEDM) of HCHCr steel by integrating response surface methodology (RSM) with differential evolution (DE). In *Computational Methods and Production Engineering* (pp. 199-221): Elsevier.
- Gill, W. R., & Berg, G. E. V. (1967). *Soil dynamics in tillage and traction: Agricultural Research Service*, US Department of Agriculture.
- Myers, R. H., Montgomery, D. C., & Anderson-Cook, C. (2002). Process and product optimization using designed experiments. *Response Surface Methodology*, 2, 328-335.
- Naderloo, L., Alimadani, R., Akram, A., Javadikia, P., & Khanghah, H. Z. (2009). Tillage depth and forward speed effects on draft of three primary tillage implements in clay loam soil. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 76(3), 382-385.
- Nee, C. Y., Saad, M. S., Nor, A. M., Zakaria, M. Z., & Baharudin, M. E. (2018). Optimal process parameters for minimizing the surface roughness in CNC lathe machining of Co28Cr6Mo medical alloy using differential evolution. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97(1-4), 1541-1555.
- O'Dogherty, M., Godwin, R., Hann, M., & Al-Ghazal, A. (1996). A geometrical analysis of inclined and tilted spherical plough discs. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 63(3), 205-217.
- Office of Agricultural Economics. (2017). *Agricultural Statistics of Thailand 2017*. Agriculture Statistics.(in Thai).



- Pitakaso, R. (2015). Differential evolution algorithm for simple assembly line balancing type 1 (SALBP-1). *Journal of Industrial and Production Engineering*, 32(2), 104-114.
- Pitakaso, R., & Sethanan, K. (2019). Adaptive large neighborhood search for scheduling sugarcane inbound logistics equipment and machinery under a sharing infield resource system. *Computers and Electronics in Agriculture*, 158, 313-325.
- Ranjbarian, S., Askari, M., & Jannatkah, J. (2017). Performance of tractor and tillage implements in clay soil. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 16(2), 154-162.
- Sethanan, K., & Pitakaso, R. (2016). Differential evolution algorithms for scheduling raw milk transportation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 121, 245-259.
- Srichok, T., Pitakaso, R., Sethanan, K., Sirirak, W., & Kwangmuang, P. (2020). Combined Response Surface Method and Modified Differential Evolution for Parameter Optimization of Friction Stir Welding. *Processes*, 8(9), 1080.
- Storn, R., & Price, K. (1997). Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of Global Pptimization*, 11(4), 341-359