การพัฒนาเครื่องตัดใบข้าวเพื่อลดการสั่นสะเทือน†
Development of Rice Leaf Cutter for Reduction of Vibration

สุวิพงษ์ เหมะธุลิน[1], ณัฐดนย์ พรรณุเจริญวงษ์[2*]
Suwipong Hemathulin[1], Nattadon Pannucharoenwong[2*]

[1]สาขาวิชาเครื่องกลและอุตสาหการ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร 47000
[2]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ 12120
[1]Department of Mechanical and Industrial, Faculty of Industrial Technology,
Rajabhat Sakon Nakhon University, Thailand 47000
[2]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University, Thailand 12120
*Corresponding author. Tel.: +66 3825 9050-55, Email: pnattado@engr.tu.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาชุดขับเคลื่อนใบมีดตัดของเครื่องตัดใบข้าว เพื่อลดการสั่นสะเทือนโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วยในการวิเคราะห์ความแข็งแรง ผลการวิเคราะห์เบื้องต้นพบว่า ค่าการเสียรูปทรงมีค่าสูงสุด 0.13762 mm ถือว่าน้อยมาก และเมื่อเปรียบเทียบการขับเคลื่อนด้วยโซ่กับการขับเคลื่อนด้วยสายพานและเครื่องตัดหญ้า โดยตัดใบข้าวพื้นที่ 400 m^2 ผลการสั่นสะเทือนในแนวแกนนอนที่ความเร็วรอบ 350 rpm เมื่อขับเคลื่อนด้วยโซ่มีค่าการสั่นสะเทือน 4.75 mm และเมื่อขับเคลื่อนด้วยสายพานมีค่าการสั่นสะเทือน 5.61 mm ค่าการสั่นสะเทือนเมื่อขับเคลื่อนด้วยโซ่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับขับเคลื่อนด้วยสายพาน 15.33% และเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องตัดหญ้าค่าการสั่นสะเทือนมีค่าลดลง 7.44 % และผลการสั่นสะเทือนในแนวแกนตั้งที่ความเร็วรอบ 350 rpm เมื่อขับเคลื่อนด้วยโซ่มีค่าการสั่นสะเทือน 4.32 mm และค่าการสั่นสะเทือนเมื่อขับเคลื่อนด้วยสายพานมีค่า 6.86 mm โดยค่าการสั่นสะเทือนเมื่อขับเคลื่อนด้วยโซ่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับขับเคลื่อนด้วยสายพานคิดเป็น 37.03 % และเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องตัดหญ้า มีค่าลดลง 19.40% ช่วยลดเวลาการทำงานลงได้ 30.90 นาที/ไร่ และสามารถลดต้นทุนในการทำนาได้ 640 บาท/ไร่

คำสำคัญ : เครื่องตัดใบข้าว การสั่นสะเทือน รถเกี่ยวนวดข้าว

Abstract

The purpose of this research is to development of rice leaf cutter for reduction of vibration by using Finite element method for strength analysis. The pre-analysis showed that total Deformation of 0.13762 mm which was relatively very little. When comparing chain drive

† บทความจากงานประชุมวิชาการระดับชาติเชิงสร้างสรรค์ครั้งที่ 2 ราชมงคลกรุงเทพวิชาการ ระหว่างวันที่ 24-26 กรกฎาคม 2561

Received 31-08-2018
Revised 22-11-2018
Accepted 28-11-2018

With belt drive and lawn mowers for an effective cutting area of 400 m^2 and motor speed of 350 rpm horizontal vibration from the chain drive was 4.75 mm and 5.61 mm from belt drive. Additionally, it was found that vibration decreased by approximately 15.33 % when the chain was used instead of the belt and reduced by 7.44 % when compared with lawn mowers. Vertical vibration at 350 rpm was 4.32 mm for a chain drive and 6.86 mm for belt drive. Vibration value decreased by 37.03 % when chain drive was used instead of belt and reduced by 19.40 % compared with lawn mowers. This reduces work time by 30.90 minute per Rai. And can reduce the cost of farming by 640 baht per Rai.

Keywords: Rice leaf cutter, Vibration, Combine harvester

1. บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ทำการเพาะปลูกพืชเป็นอาชีพ ประชาชนประกอบอาชีพทางการเกษตรคิดเป็น 34 % และ 93 % ของการทำเกษตรอยู่ในเขตชนบท [1] จำนวนพืชที่ปลูกมากที่สุดคือข้าว ไว้สำหรับบริโภคและส่งออก คิดเป็นพื้นที่ปลูกข้าวประมาณ 11.3 % ของพื้นที่ทั่วประเทศ เกษตรกรชาวนาส่วนใหญ่ทำนาหว่านแทนการทำนาดำ เนื่องจากมีขั้นตอนในการทำที่ไม่ซับซ้อน และต้นทุนการผลิตข้าวน้อยกว่า แต่การทำนาหว่านนั้นประสบปัญหาเรื่องวัชพืชที่ขึ้นมาปกคลุมต้นข้าว ทำให้ต้นข้าวเจริญเติบโตไม่เต็มที่ ได้ผลผลิตน้อย

กลุ่มเกษตรกรผู้ปลูกข้าวบ้านนางอย อำเภอเต่างอย จังหวัดสกลนคร ปัจจุบันได้ทำนาหว่านเป็นหลักและใช้เครื่องตัดหญ้าตัดใบข้าวพร้อมวัชพืช เพื่อเป็นการตัดวงจรไม่ให้หญ้าแพร่พันธุ์ และต้นข้าวเจริญเติบโตสม่ำเสมอกัน [2] ทำให้ได้ผลผลิตต่อไร่สูง [3] แต่การใช้เครื่องตัดหญ้ามาทำการตัดใบข้าวนั้นน้ำหนักของเครื่องตัดหญ้ามีน้ำหนักมาก และการสั่นสะเทือนของเครื่องตัดหญ้านั้นทำให้เกษตรกรเกิดการเหนื่อยล้าจากการใช้เครื่องตัดหญ้าตัดใบข้าวไม่สามารถทำงานได้นาน และขณะตัดใบข้าวต้องเหวี่ยงเครื่องไปมาเพื่อให้สามารถตัดใบข้าวได้บริเวณกว้างอาจก่อให้เกิดอันตรายขณะปฏิบัติงาน

ผู้วิจัยจึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาชุดขับเคลื่อนใบมีดตัดของเครื่องตัดใบข้าว เพื่อลดการสั่นสะเทือนของเครื่องตัดใบข้าวโดยประยุกต์ใช้แนวคิดหลักการออกแบบชุดใบมีดตัดจากรถเกี่ยวนวดข้าวที่มีการสั่นสะเทือนน้อยซึ่งจะทำให้ตัดใบข้าวขาดได้สม่ำเสมอ และความเร็วรอบในการตัดสัมพันธ์กับความยาวของชุดใบมีดตัดซึ่งจะส่งผลให้เกษตรกรสามารถทำงานได้สะดวกสบาย และมีน้ำหนักเบาเคลื่อนที่ได้สะดวก ลดการสั่นสะเทือนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพลดเวลาในการทำงาน ลดเวลาตัดใบข้าวและช่วยเพิ่มผลผลิตข้าว [4]

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีดำเนินการ

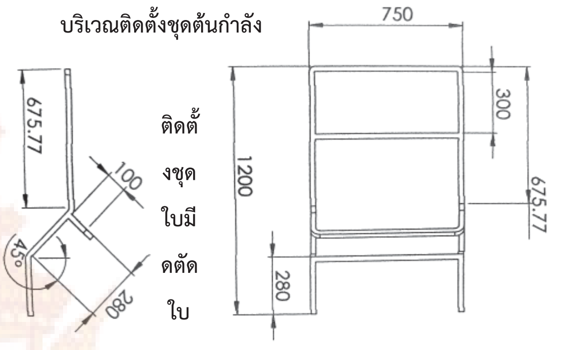
การออกแบบและพัฒนาเครื่องตัดใบข้าวเพื่อลดการสั่นสะเทือน ได้ประยุกต์ใช้ทฤษฎีการออกแบบ ชุดใบมีดตัดต้นข้าวของรถเกี่ยวนวดข้าวมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบและพัฒนา คือมีค่าการสั่นสะเทือนของชุดใบมีดตัดต้นข้าวน้อย ใบมีดตัดต้นข้าวต้องตั้งฉากกับต้นข้าวเพื่อให้ตัดต้นข้าวได้ขาดหมดและความยาวของชุดใบมีดตัดต้องสัมพันธ์กับ

ความเร็วรอบเพื่อไม่ให้เกิดการสั่นสะเทือนมากเกินไป โดยทิศทางการใช้รถเกี่ยวนวดข้าวมีแนวโน้มลดขนาดและน้ำหนักเพื่อให้สามารถเข้าถึงพื้นที่เกษตรกรรมได้ [4] และการออกแบบชุดใบมีดตัด และระบบส่งกำลังจะพยายามลดการสั่นสะเทือนขณะทำงาน เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของรถเกี่ยวนวดข้าว [5] การออกแบบระบบส่งกำลังต้องให้สัมพันธ์กับความเร็วรอบของการหมุนเพื่อให้สามารถตัดต้นข้าวขาดได้อย่างสม่ำเสมอ [6] และการออกแบบชุดข้อเหวี่ยงที่ดีสัมพันธ์กับความเร็วรอบจะสามารถลดการสั่นสะเทือนเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเครื่องเกี่ยวนวดข้าว [7] และพบว่ายังไม่มีงานวิจัยที่เกี่ยวกับการสร้างเครื่องตัดใบข้าว จากทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเหล่านี้ทางผู้วิจัยจึงได้นำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบและพัฒนาชุดขับเคลื่อนใบมีดตัดของเครื่องตัดใบข้าวเพื่อลดการสั่นสะเทือนและเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพลดเวลาในการตัดใบข้าวแบบเดิม และลดต้นทุนในการผลิตข้าว

2.1 อุปกรณ์

การศึกษาและพัฒนาชุดขับเคลื่อนใบมีดตัดของเครื่องตัดใบข้าวเพื่อลดการสั่นสะเทือน ได้ทำการออกแบบให้มีการสั่นสะเทือนของชุดใบมีดตัดให้น้อยที่สุด เนื่องจากการสั่นสะเทือนเป็นสาเหตุของการเสียหายของชิ้นส่วนโดยเฉพาะในรถเกี่ยวนวดข้าว [6] และทำให้สามารถตัดใบข้าวขาดสม่ำเสมอ แบ่งเป็นส่วนประกอบหลัก ๆ ดังนี้

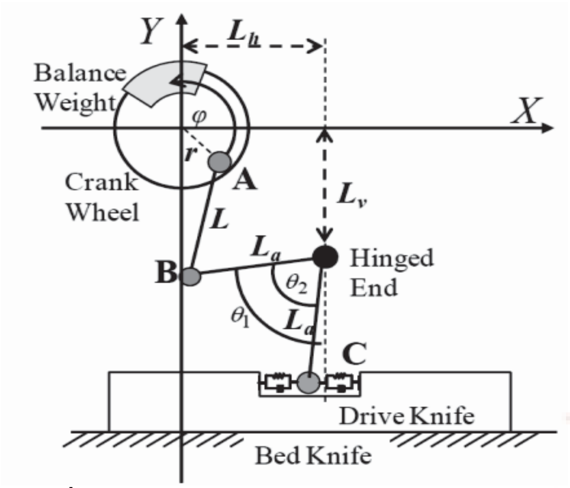
การออกแบบโครงสร้างเครื่องตัดใบข้าวโดยใช้โปรแกรมเขียนแบบในคอมพิวเตอร์สร้างต้นแบบออกมา ลักษณะโครงสร้างมีขนาดดังแสดงในภาพที่ 1 และส่วนใบมีดตัดใบข้าวออกแบบให้โครงสร้างเครื่องตัดใบข้าวทำมุมเอียงลงมาด้านล่าง 45 องศาเข้าหาใบข้าวเพื่อช่วยให้สามารถตัดใบข้าวได้สะดวกและจำกัดความยาวชุดใบมีดตัดเพื่อลดการสั่นสะเทือน เนื่องจากการสั่นสะเทือนจะสัมพันธ์กับความยาวของชุดใบมีดตัด [8] และเลือกใช้วัสดุอลูมิเนียมน้ำหนักเบาไม่เป็นสนิมและมีสายสะพายสามารถปรับให้เหมาะสมกับผู้ใช้งาน ชุดต้นกำลังใช้เครื่องตัดหญ้าแบบสะพายบ่าเป็นเครื่องยนต์ 4 จังหวะติดตั้งเข้ากับตัวโครงสร้างเครื่องให้มีการเพิ่มลูกยางกันสั่นสะเทือนและวางสมดุลน้ำหนักด้านหน้า-ด้านหลัง ระหว่างตัวเครื่องตัดหญ้ากับชุดใบมีดตัดและชุดดึงใบข้าว



ภาพที่ 1 ขนาดของโครงสร้างเครื่องตัดใบข้าวหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

ชุดใบมีดตัดใบข้าวทำมาจากอลูมิเนียม เพื่อลดน้ำหนักโดยออกแบบให้ชุดใบมีดตัดตั้งฉากกับต้นข้าวและขับเคลื่อนด้วยเฟือง และใช้สายพานขับเปรียบเทียบกับใช้โซ่ขับเพื่อไม่ให้เกิดการลื่นไถลสูญเสียงาน [5] ในการออกแบบจะมีการออกแบบระบบข้อเหวี่ยง [9] ดังแสดงในภาพที่ 2 และต้องลดการสั่นสะเทือนให้ได้มากที่สุดซึ่งจะสัมพันธ์กับความเร็วรอบของการตัดใบข้าว [10] กำหนดความเร็วรอบที่จะใช้ในการทดลองคือ 250 rpm, 300 rpm, 350 rpm และ 400 rpm [11] เพื่อให้การทดลองสามารถเปรียบเทียบความเร็วรอบกับเครื่องเกี่ยวนวดข้าวได้และเกี่ยวข้องกับระบบออกแบบข้อเหวี่ยงของชุดใบมีดตัดใบข้าว การติดตั้งใบมีดตัดใบข้าวตั้งฉากกับต้นข้าว สามารถลดการสั่นสะเทือนของใบมีดตัดได้อีกด้วย [7] โดยการทำงานของใบมีดตัดจะสัมพันธ์กับระบบกลไกข้อเหวี่ยงดัง

แสดงในภาพที่ 2 เพื่อให้การตัดมีประสิทธิภาพสูงสุด [8] สูตรการคำนวณหาจุดเชื่อมต่อของข้อเหวี่ยงจุด A, B, C แสดงในสมการที่ (1), (2), (3)



ภาพที่ 2 แบบจำลองระบบกลไกของใบมีดตัดใบข้าว

$$A : (x_a\ y_a) = (r\cos\omega t\ \ r\sin\omega t) \quad (1)$$

$$B : (x_b\ y_b) = (L_h - L_a \sin\theta_1 - L_v - L_a\cos\theta_1) \quad (2)$$

$$C : (x_c y_c) = (L_h - L_a \sin(\theta_1 - \theta_2)\ -L_v - L\cos(\theta_1 - \theta_2)) \quad (3)$$

โดย

X_a, X_b, X_c คือ ระยะการกระจัด, เมตร

r คือ รัศมีการหมุนของจุด A, เมตร

ω คือ ความเร็วเชิงมุมการหมุน, เรเดียน/วินาที

t คือ เวลา, วินาที

L คือ ความยาวจุด A ถึงจุด B, เมตร

L_a คือ ความยาวแขนเชื่อมต่อจุด A, เมตร

L_h คือ ระยะแนวนอนระหว่างศูนย์กลางข้อเหวี่ยงถึงจุดปลายบานพับ, เมตร

L_v คือ ระยะแนวตั้งระหว่างศูนย์กลางข้อเหวี่ยงถึงจุดปลายบานพับ, เมตร

θ_1 คือ มุมการทำงานของใบมีด, เรเดียน

θ_2 คือ มุมคงที่, เรเดียน

μ คือ สัมประสิทธิ์การเสียดทาน, 0.5

2.1.1 วิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างเครื่องตัดใบข้าวด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างเครื่องตัดใบข้าวที่ได้ออกแบบไว้ด้วยโปรแกรมช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยมีคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ ในการสร้างคืออลูมิเนียม ดังแสดงในตารางที่ 1 และรับน้ำหนักของเครื่องตัดหญ้าคือ 70N และรับน้ำหนักในด้านหน้าของชุดใบมีดตัด 10N กำหนดจำนวนเอลิเมนต์ในแบบจำลองเป็นแบบวิเคราะห์โครงสร้างมีจำนวนเอลิเมนต์ 5455 เอลิเมนท์ และมีจำนวนโหนด 31,532 โนด ดังแสดงในภาพที่ 3

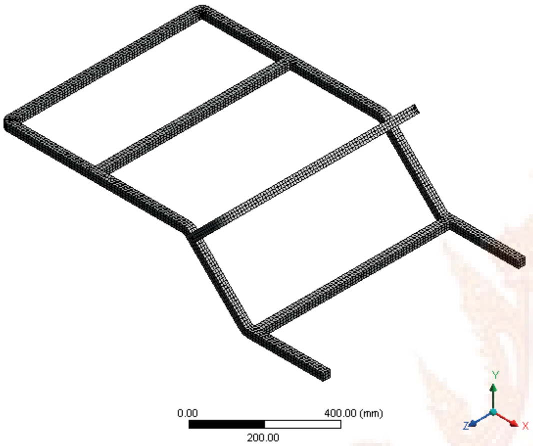
2.2 วิธีดำเนินการทดลอง

2.2.1 ทดลองวัดค่าการสั่นสะเทือน

การทดลองวัดค่าการสั่นสะเทือนโดยทำการตัดใบข้าวในแนวเส้นตรงโดยเดินหน้าตัดใบข้าวและวกกลับมีพื้นที่ในการตัดรวม 400 mm^2 โดยเปรียบเทียบการสั่นสะเทือนเมื่อใช้ชุดขับเคลื่อนใบมีดตัดด้วยสายพานและชุดขับเคลื่อนใบมีดตัดด้วยโซ่ และเปรียบเทียบกับการตัดด้วยวิธีใช้เครื่องตัดหญ้าตัดแบบดั้งเดิม และได้กำหนดค่าความเร็วรอบในการตัดเพิ่มขึ้นทีละ 50 รอบ ดังนี้ 250 rpm, 300 rpm, 350 rpm และ 400 rpm เพื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนของชุดใบมีดตัดในแนวแกนตั้งและในแนวแกนนอนด้วยเครื่องวัดการสั่นเทือนรุ่น VM-120 มีค่าความแม่นยำของอุปกรณ์คือ 1.5 % RMS ดังแสดงในภาพที่ 4 โดยค่าที่วัดจะแสดงเป็นแอมปลิจูด อยู่ในหน่วยรูทมีนสแควร์ มีค่าเป็นมิลลิเมตร (mm) โดยติดตั้งบนตัวโครงสร้างของเครื่องตัดใบข้าวใกล้กับชุดใบมีดตัดใบข้าวและระบบกลไก เพื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนให้ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของอลูมิเนียมในการวิเคราะห์

คุณสมบัติของอลูมิเนียม	
ความหนาแน่น	2.770 g/cm^3
ค่าโมดูลัสของยัง	71 GPa
อัตราส่วพัวซอง	0.33
ความแข็งเมื่อรับแรงอัด	280 MPa
ความแข็งเมื่อรับแรงดึง	280 MPa
รับแรงดึงสูงสุด	310 MPa
จำนวนเอลิเมนต์	5455
จำนวนโหนด	31,532



ภาพที่ 3 วิเคราะห์โครงสร้างเครื่องตัดใบข้าวด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ตำแหน่งการวัดค่าการสั่นสะเทือนแสดงในภาพที่ 5 และติดตั้งเครื่องวัดการสั่นสะเทือนที่ปลายเครื่องตัดหญ้าแบบสะพายบ่าบริเวณติดตั้งแสดงในภาพที่ 6 และเทียบผลการทดลองกับงานวิจัยที่มีมาแล้ว [5]

ภาพที่ 4 เครื่องวัดการสั่นสะเทือนรุ่น VM-120 [5]

ภาพที่ 5 ตำแหน่งวัดค่าการสั่นสะเทือนของชุดขับเคลื่อนใบมีดตัดใบข้าว

2.2.2 การทดลองหาเวลาในการตัดใบข้าว

ทดลองกับเกษตรกรผู้ใช้งานจริงได้ทำการทดลองใช้เครื่องตัดใบข้าว โดยให้กลุ่มเกษตรกรผู้ปลูกข้าว บ้านนางอย อำเภอเต่างอย จังหวัดสกลนคร พื้นที่นามีลักษณะเปียกเล็กน้อย ทำการทดลองตัดใบข้าวจำนวน 1 ไร่ ทำซ้ำทั้งหมด 10 ครั้ง รวมพื้นที่ทั้งหมด 10 ไร่ กำหนดช่วงเวลาในการทดลองช่วงเช้า 8.00 น. – 10.00 น. โดยทำการจับเวลาในการตัดใบข้าวเปรียบเทียบกับการตัดใบข้าวโดยใช้เครื่องตัดหญ้าแบบเดิม โดยออกแบบการทดลองการตัดใบข้าวดังแสดงในตารางที่ 2

ภาพที่ 6 ตำแหน่งวัดการสั่นสะเทือนของเครื่องตัดหญ้าที่ใช้ตัดใบข้าว

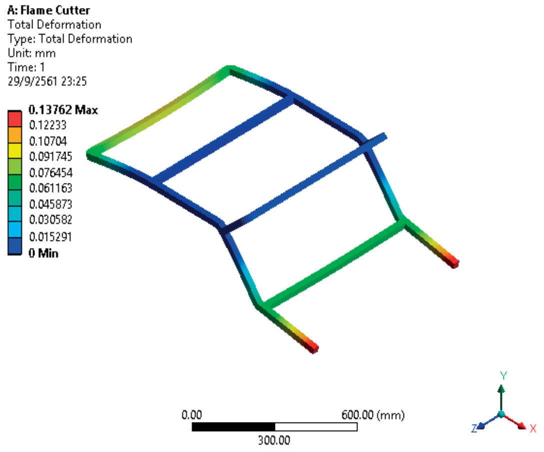
ตารางที่ 2 ทดสอบตัดใบข้าวและทำการจับเวลา

พื้นที่ทดสอบ	ผู้ทดสอบ	ช่วงเวลาทดสอบ	ทิศทางการตัด
พื้นที่ปลูกข้าว 1 ไร่ จำนวน 10 แปลง รวม 10 ไร่ หว่านข้าว โดยอายุในการตัดใบข้าว 2 เดือน	เกษตรกรบ้านนางอย อ.เต่างอย จ.สกลนคร จำนวน 1 ท่าน อายุ 35 ปี	ตัดใบข้าวช่วงเวลา 8.00 น - 10.00 น. จับเวลาในการตัด 1 ไร่	ตัดตามแนวแกน y โดยเดินตัดจนสุดเขตพื้นที่แล้ววนกลับมาจนครบ 1 ไร่ ทำซ้ำ 10 ครั้ง รวม 10 ไร่

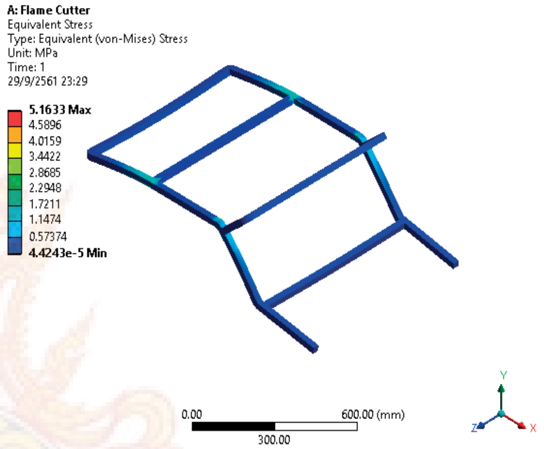
3. ผลการวิจัย

3.1 วิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้าง

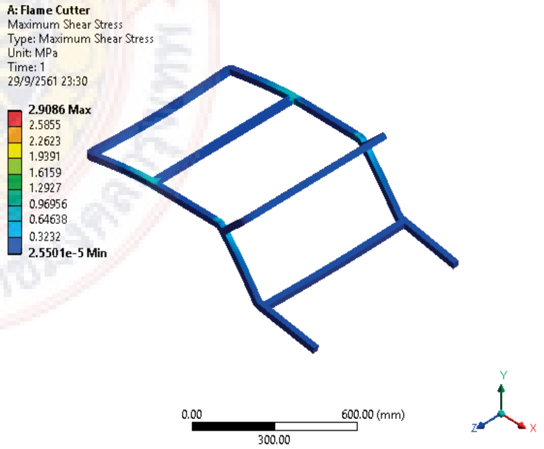
ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างเครื่องตัดใบข้าวด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยโครงสร้างทำมาจากอลูมิเนียม รับน้ำหนักจากตัวเครื่องต้นกำลัง และชุดใบมีดตัดใบข้าว โดยผลของการเสียรูปทรง (Total deformation) ของโครงสร้างเครื่องตัดใบข้าวเมื่อวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์ แสดงในภาพที่ 7 และค่าความเค้นวอนมิสเซส (Equivalent von-mises stress) แสดงในภาพที่ 8 และความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum shear stress) แสดงในภาพที่ 9 โดยผลการทดลองวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ทั้งหมดนำมารวบรวมแสดงในตารางที่ 3



ภาพที่ 7 แสดงค่าการเสียทรงรูปทั้งหมดของโครงสร้าง



ภาพที่ 8 แสดงค่าการเสียทรงรูปทั้งหมดของโครงสร้าง



ภาพที่ 9 แสดงค่า Maximum shear stress

ตารางที่ 3 แสดงค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ชนิด	ผลลัพท์
ค่าการเสียรูปทรง	0.13762 mm
ความเค้นวอนมิสเซส	5.1633 MPa
ความเค้นเฉือนสูงสุด	2.9086 MPa

3.2 วัดค่าการสั่นสะเทือน

ผลการวัดค่าการสั่นสะเทือนในแนวแกนนอนของชุดใบมีดเครื่องตัดใบข้าวโดยใช้การขับเคลื่อนด้วยโซ่เปรียบเทียบกับการขับเคลื่อนชุดใบมีดตัดใบข้าวด้วยสายพานและการใช้เครื่องตัดหญ้าตัด ใบข้าวโดยทำการวัดค่าการสั่นสะเทือนที่ความเร็วรอบ 250 rpm, 300 rpm, 350 rpm และ 400 rpm ค่าการสั่นสะเทือนที่ได้แสดงในตารางที่ 4 โดยจะมีค่าการสั่นสะเทือนจากใบมีดรถเกี่ยวนวดข้าว [5] นำมาเปรียบเทียบกับค่าการสั่นสะเทือนที่ได้จากการทดลองจริง ค่าการสั่นสะเทือนของใบมีดเครื่องตัดใบข้าวที่ได้จากการทดลองโดยเรียงลำดับจากน้อยที่สุดไปหามากที่สุด คือ ขับเคลื่อนด้วยโซ่มีค่าน้อยที่สุดลำดับถัดมาคือ ใช้เครื่องตัดหญ้าตัดใบข้าว และขับเคลื่อนด้วยสายพาน ตามลำดับและเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าการสั่นสะเทือนจากรถเกี่ยวนวดข้าวพบว่าค่าการสั่นสะเทือนจากใบมีดรถเกี่ยวนวดข้าวมีค่ามากที่สุด กรณีที่นำมาเปรียบเทียบกับรถเกี่ยวนวดข้าว เนื่องจากได้ใช้การออกแบบชุดใบมีดตัดใบข้าวจากทฤษฎีการออกแบบใบมีดตัดต้นข้าวที่ความเร็วรอบเท่ากัน

ผลการวัดค่าการสั่นสะเทือนในแนวแกนตั้งของชุดใบมีดเครื่องตัดใบข้าวโดยใช้การขับเคลื่อนด้วยโซ่เปรียบเทียบกับการขับเคลื่อนชุดใบมีดตัดใบข้าวด้วยสายพานและการใช้เครื่องตัดหญ้าตัดใบข้าวโดยทำการวัดค่าการสั่นสะเทือนที่ความเร็วรอบ 250 rpm, 300 rpm, 350 rpm และ 400 rpm ค่าการสั่นสะเทือนที่ได้ แสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 4 ค่าการสั่นสะเทือนในแนวแกนนอน

ความเร็วรอบ (rpm)	รถเกี่ยวนวดข้าว [5]	การสั่นสะเทือนในแนวแกนนอน (mm)		
		ขับเคลื่อนด้วยโซ่	**เครื่องตัดหญ้า**	**ขับเคลื่อนด้วยสายพาน**
250	2.05	2.25	2.81	3.78
300	4.06	3.52	3.92	4.85
350	6.19	4.75	5.13	5.61
400	13.44	9.85	10.38	11.24

ค่าการสั่นสะเทือนของใบมีดเครื่องตัดใบข้าวที่ได้จากการทดลองโดยเรียงลำดับจากน้อยที่สุดไปหามากที่สุด คือ ขับเคลื่อนด้วยโซ่มีค่าน้อยที่สุดลำดับถัดมาคือ ใช้เครื่องตัดหญ้าตัดใบข้าว และขับเคลื่อนด้วยสายพานตามลำดับ และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าการสั่นสะเทือนจากรถเกี่ยวนวดข้าวพบว่าค่าการสั่นสะเทือนจากใบมีดรถเกี่ยวนวดข้าวมีค่ามากที่สุด กรณีที่นำมาเปรียบเทียบกับรถเกี่ยวนวดข้าว เนื่องจากได้ใช้การออกแบบชุดใบมีดตัดใบข้าวจากทฤษฎีการออกแบบใบมีดตัดต้นข้าวที่ความเร็วรอบเท่ากัน

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าการสั่นสะเทือนในแนวแกนนอนและในแนวแกนตั้งของชุดใบมีดตัดของเครื่องตัดใบข้าวพบว่า ค่าการสั่นสะเทือนในแนวแกนนอนมีค่าน้อยกว่าค่าการสั่นสะเทือนในแนวแกนตั้ง

ตารางที่ 5 ค่าการสั่นสะเทือนในแนวแกนตั้ง

ความเร็วรอบ (rpm)	รถเกี่ยวนวดข้าว [5]	การสั่นสะเทือนในแนวแกนตั้ง (mm)		
		ขับเคลื่อนด้วยโซ่	เครื่องตัดหญ้า	ขับเคลื่อนด้วยสายพาน
250	3.77	3.25	3.52	4.24
300	5.88	3.75	4.21	5.23
350	12.03	4.32	5.36	6.86
400	18.65	10.57	12.27	13.87

3.3 เวลาในการตัดใบข้าว

ผลการทดลองใช้เครื่องตัดใบข้าวขับเคลื่อนด้วยโซ่เปรียบเทียบกับใช้เครื่องตัดหญ้าตัดใบข้าวโดยใช้ความเร็วรอบ 350 rpm ไม่ได้ใช้การขับเคลื่อนด้วยสายพานมาทำการทดสอบเนื่องจากมีค่าการสั่นสะเทือนมาก ทำการตัดใบข้าวครั้งละ 1 ไร่ ทำซ้ำทั้งหมดจำนวน 10 ครั้ง รวมเป็น 10 ไร่ ให้เกษตรกรผู้ทำนาอายุ 35 ปี ทำการตัดใบข้าว โดยทำการตัดใบข้าวในช่วงเวลา 8.00 – 10.00 น. ทำการตัดวันละ 1 ไร่ เพื่อไม่ให้เกษตรกรผู้ทำนามีความเหนื่อยล้าซึ่งอาจจะมีผลกระทบต่อค่าการสั่นสะเทือนที่วัดได้ เตรียมพื้นที่ต้นข้าวมีอายุตั้งแต่การหว่านข้าวจนถึงเวลาตัดรวม 2 เดือน โดยทำการตัดโดยเดินเป็นเส้นตรงในแนวแกน y แล้ววนกลับมาเป็นแนวเส้นตรงอีกครั้งทำซ้ำจนครบจำนวน 1 ไร่ ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 6 โดยการทดลองใช้เครื่องตัดใบข้าวขับเคลื่อนด้วยโซ่สามารถทำเวลาในการตัดใบข้าวได้เฉลี่ย 23.9 นาที/ไร่ และการใช้เครื่องตัดหญ้าในการตัดใบข้าวสามารถทำเวลาในการตัดใบข้าวได้เฉลี่ย 54.8 นาที/ไร่

ในส่วนของน้ำหนักของตัวเครื่องตัดใบข้าวเมื่อทำการชั่งน้ำหนักทั้งหมดพบว่า มีน้ำหนักเครื่องอยู่ที่ 9.10 กิโลกรัม และเมื่อชั่งน้ำหนักของเครื่องตัดหญ้าแบบสะพายบ่าที่เกษตรกรนำมาใช้ในการตัดใบข้าวพบว่ามีน้ำหนักของเครื่องอยู่ที่ 10.20 กิโลกรัม

ตารางที่ 6 เวลาที่ใช้ในการตัดใบข้าว

ครั้งที่	เครื่องตัดใบข้าว เวลา 8.00 -10.00 น. (นาที/ไร่)	เครื่องตัดหญ้า เวลา 8.00 -10.0 น. (นาที/ไร่)
1	23	51
2	25	52
3	24	57
4	22	55
5	23	58
6	26	53
7	25	55
8	24	57
9	23	54
10	24	56
เฉลี่ย	23.9	54.8

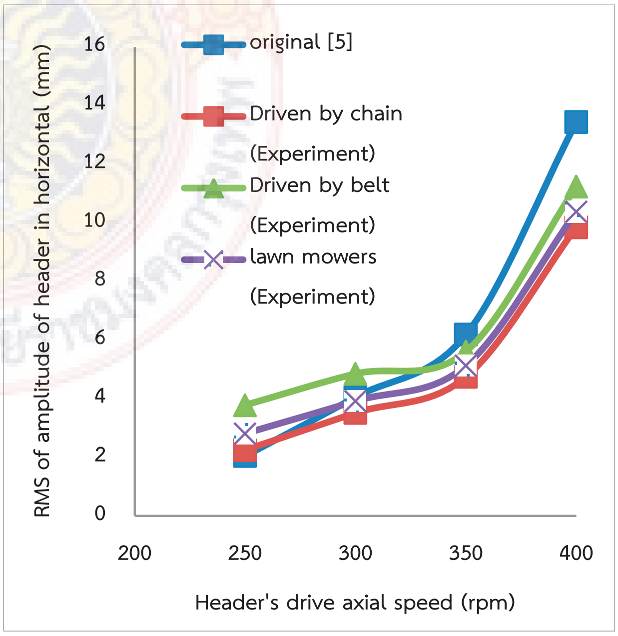
4. อภิปรายผล

เมื่อได้ทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างเครื่องตัดใบข้าว พบว่า ค่าการเสียรูปทรง (Total Deformation) มีค่าสูงสุดอยู่ที่ 0.13762 mm ซึ่งบริเวณที่เกิดการเสียรูปทรงสูงสุดอยู่บริเวณชุดขับเคลื่อนใบมีดตัด ซึ่งอยู่ด้านหน้าของเครื่องตัดใบข้าว ดังแสดงในภาพที่ 7 ซึ่งถือได้ว่ามีค่าน้อยมากและเป็นส่วนที่รับการสั่นสะเทือนจากเครื่องตัดใบข้าวมากที่สุด การวิเคราะห์ค่าความเค้นวอนมิสเซส (Equivalent von-mises stress) มีค่าสูงสุดอยู่ที่ 5.1633 MPa ซึ่งจะเกิดขึ้นบริเวณรอยต่อของโครงสร้างของเครื่องตัดใบข้าวดังแสดงในภาพที่ 8 ซึ่งค่านี้แสดงให้เห็นว่า

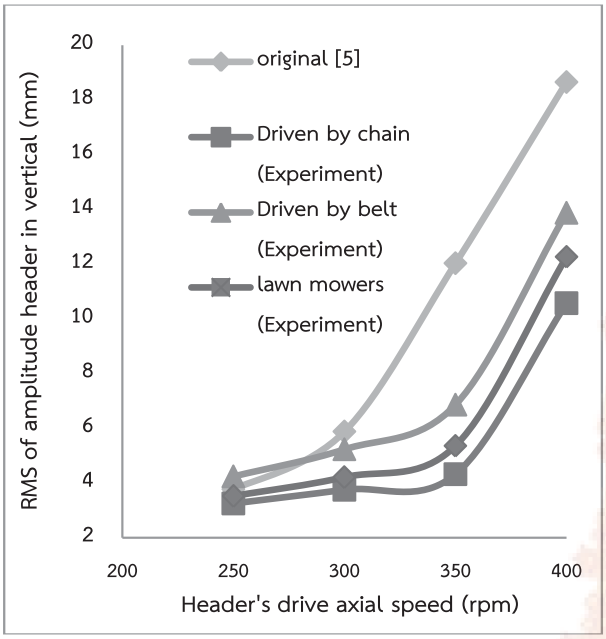
โครงสร้างของเครื่องมีความแข็งแรงสามารถรับแรงได้ดี และความเค้นสูงสุด (Maximum shear stress) ที่เกิดขึ้นมีค่า 2.9086 MPa ซึ่งมีค่าน้อยส่งผลดีต่อโครงสร้างทำให้เกิดความเสียหายได้น้อย ซึ่งจะเกิดขึ้นบริเวณรอยต่อของโครงสร้างของเครื่องตัดใบข้าวเช่นกัน ดังแสดงในภาพที่ 9

เมื่อได้ทำการทดลองตามแผนการทดลองที่กำหนดไว้ พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของชุดขับเคลื่อนใบมีดตัดใบข้าวโดยใช้หน่วยการวัดรูทมีนสแควร์ (RMS) เมื่อทำการวัดค่าการสั่นสะเทือนในแนวแกนนอนและใช้การขับเคลื่อนด้วยโซ่เปรียบเทียบกับการขับเคลื่อนด้วยสายพานและนำมาเปรียบเทียบกับการตัดใบข้าวด้วยเครื่องตัดหญ้า พบว่าค่าการสั่นสะเทือนในช่วงความเร็วรอบ 250–300 rpm มีลักษณะเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นและชุดใบมีดตัดใบข้าวสามารถตัดใบข้าวได้ขาดแต่ยังคงเหลือใบข้าวอยู่บ้างเล็กน้อย และที่ความเร็วรอบ 350 rpm ชุดใบมีดตัดใบข้าวสามารถตัดใบข้าวขาด ได้หมดค่าการสั่นสะเทือนมีค่าเพิ่มขึ้น และที่ความเร็วรอบการตัด 400 rpm ชุดใบมีดตัดใบข้าวสามารถตัดใบข้าวขาดได้หมดเช่นกัน แต่การสั่นสะเทือนจะมีค่าสูงขึ้น ค่าการสั่นสะเทือนเมื่อขับเคลื่อนด้วยโซ่มีค่าน้อยกว่าค่าการสั่นสะเทือนเมื่อขับเคลื่อนด้วยสายพาน และเมื่อนำค่าการสั่น สะเทือนมาเปรียบเทียบกับการใช้เครื่องตัดหญ้าซึ่งเป็นวิธีการแบบดั้งเดิมที่เกษตรกรผู้ปลูกข้าวนิยมนำมาใช้ในการตัดใบข้าวพบว่า ค่าการสั่นสะเทือน เมื่อขับเคลื่อนเครื่องตัดใบข้าวด้วยโซ่มีค่าน้อยกว่าค่าการสั่นสะเทือนเมื่อใช้เครื่องตัดหญ้าตัดใบข้าวและค่าการสั่นสะเทือนเมื่อขับเคลื่อนเครื่องตัดใบข้าวด้วยสายพานมีค่ามากกว่าค่าการสั่นสะเทือนเมื่อใช้เครื่องตัดหญ้าตัดใบข้าวโดยแสดงให้เห็นชัดเจนในภาพที่ 10 และเมื่อได้ทำการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของชุดขับเคลื่อนใบมีดตัดใบข้าว โดยใช้หน่วยการวัดรูทมีนสแควร์ (RMS) เมื่อทำการวัดค่าการสั่นสะเทือนในแนวแกนตั้งและใช้การขับเคลื่อนด้วยโซ่เปรียบเทียบกับการขับเคลื่อนด้วยสายพานแล้วนำมาเปรียบเทียบกับการตัดใบข้าวด้วยวิธีการแบบเดิมของเกษตรกร คือ ใช้เครื่องตัดหญ้า พบว่า ค่าการสั่นสะเทือนในช่วงความเร็วรอบ 250 rpm มีค่าใกล้เคียงกันมาก ลักษณะการใช้งานเมื่อนำมาตัดใบข้าวยังคงมีใบข้าวเหลืออยู่เล็กน้อย และที่การทดสอบที่ความเร็วรอบ 300 rpm ค่าการสั่นสะเทือนมีลักษณะเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นและชุดใบมีดตัดใบข้าวสามารถตัดใบข้าวได้ขาดแต่ยังคงเหลือใบข้าวอยู่บ้างเล็กน้อย และที่ความเร็วรอบ 350 rpm ชุดใบมีดตัดใบข้าวสามารถตัดใบข้าวขาดได้หมด

ค่าการสั่นสะเทือนมีลักษณะเพิ่มขึ้น และที่ความเร็วรอบการตัด 400 rpm ชุดใบมีดตัดใบข้าวสามารถตัดใบข้าวขาดได้หมดเช่นกัน แต่การสั่นสะเทือนของชุดขับเคลื่อนใบมีตัดใบข้าวจะมีค่ามาก ค่าการสั่นสะเทือนของชุดใบมีดตัดใบข้าว เมื่อขับเคลื่อนด้วยโซ่มีค่าน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการสั่นสะเทือนของชุดใบมีดตัดใบข้าวเมื่อขับเคลื่อนด้วยสายพาน และเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เครื่องตัดหญ้าซึ่งเป็นวิธีการแบบดั้งเดิมที่เกษตรกร



ภาพที่ 10 ความเร็วรอบกับค่าการสั่นสะเทือนในแนวแกนนอนของชุดใบมีดตัดใบข้าว

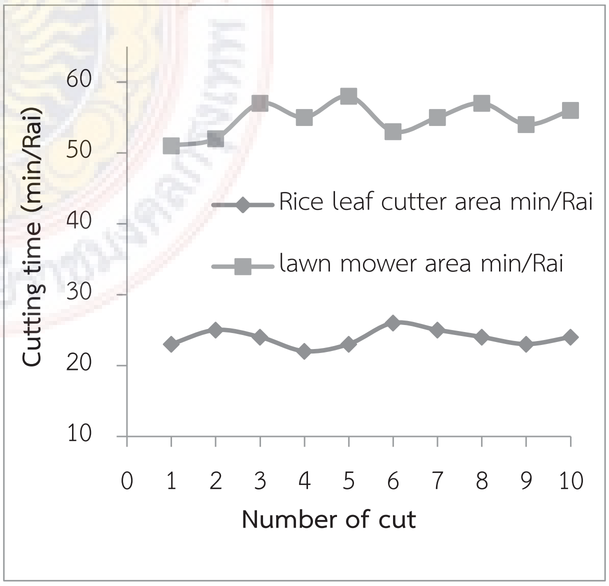


ภาพที่ 11 ความเร็วรอบกับค่าการสั่นสะเทือนในแนวแกนตั้งของชุดใบมีดตัดใบข้าว

ผู้ปลูกข้าวนิยมนำมาใช้ในการตัดใบข้าวพบว่าค่าการสั่นสะเทือนเมื่อขับเคลื่อนเครื่องตัดใบข้าวด้วยโซ่มีค่าน้อยกว่าค่าการสั่นสะเทือนเมื่อใช้เครื่องตัดหญ้าตัดใบข้าวและค่าการสั่นสะเทือนเมื่อขับเคลื่อนเครื่องตัดใบข้าวด้วยสายพานมีค่ามากกว่าค่าการสั่นสะเทือนเมื่อใช้เครื่องตัดหญ้าตัดใบข้าวและเมื่อเปรียบเทียบค่า การสั่นสะเทือนกับรถเกี่ยวนวดข้าว [5] พบว่าค่าการสั่นสะเทือนของการทดลองทั้งหมดมีค่าน้อยกว่า ดังแสดงในภาพที่ 11 และถ้าเปรียบเทียบค่าการสั่นสะเทือนของชุดใบมีดตัดของเครื่องตัดใบข้าว ในแนวแกนนอนจะมีค่าน้อยกว่าค่าการสั่นสะเทือนของชุดใบมีดตัดของเครื่องตัดใบข้าวในแนวแกนตั้ง

เวลาที่ใช้ในการทดสอบตัดใบข้าว แสดงในภาพที่ 12 แสดงเวลาในการตัดใบข้าวจำนวน 1 ไร่ โดยทำการทดสอบซ้ำ 10 ครั้ง รวมเป็นพื้นที่ 10 ไร่ พบว่าค่าเฉลี่ยเวลาที่ใช้ในการตัดใบข้าวอยู่ที่ 23.90 นาที/ไร่ และเมื่อใช้เครื่องตัดหญ้าทดสอบตัดใบข้าว เวลาโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 54.80 นาที/ไร่ แสดงในเห็นว่าผลต่างของเวลาของการตัดใบข้าวด้วยวิธีการทั้ง 2 แบบต่างกันถึง 30.90 นาที/ไร่ เนื่องมาจากการออกแบบโครงสร้างเครื่องตัดใบข้าวสามารถทำการตัดใบข้าวกินพื้นที่ได้บริเวณมากกว่าการใช้เครื่องตัดหญ้า และทำการตัดได้สะดวกเพียงแค่เดินหน้าตรงไปเท่านั้น ต่างกับการใช้เครื่องตัดหญ้าตัดใบข้าวต้องทำการเหวี่ยงเครื่องตัดหญ้าไปมาซ้ายและขวา ทำให้เสียเวลาจึงทำให้เกษตรกรสามารถประหยัดเวลา และแรงงานในการตัดใบข้าวได้อย่างมาก

ในทางเศรษฐศาสตร์ ตารางที่ 7 แสดงต้นทุนในการผลิตข้าวโดยอ้างอิงข้อมูลต้นทุนการผลิตข้าวจากกรมการค้าต่างประเทศกระทรวงพาณิชย์ ณ วันที่ 21 มกราคม 2559 [12] จะเห็นได้ว่าต้นทุนในการทำนาแบบไม่ตัดใบข้าวคิดเฉพาะต้นทุนที่เกี่ยวกับการการเตรียมดินเป็นเงิน 1,170 บาท/ไร่ ในขณะที่ค่าใช้จ่ายในการทำนาโดยใช้เครื่องตัดใบข้าวค่าใช้จ่ายเป็น 530 บาท/ไร่ สามารถลดค่าใช้จ่ายที่เป็นต้นทุนในการทำนาได้ถึง 640 บาท/ไร่



ภาพที่ 12 เปรียบเทียบเวลาในการตัดใบข้าว

ตารางที่ 7 ต้นทุนในการทำนา

ขั้นตอนการเตรียมดิน	ไม่ตัดใบข้าว (บาท/ไร่)	ตัดใบข้าว (บาท/ไร่)
1. ฉีดย่าฆ่าหญ้า	300	300
2. ฉีดย่าฆ่าหญ้าระยะ 8-12 วัน		ตัดใบข้าวแทนการฆ่าหญ้า
- ค่าแรง + ค่ายา	260	-
3. ฉีดยากำจัดแมลง/ยาฆ่าหญ้า อายุข้าว 35-40 วัน		ตัดใบข้าวแทนการฆ่าหญ้า
- ค่าแรง + ค่ายา	310	-
4. ค่าเชื้อเพลิง	300	230
รวม	1,170	530
ลดค่าใช้จ่ายได้	**640**	

5. สรุปผล

การพัฒนาชุดขับเคลื่อนใบมีดตัดของเครื่องตัดใบข้าวได้มีการออกแบบส่วนของโครงสร้างด้วยโปรแกรมออกแบบด้วยคอมพิวเตอร์และได้วิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อวิเคราะห์ความแข็งแรง และจุดที่ต้องปรับปรุงแก้ไขก่อนทำการสร้างจริงเป็นการลดเวลา และประหยัดต้นทุนในการสร้างโดยค่าการเสียรูปทรง (Total deformation) มีค่าสูงสุดอยู่ที่ 0.13762 mm ซึ่งบริเวณที่เกิดการเสียรูปทรงสูงสุด อยู่บริเวณชุดขับเคลื่อนใบมีดตัดซึ่งอยู่ด้านหน้าของเครื่องตัดใบข้าว ซึ่งถือได้ว่ามีค่าน้อยมากและค่าความเค้นวอนมิสเซส (Equivalent von-mises stress) มีค่าสูงสุดอยู่ที่ 5.1633 MPa ซึ่งจะเกิดขึ้นบริเวณรอยต่อของโครงสร้างและความเค้นสูงสุด (Maximum shear stress) ที่เกิดขึ้นมีค่า 2.9086 MPa ซึ่งจะเกิดขึ้นบริเวณรอยต่อของโครงสร้างของเครื่องตัดใบข้าวเช่นกันซึ่งค่าเหล่านี้ต้องทำการวิเคราะห์ก่อนสร้างจริงเพื่อให้เห็นถึงแนวโน้มความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นเพื่อทำการปรับปรุงแบบและแก้ไขให้โครงสร้างแข็งแรงขึ้นเพื่อลดการสั่นสะเทือน

การพัฒนาชุดขับเคลื่อนใบมีดตัดของเครื่องตัดใบข้าว เพื่อลดการสั่นสะเทือนโดยยึดแนวทางและหลักการอ้างอิงการสร้างและออกแบบจากทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับรถเกี่ยวนวดข้าว เพื่อทดสอบค่าการสั่นสะเทือนของชุดขับเคลื่อนใบมีดตัดของเครื่องตัดใบข้าวที่ออกแบบพบว่า ความเร็วรอบที่เหมาะสมในการทดลองในครั้งนี้อยู่ที่ 350 rpm เนื่องจากสามารถตัดใบข้าวได้ขาดหมดและพบว่าค่าการสั่นสะเทือนในแนวแกนนอน เมื่อใช้การขับเคลื่อนด้วยระบบโซ่มีค่าการสั่นสะเทือนน้อยกว่าใช้การขับเคลื่อนด้วยสายพานและมีค่าการสั่นสะเทือนน้อยกว่าการใช้เครื่องตัดหญ้าแบบดั้งเดิม ค่าการสั่นสะเทือนของชุดขับเคลื่อนใบมีดตัดของเครื่องตัดใบข้าวเมื่อขับเคลื่อนด้วยโซ่เปรียบเทียบกับค่าการสั่นสะเทือนเมื่อขับเคลื่อนด้วยสายพานลดลง 15.33 % และเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องตัดหญ้าค่าการสั่นสะเทือนมีค่าลดลงคิดเป็น 7.44 % และค่าการสั่นสะเทือนในแนวแกนตั้งเมื่อใช้การขับเคลื่อนด้วยระบบโซ่มีค่าการสั่นสะเทือนน้อยกว่าใช้การขับเคลื่อนด้วยสายพานโดยค่าการสั่นสะเทือนเมื่อขับเคลื่อนด้วยโซ่เปรียบเทียบกับค่าการสั่นสะเทือนเมื่อขับเคลื่อนด้วยสายพานลดลง 37.03 % และเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องตัดหญ้าค่าการสั่นสะเทือนมีค่าลดลงคิดเป็น 19.40 % ค่าการสั่นสะเทือนที่วัดได้เปรียบเทียบกับค่าการสั่นสะเทือนของรถเกี่ยวนวดข้าวมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันคือมีค่าน้อยกว่าการใช้ระบบ

ขับเคลื่อนชุดขับเคลื่อนใบมีดตัดของเครื่องตัดใบข้าวด้วยโซ่มีค่าการสั่นสะเทือนน้อยกว่าใช้สายพาน เนื่องจากสายพานจะเกิดการลื่นไถลในขณะทำงานทำให้เกิดการสั่นของสายพานทำให้ค่าการสั่นสะเทือนสูงกว่าการใช้โซ่ และจากตารางที่ 5 เมื่อเปรียบเทียบต้นทุนในการทำนาแบบเดิมไม่ตัดใบข้าวกับต้นทุนการทำนาโดยใช้เครื่องตัดใบข้าวสามารถลดต้นทุนในการผลิตข้าวได้ถึง 640 บาท/ไร่ และน้ำหนักของเครื่องตัดใบข้าวที่ได้ที่ออกแบบและพัฒนาขึ้นมามีน้ำหนักเบากว่าเครื่องตัดหญ้าแบบสะพายบ่าถึง 1.10 กิโลกรัม สามารถลดน้ำหนักลงมาได้คิดเป็น 10.78%

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยในครั้งนี้ประสบผลสำเร็จได้ด้วยดีนั้น ผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุนสนับสนุนการวิจัยสำหรับบุคลากร มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร งบประมาณแผ่นดิน พ.ศ. 2560 ขอบพระคุณกลุ่มเกษตรกรผู้ปลูกข้าว บ้านนางอย อำเภอเต่างอย จังหวัดสกลนครที่ให้เข้าไปศึกษาและเก็บข้อมูลพร้อมทั้งร่วมเสนอแนะแนวทางในการพัฒนา ขอบพระคุณคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร ที่ช่วยสนับสนุนและอำนวยความสะดวกในการทำวิจัย และท้ายที่สุดนี้ขอขอบพระคุณวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สนับสนุนบุคลากรในการให้คำปรึกษาและดำเนินการวิจัยในครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Nattadon P., Atichit W., Chatchai B., et al. Comparison of Bio-Methane Gas Wobbe Index in Different Animal Manure Substrate. Energy Procedia 2017; 138:273-77.

[2] Abdalla A., Misra AN., El- Azeem K. M. Salem. Effect of leaf cutting on physiological traits and yield of two rice cultivars. African Journal of Plant Science 2008; 12(2):147-50.

[3] Konboon Y., Sripodok S., Rattannasriwong S. Rice leaf cutting in Dry-seed broadcastingrice. Proceeding of Rice and temperate cereal crops annual conference; Bankok (Thailand); 2007. P.112-8.

[4] Baerdemaeker DJ., Saeys W. Advanced Control of Combine Harvesters. KU Leuven, Department of Biosystems, Division MeBioS Kasteelpark Arenberg 30. B3001 Heverlee, Belgium; 2014.

[5] Somchai C. Development of a Cutter Bar Driver for Reduction of Vibration for a Rice Combine Harvester. KKU Research Journal 2010; 15(7):572-80

[6] Inoue E., Fukushima T., Hirai Y., et al. Wavelet analysis of the vibration acceleration for field machines. Sci. Bull. Fac. Agr. Kyushu Univ 2003; 57(2):169-76.

[7] Takashi F., Eiji I., Muneshi M., et al. Vibration Characteristics and Modeling of Knife Driving System of Combine Harvester (Part 1). Journal of JSAM 2006; 68(5):52-5

[8] Takashi F , Eiji I , Muneshi M., et al. Collision Vibration Characteristics with Interspace in Knife Driving System of Combine Harvester. EAEF 2012; 5(3):115-120.

[9] Inoue E., Marutani I., Mitsuoka M., et al. Mechanical model on the driving mechanism of combine's cutting section and verification. Journal of JSAM 2004; 66(2):61-67.

[10] Inoue E. Time series analysis of acceleration of cutting section of Japanese combines (in Japanese). Journal of Kyushu Branch of JSAM 2001; 50:31-36

[11] Chinsuwan W., Pongjan N., Chuan-Udom S., et al. Effects of Reel Index on Gathering Loss of Rice Combine Harvester. Thai Society of Agricultural Engineering Journal 2004; 11(1):7-9.

[12] ต้นทุนการผลิตข้าวของชาวนา กรมการค้าต่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์ [อินเทอร์เน็ต]. [21 มกราคม 2016; เข้าถึงเมื่อ 10 กรกฎาคม 2018]. เข้าถึงได้จาก: http://www.thairiceimfo.go.th