

การออกแบบเส้นทางการเคลื่อนที่สำหรับเครื่องกรีดยางพาราอัตโนมัติ



นางสาวกมลชนน วงศ์สถาน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2563

**TRAJECTORY PLANNING FOR AN AUTOMATIC
PARA-RUBBER TAPPING MACHINE**



Kamonchanon Vongstan

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering Program in Mechanical and Process
System Engineering Suranaree University of Technology**

Academic Year 2020

การออกแบบเส้นทางการเคลื่อนที่สำหรับเครื่องกรีดยางพาราอัตโนมัติ

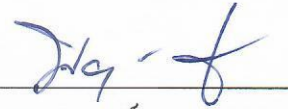
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผศ. ดร.เทวรัตน์ ตรีอำนรรค)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.พวงศักดิ์ จุลยเสน)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ดร.วันรัฐ อับดุลลาคาซิม)

กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐียงกูร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

กมลชนน วงศ์สถาน : การออกแบบเส้นทางการเคลื่อนที่สำหรับเครื่องกรีดยางพารา
อัตโนมัติ (TRAJECTORY PLANNING FOR AN AUTOMATIC PARA-RUBBER
TAPPING MACHINE) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พยุงศักดิ์ จุลยุเสณ,
63 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบเส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกลแบบสองแกนที่
เหมาะสมสำหรับการกรีดยางพารา เส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกลถูกสร้างมาจากรูปร่างของ
ต้นยางพารา การเคลื่อนที่ของแขนกลในแนวแกน Z ถูกกำหนดให้เป็นฟังก์ชันกับการเคลื่อนที่
ของแขนกลในแนวแกน X' การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของแบบจำลองทางคิเนเมติกส์ของแขน
กลถูกกระทำโดยอาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ ผลการจำลองสถานการณ์แสดง
ให้เห็นว่า เมื่อกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกลเป็นวงรี และแขนกลในแนวแกน X'
เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ดังนั้นแขนกลในแนวแกน Z เคลื่อนที่แบบฮาร์โมนิกอย่างง่าย แขน
กลที่ถูกพัฒนาประกอบด้วยโครงจับยึดต้นยาง ชุดกลไกขับเคลื่อน และชุดตัวรูปร่างและกรีดยาง
อุปกรณ์ตัวรูปร่างต้นยางถูกสร้างจากเซนเซอร์วัดตำแหน่งแบบ LVDT สปริงรับแรงกด ลูกกลิ้ง
และตัวปรับมุมของลูกกลิ้ง โปรแกรมควบคุมแขนกลถูกเขียนด้วยซอฟต์แวร์ LabVIEW จากการ
ทดสอบกรีดยางพาราพบว่า โปรแกรมควบคุมสามารถสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกล
ที่สอดคล้องกับรูปร่างของต้นยางที่วัดได้ และแขนกลสามารถกรีดยางได้ด้วยค่าความ
ผิดพลาดทางตำแหน่งเฉลี่ย 0.35 ± 0.48 mm และรอยกรีดมีความลึกเฉลี่ยและความกว้างเฉลี่ย
เท่ากับ 3.14 ± 2.06 mm และ 12.07 ± 5.80 mm ตามลำดับ

KAMONCHANON VONGSTAN : TRAJECTORY PLANNING FOR AN
AUTOMATIC PARA-RUBBER TAPPING MACHINE. THESIS ADVISOR :
ASST. PROF. PAYUNGSAK JUNYUSEN, Ph.D., 63 PP.

PARA-RUBBER TAPPING/TRAJECTORY/LVDT

The objective of this study was to design an appropriate trajectory of a two-axis manipulator for tapping para-rubber tree. The trajectory was generated from the shape of para-rubber tree. The motion of manipulator in the Z-axis was defined as a function of the motion in the X'-axis. Motion analysis of the kinematic model of the manipulator was done employing a computer simulation. The simulation results showed that when the trajectory of the manipulator was defined as an ellipse shape and the motion in the X'-axis was a constant speed, the Z-axis of the manipulator moved with a simple harmonic motion. The developed manipulator consisted of a supporting frame, a driving unit and a shape tracking and tapping unit. The shape tracking device was fabricated from a LVDT position sensor, a compressive spring, a roller and a roller's angle adjuster. The control program of the manipulator was coded using LabVIEW software. The experimental results from tapping the para-rubber tree showed that the control program could generate the trajectory of the manipulator that was similar to the tracked shape of the para-rubber tree. The manipulator could tap the para-rubber tree with the average positional error of 0.35 ± 0.48 mm, the tapping path's average depth of 3.14 ± 2.06 mm and the tapping path's average width of 12.07 ± 5.80 mm.

School of Agricultural Engineering

Academic Year 2020

Student's Signature กมลชนก วงศ์สิน

Advisor's Signature พ.อ.พ. พายุงซาก

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี หากไม่ได้รับความกรุณาจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พยุงศักดิ์ จุลยเสน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่อง เพื่อให้วิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทวรัตน์ ตรีอำรรค ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันรัฐ อับดุลลาฮาซิม กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิจากภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาลัยเขตกำแพงแสน ที่กรุณาตรวจแก้ไข และให้คำแนะนำต่างๆ ให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สมบูรณ์ถูกต้องยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางในการเรียนรู้และการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณคุณกรรณิการ์ ประเสริฐสังข์ เจ้าหน้าที่สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้คำแนะนำการจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ ดร.เกียรติศักดิ์ ใจโต คุณฉัตริน เรืองจอหอ และพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ บัณฑิตทุกท่านที่มีส่วนช่วยสนับสนุนการศึกษา ให้คำแนะนำ ช่วยเหลือการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่อนุเคราะห์ห่มอบต้นยางพาราสำหรับทำวิจัยให้ใช้ศึกษา

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณพ่อเกษม วงศ์สถาน คุณแม่กัญญาภา วงศ์สถาน และครอบครัว ที่ช่วยส่งเสริมสนับสนุนการศึกษา คอยเลี้ยงดู อบรมสั่งสอน และเป็นกำลังใจตลอดมา

กมลชนน วงศ์สถาน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ยางพารา.....	3
2.1.1 โครงสร้างของต้นยางพารา.....	3
2.1.2 การกรีดยาง.....	7
2.1.3 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการกรีดยาง.....	7
2.1.4 สัญลักษณ์ของระบบกรีดยาง.....	9
2.2 แขนกล.....	10
2.2.1 พื้นฐานของแขนกล.....	10
2.2.2 ส่วนประกอบของหุ่นยนต์.....	12
2.3 การวางแผนการเคลื่อนที่.....	13
2.4 ระบบควบคุม.....	14

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5	ระบบควบคุมป้อนกลับแบบ PID	15
2.6	การปรับจูนด้วยวิธีการของซีเกลอร์-นิโคลส์ (Ziegler-Nichols method).....	16
2.7	อุปกรณ์วัดตำแหน่ง.....	17
2.7.1	LVDT.....	17
2.7.2	เอ็นโค้ดเดอร์ (Encoder).....	19
2.8	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
3	วิธีการดำเนินการวิจัย.....	27
3.1	การวิเคราะห์ทางคิเนเมติกส์ของแขนกลกรีดยางพารา	27
3.2	การออกแบบเส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกลกรีดยางพารา.....	28
3.3	การออกแบบตัวควบคุมแบบป้อนกลับ	30
3.4	การออกแบบอุปกรณ์วัดรูปร่างต้นยางพารา.....	31
3.5	โปรแกรมควบคุมแขนกลกรีดยางพารา	35
3.6	การทดสอบการเคลื่อนที่ของแขนกลกรีดยางพารา.....	37
4	ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	40
4.1	ผลวิเคราะห์ทางคิเนเมติกส์ของแขนกลกรีดยางพารา.....	40
4.2	ผลการออกแบบเส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกลกรีดยางพารา	43
4.3	ผลการปรับจูนค่าเกนของตัวควบคุมแบบ PID	45
4.4	ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของแขนกลกรีดยางพารา	46
5	สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	51
5.1	สรุปผล	51
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	51
	รายการอ้างอิง	52
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. แบบทางวิศวกรรมของชุดวัดรูปร่างและกรีดยาง.....	54
	ภาคผนวก ข. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา	61
	ประวัติผู้เขียน	63

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	มาตรฐานการเจริญเติบโตของต้นยาง 6
2.2	ลักษณะการเจริญของลำต้น 6
2.3	ค่าเกณฑ์เหมาะสมตามวิธีการของซีเกลอร์-นิโคลส์..... 17



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	โครงสร้างของเปลือกและเซลล์ท่อน้ำยาง..... 4
2.2	โครงสร้างของต้นยางพารา..... 4
2.3	แสดงทิศทางของรอยกรีดและการเอียงของท่อน้ำยาง..... 5
2.4	ส่วนประกอบของมิดเจ๊าบง 9
2.5	การแบ่งหน้ากรีด..... 9
2.6	ส่วนประกอบของแขนกล 11
2.7	รูปแบบของพิกัดและการเคลื่อนที่ของแขนกล (a) Cartesian (b) Cylindrical (c) Spherical (d) Revolute or Articulated 12
2.8	เส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกล 14
2.9	ระบบควบคุม (ก) แบบวงเปิด (ข) แบบวงปิด..... 15
2.10	ตัวควบคุมแบบ PID..... 16
2.11	การทดสอบระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมแบบ P..... 16
2.12	ลักษณะของผลตอบสนองที่เกิดขึ้นไกว..... 16
2.13	วงจรรภายในของ LVDT 18
2.14	ค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของ LVDT โดยแกนเคลื่อนที่อยู่ในตำแหน่งใดๆ..... 18
2.15	ส่วนประกอบของ Increment encoder 19
2.16	สัญญาณบิตเอาต์พุตของ Increment encoder 20
2.17	ส่วนประกอบของ Absolute encoder..... 20
2.18	เครื่องกรีดยางไฟฟ้า 21
2.19	ปลายแขนกลกรีดยางพาราอัตโนมัติ 22
2.20	ชุดเครื่องมือกรีดยาง..... 23
2.21	เครื่องกรีดยางอัตโนมัติแบบใช้มอเตอร์ไฟฟ้า 24
2.22	เครื่องกรีดยางพาราอัตโนมัติ 25
2.23	เครื่องกรีดยางพาราอัตโนมัติแบบตั้งเวลา 26

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1	การกำหนดระบบพิกัดจากบนต้นยางพาราและทรงกระบอก 28
3.2	แบบจำลองแกนกลกรีดยางแบบสองแกน 28
3.3	เส้นทางการเคลื่อนที่ของแกนกลแกน Z 29
3.4	ค่าผิดพลาดทางตำแหน่งในการเคลื่อนที่ 30
3.5	แผนภาพบล็อกของระบบควบคุมปลายแกนกลกรีดยางพารา 31
3.6	แกนกลสำหรับกรีดยางพาราต้นแบบ 32
3.7	แบบจำลองอุปกรณ์วัดรูปร่างต้นยางพารา 33
3.8	เส้นทางการเคลื่อนที่วัดรูปร่างต้นยางและกรีดยาง 33
3.9	แกนกลกรีดยางที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดรูปร่างต้นยางพารา 34
3.10	แผนผังของระบบวัดคุมแกนกลกรีดยางพารา 35
3.11	โปรแกรมควบคุมแกนกล Shape tracking 36
3.12	โปรแกรมควบคุมแกนกล Path planning & Tapping (1) Path planning (2) Tapping 36
3.13	ขั้นตอนการทำงานของแกนกล (1) Shape tracking (2) Path planning & Tapping 38
3.14	สัณฐานของต้นยางพาราจำลองที่ใช้ทดสอบ 39
3.15	สัณฐานของต้นยางพาราจริงที่ใช้ทดสอบ 39
4.1	เส้นทางการเคลื่อนที่ของแกนกล 41
4.2	การกระจัดของตัวขั้วเร้าเชิงเส้นบนแกน X' และแกน Z 41
4.3	ความเร็วของตัวขั้วเร้าเชิงเส้นบนแกน X' และแกน Z 42
4.4	ความเร่งของตัวขั้วเร้าเชิงเส้นบนแกน X' และแกน Z 42
4.5	การกระตุกของตัวขั้วเร้าเชิงเส้นบนแกน X' และแกน Z 43
4.6	เส้นทางการเคลื่อนที่ของตัวขั้วเร้าเชิงเส้นบนแกน X' และแกน Z 44
4.7	เส้นทางการเคลื่อนที่ของแกนกลกรีดยางบนระนาบ $X'-Z$ 44
4.8	เส้นทางการเคลื่อนที่ของแกนกล เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบ PID 45
4.9	การเปรียบเทียบเส้นทางการเคลื่อนที่ของแกนกลกรีดยางพารา กับเส้นทางที่ได้จากการสำรวจรูปร่างต้นยางพาราจำลอง 47
4.10	ลักษณะรอยกรีดบนต้นยางพาราจำลอง 47

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 การเปรียบเทียบเส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกลกรีดยางพารา กับเส้นทางที่ได้จากการสำรวจรูปร่างต้นยางพาราจริง.....	49
4.12 ลักษณะรอยกรีดบนต้นยางพาราจริง.....	50
4.13 ความลึกและความกว้างที่ได้จากการสำรวจรูปร่างต้นยางพาราจริง	50



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

K_p	=	ค่าเกนแบบสัดส่วน
T_I	=	คาบเวลาปริพันธ์
T_D	=	คาบเวลาอนุพันธ์
K_U	=	ค่าเกนวิกฤต
T_U	=	คาบเวลาของการสั่นไกวของระบบ
r	=	รัศมีของต้นยางพารา
t	=	เวลาที่ใช้ในการกรีด
θ	=	มุมของรอยกรีด
ω	=	ความเร็วเชิงมุม
z_D	=	ตำแหน่งที่ต้องการ
z_A	=	ตำแหน่งจริง
e	=	ค่าผิดพลาดทางตำแหน่ง
θ_z	=	มุมของการเคลื่อนที่ในระนาบ $x'z$
x	=	ตำแหน่งในการเคลื่อนที่ในระนาบ $x'z$

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันจำนวนแรงงานกรีดยางลดลงไปเป็นจำนวนมาก เนื่องจากเศรษฐกิจยางพาราที่ค่อนข้างผันผวน รวมทั้งภาวะอากาศแปรปรวนเกิดพายุและฝนตกหนัก ทำให้แรงงานมีแรงงานมีรายได้ไม่แน่นอนจึงหันไปประกอบอาชีพอื่นที่มีรายได้ต่อวันที่ดีและมั่นคงกว่า นอกจากนี้แรงงานกรีดยางจำเป็นต้องมีทักษะ มีความชำนาญ ซึ่งจะส่งผลต่อปริมาณน้ำยางที่กรีดยาง รวมถึงการชะงักการเจริญเติบโตของต้นยางพารา เนื่องจากมีโอกาสที่คนมีฝีมือจะไปภาคเชื้อเจริญที่อยู่ติดกับบริเวณเปลือกต้นยางพารา ซึ่งเชื้อเจริญสามารถสร้างเนื้อเยื่อใหม่มาทดแทน แต่หากเนื้อเยื่อนี้ถูกทำลาย จะไม่สามารถสร้างเปลือกใหม่หรือทำให้เปลือกงอกใหม่ไม่เรียบสม่ำเสมอ เป็นรอยขรุขระ การเก็บเกี่ยวผลผลิตจากเปลือกงอกใหม่จะไม่สะดวก (สมจิตร, 2536)

อุปกรณ์ที่นิยมใช้ในการกรีดยางที่นิยมใช้มี 2 ชนิด คือ มีดเกาจ์ และมีดเจ๊ะบง แต่มีดที่นิยมใช้กรีดยางหน้าล่างโดยทั่วไปจะใช้มีดเจ๊ะบง จากการตรวจสอบพบว่า มีดเจ๊ะบงที่ใช้กันนั้นยังไม่มีข้อกำหนดมาตรฐาน ทำให้ผู้ผลิตมีดกรีดยางใช้วัสดุที่เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของการสึกหรอและแตกหักง่าย (สหรัตน์ และสมนึก, 2546) นอกจากนี้ผู้ใช้งานจะต้องมีทักษะและความชำนาญแล้ว ยังต้องสูญเสียพลังงานในการออกแรงในการกระตุกเพื่อให้คมมีดเลื่อนเปลือกยางเป็นระยะทางยาวประมาณครึ่งหนึ่งของเส้นรอบของต้นยางพารา

ผู้พัฒนาที่เป็นเกษตรกร นักวิจัย หรือผู้เกี่ยวข้องเห็นถึงความสำคัญนี้จึงได้ออกแบบและพัฒนาชนิดกรีดยางรูปแบบใหม่ๆ เพื่อสะดวกแก่เกษตรกร และราคาถูก คือ มีดกรีดยางแบบไฟฟ้า ที่ไม่ต้องออกแรงเยอะและยังสามารถกรีดยางได้เร็วกว่ามีดกรีดยางแบบดั้งเดิม (สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร, 2544) แต่มีดกรีดยางไฟฟ้าผู้ใช้ยังจะต้องมีทักษะและความชำนาญ ปัจจุบันผู้ผลิตยางรายใหญ่อย่างบริษัทจีนได้พัฒนาสร้างรูปแบบเครื่องกรีดยางใหม่ ที่ไม่ต้องอาศัยแรงงานกรีดยางที่ต้องมีทักษะและความชำนาญ โดยสร้างเครื่องกรีดยางแบบอัตโนมัติ ซึ่งประกอบไปด้วยตัวตั้งเวลา มีดกรีดยางที่ติดกับไคด์ไลน์ และตัวโครงจะล็อกยึดติดกับลำต้นของต้นยาง ซึ่งสามารถส่งงานผ่านโทรศัพท์มือถือ (มดิชนออนไลน์, 2559) และประเทศไทยที่เป็นผู้ส่งออกยางใหญ่ก็มีงานวิจัย

พัฒนาเครื่องกรีดยางพาราแบบอัตโนมัติแบบใช้มอเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งประกอบไปด้วยชุดโครงยึดเกาะกับต้นยาง เคลื่อนที่ขึ้น-ลงโดยมอเตอร์ 2 ตัว โดยมีตัวนำใบมีดคอยประสานกับรางพาเพื่อควบคุมความลึก และใช้ใบมีดแบบหัวดอกกักไม้ ลักษณะเป็นหัวแฉกตัดเฉือนเข้าเนื้อยาง (เอกสิทธิ์ อนันต์ เจริญวงศ์ และคณะ, 2562) จากงานวิจัยดังกล่าวยังมีข้อบกพร่องในเรื่องน้ำหนักที่มากเกินไป การปรับระยะของชุดยึดเกาะต้นยางที่ทำให้ตัวนำใบมีดไม่เกาะต้นยาง และค่าใช้จ่ายสูง จากการนำไปติดต้นยางในแต่ละต้น จึงมีการพัฒนาเครื่องกรีดยางในรูปแบบของแขนกลกรีดยางอัตโนมัติ ซึ่งนำเทคโนโลยีแขนกลที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรม และสามารถประยุกต์ใช้งานในด้านเกษตรกรรมได้หลากหลาย เช่น แขนกลปลูกต้นกล้า แขนกลตัดแต่งกิ่ง แขนกลเก็บเกี่ยวผลไม้นี้ เป็นต้น เนื่องจากแขนกลมีระดับความอิสระสูง (degree of freedom) สูง และมีระบบควบคุมที่มีประสิทธิภาพส่งผลให้แขนกลมีความยืดหยุ่นในการเคลื่อนที่ โดยแขนกลแบบ 2 แกนนี้ถูกออกแบบให้มีเคลื่อนที่กรีดยางไปตามเส้นทางที่กำหนดจากขนาดของต้นยางตามสมการเส้นโค้งวงกลมตามทรงกระบอกแบบง่ายๆ (ยงยุทธ เลียงดั่ง, 2559) แต่แขนกลอัตโนมัติยังมีข้อเสีย เหมือนๆกับเครื่องกรีดยางแบบอัตโนมัติที่มีอยู่ในปัจจุบันที่มีข้อจำกัดในเรื่องของการกรีดในลักษณะพื้นฐานของต้นยางในบางช่วงจะมีลักษณะโค้งงอ หรือโค้งเว้าตามธรรมชาติของต้นยางพารา ทำให้เครื่องกรีดยางไม่สามารถกรีดตามลักษณะพื้นฐานของต้นยางได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์หลักในการสร้างเส้นทางกรีดยางของแขนกลกรีดยางพาราเพื่อให้สามารถกรีดยางไปตามลักษณะพื้นฐานของต้นยางพาราได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อสร้างเส้นทางที่เหมาะสมสำหรับแขนกลกรีดยางพารา
- 1.2.2 เพื่อควบคุมแขนกลกรีดยางพาราให้เคลื่อนที่ตามเส้นทางที่ออกแบบไว้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ต้นยางพาราที่ใช้ทดลองจะใช้ต้นยางพาราพันธุ์ RRIM 600 อายุประมาณ 6-7 ปีขึ้นไป มีเส้นรอบลำต้นไม่น้อยกว่า 50 เซนติเมตร ที่ปลูกในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- 1.3.2 ต้นยางพาราจำลองถูกกำหนดให้มีลักษณะพื้นฐานใกล้เคียงกับต้นยางพารา

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้เส้นทางที่เหมาะสมสำหรับเครื่องกรีดยางพารา
- 1.4.2 แขนกลกรีดยางพาราสามารถเคลื่อนที่ตามเส้นทางที่ออกแบบไว้

บทที่ 2

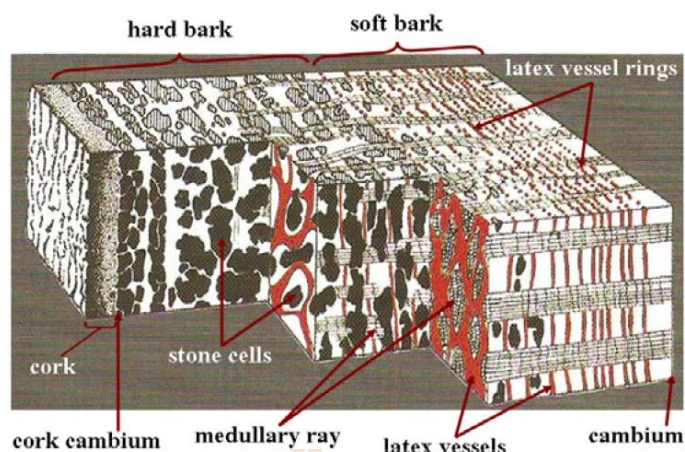
ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ยางพารา

2.1.1 โครงสร้างของต้นยางพารา

โครงสร้างของลำต้นยาง มีส่วนประกอบสำคัญ 3 ส่วน คือ

- 1) เปลือก (Bark) ที่เกี่ยวข้องกับผลผลิต แบ่งออกเป็น 3 ชั้น ตามลักษณะของเนื้อเยื่อ และการเกิดของ Stone cell ในเปลือกยาง คือ
 - เปลือกชั้นนอก หรือเปลือกแข็ง (Hard bark) อยู่ถัดจากเปลือกชั้นในออกมาทางด้านนอกเป็นส่วนเนื้อเยื่อที่ถูกออกมาด้านนอกเมื่อเยื่อเจริญมีการสร้างเนื้อเยื่อใหม่ขึ้นมาแทนที่เปลือกส่วนนี้มี Stone cell แทรกอยู่ในวงท่อน้ำยาง ทำให้ท่อน้ำยางขาดและไม่สมบูรณ์ความหนาของเปลือกชั้นนี้ประมาณร้อยละ 70-80 ของเปลือกทั้งหมด
 - เปลือกชั้นในหรือเปลือกอ่อน (Soft bark) อยู่ติดกับเยื่อเจริญเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดเพราะมีเนื้อเยื่อ และท่อน้ำยางที่สร้างขึ้นใหม่ มีจำนวนท่อน้ำยางที่หนาแน่น และสมบูรณ์ที่สุดมากกว่าเปลือกชั้นนอก ความหนาของเปลือกชั้นนี้ประมาณร้อยละ 20-30 ของเปลือกทั้งหมด
 - ชั้นของคอร์ค (Cork) เป็นชั้นของเปลือกนอกสุด ประกอบด้วยเนื้อเยื่อที่ตายแล้วทำหน้าที่ห่อหุ้ม ป้องกันและรักษาความชื้นให้แก่ส่วนของเปลือกที่อยู่ถัดเข้าไปด้านใน



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเปลือกและเซลล์ท่อน้ำยาง

2) เยื่อเจริญ (Cambium) เป็นเนื้อเยื่อที่อยู่ระหว่างเปลือกกับเนื้อไม้ ทำหน้าที่สร้างความเจริญเติบโตให้กับต้นยางและมีการแบ่งตัวตลอดเวลาโดยแบ่งตัวเข้าด้านในเป็นเนื้อไม้และแบ่งตัวออกด้านนอกเป็นเปลือกและทำหน้าที่สร้างเปลือกงอกใหม่ขึ้นมาแทนที่เปลือกที่ถูกกรีดออกไป หากเยื่อเจริญถูกทำลายเป็นบริเวณกว้าง จะไม่มีการสร้างเปลือกใหม่ขึ้นทดแทนเปลือกเดิม

3) เนื้อไม้ (Wood) เป็นแกนกลาง ทำหน้าที่ลำเลียงน้ำจากรากไปสู่ส่วนต่างๆของลำต้น เป็นส่วนที่ไม่มีท่อน้ำยาง



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของต้นยางพารา

ท่อน้ำยาง (Latex vessel) เป็นเนื้อเยื่อที่ถูกสร้างโดยเยื่อเจริญ จะเรียงตัวเป็นวงรอบต้นตามแนวตั้งเป็นชั้นๆ ซึ่งท่อน้ำยางในแต่ละวงจะเชื่อมต่อกันเป็นร่างแห ทำให้น้ำยางในวงเดียวกันสามารถติดต่อกันได้แต่ไม่ติดต่อระหว่างวง โดยท่อน้ำยางจะวางตัวเอียงไปทางขวาจากแนวตั้งประมาณ 2-7 องศา ดังรูปที่ 2.3 เมื่อหันหน้าเข้าหาต้นยาง การกรีดจึงต้องกรีดเอียงจากซ้ายบนมาขวาล่างเพื่อให้ตัดท่อน้ำยางมากที่สุด โดยท่อน้ำยางจะเรียงตัวกันเป็นวงรอบลำต้นพันธุ์ที่ให้ผลผลิตสูงมักจะมีจำนวนวงท่อน้ำยางมาก น้ำยางสามารถติดต่อกันได้ภายในวงท่อน้ำยางเดียวกันแต่ไม่สามารถติดต่อกันได้ระหว่างวงท่อน้ำยางต้นยางที่มีวงท่อน้ำยางมาก โดยส่วนใหญ่จะให้น้ำยางสูง วงท่อน้ำยางจะมีมากและสมบูรณ์ในบริเวณด้านในสุดของเปลือกชั้นใน ดังนั้น การกรีดยางจะต้องกรีดถึงชั้นนี้ จึงจะได้ น้ำยางมากที่สุด ภายในท่อน้ำยางมีน้ำยางบรรจุอยู่ น้ำยางสดที่กรีดจากต้นยางมีลักษณะเป็นของเหลวสีขาว หรือสีครีมอยู่ในสภาพสารแขวนลอย น้ำยางสดประกอบด้วยสารต่างๆ ซึ่งมีปริมาณแปรปรวนอย่างกว้างขวางขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ เช่น พันธุ์ยาง อายุของต้นยาง ฤดูกาล และวิธีการกรีดยาง เป็นต้น ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และ 2.2



รูปที่ 2.3 แสดงทิศทางของรอยกรีดและการเอียงของท่อน้ำยาง

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานการเจริญเติบโตของต้นยาง

อายุ	ขนาดลำต้นที่ความสูง 150 เซนติเมตรจากพื้นดิน (cm.)		
	ต่ำ	ปานกลาง	สูง
2	12	14	16
3	21	24	27
4	29	33	37
5	36	41	46
6	43	47	52

ตารางที่ 2.2 ลักษณะการเจริญของลำต้น

ลำดับ	สายพันธุ์ยางพารา	ขนาดรอบวงลำต้น (cm.)					ความหนาเปลือก (mm.)		วงท่อน้ำยาง (mm.)	
		ที่อายุ					ที่อายุ			
		2 ปี	3 ปี	4 ปี	ปี 5	ปี 10.5	ปี 9	ปี 10	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
1	BPM 24	9.5	21.6	31.6	41.3	59.35	7.71	8.67	12.00	11.67
2	RRI-CH-35-59	8.6	21	30.5	40.3	57.85	5.95	7.17	8.00	6.33
3	RRIT 251	10.6	23.4	33.9	43	64.53	7.08	7.83	6.67	7.67
4	PB 260	9.2	19.1	29.2	38.4	59.12	6.06	8.00	7.33	9.00
5	RRI-CH-35-470	8.4	18.9	26.3	33.7	50.81	5.76	6.83	9.00	8.33
6	RRI-CH-35-499	10.3	18.9	29.1	41.3	66.34	8.25	8.50	9.67	6.33
7	RRI-CH-35-544	10.1	24.7	36.8	48.8	82.63	6.49	7.67	11.67	13.33
8	RRIM 600	9.1	21.2	30.4	40.2	66.47	7.15	8.50	7.67	8.33
9	RRI-CH-35-650	10.9	22.2	32.5	44	72.83	4.96	10.50	5.00	5.33
10	RRI-CH-35-775	7.3	17.1	23.4	33.5	64.48	6.51	7.17	11.33	12.67
11	RRI-CH-35-787	7.5	18	26	35	51.19	5.59	6.00	9.00	7.00
12	RRI-CH-35-1396	8.3	20.8	32.2	43	58.88	7.31	8.00	8.33	9.33
13	RRI-CH-35-1397	9.5	23.4	33.1	42.7	63.00	7.62	7.83	13.67	13.00
14	RRI-CH-35-1403	8.9	19.7	29.8	42	62.72	7.37	7.67	7.67	9.67
15	RRI-CH-35-1461	8.2	21.1	32	43.6	67.62	6.92	8.17	9.33	9.00
16	RRI-CH-35-1757	7.8	16.5	25	35.4	60.83	6.04	7.00	8.00	10.00
17	OP-CH-35-1886	7.6	14.3	20.2	28.8	47.57	5.47	7.17	8.33	7.33
18	OP-CH-35-2010	10.3	22.1	34.4	46.2	74.42	7.62	9.17	11.67	13.67
19	OP-CH-35-2019	10.9	26.6	39	49.7	78.99	5.57	10.00	12.00	11.67
20	OP-CH-35-2086	8.5	21.2	31.7	41.9	68.07	7.89	9.50	6.00	6.67

2.1.2 การกรีดยาง

การกรีดยางที่ดีและถูกต้อง ต้องคำนึงถึงปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลายประการ ได้แก่ พันธุ์ยาง อายุต้นยางฤดูกาล การเปิดกรีด วิธีการกรีด ระบบกรีด วิธีการใช้สารเคมีเร่งน้ำยาง และความชำนาญของคนกรีด การเลือกใช้ปัจจัยที่สอดคล้องเหมาะสม สามารถเพิ่มผลผลิตยางให้สูงขึ้น ถนอมต้นยางให้สามารถกรีดได้ยาวนานขึ้น คำนึงค่ากับการลงทุนปลูกสร้างสวนยางโดยทั่วไปต้นยางเปิดกรีด ได้เมื่อประมาณ 7 ปีครึ่ง และต้นยางในสวนนั้นต้องมีขนาดเปิดกรีดได้มากกว่าร้อยละ 70 ของยาง ทั้งหมด (สำหรับต้นติดตาที่ระดับความสูง 150 เซนติเมตร เส้นรอบวงลำต้นต้องไม่ต่ำกว่า 50 เซนติเมตร) การกรีดยางต้องยึดหลักที่ว่า เมื่อกรีดแล้วต้องได้น้ำยางมาก เปลือกเสียหายน้อยที่สุด และสามารถกรีดได้นานประมาณ 25-30 ปี การกรีดยางเป็นกรรมวิธีการนำผลผลิตในรูปของน้ำยางจากบริเวณเปลือกของต้นยางเพื่อแปรรูป การกรีดยางโดยวิธีการที่ถูกต้อง สามารถเพิ่มผลผลิตให้มากขึ้นแบบยั่งยืน จึงควรพิจารณาปัจจัยต่างๆที่สำคัญ ได้แก่ พันธุ์ยาง อายุต้นยาง ฤดูกาล การเปิดกรีด วิธีการกรีด ระบบกรีด วิธีการใช้สารเคมีเร่งน้ำยาง และความชำนาญของคนกรีด การเลือกใช้ปัจจัยที่เหมาะสมและสอดคล้องกัน ซึ่งสามารถเพิ่มผลผลิตยางให้สูงขึ้นได้ และยังถนอมต้นยางให้กรีดได้ระยะยาวนาน และเป็นอันตรายต่อต้นยางน้อยที่สุด (พิจิต สพโชค และคณะ, 2550: 120)

2.1.3 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการกรีดยาง

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการกรีดยางที่มีผลต่อผลผลิต มีดังนี้

1) ความลึกของการกรีด ความหนาแน่นของจำนวนท่อน้ำยางมีมากบริเวณเปลือกชั้นใน และมีมากที่สุดบริเวณใกล้เชื้อเจริญ การกรีดยางให้เหลือส่วนของเปลือกในสุด 0.5 มิลลิเมตร จะตัดวงท่อน้ำยางได้ถึงร้อยละ 80 แต่โดยทั่วไปการกรีดยางจะเหลือส่วนของเปลือกชั้นในสุดถึง 1.3 มิลลิเมตร ทำให้คงเหลือวงท่อน้ำยางไว้บนต้นโดยไม่ได้กรีดถึงร้อยละ 50 ซึ่งเป็นท่อน้ำยางที่สมบูรณ์ที่สุด ดังนั้นการกรีดให้ได้น้ำยางมากจึงควรกรีดให้ใกล้เชื้อเจริญมากที่สุด อย่างไรก็ตาม หากกรีดลึกเกินไปหน้ายางจะเป็นแผลเปลือกงอกใหม่ขรุขระ ไม่สามารถกรีดต่อไปได้ ดังนั้นจึงขึ้นกับความชำนาญของคนกรีด

2) ขนาดของงานกรีด หมายถึงจำนวนต้นยางที่คนกรีดสามารถกรีดได้แต่ละวัน ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของต้น ความยาวรอยกรีด ลักษณะของพื้นที่ ความชำนาญของคนกรีด และช่วงเวลาการไหลของน้ำยาง ปกติการกรีดครั้งลำต้นสามารถกรีดได้ 450-500 ต้นต่อวัน การกรีดหนึ่งในสามของลำต้นสามารถกรีดได้ 650-700 ต้นต่อวัน

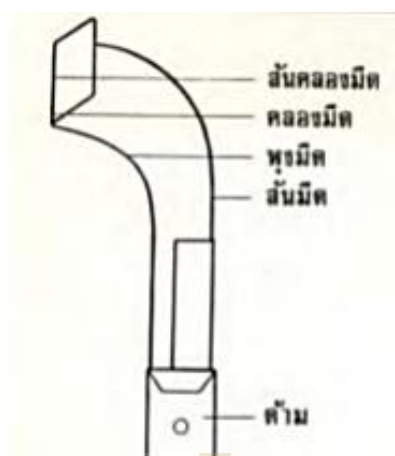
3) เวลาที่เหมาะสมสำหรับกรีดยาง ผลผลิตของน้ำยางจะขึ้นอยู่กับความเต่งของเซลล์ ซึ่งมีผลต่อความดันภายในท่อน้ำยาง ในช่วงกลางวันความเต่งของเซลล์จะลดต่ำลง สาเหตุมาจากการคายน้ำโดยจะเริ่มลดต่ำหลังดวงอาทิตย์ขึ้นจนถึงเวลา 13.00-14.00 น. จะลดลงต่ำสุด

หลังจากนั้นก็เริ่มเพิ่มขึ้นจนกลับสภาพเดิมเมื่อเวลากลางคืน จากการทดลองกรีดยาวต่างกัน พบว่าการกรีดยาวเวลา 06.00-08.00 น. ได้น้ำอย่างน้อยกว่าการกรีดยาวเวลา 03.00-06.00 น. เฉลี่ยประมาณ ร้อยละ 4-5 การกรีดยาวเวลา 08.00-11.00 น. ได้น้ำอย่างน้อยกว่าการกรีดยาวกลางคืน เฉลี่ยร้อยละ 16 และการกรีดยาวเวลา 11.00-13.00 น. ได้น้ำอย่างน้อยกว่าการกรีดยาวกลางคืน เฉลี่ยร้อยละ 25

4) ความสิ้นเปลืองเปลือก การกรีดยาวเปลือกหนาหรือบางไม่มีผลกระทบต่อผลผลิต การกรีดยาวที่ใช้ความถี่ของการกรีดยาวต่ำจะสิ้นเปลืองเปลือกต่อครั้งกรีดยาวมากกว่าการกรีดยาวที่ใช้ความถี่ของการกรีดยาวสูง แต่เมื่อรวมความสิ้นเปลืองเปลือกทุกครั้งที่กรีดยาวแล้วจะน้อยกว่าการกรีดยาววันเว้นวัน ทำให้น้ำกรีดเปลือกแรกสองน้ำกรีดหมดภายใน 11 ปี การกรีดยาววันเว้นสองวันน้ำกรีดหมดภายใน 16 ปี การกรีดยาวสองวันเว้นวันน้ำกรีดหมดภายใน 8 ปี การกรีดยาวสามวันเว้นวันน้ำกรีดหมดภายใน 7 ปี และการกรีดยาวทุกวันน้ำกรีดหมดภายใน 6 ปี โดยปกติการกรีดยาววันเว้นวัน สิ้นเปลืองเปลือกแต่ละครั้งกรีดยาว ระหว่าง 1.7-2.5 มิลลิเมตร หรือไม่เกิน 25 เซนติเมตรต่อปี

5) ความคมของมีด มีดกรีดยาวควรลับให้คมอยู่เสมอ เพราะจะทำให้ตัดท่อน้ำยางดีขึ้นและสิ้นเปลืองเปลือกน้อยกว่าการใช้มีดกรีดยาวที่ไม่คม

อุปกรณ์ที่ใช้ในการกรีดยาว มีดที่ใช้กรีดยาวมี 2 ชนิด คือ มีดเกาจ์ และมีดเงะบง แต่นิยมใช้มีดเงะบง มีดกรีดยาวควรลับให้คมอยู่เสมอ หินลับมีดมี 2 ชนิด คือ หินหยาบและหินละเอียด สำหรับหินละเอียดที่เพิ่งซื้อใหม่ จะมีความหนาไม่สามารถจะนำ มาลับแต่งคลองมีดและเดือยมีดได้ทันที จะต้องนำมาแต่งให้บางโดยใช้หินหยาบ หรือสันมีดกรีดยาวขูดหรือถูเสียก่อน เพื่อให้เหมาะสมกับการแต่งคลองมีดและเดือยมีด ในการลับมีดกรีดยาวนั้น ครั้งแรกให้ลับด้วยหินหยาบก่อน จนสังเกตว่ามีความคมเกิดขึ้นแล้ว ให้ใช้หินละเอียดลับซ้ำ การลับมีดต้องลับให้ราบเรียบสม่ำเสมอตลอดทั้งเล่ม ในขณะที่ลับด้วยหินหยาบหรือหินละเอียดพยายามหลีกเลี่ยงอย่าให้ถูกคลองมีดมากนัก เพราะจะทำให้เกิดเดือยงอกออกมา



รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบของมีดเจาะยาง

นอกจากปัจจัยของการกรีดยางต่างๆ ที่กล่าวมาแล้ว ปัจจัยอื่นนอกเหนือจากการกรีดยาง เช่น พันธุ์ยางภูมิอากาศ การบำรุงรักษา การใส่ปุ๋ยและการกำจัดวัชพืช มีผลต่อผลผลิตของยางด้วย

2.1.4 สัญลักษณ์ของระบบกรีดยาง

สภาวิจัยและพัฒนายางระหว่างประเทศ (International Rubber Research and Development Board: IRRDB) ได้ตกลงให้ใช้สัญลักษณ์ต่างๆ ของระบบกรีดยางเป็นแบบเดียวกันเพื่อความสะดวกในการใช้สัญลักษณ์ที่ควรทราบเกี่ยวกับการแบ่งหน้ากรีดยาง สามารถแบ่งหน้ากรีดยางได้หลายส่วนตามระบบกรีดยาง เช่น กรีดยาง 1/2 ของลำต้น 1/3 ของลำต้น 1/4 ของลำต้น หรือ 1/8 ของลำต้น (ประมาณ 10 เซนติเมตร) ดังรูปที่ 2.5



ก) กรีดยาง 1/2 ของลำต้น ข) กรีดยาง 1/3 ของลำต้น ค) กรีดยาง 1/4 ของลำต้น ง) กรีดยาง 1/8 ของลำต้น

รูปที่ 2.5 การแบ่งหน้ากรีดยาง

S = การกรีดรอบลำต้น เวียนจากซ้ายลงมาขวา (S ย่อจาก Spiral)

$1/2S$ = กรีดครึ่งลำต้น

$1/3S$ = กรีดหนึ่งในสามของลำต้น

$1/4S$ = กรีดหนึ่งในสี่ของลำต้น

$1/8S$ = กรีดหนึ่งในแปดของลำต้น

วันกรีด

d = วันกรีด (d ย่อมาจาก Day)

$d/1$ = กรีดทุกวัน (ตัวเลขแสดงถึงจำนวนวันกรีดครั้งหนึ่ง)

$d/2$ = กรีดทุก 2 วัน (กรีดวันเว้นวัน)

$d/3$ = กรีดทุก 3 วัน (กรีดวันเว้นสองวัน)

$d/4$ = กรีดทุก 4 วัน (กรีดวันเว้นสามวัน)

$3d/4$ = กรีด 3 วันเว้น 1 วัน

จำนวนรอยกรีด

$2 \times 1/2S$ = กรีดครึ่งลำต้น 2 รอย

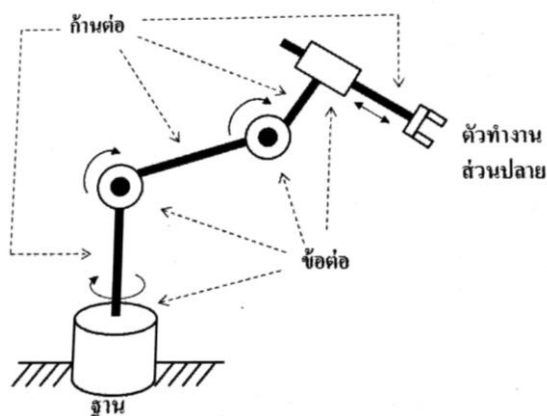
$2 \times 1/4S$ = กรีดหนึ่งในสี่ของลำต้น 2 รอย

การเปิดกรีดจะคำนึงถึงขนาดของต้นยางมากกว่าอายุของต้นยาง ก่อนที่จะเปิดกรีด ควร ศึกษารายละเอียดในการเปิดกรีด เช่น ขนาดของต้นยาง ระดับความสูงที่จะเปิดกรีด ความลาดชัน ของรอยกรีด และอื่นๆ เพื่อจะได้ทราบว่าควรเปิดกรีดอย่างไรจึงจะได้รับผลผลิตสูง (พิชิต สพโชค และ คณะ, 2550)

2.2 แขนกล

2.2.1 พื้นฐานของแขนกล

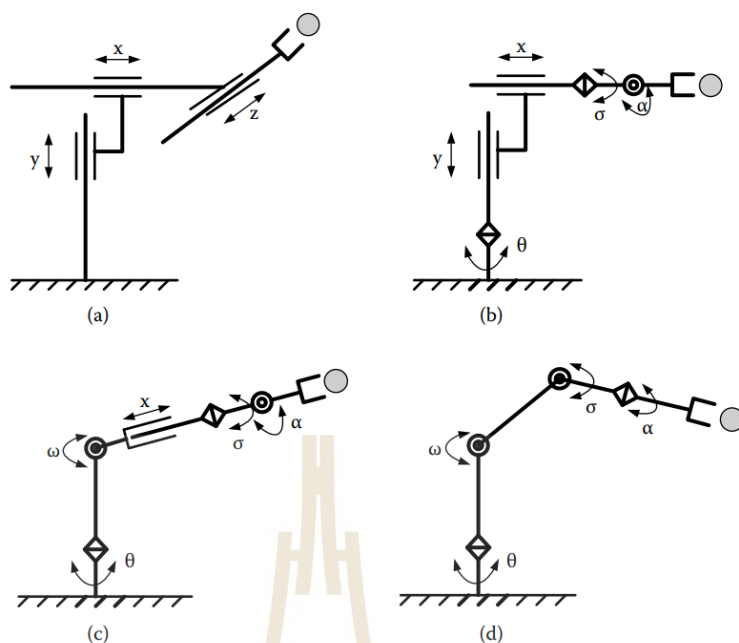
แขนกลที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมประกอบด้วยฐาน (Base) ที่ยึดติดกับพื้น ผนัง เพดาน หรือล้อหรือรางเลื่อนแล้วแต่จุดประสงค์การใช้งาน ข้อต่อ (Joints) คือ ตัวจับให้แขนเคลื่อนที่ได้ ก้านต่อ (Links) คือ ส่วนที่เชื่อมต่อระหว่างข้อต่อ และตัวทำงานส่วนปลาย (End-effector) คือ ส่วนที่สัมผัสกับชิ้นงาน มือจับ (Gripper) ที่นิยมใช้สำหรับงานเคลื่อนย้ายวัสดุ ดังรูปที่ 2.6 โดยที่ส่วนประกอบแขนและส่วนประกอบข้อต่อต่างก็มี 3 ระดับขั้นความเสรี (Degrees of freedom – DOF) และในส่วนประกอบของข้อต่อนั้นจะมีรูปแบบของการเคลื่อนที่ 3 รูปแบบ คือ Roll, Pitch และ Yaw



รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบของแขนกล (วโรดม, 2559)

รูปแบบของหุ่นยนต์ที่มีใช้ในปัจจุบันสามารถแบ่งเป็น 5 ประเภทใหญ่ตามรูปแบบของพิกัดและการเคลื่อนที่ตามรูปที่ 2.7 ดังนี้

- 1) หุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ในพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian coordinates) จะประกอบด้วยแกนเชิงเส้น (Linear axis) 3 แกน
- 2) หุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ในพิกัดทรงกระบอก (Cylindrical coordinates) จะประกอบไปด้วยแกนเชิงเส้น 2 แกน และแกนหมุน (Rotary axis) 1 แกน
- 3) หุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ในพิกัดทรงกลม (Spherical coordinates) จะประกอบไปด้วยแกนเชิงเส้น 1 แกน และแกนหมุน 2 แกน
- 4) หุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ในพิกัดหมุน (Revolute or Articulated coordinates) จะประกอบไปด้วยแกนหมุน 3 แกน (Qin and Francis, 2015)



รูปที่ 2.7 รูปแบบของพิกัดและการเคลื่อนที่ของแขนกล (a) Cartesian
(b) Cylindrical (c) Spherical (d) Revolute or Articulated

2.2.2 ส่วนประกอบของหุ่นยนต์

1) Manipulator หรือ Rover เป็นส่วนประกอบหลักของหุ่นยนต์ประกอบด้วยชิ้นส่วน (Links) ข้อต่อ (Joints) และ โครงสร้างของตัวหุ่นยนต์

2) End Effectors เป็นส่วนสุดท้ายต่อกับข้อต่อส่วนสุดท้ายของแขนกล นิยมใช้หยิบจับวัตถุหรือทำงานเฉพาะทาง เช่น ที่ติดตั้งเครื่องเชื่อม หรือเครื่องพ่นสี โดยปกติการควบคุมจะใช้ชุดควบคุม PLC (Programmable Logic Controller)

3) Actuators ชุดขับเคลื่อนมีนกล้ามเนื้อหรือชุดขับเคลื่อนของหุ่นยนต์ รูปแบบที่ใช้โดยทั่วไป ได้แก่ มอเตอร์ กระจบกลม กระจบกลไฮดรอลิก

4) Sensors คืออุปกรณ์ตรวจวัดค่าโดยแปลงค่าทางกายภาพให้เป็นค่าที่สามารถตรวจวัดได้เช่นแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้า เพื่อใช้วัดข้อมูลของหุ่นยนต์ในการรับรู้สภาพแวดล้อมเช่นชุดควบคุมที่ต้องการจะทราบตำแหน่งของชิ้นส่วนของแขนกลว่าอยู่ ณ ตำแหน่งใดๆ เมื่อเทียบกับมนุษย์ที่สามารถทราบได้ว่าแขนของเราอยู่ในตำแหน่งใดๆ แม้ว่าจะอยู่ในที่มืดเพราะชุดตรวจวัดของเราอยู่ในกล้ามเนื้อและมีการส่งค่ากลับมาอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา หลักการเหมือนหุ่นยนต์โดยใช้ชุดเครื่องมือวัดป้อนกลับ (Feedback sensors) ส่งข้อมูลจากแต่ละข้อต่อไปยังชุดควบคุมต่อไป

5) Processor and Controller ชุดควบคุมคล้ายกับสมองของมนุษย์โดยได้รับข้อมูลจากเซ็นเซอร์และสั่งการไปยังชุดขับ (Actuators) เพื่อให้เคลื่อนที่ได้ดังตั้งโปรแกรมไว้

6) Software โปรแกรมแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม โดยกลุ่มแรกเป็นระบบปฏิบัติการพื้นฐาน (Operating systems) กลุ่มที่ 2 เป็นโปรแกรมของหุ่นยนต์ (Robotic software) ซึ่งจะคำนวณการเคลื่อนที่ของข้อต่อจากสมการจลนศาสตร์ จากนั้นข้อมูลจะถูกส่งต่อไปยังชุดควบคุมโปรแกรมที่มีการควบคุมเฉพาะทางเช่นระบบวิทัศน์ (Vision systems) เป็นต้น

7) Power supply แหล่งจ่ายพลังงานเป็นส่วนสำคัญที่จ่ายกำลังงานไปยังชุดควบคุมและ Manipulator ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ ได้แก่ แหล่งจ่ายไฟฟ้า และแหล่งจ่ายพลังงานในการขับเคลื่อน (Qin and Francis, 2015)

2.3 การวางแผนการเคลื่อนที่

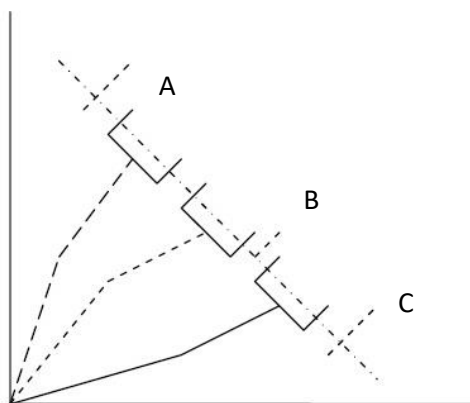
การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์สามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ

1) จุดต่อจุด (Point-to-point) การเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง โดยไม่ต้องมีการควบคุมเส้นทาง ความเร็ว และความเร่ง เช่น หุ่นยนต์เชื่อมจุดโลหะ

2) เส้นทางต่อเนื่อง (Continuous path) การควบคุมให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องตามเส้นทางที่กำหนดอย่างแม่นยำ ซึ่งต้องมีการวางแผนให้หุ่นยนต์หรือแขนกลเคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้นไปยังจุดสุดท้าย โดยควบคุมผ่านผู้ควบคุมหรือโปรแกรม ระหว่างการเคลื่อนที่นั้นแขนกลต้องหลบหลีกสิ่งกีดขวางและเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่กำหนดไว้ หรือที่เรียกว่า การวางแผนการเคลื่อนที่

- ทราเจกทอรี (Trajectory) คือ ประวัติของเวลาของตำแหน่งการเคลื่อนที่ หรือความเร็วและความเร่งของแต่ละองศาอิสระ (DOF) โดยคำนึงถึงระยะเวลาในแต่ละเส้นทางที่เคลื่อนที่ ซึ่งรวมถึงผู้ควบคุมที่เข้ามาเกี่ยวข้องกับแขนกลเพื่อสั่งงานให้แขนกลเดินไปตามเส้นทางที่กำหนด ผู้ควบคุมจำเป็นต้องเขียนแสดงในฟังก์ชันของเวลาเพื่อบอกถึงงานต้องการ และแผนการเคลื่อนที่ในรูปแบบต่างๆ ที่ต้องการ จากนั้นระบบจะคำนวณและวิเคราะห์ตำแหน่งแต่ละจุด และแสดงแผนการเคลื่อนที่ในคอมพิวเตอร์ ภายหลังจากการวางแผนสุดท้ายในการสร้างแผนการเคลื่อนที่ที่จะเกิดขึ้นในช่วงเวลาการทำงาน (Run time) โดยทั่วไปการคำนวณตำแหน่ง ความเร็ว ความเร่ง จะเกิดขึ้นพร้อมๆ กัน

- เส้นทาง (Path) คือ จุดตำแหน่งในปริภูมิข้อต่อ (Joint space) หรือปริภูมิคาร์ทีเซียน (Cartesian space) ที่เรียงลำดับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จากตำแหน่งเริ่มไปตำแหน่งสุดท้าย โดยไม่คำนึงถึงระยะเวลา เช่น หุ่นยนต์เคลื่อนที่จากจุด A ไปยังจุด B และไปยัง จุด C ลำดับขั้นของการเคลื่อนที่ ดังรูปที่ 2.8 (วโรคม, 2559)



รูปที่ 2.8 เส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกล

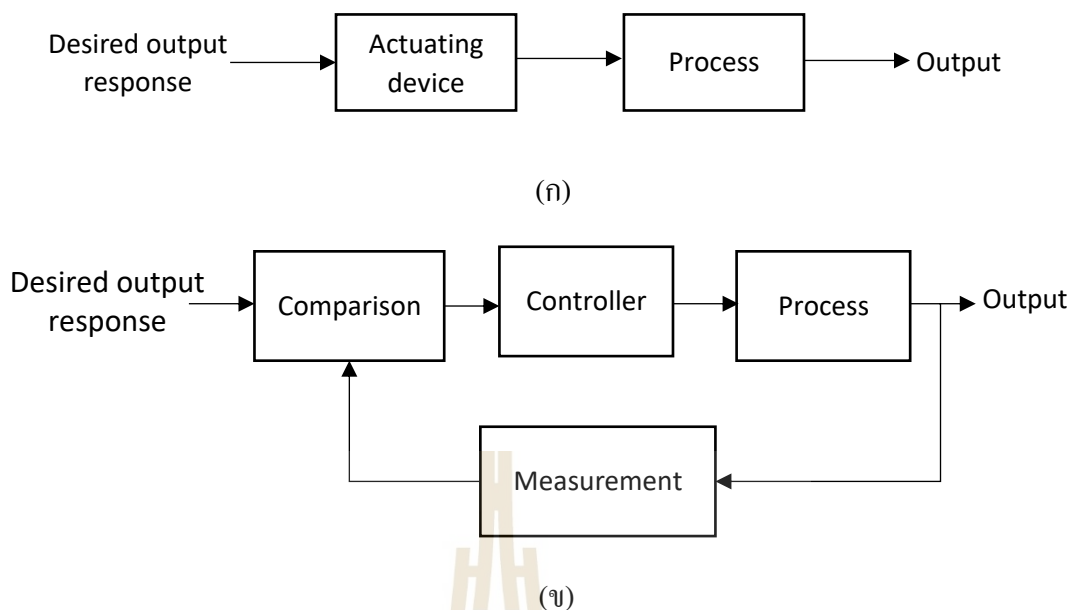
2.4 ระบบควบคุม

ระบบควบคุม (Control system) หมายถึง การควบคุมระบบหรือสิ่งที่มีผู้ออกแบบต้องการควบคุมให้ได้ผลลัพธ์ในรูปแบบของเอาต์พุตที่ต้องการ เพื่อให้หุ่นยนต์มีความแม่นยำ ความรวดเร็ว และความเสถียรภาพ

ประเภทของการควบคุมกระบวนการ แบ่งได้ 2 ประเภท คือ

1) ระบบควบคุมแบบวงเปิด (Open-loop control system) เป็นระบบที่ไม่มีให้นำเอาต์พุตป้อนกลับมาเปรียบเทียบการตอบสนองที่ต้องการ

2) ระบบควบคุมแบบวงปิด (Closed-loop control system) ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback control system) โดยเป็นระบบที่นำเอาต์พุตป้อนกลับมาเปรียบเทียบการตอบสนองที่ต้องการ เพื่อให้ตัวควบคุมสร้างสัญญาณชดเชยผลต่างระหว่างเอาต์พุตกับอินพุต ดังแสดงในรูปที่ 2.9



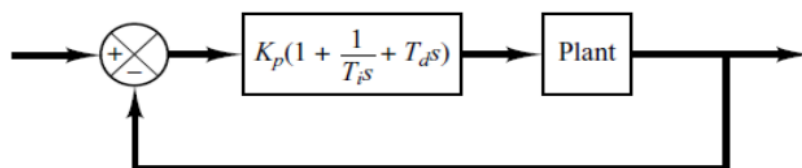
รูปที่ 2.9 ระบบควบคุม (ก) แบบวงเปิด (ข) แบบวงปิด

2.5 ระบบควบคุมป้อนกลับแบบ PID

ระบบควบคุมป้อนกลับแบบ PID เป็นระบบควบคุมที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในระบบควบคุมสำหรับงานอุตสาหกรรมทั่วไป เพราะเป็นระบบควบคุมที่มีความเรียบง่าย และปรับจูนได้หลายวิธี ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณควบคุม $U(s)$ และสัญญาณความผิดพลาด $E(s)$ ของตัวควบคุม PID เป็นดังนี้

$$U(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) E(s) \quad (2.1)$$

เมื่อ K_p คือ ค่าเกนแบบสัดส่วน
 T_I คือ คาบเวลาปริพันธ์
 T_D คือ คาบเวลาอนุพันธ์

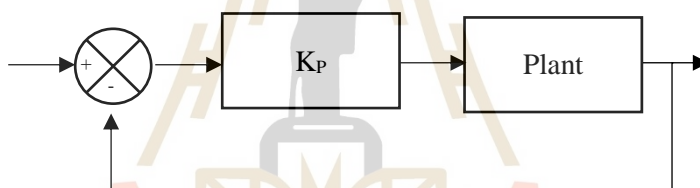


รูปที่ 2.10 ตัวควบคุมแบบ PID

2.6 การปรับจูนด้วยวิธีการของซีเกลอร์-นิโคลส์ (Ziegler-Nichols method)

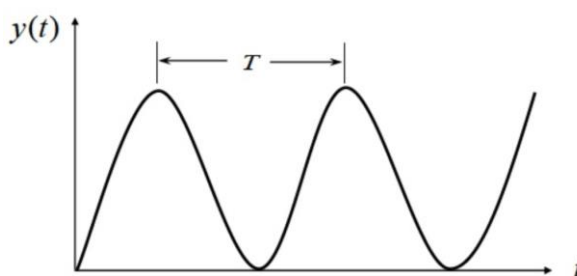
การปรับจูนด้วยวิธีการของซีเกลอร์-นิโคลส์เป็นวิธีการปรับจูนที่ไม่ต้องพึ่งพาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ อาศัยเพียงแค่ผลการทดสอบกับระบบจริง จึงถือว่ามีความสะดวกและเหมาะสมในการออกแบบควบคุมทางปฏิบัติ โดยอาศัยการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ K_p , T_i และ T_d เพื่อให้ระบบมีผลการตอบสนองตามต้องการ ซึ่งมีขั้นตอนการปรับแต่งพารามิเตอร์ ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดให้ $T_i = \infty$ และ $T_d = 0$ จากนั้นใช้เฉพาะส่วนตัวควบคุม P ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การทดสอบระบบวงปิดที่มีตัวควบคุมแบบ P

ขั้นตอนที่ 2 ทดสอบโดยการเพิ่มค่า K_p ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งสัญญาณเริ่มมีการสั่นไหว ดังแสดงดังรูปที่ 2.12 ค่า K_p ที่ทำให้เกิดการสั่นไหวแบบสม่ำเสมอจะกำหนดให้เป็นอัตราขยายวิกฤตแทนด้วย K_U



รูปที่ 2.12 ลักษณะของผลตอบสนองที่เกิดสั่นไหว

ขั้นตอนที่ 3 หาคาบเวลาของการสั้นไกวของระบบ T_U จากรูปที่ 2.12

ขั้นตอนที่ 4 นำค่า K_U และ T_U จากขั้นตอนที่แล้วไปออกแบบตัวควบคุมตามกฎของ ซีเกลอร์-นิโคลส์ ตามตารางที่ 2.3 เพื่อเลือกใช้ตัวควบคุมที่เหมาะสมกับการตอบสนองของระบบ (กองพัน, 2560)

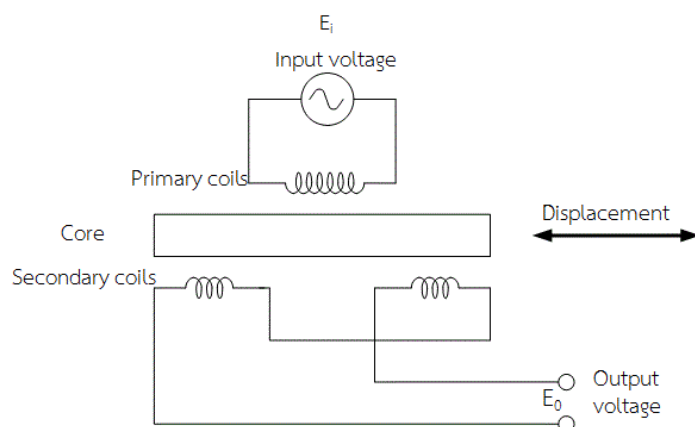
ตารางที่ 2.3 ค่าเกณฑ์เหมาะสมตามวิธีการของซีเกลอร์-นิโคลส์

Fast performance			
Controller	$K_U=K_p$	T_I	T_D
P	$0.5K_U$		
PI	$0.4K_U$	$0.8T_U$	
PID	$0.6K_U$	$0.5T_U$	$0.12T_U$

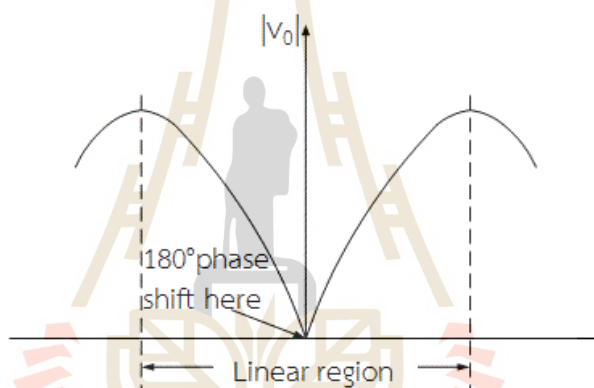
2.7 อุปกรณ์วัดตำแหน่ง

2.7.1 LVDT

ทรานสดิวเซอร์ชนิดเปลี่ยนแปลงความเหนียวแบบเชิงเส้น (Linear Variable Differential Transformer; LVDT) เป็นทรานสดิวเซอร์ประเภทพาสซีฟ (Passive transducers) ทำงานโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนียวตามตำแหน่งการเคลื่อนที่ โครงสร้างประกอบด้วย ขดลวดปฐมภูมิ (Primary winding) หนึ่งชุดอยู่ตรงกลาง และขดลวดทุติยภูมิ (Secondary winding) จำนวนสองชุดต่ออนุกรมกัน โดยมีตำแหน่งอยู่ทางด้านซ้ายและด้านขวาของขดลวดปฐมภูมิ ขดลวดทุติยภูมิทั้งสองชุดนี้มีจำนวนรอบที่เท่ากันแต่มีทิศทางการพันขดลวดตรงข้ามกัน (พันในทิศทางตามเข็มนาฬิกาหนึ่งชุด และทิศทางทวนเข็มนาฬิกาหนึ่งชุด) เมื่อขดลวดปฐมภูมิได้รับการกระตุ้นด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจากภายนอก จะมีแรงดันไฟฟ้าเหนียวเกิดขึ้นที่ขดลวดทุติยภูมิทั้งสองชุด โดยค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับขดลวดทุติยภูมิแต่ละชุดขึ้นอยู่กับตำแหน่งของแกนเคลื่อนที่ (Movable core) โดยถ้าแกนอยู่ตรงกึ่งกลางระหว่างขดลวดทั้งสองชุดพอดี แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับขดลวดทุติยภูมิทั้งสองชุดจะมีค่าเท่ากันแต่มีทิศทางตรงข้ามกัน ค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของ LVDT จึงมีค่าเท่ากับ 0 โวลต์ หรือเรียกว่า ตำแหน่งศูนย์ (Null position) ถ้าแกนเคลื่อนที่ไปทางด้านซ้าย แรงดันไฟฟ้าเหนียวจะเกิดขึ้นในขดลวดทุติยภูมิด้านซ้ายมากกว่าด้านขวา และเมื่อแกนเคลื่อนที่ไปทางด้านขวาแรงดันไฟฟ้าเหนียวจะเกิดขึ้นในขดลวดทุติยภูมิด้านขวามากกว่าด้านซ้าย ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 วงจรภายในของ LVDT



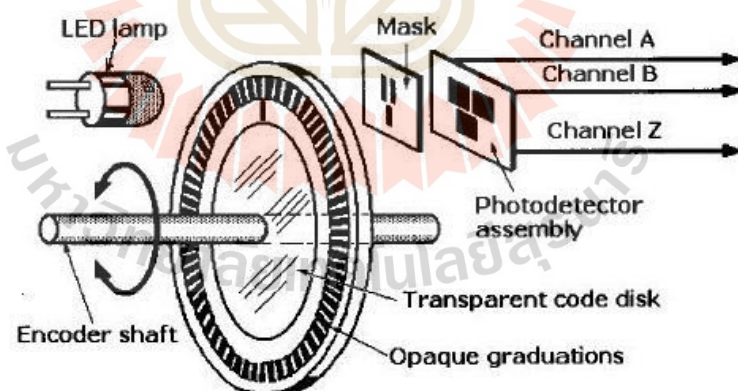
รูปที่ 2.14 ค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของ LVDT โดยแกนเคลื่อนที่อยู่ในตำแหน่งใดๆ

รูปที่ 2.14 ค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของ LVDT ที่ได้ มีค่าความเป็นเชิงเส้น (Linearity) ที่ดี อยู่เพียงช่วงหนึ่งเท่านั้น ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการเลือกย่านการใช้งาน (Range) การทำงานของ LVDT ไม่มีการสัมผัสหรือเสียดสีใดๆ กับขดลวดจึงไม่เกิดแรงเสียดทาน ทำให้มีค่าความละเอียด (Resolution) ความไว (Sensitivity) และความแม่นยำ (Accuracy) สูง มีเสถียรภาพในการใช้งานสูง มีค่าความเป็นเชิงเส้นที่ดี ใช้กำลังไฟฟ้าต่ำ มีค่าฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ต่ำ มีรูปแบบที่เรียบง่ายจึงง่ายต่อการประยุกต์ใช้งานและการติดตั้ง สามารถนำไปใช้งานได้หลายลักษณะ รวมถึงสามารถทำงานภายใต้สภาวะที่มีความร้อนสูงได้ แต่จะส่งผลทำให้ค่าความไวลดลง (นวกัทร และทวิพล, 2555)

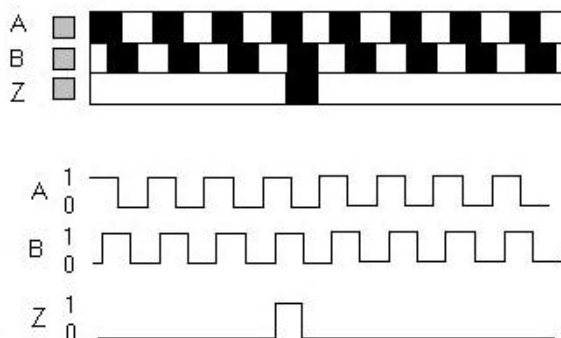
2.7.2 เอ็นโค้ดเดอร์ (Encoder)

เอ็นโค้ดเดอร์เป็นเซ็นเซอร์สำหรับวัดระยะทาง (Distance sensor), ความเร็ว (Speed), ทิศทางการหมุนของมอเตอร์ (Direction of rotation), ตำแหน่งหรือมุม และจำนวนรอบ ซึ่งสามารถแบ่งตามลักษณะของสัญญาณเอาต์พุต (Output signal) ได้ 2 ประเภท ได้ดังนี้

1) Increment encoder ประกอบไปด้วย งานหมุน และอุปกรณ์ตรวจจับ โดยงานหมุนจะมีช่องเล็กๆ เมื่อเพลลาของมอเตอร์หมุนจะทำให้งานหมุนไปตัดลำแสงของเซ็นเซอร์ (Sensor) ทำให้ชุดรับแสงได้รับสัญญาณเป็นช่วงๆ จึงทำให้สัญญาณเอาต์พุตออกมาเป็นสัญญาณพัลส์ต่อรอบ (PPR) ดังรูปที่ 2.15 หลักการเมื่อมีการหมุนของแกนเพลลา จะทำให้มีสัญญาณเอาต์พุตที่เป็นสัญญาณลูกคลื่นสี่เหลี่ยม (Square wave) มี 3 แทรค (Tracks) คือ A, B, Z โดยจะสัมพันธ์กับระยะการเคลื่อนที่และตำแหน่งสัญญาณเอาต์พุตของ Encoder A และ B มีมุมที่ห่างกัน 90 องศา ทางไฟฟ้า ส่วน Z จะมีสัญญาณ 1 พัลส์ ต่อ 1 รอบ หรือบางตัวจะเป็นพัลส์แบบ Invert เช่น A-, B-, Z- ซึ่งเป็นสัญญาณที่กลับเฟสกัน 90 องศา เพื่อเช็คทิศทางการหมุนของมอเตอร์ ดังรูปที่ 2.16 ข้อเสียหากมีการถอดสายสัญญาณออกชั่วคราวหรือแหล่งจ่ายไฟฟ้าดับข้อมูลของการเคลื่อนที่จะหายไปหมด ไม่สามารถระบุตำแหน่งพัลส์หรือตำแหน่งองศาได้ ทำให้ต้องมีการปรับที่จุดอ้างอิงใหม่อยู่ตลอดเวลา กรณีนี้อาจจำเป็นต้องใช้เครื่องนับจำนวนแบบตัวเลข (Digital counter) เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยบันทึกข้อมูลได้

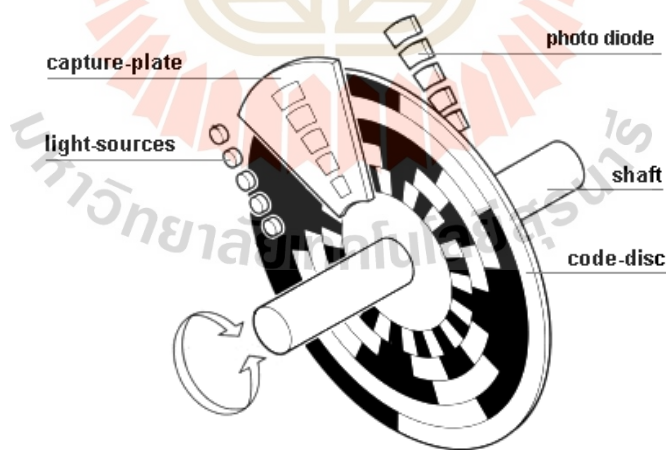


รูปที่ 2.15 ส่วนประกอบของ Increment encoder



รูปที่ 2.16 สัญญาณบิตเอาต์พุตของ Increment encoder

2) Absolute encoder จะประกอบด้วยหัวอ่านหลายชุดเท่ากับจำนวนบิตเอาต์พุต การเจาะรูบนแผ่นแต่ละชุดจะมีระยะห่างเป็นทวีคูณทำให้สามารถทราบตำแหน่งของการหมุน จึงทำให้สัญญาณออกมาในรูปแบบของรหัสไค้ด เช่น Binary, Gray code เป็นต้น ดังรูปที่ 2.17 โดยมีรูปแบบสัญญาณเอาต์พุตที่เป็นลักษณะของการเข้ารหัส โดยการใช้รหัสแทนสัญญาณพัลส์ เช่น Binary, Gray code เป็นต้น เพื่อระบุตำแหน่งการเคลื่อนที่และองศาของแกนเอ็นโค้ดเดอร์ได้มีตำแหน่งที่ถูกต้องและแม่นยำมากที่สุด กรณีแหล่งไฟฟ้าหยุดและทำการจ่ายไฟเข้าไปใหม่ข้อมูลจะยังอยู่ที่ตำแหน่งเดิม และสามารถบอกองศา ณ ตำแหน่งนั้นได้



รูปที่ 2.17 ส่วนประกอบของ Absolute encoder

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ขงยุทธ์ เลียงดั่ง, จริญญาศักดิ์ สมพงษ์, ครุ วาทกิจ และพยุหศักดิ์ จุลยุเสณ (2556) ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับแขนกลกรีดยางพาราอัตโนมัติ ผลการจำลองทางคณิตศาสตร์แขนกลแบบข้อต่อแบบเลื่อนและมีแบบสามองศาอิสระถูกสร้างบนระบบพิกัดฉาก และกำหนดให้ต้นยางพารามีลักษณะเป็นทรงกระบอกและมีมุมกรีด 30 องศา ซึ่งเมื่อจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม Solidworks พบว่า สามารถใช้สมการเส้นโค้งเฮลิคส์ในการเคลื่อนที่กรีดยางสำหรับแขนกลกรีดยางได้

ชิตพล คงศิลา (2559) ได้สร้างเครื่องกรีดยางไฟฟ้า โดยเครื่องกรีดยางไฟฟ้าใช้มีดกัดเอ็นด์มิลล์ที่ทำจากเหล็กกล้ารอบสูง (HSS) แบบปลายหน้าตัดตรงมี 2 คมตัด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm ใช้ต้นกำลังจากมอเตอร์ไฟฟ้าขนาดแรงบิด 34 Nm และมีล้อเกี๊ยง 4 ล้อ สำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของเครื่องกรีดยาง จากการทดสอบเครื่องกรีดยางไฟฟ้าเทียบกับมีดกรีดยางเจี๊บบง กับต้นยางพาราจำนวน 20 ต้น พบว่า เครื่องกรีดยางไฟฟ้าได้ความลึกของการกรีด ความสิ้นเปลืองและความลาดเอียงของรอยกรีดทำมุม 30 องศา กับแนวระดับ ดีกว่ามีดกรีดยางเจี๊บบงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 แต่ใช้เวลามากกว่ามีดกรีดยางเจี๊บบง และมากกว่าค่ามาตรฐานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05



รูปที่ 2.18 เครื่องกรีดยางไฟฟ้า

ขงยุทธ์ เลียงคัง, พยุงศักดิ์ จุลยุเสน และธีรวัฒน์ เจเดือน (2559) ออกแบบเส้นทางที่เหมาะสมสำหรับการกรีดยางพารา โดยใช้แขนกลแบบ 2 แกนควบคุมการเคลื่อนที่ ซึ่งเส้นทางที่ใช้ในการเคลื่อนที่ ได้แก่ สมการเส้นตรง สมการโพลีโนเมียล และสมการวงรี จากการทดสอบ พบว่าเส้นทางที่สร้างจากสมการเส้นตรงและวงรีเป็นเส้นทางที่เหมาะสม เพราะแขนกลนี้ถูกติดตั้งให้แกน X' เคลื่อนที่ในแนว 30 องศา กับแนวระดับจึงเหมาะกับการเคลื่อนที่ขึ้น-ลงเป็นเส้นตรง ส่วนแกน Z จากการสมมติให้ต้นยางมีลักษณะเป็นทรงกระบอก เมื่อมองจากด้านบนต้นยางจะมีลักษณะวงกลม และทำการกรีดยางลำต้น เส้นทางที่ใช้จึงเป็นเส้นโค้งครึ่งวงกลม

ขงยุทธ์ เลียงคัง (2559) ออกแบบสร้างแขนกลกรีดยางพาราอัตโนมัติแบบ 2 แกน ดังรูปที่ 2.19 โดยนำระบบแขนกลที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมมาใช้ในการกรีดยาง แขนกลกรีดยางนี้ทำงานโดยใช้ NI myRIO ในการควบคุมการทำงานของดีซีมอเตอร์ให้แขนกลสามารถเคลื่อนที่กรีดยางได้เอง ซึ่งแขนกลกรีดยางนี้จะเคลื่อนที่ด้วยระบบควบคุมป้อนกลับแบบ PID ที่มีความรวดเร็วในการตอบสนองและความแม่นยำของตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแขนกล พบว่า สามารถกรีดยางในรูปของทรงกระบอกเท่านั้น แต่เนื่องจากต้นยางไม่ได้มีรูปทรงฐานเป็นทรงกระบอกเสมอไป ทำให้เมื่อกรีดยางที่มีลักษณะรูปอื่นที่บิดเบี้ยวไปจากทรงกระบอกจะไม่สามารถกรีดยางได้สมบูรณ์ เนื่องจากรูปทรงที่บิดเบี้ยวไปอาจทำให้คมมีขนาดเนื้อเยื่อเจริญ หรือรอยกรีดยางขาดช่วงไม่สม่ำเสมอได้



รูปที่ 2.19 ปลายแขนกลกรีดยางพาราอัตโนมัติ

J V C Maliackal et al (2017) ได้พัฒนาชุดเครื่องมือกรีดยาง เพื่อลดความเมื่อยล้าจาก แรงงานกรีดยางและใช้ต้นทุนต่ำ โดยเครื่องกรีดยางประกอบไปด้วยตัวโครงยึดกับลำต้นของต้นยาง ซึ่งจะยึดกับลำต้นด้วยสกรู รวงสไลด์ทำมุมเอียง 30 องศาจากแนวระดับ และตัวสไลด์เคอร์ที่ติด ใบมีดและอยู่บนรางสไลด์ ใบมีดกรีดยางที่ใช้กรีดยางเป็นใบมีดแบบหมุน ดังรูปที่ 2.20 ซึ่งเครื่องกรีดยางนี้ จะทำงานโดยใช้แรงงานคนในการกดใบมีดเพียงเล็กน้อยเพื่อส่งแรงให้ใบมีดทำการกรีดยาง แล้วเลื่อน ลงตามสไลด์ที่เป็นเส้นทางในการกรีดยาง โดยเครื่องนี้จะให้แรง 5 N/mm ใช้เวลาทำงาน 35 วินาที และ ใช้ต้นทุนสร้างอุปกรณ์กรีดยางนี้ประมาณ 1300 บาท



รูปที่ 2.20 ชุดเครื่องมือกรีดยาง

N Nayak Vinayaka et al (2017) สร้างเครื่องกรีดยางพาราอัติโนมัติ โดยประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ โครงจับยึดต้นยาง ทำหน้าที่ยึดติดเครื่องกับลำต้นของต้นยาง มีเฟืองเดี่ยวขนาด ใหญ่ 2 อัน ทำหน้าที่เป็นรางเคลื่อนรอบลำต้นยางสำหรับเคลื่อนที่ในแนวระดับ และส่วนกรีดยางที่ ยึดอยู่ระหว่างเฟืองเดี่ยวทั้งสองอัน โดยส่วนนี้จะมีสกรูสำหรับเคลื่อนที่ในแนวตั้ง และมีใบมีด ลักษณะเหล็กพับติดอยู่กับบอลสกรู ซึ่งเครื่องกรีดยางนี้จะขับเคลื่อนโดยใช้มอเตอร์กระแสตรง 2 ตัว กับไมโครคอนโทรลเลอร์ ตั้งเวลาและควบคุมการกรีดยาง ดังรูปที่ 2.21 เมื่อทดสอบกับต้นยางจริง พบว่า เครื่องกรีดยางนี้สามารถกรีดยางได้และใช้เวลาในการกรีดยาง 20-30 วินาที/ครั้ง



รูปที่ 2.21 เครื่องกรีดยางอัตโนมัติแบบใช้มอเตอร์ไฟฟ้า

เอกสิทธิ์ อนันต์เจริญวงศ์, นางเยาว์ เมืองดี, นริศรา มหาชนินวงศ์, ปิยนากู คงทิม และสุธิดา หมายาคไต้ซ๊ะ (2018) ได้พัฒนาเครื่องกรีดยางอัตโนมัติและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องกรีดยางอัตโนมัติกับการกรีดแบบใช้มีดเจ้ะบง ซึ่งเครื่องกรีดยางพาราอัตโนมัติแบบใช้มอเตอร์ไฟฟ้า ประกอบไปด้วยชุดโครงยึดเกาะกับต้นยาง เคลื่อนที่ขึ้น-ลงโดยมอเตอร์ 2 ตัว โดยมีตัวนำใบมีดคอยประสานกับรางพาเพื่อควบคุมความลึก และใช้ใบมีดแบบหัวดอกกั๊ดไม้ ลักษณะเป็นหัวแฉกตัดเฉือนเข้าเนื้อยางดังรูปที่ 2.22 โดยทดสอบกับต้นยางอายุประมาณ 7 ปี พบว่า การกรีดยางด้วยมีดเจ้ะบงจะมีค่าเฉลี่ยความลึกของรอยกรีด 5.6 มิลลิเมตร ความยาวเฉลี่ยของรอยกรีด 17 เซนติเมตร และค่าเฉลี่ยการสิ้นเปลืองการกรีด 1.9 มิลลิเมตร/ครั้ง ส่วนเครื่องกรีดยางอัตโนมัติ จะมีการสิ้นเปลืองการกรีด 2.8 มิลลิเมตร/ครั้ง ซึ่งใกล้เคียงกับการกรีดด้วยมีดเจ้ะบงที่สถาบันวิจัยยางแนะนำ นอกจากนี้ยังใช้เวลาในการกรีดมากกว่ารวมทั้งรอยลึกของรอยกรีดประมาณ 3.0 มิลลิเมตร ความยาวของรอยกรีดประมาณ 9 เซนติเมตร และมีความสม่ำเสมอของรอยกรีดน้อยกว่าอีกด้วย



รูปที่ 2.22 เครื่องกรีดยางพาราอัตโนมัติ

คุณากร แยมพราม, ชวลิต สามเมือง และปวีร์ เชื้อปรางค์ (2562) ได้ออกแบบและสร้างเครื่องกรีดยางพาราอัตโนมัติแบบตั้งเวลา ที่สามารถตั้งเวลากรีดยางและสามารถย้ายรอยกรีดได้ โดยเครื่องกรีดยางอัตโนมัตินี้ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ชุด โครงสร้างที่ยึดกับต้นยาง ซึ่งทำมาจากเหล็กฉากที่สามารถยึดกับลำต้นยางและถอดเก็บได้ง่าย ส่วนขับเคลื่อนในการย้ายรอยกรีด ซึ่งใช้ชุดแท่ง Lead screw และชุดทดเฟืองตัวหนอนแบบติดกับมอเตอร์เกียร์เพื่อขับ Lead screw ให้ส่วนที่ติดกับใบมีดเคลื่อนลงไม่เกิน 2 mm และส่วนของการกรีดยาง โดยใบมีดที่ใช้จะเป็นเหล็กแบนขนาด 1-1/2" ทำารางกับโช้จักรยานทำมุมกับแนวระดับ 35 องศาซึ่งถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์เกียร์ โดยเคลื่อนกรีดยางอัตโนมัติจะทำงานงานด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังรูปที่ 2.23 จากผลการทดสอบโดยตั้งเวลาทุกๆ 1:00 น. เป็นเวลา 5 วัน พบว่า มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 0 เปอร์เซ็นต์ จากการทดสอบย้ายรอยกรีดในแนวตั้งทุก 2 mm เป็นจำนวน 10 ครั้ง พบว่ามีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 1.769 เปอร์เซ็นต์ และการทดสอบเก็บปริมาณน้ำยางเทียบกับแรงงานมนุษย์ ในระยะการกรีดเท่ากัน โดยทำการทดสอบเป็นเวลา 5 วัน พบว่า ปริมาณน้ำยางที่ได้จากเครื่องกรีดยางอัตโนมัติ มีปริมาณน้ำยางเกิน 70 % ของปริมาณน้ำยางที่ได้จากการกรีดด้วยแรงงานมนุษย์



รูปที่ 2.23 เครื่องกรีดยางพาราอัตโนมัติแบบตั้งเวลา



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การวิเคราะห์ทางคิเนเมติกส์ของแขนกลกรีดยางพารา

เมื่อกำหนดให้ต้นยางพารามีลักษณะเป็นทรงกระบอก และพิจารณาให้แขนกลกรีดยางพาราสร้างจากตัวขับเร้าเชิงเส้นแบบบอลสกรูจำนวนสองแกนบนพิกัดฉาก XYZ สามารถทำได้ โดยการหมุนระนาบ XY รอบแกน Z ในทิศทางตามเข็มนาฬิกาเป็นมุม θ ทำให้ได้ระบบพิกัดฉาก $X'Y'Z'$ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 เมื่อผู้วิจัยมองในทิศตั้งฉากกับระนาบ $X'Z'$ จะเห็นพื้นที่หน้าตัดของต้นยางพาราเป็นรูปวงรี เมื่อพิจารณารอยกรีดบนต้นยางพารา พบว่า เส้นทางการเคลื่อนที่ของใบมีดสามารถสร้างได้จากการกำหนดให้เส้นทางการเคลื่อนที่บนแกน X' และแกน Z เป็นแบบเส้นตรงและแบบครึ่งวงกลม ตามลำดับ ดังนั้นแขนกลกรีดยางที่สร้างจากตัวขับเร้าเชิงเส้นแบบบอลสกรูจำนวนสองตัวบนพิกัดฉาก $X'Y'Z'$ จะสามารถเคลื่อนที่ตามรอยกรีดนี้ได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยแยกเส้นทางการเคลื่อนที่ของตัวขับเร้าแต่ละแกนสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$x' = \frac{2r}{\cos \theta} t \quad (3.1)$$

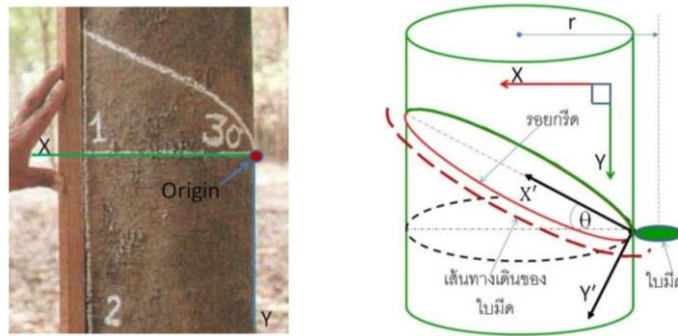
$$z = r \sin(\omega t) \quad (3.2)$$

เมื่อ r คือ รัศมีของต้นยางพารา (mm)

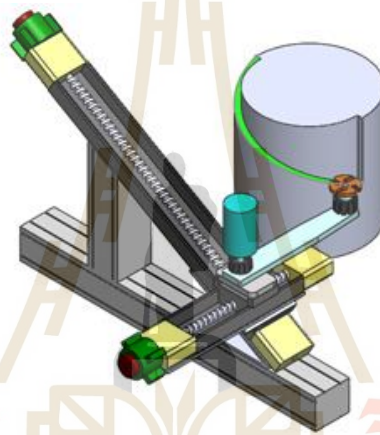
t คือ เวลาที่ใช้ในการกรีด (s)

θ คือ มุมของรอยกรีด ($^{\circ}$)

ω คือ ความเร็วเชิงมุม (rad/s)



รูปที่ 3.1 การกำหนดระบบพิกัดจากบนต้นยางพาราและทรงกระบอก



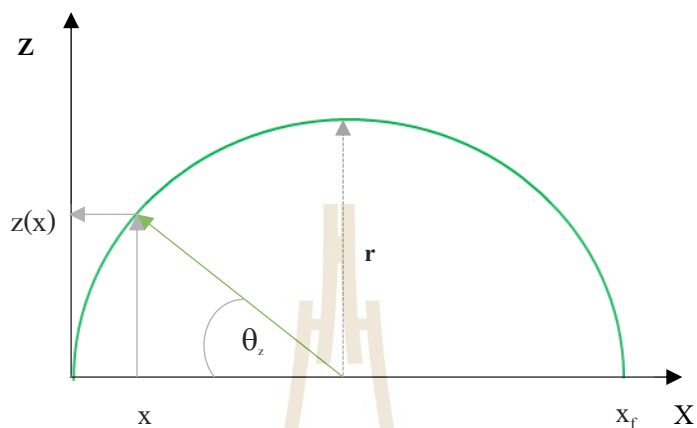
รูปที่ 3.2 แบบจำลองแขนกลกริถียงแบบสองแกน

การวิเคราะห์ทางคิเนเมติกส์ของแขนกลกริถียงพาราทำโดยการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม Solidworks โดยสมมติให้ต้นยางพารามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 220 mm ไบมีดกริถียงเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเชิงมุม $\pi/10$ rad/s และเวลาที่ใช้ในการกริถียงเท่ากับ 10 s

3.2 การออกแบบเส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกลกริถียงพารา

โดยทั่วไปเส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกลมักจะถูกออกแบบให้เป็นฟังก์ชันกับเวลา ซึ่งทำให้เกิดความสะดวกในการออกแบบเส้นทางการเคลื่อนที่ในรูปแบบต่างๆ แต่อย่างไรก็ตามแขนกลต้องเปลี่ยนแปลงความเร็วบ่อยครั้ง เพื่อที่จะติดตามเส้นทางการเคลื่อนที่ที่ออกแบบไว้ หรือแขนกลต้องการการคำนวณที่ซับซ้อน เพื่อจะรักษาความเร็วในการเคลื่อนที่ให้คงที่ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จะกำหนดให้แขนกลในแกน X' เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ และเส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกลใน

แกน Z เป็นฟังก์ชันกับเส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกลในแกน X เพื่อลดความซับซ้อนในการควบคุมแขนกล โดยเมื่อพิจารณาสมการที่ 3.4 จะเห็นได้ว่า Z สามารถคำนวณได้โดยตรงจากระยะของ X ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกลแกน Z

$$z = r \sin \theta_z \quad (3.3)$$

เนื่องจาก

$$\cos \theta_z = \frac{r-x}{r}$$

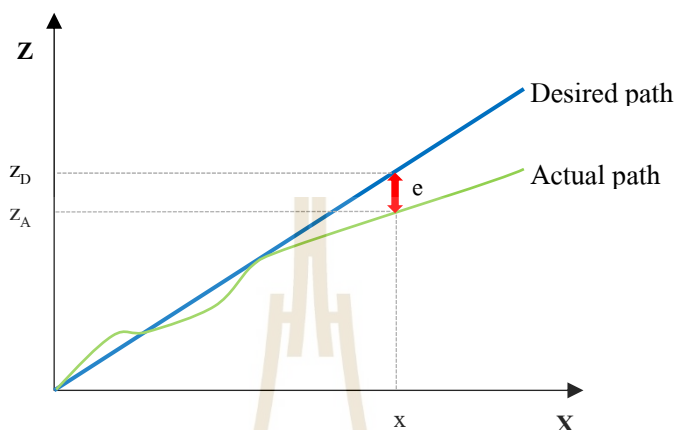
ดังนั้น

$$z = r \sin \left(\cos^{-1} \left(\frac{r-x}{r} \right) \right) = r \sqrt{1 - \left(\frac{r-x}{r} \right)^2} \quad (3.4)$$

- เมื่อ r คือ รัศมีของต้นยางพารา ในสมการ 3.3-3.4 กำหนดให้ $r = 0.5x_f$
 θ_z คือ มุมของการเคลื่อนที่ในระนาบ $X'Z$
 x คือ ตำแหน่งในการเคลื่อนที่ในระนาบ $X'Z$

3.3 การออกแบบตัวควบคุมแบบป้อนกลับ

ค่าผิดพลาดทางตำแหน่งในการเคลื่อนที่ของใบมีดถูกแสดงในรูปที่ 3.4 และสามารถคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

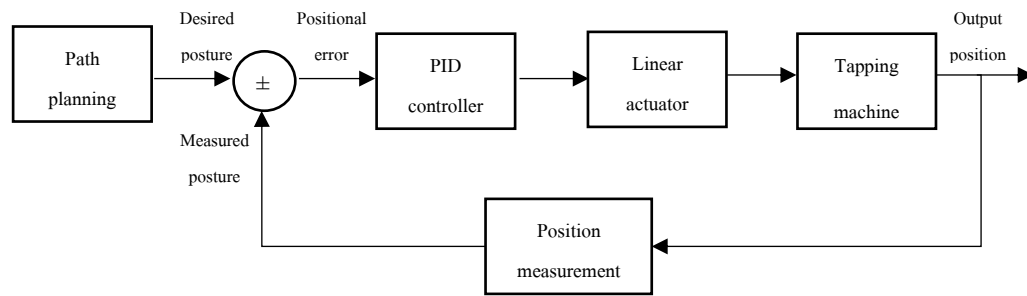


รูปที่ 3.4 ค่าผิดพลาดทางตำแหน่งในการเคลื่อนที่

$$e = z_D - z_A \quad (3.5)$$

เมื่อ z_D คือ ตำแหน่งที่ต้องการ (mm)
 z_A คือ ตำแหน่งจริง (mm)
 e คือ ค่าผิดพลาดทางตำแหน่ง (mm)

รูปที่ 3.5 แสดงส่วนประกอบของระบบควบคุมแบบป้อนกลับกริดยางพารา ซึ่งการกริดยางพาราด้วยแขนกลจะให้ความสำคัญในด้านความแม่นยำของตำแหน่งการเคลื่อนที่และความรวดเร็วของการตอบสนอง ดังนั้นตัวควบคุมแบบ PID จึงถูกเลือกใช้ เนื่องจากสมบัติของตัวควบคุมนี้จะช่วยให้การตอบสนองชั่วครู่ดีขึ้นและลดค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวลงแต่รักษาเสถียรภาพของระบบ โดยปรับจูนค่าพารามิเตอร์ K_p , T_i และ T_d ด้วยวิธีการซีเกลอร์-นิโคลส์

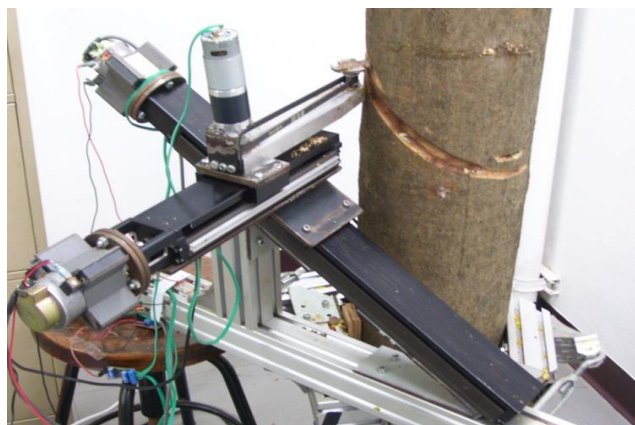


รูปที่ 3.5 แผนภาพบล็อกของระบบควบคุมแขนกลกรีดยางพารา

3.4 การออกแบบอุปกรณ์วัดรูปร่างต้นยางพารา

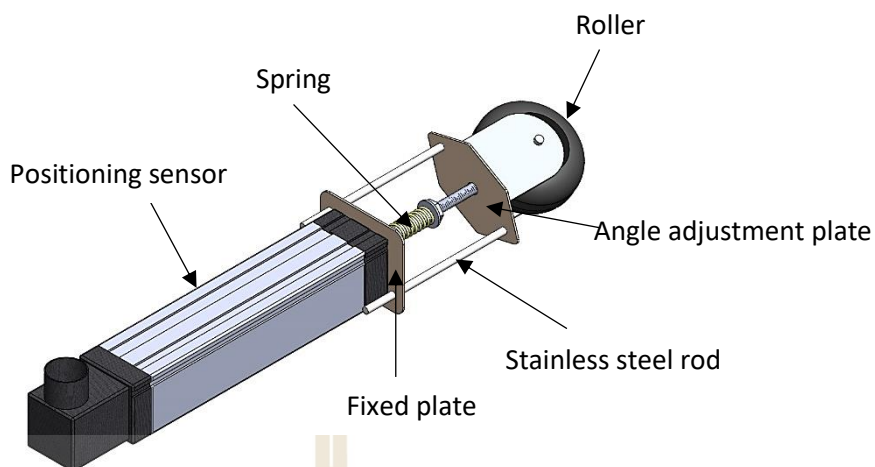
แขนกลกรีดยางพาราต้นแบบประกอบด้วย 3 ส่วน คือ (1) โครงจับยึดต้นยาง สร้างจากอลูมิเนียม โปรไฟล์ โดยออกแบบให้สามารถติดตั้งและถอดออกจากต้นยางพาราได้ (2) ชุดกลไกขับเคลื่อน สร้างจากตัวขับเคลื่อนเชิงเส้น (Linear actuator) ที่ทำจากรางสไลด์และบอลสกรู จำนวน 2 แกน ต่อตั้งฉากกันบนโครงจับยึดต้นยาง โดยตัวขับเคลื่อนเชิงเส้นแกน X' จะวางเป็นมุมเอียง 30° กับแนวระดับ ส่วนตัวขับเคลื่อนเชิงเส้นของแกน Z จะวางในแนวระดับบนตัวขับเคลื่อนเชิงเส้นแกน X' ซึ่งตัวขับเคลื่อนทั้งสองถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์กระแสตรง และ (3) ชุดใบมีดกรีดยาง โดยใบมีดกรีดยางจะเป็นใบมีดหมุน 4 ฟัน แบบใช้มอเตอร์กระแสตรงขับเคลื่อนผ่านสายพานดินตะขาบ ดังแสดงในรูป 3.6

จากการกรีดต้นยางพาราจริงด้วยแขนกลกรีดยางต้นแบบโดยการพิจารณาให้เส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกลในแกน Z เป็นลักษณะครึ่งวงกลมพบว่า ความลึกของรอยกรีดมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ เพราะว่ารูปร่างของต้นยางพาราจริงมีลักษณะเป็นทรงกระบอกที่บิดเบี้ยว นอกจากนี้หากความบิดเบี้ยวของต้นยางมีมาก แขนกลอาจจะกรีดต้นยางลึกจนถึงแกนไม้หรือไม่สามารถกรีดต้นยางพาราได้

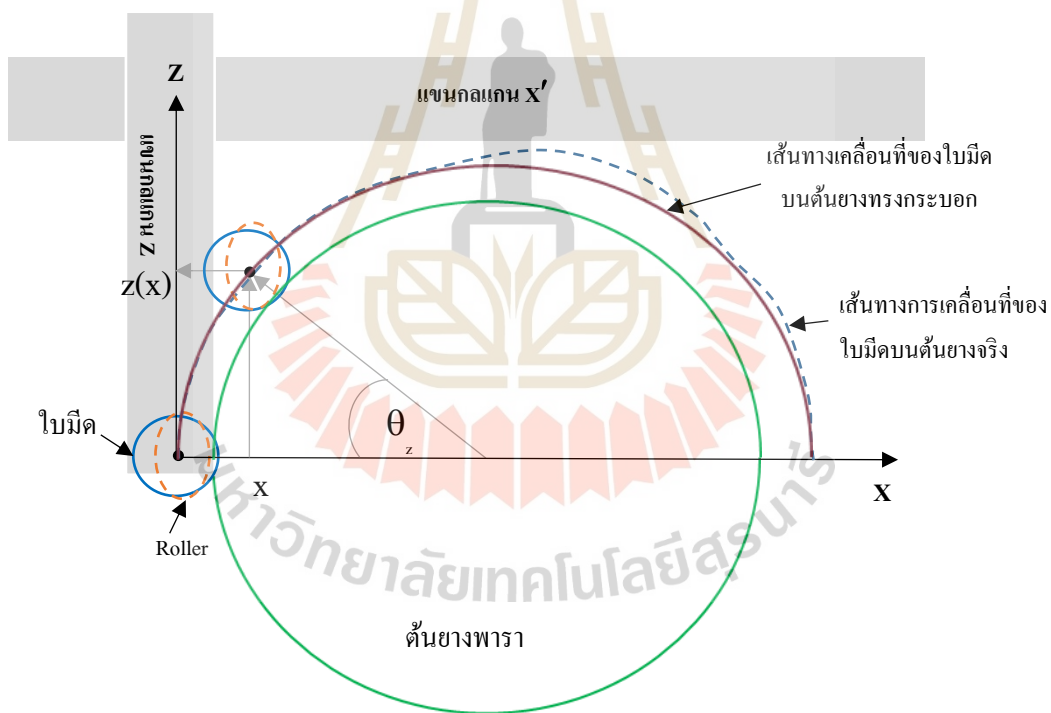


รูปที่ 3.6 แขนกลสำหรับกรีดยางพาราต้นแบบ

จากข้อจำกัดของแขนกลกรีดยางดังกล่าว ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดออกแบบอุปกรณ์วัดรูปร่างต้นยางพารา ซึ่งประกอบด้วย (1) เซนเซอร์วัดตำแหน่ง ทรานสดิวเซอร์แบบ LVDT ทำหน้าที่ติดตามรูปร่างของต้นยาง โดยการวัดระยะห่างระหว่างเซนเซอร์วัดตำแหน่งกับต้นยางพารา (2) สปริง ทำหน้าที่ผลักดันแกนของเซนเซอร์วัดตำแหน่งกลับมาตำแหน่งเดิม (3) ลูกกลิ้ง ทำหน้าที่สัมผัสพื้นผิวต้นยางพารา (4) แผ่นปรับมุม แท่งแสดนเลส และแผ่นยึด ทำหน้าที่กำหนดทิศทางของลูกกลิ้ง ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ซึ่งอุปกรณ์วัดรูปร่างต้นยางจะติดอยู่ใต้ใบมีดกรีดยาง ขั้นตอนการกรีดยางด้วยแขนกลนี้จะประกอบด้วยเคลื่อนที่ของแขนกลจำนวน 2 รอบ รอบแรกจะเคลื่อนที่เพื่อวัดรูปร่างของต้นยาง โดยแขนกลกรีดยางแกน X' จะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง และแขนแกน Z จะเคลื่อนที่ตามสมการครึ่งวงกลม ระหว่างที่เคลื่อนที่นั้นลูกกลิ้งของอุปกรณ์วัดรูปร่างต้นยาง จะกลิ้งไปกับพื้นผิวต้นยาง ทำให้อุปกรณ์วัดรูปร่างต้นยางสามารถวัดระยะห่างระหว่างเซนเซอร์วัดตำแหน่งกับต้นยาง จากนั้นนำระยะที่วัดได้จากอุปกรณ์ไปรวมกับเส้นทางครึ่งวงกลมเพื่อสร้างเส้นทางการกรีดใหม่ และบันทึกเก็บเส้นทางไว้ใช้ในรอบที่สอง รอบที่สองจะเคลื่อนที่เพื่อกรีดยาง โดยใช้เส้นทางจากอุปกรณ์วัดรูปร่างต้นยางในรอบแรกเป็นเส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกลทั้งสองแกน ดังแสดงในรูปที่ 3.8

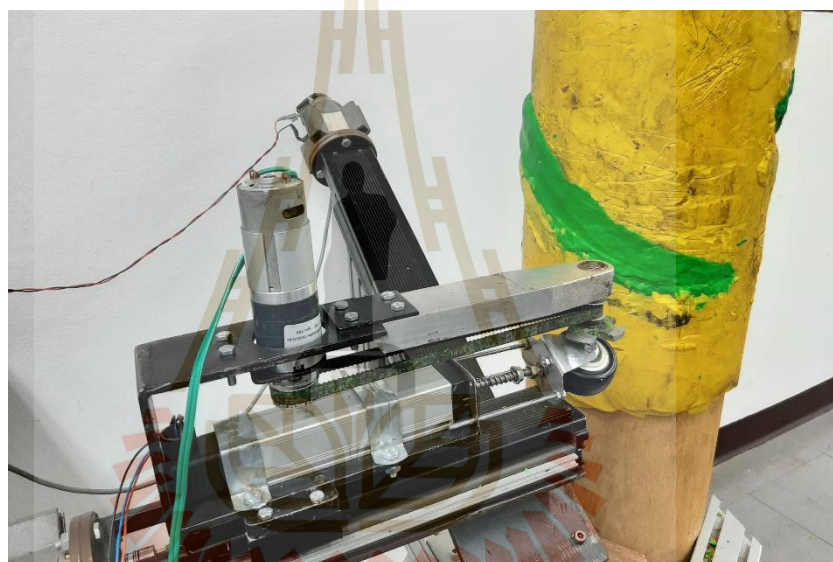


รูปที่ 3.7 แบบจำลองอุปกรณ์วัดรูปร่างต้นยางพารา

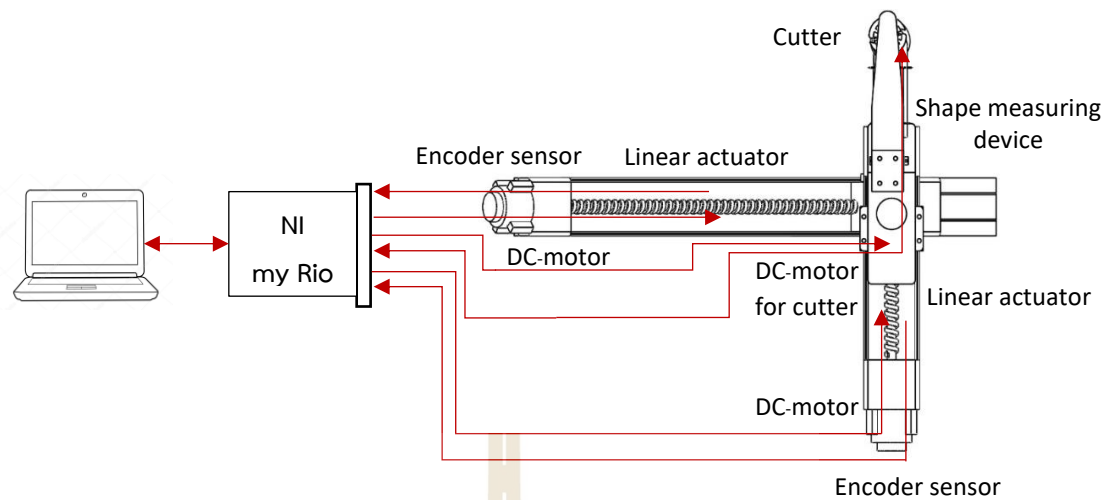


รูปที่ 3.8 เส้นทางการเคลื่อนที่ที่วัดรูปร่างต้นและกริดยาง

แขนกลกรีดยางที่ถูกปรับปรุง ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ 1) โครงจับยึดต้นยาง 2) ชุดกลไกขับเคลื่อน และ 3) ชุดตัวรูปร่างและกรีดยาง ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ตัวรูปร่างต้นยางและใบมีดกรีดยาง ดังแสดงในรูปที่ 3.9 คอมพิวเตอร์จะทำหน้าที่ประมวลผล ควบคุมการทำงานของแขนกลและบันทึกเส้นทางผ่านทาง NI myRIO ส่วนเซ็นเซอร์จะทำหน้าที่วัดการหมุนรอบของตัวตัวจับเร้าเชิงเส้นเพื่อให้แขนกลเคลื่อนที่ตามตำแหน่งที่ต้องการได้ เช่น เซอร์วัตต์ตำแหน่งทำหน้าที่วัดระยะห่างระหว่างเซ็นเซอร์วัดตำแหน่งกับต้นยาง ตามแผนผังของระบบวัดคุมของแขนกลที่ถูกแสดงในรูปที่ 3.10 โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับควบคุมแขนกลกรีดยางพัฒนาโดยใช้โปรแกรม LabVIEW



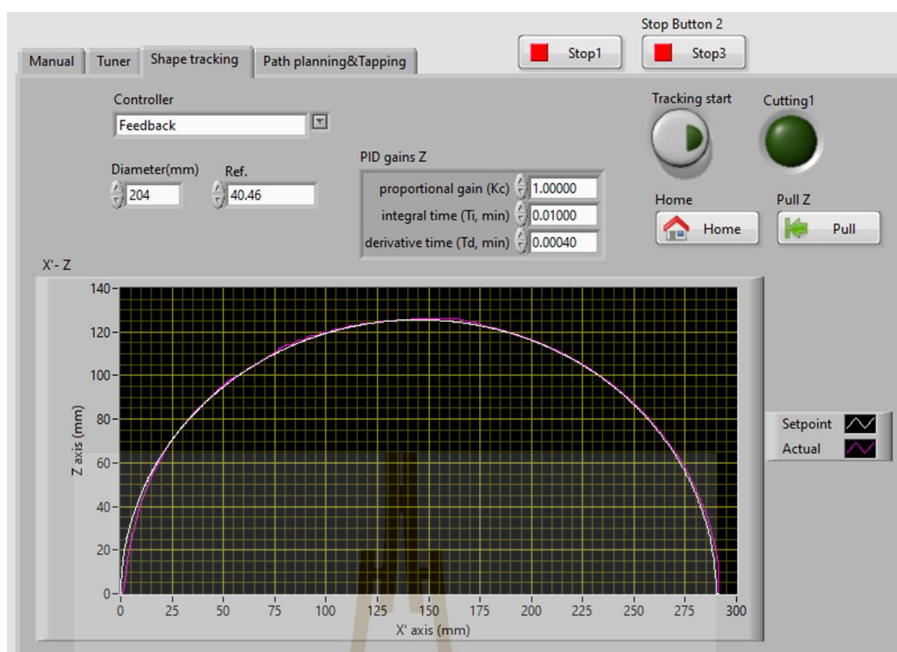
รูปที่ 3.9 แขนกลกรีดยางที่ติดตั้งอุปกรณ์ตัวรูปร่างต้นยางพารา



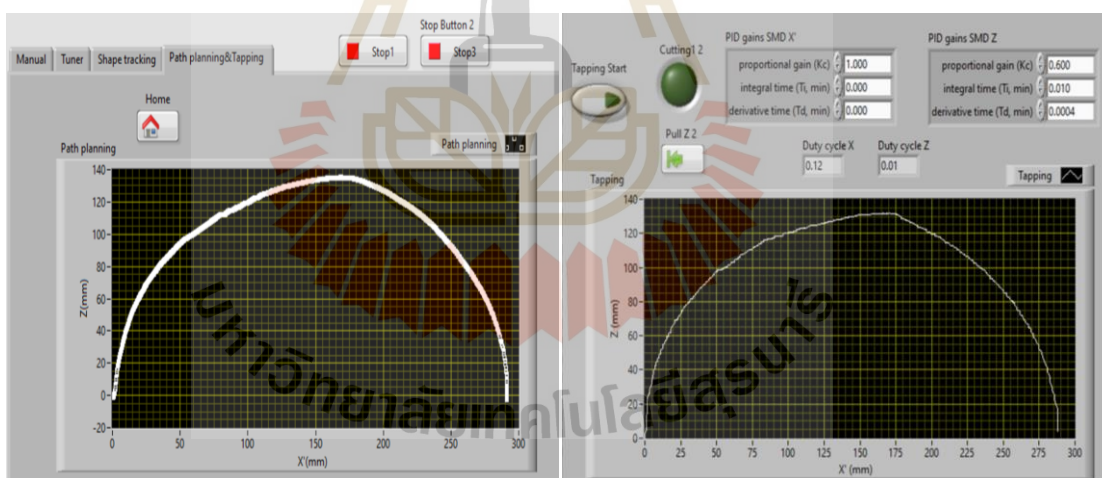
รูปที่ 3.10 แผนผังของระบบควบคุมแขนกลกรีดยางพารา

3.5 โปรแกรมควบคุมแขนกลกรีดยางพารา

โปรแกรมควบคุมแขนกลกรีดยางพาราจะถูกสร้างจากโปรแกรม LabVIEW ซึ่งประกอบด้วย 4 ฟังก์ชันหลัก (1) Manual ควบคุมความเร็วและทิศการเคลื่อนที่ของแขนกลแต่ละแกน (2) Tuner หาค่าอัตราขยายของแขนกลของแต่ละแกน (3) Shape tracking สร้างเส้นทางครึ่งวงกลมสำหรับสำรวจรูปร่างรอบต้นยาง โดยป้อนค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของต้นยาง อัตราขยายของแขนกลแกน Z และระยะอ้างอิงของอุปกรณ์วัดรูปร่างต้นยาง เนื่องจากเซนเซอร์วัดตำแหน่งที่ของอุปกรณ์วัดรูปร่างต้นยางที่นำมาติดตั้ง สามารถใช้งานได้ในช่วงระยะ 20-42 mm และบันทึกเส้นทางที่วัดจากอุปกรณ์วัดรูปร่างต้นยางไว้ ดังรูปที่ 3.11 (4) Path planning & Tapping สร้างเส้นทางและเคลื่อนที่กรีดยาง ซึ่งได้เส้นทางจากการสำรวจรอบต้นยางจากฟังก์ชัน (3) ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.11 โปรแกรมควบคุมแกนกล Shape tracking



(1)

(2)

รูปที่ 3.12 โปรแกรมควบคุมแกนกล Path planning & Tapping

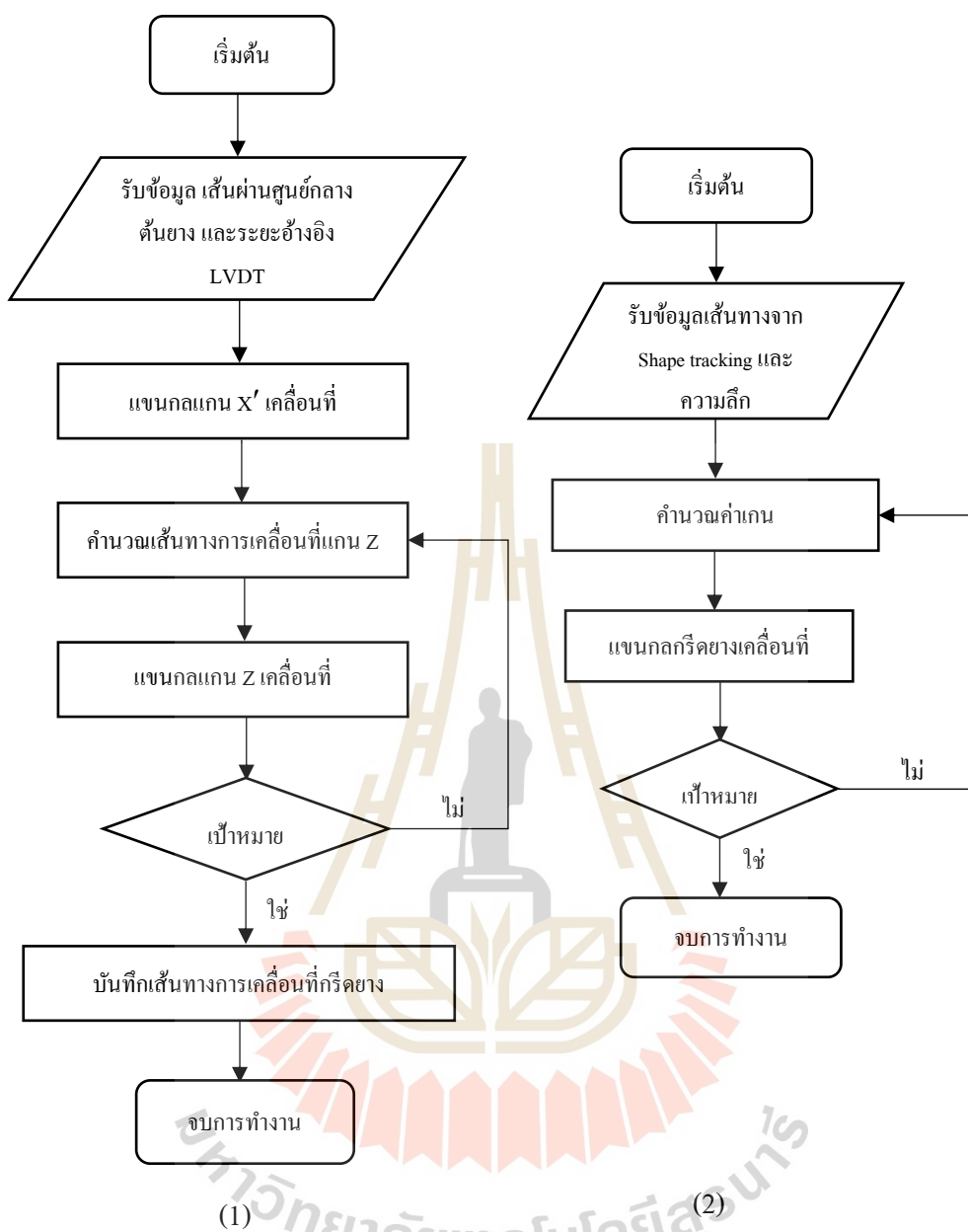
(1) Path planning (2) Tapping

3.6 การทดสอบการเคลื่อนที่ของแขนกลกริดยางพารา

การทดสอบการเคลื่อนที่ของแขนกลกริดยาง เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของเส้นทางการเคลื่อนที่ และรอยกริด แขนกลกริดยางพาราจะมีการเคลื่อนที่ทั้งหมด 2 รอบ/การทดสอบ เริ่มต้นวัดขนาดของต้นยางพาราที่ใช้ทดสอบ และติดตั้งชุดตัวรูปร่างและกริดยางให้อยู่ในตำแหน่งเริ่มต้นพร้อมเคลื่อนที่ จากนั้นป้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของต้นยางในโปรแกรม Shape tracking และกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นให้กับอุปกรณ์ตัวรูปร่าง เป็นตำแหน่งอ้างอิงให้กับอุปกรณ์ แล้วดำเนินการขั้นตอนตามในรูปที่ 3.13 (1) เพื่อสำรวจรูปร่างของต้นยางพารา การเคลื่อนที่รอบที่ 2 ติดตั้งชุดใบมีดกริดยางให้กับอุปกรณ์ และดำเนินขั้นตอนตามในรูปที่ 3.13 (2) เพื่อกริดต้นยางพารา จากนั้นใช้ไม้บรรทัดครึ่งวงกลมกำหนดมุม $0-180^{\circ}$ บนต้นยาง และเวอร์เนียร์คาลิเปอร์วัดความลึกและความกว้างของแต่ละองศาจำนวน 46 จุด เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการเคลื่อนที่ของแขนกลกริดยาง โดยจะทดสอบกับต้นยางจำลองและต้นยางจริง

1) ต้นยางพาราจำลอง แกนในสร้างจากไม้ที่ผ่านการกลึงผิว รอบนอกพอกด้วยดินน้ำมันให้มีลักษณะพื้นฐานเป็นรูปทรงกระบอก ต้นยางพาราจำลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแกนไม้ 200 mm ความหนาเปลือก 10 mm ดังนั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของต้นยางพาราจำลองจะเท่ากับ 220 mm และพอกดินน้ำมันเพิ่มบางช่วงของต้นยางเพื่อสำรวจพื้นผิวที่มีลักษณะผิดเพี้ยนจากทรงกระบอก ดังแสดงในรูปที่ 3.14

2) ต้นยางพาราจริงที่ถูกตัดจากแปลงยางพาราในฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีเพื่อใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแกนไม้ 197 mm ความหนาเปลือกไม้ 7 mm ดังนั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของต้นยางพาราจริงจะเท่ากับ 204 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.13 ขั้นตอนการทำงานของแขนกล (1) Shape tracking (2) Path planning & Tapping



รูปที่ 3.14 สัณฐานของคันทันยางพาราจำลองที่ใช้ทดสอบ



รูปที่ 3.15 สัณฐานของคันทันยางพาราจริงที่ใช้ทดสอบ

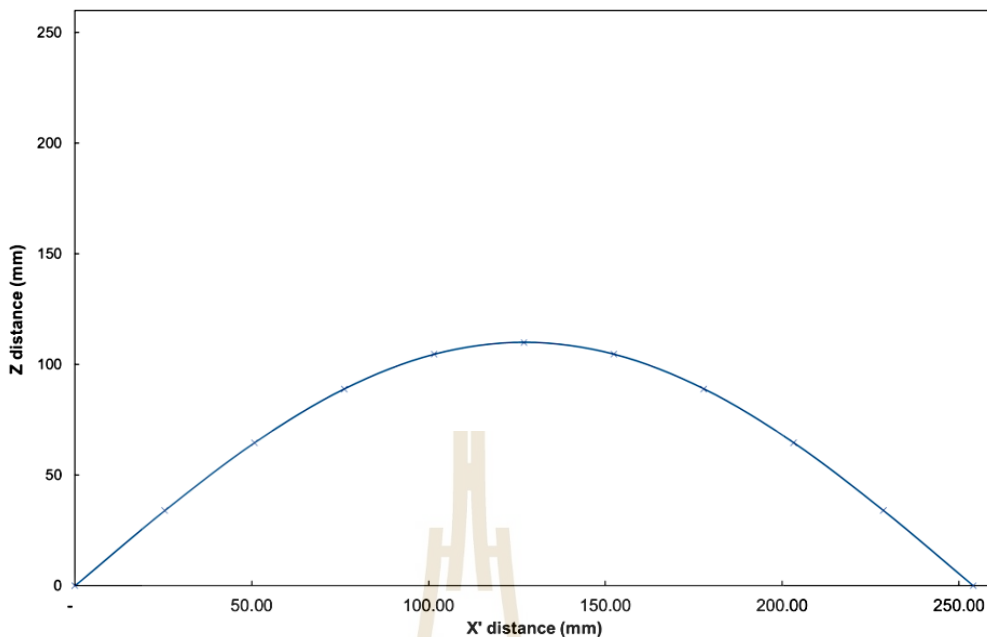
บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

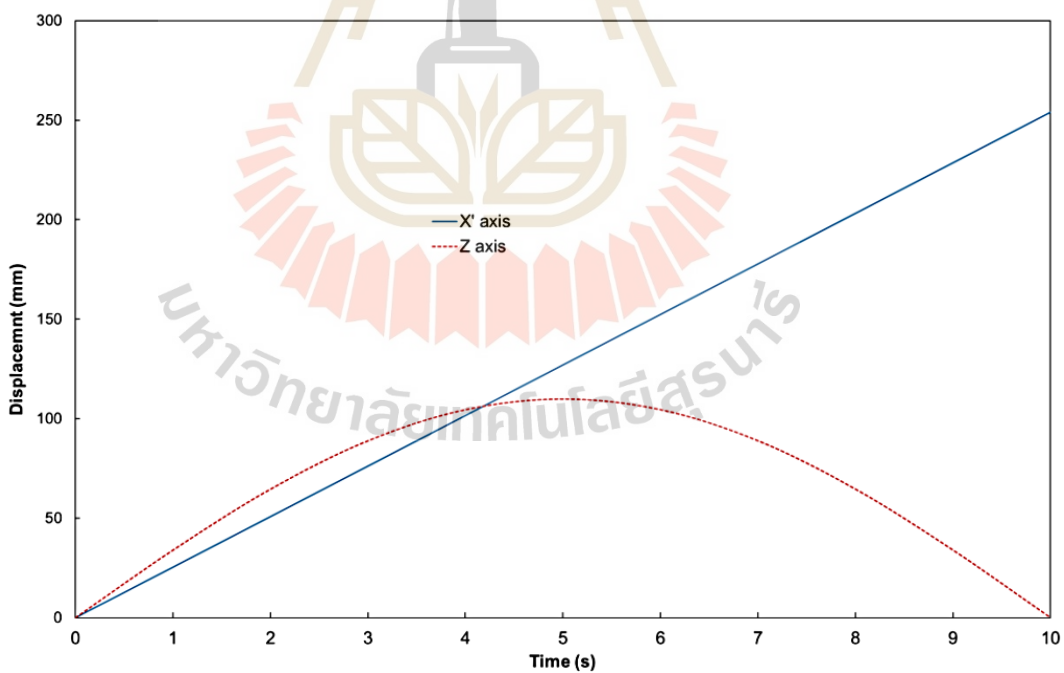
4.1 ผลวิเคราะห์ทางคิเนเมติกส์ของแขนกลกริดยางพารา

รูปที่ 4.1 แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกลกริดยางพาราแบบสองแกนจากตำแหน่งด้านล่างขวาไปยังตำแหน่งบนซ้ายของต้นยางพาราทรงกระบอก จากรูปจะเห็นได้ว่าแขนกลสามารถเคลื่อนที่ตามรอยกริดที่มีลักษณะเป็นวงรีได้

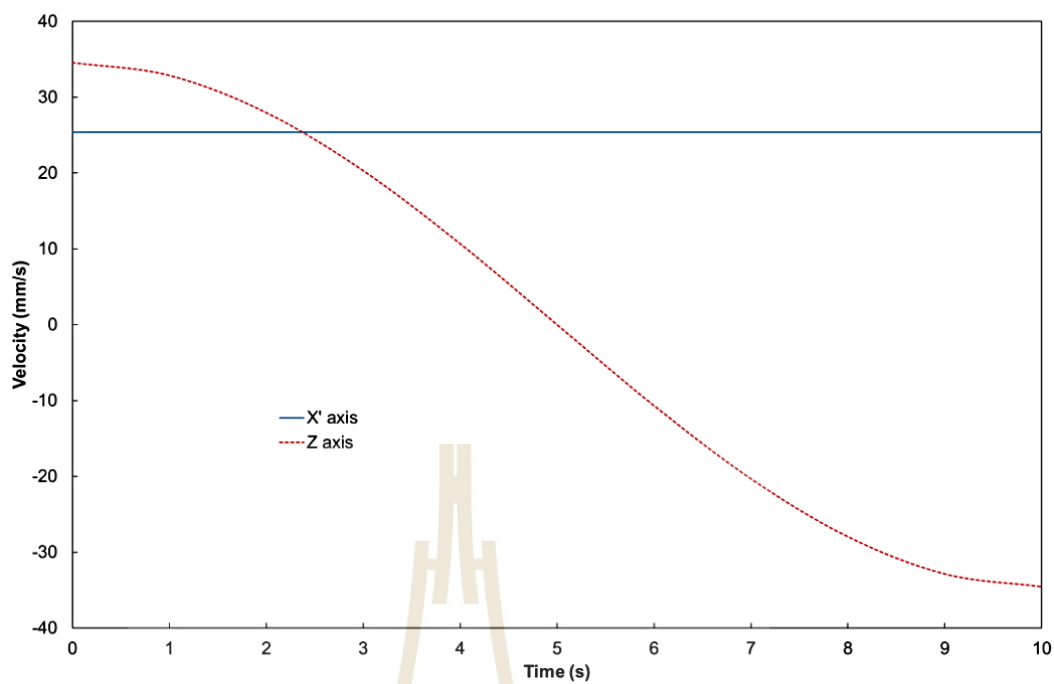
การกระจัด ความเร็ว ความเร่ง และการกระตุกของแขนกลกริดยางพาราแต่ละแกนถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4.2-4.5 จากรูปจะเห็นว่า ลักษณะการเคลื่อนที่ของแขนกลในแกน Z จะเป็นการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย ดังนั้น ในช่วงเริ่มต้นของการเคลื่อนที่จะมีการกระตุกมาก พอเคลื่อนที่ถึงช่วงกลาง แขนกลในแกน Z จะไม่เกิดการกระตุก และเมื่อเคลื่อนที่ถึงช่วงสุดท้ายจะมีการกระตุกมาก ส่งผลให้ในช่วงเริ่มต้นและช่วงสุดท้ายมีความเร็วมาก แต่ความเร่งเป็นศูนย์ ทำให้แขนกลควบคุมได้ยากในช่วงเริ่มต้นและช่วงสุดท้าย ส่วนลักษณะการเคลื่อนที่ของแขนกลในแกน X เป็นการเคลื่อนที่แบบความเร็วคงที่ ดังนั้น แขนกลของแกน X ไม่มีการกระตุก และความเร่งเป็นศูนย์ ทำให้ควบคุมแขนกลของแกน X ได้ง่าย



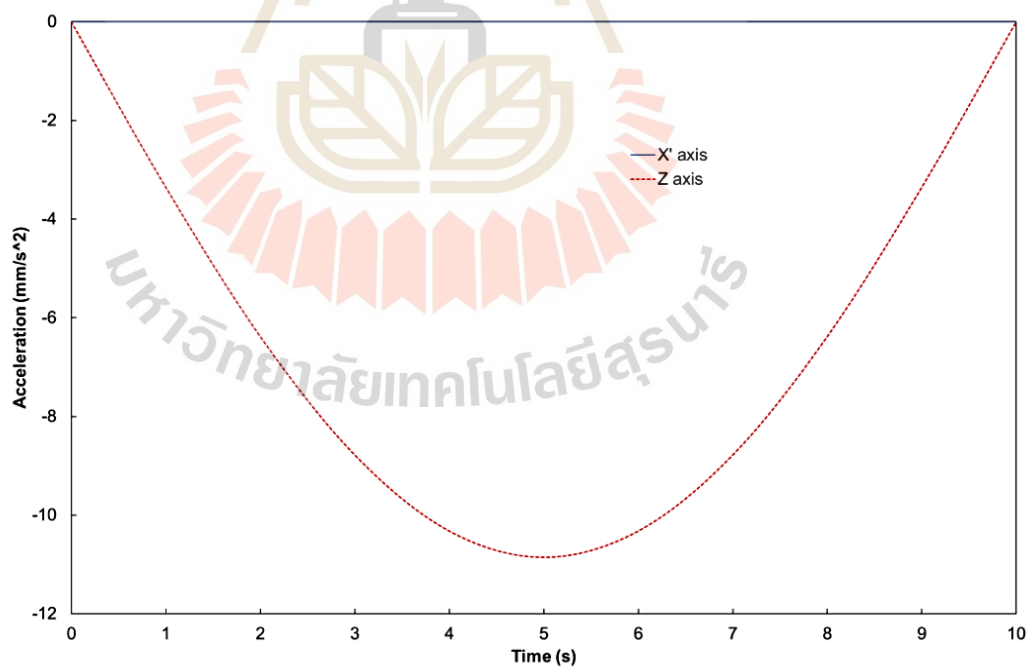
รูปที่ 4.1 เส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกล



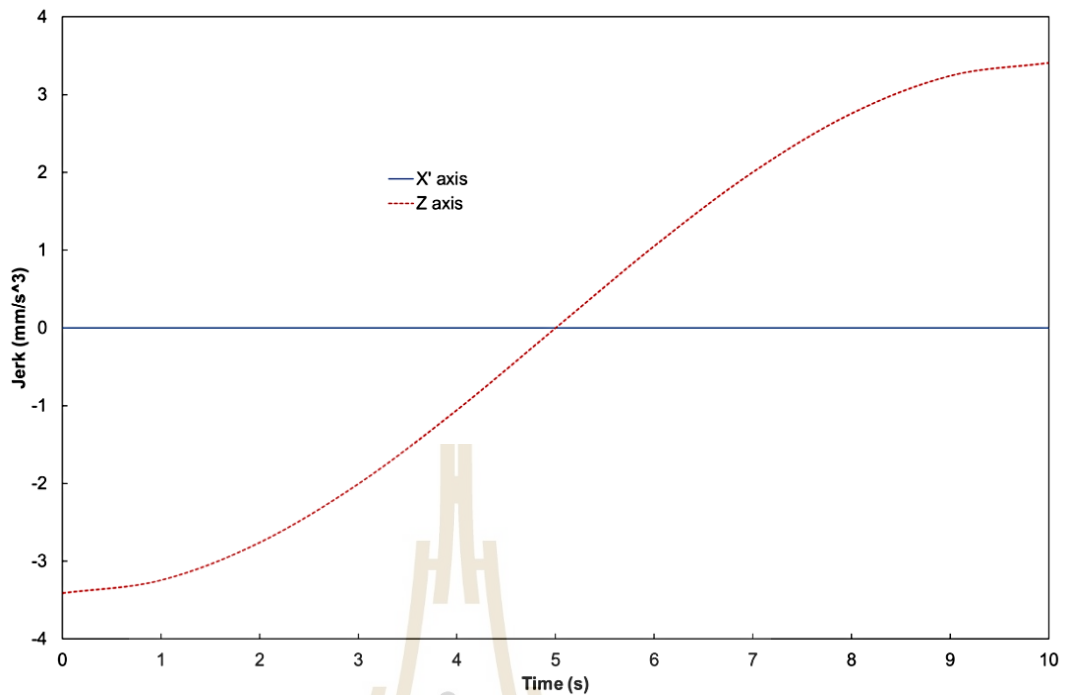
รูปที่ 4.2 การกระจัดของตัวจับเร้าเชิงเส้นบนแกน X' และแกน Z



รูปที่ 4.3 ความเร็วของตัวขับเคลื่อนบนแกน X' และแกน Z



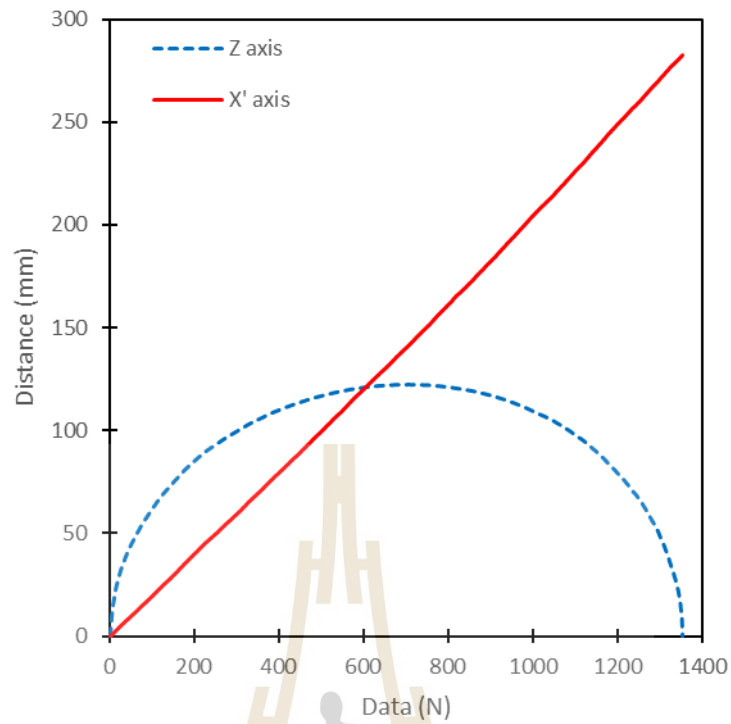
รูปที่ 4.4 ความเร่งของตัวขับเคลื่อนบนแกน X' และแกน Z



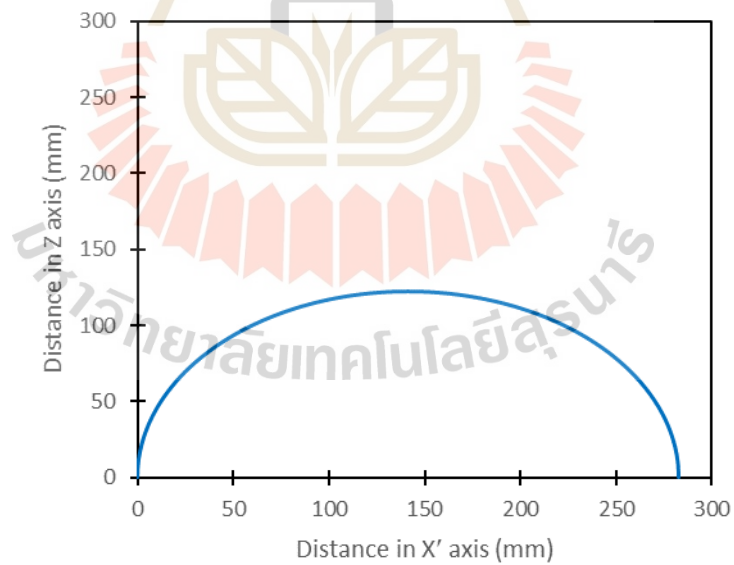
รูปที่ 4.5 การกระตุกของตัวขับเคลื่อนเชิงเส้นบนแกน X' และแกน Z

4.2 ผลการออกแบบเส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกลกริดยางพารา

เส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกลกริดยางพาราบนต้นยางทรงกระบอกสามารถพิจารณาได้จากการเคลื่อนที่ของตัวขับเคลื่อนเชิงเส้นบนแกน X' และแกน Z รูปที่ 4.6 แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของตัวขับเคลื่อนเชิงเส้นบนแต่ละแกน ขณะกริดต้นยางพาราที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 220 mm ตัวขับเคลื่อนเชิงเส้นบนแกน X' จะเคลื่อนที่เป็นแบบเส้นตรงด้วยระยะ 282.6 mm ด้วยความเร็วคงที่ ส่วนตัวขับเคลื่อนบนแกน Z จะเคลื่อนที่แบบครึ่งวงกลม ซึ่งมีระยะทางสูงสุด 123.6 mm ส่วนเส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกลกริดยางพาราถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4.7 จากรูปจะเห็นได้ว่าเส้นทางการเคลื่อนที่ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของตัวขับเคลื่อนบนแกน X' และแกน Z มีลักษณะเป็นรูปวงรี โดยมีขนาดเท่ากับรูปวงรีที่เกิดจากการโปรเจกต์เส้นผ่านศูนย์กลางของต้นยางพาราที่อยู่บนแกน X มานบนแกน X'



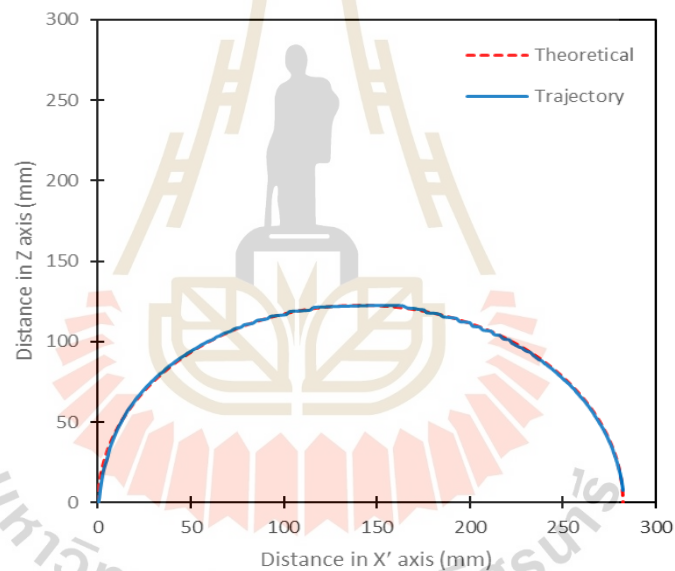
รูปที่ 4.6 เส้นทางการเคลื่อนที่ของตัวจับเร้าเชิงเส้นบนแกน X' และแกน Z



รูปที่ 4.7 เส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกลกรีดยางบนระนาบ $X'Z$

4.3 ผลการปรับจูนค่าเกนของตัวควบคุมแบบ PID

ผลการปรับจูนค่าเกนของตัวควบคุมแบบ PID สำหรับการควบคุมตัวขับเคลื่อนในแกน Z ของแขนกลด้วยวิธีการของซีเกลอร์-นิโคลส์ สามารถหาค่า K_U และ T_U เท่ากับ 2.5 และ 0.0045 แล้วนำทั้งสองค่าไปคำนวณหาค่าเกนจะได้ K_P , T_I และ T_D เท่ากับ 1, 0.01 และ 0.0004 ตามลำดับ ส่วนแกนกลกิริตยงของแกน X ควบคุมแบบ Open loop เนื่องจากต้องการให้แขนกลกิริตยงแกน X เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ของแขนกลกิริตยง พบว่า เส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกลที่เคลื่อนที่ได้จริง (Trajectory) มีค่าใกล้เคียงกับเส้นทางการเคลื่อนที่ที่ต้องการ (Theoretical) เนื่องจากคุณสมบัติของตัวควบคุมป้อนกลับแบบ PID ตัวควบคุมจะปรับความเร็วในการตอบสนองดีขึ้น พยายามลดค่าความผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุด และรักษาเสถียรภาพให้กับระบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 เส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกล เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบ PID

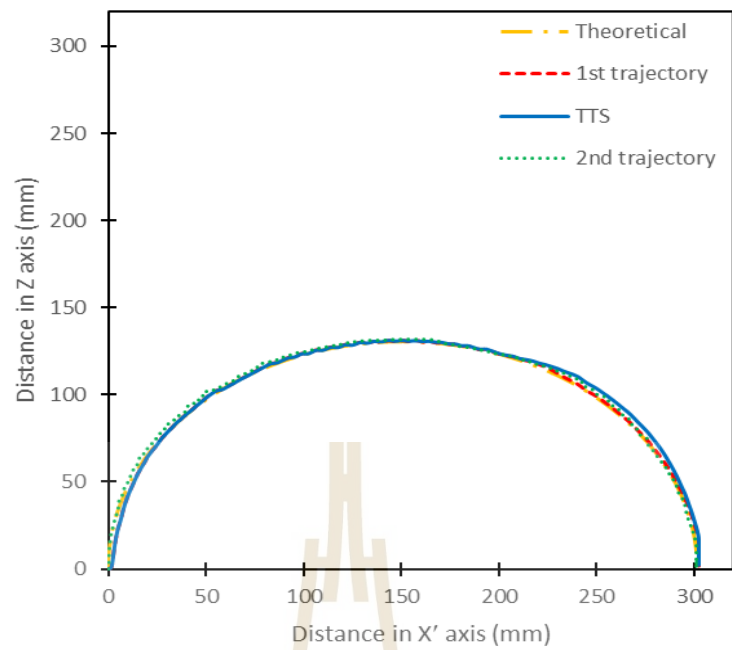
ส่วนการเคลื่อนที่กิริตยง เนื่องจากมีข้อมูลเส้นทางของทั้งสองแกนและปริมาณข้อมูลเยอะ ทำให้ค่าเกนเดิมไม่สามารถทำให้แขนกลทั้งสองแกนเคลื่อนที่สัมพันธ์กันได้ จึงต้องหาค่าเกนที่เหมาะสมกับการกิริตยงใหม่ โดยแขนกลของแกน X' จะใช้ตัวควบคุมป้อนกลับแบบ P ในการควบคุม ซึ่งเพียงพอต่อการการทำงานประสานกับแขนกลแกน Z เนื่องจากแกน X' เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ค่าเกน K_P ของแกน X' มีค่าเท่ากับ 1 และแขนกลของแกน Z จะใช้ตัวควบคุมป้อนกลับแบบ PID จะได้ค่าเกน K_P , T_I และ T_D มีค่าเท่ากับ 0.6, 0.01 และ 0.0004 ตามลำดับ

4.4 ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของแขนกลกริดยางพารา

1) ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของแขนกริดกริดยางพารากับต้นยางจำลอง

จากผลการเคลื่อนที่สำรวจรูปร่างและกริดต้นยางจำลองแสดงการเปรียบเทียบเส้นทางเคลื่อนที่แบบครึ่งวงรี (Theoretical) เส้นทางเคลื่อนที่ของแขนกลกริดยางพารารอบแรก (1st trajectory) เส้นทางที่ได้จากการสำรวจรูปร่างต้นยางพาราจำลอง (Tracked trunk shape, TTS) และเส้นทางเคลื่อนที่ของแขนกลกริดยางรอบที่สอง (2nd trajectory) ดังแสดงในรูปที่ 4.9 เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ของแขนกลกริดยางรอบแรกเพื่อสำรวจรูปร่างต้นยาง พบว่า ตลอดการเคลื่อนที่ เส้นทางเคลื่อนที่ของแขนกลมีค่าใกล้เคียงกับเส้นทางเคลื่อนที่แบบครึ่งวงรี และช่วงแรกของการเคลื่อนที่ เส้นทางที่ได้จากการสำรวจรูปร่างต้นยางพาราจำลอง มีค่าใกล้เคียงกับเส้นทางเคลื่อนที่ของแขนกล เพราะรูปร่างของต้นยางจำลองมีลักษณะเป็นทรงกระบอก แต่เมื่อแขนกลเคลื่อนที่ในแนวแกน X' ถึงช่วงระยะ 220-290 mm เส้นทางที่ได้จากการสำรวจรูปร่างต้นยางมีความแตกต่างจากเส้นการเคลื่อนที่ของแขนกล เนื่องจากในบริเวณนั้นพื้นผิวต้นยางพาราจำลองมีลักษณะ โคนงูนออกมา ทำให้ลูกกลิ้งของอุปกรณ์สำรวจรูปร่างต้นยางที่สัมผัสพื้นผิวต้นยางถูกกดลงไปตามแรงกดระหว่างต้นยางกับอุปกรณ์สำรวจรูปร่างต้นยาง

เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ของแขนกลกริดยางรอบที่ 2 พบว่า เส้นทางเคลื่อนที่ของแขนกลมีความแตกต่างจากเส้นทางที่ได้จากการสำรวจรูปร่างต้นยางเล็กน้อย เนื่องจากลดปริมาณข้อมูลของเส้นทางที่ได้จากการสำรวจรูปร่างต้นยาง และการเคลื่อนที่ของแขนกลของแกน X' ในช่วงเริ่มต้นและช่วงสุดท้ายมีความเร็วมาก แขนกลกริดยางจึงเคลื่อนที่เร็วจนออกนอกเส้นทางที่ได้จากการสำรวจรูปร่างต้นยางไป ทำให้ระบบตัวควบคุมป้อนกลับแบบ PID ตอบสนองไม่ทัน ซึ่งรอยกริดที่เกิดขึ้นบนต้นยางพาราถูกแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบเส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกลกริดยางพารา กับเส้นทางที่ได้จากการสำรวจรูปร่างต้นยางพาราจำลอง



รูปที่ 4.10 ลักษณะรอยกริดบนต้นยางพาราจำลอง

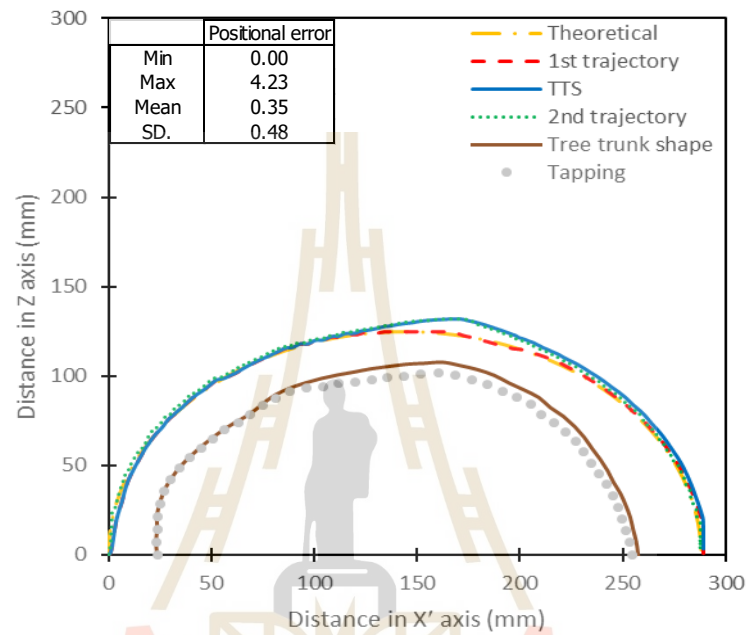
2) ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของแขนกรีดกรีดยางพารากับต้นยางจริง

จากผลการเคลื่อนที่สำรวจรูปร่างต้นยางจริงแสดงการเปรียบเทียบเส้นทางเส้นทางเคลื่อนที่แบบครึ่งวงรี (Theoretical) เส้นทางเคลื่อนที่ของแขนกลกรีดกรีดยางพารารอบแรก (1st trajectory) เส้นทางที่ได้จากการสำรวจรูปร่างต้นยางพาราจริง (Tracked trunk shape, TTS) และเส้นทางเคลื่อนที่ของแขนกลกรีดกรีดยางรอบที่สอง (2nd trajectory) ดังแสดงในรูปที่ 4.11 เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่รอบแรก เพื่อสำรวจวัตรูปร่างต้นยางจริง พบว่า ตลอดการเคลื่อนที่เส้นทางเคลื่อนที่ของแขนกลมีค่าใกล้เคียงกับเส้นทางเคลื่อนที่แบบครึ่งวงรี และช่วงแรกของการเคลื่อนที่ เส้นทางที่ได้จากการสำรวจรูปร่างต้นยางพาราจริง มีค่าใกล้เคียงกับเส้นทางเคลื่อนที่ของแขนกล เพราะรูปร่างของต้นยางพาราจริงมีลักษณะเป็นทรงกระบอก แต่เมื่อแขนกลเคลื่อนที่ในแนวแกน X' ถึงช่วงระยะ 150-170 mm เส้นทางที่ได้จากการสำรวจรูปร่างต้นยางพาราจริงมีความแตกต่างจากเส้นทางเคลื่อนที่ของแขนกลรอบแรก เนื่องจากแกนของอุปกรณ์วัตรูปร่างต้นยางถูกตัดให้เปลี่ยนด้านสัมผัสพื้นผิวด้านในเส้นทางสำรวจช่วงครึ่งหลังของลำต้น และเมื่อแขนกลเคลื่อนที่ในแนวแกน X' ถึงช่วงระยะ 170-290 mm เส้นทางที่ได้จากการสำรวจรูปร่างต้นยางมีความแตกต่างจากเส้นทางเคลื่อนที่ของแขนกลมาก เนื่องจากในบริเวณนั้นพื้นผิวด้านยางพาราจริงมีลักษณะโค้งนูนออกมา ทำให้ลูกกลิ้งของอุปกรณ์วัตรูปร่างต้นยางที่สัมผัสพื้นผิวด้านยางถูกกดลงไปตามแรงกดระหว่างต้นยางกับอุปกรณ์วัตรูปร่างต้นยาง

เมื่อพิจารณาผลการเคลื่อนที่กรีดต้นยางรอบที่สอง พบว่า เส้นทางเคลื่อนที่ของแขนกลมีค่าใกล้เคียงกับเส้นทางที่ได้จากการสำรวจรูปร่างต้นยางพาราจริงมาก และจากการวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดทางตำแหน่ง พบว่า แขนกลกรีดกรีดยางนี้มีค่าความผิดพลาดทางตำแหน่งสูงสุด เท่ากับ 4.23 mm ค่าความผิดพลาดทางตำแหน่งต่ำสุด เท่ากับ 0.00 mm ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดทางตำแหน่ง เท่ากับ 0.35 ± 0.48 mm

เมื่อพิจารณาความลึกและความกว้างของการกรีดของต้นยางพาราจริงในรูปที่ 4.12 พบว่า ต้นยางพาราจริงมีรอยกรีดตลอดการเคลื่อนที่ แต่มีความลึกไม่สม่ำเสมอ ช่วงเริ่มต้นและช่วงท้ายของการเคลื่อนที่กรีดยาง รอยกรีดจะมีระยะลึกและความกว้างใกล้เคียงกัน โดยมีระยะลึกและความกว้างน้อยสุด เท่ากับ 0.50 mm และ 5.54 mm ตามลำดับ ส่วนช่วงกลางของการเคลื่อนที่กรีดยาง รอยกรีดจะมีระยะลึกและความกว้างมากที่สุด เท่ากับ 6.74 mm และ 23.00 mm ตามลำดับ และตลอดรอยกรีดจะมีระยะลึกและความกว้างเฉลี่ย เท่ากับ 3.14 ± 2.06 mm และ 12.07 ± 5.80 mm ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.13 จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า เมื่อใบมีดกรีดกรีดยางด้วยความลึก

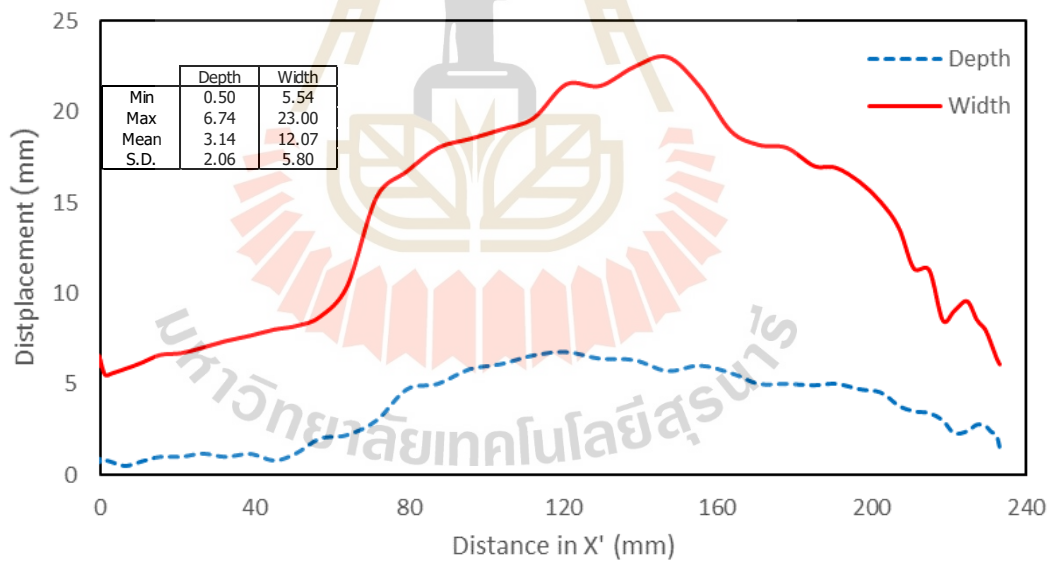
ที่มากขึ้นจะทำให้ความกว้างของรอยกรีดมีค่ามากขึ้น เพราะว่าใบมีดถูกออกแบบให้วางตัวบนระนาบ XZ ในขณะที่เส้นทางการเคลื่อนที่ของใบมีดอยู่บนระนาบ X'Z และเนื่องจากความเร็วในการเคลื่อนที่ของใบมีดในช่วงเริ่มต้นและสุดท้ายมีค่ามาก ทำให้ความลึกและความกว้างของการกรีดมีค่าน้อย



รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบเส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกลกรีดยางพารา กับเส้นทางที่ได้จากการสำรวจรูปร่างต้นยางพาราจริง



รูปที่ 4.12 ลักษณะรอยกรีดบนต้นยางพาราจริง



รูปที่ 4.13 ความลึกและความกว้างที่ได้จากการสำรวจรูปร่างต้นยางพาราจริง

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

- 1) แขนกลกรีดยางพารา ประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่ โครงจับยึดต้นยาง ชุดกลไกขับเคลื่อน และชุดวัดรูปร่างและกรีดยาง
- 2) โปรแกรมควบคุมแขนกลกรีดยาง ประกอบด้วย 4 ฟังก์ชัน ได้แก่ Manual, Tuner, Shape tracking และ Path planning & Tapping
- 3) ขั้นตอนการกรีดยางด้วยแขนกลกรีดยางจะเคลื่อนที่ 2 รอบ คือ รอบแรกเคลื่อนที่เพื่อสำรวจรูปร่างต้นยาง และรอบที่ 2 เคลื่อนที่เพื่อกรีดยาง
- 4) โปรแกรมควบคุมกรีดยางสามารถสร้างเส้นทางที่สอดคล้องกับสัณฐานต้นยางที่ได้จากอุปกรณ์วัดรูปร่างต้นยางได้
- 5) ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า แขนกลกรีดยางสามารถเคลื่อนที่กรีดยางตามเส้นทางที่มีรูปร่างตามสัณฐานของต้นยางได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรเปลี่ยนเซนเซอร์วัดตำแหน่งแบบที่มีสปริงในตัว เพื่อให้เซนเซอร์วัดตำแหน่งสามารถคืนตัวได้เร็ว เนื่องจากอุปกรณ์วัดรูปร่างต้นยาง ไม่สามารถคืนตัวได้เร็วขณะที่วัดรูปร่างต้นยางที่มีลักษณะโค้งงอได้ หรือเลเซอร์เซนเซอร์สำหรับวัดระยะที่มีความละเอียดระดับ mm เพื่อลดการสัมผัสผิวต้นยาง ไม่ให้ผิวต้นยางเกิดความเสียหาย

รายการอ้างอิง

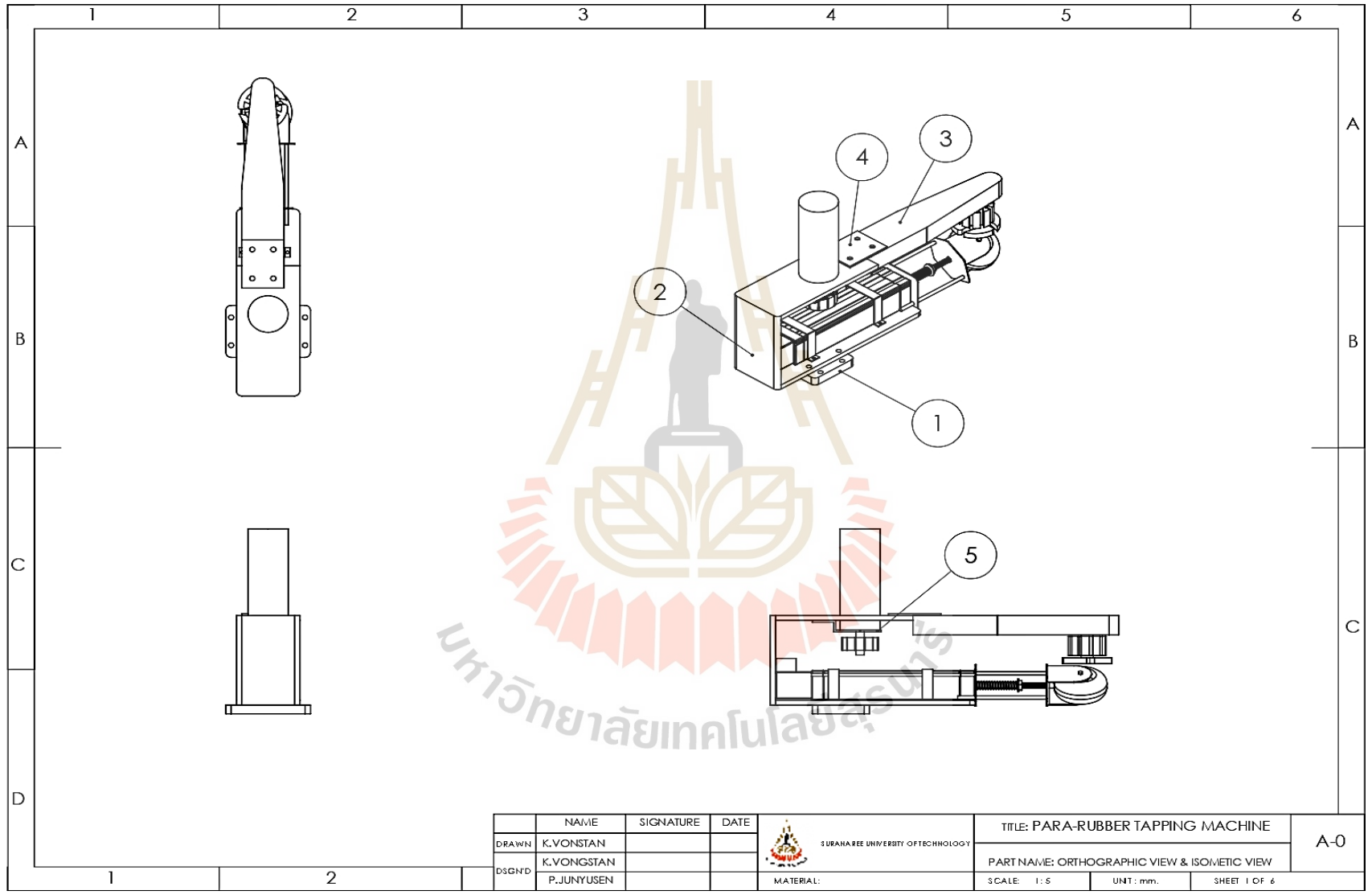
- กองพัน อารีรักษ์. (2560). ระบบควบคุม. นครราชสีมา: สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- โกเมนต์ โกศลกิตติอัมพร. (2548). แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการจำลองภาพการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกล. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- คุณากร เข้มพราหม, ชวลิต สามเมือง และปวีร์ เชื้อปรารงค์. (2562). เครื่องกรีดยางพาราอัตโนมัติ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดอนเมือง กรุงเทพมหานคร.
- ชิตพล คงศิลา. (2559). การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกรีดต้นยางพาราระหว่างเครื่องกรีดยางไฟฟ้ากับมีดกรีดยางเงาะบง. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30 วันที่ 5-8 กรกฎาคม 2559 จังหวัดสงขลา.
- เดชฤทธิ์ มณีธรรม. (2559). คัมภีร์การใช้งาน หุ่นยนต์ (ROBOT). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ ซีเอ็ดดูเคชั่น.
- นวกัทธา หนูนาค และทวีพล ชื้อสัตย์. (2555). LVDT/ทรานสดิวเซอร์ชนิดเปลี่ยนแปลงความเหนียวนำแบบเชิงเส้น [ออนไลน์]. ได้จาก www.foodnetworksolution.com
- พิชิต สฟโชค, พิสมัย จันทูมา และพนัส แพชนะ. (2550). การกรีดยาง และการใช้สารเคมีเร่งน้ำยาง [ออนไลน์]. ได้จาก www.fio.co.th/p/km/document/km-530102.pdf
- มติชนออนไลน์. (2559). เครื่องกรีดยางอัตโนมัติ ตั้งเวลากรีดเองได้ด้วยมือถือ ไม่ต้องใช้หรือจ่อแรงงานกรีดยาง [ออนไลน์]. ได้จาก www.matichon.co.th/economy/news_8444
- ขงยุทธ์ เสียงดั่ง. (2552). การออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบกรีดยางพาราแบบใช้มอเตอร์ไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ขงยุทธ์ เสียงดั่ง, จรูญศักดิ์ สมพงษ์, อภา วาทกิจ และพยุศักดิ์ จุลยุเสน. (2556). แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลสำหรับเครื่องกรีดยางพาราอัตโนมัติ. รายงานการประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14 วันที่ 1-4 เมษายน 2556 ประจวบคีรีขันธ์., หน้า 348-353
- ขงยุทธ์ เสียงดั่ง, พยุศักดิ์ จุลยุเสน และธีรวัฒน์ เจเดือน. (2559). เส้นทางที่เหมาะสมของแขนกลกรีดยางพารา. รายงานการประชุม วิชาการวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ ระดับชาติครั้งที่ 3 วันที่ 25-26 พฤศจิกายน 2559 ขอนแก่น., หน้า 118-126
- ขงยุทธ์ เสียงดั่ง. (2559). การพัฒนาแขนกลสำหรับการกรีดยางพาราอัตโนมัติ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

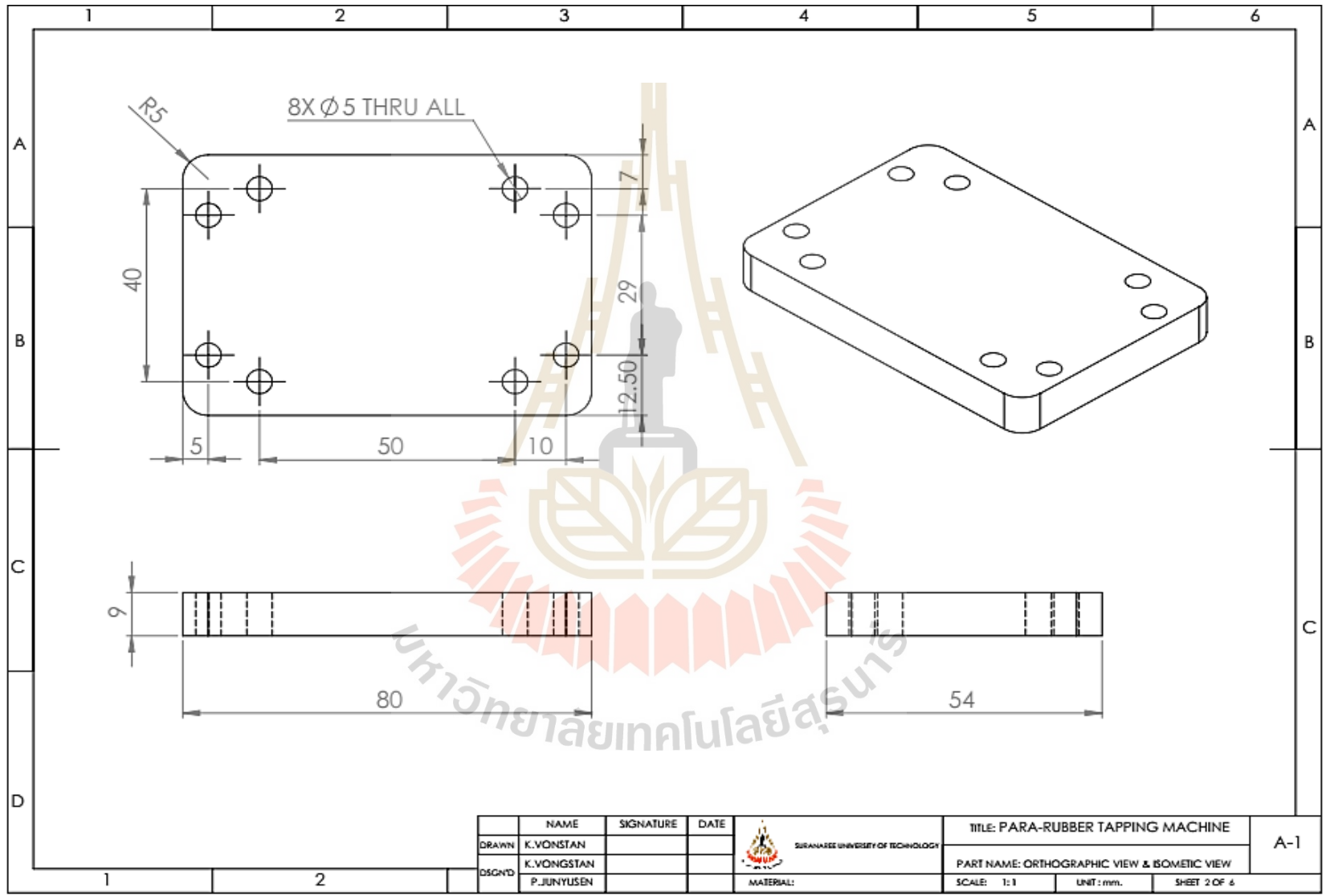
- วโรดม ผู้จินดา. (2559). การวิเคราะห์และควบคุมหุ่นยนต์อุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร, เกษตรดีที่เหมาะสมสำหรับยางพารา. พิมพ์ครั้งที่ 1 : 2544 .
สำนักงานกองทุนสงเคราะห์การทำสวนยาง,การกีดร่ว้กับการใช้สารเคมีเร่งน้ำยางบางระยะ
(เอกสารประกอบการฝึกอบรมพนักงานบรรจุใหม่ สำนักงานกองทุนสงเคราะห์การทำสวน
ยาง ณ โรงแรมหนองคายแกรนด์ อ.เมือง จ.หนองคาย, 19 – 22 กุมภาพันธ์ 2545).
- เอกสิทธิ์ อนันต์เจริญวงศ์, นายเยาว์ เมืองดี, นริศรา มหาชนินวงศ์, ปิยนากู คงทิม และสุธิดา หมาด
โตะชะ. (2561). การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องกรีดยางพาราอัตโนมัติกับการกรีด
แบบใช้มีดเจาะบง. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- J V C Maliackal, Asif K A, Sajith P A, Sajo K Joseph and Yazir. (2017). Advanced rubber tree
tapping machine. International journal on research innovations in engineering science and
technology (IJRIEST), 2(5)
- N Nayak Vinayaka, N Sanker Athul, N M Madahuraj and P Shyama Nandana. (2017). Automated
rubber tapering machine. A project report of bachelor of engineering in electronics and
communication engineering at Visvesvaraya technological university, India.
- Qin Zhang and Francis J. Pierce. (2015). Agricultural automation fundamentals and practices. Boca
Raton: Taylor & Francis Group.

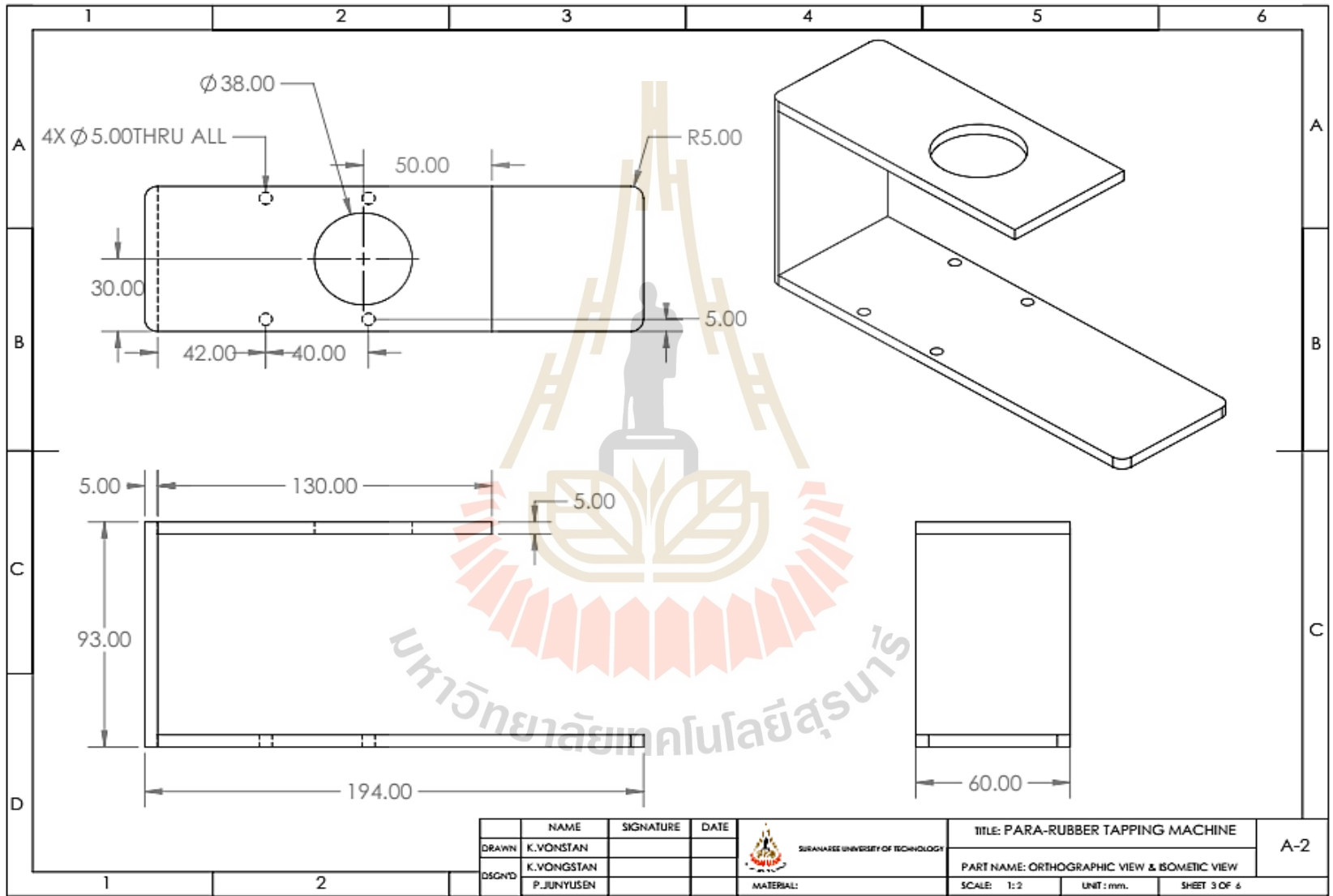


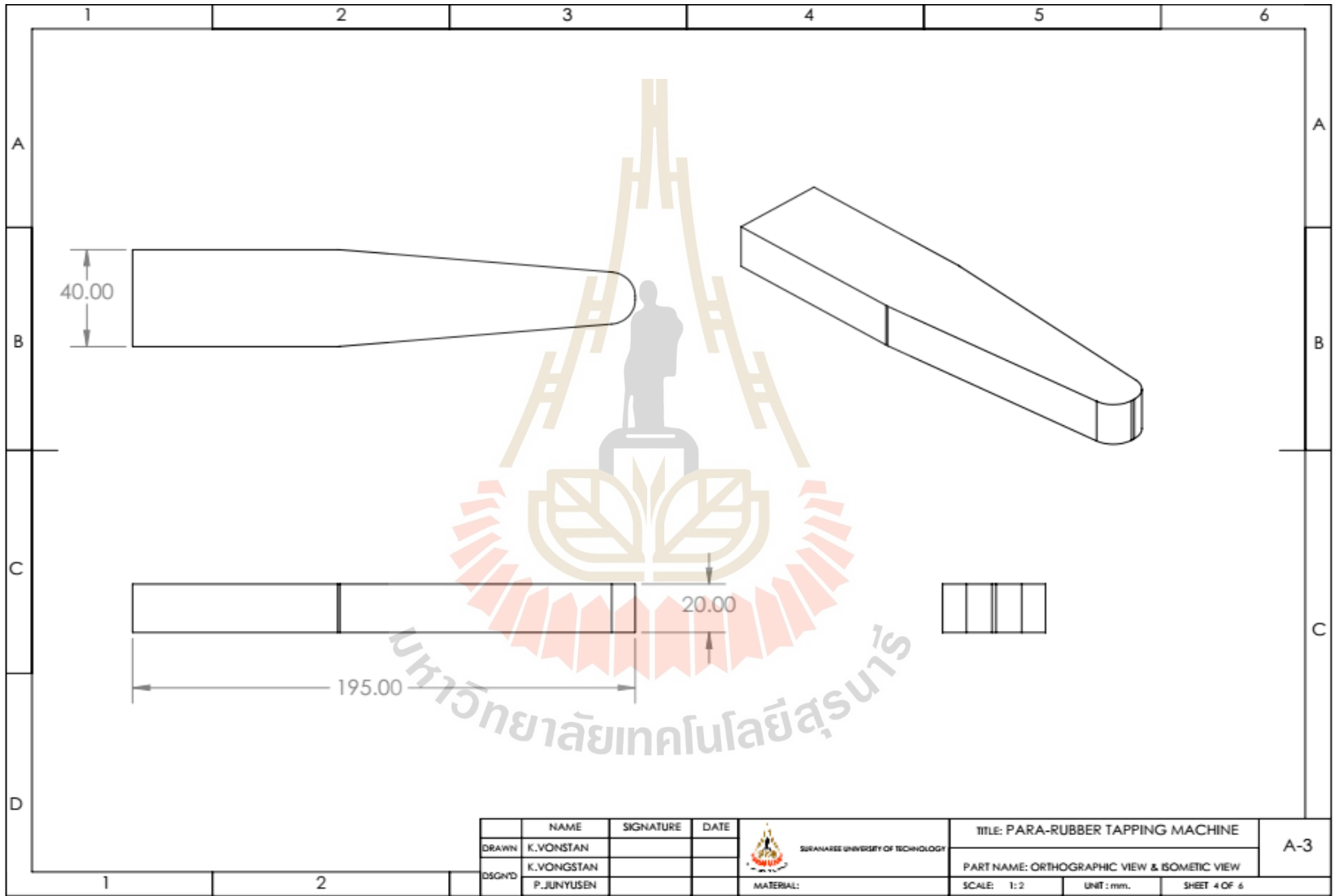
ภาคผนวก ก

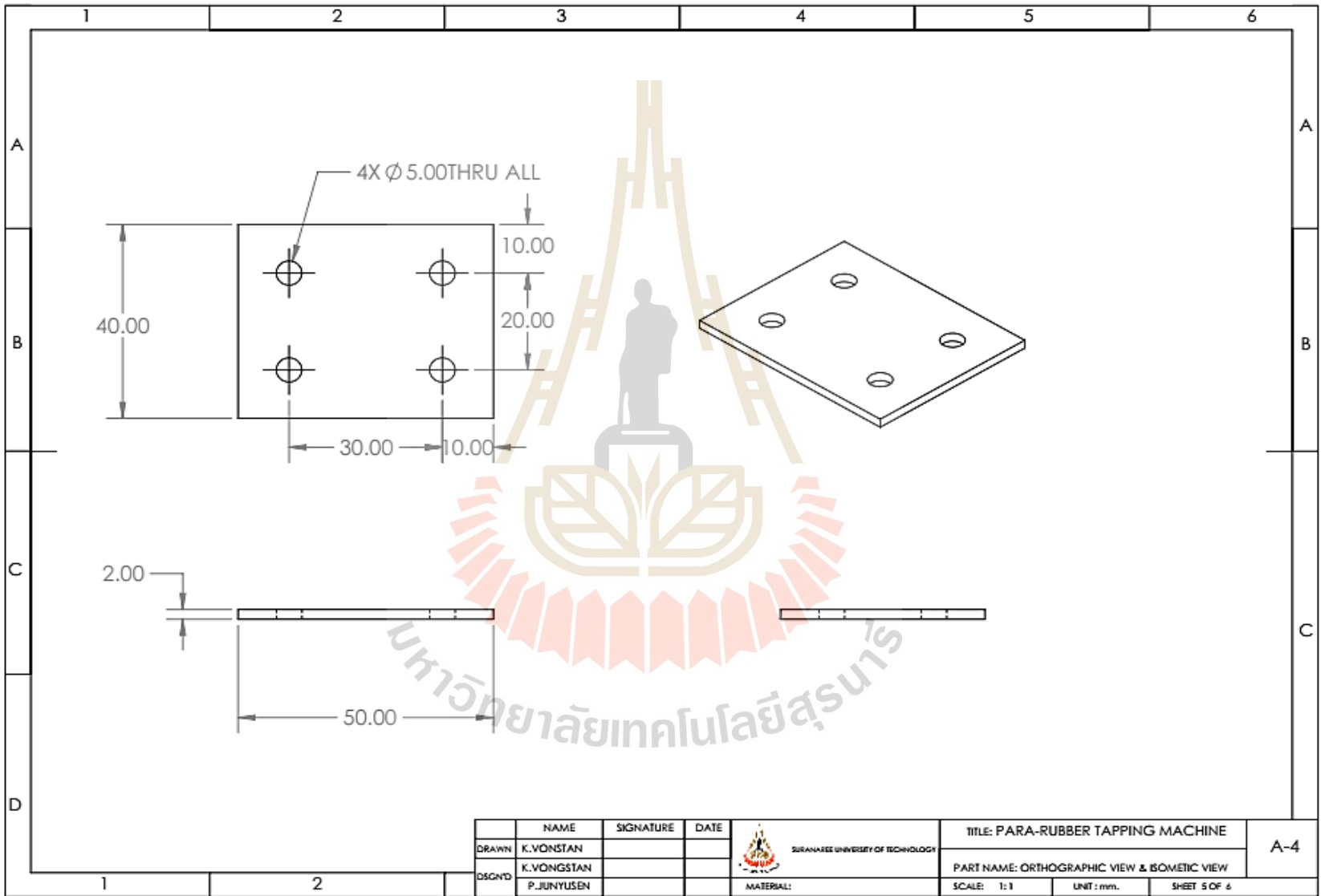
แบบทางวิศวกรรมของชุดตัวรูปร่างและกิริดยาง



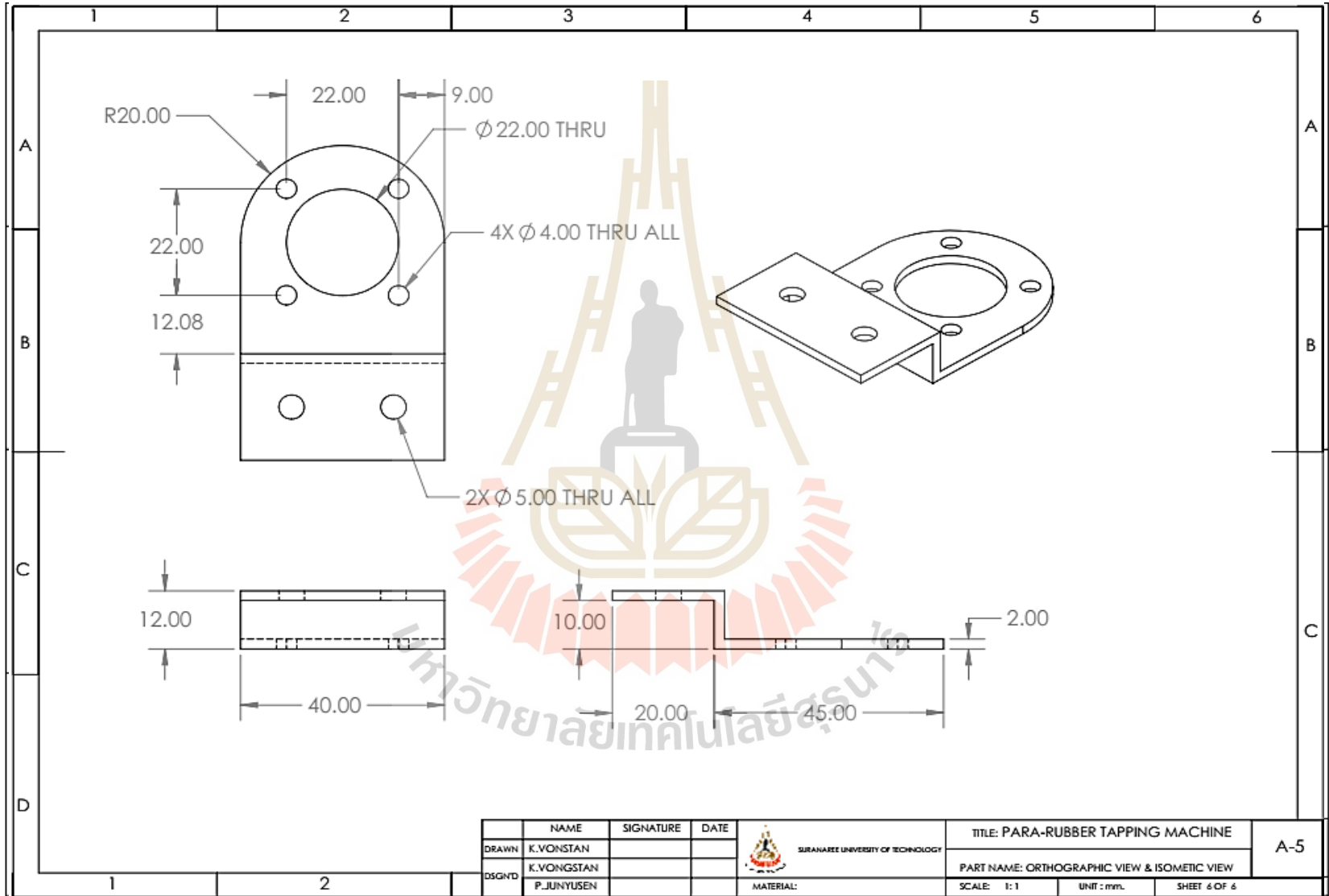








	NAME	SIGNATURE	DATE	 SURANAREE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY	TITLE: PARA-RUBBER TAPPING MACHINE	A-4
DRAWN	K.VONGSTAN				PART NAME: ORTHOGRAPHIC VIEW & ISOMETRIC VIEW	
DSGND	P.JUNYUSEN			MATERIAL:	SCALE: 1:1	UNIT: mm.
					SHEET 5 OF 6	





ภาคผนวก ข

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

กมลชนน วงศ์สถาน, นัตริน เรืองจอหอ, ยงยุทธ เสียงตั้ง และพยุงศักดิ์ จุลยุเสนา (2560). การหาค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีการปรับจูนของซีเกลอร์-นิโคลส์ สำหรับแขนกลกรีดยางพารา. การประชุมวิชาการวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ ครั้งที่ 4, โรงแรมวิวิธ อำเภอมือง จังหวัดขอนแก่น, 24-25 พฤศจิกายน 2560 หน้า 163-167



ประวัติผู้เขียน

นางสาวกมลชนน วงศ์สถาน เกิดเมื่อวันที่ 19 ธันวาคม 2537 ที่จังหวัดนครราชสีมา เป็นบุตรของ นายเกษม วงศ์สถาน และนางกัญญาภา วงศ์สถาน เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษาชั้นปีที่ 1-6 โรงเรียนรุ่งอรุณวิทยา จังหวัดนครราชสีมา ระดับมัธยมศึกษาชั้นปีที่ 1-6 โรงเรียนปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา ระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาเมื่อปีการศึกษา 2559 ภายหลังจากสำเร็จการศึกษาเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทที่สาขาเดิม โดยได้เข้าศึกษาต่อในสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ระหว่างการศึกษาได้เป็นผู้ช่วยสอนปฏิบัติการวิศวกรรมเกษตรและอาหาร 1 (Agricultural Engineering Lab. I), วิชาปฏิบัติการวิศวกรรมเกษตรและอาหาร 2 (Agricultural Engineering Lab. II), วิชาปฏิบัติการวิศวกรรมเกษตร 1 (Agricultural Engineering Lab. I) และวิชาปฏิบัติการวิศวกรรมเกษตร 2 (Agricultural Engineering Lab. II)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี