

## การศึกษาการควบคุมการแกว่งของเครน Study of Anti-Swing Crane Control

เพชรจัยพลอย<sup>\*</sup>, นิติธรงค์แก้ว, ธีรศักดิ์ศรีมิตรรุ่งโรจน์และ ไพรพัฒน์อริญนารถ

ภาควิชาวิศวกรรมขนถ่ายวัสดุและโลจิสติกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ  
1518 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800  
ติดต่อ E-mail: taetaeac@gmail.com

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอ การศึกษาการควบคุมการเคลื่อนที่และการแกว่งของเครน แบบแนวแกนเดียว เพื่อแสดงให้เห็นพฤติกรรมเคลื่อนที่ของ เครน รวมถึงการควบคุม การแกว่งของเครน ให้เป็นไปตาม ต้องการด้วยการควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control) ใช้วิธีการหาค่าการควบคุมและออกแบบตัวควบคุมแบบป้อนกลับ โดย การจำลองการควบคุมบนคอมพิวเตอร์ รวมถึงใช้ค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นของชุด เครนจำลอง ที่จัดสร้างขึ้น พร้อมทั้งกำหนดผลกระทบจากปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ที่ ทำให้เกิดการแกว่งของเครน โดยความคาดหวังถึงการควบคุมการเคลื่อนที่และการแกว่งของเครน ให้เป็นไปตามการเคลื่อนที่ออกแบบไว้เพื่อให้ได้ตัวควบคุมที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานจริง

**คำหลัก:** การควบคุมแบบป้อนกลับ, ขนถ่ายวัสดุ, การแกว่งของเครน

### Abstract

This research is to study behavior of controlling a crane Swing by applying a mathematical model to demonstrate the crane behavior with the feedback control. The input parameters to the mathematical model obtained from the crane are constructed and model is included the impact of the operating condition which acting on the crane. The expectation of this research to control the Anti-Swing Crane be in line with the designed in order to have an appropriate parameter of controlling for the next actual implementation.

**Keywords:** feedback control, Anti-Swing Crane

### 1. บทนำ

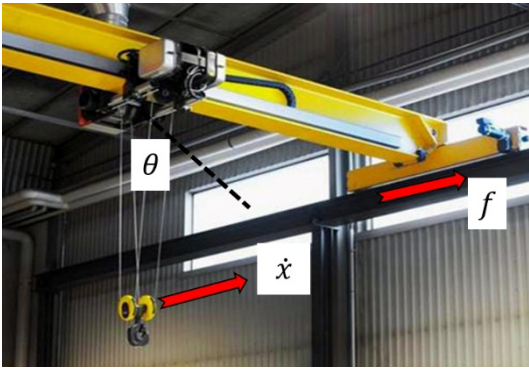
เครน ( Crane ) คือเครื่องจักรที่ใช้ยกสิ่งของขึ้นลงตามแนวดิ่งและเคลื่อนย้ายสิ่งของเหล่านั้นในลักษณะแขวนลอยไปตามแนวราบโดยในประเทศไทยนิยมใช้กันมากมายหลากหลายชนิดเช่น Overhead Crane , Tower Crane และ Truck Crane เป็นต้นโดยปัญหาที่นำมาเป็นโจทย์วิจัยในบทความนี้คือการแกว่งไปมาของเครนเวลาเคลื่อนย้ายสิ่งของทำให้ต้องคอยควบคุมความเร็วเครนให้เคลื่อนย้ายอย่างช้าๆเพื่อให้เกิดการแกว่งน้อยที่สุด เนื่องจากการแกว่งอาจทำให้วัสดุเสียหายเช่นตอมวางวัสดุ ในขณะที่วัสดุขยับแกว่งหรือวัสดุอาจหลุดร่วงขณะเครนเคลื่อนที่ส่วนใหญ่การลดการแกว่งที่ควบคุมโดยใช้คนมา

คอยประคองวัสดุตลอดเวลาการเคลื่อนย้ายอาจทำให้เกิดอันตรายขึ้นได้ซึ่งปัจจุบันยังคงไม่ได้มีการคำนึงถึงผลกระทบจากการแกว่งของเครนมากเท่าที่ควรจึงทำให้ยังไม่มีการศึกษาอย่างจริงจังในขณะที่ต่างประเทศนั้นได้มีการศึกษาวิจัยและนำไปประยุกต์ใช้งานจริงแล้ว

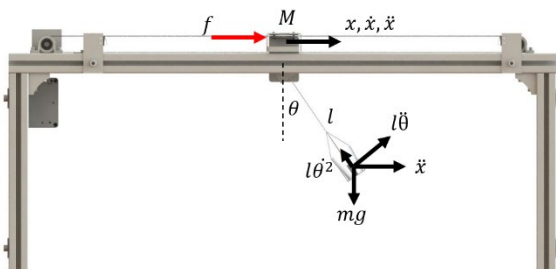
ดังนั้นบทความวิจัยนี้เป็นการศึกษาระบบควบคุมการแกว่งของเครนเหนือศีรษะขณะทำการเคลื่อนย้ายวัสดุ โดยมีจุดมุ่งหมายให้มุมของสลิงหรือมุมของการแกว่งที่เกิดขึ้นมีค่าใกล้เคียงค่าที่น้อยที่สุดหรือเข้าใกล้ศูนย์เพื่อที่ในอนาคตจะสามารถใช้เครนในความเร็วและเสถียรภาพที่มากขึ้น รวมถึงความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานมากขึ้น

## 2. หลักการทำงาน

การศึกษาควบคุมการแกว่งของเครนในบทความวิจัยนี้ได้เลือกศึกษาการควบคุมเครนเหนือศีรษะแบบคานเดี่ยว (Overhead crane single girder) ตามรูปที่ 1 โดยเครนเหนือศีรษะคานเดี่ยวที่ใช้งานทั่วไปสามารถเคลื่อนที่ได้สองทิศทางคือในทิศทางตามแนวยาวและทิศทางตามแนวขวาง แต่การใช้งานส่วนใหญ่จะเป็นทิศทางตามแนวยาวมากกว่า และเป็นทิศทางที่มีการเคลื่อนที่เร็วที่สุดเพราะมีระยะทางที่ยาวทำให้เกิดการแกว่งในทิศทางตามยาวมากกว่าในทิศทางขวางและในการใช้งานนั้นจะเคลื่อนที่เครนในทิศทางยาวให้หยุดนิ่งก่อน จากนั้นจึงบังคับเครนให้เคลื่อนที่ตามแนวขวางเป็นลำดับต่อไป



รูปที่ 1 เครนเหนือศีรษะคานเดี่ยว  
ดังนั้นการศึกษาการควบคุมการแกว่งของเครนจึงจำลองเครนเหนือศีรษะคานเดี่ยวให้เคลื่อนที่หนึ่งทิศทางตามรูปที่ 2 คือแบบจำลองของเครนเหนือศีรษะคานเดี่ยวประกอบด้วยส่วนเคลื่อนที่ตามแนวแกนรับกำลังจากสายพานขับที่เชื่อมต่อกับล้อดสลิงที่มีความยาวคงที่ผูกติดกับมวลดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แบบจำลองของเครนเหนือศีรษะคานเดี่ยวสำหรับการศึกษาการควบคุมการแกว่ง

## 3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองการควบคุมการเคลื่อนที่ของเครนเหนือศีรษะคานเดี่ยวประกอบไปด้วยลักษณะการเคลื่อนที่สอง

ลักษณะ คือ การเคลื่อนที่เชิงเส้นและการเคลื่อนที่เชิงมุม โดยทั้งสองสองลักษณะมีความความสัมพันธ์ต่อกันดังสมการต่อไปนี้

$$(M + m)\ddot{x} + D\dot{x} - ml\dot{\theta}^2 \sin\theta + ml\ddot{\theta} \cos\theta = f \quad (1)$$

$$ml^2\ddot{\theta} + mgl \sin\theta = -ml\dot{x} \cos\theta \quad (2)$$

จากสมการ (1) และ (2) แสดงถึงลักษณะการเคลื่อนที่เชิงเส้น และเชิงมุม ของเครน รวมถึงแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ [1] ของทั้งสองลักษณะ ดังนั้นในการเคลื่อนที่ของเครนจึงส่งผลกระทบต่อ การแกว่งของมวลที่ทำการเคลื่อนย้ายอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองคณิตศาสตร์ ประกอบไปด้วย  $M$  คือมวลของเครนที่เคลื่อนที่  $m$  คือมวลของวัสดุที่ทำการขนย้าย  $D$  คือแรงต้านอากาศ  $l$  คือความยาวของเชือกหรือสลิง (ในสมการข้างต้นนี้จะพิจารณา น้ำหนักของเชือกหรือสลิงเบาเมื่อเทียบกับมวล ดังนั้นจึงไม่คิดผลกระทบจากน้ำหนักของเชือกหรือสลิง)  $g$  คือความเร่ง เนื่องจากแรงโน้มถ่วง และส่วนต่อมาเป็นค่าพารามิเตอร์ที่มีความสัมพันธ์กันของการเคลื่อนที่ทั้งสองแบบประกอบไปด้วย  $\theta$  คือมุมของการแกว่ง  $\dot{\theta}$  คือความเร็วเชิงมุม  $\ddot{\theta}$  คือความเร่งเชิงมุม  $\int \dot{x}$  คือระยะการเคลื่อนที่ของเครน  $\dot{x}$  คือความเร็วเชิงเส้น  $\ddot{x}$  คือความเร่งเชิงเส้น และส่วนสุดท้าย  $f$  คือแรงสำหรับควบคุมระบบ

## 4. การควบคุมแบบป้อนกลับ

ในการควบคุมการเคลื่อนที่และการแกว่งของแบบจำลองของเครนเหนือศีรษะคานเดี่ยวจะ ใช้การควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control) โดยใช้ชุดควบคุมแบบ PID ทำการศึกษาการควบคุมการเคลื่อนที่และการแกว่งของเครนในการออกแบบการเคลื่อนที่และการรักษาเสถียรภาพของ การเคลื่อนที่ของเครนและจากสมการที่ (1) และ (2) จะเห็นได้ว่าการควบคุมการเคลื่อนที่และการแกว่งนั้นจะถูกการควบคุมผ่านแรง  $f$  เพียงอย่างเดียว แต่ในขณะเดียวกันยังต้องสามารถทำการควบคุมการแกว่งควบคู่กันไปด้วยทำให้การออกแบบกฎการควบคุมต้องคำนึงถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากทั้งสองส่วนเข้าด้วยกันในการพิจารณาออกแบบกฎการควบคุมดังกล่าว

โดยในการออกแบบกฎการควบคุมแบบป้อนกลับในบทความวิจัยนี้ส่วนแรก จะทำการ ออกแบบการควบคุมการแกว่งของเครนโดยให้มุมของการแกว่งมีค่าเข้าใกล้

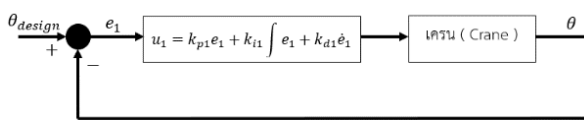
ศูนย์มากที่สุด ดังนั้น ค่าความผิดพลาดของมุมที่เกิดขึ้น (Tracking Error) [3] ของการควบคุมจะแสดงอยู่ในรูปของสมการที่ (3)

$$e_1 = \theta_d - \theta \quad (3)$$

จากสมการ (3)  $e_1$  คือค่าความผิดพลาดของมุม ที่เกิดจากผลต่างของ  $\theta_d$  คือมุมที่ออกแบบไว้กับ  $\theta$  คือมุมที่วัดออกมาได้จากการแกว่งของเครน ดังนั้น จากสมการที่ (1),(2) และ (3) ทำให้สามารถออกแบบกฎการควบคุมแบบ PID ได้ดังสมการที่ (4) เพื่อไปใช้ในการควบคุมการแกว่งของเครน

$$u_1 = k_{p1}e_1 + k_{i1} \int e_1 + k_{d1}\dot{e}_1 \quad (4)$$

โดย  $k_{p1}$ ,  $k_{i1}$  และ  $k_{d1}$  เป็นค่าคงที่มีค่าเป็นบวกแน่นอน สำหรับการปรับขนาดการควบคุมให้มีความเหมาะสม ซึ่งจาก กฎการควบคุมข้างต้น นั้น สามารถนำมาเขียนโครงสร้างการควบคุมตามรูปที่ 3



รูปที่ 3 โครงสร้างการควบคุมแบบป้อนกลับในการควบคุมการแกว่งของเครน

จากสมการที่ 4 นั้นเป็นเพียงการควบคุมการแกว่งของเครนที่หยุดนิ่งกล่าวคือไม่เกิดการเคลื่อนที่เชิงเส้นมีเพียงการเคลื่อนที่เชิงมุมเท่านั้น แต่เมื่อมีการเคลื่อนที่ของเครนเกิดขึ้นกฎการควบคุมที่ออกแบบไว้อาจไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นในการออกแบบกฎการควบคุมการแกว่งของเครนขณะเครนเคลื่อนที่ด้วยนั้นจึงควรพิจารณาผลกระทบจากการเคลื่อนที่เชิงเส้นในการออกแบบกฎการควบคุมด้วย โดย การออกแบบกฎการควบคุมแบบป้อนกลับในส่วน ต่อมาคือการ ออกแบบการควบคุมการเคลื่อนที่ของเครนดังสมการที่ (5)

$$e_2 = x_d - x \quad (5)$$

จากสมการ (5)  $e_2$  คือค่าความผิดพลาดของการเคลื่อนที่ที่เกิดจากผลต่างของ  $x_d$  คือตำแหน่งที่ออกแบบไว้กับ  $x$  คือตำแหน่งปัจจุบันที่เครนทำงานอยู่ ดังนั้นจากสมการที่ (1),(2) และ (5) ทำให้สามารถออกแบบกฎการควบคุมแบบ PID ได้ดังสมการที่ (6) [4] เพื่อนำไปใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของเครนขณะเคลื่อนที่

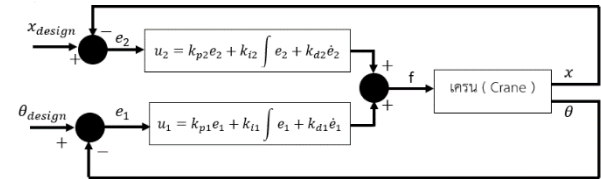
$$u_2 = k_{p2}e_2 + k_{i2} \int e_2 + k_{d2}\dot{e}_2 \quad (6)$$

โดย โดย  $k_{p2}$ ,  $k_{i2}$  และ  $k_{d2}$  เป็นค่าคงที่มีค่าเป็นบวกแน่นอน เช่นกัน สำหรับการปรับขนาดการควบคุมให้มีความเหมาะสม

จากกฎการควบคุมในสมการที่ (6) เป็นเพียงการควบคุมการเคลื่อนที่ของเครนเท่านั้นยังไม่มีการควบคุมการแกว่งของเครน ดังนั้นจากกฎการควบคุมในสมการที่ (5) และ (6) จะทำให้สามารถออกแบบกฎการควบคุมใหม่ได้ดังสมการที่ (7)

$$u = u_1 + u_2 \quad (7)$$

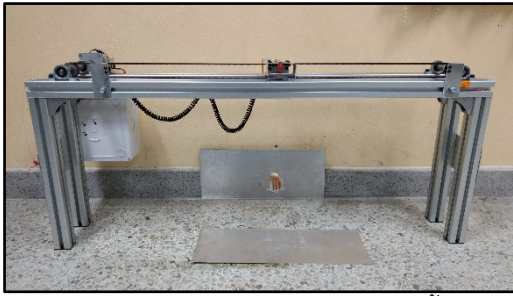
จากสมการที่ (7) เป็นกฎการควบคุมที่มีการพิจารณาถึงผลกระทบที่เกิดจากการเคลื่อนที่ทั้งสองลักษณะดังกล่าวมาในตอนต้น โดยเป็นกฎการควบคุมที่ออกแบบมาเพื่อให้สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของเครนในขณะเดียวกันก็มีการควบคุมการแกว่งของเครนควบคู่ไปพร้อมๆ กันผ่านแรง  $f$  ที่ควบคุมระบบการทำงานของแบบจำลองเครนเหนือศรีษะโดยสามารถแสดงโครงสร้างการควบคุมในรูปที่ 4



รูปที่ 4 โครงสร้างการควบคุมแบบป้อนกลับในการควบคุมการเคลื่อนที่และการแกว่งของเครน

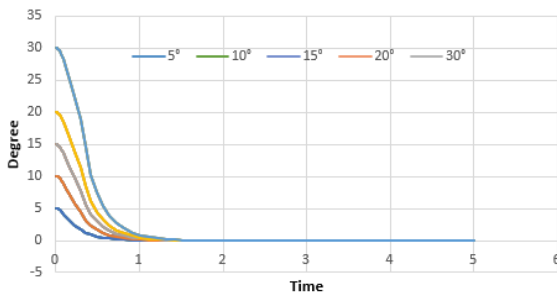
## 5. การจำลองการควบคุม

ในการควบคุมและการออกแบบการควบคุมการแกว่งของเครนจะใช้การจำลองบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Simulation Control) เพื่อให้ได้ค่าต่างๆ ของการควบคุมที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้กับการทดสอบหรือใช้งานจริงโดยการจำลองการควบคุมจะใช้ค่าค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่สร้างขึ้นเพื่อเป็นเป็น แนวทางสำหรับการออกแบบกฎการควบคุมโดยค่าค่าพารามิเตอร์ต่างๆมีค่าดังต่อไปนี้  $M = 0.24$  kg;  $m = 0.06$  g;  $l = 25$  cm;  $g = 9.81$  m/s<sup>2</sup>;  $D \approx 0$  (แรงต้านอากาศมีค่าน้อยมากเพื่อเทียบกับมวล) และ  $f \leq 25$  N

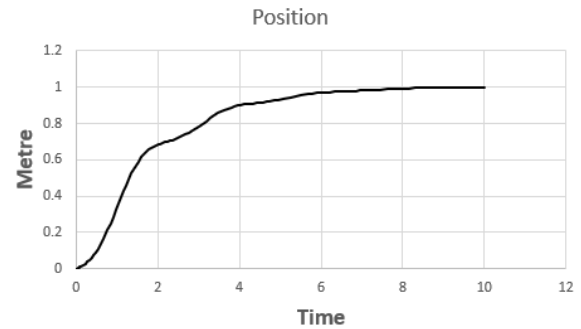


รูปที่ 5 แบบจำลองที่คอนเหนือศรีษะที่สร้างขึ้น

การจำลองการควบคุมแรกเป็นการจำลองการควบคุมการแกว่งเพียงอย่างเดียวตาม โครงสร้างการควบคุมแบบป้อนกลับดังแสดงในรูปที่ 3 โดยการรบกวนระบบทำให้มุมของคอนเริ่มต้นที่ค่าต่างๆ เพื่อทดสอบกฎการควบคุมให้สามารถทำการควบคุมให้ลดมุมการแกว่งของมวลให้เหลือน้อยที่สุดหรือเข้าใกล้ศูนย์ตามรูปที่ 6

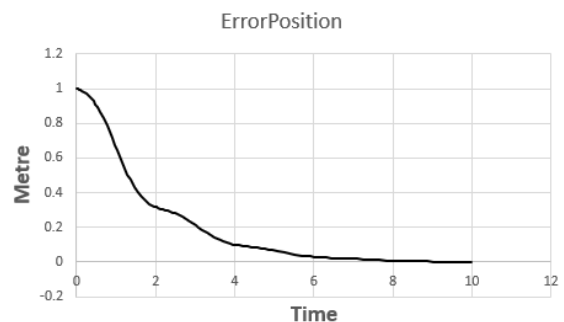


รูปที่ 6 แสดงค่าของมุมที่ถูกควบคุมให้มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ จากรูปที่ 6 เป็นผลการจำลองการควบคุมที่กำหนดให้ค่าเริ่มต้น  $\theta = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$  และ  $30^\circ$  ตามลำดับและให้  $\theta_d = 0$  หมายถึงให้คอนไม่เกิดการแกว่งพบว่าจากจำลองการทดสอบจะใช้เวลาประมาณ 1.5 วินาที ในการควบคุมที่ทำให้มุมการแกว่งมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ และการจำลองการควบคุมต่อมาเป็นการจำลองทดสอบการควบคุมการเคลื่อนที่และการแกว่งของคอนตาม โครงสร้างการควบคุมแบบป้อนกลับที่แสดงดังรูปที่ 4 โดยกำหนดให้คอนเคลื่อนที่เป็นระยะทาง 1 เมตรเพื่อทดสอบกฎการควบคุมให้สามารถควบคุมทำให้ลดมุมการแกว่งให้เหลือน้อยที่สุดหรือเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งได้ผลการจำลองดังแสดงในรูปที่ 7

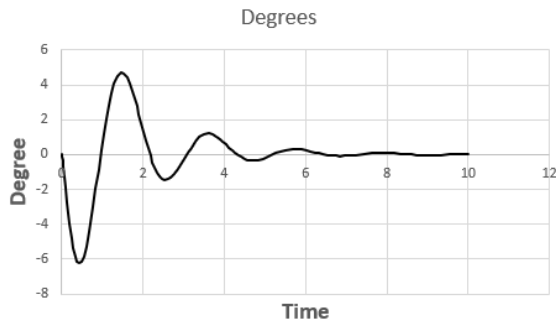


รูปที่ 7 แสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของคอน

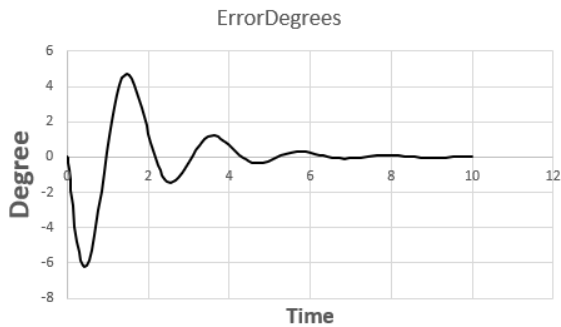
จากการจำลองการเคลื่อนที่ของแบบจำลองคอนเหนือศรีษะเป็นระยะ 1 เมตร ได้ผลการจำลองตามรูปที่ 7 ที่แสดงความสัมพันธ์ของตำแหน่งของระยะการเคลื่อนที่ของคอนโดยใช้เวลาประมาณ 10 วินาที และรูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ของตำแหน่งที่ผิดพลาดของคอนในการเคลื่อนที่กับเวลาส่วนรูปที่ 9 และ 10 แสดงค่าความสัมพันธ์ของมุมการแกว่งและค่าความผิดพลาดของมุมการแกว่งของคอนกับเวลา สังเกตได้ว่าในช่วงแรกของการเคลื่อนที่ของคอนนั้นเกิดมุมของการแกว่งค่อนข้างมากโดยอยู่ในช่วง 5-6 องศาจากนั้นมุมของการแกว่งจะถูกลดลงจนมีมุมการแกว่งเข้าใกล้ศูนย์ โดยใช้เวลารวมประมาณ 10 วินาที ก่อนระบบเกิดการหยุดนิ่งทั้งการควบคุมการเคลื่อนที่และการควบคุมการแกว่งของคอน ส่วนรูปที่ 11 แสดงถึงความสัมพันธ์ของแรงที่ใช้ควบคุมระบบทั้งหมดทั้งในการเคลื่อนที่และการควบคุมการแกว่งพบว่ามีความอยู่ประมาณ 0.25 N ซึ่งอยู่ในช่วงของการทำงานของแรงที่แบบจำลองคอนเหนือศรีษะทำได้



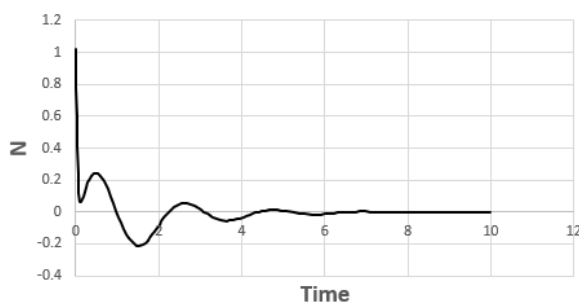
รูปที่ 8 แสดงตำแหน่งที่ผิดพลาดในการเคลื่อนที่ของคอน



รูปที่ 9 แสดงผลมุมการแกว่งของเครน



รูปที่ 10 แสดงผลค่าความผิดพลาดของมุมการแกว่ง



รูปที่ 11 แสดงแรงที่กระทำต่อระบบ

## 6. สรุป

จากการจำลองการเคลื่อนที่ของแบบจำลองเครนเหนือศรีษะโดยใน ส่วนแรกเป็นการจำลองการควบคุมการแกว่งโดยตรง พบว่าตัวควบคุมสามารถทำงานได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งการควบคุมนี้ช่วยทำให้เครนมีเสถียรภาพในการทำงาน ในขณะที่เครนหยุดนิ่งหรือถูกรบกวนจากผลกระทบภายนอก เช่นการยกไหลตที่ไม่มี ความสมดุลหรือไม่มี ความสมมาตรของจุดศูนย์ถ่วง และส่วนที่สองเป็นการจำลองการใช้งานทั่วไปที่พฤติกรรมของเครนต้องมีการเคลื่อนที่และเกิดการแกว่งแต่ด้วยกฎการควบคุมและการปรับขนาดการควบคุม (Gain) ที่ออกแบบโดยรวม พบว่าพฤติกรรม การเคลื่อนที่ของทั้งสองลักษณะทำให้ตัวควบคุมสามารถทำการควบคุมการเคลื่อนที่และการแกว่งได้ไปพร้อมๆ กัน ซึ่งจากการจำลองการควบคุมข้างต้นนั้น

ทำให้สามารถที่จะใช้กฎการควบคุมและขนาดการควบคุมที่ออกแบบไว้เป็นตัวตั้งต้นในการออกแบบการควบคุมกับแบบจำลองเครนเหนือศรีษะจริงที่ได้สร้างขึ้นเพื่อลดเวลาในการออกแบบกฎการควบคุมรวมถึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการออกแบบการควบคุมเครนในอุตสาหกรรมจริงในการทำงานได้แต่ยังมีข้อบกพร่องในการจำลองคือ การศึกษาวิจัยนี้ไม่ได้มีการผนวกรวมผลกระทบจากปัจจัยอื่นๆ ที่อาจเกิดขึ้นได้ ตัวอย่างเช่น แรงเสียดทานในส่วนต่างๆ ที่อาจส่งผลให้การควบคุมทำให้การควบคุมเกิดความผิดพลาดได้ ดังนั้นจึงขอเสนอแนะให้เป็นข้อสังเกตในงานวิจัยต่อไปในภายภาคหน้า

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] HcrHoon Lee, Sung-Kun Cho and Jae-Sung Cho(1997). A NEW ANTI-SWING CONTROL OF OVERHEAD CRANES,IFAC Automation in the Steel Industry,Kyongju Korea.
- [2] Ho-Hoon Lee (2003). A new approach for the anti-swing control of overhead cranes with high-speed load hoisting, International Journal of Control VOL.76NO.15,1493–1499, Taylor & Francis,Southeastern Louisiana University.
- [3] สุวัฒน์ กุลธนปรีดา (2554) , Automatic Control Engineering, สำนักพิมพ์ส.ส.ท. กรุงเทพฯ
- [4] Siddhartha Ray(2007), Introduction to Materials Handling ,Ansari Road, Daryaganj, New
- [5] Delhi Michael G. Kay (2012) , Material Handling Equipment, North Carolina State University