

อิทธิพลของความเร็วลมต่อความมีเสถียรภาพของปั้นจั่นยกตู้สินค้าท่าเรือชายฝั่ง

The effect of wind speed on the stability of a ship-to-shore gantry crane

ชัยยันต์ ใจบุญมา^{1*}, ธนาพล สุขชนะ¹
Chaiyun Jaiboonma^{1*}, Thanaphol Sukchana¹

Received: 27 March 2021 ; Revised: 11 May 2021 ; Accepted: 24 May 2021

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเร็วลมต่อความมีเสถียรภาพของปั้นจั่นยกตู้สินค้าท่าเรือชายฝั่ง (Ship-to-shore gantry crane) ขนาด 40 t (ตัน) โดยการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method, FEM) ซึ่งโครงสร้างหลักปั้นจั่นทำด้วยเหล็กรูปพรรณรีดร้อนเกรด SM 490 ทำการวิเคราะห์ในสภาวะปั้นจั่นทำงานปกติและกรณีหยุดนิ่งชั่วขณะเมื่อมีลมปะทะในช่วง 16-35 m/s พิจารณาดำเนินการทำงานทั้งหมด 7 ตำแหน่ง โดยมีแรงกระทำคงที่ในแนวตั้งขนาด 811,287 N (811.28 kN) และสภาวะปั้นจั่นหยุดการทำงานมีลมปะทะ 48 m/s ผลการวิเคราะห์จากไฟไนต์เอลิเมนต์ทั้ง 2 สภาวะพบว่าความเค้นสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณชุดดึง Boom (Forestay) มีค่าเท่ากับ 239.05 MPa ซึ่งน้อยกว่าความต้านทานแรงดึงครากของวัสดุ (Yield strength) และอยู่ในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นยังคงมีความปลอดภัยจากการวิบัติเนื่องจากความเค้นเกินจุดคราก แรงปฏิกิริยาสูงสุดของขาปั้นจั่นเท่ากับ 2,918.90 kN เกิดขึ้นที่บริเวณขาซ้ายของปั้นจั่น และแรงปฏิกิริยาสภาวะหยุดการทำงานไม่ก่อให้เกิดการยกตัวของโครงสร้าง ระยะกระจัดสูงสุดเท่ากับ 157.02 mm เกิดขึ้นบริเวณปลาย Boom ซึ่งค่าสูงสุดดังกล่าวอยู่ในค่าที่ยอมอนุญาตและเงื่อนไขการออกแบบของปั้นจั่น นอกจากนี้ยังพบว่าแรงที่เกิดจากการปะทะของลมไม่ส่งผลต่อการเสถียรของโครงสร้างหลักปั้นจั่นและความแข็งแรงของชิ้นส่วนปั้นจั่น

คำสำคัญ: ปั้นจั่นยกตู้สินค้า, ความเค้น, ความเร็วลม, ไฟไนต์เอลิเมนต์, ความเร็วลม

Abstract

This research aimed to study the effect of wind speed on the stability of a ship-to-shore gantry crane of 40 t analyzed using the finite element method (FEM). The main structure of the crane was made of SM 490 grade hot rolled steel. Analyses considered the crane's in-service state, the case when the crane was momentary out-of-service with wind load range of 16-35 m/s total of 7 working positions. With a constant axial force of 811,287 N (811.28 kN) and the crane in out-of-service state with a wind load of 48 m/s the results of the finite element of both states showed that the maximum stress that occurred in the boom pull set (Forestay) was 239.05 MPa. This is less than the yield strength of the material and in the linear elastic range it is safe from failure due to over yield strength. The maximum reaction force of the crane leg was 2,918.90 kN occurring in the left leg of the crane. Reaction force in the out-of-service state did not cause structure lifting. The maximum displacement was 157.02 mm occurring at the boom end with the maximum value being within the allowable values and the design conditions of the crane.

Keywords: Ship-to-shore gantry crane, Stress, Displacement, Finite element, Wind speed

^{1*} สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ หันตรา เลขที่ 60 หมู่ 3 ตำบล หันตรา อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัด พระนครศรีอยุธยา 13000 โทรศัพท์ (035) 709 101 E-mail: Chaiyun_engineer@hotmail.co.th, E-mail: Chaiyun.J@rmutsb.ac.th

¹ Department of Mechanical Engineering Faculty of Engineering and architecture Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi Huntra 60 Moo 3 Asian Highway, Phranakhon Si Ayutthaya 13000, Thailand, Tel. +66(0) 3570 9103

It was also found that the force caused by wind impact does not affect the imbalance of the main structure of the crane and the strength of parts of the crane.

1. วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ชนิดเอลิเมนต์แบบ

Beam4

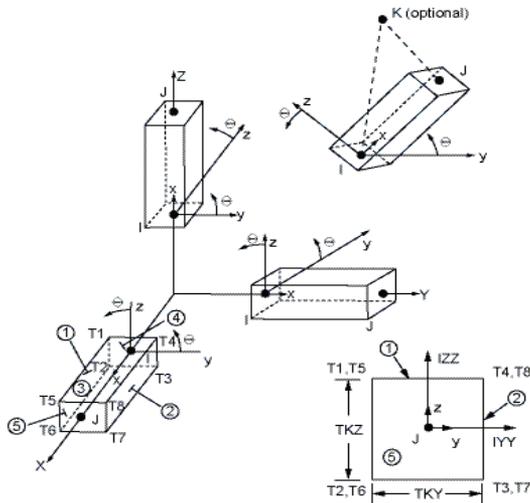


Figure 3 Element type of beam4

จาก (Moaveni, 1999) และ (Przemieniecki, 1968) จะได้เมตริกความแข็งเกร็งของเอลิเมนต์เป็น

$$[k_e]\{d_e\} = \{F_e\} \tag{1}$$

และระบบรวมเป็น

$$[k]\{d\} = \{F\} \tag{2}$$

โดยที่ $[k]$ คือ เมตริกของความแข็งเกร็ง, $\{d\}$ คือ เมตริกของระยะกระจัด, $\{F\}$ คือเมตริกของแรงกระทำ, e คือ เอลิเมนต์

2. ความเค้นของเอลิเมนต์ชนิด Beam4

ความเค้นตรง

$$\sigma^{dir} = F_x / A \tag{3}$$

โดยที่ σ^{dir} คือความเค้นตรง (N/m²), F_x คือแรงในแนวแกน (N), A คือพื้นที่ภาคตัด (m²)

ความเค้นดัด

$$\sigma_z^{bnd} = M_y t_z / 2I_y \tag{4}$$

$$\sigma_y^{bnd} = M_z t_y / 2I_z \tag{5}$$

โดยที่

σ_y^{bnd} คือ ความเค้นดัดบนเอลิเมนต์ Z ของคาน, (N/m²)

σ_z^{bnd} คือ ความเค้นดัดบนเอลิเมนต์ Y ของคาน, (N/m²)

M_y คือ โมเมนต์รอบแกน Y, (N.m)

M_z คือ โมเมนต์รอบแกน Z, (N.m)

t_y คือ ความหนาของคานในแนวแกน Y, (m)

t_z คือ ความหนาของคานในแนวแกน Z, (m)

I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่ภาคตัดคาน, (m⁴)

ความเค้นสูงสุดและความเค้นต่ำสุดเป็น

$$\sigma^{max} = \sigma^{dir} + |\sigma_z^{bnd}| + |\sigma_y^{bnd}| \tag{6}$$

$$\sigma^{min} = \sigma^{dir} - |\sigma_z^{bnd}| - |\sigma_y^{bnd}| \tag{7}$$

3. แรงปะทะที่เกิดจากความเร็วลมที่ใช้ในการวิเคราะห์ (Francesco, 2006 ; Federation Europeenne De La Manutention Section 1, 1987) สมการดังนี้

$$F = Aq \tag{8}$$

โดยที่ F คือแรงลมปะทะ (N), A คือพื้นที่ภาคตัดของโครงสร้างที่ลมปะทะ (m²), q คือ ความดันลมเท่ากับ 0.612V² (N/m²), Francesco (2006) V คือความเร็วลม (m/s)

4. ระยะกระจัดของโครงสร้างที่ยอมรับได้ตามมาตรฐาน AISC/ASD/LRFD (วินิต ช่อวิเชียร และวรนิติ ช่อวิเชียร, 2550) และสำหรับงานวิจัยนี้อนุญาตให้ระยะกระจัดเกิดขึ้นเท่ากับหรือน้อยกว่า L/180 โดยที่ L เป็นความยาวของ Boom มีหน่วยเป็น mm

การวิเคราะห์

การวิเคราะห์ป็นจัน ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 สภาวะ 1) สภาวะการทำงานปกติ (In-service) 2) สภาวะหยุดการทำงานแบบยกเก็บ Boom (Out-off-service) แสดงแผนผังการวิเคราะห์ดัง Figure 4

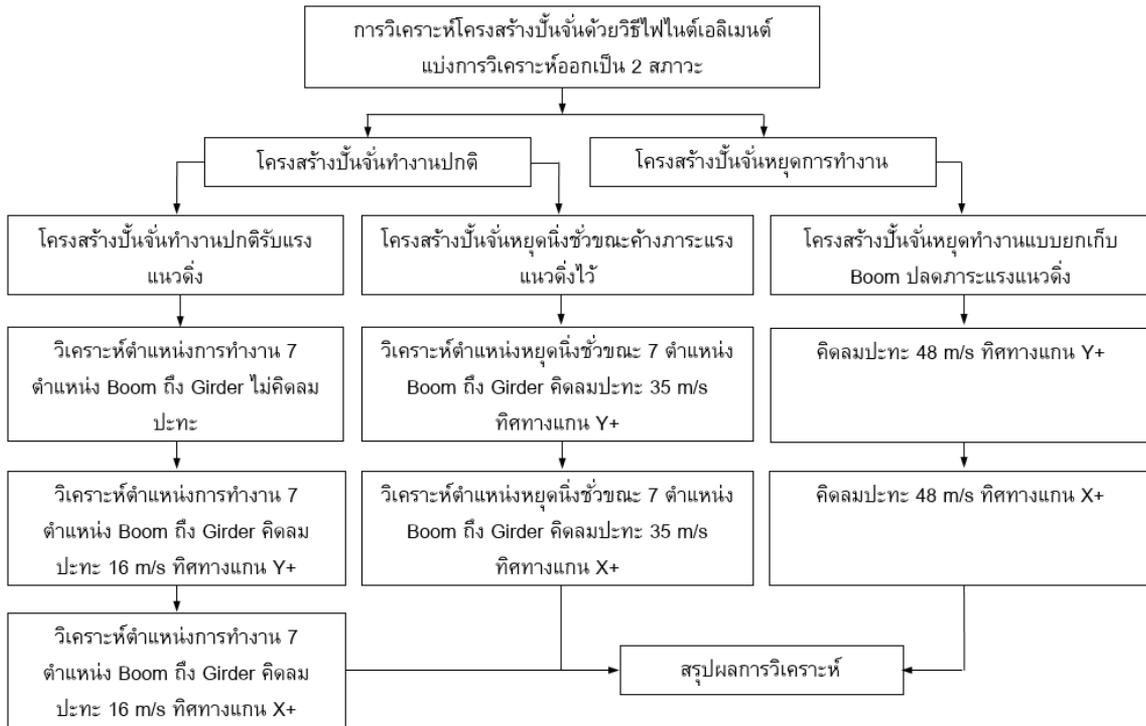


Figure 4 Analysis sequence diagram of ship-to-shore gantry crane

1. สภาวะปั้นจั่นทำงานปกติ

วิเคราะห์กรณีไม่มีลมปะทะ และกรณีคิดลมปะทะ ทิศทาง X+ และ Y+ ที่ความเร็วลม 16 m/s เป็นความเร็วลมที่ปั้นจั่นสามารถทำงานได้ตามปกติ และ 35 m/s เป็นความเร็วลมที่เริ่มเกิดพายุรุนแรงต้องหยุดการทำงานปั้นจั่นชั่วคราว (Francesco, 2006) แรงกระทำคงที่ในแนวตั้ง พิจารณาตำแหน่งทำงาน 7 ตำแหน่งระหว่าง Boom ถึง Girder ดัง Figure 5

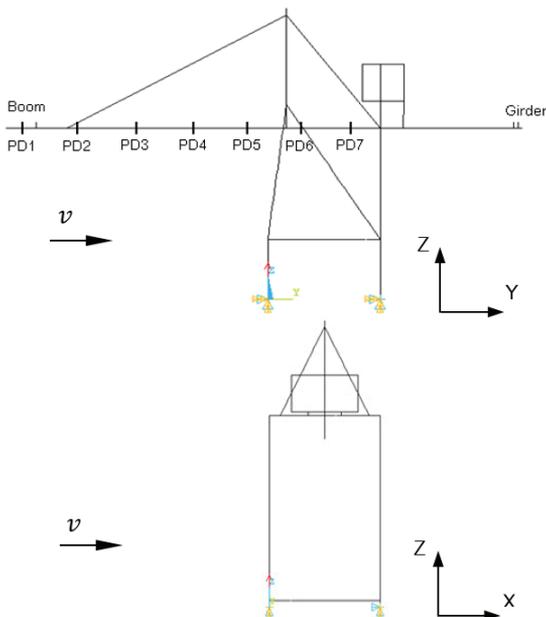


Figure 5 Analysis load position in-service and stowed wind

2. สภาวะหยุดการทำงาน

วิเคราะห์กรณีหยุดการทำงานแบบยกเก็บ Boom ปลดภาระแนวตั้ง คิดลมปะทะที่ความเร็วลม 48 m/s เป็นความเร็วลมพายุรุนแรง และหยุดการทำงานปั้นจั่นแบบยกเก็บ Boom ทิศทางแกน X+ ซึ่งเป็นทิศทางลมที่โครงสร้างมีน้ำหนักเบาว่าเนื่องจากอีกด้านหนึ่งของโครงสร้างมีน้ำหนักเนื่องจาก Dead load มากกว่า และทิศทาง Y+ เป็นทิศทางลมด้านชายฝั่ง ดัง Figure 6

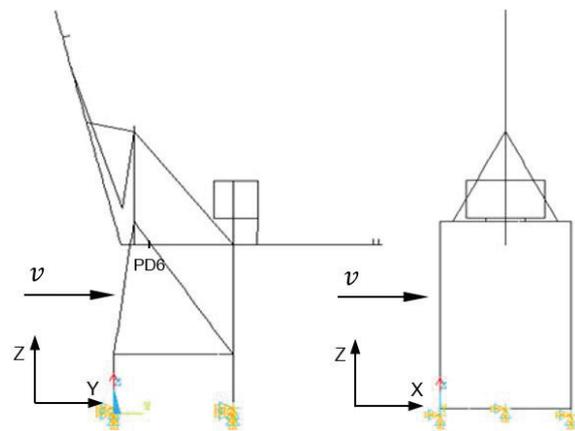


Figure 6 Analysis out-of-service

ข้อมูลทางเทคนิคประกอบการวิเคราะห์ปั้นจั่น ประกอบไปด้วย Table 1 ภาระแรงภายนอก (External load)

ที่กระทำต่อปั้นจั่น Table 2 ภาระคงที่ (Dead load) ของปั้นจั่น และ Table 3 ภาระลมปะทะ (Wind load) กระทำต่อปั้นจั่น

Table 1 External load of ship-to-shore gantry crane

External load member	Position	Load		
		(t)	(N)	(N.m)
Trolley load	PD6	29.70	291,357.00	-
Lifted load		53.00	519,930.00	-
Total load (Trolley load + Lifted load)		82.70	811,287.00	-
Lateral inertia force on movable parts X-direction	PD1-PD7	1.32	12,949.20	110,500.00
Lateral inertia force due to trolley acceleration		2.80	27,468.00	-

Table 2 Dead load of ship-to-shore gantry crane

Dead load member	Load		Node
	(t)	(N)	
Lander and other	24.46	239,952.60	Along left, Rear leg
Trolley rails	9.68	94,960.80	Along boom to girder
Apex pulleys	5.88	57,682.80	331
Boom end pulleys	1.22	11,968.20	282,380
Girder end pulleys	2.55	25,015.50	300,301,378,379
Machinery house equipment	93.99	922,041.90	Machinery house
Ballast	45.87	449,984.70	On lower sill beam

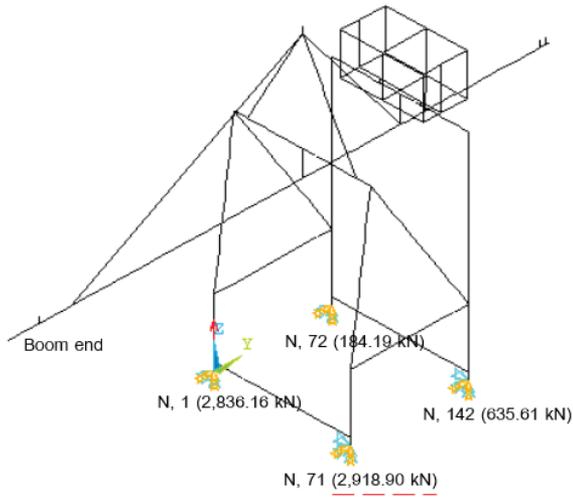
Table 3 Wind load of ship-to-shore gantry crane

Working condition	Load position	Wind load	
		Wind velocity (m/s)	Wind pressure (N/m ²)
Inservice	PD1-PD7	16	
Stowed wind	PD1-PD7	35	$q = 0.613V^2$
Out-off-service	-	48	

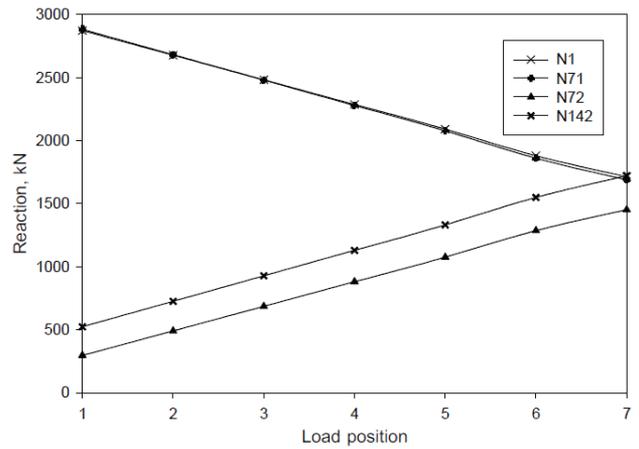
ผลการวิเคราะห์

ผลการวิเคราะห์ปั้นจั่น ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในบทความนี้ แสดงค่าสูงสุดที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างหลักซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย Francesco (2006) และ (Tang *et al.*, 2015) ดังนั้น แรงปฏิกิริยาสูงสุดของขาปั้นจั่น ความเค้นสูงสุด และระยะกระจัดสูงสุดที่เกิดขึ้นของปั้นจั่นดังต่อไปนี้

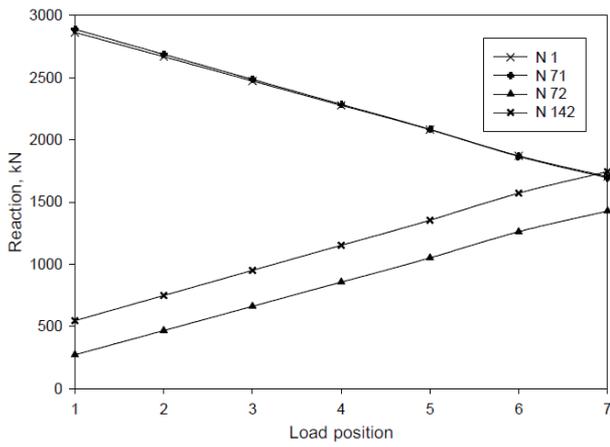
1. ผลการวิเคราะห์แรงปฏิกิริยาของปั้นจั่นทั้ง 2 สภาวะ พบว่าแรงปฏิกิริยาสูงสุดที่เกิดขึ้นที่บริเวณทางด้านซ้ายของปั้นจั่น (Left sea side corner) มีค่าเท่ากับ 2,918.90 kN และแรงปฏิกิริยาด้านต่ำสุดเกิดขึ้นที่บริเวณทางด้านขวาของปั้นจั่น (Right land side corner) มีค่าเท่ากับ 184.19 kN ที่สภาวะหยุดนิ่งชั่วขณะ ลมปะทะที่ความเร็วลม 35 m/s ทิศทางแกน X+ ตำแหน่งการทำงานที่ปลาย Boom (PD1) ดัง Figure 7 (A)



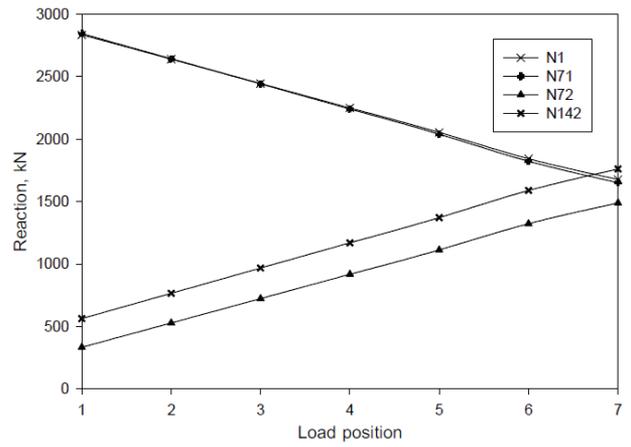
(A) Maximum reaction



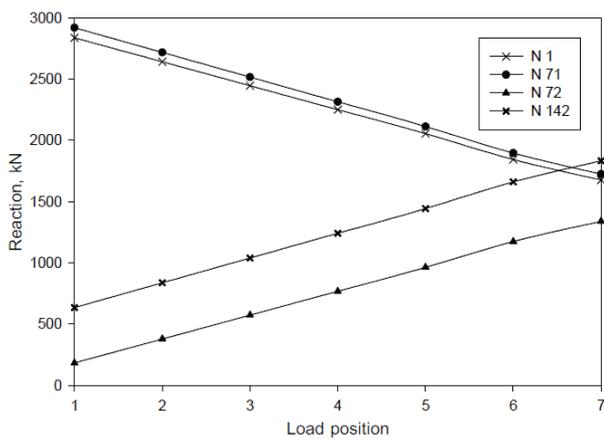
(B) No wind



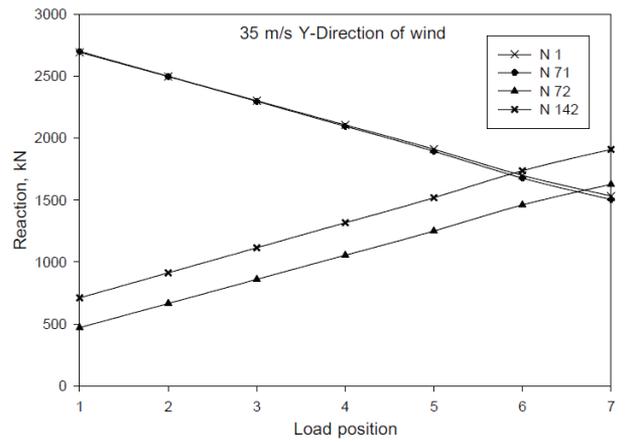
(C) 16 m/s of wind X-direction



(D) 16 m/s of wind Y-direction



(E) 35 m/s of wind X-direction



(F) 35 m/s of wind Y-direction

Figure 7 Reaction of structure

ทั้งนี้ฐานปั้นจั่นออกแบบให้มีการกระจายภาระแรงปฏิกิริยาออกเป็น 10 จุดด้วยล้อ โดยมีระยะห่างเท่ากับเสาฐานรองรับปั้นจั่น (ชัยยันต์ ไชบุญมา, 2551) ดังนั้นเสาฐานรองรับจะรับแรงต่อเสาเท่ากับ 291.89 kN ดัง Figure 8 จากเงื่อนไขของผู้ออกแบบการรับน้ำหนักฐานรองรับโครงสร้างปั้นจั่นท่าเรือชายฝั่ง ได้กำหนดค่าแรงปฏิกิริยาอนุญาตเสาฐานรองรับน้ำหนัก (Support leg of ship-to-shore gantry crane) ให้มีค่าไม่เกิน 294.30 kN ต่อเสา เนื่องจากจะก่อให้เกิดความเสียหายแก่ฐานราก ทั้งนี้ในทางปฏิบัติแล้ว ในกรณีหยุดชั่วคราวขณะค้างภาระแรงแนวตั้งไว้ (Stowed wind) ของปั้นจั่นนั้นจะไม่ค้างภาระ Container ไว้ที่ตำแหน่งปลาย Boom ผู้ควบคุมจะเลื่อนภาระ Container ให้อยู่ระหว่างตำแหน่งกลาง Boom เพื่อเป็นการกระจายแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นให้แก่ขาปั้นจั่นและเสาฐานรองรับ จากนั้นค่อยปลดภาระ Container (Total lifted load) และเลื่อน Trolley load มายังตำแหน่งที่ 6 (PD6) เพื่อให้ความเร็วลมลดลงอยู่ในช่วงที่ปั้นจั่นสามารถทำงานปกติได้ ผู้ควบคุมปั้นจั่นจึงจะเริ่มควบคุมการทำงานต่อไปอีกครั้ง จากกราฟแรงปฏิกิริยา ดัง Figure 7 สภาวะทำงานปกติของปั้นจั่นจะพบว่าแรงปฏิกิริยาขาของโครงสร้างคู่ด้านหน้าชายฝั่ง (Sea side) จะมีค่ามากกว่าคู่หลัง เกิดขึ้นที่ตำแหน่งทำงานบริเวณปลาย Boom (PD1) จากนั้นพบว่าภาระเคลื่อนมายังตำแหน่งทำงานที่ 2, 3, 4, 5, 6 จนถึงตำแหน่งที่ 7 แรงปฏิกิริยาจะค่อยๆ ลดลงตามลำดับ และในขณะเดียวกันขาของโครงสร้างคู่ด้านหลัง (Land side) แรงปฏิกิริยาจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนที่ลดลงของขาโครงสร้างคู่ด้านหน้าชายฝั่ง และทั้ง 2 สภาวะของปั้นจั่นค่าสูงสุดอยู่ในช่วงที่ยอมอนุญาตและค่าต่ำสุดไม่ก่อให้เกิดการยกตัวพลิกคว่ำของโครงสร้างปั้นจั่น (Quang *et al*, 2018)

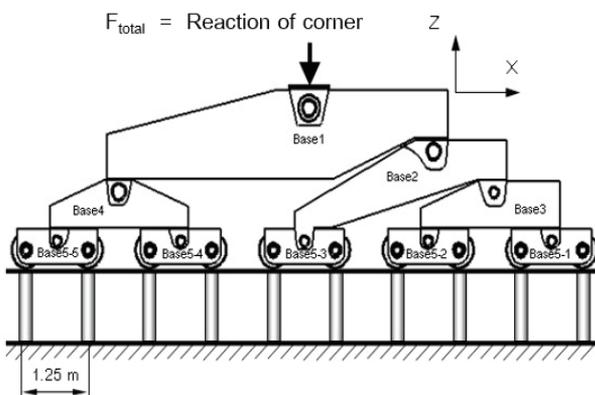


Figure 8 Support leg of ship-to-shore gantry crane (ชัยยันต์ ไชบุญมา, 2551)

2. ความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นของปั้นจั่น เกิดขึ้นที่ชุดดึง Boom (Forestay) สภาวะปั้นจั่นทำงานปกติกรณีไม่คิดแรงลมปะทะ ตำแหน่งทำงานบริเวณปลาย Boom (PD1) มีค่าเท่ากับ 239.05 MPa และพบว่าค่าลดลงเมื่อเลื่อนภาระมายังตำแหน่ง 2, 3 และ 4 จากนั้นตำแหน่ง 4, 5, 6 และ 7 ความเค้นที่เกิดขึ้นจะมีค่าคงตัว กรณีแรงลมปะทะที่ความเร็วลม 16 m/s และ 35 m/s ทิศทางแกน Y+ ยังส่งผลให้ค่าความเค้นลดลงเล็กน้อย เนื่องจากแรงลมปะทะเป็นการพยุงตัวโครงสร้างหลักของปั้นจั่น และไม่ส่งผลต่อการเสียสมดุลของปั้นจั่นแสดงดังกราฟ Figure 9 ความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่าความต้านทานแรงดึงครากของวัสดุเกรด SM 490 (Yield strength, $\sigma_y = 325$ MPa) ดังนั้นความเค้นที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วงความเค้นอนุญาตและปลอดภัยจากการวิบัติเนื่องจากความเค้นเกินจุดครากของวัสดุโครงสร้าง

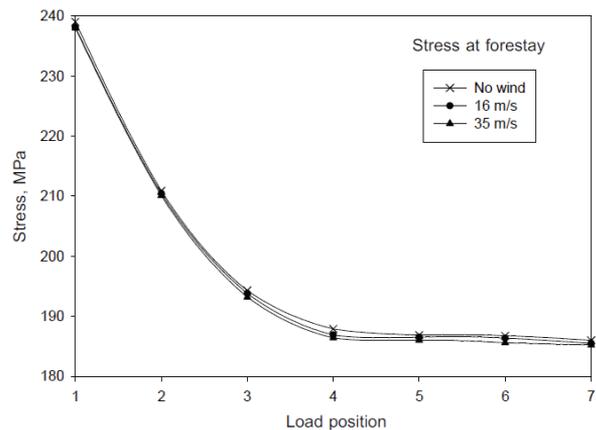
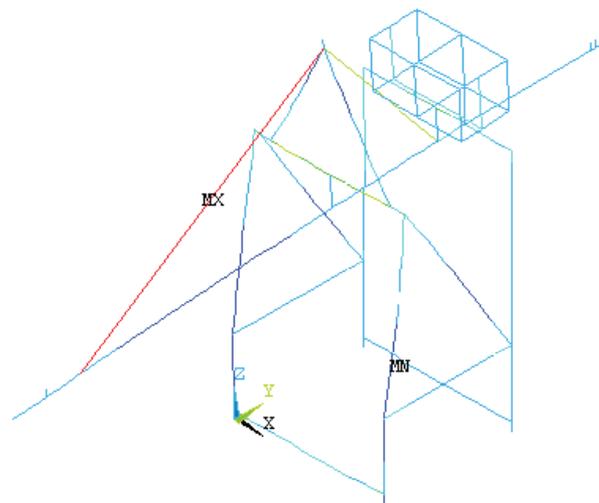


Figure 9 Maximum stress of structure

3. ผลการวิเคราะห์ระยะกระจัดของโครงสร้างปั้นจั่นพบว่าระยะกระจัดสูงสุด (Maximum displacement) เกิดขึ้นที่บริเวณปลาย Boom ตำแหน่งการทำงานที่ 1 (PD1) เท่ากับ 157.02 mm ในแนวตั้งทิศทาง Z- สภาวะหยุดนิ่งชั่วขณะค้างภาระแรงไว้ (Stowed wind) ดังกราฟ Figure 10 และระยะ

กระจัดจะค่อยๆ ลดลงกรณีเลื่อนภาระแรงมายังตำแหน่งทำงานที่ 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 ตามลำดับ ระยะกระจัดที่เกิดขึ้นอยู่ในเงื่อนไขของการ ออกแบบและเกณฑ์ที่อนุญาตสอดคล้องกับงานวิจัยของ Francesco (2006)

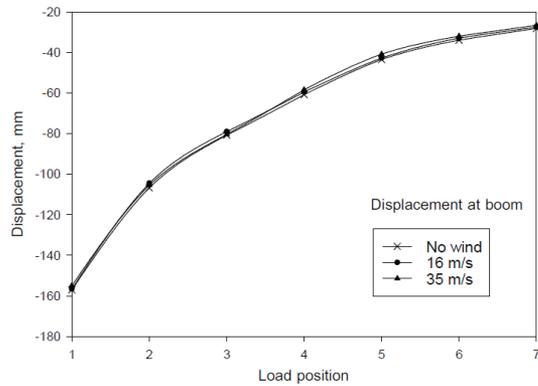
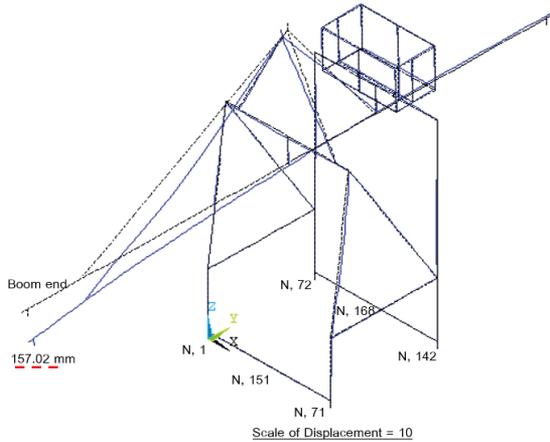
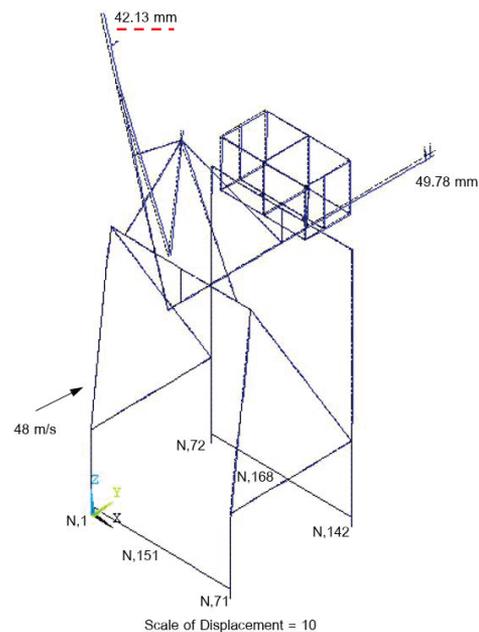
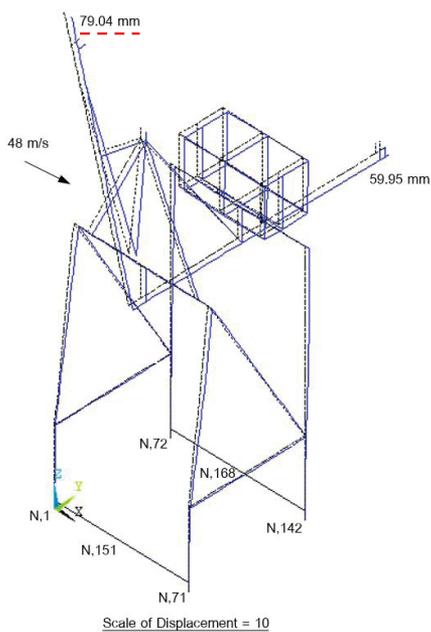


Figure 10 Displacement of structure in-service

และกรณีสภาวะหยุดการทำงาน (Out-off-service) พบว่าระยะกระจัดสูงสุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่งปลาย Boom (PD1) ทิศทางแกน X+, Y+ เท่ากับ 79.04 mm และ 42.13 mm ดัง Figure 11 (A) และ (B) ตามลำดับ และระยะกระจัดตำแหน่งปลาย Girder เกิดขึ้นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 59.95 mm ในแนวตั้งทิศทาง Z- ผลระยะกระจัดทั้ง 2 สภาวะที่วิเคราะห์อยู่ในเกณฑ์ที่อนุญาตและเงื่อนไขในการออกแบบ (วินิต ช่อวิเชียร และ วรนิติ ช่อวิเชียร, 2550)

ซึ่งมีค่าน้อยกว่า L/180 โดยที่ L คือความยาว Boom มีค่าเท่ากับ 36,000 mm จะได้ค่า $L/180 = 36,000/180 = 200$ mm เป็นค่าสูงสุดที่อนุญาตให้เกิดขึ้นตามมาตรฐาน AISC/ASD/LRFD และผลการวิเคราะห์แรงปฏิกิริยา พบว่าแรงปฏิกิริยาต่ำสุดเกิดขึ้นบริเวณทางด้านซ้ายของปั้นจั่น (Left sea side corner) มีค่าเท่ากับ 81.08 kN ดัง Table 4 ไม่ส่งผลให้เกิดการยกตัวของโครงสร้างหลักและการเสถียรของปั้นจั่น



(A) Displacement X-direction

(B) Displacement Y-direction

Figure 11 Displacement of out-off-service

Table 4 Reaction of out-of-service

Sea side			
Wind load Y-direction		Wind load X-direction	
Node	Reaction, kN	Node	Reaction, kN
1	84.47	1	104.77
151	27.10	151	26.91
71	81.08	71	143.77
Land side			
Wind load Y-direction		Wind load X-direction	
Node	Reaction, kN	Node	Reaction, kN
72	197.55	72	136.95
168	2.64	168	2.35
142	225.97	142	204.07

สรุปผล

ผลการวิเคราะห์แรงปฏิกิริยาบับันจัน แรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสูงสุดเท่ากับ 2,918.90 kN เกิดขึ้นที่ตำแหน่งขาซ้ายของบับันจัน (Left sea side conner) ฝั่งด้านหน้าชายฝั่ง (Sea side) สภาวะการทำงานหยุดนิ่งชั่วขณะค้ำภาระ Container ไว้ (Stowed wind) แรงลมปะทะที่ความเร็วลม 35 m/s ทิศทางแกน X+ ตำแหน่งทำงานปลาย Boom (PD1) ทั้งนี้ฐานของบับันจันได้ออกแบบการกระจายแรงปฏิกิริยาออกเป็น 10 จุด แรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่เสาฐานรองรับเท่ากับ 291.89 kN ซึ่งค่าที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่าเงื่อนไขของผู้ออกแบบได้กำหนดเสาฐานรองรับบับันจันให้รับภาระแรงห้ามเกิน 294.30 kN ต่อเสา ซึ่งปลอดภัยต่อการวิบัติของเสาฐานรองรับบับันจัน และในเชิงปฏิบัติแล้วแรงปฏิกิริยาสูงสุดที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อยกว่าผลการวิเคราะห์ เนื่องด้วยในสภาวะการทำงานกรณีหยุดนิ่งชั่วขณะจะไม่ค้ำภาระ Container ไว้ที่ตำแหน่งปลาย Boom ผู้ควบคุมจะเลื่อนภาระ Container ให้อยู่ระหว่างตำแหน่งกลาง Boom เพื่อเป็นการกระจายแรงให้แก่โครงสร้างบับันจันและเสาฐานรองรับ จากนั้นค่อยปลดภาระ Container (Total lifted load) และเลื่อน Trolley load มายังตำแหน่งที่ 6 (PD6) เพื่อรอความเร็วลมอยู่ในช่วงที่บับันจันสามารถทำงานปกติได้ จากนั้นผู้ควบคุมบับันจันจึงจะเริ่มควบคุมการทำงานต่อไปอีกครั้ง

ผลการวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นของโครงสร้างบับันจันทั้ง 2 สภาวะ พบว่าความเค้นสูงสุดเกิดขึ้นที่สภาวะการทำงานปกติกรณีหยุดนิ่งชั่วขณะ ตำแหน่งทำงานที่ปลาย Boom (PD1) มีค่าเท่ากับ 239.05 MPa เกิดขึ้นที่ซูดดึง Boom (Forestay) และพบว่าค่าลดลงเมื่อเลื่อนภาระมายังตำแหน่ง 2,

3 และ 4 จากนั้นตำแหน่ง 4, 5, 6 และ 7 ความเค้นที่เกิดขึ้นจะมีค่าคงตัวอยู่ในช่วง 185.74 MPa-186.98 MPa เนื่องจากการเลื่อนภาระเข้ามายังตัวโครงสร้างเป็นการกระจายความเค้นให้แก่โครงสร้าง ค่าสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่าความต้านแรงดึงครากของวัสดุเกรด SM 490 $\sigma_y = 325$ MPa ดังนั้นความเค้นที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วงความเค้นอนุญาตและปลอดภัยจากการวิบัติ เนื่องจากความเค้นเกินจุดครากของวัสดุโครงสร้าง และผลการวิเคราะห์ระยะกระจัดโครงสร้างบับันจันทั้ง 2 สภาวะอยู่ในเกณฑ์ที่อนุญาตและเงื่อนไขในการออกแบบ ค่าสูงสุดที่เกิดขึ้นเท่ากับ 157.02 mm เกิดขึ้นที่ตำแหน่งปลาย Boom ทิศทาง Z- ในแนวตั้ง ซึ่งมีค่าน้อยกว่า L/180 เท่ากับ 200 mm ค่าระยะกระจัดที่ยอมอนุญาตตามมาตรฐาน AISC/ASD/LRFD

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนโปรแกรม ANSYS จากห้องวิจัยการเผาไหม้ขั้นสูง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ภายใต้การควบคุมของ ดร. เฉลิมพล เปล่งสะอาด

เอกสารอ้างอิง

- ชัยยนต์ ใจบุญมา. (2551). การวิเคราะห์โครงสร้างเครนด้วยวิธีไฟไนต์อีเลเมนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- วินิต ช่อวิเชียร และวรินดี ช่อวิเชียร. (2550). การออกแบบโครงสร้างเหล็กตามมาตรฐาน AISC/ASD/LRFD. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- Federation Europeenne De La Manutention Section 1. (1987). *Rules for the Design of Hoisting Appliances. Classification and Loading on Structures and Mechanisms* (3rd ed). French and German: Technical Committee of the Section 1 of the F.E.M.
- Francesco, Z. (2006). *Main Structure Calculation and Safety Checks Revision 1, Paolo De Nicola-Paceco Portainer Cranes for Port Authority of Thailand*. Via Borgo Vicenza.
- Jung-Hyun J. & Sihyun K. (2020) Key Performance Indicator Development for Ship-to-Shore Crane Performance Assessment in Container Terminal Operations. *J. Mar. Sci. Eng*, 8(6), 1-11.
- Klinger, C. (2014). Failures of cranes due to wind induced vibrations. *Engineering Failure Analysis*, 43, 198-220.
- Moaveni, S. (1999). *Finite element analysis theory and application with ANSYS*. Prentice-Hall.
- Przemieniecki, J.S. (1968). *Theory of Matrix Structural Analysis*. McGraw-Hill.
- Quang, H.T., Jungwon, H., Nguyen, V.B., Choonghyun, K., Jin-Hee A. & Park, I.J. (2018). Sensitivity Analysis for Ship-to-Shore Container Crane Design. *Applied sciences*, 7, 1-14.
- Tang, G., Chi, C., Wang, Y. & Hu, C. (2019). Strength Analysis of the Main Structural Component in Ship-to-Shore Cranes Under Dynamic Load. *IEEE*, 7, 23959-23966.
- Verschoof, I.J. (2002). *Cranes-Design, Practice, and Maintenance* (2nd Eds). Professional Engineering Publishing Limited.
- Zhang, Y., Zhao J. & Yao J. (2011) Static Structural Finite-element Analysis of tower crane based on FEM. *IEEE*, 220-224.