

## การวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างเครนด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ CRANE STRUCTURE ANALYSIS BY FINITE ELEMENT METHOD

ชัยยันต์ ใจบุญมา<sup>1</sup> และวิรัตน์ จอมขวา<sup>2</sup>

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ  
1518 ถนนพิบูลสงคราม เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800 อีเมลล์ <sup>1</sup>engineering\_mech@hotmail.com <sup>2</sup>vrc@kmitb.ac.th

### บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาพฤติกรรมความเค้นในโครงสร้างปั้นจั่นยกตู้สินค้า (Ship-to-Shore Gantry Crane) โดยวิธีจำลองแบบ และคำนวณด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ โครงสร้างทำด้วยเหล็กgrupพรรณรีดร้อน (SM 490) มีขนาดเท่ากับ 30 x 75 x 42 เมตร โดยแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ลักษณะ คือลักษณะโครงสร้างทำงานปกติ และโครงสร้างหยุดการทำงาน โครงสร้างทำงานปกติพิจารณาภาวะภาระหยุดนิ่ง 7 ตำแหน่งภาระ แบบไม่มีความเร็วลม และมีความเร็วลม 16 m/s ลักษณะโครงสร้างหยุดการทำงานแบบที่ 1 พิจารณาภาวะภาระหยุดนิ่ง 7 ตำแหน่ง ค้ำภาระไว้ มีความเร็วลม 35 m/s และลักษณะโครงสร้างหยุดการทำงานแบบที่ 2 ไม่มีภาระภายนอก มีความเร็วลม 48 m/s ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทำงานปกติจากไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าความเค้นสูงสุดเกิดขึ้นที่ตัวตั้ง Boom (Forestay) เท่ากับ 238.20 MPa ผลการวิเคราะห์โครงสร้างหยุดการทำงาน ชุดฐานล้อ และจุดต่อระหว่าง Boom กับ Girder ของโครงสร้างยังอยู่ในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้น

### Abstract

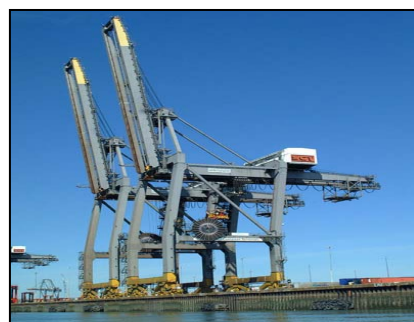
The objective of this study was to analyze the stresses in a ship-to-shore gantry crane by using a finite element method. The crane structure was made of steel (SM490) and sized of 30x75x42-meter. The crane structure was analyzed in two ways called the in-service and out-off-service structures. The in-service structure was loaded in 7 positions with wind velocity at 16 m/s acting on its structure. The out-off-service structure was divided as in CASE-1 and CASE-2. In CASE-1 the structure was loaded in 7 positions with wind velocity at 35 m/s. In CASE-2 the loads was taken off and the boom of the crane was hold-up with wind velocity at 48 m/s. The results on the in-service structure shown that the maximum stress was 238.20 MPa on the forestay. The results on the out-off-service structure also shown that the linearity of the stress-stain curve was not violated on the basement of the crane.

### 1. บทนำ

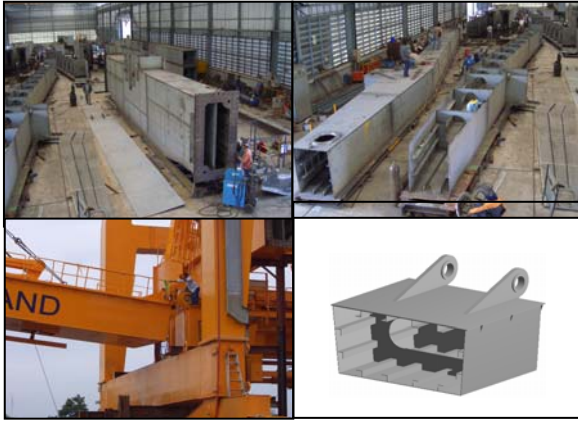
การออกแบบโครงสร้างที่รับภาระภายใต้การทำงานปกติ มีความเร็วลมกระทำ 16 m/s ดังรูปที่ 1 และหยุดการทำงานมีความเร็วลมกระทำ 35 m/s และ 48 m/s [1] ดังรูปที่ 2 ผู้ออกแบบควรออกแบบโดยคำนึงถึงความปลอดภัยเป็นหลัก โดยเฉพาะโครงสร้างที่ทำงานปกติรับภาระสูงสุด และมีความเร็วลมมากกว่าทำให้โครงสร้างต้องมีการออกแบบโดยคำนึงถึงการวิบัติของโครงสร้าง โดยพิจารณาพฤติกรรมความเค้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากภาระสูงสุด และการเกิดความล้าตัวของชิ้นส่วนที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของความเค้น เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดการวิบัติของโครงสร้าง และที่สำคัญผู้ออกแบบต้องเข้าใจการเกิดพฤติกรรมของโครงสร้าง ในขณะที่รับภาระสูงสุดได้เป็นอย่างดี ฉะนั้นในการออกแบบโครงสร้าง ที่ไม่สามารถทดสอบหาพฤติกรรมของโครงสร้างได้โดยตรง จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องสร้างและจำลองแบบ และใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยในการวิเคราะห์และหาค่าตอบ



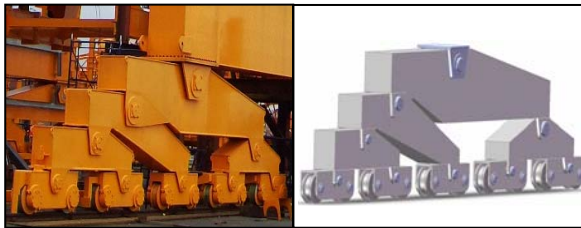
รูปที่ 1 ลักษณะโครงสร้างทำงานปกติ



รูปที่ 2 ลักษณะโครงสร้างหยุดการทำงาน



รูปที่ 3 ตำแหน่งจุดต่อระหว่าง boom กับ Girder ของโครงสร้าง



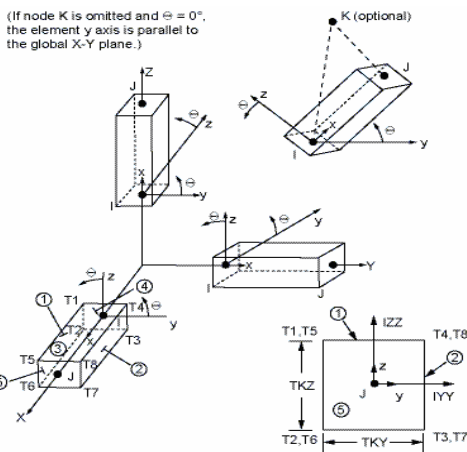
รูปที่ 4 ชุดฐานล้อของโครงสร้าง

งานวิจัยนี้ออกแบบสร้างแบบจำลองโครงสร้าง ที่เหมือนจริง เป็นสามมิติชนิดเอลเมนต์ BEAM4 โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลเมนต์ช่วยในการสร้างและจำลองแบบดังรูปที่ 7 และรูปที่ 8 วิเคราะห์พฤติกรรมความเค้นในโครงสร้าง โดยรวมทั้งระบบ รวมไปถึงการสร้างจำลองตำแหน่งจุดต่อระหว่าง Boom กับ Girder ของโครงสร้าง และจำลองชุดฐานล้อดังรูปที่ 3 และรูปที่ 4 เพื่อตรวจสอบการวิบัติ เนื่องจากความเค้นเกินจุดครากของวัสดุ

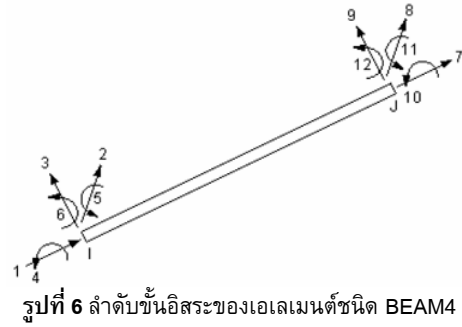
## 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาวิเคราะห์การวิเคราะห์พฤติกรรมความเค้นในโครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลเมนต์ เลือกชนิดเอลเมนต์เป็นแบบ Beam4

### 2.1 วิธีไฟไนต์เอลเมนต์ชนิดเอลเมนต์แบบ BEAM4



รูปที่ 5 แสดงชนิดเอลเมนต์แบบ BEAM4



รูปที่ 6 ลำดับชั้นอิสระของเอลเมนต์ชนิด BEAM4

ดังนั้นได้เมทริกความแข็งเกร็งของเอลเมนต์เป็น [2]

$$[k_e]\{d_e\} = \{F_e\} \quad (1)$$

และระบบรวมเป็น

$$[k]\{d\} = \{F\} \quad (2)$$

### 2.2 ความเค้นของเอลเมนต์ชนิด BEAM4

ความเค้นตรง

$$\sigma_i^{dir} = F_{x,i} / A \quad (3)$$

เมื่อ  $\sigma_i^{dir}$  = ความเค้นตรง

$$F_{x,i} = \text{แรงในแนวแกน}$$

ความเค้นดัด

$$\sigma_{z,i}^{bnd} = M_{y,i} t_z / 2I_y \quad (6)$$

$$\sigma_{y,i}^{bnd} = M_{z,i} t_y / 2I_z \quad (7)$$

เมื่อ

$$\sigma_{z,i}^{bnd} = \text{ความเค้นดัดบนเอลเมนต์ Z+ ของคานที่โหนด i}$$

$$\sigma_{y,i}^{bnd} = \text{ความเค้นดัดบนเอลเมนต์ Y- ของคานที่โหนด i}$$

$$M_{y,i} = \text{โมเมนต์รอบแกน y ที่โหนด i}$$

$$M_{z,i} = \text{โมเมนต์รอบแกน z ที่โหนด i}$$

$$t_z = \text{ความหนาของคานในแนวแกน z}$$

$$t_y = \text{ความหนาของคานในแนวแกน y}$$

ความเค้นสูงสุดและความเค้นต่ำสุดเป็น

$$\sigma_i^{\max} = \sigma_i^{dir} + \left| \sigma_{z,i}^{bnd} \right| + \left| \sigma_{y,i}^{bnd} \right| \quad (8)$$

$$\sigma_i^{\min} = \sigma_i^{dir} - \left| \sigma_{z,i}^{bnd} \right| - \left| \sigma_{y,i}^{bnd} \right| \quad (9)$$

## 3. การวิเคราะห์

การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยไฟไนต์เอลเมนต์แบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ลักษณะ

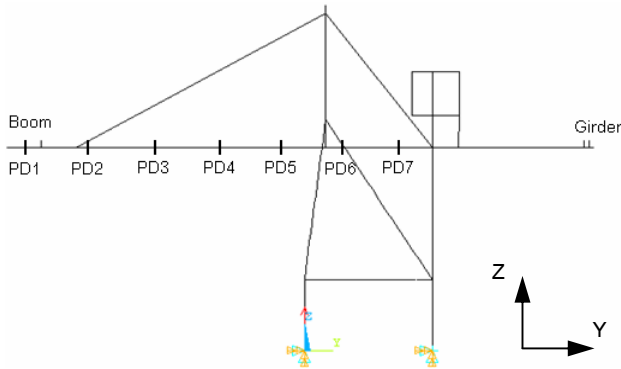
1. ลักษณะโครงสร้างทำงานปกติ (In-Service: BD1) แบบไม่มีความเร็วลม และแบบมีความเร็วลม 16 m/s ดังรูปที่ 7
2. ลักษณะโครงสร้างหยุดทำงาน
  - 2.1 ลักษณะโครงสร้างหยุดทำงานแบบ CASE-1 (Stowed Wind: BD2) ค้างภาระไว้และหยุดการทำงาน มีความเร็วลม 35 m/s ดังรูปที่ 7
  - 2.2 ลักษณะโครงสร้างหยุดทำงานแบบ CASE-2 (Out-of-Service: BU) เอาภาระออกและหยุดการทำงาน มีความเร็วลม 48 m/s ดังรูปที่ 8

**3.1 ลักษณะโครงสร้างทำงานปกติ (In-Service: BD1)**

3.1.1 วิเคราะห์ภาระกระทำ 7 ตำแหน่ง Boom ถึง Girder แบบไม่มีความเร็วลม

3.1.2 วิเคราะห์ภาระกระทำ 7 ตำแหน่ง Boom ถึง Girder แบบมีความเร็วลมกระทำ 16 m/s ทิศทางแกน Y+

3.1.3 วิเคราะห์ภาระกระทำ 7 ตำแหน่ง Boom ถึง Girder แบบมีความเร็วลมกระทำ 16 m/s ทิศทางแกน X+



รูปที่ 7 โครงสร้างทำงานปกติและตำแหน่งภาระที่วิเคราะห์

**3.2 ลักษณะโครงสร้างหยุดการทำงานแบบ CASE-1 (Stowed Wind: BD2)**

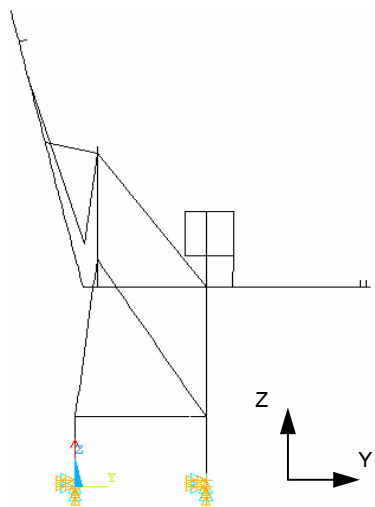
3.2.1 วิเคราะห์ภาระกระทำ 7 ตำแหน่ง Boom ถึง Girder แบบมีความเร็วลมกระทำ 35 m/s ทิศทางแกน Y+

3.2.2 วิเคราะห์ภาระกระทำ 7 ตำแหน่ง Boom ถึง Girder แบบมีความเร็วลมกระทำ 35 m/s ทิศทางแกน X+

**3.3 ลักษณะโครงสร้างหยุดการทำงานแบบ CASE-2 (Out off-Service: BU)**

3.3.1 วิเคราะห์ภาระ Trolley Load ตำแหน่งที่ 6 (PD6) แบบมีความเร็วลมกระทำ 48 m/s ทิศทางแกน Y+

3.3.2 วิเคราะห์ภาระ Trolley Load ตำแหน่งที่ 6 (PD6) แบบมีความเร็วลมกระทำ 48 m/s ทิศทางแกน X+



รูปที่ 8 โครงสร้างหยุดการทำงาน

**4. ผลการวิเคราะห์จากไฟไนต์เอลิเมนต์**

ค่าสูงสุดของแรงปฏิกิริยา ภาระกระทำสูงสุด และความเค้นสูงสุดได้แสดงในช่องที่แรเงาดังตารางที่ 1-ตารางที่ 21

**4.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทำงานปกติ (BD1)**

4.1.1 ผลวิเคราะห์ภาระกระทำ 7 ตำแหน่ง แบบไม่มีความเร็วลม แสดงผลลัพธ์ดังตารางที่ 1 ถึงตารางที่ 3

ตารางที่ 1 ผลแรงปฏิกิริยาสูงสุดในกรณีหัวข้อ 4.1.1

Load=>TL+LL	In-service: BD1, No wind				
	Metric Tonnes				
	N.1	N.71	N.72	N.142	Total
PD1	292.85	293.85	30.19	53.38	670.28
PD2	272.94	273.32	50.04	73.98	670.28
PD3	253.01	252.79	69.90	94.57	670.27
PD4	233.08	232.27	89.76	115.16	670.27
PD5	213.14	211.76	109.63	135.74	670.28
PD6	191.63	189.64	131.07	157.93	670.28
PD7	174.67	172.14	147.98	175.48	670.28

ตารางที่ 2 ผลระยะกระจัดสูงสุดในกรณีหัวข้อ 4.1.1

In-service: BD1, No wind	Displacement, mm					
	N. 273		N. 300		Maximum	
Load=>TL+LL	UZ	USUM	UZ	USUM	UZ	USUM
PD1	-122.32	122.63	24.94	25.67	-159.11	159.34
PD2	-99.83	100.22	14.40	15.86	-106.73	107.09
PD3	-78.08	78.55	4.21	8.05	-80.79	81.22
PD4	-58.05	58.55	-5.17	8.10	-61.88	62.31
PD5	-40.96	41.29	-13.18	13.81	-42.83	43.12
PD6	-25.56	25.68	-21.70	21.77	-28.16	28.26
PD7	-14.46	14.64	-37.83	37.89	-0.04	37.89

ตารางที่ 3 ผลความเค้นสูงสุดในกรณีหัวข้อ 4.1.1

Stress/Position	In-service: BD1 No wind Load=> TL+LL, MPa							
	PD1	PD2	PD3	PD4	PD5	PD7		
SMAX-I	E,496	238.14	E,496	210.14	E,496	194.00	E,496	186.90
SMIN-I	E,70	-121.48	E,207	-117.39	E,219	-137.65	E,219	-148.30
SMAX-J	E,496	233.27	E,496	228.10	E,496	218.42	E,496	207.41
SMIN-J	E,203	-139.49	E,207	-132.12	E,207	-140.23	E,218	-148.71
SDIR	E,207	122.88	E,207	124.78	E,219	141.13	E,219	151.14

Stress/Position	In-service: BD1 Load=> TL+LL, MPa					
	PD5	PD6	PD7	PD5	PD6	PD7
SMAX-I	E,496	185.66	E,496	186.35	E,239	186.62
SMIN-I	E,219	-140.28	E,496	-136.99	E,239	-137.12
SMAX-J	E,496	198.80	E,496	195.04	E,238	195.20
SMIN-J	E,496	-142.48	E,496	-142.43	E,231	-142.45
SDIR	E,219	142.99	E,219	111.74	E,239	99.91

4.1.2 ผลวิเคราะห์ภาระกระทำ 7 ตำแหน่ง แบบมีความเร็วลมกระทำ 16 m/s ทิศทางแกน Y+ แสดงผลลัพธ์ดังตารางที่ 4 ถึงตารางที่ 6

ตารางที่ 4 ผลแรงปฏิกิริยาสูงสุดในกรณีหัวข้อ 4.1.2

Load=>TL+LL	In-service: BD1, 16 m/s of wind direction Y+				
	Metric Tonnes				
	N.1	N.71	N.72	N.142	Total
PD1	289.02	289.95	33.92	57.38	670.27
PD2	269.10	269.43	53.78	77.97	670.28
PD3	249.17	248.90	73.63	98.57	670.28
PD4	229.25	228.38	93.50	119.15	670.28
PD5	209.31	207.86	113.37	139.73	670.28
PD6	187.80	185.74	134.81	161.93	670.28
PD7	170.84	168.25	151.72	179.48	670.29

ตารางที่ 5 ผลระยะกระจัดสูงสุดในกรณีหัวข้อ 4.1.2

In-service: BD1, 16 m/s of wind direction Y+	Displacement, mm					
	N. 273		N. 300		Maximum	
Load=>TL+LL	UZ	USUM	UZ	USUM	UZ	USUM
PD1	-122.15	122.60	24.42	25.67	-158.84	159.18
PD2	-99.66	100.22	13.87	16.26	-106.46	106.99
PD3	-77.90	78.60	3.68	9.46	-80.69	81.33
PD4	-57.88	58.64	-5.70	9.88	-61.80	62.47
PD5	-40.79	41.39	-13.70	14.93	-42.75	43.28
PD6	-25.39	25.72	-22.22	22.46	-28.10	28.37
PD7	-14.29	14.80	-38.36	38.49	-38.36	38.49

ตารางที่ 6 ผลความเค้นสูงสุดในกรณีหัวข้อ 4.1.2

Stress/Position	In-service: BD1 16 m/s of wind Load=> TL+LL, MPa							
	PD1		PD2		PD3		PD4	
SMAX-I	E,496	238.13	E,496	210.13	E,496	193.99	E,496	186.89
SMIN-I	E,70	-121.05	E,207	-117.34	E,219	-136.71	E,219	-147.35
SMAX-J	E,496	233.35	E,496	228.17	E,496	218.50	E,496	207.49
SMIN-J	E,203	-139.89	E,207	-131.63	E,207	-140.32	E,218	-147.88
SDIR	E,207	122.89	E,207	124.78	E,219	140.78	E,219	150.79

Stress/Position	In-service: BD1 16 m/s of wind Load=> TL+LL, MPa							
	PD5		PD6		PD7			
SMAX-I	E,496	185.65	E,496	186.35	E,239		E,496	186.61
SMIN-I	E,219	-139.96	E,496	-136.91	E,239		E,239	-137.03
SMAX-J	E,496	198.88	E,496	195.12	E,238		E,238	195.28
SMIN-J	E,496	-142.48	E,496	-142.43	E,231		E,231	-142.45
SDIR	E,219	142.64	E,219	111.39	E,239		E,239	100.35

4.1.3 ผลวิเคราะห์ภาระกระทำ 7 ตำแหน่ง แบบมีความเร็วลมกระทำ 16 m/s ทิศทางแกน X+ แสดงผลลัพธ์ดังตารางที่ 7 ถึงตารางที่ 9

ตารางที่ 7 ผลแรงปฏิกิริยาสูงสุดในกรณีหัวข้อ 4.1.3

Load=>TL+LL	In-service: BD1, 16 m/s of wind direction X+				
	Metric Tonnes				
	N,1	N,71	N,72	N,142	Total
PD1	292.07	294.64	27.79	55.78	670.28
PD2	272.15	274.11	47.65	76.37	670.28
PD3	252.22	253.58	67.50	96.97	670.27
PD4	232.29	233.06	87.36	117.55	670.27
PD5	212.35	212.55	107.24	138.13	670.28
PD6	190.85	190.42	128.69	160.33	670.28
PD7	173.88	172.93	145.59	177.88	670.28

ตารางที่ 8 ผลระยะกระจัดสูงสุดในกรณีหัวข้อ 4.1.3

In-service: BD1, 16 m/s of wind direction X+	Displacement, mm					
	N, 273		N, 300		Maximum	
Load=>TL+LL	UZ	USUM	UZ	USUM	UZ	USUM
PD1	-122.39	123.15	25.01	26.58	-159.19	159.64
PD2	-99.90	100.83	14.47	17.07	-106.82	107.78
PD3	-78.14	79.28	4.28	9.87	-80.84	81.82
PD4	-68.12	59.47	-5.10	9.54	-61.93	63.01
PD5	-41.03	42.53	-13.11	14.46	-42.88	44.09
PD6	-25.63	27.53	-21.62	22.02	-28.21	29.55
PD7	-14.53	17.58	-37.76	37.93	-37.76	37.93

ตารางที่ 9 ผลความเค้นสูงสุดในกรณีหัวข้อ 4.1.3

Stress/Position	In-service: BD1 16 m/s of wind Load=> TL+LL, MPa							
	PD1		PD2		PD3		PD4	
SMAX-I	E,496	238.14	E,496	210.15	E,496	194.02	E,496	186.92
SMIN-I	E,70	-125.84	E,207	-120.62	E,219	-136.97	E,219	-147.62
SMAX-J	E,496	233.43	E,496	228.25	E,496	218.55	E,496	207.54
SMIN-J	E,203	-144.08	E,207	-134.90	E,207	-143.02	E,218	-149.36
SDIR	E,207	125.93	E,207	127.82	E,219	140.65	E,219	150.86

Stress/Position	In-service: BD1 16 m/s of wind Load=> TL+LL, MPa							
	PD5		PD6		PD7			
SMAX-I	E,496	185.67	E,496	186.37	E,496		E,496	186.63
SMIN-I	E,219	-139.60	E,496	-137.01	E,496		E,496	-137.14
SMAX-J	E,496	198.92	E,496	195.15	E,496		E,496	195.30
SMIN-J	E,496	-142.60	E,496	-142.54	E,496		E,496	-142.55
SDIR	E,219	142.51	E,219	111.26	E,231		E,231	100.02

4.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างหยุดการทำงาน CASE-1(BD2)

4.2.1 ผลวิเคราะห์ภาระกระทำ 7 ตำแหน่ง แบบมีความเร็วลมกระทำ 35 m/s ทิศทางแกน Y+ แสดงผลลัพธ์ดังตารางที่ 10 ถึงตารางที่ 12

ตารางที่ 10 ผลแรงปฏิกิริยาสูงสุดในกรณีหัวข้อ 4.2.1

Load=>TL+LL	Out-of-Service: BD2, Stowed wind 35m/s direction Y+				
	Metric Tonnes				
	N,1	N,71	N,72	N,142	Total
PD1	274.49	275.22	48.04	72.53	670.28
PD2	254.57	254.69	67.90	93.13	670.28
PD3	234.64	234.16	87.75	113.72	670.27
PD4	214.71	213.63	107.61	134.31	670.27
PD5	194.78	193.12	127.49	154.89	670.29
PD6	173.27	171.00	148.93	177.08	670.29
PD7	156.30	153.50	165.84	194.63	670.27

ตารางที่ 11 ผลระยะกระจัดสูงสุดในกรณีหัวข้อ 4.2.1

Out-of-service: BD2, Stowed wind 35 m/s	Displacement, mm					
	N, 273		N, 300		Maximum	
Direction Y+	UZ	USUM	UZ	USUM	UZ	USUM
Load=>TL+LL						
PD1	-121.50	122.75	22.43	26.90	-157.82	158.79
PD2	-99.01	100.56	11.89	19.49	-105.45	106.91
PD3	-77.25	79.19	1.70	15.77	-80.32	82.12
PD4	-57.23	59.52	-7.68	16.88	-61.49	63.56
PD5	-40.14	42.49	-15.69	20.28	-42.44	44.61
PD6	-24.74	27.09	-24.20	26.21	-27.85	29.86
PD7	-13.64	17.36	-40.34	41.51	-40.34	41.51

ตารางที่ 12 ผลความเค้นสูงสุดในกรณีหัวข้อ 4.2.1

Stress/Position	Out of-service: BD2, Stowed wind 35m/s, MPa							
	PD1		PD2		PD3		PD4	
SMAX-I	E,496	238.10	E,496	210.10	E,496	193.96	E,496	186.86
SMIN-I	E,70	-119.42	E,207	-118.98	E,219	-137.05	E,219	-148.13
SMAX-J	E,496	233.67	E,496	228.49	E,496	218.80	E,496	207.78
SMIN-J	E,203	-141.38	E,207	-133.23	E,207	-141.92	E,218	-148.63
SDIR	E,207	122.91	E,207	124.80	E,219	139.46	E,219	149.48

Stress/Position	Out of-service: BD2, Stowed wind 35m/s, MPa							
	PD5		PD6		PD7			
SMAX-I	E,496	185.62	E,496	186.31	E,496		E,496	186.58
SMIN-I	E,219	-140.91	E,496	-136.59	E,496		E,496	-136.72
SMAX-J	E,496	199.16	E,496	195.40	E,496		E,496	195.56
SMIN-J	E,496	-142.48	E,496	-142.42	E,496		E,496	-142.44
SDIR	E,219	141.33	E,219	110.08	E,239		E,239	102.04

4.2.2 ผลวิเคราะห์ภาระกระทำ 7 ตำแหน่ง แบบมีความเร็วลมกระทำ 35 m/s ทิศทางแกน X+ แสดงผลลัพธ์ดังตารางที่ 13 ถึงตารางที่ 15

ตารางที่ 13 ผลแรงปฏิกิริยาสูงสุดในกรณีหัวข้อ 4.2.2

Load=>TL+LL	Out-of-service: BD2, Stowed wind 35m/s direction X+				
	Metric Tonnes				
	N,1	N,71	N,72	N,142	Total
PD1	289.16	297.54	18.78	64.79	670.28
PD2	269.25	277.01	38.63	85.39	670.28
PD3	249.32	256.48	58.49	105.98	670.27
PD4	229.39	235.96	78.35	126.57	670.28
PD5	209.46	215.44	98.22	147.15	670.27
PD6	187.95	193.32	119.66	169.35	670.29
PD7	170.98	175.83	136.57	186.89	670.28

ตารางที่ 14 ผลระยะกระจัดสูงสุดในกรณีหัวข้อ 4.2.2

Out-of-service: BD2, Stowed wind 35 m/s	Displacement, mm					
	Node 273		Node 300		Maximum	
direction X+	UZ	USUM	UZ	USUM	UZ	USUM
Load=>TL+LL						
PD1	-122.65	133.42	25.29	37.20	-159.53	169.59
PD2	-100.16	113.02	14.75	30.66	-107.15	121.58
PD3	-78.40	94.18	4.55	26.79	-80.63	94.66
PD4	-58.38	78.09	-4.83	26.15	-53.91	78.50
PD5	-41.29	65.94	-12.83	27.85	-39.49	69.08
PD6	-25.88	57.24	-21.35	31.99	-23.62	61.14
PD7	-14.79	53.05	-37.49	44.14	-10.27	57.27

ตารางที่ 15 ผลความเค้นสูงสุดในกรณีหัวข้อ 4.2.2

Stress/Position	Out-of-service: BD, Stowed wind 35m/s, MPa							
	PD1		PD2		PD3		PD4	
SMAX-I	E,496	238.20	E,496	210.22	E,496	194.08	E,496	186.98
SMIN-I	E,70	-142.33	E,70	-136.94	E,219	-134.83	E,219	-145.91
SMAX-J	E,496	234.04	E,496	228.86	E,496	219.17	E,496	208.15
SMIN-J	E,203	-162.31	E,207	-145.41	E,207	-153.52	E,207	-155.05
SDIR	E,207	137.44	E,207	139.33	E,207	139.68	E,219	148.85

Stress/Position	Out of-service: BD, Stowed wind 35m/s, MPa							
	PD5		PD6		PD7			
SMAX-I	E,496	185.74	E,496	186.43	E,496		E,496	186.70
SMIN-I	E,219	-138.68	E,496	-137.08	E,496		E,496	-137.20
SMAX-J	E,496	199.53	E,496	195.77	E,496		E,496	195.92
SMIN-J	E,207	-145.40	E,496	-143.15	E,496		E,496	-143.17
SDIR	E,219	140.70	E,219	109.45	E,231		E,231	104.25

### 4.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างหยุดการทำงานแบบ CASE-2 (BU)

4.3.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างหยุดการทำงานแบบ CASE-2 แบบมีความเร็วลมกระทำ 48 m/s ทิศทางแกน Y+ แสดงผลลัพธ์ดังตารางที่ 16 ถึงตารางที่ 18

ตารางที่ 16 ผลแรงปฏิกิริยาสูงสุดในกรณีหัวข้อ 4.3.1

Out-off-service: BU, 48 m/s of wind direction Y+							
Load=>TL	Metric Tonnes						
	N,1	N,151	N,71	N,72	N,168	N,142	Total
PD6	84.47	27.10	81.08	197.55	2.64	225.97	618.82

ตารางที่ 17 ผลระยะกระจัดสูงสุดในกรณีหัวข้อ 4.3.1

Out-off-service: BU, 48 m/s of wind direction Y+						
Load=>TL	Displacement, mm					
	Node 283		Node 300		Maximum	
	UY	USUM	UZ	USUM	UZ	USUM
PD6	42.13	42.50	-49.78	50.57	-49.78	50.57

ตารางที่ 18 ผลความเค้นสูงสุดในกรณีหัวข้อ 4.3.1

Out-off-service: BU, 48 m/s of wind direction Y+, Load=>TL			
Stress/Position	MPa		
	PD6		
SMAX-I	E,239	155.84	
SMIN-I	E,239	-136.50	
SMAX-J	E,231	154.60	
SMIN-J	E,231	-155.27	
SDIR	E,239	144.02	

4.3.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างหยุดการทำงานแบบ CASE-2 แบบมีความเร็วลมกระทำ 48 m/s ทิศทางแกน X+ แสดงผลลัพธ์ดังตารางที่ 19 ถึงตารางที่ 21

ตารางที่ 19 ผลแรงปฏิกิริยาสูงสุดในกรณีหัวข้อ 4.3.2

Out-off-service: BU, 48 m/s of wind direction X+							
Load=>TL	Metric Tonnes						
	N,1	N,151	N,71	N,72	N,168	N,142	Total
PD6	104.77	26.91	143.77	136.95	2.35	204.07	618.82

ตารางที่ 20 ผลระยะกระจัดสูงสุดในกรณีหัวข้อ 4.3.2

Out-off-service: BU, 48 m/s of wind direction X+						
Load=>TL	Displacement, mm					
	N, 283		N, 300		Maximum	
	UY	USUM	UZ	USUM	UY	USUM
PD6	79.04	81.14	59.95	72.02	79.04	81.14

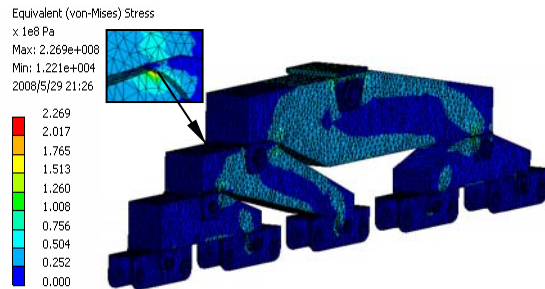
ตารางที่ 21 ผลความเค้นสูงสุดในกรณีหัวข้อ 4.3.2

Out-off-service: BU, 48 m/s of wind direction X+, Load=>TL			
Stress/Position	MPa		
	PD6		
SMAX-I	E,239	133.69	
SMIN-I	E,231	-125.03	
SMAX-J	E,231	144.83	
SMIN-J	E,231	-144.85	
SDIR	E,231	124.90	

ผลการวิเคราะห์จากตารางทั้งหมดทำให้ทราบค่าแรงปฏิกิริยาสูงสุด ระยะกระจัดสูงสุด และความเค้นสูงสุดในโครงสร้างที่ตำแหน่งภาระกระทำทั้ง 7 ตำแหน่งภาระ

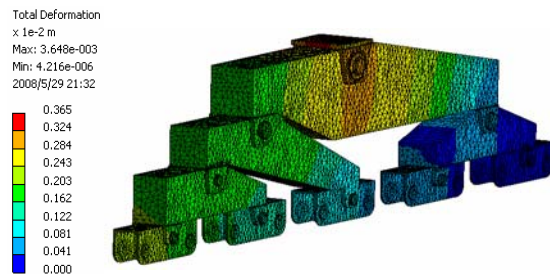
### 4.4 ผลการวิเคราะห์ของชุดฐานล้อ

ผลการวิเคราะห์ความเค้น von-Mises สูงสุดของชุดฐานล้อเท่ากับ 226.90 MPa เกิดขึ้นตำแหน่งตรงมุมด้านบนของฐานล้อตัวที่ 2 ของโครงสร้างดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ความเค้น von-Mises ของชุดฐานล้อ

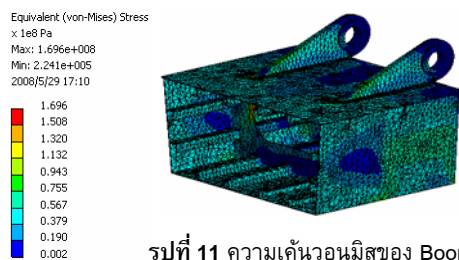
ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง จากไฟไนต์เอลิเมนต์เกิดขึ้นสูงสุดที่จุดกึ่งกลางของฐานด้านบน เท่ากับ 3.65 mm ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชุดฐานล้อ

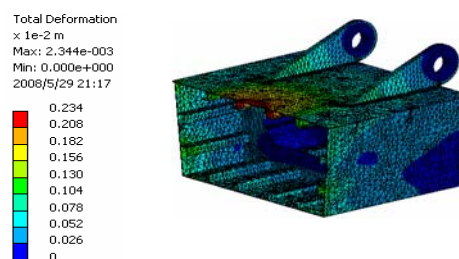
### 4.5 ผลการวิเคราะห์ของจุดต่อระหว่าง Boom กับ Girder

ผลการวิเคราะห์ความเค้น von-Mises สูงสุดของตำแหน่งจุดต่อระหว่าง Boom กับ Girder เท่ากับ 169.60 MPa เกิดขึ้นตรงครีبد้านใน (Stiffeners) ของ Boom ดังรูปที่ 11



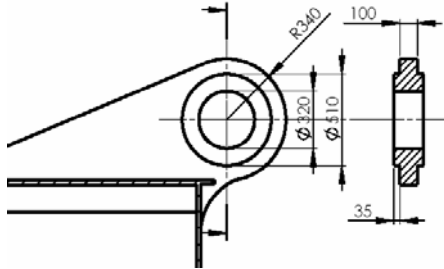
รูปที่ 11 ความเค้น von-Mises ของ Boom

ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง จากไฟไนต์เอลิเมนต์เกิดขึ้นที่จุดด้านบน Boom เท่ากับ 2.344 mm ดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ Boom

ตำแหน่งจุดต่อระหว่าง Boom กับ Girder ใช้สลักสองตัว และรับภาระภายใต้ Double Shear แรงที่ทำให้สลักเกิดความเค้นเฉือน คือแรงปฏิกิริยาที่จุดต่อระหว่าง Boom กับ Girder ผลการวิเคราะห์จากไฟไนต์เอลิเมนต์ได้แรงปฏิกิริยาที่จุดต่อระหว่าง Boom กับ Girder เท่ากับ  $2.2858 \times 10^6$  N



รูปที่ 13 ขนาดจุดต่อระหว่าง boom กับ Girder

#### 4.5.1 ความปลอดภัยเนื่องจากความเค้นเฉือน

จากสมการความเค้นเฉือน  $\tau = F / 2A$

$$\tau = (2.2858 \times 10^6 \text{ N} \times 4) / 2\pi(250^2) \text{ mm}^2 = 23.28 \text{ MPa}$$

เมื่อสลักมีขนาด  $\phi = 250$  mm

สลักเกิดความเค้นเฉือนเท่ากับ 23.28 MPa

ดังนั้นได้ค่าความปลอดภัยของสลักเท่ากับ

$$N = \tau_y / \tau_{\max} = 195 / 23.28 = 8.37$$

เมื่อ  $\tau_y = 0.6\sigma_y = 0.6(325) = 195 \text{ MPa}$

#### 4.5.2 ความปลอดภัยเนื่องจากความเค้นอัด

จากสมการความเค้น  $\sigma = F / A$

$$\sigma = F / td = 2.2858 \times 10^6 \text{ N} / (170 \times 250) \text{ mm}^2 = 53.78 \text{ MPa}$$

เมื่อ t คือความหนาที่สลักถูกอัด และ d คือเส้นผ่านศูนย์กลางของสลัก

สลักเกิดความเค้นอัดเท่ากับ 53.78 MPa

ความเค้นออกแบบเท่ากับ 325 MPa

ดังนั้นได้ค่าความปลอดภัย  $N = 325 / 53.78 = 6.04$

#### 4.5.3 ความปลอดภัยเนื่องจากความเค้นดึง

จากสมการความเค้น  $\sigma = F / A$

$$\sigma = 2.2858 \times 10^6 \text{ N} / 61200 \text{ mm}^2 = 37.34 \text{ MPa}$$

พื้นที่ภาคตัดที่ถูกดึงรวมพื้นที่ภาคตัดของบู๊ตเท่ากับ  $61200 \text{ mm}^2$

สลักเกิดความเค้นดึงเท่ากับ 36.90 MPa

ความเค้นออกแบบเท่ากับ 325 MPa

ดังนั้นได้ค่าความปลอดภัย  $N = 325 / 37.34 = 8.70$

ความเค้นที่เกิดขึ้นในสลักของตำแหน่งจุดต่อระหว่าง Boom กับ Girder และตำแหน่งจุดต่อระหว่าง Boom กับ Girder ยังอยู่ในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้น ซึ่งปลอดภัยจากการวิบัติเนื่องจากความเค้นเกินจุดครากตัวของวัสดุ ถ้าต้องการเพิ่มความปลอดภัยควรเพิ่มความหนาตำแหน่งจุดต่อระหว่าง boom กับ Girder หรือเพิ่มขนาดของสลักก็ได้ ขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบต้องการให้ส่วนใดคงทนมากกว่ากัน

## 5. สรุปผล

การวิเคราะห์โครงสร้างเคาน์เตอร์สามารถสรุปได้ดังนี้

5.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทำงานปกติ และหยุดการทำงานแบบที่ 1 ความเค้นสูงสุดเกิดขึ้นที่ตัวดึง Boom (Forestay) ผลการวิเคราะห์โครงสร้างหยุดการทำงานแบบที่ 2 ค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นยังอยู่ในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้น ทั้ง 2 ลักษณะปลอดภัยจากการวิบัติ เนื่องจากความเค้นเกินจุดครากตัวของวัสดุ

5.3 ไม่เกิดการล้าตัวของโครงสร้างเนื่องจากความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่า  $0.5\sigma_u$  ของโครงสร้างถือว่ามีความใช้งานไม่จำกัด [3]

5.1 ระยะกระจัดสูงสุดของโครงสร้างเกิดขึ้นที่ตำแหน่งปลาย Boom คือตำแหน่งที่ 1 ค่าสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่า  $L/180$  ค่าระยะกระจัดที่ยอมรับได้ตามมาตรฐาน AISC/ASD/LRFD [4]

5.4 ผลของการวิเคราะห์ในส่วนของชุดฐานล้อพบว่ามีความปลอดภัยเนื่องจากค่าความเค้นสูงสุดไม่เกินค่าความเค้นที่จุดครากตัวของวัสดุ (น่าจะเกิดเนื่องจากค่า Stress concentration) และมีค่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่างน้อยมาก

5.5 ผลของการวิเคราะห์จุดต่อระหว่าง Boom กับ Girder มีความแข็งแรงเพียงพอต่อการทำงาน มีความปลอดภัยมากเพียงพอ

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณนายสุพล สินธุวิชย์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำในสิ่งที่เป็นประโยชน์ทั้งทางทฤษฎี และทางปฏิบัติด้วยดีเสมอมา

## เอกสารอ้างอิง

1. S.I.GE.-Via Pallamaio., 2006, Structural Calculation and Safety. Revision 1.0
2. Saeed Moaveni., 1999, Finite element analysis theory and application with ANSYS. Prentice-Hall
3. วรสิทธิ์ อังภากรณ์, ชาญ ถนัดงาน, 2545. การออกแบบเครื่องจักรกลเล่ม 1
4. วินิต ซอวีเชียร, วรนิติ ซอวีเชียร, 2550, การออกแบบโครงสร้างเหล็กตามมาตรฐาน AISC/ASD/LRFD