

### บทที่ 3

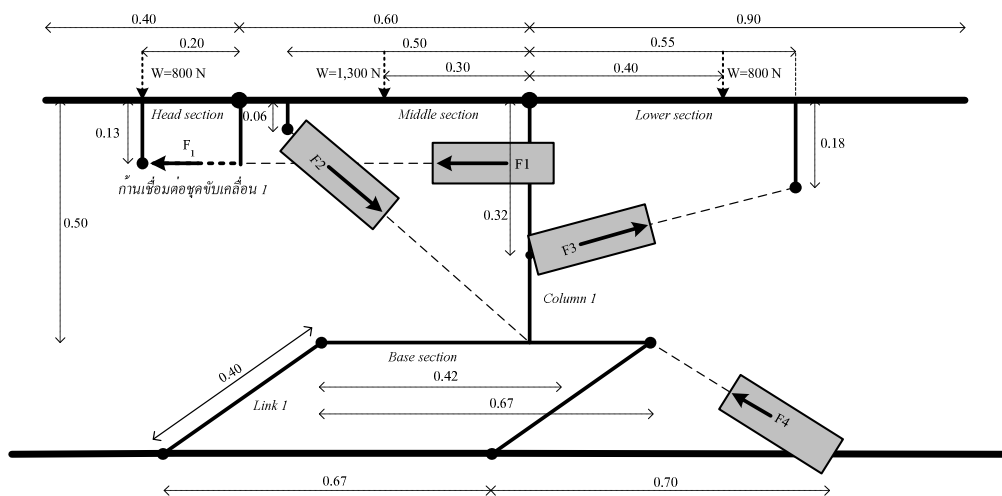
#### การออกแบบและการสร้าง

ขั้นตอนการออกแบบและสร้าง ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการออกแบบและสร้างโครงสร้างเตียงกายภาพบำบัด ขั้นตอนการออกแบบและตั้งชื่อมอเตอร์ ขั้นตอนการออกแบบและสร้างกฎการควบคุมฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic Controller) และขั้นตอนการออกแบบและสร้างระบบวงจรในการควบคุมเตียงกายภาพบำบัด เช่น การออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ (Sensor) การออกแบบและสร้างระบบขับเคลื่อน การออกแบบและสร้างวงจรแหล่งจ่ายไฟ (Power supply) 12 และ 24 โวลต์ เป็นต้น และในขั้นตอนสุดท้ายกล่าวถึงส่วนประกอบโครงสร้างที่สมบูรณ์ รายละเอียดของการออกแบบและสร้างมีดังนี้

#### 3.1 ขั้นตอนการออกแบบและสร้างโครงสร้างเตียงกายภาพบำบัด

##### 3.1.1 การคำนวณโครงสร้างของเตียงกายภาพบำบัด

การออกแบบ โครงสร้างเตียงกายภาพบำบัด แบ่งการออกแบบเป็น 4 ส่วน ดังนี้ ส่วนหัว (Head section) ส่วนกลาง (Middle section) ส่วนล่าง (Lower section) เสา (Column) รองรับทั้ง 3 ส่วน และส่วนฐานรอง (Base section) โดยมีรายละเอียดของตำแหน่งและขนาดของแรงในแต่ละส่วน แสดงดังภาพประกอบ 3-1



ภาพประกอบ 3-1 ระยะและแรงที่กระทำต่อเตียงกายภาพบำบัด

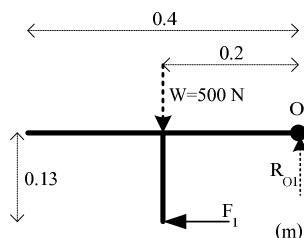
จากภาพประกอบ 3-1 กำหนดให้

- F1 คือ แรงที่ชุดขับเคลื่อน 1 กระทำต่อส่วนหัว (Head section)
- $F_1$  คือ แรงที่ก้านเชื่อมต่อชุดที่ 1 กระทำต่อส่วนหัว (Head section)
- F2 คือ แรงที่ชุดขับเคลื่อน 2 กระทำต่อส่วนกลาง (Middle section)
- F3 คือ แรงที่ชุดขับเคลื่อน 3 กระทำต่อส่วนล่าง (Lower section)
- F4 คือ แรงที่ชุดขับเคลื่อน 4 กระทำต่อส่วนฐาน (Base section)
- เสา 1 (Column 1) คือ เสาที่รับน้ำหนักระบบขับเคลื่อนและโครงสร้างทั้ง 3 ชั้นส่วน (Head section Middle section และ Lower section) ของเตียง
- ก้านเชื่อมต่อ 1 (Link 1) คือ ชิ้นส่วนเชื่อมต่อ (Link) ที่ช่วยจำกัดให้การเคลื่อนที่ของส่วนฐาน (Base section) อยู่ในระนาบ
- น้ำหนักคนที่กระทำต่อส่วนหัว (Head section) = 300 นิวตัน
- น้ำหนักคนที่กระทำต่อส่วนกลาง (Middle section) = 1,000 นิวตัน
- น้ำหนักคนที่กระทำต่อส่วนล่าง (Lower section) = 600 นิวตัน
- จะได้ว่า แรงกดที่กระทำต่อส่วนหัว = น้ำหนักคน + น้ำหนักโครงสร้าง (200 นิวตัน)  
= 300 + 200 = 500 นิวตัน
- จะได้ว่า แรงกดที่กระทำต่อส่วนกลาง = น้ำหนักคน + น้ำหนักโครงสร้าง (300 นิวตัน)  
= 1,000 + 300 = 1,300 นิวตัน
- จะได้ว่า แรงกดที่กระทำต่อส่วนล่าง = น้ำหนักคน + น้ำหนักโครงสร้าง (300 นิวตัน)  
= 600 + 300 = 900 นิวตัน

### 1) การคำนวณส่วนหัว (Head section)

ขอบเขตการเคลื่อนที่ของส่วนหัว (Head section) อยู่ในช่วง  $30^\circ$  ถึง  $-30^\circ$  ดังนั้นการคำนวณเพื่อหา F1 ที่มีค่ามากที่สุด ( $F_{1_{max}}$ ) เพื่อนำไปคำนวณหาขนาดของมอเตอร์ต้องแบ่งการคำนวณเป็น 3 กรณี คือตำแหน่งการเคลื่อนที่ส่วนหัว (Head section) ที่อยู่ที่  $30^\circ$ ,  $0^\circ$  และ  $-30^\circ$  องศาตามลำดับ โดยตำแหน่งของแรงที่กระทำ แสดงดังภาพประกอบ 3-2 พิจารณาแรงที่กระทำต่อส่วนหัว (Head section) ได้แก่

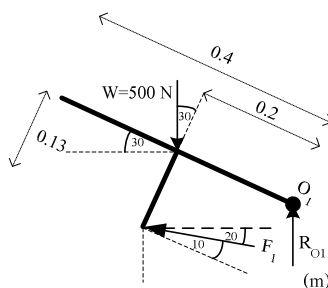
- แรงกดที่กระทำต่อชิ้นส่วนของส่วนหัว (Head section) 500 นิวตัน
- F1 คือแรงที่ชุดขับเคลื่อน 1 กระทำต่อส่วนหัว (Head section)
- แรง  $F_1$  คือแรงที่ก้านเชื่อมต่อชุดขับเคลื่อนที่ 1 กระทำต่อส่วนหัว (Head section)
- $R_{O1}$  แรงปฏิกิริยา ณ จุด  $O_1$



ภาพประกอบ 3-2 Free body diagram ของส่วนหัว (Head Section)

การคำนวณหาค่า  $F_1$  ที่มีค่ามากที่สุด ( $F_{1_{max}}$ ) พิจารณาจาก 3 กรณี ดังนี้

1.1) หาแรง  $F_1$  กรณีที่ส่วนหัว (Head Section) เคลื่อนที่มุม  $30^\circ$  โดยองค์ประกอบของแรงที่กระทำต่อโครงสร้างส่วนหัว (Head Section) แสดงดังภาพประกอบ 3-3



ภาพประกอบ 3-3 Free body diagram ของ Head section ณ ตำแหน่ง  $30^\circ$

หา  $F_1$  จากการพิจารณาโมเมนต์รอบจุด  $O_1$  จะได้

$$(500 \cos 30^\circ \times 0.2) + (F_1 \sin 10^\circ \times 0.2) = F_1 \cos 10^\circ \times 0.13$$

$$F_1 = 928.26 \text{ N}$$

พิจารณาผลรวมแรงในแนวตั้งเป็นศูนย์

$$500 - F_1 \sin 20^\circ = R_{O1}$$

$$500 - 928.26 \sin 20^\circ = R_{O1}$$

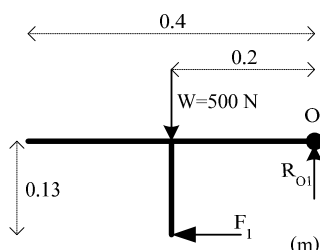
$$R_{O1} = 182.52 \text{ N}$$

เมื่อพิจารณาแรง  $F_1$  (แรงที่ชุดขับเคลื่อน 1 กระทำต่อ Head section) เป็นแรงที่อยู่ในแนวระนาบ ดังนั้นจำเป็นต้องแตกแรงที่คำนวณได้ ( $F_1$ ) ให้อยู่ในแนวระนาบได้ดังนี้

$$F_1 = 928.26 \cos 20^\circ = 872.28 \text{ N}$$

ดังนั้น  $F_1$  หรือแรงที่ชุดขับเคลื่อน (1) กระทำต่อ Head section มีค่า 872.28 นิวตัน

1.2) หาแรง  $F_1$  กรณีที่ส่วนหัว (Head section) เคลื่อนที่มุม  $0^\circ$  โดยองค์ประกอบของแรงที่กระทำต่อโครงสร้างส่วนหัว (Head section) แสดงดังภาพประกอบ 3-4



ภาพประกอบ 3-4 Free body diagram ของส่วนหัว (Head section) ณ ตำแหน่ง  $0^\circ$

หา  $F_1$  จากการพิจารณาโมเมนต์รอบจุด  $O_1$  จะได้ว่า

$$500 \times 0.2 = F_1 \times 0.13$$

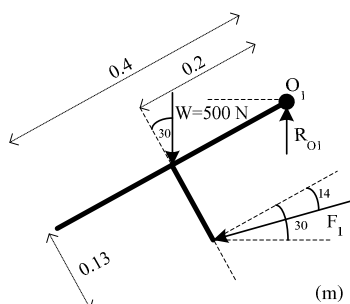
$$F_1 = 769.23 \text{ N}$$

พิจารณาผลรวมแรงในแนวตั้งเป็นศูนย์

$$R_{O1} = 500 \text{ N}$$

แรง  $F_1$  คือแรงที่ชุดขับเคลื่อน 1 กระทำต่อส่วนหัว (Head section) มีค่าเท่ากับแรง  $F_1$  เนื่องจากแรงที่คำนวณได้เป็นแรงที่อยู่ในแนวระนาบ ดังนั้น  $F_1$  หรือแรงที่ชุดขับเคลื่อน 1 กระทำต่อส่วนหัว (Head section) มีค่าเท่ากับ 769.23 นิวตัน

1.3) หาแรง  $F_1$  กรณีที่ส่วนหัว (Head section) เคลื่อนที่มุม  $-30^\circ$  โดยองค์ประกอบของแรงที่กระทำต่อโครงสร้างส่วนหัว (Head section) แสดงดังภาพประกอบ 3-5



ภาพประกอบ 3-5 Free body diagram ของส่วนหัว (Head section) ณ ตำแหน่ง  $-30^\circ$

หา  $F_1$  จากการพิจารณาโมเมนต์รอบจุด  $O_1$  จะได้

$$(500 \cos 30^\circ \times 0.2) = (F_1 \cos 14^\circ \times 0.13) + (F_1 \sin 14^\circ \times 0.2)$$

$$F_1 = 496.22 \text{ N}$$

พิจารณาผลรวมแรงในแนวตั้งเป็นศูนย์

$$500 + F_1 \sin 16^\circ = R_{O_1}$$

$$R_{O_1} = 636.78 \text{ N}$$

เมื่อพิจารณาแรง  $F_1$  (แรงที่ชุดขับเคลื่อน 1 กระทำต่อส่วนหัว (Head section)) เป็นแรงที่อยู่ในแนวระนาบตั้งนั้นจำเป็นต้องแตกแรงที่คำนวณได้ ( $F_1$ ) ให้อยู่ในแนวระนาบได้ดังนี้

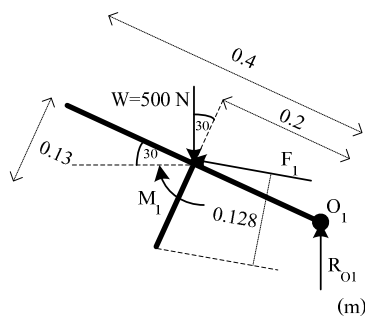
$$F_1 = 636.78 \cos 16^\circ = 476.99 \text{ N}$$

ดังนั้น  $F_1$  หรือแรงที่ชุดขับเคลื่อน 1 กระทำต่อส่วนหัว (Head section) มีค่า 476.99 นิวตัน

เมื่อพิจารณาทั้ง 3 กรณี พบว่าค่าของ  $F_1$  ที่มีค่ามากที่สุด ( $F_{1\max}$ ) มีค่า 928.26 นิวตัน ในกรณีที่ส่วนหัว (Head section) เคลื่อนที่มุม  $30^\circ$  องค์ประกอบของแรงที่กระทำต่อส่วนหัว (Head section) แสดงดังภาพประกอบ 3-3

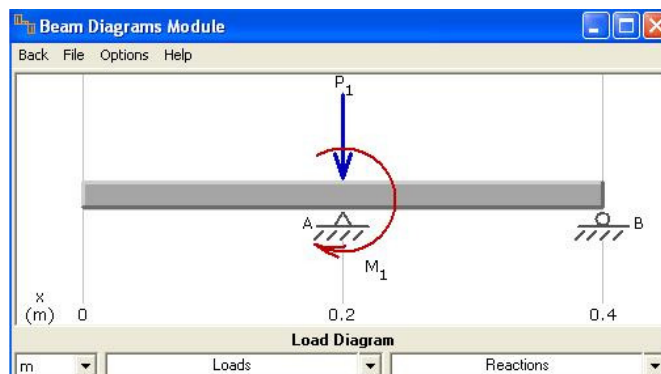
หลังจากที่ได้คำนวณหาค่าของ  $F_1$  ที่มีค่ามากที่สุด ( $F_{1\max}$ ) แล้ว จากนั้นต้องออกแบบคานที่รับน้ำหนักส่วนหัว (Head section) ซึ่งจะพิจารณาระยะการโก่ง (Deflection) และความชัน (Slope) ที่ตำแหน่งใดๆ บนคานว่ามีขนาดที่ยอมรับได้หรือไม่

การคำนวณระยะการโก่ง (Deflection) และความชัน (Slope) ที่ตำแหน่งใดๆ บนคานใช้โปรแกรม MDSolids 30 ในการคำนวณและวิเคราะห์เพื่อความสะดวกในการเขียน Free body diagram ในโปรแกรมต้องย้ายแรง  $F_{1\max}$  ให้กระทำบนคานตามทฤษฎีการย้ายแรง แสดงดังภาพประกอบ 3-6



ภาพประกอบ 3-6 Free body diagram ของส่วนหัว (Head section) หลังการย้ายแรง

ผลการรัน (Run) โปรแกรม แสดงดังภาพประกอบ 3-7 ถึง 3-12

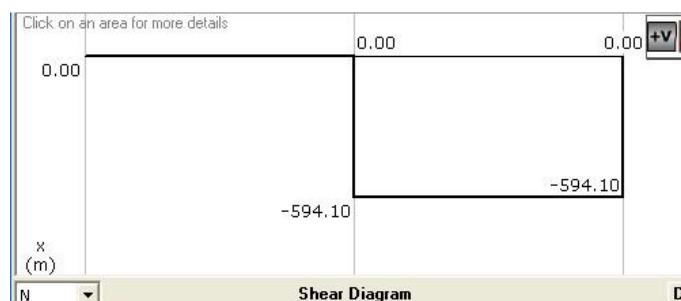


ภาพประกอบ 3-7 Free body diagram ของส่วนหัว (Head section)

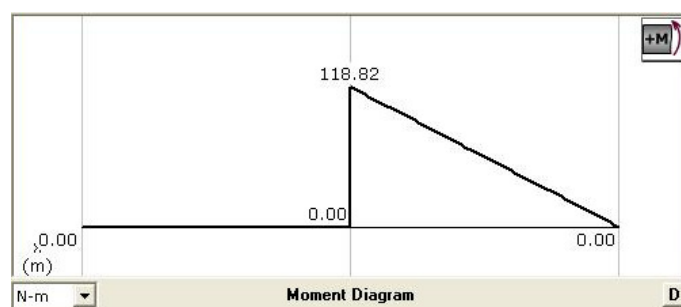
จากภาพประกอบ 3-7 รายละเอียดแรงที่กระทำมีดังนี้

$$P_1 = 500 \cos 30^\circ + (F_{\text{imax}}) \sin 10^\circ = 594.20 \text{ N}$$

$$M_1 = (F_{\text{imax}} \times 0.128) = 118.82 \text{ N.m}$$



ภาพประกอบ 3-8 แรงเฉือนที่ตำแหน่งใดๆ (Shear Diagram) ของคาน



ภาพประกอบ 3-9 โมเมนต์ดัด (Bending moment diagram) ในคานที่ตำแหน่งใดๆ

จากแผนภาพ โมเมนต์ในภาพประกอบ 3-9 พบว่า โมเมนต์สูงสุดเป็น 118.82 นิวตันเมตร

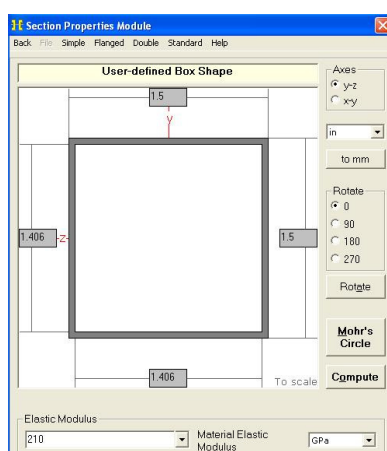
คำนวณหาค่าความเค้น (Stress) จากสูตร  $\sigma = \frac{MY}{I}$  (3-1)

$\sigma$  คือ ค่าความเค้น (Stress) ที่เกิดขึ้น

$I$  คือ โมเมนต์ความเฉื่อย

$M$  คือ โมเมนต์ดัด (Bending moment) สูงสุดที่กระทำต่อคาน

$Y$  คือ ระยะห่างจาก Neutral axis ไปยังจุดที่เราพิจารณา



ภาพประกอบ 3-10 คุณสมบัติเหล็กกล่องที่ใช้ในการออกแบบคาน

เลือกเหล็กกล่องที่มีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส กว้าง 1.5 นิ้ว สูง 1.5 นิ้วหนา 0.047 นิ้ว

โมเมนต์ความเฉื่อยของคาน  $I = 3.96 \times 10^{-8}$

แทนค่าในสมการที่(3-1) จะได้  $\sigma = \frac{118.82 \times 0.019}{3.96 \times 10^{-8}} = 57,009,595.96 \text{ N/m}^2$

จะได้  $\sigma = 57.01 \text{ MN/m}^2$

คิดค่าเพื่อความปลอดภัย (Safety factor:  $\mu$ ) = 3.5

จะได้  $\sigma_s = 57.01 \times 3.5 = 199.54 \text{ MN/m}^2$

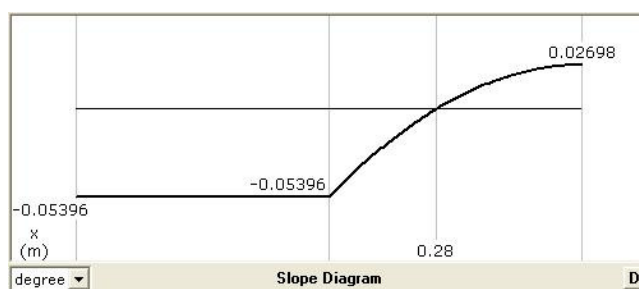
นำค่า  $\sigma_s$  (ค่าความเค้นสูงสุด  $\text{Stress}_{\text{max}}$ ) ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่า Yield strength ของเหล็ก

เปิดตารางคุณสมบัติเหล็กสำหรับผู้รับเหมาก่อสร้างและวิศวกร

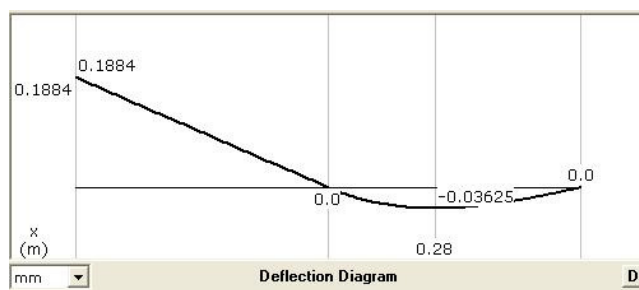
พบว่าเหล็ก St 37 มีค่า	Elastic modulus	210,000	$\text{MN/m}^2$
	Yield strength	240	$\text{MN/m}^2$
	Shear strength	140	$\text{MN/m}^2$

จากตารางคุณสมบัติเหล็กสำหรับผู้รับเหมาก่อสร้างและวิศวกรพบว่า ค่า Yield strength มีค่ามากกว่าค่า  $\text{Stress}_{\max}$  ที่เกิดขึ้น ดังนั้นสามารถเลือกใช้เหล็ก St 37 ที่มีขนาดหน้าตัด กว้าง 1.5 นิ้ว สูง 1.5 นิ้ว หน้า 0.047 นิ้วได้

นำค่าที่ออกแบบไปพิจารณาค่าความชัน (Slope) และระยะโก่ง (Deflection) ของคานที่ตำแหน่งใด เพื่อหาค่าที่มากที่สุดแล้วตรวจสอบดูว่ายอมรับได้หรือไม่ ซึ่งผลการทดสอบโปรแกรมแสดงดังภาพประกอบ 3-11 ถึง 3-12



ภาพประกอบ 3-11 ความชัน (Slope diagram) ที่ตำแหน่งใดๆ บนคาน



ภาพประกอบ 3-12 ระยะโก่ง (Deflection diagram) ที่ตำแหน่งใดๆบนคาน

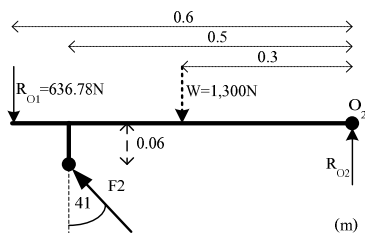
ผลการทดสอบพบว่า ระยะโก่งสูงสุดอยู่ที่ปลายคาน แสดงดังภาพประกอบ 3-12 โดยมีระยะการโก่ง 0.1884 มิลลิเมตร ซึ่งถือว่ายอมรับได้



**2) การคำนวณส่วนกลาง (Middle section)**

ขอบเขตการเคลื่อนที่ของส่วนกลาง (Middle section) อยู่ในช่วง  $0^\circ$  ถึง  $-25^\circ$  ดังนั้นการคำนวณหา  $F_2$  ที่มีค่ามากที่สุด ( $F_{2_{max}}$ ) เพื่อนำไปคำนวณหาขนาดของมอเตอร์ต้องแบ่งการคำนวณเป็น 2 กรณีคือ ตำแหน่งการเคลื่อนที่อยู่ที่  $0^\circ$  และ  $-25^\circ$  ตำแหน่งของแรงที่กระทำแสดงดังภาพประกอบ 3-13 พิจารณาแรงที่กระทำต่อส่วนกลาง (Middle section) ได้แก่

- แรงกดที่กระทำต่อชิ้นส่วนของส่วนกลาง (Middle section) 1,300 นิวตัน
- แรง  $F_2$  คือแรงขับของชุดขับเคลื่อน 2 กระทำต่อส่วนกลาง (Middle section)
- $R_{O_1}$  แรงปฏิกิริยามากที่สุดที่จุด  $O_1$  มีค่า 636.78 นิวตัน (ผลของแรงกดอันเนื่องมาจากแรงกระทำจากส่วนหัว)
- $R_{O_2}$  แรงปฏิกิริยา ณ จุด  $O_2$

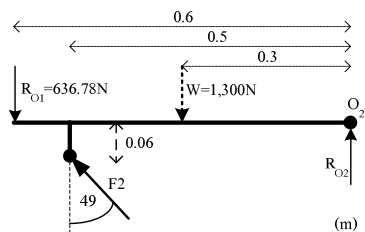


ภาพประกอบ 3-13 Free body diagram ของส่วนกลาง (Middle section)

การคำนวณหาค่า  $F_2$  ที่มีค่ามากที่สุด ( $F_{2_{max}}$ ) ได้ดังนี้

2.1) หาแรง  $F_2$  กรณีที่ส่วนกลาง (Middle section) เคลื่อนที่มุม  $0^\circ$  แสดงดัง

ภาพประกอบ 3-14



ภาพประกอบ 3-14 Free body diagram ของส่วนกลาง (Middle section) ณ ตำแหน่ง  $0^\circ$

หา  $F_2$  จากการพิจารณาโมเมนต์รอบจุด  $O_2$  จะได้

$$(636.78 \times 0.6) + (1,300 \times 0.3) = (F_2 \cos 49^\circ \times 0.5) + (F_2 \sin 49^\circ \times 0.06)$$

$$F_2 = 2,068.16 \text{ N}$$

พิจารณาผลรวมแรงในแนวตั้งเป็นศูนย์

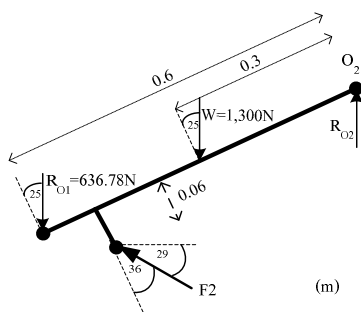
$$636.78 + 1,300 - F_2 \cos 49^\circ = R_{O_2}$$

$$636.78 + 1,300 - 2,068.16 \cos 49^\circ = R_{O_2}$$

$$R_{O_2} = 579.95$$

ดังนั้น  $F_2$  หรือแรงที่ชุดขับเคลื่อน 2 กระทำต่อส่วนกลาง (Middle section) มีค่า 2,068.16 นิวตัน

2.2) หาแรง  $F_2$  กรณีที่ส่วนกลาง (Middle section) เคลื่อนที่มุม  $-25^\circ$  แสดงด้วยภาพประกอบ 3-15



ภาพประกอบ 3-15 Free body diagram ของส่วนกลาง (Middle section) ณ ตำแหน่ง  $-25^\circ$

หา  $F_2$  จากการพิจารณาโมเมนต์รอบจุด  $O_2$  จะได้

$$(636.78 \cos 25^\circ \times 0.6) + (1,300 \cos 25^\circ \times 0.3) = (F_2 \cos 36^\circ \times 0.5) + (F_2 \sin 36^\circ \times 0.06)$$

$$F_2 = 1,591.11 \text{ N}$$

พิจารณาผลรวมแรงในแนวตั้งเป็นศูนย์

$$636.78 + 1,300 - F_2 \sin 29^\circ = R_{O_2}$$

$$636.78 + 1,300 - 1,591.11 \sin 29^\circ = R_{O_2}$$

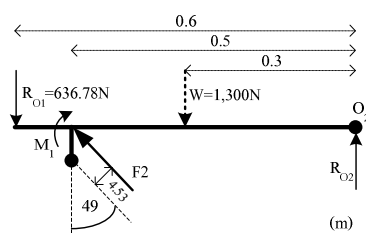
$$R_{O_2} = 1,165.39 \text{ N}$$

ดังนั้น  $F_2$  หรือแรงที่ชุดขับเคลื่อน 2 กระทำต่อส่วนกลาง (Middle section) มีค่า 1,570.65 นิวตัน

เมื่อพิจารณาทั้ง 2 กรณีพบว่า ค่าของ  $F_2$  ที่มีค่ามากที่สุด ( $F_{2_{max}}$ ) มีค่า 2,068.16 นิวตัน ในกรณีที่ส่วนกลาง (Middle section) เคลื่อนที่มุม  $0^\circ$  องค์กรประกอบของแรงที่กระทำต่อโครงสร้างส่วนกลาง (Middle section) แสดงดังภาพประกอบ 3-14

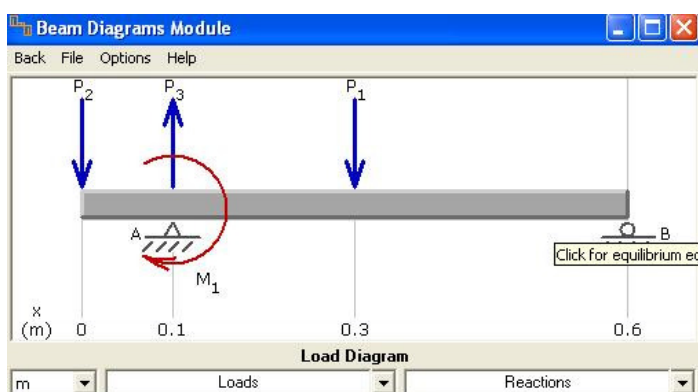
หลังจากที่ได้คำนวณหาค่าของ  $F_2$  ที่มีค่ามากที่สุด ( $F_{2_{max}}$ ) จากนั้นต้องออกแบบคานที่รับน้ำหนักของส่วนกลาง (Middle section) ซึ่งจะพิจารณาระยะการโก่ง (Deflection) และความชัน (Slope) ที่ตำแหน่งใดๆ บนคานว่ามีขนาดที่ยอมรับได้หรือไม่

การคำนวณระยะการโก่ง (Deflection) และความชัน (Slope) ที่ตำแหน่งใดๆ บนคาน ใช้โปรแกรม MDSolids 30 ในการคำนวณและวิเคราะห์เพื่อความสะดวกในการเขียน Free body diagram ในโปรแกรมต้องย้ายแรง  $F_{2_{max}}$  ให้กระทำบนคานตามทฤษฎีการย้ายแรง แสดงดังภาพประกอบ 3-16



ภาพประกอบ 3-16 Free body diagram ของส่วนกลาง (Middle section) หลังย้ายแรง

ผลการรัน (Run) โปรแกรม แสดงดังภาพประกอบ 3-17 ถึง 3-23



ภาพประกอบ 3-17 Free body diagram ของส่วนกลาง (Middle section)

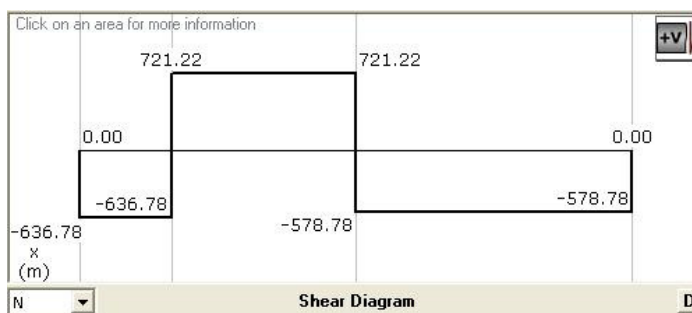
จากภาพประกอบ 3-17 รายละเอียดแรงที่กระทำดังนี้

$$P_1 = 1,300 \text{ N}$$

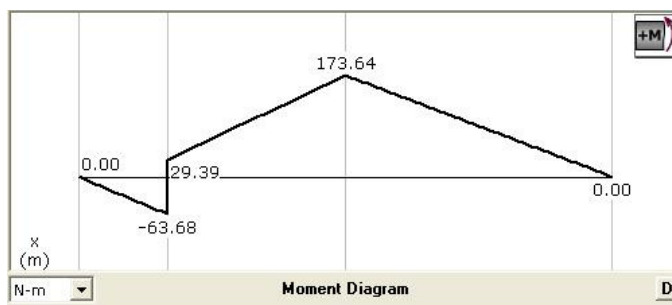
$$P_2 = 636.78 \text{ N}$$

$$P_3 = F_{2_{\max}} \cos 49^\circ = 1,356.84 \text{ N}$$

$$M_1 = (F_{2_{\max}} \times 0.045) = 93.07 \text{ N.m}$$

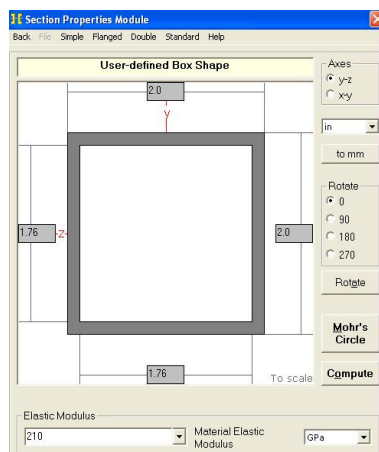


ภาพประกอบ 3-18 แรงเฉือนที่ตำแหน่งใดๆ (Shear Diagram) ของคาน



ภาพประกอบ 3-19 โมเมนต์ดัด (Bending moment diagram) ในคานที่ตำแหน่งใดๆ

จากแผนภาพโมเมนต์ในภาพประกอบ 3-19 พบว่า โมเมนต์สูงสุดเป็น 173.64 N.m  
ออกแบบหน้าตัดคาน แสดงดังภาพประกอบ 3-20



ภาพประกอบ 3-20 คุณสมบัติเหล็กกล่องที่ใช้ในการออกแบบคาน

เลือกเหล็กกล่องที่มีหน้าตัดสี่เหลี่ยม 15 กว้าง 2 นิ้ว สูง 2 นิ้วหนา 0.12 นิ้ว

โมเมนต์ความเฉื่อยของคาน  $I = 2.073 \times 10^{-7}$

แทนค่าในสมการที่ (3-1) จะได้  $\sigma = \frac{173.64 \times 0.0254}{2.073 \times 10^{-7}} = 21,275,716.35 \text{ N/m}^2$

จะได้  $\sigma = 21.28 \text{ MN/m}^2$

คิดค่าเพื่อความปลอดภัย (Safety factor:  $\mu$ ) = 5

(เนื่องมาจากส่วนกลาง (Middle section) เป็นส่วนที่รับน้ำหนักมากที่สุดมีโอกาสที่จะเสียหายจึงเลือกใช้ค่าเพื่อความปลอดภัย Safety factor ( $\mu$ ) = 5 เพื่อป้องกันกรณีที่มีน้ำหนักกดลงมากกว่าที่กำหนดไว้)

จะได้  $\sigma_s = 21.28 \times 5 = 106.4 \text{ MN/m}^2$

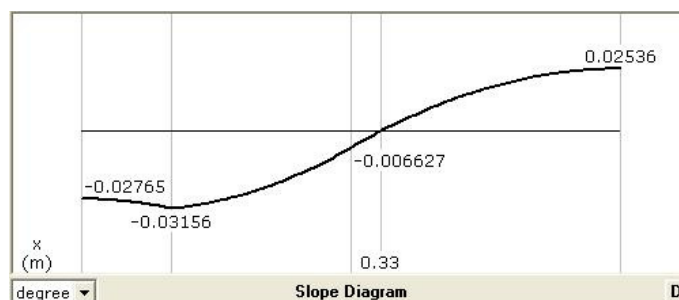
นำค่า  $\sigma_s$  (ค่าความเค้นสูงสุด  $\text{Stress}_{\text{max}}$ ) ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่า Yield strength ของเหล็ก

เปิดตารางคุณสมบัติเหล็กสำหรับผู้รับเหมาก่อสร้างและวิศวกร

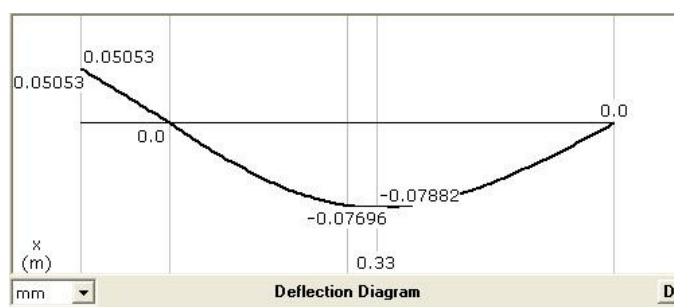
พบว่าเหล็ก St 37 มีค่า	Elastic modulus	210,000	$\text{MN/m}^2$
	Yield strength	240	$\text{MN/m}^2$
	Shear strength	140	$\text{MN/m}^2$

จากตารางคุณสมบัติเหล็กสำหรับผู้รับเหมาก่อสร้างและวิศวกรพบว่า ค่า Yield strength มีค่ามากกว่าค่า  $\text{Stress}_{\text{max}}$  ที่เกิดขึ้น ดังนั้น สามารถเลือกใช้เหล็ก St 37 มีขนาดหน้าตัด กว้าง 2 นิ้ว สูง 2 นิ้วหนา 0.12 นิ้วได้

นำค่าที่ออกแบบไปพิจารณาค่าความชัน (Slope) และระยะโก่ง (Deflection) ของคานที่ตำแหน่งใด เพื่อหาค่าที่มากที่สุดแล้วตรวจสอบดูว่ายอมรับได้หรือไม่ ซึ่งผลการทดสอบโปรแกรมแสดงดังภาพประกอบ 3-21 ถึง 3-22



ภาพประกอบ 3-21 ความชัน (Slope diagram) ที่ตำแหน่งใดๆ บนคาน



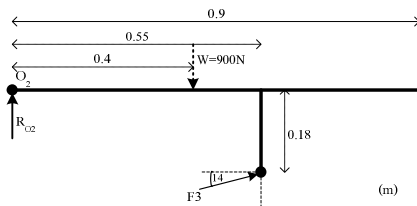
ภาพประกอบ 3-22 ระยะโก่ง (Deflection diagram) ที่ตำแหน่งใดๆ บนคาน

ผลการทดสอบพบว่า ระยะโก่งสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่ง 0.33 เมตร ดังภาพประกอบ 3-22 โดยมีระยะการโก่ง 0.079 มิลลิเมตร ซึ่งถือว่ายอมรับได้

### 3) การคำนวณส่วนล่าง (Lower section)

ขอบเขตการเคลื่อนที่ของส่วนล่าง (Lower section) อยู่ในช่วง  $60^\circ$  ถึง  $-35^\circ$  ดังนั้นการคำนวณเพื่อหา  $F_3$  ที่มีค่ามากที่สุด ( $F_{3_{max}}$ ) เพื่อนำไปคำนวณหาขนาดของมอเตอร์ ต้องแบ่งการคำนวณเป็น 3 กรณี คือตำแหน่งการเคลื่อนที่อยู่ที่  $60^\circ$ ,  $0^\circ$  และ  $-35^\circ$  ตามลำดับ ตำแหน่งของแรงที่กระทำได้ แสดงดังภาพประกอบ 3-23 พิจารณาแรงที่กระทำต่อส่วนล่าง (Lower section) ได้แก่

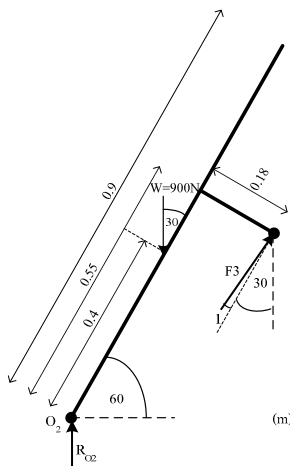
- แรงกดที่กระทำต่อส่วนล่าง (Lower section) 900 นิวตัน
- แรง  $F_3$  คือแรงที่หูดขับเคลื่อน 3 กระทำต่อส่วนล่าง (Lower section)
- $R_{O_2}$  แรงปฏิกิริยา ณ จุด  $O_2$



ภาพประกอบ 3-23 Free body diagram ของส่วนล่าง (Lower section)

การคำนวณหาค่า F3 ที่มีค่ามากที่สุด ( $F3_{max}$ ) พิจารณาจาก 3 กรณีดังนี้

3.1) หาแรง F3 กรณีที่ส่วนล่าง (Lower section) เคลื่อนที่มุม  $60^\circ$  โดยองค์ประกอบของแรงที่กระทำต่อโครงสร้างส่วนล่าง (Lower section) แสดงดังภาพประกอบ 3-24



ภาพประกอบ 3-24 Free body diagram ของส่วนล่าง (Lower section) ณ ตำแหน่ง  $60^\circ$

หา F3 จากการพิจารณาโมเมนต์รอบจุด  $O_2$  จะได้

$$(900 \sin 30^\circ \times 0.4) + (F3 \sin 1^\circ \times 0.55) = F3 \cos 1^\circ \times 0.18$$

$$F3 = 1,056.50 \text{ N}$$

พิจารณาผลรวมแรงในแนวตั้งเป็นศูนย์

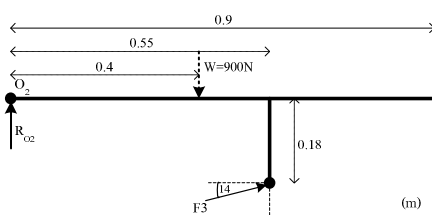
$$900 - F3 \cos 31^\circ = R_{O2}$$

$$900 - 1,056.50 \cos 31^\circ = R_{O2}$$

$$R_{O2} = -5.59 \text{ N}$$

ดังนั้น  $F_3$  หรือแรงชุดขับเคลื่อน 3 กระทำต่อส่วนล่าง (Lower section) มีค่า 1,056.50 นิวตัน และแรงปฏิกิริยา ณ จุด  $O_2$  ( $R_{O_2}$ ) มีค่า 5.59 นิวตัน ทิศทางตรงข้ามกับใน Free body diagram ดังภาพประกอบ 3-24

3.2) หาแรง  $F_3$  กรณีที่ส่วนล่าง (Lower section) เคลื่อนที่มุม  $0^\circ$  โดยองค์ประกอบของแรงที่กระทำต่อโครงสร้างส่วนล่าง (Lower section) แสดงดังภาพประกอบ 3-25



ภาพประกอบ 3-25 Free body diagram ของส่วนล่าง (Lower section) ณ ตำแหน่ง  $0^\circ$

หา  $F_3$  จากการพิจารณาโมเมนต์รอบจุด  $O_2$  จะได้

$$900 \times 0.4 = (F_3 \cos 14^\circ \times 0.18) + (F_3 \sin 14^\circ \times 0.55)$$

$$F_3 = 1,169.93 \text{ N}$$

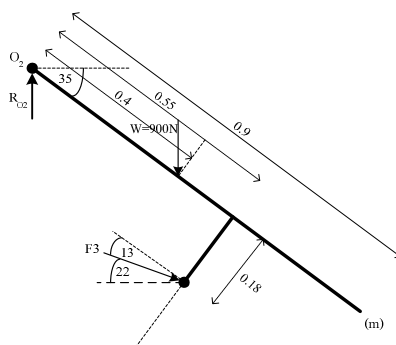
พิจารณาผลรวมแรงในแนวตั้งเป็นศูนย์

$$R_{O_2} = 900 - F_3 \sin 14^\circ$$

$$R_{O_2} = 616.97 \text{ N}$$

ดังนั้น  $F_3$  หรือแรงที่ชุดขับเคลื่อน 3 กระทำต่อส่วนล่าง (Lower section) มีค่า 1,169.93 นิวตัน

3.3) หาแรง  $F_3$  กรณีที่ส่วนล่าง (Lower section) เคลื่อนที่มุม  $-35^\circ$  โดยองค์ประกอบของแรงที่กระทำต่อโครงสร้างส่วนล่าง (Lower section) แสดงดังภาพประกอบ 3-26



ภาพประกอบ 3-26 Free body diagram ของส่วนล่าง (Lower section) ณ ตำแหน่ง  $-35^\circ$



หา F3 จากการพิจารณาโมเมนต์รอบจุด O<sub>2</sub> จะได้

$$(900 \cos 35^\circ \times 0.4) = (F3 \cos 13^\circ \times 0.18) + (F3 \sin 13^\circ \times 0.55)$$

$$F3 = 985.91 \text{ N}$$

พิจารณาผลรวมแรงในแนวตั้งเป็นศูนย์

$$900 + F3 \sin 22^\circ = R_{O_2}$$

$$900 + 985.91 \sin 22^\circ = R_{O_2}$$

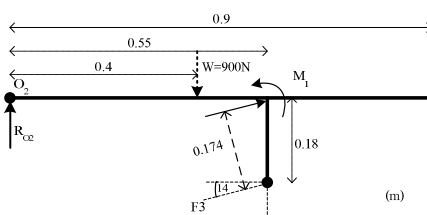
$$R_{O_2} = 1,269.33 \text{ N}$$

ดังนั้น F3 หรือแรงที่จุดขับเคลื่อน 3 กระทำต่อส่วนล่าง (Lower section) มีค่า 876.36 นิวตัน

เมื่อพิจารณาทั้ง 3 กรณีพบว่า ค่าของ F3 ที่มีค่ามากที่สุด ( $F3_{\max}$ ) มีค่า 1,169.93 นิวตัน ในกรณีที่ส่วนล่าง (Lower section) เคลื่อนที่มุม  $0^\circ$  องค์กรประกอบของแรงที่กระทำต่อโครงสร้างส่วนล่าง (Lower section) แสดงดังภาพประกอบ 3-25

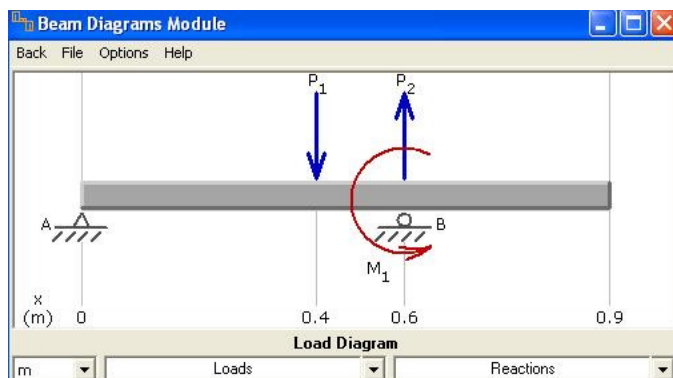
หลังจากที่ได้คำนวณหาค่าของ F3 ที่มีค่ามากที่สุด ( $F3_{\max}$ ) จากนั้นต้องออกแบบคานที่รับน้ำหนักของส่วนล่าง (Lower section) ซึ่งจะพิจารณาระยะการโก่ง (Deflection) และความชัน (Slope) ที่ตำแหน่งใดๆบนคาน ว่ามีขนาดที่ยอมรับได้หรือไม่

การคำนวณระยะการโก่ง (Deflection) และความชัน (Slope) ที่ตำแหน่งใดๆบนคาน ใช้โปรแกรม MDSolids30 ในการคำนวณและวิเคราะห์เพื่อความสะดวกในการเขียน Free body diagram ในโปรแกรมต้องย้ายแรง  $F3_{\max}$  ให้กระทำบนคานตามทฤษฎีการย้ายแรง แสดงดังภาพประกอบ 3-27



ภาพประกอบ 3-27 Free body diagram ของส่วนล่าง (Lower section) หลังย้ายแรง

ผลการรัน (Run) โปรแกรม แสดงดังภาพประกอบ 3-28 ถึง 3-33



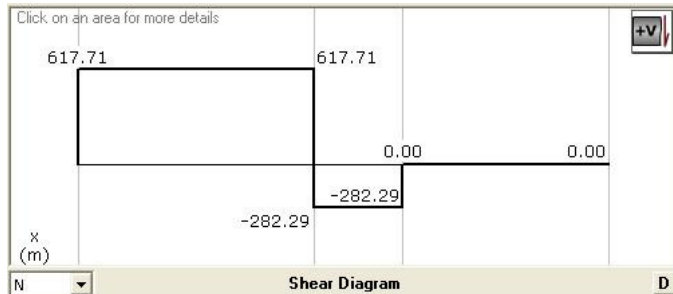
ภาพประกอบ 3-28 Free body diagram ของส่วนล่าง (Lower section)

จากภาพประกอบ 32 รายละเอียดแรงที่กระทำมีดังนี้

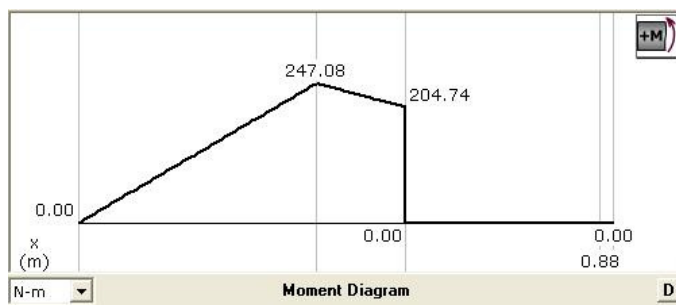
$$P_1 = 900 \text{ N}$$

$$P_2 = F_{3_{\max}} \sin 14^\circ = 283.03 \text{ N}$$

$$M_1 = F_{3_{\max}} \times 0.175 = 204.74 \text{ N.m}$$

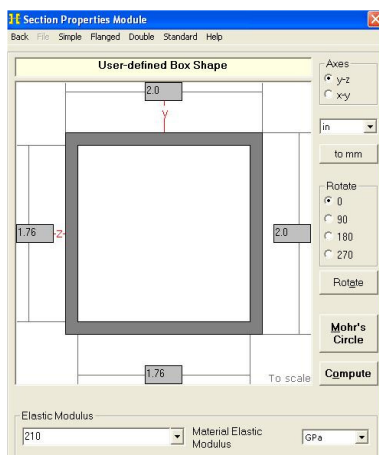


ภาพประกอบ 3-29 แรงเฉือนที่ตำแหน่งใดๆ (Shear Diagram) ของคาน



ภาพประกอบ 3-30 โมเมนต์ดัด (Bending moment diagram) ในคานที่ตำแหน่งใดๆ

จากแผนภาพโมเมนต์ในภาพประกอบ 3-30 พบว่า โมเมนต์สูงสุดเป็น 247.08 นิวตันเมตร  
ออกแบบหน้าตัดคาน แสดงดังภาพประกอบ 3-31



ภาพประกอบ 3-31 คุณสมบัติเหล็กกล่องที่ใช้ในการออกแบบคาน

เลือกเหล็กกล่องที่มีหน้าตัดสี่เหลี่ยม ตามรูปที่ 15 กว้าง 2 นิ้ว สูง 2 นิ้วหนา 0.12 นิ้ว

โมเมนต์ความเฉื่อยของคาน

$$I = 2.073 \times 10^{-7}$$

แทนค่าในสมการที่ (3-1) จะได้

$$\sigma = \frac{247.08 \times 0.0254}{2.073 \times 10^{-7}} = 30,274,153.40 \text{ N/m}^2$$

จะได้

$$\sigma = 30.27 \text{ MN/m}^2$$

คิดค่าเพื่อความปลอดภัย (Safety factor:  $\mu$ ) = 5

(เนื่องจากส่วนของส่วนล่าง (Lower section) เป็นส่วนที่รับน้ำหนักมากในกรณีที่เคลื่อนที่ไปยังมุม  $-35^\circ$  มีโอกาสที่จะเสียหายจึงเลือกใช้ค่าเพื่อความปลอดภัย (Safety factor:  $\mu$ ) = 5 เพื่อป้องกันกรณีที่มีน้ำหนักกดลงมากกว่าที่กำหนดไว้)

จะได้

$$\sigma_s = 30.27 \times 5 = 151.35 \text{ MN/m}^2$$

นำค่า  $\sigma_s$  (ค่าความเค้นสูงสุด  $\text{Stress}_{\max}$ ) ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่า Yield strength ของเหล็ก

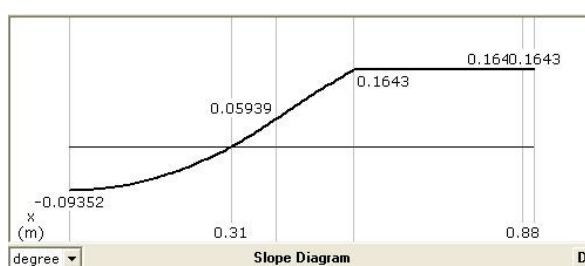
เปิดตารางคุณสมบัติเหล็กสำหรับผู้รับเหมาก่อสร้างและวิศวกร

พบว่าเหล็ก St 37 มีค่า

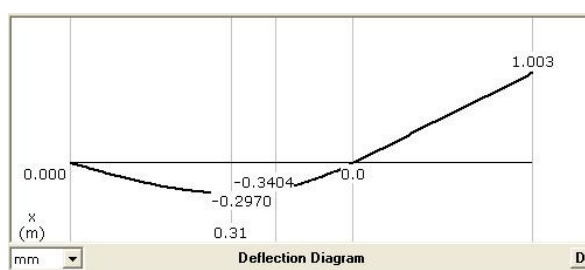
Elastic modulus	210,000	$\text{MN/m}^2$
Yield strength	240	$\text{MN/m}^2$
Shear strength	140	$\text{MN/m}^2$

จากตารางคุณสมบัติเหล็กสำหรับผู้รับหมากก่อสร้างและวิศวกรพบว่า ค่า Yield strength มีค่ามากกว่าค่า  $\text{Stress}_{\text{max}}$  ที่เกิดขึ้น ดังนั้น สามารถเลือกใช้เหล็ก St 37 ที่มีขนาดหน้าตัด กว้าง 2 นิ้ว สูง 2 นิ้ว หน้า 0.12 นิ้ว ได้

นำค่าที่ออกแบบไปพิจารณาค่าความชัน (Slope) และระยะโก่ง (Deflection) ของคานที่ตำแหน่งใดเพื่อหาค่าที่มากที่สุดแล้วตรวจสอบดูว่ายอมรับได้หรือไม่ ผลการทดสอบโปรแกรมแสดงดังภาพประกอบ 3-32 ถึง 3-33



ภาพประกอบ 3-32 ความชัน (Slope diagram) ที่ตำแหน่งใดๆ บนคาน



ภาพประกอบ 3-33 ระยะโก่ง (Deflection diagram) ที่ตำแหน่งใดๆ บนคาน

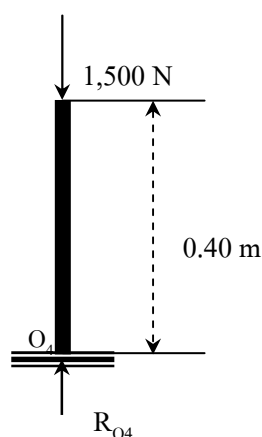
ผลการทดสอบพบว่า ระยะโก่งสูงสุดอยู่ที่ปลายคานดังภาพประกอบ 3-33 โดยมีระยะการโก่ง 1.003 มิลลิเมตรซึ่งถือว่ายอมรับได้

#### 4) การคำนวณในส่วนของเสา (Column 1)

เสา 1 (Column 1) คือ เสาที่รับน้ำหนักโครงสร้างของส่วนหัว (Head section) ส่วนกลาง (Middle section) ส่วนล่าง (Lower section) รวมถึงน้ำหนักของคนที่ตกลงมาและน้ำหนักของโครงสร้างตำแหน่งของแรงที่กระทำแสดงดังภาพประกอบ 3-34 แรงที่กระทำต่อเสา 1 ได้แก่

- แรงปฏิกิริยาที่กระทำต่อจุด  $O_4$  ( $R_{O_4}$ )
- แรงกดเนื่องมาจากน้ำหนักคน ประมาณ 1,500 นิวตัน
- แรงกดเนื่องมาจากน้ำหนักโครงสร้างส่วนหัว (Head section) ส่วนกลาง (Middle section) และส่วนล่าง (Lower section) รวมเป็น 800 นิวตัน
- น้ำหนักของชุดขับเคลื่อนทั้งหมด 700 นิวตัน

ผลรวมแรงกดที่กระทำต่อเสาทั้ง 2 เสา 3,000 นิวตัน เมื่อพิจารณาแรงที่กระทำต่อเสาเพียงเสาเดียวจะได้แรงกดมีค่า  $\frac{3,000}{2} = 1,500N$



ภาพประกอบ 3-34 Free body diagram ของเสา 1 (Column1)

หาแรงปฏิกิริยาที่กระทำต่อจุด  $O_4$  ( $R_{O_4}$ ) จากการพิจารณาผลรวมแรงในแนวตั้งเป็นศูนย์จะได้

$$R_{O_4} = 1,500 N$$

คิดค่าเพื่อความปลอดภัย (Safety factor:  $\mu$ ) = 6

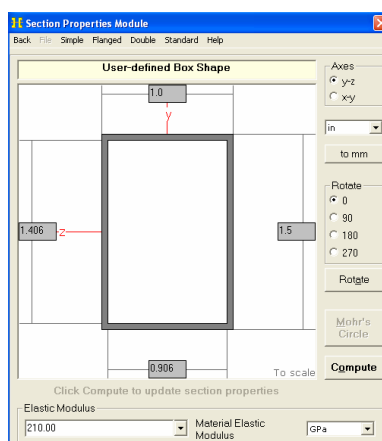
(เนื่องมาจากส่วนของ เสา 1 (Column 1) เป็นส่วนที่รองรับน้ำหนักของโครงสร้างทั้งส่วนของ Head section, Lower section, Middle section, น้ำหนักของคนและรวมถึงน้ำหนักของโครงสร้างทำให้มีโอกาสที่จะเสียหายมากจึงเลือกใช้ค่าเพื่อความปลอดภัย (Safety factor:  $\mu$ ) = 6 เพื่อป้องกันกรณีที่จะอาจจะมีน้ำหนักตกลงมากกว่าที่กำหนดไว้)

จะได้แรงกดใหม่เป็น  $= 1,500 \times 6 = 9,000$  นิวตัน

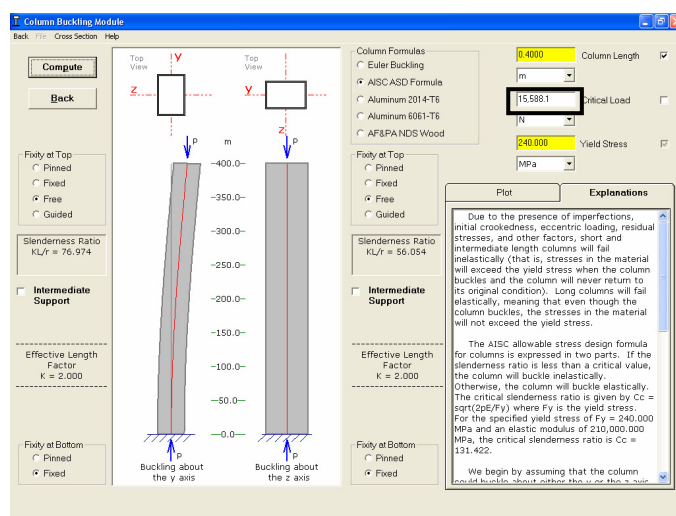
จากข้อมูลออกแบบหน้าตัดเสาด้วยเหล็กกล่องที่มีความกว้างเป็น 1.0 นิ้ว สูง 1.5 นิ้วหนา 0.047 แสดงดังภาพประกอบ 3-35 ใช้เหล็กกล้า St-37 ตามตารางคุณสมบัติเหล็กสำหรับผู้รับหมาก่อสร้างและวิศวกรพบว่าเหล็กมีคุณสมบัติดังนี้

เหล็ก St 37 มีค่า	Elastic modulus	210,000 MN/m <sup>2</sup>
	Yield strength	240 MN/m <sup>2</sup>
	Shear strength	140 MN/m <sup>2</sup>

ผลการรัน (Run) โปรแกรม แสดงดังภาพประกอบ 3-35 ถึง 3-36



ภาพประกอบ 3-35 คุณสมบัติเหล็กกล่องที่ใช้ในการออกแบบเสา



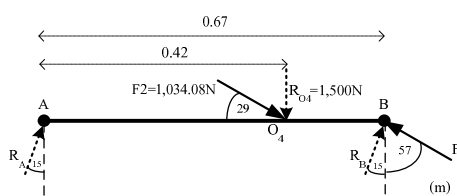
ภาพประกอบ 3-36 ผลการออกแบบ

ผลการออกแบบที่ใช้เหล็กกล่องที่มีความกว้างเป็น 1.0 นิ้ว สูง 1.5 นิ้วหนา 0.047 ใช้เหล็กกล้าตามมาตรฐานเยอรมัน St 37 สามารถรับแรงสูงสุด (Critical load) 15,588.1 นิวตัน ซึ่งมากกว่าแรงกดที่มากที่สุดที่ออกแบบมีค่า 9,000 นิวตัน ดังนั้นสามารถใช้เสาที่ออกแบบรับน้ำหนักได้

### 5) การคำนวณในส่วนฐาน Base section

ขอบเขตการเคลื่อนที่ของก้านเชื่อมต่อฐาน (Link 1) อยู่ในช่วง  $15^\circ$  ถึง  $75^\circ$  ดังนั้นการคำนวณหา  $F_4$  ที่มีค่ามากที่สุด ( $F_{4_{max}}$ ) เพื่อนำไปคำนวณหาขนาดของมอเตอร์ต้องแบ่งการคำนวณเป็น 2 กรณีคือ ตำแหน่งการเคลื่อนที่อยู่ที่  $15^\circ$  และ  $75^\circ$  ตำแหน่งของแรงที่กระทำได้ แสดงดังภาพประกอบ 3-37 พิจารณาแรงที่กระทำต่อคานเพียง 1 คาน ได้แก่

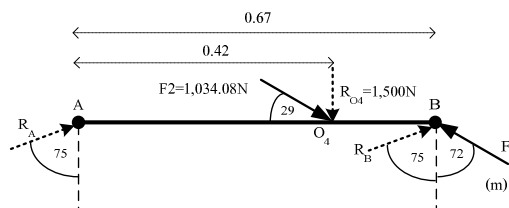
- แรงปฏิกิริยาที่กระทำต่อจุด  $O_4$  ( $R_{O_4}=1,500$  N)
- แรงปฏิกิริยาที่กระทำต่อจุด A ( $R_A$ ), แรงปฏิกิริยาที่กระทำต่อจุด B ( $R_B$ )
- ครึ่งหนึ่งของแรงปฏิกิริยาอันเนื่องมาจากแรง  $F_2$  มีค่า  $\frac{2,068.16}{2} = 1,034.08$  N
- แรง  $F_4$  ( $F_4 = \frac{F_4}{2}$ ) คือครึ่งหนึ่งของแรงที่ซุดขับเคลื่อน 4 กระทำต่อส่วนฐาน



ภาพประกอบ 3-37 Free body diagram ของส่วนฐาน (Base section)

การคำนวณหาค่า  $F_4$  ที่มีค่ามากที่สุด ( $F_{4_{max}}$ ) พิจารณาจาก 2 กรณีดังนี้

5.1) หาแรง  $F_4$  กรณีที่ก้านเชื่อมต่อฐาน (Link 1) เคลื่อนที่มุม  $15^\circ$  นั่นคือทำให้ส่วนฐาน (Base section) เคลื่อนที่ต่ำสุดทำให้แรง  $F_4$  ที่กระทำต่อส่วนฐาน (Base section) ทำมุม  $75^\circ$  กับแนวดิ่ง โดยองค์ประกอบของแรงที่กระทำต่อโครงสร้าง แสดงดังภาพประกอบ 3-38



ภาพประกอบ 3-38 Free body diagram ของก้านเชื่อมต่อด้าน (Link 1) ณ ตำแหน่ง  $15^\circ$   
หา  $F_4$  จากการพิจารณาโมเมนต์รอบจุด B จะได้

$$(1,500 \times 0.25) + (1,034.08 \sin 29^\circ \times 0.25) = R_A \cos 75^\circ \times 0.67$$

$$500.33 = 0.17 R_A$$

$$R_A = 2,943.12 \text{ N}$$

พิจารณาผลรวมแรงในแนวดิ่งเป็นศูนย์จะได้

$$(1,034.08 \sin 29^\circ) + (1,500) - (R_A \cos 75^\circ) = (R_B \cos 75^\circ) + (F_4 \cos 72^\circ)$$

$$(1,034.08 \sin 29^\circ) + (1,500) - (2,943.12 \cos 75^\circ) = (R_B \cos 75^\circ) + (F_4 \cos 72^\circ)$$

$$0.31 F_4 + 0.26 R_B = 1,239.59 \quad (3-2)$$

พิจารณาผลรวมแรงในแนวระนาบเป็นศูนย์จะได้

$$(1,034.08 \cos 29^\circ) + (R_A \sin 75^\circ) = (F_4 \sin 72^\circ) - (R_B \sin 75^\circ)$$

$$(1,034.08 \cos 29^\circ) + (2,943.12 \sin 75^\circ) = (F_4 \sin 72^\circ) - (R_B \sin 75^\circ)$$

$$0.95 F_4 - 0.97 R_B = 3,747.26 \quad (3-3)$$

แก้สมการ (3-2) และ (3-3) จะได้

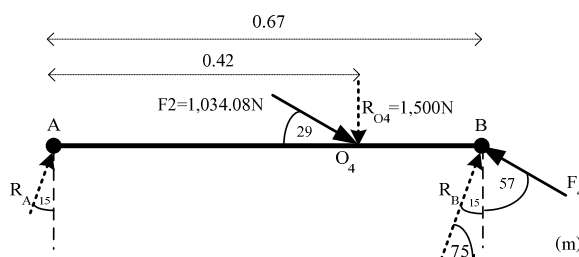
$$F_4 = 3,974.24 \text{ N}$$

$$R_B = 29.14 \text{ N}$$

แรง  $F_4$  หรือแรงที่ชุดขับเคลื่อน 4 กระทำต่อส่วนฐาน (Base section) มีค่าเป็น 2 เท่าของแรงที่คำนวณได้ ( $F_4$ ) ทำให้  $F_4$  มีค่า 7,948.48 นิวตัน และแรงปฏิกิริยาที่กระทำต่อจุด A ( $R_A$ ) มีค่า 2,943.12 นิวตัน แรงปฏิกิริยาที่กระทำต่อจุด B ( $R_B$ ) มีค่า 29.14 นิวตัน



5.2) หาแรง  $F_4$  กรณีที่ก้านเชื่อมต่อด้าน (Link 1) เคลื่อนที่มุม  $75^\circ$  โดยองค์ประกอบของแรงที่กระทำต่อโครงสร้างส่วนฐาน (Base section) แสดงดังภาพประกอบ 3-39



ภาพประกอบ 3-39 Free body diagram ของก้านเชื่อมต่อด้าน (Link 1) ณ ตำแหน่ง  $75^\circ$

หา  $F_4$  จากการพิจารณาโมเมนต์รอบจุด B จะได้

$$(1,500 \times 0.25) + (1,034.08 \sin 29^\circ \times 0.25) = R_A \cos 15^\circ \times 0.67$$

$$R_A = 773.11 \text{ N}$$

พิจารณาผลรวมแรงในแนวดิ่งเป็นศูนย์จะได้

$$(1,034.08 \sin 29^\circ) + (1,500) - (R_A \cos 15^\circ) = (R_B \cos 15^\circ) + (F_4 \cos 57^\circ)$$

$$(1,034.08 \sin 29^\circ) + (1,500) - (773.11 \cos 15^\circ) = (R_B \cos 15^\circ) + (F_4 \cos 57^\circ)$$

$$0.54 F_4 + 0.97 R_B = 1,254.57 \quad (3-4)$$

พิจารณาผลรวมแรงในแนวระนาบเป็นศูนย์จะได้

$$(1,034.08 \cos 29^\circ) + (R_A \sin 15^\circ) = (F_4 \sin 57^\circ) - (R_B \sin 15^\circ)$$

$$(1,034.08 \cos 29^\circ) + (773.11 \sin 15^\circ) = (F_4 \sin 57^\circ) - (R_B \sin 15^\circ)$$

$$0.84 F_4 - 0.26 R_B = 1,104.52 \quad (3-5)$$

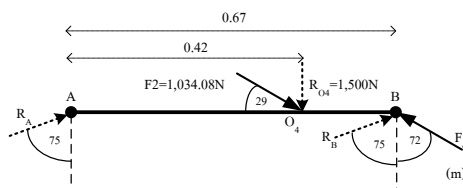
แก้สมการ (3-4) และ (3-5) จะได้

$$F_4 = 1,463.12 \text{ N}$$

$$R_B = 478.89 \text{ N}$$

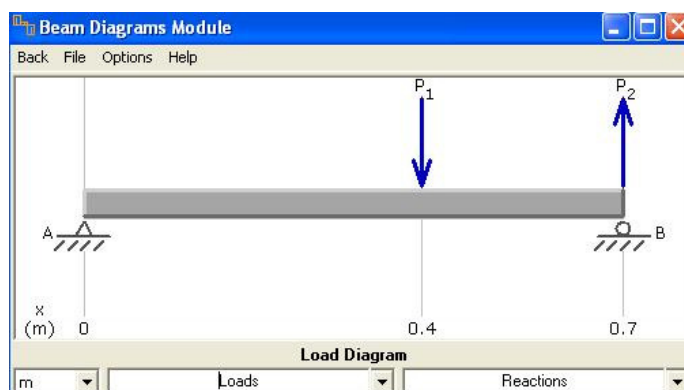
ดังนั้น  $F_4$  หรือแรงที่ชุดขับเคลื่อน 4 กระทำต่อส่วนฐาน (Base section) มีค่าเป็น 2 เท่าของแรงที่คำนวณได้ ( $F_4$ ) ทำให้  $F_4$  มีค่า 1,463.12 นิวตัน และแรงปฏิกิริยาที่กระทำต่อจุด A ( $R_A$ ) มีค่า 773.11 นิวตัน แรงปฏิกิริยาที่กระทำต่อจุด B ( $R_B$ ) มีค่า 478.89 นิวตัน

เมื่อพิจารณาทั้ง 2 กรณีพบว่า ค่าของ  $F_4$  ที่มีค่ามากที่สุด ( $F_{4\max}$ ) มีค่า 7,948.48 นิวตัน และ  $F_4$  ที่มีค่ามากที่สุด ( $F_{4\max}$ ) มีค่า 3,974.24 นิวตัน ในกรณีที่ก้านเชื่อมต่อด้าน (Link 1) เคลื่อนที่มุม  $15^\circ$  องค์ประกอบของแรงที่กระทำต่อโครงสร้างส่วนฐาน (Base section) แสดงดังภาพประกอบ 3-40



ภาพประกอบ 3-40 Free body diagram ของส่วนฐาน (Base section) หลังย้ายแรง

การคำนวณระยะการโก่ง (Deflection) และความชัน (Slope) ที่ตำแหน่งใดๆ บนคาน ใช้โปรแกรม MDSolids 30 ผลการรัน (Run) โปรแกรม แสดงดังภาพประกอบ 3-41 ถึง 3-46

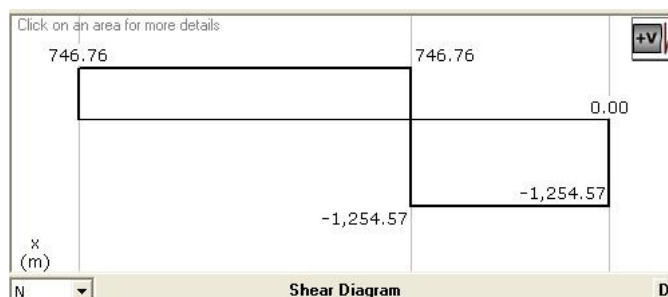


ภาพประกอบ 3-41 Free body diagram ของ Base section

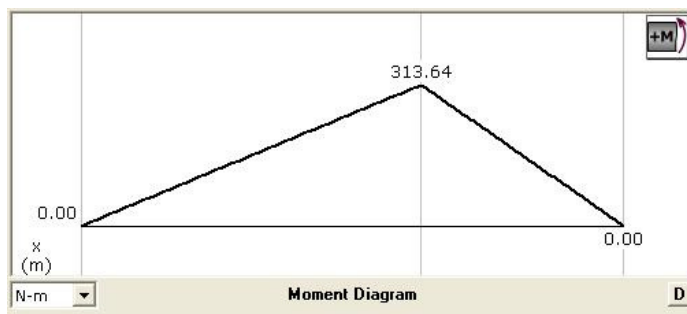
จากภาพประกอบ 3-41 รายละเอียดแรงที่กระทำมีดังนี้

$$P_1 = (1,034.08 \sin 29^\circ) + 1,500 = 2,001.33 \text{ N}$$

$$P_2 = F_4 \cos 72^\circ = 3,974.24 \cos 72^\circ = 1,228.11 \text{ N}$$

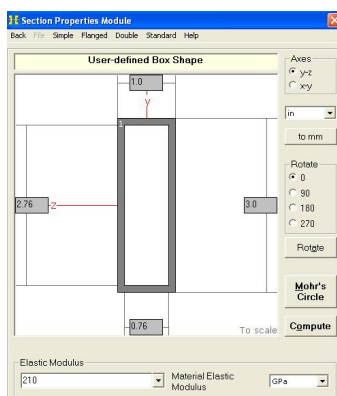


ภาพประกอบ 3-42 แรงเฉือนที่ตำแหน่งใดๆ (Shear Diagram) ของคาน



ภาพประกอบ 3-43 โมเมนต์ดัด (Bending moment diagram) ในแกนที่ตำแหน่งใดๆ

จากแผนภาพโมเมนต์ในภาพประกอบ 3-43 พบว่า โมเมนต์สูงสุดเป็น 313.64 นิวตันเมตร ออกแบบหน้าตัดคาน แสดงดังภาพประกอบ 3-44



ภาพประกอบ 3-44 คุณสมบัติเหล็กกล่องที่ใช้ในการออกแบบคาน

เลือกเหล็กที่มีหน้าตัดสี่เหลี่ยม ภาพประกอบ 48 กว้าง 1 นิ้ว สูง 3 นิ้วหนา 0.12 นิ้ว

โมเมนต์ความเฉื่อย  $I = 3.82 \times 10^{-7}$

แทนค่าในสมการที่ (3-1) จะได้ 
$$\sigma = \frac{313.64 \times 0.0375}{3.82 \times 10^{-7}} = 30,789,267.02 \text{ N/m}^2$$

จะได้  $\sigma = 30.79 \text{ MN/m}^2$

คิดค่าเผื่อความปลอดภัย (Safety factor:  $\mu = 5$ )

จะได้  $\sigma_s = 30.79 \times 5 = 153.95 \text{ MN/m}^2$

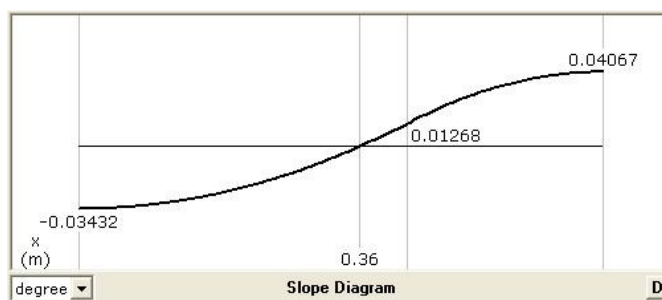
นำค่า  $\sigma_s$  (ค่าความเค้นสูงสุด  $\text{Stress}_{\text{max}}$ ) ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่า Yield strength ของเหล็ก

เปิดตารางคุณสมบัติเหล็กสำหรับผู้รับเหมาก่อสร้างและวิศวกร

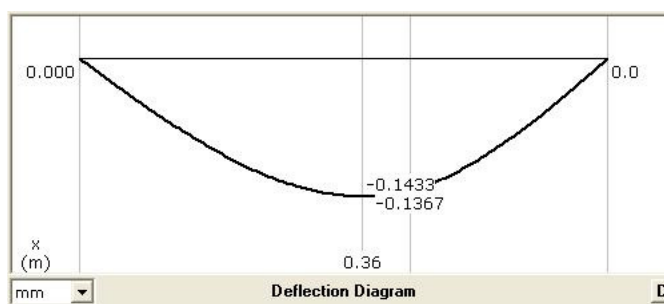
พบว่าเหล็ก St 37 มีค่า	Elastic modulus	210,000	MN/m <sup>2</sup>
	Yield strength	240	MN/m <sup>2</sup>
	Shear strength	140	MN/m <sup>2</sup>

จากตารางคุณสมบัติเหล็กสำหรับผู้รับเหมาก่อสร้างและวิศวกรพบว่าค่า Yield strength มีค่ามากกว่าค่า  $\text{Stress}_{\text{max}}$  ที่เกิดขึ้น ดังนั้น สามารถเลือกใช้เหล็ก St 37 ที่มีขนาดหน้าตัด กว้าง 1 นิ้ว สูง 3 นิ้ว หน้า 0.12 นิ้ว ได้

นำค่าที่ออกแบบไปพิจารณาค่าความชัน (Slope) และระยะ โกง (Deflection) ของคานที่ตำแหน่งใดเพื่อหาค่าที่มากที่สุดแล้วตรวจสอบดูว่ายอมรับได้หรือไม่ ผลการทดสอบโปรแกรม แสดงดังภาพประกอบ 3-45 ถึง 3-46



ภาพประกอบ 3-45 ความชัน (Slope diagram) ที่ตำแหน่งใดๆ บนคาน



ภาพประกอบ 3-46 ระยะ โกง (Deflection diagram) ที่ตำแหน่งใดๆ บนคาน

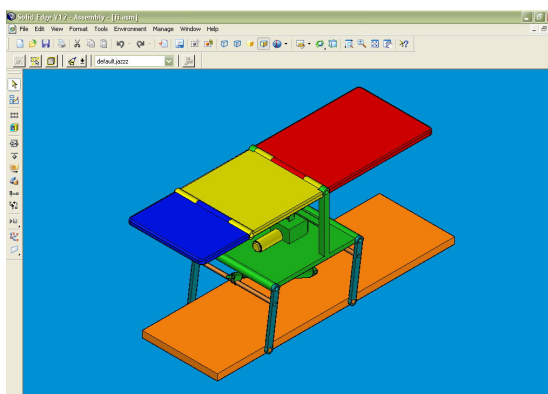
ผลการทดสอบพบว่า ระยะ โกงสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่ง 0.36 เมตร แสดงดังภาพประกอบ 3-46 โดยมีระยะการ โกง 0.6341 มิลลิเมตร ซึ่งถือว่ายอมรับได้

### 3.1.2 การออกแบบโครงสร้างของเตียงด้วยโปรแกรมออกแบบ 3 มิติ (Solid Edge)

หลังจากคำนวณหาขนาดของโครงสร้างทุกชิ้นส่วนจากนั้นทำการออกแบบโครงสร้างเตียง ภายภาพบำบัดด้วยโปรแกรมออกแบบ 3 มิติ (Solid Edge)

ในการออกแบบด้วยโปรแกรมออกแบบ 3 มิติ (Solid Edge) สามารถจำลองการเคลื่อนที่ของแต่ละส่วนเพื่อดูลักษณะการเคลื่อนที่ว่ามีชิ้นส่วนไหนของโครงสร้างที่ออกแบบเคลื่อนที่ไปกีดขวางชิ้นส่วนอื่น หรือชิ้นส่วนใดไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ และ โครงสร้างส่วนใดมีปัญหาที่สามารถแก้ปัญหาได้เฉพาะส่วนได้ทันที

เมื่อออกแบบเสร็จนำแบบที่มีรายละเอียดชิ้นส่วนทุกๆชิ้นส่วนสั่งทำแต่ละชิ้นส่วนก่อนนำมาประกอบเข้าเป็นเตียงตามที่ได้ออกแบบไว้ ผลการออกแบบ โครงสร้างเตียงกายภาพบำบัด โปรแกรมออกแบบ 3 มิติ (Solid Edge) แสดงดังภาพประกอบ 3-47



ภาพประกอบ 3-47 ผลการออกแบบด้วยโปรแกรมออกแบบ 3 มิติ

### 3.1.3 สั่งประกอบโครงสร้าง

จากที่ได้ออกแบบและแก้ไขโครงสร้างเตียงด้วยโปรแกรมออกแบบ 3 มิติจนมีความสมบูรณ์แล้วจึงสั่งประกอบโครงสร้าง โดยนำรูปแบบและขนาดที่ออกแบบซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ทุกส่วนทำให้สะดวกในการสร้าง

สำหรับการประกอบโครงสร้างเตียงนั้น สำหรับบางชิ้นส่วนอาจจะมีคลาดเคลื่อนจากที่ได้ออกแบบไว้ เนื่องจากข้อจำกัดหลายๆ ประการด้วยกัน เช่น จำเป็นต้องขยายขนาดของเหล็กในส่วนฐาน (Base section) เล็กน้อยในการใส่บูช (Bush) เพื่อให้การหมุนของข้อต่อราบเรียบ ผลจากการขยายขนาดของเหล็กก็ส่งผลให้โครงสร้างมีความแข็งแรงสามารถรับน้ำหนักได้มากขึ้น ผลการสั่งประกอบโครงสร้างเตียงกายภาพบำบัด แสดงดังภาพประกอบ 3-48



ภาพประกอบ 3-48 ผลการประกอบ โครงสร้างเตียงกายภาพบำบัด

### 3.2 ขั้นตอนการออกแบบและตั้งชื่อมอเตอร์

#### 3.2.1 การออกแบบขนาดของมอเตอร์

การออกแบบกำลังของมอเตอร์พิจารณาจากแรงบิดสูงสุด ( $Torque_{max}$ ) ที่กระทำต่อมอเตอร์ เพื่อนำมาคำนวณหากำลังของมอเตอร์ ดังสมการ (3-6)

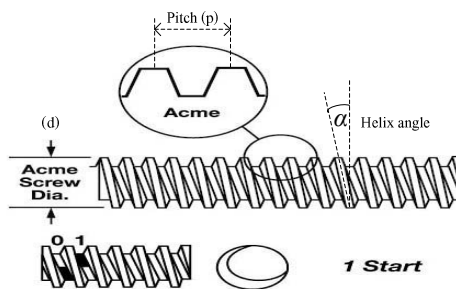
$$P = T_{max} \times \omega \quad (3-6)$$

ในกรณีที่ระบบต้องมีการขับเคลื่อนผ่านสกรูกำลัง (Power screw) นั้นจำเป็นต้องหาแรงบิดสูงสุด ( $Torque_{max}$ ) เพื่อให้ได้แรงยกตามต้องการ ในการหาแรงบิดสูงสุด ( $Torque_{max}$ ) สามารถหาได้จากสมการ (3-7) รายละเอียดตัวแปรแสดงดังภาพประกอบ 3-49

$$T = \frac{Fd_m}{2} \frac{f_s + \cos \phi \tan \alpha}{\cos \phi f_s \tan \alpha} + r_{mc} f_c F \quad (3-7)$$

โดย

- F = แรงที่สกรูกำลัง (Power screw) ต้องขับได้
- dm = เส้นผ่านศูนย์กลางของสกรูกำลัง (Power screw) 25.5 มิลลิเมตร
- fs = สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวหน้าเกลียวและเป็นเกลียว 0.5
- $\phi$  = มุมเกลียว  $14.5^\circ$
- $\alpha$  = มุม helix ( $3.57^\circ$ )
- r<sub>mc</sub> = รัศมีของ bearing 15 มิลลิเมตร
- f<sub>c</sub> = สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวหน้าของ bearing และเป็นเกลียว (0.5)



ภาพประกอบ 3-49 ลักษณะสกรุกำลังแบบเกลียว Acme

### 1) การออกแบบขนาดของมอเตอร์ขับเคลื่อนส่วนหัว (Head Section)

พิจารณาค่าแรงบิด(Torque) ของมอเตอร์โดยนำค่าตัวแปรแทนในสมการ (3-7)

ค่าตัวแปรต่างๆ มีค่าดังนี้

$$F1_{\max} = 287.28 \text{ N (แรงที่หูดขับเคลื่อนกระทำต่อส่วนหัว (Head Section) สูงสุด)}$$

$$F = F1_{\max} \times 3 \text{ (3 คือค่าเพื่อความปลอดภัย (Safety factor))}$$

$$d_m = 25.5 \text{ มิลลิเมตร}$$

$$f_s = 0.5$$

$$\phi = 14.5^\circ$$

$$\alpha = 3.57^\circ$$

$$r_{mc} = 15 \text{ มิลลิเมตร}$$

$$f_c = 0.5$$

$$\omega = 6.283 \text{ rad/s}$$

แทนค่าในสมการ (3-7)

$$\text{จะได้} \quad T = \frac{872.28 \times 3 \times 25.5 \times 10^{-3}}{2} \frac{0.5 + \cos 14.5^\circ \tan 3.57^\circ}{\cos 14.5^\circ - 0.5 \tan 3.57^\circ} + (15 \times 10^{-3} \times 0.5 \times 872.28 \times 3)$$

$$T = 39.58 \text{ N-m}$$

หาค่ากำลังมอเตอร์จากสมการ (3-6)

$$P = T \omega$$

แทนค่า

$$P = (39.58 \text{ N-m})(6.283 \text{ rad/s})$$

$$P = 248.68 \text{ วัตต์}$$

กำหนดให้ ประสิทธิภาพของมอเตอร์เป็น 80%

$$\text{ขนาดมอเตอร์มีค่า} \quad \frac{248.68}{0.80} = 310.85 \text{ วัตต์}$$

ดังนั้นกำลังที่ใช้ในการพิจารณาเลือกขนาดมอเตอร์เป็น 310.85 วัตต์

## 2) การออกแบบขนาดของมอเตอร์ขับเคลื่อนส่วนกลาง (Middle Section)

การออกแบบระบบขับเคลื่อนของมอเตอร์ในส่วนนี้ต้องเพิ่มเฟืองทดอัตรา 1 : 2 เนื่องจากแรงขับเคลื่อนในส่วนนี้มีค่ามาก พิจารณาค่าแรงบิด (Torque) ของมอเตอร์โดยนำค่าตัวแปรแทนในสมการ (3-7) ค่าตัวแปรต่างๆ มีค่าดังนี้

$$F2_{\max} = 2,068.16 \text{ N (แรงที่ชุดขับเคลื่อนกระทำต่อส่วนกลาง (Middle section))}$$

$$F = F2 \times 3 \text{ (3 คือค่าเพื่อความปลอดภัย (Safety factor))}$$

$$d_m = 25.5 \text{ มิลลิเมตร}$$

$$f_s = 0.5$$

$$\phi = 14.5^\circ$$

$$\alpha = 3.57^\circ$$

$$r_{mc} = 15 \text{ มิลลิเมตร}$$

$$f_c = 0.5$$

$$\omega = 6.283 \text{ rad/s}$$

แทนค่าในสมการ (3-7)

จะได้

$$T = \frac{2,068.16 \times 3 \times 25.5 \times 10^{-3}}{2} \frac{0.5 + \cos 14.5^\circ \tan 3.57^\circ}{\cos 14.5^\circ} + (15 \times 10^{-3} \times 0.5 \times 2,068.16 \times 3)$$

$$T = 93.85 \text{ N-m}$$

เนื่องจากใช้เฟืองทดที่มีอัตราทด 1:2

$$\text{ดังนั้น แรงบิด (Torque) ของมอเตอร์เป็น } \frac{93.85}{2} = 46.93 \text{ N-m}$$

หากำลังได้จากสมการ (3-6)

$$P = T\omega$$

$$P = (46.93 \text{ N-m})(6.283 \text{ rad/s})$$

$$P = 294.86 \text{ วัตต์}$$

กำหนดให้ ประสิทธิภาพของมอเตอร์กับประสิทธิภาพของเฟืองทดรวมเป็น 80%

$$\text{ขนาดมอเตอร์เป็น } \frac{294.86}{0.80} = 368.58 \text{ วัตต์}$$

ดังนั้นกำลังที่ใช้ในการพิจารณาเลือกขนาดมอเตอร์เป็น 368.59 วัตต์



### 3) การออกแบบขนาดของมอเตอร์ขับเคลื่อนส่วนล่าง (Lower Section)

การออกแบบระบบขับเคลื่อนของมอเตอร์ในส่วนนี้ต้องเพิ่มเฟืองทดอัตรา 1 : 2 เนื่องจากแรงขับเคลื่อนในส่วนนี้มีค่ามาก พิจารณาค่าแรงบิด (Torque) ของมอเตอร์โดยนำค่า ตัวแปรแทนในสมการ (3-7) ค่าตัวแปรต่างๆ มีค่าดังนี้

$$F_{3\max} = 1,169.93 \text{ N (แรงที่ชุดขับเคลื่อนกระทำต่อส่วนล่าง (Lower section))}$$

$$F = F_3 \times 3 \text{ (3 คือค่าเพื่อความปลอดภัย (Safety factor))}$$

$$d_m = 25.5 \text{ มิลลิเมตร}$$

$$f_s = 0.5$$

$$\phi = 14.5^\circ$$

$$\alpha = 3.57^\circ$$

$$r_{mc} = 15 \text{ มิลลิเมตร}$$

$$f_c = 0.5$$

$$\omega = 6.283 \text{ rad/s}$$

แทนค่าในสมการ (3-7)

จะได้

$$T = \frac{1,169.93 \times 3 \times 25.5 \times 10^{-3}}{2} \frac{0.5 + \cos 14.5^\circ \tan 3.57^\circ}{\cos 14.5^\circ - 0.5 \tan 3.57^\circ} + (15 \times 10^{-3} \times 0.5 \times 1,169.93 \times 3)$$

$$T = 53.09 \text{ N-m}$$

เนื่องจากใช้เฟืองทดที่มีอัตราทด 1:2

$$\text{ดังนั้น แรงบิด (Torque) ของมอเตอร์เป็น } \frac{53.09}{2} = 26.55 \text{ N-m}$$

หากำลังได้จากสมการ (3-6)

$$P = T \omega$$

$$P = (26.55 \text{ N-m})(6.283 \text{ rad/s})$$

$$P = 165.62 \text{ Watt}$$

กำหนดให้ ประสิทธิภาพของมอเตอร์เป็น 80%

$$\text{ขนาดมอเตอร์เป็น } \frac{165.62}{0.80} = 207.02 \text{ วัตต์}$$

ดังนั้นกำลังที่ใช้ในการพิจารณาเลือกขนาดมอเตอร์เป็น 207.02 วัตต์

#### 4) การออกแบบขนาดของมอเตอร์ขับเคลื่อนส่วนฐาน (Base section)

การออกแบบระบบขับเคลื่อนของมอเตอร์ในส่วนนี้ต้องเพิ่มชุดเฟืองตัวหนอน (Worm gear reducers) ที่มีอัตราทด 1 : 10 เนื่องจากแรงขับเคลื่อนในส่วนนี้มีค่ามากที่สุด พิจารณาหาค่าแรงบิด (Torque) ของมอเตอร์โดยนำค่าตัวแปรแทนในสมการ (3-7) ค่าตัวแปรต่างๆ มีค่าดังนี้

$$F4_{\max} = 5,154.25 \text{ N (แรงที่ชุดขับเคลื่อนกระทำต่อส่วนฐาน (Base section))}$$

$$F = F4_{\max} \times 4 \text{ (4 คือค่าเพื่อความปลอดภัย (Safety factor))}$$

$$d_m = 25.5 \text{ มิลลิเมตร}$$

$$f_s = 0.5$$

$$\phi = 14.5^\circ$$

$$\alpha = 3.57^\circ$$

$$r_{mc} = 15 \text{ มิลลิเมตร}$$

$$f_c = 0.5$$

$$\omega = 6.283 \text{ rad/s}$$

แทนค่าในสมการ (3-7) จะได้

$$T = \frac{5,154.25 \times 4 \times 25.5 \times 10^{-3}}{2} \frac{0.5 + \cos 14.5^\circ \tan 3.57^\circ}{\cos 14.5^\circ \cdot 0.5 \tan 3.57^\circ} + (15 \times 10^{-3} \times 0.5 \times 5,154.25 \times 1)$$

$$T = 311.89 \text{ N-m}$$

เนื่องจากใช้ชุดเฟืองตัวหนอน (Worm gear reducers) ที่มีอัตราทด 1 : 10

$$\text{ดังนั้น แรงบิด (Torque) ของมอเตอร์เป็น } \frac{311.89}{10} = 31.19 \text{ N-m}$$

หากำลังได้จากสมการ (3-6)

$$P = T \omega$$

$$P = (31.19 \text{ N-m})(6.283 \text{ rad/s})$$

$$P = 195.97 \text{ วัตต์}$$

กำหนดให้ ประสิทธิภาพของมอเตอร์เป็น 80%

$$\text{ขนาดมอเตอร์เป็น } \frac{195.97}{0.80} = 244.96 \text{ วัตต์}$$

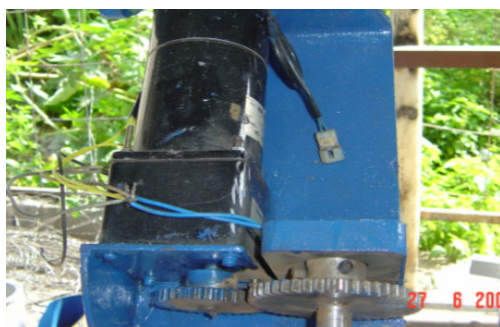
ดังนั้นกำลังที่ใช้ในการพิจารณาเลือกขนาดมอเตอร์เป็น 244.96 วัตต์

### 3.2.2 เลือกซื้อมอเตอร์และผลการประกอบโครงสร้าง

หลังจากการคำนวณมอเตอร์จึงสั่งซื้อมอเตอร์แต่พบว่าขนาดของมอเตอร์ที่ออกแบบไม่มีขายตามท้องตลาด ดังนั้นจึงเลือกซื้อมอเตอร์ที่มีขนาดใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณมากที่สุดโดยมอเตอร์ที่เลือกใช้ในแต่ละส่วน แสดงดังภาพประกอบ 3-50 ถึง 3-53



ภาพประกอบ 3-50 มอเตอร์ที่ใช้ในการจับส่วนหัว (Head section)



ภาพประกอบ 3-51 มอเตอร์ที่ใช้ในการจับส่วนกลาง (Middle section)



ภาพประกอบ 3-52 มอเตอร์ที่ใช้ในการจับส่วนล่าง (Lower section)



ภาพประกอบ 3-53 มอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนส่วนฐาน (Base section)

การประกอบระบบขับเคลื่อนกับตัวเตียงกายภาพบำบัดต้องอาศัยความชำนาญเป็นอย่างมาก เนื่องจากการประกอบโครงสร้างหากติดตั้งระบบคลาดเคลื่อนจากที่ได้ออกแบบไว้หรือติดตั้งทำมุมไม่ได้จากก็จะส่งผลให้เกิดแรงเสียดทานที่มีค่ามากทำให้ไม่สามารถขับเคลื่อนระบบและส่งผลให้มอเตอร์เกิดความเสียหายได้ ผลการติดตั้งแสดงดังภาพประกอบ 3-54



ภาพประกอบ 3-54 ผลการติดตั้งระบบขับเคลื่อน

ผลการทดสอบระบบขับเคลื่อนหลังจากประกอบโครงสร้างทั้ง 4 ชุดเพื่อตรวจสอบและแก้ไขพบว่า การเคลื่อนที่ของส่วนหัว (Head section) ลักษณะการเคลื่อนที่อยู่ในเกณฑ์ราบเรียบดี แต่จะพบปัญหาบ้างในกรณีที่รับโหลดเกิน (Critical load) ประมาณ 3 เท่าจะทำให้มอเตอร์เกิดเสียงรบกวนขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากแกนของมอเตอร์เกิดการเอียงศูนย์แต่ไม่ส่งผลต่อการรับแรง, ในส่วนของส่วนกลางและส่วนล่าง (Middle & lower section) พบว่า ลักษณะการเคลื่อนที่ในเกณฑ์ราบเรียบดีมาก, ส่วนฐาน (Base section) พบว่า ลักษณะการเคลื่อนที่ในเกณฑ์ราบเรียบดีแต่หากติดตั้งชุดขับเคลื่อนกับโครงสร้างเพียงไม่ได้มากจึงส่งผลให้โครงสร้างเพียงโยกเล็กน้อย

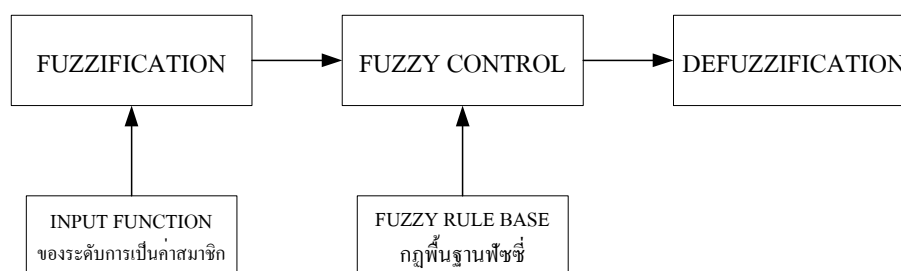
### 3.3 ขั้นตอนการออกแบบและสร้างกฎการควบคุมฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic Controller)

การควบคุมตำแหน่งของ DC Motor สามารถเลือกใช้การควบคุมได้หลายวิธี เช่น PID Control, PI Control, Neuron Network ฯลฯ และ Fuzzy Logic Controller ก็เป็นวิธีหนึ่งที่สามารถใช้ควบคุมระบบได้และมีข้อดี ดังนี้

ข้อดีของฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic Controller)

- สามารถใช้กับระบบที่ซับซ้อน และไม่เชิงเส้นได้
- ไม่จำเป็นต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ยุ่งยาก
- สามารถหาความเหมาะสมในการควบคุมระบบได้
- สามารถตัดสินใจต่อสถานการณ์ใดๆ โดยอาศัยเพียงคณิตศาสตร์ง่ายๆ เป็นต้น

ทฤษฎีการควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic Controller) ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน แสดงดังภาพประกอบ 3-55



ภาพประกอบ 3-55 แผนผังแสดงการทำงานแบบฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic Controller)

การควบคุมตำแหน่งของเตียงกายภาพบำบัด โดยใช้ระบบควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic Controller) มีตัวแปร Input คือค่าความคลาดเคลื่อนและอัตราการเปลี่ยนแปลงความคลาดเคลื่อนมุม และตัวแปร Output คือความเร็วของมอเตอร์ ลักษณะการควบคุมตำแหน่งที่ใช้ฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic Controller) มีหลักการทำงาน ดังนี้

- หากค่าความแตกต่างระหว่างมุมที่ต้องการกับตำแหน่งเดิมของเตียงมีค่ามาก ระบบควบคุมจะทำให้ความเร็วของมอเตอร์มีค่าสูงขึ้น
- เมื่อเวลาผ่านไปค่าความแตกต่างระหว่างมุมที่ต้องการกับตำแหน่งเดิมของเตียงมีค่าลดลง ระบบควบคุมจะทำให้ความเร็วลดลงด้วย
- จนกระทั่งค่าระหว่างมุมที่ต้องการกับตำแหน่งเดิมของเตียงมีค่าใกล้เคียงกัน ความเร็วจะลดลงมากจนหยุดเมื่อมุมทั้งสองมีค่าเท่ากัน

การออกแบบฟัซซีลอจิก (Fuzzy Logic Controller) ประกอบด้วย 6 ขั้นตอนดังนี้

### 3.3.1 ขั้นที่ 1 การทำฟัซซีฟิเคชันของอินพุต

การทำฟัซซีฟิเคชันของอินพุต เป็นการหาค่าอินพุตของระบบ หาช่วงฟัซซีของอินพุต และทำการสร้างระดับการเป็นสมาชิกที่เป็นไปได้ โดยอินพุตของระบบมี 2 ตัว คือ

- 1) ค่าความผิดพลาด (Error ,E)

หาได้จากความแตกต่างระหว่างค่ามุมที่เป็นอยู่ (Ang) กับค่ามุมที่ต้องการ (Ang<sub>set</sub>)

$$\text{Error (E)} = \text{Ang} - \text{Ang}_{\text{set}}$$

- 2) ค่าการแปลงค่าความผิดพลาด (Error Change ,E<sub>ch</sub>) หาได้จากความแตกต่างระหว่างค่าความผิดพลาดล่าสุด (E<sub>Lasted</sub>) กับความผิดพลาดก่อนหน้านั้น (E<sub>Previous</sub>)

$$\text{Error Change (E}_{\text{ch}}) = \text{Lasted Error (E}_{\text{L}}) - \text{Previous Error (E}_{\text{p}})$$

ตัวแปรทางอินพุตทั้ง 2 ตัวต้องนำมาผ่านขั้นตอนของการฟัซซีฟิเคชันในรูปของฟัซซีของอินพุต โดยการเทียบค่าตัวแปรทางอินพุต แสดงดังตาราง 3-1

ตาราง 3-1 การเทียบค่าตัวแปรทางอินพุต (Quantized)

Error of Angle (E ,Volt)	Error Chang of Angle (E <sub>ch</sub> ,Volt)	Quantized
$E \geq 2.8$	$E_{ch} \geq 2.8$	+5
$2.5 \leq E < 2.8$	$2.5 \leq E_{ch} < 2.8$	+4
$2.2 \leq E < 2.5$	$2.2 \leq E_{ch} < 2.5$	+3
$1.9 \leq E < 2.2$	$1.9 \leq E_{ch} < 2.2$	+2
$1.6 \leq E < 1.9$	$1.6 \leq E_{ch} < 1.9$	+1
$1.3 \leq E < 1.6$	$1.3 \leq E_{ch} < 1.6$	0
$1.0 \leq E < 1.3$	$1.0 \leq E_{ch} < 1.3$	-1
$0.7 \leq E < 1.0$	$0.7 \leq E_{ch} < 1.0$	-2
$0.4 \leq E < 0.7$	$0.4 \leq E_{ch} < 0.7$	-3
$0.1 \leq E < 0.4$	$0.1 \leq E_{ch} < 0.4$	-4
$E \leq 0.1$	$E_{ch} \leq 0.1$	-5

### 3.3.2 ขั้นที่ 2 การกำหนดตัวแปรเอาต์พุตฟัซซี่

การกำหนดตัวแปรเอาต์พุตฟัซซี่เพื่อที่จะนำไปหาค่าการเปลี่ยนแปลงดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle Change,  $D_{ch}$ ) ที่ใช้ในวงจรเพื่อเปลี่ยนค่าแรงดันทำให้ได้ความเร็วมอเตอร์กระแสตรงมีค่าสูงขึ้นหรือต่ำลงแล้วแต่กรณี และมีการกำหนดค่าจุดศูนย์กลาง (Assigned Value) ของเอาต์พุตฟัซซี่เพื่อให้สามารถทำการดีฟัซซี่ฟิเคชันได้ แสดงดังตาราง 3-2

ตาราง 3-2 การกำหนดตัวแปรเอาต์พุตฟัซซี่

Output Status	Assigned Value
LN	-0.2
SN	-0.1
ZE	0
SP	0.1
LP	0.2

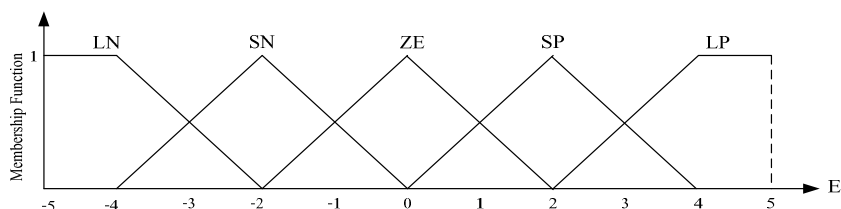
### 3.3.3 ขั้นที่ 3 การกำหนดขอบเขตเชิงภาษา (Fuzzy Linguistic) และการกำหนดค่าความเป็นสมาชิก (Grade of Membership Function)

การกำหนดขอบเขตเชิงภาษา (Fuzzy Linguistic) และการกำหนดค่าความเป็นสมาชิก (Grade of Membership Function) ของ Fuzzy Subset ต่างๆ ที่ระดับการควอนไทซ์ที่แตกต่างกัน การกำหนดขอบเขตเชิงภาษา ซึ่งเป็นภาษาที่ใช้ในระบบการควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก ในที่นี้แบ่งระดับของฟัซซี่ที่ใช้กับตัวแปรอินพุตและเอาต์พุตได้ 5 ภาษา ดังนี้

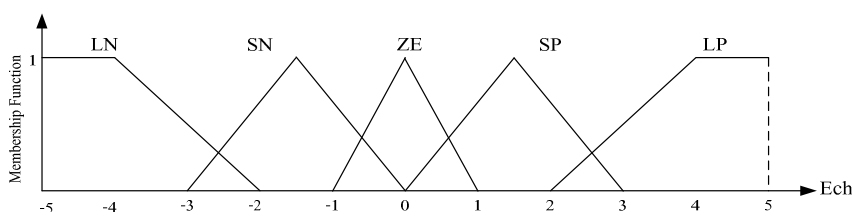
- 1) Large Positive (LP): บวกมาก
- 2) Small Positive (SP): บวกน้อย
- 3) Zero (ZE): ศูนย์
- 4) Small Negative (SN): ลบน้อย
- 5) Large Negative (LN): ลบมาก

การกำหนดรูปร่างกราฟของฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของอินพุตทั้ง 2 ตัวและของเอาต์พุตฟัซซี่นั้นใช้แบบรูปสามเหลี่ยมเนื่องจากใช้งานได้ง่ายไม่ซับซ้อน สามารถคำนวณค่าความเป็นสมาชิกในแต่ละจุดได้แม่นยำและสะดวก และสามารถปรับความกว้างของฐานเพื่อให้การควบคุมได้ผลดีที่สุดได้

การกำหนดรูปร่างกราฟของฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของอินพุตทั้ง 2 ตัวและของเอาต์พุตฟัซซี่แสดง  
ดังภาพประกอบ 3-55 และภาพประกอบ 3-56 ตามลำดับ



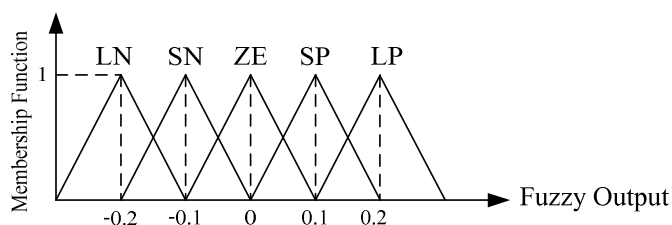
(a)



(b)

ภาพประกอบ 3-55 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของ (a) อินพุตที่ 1: Error of Angle (E)

(b) ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของอินพุตที่ 2: Error Change of Angle ( $E_{ch}$ )



ภาพประกอบ 3-56 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของเอาต์พุตฟัซซี่

### 3.3.4 ขั้นที่ 4 การสร้างเงื่อนไขหรือกฎการควบคุม

การสร้างเงื่อนไขหรือกฎการควบคุมสามารถนำค่าจากอินพุตประมวลผลออกไปได้  
เมื่อทำขั้นตอนที่ 1 และ 2 แล้วจะเป็นการสร้างเงื่อนไขที่จะนำมาใช้ในการควบคุมของฟัซซี่ลอจิก  
เพื่อสามารถควบคุมตำแหน่งของเตียงได้ตามต้องการ ขั้นตอนนี้มีความสำคัญมากเพราะเป็นการ  
จำลองพฤติกรรมของระบบที่เป็นไปได้ หรือเป็นการกำหนดให้ตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกปฏิบัติการ  
ควบคุมเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของเตียง โดยหาค่าเอาต์พุตฟัซซี่เพื่อนำไปหาค่าการ  
เปลี่ยนแปลงควิถีไซเคิลเป็นค่าเท่าไรขึ้นอยู่กับค่าอินพุตทั้ง 2 ตัวที่เปลี่ยนแปลงไปตามตาราง 3-3



ตาราง 3-3 ตารางการสร้างเงื่อนไขหรือกฎการควบคุม

<b>E</b> \ <b>Ech</b>	<b>LN</b>	<b>SN</b>	<b>ZE</b>	<b>SP</b>	<b>LP</b>
<b>LN</b>	LN	LN	LN	SN	SN
<b>SN</b>	LN	SN	SN	SN	ZE
<b>ZE</b>	SN	SN	ZE	ZE	SP
<b>SP</b>	ZE	ZE	SP	SP	LP
<b>LP</b>	SP	SP	LP	LP	LP

หรือสามารถเขียนให้อยู่ในรูป IF...THEN ได้ดังนี้

- 1) IF E = LN AND Ech = LN THEN FUZZY OUTPUT = LN
- 2) IF E = LN AND Ech = SN THEN FUZZY OUTPUT = LN
- 3) IF E = LN AND Ech = ZE THEN FUZZY OUTPUT = LN
- 4) IF E = LN AND Ech = SP THEN FUZZY OUTPUT = SN
- 5) IF E = LN AND Ech = LP THEN FUZZY OUTPUT = SN
- 6) IF E = SN AND Ech = LN THEN FUZZY OUTPUT = LN
- 7) IF E = SN AND Ech = SN THEN FUZZY OUTPUT = SN
- 8) IF E = SN AND Ech = ZE THEN FUZZY OUTPUT = SN
- 9) IF E = SN AND Ech = SP THEN FUZZY OUTPUT = SN
- 10) IF E = SN AND Ech = LP THEN FUZZY OUTPUT = ZE
- 11) IF E = ZE AND Ech = LN THEN FUZZY OUTPUT = SN
- 12) IF E = ZE AND Ech = SN THEN FUZZY OUTPUT = SN
- 13) IF E = ZE AND Ech = ZE THEN FUZZY OUTPUT = ZE
- 14) IF E = ZE AND Ech = SP THEN FUZZY OUTPUT = ZE
- 15) IF E = ZE AND Ech = LP THEN FUZZY OUTPUT = SP
- 16) IF E = SP AND Ech = LN THEN FUZZY OUTPUT = ZE
- 17) IF E = SP AND Ech = SN THEN FUZZY OUTPUT = ZE
- 18) IF E = SP AND Ech = ZE THEN FUZZY OUTPUT = SP

- 19) IF E = SP AND Ech = SP THEN FUZZY OUTPUT = SP
- 20) IF E = SP AND Ech = LP THEN FUZZY OUTPUT = LP
- 21) IF E = LP AND Ech = LN THEN FUZZY OUTPUT = SP
- 22) IF E = LP AND Ech = SN THEN FUZZY OUTPUT = SP
- 23) IF E = LP AND Ech = ZE THEN FUZZY OUTPUT = LP
- 24) IF E = LP AND Ech = SP THEN FUZZY OUTPUT = LP
- 25) IF E = LP AND Ech = LP THEN FUZZY OUTPUT = LP

ในที่นี้ใช้ตัวดำเนินการ 'AND' โดยใช้ค่าต่ำสุด (minimum) ของตัวแปรเงื่อนไข (condition) ในการคำนวณผลลัพธ์รวมของฟัซซี่ ซึ่งการเลือกค่าต่ำสุดจะทำให้ความแข็งแกร่งของกฎที่ได้เลือกอยู่นั้นขึ้นกับค่าตัวแปรส่วนเงื่อนไขที่มีค่าความเป็นสมาชิกน้อยที่สุด

### 3.3.5 ขั้นที่ 5 การดีฟัซซิฟิเคชันของเอาต์พุต

การดีฟัซซิฟิเคชันของเอาต์พุตและการกำหนดวิธีการรวมผลของฟัซซี่เพื่อให้ได้ค่าเอาต์พุตที่เป็นค่าจริงในรูปคริซป์เซต (Crisp set) จากเงื่อนไขในขั้นตอนที่ 3 เมื่อพิจารณาความเป็นไปได้ของค่าเอาต์พุต จะเห็นว่าในแต่ละอินพุตจะได้ค่าเอาต์พุตฟัซซี่ออกมาหลายค่า จึงต้องหาค่าที่แม่นยำเพียงค่าเดียวเพื่อให้ได้ค่าของเอาต์พุตที่แท้จริงของตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก ซึ่งจะใช้วิธีการหาค่าศูนย์กลางเพื่อหาค่าเซนทรอยด์ โดยหาได้จากสมการ (3-8)

$$Y = \frac{\sum_{n=1}^N (\mu_n \times Y_n)}{\sum_{n=1}^N (\mu_n)} \quad (3-8)$$

เมื่อ  $Y =$  Crisp Output  
 $\mu =$  Membership Function  
 $n =$  Number of Membership

ผลการคำนวณค่าของ Output ของตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกด้วยวิธีการหาค่าศูนย์กลางแสดงดังตาราง 3-4

ตาราง 3-4 ผลการคำนวณ Output ของระบบ

Ech E	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
-5	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1
-4	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1
-3	-0.2	-0.2	-0.2	-0.15	-0.15	-0.15	-0.1	-0.1	-0.05	-0.05	-0.05
-2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0	0	0
-1	-0.15	-0.15	-0.15	-0.1	-0.1	-0.05	-0.05	-0.05	0.05	0.05	0.05
0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0	0	0	0.1	0.1	0.1
1	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	0.05	0.05	0.05	0.15	0.15	0.15
2	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2
3	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.15	0.15	0.15	0.2	0.2	0.2
4	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

### 3.3.6 ขั้นที่ 6 การเปลี่ยนค่าเอาต์พุตที่หาได้

หลังจากที่ได้ทำดีพีซซีพีเคชันเสร็จแล้วจะได้ผลลัพธ์ในการคำนวณในรูปเอาต์พุตซึ่งค่าเอาต์พุตนี้ยังไม่สามารถนำไปใช้ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรงได้โดยตรงจึงต้องนำมาผ่านกระบวนการที่จะทำการเปลี่ยนให้ค่าของเอาต์พุตสามารถควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรงได้วิธีการก็นำเอาต์พุตไปเปรียบเทียบกับตารางเอาต์พุต เป็นกระบวนการกลับกันกับการหาค่าอินพุตของพีซซีเพื่อหาค่าการเปลี่ยนแปลงของดิวตี้ไซเคิล (Duty cycle) ที่ไปควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรง ผลการเปลี่ยนค่าเอาต์พุตที่หาได้แสดงดังตาราง 3-5

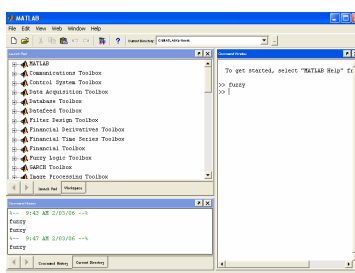
ตาราง 3-5 ผลการเปลี่ยนค่าเอาต์พุตที่หาได้

เอาต์พุต	ค่าการเปลี่ยนแปลงของตัวตั้งไขเคล (%)
[0.16,0.20]	-50
[0.11,0.15]	-40
[0.06,0.10]	-30
[0.01,0.05]	-20
0	0
[-0.05,-0.01]	20
[-0.10,-0.06]	30
[-0.15,-0.11]	40
[-0.20,0.16]	50

### การออกแบบฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic Controller) ด้วยโปรแกรม MATLAB

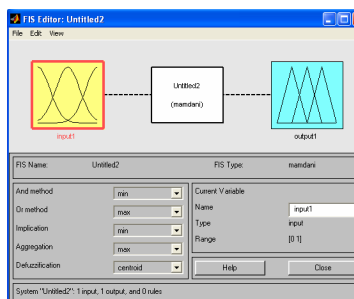
ในการออกแบบฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic Controller) สามารถคำนวณได้จากรูปแบบและสูตรดังที่ได้กล่าวข้างต้นแต่วิธีที่ง่ายและสะดวกกว่าคือวิธีการการออกแบบฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic Controller) ด้วยโปรแกรม MATLAB โดยมีขั้นตอนดังนี้

- 1) เปิดโปรแกรม MATLAB แล้วพิมพ์ “Fuzzy” ในช่อง Command เพื่อเปิดหน้าต่าง FIS Editor แสดงดังภาพประกอบ 3-58



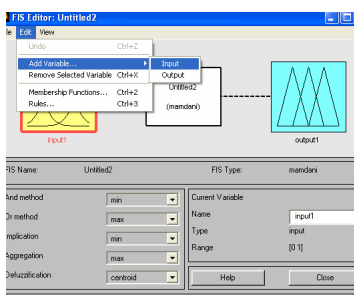
ภาพประกอบ 3-58 การออกแบบฟัซซี่ลอจิกด้วยโปรแกรม MATLAB

- 2) หน้าต่าง FIS Editor ใช้สำหรับตั้งค่าเริ่มต้นของระบบแสดงดังภาพประกอบ 3-59



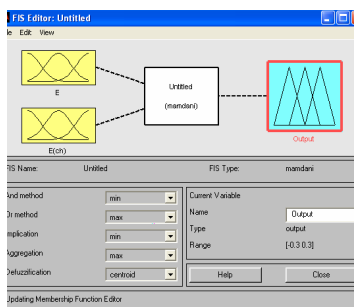
ภาพประกอบ 3-59 การออกแบบฟัซซี่ลอจิกด้วยโปรแกรม MATLAB

- 3) เลือก Edit - Add variable - Input เพื่อเพิ่ม Input แสดงดังภาพประกอบ 3-60



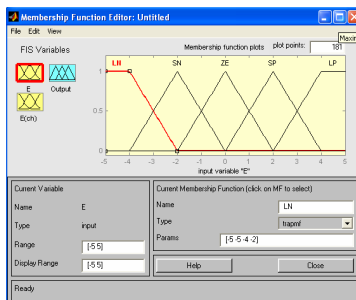
ภาพประกอบ 3-60 การออกแบบฟัซซี่ลอจิกด้วยโปรแกรม MATLAB

- 4) แสดงรูปแบบ Fuzzy Logic ซึ่งมี 2 Input คือ E (Error) และ  $E_{(ch)}$  (Error change) แสดงดังภาพประกอบ 3-61



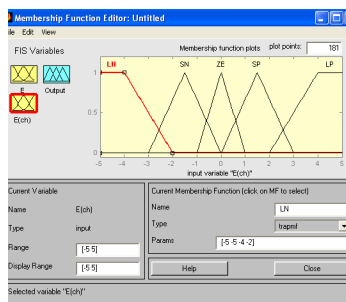
ภาพประกอบ 3-61 การออกแบบฟัซซี่ลอจิกด้วยโปรแกรม MATLAB

- 5) ตั้งค่าระดับของ Fuzzy Logic และสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์กราฟระหว่าง การเปลี่ยนแปลงของ Input 1 ( $E$ ) กับระดับความเป็นสมาชิก แสดงดังภาพประกอบ 3-62



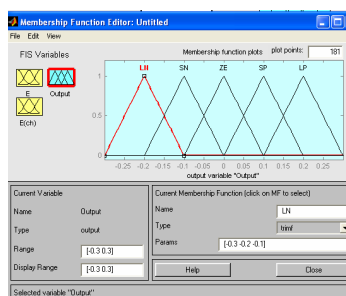
ภาพประกอบ 3-62 การออกแบบฟัซซี่ลอจิกด้วยโปรแกรม MATLAB

- 6) การเปลี่ยนแปลง Input2 ( $E_{ch}$ ) กับระดับความเป็นสมาชิกแสดงดังภาพประกอบ 3-63



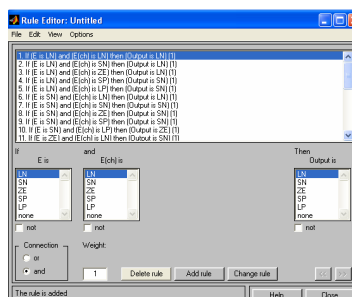
ภาพประกอบ 3-63 การออกแบบฟัซซี่ลอจิกด้วยโปรแกรม MATLAB

- 7) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลง Output กับระดับความเป็นสมาชิก แสดงดังภาพประกอบ 3-64



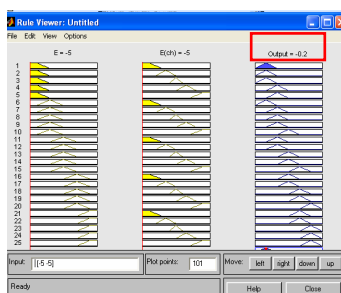
ภาพประกอบ 3-64 การออกแบบฟัซซี่ลอจิกด้วยโปรแกรม MATLAB

- 8) กด Edit - Rule เพื่อกำหนดกฎที่ใช้ใน Fuzzy Logic ทั้งหมด (25 กฎ) แสดงดังภาพประกอบ 3-65



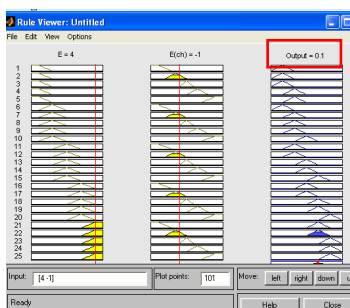
ภาพประกอบ 3-65 การออกแบบฟัซซี่ลอจิกด้วยโปรแกรม MATLAB

- 9) กด View Rule เพื่อทดลอง Simulate ค่า Output เช่น กรณี  $E = -5$ ,  $E(ch) = -5$  จะได้  $Output = -0.2$  แสดงดังภาพประกอบ 3-66



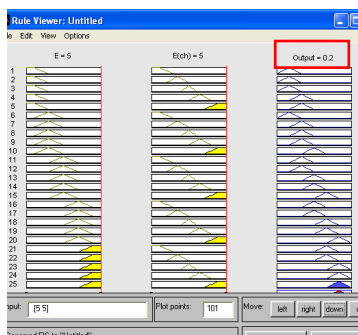
ภาพประกอบ 3-66 การออกแบบฟัซซี่ลอจิกด้วยโปรแกรม MATLAB

- กรณี  $E = 4$ ,  $E(ch) = -1$  จะได้  $Output = 0.1$  แสดงดังภาพประกอบ 3-67



ภาพประกอบ 3-67 การออกแบบฟัซซี่ลอจิกด้วยโปรแกรม MATLAB

กรณี  $E = 4, E(ch) = -1$  จะได้  $Output = 0.2$  แสดงดังภาพประกอบ 3-68



ภาพประกอบ 3-68 การออกแบบฟัซซี่ลอจิกด้วยโปรแกรม MATLAB

10) ตารางสรุปผลการจำลองระบบ (Simulation) แสดงดังตาราง 3-6

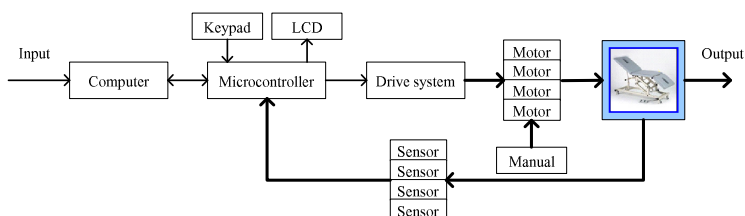
ตาราง 3-6 สรุปผลการจำลองระบบ (Simulation) ด้วยโปรแกรม MATLAB

Ech \ E	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
-5	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1
-4	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1
-3	-0.2	-0.2	-0.2	-0.15	-0.15	-0.15	-0.1	-0.1	-0.05	-0.05	-0.05
-2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0	0	0
-1	-0.15	-0.15	-0.15	-0.1	-0.1	-0.05	-0.05	-0.05	0.05	0.05	0.05
0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0	0	0	0.1	0.1	0.1
1	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	0.05	0.05	0.05	0.15	0.15	0.15
2	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2
3	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.15	0.15	0.15	0.2	0.2	0.2
4	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2



### 3.4 ขั้นตอนการออกแบบและสร้างระบบควบคุมเตียงกายภาพบำบัด

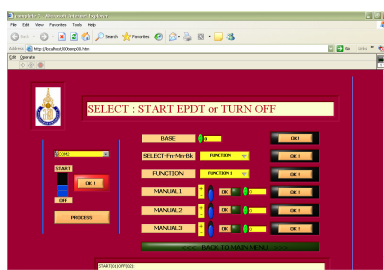
ระบบควบคุมเตียงกายภาพบำบัด ประกอบด้วย สัญญาณ (Input) คือค่าที่รับมาจากผู้ใช้ (User) โดยผ่านคอมพิวเตอร์เพื่อเชื่อมต่อ (Interface) กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (Micro controller board) ทำหน้าที่ประมวลผลเพื่อควบคุมตำแหน่งของเตียง นอกจากนี้สามารถควบคุมเตียงได้อีกวิธี คือการควบคุมผ่านคีย์แพด (Keypad) และแสดงผลผ่านจอ LCD โดยไม่ต้องควบคุมผ่านคอมพิวเตอร์ เมื่อทำการประมวลผลเสร็จก็จะส่งสัญญาณไปยังระบบขับเคลื่อน (Drive system) เพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์เพื่อให้ตำแหน่งของเตียงเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการและจะมีตัวตรวจรู้ (Sensor) ตรวจจับค่ามุมส่งกลับมาเพื่อประมวลผลในรอบต่อไปจนกว่าตำแหน่งของมุมเตียงกายภาพบำบัดเท่ากับมุมที่ต้องการรายละเอียดของส่วนประกอบ แสดงดังภาพประกอบ 3-69



ภาพประกอบ 3-69 Block diagram ระบบควบคุม Electric Postural Drainage Table

#### 3.4.1 การรับค่า (Input)

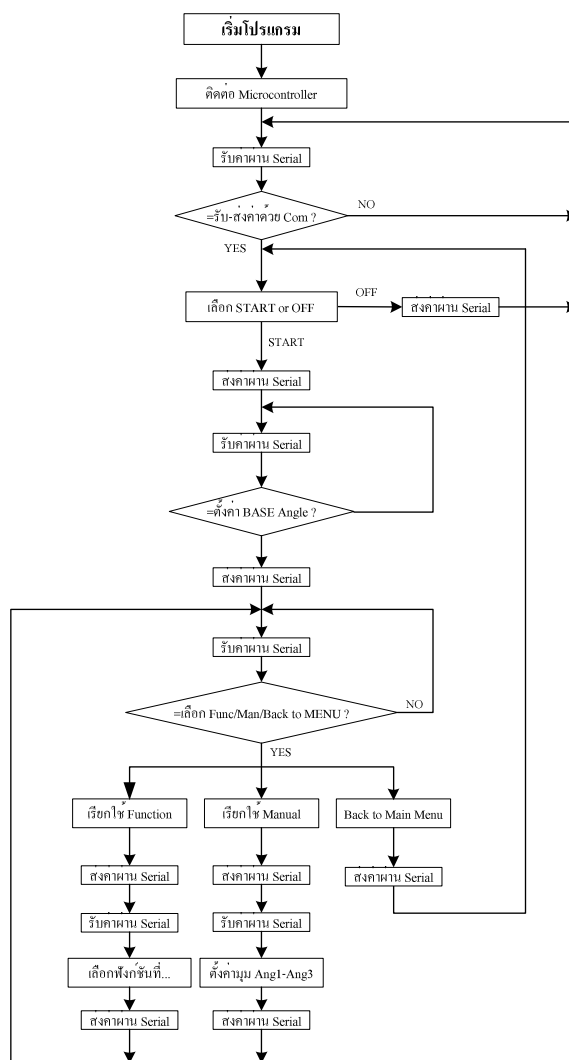
การรับค่า (Input) เป็นส่วนที่รับค่าจากผู้ใช้โดยตรง ด้วยวิธีสั่งการผ่านคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม LabVIEW แสดงดังภาพประกอบ 3-70 เหตุผลที่เลือกใช้โปรแกรม LabVIEW เนื่องจากเป็นโปรแกรมที่สามารถทำความเข้าใจเพื่อจะนำไปใช้งานได้สะดวกและรวดเร็ว สามารถเขียนภาคแสดงผลหรือส่วนที่ติดต่อกับผู้ใช้ได้สวยงาม และที่สำคัญสามารถใช้ LabVIEW เขียนโปรแกรมติดต่อ I/O ผ่านทางพอร์ตอนุกรม (Serial port) คอมพิวเตอร์ทำให้มีความสะดวกมากขึ้น



ภาพประกอบ 3-70 โปรแกรม LabVIEW

การเขียนโปรแกรมด้วยโปรแกรม LabVIEW มีขั้นตอนการทำงานตาม Flowchart แสดงดังภาพประกอบ 3-71 แต่ข้อสำคัญสำหรับการเขียนโปรแกรมนั้นต้องทำให้การเชื่อมต่อ (Interface) ระหว่างคอมพิวเตอร์กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถสื่อสารกันได้ (Synchronous) เพราะหากไม่สามารถสื่อสารกันได้ (Asynchronous) จะทำให้ฝั่งส่งฝั่งรับทำงานไม่ตรงกันทำให้การสื่อสารผิดพลาด

**Flowchart การเขียนโปรแกรมด้วย LabVIEW สำหรับควบคุมเตียงกายภาพบำบัด**

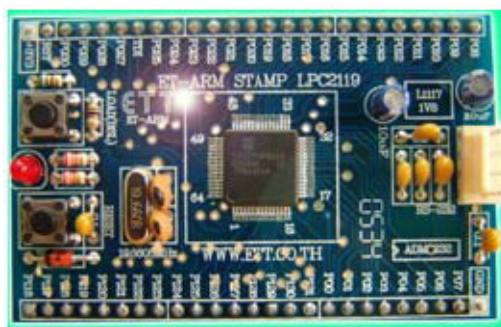


ภาพประกอบ 3-71 Flowchart การเขียนโปรแกรม LabVIEW ในการควบคุมเตียงกายภาพบำบัด

### 3.4.2 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (ARM-7)

#### 1) คุณสมบัติ ET-ARM7 STAMP LPC2119

ET-ARM7 STAMP LPC2119 เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูล ARM7TDMI-S Core เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ 16/32บิต ขนาด 64 ขา แบบใช้พลังงานต่ำและเลือกใช้ MCU เบอร์ LPC2119 ของ Philips โดยการออกแบบโครงสร้างของบอร์ดเน้นการจัดวางบอร์ดให้มีขนาดเล็กเพื่อให้ง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน โดยได้นำ MCU มาจัดวางร่วมกับอุปกรณ์ พื้นฐานที่จำเป็นและจัดขาออกมาให้ใช้งานภายนอก ซึ่งการจัดเรียงขาสัญญาณจะทำการจัดเรียงอย่างเป็นระเบียบเพื่อให้สามารถต่อใช้งานได้โดยสะดวก ตัวบอร์ดใช้ไฟ +3.3 โวลต์ สามารถรองรับ I/O ที่เป็นสัญญาณ 5 โวลต์ ได้ ตัวบอร์ดมีชุดเชื่อมต่อ (Connector) UART0 (RS-232) จำนวน 1 พอร์ต (Port) สำหรับทำการ Download Hex File หรือใช้งานในการสื่อสาร RS232



ภาพประกอบ 3-72 บอร์ด ET-ARM7 STAMP LPC2119

#### 2) การเขียนโปรแกรมด้วยภาษาซี สำหรับ บอร์ด ET-ARM7 STAMP LPC2119

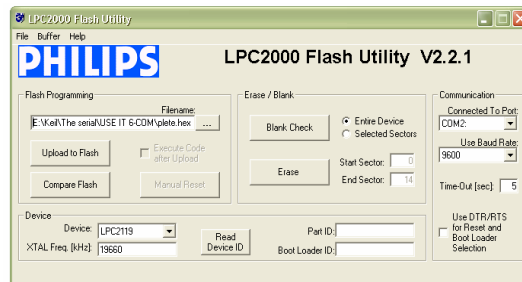
ส่วนนี้ถือเป็นหัวใจสำคัญของการควบคุม เนื่องจากจำเป็นต้องเขียนโปรแกรมเพื่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM-7 มีความสามารถในการควบคุมระบบให้เป็นไปตามที่ต้องการ รายละเอียดการเขียนโปรแกรม สามารถสั่งการด้วยคอมพิวเตอร์ ผ่านพอร์ตอนุกรม RS-232 หรือสั่งการด้วยคีย์แพด (Keypad) สามารถเรียกใช้ฟังก์ชัน (Function) หรือเลือกทำระบบที่ละมุ่ม (Manual) ในการปรับมุ่มทั้ง 3 ส่วนของเตียงได้ สามารถระบุมุ่มของส่วนฐาน (Base section) ได้ และเมื่อต้องการปิด (Turn off) ระบบโปรแกรมต้องตรวจสอบว่ามุ่มอยู่ในท่าพร้อมที่จะปิด (Turn off) หรือไม่ก่อนที่จะลดความสูงของเตียงให้อยู่ในค่าเริ่มต้น

โปรแกรมสำหรับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM-7 ใช้โปรแกรม Keil แสดงดังภาพประกอบ 3-37(a) ในการเขียนโปรแกรมควบคุมด้วยภาษาซีและคอมไพล์ (Compile) เพื่อให้เป็นนามสกุล .hex จากนั้น File Download ด้วยโปรแกรม LPC2000 แสดงดังภาพประกอบ 3-37(b)

```

0000 #include <LPC2119.h>
0001 #include <math.h>
0002 #include <stdio.h>
0003 #include <string.h>
0004 #include <stdlib.h>
0005 #include <conio.h>
0006 #include <ctype.h>
0007 #include <unistd.h>
0008 #include <fcntl.h>
0009 #include <sys/types.h>
0010 #include <sys/stat.h>
0011 #include <sys/time.h>
0012 #include <sys/mman.h>
0013 #include <sys/ioctl.h>
0014 #include <sys/socket.h>
0015 #include <sys/poll.h>
0016 #include <sys/select.h>
0017 #include <sys/eventfd.h>
0018 #include <sys/uio.h>
0019 #include <sys/xattr.h>
0020 #include <sys/sendfile.h>
0021 #include <sys/rseq.h>
0022 #include <sys/epoll.h>
0023 #include <sys/sem.h>
0024 #include <sys/shm.h>
0025 #include <sys/msg.h>
0026 #include <sys/ipc.h>
0027 #include <sys/wait.h>
0028 #include <sys/prctl.h>
0029 #include <sys/ptrace.h>
0030 #include <sys/timex.h>
0031 #include <sys/utsname.h>
0032 #include <sys/auxv.h>
0033 #include <sys/personality.h>
0034 #include <sys/auxv.h>
0035 #include <sys/auxv.h>
0036 #include <sys/auxv.h>
0037 #include <sys/auxv.h>
0038 #include <sys/auxv.h>
0039 #include <sys/auxv.h>
0040 #include <sys/auxv.h>
0041 #include <sys/auxv.h>
0042 #include <sys/auxv.h>
0043 #include <sys/auxv.h>
0044 #include <sys/auxv.h>
0045 #include <sys/auxv.h>
0046 #include <sys/auxv.h>
0047 #include <sys/auxv.h>
0048 #include <sys/auxv.h>
0049 #include <sys/auxv.h>
0050 #include <sys/auxv.h>
0051 #include <sys/auxv.h>
0052 #include <sys/auxv.h>
0053 #include <sys/auxv.h>
0054 #include <sys/auxv.h>
0055 #include <sys/auxv.h>
0056 #include <sys/auxv.h>
0057 #include <sys/auxv.h>
0058 #include <sys/auxv.h>
0059 #include <sys/auxv.h>
0060 #include <sys/auxv.h>
0061 #include <sys/auxv.h>
0062 #include <sys/auxv.h>
0063 #include <sys/auxv.h>
0064 #include <sys/auxv.h>
0065 #include <sys/auxv.h>
0066 #include <sys/auxv.h>
0067 #include <sys/auxv.h>
0068 #include <sys/auxv.h>
0069 #include <sys/auxv.h>
0070 #include <sys/auxv.h>
0071 #include <sys/auxv.h>
0072 #include <sys/auxv.h>
0073 #include <sys/auxv.h>
0074 #include <sys/auxv.h>
0075 #include <sys/auxv.h>
0076 #include <sys/auxv.h>
0077 #include <sys/auxv.h>
0078 #include <sys/auxv.h>
0079 #include <sys/auxv.h>
0080 #include <sys/auxv.h>
0081 #include <sys/auxv.h>
0082 #include <sys/auxv.h>
0083 #include <sys/auxv.h>
0084 #include <sys/auxv.h>
0085 #include <sys/auxv.h>
0086 #include <sys/auxv.h>
0087 #include <sys/auxv.h>
0088 #include <sys/auxv.h>
0089 #include <sys/auxv.h>
0090 #include <sys/auxv.h>
0091 #include <sys/auxv.h>
0092 #include <sys/auxv.h>
0093 #include <sys/auxv.h>
0094 #include <sys/auxv.h>
0095 #include <sys/auxv.h>
0096 #include <sys/auxv.h>
0097 #include <sys/auxv.h>
0098 #include <sys/auxv.h>
0099 #include <sys/auxv.h>
0100 #include <sys/auxv.h>
    
```

(a)



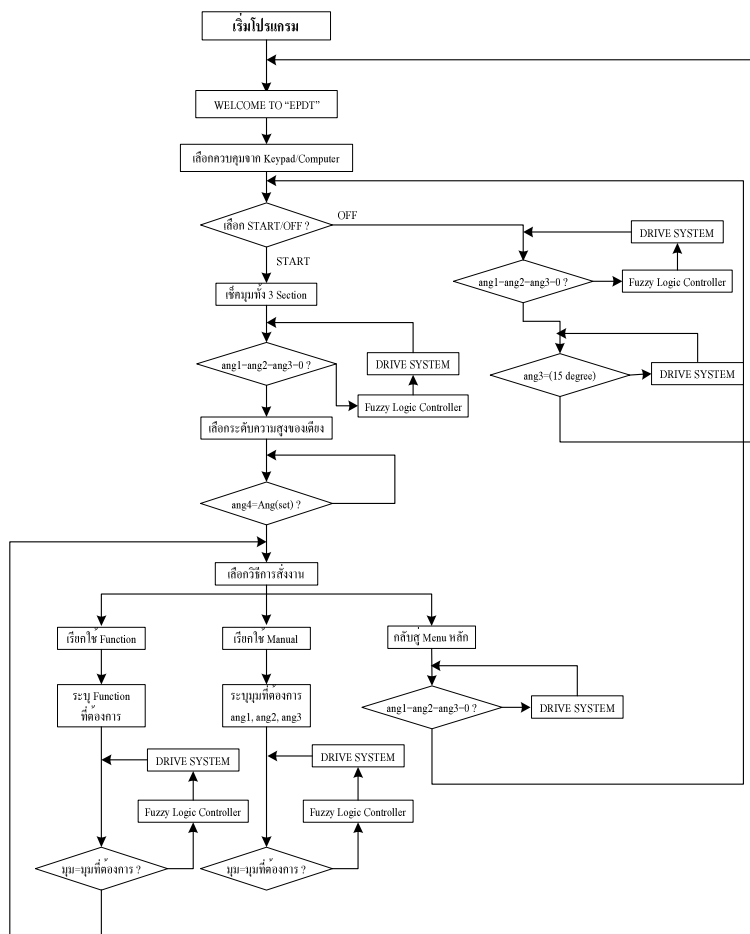
(b)

ภาพประกอบ 3-73 (a) โปรแกรม Keil สำหรับเขียนโปรแกรม

(b) โปรแกรม File Download หรือ LPC 2000

### 3) Flowchart การเขียนโปรแกรมด้วยภาษาซีสำหรับควบคุมเตียงกายภาพบำบัด แสดงดัง

ภาพประกอบ 3-74



ภาพประกอบ 3-74 Flowchart การเขียนโปรแกรมด้วยภาษาซีในการควบคุมเตียงกายภาพบำบัด

การเขียนโปรแกรมสำหรับบอร์ด ET-ARM 7 STAMP LPC 2119 มีขั้นตอนการทำงานตาม Flowchart แสดงดังภาพประกอบ 3-74 และข้อสำคัญในการเขียนโปรแกรมต้องทำให้การเชื่อมต่อ (Interface) ระหว่างคอมพิวเตอร์กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถสื่อสารกันได้ (Synchronous) ดังนั้นต้องแม่นยำในจังหวะเวลาของการสื่อสารข้อมูล

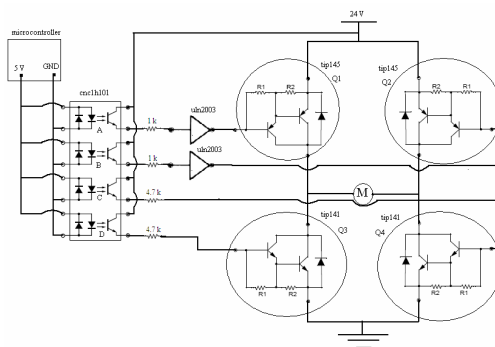
### 3.4.3 ระบบขับเคลื่อน (Drive system)

#### 1) ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรง

การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ใช้ Pulse width modulation (PWM) ส่งสัญญาณจากไมโครคอนโทรลเลอร์ จากนั้นวงจรจะขับ Optoisolators เบอร์ QTC 4N24 เพื่อขับ TIP ที่ใช้ในการควบคุมการกลับทิศและปรับระดับความเร็วของมอเตอร์ แสดงดังภาพประกอบ 3-75 ประกอบด้วย

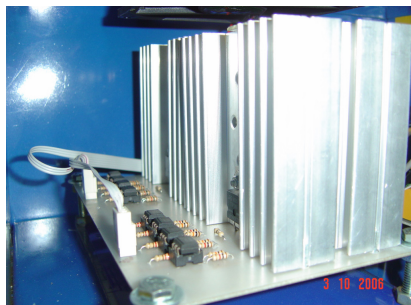
- Optoisolators เบอร์ QTC 4N24
- Q1, Q2 ใช้ TIP145 เป็นทรานซิสเตอร์แบบซิลิกอน (Silicon Transistor) ชนิด PNP
- Q3, Q4 ใช้ TIP141 เป็นทรานซิสเตอร์แบบซิลิกอน (Silicon Transistor) ชนิด NPN

เมื่อต้องการให้มอเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกาทำได้โดยการสวิตช์ให้ Q1 และ Q4 ON สามารถสวิตช์โดยสั่งให้พอร์ต A และ C ของตัว Optoisolators CNC1H101 ทำงานและเมื่อต้องการให้มอเตอร์หมุนทวนเข็มนาฬิกา สามารถทำได้โดยการสวิตช์ให้ Q2 และ Q3 ON ซึ่งสามารถสวิตช์โดยสั่งให้พอร์ต B และ D ของตัว Optoisolators CNC1H101 ทำงาน การกำหนดความเร็วทำได้โดยการเพิ่ม-ลด-duty cycle (Duty cycle) แสดงดังภาพประกอบ 3-75



ภาพประกอบ 3-75 ออกแบบวงจรขับ (Drive) มอเตอร์

ผลการสร้างวงจรชุดขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรง แสดงดังภาพประกอบ 3-76



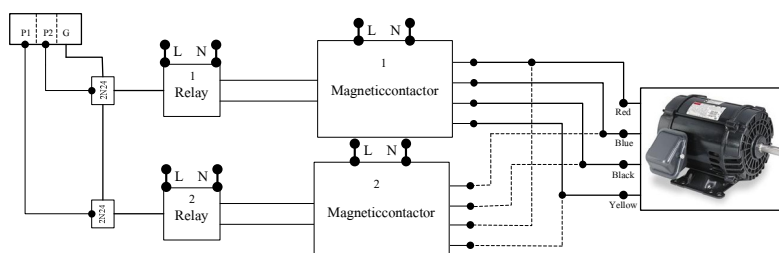
ภาพประกอบ 3-76 ผลการสร้างวงจรชุดขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรง

## 2) ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสสลับ

การควบคุมการกลับทิศของมอเตอร์นำสัญญาณจากไมโครคอนโทรลเลอร์ ที่เป็นสัญญาณลอจิก 1 และ 0 มาขับ Optoisolators เบอร์ QTC 4N24 ในการตัดต่อหน้าสัมผัสของรีเลย์เพื่อควบคุมกระแสที่ผ่านขดลวด (Coil) ของแมกเนติกคอนแทคเตอร์ (Magnetic contactor) ที่ใช้ในการควบคุมการสลับสายไฟของมอเตอร์ แสดงดังภาพประกอบ 3-77 ประกอบด้วย

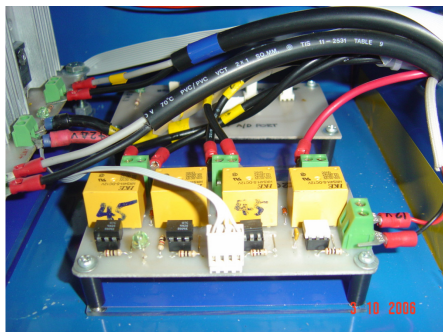
- Optoisolators เบอร์ QTC 4N24
- Relay 5A 240 VAC

เมื่อการต้องการให้มอเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกา ทำได้โดยการสั่งให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ส่งลอจิก “0” มายัง P1 และส่งลอจิก “1” มายัง P2 จะทำให้รีเลย์ตัวที่ 1 ทำงาน เมื่อรีเลย์ต่อหน้าสัมผัสจะทำให้แมกเนติกคอนแทคเตอร์ (Magnetic contactor) 1 เชื่อมต่อ Line Neutron เข้ากับสายไฟเส้นสีแดง- น้ำเงิน และ ดำ – เหลือง จะทำให้มอเตอร์หมุนในทิศตามเข็มนาฬิกาที่ต้องการ แต่หากต้องการให้มอเตอร์หมุนในทิศตรงข้ามก็สั่งให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ส่งลอจิก “1” มายัง P1 และส่งลอจิก “0” มายัง P2 เพื่อสลับสายทำให้มอเตอร์หมุนในทิศตรงข้ามได้



ภาพประกอบ 3-77 ออกแบบวงจรขับ (Drive) มอเตอร์

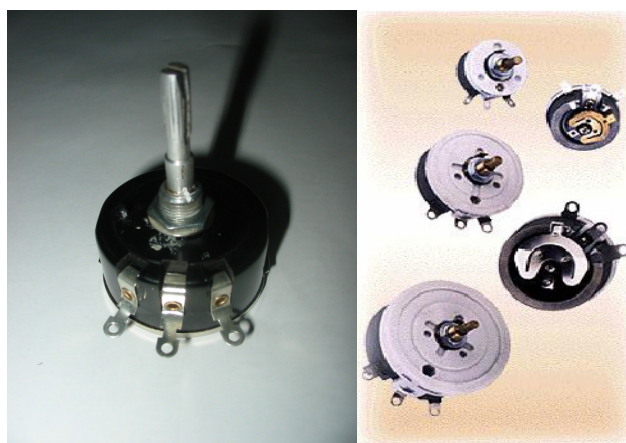
ผลการสร้างวงจรชุดขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรง แสดงดังภาพประกอบ 3-78



ภาพประกอบ 3-78 ผลการสร้างวงจรชุดขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรง

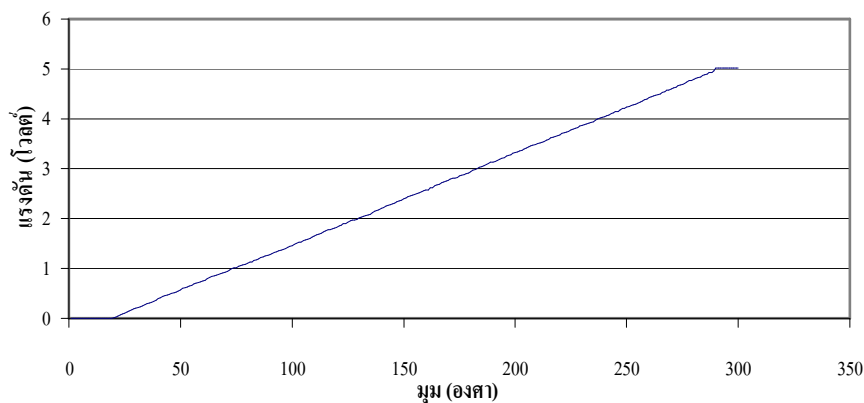
#### 3.4.4 ตัวตรวจรู้ (Sensor)

เลือกใช้โพเทนชิโอมิเตอร์ (Potentiometer) แบบ wire wound ทำหน้าที่ในการวัดมุมซึ่งมีความละเอียดในการวัดมุมสูง และใช้พื้นที่ในการติดตั้งไม่มาก ที่สำคัญเนื่องจากโพเทนชิโอมิเตอร์ (Potentiometer) ชนิดนี้ให้ความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นสูงยิ่งขึ้นได้จากผลการทดลอง ซึ่งทดลองโดยการนำโพเทนชิโอมิเตอร์ (Potentiometer) แบบ wire wound มาจ่ายไฟ 5 โวลต์ แล้ววัดค่าแรงดันในแต่ละมุมของโพเทนชิโอมิเตอร์ (Potentiometer) แสดงดังภาพประกอบ 3-79



ภาพประกอบ 3-79 โพเทนชิโอมิเตอร์ (Potentiometer)

กราฟที่ 3-1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน (โวลต์) กับมุมของ Potentiometer (องศา)

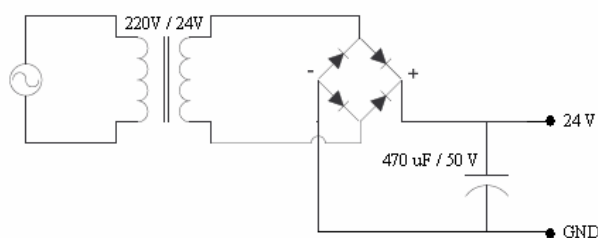


จากกราฟที่ 3-1 สรุปได้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับมุมแต่ละองศาของ โปเทนชิโอ มิเตอร์ (Potentiometer) มีความเป็นเชิงเส้นสูงระหว่างมุมที่ 20 องศา-290 องศา จึงสามารถนำมาใช้เป็นตัวตรวจรู้ (Sensor) ตรวจจับมุมของเตียง โดยค่าแรงดันของแต่ละมุมจะมีแรงดันที่แตกต่างกัน ตามความสัมพันธ์ตามผลการทดลอง

### 3.4.5 แหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power supply)

#### 1) แหล่งจ่ายไฟฟ้า 24 โวลต์ (Power supply 24 V)

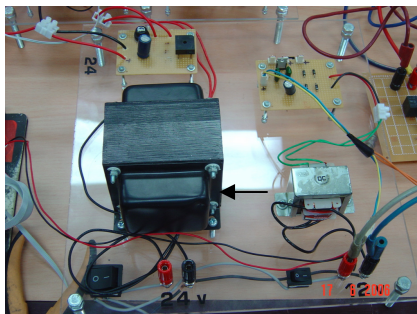
จ่ายให้กับมอเตอร์กระแสตรง 24 โวลต์ ที่ใช้ในระบบขับเคลื่อน โดยการนำกระแสไฟฟ้า 220 โวลต์ผ่านหม้อแปลงแปลงแรงดัน จากนั้นผ่านวงจรบริดจ์ (Bridge) แบบ Single phase full-wave ทำให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงและผ่านตัวเก็บประจุเพื่อให้แรงดันเรียบขึ้น แสดงดัง ภาพประกอบ 3-80



ภาพประกอบ 3-80 แหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power supply) 24 โวลต์



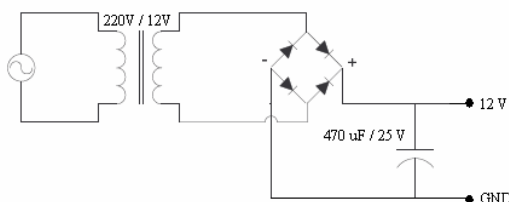
ผลการสร้างวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้า 24 โวลต์ (Power supply 24 V) แสดงดังภาพประกอบ 3-81



ภาพประกอบ 3-81 แหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power supply) 24 โวลต์

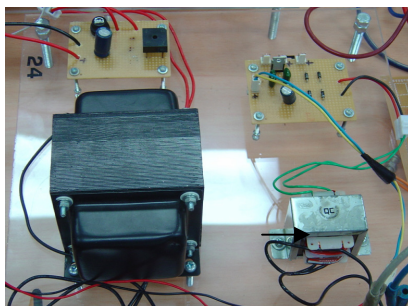
2) แหล่งจ่ายไฟฟ้า 12 โวลต์ (Power supply 12 V)

จ่ายให้กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในการประมวลผล โดยการนำกระแสไฟฟ้า 220 โวลต์ผ่านหม้อแปลง จากนั้นผ่านวงจรบริดจ์ (Bridge) แบบ Single phase full-wave ทำให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงและผ่านตัวเก็บประจุเพื่อให้แรงดันเรียบขึ้น แสดงดังภาพประกอบ 3-82



ภาพประกอบ 3-82 แหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power supply) 12 โวลต์

ผลการสร้างวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้า 12 โวลต์ (Power supply 12 V) แสดงดังภาพประกอบ 3-83



ภาพประกอบ 3-83 แหล่งจ่ายไฟฟ้า 12 โวลต์ (Power supply 12 V)

### 3.5 โครงสร้างเตียงกายภาพบำบัดที่เสร็จสมบูรณ์

หลังจากการออกแบบโครงสร้างเสร็จสิ้น จากนั้นได้ประกอบโครงสร้างกับระบบขับเคลื่อนและทดลองขับเคลื่อนเพื่อดูความราบเรียบในการเคลื่อนที่ ซึ่งผลการทดสอบพบว่าระบบการเคลื่อนที่ทุกส่วนอยู่ในเกณฑ์ดี จากนั้นก็ได้ออกแบบและสร้างส่วนประกอบในการควบคุม เช่น ระบบขับเคลื่อน ระบบตัวตรวจรู้ (Sensor) ระบบควบคุมด้วยฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy logic) ซึ่งระบบทุกอย่างพร้อมที่จะใช้ในการทดลองในขั้นตอนต่อไป โดยรูปแบบโครงสร้างและระบบควบคุมของเตียงกายภาพบำบัดแบบสมบูรณ์ แสดงดังภาพประกอบ 3-84



ภาพประกอบ 3-84 รูปแบบเตียงกายภาพบำบัดแบบสมบูรณ์