

# รายงานฉบับสมบูรณ์

## โครงการ

การพัฒนาเครื่องทดสอบกำลังอัดของดินขนาด 50 กิโลนิวตัน



ผศ. คณิต ทองพิสิฐสมบัติ

อาจารย์ณัฐพล ศรีสิทธิโกศล

อาจารย์สรัญญา ชมฉัยยา

อาจารย์เอ๋อารี กัลดานนท์

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยสยาม

## โครงการ การพัฒนาเครื่องทดสอบกำลังอัดของดินขนาด 50 กิโลนิวตัน

(Development of a 50 kN Digital Load Frame Testing Machine)

ชื่อผู้ดำเนินการ ผศ. คณิต ทองพิสิฐสมบัติ (หัวหน้าโครงการ)

- อ. สรัญญา ชมฉัยยา
- อ. เอื้ออารี กัลวาทานนท์
- อ. ณัฐพล ศรีสิทธิโชคกุล

### บทคัดย่อ

ในการศึกษาเกี่ยวกับปฐพีกลศาสตร์ไม่ว่าจะเป็นการทดสอบ CBR CU/CD, Unconfined, Triaxial Test หรือการทดสอบเพื่อหาค่า stress/strain ของดินตัวอย่าง จำเป็นต้องมีเครื่องทดสอบกำลังอัดดิน ใช้ในการทดสอบกำลังอัดของดินเรียกว่า โหลดเฟรม ซึ่งสามารถให้แรงกดอัดตัวอย่างได้ขนาด 50 กิโลนิวตัน และสามารถปรับความเร็วทดสอบของแผ่นกดตัวอย่างคือ Strain rate อยู่ในช่วง 0.00001 ถึง 9.99999 มิลลิเมตรต่อนาที งานวิจัยนี้จึงได้ทำการพัฒนาเครื่องทดสอบกำลังอัดตัวอย่างดิน โดยการประยุกต์ใช้ระบบอิเล็กทรอนิกส์ในการควบคุมความเร็วและควบคุมการทำงานการเคลื่อนที่ขึ้น, ลงของแผ่นกดตัวอย่างดิน โดยมีไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC-877 ใช้ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์แบบสเต็ปปีงมอเตอร์ ซึ่งมีชุดขับเคลื่อนสเต็ปปีงมอเตอร์แบบไมโครสเต็ปรุ่น IM483 พร้อมชุดเกียร์ซึ่งมีอัตราทด 16/1000 มีระยะเกียร์วสกรูที่ใช้เคลื่อนแผ่นกดขึ้นขนาด 6 mm/rev ชุดสเต็ปปีงมอเตอร์ได้ตั้งค่าอิเล็กทรอนิกส์เกียร์ (Resolution) ไว้ที่ 10,000 step/rev ใช้สัญญาณควบคุม PWM (Pulse Width Modulate) ในช่วง 2,000 ถึง 26,000 (0.1 ms – 1 ms) จะได้ความเร็วแผ่นกดในช่วง 1 ถึง 13 มิลลิเมตรต่อนาที มีวงจรหารจำนวน 5 หลักเพื่อปรับค่าให้ได้ค่าความเร็วในช่วง 0.00001 ถึง 13.00000 มิลลิเมตรต่อนาที มีคีย์คำสั่งงานควบคุม 3 คีย์ในการสั่งงานให้แผ่นกดตัวอย่างเคลื่อนที่ขึ้น ลง และหยุด

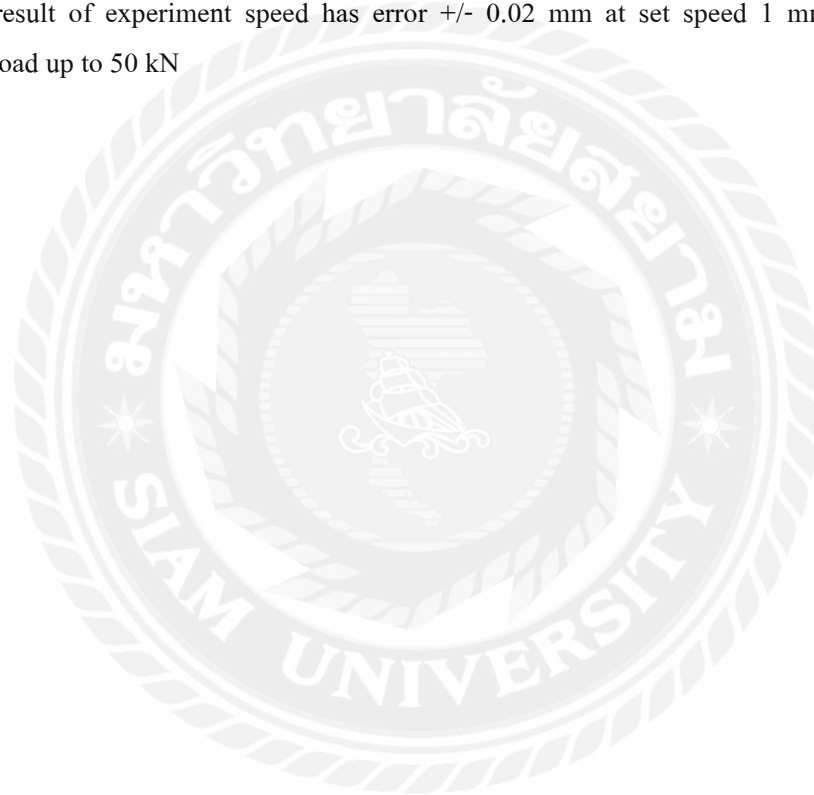
ผลการทดสอบการทำงานของเครื่องทดสอบที่พัฒนาขึ้นพบว่าสามารถปรับความเร็วของเพลาทกดตัวอย่างดินมีความผิดพลาด $\pm 0.02$  มิลลิเมตรที่ความเร็ว 1 มิลลิเมตรต่อนาที และสามารถรับแรงกดได้ 50 กิโลนิวตัน

### Abstract

The investigation Geotechnique test in laboratory for example, CBR, Quick Undrain and Triaxial Test wants compression Load Frame which it has capacity 50 kN and has variable speed

0.00001 to 9.99999 mm/min. So the specification of research is design compression a twin column with an integral fully variable speed with using Microcontroller PIC – 877 controls IM483 driver unit motive power from stepping motor and mechanical gear ratio 16/1000 with the screw jack pitch 6 mm/rev to transfer energy for compression. The control speed sets the resolution of IM483 driver 10,000 step/rev with PWM signal (Pulse Width Modulate) generates from microcontroller 2,000 to 26,000 step/sec (0.1 ms – 1 ms), so the result of speed is 1 to 13 mm/min. There are electronic divide circuit 5 digits for adjustable speed 0.00001 – 13.00000 mm/min. The machine has 3 - key function to control up, down and stop motion. And limit switch controls upper and lower motion in interval 100 mm

The result of experiment speed has error +/- 0.02 mm at set speed 1 mm/Min. and the machine can load up to 50 kN



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	i
สารบัญ	iii
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนของการดำเนินงานวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	2
2 เครื่องทดสอบกำลังอัดของดิน 50 กิโลนิวตัน	3
2.1 เครื่องทดสอบกำลังดินระบบเก่า	3
2.2 ค่าความเร็วของแผ่นกดตัวอย่างของเครื่องทดสอบ กำลังอัดของดินแต่ละมาตรฐานการทดสอบ	6
3 การออกแบบเครื่องทดสอบกำลังอัดของดินขนาด 50 กิโลนิวตัน	7
3.1 คุณลักษณะเฉพาะของตัวเครื่อง	8
3.2 การออกแบบโครงสร้างของโหลดเฟรม Load Frame	9
3.3 การออกแบบชุด เกียร์ Gear Screw jack ใช้เป็นชุดส่งกำลัง	12
3.4 ออกแบบและสร้างชุดขับเคลื่อนมอเตอร์และ สเตรปมอเตอร์เป็นชุดกำลัง	13
3.5 การออกแบบชุดปรับความเร็วส่วนอินพุทค่าความเร็ว และหน่วยแสดงผล	17
3.6 การออกแบบส่วนอินพุทค่าความเร็วให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ และการสร้างสัญญาณ PWM (Pulse width Modulate)	18
3.7 การออกแบบการควบคุมการทำงานของเครื่องทดสอบโดยใช้ PLC	21
3.8 ชิ้นงานจริงที่ได้จากการออกแบบและส่วนประกอบเป็น เครื่องทดสอบแรงอัดดิน	22
4 ผลการทดลอง	26
4.1 ขั้นตอนการทดสอบความเร็วการเคลื่อนที่ขึ้นของเพดกดตัวอย่างดิน	26
4.2 ขั้นตอนการทดสอบรับแรงอัด 50 กิโลนิวตัน	27
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	29

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันการทดลองเรื่อง CBR (California Bearing –Ratio) หรือ Unconfined Compression Test ในห้องทดลองด้านปฐพีกลศาสตร์ ยังคงใช้เครื่องกดตัวอย่างดินระบบเก่าที่ใช้งานมานาน ซึ่งเป็นระบบที่ขับเคลื่อนโดยใช้แรงงานคนที่เรียกว่ารุ่นมือหมุนหรือบางรุ่นใช้มอเตอร์ไฟฟ้า ภายในตัวเครื่องจะมีชุดเกียร์หลายชุดทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนความเร็วในการเคลื่อนที่แผ่นเพลทกดตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบนั้น ในการเลือกอัตราทดของเกียร์แต่ละครั้งจะใช้เวลานานและยุ่งยาก เพราะต้องใช้เครื่องมือกลปะจําในการถอดปรับกลไกและต้องเลือกอัตราทดให้ถูกต้องซึ่งมีอัตราทดให้เลือกรวมอยู่ 25 ระดับความเร็ว จึงทำให้เครื่องทดสอบระบบเก่ามีปัญหาและข้อผิดพลาดในการควบคุมความเร็วของแผ่นกดตัวอย่างให้มีความเร็วสม่ำเสมอตามมาตรฐานการทดสอบเป็นไปได้ยากสำหรับรุ่นมือหมุน และเกิดความล่าช้าไม่ต่อเนื่องในการปรับเปลี่ยนชุดเกียร์ จากปัญหาที่เกิดขึ้นกับเครื่องทดสอบในระบบเก่าจึงเป็นสาเหตุทำให้มีการพัฒนาเครื่องทดสอบกำลังอัดดินแบบ Digital load Frame ขนาด 50 กิโลนิวตันขึ้น โดยมีการควบคุมความเร็วด้วยระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งสามารถควบคุมความเร็วให้ถูกต้องแม่นยำและต่อเนื่อง สามารถแสดงผลเป็นแบบเชิงตัวเลขมีการรับค่าอินพุตจากคีย์ตัวเลข และสามารถปรับเปลี่ยนความเร็วได้ละเอียดในช่วง 0.00001 - 9.99999 มิลลิเมตรต่ออนาที ซึ่งสามารถนำความรู้จากผลของการวิจัยนี้ไปใช้การอัปเดตเครื่องทดสอบกำลังอัดดินระบบเก่าที่มีอยู่เดิม ซึ่งจะใช้ตัวโครงสร้างเดิมแต่ปรับเปลี่ยนชุดส่งกำลังโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าแบบสเตรปิงมอเตอร์แทนของเดิมที่ใช้มือหมุนและชุดควบคุมและปรับเปลี่ยนความเร็วการขึ้น-ลงของแผ่นกดตัวอย่างซึ่งของเดิมเป็นชุดเกียร์ปรับเปลี่ยน โดยเลือกอัตราทดทางกลมาใช้ในระบบควบคุมความเร็วโดยใช้ชุดควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์หรือจะสร้างเครื่องทดสอบกำลังอัดดินขึ้นมาใหม่ก็ได้ จึงมีประโยชน์ได้สองเหตุผลซึ่งจะทำให้ลดการนำเข้าในกรณีที่จะต้องซื้อเครื่องใหม่หรือเป็นการอนุรักษ์เครื่องทดสอบเดิมที่มีอยู่ให้ใช้งานได้นานและดีขึ้น อีกทั้งยังมีความถูกต้องแม่นยำสูงตรงตามมาตรฐานการทดสอบ เครื่องทดสอบแรงอัดดินนี้สามารถนำไปใช้ในการทดสอบทางด้านปฐพีกลศาสตร์ได้หลายรูปแบบ เช่น การทดสอบ CBR (California Bearing-Ratio) load/strain related testes, Quick Undrain Triaxial Tests and Unconfined compression Tests. Direct shear

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อพัฒนาเครื่อง Digital Load Frame ขนาด 50 กิโลนิวตัน  
สำหรับงานทดสอบดินในงานด้านปฐพีกลศาสตร์

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ออกแบบและสร้างอุปกรณ์กลของเครื่องทดสอบกำลังอัดที่สามารถรับแรงอัดได้ 50 กิโลนิวตัน
- 1.3.2 ออกแบบและสร้างระบบควบคุมการทำงานของเครื่องและระบบปรับความเร็วของแผ่นกดตัวอย่างที่มีความละเอียดในช่วง 0.00001 – 9.99999 มิลลิเมตรต่ออนาที
- 1.3.3 ทดสอบการทำงานของเครื่อง Digital Load Frame 50 kN ที่พัฒนาขึ้น

## 1.4 ขั้นตอนของการดำเนินงานวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาการทำงานของเครื่อง Digital Load frames 50 kN
- 1.4.2 ออกแบบและสร้าง Load Frames ให้รับน้ำหนักแรงกดตัวอย่างดินได้ 50 kN
- 1.4.3 ออกแบบชุดเกียร์ Gear Screw jack ใช้เป็นชุดส่งกำลัง
- 1.4.4 ออกแบบและสร้างชุดขับเคลื่อนเครื่องโดยใช้มอเตอร์ปัดมอเตอร์
- 1.4.5 ออกแบบและสร้าง  
ส่วนแสดงผลและส่วนอินพุตค่าความเร็วของการทดสอบและสร้างสัญญาณ PWM โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 877
- 1.4.6 ออกแบบและสร้างชุดควบคุมการสั่งการทำงานของเครื่องขึ้น ลง หยุด และลิมิตสวิทช์ป้องกันเมื่อขึ้นสูงสุดและลงต่ำสุด โดยใช้ PLC ควบคุม
- 1.4.7 ประกอบเครื่องต้นแบบและทดสอบส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่อง
- 1.4.8 รวบรวมข้อมูลและสรุปผลงานวิจัย

## 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

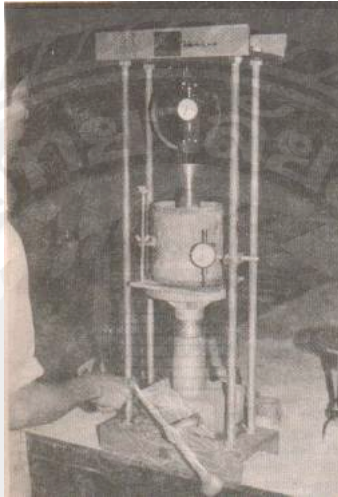
ได้เครื่องต้นแบบ Digital Load Frame ขนาด 50 กิโลนิวตัน  
ที่มีสมรรถนะเทียบเท่ากับเครื่องที่ผลิตจากต่างประเทศ ในราคาที่ต่ำกว่า

## บทที่ 2

### เครื่องทดสอบกำลังอัดของดิน 50 กิโลนิวตัน

#### 2.1 เครื่องทดสอบกำลังดินระบบเก่า

จากสภาพปัจจุบันเครื่องทดสอบกำลังอัดของดินในระบบเก่าที่ยังมีใช้ในห้องทดสอบด้านรัฐพิทยศาสตร์ มีด้วยกันหลายแบบและหลายขนาด เช่น แบบมีเสารับกำลังอัดสี่เสา (รูป 2.1.1) หรือแบบมีเสารับกำลังอัดสองเสา (รูป 2.1.2) ขนาดที่ใช้กันอยู่ก็จะมีขนาด 10 กิโลนิวตัน 50 กิโลนิวตัน และ 100 กิโลนิวตัน ส่วนระบบส่งกำลังก็จะมีอยู่สองแบบคือการส่งกำลังด้วยแรงคนหรือเราเรียกว่า รุนมือหมุน กับใช้มอเตอร์ไฟฟ้า การปรับความเร็วทำได้โดยการปรับอัตราทดของชุดเกียร์ (รูป 2.1.3)



รูป 2.1.1 แสดงโหลดเฟลมแบบสี่เสารุ่นมือหมุนขนาด 50 กิโลนิวตัน



รูป 2.1.2 แสดงโหลดเฟลมสองเสารุ่นมือหมุนขนาด 10 กิโลนิวตัน



รูป 2.1.3 แสดงโหลดเพลมแบบสองเสาใช้มอเตอร์ไฟฟ้าหรือใช้มือหมุนก็ได้รุ่น Tritest 10 kN

โหลดเพลม Tritest 10 kN สามารถใช้ได้ 2 ระบบคือ ระบบมือหมุนหรือระบบมอเตอร์ที่สามารถปรับความเร็วของเพลทกดตัวอย่างได้ 25 ระดับความเร็ว การใช้งานระบบมือหมุนจะเลือกใช้ 2 ระดับความเร็วโดยส่งกำลังจากมือหมุนผ่านไปที่ชุดเกียร์ โดยระดับความเร็วสูงสุดที่ใช้ในการเคลื่อนแผ่นเพลทกดตัวอย่างขึ้นและตัวอย่างดิ่งกับเคลื่อนแผ่นเพลทลงหลังการทดสอบเสร็จ ส่วนระดับความเร็วต่ำใช้ในการเคลื่อนเพลทกดตัวอย่าง จะมีความเร็วที่ใช้ในการกด 0.013 มิลลิเมตรต่อการหมุนหนึ่งรอบ ส่วนระบบมอเตอร์ไฟฟ้าจะส่งกำลังผ่านชุดเกียร์ ซึ่งชุดเกียร์สามารถเลือกอัตราทดในการปรับความเร็วได้ 25 ระดับ จาก 0.0006 มิลลิเมตรต่ออนาทีถึง 1.5 มิลลิเมตรต่ออนาที

ตาราง 2.1 การเลือกความเร็วของแผ่นกดกับอัตราทดของเกียร์

Selector position	1	2	3	4	5	Change	Wheels
Switch position for loading	down	up	down	up	down	“A”	“B”
Feed mm/min	1.60	0.320	0.064	0.0128	0.0026	60	30
	1.20	0.240	0.048	0.0096	0.0019	54	36
	0.800	0.160	0.032	0.0064	0.00128	45	54
	0.530	0.107	0.021	0.0043	0.00085	36	54
	0.400	0.080	0.016	0.0032	0.00064	30	60



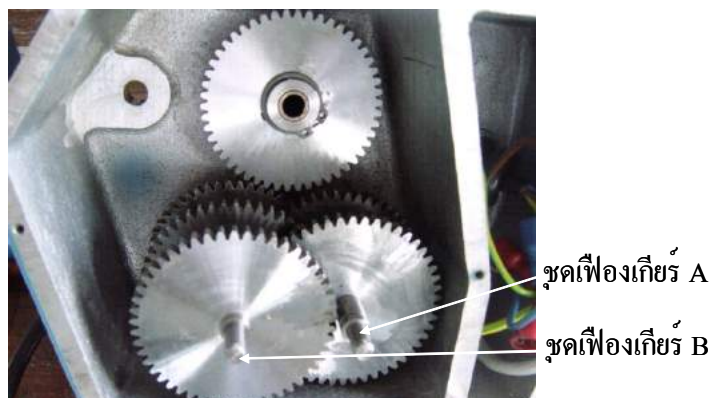
จากค่าในตาราง 2.1  
 ในกรณีที่ต้องการให้ความเร็วของเพลาทดตัวอย่างเคลื่อนที่ขึ้นด้วยความเร็ว 0.050 มิลลิเมตรต่อนาที ให้ตั้งเกียร์ชุด "A" ไปที่ 54 และเกียร์ชุด "B" ไปที่ 36 จากนั้นเลือก Selector position (รูป 2.1.4) ไปที่ตำแหน่ง 3 และ Forward drive switch ไปที่ ตำแหน่ง down



รูป 2.1.4 ตำแหน่ง Selector position และตำแหน่ง Forward drive switch



รูป 2.1.5 ระบบส่งกำลังขับเคลื่อนเพลาทดตัวอย่างอยู่ใต้เฟลม



รูป 2.1.6 รูปชุดเฟือง A และ B

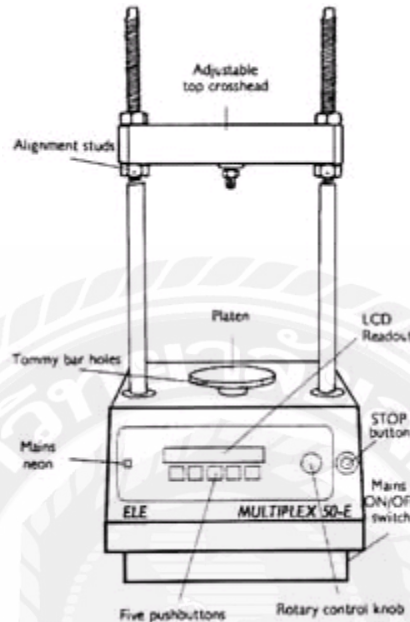
## 2.2 ค่าความเร็วของแผ่นกดตัวอย่างของเครื่องทดสอบกำลังอัดของดินแต่ละมาตรฐานการทดสอบ

เช่น การทดสอบแบบ แคลิฟอร์เนีย แบร์ริง เรโซ (CALIFORNIA BEARING RATIO :CBR) ได้กำหนดค่าความเร็วของการกดอัดตัวอย่าง ถ้าเป็นมาตรฐาน BS1377 ไว้ 1.0 มิลลิเมตร/นาที และถ้าเป็นมาตรฐาน ASTM D1883 ใช้ค่าความเร็วของการกดอัดตัวอย่าง 1.27 มิลลิเมตร/นาที สำหรับการทดสอบ UNCONFINED COMPRESSION TEST มีอัตราการกดอยู่ในช่วง 0.02 ถึง 0.1 นิ้วต่อนาที ปกติใช้ 0.05 นิ้วต่อนาที สำหรับการทดสอบ CONSOLIDATION UNDRAIN TEST (CU-Test) ตั้งค่าอัตราการกด ประมาณ 0.05 ถึง 0.10 นิ้วต่อนาที สำหรับ DIRECT SHEAR TEST เริ่มแรงเลื่อนให้ตัวอย่าง โดยให้อัตราการเคลื่อนที่ ประมาณ 0.05 ถึง 0.10 นิ้วต่อนาที อย่างสม่ำเสมอ

### บทที่ 3

#### การออกแบบเครื่องทดสอบกำลังอัดของดินขนาด 50 กิโลนิวตัน

ปัจจุบัน เครื่อง Digital Load frames 50 KN ได้ถูกพัฒนาขึ้น โดยใช้ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์มาใช้ในการควบคุมการทำงานดังรูปที่ 3.1



รูป 3.1 เครื่องทดสอบกำลังดิน

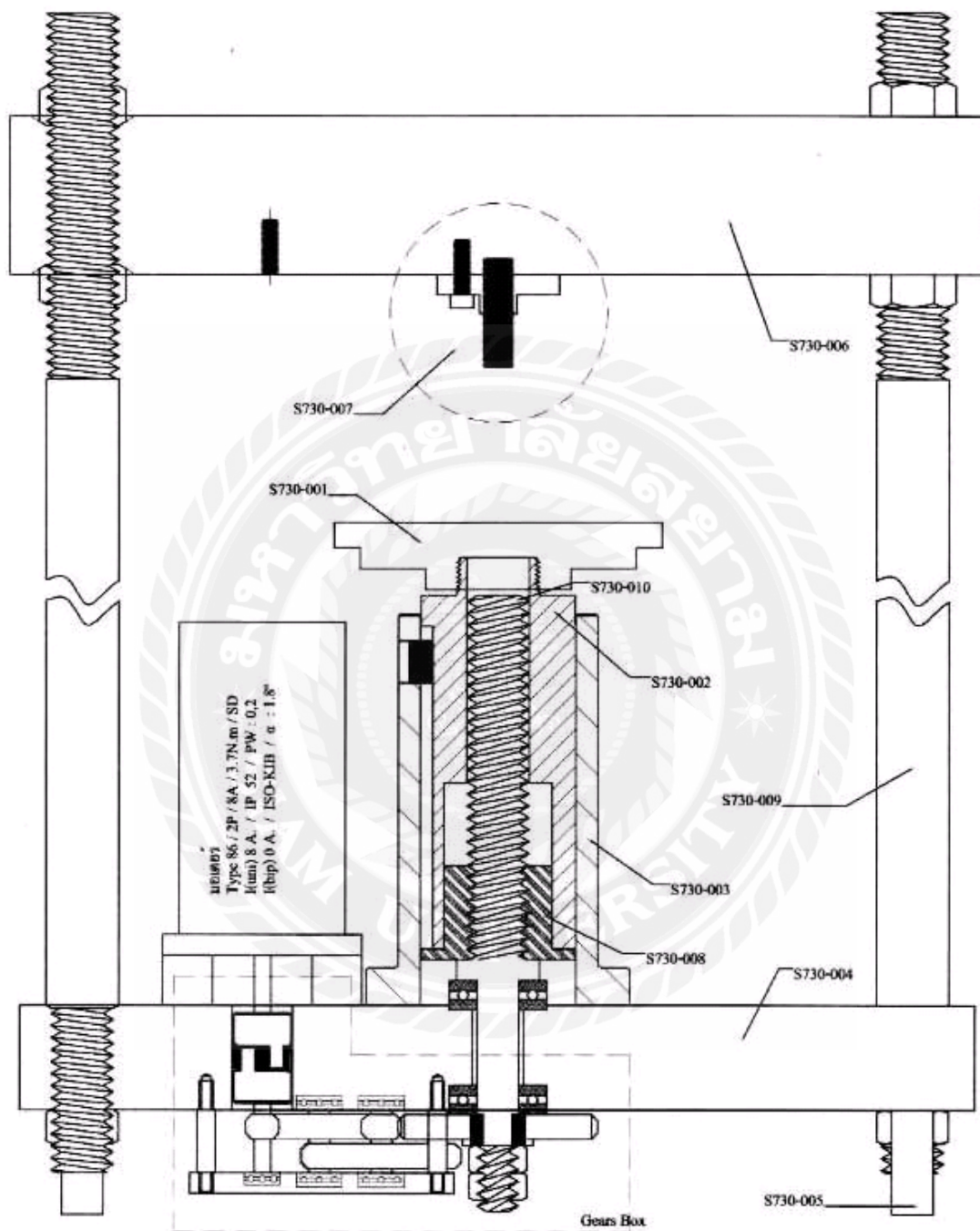
ส่วนประกอบของตัวเครื่องทดสอบ มีคานรับน้ำหนักด้านบนคือ Top Crosshead สามารถปรับขึ้นลงตามแนวตั้งในทิศทางเดียวกับเสาทั้งสองที่อยู่ทางด้านข้าง โดยส่วนประกอบของเฟลมกนี้จะต้องรับน้ำหนักแรงกดได้ไม่น้อยกว่า 50 กิโลนิวตัน การปรับ Top Crosshead ขึ้นอยู่กับขนาดของตัวอย่างที่ทำการทดสอบ ณ ตำแหน่งตรงกลางใต้ Top Crosshead จะมีการติดตั้ง Load Ring หรือ Load Transducer เพื่ออ่านค่าแรงกดที่กระทำกับตัวอย่างทดสอบ ส่วนที่ฐานด้านล่างของตัวเครื่องจะเป็นชุดส่งกำลัง โดยมีมอเตอร์ไฟฟ้าส่งกำลังไปขับ Gear Screw jack ซึ่งจะเปลี่ยนทิศทาง ทำให้แผ่นกดที่อยู่ตรงกลางเครื่องสามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงได้ในแนวตั้ง นอกจากนี้จะต้องมีลิมิตสวิทช์ที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ขึ้นสูงสุดและลงต่ำสุด โดยการเคลื่อนที่ขึ้น-ลงของสโตกของแผ่นกดจะอยู่ที่ 10 เซนติเมตร การควบคุมการทำงานด้านหน้าของตัวเครื่องจะมีปุ่มคีย์ควบคุมการกำหนดการทำงานขึ้นลงของแผ่นกดตัวอย่าง มีปุ่มคีย์หยุดการทำงานของเครื่องชั่วคราว และสวิทช์ ON/OFF การกำหนดความเร็วของการทดสอบสามารถอินพุตค่าผ่านคีย์ตัวเลขการกำหนดค่าของความเร็วของการทดสอบอยู่ในช่วง 0.00001 – 9.99999 มิลลิเมตร/นาที โดยจะแสดงผลแบบ LCD

### 3.1 คุณลักษณะเฉพาะของตัวเครื่อง

1. มีขนาด กว้าง x ยาว x สูง 560 x 400 x 1230 mm
2. มีช่องว่างในการปรับได้มากที่สุดสำหรับการทดสอบในแกน y (Maximum Vertical clearance) ในแนวตั้ง ได้ กว้าง 795 mm
3. มีช่องว่างในการปรับได้น้อยสุดสำหรับการทดสอบในแกน y (Minimum Vertical clearance) ในแนวตั้ง ได้ กว้าง 215 mm
4. ระยะระหว่างเสามีความกว้าง (Horizontal clearance) 265 mm
5. แผ่นกคสำหรับวางตัวอย่างในการทดสอบเป็นรูปวงกลม เส้นผ่านศูนย์กลาง 133.3 mm
6. platen adapter diameter มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 158.5 mm
7. ระยะขึ้น - ลงของแผ่นกคได้สูงสุด 100 mm
8. ความเร็วของแผ่นกคสามารถปรับได้ในช่วง 0.00001-9.99999 mm/Min
9. สามารถรับแรงกคได้ 50 kN
10. กำลังไฟฟ้า ประมาณ 0.300 kW
11. น้ำหนัก 100 Kg

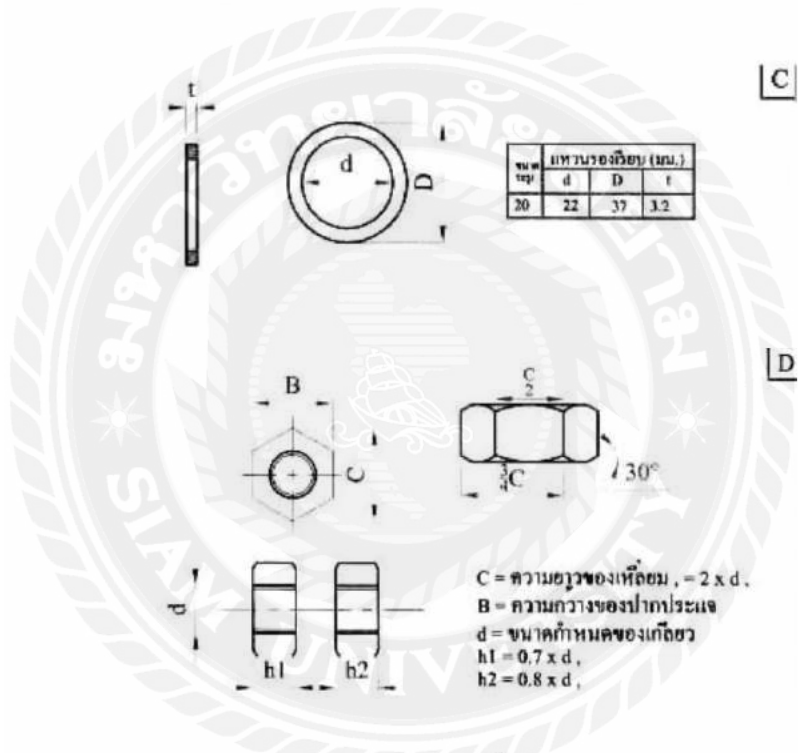
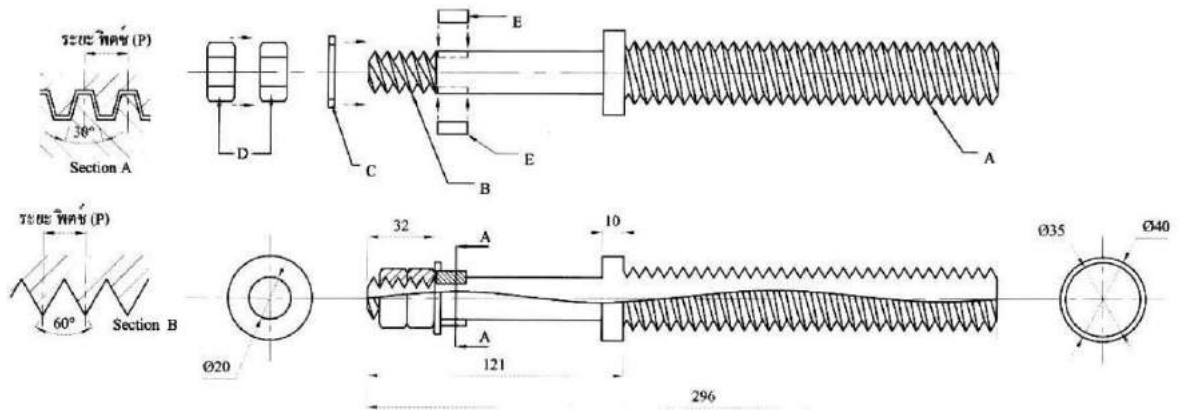
### 3.2 การออกแบบโครงสร้างของโหลดเฟรม Load Frame

มีส่วนประกอบดังรูป 3.2.1, 3.2.2 และ 3.2.3

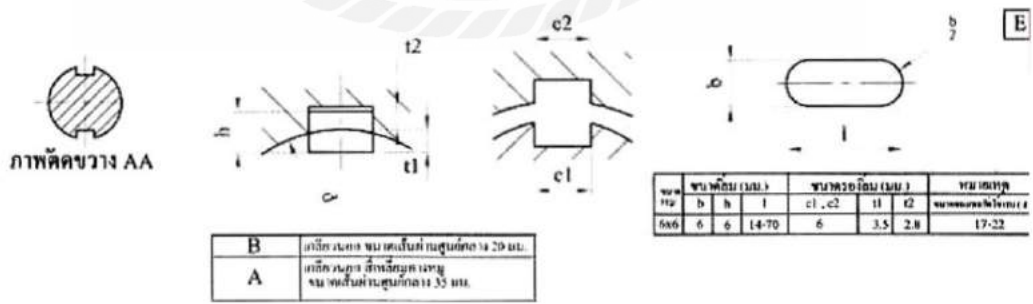


รูป 3.2.1 แสดงส่วนประกอบของโหลดเฟรม Load Frame





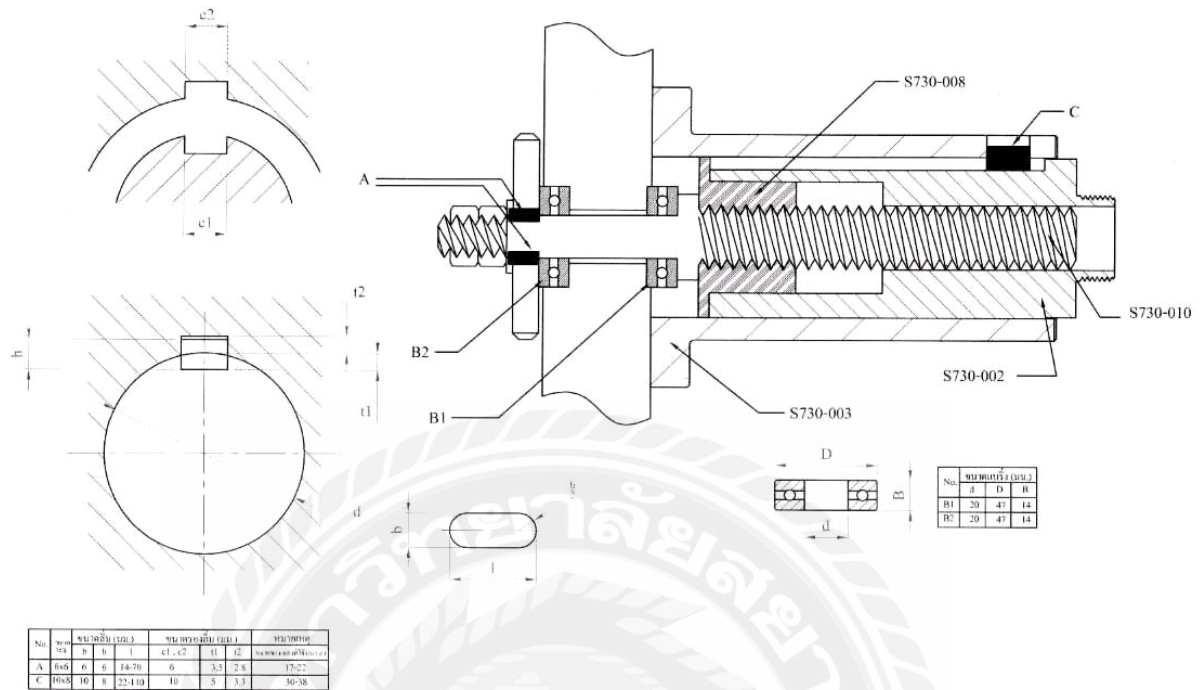
C = ความยาวของเกลียว, = 2 x d.  
 B = ความกว้างของปากประแจ  
 d = ขนาดกำหนดของเกลียว  
 h1 = 0.7 x d,  
 h2 = 0.8 x d,



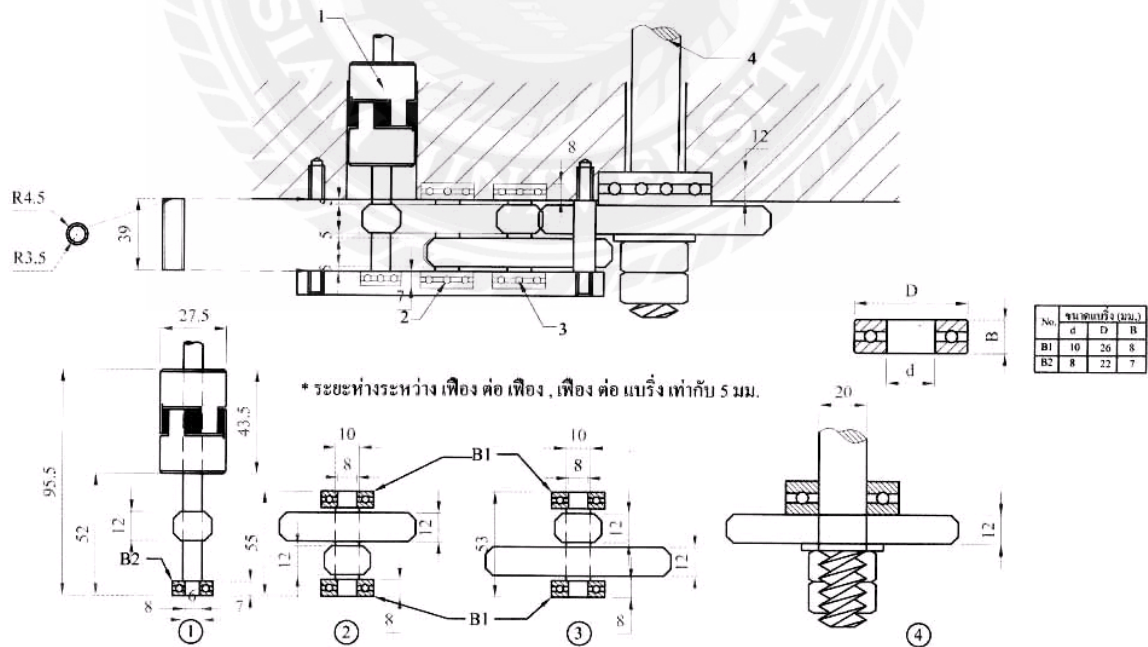
B เกล็ดเหล็ก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 มม.  
 A เกล็ดเหล็ก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 35 มม.

รูป 3.2.3 แสดงส่วนประกอบของโหลดเฟรม Load Frame (ต่อ)

3.3 การออกแบบชุดเกียร์ Gear Screw jack ใช้เป็นชุดส่งกำลัง  
มีส่วนประกอบต่างๆดังรูป 3.3.1 และ 3.3.2



รูป 3.3.1 แสดงส่วนประกอบของชุดเกียร์ Gear Screw jack



รูป 3.3.2 แสดงส่วนประกอบของชุดเกียร์ Gear Screw jack (ต่อ)

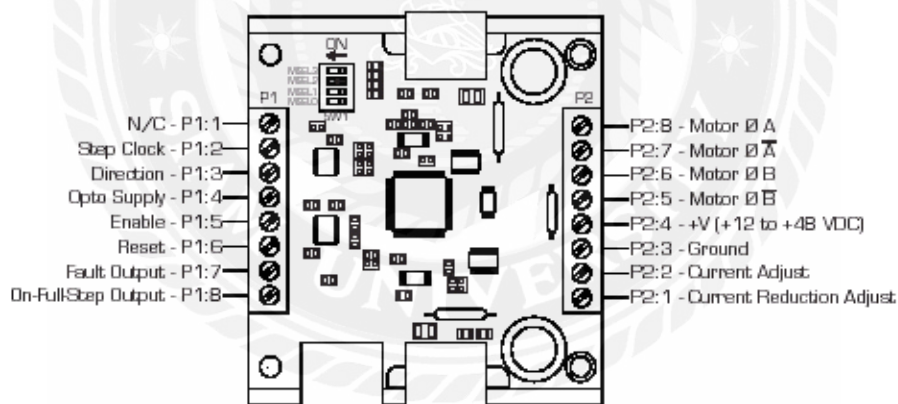


### 3.4 ออกแบบและสร้างชุดขับสเตปมอเตอร์และ สเตปมอเตอร์เป็นชุดกำลัง

ได้เลือกใช้ชุดขับสเตปมอเตอร์ IM 483 เป็นชุดขับสเตปมอเตอร์ซึ่งเป็นชุดไดรฟ์แบบไมโครสเตป สามารถติดต่อควบคุมสั่งการทำงานได้ง่าย มีขนาดเล็กมาก ใช้กับมอเตอร์แบบ Bipolar มีสาย 4 เส้น



รูป 3.4.1 แสดงชุดขับสเตปมอเตอร์ IM483



รูป 3.4.2 แสดงไดอะแกรมของขาควบคุม input /output การทำงาน IM483

หลักการทำงาน ของชุดขับสเตปมอเตอร์ทำงาน โดยต่อสัญญาณควบคุมเข้าที่พอร์ด P1 ของชุดไดรฟ์ โดยป้อนสัญญาณ PWM เข้าที่ ขา P1.2 Step clock ต่อ ไฟเลี้ยง IC opto 5 โวลต์ ที่ขา P1.4 ต่อมอเตอร์ เข้าที่ขา P2.8 –P2.5 ตามขั้วของมอเตอร์ 4 เส้น จากนั้นต่อ power supply ที่ ขา P2.4 +Vcc และ GND ที่ P2.3 และ ต่อ ตัวต้านทานระหว่าง P2.3 กับ P2.2 ประมาณ 1 กิโลโอห์มเพื่อ กัน กระแสเกิน เมื่อจ่ายไฟเข้าสู่ชุดไดรฟ์มอเตอร์ก็จะหมุนได้ ส่วนความเร็วของมอเตอร์ในการหมุน ขึ้นอยู่กับความถี่ของสัญญาณ PWM ถ้าสัญญาณ PWM มีค่าสูงมากขึ้นมอเตอร์ก็จะหมุนเร็วขึ้น

ในกรณีต้องการกลับทิศทางการหมุนของมอเตอร์ ให้ป้อนสัญญาณ GND 0 โวลต์ เข้าที่ขา P1.3 Direction ในกรณีต้องการหยุดการหมุนของมอเตอร์ ให้ป้อนสัญญาณ GND ที่ขา P1.5 การป้องกันกระแสเกินพิกัดโดยต่อตัวต้านทานป้องกันให้กับชุดไดร์ฟและการเลือกค่าตัวต้านทานให้เหมาะสมกับค่ากระแสที่ใช้

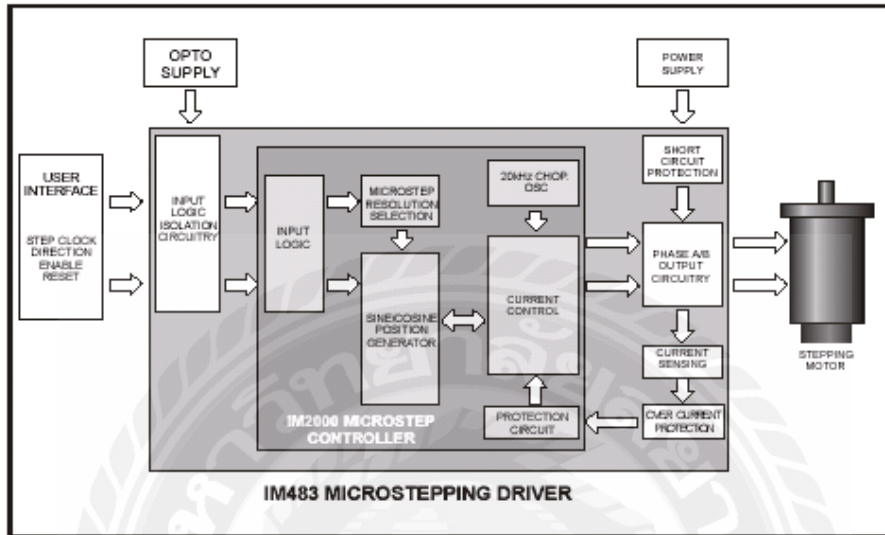


Figure 4.1: IM483 Block Diagram

รูป 3.4.3 IM 483 Block diagram

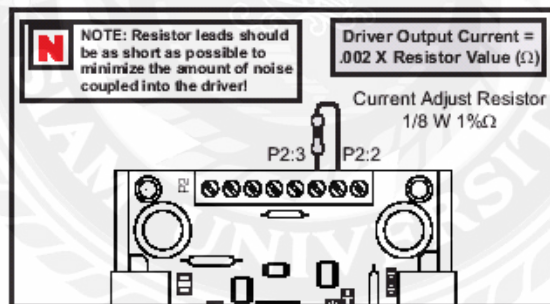


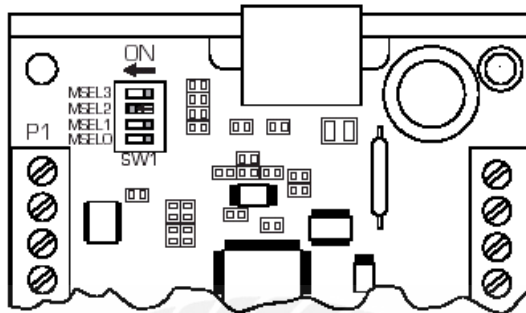
Figure 7.2: Current Adjust Resistor Placement

IM483 Current Adjust Resistor Values			
Output Current (Amps Peak)	Resistor Value (Ohms 1%)	Output Current (Amps Peak)	Resistor Value (Ohms 1%)
0.4	200	2.4	1210
0.6	301	2.6	1300
0.8	392	2.8	1400
1.0	499	3.0	1500
1.2	590	3.2	1580
1.4	698	3.4	1690
1.6	787	3.6	1780
1.8	887	3.8	1910
2.0	1000	4.0	2000
2.2	1100	-	-

Table 7.1: Current Adjust Resistor Values

รูป 3.4.4

การเลือกอิเล็กทรอนิกส์เกี่ยวกับชุดไครฟ์ (Controlling the output Resolution) ที่บนชุดไครฟ์จะมีไมโครสวิตช์ที่ MSEL0-MSEL 3 ในการกำหนด Resolution



รูป 3.4.5

จากตารางค่า Resolution ในการออกแบบได้เลือก resolution 10000 pluses ต่อรอบการหมุนของมอเตอร์ (10000 step/rev) ดังนั้นจะต้องเลือกสวิตช์ MSEL0 = 0, MSEL1 = 0, MSEL2 = 1 และ MSEL3 = 0 นั่นคือ สัญญาณ PWM ส่งเข้าไป 10000 ลูกคลื่นเป็นแบบสัญญาณสี่เหลี่ยม มอเตอร์จะหมุนไปได้ครบหนึ่งรอบ

Resolution		Microstep Select DIP Switch Settings			
Microsteps/Step	Steps/Rev	SW 1:1 (MSEL0)	SW 1:2 (MSEL1)	SW 1:3 (MSEL2)	SW 1:4 (MSEL3)
Binary Microstep Resolution Settings (1.8° Motor)					
2	400	ON	ON	ON	ON
4	800	OFF	ON	ON	ON
8	1,600	ON	OFF	ON	ON
16	3,200	OFF	OFF	ON	ON
32	6,400	ON	ON	OFF	ON
64	12,800	OFF	ON	OFF	ON
128	25,600	ON	OFF	OFF	ON
256	51,200	OFF	OFF	OFF	ON

Decimal Microstep Resolution Settings (1.8° Motor)					
5	1,000	ON	ON	ON	OFF
10	2,000	OFF	ON	ON	OFF
25	5,000	ON	OFF	ON	OFF
50	10,000	OFF	OFF	ON	OFF
125	25,000	ON	ON	OFF	OFF
250	50,000	OFF	ON	OFF	OFF

Invalid Resolution Settings : May Cause Erratic Operation					
		ON	OFF	OFF	OFF
		OFF	OFF	OFF	OFF

Table 7.2: Microstep Resolution Switch Settings

### รูป 3.4.6

สมการความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า PWM กับค่าความเร็วของแผ่นกดเคลื่อนที่ขึ้นกดตัวอย่าง  
ถ้าให้ V เป็นค่าของความเร็วของแผ่นกดที่เคลื่อนที่ขึ้น mm/Min

ค่า PWM = 2000 step/sec

ค่า Resolution = G1 = 10000 step/rev

อัตราทดของชุดเกียร์ G2 = 16/1000

ระยะเกียร์วสกรู ของแกนแผ่นกด G3 = 6mm/rev

ดังนั้น 
$$V(\text{PWM}) = \text{PWM} \times (G1) \times (G2) \times (G3) \times (60\text{sec}/1\text{Min}) \quad \dots(1)$$

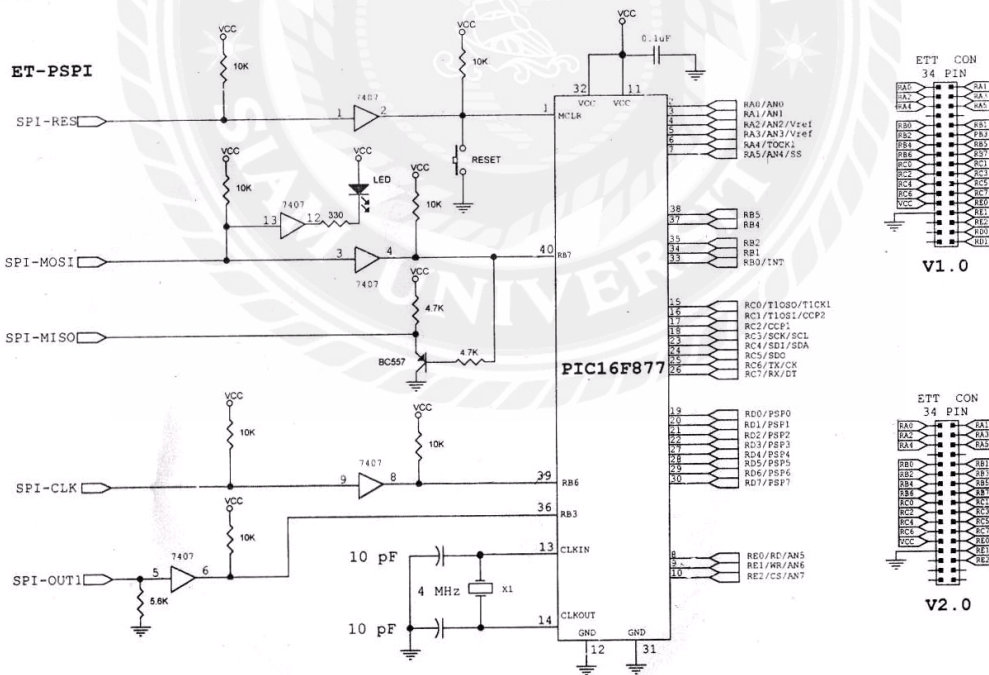
แทนค่า PWM = 2000 PLUSE/SEC ในสมการ (1) จะได้ค่าความเร็วของแผ่นกดเคลื่อนที่ขึ้น  
1mm/Min

### 3.5 การออกแบบชุดปรับความเร็วส่วนอินพุตค่าความเร็วและหน่วยแสดงผล

ได้เลือกไมโครคอนโทรลเลอร์ CP-PIC 877 ในการรับค่าอินพุตในการแสดงผล LCD และการผลิตสัญญาณ PWM ออกไปเข้าสู่ชุดขับสเตอริ่งมอเตอร์เพื่อปรับค่าความเร็วในการหมุนมอเตอร์



รูป 3.5.1 วงจรบอร์ดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 877



รูป 3.5.2 วงไมโครคอนโทรลเลอร์พร้อมพอร์ตอินพุตเอาท์พุท

### 3.6 การออกแบบส่วนอินพุตค่าความเร็วให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์และการสร้างสัญญาณ PWM (Pulse width Modulate)

ในภาคอินพุตค่าความเร็วได้ออกแบบให้รับค่าคีย์ตัวเลข 0 ถึง 9 จากคีย์เมตริกซ์แบบ  $4 \times 4$  สำหรับการกำหนดจุดทศนิยมของตัวเลข 5 หลักให้รับค่าคีย์ค่าจาก Thumb wheel switch หลักการทำงานในกรณีคีย์ตัวเลข 9 แล้วตัว Thumb wheel switch ไขว้มีต่อ ค่าของความเร็วจะปรากฏที่จอแสดงผลคือ 9.00000 มิลลิเมตรต่อนาที แต่ถ้ากดคีย์ตัวเลข 9 แล้วตั้ง Thumb wheel switch ไขว้มีค่า 5 ค่าความเร็วจะปรากฏที่จอแสดงผลคือ 0.00009 มิลลิเมตรต่อนาที นั่นคือค่าตัวเลขจะไปปรากฏที่ตำแหน่งทศนิยมที่ถูกกำหนดค่าตำแหน่งของ Thumb wheel switch

จากเงื่อนไขที่กำหนดการทำงานนี้สามารถแบ่งการทำงานเป็นวงจรหลัก 3 ส่วน คือ

1. วงจรและโปรแกรมรับค่าจากคีย์เมตริกซ์
2. วงจรและโปรแกรมรับค่าจาก Thumb wheel switch
3. วงจรหารและถอดรหัสเพื่อให้ได้ค่า PWM ที่สัมพันธ์กับค่าความเร็ว

วงจรและโปรแกรมรับค่าคีย์เมตริกซ์



รูป 3.6.1

โปรแกรมสแกนหาตัวเลขที่กด

```
PORT A = % 1111 1110
```

```
If PORT B.0 = 0 Then B = 1
```

```
If PORT B.1 = 0 Then B = 4
```

```
If PORT B.2 = 0 Then B = 7
```

```
PORT A = % 1111 1101
```

```
If PORT B.0 = 0 Then B = 2
```

```
If PORT B.1 = 0 Then B = 5
```

```
If PORT B.2 = 0 Then B = 8
```

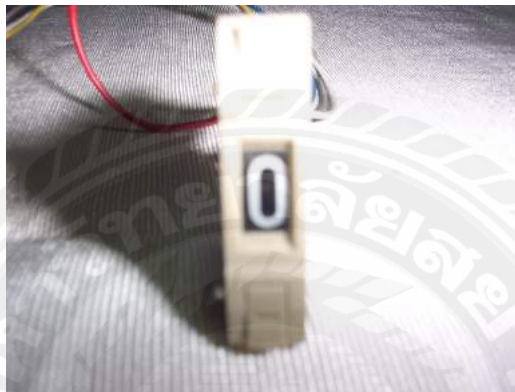
```
PORT A = % 1111 1011
```

```
If PORT B.0 = 0 Then B = 3
```

```
If PORT B.1 = 0 Then B = 6
```

```
If PORT B.2 = 0 Then B = 9
```

สำหรับวงจรและโปรแกรมการรับค่าจาก Thumb Wheel Switch



รูป 3.6.2

หลักการการทำงานของ Thumb Wheel จะแปลงค่าตัวเลขฐานสิบให้เป็นฐานสอง เมื่อตั้งค่าตัวเลข 1 ที่ Thumb Wheel จะได้ค่า 0001 ออกที่ขาทั้งสี่ จากนั้นอินพุตสัญญาณที่ได้ไปเข้า IC 4028 ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนค่า BCD – To Decimal Decoder ก็จะได้ output ของ  $Q_0$  ถึง  $Q_6$  เป็น 000000001 จากนั้นทำการเขียนโปรแกรมสแกนค่าที่ได้จาก PORT B

```
PORT A = % 1101 1111
```

```
If PORT B.0 = 0 ตัวเลขที่ป้อนจะไปอยู่ที่ทศนิยมตำแหน่ง 0 = 9.00000
```

```
If PORT B.1 = 0 ตัวเลขที่ป้อนจะไปอยู่ที่ทศนิยมตำแหน่ง 1 = 0.90000
```

```
If PORT B.2 = 0 ตัวเลขที่ป้อนจะไปอยู่ที่ทศนิยมตำแหน่ง 2 = 0.09000
```

```
If PORT B.4 = 0 ตัวเลขที่ป้อนจะไปอยู่ที่ทศนิยมตำแหน่ง 3 = 0.00900
```

```
If PORT B.5 = 0 ตัวเลขที่ป้อนจะไปอยู่ที่ทศนิยมตำแหน่ง 4 = 0.00090
```

```
If PORT B.6 = 0 ตัวเลขที่ป้อนจะไปอยู่ที่ทศนิยมตำแหน่ง 5 = 0.00009
```

การแสดงผลที่จอ LCD ใช้คำสั่ง

```
LCD out$FE, 1, "V = ", #SPEED, "mm/min"
```



รูป 3.6.3

คำสั่งที่ใช้ในการส่งสัญญาณ PWM จากไมโครคอนโทรลเลอร์ คือ HPWM 1, 127, (ค่า PWM) ซึ่งควรจะวนลูปให้กับคำสั่งนี้จะได้สัญญาณที่เหลี่ยมออกมาที่ขา C2 ของไมโครคอนโทรลเลอร์อย่างต่อเนื่อง ค่าความถี่ของสัญญาณที่ออกมาสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ของบริษัทอีทีวีเวอร์ชันหนึ่ง ได้เลือกใช้ค่า PWM ในช่วง 2,000 ถึง 20,000 จะใช้ความเร็วในช่วง 0-10 มิลลิเมตรต่อนาที

โดย

ค่า PWM = 2,000 จะได้ความเร็ว  $v = 1 \text{ mm/min}$

ค่า PWM = 4,000 จะได้ความเร็ว  $v = 2 \text{ mm/min}$

ค่า PWM = 6,000 จะได้ความเร็ว  $v = 3 \text{ mm/min}$

ค่า PWM = 8,000 จะได้ความเร็ว  $v = 4 \text{ mm/min}$

ค่า PWM = 18,000 จะได้ความเร็ว  $v = 9 \text{ mm/min}$

ค่า PWM = 26,000 จะได้ความเร็ว  $v = 13 \text{ mm/min}$

นำสัญญาณ PWM ที่ออกจากขา C2 ไปต่อเข้ากับชุดไดรฟ์ IM483 ที่ขา step มอเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วตามค่า PWM ที่กำหนดให้ การปรับค่าความเร็วของการทดสอบให้ได้ค่าในช่วง 0.00001 ถึง 9.99999 มิลลิเมตรต่อนาที

ในกรณีต้องการปรับค่าความเร็วของการทดสอบเป็น 0.00009 มิลลิเมตรต่อนาทีนั้นทำได้โดยการนำสัญญาณที่ได้จากความเร็ว 9 มิลลิเมตรต่อนาที คือ PWM = 18,000 pluses/sec มาทำการหารด้วย  $10^5$  โดยท้าววงจรหาร 10 จำนวน 5 ครั้ง วิธีการออกแบบวงจรทำได้โดยการนำตัวเลขจาก Thumb Wheel Switch มาทำการถอดรหัสว่าต้องการหารกี่ครั้ง แล้วทำการ AND กับสัญญาณที่ได้จากการหารจากวงจร 7490 ซึ่งทำไว้ 5 หลักคอยอยู่ ก็จะได้สัญญาณที่ต้องการ output จาก AND Gate



### 3.7 การออกแบบการควบคุมการทำงานของเครื่องทดสอบโดยใช้ PLC

สำหรับเครื่อง 50 kN Load Frame นี้จะมีคีย์ฟังก์ชันในการสั่งการ 3 คีย์ คือ คีย์สั่ง Up ให้แผ่นกดเคลื่อนที่ขึ้น คีย์คำสั่ง Down ให้แผ่นกดเคลื่อนที่ลง และคีย์คำสั่ง Stop ทำการหยุดการเคลื่อนที่ของแผ่นกดหลังจากที่ทำการอินพุตค่าความเร็วแล้ว เมื่อกดคีย์ Up มอเตอร์ทำงานแผ่นกดจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วตามค่าอินพุตที่กำหนดให้ แล้วจะมีไฟสัญญาณแสดงการทำงานในสถานะที่ดำเนินการอยู่ เช่น ถ้าสั่งเคลื่อนที่ขึ้น เคลื่อนที่ลง หรือหยุดนิ่ง นอกจากนี้จะมีจอ LCD แสดงค่าความเร็วที่แผ่นกดเคลื่อนที่อยู่ และเมื่อเคลื่อนที่ขึ้นสูงสุดหรือลงต่ำสุดแล้วจะมีไมโครสวิตซ์ทำการสั่งให้มอเตอร์หยุดและแผ่นกดก็จะหยุดนิ่ง ณ ตำแหน่งนั้น

การออกแบบการทำงานของไมโครสวิตซ์นี้จะมีเงื่อนไขว่าเมื่อแผ่นกดเคลื่อนที่ถึงจุดสูงสุดแล้วไมโครสวิตซ์ตัวบนสุดทำงาน โดยสั่งงานให้มอเตอร์หยุดแต่อนุญาตให้ใช้คำสั่งเคลื่อนที่ลงได้ และในทางกลับกันถ้าแผ่นกดเคลื่อนที่ลงมาอยู่ในตำแหน่งต่ำสุดและไมโครสวิตซ์ตัวที่อยู่ตำแหน่งต่ำสุดจะทำงาน ซึ่งจะทำให้มอเตอร์หยุดนิ่งแผ่นกดจะหยุด ณ ตำแหน่งนั้นแต่สามารถใช้คำสั่งเคลื่อนที่ขึ้นได้ จากเงื่อนไขเหล่านี้ผู้วิจัยจึงเลือก PLC ที่มีจำนวนอินพุต 6 อินพุตและเอาท์พุต 4 เอาท์พุต มาทำการควบคุมโดยเลือก PLC ของ Keyence รุ่น KV – 10T

ณ ตำแหน่ง 0001 คือสวิตซ์กดเพื่อสั่งงานให้แผ่นกด Up

ณ ตำแหน่ง 0000 คือสวิตซ์กดเพื่อสั่งงานให้แผ่นกด Stop

ณ ตำแหน่ง 0002 คือสวิตซ์กดเพื่อสั่งงานให้แผ่นกด Down

ณ ตำแหน่ง 0003 คือไมโครสวิตซ์เพื่อสั่งงานให้แผ่นกดหยุดเมื่อเคลื่อนที่มาอยู่ ณ ตำแหน่งสูงสุด

ณ ตำแหน่ง 0004 คือไมโครสวิตซ์เพื่อสั่งงานให้แผ่นกดหยุดเมื่อเคลื่อนที่มาอยู่ ณ ตำแหน่งต่ำสุด

ณ ตำแหน่ง 0500 เป็น output ของ PLC เพื่อสั่งงานให้ชุดขับมอเตอร์สั่งมอเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกาแผ่นกดเคลื่อนที่ขึ้น

ณ ตำแหน่ง 0501 เป็น output ของ PLC เพื่อสั่งงานให้ชุดขับมอเตอร์สั่งมอเตอร์หมุนทวนตามเข็มนาฬิกาแผ่นกดเคลื่อนที่ลง

ณ ตำแหน่ง 0502 แสดงไฟสถานะ stop

### 3.8 ชิ้นงานจริงที่ได้จากการออกแบบและส่วนประกอบเป็นเครื่องทดสอบแรงอัดดิน

#### 3.8.1 ส่วนที่เป็นชุด Gear และสกรูเพลท ได้ทำการจัดสร้างตามแบบเป็นชิ้นงานจริง



รูป 3.8.1 ส่วนแท่นเพลทกดตัวอย่างดิน



รูป 3.8.2 ชุดเกียร์ โดยมีอัตราทด 16/1000

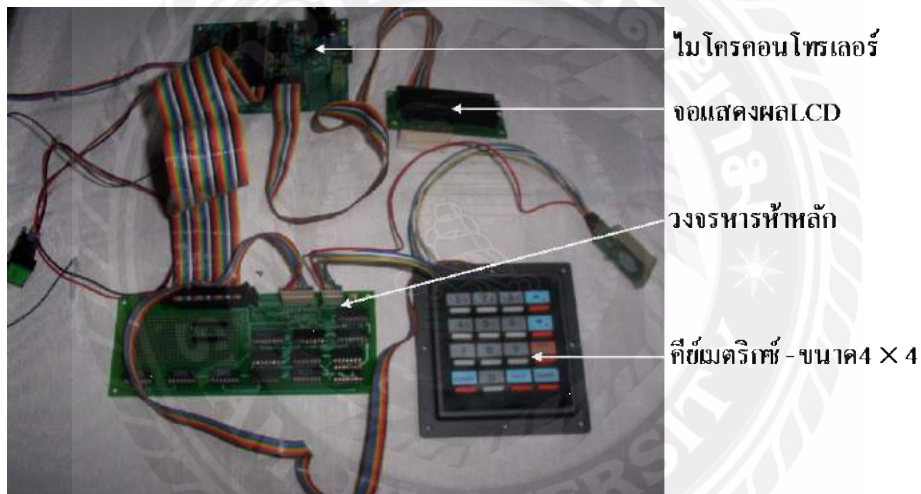


รูป 3.8.3 เป็นชุดเกียร์และสกรูเพลท



รูป 3.8.4 สเตรปिंगมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้

3.8.2 รูปชิ้นงานจริงที่ได้จากการออกแบบไมโครคอนโทรลเลอร์และส่วนวงจร PWM ให้กับชุดขับสเตรปिंगมอเตอร์



รูป 3.8.5 ส่วนวงจรควบคุมความเร็วของเพลทกคติน



รูป 3.8.6 ส่วนวงจรควบคุมการทำงานเคลื่อนที่ขึ้น - ลง - หยุด ของเครื่องทดสอบโดยใช้ PLC

### 3.8.3 ส่วนประกอบรวมทั้งหมดของเครื่องทดสอบกำลังอัดคิน



รูป 3.8 7 ส่วนประกอบภายใน โดยเอาแต่ละส่วนที่ออกแบบมารวมกันเป็นเครื่องทดสอบกำลังอัดคิน



รูป 3.8.8 ด้านหน้าของเครื่องทดสอบ



รูป 3.8.9 เครื่องทดสอบกำลังอัดดิน 50 กิโลนิวตัน

## บทที่ 4 ผลการทดลอง

การทดสอบเครื่องทดสอบกำลังอัดดินได้ทำการทดสอบความเร็วการเคลื่อนที่ขึ้นของเพลทกคตัวอย่างดินและทดสอบความสามารถรับแรงอัดได้ 50 กิโลกรัมนิวตัน

### 4.1 ขั้นตอนการทดสอบความเร็วการเคลื่อนที่ขึ้นของเพลทกคตัวอย่างดิน

4.1.1 ได้ใช้ Dial Gage ที่อ่านค่าได้ละเอียด 0.01 มิลลิเมตร ยาวประมาณ 1.0 นิ้ว

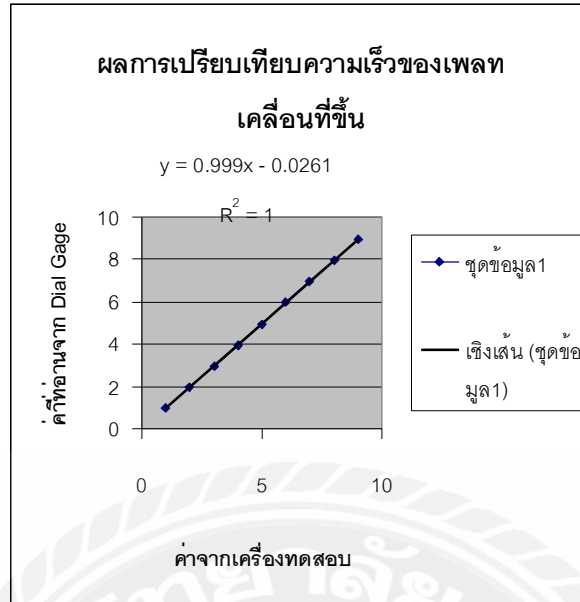
วางบนเพลทกคจากนั้นตั้งความเร็วของเพลทให้เคลื่อนที่ขึ้น ในช่วง 1 ถึง 9

มิลลิเมตรต่อนาที โดยจับเวลา 1 นาที และอ่านค่าจาก Dial Gage นำมาเปรียบเทียบ

ตามตารางที่ 4.1.1

ตาราง 4.1.1 ผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความเร็วที่ได้จากเครื่องทดสอบกับค่าที่ได้จาก Dial Gage

ค่าความเร็วเคลื่อนที่ขึ้นของเพลทจากเครื่องทดสอบ	ค่าที่อ่านได้จาก Dial Gage
1.00 mm/Min	0.98 mm/Min
2.00 mm/Min	1.97 mm/Min
3.00 mm/Min	2.97 mm/Min
4.00 mm/Min	3.98 mm/Min
5.00 mm/Min	4.96 mm/Min
6.00 mm/Min	5.96 mm/Min
7.00 mm/Min	6.95 mm/Min
8.00 mm/Min	7.97 mm/Min
9.00 mm/Min	8.98 mm/Min



รูป 4.1.1 กราฟผลการเปรียบเทียบความเร็วเคลื่อนที่ขึ้นของเพลทกดตัวอย่างดิน

#### 4.2 ขั้นตอนการทดสอบรับแรงอัด 50 กิโลนิวตัน

4.2.1 ในการทดสอบ มีอุปกรณ์ประกอบคือเครื่องมือวัดแรงอัดเป็นวงแหวนวัดแรง (Proving Ring) ขนาด 50 กิโลนิวตัน ของบริษัท ELE จากประเทศอังกฤษ และเครื่องทดสอบกำลังดินที่สร้างขึ้น นำมาติดตั้งดังรูป 4.2.1



วงแหวนรับแรง  
50 กิโลนิวตัน

รูป 4.2.1 เครื่องทดสอบกำลังอัดดินกับวงแหวนรับแรง 50 กิโลนิวตัน

4.2.2 ตั้งความเร็วในการเคลื่อนที่ขึ้นของเพลทกด 1 มิลลิเมตรต่อนาที

เพื่อให้เกิดแรงอัดกระทำกับวงแหวนรับแรงที่ติดตั้งโดยมีตัวคานบนรองรับแรงและถ่ายแ

รงอัดไปที่เสาด้านข้างทั้งสอง ผลการทดลองปรากฏว่าสามารถผ่านการทดสอบแรงอัดที่ 50 กิโลนิวตัน





## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาโครงสร้างของเครื่อง 50 kN Load Frame ใช้เป็นเครื่องกดตัวอย่างดินที่สามารถปรับความเร็วได้ตามมาตรฐานการทดสอบต่างๆ เช่น CBR, CU/CD Unconfined และ Triaxial Test จากเครื่องที่ผลิตในต่างประเทศและพยายามพัฒนา 50 kN Load Frame ที่มีโครงสร้างอย่างง่าย ทำงานด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้วัสดุและอุปกรณ์ที่หาได้ในประเทศเพื่อลดการนำเข้าพบว่า

1. ความเร็วของการทดสอบสามารถใช้ได้ในช่วง 0.00001 – 13.00000 มิลลิเมตรต่อนาที และสามารถรับแรงกดได้ 50 กิโลนิวตัน ที่ความเร็วในการทดสอบ 1 มิลลิเมตรต่อนาที
2. ปัญหาของวัสดุที่ใช้ทำสกรูเพื่อใช้ขันแผ่นกดเคลื่อนที่ขึ้น ควรใช้ Ball Screw เพื่อลดแรงเสียดทานจะได้ใช้มอเตอร์ที่มีขนาดเล็กลง ขนาดเครื่องทดสอบก็จะเล็กลงตาม
3. ควรมีการพัฒนาโปรแกรมการทดสอบให้เหมาะสมกับการทำงาน โดยมีเมนูให้เลือกมากขึ้นและสร้างปัญหาประดิษฐ์ให้กับเครื่องทดสอบ ซึ่งเครื่องจากต่างประเทศจะมีฟังก์ชันการใช้งานและดูเล่นได้หลายอย่าง เช่น สามารถจำตำแหน่งเริ่มต้นที่เคลื่อนที่ออกไป เมื่อทำการทดสอบเสร็จอาจจะเริ่มต้นใหม่ก็สามารถกดปุ่มเพื่อกลับมาที่ตำแหน่งเดิมได้
4. ควรมีการป้องกันแรงกดเกินหรือสามารถตั้งค่า Over Load ได้

ภาคผนวก ก



## ภาคผนวก ข



# ภาคผนวก ค



## เอกสารอ้างอิง

1. กฤษดา ใจเย็น, ณัฐพล วงศ์สุนทรชัย, ชัยวัฒน์ ลิมพิจิตรวิไล. 2521. เรียนรู้การใช้งาน Picbasic PRO คอมไพเลอร์ เขียนโปรแกรมภาษาเบสิกควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC. Innovative Experiment Co.,Ltd.
2. ดร.วรากร ไม้เรียง, อ.จิรพัฒน์ โชติภักไกร, อ.ประทีป ดวงเดือน. 2525. ปฐพีกลศาสตร์. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
3. วชิรินทร์ เคารพ. 2537. เรียนรู้และเข้าใจไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC ด้วยภาษาเบสิก. บริษัท อีทีที จำกัด
4. Joseph E. Bowles. 1992. Engineering properties of Soils and their measurement. McGraw-HILL, INC.

