



การออกแบบ สร้าง และทดสอบเครื่องถ่วงสมดุลย์  
ของเครื่องจักรกลหมุน

โดย

ดร. อธิพัล ปานงาม  
ดร. วิทยา ขงเจริญ

โครงการวิจัย เลขที่ 48-GER-2522  
ทุนส่งเสริมการวิจัยวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันวิจัยและพัฒนาของคณะวิศวกรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรุงเทพฯ ฯ

จพ  
วศ 15  
002302

มกราคม 2526



## โครงการวิจัย

การออกแบบสร้างและทดสอบเครื่องถ่วงสมดุลของเครื่องจักรกลหมุน

โดย

รองศาสตราจารย์ ดร.อภิสิทธิ์ ปานงาม

B.Eng..(Hons), Ph.D. (Liverpool)

รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา บงเจริญ

วศ.บ (จุฬา) Ph.D. (Iowa)

โครงการวิจัยเลขที่ 48 - GER - 2522

ทุนส่งเสริมวิจัยวิศวกรรมศาสตร์

✓ สถาบันวิจัยและพัฒนาของคณะวิศวกรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรุงเทพฯ

มกราคม 2526

กิติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะกรรมการศาสตร์ ซึ่งได้ให้การสนับสนุนด้านเงินทุนในการทำวิจัย และขอขอบคุณผู้บริหารของสถาบันวิจัยและพัฒนาของคณะฯ ที่ได้ให้ความสนใจและช่วยกระตุ้นให้ผลงานเสร็จเรียบร้อยตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้

สารบัญ



บทคัดย่อภาษาไทย

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ

รายการภาพประกอบ

รายการตารางและกราฟประกอบ

บทที่

๑. บทนำ

๑.๑ ความเป็นมาของปัญหา

๑.๒ หลักการถ่วงสมดุลย์เครื่องจักรกลหมุน

๑.๓ วัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย

๒. ทฤษฎีและหลักการของ เครื่อง ถ่วงสมดุลย์

๒.๑ สมดุลย์ของ โรเตอร์แกว่ง

๒.๒ สมดุลย์ของ โรเตอร์หมุน

๒.๓ ทนเหวของ การ เสียสมดุลย์

๒.๔ หลักการของ เครื่อง ถ่วงสมดุลย์

๒.๕ คุณภาพของ เครื่อง ถ่วงสมดุลย์

๓. การสร้าง เครื่อง ถ่วงสมดุลย์

๔. การทดสอบเครื่อง ถ่วงสมดุลย์ เครื่องจักรกลหมุน

๔.๑ การทดสอบสมรรถนะของ เครื่อง ถ่วงสมดุลย์ ระบุแบบเดี่ยว

๔.๒ การทดสอบสมรรถนะของ เครื่อง ถ่วงสมดุลย์ ระบุแบบเดี่ยว  
หลังจากการปรับปรุง เครื่อง

๔.๓ การกำหนดวิธีการ ตรวจสอบสมดุลย์สำหรับ ระบุแบบเดี่ยว  
เพื่อใช้งาน

๔.๔ การตรวจสอบสมดุลย์แบบสอง ระบุแบบ

หน้า

๑

๒

๓

๔

๖

๖

๖

๗

๘

๘

๑๐

๑๐

๑๐

๑๑

๒๐

๒๔

๒๔

๓๓

๓๓

๕๓

๕. วิเคราะห์ผลการทดสอบ	๕๕
๕.๑ วิเคราะห์ผลการทดสอบสมรรถนะของ เครื่องถ่วง สมดุคย์ระนาบเดี่ยว	๕๕
๕.๒ Trigger Circuit	๕๖
๕.๓ วิเคราะห์ผลการทดสอบสมรรถนะของ เครื่องถ่วง สมดุคย์เพื่อใช้งาน	๕๗
๕.๔ สมรรถนะของ เครื่องถ่วงสมดุคย์เพื่อใช้งานเป็น เครื่องถ่วงในระนาบเดี่ยว	๕๗
๕.๕ วิเคราะห์การทดสอบเครื่องถ่วงสมดุคย์เพื่อใช้ งานถ่วงสมดุคย์ใน ๒ ระนาบ	๕๘
๖. สรุป	๕๘

เลขหน้ ๐๗  
 ๐๑ 15  
 เลขทะเบียน ๐๐23๐2  
 วัน.เดือน.ปี 30 ก๓ ๕8



### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบสร้าง และทดสอบเครื่องถ่วงสมดุลย์เครื่องจักรกลหมุนชนิดสามารถถ่วงสมดุลย์ใน ๒ ระนาบ โดยมีร่องลื่นรับเพลาทวี - ท้าย แบบอ่อนตัว ห้อยจากคานแบบปลายอิสระ มีเกจวัดความเครียดไฟฟ้าแสดงการเคลื่อนที่ของเพลาจากร่องสมดุลย์ และมีอุปกรณ์ไฟฉายขึ้นอนแสดงมุมค่าแห่งไม่สมดุลย์ การทดสอบเบื้องต้นได้ค่าความไวต่อความเปลี่ยนแปลงของความไม่สมดุลย์ขนาด  $0.050 \text{ M/gm-mm}$ . หรือขนาด  $0.0 \times 10^{-10} \text{ mA/gm-mm}$  ได้ทำการแก้ไขปรับปรุงร่องลื่นและช้อคอเพล่า ตลอดจนแก้ไขวงจรไฟฟ้ากระตุ้นไฟฉายขึ้นอนทำให้เครื่องสามารถทำงานได้ที่  $0.005 \text{ M/gm-mm}$  หรือ  $0.56 \times 10^{-10} \text{ mA/gm-mm}$  และหาค่าแห่งไม่สมดุลย์ได้ในพิสัย ๐ - ๕ องศา สามารถถ่วงชิ้นงานได้นิดพลาดไม่เกิน  $4.5 \text{ gm-mm/kg}$  ได้ทำการทดสอบสมรรถนะของเครื่องเมื่อทำการถ่วงใน ๒ ระนาบ โดยใช้พัคคตมกกระรอกหนัก ๔.๕ กิโลกรัม ให้มีความไม่สมดุลย์เหลืออยู่ในเกณฑ์ต่ำกว่ามาตรฐานซึ่งได้ตั้งไว้เป็น  $4.5 \text{ M/gm}$  ต่อมวล ๑ กิโลกรัม

Abstract

A two-plane balancing machine for rotating piece work is designed, constructed and tested. The balancing machine is of flexible bearing type, with balancing shaft suspended from built-in cantilever springs. The shaft displacement, corresponding to the amount of unbalance is detected by electronic circuit employing electrical-resistance strain gauges while the position of unbalance is indicated by an index wheel illuminated by electromagnetically controlled Xenon-lamp. The prototype is tested and found to have sensitivity of  $0.090 \mu\text{m/gm-mm}$  or  $1.1 \times 10^{-3} \text{ mA/gm-mm}$ . Modifications to the bearings and couplings as well as the trigger circuit for Xenon-lamp are done. Sensitivity to the order of  $0.075 \mu\text{m/gm-mm}$  or  $0.96 \times 10^{-3} \text{ mA/gm-mm}$  is finally achieved, with the position of unbalance in the range of 0 to 5 degrees. Accuracy of balance is of the order  $4.5 \text{ gm-mm/kg}$ . The performance as a two-plane balancer is evaluated by employing a squirrel - cage fan, weighing 4.46 kg, turning at 1440 rpm. The amount of unbalance is better than  $4.5 \mu\text{m/kg}$ .

## รายการภาพประกอบ

รูปที่		หน้า
๒.๑	แสดงจุดหนัก-เบา เมื่อเกิดการเสียดสมคูลย์	๑๒
๒.๒	แผนภูมิแสดงการหาค่าแห่งของจุดหนัก-เบา บนชิ้นงาน	๑๔
๓.๑	แผนผัง เชปการทำงานของ เครื่อง	๒๒
๓.๒	แผนการเดินไฟฟ้าของสะพาน เกจความเครียด	๒๓
๓.๓	แผนภูมิแสดงส่วนสำคัญของ เครื่องและรูปถ่าย	๒๔
๓.๔	แบบแทนเครื่อง	๒๕
๓.๕	แบบแทนรับเพลลา	๒๖
๓.๖	แบบแสดงการขับเพลลาถ่วงชิ้นงานควยมอเตอร์	๒๗



## รายการตารางและกราฟประกอบ

ตารางที่	หน้า
๒.๑ การตรวจสอบ Sensitivity	๑๗
๒.๒ การหาจำนวนของความไม่สมดุลที่ถูกตองและแน่นอนแบบ ระนาบเดียวและระนาบคู่	๑๘
๒.๓ การหาค่าแห่งเชิงมุมของความไม่สมดุลที่ถูกตองและ แน่นอนแบบระนาบเดียวและสองระนาบ	๑๙
๔.๑ ขนาดน้ำหนักที่ใช้ในการทดสอบถ่วงสมดุลระนาบเดียว	๒๕
๔.๒ ตารางข้อมูล Proportionality test สำหรับ Single-plane ทิศตั้งน้ำหนักที่ ๐ องศา	๓๐
๔.๓ ทิศตั้งน้ำหนักที่ ๑๘๐ องศา	๓๐
๔.๔ ทิศตั้งน้ำหนักที่ ๐ ถึง ๓๓๐ องศา ช่วงละ ๓๐ องศา	๓๖
๔.๕ ตารางแสดงผลการหาขนาดของความไม่สมดุล และความไม่ สมดุลที่เหลืออยู่สำหรับระนาบเดียวที่ ๐ องศา ถึง ๓๓๐ องศา ช่วงละ ๓๐ องศา	๓๙
๔.๖ ตารางแสดงผลการหาค่าแห่งของความไม่สมดุลที่ ๐ และ ๑๘๐ องศา น้ำหนัก ๔ ขนาด	๔๐
๔.๘ ตารางแสดงผลการหาค่าแห่งของความไม่สมดุลที่ ๐ ถึง ๓๓๐ องศา ช่วงละ ๓๐ องศา น้ำหนักขนาดเดียว	๔๐
๔.๗ ตารางแสดงผลของ Proportionality Test และการ หาค่า Sensitivity ระนาบเดียวที่ ๐ องศา	๔๑
๔.๘ ตารางแสดงผลของ Proportionality Test และการ หาค่า Sensitivity ระนาบเดียวที่ ๑๘๐ องศา	๔๑
๔.๑๐ Performance Test for Single-Plane Balance Machine	'
๔.๑๑ Proportionality Test ที่ ๐ องศา	๔๑
๔.๑๒ Proportionality Test ที่ ๑๘๐ องศา	๔๑

	หน้า
๔.๑๓ การหาค่าแรงแม่สมคูลย์ควยน้ำหนัก ๒ ขนาด ที่ ๓๓๐ องศา	๔๔
๔.๑๔ ตารางการทดสอบหลังจากชิ้นงานผ่านการตรวจสอบสมคูลย์	๕๑
๔.๑๕ ผลจากการทดสอบหาค่า Rotor Sensitivity และ Phase Angle	๕๑
๔.๑๖ ตารางข้อมูลทดสอบสมคูลย์แบบระนาบเดียว	๕๒

### กราฟรูปที่

๔.๑ กราฟแสดง Proportionality Test	ตึกน้ำหนักที่ ๐	
องศา อ่านเป็น mA		๓๑
๔.๒ อ่านเป็น		๓๒
๔.๓ กราฟแสดง Proportionality Test	ตึกน้ำหนักที่	
๑๕๐ องศา อ่านเป็น mA		๓๔
๔.๔ อ่านเป็น		๓๕
๔.๕ กราฟแสดงขนาดความไม่สมคูลย์ที่ตำแหน่ง ๐ ถึง ๓๖๐ องศา		
อ่านเป็น		๓๗
๔.๖ อ่านเป็น mA		๓๘
๔.๗ กราฟแสดง Proportionality Test	ตึกน้ำหนักที่	
๓๓๐ องศา อ่านเป็น mA		๔๕
๔.๘ อ่านเป็น		๔๖
๔.๙ กราฟแสดง Proportionality Test	ตึกน้ำหนักที่	
๑๕๐ องศา อ่านเป็น		๔๗
๔.๑๐ อ่านเป็น mA		๔๘



๑.๑ ความเป็นมาของปัญหา

กฎการเคลื่อนที่ข้อที่ ๒ ของนิวตันกล่าวว่า เมื่อวัตถุเคลื่อนที่มีความเร็วจะเกิดแรงเฉื่อย (Inertia Force) เป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับมวลของวัตถุและความเร็ว เมื่อนำมาพิจารณาประกอบกับเครื่องจักรกลหมุนซึ่งมีการเคลื่อนที่เป็นวงกลม (Circular Motion) ด้วยความเร็วคงที่ ความเร็วเข้าสู่ศูนย์กลางของการหมุนจะเป็นปฏิกิริยากับระยะทางห่างจากศูนย์กลาง ( $r$ ) และกำลังสองของความเร็วเชิงมุม ( $\omega^2$ ) ดังนั้นเครื่องจักรกลหมุนที่มีการแผ่เฉื่อยของมวลไม่กระจายสม่ำเสมอโดยทั่ว เมื่อเทียบกับ จะเกิดแรงไม่สมดุลขึ้นได้มาก แรงเฉื่อยอันเกิดจากความไม่สมดุลนี้จะเป็นผลให้เกิดการแกว่งหรือการสั่นสะเทือนในโครงสร้างของเครื่องที่ฐานราก และอาจเกิดเสียงดังอีกด้วย มีความสั่นไหวของรอกสูง เป็นผลให้เกิดการเสียหายใช้งานไม่ได้ ในที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อความถี่ของการสั่นเข้าใกล้ความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) ของ โครงสร้างก็จะยิ่ง เกิดความเสียหายเร็วขึ้นอีก การถ่วงสมดุล เครื่องจักรกลหมุนจึง เป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องทำ เพื่อลดแรงเฉื่อยซึ่งทำให้เกิดการสั่นให้น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ หรือเท่าที่มีความจำเป็นทางวิศวกรรม

๑.๒ หลักการถ่วงสมดุลเครื่องจักรกลหมุน

การถ่วงสมดุลเครื่องจักรกลหมุนสามารถทำได้โดยอาศัยหลักการ ๒ หลักการ คือ

ก. การถ่วงสมดุลแบบสถิตย์ศาสตร์ ทำได้โดยการหาจุดหนักและขนาดน้ำหนักที่ไม่สมดุลของ โรเตอร์ ใช้หลักการง่าย ๆ ของสถิตย์ศาสตร์ ทำให้ใช้กับงานค่อนข้างหายิบไม่ต้องใช้เครื่องมืออุปกรณ์มาก

ข. การถ่วงสมดุลแบบพลศาสตร์ ทำได้โดยการตรวจหาขนาดของแรงเฉื่อยของการเสียสมดุล โดยอุปกรณ์วัดต่าง ๆ ทางพลศาสตร์ เช่น การวัดแรง

การวัดความเร็ว ความเร่ง หรือขนาดการเคลื่อนที่ เป็นต้น ความละเอียดอ่อน ถูกต้องขึ้นอยู่กับความละเอียดในการวัดของ เครื่องมืออุปกรณ์ต่าง ๆ หลายชิ้น นิยมใช้กันมากในงานวิศวกรรมที่ต้องการ เครื่องจักรกลหมุนที่มีความเร็วสูง

### ๑.๓ วัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย

นับแต่ประมาณ ค.ศ. ๑๕๐๐ เป็นต้นมา ได้มีการตื่นตัวในด้านการวัดสมมุติ เครื่องจักรกลหมุนเพื่อลดการสั่นสะเทือน ซึ่งทำให้งานเสียหายและได้เน้นหนักไปทาง ด้านเครื่องวัดสมมุติโดยหลักการทางพลศาสตร์ จำนวนระนาบตั้งฉากกับแกนหมุน เพื่อใช้วัดให้ได้สมมุติขนาดที่ต้องการ และความละเอียดของงานเป็นตัวกำหนดในการ ออกแบบเครื่องวัด โรเตอร์ชนิดจานหมุน เช่น มู่เล่ กังหันปั้มน้ำ มีมิติด้านระนาบ ตั้งฉากค่อนข้างน้อย สามารถวัดสมมุติได้ในระนาบเดียวโดยเลือกระนาบที่ใกล้หรือ ผ่านจุดศูนย์กลางของมวล โรเตอร์ สำหรับโรเตอร์ที่มีความยาวตามแกนหมุนมาก หรือ โรเตอร์ที่หมุนด้วยความเร็วสูงจำเป็นต้องมีการวัดสมมุติในระนาบตั้งฉากหลายระนาบ ถ้าโรเตอร์เป็นวัตถุแกว่งไม่เสียหายที่ทุกความเร็วของการหมุน การวัดสมมุติใน ระนาบตั้งฉาก ๒ ระนาบนับว่าเพียงพอ ถ้าโรเตอร์ทำงานที่ความเร็วระหว่างความ เร็ววิกฤติ ตัวแรกและตัวที่สองก็จะต้องวัดแก้ไขถึง ๓ ระนาบ ฯลฯ หลักการพื้นฐาน ที่กล่าวมานี้ยังคง เป็นหลักการที่ใช้ได้ และนำมาเป็นหลักการทำงานของ เครื่องวัดอยู่ จนถึงปัจจุบันนี้ วิวัฒนาการของเครื่องวัดกล่าวได้ว่าเกิดจากการพัฒนาวิธีการวัดขนาด ของการเสียสมมุติและตำแหน่งของการเสียสมมุติให้ได้ถูกต้องและละเอียดเพียงพอ วิธีการดั้งเดิมนั้นได้ใช้เครื่องมือวัดทางกลล้วน เช่น วัดตำแหน่งหนักของโรเตอร์โดย จับชิ้นหมุนบนแท่นที่มีการแกว่งเคลื่อนที่ในระนาบอันหนึ่ง แล้วค่อย ๆ เคลื่อนคินสอค่า อ่อน ๆ หรือฟู่กันจุ่มสี เข้าหาโรเตอร์จนเกิดการสัมผัสเฉพาะจุดหรือแกนแคบ ๆ บนโรเตอร์ ส่วนที่แกว่งออกมามากที่สุดเพื่อแสดงจุดหนัก และวัดขนาดของการเคลื่อนที่โดยใช้ไคอัล- เกจ (Mechanical Dial Gauge) มีนักประดิษฐ์บางท่าน เช่น E.L. Thearle<sup>1</sup> ได้ประดิษฐ์เครื่องวัดทางกลอัตโนมัติโดยใช้ลูกปืนรองลื่น ๒ ลูกวิ่งในรางกลมปิดใน:

<sup>1</sup> Thearle, E.L. : Mech. Eng. 46 : 670 (124)

แนวเส้นรอบวง ๆ หนึ่งของ โรเตอร์ เพื่อให้เกิดการจับตัวโดยอัตโนมัติเมื่อมีการหมุน ถ่วงสมดุลย์กับมวลส่วนเกินด้านตรงกันข้ามกับแนวจิกเรียงตัวของลูกปืน เป็นต้น

การพัฒนาเครื่องในระยะหลัง ๆ ได้นำเอาอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์เข้ามา ใช้วัดขนาดความไม่สมดุลย์ เช่น Force Transducer, Velocity Pick-up หรือ Acceleration Pick-up ฯลฯ เพื่อวัดและป้อนสัญญาณเข้าสู่เครื่องคำนวณหาขนาดไม่สมดุลย์ อุปกรณ์เหล่านี้มีราคาแพงไม่สามารถผลิตในประเทศได้ และจำเป็นต้องนำไปประกอบกับอุปกรณ์อ่าน ค่าขนาด และแปลสัญญาณอื่น ๆ ทำให้ราคาเครื่องถ่วงสมดุลย์จากต่างประเทศมีราคาแพงมาก

ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น ประกอบกับความต้องการของงานด้านการผลิต พัฒน มอเตอร์ขนาดเล็กต่าง ๆ ซึ่งมีความเร็วไม่สูง (ต่ำกว่า ๒๐๐๐ รอบต่อนาที) ซึ่งมีอยู่มากในประเทศ งานวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะนำเอาเกจวัดความเครียด (Strain Gauge) ซึ่งสามารถหาได้ในราคาต่ำมาใช้ในการวัดคำนวณหาขนาดไม่สมดุลย์แทน อุปกรณ์กลุ่ม Inductive Pick-up ซึ่งมีราคาสูงดังกล่าว

## บทที่ ๒

ทฤษฎีและหลักการของ เครื่องถ่วงสมดุลง๒.๑ สมดุลงของ โรเตอร์เกร็ง

เมื่อวัตถุเกร็ง (Rigid Body) หมุนด้วยความเร็วคงที่รอบแกนหลักของความเฉื่อย (Principal Axis of Inertia) แกนใดแกนหนึ่ง ถ้าไม่ค้ำึงถึงแรงบิดซึ่งทำให้เกิดการหมุนและแรงพียงของรอลัน วัตถุเกร็งนั้นจะหมุนรอบแกนดังกล่าวโดยไม่เกิดการแกว่ง ถ้าวัตถุเกร็งนี้เป็นโรเตอร์และเพลหาหมุนอยู่บนรอลันก็จะ เป็นระบบการหมุนที่ไ้รับการถ่วงสมดุลงอย่างสมบูรณ์ โรเตอร์จะเสี่ยสมดุลงเมื่อแนวแกนหมุนไม่ทับกับแกนหลักของความเฉื่อย ซึ่งวิ่งผ่านจุดศูนย์กลางของมวล โรเตอร์ (G) ระยะห่างตั้งฉากของ G จากแนวแกนหมุนจะเป็นตัวประกอบกำหนดขนาดของการเสี่ยสมดุลง การถ่วงสมดุลงทางสถิตย์ศาสตร์ใช้หลักการที่จะโน้มให้จุด G เข้าอยู่ในเส้นแกนหมุน โดยการเพิ่มมวลที่ระนาบขนาน และแกนหมุนคานฝั่งตรงกันข้าม (๑๘๐) กับ จุดศูนย์กลางของมวลรวมกับแกนหมุนพอดี หรือเจาะเอามวลคานเดียวกับ ออก วิธีกรนี้จะไม่สามารถทำให้แกนหลักของความเฉื่อยทับกับแกนหมุนได้ แกนคู่นี้จะมีจุดร่วมเพียงจุดเดียวคือจุดศูนย์กลางของมวลโรเตอร์ เมื่อโรเตอร์หมุนจะเกิดการไ้สมดุลงของ โมเมนต์ขึ้น และแสดงออกที่รอลันอีกไ้ ไม่นับว่าเป็นวิธีกรถ่วงสมดุลง เพื่อให้เกิดการสมดุลงสมบูรณ์จะต้องทำให้แกนหลักของความเฉื่อย โรเตอร์ทับกับแกนหมุน อาจทำได้โดยการปรับแต่งตำแหน่งแทนรับรอลัน (ไม่สะดวกในทางปฏิบัติ) หรือการเพิ่ม/ลด มวล โรเตอร์ในระนาบแนวยาวที่มีแกนหลักของความเฉื่อยและแกนหมุนอยู่ด้วยกัน ในระนาบตั้งฉากกับแกนหมุน ๒ ระนาบเป็นอย่งน้อย\* เพื่อแก้ไขทั้งมวล โมเมนต์ที่ไ้สมดุลง วิธีกรนี้เป็นวิธีกรถ่วงสมดุลงทางพลศาสตร์ อย่งไรก็ไ้สำหรับกรณีของ วัตถุเกร็งการถ่วงสมดุลงเพียง ๒ ระนาบนับว่าเพียงพอ และระนาบจะเลือกไว้ที่ไ้ไ้ไ้ทางทฤษฎี แต่ในทางปฏิบัติแล้วควรเลือกให้ระนาบทั้ง ๒ อยู่ห่างจากกันตามแนว

\* อิทธิพล ปานงาม, ประเสริฐ เสริมศรีสุวรรณ : กลศาสตร์เครื่องจักรกล ๒

แกนหมุนให้มากที่สุด เพื่อที่จะลดปริมาณของมวลที่จะใช้ในการถ่วงสมดุลย์

### ๒.๒ สมดุลย์ของ โรเตอร์หมุน

สมดุลย์ของ โรเตอร์หมุนจะต้องนำปฏิกิริยาทางพลศาสตร์ของความหมุนของ โรเตอร์และรองสั้น ตลอดจนแคมป์ (Damping Effect) ของเพลลาเข้ามาเกี่ยวข้อง และจำเป็นจะต้องถ่วงสมดุลย์ในหลายระนาบ ความเร็ววิกฤต (Critical Speed) ของระบบจะมีได้หลายค่า การถ่วงสมดุลย์จะต้องนำเอาย่านความเร็วใช้งานเป็นย่านปลอดภัยการสั่น เมื่อถ่วงสมดุลย์แล้วอาจยอมให้เกิดการสั่นที่ความเร็วอื่น ๆ ได้

### ๒.๓ ต้นเหตุของการเสียสมดุลย์

ต้นเหตุที่ทำให้เกิดการ เสียสมดุลย์ของ เครื่องจักรกลหมุนมีหลายอย่างพอสรุปได้ดังนี้

- ก. ขาดสมมาตร (Dissymmetry) เนื่องจากกรรมวิธีการผลิต
- ข. เนื้อวัสดุไม่แผ่กระจายอย่างสม่ำเสมอ หรือมีความหนาแน่นไม่คงที่
- ค. เกิดการเสีรูปทรงในขณะที่หมุน
- ง. ระบบการประกอบเครื่อง ไม่ไต่ศูนย์ รองรับเพลลาไม่กลมหรือเยื้องศูนย์
- จ. รวงสั้นไม่อยู่ในแนวเดียวกัน
- ฉ. ความไม่สมดุลย์ของระบบไฮดรอลิก หรือ อากาศพลศาสตร์ ฯลฯ

### ๒.๔ หลักการของ เครื่องถ่วงสมดุลย์

เครื่องถ่วงสมดุลย์ทางพลศาสตร์ทำได้โดยใช้หลักการ ๒ แบบ คือ

- ก. เครื่องถ่วงสมดุลย์แบบรางสั้นอ่อนตัว (Flexible Bearing)
- ข. เครื่องถ่วงสมดุลย์แบบรางสั้นแกร่ง (Rigid Bearing)

ในงานวิจัยนี้จะใช้หลักการของแบบแรกคือแบบรางสั้นอ่อนตัวซึ่งนำเอาหลักการเคลื่อนที่อิสระของโรเตอร์มาใช้ โรเตอร์จึงงานจะหมุนในรางสั้น หัว-ท้าย ซึ่งมีตุ้ยกตาตัวจับ

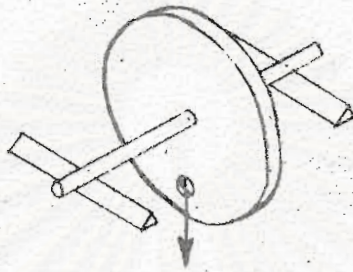
รางลื่นรองรับค้ำยันแห่งกลมทำจากวัสดุหยุ่นในแนวตั้ง การเคลื่อนที่จะมีความอ่อนตัวในแนวอนสูงกว่าในแนวตั้งมาก ๆ เป็นผลให้ความเร็ววิกฤตของการสั่นในแนวอนมีค่าต่ำกว่าความเร็ววิกฤตของการสั่นในแนวตั้งมาก เรามุ่งการวัดและการแก้ไขการเสียสมดุลจากการเคลื่อนที่ตามแนวอนของ โรเตอร์ในรูปที่ ๒.๑ แสดงรูปของการสั่นอย่างง่าย ๆ เมื่อโรเตอร์ขาดสมดุลเนื่องจากแรงควบคู่บริสุทธิ์ (Pure Couple) ทุกการางลื่นค้ำยันจะสั่นกลับกับทุกการางลื่นค้ำยันขวา ดังที่แสดงไว้โดยลูกศร ก และ ข. จะเห็นว่าแห่งกลมรองรับทุกการางลื่นทำหน้าที่เหมือนคานยึดติดอยู่กับแท่นที่ปลายคานหนึ่ง ในขณะที่ปลายอีกข้างหนึ่งสั่น สำหรับกรณีนี้ที่กล่าวถึงคานที่ปลายโรเตอร์ค้ำยันและคานขวาจะเคลื่อนที่โดยที่มุมเฟส (Phase Angle) ต่างกัน  $๑๘๐^{\circ}$  ถ้าโรเตอร์เสียสมดุลในแบบอื่น ๆ การสั่นตามลูกศร ก. และ ข. ก็เปลี่ยนทิศทางและมุมเฟสออกไป แต่อย่างไรก็ดีเวกเตอร์ ก. และ ข. จะยังคงแสดงการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิก การเคลื่อนที่สัมพันธ์ของทุกการางลื่นทั้งสองประกอบกับมุมเฟส จะนำไปสู่การหาทางถ่วงสมดุลต่อไป การวัดหาแอมพลิจูดของการสั่นที่ทุกการางลื่น สามารถทำได้โดยใช้ไฮดรอลิกเคเตอร์ (เมื่อความเร็วต่ำ ๆ) เครื่องวัดการสั่นแบบหาระยะเคลื่อนที่หาความเร็ว หรือความเร่งได้ ในการวิจัยนี้ได้ใช้เกจความเครียดติดกับคานรองรับทุกการางลื่นเพื่อวัดขนาดของความเครียดซึ่งเกิดจากการ โกงตัวของคาน เมื่อทุกการางลื่นค่าสูงสุดของความเครียดจะเป็นอัตราส่วน โดยตรงกับแอมพลิจูดของการสั่น

การหาค่าแห่งเชิงมุมของการสั่นบนระนาบที่ต้องการจะถ่วงค้ำยันน้ำหนักจึงแสดงระนาบ  $-X$  และ  $Y$  ดังในรูป ๒.๒ ทำได้โดยทางจรรยาพร้อมระหว่างวงจรวัดแอมพลิจูดของการสั่น และวงจรถ่ายมุมเฟส ที่ระนาบ  $X$  และ  $Y$  จะมีไฟฉายขึ้นอน (Xenon Lamp) ซึ่งบังคับให้ฉายไฟด้วยวงจรระทวน วงจรระทวนนี้จะเปิดไฟขึ้นอนทุกครั้งที่ได้รับสัญญาณจากวงจรวัดแอมพลิจูดที่มุมเฟสเดียวกัน เมื่อมองดูบนระนาบซึ่งแบ่งมุมไว้ก็จะเห็นระนาบหยุดนิ่งอยู่กับที่ตลอดเวลาที่ตำแหน่งมุม ๆ ใดๆ เกี่ยวตามต้องการ

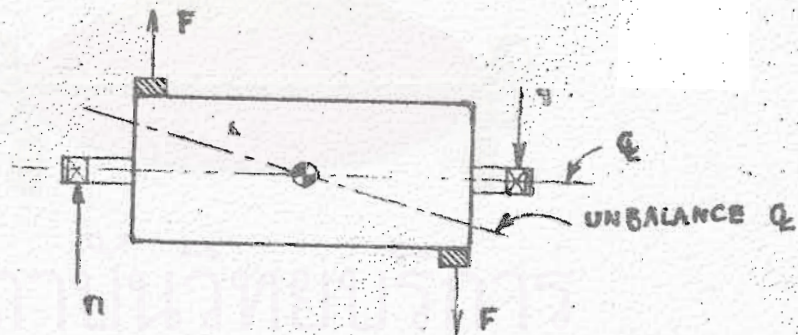
#### ๒.๕ คุณภาพของการถ่วงสมดุล

คุณภาพของเครื่องถ่วงสมดุลขึ้นอยู่กับความสามารถในการบอกปริมาณสำคัญๆ ในการถ่วงสมดุล ซึ่งเมื่อนำไปดำเนินการแล้วทำให้เครื่องจักรกลทำงานได้เรียบ

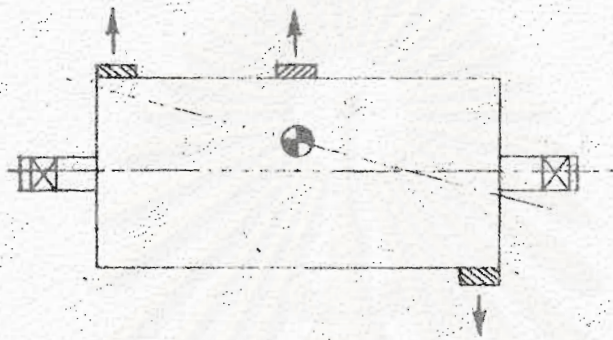




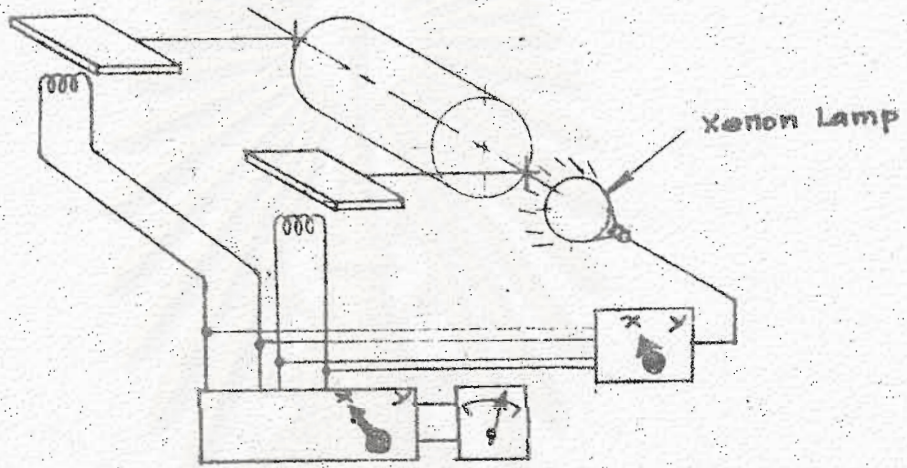
ก. จุดหนักที่สุดจะลงต่ำเมื่อทำสมดุลทางสถิตยศาสตร์



ข. แสดงการ เบี่ยงเบนของ เมื่อเกิดการ เสียสมดุลแบบแรง  
ควบคุมวิสุทธิ



ค. แสดงการ เบี่ยงเบนของ โดยทั่วไปเมื่อเกิดจากการเสียสมดุล  
 : แรงควบคุมปริศน์และแรงอื่น



รูปที่ ๒.๒ แผนภูมิแสดงการติดตั้งของชุดเทคนิค-เบารังงาน

มาตรฐานคุณภาพได้มีผู้วางไว้หลายวิธีการดูตัวอย่าง เช่น Federn ในตารางที่ ๒.๑ ซึ่งกำหนดขนาดส่วนไม่สมดุลที่ยอมรับได้ (Residual Unbalance) การวางข้อกำหนดเพื่อทดสอบสมรรถนะของ เครื่องถ่วงสมดุลอาจทำได้ดังนี้

วางความสัมพันธ์ของส่วนไม่สมดุลที่ยอมรับได้ (Permissible Residual Unbalance) สัมพันธ์กับขนาดการสั่นของรางเส้นให้สัมพันธ์กับส่วนไม่สมดุลที่ยอมรับได้ใน ระบาย ๒ ระบายที่ต่องการแก้ไขโดยให้

$$U = 8 W x_0 \quad (2.1)$$

เมื่อ  $U$  = ส่วนไม่สมดุลที่ยอมรับได้ในระบายแต่ละระบาย  
oz-in

$W$  = น้ำหนักของ โรเตอร์ lb

$x_0$  = การเคลื่อนที่ของรางเส้นสูงสุดที่ยอมรับได้, in

$$U_f = 16 W d \quad (2.2)$$

เมื่อ  $U_f$  = ส่วนของแรงไม่สมดุลที่ยอมรับได้ในระบายแต่ละระบาย  
oz-in

$W$  = น้ำหนักของ โรเตอร์ lb

$d$  = การเบี่ยงเบนของจุดศูนย์กลางถ่วงของ โรเตอร์จากแกนหมุน, in

$$U_m = \frac{M}{I} \quad (2.3)$$

$U_m$  = ส่วนของความไม่สมดุลที่มีมุมต่างกัน  $๑๘๐^\circ$  ในระบายที่แก้ ๒ ระบาย, oz-in

$M$  = ส่วนของความไม่สมดุลของ โมเมนต์ที่ยอมรับได้, oz-in-in

Federn, K : Werkstatlu. Betrieb, 86:243 (1953)

Werner I.Senger, 39 - 28, Shock and Vibration Handbook Vol 3, 1961.



1 = ระยะห่างระหว่าง ๒ ระบายแก๊ส in

$$W = \frac{U}{R} \quad (\text{ระบายแก๊ส ๒ ระบาย}) \quad (2.4)$$

$$W_F = \frac{U_F}{R} \quad (\text{ระบายแก๊สระบายเดียว}) \quad (2.5)$$

$$W_M = \frac{U_M}{R} \quad (\text{สำหรับแก๊สความไม่สมดุลของ โมเมนต์}) \quad (2.6)$$

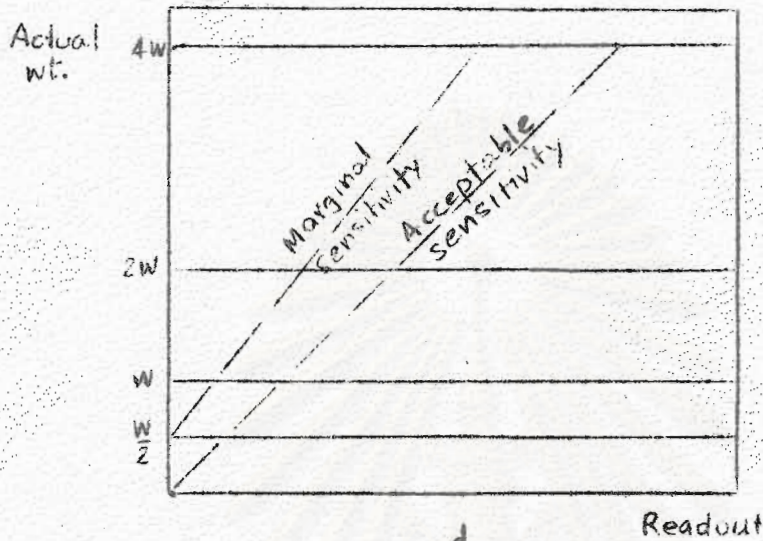
$W, W_F, W_M =$  น้ำหนักที่ต้องใช้เพื่อทำให้เกิดการเสียสมดุลที่ไม่ต้องการ, oz

$U, U_F, U_M =$  ส่วนไม่สมดุลที่ยอมรับได้, oz-in

$R =$  ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของมวล โรเตอร์จากแนวแกนหมุน, in

การทดสอบทำได้โดยใช้โรเตอร์ทดสอบซึ่งสามารถใส่ น้ำหนักทดสอบในแนวรัศมี ๑๒ แนว แบ่ง ๓๐ อย่างสม่ำเสมอ คูตารางที่ ๒.๒ และ ๒.๓

การตรวจสอบ Sensitivity ของเครื่องถ่วงสมดุล แบบระนาบเดี่ยวและสอง  
ระนาบ



ตารางที่ ๒.๑

การตรวจสอบ Sensitivity ของเครื่องถ่วงสมดุลเป็นการเช็คว่าเครื่องถ่วงสมดุลมี Sensitive ที่จะให้เราทราบว่าเครื่องอยู่ใน Limits ต่าง ๆ ที่ยอมรับได้, และทำให้เราทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างจุด high spot กับจุด Heavy spot

การทำ Sensitivity ของเครื่องมีสูตรดังนี้

$$\text{Sensitivity} = \text{Output/input} ; \frac{m}{\text{in-oz.}}$$

การเช็ค Sensitivity กระทำโดยการเพิ่มน้ำหนักต่าง ๆ (เท่ากับ Balance Tolerance) ที่รัศมีใด ๆ ของโรเตอร์ที่เราพิจารณา เครื่องจะอ่านค่าออกมานำไป Plot graph

การพิจารณาเกี่ยวกับการเช็ค Sensitivity

๑. เมื่อ Fixed ค่า  $r$  จะเปลี่ยนแปลงมวล (Vary mass) ที่เพิ่มเข้าไป
๒. เมื่อ Fixed มวลที่ใส่เข้าไปจะเปลี่ยนค่า  $r$
๓. จะเปลี่ยนตำแหน่งของ  $(mr)$  ไปเรื่อย ๆ

ตารางที่ ๒๑

การหาจำนวนของความไม่สมดุลที่ถูกทวงและแน่นอนแบบระนาบเดียวและระนาบคู่

Table Form of Record Used in Determination of Residual Unbalance in a Rotor

Angle of unbalance weight, degrees	Unbalance-indicator reading for plane A with $\delta U$ unbalance in plane A—no other unbalance	Maximum and minimum readings for plane A	Unbalance-indicator reading * for plane C with $\delta U$ unbalance in plane C—no other unbalance	Maximum and minimum readings * for plane C
1	2	3	4	5
0				
30				
60				
90				
120				
150				
180				
210				
240				
270				
300				
330				
Total		XXXX		XXXX
1/2 of total	(G)	XXXX	(I)	XXXX
Max Min	XXXX	(H)	XXXX	(J)
2				

\* Omit for rotors which require correction in a single transverse plane.

Value of H shall not be more than one-fourth of G.

Value of J shall not be more than one-fourth of I.

การหาตำแหน่งเชิงมุมของความไม่สมดุลที่ถูกต้องและแน่นอนแบบระนาบเดี่ยวและสองระนาบ

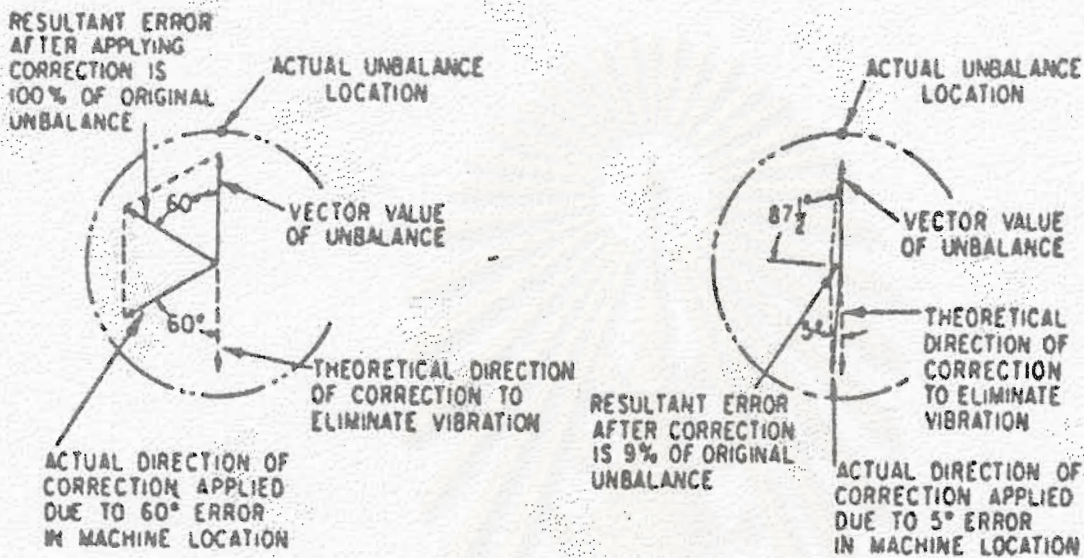


Table 2. Form of Record Used in Determining Position of Unbalance in a Rotor

No. of U units of unbalance in each of planes	Actual location		Location indicated by machine		Error		Permissible angular error
	Degrees		Degrees		Degrees		
	Plane A	Plane C*	Plane A	Plane C*	Plane A	Plane C*	Degree
A and C*	Plane A	Plane C*	Plane A	Plane C*	Plane A	Plane C*	Degree
1	2	3	4	5	6	7	8
2	0	0					15
5	0	0					6
10	0	0					3
20	0	0					1 1/2
2°	0	180					15
5°	0	180					6
10°	0	180					3
20°	0	180					1 1/2
2°	0	90					15
5°	0	90					6
10°	0	90					3
20°	0	90					1 1/2

\* Unit of rotor is corrected for balance in a single transverse plane.



บทที่ ๓การสร้าง เครื่องถ่วงสมดุล

เครื่องถ่วงสมดุลซึ่งได้ออกแบบสร้างเพื่อวิจัยนั้น เป็นเครื่องถ่วงชนิดของ  
 ดันอ่อนตัว (Flexible Beaming) ใช้เหล็กสปริงค์แบบแผ่นบางทำหน้าที่หัวเพลาเป็น  
 คานแบบปลายอิสระปลายละ ๒ ทิว มีขนาด กว้าง x ยาว x หนา = ๓.๕๐ ซม.  
 x ๙.๓๘ ซม. x ๐.๐๕ ซม. ( $E = 3.334 \times 10^6 \text{ Kg/cm}^2$ ) ความแกร่งของ  
 สปริงค์  $K = 1.001 \text{ kg/cm}$  มีเกจวัดความเครียดคิกอยู่เพื่อใช้หาขนาดการโก่งของ  
 คาน

เกจวัดความเครียด (Strain Gauge)

Model No : B - FAE - 8 - 12

Maker : Shinkoh Communication Industry Co.Ltd.

Type : Foil Material : Advance

Carrier Material : Polymide

Gauge Length : 8 mm

Gauge Factor : 2.00 %

Gauge Resistance : 120  $\pm$  0.3

Temperative Compasuation : for Carlon Steel  $10.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

Operating temperature range :  $-70^{\circ}\text{C}$  to  $200^{\circ}\text{C}$

Strain Limit : 4 - 5 %

Fatigue Limit :  $10^5$  cycles at 2000  $\mu\text{t}$

Bonding Cement

Model No : CY - 10

Operating temperature range :  $-50^{\circ}\text{C}$  to  $70^{\circ}\text{C}$

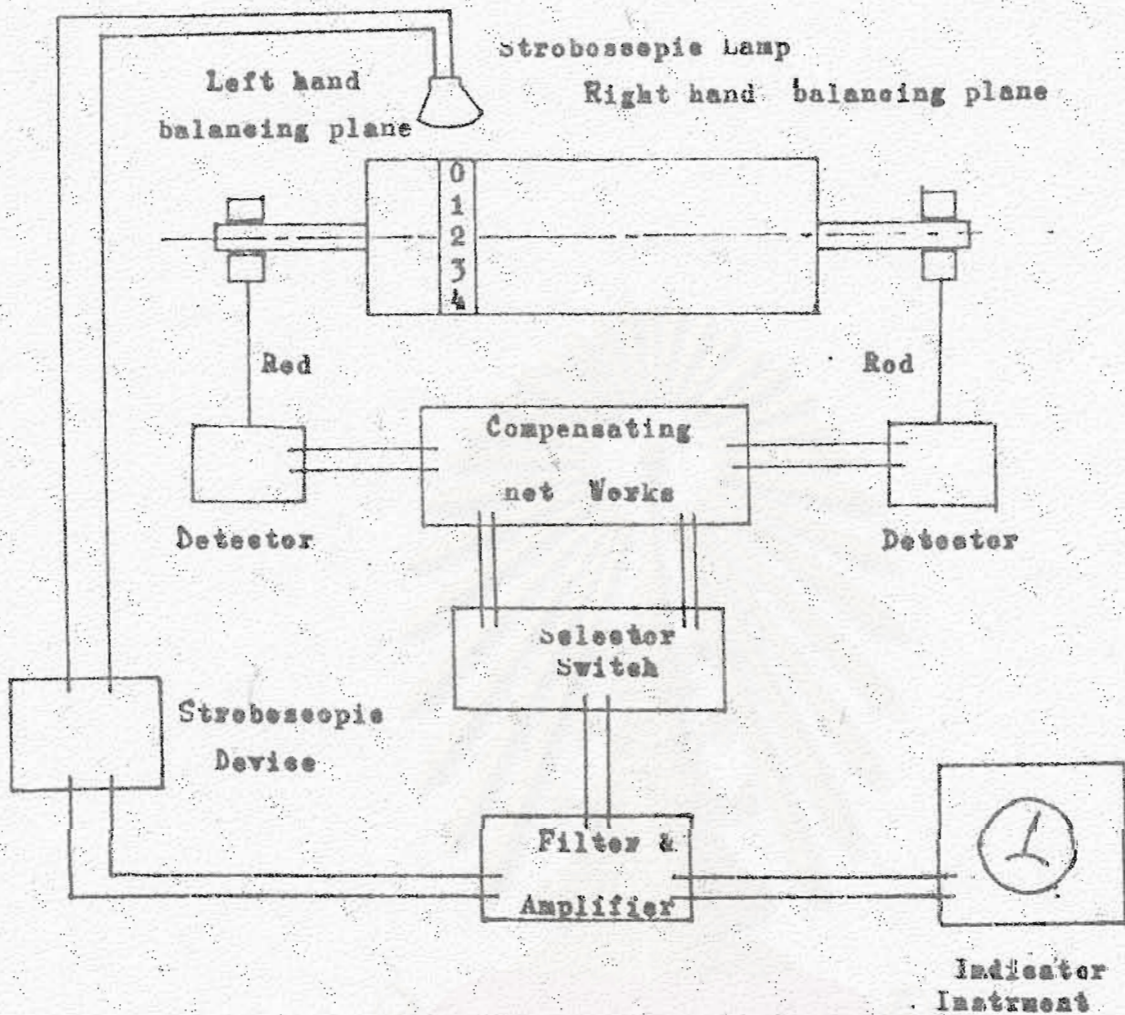
Cure Condition : 1-5 minute at narmal temperature

Strain Limit 8 %

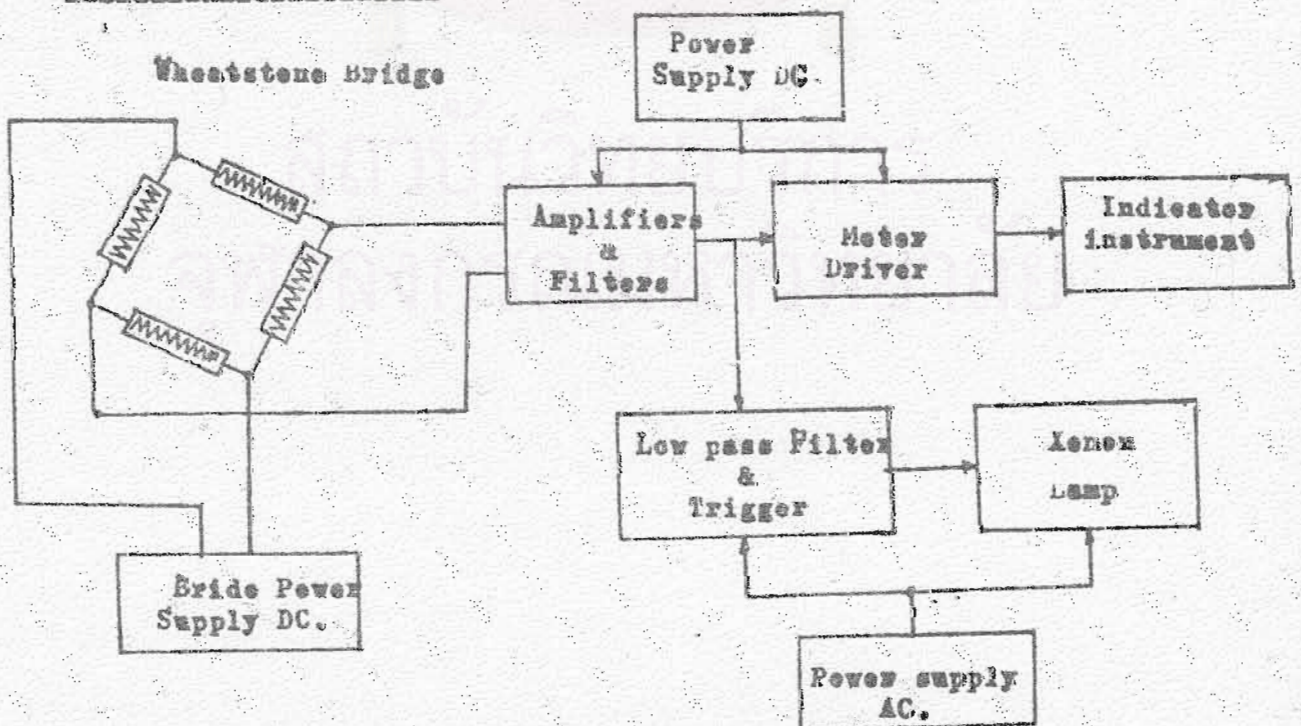
Base : Cynaacrylate

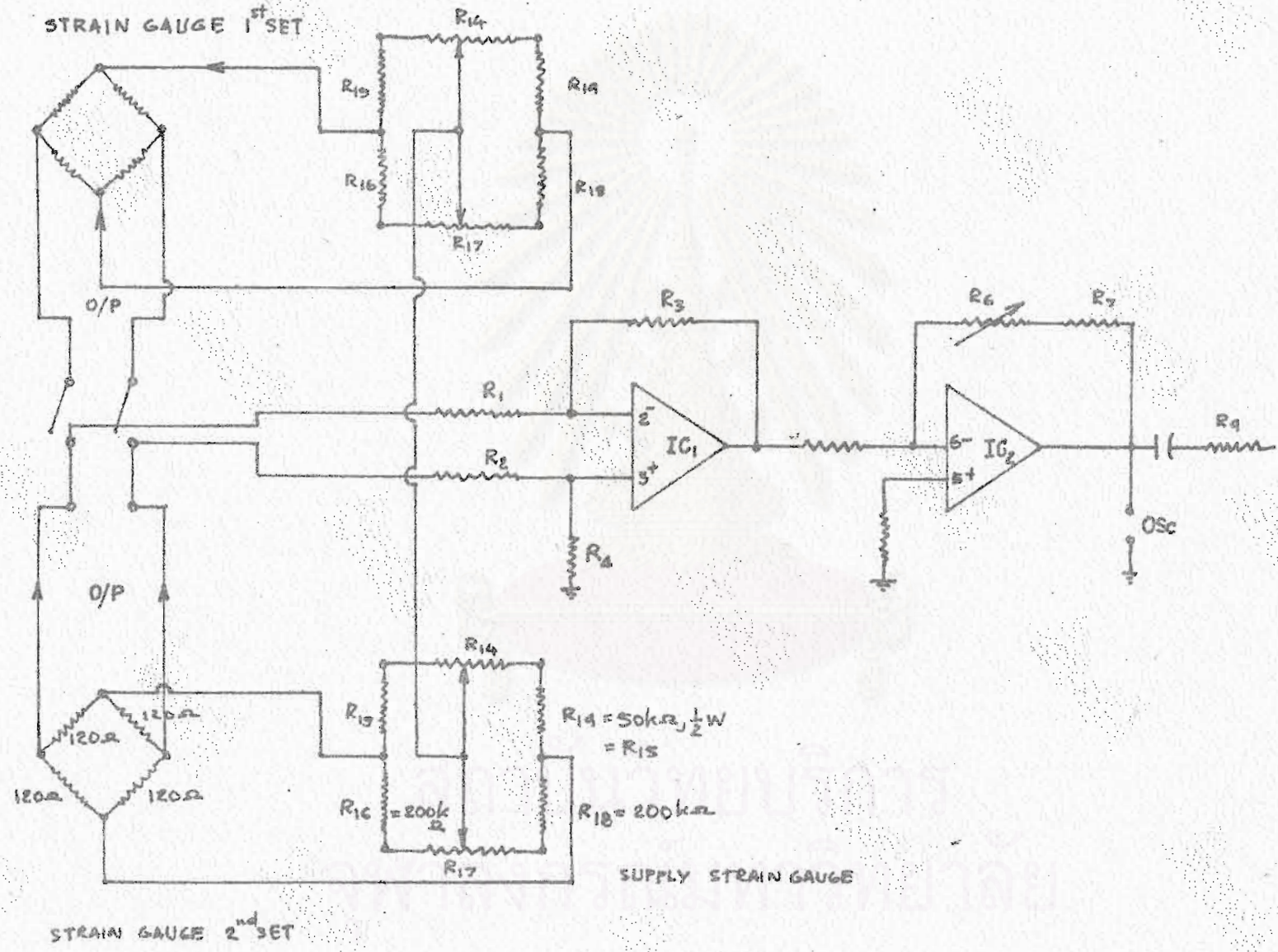
การสร้างเครื่องใช้แผนผังการทำงานดังในรูปที่ ๓.๑ โดยใช้มอเตอร์  
ขนาด ๒ แรงม้า ๑ เฟส ๒๒๐ โวลต์ ๕๐ ไซเคิล และมี Starting Current  
เท่ากับ ๒๕-๓๐ แอมแปร์ มี Load current ๕ แอมแปร์ Full Load  
Current ๑๒๕ แอมแปร์

Stroboscopic Light Transducer

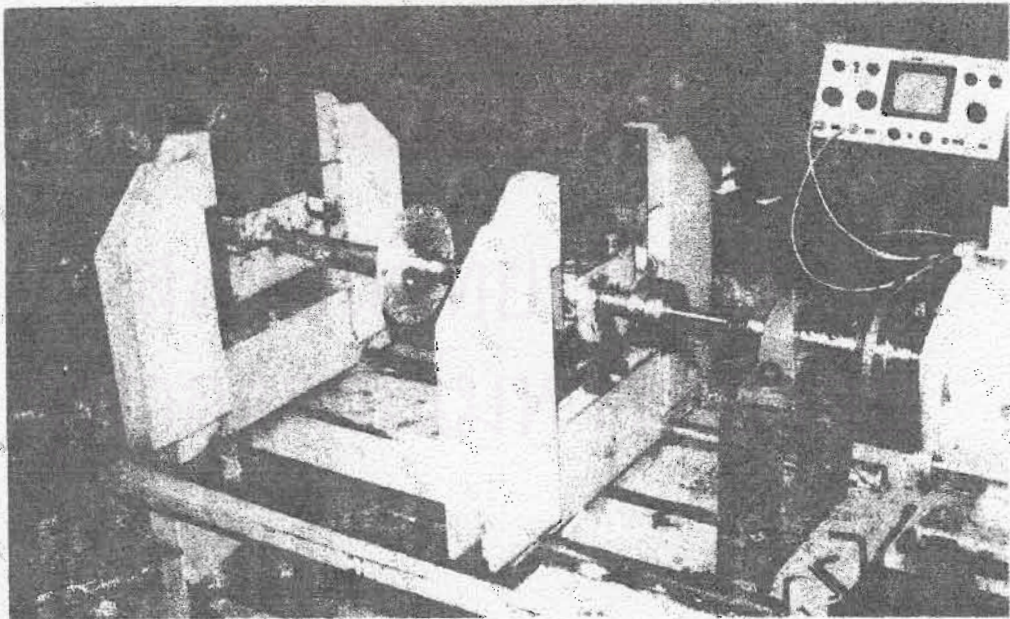
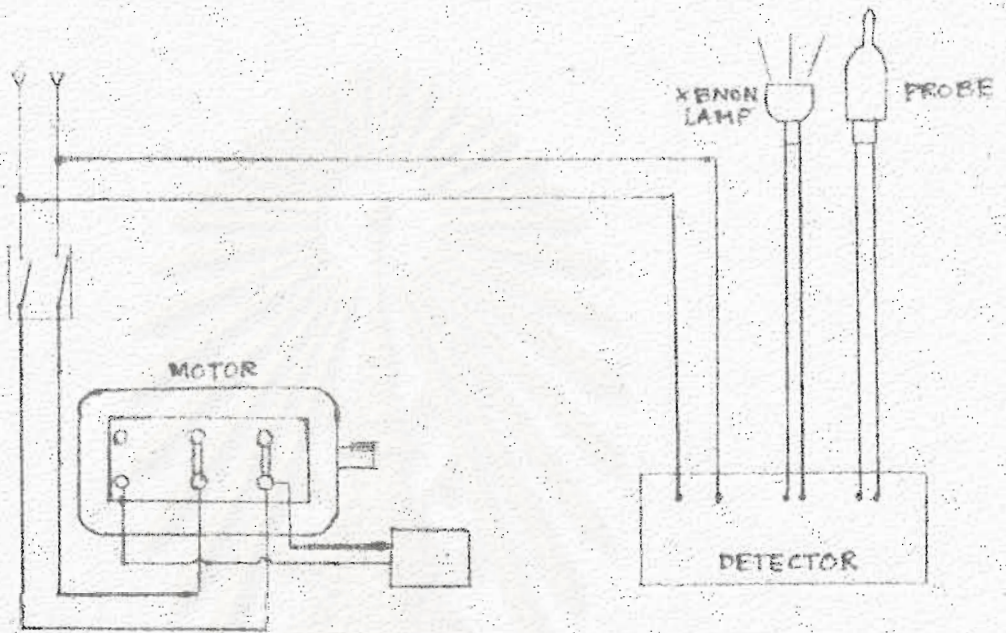


Strain Gage Transducer





ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

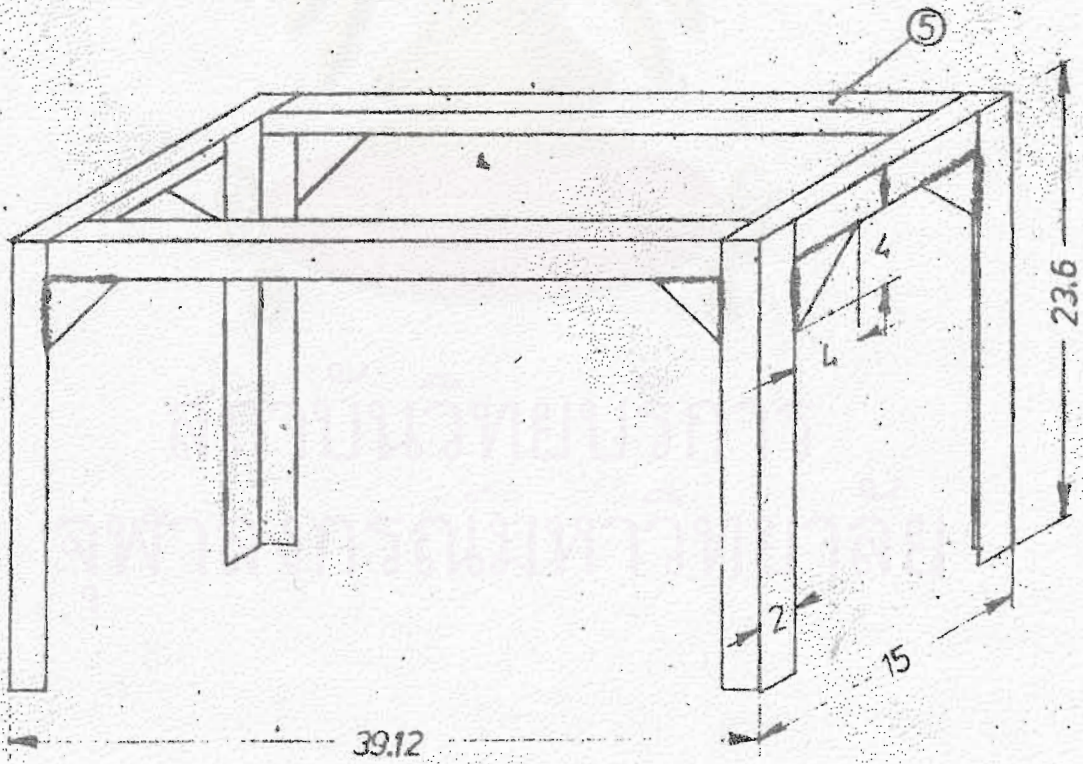
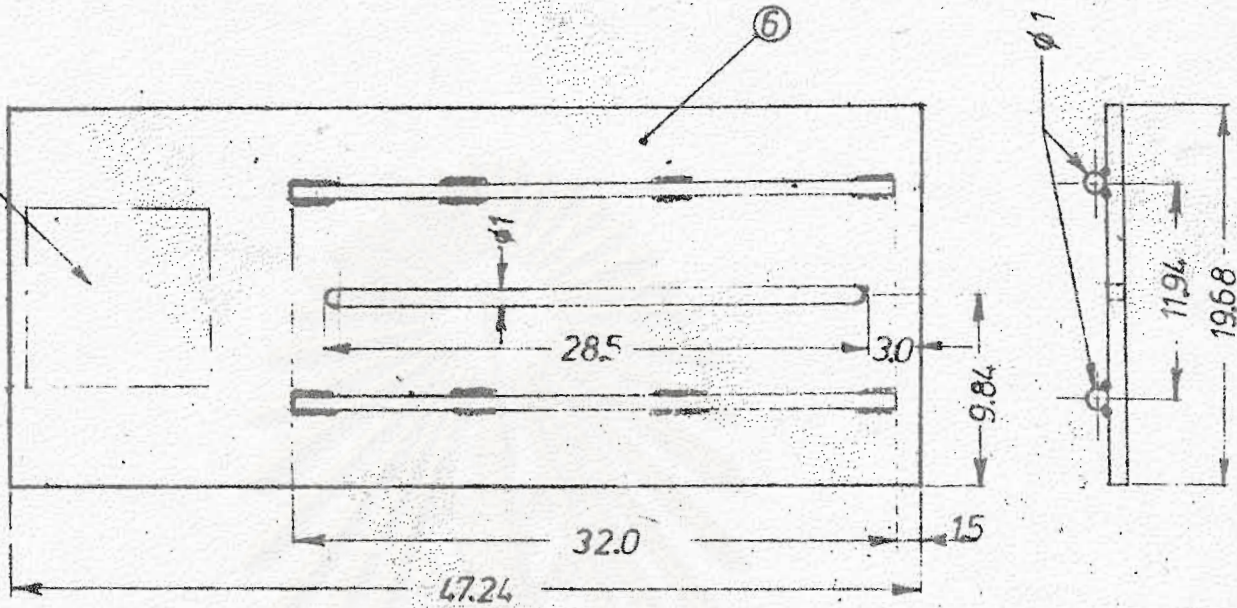


รูปที่ ๑.๑ แสดงเครื่องทดสอบอัลตราซาวด์



# STAND & TABLE

10.5 x 10.5  
Motor Space



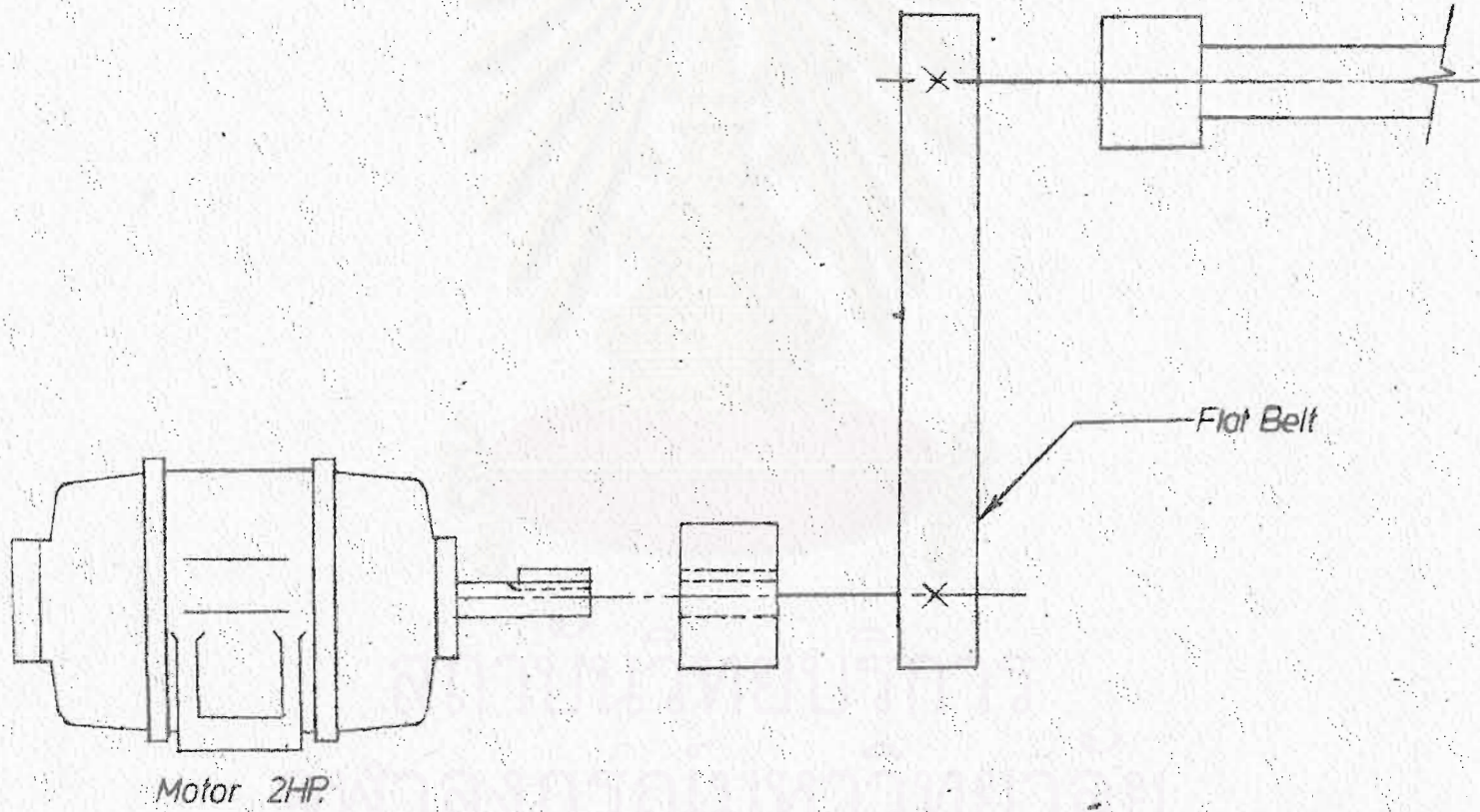
All Dimension in inch

Scale 1:10

รูปที่ ๓.๔ แบบแท่นเครื่อง



MOTOR & BELT



รูปที่ ๓.๖ แบบแสดงการรับแรงทางตั้งงานความละเอียด

๒๓๐



## บทที่ ๔

การทดสอบเครื่องถ่วงสมดุลย์เครื่องจักรกลหมุน

การทดสอบเครื่องถ่วงสมดุลย์ได้ทำเป็น ๒ ขั้นตอน คือ

ก. การทดสอบสมรรถนะของ เครื่อง เพื่อถ่วงสมดุลย์ระนาบเดียว

ข. การทดสอบสมรรถนะของ เครื่อง เพื่อถ่วงสมดุลย์ระนาบคู่

๔.๑ การทดสอบสมรรถนะของ เครื่องถ่วงสมดุลย์ระนาบเดียว

ใช้จานกลมบางหนัก ๕๕๕.๖ กรัม ซึ่งได้ตรวจสอบถ่วงสมดุลย์โดยใช้การถ่วงแบบสถิตย์ศาสตร์เพื่อเป็นจานทดสอบ การทดสอบถือค่าส่วนไม่สมดุลย์ที่ยอมรับได้

๔.๕ gm - mm/Kg ซึ่งเมื่อกำหนดหาส่วนเบี่ยงเบนของจุด G, a :-

$$1 \text{ gm-mm/Kg} = 0.01 \text{ mm}$$

$$4.5 \text{ gm-mm/Kg} = 4.5 \times 0.001/1$$

$$= 0.0045 \text{ mm}$$

จากสูตร (๒.๒)  $U_F$  คือส่วนของแรงไม่สมดุลย์ที่ยอมรับได้  
ในระนาบแก  $\text{gm-mm}$

$$U_F = 1000 \times \text{น้ำหนักจานทดสอบ} \times 0.1$$

$$U_F = 1000 \times 0.5946 \times 0.0045$$

$$= 2.6757 \text{ gm-mm}$$

ได้กำหนดคอนูกรมของน้ำหนักที่จะนำมาเพิ่มบนขอบของจานทดสอบตามรัศมีที่กำหนดไว้

๔ ตัวด้วยกันคือ ๒๐.๖๖  $U_F$  ๔๑.๒๔  $U_F$  ๑๐๔.๒๐  $U_F$  ๑๓๔.๑๒  $U_F$  จาก

สูตร (๒.๕)  $W_F = \frac{U_F}{r}$  จะได้นาหนักน้ำหนักสำหรับการทดลองถ่วงตามตารางที่ ๔.๑

Unbalance	$U_F$ gm - mm	r mm	$F = U_F/r$ gm
20.66 $U_F$	55.27	64.2	0.86
81.20 $U_F$	217.38	64.2	3.38
104.20 $U_F$	278.82	64.2	4.34
134.12 $U_F$	358.87	64.2	5.59

ตารางที่ ๔.๑ ขนาดน้ำหนักที่ใช้ในการทดสอบดวงสมดุขยัระนามเค็ยว

นำจวนทดสอบไปถวงคัยวิ ซึ่สดีคยัศาศกรบนสนมีค พบวาคองเค็มน้ำหนัก ๐.๓๕๔ gm

#### ๔.๑.๑ ลาคับขันคองการทดสอบทางพลศาสตร์

๔.๑.๑.๑ นำจวนทดสอบที่ฆานการถวงสมดุขยัศาศกร แล้วขันคคคั  
คั้งบนเครื่อถวงทางพลศาสตร์ ทรงกึ่งกลางเพลาะระหวางรองด้น N และ F

(Near Side & Far Side)

๔.๑.๑.๒ เค็มน้ำหนักทดสอบขนาดค่าง ๆ ที่เตรียมไว้

๔.๑.๑.๓ ปรับสมดุขยัจจรของ Wheatstone Bridge โดยปรับ

สัณญูฆาจากเกจรความเค็ยคคัค ทั้ง ๒ ชุค (N&F)

๔.๑.๑.๔ อานค่าแอมปลีจจคและมูมเฟสจากมาคร  $\mu$  mA และจวนครรชน  
คตรวจผลของ mA พร้อม ๆ กัันคัยไออัลเกจ

#### ๔.๑.๒ การทดสอบ

๔.๑.๒.๑ ทคสอบเช็งอัคราส่วนของ mA จากชุกเกจวคคความเค็ยคค  
และคไออัลเกจ เมือเค็มน้ำหนัก ๔ คั้วที่ค้ำฆาน่ง ๐ องศ  
ผลคตามคารางที่ ๔.๒ กราฟรูปที่ ๔.๑ - ๔.๒

๔.๑.๒.๒ ทคสอบเช็งอัคราส่วนเหมือน ๔.๑.๒.๑ คัยย้ายค้ำฆาน่ง  
คเพิ่มน้ำหนักไปที่ ๑๔๐ องศ ผลคตามคารางที่ ๔.๓

ตารางที่ ๔.๒ ตารางข้อมูลของ proportionality test สำหรับ Single-plane  
ชนิดของงานที่ทดสอบ : Disk  
ทดสอบที่ความเร็วรอบ : 1440 R.P.M

Run No.	Unbalance wt. Gram, Radius of Application 64.2 MM.	Actual Location deg	Unbalance - Indicator reading				Location indicate by machine deg.		Instability of reading deg.
			N	F	N	F	N	F	
			<i>Mm</i>		<i>MA</i>				
1	0.861	0	7	7	0.00	0.08	10	15	
2	3.386	0	16	17	0.20	0.21	5	355	
3	4.343	0	22	23	0.27	0.28	8	10	
4	5.59	0	30	31	0.34	0.35	5	7	

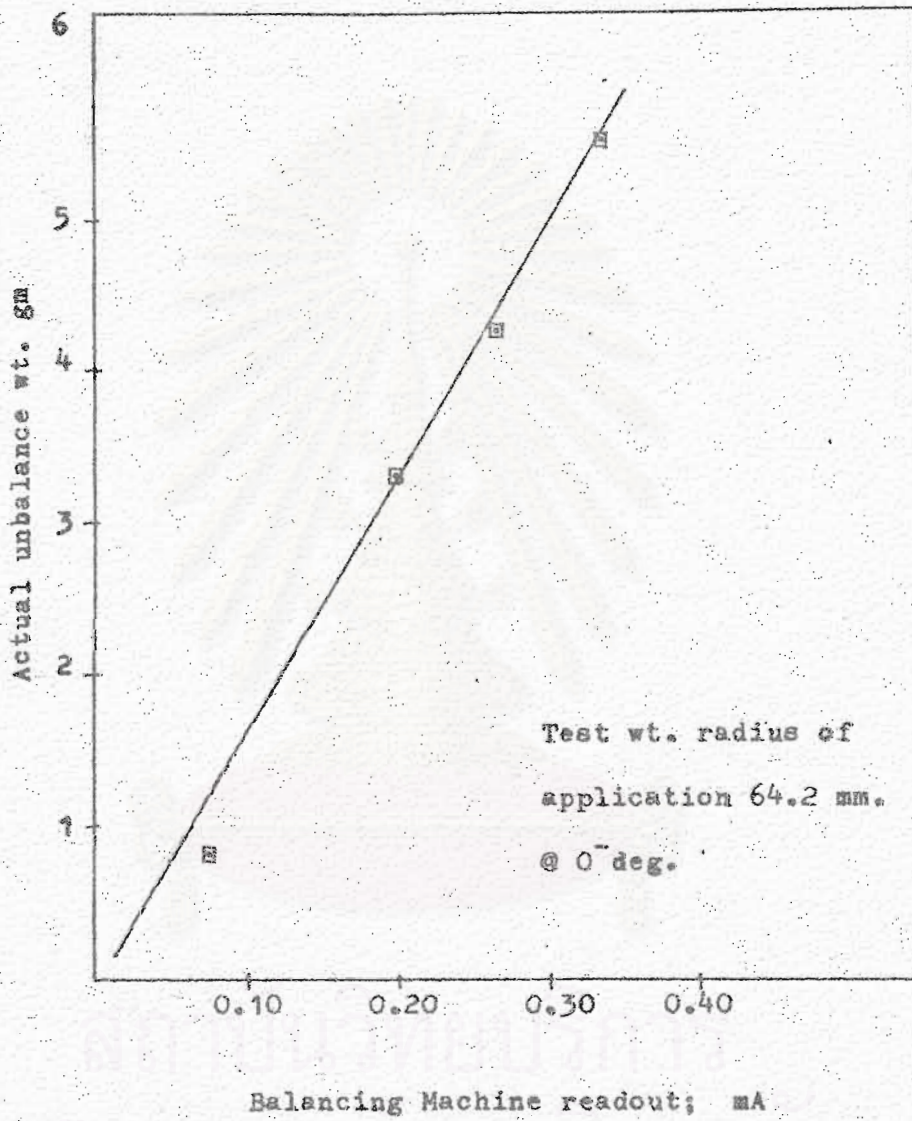
ตารางที่ ๔.๓ ตารางข้อมูล proportionality test สำหรับ Single-plane  
ชนิดของงานที่ทดสอบ : Disk  
ทดสอบที่ความเร็วรอบ : 1440 RPM.

Run No.	Unbalance wt. Gram Radius of Application 64.4 MM.	Actual Location deg.	Unbalance - Indicator Reading				Location indicated by machine		Instability of reading deg.
			N	F	N	F	N	F	
			<i>Mm</i>		<i>MA</i>				
1	0.801	180	7	8	0.08	0.09	105	163	150-210
2	3.386	180	17	17	0.21	0.21	180	185	170-190
3	4.343	180	23	24	0.28	0.29	170	172	170-185
4	5.59	180	31	32	0.35	0.36	175	174	175-185

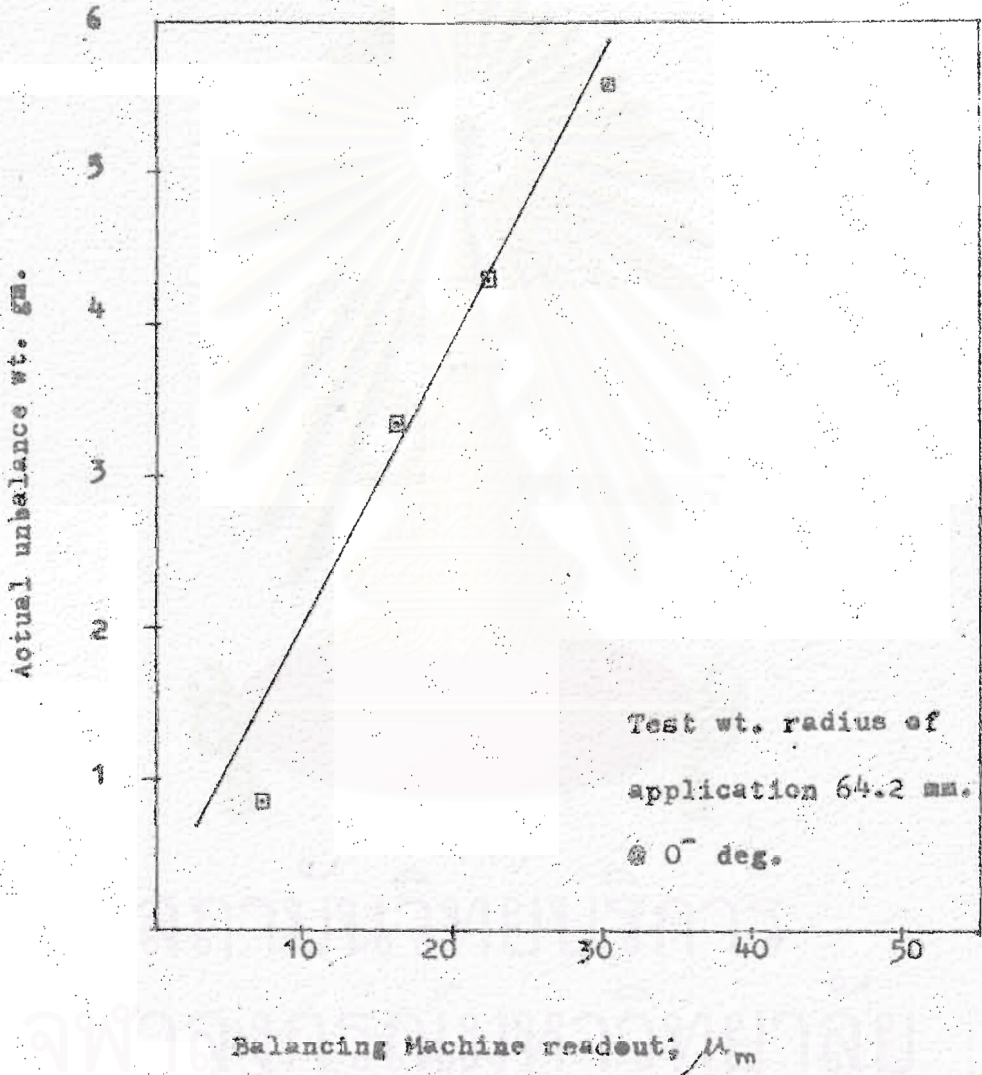
N - Near Side

F - Far Side

การพินิจ ๘.๑



การพ่วงที่ ๔.๒



กราฟรูปที่ ๔.๓ - ๔.๔

- ๔.๑.๒.๓ ทดสอบหาความสามารถของ เครื่องถ่วงในการแสดงขนาดของความไม่สมดุล โดยใช้น้ำหนักทดสอบขนาด ๓.๓๔๒ gm ที่รัศมี ๒๔.๒ mm ที่ตำแหน่ง ๐ ถึง ๓๓๐ องศา ช่วงละ ๓๐ องศา ผลตามตารางที่ ๔.๔ กราฟรูปที่ ๔.๕ - ๔.๖ พร้อมทั้งตรวจสอบการอ่านแสดงตำแหน่งที่ไม่สมดุล ค่าเบี่ยงเบนในการอ่านขนาดไม่สมดุล ตามตารางที่ ๔.๕
- ๔.๑.๒.๔ ทดสอบหาความผิดพลาดในการแสดงตำแหน่งไม่สมดุลเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักเดิม ๔ ขนาด ผลในตารางที่ ๔.๖

#### ๔.๒ การทดสอบสมรรถนะของ เครื่องถ่วงสมดุลย์ระนาบเดียว หลังจากการปรับปรุงเครื่อง

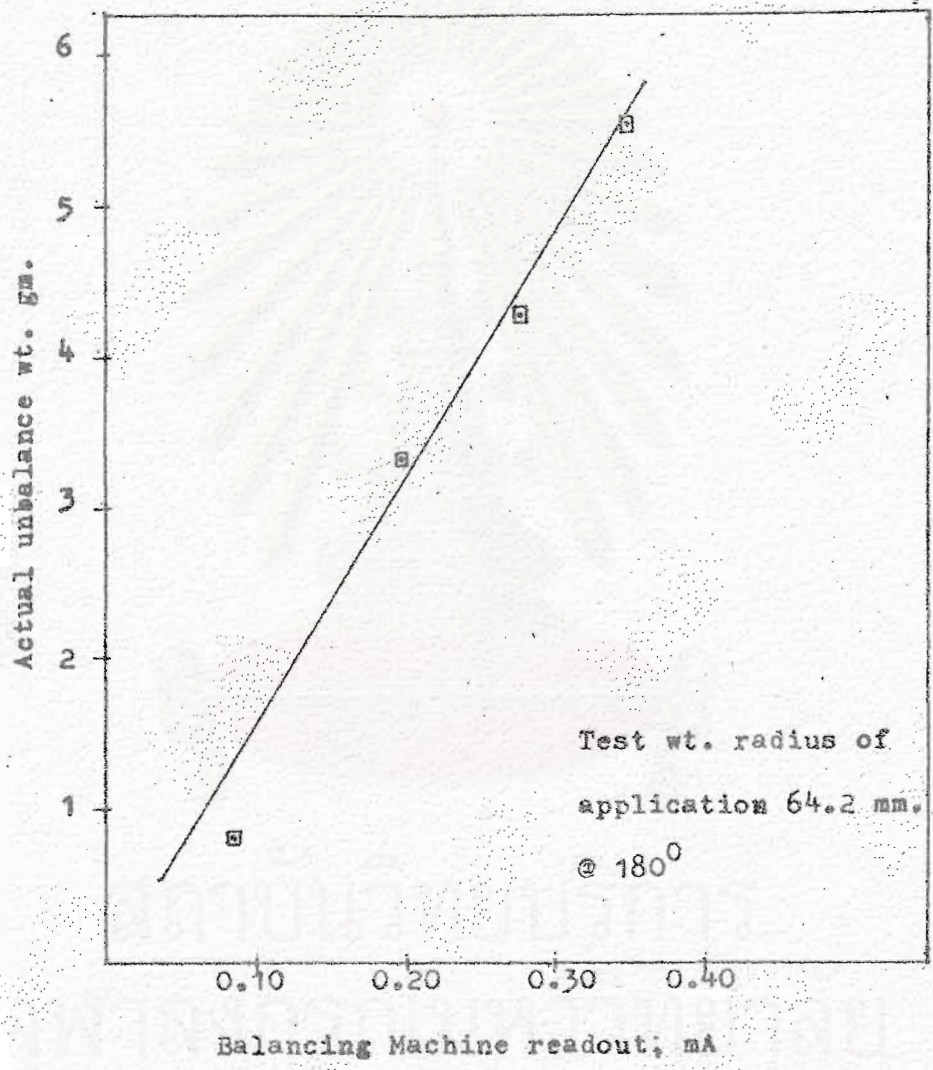
เมื่อได้ทำการทดสอบตามข้อ ๔.๑ ไปแล้ว ได้มีการปรับปรุงระบบเพลลาของเครื่องทดสอบและระบบสัญญาณกระตุ้นไฟฉาย Xenon เพื่อให้การฉายไฟ drift น้อยลง แล้วได้ทำการทดสอบหาสมรรถนะอีก

การทดสอบเชิงอัตราส่วนในการอ่านค่าไม่สมดุลย์ และตำแหน่งเท็มน้ำหนักไม่สมดุลย์ ใช้น้ำหนักทดสอบ ๒ ตัว ขนาด ๑.๑๒, ๒.๐๑ จนถึง ๖.๑๔ gm รวม ๖ ตัว ที่รัศมี ๒๔.๒ mm. ที่ตำแหน่ง ๑๕๐ และ ๓๓๐ องศา ตามตารางที่ ๔.๑๐ ถึง ๔.๑๓ กราฟรูปที่ ๔.๗ ถึง ๔.๑๐

#### ๔.๓ การกำหนดวิธีการตรวจสอบสมดุลย์สำหรับ Single - Plane เพื่อใช้งาน

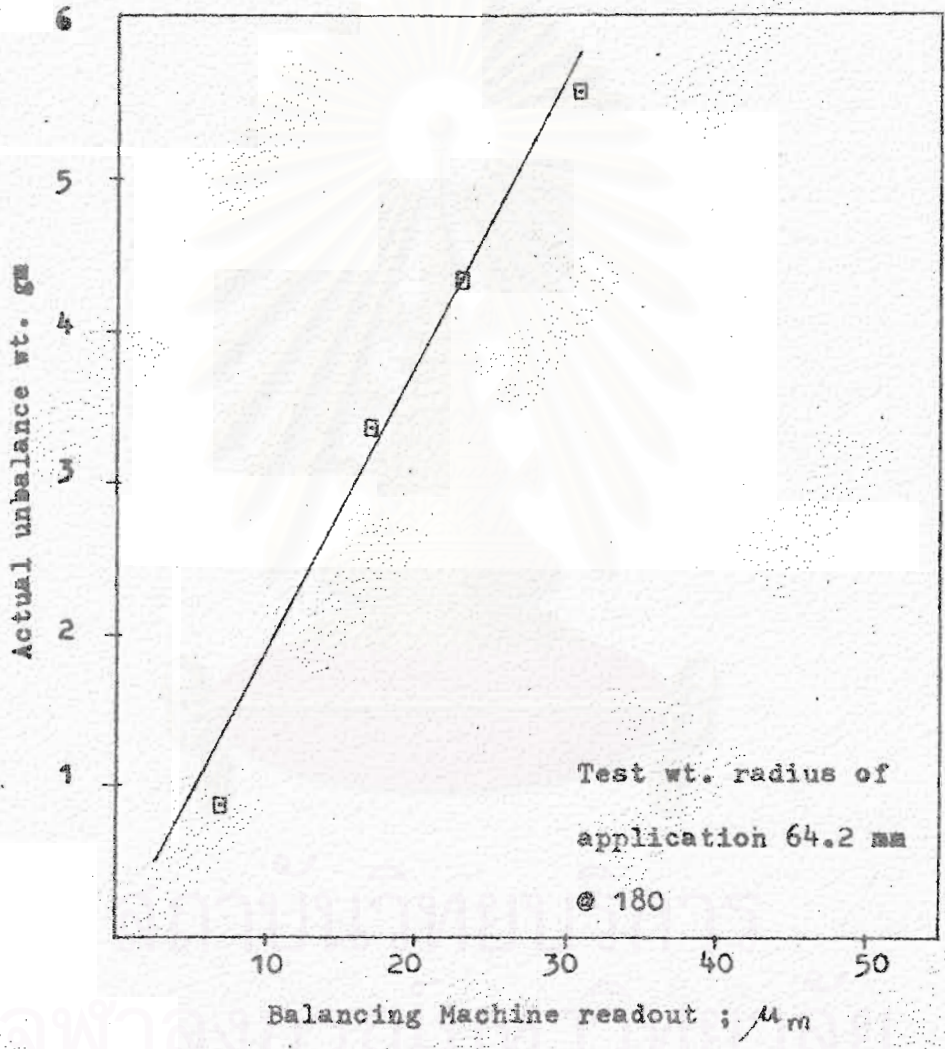
ในการตรวจสอบสมดุลย์กับชิ้นงานที่มีรูปร่างลักษณะกลมบาง หรือชิ้นงานที่มีความยาวในแนวแกนสั้น เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางเวลาหมุนเกิด dynamic couple น้อยมาก เราจะตรวจสอบแบบ single - plane Balancing เมื่อชิ้นงานที่มีรูปร่างลักษณะดังกล่าว หากมันอยู่ในสภาพ Unbalanced และมีความจำเป็นที่จะต้องตรวจสอบสมดุลย์ก่อนที่จะนำไปใช้งาน ดังนั้น วิธีการตรวจสอบสมดุลย์ในปัจจุบันที่ใช้กันอยู่คือ Trial and Error method มีหลายเทคนิคเช่น graphical vector, mathematical solution (phasor calculation)

การพ่วงที่ ๔.๓





กราฟรูปที่ ๔.๔





ตารางที่ ๔.๔ ตารางข้อมูลการทดสอบหาจำนวน Unbalance สำหรับ Single-plane

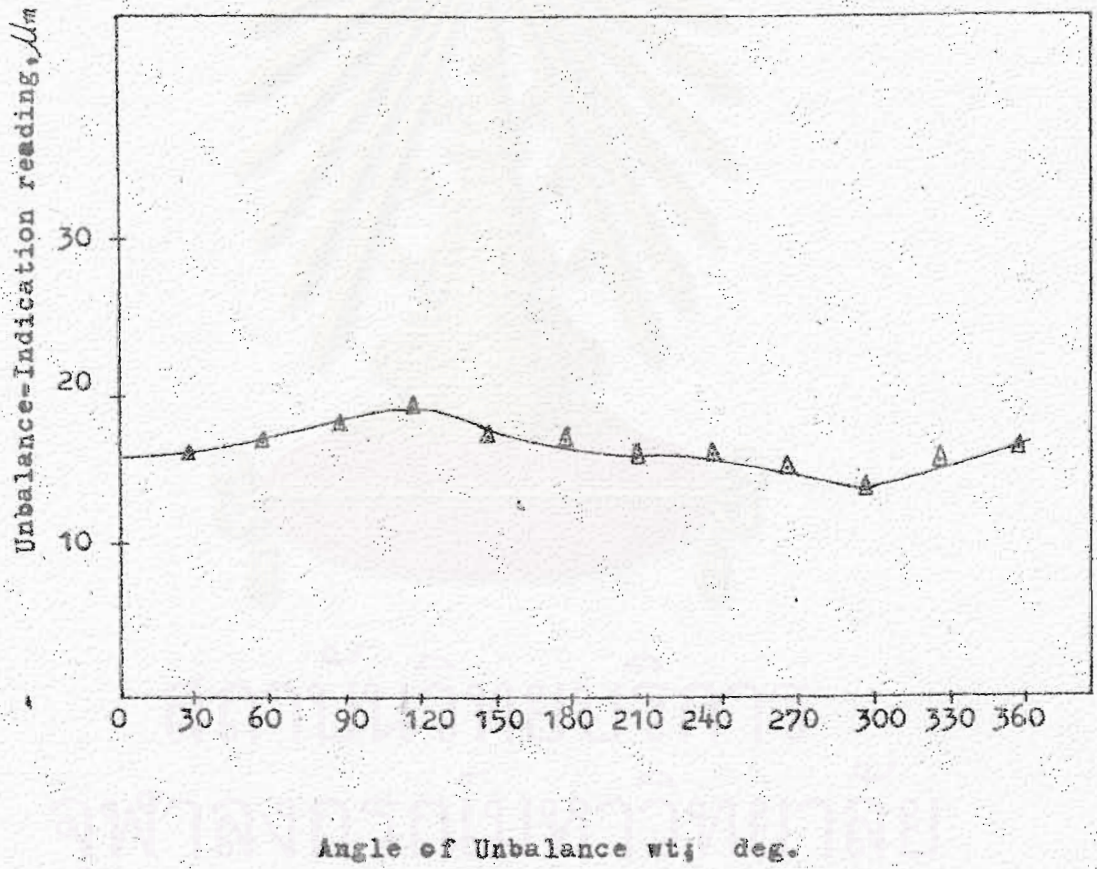
ชนิดของงานที่ทดสอบ : Disk

ทดสอบที่ความเร็วรอบ : 1440 V.P.M.

Run No.	Angle of Unbalance Deg.	Unbalance-Indication reading with 3.386 x 64.2 gm-mm				Location Indicated by machine	
		N <i>mm</i>	F <i>mm</i>	N mA	F mA	N deg.	F deg.
1	0	16	17	0.20	0.21	15	355
2	30	16	18	0.20	0.22	40	35
3	60	17	19	0.21	0.23	65	70
4	90	18	19	0.22	0.23	95	95
5	120	19	20	0.23	0.24	125	117
6	150	17	18	0.21	0.22	145	140
7	180	17	17	0.21	0.21	180	185
8	210	16	17	0.20	0.21	215	205
9	240	16	16	0.20	0.20	235	230
10	270	15	17	0.19	0.21	285	260
11	300	14	15	0.18	0.19	305	310
12	330	16	16	0.20	0.21	335	320

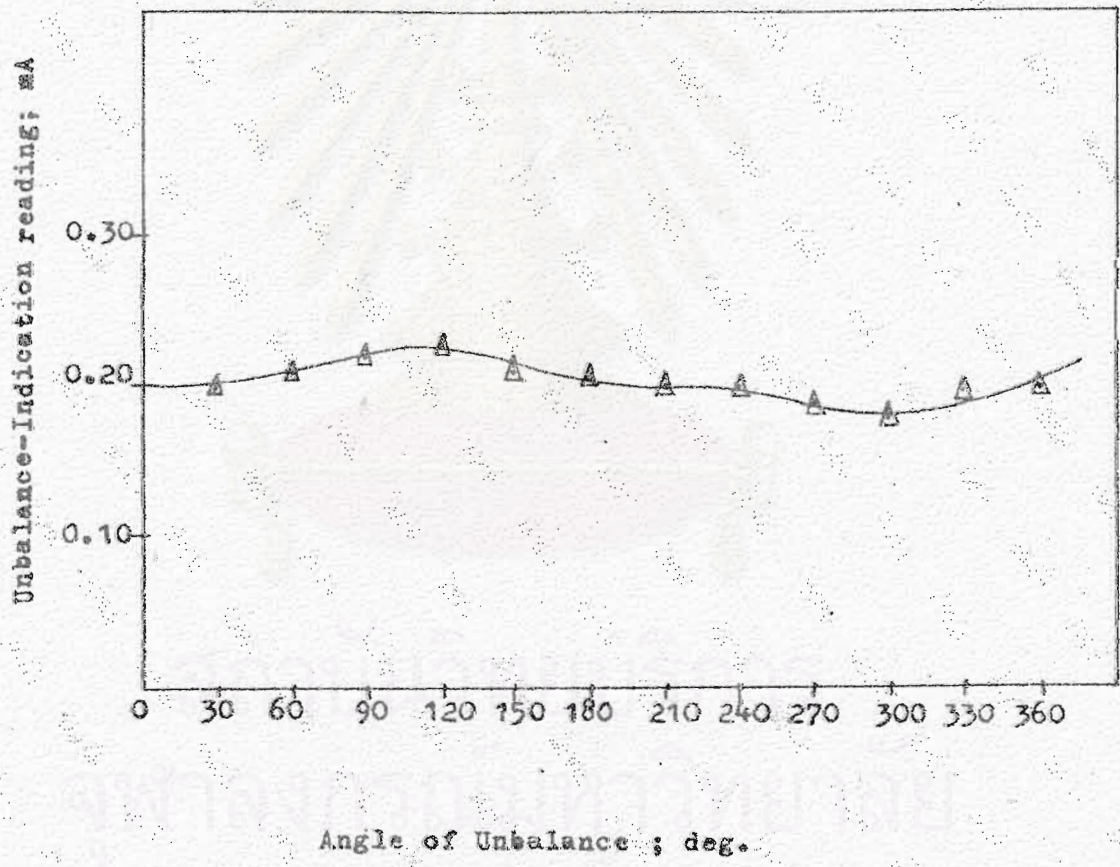
หมายเหตุ กำหนดให้คาน Far End เป็นระนาบที่ไกลกับคาน Coupling ซึ่งกำลัง  
คาน Near End เป็นระนาบที่ใกล้กับคาน Shaft End

התוצאות כ.ע



๙.

กราฟที่ ๔.๖



ตารางที่ ๔.๕ ตารางแสดงผลการหาขนาดของ Unbalance และ Residual  
Unbalance สำหรับแผ่น Disk

Angle of Unbalance deg.	Unbalance - Indication Reading with 3.386 x 64.22 Gram - mm				Maximum and Minimum Reading			
	N	F	N	F	N	F	N	F
	<i>mm</i>	<i>mm</i>	mA	mA	<i>mm</i>	<i>mm</i>	mA	mA
0	16	17	0.20	0.21				
30	16	18	0.20	0.22				
60	17	19	0.21	0.23				
90	18	19	0.22	0.23				
120	19	20	0.23	0.24	19	20	0.23	0.24
150	17	18	0.21	0.22				
180	17	17	0.21	0.21				
210	16	17	0.20	0.21				
240	16	16	0.20	0.20				
270	15	17	0.19	0.21				
300	14	15	0.18	0.19	14	15	0.18	0.19
330	16	16	0.20	0.21				
A Total of the reading	197	209	2.45	2.58				
B $A \div 12$	16.417	17.417	0.204	0.215				
C Max - min					5	5	0.05	0.05
D C/2					2.5	2.5	0.025	0.025

ตารางที่ ๔.๖ ตารางแสดงผลการหาค่าแห่งของ Unbalance ในแผ่น Disk

Number of Unbalance wt. gm	Actual Location deg.	Machine Reading		Machine Error	
		N deg.	F deg.	N deg.	F deg.
0.861	0	10	15	-10	-15
3.386	0	5	355	-5	-5
4.343	0	8	10	-8	-10
5.590	0	5	7	-5	-7
0.861	180	165	166	15	17
3.386	180	180	186	-	-5
4.343	180	170	172	+10	+8
5.590	180	175	174	+5	+6

ตารางที่ ๔.๕ ตารางแสดงผลการหาค่าแห่ง Unbalance ในแผ่น Disk

Unbalance wt. gm	Actual Location deg.	Machine Reading		Machine Error	
		N deg.	F deg.	N deg.	F deg.
3.386	0	15	355	-15	+5
3.386	30	40	35	-10	-5
3.386	60	65	70	-5	-10
3.386	90	95	95	-5	-5
3.386	120	125	117	-5	+3
3.386	150	145	140	+5	+10
3.386	180	180	185	-	-5
3.386	210	215	205	-5	+5
3.386	240	235	230	+5	+10
3.386	270	285	260	-15	+10
3.386	300	305	310	-5	-10
3.386	330	335	320	-5	+10

ตารางที่ ๔.๑ ตารางแสดงผลของ Proportionality Test และการหาค่า  
Sensitivity สำหรับแผ่น Disk

No. of Unbalance @ 0 deg. gm-mm	Unbalance - Indication Reading				Sensitivity S			
	N	F	N	F	N	F	N	F
	$M_m$	$M_m$	mA	mA	$M_m/gm-mm$	$M_m/gm-mm$	$mA/gm-mm$	$mA/gm-mm$
55.2762	7	7	0.08	0.08	0.1266	0.1266	$1.4472 \times 10^3$	$1.4472 \times 10^3$
217.380	16	17	0.20	0.21	0.0736	0.0782	$0.92 \times 10^3$	$0.966 \times 10^3$
278.8206	22	23	0.27	0.28	0.0789	0.0825	$0.9663 \times 10^3$	$1.0042 \times 10^3$
358.878	30	31	0.34	0.35	0.0835	0.0863	$0.9473 \times 10^3$	$0.9752 \times 10^3$
Total Average					0.3626 0.0906	0.6735 0.0933	$4.2824 \times 10^3$ $1.0707 \times 10^3$	$4.3926 \times 10^3$ $1.0981 \times 10^3$

ตารางที่ ๔.๒ ตารางแสดงผลของ Proportionality Test และการหาค่าของ  
Roter Sensitivity

No. of Unbalance @ 180° gm-mm	Unbalance - Indication Reading				Sensitivity			
	N	F	N	F	N	F	N	F
	$M_m$	$M_m$	mA	mA	$M_m/gm-mm$	$M_m/gm-mm$	$mA/gm-mm$	$mA/gm-mm$
55.2762	7	8	0.06	0.09	0.1266	0.1447	$1.4472 \times 10^3$	$1.6281 \times 10^3$
217.3800	17	17	0.21	0.21	0.0782	0.0782	$0.966 \times 10^3$	$0.966 \times 10^3$
278.8206	23	24	0.28	0.29	0.0824	0.0860	$1.0042 \times 10^3$	$1.04 \times 10^3$
358.878	31	32	0.35	0.36	0.0863	0.0891	$0.9752 \times 10^3$	$1.0031 \times 10^3$
Total Average					0.3737 0.0934	0.3981 0.0995	$4.3926 \times 10^3$ $1.0981 \times 10^3$	$4.6372 \times 10^3$ $1.1593 \times 10^3$

ตารางที่ ๘.๑๐ Performance Test for single-Plane Balance Machine

Run No.	Unbalance wt. @ 64.2 mm gram	Location degree	Unbalance - Indicator Reading				Location Indicated by Machine		Instability of Reading	
			N No.	F No.	N mA	F mA	N deg.	F deg.	N deg.	F deg.
1	1.12	330	5	5	0.60	0.06	-	-	-	-
2	2.01	330	9	10	0.13	0.14	345	345	±7	±7
3	3.04	330	14	15	0.18	0.20	340	340	±5	±5
4	4.02	330	20	20	0.24	0.24	340	340	±4	±4
5	5.11	330	25	24	0.32	0.32	335	335	±3	±3
6	6.14	330	29	29	0.37	0.37	335	335	±3	±3
7	1.12	150	6	6	0.07	0.07	-	-	-	-
8	2.01	150	10	10	0.14	0.14	167	167	±8	±7
9	3.04	150	15	14	0.20	0.18	160	160	±6	±6
10	4.02	150	19	20	0.24	0.25	160	160	±3	±3
11	5.11	150	25	25	0.32	0.32	145	145	±3	±3
12	6.14	150	29	30	0.37	0.39	145	145	±3	±3

Note :- เครื่องหมาย + และ - แสดงถึงความหมายดังต่อไปนี้

+ หมายถึง Stroboscope light กระพริบแสดงตำแหน่งของ Unbalance  
ด้านล่างหรือก่อนที่ Unbalance อยู่จริง ๆ

- หมายถึง Stroboscope light กระพริบแสดงตำแหน่งของ Unbalance  
ทางด้านหลังที่ Unbalance อยู่จริง ๆ

การวัด ๘.๑๑ Proportionality Test

No. of Unbalance @ 330 deg. gm.-mm	Unbalance Indication Reading				Sensitivity S			
	N	F	N	F	N	F	N	F
	$U_{330}$	$U_{330}$	mA	mA	$U/gm.-mm$	$U/gm.-mm$	mA/gm.-mm	mA/gm.-mm
1.12 x 64.2	5	5	0.60	0.60	0.0695	0.0695	$8.3444 \times 10^{-4}$	$8.3444 \times 10^{-4}$
2.01 x 64.2	9	10	0.15	0.14	0.0697	0.0774	$1.0074 \times 10^{-3}$	$1.0849 \times 10^{-3}$
3.04 x 64.2	14	15	0.18	0.20	0.0717	0.0768	$9.2228 \times 10^{-4}$	$1.0247 \times 10^{-3}$
4.02 x 64.2	20	20	0.24	0.24	0.0774	0.0774	$9.2992 \times 10^{-4}$	$9.2992 \times 10^{-4}$
5.11 x 64.2	25	24	0.32	0.30	0.0762	0.0731	$9.7542 \times 10^{-4}$	$9.1446 \times 10^{-4}$
6.14 x 64.2	29	29	0.37	0.37	0.0735	0.0735	$9.3863 \times 10^{-4}$	$9.3863 \times 10^{-4}$
Total					0.438	0.4477	$5.6080 \times 10^{-3}$	$5.727 \times 10^{-3}$
Total ÷ 6					0.0730	0.0746	$9.3468 \times 10^{-4}$	$9.545 \times 10^{-4}$

การวัด ๘.๑๒ Proportionality Test

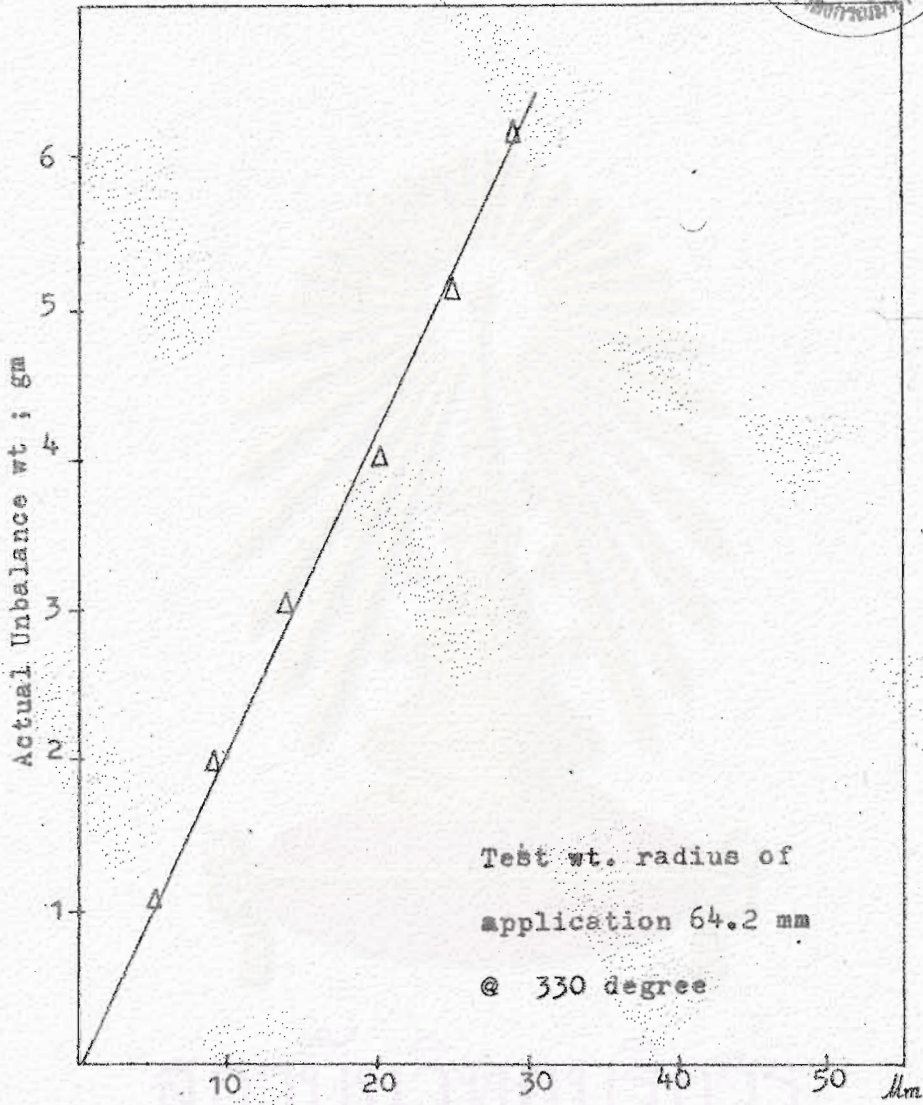
No. of Unbalance @ 150 deg. gm.-mm	Unbalance Indication Reading				Sensitivity S			
	N	F	N	F	N	F	N	F
	$U_{150}$	$U_{150}$	mA	mA	$U/gm.-mm$	$U/gm.-mm$	mA/gm.-mm	mA/gm.-mm
1.12 x 64.2	6	6	0.07	0.07	0.0834	0.0834	$9.7352 \times 10^{-4}$	$9.7352 \times 10^{-4}$
2.01 x 64.2	10	10	0.14	0.14	0.0774	0.0774	$1.0849 \times 10^{-3}$	$1.0849 \times 10^{-3}$
3.04 x 64.2	15	14	0.20	0.18	0.0768	0.0717	$1.0247 \times 10^{-3}$	$9.2228 \times 10^{-4}$
4.02 x 64.2	19	20	0.24	0.25	0.0736	0.0774	$9.2992 \times 10^{-4}$	$9.6867 \times 10^{-4}$
5.11 x 64.2	25	25	0.32	0.32	0.0762	0.0762	$9.7542 \times 10^{-4}$	$9.7542 \times 10^{-4}$
6.14 x 64.2	29	30	0.37	0.39	0.0735	0.0761	$9.3863 \times 10^{-4}$	$9.8937 \times 10^{-4}$
Total					0.4609	0.4622	$5.927 \times 10^{-3}$	$5.9141 \times 10^{-3}$
Total ÷ 6					0.0768	0.07703	$9.8784 \times 10^{-4}$	$9.8569 \times 10^{-4}$



การวัด ๘.๑๓ Determining position of unbalance in a disk

No. of Unbalance gm.	Actual Location deg.	Machine Reading		Machine Error	
		N deg.	F deg.	N deg.	F deg.
1.12	330	-	-	-	-
2.01	330	345	345	=15	=15
3.04	330	340	340	=10	=10
4.02	330	340	340	=10	=10
5.11	330	335	335	=5	=5
6.14	330	335	335	=5	=5
1.12	150	-	-	-	-
2.01	150	167	167	=17	=17
3.04	150	160	160	=10	=10
4.02	150	160	160	=10	=10
5.11	150	145	145	=5	=5
6.14	150	145	145	=5	=5

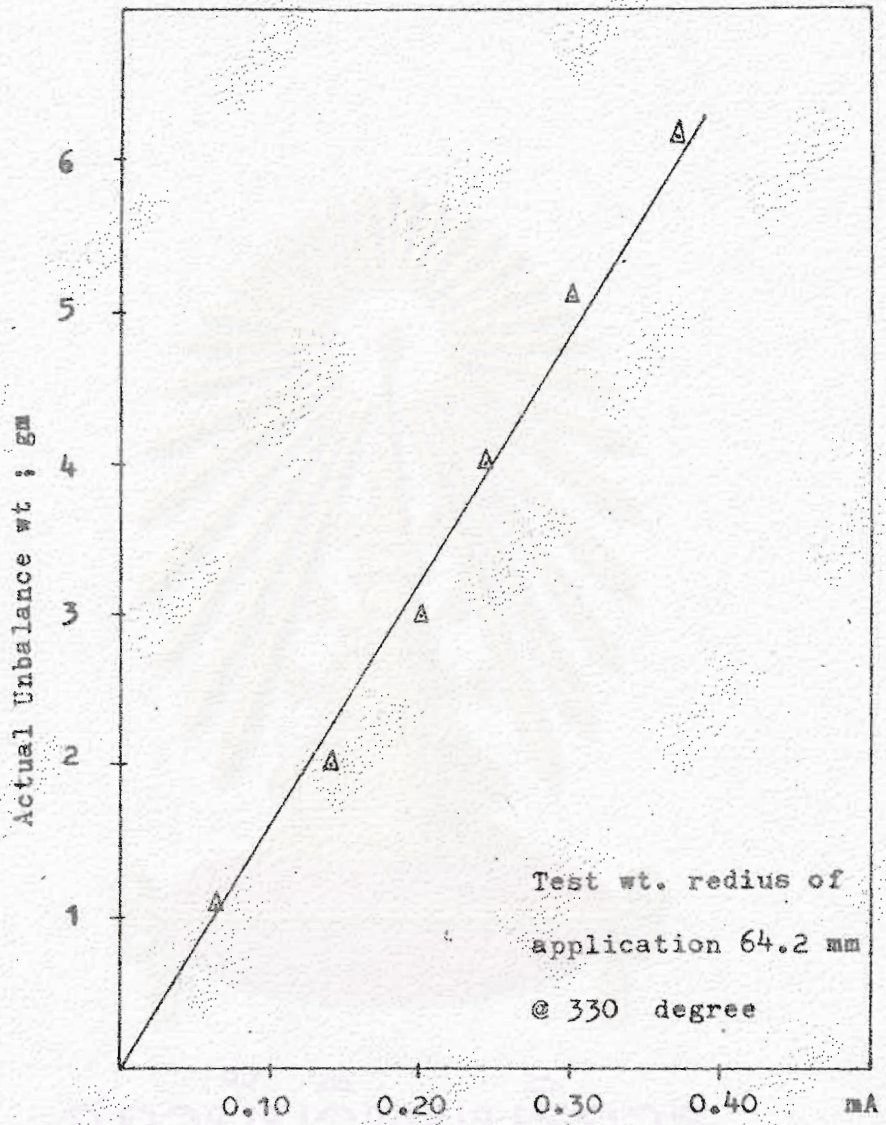
การพ่วงที่ ๘.๗



Balancing Machine readout  $\frac{1}{3}$  mm

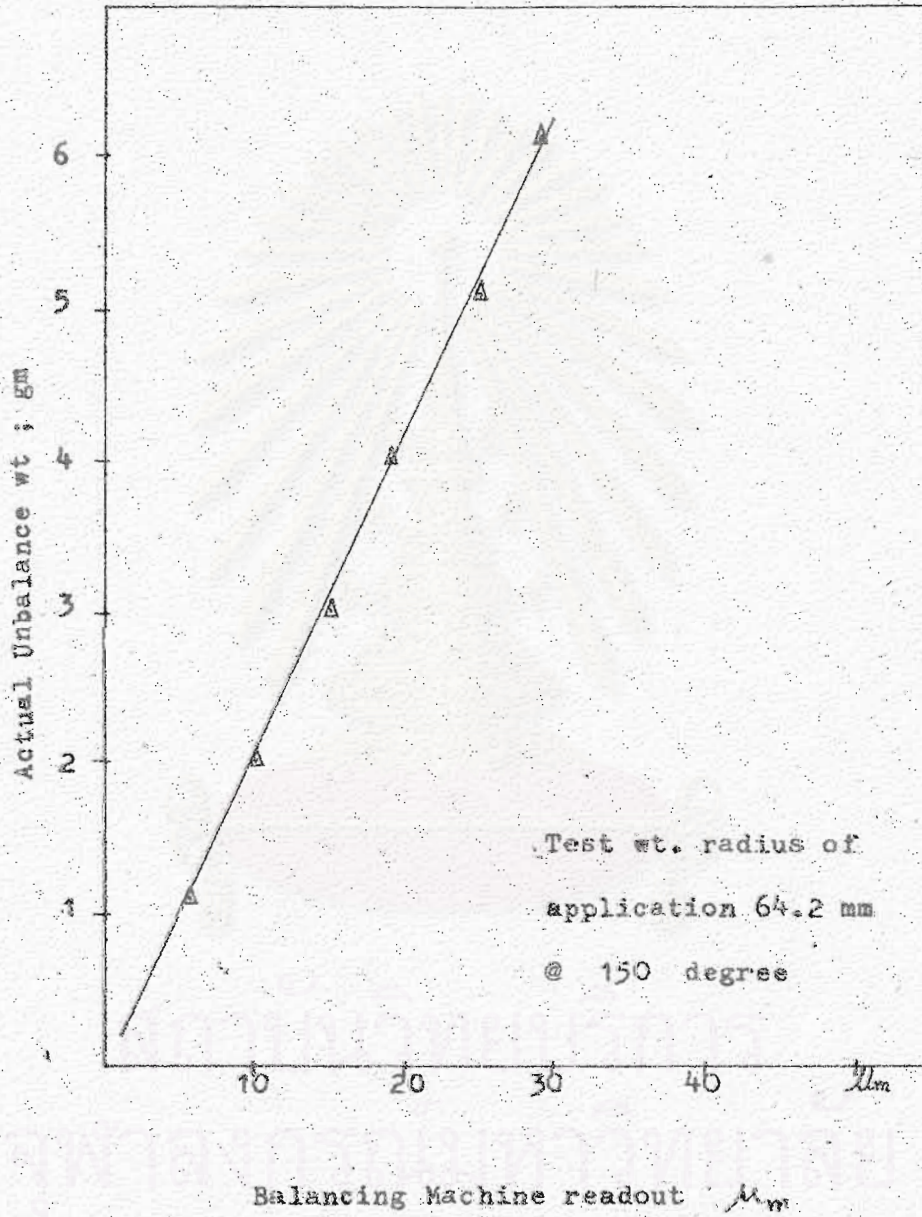
6b.

תוצאות

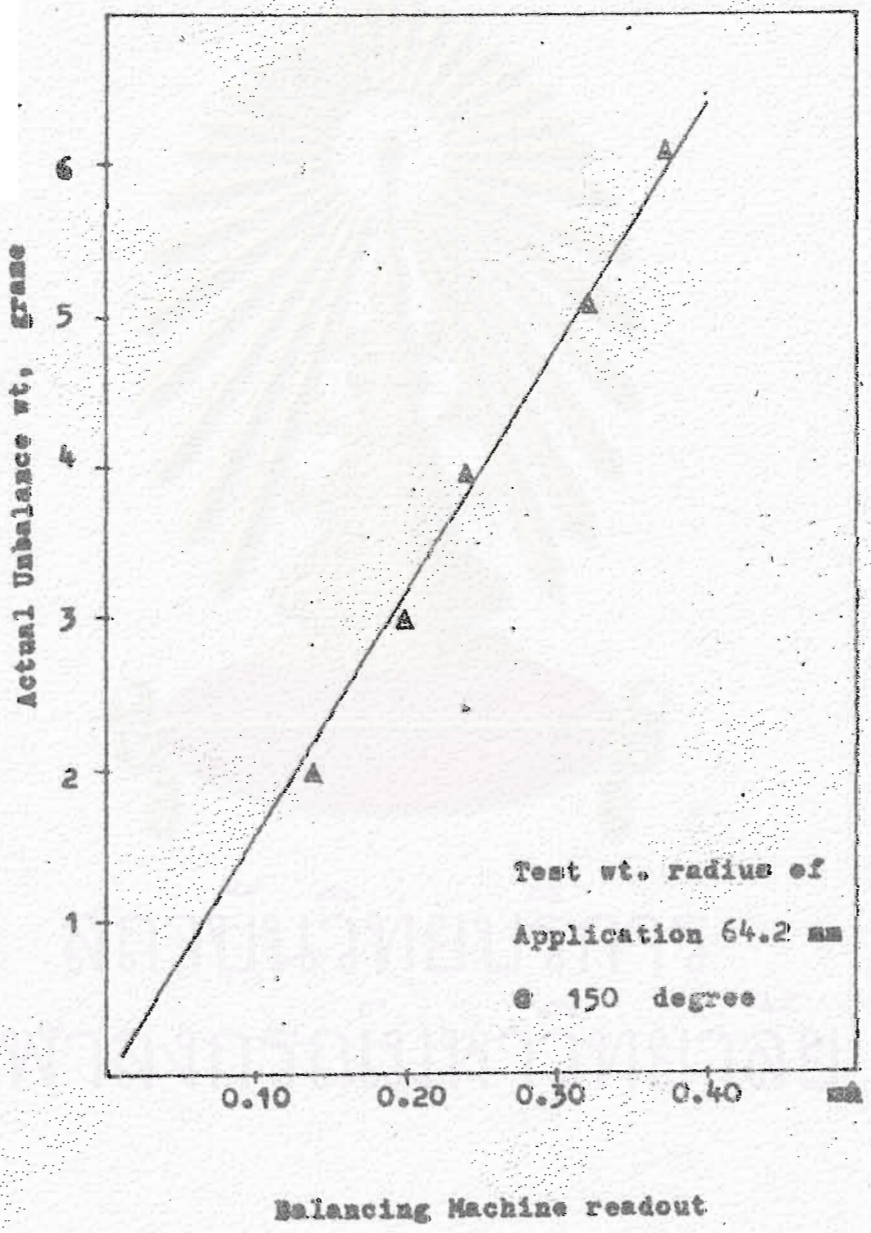


Balancing Machine readout ; mA

กราฟที่ 6.6



0.175/0.18 6.00



ตามวิธีการหรือเทคนิคที่กล่าวมานั้น เราจำเป็นต้องเดินเครื่องถึง ๒ ครั้ง จึงจะ Balanced ชิ้นงานเสร็จสิ้นได้ ๑ ชิ้น หากในกรณีที่เรามีชิ้นส่วนหรือชิ้นงานที่เหมือนกันมีจำนวนมาก ๆ เช่น Flywheel, pulley grinding wheel และมีความจำเป็นที่จะต้องผ่านการตรวจสอบสมดุลทุกชิ้นก่อนนำไปจำหน่ายหรือใช้งาน จะต้องใช้เวลาหรือเสียเวลาในการตรวจสอบสมดุลมากพอสมควร และทำให้สิ้นเปลืองต้นทุนด้วย (cost) ต้องบำรุงรักษาบ่อย ทำอย่างไรจึงจะใช้เวลาให้ลดน้อยลงกว่าเดิมในการตรวจสอบสมดุลเสร็จสมบูรณ์ต่อชิ้นงาน ๑ ชิ้น

ดังนั้น จะต้องกำหนดวิธีการหรือเทคนิคตรวจสอบสมดุลเสียใหม่สำหรับ Single-plane Balancing สมมติว่าเรามีแผ่น disk อยู่จำนวนมาก ๆ มีลักษณะรูปร่างเหมือนกันทุกประการ (Identical) น้ำหนักและขนาด (dimension) ใกล้เคียงกัน ตลอดจนลักษณะการกระจายของ mass เหมือนกัน หากแต่เราเพียงแต่ทราบ phase lead หรือ phase lags ของ Analysor และ Sensitivity ของโรเตอร์กับ unbalance ฉะนั้น ขั้นตอนการดำเนินการตรวจสอบสมดุลสำหรับ single - phase เราจะเรียกว่า "One shot" corection ภาวะใดที่กำหนดดังต่อไปนี้

๔.๓.๑ จะต้อง Balanced แผ่น disk อันแรกในจำนวนหลายแผ่น ให้อยู่ในสภาพสมดุลเสียก่อนให้เหลือ residual unbalance น้อยที่สุด หรือให้เข้าใกล้ complete balanced จากการทดสอบครั้งนี้ได้ทำการตรวจสอบแบบ statatic balanced

๔.๓.๒ นำ Balanced disk ไปวางบนเครื่องตรวจสอบสมดุลเสร็จแล้วเดินเครื่องวัดและอ่านค่า Amplitude สำหรับ residual unbalance ที่ยังมีอยู่ ดังแสดงในตารางที่ ๔.๑๔ แล้วหยุดเดินเครื่อง

๔.๓.๓ เติม Unbalance ขนาดเท่ากับ a unit unbalance ให้กับ Balanced disk ตรงตำแหน่งใด ๆ ก็ได้ จากนั้นเดินเครื่องตรวจสอบสมดุล อ่าน

ค่า Amplitude ของการสั่น และ phase angle ดังได้แสดงในตารางข้อมูล ๔.๑๕

๔.๓.๔ นำข้อมูลไปคำนวณหาค่า Rotor sensitivity หรืออาจเรียก  
ได้ว่าเป็นค่า correction factor มีหน่วยเป็น  $m/gm-mm(gm/mA)$  หรือ  
 $gm/m(gm/mA)$  และพิจารณาร่วมกับความสัมพันธ์ระหว่างถ่วงกับจุดหนัก ดังแสดงใน  
result มาใช้ให้เป็นประโยชน์กับ Unbalanced disk แผ่นต่อไป

๔.๓.๕ นำแผ่น disk ชั้นที่ ๒ ซึ่งเป็น Balanced disk ไปติดตั้งบนเครื่อง  
เครื่องตรวจสอบสมดุลและทำให้แผ่น disk อยู่ในสภาพ unbalanced โดยการเติมน้ำหน  
หนักเข้าไปที่รัศมี ๖๔.๒ มม. จำนวน ๓ ก้อน โดยเติมที่ตำแหน่งมุม ๓๐°, ๑๕๐° และ ๒๗๐°  
๒๗๐° ด้วยขนาดน้ำหนัก ๒.๐๑, ๑.๑๒ และ ๕.๑๑ กรัม ตามลำดับ

๔.๓.๖ เकिनเครื่องตรวจสอบสมดุล อ่านค่า Amplitude ของการสั่น  
อันเนื่องมาจาก Original Unbalance และ phase Angle ดังแสดงในตาราง  
ข้อมูล ๔.๑๖ ข้อมูลที่อ่านได้ไปคำนวณหาค่าขนาดน้ำหนักถ่วง (Balance wt; B.W.)  
หรือน้ำหนักที่แท้จริง (correction wt.) ที่จะต้องนำมาเติมเข้าไปให้กับแผ่น disk  
ทำให้เกิดการสมดุล

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น Balance wt.} &= \text{Rotor Sensitivity} \times \\ &= \text{original Amplitude reading.} \\ &= 0.0755 \times 17 \\ &= 225.16 \quad \text{gm-mm.} \end{aligned}$$

ถ้าหากเติมน้ำหนักถ่วงที่รัศมี ๖๔.๒ 64.2 mm.

$$\begin{aligned} \text{B.W.} &= 225.16556/64.2 \\ &= 3.50 \quad \text{gm.} \end{aligned}$$

สำหรับตำแหน่งของ unbalance wt. ให้พิจารณาจากค่า phase Angle ที่  
อ่านได้จากตาราง ๔.๑๕ และ ๔.๑๖ ซึ่งจะเห็นได้ว่าตารางผลการทดสอบ phase lag  
หรือ Mechine 7° ซึ่งค่านี้จะคงที่ตลอดไปสำหรับ Unbalanced disk นั้นต่อๆ  
ไปด้วย ถ้าไปพิจารณาค่าที่อ่านได้ในตารางข้อมูล ๔.๑๖ เครื่องอ่านตำแหน่งมุม คือ  
phase Angle ได้ที่ ๒๐๕° เพราะฉะนั้น ค่าแห่ง Unbalance wt. จริง ๆ อยู่ที่

ตารางที่ ๔.๑๖ ตารางการทดสอบหลังจากชิ้นงานผ่านการตรวจสอบสมดุลย์

ชนิดของงานที่ทดสอบ : Disk

ทดสอบที่ความเร็วรอบ : 1440 R.P.M.

Run No.	Condition	Bearing ระบุขนาด (N)			Bearing ระบุขนาด (F)		
		Amplitude		Phase Angle deg.	Amplitude		Phase Angle deg.
		$\mu m$	mA		$\mu m$	mA	
1	Balanced disk	2	0.03	—	2	0.03	—
2	Unbalance 1.02 -in (331.1258 gm mm), เค็มที่ตำแหน่ง ๐	25	0.32	7	24	0.30	7

ตารางที่ ๔.๑๕ ผลจากการทดสอบหาค่า Rotor Sensitivity และ Phase Angle

Unbalance Added @	Rotor Sensitivity output/input		Machine Reading deg.	Machine Error deg.
	$\mu m/gm-mm$	mA/gm-mm		
1.02 - in (331.1258 gm-mm)	0.0755	9.06 $\bar{5}$	7	-7



ตารางที่ ๕.๑๖ ตารางข้อมูลทดสอบสมดุขั้วแบบระนาบเดียว

ชนิดงานที่ทดสอบ : Disk

ทดสอบที่ความเร็วรอบ : 1440 R.P.M.

Run No.	Condition	Bearing ระบายซ้าย			Bearing ระบายขวา		
		Amplitude		Phase Angle deg.	Amplitude		Phase Angle deg.
		<i>mm</i>	<i>mg</i>		<i>mm</i>	<i>mg</i>	
1	Unbalanced disk	17	0.21	295	17	0.21	295
2	เติมน้ำหนักที่แท้จริง (Correction wt.) ๓.๕ กรัม ที่มุม ๑๑๐°	4	0.04	2	4	0.04	2

ตำแหน่งล่วงหน้าจาก High Spot ไป ๓ เครื่องตรวจสอบหมุนทวนเข็มนาฬิกาตามอง  
ทางด้าน Near End ดังนั้น ตำแหน่ง unbalance wt. อยู่ที่ตำแหน่งมุม ๒๘๘

๔.๓.๓ เติมน้ำหนักถ่วง (B.W.) หรือน้ำหนักที่แท้จริง (correction wt.)  
ควยขนาด ๓.๕๐๗ กรัม ที่ตำแหน่งมุม ๑๐๘ จากนั้นเดินเครื่องตรวจสอบวัดค่า  
Amplitude และ phase Angle ตามตาราง ๔.๑๖

#### ๔.๔ การตรวจสอบสมดุลชิ้นงานแบบสองระบบ

##### ๔.๔.๑ วิธีดำเนินการทดสอบ

๔.๔.๑.๑ เดินเครื่องหมุนชิ้นงานจนกระทั่งให้ความเร็วรอบคงที่เสียก่อน  
หลังจากนั้นก็ดำเนินการวัดขนาดของการสั่นและตำแหน่งมุมของ initial unbalance  
ที่แบริงขวาและแบริงซ้ายตามตาราง กำหนดให้เป็น vector N และ F พล็อตลง  
polar grap

๔.๔.๑.๒ หยุกเครื่องตรวจสอบเติม Trial weight ( ) ใน  
Balancing plane ด้าน Near End ควยขนาดน้ำหนัก ๔.๑๘๗ กรัม ๙๐° เดิน  
เครื่องตรวจสอบ จากนั้นวัดขนาดการสั่นและตำแหน่งมุมที่แบริงขวาและซ้าย กำหนด  
ให้เป็น Vector  $N_2$  และ  $F_2$  พล็อตลงใน polar grap จะเห็นได้ว่าผลจาก  
การเติม Trial Weight ๔.๑๘๗ กรัม ๙๐° ทำให้ Vector N และ F เปลี่ยน  
ไปเป็น Vector  $N_2$  และ  $F_2$  ที่มุม ๑๘๐° และ ๙๐° ตามลำดับ นั่นคือ Vector  $\vec{N} - \vec{N}_2$   
 $= N_2 - N = A$  และ Vector จาก  $F \rightarrow F_2$  นั่นคือ  $\vec{F} - \vec{F}_2 = \alpha A$  ซึ่ง  $\alpha$  ก็คือ  
Vector operator ซึ่งเป็น Constant Characteristic ของ machine  
และการติดตั้งหรือการยึด

๔.๔.๑.๓ หยุกเครื่องตรวจสอบ คือ Trial weight ๔.๑๘๗ กรัมที่  
Balancing plane ด้าน Near End ออก แล้วเติม Trial weight ( $W'_f$ )  
๓.๑๖๘ กรัม ที่มุม ๑๔๕° คือ Balancing plane ด้าน Far End จากนั้นเดินเครื่อง  
วัดขนาดของการสั่นและตำแหน่งมุมที่แบริงขวาและแบริงซ้าย ได้ Vector  $N_3$  และ  $F_3$   
จากนั้นพล็อตลงใน polar graph จะเห็นได้ว่าผลจากการเติม Trial weight

๓.๑๖๔ กรณีนี้นำให้ Vector  $F \rightarrow F_3$  และ  $N \rightarrow N_3$  นั่นคือ Vector  $F \rightarrow F_3 = F_3 - F = B$  ส่วน cross Effect คำนear End ก็คือ  $\vec{N} \rightarrow \vec{N}_3 = N_3 - N = \beta B$  ซึ่ง  $\beta$  ก็คือ Vector Operator คล้าย ๆ กับ

๔.๔.๑.๔ คำนวณน้ำหนักที่แท้จริง (correction weight) ที่จะนำมาถ่วงให้กับชั้นงานเพื่อให้เกิดภาวะการสมดุล จะใช้ Trial weight เป็นตัวน้ำหนักที่แท้จริง โดยกำหนดให้  $w_n$  และ  $w_f$  เป็น Trial weight ที่ Near End และ Far End มีทั้งขนาดและทิศทาง และให้  $w_n, w_f$  เป็น correction weight คำนear End และ Far End ซึ่ง derive จาก corresponding Trial weight โดยการนำเอา Vector operator ตัวใหม่ ๒ ตัวนำมาคูณ ทำให้มุมเขยื้อนไปแล้วจะได้ว่า

$$\begin{matrix} w_n & \theta w_n \\ w_f & \phi w_f \end{matrix}$$

Vector operator และ  $\phi$  ที่นำมาเกี่ยวข้องเพื่อทำให้  $A, \alpha A, B$  และ  $\beta B$  (ผลเนื่องมาจาก Trial weights) เกิดผลลัพธ์ใหม่ซึ่งเท่ากับและตรงกันข้าม

Vector  $N$  และ  $F$  เพื่อให้ชั้นงานอยู่ในสภาวะสมดุล ดังนี้

$$\theta A + \phi B = -N \quad 1$$

$$\phi B + \theta \alpha A = -F \quad 2$$

หา Vector operator  $\theta$  และ  $\phi$

$$\theta = \frac{\beta F - N}{(1 - \alpha \beta) A} \quad 3$$

$$\phi = \frac{\alpha N - F}{(1 - \alpha \beta) B} \quad 4$$

## บทที่ ๕

## วิเคราะห์ผลการทดสอบ

## ๕.๑ วิเคราะห์ผลการทดสอบสมรรถนะของ เครื่องถ่วงสมดุลย์ระนาบเดียว

๕.๑.๑ ผลการทดสอบการอ่านขนาด mA และ m จากโคอัลเกจ เมื่อเพิ่มน้ำหนักที่ตำแหน่ง ๐ องศา และ ๑๘๐ องศา พบว่าเครื่องถ่วงสามารถอ่านแสดงอัตราส่วนโคคี่ที่น้ำหนักเพิ่มสูง ค่าแอมพลิจูดของทั้ง mA และ m เป็นอัตราส่วนโดยกลกับน้ำหนักที่เพิ่มเข้าไป การคำนวณหาค่าความไวต่อการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก (Sensitivity) (ตารางที่ ๕.๗) โคคี่เฉลี่ยเป็น S เป็น  $0.0506 \text{ m/gm-mm}$  หรือ  $0.07 \times 10^{-3} \text{ mA/gm-mm}$  ทางคาน N และโค  $0.0533 \text{ m/gm-mm}$  หรือ  $0.052 \times 10^{-3} \text{ mA/gm-mm}$  ทางคาน F หมายถึงว่าความไม่สมดุลย์ขนาด  $1 \text{ gm-mm}$  จะทำให้ร่องคลื่นสั้น  $0.0506 \text{ micrometre}$  เมื่อตรวจด้วยโคอัลเกจ และวัดความเปลี่ยนแปลงจากเกจความเครียดโค  $0.07 \times 10^{-3} \text{ mA}$  ที่ตำแหน่ง ๐ องศา

สำหรับที่ตำแหน่ง ๑๘๐ องศา โค S เป็น  $0.0534 \text{ m/gm-mm}$  และ  $0.052 \times 10^{-3} \text{ mA}$  คาน N และ  $0.0556 \text{ m/gm-mm}$  และ  $0.055 \times 10^{-3} \text{ mA}$  ที่คาน F ค่าเบี่ยงเบนของ S จากค่าเฉลี่ย ๑๗-๕๐% อย่างไรก็ตามค่า S ในย่านน้ำหนักไม่สมดุลย์สูงอยู่ประมาณ ๐.๐๘ ถึง ๐.๐๙  $\text{m/gm-mm}$  นับว่าอยู่ในเกณฑ์ค่อนข้างดี

๕.๑.๒ ผลการทดสอบหาความสามารถของ เครื่องถ่วงในการแสดงขนาด และตำแหน่งของความไม่สมดุลย์โดยใช้น้ำหนักทดสอบขนาด  $๓.๓๘๖ \text{ gm}$  ที่รัศมี  $๖๔.๒ \text{ mm}$  ตามตารางที่ ๕.๔ และ ๕.๕ แสดงว่าการสั้นให้  $m_F$  และ  $m_N$  ต่างกันสูงสุดไม่เกิน ๑:๑๔ หรือประมาณ ๗% และต่างกันสูงสุดไม่เกิน ๐.๐๑ คอ  $0.๑๘ \text{ mA}$  หรือประมาณ ๖% ตำแหน่งอ่านค่าไม่สมดุลย์ต่ำสุดและสูงสุดเกิดขึ้นที่มุมเทิมน้ำหนัก ๓๐๐ องศา และ ๑๒๐ องศา ตามลำดับ

ส่วนการอ่านแสดงตำแหน่งไม่สมดุลย์ต่างกันตั้งแต่ + ๕ องศาถึง - ๑๕ องศา

ค่าน N และ ๑๐ ถึง -๑๐ องศา ค่าน F ดังแสดงในตารางที่ ๔.๕

๕.๑.๓ ผลการทดสอบหาความผิดพลาดในการแสดงตำแหน่งไม่สมดุลย์เมื่อใช้น้ำหนัก ๔ ขนาด ตามตารางที่ ๔.๖ พบว่าเมื่อน้ำหนักไม่สมดุลย์ค่า อ่านมุมคลาดเคลื่อน ๐-๑๗ องศา แต่ผลดีขึ้นเหลือ ๕ องศา เมื่อน้ำหนักไม่สมดุลย์สูงขึ้น แสดงว่ามีความไม่สมดุลย์เหลืออยู่ในระบบ (Residual Unbalance) ก่อนที่จะทำการทดลองเพิ่มน้ำหนักไม่สมดุลย์ที่จุดต่าง ๆ ในทางทฤษฎีเมื่อใส่ น้ำหนัก ๓.๓๘๖ gm ที่รัศมี ๖๔.๒ mm จะทำให้รอลิ้นสั้น ๑๕.๔ m แต่ค่าที่อ่านได้สูงกว่าประมาณ ๖.๕% ค่าน และ ๑๗% ค่าน

#### ๕.๒ สำหรับการอ่านมุมผิดพลาดไ้มุ่งประเด็นไปที่ Trigger Circuit

ได้ลดขนาด Capacitor ลงจาก ๒ F ๔๕๐ V ไปเป็น ๑ F ๖๓๐ V เพื่อลดระดับความผันที่ต่องานในการส่งสัญญาณให้หลอด Xcusu ทำงาน พบว่าการฉายภาพดีขึ้นมีการ drift ประมาณ  $\pm ๓$  องศา ในค่านเพลาคู่มือทดสอบได้ใช้ Silicone Lubricant ช่วยในบริเวณรอลิ้นและ Coupling และดำเนินการทดสอบใหม่โดยใช้น้ำหนักทดสอบ ๖ ตัว ตั้งแต่ขนาด ๑.๑๒ ถึง ๖.๑๔ gm ที่ตำแหน่ง ๑๕๐ และ ๓๓๐ องศา ได้ผลดังแสดงในตารางที่ ๔.๑๐ ถึง ๔.๑๓ กราฟแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ระหว่างน้ำหนักไม่สมดุลย์ที่ใส่เข้าไปในจานที่รัศมี ๖๔.๒ mm เมื่อเทียบกับ m และ mA ได้แสดงไว้ในกราฟที่ ๔.๗ ถึง ๔.๑๐ ค่า S ที่ ๓๓๐ องศา ได้เฉลี่ย ๐.๐๗๓ m/gm-mm และ  $๐.๕๓๕ \times ๑๐^{-๓}$  mA ค่าน N และ ๐.๐๗๕ m/gm-mm และ  $๐.๕๕๕ \times ๑๐^{-๓}$  mA ทางค่าน F ซึ่งดีกว่าที่ได้ทำการทดลองและได้วิเคราะห์ไว้ใน ๕.๑๑ สำหรับที่ตำแหน่ง ๑๕๐ องศา ค่า S ที่ได้อยู่ในย่านเดียวกับเมื่อวัดได้ที่ตำแหน่ง ๓๓๐ องศา (ดูตารางที่ ๔.๑๑ และ ๔.๑๒)

สำหรับผลการทดสอบแสดงตำแหน่งน้ำหนักไม่สมดุลย์ มีค่าเบี่ยงเบนสูงสุดเมื่อน้ำหนักน้อย (๒:๐๑ gm) เป็น ๑๗ องศา และที่ขึ้นเรื่อย ๆ จนเบี่ยงเบนประมาณ ๐-๕ องศา ความไม่แน่นอนในการอ่านอยู่ในช่วง  $\pm ๔$  ถึง  $\pm ๓$  องศาความสำคัญ

### ๕.๓ วิเคราะห์ผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องถ่วงสมมูลย์ เพื่อใช้งาน

ผลจากการทดสอบสมมูลย์ของงานทดสอบอันแรก ซึ่งผ่านการถ่วงน้ำหนัก โดยวิธีสถิติศาสตร์มาแล้ว เมื่อเติมความไม่สมมูลย์ ๑ oz-IN หรือ ๓๓๑.๑๓ gm-mm ที่ตำแหน่ง ๐ องศา โค้ค่าโรเตอร์เซนซitivิตี้ S ๐.๐๗๖ m/gm-mm และ ๐.๕๐๖ x ๑๐<sup>-๓</sup> mA/gm-mm โค้ค่าความเบี่ยงเบนในการอ่านมุมตำแหน่งไม่สมมูลย์ ๗ องศา

เมื่อนำงานที่ ๒ ซึ่งถ่วงสมมูลย์ไว้เรียบร้อยแล้วแต่เดิม และเพิ่มน้ำหนัก ๓ กิโล ขนาด ๒.๐๑, ๑.๑๒ และ ๕.๑๑ gm ที่รัศมี ๖๔.๒ mm ตามมุม ๓๐, ๑๕๐ และ ๒๗๐ ตามลำดับ ประกอบกับข้อมูลจากตารางที่ ๔.๑๕ และ ๔.๑๖ สามารถหาได้ว่า จะต้องใส่น้ำหนักถ่วงด้าน ๓.๕๐๗ gm ที่ตำแหน่ง ๒๔๘ องศา เมื่อแก้มุมเดือไว้ ๗ แล้ว ก็คือต้องใส่น้ำหนักที่มุม ๑๐๘ องศา นั้นเอง ผลการใส่น้ำหนักถ่วงด้านตามตารางที่ ๔.๑๖ พบว่ามีความไม่สมมูลย์เหลืออยู่ค่ามากที่สุด ๔ m หรือ ๐.๐๔ mA

งานทั้ง ๒ ที่นำมาทดสอบสมรรถนะของเครื่องถ่วงทำหน้าที่เป็นตัวอย่างแทน ชิ้นงานที่ต้องการถ่วงสมมูลย์ เช่น ใบพัดลม มูเลห์ เกียร์ ฯลฯ

### ๕.๔ สมรรถนะของเครื่องถ่วงสมมูลย์เมื่อใช้งานเป็นเครื่องถ่วงสมมูลย์ในระนาบเดียว

ในการทดสอบตามกำหนดวิธีการตรวจสอบสมมูลย์ในระนาบเดียว เพื่อใช้งานตาม ๔.๓ และโค้วิเคราะห์ผลไว้ใน ๕.๓ สำหรับงานทดสอบงานแรกซึ่งผ่านการตรวจสอบสมมูลย์ด้วยวิธีสถิติศาสตร์แล้ว เมื่อใช้เครื่องฯ พบว่ามีความไม่สมมูลย์หลงเหลืออยู่ ๒ m หรือคิดเป็น  $\frac{๒}{๒} \frac{๐.๐๑/๑๐}{๒} \times ๕๕๔.๖ = ๐.๕๕๕$  gm-mm (ตามความต้องตารในอุดมคติแล้ว งานนี้ควรอยู่ในสมมูลย์ให้มากที่สุด เนื่องจากใช้เป็นตัวควบคุมงานอื่น ๆ ที่จะทดสอบต่อไป) นับว่าน้อยมากอยู่ในเกณฑ์ใช้ได้ เมื่อนำงานที่สองมาทดสอบเพิ่มน้ำหนักเพื่อให้เสียสมมูลย์ และทำการถ่วงน้ำหนักเพื่อแก้ไขให้โค้สมมูลย์แล้ว พบว่ามีความไม่สมมูลย์เหลืออยู่ ๔ m หรือคิดเป็น  $\frac{๔}{๒} \frac{๐.๐๐๑}{๒} \times ๕๕๔.๖ = ๑.๑๑๓$  gm-mm ซึ่งต่ำกว่าที่กำหนด Tolerance เอาไว้  $\sigma_F = ๒.๖๗๒$  gm-mm ตามข้อ ๔.๑ จักว่าสมรรถนะของเครื่องถ่วงอยู่ในเกณฑ์ออกแบบที่วางไว้

อย่างไรก็ตาม ๔ m. ที่เหลืออยู่นี้มีสาเหตุจากองค์ประกอบ ๒ อย่างคือ

- ก. จานตัวแรกไม่อยู่ในสมดุลย์สมบูรณ์
- ข. น้ำหนักที่ใส่เข้าไปเกิดการเสียสมดุลย์ พบจากการนำไปลองทาง  
สถิตย์ศาสตร์ประมาณเดิมขึ้นไป ๑๐ องศา

ทั้งสององค์ประกอบนี้อยู่ในวิสัยที่แก้ไขได้เมื่อใช้งาน

#### ๕.๕ วิเคราะห์การทดสอบเครื่องสมดุลย์เมื่อใช้งานถ่วงสมดุลย์ใน ๒ ระบาย

ในการทดสอบที่ ๔.๓ ใ้คานน้ำหนักลมกรงกระรอก (Blower) ขนาดน้ำหนัก ๑๐ ปอนด์มาทำการถ่วงสมดุลย์ พบว่าเมื่อเติมน้ำหนักถ่วงสมดุลย์ใน ๒ ระบายแล้ว ๓.๘๒๕ gm ที่ ๒๓.๕ คำน N และ ๑๓.๕๗๕gm ที่ ๒๕๔.๕ คำน F มีความไม่สมดุลย์เหลือ อยู่ประมาณ ๐.๐๘ mA หรือ ๗ m. นับว่าอยู่ในเกณฑ์ค่าเครื่องใช้งานได้

## บทที่ ๒

## สรุป

การวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ห่ออกแบบเครื่องถ่วงสมดุลย์เครื่องจักรกลหมุนชนิดสามารถถ่วงสมดุลย์ได้ใน ๒ ระนาบ รองรับเพลลาชิ้นงานเป็นแบบอ่อนตัว (Flexible Bearing) ใช้คานปลายอิสระ (Cantilever) ประกอบด้วยเกจวัดความเครียด ส่งสัญญาณไฟฟ้าแสดงขนาดของการเคลื่อนที่จากแนวเส้นสมดุลย์ พร้อมทั้งมีอุปกรณ์ไฟฉาย Xenon แสดงตำแหน่งของชิ้นงานส่วนที่ไม่สมดุลย์ ในการทดลองตรวจสอบสมรรถนะของเครื่องถ่วงได้ใช้ไออัล เกจช่วยวัดเปรียบเทียบขนาดของการเคลื่อนที่ร่วมกับเกจวัดความเครียดด้วย

๒.๑ การทดสอบสมรรถนะของเครื่องถ่วงได้พบว่า เครื่องถ่วงสามารถแสดงค่าไม่สมดุลย์ได้เป็นอัตราส่วนกับความไม่สมดุลย์จริง มีความไวต่อความเปลี่ยนแปลงของความไม่สมดุลย์ ขนาด  $0.05 \text{ m/gm-mm}$  หรือขนาด  $0.0 \times 10^{-3} \text{ mA/gm-mm}$  มีความผิดพลาดในการอ่าน ๒ - ๓ % แสดงตำแหน่งมุมของน้ำหนักไม่สมดุลย์ผิดพลาด ๐ - ๑๗ องศา

๒.๒ หลังจากที่ได้แก้ไขปรับปรุงรองรับของเพลลา ข้อต่อเพลลา กับมอเตอร์ และแก้ไขระบบการกระตุ้นไฟฉาย Xcusu แล้ว พบว่าเครื่องมีสมรรถนะสูงขึ้น กล่าวคือมีความไวต่อน้ำหนักไม่สมดุลย์เฉลี่ย  $0.0๓๕ \text{ m/gm-mm}$  หรือ  $0.๕๖ \times 10^{-3} \text{ mA/gm-mm}$  และอ่านค่าตำแหน่งไม่สมดุลย์ได้ในพิสัย ๐ - ๕ องศา เมื่อมีค่าแน่นอนในการอ่านสูงสุด  $\pm ๔$  ซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการออกแบบ เครื่องถ่วงสมดุลย์สำหรับโรเตอร์ หรือใบพัดลม มีความสมดุลย์อยู่ในย่านไม่เกิน  $๔.๕ \text{ gm-mm/Kg}$

๒.๓ เมื่อได้นำเครื่องถ่วงทดสอบสมดุลย์ใน ๒ ระนาบ โดยใช้พัลลคมกรงกระรอกหนัก ๑๐ ปอนด์ (4.46 Kg) แล้วพบว่ามีความไม่สมดุลย์เหลืออยู่ทำให้เกิดการสั่น ๗ m ซึ่งต่ำกว่า  $๔.๕ \text{ m}$  ต่อมวล ๑ Kg มาก นับว่าอยู่ในเกณฑ์ใช้งานได้ดี

เครื่องถ่วงสมดุลย์ที่ได้ออกแบบสร้างขึ้นนี้มีสมรรถนะเพียงพอแก่การทำงานที่



ที่ได้ตั้งวัตถุประสงค์ไว้ งานที่ควรปรับปรุงในอนาคต คือการออกแบบระบบเพลาให้เป็นแบบ Universal สามารถรับชิ้นงานที่มีรูเพลานากต่าง ๆ และในเชิงความทนทานสมควรที่จะมีการใช้งานทดสอบเป็นเวลานานอย่างน้อย ๑ ปี เพื่อดู Reliability