บทที่ 5

เครื่องมือและอุปกรณ์

5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

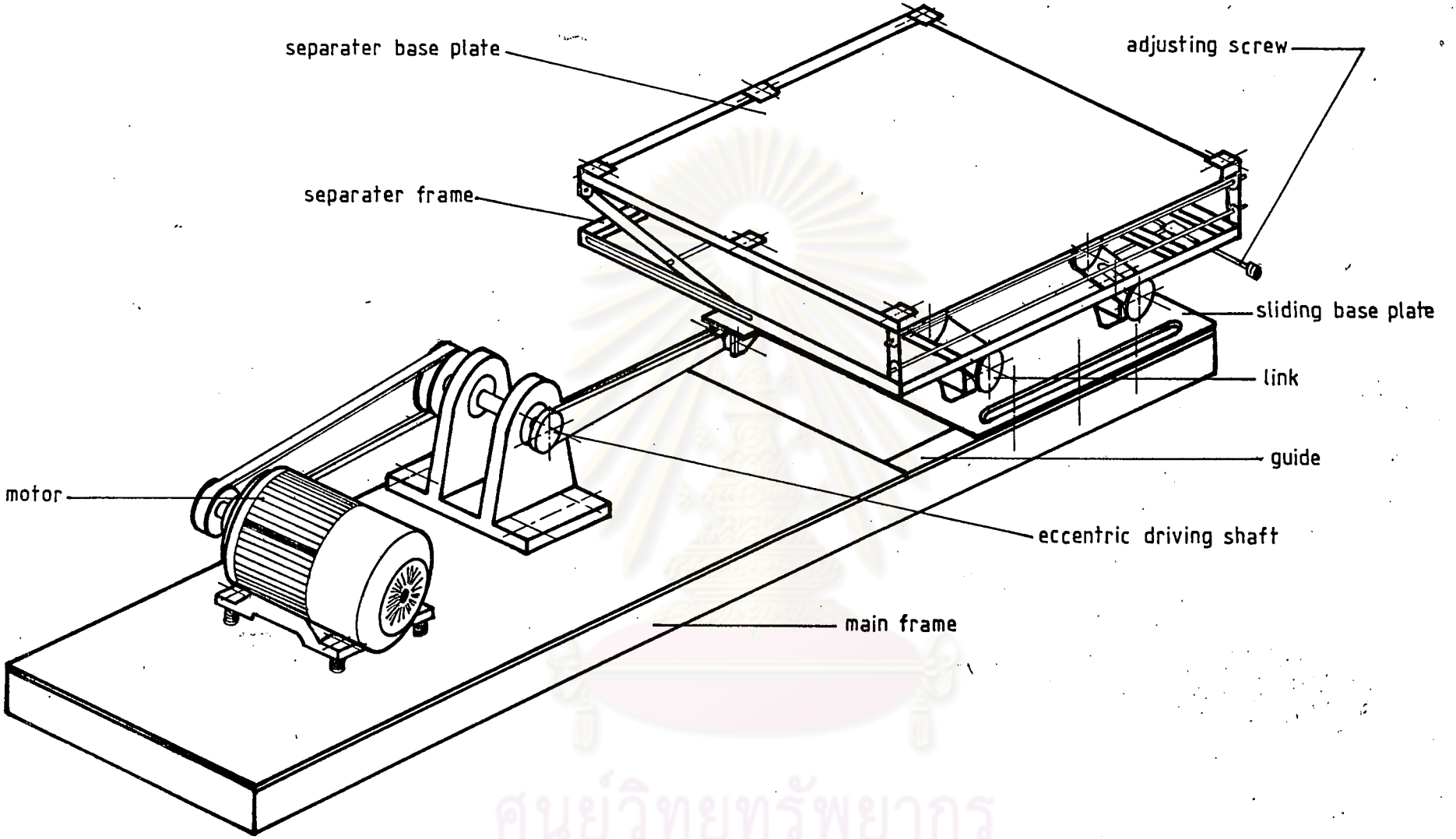
การทดลองเพื่อตรวจสอบทฤษฎีการแยกวัสดุโดยอาศัยการสั่นสะเทือน ได้ดำเนินการโดยอาศัยอุปกรณ์ดังรูปที่ 5.1 ซึ่งมีองค์ประกอบที่สำคัญ คือ

1. โครงหลัก (Main Frame) เป็นโครงทำจากเหล็กรางเชื่อมขึ้นรูป ผิวบนส่วนหน้าของโครงเชื่อมติดไว้ด้วยร่องเลื่อนผ่านการแต่งผิวให้เรียบเพื่อรองรับแผ่นเลื่อน (Sliding base plate) และด้านหน้าของโครง ยึดไว้ด้วยสกรูปรับแผ่นเลื่อนเพื่อให้เลื่อนได้ในร่องเลื่อน

2. แผ่นเลื่อน (Slide plate) เป็นแผ่นเลื่อนที่ผ่านการแต่งผิวตกบ่าให้เรียบและได้ฉาก มีไว้เพื่อใช้รองรับแขนโยก และสามารถปรับให้เลื่อนได้ในแนวขนานกับร่องเลื่อน โดยการปรับสกรูแล้วยึดด้วยสกรูยึดอีก 6 ตัว

3. แขนโยก (Link) ใช้รองรับโครงของถาดแยก 4 จุด โดยปลายข้างหนึ่งยึดกับโครงของถาดแยกและปลายอีกข้างหนึ่งยึดกับหูที่ยึดติดกับแผ่นเลื่อน และรองรับด้วยรองลื่นลูกปืน แขนโยกคู่หลังจะเป็นแบบชั้นเดียวมีความยาวคงที่ ส่วนแขนโยกคู่หน้าจะเป็นแบบ 2 ชั้น ซึ่งสามารถปรับความยาวได้โดย ชั้นหนึ่งแต่งผิวเรียบและผ่าร่องไว้ อีกชั้นหนึ่งเซาะเป็นร่องเลื่อน การปรับมุมลาดชันของถาด $\alpha 1$ จะกระทำได้โดยเลื่อนแขนโยกคู่หน้าเข้าออกให้ได้ความยาวตามต้องการแล้วยึดด้วยสกรูข้างละ 2 ตัว และโดยการปรับแผ่นเลื่อนไปในแนวขนานกับร่องเลื่อนของโครงเหล็กก็จะทำให้มุมของแขนโยกเปลี่ยนไป ด้วยวิธีนี้มุมในการสั่นสะเทือนจึงสามารถปรับค่าได้ตามความต้องการ

4. โครงของถาดแยก (Separator frame) ทำจากเหล็กฉากเชื่อมขึ้นรูป ขนาดกว้าง 50 cm. ยาว 60 cm. 2 ชั้น โดยชั้นล่างใช้รองรับแขนโยก แขนขับและมิเตอร์วัดความเร่ง ชั้นบนใช้รองรับถาดแยก ในระหว่างชั้นรองรับด้วยสกรูปรับ โดยการปรับสกรูชุดนี้



รูปที่ 5.1 ลักษณะทั่วไปของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จะสามารถปรับให้ระนาบของถาดแยกเอียงเป็นมุม $\alpha 2$ ได้ตามต้องการ

5. ถาดแยก (Separator base plate) ทำจากแผ่นวัสดุชนิดต่าง ๆ ที่จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่มีผลต่อการเคลื่อนตัวของวัสดุ เช่น เหล็กอลูมิเนียม ยาง แผ่นไม้อัดที่ปูด้วยกระดาษทรายหยาบ กระดาษทรายละเอียดและผ้าใบเป็นต้น เพื่อให้การเปลี่ยนถาดแยกสามารถทำได้อย่างรวดเร็วในระหว่างการทดลอง การยึดถาดแยกกับโครงจะกระทำโดยการยึดขอบให้แน่นด้วยสกรูอัด

6. กลไกขับ (Drive unit) ติดตั้งอยู่บนส่วนหลังของโครงหลัก ประกอบด้วย A.C. มอเตอร์ 3เฟส380 V . ขนาด 1/2 HP. สามารถควบคุมความเร็วรอบได้ระหว่าง 0-1200 รอบ/นาที เพื่อที่จะลดสัญญาณรบกวนมิเตอร์วัดความเร่ง จึงรองรับมอเตอร์ด้วยสปริงชนิดอ่อนแล้วทำให้สามารถลดสัญญาณรบกวนจาก 0.1g ในกรณีที่ยึดไว้กับโครงโดยตรงลงเหลือ 0.02g มอเตอร์นี้จะส่งกำลังผ่านสายพานวีไปขับลูกเบี้ยวเยื้องศูนย์ เมื่อคลายสกรูยึดแล้วหมุนลูกเบี้ยงก็จะทำให้รัศมีที่มีผลของข้อเหวี่ยงเปลี่ยนไป โดยอาศัยอุปกรณ์ชุดนี้จะสามารถปรับ ความถี่และแอมปลิจูด หรือความเร่งในการเคลื่อนตัวของถาดแยกได้ตามความต้องการ

5.2 การวัดสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์

อุปกรณ์ที่ใช้กำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ แสดงไว้ดังรูปที่ 5.2 ประกอบด้วยรางตรงยาว L ซึ่งเอียงทำมุม θ กับแนวระดับโดยที่มุม θ นี้สามารถปรับค่าได้ระหว่าง 0-60 องศา เมื่อปล่อยให้วัสดุลื่นไถลลงตามทางลาดเอียงการเคลื่อนตัวของวัสดุจะเป็นไปตามสมการ

$$ma = mg\sin\theta - \mu_d mg\cos\theta$$

หรือ
$$a/g = \sin\theta - \mu_d\cos\theta \qquad 5.1$$

โดยที่ μ_d เป็นสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ระหว่างชิ้นวัสดุทดลองกับราง สำหรับรางตรงวัสดุจะเลื่อนไถลลงด้วยความเร็วสม่ำเสมอ ถ้าให้ ts เป็นเวลาที่ชิ้นวัสดุลื่นไถลลงได้ระยะทาง L ซึ่งหาได้จาก

$$ts^2 = 2L/a \qquad 5.2$$

จากสมการทั้งสองเราจะได้

$$\mu d = \frac{\sin\theta - 2L/gts^2}{\cos\theta} \qquad 5.3$$

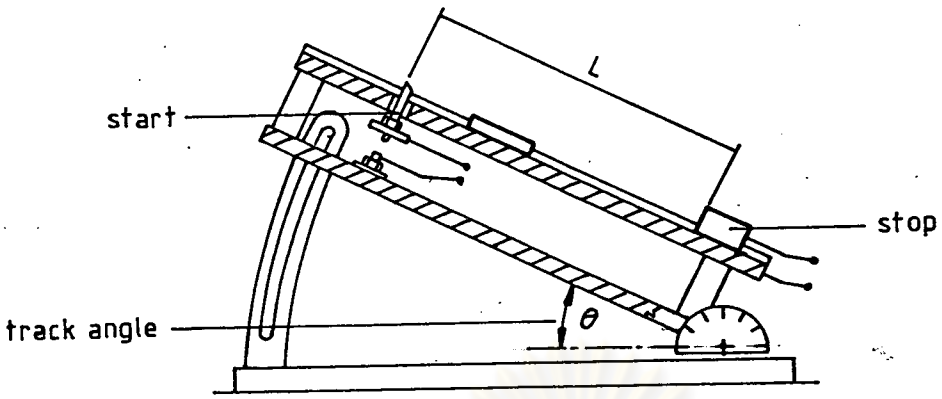
ในการกำหนดสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์นี้ใช้ชิ้นงานทดลองที่มีลักษณะเป็นวงแหวนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 มม. หนา 2 มม. ทำจากทองเหลือง อลูมิเนียม กระดาษแข็งซึ่งฉาบด้วยข้าวและข้าวเปลือก แล้วปล่อยให้โถลตัวบนผิวที่เป็นเหล็ก ยาง อลูมิเนียม ตะแกรงเหล็ก แผ่นไม้อัดที่ปูผิวด้วยกระดาษทรายหยาบ กระดาษทรายละเอียด และผ้าใบ ในแต่ละคู่ของวัสดุและรางจะปรับมุม θ ให้พอเหมาะที่วัสดุจะสามารถไถลตัวลงได้อย่างสม่ำเสมอตลอดระยะทาง L แล้วจับเวลา (ts) ในช่วงนี้ด้วยนาฬิกาจับเวลาที่สามารถจับเวลาได้ 1/ 100 นาที แล้วนำไปคำนวณหาค่า μ_d จากสมการที่ 5.3 ในแต่ละคู่ของวัสดุจะทำการจับเวลา 10 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ยภายใต้ความเชื่อมั่น 95% โดยอาศัยการแจกแจงแบบที (t-distribution) ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์และนัยของการเปลี่ยนแปลงภายใต้ความเชื่อมั่น 95% ได้สรุปไว้ในตารางที่ 5.1

5.3 เครื่องมือวัดมุมเอียงของระนาบ

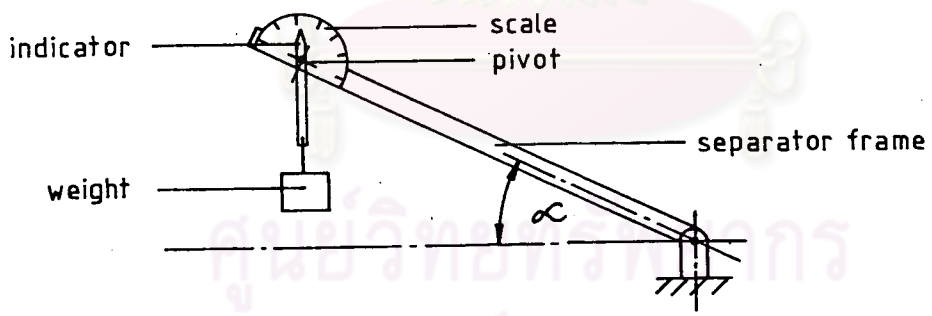
มุมเอียงของระนาบสามารถวัดได้ทางสถิตย์ โดยอาศัยเกจวัดมุมที่ยึดไว้ในแนวขนานบนโครงของถาดแยกดังรูปที่ 5.3 ซึ่งประกอบด้วยสเกลวัดมุม เข็มชี้ จุดหมุนและน้ำหนักถ่วง เมื่อระนาบเอียงไปเป็นมุม $\alpha 1$ เข็มชี้ก็จะเคลื่อนที่ไป $\alpha 1$ เช่นเดียวกันด้วยวิธีการนี้เราจะสามารถอ่านค่าและปรับความลาดชันรวมทั้งมุมเอียงของระนาบทางสถิตย์ได้ตามความต้องการ

5.4 เครื่องมือวัดการสั่นสะเทือน

ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับระบบขับเคลื่อนคือ ทิศทาง ความถี่ แอมปลิจูดและความเร็วในการเคลื่อนตัวของถาดแยก ค่าในทางสถิตย์ของตัวแปรเหล่านี้สามารถวัดได้จากเครื่องมือวัดเบื้องต้น เช่น เกจวัดมุม เครื่องมือวัดความเร็วรอบ แต่เนื่องจากความหลวมของข้อต่อกลไกและการร่อนตัวของโครงสร้างในระหว่างการสั่นสะเทือน อาจทำให้ค่าที่เกิดขึ้นจริงแตกต่างจากค่าที่วัดได้ในทางสถิตย์ ดังนั้นวิธีการที่น่าจะให้ความถูกต้องและเหมาะสมกว่า ควรจะเป็นการวัดการเคลื่อนตัวของถาดในระหว่างการสั่นสะเทือนโดยตรงดังผังของการวัดที่แสดง



รูปที่ 5.2 เครื่องมือวัดความเสียดทานจลน์

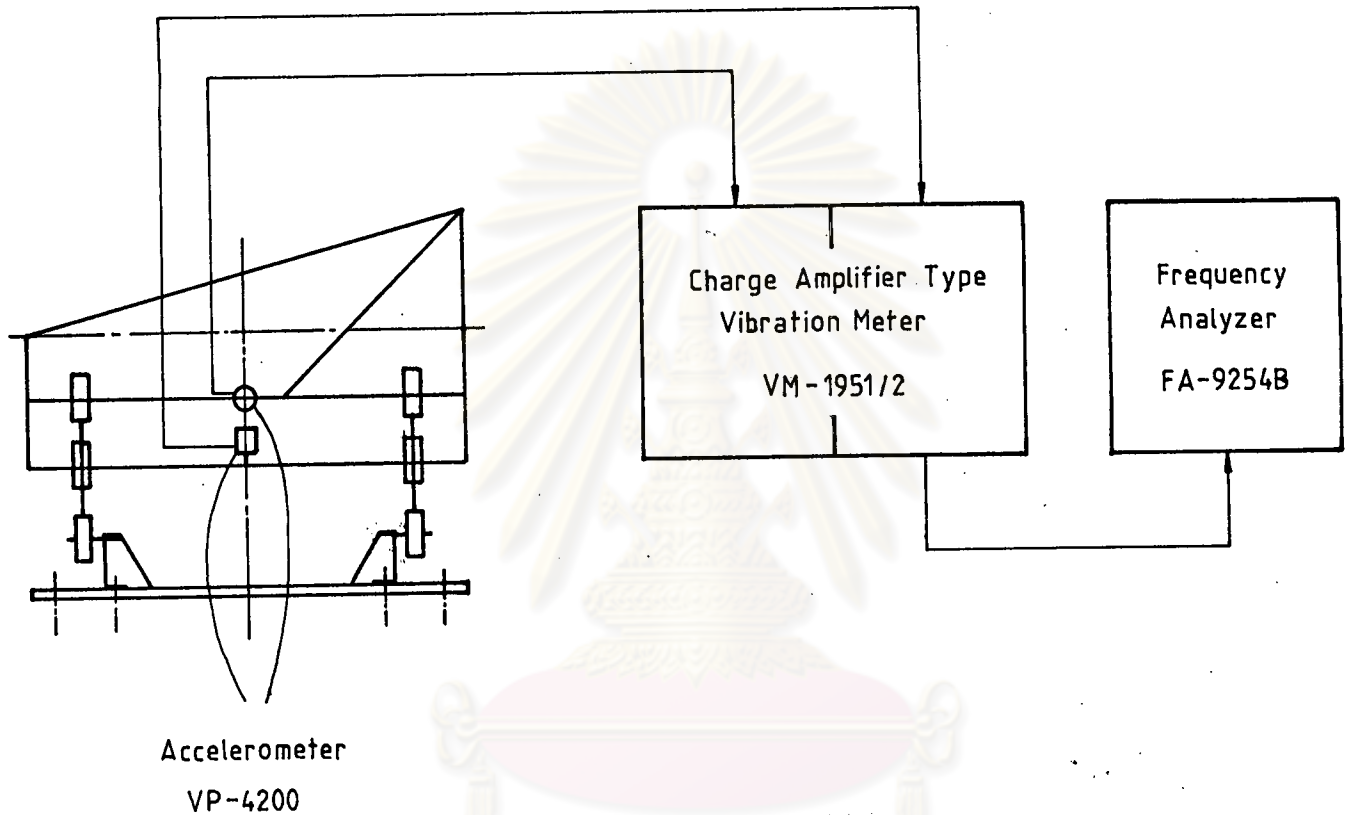


รูปที่ 5.3 เครื่องมือวัดที่ใช้ในการปรับมุมของฐานแยก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.1 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์

ชิ้นงาน	ราง	ส.ป.ส. ความเสียดทานจลน์	ระดับความเชื่อมั่น 95%
เหล็ก	กระดาษทรายหยาบ	0.446	+/- 0.017
ทองเหลือง	กระดาษทรายหยาบ	0.341	+/- 0.052
อลูมิเนียม	กระดาษทรายหยาบ	0.436	+/- 0.025
ข้าว	กระดาษทรายหยาบ	0.618	+/- 0.024
ข้าวเปลือก	กระดาษทรายหยาบ	0.689	+/- 0.014
เหล็ก	กระดาษทรายละเอียด	0.415	+/- 0.021
ทองเหลือง	กระดาษทรายละเอียด	0.367	+/- 0.038
อลูมิเนียม	กระดาษทรายละเอียด	0.417	+/- 0.024
ข้าว	กระดาษทรายละเอียด	0.556	+/- 0.028
ข้าวเปลือก	กระดาษทรายละเอียด	0.557	+/- 0.022
เหล็ก	ยาง	0.436	+/- 0.028
ทองเหลือง	ยาง	0.391	+/- 0.015
อลูมิเนียม	ยาง	0.380	+/- 0.029
ข้าว	ยาง	0.343	+/- 0.026
ข้าวเปลือก	ยาง	0.355	+/- 0.018
เหล็ก	ตะแกรงเหล็ก	0.213	+/- 0.027
อลูมิเนียม	ตะแกรงเหล็ก	0.304	+/- 0.016
ข้าว	ตะแกรงเหล็ก	0.524	+/- 0.006
ข้าวเปลือก	ตะแกรงเหล็ก	0.531	+/- 0.010
เหล็ก	เหล็ก	0.287	+/- 0.015
ทองเหลือง	เหล็ก	0.140	+/- 0.039
อลูมิเนียม	เหล็ก	0.255	+/- 0.039
ข้าว	เหล็ก	0.353	+/- 0.018
ข้าวเปลือก	เหล็ก	0.370	+/- 0.016
เหล็ก	อลูมิเนียม	0.377	+/- 0.017
ทองเหลือง	อลูมิเนียม	0.214	+/- 0.046
อลูมิเนียม	อลูมิเนียม	0.261	+/- 0.032
ข้าว	อลูมิเนียม	0.315	+/- 0.004
ข้าวเปลือก	อลูมิเนียม	0.277	+/- 0.005
ข่าว	ผ้าใบ	0.317	+/- 0.017
ข้าวเปลือก	ผ้าใบ	0.457	+/- 0.037



รูปที่ 5.4 ผังการจัดเครื่องมือวัดการสั่นสะเทือน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

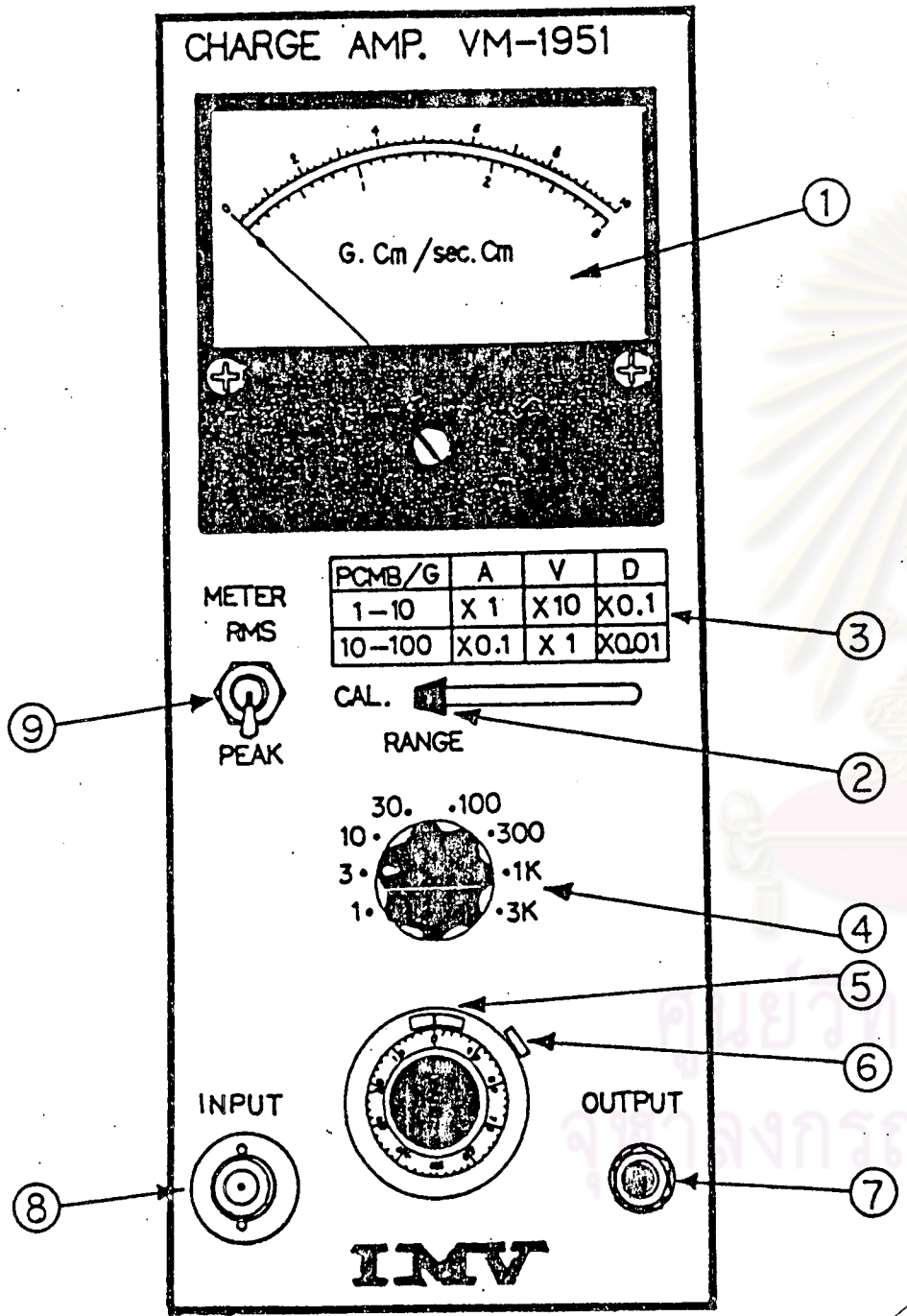
ไว้ดังรูปที่ 5.4 รายละเอียดของเครื่องมือวัดแต่ละหน่วยโดยสังเขปอธิบายได้ดังต่อไปนี้

มิเตอร์วัดความเร็ว (Accelerometer) 2 หน่วย ใช้สำหรับวัดสัญญาณขององค์ประกอบของความเร่งในแนวขนานและตั้งฉากกับระนาบของโครงถาดแยกเป็นแบบ VP-4200 มี charge sensitivity 55 pC/G และมีค่า capacitance 710 pC ส่งสัญญาณโดยอาศัยสายส่งสัญญาณ (Pick up cable) ยาว 4 เมตร มีค่า capacitance 300 pF เข้าไปยังเครื่องขยายสัญญาณชนิดที่มีมิเตอร์วัดการสั่นสะเทือนอยู่ในตัว (Charge Amplifier Type Vibration Merter) แบบ VM-1951 ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 5.5

มิเตอร์วัดการสั่นสะเทือนนี้สามารถปรับ Charge Sensitivity และแรงเคลื่อนขาออกให้เหมาะสมกับมิเตอร์วัดความเร่งที่ใช้ได้ ระหว่าง 0-100 pC/G และ 0-10 mV/G กับ 0-1 V/G สำหรับมิเตอร์วัดความเร่งแบบ VP-4200 ที่ใช้มี Charge Sensitivity 55pC/G เราจึงสามารถปรับเพื่อชดเชยความไวของมิเตอร์ได้ดังรูปที่ 5.6

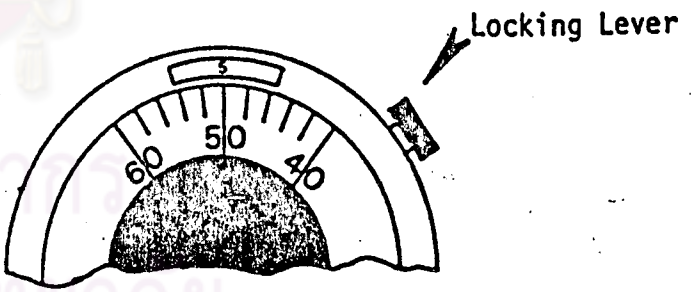
รูปที่ 5.7 เป็นผังวงจรของมิเตอร์วัดความสั่นสะเทือนอย่างง่าย ซึ่งสามารถอธิบายการทำงานพอสรุปได้ว่า ในการวัดความเร่งแรงเคลื่อนที่ออกจากเครื่องขยายสัญญาณจะถูกส่งเข้าเครื่องขยายสัญญาณขาออกแล้วนำไปแสดงไว้ที่หน้าปัทม์โดยตรง ส่วนการวัดความเร็วและการเคลื่อนตัวนั้น แรงเคลื่อนที่ออกจากเครื่องขยายสัญญาณจะต้องถูกส่งผ่านวงจรอินทิเกรตหนึ่งครั้งและสองครั้งเสียก่อนตามลำดับ จากนั้นจึงส่งเข้าวงจรกรองความถี่ต่ำ (High-Pass Filter Circuit) ซึ่งจะตัดสัญญาณที่มีความถี่ต่ำกว่า 5 Hz ออกเพื่อลดการรบกวนเสียก่อนแล้ว จึงส่งเข้าไปยังวงจรขยายสัญญาณขาออกโดยแรงเคลื่อนที่ออกจากวงจรกรองสัญญาณนี้ จะถูกขยายด้วยสัดส่วนโดยตรงกับความเร่งแล้วจึงส่งเข้าไปยังวงจรวัดสัญญาณและวงจรภาคแสดงสัญญาณ โดยที่แรงเคลื่อนที่ออกจากวงจรแสดงสัญญาณนี้สามารถปรับค่าได้ระหว่าง 0-2 V p-p สำหรับภาระ 100 K-ohm และ 0-0.2 V p-p สำหรับภาระ 20 ohm โดยปรับ Potentiameter แล้วส่งออกจากมิเตอร์ที่ Out put 7 ไปยังเครื่องมือวิเคราะห์ความถี่ (Frequency Analyzer) ดังรูปที่ 5.4

รูปที่ 5.8 เป็นรูปร่างทั่ว ๆ ไปของเครื่องมือวิเคราะห์ความถี่แบบ FA-9254 B ซึ่งรับสัญญาณรูปคลื่นจากมิเตอร์วัดการสั่นสะเทือน เครื่องมือวิเคราะห์ความถี่จะอยู่ในสภาวะที่พร้อมจะใช้งานเมื่อสวิทช์ 3 อยู่ที่ตำแหน่ง "ANA" แล้วความถี่สามารถวัดได้ด้วยสวิทช์ 1



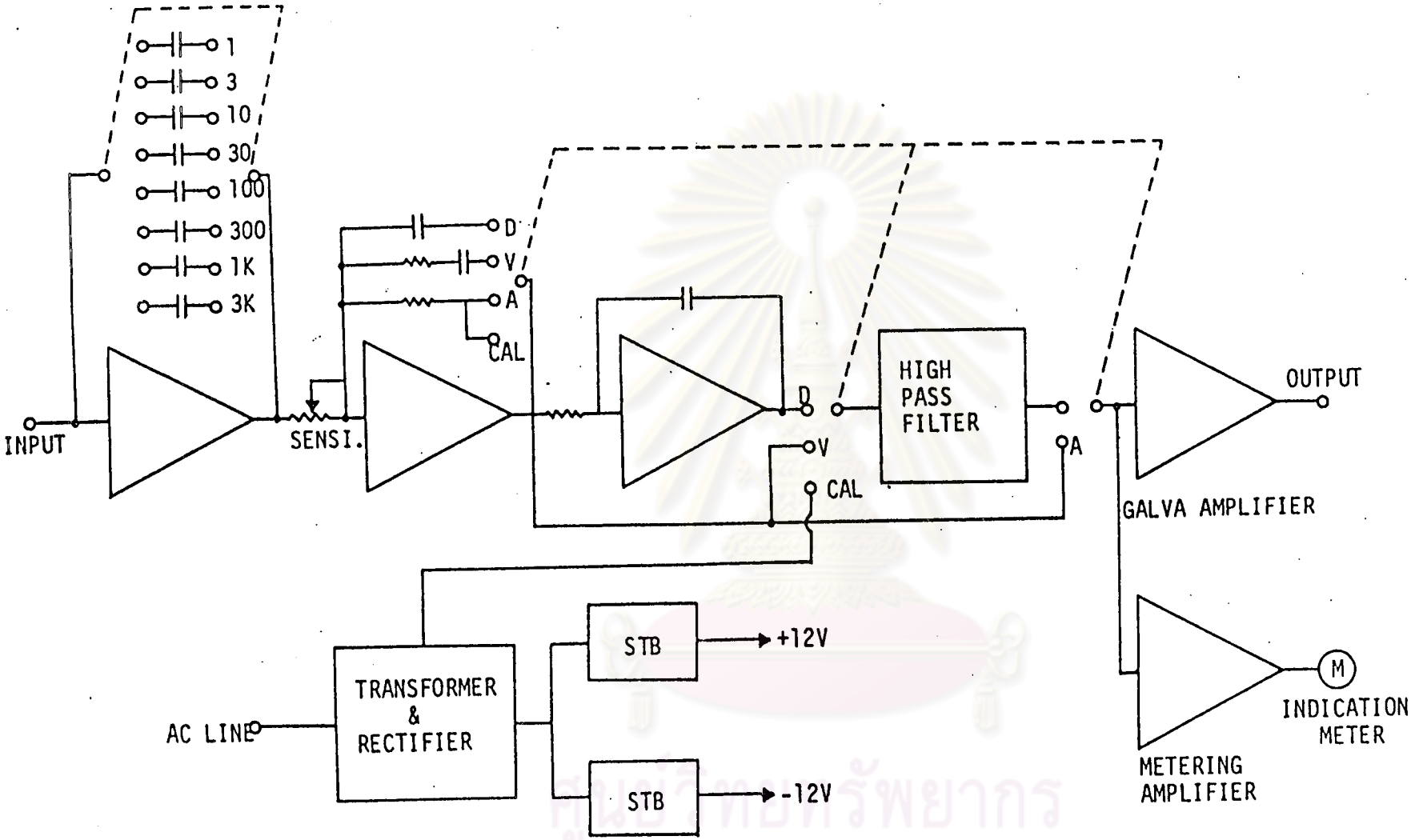
1. Meter
2. Function switch
3. Multiplier
4. Attenuator
5. Compensater
6. Locking Lever
7. Out put terminal
8. Input terminal

รูปที่ 5.5 ลักษณะทั่วไปของมิเตอร์วัดความเร่ง



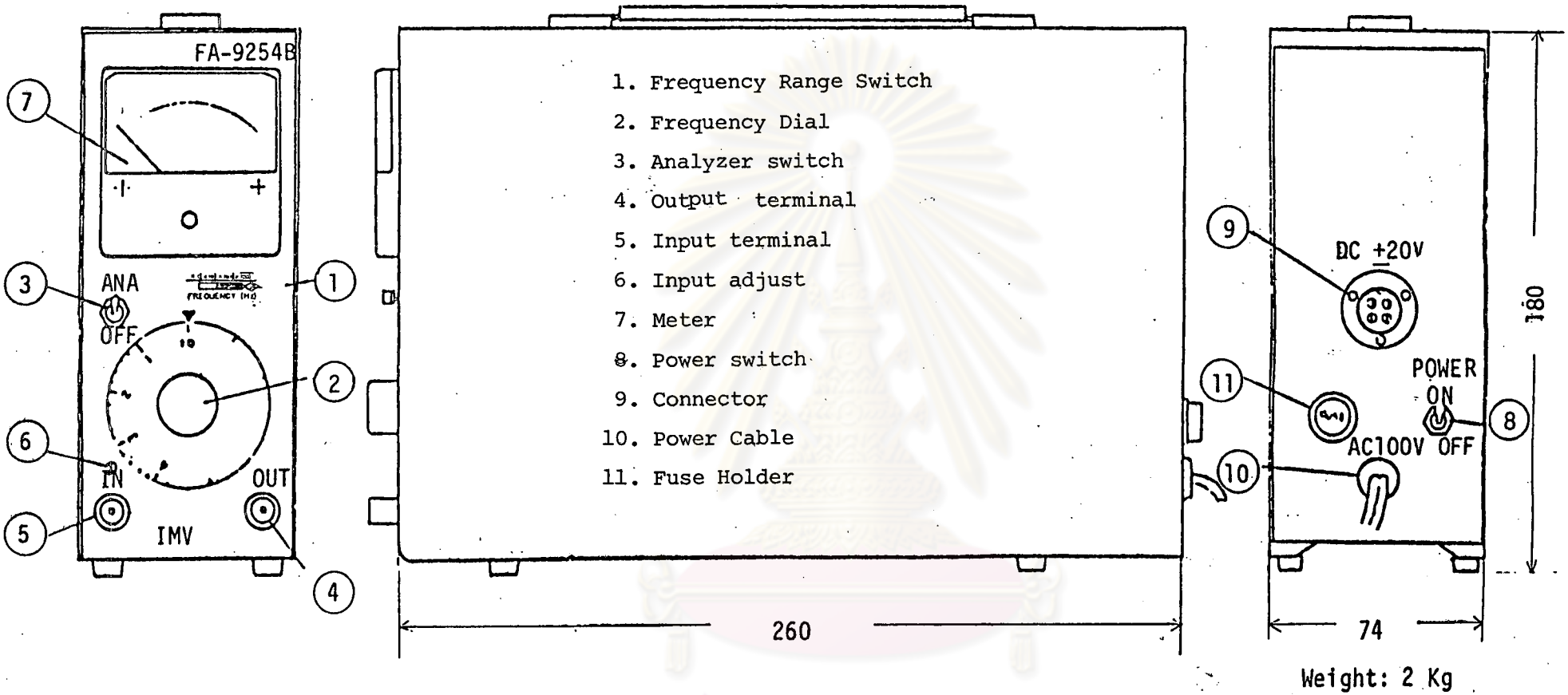
รูปที่ 5.6 การขัดเขยความไว

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.7 ผังวงจรของมิเตอร์วัดความเร่ง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.8 ลักษณะทั่วไปของเครื่องมือวิเคราะห์ความถี่

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ซึ่งมีไว้สำหรับเลือกช่วงของความถี่ที่ต้องการวัดและไดอัล 2 โดยการปรับไดอัลและสังเกตการขึ้นลงของเข็มชี้ Z จนกระทั่งเข็มชี้ที่ตำแหน่งสูงสุดแล้วอ่านค่าที่ไดอัล 2 เราจะได้ความถี่จากผลคูณระหว่างค่าที่อ่านได้จากไดอัล 2 และตัวเลขช่วงของความถี่ที่ปรับไว้ที่สวิทช์ 1

5.5 การวัดตัวแปรของระบบขับเคลื่อน

ตัวแปรของระบบขับเคลื่อนสามารถอ่านค่าได้โดยตรงจากมิเตอร์วัดความสั่นสะเทือนซึ่งรับสัญญาณจากมิเตอร์ที่ใช้วัดองค์ประกอบของความเร่งในแนวตั้งฉากและแนวขนานกับโครงของถาดแยกซึ่งถูกยึดที่ไว้ตอนกลางของโครงรองรับถาดแยก โดยที่ค่าของความเร่ง ความเร็วและการเคลื่อนตัวของถาดแยกแต่ละทิศทางที่แท้จริงก็คือ ค่าที่อ่านได้จากมิเตอร์คูณกับตัวคูณในคอลัมน์ A V และ D ตามลำดับ

การปรับมุมในการสั่นสะเทือน β ที่ต้องการสามารถกระทำได้โดยขั้นแรกปรับลูกเบี้ยวเยื้องศูนย์ให้แอมปลิจูดในแนวขนานกับโครงของถาดแยกได้ตามต้องการ จากนั้นจึงเปิดเครื่องให้ทำงานแล้วปรับสกรูให้แผ่นเลื่อน ๆ ไปจนกระทั่งแอมปลิจูดในแนวตั้งฉากที่อ่านได้จากมิเตอร์มีค่าเท่ากับนิพจน์

$$an = ap.\tan\beta \qquad 5.4$$

แล้วจึงขันสกรูยึดแผ่นเลื่อนให้แน่นกับโครงเหล็ก ตำแหน่งนี้จะเป็นตำแหน่งที่ให้มุม β ตามต้องการ เมื่อเราคงค่าแอมปลิจูดและมุมในการสั่นสะเทือนไว้ค่าพารามิเตอร์ความเร่ง A ที่ต้องการในแต่ละการทดลองนั้นสามารถปรับได้โดยการปรับความเร็วรอบของกลไกขับจนกระทั่งค่าความเร่งในแนวตั้งฉากกับโครงการรองรับถาดแยกที่อ่านได้จากมิเตอร์มีค่าเท่ากับนิพจน์

$$An = A\cos\alpha 1 \qquad 5.5$$

จากนั้นจึงวัดความถี่ที่ความเร็วรอบนี้โดยอาศัยเครื่องมือวัดความถี่ ซึ่งค่าที่วัดได้นี้จะเป็นความถี่ที่ให้ค่า A ตามต้องการ

5.6 การวัดการเคลื่อนตัวของวัสดุ

สำหรับคู่ของวัสดุและถาดแยกที่มีสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน μ_d ค่าพารามิเตอร์ความลาดชันของถาดแยกที่ต้องการ P1 สามารถกำหนดได้โดยการปรับมุม $\alpha 1$ และค่าพารา-

มิเตอร์ความลาดเอียงของฐานแยกที่ต้องการ P2 สามารถกำหนดได้โดยการปรับมุม $\alpha 2$ และหลังจากที่เราปรับความถี่ของกลไกขับที่ให้ค่าพารามิเตอร์ความเร่ง A ตามต้องการแล้วการทดลองนี้ดำเนินการอยู่ที่พารามิเตอร์ความเสียดทาน

$$P3 = \frac{\mu_d \cos\alpha 1 \cos\alpha 2}{A_p}$$

การเคลื่อนตัวในแนวแกน x และ z ของวัสดุที่พารามิเตอร์ชุดนี้สามารถหาได้โดยให้วัสดุเคลื่อนที่ในแนวแกน x เป็นระยะทาง lx และในแนวแกน z เป็นระยะทาง lz แล้วจับเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ในช่วงนี้ ซึ่งจะได้เวลาเป็น tx และ tz ตามลำดับ ดังนั้นความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนตัวของวัสดุหาได้จาก

$$\dot{x}m = lx/tx \quad \text{และ} \quad \dot{z}m = lz/tz \qquad 5.7$$

ระยะทางเฉลี่ยที่วัสดุเคลื่อนตัวไปได้ต่อวัฏจักรหาได้จาก

$$xm = \dot{x}m/f \quad \text{และ} \quad zm = \dot{z}m/f \qquad 5.8$$

และพารามิเตอร์การเคลื่อนตัวของวัสดุแบบไร้มิติจะหาได้จาก

$$X = xm/ap \quad \text{และ} \quad Z = zm/ap \qquad 5.9$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย