

บทที่ 3

การพัฒนาตัวห่วงปรับค่าได้ด้วยตัวห่วงของเหลวแม่เหล็ก

เมื่อเกิดแผ่นดินไหวโครงสร้างอาจจะเกิดความเสียหายขึ้นที่เสา คาน หรือ ข้อต่อซึ่งมีพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้น ฉะนั้นการควบคุมโครงสร้างต้องพิจารณาโครงสร้างที่จะเป็นจริงภายใต้แผ่นดินไหว ดังนั้นจึงควรใช้วิธีการควบคุมที่สามารถควบคุมพฤติกรรมไม่เชิงเส้นได้อย่างง่ายซึ่งวิธีหนึ่งที่เหมาะสม คือ วิธีที่กำหนดรูปแบบของแรงห่วงไว้ล่วงหน้า (preset damping force algorithm) โดยการใช้ตัวห่วงของเหลวแม่เหล็กซึ่งเป็นอุปกรณ์ควบคุมแบบเซมิแอคทีฟ

สำหรับรูปแบบการควบคุมที่นำเสนอเป็นการนำข้อดีของระบบการควบคุมแบบพาสซีฟสองชนิดที่มีการใช้อย่างกว้างขวางมาผสมกัน คือ การควบคุมแบบแรงเสียดทาน (friction damper) และการควบคุมแบบแรงหน่วงแบบหนืด (viscous damper) โดยการควบคุมแบบแรงเสียดทานนั้นค่าแรงหน่วงจะคงที่ตลอดช่วงการเคลื่อนที่ของตัวห่วง ดังนั้นถ้ากำหนดค่าแรงหน่วงที่เหมาะสมก็จะทำให้เกิดการสลายพลังงานได้มาก แต่เมื่อค่าระดับแรงหน่วงเพิ่มขึ้นการสลายพลังงานลดลง และตัวห่วงแบบแรงเสียดทานมีแนวโน้มที่จะทำให้เกิดค่าความเร่งมากขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนค่าแรงหน่วงอย่างทันทีทันใดเมื่อตัวห่วงเคลื่อนที่กลับทิศ ส่วนตัวห่วงแบบแรงหน่วงแบบหนืดแรงหน่วงจะมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับความเร็ว การเปลี่ยนแปลงแรงหน่วงค่อนข้างจะราบเรียบแต่เมื่อตัวห่วงเคลื่อนที่จะสู่ระยะเคลื่อนของตัวห่วงค่าแรงหน่วงจะลดลงทำให้ระยะเคลื่อนที่ในโครงสร้างมากขึ้นและมีการสลายพลังงานในตัวห่วงได้น้อยลง ดังนั้นเมื่อนำข้อดีของทั้งสองชนิดมาผสมกันจึงได้นำเสนอรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดผสมกับแบบเสียดทานที่ปรับค่าได้ (viscous-plus-variable-friction damping force algorithm, VVF) ซึ่งในที่นี้จะเรียกว่า VVF

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบพฤติกรรมของตัวห่วงของเหลวแม่เหล็ก โดยให้การเคลื่อนที่แบบวัฏจักร โดยมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ ระยะเคลื่อนที่ และระดับกระแสไฟฟ้า แล้วทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวห่วงของเหลวแม่เหล็ก สุดท้ายทำการทดสอบพฤติกรรมของตัวห่วงภายใต้รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทาน (friction damping force algorithm) การควบคุมแรงหน่วงแบบหนืด (viscous damping force algorithm) การควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดไม่เชิงเส้น (nonlinear viscous damping force algorithm) และการ

ควบคุมแรงหน่วงแบบ VVF เพื่อที่จะตรวจสอบความสามารถของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กที่สามารถควบคุมได้รูปแบบตามที่กำหนดได้ใกล้เคียงมากน้อยเพียงใด

3.1 การทดสอบพฤติกรรมของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กโดยให้การเคลื่อนที่แบบวัฏจักร

ตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กที่ใช้ในการทดสอบผลิตโดยบริษัท Lord Corporation รุ่น RD-1084 ดังรูปที่ 3.1 โดยมีความยาวขณะยืดสุด 237 mm และมีความยาวขณะหดสุด 197 mm ดังนั้นจึงมีช่วงการเคลื่อนที่ ± 20 mm มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 28 mm สามารถให้แรงหน่วงสูงสุดประมาณ 60 N ตัวหน่วงจะทำงานภายใต้กระแสไฟฟ้า 0-400 mA โดยกระแสไฟฟ้าจะจ่ายโดยเครื่องขับกระแสไฟฟ้า (current driver) รุ่น RD-3002 ผลิตโดยบริษัท Lord Corporation โดยกระแสไฟฟ้าที่จ่ายจะขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ที่รับเข้าไป ดังรูปที่ 3.2

การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.3 จากรูปตัวหน่วงจะต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดแรง (actuator) ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นเครื่องที่ให้การเคลื่อนที่แบบวัฏจักรโดยเครื่องกำเนิดแรงใช้การควบคุมระยะเคลื่อนที่ (displacement control) ส่วนอีกด้านของตัวหน่วงต่ออยู่กับเครื่องวัดแรง (load cell) ซึ่งใช้ในการวัดแรงหน่วง เครื่องวัดแรงจะต่อกับแท่นยึด (reaction frame) ระยะเคลื่อนที่จะวัดโดยใช้เครื่องวัดระยะเคลื่อนที่แบบเลเซอร์ (laser displacement transducer) เครื่องขับกระแสไฟฟ้าที่ต่อระหว่างตัวหน่วงกับคอมพิวเตอร์จะเป็นตัวจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับตัวหน่วงโดยจะมีค่าเป็นสัดส่วนกับความต่างศักย์ที่รับมาจากการวัดควบคุมที่ติดตั้งในคอมพิวเตอร์

ได้การทดสอบตัวหน่วงภายใต้การเคลื่อนที่รูปแบบคลื่น Sine โดยกำหนดความถี่ ระยะเคลื่อนที่ และ กระแสไฟฟ้าคงที่สำหรับแต่ละกรณีทดสอบ ดังตารางที่ 3.1 ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.4 จากรูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงกับระยะเคลื่อนที่จะเห็นได้ว่าใกล้เคียงกับตัวหน่วงแบบแรงเสียดทาน และเมื่อพิจารณาที่ความถี่และระยะเคลื่อนที่เดียวกันค่าแรงหน่วงจะเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาที่ระยะเคลื่อนที่และระดับกระแสไฟฟ้าเดียวกันค่าแรงหน่วงจะเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาที่ความถี่และระดับกระแสไฟฟ้าเดียวกันค่าแรงหน่วงจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น

3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็ก

จากการทดสอบตัวหน่วงภายใต้การเคลื่อนที่แบบวิวิจกรเมื่อนำค่าแรงหน่วงสูงสุดกับค่าความเร็วสูงสุด ที่กระแสไฟฟ้าต่างๆกันมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงกับความเร็ว จะได้ดังรูปที่ 3.5 จากรูปจะเห็นได้ว่าที่ระดับกระแสไฟฟ้าต่างๆความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงกับความเร็วค่อนข้างจะเป็นเส้นตรงและเมื่อพิจารณาที่ความเร็วเดียวกัน ค่าแรงหน่วงจะเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น แบบจำลองของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กถูกจำลองโดยขึ้นส่วนแรงเสียดทานและขึ้นส่วนความหนืดต่อขนานกันดังรูปที่ 3.6 สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$f_d = f_s + cv \quad (3.1)$$

เมื่อ f_d คือ แรงหน่วง
 f_s คือ แรงเสียดทาน
 c คือ สัมประสิทธิ์ความหน่วง
 v คือ ความเร็ว

จากการใช้วิเคราะห์แบบถดถอย (regression analysis) เพื่อหาสมการเส้นตรงที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับความเร็วที่ระดับกระแสไฟฟ้าต่างๆ รูปที่ 3.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทาน (f_s) ที่ความเร็วเท่ากับ 0 กับกระแสไฟฟ้าซึ่งสามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทานกับกระแสไฟฟ้าได้ดังนี้

$$f_s = 3.78 + 0.123current \quad (3.2)$$

เมื่อ f_s คือ แรงเสียดทานที่ความเร็วเท่ากับ 0 (N)
 $current$ คือ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้ตัวหน่วง (mA)

รูปที่ 3.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความหน่วง (c) กับกระแสไฟฟ้าซึ่งสามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความหน่วงกับกระแสไฟฟ้าได้ดังนี้

$$c = 0.03 - 0.0000577current \quad (3.3)$$

เมื่อ c คือ สัมประสิทธิ์ความหน่วง (N-s/mm)
 $current$ คือ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้ตัวหน่วง (mA)

แทนค่าสมการที่ (3.2) และสมการที่ (3.3) ลงในสมการที่ (3.1) จะได้

$$f_d = (3.78 + 0.123current) + (0.03 - 0.0000577current)v \quad (3.4)$$

เมื่อ f_d คือ แรงหน่วง (N)
 $current$ คือ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้ตัวหน่วง (mA)
 v คือ ความเร็ว (mm/s)

3.3 การทดสอบพฤติกรรมของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กโดยควบคุมให้มีแรงหน่วงในรูปแบบต่างๆ

ตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กเป็นอุปกรณ์ควบคุมแบบเชิงแม่เหล็กที่สามารถแปรเปลี่ยนแรงหน่วงได้ตามที่ต้องการ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะทำการตรวจสอบความสามารถของตัวหน่วงที่สามารถควบคุมได้รูปแบบตามที่กำหนดได้ใกล้เคียงมากน้อยเพียงใด

3.3.1 ลักษณะของรูปแบบการควบคุมแบบต่างๆ

รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงจะเป็นดังนี้

(1) แบบเสียดทาน รูปที่ 3.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะเคลื่อนที่และแรงกับความเร็วยังรูปแบบการควบคุมแบบเสียดทานจากรูปจะเห็นว่าเมื่อความเร็วมีเครื่องหมายเป็นบวกจะเกิดการสิ้นเปลืองโดยแรงมีค่า F_d

(2) แบบหนืด รูปที่ 3.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะเคลื่อนที่และแรงกับความเร็วยังรูปแบบการควบคุมแบบแรงหน่วงแบบหนืดจะเห็นได้ว่าแรงหน่วงจะมีค่าเป็นสัดส่วนกับความเร็วโดยมีค่าความต้านเป็นสัมประสิทธิ์ความหน่วง (Damping coefficient, C_d) ซึ่งทั้งสองรูปแบบการควบคุมนี้เป็นการควบคุมแบบพาสซีฟ

(3) แบบหนีตไม่เชิงเส้น ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะเคลื่อนที่และแรงกับความเร็ว แสดงดังรูปที่ 3.11 จากรูปจะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงกับความเร็วเป็นเส้นตรงโดยมีค่าความชันเท่ากับ C_d แต่ค่าแรงหน่วงไม่เกินค่า F_d

(4) แบบ VVF เป็นการรวมข้อดีของรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนีตกับแบบเสียดทานเข้าด้วยกัน แบบจำลองของแบบ VVF จะเป็นขึ้นส่วนแรงเสียดทานต่ออนุกรมกับขึ้นส่วนความหนีตดังรูปที่ 3.12 โดยเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นจากศูนย์ขึ้นส่วนความหนีตจะทำงานเพื่อให้แรงค่อยๆ เปลี่ยนและเพื่อให้เกิดการสลายพลังงานและเมื่อค่าแรงหน่วงของขึ้นส่วนความหนีตถึงค่าแรงสูงสุดในแต่ละทิศทางของการให้แรงหรือเมื่อถึงค่าแรงที่กำหนดขึ้นส่วนแรงเสียดทานที่ปรับค่าได้ก็จะเกิดการไถลเมื่อมีการเคลื่อนที่กลับทิศการเปลี่ยนแรงหน่วงก็จะเป็นในลักษณะเดียวกัน ความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงกับระยะเคลื่อนที่และแรงหน่วงกับความเร็วแสดงดังรูปที่ 3.13 จากรูปจะเห็นได้ว่ามีค่าพารามิเตอร์ 2 ค่าคือค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของขึ้นส่วนความหนีต (C_d) และค่าแรงที่กำหนด (F_d) ของขึ้นส่วนแรงเสียดทาน

3.3.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบของรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบต่างๆ

ทำการทดสอบตัวหน่วงโดยให้การเคลื่อนที่รูปแบบคลื่น Sine โดยแต่ละกรณีจะกำหนดความถี่และระยะเคลื่อนที่คงที่โดยมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังตารางที่ 3.2

3.4 ผลการทดสอบ

รูปที่ 3.15 แสดงหลักการทำงานของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กโดยควบคุมให้มีแรงหน่วงในรูปแบบต่างๆ รูปที่ 3.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงกับระยะเคลื่อนที่โดยเปรียบเทียบระหว่างแรงที่สั่งกับแรงที่วัดได้ของรูปแบบการควบคุมแบบต่างๆ คือ แบบเสียดทาน แบบหนีตแบบหนีตไม่เชิงเส้น และแบบ VVF โดยให้การเคลื่อนที่รูปแบบคลื่น Sine ที่ความถี่ 1 Hz จากรูปจะเห็นได้ว่าที่รูปแบบการควบคุมแบบต่างๆค่าแรงที่วัดได้น้อยกว่าค่าแรงที่สั่งเนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวหน่วงที่ใช้ในการคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าที่ต้องการนั้นได้มาจากการทดสอบภายใต้กระแสไฟฟ้าที่คงที่แต่ในการทดสอบนี้กระแสไฟฟ้าจะไม่คงที่จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนดังนั้นจึงต้องมีการชดเชยกระแสไฟฟ้าโดยการชดเชยค่าความต่างศักย์ที่ป้อนให้กับตัวจ่ายกระแสไฟฟ้างดสมการ

$$\Delta V = k * \Delta f \quad (3.5)$$

โดย ΔV คือ ค่าความต่างศักย์ที่ชดเชยให้เครื่องขับเคลื่อนไฟฟ้า (V)
 k คือ ค่าคงที่ (V/N)
 Δf คือ ผลต่างระหว่างแรงที่สั่งกับแรงที่วัดได้ (N)

3.4.1 ผลของค่าพารามิเตอร์ k ที่มีต่อรูปแบบการควบคุมแบบต่างๆ

รูปที่ 3.17 แสดงผลของค่าพารามิเตอร์ k ที่มีต่อรูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบเสียดทานภายใต้การเคลื่อนที่แบบวัฏจักรแบบคลื่น Sine ที่ความถี่ 1 Hz รูปที่ 3.17(ก) แสดงแรงท่วงกับระยะเคลื่อนที่จะเห็นได้ว่าเมื่อค่า k เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าแรงที่วัดได้ใกล้เคียงกับค่าแรงที่สั่งมากขึ้น แต่ในช่วงที่ระยะเคลื่อนที่หลายๆ (ช่วงที่ความเร็วต่ำๆ) ค่าแรงที่วัดได้จะมากกว่าค่าแรงที่สั่งในช่วงที่ตัวหน่วงมีการเคลื่อนที่กลับทิศโดยค่าผลต่างของแรงจะมากขึ้นเมื่อค่า k มากขึ้นเนื่องจากก่อนที่ตัวหน่วงจะเคลื่อนที่กลับทิศค่าแรงที่วัดได้จะน้อยกว่าค่าแรงที่สั่งจึงมีการชดเชยกระแสไฟฟ้าและเนื่องจากผลของความล่าช้าการนำความเร็วและความล่าช้าของการทำงานของตัวหน่วงจึงทำให้กระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าแรงมากขึ้นในช่วงที่ตัวหน่วงมีการกลับทิศ ดังรูปที่ 3.17(ข) และ 3.17(ค) ส่วนรูปที่ 3.18 แสดงผลของค่าพารามิเตอร์ k ที่มีต่อรูปแบบการควบคุมแบบต่างๆภายใต้การเคลื่อนที่แบบวัฏจักรแบบคลื่น Sine ที่ความถี่ 1 Hz รูปที่ 3.18(ก) แสดงรูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบหนืดจะเห็นได้ว่าเมื่อค่า k เพิ่มขึ้น จะทำให้แรงที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกับแรงที่สั่งมากขึ้น รูปที่ 3.18(ข) แสดงรูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบหนืดไม่เชิงเส้นจะเห็นได้ว่าเมื่อค่า k เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าแรงที่วัดได้ใกล้เคียงกับค่าแรงที่สั่งมากขึ้น รูปที่ 3.18(ค) แสดงรูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบ VVF โดยค่าแรงน้อยกว่าค่าแรงที่กำหนด (force limit) จะเห็นได้ว่าค่าแรงที่วัดได้ใกล้เคียงกับค่าแรงที่สั่งมากขึ้นเมื่อค่า k เพิ่มขึ้น รูปที่ 3.18(ง) แสดงรูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบ VVF จะเห็นได้ว่าค่าแรงที่วัดได้ใกล้เคียงกับค่าแรงที่สั่งมากขึ้นเมื่อค่า k เพิ่มขึ้น แต่ในช่วงที่ความเร็วต่ำๆ และมีการกลับทิศค่าแรงที่วัดได้มีค่ามากกว่าค่าแรงที่สั่งโดยผลต่างของแรงจะมากขึ้นเมื่อค่า k มากขึ้นเนื่องจากผลของความล่าช้าในการนำความเร็วและผลความล่าช้าของการทำงานของตัวหน่วง จากรูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบต่างๆจะเห็นว่าค่า $k = 0.04$ V/N สามารถลดผลต่างของแรงได้ดีกว่าค่า $k = 0.02$ V/N

รูปที่ 3.19 แสดงผลของค่าพารามิเตอร์ k ที่มีต่อรูปแบบการควบคุมแบบต่างๆภายใต้การเคลื่อนที่แบบวงจักรแบบ Sine ที่ความถี่ 2 Hz จะเห็นได้ว่าเมื่อค่า k เพิ่มขึ้นค่าแรงที่วัดได้จะมีขนาดใกล้เคียงกับแรงที่สั่งมากขึ้นในบริเวณที่ระยะเคลื่อนที่น้อย (ความเร็วสูง) ส่วนบริเวณที่มีระยะเคลื่อนที่มาก (ความเร็วต่ำ) ค่าแรงที่วัดได้จะค่อนข้างต่างกับค่าแรงที่สั่งเนื่องจากที่ความเร็วต่ำๆแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีค่าคลาดเคลื่อนเล็กน้อยในการคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าที่ต้องจ่ายให้ตัวหม้อแปลงโดยค่าแรงที่คำนวณได้น้อยกว่าค่าแรงจริงๆ จึงทำให้ตัวหม้อแปลงมีแรงต้านได้น้อยกว่าที่ต้องการจึงต้องมีการชดเชยกระแสไฟฟ้ามากในช่วงที่ความเร็วต่ำๆและเนื่องจากผลของความล่าช้าในการทำนายความเร็วและผลความล่าช้าของตัวหม้อแปลงจึงทำให้ค่าแรงที่วัดได้ในช่วงที่ความเร็วกลับทิศมากกว่าค่าแรงที่สั่ง จากรูปแบบการควบคุมแรงหม้อแปลงแบบต่างๆจะเห็นได้ว่าค่า $k = 0.04$ V/N สามารถลดผลต่างของแรงได้ดีกว่าค่า $k = 0.02$ V/N จากการเปรียบเทียบรูปที่ 3.17, 3.18 และรูปที่ 3.19 สำหรับรูปแบบการควบคุมแรงหม้อแปลงแบบต่างๆจะเห็นได้ว่าเมื่อความถี่สูงขึ้นความสามารถในการทำงานของตัวหม้อแปลงต่ำลง

จะเห็นได้ว่าการชดเชยกระแสไฟฟ้าช่วยทำให้ค่าแรงที่วัดได้ใกล้เคียงกับค่าแรงที่สั่งมากขึ้นเมื่อค่า k เพิ่มขึ้นในช่วงที่ระยะเคลื่อนที่น้อย (ความเร็วมาก) แต่ช่วงที่ความเร็วต่ำๆการชดเชยกระแสจะทำให้ค่าแรงที่วัดได้มากกว่าค่าแรงที่สั่งเนื่องจากผลของความล่าช้าในการทำนายความเร็วและผลความล่าช้าของตัวหม้อแปลง เพื่อที่จะแก้ปัญหานี้จึงได้นำเสนอวิธีการแก้ปัญหา 2 วิธีคือ (1) วิธีที่ไม่ต้องมีการชดเชยกระแสไฟฟ้า ($k = 0$ V/N) เมื่อความเร็วต่ำกว่าความเร็วที่กำหนด (v_{ko}) ดังรูปที่ 3.20 (2) การให้กระแสไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เมื่อความเร็วต่ำกว่าความเร็วที่กำหนด (v_{co}) ดังรูปที่ 3.21

3.4.2 การแก้ปัญหาในส่วนที่แรงหม้อแปลงที่ได้มากกว่าค่าแรงที่สั่งในช่วงที่ความเร็วต่ำ

ตารางที่ 3.3 แสดงกรณีที่ทำกรทดสอบการแก้ปัญหาในส่วนที่แรงหม้อแปลงที่ได้มากกว่าค่าแรงที่สั่ง รูปที่ 3.22 แสดงผลการทดสอบกรณีที่ 1 และ 2 จากรูปที่ 3.22(ก) จะเห็นได้ว่าทั้งสองวิธีสามารถช่วยลดผลเนื่องจากความล่าช้าของตัวหม้อแปลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ รูปที่ 3.22(ข) การให้ $k = 0$ V/N เมื่อความเร็วต่ำกว่า 20 mm/s ให้ผลที่ดีกว่าวิธีที่ให้กระแสไฟฟ้าเท่ากับศูนย์ที่ความเร็วเดียวกัน รูปที่ 3.22(ค) การให้ $k = 0$ V/N ให้ผลที่ดีกว่าวิธีที่ให้กระแสไฟฟ้าเท่ากับศูนย์ในช่วงความเร็วต่ำกว่า 30 mm/s แต่ผลที่ได้จะแยกว่าในรูปที่ 3.22(ข) รูปที่ 3.22(ง) จะเห็นได้ว่าทั้งสองวิธีให้ผลที่ใกล้เคียงกันโดยสามารถลดผลเนื่องจากความล่าช้าของตัวหม้อแปลงได้อย่างดี ส่วน

รูปที่ 3.22(จ) และ 3.22(ฉ) จะเห็นได้ว่าวิธีที่ให้ $k = 0 \text{ V/N}$ เมื่อความเร็วน้อยกว่า v_{k0} ให้ผลที่ดีกว่าวิธีที่ให้กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0 mA ที่ความเร็วเดียวกัน

รูปที่ 3.23 แสดงผลการทดสอบกรณีที่ 3 และ 4 จากรูปที่ 3.23(ก), 3.23(ข) และ 3.23(ค) จะเห็นได้ว่าการใช้วิธีที่ $k = 0 \text{ V/N}$ ในช่วงที่ความเร็วน้อยกว่า v_{k0} ให้ผลที่ดีกว่าวิธีที่ให้กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0 รูปที่ 3.23(ง) จะเห็นได้ว่าการให้ $k = 0 \text{ V/N}$ เมื่อความเร็วน้อยกว่า 10 mm/s ไม่สามารถลดผลเนื่องจากความล่าช้าของตัวหน่วงได้แต่วิธีที่ให้กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0 mA สามารถช่วยลดผลเนื่องจากความล่าช้าได้บ้าง รูปที่ 3.23(จ) วิธีที่ให้ $k = 0 \text{ V/N}$ ในช่วงที่ความเร็วต่ำกว่า 20 mm/s สามารถลดผลเนื่องจากความล่าช้าของตัวหน่วงได้บ้างส่วนวิธีที่ให้กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0 mA สามารถช่วยลดผลเนื่องจากความล่าช้าของตัวหน่วงได้แต่ค่าแรงที่ได้น้อยกว่าค่าแรงที่ส่งเล็กน้อย ในช่วงที่ความเร็วต่ำๆ เนื่องจากค่าความเร็วที่กำหนดสูงเกินไป (ความเร็วที่เหมาะสมอยู่ในช่วง $10\text{-}20 \text{ mm/s}$ สำหรับวิธีที่ให้กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0 mA) รูปที่ 3.23(ฉ) จะเห็นได้ว่าวิธีที่ให้ $k = 0 \text{ V/N}$ สามารถลดผลเนื่องจากความล่าช้าของตัวหน่วงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนวิธีที่ให้กระแสไฟฟ้าเท่ากับศูนย์สามารถช่วยลดผลเนื่องจากความล่าช้าได้แต่ค่าแรงที่ได้น้อยกว่าค่าแรงที่ส่งในช่วงที่ความเร็วต่ำๆ

รูปที่ 3.24 แสดงผลการทดสอบกรณีที่ 5 และ 6 จะเห็นได้ว่าทั้งสองวิธีให้ผลใกล้เคียงกัน โดยเมื่อความเร็วที่กำหนดเพิ่มขึ้นทั้งสองวิธีจะช่วยลดผลเนื่องจากความล่าช้าของตัวหน่วงได้ดีขึ้น

จากรูปที่ 3.22 ถึง รูปที่ 3.24 จะเห็นได้ว่าทั้งสองวิธีสามารถลดผลเนื่องจากความล่าช้าของตัวหน่วงได้ดีโดยเฉพาะในกรณีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทาน โดยวิธีที่ให้กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0 mA มีค่าความเร็วที่กำหนดที่เหมาะสมต่ำกว่าอีกวิธีหนึ่งและเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นความเร็วที่กำหนดที่เหมาะสมมีแนวโน้มที่สูงขึ้นทั้งสองวิธี ส่วนกรณีที่รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบ VVF ผลที่ได้ยังไม่ชัดเจนจึงมีการทดสอบเพิ่มเติมโดยมีค่าแรงที่วัดได้ประมาณ 50 N ดังกรณีที่ 7 และ 8

รูปที่ 3.25 แสดงผลการทดสอบกรณีที่ 7 จะเห็นได้ว่าทั้งสองวิธีสามารถลดผลเนื่องจากความล่าช้าของตัวหน่วงได้โดยผลเนื่องจากความล่าช้าของตัวหน่วงจะลดลงเมื่อความเร็วที่กำหนดเพิ่มขึ้น วิธีที่ให้กระแสไฟฟ้าเท่ากับศูนย์สามารถลดผลเนื่องจากความล่าช้าของตัวหน่วงได้ที่ความเร็วที่กำหนดต่ำกว่า รูปที่ 3.26 แสดงผลการทดสอบกรณีที่ 8 จะเห็นได้ว่าวิธีที่ให้ $k = 0 \text{ V/N}$

สามารถลดผลเนื่องจากความล่าช้าได้เล็กน้อยส่วนวิธีที่ให้กระแสไฟฟ้าเท่ากับศูนย์สามารถลดได้ดีกว่า แต่ก็ไม่สามารถลดได้หมด

3.5 สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กภายใต้การเคลื่อนที่แบบวัฏจักร พบว่ามีพฤติกรรมใกล้เคียงตัวหน่วงแบบแรงเสียดทาน โดยค่าแรงหน่วงจะมากขึ้น เมื่อกระแสไฟฟ้าความถี่ และ ระยะเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กถูกจำลองโดยขึ้นส่วนแรงเสียดทานและขึ้นส่วนความหนืดต่อขนานกัน หลังจากนั้นได้ทำการทดสอบตัวหน่วงภายใต้รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทาน แบบหนืด แบบหนืดไม่เชิงเส้น และแบบหนืดผสมแบบเสียดทานที่ปรับค่าได้ซึ่งเป็นรูปแบบที่น่าเสนอโดยรวมข้อดีของรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดกับแบบเสียดทานเข้าด้วยกัน จากผลการทดสอบพบว่าค่าแรงหน่วงที่วัดได้น้อยกว่าค่าแรงหน่วงที่ตั้ง เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวหน่วงที่ใช้ในการคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าที่ต้องการนั้นได้มาจากการทดสอบภายใต้กระแสไฟฟ้าที่คงที่แต่ในการทดสอบนี้กระแสไฟฟ้าจะไม่คงที่จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน ดังนั้นจึงต้องมีการชดเชยกระแสไฟฟ้าโดยการชดเชยค่าความต่างศักย์ที่ป้อนให้กับตัวจ่ายกระแสไฟฟ้าให้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลต่างของแรงหน่วงที่วัดได้กับแรงหน่วงที่ตั้ง จากผลการทดสอบที่ความถี่ 1 Hz พบว่าพบค่าเมื่อค่าสัดส่วนเท่ากับ 0.04 V/N สามารถลดผลต่างของแรงได้ดีที่สุด แต่ในช่วงที่ระยะเคลื่อนที่หลายๆ (ช่วงที่ความเร็วต่ำๆ) ค่าแรงหน่วงที่วัดได้จะมากกว่าค่าแรงหน่วงที่ตั้งในช่วงที่ตัวหน่วงมีการเคลื่อนที่กลับทิศโดยค่าผลต่างของแรงจะมากขึ้นเมื่อค่าสัดส่วนมากขึ้น เนื่องจากก่อนที่ตัวหน่วงจะเคลื่อนที่กลับทิศค่าแรงหน่วงที่วัดได้จะน้อยกว่าค่าแรงหน่วงที่ตั้งจึงมีการชดเชยความต่างศักย์และเนื่องจากผลของความล่าช้าการทำงานนำความเร็วและความล่าช้าของการทำงานของตัวหน่วงจึงทำให้กระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าแรงมากขึ้นในช่วงที่ตัวหน่วงมีการกลับทิศ เมื่อความถี่เป็น 2 Hz ค่าแรงที่ต่างจะมากขึ้น เพื่อที่จะแก้ปัญหาในส่วนที่แรงหน่วงที่ได้มากกว่าค่าแรงหน่วงที่ตั้งในช่วงความเร็วต่ำ จึงได้นำเสนอวิธีการแก้ปัญหา 2 วิธี คือ (1) วิธีที่ไม่ต้องมีการชดเชยความต่างศักย์เมื่อความเร็วต่ำกว่าความเร็วที่กำหนด (2) การให้กระแสไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เมื่อความเร็วต่ำกว่าความเร็วที่กำหนด ผลการทดสอบพบว่าทั้งสองวิธีสามารถลดผลเนื่องจากความล่าช้าของตัวหน่วงได้ดีที่ความถี่ 1 Hz แต่เมื่อความถี่เป็น 2 Hz พบว่าแรงหน่วงมีความแตกต่างกันซึ่งแสดงถึงข้อจำกัดของการใช้ตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กที่ความถี่สูงๆ

ตารางที่ 3.1 กรณีที่ทำการทดสอบพฤติกรรมของตัวห่วงของเหลวแม่เหล็ก
ภายใต้การเคลื่อนที่รูปแบบ Sine

ความถี่ (Hz)	ระยะเคลื่อนที่ (mm)	กระแสไฟฟ้า (mA)
0.01	7.5	0,100,200,300,400
	15	0,100,200,300,400
1.0	7.5	0,100,200,300,400
	15	0,100,200,300,400
2.0	7.5	0,100,200,300,400
	15	0,100,200,300,400
3.0	7.5	0,100,200,300,400
	12.5	0,100,200,300,400

หมายเหตุ

* ที่ความถี่เท่ากับ 3 Hz ระยะเคลื่อนที่ที่เครื่องกำเนิดแรงทำได้สูงสุดคือ 12.5 mm

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์สำหรับรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบต่างๆ

รูปแบบการควบคุมแรงหน่วง	ค่าพารามิเตอร์			การเคลื่อนที่	
	Cd (N-s/mm)	Cd _R (N-s/mm)	Fd (N)	ความถี่ (Hz)	ระยะ เคลื่อนที่ (mm)
แบบเสียดทาน	-	50	25	1	12.5
				2	12.5
แบบหนืด	0.35	-	-	1	12.5
				2	12.5
แบบหนืดไม่เชิงเส้น	0.35	-	25	1	12.5
				2	12.5
แบบหนืดผสมแบบเสียดทาน ที่ปรับค่าได้	0.35	50	25	1	5
					12.5
				2	5
					12.5

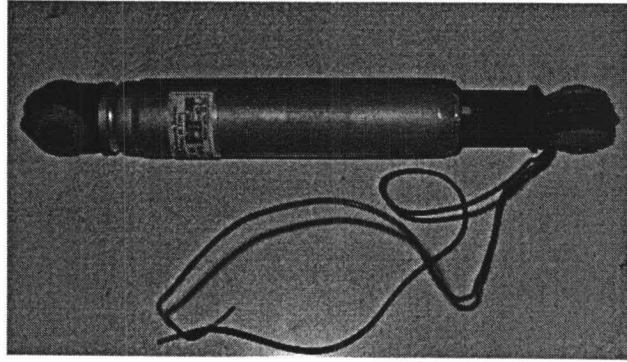
หมายเหตุ

* Cd_R คือ ค่าความชันในช่วงที่แรงกลับทิศของรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทาน ดังรูปที่ 3.14 เนื่องจากในทางปฏิบัติไม่สามารถทำให้แรงกลับทิศอย่างทันทีทันใดได้

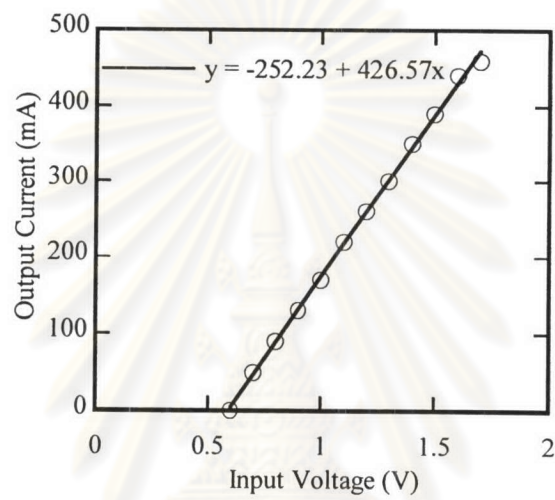
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.3 แสดงกรณีศึกษาการทดสอบการแก้ปัญหาแรงหน่วงที่วัดได้มากกว่าค่าแรงที่ตั้ง

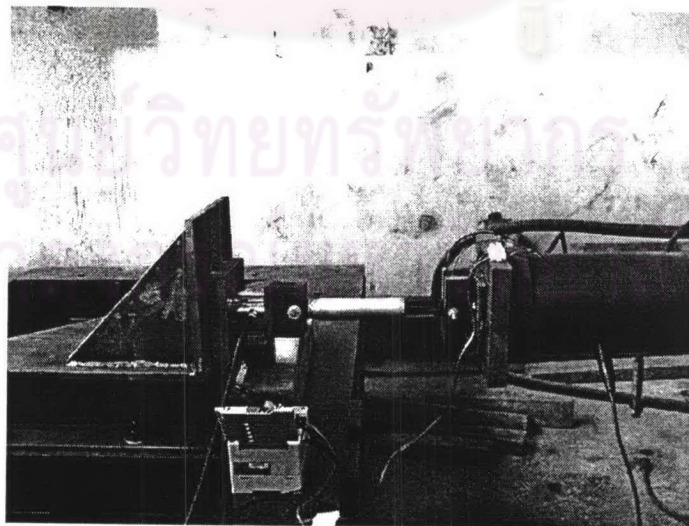
กรณีศึกษา	รูปแบบการควบคุม	ค่าพารามิเตอร์				การเคลื่อนที่		การแก้ปัญหา	
		Cd (N-s/mm)	Cd_R (N-s/mm)	Fd (N)	k (V/N)	ความถี่ (Hz)	ระยะเคลื่อนที่ (mm)	k = 0 ที่ความเร็วน้อยกว่า (mm/s)	current = 0 ที่ความเร็วน้อยกว่า (mm/s)
1	แรงเสียดทาน	50	50	25	0.02	1	12.5	10, 20, 30	10, 20, 30
2	แรงเสียดทาน	50	50	25	0.04	1	12.5	10, 20, 30	10, 20, 30
3	แรงเสียดทาน	50	50	25	0.02	2	12.5	10, 20, 30	10, 20, 30
4	แรงเสียดทาน	50	50	25	0.04	2	12.5	10, 20, 30	10, 20, 30
5	แรงหน่วงแบบหนืดผสมแรง เสียดทานที่ปรับค่าได้	0.35	50	25	0.02	2	5	10, 20, 30	10, 20, 30
6	แรงหน่วงแบบหนืดผสมแรง เสียดทานที่ปรับค่าได้	0.35	50	25	0.04	2	5	10, 20, 30	10, 20, 30
7	แรงหน่วงแบบหนืดผสมแรง เสียดทานที่ปรับค่าได้	0.6	50	50	0.04	1	12.5	10, 20, 30	10, 20, 30
8	แรงหน่วงแบบหนืดผสมแรง เสียดทานที่ปรับค่าได้	0.6	50	50	0.04	2	12.5	10, 20, 30	10, 20, 30



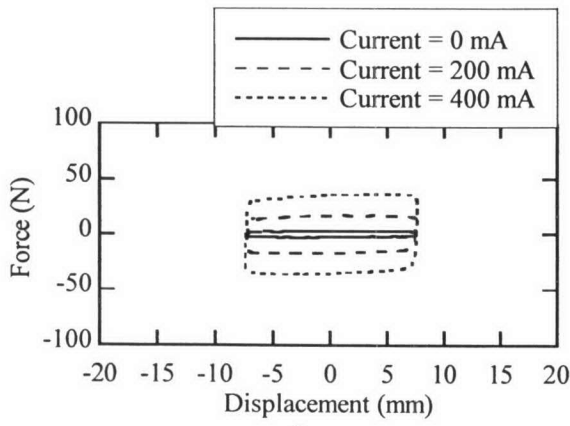
รูปที่ 3.1 ตัวหน่วยที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ที่ใส่เข้าไป
กับกระแสไฟฟ้าที่จ่ายออกมา

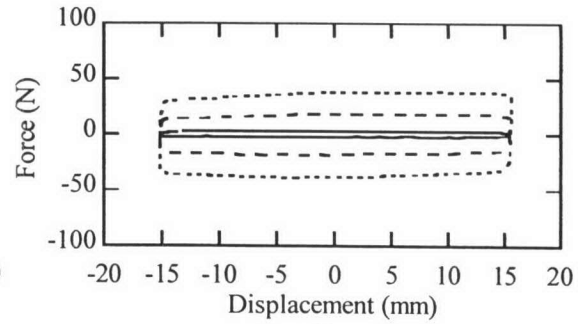


รูปที่ 3.3 การติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบ



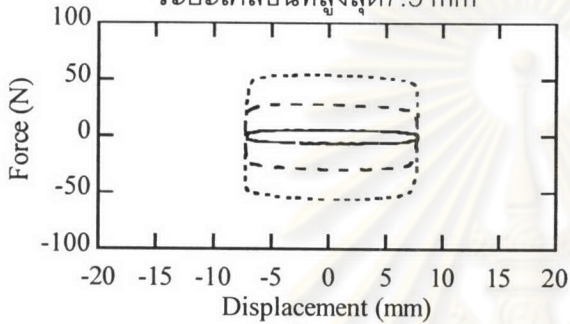
(ก) ความถี่ 0.01 Hz และ

ระยะเคลื่อนที่สูงสุด 7.5 mm



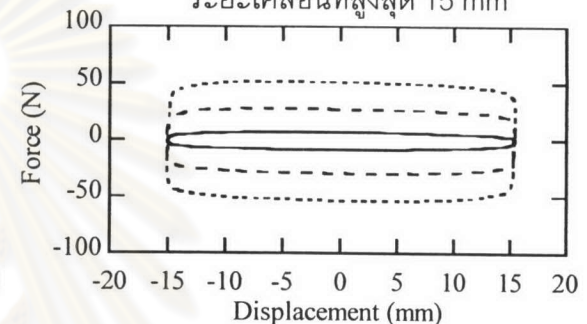
(ข) ความถี่ 0.01 Hz และ

ระยะเคลื่อนที่สูงสุด 15 mm



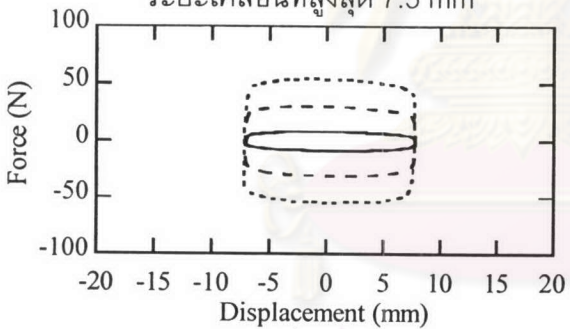
(ค) ความถี่ 1.0 Hz และ

ระยะเคลื่อนที่สูงสุด 7.5 mm



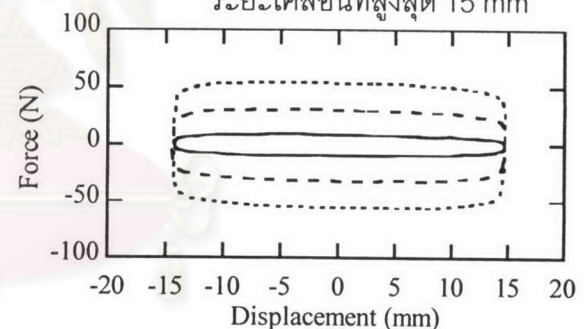
(ง) ความถี่ 1.0 Hz และ

ระยะเคลื่อนที่สูงสุด 15 mm



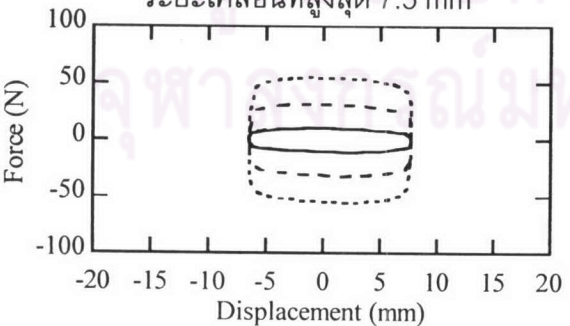
(จ) ความถี่ 2.0 Hz และ

ระยะเคลื่อนที่สูงสุด 7.5 mm



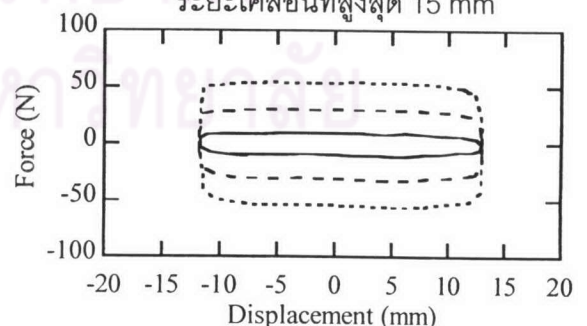
(ฉ) ความถี่ 2.0 Hz และ

ระยะเคลื่อนที่สูงสุด 15 mm



(ช) ความถี่ 3.0 Hz และ

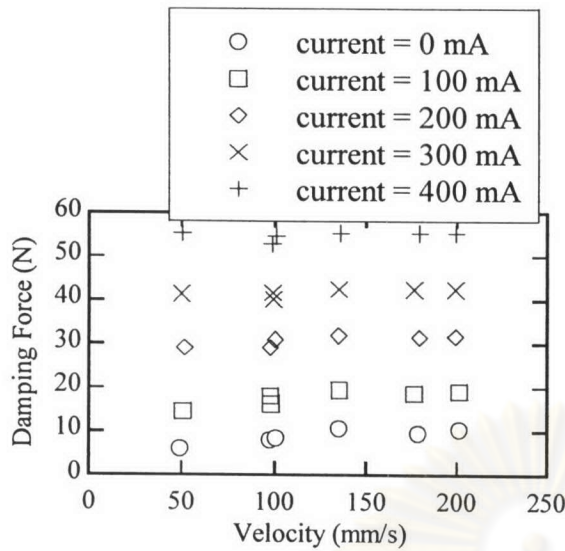
ระยะเคลื่อนที่สูงสุด 7.5 mm



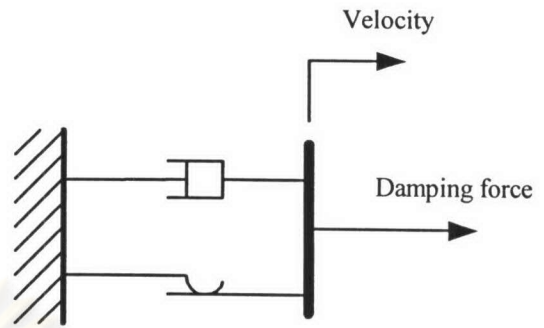
(ซ) ความถี่ 3.0 Hz และ

ระยะเคลื่อนที่สูงสุด 12.5 mm

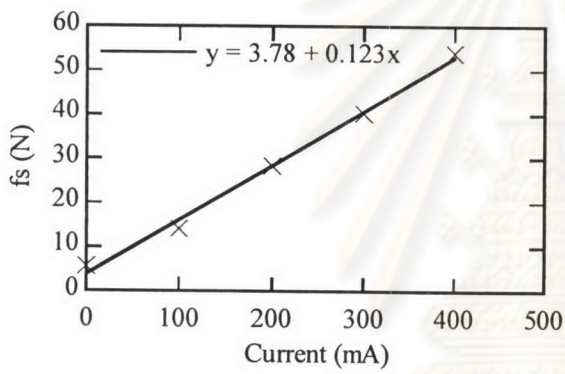
รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงกับระยะเคลื่อนที่



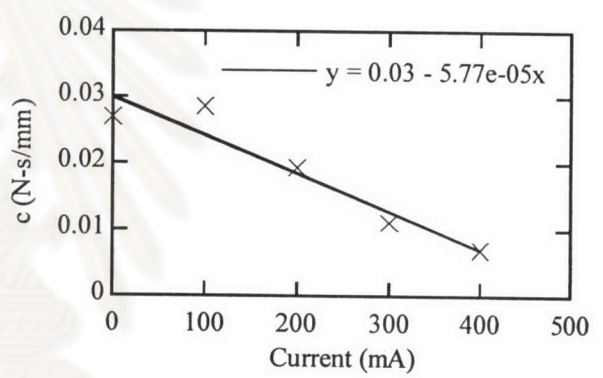
รูปที่ 3.5 แรงหน่วงสูงสุดกับความเร็วสูงสุด



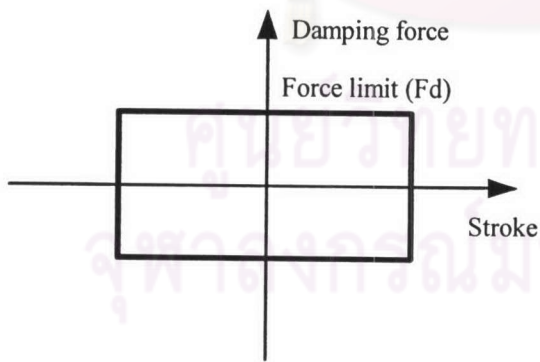
รูปที่ 3.6 แบบจำลองตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็ก



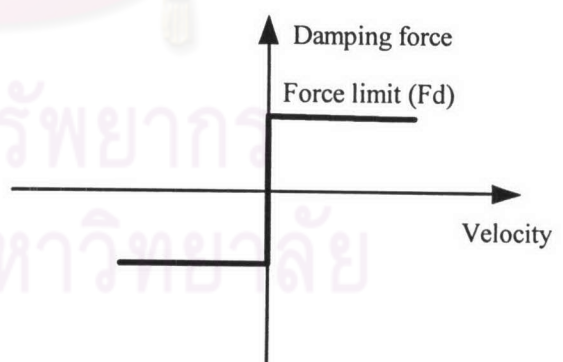
รูปที่ 3.7 แรงเสียดทานกับกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 3.8 สัมประสิทธิ์ความหน่วงกับกระแสไฟฟ้า

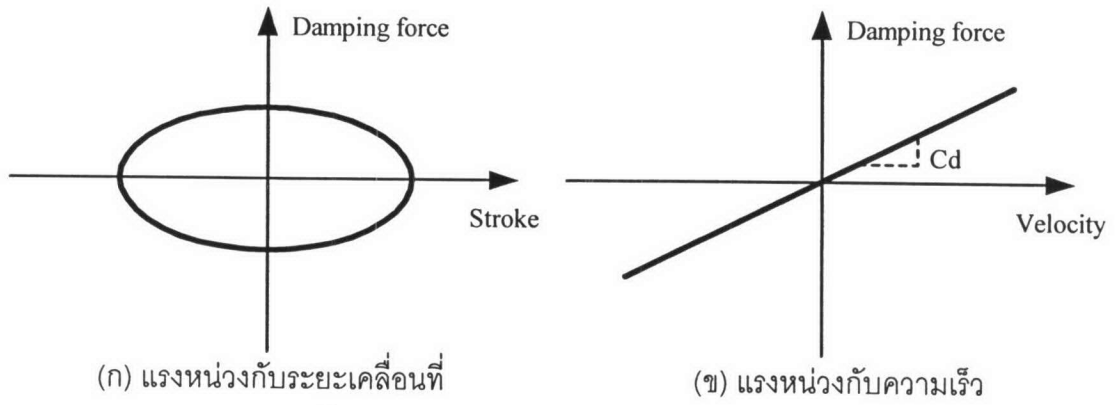


(ก) แรงหน่วงกับระยะเคลื่อนที่

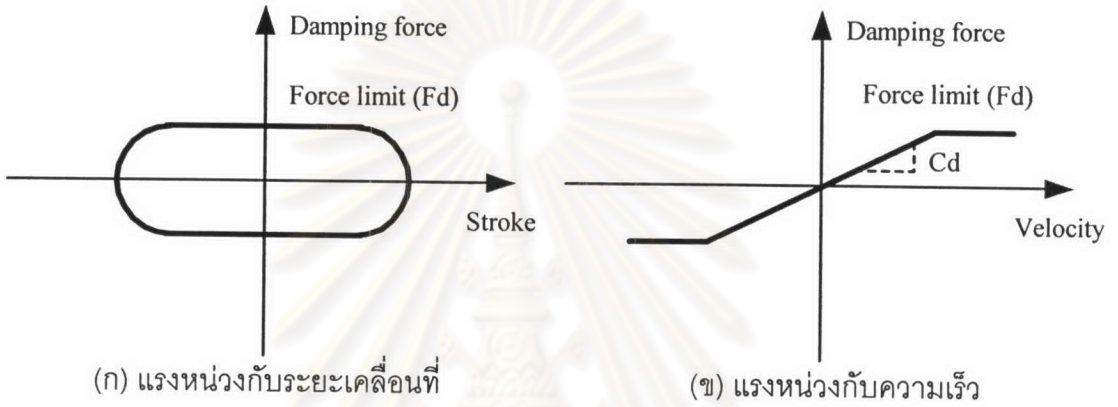


(ข) แรงหน่วงกับความเร็ว

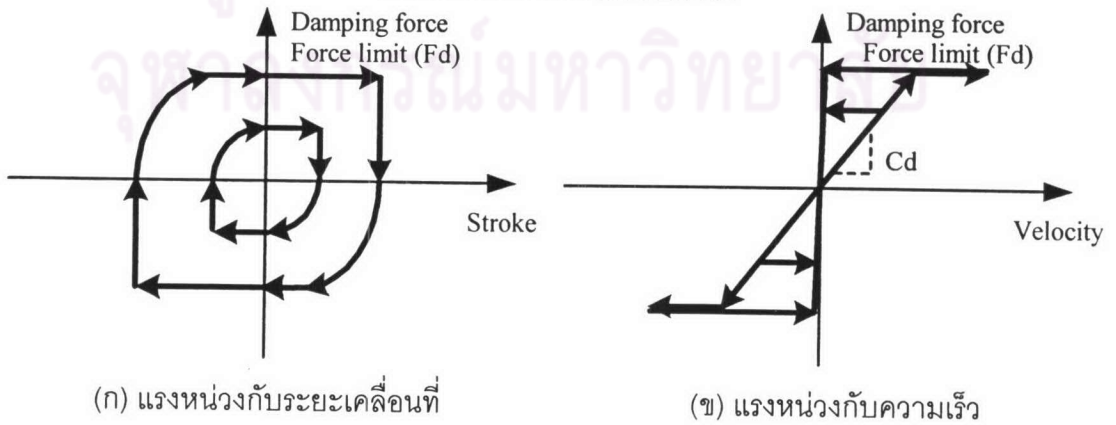
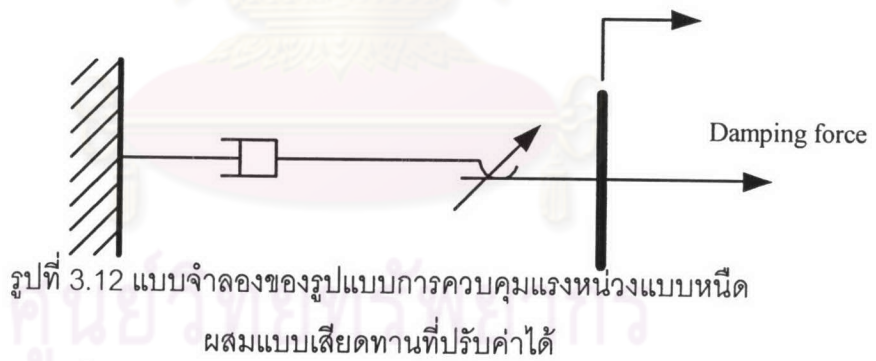
รูปที่ 3.9 รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทาน



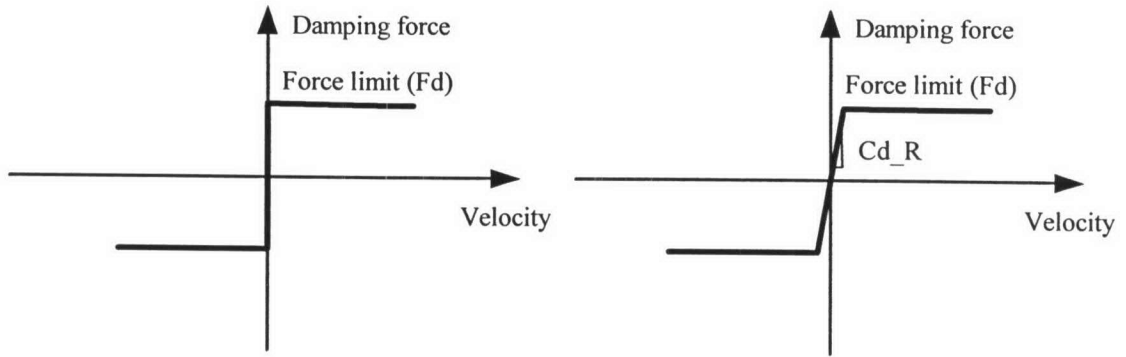
รูปที่ 3.10 รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืด



รูปที่ 3.11 รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดไม่เชิงเส้น



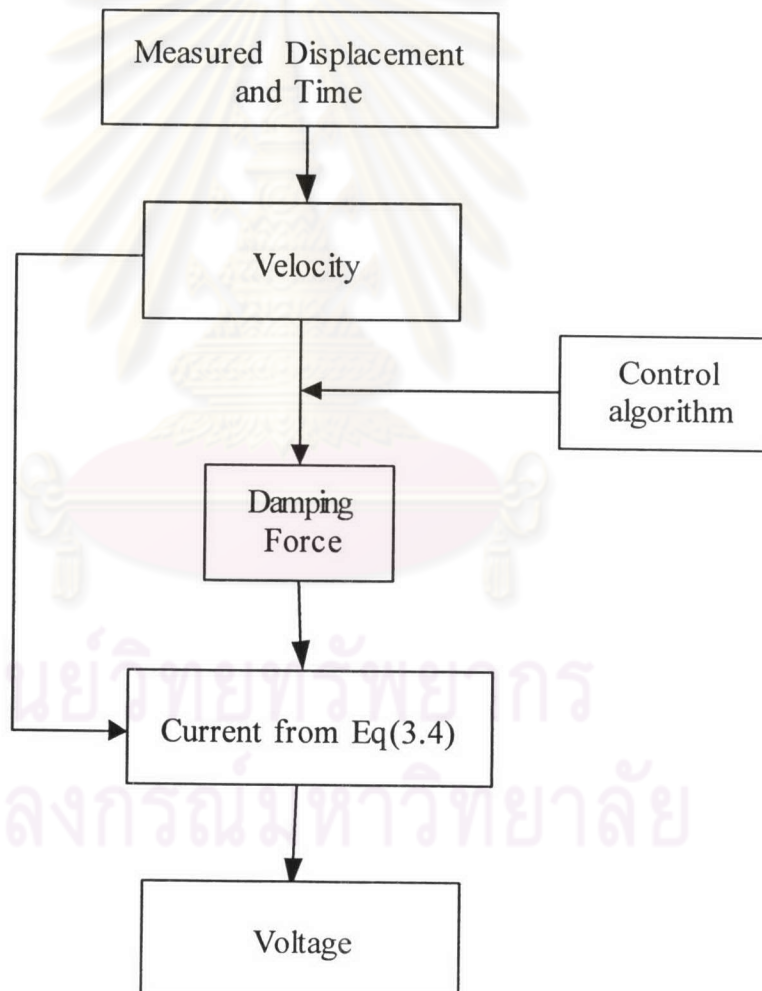
รูปที่ 3.13 รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดผสมแบบเสียดทานที่ปรับค่าได้



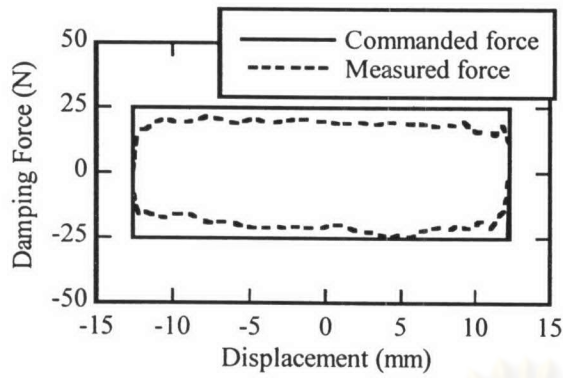
(ก) แรงหน่วงกับความเร็วในอุดมคติ

(ข) แรงหน่วงกับความเร็วในทางปฏิบัติ

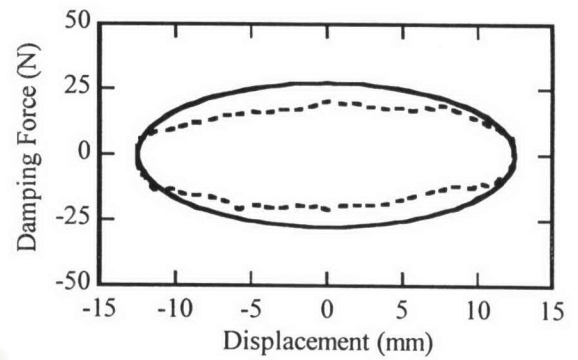
รูปที่ 3.14 รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทาน



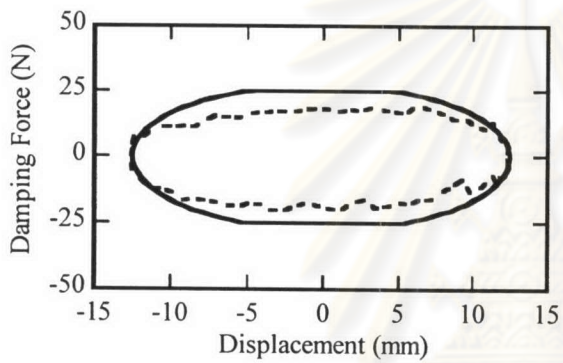
รูปที่ 3.15 แสดงหลักการทำงานของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กโดยควบคุมให้มีแรงหน่วงในรูปแบบต่างๆ



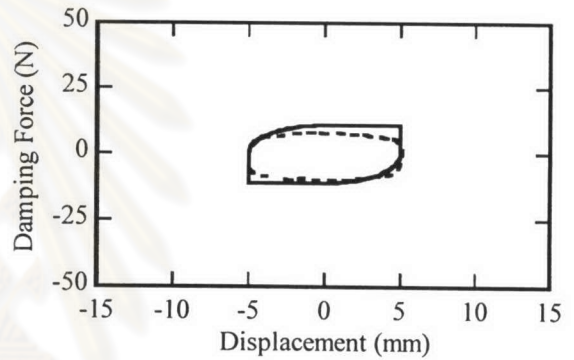
(ก) การควบคุมแรงหน่วงแบบสี่เหลี่ยม



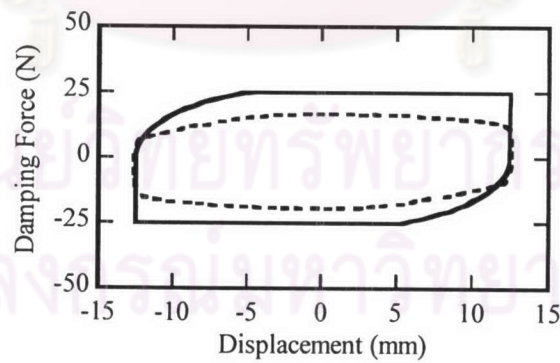
(ข) การควบคุมแรงหน่วงแบบหนึ่ง



(ค) การควบคุมแรงหน่วงแบบหนึ่งไม่เชิงเส้น

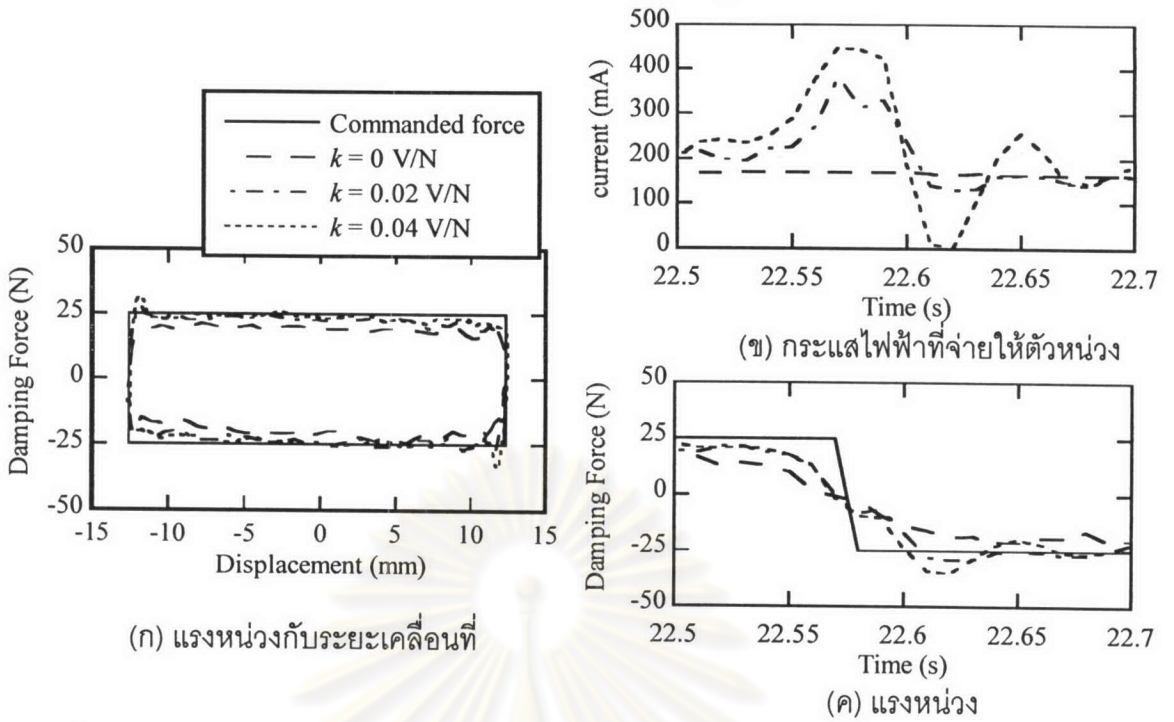


(ง) การควบคุมแรงหน่วงแบบหนึ่งผสมแบบสี่เหลี่ยมที่ปรับค่าได้เมื่อแรงน้อยกว่าแรงที่กำหนด

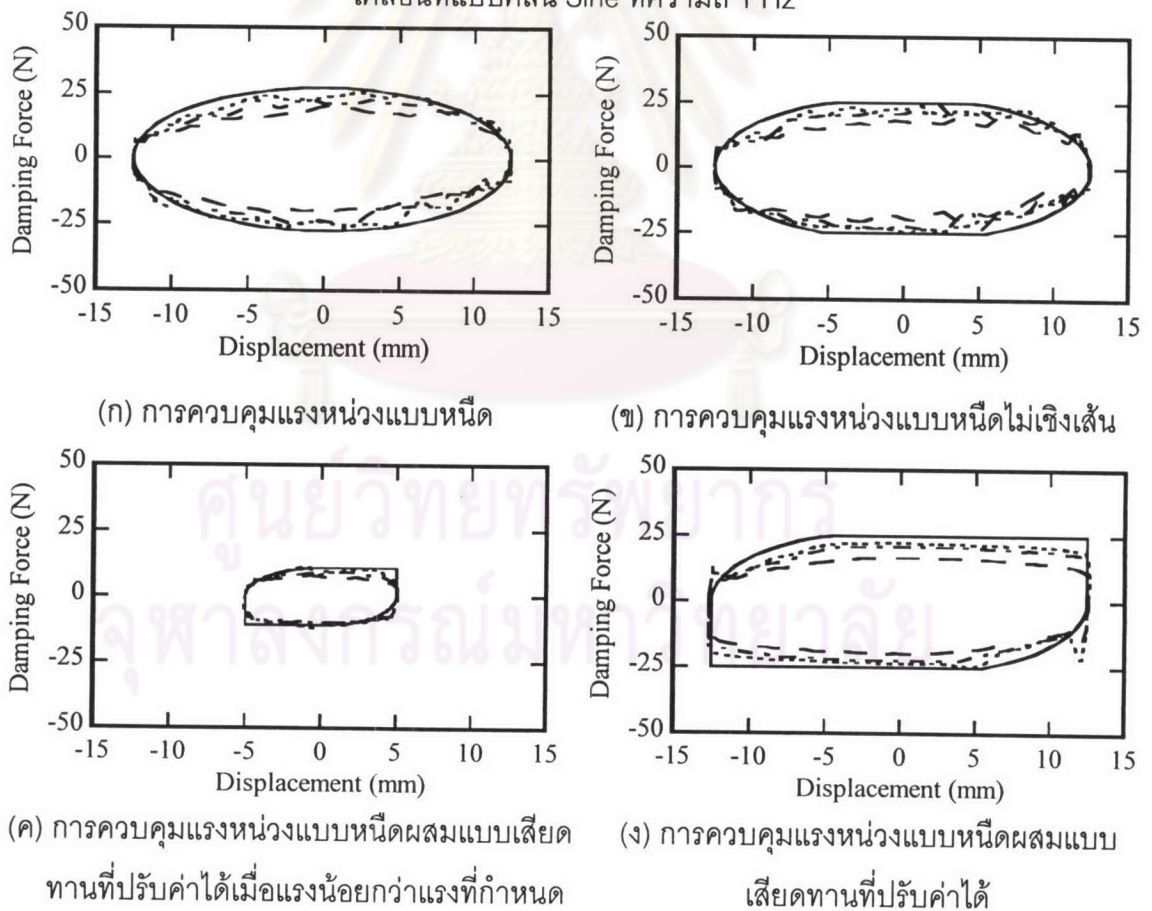


(จ) การควบคุมแรงหน่วงแบบหนึ่งผสมแบบสี่เหลี่ยมที่ปรับค่าได้

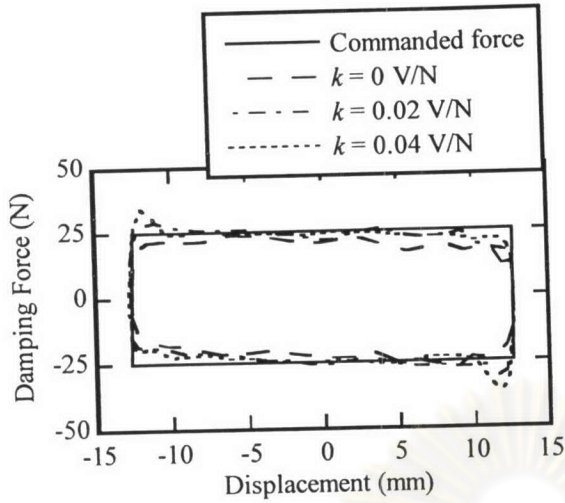
รูปที่ 3.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะเคลื่อนที่โดยเปรียบเทียบระหว่างแรงที่สั่งกับแรงที่วัดได้ของรูปแบบการควบคุมแบบต่างๆภายใต้การเคลื่อนที่แบบคลื่น Sine ที่ความถี่ 1 Hz



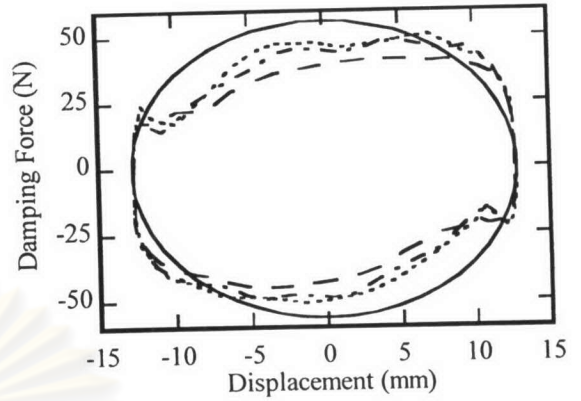
รูปที่ 3.17 แสดงผลของค่าพารามิเตอร์ k ที่มีต่อการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานภายใต้การเคลื่อนที่แบบคลื่น Sine ที่ความถี่ 1 Hz



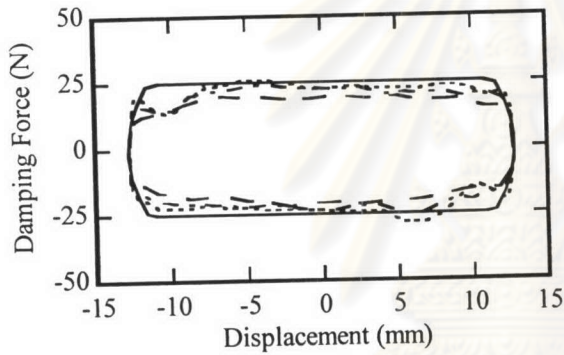
รูปที่ 3.18 แสดงผลของค่าพารามิเตอร์ k ที่มีต่อรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบต่างๆภายใต้การเคลื่อนที่แบบคลื่น Sine ที่ความถี่ 1 Hz



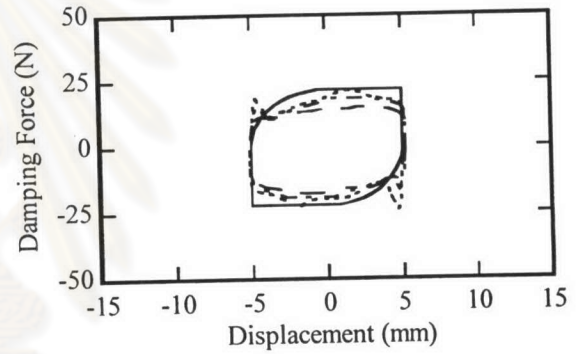
(ก) การควบคุมแรงหน่วงแบบสี่เหลี่ยม



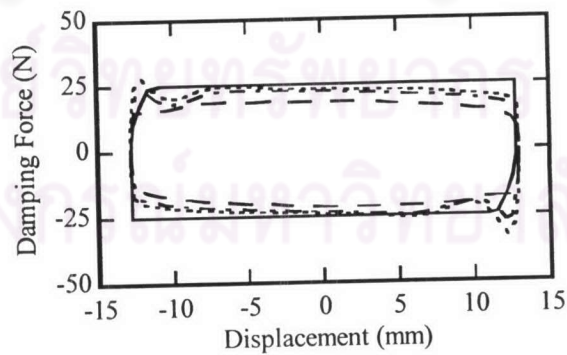
(ข) การควบคุมแรงหน่วงแบบหนึ่ง



(ค) การควบคุมแรงหน่วงแบบหนึ่งไม่เชิงเส้น

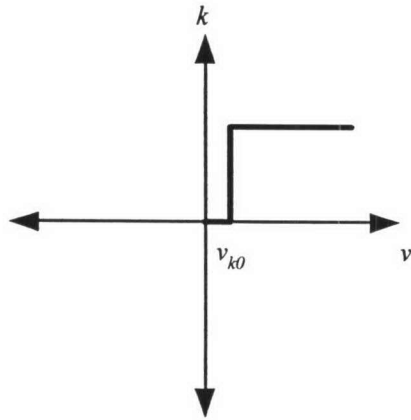


(ง) การควบคุมแรงหน่วงแบบหนึ่งผสมแบบสี่เหลี่ยมที่ปรับค่าได้เมื่อแรงน้อยกว่าแรงที่กำหนด

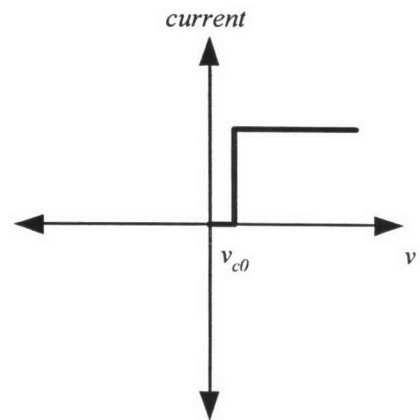


(จ) การควบคุมแรงหน่วงแบบหนึ่งผสมแบบสี่เหลี่ยมที่ปรับค่าได้

รูปที่ 3.19 แสดงผลของค่าพารามิเตอร์ k ที่มีต่อรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบต่างๆภายใต้การเคลื่อนที่แบบคลื่น Sine ที่ความถี่ 2 Hz

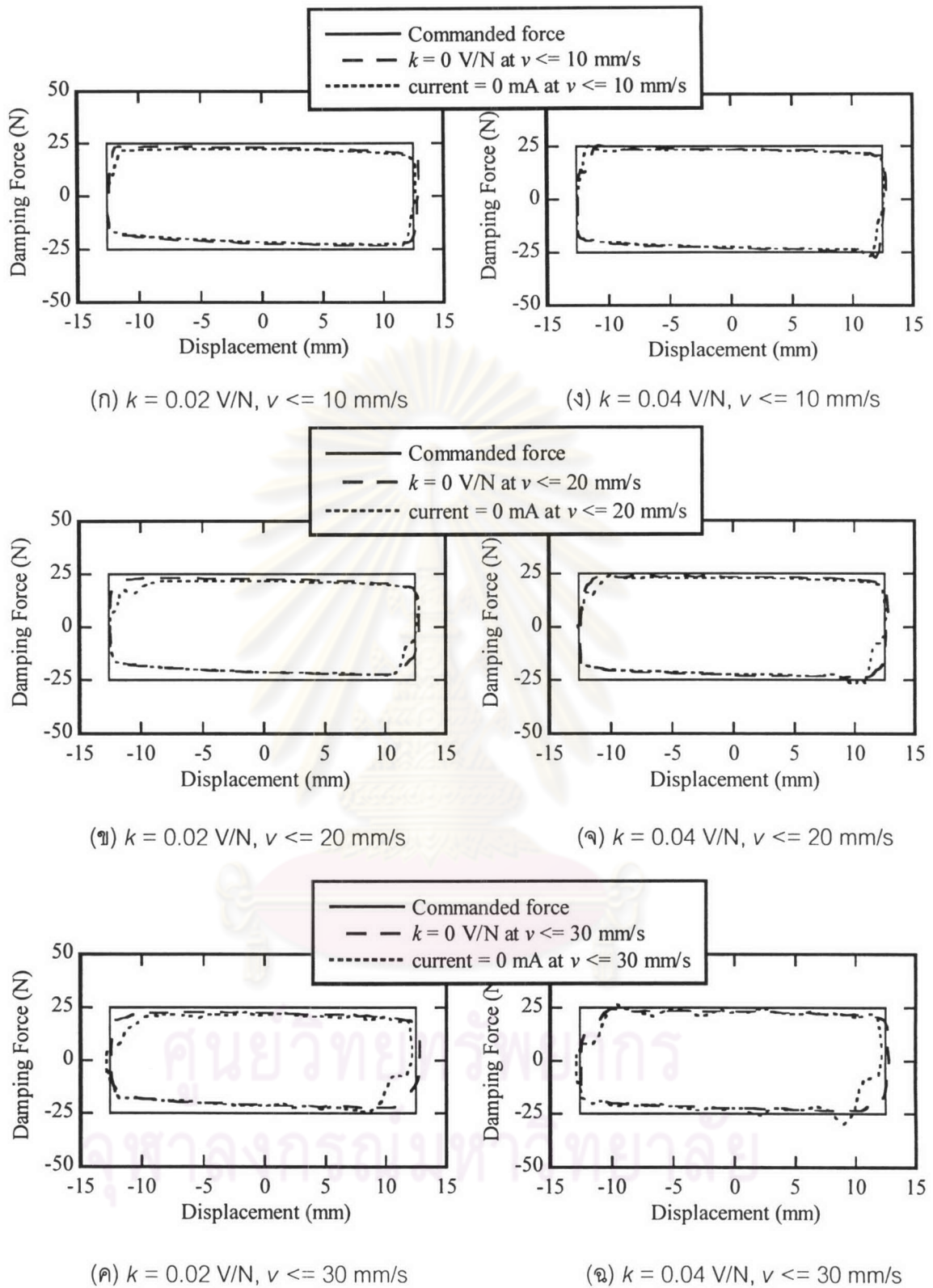


รูปที่ 3.20 วิธีที่ไม่ต้องมีการชดเชยความต่างศักย์
($k = 0$ V/N) เมื่อความเร็วต่ำกว่า v_{k0}

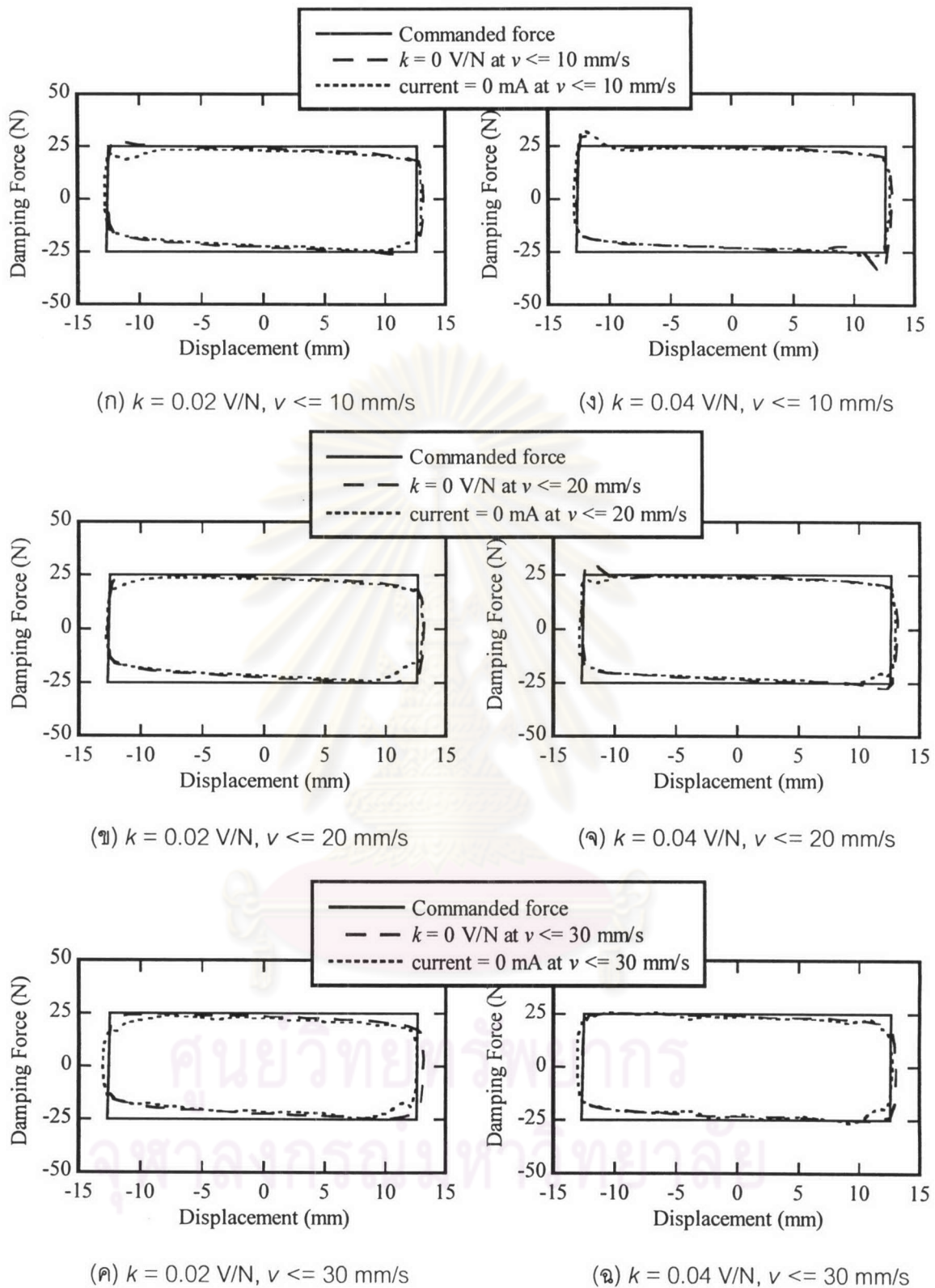


รูปที่ 3.21 วิธีที่ให้กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0
($current = 0$ mA) เมื่อความเร็วต่ำกว่า v_{c0}

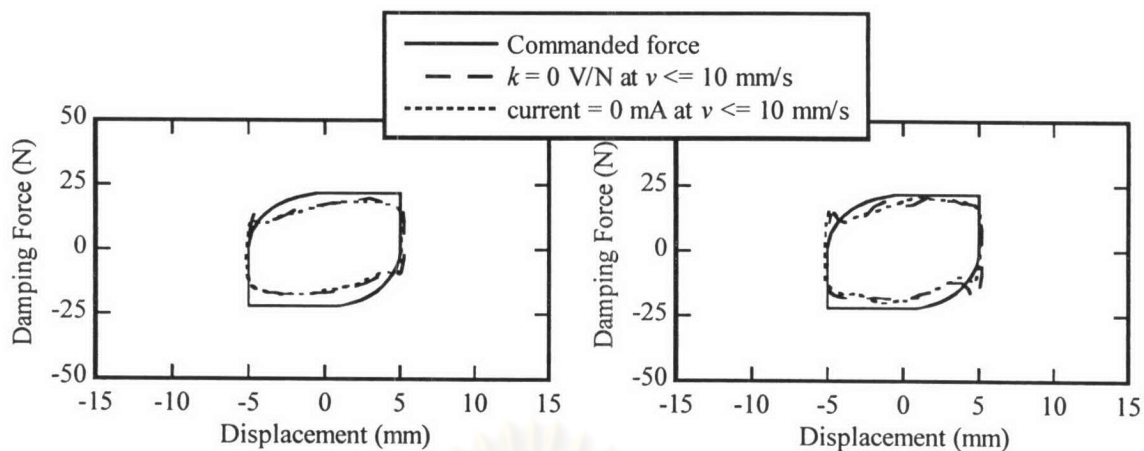
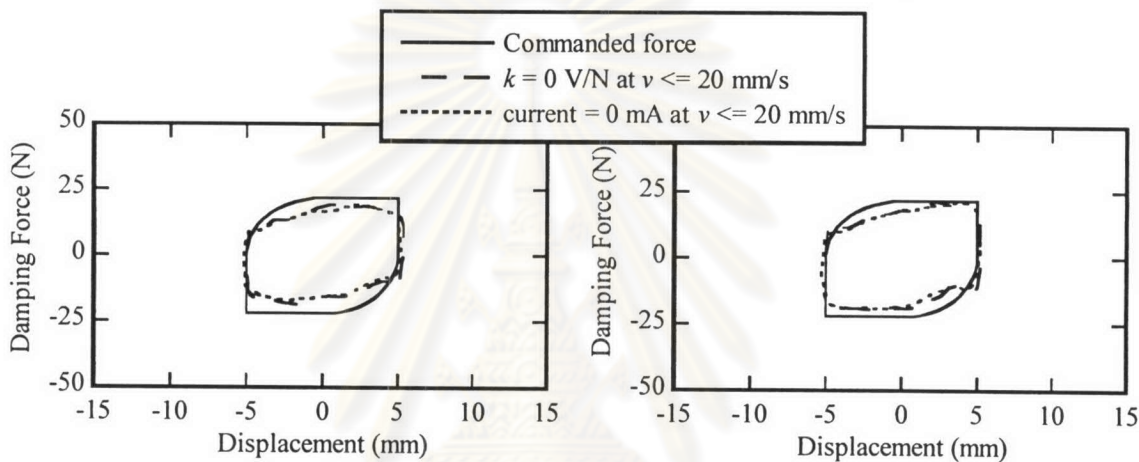
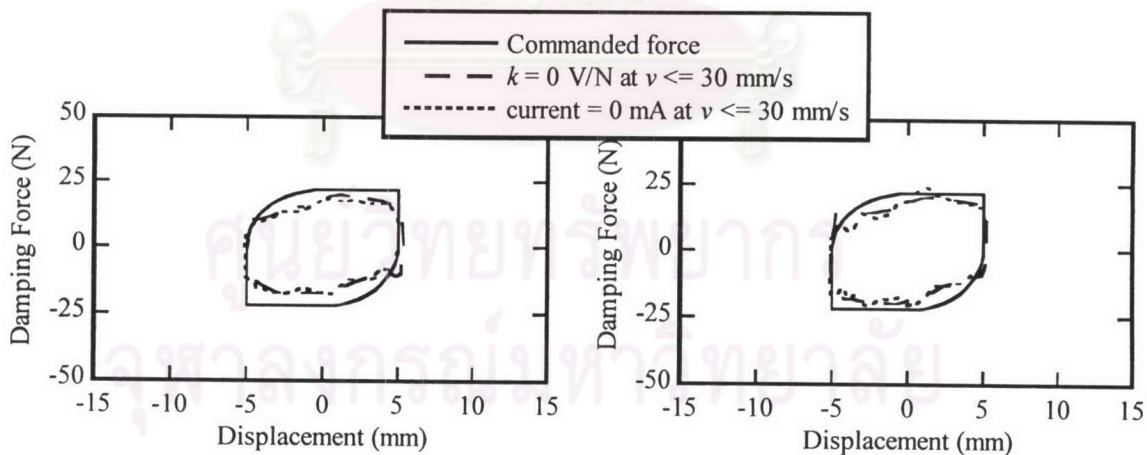
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



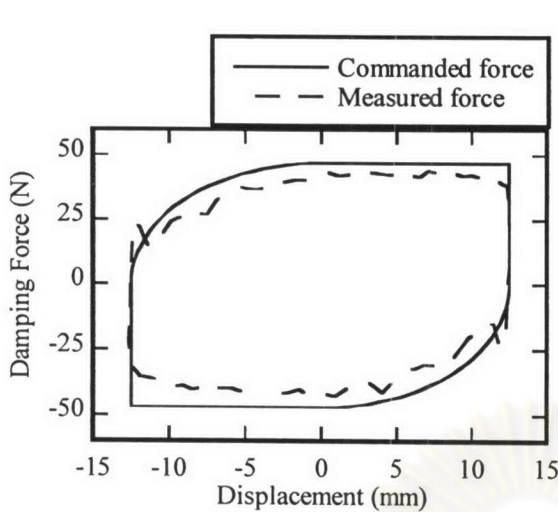
รูปที่ 3.22 การลดผลเนื่องจากความล่าช้าของตัวหน่วงของการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทาน เมื่อ $k = 0.02$ V/N และ $k = 0.04$ V/N ในช่วงที่ความเร็วมากกว่าความเร็วที่กำหนดภายใต้การเคลื่อนที่ที่มีความถี่ 1 Hz



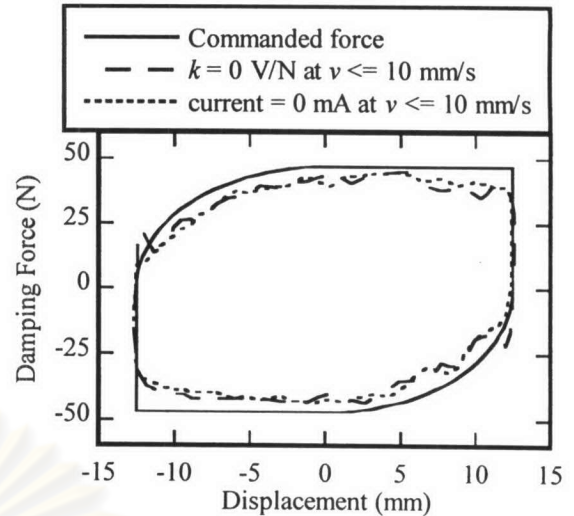
รูปที่ 3.23 การลดผลเนื่องจากความล่าช้าของตัวหน่วงของการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทาน เมื่อ $k = 0.02$ V/N และ $k = 0.04$ V/N ในช่วงที่ความเร็วมากกว่าความเร็วที่กำหนดภายใต้การเคลื่อนที่ที่ความถี่ 2 Hz

(ก) $k = 0.02$ V/N, $v \leq 10$ mm/s(ง) $k = 0.04$ V/N, $v \leq 10$ mm/s(ข) $k = 0.02$ V/N, $v \leq 20$ mm/s(จ) $k = 0.04$ V/N, $v \leq 20$ mm/s(ค) $k = 0.02$ V/N, $v \leq 30$ mm/s(ฉ) $k = 0.04$ V/N, $v \leq 30$ mm/s

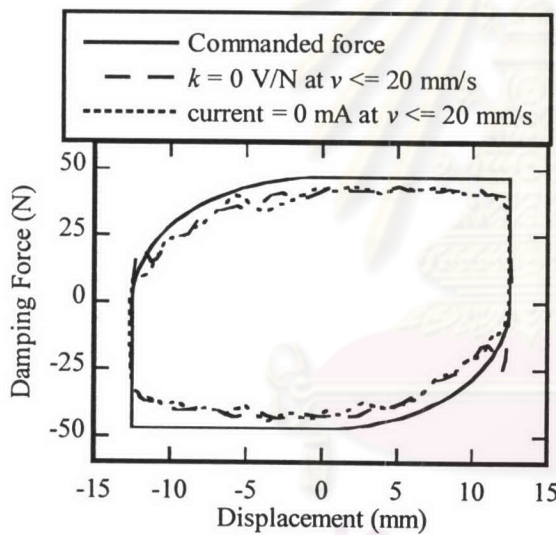
รูปที่ 3.24 การลดผลเนื่องจากความล่าช้าของตัวหน่วงของการควบคุมแรงหน่วงแบบแบบหนืดผสมแบบเสียดทานที่ปรับค่าได้เมื่อแรงน้อยกว่าค่าแรงที่กำหนดเมื่อ $k = 0.02$ V/N และ $k = 0.04$ V/N ในช่วงที่ความเร็วมากกว่าความเร็วที่กำหนดภายใต้การเคลื่อนที่ที่ความถี่ 2 Hz



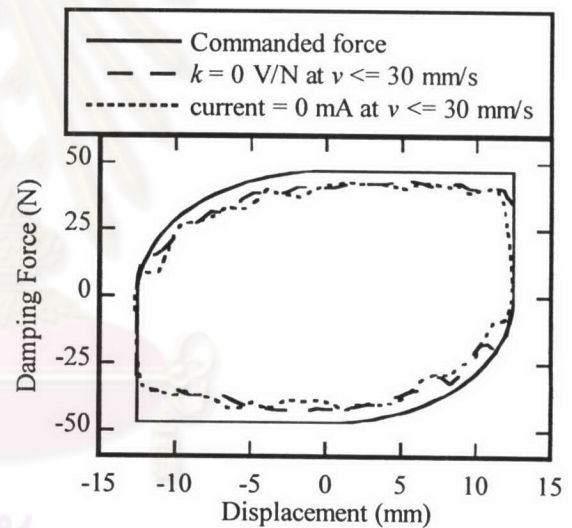
(ก) แรงที่สั่งกับแรงที่ได้ยังไม่มีการลดผล
เนื่องจากความล่าช้าของตัวหน่วง



(ข) การลดผลเนื่องจากความล่าช้าของตัวหน่วง
ในช่วงความเร็วน้อยกว่า 10 mm/s

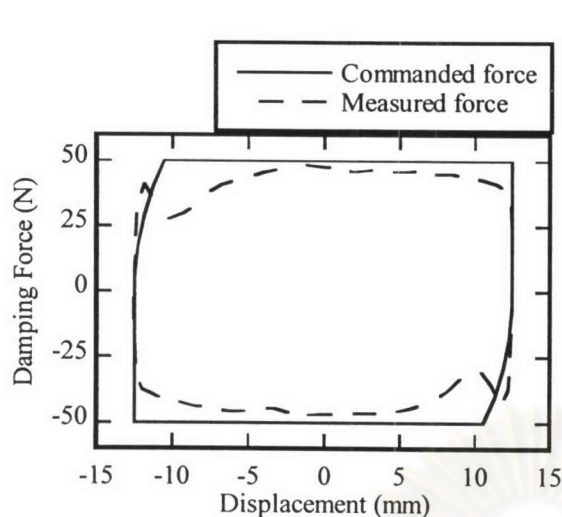


(ค) การลดผลเนื่องจากความล่าช้าของตัวหน่วง
ในช่วงความเร็วน้อยกว่า 20 mm/s

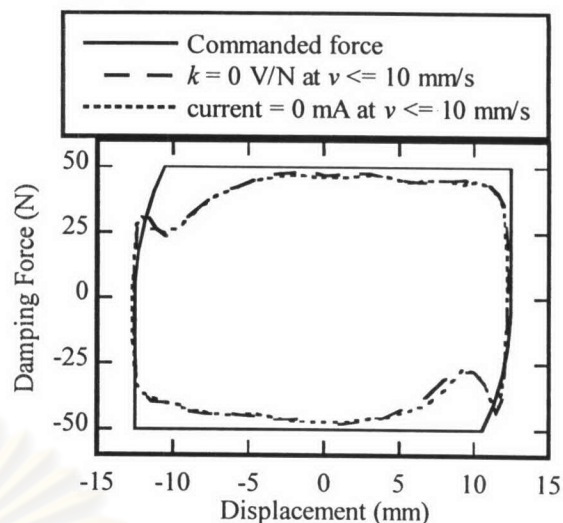


(ง) การลดผลเนื่องจากความล่าช้าของตัวหน่วง
ในช่วงความเร็วน้อยกว่า 30 mm/s

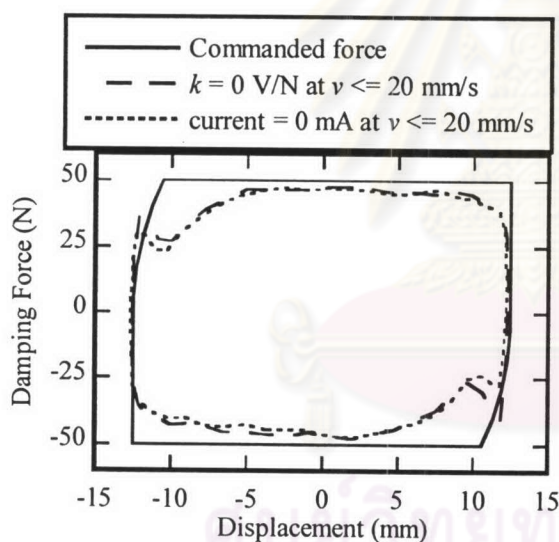
รูปที่ 3.25 การลดผลเนื่องจากความล่าช้าของตัวหน่วงของการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดผสม
แบบเสียดทานที่ปรับค่าได้โดยค่าแรงสูงสุดที่วัดได้น้อยกว่าค่าแรงที่กำหนดเมื่อ $k = 0.04$ V/N
ในช่วงที่ความเร็วมากกว่าความเร็วที่กำหนด ภายใต้การเคลื่อนที่ที่ความถี่ 1 Hz



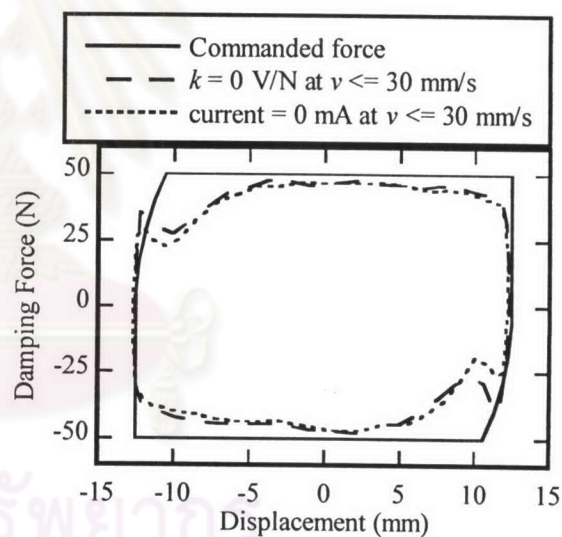
(ก) แรงที่สั่งกับแรงที่ได้ยังไม่มีการลดผล
เนื่องจากความล่าช้าของตัวหน่วง



(ข) การลดผลเนื่องจากความล่าช้าของตัวหน่วง
ในช่วงความเร็วน้อยกว่า 10 mm/s



(ค) การลดผลเนื่องจากความล่าช้าของตัวหน่วง
ในช่วงความเร็วน้อยกว่า 20 mm/s



(ง) การลดผลเนื่องจากความล่าช้าของตัวหน่วง
ในช่วงความเร็วน้อยกว่า 30 mm/s

รูปที่ 3.26 การลดผลเนื่องจากความล่าช้าของตัวหน่วงของการควบคุมแรงหน่วงแบบหนึ่งดผสมแบบเสียดทานที่ปรับค่าได้โดยค่าแรงสูงสุดที่วัดได้ถึงค่าแรงที่กำหนดเมื่อ $k = 0.04$ V/N ในช่วงที่ความเร็วมากกว่าความเร็วที่กำหนด ภายใต้การเคลื่อนที่ที่ความถี่ 2 Hz