บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

แผ่นดินไหวก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้าง ชีวิต และทรัพย์สินของผู้คนจำนวนมาก ภาคเหนือและภาคตะวันตกของประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตที่เกิดแผ่นดินไหวขนาดเล็กถึงปานกลาง ดังนั้นระบบการควบคุมโครงสร้างในการป้องกันความเสียหายที่เกิดจากแผ่นดินไหวจึงมีความสำคัญ ในขณะนี้อุปกรณ์การควบคุมโครงสร้างได้รับความสนใจและพัฒนาอย่างมากในการลดการตอบสนองของโครงสร้างภายใต้แผ่นดินไหว และมีความพยายามที่จะพัฒนาหลักการควบคุมโครงสร้างเพื่อให้สามารถใช้งานได้จริงและในขณะนี้ได้มีการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมหลายอย่างในโครงสร้างต่างๆ ซึ่งระบบควบคุมโครงสร้างจำแนกได้เป็น 3 ประเภทหลักๆ คือ

1) ระบบควบคุมแบบแพสซีฟ (Passive control system) เป็นระบบที่ติดตั้งเข้ากับโครงสร้างหลักเพื่อควบคุมการสั่นสะเทือนของโครงสร้างหลัก ระบบนี้จะสลายพลังงาน (energy dissipation) ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างหลัก ระบบที่มีลักษณะเป็นแบบแพสซีฟนี้เป็นระบบที่อุปกรณ์ต่างๆมีค่าพารามิเตอร์คงที่ไม่มีการปรับหรือเปลี่ยนแปลงไปตามการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น ดังนั้นระบบนี้จะมีประสิทธิภาพสูงหากสภาพการทำงานเป็นไปตามการออกแบบและคาดการณ์ไว้ก่อนการติดตั้ง

2) ระบบควบคุมแบบแอคทีฟ (Active control system) เป็นระบบที่มีการใช้แรงหรือพลังงานภายนอกมากระทำต่อโครงสร้างโดยตรง โดยขนาดและทิศทางของแรงที่ให้กับโครงสร้างนี้ต้องมีค่าเหมาะสมกับขนาดและทิศทางของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น วิธีการดังกล่าวนี้จะทำให้การสั่นสะเทือนของโครงสร้างลดลงได้เป็นอย่างมากแต่ต้องใช้พลังงานจำนวนมากด้วย ซึ่งอาจทำได้ยากหากโครงสร้างมีขนาดใหญ่หรือมีการสั่นสะเทือนในระดับรุนแรง นอกจากนี้ยังมีปัญหาเกี่ยวกับความเสถียรภาพของโครงสร้าง

3) ระบบควบคุมแบบเซมิแอคทีฟ (Semi-active control system) เป็นระบบที่นำส่วนดีของทั้งระบบควบคุมแบบแพสซีฟและแบบแอคทีฟมารวมกัน โดยระบบที่ติดตั้งนี้ไม่ใช่ระบบที่ตายตัว

แต่มีการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบได้โดยอาศัยพลังงานเพียงเล็กน้อยเท่านั้น นอกจากนี้โครงสร้างยังมีเสถียรภาพ

เมื่อเปรียบเทียบทั้งสามระบบที่กล่าวมาจะพบว่าระบบควบคุมแบบเซมิแอคทีฟมีความน่าสนใจที่นำมาใช้ในทางปฏิบัติ ทั้งนี้เพราะเป็นระบบที่สามารถทำการปรับตัวเองให้เหมาะสมกับสภาพการสั่นสะเทือนขณะใดๆ ของโครงสร้างหลักโดยอาศัยพลังงานไฟฟ้าเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับระบบควบคุมแบบแอคทีฟ และไม่ทำให้โครงสร้างเสียเสถียรภาพ ตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กเป็นอุปกรณ์ควบคุมแบบเซมิแอคทีฟชนิดหนึ่งซึ่งได้รับความสนใจอย่างมากเพราะเป็นอุปกรณ์ที่มีศักยภาพและความน่าเชื่อถือมากในการทำงานเพราะสามารถแปรเปลี่ยนแรงได้ในเวลาไม่กี่มิลลิวินาทีโดยใช้ความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้เมื่ออุปกรณ์การควบคุมไม่สามารถทำงานได้ตามปกติก็จะมีสภาพเป็นตัวหน่วงแบบแพสซีฟ

ความเป็นจริงเมื่อเกิดแผ่นดินไหวโครงสร้างอาจจะเกิดความเสียหายขึ้นที่เสา คาน หรือ ข้อต่อ ซึ่งมีพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้น ฉะนั้นการควบคุมโครงสร้างต้องพิจารณาโครงสร้างที่จะเป็นจริงภายใต้แผ่นดินไหว ดังนั้นจึงควรใช้วิธีการควบคุมที่สามารถควบคุมพฤติกรรมไม่เชิงเส้นได้อย่างง่ายซึ่งวิธีหนึ่งที่เหมาะสม คือ วิธีที่กำหนดความสัมพันธ์ระหว่างความหน่วงกับการตอบสนองไว้ล่วงหน้า (preset variable damper) ในการทำงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบการควบคุมการสั่นสะเทือนของแบบจำลองอาคารภายใต้แผ่นดินไหวโดยใช้ตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กเป็นอุปกรณ์ในการควบคุม ซึ่งพิจารณาพฤติกรรมของโครงสร้างที่ไม่เชิงเส้นและทำการวิเคราะห์อาคารที่ควบคุมด้วยตัวหน่วง

1.2 งานวิจัยในอดีต

Spencer และคณะ (ค.ศ. 1997) ได้เสนอแบบจำลองของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กต้นแบบดังรูปที่ 1.1 และรูปที่ 1.2 แบบจำลองประกอบด้วย แบบจำลอง Bouc-Wen ซึ่งแทนพฤติกรรมแบบวัฏจักรโดยที่ k_1 แทนสติฟเนสของ accumulator, c_0 แทนสัมประสิทธิ์ความหน่วงที่ความเร็วมากๆ, c_1 แทนสัมประสิทธิ์ความหน่วงที่ความเร็วน้อยๆ, k_0 แทนสติฟเนสที่ความเร็วมาก และเปรียบเทียบกับผลการทดลองซึ่งพบว่าสามารถบรรยายพฤติกรรมของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กต้นแบบได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยให้ค่าที่ถูกต้องอยู่ในช่วงกว้างของสภาพการทำงานและเพียงพอสำหรับการออกแบบการควบคุมและการวิเคราะห์ผล

Dyke และคณะ (ค.ศ. 1996) ได้ศึกษาการควบคุมตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กเพื่อลดการตอบสนองของโครงสร้างภายใต้แผ่นดินไหว โดยใช้ทฤษฎีการควบคุมแบบ clipped-optimal control โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากความเร่ง โดยมีสมมติฐานว่าพฤติกรรมโครงสร้างอยู่ในช่วงเชิงเส้น ได้ทำการวิเคราะห์เชิงตัวเลข โดยการใช้แบบจำลองตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กซึ่งเสนอโดย Spencer และคณะ (ค.ศ. 1996) ในการควบคุมแบบจำลองอาคาร 3 ชั้น โดยติดตั้งตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กที่ชั้นล่างดังรูปที่ 1.3 และเปรียบเทียบผลที่ได้กับ เมื่อไม่มีการควบคุม เมื่อควบคุมแบบแพสซีฟโดยจ่ายค่าความต่างศักย์ 0 V และ 2.25 V เมื่อควบคุมแบบ clipped-optimal control และเมื่อควบคุมแบบแอคทีฟ ซึ่งจากผลการทดลองจะได้ว่า การควบคุมแบบ clipped-optimal control ให้ค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์สูงสุดที่ชั้น 3 และค่าความเร่งสูงสุดน้อยกว่าแบบแพสซีฟ และให้ค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์สูงสุดน้อยกว่าการควบคุมแบบแอคทีฟในขณะที่ต้องการพลังงานที่น้อยกว่า

J.N. Yang และคณะ (ค.ศ. 1996) ศึกษาการควบคุมโครงสร้างโดยใช้วิธี sliding-mode control สำหรับควบคุมอาคารตั้งบนแบริ่งชนิดเลื่อนได้ (Sliding bearing) ทำให้โครงสร้างทั้งระบบมีพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งเป็นผลจากแรงเสียดทาน นอกจากนี้ในการวิเคราะห์พิจารณาว่าติดตั้งอุปกรณ์วัดสัญญาณบางจุด ในการศึกษาได้ทำการวิเคราะห์เชิงตัวเลขอาคารสูง 8 ชั้น ซึ่งผลที่ได้คือ (1) วิธีการควบคุมนี้มีความคงทนต่อความไม่แน่นอนของค่าพารามิเตอร์ของอาคาร (2) การควบคุมที่วัดสัญญาณป้อนกลับบางจุดพบว่าให้ผลใกล้เคียงกับการควบคุมที่วัดสัญญาณป้อนกลับทุกจุด (full-state feedback) จากนั้นได้ทำการทดลองแบบจำลองอาคารสูง 3 ชั้นทดสอบบนเครื่องจำลองแผ่นดินไหว (shaking table) พบว่าพฤติกรรมของโครงสร้างจริงภายใต้การควบคุมค่อนข้างต่างกับการวิเคราะห์เนื่องจากพลศาสตร์ของเครื่องกำเนิดแรง (actuator dynamics) ปฏิสัมพันธ์ระหว่างเครื่องกำเนิดแรงกับโครงสร้าง (actuator-structure interaction) และเวลาที่ล่าช้า (time delay)

Kurata และคณะ (ค.ศ. 1996) ได้เสนอการนำระบบตัวหน่วงแบบเซมิแอคทีฟมาประยุกต์ใช้ครั้งแรกกับอาคารจริงโดยตัวหน่วงแบบไฮโดรลิกเซมิแอคทีฟสามารถทำให้เกิดแรงหน่วงได้ 1,000 kN โดยใช้พลังงานไฟฟ้า 70 W และเนื่องจากมีขนาดกระทัดรัดจึงสามารถติดตั้งได้หลายตัวในอาคารหนึ่งๆ ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะควบคุมการตอบสนองของอาคารในขณะที่มีแผ่นดินไหวรุนแรงเพราะสามารถทำให้เกิดแรงควบคุมมากโดยใช้พลังงานเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับระบบควบคุมแบบแอคทีฟ อาคารที่ติดตั้งเป็นสำนักงานสูง 5 ชั้นเป็นโครงเหล็กติดตั้งอุปกรณ์วัดสัญญาณความเร็วในแต่ละชั้น อาคารถูกจำลองเป็นระบบรวมมวล (lumped

mass system) ในการควบคุมโครงสร้างใช้ทฤษฎี optimal control โดยใช้สัญญาณป้อนกลับจากความเร็ว ผลการวิเคราะห์การตอบสนองของอาคารภายใต้แผ่นดินไหวต่างๆปรากฏว่าพฤติกรรมของโครงสร้างอยู่ในช่วงเชิงเส้น แสดงให้เห็นว่าการควบคุมโดยตัวหน่วงแบบไฮโดรลิกเซมิแอคทีฟช่วยป้องกันความเสียหายในขณะที่เกิดแผ่นดินไหวรุนแรง แล้วทำการทดสอบตัวหน่วงแบบไฮโดรลิกเซมิแอคทีฟโดยให้แรงกระทำสลับทิศทาง ผลที่ได้ใกล้เคียงกับค่าที่นำมาใช้เป็นค่าในการออกแบบ การทดสอบหาความสามารถในการควบคุมโดยใช้การตอบสนองที่ถูกจำลอง แสดงให้เห็นว่าแรงหน่วงที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่สั่งและผลการทดสอบทางพลศาสตร์ของตัวหน่วงแบบไฮโดรลิกเซมิแอคทีฟจริงๆ

Pinkaew และ Fujino (ค.ศ. 2001) ศึกษาประสิทธิภาพการควบคุมของมวลหน่วงปรับค่าแบบเซมิแอคทีฟภายใต้การเคลื่อนตัวที่ฐานแบบฮาโมนิค โดยใช้ทฤษฎี optimal control ในการหาค่าความหน่วงของตัวหน่วง โดยมีค่าความหน่วงแปรเปลี่ยนในช่วงหนึ่ง และใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขประเมินการตอบสนองของโครงสร้างที่มีระดับขั้นความเสรีเดียวที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าแบบเซมิแอคทีฟ จากผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าแบบเซมิแอคทีฟกับมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟในการควบคุมระยะเคลื่อนที่ (displacement) ในช่วงแปรปรวน (transient) และช่วงคงที่ (steady state) พบว่าภายใต้การเคลื่อนตัวที่ฐานแบบฮาโมนิค การลดการสั่นสะเทือนโดยมวลหน่วงปรับค่าแบบเซมิแอคทีฟให้ผลดีกว่าโดยมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟทั้งในการควบคุมระยะเคลื่อนที่ (displacement) ในช่วงแปรปรวนและช่วงคงที่ ซึ่งการลดลงเทียบได้กับการใช้มวลหน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟที่มีมวลเพิ่มขึ้นเป็น 4 เท่า

Ruangrassamee และ Kawashima (ค.ศ. 2001) ศึกษาประสิทธิภาพของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กในการควบคุมแบบจำลองสะพานโดยใช้ระบบควบคุมแบบเซมิแอคทีฟ โดยทำการทดสอบหาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กโดยให้การเคลื่อนที่แบบวัฏจักร โดยเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ ขนาดของการเคลื่อนที่ และระดับกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็ก โดยแรงหน่วงถูกจำลองด้วยแบบจำลองซึ่งประกอบด้วยชิ้นส่วนที่ให้แรงเสียดทานและชิ้นส่วนที่มีความหนืดต่อขนานกัน ได้มีการควบคุม 2 แบบ ซึ่งมีการเปลี่ยนแรงหน่วงตามการเคลื่อนที่หรือความเร็ว จากผลการทดสอบพบว่าตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กสามารถให้แรงหน่วงได้ตามที่ต้องการ และได้ทำการทดสอบแบบจำลองสะพานซึ่งติดตั้งตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็ก โดยใช้เครื่องจำลองแผ่นดินไหว (shaking table) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของวิธีการควบคุม หลังจากนั้นได้เปรียบเทียบการตอบสนองเชิงพลศาสตร์ของแบบจำลองสะพานซึ่งได้จาก

การทดลองกับการตอบสนองซึ่งได้จากการวิเคราะห์ จากความสัมพันธ์แสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์สามารถทำนายการตอบสนองของสะพานแบบไม่เชิงเส้นได้ใกล้เคียง

Yi และ คณะ (ค.ศ. 2001) ได้ทำการศึกษาความสามารถของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กหลายตัวสำหรับการควบคุมโครงสร้างภายใต้แผ่นดินไหวโดยทำการทดสอบและวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างสูง 6 ชั้น ซึ่งติดตั้งตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กจำนวน 4 ตัว สำหรับใช้ควบคุมการสั่นสะเทือนภายใต้การเคลื่อนตัวที่ฐาน โดย 2 ตัวติดตั้งระหว่างฐานและพื้นชั้น 1 และอีก 2 ตัวติดตั้งระหว่างพื้นชั้น 1 และพื้นชั้น 2 โดยการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเร่งที่พื้นทั้ง 6 ชั้น ในแบบจำลองอาคารเพื่อใช้ในการควบคุม และมีการติดตั้งเครื่องวัดแรงโดยต่ออนุกรมกับตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กหนึ่งตัวในแต่ละชั้นเพื่อใช้ในการวัดแรงที่ควบคุมโครงสร้าง นอกจากนี้มีการติดตั้ง LVDT 2 ตัว เพื่อวัดระยะเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของฐานกับพื้นชั้น 1 และการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของพื้นชั้น 1 กับพื้นชั้น 2 ดังรูปที่ 1.4 และได้ทำการทดสอบหาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กโดยให้การเคลื่อนที่แบบวัฏจักรโดยเปลี่ยนแปลงขนาดของการเคลื่อนที่ และความต่างศักย์ที่ป้อนให้กับตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กหลังจากนั้นมีการเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กและทำการตรวจสอบ ส่วนแบบจำลองของโครงสร้างก็ใช้แบบจำลองแบบรวมมวล (lumped mass model) แต่ปรับค่าพารามิเตอร์โดยใช้ค่าความถี่ที่ได้จากการทดลอง หลังจากนั้นก็ทำการรวมแบบจำลองของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กและแบบจำลองของโครงสร้างเป็นแบบจำลองของระบบ ในการศึกษาได้มีการใช้ 2 วิธีการควบคุมแบบเซมิแอคทีฟคือ Lyapunov และ Clipped-optimal control โดยมีสมมติฐานว่าแรงที่ใช้ในการควบคุมโครงสร้างเพียงพอที่จะทำให้พฤติกรรมโครงสร้างอยู่ในช่วงเชิงเส้นโดยการทดลองใช้คลื่นแผ่นดินไหว El Centro โดยปรับความเข้มเป็น 3 ระดับ จากผลการทดลองพบว่ามีประสิทธิภาพการใช้งานที่ดี และการตอบสนองที่ได้จากระบบควบคุมแบบเซมิแอคทีฟดีกว่าระบบแพสซีฟ

1.3 วัตถุประสงค์

งานวิจัยครั้งนี้ได้ดำเนินการโดยมีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

1.3.1 เพื่อพัฒนารูปแบบการแปรเปลี่ยนแรงหน่วงที่เหมาะสม สำหรับการควบคุมโครงสร้างที่มีความไม่เป็นเชิงเส้น

1.3.2 เพื่อพัฒนาตัวหน่วงปรับค่าได้โดยใช้ตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็ก

1.3.3 เพื่อประเมินประสิทธิผลของตัวหน่วงปรับค่าได้ ในการลดผลตอบสนองของอาคารภายใต้แผ่นดินไหวโดยการทดลองและวิเคราะห์

1.4 ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยครั้งนี้ได้ดำเนินการอยู่ภายในขอบเขตดังต่อไปนี้

1.4.1 คลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการทดลองและวิเคราะห์ คือ คลื่นแผ่นดินไหว JMA Kobe และคลื่นแผ่นดินไหว El Centro โดยปรับระดับความเข้มต่างๆกัน

1.4.2 ในการทดลองและวิเคราะห์จะทำการเปรียบเทียบประสิทธิผลของรูปแบบการควบคุมที่นำเสนอกับรูปแบบการควบคุมแบบแพสซีฟ 2 ชนิด คือ รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานและรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืด

1.4.3 ในการทดสอบด้วยเครื่องจำลองแผ่นดินไหว (shaking table) จะทำการจำลองการเคลื่อนที่ในแนวราบ 1 ทิศทางเท่านั้น

1.4.4 ในการทดลองแบบจำลองอาคารเป็นโครงสร้างเหล็ก 3 ชั้น ติดตั้งตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็ก 1 ตัว โดยติดตั้งระหว่างฐานกับพื้นชั้น 1

1.4.5 ในการวิเคราะห์จะทำการวิเคราะห์อาคารเดียว โดยเป็นอาคารโครงสร้างเหล็กสูง 3 ชั้น ซึ่งเป็นอาคารมาตรฐานที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพอาคารที่มีพฤติกรรมไม่เชิงเส้นภายใต้แผ่นดินไหว

1.5 สมมติฐาน

งานวิจัยครั้งนี้ได้ดำเนินการโดยมีสมมติฐานดังต่อไปนี้

1.5.1 แบบจำลองอาคารมีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเท่ากันทุกชั้น

1.5.2 อาคารที่ใช้ในการวิเคราห์จะมีการเกิดความไม่เชิงเส้นขึ้นที่ปลายชิ้นส่วนโดยในการศึกษาจะใช้แบบจำลองแบบวัฏจักรแบบเส้นตรงสองเส้น (bilinear) เพื่อจำลองความไม่เชิงเส้นของชิ้นส่วนที่รับแรงดัด

1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยครั้งนี้มีวิธีการดำเนินการวิจัยตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1.6.1 ศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1.6.2 ออกแบบและก่อสร้างเครื่องจำลองแผ่นดินไหว (shaking table)

1.6.3 ทดสอบสมรรถนะของเครื่องจำลองแผ่นดินไหว (performance test)

1.6.4 ศึกษาโปรแกรม LabVIEW 6.1

1.6.5 ทดสอบตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็ก โดยให้การเคลื่อนที่แบบวัฏจักร

1.6.6 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กและเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

1.6.7 พัฒนาโปรแกรมสำหรับควบคุมตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กและทำการทดสอบ

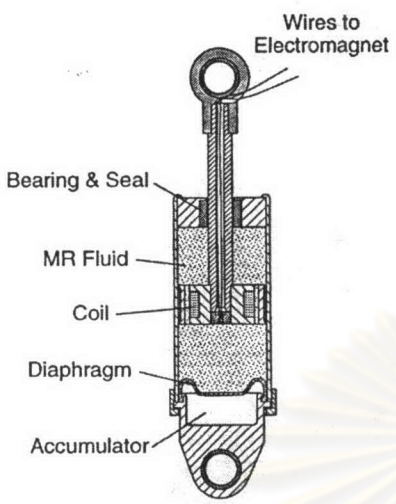
1.6.8 สร้างแบบจำลองอาคาร ทำการทดสอบแบบจำลองอาคารที่ติดตั้งตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็ก

1.6.9 วิเคราะห์อาคารมาตรฐาน

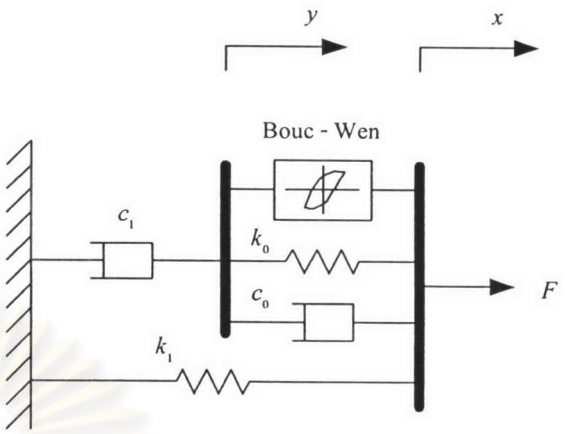
1.6.10 สรุปการศึกษาวิจัย และข้อเสนอแนะ

1.6.11 เขียนวิทยานิพนธ์

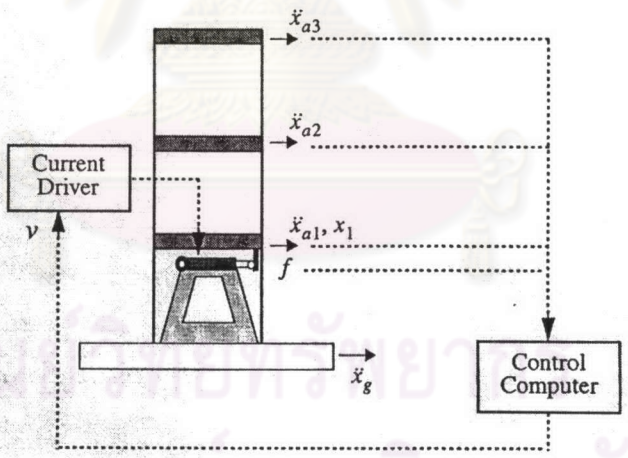
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 1.1 ตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กต้นแบบ
(จาก Spencer และคณะ ค.ศ. 1996)

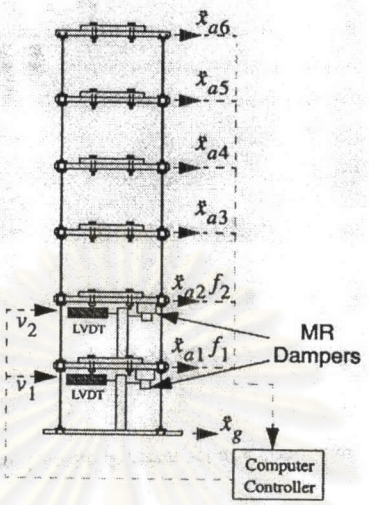


รูปที่ 1.2 แบบจำลองตัวหน่วงของเหลว
แม่เหล็กเสนอโดย spencer
(จาก Spencer และคณะ ค.ศ. 1996)



รูปที่ 1.3 รูปจำลองการติดตั้ง
(จาก Dyke และคณะ ค.ศ. 1996)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 1.4 รูปจำลองการติดตั้ง

(จาก Yi และคณะ ค.ศ. 2001)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย