สำนักงานวิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

การออกแบบระบบควบคุมมีจุดประสงค์หลักอย่างหนึ่งคือ การพยายามควบคุมค่าสัญญาณออกของระบบให้อยู่ใกล้ๆ กับค่าที่ระบุ โดยการทำให้ระบบวงปิดไม่อ่อนไหว (Insensitive) กับการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของกระบวนการ ต้องอาศัยความรู้เกี่ยวกับกระบวนการนั้นจึงจะสามารถออกแบบระบบวงปิดให้เกิดเสถียรภาพ (Stability) รวมถึงสมรรถนะ (Performance) ที่ดีได้ ขั้นตอนที่สำคัญในการออกแบบระบบควบคุมคือการหาแบบจำลอง (Modeling) กระบวนการ ขั้นตอนนี้จะนำข้อมูลจากการทดลองมาคำนวณเพื่อใช้สำหรับการออกแบบระบบควบคุม อย่างเช่นการหาเอกลักษณ์ (Identification) ของกระบวนการ ขั้นตอนนี้จะมีความสลับซับซ้อนมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับพฤติกรรมของกระบวนการ เช่นกระบวนการในอุตสาหกรรมโดยส่วนใหญ่มีพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear) รวมถึงผลจากการรบกวน (Disturbance) สัญญาณรบกวน (Noise) สภาพแวดล้อมของระบบที่เปลี่ยนแปลงไป ปริมาณของวัตถุดิบหรือแม้กระทั่งสัญญาณป้อนเข้าที่ผันแปรไปจากค่าปกติ ปริมาณเหล่านี้ล้วนเป็นความไม่แน่นอน (Uncertainty) ที่ทำให้เกิดความยุ่งยากในขั้นตอนการหาเอกลักษณ์และส่งผลกระทบต่อแบบจำลองที่ใช้ในการออกแบบระบบควบคุมผิดไปจากระบบจริง

การแก้ปัญหาที่เกิดจากความยุ่งยากในขั้นตอนการหาเอกลักษณ์ สามารถกระทำได้โดยการนำข้อมูลจากการทดลองมาคำนวณร่วมกับการออกแบบระบบควบคุม เพื่อหาตัวควบคุมที่ทำให้ระบบควบคุมมีสมรรถนะที่ดี วิธีดังกล่าวเรียกว่าวิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำ วิธีนี้เป็นขั้นตอนวิธี (Algorithm) การควบคุมแบบปรับตัว (Adaptive) โดยรวมระหว่างการหาเอกลักษณ์ของกระบวนการเข้ากับการทดลองไปพร้อมๆ กัน ทำให้ผลของตัวควบคุมสามารถควบคุมกระบวนการได้อย่างมีประสิทธิภาพแม้ว่าจะไม่ทราบแบบจำลองของกระบวนการก็ตาม

การนำวิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำไปทดลองวิจัยกับกระบวนการในอุตสาหากรรม จึงต้องเลือกกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงของแบบจำลอง เพื่อให้เห็นผลการทดลองได้อย่างชัดเจน งานวิจัยนี้จึงเลือกระบบสายพานลำเลียงที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม เพื่อทำความเข้าใจถึงลักษณะทางกายภาพของระบบ และศึกษาวิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำไปทดลองวิจัยกับกระบวนการ ให้มีสมรรถนะที่ดีตามต้องการภายใต้สภาพของการใช้งานจริง แบบจำลองของระบบทางกลนี้มีความซับซ้อนและไม่ทราบค่าพารามิเตอร์ทั้งหมด อีกทั้งในขณะทำงานอาจมีการเปลี่ยนแปลงมวลภาระ ทำให้พลวัต (Dynamic) ของกระบวนการเปลี่ยนแปลงหรือมีความไม่แน่นอน

1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา

ประเด็นหลักของการควบคุมแบบปรับตัว คือปฏิกิริยาระหว่างข้อมูลจากการทดลองกระบวนการกับการออกแบบระบบควบคุม การควบคุมแบบปรับตัวเริ่มต้นขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1950 นำไปใช้กับเครื่องบินอัตโนมัติ โดยต้องการออกแบบระบบควบคุมให้มีสมรรถนะสูง และพัฒนามาเรื่อยๆ โดยค้นคว้าวิธีการหาค่าต่ำสุดของดรรชนีสมรรถนะ ต่อมาในปี ค.ศ. 1980 [1, 2] เริ่มมีการวิเคราะห์ถึงเสถียรภาพของการควบคุมแบบปรับตัว การควบคุมแบบปรับตัวในระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง แต่งานวิจัยนี้ยังคงมีความยุ่งยากสำหรับระบบที่มีความซับซ้อนในการหาเอกลักษณ์ จนกระทั่งปัจจุบันมีขั้นตอนวิธีการควบคุมแบบปรับตัวมากมายที่มีต้นกำเนิดมาจากงานวิจัยดังกล่าว แต่ถูกดัดแปลงในส่วนของเสถียรภาพ [3] และความคงทน (Robustness)

ปี ค.ศ. 1990 เริ่มมีการตั้งข้อสมมุติฐาน (Hypothesis) การรวมระหว่างการหาเอกลักษณ์ของกระบวนการเข้ากับการทดลองไปพร้อมๆ กัน เพื่อทำให้ผลของตัวควบคุมสามารถควบคุมกระบวนการได้อย่างมีประสิทธิภาพแม้ว่าจะเป็นการประมาณแบบจำลองก็ตาม ความพยายามดังกล่าวเริ่มมีผลงานที่ดีขึ้นเรื่อยๆ ในปี ค.ศ. 1993 K. J. Åström และ P. Persson [4] งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาเอกลักษณ์ของระบบโดยลดลำดับของแบบจำลอง (Model reduction) งานนี้พยายามทำให้ระบบควบคุมวงปิดมีสมรรถนะไม่เปลี่ยนแปลง โดยนำเสนอการหาเอกลักษณ์ของระบบโดยลดลำดับของแบบจำลอง และแก้ไขความยุ่งยากในการหาเอกลักษณ์ของระบบวงปิด อย่างไรก็ตาม ยังคงมีผลกระทบจากสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นกับแบบจำลองลดลำดับซึ่งไม่ได้พิจารณา ทำให้สมรรถนะของระบบวงปิดเลวลง ในปีเดียวกันนี้ P. M. J. Hof และ R. J. P. Schrama นำเสนองานวิจัย [5, 6] โดยเสนอการหาเอกลักษณ์ของระบบโดยการวนซ้ำ (Iterative identification) ทำให้สามารถแก้ไขปัญหาความยุ่งยากของแบบจำลองตัวควบคุม และแก้ปัญหาการหาแบบจำลองตัวควบคุม

ในปี ค.ศ. 1994 งานวิจัยของ H. Hjalmarsson และคณะ [7] เริ่มมีความแตกต่างออกไปจากงานวิจัยอื่นๆ งานนี้ให้ข้อสังเกตที่ต้องการหลีกเลี่ยงความลำเอียงของแบบจำลอง โดยการใช้ข้อมูลจากระบบควบคุมโดยตรง นั้นเป็นจุดเริ่มต้นของการวนซ้ำระหว่างการหาแบบจำลองของกระบวนการกับการออกแบบตัวควบคุมเข้าด้วยกัน การเก็บข้อมูลที่ได้มาจากการทดลองระบบควบคุมวงปิดโดยตรงเพื่อปรับจูนตัวควบคุมเป็นแนวทางของวิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำ นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังนำเสนอการหาเอกลักษณ์ของระบบวงปิดที่สามารถนำมาใช้ร่วมกับการทดลอง ทำให้สามารถแก้ไขความยุ่งยากในการหาเอกลักษณ์ของระบบวงปิดได้อีกด้วย แม้ว่าจะสามารถหาเอกลักษณ์วนซ้ำได้แต่ยังคงเป็นเรื่องที่ยากในการออกแบบระบบควบคุมวงปิด เนื่องจากตัวควบคุมนั้นจะต้องปรับจูนให้เหมาะกับแบบจำลอง ในปี ค.ศ. 1995 จึงเริ่มมาสนใจการพิสูจน์การลู่เข้า (Convergence) ระหว่างแบบจำลองเหมาะที่สุดกับตัวควบคุมเหมาะที่สุด [8] และนำเสนอการหาเอกลักษณ์ของระบบโดยการเปรียบเทียบการควบคุมระหว่างระบบวงเปิดกับระบบวงปิด ในขณะที่ P. M. J. Hof และ R. J. P. Schrama [9] นำเสนอการหาเอกลักษณ์ของระบบวงปิดไปพร้อมๆ กับพิจารณาการควบคุมระบบวงปิด

ต่อมาในปี ค.ศ. 1996 Z. Zang และคณะ [10] สังเกตเห็นว่าความผิดพลาดของแบบจำลองมีผลต่อกับการออกแบบระบบควบคุมวงปิด และขึ้นอยู่กับระบบควบคุมวงเปิดที่ไม่สามารถทราบค่าได้ ทำให้

เกิดความสนใจเกี่ยวกับการหาเอกลักษณ์วนซ้ำ และยังมีการพัฒนาแบบแผนการควบคุม (Control scheme) ในปีเดียวกันนี้ H. Hjalmarsson และคณะ [11] นำเสนอการหาเอกลักษณ์ของระบบวงปิดที่สามารถนำมาใช้ร่วมกับการทดลอง ทำให้สมรรถนะของระบบดียิ่งขึ้น ปี ค.ศ. 1997 H. Hjalmarsson และ M. Gevers [12] แสดงการเปรียบเทียบความถูกต้อง (Accuracy) เชิงโดเมนความถี่ในงานวิจัย [7] ในปี ค.ศ. 1999 และปีค.ศ. 2000 เริ่มมีความเข้าใจที่ดีขึ้นเกี่ยวกับความลำเอียง (Bias) และความแปรปรวน (Variance) ในการหาเอกลักษณ์ของระบบวงปิด [13] รวมถึงการวิเคราะห์ถึงเสถียรภาพ [14] และยังคงมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ถึงเสถียรภาพของวิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำเพิ่มเติมโดย F. D. Bruyne และ L. C. Kammer [15] นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของวิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำ และประกันถึงเสถียรภาพของระบบ ยังคงมีอีกหลายๆ งานวิจัยที่กล่าวถึงการปรับจูนความลำเอียงของแบบจำลอง (Model bias) [16] เพื่อนำไปสู่การปรับจูนตัวควบคุมต่อไป

เนื่องจากการค้นหาคำตอบของวิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำอาศัยเกรเดียนต์ (Gradient) จึงมีงานวิจัยบางส่วน ที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงวิธีการหาทิศทางการค้นหาคำตอบของวิธีวนซ้ำเกาส์-นิวตัน ในปี ค.ศ. 2000 K. Hamamoto และคณะ [17] นำเสนอการปรับปรุงวิธีการหาทิศทางการค้นหาคำตอบของวิธีวนซ้ำเกาส์-นิวตัน โดยวิธี BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) ทำให้สามารถแก้ไขปัญหาการกำหนดทิศทางการค้นหาคำตอบของวิธีวนซ้ำเกาส์-นิวตันได้ ต่อมามีงานวิจัยที่แก้ไขปัญหาสัญญาณไม่มีขอบเขต (Unboundedness) ในขณะที่ทำการทดลองเพื่อให้ยังคงสามารถหาคำตอบได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในปี ค.ศ. 2001 S. E. JO และ S. W. Kim [18] นำเสนอการแก้ไขปัญหาระบบที่สัญญาณไม่มีขอบเขตในขณะที่ทำการทดลอง ทำให้ยังคงสามารถสังเคราะห์ตัวควบคุมได้

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำและมีการประยุกต์กับระบบต่างๆ และระบบที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมเพิ่มเติม เช่นปี ค.ศ. 1995 H. Hjalmarsson นำเสนอการประยุกต์ใช้กับระบบเชิงเส้นที่แปรเปลี่ยนตามเวลา (Linear time-varying systems) [19] และนำเสนอการประยุกต์ใช้กับระบบสายส่งยืดหยุ่น (Flexible transmission) [20] ส่วนงานวิจัยของ D. Molenaar [21] นำเสนอการประยุกต์ใช้กับระบบควบคุมอุณหภูมิน้ำในท่อ และ B. Ceysens และ B. Godrons [22] นำเสนอการประยุกต์ใช้กับแขนกลแบบอ่อนตัว (Flexible arm) ต่อมาในปีค.ศ. 1997 ถึงปีค.ศ. 1998 F. D. Bruyne และ P. Carrette [23] นำเสนอการประยุกต์ใช้กับระบบเลี้ยงลูกบอลบนคาน (Ball on beam) ส่วน H. Hjalmarsson และคณะ นำเสนอการประยุกต์ใช้กับระบบไม่เชิงเส้นบางระบบ [24] และยังนำเสนอการประยุกต์ใช้กับระบบมิเตอร์กระแสตรงที่มีระยะคลอน (Backlash) [25] ขณะที่ T. Birkeland นำเสนอการประยุกต์ใช้กับระบบหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก (Multi-input multi-output systems) [26] ในปีเดียวกัน

1.3 วัตถุประสงค์

วิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำเป็นแนวทางหนึ่งที่รวมการหาเอกลักษณ์กับการสังเคราะห์ (Synthesis) ตัวควบคุม กลไกการทำงานมีรูปแบบเหมือนกับการควบคุมแบบปรับตัว เป็นระบบสัญญาณเข้าเดียวสัญญาณออกเดียว (Single-input single-output system) เวลาไม่ต่อเนื่อง (Discrete time) พารามิเตอร์ของ

ระบบไม่อาจทราบค่าล่วงหน้า และพลวัตของกระบวนการอาจมีการเปลี่ยนแปลง หรือมีความไม่แน่นอน วิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำสามารถสังเคราะห์ตัวควบคุมสำหรับระบบพลวัต โดยคำนึงถึงสมรรถนะของระบบวงปิด หลักการทั่วไปของวิธีนี้จะเป็นการหาตัวควบคุมที่เหมาะที่สุด โดยมีรูปแบบปัญหาเป็นการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันเกาส์เซียนกำลังสองเชิงเส้น (Linear Quadratic Guassian) เมื่อประยุกต์วิธีเกาส์-นิวตัน (Guass-Newton) เราจึงพัฒนาระเบียบวิธีเพื่อสังเคราะห์ตัวควบคุมเหมาะที่สุดได้

ระบบสายพานลำเลียงเป็นระบบหนึ่งที่ใช้อย่างแพร่หลายในการลำเลียงผลิตภัณฑ์ (Product) แม้ว่าระบบนี้มีสัญญาณเข้าเดียวและสัญญาณออกเดียว แต่แบบจำลองของระบบมีความซับซ้อน อีกทั้งพารามิเตอร์บางตัวไม่อาจทราบค่าได้ และพลวัตของกระบวนการมีการเปลี่ยนแปลงหรือมีความไม่แน่นอน ทำให้การออกแบบตัวควบคุมที่ให้สมรรถนะสูงมีความยุ่งยาก ด้วยเหตุผลดังกล่าวเราจึงสนใจประยุกต์วิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำกับการควบคุมระบบนี้ จุดประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้เพื่อศึกษาวิธีการปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำ เพื่อสังเคราะห์ตัวควบคุมพลวัตสำหรับระบบเชิงเส้นแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง โดยที่มีพารามิเตอร์ไม่ทราบค่า อีกทั้งยังสังเคราะห์ตัวควบคุมพลวัตสำหรับระบบสายพานลำเลียง เพื่อทำให้ระบบวงปิดมีเสถียรภาพ และปรับปรุงสมรรถนะภายใต้การเปลี่ยนแปลงของสภาวะการทำงาน

1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

ออกแบบตัวควบคุมพลวัตสำหรับระบบสายพานลำเลียงโดยวิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำ ภายใต้เงื่อนไข

1. ออกแบบตัวควบคุมพลวัตเพื่อปรับปรุงสมรรถนะสำหรับระบบสายพานลำเลียงให้ดียิ่งขึ้น
2. ศึกษาวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบวงปิด
3. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการคำนวณคำตอบ เช่น ช่วงเวลาสำหรับการเก็บบันทึกข้อมูล ทิศทางและช่วงก้าวการค้นหาคำตอบของวิธีวนซ้ำเกาส์-นิวตัน
4. ศึกษาผลกระทบจากแรงเสียดทาน และส่วนประกอบที่ไม่เป็นเชิงเส้น
5. ประยุกต์ใช้ตัวควบคุมนี้กับระบบสายพานลำเลียงจริงในห้องปฏิบัติการ

1.5 ขั้นตอนในการดำเนินงาน

1. ศึกษาวิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำ
2. ศึกษาวิธีการกำหนดทิศทางและช่วงก้าวการค้นหาคำตอบของวิธีวนซ้ำเกาส์-นิวตัน
3. ศึกษาตัวอย่างเชิงเลขการสังเคราะห์ตัวควบคุมพลวัต
4. ประยุกต์ใช้ตัวควบคุมนี้กับระบบสายพานลำเลียงจริงในห้องปฏิบัติการ
5. สรุปงานวิจัย นำเสนอข้อดีและข้อเสีย

หอสมุดกลาง สำนักงานวิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

วิธีการออกแบบตัวควบคุมพลวัตโดยวิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำ สามารถประยุกต์ใช้กับระบบที่มีการใช้งานจริงในอุตสาหกรรม ดังนั้นประโยชน์ที่ได้รับจึงมีมากมายในงานอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบสายพานลำเลียงซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลาย วิธีการที่นำเสนอสามารถใช้ออกแบบตัวควบคุมได้หลายรูปแบบ เช่น ตัวควบคุมพีไอดี เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถปรับปรุงสมรรถนะของระบบวงปิด และพัฒนาเป็นซอฟต์แวร์การออกแบบตัวควบคุมพลวัตโดยวิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำ สำหรับนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมได้โดยง่าย

1.7 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

ในบทถัดไป เราจะอธิบายการออกแบบตัวควบคุมพลวัตโดยวิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำ ประกอบด้วยรูปแบบของการออกแบบตัวควบคุมพลวัต คำตอบของปัญหาการหาค่าต่ำสุดซึ่งเราจะอธิบายถึงวิธีการหาคำตอบด้วยการวนซ้ำโดยใช้ขั้นตอนวิธีของเกาส์-นิวตัน รวมถึงจะอธิบายนิยามเกรเดียนต์ของสัญญาณออกและเกรเดียนต์ของสัญญาณเข้า ที่มาของการหาเกรเดียนต์เพื่อพิสูจน์และนำไปสู่วิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำ นอกจากนี้บทที่ 2 ยังจะอธิบายการหาทิศทางการค้นหาและขนาดความยาวของการค้นหา วิธีต่างๆ เช่น การประมาณเฮสเซียนเมทริกซ์โดยวิธี BFGS และการหาขนาดความยาวของการค้นหาด้วยวิธีการตามรอยถอยหลัง (Back tracking) และสุดท้ายจะอธิบายในส่วนของเงื่อนไขการลู่เข้าของคำตอบ

จากนั้นในบทที่ 3 เราจะกล่าวถึงการประดิษฐ์ชิ้นส่วนอุปกรณ์สำหรับระบบสายพานลำเลียง โดยนำความรู้ทางกลศาสตร์และอิเล็กทรอนิกส์เข้ามาประกอบกัน เพื่อสร้างให้ระบบสายพานลำเลียงมีความสมบูรณ์แบบ ในส่วนแรกของการประดิษฐ์ทางกลศาสตร์จะกล่าวถึงโครงสร้าง วัสดุ ฐานรองอุปกรณ์ และขอบกั้นวัตถุบนสายพานลำเลียงส่วนนี้จะอธิบายถึงเหตุผลที่นำวัสดุต่างๆ มาใช้งานเพื่อให้เกิดความเหมาะสมในการใช้งาน ส่วนของการประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์จะกล่าวถึงอุปกรณ์ทั้งหมดที่นำมาใช้งาน เช่น ไมโครโพรเซสเซอร์ วงจรต่างๆ เป็นต้น และอธิบายถึงหน้าที่ของวงจรที่สร้างขึ้นพร้อมทั้งแสดงวงจรที่ใช้อีกด้วย

ถัดมาในบทที่ 4 จะกล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมพลวัตสำหรับระบบสายพานลำเลียงโดยวิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำ ในบทนี้จะอธิบายถึงระบบสายพานลำเลียง หลักการทำงานทั่วไปของระบบสายพานลำเลียง ถึงแม้ว่าวิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำจะไม่ต้องทราบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบก็ตาม แต่กระนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ก็ยังคงมีความสำคัญ เราจะอธิบายทั้งพลวัตของระบบและแบบจำลองเชิงเส้นไปพร้อมๆ กัน ตอนท้ายของบทนี้จะแสดงให้เห็นถึงผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรม MATLAB การจำลองผลตอบสนองบ่งชี้ว่าวิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำให้สมรรถนะการทำงานที่ยอมรับได้

ต่อจากนั้นในบทที่ 5 จะนำเอาวิธีคำนวณสัญญาณของสัญญาณออกและสัญญาณเข้ามาพัฒนาเป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับวัดสัญญาณออกและสัญญาณเข้า อีกทั้งอธิบายกรรมวิธีและเทคนิคในการเขียน

โปรแกรม LabVIEW เพื่อให้ได้สัญญาณออกและสัญญาณเข้าตามต้องการ เราได้แสดงให้เห็นตัวอย่างการออกแบบตัวควบคุมพลวัตโดยวิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำ เนื้อหาในบทนี้ครอบคลุมถึงผลการทดลองจริงกับระบบสายพานลำเลียง ขั้นตอนและวิธีการออกแบบตัวควบคุมพลวัตโดยวิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำ ผลที่ได้ในบทนี้คือผลการทดลองตัวควบคุมที่ออกแบบกับระบบจริง โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลสนองเชิงเวลาของสัญญาณออก สัญญาณเข้าควบคุม และดรรชนีสมรรถนะ ในตอนท้ายของบทนี้ ยังได้แสดงการทดสอบโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับระบบจริงเพื่อตรวจสอบและประเมินการทำงานของโปรแกรมดังกล่าว

สำหรับบทสุดท้ายคือบทสรุปของวิทยานิพนธ์ โดยกล่าวถึงสิ่งที่ได้ทำในวิทยานิพนธ์อย่างย่อ เน้นย้ำในจุดที่สำคัญ และเสนอแนวทางในการขยายผลของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ไปสู่การพัฒนาในกรณีเฉพาะต่างๆ