

การประมาณปริมาตรในภาษนะกวนด้วยการชดเชยแรงบิดของเครื่องกวนสาร
แบบแท่งแม่เหล็ก



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2558

**VOLUME ESTIMATION IN STIR CONTAINER USING
LOAD TORQUE COMPENSATOR OF MAGNETIC
STIRRER MACHINE**

Chatchawan Kemngoen



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Mechatronics Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2015

การประมาณปริมาตรในภาชนะกวนด้วยการชดเชยแรงบิดของเครื่องกวนสาร
แบบแท่งแม่เหล็ก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผศ. ดร. กীরติ สุกัญณ์)

ประธานกรรมการ



(รศ. ดร. จีระพล ศรีเสรีรุ่งผล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(อ. ดร. โสรฎา แจ็งการ)

กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(ศ. ดร. ชุก ภูมิปานงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม



(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ชัชวาล เข้มเงิน : การประมาณปริมาตรในภาชนะกวนด้วยการชดเชยแรงบิดของเครื่อง
กวนสารแบบแท่งแม่เหล็ก (VOLUME ESTIMATION IN STIR CONTAINER USING
LOAD TORQUE COMPENSATOR OF MAGNETIC STIRRER MACHINE)

อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสวีฐผล, 101 หน้า

เครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็กเป็นเครื่องที่ใช้ผสมสารละลายตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปเป็นที่นิยมใช้ในภาคอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย ซึ่งในบางอุตสาหกรรมขณะกวนของเหลวเพื่อผสมสารนั้นมีความจำเป็นต้องกวนตลอดเวลาระหว่างขณะนำสารที่ผสมไปใช้งาน ปัญหาของเครื่องกวนสารที่สำคัญคือการลดลงของปริมาตรของของเหลวในภาชนะซึ่งส่งผลกระทบต่อการทำงานนั้นไปใช้ไปใช้งานต่อได้ ดังนั้นปริมาตรของของเหลวในภาชนะที่มีการกวนสารผสมจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการตรวจวัด แต่การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดในภาชนะจะทำให้ประสิทธิภาพของการกวนสารผสมลดลงและเสียค่าใช้จ่าย ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการประมาณปริมาตรของของเหลวในภาชนะผ่านการเปลี่ยนแปลงของภาระโหลดที่ใช้ในเครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็กโดยไม่ต้องติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดเพิ่ม เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็ก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อนักศึกษา ชัชวาล เข้มเงิน

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ดร.จิระพล ศรีเสวีฐผล

CHATCHAWAN KEMNGOEN : VOLUME ESTIMATION IN STIR
CONTAINER USING LOAD TORQUE COMPENSATOR OF MAGNETIC
STIRRER MACHINE. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. JIRAPHON
SRISERTPOL, Ph.D., 101 PP.

VOLUME ESTIMATION/STIR CONTAINER/LOAD TORQUE/ COMPENSATOR

The magnetic stirrer machine is a mixture of two or more chemical substances. It is widely used in the industry and the mixtures of some industries that have stirred constantly throughout the process before it is used. Sometimes the problem of stirrer is the reducing of liquid in the container and requires the monitored. On the other hand, measuring devices installed in a container gets decreased performance of stirring the mixture which incurs additional cost. Consequently, this research purposes estimation the volume of liquid in the container through the variable of load torque while the magnetic stirrer machine without installs additional measuring devices. For this reason, it also increases the performance of the magnetic stirrer machine.

School of Mechanical Engineering

Academic Year 2015

Student's Signature



Advisor's Signature



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ทุกประการ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลต่าง ๆ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย ดังนี้ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนการศึกษาสำหรับผู้มีศักยภาพเข้าศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา และทุนอุดหนุนโครงการวิจัยเพื่อทำวิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้ความรู้ และคำปรึกษาในการทำงานวิจัย รวมทั้งให้คำแนะนำในการดำเนินชีวิตด้วยความเมตตา เสมอ ตลอดจนเป็นแบบอย่างที่ดีแก่ผู้วิจัย ในด้านการดำเนินชีวิต และการอุทิศตนต่อคนรุ่นหลัง โดยไม่เห็นแก่ความเหน็ดเหนื่อยส่วนตนซึ่งผู้วิจัยจะจดจำช่วงเวลาดังกล่าวไว้เป็นคติสอนใจที่ฝังใจตลอดไป

คณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ผู้ทำวิจัยด้วยความเมตตากรุณาทั้งในอดีตจนถึงปัจจุบัน

วิศวกรและเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ ตลอดจนให้คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

คุณจรรยาศักดิ์ พวงขุนทด ที่ให้การสนับสนุนในส่วนของเครื่องมือสำหรับงานวิจัย

คุณนิติศักดิ์ หนูมาน้อย คุณศุภชัย ประวันตาคุณนรงค์ศักดิ์ สีแก้วคุณสุนทร โอบสูงามคุณ ชนรัชต์ อุ่นศิริ คุณเกรียงไกร เจริญสุข ซึ่งเป็นพี่น้องบัณฑิตที่คอยให้คำปรึกษาในส่วนวิชาความรู้เกี่ยวกับงานวิจัย และการดำเนินชีวิต

ท้ายที่สุดขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อบรรจบ เข้มเงิน และคุณแม่สมคิด แสงเพ็ชร รวมถึงครอบครัวที่ให้การอบรมเลี้ยงดู และให้โอกาสทางด้านการศึกษาเป็นอย่างดีมาโดยตลอดจนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

ชัชวาล เข้มเงิน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตเบื้องต้น.....	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	3
2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ประเภทของเครื่องกวนสาร.....	4
2.1.1 เครื่องกวนสารแบบใบพัดหรือใบกวน (Stirrer Machine).....	5
2.1.1.1 เครื่องกวนสารแบบใบพัดหรือใบกวนสำหรับการใช้งาน ปั่นหรือบด.....	5
2.1.1.2 เครื่องกวนสารแบบใบพัดหรือใบกวนสำหรับการใช้งาน ของสารที่มีความหนืดสูง.....	6
2.1.1.3 เครื่องกวนสารแบบใบพัดหรือใบกวนสำหรับการใช้งาน ด้านวิทยาศาสตร์และทางการแพทย์.....	7

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.1.2	เครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็ก (Magnetic Stirrer Machine)	7
2.2	ตัวสังเกต (Observer)	9
2.2.1	การออกแบบตัวสังเกตอันดับเต็ม (Full-order observer)	9
2.3	ระบบการปรับตัวได้ด้วยชดเชยแบบปรับตัวได้จากวิธี Gradient Method	12
2.4	การควบคุมระบบ	14
2.4.1	ระบบควบคุมแบบวงเปิดหรือระบบควบคุมแบบไม่ป้อนกลับ (Open Loop Control System or No Feedback Control System)	15
2.4.2	ระบบควบคุมแบบวงปิดหรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Open Loop Control System or No Feedback Control System)	15
2.5	คุณสมบัติของตัวควบคุมระบบแบบพีไอดี	16
2.5.1	การควบคุมแบบสัดส่วน	17
2.5.2	การควบคุมแบบอินทิกรัล	18
2.5.3	การควบคุมแบบอนุพันธ์	19
2.6	ปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	20
2.7	สรุป	22
3	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	23
3.1	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	23
3.2	ตัวสังเกตอันดับเต็ม	26
3.3	การประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงโดยตัวชดเชยแบบปรับค่าได้	28
3.4	สรุป	31
4	การออกแบบตัวควบคุม ตัวสังเกต และผลการจำลองสถานการณ์	32
4.1	การระบุเอกลักษณ์	32
4.2	การออกแบบตัวสังเกต	34
4.3	การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอ	37
4.4	การจำลองสถานการณ์	40
4.4.1	การทำงานของตัวควบคุมและตัวสังเกต	40

สารบัญ (ต่อ)

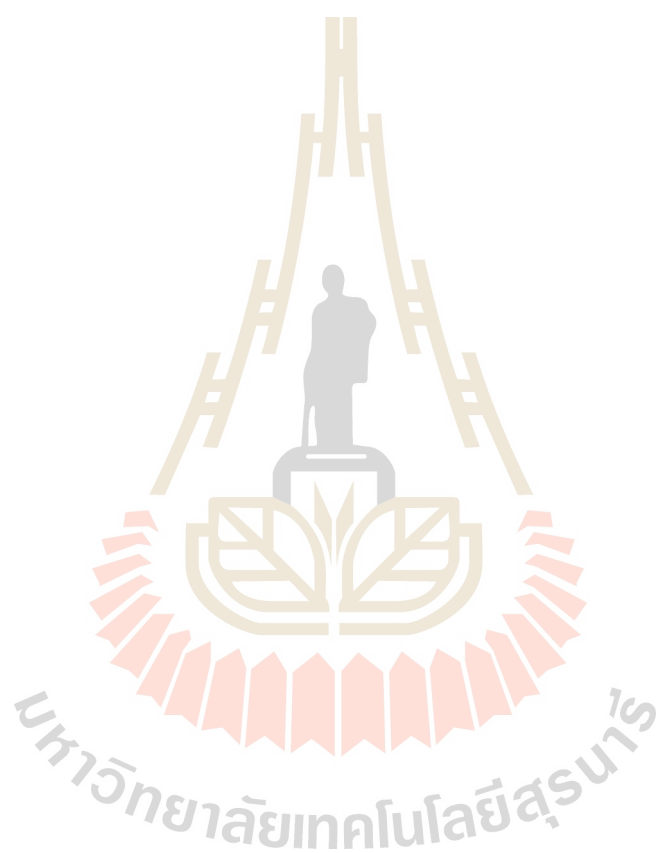
หน้า

4.4.2	การทำงานของตัวควบคุมแบบพีไอ และตัวสังเกตในกรณีที่ระบบได้รับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง	43
4.4.3	การทำงานของตัวควบคุมแบบพีไอ และตัวสังเกตร่วมกับตัวชดเชยแบบปรับตัวในกรณีที่ระบบได้รับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง	45
4.5	สรุป	47
5	ผลการทดสอบ	48
5.1	เครื่องมือทดลอง	48
5.2	การควบคุมและรับสัญญาณผ่านบอร์ดRAPCON	51
5.3	การทดสอบการทำงานของตัวสังเกตของเครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็ก	52
5.4	การทดสอบการประมาณปริมาตรของของเหลวในภาชนะกวนด้วย การชดเชยแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง	54
5.4.1	การทดสอบกรณีที่ 1 ทดสอบกวนของเหลวที่ปริมาตรคงที่	54
5.4.2	การทดสอบกรณีที่ 2 ทดสอบกวนของเหลวที่ปริมาตรเปลี่ยนแปลง	66
5.4.3	การทดสอบกรณีที่ 3 ทดสอบกวนของเหลวของเหลวต่างชนิด	67
5.6	สรุป	68
6	สรุปและข้อเสนอแนะ	69
6.1	สรุป	69
6.2	ข้อเสนอแนะ	70
	รายการอ้างอิง	71
	ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก.	ข้อมูลทางเทคนิคของบอร์ด RAPCON การติดตั้ง Hardware และ Software	72
ภาคผนวก ข.	ขั้นตอนการระบุเอกลักษณ์จากโปรแกรม MATLAB ในส่วนของ ParameterEstimation	77
ภาคผนวก ค.	การใช้โปรแกรม Simulink Response Optimization	86

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ง. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	92
ประวัติผู้เขียน.....	101



สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

4.1	แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์	33
4.2	แสดงผลให้เกิดค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวของระบบ Type	38
5.1	แสดงรายละเอียดต่าง ๆ ของ RAPCON Board.....	50
5.2	ผลการทดสอบสามารถกำหนดค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงกับปริมาตรของของเหลว และกระแสไฟฟ้าที่ให้กับมอเตอร์	65
5.3	ผลการทดสอบของน้ำมันปาล์ม และน้ำเกียร์ SEA 90 สามารถประมาณ ค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง ปริมาตรของของเหลว และกระแสไฟฟ้าที่ให้กับมอเตอร์ ขณะกวนของเหลวที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที	68

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เครื่องกวนแบบใบพัดหรือใบกวน	5
2.2 เครื่องกวนสารแบบใบพัดหรือใบกวนสำหรับการใช้งานปั่นหรือบด	6
2.3 เครื่องกวนสารแบบใบพัดหรือใบกวนสำหรับการใช้ของสารที่มีความหนืดสูง	6
2.4 เครื่องกวนสารแบบใบพัดหรือใบกวนสำหรับใช้งานด้านวิทยาศาสตร์ และทางการแพทย์	7
2.5 เครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็ก	8
2.6 แผนภาพหลักการการทำงานของตัวสังเกต	12
2.7 แผนภาพหลักการการทำงานของตัวชดเชยแบบปรับตัวได้	13
2.8 ระบบควบคุมแบบเปิดหรือระบบควบคุมแบบไม่ป้อนกลับ	15
2.9 ระบบควบคุมแบบเปิด	16
2.10 ตัวควบคุมพีไอดีของระบบควบคุมแบบปิด	16
3.1 แผนภาพวงจรรีโมเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	23
3.2 แผนภาพระบบควบคุมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวสังเกตอันดับเต็ม	26
3.3 แผนภาพการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงให้กับตัวสังเกตอันดับเต็ม	28
3.4 แผนภาพระบบตัวชดเชยแบบปรับค่าได้โดยวิธี Gradient Method สำหรับการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง	31
4.1 แผนภาพแสดงการระบุเอกลักษณ์ของระบบโดย Parameter Estimation	33
4.2 แผนภาพแบบจำลองการใช้โปรแกรมหาค่าสัมประสิทธิ์ตัวควบคุมพีไอ สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	39
4.3 แผนภาพการทำงานของตัวควบคุมพีไอ	39
4.4 ผลการแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับกรณีที่ 1	41
4.5 ผลการแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับกรณีที่ 1	41
4.6 ผลการแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับกรณีที่ 2	42
4.7 ผลการแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับกรณีที่ 2	42
4.8 การแสดงแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง $T_L(t)$ จากภายนอกที่มารบกวนระบบ	43

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 ผลแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในกรณีที่มีแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงมารบกวนระบบ	44
4.10 ผลแสดงของระบบควบคุมให้กระแสไฟฟ้ากับระบบเพื่อรักษาความเร็วรอบในกรณีที่มีแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงมารบกวนระบบ	44
4.11 การแสดงแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงที่ได้จากการชดเชยเทียบกับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงจริง	46
4.12 การแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเมื่อมีการประมาณค่าแรงบิดให้กับตัวสังเกต	46
4.13 ผลแสดงค่ากระแสไฟฟ้าที่หุ้มมอเตอร์เพื่อรักษาความเร็วรอบขณะมีการชดเชยแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงกับตัวสังเกต	47
5.1 เครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็ก	49
5.2 PCI Serial Card และบอร์ด RAPCON	50
5.3 แสดงไดอะแกรมการเชื่อมต่อของ MATLAB/Simulink กับ RAPCON Board ในการป้อนค่าสัญญาณให้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	52
5.4 ผลการประมาณค่าความเร็วรอบของตัวสังเกต	53
5.5 ผลการประมาณค่ากระแสไฟฟ้าของตัวสังเกต	53
5.6 ผลการตอบสนองของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงที่ปริมาตร 100 มิลลิลิตร	55
5.7 ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ปริมาตร 100 มิลลิลิตร	55
5.8 ผลการตอบสนองของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงที่ปริมาตร 200 มิลลิลิตร	56
5.9 ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ปริมาตร 200 มิลลิลิตร	56
5.10 ผลการตอบสนองของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงที่ปริมาตร 300 มิลลิลิตร	57
5.11 ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ปริมาตร 300 มิลลิลิตร	57
5.12 ผลการตอบสนองของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงที่ปริมาตร 400 มิลลิลิตร	58
5.13 ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ปริมาตร 400 มิลลิลิตร	58
5.14 ผลการตอบสนองของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงที่ปริมาตร 500 มิลลิลิตร	59
5.15 ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ปริมาตร 500 มิลลิลิตร	59
5.16 ผลการตอบสนองของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงที่ปริมาตร 600 มิลลิลิตร	60

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.17 ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ปริมาตร 600 มิลลิลิตร	60
5.18 ผลการตอบสนองของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงที่ปริมาตร 700 มิลลิลิตร	61
5.19 ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ปริมาตร 700 มิลลิลิตร	61
5.20 ผลการตอบสนองของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงที่ปริมาตร 800 มิลลิลิตร	62
5.21 ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ปริมาตร 800 มิลลิลิตร	62
5.22 ผลการตอบสนองของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงที่ปริมาตร 900 มิลลิลิตร	63
5.23 ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ปริมาตร 900 มิลลิลิตร	63
5.24 ผลการตอบสนองของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงที่ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร	64
5.25 ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร	64
5.26 แสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงปริมาตรกับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง	65
5.27 ผลการตอบสนองของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงที่ของเหลวมีอัตราการไหล เพิ่มขึ้น 11.6 มิลลิลิตรต่อวินาที	66
5.28 ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ของเหลวมีอัตราการไหลเพิ่มขึ้น 11.6 มิลลิลิตรต่อวินาที	67

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ω	=	ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ (rad/s)
ω_n	=	ความถี่ธรรมชาติ (rad/s)
T	=	แรงบิดของมอเตอร์ (N·m)
T_L	=	แรงบิดที่เปลี่ยนแปลง (N·m)
V_a	=	ความต่างศักย์ของอาร์เมเจอร์ (V)
V_b	=	ความต่างศักย์ back emf (V)
R_a	=	ความต้านทานของอาร์เมเจอร์ (Ω)
L_a	=	ความเหนี่ยวนำของอาร์เมเจอร์ (H)
I	=	โมเมนต์ความเฉื่อย ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)
c	=	ความหน่วง ($\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$)
L	=	อัตราขยายของตัวสังเกต
K_b	=	ค่าคงที่ของ electromotive force ($\text{V}\cdot\text{s}/\text{rad}$)
K_t	=	ค่าคงที่ของแรงบิด ($\text{N}\cdot\text{m}/\text{A}$)
K_p	=	ค่าอัตราขยายของตัวควบคุม P
K_I	=	สัมประสิทธิ์ของตัวควบคุม I
K_D	=	สัมประสิทธิ์ของตัวควบคุม D
T_i	=	ค่าIntegral Time
T_d	=	ค่าDerivative Time
e	=	ค่าความผิดพลาดของการทำงานระหว่างระบบและตัวสังเกต
g	=	เมทริกซ์ความสังเกตได้
β	=	เมทริกซ์ความควบคุมได้
ζ	=	อัตราส่วนความหน่วง
γ	=	อัตราการปรับตัว
v	=	Sensitivity Function
J	=	Loss Function

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันได้มีการพัฒนากระบวนการผลิตอย่างรวดเร็วทั้งในภาคการศึกษาและโรงงานอุตสาหกรรม จึงทำให้มีความต้องการนำเครื่องมือมางานเพิ่มขึ้น เพื่อการผลิตที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะภาคโรงงานอุตสาหกรรม เครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็กเป็นเครื่องมือที่ใช้ผสมสารละลายตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในหน่วยงานต่างๆ ทั้งภาคการศึกษาและโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งในบางอุตสาหกรรมมีความจำเป็นต้องใช้เครื่องกวนสารในกระบวนการต่างๆ อาทิ การเตรียมสารละลาย การผสมสารละลายในสารบางตัวที่ผสมยากและใช้ระยะเวลาในการผสมนานหรือสารที่เป็นอันตราย ยกกับผู้ปฏิบัติงาน เป็นต้น ขณะกวนสารหรือผสมสารอยู่นั้นอาจจะต้องกวนตลอดเวลาระหว่างกระบวนการเพื่อนำสารที่ผสมไปใช้งาน ปัญหาที่พบในกระบวนการนั้นบางครั้งปริมาณหรือระดับของเหลวในภาชนะกวนนั้นมีการเปลี่ยนแปลง อาจส่งผลกระทบต่อการนำสารไปใช้งานต่อ อีกทั้งผู้ปฏิบัติการมิได้สังเกตเครื่องกวนสารอยู่ตลอดเวลาจะทำให้กระบวนการนั้นเกิดความเสียหาย ดังนั้นการวัดระดับของเหลวในภาชนะกวนขณะกวนสารนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง แต่การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดในภาชนะกวนจะทำให้ประสิทธิภาพของการกวนสารนั้นลดลงและเสียค่าใช้จ่าย

เครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็กนอกจากจะช่วยเตรียมสารละลาย ผสมสารละลาย และผู้ปฏิบัติการไม่เกิดอันตรายแล้ว ยังสามารถประมาณปริมาณของเหลวในภาชนะกวนได้โดยไม่ต้องติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดในภาชนะกวน โดยใช้การหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการติดตั้งแม่เหล็กถาวรด้วยความเร็วรอบคงที่ เพื่อใช้กวนของเหลวในภาชนะกวนที่มีระบบควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์แบบปิด การเปลี่ยนแปลงภาระกรรมในภาชนะกวนจะมีผลกับแรงบิดของมอเตอร์ ซึ่งจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของมอเตอร์เพื่อต้องการให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะกวนของเหลวนั้นคงที่ ระบบควบคุมก็จะให้กระแสไฟฟ้ากับมอเตอร์เพื่อที่จะรักษาความเร็วรอบขณะภาระกรรมในภาชนะกวนเกิดการเปลี่ยนแปลง ภาระกรรมที่เปลี่ยนแปลงในภาชนะกวนซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับภาระกรรมที่เปลี่ยนแปลงในภาชนะกวนซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณของของเหลว ความหนืดของของเหลว และอุณหภูมิขณะกวนของเหลว

งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการประมาณระดับของของเหลวในภาชนะจากการเปลี่ยนแปลงภาระกรรมที่เกิดขึ้นในภาชนะบรรจุผ่านการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์เพื่อรักษาความเร็วรอบให้คงที่ตลอดการทำงาน โดยไม่ต้องติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดเพิ่ม เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็ก

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ประมาณปริมาตรของของเหลวในภาชนะขณะกวนของเหลวได้ โดยไม่ต้องติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1. การประมาณปริมาตรของของเหลวมาจากการหาค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากการประมาณ
2. การทดลองจริง ควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ คือ ControlBoard ผ่าน โปรแกรม Simulink ของ MATLAB
3. การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง จะพิจารณาผลกระทบของอุปกรณ์อื่นในลักษณะที่เป็นค่าคงที่ในระบบควบคุม
4. ระบบที่ใช้ในการทดสอบเป็นระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในชุดปฏิบัติการระบบควบคุมของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และบริษัท มณีสุรย์ กรุ๊ป จำกัด

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. ควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 12 V ใช้เป็นต้นกำลังในการกวนของเหลวที่ความเร็วรอบคงที่ 600 RPM
2. ภาชนะบรรจุ (Beaker) ของเหลวลักษณะทรงกระบอกขนาด 1,000 ml เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 105 mm โดยวัสดุทำจากแก้ว (Glass Material)
3. แท่งกวนของเหลว (Magnetic Bar) ความยาว 50 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 7 มิลลิเมตร
4. ของเหลวที่นำมาทำงานวิจัย คือ น้ำสะอาด ไม่มีสารใดเจือปน (น้ำสะอาดที่อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น $1,000 \text{ kg/m}^3$ ความหนืด $0.796 - 1.002 \text{ mPa}\cdot\text{s}$)

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถประมาณปริมาตรของของเหลวในภาชนะในขณะกวนโดยไม่ต้องติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด
2. ระบบสามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ขณะปฏิบัติงานได้ โดยควบคุมแบบปิด
3. เพื่อให้กระบวนการผลิตนำสารผสมไปใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

1.6 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 5 บท 3 ภาคผนวก ซึ่งมีรายละเอียดโดยย่อดังนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำซึ่งกล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ตลอดจนขอบเขต และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของตัวสังเกต การประมาณค่าตัวแปรของระบบ รวมถึงปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 กล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ตัวสังเกตอันดับเต็ม และตัวชดเชยแบบปรับตัวได้สำหรับประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง

บทที่ 4 ออกแบบระบบควบคุมพีไอ ตัวสังเกตอันดับเต็ม และตัวชดเชยแบบปรับตัวได้สำหรับประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง และผลการทดสอบการทำงานของระบบ

บทที่ 5 ผลการทดลองการประมาณปริมาตรของของเหลวในภาชนะกวนขณะกวนของเหลวของเครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็ก

บทที่ 6 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

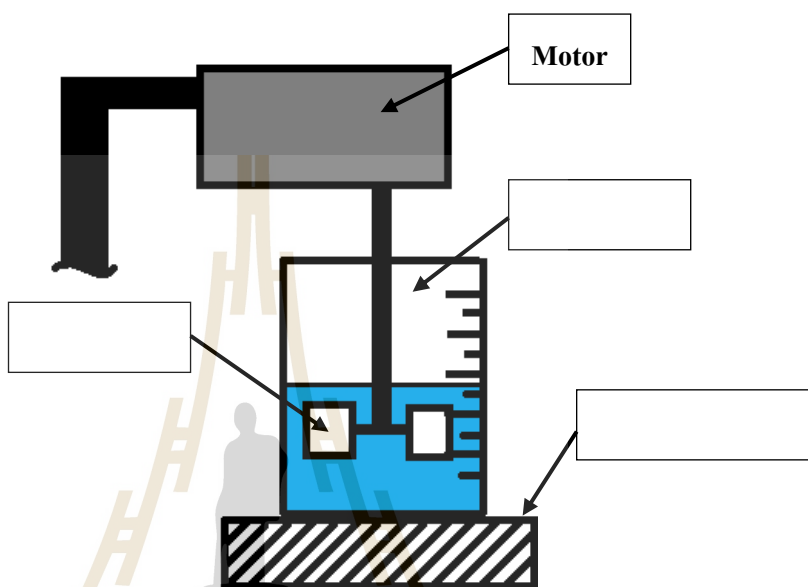
การกวน คือ การคนหรือการผสมสารตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปให้เข้ากันเป็นเนื้อเดียว โดยจะต้องมีการเตรียมสารผสมก่อนเสมอ การเตรียมสารผสมนั้นจะต้องกำหนดสารผสมให้ได้ปริมาณตามสัดส่วนที่ต้องการก่อนเสมอ เมื่อเตรียมสารผสมให้ได้ตามที่ต้องการเรียบร้อยแล้วก็นำสารที่เตรียมมาเข้ากระบวนการกวนหรือผสมให้เข้ากัน กระบวนการกวนจะต้องคำนึงถึง ความเร็วขณะกวน อุณหภูมิขณะกวน และชนิดของสารผสมด้วยเช่นกัน ในอดีตประเทศไทยนิยมนำการกวนมาใช้ในการทำอาหารเป็นส่วนใหญ่ อย่างเช่นการกวนเพื่อการถนอมอาหาร เช่น การกวนมะม่วง การกวนทุเรียน เป็นต้น โดยสมัยอดีตนั้นยังไม่มีเครื่องกวนสารหรือเครื่องมือทันสมัย การกวนจึงต้องใช้แรงงานมนุษย์เป็นส่วนใหญ่ เมื่อวิวัฒนาการของโลกเปลี่ยนแปลงไปการกวนไม่ได้กวนเพื่อทำอาหารเพียงอย่างเดียว แต่ยังกวนสารสำหรับยารักษาโรคในทางการแพทย์ กวนสารสำหรับสร้างสิ่งประดิษฐ์หรือสร้างนวัตกรรมใหม่ๆ รวมถึงนำไปใช้ในกระบวนการผลิต เช่น อุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ อุตสาหกรรมยานยนต์ เป็นต้น สารผสมบางชนิดที่นำมาผสมนั้นอาจจะเป็นสารที่ส่งผลกระทบต่อผู้กวน หรืออาจจะเป็นสารที่ผสมยากและใช้เวลานานในการผสมให้เข้ากัน จึงจำเป็นต้องนำเครื่องกวนสารมาใช้แทนแรงงานมนุษย์ อีกทั้งเพื่อให้กระบวนการผลิตที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ดังนั้นเครื่องกวนสารจึงถูกนำมาใช้งานเพิ่มมากขึ้น

2.1 ประเภทของเครื่องกวนสาร

เครื่องกวนสารเป็นเครื่องมือชนิดหนึ่งที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในภาคการศึกษา อุตสาหกรรม และทางการแพทย์ เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วเครื่องกวนสารจะกวนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรง (DC Motor) หรือมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Motor) เป็นอุปกรณ์ต้นกำลังของการกวนสารผสม สารผสมแต่ละชนิดมีความหนืดและลักษณะไม่เหมือนกันการเลือกใช้เครื่องกวนสารก็ขึ้นอยู่กับลักษณะของสารผสม โดยเครื่องกวนสารสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ เครื่องกวนสารแบบใบพัดหรือแบบใบกวน (Stirrer Machine) และเครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็ก (Magnetic Stirrer Machine)

2.1.1 เครื่องกวนสารแบบใบพัดหรือใบกวน (Stirrer Machine)

เครื่องกวนสารแบบใบพัดหรือใบกวนเป็นเครื่องกวนที่นิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลายด้วยลักษณะการกวนโดยใช้ใบกวนทำการกวนสารผสมซึ่งใบกวนจะเชื่อมต่อกับมอเตอร์ที่ทำหน้าเป็นอุปกรณ์ต้นกำลังโดยผ่านก้านใบกวน ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 เครื่องกวนสารแบบใบพัดหรือใบกวน

ใบพัดหรือใบกวนของเครื่องกวนประเภทนี้นิยมใช้สแตนเลส (Stainless Steel) เพราะวัสดุชนิดนี้สามารถป้องกันสนิมจากการทำปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนกับธาตุโลหะ และสามารถป้องกันการกัดกร่อนจากสารผสมได้อีกทั้งใบพัดหรือใบกวนมีหลากหลายชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานทำให้เครื่องกวนสารแบบใบพัดหรือใบกวนสามารถกวนสารผสมหรือของเหลวที่มีความหนืดสูงหรือต่ำได้ขึ้นอยู่กับกำลังของมอเตอร์ และชนิดของเครื่องกวนสาร โดยสามารถแบ่งลักษณะการใช้งานดังนี้

2.1.1.1 เครื่องกวนสารแบบใบพัดหรือใบกวนสำหรับการใช้งานปั่นหรือบด

เครื่องกวนสารแบบใบพัดหรือใบกวนประเภทนี้จะมีลักษณะการใช้งานแตกต่างจากเครื่องกวนสารประเภทอื่นตรงที่สารหรือของที่จะนำมากวนนั้นจะเป็นลักษณะของแข็งเป็นส่วนใหญ่ แต่จะมีของเหลวผสมขณะกวนบางส่วนเพื่อกวนได้ง่ายขึ้น เช่น การทำน้ำผลไม้ปั่น เป็นต้น ดังนั้นใบพัดหรือใบกวนสำหรับการกวนประเภทนี้จะต้องมีลักษณะที่คมและแข็งแรงพอสมควร และมอเตอร์ควรมีแรงบิดที่มากพอที่จะเอาชนะแรงต้านของสิ่งที่ทำการกวน



รูปที่ 2.2 เครื่องกวนสารแบบใบพัดหรือใบกวนสำหรับการใช้งานปั่นหรือบด

2.1.1.2 เครื่องกวนสารแบบใบพัดหรือใบกวนสำหรับการใช้งานของสารที่มีความหนืดสูง

เครื่องกวนสารแบบใบพัดหรือใบกวนประเภทนี้จะนำไปใช้กวนสารที่มีความหนืดสูง เช่น การกวนผลไม้เพื่อการถนอมอาหาร เป็นต้น ซึ่งสารผสมหรือของเหลวที่นำมากวนปกติจะมีความหนืดค่อนข้างสูง และกวนแต่ละครั้งจะกวนให้ปริมาณที่มาก ดังนั้นลักษณะของเครื่องกวนสารและใบกวนจึงต้องมีขนาดใหญ่เพื่อกวนในปริมาณที่มาก จึงทำให้เครื่องกวนสารประเภทนี้มีกำลังมอเตอร์ที่สูง แต่ความเร็วขณะกวนไม่เร็วมากขึ้นอยู่กับสารผสมหรือของเหลว



รูปที่ 2.3 เครื่องกวนสารแบบใบพัดหรือใบกวนสำหรับการใช้ของสารที่มีความหนืดสูง

2.1.1.3 เครื่องกวนสารแบบใบพัดหรือใบกวนสำหรับใช้งานด้านวิทยาศาสตร์ และทางการแพทย์

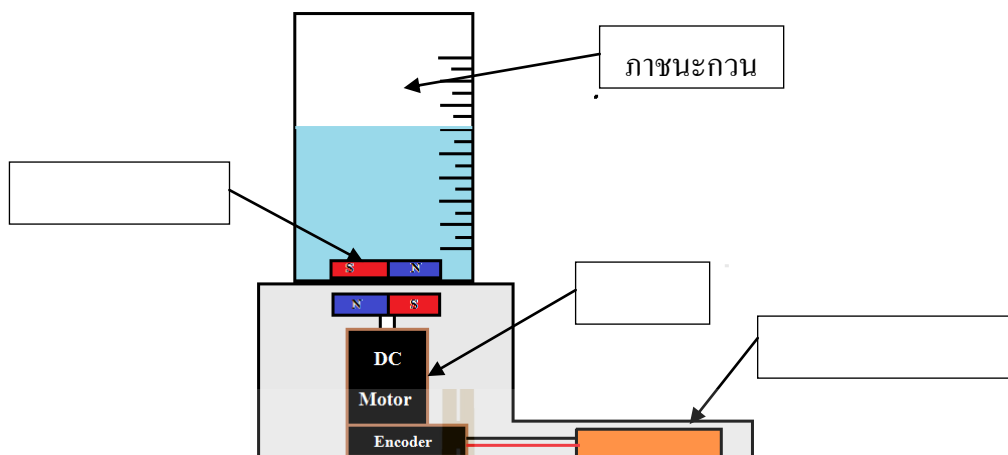
เครื่องกวนประเภทนี้จะมีลักษณะการใช้งานคล้ายกับ เครื่องกวนสารแบบใบพัดหรือใบกวนสำหรับการใช้งานของสารที่มีความหนืดสูง แต่จะต่างตรงที่เครื่องกวนสารแบบใบพัดหรือใบกวนสำหรับใช้งานด้านวิทยาศาสตร์และทางการแพทย์ จะมีขนาดของเครื่องและใบกวนที่เล็กกว่า และมีความแม่นยำมากกว่า เพราะเครื่องกวนประเภทนี้นิยมมาใช้ในการทดลองและการทำวิจัยเป็นส่วนใหญ่ สารผสมที่นำมากวนหรือผสมจะมีหลากหลายชนิด แต่ละชนิดจะมีความเร็วสำหรับกวนและลักษณะการกวนไม่เหมือนกันขึ้นอยู่กับประเภทของสาร จึงทำให้เครื่องกวนประเภทนี้มีความแม่นยำสูง



รูปที่ 2.4 เครื่องกวนสารแบบใบพัดหรือใบกวนสำหรับใช้งานด้านวิทยาศาสตร์และทางการแพทย์

2.1.2 เครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็ก (Magnetic Stirrer Machine)

เครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็กเป็นเครื่องกวนสารที่นิยมใช้งานด้านวิทยาศาสตร์และทางการแพทย์เป็นส่วนใหญ่ มีลักษณะการกวนคือใช้แท่งแม่เหล็กหรือแท่งกวน (Magnetic Bar) ทำน้ำกวนหรือผสมสาร โดยใช้มอเตอร์เป็นอุปกรณ์ต้นกำลังในการกวนสารซึ่งแท่งกวนสารกับมิได้เชื่อมต่อกันโดยตรง แต่จะใช้หลักการการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กระหว่างแท่งกวนกับแม่เหล็กถาวรที่ยึดติดกับก้านเพลลาของมอเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 เครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็ก

การที่แท่งกวนสาร ไม่เชื่อมต่อกับมอเตอร์โดยตรงจึงทำให้ไม่มีสารตกค้างจากสารอื่น เช่น น้ำยาหล่อลื่นที่มอเตอร์ เป็นต้น และแท่งกวนสารสามารถทำความสะอาดได้ง่ายกว่าใบกวนของเครื่องกวนแบบใบพัดหรือใบกวน จึงทำให้เครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็กเหมาะกับการใช้ผสมสารเคมีของงานทดลองทั้งในสวนทางการแพทย์ วิทยาศาสตร์ และกระบวนการอื่นๆ แต่เครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็กไม่เหมาะกับการกวนสารผสมที่มีความหนืดสูงขณะความเร็วกวนสูง เนื่องจากจะทำให้แรงต้านจากแรงเฉือนระหว่างแท่งกวนสารกับสารผสมมากกว่าแรงจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กจะส่งผลทำให้แท่งกวนไม่สามารถกวนสารได้

การประมาณปริมาณของของเหลวในภาชนะกวนขณะกวนอยู่นั้นสามารถทำได้หลายวิธีการ ในวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอวิธีการประมาณปริมาณของของเหลวจากการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้วิธีการชดเชยค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบปรับตัวได้ร่วมกับการประมาณค่าตัวแปรสถานะของระบบตัวสังเกตอันดับเต็ม การชดเชยค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงซึ่งจะได้จากการประมาณให้กับตัวสังเกตซึ่งจะทำให้ความผิดพลาดในการประมาณค่าตัวแปรสถานะของระบบ โดยใช้ตัวสังเกตมีความผิดพลาดลดลง

หลักการในการออกแบบตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ (Adaptive Compensator) เพื่อชดเชยค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะประยุกต์จากหลักการของการควบคุมปรับตัวชนิดอ้างอิงแบบจำลอง โดยตั้งสมมุติฐานว่าตัวแปรทุกตัวในระบบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าคงที่ และมีเพียงค่าของตัวแปรแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงเท่านั้นที่ยังมีการเปลี่ยนแปลงในระบบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

2.2 ตัวสังเกต (Observer)

การออกแบบระบบควบคุมโดยใช้วิธีการป้อนกลับตัวแปรสถานะ (State-Variable Feedback) เช่น วิธีการในการปรับเปลี่ยนค่าโพลของระบบ (Pole Placement Method) การสร้างหรือการทดสอบการทำงานของตัวควบคุมที่ทำการออกแบบมานั้นจะต้องประกอบด้วยข้อมูลจากสัญญาณของสถานะเวกเตอร์ (State Vector) ของระบบทุกค่าซึ่งส่วนมากแล้วการวัดข้อมูลจากตัวแปรสถานะหรือสัญญาณสถานะเวกเตอร์ทุกค่าเป็นไปได้ยาก ถึงแม้ในบางระบบจะสามารถวัดค่าตัวแปรสถานะได้แต่ก็อาจจะเสียค่าใช้จ่ายสูงในการวัด การควบคุมจึงมีการนำเอาตัวประมาณค่าตัวแปรสถานะ (State Estimator) หรือ ตัวสังเกตมาใช้งานเพื่อประมาณค่าตัวแปรสถานะของระบบที่จะทำการควบคุมวิธีการที่จะใช้ในการออกแบบตัวสังเกตเพื่อให้สามารถประมาณค่าตัวแปรสถานะของระบบได้อย่างถูกต้อง และรวดเร็วจึงมีความสำคัญต่อการควบคุมระบบอย่างมาก การออกแบบตัวสังเกตนั้นสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ ตัวสังเกตอันดับเต็ม (Full-Order Observer) เมื่อต้องการทราบค่าตัวแปรสถานะทุกตัวของระบบ และตัวสังเกตแบบลดอันดับ (Reduce-Order Observer) เมื่อต้องการทราบค่าตัวแปรสถานะที่ไม่สามารถวัดค่าได้บางตัวเท่านั้น ตัวสังเกตอันดับเต็มจะทำการประมาณค่าตัวแปรสถานะทุกตัวใหม่ทั้ง โดยการนำค่าของตัวแปรสถานะบางตัวที่สามารถวัดได้กับสัญญาณอินพุตที่ส่งเข้าไปในระบบมาใช้ในการประมาณค่าตัวแปรสถานะ ตัวสังเกตแบบลดอันดับ คือ การประมาณค่าตัวแปรสถานะที่ไม่สามารถวัดได้เท่านั้น โดยใช้ค่าของตัวแปรสถานะบางตัวที่สามารถวัดได้กับสัญญาณอินพุตของระบบควบคุมที่ส่งเข้าไปในระบบ ตัวสังเกตที่ใช้ในอุตสาหกรรมมักใช้กับระบบที่สามารถวัดค่าตัวแปรสถานะได้บางสถานะเพื่อที่จะลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการประมาณค่าตัวแปรสถานะของระบบเมื่อใช้ตัวสังเกต

2.2.1 การออกแบบตัวสังเกตอันดับเต็ม (Full-order observer)

การออกแบบตัวสังเกตอันดับเต็มนี้จะทำการประมาณค่าตัวแปรสถานะใหม่ทั้งหมดทุกตัวโดยใช้ข้อมูลของสัญญาณเอาต์พุตบางตัวที่สามารถวัดได้และสัญญาณอินพุตที่ส่งเข้าไปในระบบที่จะทำการประมาณค่าสถานะ สมการระบบสามารถทำหน้าที่เป็นตัวประมาณค่าสถานะของตัวเองได้แต่เป็นการประมาณในลักษณะแบบเปิด (Open-Loop Observer)

พิจารณาระบบเชิงเส้นที่ค่าตัวแปรของระบบไม่ขึ้นกับเวลา (Linear Time Invariant System) ที่ต้องการจะใช้ตัวสังเกตในการประมาณค่าตัวแปรสถานะของระบบเขียนในรูป State Space Form ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (2.1)$$

เมื่อ	A	คือเมตริกซ์สถานะของระบบ	$[n \times n]$
	B	คือ เมตริกซ์อินพุทของระบบ	$[n \times 1]$
	C	คือเมตริกซ์เอาต์พุทของระบบ	$[1 \times n]$
	x	คือสถานะเวกเตอร์ของระบบ	$[n \times 1]$
	u	คืออินพุทของระบบ	$[1 \times 1]$
	y	คือเอาต์พุทของระบบ	$[1 \times 1]$

ตัวสังเกตของระบบพลศาสตร์ที่ต้องการทำการควบคุมมีรูปแบบดังนี้คือ

$$\frac{d\hat{x}}{dt} = A\hat{x} + Bu + L[y - C\hat{x}] \quad (2.2)$$

เมื่อ	L	คือเมตริกซ์อัตราขยายของตัวสังเกต	$[n \times 1]$
	\hat{x}	คือค่าตัวแปรสถานะของตัวสังเกต	$[n \times 1]$

สมการที่ (2.1) ลบด้วยสมการที่ (2.2) จะได้

$$\frac{dx}{dt} - \frac{d\hat{x}}{dt} = Ax + Bu - \{A\hat{x} + Bu + L[y - C\hat{x}]\} \quad (2.3)$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\frac{dx}{dt} - \frac{d\hat{x}}{dt} = [A - LC](x - \hat{x}) \quad (2.4)$$

สมการที่ 2.4 สามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{de}{dt} = [A - LC]e \quad (2.5)$$

เมื่อ $e = x - \hat{x}$

เมื่อค่าความแตกต่างของ $x - \hat{x} \rightarrow 0$ จะทำให้ค่าความผิดพลาดของตัวแปรสถานะซึ่งวัดได้จากระบบจริง และประมาณค่าจากตัวสังเกตหมดไปผลที่ได้นั้นจะทำให้ตัวสังเกตสามารถประมาณค่าของตัวแปรสถานะในระบบที่ต้องการทำตัวสังเกตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การใช้ตัวสังเกตในการประมาณค่าตัวแปรสถานะของระบบจะต้องมีการตรวจสอบระบบนั้นมีคุณสมบัติในตัวสังเกตได้ (observability) โดยพิจารณาเมตริกซ์ตัวสังเกตได้ (observability matrix) คือ

$$\text{Observability matrix} = \mathcal{G} = \begin{pmatrix} C \\ CA \\ \cdot \\ \cdot \\ CA^{n-1} \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

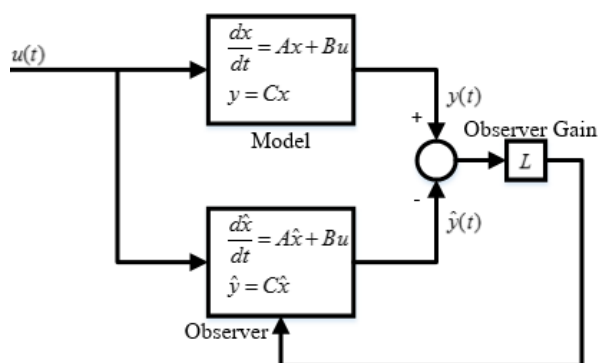
ระบบใดๆ จะมีคุณสมบัติตัวสังเกตได้ก็ต่อเมื่อ ค่าลำดับชั้นของเมตริกซ์ตัวสังเกตได้เท่ากับ n ($\text{Rank}[\mathcal{G}] = n$) เมื่อ n คือ อันดับของระบบหรือของเมตริกซ์ A สำหรับค่าอัตราขยายของตัวสังเกต (Observer Gain) สามารถหาได้จาก Ackermann's Formula

$$L = \phi(A) \begin{pmatrix} C \\ CA \\ \cdot \\ \cdot \\ CA^{n-1} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

เมื่อสมการลักษณะเฉพาะ คือ

$$\phi(\lambda) = \lambda^n + \alpha_1 \lambda^{n-1} + \dots + \alpha_{n-1} \lambda + \alpha_n \quad (2.8)$$

$$\phi(A) = A^n + \alpha_1 A^{n-1} + \dots + \alpha_{n-1} A + \alpha_n I \quad (2.9)$$



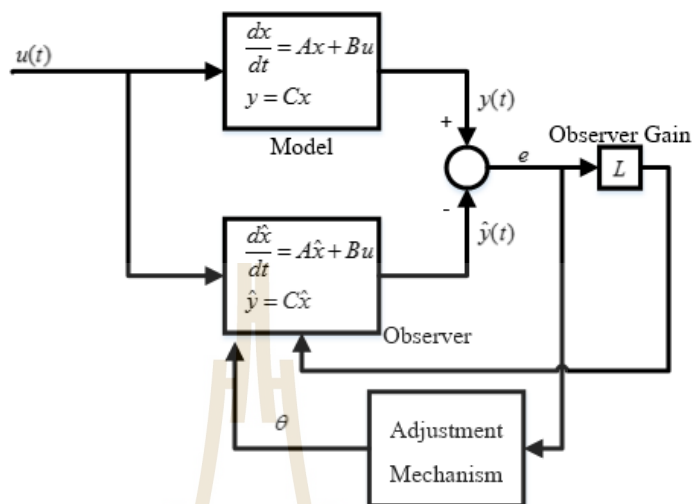
รูปที่ 2.6 แผนภาพหลักการการทำงานของตัวสังเกต

หลักการการทำงานของตัวสังเกต คือ จะนำอินพุตและเอาต์พุตของระบบที่ต้องการทราบค่าตัวแปรสถานะภายในระบบ รวมทั้งความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างระบบที่จะทำการสังเกต และนำตัวสังเกตมาประมวลผลโดยผ่านค่าอัตราขยายของตัวสังเกตเพื่อปรับค่าตัวแปรให้ตัวสังเกต เพื่อลดค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจนได้ค่าประมาณของตัวแปรสถานะที่ต้องการภายในระบบที่ไม่สามารถวัดได้โดยตรง ทั้งนี้การสร้างตัวสังเกตจำเป็นต้องทราบค่าตัวแปรทั้งหมดของระบบที่จะทำการสังเกตเพื่อนำค่าตัวแปรนั้นมาใช้ในโครงสร้างของตัวสังเกตการออกแบบตัวสังเกตเพื่อใช้งานต้องทำการหาค่าตัวแปรในระบบของตัวสังเกตซึ่งได้มาจากการระบุเอกลักษณ์ของระบบ (System Identification) ที่ต้องการจะประมาณค่าตัวแปรสถานะเพื่อหาค่าของตัวแปรที่ถูกต้องของระบบเพื่อนำไปใช้งาน ซึ่งจะทำให้การประมาณค่าตัวแปรสถานะของระบบที่ต้องการโดยใช้ตัวสังเกตมีความผิดพลาดลดลง และอีกส่วนหนึ่งที่สำคัญ คือการกำหนดตัวแปรของตัวสังเกตในขั้นตอนการหาค่าอัตราขยายตัวสังเกต เพื่อให้ค่าสัญญาณความผิดพลาดมีค่าน้อยที่สุด นั่นก็คือค่าสัญญาณเอาต์พุตของตัวสังเกตเท่ากับสัญญาณเอาต์พุตของระบบ ในทางปฏิบัติการออกแบบให้โพลของตัวสังเกตอยู่บนแกนจริง (Real Axis) เพื่อที่จะนำไปทำการหาค่าอัตราขยายของตัวสังเกต หากสามารถจัดรูปให้ไปอยู่ในรูปแบบที่เรียกว่ารูปแบบบัญญัติของตัวสังเกต (Observer Canonical Form) จะทำให้การออกแบบมีความสะดวกมากขึ้น โดยสามารถใช้สูตรแอกเคอร์มันน์ (Ackermann's Formula) ช่วยในการหาค่าอัตราขยายของตัวสังเกตได้

2.3 ระบบการปรับตัวได้ด้วยตัวชดเชยแบบปรับตัวได้จากวิธี Gradient Method

ระบบการปรับตัวได้ด้วยตัวชดเชยแบบปรับตัวจากวิธี Gradient Method ได้ถูกประยุกต์ใช้มาจากการปรับตัวได้ชนิดอ้างอิงแบบจำลอง มีหลักการงานคือจะปรับตัวแปรต่างๆภายในระบบเพื่อทำให้ความแตกต่างของเอาต์พุตของแบบจำลอง $y(t)$ และตัวสังเกต $\hat{y}(t)$ ที่ต้องการหมดไป

และผลต่างของเอาต์พุตทั้งสองจะประมวลผลผ่านกลไกการปรับตัวเพื่อปรับตัวแปรของระบบตัว
สังเกต ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แผนภาพหลักการทำงานของตัวชดเชยแบบปรับตัวได้

การปรับค่าตัวแปร (θ) เพื่อให้ความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตของตัวสังเกตและระบบ (e)
ที่ต้องการหมดไป โดยกำหนดให้ Loss function (J) มีค่า

$$J(\theta) = \frac{1}{2} e^2 \quad (2.10)$$

การปรับค่าของตัวแปร (θ) กำหนดโดย

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma \frac{dJ}{d\theta} = -\gamma e \frac{de}{d\theta} \quad (2.11)$$

$$e = y - \hat{y} \quad (2.12)$$

$$\frac{de}{d\theta} = -\frac{d\hat{y}}{d\theta} \quad (2.13)$$

โดยที่ $-\gamma$ คือ อัตราการปรับตัว (Adaptation Gain)

การปรับตัวได้ด้วยตัวชดเชยแบบปรับตัวจากวิธี Gradient Method จะทำการปรับค่าตัวแปรภายในระบบที่สนใจในทิศทาง Negative of Loss Function (J) เพื่อให้ค่าความแตกต่างระหว่างระบบ และตัวสังเกตหมดไปโดยความเร็วในการปรับตัวจะขึ้นอยู่กับค่าอัตราการปรับตัวซึ่งค่าอัตราการปรับตัวต้องเลือกใช้อย่างเหมาะสมเนื่องจากอาจจะทำให้ระบบขาดเสถียรภาพได้

2.4 การควบคุมระบบ

การควบคุมระบบในปัจจุบันมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการเข้ามาพัฒนาเทคโนโลยีในอุตสาหกรรม เช่น การควบคุมเครื่องจักรเพื่อกระบวนการผลิตที่รวดเร็ว และชีวิตประจำวัน เช่น การควบคุมเครื่องปรับอากาศของระบบปรับอากาศภายในอาคารให้คงที่ โดยทั่วไปแล้วระบบในธรรมชาติเป็นสิ่งที่เราไม่เข้าใจการทำงานของมันอย่างถ่องแท้ เหมือนกับเป็นกล่องดำที่เราทราบแต่เพียงว่าหากมีข้อมูลการกระตุ้นหรือรบกวนระบบหรืออาจเรียกว่า อินพุต (Input) และเราทราบว่าระบบจะมีการตอบสนอง ซึ่งเราเรียกว่า เอาท์พุต (Output) ดังนั้นแทนที่จะพยายามที่จะทำความเข้าใจกับระบบ แต่จะเลี่ยงไปทำความเข้าใจกับความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาท์พุตของระบบมากกว่า เพื่อที่จะหาวิธีการกำหนดอินพุตให้กับระบบเพื่อที่จะให้ระบบมีเอาท์พุตตามที่ต้องการ อย่างไรก็ตามการควบคุมระบบเรามีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเข้าใจการทำงานของระบบ แม้ว่าในหลายกรณีที่ระบบนั้นมีความซับซ้อนมากก็ตาม อาจจะต้องใช้วิธีการสร้างแบบจำลอง (Model) การทำงานของระบบขึ้นมา ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการสร้างแบบจำลองระบบ (System Modeling) จะเป็นการประมาณและกำหนดข้อจำกัดบางอย่างขึ้นมาเพื่อให้ระบบสามารถที่จะจำลองเป็นสมการคณิตศาสตร์ที่จะสามารถเข้าใจได้ดังนั้นในการศึกษาเรื่องการควบคุมระบบเราจะต้องศึกษาการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำความเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตกับเอาท์พุต และกำหนดอินพุตเพื่อที่ระบบจะให้เอาท์พุตตามที่ต้องการ การศึกษาในวิธีการควบคุมระบบมีความจำเป็นมากขึ้นเนื่องจากความต้องการในการใช้ทรัพยากรต่างๆ ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ระบบควบคุมที่มีประสิทธิภาพทำให้เราสามารถประหยัดพลังงาน เวลา และอื่นๆ ได้อย่างมากในขณะที่ได้ผลลัพธ์ออกมาได้ตามที่เราต้องการอย่างถูกต้อง

ระบบควบคุม คือ ส่วนประกอบหลายๆส่วนต่อเชื่อมกันขึ้นเป็นระบบที่จะให้การตอบสนองตามต้องการ พื้นฐานของการวิเคราะห์ระบบจะมีพื้นฐานจากทฤษฎีระบบเชิงเส้น ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ของอินพุตและเอาท์พุตหรือการตอบสนอง ในส่วนอินพุตและเอาท์พุตของระบบมักแทนด้วยสัญญาณโดยสัญญาณอินพุตจะเป็นส่วนสำคัญของผลลัพธ์หรือเอาท์พุต ระบบควบคุมแบ่งออกเป็น ระบบควบคุมแบบวงเปิด (Open Loop Control System) และระบบควบคุมแบบวงปิด (Closed Loop Control System)

2.4.1 ระบบควบคุมแบบวงเปิดหรือระบบควบคุมแบบไม่ป้อนกลับ (Open Loop Control System or No Feedback Control System)

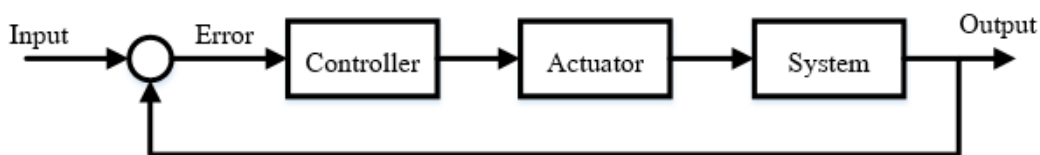
ระบบควบคุมวงเปิดเป็นระบบควบคุมส่วนใหญ่จะต้องอาศัยการคาดคะเน และการตัดสินใจในการกำหนดอินพุต ตัวอย่างเช่น การควบคุมอัตราการไหลของน้ำประปาในครัวเรือน การควบคุมมอเตอร์ของพัดลมเพื่อระบายอากาศที่มีการติดตั้งอุปกรณ์เปิด - ปิดเท่านั้น ซึ่งผู้ใช้จะต้องตัดสินใจในการเปิดการใช้งาน ดังนั้นระบบควบคุมแบบวงเปิด การใช้อุปกรณ์ Controller หรือ อุปกรณ์กระตุ้น (Control Actuator) เพื่อให้ได้การตอบสนองหรือเอาต์พุตที่เราต้องการ โดยไม่นำผลการตอบสนองของระบบเข้าสู่การพิจารณา ลักษณะของระบบควบคุมแบบเปิด ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ระบบควบคุมแบบเปิดหรือระบบควบคุมแบบไม่ป้อนกลับ

2.4.2 ระบบควบคุมแบบวงปิดหรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Closed Loop Control System or Feedback Control System)

ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ จะแตกต่างจากระบบควบคุมแบบเปิดก็คือ มีการนำเอาผลที่ได้จาก การตอบสนองของระบบมา ป้อนกลับเพื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณ อินพุตหรืออินพุตอ้างอิงจะทำให้ผลต่างความคลาดเคลื่อน (Error) ระหว่างสัญญาณอินพุตอ้างอิงกับสัญญาณเอาต์พุต เพื่อนำมาสร้างสัญญาณกระตุ้นระบบให้แก้ไขให้ผลต่างความคลาดเคลื่อนลดน้อยลงซึ่งผู้ควบคุมสามารถกำหนดเอาต์พุตให้ กับระบบ ได้ ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 มีหลักการ ดังนี้ โดยการนำผลต่างความคลาดเคลื่อนระหว่างสัญญาณอินพุตกับสัญญาณเอาต์พุตมา การประมวลผลผ่านระบบควบคุม (Controller) เพื่อกระตุ้นสัญญาณ (Actuator) ในกับระบบ (System) ให้ตอบสนองตามที่ต้องการ ซึ่งระบบควบคุมแบบปิดเป็นที่นิยมใช้ในปัจุบันและมีประสิทธิภาพในการควบคุมการตอบสนองมากกว่าระบบควบคุมแบบเปิด

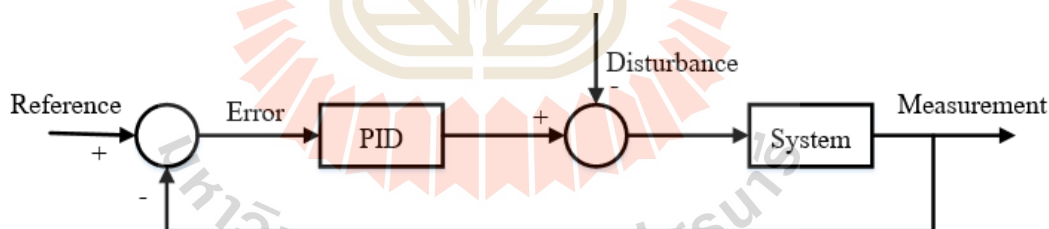


รูปที่ 2.9 ระบบควบคุมแบบเปิด

สำหรับระบบควบคุมหนึ่งๆนั้น อาจจะมีพารามิเตอร์หรือตัวแปรที่ต้องการจะควบคุมมากกว่าหนึ่งพารามิเตอร์ ซึ่งระบบควบคุมดังกล่าวเป็นระบบที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น แต่หลักการของระบบควบคุมก็จะเหมือนเดิม คือ ทุกตัวแปรที่เราต้องการควบคุมจะต้องมีการวัดค่าที่ได้จากเอาต์พุต และนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่เราต้องการของตัวแปรนั้นๆ สำหรับระบบควบคุมหลายตัวแปร (Multivariable Control System)

2.5 คุณสมบัติของตัวควบคุมระบบแบบพีไอดี

ระบบควบคุมมีตัวควบคุมหลายชนิด ซึ่งตัวควบคุมที่นิยมใช้ในระบบควบคุมระบบเป็นแบบพีไอดีโดยจะต่ออนุกรมกับระบบที่ต้องการควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ตัวควบคุมพีไอดีของระบบควบคุมแบบปิด

ระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID Controller) เป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง และมีประสิทธิภาพมาก ซึ่งตัวควบคุมแบบพีไอดีสามารถแก้ปัญหาที่ว่าร้อยละ 90 ในการควบคุมระบบ โดยระบบควบคุมแบบพีไอดีจะนำค่าความผิดพลาดจากการคำนวณของผลต่างคลาดเคลื่อนของสัญญาณอินพุตกับสัญญาณเอาต์พุตจากการตอบสนองของระบบ ระบบควบคุมแบบพีไอดีจะพยายามลดค่าความผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุดด้วยการปรับค่าสัญญาณกระตุ้นให้ระบบ ซึ่งสัญญาณกระตุ้นที่ออกจากตัวควบคุมดังสมการที่ (2.14)

$$u(t) = K_p (e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) dt + T_d \frac{de(t)}{dt}) \quad (2.14)$$

เมื่อ	$u(t)$	คือสัญญาณผ่านตัวควบคุม
	$e(t)$	คือผลต่างของสัญญาณอินพุตอ้างอิงกับสัญญาณเอาต์พุต
	K_p	คือ ค่าอัตราขยายแบบสัดส่วน
	T_i	คือ Integral Time
	T_d	คือ Derivative Time

สัญญาณของผลต่างของสัญญาณอินพุตอ้างอิงกับสัญญาณเอาต์พุตจะคลาดเคลื่อนผ่านตัวควบคุมพีไอดี โดยประกอบด้วยตัวควบคุม 3 แบบ คือ แบบสัดส่วน (Proportional) แบบอินทิกรัล (Integral) และแบบอนุพันธ์ (Derivative) แต่ละแบบสามารถนำมาประกอบกันเพื่อให้ได้ตัวควบคุมที่ต้องการควบคุมมีพารามิเตอร์ 3 ตัว คือ ค่าอัตราขยายแบบสัดส่วน ค่าอัตราขยายแบบอินทิกรัล และค่าอัตราขยายแบบอนุพันธ์ ซึ่งรายละเอียดจะมีดังนี้

2.5.1 การควบคุมแบบสัดส่วน

การควบคุมแบบสัดส่วนเป็นเทคนิคที่ง่ายที่สุด หลักการคือสัญญาณควบคุม $u(t)$ จากตัวควบคุมที่ส่งไปปรับกระบวนการที่เป็นสัดส่วนกับความคลาดเคลื่อน ซึ่งสามารถเขียนได้ในรูป

$$u(t) = K_p e(t) \quad (2.15)$$

เมื่อนำสมการ (2.15) แปลงลาปลาซ ซึ่งสามารถเขียนได้ในรูป

$$U(s) = K_p E(s) \quad (2.16)$$

คุณสมบัติของตัวควบคุมพี จะทำให้ระบบตอบสนองได้ไวขึ้นและลดความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว แต่ถ้าตัวควบคุมพีไม่เหมาะสมจะทำให้ระบบขาดเสถียรภาพได้

2.5.2 การควบคุมแบบอินทิกรัล

ผลตอบสนองของการควบคุมแบบสัดส่วนกับการควบคุมแบบอินทิกรัลสามารถอธิบายได้ในสมการ

$$u(t) = K_p (e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt) \quad (2.17)$$

เมื่อนำสมการ (2.17) แปลงลาปลาซ ซึ่งสามารถเขียนได้ในรูป

$$U(s) = \left(\frac{K_p s + K_i}{s} \right) E(s) \quad (2.18)$$

เมื่อ
$$K_i = \frac{K_p}{T_i}$$

เมื่อเปรียบเทียบกับสมการควบคุมแบบสัดส่วนแล้ว ความแตกต่างอยู่ที่เทอมไบแอส นั่นคือตัวควบคุมแบบสัดส่วนจะถูกกำจัดด้วยส่วนไบแอสเป็นค่าคงที่ ส่วนตัวควบคุมแบบอินทิกรัลจะมีการสะสมความคลาดเคลื่อนในการปรับค่าไบแอส นั่นคือทำหน้าที่เป็นตัวอินทิกรัลและจะหยุดสะสมความคลาดเคลื่อนของระบบเป็นศูนย์เมื่อผลตอบสนองของระบบเข้าสู่สมดุลสมบูรณ์แล้วไบแอสของระบบจะมีค่าน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับลักษณะของการรบกวน (Disturbance) การทำงานในลักษณะนี้จะคล้ายกับฟังก์ชันรีเซต ดังนั้นบางครั้งจึงเรียกตัวควบคุมแบบอินทิกรัลว่าฟังก์ชันรีเซต (Reset Function)

คุณสมบัติของตัวควบคุมแบบอินทิกรัลในการกำจัดความคลาดเคลื่อน เป็นข้อดีอย่างมาก จึงเป็นที่นิยมใช้กับระบบควบคุมแบบปิด แต่อย่างไรก็ตามตัวควบคุมอินทิกรัลก็มีข้อเสียทำให้เกิดความล่าช้า และทำให้ช่วงเวลากการแกว่งตัวยาวนานขึ้น โดยทั่วไประบบแบบควบคุมแบบสัดส่วนกับอินทิกรัล จะมีช่วงเวลากการแกว่งตัวนานกว่าระบบควบคุมแบบสัดส่วนอย่างเดียว 50% หรือ $T_{PI} = 1.5T_p$ สำหรับระบบที่มีค่าคงตัวเวลา (Time Constant) น้อยปัญหานี้จะไม่มีผลมากนัก แต่ถ้าระบบที่มีค่าคงตัวเวลามากจะทำให้ปัญหามาก จนทำให้ระบบเข้าสู่จุดวิกฤติที่ไม่สามารถยอมรับได้

การควบคุมแบบอินทิกรัลมีลักษณะเช่นเดียวกับการควบคุมแบบสัดส่วนตรง ผลกระทบของการเพิ่มอัตราขยายของตัวควบคุม หากค่าอัตราขยายมีค่ามากเกินไปจะทำให้ผลการตอบสนองของระบบมีการแกว่งตัว โดยทั่วไป T_i เป็นตัวแสดงว่าอัตราตอบสนองของระบบต่อ

สัญญาณควบคุมค่า T_i ที่น้อยกว่า จะทำให้ควบคุมมีการตอบสนองที่เร็วกว่าในระยะเริ่มต้น โดยที่ค่าความคลาดเคลื่อนของระบบเป็นบวกอยู่ ดังนั้นค่าความคลาดเคลื่อนจะศูนย์ ซึ่งจะทำให้เทอมตัวควบคุมโอหตุคทำงาน เทอมไบแอสก็จะมีค่าสูงกว่าที่ต้องการ ดังนั้นการตอบสนองจึงเกิดส่วนพุ่งเกิน (Overshoot) สูงกว่าที่กำหนดเป็นผลทำให้ตัวอินทิกรัลทำหน้าที่ปรับค่าความคลาดเคลื่อนให้มีความลดลง ในระบบควบคุมค่าที่วัดได้และค่าที่กำหนดควรเป็นค่าเดียวกัน หรืออีกนัยหนึ่งค่าความคลาดเคลื่อนในสถานะอยู่ตัวควรเป็นศูนย์หรือเข้าใกล้ศูนย์ ถ้ามีความคลาดเคลื่อนในสถานะสมดุล จะส่งผลทำให้ผลการตอบสนองเกิดการแกว่งตัว

2.5.3 การควบคุมแบบอนุพันธ์

ตัวควบคุมแบบสัดส่วนและอินทิกรัลต่างก็มีข้อจำกัดอยู่ที่ความคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นปัญหาต่อการควบคุมระบบ แต่ความคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่นี้สามารถรับได้ล่วงหน้าโดยพิจารณาจากแนวโน้มของความคลาดเคลื่อนหรืออัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณนั่นเอง ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์มีหลักการทำงานคือ ตัวควบคุมตอบสนองต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของความคลาดเคลื่อนถึงแม้ความคลาดเคลื่อนจะมีค่าน้อยมากสัญญาณออกของตัวอนุพันธ์ไม่ได้สัมพันธ์กับขนาดของความคลาดเคลื่อนแต่จะขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของความคลาดเคลื่อน ถ้าความคลาดเคลื่อนมีค่าคงที่ ตัวควบคุมอนุพันธ์ก็จะให้สัญญาณออกมาเป็นศูนย์ คุณสมบัติข้อนี้มีผลดีคือตัวควบคุมจะเกิดขึ้นก่อนที่ความคลาดเคลื่อนจะเพิ่มขึ้น และทำให้ระบบมีการตอบสนองที่เร็วขึ้น ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์สามารถเขียนได้ดังนี้

$$u(t) = K_p(e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt}) \quad (2.19)$$

เมื่อนำสมการ (2.19) แปลงลาปลาซ ซึ่งสามารถเขียนได้ในรูป

$$U(s) = (K_i + K_d s)E(s) \quad (2.20)$$

เมื่อ $K_d = K_p T_d$

โดยที่ T_d เป็นเวลาที่แสดงถึงผลการตอบสนองเนื่องจากตัวอนุพันธ์ การเพิ่ม T_d จะทำให้จะทำให้ผลการตอบสนองของตัวอนุพันธ์เร็วขึ้น เนื่องจากตัวอนุพันธ์มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงมาก ดังนั้นจึงนิยมใช้กับค่าที่วัดได้เท่านั้น แต่ไม่ใช้กับค่ากำหนดเพราะการเปลี่ยนค่ากำหนดมักจะเป็น

แบบขั้น (Step) ทำให้ผลตอบสนองของตัวอนุพันธ์เป็นพัลส์และทำให้เกิดการกระแทก (Bump) ของอุปกรณ์ให้ระบบ สำหรับค่าที่กำหนดใช้เฉพาะกับตัวควบคุมแบบสัดส่วนและอินทิกรัลตัวอนุพันธ์คือตัวควบคุมที่ทำงานในทิศทางตรงกันข้ามกับตัวอินทิกรัล ดังนั้นจึงใช้ในการปรับปรุงระบบที่มีการล่าช้าทางเวลามากๆ ทำให้ผลการตอบสนองเร็วขึ้น และช่วงเวลาแกว่งที่สั้นลง แต่ข้อเสียตัวควบคุมแบบอนุพันธ์มีความไวต่อสัญญาณรบกวนแม้สัญญาณรบกวนจะมีขนาดเล็กก็อาจจะส่งผลกระทบต่อสัญญาณที่ออกจากตัวควบคุม จึงเป็นไปได้ที่จะใช้ตัวอนุพันธ์ในการควบคุมผลของสัญญาณรบกวน ยิ่งไปกว่านั้นระบบใดที่มีสัญญาณรบกวนมาก จะไม่สามารถใช้ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ได้ ในวงการอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะใช้เพียงตัวควบคุมแบบพีไอเท่านั้น

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าที่กำหนดทันที ความคลาดเคลื่อนจะมีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีและส่งผลกระทบต่อผลตอบสนองของระบบ ถ้านำตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ไปใช้ควบคุมแบบสัดส่วนและอินทิกรัลจะส่งผลให้การทำงานของระบบดีขึ้น การควบคุมแบบอนุพันธ์ไม่มีผลต่อความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัว แต่จะลดช่วงเวลาที่ (Settling Time) โดยลดการแกว่ง

2.6 ปรัชญาธรรมชาติที่เกี่ยวข้อง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในการทำงานจะมีตัวควบคุมซึ่งทำหน้าที่ในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงให้ทำตามคำสั่งตามที่ต้องการ ตัวควบคุมที่ใช้มีหลายชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน และความเหมาะสม ตัวควบคุมที่ใช้บางประเภทต้องการค่าของตัวแปรสถานะเพื่อที่จะทำการควบคุมระบบให้ทำงานได้อย่างถูกต้อง และการที่ต้องการค่าของตัวแปรสถานะจึงเป็นที่มาของการนำเอาตัวสังเกตมาใช้งานในการประมาณค่าเนื่องจากช่วยลดค่าเนื่องจากช่วยลดค่าใช้จ่ายในการซื้ออุปกรณ์ตรวจวัดที่มีราคาแพง และลดความซับซ้อนในการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด ขณะทำงานมักจะมีแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงจากภายนอกมาเกี่ยวข้องเข้ามารบกวนการทำงานของระบบ แรงบิดที่เปลี่ยนแปลงเหล่านี้จะทำให้ระบบตัวสังเกตเกิดความผิดพลาด และประสิทธิภาพการทำงานของระบบควบคุมลดลง จึงเป็นที่มาของการนำเอาระบบการปรับตัวเอามาใช้เพื่อชดเชยค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง และสามารถประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงได้

Shengiang Li et al(2015)ได้นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ในการศึกษาาระบบไฟฟ้าแบบไดนามิก โดยใช้วิธีการสร้างแบบจำลองสำหรับระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งมีการเสนอพิจารณาสองสถานการณ์ คือ การทำงานของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยการใช้อุปกรณ์ป้องกันความต่างศักย์ไฟฟ้าอย่างรุนแรง (Severe Voltage Sags) และ การทำงานของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้อุปกรณ์ป้องกันความต่าง

ศักย์ไฟฟ้าที่ไม่รุนแรง (Mild Voltage Sage) ในการทำวิจัยจะทำงานผ่านซอฟต์แวร์การจำลองสถานการณ์

Dao ThanhLiem et al(2005)ได้นำเสนอการประมาณค่าแรงบิดสำหรับการประยุกต์เพื่อใช้แทนอุปกรณ์ตรวจวัดแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยนำวิธีการ Online Tuning Gray Fuzzy PID มาใช้ในระบบควบคุมเพื่อมาการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง ข้อดีของการนำระบบควบคุมแบบ Online Tuning Gray Fuzzy PID นอกจากจะสามารถวัดค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงได้โดยไม่ต้องติดตั้งอุปกรณ์ได้แล้วระบบควบคุมนี้ยังสามารถปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุมพีไอดี (PID Control) ได้อย่างอัตโนมัติเพื่อหาค่าอัตราขยายของตัวควบคุมได้อย่างเหมาะสม

Stefan Clara et al(2009)ได้นำเสนองานวิจัยการสร้างอุปกรณ์วัดค่าความเหน็ดและความหนาแน่นของของเหลวจากการนำวิธีการของการลอยตัวของก้อนแม่เหล็ก (diamagnetic) โดยการวัดความหนาแน่นจะนำก้อนแม่เหล็กแช่ในของเหลวที่ต้องการจะวัดค่า จะใช้หลักการการลอยของวัตถุเทียบความหนาแน่นของของเหลวเป็นระยะความสูงของวัตถุที่ลอยตัว การวัดความเหน็ดของของเหลวจะคล้ายกับลักษณะการวัดความหนาแน่น แต่จะวัดโดยเปรียบเทียบจากความถี่จากการแกว่งตัวของก้อนแม่เหล็กในแนวตั้ง ซึ่งแรงกระทำที่ก้อนแม่เหล็กขณะลอยตัวนั้นจะอาศัยแรงจากสนามแม่เหล็กซึ่งจะช่วยรักษาระดับของก้อนแม่เหล็กและการแกว่งตัวของแม่เหล็ก

Srisertpol and Khajomtraidat(2007)ได้นำเสนองานวิจัยวิธีการในการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้ โดยใช้วิธีการชดเชยแบบปรับตัวได้ (Adaptive Compensation) เพื่อประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงจากการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้ตัวสังเกตอันดับเต็มแบบปรับตัวจากวิธี Gradient Method และ Lyapunov's Direct Method ซึ่งการนำเอาตัวสังเกตแบบปรับตัวจากหลักการ Lyapunovทำให้ระบบมีเสถียรภาพ และเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมทำให้การตอบสนองของระบบมีความผิดพลาดลดลง

Kalender and Ege (2007)ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการพัฒนาในการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในเครื่องกววนสารแบบแท่งแม่เหล็ก สำหรับแก้ปัญหาของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ระหว่างการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้ในการกววนสารหรือผสมสาร ด้วยแท่งแม่เหล็ก โดยการปรับความต่างศักย์ไฟฟ้าและป้อนกระแสไฟฟ้าให้แก่ระบบ โดยการออกแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้กับระบบการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และใช้ พีไอซี ไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นบอร์ดควบคุมระบบขณะกววนสาร

2.7 สรุป

จากงานวิจัยที่ได้กล่าวมานั้นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ต้องการจะควบคุมจะมีประโยชน์อย่างมาก โดยเฉพาะแบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมาใช้ประโยชน์ต่องานวิจัยนี้ ซึ่งนำมาใช้ในการประมาณค่าของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงเพื่อประมาณค่าภาระกรรมจากภายนอกที่มารบกวนระบบด้วยการนำเอาตัวสังเกตอันดับเต็มมาใช้ ซึ่งตัวสังเกตจะทำหน้าที่ประมาณค่าตัวแปรสถานะของระบบในที่นี่ก็คือ แรงบิดที่เปลี่ยนแปลง และกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง พร้อมทั้งออกแบบตัวชดเชยแบบปรับตัวได้โดยวิธี Gradient Method เพื่อชดเชยค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง



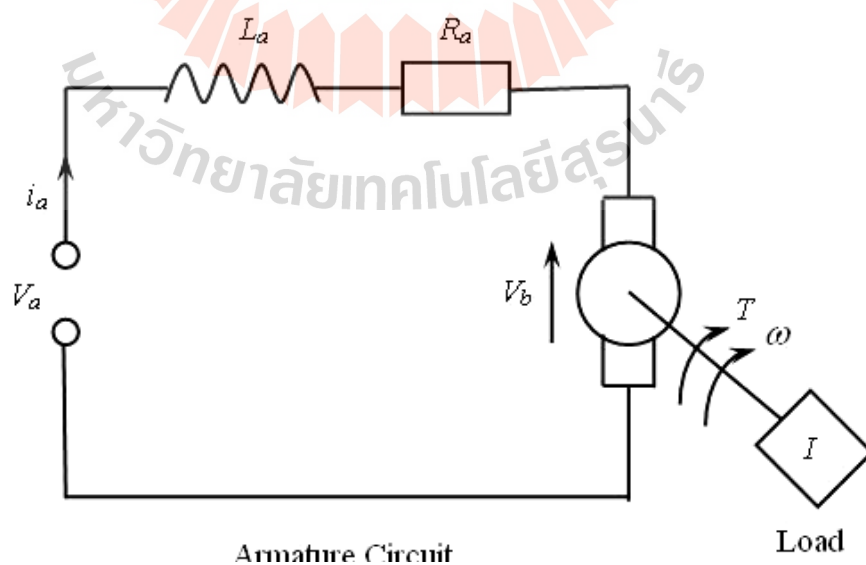
บทที่ 3

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การทำวิจัยในทางปฏิบัติ เครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็กใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นอุปกรณ์ต้นกำลังสำหรับกวนของเหลว จะต้องหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อนำมาใช้สำหรับการสร้างโครงสร้างของตัวชดเชยแบบปรับตัว และการสร้างตัวสังเกต เพื่อนำมาใช้ในการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

งานวิจัยนี้ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และนำเสนอการควบคุมด้วยวิธี Armature Control ใช้การปรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าให้กับวงจรอาร์เมเจอร์ (Armature Circuit) เพื่อการควบคุมความเร็วรอบโดยการให้กระแสไฟฟ้าให้กับวงจรสนาม (Field Circuit) คงที่จึงสามารถพิจารณาเฉพาะวงจรอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเนื่องจากกระแสที่ให้กับวงจรสนามมีค่าคงที่ ทำให้สนามแม่เหล็กของมอเตอร์คงที่ตามไปด้วย การควบคุมจะทำได้โดยการปรับเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ให้กับวงจรอาร์เมเจอร์ดังที่แสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพวงจรอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

พิจารณาสมการวงจรของไฟฟ้า

$$V_a - V_b = L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a \quad (3.1)$$

เมื่อ $V_b = K_b \omega$

ขณะการให้กระแสไฟฟ้าในกับวงจรมอเตอร์โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดที่วางตัวอยู่ในสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดแรงกระทำที่ขดลวด ซึ่งแรงกระทำที่ว่านี้จะส่งผลทำให้เกิดแรงบิดของมอเตอร์ ดังนั้นแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะกลายเป็นอินพุตให้กับระบบการควบคุม ซึ่งในที่นี้จะเอาขนาดความถี่ ความหน่วง และภาระการภายนอกที่มากระทำกับระบบทางกลพิจารณาสมการแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

$$T - T_L = I \frac{d\omega}{dt} + c\omega \quad (3.2)$$

เมื่อ $T = K_t i_a$

สมการของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในรูปแบบของ State Space Form

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= Ax + BV_a + DT_L \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (3.3)$$

- เมื่อ
- A คือเมตริกซ์สถานะของระบบ [2x2]
 - B คือเมตริกซ์อินพุตของระบบ [2x1]
 - C คือเมตริกซ์เอาต์พุตของระบบ [1x2]
 - D คือ เมตริกซ์ตัวรบกวนของระบบ [2x1]

จากสมการ (3.1) และ (3.2) จัดให้อยู่ในรูปแบบใหม่

$$I \frac{d\omega}{dt} = -c\omega + K_t i_a - T_L \quad (3.4)$$

$$L_a \frac{di_a}{dt} = -K_b \omega - R_a i_a + V_a \quad (3.5)$$

เมื่อแทนค่าตัวแปรของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจากสมการ (3.4) และ (3.5) จัดให้อยู่ในรูปของรูป State Space Form จะได้

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \omega \\ i_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{c}{I} & \frac{K_t}{I} \\ -\frac{K_b}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ i_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L_a} \end{bmatrix} V_a + \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \end{bmatrix} T_L$$

$$y = [1 \ 0] \begin{bmatrix} \omega \\ i_a \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

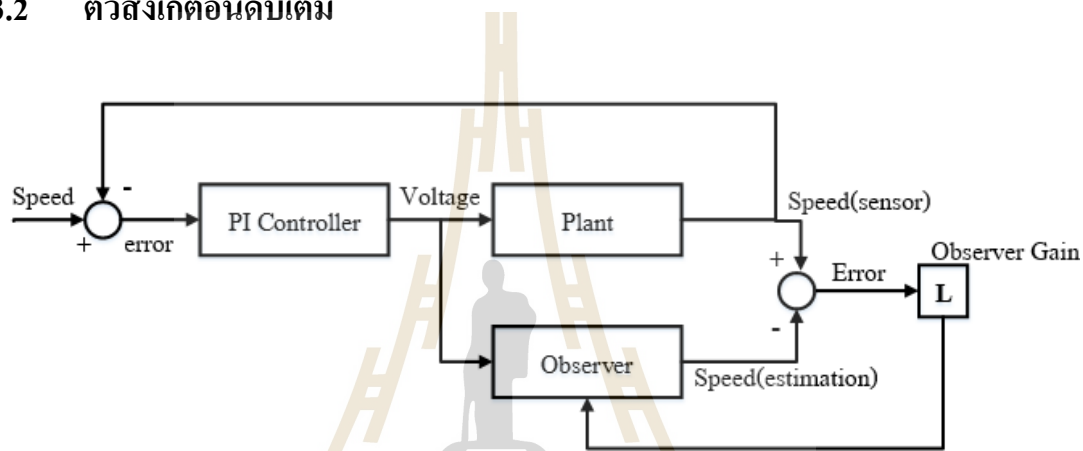
เมื่อ

I	คือ โมเมนต์ความเฉื่อย ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)
K_t	คือ ค่าคงที่ของแรงบิด ($\text{N} \cdot \text{m}/\text{A}$)
K_b	คือ ค่าคงที่ของ Electromotive Force ($\text{V} \cdot \text{s}/\text{rad}$)
T	คือ แรงบิดของมอเตอร์ ($\text{N} \cdot \text{m}$)
T_L	คือ แรงบิดที่เปลี่ยนแปลง ($\text{N} \cdot \text{m}$)
c	คือ ความหน่วง ($\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$)
R_a	คือ ความต้านทานของอาร์เมเจอร์ (Ω)
L_a	คือ ความเหนี่ยวนำของอาร์เมเจอร์ (H)
i_a	คือ กระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ (A)
ω	คือ ความเร็วรอบ (rad/s)
V_a	คือ ความต่างศักย์ของอาร์เมเจอร์ (V)
V_b	คือ ความต่างศักย์ back emf (V)

ในทางปฏิบัติตัวแปรสถานะของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ทำการศึกษานั้นไม่สามารถวัดค่าได้โดยตรง ดังนั้นหากมีความจำเป็นต้องทราบค่าตัวแปรสถานะของระบบเพื่อนำไปใช้ ประโยชน์เพื่อการควบคุมระบบจึงต้องมีการประมาณค่าโดยใช้ตัวสังเกตทั้งนี้ระบบต้องมีคุณสมบัติในการสังเกตได้ ระบบที่สามารถประมาณค่าตัวแปรสถานะโดยใช้ตัวสังเกตได้นั้นต้องสามารถทราบค่าอินพุท และเอาต์พุทของระบบได้ที่ต้องการจะประมาณค่าตัวแปรสถานะ และ

เอาที่พู่จากระบบของตัวสังเกตมาประมวลผลผ่านค่าอัตราขยายของตัวสังเกตเพื่อลดค่าความผิดพลาดระหว่างทั้งสองระบบ ในการทำวิจัยนี้ใช้ตัวสังเกตที่เป็นอันดับเต็ม โดยที่ระบบที่ทำการศึกษาที่มีค่าอินพุท คือค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าให้กับวงจรรออาร์เมเจอร์ และค่าของกระแสไฟฟ้า เมื่อมีแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงเข้ามารบกวนระบบการทำงานของตัวสังเกตจะมีความผิดพลาดเกิดขึ้น จึงต้องมีการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง และชดเชยให้กับตัวสังเกตเพื่อลดความผิดพลาดจากแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง

3.2 ตัวสังเกตอันดับเต็ม



รูปที่ 3.2 แผนภาพระบบควบคุมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวสังเกตอันดับเต็ม

จากสมการของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในรูปแบบ State Space Form ได้ค่าเมตริกซ์ คือ

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{c}{I} & \frac{K_t}{I} \\ -\frac{K_b}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L_a} \end{bmatrix}, C = [1 \ 0], D = \begin{bmatrix} -\frac{1}{I} \\ 0 \end{bmatrix}$$

ตรวจสอบคุณสมบัติในการควบคุมได้ของระบบตัวสังเกต

$$P_c = [B \ AB] \tag{3.7}$$

หากค่า $\det(P_c) \neq 0$ ระบบมีคุณสมบัติในการควบคุมได้

คุณสมบัติตัวสังเกต พิจารณาจาก

$$P_o = \begin{bmatrix} C \\ CA \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

หากค่า $\det(P_o) \neq 0$ ระบบมีคุณสมบัติในการสังเกตได้

การหาค่าอัตราการขยายของตัวสังเกต พิจารณาจาก

$$\phi(s) = s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 \quad (3.9)$$

เมื่อ ζ คือค่าอัตราส่วนความหน่วงของตัวสังเกต และ ω_n คือ ค่าความถี่ธรรมชาติของตัวสังเกตซึ่งค่าทั้งสองนี้สามารถเลือกตามความเหมาะสมในการออกแบบ เพื่อให้ตัวสังเกตทำงานได้ผลการตอบสนองตามต้องการ

การหาค่าอัตราขยายของตัวสังเกต

$$L = \phi(A) \begin{bmatrix} C \\ CA \end{bmatrix}_o^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

สมการของสังเกตอันดับเต็มในรูปแบบของ State Space Form

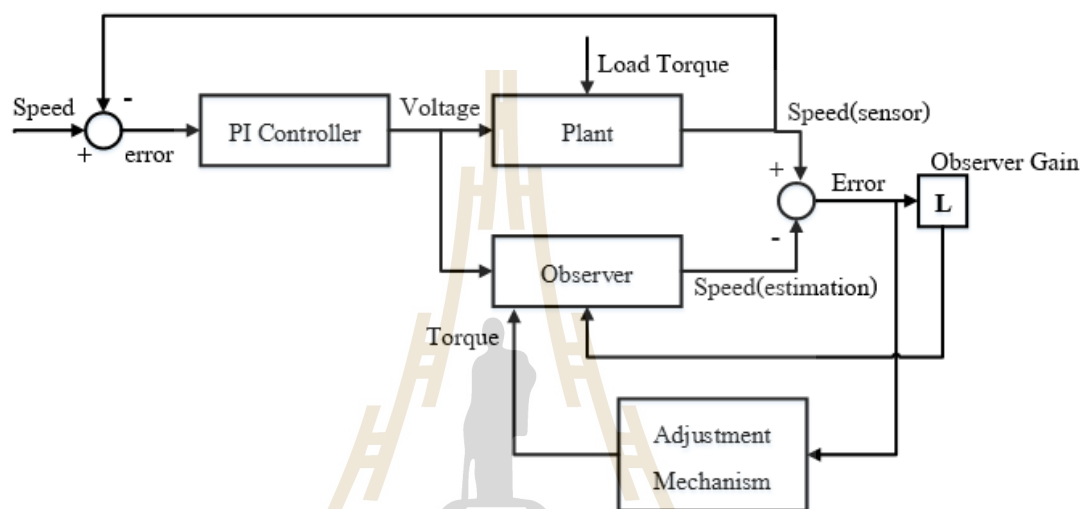
$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{i}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{c}{I} & \frac{K_t}{I} \\ -\frac{K_b}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{i}_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L_a} \end{bmatrix} V_a + \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \end{bmatrix} \hat{T}_L + \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \end{bmatrix} e \quad (3.11)$$

$$\hat{y} = [1 \ 0] \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{i}_a \end{bmatrix}$$

เมื่อ $e = y - C\hat{x} = \omega - \hat{\omega}$

โดยกำหนดให้ค่าที่มีสัญลักษณ์ " \wedge " คือค่าตัวแปรของตัวสังเกตที่ได้มาจากการประมาณค่าจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และค่า e คือค่าความผิดพลาดของความเร็วรอบที่เกิดขึ้นระหว่างมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงกับตัวสังเกต

3.3 การประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงโดยตัวชดเชยแบบปรับค่าได้



รูปที่ 3.3 แผนภาพการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงให้กับตัวสังเกตอันดับเต็ม

การใช้ตัวชดเชยแบบปรับค่าได้โดยวิธี Gradient Method ในการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และเงื่อนไขในการปรับค่าของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงในหลักการชดเชยจะใช้ของความแตกต่างระหว่างความเร็วของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และค่าความเร็วที่ได้จากประมาณค่าของตัวสังเกต เมื่อพิจารณาสมการ (3.1) และ (3.2) ระบบที่มีอินพุทคือความต่างศักย์ที่ให้กับอาร์เมเจอร์ และเอาต์พุทคือค่าความเร็วรอบจากสมการของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ตามลำดับ

$$V_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + K_b \omega \quad (3.12)$$

$$I \frac{d\omega}{dt} = -c\omega + K_t i_a - T_L \quad (3.13)$$

จัดรูปสมการ (3.12) และ (3.13) ใหม่

$$\begin{aligned} \frac{K_t}{L_a I} V_a = & \frac{d^2 \omega}{dt^2} + \left(\frac{R_a}{L_a} + \frac{c}{I} \right) \frac{d\omega}{dt} + \left(\frac{R_a c}{L_a I} + \frac{K_b K_t}{L_a I} \right) \omega \\ & + \frac{1}{I} \frac{dT_L}{dt} + \frac{R_a}{L_a I} T_L \end{aligned} \quad (3.14)$$

เมื่อมีการระบุเอกลักษณ์ ของระบบแล้วค่าของตัวแปรต่างๆ ในระบบจะคงที่มีค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงเพียงตัวแปรเดียวที่ทำให้เกิดความผิดพลาดของการประมาณค่าตัวแปรสถานะ คือ ค่าของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง (\hat{T}_L) และค่าตัวแปรของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนั้นไม่สามารถวัดค่าได้โดยตรงแต่จะได้จากสมการประมาณ แต่ในส่วนของการจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะสมมุติว่าสามารถทราบค่าตัวแปรทุกตัวภายในระบบ พิจารณาสมการของตัวสังเกต

$$\begin{aligned} \frac{K_t}{L_a I} V_a = & \frac{d^2 \hat{\omega}}{dt^2} + \left(\frac{R_a}{L_a} + \frac{c}{I} \right) \frac{d\hat{\omega}}{dt} + \left(\frac{R_a c}{L_a I} + \frac{K_b K_t}{L_a I} \right) \hat{\omega} \\ & + \frac{1}{I} \frac{dT_L}{dt} + \frac{R_a}{L_a I} \hat{T}_L \end{aligned} \quad (3.15)$$

เมื่อ $b = \frac{K_t}{L_a I}$, $\alpha_1 = \frac{R_a}{L_a I}$, $a_1 = \left(\frac{R_a c}{L_a I} + \frac{K_b K_t}{L_a I} \right)$, $\alpha_2 = \frac{1}{I}$ และ $a_2 = \left(\frac{R_a}{L_a} + \frac{c}{I} \right)$

จัดรูปสมการที่ (3.14) และ (3.15) ใหม่ตามลำดับ

$$bV_a = \frac{d^2 \omega}{dt^2} + a_2 \frac{d\omega}{dt} + a_1 \omega + \alpha_2 \frac{dT_L}{dt} + \alpha_1 T_L \quad (3.16)$$

$$bV_a = \frac{d^2 \hat{\omega}}{dt^2} + a_2 \frac{d\hat{\omega}}{dt} + a_1 \hat{\omega} + \alpha_2 \frac{dT_L}{dt} + \alpha_1 \hat{T}_L \quad (3.17)$$

ดังนั้นหลักการการทำงานของตัวชดเชยแบบปรับตัวได้คือการปรับค่าตัวแปรแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง (\hat{T}_L) ให้ความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตทั้งสองหมดไป ทำได้โดยให้ Loss Function (J) ที่มีค่า

$$J(\hat{T}) = \frac{1}{2}e^2 \quad (3.18)$$

นำสมการที่(3.16)ลบด้วยสมการที่(3.17)

$$0 = \frac{d^2e}{dt^2} + a_1 \frac{de}{dt} + a_2e + \alpha_1 \left(\frac{dT_L}{dt} - \frac{d\hat{T}_L}{dt} \right) + \alpha_2(T_L - \hat{T}_L) \quad (3.19)$$

เมื่อ $\frac{d^2e}{dt^2} = \frac{d^2\omega}{dt^2} - \frac{d^2\hat{\omega}}{dt^2}$, $\frac{de}{dt} = \frac{d\omega}{dt} - \frac{d\hat{\omega}}{dt}$ และ $e = \omega - \hat{\omega}$

การเปลี่ยนแปลงของตัวแปร (\hat{T}_L) ในทิศทาง Negative gradient of Loss function (J) คือ

$$\frac{\partial \hat{T}_L}{\partial t} = -\gamma \frac{\partial J}{\partial \hat{T}_L} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial \hat{T}_L} \quad (3.20)$$

จาก MIT Rule จะได้ตัวแปรปรับค่า คือ

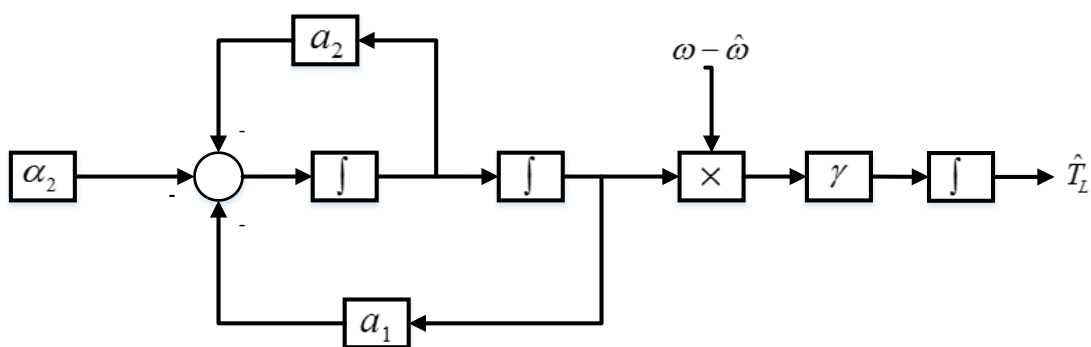
$$\frac{\partial e}{\partial \hat{T}_L} = -\frac{\partial \hat{\omega}}{\partial \hat{T}_L} \quad (3.21)$$

โดยที่ γ คืออัตราการปรับตัวและกำหนดให้ Sensitivity Function เท่ากับ

$$v = \frac{\partial \hat{\omega}}{\partial \hat{T}_L} \quad (3.22)$$

เมื่อตัวแปรปรับค่ามีการเปลี่ยนแปลงการเปลี่ยนแปลงของสมการที่ 3.22ต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรปรับค่า คือ

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + a_2 \frac{\partial v}{\partial t} + a_1 v = -\alpha_1 \quad (3.23)$$



รูปที่ 3.4 แผนภาพระบบตัวชดเชยแบบปรับค่าได้โดยวิธี Gradient Method
สำหรับการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง

3.4 สรุป

เมื่อพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็กใช้มอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงเป็นอุปกรณ์สำหรับกวนของเหลว และนำเสนอการควบคุมด้วยวิธี Armature Control แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะนำมาสร้างระบบตัวสังเกตอันดับเต็ม เพื่อประมาณค่าตัวแปรสถานะของระบบ โดยมีระบบควบคุมแบบพีไอ (PI Controller) ทั้งนี้การนำระบบตัวสังเกตอันดับเต็มมาใช้ระบบจะต้องมีคุณสมบัติของระบบควบคุมได้กับคุณสมบัติของตัวสังเกตได้ ในขณะที่ระบบของมอเตอร์ทำงานเมื่อมีแรงบิดจากภายนอกเข้ามารบกวนระบบ ระบบจะมีตัวชดเชยแบบปรับค่าได้เพื่อประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงไปชดเชยให้ระบบตัวสังเกต เพื่อลดค่าของผลต่างระหว่างความเร็วรอบของระบบมอเตอร์กับความเร็วรอบจากการประมาณของระบบสังเกต

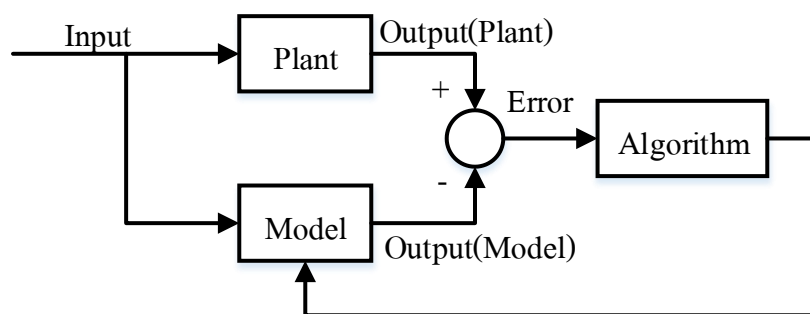
บทที่ 4

การออกแบบตัวควบคุม ตัวสังเกต และผลการจำลองสถานการณ์

ในบทนี้จะแสดงการออกแบบตัวควบคุม ตัวสังเกต และผลการจำลองสถานการณ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งการจำลองสถานการณ์ของระบบจะพิจารณาระบบควบคุมแบบปิดด้วยตัวควบคุมแบบพีไอการออกแบบตัวควบคุมและตัวสังเกต จะต้องทราบค่าพารามิเตอร์ของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจากการระบุเอกลักษณ์ เพื่อจัดรูปของปริภูมิสถานะของระบบนำไปสู่การออกแบบตัวควบคุมและตัวสังเกต ส่วนของการจำลองสถานการณ์ในของการทดสอบความสามารถของตัวควบคุมและตัวสังเกตในกรณีที่สัญญาณอ้างอิงความเร็วรอบคงที่และกรณีที่สัญญาณอ้างอิงความเร็วรอบที่เปลี่ยนแปลง ลำดับต่อมาจะกล่าวถึงการทำงานของตัวสังเกตในกรณีที่แรงบิดจากภายนอกเข้ามารบกวนระบบ จนนำไปสู่การชดเชยแบบปรับตัวได้ด้วยวิธีการ Gradient Method เพื่อประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง

4.1 การระบุเอกลักษณ์

การออกแบบระบบควบคุมนั้นจะต้องทำความเข้าใจกับพฤติกรรมของระบบที่ต้องการจะควบคุมดังนั้นการออกแบบระบบควบคุมจะทำได้ก็ต่อเมื่อแก้ปัญหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือจะกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือจำเป็นต้องสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ต้องการจะควบคุมเสียก่อน อย่างไรก็ตามปัญหาที่พบในบางระบบมาจากการที่เราไม่ทราบค่าพารามิเตอร์ของระบบนั้นๆ โดยค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวสามารถหาได้ด้วยการระบุเอกลักษณ์ของระบบ (System Identification) ซึ่งเป็นการจำลองการตอบสนองของระบบที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Model) เปรียบเทียบกับผลการตอบสนองของระบบจริง (Plant) แล้วทำการปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นจนกระทั่งให้ผลการตอบสนองแบบเดียวกับระบบจริง การระบุเอกลักษณ์ของระบบโดย Parameter Estimation ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งจากหลายวิธีในการระบุเอกลักษณ์ของระบบที่ได้รับความนิยมและถูกนำมาไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวาง หลักการทำงานนั้นจะอาศัยการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการตอบสนองของระบบจริง ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แผนภาพแสดงการระบุเอกลักษณ์ของระบบโดย

Parameter Estimation

ผลต่างระหว่างผลการตอบสนองของแบบจำลองกับผลการตอบสนองของระบบจริงจะคลาดเคลื่อนผ่านอัลกอริทึมเพื่อปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม เช่น วิธีการประมาณค่าด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Lest Square) ซึ่งสามารถช่วยปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จนกระทั่งมีผลการตอบสนองใกล้เคียงกับระบบจริงในที่สุด โดยปกติก่อนทำการระบุเอกลักษณ์ของระบบควบคุมควรตรวจสอบว่ามีค่าพารามิเตอร์ที่สามารถทำการวัดได้หรือไม่ หากมีค่าพารามิเตอร์ที่สามารถวัดได้ให้ทำการวัดค่าเพื่อลดจำนวนพารามิเตอร์ที่จะต้องหาด้วยการระบุเอกลักษณ์และส่งผลทำให้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์มีความผิดพลาดน้อยลง ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ได้จากการจากการระบุเอกลักษณ์แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์

พารามิเตอร์	ค่าตัวแปร	หน่วย
I	1.6×10^{-6}	$\text{Kg} \cdot \text{m}^2$
L_a	2.95	mH
R_a	4.95	Ω
K_t	0.0346	m/A
K_b	0.0354	v · s/rad
c	4.5×10^{-5}	$\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s/rad}$

จากผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบด้วยวิธีการระบุเอกลักษณ์ จึงทำให้สามารถนำไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบได้ ซึ่งจะมีส่วนในการวิเคราะห์และออกแบบระบบตัวควบคุมกับตัวสังเกต อีกทั้งสามารถนำไปจำลองสถานการณ์ได้

4.2 การออกแบบตัวสังเกต

ในงานวิจัยนี้ต้องการประมาณปริมาณจากการประมาณแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงผ่านการให้กระแสไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อรักษาความเร็วรอบให้คงที่ ในทางปฏิบัติพบว่ากระแสไฟฟ้าไม่สามารถวัดได้โดยตรงหรืออาจจะวัดได้แต่ต้องใช้อุปกรณ์ที่มีราคาสูง ดังนั้นจึงนำตัวสังเกตสถานะมาประมาณค่ากระแสไฟฟ้า ซึ่งกระแสไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กับตัวแปรสถานะของตัวสังเกต โดยตัวสังเกตที่นำมาใช้เป็นตัวสังเกตอันดับเต็ม การออกแบบตัวสังเกตอันดับเต็มจะมีวิธีดังต่อไปนี้

สมการมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในรูปแบบของ State Space Form

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \omega \\ i_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{c}{I} & \frac{K_t}{I} \\ -K_b & -R_a \\ L_a & L_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ i_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ L_a \end{bmatrix} V_a + \begin{bmatrix} -1 \\ I \\ 0 \end{bmatrix} T_L \quad (4.1)$$

$$y = [1 \ 0] \begin{bmatrix} \omega \\ i_a \end{bmatrix}$$

สมการตัวสังเกตอันดับเต็มในรูปแบบของ State Space Form

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{i}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{c}{I} & \frac{K_t}{I} \\ -K_b & -R_a \\ L_a & L_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{i}_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ L_a \end{bmatrix} V_a + \begin{bmatrix} -1 \\ I \\ 0 \end{bmatrix} \hat{T}_L + \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \end{bmatrix} e \quad (4.2)$$

$$\hat{y} = [1 \ 0] \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{i}_a \end{bmatrix}$$

เมื่อพิจารณาแบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในรูปแบบของ State Space Form ในกรณีที่ไม่มีแรงจากภายนอกมารบกวน

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (4.3)$$

เมื่อแทนค่าตัวแปรของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะได้

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \omega \\ i_a \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{c}{I} & \frac{K_t}{I} \\ -\frac{K_b}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ i_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L_a} \end{bmatrix} V_a \\ y &= [1 \ 0] \begin{bmatrix} \omega \\ i_a \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.4)$$

จะได้

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \omega \\ i_a \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -28 & 21,625 \\ -12 & -1,678 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ i_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 340 \end{bmatrix} V_a \\ y &= [1 \ 0] \begin{bmatrix} \omega \\ i_a \end{bmatrix} \end{aligned}$$

การออกแบบตัวสังเกตสำหรับประมาณค่าตัวแปรสถานะของระบบใดๆต้องพิจารณาคุณสมบัติในการสังเกตได้ของระบบ และคุณสมบัติในการควบคุมเพื่อจะได้ค่าตัวแปรสถานะในการออกแบบระบบควบคุมต่อไป

พิจารณาคู่สมบัตินในการควบคุมได้ของระบบ

$$\begin{aligned} P_c &= [B \ AB] = \begin{bmatrix} 0 & 7.3305 \times 10^6 \\ 340 & -0.5688 \times 10^6 \end{bmatrix} \\ \det(P_c) &= -2.492 \times 10^9 \neq 0 \end{aligned} \quad (4.5)$$

ดังนั้น ระบบมีคุณสมบัติในการควบคุมได้

พิจารณาคูณสมบัติความสังเกตได้ของระบบ

$$P_o = \begin{bmatrix} C \\ CA \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -28 & 21,625 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

$$\det(P_o) = 21,625 \neq 0$$

ดังนั้น ระบบมีคุณสมบัติความสังเกตได้

การหาค่าอัตราขยายของตัวสังเกต โดยพิจารณาจาก

$$\phi(s) = s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 \quad (4.7)$$

เลือก $\zeta = 0.8$ และ $\omega_n = 1250$ rad/sec

จะได้ $\phi(s) = s^2 + 2,000s + 1,562,500$

และค่าโพลของตัวสังเกต $s = -1000 \pm 750i$

พิจารณา

$$\begin{aligned} \phi(A) &= A^2 + 2000A + 1,562,500I \\ &= \begin{bmatrix} -28 & 21,625 \\ -12 & -1,678 \end{bmatrix}^2 + 2,000 \begin{bmatrix} -28 & 21,625 \\ -12 & -1,678 \end{bmatrix} + 1,562,500 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1.2475 \times 10^6 & 6.3558 \times 10^6 \\ -0.0035 \times 10^6 & 0.7626 \times 10^6 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

เมื่อ $L = \phi(A)P_o^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$

อัตราขยายของตัวสังเกต คือ $L = \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 293.9089 \\ 35.2665 \end{bmatrix}$

พิจารณาจากสามการ

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(e) = (A - LC)\hat{x} + Bu + Ly \quad (4.8)$$

จะได้สมการของตัวสังเกต คือ

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{i}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -322 & 21,625 \\ -47 & -1,678 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{i}_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 340 \end{bmatrix} V_a + \begin{bmatrix} 293.9089 \\ 35.2665 \end{bmatrix} \omega$$

เมื่อ L คือค่าเมตริกซ์อัตราขยายของตัวสังเกต และ e คือค่าความแตกต่างระหว่างความเร็วของระบบจริง และตัวสังเกต การตอบสนองของตัวสังเกตเป็นผลมาจากการเลือกค่าโพลของตัวสังเกตในการออกแบบอย่างเหมาะสม

4.3 การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอ

การควบคุมระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะควบคุมความเร็วรอบให้คงที่ตัวควบคุมที่ใช้ นั้นมีหลากหลายวิธีที่ใช้ควบคุมระบบ ซึ่งสามารถเลือกตัวควบคุมโดยพิจารณาจากฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง คือ

$$G(s) = \frac{\omega(s)}{V_a(s)} = \frac{K_t}{IL_a \cdot s^2 + (IR_a + cL_a) \cdot s + (cR_a + K_b K_t)} \quad (4.9)$$

จากสมการที่ 4.9 คือฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงพบว่าเป็นระบบชนิด 0 (type-0) เมื่อต้องการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ให้คงที่ สัญญาณอ้างอิงอินพุตให้กับระบบควบคุมแบบปิดจึงเป็นสัญญาณอินพุทแบบขั้นบันได (Step Input) จะส่งผลให้เกิดค่าความผิดพลาด (Steady-State Error) ที่สภาวะคงตัว เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงผลให้เกิดค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวของระบบ Type

	Type-0	Type-1	Type-2
Input	Steady-State Error	Steady-State Error	Steady-State Error
Step	$\frac{1}{1+k_p}$	0	0
Ramp	∞	$\frac{1}{k_v}$	0
Parabolic	∞	∞	$\frac{1}{k_a}$

โดย

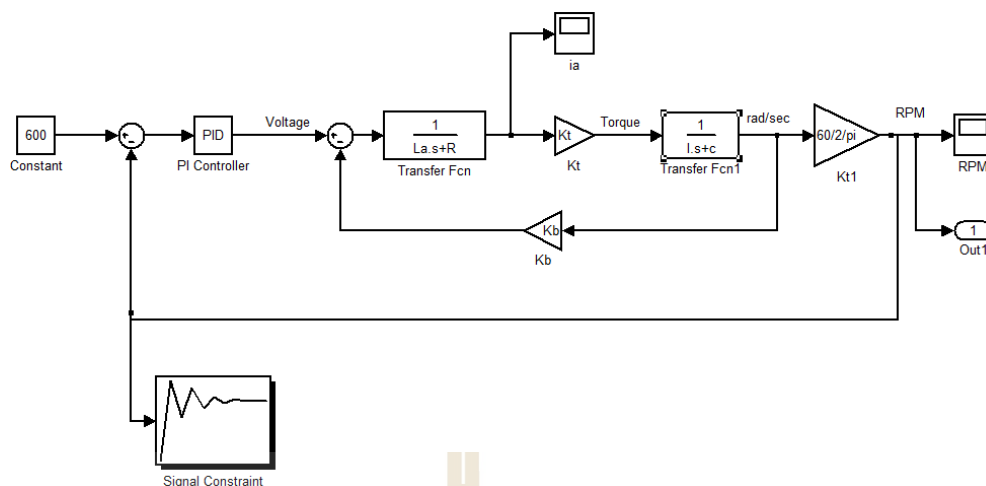
$$k_p = \lim_{s \rightarrow 0} G(s)$$

$$k_v = \lim_{s \rightarrow 0} sG(s)$$

$$k_a = \lim_{s \rightarrow 0} s^2G(s)$$

จากตารางที่ 4.2 จึงนำมาสู่การเลือกตัวควบคุมแบบพีไอ (PI Controller) ซึ่งสามารถเพิ่มให้ระบบเป็นระบบชนิด 1 (type-1) จึงทำให้ค่าความผิดพลาดที่สถานะคงตัวหมดไป

การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอจะทำการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมพีไอด้วยวิธี Response Optimization ของโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมพีไอที่เหมาะสม โดยการกำหนดลักษณะของการตอบสนองที่เหมาะสม ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดสัญญาณเอาต์พุตให้มี Rise Time น้อยกว่า 1 วินาที Settling Time น้อยกว่า 5 วินาที และ %Overshoot น้อยกว่า 10 ซึ่งข้อกำหนดเหล่านี้จะถูกระบุใน Signal Constraint Toolbox ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แผนภาพแบบจำลองการใช้โปรแกรมหาค่าสัมประสิทธิ์ตัวควบคุมพีไอ สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

จากการหาค่าสัมประสิทธิ์ตัวควบคุมแบบพีไอด้วยวิธี Response Optimization ของโปรแกรม MATLAB/Simulink ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดของแบบจำลองอ้าง คือ

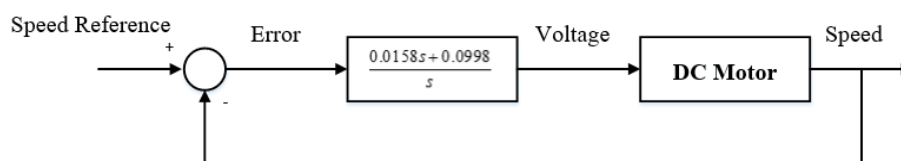
$$K_p = 0.0158$$

$$K_i = 0.0998$$

สามารถเขียนให้อยู่ในรูปฟังก์ชันการถ่ายโอนได้ดังสมการที่ 4.10

$$G_c(s) = \frac{K_p s + K_i}{s} = \frac{0.0158s + 0.0998}{s} \tag{4.10}$$

โดยมีลักษณะแผนภาพการทำงานของระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แผนภาพการทำงานของตัวควบคุมพีไอ

4.4 การจำลองสถานการณ์

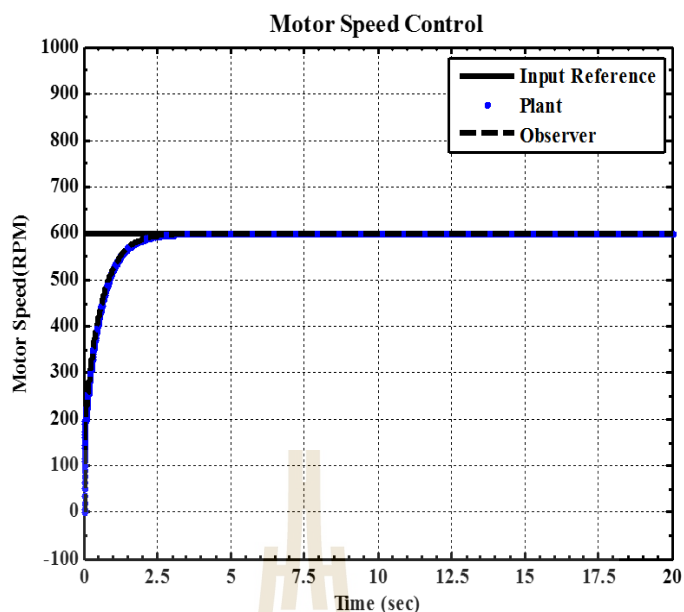
ในหัวข้อนี้แสดงผลการจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่เป็นระบบปิดด้วยมีตัวควบคุมแบบพีไอ โดยพิจารณาการจำลองสถานการณ์การทำงานของตัวควบคุมแบบพีดีและสังเกตอันดับเต็มเพื่อประมาณตัวแปรสถานะ ในกรณีที่ความเร็วรอบอ้างอิงคงที่ และในกรณีที่ความเร็วรอบอ้างอิงเปลี่ยนแปลง อีกทั้งยังแสดงผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่ระบบมีแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงมารบกวนระบบ โดยแบ่งการจำลองสถานการณ์ดังต่อไปนี้

- การทำงานของตัวควบคุมแบบพีดีและตัวสังเกตอันดับเต็ม
 - กรณีที่ 1 ความเร็วรอบอ้างอิงคงที่
 - กรณีที่ 2 ความเร็วรอบอ้างอิงเปลี่ยนแปลง
- การทำงานของตัวควบคุมแบบพีไอและตัวสังเกตอันดับเต็มในกรณีที่ระบบได้รับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง
- การทำงานของตัวควบคุมแบบพีไอและตัวสังเกตอันดับเต็มในกรณีที่ระบบได้รับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง โดยมีตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ให้กับตัวสังเกต

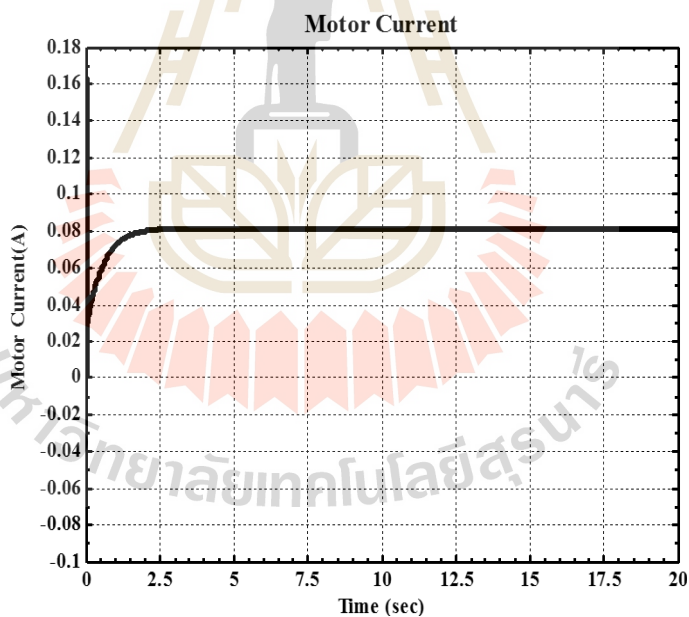
4.4.1 การทำงานของตัวควบคุมและตัวสังเกต

ในหัวข้อนี้จะแสดงการทำงานของตัวควบคุมแบบพีดี และตัวสังเกตอันดับเต็ม โดยจะแบ่งการทำงานของระบบเป็น 2 กรณี

กรณีที่ 1 พิจารณาการทำงานของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ และตัวสังเกตอันดับเต็มในกรณีที่ระบบได้รับสัญญาณความเร็วรอบอ้างอิงคงที่ 600 รอบต่อนาที ผลตอบสนองของการทำงานของระบบดังแสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5

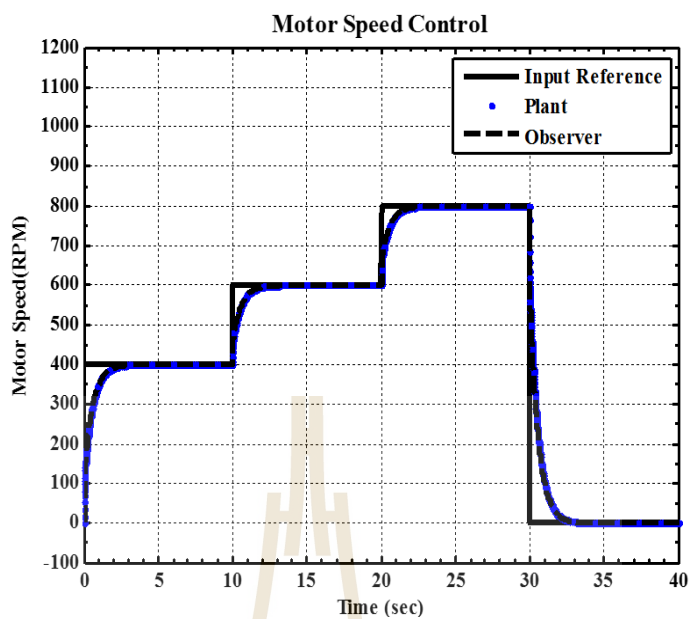


รูปที่ 4.4 ผลการแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับกรณีที่ 1

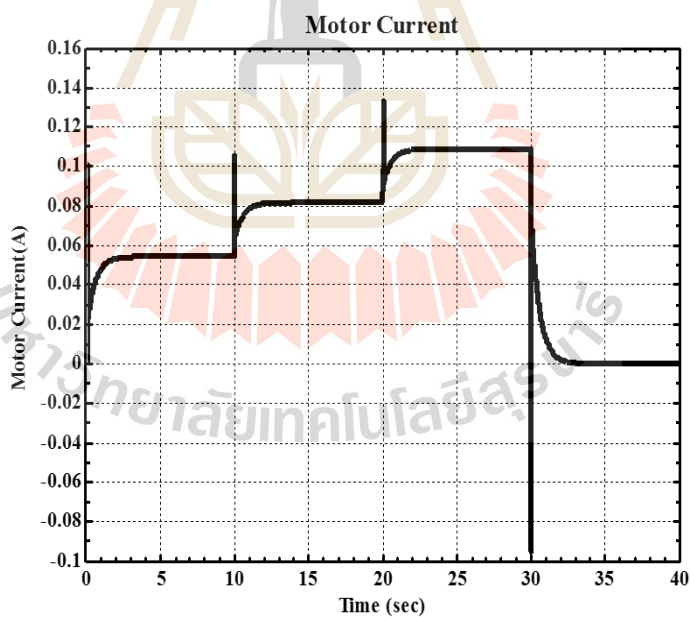


รูปที่ 4.5 ผลการแสดงผลการให้กระแสไฟฟ้ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับกรณีที่ 1

กรณีที่ 2 พิจารณาการทำงานของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ และตัวสังเกตอันดับเต็มในกรณีที่ระบบได้รับสัญญาณความเร็วรอบอ้างอิงเปลี่ยนแปลงที่ 400 600 800 รอบต่อนาที ผลตอบสนองของการทำงานของระบบดังแสดงในรูปที่ 4.6 และ 4.7



รูปที่ 4.6 ผลการแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับกรณีที่ 2

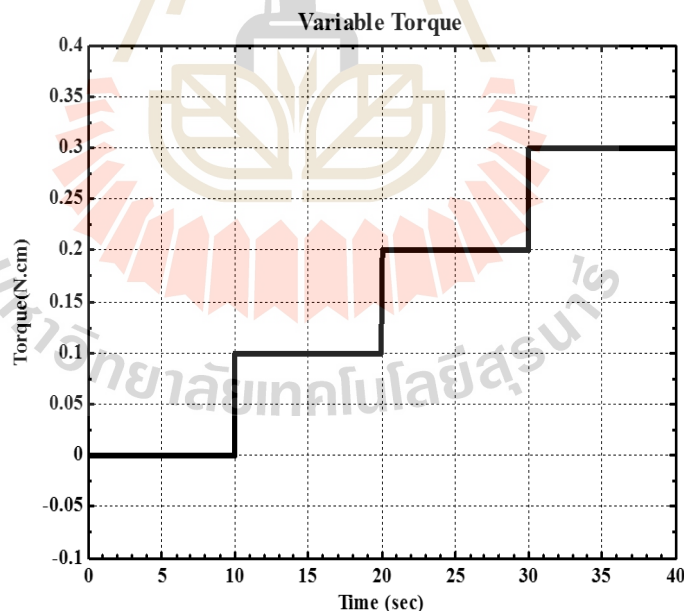


รูปที่ 4.7 ผลการแสดงผลการให้กระแสไฟฟ้ากับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
สำหรับกรณีที่ 2

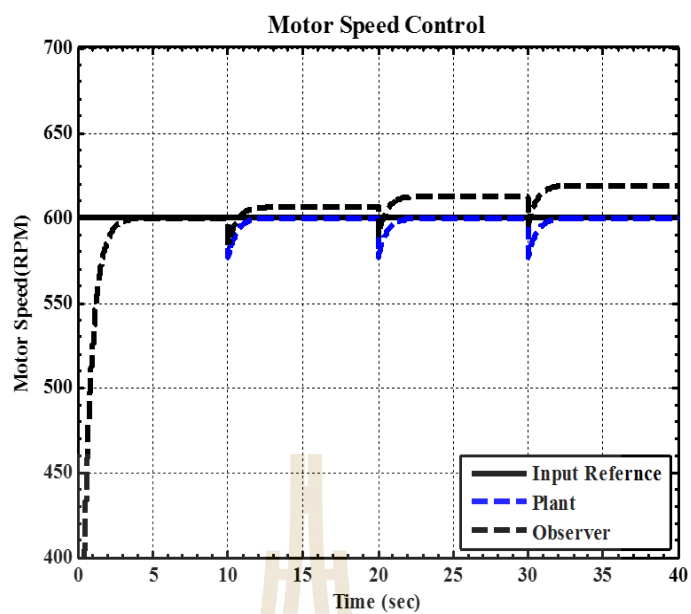
จากรูปที่ 4.4 และ 4.6 พบว่าผลการจำลองสถานการณ์ของตัวควบคุม และตัวสังเกตอันดับเต็มสามารถทำงานได้จะเห็นว่าระบบสามารถตอบสนองตามสัญญาณอ้างอิงและใช้เวลาประมาณ 2.5 วินาทีในการเข้าสู่สถานะอยู่ตัว ในขณะที่ตัวสังเกต (Observer) สามารถประมาณค่าความเร็วรอบปรับตัวตามระบบ (Plant) ได้เป็นอย่างดีอีกทั้งผลการประมาณค่ากระแสไฟฟ้าจากที่ให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าตรงของตัวสังเกตจากรูปที่ 4.5 และ 4.7 พบว่าขณะที่สัญญาณความเร็วรอบอ้างอิงเปลี่ยนแปลง ระบบควบคุมจะปรับกระแสไฟฟ้าให้กับระบบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อปรับเปลี่ยนความเร็วรอบของระบบตามสัญญาณความเร็วรอบอ้างอิง

4.4.2 การทำงานของตัวควบคุม แบบพีไอ และตัวสังเกตในกรณีที่ระบบได้รับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง

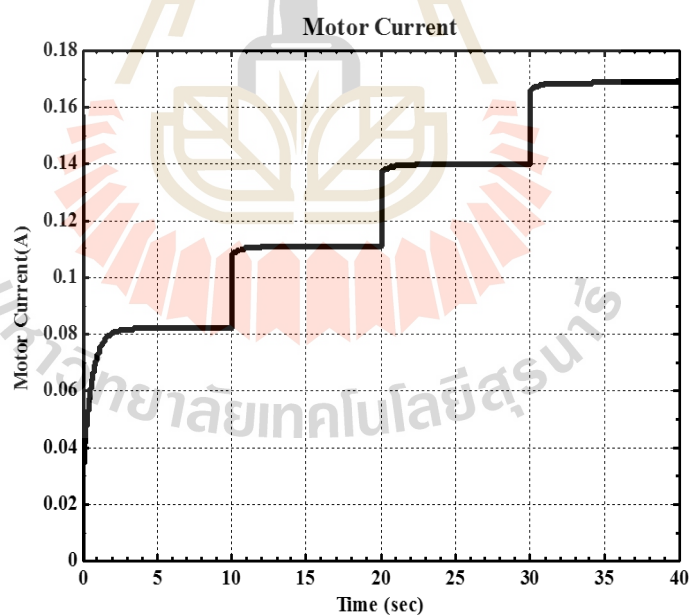
ในหัวข้อนี้จะแสดงการทำงานของตัวควบคุมแบบพีดี และตัวสังเกตอันดับเต็ม โดยมีแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง $T_L(t)$ จากภายนอกเข้ามารบกวนระบบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได (Step Function) ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งผลการตอบสนองของการทำงานดังแสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10



รูปที่ 4.8 การแสดงแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง $T_L(t)$ จากภายนอกที่มารบกวนระบบ



รูปที่ 4.9 ผลแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงกรณีที่มีแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงมารบกวนระบบ

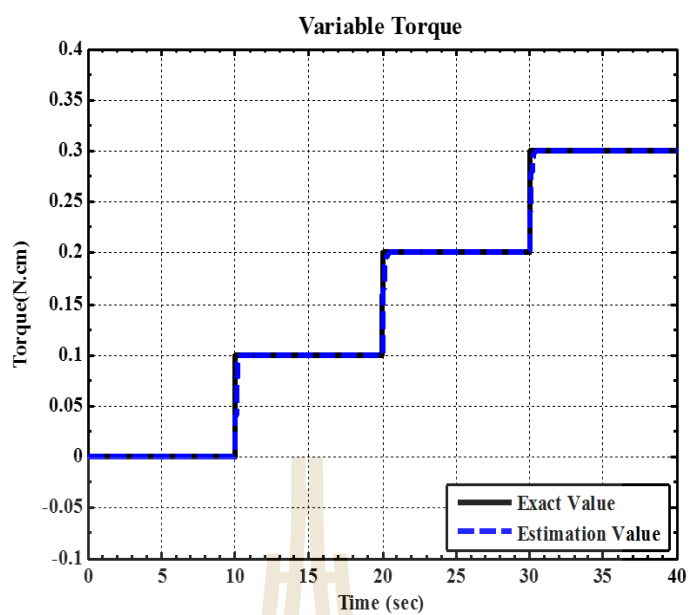


รูปที่ 4.10 ผลแสดงของระบบควบคุมให้กระแสไฟฟ้ากับระบบเพื่อรักษาความเร็วรอบกรณีที่มีแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงมารบกวนระบบ

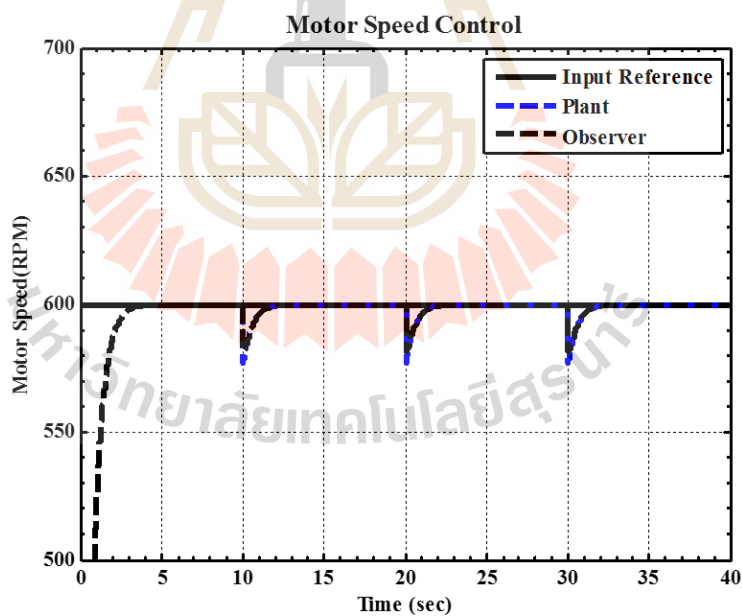
จากการทดสอบการจำลองสถานการณ์ของระบบ พบว่าขณะที่ระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทำงานนั้นมีแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงจากภายนอกเข้ามาในระบบ จากรูปที่ 4.8 และ 4.9 แสดงให้เห็นว่า ณ เวลาที่แรงบิดที่เปลี่ยนแปลงเข้ามาในระบบเพิ่มขึ้นทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ลดลง ระบบควบคุมจะเพิ่มกระแสไฟฟ้าให้กับมอเตอร์เพื่อรักษาความเร็วรอบของมอเตอร์ ขณะที่ระบบควบคุมเพิ่มกระแสไฟฟ้านั้นพบว่าระบบ (Plant) สามารถรักษาความเร็วรอบให้คงที่ได้ แต่ตัวสังเกต (Observer) ไม่สามารถรักษาความเร็วรอบให้คงที่ได้จึงทำให้ตัวสังเกตมีความผิดพลาด ซึ่งเป็นผลมาจากระบบมีแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงจากภายนอกเข้ามาขณะที่ตัวสังเกตไม่มีแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงเข้ามาในระบบ ค่าความผิดพลาดในการประมาณค่าตัวแปรสถานะของระบบจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งค่าความผิดพลาดดังกล่าวสามารถชดเชยได้โดยใช้ตัวชดเชยแบบปรับตัวได้

4.4.3 การทำงานของตัวควบคุมแบบพีไอ และตัวสังเกต ร่วมกับตัวชดเชยแบบปรับตัว ในกรณีที่ระบบได้รับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง

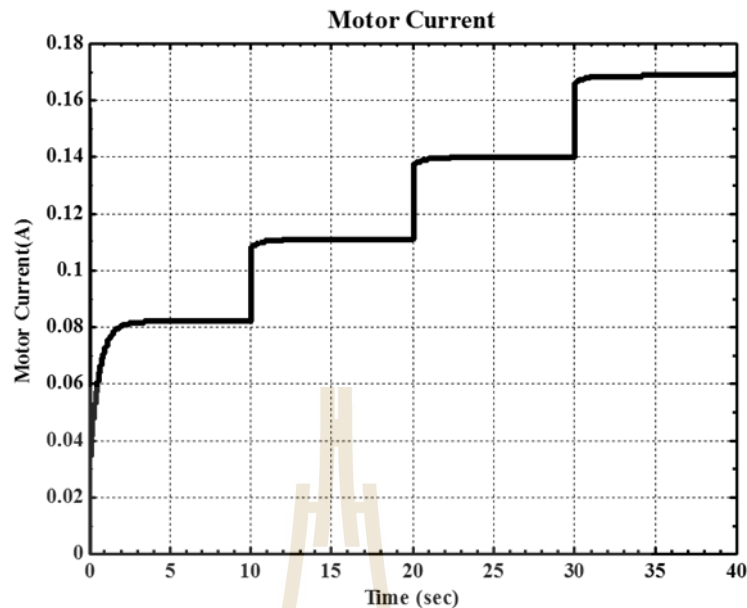
จากหัวข้อที่ผ่านมาขณะแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงจากภายนอกเข้ามาในระบบควบคุม ซึ่งสัญญาณมีลักษณะแบบขั้นบันได พบว่าการรบกวนของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงนี้ส่งผลทำให้การประมาณค่าความเร็วรอบของตัวสังเกตเกิดความผิดพลาด เนื่องจากโครงสร้างของระบบ (Plant) และโครงสร้างของตัวสังเกต (Observer) นั้นแตกต่างกัน โดยโครงสร้างของระบบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงจากภายนอกเข้ามาในระบบ ขณะที่โครงสร้างของตัวสังเกตไม่มีแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงจากภายนอกเข้ามากระทำ จึงทำให้เกิดค่าความผิดพลาดระหว่างความเร็วรอบของระบบกับตัวสังเกต ซึ่งค่าความผิดพลาดนี้สามารถนำไปประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 โดยใช้ตัวชดเชยแบบปรับตัวได้เพื่อชดเชยค่าความผิดพลาดให้กับตัวสังเกต ส่งผลให้ความเร็วรอบของระบบกับตัวสังเกตออกมาสอดคล้องกัน จึงทำให้ตัวสังเกตกลับมาทำงานได้ถูกต้อง ดังแสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.11 การแสดงแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงที่ได้จากการชดเชยเทียบกับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงจริง



รูปที่ 4.12 การแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเมื่อมีการประมาณค่าแรงบิดให้กับตัวสังเกต



รูปที่ 4.13 ผลแสดงค่ากระแสไฟฟ้าที่ให้อุปกรณ์เพื่อรักษาความเร็วรอบ
ขณะมีการชดเชยแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงกับตัวสังเกต

4.5 สรุป

เครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็กในงานวิจัยนี้อาศัยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นอุปกรณ์ต้นกำลังในการกวนของเหลวหรือสารผสม การออกแบบระบบควบคุมเพื่อรักษาความเร็วรอบขณะกวนของเหลวจะเริ่มจากการหาค่าพารามิเตอร์จากการระบุเอกลักษณ์ของระบบ (System Identification) ด้วยวิธี Parameter Estimation ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จะนำไปสู่การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจะนำมาควบคุม มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งเป็นระบบชนิด 0 (Type-0) การออกแบบตัวควบคุมจึงเลือกตัวควบคุมแบบพีไอเพื่อเพิ่มให้ระบบเป็นชนิด 1 (Type 1) ส่งผลให้ค่าความผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวเข้าใกล้ศูนย์ ต่อมาจัดรูปให้อยู่ในรูป State Space Form เพื่อง่ายต่อการออกแบบตัวสังเกตอันดับเต็มและนำไปสู่การจำลองสถานการณ์ ผลการจำลองสถานการณ์การทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง การประมาณค่าของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงโดยใช้ตัวชดเชยแบบปรับตัวได้จากวิธี Gradient Method สามารถประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงได้เพื่อนำไปชดเชยให้กับตัวสังเกต จึงทำให้ลดค่าความผิดพลาดระหว่างเอาต์พุตของตัวสังเกตกับระบบจริง ส่งผลทำให้การประมาณค่าตัวแปรสถานะของตัวสังเกตของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงออกมาแม่นยำและมีประสิทธิภาพ

บทที่ 5

ผลการทดสอบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงเครื่องมือการทดลอง การทำงานของเครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็ก กับคอมพิวเตอร์ระหว่างการรับส่งสัญญาณและการควบคุม เพื่อนำไปสู่การทดสอบการประมาณ ปริมาตรของของเหลวภายในภาชนะกวนของเครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็กด้วยการทำงานของ ตัวชดเชยแบบปรับค่าได้ที่ใช้ในการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง โดยการทดสอบดังกล่าว นำมาซึ่งการสอบเทียบระหว่างปริมาณของของเหลวในภาชนะกวนขณะกวนกับค่าแรงบิดที่ เปลี่ยนแปลงที่ได้จากการประมาณ ในงานวิจัยนี้ได้ทดลองกวนของเหลวที่ค่าความหนืดคงที่ด้วย เครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็ก โดยการทดลองได้แบ่งเป็น 2 กรณี คือ ทดสอบกวนของเหลวที่ ปริมาตรคงที่และทดสอบกวนของเหลวที่ปริมาตรไม่คงที่ ซึ่งเนื้อหาในส่วนนี้ได้แสดงผลเป็นกราฟ ความสัมพันธ์

5.1 เครื่องมือทดสอบ

ในการทดสอบนี้ผู้วิจัยทำการทดสอบด้วยการเขียนอัลกอริทึมของการควบคุมด้วย โปรแกรม MATLAB/Simulink บนคอมพิวเตอร์ จากนั้นทำการเชื่อมต่อสัญญาณการควบคุม ระหว่างคอมพิวเตอร์กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และรับสัญญาณป้อนกลับจาก Encoder ที่วัด ความเร็วรอบมอเตอร์ด้วย RAPCON Board ซึ่งเป็นบอร์ดอิเล็กทรอนิกส์ที่มีหน้าที่เป็นอุปกรณ์ เชื่อมโยงระหว่างคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ทดลองผ่านสาย Serial Crossover Cable ไปยังยัง PCI Serial Card ของคอมพิวเตอร์ ซึ่ง RAPCON Board จะเชื่อมต่อกับ โปรแกรม MATLAB/Simulink ในส่วนเสริม Real - Time Windows Target เป็นบอร์ดที่สามารถควบคุมแบบ Real Time ซึ่งมีความสามารถในการรับ - ส่งสัญญาณที่มีลักษณะทั้ง Digital Signal และ Analog Signal โดยในการ ทดสอบนั้น จะมี Power Amplifier เพื่อป้อนไฟฟ้ากระแสตรงให้แก่ RAPCON Board และตัวบอร์ด จะทำการจ่ายกระแสไปสู่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงตามคำสั่งในอัลกอริทึมที่ทำการเขียนไว้ใน โปรแกรม MATLAB/Simulink จากนั้นเมื่อมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้เป็นอุปกรณ์เป็นกำลังของ การกวนของเหลวมีการหมุน Encoder ซึ่งทำหน้าที่วัดความเร็วรอบของมอเตอร์จะส่งสัญญาณไปยัง RAPCON Board เพื่อส่งต่อไปประมวลผลยังโปรแกรมควบคุมการทำงานต่อไป



รูปที่ 5.1 เครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็ก

ส่วนประกอบของเครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็ก

1. ภาชนะ (Beaker) ขนาด 1000 มิลลิลิตร
2. แท่งกวนสาร (Magnetic Bar) ขนาด 50 มิลลิเมตร
3. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
4. Encoder ใช้สำหรับการวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้า
5. แท่งแม่เหล็กถาวร
6. บอร์ดควบคุมการทำงาน (RAPCON Board) อแดปเตอร์สำหรับจ่ายไฟเข้าสู่บอร์ด และ PCI Serial Card แสดงดังรูปที่ 5.2
7. คอมพิวเตอร์พร้อมระบบปฏิบัติการ Windows 7 32 Bit และโปรแกรม MATLAB v2009a โดยมีรายละเอียดต่าง ๆ ของ RAPCON Platform ดังตารางที่ 5.1



รูปที่ 5.2 PCI Serial Card และบอร์ด RAPCON

ตารางที่ 5.1 แสดงรายละเอียดต่าง ๆ ของ RAPCON Board (RAPCON Real – Time Rapid Control Prototyping Platform for MATLAB/SIMULINK)

Meaning	Magnitude	Unit
Power Supply(Minimum Current)	6 – 15 (0.15)	VDC (A)
Analog Input A0 – A7 Analog 12 Bit	0 - 5	V
Capture Input C0 – C1 Digital 16 Bit		
Digital Input D0_d0 – D0_d0 Digital		
Encoder Input E0 – E1 Digital 16 Bit		
Frequency Output F0 – F1 Digital 16 Bit		
Analog Output B0 – B1 Analog 12 Bit		
Digital Output G0_g0 – G0_d7 Digital		
Pulse Output H0 – H1 Digital 16 Bit		
Filtered Pulse Output L0 – L1 Analog		
H – Bridge Output P0 – P1 Digital		
Voltage Regulator Output	5 (0.25)	V (A)
Ground GND	0	V
Sampling Range	Up to 15.2	kHz

1. Expansion Slot for Serial Card
2. Serial Crossover Cable

3. Matlab R2007b หรือเวอร์ชันสูงกว่าที่มี Simulink
4. RAPCON Hardware และ Software ต้องใช้เวอร์ชัน 1.5 เป็นต้นไป

5.2 การควบคุมและรับสัญญาณผ่านบอร์ด RAPCON

ในการควบคุมซึ่งหลักการข้างต้นจะใช้ H – Bridges Output Block ซึ่งเป็น Block ที่เชื่อมต่อ RAPCON Board กับ Real – Time Windows Target ในรูปของสัญญาณ Digital แบบ 16 Bit/Channel โดยมี Channel P0 ถึง P1 แต่ละ Channel จ่าย Voltage ได้ ตั้งแต่ 0 ถึง Supply Voltage, 5 A สัญญาณ Digital ที่จ่ายอยู่ในรูป PWM (Pulse Width Modulated) แต่ละ H – Bridges มีส่วนประกอบ MOSFET Bridge สามารถขับได้ถึง 5 A ถ้าโหลดของ H – Bridges มีการกรองโดยใช้ Lowpass Filter ดังนั้น Output สามารถเลือกประยุกต์ใช้ Amplifiers แบบ Linear โดยเปลี่ยนสัญญาณ Digital เป็น Analog และ Voltage ต่อกับ H – Bridges ขึ้นกับโหลดสัมพันธ์กับ Duty – Cycle ของ Input คือ

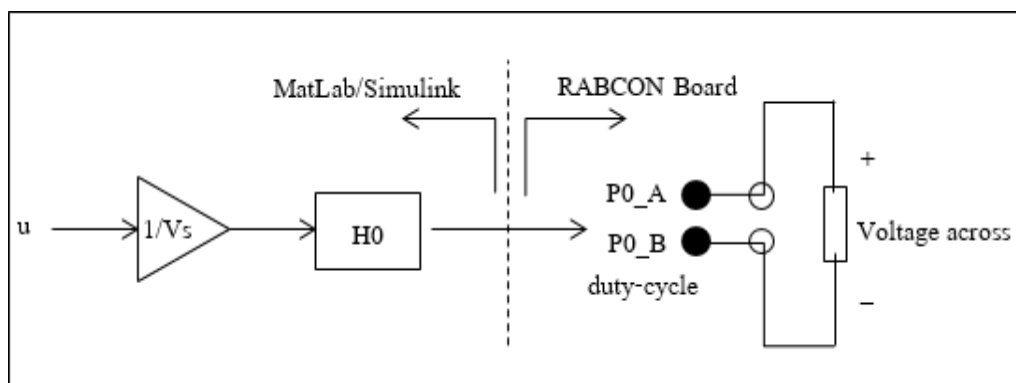
$$V_{con} \approx (2\delta - 1)V_s \quad (5.1)$$

โดยที่ $\omega = \delta/f = \delta\tau$ เมื่อ f คือ Fundamental Frequency ของ PWM อยู่ระหว่าง 449.8291 Hz ถึง 115156.25 Hz และ τ คือ คาบ ซึ่งแบ่ง H – Bridges ออกเป็น 2 โหมดโดยมีเงื่อนไขการส่งสัญญาณดังนี้

$$V_{con} \approx \begin{cases} +V_s, & u \geq V_s, \\ 2u - V_s, & 0 < u < V_s, \text{ Normal} \\ -V_s, & u \leq 0 \end{cases} \quad (5.2)$$

$$V_{con} \approx \begin{cases} +V_s, & u \geq +V_s, \\ u, & -V_s < u < +V_s, \text{ Shifted} \\ -V_s, & u \leq -V_s \end{cases} \quad (5.3)$$

ที่ Fundamental Frequency = 10,000 Hz, Supply Voltage, $V_s = \pm 15V$ และมีค่า Value คือ u/V_s ซึ่งแสดงไดอะแกรมการเชื่อมต่อของ MatLab/Simulink กับ RAPCON Board ในการป้อนค่าสัญญาณให้กับ Power Amplifier (Magnetic Bearing) ดังรูปที่ 5.3



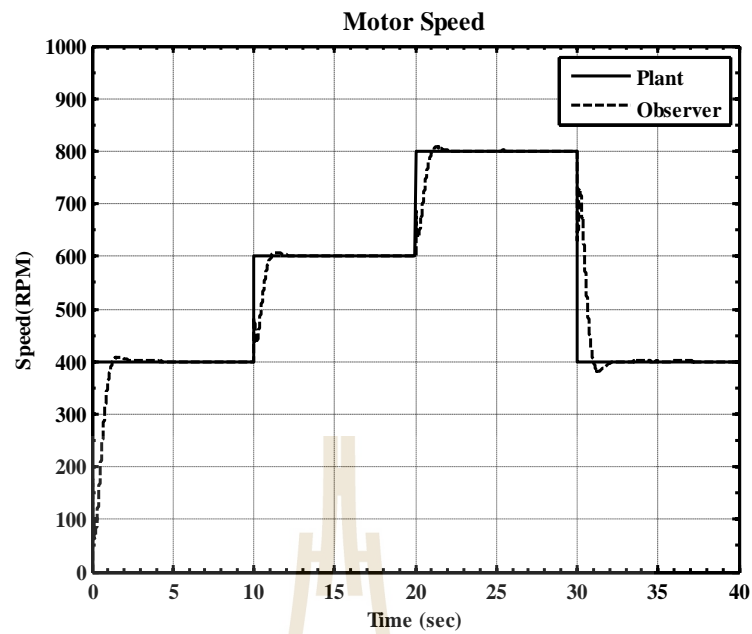
รูปที่ 5.3 แสดงไดอะแกรมการเชื่อมต่อของ Matlab/Simulink กับ RABCON Board ในการป้อนค่าสัญญาณให้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

5.3 การทดสอบการทำงานของตัวสังเกตของเครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็ก

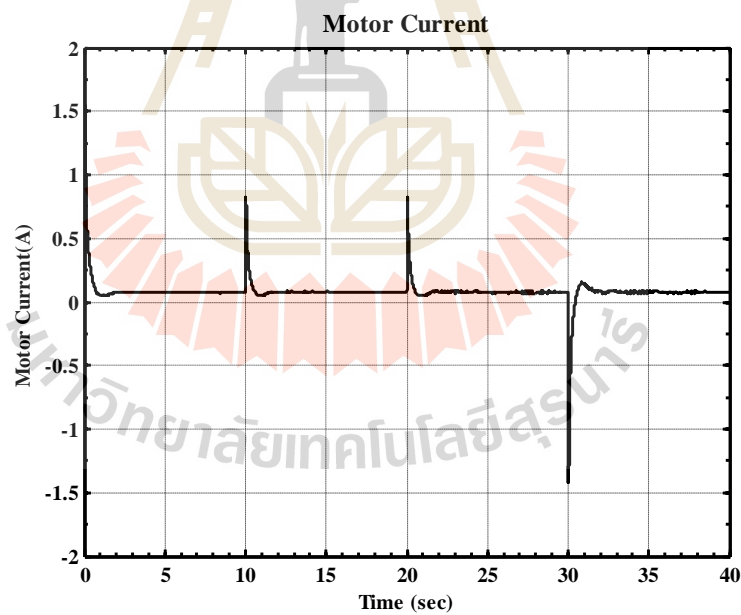
เมื่อมีการนำเอาตัวสังเกตเข้ามาใช้กับระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงของเครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็กเพื่อประมาณตัวแปรสถานะ คือ ค่าความเร็วรอบ และค่ากระแสไฟฟ้า ผลการประมาณค่าตัวแปรสถานะโดยใช้ตัวสังเกตที่ได้จะต้องมีความถูกต้องการทดสอบตัวสังเกตนี้จะทำการทดสอบระบบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในกรณีที่ไม่มีแรงบิดจากภายนอกเข้ามารบกวนระบบหรือในสถานะกวนไม่มีของเหลวการออกแบบตัวสังเกตนั้นจำเป็นต้องใช้ค่าตัวแปรของระบบที่จะทำการสังเกต ดังนั้นในการทำการทดสอบกับระบบจริงเราจำเป็นต้องใช้ค่าตัวแปรของระบบจึงจะทำให้ตัวสังเกตทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การทดสอบตัวสังเกตจะทำโดย การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นลักษณะขั้นบันได โดยจะเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบที่ 400600 และ 800 รอบต่อนาที ตามลำดับ ซึ่งผลการทดสอบการประมาณค่าความเร็วรอบ และค่ากระแสไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 5.4 และ รูปที่

5.5



รูปที่ 5.4 ผลการประมาณค่าความเร็วรอบของตัวสังเกต



รูปที่ 5.5 ผลการประมาณค่ากระแสไฟฟ้าของตัวสังเกต

จากรูปที่ 5.4 และ รูปที่ 5.5 ได้แสดงให้เห็นว่าการทำงานของตัวสังเกตสามารถประมาณค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ และค่ากระแสไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

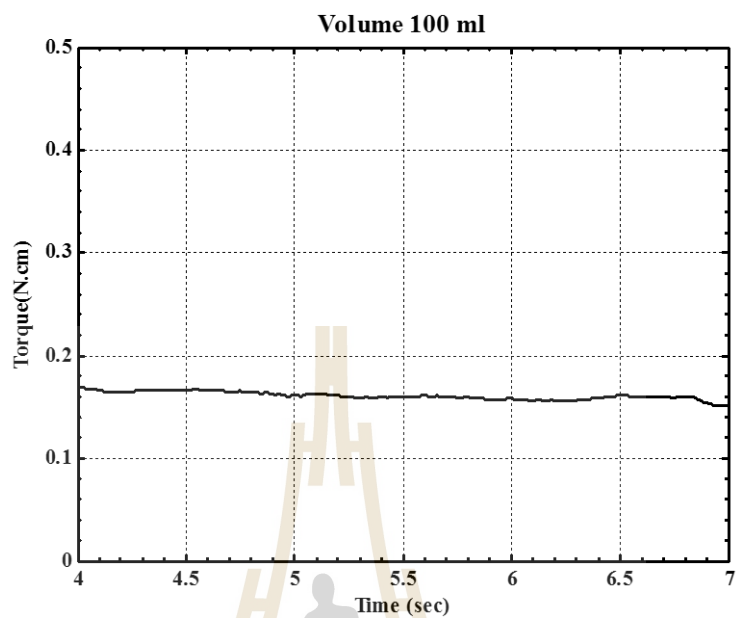
5.4 การทดสอบการประมาณปริมาตรของของเหลวในภาชนะกวนด้วยการชดเชยแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง

การประมาณปริมาตรของของเหลวในภาชนะกวนขณะเครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็กทำงานนั้นสามารถทำได้หลายวิธี แต่ในงานวิทยานิพนธ์นี้จะใช้วิธีการประมาณด้วยการชดเชยแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงจากการประมาณให้กับตัวสังเกตผ่านการให้กระแสไฟฟ้ากับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อรักษาความเร็วรอบให้คงที่ จากที่ทราบกันขณะเครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็กทำงานพบว่าปริมาตรของของเหลวในภาชนะกวนมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของของเหลวนี้ส่งผลให้แรงบิดของมอเตอร์เปลี่ยนแปลง และทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์เปลี่ยนแปลงด้วยเช่นกัน ดังนั้นเครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็กต้องการจะรักษาความเร็วรอบให้คงที่ขณะกวนทำให้ระบบควบคุมให้กระแสไฟฟ้าหรือลดกระแสไฟฟ้าเพื่อรักษาความเร็วรอบขณะกวนให้คงที่ จึงนำมาสู่การประมาณปริมาณของของเหลวแต่ละชนิดมีค่าความหนืดไม่เท่ากัน ซึ่งแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์มิได้ส่งผลมาจากปริมาตรของของเหลวที่เปลี่ยนแปลงเพียงอย่างเดียวแต่ยังส่งผลมาจากความหนืดของของเหลวแต่ละชนิดเช่นกัน ดังนั้นการประมาณปริมาตรของของเหลวในภาชนะกวนวิธีนี้จะต้องมีการสอบเทียบหรือการทดสอบเพื่อเก็บข้อมูลหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของของเหลวกับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเสียก่อน ดังนั้นการสอบการประมาณปริมาตรของของเหลวในภาชนะบรรจุทรงกระบอก ขนาด 1000 มิลลิลิตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง 105 มิลลิลิตร ขณะกวนของเหลวด้วยความเร็วรอบคงที่ 600 รอบต่อนาที ของเหลวที่ใช้ทำการทดสอบ คือน้ำสะอาดไม่สารเจือปน (น้ำสะอาดที่อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 1000 kg/m^3 และความหนืด $0.796 - 1.002 \text{ mPa}\cdot\text{s}$) โดยปริมาตรของของเหลวที่ทำการทดลองอยู่ในช่วง 0 – 1000 มิลลิลิตร โดยการทดสอบจะแบ่งเป็น 2 กรณี คือ การทดสอบกวนของเหลวที่ปริมาตรคงที่ และการทดสอบกวนของเหลวที่ปริมาตรไม่คงที่ และกรณีกวนของเหลวต่างชนิดกัน เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

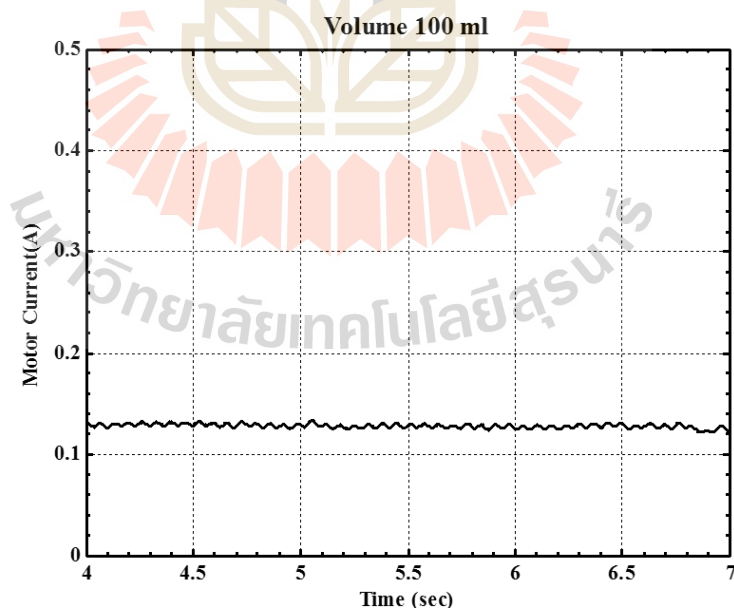
5.4.1 การทดสอบกรณีที่ 1 ทดสอบกวนของเหลวที่ปริมาตรคงที่

การทดสอบประมาณปริมาตรของของเหลวที่สถานะคงที่ ซึ่งการทดสอบกรณีนี้จะทำการทดสอบที่ปริมาตรคงที่ขณะกวนของเหลว จากนั้นจะทำการเพิ่มปริมาตรของเหลวครั้งละ 100 มิลลิลิตร และเก็บผลการทดสอบ

- ผลการทดสอบที่ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ดังแสดงในรูปที่ 5.6 และรูปที่ 5.7

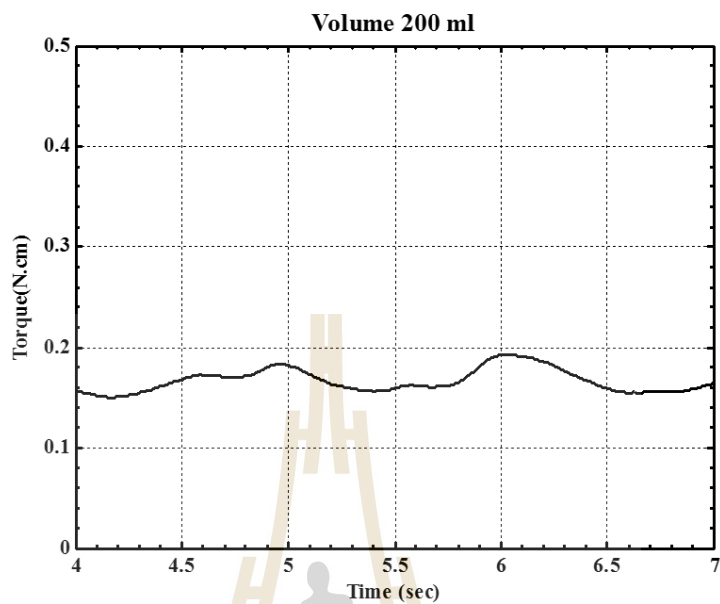


รูปที่ 5.6 ผลการตอบสนองของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงที่ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

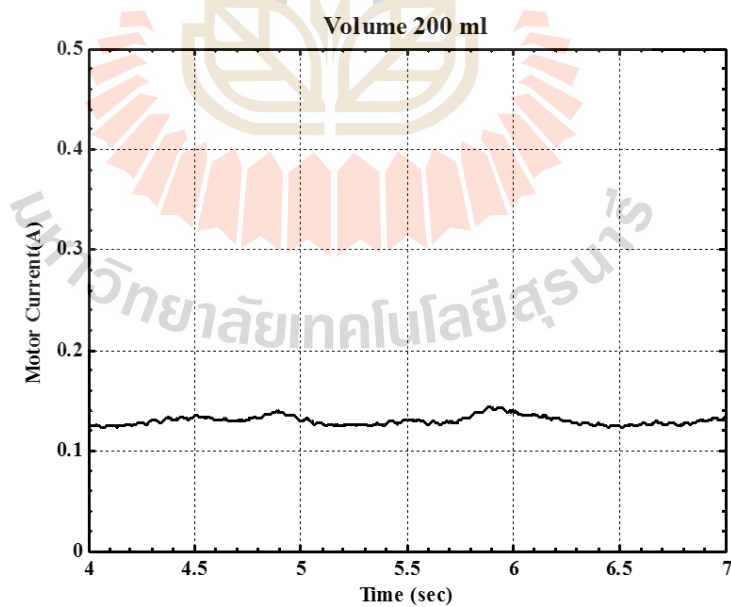


รูปที่ 5.7 ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

- ผลการทดสอบที่ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ดังแสดงในรูปที่ 5.8 และรูปที่ 5.9

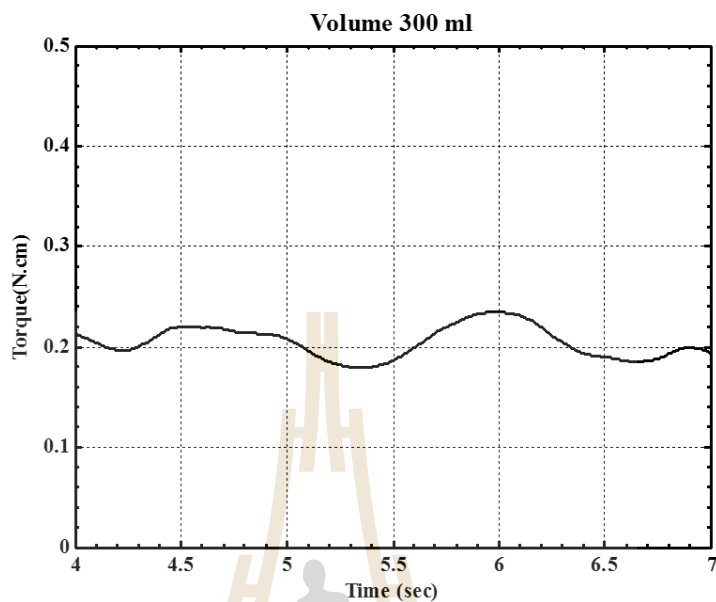


รูปที่ 5.8 ผลการตอบสนองของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงที่ปริมาตร 200 มิลลิลิตร

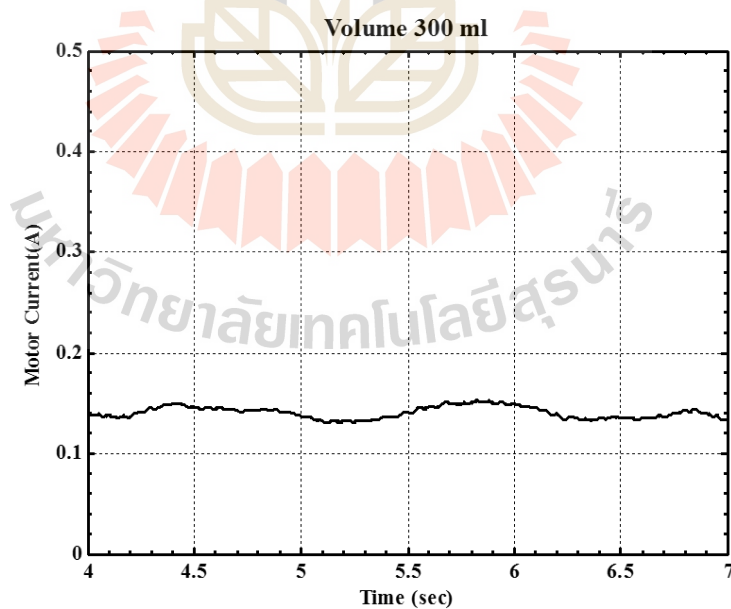


รูปที่ 5.9 ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ปริมาตร 200 มิลลิลิตร

- ผลการทดสอบที่ปริมาตร 300 มิลลิลิตร ดังแสดงในรูปที่ 5.10 และรูปที่ 5.11

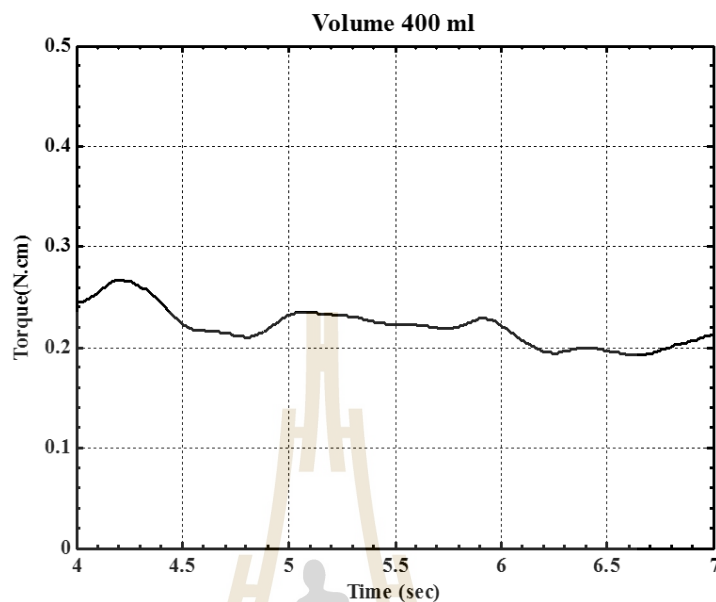


รูปที่ 5.10 ผลการตอบสนองของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงที่ปริมาตร 300 มิลลิลิตร

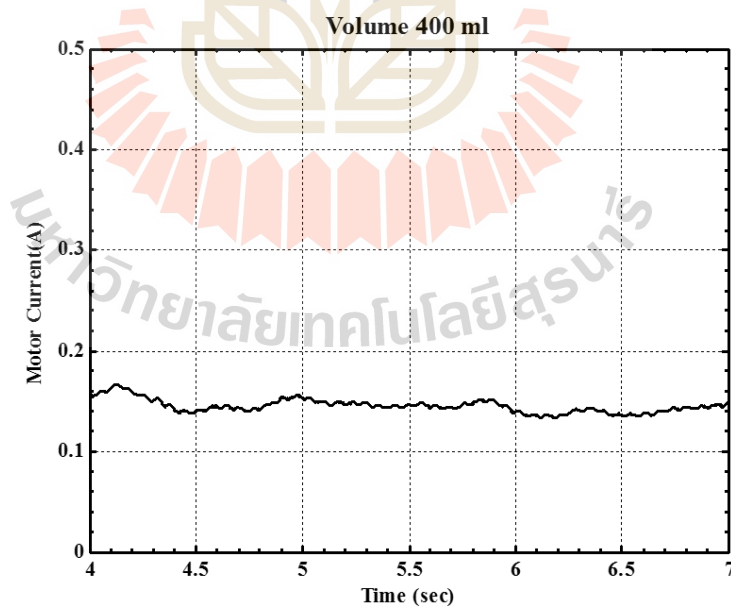


รูปที่ 5.11 ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ปริมาตร 300 มิลลิลิตร

- ผลการทดสอบที่ปริมาตร 400 มิลลิลิตร ดังแสดงในรูปที่ 5.12 และรูปที่ 5.13

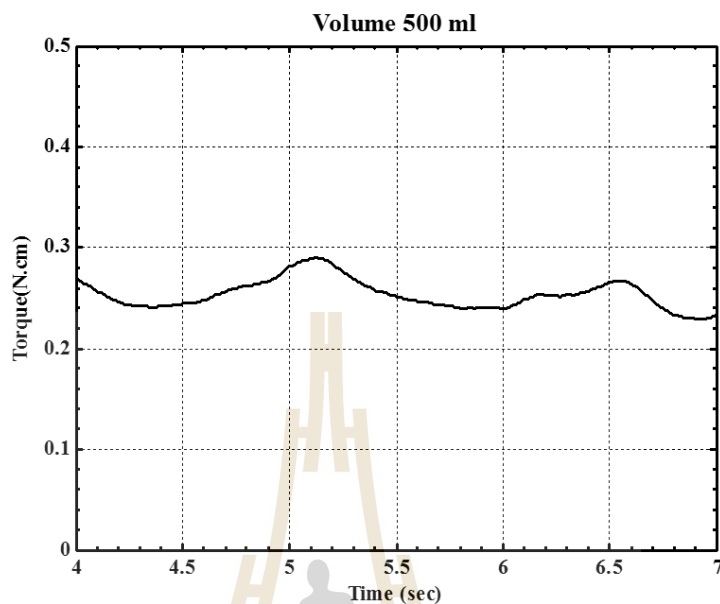


รูปที่ 5.12 ผลการตอบสนองของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงที่ปริมาตร 400 มิลลิลิตร

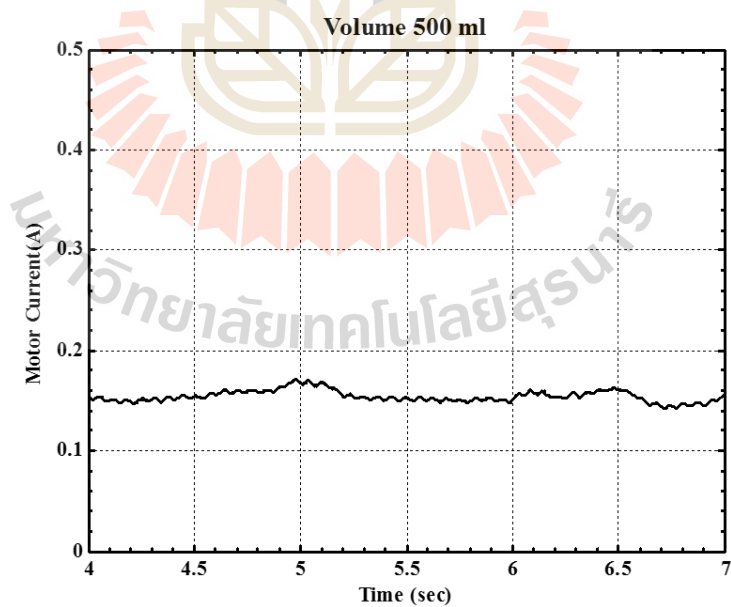


รูปที่ 5.13 ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ปริมาตร 400 มิลลิลิตร

- ผลการทดสอบที่ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ดังแสดงในรูปที่ 5.14 และรูปที่ 5.15

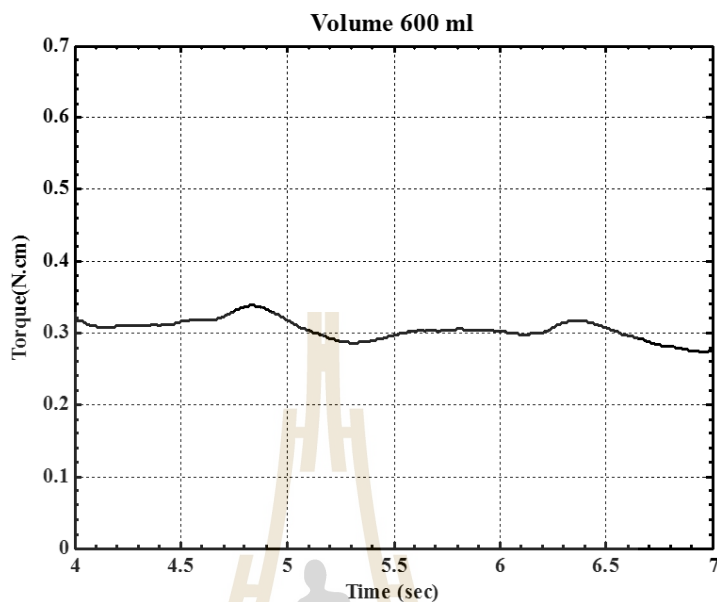


รูปที่ 5.14 ผลการตอบสนองของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงที่ปริมาตร 500 มิลลิลิตร

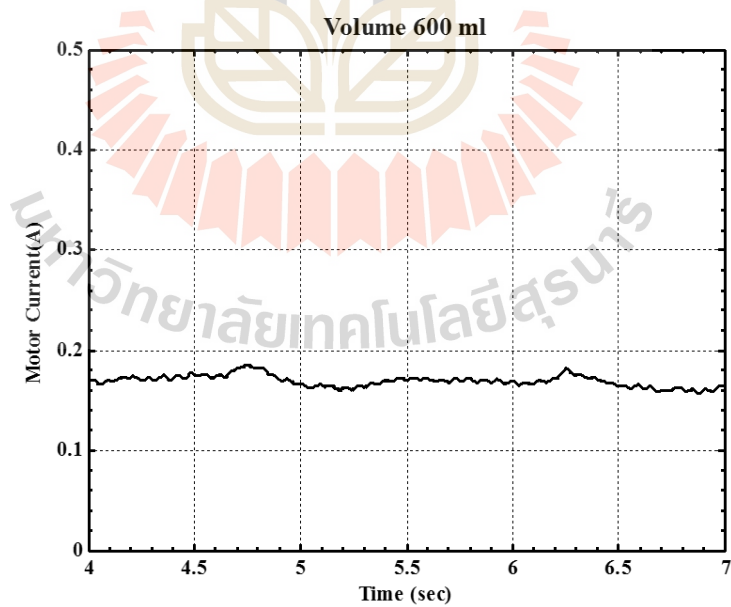


รูปที่ 5.15 ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ปริมาตร 500 มิลลิลิตร

- ผลการทดสอบที่ปริมาตร 600 มิลลิลิตร ดังแสดงในรูปที่ 5.16 และรูปที่ 5.17

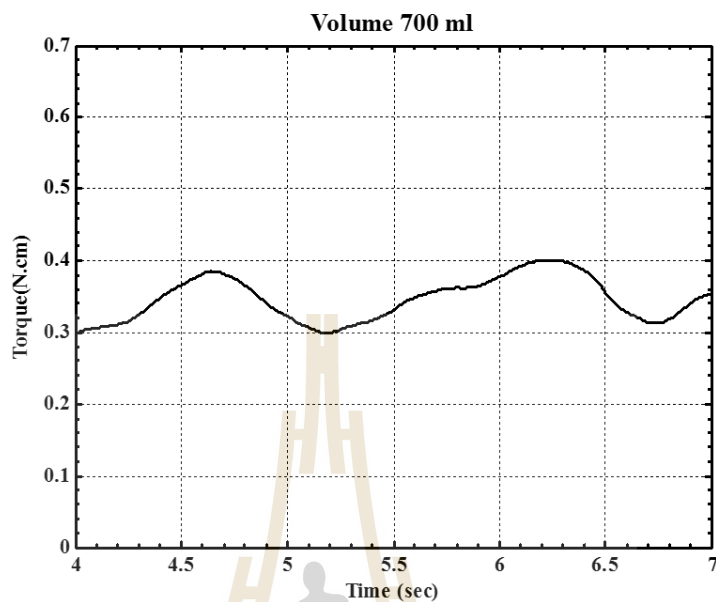


รูปที่ 5.16 ผลการตอบสนองของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงที่ปริมาตร 600 มิลลิลิตร

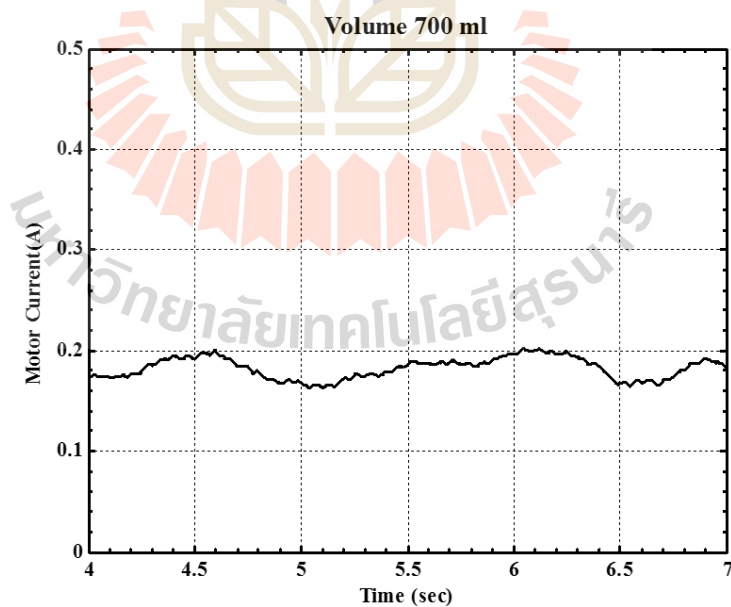


รูปที่ 5.17 ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ปริมาตร 600 มิลลิลิตร

- ผลการทดสอบที่ปริมาตร 700 มิลลิลิตร ดังแสดงในรูปที่ 5.18 และรูปที่ 5.19

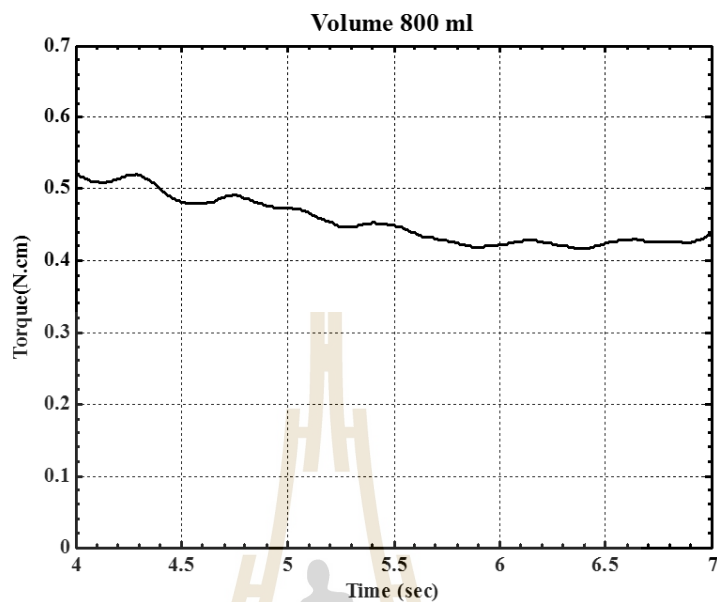


รูปที่ 5.18 ผลการตอบสนองของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงที่ปริมาตร 700 มิลลิลิตร

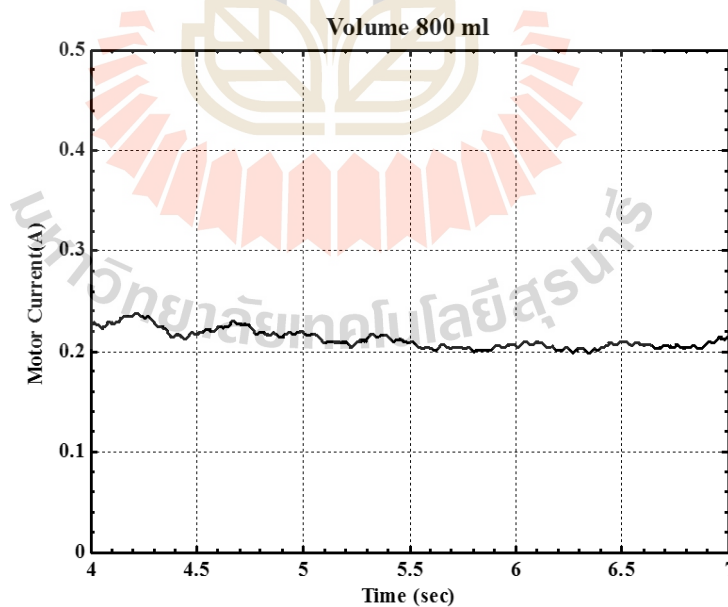


รูปที่ 5.19 ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ปริมาตร 700 มิลลิลิตร

- ผลการทดสอบที่ปริมาตร 800 มิลลิลิตร ดังแสดงในรูปที่ 5.20 และรูปที่ 5.21

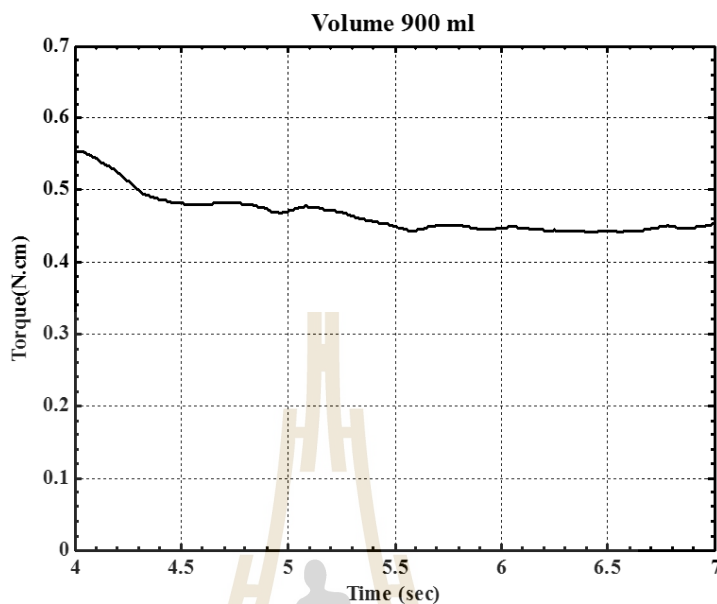


รูปที่ 5.20 ผลการตอบสนองของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงที่ปริมาตร 800 มิลลิลิตร

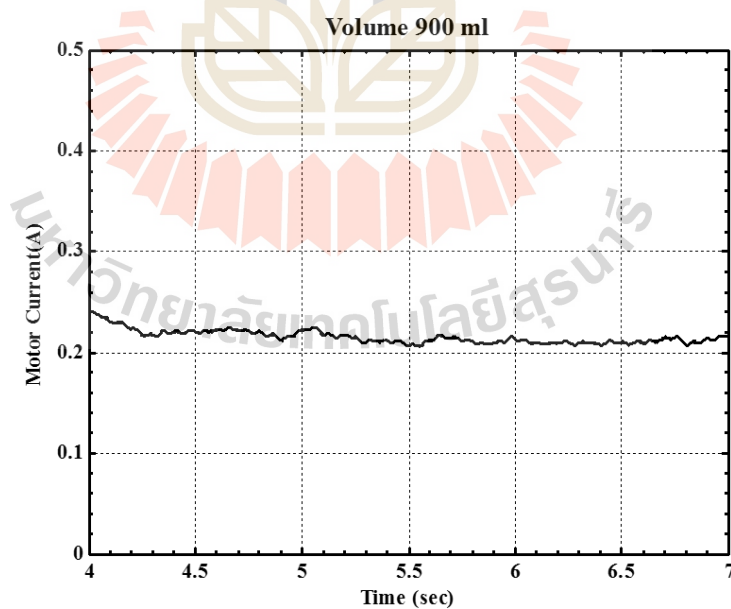


รูปที่ 5.21 ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ปริมาตร 800 มิลลิลิตร

- ผลการทดสอบที่ปริมาตร 900 มิลลิลิตร ดังแสดงในรูปที่ 5.22 และรูปที่ 5.23

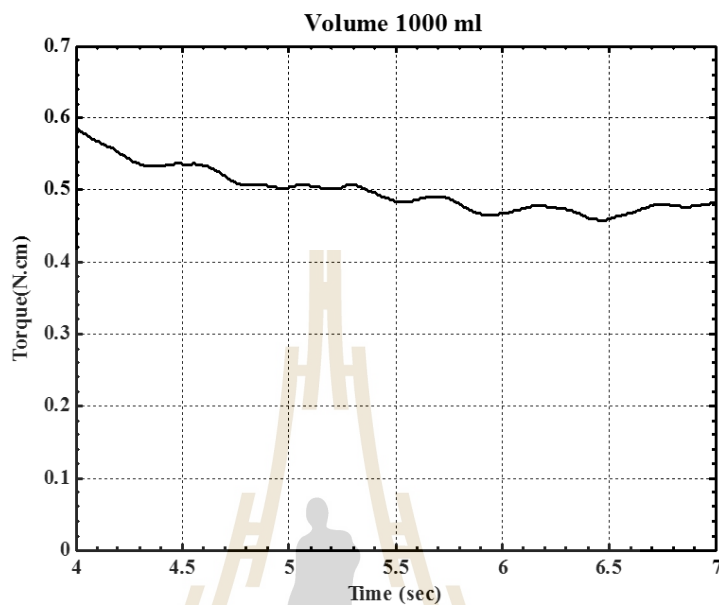


รูปที่ 5.22 ผลการตอบสนองของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงที่ปริมาตร 900 มิลลิลิตร

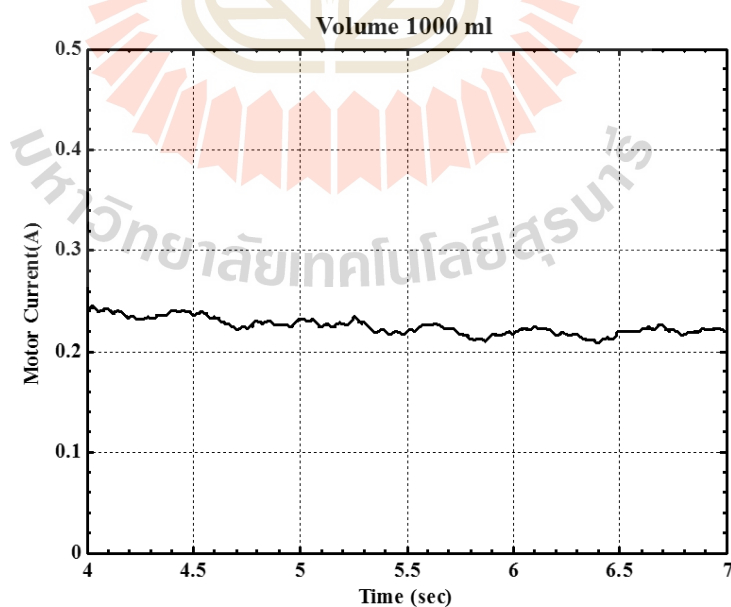


รูปที่ 5.23 ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ปริมาตร 900 มิลลิลิตร

- ผลการทดสอบที่ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร ดังแสดงในรูปที่ 5.24 และรูปที่ 5.25



รูปที่ 5.24 ผลการตอบสนองของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงที่ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร

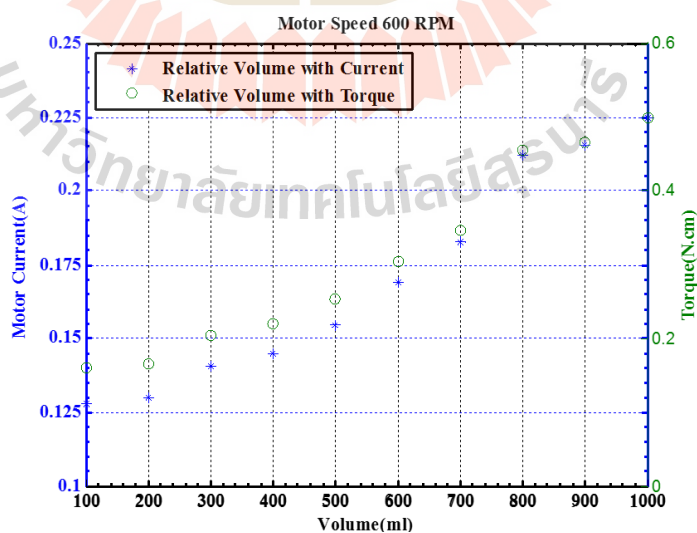


รูปที่ 5.25 ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร

จากผลการทดสอบกรณีศึกษาที่ 1 ที่ปริมาตรคงที่แสดงให้เห็นว่า ขณะเพิ่มปริมาตรของเหลวแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งจากผลการทดสอบสามารถกำหนดค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงกับปริมาตรของของเหลว และกระแสไฟฟ้าที่ให้กับมอเตอร์ ดังแสดงในตารางที่ 5.2 และแสดงในรูปที่ 5.26

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบของน้ำสะอาดสามารถประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง ปริมาตรของของเหลว และกระแสไฟฟ้าที่ให้กับมอเตอร์ขณะกวนของเหลวที่ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที

Volume (ml)	Current (A)	Torque (N.cm)
100	0.128	0.161
200	0.130	0.167
300	0.140	0.204
400	0.145	0.221
500	0.154	0.254
600	0.169	0.305
700	0.183	0.346
800	0.212	0.455
900	0.215	0.466
1000	0.225	0.501



รูปที่ 5.26 แสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงปริมาตรกับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง

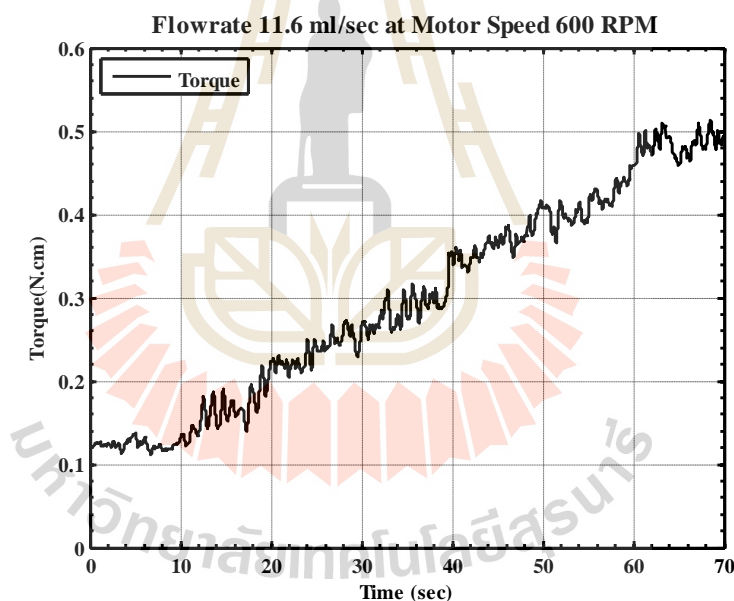
จากรูปที่ 5.26 สามารถหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของของเหลวกับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง และแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงกับกระแสไฟฟ้าที่ให้อัตราการไหลที่คงที่ ดังสมการที่ 5.4 และสมการที่ 5.5ตามลำดับ

$$\hat{T}_L (\nabla) = 7905.4\nabla - 765.16 \quad (5.4)$$

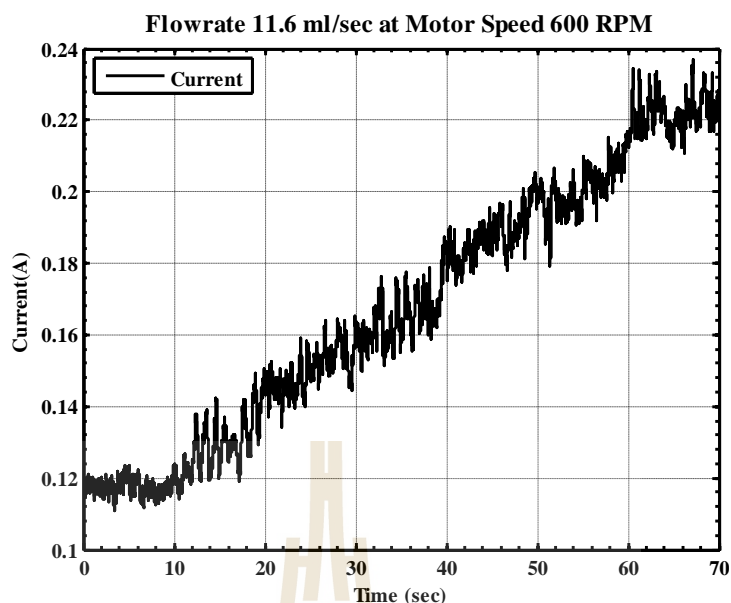
$$\hat{i}_a = 0.2864\hat{T}_L + 0.0822 \quad (5.5)$$

5.4.2 การทดสอบกรณีที่ 2 ทดสอบกวนของเหลวที่ปริมาตรเปลี่ยนแปลง

การทดสอบกวนของเหลวที่ โดยเพิ่มปริมาตรของเหลวด้วยอัตราการไหล 11.6 มิลลิลิตรต่อวินาที และเก็บผลการทดสอบ ซึ่งผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 5.27 และรูปที่ 5.28



รูปที่ 5.27 ผลการตอบสนองของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงที่ของเหลว มีอัตราการไหลเพิ่มขึ้น 11.6 มิลลิลิตรต่อวินาที



รูปที่ 5.28 ผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ของเหลวมีอัตราการไหลเพิ่ม
ขึ้น 11.6 มิลลิลิตรต่อวินาที

5.4.3 การทดสอบกรณีที่ 3 ทดสอบสอบกวนของเหลวต่างชนิด

การทดสอบกวนของเหลวต่างชนิด โดยของเหลวที่นำมาทดสอบนั้นแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ น้ำมันปาล์ม และน้ำมันเกียร์ SAE 90 ซึ่งน้ำมันปาล์มมีความหนืดเท่ากับ 85.5 mPa.s และ น้ำมันเกียร์ SAE 90 มีความหนืดเท่ากับ 365 mPa.s ความเร็วรอบขณะกวนเพื่อทำการทดสอบที่ 300 รอบต่อนาที และอุณหภูมิขณะทดลอง 25 องศาเซลเซียส โดยการทดสอบกรณีนี้จะทำการทดสอบที่ ปริมาตรคงที่ขณะกวนของเหลว จากนั้นจะทำการเพิ่มปริมาตรของเหลวครั้งละ 100 มิลลิลิตร และ เก็บผลการทดสอบ คือ แรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ และกระแสไฟฟ้าที่ให้มอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรง การทดสอบเริ่มต้นปริมาตรของเหลวที่ 100 ถึง 1000 มิลลิลิตร ซึ่งผลการทดสอบดัง แสดงในตารางที่ 5.3

ตารางการทดลองที่ 5.3 ผลการทดสอบของน้ำมันปาล์ม และน้ำเกียร์ SEA 90 สามารถประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง ปริมาตรของของเหลว และกระแสไฟฟ้าที่ให้กับมอเตอร์ ขณะกวนของเหลว ที่ความเร็วรอบ 300รอบต่อนาที

ประเภท	น้ำพีช (85.5 mP.s)		Oil SAE90 (365 mP.s)	
	Current (A)	Torque (N.cm)	Current (A)	Torque (N.cm)
100	0.103944	0.0564	0.175621	0.1828
200	0.109822	0.0666	0.184434	0.193
300	0.11484	0.0752	0.186208	0.1984
400	0.115467	0.0763	0.188174	0.2017
500	0.117952	0.0807	0.188377	0.2021
600	0.118558	0.0816	0.189287	0.2037
700	0.119575	0.0835	0.194283	0.2123
800	0.119775	0.0841	0.198892	0.2203
900	0.120072	0.0843	0.203840	0.2288
1000	0.121023	0.0850	0.205039	0.2309

5.6 สรุป

จากการทดสอบการประมาณปริมาตรของของเหลวในภาชนะกวนของเครื่องกวนสารแบบแท่งเหล็กด้วยการชดเชยแรงบิดแบบปรับตัวได้ด้วยวิธีของ Gradient Method พบว่าระบบสามารถตอบสนองกับค่าของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงจากปริมาตรของเหลวเหลวในภาชนะกวนมีการเปลี่ยนแปลงจึง สามารถนำไปประมาณปริมาตรของของเหลวได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 6

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผล

งานวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการประมาณปริมาณของของเหลวในภาชนะกวนขณะกวนของเหลว โดยใช้ตัวชดเชยแบบปรับตัวได้เพื่อประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงให้กับตัวสังเกตด้วยวิธี Gradient Method ซึ่งค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงที่ได้จากการประมาณนั้นสามารถนำมาประมาณปริมาณของของเหลวในภาชนะกวนได้ จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของของเหลวกับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ทั้งนี้สามารถสรุปผลงานวิจัยแต่ละขั้นตอนการศึกษาได้ดังนี้

1. ทำการศึกษาและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็กและจัดรูปให้อยู่ในรูป State Space Form เพื่อสะดวกต่อการออกแบบตัวสังเกตแบบอันดับเต็ม
2. นำกระบวนการระบุเอกลักษณ์ของระบบโดยใช้ Parameter Estimation ในโปรแกรม Matlab/Simulink เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งเป็นอุปกรณ์ต้นกำลังขณะกวนของเหลวโดยจะต้องเก็บค่าแรงดันไฟฟ้า และความเร็วรอบของมอเตอร์ที่สถานะใช้งานจริงจึงทำการระบุเอกลักษณ์ได้
3. ออกแบบตัวควบคุมเพื่อควบคุมระบบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยเลือกใช้ตัวควบคุมแบบพีไอเนื่องจากจะทำให้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบอันดับ 0 (Type-0) ให้เป็นระบบอันดับ 1 (Type-1) ทำให้การตอบสนองของระบบที่สถานะคงตัวไม่มีความผิดพลาด ขณะสัญญาณอ้างอิงเป็นแบบขั้นบันได
4. ออกแบบตัวสังเกตเพื่อใช้เป็นตัวแทนระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งสามารถประมาณค่าตัวแปรสถานะได้ โดยพิจารณาปริมาณของเหลวเป็นแรงบิดที่มารบกวนระบบ ดังนั้นเมื่อใช้งานตัวสังเกตในขณะที่มีการกวนของเหลวจะทำให้การประมาณค่าตัวแปรสถานะมีความคลาดเคลื่อนซึ่งเป็นผลมาจากแรงบิดรบกวนดังกล่าว โดยที่ค่าความผิดพลาดจะเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อขนาดของแรงบิดรบกวน ดังนั้นจึงนำมาสู่การสร้างตัวชดเชยค่าความผิดพลาดดังกล่าวให้กับตัวสังเกต

5. สร้างตัวชดเชยแบบปรับตัวได้เพื่อประมาณค่าแรงบิดที่รบกวนต่อระบบด้วยวิธีของ Gradient Method และชดเชยให้กับตัวสังเกต ส่งผลการตอบสนองของตัวสังเกตสอดคล้องกับระบบจริง

6. สร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของเหลวในภาชนะกวนกับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อมาสู่การประมาณปริมาตรของเหลวในภาชนะ

ผลการทดสอบจึงทำให้เห็นว่าตัวชดเชยแบบปรับตัวได้สามารถประมาณค่าแรงบิดจากภายนอกที่มารบกวนระบบได้จากปริมาตรของเหลวในภาชนะกวน อีกทั้งสามารถนำแรงบิดที่ได้จากการประมาณมาประมาณปริมาตรของเหลวในภาชนะที่มีการเปลี่ยนแปลงได้ งานวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอวิธีการดังกล่าวเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องกวนสารต่อไปในอนาคต

6.2 ข้อเสนอแนะ

เครื่องกวนสารแบบแท่งแม่สามารถประมาณปริมาตรของเหลวได้แต่การใช้งานประมาณปริมาตรของเหลวแต่ละชนิดจะต้องการสอบเทียบเสียก่อน เนื่องจากของเหลวแต่ละชนิดมีค่าความหนืดไม่เท่ากันซึ่งค่าความหนืดก็มีผลต่อแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์เช่นกันจึงจะทำให้เกิดการประมาณค่าปริมาตรเกิดความผิดพลาดอีกทั้งเครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็กใช้แท่งกวนสารทำหน้าที่กวนของเหลว ซึ่งแท่งกวนไม่ยึดติดกับเพลลาของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยตรงแต่จะใช้แรงเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กของแท่งกวนกับแท่งแม่เหล็กที่ติดยึดกับเพลลามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะส่งผลให้กวนของเหลวที่ความหนืดสูงๆ ทำให้แรงต้านจากความหนืดมากกว่าแรงเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กส่งผลให้แท่งกวนออกจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็ก

รายการอ้างอิง

- วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ (2548). การควบคุมระบบพลศาสตร์. (พิมพ์ครั้งที่ 2). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 673-688 หน้า.
- Shengqiang Li, Xiaodong Liang and Wisun Xu (2015). Modeling DC Motor Drive System in Power System Dynamic Studies. **IEEE Transactions on Industrial Applications**, Vol. 51, No. 1, January 2015.
- Dao ThanhLiem, DinhQuangThuong and Kyoung Kwan Ahn (2015). A torque estimator using online tuning grey fuzzy PID for applications to torque-sensor less control of DC motors. **Elsevier Ltd. Mechatronics** 26. February 2015.
- Stefar Clara, HannerAntlinger, Wolfgang Hilber and Bernhard Jakoby (2015) A Viscosity and Density Sensor Based on Diamagnetically Stabilized Levitation. **IEEE Sensors Journal**, Vol. 15, No. 3, March 2015.
- YavuzEge, Osman Kalender, and SedatNazlibilek (2010). Electromagnetic Stirrer Operating in Double Axis. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, Vol. 57, No. 7, July 2010.
- Srisertpol, J. and Khajorntraidat, C. (2009). Estimation of DC Motor Variable Torque Using Adaptive Compensation, **Proceedings of 21st the Chinese Control and Decision Conference (CCDC2009)**, Guilin, China.
- Osman Kalender and YavuzEge (2007). A PIC Microcontroller Based Electromagnetic Stirrer. **IEEE Transactions on Magnetics**, Vol. 43, No. 9, September 2007
- A. Sevinc. A Full Adaptive Observer for DC Servo Motors, **Turk J Engin**, Vol. 11, No.2 2003.
- NasimUllah, Shoping Wang and JawadAslam. (2011). A dative Robust Control of Electrical Load Simulator based on Fuzzy Logic Compensation. **International Conference**, Beijing, China.
- Ogata, K (2010). **Modern Control Engineering**, 5th edition, ISBN: 10: 0-13-713337-5, Pearson, New Jersey.
- Karl J. Åström and BjörnWittenmark (1995). **Adaptive Control**, 2nd edition, Addison Wesley, USA.

The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, stylized emblem. It features a central figure of a person standing on a pedestal, surrounded by a circular base with a sunburst pattern. The entire emblem is rendered in a light, semi-transparent gold and red color.

ภาคผนวก ก

ข้อมูลทางเทคนิคของ RABCON Board การติดตั้ง Hardware และ Software

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ก.1 ข้อมูลทางเทคนิคของ RABCON Board

1. INTRODUCTION

The RAPCON platform offers a seamless interface between physical plants and Matlab/Simulink for implementation of hardware-in-the-loop real-time control systems. It is fully integrated into Matlab/Simulink and has a broad range of inputs and outputs. The platform is a complete and low-cost real-time control system development package for both educational and industrial applications.

The RAPCON platform consists of the real-time control board (hardware) and the associated Matlab interface (software). The hardware of the RAPCON platform has 8×12 bit analog inputs, 2×16 bit capture inputs, 2×16 bit encoder inputs, 1×8 bit digital input, 2×12 bit analog outputs, 2×16 bit frequency outputs, 2×16 bit pulse outputs and 1×8 bit digital output. The board also contains 2 H-bridges with 5 A capability to drive external heavy loads. Some inputs and outputs are multiplexed to simplify the hardware. The board is interfaced to the host computer that runs Matlab through a serial port. The software of the RAPCON platform is fully integrated into Matlab/Simulink/Real-Time Windows Target and comes with Simulink library blocks associated with each hardware input and output. The library contains Analog Input Block, Capture Input Block, Encoder Input Block, Digital Input Block, Analog Output Block, Frequency Output Block, Digital Output Block and Pulse Output Block. The platform achieves real-time operation with sampling rates up to 15.2 kHz.

The RAPCON platform has been developed to extend and optimize the real-time operation of Matlab, Simulink and Real-Time Windows Target. The developed platform is uniquely integrated into Matlab to achieve real-time operation in Matlab under Windows. The salient features of the RAPCON platform make it ideal for implementation of hardware-in-the-loop real-time control systems in both educational and industrial applications.

1.1. Specifications

- Power supply: 6 – 15 V, minimum 0.15 A, regulated
- Interface: 460800 baud, 8 bit data, no parity, 1 stop bit
- Analog inputs: A0–A7, 0 – 5 V analog, 12 bit resolution
- Capture inputs: C0–C1, 0 – 5 V digital, 16 bit resolution
- Digital inputs: D0_d0–D0_d7, 0 – 5 V digital, 8 lines
- Encoder inputs: E0–E1, 0 – 5 V digital, 16 bit resolution
- Frequency outputs: F0–F1, 0 – 5 V digital, 16 bit resolution

- Analog outputs: B0–B1, 0 – 5 V analog, 12 bit resolution
- Digital outputs: G0_g0–G0_g7, 0 – 5 V digital, 8 lines
- Pulse outputs: H0–H1, 0 – 5 V digital, 16 bit resolution
- Filtered pulse outputs: L0–L1, 0 – 5 V analog
- H-bridge outputs: P0–P1, 0–(supply voltage) V digital, 5 A
- Voltage regulator output: VDD, 5 V, 0.25 A, regulated power supply
- Ground: GND, 0 V
- Sampling rate: up to 15.2 kHz

1.2. Requirements

- PC with Windows XP or later and an expansion slot for a serial card
- Serial crossover (null modem) cable
- Matlab R2007b or later with Simulink, Real-Time Workshop and Real-Time Windows Target
- RAPCON hardware (real-time control board) 1.5 or later
- RAPCON software 1.5 or later
- Power supply (regulated, 6 – 15 V and at least 0.15 A without any load)

1.3. Absolute Maximum Ratings

- Power supply voltage: minimum 3 V, maximum 16 V
- Each analog, digital, capture and encoder input: minimum -0.3 V, maximum $+5.3$ V
- Each analog, digital, frequency and pulse output: minimum -25 mA, maximum $+25$ mA
- Each filtered pulse output: minimum -25 mA, maximum $+25$ mA
- Each H-bridge output: minimum -5 A, maximum $+5$ A
- Total current from/into all inputs and outputs (except power supply, voltage regulator and H-bridges): minimum -200 mA, maximum $+200$ mA
- Voltage regulator output: maximum 0.5 A (total)
- Operating ambient temperature: minimum 10 °C, maximum 50 °C

2. HARDWARE

The real-time control board is based on a dsPIC30F2012 digital signal controller. It has a total number of 8×16 bit inputs and 8×16 bit outputs capability. The inputs and outputs can be selected among the inputs and outputs listed above. The board is interfaced to the main computer that runs Matlab through a serial port. Two pulse-width modulation driven H-bridges with 5 A drive capability are included on the board to drive external actuators or loads. The functional block diagram of the board is shown in Figure 1, where A0–A7 are the analog inputs, B0–B1 are the analog outputs, C0–C1 are the capture inputs, D0_d0–D0.d7 are the digital inputs, E0–E1 are the encoder inputs, F0–F1 are the frequency outputs, G0.g0–G0.g7 are the digital outputs and H0–H1 are the pulse outputs; ADC represents the analog-to-digital converter, DAC represents the digital-to-analog converter, ICM represents the input-capture module, OCM represents the output-compare module, DIP represents the digital-input port, DOP represents the digital-output port, QEM represents the quadrature-encoder module and PWM represents the pulse-width modulator; FLs are the lowpass filters with outputs L0–L1 and HBs are the H-bridges with outputs P0–P1; and μC is the central microcontroller, UART is the universal-asynchronous-receiver-transmitter unit and PC is the host computer.

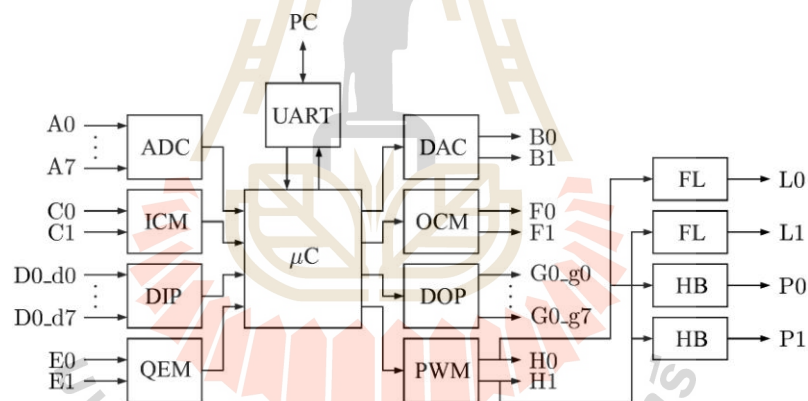


Figure 1. Functional block diagram of the board.

The layout of the board is shown in Figure 2. The inputs and outputs are connected to the board through standard pin header type connectors. The pins of all connectors are clearly indicated on the board for convenience. Access to the on-board 5 V, 0.25 A voltage regulator output is also provided for external light power supply requirements.

ก.2 การติดตั้ง Hardware กับโปรแกรม

1. ติดตั้งโปรแกรม MATLAB 2007b หรือเวอร์ชันที่สูงกว่ากับ Windows
2. ติดตั้ง Driver ของ PCI Serial Card ด้วยการเชื่อมต่อผ่านสาย Serial Crossover Cable
3. ติดตั้ง Real – Time Workshop และ Real – Time Windows Target
4. โหลดไฟล์ติดตั้งจาก Website <http://zeltom.com> ติดตั้งไฟล์ rapcon2009b.exe ซึ่งในที่นี่ใช้ MATLAB เวอร์ชัน 2009b สำหรับ Windows 7 จะมีไฟล์ rtwt_2009b_win7_fix.zip มาด้วย ซึ่งการติดตั้งต้องทำทีละขั้นตอน ด้วยวิธีการดังนี้

5. เข้าไปหาไฟล์ที่ชื่อว่า rtwin_main.c ภายในคอมพิวเตอร์ เช่น

“C:\Program Files\MATLAB\R2009b\toolbox\rtw\targets\rtwin\src” แล้วเปลี่ยนชื่อไฟล์ rtwin_main.c เป็น rtwin_main.org และ copy ไฟล์ rtwin_main.c ในโฟลเดอร์ ติดตั้งของ Rapcon มาใส่ไว้ใน Directory นี้

6. เข้าไปที่ Control Panel -> Device Manager เพื่อทำการเปลี่ยน Base Address และตรวจสอบ Comport Number ของ Serial Port หลังจากนั้นดูที่ Base Address ตัวแรกควรมี I/O Range เท่าไร เช่น I/O Range EC80 - EC87, Base Address คือ EC80 ในเลขฐาน 16 ซึ่งมีค่าเท่ากับเลขฐานสองคือ 60544 แล้วเข้าโปรแกรม MATLAB ไปในโฟลเดอร์ ไฟล์ติดตั้งของ Rapcon เปิดไฟล์ชื่อ rtwinpi.tlc และ rtwinpo.tlc แล้วทำการแก้ไขใน m.file ดังนี้

```
ifDrvAddress == 5
assign ::com = 1016
endif
```

7. สำหรับ Windows 7 Real-Time Windows Target จะถูกป้องกันไว้ดังนั้นจะต้อง copy ไฟล์ rtwtkml.sys ใน rtwt_2009b_win7_fix.zip ที่โหลดมา ไปไว้ที่

“C:\Program Files\MATLAB\R2009b\toolbox\rtw\targets\rtwin\kernel\win32”

8. พิมพ์ “rtwintgt -install” ใน Command Window ของโปรแกรม MATLAB เพื่อติดตั้ง RTWT kernel ก็เป็นอันเสร็จสมบูรณ์



ภาคผนวก ข

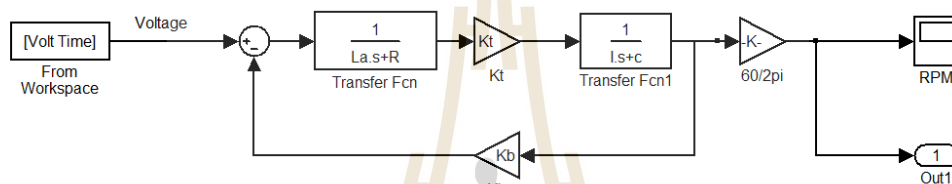
ขั้นตอนการระบุเอกลักษณ์จากโปรแกรม MATLAB ในส่วนของ Parameter

Estimation

ข1. ขั้นตอนการระบุเอกลักษณ์จาก โปรแกรม MATLAB ในส่วนของ Parameter Estimation

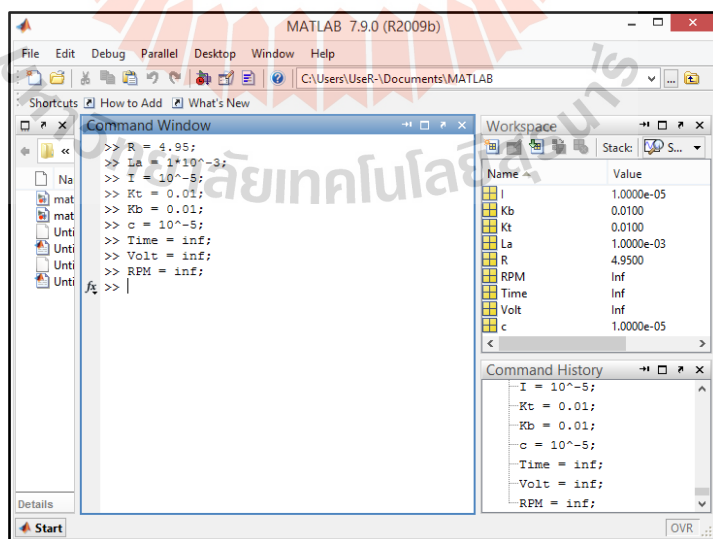
การใช้โปรแกรม Simulink Parameter Estimation

1. Import Data จากการทดลองไว้ใน Work Space ของโปรแกรม MATLAB แต่ในการแสดงตัวอย่างการใช้งานจะสร้างแบบจำลองของระบบโดยใช้ Simulink โดยกำหนดตัวแปรและค่าของตัวแปรของระบบลงไปโดยข้อมูลที่ได้จากรันโปรแกรมเปรียบเทียบกับเป็นข้อมูลจากการทดลอง โปรแกรมนี้เป็นการจำลองระบบควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ ข1.1ซึ่งเป็นระบบควบคุมแบบเปิด



รูปที่ ข1.1 แผนภาพแบบจำลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

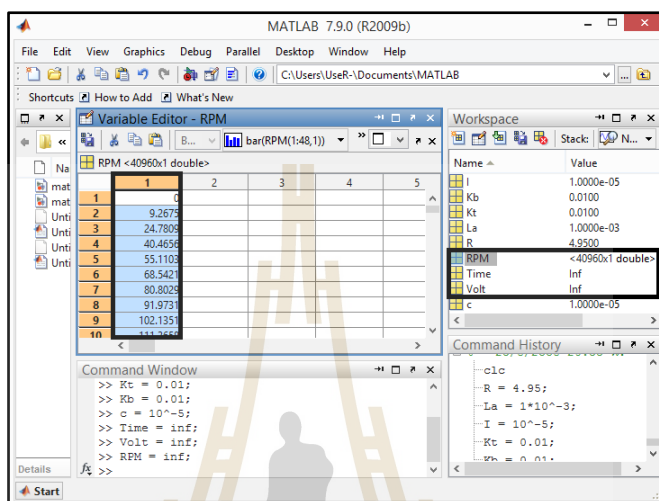
ซึ่งพิจารณาตัวแปรที่มีตัวแปรทั้งหมด 6 ตัวแปร คือ L_a, R_a, I, c, K_t, K_b ก่อนที่จะทำการประมาณตัวแปรจะต้องทำการกำหนดค่าตัวแปรเริ่มต้นก่อนทำการรันโปรแกรม โดยสามารถกำหนดค่าเริ่มต้นที่ Command Window ดังแสดงในรูปที่ ข1.2



รูปที่ ข1.2 แผนภาพแสดงกำหนดค่าเริ่มต้นที่ Command Window

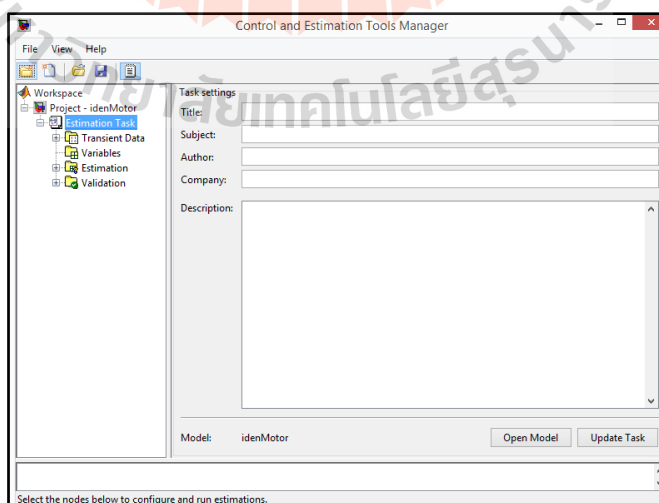
คือ $L_a = 1 \times 10^{-3}$, $R_a = 4.95$, $I = 10^{-5}$, $c = 10^{-5}$, $K_t = 0.01$ และ $K_b = 0.01$

โดยมีการประกาศตัวแปรเพื่อเก็บความข้อมูล คือ Time Volt และ RPM การนำข้อมูลมาเก็บในตัวแปรที่ประกาศจะทำได้โดย Double click ที่ตัวแปรที่ประกาศในหน้าต่าง Workspace และนำข้อมูลที่เก็บมาใส่ในช่อง Variable Editor ค้างแสดงในรูปที่ ข1.3



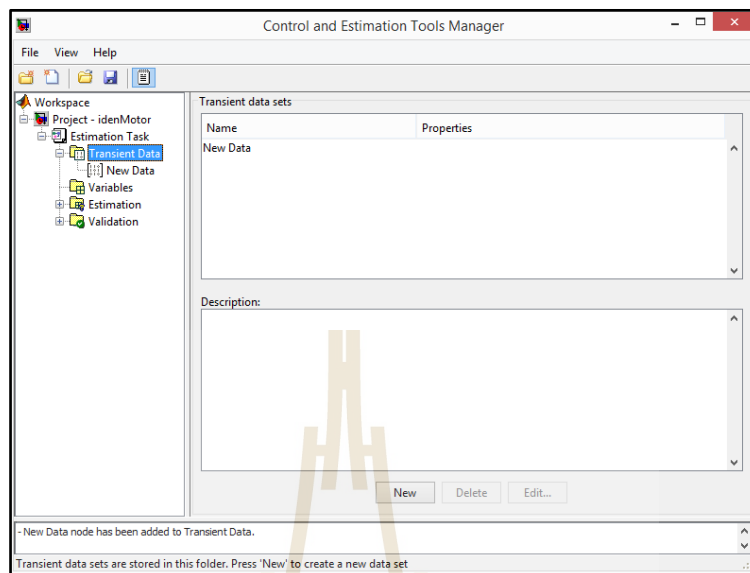
รูปที่ ข1.3 แผนภาพแสดงนำข้อมูลที่เก็บใส่ในตัวแปรที่ประกาศใน Workspace

2. เปิด Parameter Estimation บนหน้าต่างของ Simulink ที่จะทำการประมาณค่า โดยเลือก tool => Parameter Estimation จะปรากฏหน้าต่างนี้ขึ้นมา



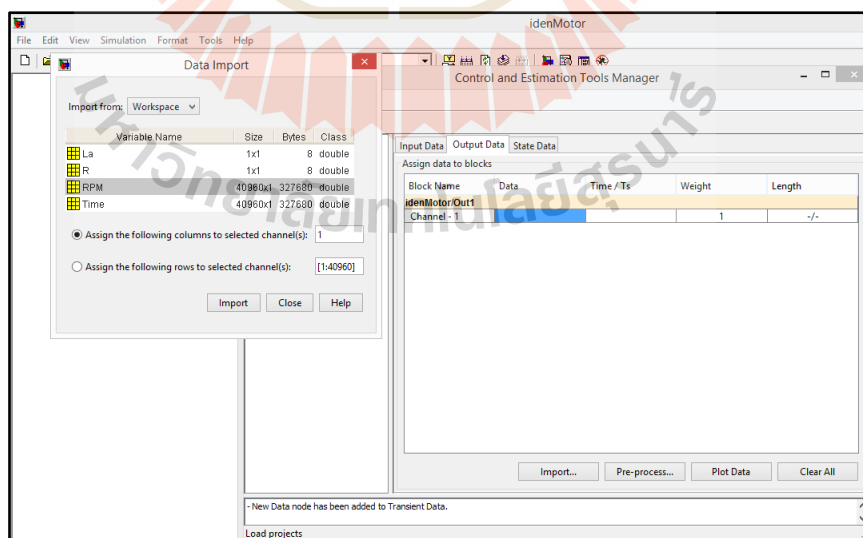
รูปที่ ข1.4 แผนภาพแสดงหน้าต่างของ Control and Estimation Tool Manager

3. Click เลือก Transient Data => New



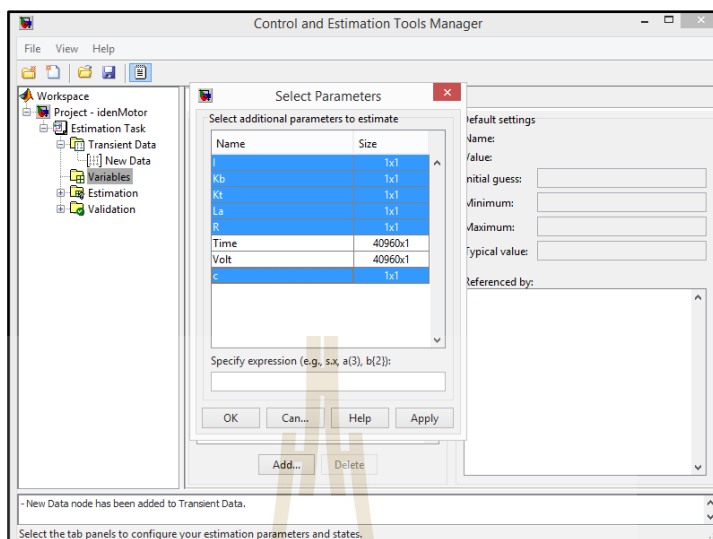
รูปที่ ข1.5 แผนภาพแสดงหน้าต่างของการเลือก New Data

4. Click New Data => Output Data => Import เพื่อเลือก RPM ในช่อง Data และ Time ในช่อง Time/Ts



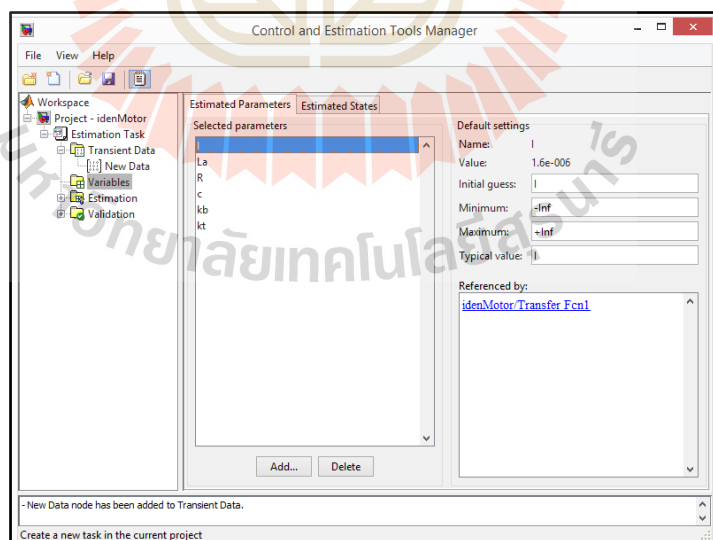
รูปที่ ข1.6 แผนภาพแสดงหน้าต่างการเลือกข้อมูลเข้า

5. Click Variables => Add =>เลือกตัวแปรที่ต้องการประมาณค่า => OK



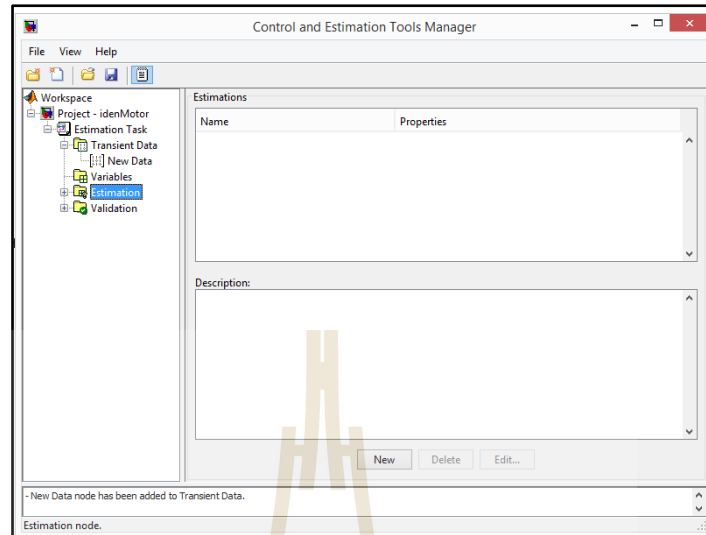
รูปที่ ข1.7 แผนภาพแสดงหน้าต่างการเลือกตัวแปร

6. กำหนดขอบเขตของตัวแปรที่จะประมาณค่าในส่วนของ Default settings กำหนดค่าต่ำสุดที่ Minimum และ ค่าสูงสุดจาก Maximum



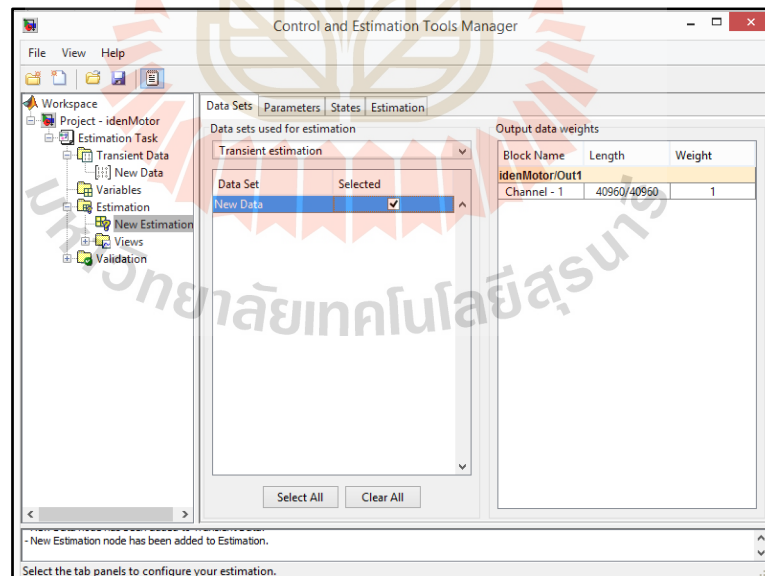
รูปที่ ข1.8 แผนภาพหน้าต่างกำหนดขอบเขตของตัวแปร

7. Click Estimation => NEW (จะปรากฏ New Estimation)



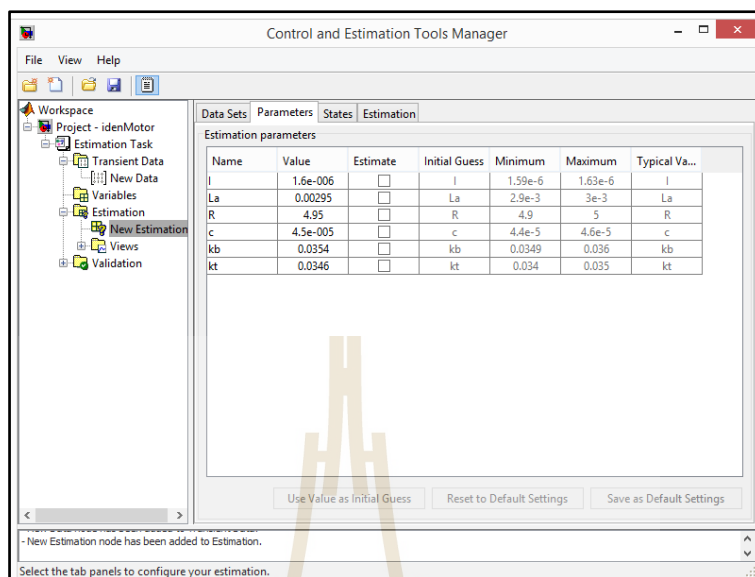
รูปที่ ข1.9 แผนภาพแสดงหน้าต่างการสร้าง New Estimation

8. Click New Data => Select All



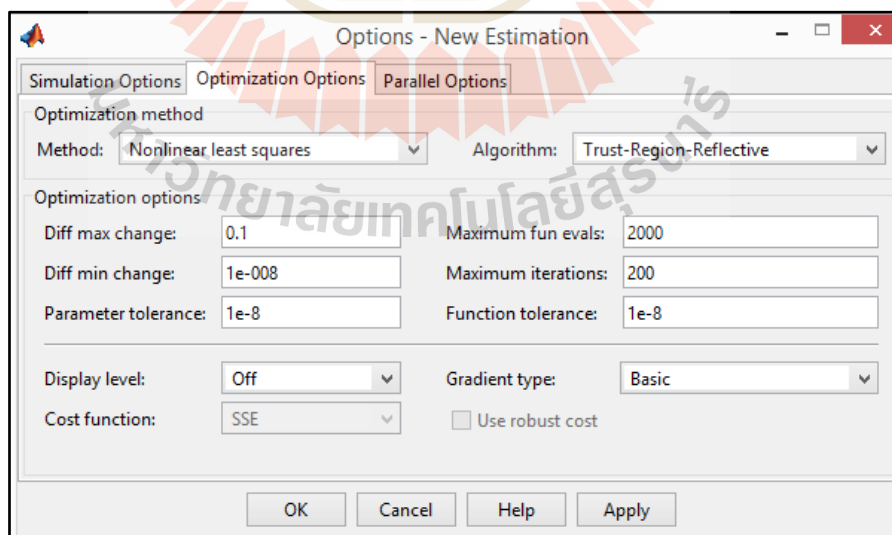
รูปที่ ข1.10 แผนภาพแสดงหน้าต่างการเลือกข้อมูลในการ Estimate

9. Click Parameters => Click เลือก Estimate ตัวแปรที่ต้องการประมาณ



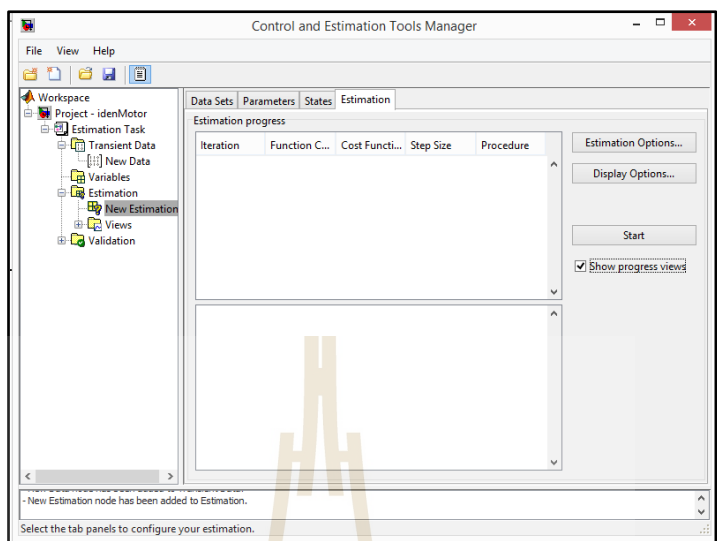
รูปที่ ข1.11 แผนภาพแสดงหน้าต่างการกำหนดที่ต้องการประมาณค่า

10. Click Estimation => Estimation Option เพื่อกำหนดอัลกอริทึมในการประมาณค่าตัวแปร

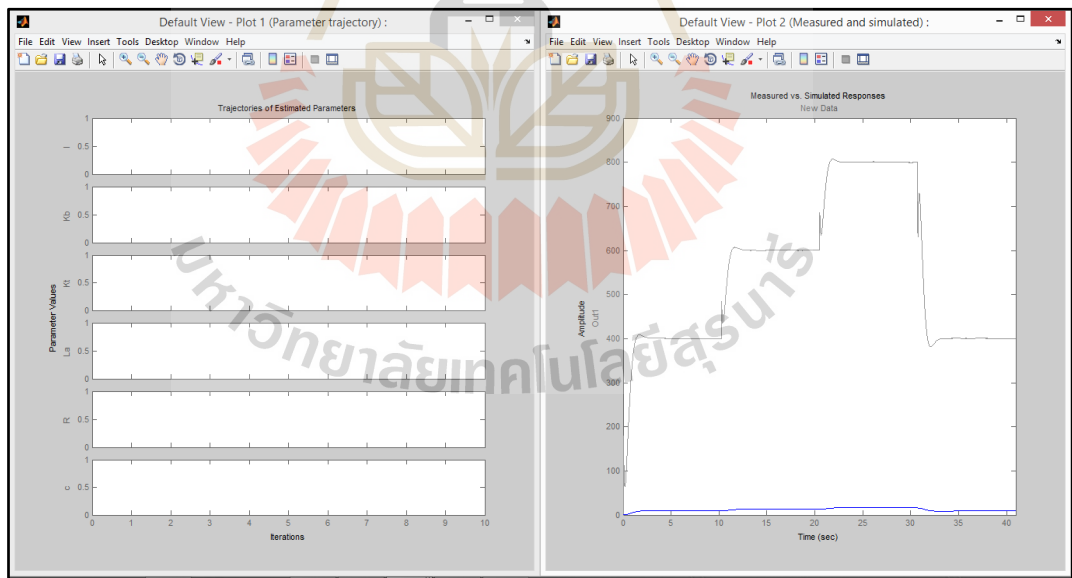


รูปที่ ข1.12 แผนภาพแสดงการกำหนดอัลกอริทึมในการประมาณค่าตัวแปร

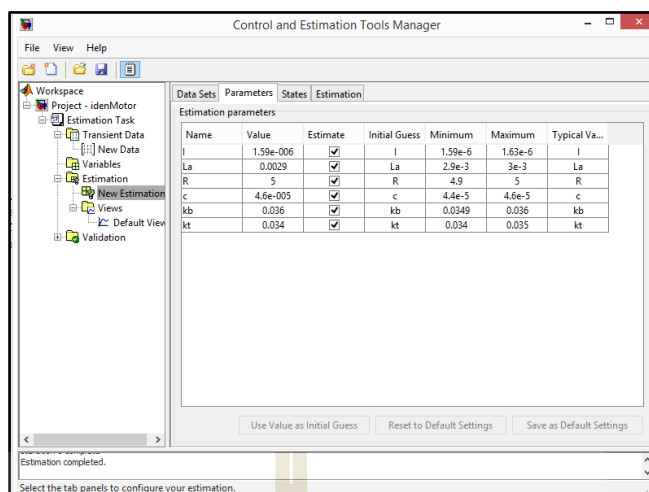
11. Click Estimation => Show Progress View => Start



รูปที่ ข1.13 แผนภาพแสดงการเริ่มการประมาณค่าตัวแปร



รูปที่ ข1.14 แผนภาพแสดงการตอบสนองจากการประมาณค่าตัวแปร

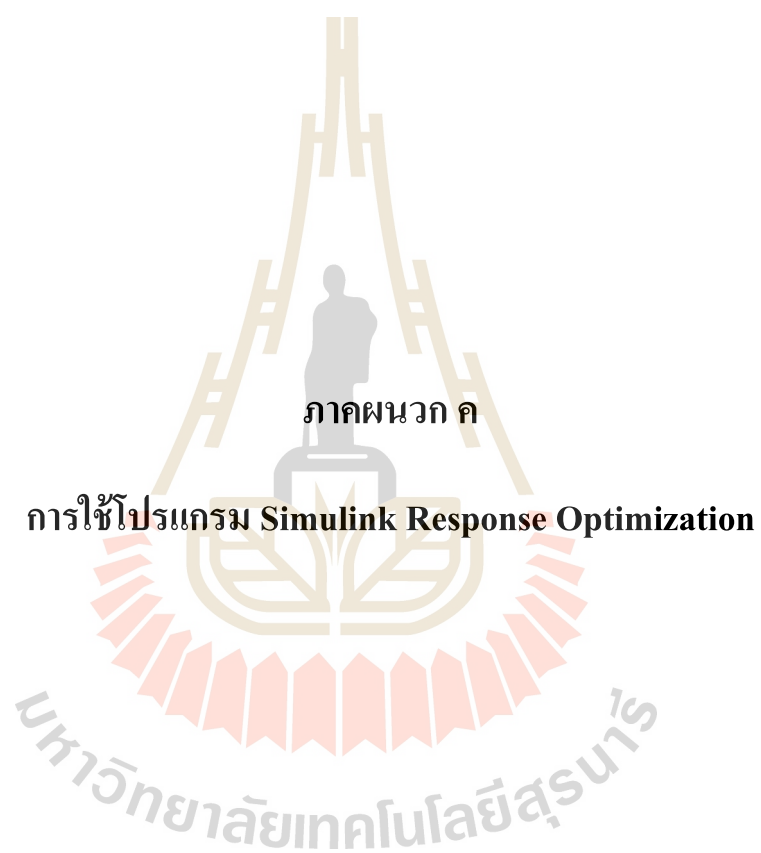


รูปที่ ข1.15 แผนภาพการแสดงผลค่าตัวแปรที่โปรแกรมประมาณได้

ตัวแปรของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากระบบเอกลักษณ์ คือ

$$I = 1.6 \times 10^{-6} \text{ kg.m}^2 / \text{rad}, K_t = 0.0346 \text{ N.m} / \text{A}, K_b = 0.0354 \text{ V.s} / \text{rad}$$

$$L_a = 2.95 \times 10^{-3} \text{ H}, R_a = 4.95 \Omega, c = 4.5 \times 10^{-5} \text{ N.m.s} / \text{rad}$$

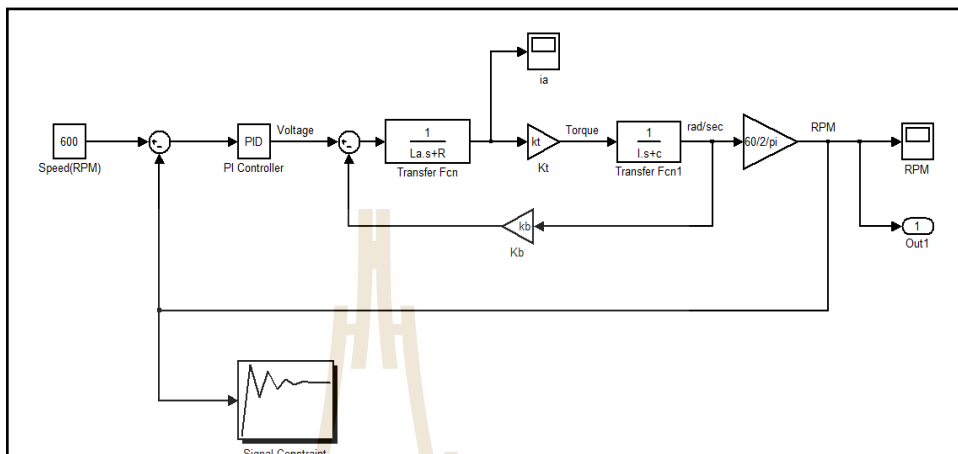


ภาคผนวก ค

การใช้โปรแกรม Simulink Response Optimization

ค1. การใช้โปรแกรม Simulink Response Optimization

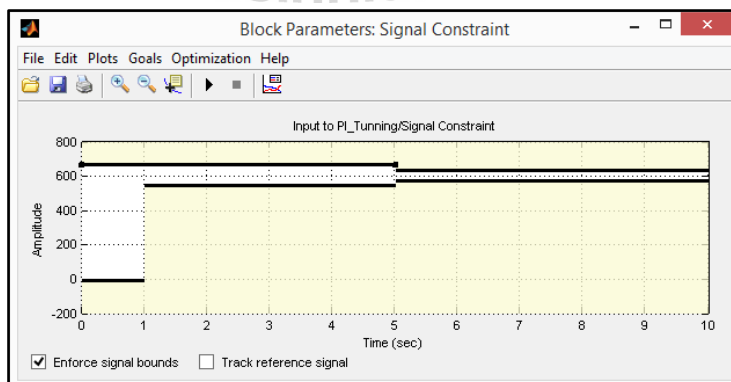
1. ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีการควบคุมแบบฟีดโอบของโปรแกรม Simulink ในส่วนของโปรแกรม MATLAB ดังแสดงในรูปที่ ค1.1



รูปที่ ค1.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ

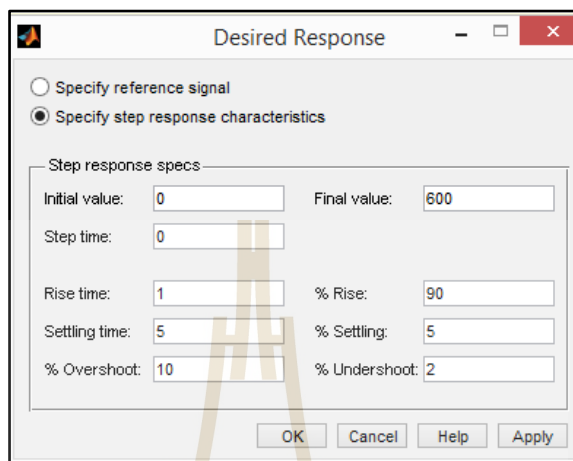
2. ระบบที่พิจารณามีตัวแปรทั้งหมด 8 ตัวแปร คือ $L_a, R_a, I, c, K_t, K_b, K_p$ และ K_i แต่สำหรับการประมาณค่าตัวแปรจะสามารถประมาณค่าได้เพียง 2 ตัวแปร คือ K_p และ K_i เนื่องจาก L_a, R_a, I, c, K_t และ K_b ทราบค่าแล้ว การจำลองสถานการณ์กำหนดอินพุตของระบบควบคุม คือ ความเร็วรอบเท่ากับ 600 RPM

3. ประมาณค่าตัวแปรของระบบโดยใช้เครื่องมือของโปรแกรม MATLAB ในส่วนของ Signal Constraint โดย Double – click ที่ตัว Signal Constraint Block เพื่อแสดง Signal Constraint window



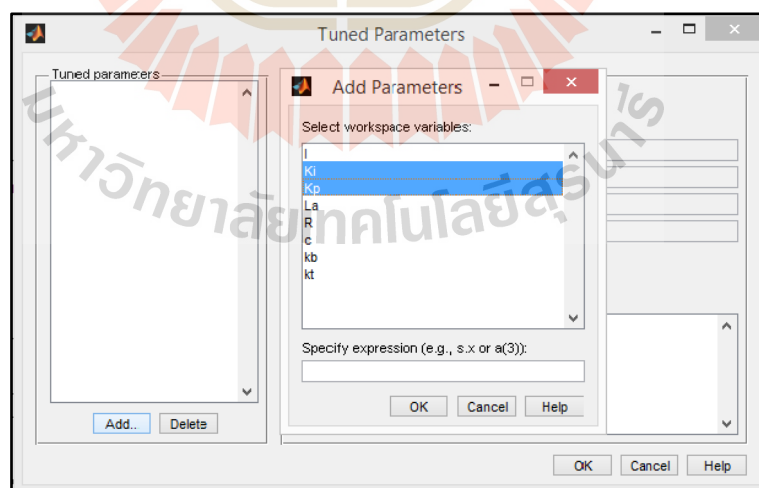
รูปที่ ค1.2 แผนภาพแสดง Signal Constraint Window

4. กำหนดรูปแบบของสัญญาณ Output ที่ต้องการบังคับ ซึ่งสัญญาณจะถูกบังคับให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนด การกำหนดขอบเขตของสัญญาณโดย Click Goals => Desired Response กำหนด Rise time, Settling time และ %Overshoot ตามขอบเขต



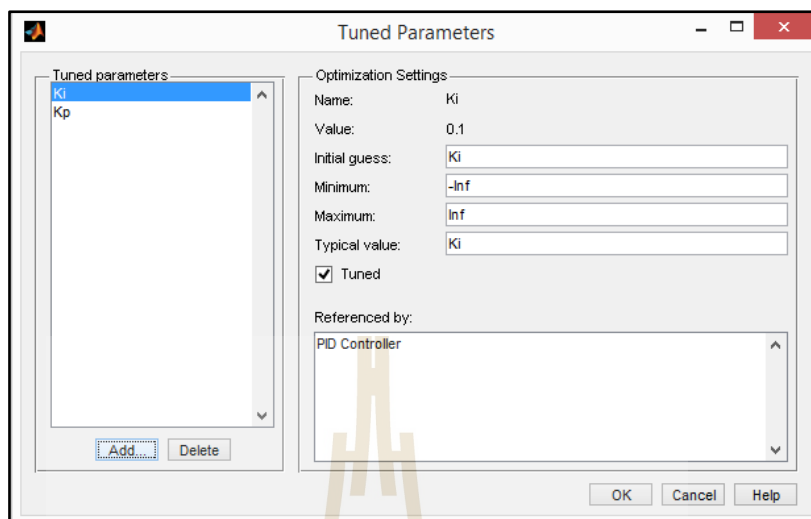
รูปที่ ๑1.3 แผนภาพการกำหนดการตอบสนองของระบบ

5. เปิด Tuned Parameters จากการเลือก Optimization => Tuned Parameters ในหน้าต่างของ Signal Window จากนั้น Click Add เลือกพารามิเตอร์ที่ต้องการปรับแต่ง



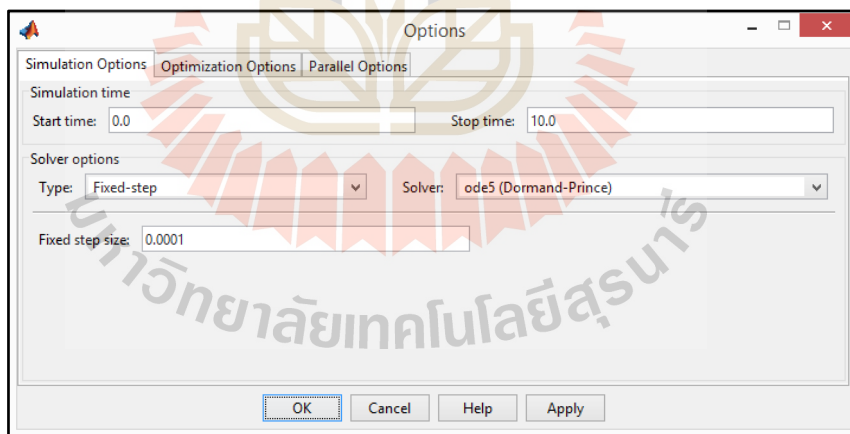
รูปที่ ๑1.4 แผนภาพแสดงการ Add Parameter

6. กำหนดขอบเขตของพารามิเตอร์แต่ละตัวในการปรับสัญญาณ



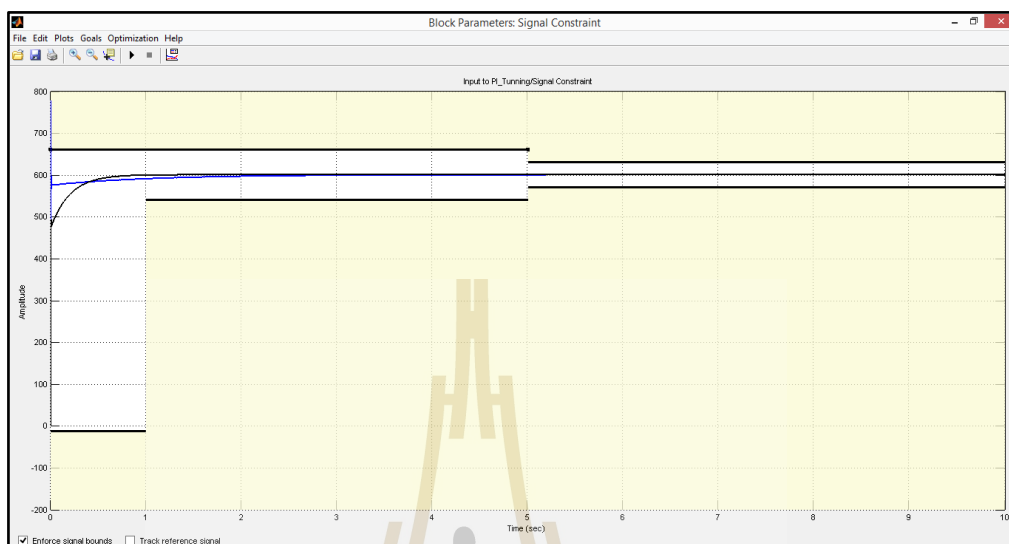
รูปที่ ค1.5 แผนภาพแสดงการกำหนดขอบเขตพารามิเตอร์

7. Click => Optimization => Simulation Options เพื่อกำหนดวิธีการ Optimization



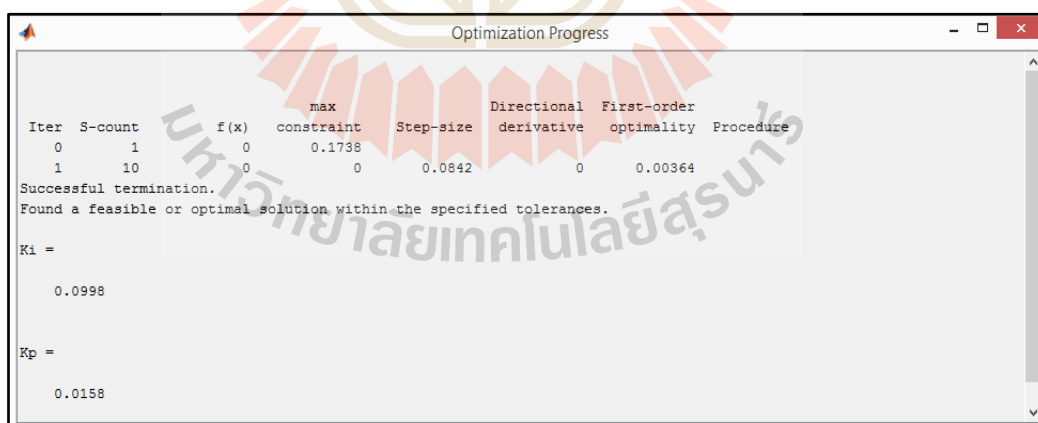
รูปที่ ค1.6 แผนภาพการกำหนด Options ของการ Optimize

8. Click ที่ Start Button ที่ Optimization menu เพื่อเริ่มการปรับแต่งพารามิเตอร์ เพื่อให้ได้สัญญาณอยู่ในขอบเขตที่กำหนด



รูปที่ ค1.7 แผนภาพแสดงการตอบสนองของสัญญาณในขอบเขต

จากนั้นแสดงความก้าวหน้าการทำงานของโปรแกรมและแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้ปรับแต่ง



รูปที่ ค1.8 แผนภาพแสดงหน้า Optimization Progress เมื่อเสร็จสิ้นการทำงาน

ตัวแปรของระบบควบคุมแบบฟีดแบ็คที่ได้จากการปรับโดยใช้โปรแกรม Simulink Response

Optimization คือ

$$K_p = 0.0158$$

$$K_i = 0.0998$$





ภาคผนวก ง

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

ัชชวาล เข้มเงิน นิติศักดิ์ หนูมาน้อย จรูญศักดิ์ พวกขุนทด และ จิระพล ศรีเสริฐผล. (2558). การประมาณปริมาตรในภาชนะกวนด้วยการชดเชยแรงบิดของเครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็ก. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 29 (ME-NETT 29, DRC18) 7 หน้า 1 – 3 กรกฎาคม. นครราชสีมา



DRC-18

การประมาณปริมาตรในภาชนะกวนด้วยการชดเชยแรงบิดของเครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็ก
Volume Estimation in Stir Container Using Load Torque Compensator of
Magnetic Stirrer Machine

ชัชวาล เข็มเงิน¹, นิตศักดิ์ หนูมณ้อย¹, จรูญศักดิ์ พวงขุนทด¹ และ จิระพล ศรีเสวีมูล¹

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000
*ติดต่อ: E-mail: kemngoen@gmail.com เบอร์โทรศัพท์: 085-535-7576

บทคัดย่อ

เครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็กเป็นเครื่องที่ใช้ผสมสารละลายตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป เป็นที่นิยมใช้ในภาคอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย ซึ่งในบางอุตสาหกรรมข ณะกวนของเหลวเพื่อผสมสารนั้นมีความจำเป็นต้องกวนตลอดเวลา ระหว่างนำสารที่ผสม ไปใช้งาน ปัญหาของเครื่องกวนสารที่สำคัญคือการลดลงของปริมาตรของของเหลวในภาชนะซึ่งส่งผลกระทบต่อ การนำสารนั้นไปใช้ไปใช้งานต่อได้ ดังนั้นปริมาตรของของเหลวในภาชนะที่มีการกวนสารผสมจึงจำเป็นต้องมีการตรวจวัด แต่การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดในภาชนะจะทำให้ประสิทธิภาพของการกวนสารผสมลดลงและเสียค่าใช้จ่าย ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการประมาณปริมาตรของของเหลวในภาชนะผ่านการเปลี่ยนแปลงของภาระกรรมที่ใช้ในเครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็กโดยไม่ต้องติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดเพิ่ม เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็ก

คำหลัก: เครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็ก, ภาระกรรม, การประมาณค่า

Abstract

The magnetic stirrer machine is a mixture of two or more chemical substances. It is widely used in the industry and the mixtures of some industries that have stirred constantly throughout the process before it is used. Sometimes the problem of stirrer is the reducing of liquid in the container and requires the monitored. On the other hand, measuring devices installed in a container gets decreased performance of stirring the mixture which incurs additional cost. Consequently, this research purposes estimation the volume of liquid in the container through the variable of load torque while the magnetic stirrer machine without installs additional measuring devices. For this reason, it also increases the performance of the magnetic stirrer machine..

Keywords: Magnetic Stirrer Machine, Load Torque, Estimation

1. บทนำ

ปัจจุบันได้มีการพัฒนากระบวนการผลิตอย่างรวดเร็ว ทั้งในภาคการศึกษาและโรงงานอุตสาหกรรม จึงทำให้มีความต้องการนำเครื่องมือมาใช้มากขึ้น เพื่อการผลิตที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพโดยเฉพาะโรงงานอุตสาหกรรม เครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็กเป็นเครื่องมือชนิดหนึ่งที่ใช้ผสมสารละลายตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป ซึ่งในบางอุตสาหกรรมจึงมีความจำเป็นต้องใช้เครื่องกวนสารใน

กระบวนการต่างๆ อาทิ การเตรียมสารละลาย การผสมสารละลายในสารบางตัวที่ผสมยากและใช้เวลาในการผสมนานหรือสารที่เป็นอันตรายกับผู้ใช้ปฏิบัติงาน [3] เป็นต้น ขณะกวนของเหลวหรือสารผสมอยู่นั้นอาจจะต้องกวนสารตลอดเวลา ระหว่างกระบวนการเพื่อนำสารที่ผสมนำไปใช้งาน ปัญหาที่ในกระบวนการนั้นบางครั้งปริมาตรของของเหลวในภาชนะนั้นมีการเปลี่ยนแปลงอาจส่งผลกระทบต่อ การนำสารไปใช้งานต่อ อีกทั้งผู้ใช้ปฏิบัติการอาจมี

DRC-18

สังเกตเครื่องกวนอยู่ตลอดเวลาจะทำให้กระบวนการนั้นเกิดความเสียหาย ดังนั้นการวัดปริมาณของของเหลวในภาชนะกวนจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง แต่การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดในภาชนะกวนจะทำให้ประสิทธิภาพของการกวนสารลดลงและเสียค่าใช้จ่าย

เครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็ก [1, 2] นอกจากจะช่วยเตรียมสารละลาย ผสมสารละลาย และไม่เกิดอันตรายกับผู้ปฏิบัติการ แล้วยังสามารถประมาณปริมาตรของของเหลวในภาชนะโดยไม่ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดในภาชนะในภาชนะ [4, 5, 6] จากการประมาณปริมาตรของของเหลวที่เปลี่ยนแปลงซึ่งมีความสัมพันธ์กับการกระทำที่เปลี่ยนแปลง ในภาชนะบรรจุของเหลว การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวของไหลจากภาชนะกระทำให้แรงบิดที่เปลี่ยนแปลงเข้ามาบรรจบการทำงานของตัวควบคุม ซึ่งระบบควบคุมโดยทั่วไปของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงใช้หลักการเพิ่มค่ากระแสไฟฟ้าให้กับมอเตอร์เพื่อให้ได้แรงบิดและความเร็วรอบตามต้องการในภาวะที่มีแรงบิดเปลี่ยนแปลง โดยระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีการนำตัวสังเกตมาใช้ในการประมาณค่าตัวแปรสเกลเพื่อนำไปใช้ในการควบคุมระบบเช่น วิธีการของ Full-state feedback Control [10] ผลของค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงจะทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้นกับการประมาณค่าตัวแปรสเกลโดยใช้ตัวสังเกต ดังนั้นประสิทธิภาพของการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงลดลง ในทางปฏิบัติค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงนี้ไม่สามารถวัดได้โดยตรงแต่สามารถประมาณค่าได้

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการประมาณปริมาตรของของเหลวในภาชนะจากการเปลี่ยนแปลงของภาชนะที่เกิดขึ้นในภาชนะบรรจุผ่านการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์เพื่อรักษาความเร็วรอบให้คงที่ตลอดการทำงาน โดยไม่ต้องติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดเพิ่ม ซึ่งรายละเอียดจะอธิบายในส่วนต่อไป

2. สมการควบคุมและตัวสังเกตอันดับเต็มของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะมีหลักการการทำงานโดยเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล โดยวิธีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดในสนามแม่เหล็ก ซึ่งจะทำให้เกิดแรงทางกลเกิดขึ้น โดยการควบคุมด้วยวิธี Armature Control ใช้การปรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าให้กับขดลวด

อาร์เมเจอร์ (Armature Circuit) เพื่อการควบคุมความเร็วรอบโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดสนาม (Field Circuit) คงที่จึงสามารถพิจารณาเฉพาะขดลวดอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเนื่องจากกระแสที่ให้กับขดลวดสนามมีค่าคงที่ที่สนามแม่เหล็กของมอเตอร์คงที่ตามไปด้วย การควบคุมจะทำได้โดยการปรับเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ให้กับขดลวดอาร์เมเจอร์ พิจารณาสมาการของแรงบิด

$$I \frac{d\omega}{dt} = -c\omega + K_t i - T_L \quad (1)$$

สมการของวงจรถวายไฟฟ้า

$$V_a - K_b \omega = L_a \frac{di}{dt} + R_a i \quad (2)$$

สมการของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในรูปแบบของ State Space Form

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= Ax + BV_a + HT \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (3)$$

เมื่อแทนค่าตัวแปรของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจากสมการ (1) และ (2) จัดให้อยู่ในรูปของรูป State Space Form

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \omega \\ i_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{c}{I} & \frac{K_t}{I} \\ -\frac{K_b}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ i_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L_a} \end{bmatrix} V_a + \begin{bmatrix} -\frac{1}{I} \\ 0 \end{bmatrix} T_L \quad (4)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ i_a \end{bmatrix}$$

และตัวสังเกตอันดับเต็มของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ดังสมการที่ 5

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{x}}{dt} &= A\hat{x} + BV_a + HT + Le \\ y &= C\hat{x} \end{aligned} \quad (5)$$

เมื่อ $e = y - C\hat{x} = \omega - \hat{\omega}$

โดยกำหนดให้ค่าที่มีสัญลักษณ์ " \wedge " คือค่าตัวแปรของตัวสังเกตที่ได้มาจากการประมาณค่าจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และค่า e คือค่าความผิดพลาดของความเร็ว

DRC-18

รอบที่เกิดขึ้นระหว่างมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงกับตัว
สังเกด

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{i}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{c}{I} & \frac{K_t}{I} \\ -\frac{K_b}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{i}_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L_a} \end{bmatrix} V_a + \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \end{bmatrix} \hat{T}_L + \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \end{bmatrix} e$$

$$y = [1 \ 0] \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{i}_a \end{bmatrix}$$

เมื่อ

- I โมเมนต์ความเฉื่อย ($\text{Kg} \cdot \text{m}^2$)
- K_t ค่าคงที่ของแรงบิด ($\text{N} \cdot \text{m}/\text{A}$)
- K_b ค่าคงที่ Electromotive Force ($\text{V} \cdot \text{s}/\text{rad}$)
- T_L แรงบิดที่เปลี่ยนแปลง ($\text{N} \cdot \text{m}$)
- c ค่าความหน่วงทางกล ($\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$)
- i_a กระแสไฟฟ้าของอาร์เมเจอร์(A)
- ω ความเร็วรอบ (rad/s)
- V_a ค่าความต่างศักย์ของอาร์เมเจอร์ (V)
- R ค่าความต้านทานของอาร์เมเจอร์ (Ω)
- L_a ค่าความเหนี่ยวนำของอาร์เมเจอร์ (H)
- L_1, L_2 ค่าตัวการขยายของตัวสังเกดการณ์

**3. การประมาณแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงโดยตัวชดเชย
แบบปรับค่าได้**

การใช้ตัวชดเชยแบบปรับค่าได้โดยวิธี Gradient
Method [10] ในการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง
จากสมการมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง(1)และ(2) เมื่อระบบ
ได้รับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง [4, 5, 6] สามารถจัดรูปได้
ดังนี้

$$\frac{K_t}{L_a I} V_a = \frac{d^2 \omega}{dt^2} + \left(\frac{R}{L_a} + \frac{c}{I}\right) \frac{d\omega}{dt} + \left(\frac{Rc}{L_a I} + \frac{K_b K_t}{L_a I}\right) \omega + \frac{1}{I} \frac{dT_L}{dt} + \frac{R_a}{L_a I} T_L$$

จากสมการที่ (7) สามารถหาค่าตัวแปรได้และกำหนดให้
ตัวแปรที่มีค่าคงที่ที่มีเพียงค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง(\hat{T}_L)
เพียงตัวเดียว ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในการประมาณค่าตัว

แปรสแตด ดังนั้นจากสมการของตัวสังเกด จะได้ตั้งสมการ
ที่ (8)

$$\frac{K_t}{L_a I} V_a = \frac{d^2 \hat{\omega}}{dt^2} + \left(\frac{R}{L_a} + \frac{c}{I}\right) \frac{d\hat{\omega}}{dt} + \left(\frac{Rc}{L_a I} + \frac{K_b K_t}{L_a I}\right) \hat{\omega} + \frac{1}{I} \frac{d\hat{T}_L}{dt} + \frac{R_a}{L_a I} \hat{T}_L$$

เมื่อ

$$b = \frac{K_t}{L_a I}, \alpha_1 = \frac{1}{I}, a_1 = \left(\frac{R_a}{L_a} + \frac{c}{I}\right), \alpha_2 = \frac{R_a}{L_a I},$$

$$a_2 = \left(\frac{R_a c}{L_a I} + \frac{K_b K_t}{L_a I}\right)$$

จัดรูปสมการ (7) กับ (8) ใหม่

$$b V_a = \frac{d^2 \omega}{dt^2} + a_1 \frac{d\omega}{dt} + a_2 \omega + \alpha_1 \frac{dT_L}{dt} + \alpha_2 T_L$$

$$b V_a = \frac{d^2 \hat{\omega}}{dt^2} + a_1 \frac{d\hat{\omega}}{dt} + a_2 \hat{\omega} + \alpha_1 \frac{d\hat{T}_L}{dt} + \alpha_2 \hat{T}_L$$

ดังนั้นหลักการการทำงานของตัวชดเชยแบบปรับค่าได้คือ
การปรับค่าตัวแปร(\hat{T}_L)ให้ความแตกต่างระหว่างเอาท์พุท
ทั้งสองหมดไป ทำได้โดยให้ Loss Function(J) ที่มีค่า

$$J(\hat{T}_L) = \frac{1}{2} e^2$$

จากสมการที่ (9) เท่ากับ สมการ (10)

$$\frac{d^2 e}{dt^2} = -\alpha_1 \frac{de}{dt} - \alpha_2 e - \alpha_1 \left(\frac{dT_L}{dt} - \frac{d\hat{T}_L}{dt}\right) - \alpha_2 (T_L - \hat{T}_L)$$

เมื่อ $e = \omega - \hat{\omega}$

การปรับตัวแปร(\hat{T}_L)ในทิศทาง Negative Gradient of
Loss Function คือ

$$\frac{\partial \hat{T}_L}{\partial t} = -\gamma \frac{\partial J}{\partial \hat{T}_L} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial \hat{T}_L}$$

จาก MIT Rule จะได้ตัวแปรปรับค่า คือ

$$\frac{\partial e}{\partial \hat{T}_L} = -\frac{\partial \hat{\omega}}{\partial \hat{T}_L}$$

DRC-18

เมื่อ γ อัตราการปรับตัวเมื่อตัวแปรปรับตัวมีการเปลี่ยนแปลงโดยกำหนดให้ Sensitivity Function เท่ากับ

$$v = \frac{\partial \hat{\omega}}{\partial \hat{I}_L} \quad (14)$$

เมื่อตัวแปรปรับค่ามีการเปลี่ยนแปลงการเปลี่ยนแปลงของสมการที่ (10) ต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรปรับค่า คือ

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + a_1 \frac{\partial v}{\partial t} + a_2 v = -\alpha_1 \quad (15)$$

4. ผลการทดสอบการทำงานของระบบ

การทดสอบการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในกรณีที่มีระบบมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วมอเตอร์แบบขั้นบันได จะพิจารณากรณีที่มีการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์แบบปิดโดยระบบจะมีตัวควบคุมแบบ พีไอ พร้อมทั้งสังเกตกระแสและความเร็วของมอเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงได้จากการประให้ตัวสังเกตด้วยวิธี Gradient Method สำหรับค่าตัวแปรที่ได้จากการทดสอบระบบและการทดลองนั้นได้จากการระบุเอกลักษณ์ของระบบ

$$I = 1.6 \times 10^{-6} \text{ Kg} \cdot \text{m}^2, \quad La = 2.95 \text{ mH},$$

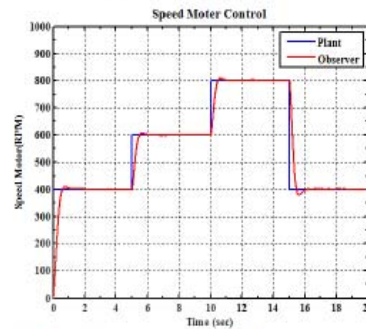
$$R = 4.95 \Omega \quad Kt = 0.0371 \text{ N} \cdot \text{m/A},$$

$$Kb = 0.0373 \text{ V} \cdot \text{s/rad}$$

$$c = 4.865 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s/rad}$$

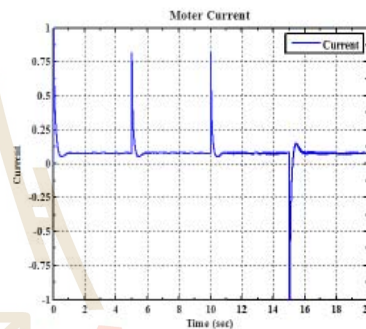
จากรูปที่ 1 ทดสอบระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นลักษณะขั้นบันได โดยจะเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบที่ 400 600 และ 800 รอบต่อนาที ตามลำดับ

จากการทดสอบระบบควบคุมด้วยการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบแบบขั้นบันได จากรูปที่ 2 จะเห็นว่าช่วงเวลาที่มีระบบควบคุมความเร็วรอบเปลี่ยนแปลงความเร็ว จะเห็นว่ากระแสไฟฟ้าถูกตัดเพื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบและกระแสไฟฟ้าขณะตั้งสูงมากเมื่อเทียบกับกระแสไฟฟ้าที่กำลังขับมอเตอร์ในช่วงความเร็วรอบคงที่



รูปที่ 1 ทดสอบระบบควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์

แบบขั้นบันได

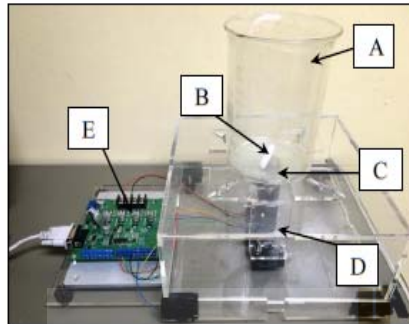


รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงของกระแสขณะทดสอบระบบควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์

5. ผลการทดลอง

การทดลองจะใช้การหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการติดตั้งแม่เหล็กแม่เหล็กถาวร เพื่อใช้กวานสารละลายในภาชนะบรรจุที่มีระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบปิด ด้วยการเปลี่ยนแปลงการกระทำในภาชนะซึ่งมีความสัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปของมอเตอร์ด้วยความเร็วของมอเตอร์ที่ปฏิบัติการโดยมีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเร็วรอบที่มอเตอร์ การกระทำที่เปลี่ยนแปลงไปในภาชนะซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับปริมาตรของของเหลวในภาชนะ โดยพื้นที่หน้าตัดของภาชนะคงที่ การควบคุมการทำงานของมอเตอร์ในเครื่องกวนสารนั้นเพื่อความเหมาะสมของสารแต่ละชนิด หากของเหลวในภาชนะเกิดการเปลี่ยนแปลงจะส่งผลให้แรงบิดของมอเตอร์เปลี่ยนแปลงไป โดยตัวควบคุมจะทำหน้าที่ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ให้คงที่ด้วยการปรับกระแสไฟฟ้าเพื่อรักษาความเร็วรอบ แสดงดังรูปที่ 3

DRC-18



รูปที่ 3 เครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็ก
A - Beaker, B – Magnetic Bar,
C – Magnetic, D – DC Motor และ E – Control Board

โดยพื้นที่หน้าตัดของภาชนะคงที่(105mm) และความหนืดคงที่(1mPa.s) ณ อุณหภูมิที่อุณหภูมิห้องโดยปริมาตรของของเหลวจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 0 -1000 ml ขณะที่ทำการทดลองกวนของเหลวอยู่นั้นเมื่อปริมาตรของเหลวมีการเปลี่ยนแปลง ระบบควบคุมจะรักษาความเร็วให้คงที่ที่ 600 รอบต่อนาที ซึ่งการทดลองจะใช้เครื่องกวนแบบแท่งแม่เหล็ก โดยมีแม่เหล็กถาวรติดกับมอเตอร์ขนาด 12 โวลต์ พร้อมมีแท่งแม่เหล็กอยู่ในภาชนะสำหรับกวนของเหลวโดยแม่เหล็กถาวรกับแท่งแม่เหล็กกวนจะอยู่อย่างอิสระต่อกัน การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ คือ Board ควบคุมผ่านโปรแกรม Simulink ของ MATLAB ซึ่งการทดลองจะแบบการทดลองเป็น 2 ส่วน คือ การทดลองการเปลี่ยนแปลงภาระโหลดของของเหลวในภาชนะโดยไม่ขึ้นกับเวลา และการทดลองการเปลี่ยนแปลงภาระโหลดของของเหลวในภาชนะที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตร

ส่วนที่ 1 การทดลองเปลี่ยนแปลงภาระโหลดในภาชนะกวนที่ไม่ขึ้นกับเวลา ด้วยระบบควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ 600 รอบต่อนาที จากรูปที่ 4 จะเห็นว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของของเหลวกับกระแสไฟฟ้า และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของของเหลวกับภาระโหลดจะมีลักษณะเชิงเส้น และได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของของเหลวกับกระแสไฟฟ้า

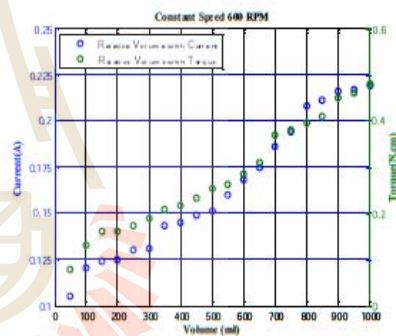
$$V = 7878.5i_a + 765.9$$

เมื่อ V คือ ปริมาตรของของเหลว และสมการความสัมพันธ์ระหว่างภาระโหลดกับกระแสไฟฟ้า

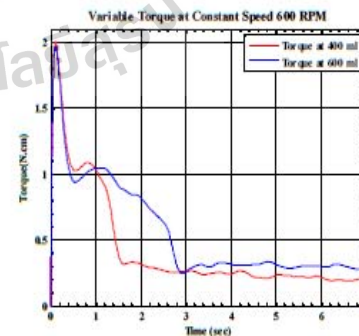
$$T_L = 3.2238i_a - 0.2481$$

ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ภาระโหลดของของเหลว(น้ำ) แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และภาระโหลด

Volume (ml)	Volt (V)	Current (A)	Torque (N.cm)
200	2.87	0.125	0.160
400	2.93	0.145	0.216
600	3.03	0.168	0.285
800	3.19	0.208	0.396
1000	3.28	0.219	0.480

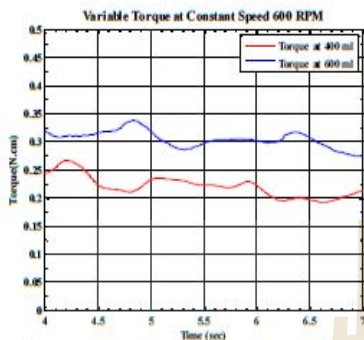


รูปที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของของเหลวกับกระแสไฟฟ้าและภาระโหลด

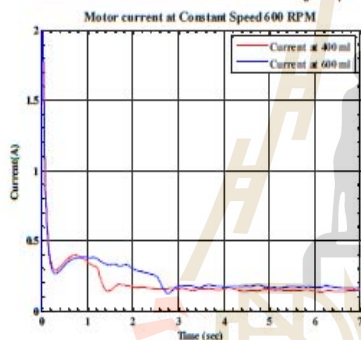


รูปที่ 5 กราฟเปรียบเทียบการตอบสนองระหว่างภาระโหลดที่ปริมาตร 400 กับ 600 มิลลิลิตร

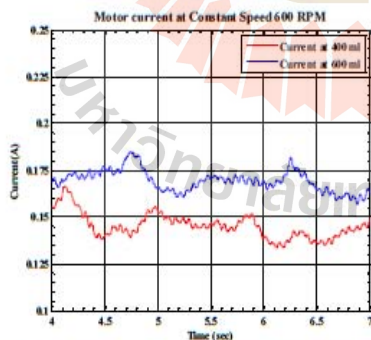
DRC-18



รูปที่ 6 กราฟเปรียบเทียบระหว่างภาระโหลดที่ปริมาตร 400 กับ 600 มิลลิลิตร ขณะระบบเข้าสู่สมดุล



รูปที่ 7 กราฟเปรียบเทียบการตอบสนองระหว่างกระแสที่ ปริมาตร 400 กับ 600 มิลลิลิตร

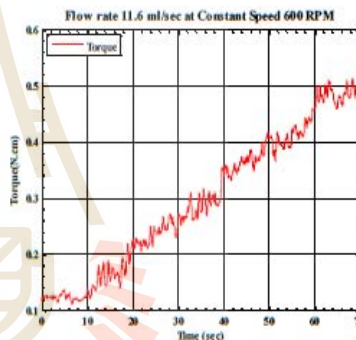


รูปที่ 8 กราฟเปรียบเทียบการตอบสนองระหว่างกระแสที่ ปริมาตร 400 กับ 600 มิลลิลิตร ขณะระบบเข้าสู่สมดุล

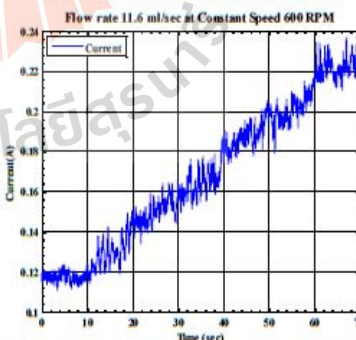
จากรูปที่ 5 และ 7 กราฟเปรียบเทียบระหว่างภาระโหลดและกระแสระหว่างปริมาตรที่ 400 กับ 600 มิลลิลิตร เมื่อระบบควบคุมเริ่มทำงานสั่งมอเตอร์ให้มีความเร็วรอบเท่ากับ 600 รอบต่อนาที จะเห็นว่าภาระโหลดทั้งสองค่า

ขึ้นสูงเป็นผลมาจากการตั้งกระแสเพื่อเอาชนะ inertia ของของเหลวเมื่อกับเทียบกับภาระโหลดที่ระบบเข้าสู่สมดุลเข้า ช่วงที่ระบบเข้าสู่สมดุลจะเห็นว่าภาระโหลดที่มากกว่าจะเข้าสู่สมดุลได้ช้ากว่า และเมื่อระบบเข้าสู่สมดุล จากรูปที่ 6 และ 8 จะเห็นว่าภาระโหลดที่มากกว่าจะมีแรงบิดมากกว่าอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งในทางปฏิบัติเราจะพิจารณาที่สภาวะสมดุลหรือ operating speed เท่านั้น

ส่วนที่ 2 การทดลองเปลี่ยนแปลงภาระโหลดในภาชนะกวนที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตร ด้วยระบบควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ 600 รอบต่อ นาที และอัตราการเปลี่ยนแปลงภาระโหลดเท่ากับ 11.6 มิลลิลิตรต่อวินาที



รูปที่ 9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดที่ภาระโหลดใน ภาชนะกวนที่อัตราการไหล 11.6 ml/sec



รูปที่ 10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ภาระโหลด ในภาชนะกวนที่อัตราการไหล 11.6 ml/sec

การทดลองในส่วนที่ 2 โดยการเพิ่มภาระโหลดใน ภาชนะกวนที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตร เมื่อเปรียบเทียบ

DRC-18

แรงบิดกับกระแสไฟฟ้าจากรูปที่ 9 และรูปที่ 10 เมื่อภาระโหลดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องที่ความเร็วรอบคงที่ จะเห็นได้ว่ากระแสไฟฟ้าและแรงบิดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยลักษณะของกราฟที่มีการเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณมีการเปลี่ยนแปลง

6. สรุป

ผลการเปลี่ยนแปลงปริมาณของของเหลวในภาชนะ จะมีผลกระทบต่อค่าแรงบิด โหลด และกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้นวิธีการชดเชยแบบปรับตัวได้เพื่อประมาณค่าของแรงบิดโหลดที่เปลี่ยนแปลงร่วมกับตัวสังเกต ซึ่งข้อมูลที่ได้จะสามารถประมาณปริมาณโดยมีความสัมพันธ์กับระดับน้ำภายในภาชนะ รวมถึงการแจ้งเตือนในกรณีของเหลวเปลี่ยนแปลงปริมาณไม่อยู่ในช่วงการทำงาน และสามารถควบคุมปริมาณที่ภายในภาชนะได้ตามต้องการ

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และบริษัท มณีสุรีย์ กรุ๊ป จำกัด ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัย

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Yavuz Ege, Osman Kalender, and Sedat Nazlibilek (2010). Electromagnetic Stirrer Operating in Double Axis. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 57, No. 7, July 2010.
- [2] Osman Kalender and Yavuz Ege (2007). A PIC Microcontroller Based Electromagnetic Stirrer. *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 43, No. 9, September 2007.
- [3] Wang Jianwen, Hu Weiqing, Jia Lifeng and Qin Yukun (2011). Effects of Water-Lime Ratio and Stirring Speed of Lime Dry Hydration Productions Properties. *International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring*, China
- [4] Srisertpol, J. and Khajomtraidat, C. (2009). Estimation of DC Motor Variable Torque Using Adaptive Compensation, *Proceedings of 21st the*

Chinese Control and Decision Conference (CCDC2009), Guilin, China.

- [5] Khajomtraidat, C. and Srisertpol, J. (2010). Simulation Studies of Position Control Systems for Estimation of DC Motor Load Torque, *Proceedings of the 9th WSEAS international Conference on Signal Processing, Robotics and Automation*, University of Cambridge, UK.
- [6] Khajomtraidat, C. and Srisertpol, J. (2010). Torque Control for DC Servo Motor Using Adaptive Load Torque Compensation, *Proceedings of ICOSSSE'10*, Iwate Prefectural University, Iwate, Japan.
- [7] A. Sevinc. A Full Adaptive Observer for DC Servo Motors, *Turk J Engin*, Vol. 11, No.2 2003.
- [8] M. BRANESH PILLAI, G.V.A.G. ASANKA PERERA, M.K.C.D. CHINTHAKA AND A.M. HARSHAS. ABEYKOON. Analysis of A DC Motor Based Velocity Controller Using Disturbance Observer, *J.Sci.Res* 5(1): 1-7, 2014, Indian
- [9] Ogata, K (2010). *Modern Control Engineering*, 5th edition, ISBN: 10: 0-13-713337-5, Pearson, New Jersey.
- [10] Karl J. Åström and Björn Wittenmark (1995). *Adaptive Control*, 2nd edition, Addison Wesley, USA.

ประวัติผู้เขียน

นายชัชวาล เข้มเงิน เกิดเมื่อวันที่ 15 สิงหาคม พ.ศ. 2532 ที่อำเภอเมือง จังหวัดนครสวรรค์ เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษาชั้นปีที่ 1-6 ระดับมัธยมชั้นปีที่ 1-3 ที่โรงเรียนประชานุเคราะห์ จังหวัดนครสวรรค์ ระดับมัธยมศึกษาชั้นปีที่ 4-6 ที่โรงเรียนนวมินทราชูทิศ มัชฌิม จังหวัดนครสวรรค์ และสำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมาเมื่อ ปี พ.ศ. 2554 จากนั้นได้ ดำรงทำงานในตำแหน่งผู้ช่วยสอนและวิจัยประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีจังหวัดนครราชสีมา เป็นเวลา 2 ปี จากนั้นเข้า ศึกษาต่อในระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต(หลักสูตรวิศวกรรมเมคค าทρονิกส์)สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ณ สถาบันการศึกษาเดิม โดยได้รับทุนการศึกษาสำหรับผู้มีศักยภาพเข้าศึกษาต่อ ระดับบัณฑิตศึกษา

ในขณะที่ศึกษาต่อในระดับมหาบัณฑิต ได้มีประสบการณ์เป็นผู้สอนปฏิบัติการของ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล จำนวน 7 รายวิชาดังนี้

- (1) วิชาปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล 1
- (2) วิชาปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล 2
- (3) วิชาปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล 3
- (4) วิชาปฏิบัติการวิศวกรรมยานยนต์4
- (5) เขียนแบบวิศวกรรม 1
- (6) เขียนแบบวิศวกรรม 2
- (7) เขียนแบบทางกล

และได้นำเสนอผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ 1 บทความเรื่อง“การประมาณปริมาตรใน ภาชนะกวนด้วยการชดเชยแรงบิดของเครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็ก”ในการประชุมการประชุม วิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 29 ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุร นารี จังหวัดนครราชสีมา วันที่ 1-3 กรกฎาคม พ.ศ. 2558