

การประมาณค่าความหนืดโดยใช้มอเตอร์กระแสตรงร่วมกับ
การชดเชยแรงบิดแบบปรับตัวได้

นายณภัสดล สิงหะตา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาแมคคาทรอนิกส์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2555

**VISCOSITY ESTIMATION USING DC MOTOR
WITH ADAPTIVE TORQUE COMPENSATOR**

Napassadol Singhata

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

Suranaree University of Technology

Academic Year 2012

การประมาณค่าความหนืดโดยใช้มอเตอร์กระแสตรงร่วมกับ
การชดเชยแรงบิดแบบปรับตัวได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.ปภากร พิทยชวล)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

นภัศล สิงหะตา : การประมาณค่าความหนืดโดยใช้มอเตอร์กระแสตรงร่วมกับการชดเชยแรงบิดแบบปรับตัวได้ (VISCOSITY ESTIMATION USING DC MOTOR WITH ADAPTIVE TORQUE COMPENSATOR) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสวีรุผล, 121 หน้า.

ความหนืดเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของของเหลวที่ภาคอุตสาหกรรมอาหาร และภาคอุตสาหกรรมน้ำมัน ใช้ความหนืดเป็นตัวแปรที่สำคัญในการวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์ วัตถุดิบด้านอาหาร น้ำมันหล่อลื่น เป็นต้น ปัจจุบันเครื่องมือวัดความหนืดส่วนใหญ่มีราคาสูง และสามารถวัดความหนืดที่สถานะคงตัวได้เท่านั้นบทความนี้ได้นำเสนอวิธีการประมาณค่าความหนืดจากการประมาณค่าแรงบิดที่รบกวนที่เกิดจากความหนืดของของเหลวต่อแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยวิธีการชดเชยแรงบิดแบบปรับตัวได้กับตัวสังเกต ในการประมาณค่าความหนืดของของเหลวที่สัมพันธ์กับแรงบิดที่รบกวนซึ่งสามารถประมาณค่าความหนืดที่สถานะคงตัวและสถานะชั่วครู่ได้ในการทดลองได้ทดสอบในช่วงความหนืด 80–320 cP เปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดความหนืดมาตรฐาน DV-III Ultra Rheometer พบว่าวิธีการดังกล่าวสามารถใช้ในการประมาณค่าความหนืดแบบสถานะคงตัวและความหนืดสถานะชั่วครู่ได้

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2555

ลายมือชื่อนักศึกษา _____
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

NAPASSADOL SINGHATA : VISCOSITY ESTIMATION USING DC
MOTOR WITH ADAPTIVE TORQUE COMPENSATOR. THESIS
ADVISOR : ASST. PROF. JIRAPHON SRISERTPHOL, Ph.D., 121 PP.

VISCOSITY ESTIMATION/ADAPTIVE COMPENSATOR/THEORY CONTROL

Viscosity is an importance property of liquid that food and petroleum industry use viscosity to be an important factor for product quality analysis such as raw food material and lubricant. At present, most of viscometers are very expensive and only measure viscosity at the steady state. So this paper presents the estimation of viscosity method from torque estimation by using DC motor with adaptive torque compensation method. Base on the viscosity relative with torque that can estimate viscosity at steady state and transient state. The experimental viscosity test show 80–320 cP in range in comparison with DV–III Ultra Rheometer for reference. The result show this method could do the viscosity estimation test.

School of Mechanical Engineering

Academic Year 2012

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ทุกประการ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลต่างๆที่
ให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้ความรู้ และ
คำปรึกษาแนะนำในการทำวิจัย รวมทั้งให้คำแนะนำในการดำเนินชีวิตด้วยความเมตตาตลอด
และสละเวลาตรวจสอบข้อบกพร่องแก้ไขให้วิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

รองศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสตร์ ที่ให้ความรู้ที่เป็นประโยชน์
ในการดำเนินงานวิจัย

ศาสตราจารย์ นาวาอากาศโท ดร.สราวุฒิ สุจิตจร ที่ให้ความรู้ในการดำเนินงานวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปภากร พิทยชวล ที่
แนะนำให้ความรู้ที่เป็นประโยชน์ในการแก้ไขงานวิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

คณาจารย์ทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ด้วยความเมตตา

คุณพิทยา ดิกล้ำ และ คุณพรพิพัฒน์ มีดีจันทร์รังสี ที่ให้การช่วยเหลือทางด้านเขียน
โปรแกรม และอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์

วิศวกรศูนย์เครื่องมือและเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือที่ให้คำแนะนำ และอำนวยความสะดวก
สะดวกในการใช้เครื่องมือต่าง ๆ

คุณศรัณย์ ดอกไม้กุล และ เจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือวิศวกรรมเคมีที่อำนวยความสะดวก
สะดวกและให้ความรู้ในการใช้เครื่องมือต่าง ๆ

คุณทรงสุดา ซาติศรีรินทร์ และเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือเทคโนโลยีอาหารทุกท่านที่
อำนวยความสะดวกและให้ความรู้ในการใช้เครื่องมือต่าง ๆ

คุณอัญชุลี รักด่านกลาง เจ้าหน้าที่ประจำสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ที่อำนวยความสะดวก
ด้านธุรการต่าง ๆ

สุดท้ายขอขอบคุณ บิดามารดา และครอบครัวที่ให้การเลี้ยงดูอบรม และสนับสนุนด้าน
การศึกษา และเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา

นภัสดล สิงหะตา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฐ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 ข้อยกเว้นเบื้องต้น.....	1
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.6 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	2
2 ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 การปรับตัวชนิดอ้างอิงแบบจำลอง.....	3
2.2 ระบบกระบวนการทำงาน.....	4
2.3 แบบจำลองอ้างอิง.....	5
2.4 วิธีการปรับตัวได้.....	7
2.5 ความหนักของของเหลว.....	8
2.5.1 ของไหลแบบนิวตันเนียน.....	10
2.6 เครื่องมือวัดความหนักแบบหมุน.....	10

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.7	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความหนืด.....	11
2.8	ปริทัศน์และวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	13
2.9	สรุป	15
3	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	16
3.1	อุปกรณ์การทดลอง.....	16
3.1.1	มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและหัวกวน.....	17
3.1.2	ไมโครคอนโทรลเลอร์.....	18
3.1.3	บอร์ดเชื่อมต่อ	19
3.1.4	เครื่องให้ความร้อนและแหล่งจ่ายไฟ	19
3.2	เครื่องมือวัดความหนืดมาตรฐาน	22
3.3	ขั้นตอนการทำงาน	25
3.4	ระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	27
3.5	ระบบการประมาณค่าแรงบิดภายนอก	28
3.5.1	ตัวสังเกต	28
3.5.2	ตัวชดเชยแรงบิดแบบ Gradient Method.....	31
3.6	สรุป	33
4	ผลการจำลองสถานการณ์	34
4.1	การประมาณค่าตัวแปรระบบ.....	34
4.2	ตัวแปรของตัวสังเกต	36
4.3	ตัวแปรตัวชดเชยแรงบิดแบบปรับค่าได้	
	ด้วยวิธี Gradient Method	38

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4	การจำลองสถานการณ์เมื่อมีค่าแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนระบบ	40
4.4.1	กรณีที่ 1 เมื่อระบบไม่มีแรงบิดเข้ามารบกวนระบบ	40
4.4.2	กรณีที่ 2 เมื่อระบบถูกรบกวนด้วยแรงบิดภายนอกแบบคงที่	43
4.4.3	กรณีที่ 3 เมื่อระบบถูกรบกวนด้วยแรงบิดภายนอก แบบเปลี่ยนแปลง	47
4.5	แรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนระบบมอเตอร์ที่ยากต่อการประมาณ	51
4.6	สรุป	55
5	การทดสอบและผลการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง	
	และการประมาณค่าความหนืด	56
5.1	วิธีการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องต้นแบบ	56
5.2	โปรแกรมการทำงานของมอเตอร์โดยใช้ระบบควบคุมที่ปรับตัวได้	57
5.3	การทดลองสถานการณ์เมื่อมีค่าแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนระบบ	59
5.3.1	กรณีที่ 1 เมื่อไม่มีแรงบิดเข้ามารบกวนระบบ	59
5.3.2	กรณีที่ 2 เมื่อระบบถูกรบกวนด้วยแรงบิดภายนอกแบบคงที่	62
5.3.3	กรณีที่ 3 เมื่อระบบถูกรบกวนด้วยแรงบิดภายนอก แบบเปลี่ยนแปลงค่าต่าง ๆ	64
5.4	ระบบถูกรบกวนด้วยแรงบิดภายนอกไม่คงที่ในรูปแบบต่าง ๆ	67
5.4.1	ระบบถูกรบกวนด้วยแรงบิดภายนอกในรูปแบบที่ 1	68
5.4.2	ระบบถูกรบกวนด้วยแรงบิดภายนอกในรูปแบบที่ 2	70
5.5	การประมาณค่าความหนืดของของเหลว	73
5.6	การทดสอบความหนืดแบบต่อเนื่อง	87
5.7	วิเคราะห์ผลการทดลอง	91
5.8	ทดสอบประสิทธิภาพเครื่องมือวัดความหนืดมาตรฐาน	92

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.9 ทดสอบความเร็วรอบเพื่อดูประสิทธิภาพในการทำซ้ำ.....	93
5.10 สรุป	93
6 สรุปและข้อเสนอแนะ	95
6.1 สรุป	95
6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางพัฒนาต่อ	95
รายการอ้างอิง	97
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. โปรแกรมใช้ในการประมาณค่าความหนืด	99
ภาคผนวก ข. โปรแกรมเครื่องมือมาตรฐาน DV-III Ultra Rheometer.....	107
ภาคผนวก ค. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	112
ประวัติผู้เขียน	121

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
5.1	สารที่ใช้ทดสอบผสมระหว่างน้ำเชื่อมกับน้ำ.....	74
5.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของเครื่องสอบเทียบ กับแรงบิดของเครื่องที่สร้าง	75
5.3	เปรียบเทียบความหนืดเครื่องประมาณความหนืดค้นแบบกับเครื่องมืออ้างอิง.....	85
5.4	อัตราส่วนที่เปลี่ยนแปลงระหว่างน้ำเชื่อมกับน้ำ	88
5.5	ทดสอบประสิทธิภาพเครื่องมือวัดความหนืดมาตรฐาน.....	92

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แผนภาพหลักการทำงานของ MRAS.....	4
2.2	แผนภาพความหนืดของของไหล.....	8
2.3	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเทียบกับอัตราเฉือน.....	10
2.4	ภาพตัดขวาง Rotational Viscometer.....	11
3.1	อุปกรณ์มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	17
3.2	แผนภาพบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์.....	18
3.3	บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์.....	18
3.4	บอร์ดเชื่อมต่อ.....	19
3.5	เครื่องให้ความร้อน.....	20
3.6	แหล่งจ่ายไฟ.....	20
3.7	แผนภาพการทำงานของอุปกรณ์การทดลอง.....	21
3.8	อุปกรณ์การทดลองเครื่องต้นแบบ.....	22
3.9	เครื่องวัดความหนืด Brookfield DV-III Ultra Rheometer.....	23
3.10	ชุดอุปกรณ์เพิ่ม-ลดอุณหภูมิ.....	23
3.11	ชุดอุปกรณ์หัวเข็มในการวัดความหนืด.....	24
3.12	แผนภาพขั้นตอนการทำงาน.....	25
3.13	แผนภาพการประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่เข้ามากระทำกับระบบ.....	26
3.14	แผนภาพวงจรมอเตอร์กระแสตรง.....	27
3.15	แผนภาพมอเตอร์กระแสตรงและตัวสังเกต.....	29
3.16	แผนภาพบล็อกของตัวชดเชยแบบปรับตัวได้โดยวิธี Gradient Method.....	33
4.1	การเปรียบเทียบระบบจำลองโดยวิธีระบุเอกลักษณ์ และสัญญาณจริงของระบบ.....	36
4.2	แผนภาพบล็อกของระบบและตัวสังเกตร่วมกับตัวชดเชยแรงบิด.....	39
4.3	แสดงค่า $T_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 1.....	40
4.4	ค่า $\omega(t)$ สำหรับกรณีที่ 1 (ระบบ).....	41

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5	ผลการตอบสนอง $\omega(t)$ และ $\omega(t)$ สำหรับกรณีที่ 1 (ตัวสังเกต) 41
4.6	ผลการตอบสนอง $\omega(t)$ และ $\omega(t)$ กรณีที่ 1 (ตัวสังเกตร่วมตัวชดเชย)..... 42
4.7	ผลการตอบสนองค่า $T_L(t)$ และ $T_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 1..... 42
4.8	ค่า $T_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 2..... 43
4.9	ผลการตอบสนองค่า $T_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 2..... 44
4.10	ผลการตอบสนองค่า $\omega(t)$ สำหรับกรณีที่ 2 (ระบบ)..... 44
4.11	ผลการตอบสนอง $\omega(t)$ และ $\omega(t)$ สำหรับกรณีที่ 2 (ตัวสังเกต) 45
4.12	ผลการตอบสนอง $\omega(t)$ และ $\omega(t)$ สำหรับกรณีที่ 2 (ตัวสังเกตร่วมตัวชดเชย)..... 45
4.13	ผลการตอบสนอง $T_L(t)$ และ $T_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 2..... 46
4.14	ค่า $T_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 3 47
4.15	ผลการตอบสนองค่า $T_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 3..... 48
4.16	ผลการตอบสนอง $\omega(t)$ สำหรับกรณีที่ 3 (ระบบ)..... 48
4.17	ผลการตอบสนอง $\omega(t)$ และ $\omega(t)$ สำหรับกรณีที่ 3 (ตัวสังเกต) 49
4.18	ผลการตอบสนอง $\omega(t)$ และ $\omega(t)$ สำหรับกรณีที่ 3 (ตัวสังเกตร่วมตัวชดเชย)..... 49
4.19	ผลการตอบสนอง $T_L(t)$ และ $T_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 3..... 50
4.20	ค่า $T_L(t)$ กรณีแรงบิดไม่มีรูปแบบที่แน่นอน 51
4.21	ผลการตอบสนองค่า $T_L(t)$ กรณีแรงบิดไม่มีรูปแบบที่แน่นอน (ระบบ) 52
4.22	ผลการตอบสนองค่า $\omega(t)$ กรณีแรงบิดไม่มีรูปแบบที่แน่นอน (ระบบ) 52
4.23	ผลการตอบสนองค่า $\omega(t)$ และ $\omega(t)$ (ตัวสังเกต)..... 53
4.24	ผลการตอบสนองค่า $\omega(t)$ และ $\omega(t)$ (ตัวสังเกตร่วมกับตัวชดเชย)..... 53
4.25	ผลการตอบสนอง $T_L(t)$ และ $T_L(t)$ กรณีแรงบิดไม่มีรูปแบบที่แน่นอน..... 54
5.1	Arduino ATmega 328..... 57
5.2	ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม 58
5.3	ผลการตอบสนองค่า $T_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 1..... 59
5.4	ผลการตอบสนอง $\omega(t)$ สำหรับกรณีที่ 1 (ระบบ)..... 60

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.5 ผลการตอบสนอง $\omega(t)$ และ $\omega(t)$ สำหรับกรณีที่ 1 (ตัวสั่งเกิด)	60
5.6 ผลการตอบสนอง $\omega(t)$ และ $\omega(t)$ สำหรับกรณีที่ 1 (ตัวสั่งเกิดร่วมตัวชดเชย).....	61
5.7 ผลการตอบสนองค่า $T_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 2.....	62
5.8 ผลการตอบสนอง $\omega(t)$ สำหรับกรณีที่ 2.....	62
5.9 ผลการตอบสนอง $\omega(t)$ และ $\omega(t)$ สำหรับกรณีที่ 2 (ตัวสั่งเกิด)	63
5.10 ผลการตอบสนอง $\omega(t)$ และ $\omega(t)$ สำหรับกรณีที่ 2 (ตัวสั่งเกิดร่วมตัวชดเชย).....	63
5.11 ผลการตอบสนองค่า $T_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 3.....	64
5.12 ผลการตอบสนอง $\omega(t)$ สำหรับกรณีที่ 3.....	65
5.13 ผลการตอบสนอง $\omega(t)$ และ $\omega(t)$ สำหรับกรณีที่ 3 (ตัวสั่งเกิด)	65
5.14 ผลการตอบสนอง $\omega(t)$ และ $\omega(t)$ กรณีที่ 3 (ตัวสั่งเกิดร่วมตัวชดเชย).....	66
5.15 ผลการตอบสนองค่า $T_L(t)$ รูปแบบที่ 1.....	67
5.16 ผลการตอบสนอง $\omega(t)$ รูปแบบที่ 1	68
5.17 ผลการตอบสนอง $\omega(t)$ และ $\omega(t)$ รูปแบบที่ 1 (ตัวสั่งเกิด)	68
5.18 ผลการตอบสนอง $\omega(t)$ และ $\omega(t)$ รูปแบบที่ 1 (ตัวสั่งเกิดร่วมตัวชดเชย).....	69
5.19 ผลการตอบสนองค่า $T_L(t)$ รูปแบบที่ 2.....	70
5.20 ผลการตอบสนอง $\omega(t)$ รูปแบบที่ 2 (ระบบ).....	70
5.21 ผลการตอบสนอง $\omega(t)$ และ $\omega(t)$ รูปแบบที่ 2 (ตัวสั่งเกิด)	71
5.22 ผลการตอบสนอง $\omega(t)$ และ $\omega(t)$ ในรูปแบบที่ 2 (ตัวสั่งเกิดร่วมตัวชดเชย).....	71
5.23 แผนภาพอธิบายขั้นตอนการเปลี่ยนแรงบิดให้เป็นความหนืด.....	73
5.24 ความหนืดเครื่องสอบเทียบกับแรงบิดเครื่องต้นแบบ.....	76
5.25 ความหนืด Hydraulic Oil VG 100 T40°C.....	77
5.26 ความหนืด Hydraulic Oil VG 46	77
5.27 ความหนืด Silicone Oil.....	78
5.28 ความหนืดน้ำมันหาวาน Hale's Blue Boy	78
5.29 ความหนืด Hydraulic Oil VG 100 T28 °C.....	79

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.30 ความหนืดสาร A.....	79
5.31 ความหนืดสาร B.....	80
5.32 ความหนืดสาร C.....	80
5.33 ความหนืดสาร D.....	81
5.34 ความหนืดสาร E.....	81
5.35 ความหนืดสาร F.....	82
5.36 ความหนืดสาร G.....	82
5.37 ความหนืดสาร H.....	83
5.38 ความหนืดสาร I.....	83
5.39 ความหนืดสาร J.....	84
5.40 การทดลองหาค่าความหนืดของสาร.....	88
5.41 กราฟความหนืดกับอัตราส่วนน้ำเชื่อม.....	90
5.42 ความเร็วรอบที่เปลี่ยนแปลงแบบชั่วขณะ.....	91
5.43 แรงบิดที่เปลี่ยนแปลงแบบชั่วขณะ.....	91
5.44 วัดความเร็วรอบมอเตอร์.....	93
ก.1 โปรแกรม Arduino 1.0.1.....	100
ก.2 หน้าต่างแสดงผลของ Arduino 1.0.1.....	101
ข.1 โปรแกรมหน้า Dashboard.....	108
ข.2 โปรแกรมหน้า Program.....	109
ข.3 โปรแกรมหน้า View/Edit.....	110
ข.4 โปรแกรมหน้า Plot.....	111

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

γ	=	อัตราการปรับตัวของวิธีการ Gradient Method
ζ	=	อัตราส่วนความหน่วง
ω_n	=	ความถี่ธรรมชาติของตัวสังเกต
ω	=	ความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
$\hat{\omega}$	=	ความเร็วที่ได้จากการประมาณค่า
b	=	ความหน่วง
cP	=	หน่วยวัดความหนืด
i_a	=	กระแสไฟฟ้า
\hat{i}_a	=	กระแสไฟฟ้าที่ได้จากการประมาณค่า
J	=	โมเมนต์ความเฉื่อย
K	=	อัตราขยายของระบบ
K_b	=	ค่าคงที่ของ Electromotive Force
K_t	=	ค่าคงที่ของแรงบิด
L	=	เมตริกซ์อัตราขยายของตัวสังเกต
L_a	=	ความเหนี่ยวนำของอาร์เมเจอร์
MRAS	=	Model-Reference Adaptive Control
R_a	=	ความต้านทานของอาร์เมเจอร์
T_L	=	แรงบิดที่เปลี่ยนแปลง
\hat{T}_L	=	แรงบิดที่เปลี่ยนแปลงที่ได้จากการประมาณค่า
τ	=	ความถี่เชิงกล
μ	=	ความหนืดของของเหลว
V_a	=	ความต่างศักย์ของอาร์เมเจอร์
V_b	=	ความต่างศักย์ back emf
VG	=	ค่าความหนืดของน้ำมันที่ 40 องศาเซลเซียส (ISO Viscosity Grade)
v	=	อัตราเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบต่อแรงบิดภายนอก

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ความหนืดเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของของเหลวที่ภาคอุตสาหกรรมอาหารและภาคอุตสาหกรรมน้ำมัน ใช้ความหนืดเป็นตัวแปรที่สำคัญในการวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์วัตถุดิบด้านอาหาร น้ำมันหล่อลื่น เป็นต้น ปัจจุบันเครื่องมือวัดความหนืดส่วนใหญ่มีราคาสูง และสามารถวัดความหนืดที่สถานะคงตัวได้เท่านั้น งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีการประมาณค่าความหนืด จากการประมาณค่าแรงบิดที่רבกวนที่เกิดจากความหนืดของของเหลว ต่อแรงบิดของมอเตอร์กระแสตรง โดยวิธีการชดเชยแรงบิดแบบปรับตัวได้กับตัวสังเกต ในการประมาณค่าความหนืดของของเหลวที่สัมพันธ์กับแรงบิดที่רבกวนซึ่งสามารถประมาณค่าความหนืดที่สถานะคงตัวและสถานะชั่วครู่ได้ ในการทดลองได้ทดสอบในช่วงความหนืด 80–320 cP เปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดความหนืด DV-III Ultra Rheometer พบว่าวิธีการดังกล่าวสามารถใช้ในการประมาณค่าความหนืดแบบสถานะคงตัวและความหนืดสถานะชั่วครู่ได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อประมาณค่าความหนืดที่เปลี่ยนแปลงด้วยมอเตอร์กระแสตรงกับการชดเชยแรงบิดภายนอกแบบปรับตัวได้

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

- 1) การประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงกับการชดเชยแรงบิด ภายนอกแบบปรับตัวได้
- 2) ออกแบบการชดเชยแรงบิดภายนอกแบบปรับตัวได้และสร้างอัลกอริทึมที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ ด้วยโปรแกรม MATLAB ในส่วนของ Simulink
- 3) หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยพิจารณาผลกระทบของอุปกรณ์อื่นในลักษณะที่เป็นตัวแปรค่าคงที่
- 4) ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในการทดสอบโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุม

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) สร้างอัลกอริทึมมอเตอร์กระแสตรงในการจำลองสถานการณ์โปรแกรม MATLAB ในส่วนของ Simulink และทำการทดลองระบบควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์
- 2) วิเคราะห์และออกแบบวิธีการประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์กระแสตรงโดยใช้วิธีการชดเชยแรงบิดภายนอกแบบปรับตัวได้
- 3) จำลองสถานการณ์และทดลองกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อประมาณค่าแรงบิดภายนอกแบบปรับตัวได้ เปลี่ยนให้เป็นความหนืดและเปรียบเทียบความหนืดกับเครื่องวัดความหนืด DV-III Ultra Rheometer
- 4) สามารถประมาณค่าความหนืดของของเหลวในช่วง 80–320 cP โดยเปรียบเทียบกับเครื่องวัดความหนืด DV-III Ultra Rheometer

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) การประมาณค่าความหนืดด้วยตัวชดเชยค่าแรงบิดภายนอกแบบปรับตัวได้ ของมอเตอร์กระแสตรง
- 2) การประมาณค่าแรงบิดที่ภายนอกที่รับกวนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยตัวชดเชยแรงบิดที่ปรับตัวได้

1.6 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 6 บท ซึ่งมีรายละเอียดโดยย่อ ดังนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำซึ่งจะกล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ และเป้าหมายของวิทยานิพนธ์ ตลอดจนขอบเขต และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวกับการทำงานของตัวสังเกต การประมาณค่าตัวแปรของระบบรวมถึงปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 กล่าวถึงอุปกรณ์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์กระแสตรง ตัวสังเกต และตัวชดเชยแรงบิดแบบปรับตัวได้สำหรับประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง

บทที่ 4 ผลการจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบมอเตอร์กระแสตรง ตัวสังเกต และตัวชดเชยแรงบิดแบบปรับตัวได้สำหรับประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงพร้อมทั้งสรุป

บทที่ 5 ผลการทดสอบระบบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ตัวสังเกต และตัวชดเชยแรงบิดแบบปรับตัวได้ สำหรับประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง และเปรียบเทียบผล

บทที่ 6 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อุตสาหกรรมน้ำมัน และอุตสาหกรรมอาหารจะใช้ความหนืดเป็นตัวบ่งบอกคุณภาพของสินค้า ดังนั้นเครื่องมือวัดความหนืดจึงมีความสำคัญ เครื่องมือวัดความหนืดจำเป็นต้องเอื้อประโยชน์ต่อการใช้งานและปรับประยุกต์ให้เข้ากับการทำงาน ใช้งานง่าย สะดวก และรวดเร็ว ในงานวิจัยนี้จะนำเสนอวิธีการประมาณค่าแรงบิดที่สัมพันธ์กับความหนืดของของเหลว แทนการหาความหนืดจากความเค้นเฉือน (Shear Stress) ต่ออัตราเฉือน (Shear Rate) โดยใช้วิธีการชดเชยแรงบิดแบบปรับตัวได้ (Adaptive Compensator) ร่วมกับการประมาณค่าตัวแปรสถานะของระบบด้วยตัวสังเกต (Observer) เมื่อมีแรงบิดเข้ามารบกวนการหมุนของมอเตอร์ และทำให้มอเตอร์หมุนช้าลงและตัวสังเกตประมาณค่าสถานะผิดพลาด ตัวชดเชยค่าแรงบิดแบบปรับตัวได้ ทำให้ตัวสังเกตประมาณค่าสถานะถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น

จากการออกแบบการชดเชยแบบปรับตัวได้ ตัวสังเกตจะทำหน้าที่ในการประมาณค่าสถานะที่เกิดขึ้นภายในมอเตอร์ และตัวชดเชยแรงบิดจะทำการประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่เข้ามารบกวน ด้วยวิธีเกรเดียนต์ (Gradient Method) โดยตั้งสมมุติฐานว่าตัวแปรทุกตัวในระบบของมอเตอร์กระแสดตรงมีค่าคงที่ และมีเพียงค่าของตัวแปรแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงเท่านั้นที่ยังมีการเปลี่ยนแปลงในระบบของ

2.1 การปรับตัวชนิดอ้างอิงแบบจำลอง (Model Reference Adaptive System)

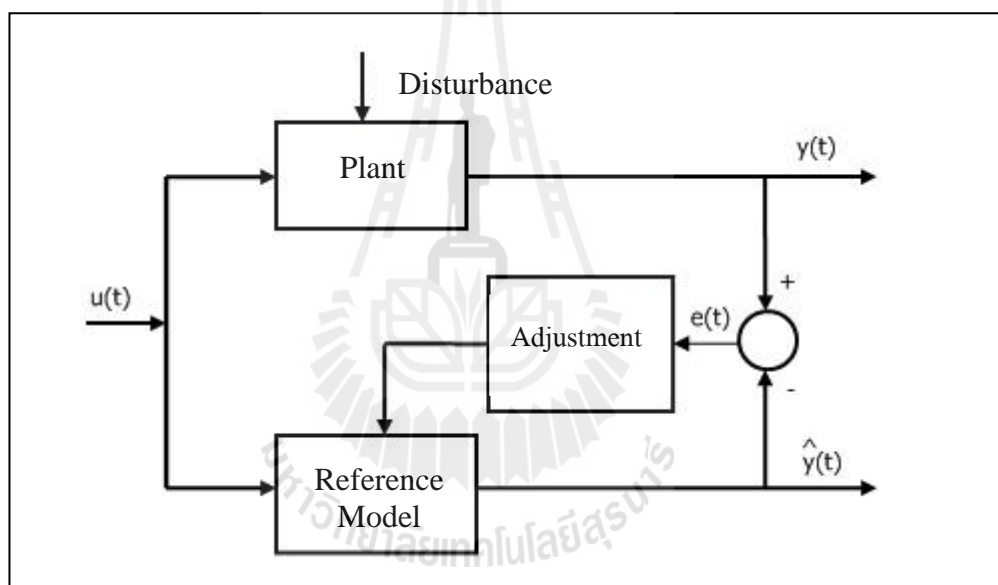
ในสภาวะแวดล้อมที่ไม่สามารถควบคุมได้ระบบที่ทำการศึกษาหรือให้ความสนใจจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรักษาเสถียรภาพเดิมไม่ได้ โดยระบบจะมีการเปลี่ยนไปตามสถานการณ์ หรือสภาพแวดล้อมที่เข้ามารบกวนระบบ เมื่อต้องการควบคุม หรือสังเกตระบบดังกล่าวจำเป็นต้องทราบการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นทันทีที่ระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม การปรับตัวชนิดอ้างอิงแบบจำลองเป็นเป็นอีกวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการรับรู้การเปลี่ยนแปลงของระบบ โดยมีหลักในการทำงานคือสร้างสัญญาณอ้างอิงและปรับค่าตัวแปรสถานะภายในของระบบจำลองอ้างอิงให้มีค่าเปลี่ยนไปตามระบบที่ทำการศึกษาเพื่อลดความแตกต่างของแบบจำลองอ้างอิงและระบบที่สนใจให้หมดไป

การทำงานการปรับตัวอ้างอิงจำลองดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยสามารถอธิบายหน้าที่ค่าต่าง ๆ ได้ดังนี้

1) ระบบกระบวนการการทำงาน (Plant) ระบบที่ให้ความสนใจ เพื่อทำการติดตามผลหรือควบคุมให้ระบบมีเสถียรภาพเป็นไปตามต้องการ

2) แบบจำลองอ้างอิง (Reference Model) จะถูกจำลองขึ้นมาเพื่อเปรียบเทียบกับ ระบบจริง โดยสามารถทราบค่าสถานะที่อยู่ภายในออกมาใช้ประโยชน์ได้ โดยแบบจำลองอ้างอิงจะต้องตอบสนองต่อระบบจริงและไม่ควรตอบสนองช้าหรือเร็วจนเกินไป

3) ระบบการปรับตัว (Adjustment) มีหน้าที่ปรับสัญญาณอ้างอิง เพื่อลดความแตกต่างระหว่างสัญญาณระบบจริง และ โมเดลอ้างอิง เมื่อระบบจริงถูกสัญญาณรบกวนจากภายนอก



รูปที่ 2.1 แผนภาพหลักการทำงานของ MRAS

2.2 ระบบกระบวนการการทำงาน

กำหนดให้ระบบเป็นกระบวนการต่อเนื่องแบบเชิงเส้นที่ค่าตัวแปรของระบบไม่ขึ้นกับเวลา (Linear Time Invariant System) และสามารถควบคุมได้ โดยเขียนให้อยู่ในรูปสมการสถานะ (State Equation) จะเป็นตัวแทนเชิงคณิตศาสตร์ของระบบที่เขียนให้อยู่ในรูปของเวกเตอร์ของสมการเชิงอนุพันธ์อันดับที่หนึ่ง ดังนี้

สมการสถานะของระบบ

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx\end{aligned}\tag{2.1}$$

เมื่อ A = เมตริกซ์สถานะของระบบ $[n \times n]$
 B = เมตริกซ์อินพุตของระบบ $[n \times 1]$
 C = เมตริกซ์เอาต์พุตของระบบ $[1 \times n]$
 x = เวกเตอร์สถานะของระบบ $[n \times 1]$
 u = อินพุตของระบบ $[1 \times 1]$
 y = เอาต์พุตของระบบ $[1 \times 1]$
 n = จำนวนเต็มบวก

2.3 แบบจำลองอ้างอิง (Reference Model)

การวัดข้อมูล โดยใช้เซนเซอร์อาจจะต้องเสียค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูง อีกทั้งทำการวัดได้ยาก ในกรณีนี้จะใช้ตัวสังเกต (Observer) ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่เราต้องการทราบออกมา การสังเกต (Observation) เป็นการสร้างแบบจำลองของระบบ ซึ่งจะประมาณค่าตัวแปรสถานะ (๕) ให้ใกล้เคียงกับค่าตัวแปรสถานะจริง (x) โดยตัวสังเกตดังกล่าวจะนำข้อมูลของสัญญาณบางสถานะที่สามารถวัดได้มาใช้ในการประมาณค่าสถานะทุกสถานะใหม่ทั้งหมดหากตัวสังเกตประมาณค่าสถานะได้ทุกตัวจะเรียกว่าตัวสังเกตแบบอันดับเต็ม (Full Order State Observer) ส่วนตัวสังเกตที่ทำการประมาณสถานะบางตัวที่ไม่สามารถวัดออกมาได้นั้น จะเรียกตัวสังเกตนี้ว่า ตัวสังเกตแบบลดอันดับ (Reduced Order State Observer) โดยในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะ แบบอันดับเต็มเท่านั้น

ตัวสังเกตของระบบพลศาสตร์ที่ต้องการจะทำการควบคุมมีรูปแบบดังนี้คือ

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L[y - C\hat{x}]\tag{2.2}$$

เมื่อ L = เมตริกซ์อัตราขยายของตัวสังเกต $[n \times 1]$
 \hat{x} = ค่าตัวแปรสถานะของตัวสังเกต $[n \times 1]$

สมการที่ (2.1) ลบด้วยสมการที่ (2.2) จะได้

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

จัดรูปสมการจะได้

$$\dot{x} - \dot{\hat{x}} = [A - LC](x - \hat{x}) \quad (2.4)$$

สมการที่ 2.4 สามารถเขียนได้เป็น

$$\dot{e} = [A - LC]e \quad (2.5)$$

เมื่อ $e = x - \hat{x}$ คือความแตกต่างค่าสถานะที่วัดได้จากระบบจริงและค่าที่ได้จากการสังเกต
 y คือเอาต์พุตของแบบจำลองอ้างอิง [n x 1]

การใช้ตัวสังเกตในการประมาณค่าตัวแปรสถานะของระบบ จะต้องมีการตรวจสอบว่าระบบนั้นมีคุณสมบัติในการสังเกตได้หรือไม่ โดยพิจารณาเมตริกซ์ความสังเกตได้ในการประมาณค่าตัวแปรสถานะของระบบ ถ้าระบบที่สถานะมีคุณสมบัติที่จะสังเกตได้ แสดงว่าสามารถนำข้อมูลที่วัดมาสร้างตัวประมาณค่าสถานะได้ Observability Matrix (\mathcal{O})

โดยพิจารณาเมตริกซ์ความสังเกตได้ ดังนี้

$$\mathcal{O} = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

ระบบใด ๆ จะมีคุณสมบัติความสังเกตได้ก็ต่อเมื่อค่าลำดับชั้นของเมตริกซ์ความสังเกตได้เท่ากับ n (Rank[\mathcal{O}] = n) เมื่อ n คืออันดับของระบบหรือลำดับชั้นของเมตริกซ์ $\det[\mathcal{O}] \neq 0$

2.4 วิธีการปรับตัวได้

ความผิดพลาดของแบบจำลองระบบอ้างอิงเกิดจากระบบที่ทำการศึกษามีค่าเปลี่ยนไปจากเดิม เมื่อมีสัญญาณจากภายนอกเข้ามารบกวน ทำให้เกิดความแตกต่างในสถานะของระบบที่สามารถวัดได้จริงกับค่าที่ได้จากแบบจำลองอ้างอิง เมื่อมีสัญญาณจากภายนอกเข้ามารบกวนระบบ ตัวสังเกตประมาณค่าแตกต่างจากระบบจริง โดยความแตกต่างระหว่างสองระบบคือค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น ดังนั้นต้องการขจัดให้ความแตกต่างระหว่างระบบทั้งสองให้หมดไป โดยกำหนดให้ ความแตกต่างระหว่างระบบทั้งสอง คือ Loss Function ดังนั้น Loss Function (J) มีค่า

$$J(\theta) = \frac{1}{2} e^2 \quad (2.7)$$

การปรับค่าของของตัวแปร (θ) กำหนดโดย

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma \frac{dJ}{d\theta} = -\gamma e \frac{de}{d\theta} \quad (2.8)$$

$$e = y - y_m \quad (2.9)$$

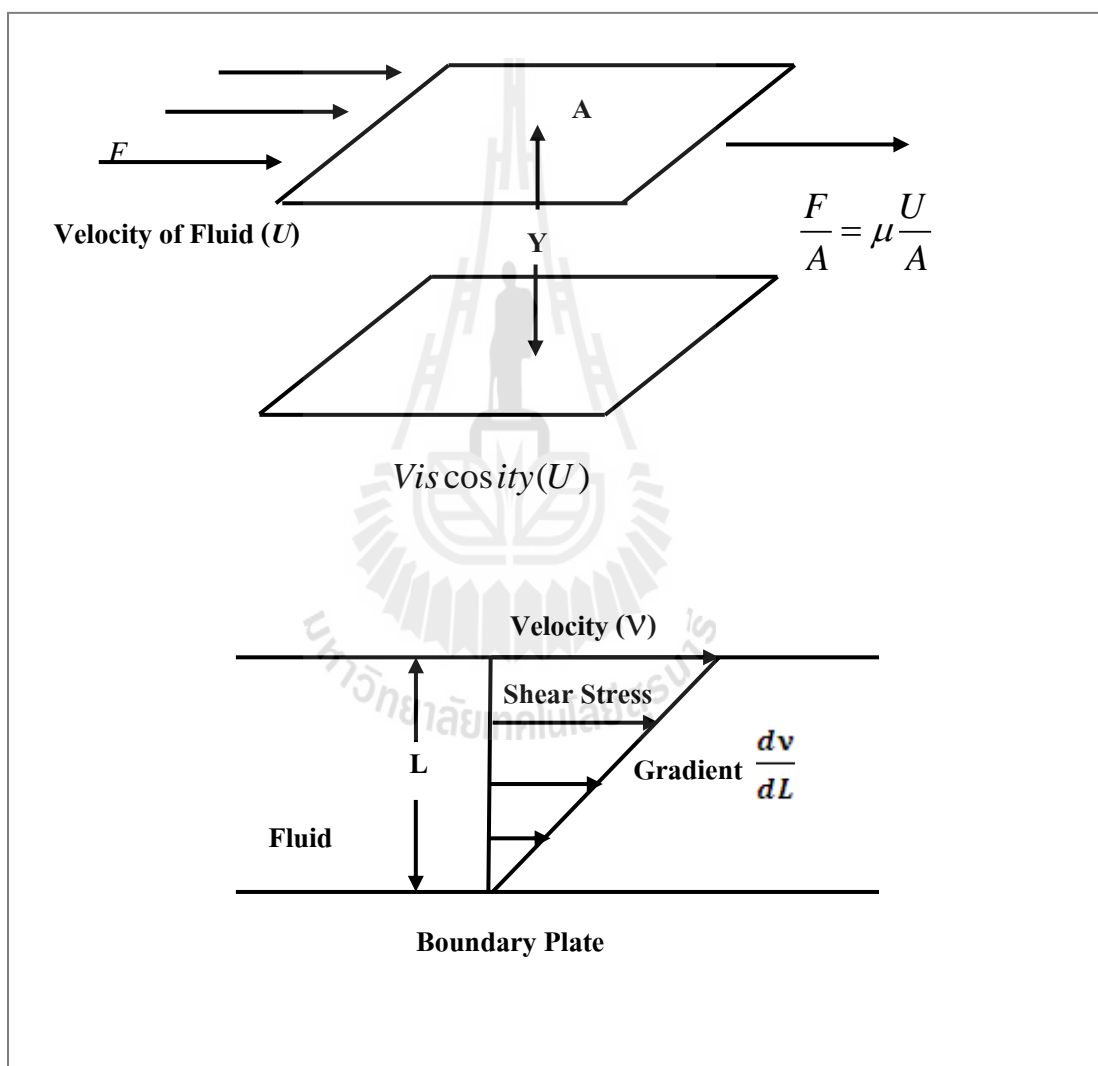
$$\frac{de}{d\theta} = -\frac{dy_m}{d\theta} \quad (2.10)$$

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

การควบคุมแบบปรับตัวชนิดอ้างอิงแบบจำลองจากทฤษฎี Gradient Method จะทำการปรับค่าตัวแปรภายในระบบที่สนใจในทิศทาง Negative of Loss Function (J) เพื่อให้ค่าความแตกต่างระหว่างระบบและแบบจำลองหมดไป เมื่อค่าความแตกต่างของ ที่ได้จากระบบจริงและค่าที่ได้จากการสังเกตมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ จะทำให้ค่าความผิดพลาดของตัวแปรสถานะซึ่งวัดได้จากระบบจริง และตัวสังเกตหมดไปผลที่ได้นั้นจะทำให้ตัวสังเกตจะสามารถประมาณค่าของตัวแปรสถานะในระบบที่ต้องการทำการสังเกตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.5 ความหนืดของของเหลว

ความหนืดเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของของเหลว โดยของเหลวแต่ละชนิดจะมีค่าความหนืดที่แตกต่างกัน เมื่อมีวัตถุเคลื่อนที่ในของเหลว ของเหลวจะต้านการไหลทำให้วัตถุดังกล่าวเคลื่อนที่ได้ช้าลง ดังนั้น เมื่อให้แกนหมุนของมอเตอร์หมุนอยู่ในของเหลวจะสังเกตได้ว่าความเร็วรอบของมอเตอร์หมุนช้าลงไปจากเดิม จึงพิจารณาได้ว่า ความหนืดของของเหลวมีความสัมพันธ์กับแรงบิดที่เข้าไปรบกวนการหมุนของมอเตอร์ส่งผลให้มอเตอร์มีความเร็วรอบลดลง



รูปที่ 2.2 แผนภาพความหนืดของของไหล

จากการทดลองกับของไหลส่วนใหญ่ที่ปรากฏว่า แรง F ที่จะทำให้วัตถุเคลื่อนที่นั้นแปรโดยตรงกับพื้นที่ A และความเร็ว U ของแผ่นวัตถุ แต่จะแปรตรงกันข้ามกับระยะห่าง Y ของแผ่นวัตถุทั้งสอง และเมื่อเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์แล้วก็จะได้ว่า

$$F \propto \frac{AU}{Y} \quad (2.11)$$

หาค่า U/Y นั้นสามารถแทนได้ด้วย velocity gradient (du/dy) และถ้าให้ μ เป็น constant of proportionality ดังนั้น

$$F = \mu A \frac{dU}{dY} = \mu A \frac{U}{Y} \quad (2.12)$$

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy} = \mu \frac{U}{Y} \quad (2.13)$$

เมื่อ τ = ความเค้นเฉือน (shearing stress)
 F = แรงที่กระทำกับวัตถุ
 A = พื้นที่ของแผ่นวัตถุ
 μ = ความหนืด
 U = ความเร็ว
 Y = ระยะห่างระหว่างแผ่นวัตถุทั้งสอง

สมการความหนืดของนิวตัน (Newton's equation of viscosity)

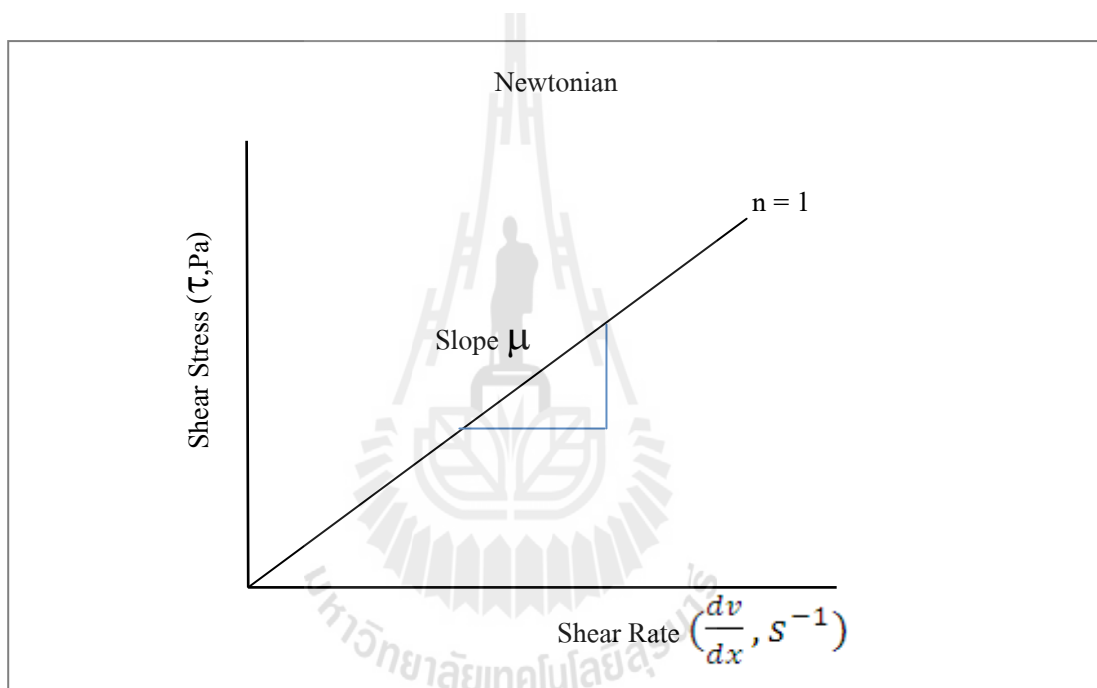
$$\mu = \frac{\tau}{du/dy} \quad (2.14)$$

เราเรียก μ นี้ว่าความหนืด บางตำราเรียกสัมประสิทธิ์ความหนืด (Coefficient of viscosity) ความหนืดสัมบูรณ์ (absolute viscosity) หรือความหนืดไดนามิกส์ (dynamic viscosity)

$$\text{หน่วยของ } \mu = \frac{N/m^2}{(m/s)/m} = \frac{N \cdot s}{m^2} = Pa \cdot s = cP$$

2.5.1 ของไหลแบบนิวตันเนียน

ของไหลแบบนิวตันเนียน (Newtonian fluid) หมายถึง ของไหลที่มีกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนเป็นเส้นตรง เส้นกราฟเริ่มต้นที่จุดกำเนิด (0,0) ดังที่ แสดงดังรูปที่ 2.3 ซึ่งเป็นไปตามหลักของนิวตัน (Sir Isaac Newton)

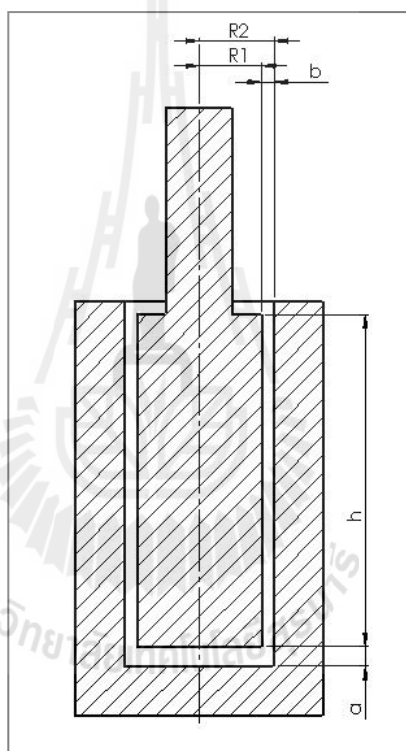


รูปที่ 2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือน

ค่าความหนืดของของเหลวประเภทนิวตันเนียน (Newtonian) มีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับอัตราเฉือนของไหลประเภทนี้ ของเหลวมีลักษณะเป็นเนื้อเดียว เหมาะแก่การทำการวัด เพราะไม่มีอนุภาคแขวนลอยตัวอย่างของไหลประเภทนี้ได้แก่ น้ำ น้ำมันพืช น้ำส้มสายชู น้ำเกลือ น้ำเชื่อม นม ขาดมันเนย เครื่องดื่ม ได้แก่ น้ำผลไม้ชนิดใส เช่น น้ำแอปเปิ้ล เครื่องดื่มอัลกอฮอล์ เช่น เบียร์ ไวน์ เป็นต้น ของไหลที่มีความหนืดสูงขึ้นจะต้องใช้แรงเฉือนที่สูงขึ้นเพื่อรักษาอัตราเฉือนให้คงที่ หรือกล่าวได้ว่าต้องเพิ่มกำลังเพื่อรักษาให้อัตราการไหล

2.6 เครื่องมือวัดความหนืดแบบหมุน

เครื่องมือวัดความหนืดแบบหมุน โดยทั่วไปจะมีส่วนประกอบและหลักการทำงานมีดังนี้คือตัวเครื่องประกอบด้วย แท่งโลหะทรงกระบอก (Spindle) หมุนอยู่ในของเหลวที่ต้องการวัด โลหะทรงกระบอกจะหมุนโดยการสวมต่อกับเพลาของมอเตอร์ เพื่อวัดค่าความหนืดของของเหลว โดยการวัดแรงต้านทานของของเหลวออกมาเป็นแรงบิด แล้วเปลี่ยนแรงบิดให้เป็นความหนืด โดยแรงบิดของของเหลวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความหนืด เครื่องวัดสามารถนำมาต่อเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อให้คอมพิวเตอร์รายงานผลการทดสอบและเก็บค่าได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ภาพตัดขวาง Rotational Viscometer

2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความหนืด

แรงบิดที่เกิดจากความหนืดของของเหลวจะมีความสัมพันธ์กันเป็นสัดส่วนดังนี้ กำหนดให้ มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วคงที่

R_1 = รัศมีแกนหมุน (Spindle) มอเตอร์

R_2 = รัศมีภาชนะใส่ของเหลว

h = ความสูงของของเหลว

a = ระยะห่างระหว่างรัศมีแกนหมุนและภาชนะใส่ของเหลวในแนวดิ่ง

b = ระยะห่างระหว่างรัศมีแกนหมุนและภาชนะใส่ของเหลวในแนวราบ

ω = ความเร็วรอบของมอเตอร์

อัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบต่อระยะทางในแนวราบ

$$\frac{du}{dy} = \frac{\omega R_2}{b} \quad (2.15)$$

อัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบต่อระยะทางในแนวดิ่ง

$$\frac{du}{dy} = \frac{\omega R_2}{a} \quad (2.16)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด (T) และความเค้นเฉือน (τ)

$$T_1 = \tau(2\pi h R_1^2) \quad (2.17)$$

$$T_2 = \tau\left(\frac{\pi^2 R_1^3}{2}\right) \quad (2.18)$$

เมื่อ T_1 = แรงบิดที่เกิดขึ้นในแนวดิ่ง

T_2 = แรงบิดที่เกิดขึ้นในแนวราบ

จากความสัมพันธ์ความหนืด (μ) จะหาได้จาก สมการ

$$\mu = \frac{\tau}{du / dy}$$

ดังนั้นแรงบิดที่เกิดขึ้นทั้งหมดจะได้จากสมการ 2.20 และ 2.21

$$T = T_1 + T_2 \quad (2.19)$$

$$\mu = \frac{T}{\pi R_1^2 \left(\frac{\pi R_1^2}{2} + \frac{2hR_2}{b} \right)} \quad (2.20)$$

$$\mu = k_\mu T \quad (2.21)$$

กำหนดให้ $k_\mu = \pi R_1^2 \left(\frac{\pi R_1^2}{2} + \frac{2hR_2}{b} \right)$ คือ ค่าคงที่เปลี่ยนแรงบิดให้เป็นความหนืด

จากสมการที่ 2.35 จะเห็นได้ว่าความหนืดจะแปรผันตามแรงบิด และสิ่งที่จะต้องคำนึงถึง คือ ค่าความหนืดของของเหลวจะแปรผันตามอุณหภูมิจึงจำเป็นต้องมีการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ตลอดเวลาในการวัด และจากสมการจะต้องมีการควบคุมปริมาณสารในการวัด

2.8 ปรัชญ่วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในการใช้งานมอเตอร์กระแสตรงโดยทั่วไปที่ต้องการค่าของตัวแปรสถานะเป็นที่มาของการนำตัวสังเกตมาใช้ในการประมาณค่า เนื่องจากช่วยลดค่าใช้จ่ายในการซื้ออุปกรณ์ตรวจวัดที่มีราคาแพง และลดความซับซ้อนในส่วนของการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด ในภาคการปฏิบัติงานจริงมักมีแรงบิดจากภายนอกที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอสามารถบวกรวมระบบซึ่งแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงเหล่านี้ทำให้การลงและลดประสิทธิภาพในการทำงานของตัวควบคุมจากแนวคิดในการที่จะพัฒนาประมาณค่าโดยใช้ตัวสังเกตมีความผิดพลาดประสิทธิภาพของระบบควบคุมมอเตอร์กระแสตรงจึงเป็นที่มาของงานวิจัยเพื่อหาค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงที่เข้ามารบกวนระบบ ในทางปฏิบัติค่าแรงบิดเปลี่ยนแปลงนี้ไม่สามารถวัดได้โดยตรง แต่สามารถประมาณค่าได้โดยใช้ตัวสังเกตร่วมกับตัวชดเชยแรงบิดแบบปรับค่าได้

Jong Sun Ko (1995) และคณะ ได้นำเสนอ การควบคุมตำแหน่งของ Brushless DC Motor โดยใช้ตัวชดเชยแบบปรับค่าได้ ด้วยทฤษฎีของ Lyapunov ร่วมกับตัวสังเกตเพื่อประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง โดยการควบคุมกระแสแบบ Feed Forward Compensator เพื่อควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ เนื่องจากแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อกระแสไฟฟ้าที่ให้กับมอเตอร์

ผลที่ได้คือ ตัวสังเกตสามารถปรับตัว และอ้างอิงตามสัญญาณจริงได้ นอกจากนี้การควบคุมมอเตอร์เป็นไปตามตำแหน่งที่ต้องการค่าความผิดพลาดมีค่าลดลงระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น

Kichul Hong and Kwanghee Nam (1998) ได้นำเสนอการชดเชยแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงและแรงบิดที่เข้ามารบกวนเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานระบบควบคุมของเซอร์โวมอเตอร์กระแสตรง (DC Servo Motor) ในสถานะที่มีแรงบิดเข้ามารบกวนแบบเปลี่ยนแปลงตามเวลา และประสิทธิภาพที่ลดลงเนื่องจากเวลาประวิง (Time Delay) ผลที่ได้คือการตอบสนองของความเร็วรอบมีความรวดเร็วมากขึ้นและลดการแกว่งตัวของ การตอบสนองในสถานะที่มีแรงบิดเปลี่ยนแปลงเข้ามารบกวนกับระบบรวมทั้งสามารถลดผลกระทบจากความไม่มีเสถียรภาพของระบบที่เกิดจาก Bandwidth ของระบบที่มีค่ามากได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Gheorghe Daniel (2003) และคณะได้นำเสนอ การควบคุมการควบคุมมอเตอร์ให้มอเตอร์มีความเร็วรอบคงที่มอเตอร์ที่ใช้จะมีเซนเซอร์วัดตำแหน่งและให้เคลื่อนที่แบบจลน์ โดยมีแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงเข้าไปรบกวนระบบ เนื่องจากโมเมนต์ความเฉื่อย ระบบจะควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอและจะประมาณค่าความเร็วรอบและแรงบิดที่เกิดจากโมเมนต์ความเฉื่อย ผลที่แสดงตัวควบคุมแบบพีไอสามารถควบคุมความเร็วรอบให้คงที่และมีเสถียรภาพในขณะที่มีแรงบิดแบบชั่วคราวเข้ามารบกวนระบบและมอเตอร์มีการเคลื่อนที่แบบจลน์

Ouassaid, M., Cherkaoui, M., Nejmi, A., and Maaroufi, M. (2005) ได้นำเสนองานวิจัยเรื่องการควบคุมแรงบิดของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นสำหรับมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร การออกแบบระบบควบคุมแรงบิดแบบง่ายและตัวควบคุมแรงบิดแบบมีประสิทธิภาพ โดยใช้หลักการของ Lyapunov Technique (integral action) เพื่อการันตีเสถียรภาพของระบบ ผลที่ได้แสดงให้เห็นการออกแบบที่ประสบความสำเร็จในการการวิเคราะห์เสถียรภาพและการจำลองของวิธีการLyapunov สำหรับระบบควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร ถึงแม้จะมีความไม่แน่นอนหรือความปั่นป่วนของพารามิเตอร์ ผลการจำลองก็ยืนยันประสิทธิภาพของการควบคุมที่มีประสิทธิภาพของระบบ

Srisertpol, J., and Khajorntraidet, C. (2009) ได้นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับวิธีการในการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟกระแสตรง โดยใช้วิธีการชดเชยแบบปรับตัวได้ (adaptive compensation) เพื่อประมาณค่าของแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง จากผลการจำลองระบบและการทดสอบแสดงให้เห็นว่าผลกระทบจากแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบควบคุมมอเตอร์ไฟกระแสตรงลดลง การประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงของมอเตอร์ไฟกระแสตรง โดยการชดเชยแบบปรับตัวได้สองวิธีการ คือ Gradient Method และ Lyapunov's Direct Method จากผลการจำลองระบบแสดงให้เห็นว่าทั้งสองวิธีการสามารถประมาณค่าแรงบิดที่

เปลี่ยนแปลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาประสิทธิภาพของระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

Chin Chih Ou and Tien Chi Chen (2012) ได้นำเสนอการควบคุมมอเตอร์ของรถเข็นผู้ป่วยให้เคลื่อนที่โดยอัตโนมัติ เพื่อลดการใช้กำลังแขนที่มากเกินไป ซึ่งอาจทำให้เกิดการบาดเจ็บ หรือปวดหัวไหล่จากการใช้กำลังแขนเพื่อให้รถเคลื่อนที่ในกรณีที่มีแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงเข้ามาในระบบ ซึ่งจะส่งผลในการเคลื่อนที่ของรถเข็น เพื่อทำการคำนวณแรงที่ต้องเพิ่มเข้าไปให้กับรถเข็นให้รถเข็นสามารถเคลื่อนที่ไปได้ โดยรักษาความเร็วให้คงที่ และใช้ตัวควบคุมแบบพีไอในการควบคุมระบบโดยประมาณแรงบิดที่เข้ามาในระบบจากตัวสังเกต จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ตัวชดเชยสามารถประมาณค่าแรงบิดชั่วคราวที่เกิดขึ้นมาได้ อย่างมีประสิทธิภาพ ถึงแม้ค่าที่ได้เป็นค่าประมาณไม่ได้มาจากการวัดก็ตาม

จากการนำเสนองานวิจัยต่าง ๆ จะเห็นได้ว่าการประมาณแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงด้วยตัวสังเกต จะสามารถประมาณค่าแรงบิดที่เข้ามาในระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ตัวสังเกตยังสามารถร่วมทำงานกับระบบควบคุม สามารถควบคุมระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยระบบจะประมาณค่าแรงบิดที่เข้ามาในระบบและตัวควบคุมจะนำค่าที่ได้จากการสังเกตไปควบคุมระบบให้ระบบมีความเสถียร และคงสถานะให้ระบบอยู่ในสภาวะสมดุล เมื่อมีแรงบิดจากภายนอกเข้ามาในระบบ ระบบสามารถกลับเข้าสู่สภาวะสมดุลได้อย่างรวดเร็ว สามารถรักษาเสถียรภาพของระบบได้ดีและมีประสิทธิภาพ ดังนั้น วิธีการประมาณค่าแรงบิดที่เกิดจากความหนืดของของเหลว ถ้าของเหลวมีการเปลี่ยนค่าความหนืด หรือมีค่าความหนืดคงที่วิธีการประมาณค่าความหนืดจากการประมาณแรงบิด ด้วยตัวสังเกตร่วมกับตัวชดเชยแรงบิดแบบปรับค่าได้จะเป็นวิธีการที่สามารถประมาณค่าความหนืดของของเหลวได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.9 สรุป

จากปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องได้นำเสนอการใช้ตัวควบคุมและตัวสังเกตแบบต่าง ๆ เกี่ยวกับการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ ปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องนี้ได้วิเคราะห์โครงสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบต่าง ๆ และได้นำเสนอการประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่เปลี่ยนแปลงที่กระทำกับระบบ จะเป็นประโยชน์ต่อการประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่เข้ามาในระบบของมอเตอร์สำหรับนำไปพัฒนาเครื่องวัดความหนืด การนำเสนอในงานวิจัยนี้เป็นการประมาณค่าแรงบิดการกระทำภายนอกที่เปลี่ยนแปลงกับมอเตอร์โดยใช้วิธีการชดเชยแบบปรับตัวได้เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่สามารถประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่เกิดจากความหนืดของของเหลวในสภาวะคงที่หรือในสภาวะเปลี่ยนแปลงได้

บทที่ 3

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การจำลองระบบให้อยู่ในลักษณะของแบบจำลองคณิตศาสตร์มีความจำเป็น เพื่อใช้ในการศึกษาวิเคราะห์และอธิบายพฤติกรรมของระบบในเชิงวิศวกรรม ในการวิเคราะห์การทำงานของระบบ จำเป็นต้องทราบถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบนั้น โดยนำค่าข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตของระบบไปวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่สำคัญ เพื่อใช้ในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ สำหรับเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อประมาณค่าความหนืดของของเหลว อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองจะประกอบด้วยเครื่องมือประมาณค่าความหนืดที่สร้างขึ้น และเครื่องมืออ้างอิงมาตรฐานใช้ในการสอบเทียบ โดยจะนำระบบเครื่องมือต้นแบบที่สร้างขึ้น มาทำการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ทฤษฎี หาค่าสัมประสิทธิ์หรือค่าตัวแปรของระบบอุปกรณ์ในการทดลอง ระบบที่สนใจศึกษาก็คือการทำงานของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และการทำงานของตัวสังเคราะห์ร่วมกับตัวชดเชยแบบปรับตัวได้

3.1 อุปกรณ์การทดลอง

ชุดอุปกรณ์การประมาณค่าความหนืด โดยใช้มอเตอร์กระแสตรงกับการชดเชยแรงบิดแบบปรับตัวได้นั้น ประกอบด้วย

- 1) มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Servo Motor)
- 2) หัวกวน (Stirrer)
- 3) บีกเกอร์ ขนาด 250 ml (Beaker)
- 4) เครื่องให้ความร้อน (Heater)
- 5) บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller Board ATmega 328 Arduino)
- 6) บอร์ดเชื่อมต่อเพื่อควบคุมการทำงานของมอเตอร์ (Interfacing Board)
- 7) แหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power Supply)

3.1.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและหัวกวน

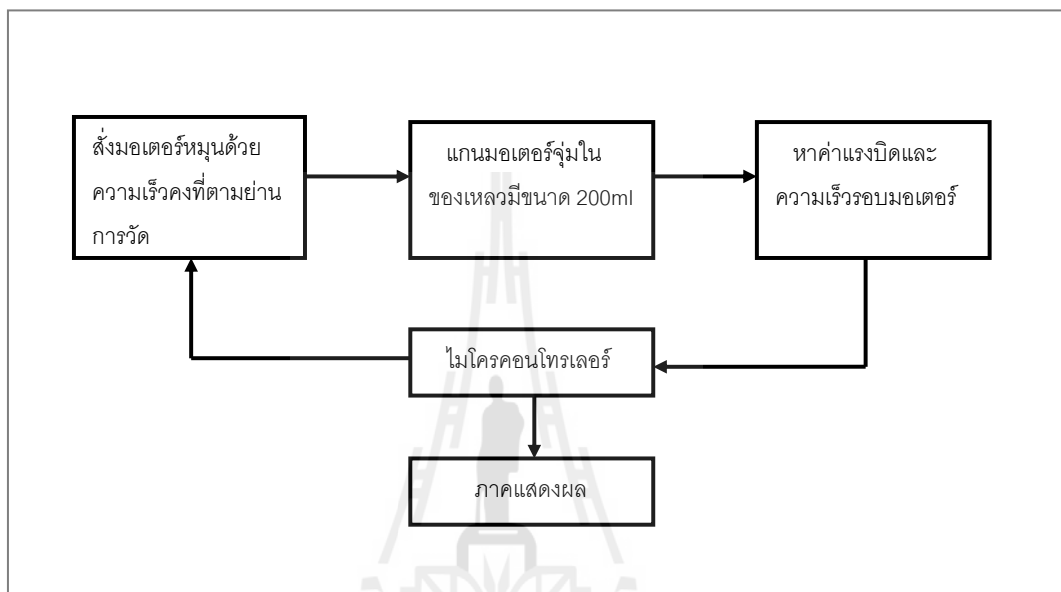
มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและหัวกวนดังรูปที่ 3.1 เป็นอุปกรณ์สำคัญในการประมาณค่าความหนืดของของเหลวในการทดลองในครั้งนี้ หัวกวนมอเตอร์จะหมุนอยู่ในของเหลวขณะที่ทำการวัด โดยสัญญาณของระบบมอเตอร์จะส่งผ่านตัวตรวจจับความเร็วรอบเทค โคมิเตอร์ (Tachometer) มีหน้าที่วัดความเร็วรอบในการหมุนมอเตอร์ การทำงานของมอเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วคงที่ตลอดในการวัด และหัวกวนมอเตอร์สร้างมาจากแท่งชุบเปอร์สตีลเนื่องจากชุบเปอร์สตีลมีความเหนียวมีจุดหลอมเหลว 120°C ไม่เกิดเสียงดังและไม่เป็นสื่อกลางในการนำกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 3.1 อุปกรณ์มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

3.1.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ATmega 328 Arduino UNO ดังรูปที่ 3.3 จะเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ควบคุมมอเตอร์และแสดงผลเพื่อประมาณค่าแรงบิดของของเหลว ความเร็วรอบของมอเตอร์ ตัวถังเกต และตัวถังร่วมกับตัวชดเชย มีหลักการทำงานดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนภาพบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 3.3 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

3.1.3 บอร์ดเชื่อมต่อ

บอร์ดเชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์และมอเตอร์ใช้ ET OPTO DC MOTOR เพื่อขยายสัญญาณจากไมโครคอนโทรลเลอร์ และจ่ายไฟจากแหล่งจ่ายไฟให้กับมอเตอร์ บอร์ดเชื่อมต่อเป็นศูนย์กลางการทำงานระหว่างมอเตอร์ไมโครคอนโทรลเลอร์กับแหล่งจ่ายไฟโดยใช้มอสเฟต (MOSFET) ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมสัญญาณไฟฟ้า และใช้กับมอเตอร์กระแสตรงได้ตั้งแต่ 5-24 โวลต์ ที่กระแส 5 แอมป์ โดยประมาณต้องมีแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงเลี้ยงบอร์ด 5 โวลต์ สำหรับเลี้ยงวงจรรวม และมีขั้วต่อ 5 PIN สำหรับต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 บอร์ดเชื่อมต่อ

3.1.4 เครื่องให้ความร้อนและแหล่งจ่ายไฟ

ปุ่มเพิ่มอุณหภูมิจะสามารถปรับอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 0-100°C โดยจะมีหน้าจอแสดงผลอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแสดงออกมาเป็นตัวเลข เครื่องให้ความร้อนจะแสดงดังรูปที่ 3.5 ส่วนแหล่งจ่ายไฟ ดังรูปที่ 3.6 สามารถปรับแรงดันไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ได้ตามต้องการ ในการทดลองจะใช้ไฟฟ้ากระแสตรง 5.6 โวลต์

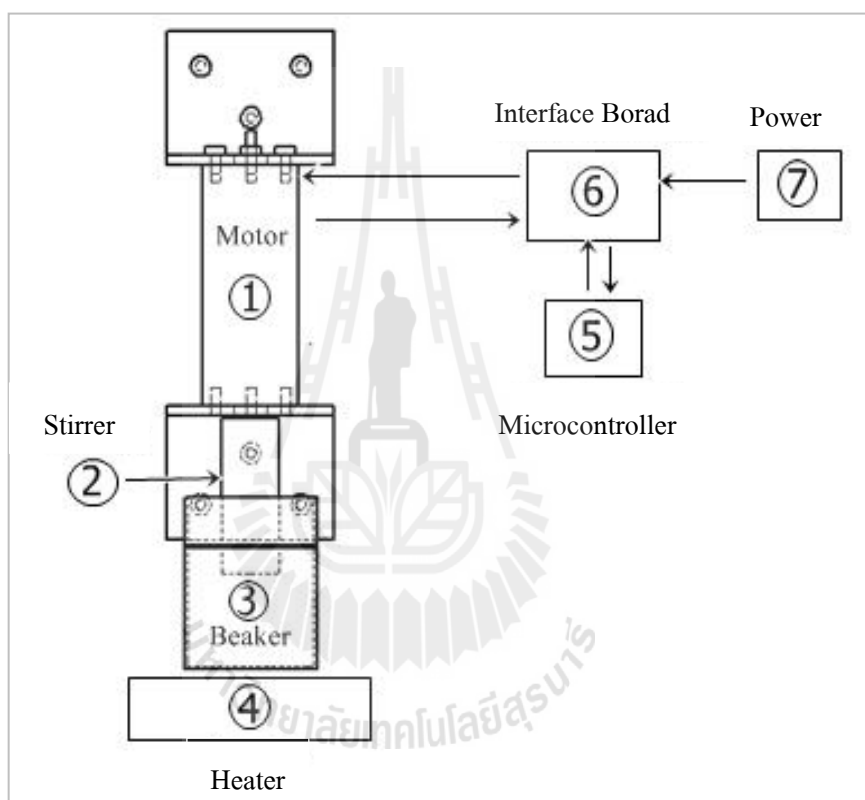


รูปที่ 3.5 เครื่องให้ความร้อน

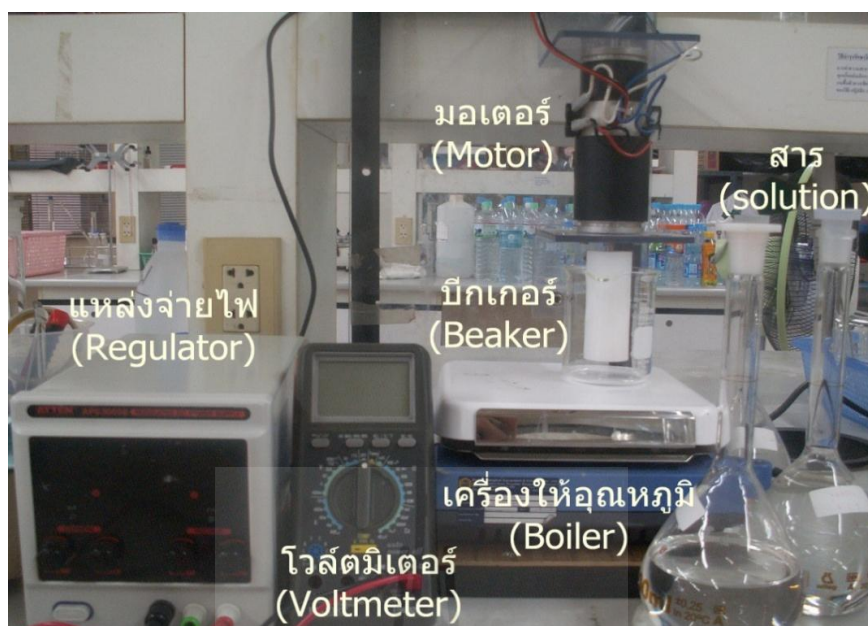


รูปที่ 3.6 แหล่งจ่ายไฟ

ในการประมาณค่าความหนืดของของเหลวจะนำของเหลวใส่ภาชนะ และนำชุดมอเตอร์พร้อมหัวกวนใส่ลงในภาชนะที่ใส่ของเหลว ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของมอเตอร์และแสดงผลประมาณค่าแรงบิดที่เกิดจากความหนืดของของเหลว โดยจะมีบอร์ดเชื่อมต่อทำหน้าที่เชื่อมระบบการทำงานระหว่างมอเตอร์กระแสตรง ไมโครคอนโทรลเลอร์และแหล่งจ่ายไฟ เมื่อต้องการวัดสารที่อุณหภูมิสูงขึ้น ตัวให้ความร้อนจะทำหน้าที่เพิ่มอุณหภูมิให้กับสาร ดังแสดงในรูปที่ 3.5 และชุดอุปกรณ์การทดลองต้นแบบที่สร้างขึ้นจริงดังแสดงในรูปที่ 3.6



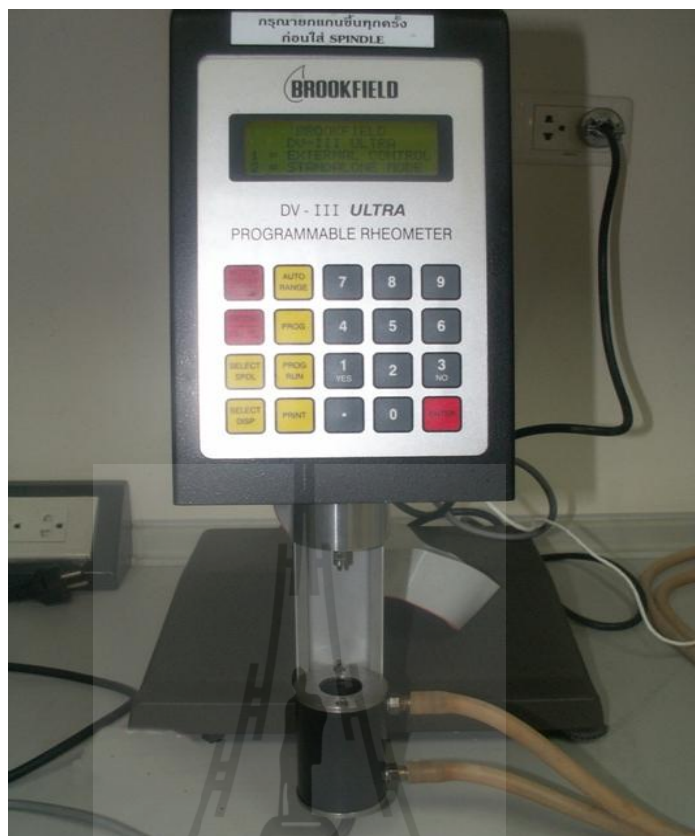
รูปที่ 3.7 แผนภาพการทำงานของอุปกรณ์การทดลอง



รูปที่ 3.8 อุปกรณ์การทดลองเครื่องต้นแบบ

3.2 เครื่องมือวัดความหนืดมาตรฐาน

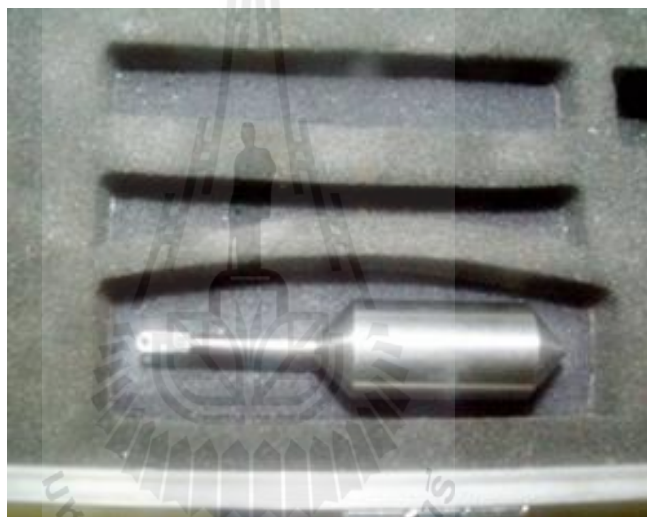
เครื่องมือมาตรฐานนำมาอ้างอิงความหนืดเพื่อยืนยันความถูกต้องความหนืดของสาร และเปรียบเทียบค่าความหนืดของสารจากการวัดของเครื่องมาตรฐาน และค่าความหนืดที่ได้จากการประมาณของเครื่องที่สร้างเพื่อยืนยันความถูกต้องความหนืดของสาร เครื่องมือที่จะใช้อ้างอิงคือ Brookfield DV-III Ultra Rheometer ดังแสดงในรูป 3.7 เป็นเครื่องมือสำหรับหาค่าความหนืดของของเหลวให้ค่าต่างดังนี้ คือ แรงบิด (Torque) ความเค้นเฉือน (Shear Stress) ความเร็วรอบในการหมุน (Speed of Rotation) และความหนืด (Viscosity) ของของเหลว โดยผู้ใช้งานสามารถกำหนดอัตราเฉือน (Shear Rate) ให้กับเครื่องวัดความหนืดผ่านทางคอมพิวเตอร์ หรือป้อนข้อมูลผ่านเครื่องได้โดยตรงถ้าต้องการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิให้แก่สารจะทำงานร่วมกับเครื่องเพิ่ม ลด อุณหภูมิ แสดงในรูป 3.8 สามารถปรับอุณหภูมิ 100–300 °C หลักการทำงานของเครื่องวัดความหนืด Brookfield DV-III Ultra Rheometer ความหนืดจะต้านการหมุนของ หัวเข็มที่ใช้ในการวัดความหนืด ดังแสดงในภาพ 3.9 โดยสามารถหมุนด้วยอัตราเร็วรอบในการหมุน 0–250 รอบต่อนาที และสปริงจะเปลี่ยนแรงต้านทานดังกล่าวให้เป็นแรงบิด ค่าแรงบิดที่ได้จะเป็นเปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงอยู่ในช่วง 0.00–99.9%



รูปที่ 3.9 เครื่องวัดความหนืด Brookfield DV-III Ultra Rheometer



รูปที่ 3.10 ชุดอุปกรณ์เพิ่ม-ลดอุณหภูมิ



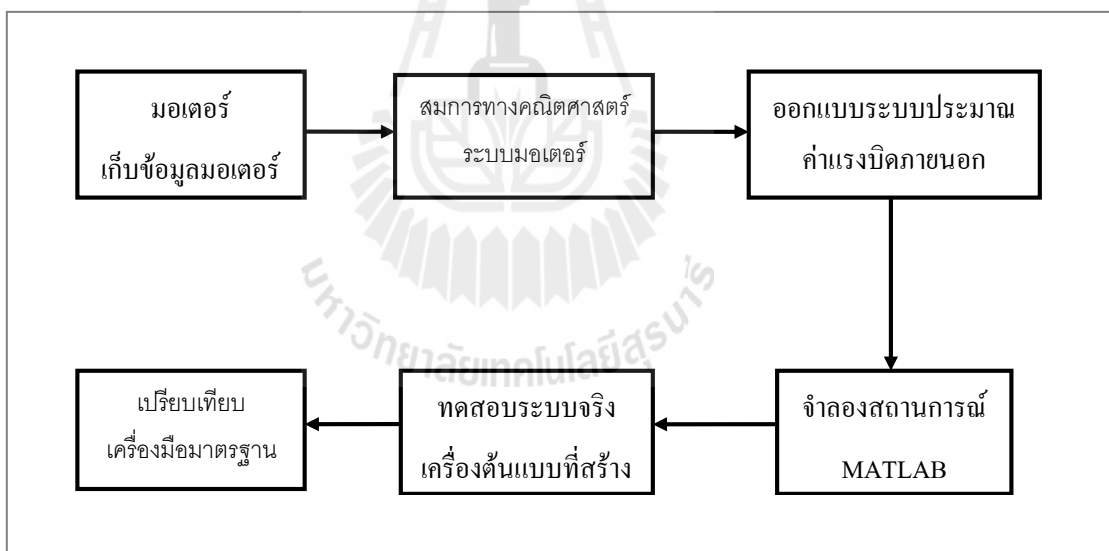
รูปที่ 3.11 ชุดอุปกรณ์หัวเข็มในการวัดความหนืด

หัวเข็มที่ใช้ในการทดสอบวัดความหนืดของเครื่องมาตรฐานจะใช้หัวเข็มเบอร์ 21 เพราะเหมาะสมกับช่วงที่ทำการวัดความหนืดของของเหลว และรองรับกับโปรแกรมของ Brookfield สามารถบันทึกผลแล้วนำมาเปรียบเทียบกับเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นมาได้ ชุดอุปกรณ์หัวเข็มในการวัดความหนืดจะแสดงดังรูปที่ 3.9

3.3 ขั้นตอนการทำงาน

การประมาณค่าความหนืดของของเหลวดังรูปที่ 3.10 มีขั้นตอนการทำงานดังนี้

- 1) เก็บข้อมูลสัญญาณเอาต์พุตของมอเตอร์เพื่อศึกษาระบบภายใต้แรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 5–12 โวลต์ เพื่อดูผลตอบสนองของระบบ
- 2) สร้างสมการทางคณิตศาสตร์จากข้อมูลที่ได้เพื่อจะนำไปสร้างเป็นระบบจำลองในโปรแกรม
- 3) ออกแบบระบบประมาณค่าแรงบิดภายนอก ประกอบด้วย ตัวสังเกตและตัวชดเชยแรงบิดแบบปรับตัวได้
- 4) นำระบบทางคณิตศาสตร์มาจำลองด้วย MATLAB เพื่อแก้ไขข้อผิดพลาดก่อนจะนำไปสร้างเป็นเครื่องต้นแบบ
- 5) ทดสอบระบบจริงแล้วทำการเปรียบเทียบผลกับเครื่องมือมาตรฐาน DV-III Ultra Rheometer



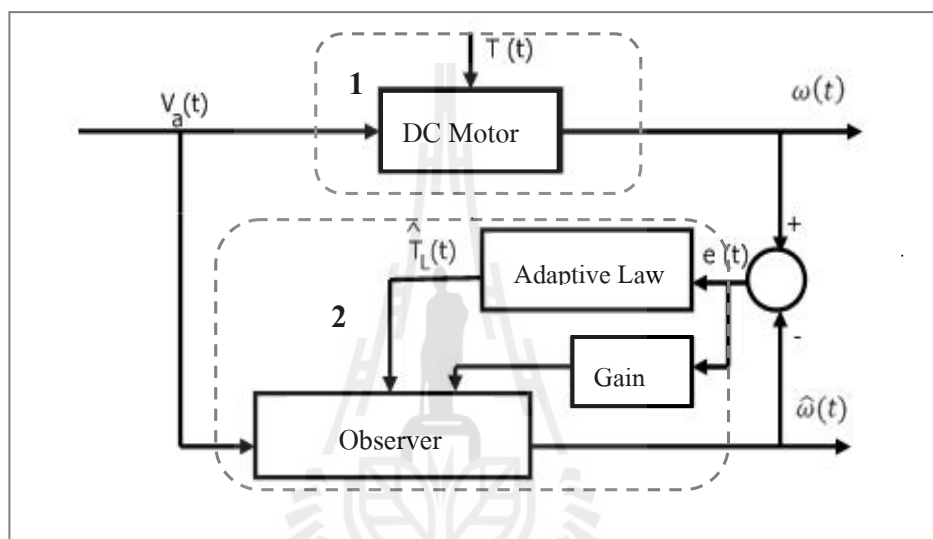
รูปที่ 3.12 แผนภาพขั้นตอนการทำงาน

แผนภาพวิธีการประมาณค่าแรงบิดภายนอกของมอเตอร์กระแสตรงนั้น สามารถแบ่งออก
ได้ 2 ส่วน คือ

ส่วนที่ 1 เป็นระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ส่วนที่ 2 เป็นระบบการประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่กระทำต่อมอเตอร์ ซึ่งจะ
ประกอบด้วย

ตัวสังเกต และตัวชดเชยแรงบิดแบบปรับค่าได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.13 แผนภาพการประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่เข้ามากระทำกับระบบ

การทำงานของระบบจะเริ่มจากป้อนอินพุตหรือแรงดันไฟฟ้าเข้าไปให้กับระบบและนำสัญญาณเอาต์พุตหรือความเร็วรอบของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเปรียบเทียบกับระบบการประมาณค่าแรงบิดภายนอก สังเกตได้ว่าเมื่อมีแรงบิดจากภายนอกมารบกวนการหมุนของมอเตอร์ จะทำให้ความเร็วรอบทั้งสองระบบมีค่าลดลง ตัวสังเกตจะประมาณค่าความเร็วรอบผิดพลาดและแตกต่างไปจากระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้นจึงเพิ่มตัวชดเชยแรงบิดแบบปรับค่าได้เข้าร่วมทำงานกับตัวสังเกต ตัวชดเชยแรงบิดแบบปรับค่าได้มีหน้าที่ในการประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่เข้ามารบกวนการหมุนของมอเตอร์ และทำงานร่วมกับตัวสังเกตในการประมาณความเร็วรอบให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น

3.4 ระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

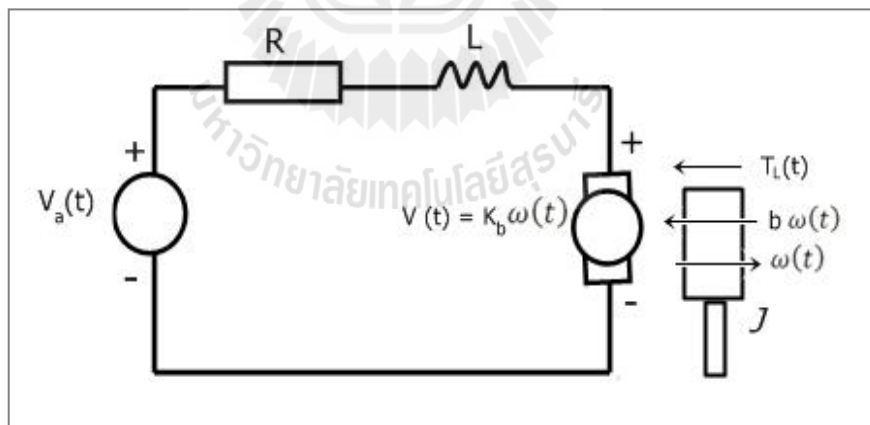
การจำลองระบบทางคณิตศาสตร์มีประโยชน์เพื่อการตรวจสอบวิเคราะห์หรือควบคุมระบบให้เป็นไปตามที่ต้องการ ระบบจำลองระบบทางคณิตศาสตร์ จำเป็นต้องทราบค่าตัวแปรภายในระบบ เนื่องจากป้อนไฟเข้าไปให้กับมอเตอร์ ทำให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบ ดังนั้นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลสมการทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงประกอบ 2 สมการดังนี้

สมการทั่วไปของมอเตอร์จะเปลี่ยนพลังงานจากไฟฟ้า-กล

$$J\dot{\omega} = -b \cdot \omega + K_t \cdot i_a - T_L \tag{3.1}$$

$$V_a - V_b = L_a \frac{di}{dt} + R_a \cdot i_a \tag{3.2}$$

เมื่อ $V_b = K_b \cdot \omega$



รูปที่ 3.14 แผนภาพวงจรของมอเตอร์กระแสตรง

จากรูปที่ 3.14 กำหนดให้ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_a) และแรงบิดภายนอก (T_L) คือ อินพุต กระแสไฟฟ้า (i_a) และความเร็วยรอบ (ω) คือเอาต์พุตของระบบ พิจารณาอินพุตและเอาต์พุตของระบบ โดยเขียนให้อยู่ในรูป State-Space เพื่อง่ายต่อการควบคุม

รูปแบบสถานะของระบบ

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (3.3)$$

$$y = Cx \quad (3.4)$$

โดยที่ A, B, C เป็นตัวแปรค่าคงที่ของระบบ u คืออินพุต y คือเอาต์พุต และ x คือเวกเตอร์สถานะของระบบ ดังนั้น

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{K_b}{L_a} \\ \frac{K_t}{J} & -\frac{b}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ T_L \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

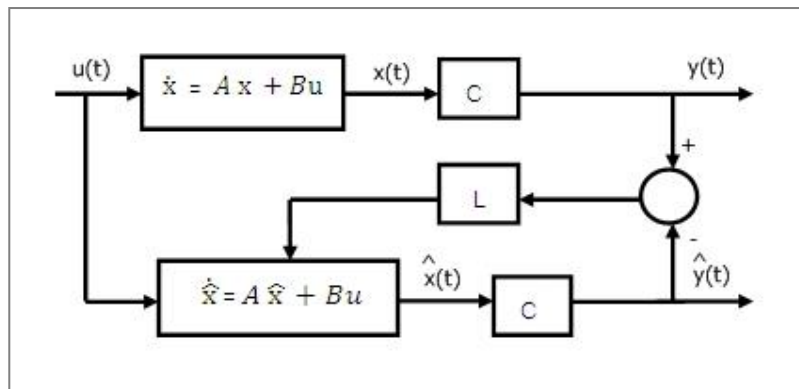
$$y = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ \omega \end{bmatrix}$$

3.5 ระบบการประมาณค่าแรงบิดภายนอก

ระบบการประมาณค่าแรงบิดภายนอกใช้ในการอ้างอิงสัญญาณระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ประกอบด้วยตัวสังเกตและตัวชดเชยแรงบิดแบบปรับตัวได้ ตัวสังเกตจะทำหน้าที่ในการประมาณค่าสถานะที่เกิดขึ้นของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวชดเชยแรงบิดแบบปรับตัวได้ จะทำการประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่เข้ามารบกวนการหมุนของมอเตอร์ โดยตัวสังเกตจะทำงานร่วมกับตัวชดเชยแรงบิดเพื่อประมาณค่าเอาต์พุต หรือสถานะที่ต้องการทราบให้มีประสิทธิภาพถูกต้อง ใกล้เคียงกับการวัดจริง

3.5.1 ตัวสังเกต (Observer)

ตัวสังเกตจะประมาณค่าสถานะภายในระบบมอเตอร์แทนการวัดจริง เนื่องจากการวัดค่าทุกๆสถานะ หรือสถานะของระบบที่ต้องการทราบอาจมีความยุ่งยากหรือเป็นไปได้ โดยตัวสังเกตจะมีประสิทธิภาพที่ดีเมื่อ ค่าประมาณที่ได้จากการอ้างอิงใกล้เคียงกับค่าที่สามารถทำการวัดได้จริงจากระบบ ดังนั้นตัวสังเกตจะมีค่าตัวแปรคงที่เหมือนกันกับระบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยจะเพิ่มอัตราขยายที่เกิดจากผลต่างของค่าประมาณจากตัวสังเกตและค่าที่สามารถวัดได้จริงจากระบบเพื่อให้การสังเกตมีตอบสนองทันทีถ้าระบบมีการเปลี่ยนแปลง สามารถอธิบายดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 แผนภาพมอเตอร์กระแสตรงและตัวสังเกต

ดังนั้นสมการของตัวสังเกตของระบบ คือ

$$J \dot{\omega} = -b \cdot \omega + K_t \cdot i_a - T_L + L_1 e \quad (3.6)$$

$$V_a - K_b \omega = L_a \frac{d\hat{i}_a}{dt} + R_a \cdot \hat{i}_a \quad (3.7)$$

จะกำหนดให้มีรูปแบบคล้ายกับระบบจริง โดยมีสัญลักษณ์ '^' คือค่าตัวแปรของตัวสังเกต

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}_a \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{K_b}{L_a} \\ \frac{K_t}{J} & -\frac{b}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_a \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_a} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ T_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \end{bmatrix} e \quad (3.8)$$

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

กำหนดให้ $e = \omega - \hat{\omega}$ คือ ค่าความผิดพลาดของความเร็รรอบที่เกิดขึ้นระหว่างระบบมอเตอร์กระแสตรงและตัวสังเกต

เมื่อ $J =$ โมเมนต์ความเฉื่อย ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)

$K_t =$ ค่าคงที่ของแรงบิด ($\text{N} \cdot \text{m/A}$)

K_b = ค่าคงที่ของ Electromotive Force (V·s/rad)

T_L = แรงบิดที่เปลี่ยนแปลง (N·m)

b = ความหน่วง (N·m·s/rad)

R_a = ความต้านทานของอาร์เมเจอร์ (Ω)

L_a = ความเหนี่ยวนำของอาร์เมเจอร์ (H)

i_a = กระแสไฟฟ้าของอาร์เมเจอร์ (A)

ω = ความเร็วรอบ (rad/s)

V_a = ความต่างศักย์ของอาร์เมเจอร์ (V)

V_b = ความต่างศักย์ back emf (V)

L_1, L_2 = อัตราขยายความแตกต่างระหว่างความเร็วรอบระบบจริง และสัญญาณอ้างอิง

คุณสมบัติความสังเกตได้

$$P_o = \begin{bmatrix} C \\ CA \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$\det(P_o) \neq 0$ ระบบจะมีคุณสมบัติในการสังเกตได้

ค่าอัตราการขยายของตัวสังเกต

$$p(\lambda) = \lambda^2 + 2\xi\omega_n\lambda + \omega_n^2 \quad (3.10)$$

เมื่อ ξ คือ ค่าอัตราการสั่นก่อนระบบจะเข้าสู่สภาวะสมดุล และ ω_n คือ ค่าความถี่ธรรมชาติของระบบซึ่งค่าทั้งสองนี้สามารถเลือกตามความเหมาะสมในการออกแบบ เพื่อให้ตัวสังเกตทำงานได้ผลการตอบสนองตามต้องการ

$$L = p(\lambda)P_o^{-1}[0 \ 1]^T \quad (3.11)$$

เพื่อให้ผลตอบสนองชั่วคราวของตัวสังเกตมีความรวดเร็วจะต้องเลือกค่า L ที่เหมาะสมกับระบบ

3.5.2 ตัวชดเชยแรงบิดด้วยวิธี Gradient Method

ปัญหาของตัวสังเกตการณ์คือไม่สามารถประมาณแรงบิดภายนอกที่มากกระทำในระบบของมอเตอร์ได้จึงจำเป็นต้องสร้างตัวชดเชยแรงบิดขึ้นมาเพื่อประมาณค่าแรงบิดดังกล่าว โดยนำสัญญาณระหว่างสัญญาณความเร็วรอบของมอเตอร์มาเปรียบเทียบกับสัญญาณความเร็วรอบที่ได้จากการสังเกต เมื่อมีแรงบิดเข้ามารบกวนระบบมอเตอร์จะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างสัญญาณทั้งสองระบบ โดยมีรายละเอียดและการพิสูจน์ทฤษฎีดังนี้

$$\frac{K_t}{L_a I} V_a = \ddot{\omega} + \left[\frac{R_a}{L_a} + \frac{b}{I} \right] \dot{\omega} + \left[\frac{R_a b}{L_a I} + \frac{K_b K_t}{L_a I} \right] \omega + \frac{1}{I} \dot{T}_L + \frac{R_a}{L_a I} T_L \quad (3.12)$$

กำหนดให้

$$a_1 = \left[\frac{R_a b}{L_a J} + \frac{K_b K_t}{L_a J} \right], \quad a_2 = \left[\frac{R_a}{L_a} + \frac{b}{J} \right], \quad \alpha_1 = \frac{R_a}{L_a J}, \quad \alpha_2 = \frac{1}{J}, \quad b_1 = \frac{K_t}{L_a J}$$

ดังนั้นสัญญาณจากมอเตอร์

$$b_1 V_a = \ddot{\omega} + a_2 \dot{\omega} + a_1 \omega + \alpha_2 \dot{T}_L + \alpha_1 T_L \quad (3.13)$$

โดยสัญญาณอ้างอิงจะคล้ายกับสัญญาณจากมอเตอร์

$$b_1 V_a = \ddot{\hat{\omega}} + a_2 \dot{\hat{\omega}} + a_1 \hat{\omega} + \alpha_2 \dot{\hat{T}}_L + \alpha_1 \hat{T}_L \quad (3.14)$$

ต้องการจัดให้ความแตกต่างความเร็วรอบระหว่างสองระบบหมดไป

กำหนดให้ Loss Function (J) มีค่า

$$J(\hat{T}_L) = \frac{1}{2} e^2 \quad (3.15)$$

ขจัดความต่างระหว่างสัญญาณจริงกับสัญญาณอ้างอิง สมการที่ (3.13)–(3.14)

$$\ddot{e} = -a_2\dot{e} - a_1e - \alpha_2(\dot{T}_L - \dot{\hat{T}}_L) - \alpha_1(T_L - \hat{T}_L) = 0 \quad (3.16)$$

เนื่องจาก แรงบิดที่มากกระทำเกิดขึ้นภายนอกระบบจริง ดังนั้นส่วนต่างที่ต้องเพิ่มเข้ามาให้ตัวสังเกต คือ \hat{T}_L โดยกำหนดให้ Loss Function (J) มีค่า

$$\frac{\partial \hat{T}_L}{\partial t} = -\gamma \frac{\partial J}{\partial \hat{T}_L} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial \hat{T}_L} \quad (3.17)$$

โดยที่

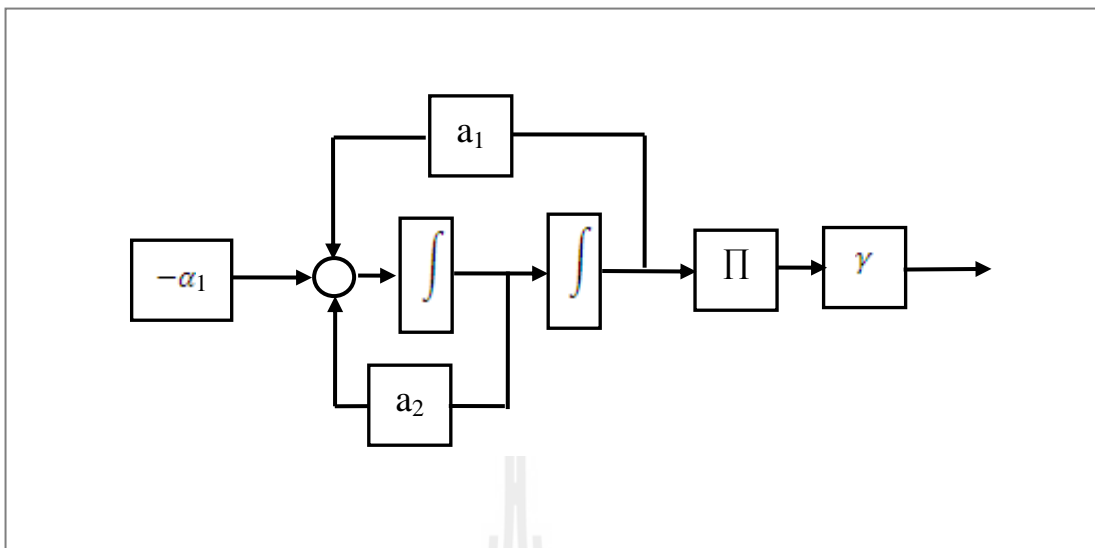
$$\frac{\partial e}{\partial \hat{T}_L} = -\frac{\partial \hat{\omega}}{\partial \hat{T}_L} \quad (3.18)$$

กำหนดให้ Sensitive Function เท่ากับ

$$v = \frac{\partial \hat{\omega}}{\partial \hat{T}_L} \quad (3.19)$$

เมื่อ \hat{T}_L มีการเปลี่ยนแปลงการเปลี่ยนแปลงของตัวสังเกตต่อการเปลี่ยนแปลงเวลา

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + a_2 \frac{\partial v}{\partial t} + a_1 v = -\alpha_1 \quad (3.20)$$



รูปที่ 3.16 แผนภาพบล็อกของตัวชดเชยแบบปรับตัวได้โดยวิธี Gradient Method

แผนภาพแสดงตัวชดเชยแรงบิดแบบปรับค่าได้ในรูปแบบทางคณิตศาสตร์ ดังรูปที่ 3.14 โดยที่ γ คือ อัตราการปรับตัว (Adaptation Gain) และให้ v คือ อัตราเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบต่อแรงบิด

3.6 สรุป

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องประมาณค่าความหนืดนั้นจะประมาณค่าความหนืดด้วยการประมาณค่าแรงบิด ในงานวิจัยนี้สร้างแบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงระบบจะประกอบไปด้วย ส่วนอินพุตคือไฟที่ป้อนกับระบบ และเอาต์พุตที่เป็นความเร็วรอบของมอเตอร์ เมื่อมีแรงบิดจากภายนอกเข้ามารบกวนการหมุนของมอเตอร์ทำให้มอเตอร์หมุนช้าลง การประมาณค่าแรงบิดที่เข้ามารบกวน และการอ้างอิงความเร็วรอบของมอเตอร์ จำเป็นต้องสร้างตัวสังเกต และตัวชดเชยแรงบิดแบบปรับตัวได้ โดยจะสร้างระบบที่ได้กล่าวมานั้นด้วยทฤษฎีและสมการทางคณิตศาสตร์

บทที่ 4

ผลการจำลองสถานการณ์

ประโยชน์ของการจำลองสถานการณ์ก่อนจะนำไปสร้างเป็นระบบจริงนั้นคือสามารถแก้ไขข้อผิดพลาดของระบบ ทดสอบประสิทธิภาพการทำงานและคาดคะเนผลที่จะเกิดขึ้น เมื่อนำไปสร้างเครื่องเพื่อทดสอบจริงจะช่วยลดเวลาในการแก้ไขปัญหา โดยระบบจำลองสร้างขึ้นจากสมการทางคณิตศาสตร์ ดังนั้นถ้าการออกแบบระบบและตัวแปรในการจำลองมีความถูกต้องและใกล้เคียงกับระบบจริงจะทำให้การจำลองมีประสิทธิภาพถูกต้องแม่นยำ และผลใกล้เคียงกับระบบทดสอบจริง ในบทนี้เป็นการแสดงผลการจำลองสถานการณ์ทำงานของมอเตอร์ โดยเริ่มจากการหาค่าตัวแปรภายในระบบของมอเตอร์หลังจากนั้นจะทำการหาค่าตัวแปรของระบบประมาณการ ซึ่งประกอบด้วยตัวสังเกตและตัวชดเชยแรงบิด และทำการจำลองสถานการณ์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบประมาณการ โดยจะแบ่งออกเป็น 3 กรณีดังนี้ ในกรณีที่ระบบไม่ได้รับแรงบิด กรณีระบบได้รับแรงบิดแบบคงที่ และกรณีที่ระบบได้รับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง โดยพิจารณาผลการตอบสนองความเร็วรอบของมอเตอร์ เมื่อมีแรงบิดเข้ามารบกวนต่อมาจะทดสอบการทำงานของตัวสังเกตในกรณีต่าง ๆ หลังจากนั้นจะเพิ่มตัวชดเชยแบบปรับค่าได้ ด้วยวิธีการ Gradient Method เพื่อประมาณค่าแรงบิดที่เข้ามารบกวนระบบ รวมทั้งพิจารณาผลการประมาณค่าความเร็วรอบของตัวชดเชยค่าแรงบิดร่วมกับตัวสังเกต

4.1 การประมาณค่าตัวแปรของระบบ

การสร้างแบบจำลองขึ้นมาจำเป็นต้องทราบค่าตัวแปรทางคณิตศาสตร์ของระบบในการประมาณค่าความหนืดในครั้งนี้ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นอุปกรณ์ในการทำงาน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทราบค่าพารามิเตอร์ภายในมอเตอร์ โดยการหาตัวแปรของระบบมอเตอร์จะไม่สามารถวัดค่าดังกล่าวได้โดยตรง ในงานวิจัยนี้จึงใช้วิธีการระบุเอกลักษณ์ (System Identification) ด้วย MATLAB เพื่อหาตัวแปรดังกล่าว การระบุเอกลักษณ์จำเป็นต้องทราบค่าต่าง ๆ ดังนี้คือ

- 1) สัญญาณป้อนเข้าให้กับระบบ (Input Signal)
- 2) สัญญาณที่ออกจากระบบ (Output Signal)
- 3) รูปแบบจำลองของระบบทางคณิตศาสตร์ (Transfer Function)

การดำเนินการหาค่าตัวแปรของระบบจะเริ่มจาก ป้อนอินพุตเข้าไปให้กับระบบ แล้วเก็บสัญญาณเอาต์พุตของระบบ หลังจากนั้นจะทำการระบุเอกลักษณ์ด้วย MATLAB โดยรูปแบบจำลองระบบทางคณิตศาสตร์จะต้องระบุอันดับของระบบ และตัวแปรค่าคงที่ภายในของระบบการปฏิบัติงานเริ่มจากการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ตั้งแต่ 5-12 โวลต์ เก็บข้อมูลสัญญาณความเร็วรอบการหมุนของมอเตอร์ พิจารณา อินพุต และเอาต์พุต ของระบบมอเตอร์ โดยจัดให้อยู่ในรูปแบบState-Space

สมการมอเตอร์

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

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

จากวิธีการระบุเอกลักษณ์ด้วย MATLAB ตัวแปรต่างๆจะมีค่าดังนี้คือ

$$J = 1 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2, K_t = 1 \times 10^{-3} \text{ V} \cdot \text{s} / \text{rad}, L_a = 1 \times 10^{-3} \text{ H},$$

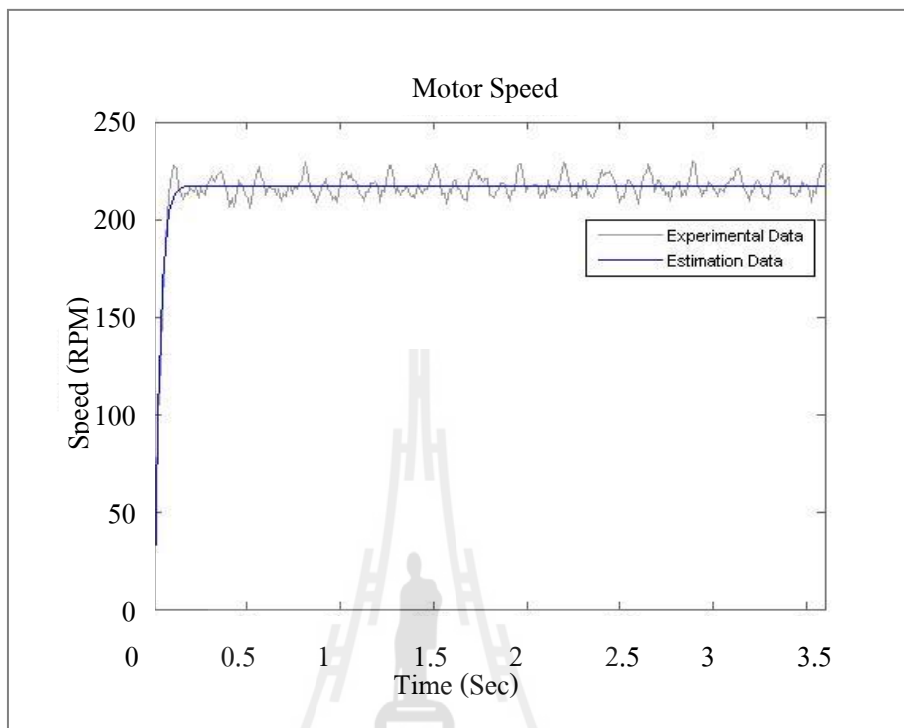
$$b = 1 \times 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} / \text{rad}, R_a = 0.173 \Omega, K_b = 1 \times 10^{-3} \text{ V} \cdot \text{s} / \text{rad}$$

นำค่าตัวแปรดังกล่าวแทนลงในสมการที่ 4.1

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -172.8 & -5057.5 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 196250 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ T_L \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

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

เมื่อนำข้อมูลจริงมาเปรียบเทียบกับระบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะแสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบระบบจำลองโดยวิธีระบุเอกลักษณ์และสัญญาณจริงของระบบ

เมื่อนำสัญญาณเอาต์พุตที่เก็บค่าได้จริงจากระบบมาเปรียบเทียบกับระบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยวิธีการระบุเอกลักษณ์ด้วย MATLAB แสดงให้เห็นว่าระบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลจริงที่เก็บมาได้ ในที่นี้จะทำการป้อนไฟ 5.6 โวลต์ ให้กับระบบแล้วเก็บค่าความเร็วรอบของมอเตอร์โดยจะมีความเร็วรอบ 217 RPM เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว

4.2 ตัวแปรของตัวสังเกต

ตัวสังเกตจะมีสมการคล้ายกันกับระบบจริง เพื่อให้ทราบว่าค่าตัวแปรดังกล่าวมาจากการประมาณของตัวสังเกต ใช้สัญลักษณ์ ‘^’ คือค่าตัวแปรที่ได้จากตัวสังเกตและ ตัวสังเกตจะมีอัตราการขยายความแตกต่างระหว่างระบบจริงของมอเตอร์และค่าที่ได้จากการสังเกตค่าดังกล่าวจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของระบบเมื่อมอเตอร์มีความเร็วรอบที่เปลี่ยนไป

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}_a \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{K_b}{L_a} \\ \frac{K_t}{J} & -\frac{b}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_a \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_a} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ T_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \end{bmatrix} e \quad (4.3)$$

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

พิจารณาคูณสมบัติความสังเกตได้ของระบบ

$$P_o = \begin{bmatrix} C \\ CA \end{bmatrix} = 196250 \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$\det(P_o) \neq 0$ ระบบจะมีคุณสมบัติในการสังเกตได้

ค่าอัตราขยายของตัวสังเกตการณ์

$$p(\lambda) = \lambda^2 + 2\xi\omega_n\lambda + \omega_n^2$$

กำหนดให้ $\xi = 1$, $\omega_n = 71.11$

$$p(\lambda) = \lambda^2 + 172.78\lambda + 5057.5$$

$$p(A) = A^2 + 172.78A + 5057.5I$$

$$= 10^5 \begin{bmatrix} 0.2480 & 8.7382 \\ -0.0017 & 0.0506 \end{bmatrix} + 172.78 \begin{bmatrix} -172.8 & -5057.5 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} + 5057.5 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} -0.6078 & -17.3654 \\ 0.0034 & -0.0145 \end{bmatrix}$$

เมื่อ $L = p(A)P_o^{-1}[0 \quad 1]^T$

$$\text{ค่าอัตราค่าขยายของตัวสังเกต } L = 10^{-3} \begin{bmatrix} 1.6 \\ 0.1 \end{bmatrix}$$

แทนลงในสมการ ที่ 4.3

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}_a \\ \omega \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -172.8 & -5057.5 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_a \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 196250 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ T_L \end{bmatrix} + 10^{-3} \begin{bmatrix} 1.6 \\ 0.1 \end{bmatrix} e \\ y &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_a \\ \omega \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.4)$$

อัตราค่าขยายของตัวสังเกต จะรับค่ามาจากค่าขยายความแตกต่างของระบบจริงและระบบที่ได้จากการสังเกต ค่าดังกล่าวจะต้องมีความเหมาะสมกับระบบ เมื่อระบบมีการเปลี่ยนแปลงค่าไปจากเดิม จะทำให้ตัวสังเกตเกิดการตอบสนองไปตามระบบ ถ้าอัตราการขยายความแตกต่างมีค่าที่เร็วเกินไปจะทำให้ค่าที่ได้จากการประมาณพุ่ง แต่ถ้าอัตราค่าขยายความแตกต่างมีค่าที่ช้าเกินไปจะทำให้ค่าที่ได้จากการประมาณไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อระบบจริงมีค่าเปลี่ยนแปลง

4.3 ตัวแปรตัวชดเชยแบบปรับค่าได้ด้วยวิธี Gradient Method

พิจารณาการทำงานของมอเตอร์กระแสตรง และตัวสังเกตในกรณีที่ระบบได้รับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง โดยทดสอบให้แรงบิดคงที่แบบขั้นบันได และให้แรงบิดที่เปลี่ยนแปลง เข้าไปรบกวนระบบจะสังเกตได้ว่าเมื่อนำความเร็วรอบที่สามารถวัดได้จริงมาเปรียบเทียบกับค่าประมาณค่าความเร็วรอบจากตัวสังเกต เมื่อมีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนระบบจะส่งผลให้ตัวสังเกตประมาณค่าสถานะผิดพลาด เนื่องจากตัวสังเกตสามารถประมาณค่าภายในระบบได้เท่านั้น จึงจำเป็นต้องสร้างตัวชดเชยในการประมาณค่าแรงบิดภายนอก เพื่อทำงานร่วมกับตัวสังเกตในการประมาณค่าสถานะให้มีประสิทธิภาพ

ค่าตัวแปรการชดเชยแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง เมื่อแรงบิดภายนอกมีการเปลี่ยนแปลง การเปลี่ยนแปลงของตัวสังเกตต่อการเปลี่ยนแปลงเวลา

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

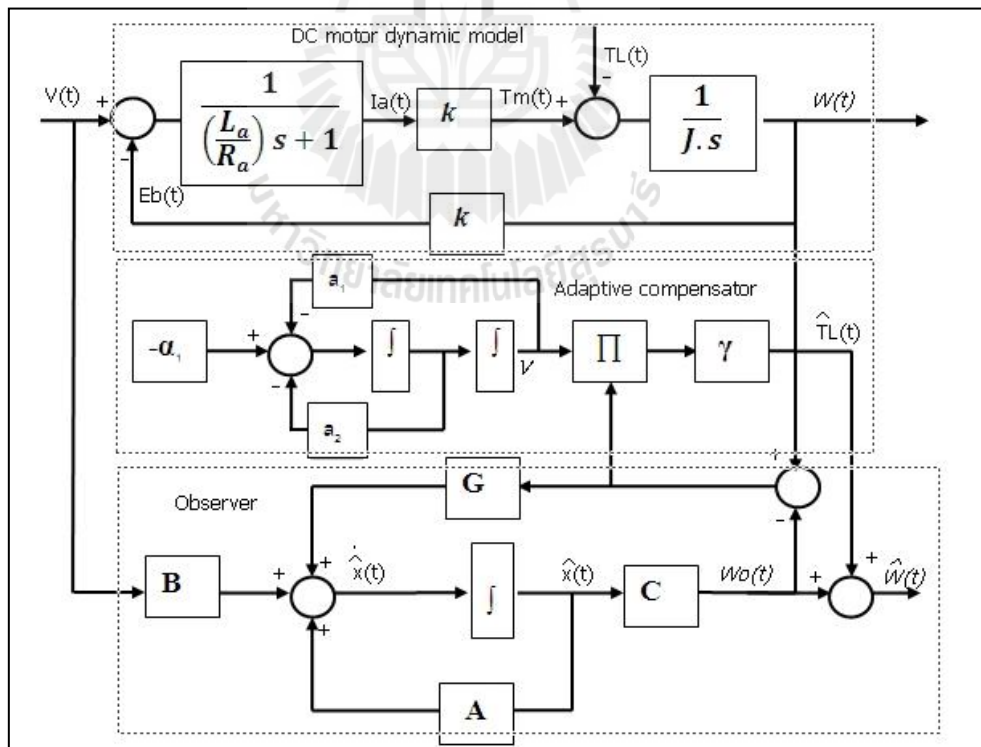
$$a_1 = \left[\frac{R_a b}{L_a J} + \frac{K_b K_t}{L_a J} \right] = 5057.5$$

$$a_2 = \left[\frac{R_a}{L_a} + \frac{b}{J} \right] = 172.8$$

$$\alpha_1 = \frac{R_a}{L_a J} = -172.8$$

โดยระบบจะมีอัตราการปรับตัว $\gamma = 29.3$

ตัวชดเชยแรงบิดแบบปรับค่าได้จะทำงานร่วมกับตัวสังเกต เพื่อให้ตัวสังเกตประมาณค่าได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยจะพิจารณาผลตอบสนองค่าความเร็วรอบ และค่าแรงบิดของระบบมอเตอร์และค่าที่ได้จากการประมาณ ดังนั้นเมื่อนำระบบทั้งหมดมารวมกัน สามารถเขียนได้ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แผนภาพบล็อกของระบบและตัวสังเกตร่วมกับตัวชดเชยแรงบิด

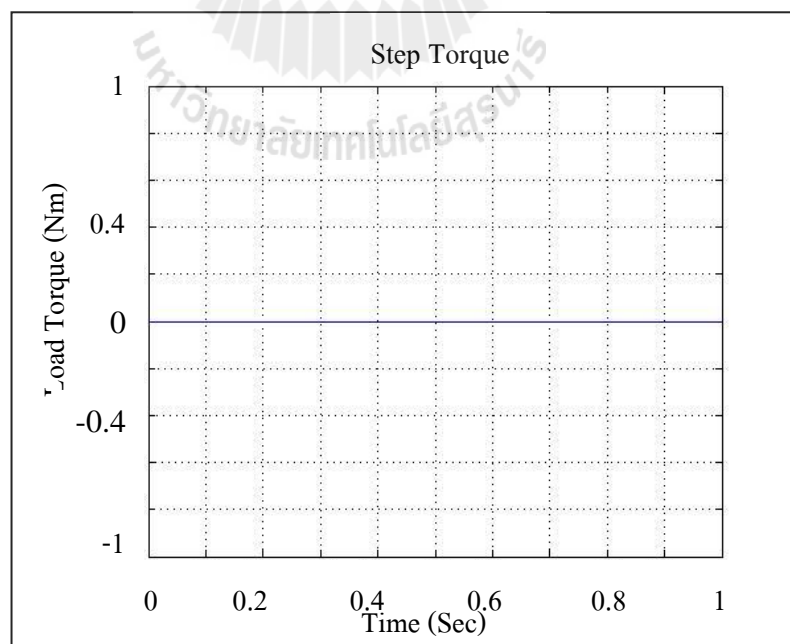
4.4 การจำลองสถานการณ์เมื่อมีค่าแรงบิดภายนอกเข้ามาในระบบ

การจำลองสถานการณ์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของการประมาณของตัวสังเกต และตัวชดเชยแรงบิดแบบปรับค่าได้ เมื่อมีแรงบิดจากภายนอกเข้ามาในระบบมอเตอร์ในรูปแบบต่าง ๆ โดยแสดงผลการตอบสนองของความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ได้จากการวัดเปรียบเทียบกับความเร็วรอบที่ได้จากการประมาณของตัวสังเกต หลังจากนั้นจะทำการเพิ่มตัวชดเชยแรงบิดแบบปรับค่าได้เข้าไปร่วมทำงานกับตัวสังเกตแล้วพิจารณาประสิทธิภาพในการประมาณค่าความเร็วรอบของตัวสังเกตอีกครั้ง นอกจากนี้จะทำการเปรียบเทียบแรงบิดที่เข้าไปในระบบกับแรงบิดที่ประมาณได้จากตัวชดเชยแรงบิดในสถานะต่าง ๆ โดยจะจำลองสถานการณ์ 3 กรณีดังนี้

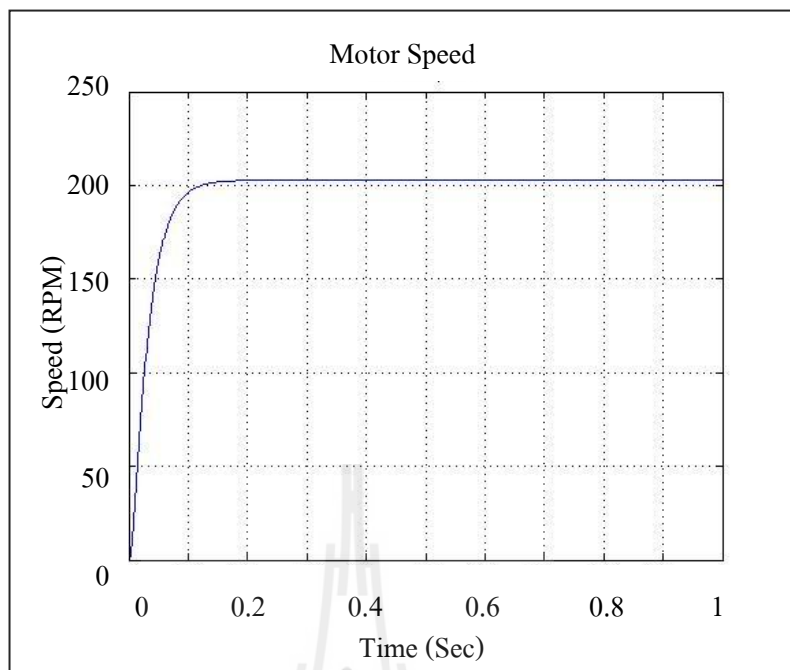
- 1) เมื่อระบบไม่มีแรงบิดเข้ามาในระบบ
- 2) เมื่อระบบถูกรบกวนด้วยแรงบิดภายนอกแบบคงที่
- 3) เมื่อระบบถูกรบกวนด้วยแรงบิดภายนอกแบบเปลี่ยนแปลง

ซึ่งจำลองระบบดังกล่าวจะทำการจำลองด้วย MATLAB โดยจะนำค่าตัวแปรทั้งหมดที่ได้จากสมการมาเขียนเป็นระบบจำลองเพื่อดูผลการทดสอบ และทำการแก้ไขข้อผิดพลาดที่จะเกิดขึ้นก่อนที่นำไปสร้างเป็นระบบจริง โดยระบบจะทำการป้อนไฟที่ 5.6 โวลต์ และสังเกตค่าความเร็วรอบที่เปลี่ยนไปเมื่อระบบถูกรบกวนในกรณีต่าง ๆ ดังนี้

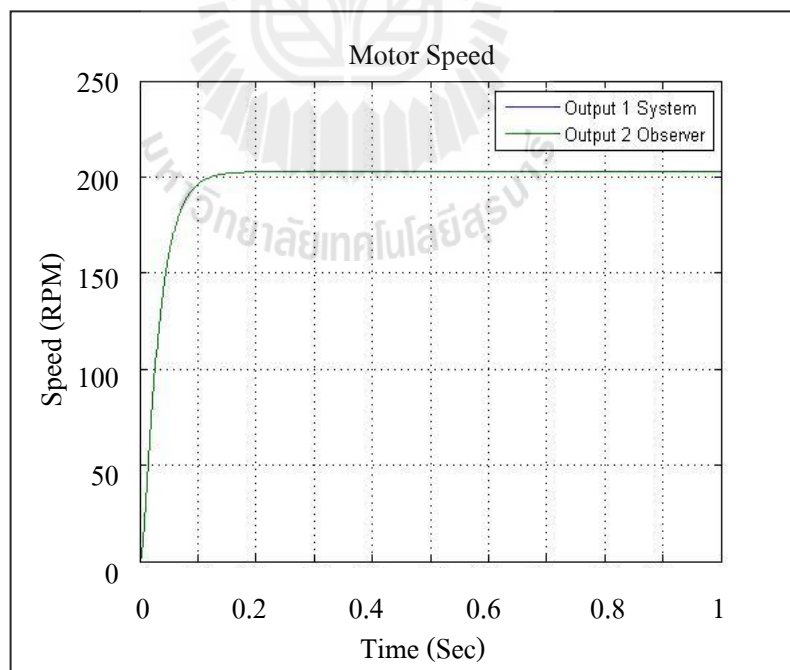
4.4.1 กรณีที่ 1 เมื่อระบบไม่มีมีแรงบิดเข้ามาในระบบ



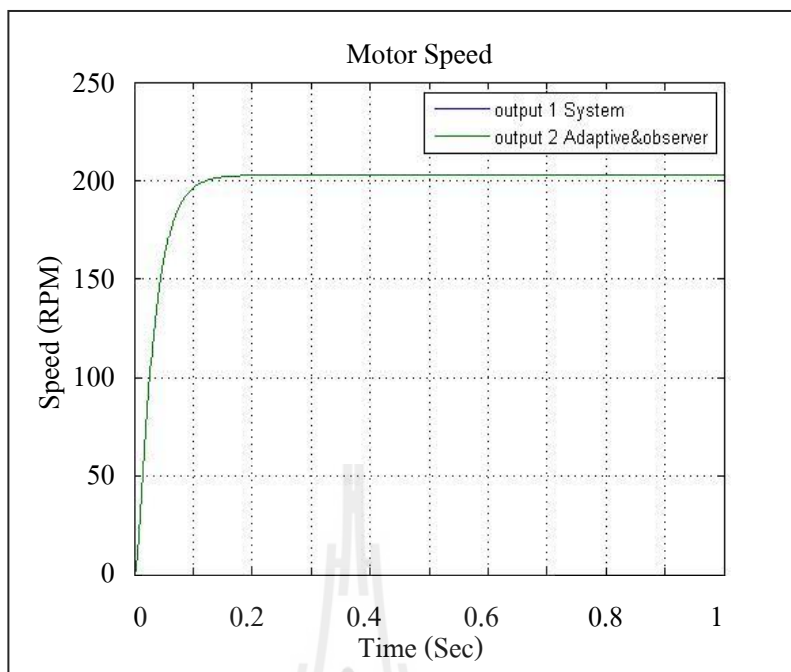
รูปที่ 4.3 แสดงค่า $T_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 1



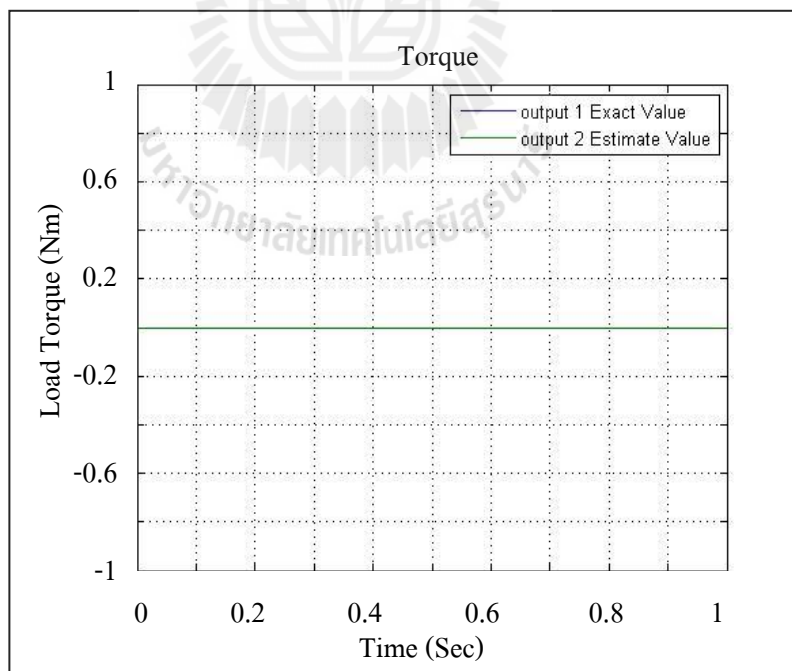
รูปที่ 4.4 ค่า $\omega(t)$ สำหรับกรณีที่ 1 (ระบบ)



รูปที่ 4.5 ผลการตอบสนอง $\omega(t)$ และ $\hat{\omega}(t)$ สำหรับกรณีที่ 1 (ตัวสังเกต)



รูปที่ 4.6 ผลการตอบสนอง $\omega(t)$ และ $\hat{\omega}(t)$ กรณีที่ 1 (ตัวสังเกตร่วมตัวชดเชย)

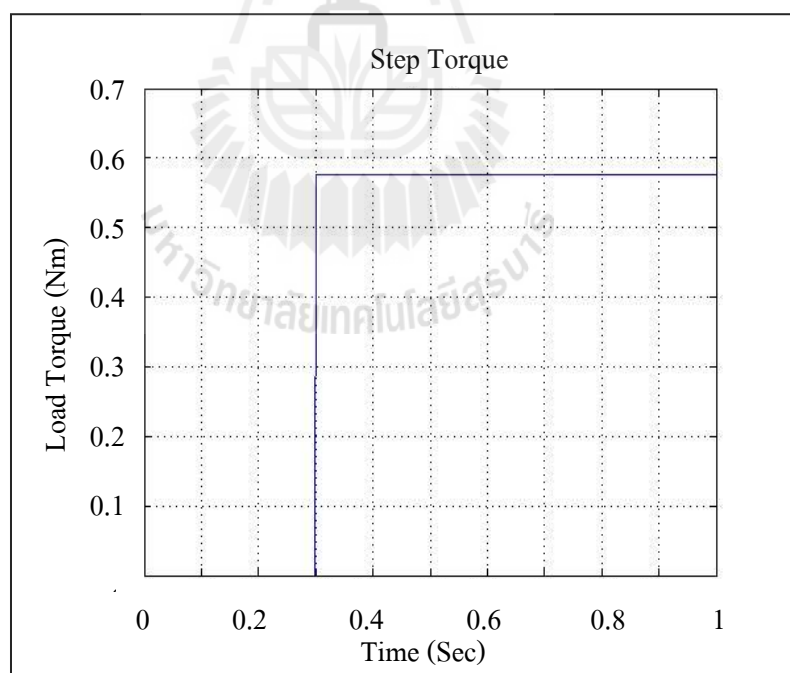


รูปที่ 4.7 ผลการตอบสนองค่า $T_L(t)$ และ $\hat{T}_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 1

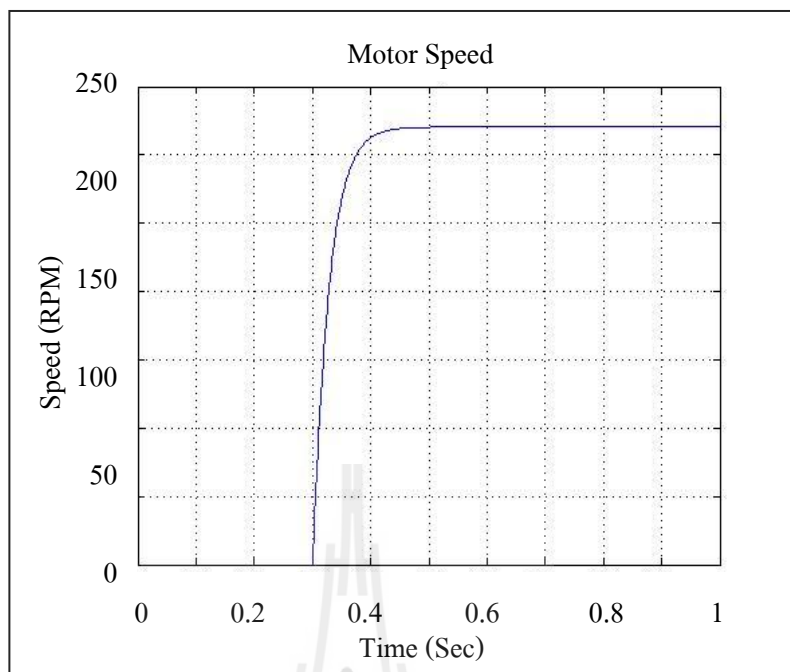
จากรูปที่ 4.3 เมื่อไม่มีแรงบิดจากภายนอกเข้ามารบกวนระบบมอเตอร์ความเร็วรอบของมอเตอร์จะมีค่าคงที่ ดังรูปที่ 4.4 หลังจากนั้นจะทำการเปรียบเทียบความเร็วรอบระหว่างระบบมอเตอร์และค่าที่ได้จากการประมาณของตัวสังเกตจะเห็นได้ว่า ตัวสังเกตสามารถประมาณค่าความเร็วรอบได้อย่างแม่นยำมีค่าใกล้เคียงกับระบบจริง ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และเมื่อเพิ่มตัวชดเชยแรงบิดแบบปรับตัวได้ให้กับตัวสังเกตการประมาณค่าความเร็วรอบของตัวสังเกตสามารถประมาณค่าความเร็วรอบได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 เมื่อนำค่าแรงบิดที่ได้จากการประมาณของตัวชดเชยแรงบิดภายนอกมาเปรียบเทียบกับค่าแรงบิดที่เข้ามารบกวนระบบ ค่าแรงบิดจะมีค่าเป็นศูนย์ ดังรูปที่ 4.7

จะเห็นได้ว่าการประมาณค่าของตัวสังเกตจะสามารถประมาณค่าได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อไม่มีแรงบิดเข้ามารบกวนมอเตอร์ หลังจากนั้นจะทำการจำลองสถานการณ์โดยให้แรงบิดเข้ามารบกวนมอเตอร์ในรูปแบบต่าง ๆ แล้วสังเกตผลของการประมาณค่าของตัวสังเกต และตัวสังเกตร่วมกับตัวชดเชยแรงบิด

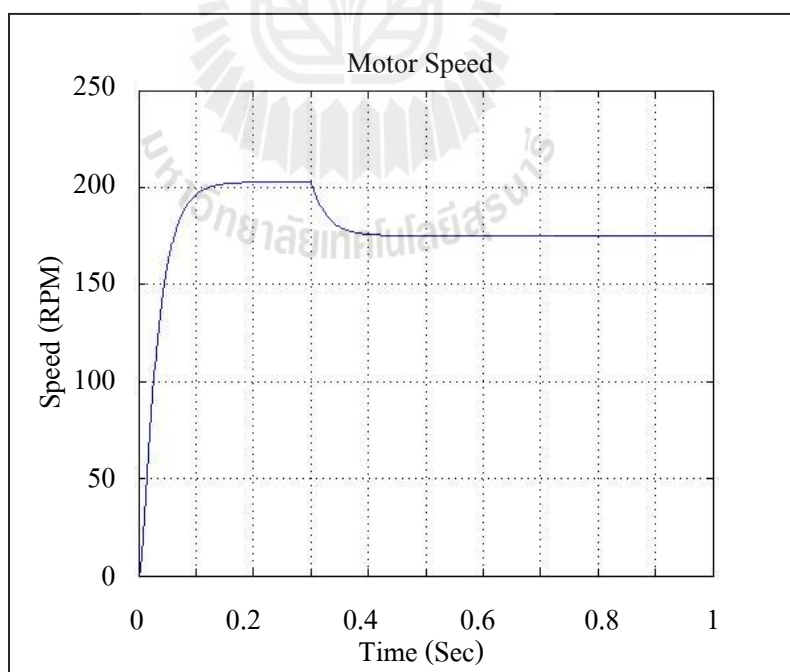
4.4.2 กรณีที่ 2 เมื่อระบบถูกรบกวนด้วยแรงบิดภายนอกแบบคงที่



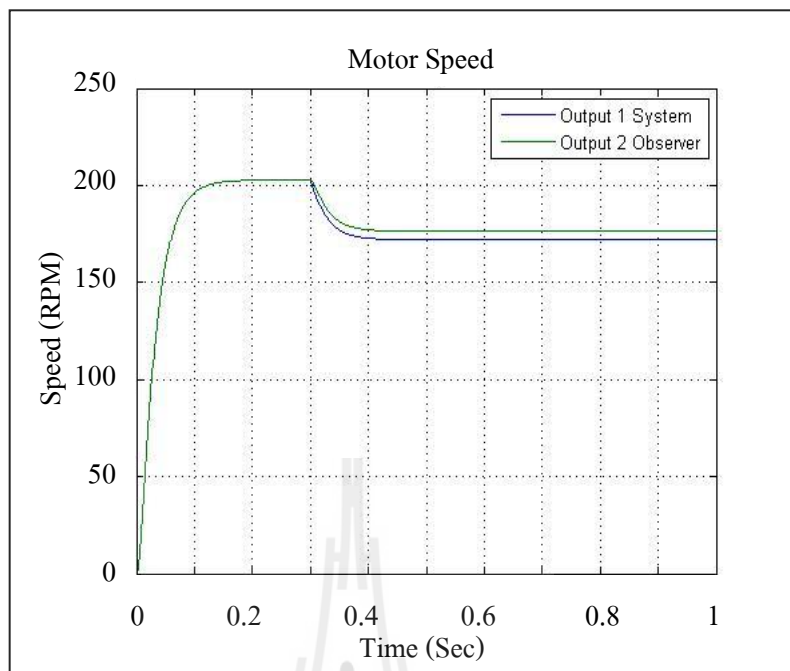
รูปที่ 4.8 ค่า $T_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 2



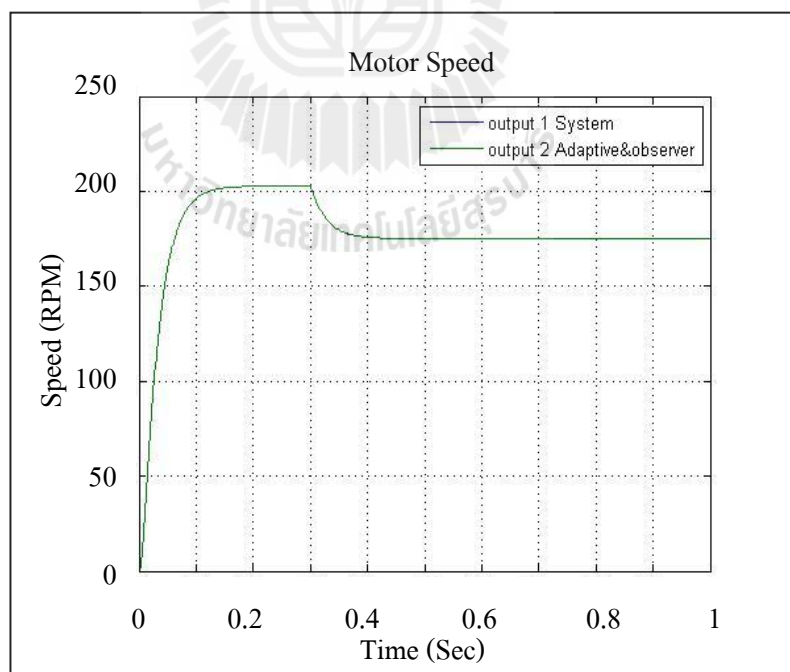
รูปที่ 4.9 ผลการตอบสนองค่า $T_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 2



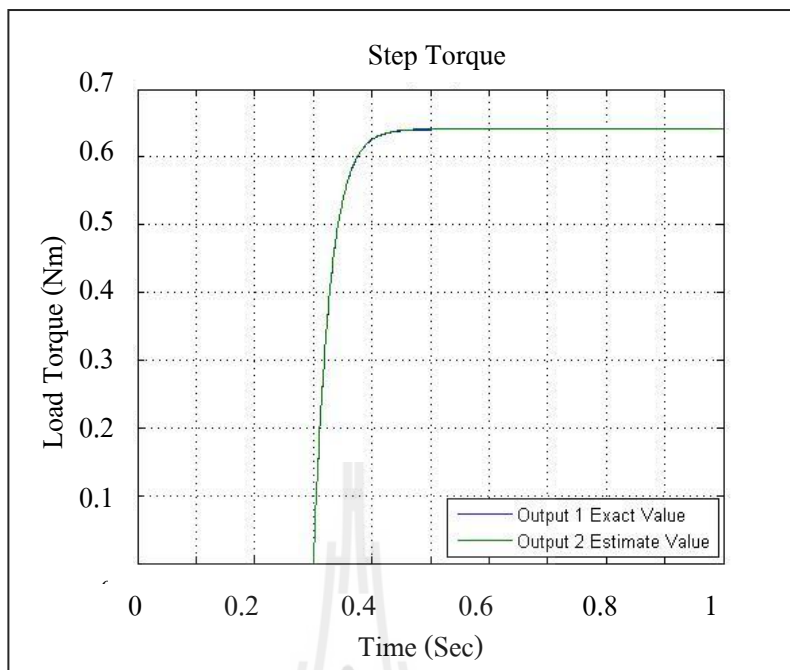
รูปที่ 4.10 ผลการตอบสนองค่า $\omega(t)$ สำหรับกรณีที่ 2 (ระบบ)



รูปที่ 4.11 ผลการตอบสนอง $\omega(t)$ และ $\hat{\omega}(t)$ สำหรับกรณีที่ 2 (ตัวสังเกต)



รูปที่ 4.12 ผลการตอบสนอง $\omega(t)$ และ $\hat{\omega}(t)$ สำหรับกรณีที่ 2 (ตัวสังเกตร่วมตัวชดเชย)

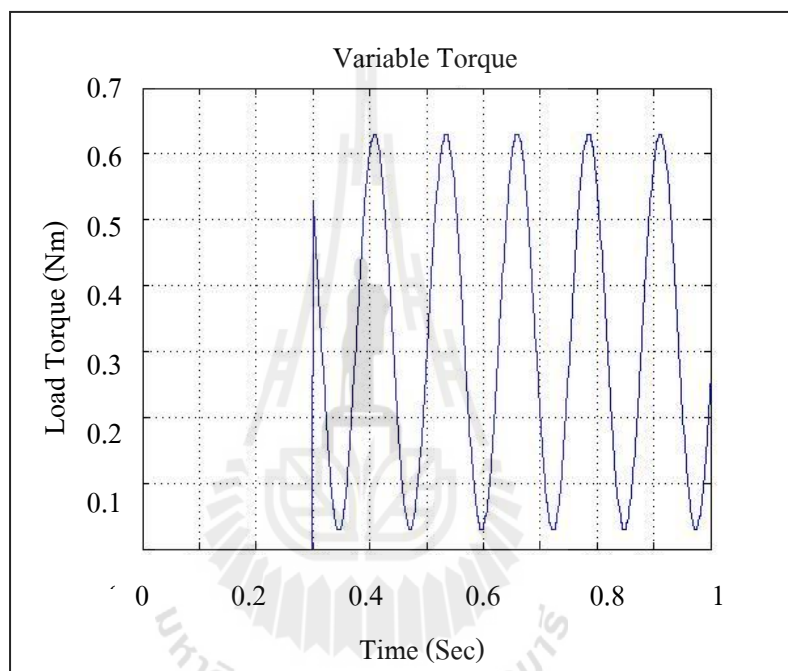


รูปที่ 4.13 ผลการตอบสนอง $T_L(t)$ และ $T_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 2

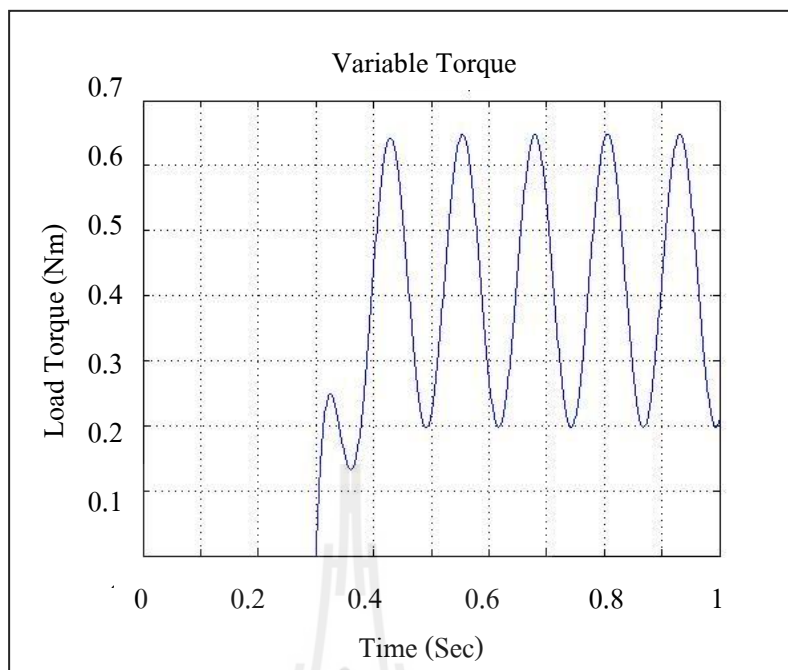
จากรูปที่ 4.8 เมื่อมีแรงบิดเข้ามาในระบบมอเตอร์คงที่แบบขั้นบันไดที่เวลา 0.3 วินาที ผลการตอบสนองของแรงบิดจะมีค่าดังรูปที่ 4.9 ทำให้ความเร็วรอบของระบบมอเตอร์มีค่าลดลงหลังจากที่มีค่าแรงบิดจากภายนอกเข้ามารบกวน ดังรูปที่ 4.10 เมื่อนำความเร็วรอบของระบบมอเตอร์มาเปรียบเทียบกับความเร็วรอบที่ได้จากการประมาณค่าของตัวสังเกตจะสังเกตได้ว่า ในช่วงที่ไม่มีแรงบิดจากภายนอกเข้ามารบกวนตัวสังเกตสามารถประมาณค่าความเร็วรอบได้อย่างมีประสิทธิภาพ หลังจากเวลา 0.3 วินาที เมื่อมีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนมอเตอร์ความเร็วรอบของระบบมอเตอร์และความเร็วรอบที่ได้จากการประมาณจะมีค่าลดลง และตัวสังเกตจะประมาณความเร็วรอบผิดพลาด ดังรูปที่ 4.11 หลังจากนั้นทำการเพิ่มตัวชดเชยแรงบิดเข้าทำงานร่วมกับตัวสังเกตจะเห็นได้ว่าความเร็วรอบที่ได้จากการประมาณแม่นยำและใกล้เคียงกับระบบมอเตอร์ยิ่งขึ้น ดังรูปที่ 4.12 เมื่อนำค่าแรงบิดภายนอกที่เข้ามารบกวนระบบมอเตอร์เปรียบเทียบกับค่าแรงบิดที่ได้จากการประมาณ แสดงให้เห็นว่าตัวชดเชยสามารถประมาณค่าแรงบิดคงที่แบบขั้นบันไดที่เข้ามารบกวนระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังแสดงในรูปที่ 4.13

4.4.3 กรณีที่ 3 เมื่อระบบถูกรบกวนด้วยแรงบิดภายนอกแบบเปลี่ยนแปลง

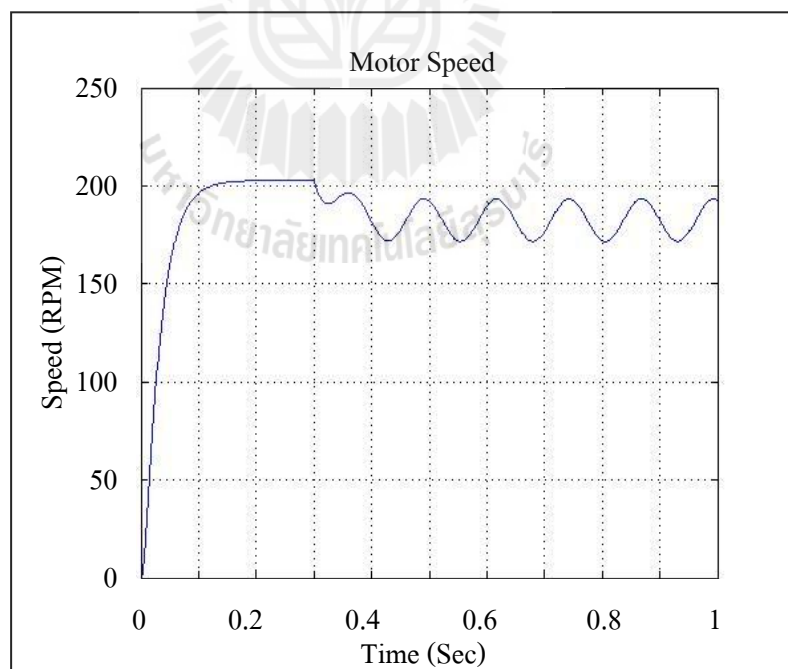
ทำการจำลองสถานการณ์เมื่อมีแรงบิดแบบเปลี่ยนแปลงในรูปคลื่นไซน์เข้ามา รบกวนมอเตอร์ที่เวลาที่เวลา 0.3 วินาที โดยรูปแบบที่เข้ามารบกวนจะทำให้การประมาณค่า ความเร็วรอบขาค้างขึ้นเพราะมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงบิดที่เข้ามารบกวนอยู่ตลอดเวลา โดยจะทำการพิจารณาผลการตอบสนองความเร็วรอบของมอเตอร์ หลังจากนั้นจะทำการเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพการประมาณของตัวสังเกต และตัวสังเกตทำงานร่วมกับตัวชดเชยแรงบิด



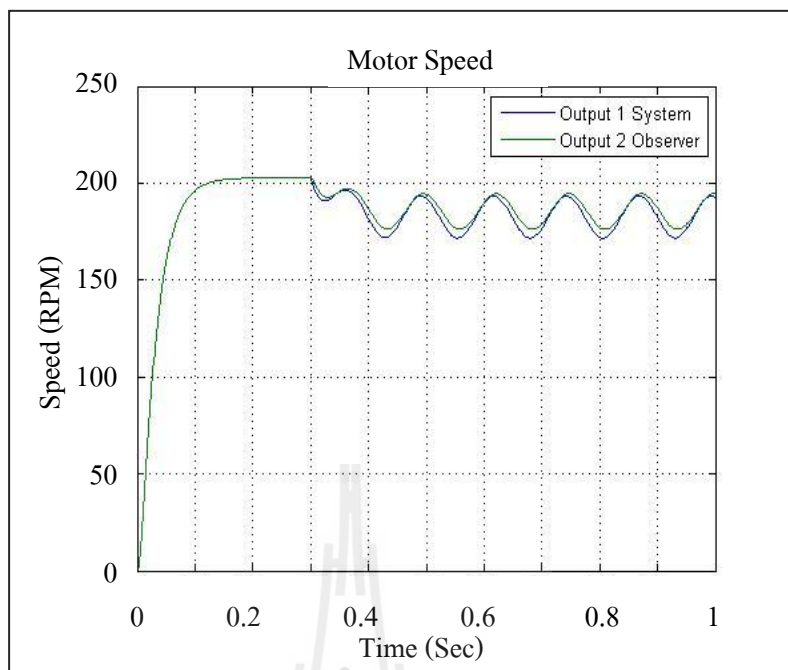
รูปที่ 4.14 ค่า $T_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 3



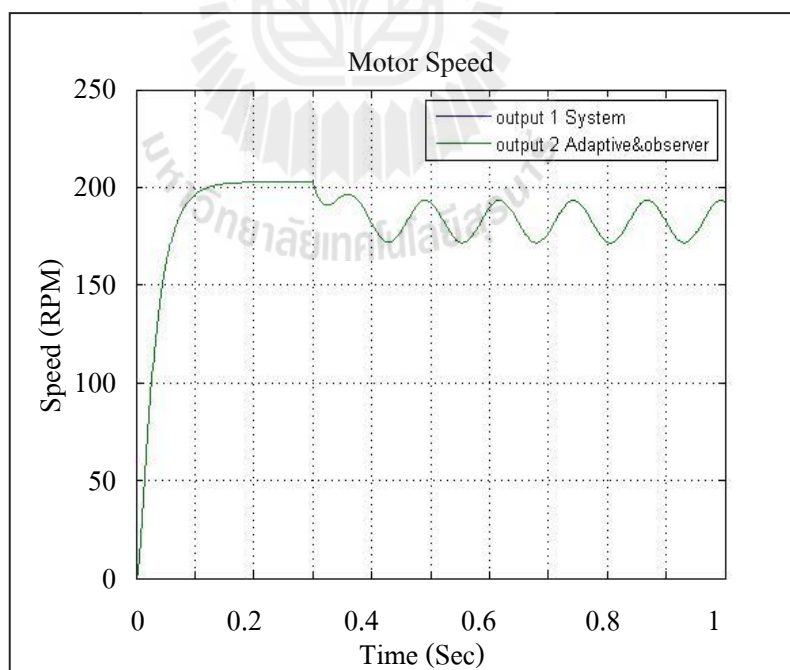
รูปที่ 4.15 ผลการตอบสนองค่า $T_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 3



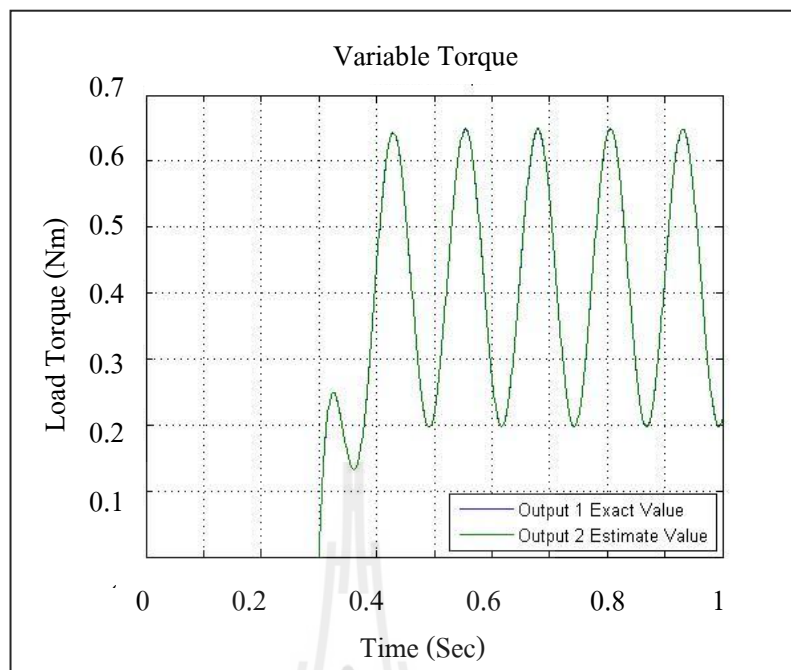
รูปที่ 4.16 ผลการตอบสนอง $\omega(t)$ สำหรับกรณีที่ 3 (ระบบ)



รูปที่ 4.17 ผลการตอบสนอง $\omega(t)$ และ $\hat{\omega}(t)$ สำหรับกรณีที่ 3 (ตัวสังเกต)



รูปที่ 4.18 ผลการตอบสนอง $\omega(t)$ และ $\hat{\omega}(t)$ สำหรับกรณีที่ 3 (ตัวสังเกตร่วมตัวชดเชย)

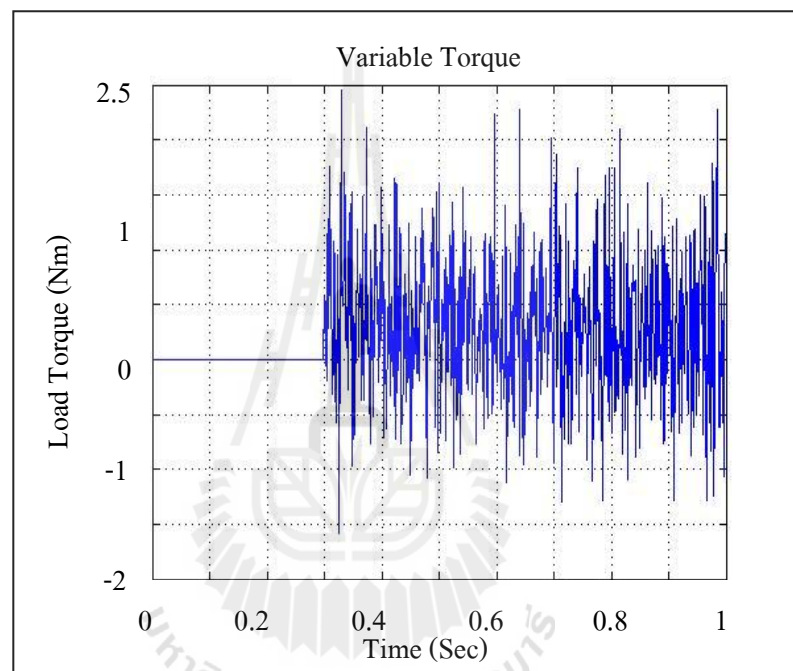


รูปที่ 4.19 ผลการตอบสนอง $T_L(t)$ และ $T_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 3

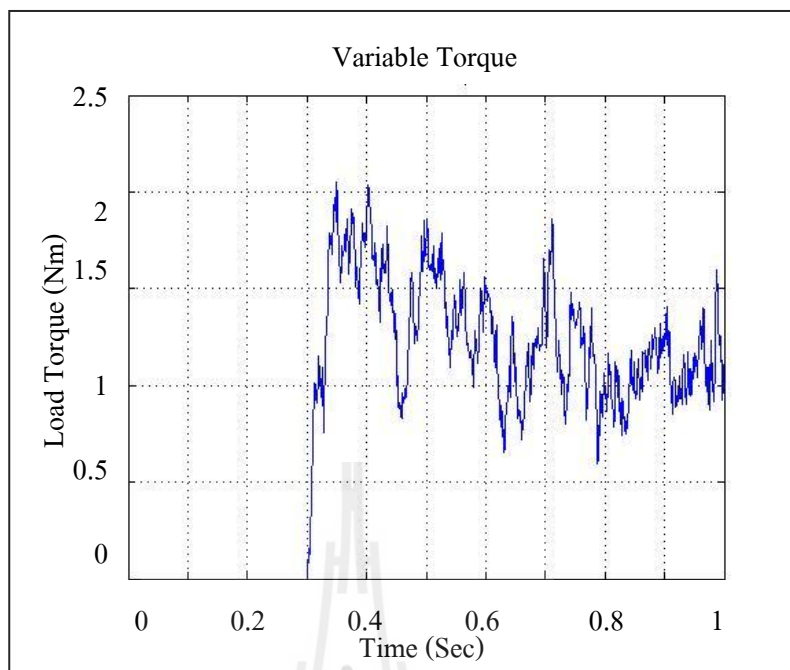
จากรูปที่ 4.14 เมื่อมีแรงบิดเข้ามารบกวนระบบมอเตอร์แบบเปลี่ยนแปลงในรูปคลื่นไซน์ที่เวลา 0.3 วินาที ผลการตอบสนองของแรงบิดจะมีค่าดังรูปที่ 4.15 ทำให้ความเร็วรอบของระบบมอเตอร์มีค่าลดลง ดังรูปที่ 4.16 เมื่อเปรียบเทียบความเร็วรอบระหว่างระบบมอเตอร์และค่าที่ได้จากการประมาณของตัวสังเกต เมื่อระบบถูกรบกวนด้วยแรงบิดภายนอกแบบเปลี่ยนแปลง สังเกตได้ว่าตัวสังเกตจะมีความผิดพลาดในการประมาณความเร็วรอบ หลังจากเวลา 0.3 วินาที เมื่อมีแรงบิดเข้ามารบกวน ดังรูปที่ 4.17 หลังจากนั้นทำการเพิ่มตัวชดเชยแรงบิดให้กับตัวสังเกตแล้วเปรียบเทียบความเร็วรอบของระบบจึงมอเตอร์และค่าที่ได้จากการสังเกต จะสังเกตได้ว่าตัวสังเกตสามารถประมาณความเร็วรอบได้แม่นยำและมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ไม่ว่าจะก่อนหรือหลังจากที่มีแรงบิดเข้ามารบกวนระบบ ดังรูปที่ 4.18 เมื่อเปรียบเทียบค่าแรงบิดที่เข้ามารบกวนกับค่าที่ได้จากการประมาณระบบสามารถประมาณค่าแรงบิดที่เข้ามารบกวนได้อย่างมีประสิทธิภาพและแม่นยำ แม้ว่าแรงบิดดังกล่าวจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ดังแสดงในรูป 4.19

4.5 แรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนระบบมอเตอร์ที่ยากต่อการประมาณ

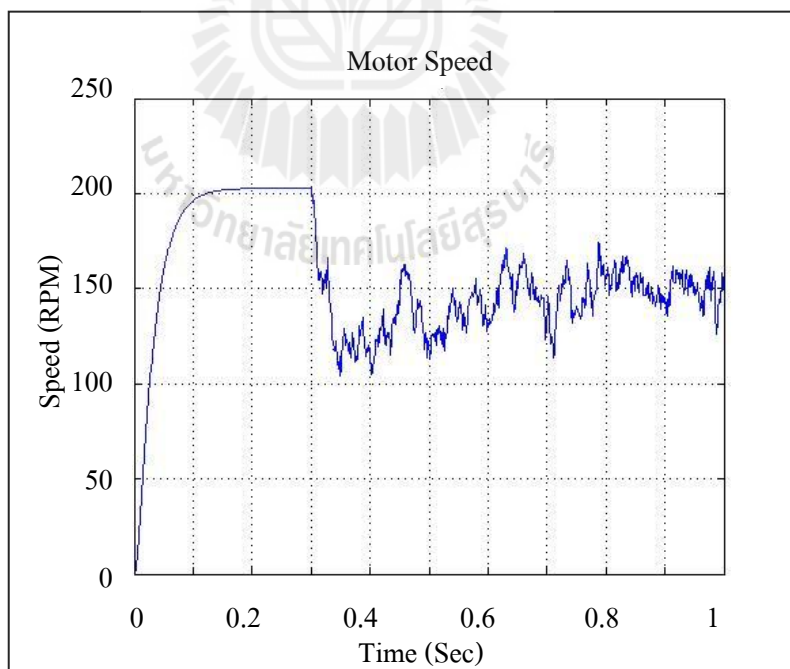
ในความเป็นจริงค่าแรงบิดที่เข้ามารบกวนระบบจะไม่มีรูปแบบที่แน่นอน มีการเพิ่มหรือลด ได้ทันทีที่ไม่สามารถคาดเดาได้ ในกรณีดังกล่าวจะยากต่อการประมาณ ดังนั้นจึงได้จำลองสถานการณ์ดังกล่าวขึ้นเพื่อดูผลตอบสนองการทำงานของตัวสังเกตร่วมกับตัวชดเชยแรงบิด โดยจะทำการพิจารณาผลการตอบสนองความเร็วรอบของมอเตอร์ หลังจากนั้นจะทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการประมาณค่าของตัวสังเกต และตัวสังเกตทำงานร่วมกับตัวชดเชยแรงบิด



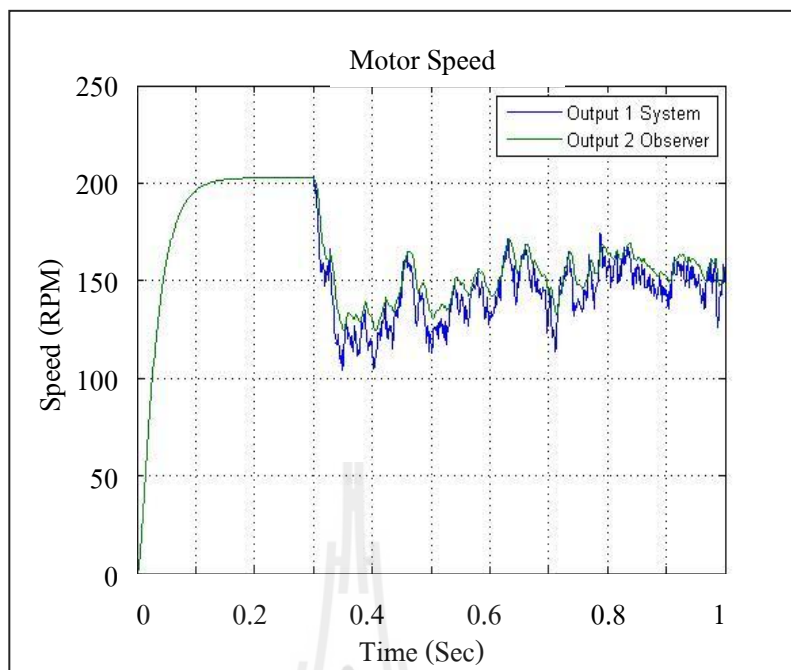
รูปที่ 4.20 ค่า $T_L(t)$ กรณีแรงบิดไม่มีรูปแบบที่แน่นอน



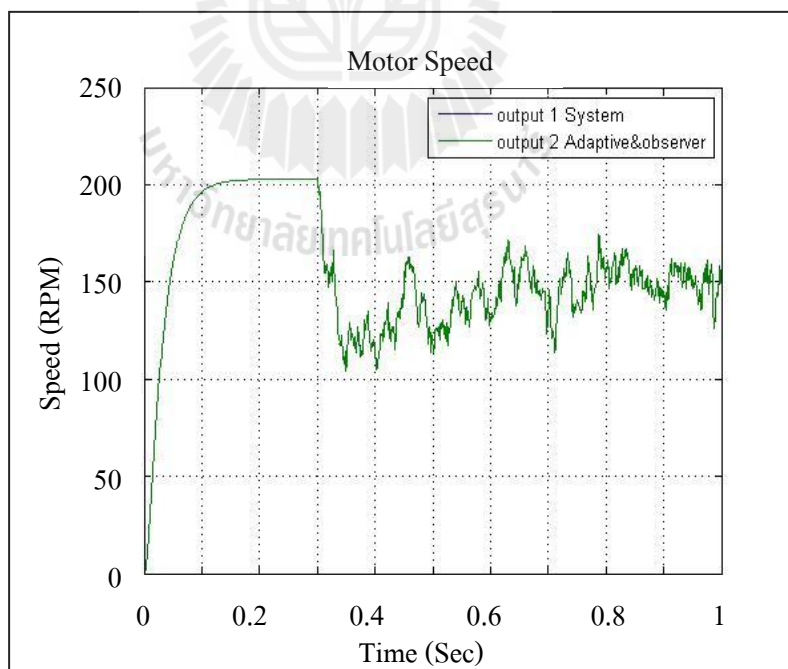
รูปที่ 4.21 ผลการตอบสนองค่า $T_L(t)$ กรณีแรงบิดไม่มีรูปแบบที่แน่นอน (ระบบ)



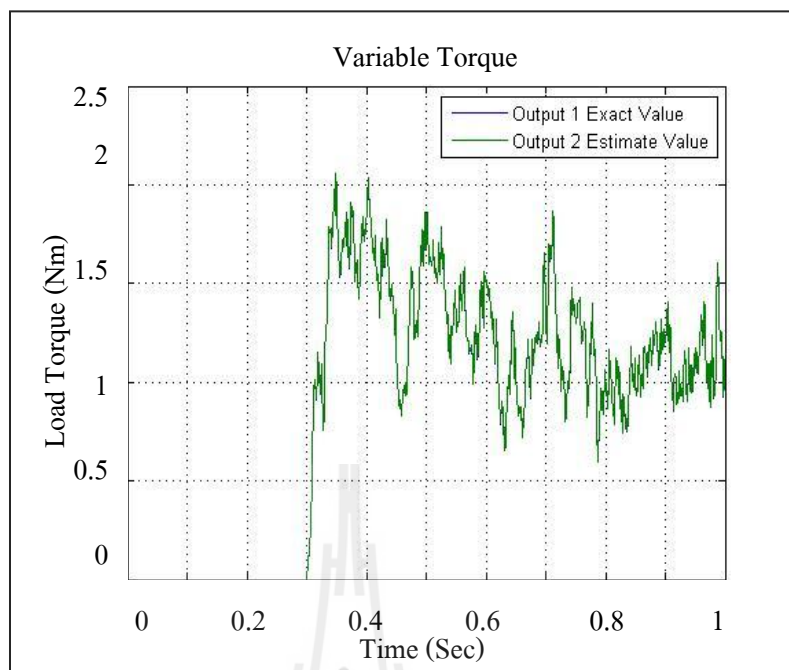
รูปที่ 4.22 ผลการตอบสนองค่า $\omega(t)$ กรณีแรงบิดไม่มีรูปแบบที่แน่นอน (ระบบ)



รูปที่ 4.23 ผลการตอบสนองค่า $\omega(t)$ และ $\omega(t)$ (ตัวสังเกต)



รูปที่ 4.24 ผลการตอบสนองค่า $\omega(t)$ และ $\omega(t)$ (ตัวสังเกตร่วมกับตัวชดเชย)



รูปที่ 4.25 ผลการตอบสนอง $T_L(t)$ และ $T_L(t)$ กรณีแรงบิดไม่มีรูปแบบที่แน่นอน

จากรูปที่ 4.20 จะสังเกตได้ว่าเมื่อมีแรงบิดเข้ามารบกวนระบบมอเตอร์ที่เวลา 0.3 วินาที ผลการตอบสนองของแรงบิดจะมีค่าดังรูปที่ 4.21 ทำให้ความเร็วรอบของระบบมอเตอร์มีค่าลดลง ดังรูปที่ 4.22 และตัวสังเกตจะประมาณความเร็วรอบผิดพลาดเมื่อมีแรงบิดเข้ามารบกวนระบบมอเตอร์ หลังจากที่มีแรงบิดเข้ามารบกวน แสดงดังรูปที่ 4.23 หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มตัวชดเชยร่วมทำงานกับตัวสังเกตเมื่อทำการเปรียบเทียบความเร็วรอบระบบจริงและค่าที่ได้จากการสังเกต ดังรูปที่ 4.24 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนที่เวลา 0.3 วินาที ถึงแม้ว่าโหลดที่เข้ามารบกวนระบบ จะยากต่อการประมาณเมื่อเพิ่มตัวชดเชยเข้าไปพร้อมกับตัวสังเกตตัวสังเกตสามารถประมาณค่าความเร็วรอบได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อค่าแรงบิดจากภายนอกที่เข้ามารบกวนมอเตอร์มาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการประมาณแรงบิดของตัวชดเชยจะสังเกตได้ว่าตัวชดเชยแรงบิดแบบปรับค่าได้สามารถประมาณค่าแรงบิดที่เข้ามารบกวนอย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ ดังรูปที่ 4.25

4.6 สรุป

จากผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าเมื่อไม่มีแรงบิดเข้าไปรบกวนระบบ ตัวสังเกตประมาณค่าความเร็วรอบได้ถูกต้อง และเมื่อมีแรงบิดแบบคงที่ หรือแบบเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ ความเร็วรอบของทั้งสองระบบจะลดลง มีค่าเปลี่ยนไปตามแรงบิดที่เข้ามารบกวนและค่าที่ได้จากการสังเกตจะมีความแตกต่างกับความเร็วรอบของมอเตอร์ ดังนั้นจึงเพิ่มตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ด้วยวิธี Gradient Method ให้ทำงานร่วมกับตัวสังเกต ผลปรากฏว่าการประมาณความเร็วรอบของตัวสังเกตมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น เป็นไปตามสมมุติฐานเบื้องต้นที่ได้ตั้งเอาไว้ และเมื่อนำค่าแรงบิดที่ได้จากการประมาณจากตัวชดเชยแรงบิดมาเปรียบเทียบกับแรงบิดที่เข้ามารบกวนก็สามารถประมาณได้อย่างแม่นยำ ไม่ว่าแรงบิดที่เข้ามาจะมีลักษณะใดๆก็ตาม ดังนั้นเมื่อมีการประมาณค่าแรงบิดอันเนื่องมาจากความหนืดของของเหลวเข้ามารบกวนระบบ ไม่ว่าของเหลวชนิดนั้นจะมีความหนืดแบบคงที่หรือเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ วิธีการดังกล่าวก็สามารถประมาณค่าความหนืดได้อย่างมีประสิทธิภาพ



บทที่ 5

การทดสอบและผลการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง และการประมาณค่าความหนืด

การสร้างเครื่องต้นแบบขึ้นจริงจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมและแสดงผลการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้เทคโคมิเตอร์ (Tachometer) วัดสัญญาณความเร็วรอบของมอเตอร์ออกมาเพื่อนำสัญญาณดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับค่าความเร็วรอบที่ได้จากการประมาณของตัวสังเกต และตัวสังเกตร่วมกับตัวชดเชยแรงบิดแบบปรับค่าได้ เพื่อยืนยันและทดสอบประสิทธิภาพการประมาณค่าสถานะเป็นตามทฤษฎีและให้ผลสอดคล้องกับระบบจำลอง โดยจะทำการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องต้นแบบโดยแบ่งออกเป็น 2 ตอน

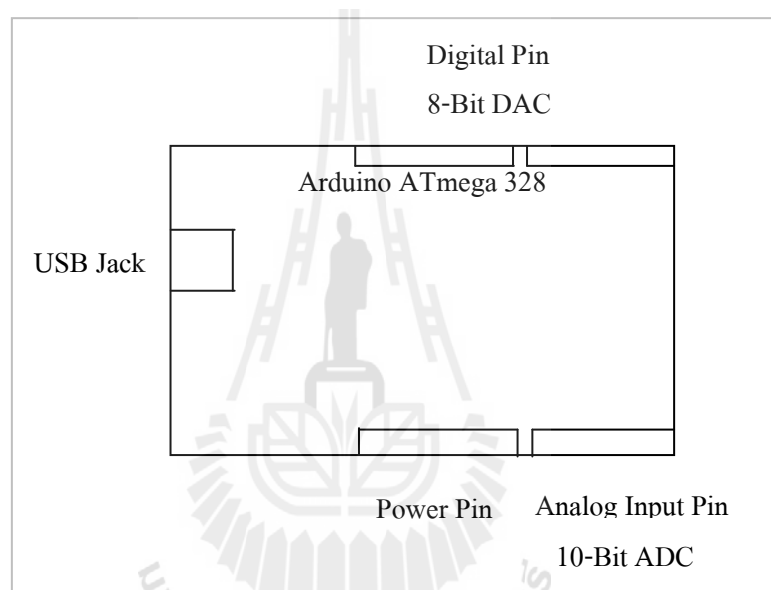
ตอนที่ 1 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการประมาณค่าของตัวสังเกตร่วมกับตัวชดเชยแรงบิดแบบปรับค่าได้ การทดสอบคล้ายกับระบบจำลองในบทที่ 4 เพื่อพิจารณาผลการทดสอบกับระบบจำลอง

ตอนที่ 2 ทำการทดลองประมาณค่าความหนืดของของเหลวโดยจะนำของเหลวที่มีช่วงความหนืดระหว่าง 80–320 cP มาทดสอบ หาความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของเครื่องอ้างอิงมาตรฐานและแรงบิดของเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้น เพื่อเปลี่ยนค่าแรงบิดจากเครื่องต้นแบบให้เป็นความหนืด หลังจากนั้นนำค่าความหนืดที่ได้จากการประมาณเปรียบเทียบกับความหนืดที่ได้จากการวัดจากเครื่องอ้างอิงมาตรฐานเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องต้นแบบ การสอบเทียบค่าความหนืดจะใช้มาตรวัดความหนืด DV-III Ultra Rheometer เป็นตัวอ้างอิงมาตรฐาน

5.1 วิธีการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องต้นแบบ

ตอนที่ 1 ปฏิบัติหาผลทดสอบการประมาณค่าแรงบิด โดยทดสอบประสิทธิภาพการประมาณค่าของตัวสังเกตร่วมกับตัวชดเชยแรงบิดภายนอกแบบปรับค่าได้ โดยให้แรงบิดค่าต่างๆ เข้าไปรบกวนมอเตอร์แล้วนำความเร็วรอบของระบบมอเตอร์มาเปรียบเทียบกับระบบประมาณค่าของตัวสังเกต โดยจะจำลองสถานการณ์ 3 กรณี คล้ายกับระบบจำลอง MATLAB

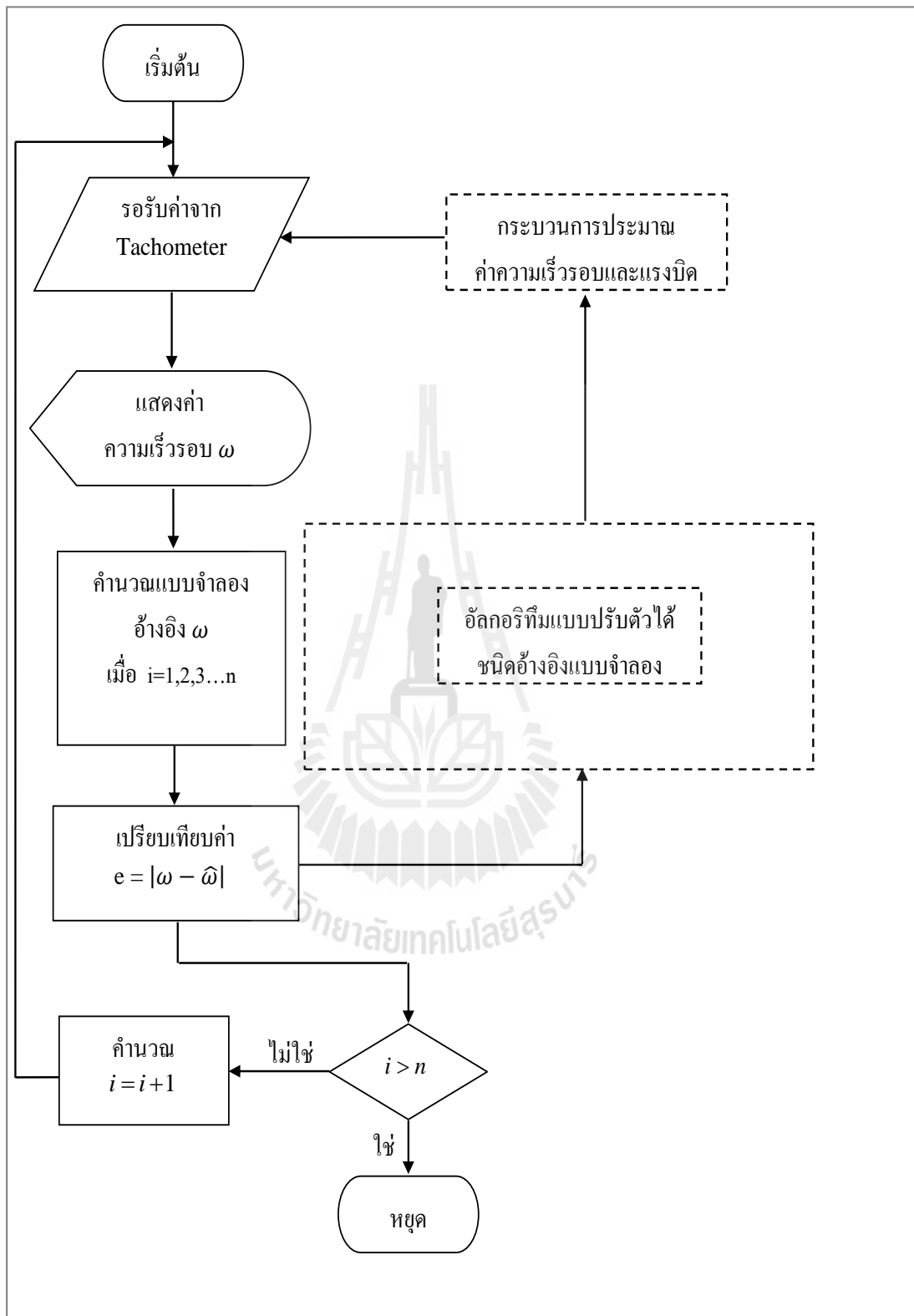
การสร้างเครื่องต้นแบบระบบจริงจำเป็นต้องใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังรูปที่ 5.1 เขียนโปรแกรมเพื่อสั่งการควบคุมและแสดงผลการทำงานของมอเตอร์ และแสดงผลการทำงานของมอเตอร์ โดยเปลี่ยนสัญญาณจากเป็นสัญญาณ Digital Signal นั้นจะถูกเปลี่ยนเป็น Analog Signal โดย Digital to Analog Converter สัญญาณที่ถูกแปลงแล้วจะถูกส่งไปยังบอร์ดเชื่อมต่อ เพื่อทำการขยายสัญญาณเข้าควบคุมมอเตอร์ต่อไป หลังจากนั้นเทค โคมิเตอร์ (Tachometer) วัดสัญญาณความเร็วรอบของมอเตอร์ Analog Signal ไปเป็น Digital Signal ด้วย Analog to Digital Converter เพื่อแปลงสัญญาณเข้าการประมวลผลของไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อทำการแสดงผล



รูปที่ 5.1 Arduino ATmega 328

5.2 โปรแกรมการทำงานของมอเตอร์โดยใช้ระบบควบคุมที่ปรับตัวได้

ในการทดสอบการควบคุมการทำงานของมอเตอร์และการเก็บบันทึกข้อมูลของแรงบิดที่เข้ามาในระบบและความเร็วรอบของมอเตอร์การทำงานในโปรแกรม Arduino 1.0.1 มีขั้นตอนการทำงานดังแสดงดังรูปที่ 5.2 เมื่อเริ่มการทำงานของมอเตอร์จะหมุนอยู่ในของเหลวที่ต้องการวัด และจะทำการเก็บค่าความเร็วรอบของมอเตอร์จากเทค โคมิเตอร์ จากนั้นโปรแกรมจะคำนวณการตอบสนองของแบบจำลองอ้างอิง โดยกำหนดให้ค่าเริ่มต้นของแบบจำลองอ้างอิงเท่ากับค่าแรกที่ได้จากการวัด ถ้ากำหนดให้การวัดในแต่ละรอบใช้เวลา t_c วินาที และระบบมี Sampling Time เท่ากับ t_s วินาที จากนั้นจะเข้าสู่เงื่อนไขการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าความเร็วรอบที่วัดได้กับค่าของแบบจำลองอ้างอิงในการตรวจสอบเงื่อนไขการทำงาน ดังนี้



รูปที่ 5.2 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

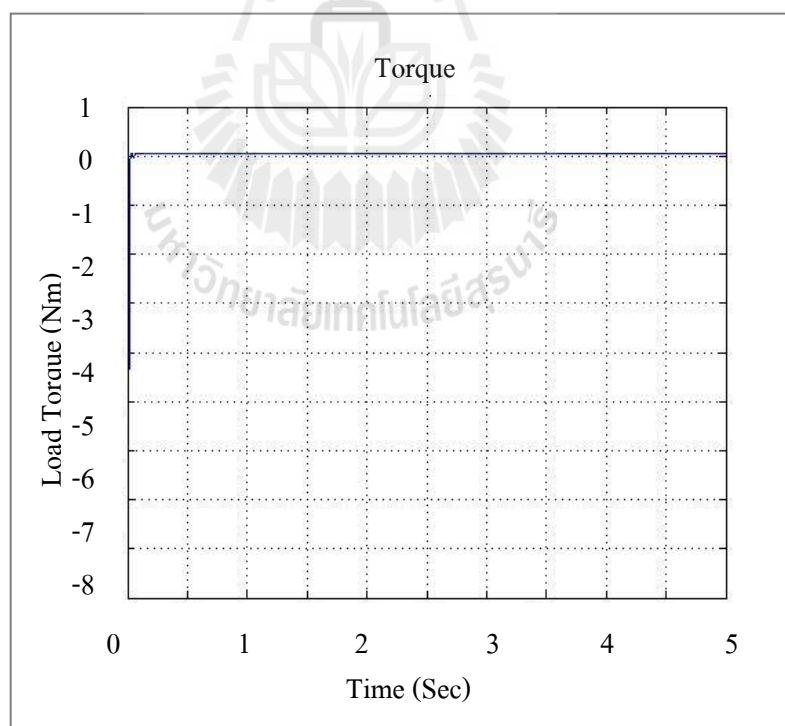
5.3 การทดลองสถานการณ์เมื่อมีค่าแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนระบบ

การทดลองสามารถวัดความเร็วรอบของระบบมอเตอร์จริงได้จากเทค โคมิเตอร์ ดังนั้นจะทำการเปรียบเทียบผลความเร็วรอบที่วัดได้จากระบบจริงจากเทค โคมิเตอร์กับความเร็วรอบที่ได้จากการประมาณของเครื่องต้นแบบ เพื่อดูประสิทธิภาพของการประมาณของตัวสังเกต และตัวชดเชยแรงบิดแบบปรับค่าได้ และแสดงผลการประมาณแรงบิดที่เข้ามารบกวนระบบ การทดสอบประสิทธิภาพของการประมาณของตัวสังเกต และตัวชดเชยแรงบิดแบบปรับค่าได้ โดยจำลองสถานการณ์ 3 กรณีดังนี้

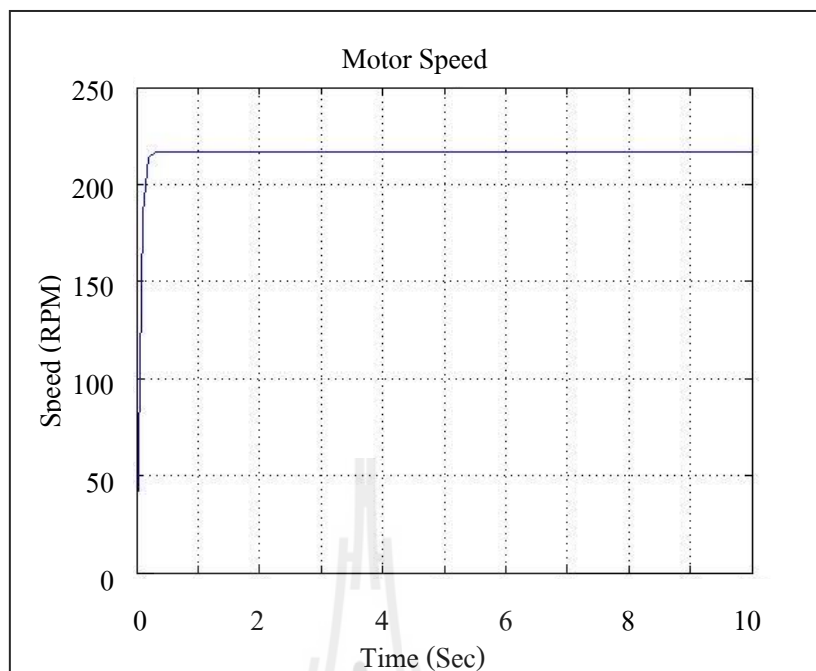
- 1) เมื่อระบบไม่มีแรงบิดเข้ามารบกวนระบบ
- 2) เมื่อระบบถูกรบกวนด้วยแรงบิดภายนอกแบบคงที่
- 3) เมื่อระบบถูกรบกวนด้วยแรงบิดภายนอกแบบเปลี่ยนแปลงค่าต่าง ๆ

โดยระบบจะทำการป้อนไฟที่ 5.6 โวลต์ และตั้งเกตค่าความเร็วรอบที่เปลี่ยนไปเมื่อระบบถูกรบกวนในกรณีต่างๆ

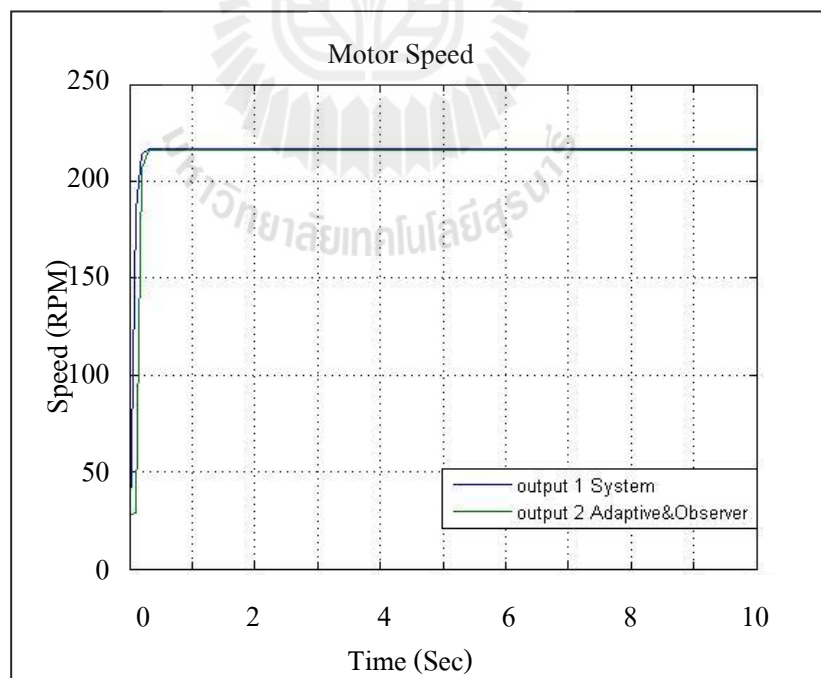
5.3.1 กรณีที่ 1 เมื่อระบบไม่มีแรงบิดเข้ามารบกวนระบบ



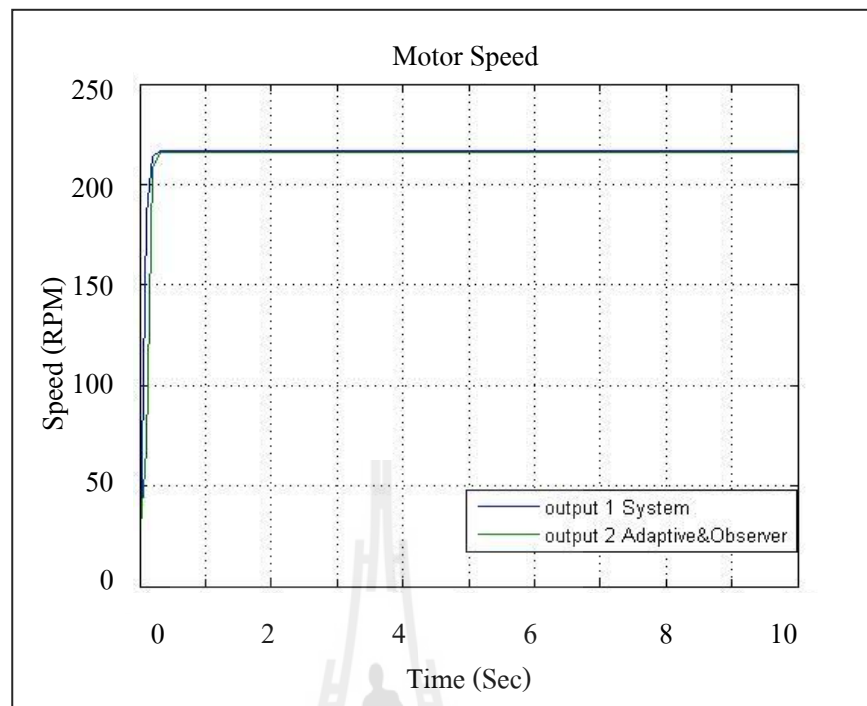
รูปที่ 5.3 ผลการตอบสนองค่า $T_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 1



รูปที่ 5.4 ผลการตอบสนอง $\omega(t)$ สำหรับกรณีที่ 1 (ระบบ)



รูปที่ 5.5 ผลการตอบสนอง $\omega(t)$ และ $\hat{\omega}(t)$ สำหรับกรณีที่ 1 (ตัวสังเกต)

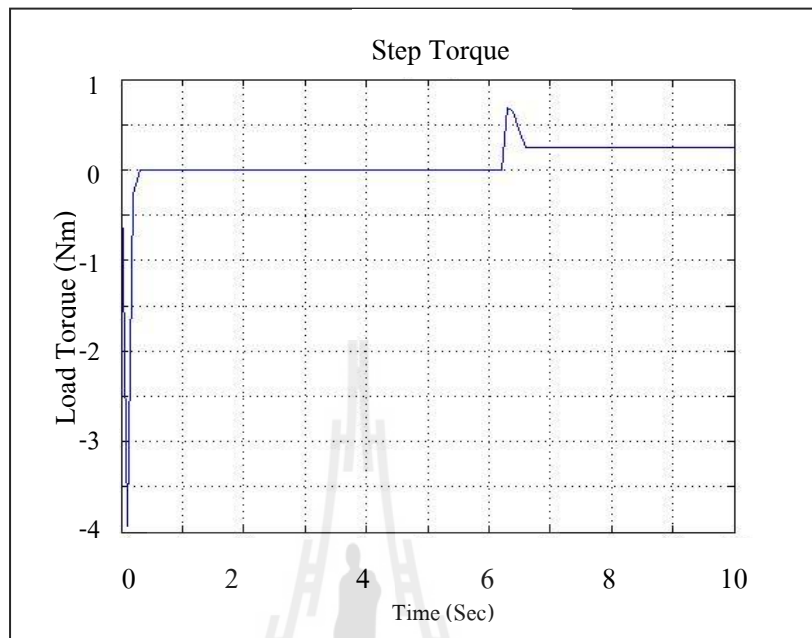


รูปที่ 5.6 ผลการตอบสนอง $\omega(t)$ และ $\hat{\omega}(t)$ สำหรับกรณีที่ 1 (ตัวสังเกตร่วมตัวชดเชย)

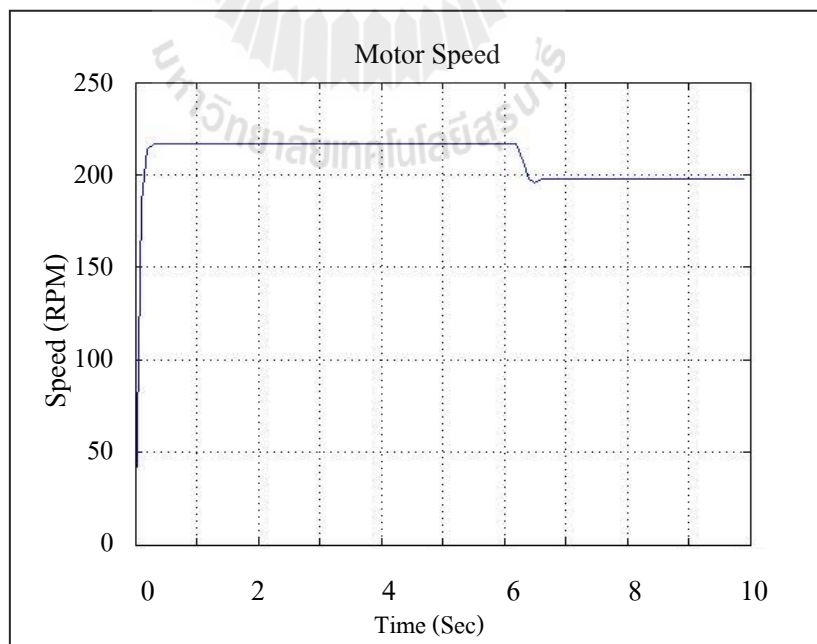
จากรูปที่ 5.3 เมื่อไม่มีแรงบิดจากภายนอกเข้ามารบกวนมอเตอร์ความเร็วรอบของระบบมอเตอร์จะมีค่าคงที่ ดังรูปที่ 5.4 หลังจากนั้นจะทำการเปรียบเทียบความเร็วรอบระหว่างระบบของมอเตอร์และค่าที่ได้จากการสังเกตจะเห็นได้ว่า ตัวสังเกตสามารถประมาณค่าความเร็วรอบได้อย่างแม่นยำมีค่าใกล้เคียงกับระบบจริง เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล ดังแสดงในรูปที่ 5.5 และเมื่อเพิ่มตัวชดเชยแรงบิดให้กับตัวสังเกต เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลการประมาณค่าความเร็วรอบของตัวสังเกตมีประสิทธิภาพในการประมาณที่ดี ดังแสดงในรูปที่ 5.6

จะเห็นได้ว่าการประมาณค่าความเร็วรอบของตัวสังเกต และตัวสังเกตร่วมกับตัวชดเชยแรงบิดจะสามารถประมาณค่าได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อไม่มีแรงบิดเข้ามารบกวนมอเตอร์ หลังจากนั้นจะทำการทดสอบระบบโดยให้แรงบิดเข้ามารบกวนมอเตอร์ในรูปแบบต่างๆ แล้วสังเกตผลของการประมาณค่าของตัวสังเกต และตัวสังเกตร่วมกับตัวชดเชยแรงบิด

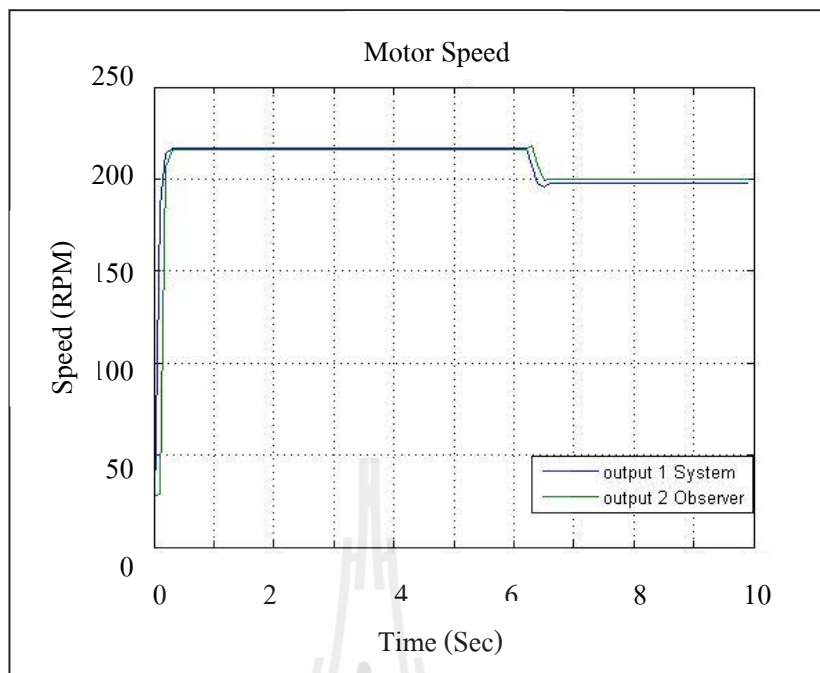
5.3.2 กรณีที่ 2 เมื่อระบบถูกรบกวนด้วยแรงบิดภายนอกแบบคงที่



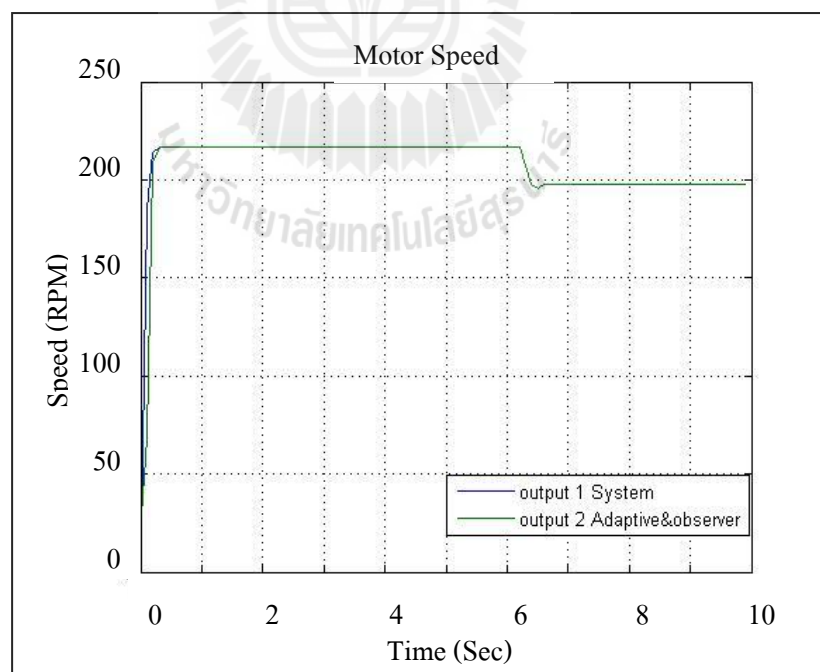
รูปที่ 5.7 ผลการตอบสนองค่า $T_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 2



รูปที่ 5.8 ผลการตอบสนอง $\omega(t)$ สำหรับกรณีที่ 2



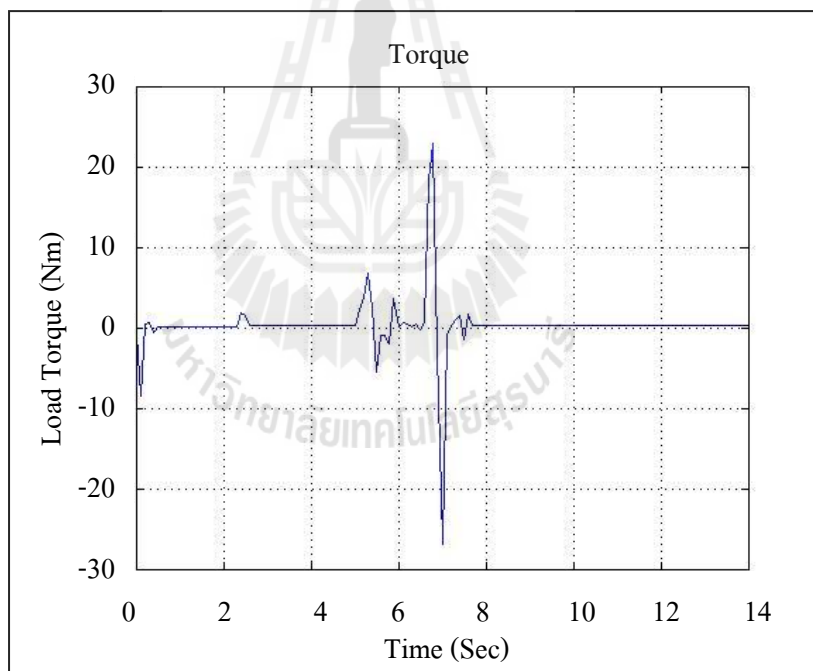
รูปที่ 5.9 ผลการตอบสนอง $\omega(t)$ และ $\hat{\omega}(t)$ สำหรับกรณีที่ 2 (ตัวสังเกต)



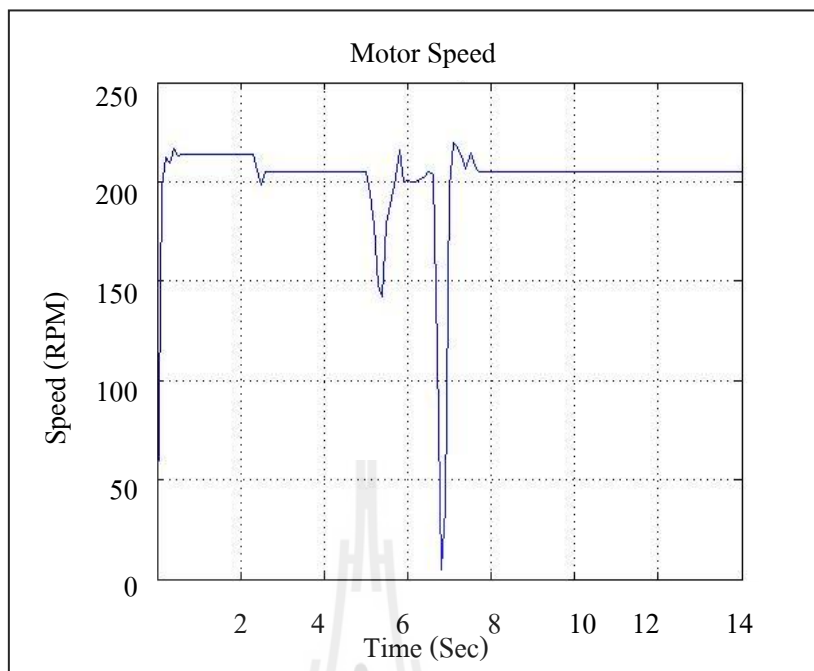
รูปที่ 5.10 ผลการตอบสนอง $\omega(t)$ และ $\hat{\omega}(t)$ สำหรับกรณีที่ 2 (ตัวสังเกตร่วมตัวชดเชย)

เมื่อมีแรงบิดเข้ามารบกวนระบบคั้งที่แบบขั้นบันได ผลการตอบสนองของแรงบิดจะมีค่า ดังรูปที่ 5.7 ทำให้ความเร็วรอบของระบบมอเตอร์มีค่าลดลง ดังรูปที่ 5.8 เมื่อนำความเร็วรอบของ ระบบมอเตอร์มาเปรียบเทียบกับความเร็วรอบที่ได้จากการประมาณค่าของตัวสังเกตจะสังเกตได้ ว่า ในช่วงที่ไม่มีแรงบิดจากภายนอกเข้ามารบกวนตัวสังเกตสามารถประมาณค่าความเร็วรอบได้ อย่างมีประสิทธิภาพแต่หลังจากมีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนการหมุนของมอเตอร์ทำให้ความเร็ว รอบของระบบมอเตอร์และความเร็วรอบที่ได้จากการประมาณของตัวสังเกตมีค่าลดลง และตัวสังเกต จะประมาณความเร็วรอบผิดพลาดเมื่อเทียบกับระบบมอเตอร์ ดังรูปที่ 5.9 หลังจากนั้นทำการเพิ่มตัว ชดเชยแรงบิดเข้าทำงานร่วมกับตัวสังเกตจะสังเกตได้ว่าความเร็วรอบที่ได้จากการประมาณ ใกล้เคียงกับความเร็วรอบระบบมอเตอร์มากยิ่งขึ้นตลอดช่วงการประมาณค่าดังรูปที่ 5.10

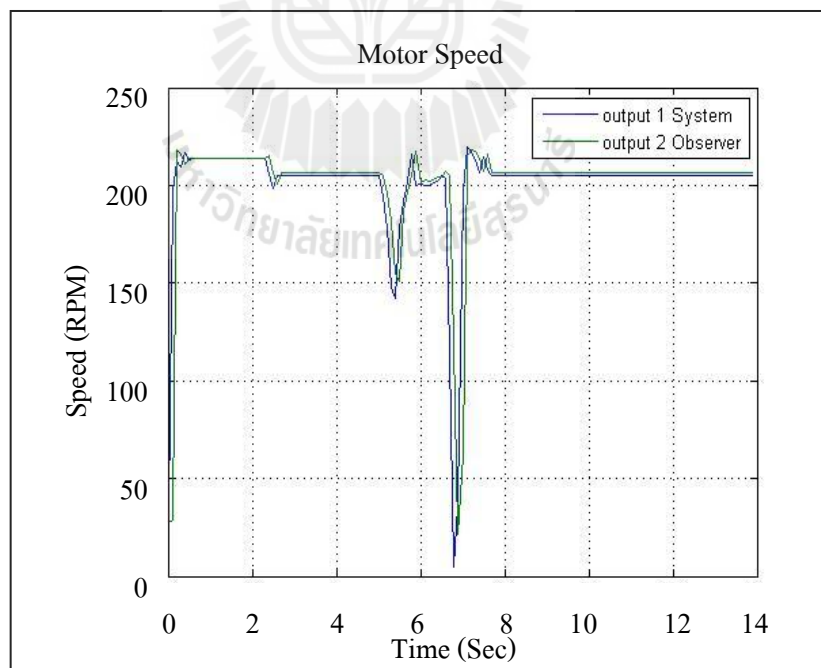
5.3.3 กรณีที่ 3 เมื่อระบบมีค่าแรงบิดภายนอกแบบเปลี่ยนแปลงค่าต่าง ๆ



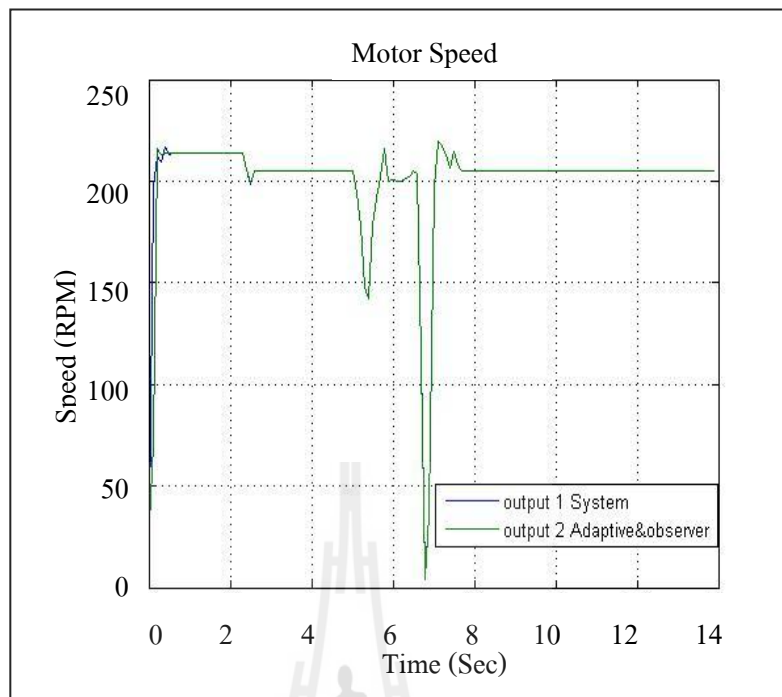
รูปที่ 5.11 ผลการตอบสนองค่า $T_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 3



รูปที่ 5.12 ผลการตอบสนอง $\omega(t)$ สำหรับกรณีที่ 3



รูปที่ 5.23 ผลการตอบสนอง $\omega(t)$ และ $\hat{\omega}(t)$ สำหรับกรณีที่ 3 (ตัวสังเกต)



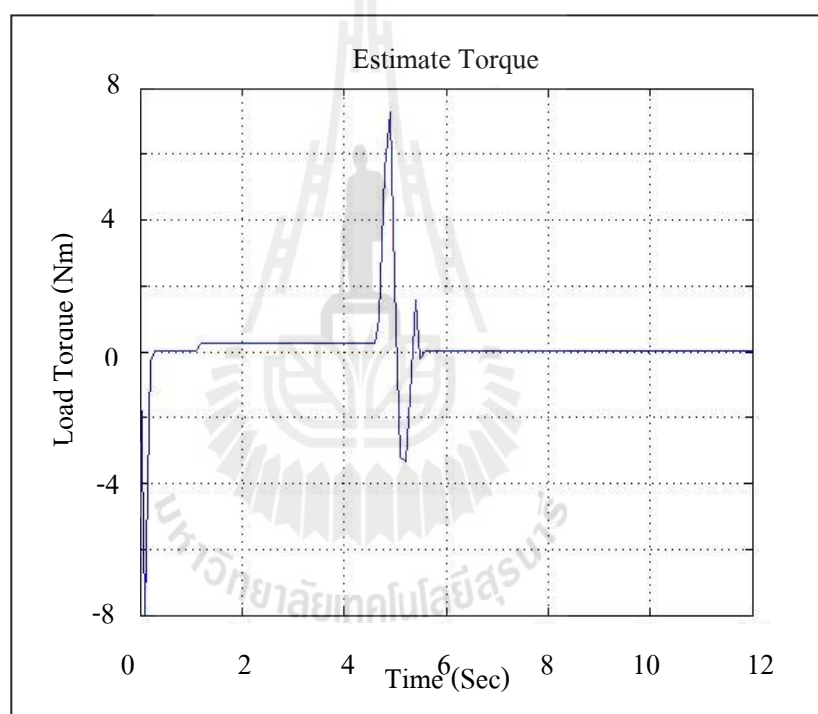
รูปที่ 5.14 ผลการตอบสนอง $\omega(t)$ และ $\hat{\omega}(t)$ กรณีที่ 3 (ตัวสังเกตร่วมตัวชดเชย)

เมื่อมีแรงบิดเข้ามารบกวนระบบแบบเปลี่ยนแปลงในรูปแบบต่าง ๆ ทั้งแบบคงที่และแบบเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหัน ผลการตอบสนองของแรงบิดจะมีค่าดังรูปที่ 5.11 ทำให้ความเร็วรอบของระบบมอเตอร์มีค่าลดลงเปลี่ยนไปตามแรงบิดที่เข้ามารบกวน ดังรูปที่ 5.12 เมื่อเปรียบเทียบความเร็วรอบระหว่างระบบมอเตอร์และค่าที่ได้จากการประมาณของตัวสังเกต หลังจากมอเตอร์ถูกรบกวนด้วยแรงบิดภายนอกแบบเปลี่ยนแปลงจะเห็นได้ว่าตัวสังเกตจะมีความผิดพลาดในการประมาณความเร็วรอบ ดังรูปที่ 5.13 หลังจากนั้นทำการเพิ่มตัวชดเชยแรงบิดให้กับตัวสังเกตแล้วเปรียบเทียบความเร็วรอบของระบบทั้งสองจะสังเกตได้ว่าตัวสังเกตสามารถประมาณความเร็วรอบได้แม่นยำและมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นตลอดช่วงการประมาณค่า ดังรูปที่ 5.14 แม้ว่าแรงบิดดังกล่าวจะมีค่าเปลี่ยนแปลงแบบคงที่หรือแรงบิดมีการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันเข้ามารบกวนการหมุนของมอเตอร์ก็ตาม

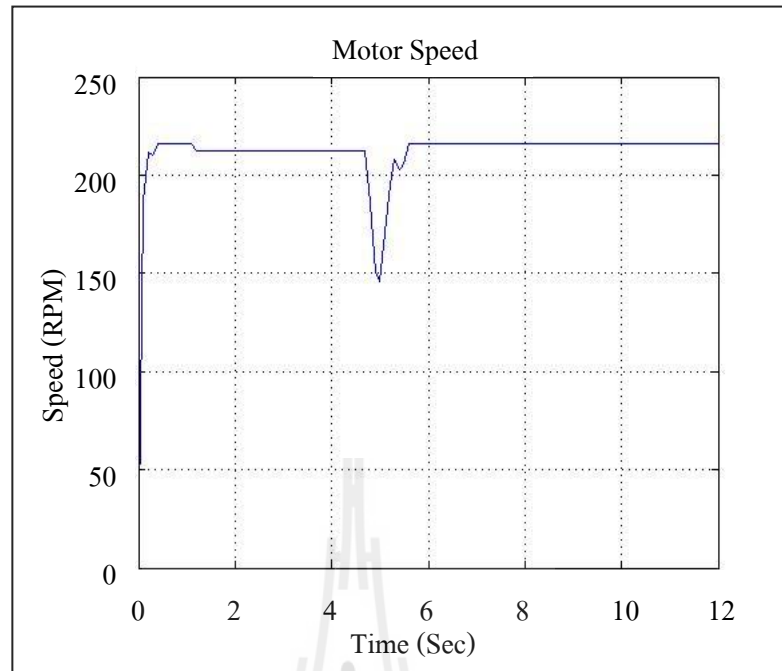
5.4 ระบบถูกรบกวนด้วยแรงบิดภายนอกแบบไม่คงที่ในรูปแบบต่าง ๆ

การทดสอบประสิทธิภาพการประมาณค่าแรงบิดของเครื่องต้นแบบเป็นสิ่งสำคัญเพราะค่าแรงบิดของของเหลวที่ได้จากการประมาณจะถูกเปลี่ยนให้เป็นความหนืด ดังนั้นจึงทำการทดสอบแรงบิดแบบไม่คงที่ในรูปแบบต่างๆเพิ่มเติม เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการประมาณของตัวชดเชยแรงบิดร่วมกับตัวสังเกต โดยจะพิจารณาผลการตอบสนองของแรงบิดและความเร็วรอบของระบบการประมาณค่า โดยการทดลองจะให้ค่าแรงบิดแบบคงที่และแบบเปลี่ยนแปลงไปชั่วขณะอย่างรวดเร็วเพื่อดูประสิทธิภาพและความเร็วในการประมาณค่าของตัวสังเกต

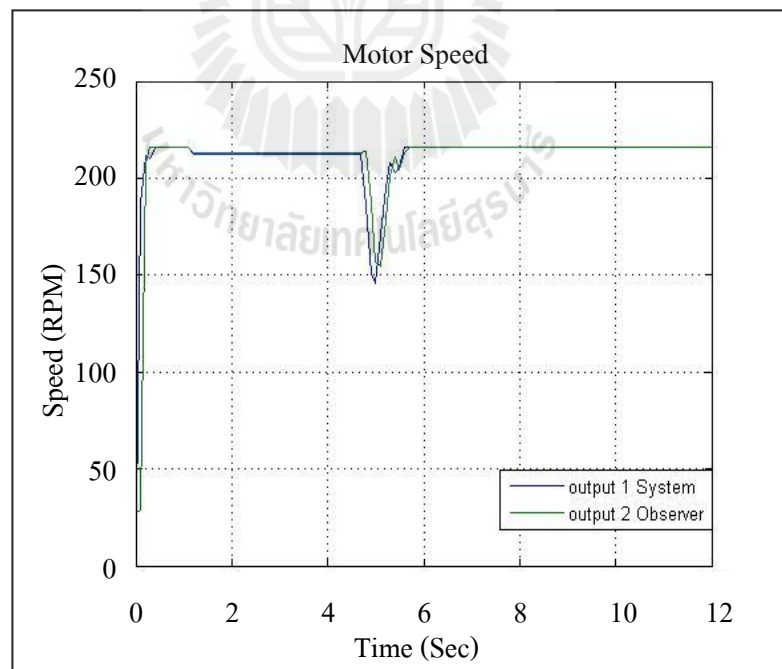
5.4.1 ระบบถูกรบกวนด้วยแรงบิดภายนอกในรูปแบบที่ 1



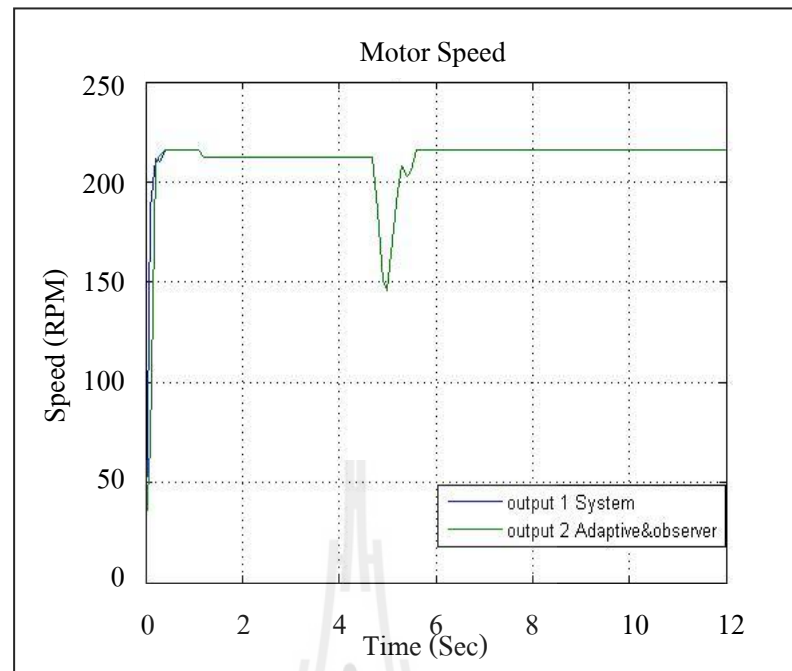
รูปที่ 5.15 ผลการตอบสนองค่า $T_L(t)$ รูปแบบที่ 1



รูปที่ 5.16 ผลการตอบสนอง $\omega(t)$ รูปแบบที่ 1



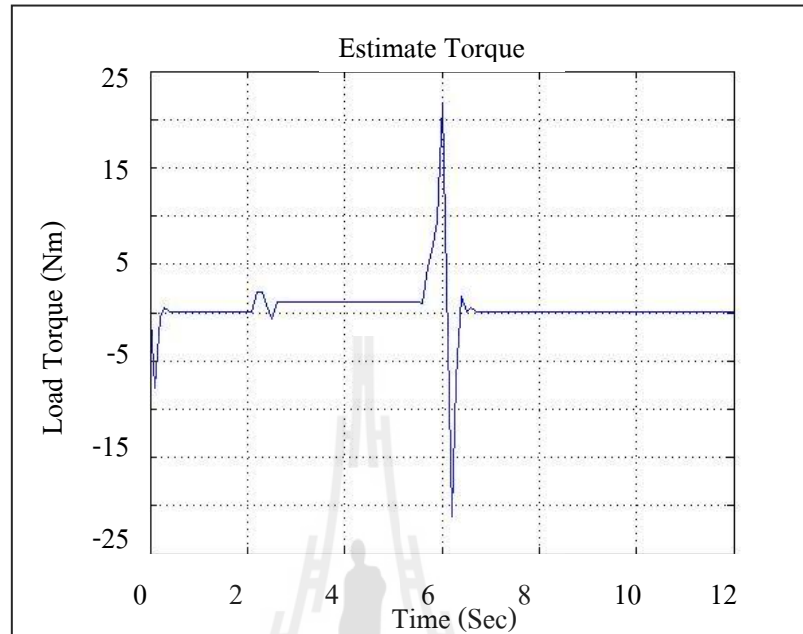
รูปที่ 5.17 ผลการตอบสนอง $\omega(t)$ และ $\hat{\omega}(t)$ รูปแบบที่ 1 (ตัวสังเกต)



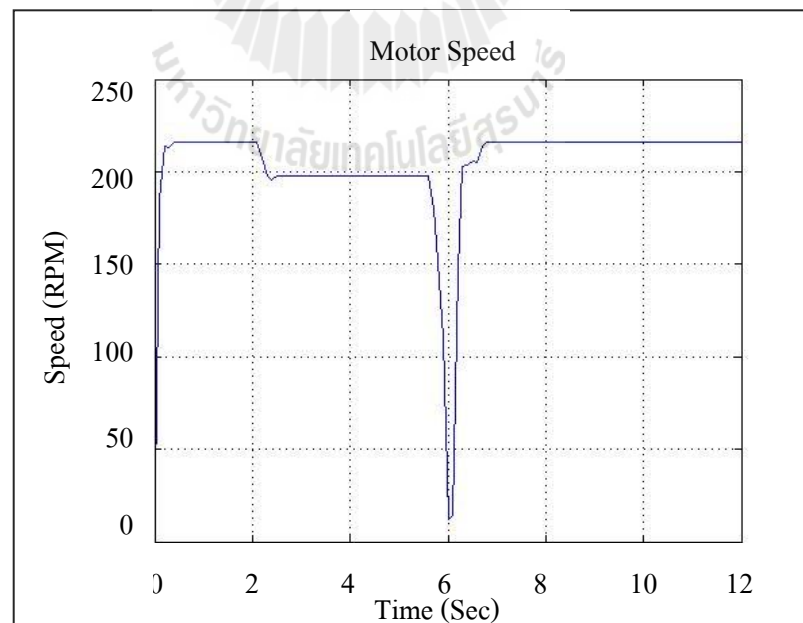
รูปที่ 5.18 ผลการตอบสนอง $\omega(t)$ และ $\hat{\omega}(t)$ รูปแบบที่ 1 (ตัวสังเกตร่วมตัวชดเชย)

เมื่อมีแรงบิดเข้ามารบกวนระบบแบบเปลี่ยนแปลงในรูปแบบต่าง ๆ ทั้งแบบคงที่และแบบเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหัน ผลการตอบสนองของแรงบิดจะมีค่าดังรูปที่ 5.15 ทำให้ความเร็วรอบของระบบมอเตอร์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามแรงบิดที่เข้ามารบกวน ดังรูปที่ 5.16 เมื่อเปรียบเทียบความเร็วรอบระหว่างระบบมอเตอร์และค่าที่ได้จากการประมาณของตัวสังเกต หลังจากมอเตอร์ถูกรบกวนด้วยแรงบิดภายนอกแบบเปลี่ยนแปลงจะเห็นได้ว่าตัวสังเกตจะมีความผิดพลาดในการประมาณความเร็วรอบ ดังรูปที่ 5.17 หลังจากนั้นทำการเพิ่มตัวชดเชยแรงบิดให้กับตัวสังเกตแล้วเปรียบเทียบความเร็วรอบของระบบทั้งสองจะสังเกตได้ว่าตัวสังเกตสามารถประมาณความเร็วรอบได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นตลอดช่วงการประมาณค่า ดังรูปที่ 5.18 แม้ในบางช่วงแรงบิดจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปชั่วขณะอย่างรวดเร็วการประมาณ ความเร็วรอบของตัวสังเกตสามารถประมาณได้แม่นยำ

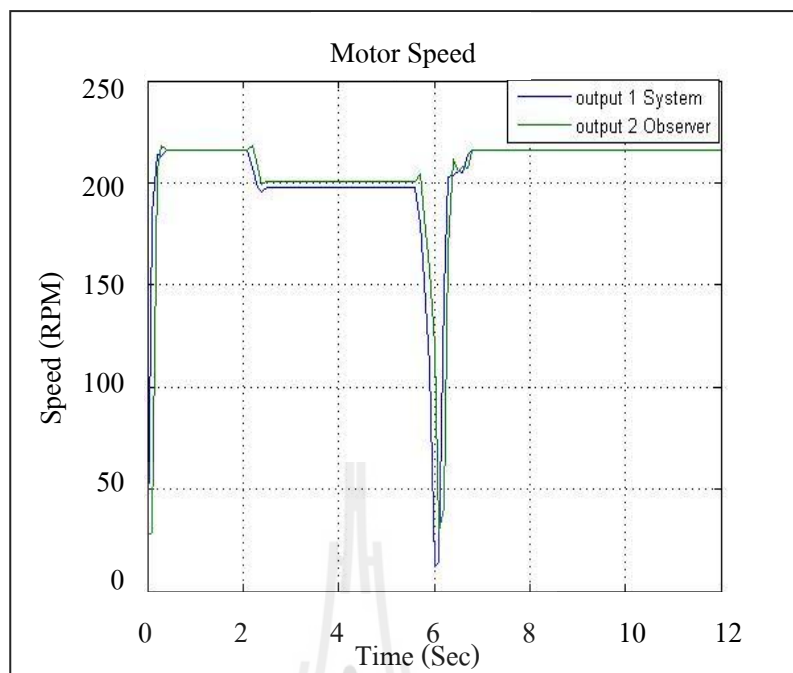
5.4.2 ระบบถูกรบกวนด้วยแรงบิดภายนอกแบบในรูปแบบที่ 2



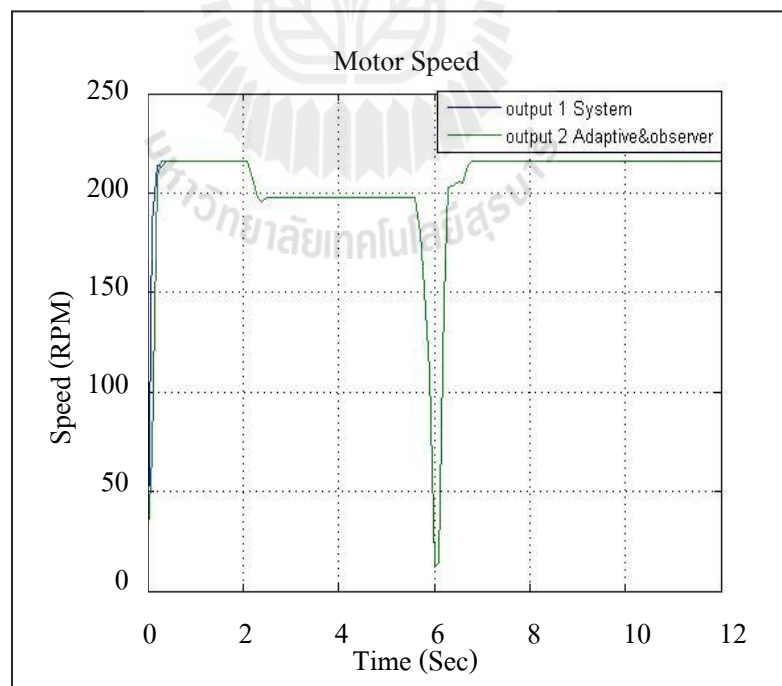
รูปที่ 5.19 ผลการตอบสนองค่า $T_L(t)$ รูปแบบที่ 2



รูปที่ 5.20 ผลการตอบสนอง $\omega(t)$ รูปแบบที่ 2 (ระบบ)



รูปที่ 5.21 ผลการตอบสนอง $\omega(t)$ และ $\hat{\omega}(t)$ รูปแบบที่ 2 (ตัวสังเกต)



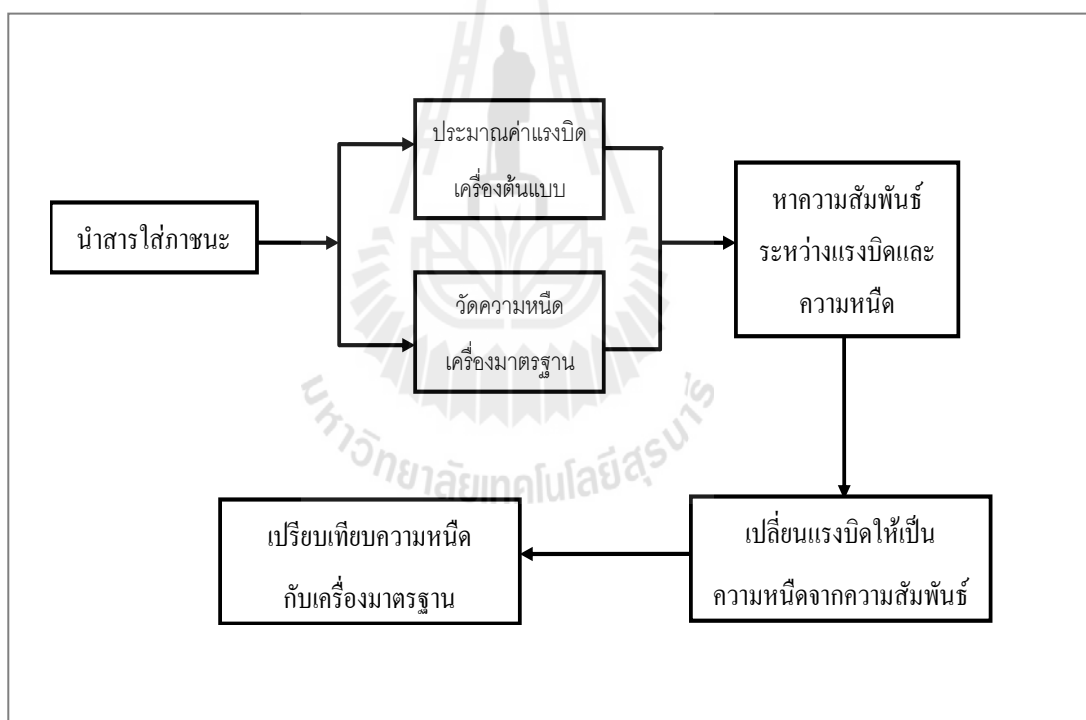
รูปที่ 5.22 ผลการตอบสนอง $\omega(t)$ และ $\hat{\omega}(t)$ ในรูปแบบที่ 2 (ตัวสังเกตร่วมตัวชดเชย)

เมื่อมีแรงบิดเข้ามารบกวนระบบมอเตอร์แบบเปลี่ยนแปลงในรูปแบบต่างๆทั้งแบบคงที่และแบบเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหัน ผลการตอบสนองของแรงบิดจะมีค่าดังรูปที่ 5.19 ทำให้ความเร็วรอบของระบบมอเตอร์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามแรงบิดที่เข้ามารบกวน ดังรูปที่ 5.20 เมื่อเปรียบเทียบความเร็วรอบระหว่างระบบมอเตอร์และค่าที่ได้จากการประมาณของตัวสังเกต หลังจากมอเตอร์ถูกรบกวนด้วยแรงบิดภายนอกแบบเปลี่ยนแปลงจะเห็นได้ว่าตัวสังเกตจะมีความผิดพลาดในการประมาณความเร็วรอบ ดังรูปที่ 5.21 หลังจากนั้นทำการเพิ่มตัวชดเชยแรงบิดให้กับตัวสังเกตแล้วเปรียบเทียบความเร็วรอบของระบบทั้งสองจะสังเกตได้ว่าตัวสังเกตสามารถประมาณความเร็วรอบได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นตลอดช่วงการประมาณค่า ดังรูปที่ 5.22 แม้ในบางช่วงแรงบิดจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปชั่วขณะอย่างรวดเร็ว การประมาณความเร็วรอบของตัวสังเกตสามารถประมาณได้แม่นยำ

การศึกษาการประมาณค่าความหนืดโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงร่วมกับการชดเชยแรงบิดแบบปรับตัวได้ เพื่อประมาณค่าแรงบิดภายนอกโดยใช้วิธี Gradient Method ผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดลองของระบบ แสดงให้เห็นว่ามีความสอดคล้องเป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยตัวสังเกตจะประมาณค่าความเร็วรอบได้ใกล้เคียงกับการวัดในกรณีที่ไม่มีแรงบิดเข้ามารบกวนระบบเท่านั้น ส่วนตัวชดเชยแรงบิดแบบปรับตัวด้วยวิธี Gradient Method เมื่อทำงานร่วมกับตัวสังเกต ในกรณีที่ไม่มีแรงบิดเข้ามารบกวนระบบมอเตอร์และในกรณีที่มีแรงบิดจากภายนอกเข้าไปรบกวนระบบแบบคงที่ และแบบเปลี่ยนแปลงได้ในรูปแบบต่างๆ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเมื่อนำค่าความเร็วรอบของตัวสังเกต และความเร็วรอบที่สามารถวัดได้จริงมาเปรียบเทียบ จะสังเกตได้ว่าตัวสังเกตสามารถประมาณความเร็วรอบได้อย่างมีประสิทธิภาพและลดความผิดพลาดในการประมาณความเร็วรอบลงจากเดิมที่มีเฉพาะตัวสังเกต นอกจากนี้ตัวชดเชยแรงบิดสามารถประมาณค่าแรงบิดที่เข้ามารบกวนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ถึงแม้แรงบิดที่เข้ามารบกวนระบบจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างรวดเร็วก็ตาม

5.5 การประมาณค่าความหนืดของของเหลว

ตอนที่ 2 ดำเนินการเปลี่ยนค่าแรงบิดให้เป็นความหนืด โดยใช้ของเหลวที่มีความหนืดอยู่ช่วงระหว่าง 80–320 cP ในการวัดจะทำการควบคุมปริมาณและอุณหภูมิของสารให้คงที่ เมื่อมีหัวกวนจุ่มลงไปพร้อมวัดสารจะมีปริมาณรวม 200 ml ตลอดทุกการทดลอง เพื่อประมาณค่าแรงบิดจากเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้น และจะวัดความหนืดของสารจากเครื่องมือมาตรฐานโดยใช้หัวเข็มเบอร์ 21 และให้อัตราเฉือน 40 1/s หลังจากนั้นนำค่าดังกล่าวไปเขียนกราฟ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดจากเครื่องต้นแบบและความหนืดของของเหลวที่วัดได้จากเครื่องอ้างอิงมาตรฐาน โดยสมการความสัมพันธ์ที่ได้จะเป็นสมการการเปลี่ยนแรงบิดให้เป็นความหนืด หลังจากนั้นเปรียบเทียบผลระหว่างความหนืดที่วัดได้จากเครื่องมาตรฐานอ้างอิงและเครื่องต้นแบบที่สร้าง ดังรูปที่ 5.22



รูปที่ 5.23 แผนภาพอธิบายขั้นตอนการเปลี่ยนแรงบิดให้เป็นความหนืด

สารที่ใช้ทดสอบจะประกอบด้วย สารทั้งหมด 6 ชนิด ได้แก่ น้ำมันอุตสาหกรรม VG 46, น้ำมันอุตสาหกรรม VG 100 น้ำมันซิลิโคน น้ำหวาน Hale 's & Blue Boy และน้ำเชื่อมผสมน้ำในอัตราส่วนต่าง ๆ ตามตารางที่ 5.1 โดยจะนำมาทำการประมาณค่าแรงบิดของของเหลวจากเครื่องต้นแบบที่สร้างและทำการวัดความหนืดด้วยเครื่องมาตรฐาน DV-III Ultra Rheometer เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดที่ได้จากการประมาณของเครื่องต้นแบบกับความหนืดที่ได้จากการวัดจากเครื่องมาตรฐาน โดยจะทำการควบคุมปริมาตรและอุณหภูมิให้คงที่ตลอดการทดลอง

ตารางที่ 5.1 สารที่ใช้ทดสอบผสมระหว่างน้ำเชื่อมกับน้ำมันดังนี้

สาร	น้ำเชื่อมมีตรผล(ml)	น้ำ (ml)
A	175	30
B	175	28
C	175	27
D	175	25
E	175	20
F	175	19
G	175	18
H	175	17
I	175	15
J	175	10

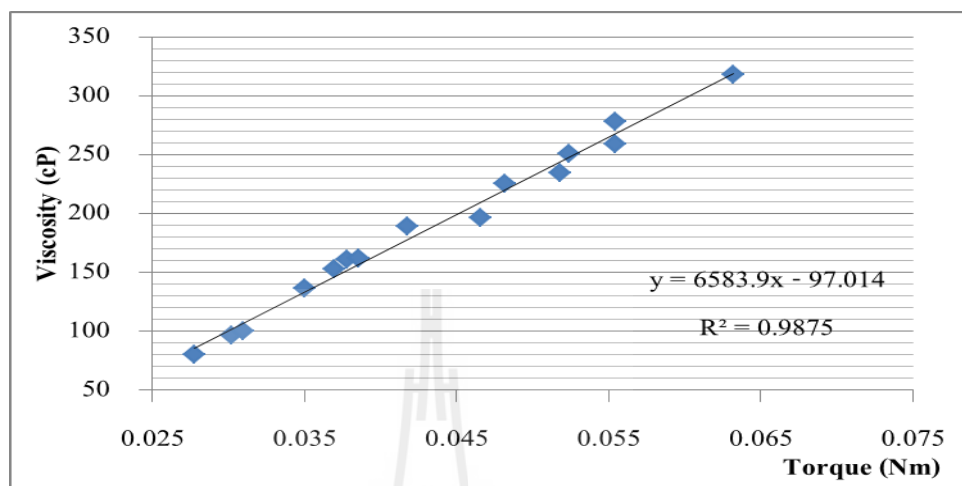
การประมาณแรงบิดของของเหลวน้ำหวานมอเตอร์จุ่มลงในภาชนะที่จะทำการวัด หลังจากนั้นนำของเหลวที่ต้องการวัดเทลงในภาชนะจนกระทั่งสารมีปริมาตร 200 ml แล้วทำการสั่งมอเตอร์ให้หมุนแล้วให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผลและแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ ความเร็วรอบและแรงบิดที่เข้ามาบรรจบมอเตอร์จากตัวสังเกต และตัวชดเชยแรงบิด โดยค่าแรงบิดที่ได้จากการประมาณของเครื่องต้นแบบและความหนืดที่วัดได้จากเครื่องมาตรฐานจะเป็นไปตามตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของเครื่องสอบเทียบกับแรงบิดของเครื่องที่สร้าง

Liquid	Torque(N·m) Prototype	Viscosity(cP) Brookfield	T(°C)
Hydraulic Oil VG46	0.0278	79.79	28
Silicone Oil	0.0302	96.8	28
Hydraulic Oil VG100	0.0310	100.11	40
A	0.0350	136.78	28
B	0.0370	152.67	28
Hale's & Blue Boy	0.0378	160.61	28
C	0.0386	162.13	28
D	0.0418	189.08	28
Hydraulic Oil VG100	0.0466	196.08	28
E	0.0482	225.78	28
F	0.0518	234.2	28
G	0.0524	250.55	28
H	0.0554	258.89	28
I	0.0554	277.69	28
J	0.0632	317.65	28

- น้ำมันอุตสาหกรรม VG XXX (ISO Viscosity Grade) เป็นค่าความหนืดน้ำมันมาตรฐาน ISO จะมีความหนืดตามที่ระบุด้านหลังอักษร VG ที่ 40 องศาเซลเซียส
- XXX คือตัวเลขที่แสดงค่าความหนืดของสาร

นำตารางที่ 5.2 มาเขียนกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงบิดที่ได้จากการประมาณของเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นกับความหนืดที่ได้จากการวัดของเครื่องมาตรฐาน ดังรูปที่ 5.24



รูปที่ 5.24 ความหนืดเครื่องสอบเทียบกับแรงบิดเครื่องต้นแบบ

เมื่อนำสารที่มีความหนืดอยู่ระหว่าง 80–320 cP เครื่องต้นแบบจะประมาณค่าแรงบิดได้ในช่วง 0.028–0.063 N·m และจะมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงโดยมีสมการ คือ

$$y = 6583.9x - 97.01$$

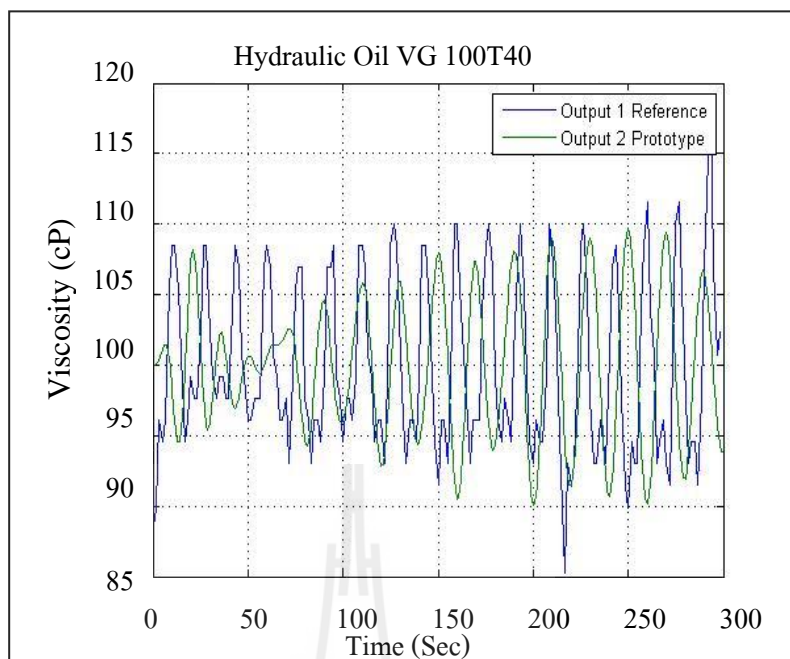
กำหนดให้

x = ค่าแรงบิดที่ได้จากการประมาณการของเครื่องต้นแบบ

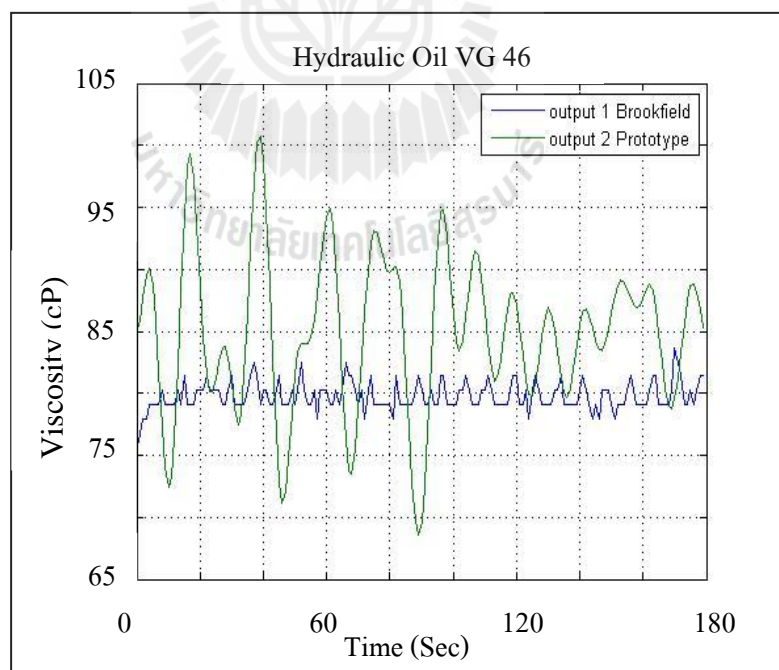
y = ค่าความหนืดที่เราต้องการทราบของเครื่องต้นแบบที่สามารถประมาณได้

โดยสมการดังกล่าวนี้มีความแม่นยำของการนำสมการคาดคะเนผลลัพธ์ (R^2) = 98.75 %

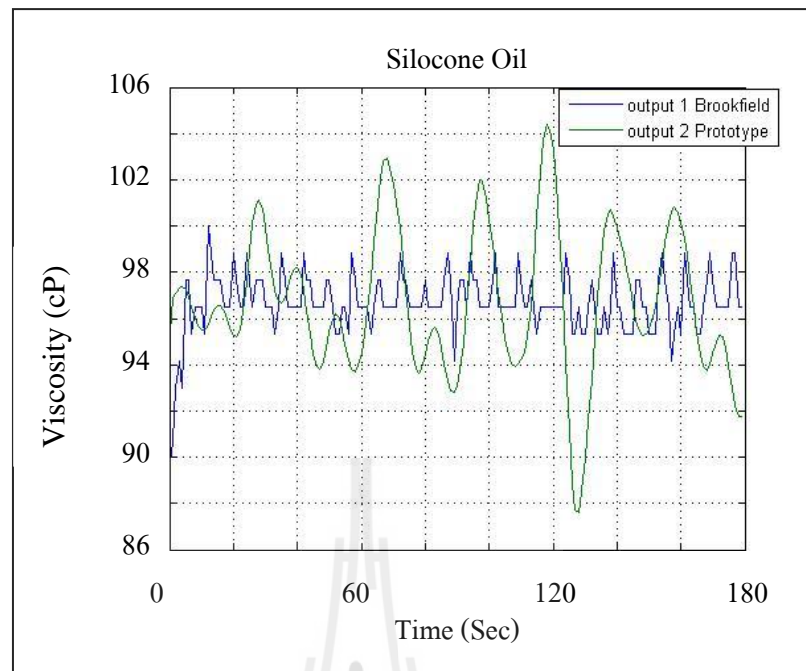
เมื่อได้สมการความสัมพันธ์ที่สามารถเปลี่ยนแรงบิดให้เป็นความหนืดของหลังจากนั้นเปลี่ยนแรงบิดดังกล่าวไว้เป็นความหนืด เพื่อที่จะทำการเปรียบเทียบความหนืดกับเครื่องอ้างอิงมาตรฐานต่อไป ดำเนินการเปลี่ยนแรงบิดให้เป็นความหนืดโดยใช้สมการเส้นตรงที่ได้จากการทดสอบ และนำความหนืดดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับเครื่องอ้างอิงมาตรฐาน ได้แก่ น้ำมันอุตสาหกรรม VG 100 น้ำมันอุตสาหกรรม VG 46 น้ำมันซิลิโคน น้ำหวาน Hale's & Blue Boy และสาร A, B, C, D, E, F, G, H, I และ J ดังแสดงในรูปที่ 5.24-5.38 ตามลำดับ



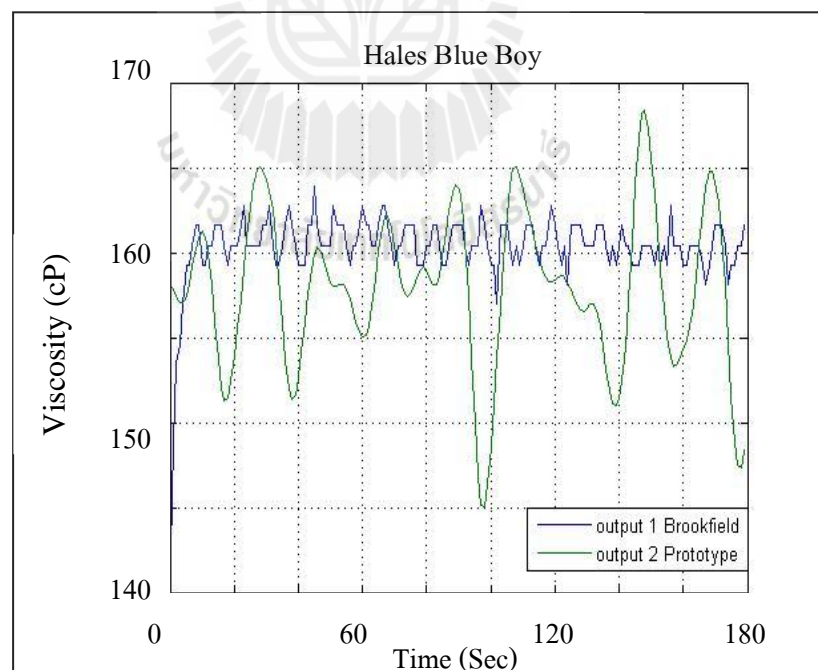
รูปที่ 5.25 ความหนืด Hydraulic Oil VG 100 T 40°C



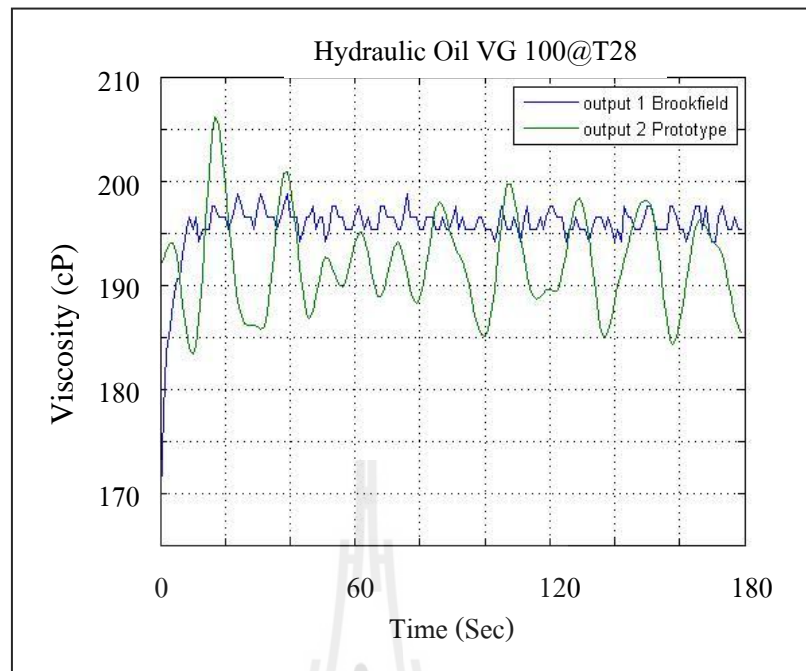
รูปที่ 5.26 ความหนืด Hydraulic Oil VG 46



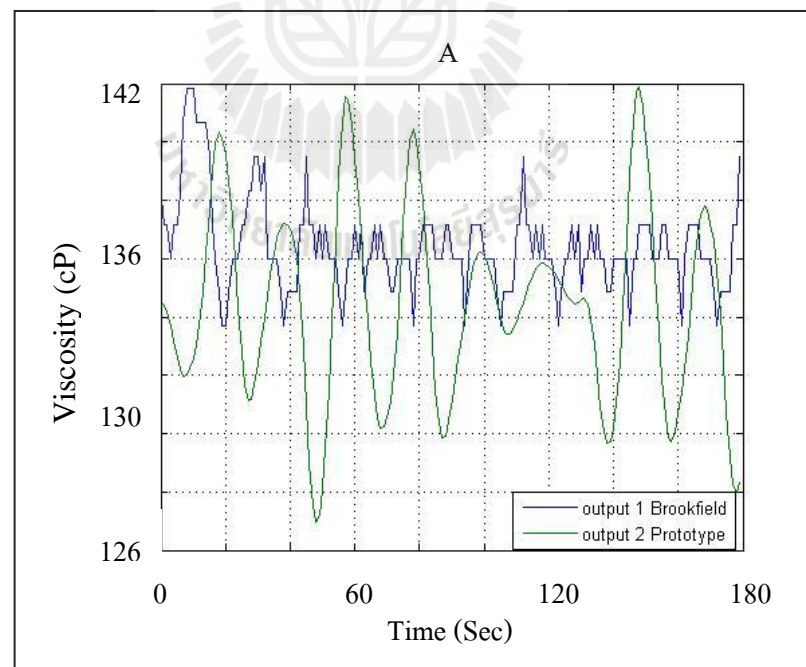
รูปที่ 5.27 ความหนืด Silicone Oil



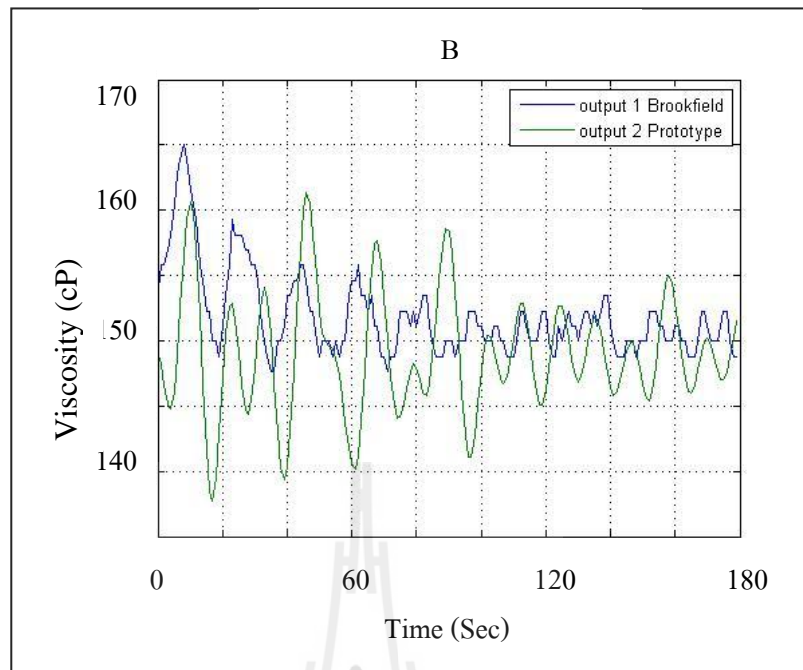
รูปที่ 5.28 ความหนืดน้ำหวาน Hale' Blue Boy



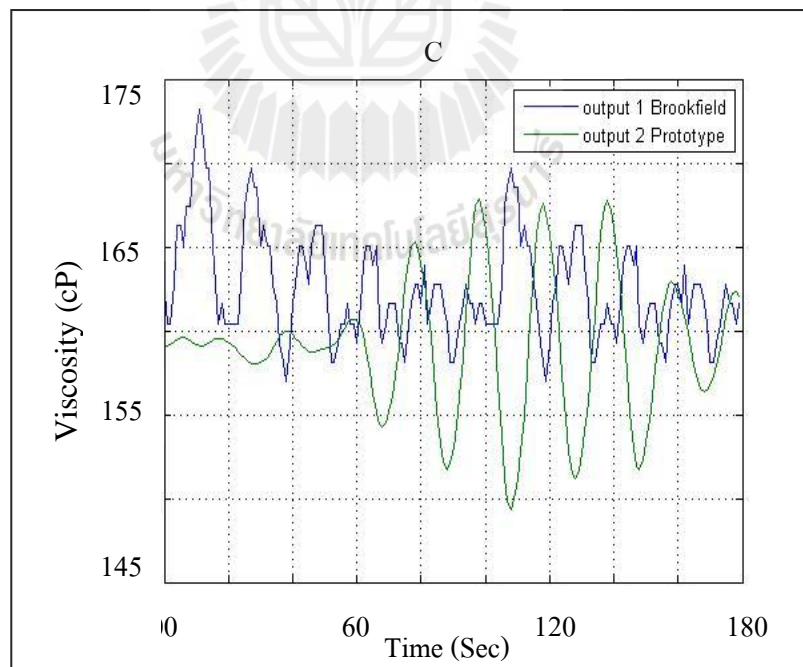
รูปที่ 5.29 ความหนืด Hydraulic Oil VG 100 T28 °C



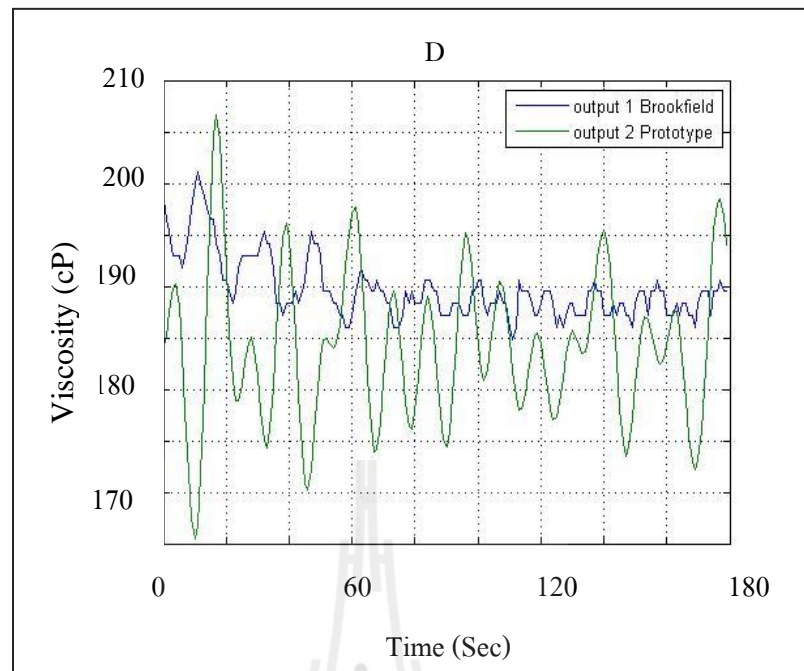
รูปที่ 5.30 ความหนืดสาร A



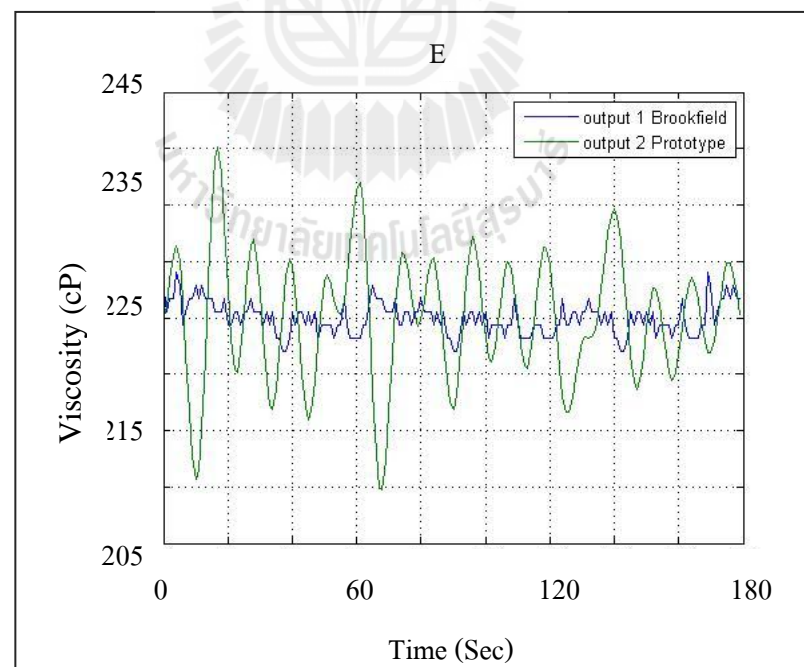
รูปที่ 5.31 ความหนืดสาร B



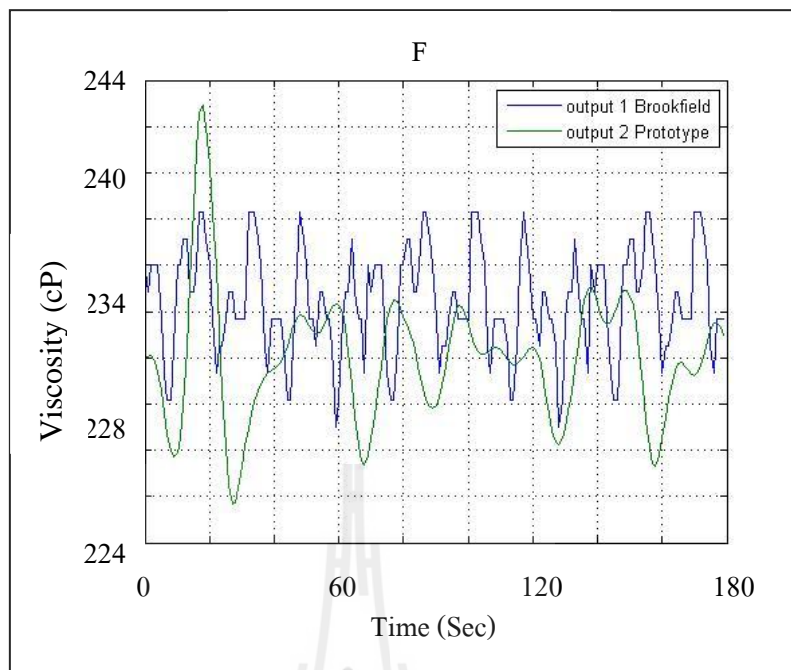
รูปที่ 5.32 ความหนืดสาร C



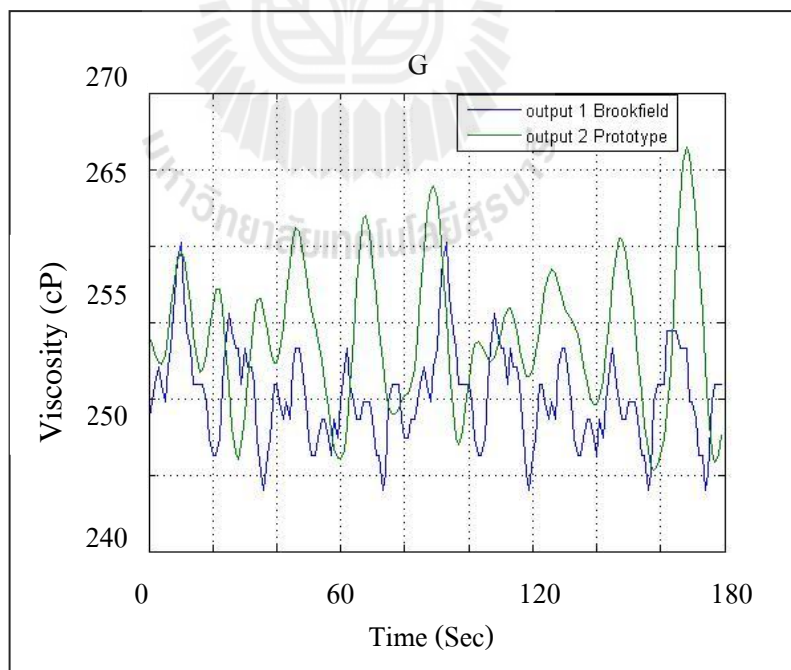
รูปที่ 5.33 ความหนืดสาร D



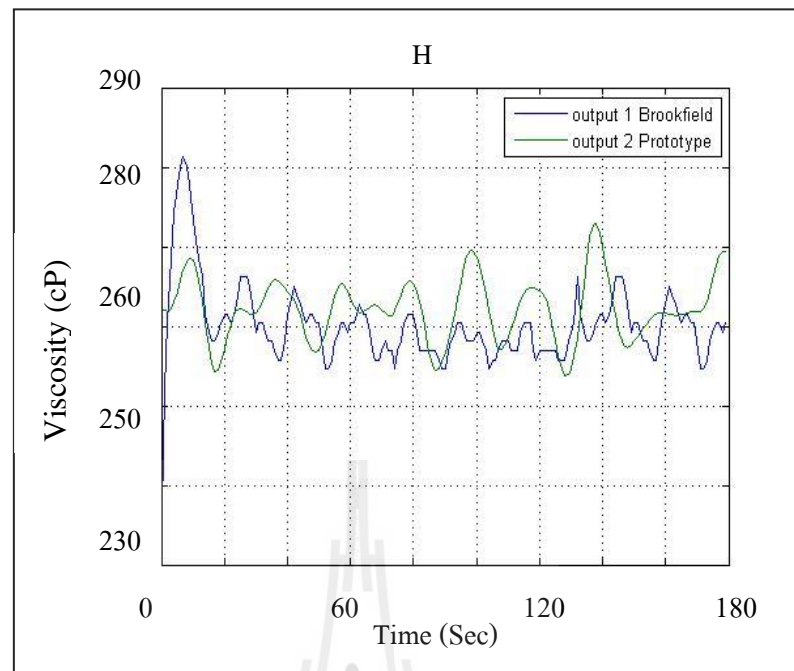
รูปที่ 5.34 ความหนืดสาร E



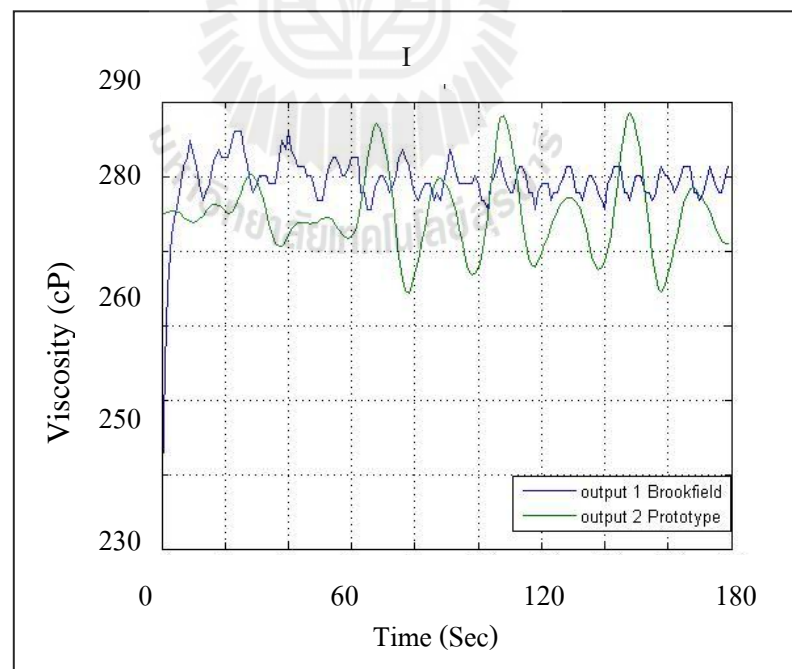
รูปที่ 5.35 ความหนืดสาร F



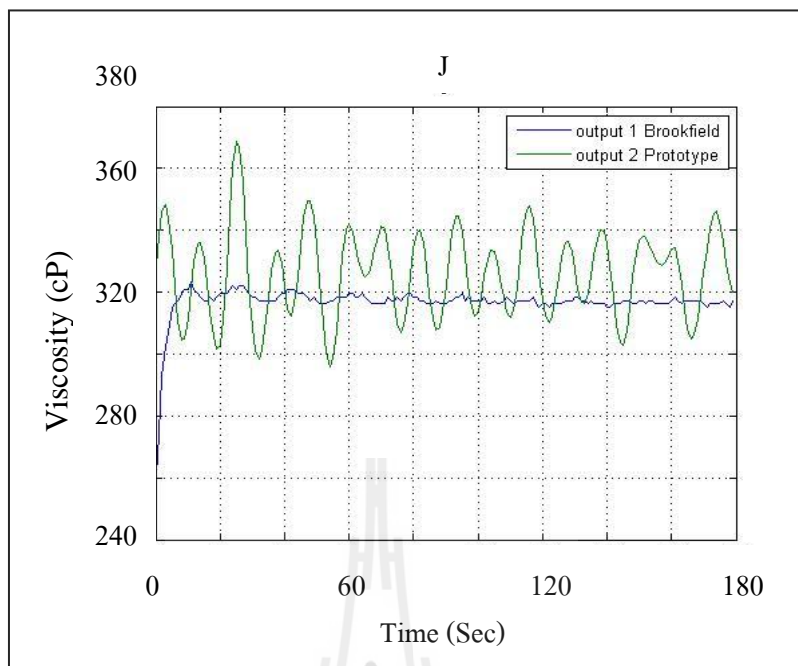
รูปที่ 5.36 ความหนืดสาร G



รูปที่ 5.37 ความหนืดสาร H



รูปที่ 5.38 ความหนืดสาร I



รูปที่ 5.39 ความหนืดสาร J

จากผลการทดลองเมื่อทำการเปรียบเทียบความหนืดที่วัดจากเครื่องมาตรฐานและความหนืดที่ได้จากการประมาณของเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นจะเห็นได้ว่าความหนืดที่ได้จากเครื่องต้นแบบจะแกว่งอยู่ในช่วงความหนืดเครื่องมาตรฐานที่นำมาสอบเทียบช่วงการแกว่งของความหนืดที่ได้จากการประมาณของเครื่องต้นแบบจะมีค่าประมาณ 15 cP และแกว่งอยู่ในช่วงความหนืดที่ได้จากการวัดของเครื่องอ้างอิงมาตรฐาน

หลังจากนั้นทำการเปรียบเทียบค่าความหนืดจากการประมาณของเครื่องต้นแบบและความหนืดที่ได้จากการวัดจากเครื่องมาตรฐานเพื่อพิจารณาความแตกต่างระหว่างความหนืดของเครื่องทั้งสองและหาค่าผิดพลาดของการประมาณค่าความหนืดด้วยเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้น การเปรียบเทียบค่าความหนืดของสารจะแสดงดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบความหนืดเครื่องประมาณความหนืดต้นแบบกับเครื่องมืออ้างอิง

Liquid	Viscosity(cP) Brookfield	Viscosity(cP) Prototype	%error
Hydraulic Oil VG46	79.79	85.37	7.01
Silicone Oil	96.80	95.07	1.78
Hydraulic Oil VG100@40	100.11	96.18	3.93
A	136.78	134.16	1.91
B	152.67	148.33	2.84
Hale' & Blue Boy	160.61	156.19	2.75
C	162.13	158.58	2.19
D	189.08	181.89	3.81
Hydraulic Oil VG100	196.08	189.29	3.46
E	225.78	224.91	0.39
F	234.20	231.29	1.24
G	250.55	253.44	1.15
H	258.89	261.86	1.15
I	277.69	273.30	1.58
J	317.65	328.29	3.35

หาความผิดพลาด โดยเทียบกับเครื่องมืออ้างอิงมาตรฐาน

$$\%error = \left| \frac{\text{ค่าความหนืดจากเครื่องมาตรฐาน} - \text{ค่าความหนืดจากเครื่องต้นแบบ}}{\text{ค่าความหนืดจากเครื่องมาตรฐาน}} \right| \times 100$$

$$\%error A = \left| \frac{136.78-134.16}{136.78} \right| \times 100 = 1.91$$

$$\%error B = \left| \frac{152.67-148.33}{152.67} \right| \times 100 = 2.84$$

$$\%error C = \left| \frac{162.13-158.58}{162.13} \right| \times 100 = 2.19$$

$$\%error D = \left| \frac{189.08-181.89}{189.08} \right| \times 100 = 3.81$$

$$\%error E = \left| \frac{225.78-224.91}{225.78} \right| \times 100 = 0.39$$

$$\%error F = \left| \frac{234.20-231.29}{234.20} \right| \times 100 = 1.24$$

$$\%error G = \left| \frac{250.55-253.44}{250.55} \right| \times 100 = 1.15$$

$$\%error H = \left| \frac{258.89-261.86}{258.89} \right| \times 100 = 1.15$$

$$\%error I = \left| \frac{277.69-273.30}{277.69} \right| \times 100 = 1.58$$

$$\%error J = \left| \frac{317.65-328.29}{317.65} \right| \times 100 = 3.35$$

$$\%error \text{ Silicone Oil} = \left| \frac{96.80-95.07}{96.80} \right| \times 100 = 1.78$$

$$\%error \text{ Hale's Blue Boy} = \left| \frac{160.61-156.19}{160.61} \right| \times 100 = 2.75$$

$$\%error \text{ Hydraulic Oil VG 46} = \left| \frac{79.79-85.37}{79.79} \right| \times 100 = 7.01$$

$$\%error \text{ Hydraulic Oil VG 100T28} = \left| \frac{196.08-189.29}{196.08} \right| \times 100 = 3.46$$

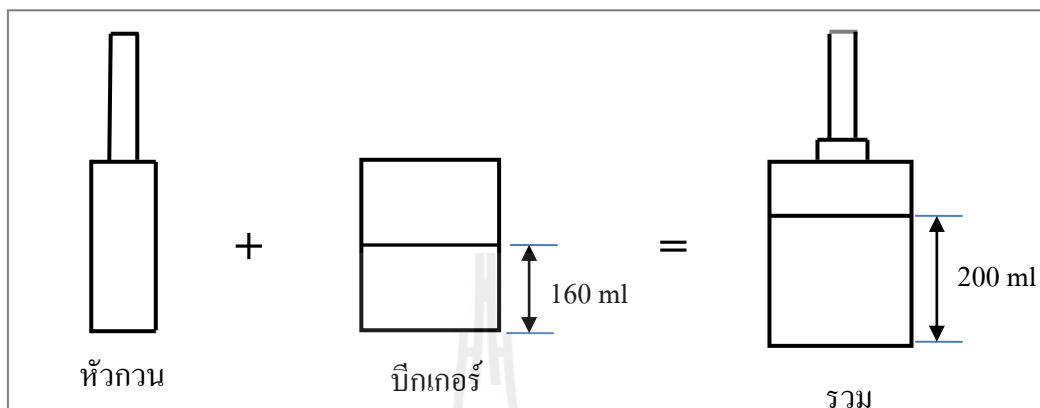
$$\%error \text{ Hydraulic Oil VG 100T40} = \left| \frac{100.11-96.18}{100.11} \right| \times 100 = 3.93$$

เมื่อเปรียบเทียบความหนืดของเครื่องมาตรฐานกับเครื่องต้นแบบจะมีค่าความหนืดที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสูงสุด คือ Hydraulic Oil VG 46 มีค่า 7.01 และเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ยประมาณ 2.57 ในช่วงที่สารมีความหนืดอยู่ระหว่าง 80–320 cP

5.6 การทดสอบความหนืดแบบต่อเนื่อง

การจำลองเหตุการณ์ที่สารมีค่าความหนืดเปลี่ยนไป โดยการทดสอบความหนืดแบบต่อเนื่องในสถานะชั่วคราวต้องมีการควบคุมอุณหภูมิ และปริมาณของสารให้คงที่ตลอดการทดลอง จากตารางที่ 5.1 จะเห็นได้ว่าสาร A-J เป็นสารชนิดเดียวกันโดยจะมีการควบคุมปริมาณในการวัด และอุณหภูมิให้คงที่ ซึ่งสารดังกล่าวจะมีค่าความหนืดเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเนื่องจากมีส่วนผสมน้ำกับน้ำเชื่อมในอัตราส่วนที่ต่างกัน ดังนั้นจึงนำสถานการณ์ดังกล่าวมาทำการจำลองสถานการณ์ความหนืดแบบต่อเนื่องเมื่อสารมีค่าความหนืดเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม

เมื่อนำสารที่มีปริมาณ 160 ml ใส่ในภาชนะแล้วนำหัวกวนจุ่มลงในภาชนะที่จะทำการวัด สารจะมีปริมาณรวมในการวัด 200 ml ดังรูปที่ 5.39



รูปที่ 5.40 การทดลองหาค่าความหนืดของสาร

การเมื่อทำการผสมน้ำเชื่อมกับน้ำในอัตราส่วนที่ต่างกันจะทำให้อัตราส่วนระหว่างน้ำ และน้ำเชื่อมมีค่าดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 อัตราส่วนที่เปลี่ยนแปลงระหว่างน้ำเชื่อมกับน้ำ

สาร	น้ำเชื่อม (ml)	น้ำ (ml)	อัตราส่วน น้ำเชื่อม (ml)	อัตราส่วนน้ำ (ml)	รวมอัตราส่วน (ml)
A	175	30	136.58	23.41	160
B	175	28	137.93	22.07	160
C	175	27	138.61	21.39	160
D	175	25	140.00	20.00	160
E	175	20	143.59	16.41	160
F	175	19	144.33	15.68	160
G	175	18	145.08	14.92	160
H	175	17	145.83	14.17	160
I	175	15	147.37	12.63	160

J	175	10	151.35	8.65	160
---	-----	----	--------	------	-----

อัตราส่วนน้ำเชื่อมและน้ำ

$$\text{น้ำเชื่อม} : \text{น้ำ} = \frac{\text{น้ำเชื่อม}}{\text{น้ำเชื่อม} + \text{น้ำ}} : \frac{\text{น้ำ}}{\text{น้ำเชื่อม} + \text{น้ำ}}$$

$$\text{สารA} = \frac{175}{175 + 30} : \frac{30}{175 + 30} = 136.58 : 23.41$$

$$\text{สารB} = \frac{175}{175 + 27} : \frac{27}{175 + 27} = 137.93 : 22.07$$

$$\text{สารC} = \frac{175}{175 + 25} : \frac{25}{175 + 25} = 138.61 : 21.39$$

$$\text{สารD} = \frac{175}{175 + 20} : \frac{20}{175 + 20} = 140.00 : 20.00$$

$$\text{สารE} = \frac{175}{175 + 30} : \frac{30}{175 + 30} = 143.59 : 16.41$$

$$\text{สารF} = \frac{175}{175 + 19} : \frac{19}{175 + 19} = 144.33 : 15.68$$

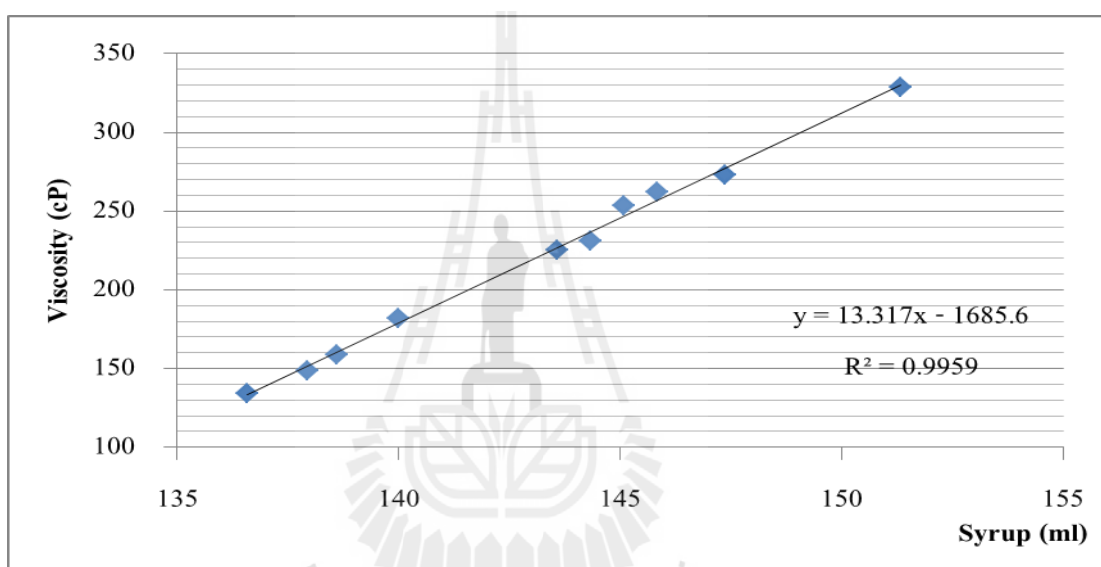
$$\text{สารG} = \frac{175}{175 + 18} : \frac{18}{175 + 18} = 145.08 : 14.92$$

$$\text{สารH} = \frac{175}{175 + 17} : \frac{17}{175 + 17} = 145.83 : 14.17$$

$$\text{สาร I} = \frac{175}{175+15} : \frac{15}{175+15} = 147.37 : 12.63$$

$$\text{สาร J} = \frac{175}{175+10} : \frac{10}{175+10} = 151.35 : 8.65$$

หาความสัมพันธ์ระหว่างความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดจากเครื่องต้นแบบ และอัตราส่วนน้ำเชื่อมเมื่อนำมาเขียนกราฟแสดงดังในรูปที่ 5.40



รูปที่ 5.41 กราฟความหนืดกับอัตราส่วนน้ำเชื่อม

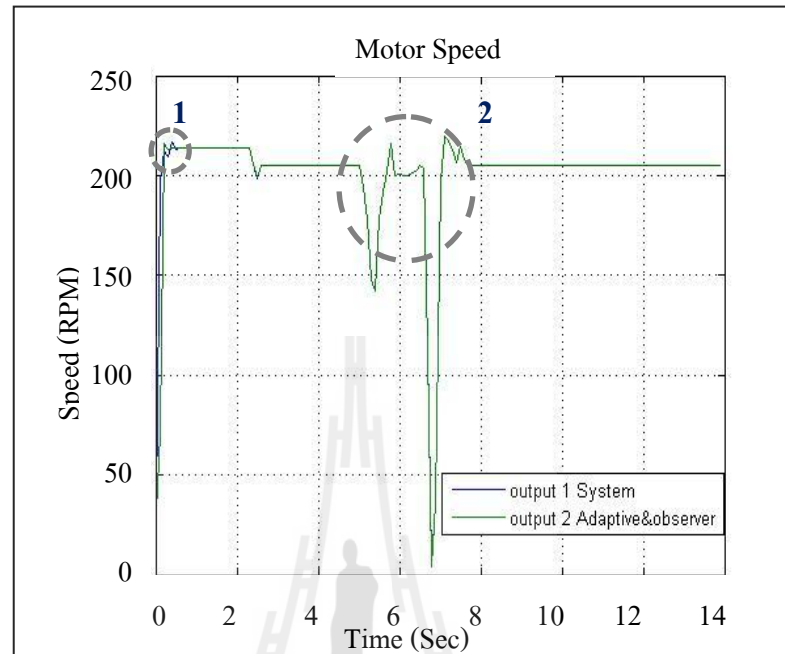
ในขณะที่ทำการวัดโดยจะมีการควบคุมปริมาณ และอุณหภูมิของสารให้คงที่ จะเห็นได้ว่าสารจะมีความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อมีอัตราส่วนของน้ำเชื่อมเพิ่มขึ้นและเครื่องจะสามารถประมาณความหนืดที่เปลี่ยนแปลงได้ โดยสมการความหนืดของสารที่เปลี่ยนแปลงแบบต่อเนื่องคือ

$$y = 13.32x - 1685.60$$

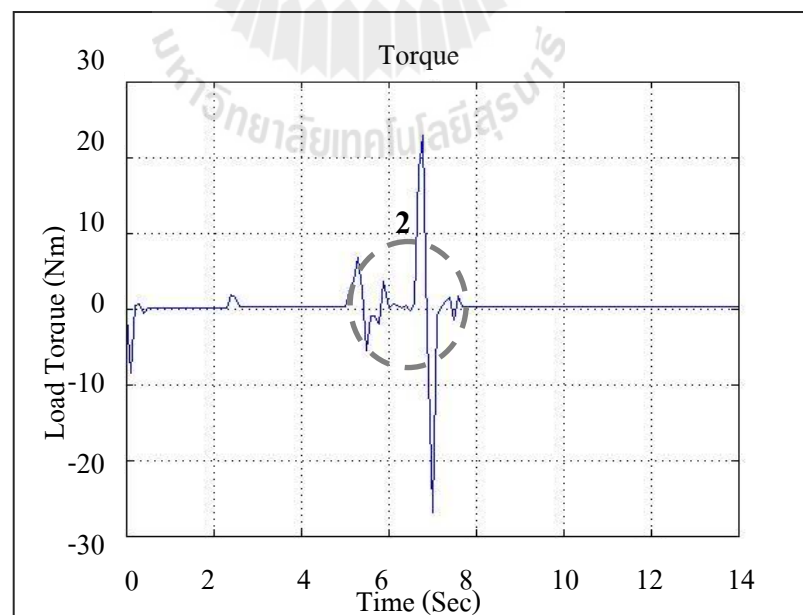
กำหนดให้ $y = \text{Viscosity (cP)}$, $x = \text{อัตราส่วนน้ำเชื่อม (ml)}$

และความแม่นยำของการนำสมการคาดคะเนผลลัพธ์ (R^2) = 99.59 %

5.7 วิเคราะห์ผลการทดลอง



รูปที่ 5.42 ความเร็วรอบที่เปลี่ยนแปลงแบบชั่วขณะ



รูปที่ 5.43 แรงบิดที่เปลี่ยนแปลงแบบชั่วขณะ

จากภาพความเร็วรอบของมอเตอร์และแรงบิดชั่วคราวแสดงให้เห็นว่า

- 1) วิธีการประมาณค่าแรงบิดที่ปรับตัวได้แบบเกรเดียนจะมีค่าที่แตกต่างเล็กน้อยในช่วงต้นวินาทีแรกหลังจากนั้นจะมีการประมาณค่าที่แม่นยำขึ้นดังรูป 5.42
- 2) เมื่อพิจารณาค่าแรงบิดเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันหรือสถานะชั่วคราวดังรูป 5.43 ตัวสังเกตร่วมกับตัวชดเชยสามารถประมาณค่าความเร็วรอบได้อย่างแม่นยำถึงแม้ระบบจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วก็ตาม
- 3) ในการประมาณความหนืดที่มีสถานะชั่วคราวหรือมีการเปลี่ยนแปลงแบบกะทันหันจะทราบได้จากความสัมพันธ์แรงบิด (x) กับความหนืด (y) คือ $y = 6583.9x - 97.01$ ดังนั้นถ้าทราบค่าแรงบิดชั่วคราวก็สามารถรู้ค่าความหนืดของของเหลวจากสมการดังกล่าว
- 4) ความหนืดแปรผันตรงกับแรงบิดแปรผกผันกับความเร็วรอบ

เมื่อทำการทดลองโดยใช้ของเหลวที่มีความหนืดในช่วง 80–320 cP โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดที่ได้จากเครื่องต้นแบบที่สร้างกับความหนืดของสารที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องมาตรฐานเครื่อง DV-III Ultra Rheometer แล้วเปลี่ยนแรงบิดให้เป็นความหนืดหลังจากนั้นทำการเปรียบเทียบความหนืดกับเครื่องมาตรฐานจะสังเกตได้ว่าวิธีการดังกล่าวสามารถประมาณค่าความหนืดที่สถานะคงตัวและสถานะชั่วคราวในช่วง 80–320 cP ได้

5.8 ทดสอบประสิทธิภาพเครื่องมือวัดความหนืดมาตรฐาน

นำสารมาตรฐานที่ทราบค่าความหนืดที่แน่นอนมาทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องมือมาตรฐาน โดยได้นำสารมาตรฐาน ดังนี้ น้ำมันอุตสาหกรรม VG100 ,VG 46,VG 32 ดังตารางที่ 5.5

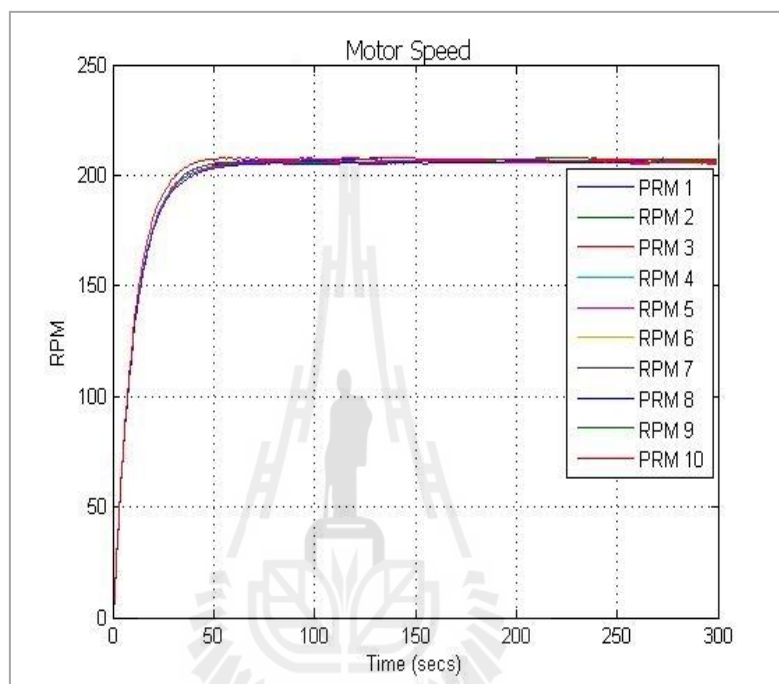
ตารางที่ 5.5 ทดสอบประสิทธิภาพเครื่องมือวัดความหนืดมาตรฐาน

Standard fluid	Viscosity (CP) Test	Viscosity (CP)	% Error	Temperature Test (°C)
VG 100	100.1071	100	0.1071	40
VG 46	45.9434	46	0.123	40
VG 32	31.96119	32	0.121	40

เครื่องมือมาตรฐานที่นำมาสอบเทียบจะมีความน่าเชื่อถือสามารถหาความหนืดได้ใกล้เคียงกับค่ามาตรฐาน โดยมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเพียง 0.12

5.9 ทดสอบความเร็วรอบเพื่อดูประสิทธิภาพในการทำซ้ำ

ในการทดลองจะวัดสารซ้ำเดิม เพื่อดูความน่าเชื่อถือและประสิทธิภาพของเครื่องต้นแบบ โดยจะนำความเร็วรอบในแต่ละครั้งมาทำการเปรียบเทียบผล จากการทดสอบจะเห็นได้ว่าความเร็วรอบเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นจะประมาณค่าได้ใกล้เคียงกันทั้ง 10 ครั้งที่ทำการวัด ดังรูปที่ 5.43



รูปที่ 5.44 วัดความเร็วรอบมอเตอร์

5.10 สรุป

ไมโครคอนโทรลเลอร์มีหน้าที่ในการสั่งการทำงานและแสดงผลของมอเตอร์โดยจะเปลี่ยนสัญญาณแบบ DAC ไปยังมอเตอร์และแปลงสัญญาณ ADC กลับเข้ามายังไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยเทคโนโลยีจะวัดความเร็วรอบของมอเตอร์กลับไปให้ไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อทำการประมวลผลการทำงานของมอเตอร์ จากผลการทดสอบจะสังเกตได้ว่าตัวสังเกตสามารถประมาณค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ได้ถูกต้องในกรณีที่ไม่มีการบิดเบือนระบบมอเตอร์เท่านั้น ดังนั้นจึงต้องเพิ่มตัวชดเชยแรงบิดแบบปรับตัวได้ด้วยวิธีการ Gradient Method เข้ามาร่วมทำงานกับตัวสังเกตการประมาณค่าความเร็วรอบของตัวสังเกตแม่นยำขึ้นไม่ว่าระบบมอเตอร์จะถูกบิดเบือนด้วยแรงบิดภายนอกหรือไม่ก็ตาม และนอกจากนี้ตัวชดเชยแรงบิดแบบปรับตัวได้ยังสามารถประมาณค่าแรงบิดที่เข้ามาบิดเบือนระบบ โดยวิธีการดังกล่าวสามารถประมาณค่าแรงบิดภายนอกทั้งสภาวะคงตัว

และสถานะชั่วคราวที่แรงบิดเปลี่ยนไปอย่างรวดเร็วได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยจะสังเกตได้จากการเปรียบเทียบความเร็วรอบที่ได้จากการวัดจริงและความเร็วรอบที่ได้จากการประมาณมีความแม่นยำใกล้เคียงกันมาก ซึ่งจากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าความเร็วรอบของมอเตอร์จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับแรงบิดที่เข้ามารอบวน เมื่อแรงบิดที่เข้ามารอบวนมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์มีค่าลดลงนั่นเอง ซึ่งค่าแรงบิดดังกล่าวที่ประมาณได้นั้นสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการหาความหนืดของของเหลวที่เข้ามารอบวนระบบมอเตอร์ จากการทดลองจะประมาณค่าความหนืดในช่วง 80–320 cP โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดที่ได้จากเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นกับความหนืดของสารที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดความหนืดมาตรฐาน DV-III Ultra Rheometer โดยเปลี่ยนแรงบิดให้เป็นความหนืดหลังจากนั้นทำการเปรียบเทียบความหนืดกับเครื่องมาตรฐานจะสังเกตได้ว่าวิธีการดังกล่าวสามารถประมาณค่าความหนืดที่สถานะคงตัวและสถานะชั่วคราวในช่วง 80–320 cP ได้ และเป็นวิธีการที่น่าสนใจอีกวิธีการหนึ่งที่จะพัฒนาเครื่องวัดความหนืดให้มีประสิทธิภาพต่อไป



บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

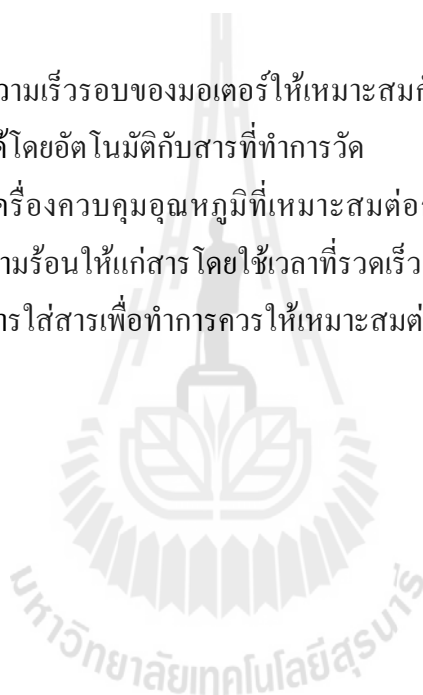
ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการประมาณค่าความหนืดของของเหลวด้วยวิธีการประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่เกิดจากความหนืดของของเหลว เริ่มจากสร้างเครื่องต้นแบบและระบุเอกลักษณ์ของระบบและหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความหนืด โดยใช้ตัวชดเชยแรงบิดทำงานร่วมกับตัวสังเกตโดยใช้ตัวสังเกตร่วมกับตัวชดเชยแรงบิดแบบปรับค่าได้ เพื่อประมาณค่าความหนืดของของเหลวแบบคงที่และเปลี่ยนแปลงได้ จากผลการจำลองระบบและการทดสอบระบบ แสดงให้เห็นว่าตัวสังเกตจะประมาณสถานะภายในที่เกิดขึ้นกับระบบ เมื่อมีแรงบิดภายนอกเข้ามารบกวนระบบจะทำให้ตัวสังเกตประมาณค่าสถานะผิดพลาด โดยสังเกตได้จากการเปรียบเทียบความเร็วรอบระหว่างค่าที่วัดได้จริงและตัวสังเกต เมื่อเพิ่มตัวชดเชยแรงบิดแบบปรับค่าได้ ด้วยวิธี Gradient Method จะทำให้การประมาณค่าสถานะของตัวสังเกต สามารถประมาณค่าได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้เพราะค่าความผิดพลาดจะเป็นสัดส่วน โดยตรงกับการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงนั่นเอง ดังนั้นจึงสามารถประมาณค่าดังกล่าวได้โดยไม่ต้องทำการวัด เมื่อนำค่าความหนืดที่ได้จากการประมาณเปรียบเทียบกับค่าความหนืดที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง DV-III Ultra Rheometer โดยสารที่นำมาทดสอบจะมีความหนืดระหว่าง 80–320 cP พบว่าวิธีการดังกล่าวสามารถใช้ในการประมาณค่าความหนืดแบบสถานะคงตัวและความหนืดสถานะชั่วครู่ได้

6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางพัฒนาต่อ

ในการทดลองครั้งนี้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นอุปกรณ์สำคัญในการประมาณค่าความหนืด มอเตอร์ควรมีประสิทธิภาพความเป็นเชิงเส้น และอุปกรณ์ในการตรวจจับความเร็วรอบหรือเทคโคมิเตอร์ต้องมีความแม่นยำถูกต้องสูง มีความรวดเร็ว และสัญญาณเอาต์พุตในการวัดไม่ยุ่งยากต่อการแปลงสัญญาณและสะดวกต่อการนำสัญญาณไปใช้งานต่อ สิ่งทีกล่าวมาดังกล่าวจะส่งผลให้การทดลองและระบบการประมาณค่าของมีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น ในการประมาณค่าความหนืดของของเหลวโดยวิธีการชดเชยแรงบิดแบบปรับค่าได้ แรงบิดจะเป็นตัวแปรสำคัญในการประมาณค่าความหนืดของของเหลว โดยปัจจัยที่มีผลต่อวิธีการประมาณค่าความหนืด ข้อเสนอแนะและแนวทางพัฒนาต่อจะต้องคำนึงถึงมีดังนี้

ข้อเสนอแนะและแนวทางพัฒนาต่อจะต้องคำนึงถึง

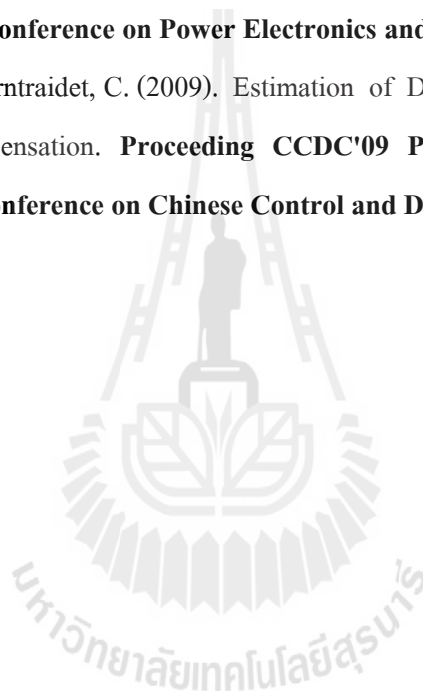
- 1) การออกแบบหัวกวนจะต้องสามารถวัดค่าแรงบิด ในช่วงที่ทำการวัดอย่างเหมาะสมไม่มีการสั่นเกิดขึ้นในขณะที่หมุน และหัวกวนควรมีหลายขนาดเพื่อความเหมาะสมในการวัดหาความหนืดของของเหลวในแต่ละช่วง
- 2) สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นเกิดจากอุปกรณ์ที่ต่อร่วมกับบอร์ด ไมโครคอนโทรลเลอร์ อุปกรณ์ดังกล่าวควรมีสัญญาณที่เข้าไปรบกวนระบบให้น้อยที่สุดหรือมีการกรองสัญญาณที่ดีก่อนที่จะนำสัญญาณเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์
- 3) เครื่องมาตรฐานจะใช้ปริมาณสารในการหาความหนืดที่น้อยกว่าเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นมา
- 4) ปรับระดับความเร็วรอบของมอเตอร์ให้เหมาะสมกับสารที่ทำการทดลอง เครื่องมือวัดควรปรับระดับความเร็วได้โดยอัตโนมัติกับสารที่ทำการวัด
- 5) มีการสร้างเครื่องควบคุมอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการวัดสามารถปรับลดอุณหภูมิได้หลายระดับ และถ่ายเทความร้อนให้แก่สาร โดยใช้เวลาที่รวดเร็ว
- 6) อุปกรณ์ในการใส่สารเพื่อทำการคววให้เหมาะสมต่อการวัดและง่ายต่อการใช้งาน



รายการอ้างอิง

- วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ (2548). การควบคุมระบบพลศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พิมพ์ครั้งที่ 2, 848 หน้า.
- บุญยงค์ ภู่นันทพงษ์ (2531). การวัดและควบคุมทางอุตสาหกรรม. ฟิสิกส์เซนเตอร์, 416 หน้า.
- สุวัฒน์ ภูธรนปรีดา (2552). วิศวกรรมการควบคุมอัตโนมัติ. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 352 หน้า.
- กิตติศักดิ์ รอดเรือง (2554). การสร้างเครื่องวัดความหนืดแบบหมุนอย่างง่ายและราคาถูก. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ชาญยุทธ ขจรไตรเดช (2550). การประมาณค่าแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้วิธีการชดเชยแบบปรับตัวได้. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี .
- Richard C. Dorf and Robert H Bishop (2005). **Modern Control Systems**. (10th Edition), London, Pearson Education.
- Karl J. Astrom and Bjorn Wittenmark(1995). **Adaptive Control**. (2nd Edition), USA, Addison Wesley.
- Katsuhiko Ogata, 2002. **Modern Control Engineering**. (4th Edition), USA, Prentice Hall.
- D. W. Brookfield and R. A.Minard. (1961).Viscosity Measurement as Used for Automatic Process Monitoring, **Ann. N.Y. Acad. Sci.**, Vol. 91, No. 4, pp. 838–849.
- Kichul Hong and Kwanghee Nam, (1998). A Load Torque Compensation Scheme Under the Speed Measurement Delay. **Journal of IEEE Transactions on Industrial Electronics**, Vol.45, Issue 2, pp.283–290.
- Dupuis,A.,Ghribi, M., and Kaddouri, A. (2004). Multiobjective genetic estimation of DC motor parameter and load torque. **International Conference on Industrial Technology(ICIT)** Vol.3, pp.1511–1514.
- Ouassaid, M., Cherkaoui, M., Nejmi, A., and Maaroufi, M. (2005). Nonlinear Torque Control for PMSM: A Lyapunov Technique Approach. **World Academy of Science Engineering and Technology 6**. pp.118–121.

- Samuel E. de Lucena and Walter Kaiser. (2008). Stepping –Motor-Driven Constant -Shear -Rate Rotating Viscometer. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, Vol. 57, No. 7, pp. 1338–1343.
- Chin Chih Ou and Tien Chi Chen.(2012).Power-Assisted Wheelchair Design base on a Lyapunov Torque Observer. **International Journal of Innovation Computing, Information and Control**,Vol. 8, pp. 8089–8102.
- Jong Sun Ko,Young Seok Jung, Sung Kwun Kim and Myung Joong Youn, (1995). MRAC Load Torque Observer for Position Control of Brushless DC Motor. **Proceedings of International Conference on Power Electronics and Drive Systems**, pp.622–627.
- Srisertpol, J., and Khajorntraidet, C. (2009). Estimation of DC Motor Variable Torque Using Adaptive Compensation. **Proceeding CCDC'09 Proceedings of the 21st annual international conference on Chinese Control and Decision Conference**, pp.767–772.



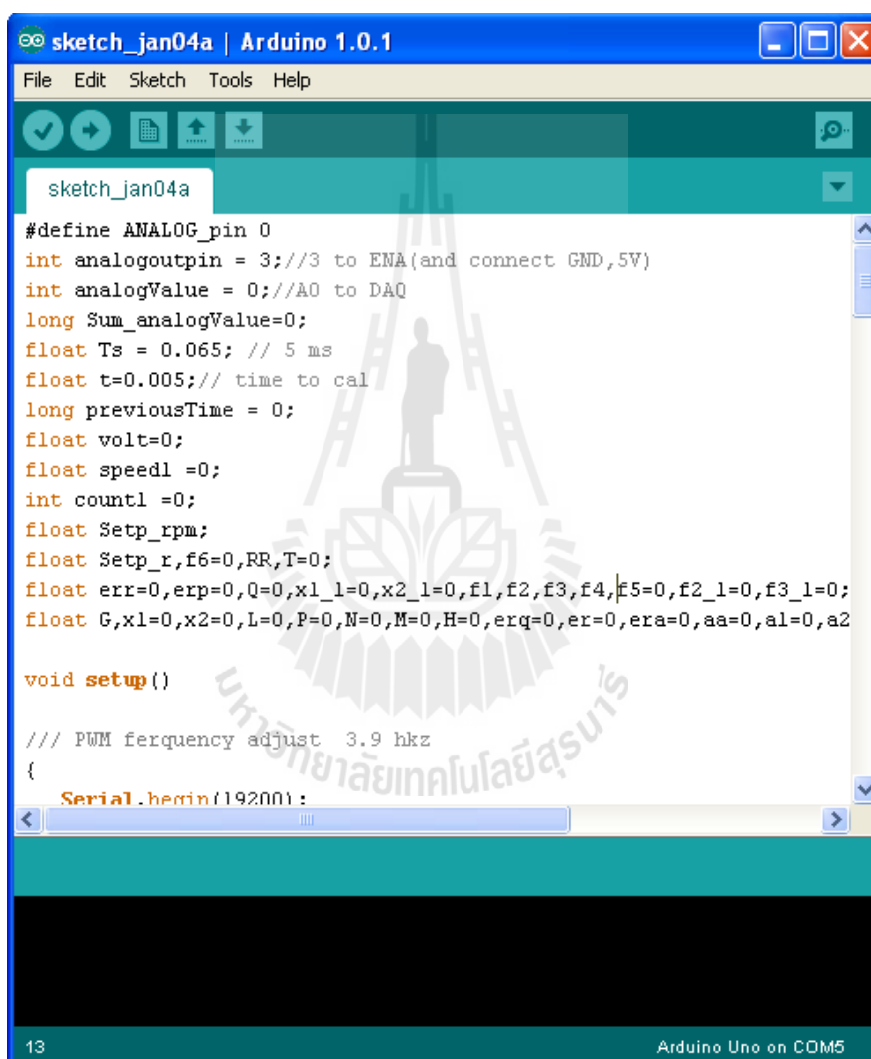


ภาคผนวก ก

โปรแกรมการประมาณค่าความหนืด

ก. โปรแกรมใช้ในการประมาณค่าความหนืด

ในการเขียนโปรแกรมควบคุมและแสดงผลการทำงานของมอเตอร์ใช้ Arduino 1.0.1 ดังแสดงในรูปที่ ก.1 โดยจะแสดงผลออกมา ได้แก่ ความเร็วรอบของระบบ ความเร็วรอบของระบบของตัวสังเกต แรงบิดที่ได้จากการประมาณ เป็นต้น โดยหน้าต่างแสดงผลไว้เก็บข้อมูล ดังรูปที่ ก.2 โดยสามารถเก็บไว้ในรูปโปรแกรม .TEXT แล้วนำไปประยุกต์ใช้เพื่อแสดงค่ากับโปรแกรมอื่นได้



```

sketch_jan04a | Arduino 1.0.1
File Edit Sketch Tools Help
sketch_jan04a
#define ANALOG_pin 0
int analogoutpin = 3;//3 to ENA(and connect GND,5V)
int analogValue = 0;//A0 to DAQ
long Sum_analogValue=0;
float Ts = 0.065; // 5 ms
float t=0.005;// time to cal
long previousTime = 0;
float volt=0;
float speedl =0;
int countl =0;
float Setp_rpm;
float Setp_r,f6=0,RR,T=0;
float err=0,erp=0,Q=0,x1_1=0,x2_1=0,f1,f2,f3,f4,f5=0,f2_1=0,f3_1=0;
float G,x1=0,x2=0,L=0,P=0,N=0,M=0,H=0,erq=0,er=0,era=0,aa=0,al=0,a2

void setup()

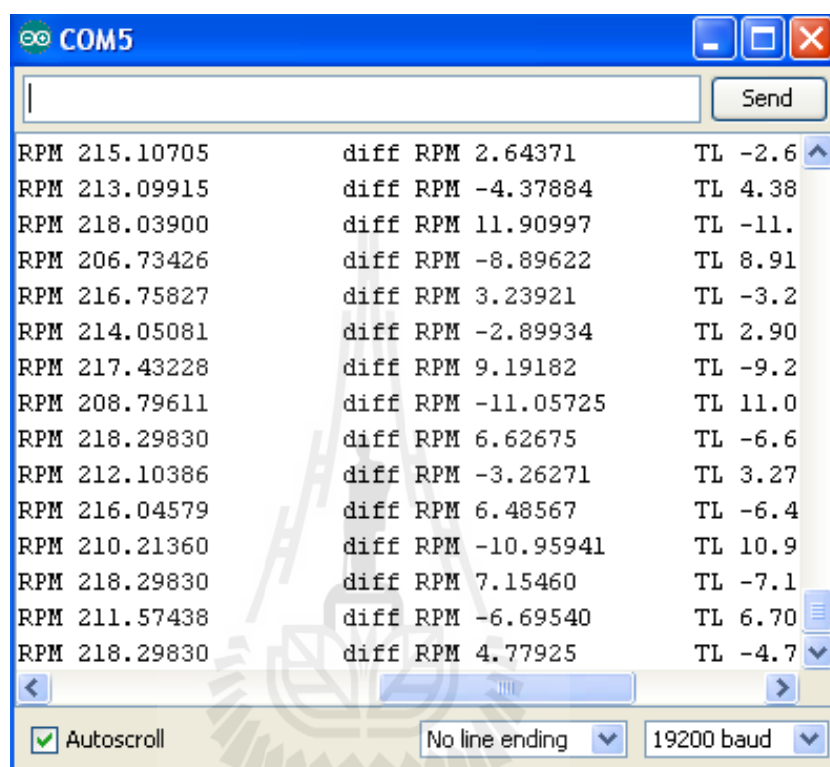
/// PWM ferquency adjust 3.9 hkHz
{
  Serial.begin(19200);

```

13 Arduino Uno on COM5

รูปที่ ก.1 โปรแกรม Arduino 1.0.1

การแสดงผลประมาณค่าแรงบิดของของเหลว สัญญาณมอเตอร์ ความเร็วรอบของมอเตอร์ ตัวสังเกต และตัวสังเกตร่วมกับตัวชดเชย เวลาที่ใช้ในการประมวลผล ค่าตัวแปรสถานะของตัวสังเกตและตัวชดเชยแรงบิด



รูปที่ ก.2 หน้าต่างแสดงผลของ Arduino 1.0.1

```

*****
// These Program is used to Viscometer using Model Reference Adaptive System
//   Program with Napassadol Singhata
//   Arduino UNO 328
//   January 2013
*****

#define ANALOG_pin 0

int analogoutpin = 3;
int analogValue = 0;
long Sum_analogValue=0;
float Ts = 0.065; //
float t=0.005;//
long previousTime = 0;
float volt=0;
float speed1 =0;
int count1 =0;
float Setp_rpm;
float Setp_r,f6=0,RR,T=0;
float err=0,erp=0,Q=0,x1_1=0,x2_1=0,f1,f2,f3,f4,f5=0,f2_1=0,f3_1=0;;
float
G,x1=0,x2=0,L=0,P=0,N=0,M=0,H=0,erq=0,er=0,era=0,aa=0,a1=0,a2=0,ab=0,ac=0,ad=0,a2_1=
0,a1_1=0;

//*****MODEL*****//

void setup()
{
  Serial.begin(19200);
  pinMode(analogoutpin,OUTPUT);
  TCCR2B = TCCR2B & 0b11111000 |0x02;// vary HZ to 3912 (from 495 HZ) 0x02 =mode 2
}

```

```

void loop()
{

while(1)
{
if(millis()-previousTime>=Ts*1000)
{previousTime=millis();

for(int i=1;i<=10;i++)
{
Sum_analogValue =Sum_analogValue+ analogRead(ANALOG_pin);

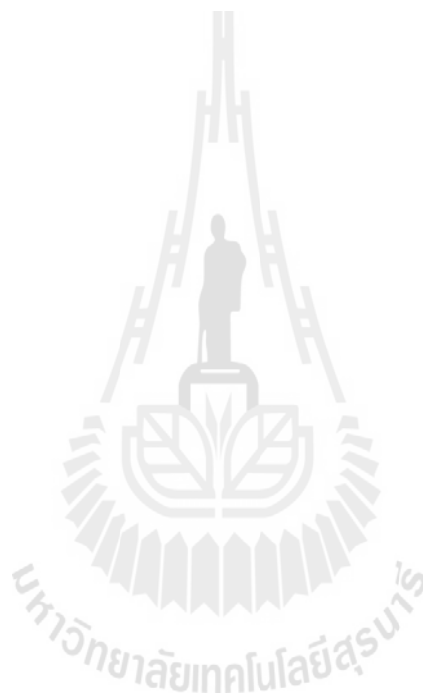
}
analogValue=Sum_analogValue/10;
Sum_analogValue=0;
volt=(float)analogValue*5/1023;
float GainMotor_Poten=217/4;
speed1=volt*GainMotor_Poten;
// Upid =0-3000
H=255;

//*****Observer*****//

Setp_rpm=5.6;
erp=Setp_rpm+(0.0448*x2);
//err=erp*255/3250; //
erq=erp-(169.9*x1)-( 4971.6*x2);
G=erq+(0.00169*Q);
x1=G*t+x1_1;//err because Ts
L=x1-(0.001*Q);
x2=L*t+x2_1;

```

```
if (x2>=0.0011263)
{
x2=0.0011263;
}
else if(x2<=0)
{
x2=0;
}
else
{
x2=x2;
}
if (x1>=0.0257)
{
x1=0.0257;
}
else if(x1<=0)
{
x1=0;
}
else
{
x1=x1;
}
N=3572.7*x2;
M=N*255/4;
P=N*54.25;
Q=P-speed1;
```




```

//*****Compensator*****//

f1= -169.9-(4971.6*f3)-(169.9*f2);
f2=f1*t + f2_1;
f3=f2*t + f3_1;
f4=f3*Q;
f5=29.3*f4;// Volt
f6=f5*54.25;// Volt to RPM
    T=P+f5;

if (f3<=-0.0342)
{
    f3=-0.0342;
}
else
{
    f3=f3;
}

analogWrite(analogoutpin,255);
x1_1=x1;
x2_1=x2;
f2_1=f2;
f3_1=f3;

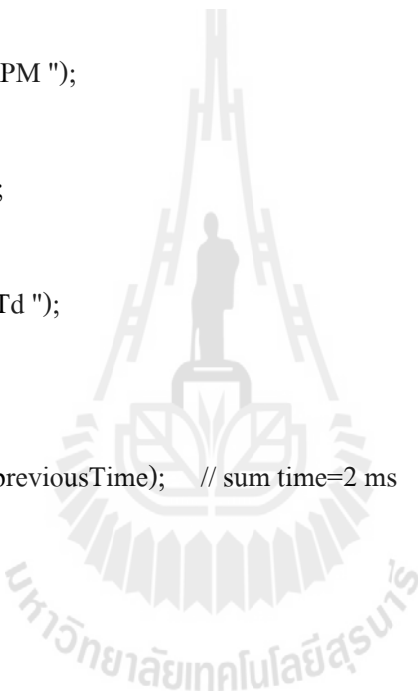
Serial.println();

Serial.print(volt); // using time = 380 us = 400

Serial.print("\t"); // using time = 380 us = 400
// Serial.print(count1); // using time = 380 us = 400
// Serial.print("\t"); // using time = 380 us = 400
Serial.print(speed1); // using time = 380 us = 400

```

```
Serial.print("\t erq ");
Serial.print(erq,5);
Serial.print("\t x1 ");
Serial.print(x1,5);
Serial.print("\t x2 ");
Serial.print(x2,5);
Serial.print("\t ObrPm ");
Serial.print(P,5);
Serial.print("\t diff RPM ");
Serial.print(Q,5);
Serial.print("\t TL ");
Serial.print(f5);
Serial.print("\t RPMTd ");
Serial.print(T);
Serial.print("\t");
Serial.print(millis()-previousTime); // sum time=2 ms
}
}
}
```

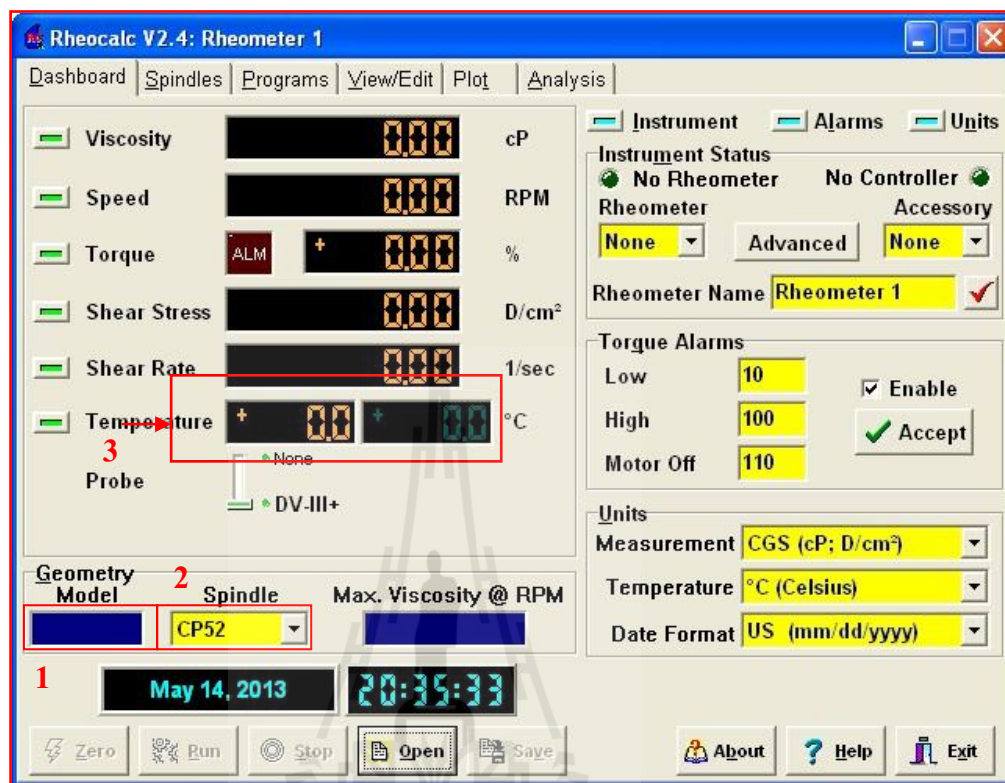


ภาคผนวก ข

โปรแกรมเครื่องมือมาตรฐาน DV-III Ultra Rheometer

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ข. โปรแกรมเครื่องมือมาตรฐาน DV-III Ultra Rheometer

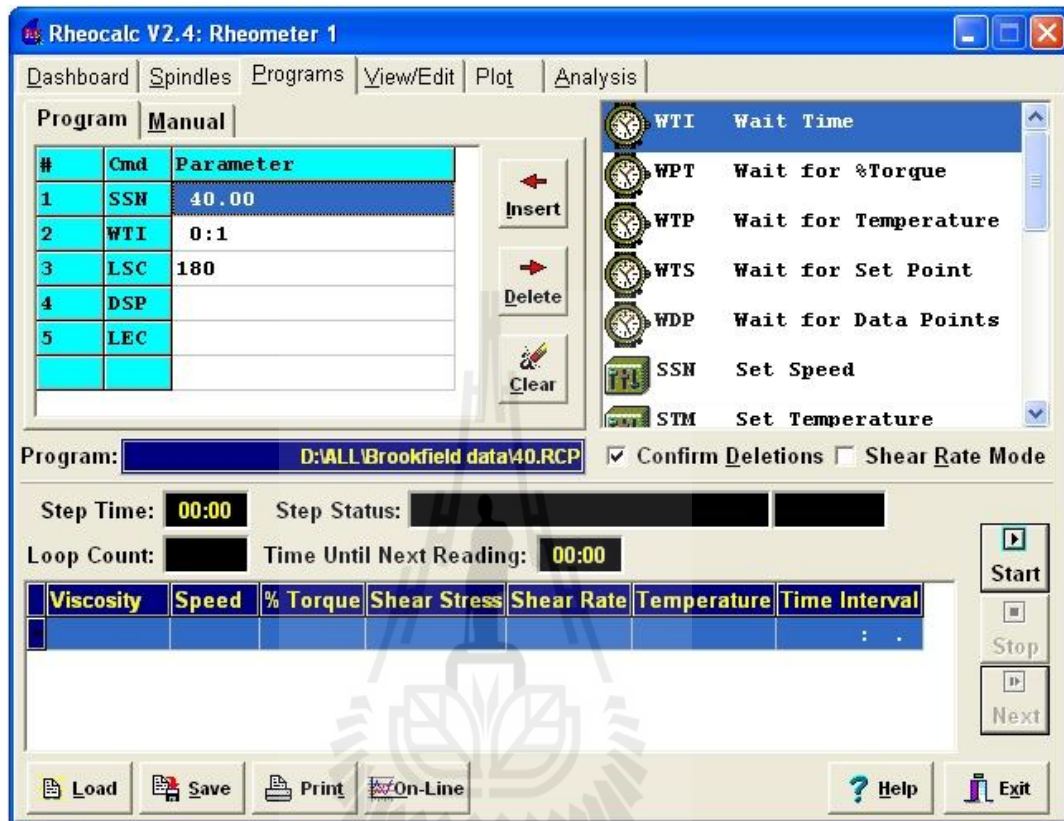


รูปที่ ข.1 โปรแกรมหน้า Dashboard

โปรแกรมหน้า Dashboard ดังรูป ข.1 พิจารณา

- 1) Geometry Model เมื่อต่อสายเครื่องมือวัดมาตรฐานกับคอมพิวเตอร์ที่ทำการบันทึกผล รันเครื่องมือวัดจะปรากฏขึ้นมาโดยอัตโนมัติ เครื่องพร้อมที่จะทำการวัดและบันทึกค่า
- 2) Spindle เลือกหัวเข็มที่ใช้ในการวัด ตัวเครื่องจะทำการคูณค่าตัวแปรที่เหมาะสมเพื่อวิเคราะห์ค่าความหนืดออกมา
- 3) Temperature ตัวตรวจวัดอุณหภูมิจะทำการอ่านค่าอุณหภูมิของสารขณะทำการวัด

การเขียนโปรแกรมเพื่อสั่งให้เครื่องวัดความหนืดทำงานตามที่ต้องการ โดยเครื่องมือจะทำงานตามที่ใช้งานป้อนโปรแกรมเข้าไป โปรแกรมหน้า Program ดังรูป ข.2



รูปที่ ข.2 โปรแกรมหน้า Program

ความหมายของคำสั่ง

SSN : Set viscosity speed

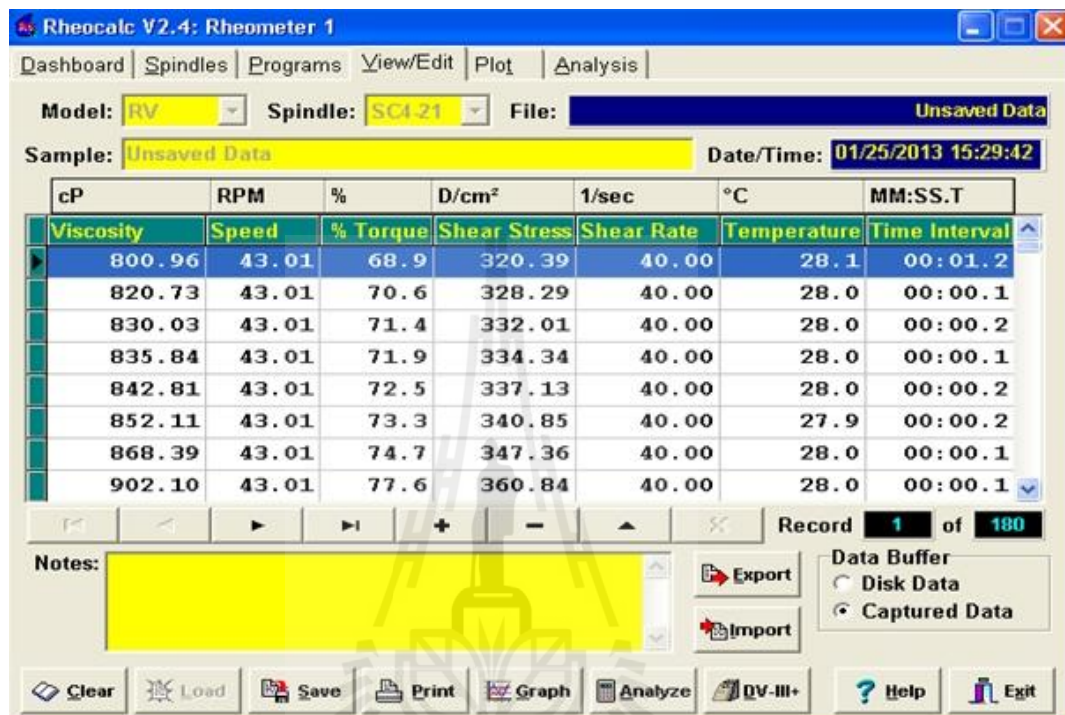
WTI : Wait for time interval

LSC : Loop start (Count)

DSP : Single data point

LEC : Loop end (Count)

โปรแกรมหน้า View/Edit ดังรูป ข.3 แสดงผลการวัดค่าของเครื่องมือมาตรฐาน โดยแสดงค่าต่างๆดังนี้ คือแรงบิด (Torque) ความเค้นเฉือน (Shear Stress) ความเร็วรอบในการหมุน (Speed of Rotation) และความหนืด (Viscosity) ของของเหลว



Rheocalc V2.4: Rheometer 1

Dashboard | Spindles | Programs | View/Edit | Plot | Analysis

Model: RV Spindle: SC1-21 File: Unsaved Data

Sample: Unsaved Data Date/Time: 01/25/2013 15:29:42

cP	RPM	%	D/cm ²	1/sec	°C	MM:SS.T
Viscosity	Speed	% Torque	Shear Stress	Shear Rate	Temperature	Time Interval
800.96	43.01	68.9	320.39	40.00	28.1	00:01.2
820.73	43.01	70.6	328.29	40.00	28.0	00:00.1
830.03	43.01	71.4	332.01	40.00	28.0	00:00.2
835.84	43.01	71.9	334.34	40.00	28.0	00:00.1
842.81	43.01	72.5	337.13	40.00	28.0	00:00.2
852.11	43.01	73.3	340.85	40.00	27.9	00:00.2
868.39	43.01	74.7	347.36	40.00	28.0	00:00.1
902.10	43.01	77.6	360.84	40.00	28.0	00:00.1

Record 1 of 180

Notes:

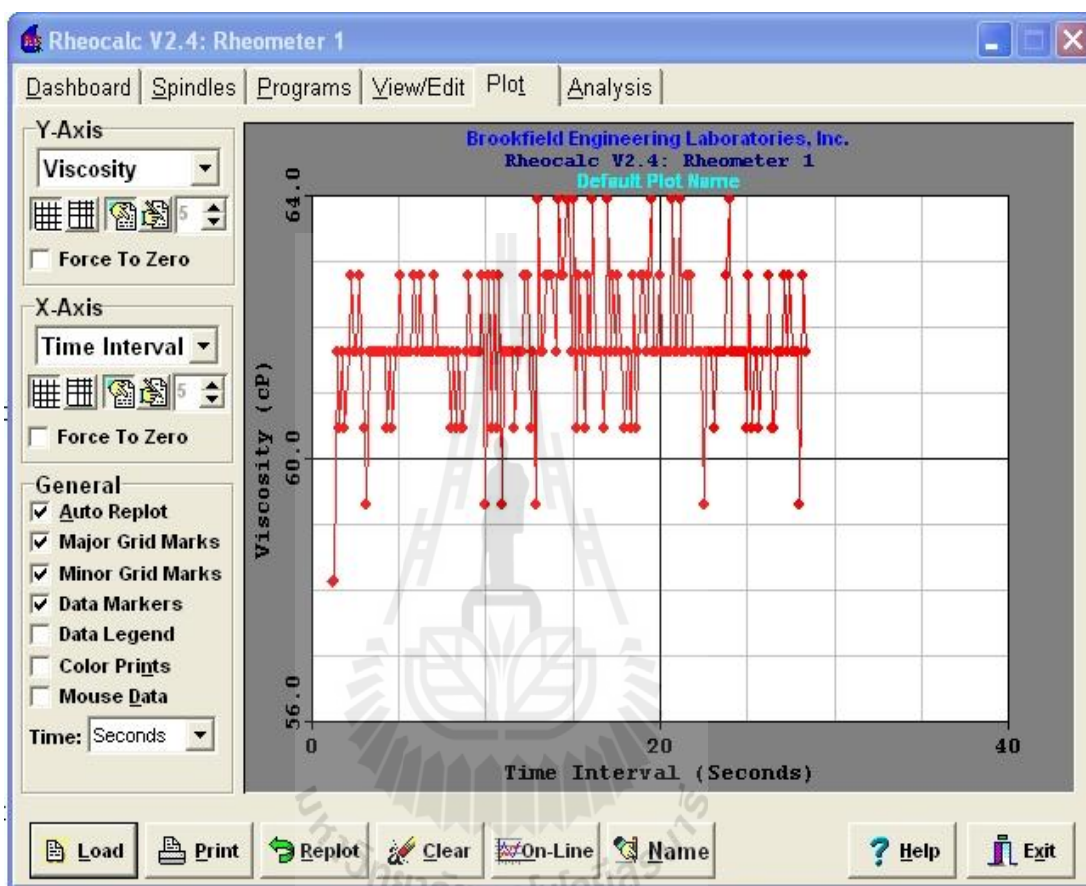
Export Import

Data Buffer
 Disk Data
 Captured Data

Clear Load Save Print Graph Analyze DV-III+ Help Exit

รูปที่ ข.3 โปรแกรมหน้า View/Edit

โปรแกรมหน้า Plot ดังรูป ข.4 แสดงผลการวัดเป็นรูปภาพ โดยสามารถเลือกแกนแนวตั้งและแนวนอนของกราฟ ได้แก่ แรงบิด ความเค้นเฉือน ความเร็วรอบในการหมุน ความหนืดของของเหลว และเวลา



รูปที่ ข.4 โปรแกรมหน้า Plot

ภาคผนวก ค

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่



รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

Srisertpol, J., Singhata N., (2013) **VISCOSITY ESTIMATION USING DC MOTOR WITH ADAPTIVE TORQUE COMPENSATOR**, Proceedings of the 5 th ECTI-CARD. 2013 Suranaree University of Technology. 8-10 May. Nakhonratchasima Thailand, pp.581-587.



Paper ID: 1235

การประมาณค่าความหนืดโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงร่วมกับการชดเชยแรงบิดแบบปรับตัวได้

VISCOSITY ESTIMATION USING DC MOTOR WITH ADAPTIVE TORQUE COMPENSATOR

นักสดล สิงหะตา¹ และ จิระพล ศรีเสวีรุณผล²

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

โทร0-4422-3117 โทรสาร0-4422-4613²อีเมลjiraphon@sut.ac.th

บทคัดย่อ

ความหนืดเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของของเหลวที่ภาคอุตสาหกรรมอาหาร ภาคอุตสาหกรรมน้ำมัน ใช้ความหนืดเป็นตัวแปรที่สำคัญในการวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์ วัตถุประสงค์ด้านอาหาร น้ำมันหล่อลื่น เป็นต้น ปัจจุบันเครื่องมือวัดความหนืดส่วนใหญ่มีราคาสูง และสามารถวัดความหนืดที่สถานะคงตัวได้เท่านั้นบทความนี้ได้นำเสนอวิธีการประมาณค่าความหนืดจากการประมาณค่าแรงบิดที่รบกวนที่เกิดจากความหนืดของของเหลวต่อแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยวิธีการชดเชยแรงบิดแบบปรับตัว ได้กับตัวสังเกต ในการประมาณค่าความหนืดของเหลวที่สัมพันธ์กับแรงบิดที่รบกวนซึ่งสามารถประมาณค่าความหนืดที่สถานะคงตัวและสถานะชั่วครู่ได้ ในการทดลองได้ทดสอบในช่วงความหนืด 80 - 320 cPเปรียบเทียบกับเครื่อง DV-III Ultra Rheometer พบว่าวิธีการดังกล่าวสามารถใช้ในการประมาณค่าความหนืดแบบสถานะคงตัวและความหนืดสถานะชั่วครู่ได้

คำสำคัญ

การประมาณค่าความหนืด, การชดเชยแบบปรับตัวได้, ทฤษฎีการควบคุม

Abstract

Viscosity is an importance property of liquid that food and petroleum industry use viscosity to be an important factor for product quality analysis such as raw food material and lubricant At present, most of viscometers are very expensive and only measure viscosity at the steady state. So this paper presents the estimation of viscosity method from torque estimation by using DC motor with adaptive torque compensation method.

Base on the viscosity relative with torque that can estimate viscosity at steady state and transient state. The experimental viscosity test show 80 - 320 cP in range in comparison with DV-III Ultra Rheometer for reference. The result show this method could do the viscosity estimation test

Keywords

Viscosity Estimation, Adaptive Compensator, Theory Control

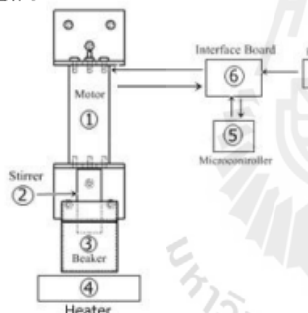
1. บทนำ

เครื่องมือวัดความหนืดแบบหมุน จะประกอบด้วยแท่งโลหะทรงกระบอก หมุนอยู่ในของเหลวที่ต้องการวัด โดยจะวัดการต้านทานของของเหลวออกมาเป็น แรงบิด(Torque)แล้วเปลี่ยนแรงบิดให้เป็นความหนืดโดยบทความนี้จะนำเสนอ การประมาณค่าแรงบิดภายนอก จากการประมาณค่าจากตัวสังเกตร่วมกับตัวชดเชยแรงบิดแบบปรับตัวได้ แทนการหาแรงบิด จากความสัมพันธ์ ที่เกิดจาก ความเค้นเฉือน (Shear Stress)กับ อัตราเฉือน (Shear Rate)[2,3] โดย[4]ได้นำเสนอวิธีการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงด้วย วิธี Lyapunov โดยได้ออกแบบเป็นระบบปิดที่มีตัวควบคุม แบบพีไอ เมื่อเพิ่มตัวชดเชยแรงบิดให้กับระบบ ตัวสังเกตจะประมาณค่าแรงบิดได้ดีและมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น [1] ได้นำเสนอการชดเชยแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของระบบควบคุมในภาวะที่แรงบิดรบกวนมีการเปลี่ยนแปลง ผลที่ได้คือ

การตอบสนองความเร็วรอบมีความรวดเร็วและลดการแกว่งตัวของ การตอบสนองในภาวะที่มีแรงบิดเข้ามา [5] ได้ใช้ตัวชดเชยด้วยวิธี Lyapunov ร่วมกับตัวสังเกต เพื่อประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง ผลที่ได้คือ การควบคุมมอเตอร์เป็นไปตามตำแหน่งที่ต้องการ ค่าความผิดพลาดมีค่าลดลง ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น ดังนั้น วิธีการประมาณค่าแรงบิดที่เกิดจากความหนืดของของเหลว ในสภาวะของเหลวมีค่า ความหนืดที่เปลี่ยนแปลง หรือ ค่าความหนืดคงที่ วิธีการประมาณค่าความหนืดโดยใช้การชดเชยแรงบิดแบบปรับตัวได้ จะเป็นวิธีที่สามารถประมาณค่าความหนืดของของเหลวที่มีประสิทธิภาพ

2. อุปกรณ์การทดลอง

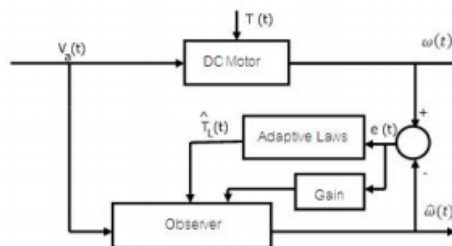
ชุดอุปกรณ์การประมาณค่าความหนืดโดยใช้มอเตอร์กระแสตรงกับการชดเชยแรงบิดแบบปรับตัวได้นั้นประกอบด้วย 1. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Servo Motor) 2. หัวกวน (Stirrer) 3. บีกเกอร์ (Beaker) 4. เครื่องเพิ่มอุณหภูมิ (Heater) 5. บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller Board) 6. บอร์ดเชื่อมต่อ (Interface Board) 7. แหล่งจ่ายไฟ (Power Supply) ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนภาพการทำงานของอุปกรณ์การทดลอง

ในการประมาณค่าความหนืดของของเหลวจะนำของเหลวใส่ภาชนะประมาณ 200 ml และนำชุดมอเตอร์พร้อมหัวกวนใส่ลงในภาชนะที่ใส่ของเหลว ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำหน้าที่ประมาณค่าแรงบิดที่รับกวนจากความหนืดของของเหลวผ่านบอร์ดเชื่อมต่อการประมาณค่าแรงบิดภายนอกของมอเตอร์กระแสตรง ที่เกิดจากแรงต้านของของเหลว นั้นสามารถประมาณค่าความหนืดของของเหลวชนิดนั้นได้ แผนภาพวิธีการประมาณค่าแรงบิดภายนอกของมอเตอร์กระแสตรงนั้น

สามารถแบ่งออกได้ 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 เป็นระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนที่ 2 เป็นระบบการประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่กระทำต่อมอเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนภาพการประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่เข้ามากระทำกับระบบ

2.1ระบบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง สามารถเขียนสมการทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ได้ดังนี้

$$J\dot{\omega} = -b \cdot \omega + K_t \cdot i_a - T_L \tag{1}$$

$$V_a - V_b = L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a \tag{2}$$

เมื่อ V_b (back emf) = $K_b \omega$, อินพุตของระบบคือความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_a) และแรงบิดภายนอก (T_L), เอาท์พุทของระบบความเร็วรอบ (ω) และ i_a คือกระแสไฟฟ้า

2.2ระบบการประมาณค่าแรงบิดภายนอก

ประกอบด้วยตัวสังเกตและตัวชดเชยแรงบิดแบบปรับตัวได้โดยตัวสังเกตจะทำหน้าที่ในการประมาณค่าสถานะที่เกิดขึ้นของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวชดเชยแรงบิดแบบปรับตัวได้ จะทำการประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่เข้ามากระทำต่อมอเตอร์

ตัวสังเกต (Observer) ในบทความนี้จะใช้ตัวสังเกตแบบเต็มอันดับประมาณค่าความเร็วรอบของมอเตอร์และสถานะของมอเตอร์ โดยมีสัญลักษณ์ $\hat{\omega}$ คือค่าตัวแปรของตัวสังเกต

$$J\dot{\hat{\omega}} = -b \cdot \hat{\omega} + K_t \cdot \hat{i}_a - \hat{T}_L + L_1 e \tag{3}$$

$$V_a - K_b \hat{\omega} = L_a \frac{d\hat{i}_a}{dt} + R_a \hat{i}_a + L_2 e \tag{4}$$

กำหนดให้ $e = \omega - \hat{\omega}$, ค่า e คือค่าความผิดพลาดของความเร็วรอบที่เกิดขึ้นระหว่างระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวสังเกต เมื่อ J = โมเมนต์ความเฉื่อย ($kg \cdot m^2$), K_t = ค่าคงที่ของแรงบิด (N·m/A), K_b = ค่าคงที่ของ Emf (V·s/rad), R_a = ความต้านทานของอาร์เมเจอร์ (Ω), L_a = ความ

เหนี่ยวนำของอาร์เมเจอร์ (H), b =ความหน่วง(N-m-s/rad), L_1, L_2 =อัตราขยายของตัวสังเกต

ตัวชดเชยแรงบิดแบบปรับตัวได้ (Adaptive Load Torque Compensator)

ตัวสังเกตไม่สามารถประมาณแรงบิดภายนอกที่มากกระทำในระบบของมอเตอร์ได้จึงจำเป็นต้องสร้างตัวชดเชยแรงบิดขึ้นมาเพื่อสังเกตค่าดังกล่าวโดยจะใช้วิธีการปรับตัวแบบเกรเดียน(Gradient Method)

จัดรูปแบบสมการเพื่อขจัดความแตกต่างของความเร็วยรอบเมื่อมีแรงบิดภายนอกกระทำต่อระบบโดยมีรายละเอียดและการพิสูจน์ทฤษฎี[4] ดังนั้นเราจะได้สมการการประมาณค่าชดเชยแรงบิดภายนอก(\hat{T}_L)ที่มีการเปลี่ยนแปลงของตัวสังเกตต่อการเปลี่ยนแปลงระบบ

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + a_2 \frac{\partial v}{\partial t} + a_1 v = -\alpha_1 \tag{5}$$

กำหนดให้ $a_1 = \left[\frac{K_b K_t + R_a b}{L_a J} \right]$, $a_2 = \left[\frac{b}{J} + \frac{R_a}{L_a} \right]$, $\alpha_1 = \frac{R_a}{L_a J}$,

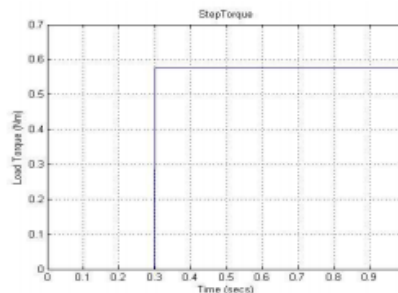
และ γ คือ อัตราการปรับตัว (Adaptation gain) และให้ $v = \frac{\partial \hat{T}_L}{\partial t}$ คือ อัตราเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบต่อแรงบิดภายนอก

3. ผลการจำลองสถานการณ์การณัของระบบ

ในหัวข้อนี้จะแสดง ผลการจำลอง การทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ในกรณีนี้ ระบบได้รับแรงบิดเปลี่ยนแปลงโดยพิจารณาจากระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์แบบระบบปิด พร้อมทั้งผลการชดเชยค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงซึ่งได้จากการประมาณให้กับตัวสังเกต ด้วยวิธี Gradient Method สำหรับค่าตัวแปรที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์การทดลอง ได้จากการวิธีระบุเอกลักษณ์ของระบบ (System Identification) ด้วยโปรแกรม MATLAB

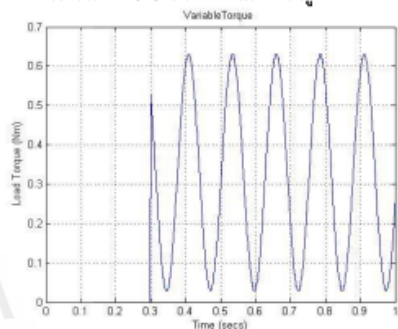
กำหนดให้ $J = 1 \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $K_t = 1 \times 10^{-3} \text{ V}\cdot\text{s}/\text{rad}$, $L_a = 1 \times 10^{-3} \text{ H}$, $b = 1 \times 10^{-6} \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$, $R_a = 0.173 \text{ }\Omega$, $K_b = 5.058 \text{ V}\cdot\text{s}/\text{rad}$ อัตราขยายของตัวสังเกต $L_1 = 0.0645$, $L_2 = -0.0004$ ตามลำดับ และ อัตราการปรับตัว $\gamma = 29.3$

กรณีนี้ 1ระบบมีค่า $T_L(t)$ แบบคงที่เป็นขั้นบันได (Step Function) และมีค่าหน่วยเวลาที่ 0.3 วินาทีดังแสดงในรูปที่ 3



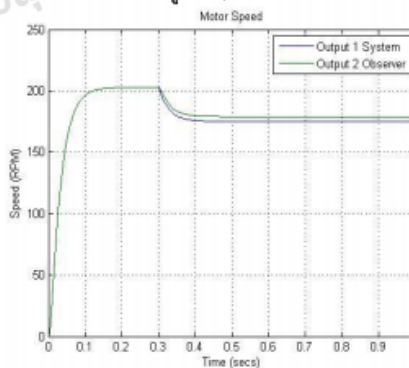
รูปที่ 3 แสดงค่า $T_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 1

กรณีนี้ 2ระบบมีค่า $T_L(t)$ แบบไม่คงที่ (Variable Torque) และมีค่าหน่วยเวลาที่ 0.3 วินาทีดังแสดงในรูปที่ 4

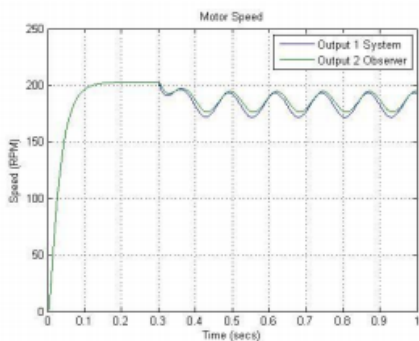


รูปที่ 4 แสดงค่า $T_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 2

การทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในภาวะที่ระบบได้รับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของความเร็วรอบ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงการประมาณค่าตัวแปรสถานะของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะมีความผิดพลาดเกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5,6

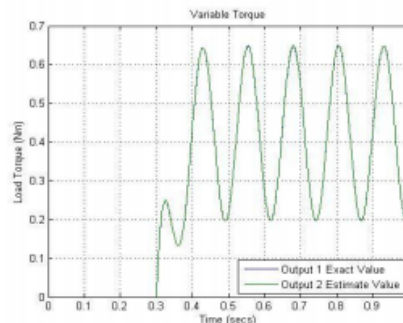


รูปที่ 5 แสดงค่า $\omega(t)$ และ $\hat{\omega}(t)$ สำหรับกรณีที่ 1

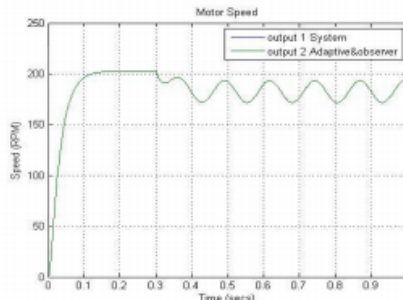


รูปที่ 6 แสดงค่า $\omega(t)$ และ $\hat{\omega}(t)$ สำหรับกรณีที่ 2

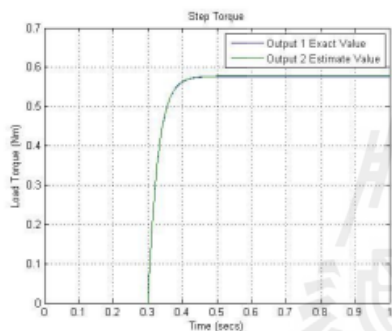
ผลการประมาณค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง และการประมาณค่าตัวแปรสถานะ $\hat{\omega}$ โดยใช้วิธี Gradient Method ที่กระทำกับระบบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ได้อย่างภาพมีประสิทธิผล ดังแสดงในรูปที่ 7,8,9,10



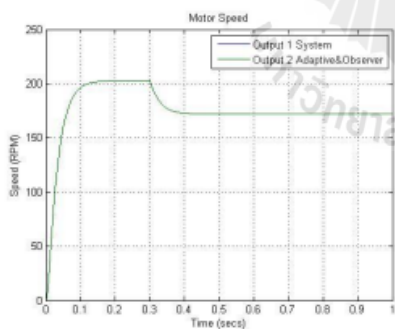
รูปที่ 9 แสดงค่า $T_L(t)$ และ $\hat{T}_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 2



รูปที่ 10 แสดงค่า $\omega(t)$ และ $\hat{\omega}(t)$ สำหรับกรณีที่ 2



รูปที่ 7 แสดงค่า $T_L(t)$ และ $\hat{T}_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 1



รูปที่ 8 แสดงค่า $\omega(t)$ และ $\hat{\omega}(t)$ สำหรับกรณีที่ 1

4. ผลการทดสอบและการวิจารณ์ผล

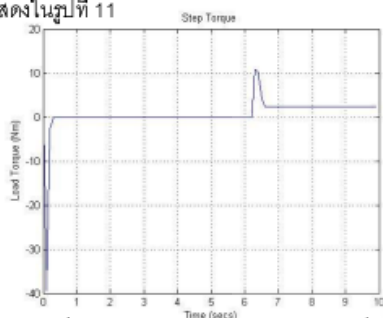
วิธีการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องต้นแบบดังนี้

1. ทดสอบประสิทธิภาพการประมาณค่าของตัวสังเกต โดยให้แรงบิดค่าต่างๆเข้าไปในระบบแล้วนำความเร็วรอบของทั้งสองระบบมาเปรียบเทียบกัน
2. หาความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของเครื่องข้างอิงมาตรฐานและแรงบิดของเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้น เพื่อแปลงค่าแรงบิดเครื่องต้นแบบเป็นความหนืด
3. นำค่าความหนืดที่ได้เปรียบเทียบกับเครื่องข้างอิงมาตรฐานเพื่อเปรียบเทียบความสามารถของเครื่องต้นแบบ การสอบเทียบค่าความหนืดจะใช้ DV-III Ultra Rheometer หัวเข็ม เบอร์ 21 โดยให้ อัตราเข็มนาฬิกา 40 1/s เป็นตัวข้างอิงมาตรฐาน

4.1 ทดสอบประสิทธิภาพการประมาณตัวสังเกต และตัวชดเชยแรงบิด เมื่อมีโหลดเข้ามาในระบบ

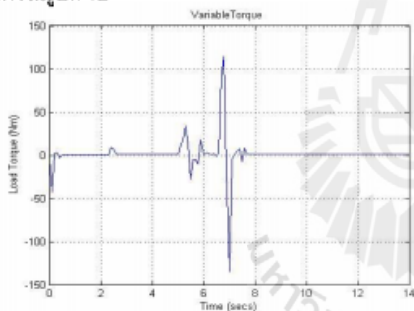
เนื่องจากไม่ทราบค่าที่แท้จริงของแรงบิดภายนอกที่เข้าไปรบกวนระบบ จึงเปรียบเทียบเฉพาะการประมาณค่าตัวแปรสถานะ $\hat{\omega}$ ที่สามารถวัดค่าจริงออกมาได้เท่านั้น เมื่อระบบมีค่า $T_L(t)$ แบบคงที่เป็นขั้นบันได(Step Function)

ดังแสดงในรูปที่ 11



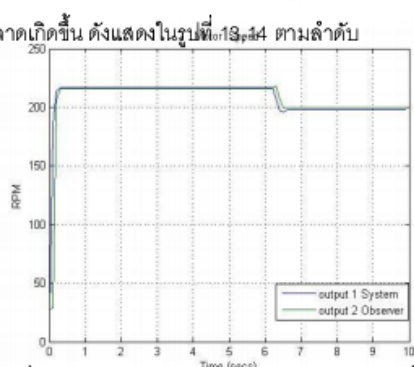
รูปที่ 11 แสดงค่า $T_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 1

และระบบมีค่า $T_L(t)$ แบบไม่คงที่ (Variable Torque) ดังแสดงในรูปที่ 12

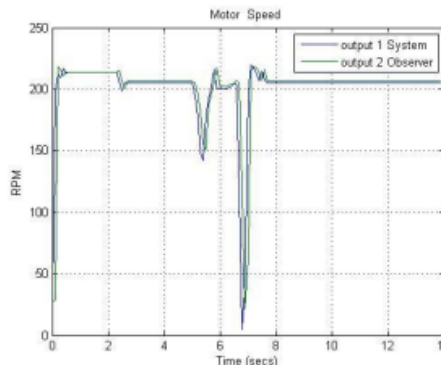


รูปที่ 12 แสดงค่า $T_L(t)$ สำหรับกรณีที่ 2

ค่าความเบี่ยงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะมีความผิดพลาดเกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 13 และ 14 ตามลำดับ

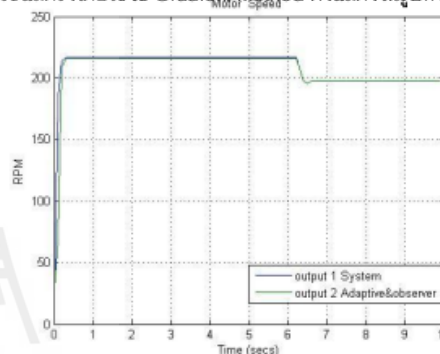


รูปที่ 13 แสดงค่า $\hat{\omega}(t)$ และ $\omega(t)$ สำหรับกรณีที่ 1

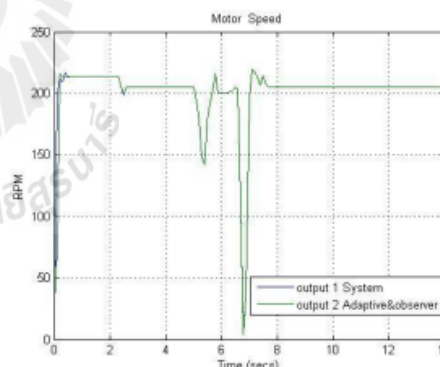


รูปที่ 14 แสดงค่า $\hat{\omega}(t)$ และ $\omega(t)$ สำหรับกรณีที่ 2

ผลการทดลองการประมาณค่าตัวแปรสถานะ $\hat{\omega}$ ของมอเตอร์ กระแสตรงโดยใช้วิธี Gradient Method ดังแสดงในรูปที่ 15, 16



รูปที่ 15 แสดงค่า $\hat{\omega}(t)$ และ $\omega(t)$ สำหรับกรณีที่ 1



รูปที่ 16 แสดงค่า $\hat{\omega}(t)$ และ $\omega(t)$ สำหรับกรณีที่ 2

4.2 ทดสอบหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดของเครื่องต้นแบบกับความหนืดของเครื่องสอบเทียบ
 สารที่ใช้ทดสอบ คือสารตารางที่ 1, น้ำมันอุตสาหกรรม VG 46 และ VG 100, น้ำมันซิลิโคน, น้ำมัน Hale 's & Blue Boy

ตารางที่ 1 สารที่ใช้ทดสอบผลสมระหว่างน้ำเชื่อมกับน้ำมีดังนี้

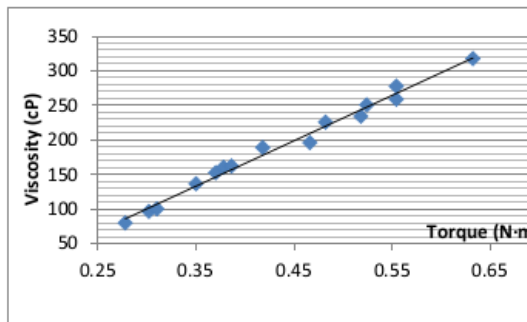
สาร	น้ำเชื่อมมีผล(ml)	น้ำ (ml)
A	175	30
B	175	28
C	175	27
D	175	25
E	175	20
F	175	19
G	175	18
H	175	17
I	175	15
J	175	10

ตารางที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของเครื่อง
 สอบเทียบกับแรงบิดของเครื่องที่สร้างสาร มีความหนืดอยู่
 ระหว่าง 80 – 320 cP เครื่องต้นแบบประมาณค่าแรงบิด
 อยู่ระหว่าง 0.28 – 0.63 N·m

Liquid	Torque(N·m) Prototype	Viscosity(cP) Brookfield	T(°C)
Hydraulic Oil VG46	0.278	79.79	28
Silicone Oil	0.302	96.8	28
Hydraulic Oil VG100	0.310	100.11	40
A	0.350	136.78	28
B	0.370	152.67	28
Hale's & Blue Boy	0.378	160.61	28
C	0.386	162.13	28
D	0.418	189.08	28
Hydraulic Oil VG100	0.466	196.08	28
E	0.482	225.78	28
F	0.518	234.2	28
G	0.524	250.55	28
H	0.554	258.89	28
I	0.554	277.69	28
J	0.632	317.65	28

นำค่าจากตารางที่ 2 มาเขียนเป็นกราฟ จะได้กราฟเส้นตรง
 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนืดและแรงบิด เป็นสมการ

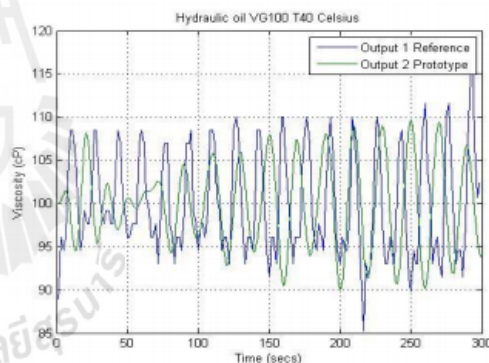
เส้นตรงโดยมีความสัมพันธ์คือ $y = 658.39x - 97.01$ ให้ $y =$
 Viscosity (cP), $x =$ Torque (N·m) ดังแสดงในรูปที่ 17



รูปที่ 17 ความหนืดเครื่องสอบเทียบกับแรงบิด
 เครื่องต้นแบบ

4.3 หาความหนืดขอสารจากเครื่องต้นแบบ

ดำเนินการเปลี่ยนแรงบิดให้เป็นความหนืดโดยใช้สมการ
 เส้นตรงที่ได้ จากการทดสอบหาความหนืดของเครื่องอ้างอิง
 สารที่นำมาแสดงคือน้ำมันอุตสาหกรรม VG100 ที่ 40 °C



รูปที่ 18 เปรียบเทียบความหนืดกับเครื่องมาตรฐาน
 ดังแสดงในรูปที่ 18 ผลการทดลอง ความหนืดที่วัดได้จาก
 เครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้น จะแกว่งอยู่ในช่วงความหนืด
 เครื่องสอบเทียบ ช่วงการแกว่ง ของสัญญาณประมาณ 15 cP

ตารางที่ 3. เปรียบเทียบเครื่องวัดความหนืดต้นแบบกับ เครื่องมืออ้างอิงเมื่อแปลงแรงบิดให้เป็นค่าความหนืด

Liquid	Viscosity(cP)		%error
	Brookfield	Prototype	
Hydraulic Oil VG46	79.79	90.37	13.25
Silicone Oil	96.8	95.07	1.8
Hydraulic Oil VG100@40	100.11	96.18	3.93
A	136.78	134.16	1.91
B	152.67	148.33	2.84
Hale' & Blue Boy	160.61	156.19	2.75
C	162.13	158.58	2.19
D	189.08	181.89	3.8
Hydraulic Oil VG100	196.08	185.29	5.5
E	225.78	224.91	0.39
F	234.20	231.29	1.24
G	250.55	253.44	1.15
H	258.89	261.86	1.15
I	277.69	273.3	1.58
J	317.65	328.29	3.35

เมื่อเปรียบเทียบความหนืดของเครื่องมาตรฐานกับ เครื่องต้นแบบ สาร J จะมีแตกต่างที่มากที่สุด คือ 10.64 โดย ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสูงสุด คือ Hydraulic Oil VG46 มี ค่า 13.25% ดังแสดงในตารางที่ 3

5. บทสรุป

การศึกษากการประมาณค่าความหนืดโดยใช้มอเตอร์ ไฟฟ้ากระแสตรงร่วมกับการชดเชยแรงบิดแบบปรับตัวได้ของ ค่าแรงบิดภายนอก ผลการจำลองสถานการณ์และผลการ ทดลองของระบบโดยใช้วิธี Gradient Method แสดงให้เห็นว่า วิธีการสามารถประมาณค่าแรงบิดภายนอกที่สัมพันธ์กับค่า ความหนืดแบบสถานะคงตัวและความหนืดสถานะชั่วครู่ได้ ในช่วง 80 - 320 cPเปรียบเทียบกับเครื่อง DV-III Ultra Rheometer

5.1 แนวทางการพัฒนาต่อ

1. หัวกวนควรมีหลายขนาดเพื่อความเหมาะสมในการ วัด หาความหนืดได้หลายย่าน และปริมาณของ สารในการวัดยังใช้ในปริมาณที่ค่อนข้างเยอะเมื่อ เทียบกับเครื่องจริง

2. สามารถปรับระดับความเร็วของมอเตอร์ให้เหมาะสม กับสารที่ทำการวัดได้เองโดยอัตโนมัติ และมีการ สร้างเครื่องควบคุมอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการวัด

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือและห้องปฏิบัติการ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Kichul Hong and Kwanghee Nam. (1998). *A Load Torque Compensation Scheme under the Speed Measurement Delay*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.45, Issue 2, pp.283-290
- [2] Samuel E. de Lucena and Walter Kaiser. (2008). *Stepping -Motor -Driven Constant -Shear -Rate Rotating Viscometer*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 57, No. 7, pp. 1338-1343
- [3] D. W. Brookfield and R. A. Minard. (1961). *Viscosity Measurement as Used for Automatic Process Monitoring*, Ann. N.Y. Acad. Sci., Vol. 91, No. 4, pp. 838-849
- [4] Chanyut Khajorntraidit and Jiraphon Srisertpol. (2010). *Torque Control for DC Servo Motor using Adaptive Load Torque Compensation*. The 9th WSEAS Proceedings of International Conference on System Science and Simulation in Engineering, Iwate, Japan, pp.454-458.
- [5] Jong Sun Ko, Young Seok Jung, Sung Kwun Kim and Myung Joong Youn. (1995). *MRAC Load Torque Observer for Position Control of Brushless DC Motor*. Proceedings of International Conference on Power Electronics and Drive Systems, pp.622-627.

ประวัติผู้เขียน

นายณภัสดล สิงหะตา เกิดเมื่อวันที่ 5 มกราคม พ.ศ. 2528 สำเร็จการศึกษาในระดับ
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอม
เกล้าธนบุรี จังหวัดกรุงเทพฯ เมื่อ พ.ศ. 2550 และวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์การbin
จากสถาบันการbinพลเรือน จังหวัดกรุงเทพฯ เมื่อ พ.ศ. 2552 และในปี พ.ศ. 2553 ได้ศึกษาต่อใน
ระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล(แมคคาทรอนิกส์) ในขณะที่ศึกษา
ต่อในระดับมหาบัณฑิต ได้มีประสบการณ์การสอน และวิชาเขียนแบบวิศวกรรมเครื่องกล 1 มี
ผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ 1 บทความ ความดังที่ได้รวบรวมไว้ใน ภาคผนวก ก

