

การวัด ทางวิศวกรรมเครื่องกล

Mechanical Engineering Measurements

พศ.ดร.โชคชัย จูทะโกสิทร์กานนท์
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยมหิดล



การวัด ทางวิศวกรรมเครื่องกล

Mechanical Engineering Measurements

พศ.ดร.โชคชัย จูทะโกสิทร์กานนท์
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยมหิดล



สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยมหิดล

พิมพ์ครั้งที่ 1 จำนวน 1,000 เล่ม

สิงหาคม 2561

จำหน่ายในรูปแบบ e-book

กุมภาพันธ์ 2566

ข้อมูลทางบรรณานุกรมของหอสมุดแห่งชาติ

โชคชัย จูฑะ โกสิทธิ์กานนท์.

การวัดทางวิศวกรรมเครื่องกล.-- นครปฐม : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยมหิดล,
2566. 422 หน้า.

1. การวัดทางอิเล็กทรอนิกส์. 2. วิศวกรรมเครื่องกล. I. ชื่อเรื่อง.

681.2

ISBN (e-book) 978-616-443-784-5

ISBN 978-616-443-205-5

อ้างอิง

โชคชัย จูฑะ โกสิทธิ์กานนท์. (2561). การวัดทางวิศวกรรมเครื่องกล = Mechanical engineering measurements. นครปฐม : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยมหิดล

จัดพิมพ์โดย

สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยมหิดล (MU PRESS)

กองบริหารงานวิจัย สำนักงานอธิการบดี มหาวิทยาลัยมหิดล

999 ถ.พุทธมณฑลสาย 4 ต.ศาลายา อ.พุทธมณฑล จ.นครปฐม

73170 โทร. 02-849-6379/080-575-5151

พิมพ์ที่

บริษัท ภาพพิมพ์ จำกัด

45/12-14, 33 หมู่ 4 ถ.บางกรวย-จางอนอม ต.บางขุน น.บางกรวย จ.นนทบุรี 11130

โทร. 0-2879-9154-6 โทรสาร 0-2879-9153

www.parbpim.com

คำนิยม

จากประสบการณ์เกี่ยวกับการสอน และการวิจัย ทางด้านการวัดและการควบคุม มากกว่า 20 ปี ขอติชมหนังสือการวัดทางวิศวกรรมเครื่องกล ซึ่งแต่งโดย ผศ.ดร.โชคชัย.

หนังสือเล่มนี้อธิบายส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องมือวัดที่แปลงจากปริมาณทางกลและความร้อน ไปเป็นปริมาณทางไฟฟ้าที่ง่ายต่อการบันทึกผลในรูปของข้อมูลดิจิทัล หรือ อนุล็อก, นอกจากนั้นแล้วผู้เขียนยังได้นำเสนอวิธีการทางสถิติ ที่จำเป็นในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการวัด และการหาความคลาดเคลื่อนของแต่ละองค์ประกอบของเครื่องมือวัด

หนังสือเล่มนี้จัดเนื้อหาในแต่ละบทได้เหมาะสมง่ายต่อการศึกษา และมีแบบฝึกหัดท้ายบทที่ดี หนังสือเล่มนี้ เหมาะสำหรับนักศึกษาปริญญาตรี ตลอดจนผู้สนใจที่จะเรียนรู้ระบบเครื่องมือวัด

ผมขอขอบคุณ ผศ. ดร. โชคชัย ที่ได้อุทิศเวลาในการแต่งหนังสือเล่มนี้ เพื่อเป็นอีกหนึ่งทางเลือกของผู้ที่มีความสนใจเรียนรู้เกี่ยวกับระบบเครื่องมือวัด

Thongchai Phairoh, PhD
Associate Professor
Virginia State University

คำนิยม

บอกตามตรงครับว่ารู้สึกประหลาดใจและเป็นเกียรติอย่างสูงในขณะเดียวกัน เมื่อ ผศ.ดร.โชคชัย จูฑะโกสิทธิ์กานนท์ หรือ “พีโซค” ผู้เป็นทั้งรุ่นพี่และอาจารย์ที่สอนพวกเรามาเรียนปริญญาตรีที่ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล เมื่อเกือบ 20 ปีที่แล้ว วันนี้แถมบอกผมว่าอยากให้ผมช่วยเขียนคำนิยมให้กับหนังสือเล่มนี้

ตัวผมเองเมื่อเรียนจบปริญญาตรีมา ก็ได้ทำงานที่วนเวียนกับเรื่องของเครื่องมือวัดและการควบคุมอัตโนมัติมาเกือบตลอดช่วงเวลาที่ทำงาน ก็เรียกว่าเกือบจะ 20 ปีที่มีเรื่องพวกนี้ผ่านเข้า-ออกชีวิตอาทิตย์ละ 5 วัน หนังสือหนังสือที่ผ่านตาไปก็มากมายพอสมควร แต่ก็ต้องบอกตามตรงว่าหนังสือหรือบทความภาษาไทยเกี่ยวกับเรื่องพวกนี้ยากมากถึงมากที่สุด ที่พอจะเห็นบ้างก็จะมีแต่ๆแบบผิวเผิน เล่มละนิด เล่มละหน่อย แล้วก็จบไป ในฐานะผู้ศึกษาเช่นเราก็ต้องคอยเก็บเล็กผสมน้อย เล่มนี้นิด เล่มนั้นหน่อย หากจากอินเทอร์เน็ตบ้าง บทความต่างประเทศบ้าง ผสมความรู้จากหลายๆของเราไปอีกหน่อย แล้วนำไปประยุกต์ใช้งานตามที่เราเข้าใจ

แต่ว่าวันนี้จะไม่เป็นอย่างนั้นอีกแล้ว เพราะหนังสือเล่มนี้จะช่วยให้ชีวิตของเราง่ายขึ้น และแน่นอนว่าผู้ที่ตั้งใจศึกษาในเรื่องของ “การวัดทางวิศวกรรมเครื่องกล” จะสามารถทำได้โดยสะดวกขึ้น เพราะจากที่อ่านต้นฉบับหนังสือเล่มนี้จะเห็นเลยว่า ดร.โชคชัย จงใจที่จะปูพื้นให้เราเห็นภาพรวมก่อนแล้วจึงเข้าไปสู่เรื่องของวงจรไฟฟ้าและรายละเอียดของอุปกรณ์ต่างๆในระบบ จากนั้นจะเป็นส่วนของการวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งตัวเนื้อหาก็จะเป็นการเริ่มต้นจากง่ายไปหายาก จึงเหมาะกับผู้ที่ต้องการศึกษาในทุกระดับ

ผมขอขอบคุณ ผศ. ดร. โชคชัย จูฑะโกสิทธิ์กานนท์ หรือ “พีโซค” ของพวกเราที่ได้อุทิศแรงกายและแรงใจเขียนหนังสือ “การวัดทางวิศวกรรมเครื่องกล” เล่มนี้ขึ้นมา ผมเชื่อมั่นว่าหนังสือเล่มนี้จะเป็นหนังสือที่ผู้ศึกษาทุกระดับจะใช้เป็นแนวทางในการศึกษาและพัฒนาทางการวัดทางวิศวกรรมให้ดียิ่งขึ้นไป

นันทวัฒน์ จินาพันธ์
ผู้จัดการทั่วไป
บริษัท เอ็มพอร์ไอ้ คอนโทรลส์ จำกัด

คำนิยม

การศึกษาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ มีความสำคัญกับการพัฒนาและการขับเคลื่อนเทคโนโลยีของประเทศไทยเป็นอย่างยิ่ง โดยเฉพาะยุคสมัยที่เศรษฐกิจของโลกขับเคลื่อน โดยใช้เทคโนโลยีเป็นตัวนำ หนึ่งในส่วนประกอบสำคัญของการศึกษาคือ แหล่งรวบรวมความรู้ เช่น เว็บไซต์ โซเชียลมีเดีย เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การรวบรวมความรู้เฉพาะเรื่องเป็นหมวดหมู่ ซึ่งสามารถเข้าถึงได้ง่าย และง่ายต่อการเผยแพร่ ได้แก่ ตำรา หรือ หนังสือ ยังมีความจำเป็น ต่อระบบการศึกษา วิชาการ และการเรียนการสอน เป็นอย่างยิ่ง

ผศ.ดร.โชคชัย จูฑะโกสิถิธกานนท์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ซึ่งมีประวัติการศึกษาระดับปริญญาตรี จาก ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล และระดับปริญญาเอก จากมหาวิทยาลัยโฮมลรัฐเพนซิลวาเนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา (Lehigh University, Pennsylvania, USA) เป็นผู้ที่มิประสพการณ์การสอนในวิชาการทางด้านวิศวกรรมเครื่องกล มากกว่า 15 ปี ท่านได้ อุทิศเวลา สติปัญญา และกำลังกาย ในการแต่งหนังสือทางด้านวิศวกรรมเครื่องมือวัดเล่มนี้ ขึ้นมาอย่างสมบูรณ์ ทั้งในเนื้อหารายละเอียด และจัดเป็นหมวดหมู่เป็นระบบ

ผมรู้สึกเป็นเกียรติเป็นอย่างยิ่งที่ได้รับเชิญให้เขียน คำนิยม ให้ผศ.ดร.โชคชัยเพื่อบรรจุ ในหนังสือเล่มนี้ ผมขอแสดงความชื่นชมที่ท่านได้เป็นส่วนหนึ่งของการพัฒนางานการศึกษา ทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ ของประเทศไทย ผมหวังเป็นอย่างยิ่งว่าหนังสือเล่มนี้จะเป็นประโยชน์ ต่อ นิสิต นักศึกษา ทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ และผู้สนใจที่ได้อ่านและศึกษาองค์ความรู้ต่างๆ จากหนังสือเล่มนี้

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.โชคชัย จูฑะโกสิถิธกานนท์ เป็นอย่างยิ่ง ในฐานะวิศวกรไทยคนหนึ่ง คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล และประธานสภาคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์แห่งประเทศไทย สมัยที่ 41 (พ.ศ.2561-2562) สำหรับสิ่งที่ท่านได้อุทิศและทำคุณประโยชน์ ให้กับวงการการศึกษาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ ของประเทศไทย



ผศ.ดร.จักรกฤษณ์ ศุทธากรณ์

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

ประธานสภาคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์แห่งประเทศไทย สมัยที่ 41

และ Trustee of International RoboCup Federation

คำนำ

หนังสือการวัดทางวิศวกรรมเครื่องกลนี้จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการประกอบการเรียนการสอนในรายวิชาการวัดทางวิศวกรรมของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล เนื่องจากเล็งเห็นว่าวิชาการวัดทางวิศวกรรมเครื่องกลเป็นวิชาที่มีประโยชน์ทั้งกลุ่มนักศึกษาที่ต้องการประกอบอาชีพด้านวิศวกรรม และกลุ่มนักศึกษาที่ต้องการศึกษาต่อในระดับสูงขึ้นไป สำหรับกลุ่มนักศึกษาที่ต้องการประกอบอาชีพด้านวิศวกรรมมีโอกาสในการนำองค์ความรู้ทางด้านการวัดทางวิศวกรรมเครื่องกลภายในหนังสือเล่มนี้เป็นพื้นฐานในการออกแบบติดตั้งและทำให้เกิดความเข้าใจในการประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์เครื่องมือวัดปริมาณต่างๆ ซึ่งในทุกอุตสาหกรรมเป็นเรื่องยากที่จะหลีกเลี่ยงการใช้หรือการออกแบบติดตั้งอุปกรณ์เครื่องมือวัดได้ สำหรับกลุ่มนักศึกษาที่ต้องการศึกษาต่อก็จะพบว่าในงานวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์การตรวจวัดเป็นเรื่องจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการได้มาของข้อมูล ดังนั้นจะรู้ได้อย่างไรว่าวิธีการบวนการวัด ความแม่นยำ ความเที่ยงตรงของข้อมูลที่ทำให้การวัดมีความเหมาะสมกับงานวิจัยนั้นๆ นอกเหนือจากที่กล่าวมา ยังอาจกล่าวได้ว่ากลุ่มบุคคลในงานด้านอื่นๆก็ยังมีการทำงานที่เกี่ยวข้องกับการวัดทั้งโดยตรงและโดยอ้อม หนังสือนี้จึงอาจใช้เพื่อเป็นแนวทางหรือประกอบการอ้างอิงได้

แม้ว่าจะมีหนังสือการวัดทางวิศวกรรมเครื่องกลอยู่มาก แต่หนังสือการวัดทางวิศวกรรมเครื่องกลที่มีการเรียบเรียงเป็นภาษาไทยก็มีค่อนข้างน้อย จึงทำให้ความรู้เกี่ยวกับการวัดทางวิศวกรรมเครื่องกลมีการเผยแพร่อยู่ในวงจำกัดตามไปด้วย หนังสือการวัดทางวิศวกรรมเครื่องกลนี้เรียบเรียงขึ้นเพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจสำหรับบุคคลที่มีความสนใจเกี่ยวกับการวัดทางวิศวกรรมเครื่องกล ด้วยเล็งเห็นว่าการใช้รูปประกอบสามารถช่วยทำให้ง่ายต่อการเข้าใจเนื้อหาได้ง่ายขึ้น จึงมีแนวคิดในการดำเนินการเขียนรูปขึ้นใหม่ทั้งหมดให้มีรูปแบบเป็นไปในแนวเดียวกัน ซึ่งแต่ละรูปมีการอ้างอิงถึงแหล่งที่มาตามที่ระบุได้ไว้ท้ายบทของแต่ละบท

เนื่องด้วยเนื้อหาของการวัดค่าปริมาณทางกลมีอยู่มากมาย จึงมีแนวคิดในการแบ่งเนื้อหาของหนังสือชุดนี้ออกเป็นสองส่วน คือส่วนของ“การวัดทางวิศวกรรมเครื่องกล” ซึ่งเป็นเนื้อหาที่กล่าวถึงกระบวนการตรวจวัดค่าทางกลโดยเรียบเรียงขึ้นภายในหนังสือเล่มนี้ และส่วนของ“เครื่องมือวัดทางวิศวกรรมเครื่องกล” ซึ่งเป็นเนื้อหาที่กล่าวถึงการวัดค่าปริมาณทางกลต่างๆ เฉพาะเจาะจงลงไปโดยจะเรียบเรียงขึ้นต่อไปภายหลัง

โชคชัย จูทะโกสิทธิ์กานนท์
สิงหาคม 2561

กิตติกรรมประกาศ

หนังสือเล่มนี้เขียนตามความรู้ที่ได้รับการสอนจากอาจารย์ธงชัย ไพเราะ สมัยที่ข้าพเจ้าได้ศึกษาในระดับปริญญาตรี ณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ข้าพเจ้าจึงขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ธงชัย ไพเราะ ซึ่งขณะนี้ท่านเป็นอาจารย์ประจำ ณ Virginia State University ซึ่งเป็นผู้ที่ถ่ายทอดความรู้เกี่ยวกับการวัดทางวิศวกรรมแก่ข้าพเจ้า จึงทำให้ข้าพเจ้าและเป็นแรงบันดาลใจอย่างยิ่งในการเรียบเรียงหนังสือเล่มนี้ขึ้น

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ที่ข้าพเจ้าได้ศึกษาในพื้นฐานความรู้ทางวิศวกรรมในแขนงต่างๆ ซึ่งมีประโยชน์ต่อการบูรณาการความรู้ต่างๆ เข้ากับความรู้ด้านการวัดทางวิศวกรรม ยิ่งไปกว่านั้นคือการที่มอบโอกาสในการประกอบสัมมาชีพในการเป็นอาจารย์จึงมีโอกาสนในการเรียบเรียงหนังสือเล่มนี้ขึ้น เพื่อใช้ประกอบการเรียนการสอนในรายวิชาการวัดทางวิศวกรรม

ขอให้คุณประโยชน์ที่เกิดขึ้นจากหนังสือเล่มนี้ส่งผลต่อความเจริญต่อชาติ พระศาสนา และพระมหากษัตริย์ รวมถึงพระคุณบิดามารดาของข้าพเจ้าอบรมเลี้ยงดูอันเป็นรากฐานที่ดีต่อการศึกษาแก่ข้าพเจ้า

สารบัญ

คำนำ.....	iv
กิตติกรรมประกาศ	v
สารบัญ	vi
บทที่ 1 การประยุกต์ใช้ระบบเครื่องมือวัดอิเล็กทรอนิกส์ (Applications of Electronic Instrument Systems).....	1
1.0 วัตถุประสงค์ (Objectives)	1
1.1 บทนำ (Introduction).....	1
1.2 ระบบเครื่องมือวัดอิเล็กทรอนิกส์ (The Electronic Instrument Systems)	2
1.3 การวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (Engineering Analysis)	7
1.4 การควบคุมกระบวนการ (Process Control).....	9
1.4.1 อุปกรณ์ควบคุมกระบวนการ (Process Control Devices).....	12
1.5 ความคลาดเคลื่อนในการทดลอง (Experimental Error)	23
1.5.1 ความคลาดเคลื่อนสะสม (Accumulation of Accepted Error).....	24
1.5.2 การใช้งานเครื่องมือไม่เหมาะสม (Improper Functioning of Instruments).....	26
1.5.3 ผลของทรานสดิวเซอร์ต่อกระบวนการ (Effect of the Transducer on the Process)...	30
1.5.4 ผลกระทบจากความไวต่อปริมาณอื่น (Dual Sensitivity Error)	32
1.5.5 ความคลาดเคลื่อนจากแหล่งอื่น (Other Sources of Error).....	33
1.6 การลดความคลาดเคลื่อนการวัด (Minimizing Experimental Error).....	35
1.7 สรุป (Summary)	38
1.8 อ้างอิง (References)	40

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 1	41
บทที่ 2 การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าเบื้องต้น	
(Analysis of Circuits)	48
2.0 วัตถุประสงค์ (Objectives)	48
2.1 บทนำและคำนิยาม (Introduction and Definitions)	48
2.2 องค์ประกอบพื้นฐานทางไฟฟ้า (Basic Electrical Components)	51
2.2.1 ความต้านทาน (Resistance)	51
2.2.2 ความจุทางไฟฟ้า (Capacitance)	53
2.2.3 ความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Inductance)	54
2.3 กฎของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Circuit Laws)	55
2.4 ไดโอด ทรานซิสเตอร์ และ เกทส์ (Diodes, Transistor, and Gates)	57
2.4.1 ไดโอด (Diodes)	57
2.4.2 ทรานซิสเตอร์ (Transistors)	59
2.4.3 เกทส์ (Gates)	63
2.5 วงจรไฟฟ้ากระแสตรง (DC Circuits)	65
2.6 ฟังก์ชันคาบ (Periodic Functions)	67
2.7 วงจรไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Circuits)	73
2.7.1 ความต้านทานเชิงซ้อน (Impedance)	77
2.8 ผลตอบสนองเชิงความถี่ (Frequency Response Function)	78
2.9 สรุป (Summary)	81
2.10 อ้างอิง (References)	85

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 2	86
บทที่ 3 อุปกรณ์บันทึกสัญญาณแบบอนาล็อก (Analog Recording Instruments)	91
3.0 วัตถุประสงค์ (Objectives)	91
3.1 บทนำ (Introduction).....	91
3.2 คุณลักษณะของอุปกรณ์บันทึก (General Characteristic of Recording Instruments)	92
3.2.1 ความต้านทานเชิงซ้อน (Input Impedance)	92
3.2.2 ความไว (Sensitivity).....	95
3.2.3 ช่วง (Range)	96
3.2.4 การเลื่อนศูนย์ (Zero Drift)	96
3.2.5 ผลตอบสนองเชิงความถี่ (Frequency Response).....	97
3.3 โวลต์มิเตอร์สำหรับการวัดในสภาวะคงที่ (Voltmeter for Steady-State Measurements) ...	99
3.3.1 คาร์อาร์สันวัตต์กลวานอมิเตอร์ (D'Arsonval Galvanometer).....	100
3.3.2 แอมมิเตอร์ (Ammeter).....	101
3.3.3 โวลต์มิเตอร์กระแสตรง (DC Voltmeter).....	102
3.3.4 ความคลาดเคลื่อนทางภาระของโวลต์มิเตอร์ (Voltmeter Loading Error).....	104
3.3.5 โวลต์มิเตอร์ขยายสัญญาณ (Amplified Voltmeters)	105
3.3.6 โวลต์มิเตอร์แบบปรับค่าความต้านทาน (Potentiometric Voltmeters)	106
3.4 โวลต์มิเตอร์สำหรับสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงช้า (Voltmeter for Slowly Varying Signals)	107
3.4.1 เครื่องบันทึกสัญญาณแบบแถบบันทึกแผนภูมิ (Strip Chart Recorders)	108
3.4.2 เครื่องบันทึกสัญญาณแบบสองแกน (X-Y Recorders).....	109

3.5 โวลต์มิเตอร์สำหรับสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงเร็ว (Voltmeter for Rapidly Varying Signals)	111
3.5.1 เครื่องบันทึกสัญญาณแบบออสซิลโลกราฟ (Oscillograph Recorders)	111
3.5.2 ผลตอบสนองทางเวลาของกัลวานอมิเตอร์ (Transient Response of Galvanometers) .	113
3.5.3 ผลตอบสนองสัญญาณคาบของกัลวานอมิเตอร์ (Periodic Signal Response of Galvanometers)...	119
3.5.4 ออสซิลโลสโคป (Oscilloscopes)	124
3.5.5 แถบแม่เหล็กบันทึกสัญญาณ (Magnetic Tape Recorder).....	126
3.6 สรุป (Summary)	128
3.7 อ้างอิง (References)	130
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 3	131
บทที่ 4 ระบบบันทึกสัญญาณแบบดิจิทัล	
(Digital Recording Systems)	137
4.0 วัตถุประสงค์ (Objectives)	137
4.1 บทนำ (Introduction).....	137
4.2 ค่าทางดิจิทัล (Digital Codes).....	138
4.3 กระบวนการแปลงค่า (Conversion Processes).....	141
4.4 การแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก (Digital-to-Analog Conversion)	144
4.5 การแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล (Analog-to-Digital Conversion)	147
4.5.1 วิธีประมาณสืบเนื่อง (Successive Approximation Method)	148
4.5.2 วิธีบูรณาการ (Integration Method)	151
4.5.3 วิธีขนานหรือทันที (Parallel or Flash Method)	154
4.6 การรับส่งกระจายข้อมูล (Data Distribution).....	156

4.6.1 โครงสร้างสายสัญญาณ (Bus Structures).....	158
4.7 การเชื่อมต่อ (Interfaces)	164
4.8 ดิจิตอลโวลต์มิเตอร์ (Digital Voltmeters)	167
4.9 ระบบเก็บข้อมูล (Data-Logging Systems)	169
4.10 ระบบจัดเก็บข้อมูล (Data-Acquisition Systems).....	171
4.11 ระบบจัดเก็บข้อมูลด้วยคอมพิวเตอร์ (PC-Based Data-Acquisition Systems)	173
4.12 ออสซิลโลสโคปแบบดิจิตอล (Digital Oscilloscopes)	174
4.13 เครื่องบันทึกคลื่นสัญญาณ (Waveform Recorders)	178
4.14 การเกิดนัยแฝง (Aliasing)	179
4.14.1 กรองสัญญาณนัยแฝง (Anti Aliasing Filters).....	183
4.15 สรุป (Summary)	184
4.16 อ้างอิง (References)	187
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 4	188
บทที่ 5 เซ็นเซอร์สำหรับทรานสดิวเซอร์	
(Sensors for Transducers).....	193
5.0 วัตถุประสงค์ (Objectives)	193
5.1 บทนำ (Introduction).....	193
5.2 โปเทนชิโอมิเตอร์ (Potentiometers).....	193
5.3 หม้อแปลงความเหนี่ยวนำ (Differential Transformers)	196
5.4 สเตรนเกจแบบความต้านทานไฟฟ้า (Resistance Strain Gages).....	201
5.5 เซ็นเซอร์ชนิดเก็บประจุ (Capacitance Sensors)	206

5.6 เซ็นเซอร์ชนิดกระแสไหลวน (Eddy-Current Sensors)	210
5.7 เซ็นเซอร์ชนิดเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Sensors)	214
5.8 เซ็นเซอร์ชนิดเพียโซรีซิสทีฟ (Piezoresistive Sensors)	218
5.9 เซ็นเซอร์ชนิดโฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric Sensors)	221
5.9.1 อุปกรณ์ตรวจจับโฟตอนชนิดหลอดสุญญากาศ (Vacuum Tube Photon Detectors)	224
5.9.2 เซลล์โฟโตคอนดักเตอร์ (Photoconductive Cells)	226
5.9.3 โฟโตไดโอดชนิดเซมิคอนดักเตอร์ (Semiconductor Photodiodes)	228
5.10 เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิแบบความต้านทานแปรผัน (Resistance Temperature Detectors) ..	230
5.11 เทอร์มิสเตอร์ (Thermistors)	231
5.12 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouples)	233
5.13 คริสตัลลออสซิลเลเตอร์ (Crystal Oscillators)	235
5.14 สรุป (Summary)	238
5.15 อ้างอิง (References)	240
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 5	241
บทที่ 6 วงจรปรับสัญญาณ	
(Signal Conditioning Circuits)	247
6.0 วัตถุประสงค์ (Objectives)	247
6.1 บทนำ (Introduction)	247
6.2 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (Power Supplies)	248
6.2.1 แบตเตอรี่ (Battery Supplies)	248
6.2.2 แหล่งจ่ายพลังงานชนิดสายส่งแรงดันไฟฟ้า (Line Voltage Supplies)	252

6.3 วงจร โปเทนชิโอมิเตอร์แรงดันคงที่ (Constance Voltage Potentiometer Circuit).....	254
6.4 วงจร โปเทนชิโอมิเตอร์กระแสคงที่ (Constance Current Potentiometer Circuit)	258
6.5 วงจรวิทสโตนบริดจ์แรงดันคงที่ (Constance Voltage Wheatstone Bridge).....	260
6.6 วงจรวิทสโตนบริดจ์กระแสคงที่ (Constance Current Wheatstone Bridge)	265
6.7 วงจรขยายสัญญาณ (Amplifiers).....	269
6.8 วงจรขยายสัญญาณอ็อปแอมป์ (Operational Amplifiers).....	276
6.8.1 วงจรขยายสัญญาณการกลับเฟส (Inverting Amplifier).....	277
6.8.2 วงจรขยายสัญญาณผลต่าง (Differential Amplifier)	280
6.8.3 วงจรตามสัญญาณแรงดัน (Voltage Follower)	283
6.8.4 วงจรขยายสัญญาณการรวม (Summing Amplifier).....	284
6.8.5 วงจรขยายสัญญาณการอินทิเกรต (Integrating Amplifier)	287
6.8.6 วงจรขยายสัญญาณการดิฟเฟอเรนเชียล (Differentiating Amplifier)	288
6.9 วงจรกรองสัญญาณ (Filters).....	289
6.9.1 วงจรกรองสัญญาณความถี่สูงผ่านชนิดตัวต้านทานตัวเก็บประจุไฟฟ้า (High Pass RC Filter). 289	
6.9.2 วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่านชนิดตัวต้านทานตัวเก็บประจุไฟฟ้า (Low Pass RC Filter).. 292	
6.9.3 วงจรกรองสัญญาณชนิดแอคทีฟ (Active Filter)	293
6.10 วงจรผสมและแยกขนาดสัญญาณ (Amplitude Modulation and Demodulation).....	296
6.11 วงจรวัดเวลา (Time Measuring Circuits)	299
6.11.1 วงจรนับรหัสไบนารี (Binary Counting Unit)	299
6.11.2 การใช้เกทส์เพื่อการนับเวลา (Gates in Counter Applications).....	301
6.11.3 ทรigger (Triggers).....	301

6.11.4 เครื่องมือนับเวลา (Counting Instruments)	303
6.12 สรุป (Summary)	307
6.13 อ้างอิง (References)	313
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 6	314
บทที่ 7 กระบวนการทางสถิติ	
(Statistical Methods)	326
7.0 วัตถุประสงค์ (Objectives)	326
7.1 บทนำ (Introduction).....	326
7.2 คุณลักษณะการแจกแจงทางสถิติ (Characterizing Statistical Distributions)	327
7.2.1 กราฟแผนภาพแสดงการแจกแจงทางสถิติ (Graphic Representation of the Distributions)..	330
7.2.2 แนวโน้มค่ากลางของการวัด (Measure of Central Tendency).....	332
7.2.3 การวัดการแจกแจง (Measure of Dispersion)	334
7.3 ฟังก์ชันการแจกแจงทางสถิติ (Statistical Distribution Functions)	336
7.3.1 การแจกแจงแบบเกาส์ (Gaussian Distributions)	338
7.3.2 การแจกแจงแบบไวบูลล์ (Weibull Distributions)	344
7.4 ช่วงความเชื่อมั่นสำหรับการทำนาย (Confidence Intervals for Predictions)	348
7.5 การเปรียบเทียบค่ากลาง (Comparison of Means)	353
7.6 เงื่อนไขทางสถิติของข้อมูลดิบ (Statistical Conditioning of Data)	355
7.7 การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis)	356
7.7.1 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Analysis)	357
7.7.2 การวิเคราะห์การถดถอยหลายตัวแปร (Multivariate Regression Analysis)	361

7.8 การทดสอบไคสแควร์ (Chi-Square Testing)	363
7.9 ความคลาดเคลื่อนสะสมและแพร่กระจาย (Error Accumulation and Propagation).....	369
7.10 สรุป (Summary)	372
7.11 อ้างอิง (References)	375
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 7	376
ภาคผนวก ก (Property Data and Conversion Factors).....	385
ดัชนี (Index)	404

บทที่ 1

การประยุกต์ใช้ระบบเครื่องมือวัดอิเล็กทรอนิกส์ (Applications of Electronic Instrument Systems)

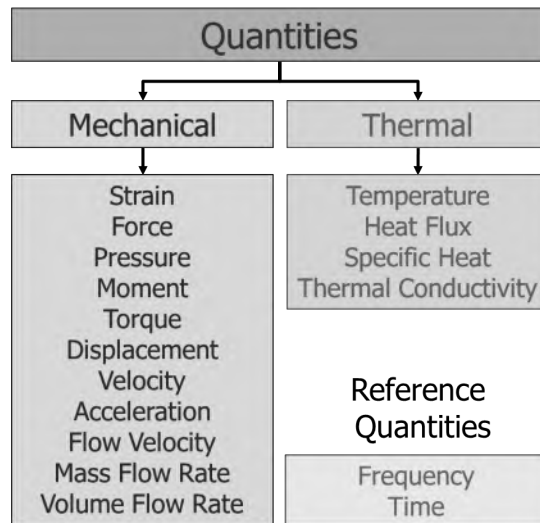
1.0 วัตถุประสงค์ (Objectives)

- บรรยาย คำนิยามพื้นฐานที่เกี่ยวข้องในการวัดทางวิศวกรรม
- ทบทวนความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้องในการวัดทางวิศวกรรม
- ยกตัวอย่างการใช้งานการวัดทางวิศวกรรม

1.1 บทนำ (Introduction)

วัตถุประสงค์หลักของบทนี้เป็นการแนะนำระบบเครื่องมือวัดอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อก่อให้เกิดความสามารถในการอ่านค่าหรือแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงสำหรับกระบวนการวัดค่าที่ถูกต้องเที่ยงตรง (Accurate) รวมถึงความสามารถในการตีความหมายจากการวัดค่าปริมาณทางกล ปริมาณทางความร้อน และปริมาณอ้างอิงได้ ตัวอย่างปริมาณทางกล เช่น ความเครียด ความเค้น แรง ความดัน โมเมนต์ แรงบิด การกระจัด ความเร็ว ความเร่ง ความเร็วการไหล อัตราการไหลเชิงมวล และอัตราการไหลเชิงปริมาตร ปริมาณทางความร้อน เช่น อุณหภูมิ อัตราการถ่ายเทความร้อน ค่าความร้อนจำเพาะ และค่าการนำความร้อน ปริมาณอ้างอิง เช่น ความถี่ และเวลา [5]

นิยาม ความหมาย ความเข้าใจแนวคิดเกี่ยวกับปริมาณทางกลและปริมาณทางความร้อน เป็นพื้นฐานจากการศึกษาที่ผ่านมาจากวิชาทางกลศาสตร์ ฟิสิกส์ หรือพื้นฐานทางวิทยาศาสตร์แล้ว เช่น สถิตศาสตร์ พลศาสตร์ กลศาสตร์วัสดุ หรืออุณหพลศาสตร์ ตลอดจนการมีประสบการณ์ในการวัดปริมาณดังกล่าวจากการปฏิบัติการทดลองทางวิศวกรรมแล้ว จุดมุ่งหมายของการศึกษาการวัดทางวิศวกรรมนี้ จึงต้องการแนะนำวิธีการวัดที่สามารถประยุกต์ใช้สำหรับระบบเครื่องมือวัดอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในปฏิบัติการทดลองเพื่อให้เกิดการใช้งานอย่างเหมาะสม รวมถึงสามารถประยุกต์ใช้วิธีการวัดให้มีประสิทธิภาพเพื่อแก้ปัญหาปฏิบัติการทางวิศวกรรม

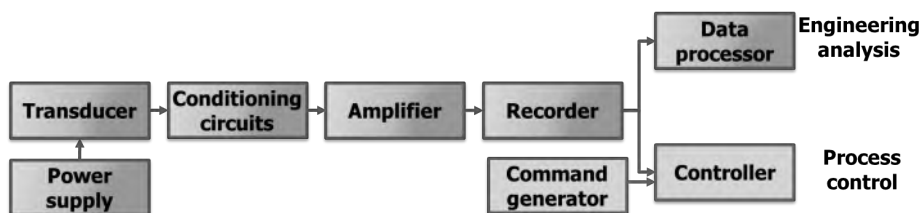


ภาพที่ 1.1 ปริมาณทางกลและปริมาณทางความร้อน [5]

สำหรับขั้นตอนนี้จะให้ความสำคัญกับระบบเครื่องมือวัดอิเล็กทรอนิกส์มากกว่าระบบทางกล เนื่องจากโดยส่วนใหญ่ระบบทางอิเล็กทรอนิกส์ให้ข้อมูลที่มีความเที่ยงตรงมากกว่า ประกอบกับมีคุณลักษณะที่ง่ายต่อการออกแบบ มีความครบถ้วน รวมถึงกระบวนการประเมินผลจากการทดลอง นอกจากนี้ระบบอิเล็กทรอนิกส์ให้ผลลัพธ์สัญญาณไฟฟ้าที่สามารถนำมาใช้โดยตรงสำหรับการควบคุมกระบวนการแบบอนาล็อกหรือทำการแปลงเป็นข้อมูลดิจิทัลสำหรับการบันทึกค่า จากข้อได้เปรียบของระบบการวัดอิเล็กทรอนิกส์เปรียบเทียบกับระบบการวัดทางกล จึงทำให้การเลือกใช้ระบบการวัดอิเล็กทรอนิกส์มีความสำคัญสำหรับวัดค่าทางกลมากกว่าระบบการวัดทางกลที่มีความนิยมลดลงไปในปัจจุบัน

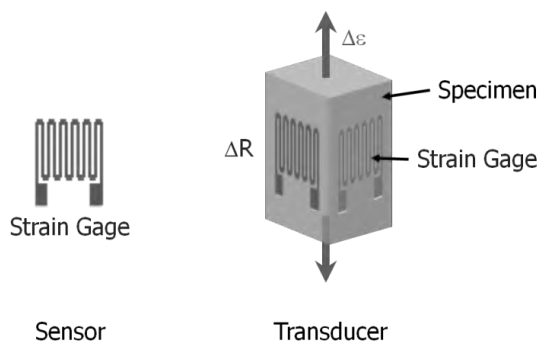
1.2 ระบบเครื่องมือวัดอิเล็กทรอนิกส์ (The Electronic Instrument Systems)

ระบบเครื่องมือวัดอิเล็กทรอนิกส์ที่สมบูรณ์มักประกอบขึ้นจากองค์ประกอบหรือระบบย่อยอย่างน้อยหกองค์ประกอบจากแปดองค์ประกอบ [2] ตามที่แสดงในรูป 1.2 ซึ่งประกอบด้วย แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ทรานสดิวเซอร์ วงจรเงื่อนไขสัญญาณ อุปกรณ์ขยายสัญญาณ อุปกรณ์บันทึกสัญญาณ อุปกรณ์กำเนิดคำสั่ง อุปกรณ์ประมวลผลข้อมูล และอุปกรณ์ควบคุมกระบวนการ



ภาพที่ 1.2 แผนภาพแสดงองค์ประกอบหลักของระบบเครื่องมือวัดอิเล็กทรอนิกส์ [2]

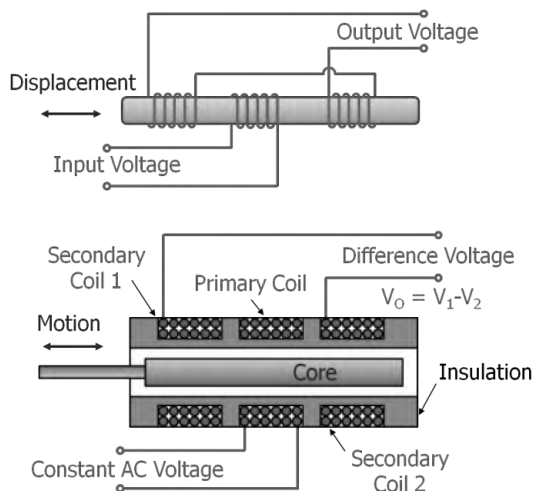
ทรานสดิวเซอร์ (Transducer) เป็นอุปกรณ์แบบอนาล็อกซึ่งใช้แปลงสัญญาณ โดยแปลงการเปลี่ยนแปลงปริมาณในทางกลหรือทางความร้อนที่ถูกวัดเป็นปริมาณทางไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น สเตรนเกจ (Strain Gage Sensor) ที่ยึดติดกับชิ้นงาน (Specimen) แปลงค่าการเปลี่ยนความเครียดของชิ้นงาน $\Delta\epsilon$ ให้เป็นการเปลี่ยนความต้านทานทางไฟฟ้า ΔR ของสเตรนเกจ ซึ่งการเปลี่ยนความต้านทานทางไฟฟ้ายังสามารถแปลงเป็นการเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้า ΔV ทำให้สามารถวัดได้อย่างเที่ยงตรงด้วยความสัมพันธ์อย่างง่าย เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าเป็นสัดส่วนกับความเครียดความเครียดถูกวัดพร้อมแปลงสัญญาณด้วยทรานสดิวเซอร์ (สเตรนเกจและชิ้นงาน) เมื่อระบบเครื่องมือวัดที่ใช้มีการสอบเทียบ (Calibrated) อย่างถูกต้อง



ภาพที่ 1.3 โหลดเซลล์ (Load Cell) [4]

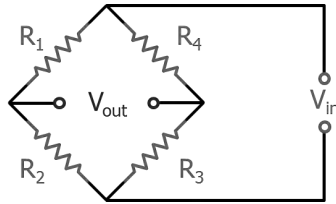
แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (Power Supply) เป็นอุปกรณ์ที่จ่ายพลังงานให้กับทรานสดิวเซอร์และระบบเครื่องมือวัด ตัวอย่างเช่น หม้อแปลงความเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น (Linear Variable Differential

Transformer) ซึ่งเป็นทรานสดิวเซอร์ที่ใช้วัดระยะ (Displacement) ต้องการแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อใช้สร้างคลื่นสนามแม่เหล็กกระตุ้นขดลวดที่ใช้ในการวัดค่าทั้งสองข้างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามีหลายชนิดเช่น จ่ายกำลังงานไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันคงที่ (Constant DC Voltage Sources) จ่ายกำลังงานไฟฟ้ากระแสตรงกระแสคงที่ (Constant DC Current Sources) จ่ายกำลังงานไฟฟ้ากระแสสลับแรงดัน (AC Voltage Sources) โดยที่ต้องเลือกใช้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้ตรงตามความต้องการของทรานสดิวเซอร์



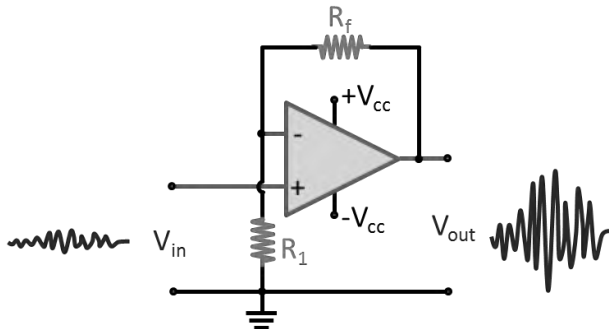
ภาพที่ 1.4 หม้อแปลงความเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น [4]

วงจรเงื่อนไขสัญญาณ (Signal Conditioners Circuits) เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้แปลง ขดเซชหรือจัดการกับสัญญาณที่วัดได้จากทรานสดิวเซอร์ให้เป็นปริมาณทางไฟฟ้าที่เหมาะสมกับการใช้งานมากขึ้น เช่นวงจรวิสโตนบริดจ์ (Wheatstone Bridge) เป็นวงจรที่ใช้เพื่อแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าของเกจ (Gage Resistance) ΔR จากเซ็นเซอร์สเตรนเกจให้เป็นค่าแรงดันไฟฟ้า (Voltage) ΔV ตัวอย่างวงจรเงื่อนไขสัญญาณอื่นที่มีใช้ทั่วไปในระบบเครื่องมือวัดอิเล็กทรอนิกส์ เช่น วงจรกรองสัญญาณ (Filters) วงจรชดเชยสัญญาณ (Compensators) วงจรผสมสัญญาณ (Modulators) วงจรแยกสัญญาณ (Demodulators) วงจรอินทิเกรเตอร์ (Integrators) และวงจรดิฟเฟอเรนติเอเตอร์ (Differentiators)



ภาพที่ 1.5 Wheatstone Bridge [4]

อุปกรณ์ขยายสัญญาณ (Amplifiers) มีความต้องการสำหรับระบบที่มีขนาดสัญญาณเอาต์พุตหลังจากวงจรเงื่อนไขสัญญาณของทรานสดิวเซอร์แล้วมีขนาดเล็กมาก โดยปกติสัญญาณมักมีขนาดเป็นมิลลิโวลต์ (mV) หรือเล็กกว่านั้น สำหรับระบบที่มีอุปกรณ์วัดแรงดันไฟฟ้า (Voltage Measuring Devices) การใช้อุปกรณ์ขยายสัญญาณที่มีอัตราขยาย (Gains) จาก 10 ถึง 1000 เท่า สามารถเพิ่มขนาดสัญญาณที่มีขนาดเล็กมากให้มีขนาดเพิ่มในระดับ 1 ถึง 10 โวลต์ (V) ทำให้เหมาะสมกับอุปกรณ์วัดแรงดันไฟฟ้าในการตรวจวัด



ภาพที่ 1.6 วงจรขยายสัญญาณ [4]

อุปกรณ์บันทึกสัญญาณ (Recorders) เป็นอุปกรณ์วัดแรงดันไฟฟ้าใช้ในการแสดงค่าที่วัดออกมาให้สามารถอ่านและตีความหมายได้ อุปกรณ์บันทึกสัญญาณอาจเป็นแบบอนาล็อก (Analog) หรือแบบดิจิทัล (Digital) แรงดันไฟฟ้าจากอุปกรณ์ขยายสัญญาณมักเป็นสัญญาณแบบอนาล็อก ซึ่งจะเป็นสัญญาณอินพุตของอุปกรณ์บันทึกสัญญาณต่อไป อุปกรณ์บันทึกสัญญาณแบบอนาล็อกเช่น ออสซิลโลสโคป (Oscilloscopes) ออสซิลโลกราฟ (Oscillographs) และเครื่องบันทึกเทปแม่เหล็ก

(Magnetic Tape Recorders) มีหน้าที่แสดงหรือบันทึกสัญญาณแบบอนาล็อก สำหรับอุปกรณ์บันทึกสัญญาณแบบดิจิทัลจะรับสัญญาณแบบอนาล็อกและแปลงสัญญาณให้เป็นรหัสดิจิทัล (Digital Code) เพื่อแสดงผลเป็นตัวเลขหรือบันทึกสัญญาณในรูปแบบรหัสดิจิทัลบนสื่อแม่เหล็ก (Magnetic Storage Media)

อุปกรณ์ประมวลผลข้อมูล (Data Processors) ถูกใช้ร่วมกับระบบเครื่องมือวัดที่มีอุปกรณ์แปลงสัญญาณจากอนาล็อกเป็นดิจิทัล (Analog-to-Digital Converters : A/D : ADC) และสัญญาณที่วัดออกมาอยู่ในรูปแบบรหัสดิจิทัล อุปกรณ์ประมวลผลข้อมูลโดยปกติแล้วมักเป็นไมโครคอมพิวเตอร์ (Microcomputers) ซึ่งรับสัญญาณอินพุตเป็นแบบดิจิทัลและทำการประมวลผลสอดคล้องกับโปรแกรมที่ได้เขียนไว้ สัญญาณเอาต์พุตจากอุปกรณ์ประมวลผลข้อมูลมักแสดงในรูปของกราฟและตาราง ซึ่งทำให้เห็นภาพของผลลัพธ์อย่างชัดเจนมากกว่าข้อมูลจากการศึกษาทดลอง

อุปกรณ์กำเนิดคำสั่ง (Command Generator) เป็นอุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่เป็นปัจจัยสำคัญต่อกระบวนการซึ่งปกติเปลี่ยนแปลงตามเวลา ตัวอย่างเช่น รูปแบบของอุณหภูมิและเวลา (Time Temperature Profile) ที่ต้องควบคุมในเตาสำหรับการขึ้นรูปพลาสติก อุปกรณ์กำเนิดคำสั่งจะทำการผลิตสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่มีขนาดเป็นอัตราส่วนตามรูปแบบของอุณหภูมิและเวลาที่ต้องการในเตาสำหรับการขึ้นรูปพลาสติก

อุปกรณ์ควบคุมกระบวนการ (Process Controllers) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับตรวจสอบและปรับแต่งปริมาณใดๆที่ต้องการรักษาไว้ที่ค่าเฉพาะค่าหนึ่งเพื่อการผลิตวัสดุหรือผลิตภัณฑ์ สำหรับกระบวนการที่ถูกควบคุมให้เป็นไปตามความต้องการ สัญญาณจากระบบเครื่องมือวัดจะถูกเปรียบเทียบกับสัญญาณจากอุปกรณ์กำเนิดคำสั่ง เพื่อสะท้อนถึงค่าปริมาณที่กระบวนการต้องการ อุปกรณ์ควบคุมกระบวนการสร้างสัญญาณความคลาดเคลื่อน (Error Signal) จากการเปรียบเทียบเพื่อใช้ในการปรับแต่งค่าของกระบวนการแบบอัตโนมัติ

การประยุกต์ใช้เครื่องมือวัดอิเล็กทรอนิกส์ทางวิศวกรรมอาจแบ่งออกได้เป็นสามลักษณะแตกต่างกันดังนี้

1. การวิเคราะห์ทางวิศวกรรมของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล โครงสร้าง และยานยนต์ เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพ (Ensure Efficient) และความเชื่อถือได้ในการใช้งาน (Reliable Performance)
2. แสดงตรวจสอบ (Monitoring) กระบวนการเพื่อให้ผู้ดูแลระบบสามารถปรับแต่งค่าแบบทันที (On-line) ในการควบคุมกระบวนการได้
3. ใช้ข้อมูลสำหรับกระบวนการควบคุมอัตโนมัติ เพื่อการควบคุมกระบวนการแบบป้อนกลับ (Feedback Control) เพื่อให้กระบวนการสามารถทำงานได้เองอย่างต่อเนื่อง

ซึ่งการประยุกต์ใช้เครื่องมือวัดอิเล็กทรอนิกส์ทางวิศวกรรมจะกล่าวรายละเอียดของการประยุกต์ใช้เครื่องมือวัดอิเล็กทรอนิกส์ในแต่ละลักษณะเป็นหัวข้อต่อไป

1.3 การวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (Engineering Analysis)

การวิเคราะห์ทางวิศวกรรมนำไปสู่แนวทางการออกแบบหรือการปรับปรุง ชิ้นส่วนเครื่องจักรกล โครงสร้างยานยนต์ หรือระบบทางอิเล็กทรอนิกส์ ให้มีความมั่นใจในประสิทธิภาพและความเชื่อถือได้ในการทำงาน (Efficient and Reliable Performance) ของกระบวนการหรือระบบการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมแบ่งออกได้สองแนวทาง คือการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางทฤษฎี และการวิเคราะห์ด้วยการพิจารณาจากการทดลอง

การวิเคราะห์ทางทฤษฎี (Theoretical Approach) เป็นการวิเคราะห์แบบจำลอง (Analytical Model) โดยอาศัยส่วนประกอบของสูตร (Formulated) และสมมติฐาน (Assumptions) ในการสร้างเงื่อนไขต่างๆของสภาวะการทำงานเช่นภาระที่กระทำกับชิ้นส่วน คุณสมบัติของวัสดุ และรูปแบบของความเสียหายที่เกิดขึ้น สมการอธิบายพฤติกรรมต่างๆของแบบจำลองที่เขียนขึ้นสามารถหาคำตอบได้ทั้งวิธีทางคณิตศาสตร์ (Exact Mathematical Methods) หรือโดยส่วนใหญ่มักใช้วิธีเชิงตัวเลข (Numerical Computation) ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ทางทฤษฎีทำให้ผู้ออกแบบทราบถึงความเหมาะสมของการออกแบบ และสามารถประเมินความเป็นไปได้ของการทำงานของชิ้นส่วนหรือโครงสร้าง

ความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นในการวิเคราะห์ทางทฤษฎีหรือวิธีเชิงตัวเลขมักมีผลมาจาก (1) แบบจำลองทางทฤษฎีมีความถูกต้องและสะท้อนถึงต้นแบบจำลองหรือไม่ (2) สมมติฐานสภาวะ

การใช้งานของภาระที่กระทำกับแบบจำลองสามารถใช้ครอบคลุมทุกช่วงการใช้งานหรือไม่ (3) เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) มีความสอดคล้องเหมาะสมกับแบบจำลองหรือไม่ (4) มีความคลาดเคลื่อนที่มีนัยสำคัญของกระบวนการทางเชิงตัวเลข (Numerical Procedures) หรือไม่

การวิเคราะห์โดยการทดลอง (Experimental Approach) อาศัยต้นแบบจำลอง (Prototype or Scale Model) ที่ผลิตขึ้นและทำการทดสอบเพื่อนำไปสู่การประเมินสมรรถนะของส่วนประกอบต่างๆ โดยการวัดค่าปริมาณที่เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการออกแบบโดยตรงจากต้นแบบจำลอง การวิเคราะห์โดยการทดลองสามารถกำจัดความไม่แน่นอนสองประการของการวิเคราะห์ทางทฤษฎี คือ ไม่ต้องการการวิเคราะห์แบบจำลอง และสมมุติฐานต่างๆ เช่น เงื่อนไขสภาวะการทำงาน คุณสมบัติของวัสดุ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบการวิเคราะห์โดยการทดลองกับการวิเคราะห์ทางทฤษฎี จะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์โดยการทดลองใช้ทุนสูงกว่ามากๆ และมีความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นจากความคลาดเคลื่อนในการวัดค่าการทดลอง นอกจากนี้ยังมีคำถามเกี่ยวกับตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับทรานสดิวเซอร์ที่ใช้บันทึกค่าปริมาณต่างๆ ว่าถูกต้องและเพียงพอต่อการออกแบบหรือไม่

การวิเคราะห์ที่นิยมจึงเป็นการวิเคราะห์ร่วมกันระหว่างการวิเคราะห์ทางทฤษฎีและการวิเคราะห์โดยการทดลอง ซึ่งการวิเคราะห์ทางทฤษฎีจะนำไปสู่การเข้าใจปัญหา ผลลัพธ์ที่มีนัยสำคัญของการวิเคราะห์ทางทฤษฎีที่มีความสมบูรณ์และระบุถึงสิ่งที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจน การวิเคราะห์ทางทฤษฎีจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งยวดต่อการออกแบบวิธีการทดลอง ตำแหน่งและทิศทางการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด ความเที่ยงตรงและจำนวนอุปกรณ์ตรวจวัดที่เลือกใช้ ลดจำนวนครั้งในการทดสอบได้ การทดลองจึงเป็นการออกแบบเพื่อตรวจสอบ และยืนยัน สมมุติฐาน เงื่อนไขสภาวะการทำงาน คุณสมบัติวัสดุ และความถูกต้องของกระบวนการทางเชิงตัวเลข หากผลของการวิเคราะห์โดยการทดลองมีความแตกต่างกับการวิเคราะห์ทางทฤษฎีอย่างมีนัยสำคัญ จำเป็นต้องปรับแก้แบบจำลองทางทฤษฎี จนผลวิเคราะห์ทางทฤษฎีและการทดลองมีความสอดคล้องกัน หลังจากนั้นจึงมีความเชื่อมั่นต่อการวิเคราะห์ทางทฤษฎีและสามารถนำไปวิเคราะห์หาความเหมาะสม (Optimize) ทางน้ำหนัก ภาระ หรือราคา ของชิ้นส่วนทางกล โครงสร้าง ระบบ อิเล็กทรอนิกส์ต่อไป

การออกแบบการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมมีผลต่อการวางแผนการทดสอบและการวัดค่า แผนสำหรับการทดสอบและการวัดค่าสามารถแบ่งเป็นสามขั้นตอนดังนี้

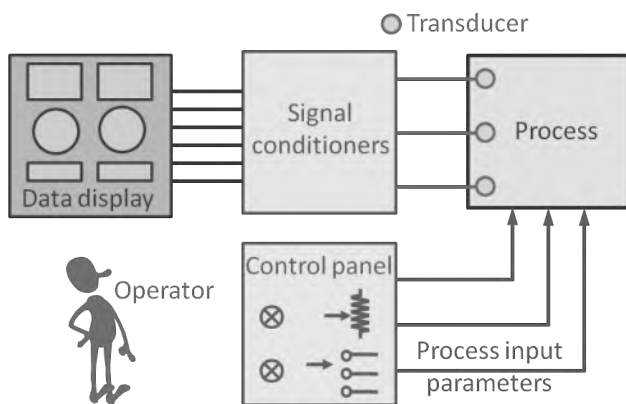
1. แผนการออกแบบปัจจัย (Parameter Design Plan) ระบุวัตถุประสงค์ในการทดสอบ และกำหนดหรือให้นิยามตัวแปร (Variables) และปัจจัย (Parameters) ของกระบวนการ (Process) พร้อมความหมายหรือผลลัพธ์ที่ค่าเหล่านั้นควบคุม ควรตั้งคำถามว่า อะไรคือปัญหาที่กำลังพยายามจะหาคำตอบ อะไรที่จำเป็นต้องทำการวัดค่า ค่าตัวแปรและค่าปัจจัยไหนบ้างที่มีผลกระทบต่อคำตอบของปัญหา
2. แผนการออกแบบระบบและการเผื่อ (System and Tolerance Design Plan) เป็นการเลือกเทคนิค อุปกรณ์ เครื่องมือ และวิธีการสำหรับการวัดค่า ภายใต้ข้อจำกัดการเผื่อของความคลาดเคลื่อนที่ถูกระบุไว้ ควรตั้งคำถามว่า มีวิธีไหนบ้างที่สามารถทำการวัดค่าได้ และคุณภาพของผลลัพธ์ควรดีเท่าไร เป็นอย่างไร จึงเป็นสามารถใช้แก้ปัญหาที่กำลังพยายามจะหาคำตอบ
3. แผนการออกแบบปรับปรุงข้อมูล (Data Reduction Design Plan) วางแผนว่าจะทำการวิเคราะห์ผล (Analyze) แสดงผลลัพธ์ (Present) และใช้ข้อมูลที่คาดหวังไว้ (Anticipated Data) อย่างไร ควรตั้งคำถามว่า จะอธิบายข้อมูลผลลัพธ์อย่างไร จะใช้ข้อมูลในการตอบปัญหาอย่างไร คำตอบที่ได้เหมาะสมมากน้อยอย่างไร คำตอบที่ได้เป็นเหตุเป็นผลหรือไม่

การออกแบบการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมด้วยขั้นตอนการวางแผนทั้งสามขั้นตอนก่อนทำการวัดค่าจนกลายเป็นนิสัยมีประโยชน์มาก และมักนำไปสู่ความสำเร็จในการวิเคราะห์ทางวิศวกรรม ซึ่งบ่อยครั้งที่แผนการออกแบบในขั้นตอนที่ 3 จะบังคับให้ต้องกลับไปพิจารณาแผนการออกแบบในขั้นตอนที่ 1 และ 2 อีกครั้งหนึ่ง

1.4 การควบคุมกระบวนการ (Process Control)

การควบคุมกระบวนการของระบบเครื่องมือวัดอิเล็กทรอนิกส์มีใช้กันอยู่สองลักษณะคือการควบคุมแบบเปิดหรือเฝ้าดูแล (Open Loop or Monitoring) และการควบคุมแบบปิดหรืออัตโนมัติ (Closed Loop or Automatic)

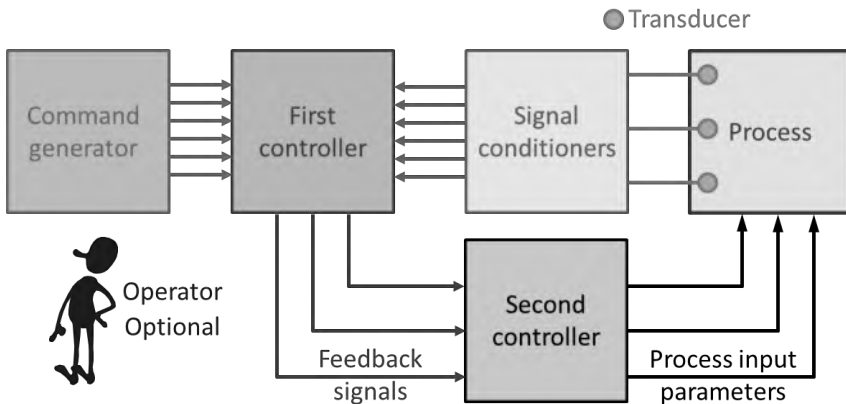
การควบคุมแบบเปิด (Open Loop) มีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการในแง่ของการตรวจสอบซึ่งอาจประกอบด้วยทรานสดิวเซอร์หลายชนิดดังแสดงในภาพที่ 1.7 ข้อมูลจากทรานสดิวเซอร์จะถูกแสดงอย่างต่อเนื่องบนแผงหน้าปัดของเครื่องมือวัด (Instrument Panel) ที่อุปกรณ์แสดงผลที่ประกอบไปด้วย แผนภาพ (Chart) มาตรวัด (Meters) จอแสดงผลดิจิทัล (Digital Display) โดยที่ผู้ดูแลจะคอยตรวจสอบ (Monitoring) ค่าปริมาณต่างๆที่แสดงบนแผงหน้าปัด และหากมีความจำเป็น สามารถทำการปรับแต่งค่าตัวแปรอินพุตให้กับกระบวนการ เพื่อรักษาค่าปริมาณที่ต้องควบคุมของกระบวนการไว้ ดังนั้นผู้ดูแลระบบทำหน้าที่ให้ระบบเปิดเสมือนเป็นระบบปิด ความเที่ยงตรง (Accuracy) และความเชื่อถือได้ (Reliability) ในความพร้อมใช้งานของข้อมูลที่แสดงบนหน้าปัดของเครื่องมือวัดมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากข้อมูลเหล่านี้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการตัดสินใจของผู้ดูแลระบบในการปรับแก้ระบบ เรือส่วนใหญ่่มักจะเป็นระบบควบคุมแบบเปิด ผู้ดูแลระบบที่อยู่ในห้องควบคุมจะคอยตรวจสอบค่าต่างๆที่ทำการวัด ความเร็วเรือ ความเร็วเครื่องยนต์ อุณหภูมิเครื่องยนต์ ความดัน น้ำมัน อัตราการบริโภคเชื้อเพลิง และปริมาณอื่นๆ พร้อมทำการปรับแต่งค่าเพื่อควบคุมการทำงานของเครื่องยนต์เพื่อให้เรือรักษาความเร็วได้ตามที่ต้องการ



ภาพที่ 1.7 แผนภาพแสดงระบบควบคุมกระบวนการแบบเปิด [2]

รูปแบบการควบคุมอีกลักษณะเป็นที่รู้จักกันว่า การควบคุมแบบปิด (Closed Loop) หรือการควบคุมแบบอัตโนมัติ (Automatic Control) ดังแสดงในภาพที่ 1.8 สำหรับระบบควบคุมแบบ

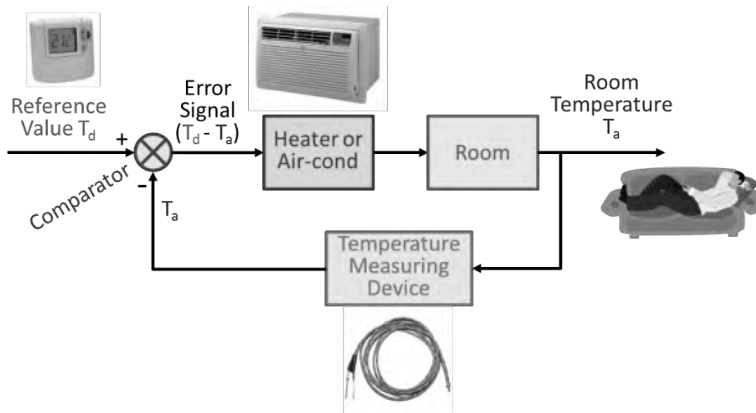
ปิดไม่จำเป็นต้องมีผู้ดูแลระบบ โดยสัญญาณที่ได้จากระบบเครื่องมือวัดทางอิเล็กทรอนิกส์จะถูกเปรียบเทียบกับกับสัญญาณจากอุปกรณ์กำเนิดคำสั่งในลักษณะของปริมาณที่มีความสัมพันธ์กันระหว่างแรงดันไฟฟ้าและเวลาสำหรับทุกปริมาณที่มีความสำคัญต่อการดำเนินการของกระบวนการ อุปกรณ์ควบคุมชุดแรก (First Controller) เป็นอุปกรณ์ที่เปรียบเทียบค่าปริมาณความแตกต่างระหว่างสัญญาณจากอุปกรณ์กำเนิดคำสั่ง (Command Signal) กับสัญญาณการตรวจวัดที่ได้จากทรานสดิวเซอร์ (Transducer Signal) เพื่อหาค่าสัญญาณความคลาดเคลื่อนหรือสัญญาณป้อนกลับ (Error Signal or Feedback Signal) สัญญาณป้อนกลับจะถูกส่งต่อไปยังอุปกรณ์ควบคุมชุดที่สอง (Second Controller) เพื่อทำการขยายสัญญาณและใช้สัญญาณในการควบคุมอุปกรณ์นำการปรับแก้กระบวนการ ในบางครั้งอาจผู้ดูแลคอยตรวจสอบดูแลระบบ



ภาพที่ 1.8 แผนภาพแสดงระบบควบคุมกระบวนการแบบปิด [2]

ตัวอย่างการควบคุมแบบปิด พิจารณากระบวนการปรับอากาศของเครื่องปรับอากาศที่ใช้ควบคุมอุณหภูมิห้อง โดยอุณหภูมิอ้างอิง (Reference Temperature) ของห้องที่ต้องการจะถูกตั้งด้วยเทอร์โมสตัท (Thermostat) ซึ่งทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์กำเนิดคำสั่งซึ่งปกติเทอร์โมสตัทจะมีวงจรเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิ (Comparator) ระหว่างอุณหภูมิอ้างอิงกับอุณหภูมิห้องที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิ้ล (Thermocouple) ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิอ้างอิงกับอุณหภูมิห้องจากวงจรเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิซึ่งทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ควบคุมชุดแรก (First Controller) จะใช้เป็นค่า

สัญญาณความคลาดเคลื่อน หรือ สัญญาณป้อนกลับ (Error Signal or Feedback Signal) ส่งต่อไปยังเครื่องปรับอากาศ (Heater or Air Condition) ซึ่งทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ควบคุมชุดที่สอง (Second Controller) ทำการขยายสัญญาณและใช้สัญญาณในการปรับแก้อุณหภูมิอากาศในห้อง [1]



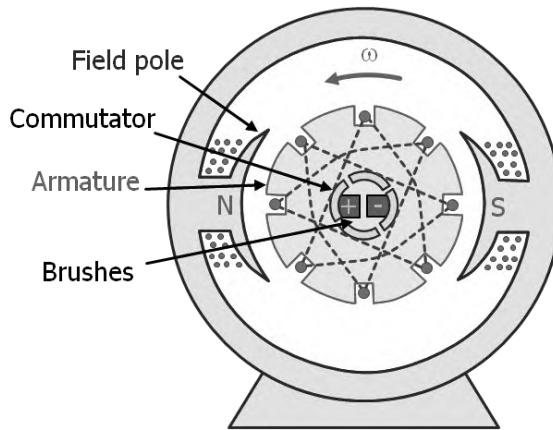
ภาพที่ 1.9 ตัวอย่างระบบควบคุมกระบวนการแบบปิดเครื่องปรับอากาศ [4]

1.4.1 อุปกรณ์ควบคุมกระบวนการ (Process Control Devices)

การควบคุมกระบวนการมักมีความจำเป็นต้องมีการปรับแต่งปริมาณที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการอย่างสม่ำเสมอ แม้ว่าอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมกระบวนการในระบบควบคุมแบบปิดส่วนใหญ่จะทำหน้าที่เหมือนกันกับที่ใช้ในระบบควบคุมแบบเปิด แต่บางครั้งอาจมีรายละเอียดต่างกันไป การควบคุมการไหลของของไหลด้วยวาล์วอาจทำได้โดยการปิดหรือเปิดวาล์ว ซึ่งการปิดเปิดวาล์วในกรณีของระบบเปิดจะทำโดยผู้ดูแลระบบ ในขณะที่ระบบปิดจะทำโดยอัตโนมัติด้วยเซอร์โวมอเตอร์ (Servomotor) สำหรับชนิดอุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับแต่งค่าตัวแปรของกระบวนการจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

มอเตอร์กระแสตรง (DC Motors) เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานทางไฟฟ้าเป็นการหมุนทางกล โดยอาศัยแกนเหนี่ยวนำที่หมุนตัดผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในช่องว่างทรงกระบอกระหว่างขดลวดแกนเหล็กทั้งสอง สนามแม่เหล็กเกิดขึ้นจากขดลวดรอบแกนเหล็ก โดยที่จำนวนของขดลวดรอบแกนเหล็กจะมีจำนวนเป็นคู่ และใช้กำเนิดขั้วสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

(Field Pole) ที่ตรงข้ามกันคือสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขั้วเหนือและสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขั้วใต้ ส่วนประกอบที่มีการเคลื่อนที่คือแกนหมุนหรืออาร์เมเจอร์ (Armature) ทำจากแกนเหล็กทรงกระบอก (Cylindrical Iron Core) พันด้วยขดลวดไฟฟ้า (Armature Coils) ตามร่องของแกนเหล็กที่แบ่งเป็นส่วนๆ และแยกไปเชื่อมต่อยังคอมมิวเตเตอร์ (Commutator) กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดของแกนหมุนจะจ่ายผ่านแปรงถ่าน (Brushes) ที่ยึดนิ่งไปยังคอมมิวเตเตอร์ที่หมุนผ่านแปรงถ่าน



ภาพที่ 1.10 โครงสร้างมอเตอร์กระแสตรง [2]

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงบิด (Torque) สำหรับมอเตอร์กระแสตรงหาได้จาก

$$v = E + iR_A = K\phi\omega + iR_A \quad (1.1)$$

$$T = K\phi i \quad (1.2)$$

เมื่อ v คือ แรงดันไฟฟ้า (Terminal Voltage)

E คือ แรงดันแม่เหล็กไฟฟ้า (EMF Produced by the Rotating Armature)

ϕ คือ อัตราการเปลี่ยนสนามแม่เหล็กต่อขั้ว (Magnetic Flux Per Pole in Webers)

i คือ กระแสไฟฟ้าที่อาร์มาเจอร์ (Armature Current)

R_A คือ ความต้านทานของอาร์มาเจอร์ (Resistance of the Armature winding)

K คือ ค่าคงที่สำหรับมอเตอร์ (Constant for a Specific Motor)

หากความสูญเสียทางกลและไฟฟ้าในน้อยมากจนละทิ้งได้ พลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์จะมีค่าเท่ากับพลังงานทางกลที่ได้ออกมา ดังนั้น

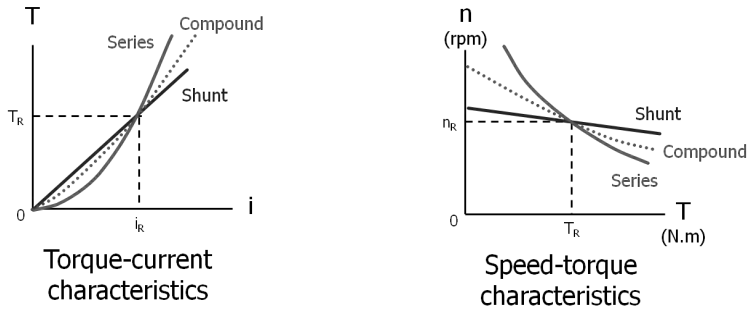
$$E_i = T\omega \quad (1.3)$$

มอเตอร์กระแสตรงแบ่งตามรูปแบบวงจรที่ใช้งานออกเป็น 3 ชนิด คือ วงจรมอเตอร์กระแสตรงแบบอนุกรมหรือเรียกว่าซีรีย์มอเตอร์ (Series Motor) วงจรมอเตอร์กระแสตรงแบบขนานหรือเรียกว่าชันทัมอเตอร์ (Shunt Motor) และวงจรมอเตอร์กระแสตรงแบบผสมหรือเรียกว่าคอมเปาว์ดมอเตอร์ (Compound Motor) ผังวงจรมอเตอร์กระแสตรงพร้อมความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงบิดของมอเตอร์กระแสตรงแบบอนุกรม มอเตอร์กระแสตรงแบบขนาน และมอเตอร์กระแสตรงแบบผสม แสดงดังภาพที่ 1.11 จะเห็นได้ว่าสำหรับวงจรมอเตอร์แบบผสมจะมีความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงบิดอยู่ระหว่างวงจรมอเตอร์กระแสตรงแบบอนุกรมและวงจรมอเตอร์กระแสตรงแบบขนาน ดังแสดงในภาพที่ 1.12

ในระบบควบคุมมอเตอร์กระแสตรงมักถูกใช้ในการเปิดและปิดวาล์วเพื่อควบคุมการไหล ใช้ในการหมุนเกลียวปรับแต่งคัมเปอร์ และอื่นๆ ซึ่งเป็นการประยุกต์ใช้งานที่ต้องการควบคุมความเร็วและแรงบิดจากมอเตอร์เป็นสำคัญ มอเตอร์กระแสตรงสามารถควบคุมในวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกันได้หลายแบบ จากภาพที่ 1.12 จะเห็นได้ว่าแรงบิด T ทั้งสามลักษณะของวงจรมอเตอร์กระแสตรงสามารถปรับแต่งได้จากการปรับแต่งค่ากระแสไฟฟ้า i สำหรับวงจรมอเตอร์กระแสตรงแบบขนานการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้า R_c ในขดลวดที่สร้างสนามแม่เหล็กเป็นการปรับแต่งค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ ส่วนวงจรมอเตอร์แบบอนุกรมการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้า R_c ของแกนหมุนเป็นการปรับค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ และวงจรมอเตอร์กระแสตรงทั้งสามชนิดความเร็วรอบและแรงบิดสามารถควบคุมได้โดยการปรับค่าแรงดันไฟฟ้า

Type	Wiring Diagram	Speed-torque Characteristic
Shunt Motor		
Series Motor		
Compound Motor		

ภาพที่ 1.11 ผังวงจรมอเตอร์กระแสตรงและความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงบิด [2]

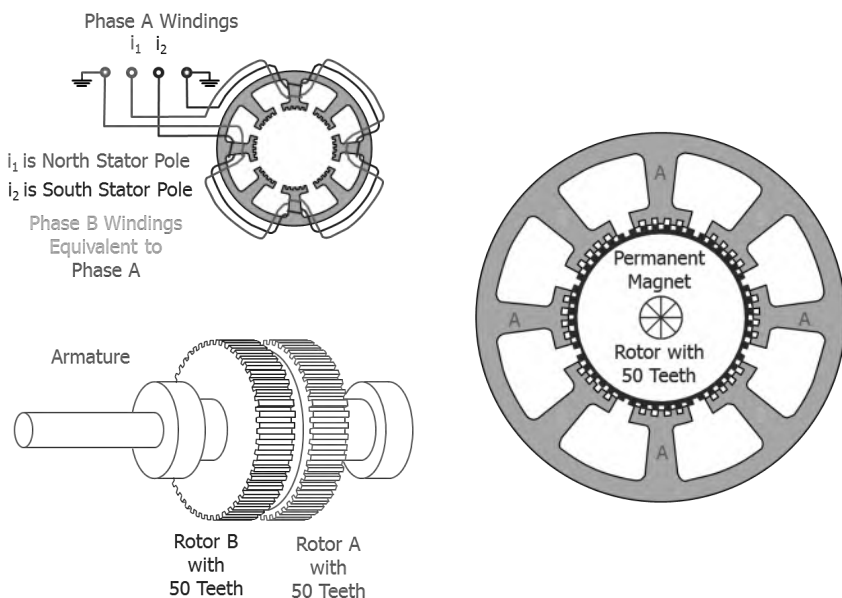


ภาพที่ 1.12 คุณลักษณะเปรียบเทียบการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบต่างๆ [2]

สเตปป์ิงมอเตอร์ (Stepping Motors) เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าที่มีความแตกต่างกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงอยู่หลายประการ มีลักษณะตามแสดงในภาพที่ 1.13 สเตปป์ิงมอเตอร์มีจำนวนของแกนเหล็ก (Stator) มากกว่า โดยที่แต่ละแกนมีขดลวดไฟฟ้าเพื่อกำเนิดขั้วสนามแม่เหล็ก (Field Pole) เป็นส่วนเล็กเรียงลำดับกันไปโดยรอบ นอกจากนั้นแต่ละแกนเหล็กยังแบ่งขั้วสนามแม่เหล็กเป็นรูปทรงฟันเฟืองย่อย (ตัวอย่างตามแสดงในภาพแต่ละแกนมีห้าฟัน) แกนหมุนหรือแกนอาร์เมเจอร์ (Armature) ประกอบด้วยฟันเฟืองที่มีช่องไฟเท่ากันจำนวนหนึ่งหรือสองชุด แกนอาร์เมเจอร์มักเป็นวัสดุที่เป็นแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet) จึงไม่จำเป็นต้องมีขดลวดแกนอาร์มาเจอร์ (Armature Coils) คอมมิวเตเตอร์ (Commutator) และแปรงถ่าน (Brushes)

สเตปป์ิงมอเตอร์ถูกขับโดยชุดขบวนสัญญาณพัลส์ (Train of Pulses) ที่จ่ายให้กับขดลวดสนามไฟฟ้าของแกนเหล็ก (Field Coils) ชุดขบวนสัญญาณพัลส์มีคุณสมบัติ (เวลาเริ่ม Rise Time, ช่วงขับ Duration, เวลาหยุด Fall Time และขนาดกระแส Amplitude) สอดคล้องกับความเฉื่อยของมอเตอร์ (Inertia of Motor) ดังนั้นแกนอาร์มาเจอร์หมุนหนึ่งสเตป (มุมระหว่างสองฟันเฟืองบนแกนอาร์มาเจอร์) ต่อสัญญาณหนึ่งพัลส์ กระบวนการควบคุมตำแหน่งของมุมของสเตปป์ิงมอเตอร์อย่างง่าย จึงสามารถทำได้โดยนับจำนวนของพัลส์ที่ป้อนเข้าไปให้กับขดลวดไฟฟ้า ดังนั้นความเร็วของสเตปป์ิงมอเตอร์สามารถควบคุมได้ด้วยการปรับอัตราสัญญาณพัลส์ที่ป้อน

โดยปกติสเตปป์มอเตอร์มีแกนอาร์มาเจอร์เป็นแม่เหล็กถาวรที่มีฟันเพียง 50 ฟัน ในแกน ขดลวดไฟฟ้า 4 แกน (Four Pole Single Phase Stator) สเตปป์มอเตอร์จึงมีจำนวน 200 สเตป ต่อรอบ (Steps/Revolution) โครงสร้างนี้จะหมุน 1.8 องศาต่อสเตป หรือต่อพัลส์ สำหรับแกน อาร์มาเจอร์ที่มีฟันเพียง 2 ชุด โดยที่ฟันเฟืองชุดที่สองจะวางเอียงกับชุดแรกครึ่งพิทช์ (Pitch) ทำให้ความละเอียด (Resolution) ของสเตปป์มอเตอร์เพิ่มขึ้นเป็น 0.9 องศาต่อสเตป

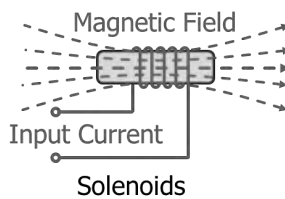


ภาพที่ 1.13 ส่วนประกอบต่างของสเตปป์มอเตอร์ [2]

สเตปป์มอเตอร์จะมีความเที่ยงตรงสูงมากถ้าใช้งานไม่เกินค่าแรงบิด (Torque) ที่สามารถรับ ได้ ความเร็วและแรงบิดของสเตปป์มอเตอร์จะขึ้นอยู่กับขนาดและ โครงสร้างของสเตปป์ มอเตอร์สเตปป์มอเตอร์ขนาดใหญ่สามารถรับแรงบิดได้ถึง 10 N.m สเตปป์มอเตอร์ขนาดเล็กจะรับแรงบิดได้น้อยแต่มีความเร็วสูงถึง 15000 พัลส์ต่อวินาที หรือ 4500 rpm

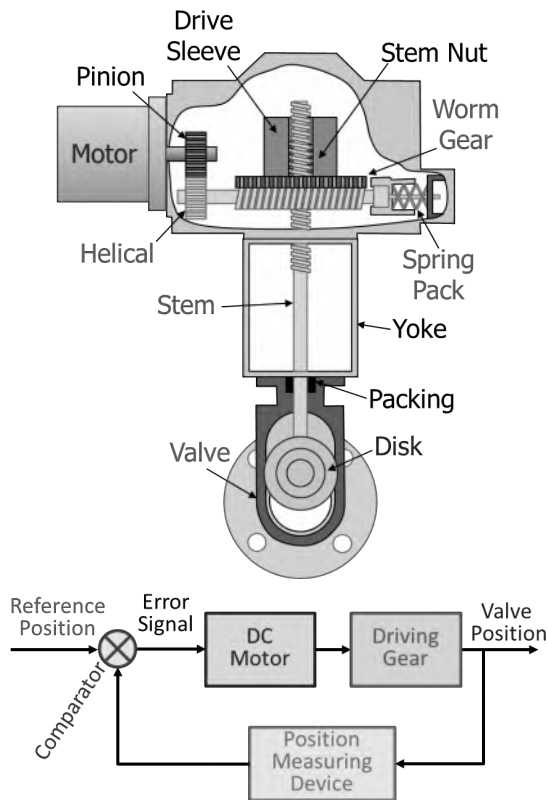
ขดลวดโซลินอยด์ (Solenoid) ประกอบขึ้นจากขดลวดไฟฟ้าพันรอบแกนเหล็ก (Coil) เมื่อ กระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดโซลินอยด์จะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีขั้วเหนือ

N และขั้วได้ S ตามแนวแกนของแกนเหล็ก แกนเหล็กที่อยู่ภายในขดลวดโซลินอยด์จึงมีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กชั่วขณะมีสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) และแรงแม่เหล็ก (Magnetic Force) ซึ่งแรงแม่เหล็กมีปัจจัยขึ้นอยู่กับ ขนาดกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดโซลินอยด์ จำนวนรอบของขดลวดไฟฟ้า และรูปทรงของแกนเหล็ก ขดลวดโซลินอยด์มักใช้เพื่อเปิดและปิดวาล์วด้วยแรงแม่เหล็กในการเลื่อนแกนวาล์วที่สามารถกลับไปตำแหน่งเดิมโดยสปริงวาล์ว ลักษณะนี้มักใช้ในการควบคุมการไหลของของเหลวในกระบวนการหลายๆแบบ การเปิดปิดที่ควบคุมด้วยโซลินอยด์วาล์วมักถูกเรียกว่า การควบคุมแบบแบงแบง (Bang Bang Control) ซึ่งเป็นการเปิดปิดแบบสุดเพื่อให้ของเหลวไหลผ่านได้เต็มที่หรือไม่สามารถไหลผ่านได้เลย



ภาพที่ 1.14 แผนภาพขดลวดโซลินอยด์ [4]

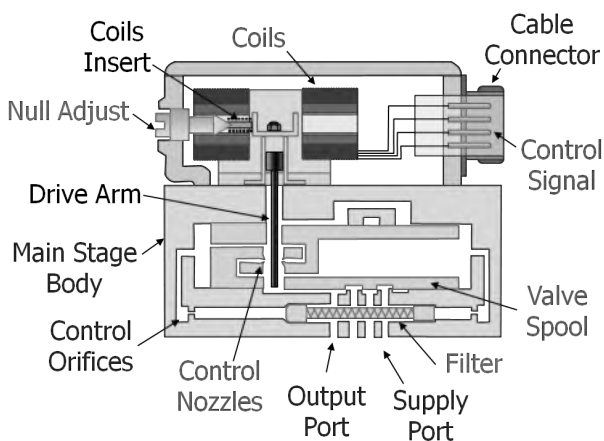
วาล์วมอเตอร์ไรซ์ (Motorized Valve) เป็นวาล์วที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า เนื่องจากการควบคุมกระบวนการหลายแบบมีระดับขั้น (Degree of Control) ซึ่งการใช้ขดลวดโซลินอยด์ควบคุมจึงไม่สามารถทำได้ สำหรับวาล์วมอเตอร์ไรซ์จะใช้มอเตอร์กระแสตรงขับเคลื่อนไปปรับตำแหน่งแบบสกรูซึ่งเป็นแกนวาล์ว (Valve Stem) โดยวิธีการจัดการนี้วาล์วจึงสามารถปรับตำแหน่งและสามารถควบคุมอัตราการไหลได้อย่างเที่ยงตรง สำหรับการควบคุมแบบปิด (Closed Loop) อัตราการไหลที่ทำการวัดค่าปริมาณการไหลและเปรียบเทียบกับปริมาณการไหลที่กำหนดไว้ สัญญาณความคลาดเคลื่อน (Error Signal) เกิดจากความแตกต่างของปริมาณอัตราการไหลทั้งสอง ซึ่งสัญญาณความคลาดเคลื่อนนี้ใช้สำหรับการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงเพื่อปรับแต่งอัตราการไหลจนกระทั่งอัตราการไหลมีค่าอยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ (Acceptable Limits) โดยที่ขอบเขตที่ยอมรับได้ถูกใช้เป็นค่าอ้างอิงสำหรับการควบคุม (Control Bands) ซึ่งมีการระบุขอบด้านบนและขอบด้านล่างของปริมาณที่ควบคุม



ภาพที่ 1.15 แผนภาพวาล์วมอเตอร์ไร้ซ์และฟังก์ชันการควบคุมวาล์ว [4]

วาล์วมอเตอร์ไร้ซ์เป็นอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสำหรับการใช้ควบคุมการไหลที่มีรูปแบบการไหลแบบกระบวนการเสถียร (Quasi Statics Process) ตลอดช่วง ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลด้วยอัตราที่ช้าและน้อยมาก กรณีที่มีรูปแบบการไหลมีการเปลี่ยนแปลงความสัมพันธ์ช้าและน้อยดังกล่าว การปรับแต่งวาล์วมอเตอร์ไร้ซ์จึงไม่ต้องการผลตอบสนองที่รวดเร็ว ทำให้วาล์วมอเตอร์ไร้ซ์สามารถมีอัตราการปรับแต่งอัตราการไหลช้าได้ การเลือกใช้วาล์วมอเตอร์ไร้ซ์จึงเป็นที่ยอมรับได้ ในหลายการประยุกต์ใช้งาน วาล์วมอเตอร์ไร้ซ์ไม่สามารถรองรับความต้องการใช้งานได้ เนื่องจากเป็นการควบคุมกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็วกว่าค่าที่ยอมรับได้

วาล์วเซอร์โว (Servo Control Valve) เป็นอุปกรณ์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic) ที่ใช้สำหรับควบคุมการไหล วาล์วเซอร์โวมีความแตกต่างกับวาล์วมอเตอร์ไรซ์ในแง่ของผลตอบแทนกับสัญญาณคำสั่งที่ใช้ควบคุมอุปกรณ์ได้รวดเร็วกว่า ปกติความถี่ในการตอบสนองของวาล์วเซอร์โวมีค่าน้อยกว่า โดยมีค่าอยู่ในช่วง 20 Hz ถึง 40 Hz

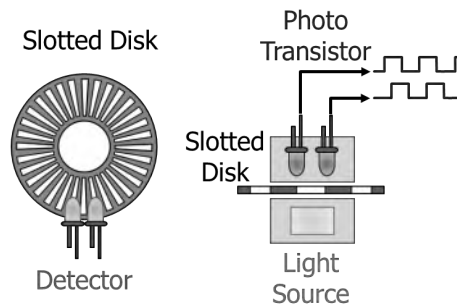


ภาพที่ 1.16 แผนภาพวาล์วเซอร์โว [4]

โครงสร้างของวาล์วเซอร์โวทั่วไปแสดงในภาพที่ 1.16 ซึ่งประกอบระบบย่อยสองส่วน โดยที่ส่วนแรกเป็นส่วนขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าอยู่ทางด้านบนในภาพที่ 1.16 ซึ่งสัญญาณควบคุมจากอุปกรณ์ขยายสัญญาณผลิตกระแสไฟฟ้ากระตุ้นขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า (Coils) เกิดแรงส่งผ่านไปยังแกนเหล็กในขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า (Coil Insert) ซึ่งการเคลื่อนที่ของแกนเหล็กในขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าจะส่งไปในส่วนที่สองเพื่อไปขับแกนขับ (Drive Arm) ให้เคลื่อนที่อยู่ระหว่างช่องควบคุมการไหลหัวฉีด (Control Nozzles) ตามอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า การเคลื่อนที่นี้ทำให้เกิดความไม่สมดุลภายในวงจรของระบบไฮดรอลิก (Hydraulic System) ซึ่งประกอบขึ้นด้วยช่องควบคุมการไหลออร์ฟิส (Control Orifices) และช่องควบคุมการไหลหัวฉีด ซึ่งความไม่สมดุลภายในวงจรของระบบไฮดรอลิกทำให้เกิดการไหลของของไหลไปขับวาล์วบังคับทิศทาง (Spool Valve) ให้เลื่อนปิดเปิดช่องอินพุต (Input Port) และช่องเอาต์พุต (Output Port) ตามจังหวะ การใช้ระบบไฮดรอลิกขยาย

สัญญาณเพื่อขับวาล์วบังคับทิศทางจะใช้แรงขับจากขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าที่ขับแกนขับเพียงเล็กน้อย (Drive Arm) ในการขับวาล์วเซอร์โวจะใช้กระแสไฟฟ้าในการควบคุมน้อยมากโดยปกติแล้วอยู่ในช่วง 10 ถึง 50 mA

อุปกรณ์ควบคุมตำแหน่ง (Positioning Devices) ตำแหน่งเชิงมุมในการหมุนง่ายต่อการตรวจวัดโดยใช้สัญญาณควบคุมป้อนกลับ (Feedback Control) จากมอเตอร์กระแสตรง หรือสัญญาณจากสแตปปีงมอเตอร์ทั้งที่ใช้หรือไม่ใช้สัญญาณควบคุมป้อนกลับ

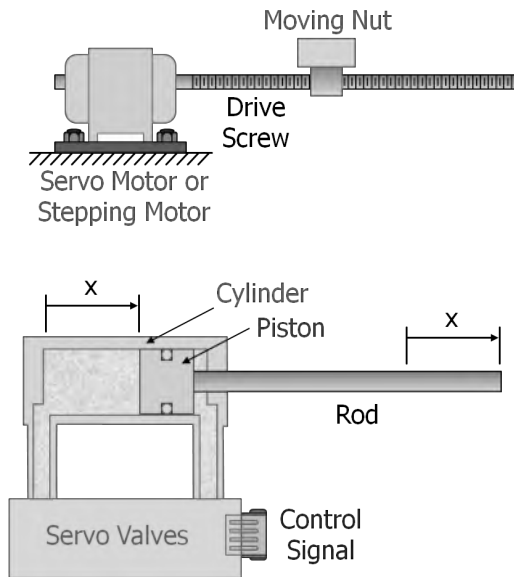


ภาพที่ 1.17 อุปกรณ์วัดตำแหน่งเชิงมุมของเพลลา [4]

สำหรับการวัดสัญญาณตำแหน่งเชิงมุมควบคุมป้อนกลับ อาจใช้อุปกรณ์วัดตำแหน่งเชิงมุมของเพลลา (Shaft Encoder) [4] ที่มีลักษณะเป็นแผ่นจานเจาะรูดังแสดงในภาพที่ 1.17

สำหรับตำแหน่งเชิงเส้นจะต้องการระบบย่อยทางกลที่เป็นกลไกทำให้เกิดการเคลื่อนที่เชิงเส้นวิธีที่ง่ายและเที่ยงตรงในการควบคุมเชิงเส้นคือการติดตั้งเซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor) เข้ากับเกลียวขับ (Drive Screw) ดังแสดงในภาพที่ 1.18

ความละเอียดของตำแหน่งเชิงเส้นจะขึ้นกับการเลือกใช้เกลียวขับ ตัวอย่างเช่นการใช้สแตปปีงมอเตอร์ที่มีค่าจำกัดที่ $\pm 3.24 \text{ min}$ ($1 \text{ Minute of Arc} = 1/60 \text{ Degree}$) ขับแกนขับที่มีระยะพิทช์ (Pitch) 1 mm (ระยะจากยอดเกลียวถึงอีกยอดเกลียว เท่ากับเกลียวหมุน 1 รอบ) จะสามารถบอกความละเอียดของตำแหน่งเชิงเส้นได้ $0.15 \mu\text{m}$ ยิ่งไปกว่านั้นยังสามารถที่จะมีช่วงการวัดได้กว้าง เนื่องจากการทำสกรูให้ยาวไม่ใช่เรื่องยาก



ภาพที่ 1.18 แผนภาพเซอร์โวมอเตอร์ และวาล์วเซอร์โว [2]

สำหรับการใช้เกลียวขับเคลื่อนการควบคุมเชิงเส้นมีข้อเสียอยู่ 2 ประการ ประการแรกค่อนข้างช้า ความเร็วสูงสุดประมาณ 100 mm/s ประการที่สองสำหรับการเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่มี ช่วงว่างระหว่างเกลียวกับน็อต (Clearance) ทำให้เกิดระยะห่างของเกลียวขับเคลื่อนซึ่งเป็นตัวขัดต้อง หมุนฟรีก่อนที่จะกลับมาสัมผัสกับเกลียวของน็อตอีกด้าน (Backlash) มีผลทำให้ความ เที่ยงตรงของตำแหน่งคลาดเคลื่อน

สำหรับการควบคุมตำแหน่งเชิงเส้นความเร็วสูง สามารถใช้กระบอกไฮดรอลิก (Hydraulic Cylinder) ดังแสดงในภาพที่ 1.18 ซึ่งการควบคุมระยะ x ที่ปลายของก้านลูกสูบด้วยวาล์ว เซอร์โวโดยการปรับแต่งการไหลในแต่ละด้านของลูกสูบ ความเร็ว $\dot{x}$ ของปลายก้านสูบขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของวาล์วเซอร์โว และพื้นที่หน้าตัดของลูกสูบ เมื่อใช้กระบอกสูบขนาดเล็ก กับวาล์วเซอร์โวที่มีอัตราการไหลสูง ความเร็วของปลายก้านสูบสามารถทำได้ถึง 10 m/s แรง ขับของกระบอกไฮดรอลิกขึ้นอยู่กับความดัน (ปกติมีค่าประมาณ 3000 ถึง 5000 psi) และ พื้นที่หน้าตัดของลูกสูบ

ขดลวดความร้อน (Resistance Heaters) เป็นอุปกรณ์ที่โดยปกติแล้วจะถูกใช้ในกระบวนการควบคุมที่ต้องการเพิ่มอุณหภูมิของวัตถุหรือมวลของของไหล พลังงานที่สิ้นเปลืองไปกับความต้านทานทางไฟฟ้าของอุปกรณ์หาได้จาก

$$p = i^2 R = \frac{v^2}{R} \quad (1.4)$$

เมื่อ p คือ กำลังงาน (Power)
 v คือ แรงดันไฟฟ้า (Applied Voltage)
 i คือ กระแสไฟฟ้า (Current)
 R คือ ความต้านทานไฟฟ้า (Resistance)

กรณีใช้ในของเหลวขดลวดความต้านทานที่ถูกใช้เป็นเครื่องทำความร้อนแบบแช่ในการไหล ซึ่งต้องป้องกันอุปกรณ์ความต้านทานในปอกหุ้ม สำหรับวัตถุที่เป็นของแข็งในเตาอบความต้านทานอาจใช้แท่งเรืองแสง (Rods of SiC) หรือหลอดทำความร้อน (Quartz Lamps) ซึ่งความต้านทานทั้งสองนั้นสามารถทำอุณหภูมิได้สูงกว่า 1000°C ความร้อนจะถ่ายเทไปสู่วัตถุโดยการแผ่รังสีอินฟราเรด (Infrared Radiation) ในทุกกรณีการควบคุมทำได้โดยใช้สัญญาณป้อนกลับ (Feedback Signal) พร้อมอุปกรณ์ขยายสัญญาณเพื่อปรับกระแสไฟฟ้าควบคุมระดับพลังงานจนกระทั่งอุณหภูมิของวัตถุอยู่ในช่วงความคลาดเคลื่อนตามอุณหภูมิที่ควบคุม (Command Temperature)

1.5 ความคลาดเคลื่อนในการทดลอง (Experimental Error)

ความคลาดเคลื่อน (Error) คือความแตกต่างระหว่างค่าจริงกับค่าที่วัดได้ของปริมาณทางกลและปริมาณทางความร้อน เช่นการกระจัด ความดัน และอุณหภูมิเป็นต้น การออกแบบที่ดีระบบเครื่องมือวัดอิเล็กทรอนิกส์จะมีความคลาดเคลื่อนจำกัดอยู่และมีความแน่นอนในทุกการวัดค่า จึงทำให้ปริมาณที่วัดยอมรับได้ในแง่ของความเที่ยงตรงที่ต้องการในการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมหรือในกระบวนการควบคุม โดยผลของความคลาดเคลื่อนมีสาเหตุมาจาก

1 การสะสมความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้จากแต่ละส่วนประกอบของระบบวัด

- 2 การใช้งานที่ไม่เหมาะสมของแต่ละส่วนประกอบในระบบวัด
- 3 ผลกระทบของทรานสดิวเซอร์ที่มีต่อกระบวนการ
- 4 ผลกระทบจากความไวต่อปริมาณอื่นที่ไม่ได้ต้องการวัดต่อทรานสดิวเซอร์
- 5 ผลจากแหล่งที่ไม่ชัดเจนอื่นๆ

ในแต่ละสาเหตุข้างต้นจะได้กล่าวถึงรายละเอียดในแง่ของคุณลักษณะของส่วนประกอบในระบบเครื่องมือวัด

1.5.1 ความคลาดเคลื่อนสะสม (Accumulation of Accepted Error)

ส่วนประกอบต่างๆ ของระบบเครื่องมือวัดทั้งหมด มีค่าจำกัดความเที่ยงตรง (Accuracy Limits) มาจากผู้ผลิตโดยระบุในคู่มือ ตัวอย่างเช่นอุปกรณ์บันทึกสัญญาณอาจระบุค่าความเที่ยงตรง (Accuracy Specified) ว่า $\pm 2\%$ ของค่าเต็มสเกล (Full Scale) อุปกรณ์บันทึกสัญญาณจะสามารถใช้งานได้โดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกินค่าที่ระบุไว้ หากใช้อย่างระมัดระวัง มีการบำรุงรักษา และการสอบเทียบ (Calibrated) เครื่องมือสม่ำเสมอเพราะว่าค่าจำกัดของความเที่ยงตรงนี้ อุปกรณ์บันทึกสัญญาณจะเป็นส่วนหนึ่งของความคลาดเคลื่อนในการวัดเมื่อนำไปใช้ในระบบเครื่องมือวัด อย่างไรก็ตามค่าความคลาดเคลื่อนนี้ก็เป็นส่วนที่ทราบเมื่ออุปกรณ์บันทึกสัญญาณทำงานตามที่ระบุในคู่มือ

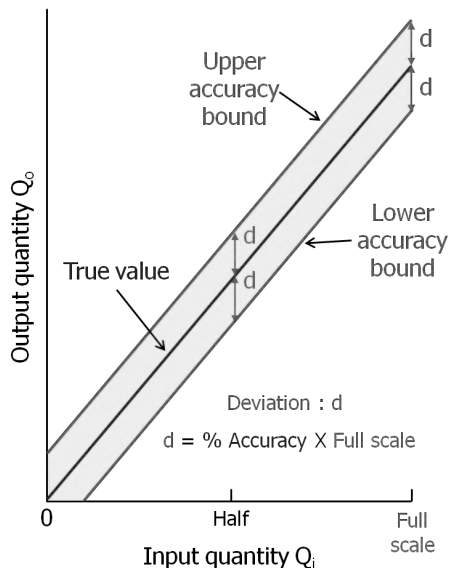
ควรมีความเข้าใจอย่างชัดเจนเกี่ยวกับความเที่ยงตรงจำกัดว่าเครื่องมือวัดที่มีความเที่ยงตรง $\pm 2\%$ สามารถเกิดความคลาดเคลื่อนที่มากกว่าขีดจำกัดดังกล่าวได้ พิจารณากราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตสำหรับอุปกรณ์บันทึกสัญญาณตามภาพที่ 1.19 ค่าเบี่ยงเบน (Deviation : d) หรือช่วงความคลาดเคลื่อนถูกนิยามให้มีค่าเท่ากับผลคูณระหว่างเปอร์เซ็นต์ความเที่ยงตรงกับค่าเต็มสเกลของผลตอบสนองของอุปกรณ์บันทึกสัญญาณ

$$d = \%Accuracy \times Full\ scale \quad (1.5)$$

เส้นตรงที่ลากขนานกับค่าผลตอบสนองจริง (True Response) ของอุปกรณ์บันทึกสัญญาณ ด้วยระยะห่าง $\pm d$ ไปยังขอบด้านบนและล่างถูกให้นิยามว่าผลตอบสนองจริง (Actual Response) ของเครื่องมือวัด พื้นที่ส่วนที่แรงเงาในระหว่างขอบบนและล่างเป็นพื้นที่ที่

อุปกรณ์บันทึกสัญญาณ (หรือชิ้นส่วนอุปกรณ์อื่นๆ) ทำงานตามที่ระบุไว้ในคู่มือของ บริษัทผู้ผลิต แม้ว่าอุปกรณ์เครื่องมือวัดจะทำงานเพียงครั้งหนึ่งของค่าเต็มสเกลแต่เบี่ยงเบน d ยังคงเป็นค่าคงที่ โดยที่ค่าที่วัดได้จริงจะเป็นเพียงครั้งหนึ่ง ดังนั้นค่าความคลาดเคลื่อนที่นิยาม ให้มีค่าเท่ากับค่าเบี่ยงเบนหารด้วยค่าจริง

$$\% \text{ความคลาดเคลื่อน} = \frac{\text{ค่าจริง} - \text{ค่าที่วัดได้}}{\text{ค่าจริง}} \times 100 \quad (1.6)$$



ภาพที่ 1.19 ขอบเขตความเที่ยงตรงสำหรับการทำงานของเครื่องมือวัด [2]

ตามตัวอย่างนี้ถ้าใช้อุปกรณ์บันทึกสัญญาณที่กล่าวมาวัดปริมาณเพียงครั้งหนึ่งของค่าเต็มสเกล จะพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนจะเพิ่มขึ้น $\pm 4\%$ ดังระบุไว้ในคู่มือเมื่ออุปกรณ์บันทึกสัญญาณ แม้ว่าการใช้งานเครื่องมือวัดเพื่อวัดปริมาณที่มีค่าน้อยกว่าค่าเต็มสเกลมากๆเป็นเรื่องสะดวก แต่อย่างไรก็ตามทุกการลดลงของสเกลควรต้องพิจารณาอย่างระมัดระวังอย่างมาก เนื่องจากความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามเปอร์เซ็นต์ของการลดลงของสเกล โดยปกติไม่ควรใช้เครื่องมือวัดในการวัดปริมาณที่มีค่าต่ำกว่าหนึ่งในสามถึงหนึ่งในสองของค่าเต็มสเกลโดย

ไม่มีการพิจารณาถึงความคลาดเคลื่อนที่เกี่ยวข้องกับการตรวจวัดว่าไม่ทำให้เกิดผลกระทบต่อ วัตถุประสงค์ของการทดลอง

โดยปกติระบบเครื่องมือวัดจะประกอบด้วยหลายส่วนประกอบ ซึ่งแต่ละส่วนประกอบต่างก็มีความคลาดเคลื่อนในขณะที่ทำงานตามที่ได้ระบุไว้จึงสามารถประเมินค่าความคลาดเคลื่อนสะสม (Accumulated Error : ε_a) สำหรับระบบเครื่องมือวัดได้ดังนี้

$$\varepsilon_a = \sqrt{\varepsilon_T^2 + \varepsilon_{SC}^2 + \varepsilon_A^2 + \varepsilon_R^2} \quad (1.7)$$

- เมื่อ ε_a คือความคลาดเคลื่อนสะสม
 ε_T คือความคลาดเคลื่อนของทรานสดิวเซอร์
 ε_{SC} คือความคลาดเคลื่อนของวงจรเงื่อนไขสัญญาณ
 ε_A คือความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์ขยายสัญญาณ
 ε_R คือความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์บันทึกสัญญาณ

จากสมการที่ 1.7 เป็นการยืนยันว่า แม้ความคลาดเคลื่อนของแต่ละส่วนประกอบในระบบเครื่องมือวัดมีค่าน้อยยอมรับได้ก็ตาม แต่ความคลาดเคลื่อนสะสมอาจจะมีค่าเกินจนไม่สามารถยอมรับได้ จึงต้องการความเที่ยงตรงที่มากขึ้นของแต่ละส่วนประกอบเพื่อให้ความคลาดเคลื่อนสะสมมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้

1.5.2 การใช้งานเครื่องมือไม่เหมาะสม (Improper Functioning of Instruments)

หากส่วนประกอบต่างๆของระบบเครื่องมือวัด หากไม่ได้มีการบำรุงรักษาหรือมีการปรับแต่งค่าให้เหมาะสมก่อนการนำไปใช้งานเช่น สอบเทียบ ปรับระยะเลื่อนศูนย์ หรือตรวจสอบช่วงการวัด ความคลาดเคลื่อนก็สามารถเกิดขึ้นได้ ก่อนที่จะกล่าวถึงความคลาดเคลื่อนเหล่านี้พิจารณากราฟผลตอบแทนสำหรับเครื่องมือวัดทั่วไปตามภาพที่ 1.20 ปริมาณเอาต์พุต Q_o เป็นปริมาณที่ถูกวัดและปริมาณอินพุต Q_i เป็นปริมาณที่แปรผันความสัมพันธ์ของอัตราส่วนผลตอบแทนสามารถแสดงในรูปของกราฟเส้นตรงซึ่งได้มาจากการจัดสมการข้อมูล (Fitted

Curve) โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุด (Least Squares Method) ความชันของสมการเส้นตรงเป็นค่าคงที่ของการสอบเทียบ (Calibration Constant) หรือ ค่าความไว (Sensitivity : S) ของเครื่องมือวัด มีค่าดังนี้

$$S = \frac{\Delta Q_o}{\Delta Q_i} \quad (1.8)$$

สำหรับเครื่องบันทึกแผนภูมิ (Strip Chart Recorder) ค่าความไว S จะมีหน่วยอยู่ในรูปของระยะเคลื่อนที่ของปากกาต่อแรงดันไฟฟ้า (Pen Displacement per Volt) สำหรับอุปกรณ์วัดความดันแบบเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Pressure Gage) ค่าความไว S จะอยู่ในรูปแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าต่อหน่วยความดัน (Voltage or Charge Output per Unit of Pressure)

ในกรณีที่กราฟเส้นตรงของผลตอบสนองที่ไม่ผ่านจุดกำเนิด ระยะของส่วนเบี่ยงเบน (Deviation : d) ที่ถูกวัดออกจากจุดกำเนิดจะมีชื่อเรียกว่าระยะเลื่อนศูนย์ (Zero Offset : Z_0) ซึ่งแสดงอยู่ในภาพที่ 1.19

$$Q_o = SQ_i + Z_0 \quad (1.9)$$

เครื่องมือวัดส่วนใหญ่สามารถที่จะปรับแต่งค่าระยะเลื่อนศูนย์ (Adjusting the Zero Offset) ได้ ดังนั้นค่า Z_0 จึงสามารถปรับให้มีค่าเป็นศูนย์ความสัมพันธ์สำหรับปริมาณเอาต์พุต Q_o จึงสามารถทอนรูปเหลือเป็น

$$Q_o = SQ_i \quad (1.10)$$

สำหรับปริมาณอินพุตที่มีค่ามากผลตอบสนองทั่วไปมักจะเบี่ยงเบนออกจากกราฟเส้นตรงของความสัมพันธ์เชิงเส้นตามที่แสดงในส่วนของค่าขอบบนขวาตามภาพที่ 1.20 เมื่อส่วนเบี่ยงเบนมีค่ามากกว่า 1 ถึง 2 เปอร์เซ็นต์ สมการที่ 1.9 และ 1.10 จะไม่สามารถใช้ได้เนื่องจากช่วงการวัดของเครื่องมือเกินออกไป ค่า Q_i^R จึงถูกนิยามให้เป็นค่าจำกัดบน (Upper Limit of