

การศึกษาตัวแปรต่างๆของตัวรับรู้แบบฮอลล์เอฟเฟคในการวัดระยะขึ้นงาน

บุญฤทธิ์ แก้วประชุม

TNI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

ปีการศึกษา 2556

THE STUDY OF INFLUENT PARAMETERS OF THE HALL-EFFECT SENSOR
FOR WORKPIECE MEASUREMENT

Boonrit Kaewprachum

TNI

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for the Degree of Master of Engineering Technology Program in Engineering

Faculty of Engineering
Thai-Nichi Institute of Technology
Academic Year 2013

หัวข้อปริญญานิพนธ์

การศึกษาตัวแปรต่างๆของตัวรับรู้แบบฮอลล์เอฟเฟค
ในการวัดระยะขึ้นงาน

โดย

บุญฤทธิ์ แก้วประชุม

สาขาวิชา

เทคโนโลยีวิศวกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วราคม เนินน้อย

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....บัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.พิชิต สุขเจริญพงษ์)

วัน.....เดือน.....พ.ศ.....

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรชัย นิเวศน์รังสรรค์)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เลอเกียรติ วงศ์สารพิกุล)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพล ลิ้มจิระจรัส)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วราคม เนินน้อย)

บุญฤทธิ์ แก้วประทุม : การศึกษาตัวแปรต่างๆของตัวรับรู้แบบฮอลล์เอฟเฟคในการวัดระยะชิ้นงาน. อาจารย์ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.วราคม เนินน้อย, 62 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของความหนาของชิ้นงาน และระยะใกล้ขอบของชิ้นงานที่มีผลต่อการวัดระยะ เมื่อใช้ตัวรับรู้ฮอลล์เอฟเฟคที่ในการวัดระยะชิ้นงาน เพื่อนำตัวรับรู้ไปพัฒนาสร้าง Checking fixture แบบไม่สัมผัส โดยการสร้างตัวรู้นี้จะใช้อุปกรณ์คือ Hall-effect Sensor แม่เหล็กและเหล็กตัวนำมาประกอบกันเป็นตัวรับรู้ (Sensor) ค่าระยะที่ได้จากตัวรับรู้จะอยู่ในรูปความต่างศักย์ (V_{out}) และเพื่อให้ได้ช่วงความต่างศักย์ที่มากพอในการวัดด้วยระบบคอมพิวเตอร์ จึงต้องนำความต่างศักย์จากตัวรับรู้มาขยายสัญญาณแล้วจึงนำสัญญาณที่ได้ไปวัด ในการวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 กรณีคือ กรณีที่ 1 เป็นการทดลองหาเสถียรภาพการทำงานของชุดอุปกรณ์ทั้งหมดภายใต้เงื่อนไขค่าความผิดพลาดของการวัดระยะไม่เกิน $\pm 5\%$ และอุณหภูมิภายนอกอยู่ในช่วง $25-30^{\circ}\text{C}$ กรณีที่ 2 เป็นการทดลองผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนความหนาของชิ้นงาน โดยใช้ชิ้นงานหนา 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิเมตรและกรณีที่ 3 เป็นการทดลองผลกระทบเนื่องจากระยะระหว่างตัวรับรู้กับขอบชิ้นงาน (ระยะ e) เป็นการศึกษาเพื่อหาตำแหน่งติดตั้งตัวรับรู้ใกล้ขอบที่สุดที่ไม่ส่งผลกระทบต่อค่าการวัดค่า สำหรับกรณีที่ 2 และกรณีที่ 3 มีเงื่อนไขค่าความผิดพลาดของการวัดระยะไม่เกิน $\pm 10\%$

จากผลวิจัยพบว่าเพื่อให้ได้เสถียรภาพการทำงานของตัวรับรู้ จะต้องจ่ายไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ก่อนนำตัวรู้นี้ไปทำการวัด อย่างน้อย 10 นาที ในการศึกษากรณีที่ 2 พบว่าต้องใช้สมการความสัมพันธ์ระหว่างระยะ D กับความต่างศักย์เฉพาะตามความหนาชิ้นงานที่ทำการวัด และมีค่าความไม่แน่นอนในการวัดสูงสุดเท่ากับ ± 0.048 มิลลิเมตร และกรณีที่ 3 ผลของระยะห่างระหว่างตัวรับรู้กับขอบชิ้นงาน (ระยะ e) นั้นมีความสัมพันธ์กับระยะห่างระหว่างตัวรับรู้กับชิ้นงาน (ระยะ L) กล่าวคือหากติดตั้งระยะ L ในช่วง 1 และ 2 มิลลิเมตร จะต้องวัดห่างจากขอบชิ้นงานมากกว่า 6 มิลลิเมตรขึ้นไป โดยมีค่าความไม่แน่นอนในการวัดสูงสุดเท่ากับ ± 0.005 มิลลิเมตร หากติดตั้งระยะ L ในช่วง 3 และ 4 มิลลิเมตร ต้องวัดห่างจากขอบชิ้นงานมากกว่า 8 มิลลิเมตรขึ้นไป โดยมีค่าความไม่แน่นอนในการวัดเท่ากับ ± 0.013 มิลลิเมตร ข้อสรุปนี้สามารถใช้ได้กับชิ้นงานที่มีความหนาตั้งแต่ 1 ถึง 5 มิลลิเมตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สาขาวิชา เทคโนโลยีวิศวกรรม

ปีการศึกษา 2556

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

BOONRIT KAEWPRACHUM : THE STUDY OF INFLUENT PARAMETERS OF THE HALL-EFFECT SENSOR FOR WORKPIECE MEASUREMENT. ADVISOR: ASST.DR. WARAKOM NERDNOI, 62 PP.

This research is the study of the effect of thickness and nearest-edged distance of the workpiece on distance measurement by using Hall-effect sensor in order to develop non-contact checking fixture. Hall-effect sensor, magnetic and coupling metal were used to make the probe which provides distance value in terms of electric voltage (V_{out}). The output voltage signals must be magnified to obtain the proper voltage range for measuring by computer. The studies were divided into three cases. Case I, the determination of the stability of overall equipment within $\pm 5\%$ of measuring error, at working temperature range of 25 to 30°C. Case II, the investigation of an influence of different workpiece thickness when using the thickness of 1, 2, 3, 4, and 5 mm. Case III, the examination of the effect of the distance between the sensor and workpiece edge (d) in order to find the nearest distance to install the sensor to avoid an effect on the measuring value. Case II and III were tested under $\pm 10\%$ of measuring error.

The results showed that to obtain the appropriate working stability, the sensor and electronic circuits need current supply at least 10 minutes before the application. In case II, the specific equation of relation between distance D and voltage must be applied in accordant with workpiece thickness and the maximum uncertainty is equal to ± 0.048 mm. In case III, the correlation between the sensor-to-workpiece edge distance (d) and the sensor-to-workpiece distance (L) has been found, i.e when installation distance (L) is in a range of 1 to 2 mm, sensor-to-workpiece edge distance must be more than 6 mm with the maximum uncertainty of ± 0.005 mm; however, when installation distance (L) is in a range of 3 to 4 mm, the distance e must be more than 8 mm. The maximum uncertainty of this case is ± 0.013 mm. This can be applied to the workpiece with the thickness between 1 and 5 mm.

Faculty of Engineering

Student's Signature.....

Field of Engineering Technology

Advisor's Signature.....

Academic Year 2013

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้กระทำให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี อันเนื่องมาจากความกรุณาอย่างสูงจากท่าน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วราคม เนินน้อย ซึ่งเป็นผู้ริเริ่มโครงการวิจัย ทั้งยังกรุณาสละเวลาอันมีค่าของท่านมาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาแนวทางและการพัฒนาในการทำวิจัย ตลอดจนสอนวิธีการใช้เครื่องมือวัดต่างๆ มาโดยตลอดการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐพล ลิ้มจิระจรัส ที่กรุณาเสียสละเวลาให้คำปรึกษา อีกทั้งยังแนะนำแนวทางการทำวิทยานิพนธ์และการนำเสนองานวิจัย

และท้ายที่สุดขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่ให้โอกาสในการศึกษาและขอบคุณเพื่อนๆ อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน ทั้งผู้ที่กล่าวนามและไม่ได้กล่าวนามใน ณ ที่นี้ ผู้เขียนมีความซาบซึ้งในความกรุณาอันดีจากทุกท่านและขอกราบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

บุญฤทธิ์ แก้วประชุม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ซ
สารบัญรูป.....	ฅ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
ขอบเขตของการศึกษาและวิจัย.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
แผนการดำเนินงาน.....	3
2 หลักการพื้นฐาน เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
ทบทวนวรรณกรรม.....	4
ฮอลล์เอฟเฟกเซนเซอร์(Hall-Effect Sensor).....	5
คำนิยามของการวัด.....	10
เส้นแนวโน้มโพลิโนเมียล.....	13
3 ระเบียบวิธีวิจัย.....	14
ผังแสดงภาพรวมการวิจัยและขั้นตอนการทำงาน.....	14
อุปกรณ์การทดลองและเครื่องมือสอบเทียบ.....	16
ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	23

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	26
ผลการทดลองเสถียรภาพการทำงานของเซนเซอร์.....	26
ผลการทดลองผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนความหนาของชิ้นงาน.....	30
ผลการทดลองผลกระทบเนื่องจากระยะ d.....	42
5 สรุปผลการวิจัย.....	49
สรุปผลการทดสอบ.....	50
บรรณานุกรม.....	51
ภาคผนวก.....	53
ภาคผนวก ก.....	54
ตารางที่ ก.1 ค่าความต่างศักย์จากการทดลองซ้ำเป็นจำนวน 5 ครั้ง (อุณหภูมิ $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$).....	56
ตารางที่ ก.2 ค่าความต่างศักย์จากการทดลองซ้ำเป็นจำนวน 5 ครั้ง (อุณหภูมิ $30^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$).....	58
ภาคผนวก ข.....	60
ตารางที่ ข.1 ระยะ D_2 ณ ตำแหน่งระยะ d ต่างๆ ในการวัดชิ้นงานหนา 2 มิลลิเมตร.....	62
ตารางที่ ข.2 ระยะ D_3 ณ ตำแหน่งระยะ d ต่างๆ ในการวัดชิ้นงานหนา 3 มิลลิเมตร.....	62
ตารางที่ ข.3 ระยะ D_4 ณ ตำแหน่งระยะ d ต่างๆ ในการวัดชิ้นงานหนา 4 มิลลิเมตร.....	63
ตารางที่ ข.4 ระยะ D_5 ณ ตำแหน่งระยะ d ต่างๆ ในการวัดชิ้นงานหนา 5 มิลลิเมตร.....	63
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	64

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 แผนงานและระยะเวลาดำเนินงาน.....	3
2.1 ตัวคูณที่เหมาะสมของความเชื่อมั่นที่ระดับต่างๆ.....	12
4.1 ตารางที่ 4.1 ค่าความต่างศักย์เฉลี่ยและค่าความผิดพลาดจากการทดลองวัดชิ้นงาน 5 ครั้ง ที่อุณหภูมิ ($25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$) และ ($30^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$).....	26
4.2 ความต่างศักย์ที่ตำแหน่งระยะ L ต่างๆ ในการทดลองวัดชิ้นงานหนา 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิเมตร.....	27
4.3 ระยะ D และค่าความผิดพลาดระยะ D สำหรับชิ้นงานหนา 1 ถึง 5 มิลลิเมตร (โดยใช้สมการความสัมพันธ์ระยะ D กับระยะ L).....	30
4.4 ค่าคงที่เพื่อใช้หาระยะ D กับความต่างศักย์ของชิ้นงานหนา 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิเมตร.....	33
4.5 ระยะ D และค่าความผิดพลาดระยะ D สำหรับชิ้นงานหนา 1 ถึง 5 มิลลิเมตร (โดยใช้สมการความสัมพันธ์ระยะ D กับระยะ L แยกตามความหนาชิ้นงาน).....	34
4.6 ค่า Standard Deviation และค่า Uncertainty ในการทดลองชิ้นงาน 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิเมตร.....	36
4.7 ตารางที่ 4.7 ระยะ D , ณ ตำแหน่งระยะ d ต่างๆ ในการวัดชิ้นงานหนา 1 มิลลิเมตร.....	38
5.1 ค่าคงที่เพื่อใช้หาระยะ D กับความต่างศักย์ของชิ้นงานหนา 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิเมตร.....	44
5.2 ระยะ d และระยะ L เพื่อการติดตั้งเซนเซอร์ให้เหมาะสมกับการใช้งานโดยพิจารณา จากค่า ความผิดพลาดของระยะ D เท่ากับ $\pm 10\%$	40

TNI

TAHITI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

สารบัญรูป

รูป	หน้า
2.1	หลักการของฮอลล์เอฟเฟค.....5
2.2	เมื่อจ่ายกระแสให้กับแผ่นตัวนำอย่างคงที่.....6
2.3	เมื่อมีฟลักซ์แม่เหล็กมากระทำต่อตัวนำที่มีประจุพาหะเป็นอิเล็กตรอน.....6
2.4	แรงดันเออร์ตพุดเมื่อกลับขั้วแม่เหล็ก.....7
2.5	แสดงการกระตุ้นเซนเซอร์แบบกรณี Unipolar Head-On.....9
3.1	ผังการดำเนินงาน.....15
3.2	ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง.....16
3.3	Linear Hall Effect Sensor ยี่ห้อ Allegro รุ่น A 1302.....17
3.4	เหล็คนำเส้นแรงแม่เหล็ก.....17
3.5	แม่เหล็ก.....17
3.6	อลูมิเนียมกรอบเซนเซอร์.....18
3.7	ตำแหน่งการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ ของเซนเซอร์.....18
3.8	เซนเซอร์ที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์.....19
3.9	การติดตั้งชุดทดลอง.....19
3.10	การจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงและวงจรขยายสัญญาณสำหรับเซนเซอร์.....20
3.11	Data Acquisition.....21
3.12	บล็อกไดอะแกรมของโปรแกรม LabVIEW.....21
3.13	แสดงหน้าจอของโปรแกรม LabVIEW.....22
3.14	Dial Gauge.....22
3.15	การศึกษาเสถียรภาพการทำงานเซนเซอร์.....23
3.16	การศึกษาผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนความหนาของชิ้นงาน.....24
3.17	การศึกษาผลกระทบเนื่องจากระยะ d.....25
4.1	(ก-จ) ค่าความต่างศักย์จากการทดสอบเสถียรภาพการทำงานของเซนเซอร์ เป็นจำนวน 5 ครั้ง ณ อุณหภูมิ $25 \pm 2^{\circ}$24
4.2	(ก-จ) ค่าความต่างศักย์จากการทดสอบเสถียรภาพการทำงานของเซนเซอร์ เป็นจำนวน 5 ครั้ง ณ อุณหภูมิ.....25
4.3	ความต่างศักย์ที่ตำแหน่งระยะ L ต่างๆ ในการทดลองวัดชิ้นงานหนา 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิเมตร.....28

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.4	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะ D กับความต่างศักย์ของชิ้นงานหนา 1 มิลลิเมตร.....28
4.5	แสดงการเปรียบเทียบระยะ D ที่คำนวณได้กับระยะ L ของชิ้นงานหนา 1 ถึง 5 มิลลิเมตร.....29
4.6	เปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดระยะ D ณ ระยะ L ต่างๆเมื่อใช้สมการความสัมพันธ์ระหว่างระยะ D กับระยะ L ร่วมกันทั้ง 5 ความหนา.....30
4.7	สมการความสัมพันธ์ระหว่างระยะ D_1 กับความต่างศักย์สำหรับชิ้นงานหนา 1 มิลลิเมตร.....31
4.8	(ก-ง) สมการความสัมพันธ์ระหว่างระยะ D_2, D_3, D_4 และ D_5 กับค่าความต่างศักย์.....32
4.9	แสดงการเปรียบเทียบระยะ D ที่คำนวณได้กับระยะ L ตามความหนาชิ้นงาน.....33
4.10	เปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดระยะ D ณ ระยะ L ต่างๆเมื่อใช้สมการความสัมพันธ์ระหว่างระยะ D กับระยะ L สมการแยกตามความหนาชิ้นงาน.....35
4.11	(ก-จ) ค่า Uncertainty ของชิ้นงานหนา 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิเมตร.....37
4.12	แสดงค่าระยะ D_1 ณ ตำแหน่งระยะ d ต่างๆ ในการวัดชิ้นงานหนา 1 มิลลิเมตร.....39
4.13	แสดงค่าระยะ D_2 ณ ตำแหน่งระยะ d ต่างๆ ในการวัดชิ้นงานหนา 2 มิลลิเมตร.....40
4.14	แสดงค่าระยะ D_3 ณ ตำแหน่งระยะ d ต่างๆ ในการวัดชิ้นงานหนา 3 มิลลิเมตร.....41
4.15	แสดงค่าระยะ D_4 ณ ตำแหน่งระยะ d ต่างๆ ในการวัดชิ้นงานหนา 4 มิลลิเมตร.....41
4.16	แสดงค่าระยะ D_5 ณ ตำแหน่งระยะ d ต่างๆ ในการวัดชิ้นงานหนา 5 มิลลิเมตร.....42

TNI

THAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

บทที่ 1

บทนำ

ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ชิ้นงานโลหะแผ่นที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการปั๊มขึ้นรูป (Stamping) มีความจำเป็นที่จะต้องทำการตรวจสอบขนาดและรูปร่างของชิ้นงานเพื่อความถูกต้องก่อนที่จะส่งให้กับลูกค้า เนื่องจากชิ้นงานเหล่านี้ต้องนำไปประกอบกับชิ้นส่วนอื่น ซึ่งในอดีตการตรวจสอบขนาดและรูปร่างของชิ้นงานกระทำโดยวิธีการใช้ Check Fixture (CF), Taper Gauge และ Go-No Go Gauge ในการตรวจสอบชิ้นงานแล้วบันทึกข้อมูลที่ได้ลงในกระดาษบันทึกผล แต่เนื่องจากตำแหน่งที่ต้องตรวจสอบนั้นมีเป็นจำนวนมาก จึงต้องใช้เวลาในการตรวจสอบนาน ดังนั้นการตรวจสอบจึงกระทำเป็นลักษณะแบบสุ่มตรวจ เมื่อการตรวจสอบต้องใช้เวลาาน ทำให้กว่าจะตรวจพบปัญหาที่เกิดจากชิ้นงานที่ไม่ได้ขนาดนั้น ชิ้นงานในสายการผลิตก็เกิดความเสียหายไปเป็นจำนวนมากแล้ว รวมถึงการใช้คนในการตรวจสอบ พอเวลาผ่านไปนานๆคนเกิดความเหนื่อยล้าจากการทำงานจึงมักทำให้เกิดความผิดพลาดทั้งในการวัดและการบันทึกผล อีกทั้งข้อมูลที่ได้จากการตรวจสอบต้องนำไปบันทึกลงในระบบคอมพิวเตอร์ เพื่อนำไปประมวลผลหาค่าประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต ด้วยวิธีการเก็บข้อมูลที่หลายขั้นตอนจึงทำให้เกิดความล่าช้าในการที่จะทราบถึงสถานะของกระบวนการผลิต

ผู้วิจัยจึงเกิดแนวคิดในการนำเซนเซอร์วัดระยะแบบฮอลล์เอฟเฟค (Linear Hall-Effect Sensor) หลายๆ ตัวเข้าไปติดตั้งบน Check Fixture เพื่อใช้ในการตรวจสอบขนาดของชิ้นงานได้พร้อมกันหลายตำแหน่งในเวลาเดียวกัน แล้วส่งข้อมูลไปเก็บไว้ในระบบฐานข้อมูลของคอมพิวเตอร์ โดยมีลักษณะการทำงานแบบกึ่งอัตโนมัติ เพื่อลดเวลาในการตรวจสอบขนาดชิ้นงาน ลดความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดด้วยคน ข้อมูลที่ได้มีความน่าเชื่อถือสูงขึ้น และยังสามารถนำข้อมูลไปเก็บไว้ในระบบฐานข้อมูลของคอมพิวเตอร์ได้ในทันที ด้วยความรวดเร็วในการตรวจสอบขนาดชิ้นงานจึงทำให้สามารถตรวจสอบชิ้นงานได้ทุกชิ้นโดยไม่ต้องสุ่มตรวจ และทราบถึงสถานะของกระบวนการผลิตได้เร็วขึ้น จึงสามารถปรับแก้เครื่องจักรได้ทันเวลาก่อนที่จะเกิดของเสียขึ้นในกระบวนการผลิต

เพื่อให้ได้มาซึ่งความถูกต้องของการวัดด้วยเซนเซอร์วัดระยะแบบฮอลล์เอฟเฟค จึงต้องมีการศึกษาถึงผลกระทบของลักษณะรูปร่าง และความหนาของชิ้นงานที่มีต่อเซนเซอร์วัดระยะแบบฮอลล์เอฟเฟค โดยทำการทดลองและการคำนวณหาผลกระทบของค่าตัวแปรต่างๆ ในการวัด เพื่อนำผลที่ได้จากการศึกษาไปใช้ในการกำหนดตำแหน่งการติดตั้งเซนเซอร์วัดระยะแบบฮอลล์เอฟเฟค เพื่อให้การวัดที่มีประสิทธิภาพและมีความถูกต้องแม่นยำ

วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ออกแบบและสร้างเซนเซอร์วัดระยะแบบฮอลล์เอฟเฟคที่มีความถูกต้องและแม่นยำ
2. ศึกษาเสถียรภาพการทำงานของเซนเซอร์
3. ศึกษาอิทธิพลการวัดเมื่อความหนาของชิ้นงานเปลี่ยนไป
4. ศึกษาอิทธิพลของการวัดใกล้ขอบชิ้นงาน

ขอบเขตของการศึกษาและวิจัย

1. ใช้ Linear Hall-effect Sensor ยี่ห้อ Allegro รุ่น A 1302 ในการศึกษา
2. ใช้เหล็กแผ่น SS400 ที่มีขนาด 60×120 มิลลิเมตร มีความหนาตั้งแต่ 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิเมตร ในการทดสอบ
3. สอบเทียบความถูกต้องกับ Dial Gauge ความละเอียด 0.001 มิลลิเมตร
4. กรณีศึกษาเสถียรภาพการทำงานของเซนเซอร์ อยู่ภายใต้เงื่อนไขค่าความผิดพลาดไม่เกิน $\pm 5\%$
5. ศึกษาอิทธิพลการวัดเมื่อความหนาของชิ้นงานเปลี่ยนไป อยู่ภายใต้เงื่อนไขค่าความผิดพลาดไม่เกิน $\pm 10\%$
6. ศึกษาอิทธิพลของการวัดใกล้ขอบชิ้นงาน อยู่ภายใต้เงื่อนไขค่าความผิดพลาดไม่เกิน $\pm 10\%$

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพิ่มองค์ความรู้เกี่ยวกับการใช้งานฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์สำหรับงานวัดระยะ
2. ได้เงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการใช้เซนเซอร์วัดระยะแบบฮอลล์เอฟเฟค ตรวจสอบขนาดของชิ้นงาน

แผนการดำเนินงาน

สำหรับการดำเนินงาน ได้มีการวางแผนดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 แผนงานและระยะเวลาดำเนินงาน

[illegible]

บทที่ 2

หลักการพื้นฐาน เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทบทวนวรรณกรรม

ปรากฏการณ์ฮอลล์นั้นได้เป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายมากกว่า 100 ปี แต่ได้นำมาดัดแปลงใช้งานเมื่อ 60 ปีที่ผ่านมา ใการใช้งานภาคปฏิบัติเป็นครั้งแรกมีมาเมื่อประมาณ ค.ศ.1950 เพื่อใช้เป็นเซนเซอร์ตรวจจับความเข้มข้นแม่เหล็กของคลื่นไมโครเวฟ และเมื่อเข้าสู่ยุคที่มีการผลิตสารกึ่งตัวนำก็มีความเป็นไปได้ที่จะนำปรากฏการณ์ฮอลล์มาใช้ในงานต่างๆอย่างแพร่หลาย โดยบริษัท Honeywell Micro Switch Sensing and Control ได้ปฏิวัติวงการอุตสาหกรรมการผลิตคีย์บอร์ดคอมพิวเตอร์ขนาดใหญ่ในปี ค.ศ.1968 โดยเปิดตัวโซลิตสเทคคีย์บอร์ดที่ใช้ปรากฏการณ์ฮอลล์ [1]

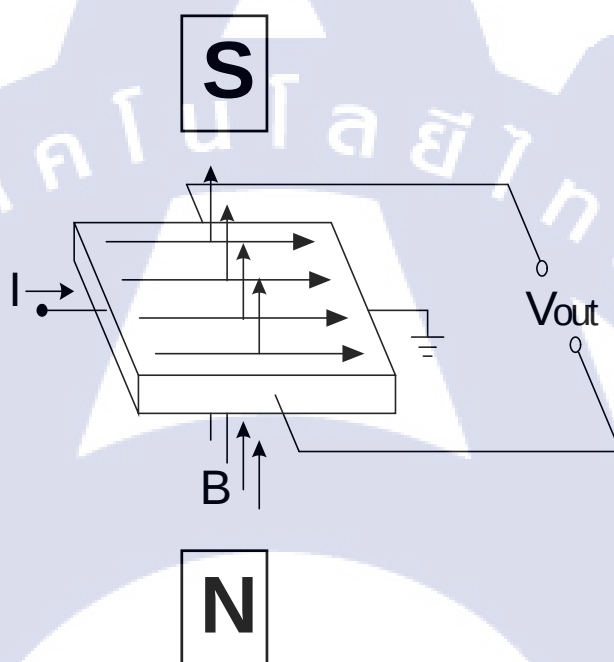
ในวงการวิจัยเรื่องการประยุกต์ใช้เซนเซอร์วัดระยะแบบฮอลล์เอฟเฟค (Linear Hall-effect Sensor) ได้มีการประยุกต์ใช้เซนเซอร์วัดระยะแบบฮอลล์เอฟเฟคในการวัดระยะผิดพลาดที่ปลายหัวกัดของเครื่องมือกลโดยการนำเซนเซอร์มาวัดตำแหน่งที่ผิดพลาดที่ปลายหัวกัดของเครื่องมือกลซึ่งอาศัยหลักการของ Hall-Effect มาประยุกต์ใช้ทำหัวเซนเซอร์ ข้อดีของการใช้เซนเซอร์ประเภทนี้คือสามารถวัดระยะที่ผิดพลาดได้โดยไม่ต้องอาศัยการสัมผัสกันระหว่างวัตถุที่จะวัดกับอุปกรณ์วัด โดยสามารถตอบสนองได้ไวถึง 20-40 kHz [2] และได้มีการนำเซนเซอร์วัดระยะแบบฮอลล์เอฟเฟคมาใช้ในการสร้างชุดวัดการกระจายแรงของเสื่อเกราะกันกระสุนซึ่งประกอบไปด้วยกระบอกสูบทำหน้าที่รับแรงร่วมกับเซนเซอร์วัดระยะแบบฮอลล์เอฟเฟคที่มีราคาถูก ตอบสนองเร็วและมีความเป็นเชิงเส้น ในส่วนการรับรู้ทำหน้าที่ในการแปลงค่าแรงกระทำให้เป็นแรงดันไฟฟ้า โดยใช้ Data Acquisition และส่งผ่านไปยังส่วนการบันทึกค่า ประมวลผล และแสดงผลในคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม LabVIEW [3]

ผู้วิจัยจึงเกิดแนวคิดในการนำเซนเซอร์วัดระยะแบบฮอลล์เอฟเฟคมาประยุกต์สร้างเซนเซอร์เพื่อใช้ในการตรวจสอบขนาดชิ้นงานว่ามีความถูกต้องเพียงไร และเพื่อให้เกิดความรวดเร็วมากกว่าวิธีการตรวจสอบแบบเดิม

ฮอลล์เอฟเฟกเซนเซอร์(Hall-Effect Sensor)

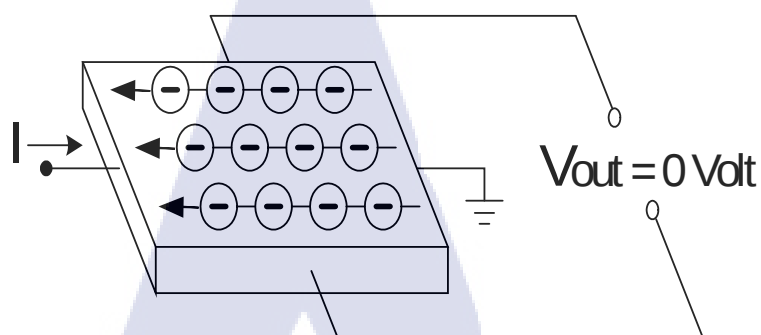
1. ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall-Effect)

Hall-Effect เป็นหลักทางฟิสิกส์ที่พบโดย Edwin Hall (ค.ศ.1855-1938) เป็นปรากฏการณ์ที่ว่า“เมื่อมีกระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวนำ”(หรือวัตถุใดๆ หรือแผ่นสารใดๆ เช่น สารกึ่งตัวนำ) ที่วาง อยู่ในสนามแม่เหล็กจะมีแรงดันเกิดขึ้นคร่อมตัวนำนั้นโดยทิศของแรงดันจะตั้งฉากกับทิศสนามแม่เหล็กและทิศของกระแสไฟฟ้า [3]



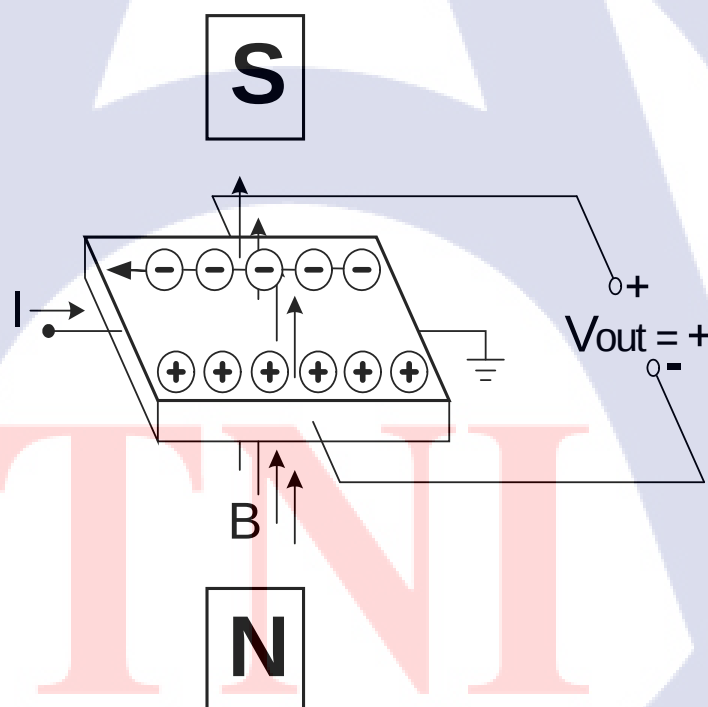
รูปที่ 2.1 หลักการของฮอลล์เอฟเฟค

แผ่นตัวนำที่มีกระแสไหลผ่านเมื่อมีฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic Flux) มากระทำในทิศทางตั้งฉากกับแผ่นตัวนำ จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าหรือแรงดันเรียกว่าแรงดันฮอลล์(Hall Voltage) ขึ้นที่ตัวนำ ในทิศทางตั้งฉากกับกระแสและฟลักซ์แม่เหล็กดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.2 เมื่อจ่ายกระแสให้กับแผ่นตัวนำอย่างคงที่

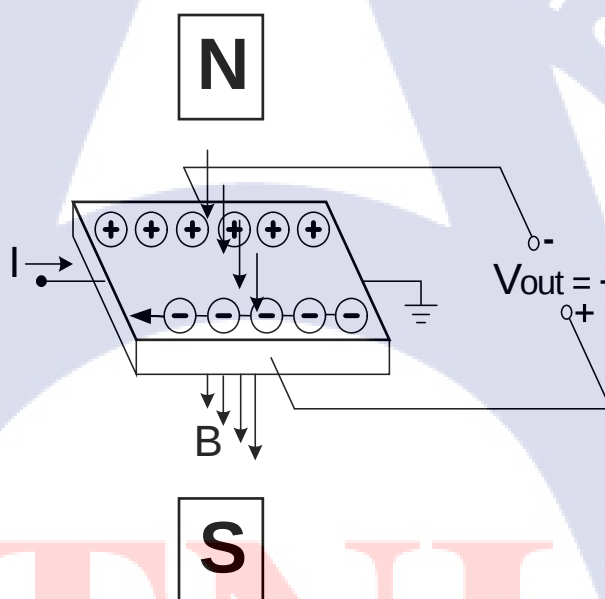
เมื่อจ่ายกระแสคงที่ให้แผ่นตัวนำจะทำให้กระแสไหลผ่านแผ่นตัวนำอย่างคงที่ โดยอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากซ้ายไปขวาดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.3 เมื่อมีฟลักซ์แม่เหล็กมากกระทำต่อตัวนำที่มีประจุพาหะเป็นอิเล็กตรอน

เมื่อมีฟลักซ์แม่เหล็กมากระทำกับแผ่นตัวนำในทิศทางตั้งฉากจะทำให้ประจุพาหะ (Charge Carrier) ของตัวนำเบี่ยงเบนไปด้านบนของแผ่นตัวนำ รูปที่ 2.3 ประจุพาหะเป็นอิเล็กตรอนมีประจุเป็นประจุลบทำให้ด้านบนของแผ่นตัวนำมีขั้วไฟฟ้าเป็นลบ ส่วนด้านล่างของแผ่นตัวนำจะมีขั้วตรงข้ามกับด้านบนนั่นคือมีประจุบวก เมื่อวัดความต่างศักย์ระหว่างด้านบนกับด้านล่างทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าออกมาเป็นแรงดันลบ โดยขนาดของแรงดันที่วัดได้จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กที่มากระทำ หากความเข้มแม่เหล็กมากก็จะทำให้เกิดแรงดันมาก และถ้าความเข้มสนามแม่เหล็กลดลงแรงดันก็จะน้อยตามไปด้วย

ส่วนกรณีที่มีการกลับขั้วแม่เหล็กจะทำให้แรงดันเอาต์พุต กลับขั้วกับกรณีที่กำลังกล่าวมา ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แรงดันเอาต์พุตเมื่อกลับขั้วแม่เหล็ก

การใช้งานฮอลล์เอฟเฟกเซนเซอร์เป็นการใช้วัดค่าความเข้มของฟลักซ์แม่เหล็ก เมื่อความเข้มของฟลักซ์แม่เหล็กเปลี่ยนแปลงตามระยะทาง ดังนั้นเราจึงสามารถนำฮอลล์เอฟเฟกเซนเซอร์มาใช้เป็นเซนเซอร์วัดการกระจัดได้

2.คำนวณหาความเข้มของสนามแม่เหล็กสำหรับฮอลล์เอฟเฟกเซนเซอร์

ฮอลล์เอฟเฟกต์ใช้ในการตรวจวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กซึ่งอาศัยปรากฏการณ์ฮอลล์ทำให้เกิดความต่างศักย์ค่าหนึ่งที่เปลี่ยนแปลงตามความเข้มของสนามแม่เหล็ก ถ้านำขั้วเหนือเข้าใกล้ค่าความต่างศักย์จะเพิ่มขึ้นทางด้านลบ (-) แต่ถ้านำขั้วใต้เข้าใกล้ค่าความต่างศักย์จะเพิ่มขึ้นทางด้านบวก (+) ความต่างศักย์ที่เปลี่ยนไปมีความสัมพันธ์กับความเข้มของสนามแม่เหล็กหรือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กดังนี้ [4]

$$B = \frac{V_{out(B)} - V_{out(O)}}{S} \quad (2.1)$$

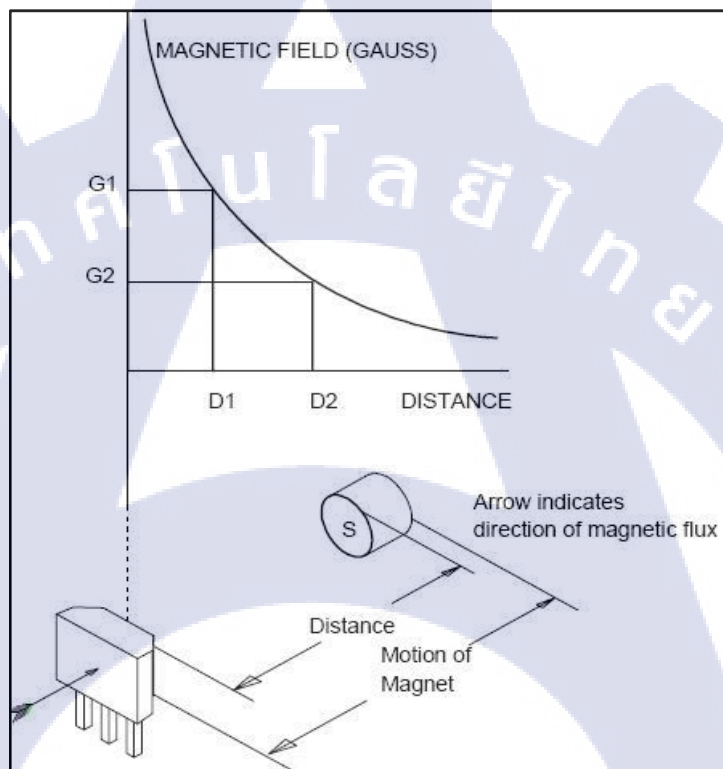
เมื่อ	$V_{out(B)}$	เป็นความต่างศักย์ขณะไม่มีสนามแม่เหล็ก
	$V_{out(O)}$	เป็นความต่างศักย์ขณะมีสนามแม่เหล็ก
	S	เป็นสัมประสิทธิ์ความไว มีหน่วยเป็นโวลต์ต่อเกาส์ (V/G)
	B	เป็นความเข้มของสนามแม่เหล็กมีหน่วยเป็นเกาส์ (G)

ค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างสนามแม่เหล็กที่เข้าใกล้บริเวณตัวนำกระแสไฟฟ้าภายในฮอลล์เอฟเฟกต์ ถ้าอยู่ใกล้ค่าความต่างศักย์ที่ได้จะสูง แต่ถ้าอยู่ไกลค่าความต่างศักย์จะต่ำลงจนเหลือเท่ากับครึ่งหนึ่งของความต่างศักย์ที่จ่ายให้ การใช้ฮอลล์เอฟเฟกต์สำหรับการตรวจสอบตำแหน่งหรือการเคลื่อนที่ วิธีพื้นฐานที่ง่ายที่สุด คือ การวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กแบบขั้วเดียวทางหัว (Unipolar Head-On Mode)

ขั้วเดียวทางหัว (Unipolar Head-On) คำว่า Head-On นั้นหมายถึง การที่แม่เหล็กเคลื่อนที่สัมผัสกับจุดอ้างอิงของเซนเซอร์ ในกรณีนี้ทิศทางการเคลื่อนที่ของแม่เหล็กจะวิ่งเข้าหาหรือออกจากเซนเซอร์โดยที่เส้นของฟลักซ์แม่เหล็กจะผ่านเข้าสู่จุดอ้างอิงของเซนเซอร์ แม่เหล็กและเซนเซอร์จะจัดวางโดยที่ขั้วใต้แม่เหล็กจะหันหน้าเข้าหาหน้าตรวจวัดของเซนเซอร์แบบปรากฏการณ์ฮอลล์

เส้นฟลักซ์จะบอกปริมาณเวกเตอร์ที่มีทิศทางที่แน่นอน ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กจะมีขั้วเป็นบวก ถ้าทิศทางของมันมีทิศทางเดียวกันกับทิศทางอ้างอิงของเซนเซอร์ ลูกศรในรูปที่ 2.5 จะแสดงทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็ก ในรูปเส้นฟลักซ์ในทิศทางที่กำหนดเท่านั้นที่จะถูกตรวจวัดได้จึงเรียกกรณีนี้ว่า Unipolar (ขั้วเดียว)

ในกรณี Unipolar head-on จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็ก (GAUSS) กับระยะห่าง (Distance) โดยที่รูปกราฟแสดงโดยกฎยกกำลังผกผัน (Inverse Square law) คือเมื่อระยะห่างของเซนเซอร์กับแม่เหล็กเพิ่มมากขึ้นจะทำให้สนามแม่เหล็กมีค่าลดลง



TNI

THAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

คำนิยามของการวัด

การวัด (Measurement) เป็นพื้นฐานสำหรับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทุกสาขา การวัดคือการกำหนดตัวเลขให้กับคุณสมบัติ (Properties) ของวัตถุหรือเหตุการณ์ ดังนั้นมันจึงเป็นการบรรยายถึงค่าของคุณสมบัติของวัตถุหรือของเหตุการณ์ที่มีผลต่อการวัดด้วยวิธีการต่างๆ ที่เกิดขึ้นเนื่องจากโครงสร้างของเครื่องมือวัดได้แก่ [5]

1. ย่านการวัด (Range)

ย่านการวัดหรือพิสัยการวัด หมายถึงขีดความสามารถ หรือขีดจำกัดที่เครื่องมือวัดสามารถตรวจวัดหรือบันทึกค่าได้ โดยแบ่งออกเป็น 2 ระดับคือ

ก. ค่าต่ำสุดของย่านการวัด (Lower Range Value, LRV) คือค่าต่ำสุดที่เครื่องมือวัดตัวนั้นๆ จะสามารถปรับลงมาอ่านหรือบันทึกค่าได้ ตัวอย่างเช่น ในเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าทุกๆ ไปจะมีค่าต่ำสุดของย่านการวัดเป็นศูนย์ แต่เครื่องมือวัดทางอุตสาหกรรม เช่น เครื่องมือวัดความดันอาจมีค่าต่ำสุดของย่านการวัดเริ่มต้นที่ค่าใดๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของความดันที่ใช้ในระบบ ถ้าความดันที่ต้องการตรวจวัดในระบบนั้นมีค่าสูงมากๆ ค่าต่ำสุดของย่านการวัดก็อาจจะเริ่มต้นที่ค่าใดๆ ก็ได้ที่ไม่ใช่ศูนย์

ข. ค่าสูงสุดของย่านการวัด (Upper Range Value, URV) คือค่าสูงสุดที่เครื่องมือวัดนั้นๆ สามารถปรับขึ้นไปอ่านหรือบันทึกค่าได้ ซึ่งในเครื่องมือวัดตัวหนึ่งๆ อาจมีค่าสูงสุด (URV) อยู่หลายระบบหน่วย (Multi-Range) ของการวัดได้

2. สเปน (Span)

คำว่า “สเปน” หมายถึงผลต่างระหว่างค่าสูงสุดของย่านการวัด (URV) กับค่าต่ำสุดของย่านการวัด (LRV) ซึ่งในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงไม่จำเป็นที่สเปนต้องเปลี่ยนตาม ถ้าค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดของย่านการวัดมีการเปลี่ยนแปลงในระดับที่เท่ากันหรือสมมาตรกันทั้งเพิ่มขึ้นและลดลง แต่นอกเหนือจากกรณีดังกล่าวแล้วจะทำให้สเปนเปลี่ยนตามย่านการวัดด้วย

$$\text{Span} = \text{URV} - \text{LRV} \quad (2.2)$$

3. การคำนวณความค่าความไม่แน่นอนในการวัด

ความไม่แน่นอนของการวัดคือสิ่งที่บอกได้ถึงคุณภาพของผลการวัด ว่ามีความน่าเชื่อถือเพียงใด การรายงานความไม่แน่นอนของการวัดจะต้องรายงานพร้อมกับผลของการวัดเสมอ เพื่อที่จะให้เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการวัดกับข้อกำหนดจำเพาะหรือมาตรฐาน หรือเกณฑ์ยอมรับสำหรับสิ่งที่ถูกวัด (Measured)

เป็นที่ยอมรับกันว่าการวัดทุกครั้งมีความคลาดเคลื่อน (Error) เกิดขึ้นเสมอ ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ผลการวัดมีความแตกต่างจากค่าจริงของสิ่งที่ถูกวัด (True Value) และความไม่แน่นอนของการวัดส่วนหนึ่งได้มาจากการกระจายค่าของผลการวัดนั้นๆ เมื่อทำการวัดหลายๆ ครั้ง มีแนวคิดหลากหลายที่ใช้แสดงความน่าเชื่อถือได้ของผลการวัด อย่างไรก็ตามก็มีความยากลำบากในการใช้วิธีประเมินความน่าเชื่อถือได้ที่ต่างๆ กันเหล่านั้น ในปี ค.ศ.1990 องค์การมาตรฐานระหว่างประเทศ (International Standards Organization, ISO) ร่วมกับ สำนักงาน ชั่ง ตวง วัด ระหว่างประเทศ (BIPM) ได้แนะนำให้ใช้ความไม่แน่นอนของการวัดเป็นมาตรการในการบอกความน่าเชื่อถือของผลการวัดและได้เสนอแนวทางในการประเมินความไม่แน่นอนของการวัด คือ Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) ซึ่งมีแนวคิด ดังนี้

ปริมาณที่ถูกวัด “Y” ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการวัดจะขึ้นอยู่กับปริมาณอินพุตที่เกี่ยวข้องในกระบวนการวัด $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) \quad (2.3)$$

ในทางปฏิบัติไม่สามารถทราบค่าที่แท้จริงของปริมาณอินพุตเหล่านั้นได้ปริมาณอินพุตที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการวัดจะมีความไม่แน่นอนติดมาด้วยเสมอ ดังนั้นผลการวัด “Y” จึงเป็นเพียงค่าประมาณ “y” พร้อมกับความไม่แน่นอนของการวัดที่เกิดจากปริมาณอินพุตเหล่านั้นด้วย

ในการรายงานผล ปริมาณที่ถูกวัดจะอยู่ในรูป

$$Y = y \pm U \quad (2.4)$$

โดยความไม่แน่นอน “U” ได้มาจากการประมาณองค์ประกอบรวมทั้งหมดของความไม่แน่นอนในรูปแบบที่เป็น Type A และ Type B การประมาณ Type A เป็นผลมาจากการประมาณทางสถิติที่อยู่ในรูปของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และการประมาณ Type B จะใช้วิธีอื่นๆ ที่มีใช้การประมาณทางสถิติ ซึ่งอยู่ในรูปของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้มาจากใบรับรองการสอบเทียบ หรือข้อกำหนดจำเพาะของเครื่องมือ เป็นต้น

4. สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้การประมาณแบบ Type A มีขั้นตอนสรุปโดยดังนี้

(1) หาค่าเฉลี่ยของค่าที่วัด ถ้ามีการวัดปริมาณ x ที่เป็นอิสระต่อกันจำนวน n ครั้ง ค่าเฉลี่ยจะประมาณได้จาก

$$\bar{x} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n}{n} \quad (2.5)$$

(2) การกระจายของข้อมูลโดยประมาณจาก Standard Deviation จะได้ว่า

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2.6)$$

(3) หาค่า Standard Deviation ของ Mean

จากสมการที่ ค่าความไม่แน่นอน Standard Deviation ที่ประมาณได้ดังกล่าวมีความเชื่อถือได้ขนาดหนึ่ง ซึ่งยังมีความเหมาะสมไม่มากพอที่จะใช้ได้ในภาคปฏิบัติ ทั้งนี้ค่าความไม่แน่นอนของการวัดที่เหมาะสมใช้ได้ทางปฏิบัติ ควรมีความเชื่อมั่นที่ระดับ 95% ค่าความไม่แน่นอน Standard Deviation ที่ประเมินได้ดังกล่าวจึงต้องนำมาดำเนินการต่อโดยการหาตัวคูณที่เหมาะสมมาคูณกับค่า Standard Deviation ที่ได้เพื่อให้ได้เป็น Uncertainty ซึ่งได้แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตัวคูณที่เหมาะสมของความเชื่อมั่นที่ระดับต่างๆ

ช่วงค่าของ Standard Deviation จาก Mean	% ของประชากร
± 1	68.27
± 2	95.45
± 3	99.73

ระดับความเชื่อมั่นในการสอบเทียบจะสามารถเลือกที่ค่าใดก็ได้ตามระดับความเชื่อมั่นที่เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปได้แก่ความเชื่อมั่นที่ระดับเท่ากับ 95% และโดยปกติจะอนุโลมค่าระดับความเชื่อมั่น 95.45% ว่าเป็น 95% โดยที่ระดับความเชื่อมั่น 95.45% ได้ง่ายกว่าเท่ากับ ± 2

จะได้สมการสำหรับหาค่า Uncertainty ดังนี้

$$U = \pm 2(S) \quad (2.7)$$

โดย U = Uncertainty
 S = Standard Deviation

เส้นแนวโน้ม

1.เส้นแนวโน้มแบบเอกซ์โพเนนเชียล

เส้นแนวโน้มนี้จะมีประโยชน์ในกรณีที่ค่าข้อมูลต่างๆ เพิ่มขึ้นหรือลดลงในอัตราที่เพิ่มขึ้นคงที่ ซึ่งจะแสดงเส้นโค้งที่คุณไม่สามารถสร้างเส้นแนวโน้มเอกซ์โพเนนเชียลได้ถ้าข้อมูลของคุณมีค่าที่เป็นศูนย์หรือติดลบ เส้นแนวโน้มเอกซ์โพเนนเชียลจะใช้สมการเพื่อคำนวณกำลังสองน้อยที่สุดของจุดต่างๆ ดังนี้ [6]

$$y = ce^{bx} \quad (2.9)$$

โดยที่ c และ b เป็นค่าคงที่ และ e เป็นฐานของลอการิทึม

2.สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination : R Square: R^2)

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ หรือ R square หรือ R^2 หมายถึงสัดส่วนที่ตัวแปร x สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร y ได้หรือเป็นตัวที่แสดงประสิทธิภาพของสมการนั่นเองค่า R^2 มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 และไม่มีหน่วยถ้า R^2 มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่า สมการที่ได้มีประสิทธิภาพสูง ถ้าเข้าใกล้ 0 แสดงว่า มีประสิทธิภาพต่ำ ในการศึกษาความสัมพันธ์ เราอยากให้ R^2 เข้าใกล้ 1 มาก ๆ

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

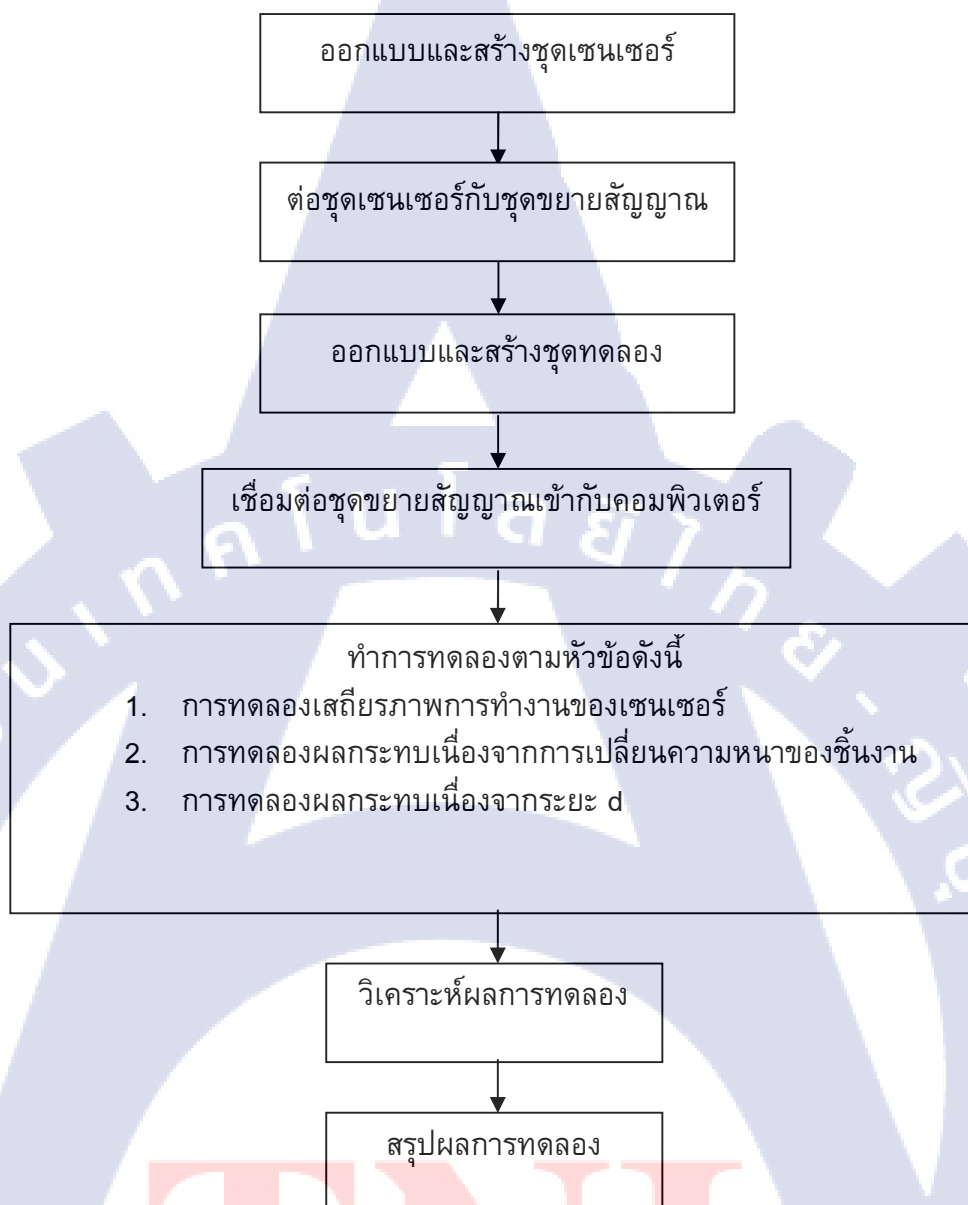
ผังแสดงภาพรวมการวิจัยและขั้นตอนการทำงาน

สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการออกแบบและสร้างเซนเซอร์ สำหรับวัดระยะชิ้นงานขึ้นมาและนำมาทดลองเพื่อหาตัวแปรต่างๆในการใช้งานของเซนเซอร์

โดยการสร้างตัวรับรู้จะใช้อุปกรณ์คือ Hall-effect Sensor แม่เหล็กและเหล็กตัวนำมาประกอบกันเป็นตัวรับรู้ (Sensor) ค่าระยะที่ได้จากตัวรับรู้จะอยู่ในรูปความต่างศักย์ (V_{out}) และเพื่อให้ได้ช่วงความต่างศักย์ที่มากพอในการวัดด้วยระบบคอมพิวเตอร์ จึงต้องนำความต่างศักย์จากตัวรับรู้มาขยายสัญญาณแล้วจึงนำสัญญาณที่ได้ไปวัด ในการวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 กรณีคือ กรณีที่ 1 เป็นการทดลองหาเสถียรภาพการทำงานของชุดอุปกรณ์ทั้งหมดภายใต้เงื่อนไขค่าความผิดพลาดของการวัดระยะไม่เกิน $\pm 5\%$ และอุณหภูมิภายนอกอยู่ในช่วง $25-30^{\circ}\text{C}$ กรณีที่ 2 เป็นการทดลองผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนความหนาของชิ้นงาน โดยใช้ชิ้นงานหนา 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิเมตรและกรณีที่ 3 เป็นการทดลองผลกระทบเนื่องจากการระยะระหว่างตัวรับรู้กับขอบชิ้นงาน (ระยะ e) เป็นการศึกษาเพื่อหาดำแหน่งติดตั้งตัวรับรู้ใกล้ขอบที่สุดที่ไม่ส่งผลกระทบต่อการวัดค่า สำหรับกรณีที่ 2 และกรณีที่ 3 มีเงื่อนไขค่าความผิดพลาดของการวัดระยะไม่เกิน $\pm 10\%$ จากนั้นก็จะนำข้อมูลที่วัดได้มาวิเคราะห์และสรุปผล ดังแสดงในรูปที่ 3.1

TNI

THAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY



รูปที่ 3.1 ผังการดำเนินงาน



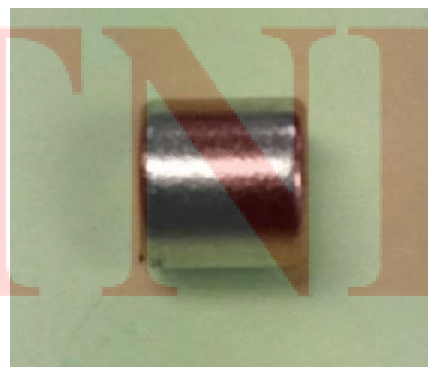
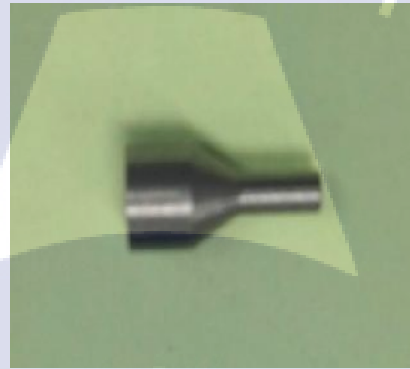
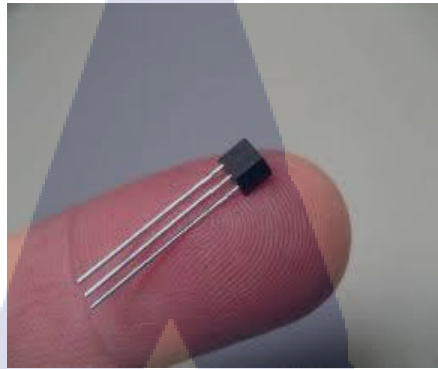
TNI

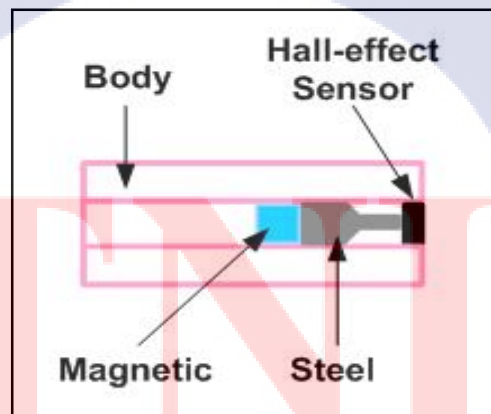
THAI

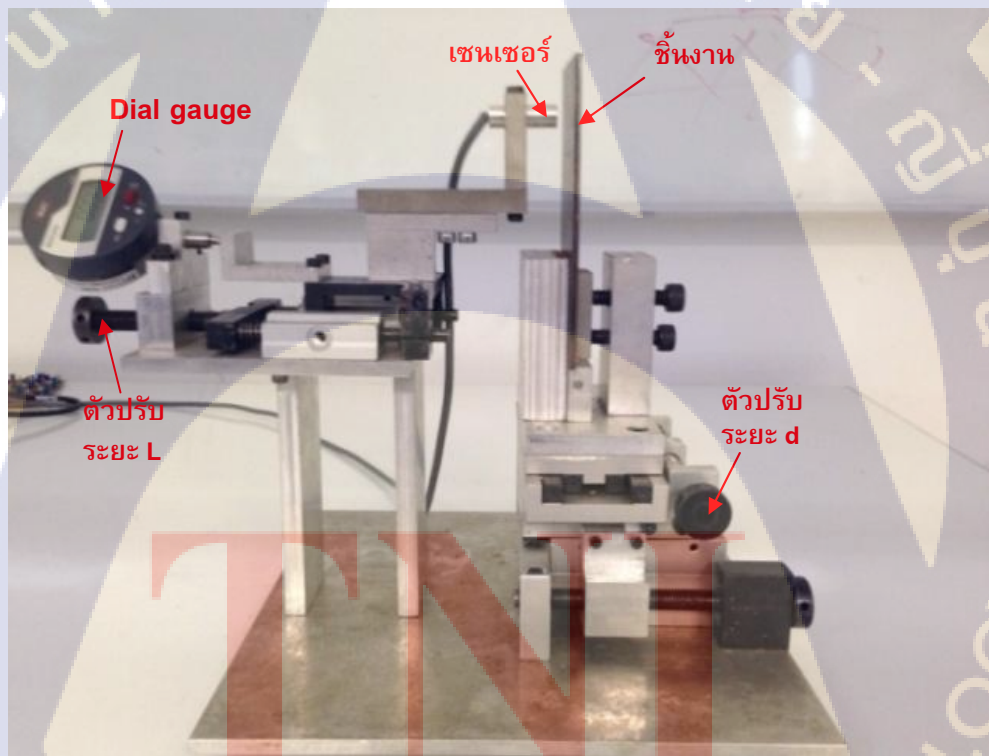
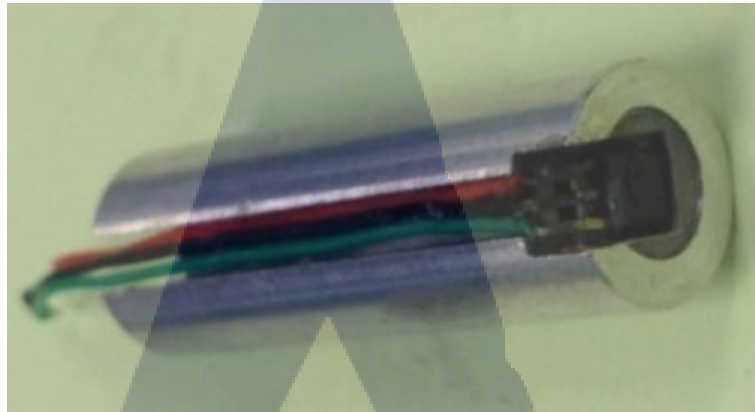
NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

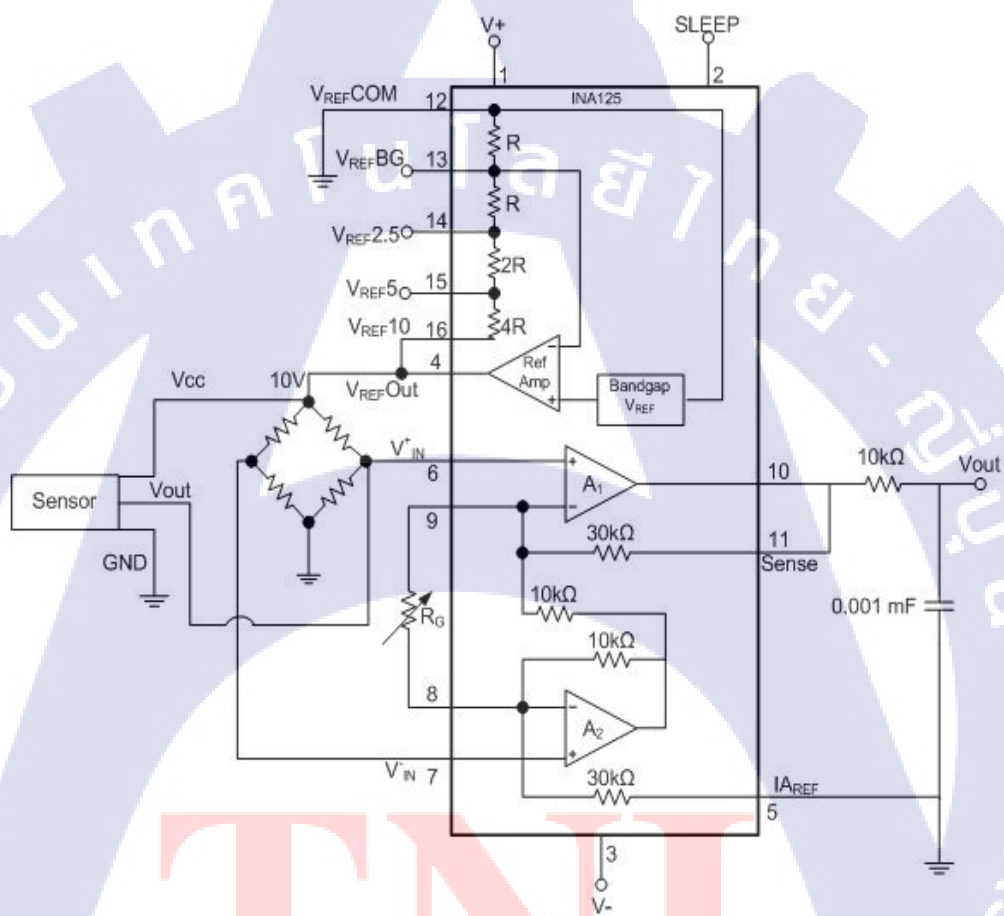
•

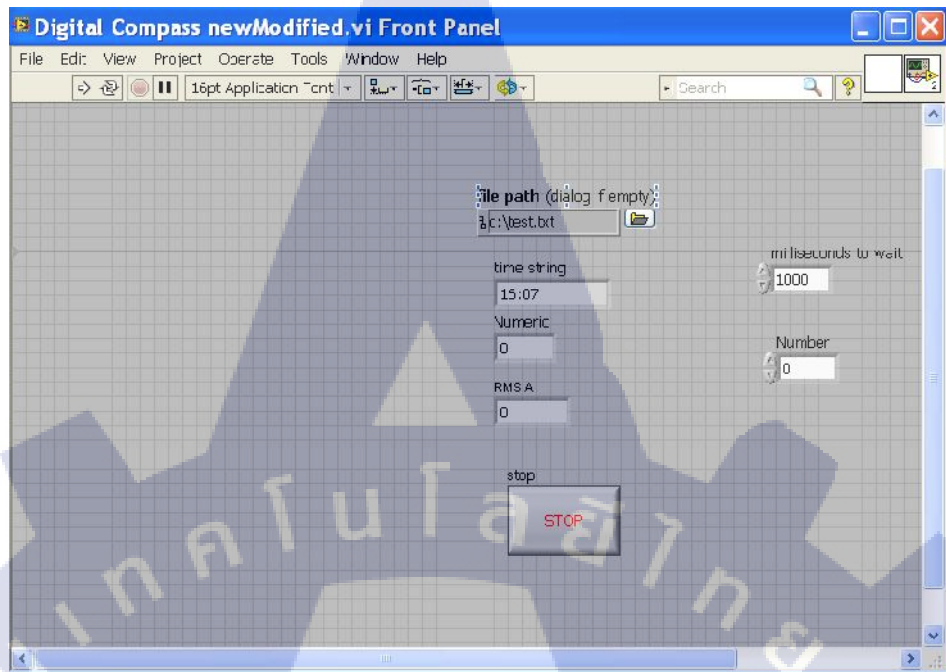
•

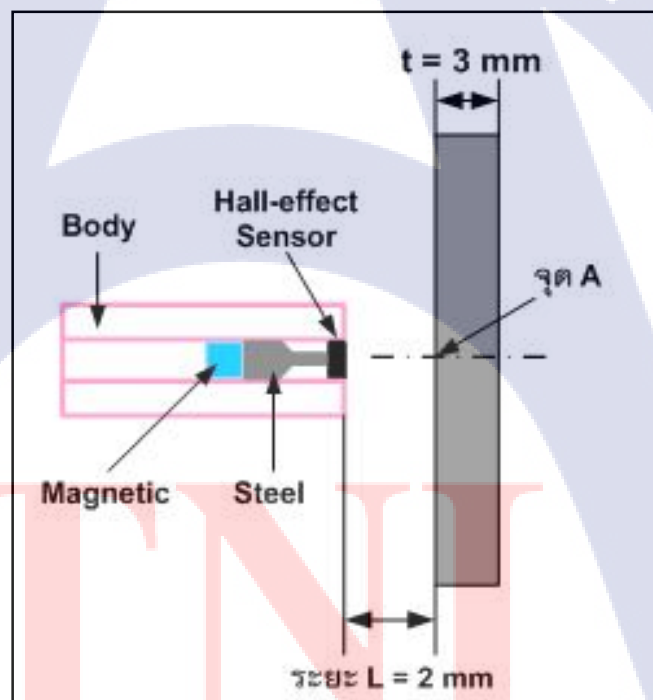


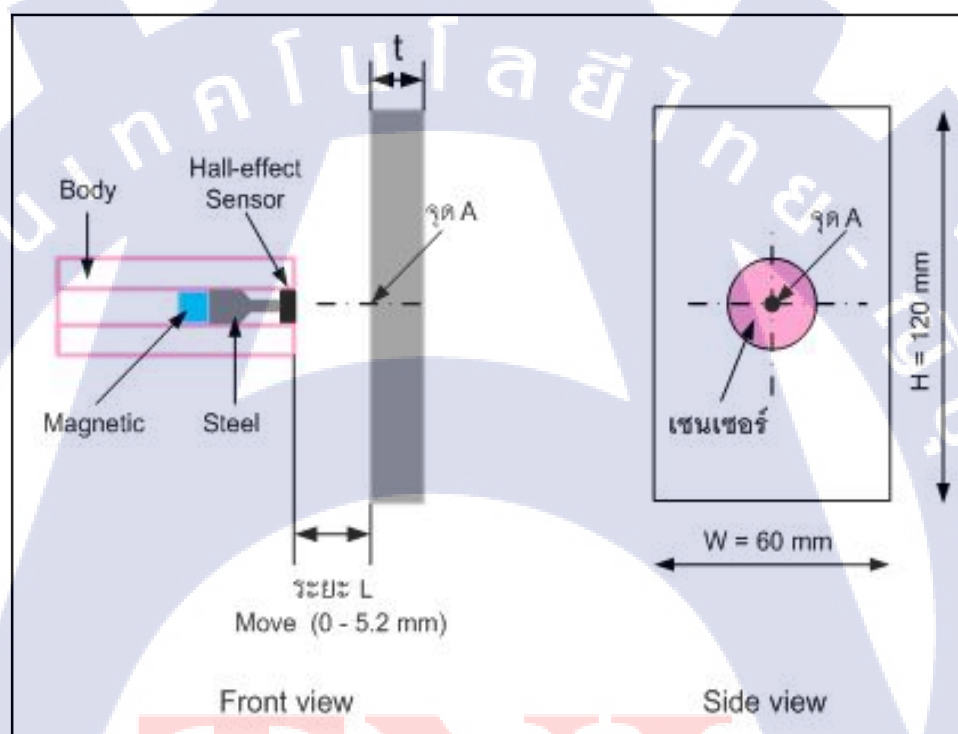


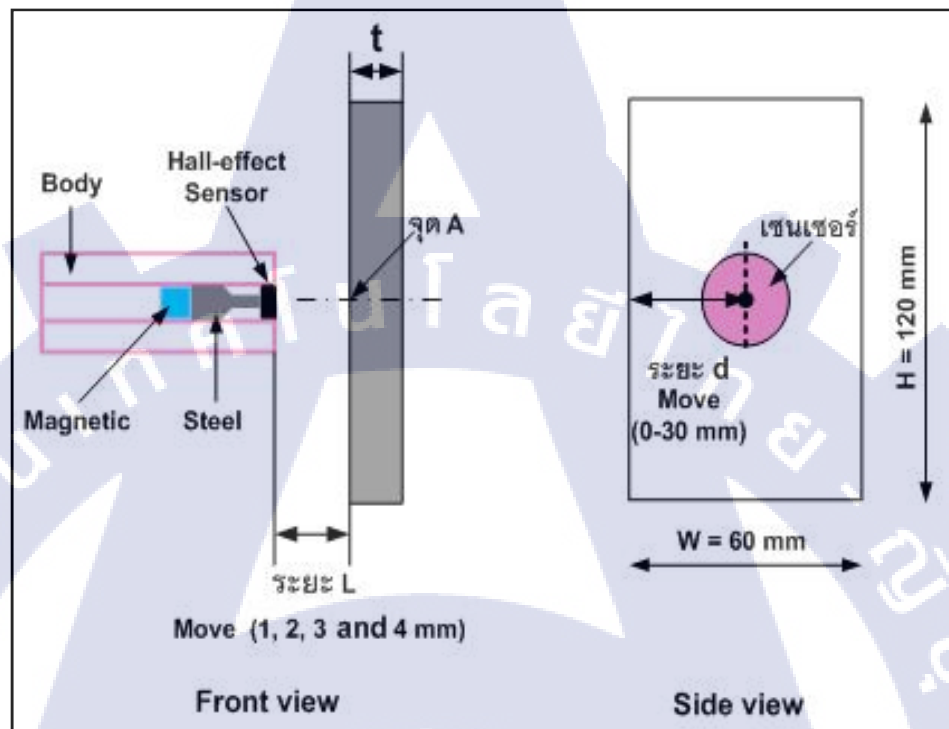












TNI

THAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองที่ได้จากการทดลองในบทที่ 3 ซึ่งจะแบ่งผลการทดลองที่ได้ออกเป็น 3 หัวข้อดังนี้

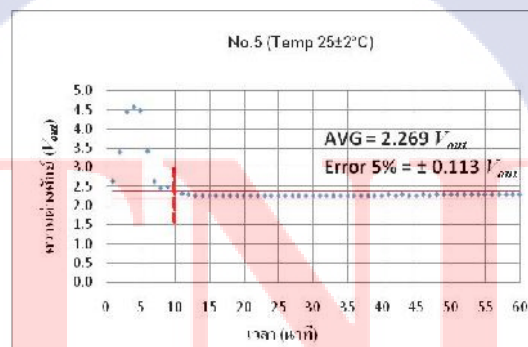
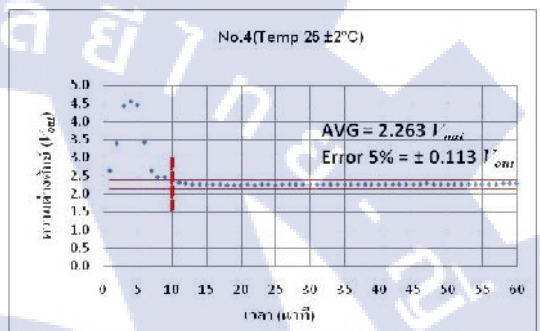
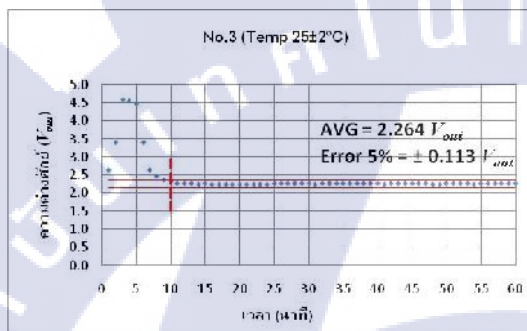
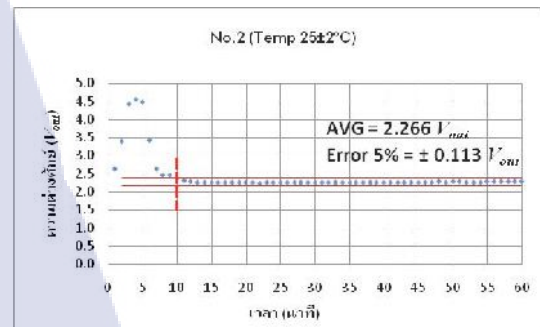
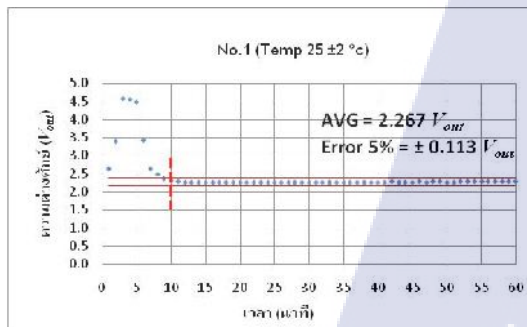
1. ผลการทดลองเสถียรภาพการทำงานของเซนเซอร์
2. ผลการทดลองผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนความหนาของชิ้นงาน
3. ผลการทดลองผลกระทบเนื่องจากระยะ d

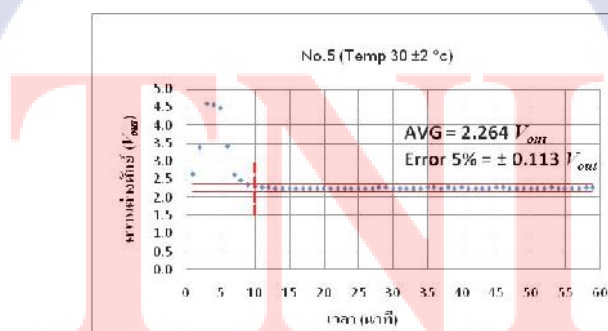
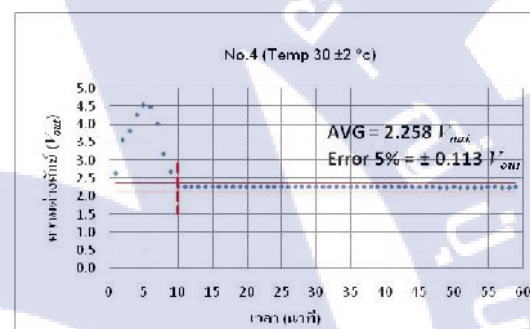
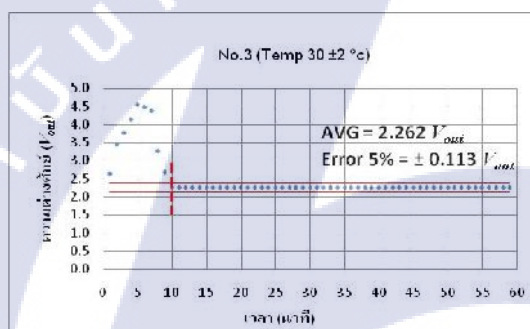
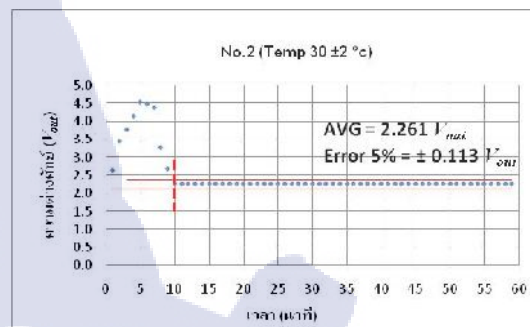
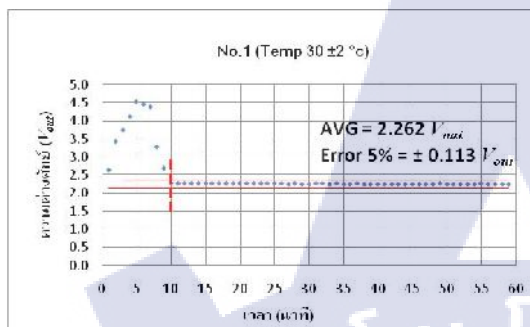
ผลการทดลองเสถียรภาพการทำงานของเซนเซอร์

จากการทดสอบโดยการนำเซนเซอร์มาติดตั้งบนชุดทดลองดังรูปที่ 3.15 ในบทที่ 3 แล้วตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คือ

- (1) ตั้งค่าระยะ L คงที่ ($L = 2$ มิลลิเมตร)
- (2) ใช้ชิ้นงานหนาเท่ากับ 3 มิลลิเมตร
- (3) จ่ายไฟเลี้ยงให้วงจรขยายของเซนเซอร์
- (4) ทดลองที่อุณหภูมิ ($25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$) และ ($30^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$)
- (5) เก็บผลการทดลองโดยเก็บค่าความต่างศักย์ทุกๆ 1 นาที จนครบ 60 นาที แล้วปิดไฟเลี้ยง ปล่อยให้อุปกรณ์เย็นตัวอย่างน้อย 6 ชั่วโมง โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ ($25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$) ซ้ำ 5 ครั้ง และทำการทดลองที่อุณหภูมิ ($30^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$) ซ้ำ 5 ครั้ง ข้อมูลดิบได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก. จากนั้นจึงนำข้อมูลมาวิเคราะห์

นำผลการทดลองที่อุณหภูมิ ($25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$) จำนวน 5 ครั้งมาเขียนแผนภูมิเพื่อพิจารณาดูแนวโน้มดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.1(ก-จ)





จากรูปที่ 4.1(ก-จ) เป็นกราฟแสดงผลการทดสอบเสถียรภาพการทำงานของเซนเซอร์เป็นจำนวน 5 ครั้ง ณ อุณหภูมิ $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$ โดยแสดงข้อมูลดิบไว้ในตารางที่ ก.1 ในภาคผนวก ก. ซึ่งกราฟทั้ง 5 จะมีแนวโน้มของค่าความต่างศักย์ที่วัดได้ในลักษณะเดียวกันคือช่วงเวลา 5 นาทีแรกหลังจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับเซนเซอร์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ค่าความต่างศักย์จะค่อยๆ สูงขึ้น หลังจากนั้นช่วงเวลา 5-10 นาทีความต่างศักย์จะค่อยๆ ลดลงและความต่างศักย์จะเข้าสู่สภาวะคงที่ในช่วงเวลาหลัง 10 นาทีเป็นต้นไปโดยพิจารณาจากค่าความผิดพลาดเท่ากับ $\pm 5\%$ ของค่าเฉลี่ยในช่วงเวลา 10 ถึง 60 นาที

จากรูปที่ 4.2(ก-จ) เป็นกราฟแสดงผลการทดสอบเสถียรภาพการทำงานของเซนเซอร์เป็นจำนวน 5 ครั้ง ณ อุณหภูมิ $30 \pm 2^{\circ}\text{C}$ โดยแสดงข้อมูลดิบไว้ในตารางที่ ก.2 ในภาคผนวก ก. ซึ่งแนวโน้มของค่าความต่างศักย์ที่วัดได้เช่นเดียวกับการทดลองที่ อุณหภูมิ $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$ คือช่วงเวลา 5 นาทีแรกหลังจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับเซนเซอร์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ค่าความต่างศักย์จะค่อยๆ สูงขึ้น หลังจากนั้นช่วงเวลา 5-10 นาทีความต่างศักย์จะค่อยๆ ลดลงและความต่างศักย์จะเข้าสู่สภาวะคงที่ในช่วงเวลาหลัง 10 นาทีเป็นต้นไป โดยพิจารณาจากค่าความผิดพลาดเท่ากับ $\pm 5\%$ ของค่าเฉลี่ยในช่วงเวลา 10 ถึง 60 นาที

จากผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับหลักการทำงานของอุปกรณ์ขยายสัญญาณที่นำมาใช้งาน กล่าวคือ ในช่วงแรกการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับวงจรขยายสัญญาณนั้น ค่าของอัตราขยายตัวของวงจรขยายสัญญาณจะมีความแปรปรวนสูงเนื่องจากกระบวนการระบายความร้อนสู่ภายนอกของวงจรขยายยังทำงานได้ไม่เสถียรพอ แต่เมื่อเวลาผ่านไปประยะหนึ่งระบบระบายความร้อนวงจรขยายสัญญาณจะเข้าสู่สภาวะคงตัวจึงทำให้ค่าของอัตราขยายสัญญาณเข้าสู่สภาวะคงที่ส่วนอุณหภูมิภายนอกช่วง $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ถึง $30 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ไม่มีผลต่อวงจรขยายสัญญาณแต่อย่างใดและสามารถสรุปเป็นตารางการใช้งานเซนเซอร์ได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าความต่างศักย์เฉลี่ยและค่าความผิดพลาดจากการทดลองวัดขึ้นงาน 5 ครั้ง ที่อุณหภูมิ $(25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C})$ และ $(30^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C})$

	Temp $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$					Temp $30 \pm 2^{\circ}\text{C}$				
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
AVG (V_{out})	2.267	2.266	2.264	2.263	2.269	2.262	2.261	2.262	2.258	2.264
Error $\pm 5\%(V_{out})$	± 0.113	± 0.113	± 0.113	± 0.113	± 0.113	± 0.113	± 0.113	± 0.113	± 0.113	± 0.113
Voltage stable (min)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

จากตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าในการใช้งานเซนเซอร์ที่ประกอบขึ้นนั้นจำเป็นต้องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับเซนเซอร์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทิ้งไว้เวลา 10 นาทีก่อนนำเซนเซอร์ไปใช้งานจริง โดยอ้างอิงจากความผิดพลาดของค่าความต่างศักย์เท่ากับ $\pm 5\%$ ซึ่งสามารถใช้ได้กับช่วงอุณหภูมิ $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ถึง $30 \pm 2^{\circ}\text{C}$

ผลการทดลองผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนความหนาของขึ้นงาน

สำหรับหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองจากการนำขึ้นงานที่มีความหนา 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิเมตร และนำผลการทดลองที่ได้ใช้ในการหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างระยะ D กับความต่างศักย์ และทำวิเคราะห์สมการความสัมพันธ์ดังกล่าวเพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการนำไปใช้ในงานจริงในกรณีที่ขึ้นงานมีความหนาต่างกัน จากนั้นจึงคำนวณหาค่า Standard Deviation และค่า Uncertainty

1.ผลการวัดชิ้นงานที่มีความหนา 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิเมตร

ในการทดลองจะนำชิ้นงานที่มีความหนา 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิเมตรมาทำการทดลองในลักษณะเดียวกันคือ นำมาวัดที่ตำแหน่งจุด A ดังรูปที่ 3.16 ในบัพที่ 3 และกำหนดระยะ L โดยเริ่มต้นที่ 0.4 มิลลิเมตร จากนั้นจึงทำการปรับระยะ L เพิ่มขึ้นครั้งละ 0.4 มิลลิเมตร ไปจนถึง 5.2 มิลลิเมตร โดยใช้ Dial gauge ในการสอบเทียบระยะ L และทำการทดสอบซ้ำเป็นจำนวน 5 ครั้งเพื่อใช้ในการหาค่าเฉลี่ยของความต่างศักย์ที่วัดได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ความต่างศักย์ที่ตำแหน่งระยะ L ต่างๆ ในการทดลองวัดชิ้นงานหนา 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิเมตร

ระยะ L (mm)	ค่าความต่างศักย์เฉลี่ย				
	t=1mm (V_{out})	t=2mm (V_{out})	t=3mm (V_{out})	t=4mm (V_{out})	t=5mm (V_{out})
0.4	6.270	6.287	6.483	6.497	6.637
0.8	4.744	4.756	4.977	4.981	5.005
1.2	3.679	3.717	3.924	3.932	3.986
1.6	2.961	2.972	3.037	3.164	3.242
2.0	2.393	2.403	2.427	2.604	2.733
2.4	1.958	1.985	2.058	2.167	2.173
2.8	1.613	1.644	1.697	1.810	1.822
3.2	1.334	1.362	1.403	1.529	1.535
3.6	1.109	1.132	1.160	1.287	1.308
4.0	0.907	0.934	0.961	1.095	1.117
4.4	0.743	0.767	0.766	0.791	0.933
4.8	0.612	0.632	0.633	0.647	0.800
5.2	0.495	0.513	0.515	0.529	0.682

หลังจากนั้นนำค่าจากตารางที่ 4.2 ไปเขียนแผนภูมิเพื่อพิจารณาดูแนวโน้มของค่าความต่างศักย์ของชิ้นงานหนา 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิเมตรโดยเปรียบเทียบที่ระยะ L ต่างๆดังแสดงในรูปที่ 4.2

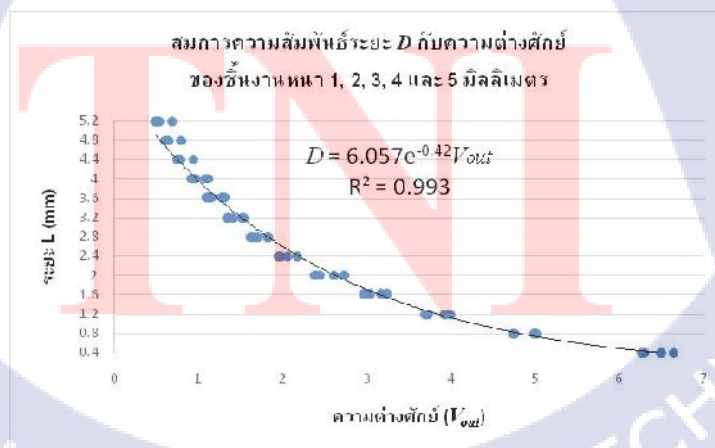
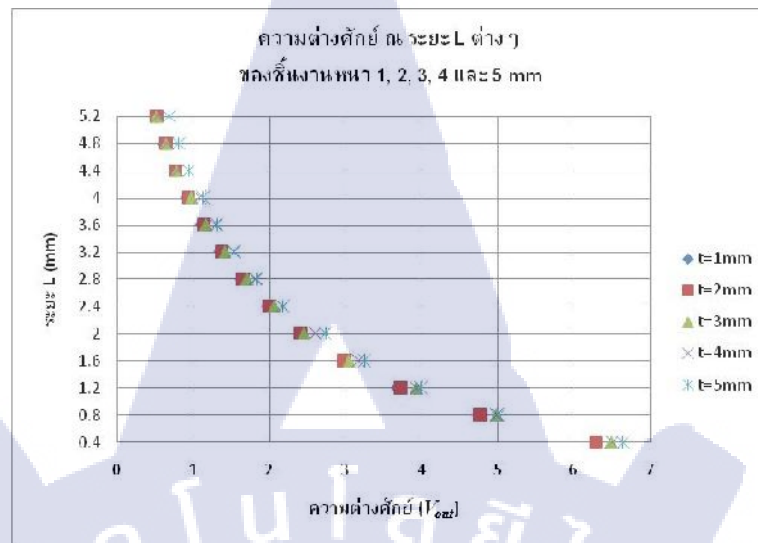
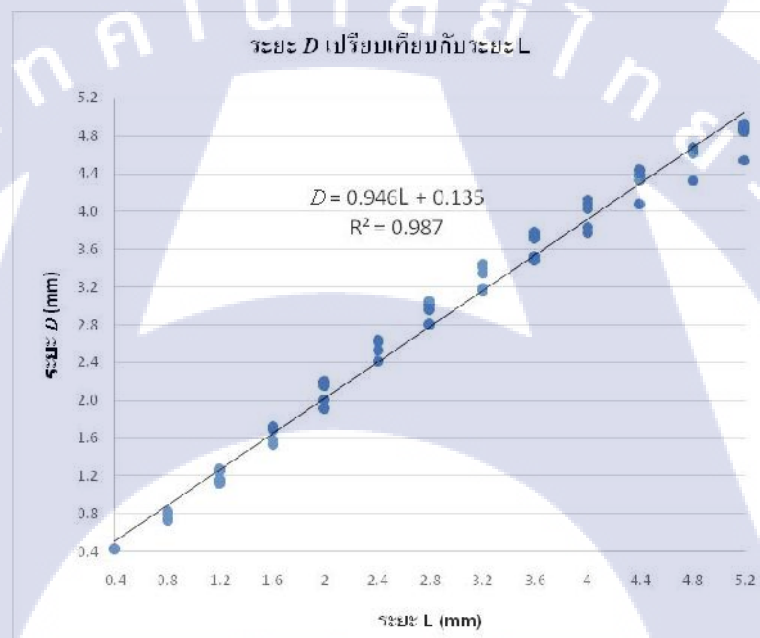
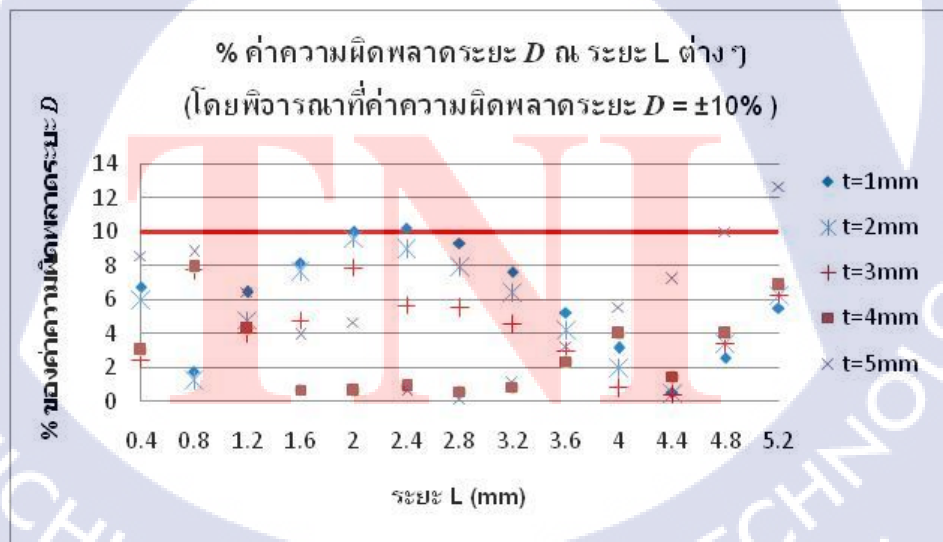


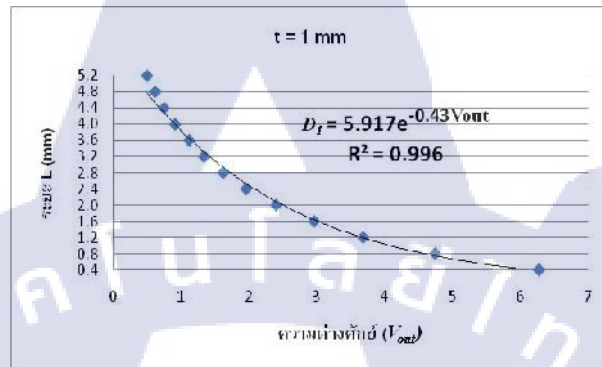
Table 1. Results

$$D_{1-5} = e^{-0.42V_{out}}$$



ระยะ L (mm)	ระยะ D (mm)					ค่าความผิดพลาดระยะ D				
	t=1	t=2	t=3	t=4	t=5	t=1	t=2	t=3	t=4	t=5
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
0.4	0.427	0.424	0.390	0.388	0.366	±3.028	±2.460	±6.007	±6.745	±8.611
0.8	0.814	0.810	0.738	0.737	0.729	±7.915	±7.767	±1.280	±1.796	±8.852
1.2	1.278	1.257	1.152	1.148	1.122	±4.315	±4.007	±4.769	±6.466	±6.484
1.6	1.731	1.723	1.677	1.589	1.537	±0.699	±4.791	±7.694	±8.196	±3.938
2.0	2.202	2.192	2.158	2.013	1.906	±0.675	±7.898	±9.590	±10.08	±4.696
2.4	2.646	2.616	2.536	2.422	2.416	±0.904	±5.683	±8.998	±10.25	±0.648
2.8	3.061	3.022	2.955	2.816	2.803	±0.588	±5.548	±7.932	±9.329	±0.096
3.2	3.446	3.405	3.346	3.172	3.165	±0.868	±4.558	±6.406	±7.673	±1.103
3.6	3.789	3.752	3.708	3.515	3.483	±2.368	±3.002	±4.230	±5.240	±3.256
4.0	4.127	4.080	4.033	3.839	3.776	±4.034	±0.835	±1.993	±3.165	±5.588
4.4	4.424	4.380	4.381	4.335	4.082	±1.481	±0.433	±0.459	±0.549	±7.216
4.8	4.675	4.636	4.635	4.607	4.318	±4.019	±3.432	±3.424	±2.604	±10.04
5.2	4.913	4.876	4.872	4.843	4.539	±6.867	±6.306	±6.227	±5.518	±12.70





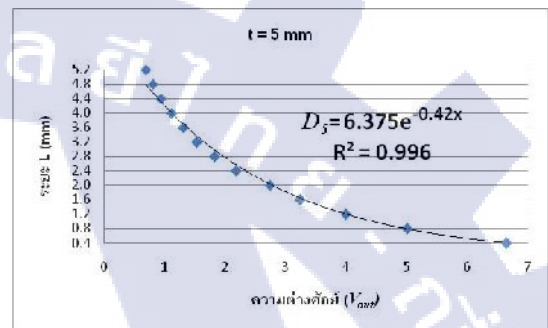
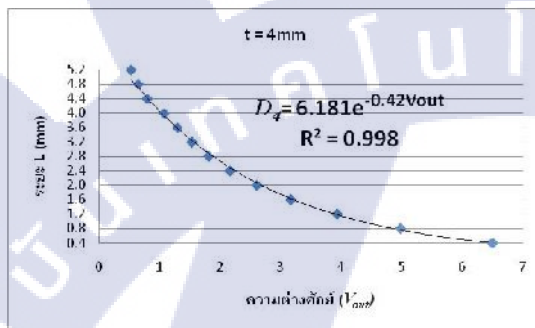
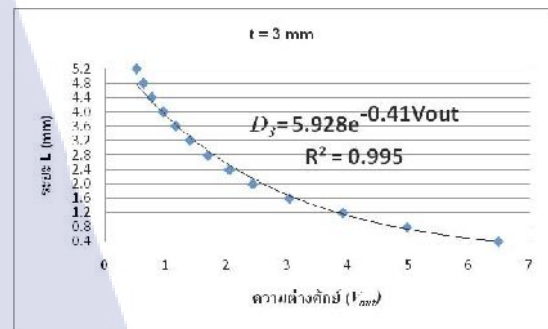
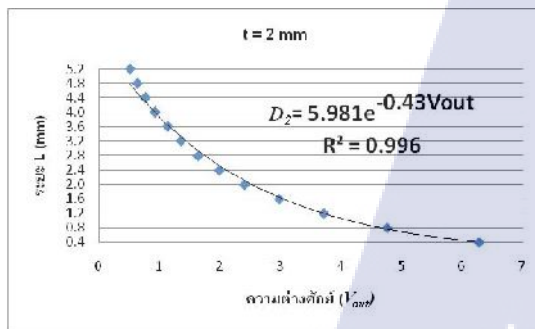
ค่าคงที่:

$$D_1 = 5$$

พารามิเตอร์:

$$e^{-0.43V_{out}}$$

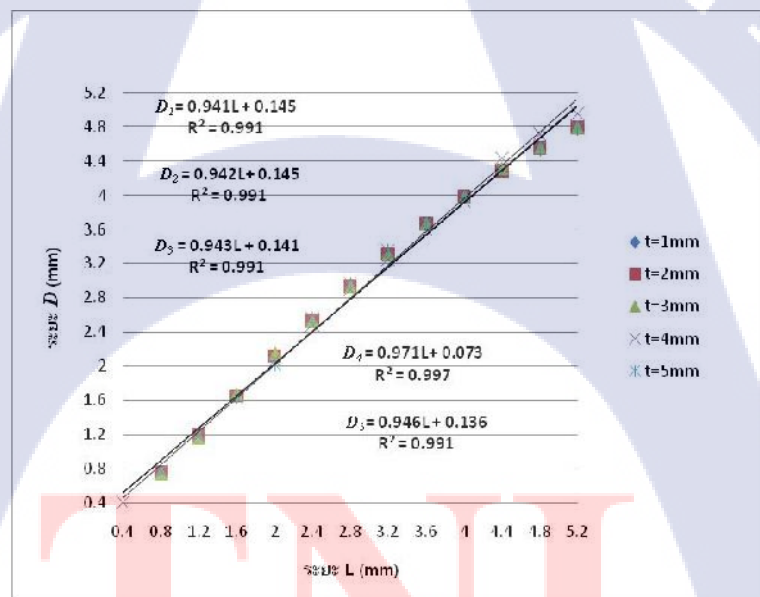
TNI



สมการถดถอย

$$D_n = ce^{-bV_{out}}$$

n	c	b
1	5.917	-0.43
2	5.981	-0.43
3	5.928	-0.41
4	6.181	-0.42
5	6.375	-0.42



จากรูปที่ 4.9 ทำให้ได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างระยะ D กับระยะ L ของแต่ละความหนา
ดังนี้

$$D_1 = 0.941L + 0.145 \quad (4.5)$$

$$D_2 = 0.942L + 0.145 \quad (4.6)$$

$$D_3 = 0.943L + 0.141 \quad (4.7)$$

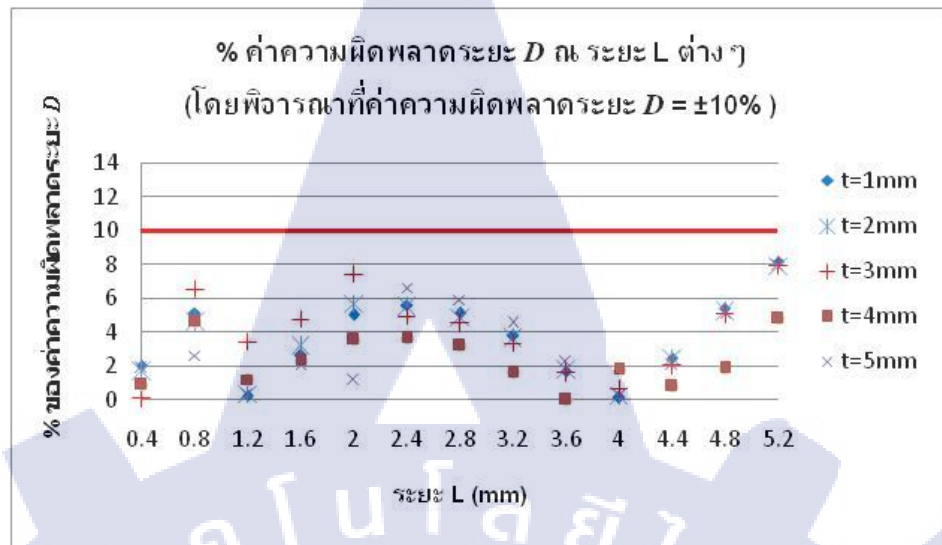
$$D_4 = 0.971L + 0.073 \quad (4.8)$$

$$D_5 = 0.946L + 0.136 \quad (4.9)$$

และจึงนำสมการที่ 4.5 ถึง 4.9 มาคำนวณหาค่าความผิดพลาดระหว่างระยะ D กับระยะ L
ตามความหนาชิ้นงาน โดยให้ค่าความผิดพลาดระยะ D เท่ากับ $\pm 10\%$ ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ระยะ D และค่าความผิดพลาดระยะ D สำหรับชิ้นงานหนา 1 ถึง 5 มิลลิเมตร
(โดยใช้สมการความสัมพันธ์ระยะ D กับระยะ L แยกตามความหนาชิ้นงาน)

ระยะ L (mm)	ระยะ D (mm)					ค่าความผิดพลาดระยะ D				
	t=1 mm	t=2 mm	t=3 mm	t=4 mm	t=5 mm	t=1 mm	t=2 mm	t=3 mm	t=4 mm	t=5 mm
0.4	0.392	0.393	0.400	0.404	0.392	± 2.053	± 1.697	± 0.108	± 0.904	± 1.882
0.8	0.759	0.763	0.748	0.763	0.779	± 5.158	± 4.632	± 6.534	± 4.616	± 2.619
1.2	1.203	1.196	1.159	1.186	1.195	± 0.255	± 0.318	± 3.438	± 1.199	± 0.393
1.6	1.642	1.652	1.676	1.637	1.633	± 2.619	± 3.232	± 4.759	± 2.299	± 2.090
2.0	2.100	2.113	2.148	2.071	2.023	± 5.003	± 5.649	± 7.415	± 3.540	± 1.131
2.4	2.535	2.532	2.518	2.487	2.559	± 5.620	± 5.518	± 4.930	± 3.640	± 6.622
2.8	2.943	2.936	2.927	2.890	2.966	± 5.100	± 4.844	± 4.531	± 3.204	± 5.925
3.2	3.322	3.317	3.307	3.252	3.346	± 3.798	± 3.653	± 3.338	± 1.624	± 4.566
3.6	3.660	3.664	3.659	3.600	3.680	± 1.680	± 1.767	± 1.627	± 0.014	± 2.220
4.0	3.995	3.991	3.974	3.930	3.988	± 0.123	± 0.220	± 0.649	± 1.754	± 0.301
4.4	4.290	4.292	4.311	4.434	4.309	± 2.496	± 2.455	± 2.033	± 0.773	± 2.075
4.8	4.539	4.549	4.557	4.710	4.555	± 5.429	± 5.234	± 5.073	± 1.865	± 5.094
5.2	4.776	4.791	4.785	4.950	4.787	± 8.151	± 7.874	± 7.974	± 4.811	± 7.936



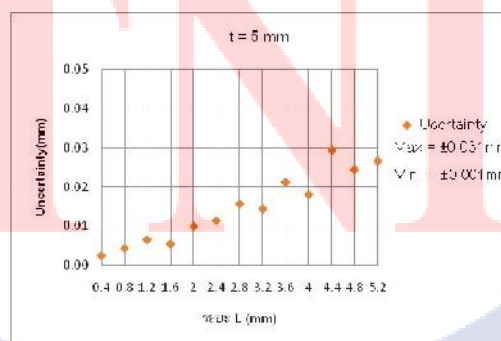
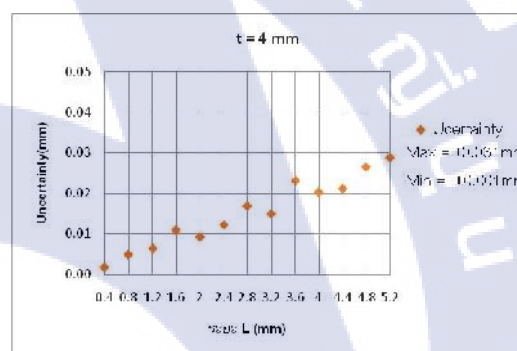
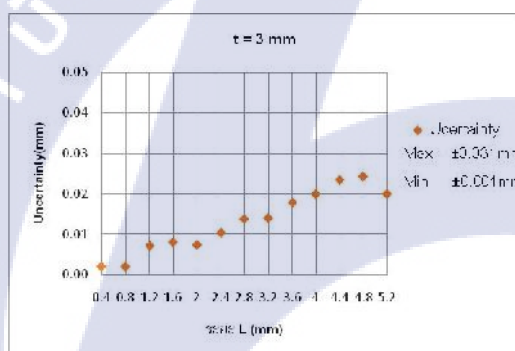
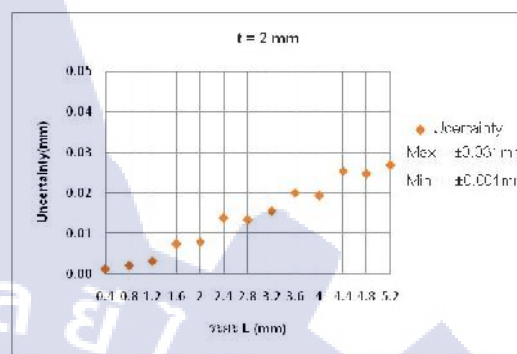
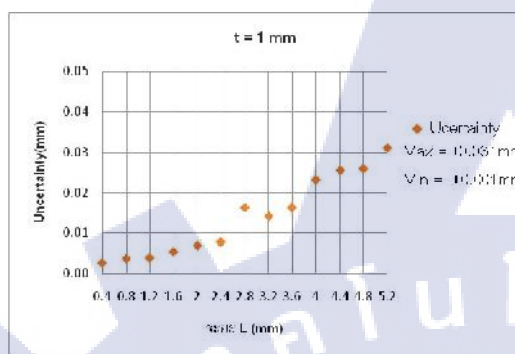
TNI

THAI

NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

ตารางที่ 4.6 ค่า Standard Deviation และค่า Uncertainty ในการทดลองชิ้นงาน 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิเมตร

ระยะ L (mm)	ค่า Standard Deviation (mm)					ค่า Uncertainty ($\pm$ mm)				
	t=1 mm	t=2 mm	t=3 mm	t=4 mm	t=5 mm	t=1 mm	t=2 mm	t=3 mm	t=4 mm	t=5 mm
0.4	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	± 0.003	± 0.001	± 0.002	± 0.002	± 0.002
0.8	0.002	0.001	0.001	0.002	0.002	± 0.004	± 0.002	± 0.002	± 0.004	± 0.004
1.2	0.002	0.002	0.004	0.003	0.003	± 0.004	± 0.003	± 0.008	± 0.006	± 0.006
1.6	0.003	0.004	0.004	0.005	0.003	± 0.006	± 0.007	± 0.008	± 0.010	± 0.006
2.0	0.003	0.004	0.004	0.005	0.005	± 0.007	± 0.008	± 0.008	± 0.010	± 0.010
2.4	0.004	0.007	0.005	0.006	0.006	± 0.008	± 0.014	± 0.010	± 0.012	± 0.012
2.8	0.008	0.007	0.007	0.008	0.008	± 0.016	± 0.013	± 0.014	± 0.016	± 0.016
3.2	0.007	0.008	0.007	0.008	0.007	± 0.014	± 0.016	± 0.014	± 0.016	± 0.014
3.6	0.008	0.010	0.009	0.011	0.011	± 0.016	± 0.020	± 0.018	± 0.022	± 0.022
4.0	0.012	0.010	0.010	0.010	0.009	± 0.023	± 0.019	± 0.020	± 0.020	± 0.018
4.4	0.013	0.013	0.012	0.011	0.015	± 0.025	± 0.025	± 0.024	± 0.022	± 0.030
4.8	0.013	0.012	0.012	0.013	0.012	± 0.026	± 0.025	± 0.024	± 0.026	± 0.024
5.2	0.016	0.013	0.010	0.014	0.013	± 0.031	± 0.027	± 0.020	± 0.028	± 0.026



จากรูปที่ 4.11(ก-จ) แสดงค่า Uncertainty ของชิ้นงานที่มีความหนา 1, 2, 3, 4, และ 5 มิลลิเมตร จะเห็นได้ว่าค่า Uncertainty ที่ได้จากการทดลองชิ้นงานทั้ง 5 ความหนามีค่าไม่เกิน 0.05 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่าเซนเซอร์ที่ใช้ในการทดลองมีเสถียรภาพในการใช้งานค่อนข้างดีระยะ L ช่วง 0.4 ถึง 3.2 มิลลิเมตร จะมีค่า Uncertainty ค่อนข้างต่ำมากซึ่งมีค่าไม่เกิน 0.020 มิลลิเมตร ส่วนระยะ L ช่วง 3.6 ถึง 5.2 มิลลิเมตร จะมีค่า Uncertainty ค่อนข้างสูงคือตั้งแต่ 0.020 ถึง 0.048 มิลลิเมตร

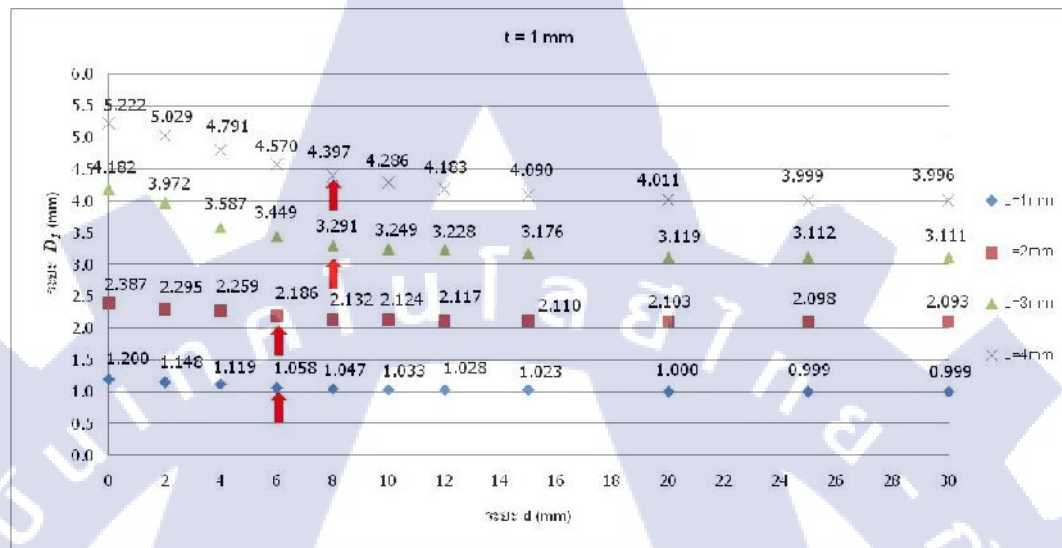
ผลการทดลองผลกระทบเนื่องจากระยะ d

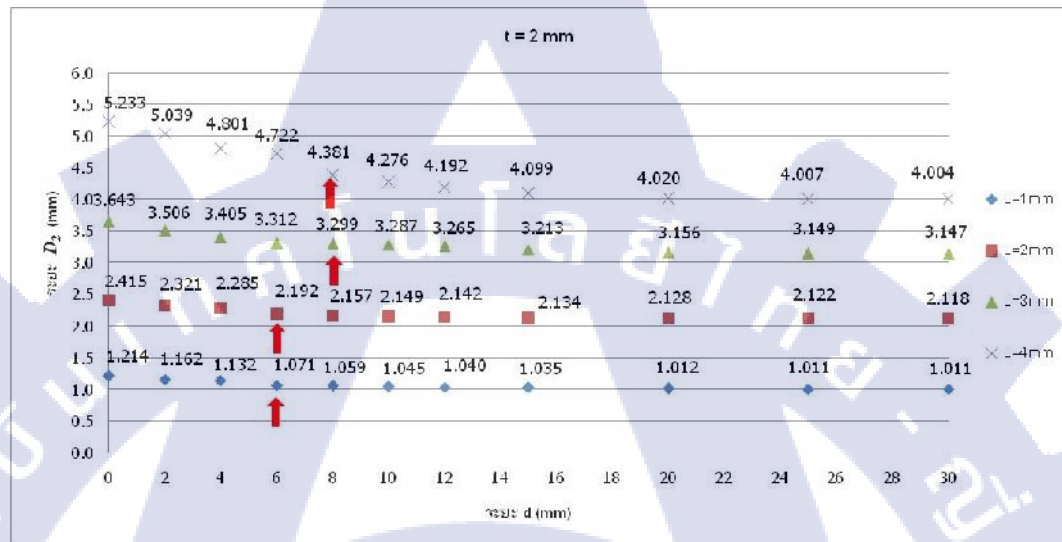
ในการทดลองจะนำชิ้นงานที่มีความหนา 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิเมตร โดยตั้งระยะ L เท่ากับ 1, 2, 3 และ 4 มิลลิเมตรและใช้ Dial gauge ในการสอบเทียบดังรูปที่ 3.17 ในบทที่ 3 สำหรับการทดลองแต่ละครั้งจะตั้งระยะ L คงที่โดยค่าแรกที่ใช้คือ 1 มิลลิเมตรจากนั้นเริ่มทำการวัดโดยตั้งระยะ d เท่ากับ 30 มิลลิเมตรซึ่งเป็นตำแหน่งตรงกลางชิ้นงานจากนั้นจึงทำการเปลี่ยนระยะ d ดังนี้คือ 30, 25, 20, 15, 10, 8, 6, 4, 2 และ 0 มิลลิเมตรทำการทดลองซ้ำเป็นจำนวน 5 ครั้งจากนั้นทำการเปลี่ยนระยะ L เป็น 2, 3 และ 4 มิลลิเมตรแล้วทดสอบใหม่โดยการเลื่อนระยะ d ด้วยระยะเดิมแล้วทำการบันทึกค่า

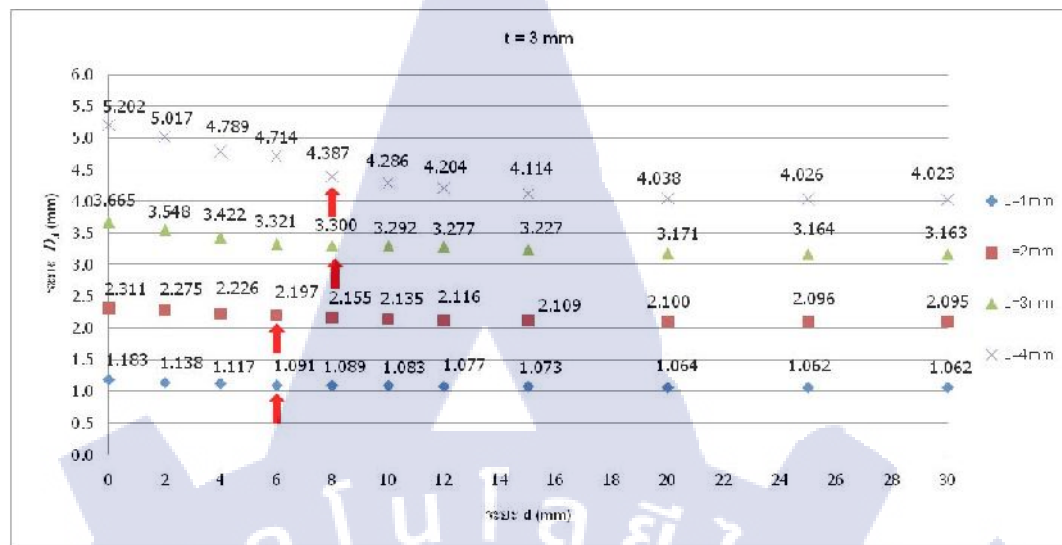
1.ผลการทดลองผลกระทบเนื่องจากระยะ d จากการวัดชิ้นงานหนา 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4.7 ระยะ D_i ณ ตำแหน่งระยะ d ต่างๆ ในการวัดชิ้นงานหนา 1 มิลลิเมตร

ระยะ d (mm)	ระยะ D_i เฉลี่ย (mm)				ค่า Uncertainty ($\pm$ mm)			
	L=1mm	L=2mm	L=3mm	L=4mm	L=1mm	L=2mm	L=3mm	L=4mm
30	0.999	2.093	3.111	3.996	± 0.001	± 0.001	± 0.001	± 0.001
25	0.999	2.098	3.112	3.999	± 0.002	± 0.001	± 0.001	± 0.001
20	1.000	2.103	3.119	4.011	± 0.001	± 0.001	± 0.001	± 0.001
15	1.023	2.110	3.176	4.090	± 0.001	± 0.001	± 0.002	± 0.001
12	1.028	2.117	3.228	4.183	± 0.002	± 0.002	± 0.002	± 0.001
10	1.033	2.124	3.249	4.286	± 0.002	± 0.002	± 0.002	± 0.001
8	1.047	2.132	3.291	4.397	± 0.001	± 0.002	± 0.003	± 0.001
6	1.058	2.186	3.449	4.570	± 0.002	± 0.002	± 0.003	± 0.002
4	1.119	2.259	3.587	4.791	± 0.004	± 0.002	± 0.002	± 0.002
2	1.148	2.295	3.972	5.029	± 0.005	± 0.003	± 0.003	± 0.003
0	1.200	2.387	4.182	5.222	± 0.004	± 0.005	± 0.004	± 0.005

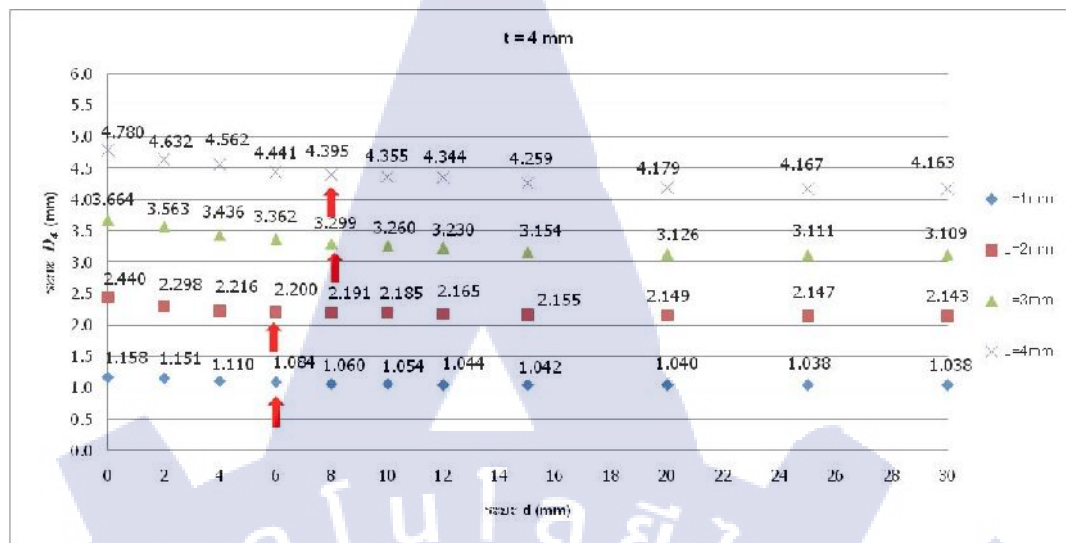


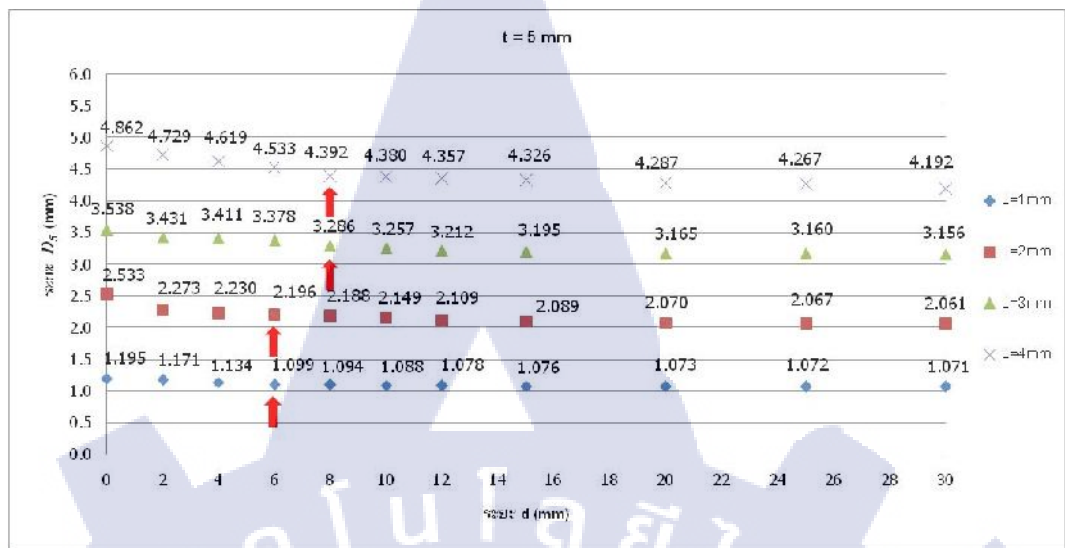




TNI

THAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY





หากตั้งระยะ L เท่ากับ 2 มิลลิเมตร เพื่อใช้ในการวัดชิ้นงานหนา 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิเมตร ก็จะได้ระยะ d เท่ากับ 6 มิลลิเมตร ค่า Uncertainty ในการวัดเท่ากับ ± 0.004 มิลลิเมตร (เลือกใช้ค่า Uncertainty ที่มีค่าสูงที่สุด)

หากตั้งระยะ L เท่ากับ 3 มิลลิเมตร เพื่อใช้ในการวัดชิ้นงานหนา 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิเมตร ก็จะได้ระยะ d เท่ากับ 8 มิลลิเมตร ค่า Uncertainty ในการวัดเท่ากับ ± 0.007 มิลลิเมตร (เลือกใช้ค่า Uncertainty ที่มีค่าสูงที่สุด)

หากตั้งระยะ L เท่ากับ 4 มิลลิเมตร เพื่อใช้ในการวัดชิ้นงานหนา 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิเมตร ก็จะได้ระยะ d เท่ากับ 8 มิลลิเมตร ค่า Uncertainty ในการวัดเท่ากับ ± 0.021 มิลลิเมตร (เลือกใช้ค่า Uncertainty ที่มีค่าสูงที่สุด)

แสดงให้เห็นว่าระยะ L มีผลกระทบต่อระยะ d กล่าวคือหากเลือกใช้ระยะ L น้อยก็จะได้ระยะ d ที่เหมาะกับการใช้งานน้อยนั่นหมายความว่าเราสามารถติดตั้งเซนเซอร์ได้ใกล้ขอบชิ้นงานมากขึ้น แต่หากตั้งระยะ L มากก็จะทำให้ได้ระยะ d มากเช่นกันนั่นหมายความว่าเราสามารถติดตั้งเซนเซอร์ได้ใกล้ขอบชิ้นงานน้อยลง

TNI

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

สรุปผลการทดลอง

1.การทดลองเสถียรภาพการทำงานของเซนเซอร์

ในการใช้งานเซนเซอร์ที่ประกอบขึ้นนั้นจำเป็นต้องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับเซนเซอร์ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งใช้เวลา 10 นาทีก่อนนำเซนเซอร์ไปใช้งานจริง โดยมีความผิดพลาดของค่าความต่างศักย์เท่ากับ $\pm 5\%$ ซึ่งสามารถใช้ได้กับช่วงอุณหภูมิ $25\pm^{\circ}\text{C}$ ถึง $30\pm^{\circ}\text{C}$

2.การทดลองผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนความหนาของชิ้นงาน

สำหรับการวัดชิ้นงานที่มีความหนา 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิเมตร หากค่าความผิดพลาดของระยะ D เท่ากับ $\pm 10\%$ ต้องสมการความสัมพันธ์ระหว่างระยะ D กับความต่างศักย์ตามความหนาชิ้นงานที่วัด ซึ่งได้แสดงไว้ในสมการที่ 5.1 และใช้ค่าคงที่ในตารางที่ 5.1ดังนี้

$$D_n = ce^{-bV_{out}} \quad (5.1)$$

โดย c และ b คือค่าคงที่ สามารถดูได้จากตารางที่ 5.1
 n คือความหนาชิ้นงานที่ทำการวัด

ตารางที่ 5.1 ค่าคงที่เพื่อใช้หาระยะ D ของชิ้นงานหนา 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิเมตร

n	c	b
1	5.917	-0.43
2	5.981	-0.43
3	5.928	-0.41
4	6.181	-0.42
5	6.375	-0.42

สำหรับระยะ L ในช่วง 0.4 ถึง 3.2 มิลลิเมตรมีค่า Uncertainty เท่ากับ ± 0.018 มิลลิเมตร
(พิจารณาจากค่า Uncertainty ที่มีค่าสูงสุด)

สำหรับระยะ L ในช่วง 3.6 ถึง 5.2 มิลลิเมตรมีค่า Uncertainty เท่ากับ ± 0.031 มิลลิเมตร
(พิจารณาจากค่า Uncertainty ที่มีค่าสูงสุด)

3.การทดลองผลกระทบเนื่องจากระยะ d

พิจารณาค่าของระยะ d ที่สามารถใช้งานได้โดยพิจารณาจากค่าความผิดพลาดของระยะ D
เท่ากับ $\pm 10\%$ ณ ระยะ L เท่ากับ 1, 2, 3 และ 4 มิลลิเมตร ซึ่งได้สรุปไว้ในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ระยะ d และระยะ L เพื่อการติดตั้งเซนเซอร์ให้เหมาะสมกับการใช้งานโดยพิจารณาจาก
ค่าความผิดพลาดของระยะ D เท่ากับ $\pm 10\%$

ระยะ L (mm)	ระยะ d ที่สามารถใช้งานได้ (พิจารณาจากค่าความผิดพลาด $\pm 10\%$)					Uncertainty ($\pm$ mm)
	t=1mm	t=2mm	t=3mm	t=4mm	t=5mm	
1	6	6	6	6	6	± 0.005
2	6	6	6	6	6	± 0.005
3	8	8	8	8	8	± 0.007
4	8	8	8	8	8	± 0.013

บรรณานุกรม

TNI

บรรณานุกรม

- [1] ชาญณรงค์ น้อยบางยาง. (2552). การตรวจจับด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์. **วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ**. 1 (2) : 15-29.
- [2] ไมตรี กระทบพิจิตร; และ วราคม เนินน้อย. (2547). การประยุกต์ใช้ Hall-effect Sensor ในการวัดระยะผิดพลาดที่ปลายหัวกัดของเครื่องมือกล. สืบค้นเมื่อ 25 มิถุนายน 2556, จาก www.research.mut.ac.th/lsac/XML/XML_YEAR/2527.xml
- [3] นระรา เฉลิมกลิ่น; และ ฉัตรชัย ศุภพิทักษ์สกุล. (2553). ชุดวัดการกระจายแรงสำหรับทดสอบเลื้อยเกราะกันกระสุน. สืบค้นเมื่อ 8 เมษายน 2556, จาก <http://vdo.eng.psu.ac.th/pec8cd/paper/EE/PEC8OR069.pdf>
- [4] ----- . (2553). การประยุกต์ใช้ฮอลล์เอฟเฟคเซ็นเซอร์ในการออกแบบทรานสดิวเซอร์วัดแรง. สืบค้นเมื่อ 13 มีนาคม 2556, จาก www.en.rmutt.ac.th/ee2/index.php?option=com...id..
- [5] สายชล สิ้นสมบูรณ์ทอง. (2551). **สถิติวิศวกรรม**. กรุงเทพฯ : จามจุรีโปรดักท์.
- [6] สมศักดิ์ กิริตวิเศษชัย. (2546). **หลักการและการใช้งานเครื่องมือวัดอุตสาหกรรม**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).



TNI

ภาคผนวก

TNI

ภาคผนวกก.

ตารางที่ ก.1 ค่าความต่างศักย์จากการทดลองซ้ำเป็นจำนวน 5 ครั้ง

(อุณหภูมิ $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$)

ตารางที่ ก.2 ค่าความต่างศักย์จากการทดลองซ้ำเป็นจำนวน 5 ครั้ง

(อุณหภูมิ $30^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$)

TNI

ตารางที่ ก.1 ค่าความต่างศักย์จากการทดลองซ้ำเป็นจำนวน 5 ครั้ง (อุณหภูมิ $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$)

เวลา	ความต่างศักย์(V_{out})				
(นาทีก)	Trial#1	Trial#2	Trial#3	Trial#4	Trial#5
1	2.637	2.637	2.643	2.634	2.639
2	3.392	3.392	3.398	3.389	3.394
3	4.582	4.442	4.588	4.439	4.444
4	4.565	4.565	4.571	4.562	4.567
5	4.467	4.467	4.473	4.464	4.469
6	3.413	3.413	3.419	3.410	3.415
7	2.626	2.626	2.632	2.623	2.628
8	2.470	2.450	2.476	2.447	2.452
9	2.356	2.470	2.362	2.467	2.472
10	2.307	2.356	2.313	2.353	2.358
11	2.280	2.307	2.286	2.304	2.309
12	2.267	2.280	2.273	2.277	2.282
13	2.256	2.267	2.262	2.264	2.269
14	2.253	2.256	2.259	2.253	2.258
15	2.256	2.253	2.262	2.250	2.255
16	2.253	2.256	2.259	2.253	2.258
17	2.251	2.253	2.257	2.250	2.255
18	2.249	2.251	2.255	2.248	2.253
19	2.250	2.249	2.256	2.246	2.251
20	2.252	2.250	2.258	2.247	2.252
21	2.248	2.252	2.254	2.249	2.254
22	2.253	2.248	2.259	2.245	2.250
23	2.254	2.253	2.260	2.250	2.255
24	2.252	2.254	2.258	2.251	2.256
25	2.257	2.252	2.263	2.249	2.254
26	2.258	2.257	2.264	2.254	2.259
27	2.257	2.258	2.263	2.255	2.260
28	2.262	2.257	2.268	2.254	2.259
28	2.262	2.262	2.268	2.259	2.264
30	2.260	2.262	2.266	2.259	2.264
31	2.264	2.260	2.265	2.257	2.262
32	2.265	2.264	2.265	2.261	2.266
33	2.265	2.265	2.267	2.262	2.267

ตารางที่ ก.1 ค่าความต่างศักย์จากการทดลองซ้ำเป็นจำนวน 5 ครั้ง(อุณหภูมิ $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$) (ต่อ)

เวลา	ความต่างศักย์(V_{out})				
(นาทื)	Trial#1	Trial#2	Trial#3	Trial#4	Trial#5
34	2.267	2.265	2.265	2.262	2.267
35	2.265	2.267	2.268	2.264	2.270
36	2.268	2.265	2.267	2.265	2.269
37	2.267	2.268	2.268	2.266	2.267
38	2.268	2.267	2.269	2.263	2.265
39	2.269	2.268	2.267	2.265	2.268
40	2.267	2.269	2.268	2.266	2.267
41	2.268	2.267	2.265	2.266	2.268
42	2.261	2.262	2.262	2.262	2.262
43	2.262	2.266	2.262	2.266	2.266
44	2.262	2.267	2.260	2.267	2.267
45	2.264	2.267	2.264	2.267	2.267
46	2.265	2.270	2.265	2.270	2.270
47	2.266	2.269	2.265	2.269	2.269
48	2.263	2.267	2.267	2.267	2.267
49	2.265	2.265	2.265	2.265	2.265
50	2.266	2.265	2.268	2.268	2.261
51	2.266	2.267	2.267	2.267	2.262
52	2.261	2.265	2.265	2.260	2.262
53	2.262	2.268	2.265	2.264	2.264
54	2.262	2.267	2.267	2.265	2.265
55	2.265	2.268	2.265	2.265	2.266
56	2.265	2.269	2.268	2.267	2.263
57	2.267	2.267	2.267	2.265	2.265
58	2.265	2.268	2.268	2.268	2.266
59	2.268	2.265	2.269	2.267	2.266
60	2.267	2.265	2.267	2.266	2.261
AVG	2.267	2.266	2.264	2.263	2.269
Error $\pm 5\%$	0.113	0.113	0.113	0.113	0.113

ตารางที่ ก.2 ค่าความต่างศักย์จากการทดลองซ้ำเป็นจำนวน 5 ครั้ง (อุณหภูมิ $30^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$)

เวลา	ความต่างศักย์(V_{out})				
(นาทื)	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
1	2.637	2.637	2.637	2.638	2.643
2	3.443	3.443	3.443	3.578	3.398
3	3.764	3.764	3.764	3.820	4.588
4	4.129	4.129	4.129	4.258	4.571
5	4.544	4.544	4.544	4.544	4.473
6	4.478	4.478	4.478	4.478	3.419
7	4.388	4.388	4.388	4.026	2.632
8	3.284	3.284	3.284	3.168	2.476
9	2.685	2.685	2.685	2.685	2.362
10	2.270	2.270	2.270	2.259	2.313
11	2.271	2.2689	2.271	2.262	2.286
12	2.270	2.2686	2.270	2.262	2.273
13	2.270	2.2668	2.270	2.260	2.262
14	2.269	2.2692	2.269	2.264	2.259
15	2.269	2.2673	2.269	2.260	2.262
16	2.269	2.2673	2.269	2.261	2.259
17	2.267	2.2651	2.267	2.262	2.257
18	2.269	2.2654	2.269	2.258	2.255
19	2.267	2.264	2.267	2.259	2.256
20	2.267	2.2641	2.267	2.261	2.258
21	2.265	2.2633	2.265	2.260	2.254
22	2.265	2.2616	2.265	2.261	2.259
23	2.264	2.2598	2.264	2.260	2.260
24	2.264	2.2613	2.264	2.259	2.258
25	2.263	2.26	2.263	2.258	2.263
26	2.262	2.2593	2.262	2.257	2.264
27	2.260	2.2623	2.260	2.256	2.263
28	2.261	2.2615	2.261	2.259	2.268
28	2.260	2.2598	2.260	2.263	2.268
30	2.259	2.2637	2.259	2.259	2.266
31	2.262	2.2603	2.262	2.258	2.258
32	2.262	2.2606	2.262	2.260	2.263
33	2.260	2.2624	2.260	2.259	2.264

ตารางที่ ก.2 ค่าความต่างศักย์จากการทดลองซ้ำเป็นจำนวน 5 ครั้ง (อุณหภูมิ $30^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$) (ต่อ)

เวลา	ความต่างศักย์(V_{out})				
(นาทื)	Trial#1	Trial#2	Trial#3	Trial#4	Trial#5
34	2.264	2.2583	2.264	2.260	2.263
35	2.260	2.2593	2.260	2.261	2.268
36	2.261	2.2607	2.261	2.259	2.268
37	2.262	2.2603	2.262	2.257	2.266
38	2.258	2.2605	2.258	2.257	2.268
39	2.259	2.26	2.259	2.259	2.266
40	2.261	2.2586	2.261	2.256	2.273
41	2.260	2.2584	2.260	2.256	2.258
42	2.261	2.2569	2.261	2.257	2.263
43	2.260	2.2558	2.260	2.258	2.264
44	2.259	2.2587	2.259	2.256	2.263
45	2.258	2.2628	2.258	2.257	2.268
46	2.257	2.2588	2.257	2.256	2.268
47	2.256	2.2584	2.256	2.257	2.266
48	2.259	2.26	2.259	2.254	2.258
49	2.263	2.2587	2.263	2.253	2.258
50	2.259	2.2599	2.259	2.255	2.263
51	2.258	2.2613	2.258	2.254	2.264
52	2.260	2.2589	2.260	2.252	2.263
53	2.259	2.2567	2.259	2.254	2.268
54	2.260	2.2571	2.260	2.253	2.258
55	2.261	2.2586	2.261	2.255	2.263
56	2.259	2.2557	2.259	2.255	2.264
57	2.257	2.2557	2.257	2.253	2.263
58	2.257	2.2565	2.257	2.254	2.268
59	2.259	2.2575	2.259	2.255	2.268
60	2.256	2.256	2.256	2.252	2.266
AVG	2.262	2.261	2.262	2.258	2.264
Error $\pm 5\%$	0.113	0.113	0.113	0.113	0.113

ภาคผนวกข.

ตารางที่ ข.1 ระยะ D_2 ณ ตำแหน่งระยะ d ต่างๆ ในการวัดชิ้นงานหนา 2 มิลลิเมตร

ตารางที่ ข.2 ระยะ D_3 ณ ตำแหน่งระยะ d ต่างๆ ในการวัดชิ้นงานหนา 3 มิลลิเมตร

ตารางที่ ข.3 ระยะ D_4 ณ ตำแหน่งระยะ d ต่างๆ ในการวัดชิ้นงานหนา 4 มิลลิเมตร

ตารางที่ ข.4 ระยะ D_5 ณ ตำแหน่งระยะ d ต่างๆ ในการวัดชิ้นงานหนา 5 มิลลิเมตร

TNI

ตารางที่ ข.1 ระยะ D_2 ณ ตำแหน่งระยะ d ต่างๆ ในการวัดชิ้นงานหนา 2 มิลลิเมตร

ระยะ d (mm)	ระยะ D_2 (mm)เฉลี่ย				ค่า Uncertainty ($\pm$ mm)			
	L=1mm	L=2mm	L=3mm	L=4mm	L=1mm	L=2mm	L=3mm	L=4mm
30	1.011	2.118	3.147	4.004	± 0.001	± 0.001	± 0.002	± 0.002
25	1.011	2.122	3.149	4.007	± 0.002	± 0.001	± 0.007	± 0.007
20	1.012	2.128	3.156	4.020	± 0.001	± 0.001	± 0.002	± 0.002
15	1.035	2.134	3.213	4.099	± 0.001	± 0.001	± 0.002	± 0.002
12	1.040	2.142	3.265	4.192	± 0.001	± 0.001	± 0.002	± 0.002
10	1.045	2.149	3.287	4.276	± 0.002	± 0.001	± 0.004	± 0.004
8	1.059	2.157	3.299	4.381	± 0.001	± 0.002	± 0.004	± 0.004
6	1.071	2.192	3.312	4.722	± 0.002	± 0.002	± 0.005	± 0.005
4	1.132	2.285	3.405	4.801	± 0.003	± 0.003	± 0.005	± 0.005
2	1.162	2.321	3.506	5.039	± 0.003	± 0.003	± 0.007	± 0.007
0	1.214	2.415	3.643	5.233	± 0.003	± 0.003	± 0.004	± 0.004

ตารางที่ ข.2 ระยะ D_3 ณ ตำแหน่งระยะ d ต่างๆ ในการวัดชิ้นงานหนา 3 มิลลิเมตร

ระยะ d (mm)	ระยะ D_3 (mm)เฉลี่ย				ค่า Uncertainty ($\pm$ mm)			
	L=1mm	L=2mm	L=3mm	L=4mm	L=1mm	L=2mm	L=3mm	L=4mm
30	1.062	2.095	3.163	4.023	± 0.001	± 0.001	± 0.002	± 0.002
25	1.062	2.096	3.164	4.026	± 0.001	± 0.001	± 0.002	± 0.004
20	1.064	2.100	3.171	4.038	± 0.001	± 0.001	± 0.002	± 0.004
15	1.073	2.109	3.227	4.114	± 0.001	± 0.001	± 0.002	± 0.004
10	1.077	2.116	3.277	4.204	± 0.001	± 0.002	± 0.003	± 0.005
12	1.083	2.135	3.292	4.286	± 0.001	± 0.002	± 0.003	± 0.005
8	1.089	2.173	3.300	4.387	± 0.001	± 0.002	± 0.003	± 0.003
6	1.091	2.197	3.321	4.714	± 0.001	± 0.002	± 0.003	± 0.007
4	1.117	2.226	3.422	4.789	± 0.001	± 0.002	± 0.005	± 0.007
2	1.138	2.275	3.548	5.017	± 0.001	± 0.004	± 0.006	± 0.009
0	1.183	2.311	3.665	5.202	± 0.002	± 0.004	± 0.006	± 0.013

ตารางที่ ข.3 ระยะ D_4 ณ ตำแหน่งระยะ d ต่างๆ ในการวัดชิ้นงานหนา 4 มิลลิเมตร

ระยะ d (mm)	ระยะ D_4 (mm)เฉลี่ย				ค่า Uncertainty ($\pm$ mm)			
	L=1mm	L=2mm	L=3mm	L=4mm	L=1mm	L=2mm	L=3mm	L=4mm
30	1.038	2.143	3.109	4.163	± 0.001	± 0.001	± 0.001	± 0.002
25	1.038	2.147	3.111	4.167	± 0.001	± 0.001	± 0.001	± 0.002
20	1.040	2.149	3.126	4.179	± 0.001	± 0.001	± 0.002	± 0.002
15	1.042	2.155	3.154	4.259	± 0.001	± 0.001	± 0.002	± 0.003
12	1.044	2.165	3.230	4.344	± 0.001	± 0.001	± 0.002	± 0.003
10	1.054	2.185	3.260	4.355	± 0.001	± 0.001	± 0.003	± 0.003
8	1.060	2.191	3.299	4.395	± 0.001	± 0.001	± 0.004	± 0.006
6	1.084	2.200	3.362	4.441	± 0.001	± 0.002	± 0.003	± 0.004
4	1.110	2.216	3.436	4.562	± 0.001	± 0.003	± 0.004	± 0.006
2	1.151	2.298	3.563	4.632	± 0.001	± 0.002	± 0.005	± 0.006
0	1.158	2.440	3.664	4.780	± 0.002	± 0.003	± 0.007	± 0.010

ตารางที่ ข.4 ระยะ D_5 ณ ตำแหน่งระยะ d ต่างๆ ในการวัดชิ้นงานหนา 5 มิลลิเมตร

ระยะ d (mm)	ระยะ D_5 (mm)เฉลี่ย				ค่า Uncertainty ($\pm$ mm)			
	L=1mm	L=2mm	L=3mm	L=4mm	L=1mm	L=2mm	L=3mm	L=4mm
30	1.071	2.061	3.156	4.192	± 0.001	± 0.001	± 0.002	± 0.004
25	1.072	2.067	3.160	4.267	± 0.001	± 0.001	± 0.002	± 0.003
20	1.073	2.070	3.165	4.287	± 0.001	± 0.001	± 0.002	± 0.004
15	1.076	2.089	3.195	4.326	± 0.001	± 0.001	± 0.002	± 0.005
12	1.078	2.109	3.212	4.357	± 0.001	± 0.001	± 0.002	± 0.005
10	1.088	2.149	3.257	4.380	± 0.001	± 0.001	± 0.003	± 0.007
8	1.094	2.188	3.286	4.392	± 0.001	± 0.001	± 0.003	± 0.006
6	1.099	2.196	3.378	4.533	± 0.001	± 0.001	± 0.003	± 0.005
4	1.134	2.230	3.411	4.619	± 0.001	± 0.002	± 0.005	± 0.007
2	1.171	2.273	3.431	4.729	± 0.001	± 0.002	± 0.007	± 0.008
0	1.195	2.533	3.538	4.862	± 0.001	± 0.003	± 0.006	± 0.009