

การพัฒนาระบบวัดมุมสัมผัส
DEVELOPMENT OF A CONTACT ANGLE
MEASUREMENT SYSTEM



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

การพัฒนาระบบวัดมุมสัมผัส
DEVELOPMENT OF A CONTACT ANGLE
MEASUREMENT SYSTEM



T149331



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน **149331**
รับ เดือน ปี **12 ก.พ. 2561**

12881831

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF A CONTACT ANGLE
MEASUREMENT SYSTEM





A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)
DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การพัฒนาระบบวัดมุมสัมผัส Development of a Contact Angle Measurement System
ชื่อนักศึกษา	นางสาวกานต์พิชชา ธาระพิช รหัสนักศึกษา 56051116 นางสาวดวงฤดี ขวัญเมือง รหัสนักศึกษา 56051142 นายทองศักดิ์ คำแพทย์ รหัสนักศึกษา 56051143
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2559
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ภาณุพล โขลนกระโทก

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์) ประจำปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.อนุพงศ์ สรงประภา ประธานกรรมการ	
ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี กรรมการ	
อ.ภูมินทร์ จินดาจิราวัฒน์ กรรมการ	
ดร.ภาณุพล โขลนกระโทก กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การพัฒนาระบบวัดมุมสัมผัส
ชื่อนักศึกษา	นางสาวกานต์พิชชา ธาระพิช รหัสนักศึกษา 56051116 นางสาวดวงฤดี ขวัญเมือง รหัสนักศึกษา 56051142 นายทองศักดิ์ คำแพทย์ รหัสนักศึกษา 56051143
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2559
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ภาณุพล โขลนกระโทก

บทคัดย่อ

การพัฒนาระบบวัดมุมสัมผัส มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาให้ระบบสามารถวัดมุมสัมผัสแบบเรียลไทม์และวัดความเข้มข้นของสารละลายได้ โดยใช้กระบวนการวิเคราะห์ด้วยภาพซึ่งพัฒนาด้วยโปรแกรม LabVIEW เครื่องมือที่สร้างขึ้นมี 2 ส่วน คือหนึ่งส่วนที่สร้างหยดของเหลวตามปริมาตรที่ต้องการโดยใช้การควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ และส่วนที่สองคือ การประมวลผลด้วยภาพ เพื่อวัดมุมสัมผัสและวิเคราะห์ความเข้มข้นของของเหลว โดยเครื่องมือที่สร้างขึ้นสามารถวัดมุมสัมผัสได้อย่างแม่นยำใกล้เคียงกับเครื่องมือที่เชื่อถือได้ ในช่วง $68.8860^{\circ} \pm 2.4331^{\circ}$ มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด 6.93% และยังสามารถบอกค่าความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลในช่วงความเข้มข้น 10% ถึง 50% โดยมวล มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด 21.34% และสารละลายน้ำเกลือในช่วงความเข้มข้น 5% ถึง 30% โดยมวล มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด 4.72% อีกด้วย

คำสำคัญ : มุมสัมผัส วิธีมุมสองเท่า ความเข้มข้นสารละลาย

Title	Development of A Contact Angle Measurement System
Students	Miss Kanpitcha Tharapit Student ID 56051116 Miss Dungrudee Khwanmung Student ID 56051142 Mr. Thanongsak Khempaet Student ID 56051143
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)
Department	Physics
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2016
Advisor	Dr.Bhanupol Klonggratog

Abstract

The objective of Contact Angle System Development is to develop the system to measure the contact angle in real time mode and also be able to measure concentration of liquid solution. The method uses for this development is image analysis using LabVIEW software. The developed device comprises of 2 components, the liquid drop system which control volume of dropped liquid by using micro controller and the image processing system to measurement contact angle and concentration of liquid. After development, the device is tested with compare to standard device. The developed device has capability to measure contact angle in the range of $68.8860^{\circ} \pm 2.4331^{\circ}$ with the max deviation of 6.93%. The solution concentration is also tested compare to standard device. The Concentration of sugar solution is measured in the range of 10% to 50% by mass with deviation of 21.34% and the concentration of salt solution is measured in the range of 5% to 30% by mass with max deviation of 4.72%

Keyword : Contact angle, Half Angle Algorithm, Solution concentration

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากความกรุณาและร่วมมือของทุกๆท่าน ขอขอบพระคุณ ดร.ภาณุพล โขลนกระโทก ที่คอยให้คำปรึกษาและให้การดูแลอย่างใกล้ชิดและให้คำแนะนำช่วยเหลือที่ดีในการปรับปรุงข้อบกพร่องในการทำโครงการพิเศษ

ขอขอบพระคุณ คุณศักรินทร์ บุญล้ำ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการให้ความรู้ในเรื่องอุปกรณ์ต่างๆ

ขอขอบพระคุณ คุณวาสนี ธรรมสถิต ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความรู้พื้นฐานสำหรับเครื่องวัดมุมสัมผัสต้นแบบ

ขอขอบพระคุณ คุณธนิดา พ่อคำผล ห้องปฏิบัติการเคมี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องชั่งน้ำหนักสาร

ขอขอบคุณเพื่อนๆพี่ๆ สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ทุกคนที่ช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา ให้กำลังใจในการทำโครงการพิเศษมาตลอด

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยให้คำปรึกษา ให้ทุนทรัพย์ และเป็นแรงผลักดันให้มีความตั้งใจในการทำโครงการพิเศษซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดในการศึกษาและการทำโครงการพิเศษนี้

กานต์พิชชา ธาระพิช
ดวงฤดี ขวัญเมือง
ทนต์ศักดิ์ คำแพทย์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	จ
สารบัญรูป	ฉ
คำย่อ/สัญลักษณ์	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขต	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2
2.1 ทฤษฎีมุมมองสัมผัส	2
2.1.1 แรงตึงผิว	2
2.1.2 สภาวะการเปียก	2
2.1.3 มุมสัมผัส	3
2.1.4 ประเภทของการวัดมุมสัมผัส	4
2.1.5 การวัดมุมสัมผัส	5
2.2 การประมวลผลภาพ	7
2.2.1 ความหมายของการประมวลผลภาพดิจิทัล	7
2.2.2 รูปภาพ	7
2.2.3 ความหมายของพิกเซลและดอท	8
2.2.4 ความละเอียดของภาพ	9
2.2.5 ประเภทของภาพบิตแม็พ	9
2.3 ประเภทของกล้อง	11
2.3.1 ประเภทของกล้องจุลทรรศน์	11
2.3.2 ส่วนประกอบกล้องจุลทรรศน์	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.3 ประเภทกล้องเว็บแคม	14
2.3.4 ส่วนประกอบกล้องเว็บแคม	15
2.4 เซ็นเซอร์รับภาพ	16
2.4.1 ประเภทของเซ็นเซอร์	16
2.4.2 ขนาดของเซนเซอร์	17
2.5 Field of View	18
2.6 Depth of Field	18
2.7 สัญญาณรบกวน	19
2.7.1 ประเภทของสัญญาณรบกวน	19
2.7.2 ลักษณะของสัญญาณรบกวน	20
2.8 โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย	21
2.8.1 แลบลิว (LabVIEW)	21
2.8.2 SolidWorks	24
2.8.3 Arduino	26
2.9 สารละลาย	27
2.9.1 การละลายของสารในตัวทำละลาย	27
2.9.2 ความเข้มข้นของสารละลาย	28
2.10 การประเมินค่าความไม่แน่นอนในการวัดและการสอบเทียบ	29
2.10.1 แหล่งความไม่แน่นอนในการวัด	29
2.10.2 การประเมินค่า Type A Uncertainty	29
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	31
3.1 การทดสอบระบบซอฟต์แวร์วัดมุมสัมผัส	31
3.1.1 ทดสอบสร้างรูปร่างหยดของเหลวจากโปรแกรม SoloidWork	31
3.1.2 ทดสอบวิเคราะห์วิดีโอจากเครื่องที่เชื่อถือได้	32
3.2 การทดสอบระบบสร้างหยดของเหลว	32
3.2.1 ชุดเคลื่อนที่เสริม	32
3.2.2 ชุดเข็มหยดของเหลว	32
3.3 การทดสอบระบบเทียบกับเครื่องที่เชื่อถือได้	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 การออกแบบเครื่องมือ	33
3.4.1 ระบบหยดของเหลว	33
3.4.2 ระบบการเคลื่อนที่ในทิศทางแกนต่าง	33
3.4.3 ระบบการติดตั้งกล้อง	34
3.4.4 ระบบส่องสว่าง(ฉากหลัง)	35
3.4.5 ระบบรวมของเครื่องมือ	35
3.5 การทดสอบของเหลวที่ความเข้มข้นต่างกัน	36
3.5.1 สารละลายน้ำเกลือ	36
3.5.2 สารละลายน้ำตาล (ซูโครส)	36
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	37
4.1 ผลการทดสอบซอฟต์แวร์การวัดมุมสัมผัส	37
4.1.1 ผลการวิเคราะห์ภาพจำลองมุมสัมผัส	37
4.1.2 ผลการวิเคราะห์การวัดมุมสัมผัสที่เป็นมุมแหลม	38
4.1.3 ผลการวิเคราะห์การวัดมุมสัมผัสที่เป็นมุมป้าน	40
4.2 ผลการทดสอบระบบการสร้างหยดของเหลว	42
4.3 ผลการวิเคราะห์ระบบเทียบเครื่องมือที่เชื่อถือ	44
4.4 ผลการออกแบบระบบวัดมุมสัมผัสที่สร้างขึ้น	45
4.5 ผลการวิเคราะห์ของเหลวที่ความเข้มข้นต่างกัน	45
4.5.1 สารละลายน้ำเกลือ	45
4.5.2 สารละลายน้ำตาล (ซูโครส)	47
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	50
5.1 สรุปผลงานวิจัย	50
5.2 ข้อเสนอแนะ	50
เอกสารอ้างอิง	51
ภาคผนวก ก	53
ภาคผนวก ข	65
ภาคผนวก ค	75
ภาคผนวก ง	85
ภาคผนวก จ	92
ภาคผนวก ฉ	98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
2.1 สมบัติกล้องประเภทต่าง ๆ	15
4.1 การเปรียบเทียบมุมสัมผัส(มุมแหลม)ที่ได้จากเครื่องมือที่เชื่อถือและเครื่องที่สร้างขึ้น	38
4.2 ผลการคำนวณความไม่แน่นอนในการวัดและค่าความผิดพลาดในการวัดเมื่อเทียบกับเครื่องมือที่เชื่อถือ	39
4.3 การเปรียบเทียบมุมสัมผัส(มุมป้าน)ที่ได้จากเครื่องมือที่เชื่อถือและเครื่องที่สร้างขึ้น	40
4.4 ผลการคำนวณความไม่แน่นอนในการวัดและค่าความผิดพลาดในการวัดเมื่อเทียบกับเครื่องมือที่เชื่อถือ	42
4.5 ค่าเฉลี่ยปริมาตรหยดน้ำในแต่ละคำสั่ง	42
4.6 จำนวนรอบที่เหมาะสมกับปริมาตรของเหลวที่ต้องการ	43
4.7 ผลเปรียบเทียบมุมสัมผัสเฉลี่ยของแผ่นชิ้นงานตัวอย่างระหว่างเครื่องมือที่เชื่อถือกับเครื่องที่สร้างขึ้น	44
4.8 ผลการคำนวณความไม่แน่นอนในการวัดและค่าความผิดพลาดในการวัดเมื่อเทียบกับเครื่องมือที่เชื่อถือ	45
4.9 มุมสัมผัสเฉลี่ยของสารละลายน้ำเกลือแต่ละความเข้มข้น	46
4.10 ความเข้มข้นเฉลี่ยที่นำมาทดสอบและความเข้มข้นเฉลี่ยที่คำนวณได้	47
4.11 มุมสัมผัสที่เริ่มคงที่ของสารละลายน้ำตาล	48
4.12 ค่าความผิดพลาดของการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของน้ำตาล	49

สารบัญรูป

	หน้า
2.1 ลักษณะน้ำกลิ้งบนใบบัว	3
2.2 ลักษณะมุมสัมพันธ์	4
2.3 ลักษณะมุมสัมพันธ์ของหยดน้ำบนผิวระนาบ	4
2.4 ลักษณะวิธีการวัดมุมบนพื้นผิวเอียง	5
2.5 แผนผังการวิเคราะห์มุมสัมพันธ์โดยวิธีการวัดแบบ Half-angle	5
2.6 กระบวนการประมวลผลภาพ	7
2.7 ตัวอย่างภาพขยายแบบเวกเตอร์และภาพขยายแบบบิตแม็พ	8
2.8 ระดับความเข้มเทา	10
2.9 ระดับความเข้มสี	10
2.10 ตัวอย่างสัดส่วนการผสมสี RGB	11
2.11 ภาพไบนารี	11
2.12 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	12
2.13 ส่วนประกอบกล้องจุลทรรศน์	14
2.14 กล้องเว็บแคม	15
2.15 พิลเตอร์แยก 3 สี ของเซ็นเซอร์ CCD	16
2.16 ประเภทเซ็นเซอร์	17
2.17 ขนาดต่างๆของเซ็นเซอร์	17
2.18 ระยะเวลาการทำงานของเซ็นเซอร์	18
2.19 การเปิดรับแสงที่มีผลต่อความคมชัดของภาพ	18
2.20 ตัวอย่างสัญญาณรบกวน ชนิด Random noise	19
2.21 ตัวอย่างสัญญาณรบกวน ชนิด Fixed Pattern Noise	19
2.22 ตัวอย่างสัญญาณรบกวน ชนิด Banding Noise	20
2.23 ตัวอย่างสัญญาณรบกวน ชนิด Chrominance Noise	20
2.24 ตัวอย่างสัญญาณรบกวน ชนิด Luminance Noise	21
2.25 หน้าจอฟอร์นพาแนล	22
2.26 หน้าจอบล็อกไดอะแกรม	23
2.27 การทำงาน Part Mode	25
2.28 หน้าจอประกอบชิ้นส่วน	25
2.29 หน้าจอการทำงานการสร้างรูปแบบต่างๆ	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
2.30 บอร์ด Arduino UNO 3	26
2.31 ตัวอย่างกาเขียนโค้ดในโปรแกรมอะคูโน่	27
3.1 ภาพจำลองลักษณะหยดของเหลว	31
3.2 ภาพหยดของเหลวที่มีสัญญาณรบกวน ชนิด ขาวดำ	32
3.3 ภาพจำลองชุดหยดของเหลว	33
3.4 ภาพจำลองฐานรองชิ้นงานตัวอย่าง	34
3.5 ภาพจำลองฐานวางกล่องดิจิตอล	34
3.6 ภาพจากการฉายแสงเข้าด้านต่างๆของหยดของเหลว	35
3.7 ภาพจำลองฐานระบบส่องสว่าง	35
3.8 ภาพจำลองระบบเครื่องมือวัดมุมสัมผัสที่สร้างขึ้น	36
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์สัญญาณรบกวนกับเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด	37
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยปริมาตรกับจำนวนรอบของสเต็ปมอเตอร์	43
4.3 ภาพถ่ายระบบเครื่องมือมุมสัมผัสที่สร้างขึ้น	45
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายน้ำเกลือกับมุมสัมผัสเฉลี่ยที่วัดได้	46
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายน้ำเกลือที่ทราบค่ากับการทดลอง	47
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมผัสกับเวลา	48
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลที่ทราบค่ากับการทดลอง	49

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

วัสดุแต่ละชนิดมีองค์ประกอบ พื้นผิวและคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ตัวอย่าง เช่น ใบบัวที่มีผิวมีลักษณะพิเศษ เมื่อมีหยดน้ำตกลงไปก็จะกลิ้งบนใบบัว โดยที่ใบบัวนั้นไม่เปียกหรือที่เรียกกันทั่วไปว่าปรากฏการณ์ “Lotus Effect” เป็นการบอกว่าพื้นผิวนี้มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำและเมื่อพื้นผิวของวัสดุมีการดูดซับน้ำนั้นหมายความว่าวัสดุนั้นมีสมบัติที่ชอบน้ำ ในปัจจุบันอุตสาหกรรมหลากหลายประเภทล้วนอาศัยการวัดคุณสมบัติทางพื้นผิวด้วยการวัดมุมสัมผัส เช่น น้ำมันหล่อลื่น เทคโนโลยีการพิมพ์คอนแทคเลนส์ ฮาร์ดดิสไดรฟ์ เซมิคอนดักเตอร์และเวชสำอาง เป็นต้น อีกทั้งเครื่องมือวัดมุมสัมผัสที่สร้างขึ้นสามารถลดการนำเข้าเครื่องมือวัดจากต่างประเทศภายใต้เงื่อนไขการใช้วัสดุภายในประเทศ ต้นทุนการผลิตต่ำอีกทั้งยังทำให้เกิดการหมุนเวียนทางด้านเศรษฐศาสตร์ภายในประเทศและอยู่บนพื้นฐานของการพึ่งพาตนเอง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาระบบการวัดมุมสัมผัส
- 2) เพื่อศึกษาวิธีการคำนวณและการเขียนโปรแกรมสำหรับระบบวัดมุมสัมผัส
- 3) เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดมุมสัมผัส

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ออกแบบและสร้างเครื่องมือในการวัดมุมสัมผัสได้
- 2) วิเคราะห์ประสิทธิภาพของเครื่องมือ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เครื่องมือที่ออกแบบสามารถใช้งาน วิเคราะห์การคำนวณมุมสัมผัสและความเข้มข้นของสารละลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้ผู้วิจัยกล่าวถึงหลักการที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยโดยอธิบายนิยามเบื้องต้นของมุมสัมผัส แรงตึงผิว สมบัติของสาร การเขียนโปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย รวมถึงเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ คุณสมบัติ

2.1 ทฤษฎีของมุมสัมผัส

2.1.1 แรงตึงผิว (surface tension)

ความพยายามในการยึดติดผิวของของเหลว คือ แรงต่อหน่วยความยาวของผิวสัมผัส เรียกว่า แรงตึงผิวของของเหลว [1] นั่นคือ แรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นบริเวณที่ผิวของของเหลวสัมผัสกับผิวของของเหลวอื่นหรือกับผิวของของแข็ง คือโมเลกุลของของแข็งดึงดูดกับโมเลกุลของของเหลว แรงของโมเลกุลที่อยู่ในของแข็งถูกดึงดูดจากแรงกระทำของโมเลกุลอื่นๆ ที่อยู่โดยรอบในขณะที่โมเลกุลที่พื้นผิวเกิดความไม่สมดุล คือการเกิดพลังงานอิสระบนพื้นผิวของของไหล เรียกว่าพลังงานอิสระบนพื้นผิว (surface free energy) นิยมแสดงในลักษณะปริมาณในรูปทรงของพลังงานต่อระยะทาง โดยทั่วไปหน่วยที่นิยมใช้ในการวัดค่าแรงตึงผิว คือ dynes/cm หรือ N/m พลังงานที่มากเกินไปนี้เกิดขึ้นระหว่างผิวของของไหลสองชนิด

2.1.2 สภาวะการเปียก (Wetting)

คือลักษณะของของเหลวที่ยึดเกาะอยู่บนผิวของของเหลว การที่ของเหลวเปียกบนของแข็งได้ดีหรือไม่นั้น มีผลมาจากแรงสองแรง [2] คือ

1.แรงเชื่อมแน่น (Cohesive force) คือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสารชนิดเดียวกัน ในที่นี้คือแรงที่พยายามทำให้โมเลกุลของของเหลวเกาะกลุ่มกันเองเป็นหยด

2.แรงยึดติด (Adhesive force) คือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสารต่างชนิดกัน ซึ่งในที่นี้หมายถึงแรงระหว่างโมเลกุลของของเหลวและของแข็ง ซึ่งเป็นแรงที่ตรงข้ามกับแรงเชื่อมแน่น คือแรงยึดติดพยายามทำให้หยดของของเหลวแตกออกจากกันและกระจายแนบไปกับผิวของของแข็ง

เมื่อพิจารณาน้ำกับวัสดุชนิดหนึ่ง ขณะที่น้ำเกาะอยู่บนพื้นผิวของของแข็งเกิดสภาพสมดุลของแรงยึดติดและแรงเชื่อมแน่น ถ้าแรงยึดติดมีค่ามากกว่าแรงเชื่อมแน่นอย่างมาก ส่งผลให้น้ำกระจายหลุดออกจากผิว แล้วรวมกันเป็นหยดกลิ้งไปมาได้บนผิวของของแข็งเหมือนกับหยดน้ำบนใบบัว เป็นต้น ดังรูปที่ 2.1



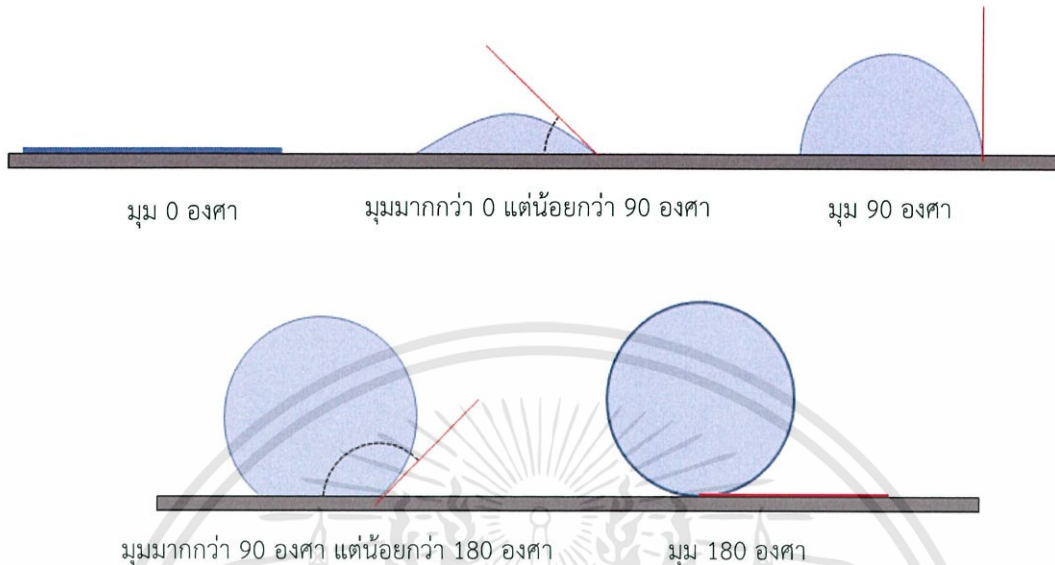
รูปที่ 2.1 ลักษณะน้ำกลิ้งบนใบบัว

ในการพิจารณาการเปียกนั้นของเหลวบนพื้นผิวของแข็ง สภาพสมดุลของแรงสองแรงนำไปสู่ปริมาณที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง ที่นิยมใช้วัดความเปียกที่เรียกว่า มุมสัมผัส (contact angle)

2.1.3 มุมสัมผัส

คือมุมระหว่างหยดของของเหลววัดเทียบกับผิววัสดุและแก๊ส ณ จุดที่พื้นผิวทั้งสองเกาะติดกันมีการแบ่งการเปียกของของเหลวได้ดีหรือไม่ได้ดี [3] ดังรูปที่ 2.2

1. มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 0 องศา คือการเปียกอย่างสมบูรณ์ (Super hydrophilic) ที่แรงยึดติดมีค่ามากกว่าแรงเชื่อมแน่นมากๆ เมื่อของเหลวถูกหยดลงบนพื้นผิว ทำให้ของเหลวกระจายไปตามผิวของของแข็งจนกลายเป็นชั้นของของเหลวบางๆ ครอบคลุมพื้นผิวของของแข็งเป็นบริเวณกว้าง
2. มุมสัมผัสมีค่าระหว่าง 0 ถึง 90 องศา คือการเปียกได้ดี (Hydrophilic) ของเหลวมีการกระจายบนพื้นผิวได้เป็นบริเวณกว้าง แต่ก็ยังคงเกาะกันเป็นหยดลักษณะนูนขึ้นเล็กน้อยจากพื้นผิวของของแข็ง
3. มุมสัมผัสมีค่าตั้งแต่ 90 องศา แต่ไม่ถึง 180 องศา คือ วัสดุชนิดนั้นเปียกได้ยาก (Hydrophobic) ของเหลวรวมกันเป็นหยดมีลักษณะทรงกลมสูง
4. มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 180 องศาเรียกว่า ผิวไม่เปียก (Super hydrophobic) เกิดขึ้นเมื่อแรงยึดติดมีค่าน้อยกว่าแรงเชื่อมแน่นมากๆ ดังนั้นของเหลวรวมกันเป็นหยดทรงกลมเป็นบริเวณที่ของเหลวแตะกับพื้นผิว และของเหลวสามารถกลิ้งไปมาบนผิวได้อย่างอิสระเหมือนลูกบอลกลิ้งบนพื้นผิวเรียบ [4]



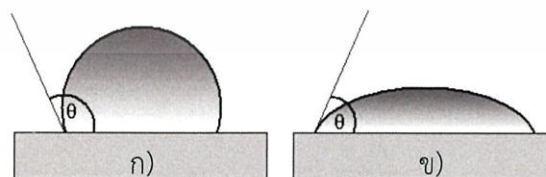
รูปที่ 2.2 ลักษณะของมุมสัมผัส

2.1.4 ประเภทของการวัดมุมสัมผัส

ในงานวิจัยนี้ศึกษาวิธีการวัดมุมสัมผัส 2 ประเภท คือ

1. การวัดมุมสัมผัสของน้ำที่พื้นผิวระนาบ (Static Contact Angle)

การวัดมุมสัมผัสโดยวิธีนี้เป็นการวัดที่นิยมเอามาใช้เป็นส่วนใหญ่ ใช้สำหรับการวิเคราะห์ของหยดน้ำหรือของเหลวที่ไม่มีการเคลื่อนที่ด้วยระยะเวลาเพียงสั้นๆ การวัดมุมสัมผัสโดยวิธีนี้ถูกนำมาใช้ในการประเมินความสะอาดของพื้นผิววัสดุ วิธีการวัดมุมสัมผัสวิธีนี้เป็นการวัดเพื่อตรวจสอบความชอบน้ำหรือไม่ชอบน้ำของพื้นผิวของวัสดุที่นำมาทดสอบ ดังรูปที่ 2.3



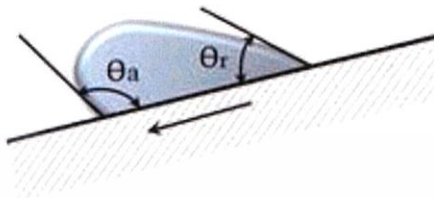
รูปที่ 2.3 ลักษณะมุมสัมผัสของหยดน้ำที่พื้นผิวระนาบ

ก) ลักษณะของหยดน้ำบนวัสดุที่ไม่ชอบน้ำ

ข) ลักษณะของหยดน้ำบนวัสดุที่ชอบน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การวัดมุมสัมผัสของน้ำที่พื้นผิวไมระนาบ เป็นการวัดมุมสัมผัสโดยการวิเคราะห์ Sessile Drop ทั้งสองข้าง (ซ้าย และ ขวา) จากรูปที่ 2.4 พื้นผิวของวัสดุถูกทำให้เอียง มุมสัมผัสของของเหลวด้านบนที่เป็นเนินลาดลงมามีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมุมสัมผัสของของเหลวด้านบนลดลงมาตามลำดับ [5]

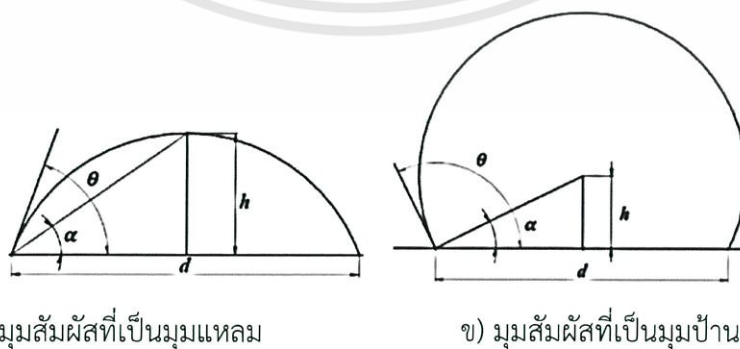


รูปที่ 2.4 ลักษณะวิธีการวัดมุมสัมผัสบนพื้นผิวของของแข็งที่มีลักษณะเอียง

2.1.5 การวัดมุมสัมผัส (Contact Angle Measurement)

การวัดมุมสัมผัส คือการวัดความสามารถของของเหลวที่แพร่กระจายไปบนพื้นผิว มุมสัมผัสนี้สามารถบอกแนวโน้มที่หยดของของเหลวกระจายตัวบนพื้นผิวของของแข็งโดยมุมสัมผัสนั้นมีค่าแปรผกผันกับความสามารถในการกระจายตัวของของเหลว ประกอบไปด้วยการวัดมุมระหว่างเส้นสัมผัสของหยดน้ำบนพื้นผิวของแข็ง โดยมุมสัมผัสสามารถบ่งบอกค่าพลังงานพื้นผิววัสดุได้ [5]

การหามุมสัมผัสมีหลายวิธีการ ตั้งแต่ในการใช้ตามอง Goniometer measure เป็นการวัดโดยใช้ตามองผ่านกล้อง ฉากรับด้านหลังเป็น Goniometer เป็นตัวบ่งบอกมุมสัมผัส คือทำการหยดสารลงมาแล้วมองผ่านกล้อง ทำการปรับ Goniometer เพื่อวัดค่ามุมสัมผัส แต่ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ วิธี Half Angle Algorithm [6] มีสมมุติฐานว่าการหยดสารลงมานั้นเป็นส่วนหนึ่งของทรงกลมในอุดมคติ ดังนั้นมุมมองด้านข้างของหยดน้ำเป็นรูปวงกลมในอุดมคติ ดังนั้นมุมสัมผัสสามารถคำนวณได้จากความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดน้ำ ดังรูปที่ 2.5 แสดงแผนผังภาพวาดของมุมสัมผัสที่เป็นมุมแหลมและมุมป้าน



ก) มุมสัมผัสที่เป็นมุมแหลม

ข) มุมสัมผัสที่เป็นมุมป้าน

รูปที่ 2.5 แผนผังการวาดรูปของการวิเคราะห์หยดน้ำโดยวิธีการวัดแบบ Half angle

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก) ทำการวัดความสูงโดยวัดจากจุดกึ่งกลางของฐานขึ้นไปหาจุดสูงสุดของหยดน้ำ แล้วลากเส้นจากจุดสูงสุดมาหาขอบของหยดน้ำทำมุม α ดังนั้น 2α เท่ากับมุมสัมผัสของหยดน้ำ

ข) ทำการวัดความสูงโดยลากจากจุดกึ่งกลางของฐานขึ้นไปหาจุดกึ่งกลางของหยดน้ำแล้วลากเส้นจากจุดสูงสุดมาหาขอบของหยดน้ำทำมุม α และลากเส้นตั้งฉากกับเส้นที่ลากจากจุดสูงสุดมาหาขอบของหยดน้ำ

ซึ่งในกรณีนี้ θ คือ มุมสัมผัส α คือ มุมประชิดต่อผิวของแข็ง h คือ ความสูงของหยดน้ำ d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของหยดน้ำ ถ้าหยดน้ำเป็นรูปทรงกลมในอุดมคติตามสมมติฐาน มุมสัมผัสอาจเป็นดังที่แสดงในสมการที่ 1 สำหรับมุมแหลม และเป็นไปตาม สมการที่ 2 สำหรับมุมป้าน

$$\theta = 2\alpha = 2 \tan^{-1} \left(\frac{h}{d/2} \right) \quad (1)$$

$$\theta = 90^\circ + \alpha = 90 + \tan^{-1} \left(\frac{h}{d/2} \right) \quad (2)$$

โดยที่

θ = มุมสัมผัส

α = มุมที่ลากจากจุดกึ่งกลางและจุดสูงสุดของหยดน้ำ

h = ความสูงที่ลากจากฐานไปหาจุดกึ่งกลางของหยดน้ำและลากจากฐานไปหาจุดสูงสุดของหยดน้ำ

d = รัศมีของหยดน้ำ

เพื่อให้ได้รูปวงกลมในอุดมคติ ปริมาตรของหยดน้ำต้องไม่ใหญ่จนเกินไป ดังนั้นปริมาตรสูงสุดของหยดน้ำมีการคำนวณ ดังสมการ (3)

$$V_{\max} = \frac{\pi}{48} \left(\frac{\gamma}{\rho g} \right)^{3/2} \left(\tan \frac{\theta}{2} \right) \times \left(3 + \left(\tan \frac{\theta}{2} \right)^2 \right) \left[\left(1 + 8 \frac{(\sin \theta)^2}{1 - \cos \theta} \right)^{1/2} - 1 \right] \quad (3)$$

จากสมการที่ 3 ปริมาตรสูงสุดที่คำนวณได้ $10 \mu\text{L}$ สำหรับการหยดเพื่อมุมสัมผัสระหว่าง 10° ถึง 140° โดยที่

θ = มุมสัมผัสมุมสัมผัส

V_{\max} = ปริมาตร (μL)

γ = แรงตึงผิวระหว่างน้ำกับอากาศ (N/m or J/m^2)

ρ = ความหนาแน่นของของเหลว (kg/m^3)

g = แรงโน้มถ่วงโลก (m/s^2)

2.2 การประมวลผลภาพ

การถ่ายภาพจากกล้องดิจิทัล หากพิจารณาในรูปแบบเดียวกับคอมพิวเตอร์ นั่นก็คือจุดสีหลายๆ จุดที่นำมาเรียงต่อกันหรือที่เรียกว่า “พิกเซล (pixel)” จนสามารถบอกได้ว่าภาพนี้ คือภาพอะไร รวมถึงสามารถรับรู้และเข้าใจว่าแค่เป็นจุดสีหลายๆ จุดที่เรียงต่อกันในความสัมพันธ์ระหว่างจุดที่เหมาะสม

2.2.1 ความหมายของการประมวลผลภาพดิจิทัล

การประมวลผลภาพ หมายถึง การเรียกใช้ขั้นตอนหรือกรรมวิธีใดๆ มากกระทำกับภาพ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณภาพของภาพ ให้ได้ภาพใหม่ที่มีคุณสมบัติตามต้องการ เช่น ความคมชัดหรือการประหยัดพื้นที่ในการเก็บข้อมูลและใช้ในการประมวลผลระดับสูง โดยทั่วไปแล้ว วัตถุประสงค์ของการประมวลผลภาพคือ

การประมวลผลภาพ (Image Processing) คือ การนำภาพมาประมวลผลหรือคิดคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ต้องการทั้งเชิงปริมาณและคุณภาพ โดยมีขั้นตอนที่สำคัญ คือ การทำให้ภาพคมชัด การจำกัดสัญญาณรบกวนออกจากภาพ นำส่วนที่สนใจออกมาจากภาพเพื่อนำไปประมวลผลหาข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น ขนาด รูปร่างและสีของวัตถุในภาพ จากนั้นสามารถนำข้อมูลไปวิเคราะห์และสร้างระบบเพื่อใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ โดยมีกระบวนการดังรูปที่

2.6



รูปที่ 2.6 กระบวนการการประมวลผลภาพ

การประมวลผลภาพด้วยคอมพิวเตอร์ สามารถทำได้โดยนำภาพที่ได้จากกล้องหรือจากหน่วยความจำต่างๆ ซึ่งเป็นสัญญาณอนาล็อก แล้วนำมาแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลที่มีลักษณะเชิงตัวเลข 0 หรือ 1 ที่สามารถใช้รูปแบบทางคณิตศาสตร์มาช่วยในคำนวณและการประมวลผลข้อมูลภาพด้วยคอมพิวเตอร์ได้ต่อไป [7]

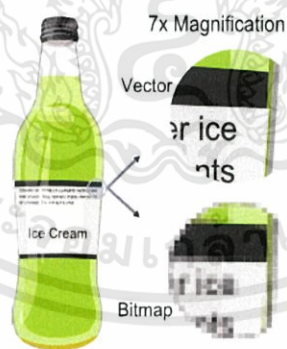
2.2.2 รูปภาพ

สามารถแบ่งตามวิธีการบันทึก 2 ชนิดหลักๆ ดังนี้

1. รูปภาพแบบเวกเตอร์ (vector Image) เป็นรูปภาพที่ไม่ขึ้นกับความละเอียดภาพ เนื่องจากภาพชนิดนี้ถูกสร้างขึ้นจากสมการเส้นต่างๆ ภาพประเภทนี้ไม่ว่าทำการปรับขนาดรูปอย่างไร ก็ยังสามารถรักษาความละเอียดและความคมชัดไว้ได้เหมือนเดิมโดยไม่ผิดเพี้ยน เนื่องจากภาพแบบเวกเตอร์นั้นประกอบขึ้นจากเส้นตรง เส้นโค้ง รูปทรงต่างๆ ภาพที่ได้สร้างขึ้นจากคำสั่งที่บอกถึง

ลักษณะของภาพในรูปแบบเรขาคณิตด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ดังนั้นโปรแกรมที่ใช้ในการประมวลรูปภาพต้องนำสมการต่างๆ ที่บันทึกไว้มาคำนวณและสร้างรูปทรงของภาพขึ้นมาใหม่ จุดเด่นของภาพแบบนี้ คือ ไม่ว่าจะทำการปรับขนาดของรูปเท่าไรคอมพิวเตอร์วิเคราะห์สมการต่างๆ ใหม่ทุกครั้ง ทำให้ภาพที่ได้มีความคมชัด ภาพเวกเตอร์จึงเหมาะสมกับงานที่มีความแม่นยำและต้องการความละเอียดสูง เช่น การสร้างโลโก้ การสร้างภาพสามมิติ การสร้างแบบร่างทางวิศวกรรม เมื่อทำการย่อขยายรูปภาพลักษณะดังกล่าวคอมพิวเตอร์ทำการคำนวณรูปภาพใหม่ ให้มีความคมชัดอยู่เสมอ [7]

2.รูปภาพแบบบิตแมพ (Bitmap image) สามารถเรียกอีกอย่างได้ว่าภาพแบบราสเตอร์ (Raster image) เป็นจุดที่รูปภาพที่เกิดจากจุดเล็กๆ ที่เรียกว่า พิกเซลจำนวนมากที่เรียงต่อกันเป็นภาพภาพหนึ่งดังรูปที่ 2.7 เช่น การแสดงป้ายสีแปลอักษรบนจอคอมพิวเตอร์ ภาพแบบบิตแมพนี้มีจำนวนจุดเล็กๆ เป็นจำนวนมาก ดังนั้นตาของมนุษย์ไม่สามารถมองเห็นและแยกแยะรายละเอียดส่วนย่อยเล็กๆ นั้นได้ แต่เมื่อทำการขยายภาพทำให้เกิดภาพในลักษณะเป็นตาราง ยิ่งขยายมากเท่าไร ตารางสีเหลี่ยม ก็มีขนาดใหญ่ขึ้นจนทำให้เห็นจุดของภาพหรือพิกเซลจึงมีผลทำให้ไม่สามารถบอกได้ว่าภาพนั้นเป็นภาพอะไร เนื่องมาจากภาพแบบบิตแมพมีจำนวนพิกเซลคงที่ จึงทำให้มีข้อจำกัดในเรื่องการขยายขนาดของภาพ การเปลี่ยนขนาดของภาพทำได้โดยการเพิ่มหรือลดจำนวนพิกเซลจากเดิมที่มีอยู่ เมื่อขยายภาพให้มีขนาดใหญ่ขึ้นความละเอียดของภาพจึงลดลง หากถ้าเพิ่มความละเอียดมากขึ้นทำให้ไฟล์มีขนาดใหญ่และเปลืองเนื้อที่หน่วยความจำมากขึ้นตามไปด้วย ภาพที่ขยายที่มีขนาดใหญ่ขึ้นนั้นมองเห็นเป็นตารางสีเหลี่ยมเรียงต่อกันเป็นไฟล์ภาพแบบบิตแมพในระบบวินโดวส์ได้แก่ ไฟล์ที่มีนามสกุล .bmp .pcx .tif .jpg .msp และ .pcd เป็นต้น [7]



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างภาพขยายแบบเวกเตอร์และภาพขยายแบบบิตแมพ

2.2.3 ความหมายของพิกเซลและดอท (Dot)

พิกเซล คือหน่วยที่เล็กที่สุดของรูปภาพเป็นจุดเล็กๆ ที่นำมาพร้อมกัน ทำให้เกิดภาพขึ้นในแต่ละภาพนั้นประกอบไปด้วยพิกเซลหรือจุดมากมาย ซึ่งแต่ละภาพที่สร้างขึ้นมีความหนาแน่นของจุดหรือพิกเซลเหล่านี้แตกต่างกันไป ความหนาแน่นของจุดนี้เป็นตัวบอกถึงความละเอียดของภาพ

โดยมีหน่วยเป็นพีพีไอ (*Pixel Per Inch : ppi*) คือจำนวนจุดต่อนิ้ว พิกเซลมีความสำคัญต่อการสร้างภาพของคอมพิวเตอร์เป็นอย่างมาก เพราะทุกส่วนของกราฟิก เช่น จุด เส้น แบบลายและสีของภาพนั้นเริ่มจากพิกเซลทั้งสิ้น เมื่อขยายภาพ

เห็นภาพเป็นจุด โดยปกติแล้วภาพที่มีความละเอียดสูงหรือคุณภาพดีควรมีค่าความละเอียด 300×300 ppi ขึ้นไป ความละเอียดคมชัดของภาพนั้น แปรผันตรงกับค่าพีพีไอของภาพ

จุดหรือพิกเซล แต่ละจุดแสดงถึงสมบัติทางสีของภาพ โดยแต่ละจุดเป็นตัวสร้างสีประกอบเป็นภาพรวม ซึ่งอาจมีขนาดความเข้มและสีต่างกัน ทำให้เกิดภาพที่มีสีเส้นต่างๆ ของอุปกรณ์แสดงผล (Output Devices) ได้แก่ เครื่องพิมพ์แบบดอตเมตริกหรือแบบเลเซอร์รวมทั้งจอภาพ ซึ่งเป็นการแสดงผลแบบการรวมกันของพิกเซลออกมาเป็นรูปภาพ (Raster Devices)

ดอท คือ จุดเล็กที่สุดที่ใช้ในกระบวนการพิมพ์ การสร้างพิกเซลขึ้นมาหนึ่งพิกเซลต้องใช้ดอทเป็นจำนวนมาก เพื่อทำให้เกิดภาพความเข้มและสีต่าง ๆ กันซึ่งมีหน่วยเป็น ดอทต่อนิ้ว (*dpi*) โดยทั่วไปมักใช้ระบุถึงความละเอียดของเครื่องสแกนและจอภาพ [7]

2.2.4 ความละเอียดของภาพ (Resolution)

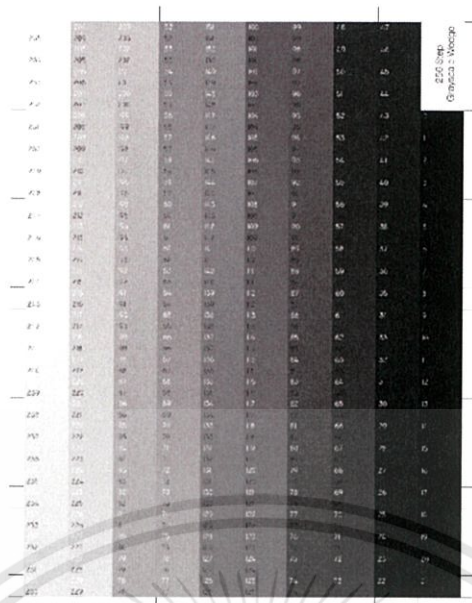
ความละเอียดของภาพเป็นสิ่งที่บอถึงคุณภาพของภาพนั้น หน่วยที่นิยมใช้บอถึงความละเอียดของภาพนั้น คือ พิกเซลต่อนิ้ว (*pixel/Inch*) เป็นค่าแสดงจำนวนพิกเซลในพื้นที่หนึ่งตารางนิ้ว และยังสามารถคำนวณหาจุดทั้งหมดของภาพได้อีกด้วย [7]

2.2.5 ประเภทของภาพบิตแมพ

สามารถแบ่งประเภทของภาพบิตแมพ ตามสมบัติการแสดงผลของสีภาพเป็น 4 ประเภท ดังนี้

1.ภาพระดับความเข้มเทา (Intensity image or Gray Scale Image) ลักษณะของภาพชนิดนี้ ในแต่ละพิกเซลมีค่าความเข้มแสงในแต่ละระดับที่แตกต่างกันไปตั้งแต่ระดับสีดำไปยังระดับสีขาว สามารถกำหนดระดับความเข้มของแสงนั้น โดยใช้ค่าระดับความเข้มเทา (Gray Scale) โดยทั่วไปภาพแบบระดับสีเทามีค่าระดับความเข้มเทาเท่ากับ 8 บิต ดังนั้นค่าความเข้มแสงถูกแบ่งออกเป็น 256 ระดับ เมื่อค่าระดับความเข้มเทามีค่าเท่ากับ 0 หมายถึงจุดภาพนั้นมีค่าระดับความเข้มเทาของแสงต่ำและทำให้จุดในภาพเป็นสีดำ ในทางกลับกันหากค่าระดับความเข้มเทามีค่า เท่ากับ 255 หมายถึงจุดภาพนั้นมีค่าความเข้มแสงมากทำให้ภาพเป็นสีขาว ซึ่งสีขาวถูกแทนที่ด้วยค่าความเข้มเทา 255 และสีดำถูกแทนค่าด้วยระดับความเข้มเทาเท่ากับ 0 ส่วนค่าระหว่าง 0-255 ก็มีเฉดสีจากดำไปสีขาวนั่นเอง

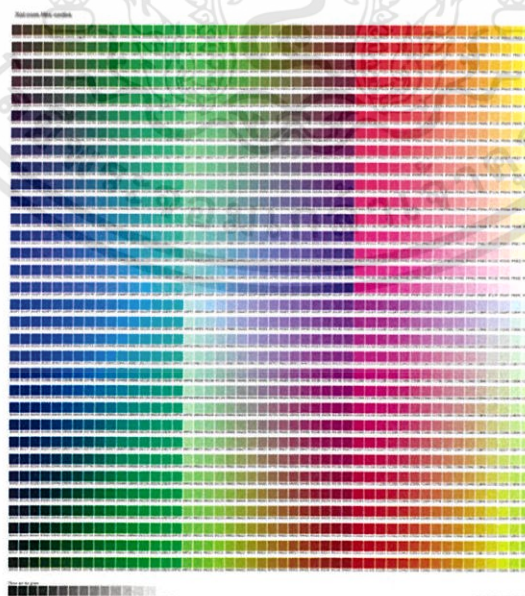
ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ระดับความเข้มเทา

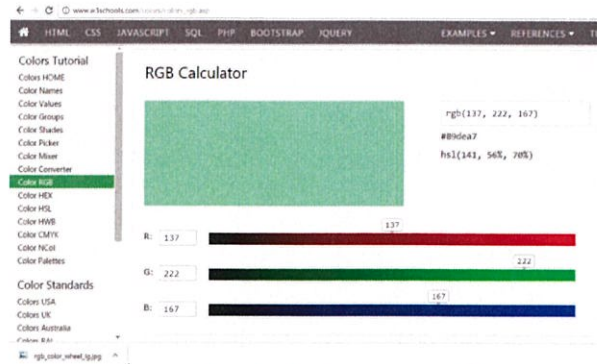
2.ภาพสี (color Image)

ภาพชนิดนี้แต่ละจุดภาพหรือพิกเซลของภาพมีการบันทึกค่าระดับความเข้มของแต่ละแถบแสงของแม่สีหลัก 3 สีที่ซ้อนกันอยู่ คือสีแดง (Red) สีเขียว (Green) และ สีน้ำเงิน (blue) ซึ่งในแต่ละพิกเซลนั้นๆ แสดงผลของค่าสีของแต่ละพิกเซลตามระดับความเข้มในแต่ละแถบแสง ผลของค่าสีแต่ละพิกเซลตามระดับความเข้มในแต่ละแถบสีนั้น ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งเกิดจากการผสมของ RGB โดยสัดส่วน ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 ระดับความเข้มสี

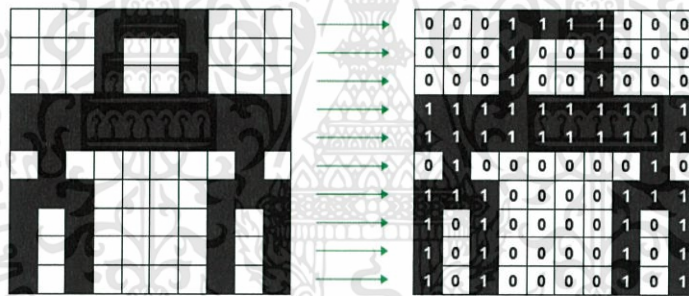
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างสไลด์ส่วนการผสมสี RGB

3. ภาพไบนารี (Binary Image)

ภาพไบนารีแสดงลักษณะของข้อมูลในรูปแบบขาวดำ กล่าวคือ ในแต่ละภาพถูกแสดงด้วยค่าไบนารี (Binary) คือมี 1 บิต ซึ่งประกอบไปด้วยค่า 1 และ 0 โดยที่ 1 หมายถึงจุดภาพสีขาว และ 0 หมายถึง จุดภาพสีดำ ภาพประเภทนี้เหมาะสมกับภาพที่เกี่ยวข้องกับตัวอักษร (Text) ภาพลายนิ้วมือ (Finger Print) ดังรูปที่ 2.11 แสดงตัวอย่างแสดงภาพแบบขาวดำ [7]



รูปที่ 2.11 ภาพไบนารี

2.3 ประเภทของกล้อง

กล้องที่ใช้ในปัจจุบัน มีหลากหลายชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะงานที่เลือกใช้ เช่น กล้องดิจิทัล กล้องที่ใช้ในอุตสาหกรรม กล้องเว็บแคมและกล้องดิจิทัลไมโครสโคป โดยการวิจัยนี้มีจุดประสงค์ที่เลือกใช้กล้องที่ติดตั้งได้ง่าย ไม่ซับซ้อน มีความละเอียดของภาพสูง จึงเลือกใช้กล้องดิจิทัลไมโครสโคป

กล้องจุลทรรศน์ (microscope) อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสิ่งที่มีขนาดเล็กที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เป็นเครื่องขยายขอบเขตประสาทสัมผัสตา ให้เห็นสิ่งที่ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าได้

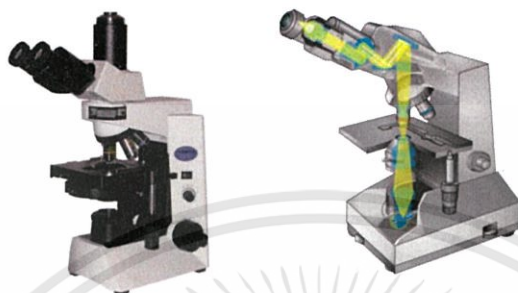
2.3.1 ประเภทของกล้องจุลทรรศน์

กล้องจุลทรรศน์สามารถแบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 2 ประเภท คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (optical microscopes)

เป็นกล้องจุลทรรศน์ ชนิดที่ใช้เลนส์หลายอันและมีกำลังขยายต่างๆ กันสามารถมองเห็นภาพของวัตถุได้โดยมีการสะท้อนแสงจากวัตถุเข้าสู่เลนส์ ประกอบด้วยเลนส์ 2 ชุด คือ เลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) และเลนส์ใกล้ตา (ocular lens หรือ eyepiece) ตัวอย่างของกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

2. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron microscope)

เป็นกล้องจุลทรรศน์แบบหนึ่งที่ใช้อิเล็กตรอนที่ถูกเร่งความเร็วเป็นแหล่งที่มาของการส่องสว่าง เนื่องจากอิเล็กตรอนมีความยาวคลื่นสั้นกว่าโฟตอนของแสงที่มนุษย์มองเห็นได้ถึง 100,000 เท่า กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจึงมีกำลังขยายสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและสามารถเปิดเผยให้เห็นถึงโครงสร้างของวัตถุที่มีขนาดเล็กมากๆ ได้ ซึ่งกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบ่งได้ 2 ชนิด คือ

ก) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) หรือ SEM เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ศึกษาพื้นผิวของตัวอย่าง โดยลำอิเล็กตรอนส่องกราดไปบนผิวของวัตถุ ทำให้ได้ภาพซึ่งมีลักษณะเป็นภาพ 3 มิติ กำลังขยาย 20-800,000 เท่า

ข) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope) หรือ TEM เป็นกล้องที่ประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron Gun) ซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนโดย filament ที่ถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนถูกบีบให้เป็นลำอิเล็กตรอนด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Lens) ซึ่งทำหน้าที่เป็น Condenser lens ซึ่งสามารถปรับลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดเล็กใหญ่ตามต้องการได้ ลำอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ผ่าน ตัวอย่าง (Specimen) ที่บางมากๆ (60 – 90 nm) ทำให้อิเล็กตรอนวิ่งทะลุผ่านไปได้ อิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่างวิ่งไปยังเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective Lens) ซึ่งทำหน้าที่ปรับโฟกัสและสร้างภาพที่ Intermediate Image ขึ้นและขยายสัญญาณภาพด้วย Projector Lens ลงบนฉากเรืองแสง (Fluorescence Screen) เกิดเป็นภาพ 2 มิติขึ้น

2.3.2 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์

1.ลำกล้อง (Body tube) เป็นส่วนที่ปลายด้านบนมีเลนส์ตา ส่วนปลายด้านล่างติดกับเลนส์วัตถุ ซึ่งติดกับแผ่นหมุนได้ เพื่อเปลี่ยนเลนส์ขนาดต่างๆ ติดอยู่กับจานหมุนที่เรียกว่า Revolving Nosepiece

2.จานหมุน (Revolving nosepiece) ใช้หมุนเมื่อต้องการเปลี่ยนกำลังขยายของเลนส์ใกล้วัตถุ

3.เลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) เป็นเลนส์ที่อยู่ใกล้กับแผ่นสไลด์ หรือวัตถุปกติติดกับแป้นวงกลมซึ่งมีกำลังขยาย $\times 10$ โดยที่เลนส์แต่ละตัวมีกำลังขยายบอกเอาไว้ ภาพที่เกิดจากเลนส์ใกล้วัตถุเป็นภาพจริงหัวกลับ

4.เลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) เป็นเลนส์ที่อยู่ใกล้กับแผ่นสไลด์ หรือวัตถุปกติติดกับแป้นวงกลมซึ่งมีกำลังขยาย $\times 40$ โดยที่เลนส์แต่ละตัวมีกำลังขยายบอกเอาไว้ ภาพที่เกิดจากเลนส์ใกล้วัตถุเป็นภาพจริงหัวกลับ

5.เลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) เป็นเลนส์ที่อยู่ใกล้กับแผ่นสไลด์ หรือวัตถุปกติติดกับแป้นวงกลมซึ่งมีกำลังขยาย $\times 100$ โดยที่เลนส์แต่ละตัวมีกำลังขยายบอกเอาไว้ ภาพที่เกิดจากเลนส์ใกล้วัตถุเป็นภาพจริงหัวกลับ

6.ที่หนีบสไลด์ (Stage Clip) ใช้หนีบสไลด์ให้ติดอยู่กับแท่นวางวัตถุ ในกล้องรุ่นใหม่มี Mechanical stage แทนเพื่อควบคุมการเลื่อนสไลด์ให้สะดวกยิ่งขึ้น

7.เลนส์รวมแสง (Condenser) ทำหน้าที่รวมแสงให้เข้มข้นเพื่อส่งไปยังวัตถุที่ต้องการศึกษา

8.หลอดไฟ แหล่งกำเนิดแสงเพื่อให้ความสว่างแก่วัตถุ

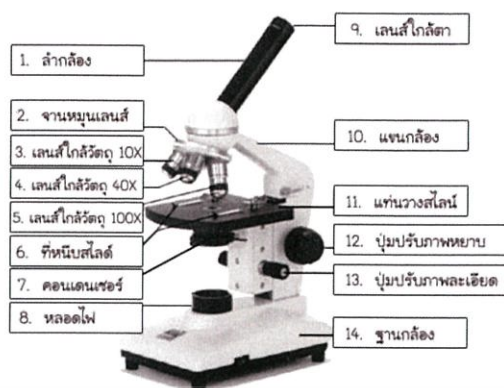
9.เลนส์ใกล้ตา (Eye piece) เป็นเลนส์ที่อยู่บนสุดของลำกล้อง โดยทั่วไปมีกำลังขยาย $10\times$ หรือ $15\times$ ทำหน้าที่ขยายภาพที่ได้จากเลนส์ใกล้วัตถุให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้เกิดภาพที่ตาผู้ศึกษาสามารถมองเห็นได้ โดยภาพที่ได้เป็นภาพเสมือนหัวกลับ

10.แขน (Arm) เป็นส่วนเชื่อมตัวลำกล้องกับฐาน ใช้เป็นที่จับเวลาเคลื่อนย้ายกล้องจุลทรรศน์

11.แท่นวางวัตถุ (Speciment Stage) เป็นแท่นใช้วางแผ่นสไลด์ที่ต้องการศึกษา

12.ปุ่มปรับภาพหยาบ (Coarse adjustment) ทำหน้าที่ปรับภาพโดยเปลี่ยนระยะโฟกัสของเลนส์ใกล้วัตถุ (เลื่อนลำกล้องหรือแท่นวางวัตถุขึ้นลง) เพื่อให้ได้เห็นภาพชัดเจน

13.ปุ่มปรับภาพละเอียด (Fine adjustment) ทำหน้าที่ปรับภาพ ทำให้ได้ภาพที่ชัดเจนมากขึ้น [7] ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์

2.3.3 ประเภทกล้องเว็บแคม (Webcam)

เว็บแคม หรือ Web Camera แต่ในบางครั้งเรียกว่า Video Camera หรือ video conference เป็นอุปกรณ์ที่สามารถจับภาพเคลื่อนไหวของไปปรากฏบนหน้าจอคอมพิวเตอร์และสามารถส่งภาพเคลื่อนไหวนี้ผ่านระบบเครือข่ายทำให้คนอื่นอีกฝ่ายหนึ่งสามารถเห็นตัวเคลื่อนไหวเหมือนอยู่ต่อหน้า ถือว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีประโยชน์อีกตัวหนึ่ง

สำหรับเซนเซอร์ที่กล้องเว็บแคมใช้นั้นมีอยู่ 2 ชนิด คือ CCD และ CMOS แต่ที่นิยมมากที่สุดตอนนี้ก็คือ CMOS เนื่องจากเหตุผลหลายๆ ประการและตัวเซนเซอร์แบบ CMOS เองก็แบ่งได้ 2 ชนิดด้วยกัน คือ

CLF Color CMOS Sensor ที่มีความละเอียดของพิกเซลแค่ 110,000 พิกเซล (367 x 291)

VGA Color CMOS Sensor ให้ความละเอียดสูงกว่าที่ 350,000 พิกเซล (655 x 493)

ดังนั้น การเลือกใช้งานกล้องเว็บแคมสามารถดูทั้งความละเอียดที่ระบุไว้ หรือชนิดของ CMOS สำหรับเซนเซอร์แบบ CCD เป็นเซนเซอร์ที่ได้รับความนิยมใช้ในกล้องดิจิทัล เพราะให้ความละเอียดที่สูงกว่าและก็มี noise ไม่มากเหมือนกับเซนเซอร์แบบ CMOS นอกจากนี้ กล้องเว็บแคมสามารถแบ่งได้สองชนิด คือ แบบมีสายและไร้สาย โดยแต่ละประเภทมีความแตกต่างกันดังนี้

1. กล้องเว็บแคมแบบมีสาย มีความยุ่งยากในเรื่องการใช้สายต่อพ่วงเข้ากับคอมพิวเตอร์ แต่มีราคาถูกกว่าแบบไร้สายมาก ทำให้คนส่วนใหญ่นิยมซื้อกล้องเว็บแคมแบบมีสายมาใช้งาน แต่ทำให้ไม่สามารถติดตั้งกล้องไว้ในระยะไกลได้เหมือนกล้องแบบไร้สาย

2. กล้องเว็บแคมแบบไร้สาย มีราคาค่อนข้างแพงเมื่อเทียบกับกล้องเว็บแคมแบบมีสาย เนื่องจากตัวกล้องต้องใช้เทคโนโลยีที่เรียกว่า Wireless Wi-Fi หรือ IEEE 802.11 ที่มีต้นทุนค่อนข้างสูง จึงไม่ค่อยได้รับความนิยมมากนัก สามารถนำไปตั้งที่จุดใดก็ได้ โดยไม่ต้องใช้สายสัญญาณระหว่างตัวกล้องกับคอมพิวเตอร์ ทำให้มีความสะดวกในการติดตั้ง [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)



ข)

รูปที่ 2.14 ก) กล้องเว็บแคมแบบมีสาย ข) กล้องเว็บแคมแบบไร้สาย

2.3.4 ส่วนประกอบกล้องเว็บแคม

กล้องเว็บแคมประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

- 1.เลนส์กล้อง ทำหน้าที่ในการจับภาพเคลื่อนไหวต่างๆ ที่เคลื่อนที่ไปมาอยู่ด้านหน้ากล้องหรืออยู่ในระยะที่กล้องสามารถจับภาพได้
- 2.ตัวปรับระยะโฟกัส ทำหน้าที่ในการปรับโฟกัสของภาพให้มีความชัดเจนมากขึ้น
- 3.ฐานรองกล้อง มีไว้สำหรับเป็นตัวตั้งกล้อง ช่วยให้วางได้อย่างสะดวกและมั่นคง

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบสมบัติกล้องประเภทต่างๆ

สมบัติ				
ประเภทใช้งาน	การถ่ายภาพทั่วไป	การถ่ายภาพในอุตสาหกรรม	การบันทึกภาพหรือการเคลื่อนไหว	การบันทึกภาพหรือการสื่อสาร
ความละเอียดภาพ	> 2 ล้านพิกเซล	> 0.3 ล้านพิกเซล	> 1.3 ล้านพิกเซล	> 0.3 ล้านพิกเซล
Sensor	CCD	CCD	CCD / CMOS	CMOS
การเชื่อมต่อข้อมูล	Firewire / WIFI	Firewire / camera link	WIFI	USB
ราคา	ถูก - แพง	แพง	ปานกลาง	ถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

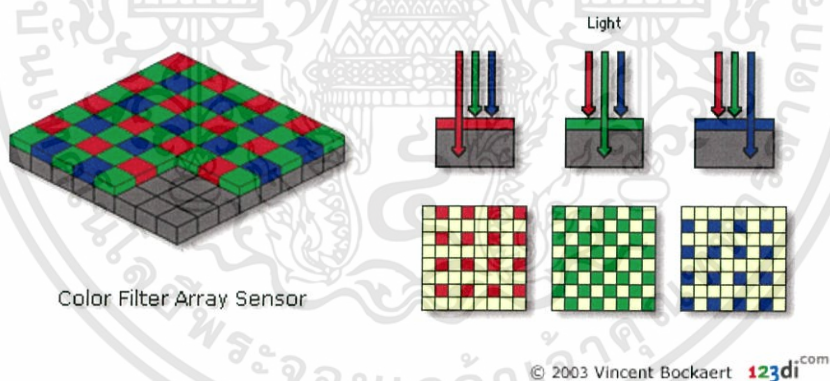
2.4 เซ็นเซอร์รับภาพ (Image Sensor)

เป็นโครชิพที่มีความไวแสง ทำหน้าที่เปลี่ยนแสงให้เป็นภาพ ทำได้ด้วยการวัดปริมาณไฟฟ้าที่เกิดขึ้นตามความเข้มแสงนั้น เพื่อให้ได้ข้อมูลในรูปแบบดิจิทัลในที่สุด

2.4.1 ประเภทของเซ็นเซอร์

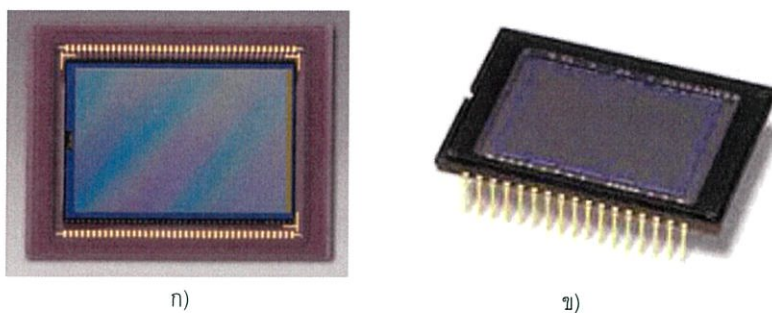
ในปัจจุบันมีเซ็นเซอร์รับภาพที่ใช้กันอยู่ 2 ชนิด คือ

1. CCD (Charge Couple Device) การทำงานของ CCD นั้น เมื่อชุดของ CCD รับแสงมาแล้วมีการเปลี่ยนแปลงอนุภาคแสงเป็นประจุไฟฟ้าก่อน ซึ่งได้สัญญาณเป็นแบบ Analog ความสม่ำเสมอของสัญญาณสูง ทำให้คุณภาพออกมาดี หลังจากนั้นจึงส่งต่อไปยังหน่วยประมวลผล ซึ่งการแปลงสัญญาณจาก Analog ไปเป็นสัญญาณ Digital และจัดการเรื่องภาพต่อไป เห็นว่าที่ตัว CCD สามารถรับแสงได้เต็มที่เพราะมีเพียงตัวรับสัญญาณและตัวผ่านสัญญาณเท่านั้น ตามหลักการแล้ว CCD จึงทำให้คุณภาพภาพที่ดี อย่างไรก็ตามกระบวนการในการนำ CCD ไปใช้ซับซ้อนกว่าเนื่องจากต้องมีแผงวงจรของหน่วยประมวลผลอีกส่วนหนึ่ง นอกจากนี้ยังกินไฟมากกว่าและมีราคาสูงกว่า CMOS ตัวอย่างการรับแสงของ CCD มีฟิลเตอร์แยกเป็น 3 สี คือ แดง เขียวและน้ำเงินโดย CCD แต่ละชุดสามารถรับได้เพียงสีเดียว ดังรูปที่ 2.15 ดังนั้นต้องใช้ CCD ชุด แล้วนำค่าสีแต่ละจุดมาผสมกันโดยใช้กระบวนการในกล่องต่อไป [11]



รูปที่ 2.15 ฟิลเตอร์แยก 3 สี ของเซนเซอร์แบบ CCD

2. CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) ใช้เทคโนโลยีเดียวกับการทำวงจรรีเลย์ทรอนิกส์ในซีพียูของคอมพิวเตอร์ โดยในแต่และซีพียูของคอมพิวเตอร์ โดยในแต่ละพิกเซลของ CMOS นอกจากประกอบไปด้วยตัวรับแสงแล้วยังมีส่วนที่ซับซ้อนซึ่งใช้ในการประมวลผลและแปลงสัญญาณจาก Analog ให้เป็นสัญญาณ Digital ด้วย จึงทำให้พื้นที่ส่วนรับแสงน้อยลงและความสม่ำเสมอของสัญญาณไม่ค่อยดีนัก



ก)

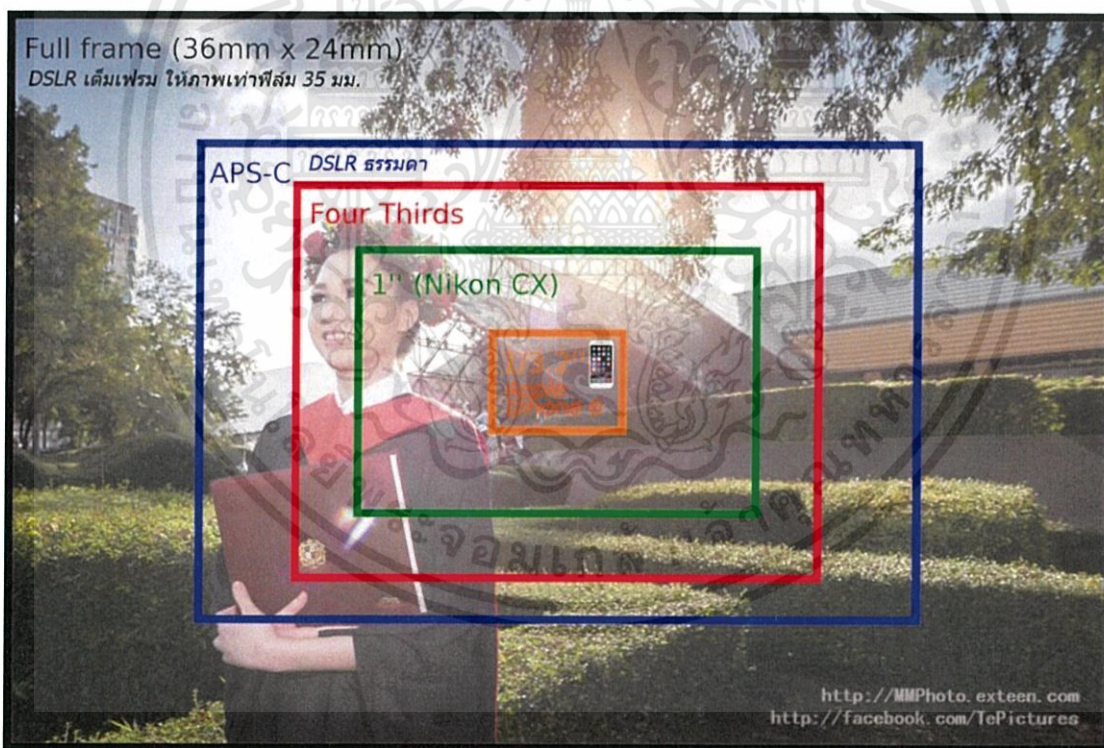
ข)

รูปที่ 2.16 ก) เซ็นเซอร์รับภาพชนิด CMOS

ข) เซ็นเซอร์รับภาพชนิด CCD

2.4.2 ขนาดของเซ็นเซอร์

ขนาดของเซ็นเซอร์เป็นตัวกำหนดคุณภาพ โดยหากมีการใช้เทคโนโลยีการผลิตเดียวกัน จำนวนพิกเซลเท่ากัน ภายในกล้องใช้ Processor และ Software ตัวเดียวกัน กล้องที่มีขนาดของเซ็นเซอร์ใหญ่กว่ามีแนวโน้มได้ภาพที่คุณภาพดีกว่ากล้องที่มีเซ็นเซอร์ขนาดเล็ก [11]



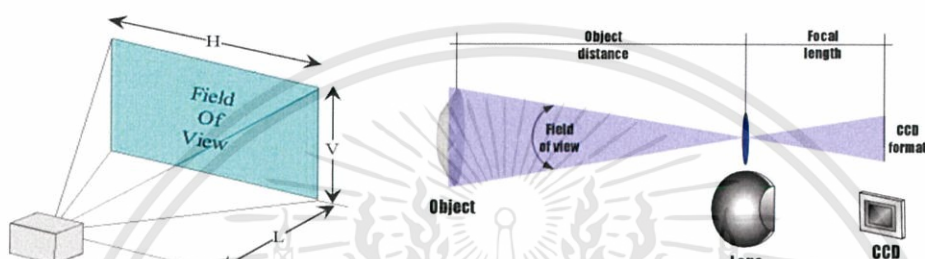
รูปที่ 2.17 ขนาดต่างๆ ของเซ็นเซอร์

จากรูปที่ 2.17 แสดงถึงขนาดของเซ็นเซอร์รับภาพขนาดต่างๆ เปรียบเทียบกับเซ็นเซอร์รับภาพของกล้องฟิล์ม ขนาด 35 มิลลิเมตร โดยขนาดของเซ็นเซอร์มีผลต่อมุมรับภาพที่สามารถถ่าย

ได้ในกรณีที่ใช้เลนส์ทางยาวโฟกัสเดียวกันถ่าย ดังนั้นภาพที่ถ่ายด้วยกล้องที่มีเซ็นเซอร์ขนาดใหญ่สามารถเก็บภาพมุมกว้างได้กว้างภาพที่ถ่ายด้วยกล้องที่มีเซ็นเซอร์ขนาดเล็กลงมา

2.5 Field of View (FOV)

คือขนาดความกว้างคูณความยาวของภาพที่กล้องจับภาพได้ ในระยะติดตั้งหนึ่งโดยขนาดการมองเห็นนี้กว้างหรือแคบขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ขนาดของภาพ ระยะการติดตั้ง ขนาดของเลนส์ที่เลือกใช้ ดังรูปที่ 2.18 แสดงให้เห็นถึงระยะการทำงานของเซ็นเซอร์กล้อง [9]



รูปที่ 2.18 ระยะการทำงานของเซ็นเซอร์

2.6 Depth Of Field (DOF)

คือระดับความลึก-ตื้นของภาพที่มองเห็นจากกล้องในระยะการติดตั้งหนึ่งโดยระดับการมองลึก-ตื้น ขึ้นอยู่กับชนิดของเลนส์ที่ใช้และการเปิดปิดรูรับแสงของเลนส์เป็นหลัก ดังรูปที่ 2.19 แสดงการเปิดรูรับแสงที่ส่งผลต่อระดับความชัดลึก-ตื้นของภาพ โดยการเปิดรูรับแสงกว้างทำให้ได้ภาพชัดตื้นคือมีความชัดเฉพาะจุดที่โฟกัส ในทางกลับกันเมื่อเปิดรูรับแสงแคบทำให้ภาพชัดลึก คือได้ภาพที่ชัดทั้งภาพ [9]



รูปที่ 2.19 การเปิดรูรับแสงที่มีผลต่อระดับความชัดภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 สัญญาณรบกวน (Noise)

สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในภาพ ทำให้เห็นความไม่สม่ำเสมอของความสว่างและสี ซึ่งเกิดจากการถ่ายภาพด้วยความไวแสงสูงๆ การใช้ระยะเวลาในการถ่ายภาพนานๆ หรืออุณหภูมิและขนาดของเซ็นเซอร์รับภาพอีกด้วย โดยที่กล่าวมานั้น ก็มักเป็นปัจจัยที่ก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนได้ทั้งสิ้น [11]

2.7.1 ประเภทของสัญญาณรบกวน

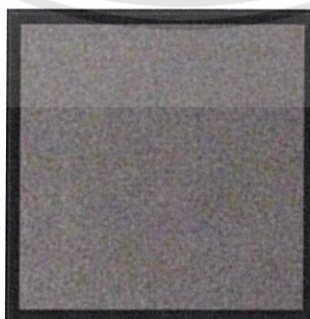
สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในภาพที่ถ่ายด้วยอุปกรณ์ถ่ายภาพแบบดิจิทัลนั้นมี 3 ประเภทโดยมีสาเหตุการเกิดที่แตกต่างกัน ดังนี้

1. Random Noise คือ สัญญาณรบกวนที่ไม่มีรูปแบบเฉพาะ เป็นรูปแบบของสัญญาณที่เกิดขึ้นได้ในทุกช่วงที่ถ่ายภาพ และเกิดขึ้นมากขึ้นเมื่อทำการปรับความไวแสงสูง รูปแบบการเกิดสัญญาณรบกวนประเภทนี้ เปลี่ยนไปกับภาพที่ทำการบันทึก แม้ว่าค่าต่างๆที่ใช้ในการถ่ายไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังรูปที่ 2.20



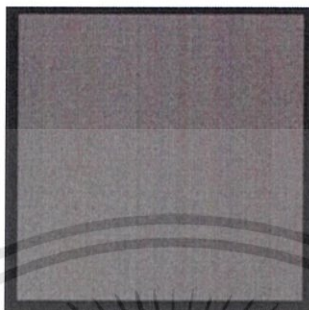
รูปที่ 2.20 ตัวอย่างสัญญาณรบกวนชนิด Random Noise

2. Fixed Pattern Noise คือ สัญญาณรบกวนเฉพาะรูปแบบของสัญญาณที่รวมไปถึง Hot pixel ด้วยและโดยทั่วไปแล้วสัญญาณรบกวนในรูปแบบนี้ปรากฏในภาพที่ใช้เวลาในการบันทึกภาพ และถ้ามีอุณหภูมิสูงขึ้นก็ปรากฏสัญญาณรบกวนเพิ่มมากขึ้นด้วย ความแตกต่างจากสัญญาณรบกวนรูปแบบนี้มีรูปแบบเฉพาะในการเกิดและเกิดในตำแหน่งเดิมที่ภาพที่อยู่ภายใต้เงื่อนไขการถ่ายเดียวกัน ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 ตัวอย่างสัญญาณรบกวนชนิด Fixed Pattern Noise

3. Banding Noise คือ สัญญาณรบกวนแบบแถบเป็นรูปแบบสัญญาณที่เกิดขึ้นมากในการถ่ายภาพแบบดิจิทัล เนื่องจากการอ่านข้อมูลจากเซ็นเซอร์ภาพ พบสัญญาณรบกวนในรูปแบบแถบอย่างชัดเจนเมื่อใช้ความไวแสงสูง หรือ เมื่อมีการปรับความสว่างเพิ่มในพื้นที่เงามืดของภาพด้วยซอฟต์แวร์



รูปที่ 2.22 ตัวอย่างสัญญาณรบกวนชนิด Banding Noise

2.7.2 ลักษณะของสัญญาณรบกวน

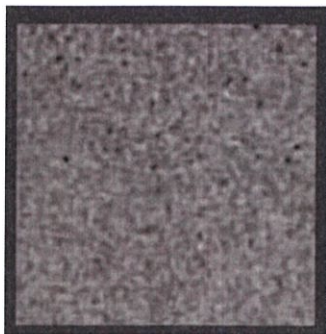
ลักษณะของการเกิดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในภาพมี 2 ลักษณะ คือ

1. Chrominance Noise คือ สัญญาณรบกวนที่มีเม็ดสีแตกต่างไปจากภาพจริง ซึ่งสามารถพบสัญญาณรบกวนในลักษณะนี้ เมื่อใช้เวลานานในการบันทึกภาพ ดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 ตัวอย่างสัญญาณรบกวนลักษณะ Chrominance Noise

2. Luminance Noise คือสัญญาณรบกวนที่มีความสว่างของพิกเซลไม่เท่ากัน โดยมีลักษณะเป็นสีเทาหรือขาวคล้ายเกรนของฟิล์ม ซึ่งสามารถพบสัญญาณรบกวนในลักษณะนี้ เมื่อใช้ความไวแสงสูง ดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 ตัวอย่างสัญญาณรบกวนลักษณะ Luminance Noise

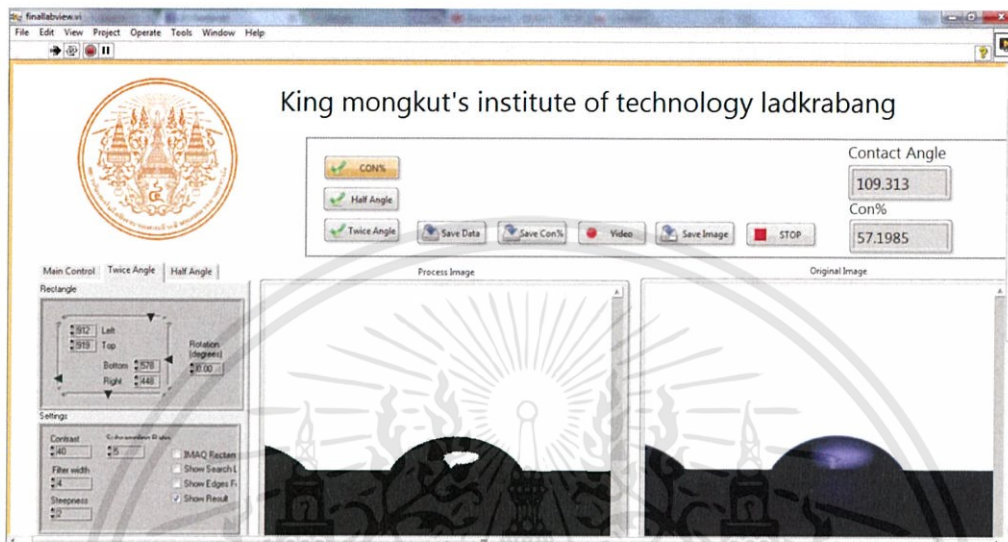
2.8 โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย

2.8.1 แลบลิว (LabVIEW)

เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สร้างเพื่อนำมาใช้ในด้านการวัดและเครื่องมือที่ใช้สำหรับงานทางวิศวกรรม ซึ่งหมายความว่า เป็นโปรแกรมที่สร้างเครื่องมือวัดเสมือนจริงในห้องปฏิบัติการทางวิศวกรรม ดังนั้นจุดประสงค์หลักการทำงานของโปรแกรมนี้ คือการจัดการในด้านการวัดและเครื่องมือวัดอย่างมีประสิทธิภาพ และในตัวโปรแกรมประกอบไปด้วยฟังก์ชันที่ช่วยในการวัดที่แม่นยำ โปรแกรมนี้มีประโยชน์สูงสุดเมื่อใช้ร่วมกับเครื่องมือวัดต่างๆ

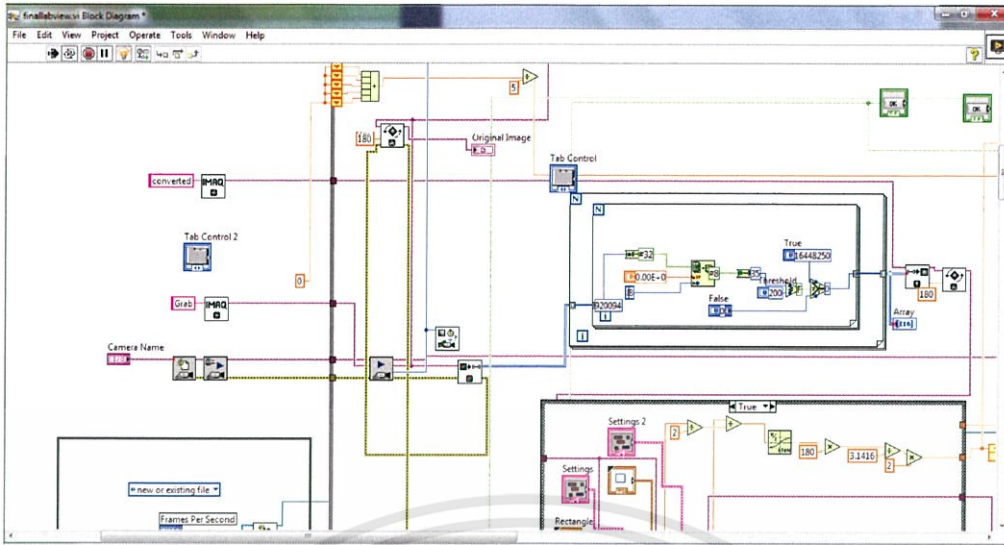
สิ่งที่แลบลิวแตกต่างจากโปรแกรมอื่นอย่างเห็นได้ชัดที่สุด คือแลบลิวนี้เป็นโปรแกรมประเภท GUI (Graphic User Interface) โดยสมบูรณ์ นั่นหมายถึงไม่จำเป็นต้องมีการเขียนโค้ดแบบ command line หรือคำสั่งใดๆ ทั้งสิ้นและที่สำคัญลักษณะภาษาที่ใช้ในโปรแกรมนี้เรียกว่าเป็นภาษารูปภาพหรือภาษากราฟิก (Graphic Language) เป็นการเขียนโดยใช้ลักษณะการไหลของข้อมูล (Data Flow) ซึ่งเมื่อเริ่มส่งข้อมูลเข้าสู่โปรแกรมต้องมีการกำหนดทิศทางการไหลของข้อมูลว่าต้องการให้ไหลไปที่ส่วนใด ผ่านการประเมินผลและคำนวณในส่วนใดบ้าง และมีการแสดงผลเป็นอย่างไร ซึ่งแทนในส่วนของการเขียนโปรแกรมเป็นบรรทัดแบบภาษาซี เช่น C Basic หรือ Fortran ด้วยรูปภาพหรือสัญลักษณ์ทั้งหมด ซึ่งแลบลิวนี้มีความสะดวกสบายและสามารถลดเวลาในการเขียนลงไปได้มาก โดยเฉพาะในงานเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์อื่นๆ เพื่อใช้ในการวัดและควบคุม โปรแกรมที่เขียนขึ้นมาแลบลิวเรียกว่า วีไอ (Visual Instrument) เพราะลักษณะที่ปรากฏทางจอภาพเมื่อผู้ใช้ใช้งานเหมือนเครื่องมือวัด ในขณะที่เดียวกันหลังฉากของอุปกรณ์เสมือนจริงเหล่านั้นเป็นการทำงานของฟังก์ชันและโปรแกรมหลักเหมือนกับภาษาทั่วไป สำหรับวีไอหนึ่งๆ ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 3 ส่วน [8] คือ

1. ฟอรัมพาแนล (Front Panel) เป็นส่วนที่สื่อความกันระหว่างผู้ใช้งานกับโปรแกรม หรือที่นิยมเรียกว่า User interface โดยทั่วไปมีลักษณะเหมือนกับหน้าปัดของเครื่องมือวัด ประกอบไปด้วย สวิตช์ปิดเปิด ปุ่มบิด ปุ่มกด จอแสดงผลหรือแม้กระทั่งการกำหนดจำนวนในพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.15

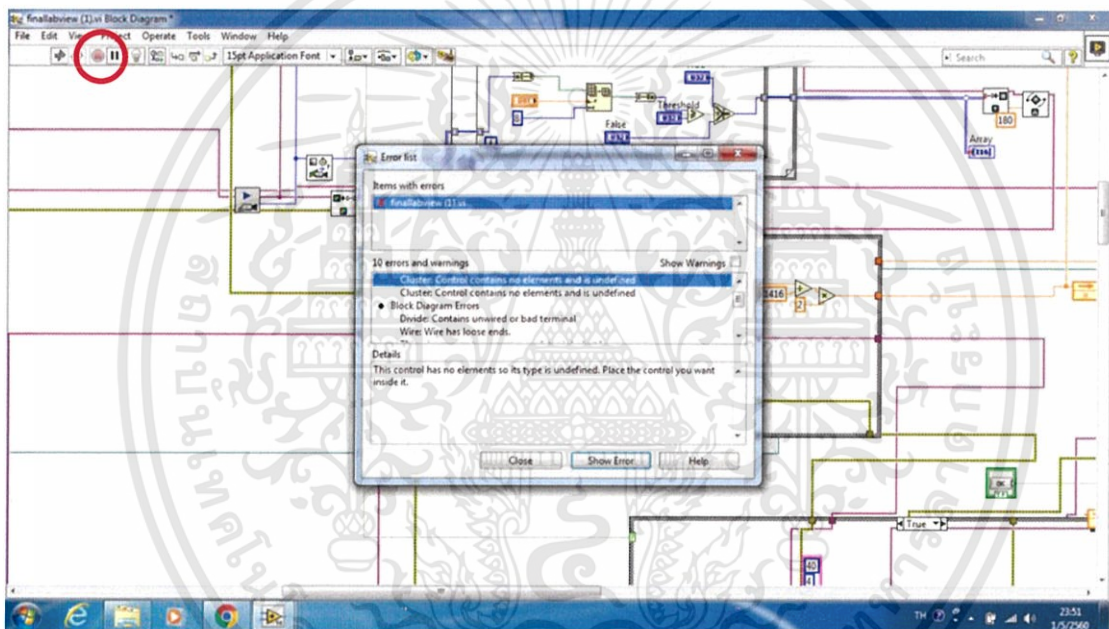


รูปที่ 2.25 หน้าจอฟอรัมพาแนล

2. บล็อกไดอะแกรม (Block Diagram) สามารถเปรียบเทียบจากซอร์สโค้ด (Source Code) หรือโปรแกรมของแลบวิว ซึ่งปรากฏว่าอยู่ในรูปของภาษาจี ซึ่งแผนภาพบล็อกไดอะแกรมนี้ ถือเป็นโปรแกรมปฏิบัติการ คือสามารถทำงานได้ทันที และข้อดีอีกประการ คือแลบวิวมีการตรวจสอบความผิดพลาดของโปรแกรมตลอดเวลา ทำให้โปรแกรมทำงานได้ก็ต่อเมื่อไม่มีข้อผิดพลาดทางไวยากรณ์ของโปรแกรมเท่านั้น โดยผู้ใช้งานสามารถดูรายละเอียดของความผิดพลาดได้ ทำให้การเขียนโปรแกรมนั้นง่ายขึ้นมาก ส่วนประกอบของบล็อกไดอะแกรมนี้ ประกอบไปด้วยฟังก์ชัน ค่าคงที่ โปรแกรมควบคุมการทำงานหรือโครงสร้าง จากนั้นในแต่ละส่วนเหล่านี้ ปรากฏในรูปของบล็อกได้รับการเชื่อมต่อสาย (wire) สำหรับบล็อกที่เหมาะสมเข้าด้วยกัน เพื่อกำหนดลักษณะการไหลของข้อมูลระหว่างบล็อกเหล่านั้น ทำให้ข้อมูลประมวลผลตามต้องการและแสดงต่อผู้ใช้ต่อไป



ก)



ข)

รูปที่ 2.26 ก) หน้าจอบล็อกไดอะแกรม

ข) หน้าจอบล็อกไดอะแกรมเมื่อมีความผิดพลาดทางไวยากรณ์

3. ไอคอนคอนเนคเตอร์ (Icon connector)

เปรียบเสมือนโปรแกรมย่อย (Subroutine) ในโปรแกรมปกติทั่วไปไอคอน หมายถึง บล็อกไดอะแกรมตัวหนึ่งที่มีการส่งข้อมูลเข้าและออกผ่านทางคอนเนคเตอร์ซึ่งในแลบวิวเรียกว่า โปรแกรมย่อยนี้ว่า ซับวีไอ (Sub VI) ข้อดีของโปรแกรมด้วยภาษา จี คือสามารถสร้างวีไอทีละส่วนขึ้นมาเพื่อให้ทำงานด้วยตัวเองอย่างอิสระ จากนั้นในภายหลังหากต้องการก็สามารถเขียนโปรแกรมตัวอื่นเพื่อนเรียกใช้งาน วีไอ ที่เคยสร้างก่อนหน้านี้ได้ ซึ่งทำให้ วีไอ ที่เขียนก่อนหน้ากลายเป็นซับวีไอ ในการเขียนแบบนี้เรียกว่า เขียนเป็นโมดูล [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.2 SolidWorks

เป็นซอฟต์แวร์เพื่อให้ผู้ออกแบบใช้เป็นเครื่องมือในการออกแบบทางวิศวกรรม เพื่อสร้างตัวอย่างผลิตภัณฑ์จำลองในคอมพิวเตอร์ก่อนที่สร้างผลิตภัณฑ์ต้นแบบจริง โดยตัวซอฟต์แวร์จัดอยู่ในตระกูล CAD (Computer Aided Design) ซึ่งสามารถสร้างชิ้นงานจำลองในรูปแบบ 3D Solid Models เป็นงานแยกชิ้น(Part) และแบบงานประกอบ(Assembly) เพื่อนำไปสร้างเป็น 2D Standard Engineering หรือ CADD : Computer Aided Design and Drafting [12]

SolidWorks เป็นโปรแกรมที่มีความยืดหยุ่นในการทำงานสูง คือ สามารถที่ทำงานได้มากมายหลายรูปแบบไม่ว่าชิ้นงานที่ขึ้นเป็นชิ้นงานที่มีความหนาหรือการออกแบบพื้นผิว เมื่อสร้างชิ้นงานเสร็จเรียบร้อยก็สามารถที่ประกอบชิ้นงานได้ในโหมดของชุดคำสั่งการประกอบชิ้นงาน (Assembly) รวมทั้งผู้ต้องการภาพไอโซเมตริกของชิ้นงานก็สามารถที่เรียกใช้งานชุดคำสั่งได้เช่นเดียวกัน โดยประสิทธิภาพของโปรแกรมเป็นการเจาะลึกให้ผู้ออกแบบสามารถสร้างชิ้นงานจำลองทางด้าน Mechanical Engineering Design ได้อย่างสมบูรณ์แบบ นอกจากนี้ยังสามารถเอาไปใช้ในการคำนวณทางวิศวกรรมและการตรวจสอบความผิดพลาดของแบบจำลองสามมิติ เพื่อลดต้นทุนการผลิต และลดระยะเวลาการทำงานในการออกแบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานให้กับบริษัทและองค์กร ลักษณะการทำงานของโปรแกรม SolidWorks นั้นแบ่งหมวดการทำงานหลักออกเป็น 3 หมวด คือ

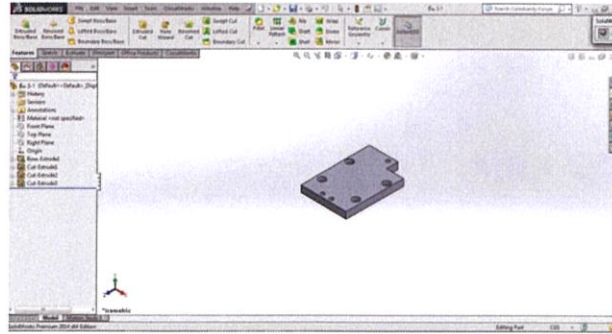
1. Part Mode

เป็นโหมดการทำงานเริ่มต้นก่อนที่ก้าวสู่การทำงานในโหมดประกอบชิ้นส่วนงานและโหมดการเขียนภาพไอโซเมตริกของชิ้นงาน ซึ่งมีการแบ่งการแบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วน คือการใช้งานแบบ 2D Sketch เพื่อนำไปสู่การสร้างเป็น 3D Feature ดังรูปที่ 2.26 และมีเงื่อนไขเป็น Feature-Based Modeling และ Parametric โดยมีการอ้างอิงจาก Solid Mode

- Feature-Based Modeling คือ การออกแบบซอฟต์แวร์ให้รู้ถึงคุณสมบัติต่างๆของ Solid Model ที่สร้างขึ้นมา เพื่อให้ได้ผู้ใช้งานสามารถเปลี่ยนแปลงและแก้ไขแบบจำลอง ในลำดับการทำงานแต่ละขั้นได้ง่ายและรวดเร็ว

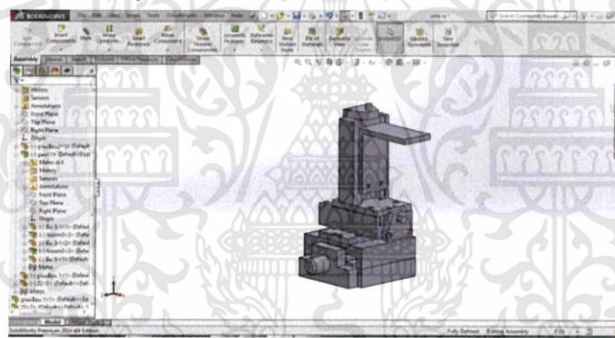
- Parametric Model คือ การออกแบบซอฟต์แวร์ซึ่งใช้เงื่อนไขทางคณิตศาสตร์ในการแก้ไขขนาดรูปร่างทางเรขาคณิตของแบบจำลองที่สร้างขึ้นมาได้

- Solid Model คือ แบบจำลองบนคอมพิวเตอร์ที่สามารถแสดงค่าต่างๆ เช่น ความหนาแน่น ประเภทของวัสดุ น้ำหนัก มวล เป็นต้น และยังสามารถมองเป็นแบบจำลองสามมิติได้ทุกมุมมอง



รูปที่ 2.27 การทำงาน Part Mode

2. Assembly Mode เป็นโหมดการทำงานเพื่อนำ Part Model เข้าไปประกอบเป็นเครื่องจักรกลหรือกลไกต่างๆและมีเงื่อนไขเป็น Feature Base และ Parametric เช่นเดียวกับ Part Model และโหมดประกอบชิ้นงานมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน เมื่อทำการแก้ไขในโหมดใดหรือมีการประกอบที่ซ้อนหรือทับกันหมดมีการเปลี่ยนแปลงตามการแก้ไขไปด้วย การทำงานในการประกอบชิ้นงานนั้นสามารถช่วยให้นักออกแบบหรือวิศวกรสามารถตรวจสอบความผิดพลาดในการสร้าง Part โดยการใช้คำสั่งต่างๆ ได้ ดังรูปที่ 2.27



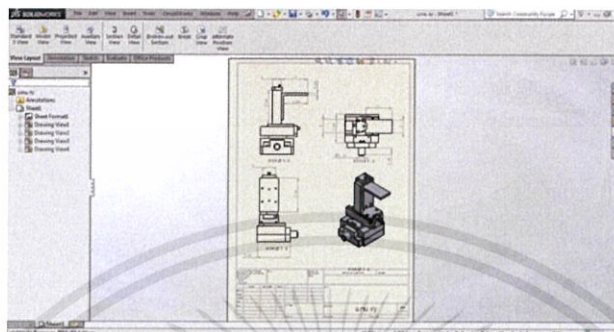
รูปที่ 2.28 หน้าจอการทำงานการประกอบชิ้นงานต่างๆ เข้าด้วยกัน

3. Drawing Mode เป็นการทำงานเมื่อสร้าง 2D Standard Engineering โดยในหมวดนี้เป็นการสร้างมุมมองและกำหนดรายละเอียดตามระบบมาตรฐานต่างๆ ดังรูปที่ 2.28 โดยแบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วน คือ

- Generative Drafting ซึ่งเป็นการสร้าง 2D Sketch และ Interaction Drafting เป็นการนำแบบจำลองสามมิติที่สร้างขึ้นจากโหมดส่วนของชิ้นงานและโหมดประกอบชิ้นงานมาวาง Drawing เพื่อสร้างเป็น Parametric และ Relation แต่ไม่สามารถใช้คำสั่งใน Drawing Commands ได้เพราะคำสั่งต่างๆต้องอ้างอิงกับแบบจำลองสามมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Interaction Drafting คือการนำเอาแบบจำลองสามมิติ จากโหมดส่วนของชิ้นงาน และโหมดประกอบชิ้นงาน มาวาง Drawing เพื่อสร้างเป็น 2D Drafting การทำงานในโหมดนี้สามารถใช้คำสั่งจาก Annotation Command และ Drawing Command เพื่อสร้างมุมมองและกำหนดรายละเอียดได้โดยอัตโนมัติ



รูปที่ 2.29 หน้าจอการทำงานการสร้างรูปภาพแบบร่าง

2.8.3 Arduino

Arduino คือ Open-source Platform สำหรับการสร้างต้นแบบทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยมีจุดมุ่งหมายให้ Arduino Platform เป็นรูปแบบที่ง่ายต่อการใช้งาน ซึ่งประกอบไปด้วย [13]

1. ส่วนที่เป็น Hardware

คือบอร์ดอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก ที่มีไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU) เป็นชิ้นส่วนหลัก ถูกนำมาประกอบร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ เพื่อให้ง่ายต่อการใช้งานหรือที่เรียกกันว่าบอร์ด Arduino ดังรูปที่ 2.30 โดยบอร์ด Arduino เองก็มีหลายรุ่นให้เลือกใช้ ในแต่ละรุ่นนั้นมีคุณสมบัติที่ต่างกัน เช่น จำนวนของขารับส่งสัญญาณอินพุต เอาท์พุต แรงดันไฟที่ใช้ ประสิทธิภาพของ MCU เป็นต้น




รูปที่ 2.30 บอร์ด Arduino รุ่น UNO 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.ส่วนที่เป็น Software

ใช้ภาษา C /C++ สำหรับเขียนข้อมูลลงใน IDE เพื่อคอมไพล์ (Compile) และอัปโหลดโปรแกรมที่เขียนลงบอร์ด



```

finalcontrol | Arduino 1.6.12
File Edit Sketch Tools Help
finalcontrol$
1 #include <Wire.h>
2 #include <LCD.h>
3 #include <LiquidCrystal_I2C.h>
4 #define I2C_ADDR 0x3f
5
6 #define BACKLIGHT_PIN 3
7 LiquidCrystal_I2C lcd(I2C_ADDR,2,1,0,4,5,6,7);
8 int moterCW = 8;
9 int moterCCW = 9;
10 int info = 0;
11 int i,j,D,U,s,k;
12 boolean OPT01 = 1;
13 boolean OPT02 = 1;
14 void setup() {
15   attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(2), OPT01_ISR, FALLING);
16   attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(9), OPT02_ISR, FALLING);
17   lcd.begin (16,2);
18   lcd.setBacklightPin(BACKLIGHT_PIN, POSITIVE);
19   lcd.setBacklight(HIGH);
20   lcd.home ();
21
22   pinMode(moterCW, OUTPUT); digitalWrite(moterCW, HIGH);
23   pinMode(moterCCW, OUTPUT); digitalWrite(moterCCW, HIGH);
24   Serial.begin(9600);
25   lcd.setCursor(0,0);
26   lcd.print("READY");
27   noInterrupts();
28
29   }
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100
101
102
103
104
105
106
107
108
109
110
111
112
113
114
115
116
117
118
119
120
121
122
123
124
125
126
127
128
129
130
131
132
133
134
135
136
137
138
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149
150
151
152
153
154
155
156
157
158
159
160
161
162
163
164
165
166
167
168
169
170
171
172
173
174
175
176
177
178
179
180
181
182
183
184
185
186
187
188
189
190
191
192
193
194
195
196
197
198
199
200
201
202
203
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
221
222
223
224
225
226
227
228
229
230
231
232
233
234
235
236
237
238
239
240
241
242
243
244
245
246
247
248
249
250
251
252
253
254
255
256
257
258
259
260
261
262
263
264
265
266
267
268
269
270
271
272
273
274
275
276
277
278
279
280
281
282
283
284
285
286
287
288
289
290
291
292
293
294
295
296
297
298
299
300
301
302
303
304
305
306
307
308
309
310
311
312
313
314
315
316
317
318
319
320
321
322
323
324
325
326
327
328
329
330
331
332
333
334
335
336
337
338
339
340
341
342
343
344
345
346
347
348
349
350
351
352
353
354
355
356
357
358
359
360
361
362
363
364
365
366
367
368
369
370
371
372
373
374
375
376
377
378
379
380
381
382
383
384
385
386
387
388
389
390
391
392
393
394
395
396
397
398
399
400
401
402
403
404
405
406
407
408
409
410
411
412
413
414
415
416
417
418
419
420
421
422
423
424
425
426
427
428
429
430
431
432
433
434
435
436
437
438
439
440
441
442
443
444
445
446
447
448
449
450
451
452
453
454
455
456
457
458
459
460
461
462
463
464
465
466
467
468
469
470
471
472
473
474
475
476
477
478
479
480
481
482
483
484
485
486
487
488
489
490
491
492
493
494
495
496
497
498
499
500
501
502
503
504
505
506
507
508
509
510
511
512
513
514
515
516
517
518
519
520
521
522
523
524
525
526
527
528
529
530
531
532
533
534
535
536
537
538
539
540
541
542
543
544
545
546
547
548
549
550
551
552
553
554
555
556
557
558
559
560
561
562
563
564
565
566
567
568
569
570
571
572
573
574
575
576
577
578
579
580
581
582
583
584
585
586
587
588
589
590
591
592
593
594
595
596
597
598
599
600
601
602
603
604
605
606
607
608
609
610
611
612
613
614
615
616
617
618
619
620
621
622
623
624
625
626
627
628
629
630
631
632
633
634
635
636
637
638
639
640
641
642
643
644
645
646
647
648
649
650
651
652
653
654
655
656
657
658
659
660
661
662
663
664
665
666
667
668
669
670
671
672
673
674
675
676
677
678
679
680
681
682
683
684
685
686
687
688
689
690
691
692
693
694
695
696
697
698
699
700
701
702
703
704
705
706
707
708
709
710
711
712
713
714
715
716
717
718
719
720
721
722
723
724
725
726
727
728
729
730
731
732
733
734
735
736
737
738
739
740
741
742
743
744
745
746
747
748
749
750
751
752
753
754
755
756
757
758
759
760
761
762
763
764
765
766
767
768
769
770
771
772
773
774
775
776
777
778
779
780
781
782
783
784
785
786
787
788
789
790
791
792
793
794
795
796
797
798
799
800
801
802
803
804
805
806
807
808
809
810
811
812
813
814
815
816
817
818
819
820
821
822
823
824
825
826
827
828
829
830
831
832
833
834
835
836
837
838
839
840
841
842
843
844
845
846
847
848
849
850
851
852
853
854
855
856
857
858
859
860
861
862
863
864
865
866
867
868
869
870
871
872
873
874
875
876
877
878
879
880
881
882
883
884
885
886
887
888
889
890
891
892
893
894
895
896
897
898
899
900
901
902
903
904
905
906
907
908
909
910
911
912
913
914
915
916
917
918
919
920
921
922
923
924
925
926
927
928
929
930
931
932
933
934
935
936
937
938
939
940
941
942
943
944
945
946
947
948
949
950
951
952
953
954
955
956
957
958
959
960
961
962
963
964
965
966
967
968
969
970
971
972
973
974
975
976
977
978
979
980
981
982
983
984
985
986
987
988
989
990
991
992
993
994
995
996
997
998
999
1000
1001
1002
1003
1004
1005
1006
1007
1008
1009
1010
1011
1012
1013
1014
1015
1016
1017
1018
1019
1020
1021
1022
1023
1024
1025
1026
1027
1028
1029
1030
1031
1032
1033
1034
1035
1036
1037
1038
1039
1040
1041
1042
1043
1044
1045
1046
1047
1048
1049
1050
1051
1052
1053
1054
1055
1056
1057
1058
1059
1060
1061
1062
1063
1064
1065
1066
1067
1068
1069
1070
1071
1072
1073
1074
1075
1076
1077
1078
1079
1080
1081
1082
1083
1084
1085
1086
1087
1088
1089
1090
1091
1092
1093
1094
1095
1096
1097
1098
1099
1100
1101
1102
1103
1104
1105
1106
1107
1108
1109
1110
1111
1112
1113
1114
1115
1116
1117
1118
1119
1120
1121
1122
1123
1124
1125
1126
1127
1128
1129
1130
1131
1132
1133
1134
1135
1136
1137
1138
1139
1140
1141
1142
1143
1144
1145
1146
1147
1148
1149
1150
1151
1152
1153
1154
1155
1156
1157
1158
1159
1160
1161
1162
1163
1164
1165
1166
1167
1168
1169
1170
1171
1172
1173
1174
1175
1176
1177
1178
1179
1180
1181
1182
1183
1184
1185
1186
1187
1188
1189
1190
1191
1192
1193
1194
1195
1196
1197
1198
1199
1200
1201
1202
1203
1204
1205
1206
1207
1208
1209
1210
1211
1212
1213
1214
1215
1216
1217
1218
1219
1220
1221
1222
1223
1224
1225
1226
1227
1228
1229
1230
1231
1232
1233
1234
1235
1236
1237
1238
1239
1240
1241
1242
1243
1244
1245
1246
1247
1248
1249
1250
1251
1252
1253
1254
1255
1256
1257
1258
1259
1260
1261
1262
1263
1264
1265
1266
1267
1268
1269
1270
1271
1272
1273
1274
1275
1276
1277
1278
1279
1280
1281
1282
1283
1284
1285
1286
1287
1288
1289
1290
1291
1292
1293
1294
1295
1296
1297
1298
1299
1300
1301
1302
1303
1304
1305
1306
1307
1308
1309
1310
1311
1312
1313
1314
1315
1316
1317
1318
1319
1320
1321
1322
1323
1324
1325
1326
1327
1328
1329
1330
1331
1332
1333
1334
1335
1336
1337
1338
1339
1340
1341
1342
1343
1344
1345
1346
1347
1348
1349
1350
1351
1352
1353
1354
1355
1356
1357
1358
1359
1360
1361
1362
1363
1364
1365
1366
1367
1368
1369
1370
1371
1372
1373
1374
1375
1376
1377
1378
1379
1380
1381
1382
1383
1384
1385
1386
1387
1388
1389
1390
1391
1392
1393
1394
1395
1396
1397
1398
1399
1400
1401
1402
1403
1404
1405
1406
1407
1408
1409
1410
1411
1412
1413
1414
1415
1416
1417
1418
1419
1420
1421
1422
1423
1424
1425
1426
1427
1428
1429
1430
1431
1432
1433
1434
1435
1436
1437
1438
1439
1440
1441
1442
1443
1444
1445
1446
1447
1448
1449
1450
1451
1452
1453
1454
1455
1456
1457
1458
1459
1460
1461
1462
1463
1464
1465
1466
1467
1468
1469
1470
1471
1472
1473
1474
1475
1476
1477
1478
1479
1480
1481
1482
1483
1484
1485
1486
1487
1488
1489
1490
1491
1492
1493
1494
1495
1496
1497
1498
1499
1500
1501
1502
1503
1504
1505
1506
1507
1508
1509
1510
1511
1512
1513
1514
1515
1516
1517
1518
1519
1520
1521
1522
1523
1524
1525
1526
1527
1528
1529
1530
1531
1532
1533
1534
1535
1536
1537
1538
1539
1540
1541
1542
1543
1544
1545
1546
1547
1548
1549
1550
1551
1552
1553
1554
1555
1556
1557
1558
1559
1560
1561
1562
1563
1564
1565
1566
1567
1568
1569
1570
1571
1572
1573
1574
1575
1576
1577
1578
1579
1580
1581
1582
1583
1584
1585
1586
1587
1588
1589
1590
1591
1592
1593
1594
1595
1596
1597
1598
1599
1600
1601
1602
1603
1604
1605
1606
1607
1608
1609
1610
1611
1612
1613
1614
1615
1616
1617
1618
1619
1620
1621
1622
1623
1624
1625
1626
1627
1628
1629
1630
1631
1632
1633
1634
1635
1636
1637
1638
1639
1640
1641
1642
1643
1644
1645
1646
1647
1648
1649
1650
1651
1652
1653
1654
1655
1656
1657
1658
1659
1660
1661
1662
1663
1664
1665
1666
1667
1668
1669
1670
1671
1672
1673
1674
1675
1676
1677
1678
1679
1680
1681
1682
1683
1684
1685
1686
1687
1688
1689
1690
1691
1692
1693
1694
1695
1696
1697
1698
1699
1700
1701
1702
1703
1704
1705
1706
1707
1708
1709
1710
1711
1712
1713
1714
1715
1716
1717
1718
1719
1720
1721
1722
1723
1724
1725
1726
1727
1728
1729
1730
1731
1732
1733
1734
1735
1736
1737
1738
1739
1740
1741
1742
1743
1744
1745
1746
1747
1748
1749
1750
1751
1752
1753
1754
1755
1756
1757
1758
1759
1760
1761
1762
1763
1764
1765
1766
1767
1768
1769
1770
1771
1772
1773
1774
1775
1776
1777
1778
1779
1780
1781
1782
1783
1784
1785
1786
1787
1788
1789
1790
1791
1792
1793
1794
1795
1796
1797
1798
1799
1800
1801
1802
1803
1804
1805
1806
1807
1808
1809
1810
1811
1812
1813
1814
1815
1816
1817
1818
1819
1820
1821
1822
1823
1824
1825
1826
1827
1828
1829
1830
1831
1832
1833
1834
1835
1836
1837
1838
1839
1840
1841
1842
1843
1844
1845
1846
1847
1848
1849
1850
1851
1852
1853
1854
1855
1856
1857
1858
1859
1860
1861
1862
1863
1864
1865
1866
1867
1868
1869
1870
1871
1872
1873
1874
1875
1876
1877
1878
1879
1880
1881
1882
1883
1884
1885
1886
1887
1888
1889
1890
1891
1892
1893
1894
1895
1896
1897
1898
1899
1900
1901
1902
1903
1904
1905
1906
1907
1908
1909
1910
1911
1912
1913
1914
1915
1916
1917
1918
1919
1920
1921
1922
1923
1924
1925
1926
1927
1928
1929
1930
1931
1932
1933
1934
1935
1936
1937
1938
1939
1940
1941
1942
1943
1944
1945
1946
1947
1948
1949
1950
1951
1952
1953
1954
1955
1956
1957
1958
1959
1960
1961
1962
1963
1964
1965
1966
1967
1968
1969
1970
1971
1972
1973
1974
1975
1976
1977
1978
1979
1980
1981
1982
1983
1984
1985
1986
1987
1988
1989
1990
1991
1992
1993
1994
1995
1996
1997
1998
1999
2000
2001
2002
2003
2004
2005
2006
2007
2008
2009
2010
2011
2012
2013
2014
2015
2016
2017
2018
2019
2020
2021
2022
2023
2024
2025
2026
2027
2028
2029
2030
2031
2032
2033
2034
2035
2036
2037
2038
2039
2040
2041
2042
2043
2044
2045
2046
2047
2048
2049
2050
2051
2052
2053
2054
2055
2056
2057
2058
2059
2060
2061
2062
2063
2064
2065
2066
2067
2068
2069
2070
2071
2072
2073
2074
2075
2076
2077
2078
2079
2080
2081
2082
2083
2084
2085
2086
2087
2088
2089
2090
2091
2092
2093
2094
2095
2096
2097
2098
2099
2100
2101
2102
2103
2104
2105
2106
2107
2108
2109
2110
2111
2112
2113
2114
2115
2116
2117
2118
2119
2120
2121
2122
2123
2124
2125
2126
2127
2128
2129
2130
2131
2132
2133
2134
2135
2136
2137
2138
2139
2140
2141
2142
2143
2144
2145
2146
2147
2148
2149
2150
2151
2152
2153
2154
2155
2156
2157
2158
2159
2160
2161
2162
2163
2164
2165
2166
2167
2168
2169
2170
2171
2172
2173
2174
2175
2176
2177
2178
2179
2180
2181
2182
2183
2184
2185
2186
2187
2188
2189
2190
2191
2192
2193
2194
2195
2196
2197
2198
2199
2200
2201
2202
2203
2204
2205
2206
2207
2208
2209
2210
2211
2212
2213
2214
2215
2216
2217
2218
2219
2220
2221
2222
2223
2224
2225
2226
2227
2228
2229
2230
2231
2232
2233
2234
2235
2236
2237
2238
2239
2240
2241
2242
2243
2244
2245
2246
2247
2248
2249
2250
2251
2252
2253
2254
2255
2256
2257
2258
2259
2260
2261
2262
2263
2264
2265
2266
2267
2268
2269
2270
2271
2272
2273
2274
2275
2276
2277
2278
2279
2280
2281
2282
2283
2284
2285
2286
2287
2288
2289
2290
2291
2292
2293
2294
2295
2296
2297
2298
2299
2300
2301
2302
2303
2304
2305
2306
2307
2308
2309
2310
2311
2312
2313
2314
2315
2316
2317
2318
2319
2320
2321
2322
2323
2324
2325
2326
2327
2328
2329
2330
2331
2332
2333
2334
2335
2336
2337
2338
2339
2340
2341
2342
2343
2344
2345
2346
2347
2348
2349
2350
2351
2352
2353
2354
2355
2356
2357
2358
2359
2360
2361
2362
2363
2364
2365
2366
2367
2368
2369
2370
2371
2372
2373
2374
2375
2376
2377
2378
2379
2380
2381
2382
2383
2384
2385
2386
2387
2388
2389
2390
2391
2392
2393
2394
2395
2396
2397
2398
2399
2400
2401
2402
2403
2404
2405
2406
2407
2408
2409
2410
2411
2412
2413
2414
2415
2416
2417
2418
2419
2420
2421
2422
2423
2424
2425
2426
2427
2428
2429
2430
2431
2432
2433
2434
2435
2436
2437
2438
2439
2440
2441
2442
2443
2444
2445
2446
2447
2448
2449
2450
2451
2452
2453
2454
2455
2456
2457
2458
2459
2460
2461
2462
2463
2464
2465
2466
2467
2468
2469
2470
2471
2472
2473
2474
2475
2476
2477
2478
2479
2480
2481
2482
2483
2484
2485
2486
2487
2488
2489
2490
2491
2492
2493
2494
2495
2496
2497
2498
2499
2500
2501
2502
2503
2504
2505
2506
2507
2508
2509
2510
2511
2512
2513
2514
2515
2516
2517
2518
2519
2520
2521
2522
2523
2524
2525
2526
2527
2528
2529
2530
2531
2532
2533
2534
2535
2536
2537
2538
2539
2540
2541
2542
2543
2544
2545
2546
2547
2548
2549
2550
2551
2552
2553
2554
2555
2556
2557
2558
2559
2560
2561
2562
2563
2564
2565
2566
2567
2568
2569
2570
2571
2572
2573
2574
2575
2576
2577
2578
2579
2580
2581
2582
2583
2584
2585
2586
2587
2588
2589
2590
25
```

ทองเหลือง ประกอบด้วยทองแดงเป็นตัวทำละลายและสังกะสีเป็นตัวถูกละลาย หรือ นาก ประกอบด้วยทองแดงเป็นตัวทำละลายและทองคำเป็นตัวถูกละลาย

2.9.2 ความเข้มข้นของสารละลาย

ความเข้มข้นของสารละลาย คือ ปริมาตรของสารที่เป็นตัวละลายอยู่ในสารละลาย ซึ่งความเข้มข้นของสารละลายนั้นสามารถบอกให้รู้ได้ว่าในสารละลายนั้นๆ มีปริมาณตัวถูกละลายจำนวนเท่าไร และการบอกความเข้มข้นของสารละลายนั้นมีหลายรูปแบบ ดังนี้

1. ร้อยละ (Percent)
2. โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร หรือโมลาริตี (mol/dm^3 or Molarity)
3. โมลต่อกิโลกรัม หรือโมแลริตี (mol/kg molality) หรือเรียกว่า โมแลล
4. ส่วนในล้าน (ppm)
5. เศษส่วนโมล (mole fraction)

ความเข้มข้นของสารละลายรูปแบบร้อยละ (percent) แบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะ คือ ก) ร้อยละโดยมวลต่อมวล (%w/w) หรือที่เรียกสั้นๆกันว่า ร้อยละโดยมวล ซึ่งเป็นหน่วยที่บอกมวลของตัวถูกละลายที่มีอยู่ในสารละลายได้ เช่น สารละลายน้ำเกลือเข้มข้นร้อยละ 10 โดยมวล นั้นหมายความว่าในสารละลายน้ำเกลือ 100 กรัม มีเกลืออยู่ 10 กรัม หรือในสารละลายน้ำเกลือ 100 กิโลกรัม มีเกลืออยู่ 10 กิโลกรัม

$$\text{ร้อยละโดยมวล} = \frac{\text{มวลของตัวถูกละลาย}}{\text{มวลของสารละลาย}} \times 100 \quad (4)$$

ข) ร้อยละโดยปริมาตรต่อปริมาตร (%v/v) หรือที่เรียกสั้นๆว่าร้อยละโดยปริมาตรของตัวถูกละลายที่มีอยู่ในสารละลาย 100 หน่วยปริมาตรเดียวกัน เช่น สารละลายเอทานอลในน้ำเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร นั้นหมายถึงสารละลาย 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร มีเอทานอลละลายอยู่ 20 ลูกบาศก์เซนติเมตร

$$\text{ร้อยละโดยปริมาตร} = \frac{\text{ปริมาตรของตัวถูกละลาย}}{\text{ปริมาตรของสารละลาย}} \times 100 \quad (5)$$

ค) ร้อยละโดยมวลต่อปริมาตร (w/v) คือหน่วยที่บ่งบอกมวลของตัวถูกละลายที่มีอยู่ในสารละลาย 100 หน่วยปริมาตร เช่น สารละลายกลูโคสเข้มข้นร้อยละ 30 โดยมวลต่อปริมาตรนั้นหมายความว่าในสารละลาย 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร มีกลูโคสละลายอยู่ 30 กรัม หรือในสารละลาย 100 ลูกบาศก์เดซิเมตร มีกลูโคสละลายอยู่ 30 กิโลกรัม

$$\text{ร้อยละโดยมวลต่อปริมาตร} = \frac{\text{มวลของตัวถูกละลาย}}{\text{ปริมาตรของสารละลาย}} \times 100 \quad (6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 การประเมินค่าความไม่แน่นอนในการวัดและการสอบเทียบ

ความไม่แน่นอนในการวัดแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ การวัดเพื่อทดสอบและการวัดเพื่อสอบเทียบ เครื่องมือ [16] ความไม่แน่นอนในการวัดเป็นข้อมูลที่ใช้ประกอบการตัดสินใจคุณภาพต่างๆ ว่า ปริมาณที่ทำการวัด มีค่าคุณภาพตามเกณฑ์ที่กำหนดหรือไม่

2.10.1 แหล่งความไม่แน่นอนในการวัด

ความไม่แน่นอนในการวัด มีแหล่งความไม่แน่นอนต่างกันตามปริมาณที่วัดและวิธีการวัด แบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

1. ความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม (Random Error) เป็นแหล่งความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นจากความแตกต่างกันของค่าที่ได้จากการวัดแต่ละครั้ง โดยไม่สามารถอธิบายเหตุผลได้ชัดเจนอีกทั้งยังไม่สามารถคาดการณ์แนวโน้มของความแตกต่างของผลการวัดแต่ละครั้งด้วย

2. ความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ (Systematic Error) เป็นแหล่งความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นจากความไม่สมบูรณ์ในการวัดภายใต้ระบบใดระบบหนึ่งที่ได้รับการจัดการให้คงที่มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ ซึ่งผู้มีประสบการณ์ในการวัดสามารถคาดการณ์ความไม่สมบูรณ์ต่างๆ จากแหล่งของความไม่แน่นอนนี้ได้ โดยอ้างอิงจากเอกสารหรือข้อมูลทางวิชาการ

2.10.2 การประเมินค่า Type A Standard Uncertainty

การประเมินค่า Type A Standard Uncertainty เป็นการประมาณโดยใช้หลักทางสถิติเพื่อพิจารณาถึงความสามารถในการซ้ำหรือในทางกลับกันคือพิจารณาการกระจายของค่าเฉลี่ยที่ได้จากแต่ละชุดของการวัด มีขั้นตอนดังนี้ หากค่าเฉลี่ยเลขคณิต (Arithmetic mean, \bar{x}) คือค่ากลางที่อ่านได้จากการวัด สามารถคำนวณได้จากการรวมค่าที่อ่านได้จากการวัดปริมาณที่เป็นอิสระต่อกันจำนวน n ครั้ง

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (7)$$

โดย \bar{x} คือ ค่าเฉลี่ย

x_i คือ ค่าที่ได้จากการวัดในแต่ละครั้ง

n คือ จำนวนครั้งที่วัด

หากการกระจายข้อมูลโดยประมาณจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, S)

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (8)$$

หาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย : $S(\bar{x})$ สามารถหาได้จาก

$$s(\bar{x}) = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยที่ประมาณได้ Type A Standard Uncertainty : $U_A(x)$

$$u_A(x) = s(\bar{x}) \quad (10)$$

โดยที่ Type A Standard Uncertainty เป็นข้อมูลที่ได้มาจากสภาวะการวัดภายใต้เงื่อนไขของความสามารถในการซ้ำค่าเดิม ค่านี้ซึ่งมักถูกเรียกว่า ความสามารถในการทวนซ้ำ (Repeatability).



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

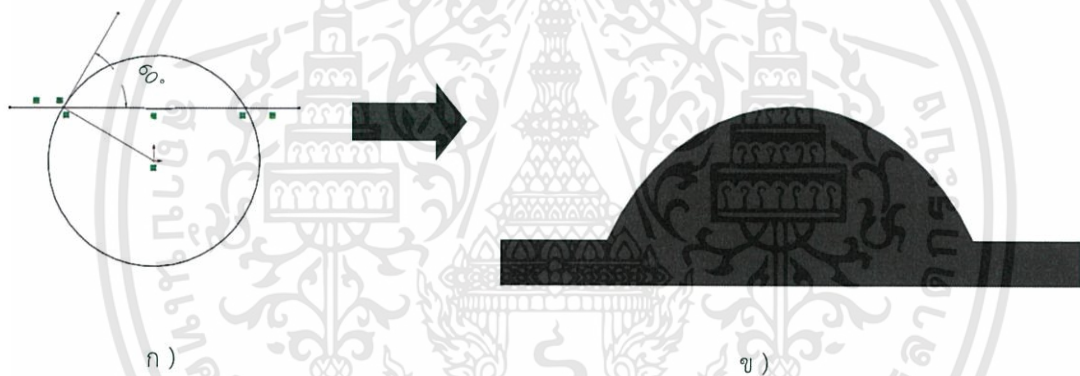
บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในการดำเนินการวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน โดยส่วนที่ 1 เป็นการออกแบบโครงสร้างของเครื่องมือวัดด้วยโปรแกรม SolidWork ส่วนที่ 2 การวางโครงสร้างของเครื่องมือวัดทั้งหมดและในส่วนที่ 3 เป็นการประมวลผลภาพจากการวัดที่ได้โดยใช้โปรแกรม LabVIEW

3.1 การวิเคราะห์ระบบซอฟต์แวร์การวัดมุมสัมผัส

3.1.1 ทำการทดลองสร้างรูปร่างของหยดของเหลวขึ้นมาจากโปรแกรม SolidWork เพื่อทดสอบความถูกต้อง แม่นยำของซอฟต์แวร์ที่สร้างขึ้น เมื่อเทียบกับค่ามุมสัมผัสที่ทราบค่า ดังรูปที่ 3.1 คือมีค่ามุมสัมผัส เท่ากับ 60°



รูปที่ 3.1 ก) ภาพแสดงมุมสัมผัสจากโปรแกรม Solid Work
ข) ภาพแสดงจำลองลักษณะหยดของของเหลว

โดยรูปที่ 3.1 ข) คือ ภาพที่ไปทำการวิเคราะห์ภาพโดยโปรแกรม LabVIEW ทำการทดสอบโดยมีการสร้างภาพขึ้นที่มีการเพิ่มมุมขึ้นทุก 10° และทำการวิเคราะห์ซ้ำมุมละ 30 ครั้ง และมีการทดสอบโดยการใส่สัญญาณรบกวนแบบสุ่ม โดยลักษณะของสัญญาณรบกวนที่ทำการเพิ่มเข้าไป คือสัญญาณรบกวน ชนิดขาวดำ เพื่อหาทดสอบว่าซอฟต์แวร์ยังสามารถหามุมสัมผัสได้อย่างถูกต้องอยู่หรือไม่ ดังรูปที่ 3.2 คือภาพตัวอย่างการใส่สัญญาณรบกวน 20 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 3.2 ก) ภาพหดยดของเหลวที่มีสัญญาณรบกวน ชนิดขาวดำ

3.1.2 ทำการทดลองโดยการนำวิดีโอที่บันทึกได้จากเครื่องมือที่เชื่อถือมาทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมของเครื่องที่สร้างขึ้นมา เพื่อตัดตัวแปรความผิดพลาดเรื่องกล้องออกไป ทำการวิเคราะห์ค่าเปรียบเทียบกับเครื่องมือที่เชื่อถือ ทำการทดลองวิเคราะห์แบบเรียลไทม์บันทึกค่ามุมสัมผัสทุก 1/4 วินาที

3.2 การทดสอบระบบสร้างหดยดของเหลว

3.2.1 ชุดเคลื่อนที่เข้ม โดยใช้ส้เต้ปมอเตอร้เป็นตัวขับเคลื่อนให้ไมโครไซริงค์ (Syringe) ผลิตหดยน้ำให้แ่ระบบ ใช้คำสั่งจากโปรแกรม LabVIEW เป็นตัวสั่งให้ส้เต้ปมอเตอร้เคลื่อนที่ กตไซริงค์เพื่อให้เกิดหดยน้ำขึ้นที่ปลายเข้ม ทำการทดสอบโดยใช้คำสั่งเดิม เพื่อดูว่าในการสั่งแต่ละครั้งได้ระยะในการกตเข้มระยะเดียวกันหรือไม่ โดยทำการทดลองซ้ำ 30 ครั้งในแต่ละคำสั่ง

3.2.2 ชุดเข้มหดยดของเหลว การวิเคราะห์ห้มุมสัมผัสนั้นหดยดของเหลวต้องมีปริมาตรน้อยกว่า 10 μL [6] ซึ่งใช้ไมโครไซริงค์ (Micro Syringe) ในการหดย จึงทำการทดสอบโดยหดยดของเหลวลงบนกระดาษฟอยล์ แล้วนำไปช้บนเครื่องช้ดิจิตอล ยี่ห้อ OHAUS รุ่น PIONEER PA214 ทำการทดลองซ้ำ 30 ครั้งในแต่ละปริมาตรเพื่อทดสอบความสามารถในการทำซ้ำ

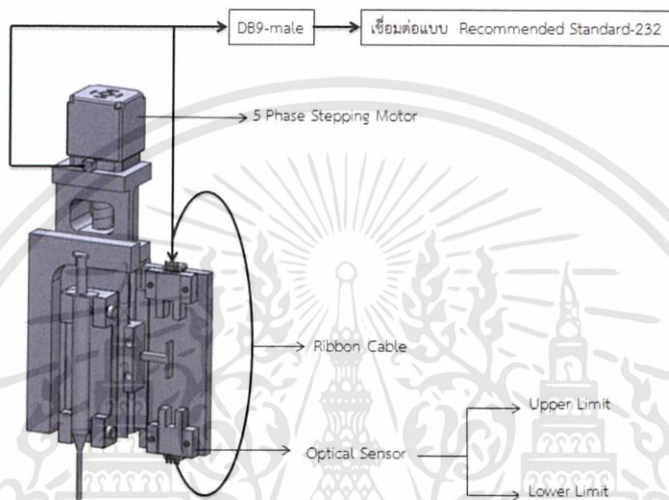
3.3 การทดสอบระบบเทียบกับเครื่องมือที่เชื่อถือได้

เครื่องมือที่เชื่อถือได้ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือเครื่องวัดมุมสัมผัส ยี่ห้อ Data Physics รุ่น OCA 20 โดยซ้ในงานตัวอย่างที่นำมาทดลอง คือแผ่นอะคริลิกความหนา 2 มิลลิเมตร กว้าง 48 มิลลิเมตร ยาว 50 มิลลิเมตร ของเหลวที่ใช้ในการทดสอบหดยดลงไป คือ น้ำปราศจากไอออน (DI) ปริมาตร 6 ไมโครลิตร ทำการวัดซ้ำทั้งหมด 30 ครั้ง ทำการวิเคราะห์บนเงื่อนไขเดียวกันทั้งเครื่องมือที่เชื่อถือได้และเครื่องที่สร้างขึ้นมา

3.4 การออกแบบเครื่องมือ

3.4.1 ระบบหยุดของเหลว

สเต็ปมอเตอร์ คือ มอเตอร์ที่มีการหมุนของแกนหมุนเป็นสเต็ป เมื่อมีสัญญาณพัลส์มากระตุ้น โดยการหมุนของมอเตอร์แต่ละสเต็ปนั้นสามารถบังคับทิศทางและความเร็วของการหมุนได้ ภาพจำลองของระบบหยุดของเหลว ประกอบไปด้วยสเต็ปมอเตอร์ของ SUNYO DENKI รุ่น STEPSYN 03F5305-7041 เป็นตัวกวดปลายไซริงค์ยี่ห้อ NIPRO U-100 1 mL เข็มหัวตัด เบอร์ 27 ดังรูปที่ 3.3

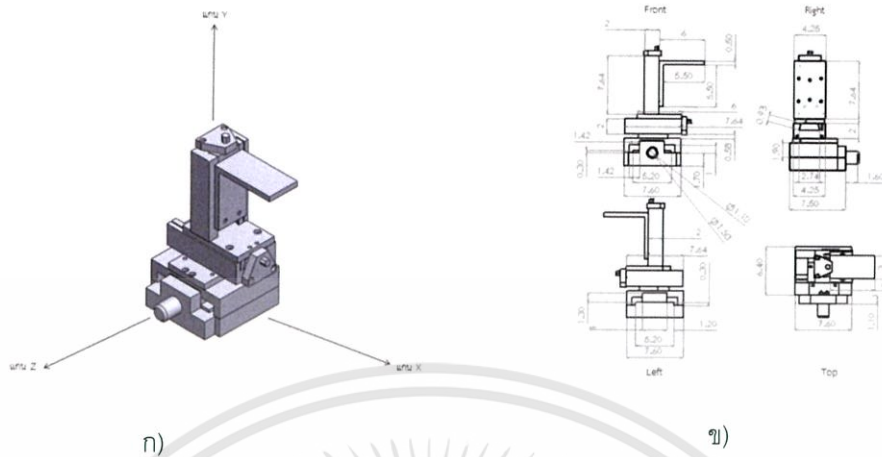


รูปที่ 3.3 ภาพจำลองชุดหยุดของเหลว

ซึ่งได้เลือกใช้สเต็ปมอเตอร์ของ SUNYO DENKI รุ่น STEPSYN 03F5305-7041 เป็นสเต็ป มอเตอร์แบบ 5 เฟส ที่เลือกใช้งานมอเตอร์แบบ 5 เฟส ซึ่งมีการกระตุ้นการกระตุ้นเฟสแบบ ฮาล์ฟสเต็ป (Half Step Motor) หรือ one – two phase Driver คือ การกระตุ้นเฟสแบบฟูลสเต็ป 1 เฟส และ 2 เฟส เรียงตามลำดับกันไป แรงบิดที่ได้จากการกระตุ้นเฟสแบบนี้มีเพิ่มมากขึ้น เพราะช่วงของสเต็ปมีระยะสั้นลง ในการกระตุ้นแบบนี้ 2 ครั้ง จึงได้ระยะของสเต็ปเท่ากับการกระตุ้นเพียงครั้งเดียวของแบบฟูลสเต็ป

3.4.2 ระบบการเคลื่อนที่ในทิศทางแกนต่างๆ

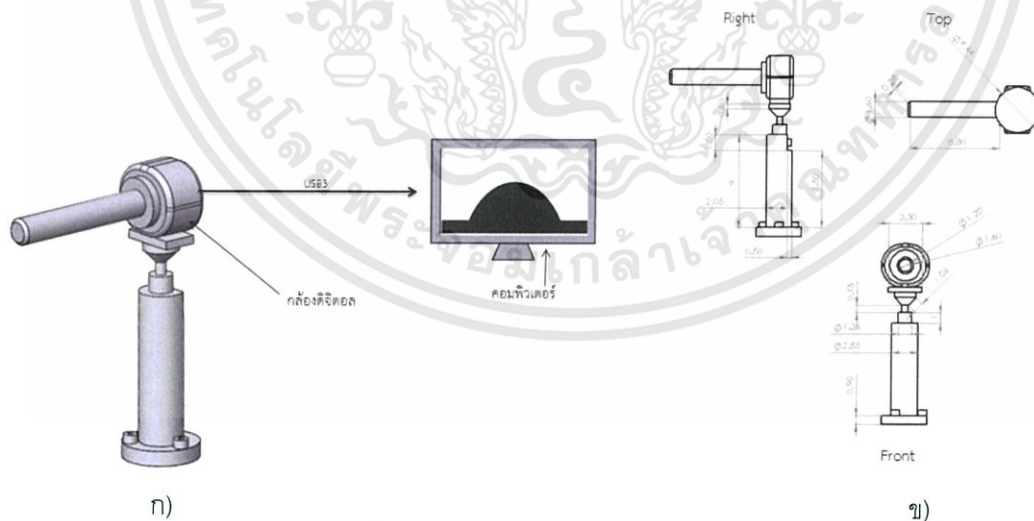
เครื่องมือที่สร้างขึ้นสามารถขยับชิ้นตัวอย่างที่นำมาวัดได้ ทั้งในแนวตั้ง และแนวระนาบ โดยมีฐานรอง ดังรูปที่ 3.4 ทำให้ง่ายต่อการใช้งานของผู้ใช้



รูปที่ 3.4 ก)ภาพจำลองฐานรองชิ้นงานตัวอย่าง
 ข)ภาพไอโซเมตริกฐานรองชิ้นงานตัวอย่าง

3.4.3 ระบบการติดตั้งกล้อง

งานวิจัยชิ้นนี้ใช้กล้องดิจิทัล เซนเซอร์แบบ CMOS ใช้ร่วมกับเลนส์ที่มีระยะโฟกัส 100 มิลลิเมตร เพื่อให้ได้ภาพหยดของเหลวที่คมชัด ดังรูปที่ 3.5 แสดงให้เห็นถึงระบบการติดตั้งกล้อง ยี่ห้อ IDS ซึ่งสามารถบันทึกค่าได้แบบเรียลไทม์ ทำให้ได้ค่าที่แท้จริงของพื้นผิวที่ทำการวัด

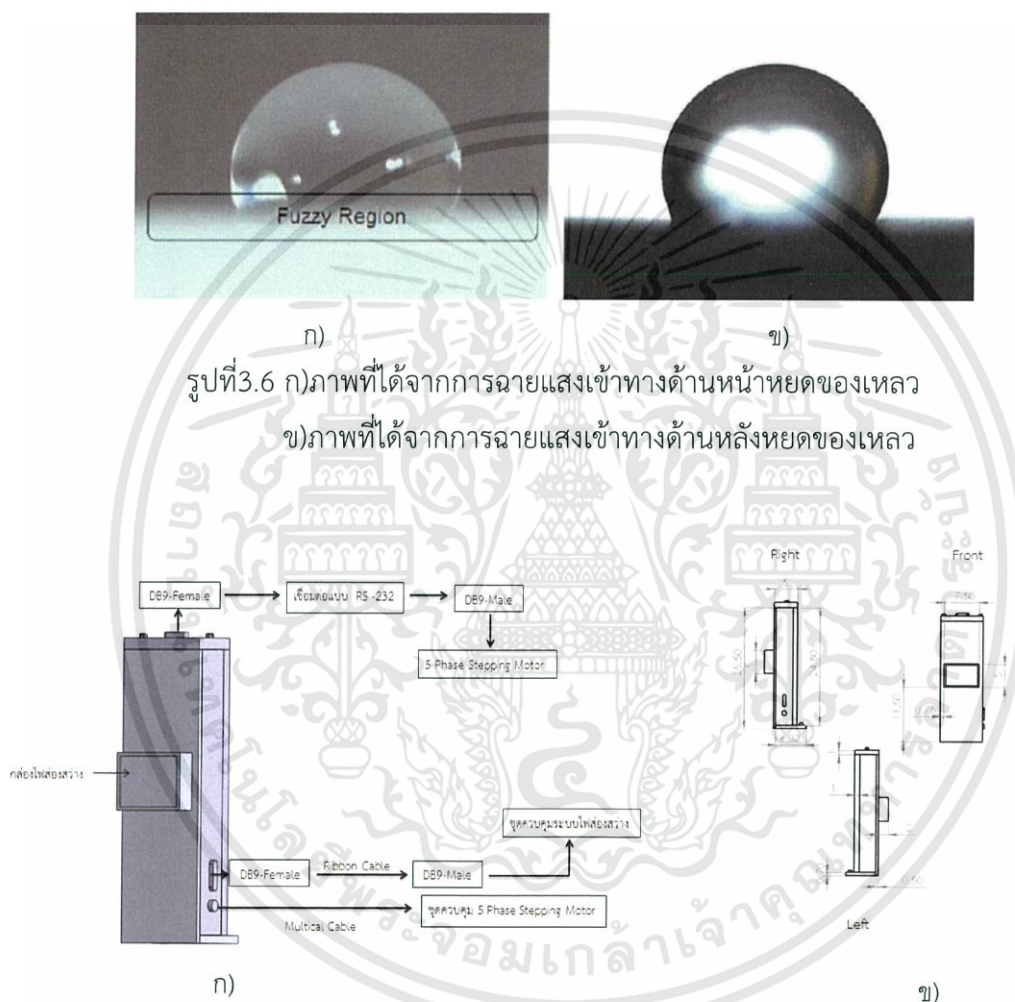


รูปที่ 3.5 ก)ภาพจำลองฐานกล้องดิจิทัล
 ข)ภาพไอโซเมตริกฐานกล้องดิจิทัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.4 ระบบส่องสว่าง (ฉากหลัง)

จากรูปที่ 3.6 ก) เป็นการเลือกใช้แสงที่ฉายจากด้านหน้า และในรูปที่ 3.6 ข) เป็นการเลือกใช้แสงที่ฉายเข้าจากทางด้านหลัง ซึ่งเห็นได้ว่าภาพที่ 3.6 ข) สามารถเห็นได้ชัดเจนกว่ารูปที่ 3.6 ก) เมื่อเลือกใช้แสงที่ฉายจากด้านหน้าบริเวณที่เลือนราง (Fuzzy Region) ทำให้ขอบของหยดของเหลวที่ได้ไม่ชัดเจน ตรวจสอบภาพได้ไม่ถูกต้อง [15] ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้การฉายแสงเข้าทางด้านหลังของชิ้นงานตัวอย่าง



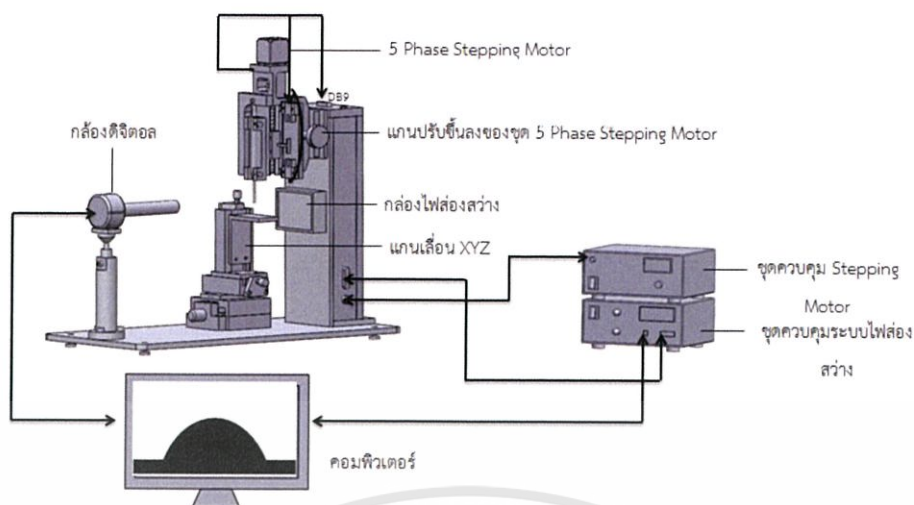
รูปที่ 3.7 ก) ภาพจำลองฐานระบบส่องสว่าง

ข) ภาพไฟโซเมติกฐานระบบส่องสว่าง

3.4.5 ระบบรวมของเครื่องมือ

หลังจากออกแบบระบบต่างๆ นำมาประกอบเข้าด้วยกันเพื่อให้ได้ระบบเครื่องมือวัดมุมสัมผัสที่สมบูรณ์ ดังรูปที่ 3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 ภาพจำลองระบบเครื่องมือวัดมุมสัมผัสที่สร้างขึ้น

3.5 การทดสอบของเหลวที่ความเข้มข้นต่างกัน

ทำการทดสอบโดยสารละลายที่ใช้ในการทดสอบ คือ สารละลายน้ำเกลือและสารละลายน้ำเชื่อมที่มีความเข้มข้นต่างๆ ซึ่งมีสมมุติฐานว่าเมื่อความเข้มข้นต่างกันค่ามุมสัมผัสที่วัดได้มีค่าต่างกัน เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถหาความเข้มข้นของสารที่นำมาวัดหามุมสัมผัสได้

3.5.1 สารละลายน้ำเกลือ

ทำการเตรียมสารละลายน้ำเกลือ ใช้เกลือบริโภาค ยี่ห้อ ปรงทิพย์ โดยใช้สารละลายน้ำเกลือที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 5% โดยมวล จนถึงสารละลายน้ำเกลือที่มีความเข้มข้น 30% โดยมวล เพิ่มความเข้มข้นขึ้นครั้งละ 5% โดยมวล

3.5.2 สารละลายน้ำตาล (ซูโครส)

ทำการเตรียมสารละลายน้ำตาล ใช้น้ำตาล ยี่ห้อ มิตรผล โดยใช้สารละลายน้ำตาลที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 20% โดยมวล จนถึงสารละลายน้ำตาลที่มีความเข้มข้น 50% โดยมวล เพิ่มความเข้มข้นขึ้นครั้งละ 10% โดยมวล

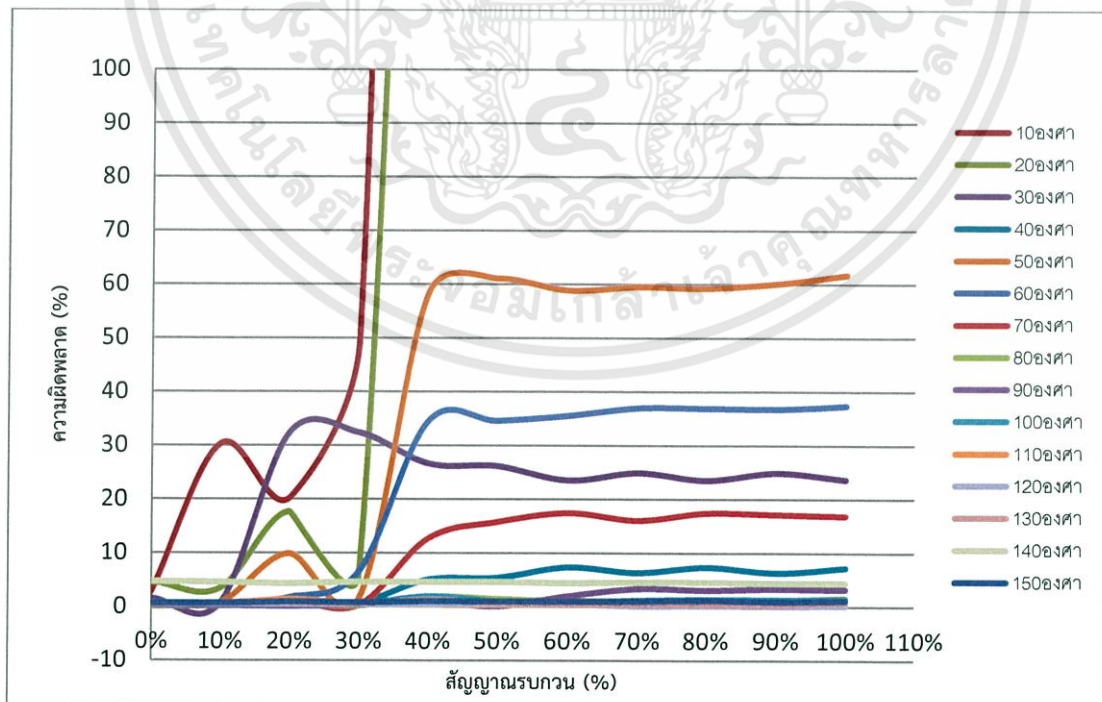
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ในการวัดมุมสัมผัสของของเหลวด้วยวิธีการประมวลผลด้วยภาพ ประกอบด้วยการออกแบบเครื่องวัดมุมสัมผัสการออกแบบซอฟต์แวร์ และการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเครื่องมือ

4.1 ผลการวิเคราะห์ซอฟต์แวร์การวัดมุมสัมผัส

4.1.1 ผลการวิเคราะห์ภาพจำลองมุมสัมผัส

จากการที่นำภาพมุมสัมผัสที่สร้างขึ้นจากโปรแกรม SolidWorksไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม LabVIEW ทำการวิเคราะห์ภาพที่มีค่ามุมสัมผัสตั้งแต่ 10° ถึงภาพที่มีค่ามุมสัมผัส 150° และทำการเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบสุ่ม โดยลักษณะสัญญาณรบกวนที่ใส่เข้าไป คือ สัญญาณรบกวนชนิดขาวดำ ดังหัวข้อที่ 3.1 ผลที่ได้เมื่อทำการวิเคราะห์แบบไม่มีสัญญาณรบกวนคือ มุมที่วิเคราะห์ได้มีค่าใกล้เคียงกับมุมที่สร้างขึ้นด้วยโปรแกรมSolidWorksแต่เมื่อทำการวิเคราะห์มุมจากรูปภาพที่ทำการใส่สัญญาณรบกวนเข้าไปในภาพ ค่ามุมที่วิเคราะห์ได้มีค่าผิดพลาดมากขึ้นตามเปอร์เซ็นต์ของสัญญาณรบกวนที่มากขึ้น ดังผลการวิเคราะห์ในรูปที่ 4.1 เมื่อทำการวิเคราะห์จนถึงภาพที่มีการใส่สัญญาณรบกวนมากกว่า 30 เปอร์เซ็นต์ไม่สามารถทำการวิเคราะห์ได้เนื่องจากซอฟต์แวร์ไม่สามารถแยกจุดขาวดำในภาพได้ดังตารางในภาคผนวก ก



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์สัญญาณรบกวนกับเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ผลการวิเคราะห์การวัดมุมสัมผัสที่เป็นมุมแหลม

โดยนำวิดีโอที่บันทึกจากเครื่องมือที่เชื่อถือได้มาทำการวิเคราะห์มุมสัมผัสโดยใช้ซอฟต์แวร์ที่สร้างขึ้นมา ซึ่งซอฟต์แวร์ที่สร้างขึ้นมีวิธีการหามุมสัมผัสด้วยกัน 2 วิธี คือ วิธีจากจุดศูนย์กลางและวิธีคำนวณมุมสองเท่า ซึ่งทำการวิเคราะห์แบบเรียลไทม์ตามวิดีโอพบว่าค่ามุมสัมผัสที่วัดได้จากเครื่องมือที่เชื่อถือได้และเครื่องที่สร้างขึ้น มีค่าใกล้เคียงกันดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบผลการวัดมุมสัมผัส (มุมแหลม) ที่ได้จากเครื่องมือที่เชื่อถือได้และเครื่องที่สร้างขึ้น โดยมีวิธีการวัดด้วยกัน 2 วิธี

เครื่องมือที่เชื่อถือได้(°)	เครื่องที่สร้างขึ้น วิธีคำนวณมุมสองเท่า(°)	เครื่องที่สร้างขึ้น วิธีจากจุดศูนย์กลาง(°)
72.401	66.441	62.329
66.963	66.421	62.335
69.688	68.431	64.006
68.119	67.12	64.506
69.760	66.544	63.249
79.260	77.861	75.877
75.149	75.446	72.012
74.791	75.698	71.988
75.641	75.115	70.884
75.093	72.667	65.661
68.750	67.825	63.982
69.418	68.16	64.36
71.779	70.325	62.549
71.962	71.302	62.298
81.051	80.604	67.737
71.034	71.287	64.183
65.312	64.698	61.135
71.517	72.122	65.906

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ต่อ) ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบผลการวัดมุมสัมผัส (มุมแหลม) ที่ได้จากเครื่องมือที่เชื่อถือได้และ เครื่องที่สร้างขึ้น โดยมีวิธีการวัดด้วยกัน 2 วิธี

เครื่องมือที่เชื่อถือได้(°)	เครื่องที่สร้างขึ้น วิธีคำนวณมุมสองเท่า(°)	เครื่องที่สร้างขึ้น วิธีจากจุดศูนย์กลาง(°)
74.222	72.644	67.573
75.270	76.67	67.29
73.497	73.814	69.034
80.579	81.335	71.096
81.886	82.617	75.828
83.713	84.684	75.974
86.879	85.471	77.968
82.045	81.590	75.443
85.260	82.352	75.368
85.954	85.036	78.095
82.732	83.051	72.192

จากตารางที่ 4.1 พบว่าในการวิเคราะห์ครั้งนี้วิธีการวัดมุมจากจุดศูนย์กลางมีค่ามุมสัมผัสผิดพลาดจากเครื่องมือที่เชื่อถือได้มากกว่าวิธีการวัดมุมสัมผัสแบบคำนวณมุมสองเท่า เนื่องจากพื้นผิวที่นำไปทำการวิเคราะห์มีความขรุขระ ทำให้มุมสัมผัสที่ได้เป็นมุมแหลม วิธีการคำนวณมุมสองเท่าจึงมีความแม่นยำในการวัดมุมแหลมมากกว่าวิธีจากจุดศูนย์กลางซึ่งผลการคำนวณความไม่แน่นอนในการวัดดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการคำนวณความไม่แน่นอนในการวัดและค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดเมื่อเทียบกับเครื่องมือที่เชื่อถือ

	uncertainty		Error (%)
	@68.2%	@95%(k=2)	
เครื่องมือที่เชื่อถือได้	$75.7^{\circ} \pm 1.12^{\circ}$	$75.7^{\circ} \pm 2.24^{\circ}$	0%
เครื่องที่สร้างขึ้น วิธี Half-angle	$68.886^{\circ} \pm 1.00^{\circ}$	$68.886^{\circ} \pm 2.43^{\circ}$	9.00%
เครื่องที่สร้างขึ้น วิธี มุมสองเท่า	$75.046^{\circ} \pm 1.21^{\circ}$	$75.046^{\circ} \pm 2.01^{\circ}$	0.86%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 ผลการวิเคราะห์การวัดมุมสัมผัสที่เป็นมุมป้าน

โดยการนำภาพที่ทำการบันทึกการวัดกระดาษซับหน้ามัน ยี่ห้อ Artistry จากเครื่องมือที่เชื่อถือได้ มาทำการวิเคราะห์มุมสัมผัสโดยใช้ซอฟต์แวร์ที่สร้างขึ้นมา ซึ่งซอฟต์แวร์ที่สร้างขึ้นมีวิธีการหามุมสัมผัสด้วยกัน 2 วิธี คือ วิธีจากจุดศูนย์กลางและวิธีคำนวณมุมสองเท่า พบว่าค่ามุมสัมผัสที่วัดได้จากเครื่องมือที่เชื่อถือได้และเครื่องที่สร้างขึ้น มีค่าใกล้เคียงกัน ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบผลการวัดมุมสัมผัส (มุมป้าน) ที่ได้จากเครื่องมือที่เชื่อถือได้และเครื่องที่สร้างขึ้น โดยมีวิธีการวัดด้วยกัน 2 วิธี

เครื่องมือที่เชื่อถือ(°)	เครื่องที่สร้างขึ้น วิธีคำนวณมุมสองเท่า(°)	เครื่องที่สร้างขึ้น วิธีจากจุดศูนย์กลาง(°)
116.6	114.653	117.232
114.65	111.173	111.416
104.25	103.426	114.423
122.1	119.051	120.593
115.25	115.209	114.094
109.15	107.404	104.683
112.4	115.304	109.154
112.6	109.317	110.339
110.35	108.06	110.258
110.8	108.173	110.318
114	111.765	111.236
111.1	108.922	109.941
110.7	106.936	111.42
110.5	106.966	111.058
102.7	103.559	101.408
116.35	111.832	113.834

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ต่อ) ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบผลการวัดมุมสัมผัส (มุมป้าน) ที่ได้จากเครื่องมือที่เชื่อถือได้และ เครื่องที่สร้างขึ้น โดยมีวิธีการวัดด้วยกัน 2 วิธี

เครื่องมือที่เชื่อถือได้ (°)	เครื่องที่สร้างขึ้น วิธีคำนวณมุมสองเท่า (°)	เครื่องที่สร้างขึ้น วิธีจากจุดศูนย์กลาง (°)
116.05	113.105	114.565
117.2	113.433	115.789
114.85	111.748	112.691
117.5	114.283	114.293
115.25	112.507	114.709
116.1	113.231	115.988
115.4	113.153	112.112
113.85	109.694	112.571
111.85	108.996	109.516
119.05	115.571	114.591
118.1	115.544	116.659
109.2	105.755	108.655
112.1	108.337	110.658

จากตารางที่ 4.3 สามารถเห็นได้ว่าการวิเคราะห์ครั้งนี้อธิบายวิธีการวัดมุมจากจุดศูนย์กลาง มีค่ามุมสัมผัสผิดพลาดจากเครื่องมือที่เชื่อถือได้น้อยกว่าวิธีการวัดมุมสัมผัสแบบคำนวณมุมสองเท่า เนื่องจากพื้นผิวที่นำไปทำการวิเคราะห์มีสมบัติไม่ชอบน้ำ ทำให้มุมสัมผัสที่ได้เป็นมุมป้าน วิธีการจากจุดศูนย์กลางจึงมีความแม่นยำในการวัดมุมป้านมากกว่าวิธีคำนวณมุมสองเท่า ซึ่งผลการคำนวณความไม่แน่นอนในการวัด ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการคำนวณความไม่แน่นอนในการวัดและค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดเมื่อเทียบกับเครื่องมือที่เชื่อถือ

	uncertainty		Error (%)
	@68.2%	@95%(k=2)	
เครื่องมือที่เชื่อถือได้	$113.30^{\circ} \pm 0.76^{\circ}$	$113.30^{\circ} \pm 1.52^{\circ}$	0%
เครื่องที่สร้างขึ้น วิธีจากจุดศูนย์กลาง	$112.04^{\circ} \pm 0.70^{\circ}$	$112.04^{\circ} \pm 1.40^{\circ}$	1.11%
เครื่องที่สร้างขึ้น วิธีคำนวณมุมสองเท่า	$110.79^{\circ} \pm 0.70^{\circ}$	$110.79^{\circ} \pm 1.41^{\circ}$	2.21%

4.2 ผลการวิเคราะห์ระบบสร้างหยดของเหลว

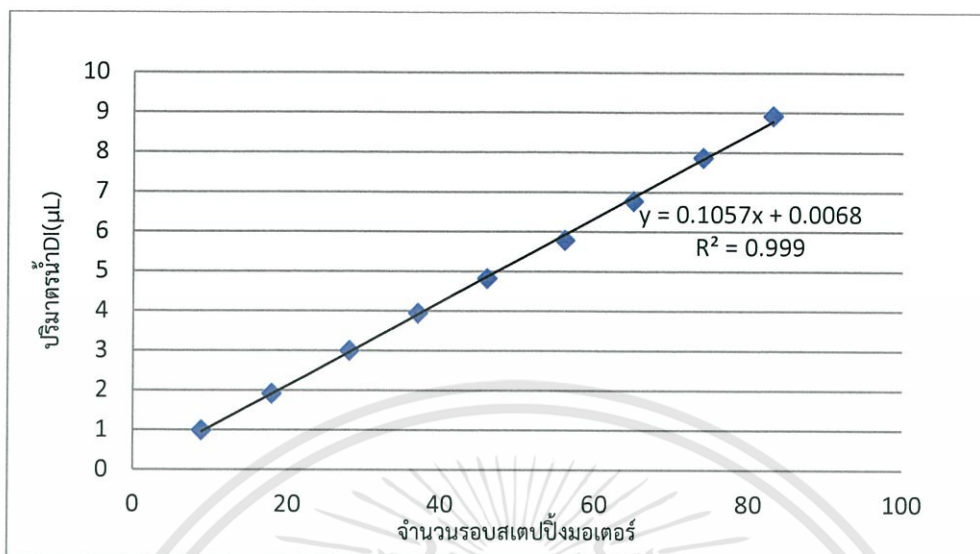
ทำการวิเคราะห์โดยการป้อนคำสั่งลงจากโปรแกรม LabVIEW เพื่อสั่งให้สเต็ปปั๊มมอเตอร์หมุนตามจำนวนที่กำหนดไว้ ทำให้ได้หยดของของเหลวตามปริมาตรผู้ใช้งาน ซึ่งในการวัดสิ่งต่างๆ ด้วยเครื่องมือวัดต้องมีความผิดพลาดเกิดขึ้นเสมอ ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์และรายงานผล เรียกว่า ความไม่แน่นอนในการวัด (Uncertainty of Measurement) ซึ่งในงานวิจัยนี้ทำการคำนวณค่าความไม่แน่นอนในการวัด ประเภทเอ โดยทำการทดลองซ้ำ 30 ครั้งในแต่ละคำสั่ง เพื่อให้ได้ค่าความเชื่อมั่น 68.2% ดังนั้นจึงทำการขยายค่าความเชื่อมั่นเป็น 95 % โดยมี K = 2 จากนั้นนำหยดของเหลวที่หยดออกมาแต่ละครั้งไปทำการชั่งด้วยเครื่องชั่งดิจิตอลยี่ห้อ OHAUS รุ่น PIONEER PA214 ดังหัวข้อที่ 3.2 ได้ผลดังภาคผนวก ข ซึ่งมีค่าเฉลี่ยดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยปริมาตรหยดน้ำในแต่ละคำสั่ง

จำนวนรอบของสเต็ปปั๊มมอเตอร์	ค่าเฉลี่ยปริมาตรของหยดน้ำ (μL)
9	1.0
18	1.9
28	3.0
37	4.0
46	4.8
56	5.8
65	6.8
74	7.9
83	8.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำผลที่ได้มาสร้างความสัมพันธ์ เพื่อนำความสัมพันธ์ไปประเมินจำนวนรอบของสเต็ปป์มอเตอร์ที่เหมาะสมกับการสร้างหยดของเหลวตามปริมาตรที่ต้องการดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยปริมาตรกับจำนวนรอบของสเต็ปป์มอเตอร์

จากนั้นนำความสัมพันธ์มาทำการประเมินรอบสเต็ปป์มอเตอร์ที่เหมาะสมกับปริมาตรหยดของเหลวที่ต้องการ เพื่อนำไปทำการวิเคราะห์อีก 1 ครั้งโดยจำนวนรอบที่เหมาะสม และผลค่าเฉลี่ยปริมาตรหยดน้ำที่ได้จากการวิเคราะห์ ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 จำนวนรอบที่เหมาะสมกับปริมาตรของหยดของเหลวที่ต้องการ

ปริมาตรของเหลวที่ต้องการ (μL)	จำนวนรอบของสเต็ปป์มอเตอร์	ค่าเฉลี่ยของปริมาตรหยดน้ำ (μL)
1	10	0.9433
2	19	2.0267
3	28	2.9000
4	38	3.8400
5	47	5.0333
6	57	5.9367
7	66	6.7867
8	76	7.9733
9	85	8.9633

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวิเคราะห์พบว่าได้ปริมาตรของเหลวใกล้เคียงกับปริมาตรของเหลวที่ต้องการมากกว่า การทดลองก่อนการทำความสัมพันธ์ดังผลในภาคผนวก ค

4.3 ผลการวิเคราะห์ระบบเทียบกับเครื่องมือที่เชื่อถือ

จากทำการวิเคราะห์ชิ้นงานตัวอย่างบนเงื่อนไขเดียวกันทั้งเครื่องมือที่เชื่อถือได้และเครื่องที่สร้างขึ้น โดยทำการหยดน้ำปราศจากไอออนปริมาตร $6 \mu\text{L}$ จำนวน 30 หยดลงบนแผ่นอะคริลิก หา มุมสัมผัสเพื่อนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของระบบวัดมุมสัมผัส โดยผลดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลเปรียบเทียบมุมสัมผัสเฉลี่ยของแผ่นชิ้นงานตัวอย่างระหว่างเครื่องมือที่เชื่อถือได้กับ เครื่องที่สร้างขึ้น

ครั้งที่	มุมสัมผัสเฉลี่ย ที่วัดได้จาก เครื่องมือที่เชื่อถือ (°)	มุมสัมผัสเฉลี่ย ที่วัดได้จาก เครื่องที่สร้าง ขึ้น(°)	ครั้งที่	มุมสัมผัสเฉลี่ย ที่วัดได้จาก เครื่องมือที่เชื่อถือ (°)	มุมสัมผัสเฉลี่ย ที่วัดได้จาก เครื่องที่สร้าง ขึ้น(°)
1	72.401	70.864	16	71.034	70.097
2	66.963	69.498	17	65.312	70.722
3	69.668	69.498	18	71.517	70.368
4	68.119	69.498	19	74.222	77.047
5	69.76	69.782	20	75.27	67.722
6	79.26	70.800	21	72.497	67.717
7	75.149	69.839	22	80.579	68.893
8	74.791	69.843	23	81.886	67.727
9	75.641	69.839	24	83.713	67.721
10	75.093	69.839	25	86.879	71.583
11	68.75	69.842	26	82.045	71.522
12	69.418	70.678	27	81.57	70.343
13	71.779	76.125	28	85.26	72.651
14	71.962	69.855	29	85.984	69.408
15	81.051	72.625	30	82.432	70.762

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

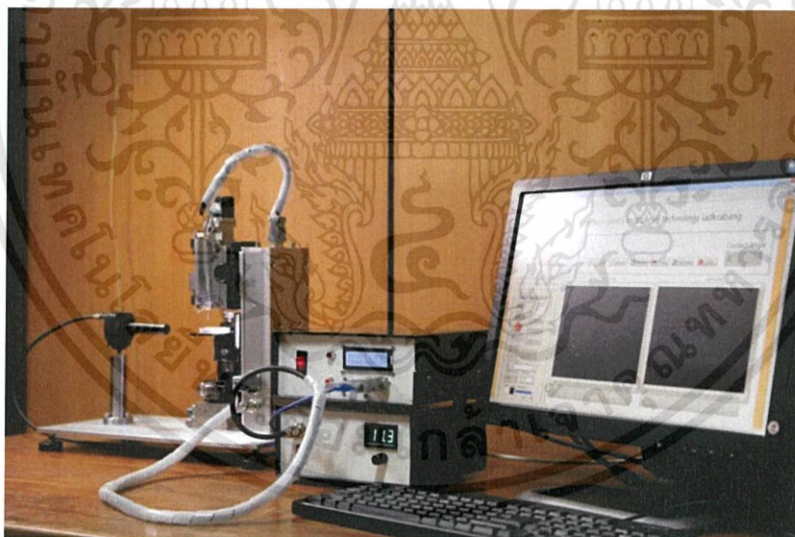
ผลที่ได้จากเครื่องที่สร้างขึ้นในตารางที่ 4.7 เลือกใช้วิธีการคำนวณมุมสองเท่ามาทำการวิเคราะห์เนื่องจากวิธีการมุมสองเท่ามีความแม่นยำในการวัดมุมสัมผัสที่เป็นมุมแหลมมากกว่าวิธี จากจุดศูนย์กลางซึ่งผลการคำนวณความไม่แน่นอนในการวัด ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ผลการคำนวณความไม่แน่นอนในการวัดและค่าความผิดพลาดในการวัดเมื่อเทียบกับเครื่องมือที่เชื่อถือ

	uncertainty @68.2%	uncertainty @95%(k=2)	Error (%)
เครื่องมือที่เชื่อถือได้	$75.67^{\circ} \pm 1.12^{\circ}$	$75.67^{\circ} \pm 2.25^{\circ}$	-
เครื่องที่สร้างขึ้น วิธี คำนวณมุมสองเท่า	$70.42^{\circ} \pm 0.38^{\circ}$	$70.42^{\circ} \pm 0.76^{\circ}$	6.93%

4.4 ผลการออกแบบระบบวัดมุมสัมผัสที่สร้างขึ้น

จากการออกแบบระบบต่างๆ ของเครื่องมือวัดมุมสัมผัส ตามหัวข้อที่ 3.4 ทำให้ได้เครื่องมือที่เป็นระบบสมบูรณ์ ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายระบบเครื่องมือวัดมุมสัมผัสที่สร้างขึ้น

4.5 ผลการวิเคราะห์ของเหลวที่ความเข้มข้นต่างกัน

4.5.1 สารละลายน้ำเกลือ

โดยใช้สารละลายน้ำเกลือที่ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 5% โดยมวล ถึงสารละลายน้ำเกลือที่มีความเข้มข้น 30% โดยมวล และเพิ่มความเข้มข้นขึ้นครั้งละ 5% หยดลงบนแผ่นอะคริลิกทำซ้ำทั้งหมด 30 ครั้ง ดังหัวข้อที่ 3.5.1 ผลการวิเคราะห์พบว่าค่ามุมสัมผัสที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้นตามความ

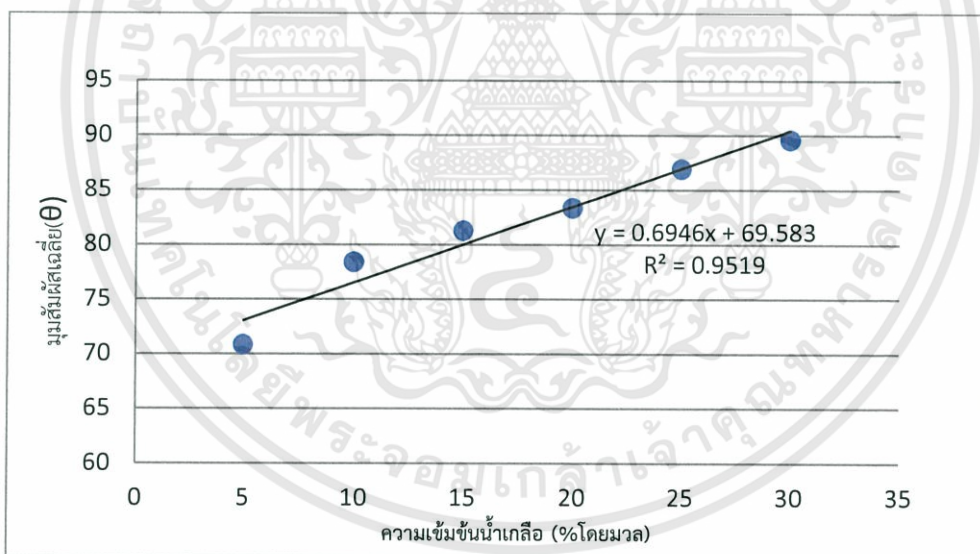
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้มข้นของสารละลายน้ำเกลือ แปรผันตรงกันและมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น ดังตารางในภาคผนวก ง และมีมุมสัมผัสเฉื่อยของสารละลายน้ำเกลือแต่ละความเข้มข้น ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ค่าเฉลี่ยมุมสัมผัสของสารละลายน้ำเกลือแต่ละความเข้มข้น

ความเข้มข้นของน้ำเกลือ (%โดยมวล)	ค่าเฉลี่ยมุมสัมผัสที่วัดได้ (°)
5	70.844
10	78.404
15	81.270
20	83.359
25	86.932
30	89.619

นำค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวิเคราะห์ไปสร้างความสัมพันธ์เพื่อนำความสัมพันธ์ที่ได้ ไปประเมินหาความเข้มข้นของสารละลายน้ำเกลือที่ไม่ทราบค่า ดังรูปที่ 4.4



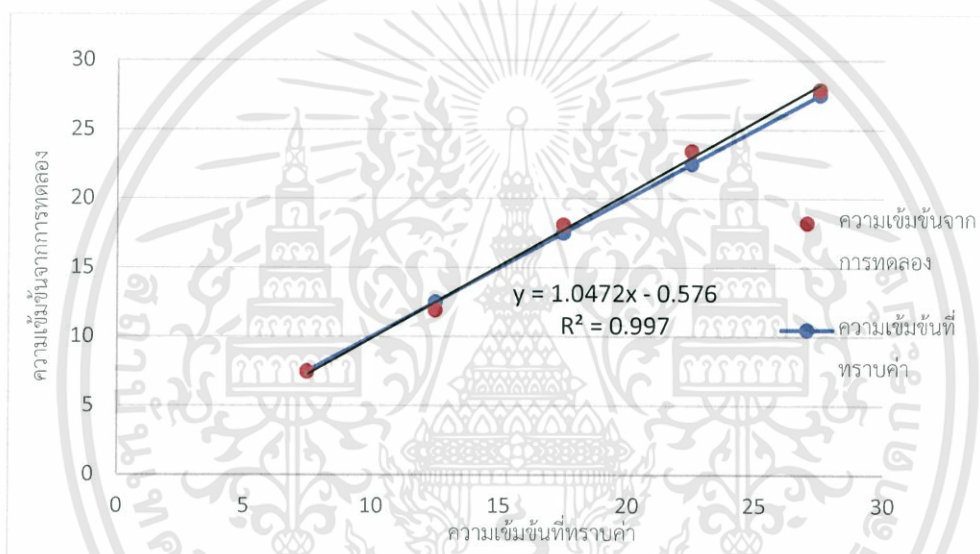
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายน้ำเกลือ (%โดยมวล) กับมุมสัมผัสเฉื่อยที่วัดได้

หลังจากนั้นนำความสัมพันธ์ที่ได้ เพื่อนำไปประเมินความเข้มข้นของสารละลายที่ไม่ทราบค่า โดยนำสารละลายน้ำเกลือ 5 ความเข้มข้นมาทำการวิเคราะห์ หาความเข้มข้นจากการวัดมุมสัมผัสพบว่าซอฟต์แวร์ที่สร้างขึ้นมาสามารถคำนวณค่าความเข้มข้นจากค่ามุมสัมผัสได้ใกล้เคียงกับค่าความเข้มข้นที่นำมาวิเคราะห์ ได้ผลดังตารางในภาคผนวก จ มีความเข้มข้นเฉลี่ยและค่าความผิดพลาด ดังตารางที่ 4.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 ความเข้มข้นเฉลี่ยที่นำมาวิเคราะห์กับความเข้มข้นเฉลี่ยที่คำนวณได้

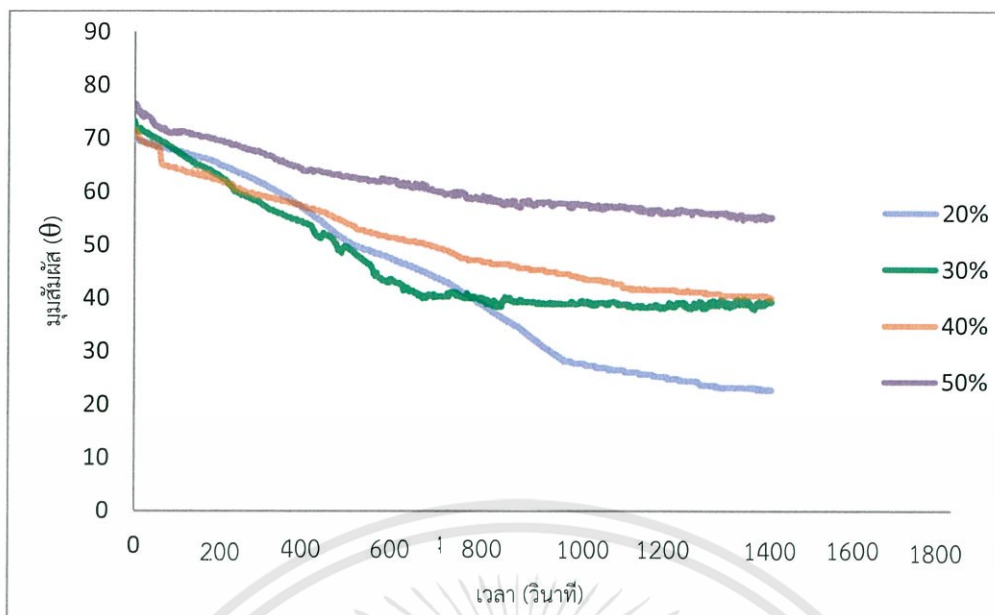
ความเข้มข้นของน้ำเกลือ ที่นำมาทดลอง (%โดยมวล)	ความเข้มข้นของน้ำเกลือ ที่คำนวณได้ (%โดยมวล)	ความคลาดเคลื่อน (%)
7.5	7.45	0.67%
12.5	11.91	4.72%
17.5	18.09	3.37%
22.5	23.43	4.13%
27.5	27.87	1.35%



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายน้ำเกลือที่ทราบค่ากับความเข้มข้นสารละลายน้ำเกลือจากการทดลอง

4.5.2 สารละลายน้ำตาล (ซูโครส)

โดยใช้สารละลายน้ำตาลที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 20% โดยมวล ถึงสารละลายน้ำตาลที่มีความเข้มข้น 50% โดยมวล หยดลงบนแผ่นอะคริลิกบันทึกผลมุมสัมผัสเป็นเวลา 90 นาที ซึ่งใน 1 วินาที สามารถเก็บค่ามุมสัมผัสได้ 5 ข้อมูล ดังหัวข้อที่ 3.5.2 ผลการวิเคราะห์พบว่าค่ามุมสัมผัสที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาล ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างมูมสัมพัทธ์กับเวลา

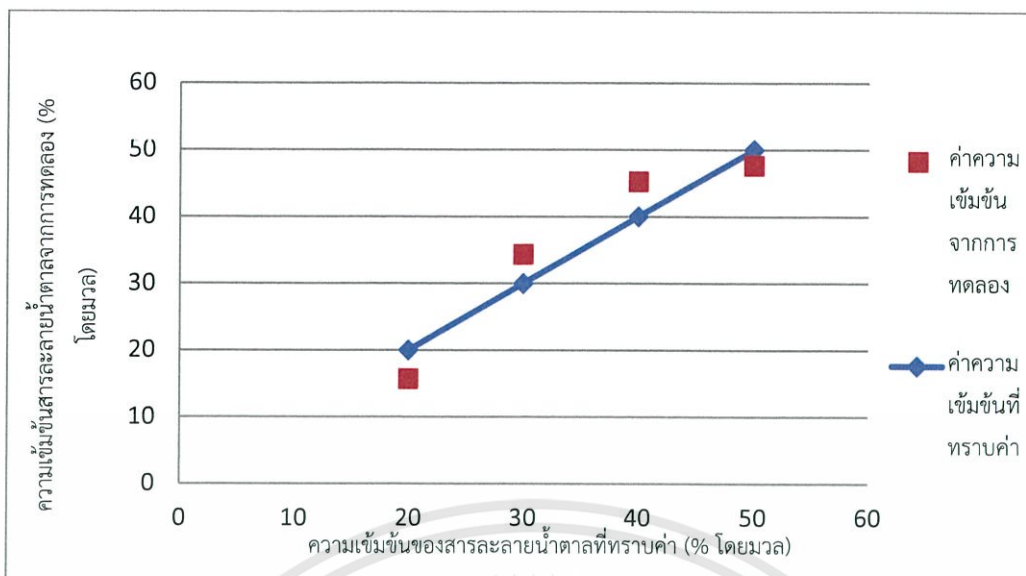
ผลการวิเคราะห์มูมสัมพัทธ์ของสารละลายน้ำตาล พบว่าค่ามูมสัมพัทธ์ของสารละลายที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ มีค่าลดลงแปรผกผันกับเวลาที่เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.6 เมื่อเวลาผ่านไปค่ามูมสัมพัทธ์เริ่มมีค่าคงที่โดยสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ค่ามูมสัมพัทธ์ที่เริ่มคงที่ของสารละลายน้ำตาล

ความเข้มข้นสารละลาย น้ำตาล(%โดยมวล)	ค่ามูมสัมพัทธ์ที่เริ่มคงที่ (องศา)
20	25
30	38
40	41
50	58

จากรูปที่ 4.7 พบว่าเครื่องมือที่สร้างขึ้นสามารถวัดความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลจากค่ามูมสัมพัทธ์ได้ในช่วงความเข้มข้น 20% ถึง 50%โดยมวล และมีความคลาดเคลื่อนสูงสุด 21.34% ดังตารางที่ 4.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลที่ทราบค่ากับความเข้มข้นสารละลายน้ำตาลจากการทดลอง

ตารางที่ 4.12 ค่าความผิดพลาดของการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของน้ำตาล

ความเข้มข้นที่ทราบค่า (% โดยมวล)	ความเข้มข้นจากการทดลอง (% โดยมวล)	ความคลาดเคลื่อน (%)
20.00	15.73	21.34
30.00	34.37	14.56
40.00	45.27	13.18
50.00	47.67	4.64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

จากการทำการทดสอบและวิเคราะห์ผลแบ่งเป็นสองตอน ตอนที่หนึ่ง เป็นการทำการวิเคราะห์การออกแบบเครื่องมือวัดมุมสัมผัส ตอนที่สองเป็นการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการวัดความเข้มข้นของสารละลาย โดยในตอนหนึ่งพบว่าเครื่องมือที่ทำการออกแบบมานั้น สามารถทำการวิเคราะห์ผลได้ทั้งรูปภาพนิ่ง วิดีโอ และสามารถวิเคราะห์มุมสัมผัสแบบเรียลไทม์ได้ โดยมีความแม่นยำและประสิทธิภาพเมื่อเทียบกับเครื่องที่เชื่อถือมีค่าความผิดพลาดสูงสุด 6.93% และตอนที่สองเป็นการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการวัดความเข้มข้นของสารละลายจากเครื่องที่สร้างขึ้น โดยเครื่องที่สร้างขึ้นสามารถวัดสารละลายน้ำเกลือที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 5% ถึง 30% โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด 4.72% และสารละลายน้ำตาลที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 20% ถึง 50% โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด 21.34%

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1.ควรเพิ่มวิธีการวัดมุมสัมผัสให้มีมากกว่า 1 วิธี เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพความแม่นยำให้กับเครื่องมือที่สร้างขึ้น
- 2.ควรมีการหาจำนวนรอบสตีปิ้งมอเตอร์ของสารละลายที่มีความเข้มข้นไม่เท่ากัน เพื่อลดความผิดพลาดในการวัดความเข้มข้นของสารละลาย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Physics02. (นามแฝง). 2554. แรงตึงผิว. [Online]. Available : [http://www.scimath.org/socialnetwork/groups/viewbulletin/302-แรงตึงผิว+\(Surface+tension\)?groupid=42](http://www.scimath.org/socialnetwork/groups/viewbulletin/302-แรงตึงผิว+(Surface+tension)?groupid=42)
- [2] พัชรี ลิ้มสุวรรณ. 2552. นาโนกับชีวิตประจำวัน (ตอนที่ 2) ตอน ไบบัว. [Online]. Available : <http://www.sahavicha.com/?name=knowledge&file=readknowledge&id=503>
- [3] สุรางคณา สินธุรงค์ และสุรีฉาย ชันขพัด. 2556. การปรับปรุงระบบการวัดสมบัติของพื้นผิวโดยวิธีการวัดมุมสัมผัส. ปรียญานิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [4] StarFall1. 2554. กระจกทำความสะอาดตัวเองได้ด้วยวิธี ไม่ชอบน้ำ. [Online]. Available : <http://www.vcharkarn.com/varticle/43544>
- [5] อริชญ์สร สามารถ และอธิฐาน ประยงค์ขำ. 2554. การวัดพลังงานพื้นผิวโดยวิธีการวัดมุมสัมผัส. ปรียญานิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [6] Hanyang Gu , ChiWang , Shengjie Gong , Yong Mei , Huang Li and Weimin Ma. 2016. Investigation on contact angle measurement methods and wettability transition of porous Surfaces. Surface & Coatings Technology . : 72-73.
- [7] ชะห์. (นามแฝง). 2558. กล้องจุลทรรศน์คืออะไร??. [Online]. Available : <http://anisahcheana.wordpress.com/2015/11/29/กล้องจุลทรรศน์/>
- [8] กรรณิการ์ แก้วกันเนตร. 2558. “การอ่านเงาวัดเข้มด้วยระบบวิสัยทัศน์จักรกล”. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [9] อรวินท์ เมฆพิรุณ. 2549. 108 เทคนิคการถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิตอล. กรุงเทพฯ : โปรวิชั่น
- [10] ณิชฐพงศ์ ฐิติมานะกุล และรัชศักดิ์ สิทธิวิไล. 2554. กล้องดิจิตอล ครบเครื่องเรื่องกล้องและการถ่ายภาพ.กรุงเทพฯ : สวีสวี ไอที
- [11] ศุภฤกษ์ คฤหานนท์. 2556. Noise เรื่องนอยๆของการถ่ายภาพดาราศาสตร์. [Online]. Available: <http://www.manager.co.th/Around/ViewNews.aspx?NewsID=9560000086131>

(ต่อ) เอกสารอ้างอิง

- [12] กฤติไกร ไชยล็ก. 2552. SolidWorks. [Online]. Available :
<http://solidworkweb.blogspot.com/>
- [13] Pond Xi. (นามแฝง). 2559. Arduino. [Online]. Available :
<https://poundxi.me/arduino%E0%B8%84%E0%B8%B7%E0%B8%AD%E0%B8%AD%E0%B8%B0%E0%B9%84%E0%B8%A3>
- [14] นพรัตน์ งอนจำปา. 2555. บทที่3 สารละลาย. [Online]. Available :
<https://sites.google.com/site/nopparat04032536/khaa-xthibay-raywicha/bth-thi-3-sarlalay>
- [15] Bingliang Xu , Dianwen Liu, Guoyin Xu , XiaoLin Zhang and Lingcheng Bi. 2013.
 A measurement method for contact angle based on Hough Transformation :
 1109-1114
- [16] Fluke Corporation. 1994 Calibration : philosophy in practice. Everett, WA : Fluke operation



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ตารางที่ 1 แสดงการวัดมุมที่สร้างขึ้นด้วยโปรแกรม SolidWord ไปทำการวิเคราะห์ความสามารถในการวัดมุมสัมผัสของเครื่องมือที่สร้างขึ้น โดยไม่มีสัญญาณรบกวน

ค่ามุมที่สร้างขึ้น (°)	ค่ามุมที่วัดได้ (°)
10	9.728
20	19.071
30	29.546
40	39.730
50	49.654
60	60.103
70	70.230
80	80.015
90	89.793
100	99.348
110	109.322
120	119.459
130	129.380
140	133.484
150	149.037

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 แสดงการวัดมุมที่สร้างขึ้นด้วยโปรแกรม SolidWord ไปทำการวิเคราะห์ความสามารถในการวัดมุมสัมผัสของเครื่องมือที่สร้างขึ้น โดยมีสัญญาณรบกวน 10 %

ค่ามุมที่สร้างขึ้น (°)	ค่ามุมที่วัดได้ (°)
10	13.032
20	19.323
30	29.817
40	39.720
50	49.631
60	60.372
70	70.446
80	80.110
90	89.813
100	99.438
110	109.366
120	119.404
130	129.102
140	133.636
150	149.006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3 แสดงการวัดมุมที่สร้างขึ้นด้วยโปรแกรม SolidWord ไปทำการวิเคราะห์ความสามารถในการวัดมุมสัมพันธ์ของเครื่องมือที่สร้างขึ้น โดยมีสัญญาณรบกวน 20 %

ค่ามุมที่สร้างขึ้น (°)	ค่ามุมที่วัดได้ (°)
10	12.012
20	16.464
30	30.160
40	39.727
50	54.940
60	61.017
70	70.867
80	80.289
90	89.909
100	99.506
110	108.499
120	119.414
130	129.077
140	133.916
150	148.659

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4 แสดงการวัดมุมที่สร้างขึ้นด้วยโปรแกรม SolidWord ไปทำการวิเคราะห์ความสามารถในการวัดมุมสัมผัสของเครื่องมือที่สร้างขึ้น โดยมีสัญญาณรบกวน 30 %

ค่ามุมที่สร้างขึ้น (°)	ค่ามุมที่วัดได้ (°)
10	4.993
20	18.806
30	30.583
40	39.711
50	49.306
60	63.910
70	70.192
80	80.160
90	89.678
100	99.473
110	109.344
120	119.374
130	129.327
140	133.498
150	148.803

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5 แสดงการวัดมุมที่สร้างขึ้นด้วยโปรแกรม SolidWord ไปทำการวิเคราะห์ความสามารถในการวัดมุมสัมผัสของเครื่องมือที่สร้างขึ้น โดยมีสัญญาณรบกวน 40 %

ค่ามุมที่สร้างขึ้น (°)	ค่ามุมที่วัดได้ (°)
10	65.381
20	80.211
30	40.022
40	37.995
50	79.322
60	80.773
70	78.9018
80	78.479
90	90.930
100	101.905
110	109.589
120	119.383
130	128.324
140	133.502
150	148.485

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6 แสดงการวัดมุมที่สร้างขึ้นด้วยโปรแกรม SolidWord ไปทำการวิเคราะห์ความสามารถในการวัดมุมสัมผัสของเครื่องมือที่สร้างขึ้น โดยมีสัญญาณรบกวน 50 %

ค่ามุมที่สร้างขึ้น (°)	ค่ามุมที่วัดได้ (°)
10	64.811
20	90.567
30	43.888
40	37.852
50	80.564
60	80.760
70	81.055
80	78.843
90	90.070
100	101.000
110	109.603
120	119.384
130	129.187
140	133.489
150	148.535

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7 แสดงการวัดมุมที่สร้างขึ้นด้วยโปรแกรม SolidWord ไปทำการวิเคราะห์ความสามารถในการวัดมุมสัมผัสของเครื่องมือที่สร้างขึ้น โดยมีสัญญาณรบกวน 60 %

ค่ามุมที่สร้างขึ้น (°)	ค่ามุมที่วัดได้ (°)
10	68.417
20	93.600
30	44.071
40	37.063
50	79.445
60	81.325
70	82.225
80	79.128
90	91.799
100	100.897
110	109.382
120	119.390
130	129.475
140	133.791
150	148.533

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 8 แสดงการวัดมุมที่สร้างขึ้นด้วยโปรแกรม SolidWord ไปทำการวิเคราะห์ความสามารถในการวัดมุมสัมผัสของเครื่องมือที่สร้างขึ้น โดยมีสัญญาณรบกวน 70 %

ค่ามุมที่สร้างขึ้น (°)	ค่ามุมที่วัดได้ (°)
10	69.838
20	92.917
30	45.460
40	37.468
50	79.783
60	82.204
70	81.278
80	79.086
90	93.021
100	101.206
110	109.345
120	119.804
130	129.399
140	133.587
150	148.433

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 9 แสดงการวัดมุมที่สร้างขึ้นด้วยโปรแกรม SolidWord ไปทำการวิเคราะห์ความสามารถในการวัดมุมสัมผัสของเครื่องมือที่สร้างขึ้น โดยมีสัญญาณรบกวน 80 %

ค่ามุมที่สร้างขึ้น (°)	ค่ามุมที่วัดได้ (°)
10	70.113
20	93.740
30	44.405
40	37.063
50	79.664
60	82.162
70	82.213
80	78.994
90	92.834
100	101.420
110	109.193
120	119.768
130	129.405
140	133.585
150	148.184

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 10 แสดงการวัดมุมที่สร้างขึ้นด้วยโปรแกรม SolidWord ไปทำการวิเคราะห์ความสามารถในการวัดมุมสัมพันธ์ของเครื่องมือที่สร้างขึ้น โดยมีสัญญาณรบกวน 90 %

ค่ามุมที่สร้างขึ้น (°)	ค่ามุมที่วัดได้ (°)
10	70.096
20	93.737
30	44.686
40	37.468
50	80.086
60	82.089
70	82.045
80	78.972
90	93.285
100	101.358
110	109.220
120	119.802
130	129.419
140	133.788
150	148.539

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 11 แสดงการวัดมุมที่สร้างขึ้นด้วยโปรแกรม SolidWord ไปทำการวิเคราะห์ความสามารถในการวัดมุมสัมผัสของเครื่องมือที่สร้างขึ้น โดยมีสัญญาณรบกวน 100 %

ค่ามุมที่สร้างขึ้น (°)	ค่ามุมที่วัดได้ (°)
10	60.740
20	94.661
30	45.044
40	37.101
50	80.085
60	82.426
70	81.836
80	78.687
90	92.995
100	101.413
110	109.278
120	119.780
130	128.951
140	133.799
150	148.303

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ตารางที่ 1 แสดงการสอบเทียบจำนวนรอบของสตีปิ้งมอเตอร์กับปริมาตรหยดน้ำ 1 μL
โดยกำหนดรอบของ สตีปิ้งมอเตอร์เท่ากับ 9 รอบ

ครั้งที่	ค่าที่ได้จาก เครื่องชั่ง (g)	ปริมาตร (μL)	ครั้งที่	ค่าที่ได้จาก เครื่องชั่ง (g)	ปริมาตร (μL)
1	0.0006	0.6	16	0.0012	1.2
2	0.0010	1.0	17	0.0011	1.1
3	0.0009	0.9	18	0.0012	1.2
4	0.0008	0.8	19	0.0010	1.0
5	0.0010	1.0	20	0.0011	1.1
6	0.0010	1.0	21	0.0014	1.4
7	0.0012	1.2	22	0.0010	1.0
8	0.0011	1.1	23	0.0009	0.9
9	0.0010	1.0	24	0.0011	1.1
10	0.0010	1.0	25	0.0009	0.9
11	0.0010	1.0	26	0.0008	0.8
12	0.0010	1.0	27	0.0009	0.9
13	0.0010	1.0	28	0.0010	1.0
14	0.0012	1.2	29	0.0009	0.9
15	0.0007	0.7	30	0.0008	0.8
ค่าเฉลี่ยของปริมาตรหยดน้ำที่ได้ เท่ากับ 0.993					
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.164					
Type A Uncertainty @CI 95% = 0.0598 ;k =2					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 แสดงการสอบเทียบจำนวนรอบของสตีปิ้งมอเตอร์กับปริมาตรหยดน้ำ 2 μL
โดยกำหนดรอบของ สตีปิ้งมอเตอร์เท่ากับ 18 รอบ

ครั้งที่	ค่าที่ได้จากเครื่องชั่ง (g)	ปริมาตร (μL)	ครั้งที่	ค่าที่ได้จากเครื่องชั่ง (g)	ปริมาตร (μL)
1	0.0018	1.8	16	0.0019	1.9
2	0.0019	1.9	17	0.0017	1.7
3	0.0016	1.6	18	0.0019	1.9
4	0.0017	1.7	19	0.0017	1.7
5	0.0021	2.1	20	0.0018	1.8
6	0.0019	1.9	21	0.0020	2.0
7	0.0021	2.1	22	0.0020	2.0
8	0.0018	1.8	23	0.0023	2.3
9	0.0021	2.1	24	0.0022	2.2
10	0.0021	2.1	25	0.0018	1.8
11	0.0019	1.9	26	0.0017	1.7
12	0.0017	1.7	27	0.0020	2.0
13	0.0023	2.3	28	0.0019	1.9
14	0.0021	2.1	29	0.0018	1.8
15	0.0019	1.9	30	0.0020	2.0
ค่าเฉลี่ยของปริมาตรหยดน้ำที่ได้ เท่ากับ 1.923					
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.832					
Type A Uncertainty @CI 95% = 0.0669 ;k =2					

ตารางที่ 3 แสดงการสอบเทียบจำนวนรอบของสตีปิ้งมอเตอร์กับปริมาตรหยดน้ำ 3 μL
โดยกำหนดรอบของ สตีปิ้งมอเตอร์เท่ากับ 28 รอบ

ครั้งที่	ค่าที่ได้จากเครื่องชั่ง (g)	ปริมาตร (μL)	ครั้งที่	ค่าที่ได้จากเครื่องชั่ง (g)	ปริมาตร (μL)
1	0.0032	3.2	16	0.0031	3.1
2	0.0031	3.1	17	0.0029	2.9
3	0.0031	3.1	18	0.0028	2.8
4	0.0026	2.6	19	0.0030	3.0
5	0.0030	3.0	20	0.0030	3.0
6	0.0030	3.0	21	0.0030	3.0
7	0.0031	3.1	22	0.0031	3.1
8	0.0031	3.1	23	0.0031	3.1
9	0.0032	3.2	24	0.0027	2.7
10	0.0030	3.0	25	0.0031	3.1
11	0.0031	3.1	26	0.0030	3.0
12	0.0030	3.0	27	0.0030	3.0
13	0.0027	2.7	28	0.0030	3.0
14	0.0030	3.0	29	0.0029	2.9
15	0.0029	2.9	30	0.0033	3.3
ค่าเฉลี่ยของปริมาตรหยดน้ำที่ได้ เท่ากับ 3.003					
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.1520					
Type A Uncertainty @CI 95% = 0.0554 ;k =2					

ตารางที่ 4 แสดงการสอบเทียบจำนวนรอบของสเต็ปป์มอเตอร์กับปริมาตรหยดน้ำ 4 μL
โดยกำหนดรอบของ สเต็ปป์มอเตอร์เท่ากับ 37 รอบ

ครั้งที่	ค่าที่ได้จาก เครื่องชั่ง (g)	ปริมาตร (μL)	ครั้งที่	ค่าที่ได้จาก เครื่องชั่ง (g)	ปริมาตร (μL)
1	0.0035	3.5	16	0.0038	3.8
2	0.0042	4.2	17	0.0039	3.9
3	0.0038	3.8	18	0.0037	3.7
4	0.0037	3.7	19	0.0042	4.2
5	0.0040	4.0	20	0.0039	3.9
6	0.0038	3.8	21	0.0040	4.0
7	0.0043	4.3	22	0.0038	3.8
8	0.0039	3.9	23	0.0041	4.1
9	0.0041	4.1	24	0.0042	4.2
10	0.0040	4.0	25	0.0038	3.8
11	0.0041	4.1	26	0.0037	3.7
12	0.0038	3.8	27	0.0042	4.2
13	0.0041	4.1	28	0.0042	4.2
14	0.0038	3.8	29	0.0039	3.9
15	0.0040	4.0	30	0.0040	4.0
ค่าเฉลี่ยของปริมาตรหยดน้ำที่ได้ เท่ากับ 3.950					
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.1943					
Type A Uncertainty @CI 95% = 0.0709 ;k =2					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5 แสดงการสอบเทียบจำนวนรอบของสตีปิ้งมอเตอร์กับปริมาตรหยดน้ำ 5 μL
โดยกำหนดรอบของ สตีปิ้งมอเตอร์เท่ากับ 46 รอบ

ครั้งที่	ค่าที่ได้จากเครื่องชั่ง (g)	ปริมาตร (μL)	ครั้งที่	ค่าที่ได้จากเครื่องชั่ง (g)	ปริมาตร (μL)
1	0.0049	4.9	16	0.0048	4.8
2	0.0051	5.1	17	0.0049	4.9
3	0.0051	5.1	18	0.0047	4.7
4	0.0051	5.1	19	0.0046	4.6
5	0.0051	5.1	20	0.0045	4.5
6	0.0050	5.0	21	0.0046	4.6
7	0.0049	4.9	22	0.0048	4.8
8	0.0050	5.0	23	0.0048	4.8
9	0.0048	4.8	24	0.0048	4.8
10	0.0050	5.0	25	0.0047	4.7
11	0.0043	4.3	26	0.0047	4.7
12	0.0050	5.0	27	0.0048	4.8
13	0.0045	4.5	28	0.0050	5.0
14	0.0048	4.8	29	0.0050	5.0
15	0.0047	4.7	30	0.0048	4.8
ค่าเฉลี่ยของปริมาตรหยดน้ำที่ได้ เท่ากับ 4.8267					
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.1999					
Type A Uncertainty @CI 95% = 0.0729 ;k =2					

ตารางที่ 6 แสดงการสอบเทียบจำนวนรอบของสตีปิ้งมอเตอร์กับปริมาตรหยดน้ำ 6 μL
โดยกำหนดรอบของ สตีปิ้งมอเตอร์เท่ากับ 56 รอบ

ครั้งที่	ค่าที่ได้จาก เครื่องชั่ง (g)	ปริมาตร (μL)	ครั้งที่	ค่าที่ได้จาก เครื่องชั่ง (g)	ปริมาตร (μL)
1	0.0065	6.5	16	0.0057	5.7
2	0.0060	6.0	17	0.0056	5.6
3	0.0062	6.2	18	0.0058	5.8
4	0.0057	5.7	19	0.0057	5.7
5	0.0057	5.7	20	0.0055	5.5
6	0.0060	6.0	21	0.0058	5.8
7	0.0058	5.8	22	0.0055	5.5
8	0.0059	5.9	23	0.0055	5.5
9	0.0057	5.7	24	0.0058	5.8
10	0.0058	5.8	25	0.0059	5.9
11	0.0059	5.9	26	0.0055	5.5
12	0.0059	5.9	27	0.0056	5.6
13	0.0058	5.8	28	0.0058	5.8
14	0.0055	5.5	29	0.0057	5.7
15	0.0057	5.7	30	0.0060	6.0
ค่าเฉลี่ยของปริมาตรหยดน้ำที่ได้ เท่ากับ 5.783					
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.2198					
Type A Uncertainty @CI 95% = 0.0803 ;k =2					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7 แสดงการสอบเทียบจำนวนรอบของสตีปิ้งมอเตอร์กับปริมาตรหยดน้ำ 7 μL
โดยกำหนดรอบของ สตีปิ้งมอเตอร์เท่ากับ 65 รอบ

ครั้งที่	ค่าที่ได้จาก เครื่องชั่ง (g)	ปริมาตร (μL)	ครั้งที่	ค่าที่ได้จาก เครื่องชั่ง (g)	ปริมาตร (μL)
1	0.0067	6.7	16	0.0065	6.5
2	0.0069	6.9	17	0.0071	7.1
3	0.0068	6.8	18	0.0067	6.7
4	0.0067	6.7	19	0.0068	6.8
5	0.0069	6.9	20	0.0069	6.9
6	0.0070	7	21	0.0070	7.0
7	0.0065	6.5	22	0.0071	7.1
8	0.0070	7	23	0.0067	6.7
9	0.0068	6.8	24	0.0070	7.0
10	0.0068	6.8	25	0.0067	6.7
11	0.0067	6.7	26	0.0068	6.8
12	0.0067	6.7	27	0.0066	6.6
13	0.0066	6.6	28	0.0068	6.8
14	0.0067	6.7	29	0.0066	6.6
15	0.0065	6.5	30	0.0066	6.6
ค่าเฉลี่ยของปริมาตรหยดน้ำที่ได้ เท่ากับ 6.7733					
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.1721					
Type A Uncertainty @CI 95% = 0.0628 ;k =2					

ตารางที่ 8 แสดงการสอบเทียบจำนวนรอบของสตีปิ้งมอเตอร์กับปริมาตรหยดน้ำ 8 μL
โดยกำหนดรอบของ สตีปิ้งมอเตอร์เท่ากับ 74 รอบ

ครั้งที่	ค่าที่ได้จาก เครื่องชั่ง (g)	ปริมาตร (μL)	ครั้งที่	ค่าที่ได้จาก เครื่องชั่ง (g)	ปริมาตร (μL)
1	0.0078	7.8	16	0.0081	8.1
2	0.0074	7.4	17	0.0077	7.7
3	0.0076	7.6	18	0.0078	7.8
4	0.0075	7.5	19	0.0079	7.9
5	0.0077	7.7	20	0.0082	8.2
6	0.0073	7.3	21	0.0078	7.8
7	0.0075	7.5	22	0.0080	8.0
8	0.0079	7.9	23	0.0079	7.9
9	0.0078	7.8	24	0.0083	8.3
10	0.0074	7.4	25	0.0076	7.6
11	0.0080	8.0	26	0.0081	8.1
12	0.0081	8.1	27	0.0080	8.0
13	0.0079	7.9	28	0.0079	7.9
14	0.0082	8.2	29	0.0084	8.4
15	0.0078	7.8	30	0.0083	8.3
ค่าเฉลี่ยของปริมาตรหยดน้ำที่ได้ เท่ากับ 7.8633					
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.2846					
Type A Uncertainty @CI 95% = 0.1039 ;k =2					

ตารางที่ 9 แสดงการสอบเทียบจำนวนรอบของสตีปิ้งมอเตอร์กับปริมาตรหยดน้ำ 9 μL
โดยกำหนดรอบของ สตีปิ้งมอเตอร์เท่ากับ 83 รอบ

ครั้งที่	ค่าที่ได้จาก เครื่องชั่ง (g)	ปริมาตร (μL)	ครั้งที่	ค่าที่ได้จาก เครื่องชั่ง (g)	ปริมาตร (μL)
1	0.0087	8.7	16	0.0089	8.9
2	0.0092	9.2	17	0.0090	9.0
3	0.0091	9.1	18	0.0088	8.8
4	0.0089	8.9	19	0.0089	8.9
5	0.0089	8.9	20	0.0087	8.7
6	0.0093	9.3	21	0.0089	8.9
7	0.0091	9.1	22	0.0086	8.6
8	0.0092	9.2	23	0.0087	8.7
9	0.0092	9.2	24	0.0088	8.8
10	0.0088	8.8	25	0.0092	9.2
11	0.0089	8.9	26	0.0085	8.5
12	0.0093	9.3	27	0.0088	8.8
13	0.0093	9.3	28	0.0086	8.6
14	0.0080	8.0	29	0.0089	8.9
15	0.0093	9.3	30	0.0090	9.0
ค่าเฉลี่ยของปริมาตรหยดน้ำที่ได้ เท่ากับ 8.9167					
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.2878					
Type A Uncertainty @CI 95% = 0.1005 ;k =2					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ตารางที่ 1 แสดงการสอบเทียบจำนวนรอบของสตีปิ้งมอเตอร์กับปริมาตรหยดน้ำ 1 μL
โดยกำหนดรอบของ สตีปิ้งมอเตอร์เท่ากับ 10 รอบ

ครั้งที่	ค่าที่ได้จาก เครื่องชั่ง (g)	ปริมาตร (μL)	ครั้งที่	ค่าที่ได้จาก เครื่องชั่ง (g)	ปริมาตร (μL)
1	0.0010	1.0	16	0.0009	0.9
2	0.0008	0.8	17	0.0010	1.0
3	0.0014	1.4	18	0.0011	1.1
4	0.0009	0.9	19	0.0008	0.8
5	0.0012	1.2	20	0.0009	0.9
6	0.0008	0.8	21	0.0011	1.1
7	0.0009	0.9	22	0.0010	1.0
8	0.0008	0.8	23	0.0011	1.1
9	0.0007	0.7	24	0.0010	1.0
10	0.0012	1.2	25	0.0011	1.1
11	0.0007	0.7	26	0.0011	1.1
12	0.0004	0.4	27	0.0010	1.0
13	0.0007	0.7	28	0.0010	1.0
14	0.0007	0.7	29	0.0011	1.1
15	0.0010	1.0	30	0.0009	0.9
ค่าเฉลี่ยของปริมาตรหยดน้ำที่ได้ เท่ากับ 0.9433					
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.1977					
Type A Uncertainty @CI 95% = 0.0721 ;k =2					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 แสดงการสอบเทียบจำนวนรอบของสตีปิ้งมอเตอร์กับปริมาตรหยดน้ำ 2 μL
โดยกำหนดรอบของ สตีปิ้งมอเตอร์เท่ากับ 19 รอบ

ครั้งที่	ค่าที่ได้จาก เครื่องชั่ง (g)	ปริมาตร (μL)	ครั้งที่	ค่าที่ได้จาก เครื่องชั่ง (g)	ปริมาตร (μL)
1	0.0025	2.5	16	0.0014	1.4
2	0.0016	1.6	17	0.0020	2.0
3	0.0017	1.7	18	0.0020	2.0
4	0.0025	2.5	19	0.0020	2.0
5	0.0020	2.0	20	0.0020	2.0
6	0.0025	2.5	21	0.0017	1.7
7	0.0020	2.0	22	0.0021	2.1
8	0.0020	2.0	23	0.0018	1.8
9	0.0020	2.0	24	0.0020	2.0
10	0.0022	2.2	25	0.0021	2.1
11	0.0017	1.7	26	0.0021	2.1
12	0.0025	2.5	27	0.0023	2.3
13	0.0019	1.9	28	0.0019	1.9
14	0.0020	2.0	29	0.0014	1.4
15	0.0027	2.7	30	0.0022	2.2
ค่าเฉลี่ยของปริมาตรหยดน้ำที่ได้ เท่ากับ 2.0267					
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.0575					
Type A Uncertainty @CI 95% = 0.1150 ;k =2					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3 แสดงการสอบเทียบจำนวนรอบของสตีปิ้งมอเตอร์กับปริมาตรหยดน้ำ 3 μL
โดยกำหนดรอบของ สตีปิ้งมอเตอร์เท่ากับ 28 รอบ

ครั้งที่	ค่าที่ได้จาก เครื่องชั่ง (g)	ปริมาตร (μL)	ครั้งที่	ค่าที่ได้จาก เครื่องชั่ง (g)	ปริมาตร (μL)
1	0.0030	3.0	16	0.0029	2.9
2	0.0029	2.9	17	0.0030	3.0
3	0.0028	2.8	18	0.0031	3.1
4	0.0028	2.8	19	0.0027	2.7
5	0.0027	2.7	20	0.0032	3.2
6	0.0028	2.8	21	0.0029	2.9
7	0.0029	2.9	22	0.0027	2.7
8	0.0027	2.7	23	0.0028	2.8
9	0.0028	2.8	24	0.0029	2.9
10	0.0031	3.1	25	0.0027	2.7
11	0.0028	2.8	26	0.0030	3.0
12	0.0028	2.8	27	0.0033	3.3
13	0.0031	3.1	28	0.0028	2.8
14	0.0029	2.9	29	0.0030	3.0
15	0.0027	2.7	30	0.0032	3.2
ค่าเฉลี่ยของปริมาตรหยดน้ำที่ได้ เท่ากับ 2.900					
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.1681					
Type A Uncertainty @CI 95% = 0.0614 ;k =2					

ตารางที่ 4 แสดงการสอบเทียบจำนวนรอบของสตีปิ้งมอเตอร์กับปริมาตรหยดน้ำ 4 μL
โดยกำหนดรอบของ สตีปิ้งมอเตอร์เท่ากับ 38 รอบ

ครั้งที่	ค่าที่ได้จาก เครื่องชั่ง (g)	ปริมาตร (μL)	ครั้งที่	ค่าที่ได้จาก เครื่องชั่ง (g)	ปริมาตร (μL)
1	0.0035	3.5	16	0.0039	3.9
2	0.0037	3.7	17	0.0038	3.8
3	0.0039	3.9	18	0.0039	3.9
4	0.0039	3.9	19	0.0039	3.9
5	0.0037	3.7	20	0.0040	4.2
6	0.0038	3.8	21	0.0038	3.8
7	0.0039	3.9	22	0.0040	4.0
8	0.0039	3.9	23	0.0039	3.9
9	0.0039	3.9	24	0.0037	3.7
10	0.0042	4.2	25	0.0037	3.7
11	0.0041	4.1	26	0.0027	2.7
12	0.0040	4.0	27	0.0037	3.7
13	0.0041	4.1	28	0.0038	3.8
14	0.0036	3.6	29	0.0040	4.0
15	0.0041	4.1	30	0.0039	3.9
ค่าเฉลี่ยของปริมาตรหยดน้ำที่ได้ เท่ากับ 3.8400					
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.2725					
Type A Uncertainty @CI 95% = 0.0994 ;k =2					

ตารางที่ 5 แสดงการสอบเทียบจำนวนรอบของสตีปิ้งมอเตอร์กับปริมาตรหยดน้ำ 5 μL
โดยกำหนดรอบของ สตีปิ้งมอเตอร์เท่ากับ 47 รอบ

ครั้งที่	ค่าที่ได้จาก เครื่องชั่ง (g)	ปริมาตร (μL)	ครั้งที่	ค่าที่ได้จาก เครื่องชั่ง (g)	ปริมาตร (μL)
1	0.0047	4.7	16	0.0048	4.8
2	0.0049	4.9	17	0.0051	5.1
3	0.0048	4.8	18	0.0054	5.4
4	0.0049	4.9	19	0.0049	4.9
5	0.0048	4.8	20	0.0049	4.9
6	0.0054	5.4	21	0.0053	5.3
7	0.0050	5.0	22	0.0053	5.3
8	0.0047	4.7	23	0.0055	5.5
9	0.0051	5.1	24	0.0054	5.4
10	0.0053	5.3	25	0.0054	5.4
11	0.0049	4.9	26	0.0047	4.7
12	0.0051	5.1	27	0.0050	5.0
13	0.0050	5.0	28	0.0051	5.1
14	0.0049	4.9	29	0.0048	4.8
15	0.0050	5.0	30	0.0049	4.9
ค่าเฉลี่ยของปริมาตรหยดน้ำที่ได้ เท่ากับ 5.0333					
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.2397					
Type A Uncertainty @CI 95% = 0.0875 ;k =2					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6 แสดงการสอบเทียบจำนวนรอบของสตีปิ้งมอเตอร์กับปริมาตรหยดน้ำ 6 μL
โดยกำหนดรอบของ สตีปิ้งมอเตอร์เท่ากับ 57 รอบ

ครั้งที่	ค่าที่ได้จาก เครื่องชั่ง (g)	ปริมาตร (μL)	ครั้งที่	ค่าที่ได้จาก เครื่องชั่ง (g)	ปริมาตร (μL)
1	0.0057	5.7	16	0.0060	6.0
2	0.0061	6.1	17	0.0060	6.0
3	0.0063	6.3	18	0.0059	5.9
4	0.0063	6.3	19	0.0060	6.0
5	0.0057	5.7	20	0.0060	6.0
6	0.0058	5.8	21	0.0060	6.0
7	0.0060	6.0	22	0.0059	5.9
8	0.0059	5.9	23	0.0063	6.3
9	0.0058	5.8	24	0.0058	5.8
10	0.0061	6.1	25	0.0058	5.8
11	0.0058	5.8	26	0.0060	6.0
12	0.0057	5.7	27	0.0059	5.9
13	0.0060	6.0	28	0.0058	5.8
14	0.0059	5.9	29	0.0058	5.8
15	0.0058	5.8	30	0.0060	6.0
ค่าเฉลี่ยของปริมาตรหยดน้ำที่ได้ เท่ากับ 5.783					
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.2198					
Type A Uncertainty @CI 95% = 0.0803 ;k =2					

ตารางที่ 7 แสดงการสอบเทียบจำนวนรอบของสตีปิ้งมอเตอร์กับปริมาตรหยดน้ำ 7 μL
โดยกำหนดรอบของ สตีปิ้งมอเตอร์เท่ากับ 66 รอบ

ครั้งที่	ค่าที่ได้จาก เครื่องชั่ง (g)	ปริมาตร (μL)	ครั้งที่	ค่าที่ได้จาก เครื่องชั่ง (g)	ปริมาตร (μL)
1	0.0071	7.1	16	0.0071	7.1
2	0.0069	6.9	17	0.0070	7.0
3	0.0071	7.1	18	0.0067	6.7
4	0.0069	6.9	19	0.0064	6.4
5	0.0066	6.6	20	0.0064	6.4
6	0.0067	6.7	21	0.0068	6.8
7	0.0063	6.3	22	0.0070	7.0
8	0.0067	6.7	23	0.0064	6.4
9	0.0072	7.2	24	0.0068	6.8
10	0.0063	6.3	25	0.0064	6.4
11	0.0070	7.0	26	0.0067	6.7
12	0.0064	6.4	27	0.0070	7.0
13	0.0069	6.9	28	0.0073	7.3
14	0.0067	6.7	29	0.0068	6.8
15	0.0070	7.0	30	0.0070	7.0
ค่าเฉลี่ยของปริมาตรหยดน้ำที่ได้ เท่ากับ 6.7867					
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.2837					
Type A Uncertainty @CI 95% = 0.1036 ;k=2					

ตารางที่ 8 แสดงการสอบเทียบจำนวนรอบของสตีปิ้งมอเตอร์กับปริมาตรหยดน้ำ 8 μL
โดยกำหนดรอบของ สตีปิ้งมอเตอร์เท่ากับ 76 รอบ

ครั้งที่	ค่าที่ได้จาก เครื่องชั่ง (g)	ปริมาตร (μL)	ครั้งที่	ค่าที่ได้จาก เครื่องชั่ง (g)	ปริมาตร (μL)
1	0.0074	7.4	16	0.0080	8.0
2	0.0084	8.4	17	0.0081	8.1
3	0.0084	8.4	18	0.0079	7.9
4	0.0078	7.8	19	0.0083	8.3
5	0.0079	7.9	20	0.0080	8.0
6	0.0081	8.1	21	0.0079	7.9
7	0.0082	8.2	22	0.0081	8.1
8	0.0080	8.0	23	0.0080	8.0
9	0.0078	7.8	24	0.0080	8.0
10	0.0077	7.7	25	0.0077	7.7
11	0.0082	8.2	26	0.0079	7.9
12	0.0077	7.7	27	0.0082	8.2
13	0.0079	7.9	28	0.0077	7.7
14	0.0081	8.1	29	0.0080	8.0
15	0.0079	7.9	30	0.0079	7.9
ค่าเฉลี่ยของปริมาตรหยดน้ำที่ได้ เท่ากับ 7.9733					
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.2212					
Type A Uncertainty @CI 95% = 0.0807 ;k =2					

ตารางที่ 9 แสดงการสอบเทียบจำนวนรอบของสตีปิ้งมอเตอร์กับปริมาตรหยดน้ำ 9 μL
โดยกำหนดรอบของ สตีปิ้งมอเตอร์เท่ากับ 85 รอบ

ครั้งที่	ค่าที่ได้จากเครื่องชั่ง (g)	ปริมาตร (μL)	ครั้งที่	ค่าที่ได้จากเครื่องชั่ง (g)	ปริมาตร (μL)
1	0.0094	9.4	16	0.0088	8.8
2	0.0090	9.0	17	0.0090	9.0
3	0.0093	9.3	18	0.0092	9.2
4	0.0093	9.3	19	0.0087	8.7
5	0.0093	9.3	20	0.0092	9.2
6	0.0090	9.0	21	0.0087	8.7
7	0.0088	8.8	22	0.0087	8.7
8	0.0090	9.0	23	0.0090	9.0
9	0.0092	9.2	24	0.0086	8.6
10	0.0090	9.0	25	0.0090	9.0
11	0.0088	8.8	26	0.0093	9.3
12	0.0090	9.0	27	0.0086	8.6
13	0.0088	8.8	28	0.0093	9.3
14	0.0088	8.8	29	0.0092	9.2
15	0.0085	8.5	30	0.0084	8.4
ค่าเฉลี่ยของปริมาตรหยดน้ำที่ได้ เท่ากับ 8.9633					
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.2709					
Type A Uncertainty @CI 95% = 0.0989 ;k =2					



ภาคผนวก ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

ตารางที่ 1 ผลเฉลี่ยวัดมุมสัมพันธ์ของสารละลายน้ำเกลือที่มีความเข้มข้น 5% โดยมวล

ครั้งที่	ค่าเฉลี่ยมุมสัมพันธ์ที่วัดได้ (°)	ครั้งที่	ค่าเฉลี่ยมุมสัมพันธ์ที่วัดได้ (°)
1	68.653	16	77.629
2	79.729	17	79.57
3	78.424	18	79.096
4	77.593	19	83.024
5	82.114	20	82.417
6	80.016	21	79.764
7	73.149	22	81.842
8	79.224	23	82.939
9	80.605	24	76.799
10	73.052	25	74.059
11	79.69	26	74.457
12	79.409	27	77.639
13	80.576	28	75.821
14	79.488	29	74.75
15	79.819	30	80.78
ค่าเฉลี่ยของมุมสัมพันธ์ที่วัดได้ เท่ากับ 70.844			
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 3.3405			
Type A Uncertainty @CI 95% = 1.1298 ;k =2			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 ผลเฉลี่ยวัดมุมสัมพัทธ์ของสารละลายน้ำเกลือที่มีความเข้มข้น 10% โดยมวล

ครั้งที่	ค่าเฉลี่ยมุมสัมพัทธ์ที่วัดได้ (°)	ครั้งที่	ค่าเฉลี่ยมุมสัมพัทธ์ที่วัดได้ (°)
1	84.020	16	79.984
2	83.271	17	84.607
3	82.357	18	82.856
4	82.668	19	79.415
5	80.882	20	82.002
6	80.197	21	79.530
7	80.949	22	79.345
8	80.390	23	80.232
9	80.818	24	78.118
10	82.341	25	76.843
11	80.630	26	78.271
12	81.163	27	80.763
13	83.193	28	80.861
14	81.214	29	83.849
15	83.018	30	84.339
ค่าเฉลี่ยของมุมสัมพัทธ์ที่วัดได้ เท่ากับ 78.404			
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 1.9256			
Type A Uncertainty @CI 95% = 0.7031 ;k =2			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3 ผลเฉลี่ยวัดมุมสัมพัทธ์ของสารละลายน้ำเกลือที่มีความเข้มข้น 15% โดยมวล

ครั้งที่	ค่าเฉลี่ยมุมสัมพัทธ์ที่วัดได้ (°)	ครั้งที่	ค่าเฉลี่ยมุมสัมพัทธ์ที่วัดได้ (°)
1	68.953	16	71.049
2	67.471	17	72.011
3	71.293	18	70.548
4	69.996	19	71.770
5	69.425	20	71.191
6	68.573	21	71.206
7	72.533	22	71.687
8	71.942	23	72.978
9	69.357	24	71.441
10	70.078	25	73.200
11	69.826	26	72.059
12	68.624	27	71.393
13	68.020	28	68.691
14	66.945	29	76.046
15	71.979	30	75.051
ค่าเฉลี่ยของมุมสัมพัทธ์ที่วัดได้ เท่ากับ 81.270			
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 2.0783			
Type A Uncertainty @CI 95% = 0.7589 ;k =2			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4 ผลเฉลี่ยวัดมุมสัมพัทธ์ของสารละลายน้ำเกลือที่มีความเข้มข้น 20% โดยมวล

ครั้งที่	ค่าเฉลี่ยมุมสัมพัทธ์ที่วัดได้ (°)	ครั้งที่	ค่าเฉลี่ยมุมสัมพัทธ์ที่วัดได้ (°)
1	82.244	16	81.975
2	80.666	17	85.150
3	61.633	18	84.167
4	69.964	19	85.430
5	86.120	20	84.719
6	84.956	21	88.085
7	84.393	22	87.473
8	81.545	23	87.523
9	80.729	24	88.426
10	79.448	25	88.495
11	78.544	26	88.136
12	84.302	27	87.755
13	83.691	28	87.414
14	86.078	29	87.751
15	79.579	30	87.500
ค่าเฉลี่ยของมุมสัมพัทธ์ที่วัดได้ เท่ากับ 83.359			
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 5.7470			
Type A Uncertainty @CI 95% = 2.0985 ;k =2			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5 ผลเฉลี่ยวัดมุมสัมพัทธ์ของสารละลายน้ำเกลือที่มีความเข้มข้น 25% โดยมวล

ครั้งที่	ค่าเฉลี่ยมุมสัมพัทธ์ที่วัดได้ (°)	ครั้งที่	ค่าเฉลี่ยมุมสัมพัทธ์ที่วัดได้ (°)
1	86.269	16	91.923
2	83.633	17	88.381
3	82.384	18	89.684
4	85.944	19	87.292
5	81.774	20	85.983
6	90.509	21	85.962
7	92.671	22	84.365
8	85.194	23	88.600
9	84.802	24	85.733
10	89.069	25	89.347
11	92.094	26	82.149
12	89.645	27	84.848
13	83.922	28	88.858
14	77.177	29	88.460
15	93.484	30	87.815
ค่าเฉลี่ยของมุมสัมพัทธ์ที่วัดได้ เท่ากับ 86.932			
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 3.6475			
Type A Uncertainty @CI 95% = 1.3319 ;k =2			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6 ผลเฉลี่ยวัดมุมสัมผัสของสารละลายน้ำเกลือที่มีความเข้มข้น 30% โดยมวล

ครั้งที่	ค่าเฉลี่ยมุมสัมผัสที่วัดได้ (°)	ครั้งที่	ค่าเฉลี่ยมุมสัมผัสที่วัดได้ (°)
1	92.632	16	88.469
2	90.789	17	90.382
3	88.588	18	88.285
4	83.520	19	85.260
5	93.562	20	82.716
6	90.563	21	85.989
7	94.417	22	84.801
8	87.746	23	86.374
9	93.679	24	83.945
10	93.156	25	92.178
11	92.583	26	89.658
12	92.764	27	88.950
13	90.999	28	94.606
14	92.390	29	89.419
15	91.157	30	88.994
ค่าเฉลี่ยของมุมสัมผัสที่วัดได้ เท่ากับ 89.619			
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 3.3888			
Type A Uncertainty @CI 95% = 1.2374 ;k =2			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

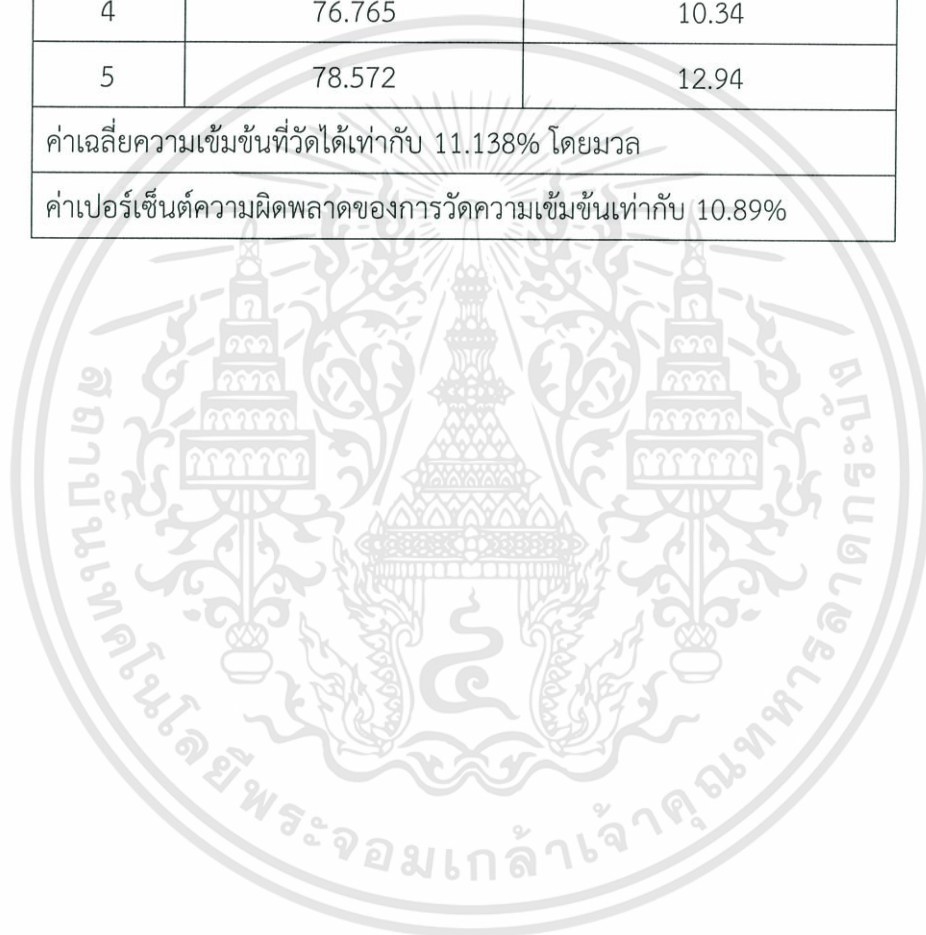
ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นที่คำนวณได้จากเครื่องที่สร้างขึ้น โดยใช้สารละลายน้ำเกลือที่มีความเข้มข้น 7.5% โดยมวล

ครั้งที่	ค่าเฉลี่ยมุมสัมผัสที่วัดได้ (°)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นที่วัดได้ (% โดยมวล)
1	73.190	5.19
2	75.069	7.89
3	75.300	8.23
4	74.995	7.79
5	74.112	6.52
ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นที่วัดได้เท่ากับ 7.124% โดยมวล		
ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของการวัดความเข้มข้นเท่ากับ 5.01% โดยมวล		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นที่คำนวณได้จากเครื่องที่สร้างขึ้น โดยใช้สารละลายน้ำเกลือที่มี
ความเข้มข้น 12.5% โดยมวล

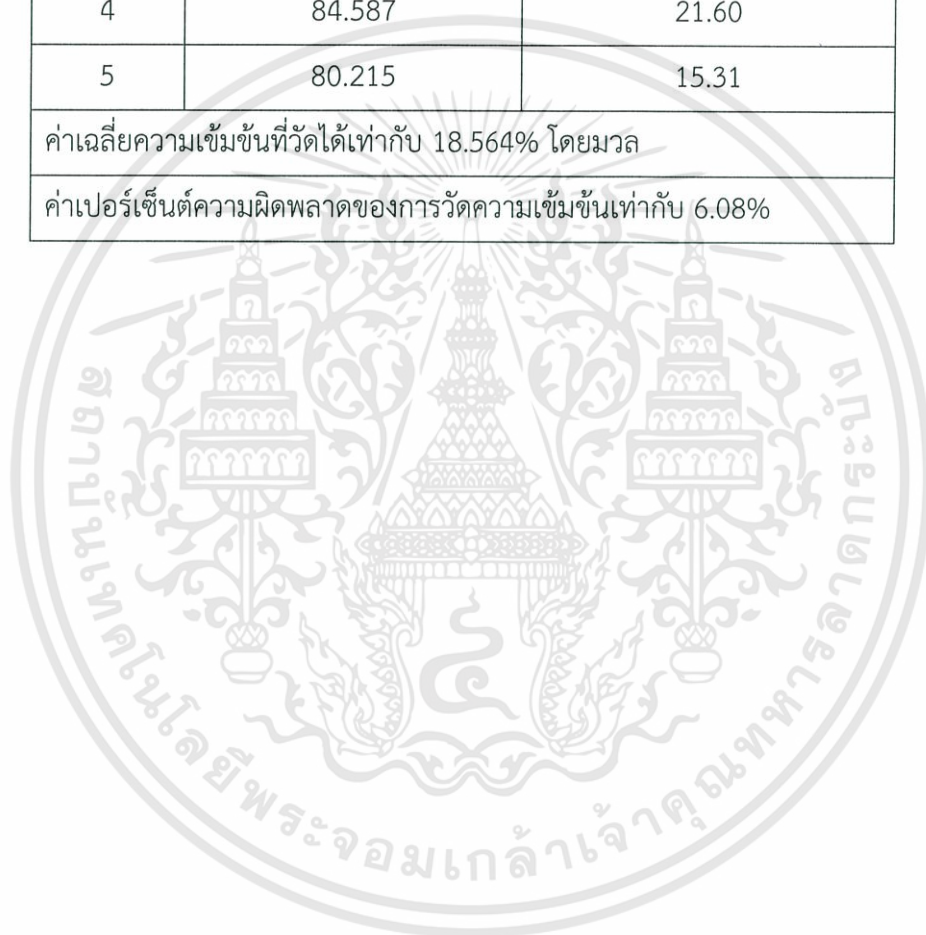
ครั้งที่	ค่าเฉลี่ยมุมสัมผัสที่วัดได้ (°)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นที่วัดได้ (% โดยมวล)
1	77.392	11.24
2	76.090	9.36
3	77.814	11.81
4	76.765	10.34
5	78.572	12.94
ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นที่วัดได้เท่ากับ 11.138% โดยมวล		
ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของการวัดความเข้มข้นเท่ากับ 10.89%		



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

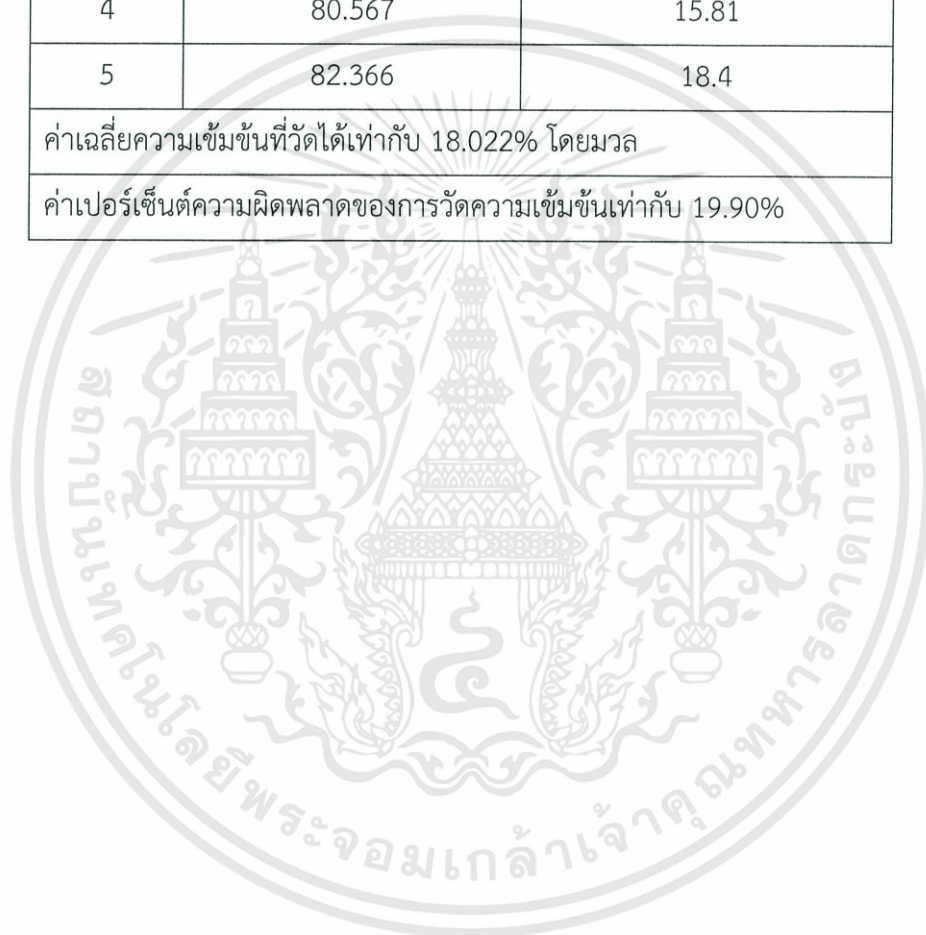
ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นที่คำนวณได้จากเครื่องที่สร้างขึ้น โดยใช้สารละลายน้ำเกลือที่มีความเข้มข้น 17.5% โดยมวล

ครั้งที่	ค่าเฉลี่ยมุมสัมผัสที่วัดได้ (°)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นที่วัดได้ (% โดยมวล)
1	82.127	18.06
2	81.643	17.36
3	83.812	20.49
4	84.587	21.60
5	80.215	15.31
ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นที่วัดได้เท่ากับ 18.564% โดยมวล		
ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของการวัดความเข้มข้นเท่ากับ 6.08%		



ตารางที่ 4 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นที่คำนวณได้จากเครื่องที่สร้างขึ้น โดยใช้สารละลายน้ำเกลือที่มีความเข้มข้น 22.5% โดยมวล

ครั้งที่	ค่าเฉลี่ยมุมสัมผัสที่วัดได้ (°)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นที่วัดได้ (% โดยมวล)
1	82.127	18.06
2	81.643	17.36
3	83.811	20.48
4	80.567	15.81
5	82.366	18.4
ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นที่วัดได้เท่ากับ 18.022% โดยมวล		
ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของการวัดความเข้มข้นเท่ากับ 19.90%		



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นที่คำนวณได้จากเครื่องที่สร้างขึ้น โดยใช้สารละลายน้ำเกลือที่มี
ความเข้มข้น 27.5% โดยมวล

ครั้งที่	ค่าเฉลี่ยมุมสัมผัสที่วัดได้ (°)	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นที่วัดได้ (% โดยมวล)
1	88.399	27.08
2	86.294	24.06
3	88.876	27.78
4	90.209	29.69
5	89.478	28.64
ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นที่วัดได้เท่ากับ 27.45 % โดยมวล		
ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของการวัดความเข้มข้นเท่ากับ 0.18 %		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

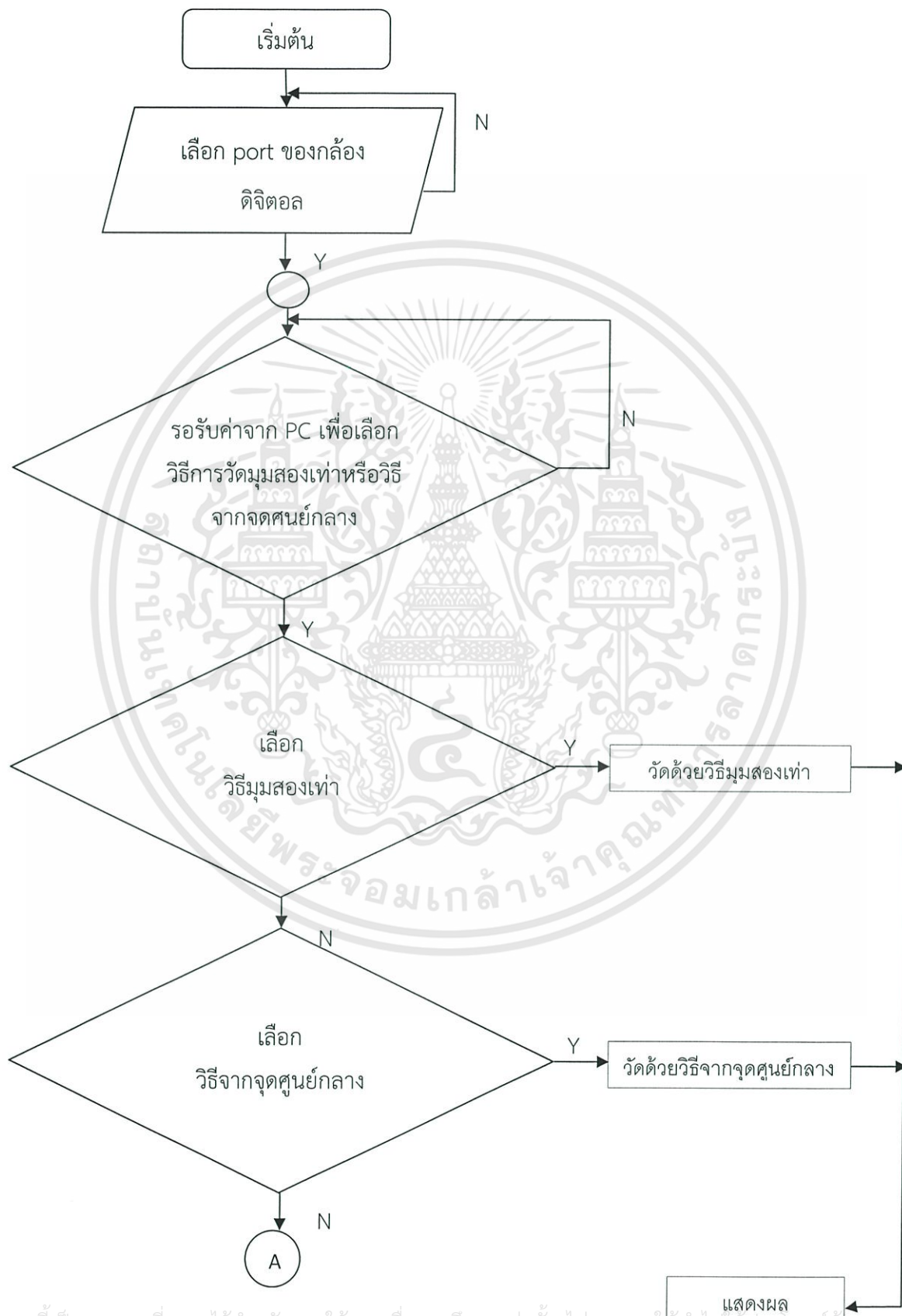


ภาคผนวก ฉ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

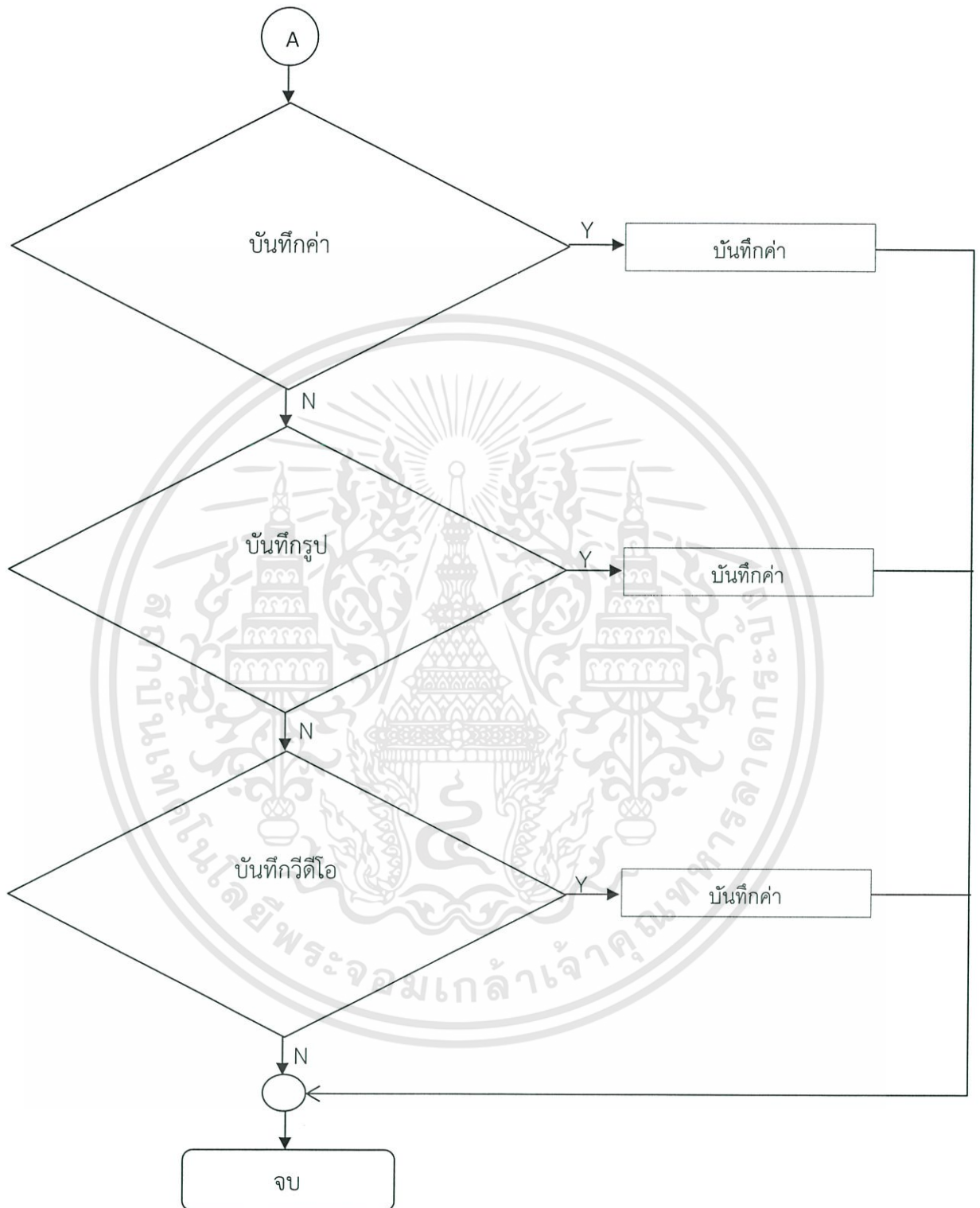
ภาคผนวก ฉ

แผนผังการทำงานของโปรแกรม LabVIEW



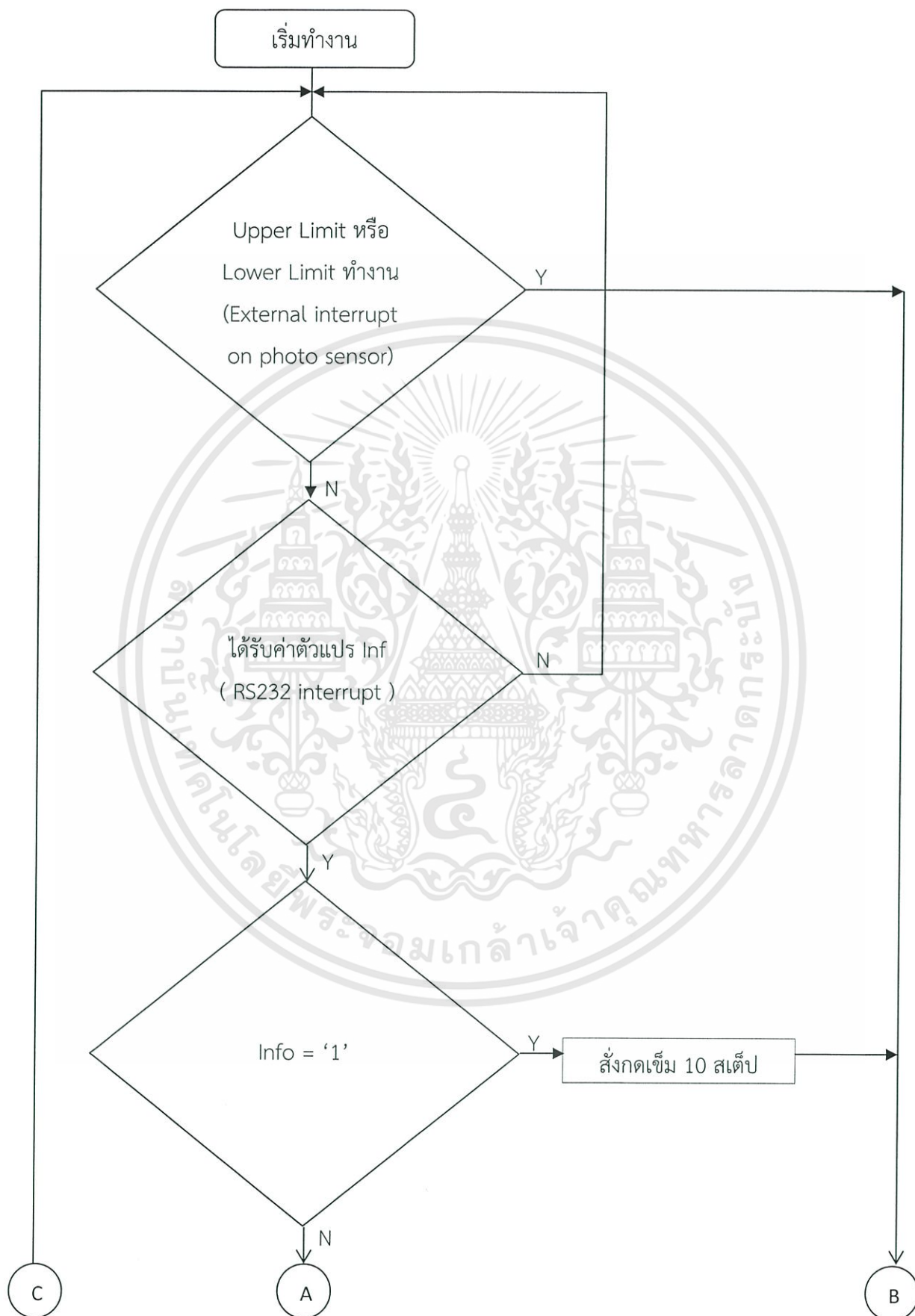
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ต่อ) แผนผังการทำงานของโปรแกรม LabVIEW



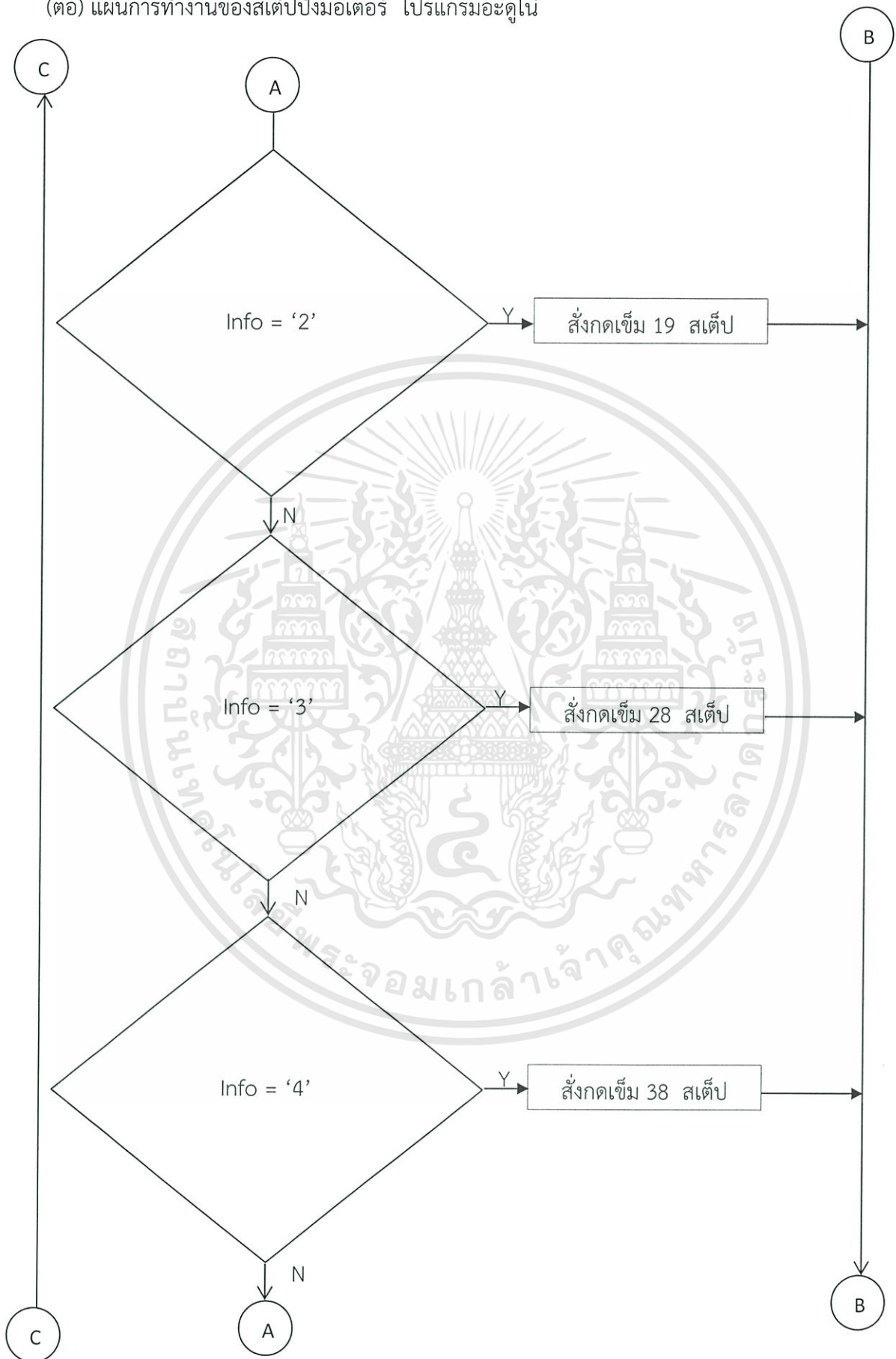
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนการทำงานของสเต็ปปั๊มมอเตอร์ โปรแกรมอะคูโน้



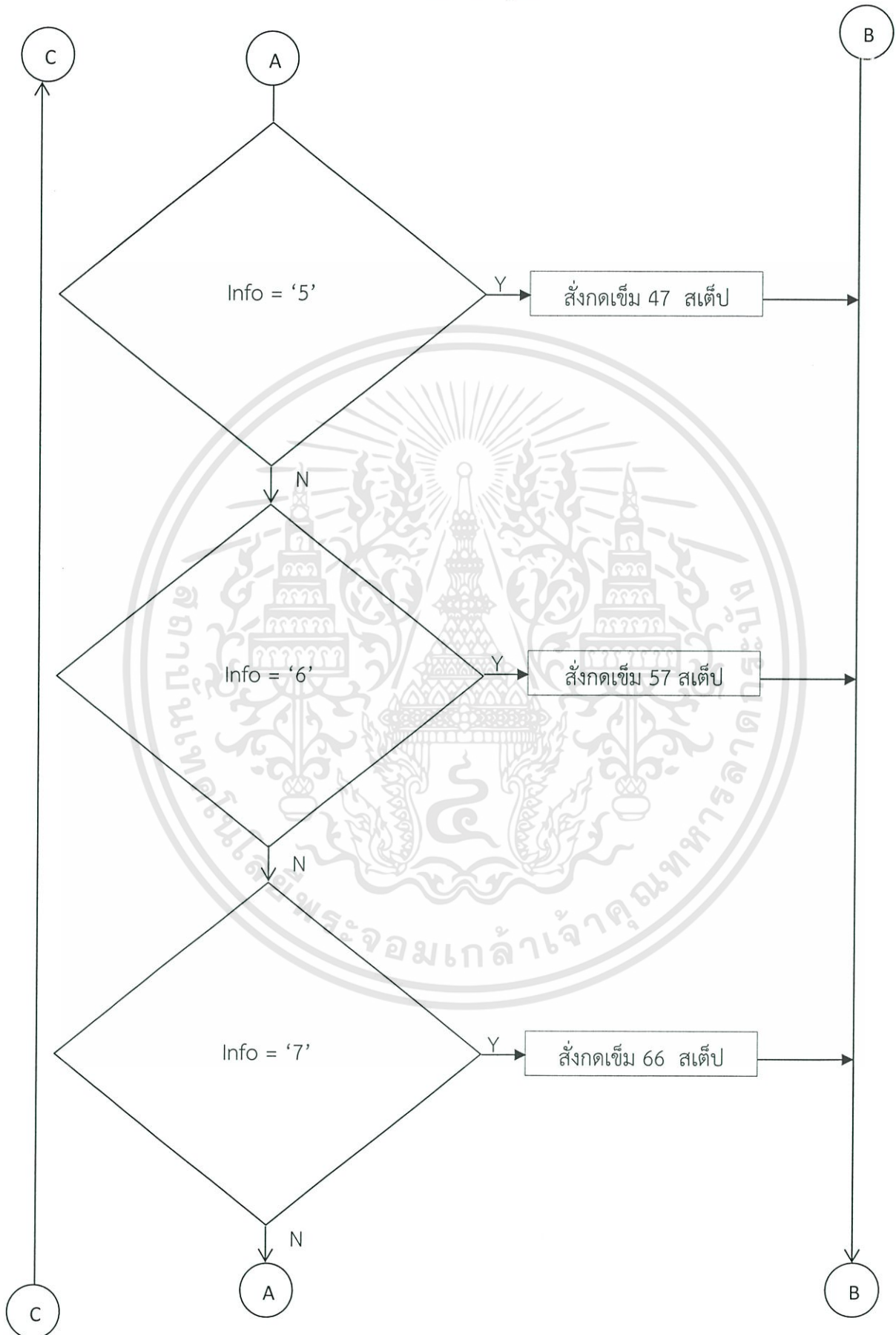
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ต่อ) แผนการทำงานของสตีปปีงมอเตอร์ โปรแกรมอะคูโน



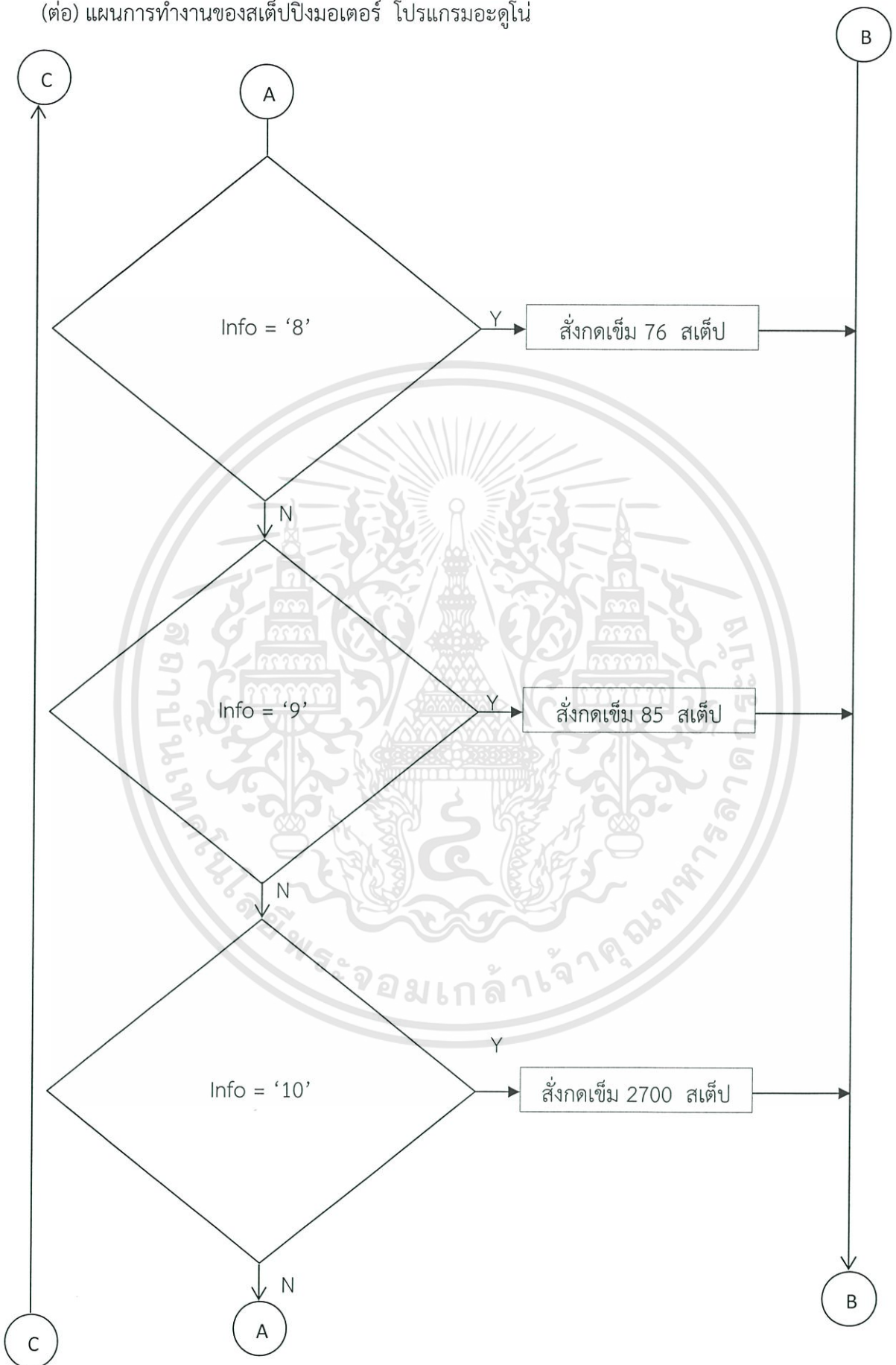
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ต่อ) แผนการทำงานของสตีปปีงมอเตอร์ โปรแกรมอะคูโน



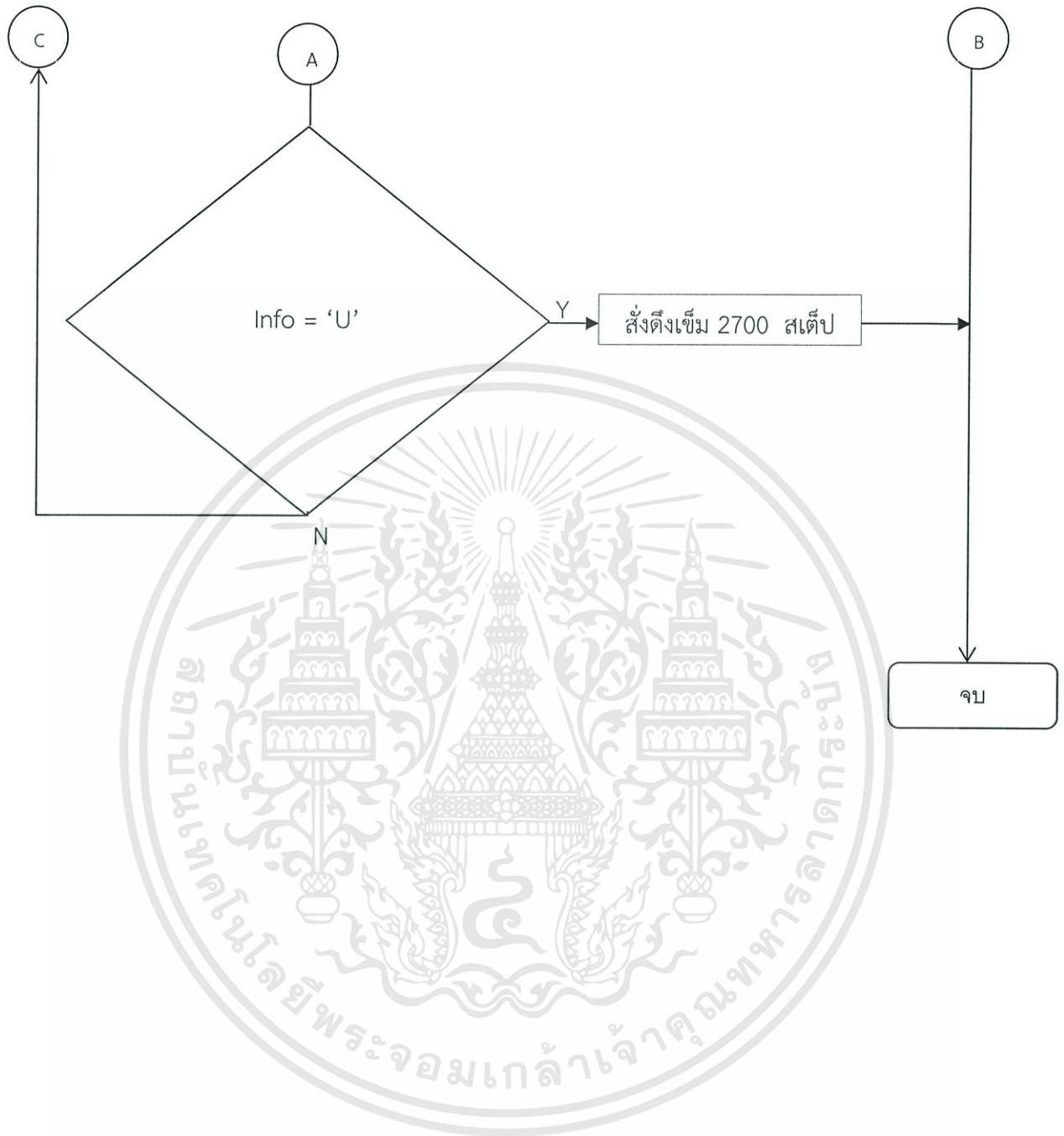
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ต่อ) แผนการทำงานของสตีปปีงมอเตอร์ โปรแกรมอะดูโน่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ต่อ) แผนการทำงานของสตีปปี้งมอเตอร์ โปรแกรมอะคูโน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



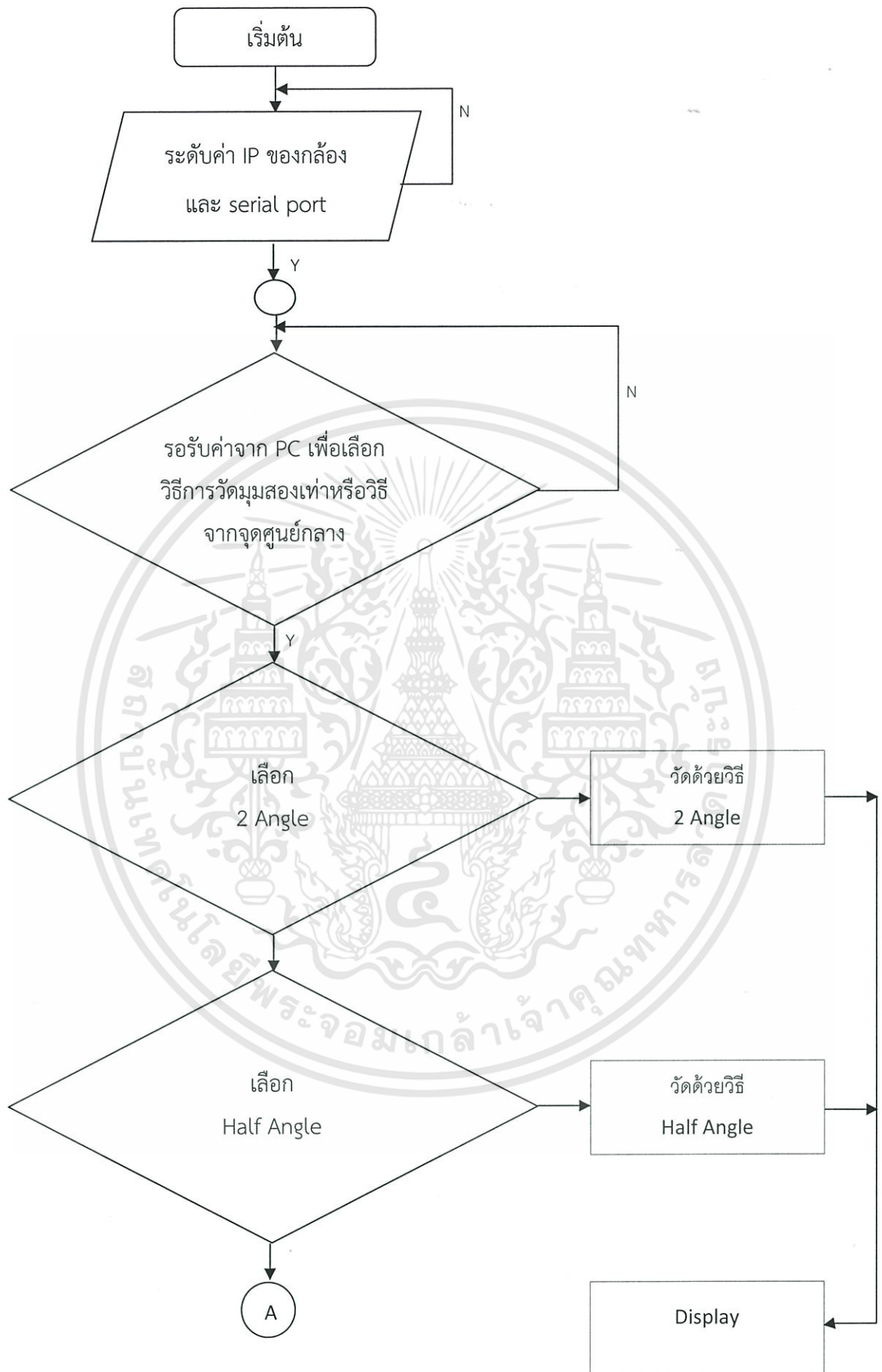
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้