การพัฒนาระบบหมุนเวียนความร้อนขนาดเล็กสำหรับของเหลวระดับไมโครลิตร

นายพิทยา ดีกล้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2557

DEVELOPMENT OF MINIATURIZED THERMO CYCLING SYSTEM FOR MICROLITER LIQUID

Pittaya Deekla

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the

Degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2014

การพัฒนาระบบหมุนเวียนความร้อนขนาดเล็กสำหรับของเหลวระดับไมโครลิตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาดุษฎีบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

_____

(รศ. ดร.กิตติ อัตถกิจมงคล)
ประธานกรรมการ

_____

(อ. ดร.นิมิต ชมนาวัง)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

_____

(ผศ. ดร.เผด็จ เผ่าละออ)
กรรมการ

_____

(อ. ดร.วิโรจน์ แสงธงทอง)
กรรมการ

_____

(ดร.ประพงษ์ คล้ายสุบรรณ์)
กรรมการ

_____

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

_____

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

พิทยา ดีกล้า : การพัฒนาระบบหมุนเวียนความร้อนขนาดเล็กสำหรับของเหลวระดับไมโครลิตร (DEVELOPMENT OF MINIATURIZED THERMO CYCLING SYSTEM FOR MICROLITER LIQUID) อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.นิมิต ชมนาวัง, 187 หน้า.

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาระบบหมุนเวียนความร้อนสำหรับของเหลวระดับไมโครลิตร เพื่อเป็นต้นแบบเครื่องพีซีอาร์ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำหรับเพิ่มปริมาณดีเอ็นเอ ให้มีขนาดเล็ก ทำงานรวดเร็ว พกพาสะดวก ด้วยการสร้างลวดลายของชุดทำความร้อนที่ประกอบด้วยไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิโดยการเคลือบไอโลหะผ่านหน้ากากแข็งที่สร้างด้วยรังสีเอกซ์ พบว่าขนาดลวดลายที่ผลิตได้มีค่าความผิดพลาดเฉลี่ย ±7.50 % จากการออกแบบ กระบวนการดังกล่าวเป็นเทคนิคใหม่ที่สามารถลดต้นทุน เวลา สารเคมีและเครื่องมือในการสร้างได้อย่างมาก ซึ่งในงานวิจัยได้สร้างชุดทำความร้อนบนฐานรองกระจกหนา 1 mm และกระจกบาง 0.15 mm หลังจากนั้นทำการทดสอบคุณสมบัติ เมื่อพิจารณาชุดทำความร้อนบนฐานรองกระจกหนา เซนเซอร์มีค่าความแม่น ±2.4 % จากค่าเต็มสเกลที่ 110 ^{o}C และความมีค่าความไว 0.396 Ω/^{o}C ไมโครฮีตเตอร์มีค่าคงตัวทางเวลา 8.2 วินาที เวลาขาขึ้น 32.5 วินาที เวลาขาลง 38 วินาที และใช้กำลังขับ 392 W ส่วนชุดทำความร้อนบนฐานรองกระจกบาง เซนเซอร์มีค่าความแม่น ±1.8 % จากค่าเต็มสเกลที่ 110 ^{o}C มีค่าความไว 0.479 Ω/^{o}C และไมโครฮีตเตอร์มีค่าคงตัวทางเวลา 3.7 วินาที เวลาขาขึ้น 13 วินาที เวลาขาลง 14 วินาที ใช้กำลังขับ 206 W ดังนั้นชุดทำความร้อนบนกระจกบางให้ผลตอบสนองดีกว่าชุดทำความร้อนบนกระจกหนาดังนี้ ค่าคงตัวทางเวลาลดลง 54.8 % เวลาขาขึ้นลดลง 60.0 % เวลาขาลงลดลง 57.3 % และกำลังไฟฟ้าที่ในการขับลดลงเฉลี่ยเท่ากับ 50.97 % ต่อมาทำการทดสอบหมุนเวียนความร้อนตามหลักการของพีซีอาร์จำนวน 30 รอบ พร้อมกับห้องบรรจุของเหลวที่ถูกสร้างด้วย PDMS บรรจุน้ำ 10 μL ได้ผลดังนี้ แบบที่ 1 (SUT1) ชุดทำความร้อนบนกระจกหนาไม่ระบายความร้อนใช้เวลา 30 นาที แบบที่ 2 (SUT2) ชุดทำความร้อนบนกระจกหนาระบายความร้อนด้วยก๊าซไนโตรเจนแรงดัน 0.5 บาร์ ใช้เวลา 23 นาที แบบที่ 3 (SUT3) ชุดทำความร้อนบนกระจกบางไม่ระบายความร้อนใช้เวลา 23 นาที และแบบที่ 4 (SUT4) ชุดทำความร้อนบนกระจกบางระบายความร้อนด้วยก๊าซไนโตรเจนแรงดัน 0.5 บาร์ ใช้เวลา 15 นาที หากทำการเปรียบเทียบเวลาในการทำงานกับแบบที่ 1 พบว่า เวลาทำงานแบบที่ 2 และแบบที่ 3 ลดเวลาได้ 1.3 เท่า ส่วนแบบที่ 4 สามารถลดเวลาได้ 2 เท่า

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนักศึกษา_____

ปีการศึกษา 2557 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา_____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม_____

PITTAYA DEEKLA : DEVELOPMENT OF MINIATURIZED THERMO CYCLING SYSTEM FOR MICROLITER LIQUID. THESIS ADVISOR : NIMIT CHOMNAWANG, Ph.D., 187 PP.

MICROHEATER/TEMPERATURE SENSOR/THERMO CYCLE/ PCR/MEMS

This research aims to develop a miniaturized thermo cycling system using liquid in amount of microliters for a prototype of PCR machine which is used to amplify a single or a few copies of a piece of DNA. To gain size reduction, fast operation and portable of the system, pattern of thermal set is designed with a microheater and sensor fabricated by evaporating metal through hard-mask which is constructed by X-ray lithography. There are errors of ±7.50 % from patterning design. To reduce costs, times, chemicals and machines in fabrication process, the fabrication of thermal set is based on glass slide with 1 mm-thick and 0.15 mm-thick. From the experiment and testing, the thermal set characteristics on both glasses, sensor of the thermal set on the thick glass has the accuracy of ±2.4 % at full-scale of 110 ^{o}C and sensitivity of 0.396 Ω/^{o}C while microheater has the time constant for 8.2 s, rise-time for 32.5 s and fall-time for 38 s using power at 392 W. On the other hand, sensor of the thermal set on the thin glass has the accuracy of ±1.8 % at the full-scale of 110 ^{o}C same as above and sensitivity of 0.479 Ω/^{o}C while microheater has the time constant for 3.7 s, rise-time for 13 s and fall-time for 14 s using power at 206 W. Obviously, the thermal set on the thin glass is better than the thermal set on the thick glass considering as time constant reduction at 54.8 %, rise-time reduction at 60.0 %, fall-time reduction at 57.3 % and power reduction at 50.97 %. Next, testing thermo cycler

by PCR technique in condition of 30 cycles times with liquid of 10 microliter in chamber which is fabricated by PDMS to be investigated in four cases for operating time. For the first case (SUT1), the thermal set on the thick glass with no cooling uses operating time for 30 minutes. For the second case (SUT2), the thermal set on the thick glass with N_2-0.5 bar cooling uses operating time for 23 minutes. For the third case (SUT3), the thermal set on the thin glass with no cooling uses operating time for 23 minutes. For the fourth case (SUT4), the thermal set on the thin glass with N_2-0.5 bar cooling uses operating time for 15 minutes. The comparisons of the first case with the second and third cases which have the reduction in operating time at 1.3 times and the fourth case has the reduction in operating time at 2 times.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

School of Electrical Engineering

Academic Year 2014

Student's Signature_____

Advisor's Signature_____

Co-Advisor's Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลือ อย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและการดำเนินงานวิจัย รวมถึงหน่วยงานต่าง ๆ ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัย อาทิ

อาจารย์ ดร.นิมิต ชมนาวัง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำและชี้แนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิทยานิพนธ์ รวมทั้งเป็นกำลังใจในระหว่างการดำเนินการวิจัยให้กับผู้วิจัยเสมอมา

ดร.ประพงษ์ คล้ายสุบรรณ์ ผู้อำนวยการฝ่ายเทคโนโลยีเครื่องเร่งอนุภาค สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่กรุณาให้แนะนำและคำปรึกษาทางด้านวิชาการ

ศาสตราจารย์ นาวาอากาศโท ดร.สราวุฒิ สุจิตจร ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย

ดร.รุ่งเรือง พัฒนากุล นักวิทยาศาสตร์ระบบลำเลียงแสง สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย

คณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำหรับการสนับสนุนเครื่องมือวิจัย สถานที่ทำวิจัยและให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัยตลอดระยะเวลาที่ศึกษา

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องและเพื่อนพ้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ได้ให้ความรัก ความอบอุ่น ความห่วงใย ให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษาอย่างดียิ่ง

พิทยา ดีกล้า

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) ..... ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) ..... ข
กิตติกรรมประกาศ ..... ง
สารบัญ ..... จ
สารบัญตาราง ..... ช
สารบัญรูป ..... ฌ

บทที่

1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 2
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย 2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินการ 2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3
1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์ 3
2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4
2.1 สารพันธุกรรม 4
2.2 หลักการของพีซีอาร์ 5
2.3 ไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ 9
2.4 เทคนิคพีซีอาร์ 15
2.5 บทสรุป 20
3 กระบวนการพื้นฐานที่ใช้ในงานวิจัย 21
3.1 กระบวนการลิโธกราฟฟี 21
3.2 การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า 23
3.3 กระบวนการเคลือบโลหะ 26
3.4 บทสรุป 29

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4 การทำความร้อน 30
4.1 การทำความร้อน 32
4.2 สมการนำความร้อน 35
4.3 การนำความร้อนในสภาวะคงตัว 38
4.4 การจำลองความร้อนในไมโครฮีตเตอร์ 40
4.5 บทสรุป 47
5 การพัฒนาไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ 48
5.1 การสร้างไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต 48
5.2 การพัฒนาไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิด้วยรังสีเอกซ์ 51
5.2.1 การสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ 51
5.2.2 กระบวนการสร้างหน้ากากแข็งของไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์ด้วยรังสีเอกซ์ด้วยฐานรองกราไฟต์ 56
5.2.3 กระบวนการสร้างหน้ากากแข็งของไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์ด้วยรังสีเอกซ์ด้วยฐานรองสเตนเลส 60
5.2.4 กระบวนการสร้างลวดลายของไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์ 67
5.3 การเปรียบเทียบต้นทุนการสร้างไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตและรังสีเอกซ์ 80
5.4 การเชื่อมต่อไมโครฮีตเตอร์กับวงจร 88
5.5 การสร้างห้องบรรจุของเหลว 93
5.6 บทสรุป 98
6 คุณลักษณะของไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์ 99
6.1 การปรับเทียบเซนเซอร์ 99
6.1.1 การปรับเทียบและคุณลักษณะเซนเซอร์บนฐานรองกระจกหนา 101
6.1.2 การปรับเทียบและคุณลักษณะเซนเซอร์บนฐานรองกระจกบาง 109
6.1.3 สรุปคุณสมบัติของเซนเซอร์ 117
6.2 การหาผลตอบสนองทางเวลาของชุดทำความร้อน 118
6.2.1 ทดสอบวงจรขับแบบ DAC 120

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.2.2 ทดสอบวงจรขับแบบ PWM 130
6.3 บทสรุป 135
7 การทดสอบการหมุนเวียนความร้อน 136
7.1 ชุดทดสอบหมุนเวียนความร้อน 136
7.2 การทดสอบระบบหมุนเวียนความร้อน 141
7.2.1 การหมุนเวียนความร้อนบนฐานรองกระจกหนา 141
7.2.2 การหมุนเวียนความร้อนบนฐานรองกระจกบาง 147
7.3 บทสรุป 157
8 สรุปและข้อเสนอแนะ 158
8.1 สรุป 158
8.2 ข้อเสนอแนะ 160
รายการอ้างอิง 162
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก. การทดสอบไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์จากกระบวนการลิโธกราฟี
ด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต 167
ประวัติผู้เขียน 187

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 การพัฒนาเครื่องหมุนเวียนความร้อนขนาดเล็ก 20
3.1 ส่วนประทางเคมีสำหรับการทำ wood's strike 26
4.1 คุณสมบัติการนำความร้อนและไฟฟ้าของวัสดุที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ 43
5.1 พารามิเตอร์ของไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์ที่สร้างด้วยรังสีอัลตราไวเลต 50
5.2 ขนาดโครงสร้างของไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์สำหรับสร้างผ่านหน้ากากแข็ง 52
5.3 ความต้านทานจากการเคลือบด้วยการสปัตเตอริ่ง 70
5.4 ความต้านทานจากเคลือบด้วยการระเหยไอในสุญญากาศ 71
5.5 ผลการวัดขนาดของฟิล์มกั้นรังสีอัลตราไวโอเลต 75
5.6 ผลการวัดขนาดหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ 76
5.7 ผลการวัดขนาดหน้ากากแข็ง 77
5.8 ผลการวัดลวดลายผ่านหน้ากากแข็ง 78
5.9 ผลการวัดลวดลายโดยกระบวนการสร้างด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต 79
5.10 สรุปกระบวนการสร้างลวดลายด้วยกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสี อัลตราไวโอเลต 81
5.11 สรุปการสร้างลวดลายด้วยเคลือบโลหะผ่านหน้ากากแข็ง 82
5.12 การประมาณต้นทุการสร้างไมโครฮีตเตอร์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต 83
5.13 ต้นทุการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ 84
5.14 ต้นทุนการสร้างหน้ากากแข็ง 85
5.15 ต้นทุนการสร้างลวดลายผ่านหน้ากากแข็ง 85
5.16 เปรียบเทียบต้นทุนการสร้างอุปกรณ์ 86
5.17 เปรียบเทียบต้นทุนการสร้างอุปกรณ์ต่อชิ้น 86
5.18 เปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของกระบวนการสร้าง 88
6.1 คุณสมบัติเซนเซอร์ของชุดทำความร้อนบนฐานรองกระจกหนา 106
6.2 คุณสมบัติเซนเซอร์ของชุดทำความร้อนบนฐานรองกระจกบาง 115

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

6.3 สรุปคุณสมบัติของเซนเซอร์ที่ได้จากการสร้าง 117
6.4 ค่าความต้านทานของไมโครฮีตเตอร์ขณะทำการป้อนแรงดันบนฐานรองกระจกหนา 123
6.5 ค่าความต้านทานของไมโครฮีตเตอร์ขณะทำการป้อนแรงดันบนฐานรองกระจกบาง 124
6.6 เปรียบเทียบ อินพุตที่ป้อนสู่ไมโครฮีตเตอร์ระหว่างกระจกหนาและกระจกบาง ด้วยตัวขับแบบ DAC 126
6.7 เปรียบเทียบกำลังอินพุตที่ป้อนสู่ไมโครฮีตเตอร์ระหว่างฐานรองกระจกหนาและ ฐานรองกระจกบาง 127
6.8 สรุปคุณสมบัติของไมโครฮีตเตอร์ที่ได้จากการสร้าง 128
6.9 เปรียบเทียบ อินพุตที่ป้อนสู่ไมโครฮีตเตอร์ระหว่างกระจกหนาและกระจกบาง ด้วย PWM 134
6.10 เปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาระหว่างกระจกหนาและกระจกบางด้วย PWM 135
7.1 เปรียบเทียบผลทดสอบชุดทำความร้อนบนกระจกหนาที่ระบายอากาศด้วย ก๊าซไนโตรเจน 146
7.2 เปรียบเทียบผลทดสอบชุดทำความร้อนบนกระจกบางที่ระบายอากาศด้วย ก๊าซไนโตรเจน 151
7.3 เปรียบเทียบเวลาทำงานของพีซีอาร์ต้นแบบที่สร้างขึ้น 155

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

2.1 โครงสร้างพื้นฐานของดีเอ็นเอ 5
2.2 การทำเทคนิคพีซีอาร์เพื่อเพิ่มปริมาณดีเอ็นเอ 6
2.3 การแยกขนาดดีเอ็นเอด้วยการทำเจลอิเล็กโตรโฟรีซิส 8
2.4 โครงสร้างของโมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ 9
2.5 โครงสร้างไมโครฮีตเตอร์ของ Guan (2010) 11
2.6 โครงสร้างไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิของ Kim (2009) 12
2.7 โครงสร้างไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิของ Chung (2010) 12
2.8 โครงสร้างไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิของ Hwang (2011) 13
2.9 โครงสร้างไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิของ Nam (2010) 13
2.10 การสร้างไมโครฮีตเตอร์และอุปกรณ์ด้วยเลเซอร์ของ Cai (2011) 14
2.11 การสร้างไมโครฮีตเตอร์และอุปกรณ์ของ Cai (2011) 15
2.12 การหมุนเวียนอุณหภูมิด้วยเทคนิคพีซีอาร์ของ Yoon (2002) 16
2.13 โครงสร้างพีซีอาร์ของ Shin (2003) 16
2.14 โครงสร้างพีซีอาร์ของ Maturos (2010) 17
2.15 เปรียบเทียบเวลาต่อรอบการทำงานกับปริมาตรของงานวิจัยต่าง ๆ 20
3.1 กระบวนการหมุนเคลือบสารไวแสง 22
3.2 เปรียบเทียบการใช้สารไวแสงสองชนิดในกระบวนการลิโธกราฟฟี 23
3.3 การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า 24
3.4 เครื่องเคลือบโลหะด้วยการระเหยไอโลหะในสุญญากาศ 26
3.5 เครื่องเคลือบโลหะแบบการสปัตเตอริง 28
4.1 การนำความร้อนผ่านผนังที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ 31
4.2 การเปรียบเทียบการไหลของความร้อนกับการไหลของกระแสไฟฟ้า 32
4.3 ลักษณะการเกิดการพาความร้อน 33
4.4 การถ่ายโอนความร้อนแบบแผ่รังสีความร้อน 35

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.5 ภาพแสดงการนำความร้อนจากตำแหน่ง x ไปยังตำแหน่ง x+Δx....35
4.6 รูปสำหรับการพิจารณาอุณหภูมิจากการนำความร้อนที่วัสดุมีโครงสร้างสมมาตรกัน 39
4.7 โครงสร้างอย่างง่ายของไมโครฮีตเตอร์....41
4.8 ผลการจำลองป้อนแรงดันที่ระดับต่าง ๆให้กับไมโครฮีตเตอร์....44
4.9 อิทธิพลของความร้อนของตัวต้านทานใด ๆ ต่อตัวต้านทานรอบข้าง 46
4.10 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในตัวต้านทานจะค่าสูงสุดบริเวณตรงกลาง 47
5.1 การสร้างไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์ด้วยกระบวนลิโธกราฟฟีด้วย
รังสีอัลตราไวโอเลต....49
5.2 โครงสร้างอุปกรณ์ที่ได้จากกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต....50
5.3 ลวดลายโครงสร้างสำหรับสร้างไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ 52
5.4 การจำลองความต้านทานของไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์กับความหนาโลหะ....53
5.5 กระบวนการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์....54
5.6 หน้ากากกั้นรังสีเอกซ์หลังจากการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตและทำการอบ 55
5.7 หน้ากากกั้นรังสีเอกซ์หลังจากล้างสารไวแสง....55
5.8 หน้ากากกั้นรังสีเอกซ์หลังชุบโลหะทองคำ....56
5.9 กระบวนการสร้างหน้ากากแข็งด้วยกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอกซ์ 56
5.10 ลวดลายหลังจากกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอกซ์บนฐานรองกราไฟต์ 58
5.11 การสร้างหน้ากากแข็งหลังชุบโลหะนิกเกิลบนฐานรองกราไฟต์....58
5.12 หลังขัดโลหะสำหรับหน้ากากแข็งจากฐานรองกราไฟต์....59
5.13 หลังสกัดสารไวแสงออกจากหน้ากากแข็งของไมโครฮีตเตอร์ 60
5.14 กระบวนการสร้างหน้ากากแข็งของไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์ด้วยรังสีเอกซ์
ด้วยฐานรองสเตนเลส....61
5.15 การสร้างหน้ากากแข็งหลังฉายรังสีเอกซ์บนฐานรองสเตนเลส....62
5.16 การสร้างหน้ากากแข็งหลังล้างสารไวแสงบนฐานรองสเตนเลส....62
5.17 การสร้างหน้ากากแข็งหลังชุบโลหะนิกเกิลบนฐานรองสเตนเลส....63
5.18 หลังขัดโลหะสำหรับหน้ากากแข็งจากฐานรองสเตนเลส....63

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

5.19 หลังสกัดสารไวแสงออกจากหน้ากากแข็งของไมโครฮีตเตอร์ 64
5.20 ชิ้นงานที่เสียหายจากการแยกชิ้นงานจากฐานรองสเตนเลส 66
5.21 การสร้างลวดลายโลหะผ่านหน้ากากแข็ง 67
5.22 การเคลือบโลหะผ่านหน้ากากแข็งด้วยการสปัตเตอริ่ง 68
5.23 ลวดลายที่เกิดจากการเคลือบโลหะด้วยการสปัตเตอริ่งที่เวลาต่าง ๆ 69
5.24 การเคลือบลวดลายผ่านหน้ากากแข็งด้วยการเคลือบแบบระเหยไอในสุญญากาศ 71
5.25 ตำแหน่งสำหรับวัดขนาดความคลาดเคลื่อนของโครงสร้าง 73
5.26 การวัดขนาดของลวดลายที่สร้างผ่านหน้ากากแข็ง 74
5.27 แนวทางการวัดความคลาดเคลื่อนของลวดลายที่สร้างผ่านหน้ากากแข็ง 74
5.28 ขั้นตอนการวัดขนาดโครงสร้าง 80
5.29 เปรียบเทียบกระบวนการสร้างลวดลายระหว่างกระบวนการลิโธกราฟฟี
ด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตและการเคลือบโลหะผ่านหน้ากากแข็ง 82
5.30 การเปรียบต้นทุนการสร้างไมโครฮีตเตอร์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตและรังสีเอกซ์ 87
5.31 ความเสียหายที่เกิดจากการเชื่อมต่อสายไฟฟ้าโดยใช้แท่งโลหะกดสัมผัสกับ
ลวดลายโดยตรง 89
5.32 การเชื่อมต่อสายไฟฟ้าโดยแผ่น PCB เป็นฐานรองพร้อมลวดลายตะกั่ว 90
5.33 จากการเชื่อมต่อสายไฟฟ้าโดยสร้างลวดลายทองแดงภายนออก 91
5.34 การเชื่อมต่อสายไฟฟ้าด้วยเครื่อง wire bonding และกาวนำไฟฟ้า 92
5.35 การเชื่อมต่อชุดไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์ 93
5.36 หน้ากากดูดซับรังสีเอกซ์สำหรับสร้างห้องบรรจุของเหลว 94
5.37 กระบวนการสร้างห้องบรรจุของเหลวและแม่พิมพ์ 94
5.38 แม่พิมพ์ SU8 หลังฉายแสงและล้างสารไวแสง 95
5.39 การหล่อมแบบ PDMS ลงบนม่พิมพ์ SU8 96
5.40 หลังทำการลอก PDMS ออกจกาแม่พิมพ์ SU8 97
5.41 ขนาดโครงสร้างของห้องบรรจุของเหลว 97
5.42 ชุดทำความร้อนขนาดเล็กสำหรับของเหลวระดับไมโครลิตร 98
6.1 การจัดเรียงไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์ 99

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

6.2 การปรับเทียบเซนซอร์บนแผ่นความร้อน 100
6.3 กราฟแสดงการปรับเทียบเทียบเซนเซอร์บนฐานรองกระจกหนา 101
6.4 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของการปรับเทียบเทียบเซนเซอร์บนฐานรองกระจกหนา 103
6.5 ผลการทดสอบฮีสเตอร์รีซีสของชุดทำความร้อนบนฐานรองกระจกหนา....105
6.6 วงจรปรับแต่งสัญญาณเซนเซอร์ 107
6.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับอุณหภูมิเซนเซอร์บนกระจกหนา 108
6.8 กราฟแสดงการปรับเทียบเทียบเซนเซอร์บนกระจกบาง 110
6.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับอุณหภูมิเซนเซอร์ บนฐานรองกระจกบาง....112
6.10 ผลการทดสอบฮีสเตอร์รีซีสของชุดทำความร้อนบนฐานรองกระจกบาง....113
6.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับอุณหภูมิของเซนเซอร์ บนฐานรองกระจกบาง....116
6.12 วงจรสำหรับทดสอบผลตอบสนองทางเวลาโดยใช้ DAC....118
6.13 ผลของแรงดันที่ป้อนเข้าสู่ไมโครฮีตเตอร์กับอุณหภูมิบนฐานรองกระจกหนา....120
6.14 ผลของกำลังที่ป้อนเข้าสู่ไมโครฮีตเตอร์กับอุณหภูมิบนฐานรองกระจกหนา....121
6.15 ผลตอบสนองทางเวลาของไมโครฮีตเตอร์บนฐานรองกระจกหนา....121
6.16 ผลของแรงดันที่ป้อนเข้าสู่ไมโครฮีตเตอร์กับอุณหภูมิบนฐานรองกระจกบาง....123
6.17 ผลของกำลังที่ป้อนเข้าสู่ไมโครฮีตเตอร์กับอุณหภูมิบนฐานรองกระจกบาง....124
6.18 ผลตอบสนองทางเวลาของไมโครฮีตเตอร์บนฐานรองกระจกบาง....125
6.19 เปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาของไมโครฮีตเตอร์บนฐานรองกระจกหนา และบางด้วยตัวขับแบบ DAC 126
6.20 ผลการจำลองการกระจายความร้อนของไมโครฮีตเตอร์ บนฐานรองกระจกหนาและบาง....129
6.21 วงจรสำหรับควบคุมชุดทำความร้อนแบบ PWM....130
6.22 ผลตอบสนองทางเวลาของไมโครฮีตเตอร์บนฐานรองกระจกหนา ด้วยสัญญาณ PWM....132

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

6.23 ผลตอบสนองทางเวลาของไมโครฮีตเตอร์บนฐานรองกระจกบาง ด้วยสัญญาณ PWM 133

6.24 เปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาของชุดทำความร้อนบนฐานรอง กระจกหนาและบางที่ควบคุมด้วย PWM 134

7.1 ชุดหมุนเวียนความร้อนสำหรับของเหลวระดับไมโครลิตร 137

7.2 เครื่องหมุนเวียนความร้อนขนาดเล็กสำหรับเทคนิคพีซีอาร์ 138

7.3 แนวทางการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของระบบทำความร้อนสำหรับใช้กับ เทคนิคพีซีอาร์ 141

7.4 การแสดงผลที่อุณหภูมิระดับต่าง ๆ ผ่านจอแสดงผล 142

7.5 การหมุนเวียนความร้อนแบบไร้โหลดของฐานรองกระจกหนา 143

7.6 การหมุนเวียนความร้อนมีโหลดเป็นห้องบรรจุของเหลวของฐานรองกระจกหนา 144

7.7 การหมุนเวียนความร้อนมีโหลดเป็นห้องบรรจุของเหลวและน้ำ ของฐานรองกระจกหนา 145

7.8 การหมุนเวียนความร้อนแบบไร้โหลดของฐานรองกระจกบาง 148

7.9 การหมุนเวียนความร้อนมีโหลดเป็นห้องบรรจุของเหลว ของฐานรองกระจกบาง 149

7.10 การหมุนเวียนความร้อนมีโหลดเป็นห้องบรรจุของเหลวและน้ำ ของฐานรองกระจกบาง 150

7.11 การหมุนเวียนความร้อนของเครื่องต้นแบบพีซีอาร์ขนาดเล็ก 153

7.12 เครื่องหมุนเวียนความร้อนขนาดเล็กสำหรับเทคนิคพีซีอาร์ 156

8.1 เปรียบเทียบเครื่องหมุนเวียนความร้อนขนาดเล็กกับงานวิจัยอื่น 161

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

การศึกษาวิเคราะห์เกี่ยวกับสารพันธุกรรมได้เข้ามามีบทบาททางการแพทย์เป็นอย่างมาก เนื่องจากพันธุกรรม (Genetics) เป็นสิ่งที่บ่งบอกการถ่ายทอดลักษณะต่าง ๆ ของสิ่งมีชีวิตจากบรรพบุรุษสู่รุ่นลูกหลาน การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางพันธุกรรมอาจจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ใหม่หรือส่งผลกระทบต่อการดำเนินชีวิตของสิ่งมีชีวิตนั้นได้ เทคโนโลยีที่ใช้ศึกษาวิเคราะห์เกี่ยวกับสารพันธุกรรมได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องและเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายคือ เทคนิคปฏิกิริยาลูกโซ่พอลิเมอเรส (Polymerase chain reaction : PCR) เป็นเทคนิคที่ลอกเลียนแบบการสังเคราะห์ดีเอ็นเอในธรรมชาติ สามารถเพิ่มดีเอ็นเอจากหนึ่งชิ้นให้เป็นหลายล้านชิ้นที่มีลักษณะเหมือนเดิม แต่ปัจจุบันระบบดังกล่าวยังมีราคาที่สูงทำงานช้า

ในงานวิจัยมีแนวทางประยุกต์เทคโนโลยีทางด้านกลไฟฟ้าจุลภาค (Micro Electro Mechanical System : MEMS) เพื่อสร้างอุปกรณ์สำหรับเพิ่มปริมาณดีเอ็นเอ (DNA) หรือเรียกว่าเครื่องพีซีอาร์ (PCR machine) หรือเทอร์โมไซเคิล (Thermo cycle) เป็นต้นแบบเครื่องมือสำหรับเพิ่มปริมาณดีเอ็นเอเพื่อเป็นประโยชน์ในด้านเทคโนโลยีชีวภาพ นอกจากนี้แล้วเทคนิคดังกล่าวยังเป็นเทคนิคที่สำคัญสำหรับการประยุกต์ใช้ในทางวิทยาศาสตร์อีกหลากหลายสาขา ซึ่งจำเป็นต้องมีระบบทำความร้อนที่ดีเพื่อให้ได้ผลทดลองที่ถูกต้องและรวดเร็วที่สุด แต่ปัจจุบันระบบดังกล่าวนั้นยังไม่สามารถทำงานได้ดีพอ เนื่องจากยังขาดองค์ความรู้ของการสร้างอุปกรณ์ที่ดีพอทำให้ต้องพึ่งพาเครื่องมือที่นำเข้าจากต่างประเทศและเครื่องมือที่มีขายอยู่ในท้องตลาดทั่วไปใช้เวลาในการวิเคราะห์ที่เนิ่นนาน โดยเฉลี่ยการใช้เวลาในการเพิ่มปริมาณดีเอ็นเอประมาณ 1 ถึง 3 ชั่วโมง อันเป็นผลมาจากระบบทำความร้อนที่ทำงานได้ช้า แต่หากเปลี่ยนมาใช้ชุดทำความร้อนขนาดเล็กที่ประกอบด้วยไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ จะช่วยลดระยะเวลาลง ส่งผลให้สามารถขยายจำนวนและวิเคราะห์ดีเอ็นเอได้รวดเร็วกว่าเดิม นอกจากนี้ไมโครฮีตเตอร์ยังมีประโยชน์ด้านอื่น เช่น เป็นอุปกรณ์สำหรับทำเซนเซอร์วัดก๊าซ หรือแม้แต่ใช้ในหัวอ่านฮาร์ดดิสก์และยังสามารถประยุกต์ใช้เป็นไมโครปั๊มสำหรับขับของไหลได้ในระดับไมโครลิตร ทำให้สามารถทดสอบงานทางวิทยาศาสตร์ได้อย่างแม่นยำ

การสร้างระบบทำความร้อนให้กับของเหลวระดับไมโครลิตรในงานวิจัยนี้ เป็นการสร้างต้นแบบอุปกรณ์ทำความร้อนที่เรียกว่าเครื่องพีซีอาร์ ซึ่งเป็นเครื่องมือสำหรับขยายหรือเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอ มีอยู่ด้วยกัน 2 ส่วน ส่วนแรกคือระบบทำความร้อนหรือชุดทำความร้อนประกอบด้วยไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ จะอาศัยกระบวนการสร้างด้วยการเคลือบโลหะผ่านหน้ากากแข็งที่สร้างจากกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอกซ์และส่วนที่สองคือ ส่วนของห้องบรรจุของเหลว (Liquid chamber) หรือห้องทำปฏิกิริยา (Reaction chamber) ของดีเอ็นเอ ซึ่งจะใช้พอลิเมอร์เป็นโครงสร้างหลัก โดยเป้าหมายของงานวิจัยนี้จะเน้นให้เครื่องมือที่สร้างขึ้นสามารถทำงานได้อย่างรวดเร็ว มีขนาดเล็ก พกพาได้สะดวก นอกจากนี้ยังต้องการหาแนวทางใหม่ในการสร้างอุปกรณ์เพื่อช่วยลดต้นทุน เวลา เครื่องมือและวัสดุที่ใช้ได้อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- สร้างองค์ความรู้และพัฒนาเทคนิคใหม่สำหรับการสร้างไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์อุณหภูมิ

- พัฒนาอุปกรณ์ทำความร้อนสำหรับปรับเปลี่ยนอุณหภูมิต้นแบบให้กับของเหลวระดับเล็กเพื่อประยุกต์ใช้ในงานด้านเทคโนโลยีชีวภาพ

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

สร้างระบบทำความร้อนเพื่อปรับเปลี่ยนอุณภูมิของน้ำระดับไมโครลิตรด้วยไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิชนิดฟิล์มบาง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- ศึกษาและออกแบบโครงสร้างพื้นฐานของไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ

- พัฒนากระบวนการสร้างไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิด้วยกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอกซ์

- สร้างระบบควบคุมสำหรับชุดทำความร้อน

- ทดสอบระบบทำความร้อน

- สรุป เขียนวิทยานิพนธ์และแผยแพร่ผลงานวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- เทคนิคใหม่สำหรับการสร้างระบบทำความร้อนโดยใช้แสงซินโครตรอน ซึ่งสามารถลดต้นทุนการผลิตจากแบบทั่ว ๆ ไปได้

- ต้นแบบเครื่องปรับเปลี่ยนอุณหภูมิขนาดเล็กสำหรับใช้งานด้านเทคโนโลยีชีวภาพ

1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 7 บทได้แก่ *บทที่ 1* เป็นบทนำ กล่าวถึงความเป็นมา ความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์งานวิจัย ขอบเขตงานวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ *บทที่ 2* กล่าวถึง ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง *บทที่ 3* กระบวนการสำหรับสร้างชุดทำความร้อน *บทที่ 4* กล่าวถึงทฤษฎีเกี่ยวกับความร้อน *บทที่ 5* กล่าวถึง กระบวนการสร้าง *บทที่ 6* แสดงการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติของชุดทำความร้อนที่สร้างขึ้น *บทที่ 7* เป็นเป็นการทดสอบหมุนเวียนความร้อน *บทที่* 8 เป็นบทสรุปงานวิจัย ข้อเสนอแนะ *ภาคผนวก ก.* กล่าวถึงการทดสอบไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์จากกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับการพัฒนาระบบทำความร้อนเพื่อประยุกต์ใช้ในงานด้านเทคโนโลยีชีวภาพนั้น จะเน้นในด้านการสร้างอุปกรณ์ทำความร้อนขนาดเล็กที่เรียกว่าเครื่องพีซีอาร์ บางครั้งเรียกว่า “เทอร์โมไซเคิล” ซึ่งเป็นเครื่องมือสำหรับขยายหรือเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอ มีประโยชน์หลายด้าน ประกอบด้วยส่วนที่ทำความร้อนและส่วนที่บรรจุของเหลวสำหรับสารที่ต้องการวิเคราะห์ การพัฒนาแนวทางการเพิ่มปริมาณชิ้นส่วนดีเอ็นเอได้เริ่มตั้งแต่ปี ค.ศ. 1980 โดย Kary Mullis ได้ทดสอบในหลอดทดลองที่เรียกว่า “Polymerase chain reaction” หรือ PCR เป็นเทคนิคที่เลียนแบบการสังเคราะห์ดีเอ็นเอในธรรมชาติ เมื่อสำเร็จสามารถเพิ่มดีเอ็นเอได้หลายล้านชิ้น นับแต่บัดนั้นเป็นต้นมาก็ได้มีการพัฒนาเครื่องพีซีอาร์อย่างต่อเนื่อง

2.1 สารพันธุกรรม

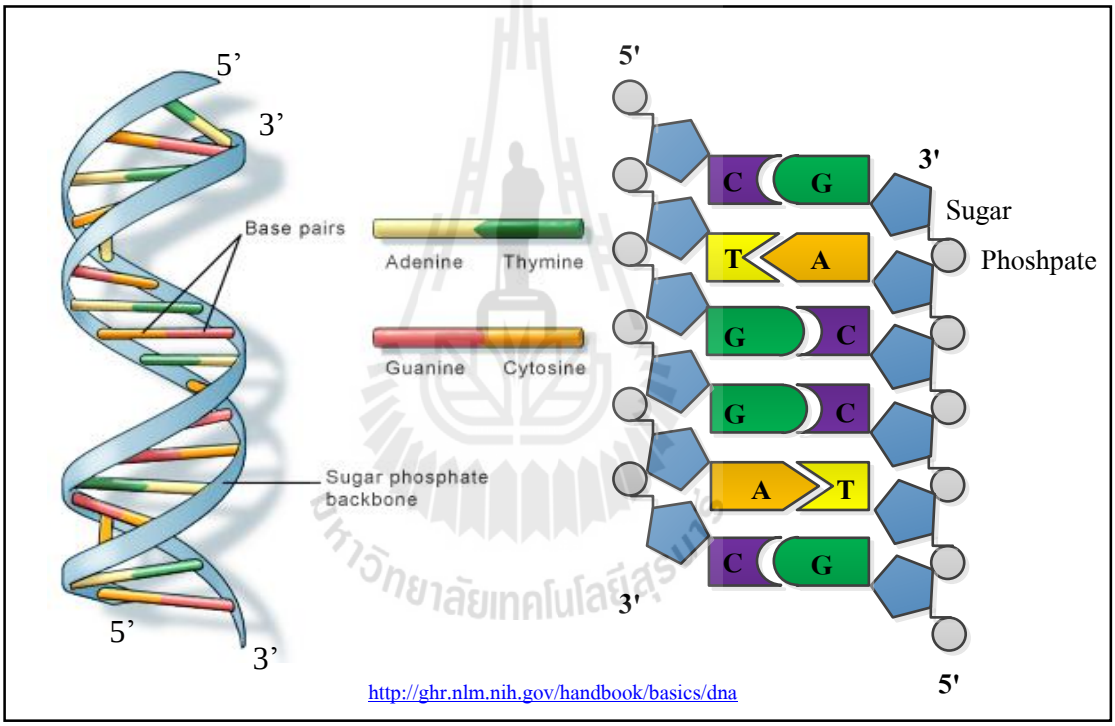
กรดนิวคลีอิก (Nucleic acid) ทำหน้าที่เป็นตัวกำหนดลักษณะต่าง ๆ ของสิ่งมีชีวิต เป็นสารที่ทำหน้าที่เก็บหน้าเก็บข้อมูลทางพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิตและสามารถถ่ายทอดไปสู่ลูกหลาน ประกอบด้วยหน่วยย่อยที่เรียกว่า นิวคลีโอไทด์ (Nucleotide) มี 3 องค์ประกอบเสมอคือ เบสไนโตรเจน (Nitrogenous base) น้ำตาลเพนโทส (Pentose) และกรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid) น้ำตาลเพนโทสที่พบเป็นองค์ประกอบของนิวคลีโอไทด์ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ซึ่งการเรียกชื่อกรดนิวคลีอิกนี้จะเรียกชื่อตามชนิดของน้ำตาลที่แตกต่างกันคือ

1) กรดนิวคลีอิกที่มีน้ำตาลไรโบส เป็นส่วนประกอบเรียกว่า กรดไรโบนิวคลีอิก (Ribonucleic acid) หรือ เรียกย่อๆว่า อาร์เอ็นเอ (RNA)

2) กรดนิวคลีอิกที่มีน้ำตาลดีออกซิไรโบส เรียกว่า กรดดีออกซิไรโบส (deoxyribonucleic acid) หรือ ดีเอ็นเอ (DNA) ทำหน้าที่เป็นสารพันธุกรรม

ดีเอ็นเอพบในเซลล์ของสิ่งมีชีวิตทุกชนิด ได้แก่ คน สัตว์ พืช เชื้อรา แบคทีเรีย (ไวรัส จะไม่ถูกเรียกว่าสิ่งมีชีวิตเป็นเพียงอนุภาคเท่านั้น) เป็นต้น ดีเอ็นเอจะบรรจุข้อมูลทางพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิตชนิดนั้นไว้ ซึ่งมีลักษณะที่ผสมผสานมาจากสิ่งมีชีวิตรุ่นก่อนซึ่งก็คือ พ่อและแม่ และสามารถถ่ายทอดไปยังสิ่งมีชีวิตรุ่นถัดไป ซึ่งก็คือ ลูกหลาน ดีเอ็นเอมีรูปร่างเป็นเกลียวคู่ คล้ายกับบันไดลิงที่บิดตัวทางขวา หรือบันไดเวียนขวา ขาหรือราวของบันไดแต่ละข้าง คือการเรียงตัวของ

นิวคลีโอไทด์ เบสในนิวคลีโอไทด์มีอยู่ 4 ชนิด ได้แก่ อะดีนีน (adenine, A) ไทมีน (thymine, T) ไซโทซีน (cytosine, C) และกัวนีน (guanine, G) ขาหรือราวของบันไดสองข้างหรือนิวคลีโอไทด์ถูกเชื่อมด้วยเบส โดยที่ A จะเชื่อมกับ T ด้วยพันธะไฮโดรเจนแบบพันธะคู่ และ C จะเชื่อมกับ G ด้วยพันธะไฮโดรเจนแบบพันธะสาม ข้อมูลทางพันธุกรรมในสิ่งมีชีวิตชนิดต่าง ๆ เกิดขึ้นจากการเรียงลำดับของเบสในดีเอ็นเอนั่นเอง โครงสร้างดีเอ็นเอจะเป็นลักษณะเกลียวคู่ (double helix) ประกอบด้วย 2 สาย พันกันเป็นเกลียวเวียนขวาในลักษณะแกนร่วมเดียวกัน ถ้าสายหนึ่งเรียงตัวจาก 5’ ไป 3’ (5’⟶3’) ฝั่งตรงข้ามจะเรียงตัวจาก 3’ ไป 5’ (3’⟶5’) ดังแสดงโครงสร้างพื้นฐานในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างพื้นฐานของดีเอ็นเอ

2.2 หลักการของพีซีอาร์

พีซีอาร์คือ เทคนิคการเพิ่มขยายปริมาณสารพันธุกรรมหรือชิ้นส่วนของดีเอ็นเอให้มีจำนวนมากขึ้นกว่าเดิมเป็นล้านเท่า (เตือนจิต คำพิทักษ์ และคณะ, 2551)โดยเลียนแบบกระบวนการจำลองดีเอ็นเอภายในเซลล์ จำเป็นต้องอาศัยองค์ประกอบดังนี้ ดีเอ็นเอแม่พิมพ์หรือต้นแบบ (template DNA) , DNA polymerase, Deoxyribonucleotide triphosphates (dNTPs) Oligonucleotide primers

และบัฟเฟอร์ที่เหมาะสม ปฏิกิริยาการสังเคราะห์จะเกิดต่อเนื่องซ้ำกันเป็นวงจรลูกโซ่ในแต่ละรอบ (Cycle) ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนเป็นดังรูปที่ 2.2 (ก) รูปที่ 2.2 (ค) โดยมีรายละเอียดดังนี้

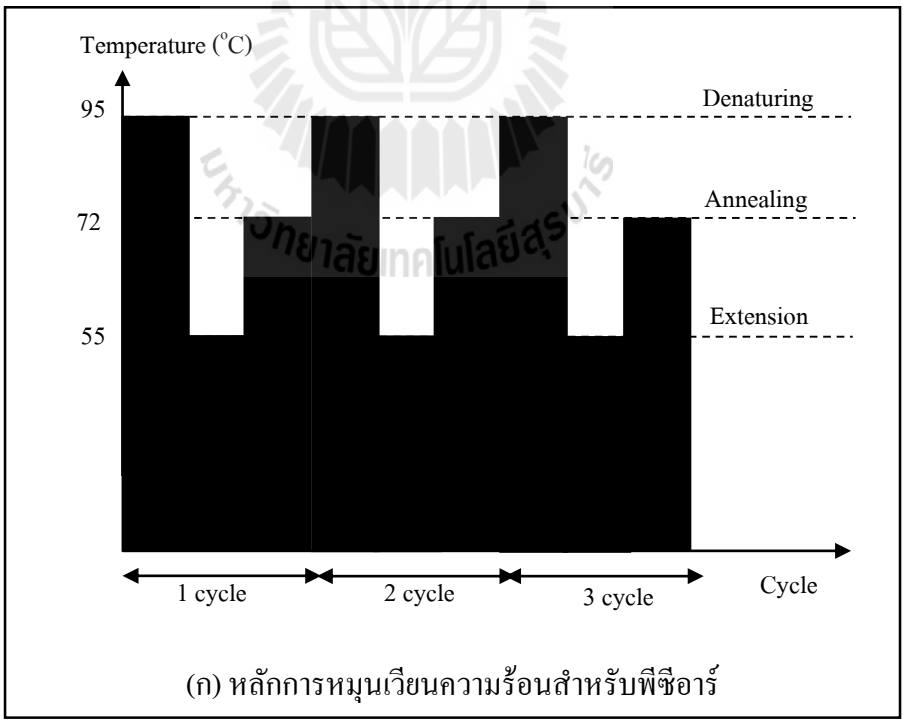
(1) Denaturing เป็นการให้ความร้อนสูงเพื่อแยกสายดีเอ็นเอจากต้นแบบหรือแม่พิมพ์ที่เป็นสายคู่ให้เป็นสายเดี่ยวใช้อุณหูมิประมาณ 90 °C ถึง 95 °C โดยทั่วไปใช้ 95 °C

(2) Annealing เป็นขั้นตอนการลดอุณหภูมิทำให้ไพรเมอร์ (Primer) ซึ่งเป็นดีเอ็นเอสายเดี่ยว จับคู่กับดีเอ็นเอแม่พิมพ์สายเดี่ยวทั้งสองใช้อุณหูมิประมาณ 50 °C ถึง 65 °C โดยทั่วไปใช้ 55 °C

(3) Extension หรือ polymerization เป็นขั้นตอนการสร้างสายดีเอ็นเอสายใหม่ด้วยการเติมนิวคลีโอไทด์เข้ากับสายดีเอ็นเอต้นแบบ ใช้อุณหูมิประมาณ 70 °C ถึง 75 °C โดยทั่วไปใช้ 72 °C

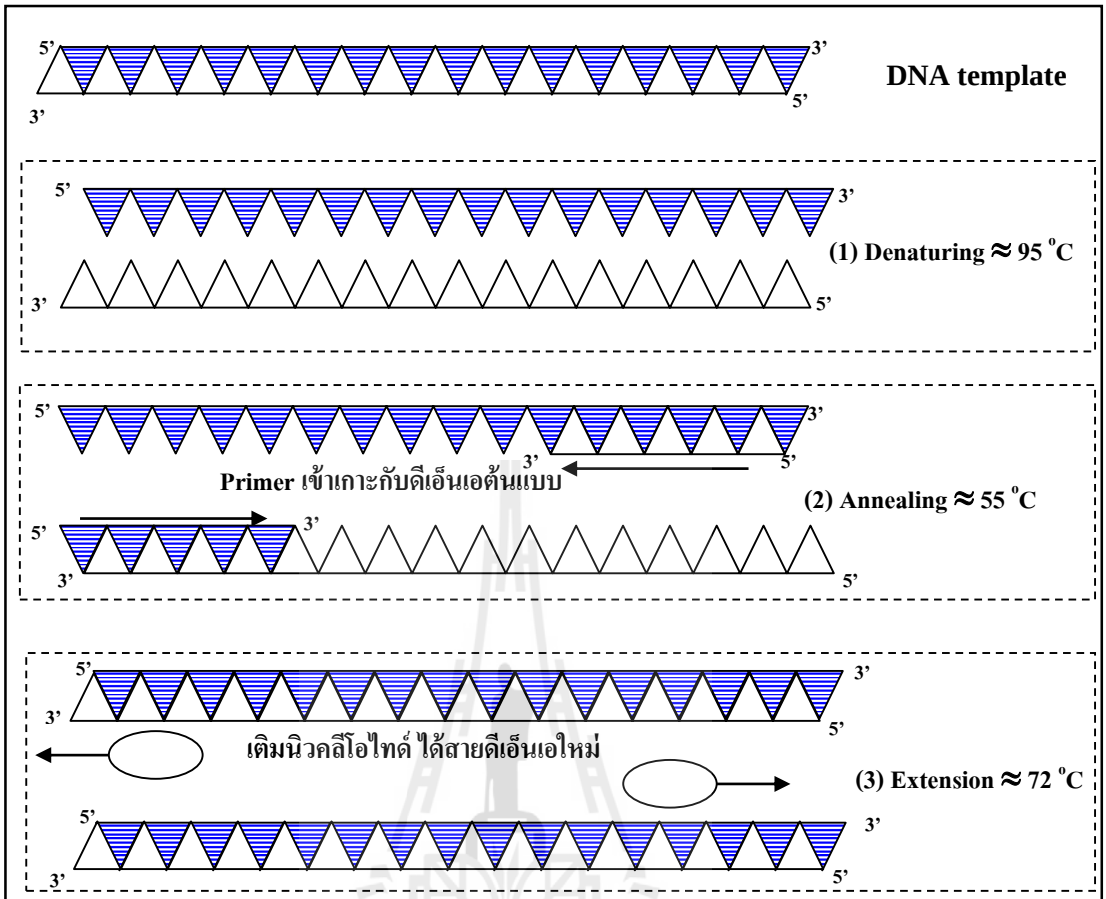
จากขั้นตอนในการให้ความร้อนที่ (1) ถึง (3) นั้น เรียกว่า 1 รอบ หรือ 1 ไซเคิล การหมุนเวียนแต่ละรอบจะได้จำนวนดีเอ็นเอเป็น 2 เท่า ลักษณะการเพิ่มขึ้นเป็นทวีคูณ โดยทั่วไปจะดำเนินกระบวนการการดังกล่าวประมาณ 20-40 รอบ ซึ่งจะได้ปริมาณดีเอ็นเอนับล้านเท่า แล้วจึงนำไปวิเคราะห์กับกระบวนการอื่นต่อไป

ประโยชน์ของพีซีอาร์มีอย่างหลากหลายเช่น เทคนิคการแพทย์ การพิสูจน์หลักฐาน การศึกษาทางด้านโบราณคดีและด้านการเกษตรเป็นต้น

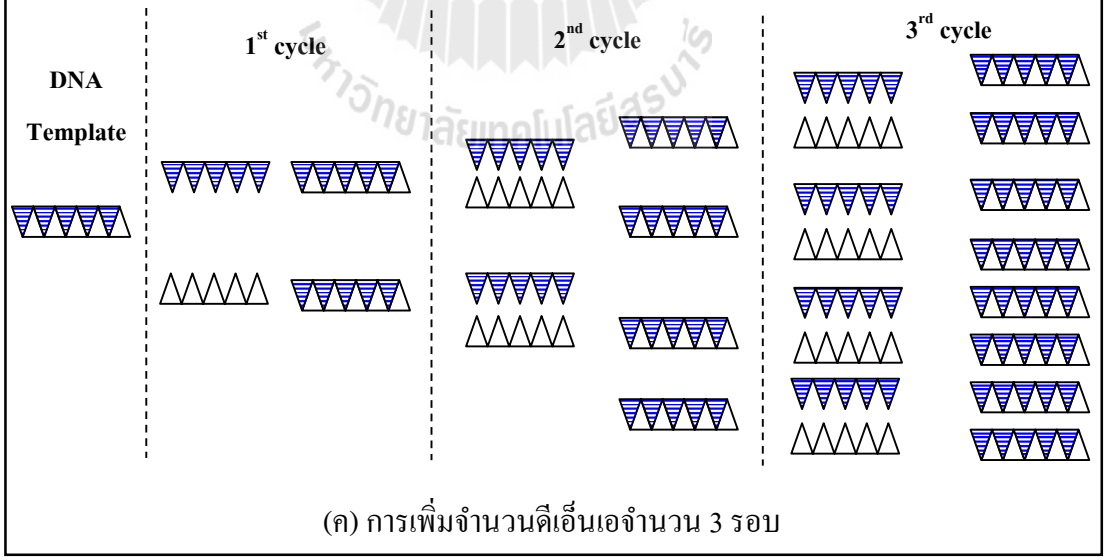


(ก) หลักการหมุนเวียนความร้อนสำหรับพีซีอาร์

รูปที่ 2.2 การทำเทคนิคพีซีอาร์เพื่อเพิ่มปริมาณดีเอ็นเอ



(ข) การเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอ 1 รอบ

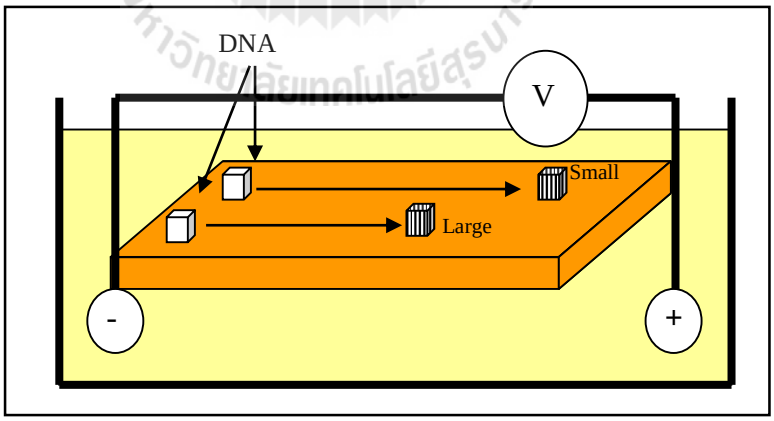


(ค) การเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอจำนวน 3 รอบ

รูปที่ 2.2 การทำเทคนิคพีซีอาร์เพื่อเพิ่มปริมาณดีเอ็นเอ (ต่อ)

เมื่อทำการเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอจนเสร็จสิ้นแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการวิเคราะห์ดีเอ็นเอ ซึ่งมีหลากหลายวิธี วิธีที่นิยมใช้คือ เจลอิเล็กโตรโฟรีซิส (Gel electrophoresis) เป็นการแยกสารพันธุกรรมหรือโปรตีนโดยใช้กระแสไฟฟ้าเป็นตัวทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่ไปในชิ้นวุ้น โมเลกุลที่มีขนาดต่างกันเหมือนกันจะเคลื่อนรวดเร็วแตกต่างกัน โดยโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ จะเคลื่อนที่ได้ช้ากว่าโมเลกุลที่มีขนาดเล็ก โดยปกติแล้วดีเอ็นเอมีประจุเป็นลบ

อิเล็กโตรโฟรีซิส (Electrophoresis) เป็นเทคนิคที่ใช้แยกสาร วิเคราะห์ และเตรียมสารที่มีประจุไฟฟ้า เช่น กรดอะมิโน โปรตีน และ กรดนิวคลีอิก ให้บริสุทธิ์โดยอาศัยหลักการที่ว่า เมื่อให้สนามไฟฟ้า สารที่มีประจุไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วที่ตรงข้ามกัน ด้วยอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ขึ้นอยู่กับปริมาณประจุสุทธิบนโมเลกุลของสาร รูปร่างและขนาดของโมเลกุลของสารและกระแสไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.3 ทำได้โดยเตรียมชิ้นวุ้นที่มีชนิดและขนาดของรูพรุนตามความเหมาะสม จากนั้นใส่ดีเอ็นเอลงไปด้านบนของชิ้นวุ้น แล้วนำไปแช่ในสารละลายและเปิดกระแสไฟฟ้า ดีเอ็นเอแต่ละชิ้นจะเคลื่อนที่จากประจุลบไปยังประจุบวก ด้วยความเร็วที่ต่างกัน (ขึ้นกับขนาดและรูปร่างของดีเอ็นเอ) เมื่อปิดกระแสไฟฟ้า ก็จะได้โมเลกุลของดีเอ็นเอแต่ละชิ้น อยู่ที่ตำแหน่งต่างกันในชิ้นวุ้น จากนั้นนำไปแช่ในสารละลายเอธิเดียมโบรไมด์ แล้วนำไปส่องด้วยแสงอุลตราไวโอเลต จะเห็นแถบดีเอ็นเอขนาดต่างๆ เพราะเอธิเดียมโบรไมด์ที่จับกับดีเอ็นเอจะเรืองแสง ทำให้มองเห็นได้ชัดเจน การทำอิเล็กโตรโฟรีซิส ทำให้สามารถระบุได้ว่าดีเอ็นเอแต่ละชิ้นมีขนาดหรือจำนวนเท่าใด โดยเทียบกับโมเลกุลดีเอ็นเอที่ทราบขนาด (DNA marker)



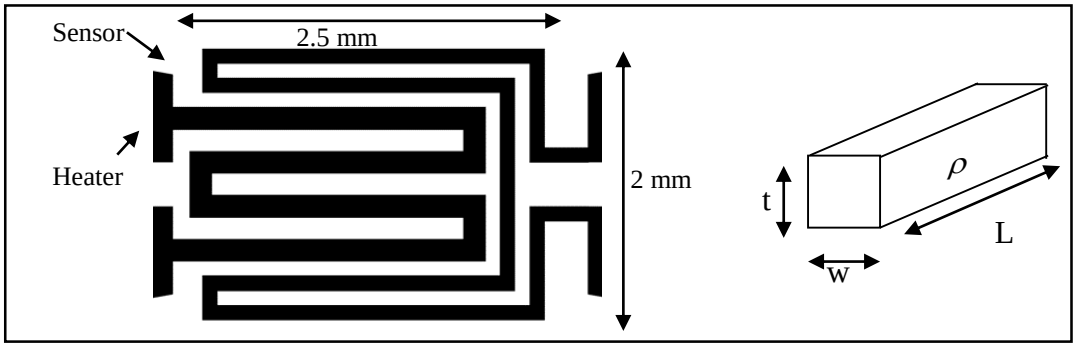
รูปที่ 2.3 การแยกขนาดดีเอ็นเอด้วยการทำเจลอิเล็กโตรโฟรีซิส

จากที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้ว่าเครื่องพีซีอาร์ที่นำมาใช้ทั่วไปนั้น มักเป็นเครื่องมือที่นำเข้าจากต่างประเทศซึ่งมีราคาค่อนข้างสูงและที่ใช้ในงานวิจัยมีอยู่ประมาณ 3 ชนิด ได้แก่ 1) ใช้ฮีตเตอร์เป็นอุปกรณ์ทำความร้อนและแอร์คอมเพรสเซอร์เป็นอุปกรณ์ทำความเย็น 2) ประเภทที่ใช้เพลเทียร์ในการควบคุมอุณหภูมิสามารถทำความร้อนและเย็นได้ใน 3) ประเภทที่มีโครงสร้างการทำงานแบบตู้อบควบคุมอุณหภูมิเป็นขดลวด

เครื่องพีซีอาร์ที่ใช้กันทั่วไปมีขนาดใหญ่น้ำหนักประมาณ 8 ถึง 10 กิโลกรัม มีราคาอยู่ในช่วง 2,000 ถึง 8,000 USD ราคาดังกล่าวนี้ยังไม่รวมค่านำเข้าและภาษีซึ่งจะมีราคาสูงขึ้นอีก ทั้งนี้ราคาจะสูงหรือไม่นั้นขึ้นอยู่กับฟังก์ชันการทำงานตามความต้องการของผู้ใช้งาน และนี่เป็นอีกหนึ่งเหตุผลที่ทำให้เกิดงานวิจัยนี้ขึ้นมา ในงานวิจัยไม่ได้มุ่งเน้นเพื่อทำระบบใหญ่เช่นนั้น แต่จะเน้นเพื่อทำให้สามารถพกพาได้ มีขนาดเล็ก ขนย้ายได้ง่ายและต้นทุนไม่สูง จึงได้มีแนวคิดที่จะสร้างเครื่องทำความร้อนขนาดเล็กที่สามารถปรับเปลี่ยนหมุนเวียนอุณหภูมิได้ ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนของอุปกรณ์ทำความร้อนและส่วนของห้องบรรจุของเหลวหรือห้องทำปฏิกิริยานั่นเอง

2.3 ไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ

ไมโครฮีตเตอร์เป็นหัวใจสำคัญในงานวิจัยเพราะเป็นตัวทำความร้อนหรือสร้างอุณหภูมิที่ต้องการ ส่วนเซนเซอร์เป็นตัวตรวจจับความร้อนที่มาจากไมโครฮีตเตอร์สำหรับการสร้างไมโครฮีตเตอร์อาศัยหลักการพื้นฐานจากการสร้างความต้านทานขึ้นมา มีโครงสร้าง ดังรูปที่ 2.4 ค่าความต้านทานของไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.1) และทำการป้อนกระแสให้ไหลผ่านความต้านทานก็จะเกิดกำลังสูญเสียที่ตัวต้านทานนั้น ออกมาในรูปของความร้อน โดยพื้นฐานของการเกิดความร้อนจะอธิบายไว้ในบทที่ 4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของโมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ

$$R = \frac{\rho L}{wt} \tag{2.1}$$

โดยที่ R คือ ความต้านทาน (Ω)

ρ คือ สภาพความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุ (Ω·m)

L คือ ความยาว (m)

w คือ ความกว้าง (m)

t คือ ความหนา (m)

เมื่อมีอุณหภูมิแวดล้อมเกิดการเปลี่ยนแปลง คุณสมบัติของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุ ใด ๆ เกิดการแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมินั้น ๆ โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถเขียนอธิบายได้ดังสมการที่ (2.2)

$$R = R_o[1+\alpha(T-T_o)] \tag{2.2}$$

เมื่อ R คือ ความต้านทาน (Ω)

R_o คือ ความต้านทานของอุณหภูมิเริ่มต้น (Ω)

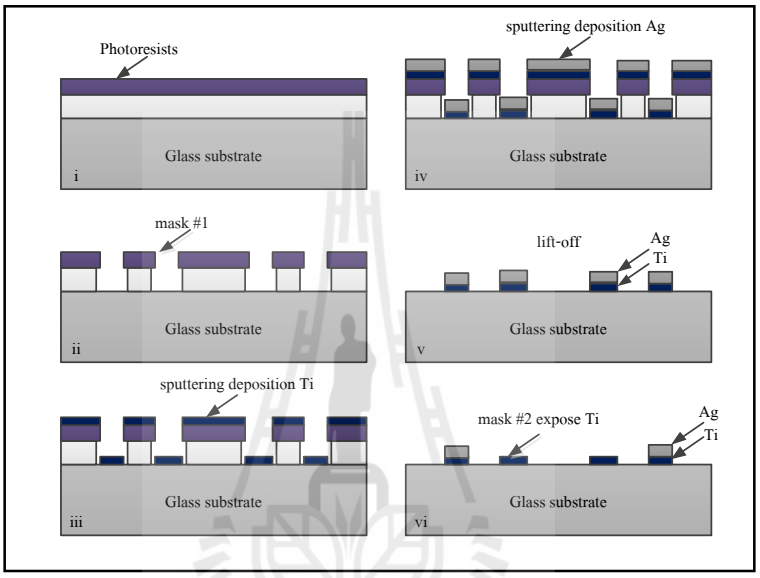
α คือ ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของค่าความต้านทาน (Temperature coefficient of resistance:TCR)

T คือ อุณหภูมิ (^{o}C)

T_o คือ อุณหภูมิที่ความต้านทานเริ่มต้น (^{o}C)

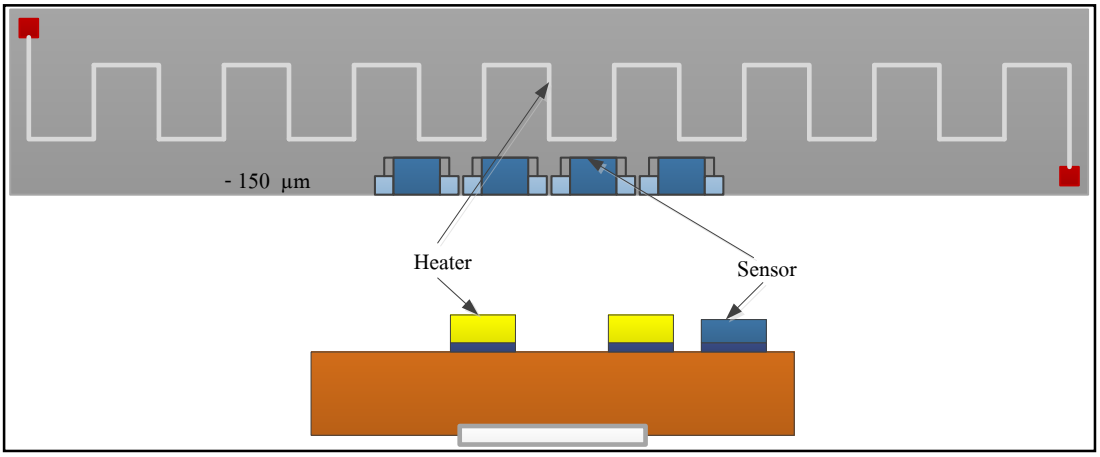
ไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิเป็นอุปกรณ์ที่ถูกนำไปใช้งานได้อย่างแพร่หลายทั้งทางด้านอุตสาหกรรมและด้านงานวิจัย เช่น ระบบตรวจวัดก๊าซ (Gas sensor) ซึ่งส่วนใหญ่แล้วต้องทำการอุ่นเครื่องหรือหัวอ่าน (Probe) เพื่อให้อุปกรณ์นั้นทำงานได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้แล้วยังมีการใช้ในระบบไมโครฟลูอิดิกส์ (Microfluidic) ล้วนอาศัยอุปกรณ์ทำความร้อนโดยใช้เซนเซอร์ทำหน้าที่ตัวตรวจวัดอุณหภูมิเพื่อให้ไมโครฮีตเตอร์ให้สร้างระดับอุณหภูมิได้ตามที่ต้องการ ไมโครฮีตเตอร์ที่ดีจะต้องให้ความร้อนได้รวดเร็ว ส่วนเซนเซอร์ก็เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญเนื่องจากเป็นตัวรับรู้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ เพื่อส่งค่าป้อนกลับไปยังอุปกรณ์ควบคุมเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ตามที่ต้องการ ในอดีตที่ผ่านได้มีกระบวนการสร้างที่หลากหลายเทคนิคได้แก่

1) กระบวนการลิโธกราฟฟีร่วมกับเทคนิคลิฟท์ออฟ (Lift-off) ได้แก่ กลุ่มนักวิจัยของ Guan and Puers (2010) ; Zhang et al. (2007) เป็นกระบวนการพื้นฐานทั่วไปใช้สำหรับสร้างอุปกรณ์ทางด้านกลไฟฟ้าจุลภาค ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.5 เป็นกระบวนการสร้างอุปกรณ์ของ Guan ใช้กระบวนการลิโธกราฟฟีสร้างลวดลายไมโครฮีตเตอร์ ด้วยไทเทเนียม (Ti) ส่วนบริเวณสำหรับต่อวงจรได้ใช้วัสดุเงิน (Ag) ทับลงไปอีกชั้นเพื่อให้เกิดความต้านทานกับจุดเชื่อมต่อน้อยที่สุด



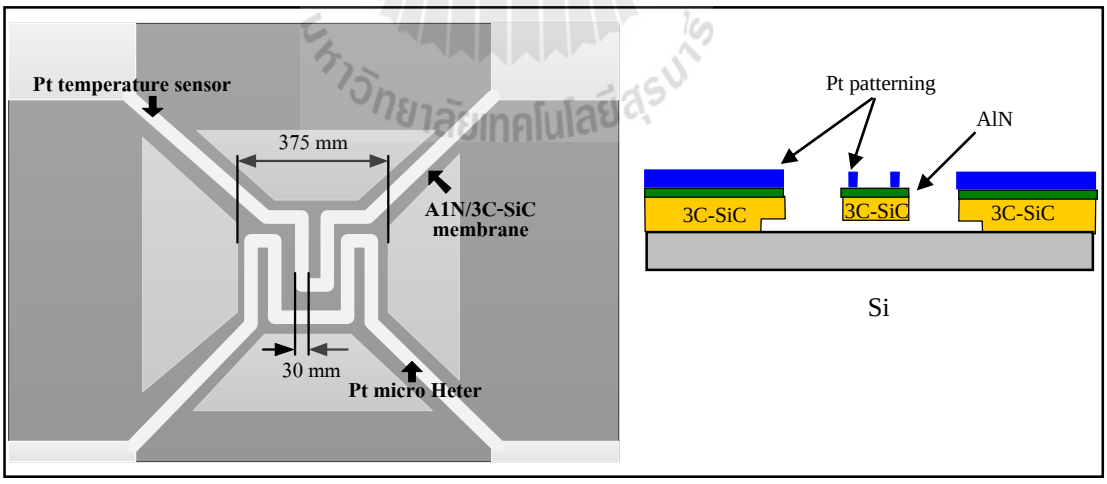
รูปที่ 2.5 โครงสร้างไมโครฮีตเตอร์ของ Guan (2010)

นอกจานี้ยังมีตัวอย่างของ Kim (2009) โดยใช้ทองคำ (Au) เป็นไมโครฮีตเตอร์และแพลตตินัม (Pt) เป็นเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ อยู่บนฐานรองซิลิคอน ซึ่งใช้เครื่อง PECVD ในการปลูกหรือสร้างฟิล์มโลหะดังรูปที่ 2.6



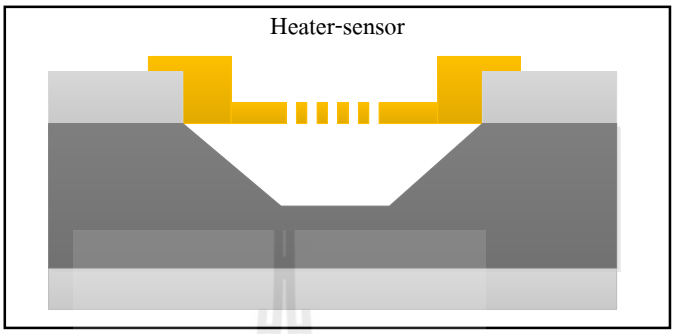
รูปที่ 2.6 โครงสร้างไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิของ Kim (2009)

2) กระบวนการกัดซิลิคอนร่วมกับเทคนิคลิฟท์ออฟ เพื่อสร้างเมมเบรนขึ้นมาสำหรับวางไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ ซึ่งใช้โลหะแพลตตินัม (Pt) เป็นวัสดุ มีข้อดีคือสามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงถึง 800 °C งานวิจัยดังกล่าวได้นำชิ้นงานที่สร้างไปเป็นอุปกรณ์สำหรับระบบวัดปริมาณก๊าซ เพราะโดยทั่วไปแล้ว เซนเซอร์วัดก๊าซจะต้องมีการอุ่นเครื่องก่อนเพื่อให้ได้ผลการวัดที่แม่นยำดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โครงสร้างไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิของ Chung (2010)

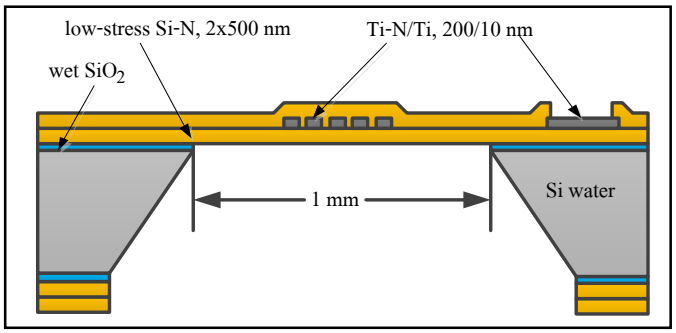
3) กระบวนการสร้างไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์โดยการสกัดด้วยสารเคมีโดย (Hwang et al., 2011) เพื่อใช้เป็นเซนเซอร์วัดก๊าซประเภท เอธานอล (C_2H_5OH) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และไฮโครเจนซัลไฟด์ (H_2S) โดยใช้แพลตินัมเป็นเซนเซอร์กับไมโครฮีตเตอร์ ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 โครงสร้างไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิของ Hwang (2011)

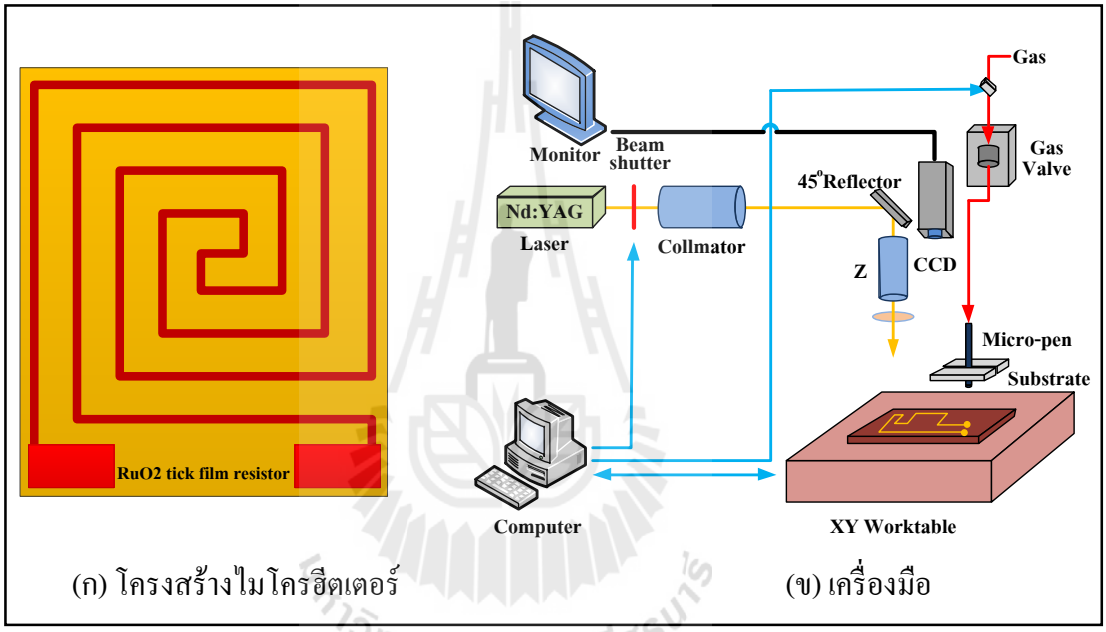
4) กระบวนการกัดซิลิคอนร่วมกับ RIE (Reactive ion etching) ได้แก่ กลุ่มนักวิจัยของ Yoon and Kim (2011); Lee et al. (2010); Briand et al. (2005) วิธีการนี้คล้ายกับวิธีการอื่นที่ผ่านมา ซึ่งต้องใช้สารเคมีที่มีราคาสูงเช่นกัน

5) กระบวนการกัดซิลิคอนร่วมกับกระบวนการ PECVD/LPCVD ได้แก่ กลุ่มนักวิจัยของ Hwang (2011); Creemer (2008); Nam (2010); Hanamane (2006) วิธีนี้ก็ยังต้องพึ่งพาเครื่องมือที่มีราคาสูง ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.9 เป็นของ Nam (2010) สร้างไมโครฮีตเตอร์ด้วย ไทเทเนียมไนไตร (TiN) เพื่อนำไปเป็นแผ่นทำความร้อน ข้อดีของไทเทเนียมไนไตรคือสามรถทนอุณหภูมิได้สูง



รูปที่ 2.9 โครงสร้างไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิของ Nam (2010)

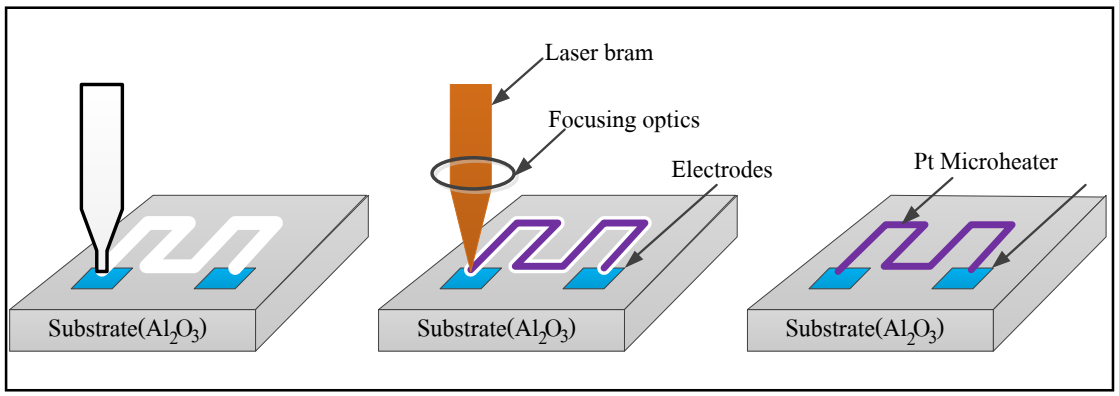
นอกจากที่ได้กล่าวมาแล้วยังมีอีก 2 วิธีที่ไม่ต้องใช้กระบวนการกัดซิลิคอน ไม่ต้องใช้กระบวนการลิโธกราฟฟีแต่อย่างใด เป็นการเขียนลวดลายอุปกรณ์โดยตรง (Direct write) คือใช้แสงเลเซอร์ Cai et al. (2009) ได้ใช้เครื่องเลเซอร์ในการวาดลวดลายไมโครฮีตเตอร์ มีข้อดีคือ สามารถสร้างอุปกณ์ต้นแบบได้อย่างรวดเร็ว โดยใช้วัสดุที่เรียกว่า RuO_2 (Ruthenium Oxide) หลักการคือวาดลวดลายด้วยแสงเลเซอร์เป็นการให้ความร้อนลงบนวัสดุดังกล่าว ที่มีฐานรองเป็นแผ่นอะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ที่ทนความร้อนสูง จากนั้นทำการสกัดส่วนที่ได้ต้องการออกไปด้วยสารเคมี โครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.10 (ก) และมีเครื่องมือดังรูป 2.10 (ข)



(ก) โครงสร้างไมโครฮีตเตอร์ (ข) เครื่องมือ

รูปที่ 2.10 การสร้างไมโครฮีตเตอร์และอุปกรณ์ด้วยเลเซอร์ของ Cai (2011)

จากที่ได้กล่าวมายังมีประเภทที่เขียนภาพโดยตรง โดย Cai et al. (2011) คือ เป็นการสร้างไมโครฮีเตอร์ด้วยการใช้ปากกาขนาดเล็กที่บรรจุแพลตตินัม วาดเป็นลวดลายลงไปบนฐานรองอะลูมินา จากนั้นทำการใช้เลเซอร์ยิงเข้าใส่ลวดลายเป็นการให้ความร้อนกับแพลตตินัมอีกครั้งสุดท้ายทำการสกัดลวดลายที่ไม่ได้ถูกเลเซอร์ออกไปด้วยสารเคมีดังรูปที่ 2.11



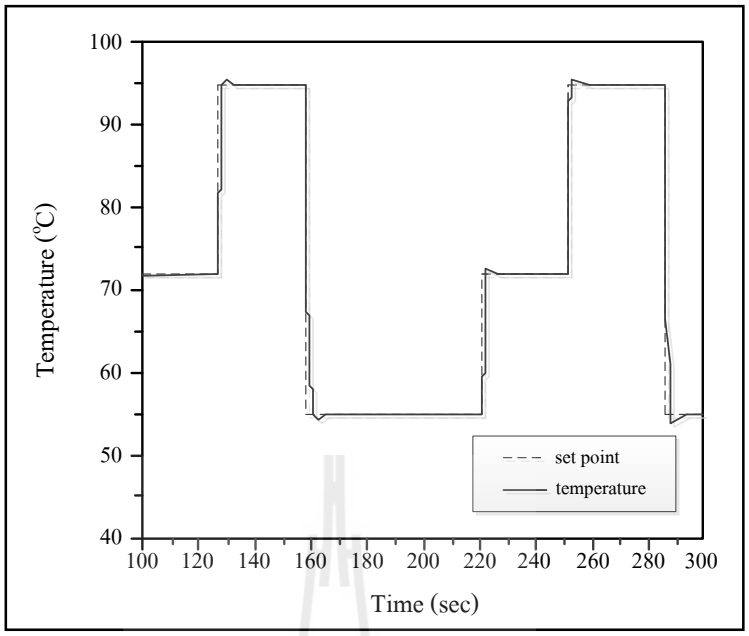
รูปที่ 2.11 การสร้างไมโครฮีตเตอร์และอุปกรณ์ของ Cai (2011)

จากหลากหลายกระบวนการสร้างที่ผ่านมา พบว่ากระบวนการสร้างไมโครฮีตเตอร์หรือเซนเซอร์นั้นใช้กระบวนลิโธกราฟฟีเป็นพื้นฐานหลักร่วมกับเทคนิคอื่น เช่น เทคนิคการลิฟท์ออฟและกระบวนการกัดซิลิคอน เป็นต้น ทำให้ต้องใช้อุปกรณ์และเครื่องมือจำนวนมากในการสร้างส่งผลต้นทุนเนื่องจากใช้วัสดุที่มีราคาสูง เช่น ฐานรองซิลิคอนซึ่งต้องมีการจัดเตรียมที่มีหลายขั้นตอนก่อนสร้างลวดลาย ส่วนการสร้างลวดลายด้วยการเขียนภาพโดยตรงถึงแม้จะสร้างได้อย่างรวดเร็วแต่ก็มีข้อเสีย คือทำได้ครั้งละ 1 ตัวเท่านั้น ซึ่งเหมาะกับการสร้างต้นแบบ อีกทั้งยังต้องใช้สารเคมีในบางขั้นตอนเช่นกัน ในงานวิจัยจึงคิดแนวทางใหม่สำหรับสร้างอุปกรณ์ให้ความร้อนดังกล่าว โดยการประยุกต์ใช้แสงซินโครตรอนเป็นส่วนสำคัญในการสร้าง เพื่อลดภาระการใช้วัสดุและอุปกรณ์ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

2.4 เทคนิคพีซีอาร์

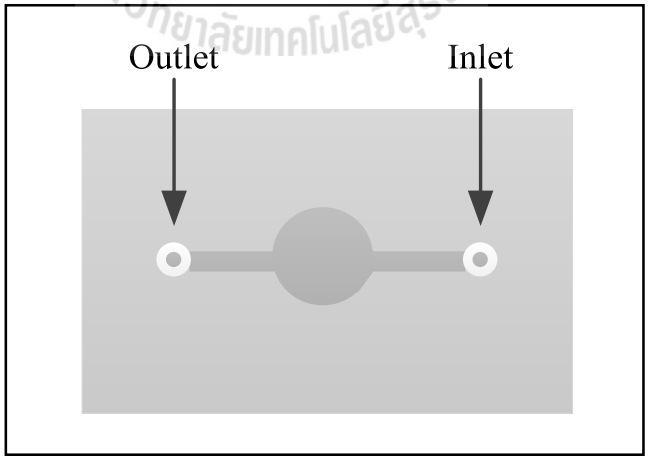
เทคนิคพีซีอาร์เป็นการผสมผสานระหว่างอุปกรณ์ทำความร้อนกับห้องบรรจุของเหลว (Liquid chamber) หรือห้องปฏิกิริยา (Reaction chamber) ซึ่งมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังจะกล่าวถึงต่อไปนี้

ในปี ค.ศ. 2002 กลุ่มนักวิจัยของ Yoon ได้ทำการสร้างเครื่องหมุนเวียนความร้อน (Thermal cycling) สำหรับใช้กระบวนการพีซีอาร์ซึ่งขนาดเล็ก โดยสร้างไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์ สร้างจากแพลตตินัม (Pt) ส่วนห้องปฏิกิริยาอาศัยการกัดซิลิคอน ด้วยกระบวนการผลิตชิ้นส่วนจุลภาค (Micro fabrication) มีเป็นผลการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของเครื่องพีซีอาร์ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การหมุนเวียนอุณหภูมิด้วยเทคนิคพีซีอาร์ของ Yoon (2002)

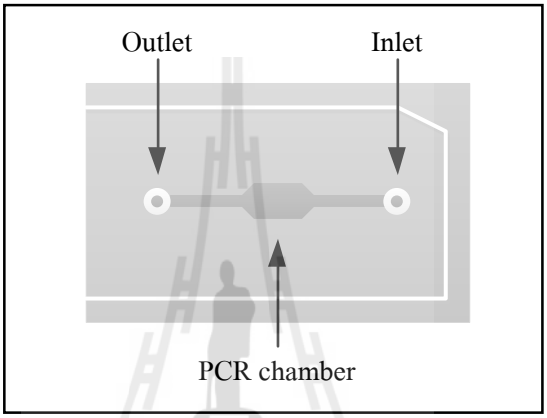
ในปี ค.ศ. 2003 กลุ่มนักวิจัย Shin ได้ใช้พอลิเมอร์ประเภท PDMS เป็นอุปกรณ์สำหรับสร้างห้องปฏิกิริยา เนื่องจากมีความโปร่งใสและสามารถทนต่อปฏิกิริยาเคมีในทางชีวภาพได้ดี มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 โครงสร้างพีซีอาร์ของ Shin (2003)

ในปี ค.ศ. 2008 กลุ่มวิจัยของ Lee ได้ทำการสร้างเครื่องหมุนความร้อนขนาดเล็ก สำหรับใช้ในกระบวนการพีซีอาร์ โดยมีไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์อยู่บนแผ่นฟิล์มพอลิอิไมด์ (PI-film) สวนห้องปฏิกิริยาอาศัยการกัดซิลิคอน

ในปี ค.ศ. 2010 กลุ่มวิจัยของ Maturos ได้สร้างเครื่องหมุนเวียนความร้อนด้วยการใช้เพลเทียร์เป็นอุปกรณ์ให้ความร้อน มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.14 เป็นอุปกรณ์ที่มีลักษณะของเหลววิ่งไหลผ่านตัวฮีตเตอร์



รูปที่ 2.14 โครงสร้างพีซีอาร์ของ Maturos (2010)

การสร้างเครื่องพีซีอาร์สำหรับของเหลวขนาดเล็กนั้น นอกจะมีโครงสร้างที่เป็นลักษณะการทำงานโดยให้ของเหลวอยู่กับที่ ซึ่งจะชุดทำความร้อนเพียงชุดเดียวดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ยังมีโครงสร้างอีกแบบหนึ่งคือมีห้องบรรจุของเหลวจำนวน 3 ชุด แต่ละชุดจะทำอุณหภูมิในระดับที่ต่างกันคือ 1) Denaturation 2) Annealing และ 3) Extension ดังตัวอย่างของ Wang (2007) ซึ่งได้สร้างเครื่องพีซีอาร์เป็นลักษณะวงกลมและมีห้องปฏิกิริยาสร้างจาก PMDS ซึ่งมีจำนวน 3 ชุด มีไมโครวาล์วสำหรับเปิด-ปิดเพื่อให้ของเหลวให้ไหลเข้าและออกจากห้องปฏิกิริยา นอกจากนี้แล้วยังมีลักษณะที่คล้ายคลึงกันคือ Wang (2009); Chein (2009) ซึ่งใช้กระบวนการลิโธกราฟฟีร่วมกับลิฟท์ออฟในการสร้างไมโครฮีตเตอร์โดยแพลทตินัม (Pt) เป็นเซนเซอร์และไมโครฮีตเตอร์วางอยู่บนกระจกและใช้ PDMS สร้างเป็นห้องบรรจุของเหลว

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการสร้างห้องบรรจุของเหลว เพื่อประกอบเป็นเครื่องพีซีอาร์ โดยทั่วไปเน้นการใช้งานพอลิเมอร์ชนิด PDMS (Polydimethylsiloxane) เนื่องจากทนต่อสารเคมีจึงนิยมใช้กับกระบวนการทางด้านชีวภาพ สำหรับในงานวิจัยนี้จะพัฒนาห้องบรรจุของเหลวด้วยเทคนิคการคัดลอกพอลิเมอร์ PDMS จากแม่พิมพ์ SU8 ซึ่งได้จากกระบวนการลิโธ

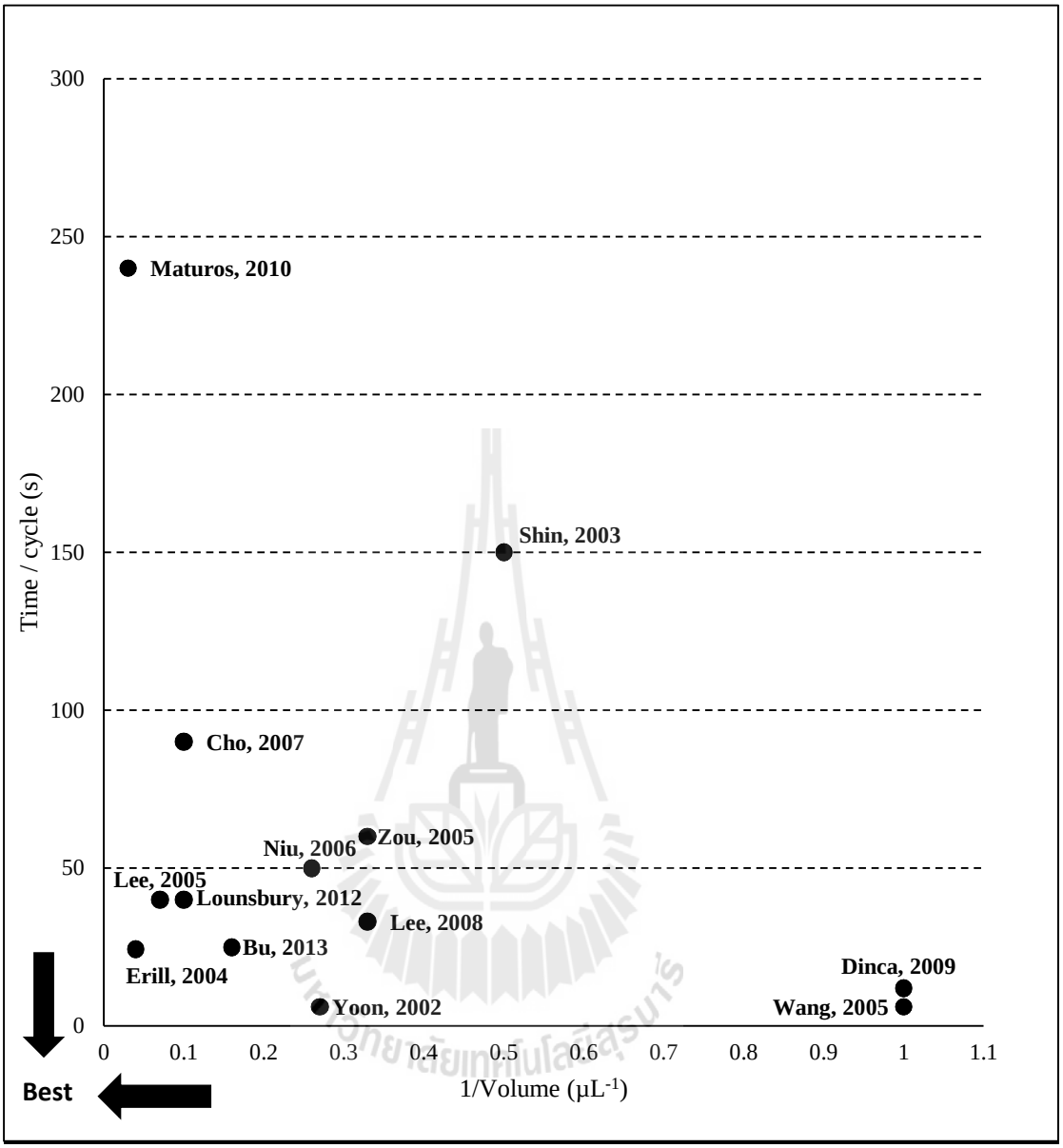
กราฟฟีด้วยรังสีเอกซ์ เนื่องจากรังสีเอกซ์สามารถสร้างลวดลายได้ผนังที่เรียบตรง ส่วนการควบคุมความร้อนจะใช้ระบบป้อนกลับทั่วไป การสร้างเครื่องพีซีอาร์นั้นมีหลัก ๆ อยู่ 2 รูปแบบ คือ แบบแรก ของเหลวเคลื่อนที่ผ่านอุณหภูมิทั้ง 3 ระดับ จากตัวทำความร้อน 3 ชุด และแบบที่สอง ของเหลวอยู่กับที่แล้วทำการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิขึ้นลงไปมา ในงานวิจัยจะเลือกหลักการสร้างในแนวทางหลังคือ ของเหลวอยู่กับที่แล้วทำการเปลี่ยนอุณหภูมิไปมา เนื่องจากการใช้งานในรูปแบบดังกล่าวเป็นการใช้งานแบบปกติทั่วไป

นอกจากนี้แล้วยังสรุปเปรียบเทียบงานวิจัยที่ได้ทำการค้นคว้าเพื่อให้เห็นความแตกต่างรวมถึงการพัฒนาความเร็วของการทำงานต่อคาบเวลา เป็นดังตารางที่ 2.1 และนำไปวาดกราฟเปรียบเทียบปริมาตรของห้องบรรจุของเหลวกับเวลาการหมุนเวียนความร้อนต่อรอบเพื่อให้เห็นภาพชัดเจนยิ่งขึ้นดังรูปที่ 2.15 โดยที่แกนตั้งเป็นเวลาต่อคาบการทำงานและแกนนอนเป็นส่วนกลับของปริมาตรของห้องบรรจุของเหลว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 2.1 การพัฒนาเครื่องหมุนเวียนความร้อนขนาดเล็ก

ปี	นักวิจัย	เวลาต่อไซเคิล (s)	ปริมาตร	1/ปริมาตร	Heating rate / Cooling rate (^{o}C/s)	ฮีตเตอร์-เซนเซอร์	ฐานรอง	ห้องบรรจุของเหลว
2002	Yoon	6	3.6	0.27	36/22	Pt-Pt	Glass	Si
2003	Shin	150	2	0.5	2/1.2	-	Glass	PDMS
2004	Erill	24.4	25	0.04	10.7/5.6	Peltier –Pt100	Glass	Si
2005	Wang	6	1	1	-	Pt-pt	Glass	Si
2005	Zou	60	3	0.33	6/3.5	Cr/Au-Cr/Au	pcb	Si
2005	Lee	40	15	0.07	20/10	Pt-Pt	Glass	PDMS
2006	Niu	50	3.9	0.26	10/4.6	Pt-pt	Glass	PDMS
2007	Cho	90	10	0.1	5/6	Cr/Au	Glass	PDMS
2008	Lee	33	3	0.33	5/6	Cu-Cu	PI	Si
2009	Dinca	12	1	1	7.7/6.6	Pt-Pt	PCB	PDMS
2010	Maturos	240	30	0.03	2/1	Peltier-M35	Glass	PDMS
2012	Junny	40	10	0.1	6.19/7.99	Infrared	PMMA	PMMA
2013	Bu	25	6	0.16	4.3/5	Pt/Pt	Si	TOPAS chip



รูปที่ 2.15 เปรียบเทียบเวลาต่อรอบการทำงานกับปริมาตรของงานวิจัยต่าง ๆ

2.5 บทสรุป

ในหัวข้อนี้ได้อธิบายเกี่ยวกับสารพันธุกรรม หลักการเบื้องต้นของเทคนิคพีซีอาร์และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาและการสร้างไมโครฮีตเตอร์และเครื่องพีซีอาร์ขนาดเล็ก

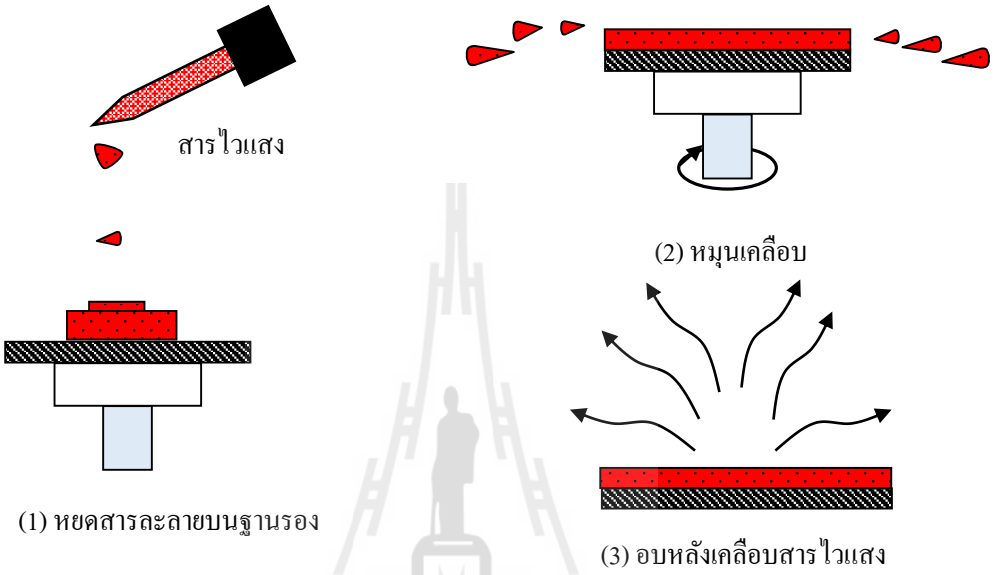
บทที่ 3
กระบวนการพื้นฐานที่ใช้ในงานวิจัย

การสร้างไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์หรือกระบวนการต่าง ๆ ทางด้านระบบกลไฟฟ้าจุลภาค นิยมใช้กระบวนการลิโธกราฟฟี ซึ่งเป็นกระบวนการมาตรฐานสำหรับสร้างวงจรรวมในอุตสาหรกรรม ประกอบด้วยขั้นตอนการฉายแสง การล้างสารไวแสง นอกจากนี้ยังมีเทคนิคอื่นที่เกี่ยวข้อง เนื่องจากกระบวนการลิโธกราฟฟีเป็นเพียงการสร้างลวดลายบนสารไวแสงเท่านั้น ได้แก่ การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า การสกัดเนื้อวัสดุ การเคลือบโลหะด้วยเทคนิคสปัตเตอริ่ง การเคลือบโลหะด้วยไอระเหย ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

3.1 กระบวนการลิโธกราฟฟี

กระบวนการลิโธกราฟฟี (Lithography) เป็นกระบวนการพื้นฐานที่สำคัญสำหรับการพัฒนางานวิจัยในระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (Micro electro mechanical systems : MEMS) หมายถึงการสร้างหรือการถ่ายทอดลวดลายด้วยการฉายแสง ผ่านหน้ากากกั้นแสง (Mask) ลงบนสารไวแสง (Photoresist) โดยในงานวิจัยใช้เครื่องฉายรังสีอัลตราไวโอเลต รุ่น Quintel Q4000 ความยาวคลื่น 365 nm ฉายลงบนชิ้นงานที่เป็นสารไวแสง บริเวณที่ถูกแสงฉายแสงนี้จะเกิดการทำปฏิกิริยากับแสง เมื่อนำไปล้างด้วยน้ำยาล้างสารไวแสง (Developer) จะได้ลวดลวยตามที่ต้องการ ซึ่งอาจจะเหมือนกับลวดลายต้นแบบหรือตรงข้ามกันขึ้นอยู่กับชนิดของสารไวแสง เมื่อถึงจุดนี้ถือว่าสุดกระบวนการลิโธกราฟฟี แหล่งกำเนิดแสงสำหรับกระบวนการลิโธกราฟี นอกจากแสงอัลตราไวโอเลตแล้ว ยังมีรังสีเอ็กซ์ซึ่งต้องใช้หน้ากากกั้นแสงที่สามารถดูดซับรังสีเอกซ์ได้ ข้อดีคือสามารถสร้างชิ้นงานได้โครงสร้างที่สูงกว่าแสงอัลตราไวโอเลต เพราะมีพลังงานสูงกว่า ทำให้ผนังเรียบตรงพร้อมกับตั้งฉากกับลำแสง สำหรับสารไวแสงที่ใช้ในกระบวนการลิโธกราฟฟีนั้นมีอยู่ 2 ชนิดหลักคือ สารไวแสงชนิดบวก (Positive photoresist) ได้แก่สารไวแสงตระกูล AZ และสารไวแสงชนิดลบ (Negative photoresist) ได้แก่สารไวแสงตระกูล SU8 มีความแตกต่างกันคือสารไวแสงชนิดบวกสามารถล้างออกได้ง่าย แต่ข้อเสียคือมีข้อจำกัดอยู่ที่ความหนาไม่มากนักในระดับไม่เกิน 100 μm ส่วนสารไวแสงชนิดลบสามารถสร้างความหนาสูงมากถึงระดับ 2 mm แต่การสกัดสารทิ้งยากกว่าเพราะมีความเหนียว สำหรับการเตรียมสารไวแสงเพื่อใช้ในงานวิจัยสามารถเตรียมได้หลายวิธีทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งานหากนำไปใช้งานเพื่อสร้างลวดลายไม่สูงมากใน

ระดับไม่เกิน 100 μm จะใช้วิธีการหมุนเคลือบสารไวแสงดังรูปที่ 3.1 แต่หากต้องการความหนามากระดับ 100 μm จนถึง 2 mm สามารถทำได้ด้วยการหยดสารไวแสงลงบนฐานรองแล้วนำไปบนแผ่นทำความร้อนได้แล้วทำการขัดให้ได้ความหนาตามที่ต้องการ

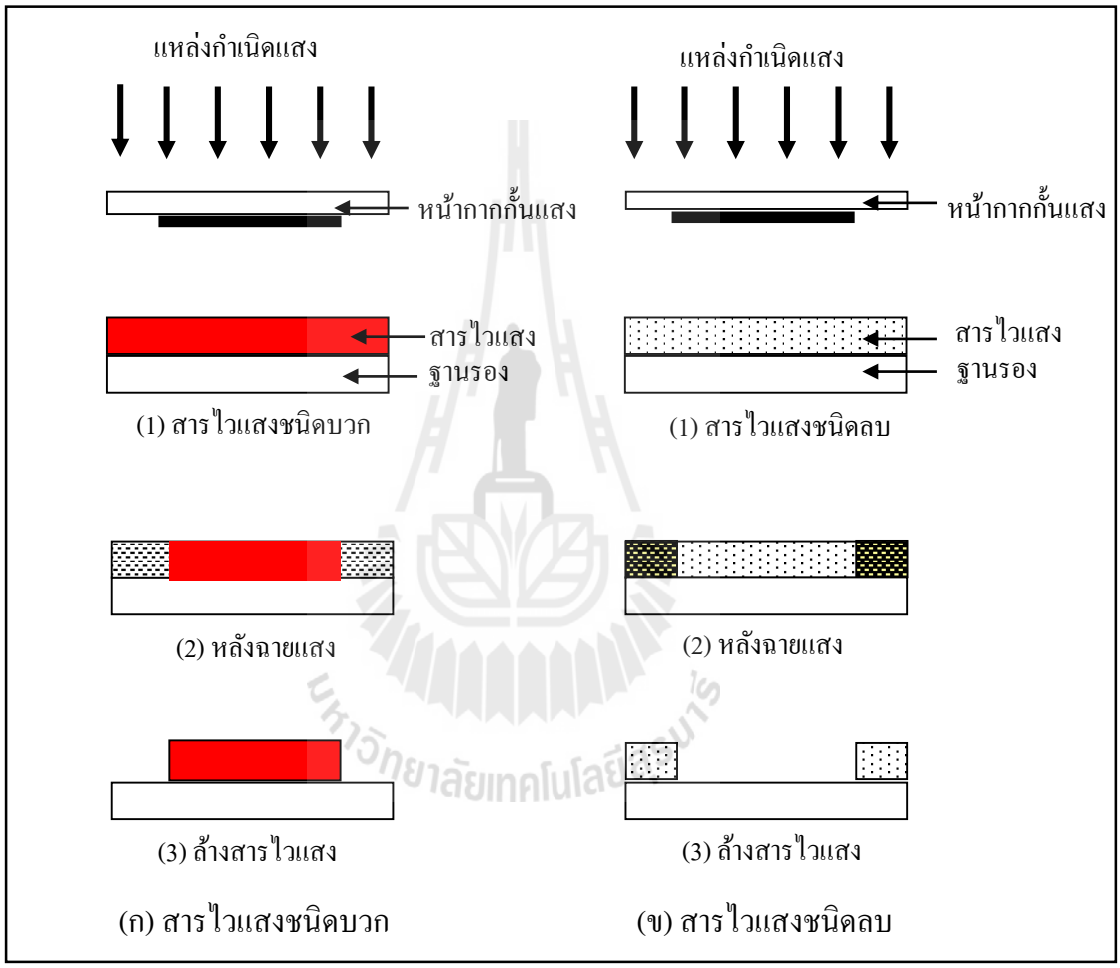


(ก) การเคลือบสารไวแสง

(ข) เครื่องเคลือบสารไวแสง

รูปที่ 3.1 กระบวนการหมุนเคลือบสารไวแสง

หลังจากทำการเคลือบสารไวแสงลงบนฐานรองแล้วต่อไปคือการฉายแสงลงบนสารไวแสงที่ได้เตรียมไว้ หากเปรียบเทียบสารไวแสงสามารถแสดงให้เห็นภาพชัดเจนขึ้นดังรูปที่ 3.1 (ก) เป็นสารไวแสงชนิดบวกบริเวณที่ถูกฉายแสงจะทำปฏิกิริยากับเนื้อสารทำให้เกิดการอ่อนตัวเมื่อนำไปล้างในน้ำยาล้างสารไวแสงบริเวณดังกล่าวจะหายไป สำหรับสารไวแสงชนิดลบบริเวณที่ถูกฉายแสงจะแข็งตัว ไม่สามารถล้างออกได้น้ำยาล้างสารไวแสงแสดงในรูปที่ 3.2

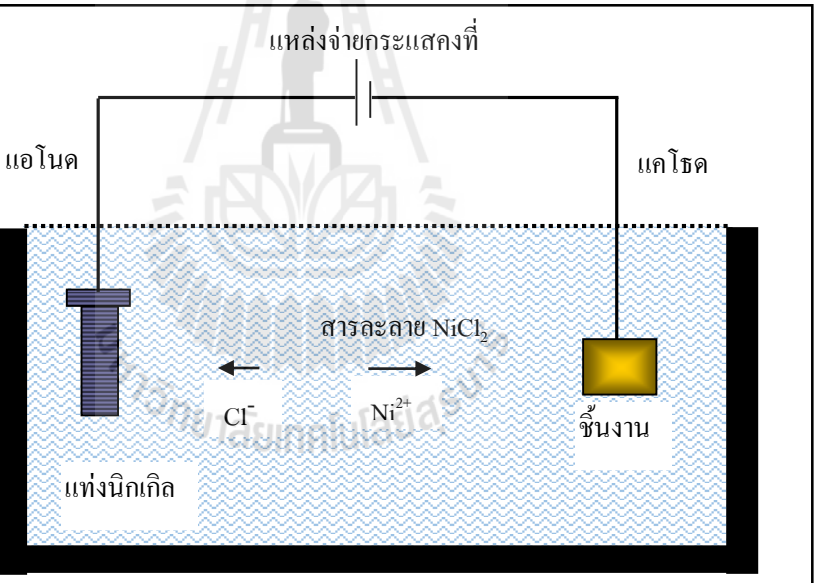


รูปที่ 3.2 เปรียบเทียบการใช้สารไวแสงสองชนิดในกระบวนการลิโธกราฟฟี

3.2 การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

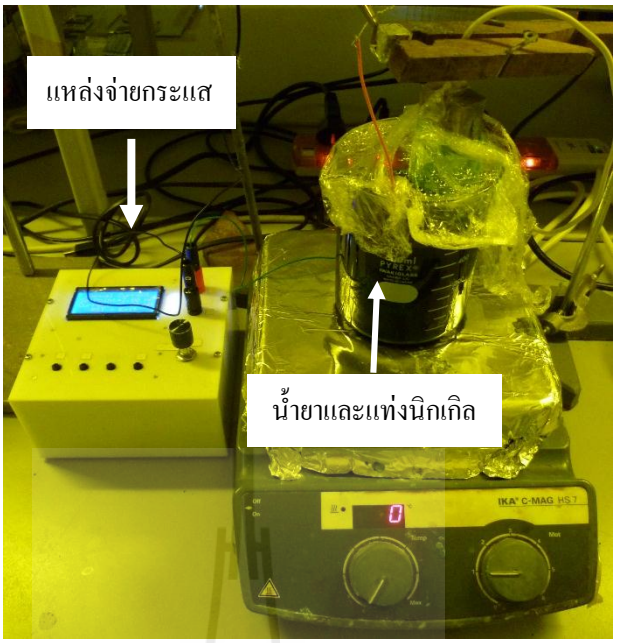
หลังจากสร้างลวดลายลงบนฐานรองด้วยกระบวนการลิโธกราฟฟีแล้วขั้นตอนต่อไปคือการเติมโลหะเข้าไปในช่องว่างของสารไวแสงเพื่อสร้างชิ้นงานที่ต้องการซึ่งใช้การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating) มีความสำคัญอย่างมากเนื่องจากใช้สำหรับขึ้นรูปโลหะเพื่อสร้างเนื้องานที่

นำไฟฟ้าหรือแม้แต่สร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ เป็นกระบวนการไฟฟ้าเคมีซึ่งไอออนของโลหะที่เป็นขั้วแอโนด (Anode) จะผ่านสารละลายมาเคลือบบนชิ้นงานซึ่งเป็ขั้วแคโธด (Cathode) โลหะที่เหมาะสำหรับการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าที่ขึ้นรูปได้เป็นอย่างดีสำหรับกระบวนการนี้คือ ทองคำ ทองแดง เงินและนิกเกิล ในการชุบไฟฟ้าจะควบคุมด้วยการป้อนกระแสคงที่ การชุบโลหะด้วยไฟฟ้าให้มีความสม่ำเสมอจะขึ้นกับการรักษาความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าให้เหมาะสมตลอดกระบวนการ ในรูปที่ 3.3 เป็นตัวอย่างวงจรสำหรับชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้า จากภาพอุปกรณ์สำหรับชุบโลหะนิกเกิล ซึ่งใช้น้ำยากนิกเกิลสำเร็จรูปพร้อมใช้งานจาก บริษัท อินเทลลิเคม จำกัด ประกอบด้วย แหล่งจ่ายกระแส แผ่นทำความร้อน สารละลายและชิ้นงาน การต่อวงจรทำได้โดยนำชิ้นงานต่อเข้าที่แคโธดและแท่งนิกเกิลที่แอโนด เมื่อเกิดกระแสไหลนิกเกิลจะก่อตัวที่ผิวของชิ้นงานจนได้ความหนาตามต้องการ ส่วนการชุบเงินหรือทองแดง หรือโลหะชนิดอื่น ก็ทำได้ในลักษณะเช่นเดียวกันนี้ หากแต่เปลี่ยนชนิดของสารละลาย



(ก) วงจรสำหรับการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

รูปที่ 3.3 การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า



(ข) วงจรสำหรับการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

รูปที่ 3.3 การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (ต่อ)

สำหรับการชุบโลหะบนแผ่นฐารองสเตนเลสนั้นจะต้องมีกระบวนการสกัดผิวของแผ่นสเตนเลสออก เนื่องจากฐานรองประเภทนี้ไม่สามารถชุบโลหะได้โดยตรงเพราะจะมีออกไซด์ทำให้ลำบากต่อการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า จึงต้องทำการสกัดผิวเรียกว่ากระบวนการ Wood's strike ซึ่งมีส่วนผสมของนิกเกิลคลอไรด์ กรดไฮโดรคลอริกและน้ำสะอาด ตามส่วนผสมดังตารางที่ 3.1 มีกระบวนการคือ 1) ทำการชุบด้วยไฟฟ้าโดยการย้อนกลับกระแส (Reverse electroplate) ในสารละลาย ที่มีส่วนผสมของนิกเกิลคลอไรด์กับกับไฮโดรคอลริกเท่ากับ 10 % โดยปริมาตร โดยที่ขั้วแอโนดจะเป็นชิ้นงานที่ต้องการชุบ ส่วนขั้วแคโธดจะเป็นแท่งเพลทตินัม ด้วยความเข้มกระแส 10 mA/cm^2 เป็นเวลา 2 นาที เพื่อเป็นการสกัดผิวที่มีออกไซด์บนฐานรองออกไป 2) ทำการลดความเข้มกระทันทีให้เหลือ 1 mA/cm^2 เป็นเวลา 1 นาที ด้วยการชุบแบบปกติ (Forward electroplate) กระบวนการนี้จะเป็นการเคลือบผิวนิกเกิลบาง ๆ บนฐานรองสเตนเลส จากนั้นก็ทำการชุบโลหะนิกเกิลด้วยกระบวนการตามปกติ

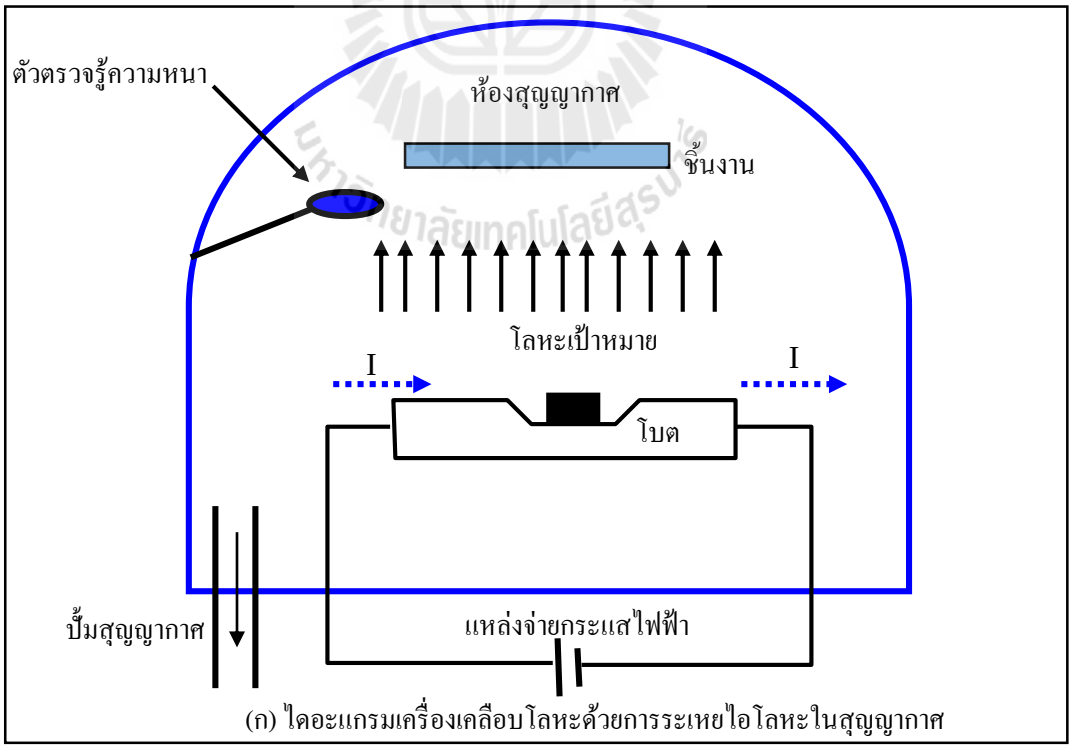
ตารางที่ 3.1 ส่วนประทางเคมีสำหรับการทำ wood's strike

ส่วนประกอบ	สูตรทางเคมี	ปริมาณ
Nickel chloride	$NiCl_2.6H_2O$	240 g
Hydrochloric acid	HCl	80 g
DI water	H_2O	ตามความเข้มข้นที่ต้องการ

3.3 กระบวนการเคลือบโลหะ

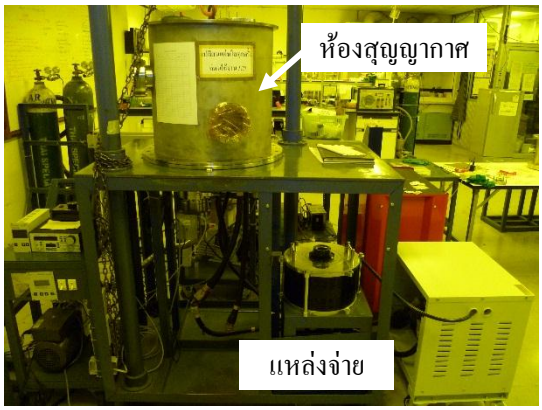
เทคนิคการเคลือบโลหะส่วนใหญ่แล้วเน้นเพื่อเคลือบวัสดุที่เป็นฉนวนให้สามารถนำไฟฟ้าได้เพื่อนำไปสร้างอุปกรณ์หรือชิ้นงานต่าง ๆ เช่น การเคลือบโลหะส่วนใหญ่แล้วจะได้ความหนาในระดับนาโนเมตร ในงานวิจัยนี้ใช้การเคลือบโลหะ 2 วิธีคือ

1. การระเหยไอโลหะในสุญญากาศ (Thermal evaporation) เทคนิคนี้อาศัยความร้อนจากจากป้อนกระแสจากแหล่งจ่ายรุ่น KT-504 มีพิกัดกำลัง 5 kVA ให้กับแผ่นความร้อน (Heating element) หรือโบต (Boat) ทำให้โลหะหลอมเหลวระเหยกระจายออกไปเคลือบชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 3.4

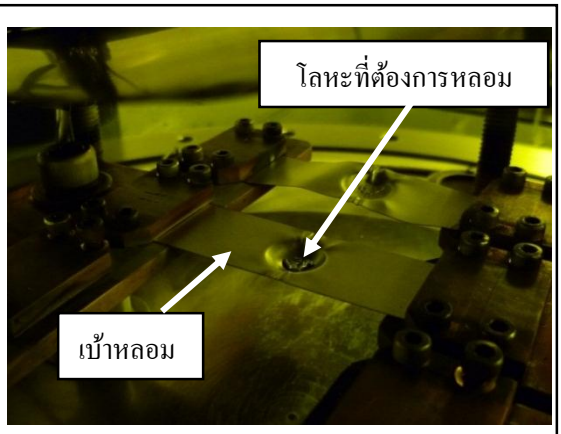


(ก) ไดอะแกรมเครื่องเคลือบโลหะด้วยการระเหยไอโลหะในสุญญากาศ

รูปที่ 3.4 เครื่องเคลือบโลหะด้วยการระเหยไอโลหะในสุญญากาศ



(ก) เครื่องเคลือบโลหะ

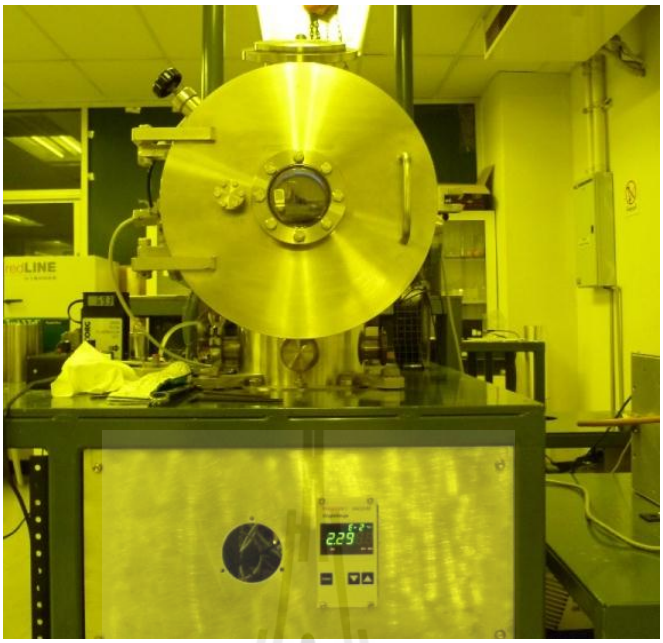


(ข) โลหะเป้าหมายภายในเบ้าหลอม

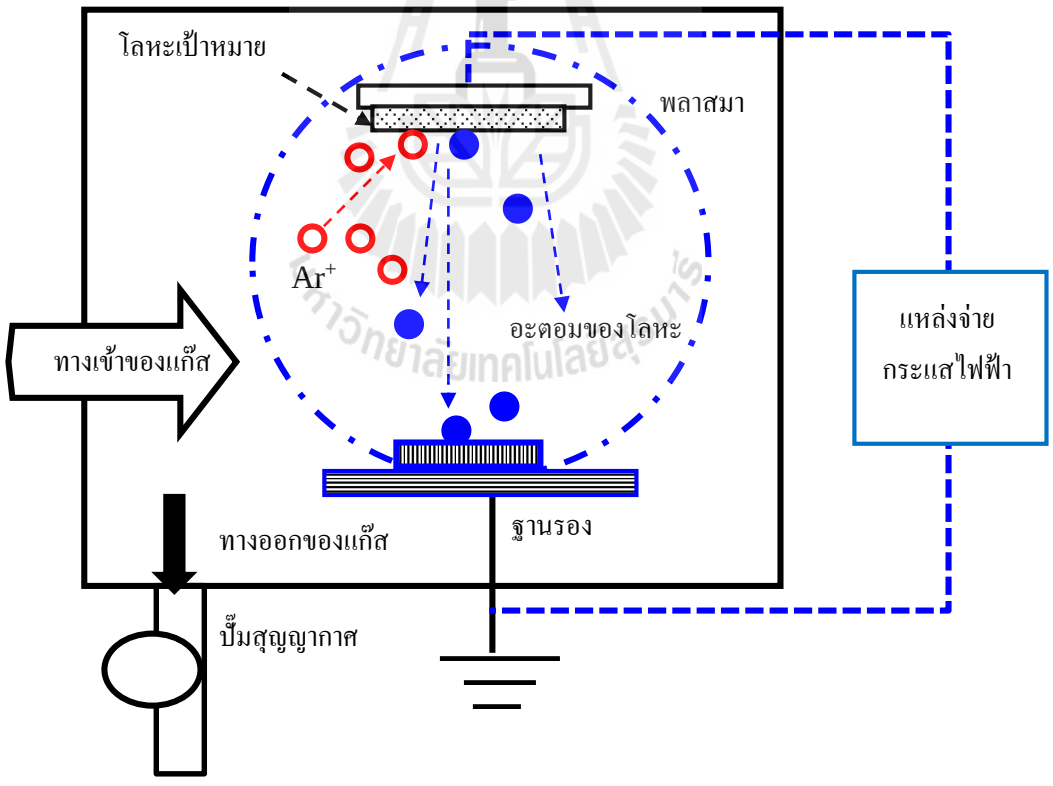
รูปที่ 3.4 เครื่องเคลือบโลหะด้วยการระเหยไอโลหะในสุญญากาศ (ต่อ)

จากรูปที่ 3.4 เครื่องมือสำหรับการเคลือบโลหะด้วยไอระเหยประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ คือ แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า โบต โลหะเป้าหมาย ชิ้นงาน การเคลือบโลหะลงบนชิ้นงานจะทำที่ความดันสุญญากาศในระดับ 10^{-5} ถึง 10^{-6} torr ข้อดีเครื่องเคลือบโลหะแบบนี้คือสร้างและใช้งานได้ง่าย แต่มีผลเสียตรงที่เกิดความร้อนมากและทิศทางของการเคลือบเป็นแบบทิศทางเดียว (Anisotropic) คือ ในแนวตรงจากแผ่นให้ความร้อน ทำให้ไม่สามารถเคลือบผิวชิ้นงานได้อย่างทั่วถึง

2. การสปัตเตอริ่ง (Sputtering) วิธีนี้อาศัยการสร้างพลาสมาของแก๊สเฉื่อย Ar^+ และเหนี่ยวนำให้พุ่งเข้าชนโลหะเป้าหมายทำให้อะตอมของโลหะเป้าหมายกระเจิงออกมาเคลือบบนชิ้นงานการสปัตเตอริง แบ่งออกเป็น 2 ชนิด การสร้างพลาสมาด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC sputtering) เหมาะสำหรับวัสดุเป้าหมายที่เป็นโลหะและการสร้างพลาสมาด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (RF sputtering) เหมาะสำหรับวัสดุเป้าหมายที่เป็นตัวนำหรือฉนวนความถี่ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับนิยมใช้ค่า 13.56 MHz ดังรูปที่ 3.5 แสดงองค์ประกอบของระบบเคลือบวัสดุด้วยวิธีสปัตเตอริง



(ก) เครื่องสปัตเตอริง



(ข) วงจรและอุปกรณ์

รูปที่ 3.5 เครื่องเคลือบโลหะแบบการสปัตเตอริ่ง

3.4 บทสรุป

บทนี้ได้กล่าวถึงกระบวนการสร้างพื้นฐานทางด้านระบบกลไฟฟ้าจุลภาค ได้แก่ กระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต กระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอกซ์ กระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า การเคลือบโลหะ ทำความสะอาดฐานรอง การเตรียมวัสดุไวแสง กระบวนการดังที่ได้กล่าวมาจะเป็นขั้นพื้นฐานสำหรับพัฒนาอุปกรณ์อื่น ๆ เช่น ตัวตรวจรู้ ตัวขับเร้า และอุปกรณ์อื่นทางด้านระบบกลไฟฟ้าจุลภาค

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 4
การทำความร้อน

4.1 การทำความร้อน

การเปลี่ยนแปลงพลังงานในรูปอื่นให้เป็นพลังงานความร้อน เรียกว่า การเกิดความร้อน (Heat generation) (ผ่องศรี ศิวราศักดิ์, 2551; Cengel, 2002) เช่น การเกิดความร้อนเกิดจากการป้อนกระแสไฟฟ้าไหลผ่านความต้านทานดังสมการ $P=I^2R$ การเกิดความร้อนเป็นปรากฏการณ์เชิงปริมาตร ซึ่งเกิดขึ้นกับรูปทรงของตัวกลาง อัตราการเกิดความร้อนจะมีหน่วยต่อปริมาตร นิยมใช้สัญลักษณ์ $\dot{q}$ มีหน่วยเป็น W/m^3 หรือ $Btu/h{\cdot}ft^3$ จะแปรผันตามตำแหน่ง ในปริมาตรหาได้จากสมการที่ (4.1)

$$q_G = \int_V \dot{q} dV \tag{4.1}$$

ในกรณีที่อัตราการเกิดความร้อนสม่ำเสมอ (Uniform heat generation) เช่น ความร้อนที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านความต้านทานที่วัสดุเป็นเนื้อเดียวกันตลอดจะได้สมการเป็น (4.2)

$$q_G = \dot{q}_G V \tag{4.2}$$

เมื่อ q_G คือ อัตราการเกิดความร้อน (W หรือ J/s)

V คือ ปริมาตรตัวกลาง (m^3)

$\dot{q}_G$ คือ อัตราการกำเนิดความร้อนต่อปริมาตร W/m^3

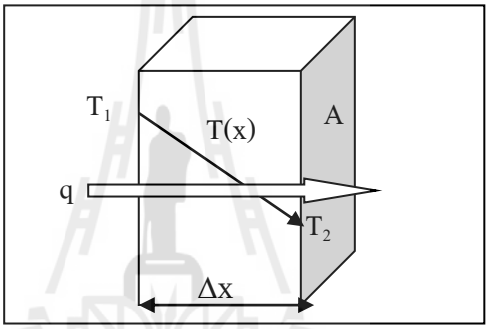
กลไกลการถ่ายโอนความร้อนนั้นจะเกิด 3 กรณี ได้แก่ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อนซึ่งจะเกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างวัตถุและมีทิศทางจากอุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิที่ต่ำกว่ามีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องดังนี้

1) การนำความร้อน (Heat conduction) คือ การถ่ายโอนความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่าสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า เกิดได้ในของแข็ง ของเหลวและก๊าซ สำหรับการนำความร้อน

ในของแข็งจะเกิดจากการสั่นของโมเลกุลและส่งผ่านพลังงานโดยอิเล็กตรอน ดังนั้นโลหะที่นำความร้อนได้ดีก็จะนำไฟฟ้าได้ดีด้วย ส่วนการนำความร้อนในของเหลวและก๊าซ การนำความร้อนจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ รูปทรงของตัวกลาง ชนิดและความหนาของวัสดุ ความแตกต่างของอุณหภูมิของตัวกลาง

อัตราการนำความร้อน (q) ผ่านระนาบใด ๆ จะแปรผันตรงกับความแตกต่างของอุณหภูมิ (ΔT) และพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน (A) เป็นดังรูปที่ 4.1 และแสดงได้ดังสมการที่ (4.3)

$$q \propto A\frac{\Delta T}{\Delta x} \tag{4.3}$$



รูปที่ 4.1 การนำความร้อนผ่านผนังที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ

หากเขียนเป็นความสัมพันธ์จะเป็นดังสมการที่ (4.4)

$$q = -kA\frac{\Delta T}{\Delta x} \tag{4.4}$$

หรือเขียนอยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์จะได้ว่า

$$q = -kA\frac{dT}{dx} \tag{4.5}$$

เมื่อ k คือ สภาพนำความร้อนของวัสดุ (Thermal conductivity : W/m·°C) ค่า k เป็นอัตราการถ่ายโอนความร้อนผ่านความหนาของวัสดุต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยอุณหภูมิ

A คือ พื้นที่หน้าตัด (m^3)

$\frac{dT}{dx}$ คือ เกรเดียนท์ของอุณหภูมิ ($^{\circ}C$ /m)

q คือ อัตราการนำความร้อน (W,J/s)

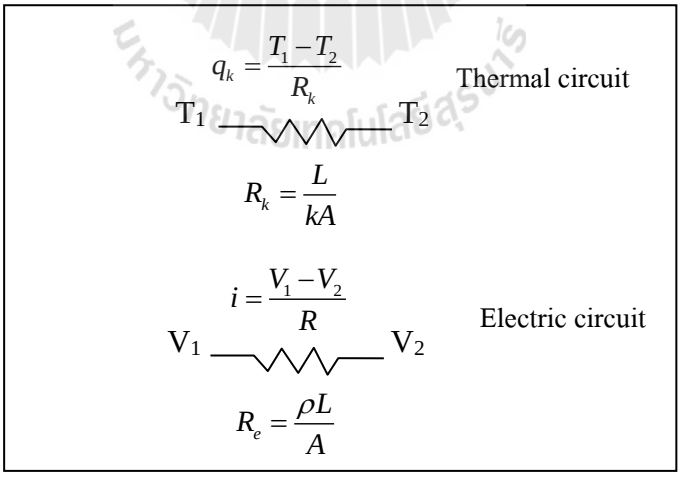
เรียกสมการที่ (4.5) นี้ว่า “กฎการนำความร้อนของฟูรีเยร์” (Fourier’s Law of heat conduction) เมื่อเครื่องหมายลบบ่งบอกถึง อุณหภูมิลดลงเมื่อมีระยะความหนาที่เพิ่มขึ้น

เมื่อเปรียบการไหลของความร้อนเป็นดังการไหลของกระแสไฟฟ้าซึ่งจะทำให้เข้าใจง่ายขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และหากความร้อนไหลผ่านผนังซึ่งรายเรียงกันเป็นชั้นแบบอนุกรมหรือขนาน ก็สามารถวิเคราะห์ได้เช่นเดียวกับการวิเคราะห์การไหลของกระแสไฟฟ้า จัดสมการที่ (4.5) ใหม่เป็นดังนี้

$$q = \frac{\Delta T}{R_k} = \frac{T_1 - T_2}{R_k} \tag{4.6}$$

เมื่อ R_k คือ ค่าความต้านทานความร้อน (Thermal resistivity : $R_k = \Delta T/q = L/kA$)

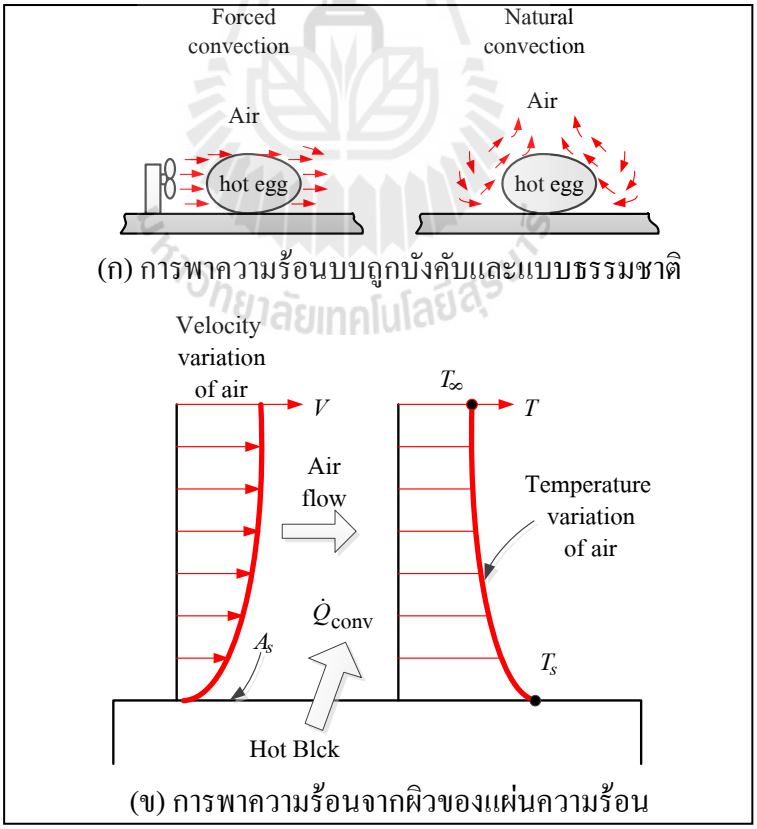
ΔT คือ ความต่างศักย์ทางความร้อน (Thermal potential)



รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบการไหลของความร้อนกับการไหลของกระแสไฟฟ้า

2) การพาความร้อน (Heat convection) คือ การถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นจากผิวของแข็งไปยังของเหลวหรือก๊าซที่อยู่ใกล้ผิวนั้น ซึ่งกำลังเคลื่อนที่ การถ่ายโอนความร้อนจะได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับการเคลื่อนที่ของของไหลว่าเร็วหรือช้า ในกรณีที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของก้อนของไหลใด ๆ การถ่ายโอนความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหลที่อยู่ใกล้ผิว จะเป็นการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว (Pure conduction)

การพาความร้อนแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ (1) การพาความร้อนแบบถูกบังคับ (Forced convection) เมื่อของไหลถูกทำให้ไหลผ่านผิวโดยแรงจากภายนอก ได้แก่ พัดลม ปั๊ม (2) การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Neutral or free convection) เกิดจากแรงลอยตัวของของไหลเนื่องจากการแปรเปลี่ยนอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ทำให้ความหนาแน่นแตกต่างกัน ดังรูปที่ 4.3 (ก) เป็นการแสดงการต้มไข่ที่มีทั้งการพาความร้อนแบบถูกบังคับและการพาแบบธรรมชาติ การถ่ายโอนความร้อนจากผิวแท่งความร้อน (Hot block) ดังรูปที่ 4.3 (ข) เกิดจากโมเลกุลของอากาศเคลื่อนที่ นำเอาอากาศร้อนที่อยู่ใกล้ผิวออกไป ซึ่งจะถูกแทนที่ด้วยอากาศเย็น หากเกิดการไหลเวียนของอากาศมากจะทำให้อุณหภูมิที่อยู่ใกล้ผิวลดลง



รูปที่ 4.3 ลักษณะการเกิดการพาความร้อน

อัตราการถ่ายโอนความร้อนจากการพาความร้อน เป็นดังสมการที่ (4.7) เรียกว่ากฎการทำให้เย็นของนิวตัน (Newton's Law of cooling) ซึ่งได้มาจากการพาความร้อนจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างของอุณหภูมิ

$$q_{conv} = hA(T_s - T_\infty) \tag{4.7}$$

เมื่อ h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convection heat coefficient $W/m^2 \cdot °C$) ขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร ได้แก่ รูปร่างของผิว ธรรมชาติการเคลื่อนที่ของของไหล คุณสมบัติของของไหล และความเร็วของก้อนของของไหล

A คือ พื้นที่ผิวการถ่ายโอนความร้อน (m^2)

T_s คือ อุณหภูมิที่ผิว (°C)

$T\infty$ คือ อุณหภูมิของไหลที่อยู่ไกลจากผิว (°C)

q_{conv} คือ อัตราการถ่ายโอนแบบพาความร้อน (W)

3) การแผ่รังสีความร้อน (Heat radiation) คือ การถ่ายโอนความร้อนที่เกิดจากการปลดปล่อยพลังงานออกจากสสาร (Matter) ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) หรือโฟตอน (Photon) การแผ่รังสีหาได้จากกฎของ Stefan-Boltzmann เป็นดังรูปที่ 4.4 มีสมการดังสมการที่ (4.8)

$$q_{rad} = \varepsilon\sigma A(T_s^4 - T_{surr}^4) \tag{4.8}$$

เมื่อ ε คือ สภาพการเปล่งรังสี (Emisitivity) ของผิวมีค่าอยู่ในช่วง 0-1

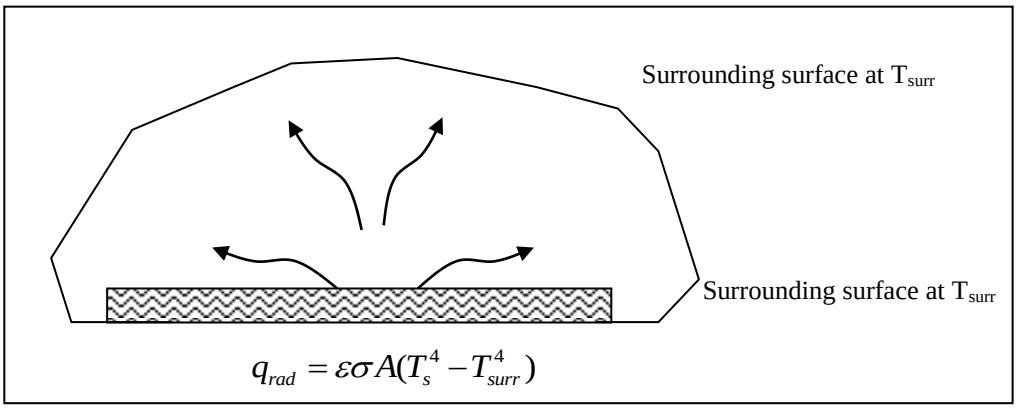
σ คือ ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann (5.67×10^{-8} $W/m^2 \cdot °C$)

A คือ พื้นที่ผิวการถ่ายโอนความร้อน (m^2)

T_s คือ อุณหภูมิผิวหน้า (°C)

T_{surr} คือ อุณหภูมิที่ล้อมรอบ (°C)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

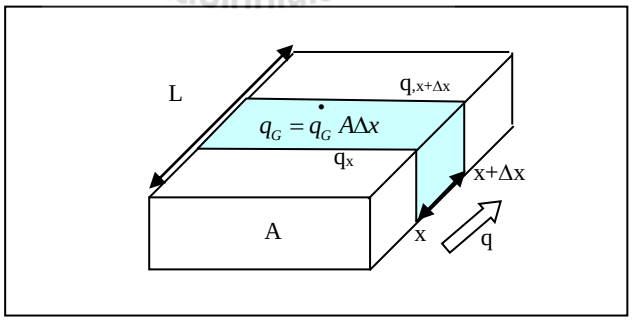


รูปที่ 4.4 การถ่ายโอนความร้อนแบบแผ่รังสีความร้อน

การถ่ายโอนความร้อนอาจจะเกิดจากการหลายรูปแบบผสมกันได้ เช่น เกิดการพาความร้อนร่วมกับการแผ่รังสีในของไหลซึ่งเคลื่อนที่ การถ่ายโอนความร้อนแบบแผ่รังสีในสุญญากาศเนื่องจากไม่ต้องอาศัยตัวกลาง ส่วนการนำและพาความร้อนต้องอาศัยตัวกลางของวัสดุ

4.2 สมการนำความร้อน

หากพิจารณาการนำความร้อนผ่านผนังแบนราบมีโครงสร้างเป็นดังรูปที่ 4.5 ผนังมีความยาวสั้น ๆ เท่ากับ Δx มีความหนาแน่นของวัสดุเท่ากับ ρ_v และมีพื้นที่ตั้งฉากกับทิศทางของการนำความร้อนเท่ากับ A ในเวลาช่วงสั้น ๆ เท่ากับ Δt



รูปที่ 4.5 ภาพแสดงการนำความร้อนจากตำแหน่ง x ไปยังตำแหน่ง x+Δx

จากการสมดุลพลังงาน (Conservation of energy) ในรูปของอัตราการนำความร้อนจะได้เป็นดังนี้

$$\begin{bmatrix}\text{Rete of heat}\\ \text{conduction}\\ \text{at x}\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}\text{Rete of heat}\\ \text{conduction}\\ \text{at x+}\Delta\text{x}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\text{Rete of heat}\\ \text{generation in}\\ \text{side the element}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\text{Rete of change of}\\ \text{the energycontent}\\ \text{of the element}\end{bmatrix}$$

หรือสามารถเขียนใหม่ได้เป็นดังสมการที่ (4.9)

$$q_x - q_{x+\Delta x} + q_G = \frac{\Delta q_{thermal,system}}{\Delta t} \tag{4.9}$$

เมื่อ $\Delta q_{thermal,system} = mc(T_{t+\Delta t} - T_t) = \rho_v cA\Delta x(T_{t+\Delta t} - T_t)$; $q_G = \dot{q}_G V = \dot{q}_G A\Delta x$

m คือ มวล (kg)

$c = c_p$ คือ ความร้อนจำเพาะ (J/kg•°C)

ρ_v คือ ความหนาแน่นของวัสดุ (kg/m^3)

$\dot{q}_G$ คือ อัตราการนำความร้อนต่อปริมาตร W/m^3

q_x คือ อัตราการนำความร้อนที่ตำแหน่ง x

$q_{x+\Delta_x}$ คือ อัตราการนำความร้อนที่ตำแหน่ง x+Δx

q_{gen} คือ อัตราพลังงานความร้อนที่กำเนิดขึ้น

t คือ เวลาที่ t

$t_{t+\Delta_t}$ คือ เวลาที่ t +Δt

จัดสมการใหม่เป็น

$$q_x - q_{x+\Delta x} + \dot{q}_G A\Delta x = \frac{\rho_v cA\Delta x(T_{t+\Delta t} - T_t)}{\Delta t} \tag{4.10}$$

นำ AΔx หารตลอดจะได้เป็น

$$-\frac{1}{A}\frac{(q_{x+\Delta x} - q_x)}{\Delta x} + \dot{q}_G = \frac{\rho_v c(T_{t+\Delta t} - T_t)}{\Delta t} \tag{4.11}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ให้ลิมิต $\Delta x, \Delta t \rightarrow 0$ $\lim_{\Delta x \to 0} \frac{q_{x+\Delta x} - q_x}{\Delta x} = \frac{dq}{dx}$ และ $\lim_{\Delta t \to 0} \frac{T_{t+\Delta t} - T_t}{\Delta t} = \frac{dT}{dt}$ เขียนใหม่ในสมการเชิงอนุพันธ์จะได้

$$-\frac{1}{A}\frac{dq}{dx} + \dot{q}_G = \rho_v c \frac{dT}{dt}$$

$$-\frac{1}{A}\frac{d}{dx}\left(-kA\frac{dT}{dx}\right) + \dot{q}_G = \rho_v c \frac{dT}{dt} \qquad ; q = -kA\frac{dT}{dx}$$

ปรับแต่งสมการใหม่จะได้เป็นดังสมการที่ (4.12) เรียก ว่าสมการนำความร้อนแบบนำความร้อนแบบปรับเปลี่ยน (Variable conductivity)

$$k\frac{d^2T}{dx^2} + \dot{q}_G = \rho_v c \frac{dT}{dt} \tag{4.12}$$

โดยที่ $k\frac{d^2T}{dx^2}$ คือ อัตราการนำความร้อนสุทธิ (Net rate of heat conduction)

$\dot{q}_G$ คือ อัตราการกำเนิดพลังงานต่อปริมาตร (Rate of energy generate per unit volume)

$\rho_v c \frac{dT}{dt}$ คือ อัตราการเพิ่มพลังงานภายใน (Rate of increase internal energy)

จาก (4.13) นำค่า k หารตลอด จะได้เป็นดังสมการที่ (4.13) เรียกว่าสมการนำความร้อนแบบคงที่ (Constant conductivity)

$$\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{\dot{q}_G}{k} = \frac{1}{\alpha}\frac{dT}{dt} \tag{4.13}$$

เมื่อ $\alpha = \frac{k}{\rho_v c}$ คือ สภาพการแพร่ความร้อน (Thermal diffusion) (m^2/s)

สำหรับวิเคราะห์ความร้อนแบบไม่คงที่ (transient heat conduction) คือมีเวลามาเกี่ยวข้อง ถ้ามีค่ามากจะทำให้ความร้อนเข้าและออกมีค่า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.3 การนำความร้อนในสภาวะคงตัว

เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady state) แล้ว อุณหภูมิไม่แปรผันตามเวลาทำให้ผลของเวลาไม่ถูกนำมาคิด (Kreith et al., 2011) ส่งผลให้พจน์ $\frac{dT}{dt}$ ของสมการ (4.13) จะถูกละทิ้งไป สามารถเขียนใหม่ได้เป็นดัง (4.14) เรียกว่าสมการพัวซอง (Poisson's equation)

$$\frac{d^2T}{dx^2}+\frac{\dot{q}_G}{k}=0 \tag{4.14}$$

ปรับสมการใหม่เพื่อทำการแก้ปัญหาสภาวะคงตัวได้เป็นดังสมการ

$$\frac{d^2T}{dx^2}=-\frac{\dot{q}_G}{k} \tag{4.15}$$

แก้สมการด้วยการอินทิเกรตครั้งที่ 1 จะได้เป็น

$$\frac{dT(x)}{dx}=-\frac{\dot{q}_G}{k}x+C_1 \tag{4.16}$$

แก้สมการด้วนการอินทิเกรตครั้งที่ 2 จะได้เป็น

$$T(x)=-\frac{\dot{q}_G}{2k}x^2+C_1x+C_2 \tag{4.17}$$

เมื่อ C_1 และ C_2 เป็นค่าคงที่ มีค่าเริ่มต้นเป็นของระบบคือ $T_{(x=0)}=T_1, T_{(x=L)}=T_2$

และ $T(x=0)\rightarrow T_1=-\frac{\dot{q}_G}{2k}(0)+C_1(0)+C_2$ จะได้ค่า $C_2=T_1$

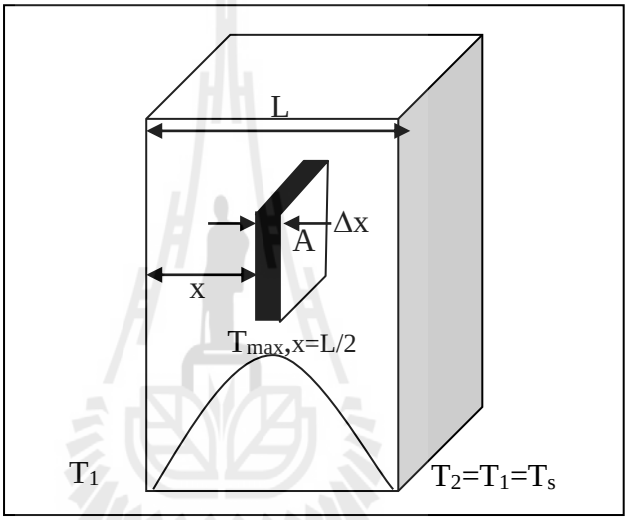
และ $T(x=L)\rightarrow T_2=-\frac{\dot{q}_G}{2k}L^2+C_1L+C_2$; $T_1=C_2$

จะได้ค่า $C_1=\frac{T_2-T_1}{L}+\frac{\dot{q}_G}{2k}L$

เมื่อแทน C_1 และ C_2 ในสมการ (4.17) จะได้ดังสมการ

$$T(x) = -\frac{\dot{q}_G}{2k}x^2 + \frac{T_2 - T_1}{L}x + \frac{\dot{q}_G}{2k}Lx + T_1 \qquad (4.18)$$

หากพิจาณาอุณหภูมิที่ผิวทั้งสองข้างมีโครงสร้างที่สมมาตรกัน ทำให้อุณหภูมิที่ตำแหน่ง $T_1=T_2=T_s$ ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 รูปสำหรับการพิจารณาอุณหภูมิจากการนำความร้อนที่วัสดุมีโครงสร้างสมมาตรกัน

จะได้สามารถจัดสมการกระจายอุณหภูมิใหม่ได้เป็นดังสมการที่ (4.19)

$$T(x) = \frac{\dot{q}_G}{2k}(Lx - x^2) + T_s \qquad (4.19)$$

จากสมการสามารถหาค่าความร้อนจะเกิดขึ้นมากที่สุดด้วยการทำ $\frac{dT(x)}{dx} = 0$ จะได้ x=L/2 หรือจุดกึ่งกลางของตัวนำ เป็นดังสมการที่ (4.20)

$$T_{\max} = \frac{\dot{q}_G L^2}{8k} + T_s \qquad (4.20)$$

จะได้อัตราการถ่ายโอนของระบบนี้เท่ากับ

$$q(x) = kA\left[\frac{\dot{q}_G}{2k}(2x - L)\right] \tag{4.21}$$

หาพิจารณา $\dot{q}_G$ คือ อัตราการเกิดความร้อนต่อหน่วยปริมาตร (W/m^3) ซึ่งหมายถึงพลังงานความร้อนที่เกิดจากภายในบางครั้งเรียกว่า Internal heat generation เช่น ความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี หรือ ความร้อนที่เกิดจากการป้อนกระแสผ่านตัวต้านทาน (Hyang and Lee, 1999; Incropera and de Witt, 1990) เป็นดังสมการที่ (4.22)

$$\dot{q}_G = J^2\rho = \frac{V_B^2}{\rho L^2} = \frac{V_B^2}{RAL} \tag{4.22}$$

เมื่อ ρ คือ สัมประสิทธ์ความต้านทานไฟฟ้า ($\Omega \cdot m$)

V_B คือ แรงดันที่ป้อนสู่ไมโครฮีตเตอร์

L คือ ความยาวของไมโครฮีตเตอร์

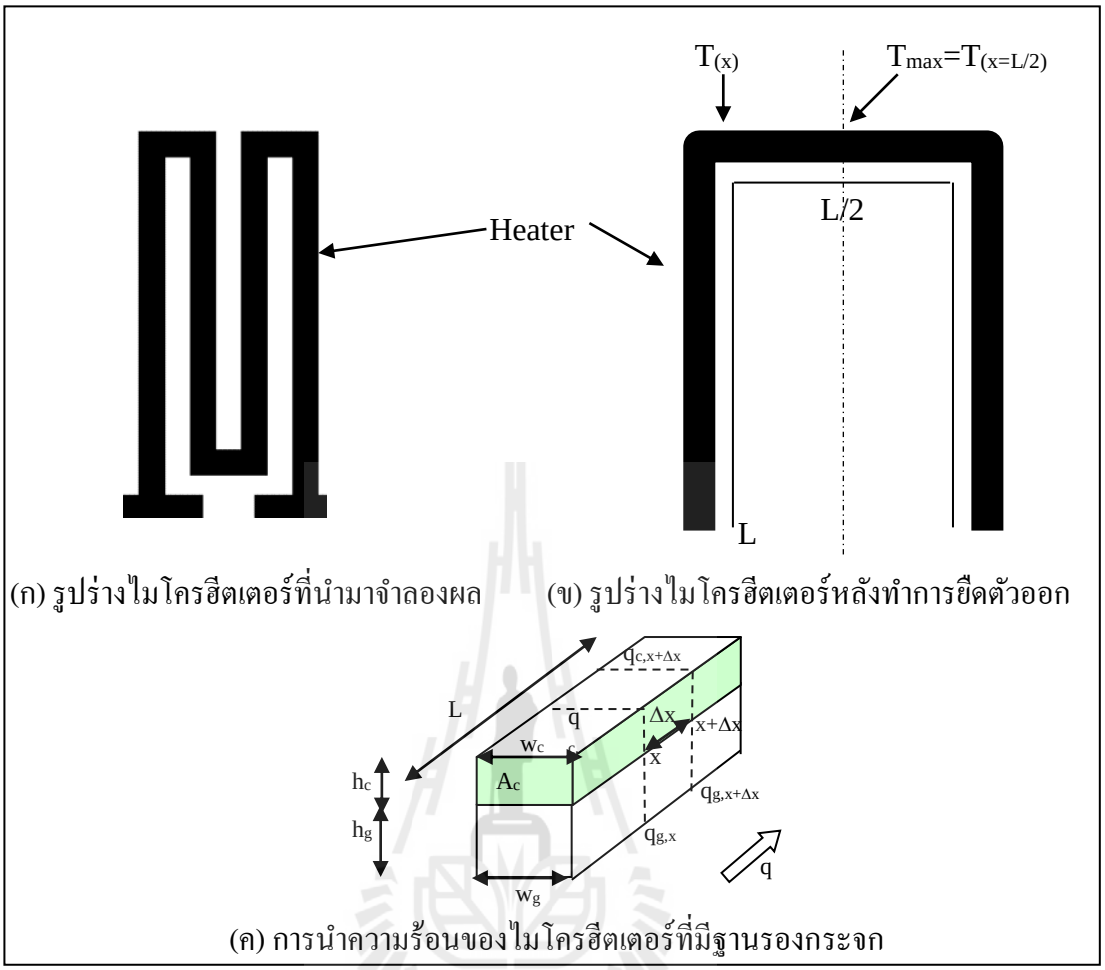
R คือ ความต้านทานของไมโครฮีตเตอร์

A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวต้านทาน

$\dot{q}_G$ คือ อัตราการเกิดความร้อนต่อหน่วยปริมาตร (W/m^3)

4.4 การจำลองความร้อนในไมโครฮีตเตอร์

สำหรับผลการจำลองจะนำพารามิเตอร์ที่ได้จากขนาดลวดลายจากการสร้างในบทที่ 5 มีวัสดุเป็นอะลูมิเนียม (Al) บนโครงสร้างกระจกหนาและโครงสร้างเป็นดังรูปที่ 4.7 (ก) มีขนาด w×t×L เท่ากับ $150\ \mu m \times 192\ Å \times 8700\ \mu m$ วางอยู่บนกระจกมีความหนา 1 mm และจากสมการการนำความร้อนที่ (4.19) เป็นสมการที่ไม่มีฐานรอง แต่ในงานวิจัยมีฐานรองเป็นกระจก ดังนั้นต้องเพิ่มส่วนของฐานรองเข้าไปด้วย ซึ่งจะคล้ายคลึงกับงานวิจัยของ Hyang and Lee (1999) และเพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาทำการยืดโครงสร้างของไมโครฮีตเตอร์ให้มีลักษณะเป็นเส้นลวดได้ดังรูปที่ดังรูปที่ 4.7 (ข) และ 4.7 (ค)



รูปที่ 4.7 โครงสร้างของไมโครฮีตเตอร์

หากพิจารณาสมการที่ (4.10) อีกครั้ง ด้วยการเพิ่มส่วนของฐานรองกระจกเข้าไปและไม่คิดผลของเวลา (steady state) จะได้เป็น

$$(q_{c,x} - q_{c,x+\Delta x}) + (q_{g,x} - q_{g,x+\Delta x}) = -\dot{q}_G A\Delta x \tag{4.23}$$

นำ AΔx หารตลอดจะได้เป็น

$$\frac{1}{A}\frac{(q_{c,x+\Delta x} - q_{c,x}) + (q_{g,x+\Delta x} - q_{g,x})}{\Delta x} = \dot{q}_G \tag{4.24}$$

ให้ลิมิต $\Delta x \rightarrow 0$ เขียนใหม่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์จะได้เป็น จะได้เป็น

$$\frac{1}{A_c}\left(\frac{dq_c}{dx}+\frac{dq_g}{dx}\right)=\dot{q}_G$$

$$\frac{1}{A_c}\left(\frac{d}{dx}\left[-k_c A_c \frac{dT}{dx}\right]+\frac{dq_g}{dx}\left[-k_g A_g \frac{dT}{dx}\right]\right)=\dot{q}_G \text{ ; } q=-kA\frac{dT}{dx}$$

$$\frac{1}{A_c}\left(-k_c A_c \frac{d^2T}{dx^2}-k_g A_g \frac{d^2T}{dx^2}\right)=\dot{q}_G$$

$$\frac{d^2T}{dx^2}\left(k_c+k_g\frac{A_g}{A_c}\right)=-\dot{q}_G$$

ปรับรูปสมการได้ดังสมการที่ (4.25)

$$\frac{d^2T}{dx^2}=\frac{-\dot{q}_G}{k_c+k_g\dfrac{A_g}{A_c}} \tag{4.25}$$

พิจรณาสมการที่ (4.25) กับสมการที่ (4.15) และ (4.19) พร้อมกับปรับแต่งสมการจนได้เป็นดังนี้

$$T(x)=\frac{\dot{q}_G}{2}(Lx-x^2)\left[\frac{1}{k_c+k_g\dfrac{A_g}{A_c}}\right]+T_s \tag{4.26}$$

เมื่อ k_c คือ สภาพการนำความร้อนที่เป็นตัวนำ (thermal conductivity of nonconductive)

k_g คือ สภาพการนำความร้อนที่เป็นฐานรองหรือกระจก (thermal conductivity of substrate)

A_c คือ พื้นที่หน้าตัดที่เป็นตัวนำ (Area of conductive Ac = $w_c h_c$)

A_g คือ พื้นที่หน้าตัดของฐานรอง (Area of substrate $A_g = w_c h_g$)

เนื่องจากต้องการจำลองผลการเพื่อดูแนวโน้มของอุณหภูมิ ได้เพิ่มตัวปรับคูณ (factor : ζ) เพื่อชดเชยค่าต่าง ๆ เช่น การคำนวณและค่าที่วัดได้ อาจจะมีสาเหตุความผิดพลาดจากการวัดขนาด ได้แก่ ความหนา ความต้านทาน ผลจุดเชื่อมต่อระหว่างวงจรกับความต้านทาน อีกทั้งความหนาที่ไม่สม่ำเสมอจากการสร้าง ไม่สม่ำเสมอกัน ปัจจัยเหล่านี้มีผลต่ออุณหภูมิแต่ไม่สามารถวัดออกมาได้ว่า

มีค่ามากเท่าใด โดยทำการปรับคูณในสมการที่ (4.26) คือ $\dot{q} = \frac{1}{\zeta}\dot{q}_G$ ได้สมการใหม่เป็นดังสมการที่ (4.27)

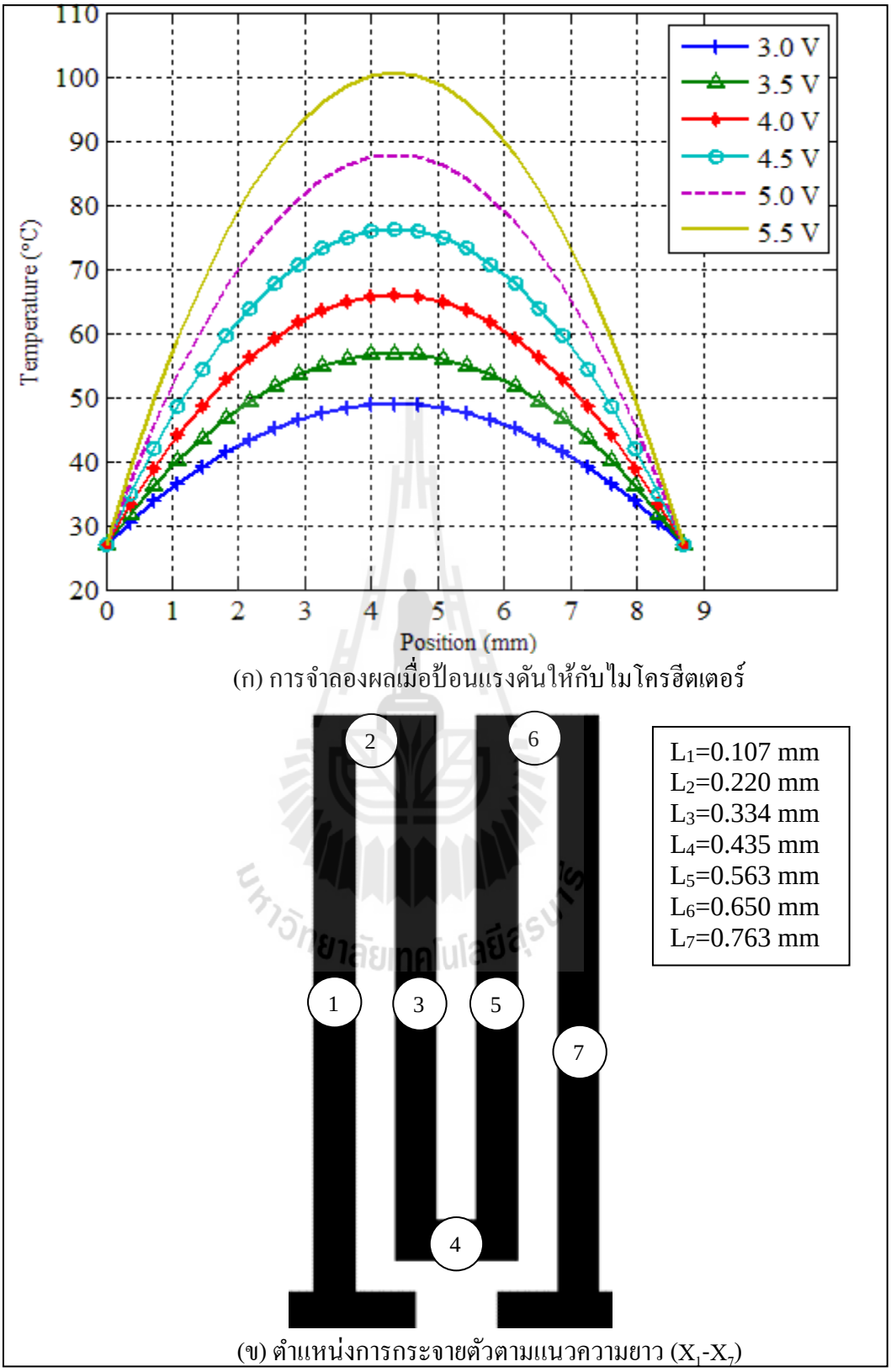
$$T(x) = \frac{\dot{q}}{2}(Lx - x^2)\left[\frac{1}{k_c + k_g \frac{A_g}{A_c}}\right] + T_s \qquad (4.27)$$

นอกจากนี้ยังได้ทำการจำลองผลการป้อนแรงดันเข้าสู่ไมโครฮีตเตอร์ที่ระดับแรงดันต่าง ๆ เพื่อศึกษาแนวโน้มการเกิดความร้อนได้ใช้ขนาดพารามิเตอร์ของวัสดุดังตารางที่ 4.1 และใช้ค่าความต้านทานเริ่มต้นไมโครฮีตเตอร์ที่สร้างได้ R เท่ากับ 76 Ω ที่อุณหภูมิ 26 ^{o}C ขนาด w×t×L เท่ากับ 150 μm × 192 Å × 8700 μm บนกระจกหนา 1 mm โดยให้วัสดุอะลูมิเนียม (Al) เป็นไมโครฮีตเตอร์ได้ผลการจำลองการกระจายความร้อนที่แรงดันต่าง ๆ รูปที่ 4.8 (ก) และผลการกระจายความความร้อนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.8 (ข) ถึง (ค)

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติการนำความร้อนและไฟฟ้าของวัสดุที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

วัสดุ (Materials)	สภาพการนำความร้อน (Thermal conductivity : k) (W/m·^{o}C)	สัมประสิทธ์ความต้านทานไฟฟ้า (Resistivity Coefficient : ρ) (Ω.m)
อะลูมิเนียม (Al)	237	2.65×10^{-8}
กระจก (Glass)	0.8	10×10^{12}

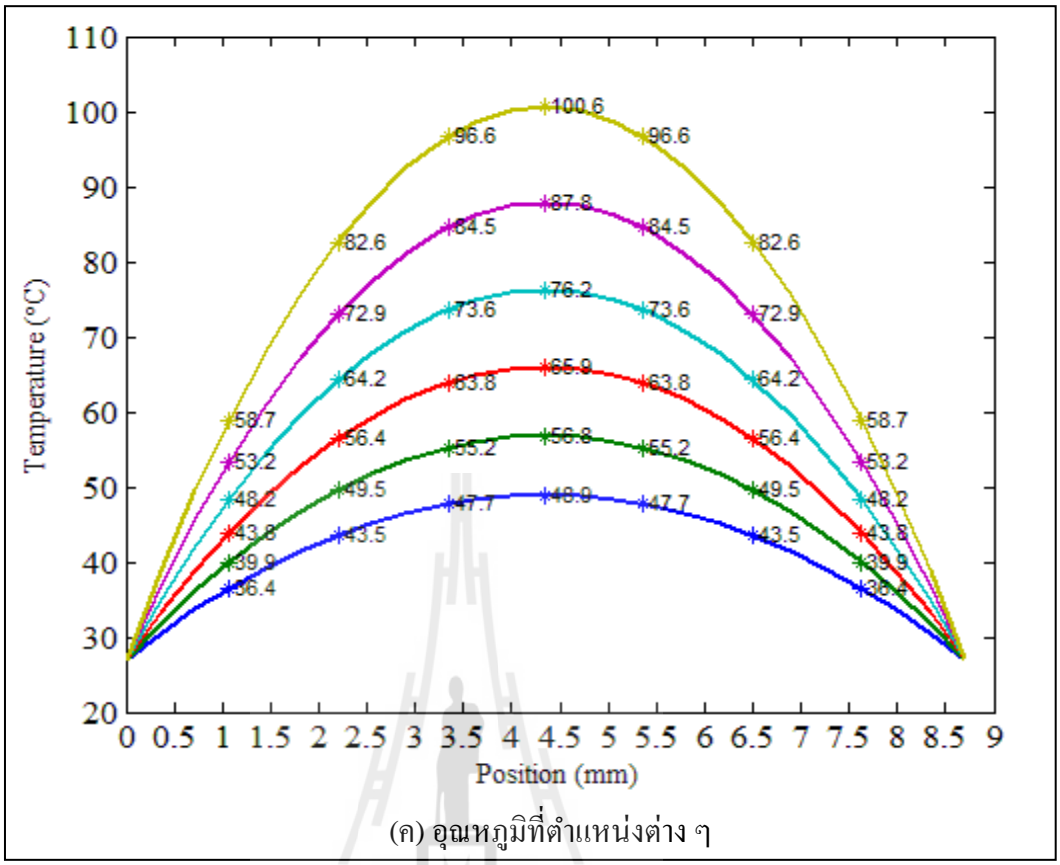
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(ก) การจำลองผลเมื่อป้อนแรงดันให้กับไมโครฮีตเตอร์

(ข) ตำแหน่งการกระจายตัวตามแนวความยาว (X_1-X_7)

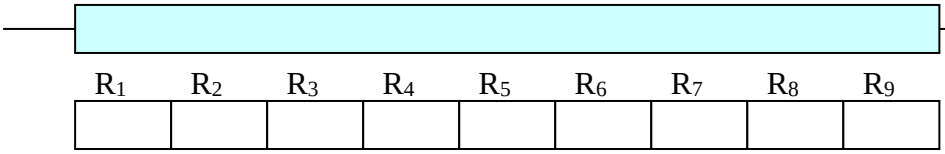
รูปที่ 4.8 การจำลองแนวโน้มการกระจายอุณหภูมิของไมโครฮีตเตอร์



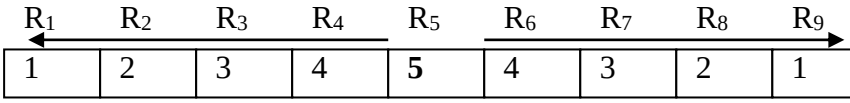
(ค) อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ

รูปที่ 4.8 การจำลองแนวโน้มการกระจายอุณหภูมิของไมโครฮีตเตอร์ (ต่อ)

หากพิจารณาผลของการจำลองแล้วอาจจะทำให้เกิดข้อสงสัยว่าเหตุใด เมื่อป้อนกระแสผ่านความต้านทานจึงเกิดความร้อนมากที่สุดที่บริเวณตรงกลาง ซึ่งก็สอดคล้องกับสมการนำความร้อน เพื่อให้เข้าใจมากยิ่งขึ้นสามารถอธิบายเกี่ยวกับความร้อนได้โดยยกตัวอย่างโดยง่าย ดังนี้ สมมติมีความต้านทานตัวหนึ่งมีวัสดุเป็นเนื้อเดียวกันมีความยาว L ดังรูปที่ 4.9 (ก) แสดงตัวต้านทานที่มีความยาว 9 ตัวมีขนาดเท่ากันทุกประการ และมีพลังงานสูญเสียตัวละ 5 W ส่วนในรูปที่ 4.9 (ข) สมมติให้อิทธิพลของความร้อนที่เกิดขึ้น ณ ตัวต้านทานใด ๆ ส่งผลต่อตัวต้านทานรอบข้างลดลงไป 1 W เมื่อระยะห่างออกไป 1 หน่วย กรณีนี้ยกตัวอย่างตัวต้านทานตรงกลาง (R_5) หรือตัวที่ 5 อิทธิพลของความร้อนจะลดลงเป็น 4 3 2 และ 1 W เมื่อมีระยะห่างออกไปเป็น 1 2 3 และ 4 หน่วย ตามลำดับ และรูปที่ 4.9 (ค) แสดงตัวต้านทานทั้งหมดที่มีอิทธิพลต่อตัวต้านทานรอบด้านเมื่อทำมาสร้างกราฟเพื่อให้เห็นแนวโน้มความร้อนที่เกิดขึ้นที่ตัวต้านทานจะได้เป็นดังรูปที่ 4.10



(ก) ความต้านทานมีความยาว 9 หน่วย

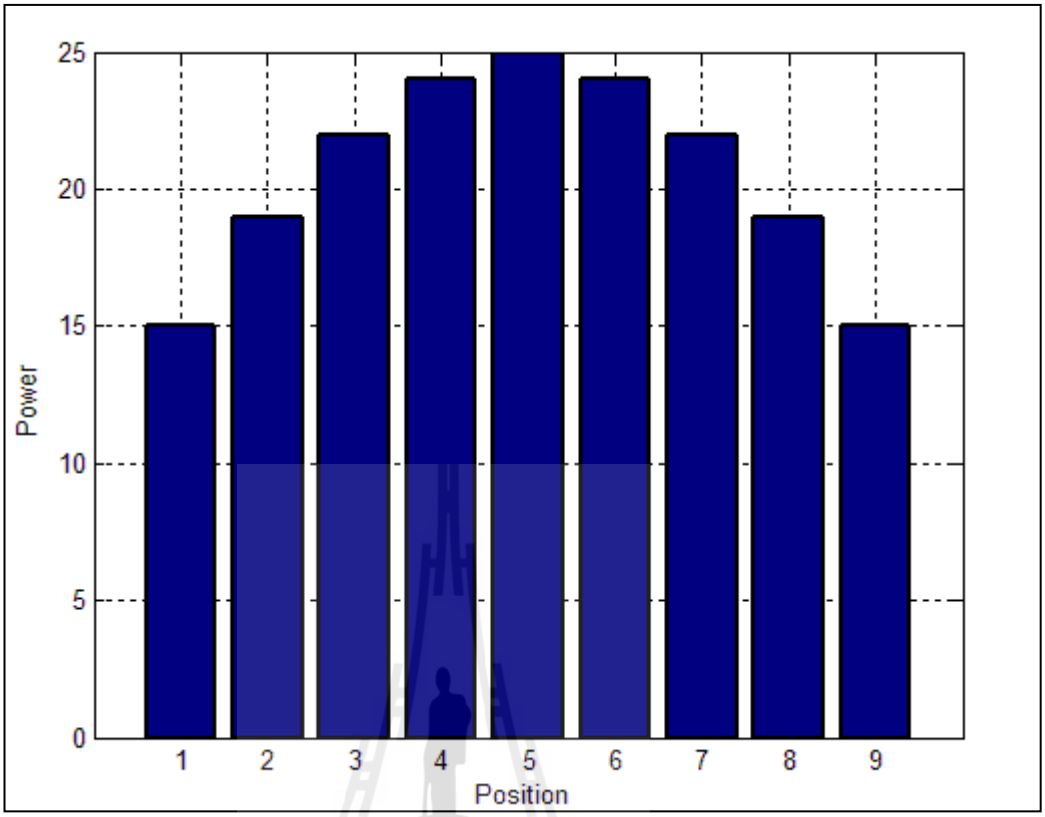


(ข) อิทธิพลของความร้อนของตัวต้านทานตัวที่ 5 (R_5) ต่อตัวต้านทานรอบข้าง

R_1	**5**	4	3	2	1	0	0	0	0
R_2	4	**5**	4	3	2	1	0	0	0
R_3	3	4	**5**	4	3	2	1	0	0
R_3	2	3	4	**5**	4	3	2	1	0
R_5	1	2	3	4	**5**	4	3	2	1
R_6	0	1	2	3	4	**5**	4	3	2
R_7	0	0	1	2	3	4	**5**	3	3
R_7	0	0	0	1	2	3	4	**5**	4
R_9	0	0	0	0	1	2	3	4	**5**
	15	19	22	24	25	24	22	17	15

(ค) แสดงตัวต้านทานทั้งหมดที่มีอิทธิพลต่อตัวท้านทานรอบด้าน

รูปที่ 4.9 อิทธิพลของความร้อนของตัวต้านทานใด ๆ ต่อตัวต้านทานรอบข้าง



รูปที่ 4.10 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในตัวต้านทานจะค่าสูงสุดบริเวณตรงกลาง

หากพิจารณาจะพบว่าตัวต้านทานที่อยู่ตรงกลางจะได้รับความร้อนจากการนำความร้อนมากที่สุดเนื่องจากได้รับความร้อนทั้งที่สร้างขึ้นเองและความร้อนจากตัวข้างเคียง ซึ่งก็สอดคล้องกับทฤษฎีการนำความร้อนที่ได้ผ่านการพิสูจน์ด้วยสมการแล้ว คือบริเวณตรงกลางของวัสดุเกิดความร้อนสูงสุด

4.5 บทสรุป

บทนี้ได้อธิบายเกี่ยวกับทฤษฎีการเกิดความร้อนในรูปแบบต่าง ๆ ได้แก่การนำความร้อน การพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน พร้อมกับได้ทำการจำลองผลการเกิดความร้อนเมื่อทำการป้อนแรงดันผ่านไมโครฮีตเตอร์ที่ระดับต่าง ๆ

บทที่ 5
การพัฒนาไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ

ในงานวิจัยนี้จะนำเสนอการเปรียบเทียบกระบวนการสร้างไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิด้วยกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตและรังสีเอกซ์ เพื่อให้เห็นถึงความสำคัญและประโยชน์ของการนำรังสีเอกซ์มาใช้สร้างอุปกรณ์ โดยเบื้องต้นได้ทำการทดลองสร้างลวดลายด้วยกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต เพื่อศึกษาแนวทางความเป็นไปได้ในการสร้างและเพื่อศึกษาคุณลักษณะของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น จากนั้นทำการปรับปรุงกระบวนการสร้างแนวทางใหม่เพื่อหาแนวทางที่ดีที่สุดดังจะกล่าวถึงต่อไปนี้

5.1 การสร้างไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต

กระบวนการสำหรับสร้างไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์ได้ใช้กระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต เป็นการสร้างลวดลายด้วยการใช้แสงอัลตราไวโอเลตและนอกจากนี้ยังมีเทคนิคลิฟท์ออฟ (Lift-off) มีขั้นตอนการสร้างแสดงดังรูปที่ 5.1 ซึ่งรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.ทำความสะอาดกระจกสไลด์ความหนา 1 mm ขนาด 2.54 cm × 3.81 cm แล้วทำการเคลือบโลหะอะลูมิเนียมด้วยเครื่องเคลือบไอระเหยในสุญญากาศเพื่อให้ฐานรองนำไฟฟ้า

2.หมุนเคลือบสารไวแสง AZ1512 ด้วยความเร็ว 3000 rpm เป็นเวลา 30 วินาที แล้วอบให้ความร้อนบนแผ่นความร้อนที่อุณหภูมิ 95 ^{o}C เป็นเวลา 5 นาที

3.สร้างลวดลายของไมโครฮีตเตอร์ด้วยฉายรังสีอัลตราไวโอเลตผ่านหน้ากากที่ความเข้มแสงเท่ากับ 18 mW/cm^2 เป็นเวลา 3 วินาที

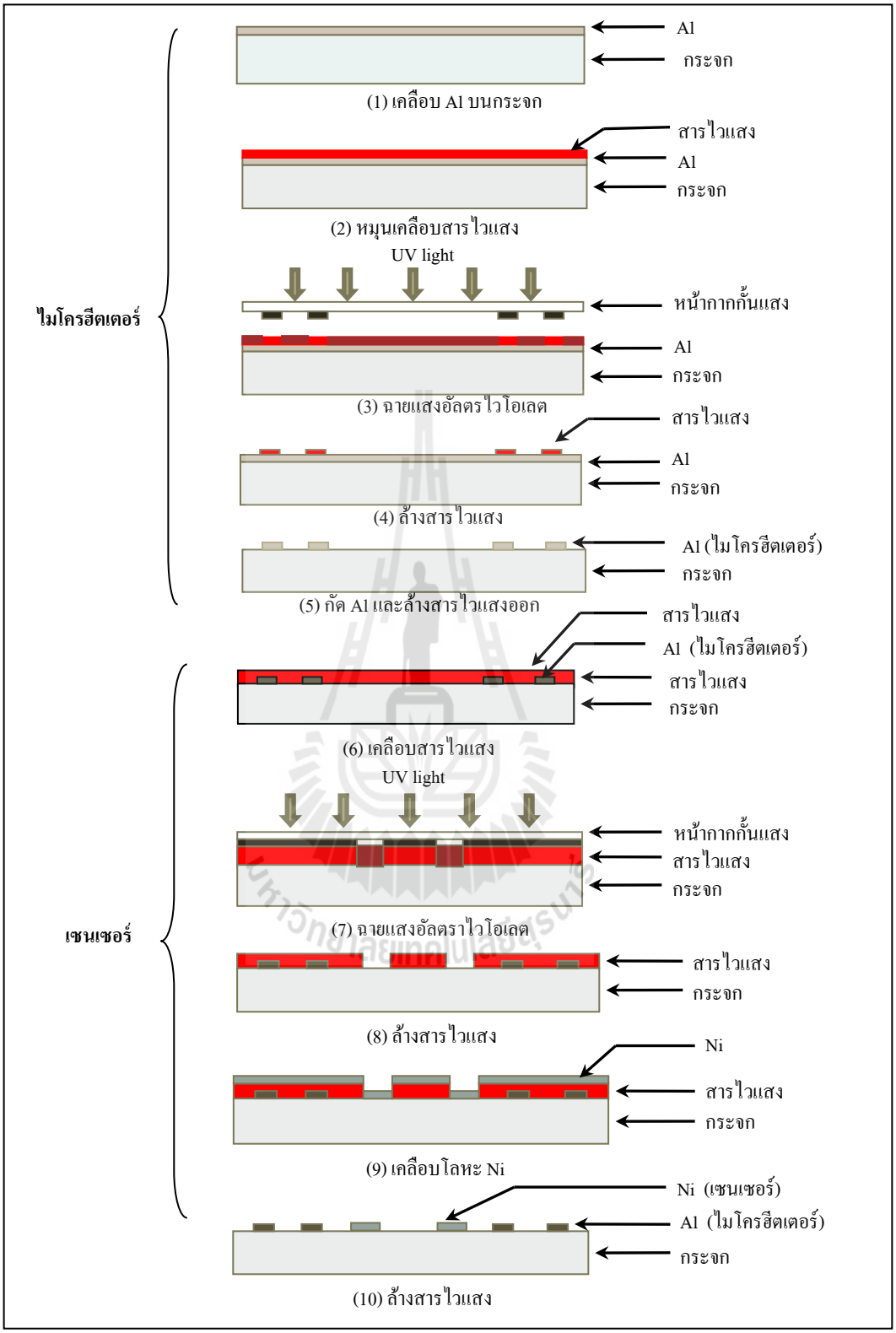
4.ล้างสารไวแสงออกด้วยน้ำยา AZ-developer จะปรากฏลวดลายไมโครฮีตเตอร์

5.กัดโลหะอะลูมิเนียมบริเวณที่ไม่ต้องการด้วยสารละลาย HF ความเข้มข้น 10 % โดยปริมาตร จากนั้นล้างสารไวแสงส่วนที่เหลือทิ้งด้วยอะซิโตน

6.หมุนเคลือบสารไวแสงชนิดบวก AZ1512 บนงานชิ้นอีกครั้ง ด้วยความเร็ว 3000 rpm เป็นเวลา 30 วินาที แล้วอบให้ความร้อนบนแผ่นความร้อนที่อุณหภูมิ 95 ^{o}C เป็นเวลา 5 นาที

7.สร้างช่องว่างซึ่งเป็นลวดลายเซนเซอร์ด้วยการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตอีกครั้ง

8.ล้างสารไวแสงจะปรากฏลวดลายเซนเซอร์ด้วย AZ-developer

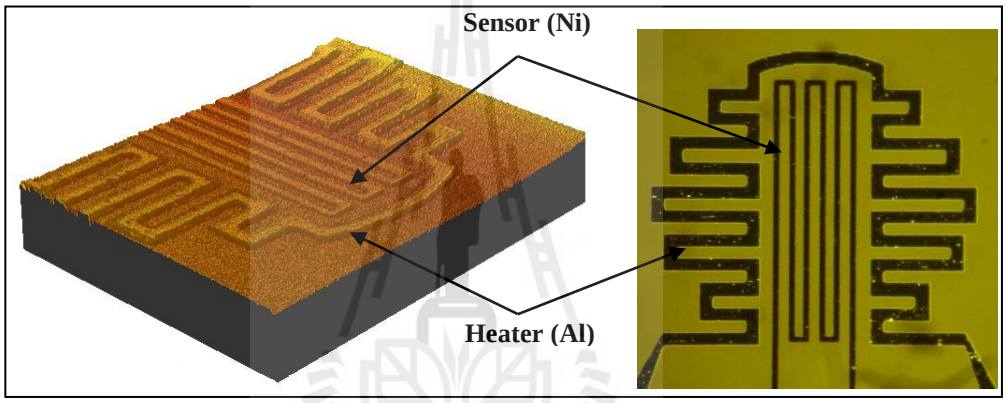


รูปที่ 5.1 การสร้างไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์ด้วยกระบวนลิโธกราฟฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต

9.เติมโลหะนิกเกิลในช่องว่างที่เป็นลวดลายของเซนเซอร์ด้วยเครื่องเคลือบไอระเหยในสุญญากาศ

10.สกัดสารไวแสงพร้อมกับโลหะที่ติดอยู่บนสารไสแสงออกจากชิ้นงานด้วยอะซิโตน ได้ลวดลายของไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ เรียกเทคนิคนี้ว่า “เทคนิคลิฟท์ออฟ”

หลังจากสิ้นสุดกระบวนการสร้างได้คุณลักษณะของไมโครฮีตเตอร์ที่สร้างจากอะลูมิเนียมและเซนเซอร์ที่สร้างจากนิกเกิลมีโครงสร้างวางอยู่บนกระจกสไลด์แสดงได้ดังรูปที่ 5.2 เป็นภาพถ่ายด้วยกล้องวัดความหนาและพื้นผิว (Veeco รุ่น WYKO NT1100) มีค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 5.1



รูปที่ 5.2 โครงสร้างอุปกรณ์ที่ได้จากกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต

ตารารที่ 5.1 พารามิเตอร์ของไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์ที่สร้างด้วยรังสีอัลตราไวเลต

Materials	ρ (Ω·m)	L (μm)	w (μm)	t (Å)	R (Ω)
Al (Heater)	2.6×10^{-8}	7100	50	430	114
Ni (Sensor)	6.9×10^{-8}	8700	30	125	1427

หลังจากสร้างเสร็จได้ทำการทดสอบการควบคุมได้ผลเป็นที่น่าพอใจซึ่งได้แสดงใน *ภาคผนวก ก.* จากการพิจารณากระบวนการสร้างไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์ด้วยกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตซึ่งเป็นการศึกษาแนวทางความเป็นไปได้ในการสร้าง จะต้องใช้กระบวนการและอุปกรณ์ที่หลากหลาย ได้แก่ การเคลือบโลหะ การเคลือบสารไวแสง การฉายแสง การอบสารไวแสง การกัดโลหะ เป็นต้น นอกจากนี้ยังได้ศึกษาแนวทางการควบคุมแบบป้อนกลับบนไมโครคอนโทรลเลอร์ จนสามารถนำมาใช้กับงานด้านระบบกลไฟฟ้าจุลภาคได้เป็นอย่างดี จาก

กระบวนการสร้างด้วยวิธีดังกล่าวหากสามารถลดขั้นตอนดังกล่าวให้เหลือเพียงกระบวนการสร้างลวดลวยด้วยวิธีเคลือบโลหะเพียงขั้นตอนเดียวเท่านั้น จะส่งผลทำให้ประหยัดค่าวัสดุและเครื่องมือเป็นอย่างมาก ด้วยปัญหานี้จึงเป็นที่มาของวิธีการสร้างลวดลายด้วยการเคลือบโลหะผ่านหน้ากากแข็งที่สร้างจากกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอกซ์ โดยได้ทำการทดลองการสร้างหน้ากากแข็งด้วยโลหะนิกเกิลแบบแยกส่วนซึ่งได้ผลที่ไม่ดีนัก เนื่องจากขนาดความกว้างของโครงสร้างที่ออกแบบไว้มีขนาดเล็กเกินไปทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหักง่ายและลวดลายที่ออกมาไม่คมชัด จึงได้ทำการออกแบบขนาดโครงสร้างและลวดลายใหม่โดยมีขนาดของความกว้างเพิ่มขึ้นเพื่อให้สามารถผลิตออกมาได้จริงต่อไปนี้

5.2 การพัฒนาไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิด้วยรังสีเอกซ์

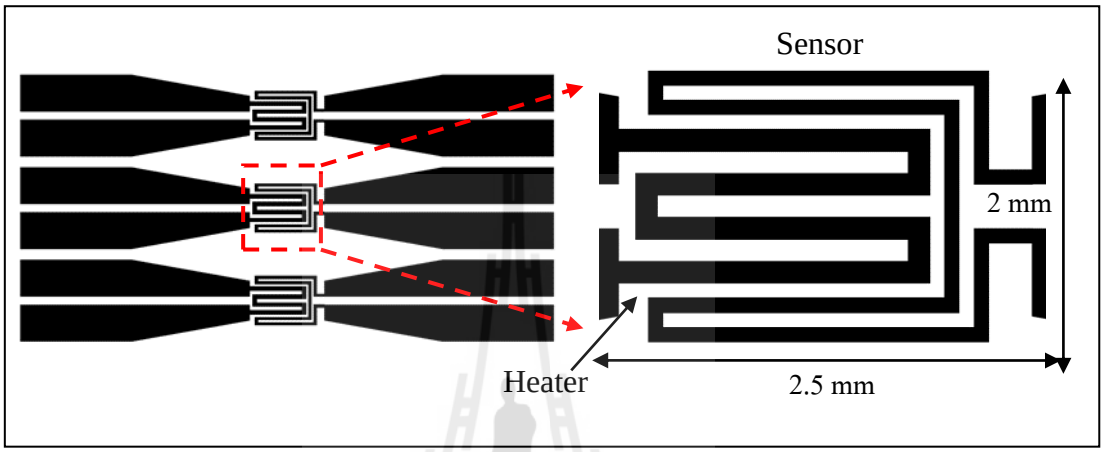
การพัฒนาต่อไปนี้คือการสร้างหน้ากากแข็ง (Hard mask) เพื่อเป็นแม่พิมพ์ต้นแบบที่มีลวดลายของไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์ด้วยวิธีการเคลือบไอโลหะ โดยใช้กระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอกซ์ เป็นการสร้างแม่พิมพ์เพียงครั้งเดียวเท่านั้น การนำไปสร้างลวดลายจะเป็นการเคลือบโลหะที่ต้องการผ่านแม่พิมพ์นี้เพียงขั้นตอนเดียว เป็นการลดกระบวนการลิโธกราฟฟีหรือกระบวนการที่ยุ่งเกี่ยวกับสารเคมี จุดนี้จะเป็นจุดเด่นที่ได้เปรียบกว่าวิธีที่ทั่วไป เนื่องจากจะทำให้ลดต้นทุนการสร้าง นอกจากนี้แล้วเทคนิคการสร้างดังกล่าวยังเป็นเทคนิคใหม่ทำให้สามารถสร้างลวดลายได้อย่างลวดเร็ว การสร้างลวดลายของไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์ มี 3 กระบวนการหลัก คือ 1) การสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ 2) กระบวนการสร้างหน้ากากแข็ง 3) กระบวนการสร้างลวดลายอุปกรณ์ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.2.1 การสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์

หน้ากากกั้นรังสีเอกซ์มีความสำคัญต่อกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอกซ์เป็นอย่างยิ่ง เพราะหน้ากากเป็นตัวกำหนดรูปร่างของโครงสร้างที่จะได้ออกมา กระบวนการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์นั้น ยังคงอาศัยกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต ในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม Layout Editor เป็นเครื่องมือในการออกแบบซึ่งอาศัยโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนดังรูปที่ 5.3 และมีขนาดโครงสร้างเป็นดังตารางที่ 5.2 ขนาดของการออกแบบจะสัมพันธ์กับขนาดของห้องบรรจุของเหลวซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อการสร้างห้องบรรจุของเหลวต่อไป

สำหรับขนาดห้องบรรจุของเหลวนั้นปริมาตรที่เหมาะกับการใช้งานคือ ประมาณ 5 μL ซึ่งได้ทำการออกแบบเผื่อไว้อีก 5 μL รวมเป็น 10 μL จากนั้นคำนึงถึงความสามารถของรังสีเอกซ์ที่สร้างลวดลายบนสารไวแสงได้ คือความหนาประมาณ 1.5 mm เมื่อทำการคำนวณลวดลายการสร้างเป็นทรงกระบอก จะได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของห้องบรรจุของเหลวเท่ากับ 3 mm

ขนาดดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดขอบเขตของตัวทำความร้อนที่จะสร้างขึ้นซึ่งเป็นรูปเลขาคณิตอย่างง่ายมีขนาดประมาณ 2 mm × 2.5 mm ทำการออกแบบลวดลายโดยคำนึงถึงขนาดความกว้างที่สร้างได้จริงที่จะไม่ทำให้เกิดความเสียหาย จึงได้ทำการออกแบบขนาดความกว้างของไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์เท่ากับ 150 µm และ 100 µm ตามลำดับ



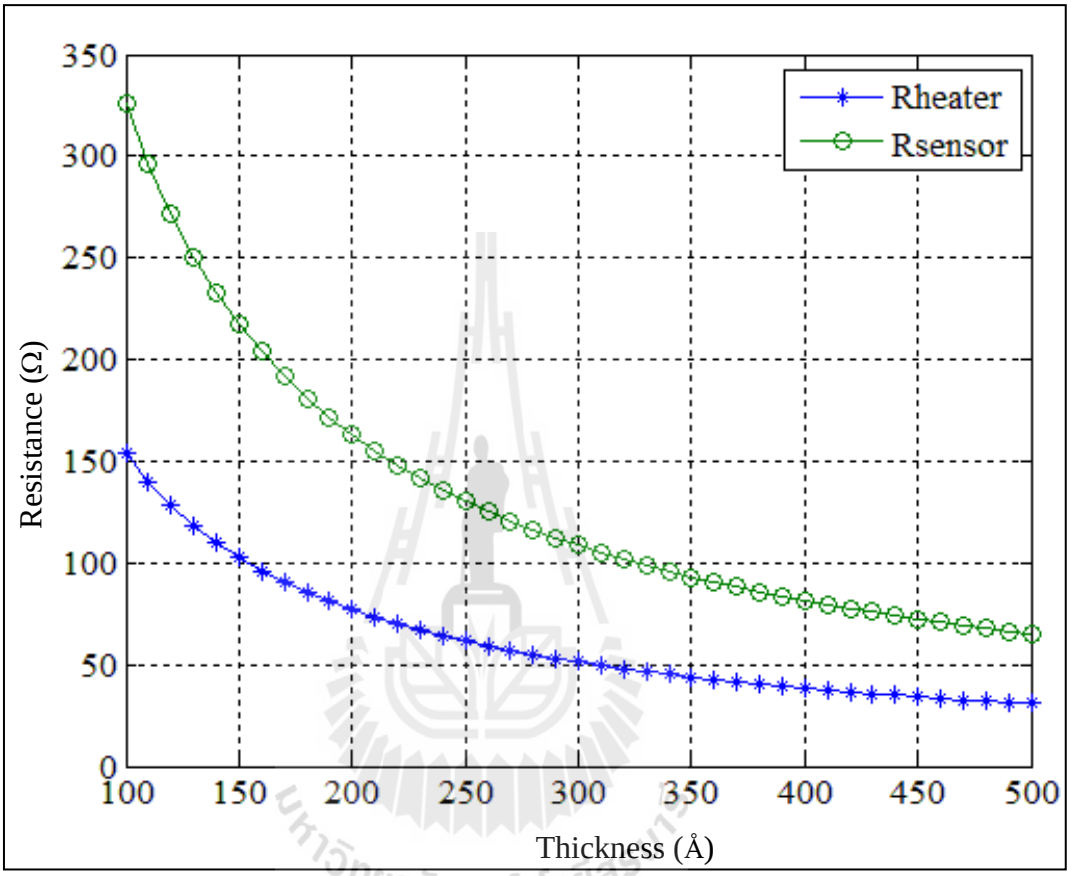
รูปที่ 5.3 ลวดลายโครงสร้างสำหรับสร้างไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ

ตารางที่ 5.2 ขนาดโครงสร้างของไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์สำหรับสร้างหน้ากากแข็ง

Materials	L (µm)	w (µm)
Heater	8700	150
Sensor	12300	100

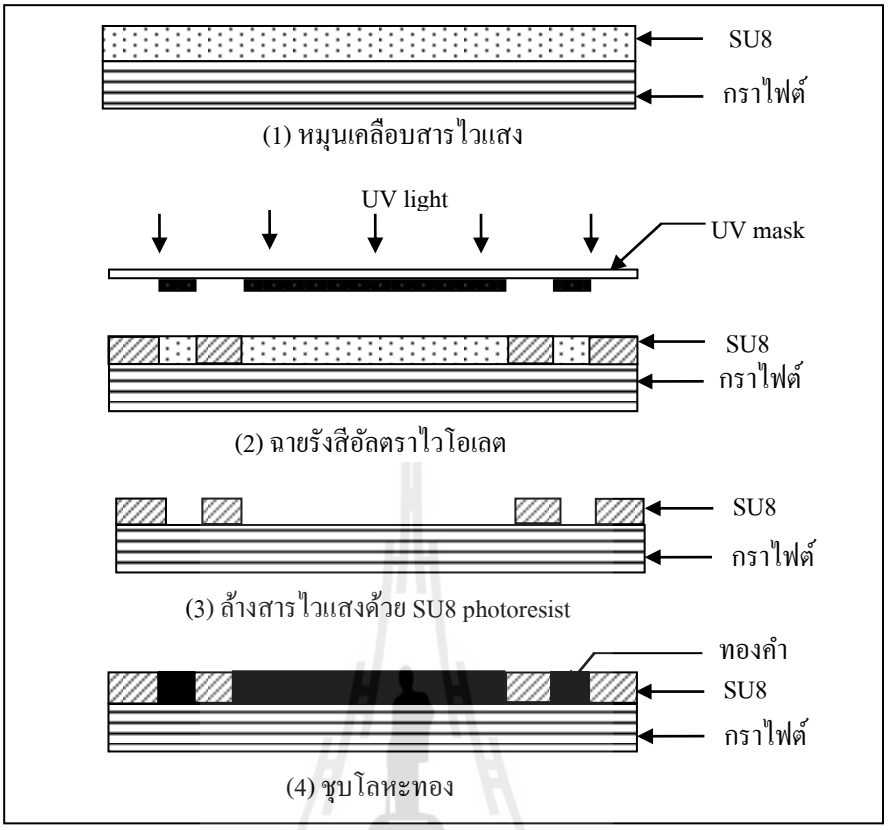
จากขนาดโครงสร้างในตารางที่ 5.2 สามารถนำมาคำนวณค่าความต้านทานของไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์ที่ความหนาต่าง ๆ ตั้งแต่ระดับ 100 Å ถึง 500 Å ด้วยโลหะอะลูมิเนียมที่มีค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานไฟฟ้า $\rho = 2.65\times10^{-8}$ Ω/m ด้วยสมการ $R=\rho L/A$ สามารถประมาณค่าความต้านทานหลังสร้างเสร็จดังรูปที่ 5.4 ซึ่งหากคำนวณอัตราส่วนของค่าความต้านทานระหว่างเซนเซอร์กับฮีตเตอร์ (R_s/R_h) มีค่าประมาณ 2.1 หมายความว่า ถ้าหากไมโครฮีตเตอร์มีค่าความต้านทานเท่ากับ 1 Ω ค่าความต้านทานของฮีตเตอร์จะมีค่าเท่ากับ 2.1 Ω ค่าอัตราส่วนดังกล่าวนี้จะช่วยให้ตรวจสอบค่าความต้านทานที่เกิดจากการสร้างได้เป็นอย่างดี ว่าลวดลายที่เกิดขึ้นมีข้อผิดพลาดมากน้อยเพียงใด ทั้งนี้ค่าความต้านทานก็ขึ้นอยู่กับความสม่ำเสมอของความหนาของ

โลหะที่เคลือบลงบนฐานรองและความขรุขระของผิวฐานรองเช่นกัน หากกระจกมีผิวที่เรียบและมีความหนาของโลหะเท่ากันทั่วทั้งลวดลาย ค่าความต้านทานก็จะใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด ซึ่งสุดท้ายแล้วการนำไปใช้งานจะต้องมีการปรับเทียบก่อนเสมอ



รูปที่ 5.4 การจำลองความต้านทานของไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์กับความหนาโลหะ

การสร้างหน้ากากแข็งจะเริ่มจากการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ก่อนเป็นลำดับแรก ซึ่งมีความสำคัญต่อกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอกซ์เป็นอย่างยิ่ง เพราะหน้ากากเป็นตัวกำหนดรูปร่างของโครงสร้างที่จะได้ออกมา กระบวนการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์นั้นอาศัยกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตเพื่อสร้างดังรูปที่ 5.5



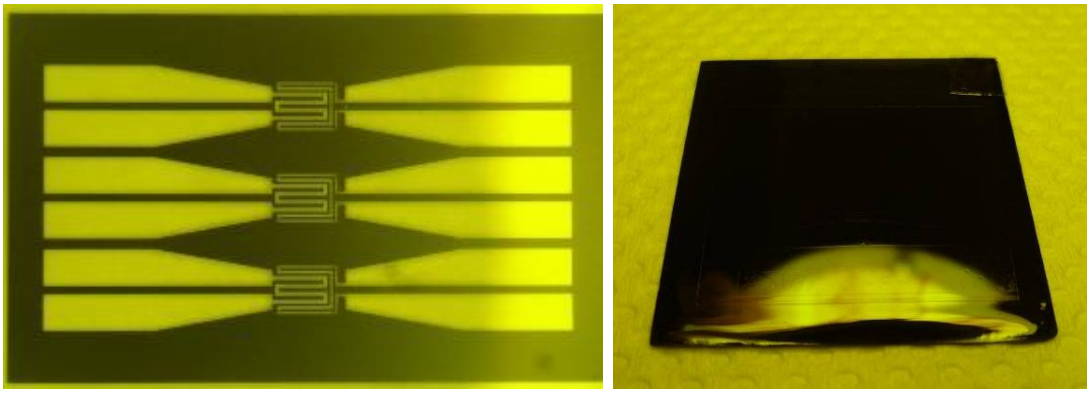
รูปที่ 5.5 กระบวนการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์

จากกระบวนการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์สามารถอธิบายขั้นตอนโดยละเอียดได้ดังนี้

1.ทำความสะอาดแผ่นกราไฟต์ขนาด 2.5 cm × 2.5 cm หนา 480 μm ด้วยอะซีโตน แล้วทำความสะอาดโดยเครื่องอัลตราโซนิกในน้ำสะอาดประมาณ 2 ครั้ง ใช้เวลาครั้งละ10 นาที จากนั้นเป่าให้แห้งแล้วอบที่อุณหภูมิ 150 ^{o}C เป็นเวลา 30 นาที ต่อมานำมาเคลือบสารไวแสงที่ความเร็วรอบโดยวิธีการหยด SU8-2100 บนแผ่น กราไฟต์และทำการหมุนเคลือบด้วยความเร็ว 500 rpm และ 3000 rpm ตามลำดับ ทำการอบบนแผ่นทำความร้อนที่อุณหภูมิ 95 ^{o}C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้องได้ความหนาของสารไวแสงเท่ากับ 25 μm

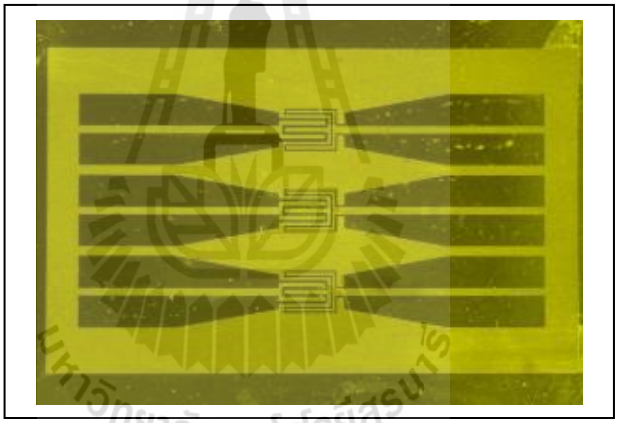
2.ฉายรังสีอัลตราไวโอเลตผ่านหน้ากากกันแสงที่ได้ออกแบบไว้ลงบนสารไวแสงที่ได้เตรียมเอาไว้ที่ความเข้มแสง 18.5 mW/cm^2 เป็นเวลา 10 วินาที ได้พลังงานสะสมตกกระทบบนเนื้อสารไวแสงเท่ากับ 1.85 J/cm^2 ดังรูปที่ 5.6 แล้วอบที่อุณหภูมิ 95 ^{o}C เป็นเวลา 15 นาที

3.ล้างสารไวแสงด้วยน้ำยาล้างสารไวแสง (SU8 developer) เป็นเวลา 3 นาที จากนั้นปล่อยให้แห้งดังรูปที่ 5.7



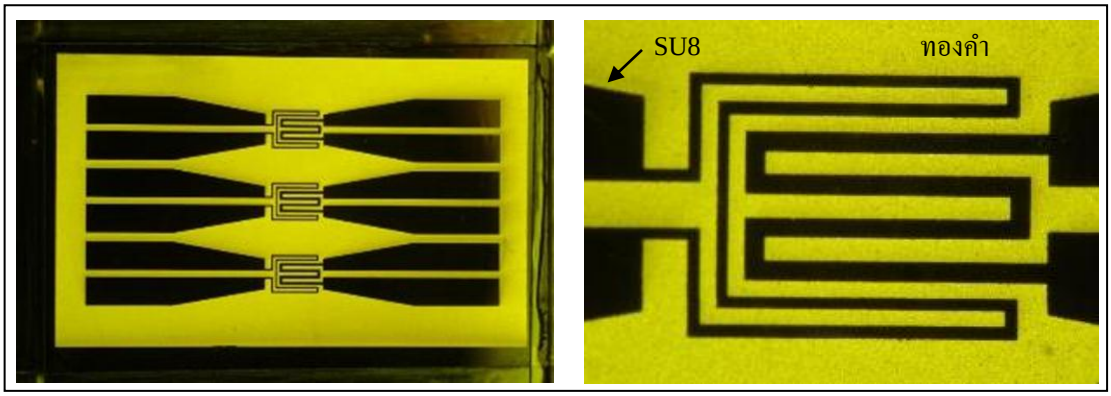
(ก) หน้ากากกั้นรังสีอัลตราไวโอเลต (ข) ชิ้นงานหลังฉายแสง

รูปที่ 5.6 หน้ากากกั้นรังสีเอกซ์หลังจากการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตและทำการอบ



รูปที่ 5.7 หน้ากากกั้นรังสีเอกซ์หลังจากล้างสารไวแสง

4.ทำความสะอาดผิวชิ้นงานด้วยการพลาสมาของก๊าซออกซิเจนที่กำลัง RF 100 W เป็นเวลา 3 นาที แล้วชุบโลหะทองคำสำหรับเป็นวัสดุดูดซับรังสีเอกซ์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ด้วยความเข้มกระแส 1 mA/cm^2 ได้ความหนาเท่ากับ 22 μm ดังรูปที่ 5.8

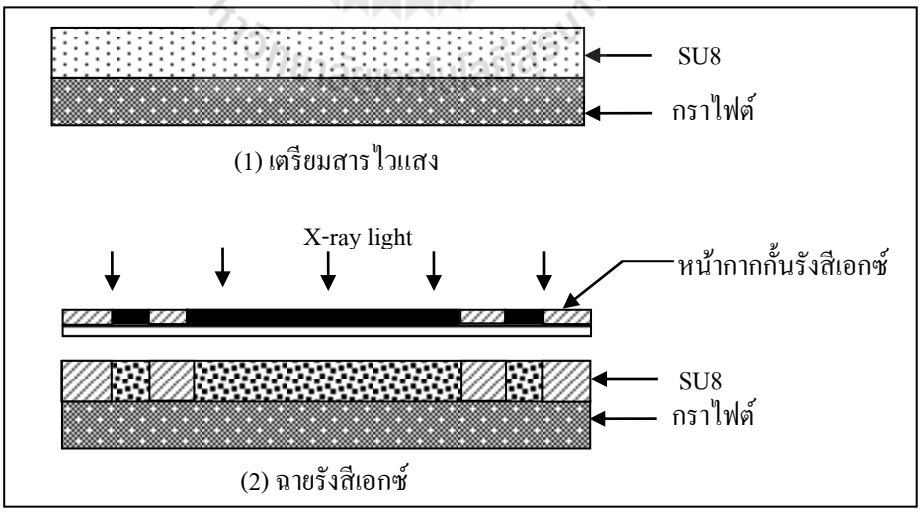


รูปที่ 5.8 หน้ากากกั้นรังสีเอกซ์หลังชุบโลหะทองคำ

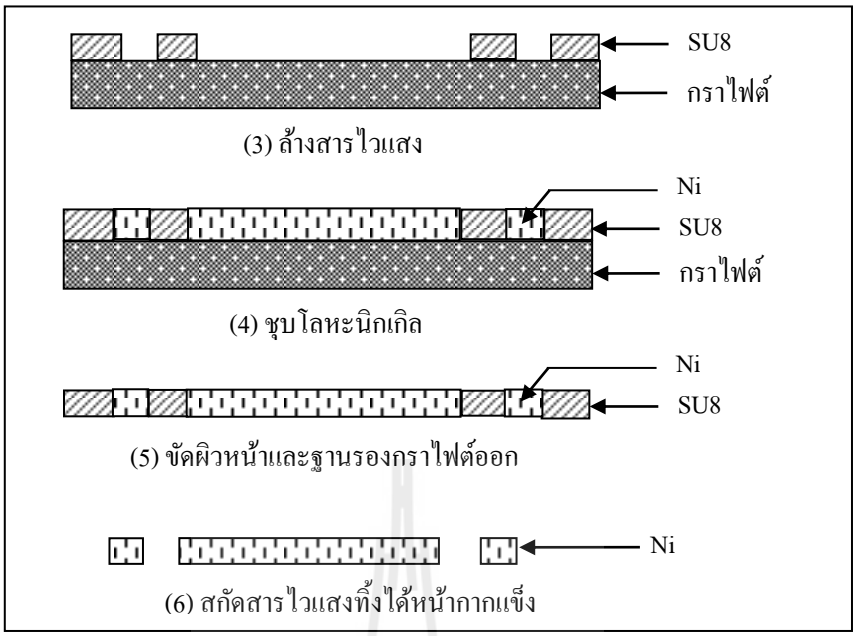
หลังจากได้หน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ แล้วขั้นตอนต่อไปคือการสร้างหน้ากากแข็งด้วยกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอกซ์

5.2.2 กระบวนการสร้างหน้ากากแข็งของไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์ด้วยรังสีเอกซ์ด้วยฐานรองกราไฟต์

ขั้นตอนกระบวนการสร้างหน้ากากแข็งสำหรับไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์เป็นขั้นตอนแรกเพื่อสร้างแม่พิมพ์ต้นแบบมีกระบวนการดังรูปที่ 5.9 และขั้นตอนดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.9 กระบวนการสร้างหน้ากากแข็งด้วยกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอกซ์



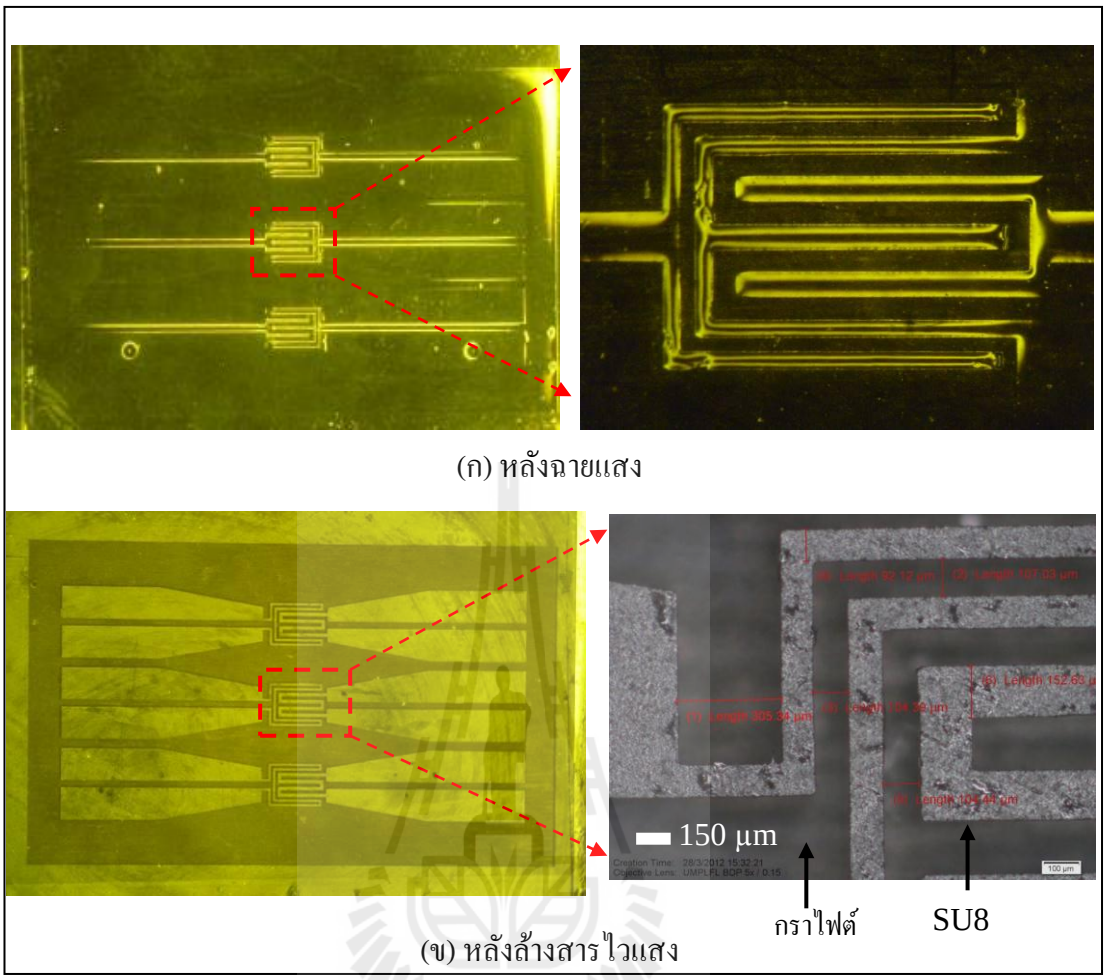
รูปที่ 5.9 กระบวนการสร้างหน้ากากแข็งด้วยกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอกซ์ (ต่อ)

1.ทำความสะอาดแผ่นกราไฟต์ขนาด 2.5 cm × 2.5 cm หนา 500 μm ด้วยอะซีโตน แล้วทำความสะอาดโดยเครื่องอัลตราโซนิกในน้ำสะอาดประมาณ 2 ครั้ง ใช้เวลาครั้งละ10 นาที จากนั้นเป่าให้แห้งอบที่อุณหภูมิ 150 ^{o}C เป็นเวลา 30 นาที ต่อมานำมาเคลือบสารไวแสงโดยวิธีการหยอด SU8 2100 บนแผ่น กราไฟต์และทำการอบบนแผ่นทำความร้อนที่อุณหภูมิ 95 ^{o}C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง สุดท้ายทำการขัดให้ได้ความหนาประมาณ 350 μm ด้วยกระดาษทราย

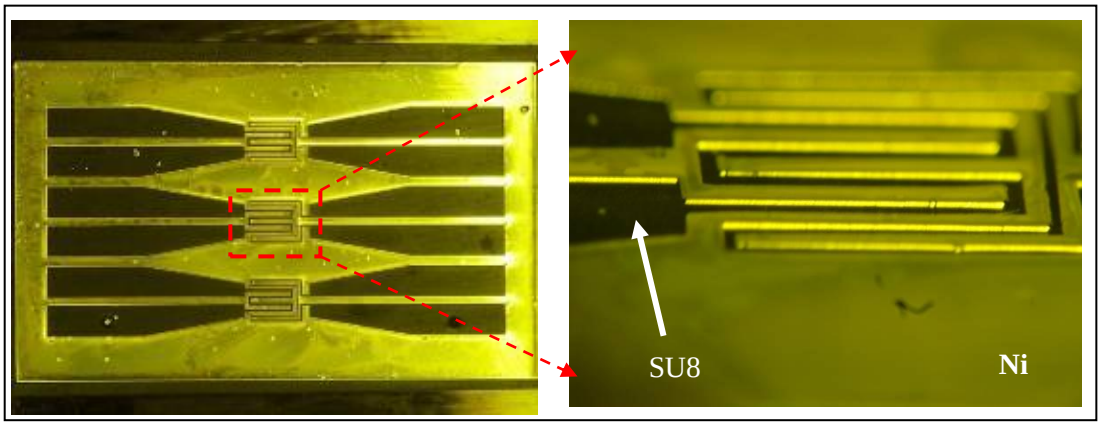
2.ฉายรังสีเอกซ์ผ่านหน้ากากดูซับรังสีลงบนสารไวแสงที่ได้เตรียมเอาไว้ที่พลังงาน (Acc. BottomBright) เท่ากับ 12.1 J/cm^{3} ที่กระแสอิเล็กตรอน 95 mA

3.นำชิ้นงานอบบนแผ่นความร้อนที่อุณหภูมิ 60 ^{o}C เป็นเวลา 45 นาที ปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง และล้างสารไวแสงโดยใช้น้ำยา SU8 ดีเวลอปเปอร์ ประมาณ 15 นาที ได้ผลดังรูปที่ 5.10

4.ทำความสะอาดพื้นผิวของโลหะด้วยการพลาสมาของ O_2 ด้วยกำลัง RF 200 W ใช้เวลา 3 นาที จากนั้นนำชิ้นงานชุบโลหะนิกเกิลด้วยไฟฟ้าจนล้นแม่พิมพ์ โดยใช้ความหนาแน่นของกระแส 6 mA/cm^{2} ใช้เวลา 42 ชั่วโมง ได้ผลดังรูปที่ 5.11

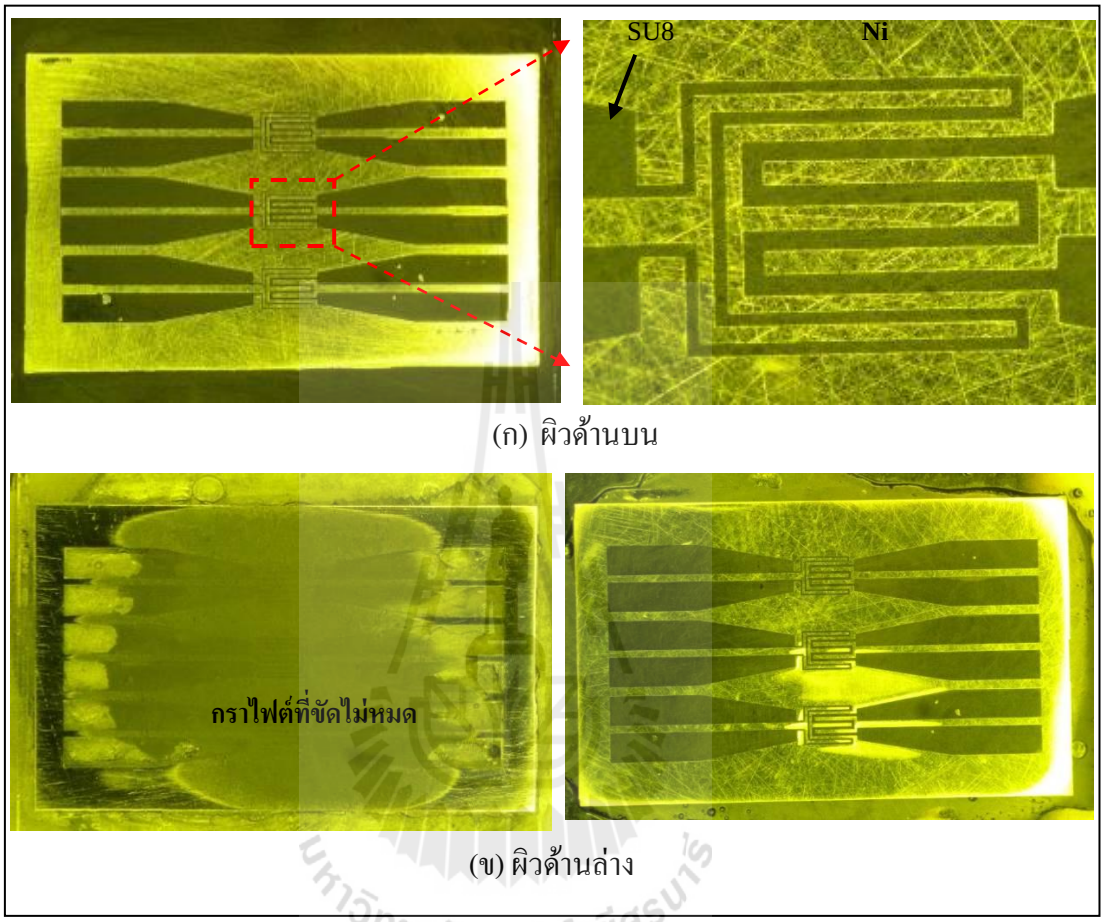


รูปที่ 5.10 ลวดลายหลังจากกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอกซ์บนฐานรองกราไฟต์



รูปที่ 5.11 การสร้างหน้ากากแข็งหลังชุบโลหะนิกเกิลบนฐานรองกราไฟต์

5.ขัดกราไฟต์ออกด้วยกระดาษทรายเบอร์ จนได้โครงสร้างแผ่นโลหะนิกเกิลที่มีความเรียบดังรูปที่ 5.12

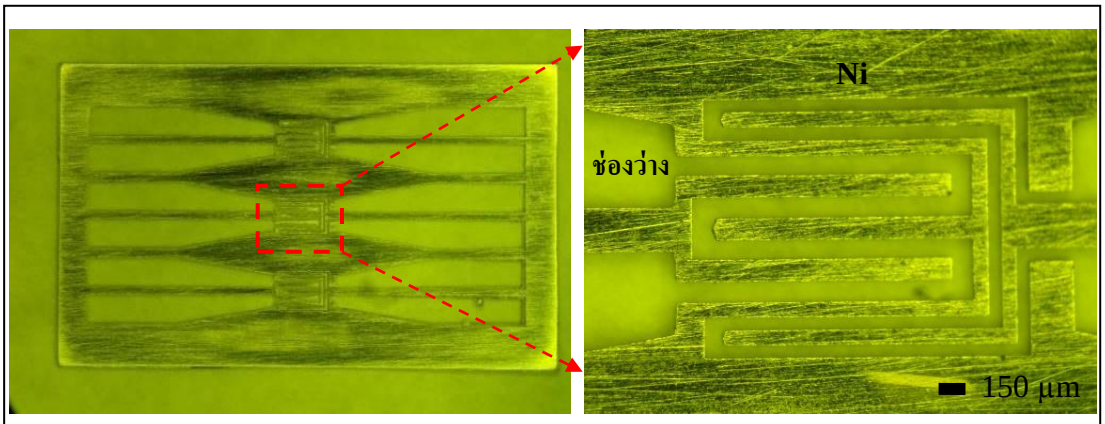


(ก) ผิวด้านบน

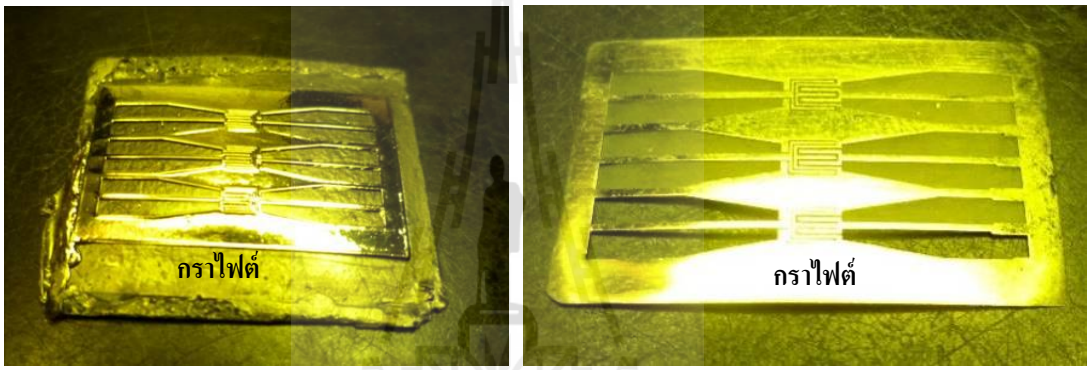
(ข) ผิวด้านล่าง

รูปที่ 5.12 หลังขัดโลหะสำหรับหน้ากากแข็งจากฐานรองกราไฟต์

6.สกัดสารไวแสงด้วยการพลาสมาจะได้หน้ากากแข็งของไมโครฮีตเตอร์ด้วยพลาสมาของ O_2 กับ CF_4 ที่กำลัง RF 200 W ออกจนหมดโดยใช้เวลาประมาณ 70 ชั่วโมง ได้ผลดังรูปที่ 5.13 จะได้หน้ากากแข็งที่พร้อมใช้งานสำหรับสร้างลวดลายด้วยวิธีการเคลือบโลหะต่อไป



(ก) หน้ากากแข็งที่สมบูรณ์

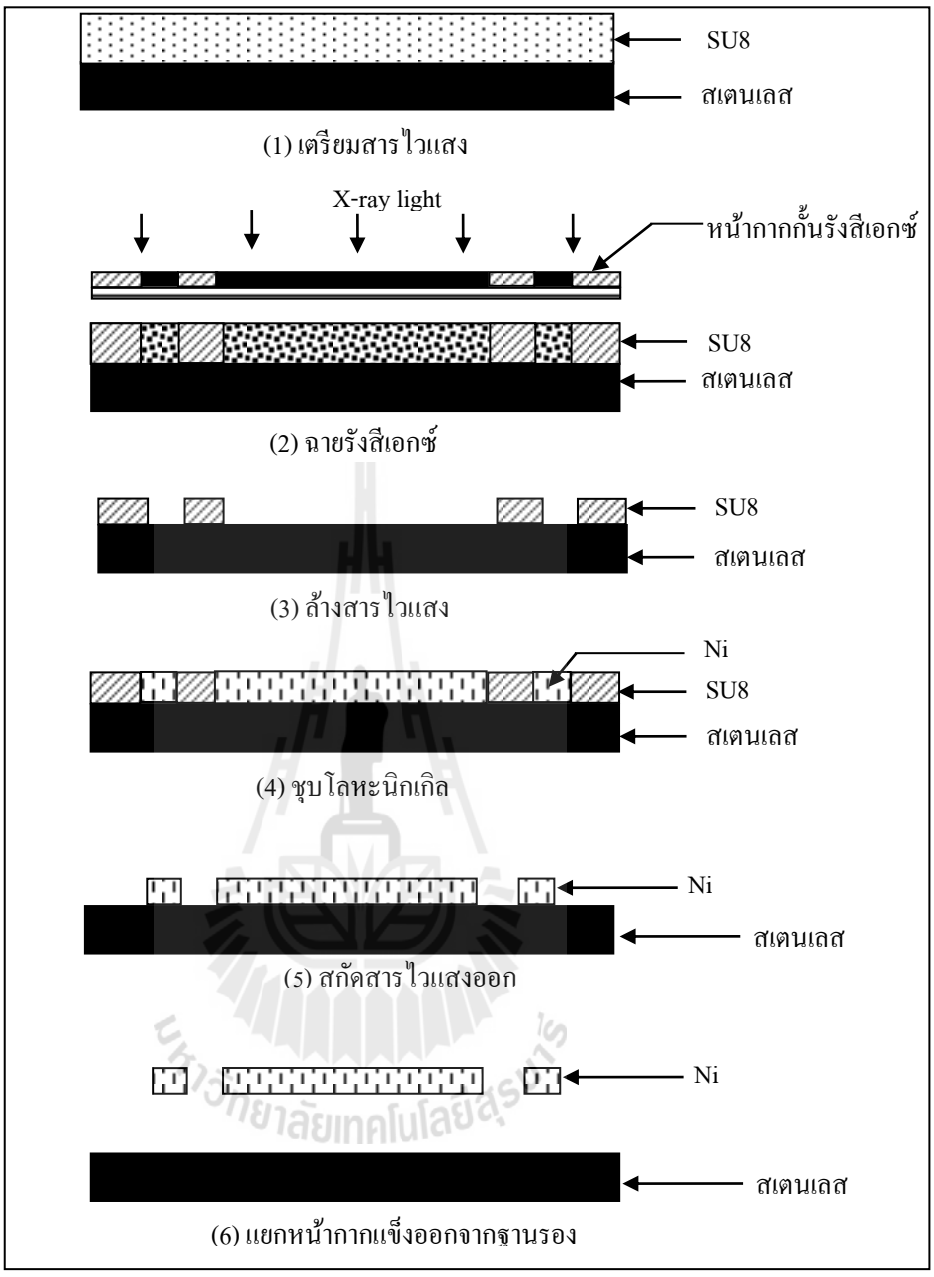


(ข) หน้ากากแข็งที่เสียเกิดจากการงอตัว

รูปที่ 5.13 หลังสกัดสารไวแสงออกจากหน้ากากแข็งของไมโครฮีตเตอร์

5.2.3 กระบวนการสร้างหน้ากากแข็งของไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์ด้วยรังสีเอกซ์ด้วยฐานรองสเตนเลส

ขั้นตอนกระบวนการสร้างหน้ากากแข็งสำหรับไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์เป็นขั้นตอนแรกเพื่อสร้างแม่พิมพ์ต้นแบบมีกระบวนการดังรูปที่ 5.14 และขั้นตอนดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.14 กระบวนการสร้างหน้ากากแข็งของไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์ด้วยรังสีเอกซ์ด้วยฐานรองสเตนเลส

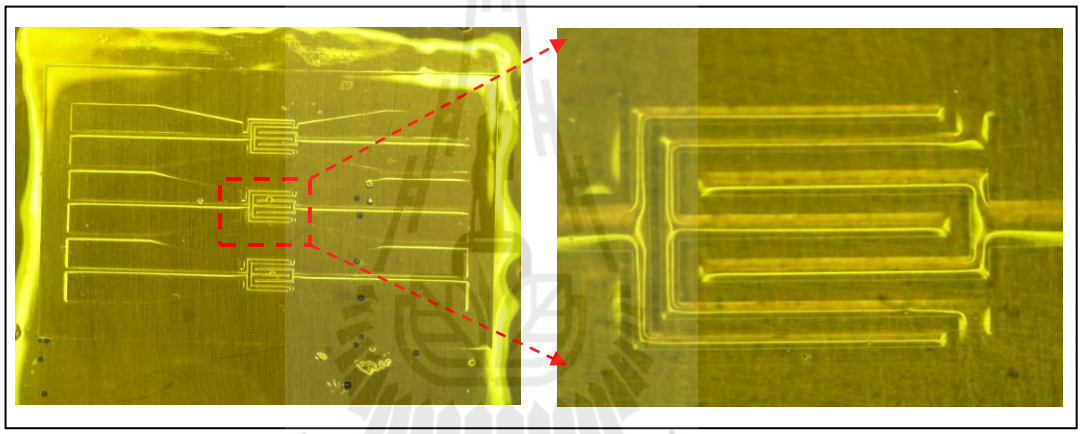
จากกระกระบวนการสร้างหน้ากากแข็งของไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์ด้วยรังสีเอกซ์ด้วยฐานรองสเตนเลสสามารถอธิบายขั้นตอนได้ดังนี้

1.ทำความสะอาดแผ่นสเตนเลสด้วยอะซีโตน โดยล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ แล้วทำความสะอาดโดยคลื่นอัลตราโซนิกในน้ำสะอาดประมาณ 2 ครั้ง ใช้เวลาครั้งละ10 นาที จากนั้นเป่าให้

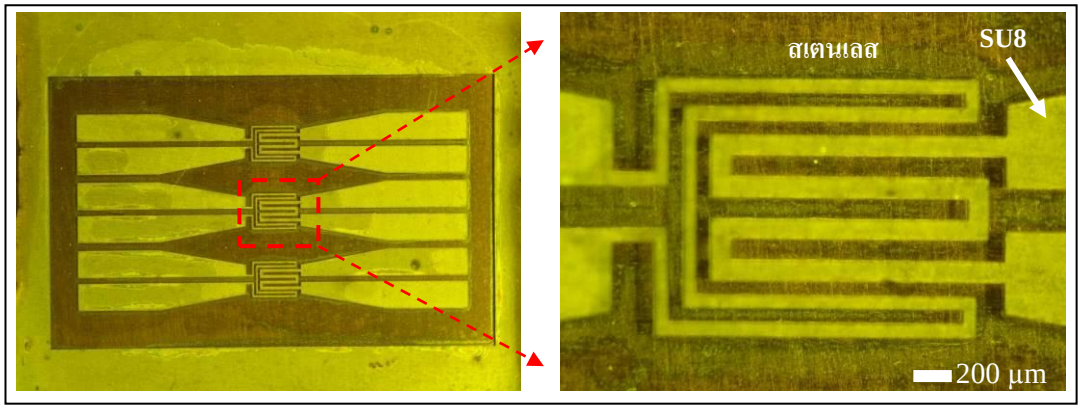
แห้งอบที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลา 30 นาที ต่อมานำมาเคลือบสารไวแสงโดยวิธีการหยอดสารไวแสง SU8-2100 บนแผ่น กราไฟต์และทำการอบบนแผ่นทำความร้อนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง สุดท้ายทำการขัดให้ได้ความหนาประมาณ 350 µm ด้วยกระดาษทราย

2.ฉายรังสีเอกซ์ผ่านหน้ากากดูซับรังสี ลงบนสารไวแสงที่ได้เตรียมเอาไว้ที่พลังงาน 10.1 J/cm^3 ที่กระแสอิเล็กตรอนเท่ากับ 72 mA

3.นำชิ้นงานอบบนแผ่นความร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 45 นาที ปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง และล้างสารไวแสงโดยใช้น้ำยา SU8-developer ประมาณ 15 นาที ได้ผลดังรูปที่ 5.15 และ 5.16

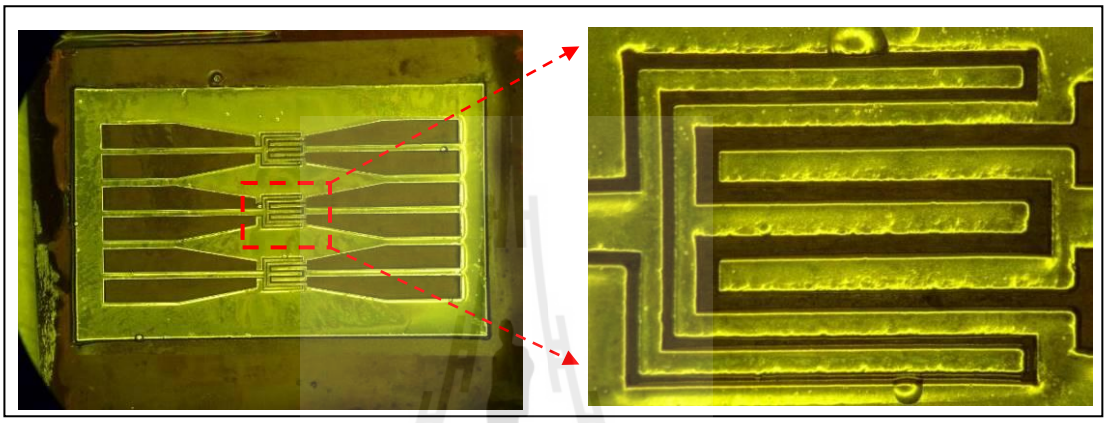


รูปที่ 5.15 การสร้างหน้ากากแข็งหลังฉายรังสีเอกซ์บนฐานรองสเตนเลส



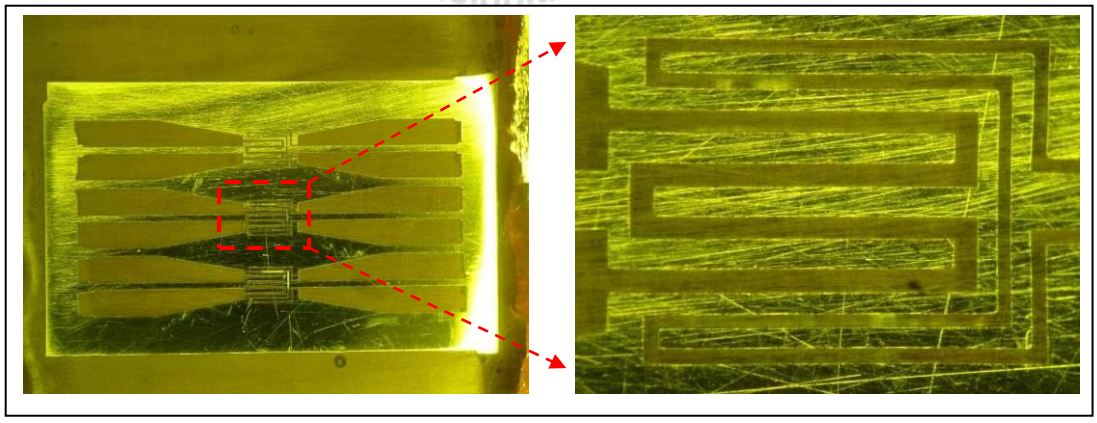
รูปที่ 5.16 การสร้างหน้ากากแข็งหลังล้างสารไวแสงบนฐานรองสเตนเลส

4.ทำความสะอาดพื้นผิวของโลหะด้วยการพลาสมาของ O_2 ด้วยกำลัง 200 W ใช้เวลา 3 นาที เนื่องจากการชุบโลหะนิกเกิลบนฐานรองประเภทสเตนเลสนั้นไม่สามารถทำได้โดยตรงจึงต้องทำการสกัดผิวหน้าบางส่วนออกไปเรียกว่าการทำ Wood's strike เพื่อสกัดเนื้อฐานรองออกแล้วชุบโลหะนิกเกิลด้วยไฟฟ้าจนล้นแม่พิมพ์ โดยใช้ความหนาแน่นของกระแส 6 mA/cm^2 ใช้เวลา 40 ชั่วโมง ได้ผลดังรูปที่ 5.17



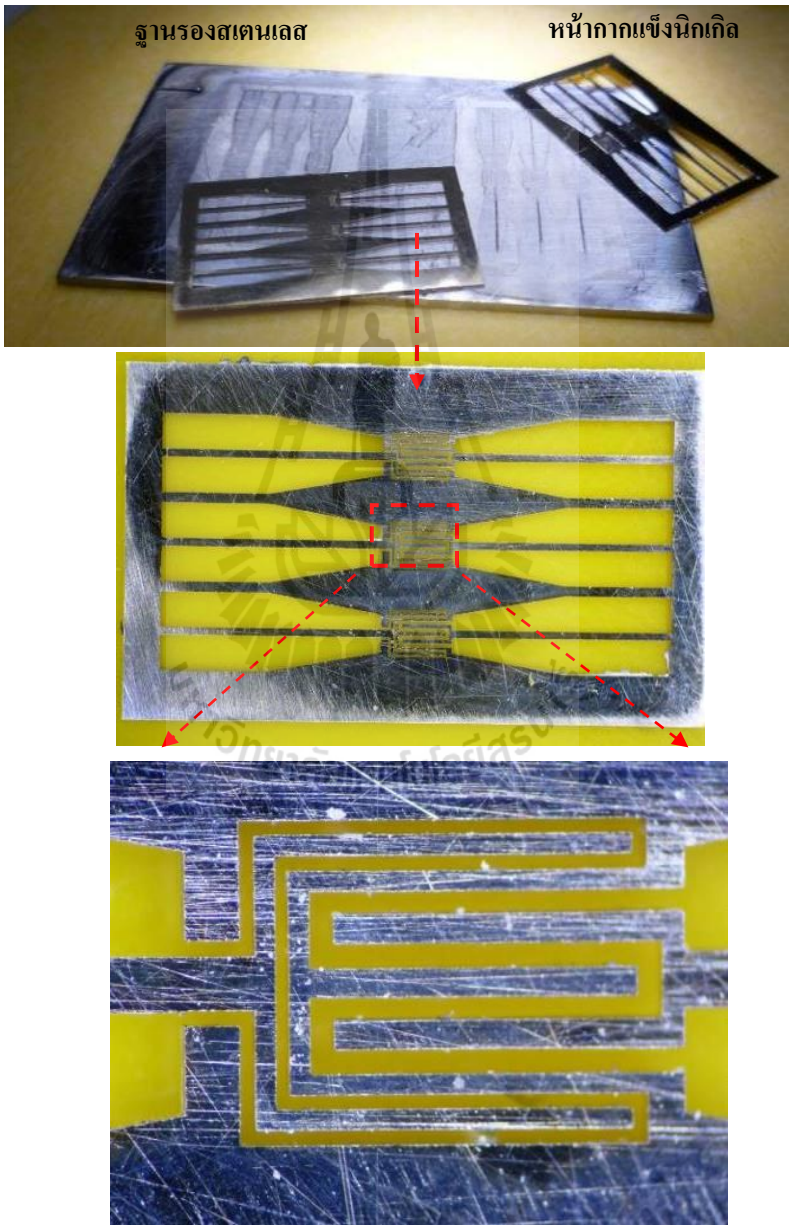
รูปที่ 5.17 การสร้างหน้ากากแข็งหลังชุบโลหะนิกเกิลบนฐานรองสเตนเลส

5.ขัดผิวหน้าชิ้นงานออกด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400 และได้แผ่นโลหะนิกเกิลที่มีความเรียบขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 3000 และ 5000 ตามลำดับ ได้ผลดังรูปที่ 5.18



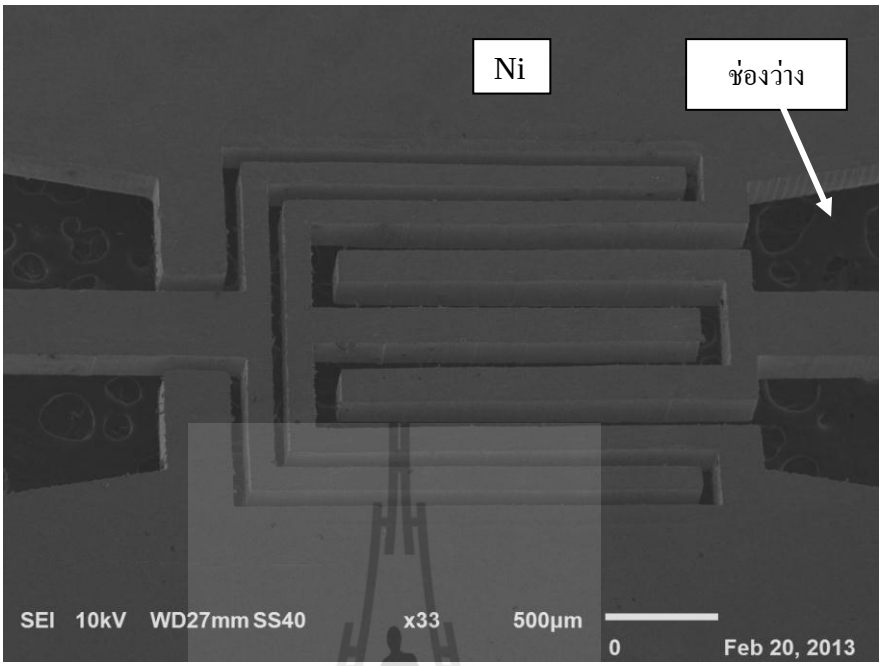
รูปที่ 5.18 หลังขัดโลหะสำหรับหน้ากากแข็งจากฐานรองสเตนเลส

6.สกัดสารไวแสงด้วยการพลาสมาของ O_2 กับ CF_4 ออกจนหมดโดยใช้เวลาประมาณ 70 ชั่วโมง พร้อมกับทำการแยกชิ้นส่วนของหน้ากากแข็งกับฐานรองสเตนเลสด้วยการชโลมน้ำมันหล่อลื่น แล้วใช้วัสดุปลายแหลมแยกออกจากกันได้ผลดังรูปที่ 5.19 (ก) เป็นหน้ากากแข็งที่พร้อมใช้งาน ส่วนรูปที่ 5.19 (ข) และ (ค) เป็นภาพถ่ายด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

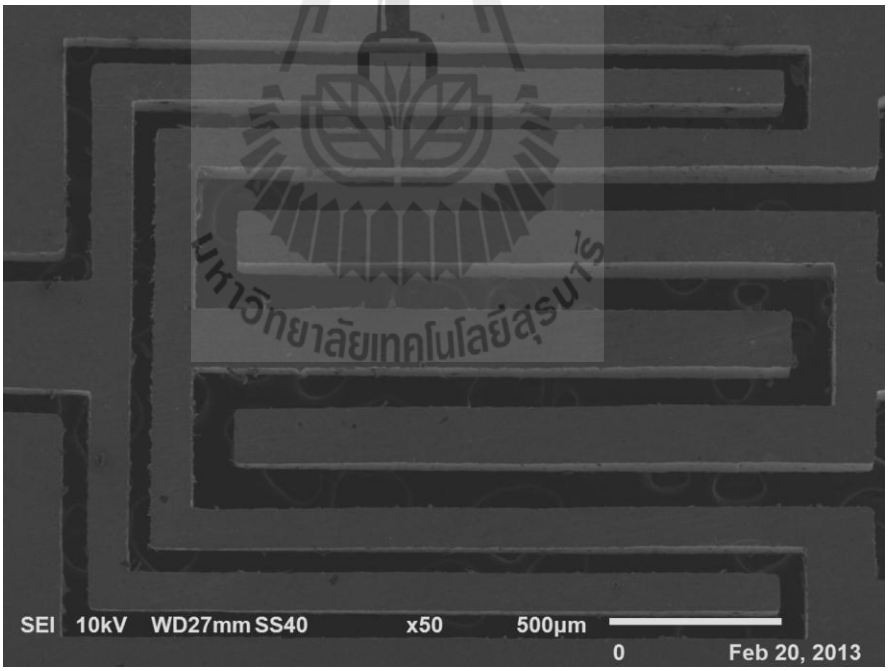


(ก) หน้ากากแข็งที่สมบูรณ์จากฐานรองสเตนเลส

รูปที่ 5.19 หน้ากากแข็งจากฐานรองสเตนเลส



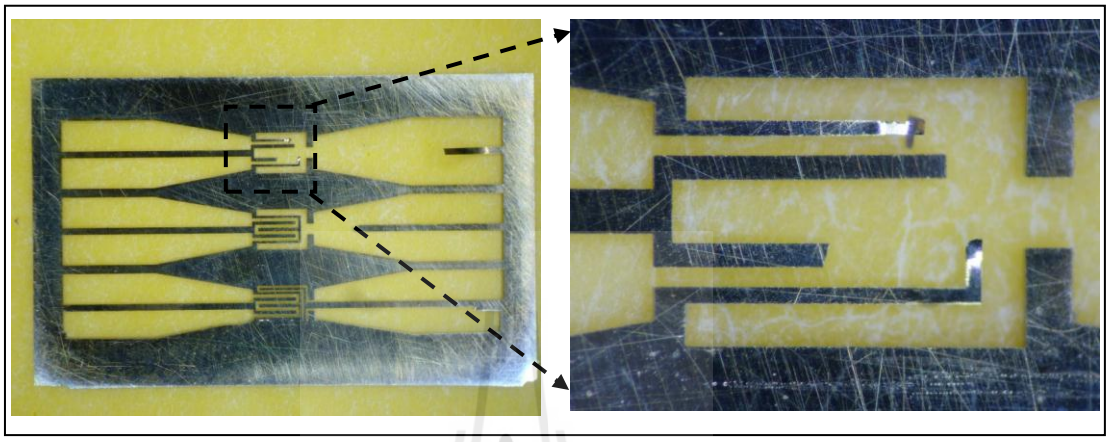
(ข) ภาพหน้ากากแข็งจากการถ่ายด้วยกล้อง SEM



(ค) ภาพหน้ากากแข็งจากการถ่ายด้วยกล้อง SEM

รูปที่ 5.19 หน้ากากแข็งจากฐานรองสเตนเลส (ต่อ)

ความเสียหายเนื่องจากทำกระบวนการ Wood's strike นานเกินไป (ประมาณ 10 นาที) ทำให้เนื้อของนิกเกิลที่เป็นหน้ากากแข็งฝังแน่นกับฐานรองเกินไป ทำให้ลำบากในการแยกชิ้นงานออกจากกันจึงเกิดการหักดังรูปที่ 5.20

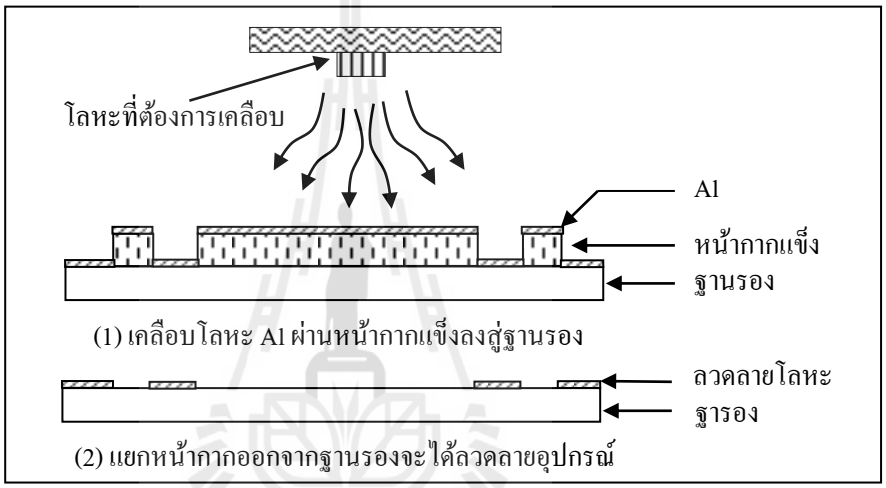


รูปที่ 5.20 ชิ้นงานที่เสียหายจากการแยกชิ้นงานจากฐานรองสเตนเลส

หลังสิ้นสุดกระบวนการสร้างหน้ากากแข็งลวดลายไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์ด้วยฐานรองที่แตกต่างกันพบว่า ข้อเสียของการใช้ฐานรองแบบกราไฟต์คือ เมื่อทำการชุบโลหะนิกเกิลเป็นเวลานานความหนาของโลหะจะเพิ่มขึ้นทำให้ชิ้นงานที่ผ่านการชุบเกิดการงอตัวบิดเบี้ยวผิดรูป เมื่อทำการสกัดสารไวแสงด้วยเครื่องพลาสมาซึ่งจะเกิดความร้อนขึ้นกับชิ้นงานยิ่งทำให้เกิดการบิดงอมากขึ้นอีกและยังมีข้อเสียที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือจะต้องเสียฐานรองกราไฟต์เพราะต้องทำการขัดทิ้ง จึงได้ทำการแก้ไขปัญหาด้วยการใช้ฐานรองที่เป็นสเตนเลส มีข้อดีคือหลังทำการชุบนิกเกิลแล้ว ชิ้นงานจะไม่มีการงอตัวเพราะมีความแข็งแรง อีกทั้งผิวหน้าชิ้นงานจะเรียบเหมือนกับผิวของฐานรองอีกด้วย แต่ต้องเพิ่มขั้นตอนการชุบโลหะที่เรียกว่ากระบวนการทำ wood's strike ในกระบวนการ เพื่อให้นิกเกิลยึดเกาะกับฐานรองสเตนเลสได้ซึ่งเพิ่มเวลาในกระบวนการเพียง 10 นาทีเท่านั้น ส่วนข้อเสียคือหากทำขั้นตอนนี้นานเกินไปฐานรองสเตนเลสจะถูกสกัดผิวหน้าออกเมื่อชุบโลหะนิกเกิลจนเสร็จสิ้นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวของนิกเกิลกับฐานรองมีมากเกินไปจะทำให้หน้ากากเสียหายได้ง่าย เมื่อได้หน้ากากที่สมบูรณ์แล้ว ขั้นตอนต่อไปคือสร้างลวดลายไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิลงบนฐานรองผ่านหน้ากากแข็งที่สร้างขึ้น

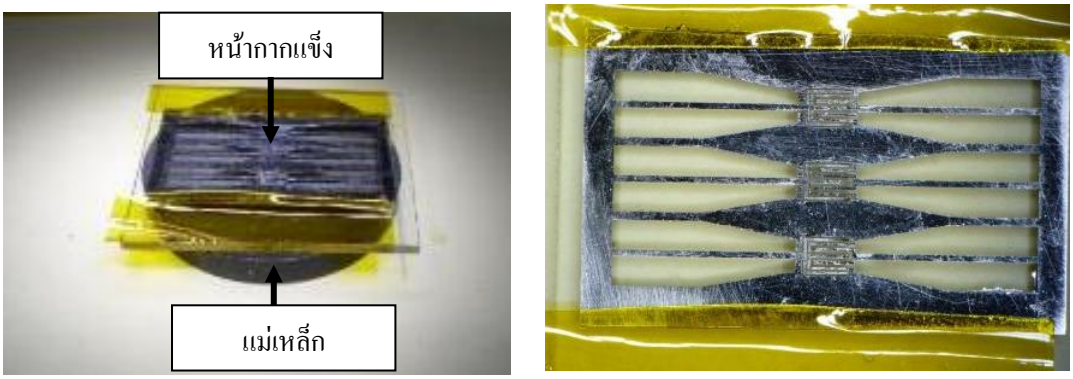
5.2.4 กระบวนการสร้างลวดลายของไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์

กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่สำคัญเป็นเทคนิคใหม่ สำหรับการสร้างไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิซึ่งอาศัยเพียงกระบวนการเคลือบโลหะเท่านั้น โดยไม่ต้องมีกระบวนการ ฉายแสง ล้างสารไสแสงหรือสกัดสารไวแสงอีกต่อไป มีกระบวนการดังรูปที่ 5.21 มีขั้นตอนคือ ประกบหน้ากากแข็งของลวดลายไมโครฮีตเตอร์บนกระจกยึดติดด้วยพอลิอิไมด์เทป (PI-tape) แล้วเคลือบอะลูมิเนียมด้วยเครื่องเคลือบโลหะ แล้วนำหน้ากากแข็งออกได้ลวดลายของไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์หลังจากจากเคลือบโลหะ



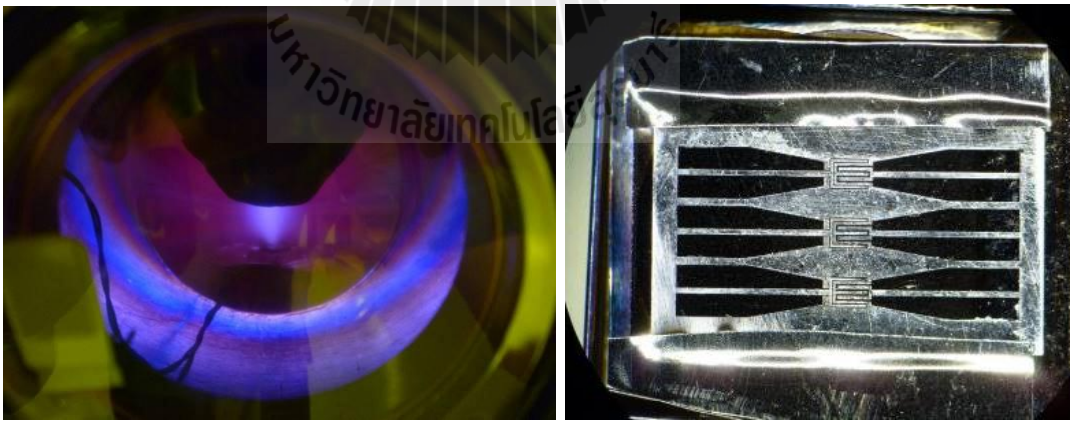
รูปที่ 5.21 การสร้างลวดลายโลหะผ่านหน้ากากแข็ง

1) สร้างลวดลายด้วยการสปัตเตอริ่ง เริ่มต้นด้วยการประกบหน้ากากแข็งกับฐานรองกระจกหนา 1 mm ขนาด 2.54 cm × 2.54 cm เพื่อให้เกิดความแนบชิดระหว่างฐานรองกับหน้ากากแข็งมากขึ้น จึงได้เพิ่มแม่เหล็กไว้ข้างล่างฐานรองกระจก จากนั้นนำไปเคลือบด้วยเครื่องสปัตเตอริ่ง ดังรูป 5.22



(ก) การประกบยึดชิ้นงานกับกระจก

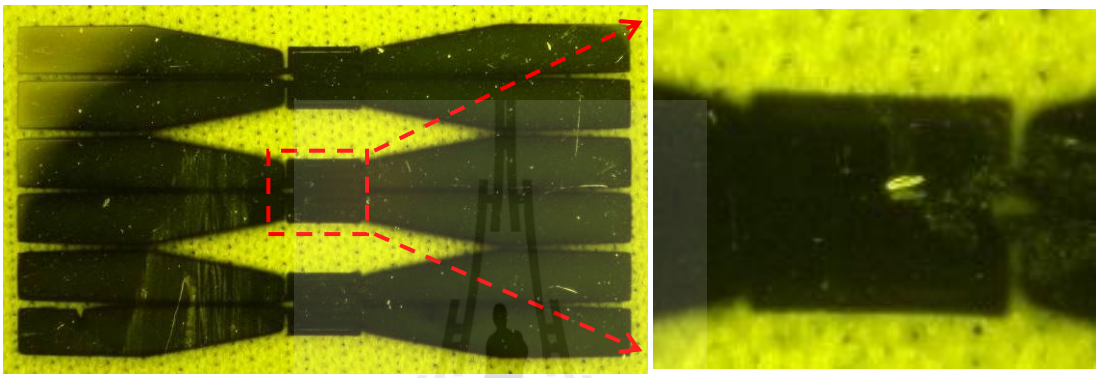
(ข) การติดตั้งชิ้นงานและนำเข้าเครื่องสปัตเตอริ่ง



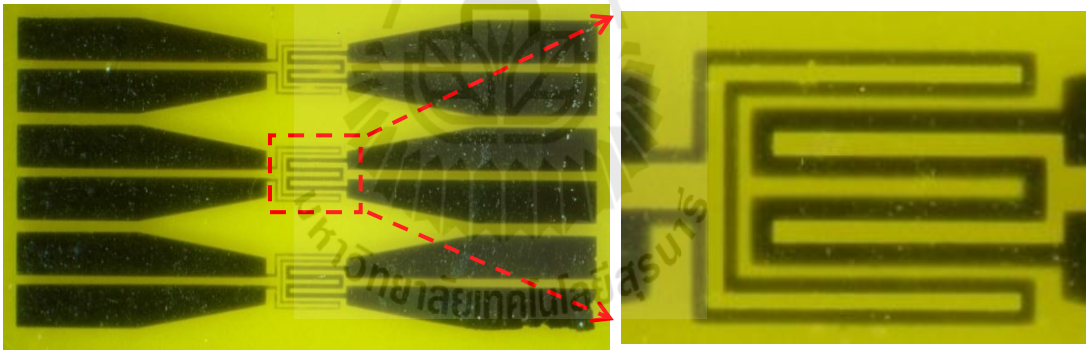
(ค) ทำการเคลือบโลหะผ่านหน้ากากแข็ง

รูปที่ 5.22 การเคลือบโลหะผ่านหน้ากากแข็งด้วยการสปัตเตอริ่ง

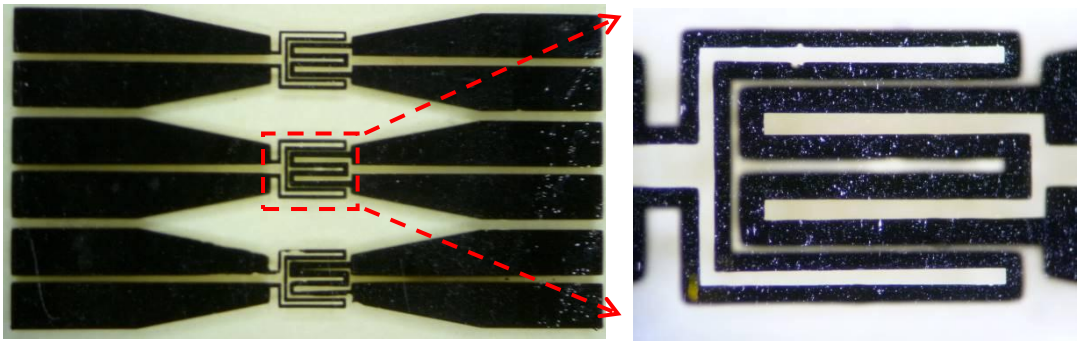
หลังจากติดตั้งชิ้นงานเรียบร้อยแล้ว ได้ทำการเคลือบอะลูมิเนียมผ่านหน้ากากแข็งด้วยเครื่องสปัตเตอริ่งที่กำลัง DC 200 W โดยทำการปรับเวลาในการเคลือบเพื่อให้ได้ความหนาที่แตกต่างกันได้ผลดังที่ 5.23 และได้ค่าความต้านทานดังตารางที่ 5.3 พบว่าค่าความต้านทานของเซนเซอร์และไมโครฮีตเตอร์ มีค่าความต้านทานไม่ที่แตกต่างกันทั้งหมด เนื่องจากการเคลือบด้วยวิธีดังกล่าวได้ความหนาของโลหะที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งเป็นผลมาจากเครื่องมือที่ไม่ดีพอ



(ก) กำลัง 200 W 25 นาที

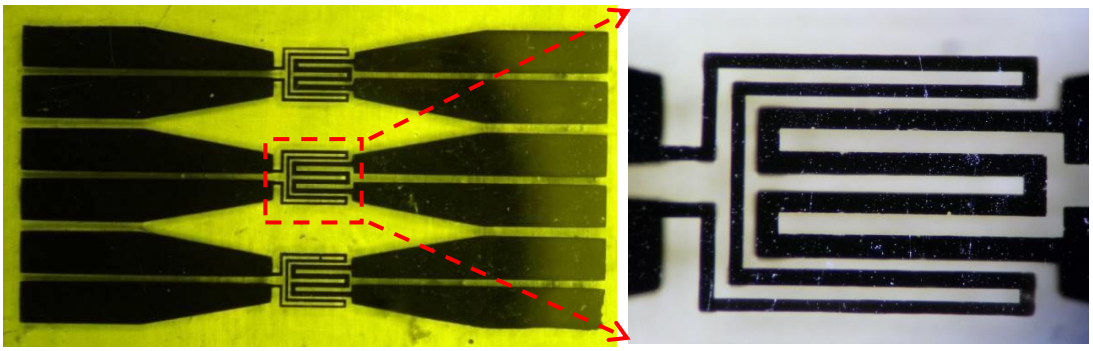


(ข) กำลัง 200 W 20 นาที

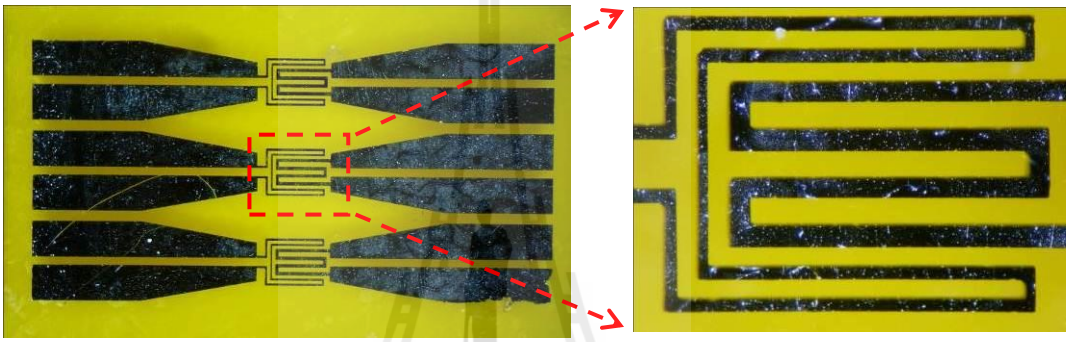


(ค) กำลัง 200 W 15 นาที

รูปที่ 5.23 ลวดลายที่เกิดจากการเคลือบโลหะด้วยการสปัตเตอริ่งที่เวลาต่าง ๆ



(ง) กำลัง 200 W 10 นาที



(จ) กำลัง 200 W 5 นาที

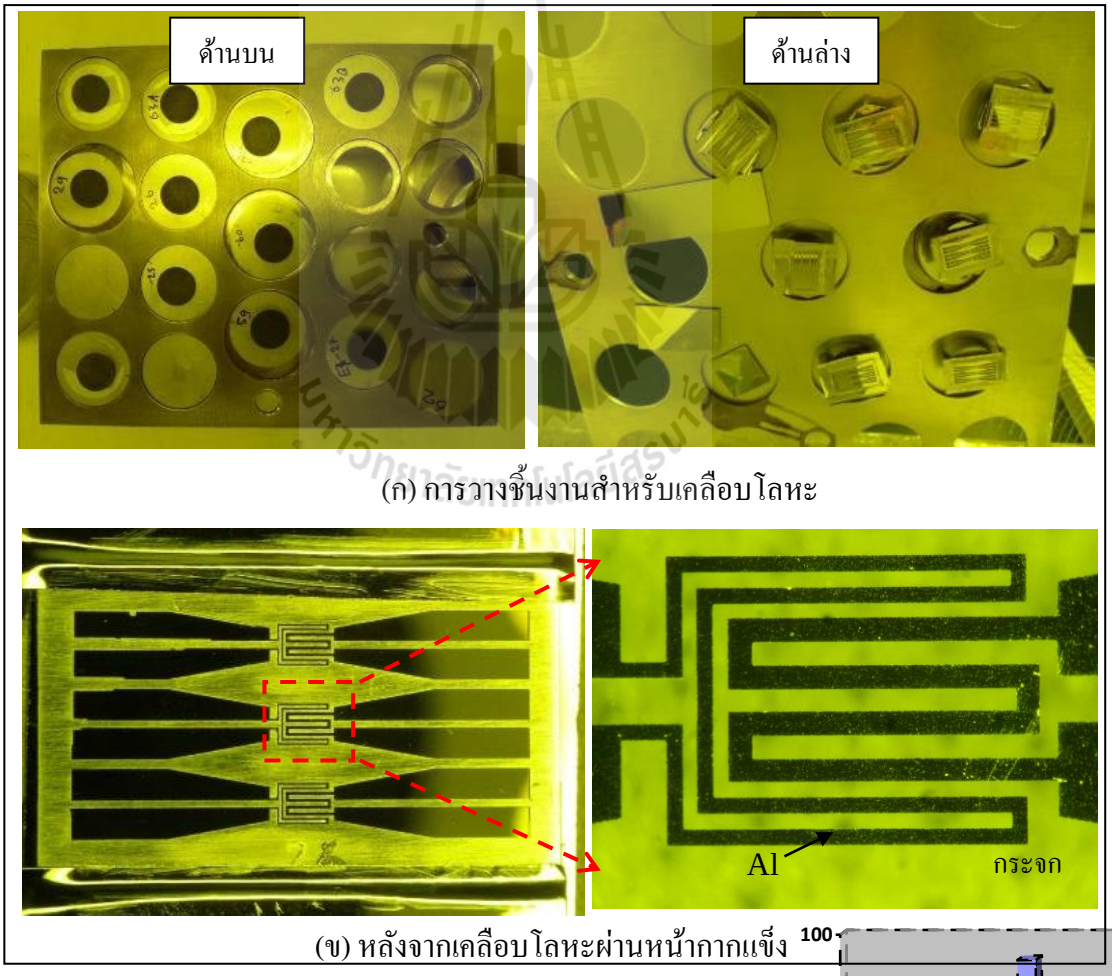
รูปที่ 5.23 ลวดลายที่เกิดจากการเคลือบโลหะด้วยการสปัตเตอริ่งที่เวลาต่าง ๆ (ต่อ)

ตารางที่ 5.3 ความต้านทานจากการเคลือบด้วยการสปัตเตอริ่ง

ลำดับ	เวลา (นาที)	ความต้านทานของไมโครฮีตเตอร์ (Ω)			ความต้านทานของเซนเซอร์ (Ω)		
		R_{h1}	R_{h2}	R_{h3}	R_{s1}	R_{s2}	R_{s3}
1	25	6.1	2.1	3.1	4.0	5.2	11.1
2	20	8.8	15.2	12.8	14.1	19.3	96.5
3	15	65	60	90	305	196	7.6 k
4	10	287	250	293	5.6 k	1.4 k	9.26 k
5	5	823	673	856	20 k	6.8 k	13.6 k

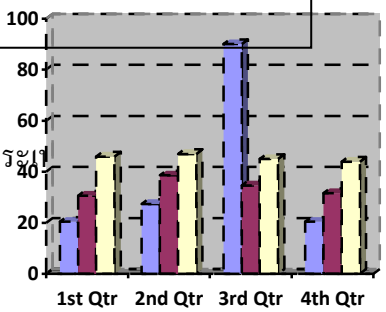
เนื่องจากการเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริ่งพบว่าลวดลายที่ได้มานั้นมีความคมชัดดี แต่เกิดปัญหาคือค่าความต้านทานที่ได้มีค่าแตกต่างกันมากเกินไป ไม่เป็นตามอัตราส่วนระหว่างค่าความต้านทานของ R_s/R_h เท่ากับ 2.1 ไม่สามารถนำมาไปใช้งานได้ ซึ่งบ่งบอกให้เห็นถึงความหนาของโลหะที่ผ่านหน้ากากแข็งเข้าสู่ฐานรองกระจกไม่เท่ากัน เนื่องด้วยเครื่องมือที่ใช้ไม่เหมาะกับนำไปใช้งาน จึงได้เปลี่ยนแนวทางใหม่เป็นการเคลือบด้วยเครื่องระเหยไอในสุญากาศ (Thermal evaporation)

2) สร้างลวดลายด้วยการระเหยไอในสุญากาศ ทำการติดตั้งหน้ากากแข็งกับฐานรองกระจกด้วยวิธีเดิม จากนั้นนำชิ้นงานเข้าเครื่องเคลือบโลหะดังรูปที่ 5.24 แล้วทำการเคลือบโลหะอะลูมิเนียมผ่านหน้ากากแข็ง โดยทำการปรับน้ำหนักของโลหะที่ค่าต่าง ๆ ได้ค่าความต้านทานดังตารางที่ 5.4



(ก) การวางชิ้นงานสำหรับเคลือบโลหะ

(ข) หลังจากเคลือบโลหะผ่านหน้ากากแข็ง



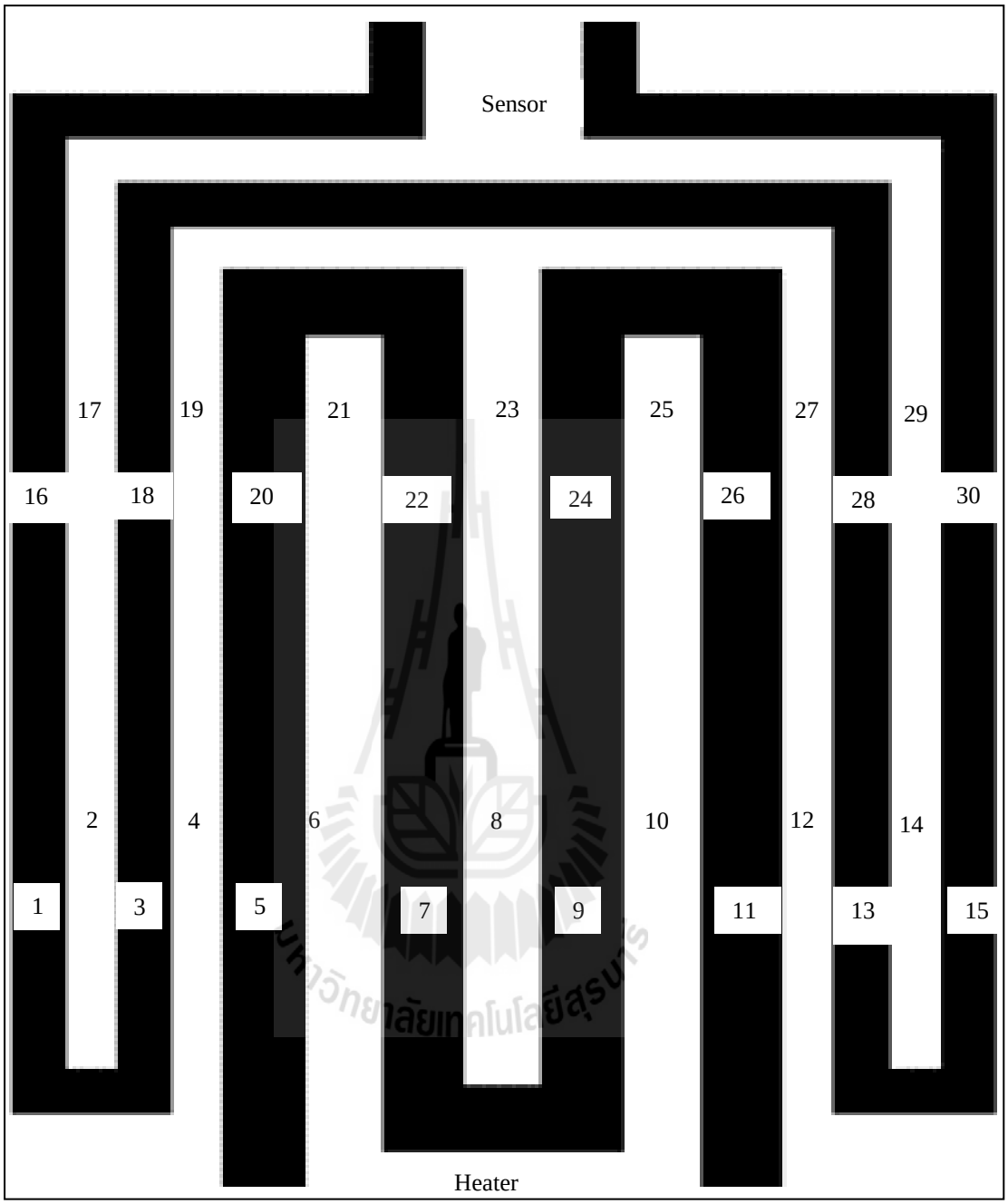
รูปที่ 5.24 การเคลือบลวดลายผ่านหน้ากากแข็งด้วยการเคลือบแบบระเ

ตารางที่ 5.4 ความต้านทานจากเคลือบด้วยการระเหยไอในสุญญากาศ

ลำดับ	น้ำหนัก Al (g)	ความต้านทานของไมโครฮีตเตอร์ (Ω)			ความต้านทานของเซนเซอร์ (Ω)		
		R_{h1}	R_{h2}	R_{h3}	R_{s1}	R_{s2}	R_{s3}
1	0.070	17.3	17.3	17.0	34.9	34.9	34.6
2	0.040	54	52	53	110	113	112
3	0.032	66	64	64	124	120	122
4	0.025	72	71	72	148	149	149
5	0.010	148	146	148	298	293	300

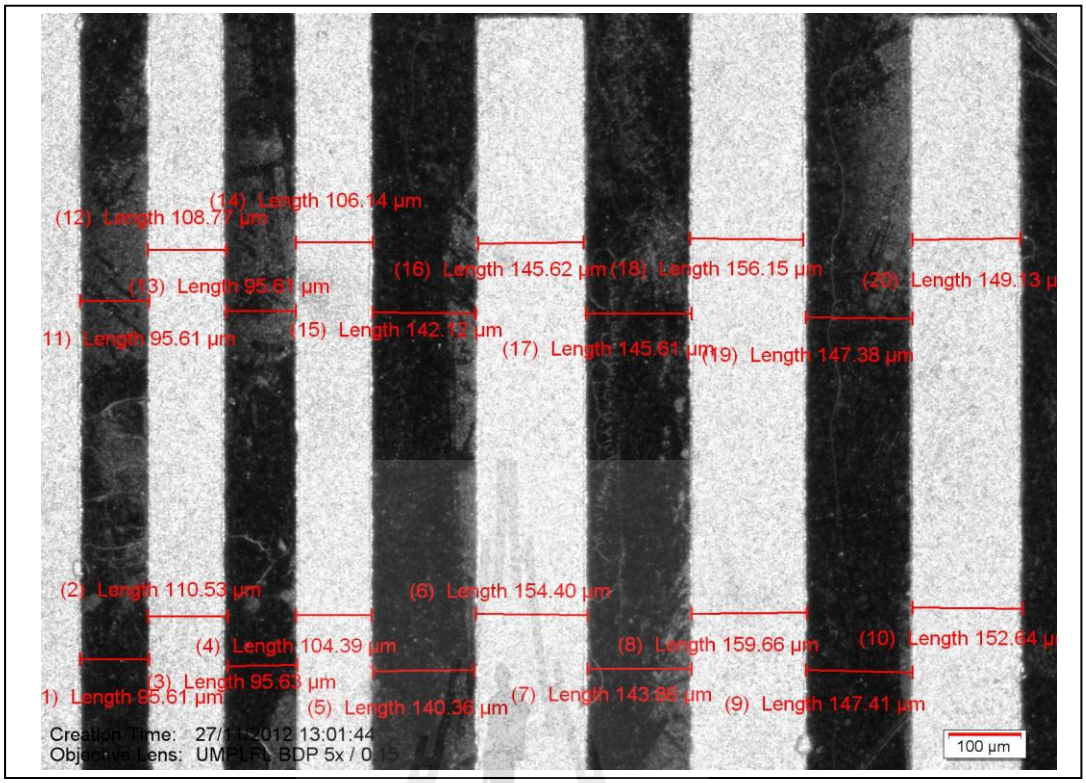
จากการสร้างชิ้นงานด้วยการเคลือบโดยใช้เครื่องสปัตเตอริ่งและเครื่องเคลือบแบบไอระเหยในสุญญากาศ พบว่าวิธีหลังนี้สามารถสร้างลวดลายได้ประสิทธิภาพกว่าวิธีแรก เนื่องจากการเคลือบดังกล่าวสามารถเคลือบชิ้นงานที่มีความหนาได้สม่ำเสมอกว่า ทำให้ความต้านทานของไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์นั้นเป็นไปตามอัตราส่วนของ R_s/R_h ใกล้เคียง 2.1 ซึ่งสามารถนำไปใช้งานต่อไปได้

การสร้างลวดลายนั้นความหนาของหน้ากาก มีส่วนสำคัญในการสร้างลวดลายเช่นกันคือ หากหน้ากากแข็งหนาเกินไป การเคลือบโลหะด้วยเครื่องเคลือบแบบระเหยไอในสุญญากาศผ่านหน้ากากแข็งดังกล่าวไม่สามารถเข้าได้ทุกพื้นที่ทำให้ลวดลายที่สร้างขึ้นค่าความต้านทานเกิดการผิดเพี้ยนและถ้าหากหน้ากากบางเกินไปก็จะเกิดการหยิบจับใช้งานได้ยาก ขนาดความหนาของหน้ากากแข็งที่เหมาะกับการใช้งานอยู่ในช่วงความหนา 200 μm ถึง 250 μm นอกจากนี้ยังได้ทำการวัดความผิดเพี้ยนของลวดลายจากการสร้างโดยกำหนดตำแหน่งวัดทั้งหมด 30 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 5.25

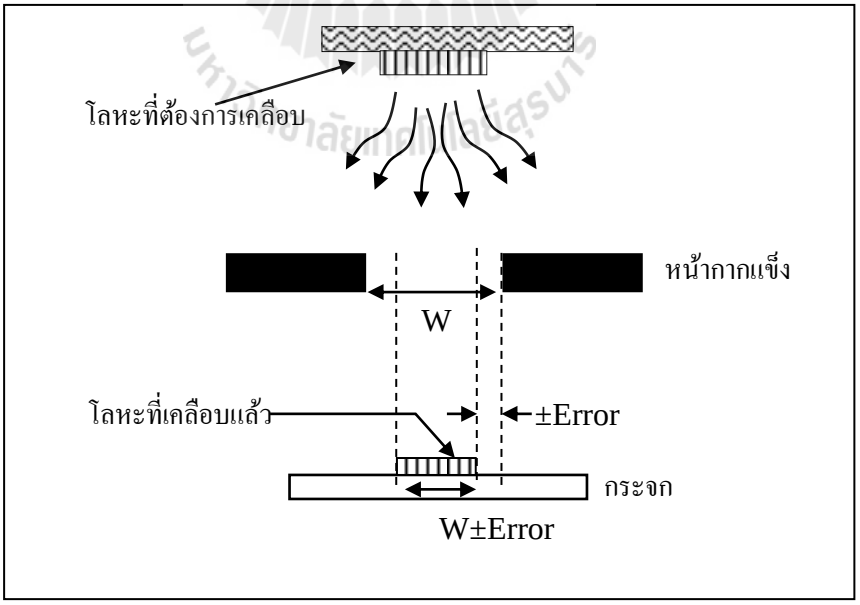


รูปที่ 5.25 ตำแหน่งสำหรับวัดขนาดความคลาดเคลื่อนของโครงสร้าง

สำหรับการวัดขนาดของชิ้นงานเพื่อหาความคลาดเคลื่อนของโครงสร้างจากการออกแบบได้ใช้กล้อง OLYMPUS รุ่น BX51 พร้อมอุปกรณ์และซอฟแวร์ OLYMPUS Stream Version 1.6.1 มีแนวทางการวัดเป็นดังรูปที่ 5.26 และรูปที่ 5.27



รูปที่ 5.26 การวัดขนาดของลวดลายที่สร้างผ่านหน้ากากแข็ง



รูปที่ 5.27 แนวทางการวัดความคลาดเคลื่อนของลวดลายที่สร้างผ่านหน้ากากแข็ง

หลังจาการวัดขนาดลวดลายได้นำไปเปรียบเทียบกับขนาดการออกแบบ ขนาดหน้ากากกั้นรังสีอัลตราไวโอเลต ขนาดหน้ากากกั้นงรังสีเอกซ์และขนาดลวดลายที่สร้างด้วยกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตได้บันทึกผลเป็นตังตารางที่ 5.5 ถึง ตารางที่ 5.10

ตารางที่ 5.5 ผลการวัดขนาดของฟิล์มกั้นรังสีอัลตราไวโอเลต

ตำแหน่ง	ออกแบบ	ขนาดฟิล์ม (μm)			ค่าเฉลี่ย	คลาดเคลื่อน
	(μm)	UVM1	UVM2	UVM3		%
1	100	92.45	98.09	93.86	94.80	5.20
2	100	103.28	104.04	98.54	101.95	-1.95
3	100	98.36	92.11	93.35	94.61	5.39
4	100	103.14	102.65	103.16	102.98	-2.98
5	150	142.11	148.87	147.38	146.12	2.59
6	150	153.2	154.4	151.4	153.00	-2.00
7	150	143.86	140.35	133.34	139.18	7.21
8	150	156.14	161.4	161.4	159.65	-6.43
9	150	145.62	136.85	147.37	143.28	4.48
10	150	153.17	154.41	154.99	154.19	-2.79
11	150	154.22	147.73	152.5	151.48	-0.99
12	100	103.17	103.16	104.91	103.75	-3.75
13	100	92.12	95.09	102.11	96.44	3.56
14	100	103.16	103.16	107.91	104.74	-4.74
15	100	93.86	93.86	96.84	94.85	5.15
16	100	93.93	95.16	93.86	94.32	5.68
17	100	109.3	95.8	104.04	103.05	-3.05
18	100	103.93	102.12	103.33	103.13	-3.13
19	100	106.15	98.42	104.91	103.16	-3.16
20	150	143.86	147.37	143.87	145.03	3.31
21	150	161.4	156.14	163.17	160.24	-6.82
22	150	145.66	142.12	136.85	141.54	5.64
23	150	152.67	161.41	161.41	158.50	-5.66
24	150	145.62	142.12	142.12	143.29	4.48
25	150	164.91	153.16	153.16	157.08	-4.72
26	150	144.21	139.47	142.47	142.05	5.30
27	100	112.28	105.79	110.53	109.53	-9.53
28	100	93.86	93.33	92.12	93.10	6.90
29	100	111.4	98.46	109.66	106.51	-6.51
30	100	92.11	92.11	98.6	94.27	5.73
ค่า root mean square error (rmse)						4.98
ขนาดความกว้างของเซนเซอร์					95.69	4.31
ขนาดความกว้างของไมโครฮีตเตอร์					144.0	6.00

ตารางที่ 5.6 ผลการวัดขนาดหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์

ตำแหน่ง	ออกแบบ	ขนาดหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ (µm)			ค่าเฉลี่ย	คลาดเคลื่อน
	(µm)	XM1	XM2	XM3		%
1	100	95.61	93.93	97.38	95.64	4.36
2	100	110.53	103.52	103.51	105.85	-5.85
3	100	95.63	102.65	104.39	100.89	-0.89
4	100	104.39	100.89	100.88	102.05	-2.05
5	150	140.36	145.61	147.37	144.45	5.55
6	150	154.4	150.88	149.13	151.47	-1.47
7	150	143.86	154.4	157.9	152.05	-2.05
8	150	159.66	156.14	152.63	156.14	-6.14
9	150	147.41	149.22	145.66	147.43	2.57
10	150	152.64	150.88	154.39	152.64	-2.64
11	150	151.75	151.76	148.26	150.59	-0.59
12	100	106.15	106.14	104.39	105.56	-5.56
13	100	93.86	92.11	106.15	97.37	2.63
14	100	106.14	102.65	93.86	100.88	-0.88
15	100	95.61	99.12	93.86	96.20	3.80
16	100	95.61	99.12	102.65	99.13	0.87
17	100	108.77	105.26	103.51	105.85	-5.85
18	100	95.61	99.61	102.63	99.28	0.72
19	100	106.14	100.89	109.13	105.39	-5.39
20	150	142.12	149.12	149.12	146.79	3.21
21	150	145.62	150.89	157.89	151.47	-1.47
22	150	145.61	154.4	150.89	150.30	-0.30
23	150	156.15	150.89	152.64	153.23	-3.23
24	150	147.38	147.38	150.89	148.55	1.45
25	150	149.13	150.89	139.48	146.50	3.50
26	150	150.01	144.75	107.89	134.22	15.78
27	100	102.63	104.4	106.14	104.39	-4.39
28	100	92.12	93.88	90.35	92.12	7.88
29	100	104.39	100.89	106.14	103.81	-3.81
30	100	92.11	95.61	97.37	95.03	4.97
ค่า root mean square error (rmse)						4.73
ขนาดความกว้างของเซนเซอร์					96.69	3.31
ขนาดความกว้างของไมโครฮีตเตอร์					146.80	3.20

ตารางที่ 5.7 ผลการวัดขนาดหน้ากากแข็ง

ตำแหน่ง	ออกแบบ	หน้ากากแข็ง (μm) [หนา 215 μm]			ค่าเฉลี่ย	คลาดเคลื่อน
	(μm)	HM1	HM2	HM3		%
1	100	88.33	88.6	86.91	87.95	12.05
2	100	108.77	110.54	112.29	110.53	-10.53
3	100	95.62	92.11	104.4	97.38	2.62
4	100	113.16	111.43	106.14	110.24	-10.24
5	150	133.33	135.09	140.38	136.27	9.16
6	150	159.66	164.91	159.65	161.41	-7.60
7	150	142.11	147.38	150.88	146.79	2.14
8	150	168.2	161.41	156.15	161.92	-7.95
9	150	136.89	138.6	142.12	139.20	7.20
10	150	161.41	161.41	161.4	161.41	-7.60
11	150	147.37	150.9	149.13	149.13	0.58
12	100	107.02	111.4	106.14	108.19	-8.19
13	100	89.49	88.61	92.12	90.07	9.93
14	100	107.02	112.28	110.58	109.96	-9.96
15	100	85.6	90.36	99.12	91.69	8.31
16	100	85.11	85.11	92.11	87.44	12.56
17	100	108.79	112.34	108.78	109.97	-9.97
18	100	93.88	95.61	99.14	96.21	3.79
19	100	106.15	109.71	106.15	107.34	-7.34
20	150	135.1	138.61	142.11	138.61	7.60
21	150	156.18	159.65	157.9	157.91	-5.27
22	150	142.12	147.37	145.62	145.04	3.31
23	150	164.91	157.9	156.15	159.65	-6.44
24	150	136.84	138.6	138.6	138.01	7.99
25	150	163.16	161.4	164.91	163.16	-8.77
26	150	149.12	150.89	147.38	149.13	0.58
27	100	104.99	107.89	109.65	107.51	-7.51
28	100	92.98	91.23	90.35	91.52	8.48
29	100	112.29	112.28	114.04	112.87	-12.87
30	100	86.84	86.84	90.35	88.01	11.99
ค่า root mean square error (rmse)						9.68
ขนาดความกว้างของเซนเซอร์					91.28	8.72
ขนาดความกว้างของไมโครฮีตเตอร์					88.01	7.23

ตารางที่ 5.8 ผลการวัดลวดลายผ่านหน้ากากแข็ง

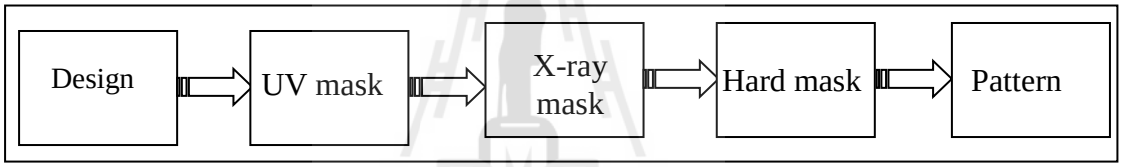
ตำแหน่ง	ออกแบบ	ลวดลายผ่านหน้ากากแข็ง (μm)			ค่าเฉลี่ย	คลาดเคลื่อน
	(μm)	P1	P2	P3		%
1	100	85.09	86.84	88.6	86.84	13.16
2	100	106.15	107.91	109.66	107.91	-7.91
3	100	106.15	109.66	104.39	106.73	-6.73
4	100	102.63	109.66	107.91	106.73	-6.73
5	150	143.96	145.66	138.64	142.75	4.83
6	150	156.14	156.14	157.9	156.73	-4.48
7	150	147.38	152.64	152.63	150.88	-0.59
8	150	159.66	157.89	156.18	157.91	-5.27
9	150	145.74	142.17	136.91	141.61	5.60
10	150	154.4	159.65	157.93	157.33	-4.88
11	150	152.67	154.4	150.89	152.65	-1.77
12	100	107.02	107.03	117.6	110.55	-10.55
13	100	90.37	92.11	86.88	89.79	10.21
14	100	104.39	107.95	111.4	107.91	-7.91
15	100	102.65	99.12	92.12	97.96	2.04
16	100	88.6	92.17	88.61	89.79	10.21
17	100	109.65	107.91	113.18	110.25	-10.25
18	100	104.4	106.15	102.69	104.41	-4.41
19	100	104.39	106.15	106.27	105.60	-5.60
20	150	143.97	145.62	142.2	143.93	4.05
21	150	154.4	156.14	157.89	156.14	-4.10
22	150	145.61	152.64	150.97	149.74	0.17
23	150	157.9	156.14	159.65	157.90	-5.26
24	150	143.87	142.11	138.7	141.56	5.63
25	150	156.14	156.15	163.16	158.48	-5.66
26	150	150.89	152.63	149.12	150.88	-0.59
27	100	103.51	108.77	112.29	108.19	-8.19
28	100	90.37	90.35	90.42	90.38	9.62
29	100	104.39	107.9	111.41	107.90	-7.90
30	100	97.37	97.38	90.35	95.03	4.97
ค่า root mean square error (rmse)						7.50
ขนาดความกว้างของเซนเซอร์					95.0	5.0
ขนาดความกว้างของไมโครฮีตเตอร์					146.75	3.25

ตารางที่ 5.9 ผลการวัดลวดลายโดยกระบวนการสร้างด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต

ตำแหน่ง	ออกแบบ	ลวดลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลต (μm)			ค่าเฉลี่ย	คลาดเคลื่อน
	(μm)	UV1	UV2	UV3		%
1	100	102.63	102.65	95.63	100.30	-0.30
2	100	98.25	103.51	100.89	100.88	-0.88
3	100	102.69	102.65	106.15	103.83	-3.83
4	100	99.14	95.63	100.89	98.55	1.45
5	150	156.14	152.64	150.89	153.22	-2.15
6	150	147.37	154.39	143.86	148.54	0.97
7	150	154.39	152.64	152.64	153.22	-2.15
8	150	159.89	149.12	150.89	153.30	-2.20
9	150	154.41	156.14	145.64	152.06	-1.38
10	150	140.35	154.4	150.89	148.55	0.97
11	150	152.63	147.38	156.14	152.05	-1.37
12	100	101.75	100.88	105.28	102.64	-2.64
13	100	106.14	102.63	95.63	101.47	-1.47
14	100	92.12	99.12	102.63	97.96	2.04
15	100	104.44	107.91	102.65	105.00	-5.00
16	100	99.14	106.14	95.61	100.30	-0.30
17	100	95.6	101.74	104.49	100.61	-0.61
18	100	99.12	104.4	100.89	101.47	-1.47
19	100	100.89	99.14	104.4	101.48	-1.48
20	150	157.93	154.4	154.4	155.58	-3.72
21	150	143.87	152.64	147.47	147.99	1.34
22	150	150.92	154.43	152.72	152.69	-1.79
23	150	154.4	149.13	150.89	151.47	-0.98
24	150	154.39	154.39	149.13	152.64	-1.76
25	150	145.61	156.15	154.39	152.05	-1.37
26	150	154.4	149.13	150.88	151.47	-0.98
27	100	101.77	101.77	103.51	102.35	-2.35
28	100	104.39	100.89	93.88	99.72	0.28
29	100	93.86	99.16	93.13	95.38	4.62
30	100	104.39	104.4	100.89	103.23	-3.23
ค่า root mean square error (rmse)						2.58
ขนาดความกว้างของเซนเซอร์					101.91	1.91
ขนาดความกว้างของไมโครฮีตเตอร์					152.87	2.87

หลังจากทำการวัดขนาดโครงสร้างของลวดลายสามารถแสดงขั้นตอนการวัดตั้งแต่ออกแบบจนถึงจนสิ้นสุดกระบวนการเป็นดังรูปที่ 5.28 มีค่าความผิดพลาด (RMSE) ดังนี้ ลวดลาย

ของฟิล์มกั้นรังสีอัลตราไวโอเลตคลาดเคลื่อนจากการออกแบบเท่ากับ ±4.98 % โครงสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์มีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ ±4.73 % หน้ากากแข็งที่มีความคลาดเคลื่อน ±9.68 % ลวดลายโลหะที่สร้างผ่านหน้ากากแข็งมีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ ±7.50 % และสุดท้ายลวดลายที่สร้างด้วยรังสีอัลตราไวโอลตมีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ ±2.58 % หากพิจารณาจะพบว่าลวดลายที่สร้างด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตจะมรประสิทธิภาพดีกว่าลวดลายที่สร้างด้วยกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอกซ์เท่ากับ ±4.92 % ข้อมูลการวัดนี้จะเป็นประโยชน์อย่างมาก เนื่องจากแสดงให้เห็นถึงจุดผิดพลาดหรือคลาดเคลื่อนเมื่อผ่านกระบวนการต่าง ๆ ว่ามีค่ามากหรือน้อยเท่าไหร่ ซึ่งจะทำให้หาแนวทางการปรับปรุงกระบวนการพัฒนาให้ดียิ่งขึ้น ไม่เฉพาะกับการสร้างลวดลายไมโครฮีตเตอร์กับเซนเซอร์วัดอุณหูมิเท่านั้น แต่ยังจะมีประโยชน์ต่อการสร้างอุปกรณ์อื่น ๆ ที่คล้ายคลึงกันอีกด้วยเช่น การสร้างเซนเซอร์วัดความดัน เซนเซอร์วัดความชื้น หรืออุปกรณ์ที่ต้องการลวดลายชนิดที่ฟิล์มบาง

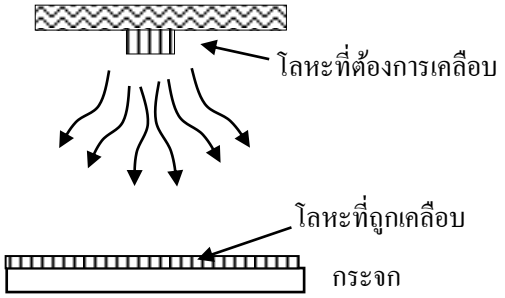
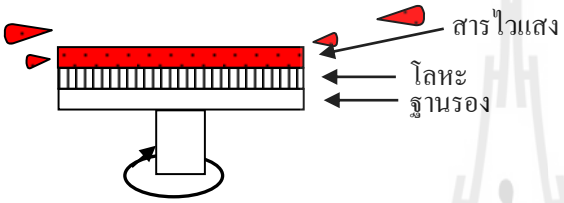
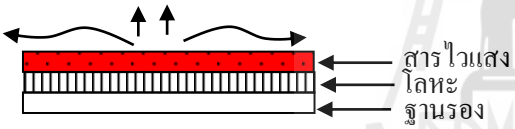
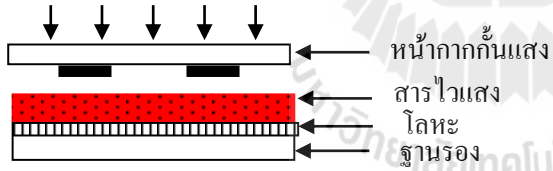
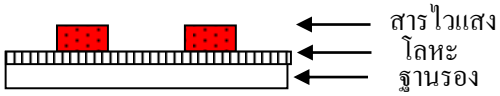
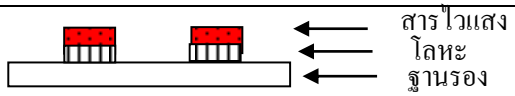
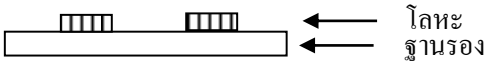


รูปที่ 5.28 ขั้นตอนการวัดขนาดโครงสร้าง

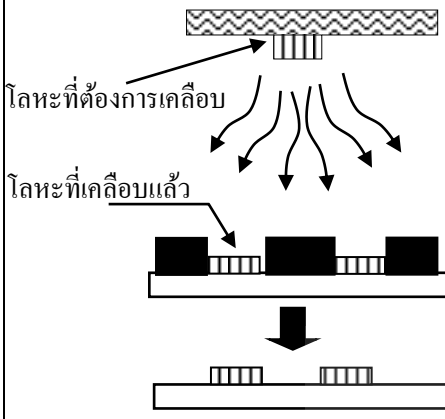
5.3 การเปรียบเทียบต้นทุนการสร้างไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตและรังสีเอกซ์

หากเปรียบเทียบกระบวนการสร้างระหว่างรังสีอัลตราไวโอเลตและรังสีเอกซ์ จะได้ผลของการสร้างไม่ต่างกันมากนัก แต่สิ่งที่ต่างกันคือ ต้นทุนสำหรับการผลิตเนื่องจากกระบวนการสร้างด้วยวิธีลิโธกราฟฟีนั้นต้องใช้ทั้งการล้างสารไวแสง การเคลือบโลหะและอีกหลายกระบวนการ ทำให้สิ้นเปลืองเพราะใช้อุปกรณ์และสารเคมีในการสร้างมาก ได้แก่ สารไวแสง น้ำยาล้างสารไวแสง น้ำยากัดโลหะหรือเป็นที่เข้าใจคือ ใช้สารไวแสงเพื่อทำเป็นวัสดุชั่วคราว (Sacrificial layer) สุดท้ายก็ทำการสกัดทิ้งไปทำให้มีผลต่อต้นทุนการผลิต แต่หากเปลี่ยนมาใช้วิธีการเคลือบโลหะผ่านหน้ากากแข็งไม่ต้องใช้สารไวแสงมาดำเนินการอีกต่อไป ใช้เพียงสร้างแม่พิมพ์ต้นแบบในครั้งแรกเท่านั้น ทำให้สามารถประหยัดกระบวนการส่งผลให้ลดวัสดุสิ้นเปลืองและเวลาซึ่งมีผลต่อต้นทุนการผลิตได้หลายเท่าตัว เพื่อให้เห็นภาพที่ชัดเจนยิ่งขึ้น สามารถแสดงกระบวนการโดยสรุปได้ดังตารางที่ 5.10 ถึง ตารางที่ 5.11

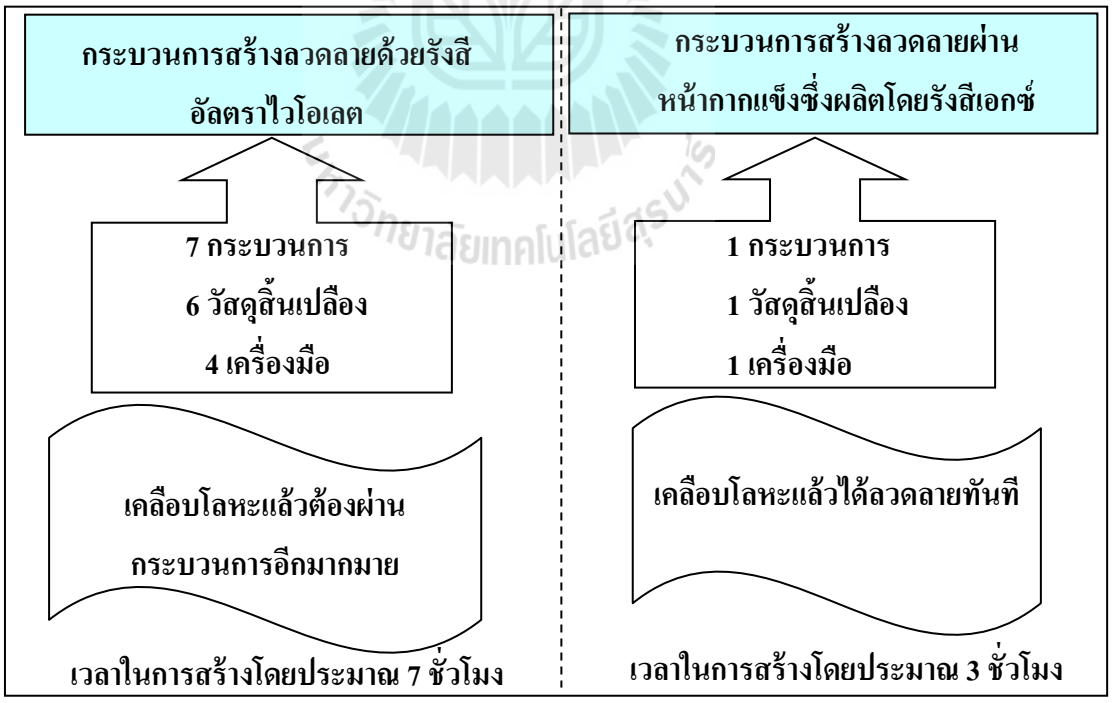
ตารางที่ 5.10 สรุปกระบวนการสร้างลวดลายด้วยกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต

กระบวนการ	วัสดุ	เครื่องมือ	เวลา
 1. กระบวนการเคลือบโลหะบนฐานรอง	(1) โลหะ	(1) เครื่องเคลือบโลหะ	3 ชั่วโมง
 2. กระบวนการเคลือบสารไวแสง	(2) สารไวแสง	(2) เครื่องหมุนเคลือบ	1 ชั่วโมง
 3. กระบวนการอบสารไวแสง	-	(3) เตาอบ	1 ชั่วโมง
 4. กระบวนการฉายแสง	(3) หน้ากากกั้นแสง	(4) เครื่องฉายแสงอัลตราไวโอเลต	1 ชั่วโมง
 5. กระบวนการล้างสารไวแสง	(4) น้ำยา AZ-developer	-	0.2 ชั่วโมง
 6. กระบวนการกัดโลหะ	(5) น้ำยากัดโลหะ	-	0.2 ชั่วโมง
 7. กระบวนการล้างสารไวแสง	(6) น้ำยาล้างสารไวแสง	-	0.2 ชั่วโมง

ตารางที่ 5.11 สรุปการสร้างลวดลายด้วยเคลือบโลหะผ่านหน้ากากแข็ง

กระบวนการ	วัสดุ	อุปกรณ์	เวลา
 1.กระบวนการเคลือบโลหะบนฐานรอง	(1) โลหะ	(1) เครื่องเคลือบโลหะ	3 ชั่วโมง

จากกระบวนการสร้างไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์ทั้ง 2 วิธี ที่ผ่านมาสามารถสรุปเพื่อให้เห็นความสำคัญและความชัดเจนของแนวทางการสร้างลวดลายยิ่งขึ้นแสดงได้ดังรูปที่ 5.29



รูปที่ 5.29 เปรียบเทียบกระบวนการสร้างลวดลายระหว่างกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตและการเคลือบโลหะผ่านหน้ากากแข็ง

หากพิจารณาเฉพาะการสร้างลวดลายด้วยการเคลือบโลหะผ่านหน้ากากแข็งที่สร้างด้วยรังสีเอกซ์จะสามารถลดขั้นตอนจาก 6 กระบวนการ 7 วัสดุสิ้นเปลือง และ 4 เครื่องมือ ให้ลดลงเหลือเพียง 1 กระบวนการ 1 วัสดุสิ้นเปลือง และ 1 เครื่องมือเท่านั้น โดยที่ไม่หมายรวมถึงกระบวนลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอกซ์และกระบวนการสร้างหน้ากากดูดซับรังสี เนื่องจากเป็นขั้นตอนเริ่มต้นเพื่อให้ได้ซึ่งหน้ากากแข็งซึ่งจะกระทำเป็นครั้งแรกและครั้งเดียวเท่านั้น นับว่าเป็นขั้นตอนที่มีความรวดเร็วเพราะไม่ต้องใช้สารไวแสงรวมถึงไม่ต้องใช้สารเคมีอื่น ๆ ใช้เพียงโลหะร่วมกับเครื่องเคลือบโลหะเท่านั้น

หลังจากที่ได้ทำการเปรียบเทียบกระบวนการสร้างแล้วพบว่าสามารถลดขั้นตอนกระบวนการสร้างได้เป็นอย่างมาก เมื่อทำการเปรียบเทียบต้นทุนการวิจัยได้ทำการประมาณราคาต้นทุนการสร้างได้ดังนี้ (ที่มา : ส่วนงานพัฒนาธุรกิจ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน)

1) การประมาณต้นทุนการสร้างไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต

1.1) ต้นทุการสร้างไมโครฮีตเตอร์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตต่อ 1 ครั้ง มีรายละเอียดของราคาอุปกรณ์ดังตารางที่ 5.12 รวมเป็นเงิน 2,176 บาท

ตารางที่ 5.12 การประมาณต้นทุการสร้างไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต

ลำดับ	รายการ	จำนวน	หน่วย	ราคา/หน่าย	รวม
1	โลหะ Al	1	นิ้ว	39	39
2	ค่าไฟปั้มเครื่อง Evaporation	3	ชั่วโมง	220	660
3	กระจกสไลด์	1	ชิ้น	1	1
4	AZ1512	2	ลบ.ซม.	30	60
5	เครื่องหมุนเคลือบ	1	ชั่วโมง	180	180
6	เตาอบ	5	ชั่วโมง	180	900
7	เครื่องฉายแสงอัลตราไวโอเลต	1	ชั่วโมง	330	330
8	KOH (AZ-developer)	1	กรัม	1	1
9	H3Bo3 (AZ-developer)	4	กรัม	0.5	2
10	HF	2	มิลลิลิตร	1.5	3
11	Acetone	10	มิลลิลิตร	0.5	5
12	IPA	10	มิลลิลิตร	0.5	5
รวม					2,176

1.2) ต้นทุนหน้ากากกั้นรังสีอัลตราไวโอเลต (คิดครั้งแรก) เท่ากับ 530 บาท

∴ ดังนั้นรวมต้นทุนการผลิตไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์ด้วยกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตเท่ากับ 2,176+530 = 2,706 บาท

2) การประมาณต้นทุนการสร้างไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์ด้วยกระบวนการเคลือบโลหะผ่านหน้ากากแข็ง

สำหรับการสร้างอุปกรณ์ด้วยกระบวนการเคลือบโลหะผ่านหน้ากากแข็งนั้นจะประกอบด้วยส่วนสำคัญคือ การสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ การสร้างหน้ากากแข็งและการสร้างลวดลายผ่านหน้ากากแข็ง

2.1) การสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์มีรายละเอียดต้นทุนการประมาณราคาดังตารางที่ 5.13 รวมเป็นเงิน 2,765 บาท

ตารางที่ 5.13 ต้นทุการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์

ลำดับ	รายการ	จำนวน	หน่วย	ราคา/หน่าย	รวม
1	หน้ากากกั้นรังสีอัลตราไวโอเลต	1	แผ่น	530	530
2	แผ่นกราไฟต์	2	ตร.ซม.	300	600
3	SU8-3025	1	ลบ.ซม.	115	115
4	เครื่องหมุนเคลือบ	1	ชั่วโมง	180	180
5	เตาอบ	5	ชั่วโมง	180	900
6	เครื่องฉายแสงอัลตราไวโอเลต	1	ชั่วโมง	330	330
7	SU8-developer	20	ลบ.ซม.	5	100
8	ชุบโลหะเงิน (ไม่คิดราคา)	2	ชั่วโมง	0	0
9	Acetone	10	มิลลิลิตร	0.5	5
10	IPA	10	มิลลิลิตร	0.5	5
รวม					2,765

2.2) การสร้างหน้ากากแข็งมีรายละเอียดต้นทุนการประมาณราคาดังตารางที่ 5.14 รวมเป็นเงิน 9,021 บาท

ตารางที่ 5.14 ต้นทุนการสร้างหน้ากากแข็ง

ลำดับ	รายการ	จำนวน	หน่วย	ราคา/หน่าย	รวม
1	SU8-2010	1	ลบ.ซม.	115	115
2	แผ่นกราไฟต์	2	ตร.ซม.	300	600
3	การฉายรังสีเอกซ์	0.5	ชั่วโมง	7000	3,500
4	SU8-develpoer	20	ลบ.ซม.	5	100
5	เตาอบ	15	ชั่วโมง	180	2,700
6	ชุบโลหะนิกเกิล (ไม่คิดราคา)	72	ชั่วโมง	0	0
7	กระดาษทรายเบอร์ 1200	1	แผ่น	6	6
8	สกัดด้วยพลาสมา	20	ชั่วโมง	100	2,000
รวม					9,021

2.3) การสร้างลวดลายผ่านหน้ากากมีรายละเอียดต้นทุนการประมาณราคาดังตารางที่ 5.15 รวมเป็นเงิน 699 บาท

ตารางที่ 5.15 ต้นทุนการสร้างลวดลายผ่านหน้ากากแข็ง

ลำดับ	รายการ	จำนวน	หน่วย	ราคา/หน่าย	รวม
1	โลหะอะลูมิเนียม	1	นิ้ว	39	39
2	ค่าไฟปั้ม Evaporation	3	ชั่วโมง	220	660
รวม					699

∴ ดังนั้นรวมต้นทุนการผลิตไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์ด้วยกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอกซ์เท่ากับ 2,765+9,021+699 = 11,786 บาท

หากเปรียบเทียบราคาของการสร้างอุปกรณ์ด้วยกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตกับกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอกซ์จำนวน 1 ชิ้น จะมีราคาถูกกว่าเป็นอย่างมากประมาณ 11,786/2,706 = 4.4 เท่า แต่เมื่อผลิตจำนวน 10 ชิ้น ขึ้นไปจะพบว่าจะมีต้นทุนการผลิตสูงกว่าเป็นประมาณ 1.17 เท่า ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากกระบวนการที่ใช้รังสีอัลตราไวโอเลตนั้นไม่ว่าจะ

สร้างกี่ครั้งก็ตามจะต้องใช้วัสดุ และเครื่องมือเหมือนเดิมทุกครั้งทำให้ต้นทุนการผลิตไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงเฉพาะส่วนที่เป็นหน้ากากกั้นรังสีอัลตราไวเท่านั้น ส่วนกรณีที่ใช้รังสีเอกซ์นั้นพบว่าจะมีต้นทุนถูกลงอย่างมากเมื่อมีการผลิตหลาย ๆ ครั้ง เนื่องจากสร้างหน้ากากแข็งหรือเมื่อพิมพ์โลหะเพียงครั้งเดียว ต่อจากนั้นจะเป็นการใช้เพียงโลหะและเครื่องเคลือบโลหะ ทำให้ต้นทุนต่อชิ้นถูกลง จึงได้ทำการสรุปต้นทุการสร้างเป็นดังตารางที่ 5.16 เป็นต้นทุนการสร้างอุปกรณ์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตและรังสีเอกซ์ ส่วนตารางที่ 5.17 เป็นต้นทุนการสร้างอุปกรณ์ต่อชิ้น จากผลการประมาณราคาแล้วถึงแม้ว่าราคาต่อชิ้นพบว่า อาจจะจะไม่ถูกเท่ากับท้องตลาดซึ่งฮีตเตอร์ที่เป็นขดลวดทั่วไปมีราคาขนาดตั้งแต่ 500 บาท จนถึง 1,000 บาท ส่วนเซนเซอร์นั้นมีราคาอยู่ในช่วง 50 บาท ถึง 2,000 บาท แต่อุปกรณ์ที่มีขายนั้นมีขนาดใหญ่เกินไป ไม่สามารถที่จะนำมาทดสอบได้เพราะในงานวิจัยเน้นพัฒนาต้นแบบที่สามารถทำความร้อนได้เร็วขนาดเล็กและพกพาได้

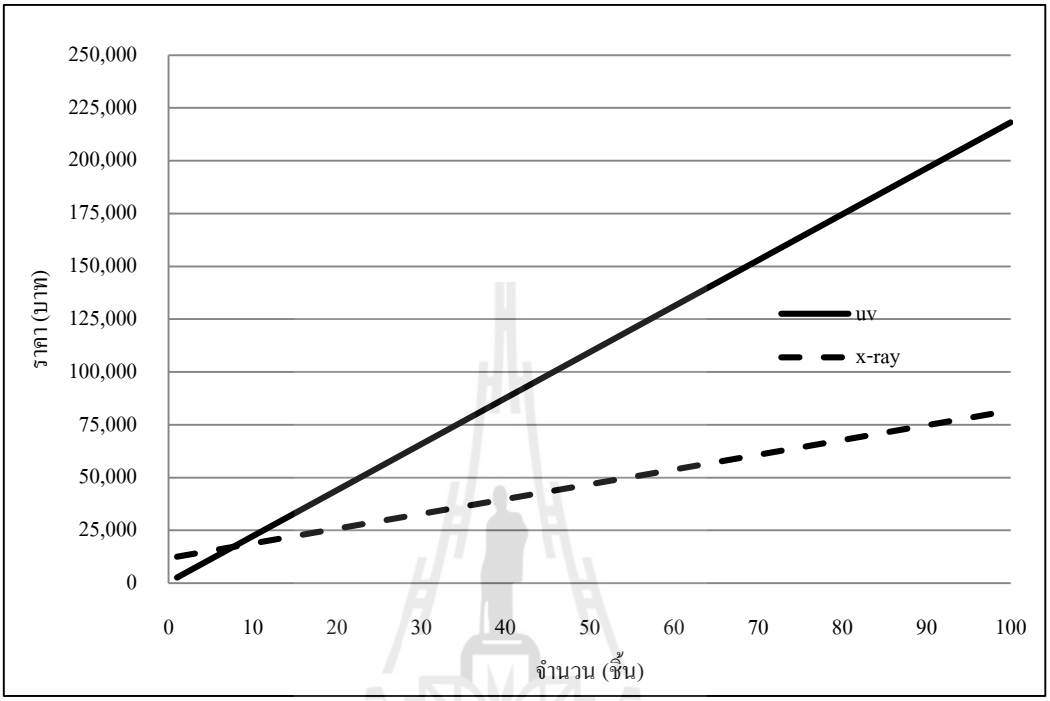
ตารางที่ 5.16 เปรียบเทียบต้นทุนการสร้างอุปกรณ์

จำนวนครั้งที่สร้าง	ราคา (บาท)	
	รังสีอัลตราไวโอเลต	รังสีเอกซ์
1	2,706	12,485
2	4,882	13,184
5	11410	15,281
10	22,290	18,776
20	44,050	25,766
50	109,330	46,736
100	218,130	81,686

ตารางที่ 5.17 เปรียบเทียบต้นทุนการสร้างอุปกรณ์ต่อชิ้น

จำนวนชิ้น	ราคาต่อชิ้น (บาท)	
	รังสีอัลตราไวโอเลต	รังสีเอกซ์
1	2,706	12,485
2	2,441	6,592
5	2,282	3,056
10	2,229	1,878
20	2,202	1,288
50	2,186	935
100	2,181	816

เพื่อให้เห็นภาพที่ชัดเจนยิ่งขึ้นได้ทำการสร้างกราฟเพื่อดูแนวโน้มต้นทุนการสร้างชุดทำความร้อนของทั้งสองกระบวนการแสดงได้ดังรูปที่ 5.30



รูปที่ 5.30 การเปรียบต้นทุนการสร้างไมโครฮีตเตอร์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตและรังสีเอกซ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

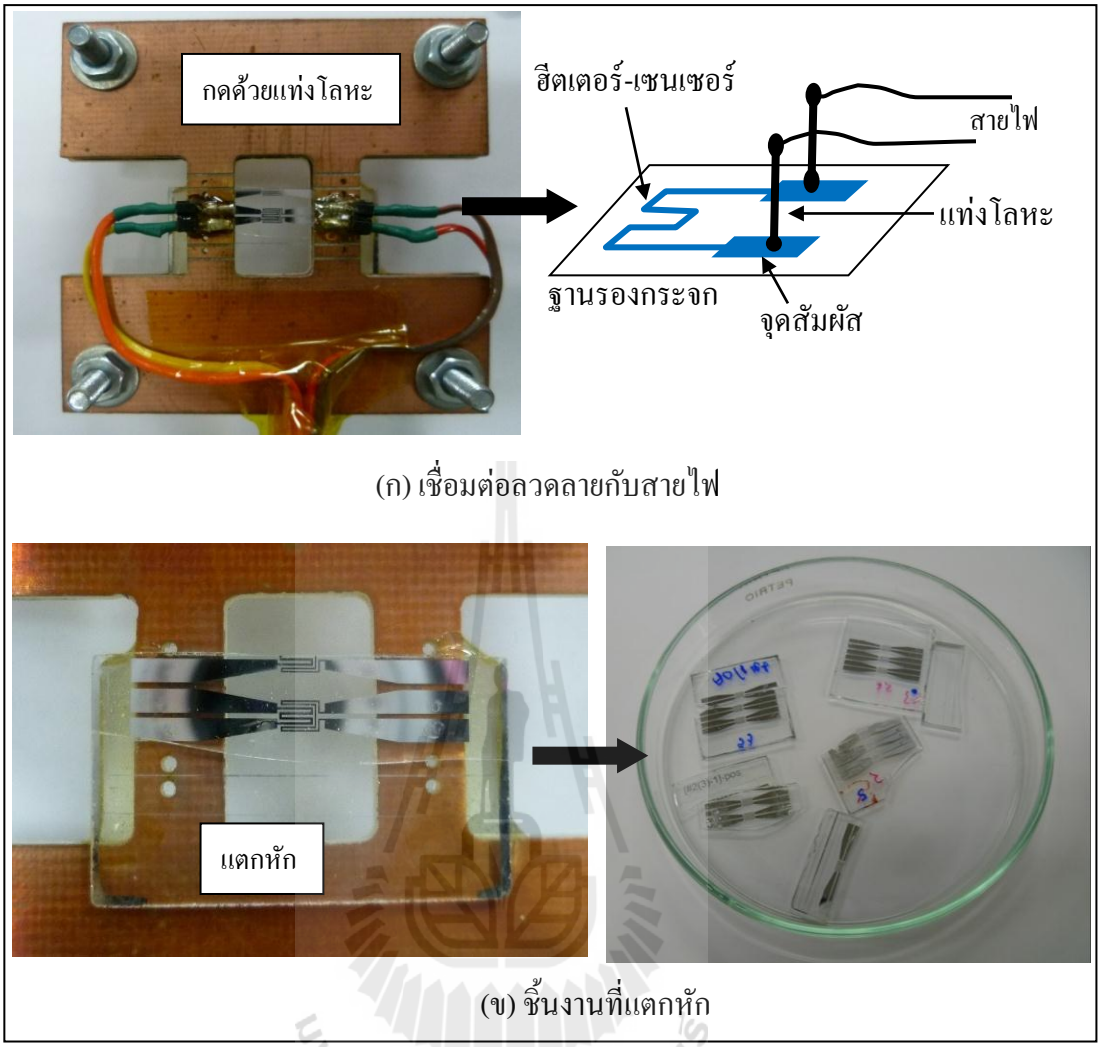
เมื่อทำการสร้างอุปกรณ์ด้วยโครงสร้างดังที่ได้ออกแบบแล้ว จากนั้นจะเป็นการวัดผลลวดลายจน เพื่อวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนจากกระบวนการสร้าง ถัดมาคือการประมาณต้นทุนการสร้างด้วยราคาจริงและสุดท้ายวิเคราะห์ข้อดี-ข้อเสียแต่ละกระบวนการซึ่งมีผลดังตารางที่ 5.18

ตารางที่ 5.18 เปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของกระบวนการสร้าง

กระบวนการสร้างลวดลายด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต	กระบวนการสร้างลวดลายผ่านหน้ากากแข็งซึ่งผลิตโดยรังสีเอกซ์
<u>ข้อดี</u> -ได้ลวดลาดที่มีความผิดเพี้ยนน้อย	<u>ข้อดี</u> -ต้นทุนการผลิตต่อชิ้นต่ำ -ใช้กระบวนการและสารเคมีในการสร้างน้อย -เวลาในการสร้างน้อย -หากการสร้างเกิดความผิดพลาดการแก้ไขสามารถทำได้ในกระบวนการเดียว
<u>ข้อเสีย</u> -ต้นทุนการผลิตต่อชิ้นสูง -ใช้กระบวนการและสารเคมีในการสร้างมาก -เวลาในการสร้างมาก -หากการสร้างเกิดข้อผิดพลาดต้องทำการสร้างใหม่ตั้งแต่ต้น -เกิดของเสียจากสารเคมีที่ใช้ในการสร้าง	<u>ข้อเสีย</u> -ลวดลายที่ผิดเพี้ยนจากการสร้าง

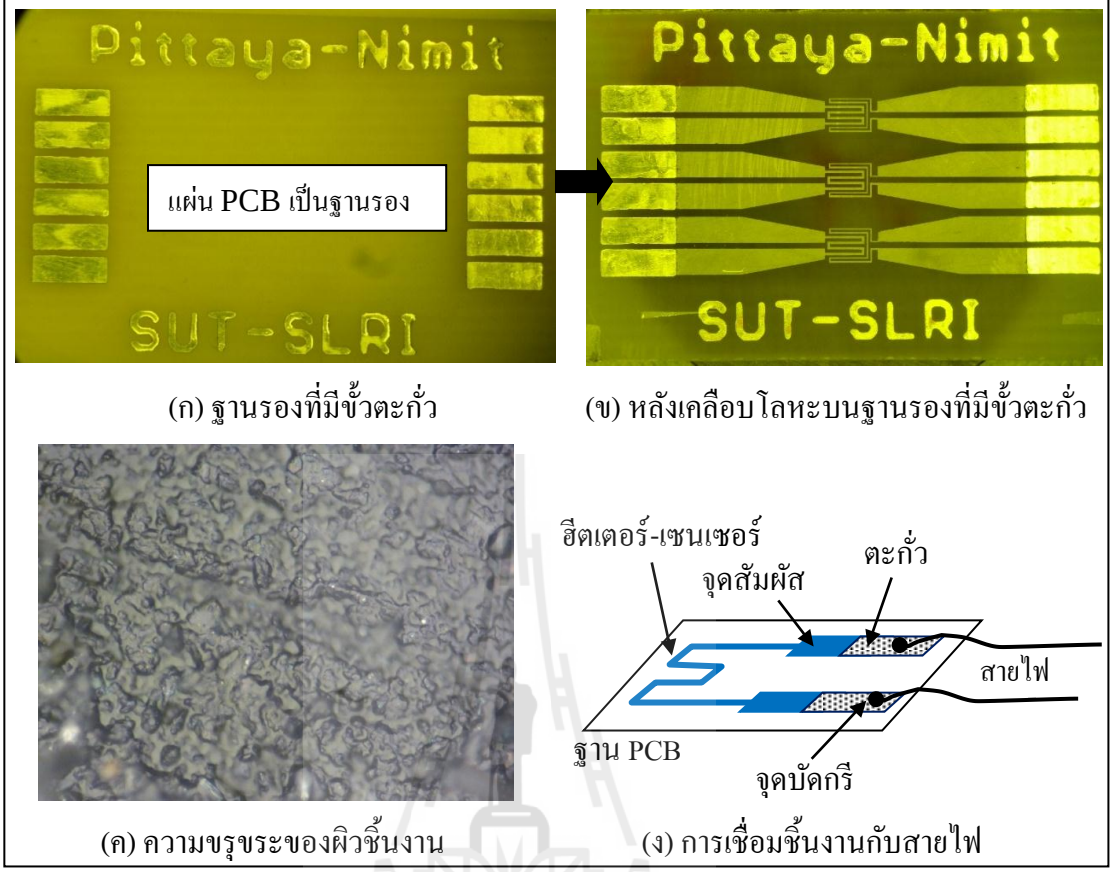
5.4 การเชื่อมต่อชุดทำความร้อนกับวงจรวัดคุม

ปัญหาของการเชื่อมต่อระหว่างชุดทำความร้อนกับวงจรนับว่าเป็นปัญหาอีกประการหนึ่งสำหรับการควบคุมชุดทำความร้อนเนื่องจากถ้าจุดเชื่อมต่อไม่ดีจะเกิดค่าความต้านทาน ทำให้ไม่ได้ค่าที่ถูกต้อง ซึ่งแนวทางเดิมเป็นการเชื่อมต่อโดยใช้แท่งโลหะกดสัมผัสกับบริเวณปลายอุปกรณ์ ซึ่งได้ผลดีในระดับหนึ่งคือ สามารถทำการวัดคุมได้ แต่เมื่อใดก็ตามที่เกิดการขยับของอุปกรณ์เพียงเล็กน้อย อาจจะเป็นสาเหตุมาจากการใช้งานบ่อย การตกหล่น ค่าความต้านทานจะเกิดผิดเพี้ยนทันทีและลวดลายอุปกรณ์จะเสียหายเนื่องด้วยการเคลือบผิวของโลหะที่เป็นฟิล์มบางและข้อเสียที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งก็คือหากทำการกดด้วยแรงมากเกิดไปจะเกิดการแตกหักของอุปกรณ์ดังรูปที่ 5.31



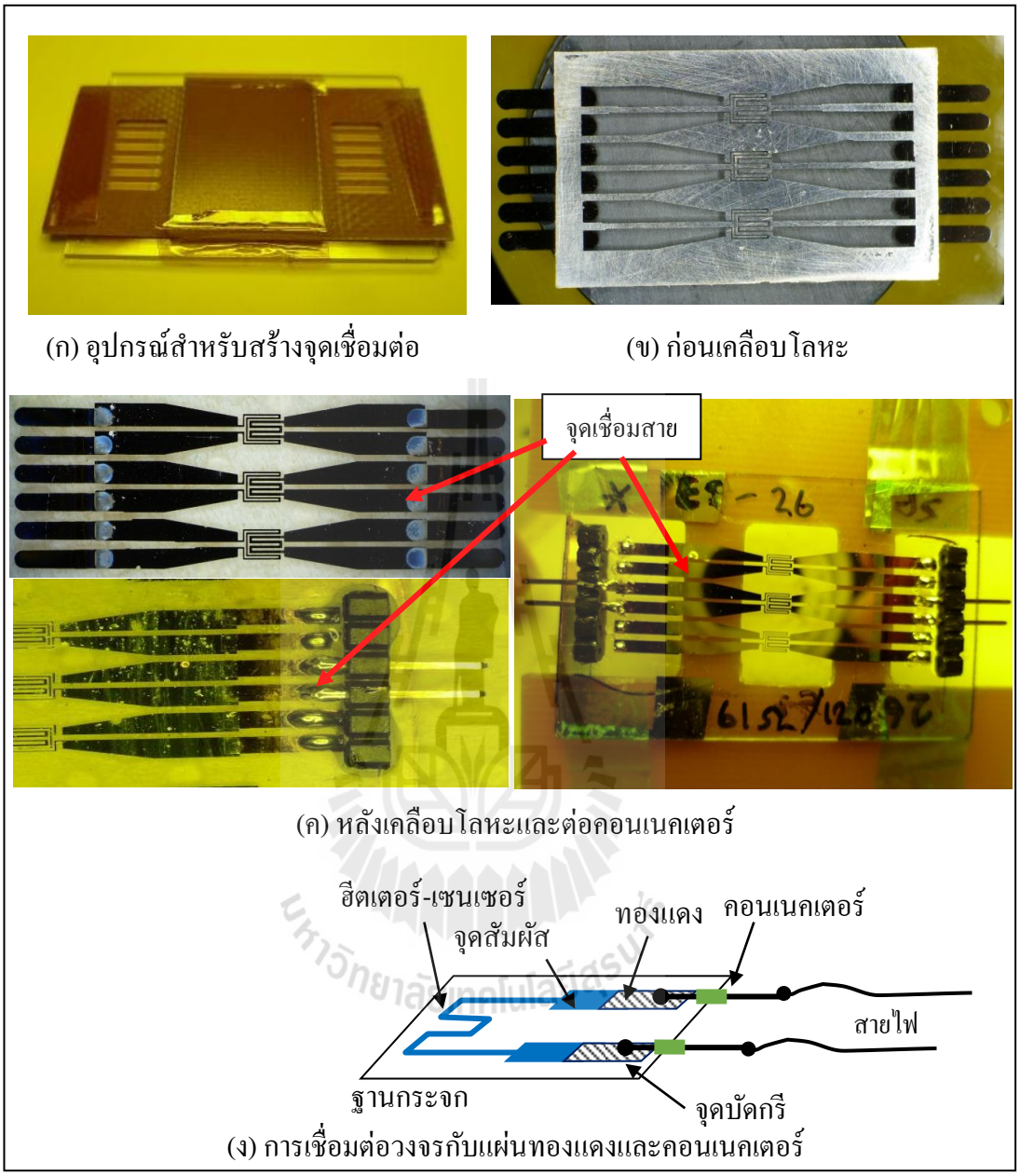
รูปที่ 5.31 ความเสียหายที่เกิดจากการเชื่อมต่อสายสัญญาณโดยใช้แท่งโลหะกดสัมผัสกับลวดลายโดยตรง

หลังจากพบปัญหาการเชื่อมต่อแล้วทำให้ต้องทำการปรับปรุงใหม่ด้วยการสร้างลวดลายบนแผ่น PCB เป็นฐานรอง ที่มีลวดลายตะกั่วสำหรับบัดกรีสายไฟหรือสายสัญญาณได้เป็นอย่างดี แต่ก็พบกับปัญหาคือแผ่นดังกล่าวเป็นอิพ๊อกซี มีผิวขรุขระความต้านทานไม่สามารถที่จะนำมาเป็นอุปกรณ์ทำความร้อนได้ดังรูปที่ 5.32



รูปที่ 5.32 การเชื่อมต่อสายสัญญาณโดยแผ่น PCB เป็นฐานรองพร้อมลวดลายตะกั่ว

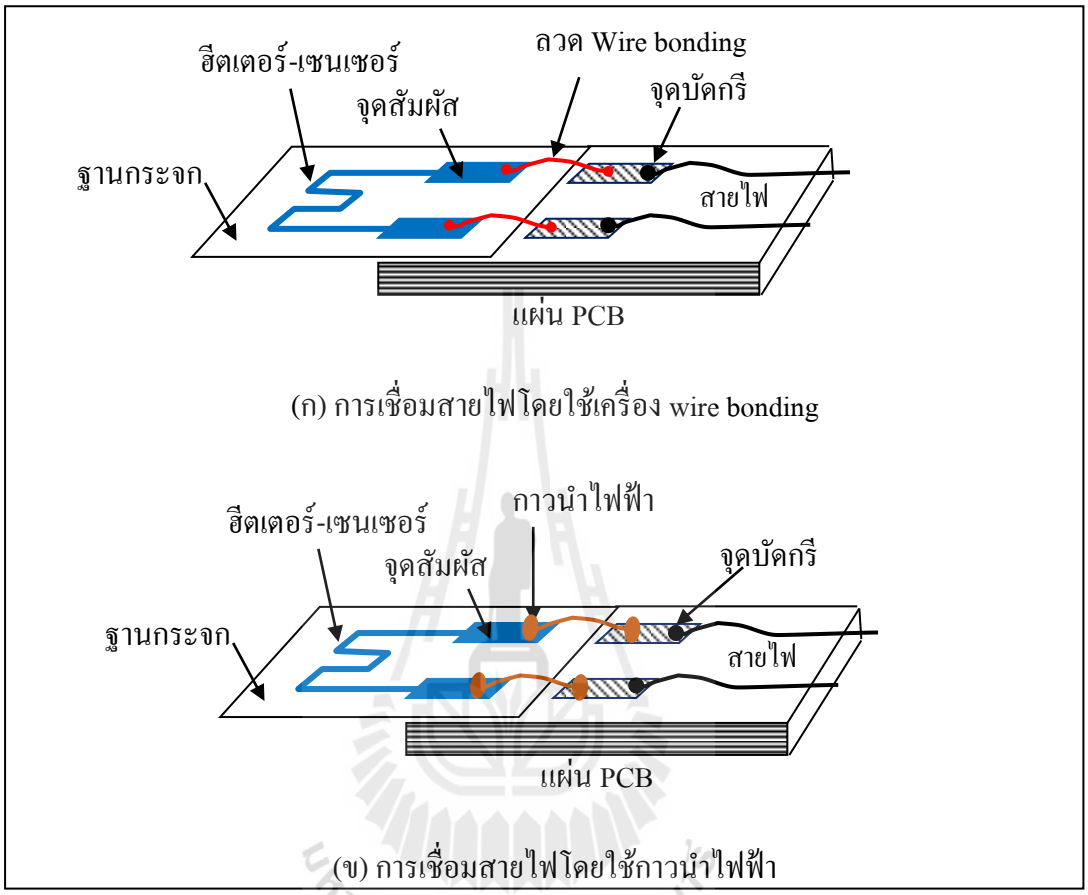
การปรับปรุงอีกหนึ่งวิธีคือการสร้างลวดลายบนกระจกเช่นเดิมแล้วเคลือบจุดเชื่อมต่อด้วยโลหะทองแดงได้ผลคือ สามารถบัดกรีวงจรกับอุปกรณ์ควบคุมได้เป็นอย่างดีดังรูปที่ 5.33 ทำให้ลดการแตกหักและสูญเสียของชุดทำความร้อน แต่สุดท้ายบริเวณดังกล่าวบางเกินไปทำให้บริเวณที่บัดกรีเกิดการหลุดออกจากฐานรองและถ้าหากเคลือบจุดเชื่อมต่อให้มีความหนาเพิ่มขึ้น จะทำให้บริเวณดังกล่าวไม่สามารถบัดกรีติดได้เช่นกัน



รูปที่ 5.33 การเชื่อมต่อสายสัญญาณโดยสร้างลวดลายทองแดงภายนอก

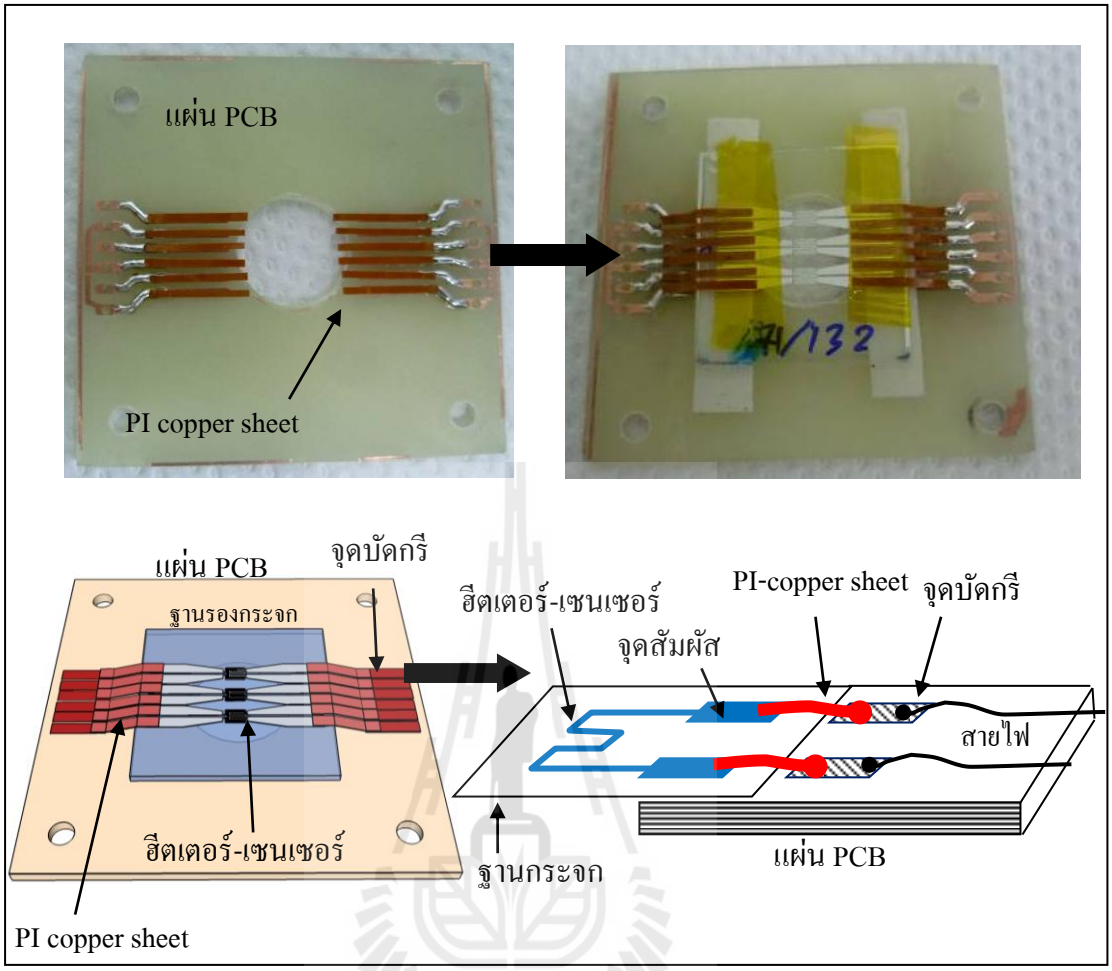
นอกจากนี้ยังได้ทำการใช้เครื่องเชื่อมสาย (wire bonding) และกาวเงินนำไฟฟ้าเป็นตัวสำหรับเชื่อมระหว่างวงจรกับลวดลายแต่ก็ไม่เป็นผล สำหรับเครื่องเชื่อมสายนั้นไม่สามารถเชื่อมติดกับชิ้นงานที่สร้างขึ้นได้ ซึ่งได้เพิ่มแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีลวดลายทองแดงสำหรับการบัดกรีกับสายสัญญาณ ส่วนกาวเงินได้ทำการเพิ่มแผ่นวงจรพิมพ์เช่นกันซึ่งก็ทำการเชื่อมได้แต่จะเกิดความ

ต้านทานที่จุดสัมผัสเนื่องจากกาวเงินดังกล่าวมีส่วนผสมของของอิพ๊อกซีซึ่งเป็นพอลิเมอร์และเป็นฉนวนไฟฟ้าทำให้ไม่สามารถนำไปใช้งานได้เช่นกันดังรูปที่ 5.34



รูปที่ 5.34 การเชื่อมต่อสายไฟฟ้าด้วยเครื่อง wire bonding และกาวนำไฟฟ้า

จากที่ผ่านมาได้ทำการแก้ปัญหาด้วยวิธีต่าง ๆ แต่ยังไม่ได้ผลและเนื่องจากชุดทำความร้อนที่สร้างขึ้นเป็นโลหะอะลูมิเนียมมีความหนา 100 Å ถึง 300 Å ไม่สามารถบัดกรีด้วยตะกั่วได้โดยตรง จึงได้ค้นหาแนวทางใหม่โดยทำการออกแบบฐานรอง PCB ให้มีร่องระบายความร้อน จากนั้นได้ทำการตัดแผ่น PI copper เป็นแผ่นเล็ก ๆ แล้วเชื่อมด้วยตะกั่วที่ปลายด้านหนึ่ง ส่วนอีกด้านหนึ่งกดทับลงไปโดยตรงกับลวดลายของชุดทำความร้อนแล้วปิดทับด้วยเทป PI ให้แน่น วิธีการนี้ทำให้สามารถเชื่อมสัญญาณทางไฟฟ้ากับชุดวัดคุมได้เป็นอย่างดีดังรูปที่ 5.35



รูปที่ 5.35 การเชื่อมต่อชุดไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์

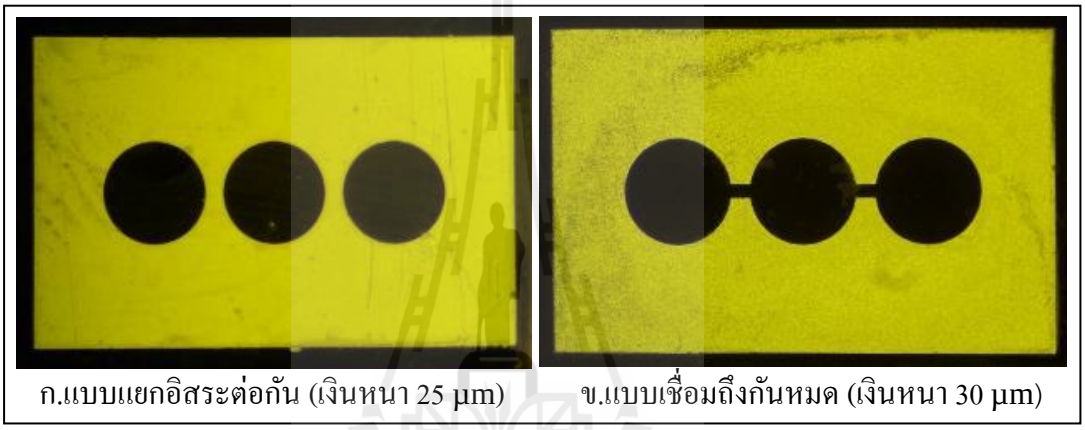
กระบวนการสร้างไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ เริ่มตั้งแต่กระบวนการออกแบบ การสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ การสร้างหน้ากากแข็ง การสร้างลวดลายผ่านหน้ากากแข็งและการเชื่อมสายสัญญาณกับอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นล้วนแล้วแต่เป็นขั้นตอนที่ยุ่งยาก ต่อไปจะเป็นการปรับเทียบเซนเซอร์และการทดสอบการควบคุมซึ่งจะกล่าวถึงในบทถัดไป

5.5 การสร้างห้องบรรจุของเหลว

สำหรับการสร้างห้องบรรจุของเหลว (Liquid chamber) หรือห้องเกิดปฏิกิยา (Reaction chamber) สำหรับเพิ่มปริมาณดีเอ็นเอ ใช้กระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอกซ์เช่นกัน โดยสร้างด้วยสารไวแสงชนิดลบ SU8 เป็นแม่พิมพ์ ซึ่งได้ทำโครงสร้างไว้รองรับการแตกตัวดีเอ็นเอ 2 รูปแบบคือ แบบแรกเป็นการสร้างห้องดีเอ็นเอแบบแยกอิสระโครงสร้างที่มีข้อดีคือสามารถควบคุม

อุณหภูมิสำหรับขยายตัวดีเอ็นเอได้ครั้งละ 1 ถึง 3 ตัวอย่างพร้อม ๆ กัน ส่วนแบบที่สองเป็นแบบห้องดีเอ็นเอเชื่อมถึงกันหมด มีข้อดีคือสามารถควบคุมอุณหภูมิสำหรับขยายตัวดีเอ็นเอได้ครั้งละจำนวนมาก และข้อดีของการมีชุดทำความร้อนถึงสามชุดคือ เมื่อตัวใดตัวหนึ่งเสียตัวที่เหลือจะยังคงทำงานทดแทนต่อได้

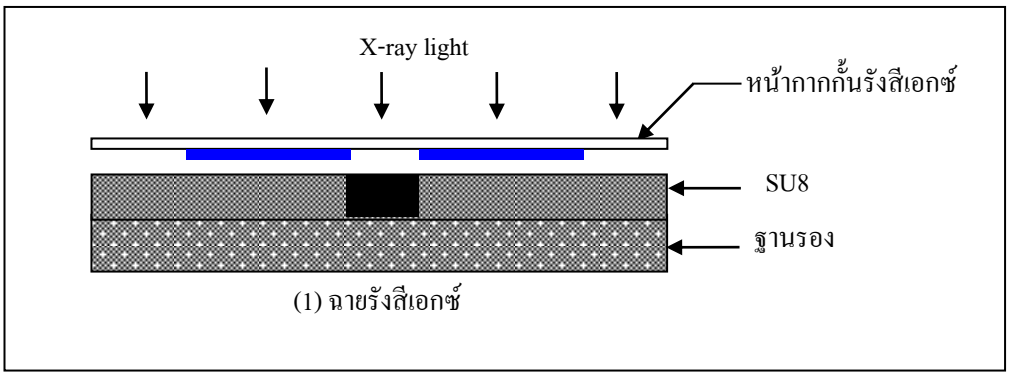
สำหรับหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ของห้องบรรจุของเหลวบรรจุของเหลวนั้นมีวัสดุดูดซับรังสีเอกซ์เป็นเงิน โดยใช้กระบวนการเดียวกับการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ของไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์ดังแสดงในรูปที่ 5.36



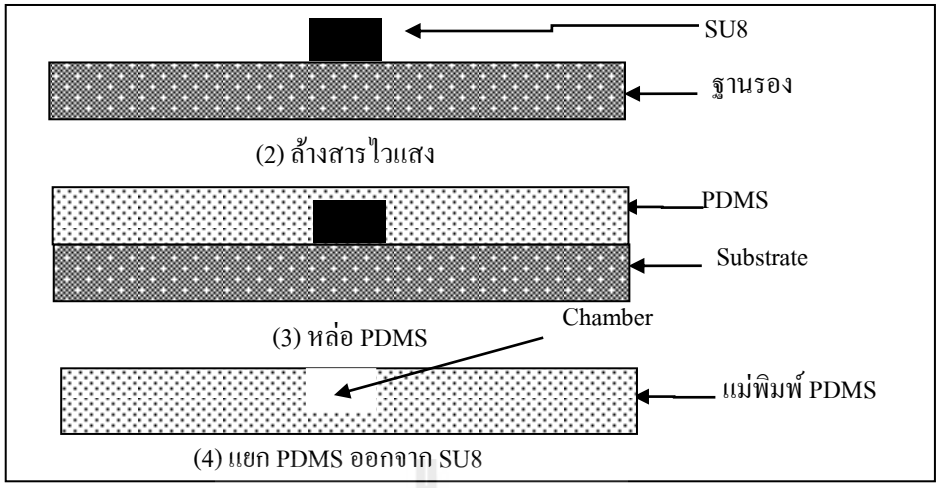
ก.แบบแยกอิสระต่อกัน (เงินหนา 25 µm) ข.แบบเชื่อมถึงกันหมด (เงินหนา 30 µm)

รูปที่ 5.36 หน้ากากดูดซับรังสีเอกซ์สำหรับสร้างห้องบรรจุของเหลว

เมื่อได้หน้ากากกั้นรังสีเอกซ์แล้วต่อมาเป็นการสร้างห้องบรรจุของเหลวซึ่งมีกระบวนการเป็นไปตามรูปที่ 5.37



รูปที่ 5.37 กระบวนการสร้างห้องบรรจุของเหลวและแม่พิมพ์

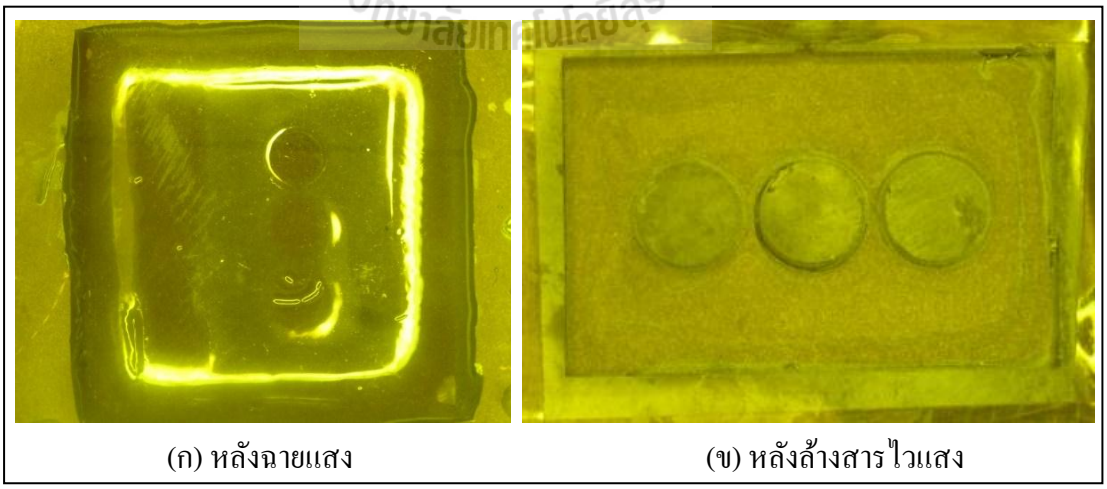


รูปที่ 5.37 กระบวนการสร้างห้องบรรจุของเหลวและแม่พิมพ์ (ต่อ)

จากกระบวนการสร้างห้องบรรจุของเหลวสามารถอธิบายได้ดังนี้

1.ฉายรังสีเอกซ์ผ่านหน้ากากดูซับรังสีลงบนสารไวแสงที่มีฐานรองเป็นแผ่นวงจรพิมพ์ (PCB) ที่ได้เตรียมเอาที่ความหนา 1,000 μm ถึง 1,500 μm ด้วยที่พลังงาน 5.0 J/cm^2

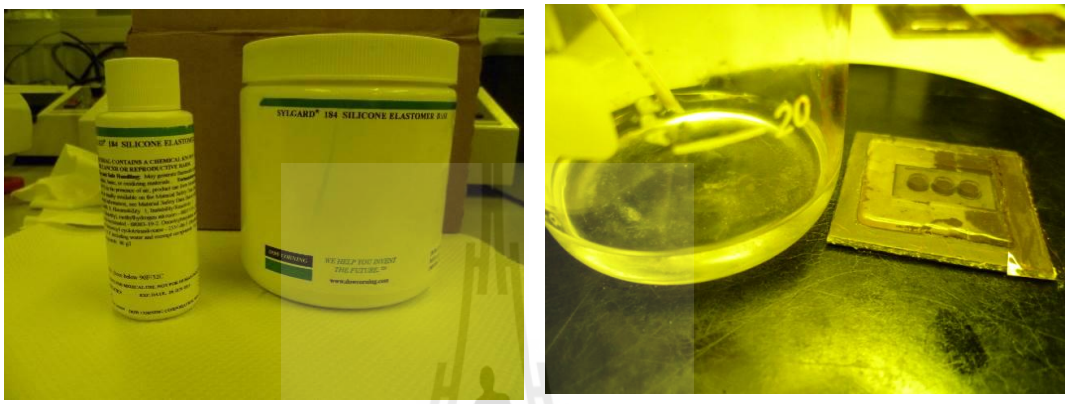
2.นำชิ้นงานอบบนแผ่นความร้อนที่อุณหภูมิ 60 $^{\circ}$C เป็นเวลา 45 นาที ปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้องแล้วล้างสารไวแสงโดยใช้น้ำยา SU8 ดีเวลอปเปอร์ ประมาณ 30 นาที จะได้แม่พิมพ์ SU8 ดังรูปที่ 5.38



(ก) หลังฉายแสง (ข) หลังล้างสารไวแสง

รูปที่ 5.38 แม่พิมพ์ SU8 หลังฉายแสงและล้างสารไวแสง

3.ผสม PDMS อัตราส่วนของ A:B เท่ากับ 10 :1 โดยน้ำหนัก แล้วนำไปดูดฟองอากาศด้วยปั๊มสุญญากาศเป็นเวลา 5 นาที ดังรูปที่ 5.39 (ก) จากนั้นเทลงแม่พิมพ์ SU8 แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 30 นาที ดังรูปที่ 5.39 (ข) สำหรับเทคนิคการกำหนดความหนาของผนังด้านของ PDMS นั้นได้ทำการสร้างขอบด้วยแผ่นเทป PI ติดที่ขอบก่อนที่จะทำการหล่อ

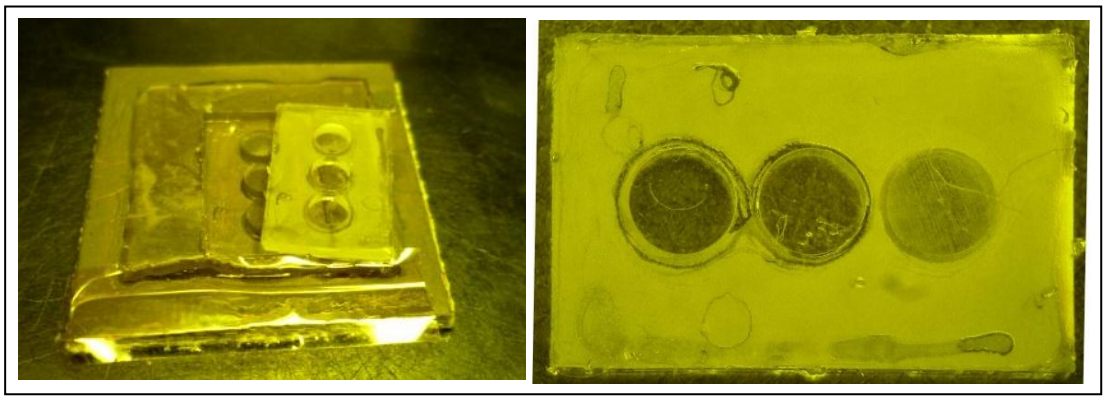


(ก) การผสม PDMS

(ข) หลังทำการอบให้ความร้อน PDMS

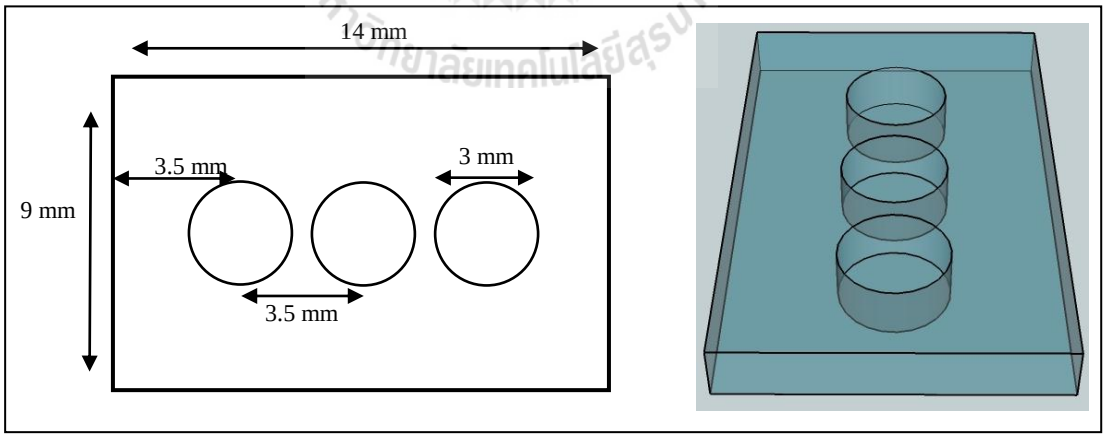
รูปที่ 5.39 การหล่อมแบบ PDMS ลงบนม่พิมพ์ SU8

4.ทำการลอก PDMS ออกจากแม่พิมพ์ SU8 ดังรูปที่ 5.40 เป็นอันสิ้นสุดกระบวนการสร้างห้องบรรจุของเหลว



รูปที่ 5.40 หลังทำการลอก PDMS ออกจกาแม่พิมพ์ SU8

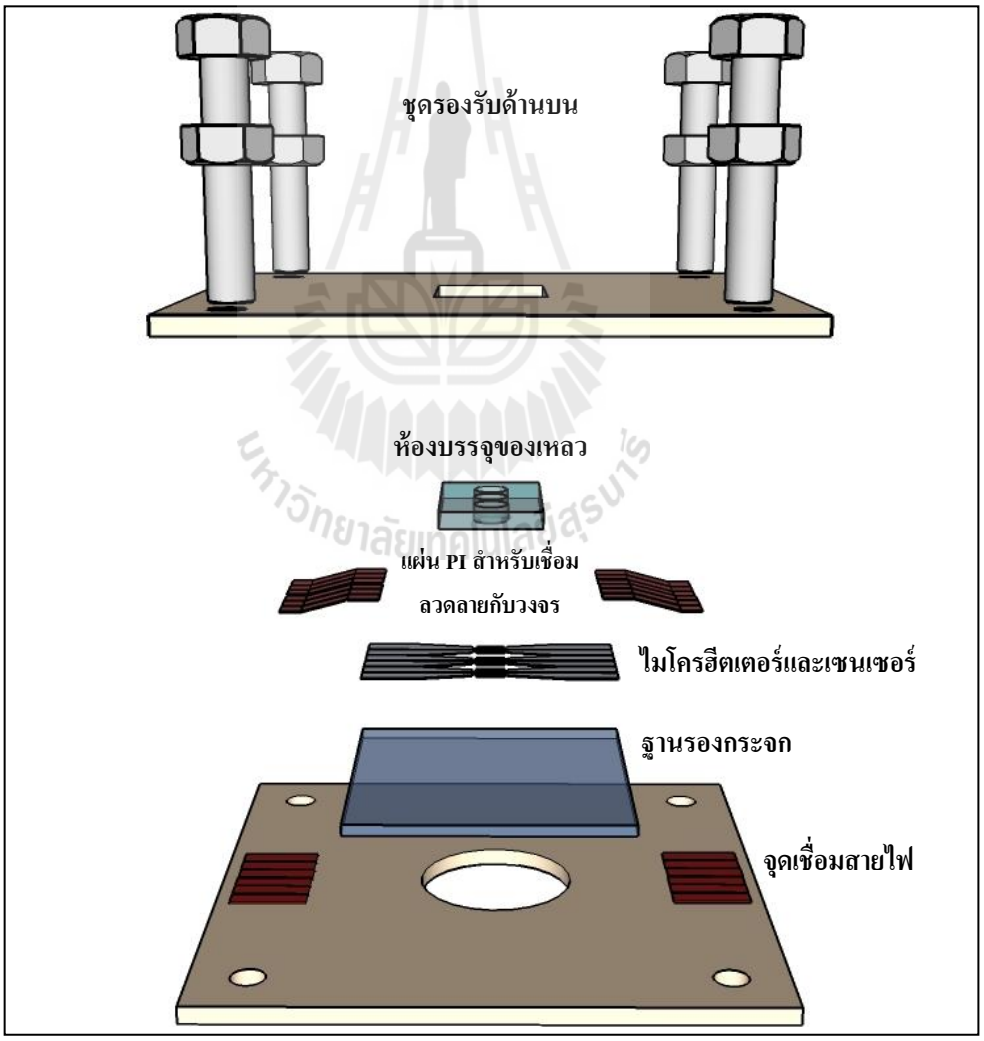
การออกแบบขนาดของห้องทำปฏิกิริยามีได้คำนึงถึงปริมาตรที่เหมาะกับการทำพีซีอาร์คือขนาด 5 μL จึงได้ทำการออกแบบเผื่อไว้อีก 1 เท่าตัว รวมเป็น 10 μL ต่อห้อง นอกจากนี้ยังคำนึงถึงขนาดความหนาที่สุดของ SU8 ที่สามารถสร้างด้วยรังสีเอกซ์คือ 1.5 mm ซึ่งเมื่อคำนวณจะได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 3.0 mm แต่ในการสร้างได้สร้างไว้ทั้งหมด 3 ห้องจึงสามารถบรรจุของเหลวได้สูงถึง 30 μL ดังรูปที่ 5.41 สำหรับห้องบรรจุของเหลวแบบที่มีช่องเชื่อมต่อกันนั้น ช่องว่างที่เชื่อมต่อมีขนาเท่ากับ 0.4 mm ยาว 0.5 mm จำนวน 2 ช่อง ทำให้มีปริมาตรเพิ่มขึ้นอีก 0.4 μL



รูปที่ 5.41 ขนาดโครงสร้างของห้องบรรจุของเหลว

5.6 บทสรุป

บทนี้เป็นกระบวนการสร้างและการพัฒนาลวดลายไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์ที่ได้จากกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอกซ์และห้องบรรจุของเหลว ได้แสดงให้เห็นถึงปัญหาและการแก้ไขปัญหาในรูปแบบต่าง ๆ เรื่อยมาจนกระทั่งได้ผลการสร้างที่สมบูรณ์ นอกจากนี้ยังแสดงการเปรียบเทียบถึงข้อดีและข้อเสียของวิธีที่แตกต่างกันและเมื่อนำชุดทำความร้อนที่มีไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์ ห้องบรรจุของเหลว และชุดรองรับจะได้โครงสร้างชุดหมุนเวียนความร้อนขนาดเล็กสำหรับของเหลวเป็นดังรูปที่ 5.42 ประกอบด้วย ชุดฐานรองรับสำหรับรองรับและยึดติดอุปกรณ์ ฐานรองกระจกทีมีไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์ แผ่น PI สำหรับเชื่อมต่อวงจรและห้องบรรจุของเหลว ในบทต่อไปจะเป็นการนำเสนอการทดสอบและการควบคุม



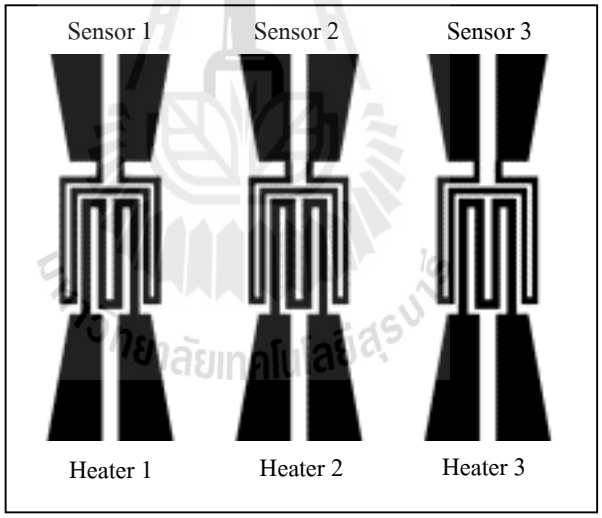
รูปที่ 5.42 ชุดทำความร้อนขนาดเล็กสำหรับของเหลวระดับไมโครลิตร

บทที่ 6
คุณลักษณะของไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ

หลังจากการสร้างลวดลายของชุดทำความร้อนที่ประกอบด้วยไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิด้วยกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอกซ์สิ้นสุดลง จนได้ชิ้นงานที่เสร็จสมบูรณ์ ต่อไปจะเป็นการนำเสนอการหาคุณสมบัติของชุดทำความร้อนที่สร้างขึ้น ดังจะได้กล่าวถึงต่อไปนี้

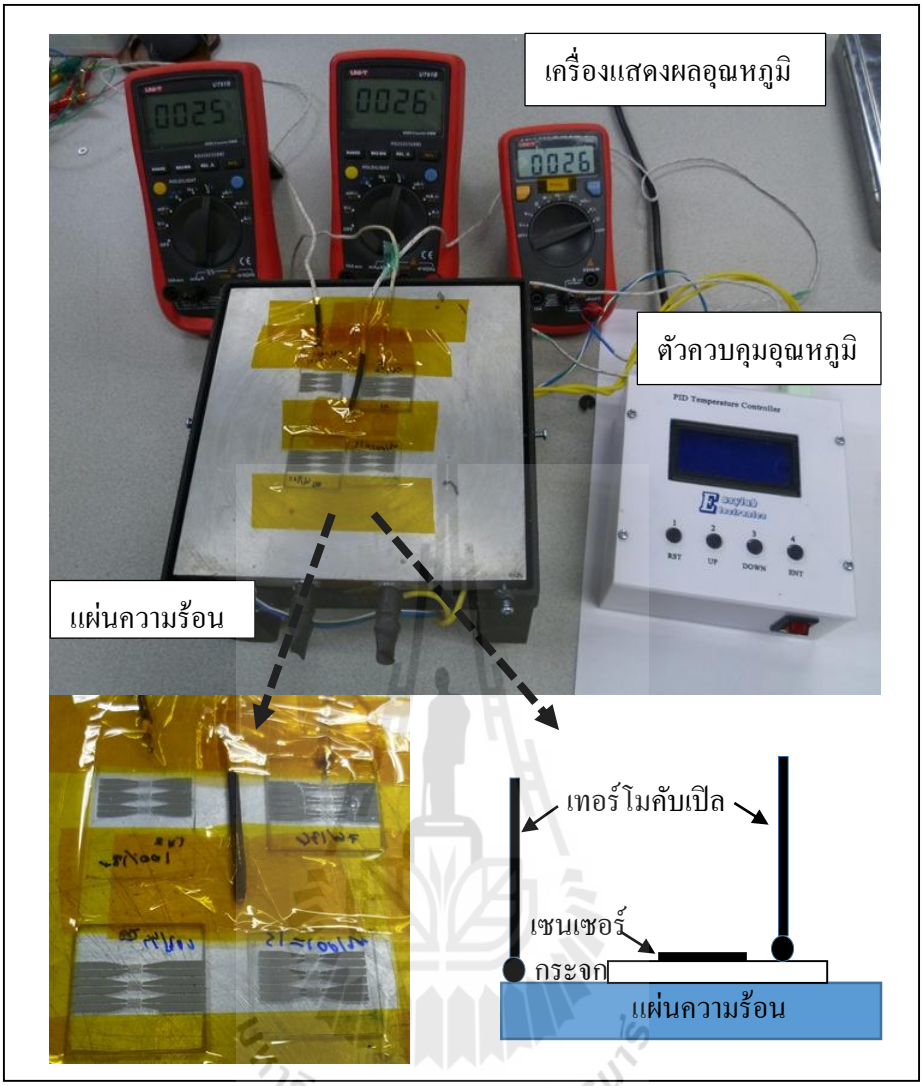
6.1 การปรับเทียบเซนเซอร์และคุณลักษณะของเซนเซอร์

ลวดลายของไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์ถูกสร้างขึ้นบนฐานรองกระจกหนา 1 mm และฐานรองกระจกบาง 0.15 mm โดยทำการจัดเรียงลำดับเป็นดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 การจัดเรียงไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์

การปรับเทียบเซนเซอร์เริ่มด้วยการนำชิ้นงานที่สร้างขึ้นวางบนแผ่นความร้อน (Hotplate) ดังรูปที่ 6.2 แล้วทำการเพิ่มและลดอุณหภูมิมที่ค่าต่าง ๆ โดยใช้เทอร์โมคับเปิลชนิด K (Accuracy ±2.5 %) เป็นมาตรฐานสำหรับปรับเทียบ ด้วยการติดตั้งไว้บนแผ่นความร้อนและฐานรองกระจกที่มีลวดลายของไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์ ทำการบันทึกค่าความต้านทาน โดยใช้ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (DMM) เป็นเครื่องมือวัดค่าความต้านทานโดยตรงจากเซนเซอร์



รูปที่ 6.2 การปรับเทียบเซนซอร์บนแผ่นความร้อน

เหตุผลสำหรับการปรับเทียบเซนเซอร์ที่ไม่ได้ปรับเทียบในเตาอบ เนื่องจากต้องนำไปประกอบกับชุดตัวรองรับ พร้อมกับเชื่อมต่อเข้ากับวงจร จะทำให้มีสายสัญญาณเข้าไปอยู่ในเตาอบด้วยซึ่งมีผลเสียคือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นสายไฟหรือสายสัญญาณที่เชื่อมกับวงจรจะเปลี่ยนแปลงความต้านทานไปด้วย แต่สามารถชดเชยความผิดพลาดได้ด้วยการหุ้มฉนวนความร้อน แต่ข้อเสียที่สำคัญที่สุดคือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ 70 ^{o}C เป็นต้นไป ชุดรองรับเซนเซอร์จะเกิดการคลายตัวเนื่องจากความร้อนตัว ทำให้จุดเชื่อมต่อระหว่างสายสัญญาณกับชิ้นงานแนบกันไม่สนิทจนไม่สามารถทำการวัดต่อไปได้เพราะค่าความต้านทานจะเกิดการผิดเพี้ยนอย่างมาก ซึ่งกลายเป็นการเปิดวงจรและหากทำการปรับให้ชุดรองรับนั้น แน่นเพิ่มขึ้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว จะเกิดการแตกหัก

หรือลวดลายเกิดการขีดข่วนเมื่ออุณหภูมิในเตาอบลดลง จึงหันมาใช้วิธีการปรับเทียบบนแผ่นความร้อนแทน

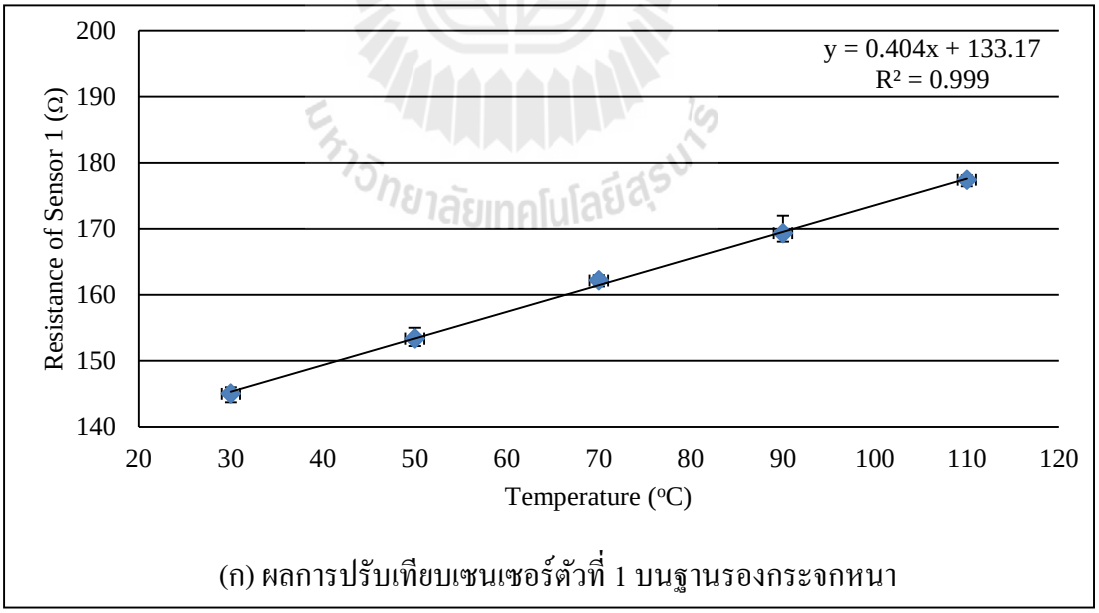
6.1.1 การปรับเทียบและคุณลักษณะเซนเซอร์บนฐานรองกระจกหนา (1 mm)

ผลการปรับเทียบของเซนเซอร์ทั้งสามตัวเป็นดังกราฟในรูปที่ 6.3 และได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับอุณหภูมิบนฐานรองกระจกหนาของเซนเซอร์ทั้ง 3 ตัว เป็นดังสมการที่ 6.1 ซึ่งสมการดังกล่าวยังบ่งบอกค่าความไว (Sensitivity : S) ในรูปของอัตราส่วนของค่าความต้านทานต่ออุณหภูมิ ($\Delta R/\Delta T$) หรือค่าความชั้นนั่นเองมีค่าเท่ากับ 0.404 $\Omega/^{o}C$ 0.383 $\Omega/^{o}C$ และ 0.393 $\Omega/^{o}C$ ตามลำดับ

$$\begin{aligned} R_{1,1} &= 0.404T + 133.17 \\ R_{1,2} &= 0.383T + 134.54 \\ R_{1,3} &= 0.393T + 137.38 \end{aligned} \qquad (6.1)$$

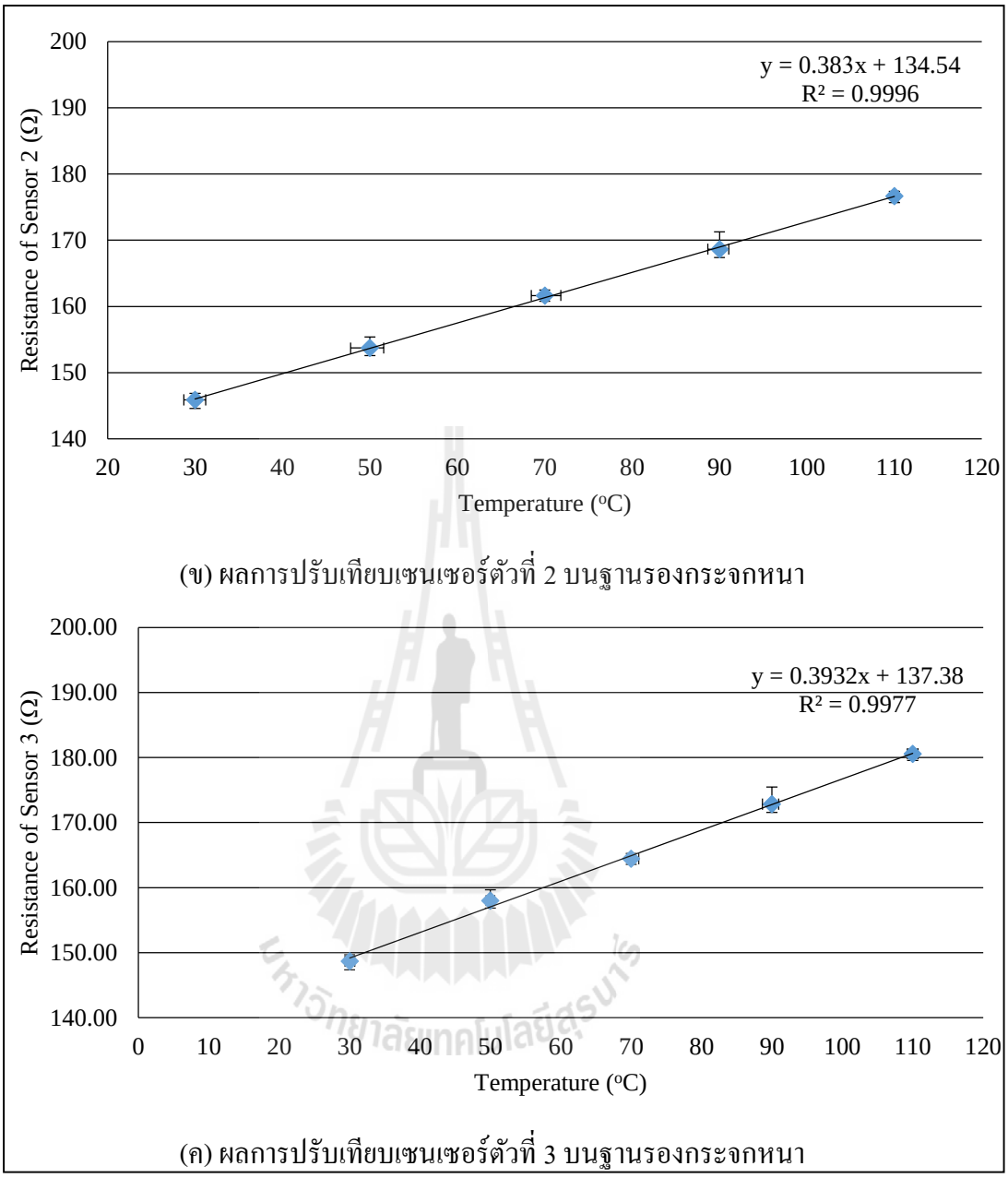
เมื่อ $R_{1,1}$ $R_{1,2}$ และ $R_{1,3}$ คือ ค่าความต้านทานของเซนเซอร์บนฐานรองกระจกหนา

T คือ อุณหภูมิ



(ก) ผลการปรับเทียบเซนเซอร์ตัวที่ 1 บนฐานรองกระจกหนา

รูปที่ 6.3 กราฟแสดงการปรับเทียบเซนเซอร์บนฐานรองกระจกหนา



(ข) ผลการปรับเทียบเซนเซอร์ตัวที่ 2 บนฐานรองกระจกหนา

(ค) ผลการปรับเทียบเซนเซอร์ตัวที่ 3 บนฐานรองกระจกหนา

รูปที่ 6.3 กราฟแสดงการปรับเทียบเซนเซอร์บนฐานรองกระจกหนา (ต่อ)

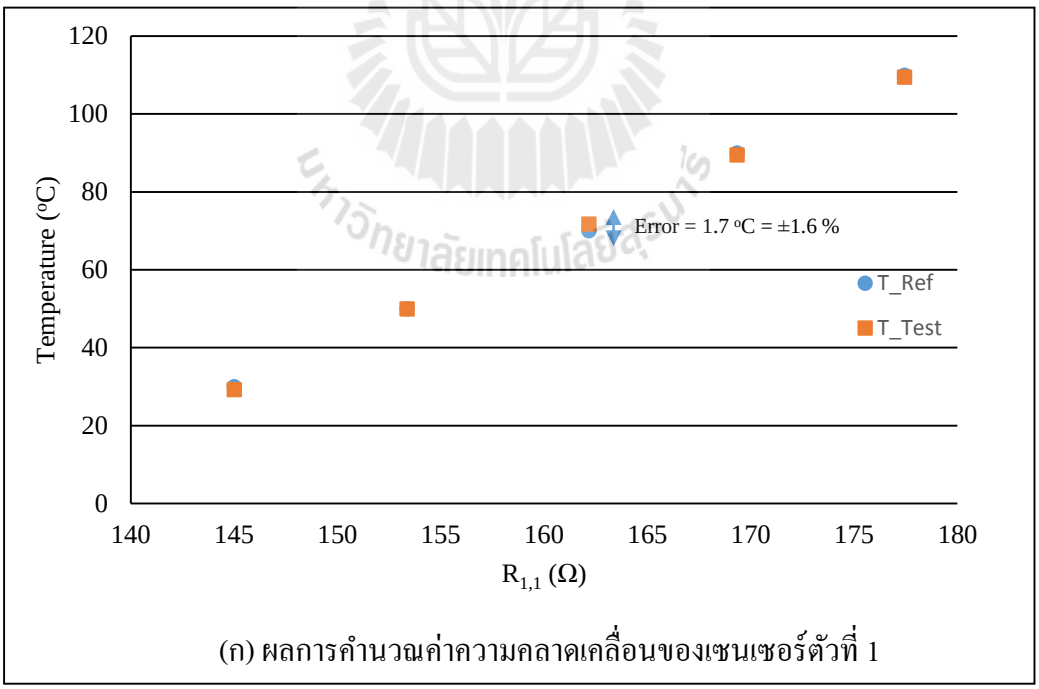
สำหรับการใช้งานในทางปฏิบัตินั้นจำเป็นต้องทราบค่าอุณหภูมิ ทำการปรับสมการที่ (6.1) ได้สมการใหม่ดังสมการที่ (6.2)

$$
\begin{aligned}
T_{1,1} &= \left(R_{1,1} - 133.17\right) / 0.404 \\
T_{1,2} &= \left(R_{1,2} - 134.54\right) / 0.383 \\
T_{1,3} &= \left(R_{1,3} - 137.38\right) / 0.393
\end{aligned}
\tag{6.2}
$$

เมื่อ $R_{1,1}$ $R_{1,2}$ และ $R_{1,3}$ คือ ค่าความต้านทานของเซนเซอร์บนฐานรองกระจกหนา

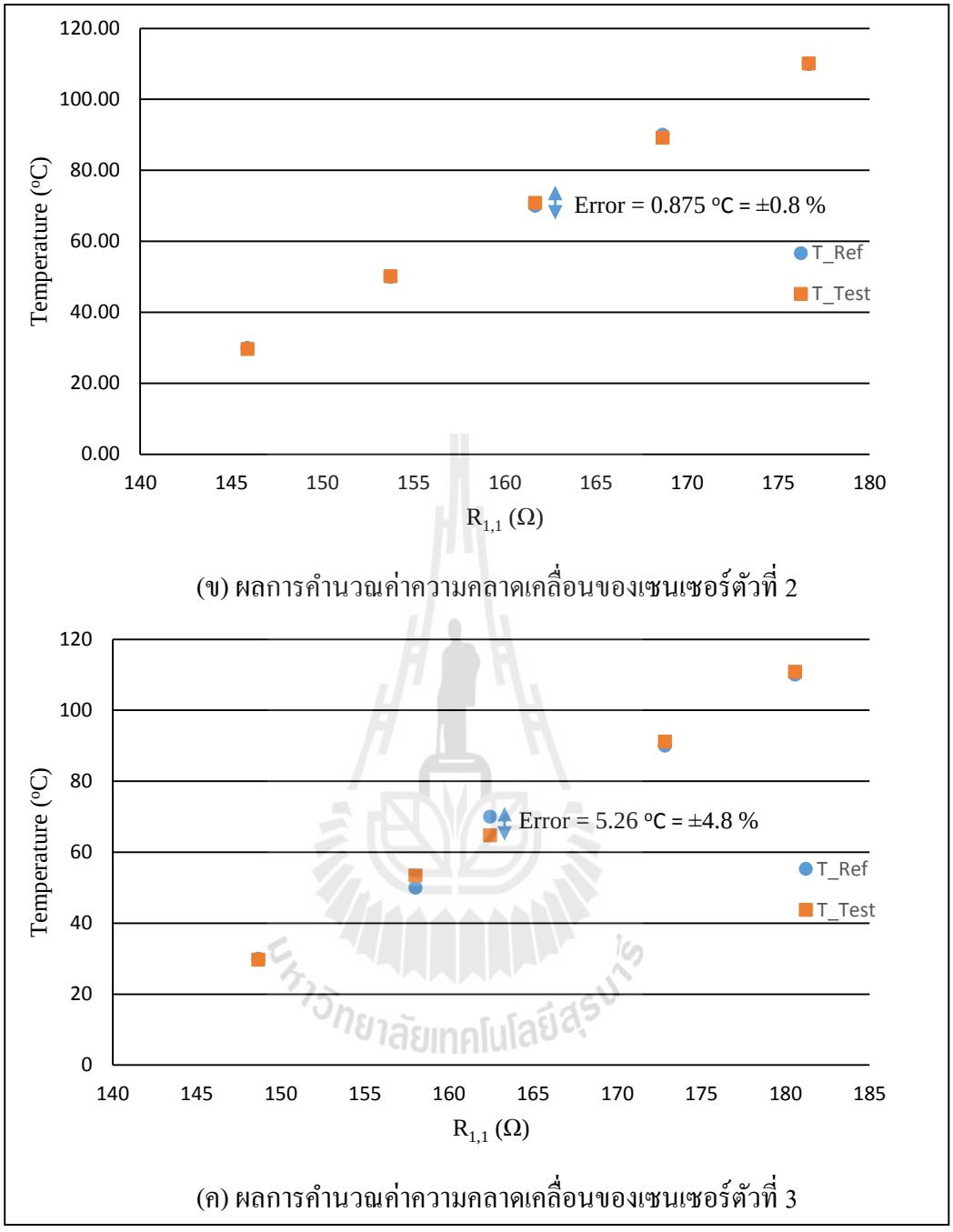
$T_{1,1}$ $T_{1,2}$ และ $T_{1,3}$ คือ อุณหภูมิของเซนเซอร์แต่ละตัว

เมื่อนำสมการที่ (6.2) มาวาดกราฟเทียบกับค่าอุณหภูมิจริงที่ได้จากการวัดเพื่อทดสอบหาค่าความแม่น (Accuracy) ซึ่งแสดงเป็นค่าเต็มสเกล (Full scale deflection : %FSD) ที่ 110°C โดยใช้ค่าจริง(T_Ref) และค่าคำนวณ (T_Test) ของเซนเซอร์วัดอุณหภูมิได้เป็นดังรูปที่ 6.4 มีค่าความแม่นเท่ากับ ±1.6 %FSD ±0.8 %FSD และ ±4.8 %FSD ตามลำดับ



(ก) ผลการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของเซนเซอร์ตัวที่ 1

รูปที่ 6.4 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของการปรับเทียบเซนเซอร์บนฐานรองกระจกหนา



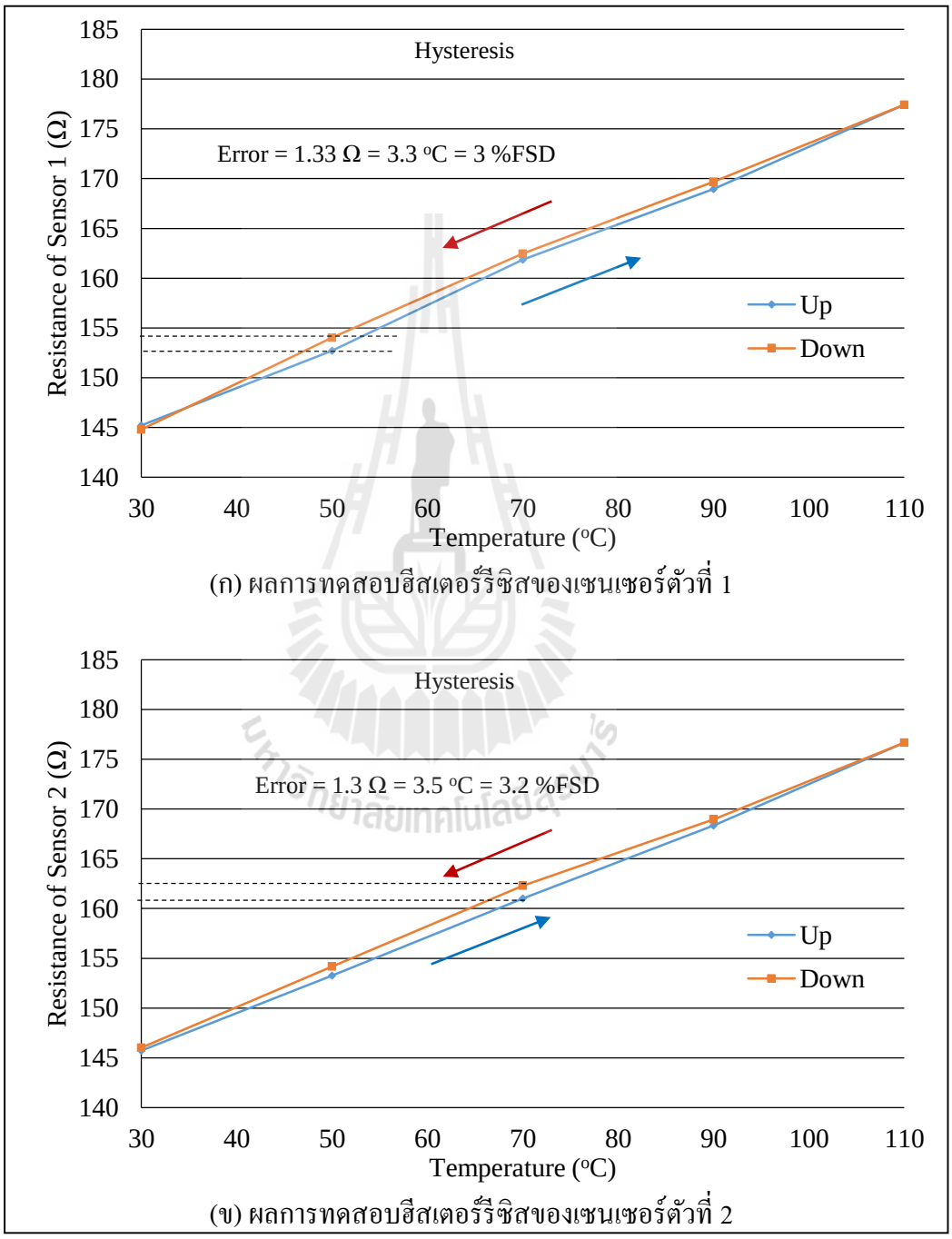
(ข) ผลการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของเซนเซอร์ตัวที่ 2

(ค) ผลการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของเซนเซอร์ตัวที่ 3

รูปที่ 6.4 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของการปรับเทียบเซนเซอร์บนฐานรองกระจกหนา (ต่อ)

นอกจากค่าความไวและความแม่นแล้ว ยังได้ทำการทดสอบคุณลักษณะของเซนเซอร์อีกอย่างหนึ่งคือการทดสอบ ฮีสเตอร์รีซิส (Hysteresis) ซึ่งเป็นการทดสอบค่าความผิดพลาดทางเอาต์พุตต่ออินพุตเมื่อทำการวัดในทิศทางที่ตรงข้าม ค่าที่แสดงออกมาจะเป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่อินพุตค่าเดิม โดยเลือกจากค่าที่มีขนาดมากที่สุด ในการทดสอบครั้งนี้ได้ทำการ

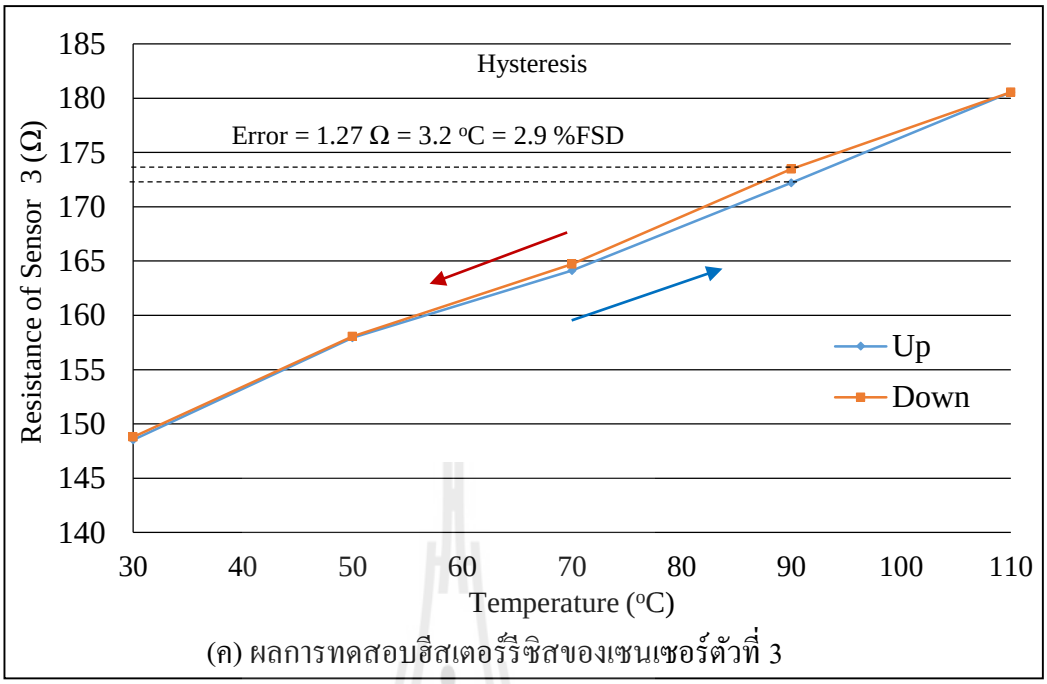
เพิ่มอุณหภูมิขึ้นจาก 30 °C ถึง 110 °C และลดจาก 110 °C ถึง 30 °C เป็นจำนวน 3 รอบแล้วหาค่าเฉลี่ย แล้วนำมาวาดกราฟได้ผลเป็นดังรูปที่ 6.5 โดยมีค่าความผิดพลาดฮีสเตอร์รีซิสของเซนเซอร์แต่ละตัวเท่ากับ ±3 %FSD ±3.2 %FSD และ ±2.9 %FSD ตามลำดับ



(ก) ผลการทดสอบฮีสเตอร์รีซิสของเซนเซอร์ตัวที่ 1

(ข) ผลการทดสอบฮีสเตอร์รีซิสของเซนเซอร์ตัวที่ 2

รูปที่ 6.5 ผลการทดสอบฮีสเตอร์รีซีสของชุดทำความร้อนบนฐานรองกระจกหนา



(ค) ผลการทดสอบฮีสเตอร์รีซิสของเซนเซอร์ตัวที่ 3

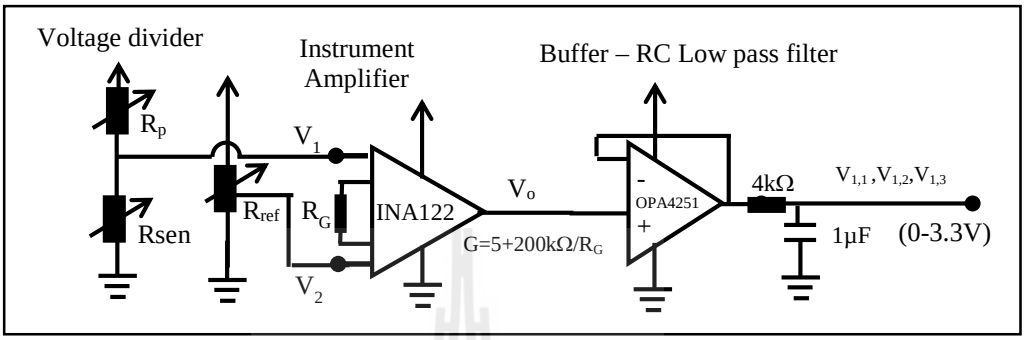
รูปที่ 6.5 ผลการทดสอบฮีสเตอร์รีซีสของชุดทำความร้อนบนฐานรองกระจกหนา (ต่อ)

ผลการปรับเทียบได้ค่าสามารถวัดค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานไฟฟ้า (Temperature coefficient of resistance : TCR) ค่าความไว (Sensitivity : s) ค่าความแม่น (%FSD) และค่าฮีสเตอร์รีซิส ที่ค่าเต็มสเกล 110 °C ที่ได้จากการสร้างบนฐานรองกระจกหนาเป็นดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 คุณสมบัติเซนเซอร์ของชุดทำความร้อนบนฐานรองกระจกหนา

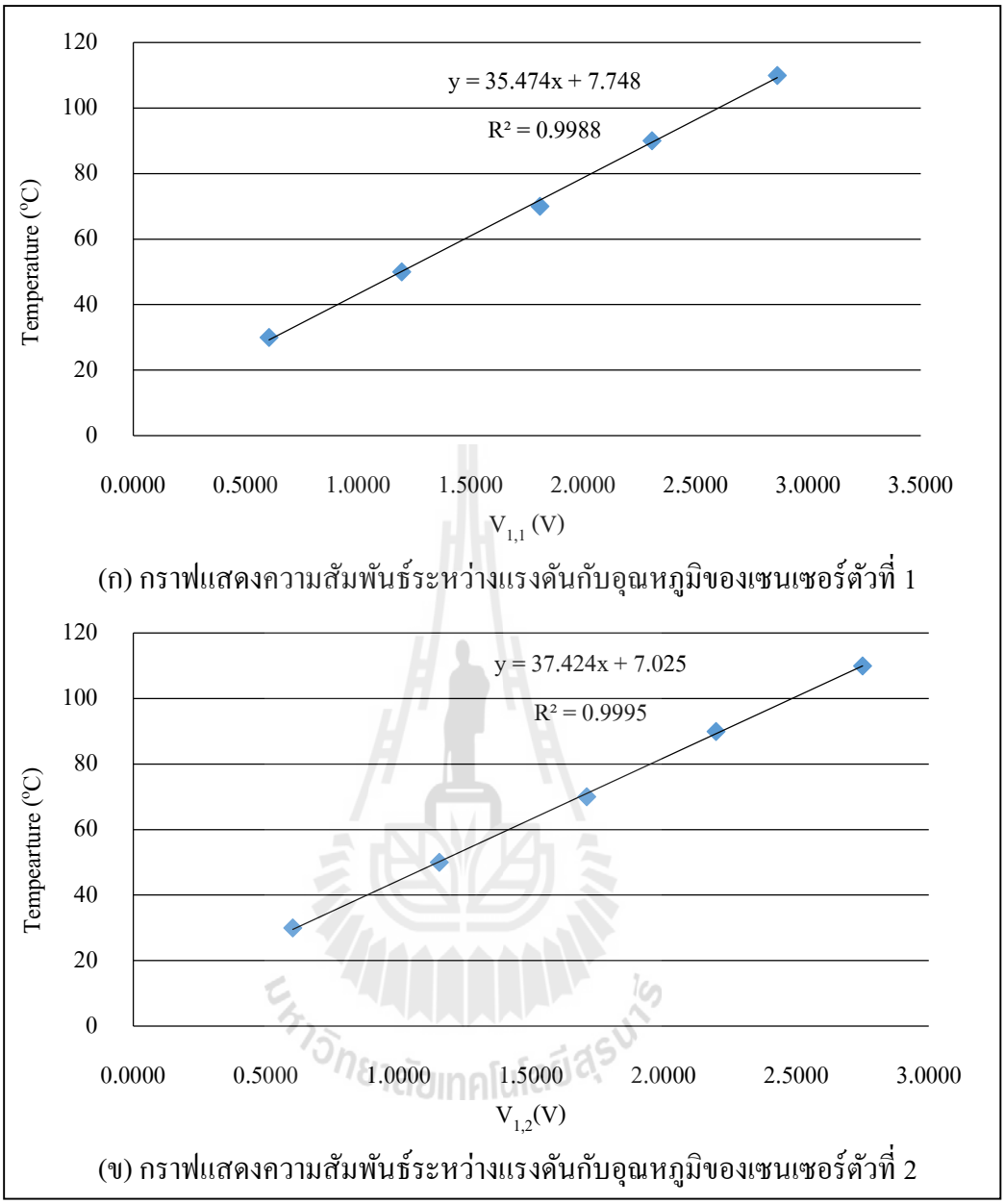
Sensor	TCR=(R-R_o)/(T-T_o)R_o (C^{-1})	Sensitivity (Ω/°C)	Accuracy (%FSD)	Hysteresis Error (%FSD)
Sensor 1	2.79×10^{-3}	0.404	±1.6	±3.0
Sensor 2	2.63×10^{-3}	0.383	±0.8	±3.2
Sensor 3	2.68×10^{-3}	0.393	±4.8	±2.9
Average	2.70×10^{-3}	0.396	±2.4	±3.0

ทำการออกแบบวงจรปรับแต่งสัญญาณเป็นดังรูปที่ 6.6 ซึ่งได้ใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้ (R_p) ทดแทนความต้านของเซนเซอร์ (R_{sen}) เพื่อแปลงเป็นแรงดันเอาต์พุตจากวงจรปรับแต่งสัญญาณที่ค่าความต้านทานของเซนเซอร์ที่ระดับต่าง ๆ



รูปที่ 6.6 วงจรปรับแต่งสัญญาณเซนเซอร์

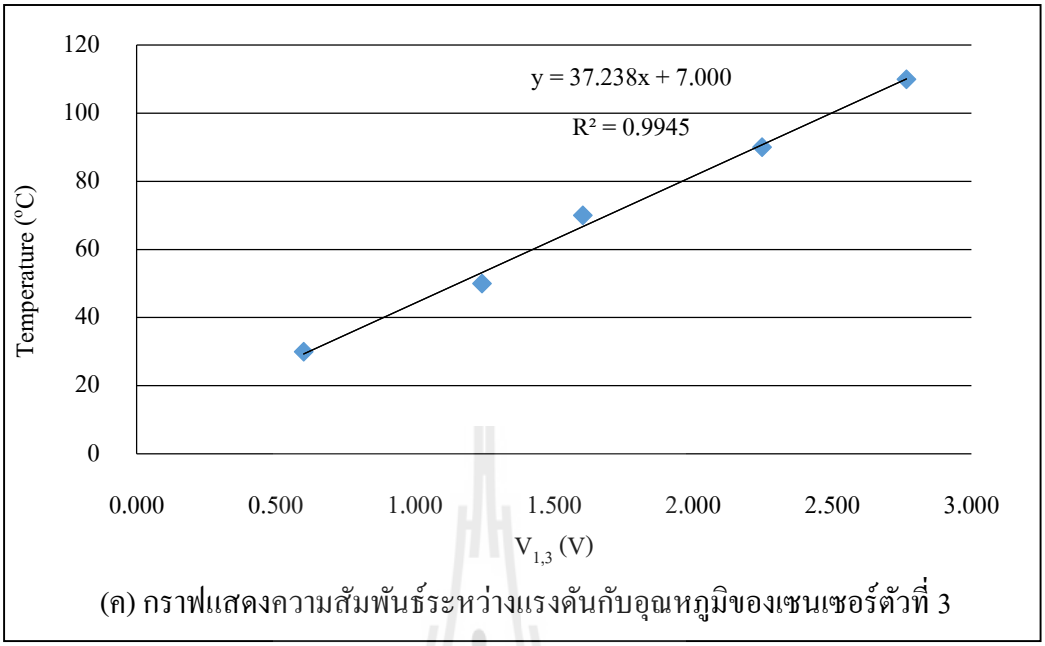
จากวงจรรูปที่ 6.6 แรงดันตกคร่อมที่ R_{sen} จะมีค่าเท่ากับ V_1 แรงดันที่ตกคร่อมค่าความต้านทานอ้างอิง (R_{ref}) เป็นแรงดันเท่ากับ V_2 สำหรับปรับระดับอ้างอิง (Reference voltage) เพื่อเข้าสู่วงจรขยายแบบอินสทรูเมนต์เบอร์ INA122 มีอัตราขยายเป็น $G = 5+200\ k\Omega/R_G$ เมื่อ R_G เท่ากับ 2 kΩ จะได้อัตราขยายเป็น 105 เท่า และมีแรงดันเอาต์พุต $V_o= G(V_1-V_2)$ เข้าสู่วงจรบัฟเฟอร์ด้วยไอซีเบอร์ OPA4251 กับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ดังนั้นแรงดันที่ออกจากวงจรปรับแต่งสัญญาณเซนเซอร์ (V_{out}) วัดอุณหภูมิจึงมีค่าใกล้เคียงกับ V_o ซึ่งได้ผลของการวัดแรงดัน V_{out} ทั้ง 3 ชุด ($V_{1,1}$,$V_{1,2}$,$V_{1,3}$) ดังกราฟในรูปที่ 6.7



(ก) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับอุณหภูมิของเซนเซอร์ตัวที่ 1

(ข) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับอุณหภูมิของเซนเซอร์ตัวที่ 2

รูปที่ 6.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับอุณหภูมิของเซนเซอร์บนฐานรองกระจกหนา



(ค) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับอุณหภูมิของเซนเซอร์ตัวที่ 3

รูปที่ 6.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับอุณหภูมิของเซนเซอร์บนฐานรองกระจกหนา (ต่อ)

จากรูปที่ 6.7 ได้ความสัมพันธ์ระหว่าแรงดันกับอุณหภูมิเป็นดังสมการที่ (6.3) ซึ่งสมการดังกล่าวมีค่าความไวเมื่อผ่านวงจรปรับแต่งสัญญาณเท่ากับ 0.028 V/°C 0.027 V/°C และ 0.027 V/°C

$$T_{1,1} = 35.474V_{1,1} + 7.748$$
$$T_{1,2} = 37.424V_{1,2} + 7.025 \qquad (6.3)$$
$$T_{1,3} = 37.238V_{1,3} + 7.000$$

เมื่อ $T_{1,1}$ $T_{1,2}$ และ $T_{1,3}$ คือ อุณหภูมิของเซนเซอร์แต่ละตัวบนฐานรองกระจกหนา

$V_{1,1}$ $V_{1,2}$ และ $V_{1,3}$ คือ แรงดันจากวงจรปรับแต่งสัญญาณเซนเซอร์แต่ละตัว

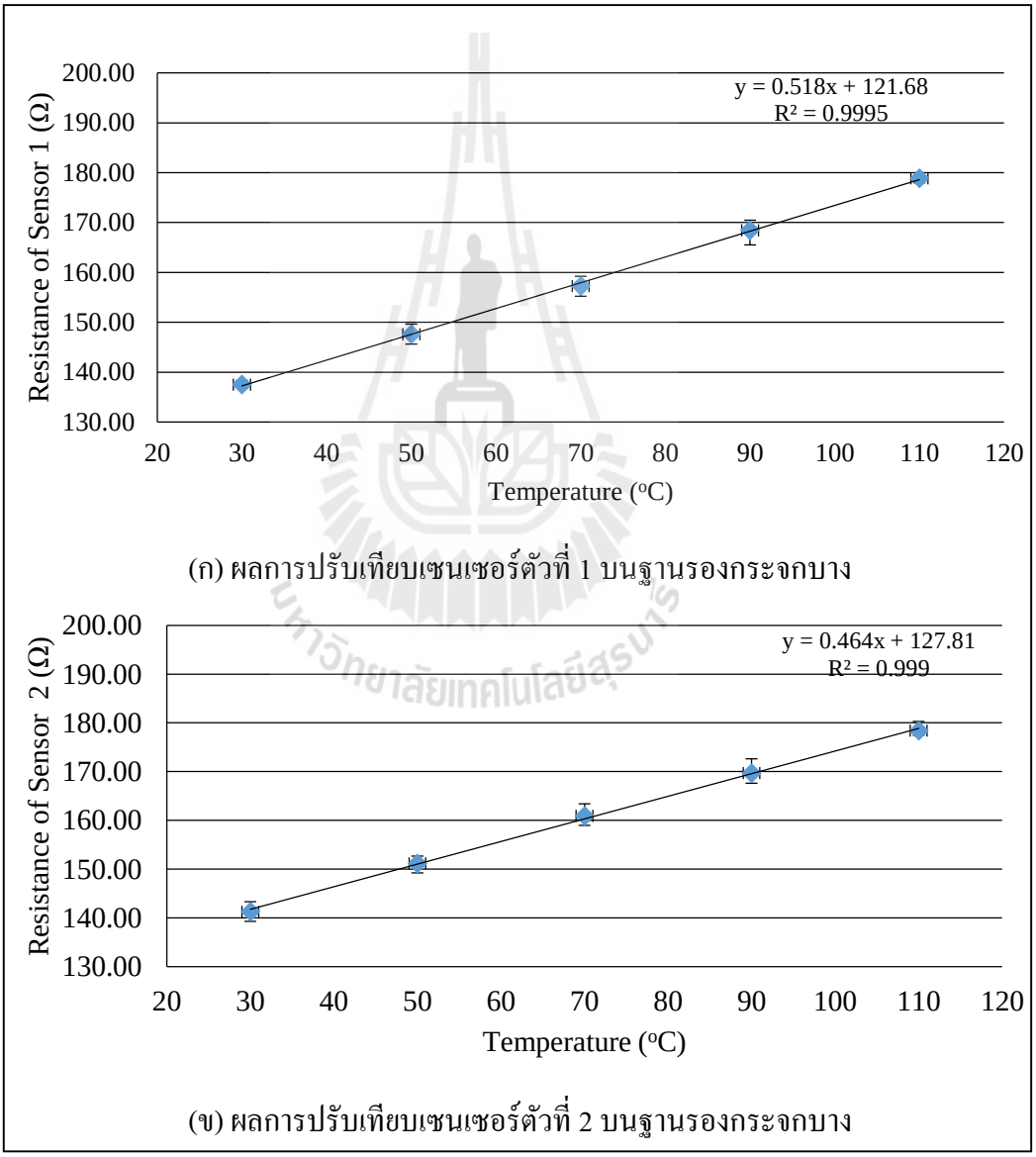
6.1.2 การปรับเทียบและคุณลักษณะเซนเซอร์บนฐานรองกระจกบาง (0.15 mm)

ได้ผลการปรับเทียบของเซนเซอร์เป็นดังรูปที่ 6.8 ได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับอุณหภูมิบนฐานรองกระจกบางของเซนเซอร์ทั้ง 3 ตัว มีค่าความไวเท่ากับ 0.518 Ω/°C 0.464 Ω/°C และ 0.474 Ω/°C เป็นดังสมการที่ 6.4

$$
\begin{aligned}
R_{2,1} &= 0.518T + 121.68 \\
R_{2,2} &= 0.464T + 127.81 \\
R_{2,3} &= 0.471T + 126.25
\end{aligned}
\qquad (6.4)
$$

เมื่อ $R_{2,1}$ $R_{2,2}$ และ $R_{2,3}$ คือ ค่าความต้านทานของเซนเซอร์บนฐานรองกระจกบาง

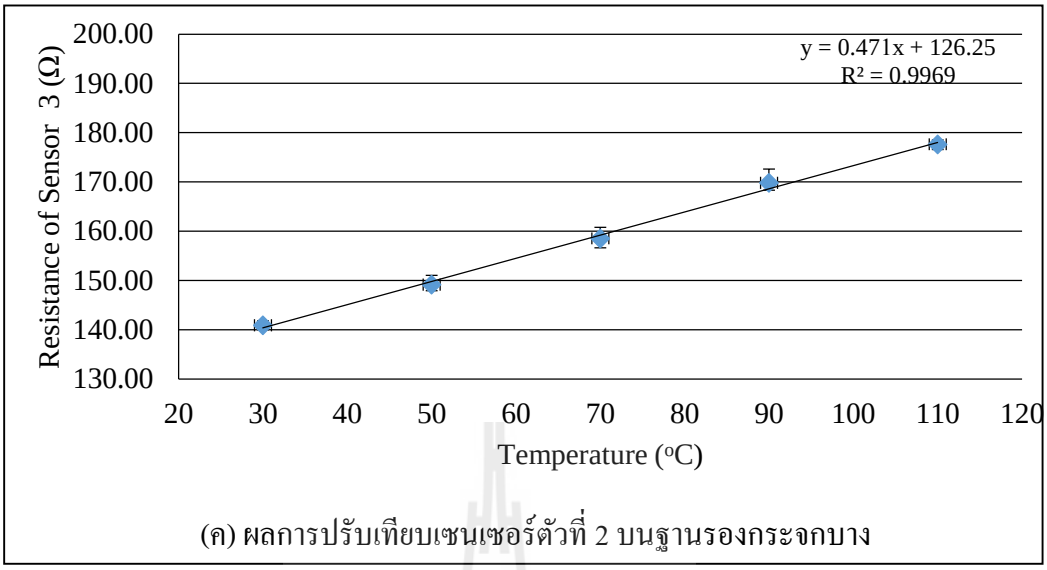
T คือ อุณหภูมิ



(ก) ผลการปรับเทียบเซนเซอร์ตัวที่ 1 บนฐานรองกระจกบาง

(ข) ผลการปรับเทียบเซนเซอร์ตัวที่ 2 บนฐานรองกระจกบาง

รูปที่ 6.8 กราฟแสดงการปรับเทียบเซนเซอร์บนฐานรองกระจกบาง



(ค) ผลการปรับเทียบเซนเซอร์ตัวที่ 2 บนฐานรองกระจกบาง

รูปที่ 6.8 กราฟแสดงการปรับเทียบเซนเซอร์บนฐานรองกระจกบาง (ต่อ)

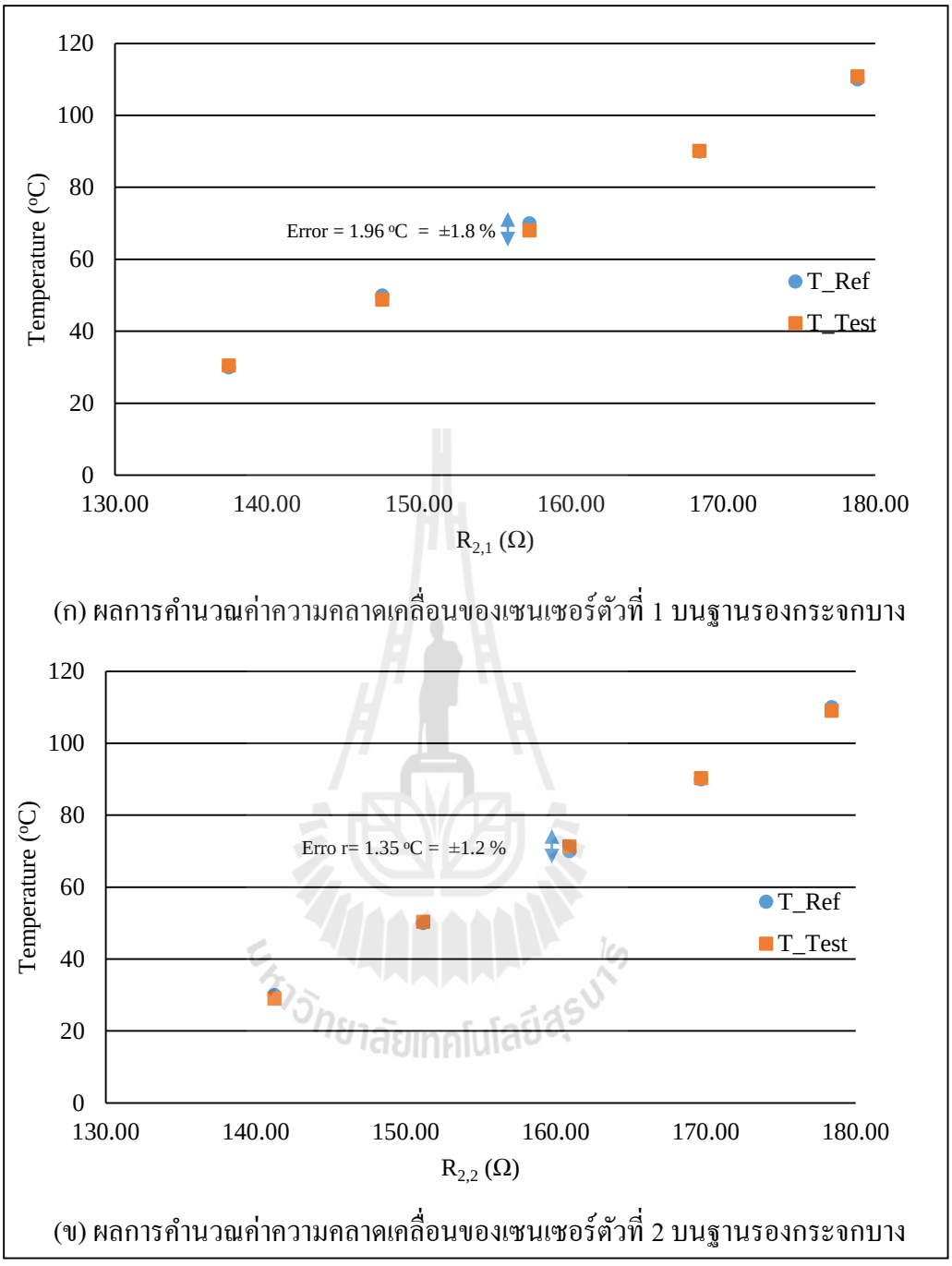
สำหรับการใช้งานในทางปฏิบัตินั้นจำเป็นต้องทราบค่าอุณหภูมิ ดังนั้นจากสมการที่ (6.4) ทำการปรับสมการใหม่ได้เป็น

$$\begin{aligned} T_{2,1} &= \left(R_{1,1} - 121.68\right)/0.517 \\ T_{2,2} &= \left(R_{1,2} - 127.81\right)/0.464 \\ T_{2,3} &= \left(R_{1,3} - 126.25\right)/0.471 \end{aligned} \tag{6.5}$$

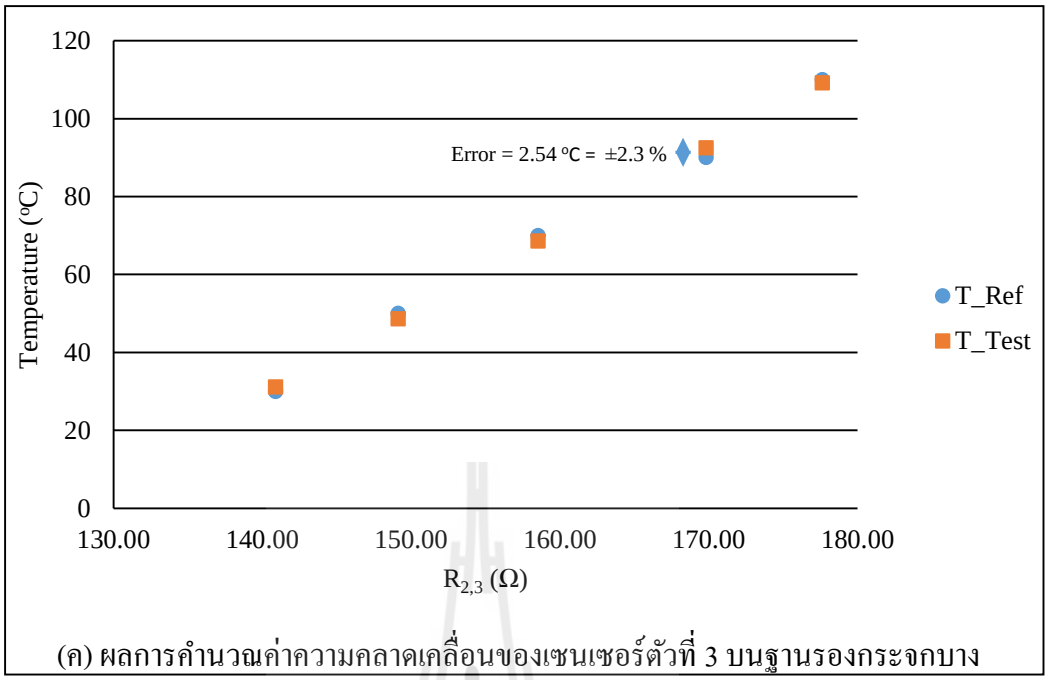
เมื่อ $R_{2,1}$ $R_{2,2}$ และ $R_{2,3}$ คือ ค่าความต้านทานของเซนเซอร์บนฐานรองกระจกบาง

$T_{2,1}$ $T_{2,2}$ และ $T_{2,3}$ คือ อุณหภูมิของเซนเซอร์แต่ละตัว

เมื่อนำสมการที่ (6.5) มาวาดกราฟเทียบกับค่าอุณหภูมิจริงที่ได้จากการวัดเพื่อทดสอบหาค่าความผิดพลาดของเซนเซอร์วัดอุณหภูมิบนฐานรองกระจกบาง สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.9 มีค่าความแม่นเท่ากับ ±1.8 %FSD ±1.2 %FSD และ ±2.3 %FSD ตามลำดับ



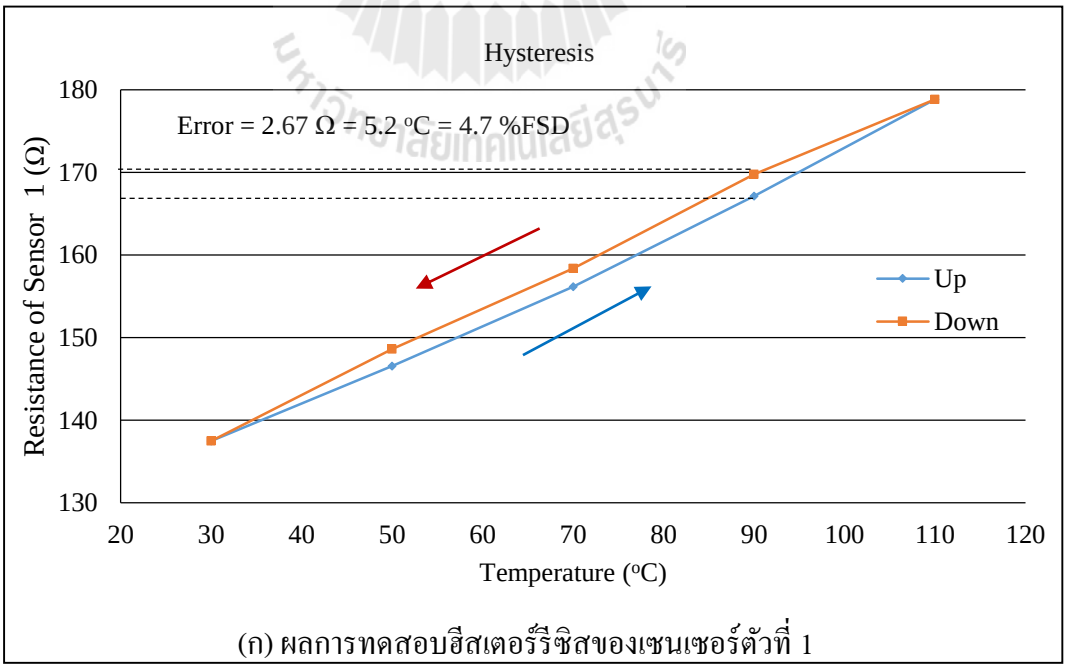
รูปที่ 6.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับอุณหภูมิของเซนเซอร์บนฐานรองกระจกบาง



(ค) ผลการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของเซนเซอร์ตัวที่ 3 บนฐานรองกระจกบาง

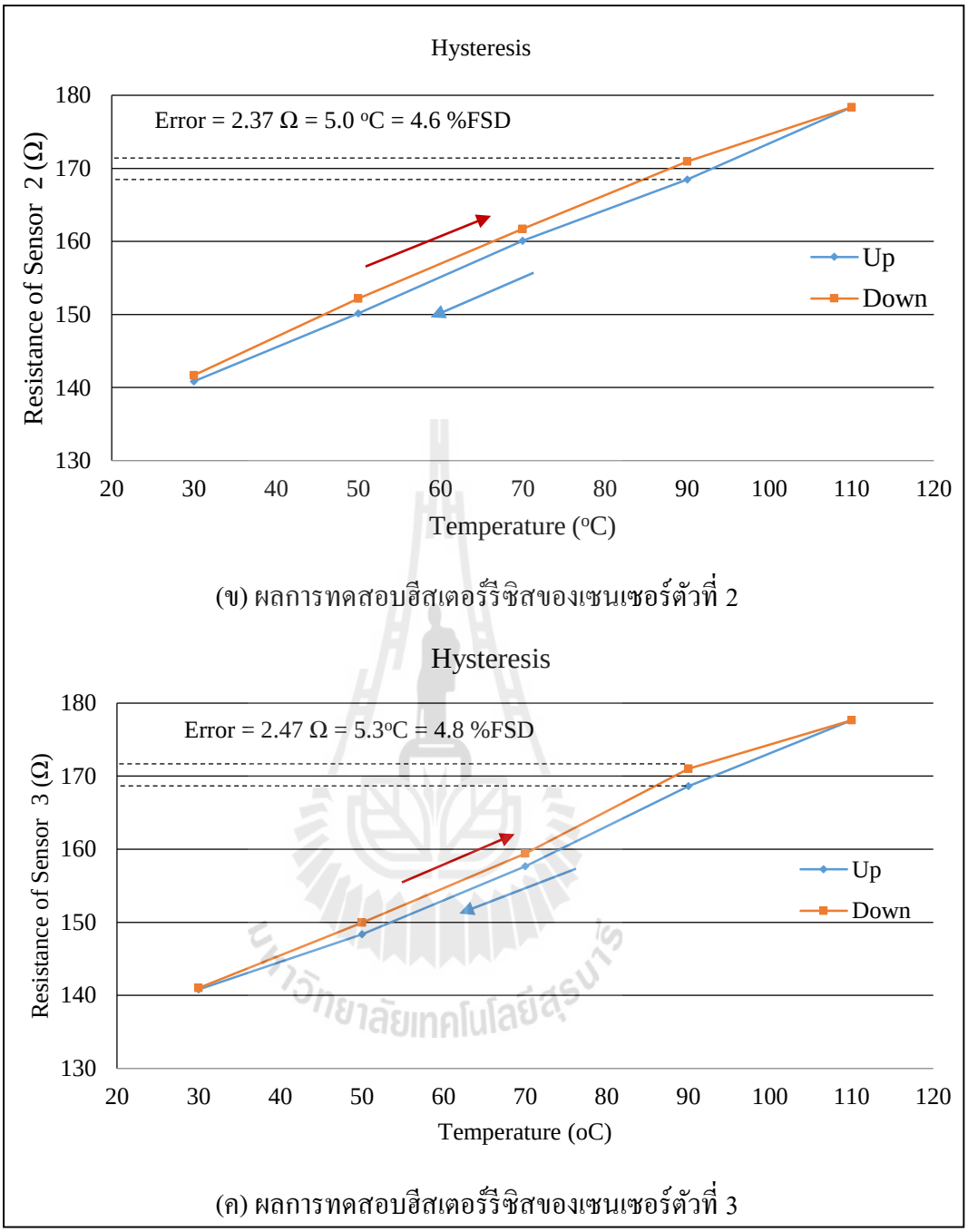
รูปที่ 6.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับอุณหภูมิของเซนเซอร์บนฐานรองกระจกบาง (ต่อ)

ค่าฮีสเตอร์รีซีสของชุดทำความร้อนบนฐานรองกระจกบางได้ผลเป็นดังรูปที่ 6.10



(ก) ผลการทดสอบฮีสเตอร์รีซิสของเซนเซอร์ตัวที่ 1

รูปที่ 6.10 ผลการทดสอบฮีสเตอร์รีซีสของชุดทำความร้อนบนฐานรองกระจกบาง



รูปที่ 6.10 ผลการทดสอบฮีสเตอร์รีซีสของชุดทำความร้อนบนฐานรองกระจกบาง (ต่อ)

ผลการปรับเทียบสามารถวัดค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทาน ค่าความไว ค่าความแม่น และค่าฮีสเตอร์รีซิสที่ได้จากการสร้างชุดทำความร้อนบนฐานรองกระจกบางเป็นดังตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 คุณสมบัติเซนเซอร์ของชุดทำความร้อนบนฐานรองกระจกบาง

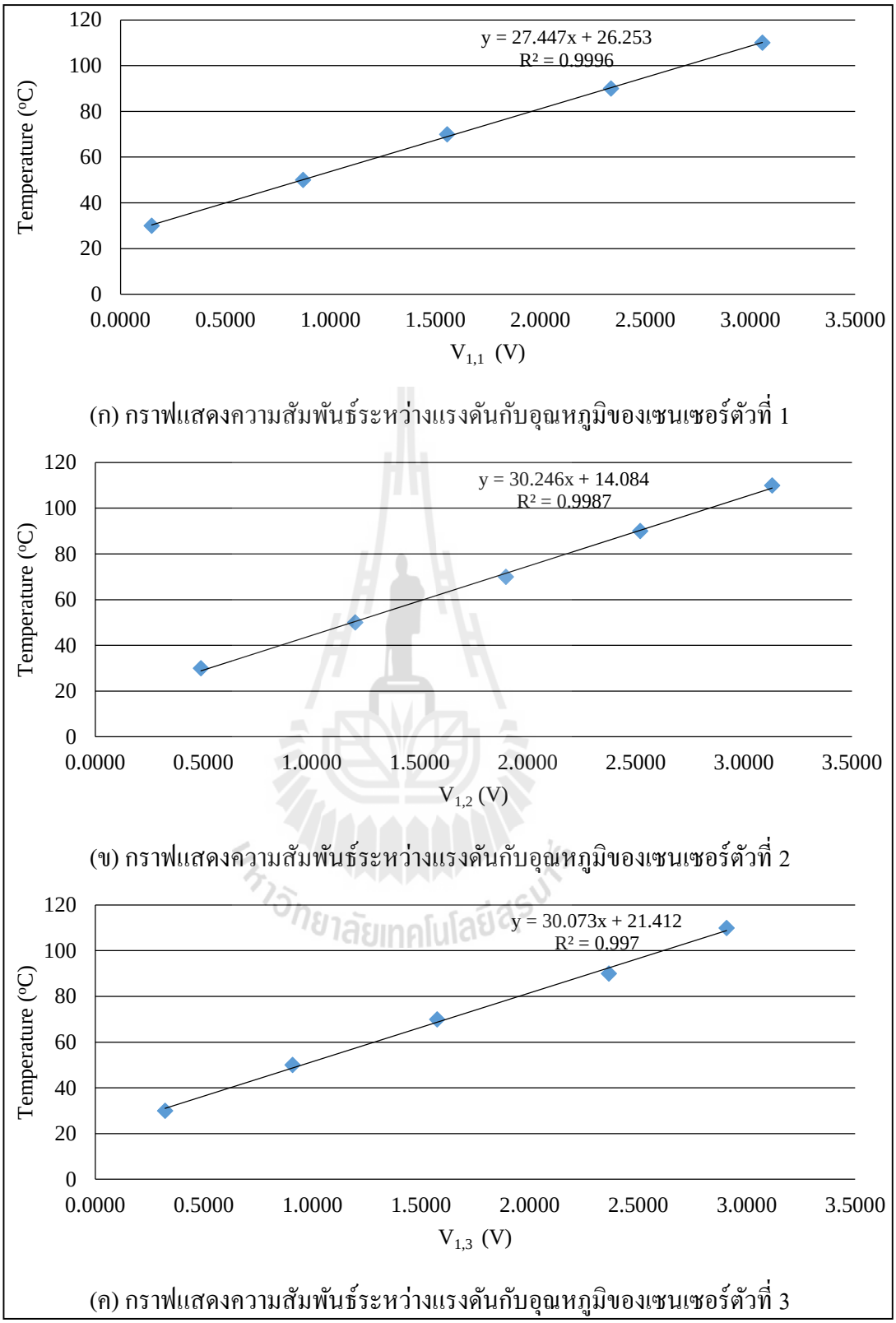
sensor	TCR=(R-R_o)/(T-T_o)R_o (C^{-1})	Sensitivity ($\Omega/^oC$)	Accuracy (%FSD)	Hysteresis error (%FSD)
Sensor 1	3.75×10^{-3}	0.518	±1.8	±4.7
Sensor 2	3.28×10^{-3}	0.464	±1.2	±4.6
Sensor 3	3.26×10^{-3}	0.470	±2.3	±4.8
Average	3.430×10^{-3}	0.479	±1.77	±4.7

สำหรับวงจรปรับแต่งสัญญาณและวงจรขับยังคงเป็นวงจรเดิม ได้ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับแรงดันจากวงจรปรับแต่งสัญญาณเป็นดังรูปที่ 6.11 ได้ความสัมพันธ์เป็นดังสมการ ซึ่งสมการดังกล่าวมีค่าความไวเมื่อผ่านวงจรปรับแต่งสัญญาณเท่ากับ 0.036 $V/^oC$ 0.033 $V/^oC$ และ 0.033 $V/^oC$

$$\begin{aligned} T_{2,1} &= 27.447V_{2,1} + 26.253 \\ T_{2,2} &= 30.246V_{2,2} + 14.084 \\ T_{2,3} &= 30.073V_{2,3} + 21.412 \end{aligned} \qquad (6.6)$$

เมื่อ $T_{2,1}$ $T_{2,2}$ และ $T_{2,3}$ คือ อุณหภูมิของเซนเซอร์แต่ละตัวบนฐานรองกระจกบาง

$V_{2,1}V_{2,2}$ และ $V_{2,3}$ คือ แรงดันจากวงจรปรับแต่งสัญญาณเซนเซอร์แต่ละตัว



(ก) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับอุณหภูมิของเซนเซอร์ตัวที่ 1

(ข) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับอุณหภูมิของเซนเซอร์ตัวที่ 2

(ค) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับอุณหภูมิของเซนเซอร์ตัวที่ 3

รูปที่ 6.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับอุณหภูมิของเซนเซอร์บนฐานรองกระจกบาง

6.1.3 สรุปคุณสมบัติของเซนเซอร์

หลังจากทำการปรับเทียบพร้อมกับหาคุณสมบัติต่าง ๆ ของเซนเซอร์แล้วสามารถสรุปข้อมูลต่าง ๆ ของเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นทั้งบนฐานรองกระจกหนาและฐานรองกระจกบางได้ดังตารางที่ 6.3

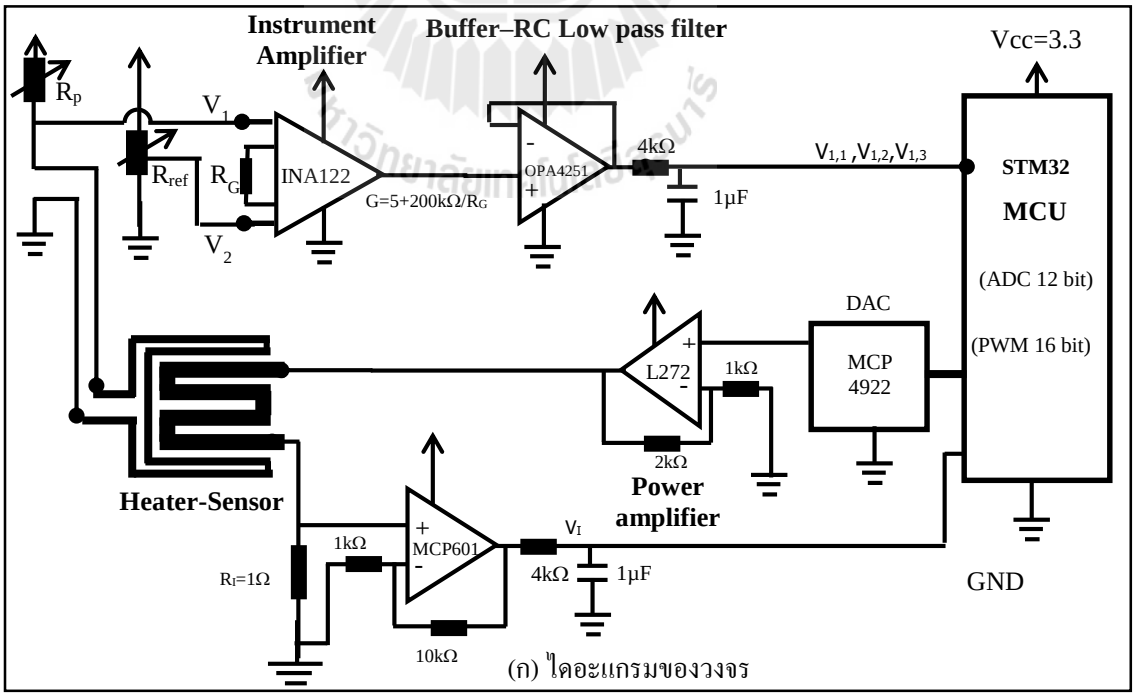
ตารางที่ 6.3 สรุปคุณสมบัติของเซนเซอร์ที่ได้จากการสร้าง

Characteristic	Number of sensor	Set1 : Thick glass (1 mm)	Set2 : Thin glass (0.15 mm)
Accuracy (%FSD)	Sensor#1	±1.6	±1.8
	Sensor#2	±0.8	±1.2
	Sensor#3	±4.8	±2.3
	Average	±2.4	±1.8
Hysteresis error (%FSD)	Sensor#1	±3.0	±4.7
	Sensor#2	±3.2	±4.6
	Sensor#3	±2.9	±4.8
	Average	±3.0	±4.7
Sensitivity (S) ($\Omega/^{o}C$)	Sensor#1	0.404	0.518
	Sensor#2	0.383	0.464
	Sensor#3	0.393	0.470
	Average	0.396	0.479
Sensitivity (S) ($V/^{o}C$)	Sensor#1	0.028	0.036
	Sensor#2	0.027	0.033
	Sensor#3	0.027	0.033
	Average	0.027	0.034
Thermal coefficient of resistance (TCR) (^{-1}C)	Sensor#1	2.79×10^{-3}	3.75×10^{-3}
	Sensor#2	2.63×10^{-3}	3.28×10^{-3}
	Sensor#3	2.68×10^{-3}	3.26×10^{-3}
	Average	2.70×10^{-3}	3.43×10^{-3}

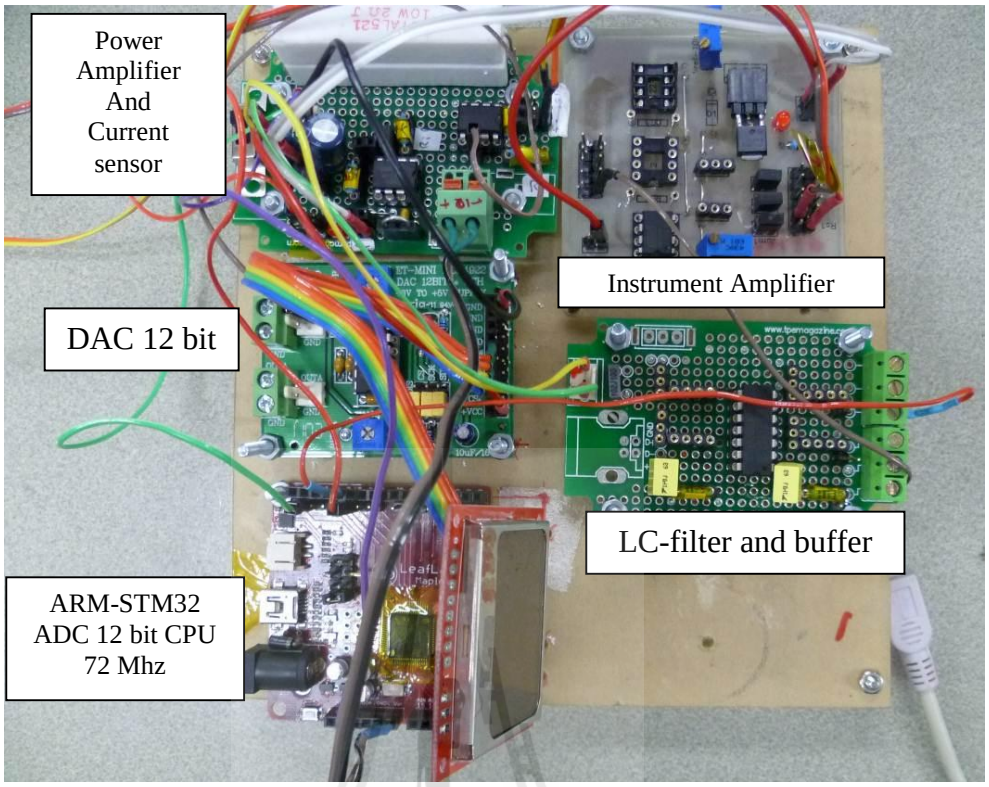
โดยทั่วไปแล้วเซนเซอร์ที่เป็นลักษณะมีค่าความต้านทานแปรผันตามอุณหภูมิ (Resistance Temperature Detector : RTD) ผู้ผลิตในเชิงพาณิชย์จะให้เฉพาะข้อมูลสำคัญ ได้แก่ ค่าความต้านทานเริ่มต้น ค่า TCR และค่าความแม่น หรือบอกเป็นผลการปรับเทียบระหว่างค่าความต้านทานกับอุณหภูมิออกมาเป็นตารางปรับเทียบ ซึ่งข้อมูลดังกล่าวเพียงพอต่อการงานโดยจะทำการปรับแต่งสัญญาณก่อนนำไปใช้จริง

6.2 การหาผลตอบสนองทางเวลาของชุดทำความร้อน

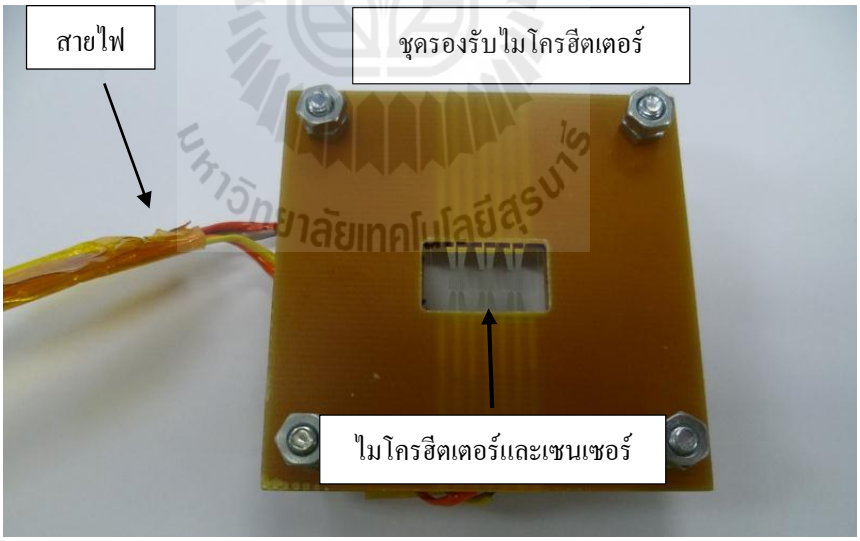
สำหรับการหาผลตอบสนองทางเวลา (Response time) ของชุดทำความร้อนได้แก่ ค่าคงตัวทางเวลา (Time constants : τ) เวลาขาขึ้น (Rise time : T_r) เวลาขาลง (Fall Time : T_f) และเวลาเข้าสู่สถานะอยู่ตัว (Setting time : T_s) จะทำการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างชุดทำความร้อนบนฐานรองกระจกหนาและกระจกบาง ได้นำวงจรปรับแต่งสัญญาณเซนเซอร์ จากรูปที่ 6.5 มาทำการปรับปรุง เพื่อทำการทดสอบคุณลักษณะต่าง ๆ เพื่อหาผลตอบสนองทางเวลาตามวงจรประกอบไปด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์ วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะลอก (Digital to analog converter : DAC) วงขยายกำลัง (Power amplifier) เพื่อศึกษาผลของกำลังที่ป้อนต่ออุณหภูมิของไมโครฮีตเตอร์ ดังรูปที่ 6.12



รูปที่ 6.12 วงจรสำหรับทดสอบผลตอบสนองทางเวลาโดยใช้ DAC



(ข) วงจรสำหรับการวัดและควบคุมโดยใช้ DAC



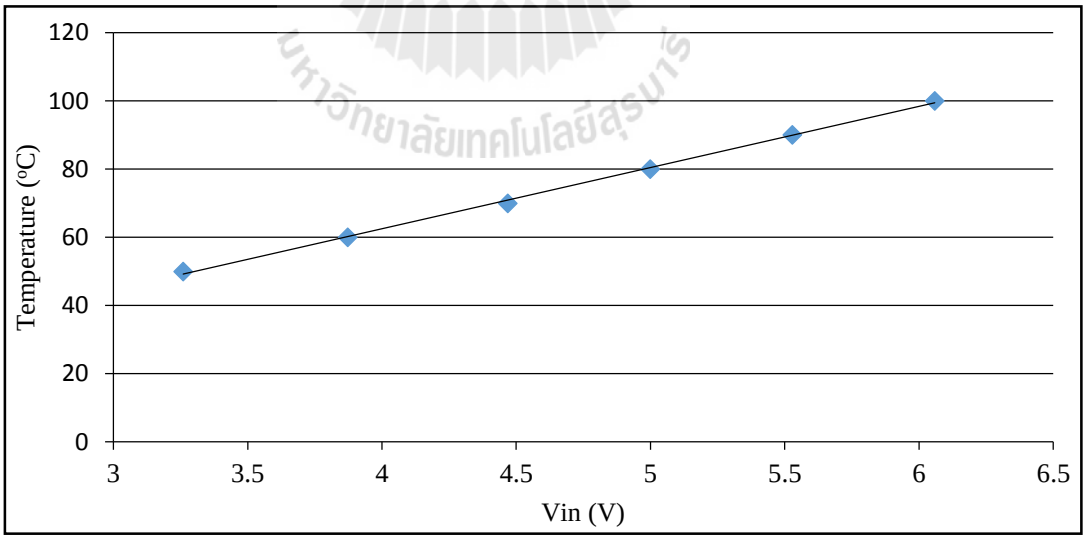
(ค) ประกอบไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์เข้ากับชุดรองรับ

รูปที่ 6.12 วงจรสำหรับทดสอบผลตอบสนองทางเวลาโดยใช้ DAC (ต่อ)

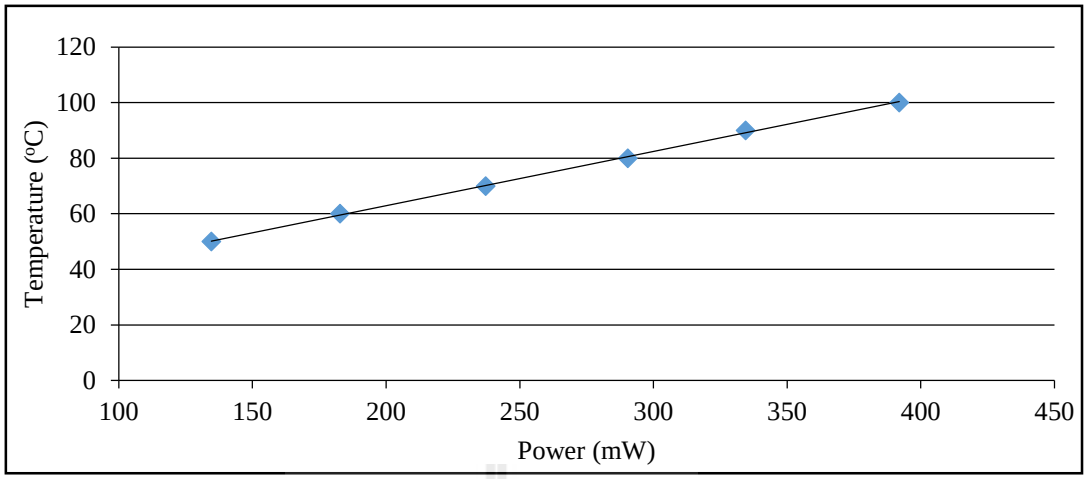
จากรูปวงจรในรูปที่ 6.10 สามารถอธิบายรายละเอียดดังนี้ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำหน้าที่เป็นตัวส่งสัญญาณดิจิตอลเข้าสู่ DAC ขนาด 12 bit ด้วยไอซีเบอร์ MCP4922 เพื่อแปลงเป็นระดับแรงดันที่มีขนาดตั้งแต่ 0 ถึง 3 V เข้าสู่วงจรขยายกำลัง 3 เท่า ด้วยออปแอมป์เบอร์ L272 จะได้แรงดันออกมา 0 ถึง 9 V จากนั้นจะนำไปขับโหลดที่เป็นไมโครฮีตเตอร์ ซึ่งได้ทำการต่อความต้านทาน (R_l) 1 Ω สำหรับตรวจจับกระแสที่ไหลผ่านโหลดซึ่งจะออกมาเป็นแรงดันแล้วผ่านวงจรขยาย (Amplifier) ขนาด 11 เท่าด้วยออปแอมป์เบอร์ MCP601 ที่เชื่อมต่อกับวงจรกรองความถี่แบบต่ำผ่านเป็นแรงดันวัดค่ากระแส (V_l) แล้วเข้าสู่ ADC ของไมโครคอนโทรลเลอร์ ในขณะเดียวกันเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าตวามต้านทานของเซนเซอร์จะจะถูกแปลงเป็นแรงดันเข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งมีขนาด ADC เท่ากับ 12 บิต เพื่อทำการประมวลผล

6.2.1 ทดสอบด้วยวงจรขับแบบ DAC

1) ชุดทำความร้อนบนฐานรองกระจกหนา การทดสอบหาผลตอบสนองทางเวลาจะใช้การควบคุมแบบวงเปิด (Open loop control) โดยใช้วงจรในรูปที่ 6.12 ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวกำหนดค่าแรงดันตามที่ต้องการเข้าสู่ไมโครฮีตเตอร์ผ่านวงจร DAC และวงจรขยายกำลัง (Power Amplifier) ผลการทดสอบระหว่างแรงดันและกำลังที่ป้อนเข้าสู่ไมโครฮีตเตอร์ 1 ตัว (ตัวกลาง) เป็นดังรูปที่ 6.13 และ 6.14 ตามลำดับ

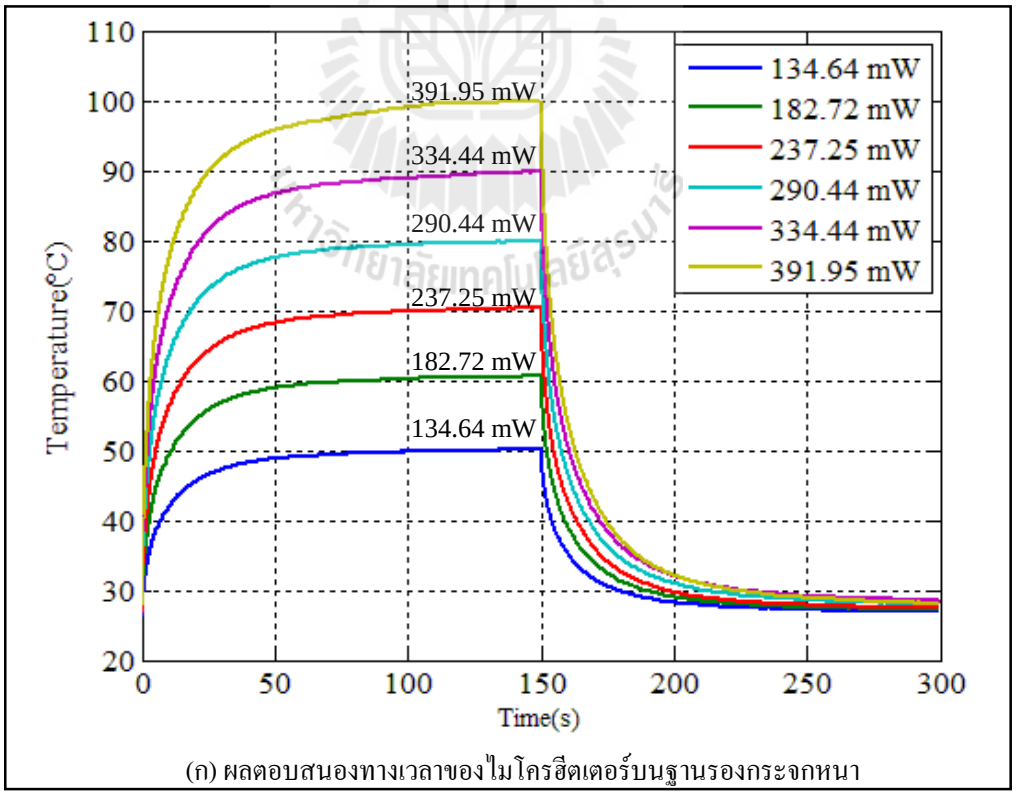


รูปที่ 6.13 ผลของแรงดันที่ป้อนเข้าสู่ไมโครฮีตเตอร์กับอุณหภูมิบนฐานรองกระจกหนา



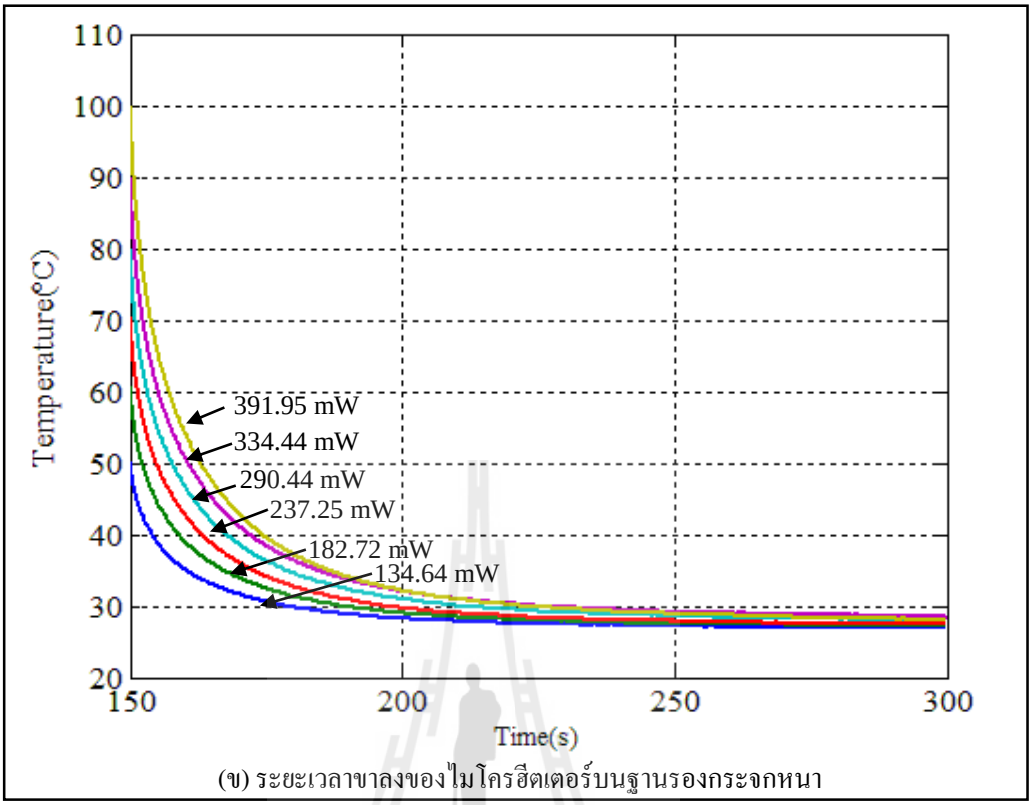
รูปที่ 6.14 ผลของกำลังที่ป้อนเข้าสู่ไมโครฮีตเตอร์กับอุณหภูมิบนฐานรองกระจกหนา

ทำการบันทึกผลของกำลังอินพุตกับอุณหภูมิที่ระดับต่าง ๆ ได้ผลตอบสนองเป็นดังรูปที่ 6.15



(ก) ผลตอบสนองทางเวลาของไมโครฮีตเตอร์บนฐานรองกระจกหนา

รูปที่ 6.15 ผลตอบสนองทางเวลาของไมโครฮีตเตอร์บนฐานรองกระจกหนา



(ข) ระยะเวลาขาลงของไมโครฮีตเตอร์บนฐานรองกระจกหนา

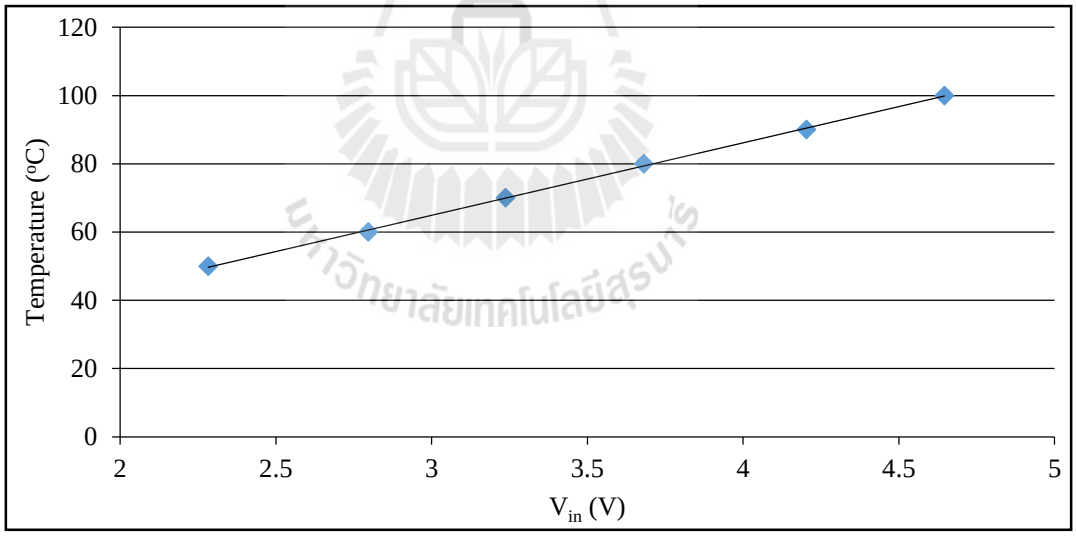
รูปที่ 6.15 ผลตอบสนองทางเวลาของไมโครฮีตเตอร์บนฐานรองกระจกหนา (ต่อ)

นอกจากนี้แล้วยังได้ทำการบันทึกค่ากระแส แรงดันระหว่างทำการป้อนอินพุตด้วยดิจิตอลมัลติมิเตอร์ พร้อมกับคำนวณกำลังและค่าความต้านทานของไมโครฮีตเตอร์ขณะที่กระแสไหลผ่านได้ผลเป็นดังตารางที่ 6.4 พบว่าแรงค่าความต้านทานของไมโครฮีตเตอร์จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นสามารถคำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่อกำลังอินพุต ($\Delta^{o}C/\Delta P$) ของชุดทำความร้อนที่สร้างขึ้นบนฐานรองกระจกหนาเท่ากับ 194.31 $^{o}C/W$ ค่าดังกล่าวหมายถึง หากทำการป้อนกำลัง 1 W จะทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากเดิม 194.31 ^{o}C อัตราการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานต่อกำลังอินพุต ($\Delta R/\Delta P$) มีค่าเท่ากับ 57.130 $\Omega/^{o}W$ นอกจากนี้ยังได้ทำการคำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานต่อกำลังอินพุต ($\Delta R/\Delta T$) เท่ากับ 0.294 $\Omega/^{o}C$

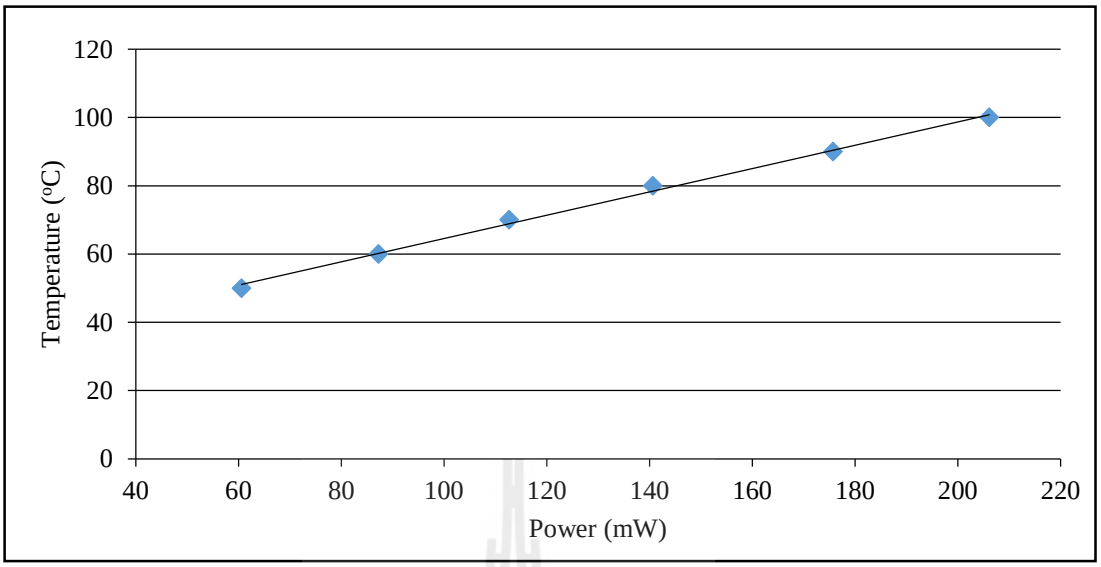
ตารางที่ 6.4 ค่าความต้านทานของไมโครฮีตเตอร์ขณะทำการป้อนแรงดันบนฐานรองกระจกหนา

อุณหภูมิ (^{o}C)	กระแส (mA)	แรงดัน (V)	กำลัง (mW)	ความต้านทานฮีตเตอร์ (Ω)
50	41.30	3.260	134.64	78.93
60	47.18	3.873	182.73	82.09
70	53.10	4.468	237.25	84.14
80	58.10	4.999	290.44	86.04
90	60.50	5.528	334.44	91.37
100	64.70	6.058	391.95	93.63
ΔT=50	ΔI=23	ΔV=2.798	ΔP=257.31	ΔR=14.7

2) ชุดทำความร้อนบนฐานรองกระจกบาง สำหรับผลของการทดสอบป้อนอินพุตกับชุดทำความร้อนบนฐานรองกระจกบางใช้วงจรและการควบคุมเช่นเดียวกับกระจกหนาได้ผลดังรูปที่ 6.16 เป็นการป้อนแรงดัน ส่วนรูปที่ 6.17 เป็นผลของการป้อนกำลัง



รูปที่ 6.16 ผลของแรงดันที่ป้อนเข้าสู่ไมโครฮีตเตอร์กับอุณหภูมิบนฐานรองกระจกบาง



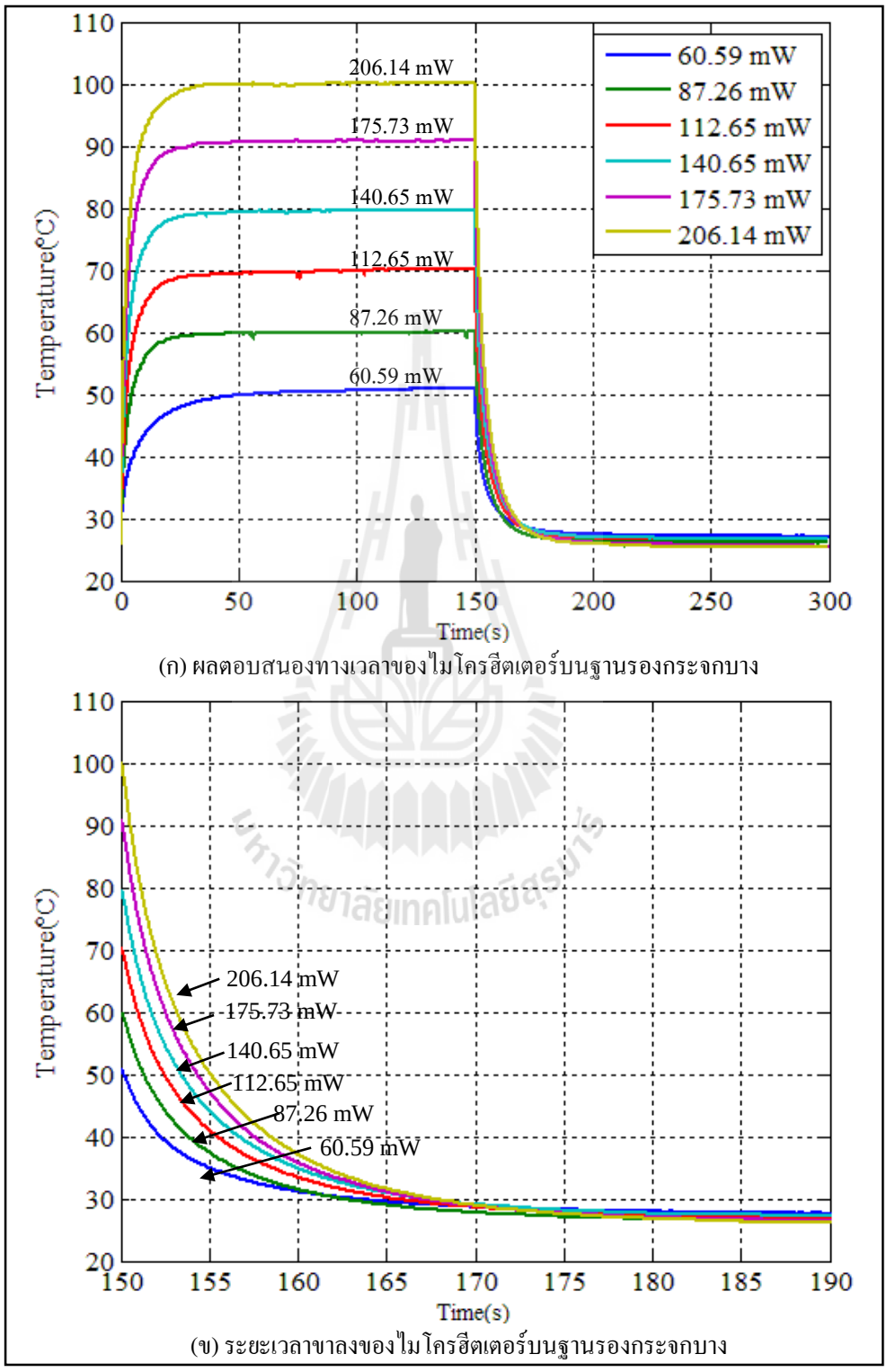
รูปที่ 6.17 ผลของกำลังที่ป้อนเข้าสู่ไมโครฮีตเตอร์กับอุณหภูมิบนฐานรองกระจกบาง

สำหรับค่ากระแส แรงดัน กำลังไฟฟ้า และค่าความต้านทานของไมโครฮีตเตอร์บนฐานรองกระจกบางที่ได้จากการคำนวณได้ผลเป็นดังตารางที่ 6.5 มีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่อกำลังเท่ากับ 343.35 ^{o}C/W ซึ่งค่าสูงกว่าชุดทำความร้อนบนฐานรองกระจกหนาถึง 1.76 เท่า หรือ 43 % แสดงว่าชุดทำความร้อนบนฐานรองกระจกบางจะใช้กำลังไฟฟ้าน้อยกว่าเมื่อต้องการควบคุมอุณหภูมิที่เท่ากัน ส่วนอัตราการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานต่อกำลังอินพุต ($\Delta R/\Delta P$) มีค่าเท่ากับ 128.41 Ω/Wอัตราการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานต่อกำลังอินพุต ($\Delta R/\Delta T$) เท่ากับ 0.373 Ω/^{o}C

ตารางที่ 6.5 ค่าความต้านทานของไมโครฮีตเตอร์ขณะทำการป้อนแรงดันบนฐานรองกระจกบาง

อุณหภูมิ (^{o}C)	กระแส (mA)	แรงดัน (V)	กำลัง (mW)	ความต้านทานฮีตเตอร์ (Ω)
50	26.54	2.283	60.59	86.02
60	31.21	2.796	87.26	89.59
70	34.8	3.237	112.65	93.02
80	38.21	3.681	140.65	96.34
90	41.81	4.203	175.73	100.53
100	44.37	4.646	206.14	104.71
ΔT=50	ΔI=17.83	ΔV=2.363	ΔP=145.55	ΔR=18.69

ผลตอบสนองของชุดทำความร้อนบนกระจกบางแสดงได้ดังรูปที่ 6.18

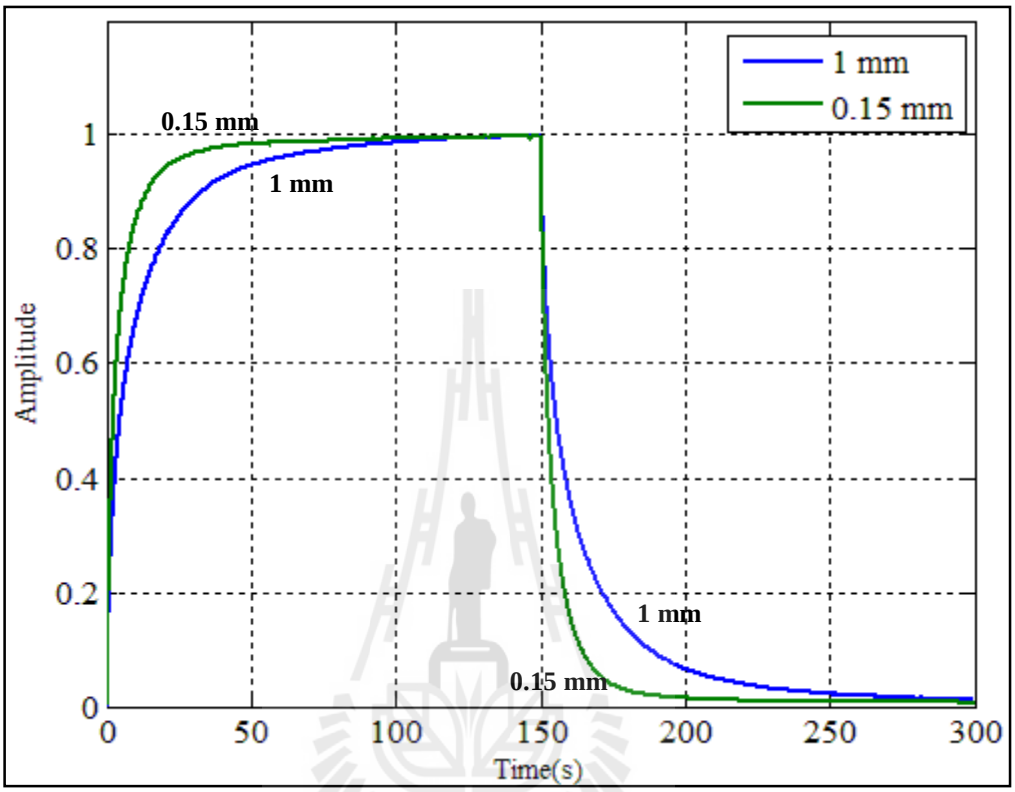


(ก) ผลตอบสนองทางเวลาของไมโครฮีตเตอร์บนฐานรองกระจกบาง

(ข) ระยะเวลาขาลงของไมโครฮีตเตอร์บนฐานรองกระจกบาง

รูปที่ 6.18 ผลตอบสนองทางเวลาของไมโครฮีตเตอร์บนฐานรองกระจกบาง

ทำการนอมอลไลซ์อุณหภูมิพร้อมกับหาค่าเฉลี่ยเพื่อเปรียบเทียบผลระหว่างชุดทำความร้อนบนฐานรองกระจกหนาและกระจกบางได้ผลดังรูปที่ 6.19



รูปที่ 6.19 เปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาของไมโครฮีตเตอร์บนฐานรองกระจกหนาและบางด้วยตัวขับแบบ DAC

ทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบการตอบสนองทางเวลาของชุดทำความร้อนบนฐานรองกระจกหนาและบางได้ผลดังตาราง 6.6 และกำลังอินพุตได้ผลดังตารางที่ 6.7

ตารางที่ 6.6 เปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาระหว่างกระจกหนาและกระจกบางด้วยตัวขับแบบ DAC

ประเภทฐานรอง	เวลาคงตัว	เวลาขาขึ้น	เวลาเข้าที่	เวลาขาลง
กระจกหนา (1 mm)	8.2 s	32.5 s	86 s	38 s
กระจกบาง (0.15 mm)	3.7 s	13 s	45 s	14 s
ผลต่าง	54.8 %	60 %	52.3 %	57.3 %

ตารางที่ 6.7 เปรียบเทียบกำลังอินพุตที่ป้อนสู่ไมโครฮีตเตอร์ระหว่างฐานรองกระจกหนาและฐานรองกระจกบางด้วยตัวขับแบบ DAC

อุณหภูมิ (^{o}C)	กำลัง (mW)		ผลต่าง (%)
	ชุดที่ 1 กระจกหนา (1 mm)	ชุดที่ 2 กระจกบาง (0.15 mm)	
50	134.64	60.59	54.99
60	182.72	87.26	52.24
70	237.25	112.65	52.51
80	290.44	140.65	51.57
90	334.44	175.73	47.45
100	391.95	206.14	47.06
ค่าเฉลี่ยผลต่าง			50.97

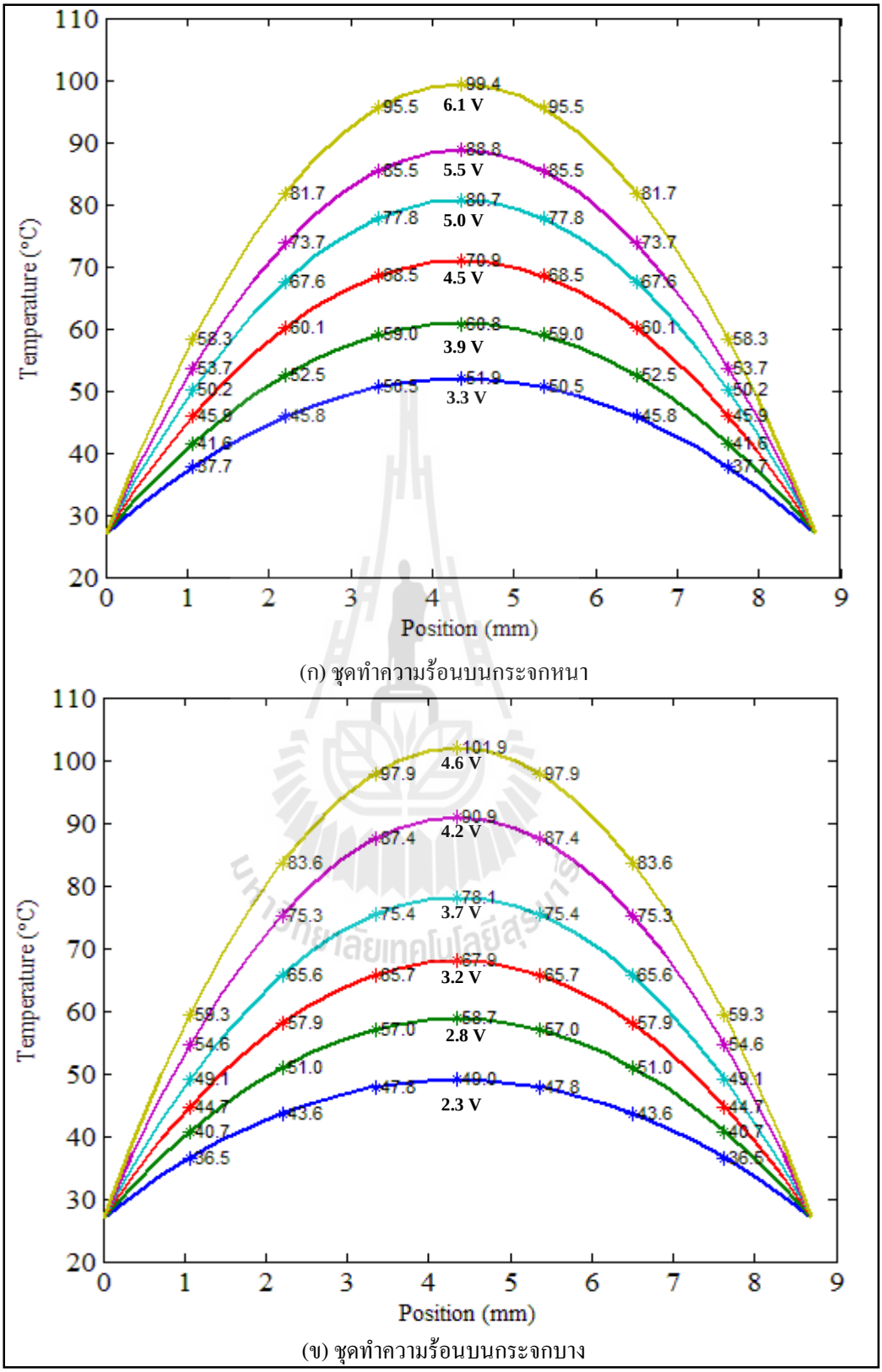
จากตารางที่ 6.5 และ 6.6 หากทำการพิจารณาผลตอบสนองทางเวลาพบว่าชุดทำความร้อนบนฐานรองกระจกบางมีค่าเฉลี่ยที่ดีกว่าชุดทำความร้อนบนฐานรองกระจกหนา คือค่าคงตัวทางเวลาลดลง 2.21 เท่า หรือ 54.8 % เวลาขาขึ้นลดลง 2.5 เท่า หรือ 60 % ส่วนเวลาขาลงลดลง 2.71 เท่า หรือ 57.3 % หากพิจารณาส่วนของกำลังไฟฟ้าที่มีผลต่ออุณหภูมิพบว่าชุดทำความร้อนบนฐานรองกระจกหนาจะใช้กำลังไฟฟ้าในการให้ความร้อนมากกว่าชุดทำความร้อนบนฐานรองกระจกบางเฉลี่ย 50.97 % ซึ่งเป็นผลมาจากความหนาของกระจก

หลังจากทำการทดสอบหาคุณสมบัติต่าง ๆ ของไมโครฮีตเตอร์ที่ได้จากการสร้างแล้วสามารถสรุปคุณสมบัติได้ดังตารางที่ 6.8 ซึ่งเป็นการทดสอบชุดทำความร้อนเพียงชุดเดียวเท่านั้น

ตารางที่ 6.8 สรุปคุณสมบัติของไมโครฮีตเตอร์ที่ได้จากการสร้าง

Characteristic	Set1 : Thick glass (1 mm)	Set2 : Thin glass (0.15 mm)
Time constant (s)	8.2	3.7
Rise Time (s)	32.5	13
Setting Time (s)	80	23
Fall Time (s)	38	14
Power (mW)	391	206
Voltage (V)	6.1	4.5
Current (mA)	64.70	44.37
Sensitivity (^{o}C/W)	194.31	343.35
Sensitivity (Ω/W)	57.130	128.41
Sensitivity (Ω/^{o}C)	0.294	0.373

จากสมการที่ (4.27) ในบทที่ 4 ได้ทำการจำลองผลอีกครั้งโดยใช้พารามิเตอร์จากผลการวัดจริงคือ แรงดันและความต้านทานของไมโครฮีตเตอร์ที่เกิดขึ้นจริงขณะทำการป้อนแรงดันจากตารางที่ 6.3 และ 6.4 เพื่อดูแนวโน้มการกระจายความร้อนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ได้ผลการจำลองดังรูปที่ 6.20 (ก) สำหรับฐานรองกระจกหนาและฐานรองกระจกบางเป็นดังรูปที่ 6.20 (ข) พบว่าการจำลองการกระจายตัวของความร้อนที่ตำแหน่งต่าง ๆ พบว่าความร้อนตำแหน่งสูงสุดของไมโครฮีตเตอร์มีแนวโน้มใกล้เคียงกับความเป็นจริงเนื่องจากได้ทำการป้อนค่าแรงดันและความต้านที่เกิดขึ้นจริงที่อุณหภูมิต่าง ๆ



(ก) ชุดทำความร้อนบนกระจกหนา

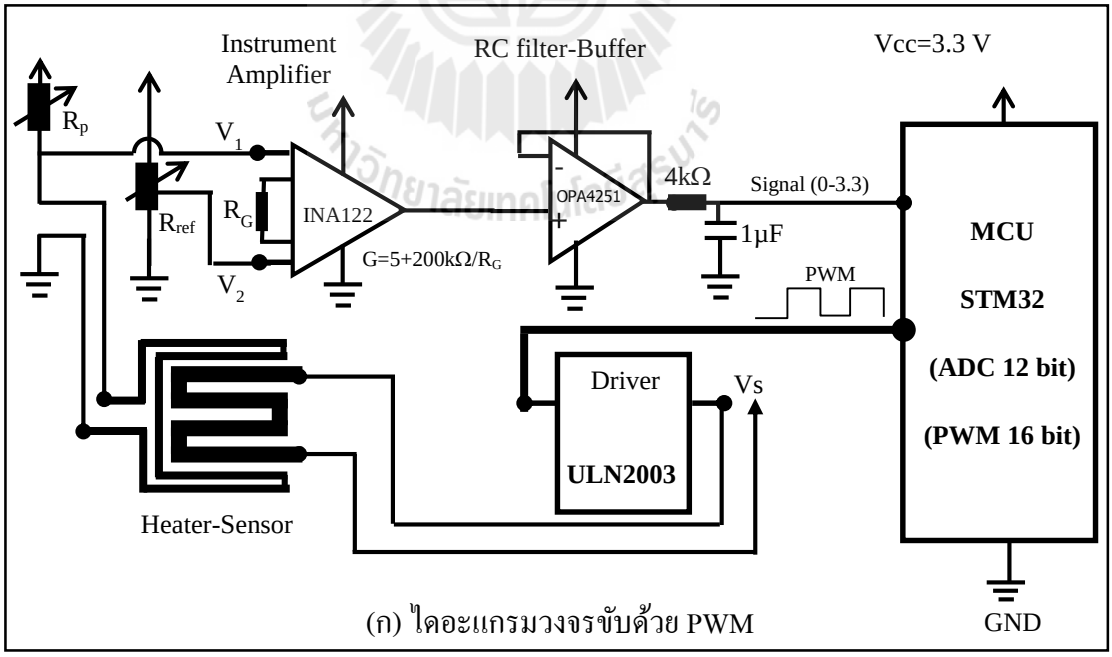
(ข) ชุดทำความร้อนบนกระจกบาง

รูปที่ 6.20 ผลการจำลองการกระจายความร้อนของไมโครฮีตเตอร์บนฐานรองกระจกหนาและบาง

จากการทดสอบโดยใช้วงจรขยายกำลัง (DAC) เป็นชุดขับ สามารถสร้างแรงดันได้ตั้งแต่ 0 ถึง 9 V เพื่อหาผลตอบสนองทางเวลาของชุดทำความร้อน พบว่าชุดทำความร้อนที่สร้างบนฐานรองกระจกหนาใช้เวลาและกำลังในการป้อนเพื่อให้อุณหภูมิเข้าสู่เป้าหมายมากกว่าชุดทำความร้อนที่สร้างบนฐานรองกระจกบาง จากการทดสอบที่ผ่านมาเป็นการทดสอบหาผลตอบสนองของไมโครฮีตเตอร์เพียงหนึ่งตัวเพื่อดูแนวโน้มของการตอบสนอง เนื่องจากวงจรขับมีอุปกรณ์ไม่เพียงพอสำหรับชุดทำความร้อนทั้งหมด จึงได้หาแนวทางในการลดจำนวนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สำหรับขับโดยจะใช้ทรานซิสเตอร์อาร์เรย์ (Transistor array) เบอร์ ULN2003 เป็นชุดขับโดยใช้สัญญาณ PWM เป็นสัญญาณเอาต์พุตซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป

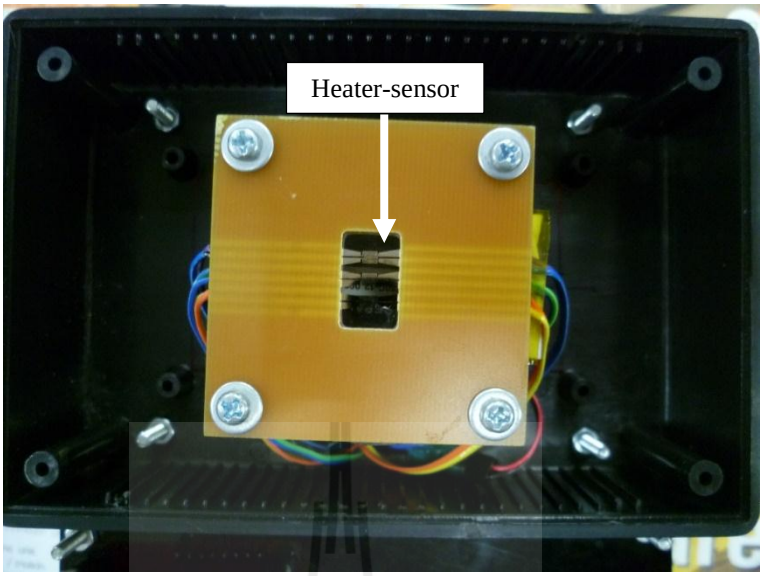
6.2.2 ทดสอบด้วยวงจรขับแบบ PWM

ดังที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้แล้วว่าการขับชุดทำความร้อนด้วยแรงดันที่ได้จากวงจร DAC ร่วมกับวงจรขยายสัญญาณนั้น จำเป็นจะต้องเพิ่มวงจรขับอีกสองชุดเพื่อให้เพียงพอต่อการควบคุม แต่ถ้าหากเปลี่ยนชุดขับแบบแอนะลอกมาเป็นสัญญาณขับแบบดิจิตอล จะช่วยลดอุปกรณ์เหลือเพียงไอซีตัวเดียวเท่านั้น ทำให้ประหยัดพื้นที่และอุปกรณ์ลงได้ ดังรูปที่ 6.21 โดยสัญญาณออกมาจากไมโครคอนโทรลเลอร์จะเป็นสัญญาณ PWM ที่แรงดัน 9 V

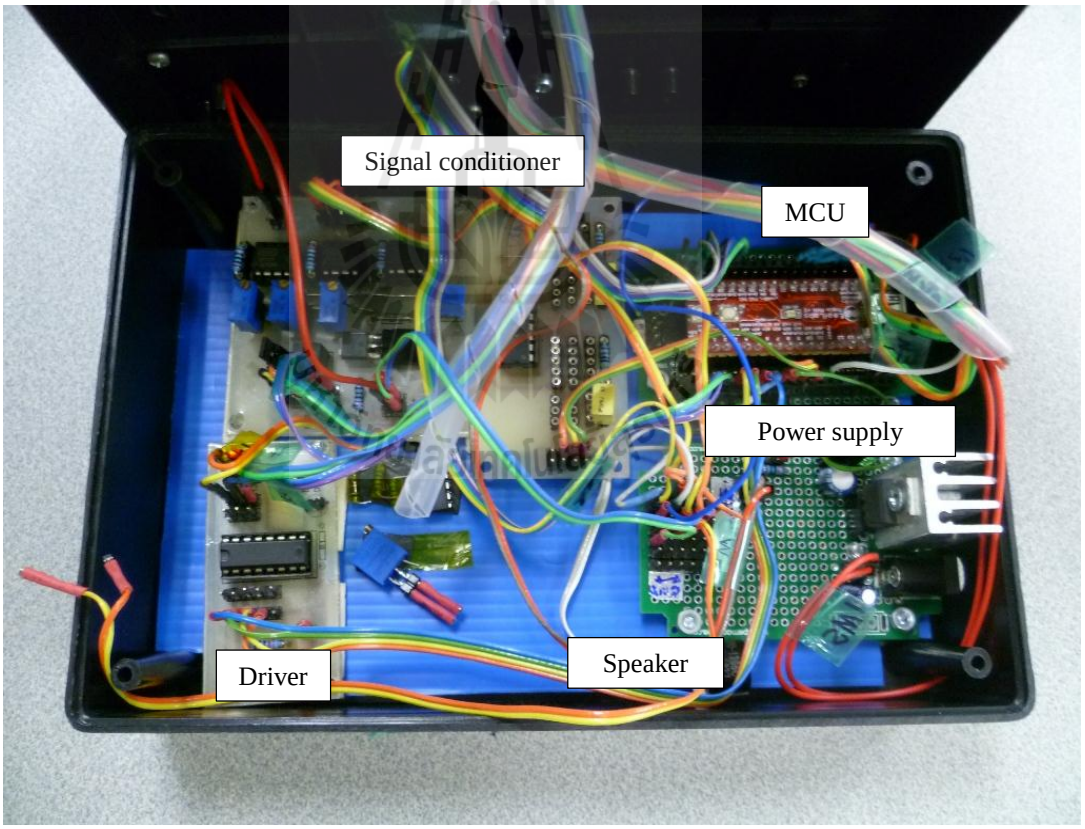


(ก) ไดอะแกรมวงจรขับด้วย PWM

รูปที่ 6.21 วงจรสำหรับควบคุมชุดทำความร้อนแบบ PWM



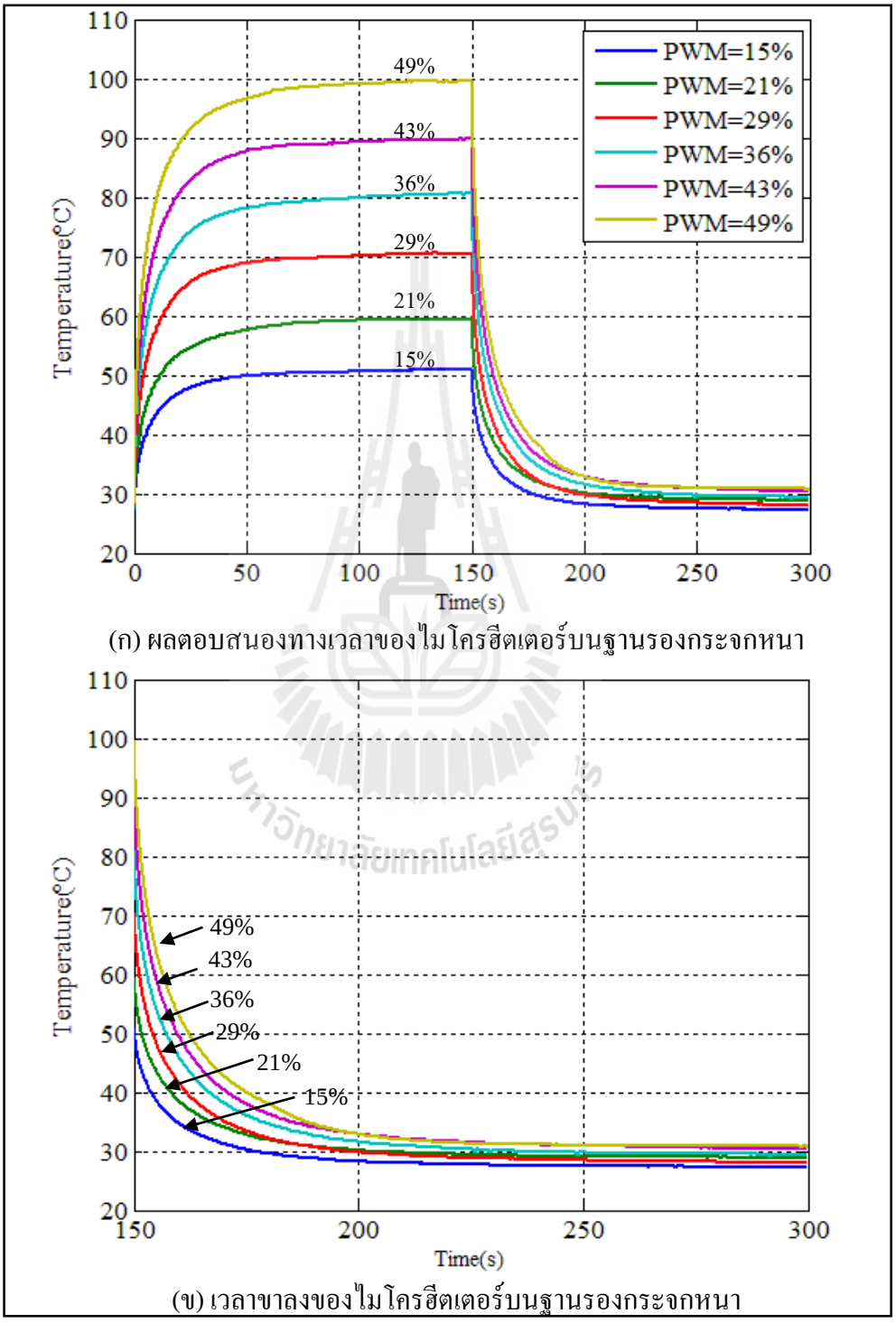
(ข) ชุดทำความร้อน



(ค) วงจรขับ

รูปที่ 6.21 วงจรสำหรับควบคุมชุดทำความร้อนแบบ PWM (ต่อ)

1) ชุดทำความร้อนบนฐานรองกระจกหนา ทดสอบขับไมโครฮีตเตอร์ที่ขนาด %Duty cycle ต่าง ๆ ได้ผลดังรูป 6.22

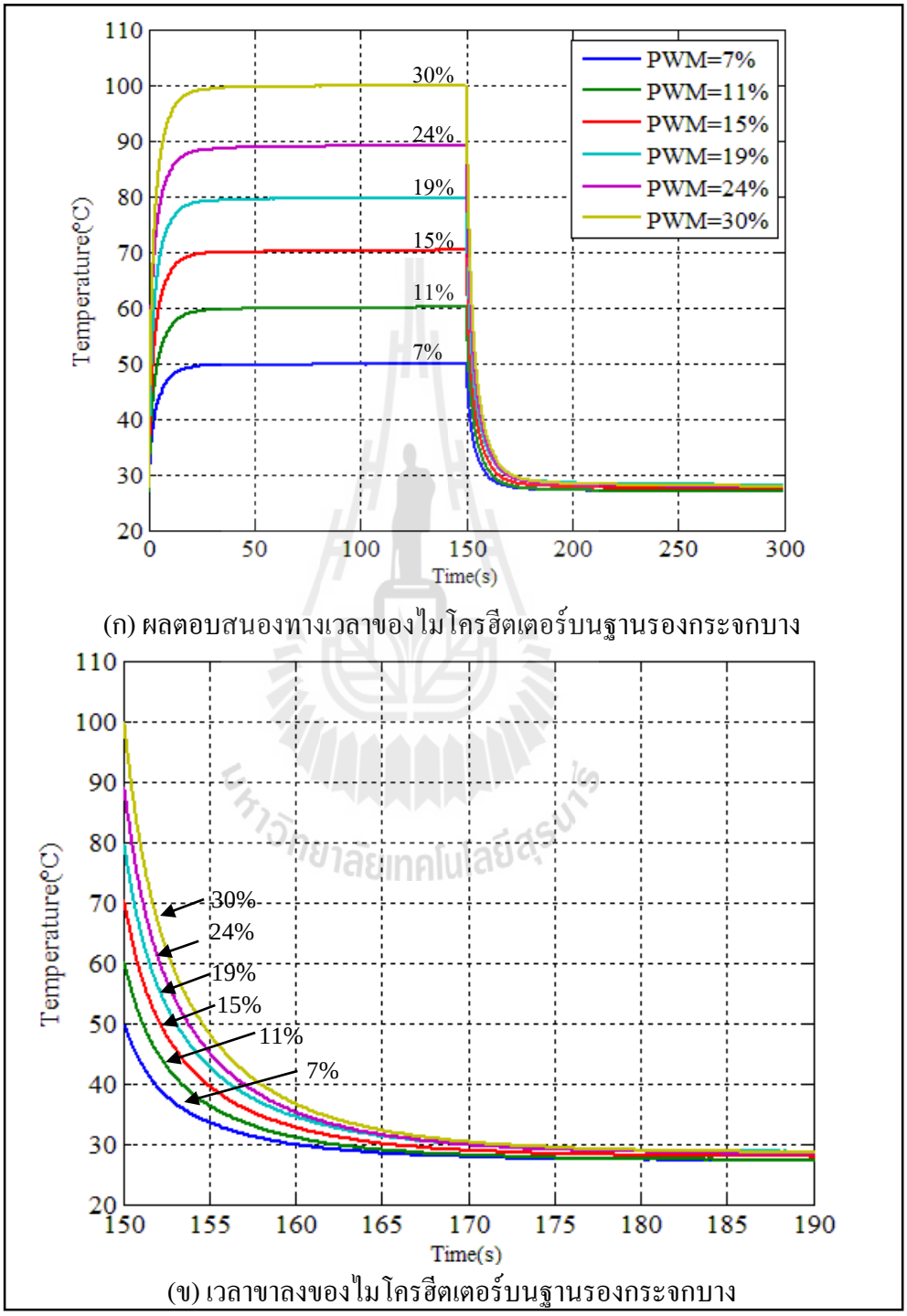


(ก) ผลตอบสนองทางเวลาของไมโครฮีตเตอร์บนฐานรองกระจกหนา

(ข) เวลาขาลงของไมโครฮีตเตอร์บนฐานรองกระจกหนา

รูปที่ 6.22 ผลตอบสนองทางเวลาของไมโครฮีตเตอร์บนฐานรองกระจกหนาด้วยสัญญาณ PWM

2) ชุดทำความร้อนบนฐานรองกระจกบาง ทดสอบขับไมโครฮีตเตอร์ที่ขนาด %Duty cycle ต่าง ๆ ได้ผลดังรูป 6.23



(ก) ผลตอบสนองทางเวลาของไมโครฮีตเตอร์บนฐานรองกระจกบาง

(ข) เวลาขาลงของไมโครฮีตเตอร์บนฐานรองกระจกบาง

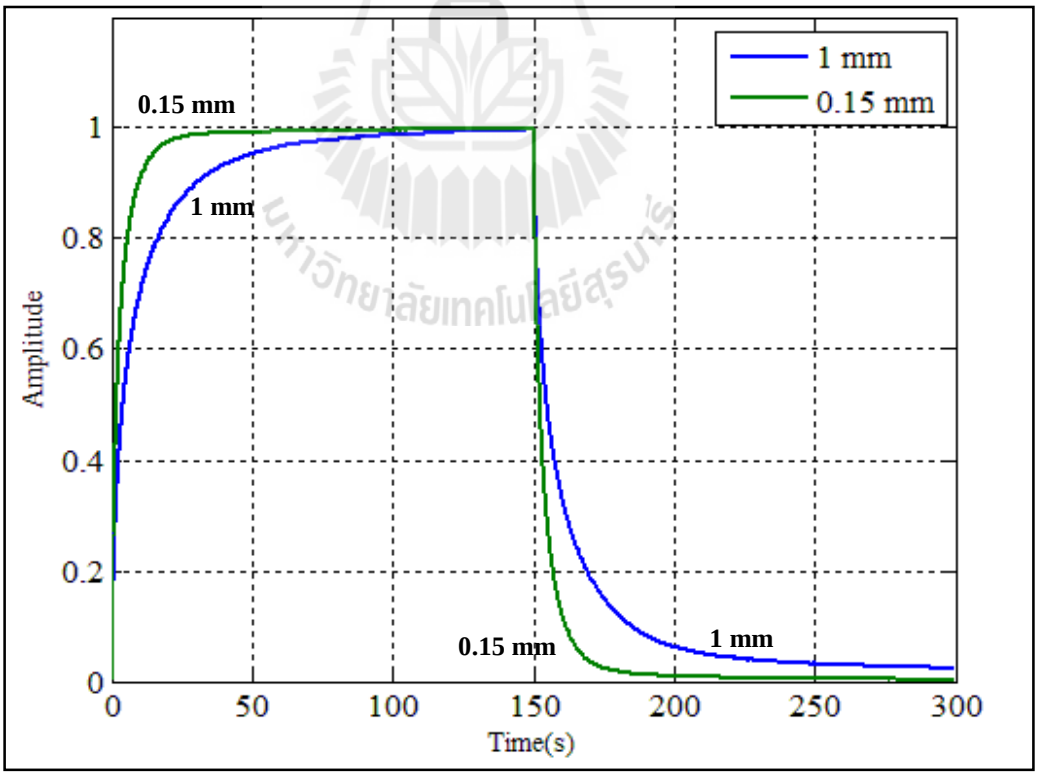
รูปที่ 6.23 ผลตอบสนองทางเวลาของไมโครฮีตเตอร์บนฐานรองกระจกบางด้วยสัญญาณ PWM

เปรียบเทียบขนาดของ PWM ที่ป้อนเข้าสู่ไมโครฮีตเตอร์ได้ผลดังตารางที่ 6.9

ตารางที่ 6.9 เปรียบเทียบอินพุตที่ป้อนสู่ไมโครฮีตเตอร์ระหว่างชุดทำความร้อนบนฐานรองกระจกหนาและกระจกบางด้วย PWM

อุณหภูมิ (^{o}C)	Duty cycle (%)		
	ชุดที่ 1 กระจกหนา (1 mm)	ชุดที่ 2 กระจกบาง (0.15 mm)	ผลต่าง(%)
50	15	7	53.33
60	21	11	47.6
70	29	15	48.0
80	36	19	47.22
90	43	24	44.18
100	49	30	38.77

ทำการนอมอลไลซ์ผลตอบสนองของชุดทำความร้อนทั้งบนกระจกหนาและบาง พร้อมกับเปรียบเทียบได้ผลดังรูปที่ 6.24 และตารางที่ 6.10



รูปที่ 6.24 เปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาของชุดทำความร้อนบนฐานรองกระจกหนาและบางที่ควบคุมด้วย PWM

ตารางที่ 6.10 เปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาระหว่างกระจกหนาและกระจกบางด้วย PWM

ประเภทฐานรอง	เวลาคงตัว	เวลาขาขึ้น	เวลาเข้าที่	เวลาขาลง
กระจกหนา (1 mm)	7.1 s	32 s	80 s	34 s
กระจกบาง (0.15 mm)	2.9 s	11 s	23 s	13 s
ผงต่าง	59.2 %	65.6 %	71.3 %	61.7 %

จากการหาผลตอบสนองทางเวลาของชุดทำความร้อนที่สร้างทั้งบนฐานรองกระจกหนาและบางพบว่าผลตอบสนองของกระจกบางจะเร็วกว่ากระจกหนาประมาณ 2 ถึง 3 เท่า อีกทั้งผลการขับโดยใช้ DAC และ PWM สามารถทำให้ไมโครฮีตเตอร์ให้ความร้อนถึงอุณหภูมิเป้าหมายได้ใกล้เคียงกัน ซึ่งการขับทั้งสองแบบมีข้อแตกต่างกันคือ *แบบที่ 1* ขับด้วยสัญญาณ DAC ผ่านชุดขยายสัญญาณ มีข้อดีคือสามารถบันทึกสัญญาณแรงดัน กระแสและกำลังที่ป้อนเข้าสู่ไมโครฮีตเตอร์ได้ แต่ข้อเสียคือมีวงจรขนาดใหญ่เพราะมีอุปกรณ์ต่อพ่วงและราคาสูงหากจะต้องใช้เพื่อควบคุมชุดทำความร้อนทั้งหมดต้องเพิ่มจำนวนของ DAC และวงจรขยายสัญญาณอีกจำนวน 2 ชุด *แบบที่ 2* ขับด้วยสัญญาณ PWM ผ่านชุดทรานซิสเตอร์อาเรย์ มีข้อดีคือไอซีมีขนาดเล็ก ประหยัดพื้นที่สามารถขับอุปกรณ์ได้ถึง 8 ช่อง ราคาถูก และไม่ต้องมีอุปกรณ์พ่วง แต่ไม่สามารถรู้ แรงดัน กระแส และกำลังงานที่แท้จริงได้ ทำได้เพียงคำนวณด้วยวิธีอ้อมเท่านั้น

ดังนั้นงานวิจัยต่อจากนี้จะใช้ตัวทรานซิสเตอร์อาเรย์เป็นตัวขับไมโครฮีตเตอร์ด้วยสัญญาณ PWM ทั้งหมด ส่วนวงจรปรับแต่งสัญญาณยังคงเป็นวงจรเดิมคือใช้อินสทรูเมนต์แอมป์เป็นตัวขยายสัญญาณ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

6.3 บทสรุป

บทนี้ได้ทำการทดสอบปรับเทียบเซนเซอร์ที่ได้จากการสร้างทั้งบนฐานรองกระจกหนาและบาง ทำให้พบคุณลักษณะพื้นฐานของเซนเซอร์ได้แก่ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานและอุณหภูมิ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานไฟฟ้า ความไว ความแม่น ค่าความผิดพลาดฮีสเตอร์รีซิส แล้วทำการออกแบบวงจรวัดและควบคุมการทำงานของไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์โดยมีวงจรขับแบบ DAC และ PWM จากนั้นทำการทดสอบป้อนกระแสไฟฟ้าผ่านไมโครฮีตเตอร์ด้วยวงจรขับทั้งสองแบบ เพื่อหาผลตอบสนองทางเวลาได้ผลคือไมโครฮีตเตอร์ที่สร้างบนฐานรองกระจกบางให้ผลตอบสนองเร็วกว่าไมโครฮีตเตอร์ที่สร้างบนฐานรองกระจกหนา นอกจากที่ยังพบใช้กำลังไฟฟ้าในการทำความร้อนน้อยกว่าเช่นกัน ในบทต่อไปจะกล่าวถึงแนวทางการประยุกต์ใช้งานของชุดทำความร้อนที่สร้างขึ้นเพื่อเป็นต้นแบบเครื่องพีซีอาร์เพื่อใช้ในงานด้านชีวภาพ

บทที่ 7
การทดสอบการหมุนเวียนความร้อน

บทที่ผ่านมาเป็นการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ สำหรับบทนี้จะเป็นการทดสอบการหมุนเวียนความร้อนตามหลักการพีซีอาร์ โดยจะทดสอบกับน้ำแทนการทดสอบดีเอ็นเอของจริง เนื่องจากในงานวิจัยมีเป้าหมายคือการพัฒนากระบวนการสร้างระบบทำความร้อนแนวใหม่ด้วยรังสีเอกซ์ เพื่อลดต้นทุน กระบวนการ เวลาและสารเคมีของการผลิตให้แตกต่างจากวิธีทั่วไป นอกจากนี้แล้วยังมีอีกหนึ่งเป้าหมายที่สำคัญคือ พัฒนาให้ระบบหมุนเวียนความร้อนให้มีขนาดเล็กพกพาได้ง่ายและปรับเปลี่ยนอุณหภูมิตามที่ต้องการได้อย่างรวดเร็ว อีกทั้งสารละลายสำหรับการทำพีซีอาร์นั้นเป็นของเหลวซึ่งมีน้ำเป็นส่วนประกอบเป็นส่วนใหญ่ จึงใช้น้ำเป็นตัวทดแทนสารละลายดังกล่าว เพราะเป้าหมายหลักของงานวิจัยคือทำให้อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นทำงานได้รวดเร็ว

7.1 ชุดทดสอบหมุนเวียนความร้อน

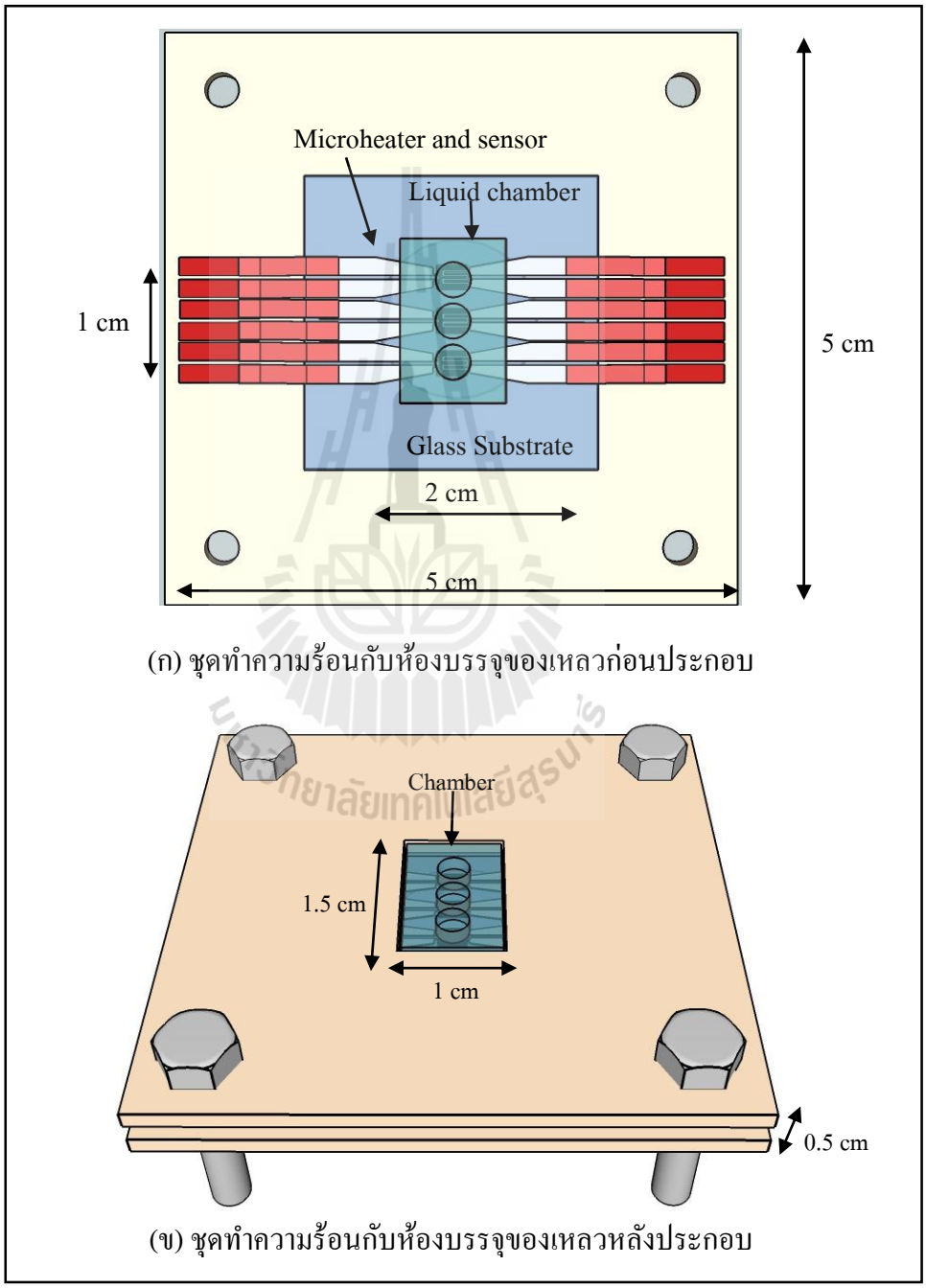
หลังจากได้ทำการหาผลตอบสนองทางเวลารวมถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ของชุดทำความร้อนต้นแบบ ต่อไปจะเป็นการทดสอบการหมุนเวียนความร้อนตามหลักการของพีซีอาร์ การควบคุมครั้งนี้ใช้การควบคุมแบบพีไอเช่นเดิม โดยใช้ข้อมูลจากผลตอบสนองเมื่อทดสอบขับด้วย PWM จากบทที่ผ่านมาด้วยการ ARMAX toolbox จาก MATLAB เป็นเครื่องมือ ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของชุดทำความร้อนบนกระจกหนา ($G_{p,Thick}$) และบาง ($G_{p,Thin}$) เป็นดังสมการที่ (7.1) และ (7.2) ตามลำดับ

$$G_{p,Thick}(s) = \frac{0.001894(s + 79.9894)}{s + 0.1516} \tag{7.1}$$

$$G_{p,Thin}(s) = \frac{0.004246(s+80.0047)}{s + 0.3397} \tag{7.2}$$

เมื่อทำการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีโดเมนความถี่จะได้ค่าเกนของชุดทำความร้อนบนกระจกหนามีค่า K_p เท่ากับ 23.83 และ K_i เท่ากับ 8.61 ส่วนชุดทำความร้อนบนฐานรองกระจกบางมีค่า K_p เท่ากับ 10.34 และ K_i เท่ากับ 3.62 ส่วนค่า Sampling time (T_s) มีค่าเท่ากับ 25 มิลลิวินาที

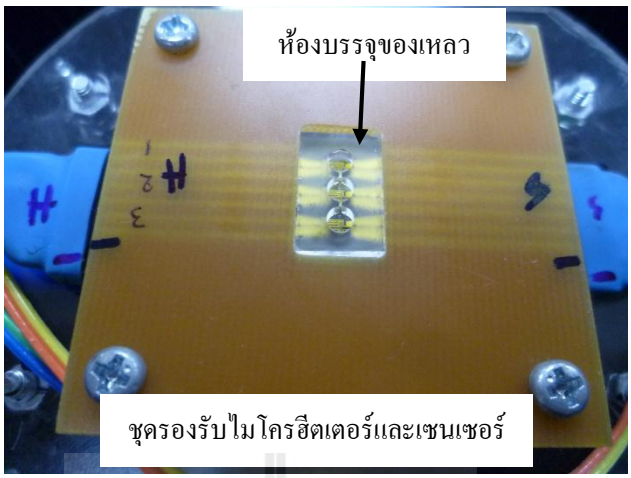
นำอุปกรณ์ดังกล่าวมาประกอบเข้ากับระบบทำความร้อนแสดงโครงสร้างและส่วนประกอบดังรูปที่ 7.1 (ก) และ 7.1 (ข) ส่วนรูปที่ 7.1 (ค) ชุดทำความร้อนที่มีไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์พร้อมกับห้องบรรจุของเหลวที่สร้างด้วย PDMS ซึ่งในการทดสอบครั้งนี้ ใช้ห้องบรรจุของเหลวมีปริมาตรห้องละประมาณ 10 μL รวม 30 μL สำหรับบรรจุน้ำเพื่อการทดสอบ



(ก) ชุดทำความร้อนกับห้องบรรจุของเหลวก่อนประกอบ

(ข) ชุดทำความร้อนกับห้องบรรจุของเหลวหลังประกอบ

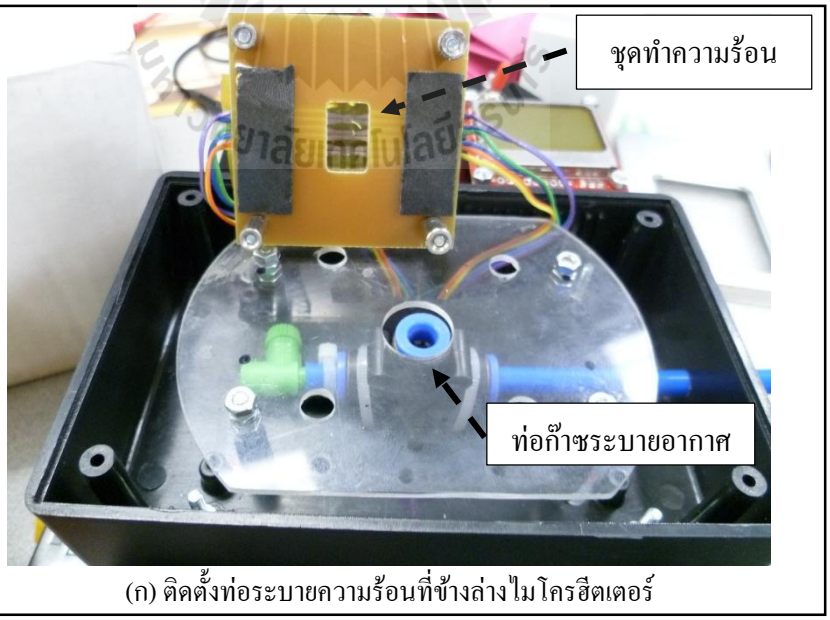
รูปที่ 7.1 ชุดหมุนเวียนความร้อนสำหรับของเหลวระดับไมโครลิตร



(ค) ชุดทำความร้อนกับห้องบรรจุของเหลว

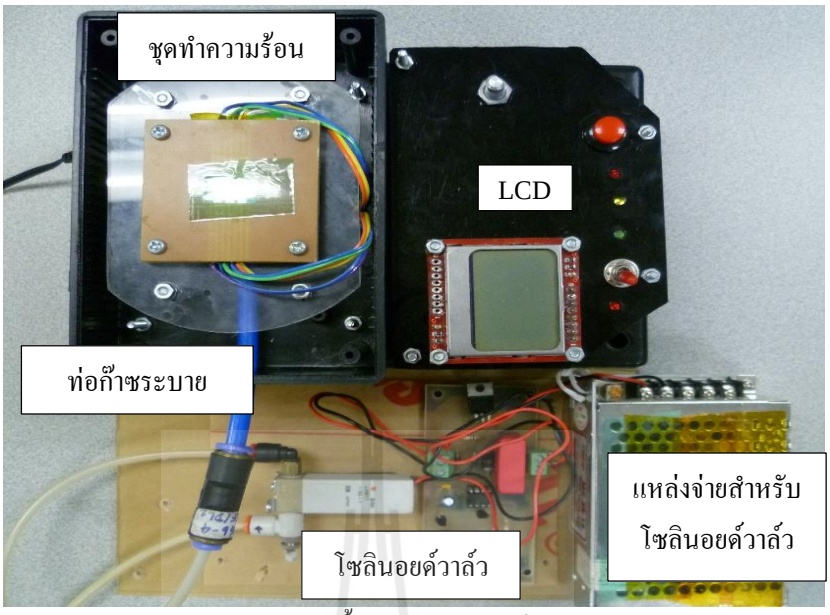
รูปที่ 7.1 ชุดหมุนเวียนความร้อนสำหรับของเหลวระดับไมโครลิตร (ต่อ)

การทดสอบในหัวข้อนี้ได้เพิ่มชุดระบายความร้อนด้วยก๊าซในโตรเจน (N_2) มีช่องระบายความร้อนและอุปกรณ์เปิด-ปิดก๊าซดังรูปที่ 7.2 ประกอบด้วย ไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์พร้อมชุดรองรับ ท่อก๊าซระบายความร้อน โซลินอยด์วาล์วและชุดควบคุมพร้อมอุปกรณ์แสดงผล

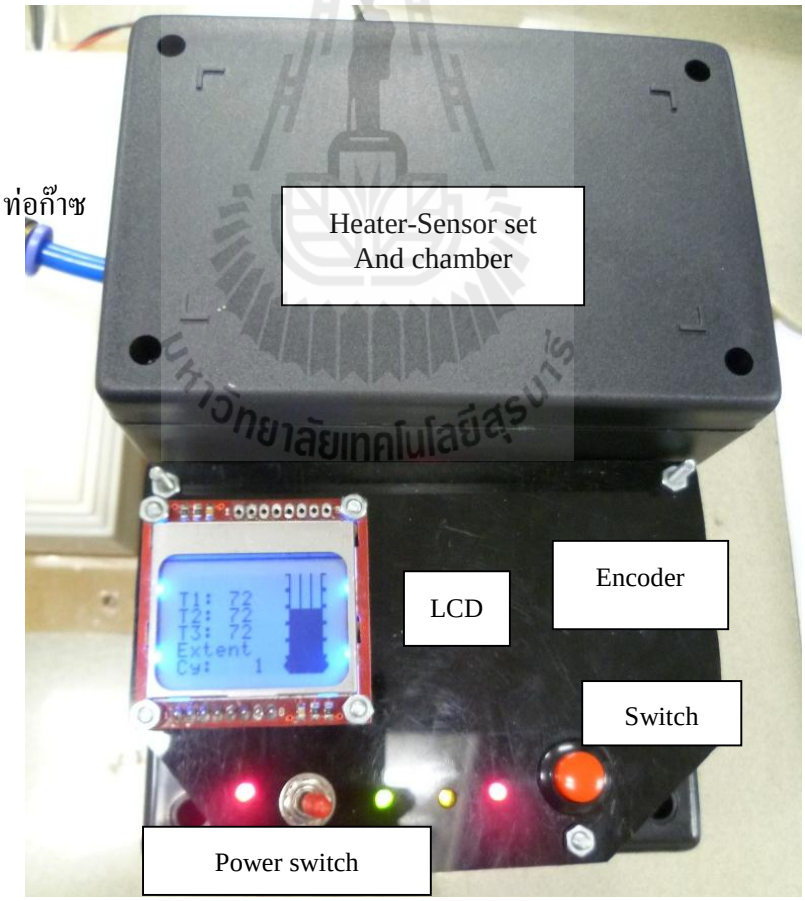


(ก) ติดตั้งท่อระบายความร้อนที่ข้างล่างไมโครฮีตเตอร์

รูปที่ 7.2 เครื่องหมุนเวียนความร้อนขนาดเล็กสำหรับเทคนิคพีซีอาร์

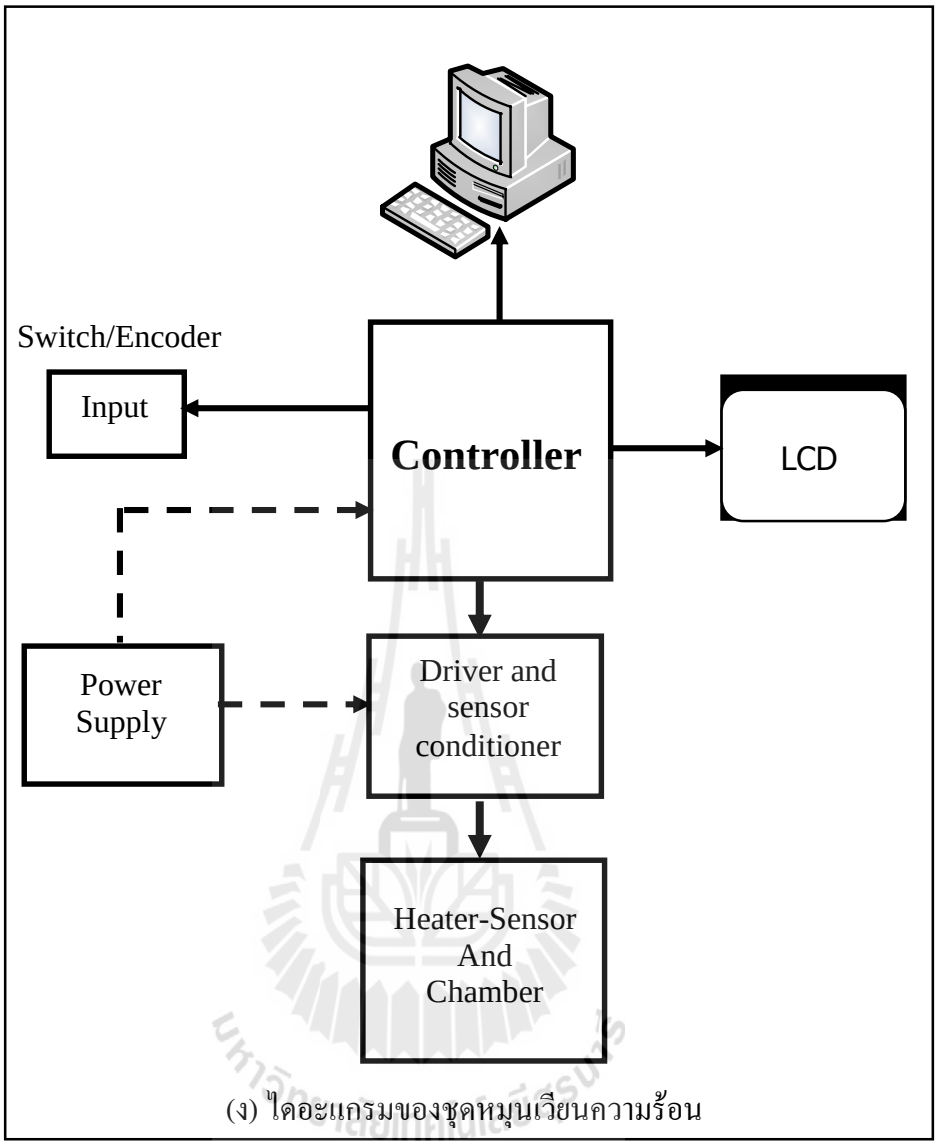


(ข) ติดตั้งชุดระบายความร้อน



(ค) ประกอบอุปกรณ์ลงกล่อง

รูปที่ 7.2 เครื่องหมุนเวียนความร้อนขนาดเล็กสำหรับเทคนิคพีซีอาร์ (ต่อ)



(ง) ไดอะแกรมของชุดหมุนเวียนความร้อน

รูปที่ 7.2 เครื่องหมุนเวียนความร้อนขนาดเล็กสำหรับเทคนิคพีซีอาร์

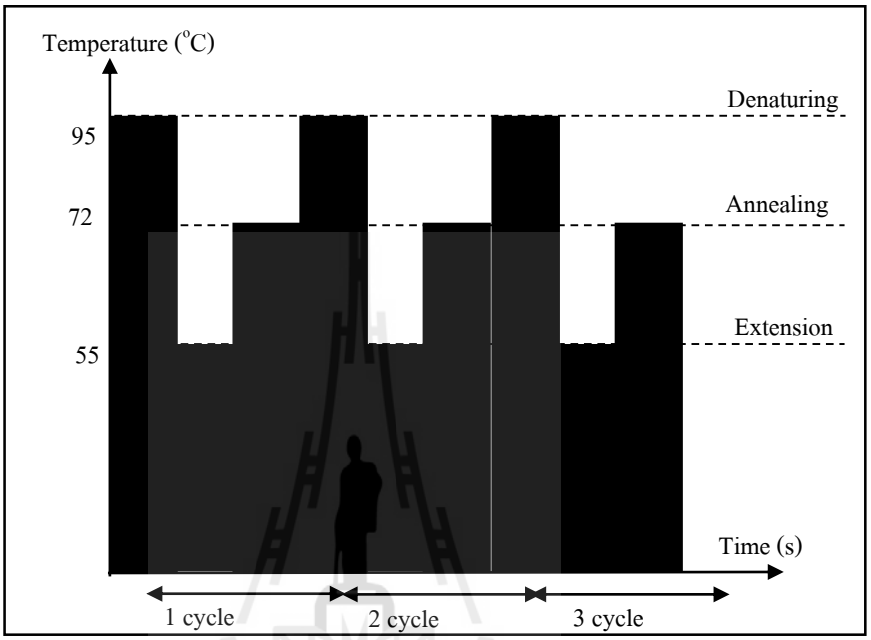
สำหรับการควบคุมพีซีอาร์เพื่อขยายจำนวนเพิ่มดีเอ็นเอ อธิบายคือพอสังเขปดังนี้ ไมโครฮีตเตอร์ทำหน้าที่ให้ความร้อนกับสารละลายพีซีอาร์ที่มีดีเอ็นเอต้นแบบผสมอยู่ โดยมีเซนเซอร์วัดอุณหภูมิเป็นตัวป้อนสัญญาณกลับเพื่อชดเชยให้ได้อุณหภูมิตามต้องการ การทำงานจะมีการควบคุมอุณหภูมิทั้งหมด 3 ระดับดังรูปที่ 7.3 และมีรายละเอียดดังนี้

1) Denaturing อุณหภูมิอยู่ในช่วง 90 °C ถึง 95 °C โดยทั่วไปใช้ 95 °C

2) Annealing อุณหภูมิอยู่ในช่วง 50 °C ถึง 65 °C โดยทั่วไปใช้ 55 °C

3) Extension อุณหภูมิอยู่ในช่วง 70 °C ถึง 75 °C โดยทั่วไปใช้ 72 °C

จากขั้นตอนในการให้ความร้อนที่ (1) ถึง (3) นั้น เรียกว่า 1 รอบ หรือ 1 cycle การเพิ่มขึ้น-ลดลง 1 รอบ ดีเอ็นเอจะขยายตัวเป็น 2 เท่า ทั่วไปแล้วการทำงานจะใช้ประมาณ 20 ถึง 40 รอบ ซึ่งจะได้ปริมาณ ดีเอ็นเอเพิ่มขึ้นนับล้านเท่าเมื่อสิ้นสุดกระบวนการ



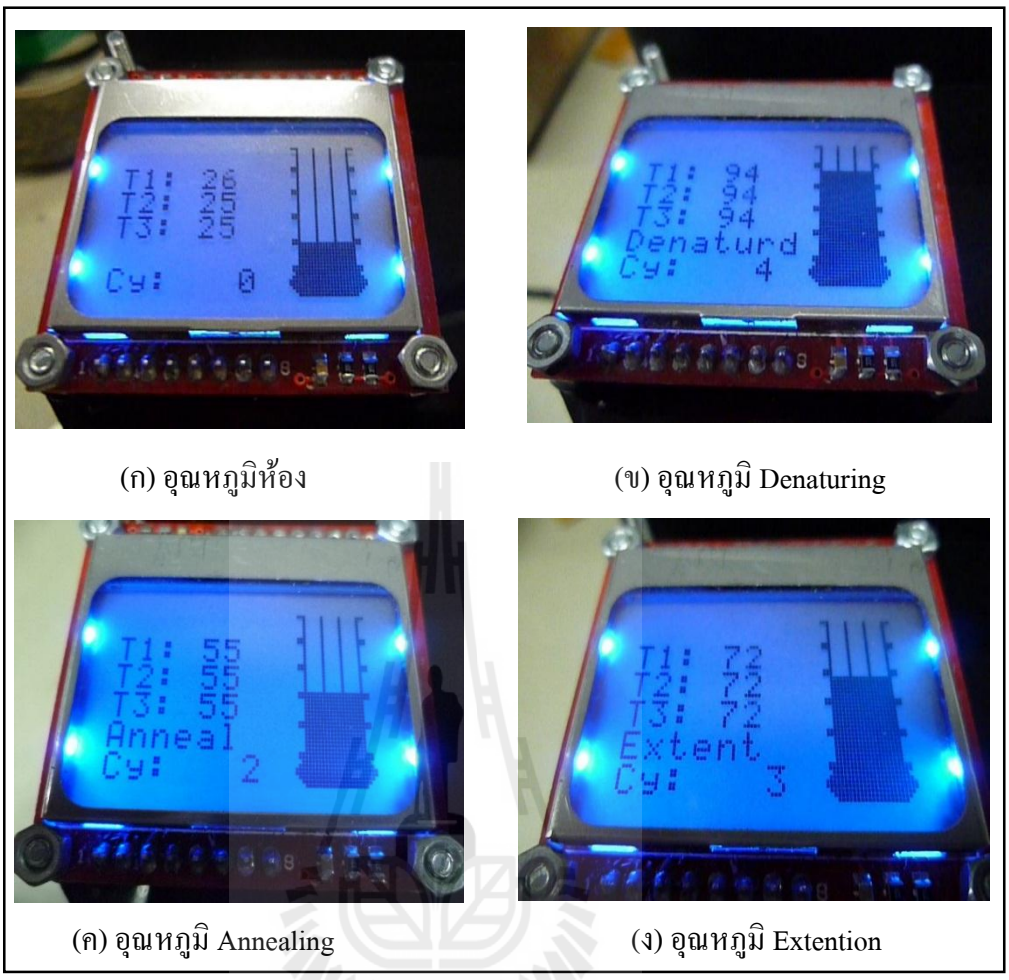
รูปที่ 7. 3 แนวทางการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของระบบทำความร้อนสำหรับใช้กับเทคนิคพีซีอาร์

7.2 การทดสอบระบบหมุนเวียนความร้อน

หลังจากทำการเตรียมชุดทดสอบ ต่อมาจะเป็นการทดสอบการทำหมุนเวียนความร้อน ทั้งชุดทำความร้อนที่อยู่บนฐานรองกระจกหนาและบางดังนี้

7.2.1 การทดสอบหมุนเวียนความร้อนบนฐานรองกระจกหนา

การควบคุมการหมุนเวียนความร้อนแบบปิด (closed loop) แบบแยกอิสระจากกันทั้ง 3 ชุด ด้วยการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ มีอัตราขยายตามที่ได้กล่าวมาแล้วก่อนหน้านี้ โดยใช้สัญญาณ PWM ความถี่ 550 Hz ที่แรงดันไฟฟ้า 9 V พร้อมกับการระบายความร้อนด้วย N_2 ที่ระดับความดันตั้งแต่ 0.5 ถึง 4 บาร์ แสดงผลออกทางจอ LCD พร้อมกับบันทึกผลลงคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 7. 4

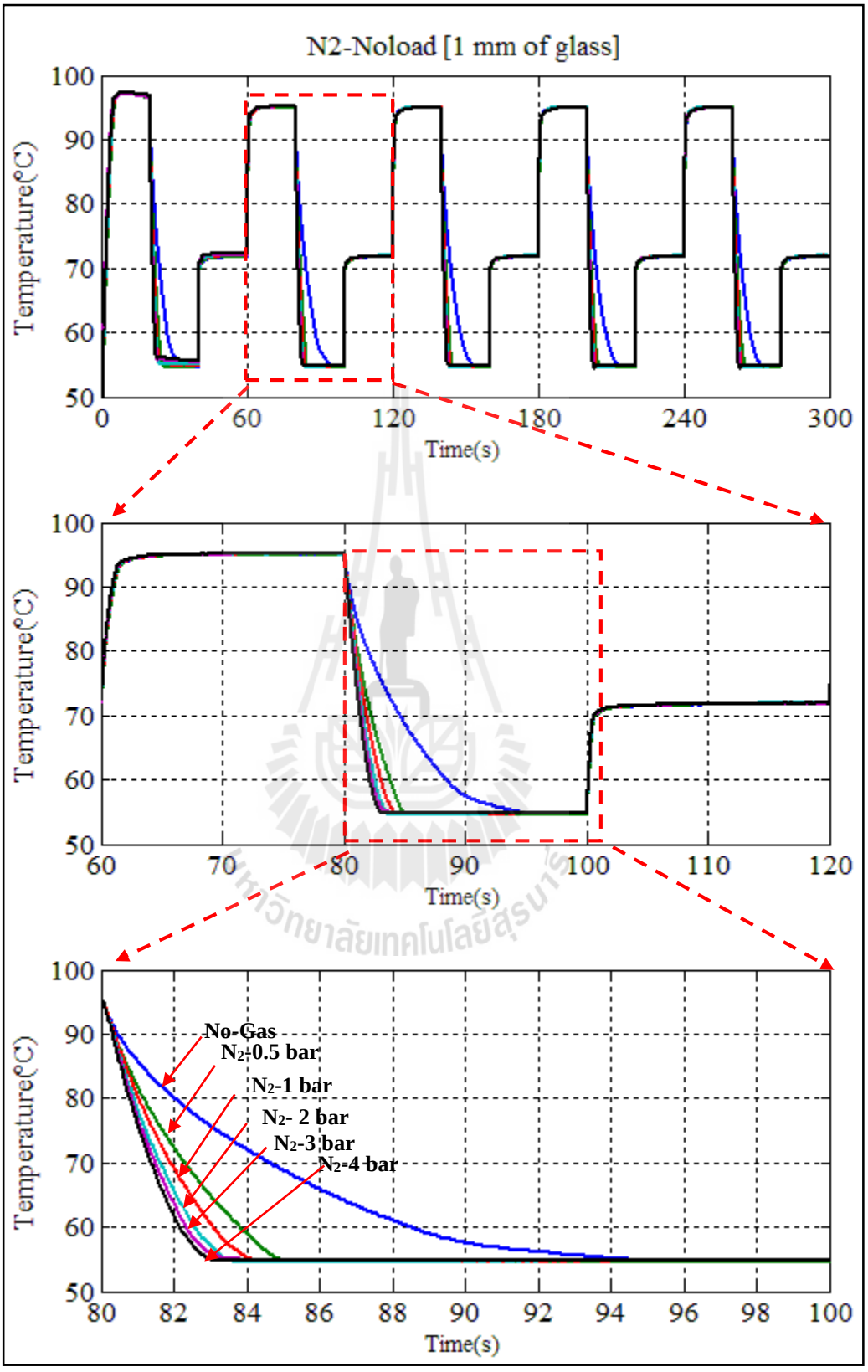


(ก) อุณหภูมิห้อง (ข) อุณหภูมิ Denaturing

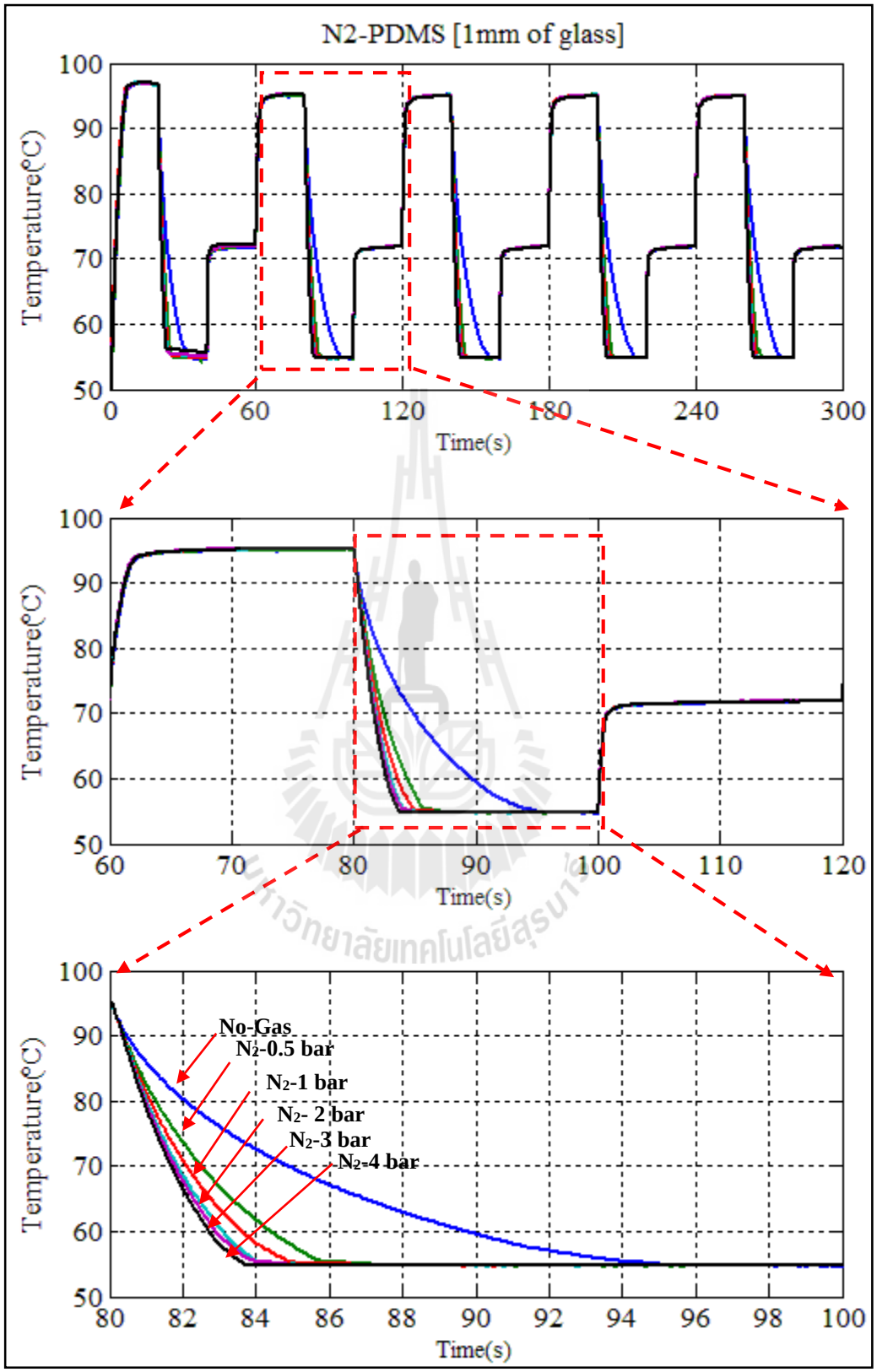
(ค) อุณหภูมิ Annealing (ง) อุณหภูมิ Extention

รูปที่ 7. 4 การแสดงผลที่อุณหภูมิระดับต่าง ๆ ผ่านจอแสดงผล

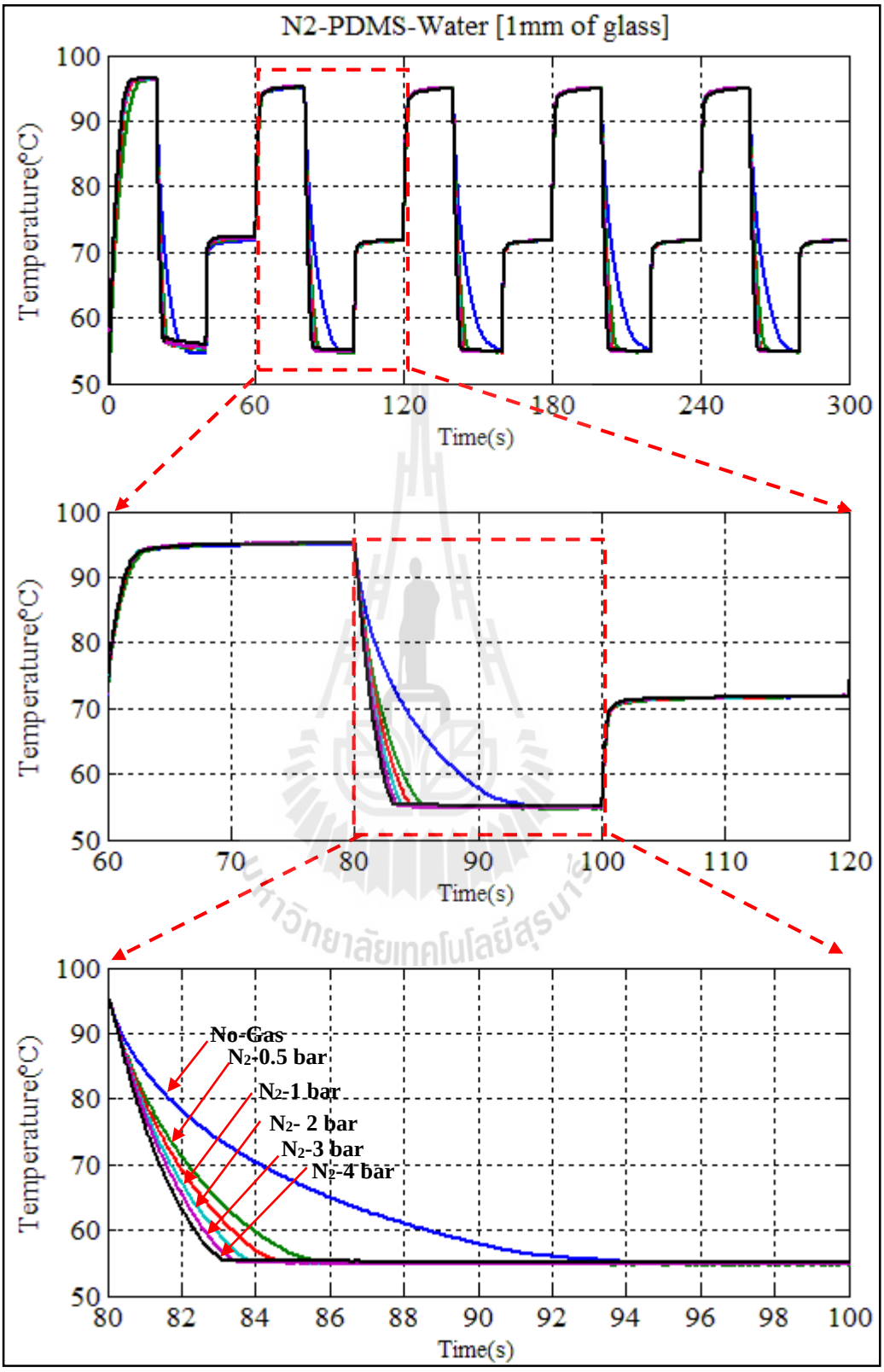
การทดสอบหมุนเวียนความร้อนด้วยหลักการพีซีอาร์ได้ทำการทดสอบ 3 รูปแบบคือ 1) *การทดสอบแบบไร้โหลด* คือทดสอบชุดทำความร้อนที่ประกอบด้วยไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์เท่านั้นโดยไม่มีห้องบรรจุของเหลวเป็นโหลดในการทดสอบได้ผลดังรูปที่ 7.5 เป็นการบันทึกค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิทั้ง 3 ตัว โดยทดสอบที่ระดับแรงดันก๊าซได้แก่ 0.5 1 2 3 และ 4 บาร์ตามลำดับ 2) *การทดสอบโดยโหลดเป็นห้องบรรจุของเหลว* ได้ผลดังรูปที่ 7.6 และ 3) *การทดสอบโดยโหลดเป็นห้องบรรจุของเหลวและน้ำ* ได้ผลดังรูปที่ 7.7



รูปที่ 7.5 การหมุนเวียนความร้อนแบบไร้โหลดของฐานรองกระจกหนา



รูปที่ 7.6 การหมุนเวียนความร้อนมีโหลดเป็นห้องบรรจุของเหลวของฐานรองกระจกหนา



รูปที่ 7.7 การหมุนเวียนความร้อนมีโหลดเป็นห้องบรรจุของเหลวและน้ำของฐานรองกระจกหนา

จากการทดสอบการควบคุมชุดทำความร้อนบนกระจกหนาในรูปแบบต่าง ๆ ทั้งแบบไร้โหลด โหลดเป็นห้องบรรจุของเหลวและโหลดเป็นห้องบรรจุของเหลวกับน้ำ พร้อมกับทำการป้อนก๊าซในโตรเจน เพื่อระบายความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ สามารถสรุปผลดังตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 เปรียบเทียบผลทดสอบชุดทำความร้อนบนกระจกหนาที่ระบายอากาศด้วยก๊าซไนโตรเจน

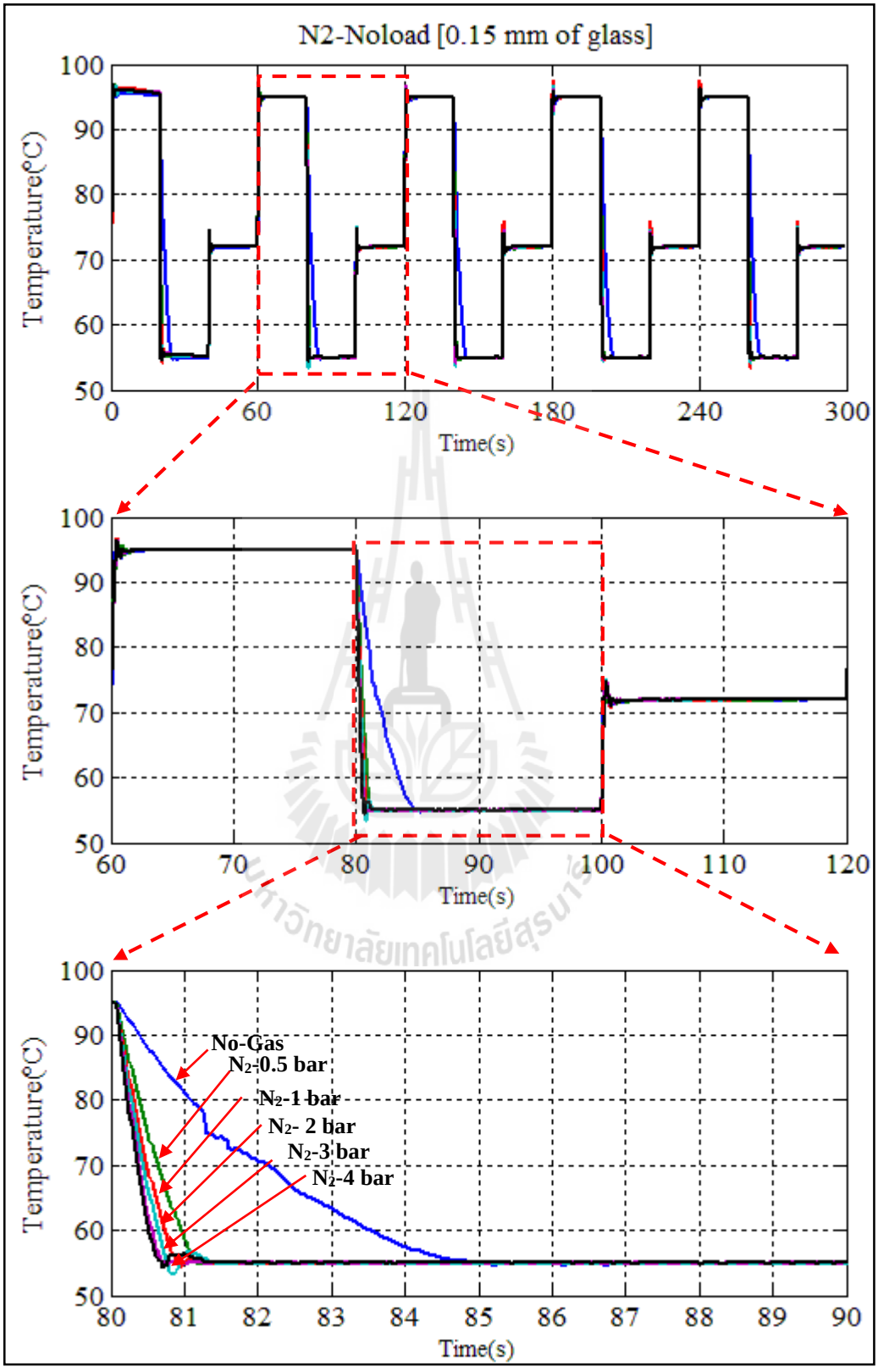
Load	N_2 (bar)	Rise time T_{r1} (s) [72-95°C]	Fall time T_f (s) [95-55°C]	Rise time T_{r2} (s) [55-72°C]
No load	-	3	15	2
	0.5	3	5	2
	1	3	4	2
	2	3	3.5	2
	3	3	3	2
	4	3	2.8	2
PDMS	-	3	16	2
	0.5	3	6	2
	1	3	4.8	2
	2	3	4	2
	3	3	3.8	2
	4	3	3.5	2
PDMS+Water	-	3	15	2
	0.5	3	5.5	2
	1	3	4.5	2
	2	3	3.7	2
	3	3	3.3	2
	4	3	3.2	2

จากผลการทดสอบการควบคุมและการระบายความร้อนด้วยก๊าซในโตรที่ระดับต่าง ๆ เมื่อพิจารณาเฉพาะสภาวะมีโหลดเป็นห้องบรรจุของเหลวที่มีน้ำ พบว่า กรณีที่ไม่มีการระบายความร้อนอุณหภูมิของช่วงขาลงลดจาก 95 °C ถึง 55°C ใช้เวลาประมาณ 15 วินาที และเมื่อทำการระบายความร้อนด้วยก๊าซในโตร เจนที่ประมาณ 0.5 บาร์ จะใช้เวลาประมาณ 5.5 วินาที หรือลดลงเวลา 2.7 เท่า ส่วนช่วงข้าขึ้นจากอุณหภูมิ 55 °C ถึง 72 °C และ 72 °C ถึง 95 °C ใช้เวลา 2 วินาที และ 3 วินาที ตามลำดับ สำหรับระดับแรงดันก๊าซอื่น ผลจะออกมาในลักษณะรูปแบบเดียวกันคือ เมื่อระดับแรงดันก๊าซเพิ่มขึ้นจะทำให้เวลาขาลงลดลงเร็วกว่าเดิมแต่ไม่ต่างกับที่ระดับแรงดัน 0.5 บาร์ มากนัก จึงแสดงให้เห็นเฉพาะที่ระดับแรงดันดังกล่าว

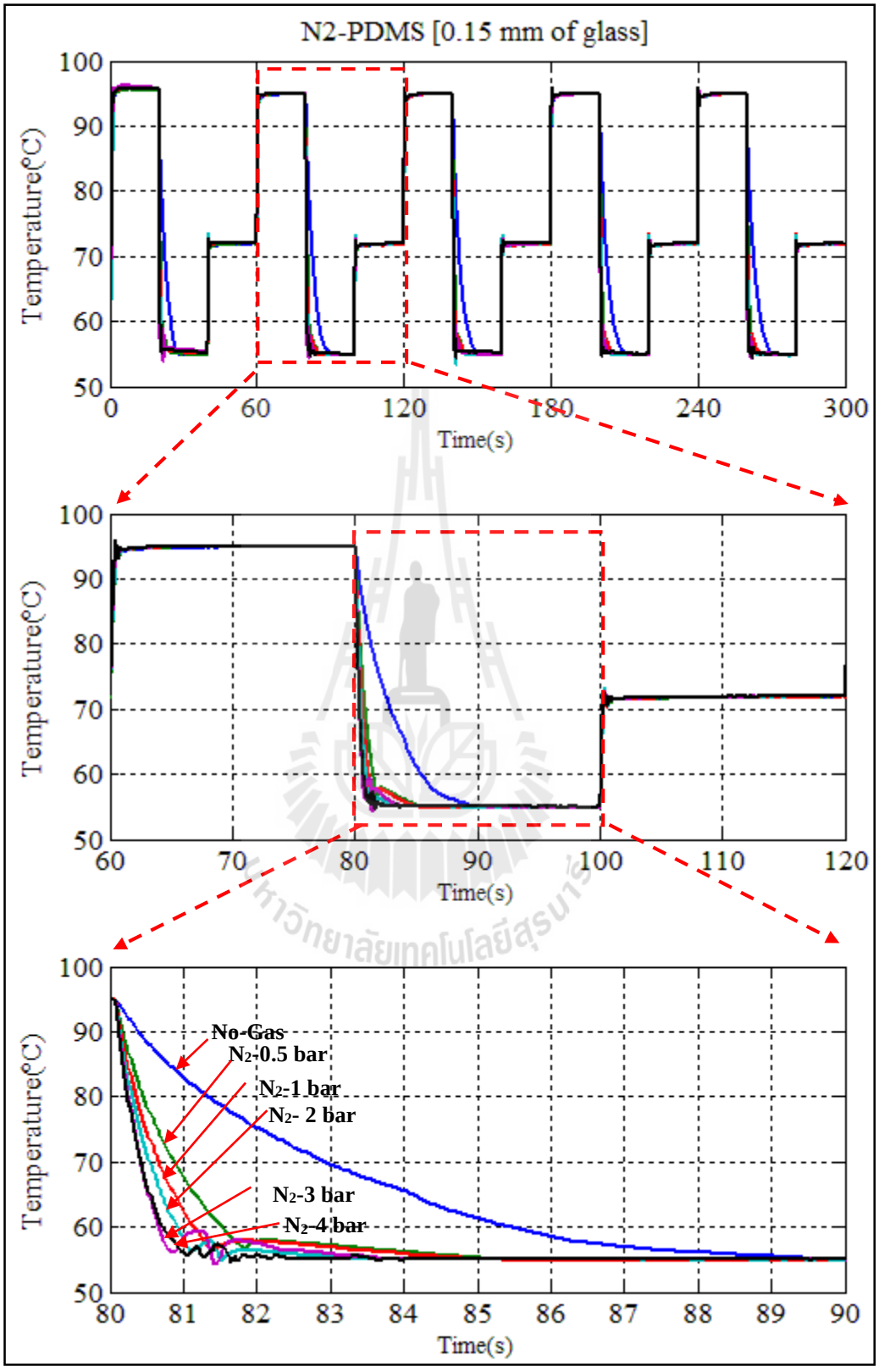
7.2.2 การควบคุมชุดทำความร้อนบนฐานรองกระจกบาง

การทดสอบหมุนเวียนความร้อนด้วยหลักการพีซีอาร์ด้วยชุดทำความร้อนบนฐานรองกระจกบางได้ทำการทดสอบเช่นเดียวกันกับการทดสอบชุดทำความร้อนบนกระจกหนา 3 รูปแบบคือ *1) การทดสอบแบบไร้โหลด* ได้ผลดังรูปที่ 7.8 และ *2) การทดสอบโดยโหลดเป็นห้องบรรจุของเหลว* ได้ผลดังรูปที่ 7.9 และ *3) การทดสอบโดยโหลดเป็นห้องบรรจุของเหลวและน้ำ* ได้ผลดังรูปที่ 7.10

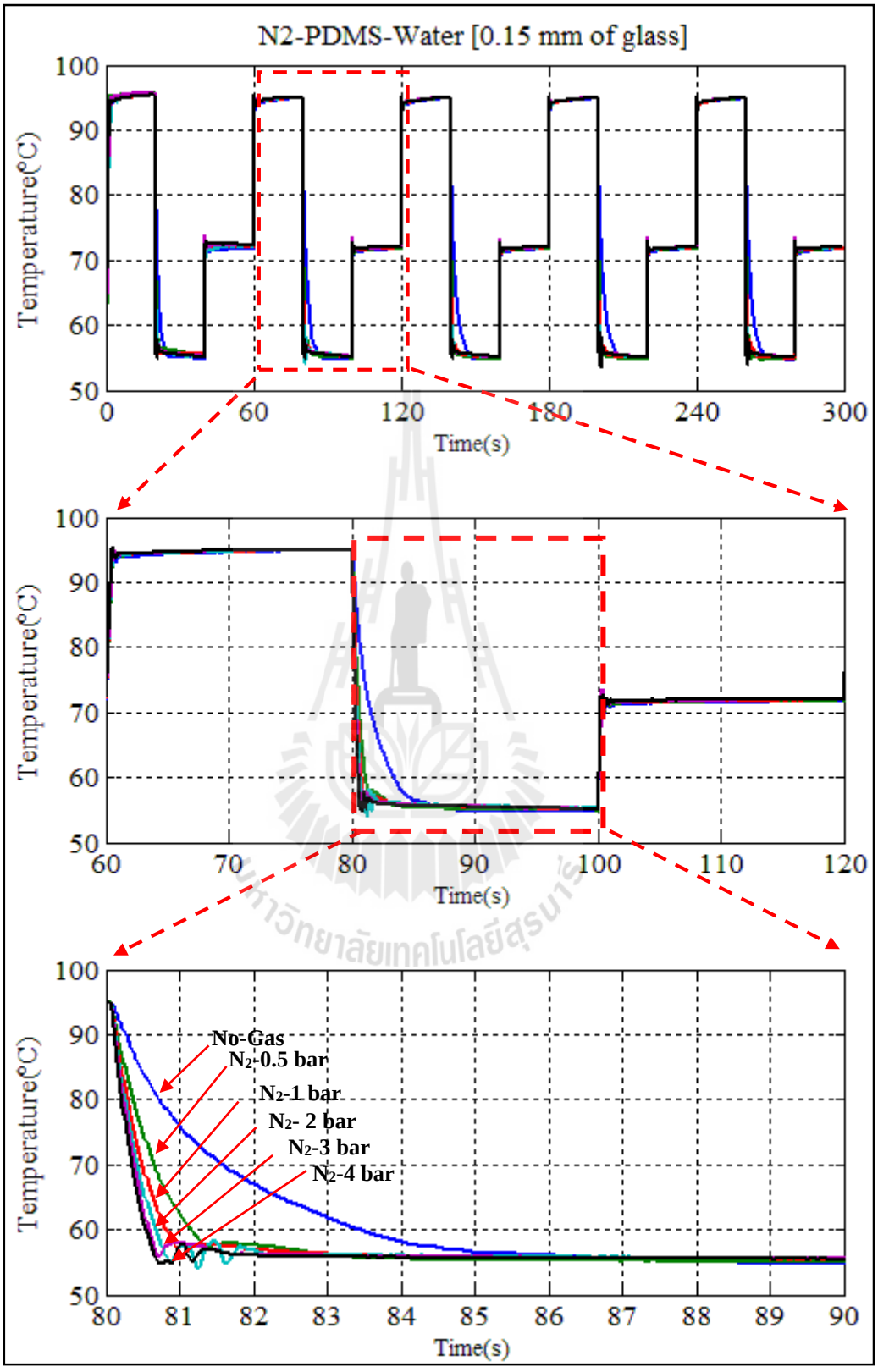
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 7.8 การหมุนเวียนความร้อนแบบไร้โหลดของฐานรองกระจกบาง



รูปที่ 7.9 การหมุนเวียนความร้อนมีโหลดเป็นห้องบรรจุของเหลวของฐานรองกระจกบาง



รูปที่ 7.10 การหมุนเวียนความร้อนมีโหลดเป็นห้องบรรจุของเหลวและน้ำของฐานรองกระจกบาง

จากการทดลองการควบคุมชุดทำความร้อนบนกระจกบางทั้งแบบไร้โหลด โหลดเป็นห้องบรรจุของเหลวและโหลดเป็นห้องบรรจุของเหลวกับน้ำพร้อมกับทำการป้อนก๊าซไนโตรเจนเพื่อระบายความร้อนที่อุณหภูมิช่วงเวลาขาลง สามารถสรุปผลดังตารางที่ 7.2

ตารางที่ 7.2 เปรียบเทียบผลการระบายความร้อนกับชุดทำความร้อนบนกระจกบางด้วยก๊าซไนโตรเจน

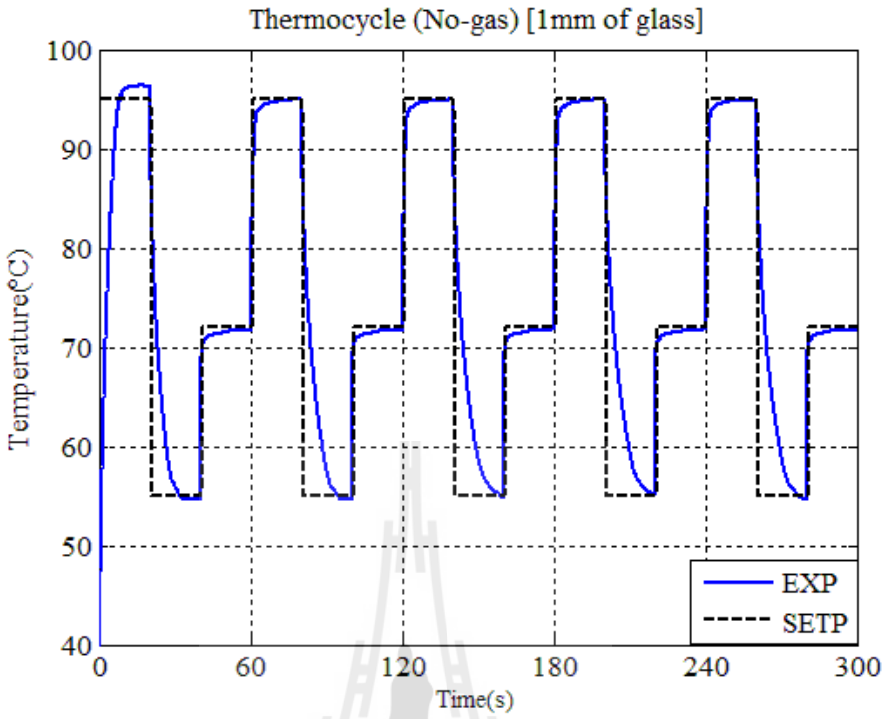
Load	N_2 (bar)	Rise time T_{r1} (s) [72-95°C]	Fall time T_f (s) [95-55°C]	Rise time T_{r2} (s) [55-72°C]
No load	-	1	5	0.7
	0.5	1	1.2	0.7
	1	1	0.9	0.7
	2	1	0.75	0.7
	3	1	0.7	0.7
	4	1	0.65	0.7
PDMS	-	0.8	9	0.7
	0.5	0.8	3	0.7
	1	0.8	2.8	0.7
	2	0.8	1.5	0.7
	3	0.8	0.9	0.7
	4	0.8	0.8	0.7
PDMS-Water	-	0.8	6	2
	0.5	0.8	3	2
	1	0.8	2.5	2
	2	0.8	1.3	2
	3	0.8	1	2
	4	0.8	0.7	2

เมื่อพิจารณาเฉพาะสภาวะโหลดเป็นห้องบรรจุของเหลวและน้ำ สำหรับชุดทำความร้อนบนฐานรองกระจกบาง พบว่าหากไม่การระบายความร้อนของระบบ ช่วงเวลาขาลงอุณหภูมิลดจาก 95 °C ถึง 55°C ใช้เวลา 6 วินาที และเมื่อทำการระบายความร้อนด้วยไนโตรเจนที่ประมาณ 0.5 บาร์ จะใช้เวลา 3 วินาที หรือลดลงเวลาได้ 2 เท่า ส่วนขาขึ้นจาก 55 °C ถึง 72 °C และ 72 °C ถึง 95 °C ใช้เวลา 0.8 วินาที และ 2 วินาที ตามลำดับ

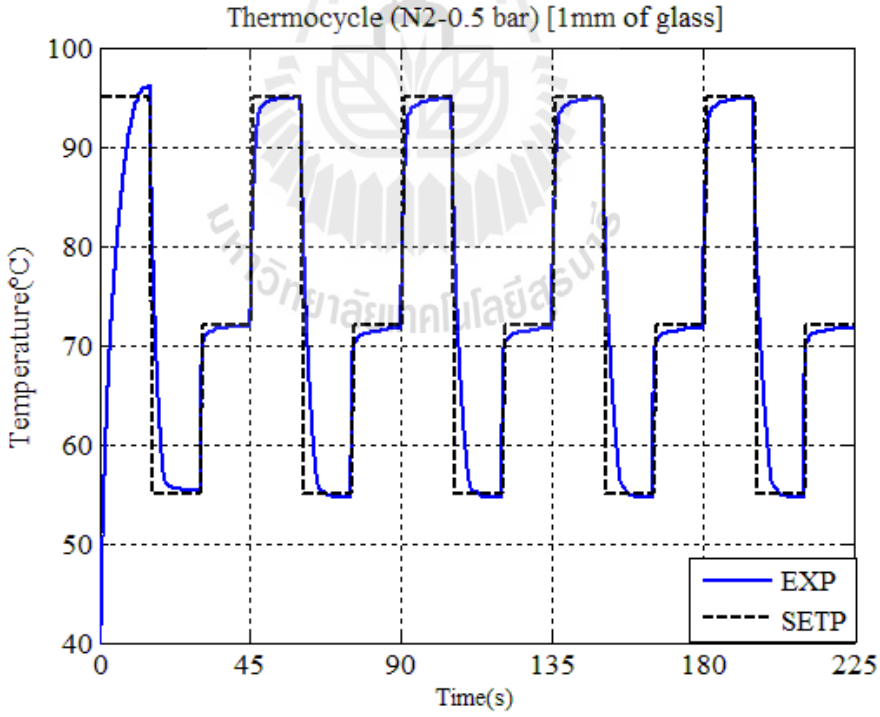
นอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบระดับเสียงด้วยเครื่อง Sound level meter (Lutron) SL-4023SD ที่ระดับแรงดันดันก๊าซต่าง ๆ ได้ผลดังนี้ ไม่ระบายด้วยก๊าซ ระดับเสียงเท่ากับ 51 dB ที่แรงดันก๊าซ 0.5 บาร์ ระดับเสียงเท่ากับ 55 dB แรงดันก๊าซ 1 บาร์ ระดับเสียงเท่ากับ 57 dB แรงดันก๊าซ 2 บาร์ ระดับเสียงเท่ากับ 69 dB แรงดันก๊าซ 3 บาร์ ระดับเสียงเท่ากับ 78 dB และที่แรงดันก๊าซ 4 บาร์ ระดับเสียงเท่ากับ 87 dB ซึ่งไม่ก่อให้เกิดมลภาวะทางเสียงต่อผู้ปฏิบัติงาน โดยมาตรฐานการทำงานอยู่ความดังต้องไม่เกิน 90 dB

เนื่องจากข้อมูลการทดสอบระบายความร้อนด้วยก๊าซที่ระดับแรงดัน 1 2 3 และ 4 บาร์ ลดระยะเวลาขาลงได้ไม่แตกต่างมากนัก จึงเลือกใช้แรงดันก๊าซที่ 0.5 บาร์ ในการนำมาพิจารณาการหมุนเวียนความร้อน อีกทั้งยังเป็นการประหยัดก๊าซสำหรับระบายความร้อนด้วย นอกจากนี้ได้ทำการแสดงให้เห็นอีกครั้ง สำหรับการทดสอบตามหลักการพีซีอาร์ที่มีน้ำบรรจุอยู่มีทั้งหมด 4 รูปแบบ ผลทดสอบเป็นดังรูปที่ 7.11

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

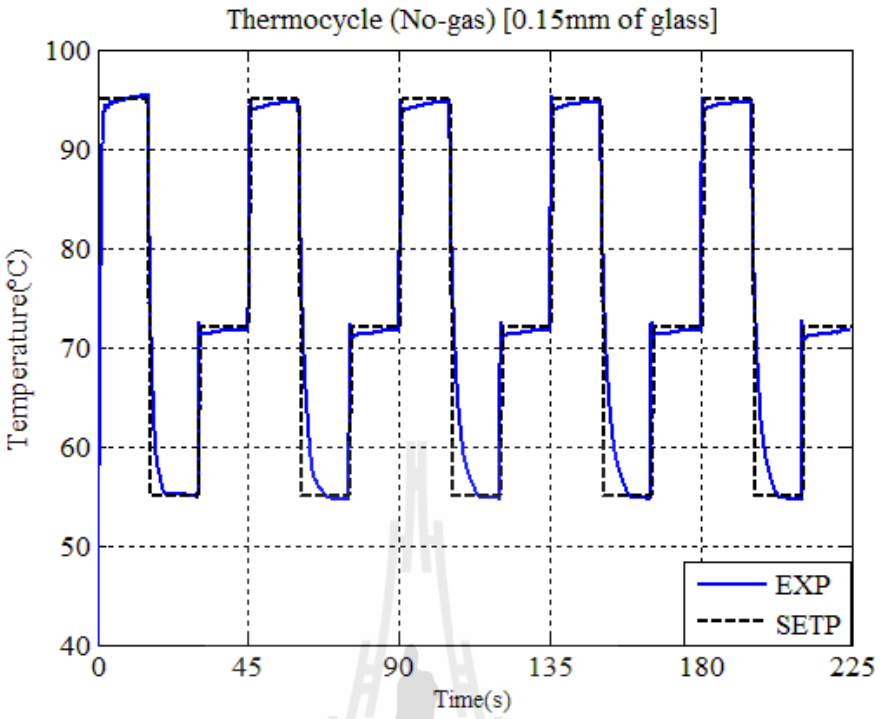


(ก) แบบที่ 1 การหมุนเวียนความร้อนด้วยชุดทำความร้อนกระจกหนาที่คาบการทำงาน 60 วินาที

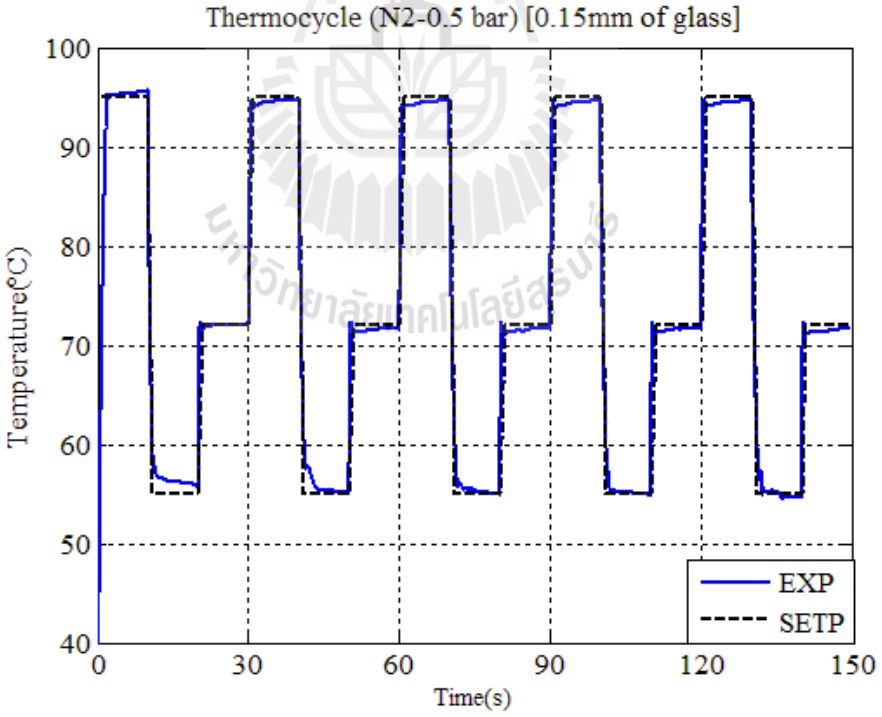


(ข) แบบที่ 2 การหมุนเวียนความร้อนด้วยชุดทำความร้อนกระจกหนาที่คาบการทำงาน 45 วินาที โดยมีก๊าซระบายความร้อนเท่ากับ 0.5 บาร์

รูปที่ 7.11 การหมุนเวียนความร้อนของเครื่องต้นแบบพีซีอาร์ขนาดเล็ก



(ค) แบบที่ 3 การหมุนเวียนความร้อนด้วยชุดทำความร้อนกระจกบางที่คาบการทำงาน 45 วินาที



(ง) แบบที่ 4 การหมุนเวียนความร้อนด้วยชุดทำความร้อนกระจกบางที่คาบการทำงาน 30 วินาที โดยมีก๊าซระบายความร้อนเท่ากับ 0.5 บาร์

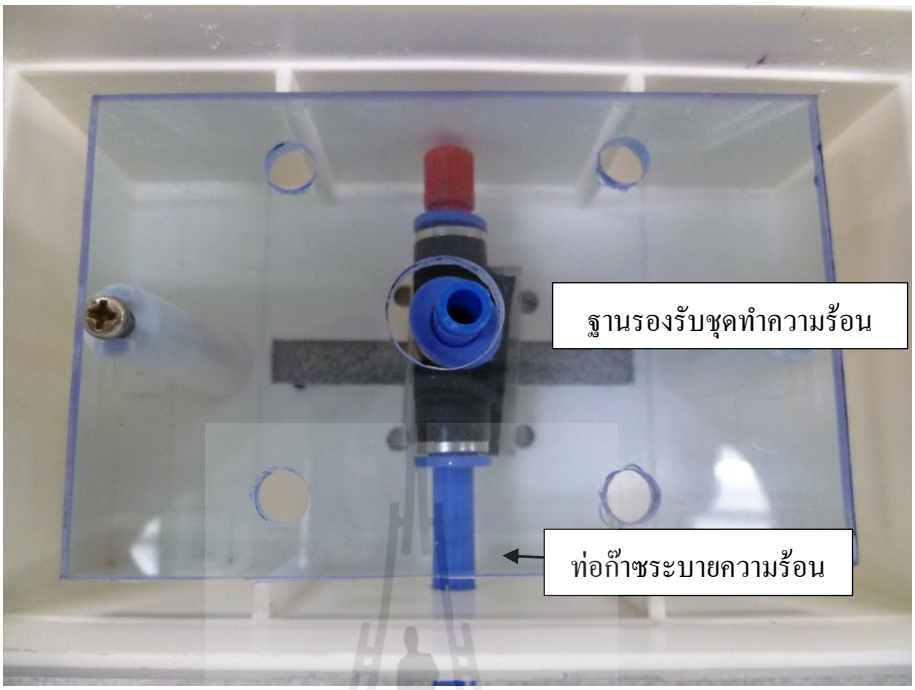
รูปที่ 7.11 การหมุนเวียนความร้อนของเครื่องต้นแบบพีซีอาร์ขนาดเล็ก (ต่อ)

จากการทดสอบหาผลตอบสนองทางเวลาของชุดทำความร้อน การจำลองผลการกระจายความร้อนรวมถึงการการควบคุมอุณหภูมิที่ระดับต่าง ๆ หากทำการคำนวณเวลาต่อการคาบการทำงาน หรือต่อ 1 cycle จะสามารถบอกถึงเวลาที่ใช้ในการทำพีซีอาร์ตามหลักการของพีซีอาร์จำนวน 30 รอบ ได้ดังนี้ *แบบที่ 1* (SUT1) ชุดทำความร้อนบนกระจกหนาไม่ระบายความร้อนใช้เวลาในการทำงานคาบหรือไซเคิลละ 60 วินาที จะใช้เวลา 30 นาที *แบบที่ 2* (SUT2) ชุดทำความร้อนบนกระจกหนากรณีระบายความร้อนด้วยก๊าซไนโตรเจน 0.5 บาร์ จะใช้เวลา 23 นาที *แบบที่ 3* (SUT3) ชุดทำความร้อนบนกระจกบางกรณีไม่ระบายความร้อน จะใช้เวลา 23 นาที และ *แบบที่ 4* (SUT4) ชุดทำความร้อนบนกระจกบางกรณีระบายความร้อนด้วยไนโตรเจน จะใช้เวลา 15 นาที สามารถสรุปเป็นตารางได้ดังตารางที่ 7.3 หากทำการเปรียบเทียบต้นแบบพีซีอาร์ที่ขนาดเล็กที่สร้างขึ้นกับเครื่องพีซีอาร์ที่ใช้กับห้องปฏิบัติการทั่วไปที่ใช้เวลา 60 นาที ในการทำงาน เครื่องพีซีอาร์ต้นแบบสามารถลดเวลาในการทำงานได้ ได้ 2 ถึง 4 เท่า

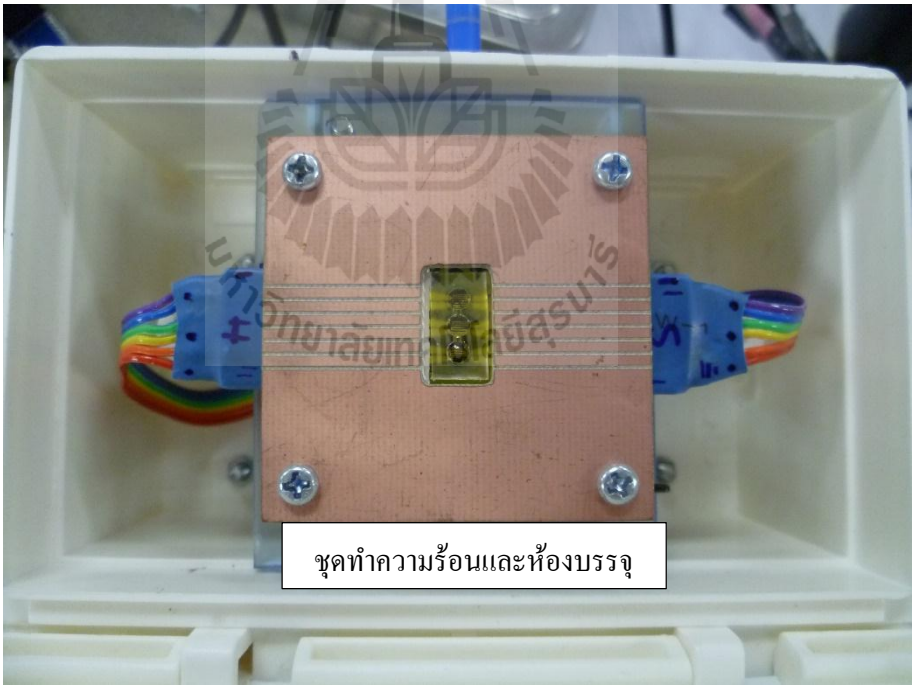
ตารางที่ 7.3 เปรียบเทียบเวลาทำงานของพีซีอาร์ต้นแบบที่สร้างขึ้น

แบบที่	เวลาในการทำงาน (30 รอบ) (นาที)	ผลต่างจากแบบที่ 1
SUT1 : ชุดทำความร้อนบนกระจกหนา ไม่ระบายความร้อน	30	-
SUT2 : ชุดทำความร้อนบนกระจกหนาระบายความร้อนด้วยไนโตรเจน 0.5บาร์	22.3	1.3 เท่า
SUT3 : ชุดทำความร้อนบนกระจกบาง ไม่ระบายความร้อน	22.3	1.3 เท่า
SUT4 : ชุดทำความร้อนบนกระจกบางระบายความร้อนด้วยไนโตรเจน 0.5 บาร์	15	2 เท่า

นอกจากนี้ยังพัฒนาเครื่องต้นแบบมาใหม่อีก 1 ชุด ที่สามารถทำงานได้เหมือนเดิมทุกประการ ด้วยการออกแบบใหม่เพื่อความแข็งแรง ความเป็นระเบียบในการบำรุงรักษาและเพื่อให้ผู้ใช้งานพกพาสะดวกขึ้นดังรูปที่ 7.12 ซึ่งประกอบด้วย ฐานรองรับชุดทำความร้อน ท่อระบายอากาศ วงจร อุปกรณ์แสดงผล

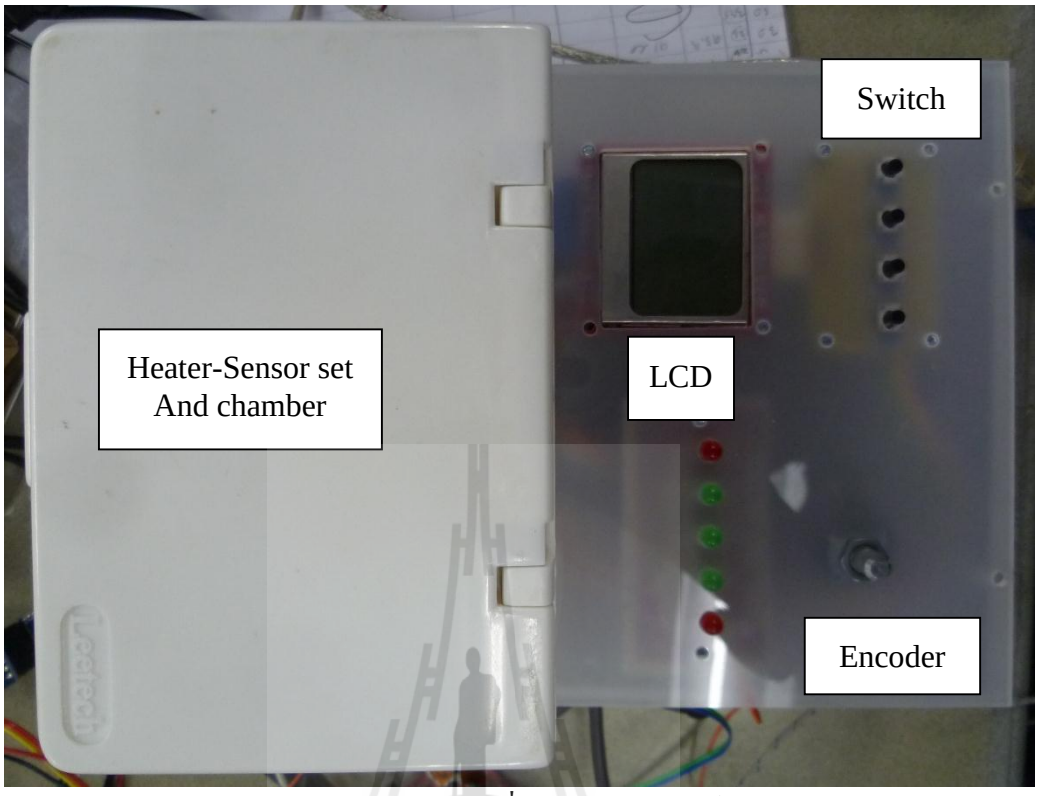


(ก) ท่อสำหรับต่อก๊าซระบายความร้อน



(ข) ไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์พร้อมห้องบรรจุของเหลว

รูปที่ 7.12 เครื่องหมุนเวียนความร้อนขนาดเล็กสำหรับเทคนิคพีซีอาร์



(ค) เครื่องต้นแบบพีซีอาร์

รูปที่ 7.12 เครื่องหมุนเวียนความร้อนขนาดเล็กสำหรับเทคนิคพีซีอาร์

7.3 บทสรุป

เนื้อหาบทนี้เป็นการทดสอบการควบคุมชุดทำความร้อนที่ตามหลักการของพีซีอาร์ทั่วไป โดยทดสอบที่เงื่อนไขต่าง ๆ ได้แก่ 1) ที่สภาวะไร้โหลด 2) ที่สภาวะมีโหลดเป็นห้องบรรจุของเหลว และ 3) ที่สภาวะมีโหลดเป็นห้องบรรจุของเหลวและกับน้ำ นอกจากนี้ยังได้ทำการป้อนก๊าซที่ระดับต่าง ๆ เพื่อระบายความร้อนให้กับชุดทดสอบ เพื่อดูผลการทำงานของชุดทำความร้อนทั้งบนฐานรองกระจกหนาและบาง ได้ผลการทดลองเป็นน่าพอใจ ซึ่งในอนาคตจะมีการนำไปทดสอบใช้งานโดยนักวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อพร้อมกับปรับปรุงสมรรถนะต่อไป

บทที่ 8
สรุปและข้อเสนอแนะ

8.1 สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการสร้างระบบทำความร้อนขนาดเล็กเพื่อสร้างต้นแบบเครื่องหมุนเวียนความร้อนหรือเครื่องพีซีอาร์หรือเครื่องเทอร์โมไซเคิลขนาดเล็ก ทำหน้าที่เป็นเครื่องขยายหรือเพิ่มปริมาณดีเอ็นเอ เพื่อใช้ในงานทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพ ประกอบด้วยไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ โดยใช้กระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอกซ์ ซึ่งเป็นกระบวนการสำคัญสำหรับงานวิจัย เริ่มต้นด้วยการออกแบบลวดลายโครงสร้างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อสร้างหน้ากากกั้นรังสีอัลตราไวโอเลตหรือฟิล์มกั้นแสง แล้วสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ด้วยฟิล์มที่ได้จากการออกแบบ โดยกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต จากนั้นทำการสร้างลวดลายลงบนสารไวแสงชนิดลบ (SU8) โดยกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอกซ์ที่มีฐานรองเป็นแผ่นกราไฟต์และแผ่นสเตนเลส ต่อมาทำการชุบโลหะนิกเกิลจนเต็ม ทำการขัดผิวหน้าของชิ้นงานให้เรียบพร้อมกับขัดฐานรองที่เป็นแผ่นกราไฟต์ออก สำหรับชิ้นงานที่อยู่บนฐานรองสเตนเลสทำการขัดผิวหน้าให้เรียบเช่นกันพร้อมกับสกัดสารแสงทิ้งด้วยการพลาสมาโดยใช้ O_2 กับ CF_4 ให้หมด จนได้หน้ากากแข็งสำหรับใช้งาน ทำการเคลือบโลหะอะลูมิเนียมเพื่อสร้างลวดลวยของไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์ผ่านหน้ากากแข็งดังกล่าวลงบนกระจกสไลด์ด้วยการสปัตเตอริ่งพบว่า ลวดลายที่สร้างได้นั้นมีความคมชัดมาก แต่ไม่สามารถนำมาใช้งานได้ เพราะค่าความต้านทานที่สร้างขึ้นมีค่าผิดเพี้ยนมากเกินไป สาเหตุเนื่องจากเครื่องที่ใช้งานไม่สามารถสร้างให้ลวดลายมีความหนาของโลหะสม่ำเสมอกันตลอดทั้งโครงสร้าง เมื่อพบกับปัญหาดังกล่าวจึงได้เปลี่ยนแนวทางการเคลือบโลหะโดยใช้การเคลือบแบบระเหยไอในสุญญากาศจนได้ลวดลาย ซึ่งได้ทำการสร้างทั้งบนฐานรองกระจกหนาและบาง นำชิ้นงานที่สร้างเสร็จแล้วทำการวัดขนาดความผิดพลาดของโครงสร้าง พบว่ามีความผิดพลาดจากที่ออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เท่ากับ ±7.5 % มีค่าความผิดเพี้ยนมากว่าการสร้างด้วยวิธีกระบวนลิโธกราฟฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตซึ่งเป็นกระบวนการมาตรฐานทั่วไปที่มีความผิดพลาดจาการออกแบบเท่ากับ ±2.58 % ความผิดพลาดนี้มีผลจากกระบวนการสร้างที่มีหลายขั้นตอน หากพิจารณากระบวนการสร้างลวดลายด้วยการเคลือบโลหะผ่านหน้ากากแข็งที่สร้างด้วยรังสีเอกซ์จะช่วยลดขั้นตอนจากวิธีสร้างด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตจาก 6 กระบวนการ 7 วัสดุสิ้นเปลือง และ 4 เครื่องมือ ให้ลดลงเหลือเพียง 1 กระบวนการ 1 วัสดุสิ้นเปลือง และ 1 เครื่องมือ

เท่านั้น ซึ่งจะมีผลต่อต้นทุนการผลิตเป็นอย่างมาก กระบวนการสร้างลวดลายผ่านหน้ากากแข็งนี้เป็นเทคนิคใหม่สำหรับสร้างลวดลายนอกจากนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์สร้างลวดลายอื่น ๆ ที่มีลักษณะเป็นฟิล์มบางที่คล้ายกันได้อีกด้วย

เมื่อสิ้นสุดกระบวนการสร้างแล้วต่อมาเป็นการทดสอบคุณสมบัติของเซนเซอร์และไมโครฮีตเตอร์ โดยเริ่มจากการปรับเทียบเซนเซอร์เพื่อหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าความต้านทาน โดยเซนเซอร์ที่สร้างบนฐานรองกระจกหนา มีค่าความไวเฉลี่ยเท่ากับ 0.396 $\Omega/^{o}C$ ความแม่นเฉลี่ยเท่ากับ ±2.4 %FSD (ค่าเต็มสเกลเท่ากับ 110 ^{o}C) ค่าฮีสเตอร์รีซิสเฉลี่ยเท่ากับ ±3.0 % FSD (ค่าเต็มสเกลเท่ากับ 110 ^{o}C) และค่าสัมประสิทธ์การเปลี่ยนแปลงความร้อนต่ออุณหภูมิ (Temperature coefficient of resistance : TCR) เฉลี่ยเท่ากับ 2.70×10^{-3} $^{o}C^{-1}$ ส่วนเซนเซอร์ที่สร้างบนฐานรองกระจกหนามีค่าความไวเฉลี่ยเท่ากับ 0.479 $\Omega/^{o}C$ ความแม่นเฉลี่ยเท่ากับ ±1.8 %FSD (ค่าเต็มสเกลเท่ากับ 110 ^{o}C) ค่าฮีสเตอร์รีซิสเฉลี่ยเท่ากับ ±4.7 %FSD (ค่าเต็มสเกลเท่ากับ 110 ^{o}C) และค่า TCR เฉลี่ยเท่ากับ 3.43×10^{-3} $^{o}C^{-1}$ จากนั้นทำการออกแบบและสร้างวงจรปรับแต่งสัญญาณและวงจรขับ พร้อมกับประกอบเป็นชุดทำความร้อน ทำการทดสอบเพื่อคุณสมบัติของไมโครฮีตเตอร์ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นอุปกรณ์ควบคุม มีตัวแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะลอก (DAC) ต่ออยู่ภายนอกร่วมกับวงจรขยายกำลัง เป็นอุปกรณ์ขับได้ผลการทดสอบดังนี้ ชุดทำความร้อนที่สร้างบนฐานรองกระจกหนามีค่าคงตัวทางเวลาเท่ากับ 8.2 วินาที เวลาขาขึ้นเท่ากับ 32.5 วินาที เวลาขาลงเท่ากับ 38 วินาที ใช้กำลังในการขับสูงสุด 391 mW มีค่าความไว 194^{o}C /W ส่วนชุดทำความร้อนที่สร้างบนฐานรองกระจกบาง มีค่าคงตัวทางเวลาเท่ากับ 3.7 วินาที เวลาขาขึ้นเท่ากับ 13 วินาที เวลาขาลงเท่ากับ 14 วินาที ใช้กำลังในการขับสูงสุด 206 mW มีค่าความไว 343^{o}C /W หากเปรียบเทียบคุณสมบัติชุดทำความร้อนทั้งสองจะพบว่าชุดทำความร้อนที่สร้างบนกระจกบางจะมีผลตอบสนองดีกว่าชุดทำความร้อนบนกระจกหนาคือ ค่าคงตัวทางเวลาลดลงเท่ากับ 54.8 % เวลาขาขึ้นลดลงเท่ากับ 60 % เวลาขาลงลดลงเท่ากับ 57.3 % และกำลังในการขับลดลงเฉลี่ยเท่ากับ 50.97 % เนื่องจากฐานรองที่บางกว่าทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้เร็วกว่า จากนั้นทำการทดสอบด้วยวงจรขับแบบ PWM โดยมีทรานซิสเตอร์อาเรย์เป็นตัวขับพบว่าผลตอบสนองมีค่าใกล้เคียงกับการขับโดยใช้ DAC ซึ่งมีข้อดีคือ ประหยัด ขนาดเล็ก และสามารถใช้งานได้หลายอินพุต-เอาต์พุต แต่มีข้อเสียคือ ไม่สามารถวัดค่าแรงดัน กระแสที่จ่ายให้กับไมโครฮีตเตอร์ได้โดยตรง

นอกจากนี้ยังได้ทำการสร้างห้องบรรจุของเหลวหรือห้องสำหรับทำปฏิกิริยาด้วยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ลงบนสารไวแสงชนิดลบ เพื่อเป็นแม่พิมพ์ต้นแบบสำหรับหล่อ PDMS ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ทนต่อสารเคมีทางด้านชีวภาพจึงเหมาะกับการสร้างห้องบรรจุของเหลวเพื่อไว้ใช้ทำปฏิกิริยาด้วยเทคนิคพีซีอาร์ ในงานวิจัยนี้ได้นำชุดทำความร้อนที่มีด้วยไมโคร

ฮีตเตอร์และเซนเซอร์มาประกอบกับห้องบรรจุของเหลวที่เป็น PDMS แล้วทำการทดสอบควบคุมที่อุณหภูมิต่าง ๆ ตามหลักการของเครื่องพีซีอาร์ทั่วไปได้แก่ Denaturing (95°C) Annealing (72°C) และ Extension (55°C) จำนวน 30 รอบได้ผลดังนี้ *แบบที่ 1* (SUT1) ชุดทำความร้อนบนกระจกหนากรณีไม่ระบายความร้อน ใช้เวลาในการทำงานคาบหรือไซเคิลละ 60 วินาที หากทำงาน 30 รอบ หรือใช้เวลาทำงานทั้งหมด 30 นาที *แบบที่ 2* (SUT2) ชุดทำความร้อนบนกระจกหนากรณีระบายความร้อนด้วยแก๊สไนโตรเจน 0.5 บาร์ จะใช้เวลาคาบละ45 วินาที หรือใช้เวลาทำงานทั้งหมด 23 นาที หรือลดเวลาลงจากแบบที่ 1 เท่ากับ 1.3 เท่า *แบบที่ 3* (SUT3) ชุดทำความร้อนบนกระจกบางกรณีไม่ระบายความร้อน จะใช้เวลาคาบละ 45 วินาที หรือใช้เวลาทำงานทั้งหมด 23 นาที หรือลเวลาดลง 1.3 เท่า และ *แบบที่ 4* (SUT4) ชุดทำความร้อนบนกระจกบางกรณีระบายความร้อนด้วยไนโตรเจน 0.5 บาร์ หรือใช้เวลาทำงานทั้งหมด 15 นาที หรือลดเวลาลง 2 เท่า หากทำการเปรียบเทียบต้นแบบพีซีอาร์ที่ขนาดเล็กที่สร้างขึ้นสามารถลดเวลาในการทำงานได้จากเครื่องพีซีอาร์ทั่วไปที่ใช้เวลา 60 นาที ได้ 2 ถึง 4 เท่า

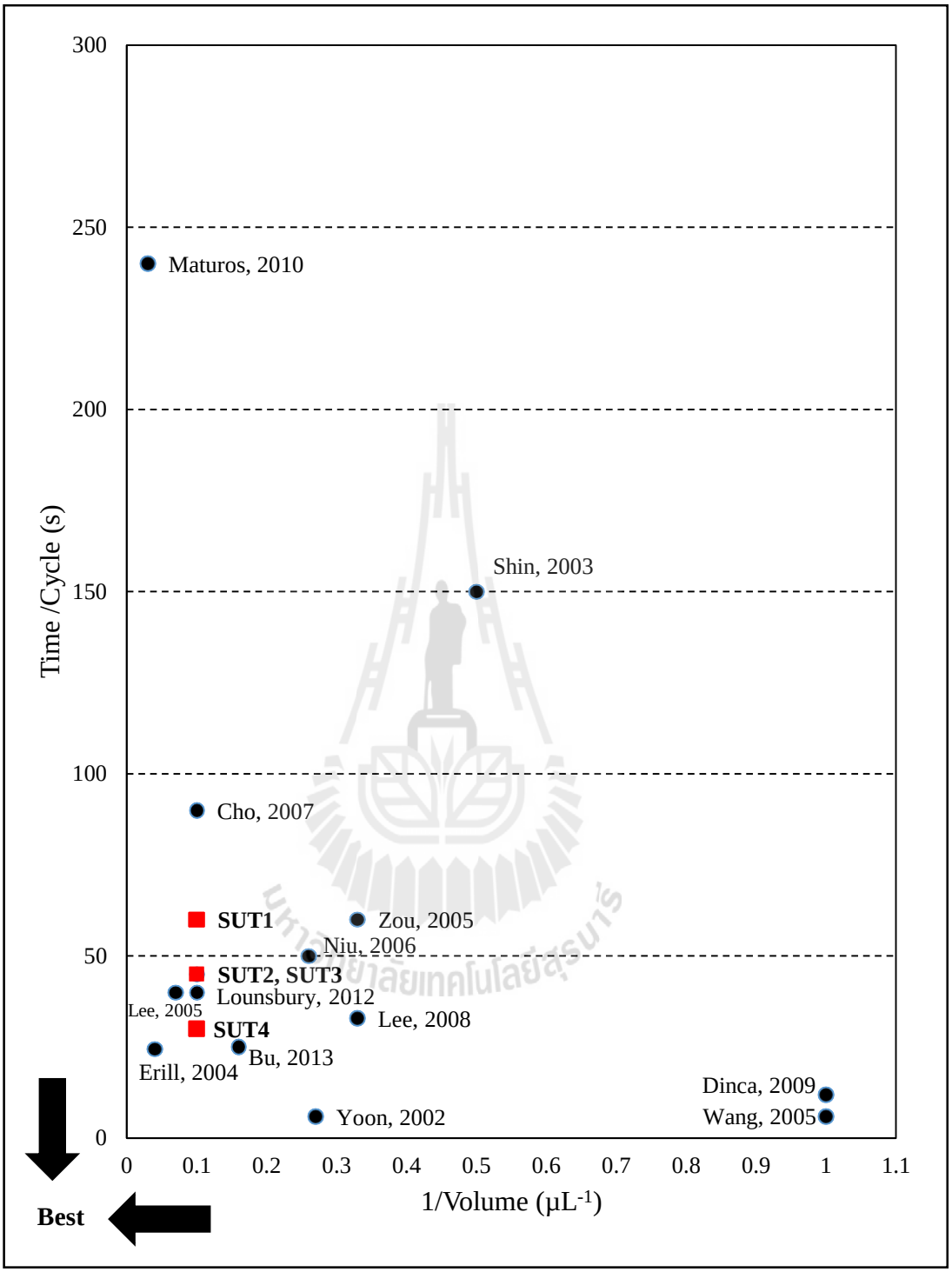
งานวิจัยนี้ได้เน้นหาแนวทางในการสร้างต้นแบบเครื่องหมุนเวียนความร้อนสำหรับเทคนิคพีซีอาร์ ด้วยแนวทางการสร้างที่ใหม่ให้สามารถปรับเปลี่ยนอุณหภูมิให้รวดเร็ว มีขนาดเล็ก สะดวกต่อการพกพาอีกทั้ง ใช้พลังงานต่ำ พร้อมลดต้นทุนในการสร้าง ซึ่งเน้นใช้การใช้งานภาคสนามหรือพกพาเป็นหลัก เนื่องจากสามารถใส่ตัวอย่างได้น้อยกว่าเครื่องพีซีอาร์ในห้องปฏิบัติการแต่สามารถทำงานได้เร็วกว่า นอกจากนี้ยังได้เปรียบเทียบกับงานวิจัยที่สร้างขึ้น เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่เป็นเครื่องพีซีอาร์ขนาดเล็กได้ดังรูปที่ 8.1 ซึ่งได้ผลอยู่ในเกณฑ์ที่ดี

8.2 ข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ที่ผ่านมา ทำให้เกิดแนวความคิดและข้อเสนอแนะเพื่อการดำเนินงานวิจัยต่อไปในอนาคตดังนี้

- สำหรับการเชื่อมต่อสายระหว่างชุดไมโครฮีตเตอร์กับเซนเซอร์ควรหาวิธีเชื่อมต่อที่ดีขึ้น เพราะจุดสัมผัสนั้นมีผลอย่างมากในการวัดและควบคุม เนื่องจากค่าความต้านทานของจุดสัมผัสจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน

- เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการสร้างไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์เพื่อเป็นเครื่องต้นแบบหมุนเวียนความร้อนสำหรับขยายตัวดีเอ็นเอ พร้อมกับทดสอบคุณลักษณะต่าง ๆ ตามหลักการของพีซีอาร์ ดังนั้นเพื่อความสำเร็จทำให้งานวิจัยสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ในอนาคตควรมีการนำเครื่องมือที่สร้างขึ้นไปทดสอบในห้องปฏิบัติการจริงเพื่อนำมาปรับปรุงประสิทธิภาพต่อไป



รูปที่ 8.1 เปรียบเทียบเครื่องหมุนเวียนความร้อนขนาดเล็กกับงานวิจัยอื่น

รายการอ้างอิง

เตือนจิต คำพิทักษ์ นิษฌา นามวาท ปีติ ธุวจิตต์ และ ชนิตตา ธุวจิตต์, **พันธุศาสตร์ทางการแพทย์**, พิมพ์ครั้งที่ 3, โรงพิมพ์คลังนานาวิทยา, ขอนแก่น, 2551

ผ่องศรี ศิวราศักดิ์, **การถ่ายโอนความร้อน**, ทริปเพิ้ล เอดดูเคชั่น, กรุงเทพ, 2551

Briand, D., Colin S.,Gangadharaiah, A., Vela, E., Dubois, P., Thiery, L.; Rooij, N. F. Polymeric hotplates for sensors and actuators. **Eurosensors,** 2005, 1, TB15.

Bu, M.,Perch-Nielsen, I.R., SÃ¸rensen, K.S.,Skov, J., Sun, Y., Duong Bang, D.; Pedersen, M.E.; Hansen, M.F.,Wolff, A. A temperature control method for shortening thermal cycling time to achieve rapid polymerase chain reaction (PCR) in a disposable polymer microfluidic device. **Journal of Micromechanics and Microengineering**, 23 (2013), 074002

Chung, G.-S.;Jeong, J.-M. Fabrication of micro heaters on polycrystalline 3C-SiC suspended membranes for gas sensors and their characteristics. **Microelectronic Engineering,** 87 (2010) 2348–2352.

Creemer, J.F.; Briand, D.;Zandbergen H.W.; van der Vlist, W.; de Boer, C. R.; de Rooij, N.F.; Sarro, P.M. Microhotplates with TiN heaters. **Sensors and Actuators A,** 148 (2008) 416–421.

Cai Z.X., Li X.Y, Hu Q.W, Zeng X.Y, Fabrication of microheater by laser micro cladding electronic paste, **Materials Science and Engineering B,** 157 (2009) 15–19

Cai Z.X, Zeng X.Y., J. Duan . Fabrication of platinum microheater on alumina substrate by micro-pen and laser sintering,**Thin Soilde Films**, 519 (2011) 3893-3896

Cengel Y. A., **Heat transfer a practical approach**: Mcgraw-Hill (Tx); 2nd edition 2002

Cho, C.-H., Cho, W., Ahn, Y. and Whang, S.-Y. PDMS – glass serpentine microchennel chip for time domain PCR with bubble suppression in sample injection. **Journal of micromechanics and microengineering**,17 (2007) 1810-1817

Chien, L.-J., Wang, J.-H., Hsieh, T.-M.,Chen, P.-H.,Chen, P.-J.,Lee, D.-S.,Luo, C.-H. and Lee, G.-B. A micro circulating PCR chip using a suction-type membrane for fluidic transport. **Biomed Microdevices,**11 (2009) 359-367

Dinca , M. P., Gheorghe, M., Aherne, M. and Galvin, P. Fast and accurate temperature control of a PCR microsystem with a disposable reactor. **Journal of micromechanics and microengineering,** 19 (2009) 1-15

Erill, I., Campoy, S. Rus, J., Fonseca, L., Ivorra, A.,Navarro Z.,Plaza, A. J. , Aguilo, J. and Barbe, J. Development of a CMOS-compatible PCR chip : comparison of design and systrm strategies. **Journal of micromechanics and microengineering,** 14 (2004) 1558-1568

Hwang, I.-S.; Lee, E.-B.; Kim, S.-J.; Choi, J.-K.; Cha, J.-H.; Lee, H.-J.; Ju, B.-K.; Lee, J.H. "Gas sensing properties of SnO 2 nanowires on micro-heater". **Sensors. Actuators B**,154 (2011) 295-300.

Hwang, W.-J.; Shin, K.-S.; Roh, J.-H.; Lee, D.-S.; Choa, S.-H. "Development of micro-heaters with optimized temperature compensation design for gas sensors". S**ensors**, 11(2011) 2580-2591

Hyang and Lee, Analytical modeling and optimizeation for a laterally-driven polysilicon thermal actuator,**Microsystem technology,** 5 (1999),133-137

Incropera F. P and de Witt A. D.. **Fundamental of Heat and mass transfer**, John wiley and sons.Sigapore, 1990

Kreith F. and Bohn M. S., **Principles of heat transfer,** 7th Edition, Cengage Learning,2011

Kim, J.-C.; Chung, J.-T.; Lee, D-J.; Kim, Y.-K.; Kim, J.-W.; Hwang, S.; Ju, B.-K.; Yun, S.-k.; Park, H.-W. "Development of temperature feedback control system for piezo-actuate display package". **Sensor and Actuator A**, 151 (2009)213-219.

Lee, C.-Y.; Fu, L-M.; Hong, T.-F.; Chen, S.-C.; Chiang, C.-M.;Kuo, W.-C. High-performance MEMS-based gas chromatography column with integrated micro-heater. Symposium on Design Test Integration and Packaging of MEMS/MOEMS .**DTIP**, 2010, 5-7 May .

Lee, D.-S.; Park, S.H; Chung, K.H.; Pyo, H.-B. A disposable plastic-silicon micro PCR chip using flexible printed circuit board protocols and its application to genomic DNA amplification. **IEEE SENSORS JOURNAL,** 8(5) (2008),558-564

Lee, C.-Y.,Lee, G.-B.,Lin, J.-L.,Huang, F.-C. and Liao, C.-S. Integrate microfluidic systems for cell lysis,mixing/pumping and DNA amplication. **Journal of micromechanics and microengineering**, 15 (2005) 1215-1233

Lounsbury,J.A,Poe, B.L., Do, M., JP Landers (2012) Laser-ablated poly (methyl methacrylate) microdevices for sub-microliter DNA amplification suitable for micro-total analysis systems**.Journal of Micromechanics and Microengineering,** 22 (8), 085006

Mamanee, W.,Tuantranont, A., Afzulpurkar, A.-V.,Porntheerapat, N.,Rahong, S. and Wisitsoraat, A. PDMS base thermopnumatic peristaltic micropump for microfluidic systems.**Journal of physics :Conference series**, 34 (2006) 564-569

Maturos T., Pogfay T., Mongpraneet S., Wisitsoraat A., Lomas T. and Tuantranont A., Temperature cycle and Surface Treatment Study of Thermoelectric Based Micro PCR, **Proceedings of the 2010 5th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems**, 712-715,January 20-23, Xiamen, China

Muluf, N. and Williams, K. (2004).**An introduction to microelectromechanical systems Engineering,** 2nd ed. Norwood,ARTCH HOUSE.

Nam, S.-K.; Kim, J.-K.; Cho, S.-C.; Lee, S.-K. Design and characterization of a high resolution microfluidic heat flux sensor with thermal modulation. **Sensors**, 10 (2010) 6594-6611

Niu, Z. Q.,Chen, W. Y.,Shao, S. Y., Jia, Y. and Zhang, P. W. DNA amplification on a PDMS-glass hybrid microchip. **Journal of micromechanics and microengineering,** 16 (2006) 425-433

Phillips, C. L.; Harbor, R. D. Feedback control system, 4th ed. ;Prentice Hall

Shin Y. S., Cho K., Lim S., Chung H., Park S.,S.-J., Chung C., Han D.-C. and Chang J. K. PDMS-based micro PCR chip with Parylene coating**, J. Micromech. Microeng,** 13 (2003) 768–774

Wang, W., Li, Z.-X. Luo, R., Lu, S.-H. Xu, A.-D., and Yang, Y-J. Droplet-base micro oscillating-flow PCR chip. **Journal of micromechanics and microengineering,** 15 (2005) 1369-1377

Wang, J.-H., Chien, L.-J.,Hsieh, T.-M.,Lou, C.-H. Chou, W.-P.,Chen, P.-H.,Chen, P.-J.,Lee, D.-S. and Lee, G.-B. A miniaturized quantitative polymerase chain reaction system for DNA amplification and detection. **Sensor and Actuators B:Chemecal,** 141 (2009) 329-337

Wang, C.-H.,Chen, Y.-Y.,Liao, C.-S.,Hsieh,T.-M,Luo, C.-H.,Wu, J.-J.,Lee, H.-H. and Lee, G.-B.

Circulating polymerase chain reaction chips utilizing multiple-membrane activation. **Journal of micromechanics and microengineering,** 17 (2007) 367-375

Yoon, J.-H.; Kim, J.-S. "Study on the MEMS-type gas sensor for detecting a nitrogen oxide gas". **Solid State Ionics**, 192(1) (2010) 668-671.

Yoon D. S., Lee Y.-S., Lee Y., Cho H. J., Sung S. W., Oh K W, Cha J. and Lim G.,Precise temperature control and rapid thermal cycling in a micromachined DNA polymerase chain reaction **Journal of micromechanics and microengineering, 12** (2002) 813–823

Zou, Z.-Q.,Chen, X., Jin Q.-H., Yang, M.-S. and Zhao, J.-L. A novel miniaturized PCR multi-reactor arrayfabrication using flip-chip boding techniques.**Journal of micromechanics and microengineering,** 15 (2005) 1476-1481

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ก

การทดสอบไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์จากกระบวนการลิโธกราฟี ด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต

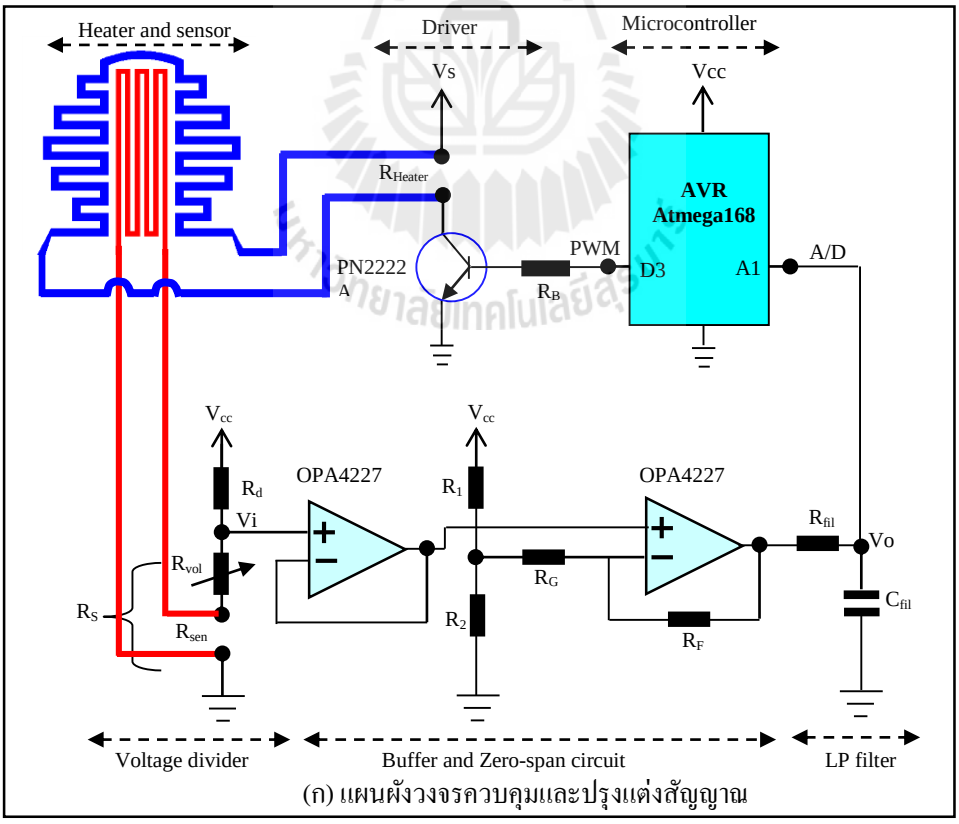
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การทดสอบการไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ

หัวขอนี้จะเป็นการทดสอบไมโครฮีตเตอร์และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิจากการทดสอบสร้างด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต เพื่อศึกษาแนวทางและความเป็นไปได้ในการสร้างชิ้นงานก่อนที่จะได้ทำการออกแบบและทดสอบสร้างเพื่อใช้งานสำหรับระบบพีซีอาร์จริงต่อไป

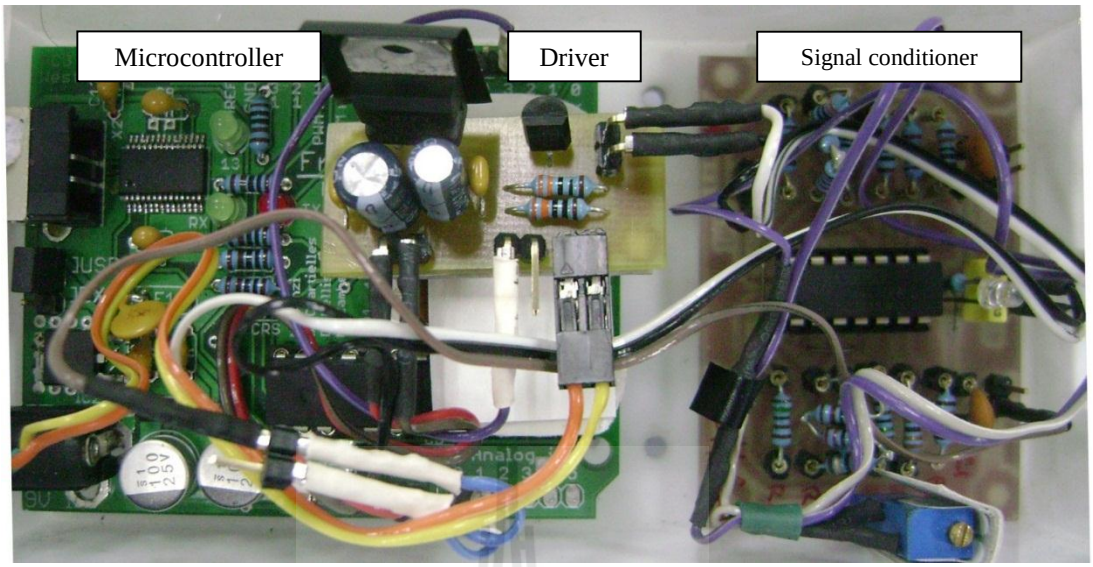
ก.1 การปรับเทียบเซนเซอร์

เมื่อกระบวนการสร้างอุปกรณ์ได้สิ้นสุดลง จนได้เซนเซอร์วัดอุณหภูมิและไมโครฮีตเตอร์วางอยู่บนกระจกเป็นที่เรียบร้อย ได้ทำการสร้างวงจรสำหรับขับไมโครฮีตเตอร์และวงจรปรับแต่งสัญญาณเซนเซอร์ เพื่อใช้สำหรับการปรับเทียบ ในส่วนของวงจรขับใช้ทรานซิสเตอร์สวิตชิ่งเบอร์ PN2222A ส่วนวงจรปรับแต่งสัญญาณนั้นประกอบด้วยวงจรแบ่งแรงดัน (Voltage divider) วงจรบัฟเฟอร์ (Buffer) วงจรปรับเยื้องศูนย์และความชัน ด้วยออปแอมป์เบอร์ OPA4227 และสุดท้ายคือวงจรกรองสัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่าน (LP filter) ก่อนที่จะเข้าวงจรแปลงแอนะลอกเป็นดิจิตอล (A/D converter) ของไมโครคอนโทรลเลอร์ขาด 8 บิต เบอร์Atmega168 แสดงดังรูปที่ ก.1



(ก) แผนผังวงจรควบคุมและปรุงแต่งสัญญาณ

รูปที่ ก.1 วงจรควบคุมและปรุงแต่งสัญญาณ



(ข) วงจรควบคุมและปรุงแต่งสัญญาณ

รูปที่ ก.1 วงจรควบคุมและปรุงแต่งสัญญาณ (ต่อ)

เนื่องจากความต้านทานของเซนเซอร์ที่สร้างได้มีค่า R_{sen} = 1.247 kΩ ที่อุณหภูมิ 25°C จึงได้ทำการเพิ่มความต้านทานปรับค่าได้ (R_{vol}) ต่ออนุกรมเข้าไป แล้วปรับความต้านทาน R_s (R_s=R_{sen}+R_{vol}) เท่ากับ 1.5 kΩ การเพิ่มความต้านทานปรับค่าได้ลงไปดังกล่าวนั้น เพื่อให้สามารถปรับจูนเซนเซอร์เมื่อเกิดความคลาดเคลื่อน แล้วนำเข้าสู่วงจรแบ่งแรงดัน เมื่อเกิดความร้อนเปลี่ยนแปลงที่ไมโครฮีตเตอร์ตั้งแต่ 25°C ถึง 140°C ความมต้านทานของเซนเซอร์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงอยู่ในย่าน (ΔR) 0 Ω ถึง 500 Ω ทำให้แรงดันอินพุตที่ออกมาจากเซนเซอร์อยู่ในช่วง แคบ ๆ ประมาณ 2.5 V ถึง 2.82 V จึงได้ทำการปรับแต่งสัญญาณด้วยวงจรปรับเยื้องศูนย์และความชันขยายย่านสัญญาณให้อยู่ในช่วง กว้างขึ้น เพื่อให้เข้ากับวงจร A/D converter ของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยสามารถแสดงการคำนวณเอาต์พุตของวงจรได้ดังนี้ได้ดังสมการที่ (ก.1) (Carter and Mancini, 2009) และพารามิเตอร์ของวงจรแสดงดังตารางที่ ก.1

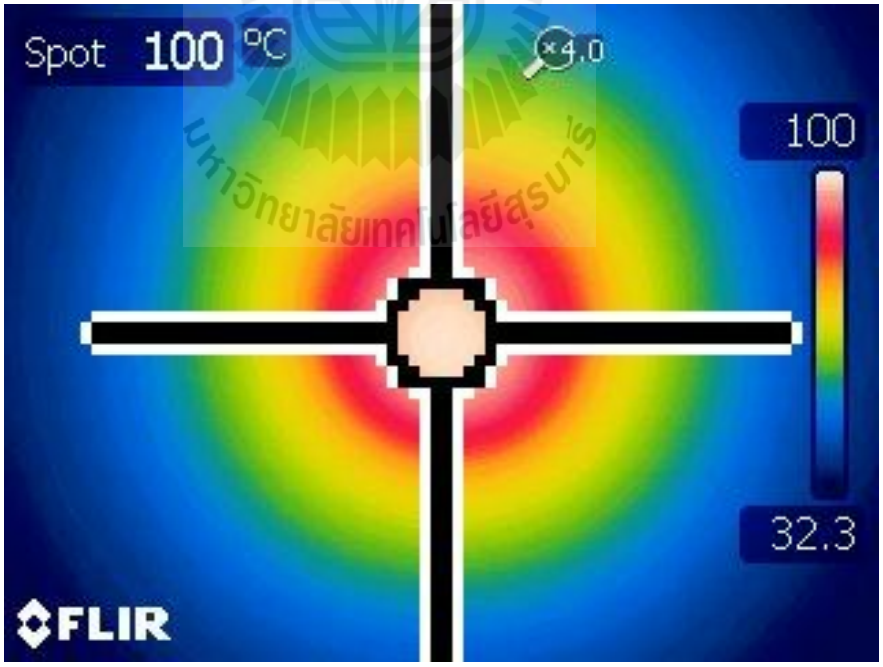
$$V_O = m_1 V_{in} + b_1 \qquad \text{(ก.1)}$$

เมื่อ $$m_1 = \frac{R_F + R_G}{R_G}, b_1 = -V_{cc}(\frac{R_F}{R_G})(\frac{R_2}{R_1 + R_2}), V_{in} = \frac{R_s V_{cc}}{R_s + R_d} = V_{sensor}$$

ตารางที่ ก.1 พารามิเตอร์ของวงจรควบคุมและปรุงแต่งสัญญาณ

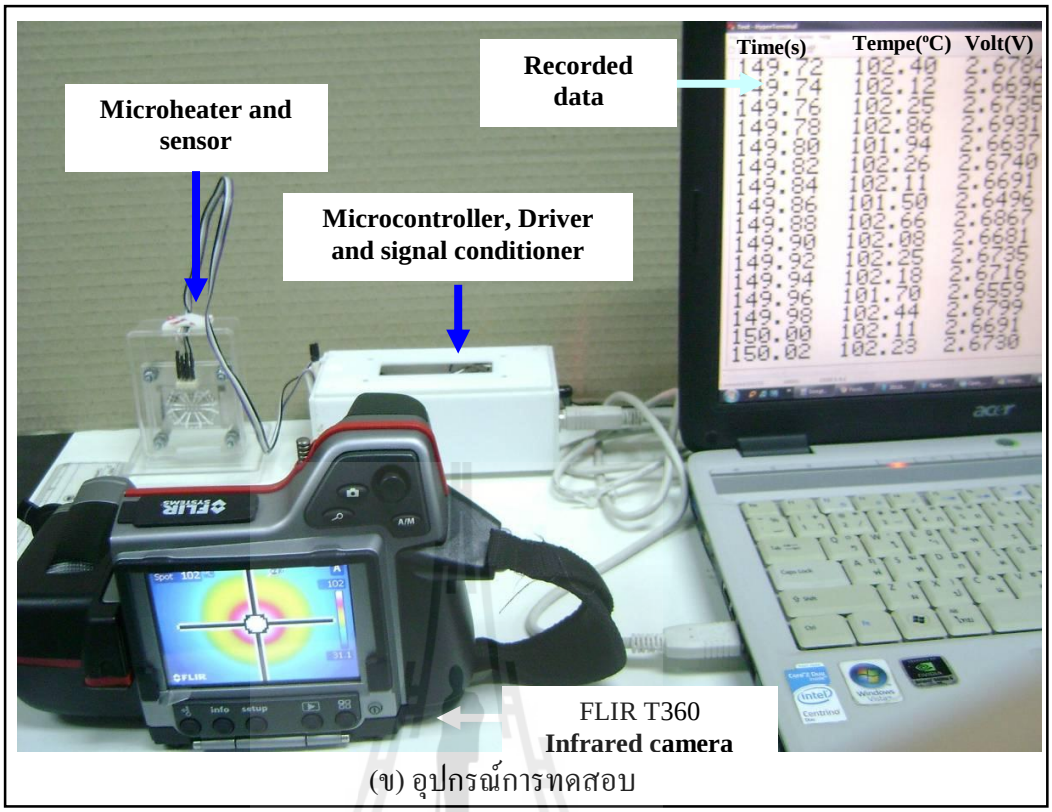
Microheaterdrivr circuit	Voltage divider	Zero-span circuit	LP filter
$V_s = 9$ V	$V_{cc} = 5$ volt	$R_1 = 1.277$ k Ω	$R_{fil} = 100$ k Ω
$R_B = 330$ Ω	$R_d = 1.5$ kΩ	$R_2 = 1.50$ k Ω	$C_{fil} = 0.1$ μF
$R_{heater} = 114$ Ω	$R_{vol} = 305$ Ω	$R_G = 30$ k Ω	
	$R_{sen} = 1.247$ k Ω	$R_F = 330$ k Ω	

ทำการปรับเทียบเซนเซอร์กับอุณหภูมิโดยกล้องอินฟราเรด FLIR รุ่น T360 system ด้วยการป้อนสัญญาณอินพุต (PWM 8 bit) จากไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านวงจรขับ ทดลองซ้ำเป็นจำนวน 10 รอบ แสดงอุปกรณ์และชุดทดสอบดังรูปที่ ก.2 ได้ผลของการทดสอบการป้อนอินพุตและค่าความต้านทานของเซนเซอร์กับอุณหภูมิจากกล้องอินฟราเรดเป็นดังรูปที่ ก.3 ส่วนรูปที่ ก.4 เป็นความสัมพันธ์แรงดันจากวงจรปรับแต่งสัญญาณและค่าความต้านทานของเซนเซอร์ รูปที่ ก.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเซนเซอร์และอุณหภูมิจากกล้องอินฟราเรด และผลของแรงดันจากวงจรปรุงแต่งสัญญาณกับอุณหภูมิของกล้องอินฟราเรดมีความสัมพันธ์เป็นดังรูปที่ ก.6



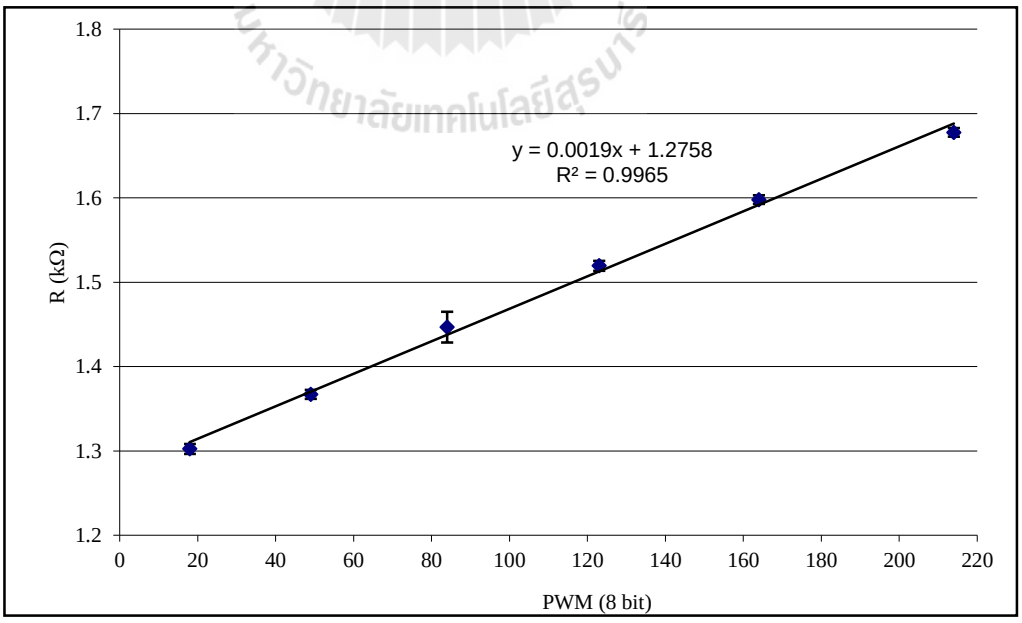
(ก) การจับอุณหภูมิด้วยกล้องอินฟราเรด

รูปที่ ก.2 การวัดอุณหภูมิด้วยกล้องอินฟราเรดรุ่น FLIR T360 และการบันทึกข้อมูล

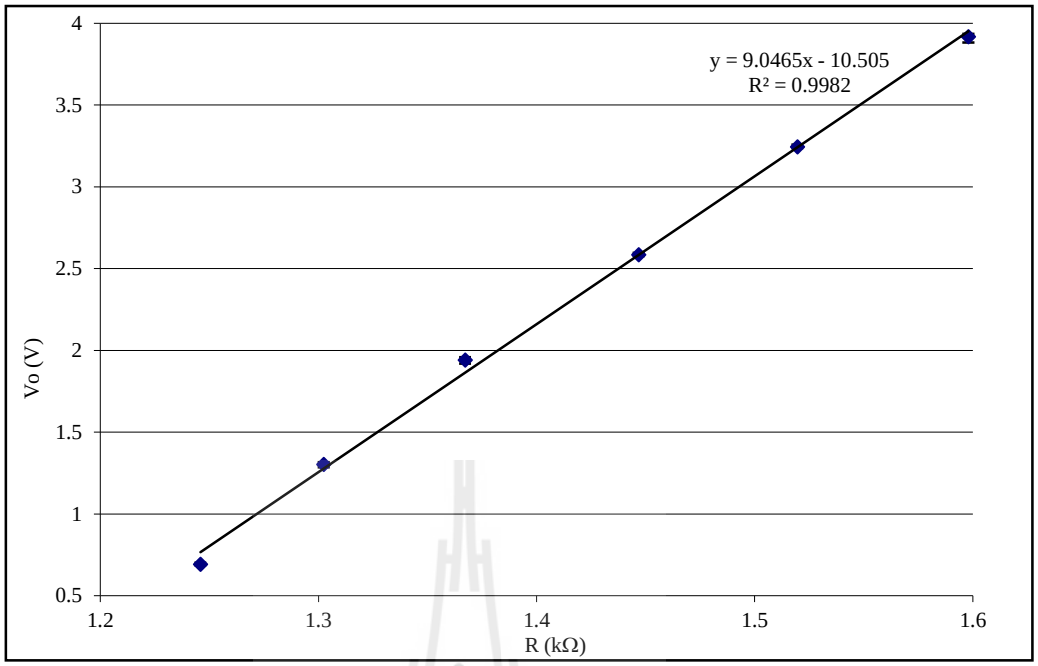


(ข) อุปกรณ์การทดสอบ

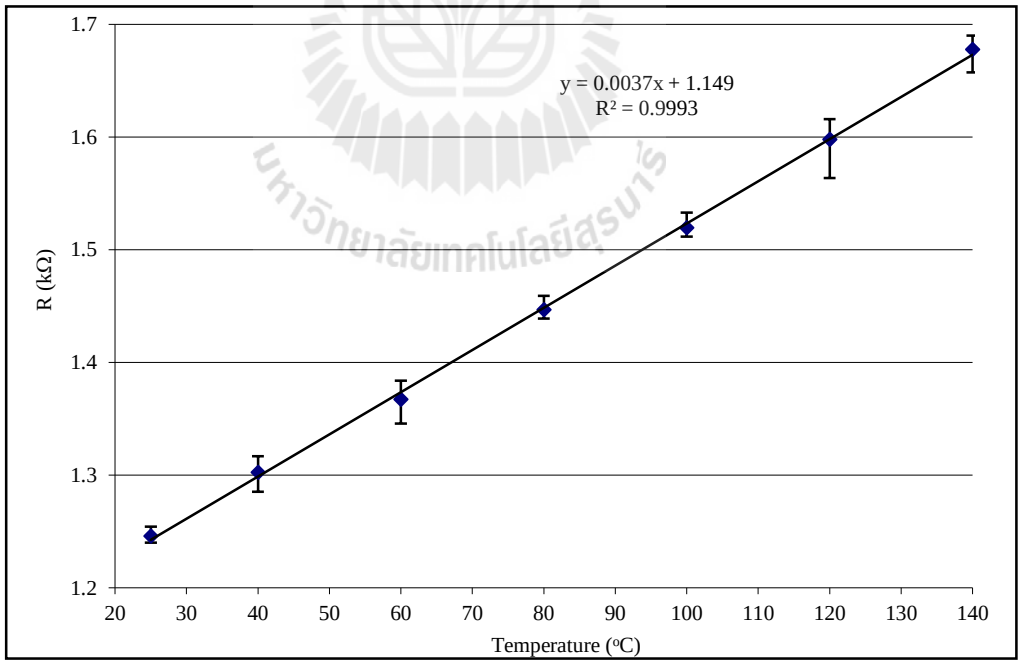
รูปที่ ก.2 การวัดอุณหภูมิด้วยกล้องอินฟราเรดรุ่น FLIR T360 และการบันทึกข้อมูล



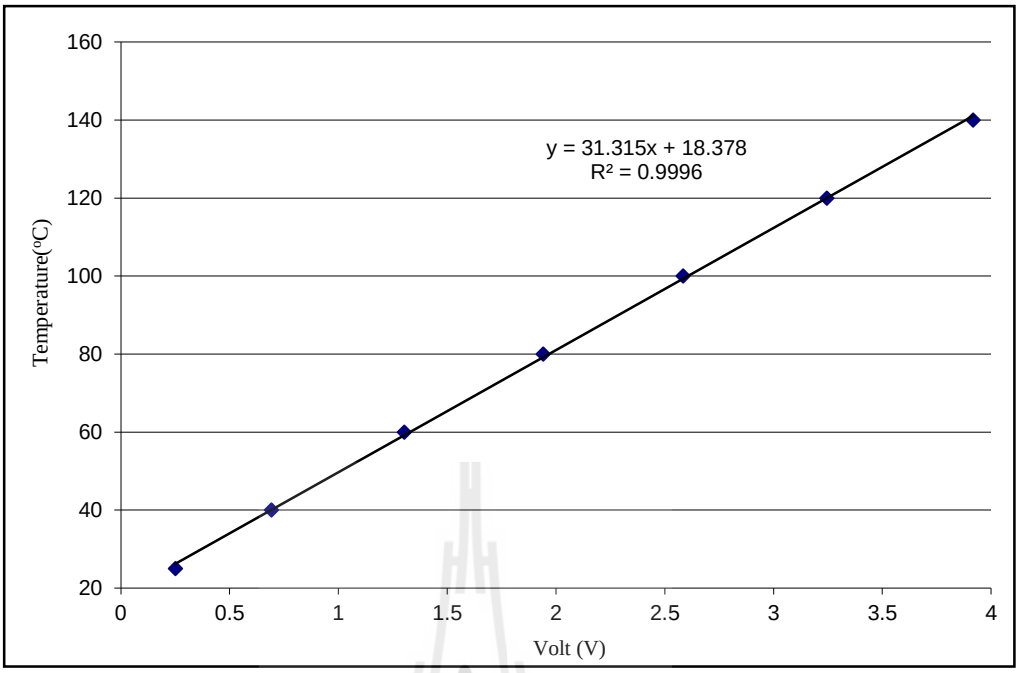
รูปที่ ก.3 การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานเมื่อเพิ่มขนาดของอินพุต PWM



รูปที่ ก.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันจากวงจรปรุงแต่งสัญญาณกับความต้านทานเซนเซอร์



รูปที่ ก.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเซนเซอร์และอุณหภูมิจากกล้องอินฟราเรด



รูปที่ ก.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันจากวงจรปรุงแต่งสัญญาณกับ
อุณหภูมิของกล้องอินฟราเรด

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์หะว่างอุณหภูมิกับแรงดันจากวงจรปรุงแต่งสัญญาณได้เป็นดังสมการที่ (ก.2)

$$T = 31.315V_o + 18.378 \quad \text{(ก.2)}$$

เมื่อ V_o คือ แรงดันจากวงจรปรุงแต่งสัญญาณ (V)

T คือ อุณหภูมิ (°C)

สำหรับเซนเซอร์วัดอุณหภูมิที่เป็นตัวต้านทานและสร้างจากโลหะนั้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงนั้นจะขึ้นอยู่กับโลหะแต่ละชนิด จะเป็นไปตามสมการที่ (ก.3)

$$R_2 = R_1[1+\alpha(T_2 - T_1)] \quad \text{(ก.3)}$$

เมื่อ R_1 คือ ความต้านทานที่อุณหภูมิ T_1

R_2 คือ ความต้านทานที่อุณหภูมิ T_2

T_1, T_2 คือ อุณหูมิ

α คือ สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานต่ออุณหภูมิ [Temperature coefficient of resistance : TCR ($^oC^{-1}$)]

หากทำการหาค่า α จากการทดลอง โดยอุณหภูมิ 100 ^oC ค่าความต้านทานมีค่าเท่ากับ 1.510 kΩ และที่ 60 ^oC ค่าความต้านทานมีค่าเท่ากับ 1.362 kΩ จากสมการ (2) จะได้เป็น

$$\alpha = TCR = \frac{R - R_o}{(T - T_o)R_o} = \frac{1.510 - 1.362}{(100 - 60)1.362} = 2.7 \times 10^{-3}\ {}^oC^{-1}$$

เมื่อทำการพิจารณาค่า α จากคุณสมบัติของวัสดุในงานวิจัยนี้ใช้นิกเกิล เป็นวัสดุสร้างเซนเซอร์ซึ่งมีค่าเท่ากับ $6.7 \times 10^{-3}\ {}^oC^{-1}$ มีค่ามากกว่าผลจากการวัดประมาณ 2.48 เท่า ผลดังกล่าวเป็นสาเหตุของการใช้อุปกรณ์ในการปรับเทียบที่เป็นกล้องอินฟราเรดเนื่องจากขนาดของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น มีขนาดเล็กอาจจะเป็นสาเหตุทำให้กล้องไม่สามารถวัดอุณหภูมิได้แม่นยำ ซึ่งจะแก้ไขปัญหาด้วยการปรับเทียบโดยใช้เตาอบร่วมกับเซนเซอร์วัดอุณหภูมิที่นิยมใช้ทั่วไปในท้องตลาด เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองจะทำให้เห็นผลที่มีความถูกต้องยิ่งขึ้น

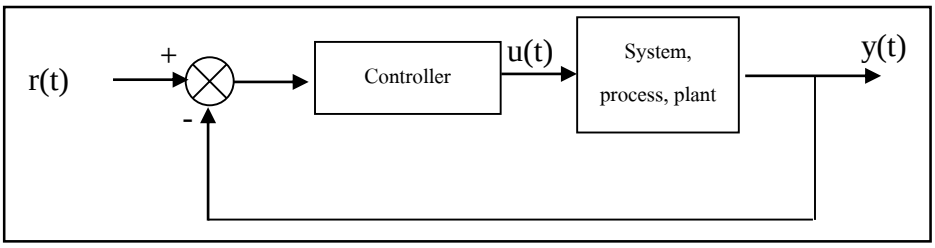
จากนั้นทำการหาค่าความไว (Sensitivity : S) ของเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ ซึ่งจะบ่งบอกถึงอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงปริมาณแรงจากวงจรปรุงแต่งสัญญาณดันกับอุณหภูมิ ($V/^oC$) สามารถคำนวณค่าความไวได้ดังนี้ ที่อุณหภูมิ 100 °C แรงดันมีค่าเท่ากับ 2.576 V และที่ 60 °C แรงดันมีค่าเท่ากับ 1.281 V ดังนั้นแล้วจะได้ค่าความไวของเซนเซอร์เท่ากับ S = (2.576 V-1.281V)/(100°C - 60°C) = 0.0323 V/°C

ก.2 การควบคุมไมโครฮีตเตอร์แบบเปิด-ปิด

หลังจากทำการปรับเทียบเซนเซอร์วัดอุณหภูมิจนได้ความสัมพันธ์ต่าง ๆในหัวข้อที่ผ่านมาเป็นที่เรียบร้อยแล้ว กระบวนการที่สำคัญอีกกระบวนการหนึ่งคือ การควบคุมไมโครฮีตเตอร์ที่สร้างขึ้นเพื่อให้ได้อุณหภูมิต่าง ๆ ตามที่ต้องการและเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าระบบการควบคุมที่มีประสิทธิภาพ คือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback control) ซึ่งหมายถึงระบบที่มีการควบคุมโดยอาศัยการวัดสัญญาณเอาต์พุตแล้วนำผลมาเปรียบเทียบกับค่าเป้าหมายที่ต้องการ จากนั้นทำการชดเชยสัญญาณควบคุมออกไปเพื่อให้ระบบทำงานตามที่คาดหวังไว้

ระบบ (System) คือ สิ่งที่อยู่ในขอบเขตที่เราสนใจและศึกษา โดยสิ่งที่ป้อนให้ระบบเรียกว่าอินพุต (Input) และผลลัพธ์คือ เอาต์พุต (Output) สำหรับระบบควบคุมวงปิดประกอบด้วยหลาย

ส่วน ดังรูปที่ ก.7 ได้แก่ สัญญาณอ้างอิง r(t) หรือสัญญาณอินพุตเพื่อกำหนดเป้าหมาย (Setpoint) สัญญาณควบคุม u(t) และสัญญาณเอาต์พุต y(t)



รูปที่ ก.7 ระบบควบคุมวงปิด

การควบคุมแบบวงสำหรับไมโครฮีตเตอร์ได้ทำการทดลองควบคุมแบบง่ายก่อนด้วยการเลือกใช้การควบคุมแบบเปิด-ปิด (On-Off) มีอัลกอลิธึมควบคุมดังสมการ (ก.4) ซึ่งหากค่าเอาต์พุตมีค่าน้อยกว่าค่าเป้าหมาย สัญญาณควบคุมจะออกมาเป็น 1 หรือหมายถึงแรงดันเท่ากับค่าสูงสุด ในที่นี้คือ 9 V ป้อนเข้าสู่ไมโครฮีตเตอร์ ส่วนกรณีอื่นสัญญาณควบคุมจะเป็น 0 หรือหมายถึง 0 V นั่นเอง

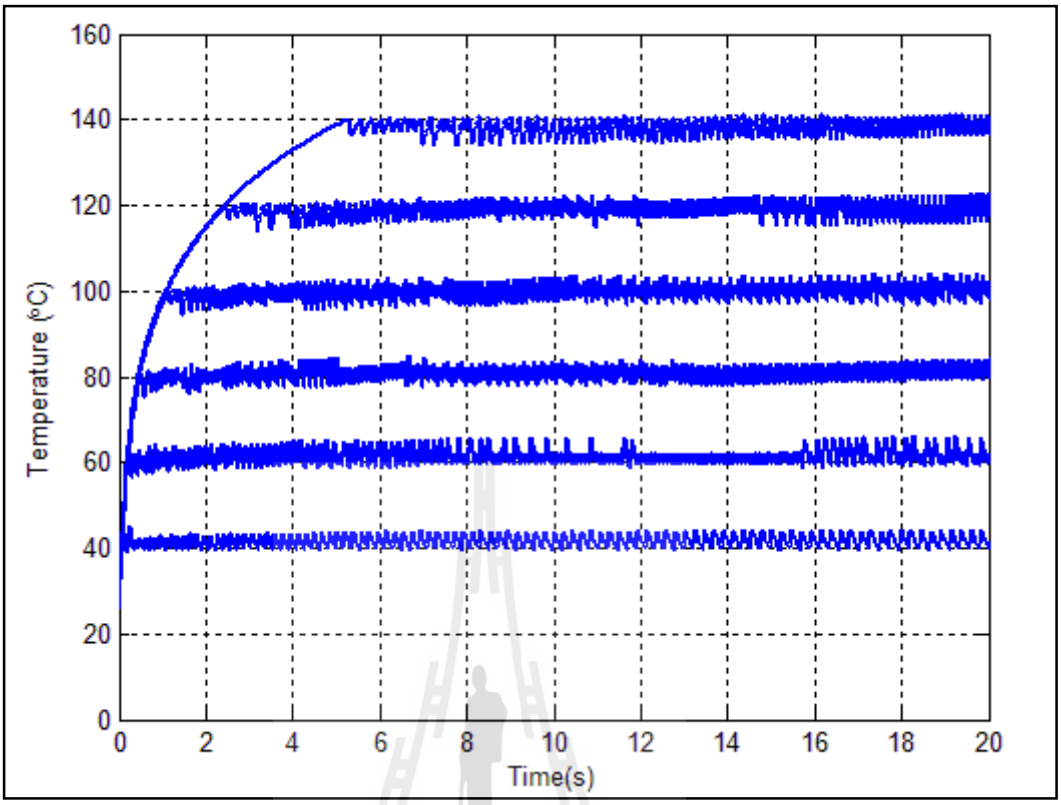
$$u(t) = \begin{cases} 1 \; ; y(t) < r(t) \\ 0 \; ; y(t) \geq r(t) \end{cases} \qquad \text{(ก.4)}$$

เมื่อ u(t) คือ สัญญาณควบคุมที่ป้อนเข้าสู่ตัวขับ

r(t) คือ สัญญาณอ้างอิงหรือเป้าหมาย (Setpoint)

y(t) คือ สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากเซนเซอร์

หลังทำการทดลองควบคุมแบบเปิด-ปิด ที่อุณหภูมิ 40 ^{o}C ถึง 140 ^{o}C ด้วยแรงดัน 9 V ซึ่งพบว่าอุณหภูมิมีการแกว่งตัวอย่างมากประมาณ 4 ^{o}C ถึง 7 ^{o}C เนื่องจากการควบคุมวงปิดด้วยวิธีนี้เป็นวิธีที่ไม่ดีนัก เนื่องจากขณะที่อุณหภูมิยังไม่เข้าสู่เป้าหมายตัวควบคุมจะสร้างสัญญาณควบคุม ON ไปยังชุดขับ จากนั้นชุดขับก็จะสร้างแรงดัน 9 V ป้อนเข้าสู่ไมโครฮีตเตอร์ ซึ่งได้รับกระแสเต็มพิกัดจะทำให้เกิดความร้อนอย่างรวดเร็ว และเมื่อถึงอุณหภูมิที่ต้องการตัวควบคุมสร้างสัญญาณ OFF ไฟยังตัวขับเช่นกัน ซึ่งการควบคุมแบบนี้จะทำให้เกิดการแกว่งตัวอย่างมากดังรูปที่ ก.7 ซึ่งสูงเกินไปจึงหาวิธีการควบคุมแบบด้วยการป้อนกลับแบบพีไอ



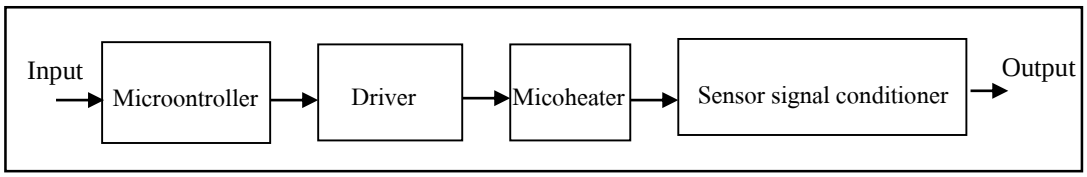
รูปที่ ก.7 การควบคุมไมโครฮีตเตอร์ด้วยการป้อนกลับแบบเปิด-ปิด

ก.3 การหาแบบจำลองของตัวไมโครฮีตเตอร์

เมื่อพบกับปัญหาการควบคุมวงปิดด้วยการควบคุมแบบเปิด-ปิด ซึ่งเกิดการแกว่งตัวของอุณหภูมิ จึงได้ทำการแก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยการควบคุมป้อนกับแบบพีไอ โดยได้ทำการหาแบบจำลองของระบบเพื่อทำการออกแบบตัวควบคุมหรืออัตราขยาย (Gain) การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบใช้จำลองผลก่อนการปฏิบัติงานจริง สำหรับการหาแบบจะลองของระบบนั้นสามารถหาได้จากการวิเคราะห์ทางกายภาพของระบบ (Physical analysis) ซึ่งการหาแบบจำลองวิธีนี้จะต้องรู้ปัจจัยและตัวแปรต่าง ๆ อย่างละเอียด ซึ่งแบบจำลองนี้ค่อนข้างที่จะกระทำได้ลำบาก แต่ยังมีวิธีการหาแบบจะลองอีกวิธีหนึ่งคือสร้างแบบจำลองจากการวัด (Measuring model) หรือการทดสอบผลของอินพุตและเอาต์พุตจากนั้น แล้วนำมาหาแบบจำลอง เพราะบางระบบไม่สามารถรู้ปริมาณทางกายภาพจริง ๆ ได้ ต้องอาศัยการทดสอบเท่านั้น

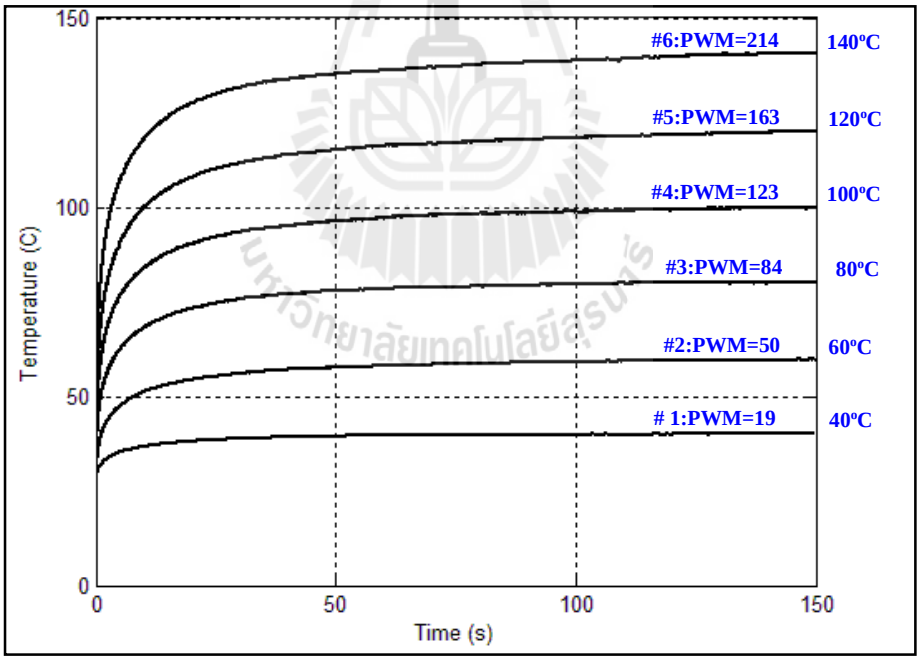
ทำการทดสอบอุณหภูมิเพื่อหาฟังก์ชันถ่ายโอนด้วยการควบคุมวงเปิด (Open loop control) ได้ทำการทดสอบตั้งแต่อุณหภูมิ 40 °C ถึง 140 °C มีโครงสร้างวงเปิดสำหรับทดสอบเพื่อหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบแสดงดังรูปที่ ก.8 ประกอบด้วย การสร้างสัญญาณเอาต์พุต (PWM) แรงดัน 9 V

จากไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านวงจรขับแล้วเข้าสู่วงจรขับฮีตเตอร์แล้วเก็บข้อมูลทดสอบจากวงจรปรับแต่งสัญญาณเซนเซอร์ผ่านช่อง ADC ของไมโครคอนโทรลเลอร์

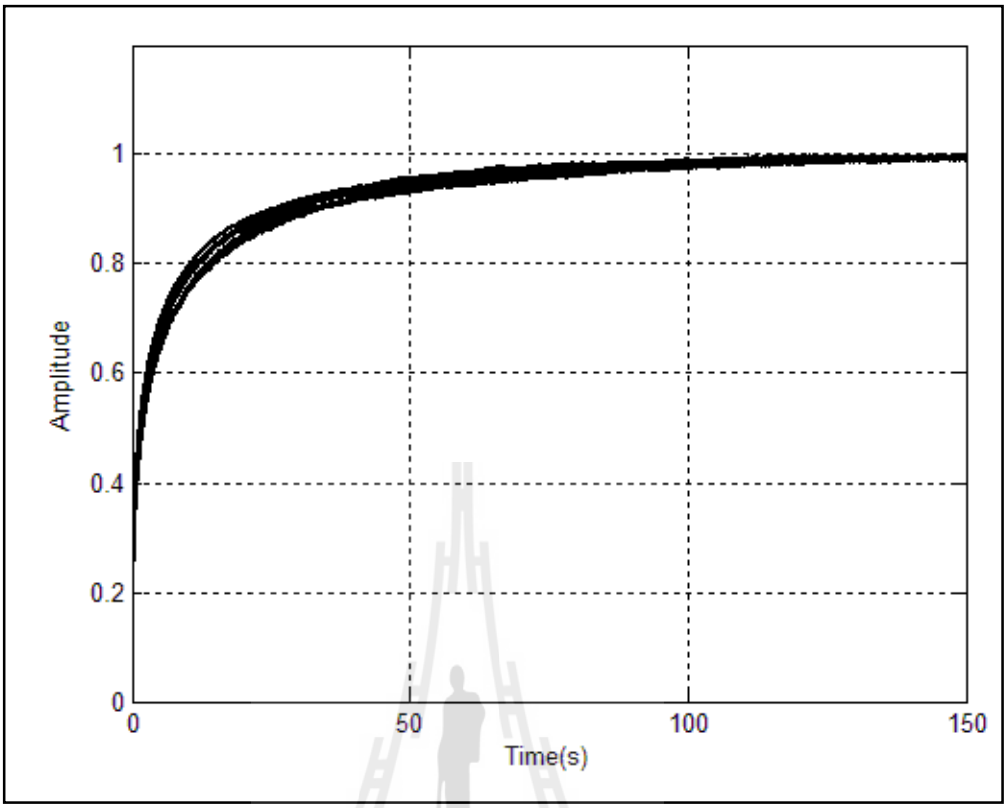


รูปที่ ก.8 ไดอะแกรมสำหรับควบคุมวงเปิดเพื่อหาแบบจำลองของไมโครฮีตเตอร์

ผลการทดสอบวงเปิดแสดงได้ดังรูปที่ ก.9 จากนั้นนอมอลไลซ์ทุกเส้นของอุณหภูมิดังรูปที่ ก.10 พบว่ากราฟแต่ละอุณหภูมิมีผลตอบสนองทางเวลาโดยใกล้เคียงกันซึ่งหากทำการระบุเอกลักษณ์ออกมาก็จะได้เป็นแบบจำลองรวมของระบบ

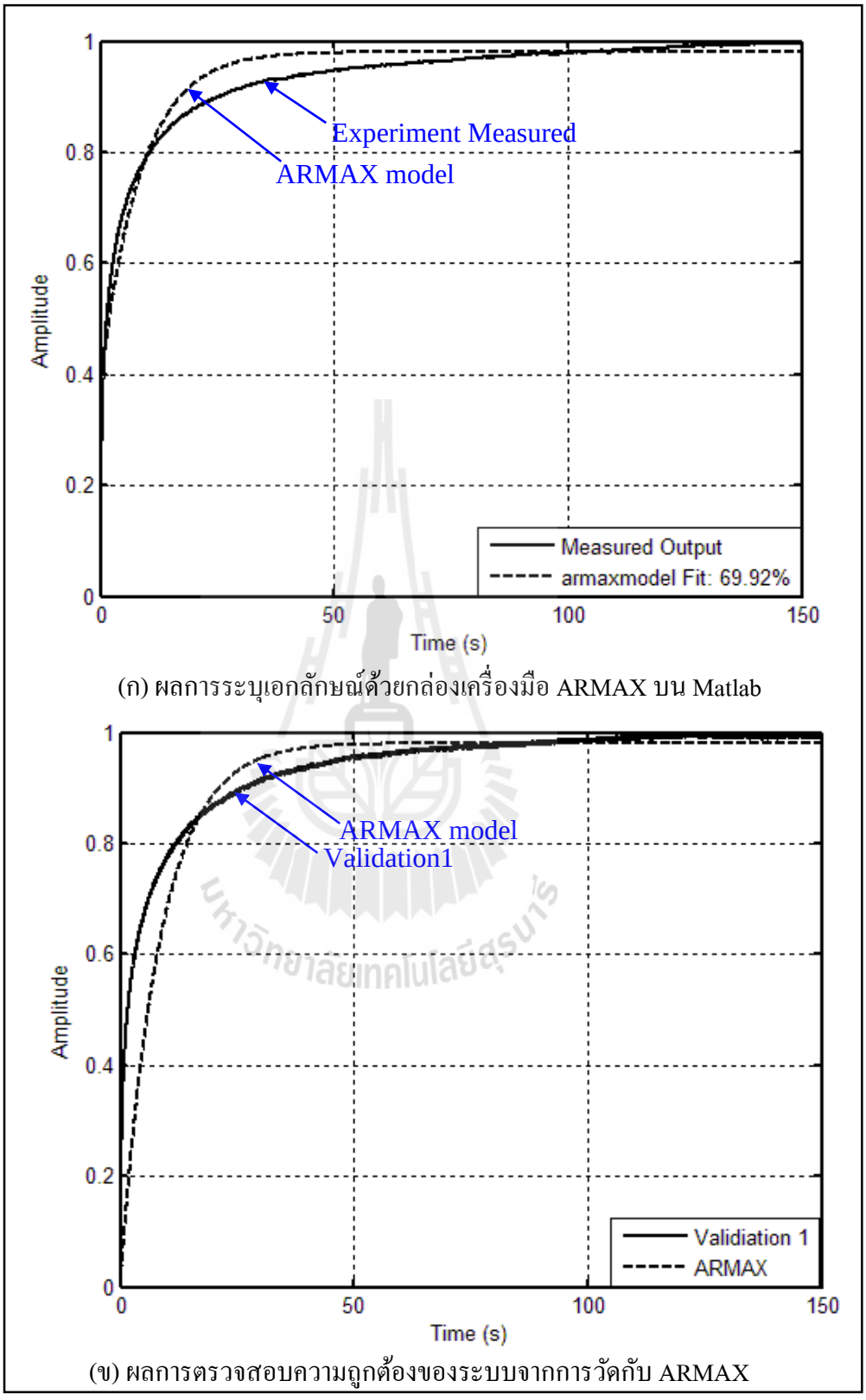


รูปที่ ก.9 ผลตอบสนองไมโครฮีตเตอร์จากการควบคุมวงเปิด โดยเส้นกราฟที่ 1 2 4 และ 6 สำหรับระบุเอกลักษณ์ เส้นกราฟที่ 3 และ 5 สำหรับทดสอบความถูกต้อง



รูปที่ ก.10 หลังนอมอลไลซ์ทุกเส้นของอุณหภูมิ

จากนั้นทำการระบุเอกลักษณ์ด้วยกล่องเครื่องมือ ARMAX บน Matlab ซึ่งเป็นโปรแกรมสำหรับระบุเอกลักษณ์ของระบบจากผลการวัด เป็นการระบุเอกลัษณ์ประเภทกล่องดำ (Black block model) สามารถใช้ทดแทนการสร้างแบบจำลองด้วยการคำนวณระบบจากปริมาณทางกายภาพได้ โดยเลือกอุณภูมิจำนวน 4 เส้น คือ ที่ 40 ^{o}C 60 ^{o}C 100 ^{o}C และ 140 ^{o}C ส่วนอุณหภูมิที่ 80 ^{o}C และ 120 ^{o}C เป็นชุดสำหรับทดสอบหลังจากทำการระบุเอกลักษณ์ สามารถประมาณค่าได้ประมาณเท่ากับ 72.06 % 64.54 % 69.5 % และ 69.92 % แสดงดังรูปที่ ก.11 (ก) ส่วนผลการตรวจสอบความถูกต้องสำหรับประเมินระบบมีค่า RMSE (Root mean square error) เท่ากับ 0.0628 และ 0.0665 แสดงได้ดังรูปที่ ก.11 (ข)



(ก) ผลการระบุเอกลักษณ์ด้วยกล่องเครื่องมือ ARMAX บน Matlab

(ข) ผลการตรวจสอบความถูกต้องของระบบจากการวัดกับ ARMAX

รูปที่ ก.11 ผลการระบุเอกลักษณ์ด้วยกล่องเครื่องมือ ARMAX บน Matlab

หากพิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนจากการระบุเอกลักษณ์พบว่า การระบุเอกลักษณ์ดังกล่าว ระบบเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ 0.981 จึงเพิ่ม อัตราขยาย (DC gain : K) เป็น K=1/0.981 =1.01936 เพื่อให้บรรลุเป้าหมายที่ทำให้ ระบบเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่ 1 ทำให้ผลของการการตรวจสอบความถูกต้องสำหรับประเมินระบบมีค่า RMSE เปลี่ยนแปลงเป็น 0.0648 และ 0.0701 จึงได้ฟังก์ชันถ่ายโอนระบบ (หรือ พลานต์ : G_p) เป็นดังสมการที่ (ก.4)

$$G_p(s) = \frac{0.0012(s + 100)}{s + 0.1183} \qquad \text{(ก.4)}$$

ก.4 การควบคุมป้อนกลับแบบพีไอ

ระบบควบคุมสำหรับไมโครฮีตเตอร์ใช้วิธีการควบคุมแบบ ในงานนี้ได้นำระบบป้อนกลับเข้ามาเติมเต็มเพื่อให้ระบบระบบทำความร้อนที่สร้างขึ้นสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมีสองส่วนคือ ส่วนของการประดิษฐ์โปรแกรมและส่วนของการออกแบบตัวควบคุม

1) การสร้างตัวควบคุมบนไมโครคอนโทรลเลอร์ โครงสร้างของตัวควบคุมแบบพีไอแสดงได้ดังรูป ก.12 และสามารถอธิบายส่วนประกอบพอสังเขปได้คือ

1.สัญญาณอ้างอิง (Reference Signal : r(t) หรือ Setpoint) คือ เป็นสัญญาณอินพุตของระบบ ในที่นี้หมายถึงค่าของอุณหภูมิ เช่น r(t) = 90 ^{o}C

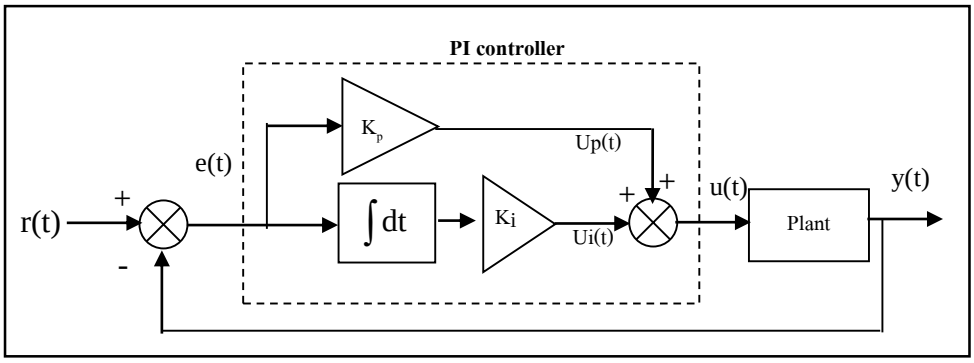
2.ตัวควบคุมพีไอ (Controller) คือ ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมให้ระบบมีผลลัพธ์ตามต้องการ

3.สัญญาณควบคุม (Control command : u(t)) เป็นเอาต์พุตของตัวควบคุม ซึ่งเกิดจากการรวมกันของพจน์ Up(t) เอาพุตต์ของตัวควบคุมพี และ Ui(t) เอาต์พุตของตัวควบคุมไอ

4.กระบวนการหรือระบบ (System, process, plant) ที่ต้องการควบคุม หมายถึงไมโครฮีตเตอร์

5.ผลการควบคุม (Output : y(t)) หมายถึงอุณหภูมิที่อ่านได้จากเซนเซอร์หรือเอาต์พุต

6.ผลต่างหรือความคลาดเคลื่อน e(t) = r(t)-y(t)



รูปที่ ก.12 โครงสร้างตัวควบคุมแบบพีไอ

สมการทางคณิตศาสตร์ของตัวควบคุมพีไอในรูปเวลาต่อเนื่องได้ดังสมการที่ (ก.5)

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t)dt = u_p(t) + u_i(t) \qquad \text{(ก.5)}$$

โดยที่ u(t) คือ สัญญาณของตัวควบคุมพีไอ

K_p คือ เกนของตัวควบคุมพี

K_i คือ เกนของตัวควบคุมไอ

e(t) คือ ผลต่างของการควบคุม

- พิจารณาพจน์พี $u_p(t) = K_p e(t)$

แปลงเป็น s โดเมน จะได้เป็น $U_p(s) = K_p E(s)$

แปลงเป็น z โดเมน จะได้เป็น $U_p(z) = K_p E(z)$

แปลงให้อยู่ในรูปของผลต่างจะได้สมการของพจน์พีเป็นดังนี้

$$u_p(i) = K_p e(i) \qquad \text{(ก.6)}$$

- พิจารณาพจน์ไอ $u_i(t) = K_i \int e(t)dt$

แปลงเป็น s โดเมน จะได้เป็น $Ui(s) = \frac{K_i}{s} E(s)$

แปลงเป็น z โดเมนวิธี Tustin $\frac{1}{s} \xrightarrow{z} \frac{T}{2}\frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}}$ จะได้ว่า

$$U_i(z) = K_i\left(\frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}}\right)E(z)$$

$$U_i(z) = \frac{K_iT}{2}[E(z)+z^{-1}E(z)]+z^{-1}U_i(z)$$

แปลงให้อยู่ในรูปของผลต่างจะได้สมการของพจน์ไอเป็นดังนี้

$$u_i(i) = \frac{K_iT}{2}[e(i)+e(i-1)]+u_i(i-1) \qquad \text{(ก.7)}$$

ดังนั้นสมการควบคุมพีไอจะได้เป็นดังสมการที่ (ก.8)

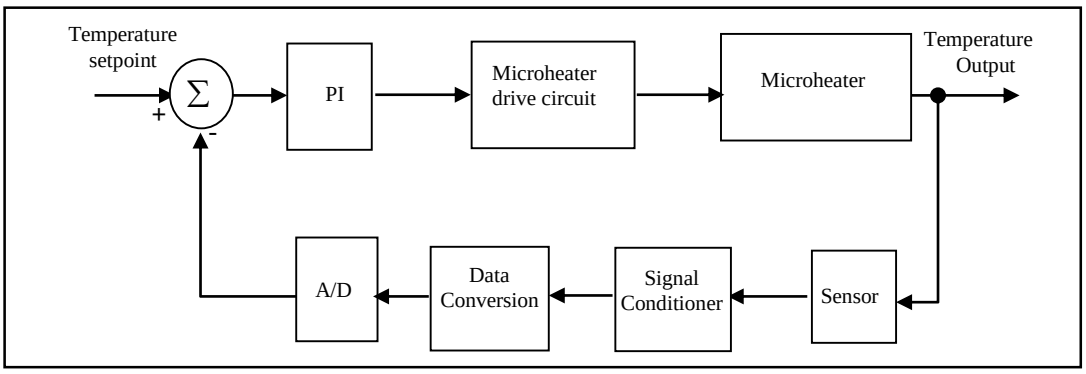
$$u(i) = u_p(i)+u_i(i) \qquad \text{(ก.8)}$$

เมื่อ $u_p(i) = K_pe(i)$

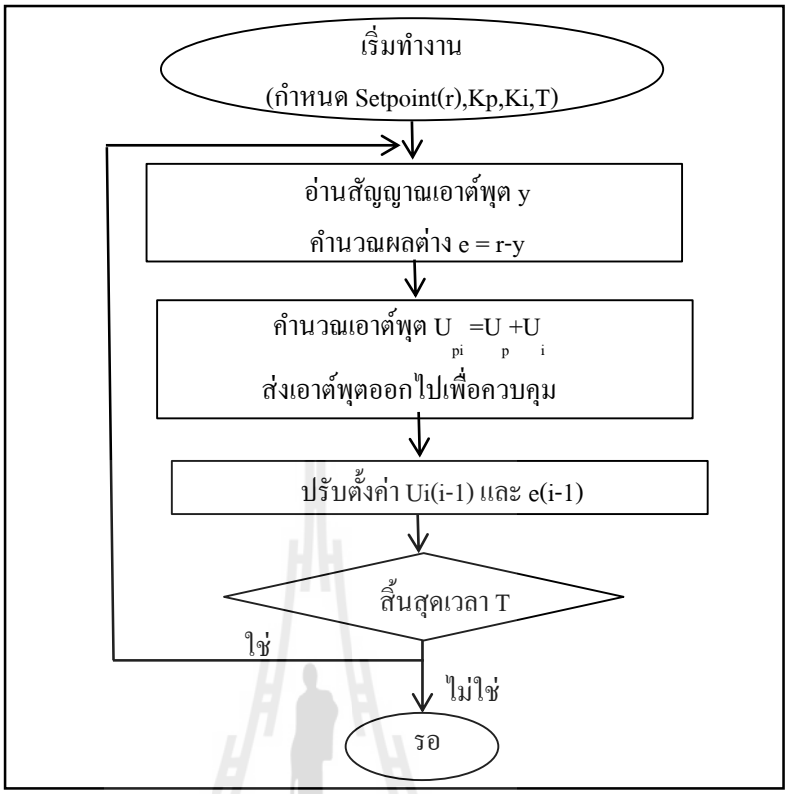
$$u_i(i) = \frac{K_iT}{2}[e(i)+e_i(i-1)]+u_i(i-1)$$

T = sampling time

สร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะได้เป็นตารางที่ ก.2 แล้วนำโปรแกรมดังกล่าวไปบรรจุลงไมโครคอนโทรลเลอร์ มีแผนผังการควบคุมดังรูปที่ ก.13 และแผนผังการทำงานเป็นดังรูปที่ ก.14



รูปที่ ก.13 แผนผังการควบคุมป้อนกลับแบบพีไอ



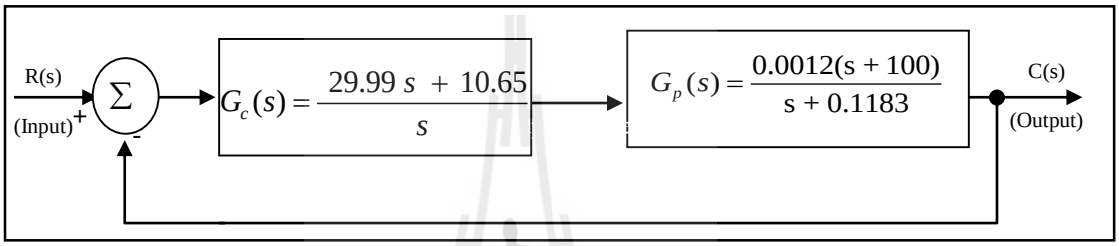
รูปที่ ก.14 แผนผังการควบคุมป้อนกลับแบบพีไอ

ตารางที่ ก.2 โปรแกรมการควบคุมพีไอแบบรูปดิจิตอล

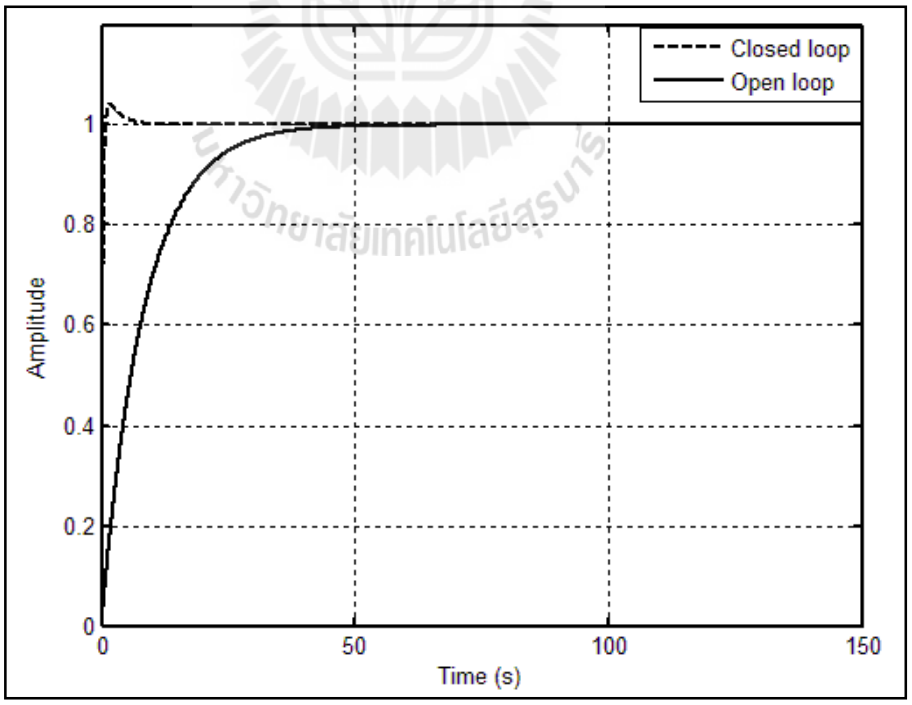
Program	Definitions
Kp=conts,Ki=conts,T=conts;	กำหนดค่าเกนพี เกนไอและ Sampling time
r=setpoint;	กำหนดค่าเป้าหมาย
Ui_1=0,err_1=0;	กำหนดให้เทอมไอและผลต่างเท่ากับ 0
while (1) { y=output;	อ่านสัญญาณเอาต์พุต
err=r-y;	คำนวณผลต่าง
Up=Kp*err ;	คำนวณเอาต์พุตของเทอมพี
Ui=(Ki*T/2)*(err+err_1)+Ui_1;	คำนวณเอาต์พุตของเทอมไอ
Upi=Up+Ui;	คำนวณเอาต์พุตเทอมพีไอ
SentToDriver(Upi);	ส่งสัญญาณพีไปเข้าสู่วงจรขับ
// Save variable	//เก็บค่าตัวแปรเอาไว้ใช้รอบถัดไป
Ui_1=Ui;	เก็บค่าเอาต์พุตของเทอมไอ
err_1 =err;	เก็บค่าผลต่าง
}	

2) การออกแบบตัวควบคุม ในการออกแบบตัวควบคุมได้ทำออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีโดเมนทางความถี่ด้วยวิธีของ Phillip (2003) ได้ค่า Kp เท่ากับ 29.99 และ Ki เท่ากับ 10.65 จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมหรือตัวชดเชย G_c เป็น ดังสมการ (ก.9) ดังนั้นจะได้ไดอะแกรมของระบบที่มีตัวควบคุมแล้วเป็นดังรูปที่ ก.15 และได้ผลการจำลองเป็นดังรูปที่ ก.16

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} = \frac{K_p s + K_i}{s} = \frac{29.99\ s\ +\ 10.65}{s} \qquad \text{(ก.9)}$$

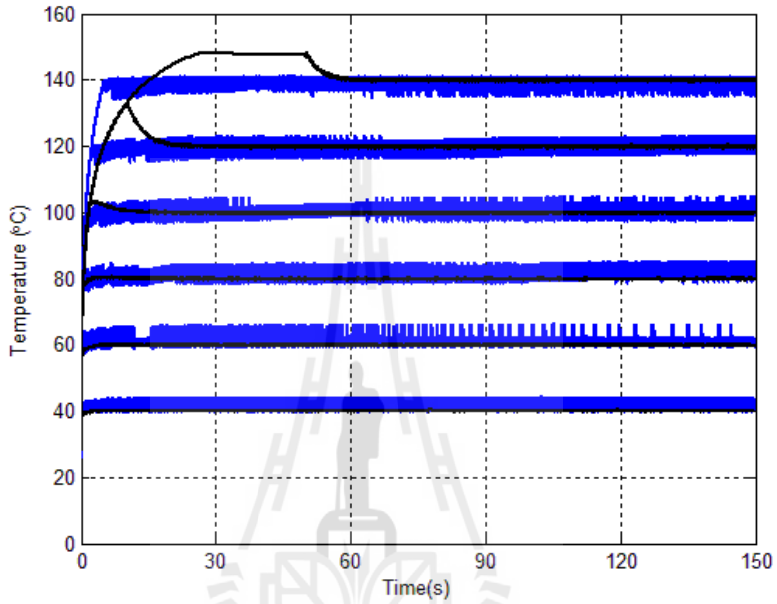


รูปที่ ก.15 ไดอะแกรมของระบบที่มีตัวควบคุมวงปิด

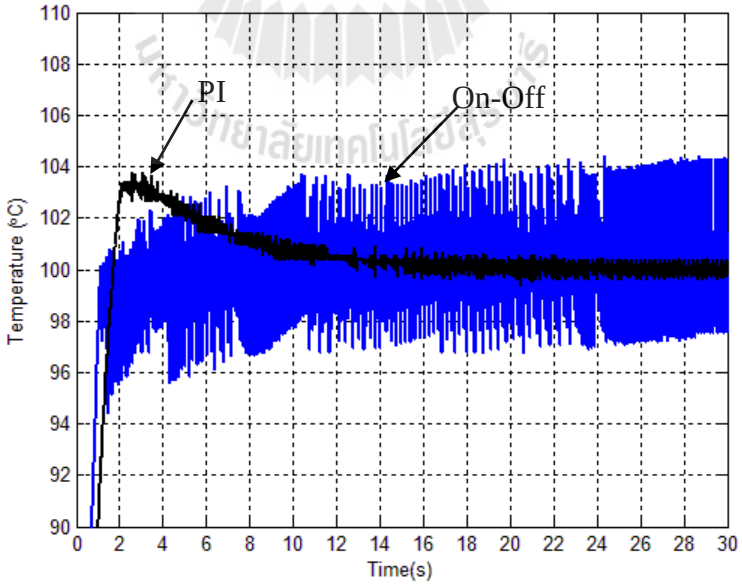


รูปที่ ก.16 ผลการจำลองการตอบสนองก่อนและหลังมีตัวชดเชยด้วยตัวควบคุมพีไอ

นำค่าเกนพีและเกนไอมาทดสอบการควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ได้ผลการทดลองควบคุมที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังรูปที่ ก.17 (ก) หากพิจาณาเฉพาะอุณหภูมิที่ 100 °C ได้เป็นดังรูปที่ ก.17 (ข) พบว่าอุณหภูมิของการควบคุมแบบเปิด-ปิด แกว่างตัวประมาณ 7 °C ขณะที่การควบคุมแบบพีไอเกิดการแกว่างตัวประมาณ 0.6 °C เท่านั้น



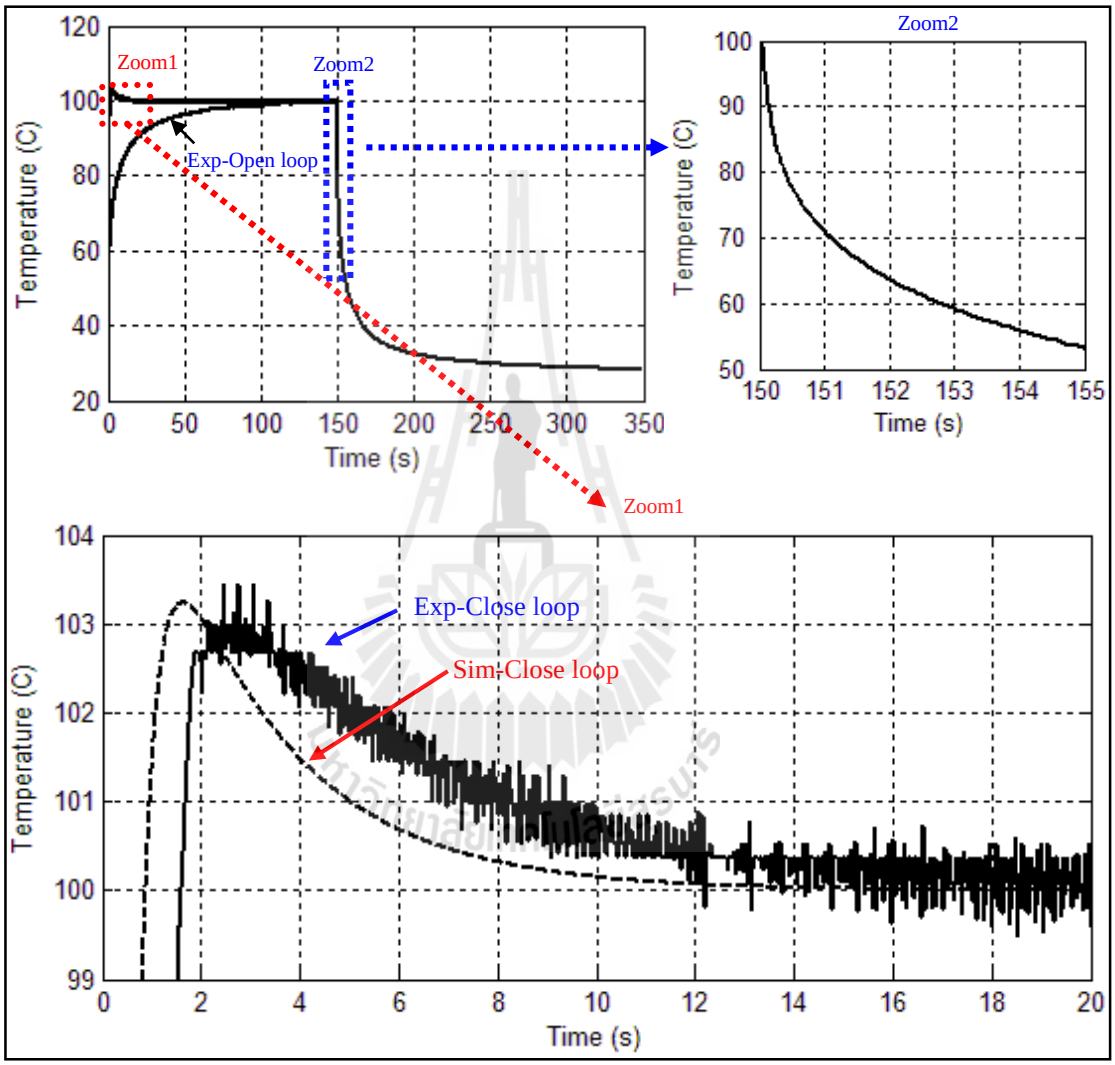
(ก) เปรียบเทียบอุณหภูมิระหว่างการควบคุมแบบเปิด-ปิดและการควบคุมแบบพีไอ



(ข) เปรียบเทียบอุณหภูมิระหว่างการควบคุมแบบเปิด-ปิดและการควบคุมแบบพีไอที่ 100 °C

รูปที่ ก.17 เปรียบเทียบอุณหภูมิระหว่างการควบคุมแบบเปิด-ปิดและการควบคุมแบบพีไอ

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะใช้การควบคุมแบบพีไอในการควบคุมอุณหภูมิเท่านั้นเพราะได้ผลการควบคุมที่ดีกว่าทั้งการควบคุมแบบเปิด-ปิด ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบการควบคุมอุณหภูมิระหว่างการควบคุมแบบเปิดและการควบคุมแบบพีไอเฉพาะที่ 100 °C ดังรูปที่ ก.18 เป็นการแสดงผลการจำลองและการวัดผลตอบสนองของไมโครฮีตเตอร์



รูปที่ ก.19 ผลการจำลองและการวัดการตอบสนองของโครฮีตเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบหลังชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบพีไอที่ 100 °C

จากผลการตอบสนองของระบบในทางปฏิบัติมีค่าคลาดเคลื่อนจากผลการจำลองไม่มากนักและค่าความคลาดเคลื่อนนั้นเป็นผลมาจากการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบซึ่ง ARMAX tool box สามารถประมาณค่าเฉลี่ยไว้ได้เพียง 69.05 % จึงทำให้เกิดข้อผิดพลาดดังกล่าวพบว่าช่วงระยะเวลา

ขาขึ้น (10 % ถึง 90 %) จากเดิมใช้เวลาประมาณ 32 วินาที ลดลงเหลือประมาณ 2 วินาที หรือลดลง 16 เท่า ส่วนระยะเวลาเข้าที่ (±2 %) ก่อนการควบคุมใช้เวลาประมาณ 100 วินาที ลดลงเหลือ 6.2 วินาที หรือประมาณ 16 เท่า และมีอัตราการพุ่งเกินมีค่าประมาณ 3.4 % หากพิจารณาผลตอบสนองทางเวลาช่วงขาลง พบว่าอุณหภูมิลงสู่สภาวะอุณหภูมิห้องอย่างช้า ๆใช้เวลาประมาณ 150 วินาที โดยเฉพาะอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 60 ^{o}C จะมีขาลงที่ช้านั้นเป็นผลมาจากธรรมชาติการคายความร้อนของระบบ เนื่องจากไม่สามารถควบคุมได้

ก.5 บทสรุป

จากการทดสอบการควบคุมอุณหภูมิของไมโครฮีตเตอร์ที่สร้างโดยกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต เป็นการศึกษาแนวทางการควบคุมเพื่อเป็นองค์ความรู้สำหรับควบคุมอุปกรณ์ที่จะสร้างขึ้นจริงในอนาคต ซึ่งเริ่มต้นด้วยการปรับเทียบเซนเซอร์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับแรงดันที่ออกจากวงจรปรับแต่งสัญญาณโดยใช้กล้องอินฟราเรด ซึ่งความแม่นยำอาจจะไม่ถูกต้องนัก เนื่องจากชิ้นงานที่สร้างขึ้นมีขนาดเล็กมากจึงต้องหาวิธีการปรับเทียบที่ดีขึ้นต่อไป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้เขียน

นายพิทยา ดีกล้า เกิดเมื่อวันที่ 24 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2527 ที่อำเภอพิมาย จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาโรงเรียนเพชรหนองขาม มัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจากโรงเรียนพิมายวิทยา จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) เมื่อ พ.ศ. 2550 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) เมื่อ พ.ศ. 2552 สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ระหว่างที่ทำการศึกษาระดับปริญญาตรีได้ศึกษาเกี่ยวกับระบบหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ จากนั้นได้เข้าศึกษาระดับมหาบัณฑิตในสาขาวิชาเดียวกัน โดยได้รับทุนการศึกษาจากสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) โครงการ "ทุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา" ขณะศึกษาได้ทำงานวิจัยด้านระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (MEMS) โดยทำการพัฒนาและสร้างตัวขับเร้าจุลภาคแบบไฟฟ้าสถิต โดยใช้กระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอกซ์ ณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี หลังสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโทแล้วได้เข้าศึกษาระดับดุษฎีบัณฑิตในสาขาวิชาเดียวกัน ด้วยทุนจากสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ในโครงการเดียวกัน ด้วยงานวิจัยเกี่ยวระบบทำความร้อนขนาดเล็กโดยใช้กระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอกซ์ ทั้งนี้ผู้วิจัยมีความสนใจทางด้านระบบกลไฟฟ้าจุลภาค กระบวนการลิโธกราฟฟี การสร้างและพัฒนาเซนเซอร์ การควบคุมอัตโนมัติ การออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์และการประยุกต์ใช้ระบบปัญญาประดิษฐ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี