

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบและสร้างไมโครฮีตเตอร์ร่วมกับตัวตรวจวัดอุณหภูมิด้วย
วัสดุเพลทินัมสำหรับชิพเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอ

DESIGN AND FABRICATION OF PLATINUM MICRO-HEATER
WITH THERMAL SENSOR FOR DNA AMPLIFICATION CHIP



T117063

สารบัญ.....
เลขทะเบียน 117063
วันเดือนปี 23 ส.ย. 2554

b.....
i.....

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2553

KMITL- 2010-NT-M-001-001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**DESIGN AND FABRICATION OF PLATINUM MICRO-HEATER
WITH THERMAL SENSOR FOR DNA AMPLIFICATION CHIP**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN NANOSCIENCE AND NANOTECHNOLOGY
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2010

KMITL- 2010-NT-M-001-001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2010

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบและสร้างไมโครฮีตเตอร์ร่วมกับตัวตรวจวัดอุณหภูมิด้วยวัสดุเพลทินัมสำหรับชิพเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอ

Thesis Title Design and Fabrication of Platinum Micro-Heater with Thermal Sensor for DNA Amplification Chip

นักศึกษา นายวิศรุต ศรีพุ่มไฉ่

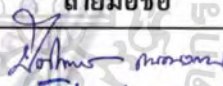

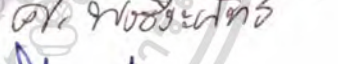


รหัสประจำตัว 51064602

ปริญญา วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต

สาขาวิชา นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. จิติ หนูแก้ว

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2010-NT-M-001-001

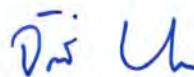
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ดร.ปิติพร	ถนอมงาม	
รศ.ดร.จิติ	หนูแก้ว	
ดร.ศุภานิจ	พรธีระภัทร	
ดร.สิรพัฒน์	ประโทนเทพ	
ดร.ทศิยาภรณ์	ทิวาวงศ์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 8 กรกฎาคม พ.ศ. 2553 เวลา 9.00-12.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคารวิจัยนาโนเทคโนโลยีสิรินธร ชั้น 1 ห้องประชุมนาโน 1
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRBANG

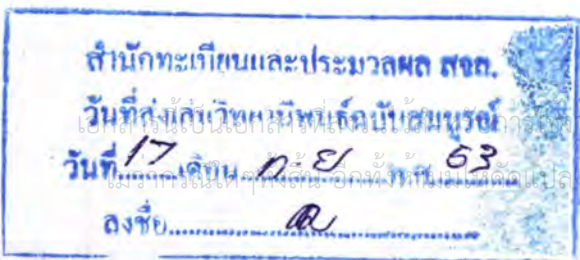
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.จิติ หนูแก้ว)

คณบดี

วันที่ 28 กรกฎาคม พ.ศ. 2553



เอกสารนี้เป็นเอกสารของสถาบันเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การออกแบบและสร้างไมโครฮีทเตอร์ร่วมกับตัวตรวจวัดอุณหภูมิด้วยวัสดุเพลทินัมสำหรับชีพเพิ่มจำนวนคีเอ็นเอ

นักศึกษา

นายวิศรุต ศรีพุ่มไข

รหัสประจำตัว

51064602

ปริญญา

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี

พ.ศ.

2553

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รศ.ดร. จิติ หนูแก้ว

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ดร. ศุภนิช พรธีระภัทร

บทคัดย่อ

รายงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการออกแบบและสร้างต้นแบบไมโครฮีทเตอร์ที่มีตัวตรวจวัดอุณหภูมิรวมอยู่ด้วย สำหรับใช้เป็นอุปกรณ์ส่วนหลักในการเพิ่มจำนวนคีเอ็นเอ ด้วยเทคนิคพีซีอาร์เนื่องจากประสิทธิภาพของการเพิ่มจำนวนคีเอ็นเอ จะขึ้นอยู่กับความแม่นยำของอุณหภูมิ ความรวดเร็วเพื่อให้ได้อุณหภูมิตามต้องการ และความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ โดยจะอาศัยการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตามขั้นตอน โดยเริ่มจากการแยกสายของดีเอ็นเอที่อุณหภูมิประมาณ 90-95 องศาเซลเซียส จากนั้นลดอุณหภูมิไปที่ 45-60 องศาเซลเซียส และเพิ่มเป็น 70-75 องศาเซลเซียส ซึ่งจะทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิไปเป็นจำนวนรอบซ้ำๆ กัน

ทำการออกแบบและสร้างไมโครฮีทเตอร์ที่มีรูปแบบต่างๆกัน โดยใช้เทคโนโลยีของซิลิกอนทำการสร้างชั้นฟิล์มนำความร้อนด้วยวัสดุเพลทินัมความหนา 200 นาโนเมตรและศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการแอนนิลที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ไมโครฮีทเตอร์ พร้อมทั้งทำการเทียบมาตรฐานของตัวตรวจวัดอุณหภูมิที่เป็น โลหะเพลทินัมด้วยเครื่องสำหรับการสอบเทียบมาตรฐานที่มีค่าความเสถียรภาพ ± 0.015 องศาเซลเซียส

ทำการออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิโดยใช้เทคนิคการควบคุมแบบพีไอดี สำหรับที่จะศึกษาผลการตอบสนองของอุณหภูมิที่ใช้สำหรับเพิ่มจำนวนคีเอ็นเอของไมโครฮีทเตอร์และตัวตรวจวัดอุณหภูมิ

คำสำคัญ : ไมโครฮีทเตอร์, ตัวตรวจวัดอุณหภูมิ, อุปกรณ์เพิ่มจำนวนคีเอ็นเอ, การควบคุมแบบพีไอดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	DESIGN AND FABRICATION OF PLATINUM MICRO-HEATER WITH THERMAL SENSOR FOR DNA AMPLIFICATION CHIP
Student	Witsaroot Sripumkhai
Student ID	51064602
Degree	Master of Science
Program	Nanoscience and Nanotechnology
Year	2010
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Jiti Nukeaw
Thesis Coadvisor	Dr. Supanit Porntheeraphat

ABSTRACT

In this research, a prototype of micro-heater with in situ thermal sensor is demonstrated for a fully integrated disposable polymerases chain reaction (PCR) chip device which is a standard technique for DNA amplification, usually consisting of periodical repetition of three reaction steps: a denaturing step at 92-96 °C, an annealing step at 55 °C and an extending step at 72 °C.

Multiple resistive heaters of difference geometries have been designed and fabricated by using silicon micro fabrication technique. The platinum (Pt) thin film with a thickness of 200 nm was deposited on patterned micro-heater and thermal sensor geometric on substrate by using an electron-beam evaporator system. The influence of annealing temperature on the physical and electrical properties of micro heater devices was studied. The Pt thermal sensors were calibrated by using standard temperature bath with stability of $\pm 0.015^{\circ}\text{C}$.

The custom-designed microcontroller instrument with PID technique was implemented to characterize the dynamic response of thermocycle of micro-heater with in situ thermal sensor devices. The efficiency of PCR chip is determined by accurate, rapid thermal cycling and temperature uniformity.

Keywords: Micro-heater; Thermal sensor; Polymerase Chain Reaction (PCR); PID technique

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือนำไปใช้ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดีได้นั้น ต้องขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ รศ.ดร. จิตี หนูแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ซึ่งเป็นผู้มอบโอกาส ประสิทธิ์ประสาทวิชา ความรู้ สอนให้รู้จักวิธีการแก้ปัญหา รวมทั้งให้ที่อยู่อาศัย และสถานที่ทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ ดร. ศุภนิจ พรธีระภัทร (พี่หน่อง) อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ช่วยสอน และให้ความรู้เกี่ยวกับงานวิจัย วิธีการแก้ปัญหา และความรู้ต่างๆ ที่ไม่สามารถหาอ่านได้ในตำราทั่วไป ขอขอบคุณสำหรับเรื่องราวต่างๆ ที่พี่ได้เล่าให้ฟัง ประสบการณ์ต่างๆ ที่พี่ได้สอน ขอขอบคุณที่ผม ได้มาร่วมงานกับพี่ ขอขอบคุณที่พี่ได้แสดงให้เห็นถึงการสำนึกเพื่อส่วนรวม และอีกหลายอย่างที่ไม่สามารถที่จะอธิบายเป็นคำพูดได้

ขอขอบคุณ ดร. ปิติพร ถนอมงาม ดร. สิริพัฒน์ ประ โทณเทพ ดร. ทูติยาภรณ์ ทิววงศ์ ที่ให้ความกรุณาเป็น คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้งให้ข้อเสนอแนะ และช่วยแก้ไขวิทยานิพนธ์ ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ คุณวิน บรรจงปรุ (พี่วิน) ที่ได้สอนให้รู้จักระบบการวางแผน แนวความคิด และสามารถที่จะทำงานเป็นระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ขอขอบคุณ คุณสากล ระหงส์ (พี่แจ๊ค) ที่สอนให้ได้รู้ว่าการทำวิจัยไม่จำเป็นจะต้องเครียด

ขอขอบคุณ พี่ม่อน ผู้ร่วมทำวิจัยคนสำคัญที่ผ่านการร่วมทุกข์ร่วมสุข ในงานวิจัยที่เข้มข้น

ขอขอบคุณรุ่นพี่ QoSLab ทุกคน (พี่ชาติ พี่นพ) ที่เป็นจุดเริ่มต้นสำหรับการทำงานวิจัย อีกทั้งช่วยสร้างความเข้มแข็งและสอนให้รู้จักการทำวิจัยที่อบอุ่น

ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) และพี่ๆ ทุกคนที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในการทำวิจัย ให้สะดวกและผ่านไปได้อย่างดี รวมถึงความเป็นกันเองจากพี่ๆ ทุกคน

ขอขอบคุณ ดร.ศรัณย์ สัมฤทธิ์เดชขจร ผู้อำนวยการฝ่ายหน่วยปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีโฟโตนิกส์ และสมาชิกทุกคน ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน FLIR รุ่น Thermovision A40

ขอขอบคุณ ผศ.โกศล ตราชู อาจารย์ประจำภาควิชา ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยในการสร้างและพัฒนาในส่วนของระบบควบคุมอุณหภูมิ

ขอขอบคุณทีมงาน TMEC (พี่ม่อน โอเล่ สอง บอย เต้) ที่ผ่านการร่วมทุกข์ร่วมสุขกันมา จากวิกฤติการณ์ทางความคิดหลายๆ เรื่อง

ขอขอบคุณพี่น้องชาววิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังทุกคน ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจในการศึกษาได้เป็นอย่างดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา III และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขอขอบคุณน้ำใสใจจริงจากชนากร (เต้) ที่ทำให้สามารถฟันฝ่าอุปสรรคในการเรียนมาได้โดยตลอดรอดฝั่ง ความไวใจ รวมถึงคำปรึกษาในหลายๆ เรื่อง

ขอขอบใจน้องภัทร น้องต้นน้ำ ที่ทำให้การดำเนินชีวิตเป็นไปอย่างไม่น่าเบื่อ และทำให้ผมต้องรู้จักวิธีการแก้ปัญหา ที่นอกเหนือจากงานวิจัย (ยิ้ม)

ขอขอบคุณสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) ที่สนับสนุนทางด้านทุนการศึกษาจนสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท

ขอขอบคุณผู้มีพระคุณ ที่ช่วยเหลือด้านความอนุเคราะห์ต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นทางด้านอุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย รวมทั้งความร่วมมือจากหลายๆ หน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

สุดท้ายขอขอบคุณความรัก ความเข้าใจ และกำลังใจอันอบอุ่นเสมอมา จากครอบครัว ศรีพุ่มไข ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญในการผลักดันให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จอย่างสมบูรณ์ และหวังเป็นอย่างยิ่งว่า เนื้อหาความรู้ จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ทางด้านวิชาการแก่ท่านผู้อ่านไม่มากก็น้อยครับ คุณประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขออุทิศแด่ครูบาอาจารย์และผู้มีพระคุณทุกท่าน

วิศรุต ศรีพุ่มไข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6 รายละเอียดของงานวิจัย.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการทํางาน.....	6
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1.1 Conventional PCR.....	6
2.1.2 PCR chip.....	7
2.2 กลไกการถ่ายเทความร้อน.....	11
2.2.1 การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน (Conduction).....	11
2.2.2 การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน (Convection).....	12
2.2.3 การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี (Radiation).....	13
2.3 หลักการทํางานของไมโครฮีตเตอร์.....	14
2.3.1 ไมโครฮีตเตอร์ความต้านทานแบบโดยตรง.....	15
2.3.2 ไมโครฮีตเตอร์ความต้านทานแบบโดยอ้อม.....	15
2.4 ทฤษฎีเกี่ยวกับตัวตรวจวัดอุณหภูมิชนิดความต้านทาน.....	16
2.4.1 หลักการเบื้องต้นสำหรับตัวตรวจวัดอุณหภูมิชนิดความต้านทาน.....	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.2 สมบัติของโลหะที่สามารถทำเป็นตัวตรวจวัดอุณหภูมิชนิดความต้านทาน.....	18
2.4.3 ข้อดีและข้อเสียของการใช้ตัวตรวจวัดอุณหภูมิชนิดความต้านทาน.....	20
2.5 เทคนิคการควบคุมกระบวนการทางความร้อน.....	20
2.5.1 เทคนิคการควบคุมความร้อนแบบ On-Off.....	20
2.5.2 การควบคุมความร้อนแบบ Proportional (P).....	22
2.5.3 การควบคุมความร้อนแบบ Proportional-Integral (PI).....	24
2.5.4 การควบคุมความร้อนแบบ Proportional-Integral-Derivative (PID).....	26
2.6 ทฤษฎีการเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอโดยเทคนิคพีซีอาร์.....	29
2.6.1 หลักการของเทคนิคพีซีอาร์.....	29
2.6.2 อุณหภูมิที่ใช้ในการทำพีซีอาร์.....	31
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	33
3.1 แนวคิดในการออกแบบไมโครฮีตเตอร์ที่มีตัวตรวจวัดอุณหภูมิ.....	33
3.1.1 การกำหนด layout ของการออกแบบ.....	33
3.1.2 การออกแบบไมโครฮีตเตอร์ที่มีตัวตรวจวัดอุณหภูมิ.....	34
3.1.3 การคำนวณค่าความต้านทานของอุปกรณ์ที่ออกแบบ.....	37
3.2 ขั้นตอนที่ใช้ในการสร้างไมโครฮีตเตอร์ที่มีตัวตรวจวัดอุณหภูมิ.....	38
3.2.1 เตรียมฐานรองรับ.....	38
3.2.2 สร้างชั้นฉนวน.....	39
3.2.3 สร้างลวดลายด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี.....	40
3.2.4 การสร้างฟิล์มโลหะด้วยระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศ.....	45
3.2.5 การล้างน้ำยาไวแสงหลังจากการระเหยฟิล์มโลหะ.....	48
3.2.6 การแอนนیلเพื่อปรับปรุงสมบัติของฟิล์ม.....	49
3.3 การบรรจุภัณฑ์.....	49
3.3.1 การตัดแยกอุปกรณ์ออกเป็นแต่ละตัว.....	49
3.3.2 การต่อขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์.....	50
3.4 ผลของการสร้างอุปกรณ์.....	51

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5 การตรวจสอบสมบัติของอุปกรณ์.....	52
3.5.1 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ.....	52
3.5.2 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า.....	53
3.5.3 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อน.....	54
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล.....	55
4.1 การตรวจวัดสมบัติทางกายภาพ.....	55
4.1.1 ผลการตรวจสอบฟิล์มบางเพลทินัมด้วย FE-SEM.....	55
4.1.2 ผลการตรวจสอบฟิล์มบางเพลทินัมด้วย AFM.....	60
4.2 การตรวจวัดสมบัติทางไฟฟ้า.....	62
4.2.1 ผลการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของไมโครฮีทเตอร์.....	62
5.2.2 ผลการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดอุณหภูมิ.....	63
4.3 การตรวจวัดสมบัติทางความร้อน.....	66
4.3.1 การสอบเทียบมาตรฐานของตัวตรวจวัดอุณหภูมิ.....	66
4.3.2 ผลการสอบเทียบมาตรฐานของตัวตรวจวัดอุณหภูมิ.....	68
4.3.3 การตรวจวัดผลทางความร้อนของไมโครฮีทเตอร์ที่มีตัวตรวจวัดอุณหภูมิ.....	74
4.3.4 ผลการวัดผลทางความร้อนของไมโครฮีทเตอร์ที่มีตัวตรวจวัดอุณหภูมิ.....	75
4.4 การวิเคราะห์ผลด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน.....	83
4.5 การนำไปใช้งานกับระบบควบคุมอุณหภูมิ.....	84
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	85
เอกสารอ้างอิง.....	87
ภาคผนวก.....	91
ประวัติผู้เขียน.....	100

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สัมประสิทธิ์ความต้านทานต่ออุณหภูมิและความต้านทานจำเพาะที่ 20°C.....	18
3.1 สรุปเงื่อนไขการออกแบบแต่ละรูปแบบของอุปกรณ์.....	37
3.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างฟิล์มเพคตินัมด้วยระบบระเหยสารในสุญญากาศ.....	47
4.1 สรุปค่าความต้านทานที่วัดได้ของไมโครฮีเตอร์ที่แอนนูลด้วยอุณหภูมิต่างๆ.....	62
4.2 แสดงค่า sensitivity ของตัวตรวจวัดอุณหภูมิเงื่อนไขที่ไม่ได้ทำการแอนนูล.....	69
4.3 แสดงค่า sensitivity ของตัวตรวจวัดอุณหภูมิเงื่อนไขเมื่อแอนนูลที่อุณหภูมิ 600°C.....	70
4.4 แสดงค่า sensitivity ของตัวตรวจวัดอุณหภูมิเงื่อนไขเมื่อแอนนูลที่อุณหภูมิ 900°C.....	71
4.5 แสดงค่า sensitivity ของตัวตรวจวัดอุณหภูมิเงื่อนไขเมื่อแอนนูลที่อุณหภูมิ 1200°C.....	72
4.6 ผลการคำนวณค่า TCR ของอุปกรณ์แต่ละเงื่อนไข.....	73
4.7 ผลการทดลองเกี่ยวกับค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ (Power consumption).....	82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เครื่อง Conventional PCR (Expendorf MasterCycler).....	7
2.2 ลักษณะ โครงสร้างของอุปกรณ์ PCR แบบ Stationary PCR chamber.....	9
2.3 ลักษณะ โครงสร้างของอุปกรณ์ PCR แบบ Continuous flow PCR.....	10
2.4 เครื่องหมายแสดงทิศทางการไหลของความร้อนในกฎของ Fourier.....	12
2.5 ลักษณะของ ไมโครฮีทเตอร์ความต้านทานแบบ โดยตรง.....	15
2.6 ลักษณะของ ไมโครฮีทเตอร์ความต้านทานแบบ โดยอ้อม.....	16
2.7 โครงสร้างในการคำนวณหา ความต้านทานของตัวตรวจวัดอุณหภูมิ.....	17
2.8 กิริยาการควบคุมความร้อนแบบ On-Off.....	21
2.9 ตัวอย่างผลการตอบสนองของระบบควบคุมอุณหภูมิแบบ On-Off.....	22
2.10 คุณสมบัติของกิริยาการควบคุมความร้อนแบบ Proportional.....	23
2.11 ตัวอย่างผลตอบสนองของระบบควบคุมอุณหภูมิแบบ Proportional.....	24
2.12 ผลตอบสนองของกิริยาการควบคุมแบบ Integral.....	25
2.13 ตัวอย่างผลตอบสนองของกิริยาการควบคุมแบบ PI (Direct Action).....	26
2.14 ตัวอย่างคุณสมบัติของกิริยาการควบคุมแบบ Derivative.....	27
2.15 ตัวอย่างผลตอบสนองของกิริยาการควบคุมแบบ PID.....	28
2.16 ตัวอย่างผลตอบสนองของระบบควบคุมอุณหภูมิแบบ PID.....	29
2.17 หลักการพื้นฐานในการสังเคราะห์ดีเอ็นเอสายใหม่จากสายดีเอ็นเอที่เป็นต้นแบบ ในแต่ละขั้นตอน denaturing, annealing และ extension.....	30
2.18 ช่วงของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำพีซีอาร์.....	32
3.1 ขนาดของ Layout ที่จะใช้สำหรับการออกแบบมาสก์ สำหรับเครื่อง mask aligner ที่ TMEC.....	34
3.2 ลักษณะของชิพที่ออกแบบให้มี ไมโครฮีทเตอร์และตัวตรวจวัดอุณหภูมิอยู่ในชิพเดียวกัน.....	35
3.5 ส่วนของการออกแบบ chamber โดยมีขนาดโดยรวม 12x25 mm.....	35
3.4 หน้าต่างของซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ.....	36
3.5 ฟิล์มพลาสติกความละเอียดสูงสำหรับใช้เป็นหน้ากากในกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี.....	36
3.6 ขั้นตอนและกระบวนการสร้างไมโครฮีทเตอร์และตัวตรวจวัดอุณหภูมิ.....	38
3.7 โครงสร้างของการสร้างชั้นฟิล์มฉนวน $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ บนฐานรองรับซิลิคอน.....	39
3.8 กระบวนการ โฟโตลิโธกราฟี (Photolithography Process).....	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.9 โครงสร้างของการเคลือบนำยาไวแสงด้วยเครื่องสปินเนอร์.....	41
3.10 ลักษณะของการฉายแสงยูวีผ่านฟิล์มมาส์กที่ทำการออกแบบไว้.....	42
3.11 ระบบที่ใช้ในการฉายแสงโดย (a) แสดงตำแหน่งของช่องที่แสงผ่านและภาคเลื่อน สำหรับวางแผ่นซิลิคอน, (b) แสดงถึงลักษณะพิกัดของตำแหน่งที่ทำการฉายแสง.....	42
3.12 (a) ลักษณะโครงสร้างลวดลายของนำยาไวแสงบนฐานรองรับ, (b) ภาพถ่ายชิ้นงาน จริงที่มีลวดลายของนำยาไวแสงบนฐานรองรับ 6 นิ้ว.....	43
3.13 ลักษณะของลวดลายนำยาไวแสงกรณีที่ใช้เวลาในการฉายแสงน้อยเกินไป.....	44
3.14 ลักษณะของลวดลายของนำยาไวแสงกรณีที่ใช้เวลาในการฉายแสงมากเกินไป.....	45
3.15 ระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศ.....	46
3.16 ลักษณะของการติดแผ่นของชิ้นงานกับตัว holder ของเครื่อง E-beam.....	47
3.17 โครงสร้างของลักษณะชั้นฟิล์ม โลหะบนลวดลายของนำยาไวแสง.....	48
3.18 (a) ลักษณะของชิ้นงานขณะที่ทำการล้างนำยาไวแสง, (b) โครงสร้าง ลวดลายของโลหะบนฐานรองรับ.....	48
3.19 เตาแอนนีสแบบแนวนอนที่ TMEC รุ่น SVG THERMCO TMX2604 Diffusion Furnace.....	49
3.20 ลักษณะของอุปกรณ์หลังจากที่ตัดด้วยเครื่อง Dicing Saw.....	50
3.21 ลักษณะการต่อขั้วไฟฟ้าโดยใช้กาวเงิน.....	51
3.22 ไมโครฮีเตอร์ที่มีตัวตรวจวัดอุณหภูมิจำนวน 32 ชั้นบนแผ่นซิลิคอนขนาด 6 นิ้ว.....	51
3.23 ลักษณะของไมโครฮีเตอร์ที่ถูกตัดแบ่งเป็นแต่ละชิปแล้ว (a) ไมโครฮีเตอร์ 6 รูปแบบ (b) ไมโครฮีเตอร์ที่ทำการต่อสายไฟพร้อมใช้งาน (c) ลักษณะของขั้วไฟฟ้า ที่จะนำไปต่อใช้งาน.....	52
3.24 เครื่องมือที่ใช้ตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ (a) FE-SEM, (b) AFM.....	53
3.25 ระบบวัดค่ากระแส - ความต่างศักย์	53
3.26 กล้องถ่ายภาพความร้อน รุ่น FLIR Systems Cameras: Thermo Vision A40.....	54
4.1 ลักษณะผิวของฟิล์มบางเพลทินัมจากการตรวจสอบด้วยเครื่อง FE-SEM.....	56
4.2 ความหนาของฟิล์มบางเพลทินัมจากการตรวจสอบด้วยเครื่อง FE-SEM.....	57
4.3 ค่าความต้านทานจำเพาะ (resistivity) กับอุณหภูมิที่ใช้ในการแอนนีสของเพลทินัม ที่สร้างจากระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศ.....	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 ภาพถ่ายจากเครื่อง FE-SEM ของฟิล์มแพลทินัมเมื่อแอนนีสที่อุณหภูมิ 1200 °C (a) กำลังขยาย 10,000 เท่า, (b) กำลังขยาย 50,000 เท่า.....	59
4.5 ตำแหน่งและผลการวิเคราะห์ของการตรวจวัดด้วยเครื่อง EDS.....	60
4.6 ลักษณะผิวของฟิล์มบางแพลทินัมจากการตรวจสอบด้วยเครื่อง AFM.....	61
4.7 แนวโน้มค่าความต้านทานของ ไมโครฮีตเตอร์แต่ละรูปแบบเมื่อทำการแอนนีส ที่อุณหภูมิต่างกัน.....	63
4.8 ความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดอุณหภูมิ (RTD) เจือไนไมได้แอนนีส.....	64
4.9 ความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดอุณหภูมิ เมื่อแอนนีสที่อุณหภูมิ 600 °C.....	64
4.10 ความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดอุณหภูมิเมื่อแอนนีสที่อุณหภูมิ 900 °C.....	65
4.11 ความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดอุณหภูมิเมื่อแอนนีสที่อุณหภูมิ 1200 °C.....	65
4.12 เครื่องทำอุณหภูมิมาตรฐานแบบอ่างของเหลว (Fluke 7103 Micro Bath).....	67
4.13 ดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์ (YOKOGAWA 7563 Digital Thermometer).....	67
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิที่ได้จากการสอบเทียบ.....	68
4.15 ผลการสอบเทียบของตัวตรวจวัดอุณหภูมิเจือไนไมได้ทำการแอนนีส.....	69
4.16 ผลการสอบเทียบของตัวตรวจวัดอุณหภูมิเจือไนเมื่อแอนนีสที่อุณหภูมิ 600 °C.....	70
4.17 ผลการสอบเทียบของตัวตรวจวัดอุณหภูมิเจือไนเมื่อแอนนีสที่อุณหภูมิ 900 °C.....	71
4.18 ผลการสอบเทียบของตัวตรวจวัดอุณหภูมิเจือไนเมื่อแอนนีสที่อุณหภูมิ 1200 °C.....	72
4.19 ผลการทดสอบค่าความเสถียรภาพของตัวตรวจวัดอุณหภูมิ.....	73
4.20 ระบบที่ใช้ในการตรวจวัดผลทางความร้อนของไมโครฮีตเตอร์.....	74
4.21 หน้าต่างของโปรแกรม Labview ที่ใช้วัดผลทางความร้อนของไมโครฮีตเตอร์.....	75
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของไมโครฮีตเตอร์เจือไนไมได้แอนนีส.....	76
4.23 อัตราการเพิ่ม (heating rate) อุณหภูมิของไมโครฮีตเตอร์เจือไนไมได้แอนนีส.....	77
4.24 ค่าอุณหภูมิสูงสุดที่แรงดันค่าต่างๆ ของไมโครฮีตเตอร์เจือไนไมได้แอนนีสแต่ละรูปแบบ...77	
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของไมโครฮีตเตอร์เจือไนแอนนีส 600 °C.....	78
4.26 อัตราการเพิ่ม (heating rate) อุณหภูมิของไมโครฮีตเตอร์เจือไนแอนนีส 600 °C.....	79
4.27 ค่าอุณหภูมิสูงสุดที่แรงดันค่าต่างๆ ของไมโครฮีตเตอร์เจือไนแอนนีส 600 °C.....	80
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของไมโครฮีตเตอร์เจือไนแอนนีส 900 °C.....	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของไมโครฮีทเตอร์เจือไนเซียมที่ 1200°C	82
4.30 ภาพถ่ายทางความร้อนของไมโครฮีทเตอร์ที่เวลาต่างๆ.....	84
4.31 ผลการนำไมโครฮีทเตอร์ที่มีตัวตรวจวัดอุณหภูมิมาใช้งานร่วมกับระบบควบคุมอุณหภูมิที่สร้างขึ้น.....	84



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการลดขนาดของอุปกรณ์ให้มีขนาดเล็กลง กำลังได้รับความสนใจจากกลุ่มของนักวิจัยหลากหลายกลุ่ม อาทิ เช่น ทางด้านชีววิทยา ทางด้านเคมีวิเคราะห์ ทางด้านการแพทย์ ทางด้านการเกษตร เป็นต้น [1-2] ซึ่งการลดขนาดของอุปกรณ์ให้มีขนาดเล็กลง จะมีข้อดีหลายอย่าง เช่น มีขนาดเล็กลง ราคาต้นทุนที่ต่ำ ใช้งานง่าย และสะดวกต่อการพกพาไปใช้งานภายนอกสถานที่ ซึ่งในงานวิจัยนี้จึงเลือกที่จะศึกษาถึงการย่อขนาดของตัวทำความร้อนและตัวตรวจวัดอุณหภูมิในเครื่องเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอ (Conventional PCR) ให้มีขนาดเล็กลงโดยที่ยังคงมีประสิทธิภาพเหมือนเดิม

ในบทนี้จะกล่าวถึง ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย สมมุติฐานของงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

เมื่อกกล่าวถึงคำว่า “ชิปเตอร์” ส่วนใหญ่ก็จะนึกถึงขดลวดตัวทำความร้อน ซึ่งจะมีอยู่หลากหลายลักษณะขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งาน โดยชิปเตอร์ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวทำความร้อนในอุปกรณ์ต่างๆ มากมาย เช่น ทางด้านเครื่องใช้ไฟฟ้า เตาเร็ด กาต้มน้ำ หม้อหุงข้าว เตาไฟฟ้าสำหรับย่างบิบิกิว หรือแม้แต่ทางด้านความสวย ความงาม เครื่องอบไอน้ำ เครื่องหนีบผม ซึ่งจะเห็นว่า ชิปเตอร์ได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์เกี่ยวกับชีวิตประจำวันมากมาย ในอุปกรณ์ที่มีตัวชิปเตอร์เป็นองค์ประกอบอยู่นั้นส่วนใหญ่จะต้องมีตัวตรวจวัดอุณหภูมิรวมอยู่ด้วย โดยทั่วไปก็จะเป็นเทอร์โมมิเตอร์ จะเห็นได้ว่า อุปกรณ์ข้างต้นที่กล่าวมานั้น มีขนาดค่อนข้างใหญ่ ส่งผลให้เกิดการสิ้นเปลืองของพลังงานมาก ซึ่งในปัจจุบันนี้ ความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะงานทางการลดขนาดของอุปกรณ์ (Miniature device) และระบบห้องปฏิบัติการบนชิป (Lab On a Chip) โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อที่จะพัฒนาให้อุปกรณ์มีขนาดเล็กลง กระทัดรัด ใช้งานได้สะดวก ราคาถูก ใช้เวลาในการวิเคราะห์รวดเร็ว ปริมาณสารที่ใช้ลดลง และสามารถที่จะนำไปใช้ในแบบพกพาภายนอกห้องปฏิบัติการได้ ซึ่งชิปเตอร์และตัวตรวจวัดอุณหภูมิเป็นหนึ่งในอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาให้มีขนาดเล็กลง เพื่อให้สอดคล้องกับความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไมโครฮีทเตอร์ เป็นผลจากความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีของการลดขนาดอุปกรณ์ ที่ทำการพัฒนาฮีทเตอร์ให้มีขนาดเล็กลง และมีการนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวาง ยกตัวอย่างเช่นทางด้านอุปกรณ์ Lab On a Chip หรืออุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาเคมีบนชิพที่มีของเหลวอยู่ในท่อระดับไมโครเมตร โดยปฏิกริยานั้นจะต้องอาศัยความร้อนหรือต้องการรักษาอุณหภูมิในตำแหน่งหรือบริเวณเล็กๆ ภายในท่อระดับไมโครเมตร ซึ่งนับได้ว่าเป็นความท้าทายของนักวิจัยที่ทำการศึกษาวิจัยในเรื่องที่เกี่ยวกับไมโครฮีทเตอร์เป็นอย่างมาก เพื่อที่จะออกแบบและสร้างไมโครฮีทเตอร์ให้ได้ความร้อนที่อยู่ในบริเวณที่ต้องการ อีกทั้งยังได้นำไปเป็นส่วนสำคัญในอุปกรณ์จำพวกเซนเซอร์ชนิดต่างๆ ได้แก่ เซนเซอร์ตรวจวัดก๊าซ เซนเซอร์วัดความดัน เซนเซอร์วัดความชื้น และเซนเซอร์วัดอัตราการไหล โดยเฉพาะในปัจจุบันได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานที่เกี่ยวข้องกับระบบไมโครฟลูอิดิก (Microfluidic systems) [1-3] ซึ่งถือได้ว่าจะเป็นส่วนที่เชื่อมโยงงานวิจัยทางด้านชีววิทยา ทางด้านเคมีทางการแพทย์ หรือแม้แต่กระทั่งทางด้านเกษตรไว้ด้วยกัน

ในบางงานวิจัย สมบัติของตัวเซนเซอร์นั้นก็จะขึ้นอยู่กับกระบวนการทางความร้อน เช่น ในกรณีของระบบไมโครฟลูอิดิก การให้ความร้อนและการควบคุมความร้อนมีความสำคัญมากในกระบวนการทางชีวเคมี ดังนั้นการพัฒนาไมโครฮีทเตอร์ให้มีขนาดเล็กลงจะช่วยในเรื่องผลของความร้อนในบริเวณที่ต้องการ เพราะกระบวนการทางชีวเคมีบางอย่างต้องการความร้อนที่แม่นยำ และการกระจายของความร้อนที่สม่ำเสมอ เช่น กระบวนการที่ใช้ในการเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอ

Polymerase Chain Reaction (PCR) เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการเพิ่มจำนวนของดีเอ็นเอ โดยหลักการของพีซีอาร์ จะต้องอาศัยปฏิกิริยาที่ต่อเนื่องหลายรอบ ซึ่งแต่ละรอบจะประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก คือ ขั้นตอนแรก denaturation จะใช้อุณหภูมิประมาณ 90-95 องศาเซลเซียส ขั้นตอนที่สอง annealing จะลดอุณหภูมิลงมาที่ 50-60 องศาเซลเซียส และขั้นตอน extension จะใช้อุณหภูมิประมาณ 70-75 องศาเซลเซียส เนื่องจากพีซีอาร์เป็นเทคนิคที่นิยมใช้กันแพร่หลาย จึงทำให้มีการพัฒนาและสร้างเครื่อง conventional PCR ซึ่งทำให้สะดวกในการทำพีซีอาร์ แต่ข้อเสียเปรียบของเครื่อง conventional PCR ก็คือ ขนาดใหญ่ ราคาสูง อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานสูง จึงทำให้มีใช้งานเฉพาะในโรงพยาบาลใหญ่ๆ หรือในห้องปฏิบัติการที่เฉพาะทาง ดังนั้นจึงมีความพยายามที่จะทำการพัฒนาเกี่ยวกับ miniaturized PCR chip เพื่อให้มีขนาดเล็กลง ลดเวลาในการทำงาน ราคาถูก ใช้ปริมาณสารตัวอย่างน้อย อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานต่ำ จึงทำให้ใช้เวลาในการวิเคราะห์น้อยกว่า conventional PCR และคุณสมบัติที่สำคัญอีกอย่างคือสามารถทำเป็นอุปกรณ์ที่พกพาไปใช้งานภายนอกห้องปฏิบัติการได้ (hand-held device)

จากหลักการของเทคนิคพีซีอาร์ จะเห็นได้ว่าตัวทำความร้อนเป็นส่วนที่สำคัญมากในการเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอ ถ้าอุณหภูมิไม่เหมาะสมจะทำให้เกิดการขยายดีเอ็นเอในช่วงที่ไม่ต้องการ (Non-specific DNA) ดังนั้นตัวทำความร้อนจะต้องมีการกระจายความร้อนของอุณหภูมิที่สม่ำเสมอ อัตรา

เอก การเพิ่มอุณหภูมิสูง ใช้พลังงานน้อย และอีกส่วนหนึ่งที่สำคัญคือมีระบบควบคุมอุณหภูมิที่แม่นยำ การค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในงานวิจัยนี้จะพัฒนาในส่วนของ การออกแบบและสร้างไมโครฮีทเตอร์พร้อมตัวตรวจวัดอุณหภูมิจากวัสดุเพลาทินัมสำหรับชีพเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอ

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับ ไมโครฮีทเตอร์และตัวตรวจวัดอุณหภูมิ
2. ออกแบบและสร้างไมโครฮีทเตอร์ที่มีตัวตรวจวัดอุณหภูมิสำหรับชีพเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอ
3. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์สมบัติด้านต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง กับอุปกรณ์ไมโครฮีทเตอร์ที่มีตัวตรวจวัดอุณหภูมิ
4. เพื่อการทดสอบประยุกต์ใช้งานสำหรับเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอ

1.3 สมมุติฐานของงานวิจัย

เนื่องจากเครื่อง Conventional PCR ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีขนาดที่ค่อนข้างใหญ่ ราคาสูง จะมีใช้งานเฉพาะในห้องปฏิบัติการเฉพาะทางหรือโรงพยาบาลใหญ่เท่านั้น ซึ่งงานวิจัยนี้ได้มีแนวคิดที่จะทำการสร้างชีพสำหรับเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอ ซึ่งมีหลักการคล้ายกับเครื่องที่เป็น Conventional PCR มีขนาดเล็ก ราคาถูก และสามารถที่จะนำไปใช้งานแบบพกพาได้ โดยการดำเนินงานวิจัยนี้ได้เน้นในส่วนของ การออกแบบและสร้างไมโครฮีทเตอร์ที่มีตัวตรวจวัดอุณหภูมิสำหรับชีพเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอ ซึ่งเทียบได้กับส่วนที่เป็นตัวทำความร้อนในเครื่อง Conventional PCR ให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้เริ่มจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ไมโครฮีทเตอร์สำหรับชีพเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอด้วยเทคนิคพีซีอาร์ ซึ่งจะช่วยให้ทราบถึงวิวัฒนาการในการพัฒนาอุปกรณ์สำหรับเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอ รวมทั้งแนวทางในการออกแบบ กระบวนการพื้นฐานที่ใช้ในการสร้าง และการตรวจสอบสมบัติต่างๆ ของอุปกรณ์

ในการดำเนินงานวิจัย ทำการออกแบบไมโครฮีทเตอร์ที่มีตัวตรวจวัดอุณหภูมิสำหรับชีพเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอ สำหรับการออกแบบไมโครฮีทเตอร์ได้เปลี่ยนแปลงเป็นรูปแบบต่างๆ ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความต้านทานของแต่ละรูปแบบแตกต่างกัน ส่วนที่เป็นตัวตรวจวัดอุณหภูมิจะออกแบบให้เป็นรูปแบบเดียวกันทั้งหมด สำหรับการสร้างไมโครฮีทเตอร์และตัวตรวจวัดอุณหภูมิจะใช้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคโนโลยีการผลิตของ CMOS โดยใช้ฟิล์มบางแพลทินัมความหนา 200 นาโนเมตร เป็นไมโครฮีทเตอร์และตัวตรวจวัดอุณหภูมิ หลังจากนั้นได้ศึกษาถึงผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการแอนนัลฟิล์มแพลทินัม เพื่อปรับปรุงสมบัติของฟิล์มแพลทินัม ขั้นตอนต่อไปเป็นการตรวจสอบลักษณะของฟิล์มบางแพลทินัมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscopy: FE-SEM) และกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic force microscope : AFM) และทำการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของไมโครฮีทเตอร์ที่มีตัวตรวจวัดอุณหภูมิ โดยจะทำการสอบเทียบตัวตรวจวัดอุณหภูมิกับระบบมาตรฐานที่ใช้ในการสอบเทียบตัวตรวจวัดอุณหภูมิ หลังจากนั้นจะใช้ตัวตรวจวัดอุณหภูมิที่สร้างขึ้นสำหรับวัดอุณหภูมิของไมโครฮีทเตอร์ สำหรับไมโครฮีทเตอร์จะศึกษาผลการตอบสนองของอุณหภูมิเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าค่าต่างๆ ให้กับไมโครฮีทเตอร์และนำอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น ไปใช้กับระบบควบคุมอุณหภูมิสำหรับชีพเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ ความเข้าใจ เกี่ยวกับหลักการของไมโครฮีทเตอร์และตัวตรวจวัดอุณหภูมิ
2. ชุดต้นแบบไมโครฮีทเตอร์ที่มีตัวตรวจวัดอุณหภูมิและมีระบบควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สำหรับชีพเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอ
3. สามารถวิเคราะห์และพัฒนาอุปกรณ์ให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นได้
4. สามารถนำไปทดสอบใช้งานสำหรับเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอ

1.6 รายละเอียดของงานวิจัย

ในรายงานวิจัยเล่มนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท โดยในแต่ละบทมีรายละเอียดดังต่อไปนี้
 บทที่ 1 เป็นบทนำ จะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย สมมุติฐานของงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และรายละเอียดของงานวิจัย

บทที่ 2 จะเป็นการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทฤษฎีกลไกการถ่ายเทความร้อน รวมถึงหลักการการทำงานของไมโครฮีทเตอร์และตัวตรวจวัดอุณหภูมิชนิดความต้านทาน เทคนิคของการควบคุมกระบวนการทางความร้อนแบบต่างๆ ซึ่งจะเป็นส่วนที่ช่วยให้เข้าใจงานวิจัยมากยิ่งขึ้น

บทที่ 3 เป็นขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยซึ่งจะบอกถึงกระบวนการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการสร้างไมโครฮีทเตอร์ที่มีตัวตรวจวัดอุณหภูมิสำหรับชีพเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอ อาทิเช่น โปรแกรมที่ใช้ในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกแบบ เทคโนโลยีของ CMOS การบรรจุภัณฑ์ รวมถึงวิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติทางความร้อนของอุปกรณ์

บทที่ 4 เป็นผลการตรวจวัดและการวิเคราะห์สมบัติด้านต่างๆ ของอุปกรณ์เริ่มจากผลการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ลักษณะของพื้นผิวของฟิล์มโดยเครื่อง FE-SEM และ AFM ผลการตรวจสอบทางด้านไฟฟ้าของไมโครฮีตเตอร์และตัวตรวจวัดอุณหภูมิ และผลการตรวจสอบสมบัติทางความร้อน การเทียบมาตรฐานของตัวตรวจวัดอุณหภูมิ ผลทางความร้อนของไมโครฮีตเตอร์ และสุดท้ายจะเป็นผลการนำไมโครฮีตเตอร์ที่มีตัวตรวจวัดอุณหภูมิไปใช้งานกับระบบควบคุมอุณหภูมิ

บทที่ 5 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะของงานวิจัย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการทำงาน

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับเทคนิคพีซีอาร์ รวมทั้งอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทำพีซีอาร์ โดยคนส่วนใหญ่อาจจะเคยได้ยินกับคำว่าพีซีอาร์ ในช่วงที่มีการระบาดของไข้หวัด 2009 ซึ่งจะต้องมีการใช้เทคนิคพีซีอาร์ มาช่วยในการตรวจวิเคราะห์ และสำหรับการตรวจหาเชื้อโรคของไข้หวัด 2009 นั้นจะทำได้เฉพาะที่โรงพยาบาลขนาดใหญ่ หรือมีผู้เชี่ยวชาญเฉพาะทางเท่านั้น และค่าใช้จ่ายในการตรวจยังมีราคาที่สูง โดยข้อจำกัดที่ทำให้เฉพาะบางโรงพยาบาลนั้น ส่วนหนึ่งก็มาจากเครื่องมือที่จะใช้สำหรับการทำพีซีอาร์ ในหัวข้อต่อไปจะมาทำความรู้จักกับเครื่องพีซีอาร์กันมากขึ้น

2.1.1 Conventional PCR

เนื่องจากพีซีอาร์เป็นเทคนิคที่ใช้ในการเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอ (Deoxyribonucleic acid: DNA) ซึ่งมีความจำเป็นมากสำหรับงานเกี่ยวกับการศึกษาทางด้าน โมเลกุล รวมทั้งยังมีการนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านต่างๆ มากมาย เช่น ทางด้านการวินิจฉัยโรค การตรวจโรค ทางด้านอาหาร การตรวจสอบปนเปื้อน ทางด้านนิติวิทยาศาสตร์ และทางด้านการเกษตร ซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็นเทคนิคที่มีการนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย จึงได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเป็นเครื่องมือที่มีมาตรฐาน ซึ่งเป็นเครื่องที่รู้จักทางการค้าว่า “Conventional PCR”

สำหรับเครื่อง Conventional PCR ก็จะประกอบด้วย 2 ส่วนหลักที่สำคัญ คือ ส่วนที่เป็นตัวทำความร้อน สำหรับการควบคุมอุณหภูมิตามปฏิกิริยาของพีซีอาร์ และมีช่องสำหรับใส่หลอดสำหรับการทำพีซีอาร์ (PCR tube) จะเห็นได้ว่าส่วนของการควบคุมอุณหภูมิถือว่าเป็นส่วนที่สำคัญมากสำหรับการทำพีซีอาร์

โดยเครื่อง Conventional PCR ในปัจจุบันมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อเพิ่มความสะดวกสบายต่อผู้ใช้งาน โดยที่ผู้ใช้งานสามารถที่จะทำการตั้งโปรแกรมเพื่อกำหนดจำนวนรอบที่จะใช้ในการทำพีซีอาร์ เวลาและอุณหภูมิที่จะใช้ในแต่ละช่วงอุณหภูมิ โดยอย่างยิ่งเฉพาะรุ่นใหม่ๆ ผู้ใช้งานสามารถที่จะใช้งานและควบคุมผ่านทางคอมพิวเตอร์ได้อย่างสะดวก เนื่องจากจะเพิ่มช่องสำหรับการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับตัวอย่างของเครื่อง Conventional PCR ของ Eppendorf MasterCycler จะแสดงดังรูปที่ 2.1 โดยจะมีขนาดของเครื่องโดยรวม คือ 26 เซนติเมตร× 41 เซนติเมตร× 27 เซนติเมตร (กว้าง×ยาว×สูง) และมีน้ำหนัก 2.4 กิโลกรัม โดยค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิจะอยู่ที่ ± 0.2 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียส/วินาที และอัตราการลดลงของอุณหภูมิ ประมาณ 2 องศาเซลเซียส/วินาที โดยใช้กำลังไฟฟ้าถึง 500 วัตต์



รูปที่ 2.1 เครื่อง Conventional PCR (Eppendorf MasterCycler)

จะเห็นได้ว่าเครื่อง Conventional PCR นั้นมีประโยชน์มากสำหรับผู้ใช้งานที่ทำงานทางด้านเกี่ยวกับการศึกษาในเชิงโมเลกุล แต่ถึงอย่างไรก็ตามในปัจจุบันเครื่อง Conventional PCR ยังมีราคาที่ยังค่อนข้างสูง ขนาดของเครื่องมีขนาดใหญ่ ไม่สามารถที่จะนำไปใช้งานภายนอกห้องปฏิบัติการได้ และผู้ที่ใช้งานต้องมีความเชี่ยวชาญเฉพาะ รวมทั้งยังสิ้นเปลืองพลังงานอีกด้วย จึงทำให้มีใช้งานกันเฉพาะห้องปฏิบัติการที่ทำเฉพาะด้านหรือโรงพยาบาลขนาดใหญ่เท่านั้น

2.1.2 PCR chip

ถึงแม้ว่าเครื่อง Conventional PCR จะมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพที่ดีแล้ว แต่ก็ยังพบว่า ยังมีปัญหาในเรื่องของราคาที่สูงและขนาดที่ใหญ่ ด้วยความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีทำให้มีการวิจัย หรือ ได้พยายามที่จะพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อจะทำให้เครื่องพีซีอาร์มีขนาดเล็กลง (PCR chip) แต่ยังคงที่จะมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับเครื่อง Conventional PCR โดยกลุ่มวิจัยของ Northrop et al เป็นนักวิจัยกลุ่มแรกที่สามารถสร้าง PCR chip ออกมาได้สำเร็จทำให้เป็นที่สนใจของนักวิจัยในอีกหลายกลุ่มมากมายที่ได้พยายามที่จะนำแนวคิดของ PCR chip รุ่นแรกมาทำการพัฒนาต่อโดยวัตถุประสงค์หลักๆ สำหรับการพัฒนาอุปกรณ์ PCR chip นั้นจะเกี่ยวข้องกับ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเลือกฐานรองรับที่จะนำมาใช้ การออกแบบ PCR chip หรือโครงสร้างของอุปกรณ์ขนาดเล็ก รวมทั้ง ปริมาตรของสารที่ใช้ในการทำพีซีอาร์ ความเร็วหรือเวลาที่ใช้ในการทำพีซีอาร์ และส่วนที่สำคัญมากอีกส่วนก็คือ ส่วนของการควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสมสำหรับการทำพีซีอาร์ โดยมีหลายบทความวิจัยที่ได้ทำการรวบรวมงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาอุปกรณ์ PCR chip [1-4]

2.1.2.1 แนวคิดที่ทำให้เกิดการพัฒนาอุปกรณ์ PCR chip

PCR chip หรือจะเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า PCR Microfluidics เป็นเทคนิคที่มีความสำคัญมากในหลายๆด้าน เช่น ทางด้านการแพทย์ ทางด้านชีววิทยา ทางด้านอาหาร ทางด้านความมั่นคง แม้แต่ทางด้านการเกษตร ก็จำเป็นที่ต้องใช้เทคนิคพีซีอาร์ ดังนั้นนักวิจัยหลายๆ สาขาจึงพยายามที่จะลดขนาดของอุปกรณ์พีซีอาร์ให้มีขนาดเล็กลง เนื่องจากจะทำให้สามารถที่จะลดค่าใช้จ่ายในการสร้างและการนำไปใช้งาน ลดเวลาในการเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอ ลดการสิ้นเปลืองสารตัวอย่างในการทำพีซีอาร์ เนื่องจากสารตั้งกล่าวมีราคาที่สูง ลดการเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอในส่วนที่ไม่ต้องการ (Non-specific products) และพยายามที่จะทำให้สามารถนำไปใช้งานภายนอกห้องปฏิบัติการ ได้หรือแบบพกพา

2.1.2.2 ฐานรองรับที่นำมาใช้สำหรับการสร้าง PCR chip

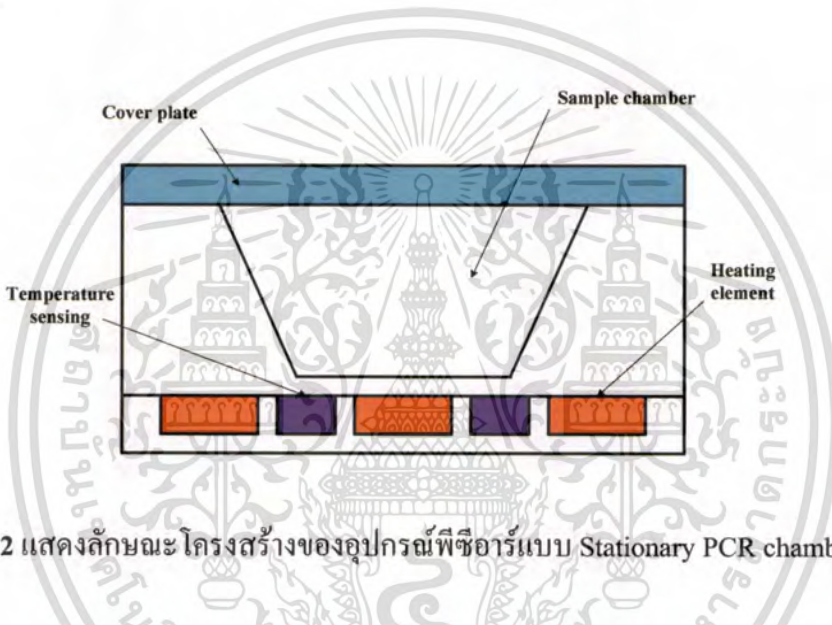
โดยอุปกรณ์ PCR chip จะสร้างจากวัสดุที่เป็นซิลิคอน (Si) [5-9] หรือฐานรองรับที่เป็นกระจก [10-12] รวมทั้งยังมีการพัฒนาที่จะนำพอลิเมอร์มาใช้สำหรับเป็นฐานรองรับด้วย เช่น Polydimethylsiloxane (PDMS) [13-19] ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมมากสำหรับอุปกรณ์ทางด้าน Microfluidics วัสดุ Polycarbonate (PC) [20,21] และ Polymethylmethacrylate (PMMA) [22] ซึ่งจะช่วยเพิ่มทางเลือกที่จะสามารถนำมาใช้สำหรับเป็นฐานรองรับในการพัฒนา PCR chip และวัสดุที่เริ่มมีการนำมาใช้ในอุปกรณ์ PCR chip เช่น SU-8 [23], cyclic olefin copolymer (COC) โดยฐานรองรับแต่ละชนิดก็จะมีสมบัติหรือลักษณะที่แตกต่างกัน ซึ่งแน่นอนว่าสารตัวอย่างก็จะมีทั้งข้อดีและข้อเสีย ถ้าจะเลือกวัสดุที่มีการนำความร้อนดี และมีเครื่องมือที่ช่วยในการอำนวยความสะดวกต่างๆ ก็จะต้องคิดถึงซิลิคอนเป็นอันดับแรก แต่สิ่งที่ตามมาคือ ซิลิคอนจะเป็นตัวที่ยับยั้งปฏิกิริยาของการทำพีซีอาร์ และการที่มีค่าของการนำความร้อนสูงมากนั้น ก็จะทำให้ต้องมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิความร้อนเข้ามาช่วยและมีข้อจำกัดในเรื่องของการนำไปวิเคราะห์ทางแสง จึงทำให้กระจกและ PDMS เป็นตัวเลือกที่น่าสนใจ

2.1.2.3 โครงสร้างสำหรับอุปกรณ์ PCR chip

สำหรับโครงสร้างของอุปกรณ์ PCR chip จะแบ่งตามลักษณะของการเคลื่อนที่ของของเหลว จะแบ่งออกได้เป็น 2 แบบใหญ่ๆ คือ แบบที่ของเหลวอยู่นิ่งกับที่ (Stationary PCR

Chamber) และของเหลวไหลเคลื่อนที่ในท่อขนาดเล็ก (Continuous flow PCR) ซึ่งแต่ละแบบจะมีทั้งข้อดีและข้อเสียต่างกัน ขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งาน

1. Stationary PCR chamber ในรูปแบบนี้จะเป็นรูปแบบที่ของเหลวอยู่กับที่ภายใน Chamber โดยจะทำการเก็บสารตัวอย่างให้อยู่ภายใน chamber และทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามหลักการของพีซีอาร์ โดย PCR chip ลักษณะนี้ได้ถูกพัฒนาโดยทีมวิจัยของ Northrop et al. ในปี 1993 [24] ตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา PCR chip ในรูปแบบนี้ได้ถูกนำมาเป็นแบบอย่างในการพัฒนาอย่างกว้างขวาง นับได้ว่า ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา งานวิจัยทางการลดขนาดของอุปกรณ์ PCR chip ได้รับความสนใจอย่างสูง โดยลักษณะโครงสร้างของ PCR chip จะแสดงได้ดังรูปที่ 2.2 [8-9,14, 17-20, 24-26]

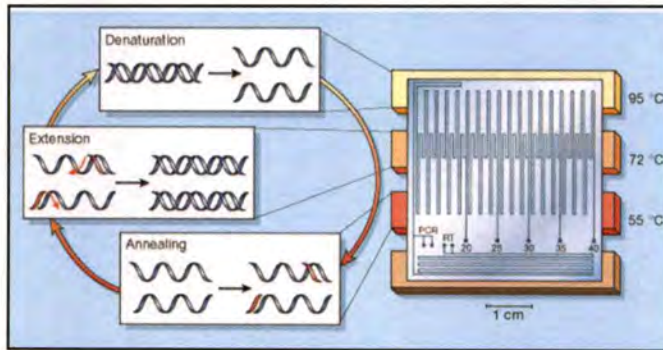


รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะ โครงสร้างของอุปกรณ์พีซีอาร์แบบ Stationary PCR chamber

สำหรับข้อดีของรูปแบบนี้ ก่อนข้างที่จะมีความยืดหยุ่นสำหรับการกำหนดจำนวนรอบของการทำพีซีอาร์ สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงสารตัวอย่างได้ตามขนาดของ chamber ส่วนข้อเสียก็คือ ก่อนข้างยากที่จะทำให้เป็นระบบที่สมบูรณ์โดยตัวเอง เช่น มีการลดปริมาณของการเพิ่มของดีเอ็นเอหลังจากที่ทำพีซีอาร์เสร็จ ซึ่งอาจจะทำให้เกิดการปนเปื้อนระหว่างการเปลี่ยนสารตัวอย่าง การระเหยของสารตัวอย่าง ในขณะที่ทำปฏิกิริยาพีซีอาร์

2. Continuous flow PCR ในรูปแบบนี้ของเหลวจะมีการไหลผ่านส่วนของตัวทำความร้อนตามช่วงที่กำหนด ซึ่งวิธีนี้จะทำให้สามารถที่จะปรับเปลี่ยนความเร็วของการทำพีซีอาร์ ที่เป็นแบบ continuous นั้น ทีมวิจัยกลุ่มแรกที่ได้มีการนำเสนอคือกลุ่มของ Kopp et al. ในปี 1998 [27] โดยใช้ทองแดงเป็นส่วนของตัวทำความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งมีนักวิจัยหลายกลุ่มได้ร่วมกันพัฒนาต่อ [1, 16, 22, 28-31] ซึ่งรูปแบบนี้จะมีทั้งข้อดีและข้อเสียเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะ โครงสร้างของอุปกรณ์พีซีอาร์แบบ Continuous flow PCR

2.1.2.4 ตัวทำความร้อนและการควบคุมอุณหภูมิสำหรับ PCR chip

จากที่ทราบกันแล้วส่วนสำคัญของอุปกรณ์ PCR chip ก็คือส่วนของตัวทำความร้อน ซึ่งจะเป็นตัวชี้วัดพารามิเตอร์ต่างๆ ของอุปกรณ์ PCR chip เช่น เวลาที่ใช้ในการทำพีซีอาร์ รวมถึงประสิทธิภาพของการทำพีซีอาร์ หรือ PCR product

ถึงอย่างไรก็ตาม การเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอ จะประสบความสำเร็จหรือมีประสิทธิภาพมากน้อยเพียงใด การควบคุมอุณหภูมิถือว่าเป็นส่วนสำคัญอย่างมาก โดยตัวควบคุมอุณหภูมิจะต้องมีความแม่นยำ และอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิสูง ไม่สิ้นเปลืองพลังงาน โดยจะขอกกล่าวรายละเอียดเฉพาะในส่วนของตัวทำความร้อนที่ใช้ในแบบสัมผัสเท่านั้น (contact heating methods) ซึ่งแบบที่เป็น contact heating นั้นจะมี 2 แบบหลักๆ คือ แบบที่เป็นตัวทำความร้อนสำเร็จรูปที่เป็น Peltier หรือ Thermo-Electric (TE) ceramic ซึ่งก็จะมีการนำมาใช้ในการทำ PCR chip แต่ก็ไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากขนาดของตัว TE ค่อนข้างที่จะมีขนาดใหญ่ และสิ้นเปลืองพลังงาน

สำหรับตัวทำความร้อนที่เป็นแบบสัมผัสอีกแบบหนึ่งก็คือ เป็นตัวทำความร้อนที่สร้างขึ้นโดยใช้เทคโนโลยีของการสร้างฟิล์มบาง ซึ่งส่วนใหญ่ จะใช้วัสดุเพคตินัม [32-36] เนื่องจากมีข้อดีในส่วนของคุณสมบัติการสัมผัสระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทาน ทนต่อสารเคมี และไม่เกิดการออกซิไดซ์ หรือทำปฏิกิริยากับออกซิเจน เนื่องจากการเกิดออกซิไดซ์ทำให้สมบัติของอุปกรณ์เปลี่ยนไป แต่ก็จะมีบางงานวิจัยใช้โลหะอะลูมิเนียม [37] โครเมียม [38] เป็นต้น และวัสดุที่เริ่มมีการนำมาใช้ทำเป็นฟิล์มบาง ITO (Indium Tin Oxide) [40] ซึ่งมีข้อดีคือ สามารถที่จะยึดเกาะกับกระจกได้ และที่สำคัญมีลักษณะ โปร่งแสง จึงเป็นวัสดุใหม่ที่น่าสนใจ

2.2 กลไกการถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทของความร้อนจะเกิดเมื่อวัตถุทั้งสองมีอุณหภูมิที่แตกต่างกัน โดยจะมีการถ่ายเทความร้อนจากวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปยังวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยกลไกการถ่ายเทความร้อนมีด้วยกัน 3 ประเภท คือ

การนำความร้อน เป็นการส่งถ่ายความร้อนโดยที่โมเลกุลไม่มีการเคลื่อนย้ายตำแหน่ง โดยทิศทางการไหลของความร้อนจะมีทิศจากที่อุณหภูมิสูงไปที่อุณหภูมิต่ำ

การพาความร้อน เกิดจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของตัวกลางที่พาความร้อนไปด้วย ซึ่งอาจเกิดจากการพาความร้อนอย่างธรรมชาติ เช่น การเกิดลมหรือ การพาความร้อนที่ถูกแรงบังคับ เช่น การระบายความร้อนของหม้อน้ำรถยนต์

การแผ่รังสีความร้อน เป็นการส่งผ่านความร้อนโดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง

2.2.1 การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน (Conduction)

การถ่ายเทความร้อนโดยหลักการของการนำความร้อน เป็นกลไกของการแลกเปลี่ยนพลังงานภายใน จากวัตถุหนึ่งไปยังวัตถุหนึ่ง หรือจากส่วนหนึ่งของวัตถุไปยังส่วนอื่นๆ ของวัตถุ โดยการแลกเปลี่ยนพลังงานที่เกิดจากการสั่นของโมเลกุลที่อยู่ติดกัน หรือ เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า การถ่ายเทความร้อนโดยการนำนั้นความร้อนจะไหลจากโมเลกุลของวัตถุที่อุณหภูมิสูงไปสู่โมเลกุลที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าโดยที่วัตถุนั้นไม่มีการเคลื่อนที่ การนำความร้อนจะเกิดขึ้นได้ดีในวัสดุที่เป็นของแข็ง ตัวอย่างของการนำความร้อน ได้แก่ แท่งโลหะที่ถูกเผาให้ร้อนที่ปลายข้างหนึ่งเมื่อเวลาผ่านไปที่ปลายอีกข้างหนึ่งจะร้อนขึ้นเพราะเกิดการถ่ายเทความร้อนโดยการนำ

โลหะส่วนใหญ่ที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีจะเป็นตัวนำความร้อนที่ดีด้วย ตัวอย่างเช่น เงิน ทองแดง อลูมิเนียม และทองคำ เพราะโลหะมีอิเล็กตรอนอิสระที่เป็นตัวช่วยเสริมให้กลไกการถ่ายโอนความร้อนมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

สำหรับกฎเบื้องต้นที่ใช้อธิบายถึงวิธีการถ่ายเทความร้อนโดยการนำก็คือ กฎของ Fourier ซึ่งกล่าวไว้ว่าอัตราการไหลของความร้อนโดยการนำโดยทิศทางที่กำหนดจะเป็นสัดส่วนกับอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับระยะทาง dT/dn พื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อน A ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำในทิศทาง n ก็คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Q_n = -kA \frac{dT}{dn} \quad (2.1)$$

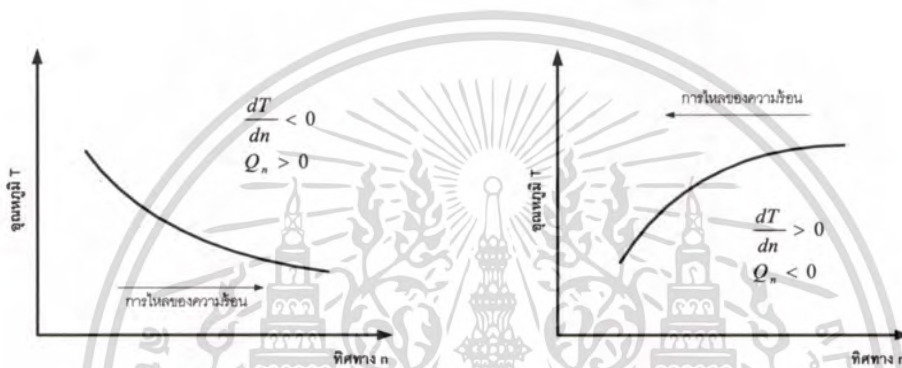
เมื่อ

Q_n คือ อัตราการไหลของความร้อนในทิศทาง n บวก

A คือ พื้นที่หน้าตัดของผิวสัมผัสที่มีทิศทางตั้งฉากกับการไหลของความร้อนทิศทาง n

dT/dn เป็นเกรเดียนต์ของอุณหภูมิในทิศทางการไหลของความร้อน

k คือ สภาพนำความร้อน (thermal conductivity) เป็นสมบัติของสสาร มีหน่วยคือ 1 J(s m C)^{-1}



รูปที่ 2.4 เครื่องหมายแสดงทิศทางการไหลของความร้อนในกฎของ Fourier

2.2.2 การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน (Convection)

การพาความร้อน คือ วิธีการที่ความร้อนเคลื่อนที่ระหว่างผิวของของแข็งกับตัวกลางที่เคลื่อนที่ได้ซึ่งตัวกลางนั้นอาจอยู่ในสถานะของเหลวหรือก๊าซก็ได้ กลไกที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพานั้น เกิดจากผลรวมของการนำความร้อน การสะสมพลังงานและการเคลื่อนที่ของของไหล การพาความร้อนยังสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ การพาความร้อนโดยการบังคับ (force convection) และ การพาความร้อนตามธรรมชาติ (nature or free convection)

1. การพาความร้อนโดยการบังคับ (force convection) คือ การเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยที่ของไหลถูกบังคับให้เคลื่อนที่ไปสัมผัสโดยใช้กลไกภายนอก เช่น ปัดลม เป็นต้น

2. การพาความร้อนตามธรรมชาติ (nature or free convection) คือ การเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยที่ของไหลที่อยู่ใกล้พื้นผิวของของแข็งจะยกตัวขึ้นเนื่องจากมีความหนาแน่นที่ต่ำกว่าของไหลที่อยู่ไกลออกไป การพาความร้อนตามธรรมชาตินี้ เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคลื่อนที่โดยแรงลอยตัวของของไหลเอง แรงลอยตัวนี้เกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่นของของไหล ซึ่งเกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิ

การคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อน โดยการพา นั้นเป็นเรื่องยาก เพราะมีพารามิเตอร์มากมายที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ เป็นต้นว่า สมบัติทางกายภาพของของไหล ความเร็วของการไหล ความแตกต่างของอุณหภูมิของของแข็งกับของไหล การคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่จะใช้สมการของ Newton

$$q = h(T_h - T_c) \quad (2.2)$$

โดยที่

h คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ($\text{watt/m}^2\text{K}$)

T_c คือ อุณหภูมิด้านที่เย็น (K)

T_h คือ อุณหภูมิด้านที่ร้อน (K)

ถ้าเราหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้ เราก็สามารถหาปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทได้ ซึ่งสมการสำหรับคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนส่วนใหญ่จะเป็นสมการชนิดเอมไพริกัล (Empirical equation)

2.2.3 การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี (Radiation)

การแผ่รังสี ความร้อนจะเคลื่อนที่โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางซึ่งแตกต่างไปจากการถ่ายเทสองแบบข้างต้น แต่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงจากพลังงานความร้อนไปในรูปคลื่นแสงที่มีความถี่ในช่วงที่เป็นรังสียูวี ถึงช่วง รังสีอินฟราเรด การอธิบายถึงกลไกการถ่ายเทความร้อนแบบการแผ่รังสี เป็นสิ่งที่ทำได้ยากในเชิงกายภาพ สมการที่ใช้คำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีหาได้จากสมการ

$$q = \sigma AT^4 \quad (2.3)$$

$$q = \epsilon \sigma AT^4 \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

σ คือ ค่าคงที่สเตฟาน-โบลซ์มันน์เท่ากับ $5.67 \times 10^{-8} \text{ watt/m}^2 \text{ K}^4$

ϵ คือ ค่าการแผ่รังสี (emissivity) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อเป็นวัตถุดำ (black body)

วัตถุดำให้ค่าการแผ่รังสีสูงสุดตามสมการที่ (2.3) เรียกว่า วัตถุดำหรือ วัตถุดำ ซึ่งถ้าเป็นวัตถุดำทั่วไปจะมีการแผ่รังสีได้น้อยกว่าวัตถุดำ การแผ่รังสีของวัตถุดำทั่วไปสามารถหาได้จากสมการที่ (2.4)

2.3 หลักการทำงานของไมโครฮีตเตอร์

หลักการทำงานของไมโครฮีตเตอร์ คือ การเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อนเพื่อเปลี่ยนค่าอุณหภูมิให้กับวัสดุที่ต้องการ พลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไมโครฮีตเตอร์ทั้งหมดนี้ได้ถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อนแต่มีบางส่วนที่มีการสูญเสียไปกับระบบโดยส่วนที่เหลือจะเป็นความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับวัสดุกับการสูญเสียไปโดยไร้ประโยชน์ทั้งโดยตั้งใจและไม่ตั้งใจ การเข้าใจถึงสัดส่วนของพลังงานความร้อนที่ถูกนำไปใช้ในส่วนต่างๆจะช่วยให้การพิจารณาเรื่องการประหยัดพลังงานทำได้ง่ายขึ้น

สำหรับไมโครฮีตเตอร์ความต้านทานอาศัยหลักการทางไฟฟ้า คือ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดความต้านทาน จะมีการกำเนิดไฟฟ้าเกิดขึ้นตามสมการที่ (2.5)

$$P = I^2 R = V^2 / R \quad (2.5)$$

เมื่อ

P คือ กำลังไฟฟ้า มีหน่วยเป็นวัตต์ (watt)

I คือ กระแสไฟฟ้าผ่านตัวต้านทาน มีหน่วยเป็นแอมแปร์ (A)

R คือ ความต้านทานของตัวนำ มีหน่วยเป็นโอห์ม (Ω)

V คือ แรงดันไฟฟ้าที่ความต้านทาน มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)

กำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนไปเป็นค่าความต้านทานความร้อนโดยคำนวณได้จากสมการที่ (2.6)

$$Q = 0.24Pt \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

Q คือ ค่าความร้อนที่เกิดขึ้น มีหน่วยเป็นแคลอรี (Cal)

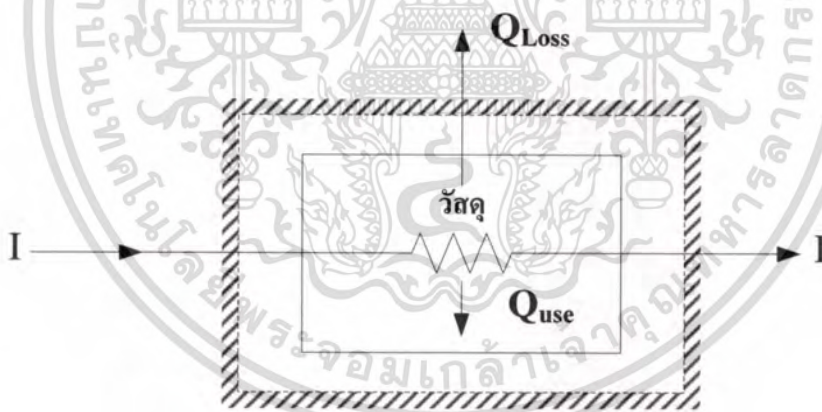
P คือ กำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้น มีหน่วยเป็นวัตต์ (watt)

t คือ เวลาที่ใช้งาน มีหน่วยเป็นวินาที (sec)

สำหรับหลักการทำงานของฮีตเตอร์ความต้านทานนั้น ถ้าจะแบ่งจากลักษณะการถ่ายเทความร้อนก็จะมี 2 ลักษณะหลักคือ ไมโครฮีตเตอร์ความต้านทานแบบโดยตรง และ ไมโครฮีตเตอร์ความต้านทานแบบโดยอ้อม

2.3.1 ไมโครฮีตเตอร์ความต้านทานแบบโดยตรง

เป็นแบบที่ใช้หลักการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในวัสดุซึ่งเป็นตัวนำที่ต้องการให้ความร้อนโดยตรง ความร้อนที่เกิดขึ้นถูกนำไปใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุโดยตรงและมีส่วนหนึ่งซึ่งต้องสูญเสียไป ดังแสดงในรูปที่ 2.5

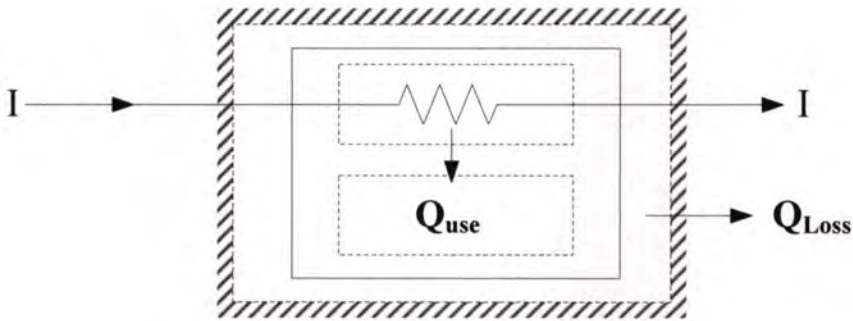


รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะของไมโครฮีตเตอร์ความต้านทานแบบโดยตรง

2.3.2 ไมโครฮีตเตอร์ความต้านทานแบบโดยอ้อม

เป็นแบบที่ใช้หลักการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในตัวกำเนิดความร้อนซึ่งเป็นตัวความต้านทาน ความร้อนที่เกิดขึ้นถูกใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับตัวกำเนิดความร้อนเองแล้วถ่ายทอดให้กับวัตถุที่ต้องการเพิ่มอุณหภูมิโดยการพา การนำ และการแผ่รังสี มีความร้อนส่วนหนึ่งสูญเสียไปโดยมิได้ประโยชน์ ดังแสดง ในรูปที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะของไมโครฮีเตอร์ความต้านทานแบบโดยอ้อม

2.4 ทฤษฎีเกี่ยวกับตัวตรวจวัดอุณหภูมิชนิดความต้านทาน

ตัวตรวจวัดอุณหภูมิชนิดความต้านทาน (Resistance Temperature Detectors: RTD) คือ ตัวตรวจวัดอุณหภูมิที่ใช้หลักการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของโลหะซึ่งค่าความต้านทานดังกล่าวจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ ความต้านทานของโลหะที่เพิ่มเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นนี้ เรียกว่า “สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบบวก (Positive Temperature Coefficient: PTC)”

ตัวตรวจวัดอุณหภูมิชนิดความต้านทาน (RTD) ค้นพบในปีเดียวกับที่ซีเบ็คค้นพบปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก โดย Sir Humphry Day ซึ่งพบว่า ความต้านทานในโลหะจะมีผลตามค่าความร้อน และในอีก 50 ปีต่อมา Sir William Siemens ก็นำเอาโลหะแพลทินัมมาทำเป็นเทอร์โมมิเตอร์และจัดให้เป็นเทอร์โมมิเตอร์แบบปฐมภูมิที่มีความแม่นยำสูง

2.4.1 หลักการเบื้องต้นสำหรับตัวตรวจวัดอุณหภูมิชนิดความต้านทาน

วัสดุสามารถแบ่งได้เป็นตัวนำไฟฟ้า สารกึ่งตัวนำและฉนวน ตามการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง โลหะเกือบทุกชนิดจะมีความต้านทานจำเพาะประมาณ 10^{-3} ถึง 10^{-6} Ω -cm สารกึ่งตัวนำจะมีประมาณ 10 ถึง 10^6 Ω -cm และฉนวนจะมีมากกว่า 10^{12} Ω -cm โลหะทุกชนิดมีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ทุกๆ อุณหภูมิ ยกเว้นที่อุณหภูมิต่ำมากๆ ความนำไฟฟ้าเป็นส่วนกลับกับความต้านทานต่อการไหลของ กระแสความต้านทานของตัวนำไฟฟ้าเป็นไปตามกฎของโอห์ม คือ

$$V = IR \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

V คือ ความต่างศักย์มีหน่วยเป็น โวลต์

I คือ กระแสมีหน่วยเป็นแอมแปร์

R คือ ความต้านทานที่มีหน่วยเป็น โอห์ม

โลหะต่างชนิดกันจะมีค่าความต้านทานจำเพาะต่างกันและความต้านทานของตัวนำจะแปรผันตรงกับความยาวของตัวนำ และแปรผกผันกับพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ นั่นคือ

$$R = \frac{\rho L}{WT} \quad (2.8)$$

เมื่อ

R คือ ความต้านทานของตัวนำ

ρ คือ ความต้านทานจำเพาะของวัสดุมีหน่วยเป็น โอห์ม-เมตร

L คือ ความยาวของตัวนำมีหน่วยเป็นเมตร

W คือ ความกว้างของตัวนำมีหน่วยเป็นเมตร

T คือ ความหนาของตัวนำมีหน่วยเป็นเมตร



รูปที่ 2.7 โครงสร้างในการคำนวณหา ความต้านทานของตัวตรวจวัดอุณหภูมิ

ความต้านทานจำเพาะของตัวนำขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ สำหรับโลหะนั้นค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานจำเพาะมีค่าเป็นบวก นั่นคือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความต้านทานจะเพิ่มขึ้น สำหรับสารกึ่งตัวนำโดยปกติค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานจำเพาะมีค่าเป็นลบ ในช่วงอุณหภูมิจำกัดใกล้ๆ 0°C อาจถือว่าความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของโลหะกับอุณหภูมิ จะมีลักษณะเป็นเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ส่วนตัวเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

R คือ ความต้านทานที่อุณหภูมิ t มีหน่วยเป็น โอห์ม

R_0 คือ ความต้านทานที่อุณหภูมิอ้างอิงมีหน่วยเป็น โอห์ม

Δt คือ ผลต่างของอุณหภูมิจากอุณหภูมิอ้างอิง t_0 มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส

α คือ สัมประสิทธิ์ความต้านทานต่ออุณหภูมิของวัสดุมีหน่วยเป็น $^{\circ}\text{C}^{-1}$

ตารางที่ 2.1 สัมประสิทธิ์ความต้านทานต่ออุณหภูมิและความต้านทานจำเพาะที่ 20°C

วัสดุ	α ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	ρ ($\mu\Omega\text{-cm}$)
นิกเกิล	0.0067	6.85
เหล็ก (โลหะผสม)	0.002 - 0.006	10
ทังสเตน	0.0048	5.65
อลูมิเนียม	0.0045	2.65
ทองแดง	0.0043	1.67
ตะกั่ว	0.0042	20.6
เงิน	0.0041	1.59
ทอง	0.0040	2.35
แพลทินัม	0.00392	10.5
ปรอท	0.00099	98.4
แมงกานีส	± 0.00002	44
คาร์บอน	-0.0007	1400

2.4.2 สมบัติของโลหะที่สามารถทำเป็นตัวตรวจวัดอุณหภูมิชนิดความต้านทาน

1. มีค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานไฟฟ้าต่ออุณหภูมิสูง เพื่อให้ได้ความไวในการวัดสูง
2. มีความต้านทานจำเพาะสูง ทำให้ไม่ต้องใช้สายโลหะยาวเกินไป ขนาดจะเล็กกระทัดรัด และ ช่วยให้ความไวในการวัดดีด้วย
3. มีความคงทนถาวร แม้ใช้เป็นเวลานาน หรือ ใช้ในอุณหภูมิช่วงกว้างมากๆ ก็ไม่ทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป
4. มีความต้านทานไฟฟ้าสัมพันธ์กับอุณหภูมิเป็นเชิงเส้น
5. มีความสัมพันธ์ของความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิที่เป็นค่าคงที่แน่นอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ทำเป็นเส้นได้ง่าย และมีความแข็งแรงในเชิงโครงสร้าง และถ้าเป็นไปได้ควรมีสัมประสิทธิ์ การขยายตัวต่อความร้อนต่ำ

7. มีความบริสุทธิ์สูง

โดยโลหะที่นิยมนำมาทำเป็นไมโครฮีทเตอร์และตัวตรวจวัดอุณหภูมิแบบความต้านทานคือ แพลตินัม นิเกิล และทองแดง โลหะเหล่านี้มีข้อดีคือ สามารถผลิตให้มีความบริสุทธิ์ได้ค่อนข้างสูง สามารถผลิตตัวตรวจวัดอุณหภูมิแบบความต้านทานให้มีลักษณะจำเพาะและสร้างใหม่ให้เหมือนเดิม

ในปี ค.ศ. 1871 มีการใช้แพลตินัมเป็นวัสดุมาตรฐานที่ใช้ในตัวตรวจวัดอุณหภูมิชนิดความต้านทาน ซึ่งนิยามสเกลอุณหภูมิในทางปฏิบัติสำหรับนานาชาติ จากจุดสามสถานะของไฮโดรเจน ไม่ใช่เพราะมีสัมประสิทธิ์ความต้านทานจำเพาะสูง แต่ใช้เพราะมีเสถียรภาพต่อการใช้งานดี โดยทั่วไปสัมประสิทธิ์ความต้านทานที่มีค่าสูงเป็นสิ่งที่บ่งชี้ถึงความบริสุทธิ์ของแพลตินัม สารไม่บริสุทธิ์ในตัวตรวจวัดอุณหภูมิ แบบความต้านทานจะเกิดขึ้นจากการระเหยเป็นไอส่งผลให้ตัวตรวจวัดอุณหภูมิขาดเสถียรภาพ ค่าสัมประสิทธิ์ต่ออุณหภูมิของความต้านทานจำเพาะจะมีความไวต่อความเครียดภายในวัสดุจึงจำเป็นต้องนำแพลตินัมมา แอนนิลที่อุณหภูมิสูงกว่าค่าของอุณหภูมิที่ใช้งาน ผลของการแอนนิลจะทำให้แพลตินัมมีความบริสุทธิ์มากขึ้น

นิเกิลซึ่งมีราคาถูกกว่าแพลตินัมเป็นทางเลือกหนึ่งในการนำมาทำตัวตรวจวัดอุณหภูมิชนิดความต้านทาน นิเกิลมีพิสัยการใช้งานจำกัดอยู่ในช่วง -100°C ถึง $+350^{\circ}\text{C}$ แต่สัมประสิทธิ์ความต้านทานต่ออุณหภูมิของนิเกิลสูงกว่าของแพลตินัม 50% ซึ่งจะเกิดประโยชน์สำหรับเครื่องวัดบางแบบ โดยการใช้งานตัวตรวจวัดอุณหภูมินิเกิลจะพบมากในระบบทำความร้อนและเครื่องปรับอากาศ แต่จะคำนึงถึงกระแสที่ไหลผ่านตัวตรวจวัดอุณหภูมิต้องมีค่าต่ำพอที่จะจำกัดการเกิดความร้อนขึ้นภายในตัวตรวจวัดอุณหภูมิ สำหรับการประยุกต์ใช้งานบางอย่าง

ทองแดงใช้เป็นตัวตรวจวัดอุณหภูมิที่ใช้สำหรับอุณหภูมิที่อยู่ในช่วง -200°C ถึง 250°C แม้มีความเป็นเชิงเส้นดีราคาถูก แต่ทองแดงมีข้อเสียคือ มีค่าความต้านทานจำเพาะต่ำ เมื่อทำเป็นตัวตรวจวัดอุณหภูมิจะมีขนาดใหญ่ไม่สะดวก นอกจากนั้นทองแดงยังมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนต่ำ เป็นผลให้ลักษณะจำเพาะทางไฟฟ้าไม่เสถียร การประยุกต์ใช้ ทองแดงสำหรับตัวตรวจวัดอุณหภูมิชนิดความต้านทาน คือ ใช้ในเครื่องมือวัดอิเล็กทรอนิกส์ เมื่ออยู่ในสิ่งแวดล้อมที่มีการควบคุม

2.4.3 ข้อดีและข้อเสียของการใช้ตัวตรวจวัดอุณหภูมิชนิดความต้านทาน

ข้อดีของตัวตรวจวัดอุณหภูมิชนิดความต้านทาน

1. สามารถสร้างได้ง่าย
2. มีความเป็นเชิงเส้นตลอดพิสัยการใช้งานดี
3. มีย่านการใช้งานในช่วงที่กว้าง
4. สามารถใช้วัดอุณหภูมิสูงได้
5. มีเสถียรภาพที่ดี

ข้อเสียของการใช้ตัวตรวจวัดอุณหภูมิชนิดความต้านทาน คือ

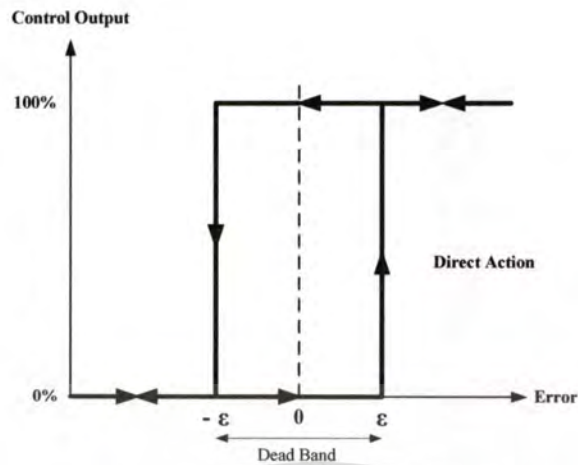
1. เนื่องจากอาร์ทีดีไม่สามารถกำเนิดพลังงานได้เหมือนกับเทอร์โมคัปเปิล จึงทำให้มีกระแสไหลผ่านและเกิดผลของความร้อนจูล (I^2R) กับตัวมันเอง
2. มีความไวต่ำ

2.5 เทคนิคการควบคุมกระบวนการทางความร้อน

ในปัจจุบันการควบคุมกระบวนการทางความร้อนส่วนใหญ่จะใช้การพิจารณาถึงคุณลักษณะของกระบวนการทางความร้อนที่ต้องการควบคุม ทั้งนี้เนื่องจากจะได้เลือกชนิดของการควบคุมให้เหมาะสม กับระบบเพื่อให้การควบคุมมีประสิทธิภาพและมีความคุ้มค่าที่สุด โดยสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมจะเป็นไปตามลักษณะของการสร้างสัญญาณควบคุมหรือกิริยาการควบคุม (Control Action)

2.5.1 เทคนิคการควบคุมความร้อนแบบ On-Off

การควบคุมความร้อนแบบ On-Off เป็นการควบคุมความร้อนที่ง่ายที่สุดและเป็นวิธีการควบคุม ที่ใช้กันมากกับระบบควบคุมความร้อนที่มีขนาดความจุมาก ๆ ซึ่งอุณหภูมิของระบบที่ใช้การควบคุมแบบนี้จะเป็นในลักษณะที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างช้า ๆ โดยตัวควบคุมจะทำงานเพียง 2 สถานะ คือ เปิดกับปิด และสัญญาณเอาต์พุตที่ได้ก็จะมี 2 สถานะเช่นกัน คือ 0% กับ 100% กิริยาการควบคุมความร้อนแบบ On-Off แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงการทำงานของควบคุมความร้อนแบบ On-Off

จากรูปที่ 2.8 จะเห็นว่าถ้าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นมากกว่าค่าวิกฤต (Critical value) หรือ + ค่าเอาต์พุทของตัวควบคุมจะเปลี่ยนจาก 0% ไปเป็น 100% ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิต่ำลงจนต่ำกว่าค่าวิกฤต(-) ค่าเอาต์พุทของตัวควบคุมจะเปลี่ยนจาก 100% ไปเป็น 0% ดังนั้น จะเห็นว่าก่อนที่ค่าเอาต์พุทจะเปลี่ยนแปลงนั้นจะเกิดเขตแบนด์ (Dead Band) ขึ้นรอบๆ ค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับศูนย์ (Zero Error) โดยในช่วงเขตแบนด์นั้น ค่าเอาต์พุทจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากการเสียดทานที่ไม่คาดคิดไว้ก่อน หรือบางครั้งก็ ต้องทำให้มีช่วงเขตแบนด์ เพื่อป้องกันการ On-Off บ่อยเกินไป อันจะทำให้อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ หรือกระบวนการเกิดการเสียหายได้ แต่ช่วงเขตแบนด์นี้ก็ต้องไม่กว้างนักเพราะจะทำให้ค่าความเที่ยงตรงของการควบคุมอุณหภูมิตดลง การทำงานของควบคุมแบบ On-Off สามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ ดังนี้

$$\begin{aligned} m(t) &= 0\% \text{ เมื่อ } e < -\epsilon \\ &= 100\% \text{ เมื่อ } e > +\epsilon \end{aligned} \quad (2.10)$$

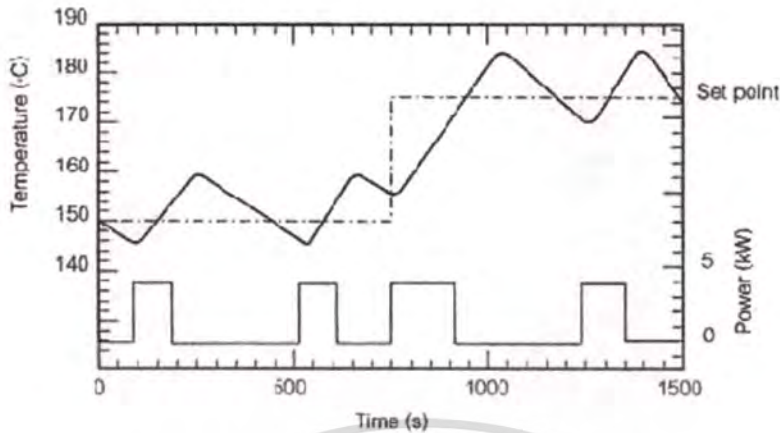
เมื่อ

$m(t)$ คือ สัญญาณควบคุมหรือเอาต์พุทของตัวควบคุม

$e(t)$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อน

ϵ คือ $\frac{1}{2}$ ของค่าเขตแบนด์

จากการควบคุมความร้อนแบบ On-Off จะทำให้ผลการตอบสนองของระบบเกิดการแกว่ง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้าน การค้าอย่างตอเนื่อง (Oscillation) สูง ดังแสดงในรูปที่ 2.9
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 แสดงตัวอย่างผลการตอบสนองของระบบควบคุมอุณหภูมิแบบ On-Off

การควบคุมความร้อนแบบ On-Off จะนิยมใช้ในการควบคุมกระบวนการทางความร้อนที่ไม่ต้องการความเที่ยงตรงที่สูงนัก และผลของความคลาดเคลื่อนไม่ส่งผลต่อการควบคุม เช่น การควบคุมอุณหภูมิในระบบควบคุมความร้อนที่มีขนาดความจุมากๆ ซึ่งอุณหภูมิของระบบที่ใช้ในการควบคุมแบบนี้ จะเป็นในลักษณะที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างช้าๆ เนื่องจากค่าความคลาดเคลื่อนจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับขนาดค่าความจุ ทำให้ลดต้นทุนได้อย่างมาก

2.5.2 การควบคุมความร้อนแบบ Proportional (P)

การควบคุมความร้อนแบบ Proportional จะนิยมใช้ในการควบคุมกระบวนการทางความร้อนที่ไม่ต้องการความเที่ยงตรงที่สูงนัก แต่ผลของความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิจะส่งผลต่อการควบคุม ซึ่งการควบคุมความร้อนแบบ Proportional นั้น จะควบคุมโดยประมวลผลจากค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิ สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมจะเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นสัดส่วน โดยตรงกับค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิ กล่าวคือ ถ้าค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิมียุคค่ามาก ค่าเอาต์พุต ของตัวควบคุมก็จะมากขึ้นตาม และถ้าค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิมียุคค่าน้อยค่าเอาต์พุตที่ได้ ก็จะน้อยด้วย ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัวนี้ คือ อัตราขยายของตัวควบคุมความร้อนแบบ P (Proportional Gain) ทรียการควบคุมแบบ P สามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$m_p(t) = \bar{m} + K_p e(t) \quad (2.11)$$

เมื่อ

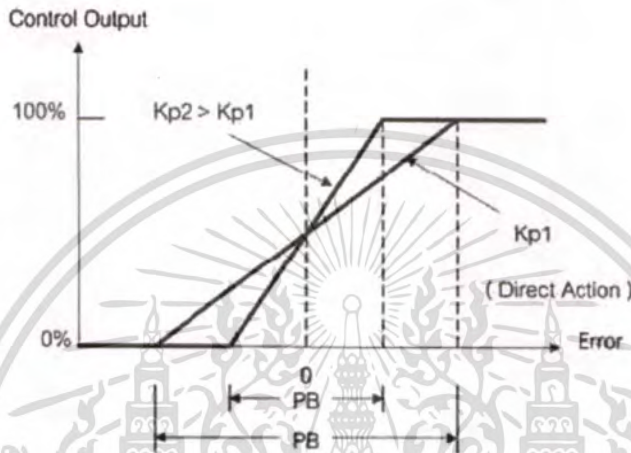
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$m_p(t)$ คือ ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบ Proportional

K_p คือ อัตราขยายของตัวควบคุมแบบ Proportional

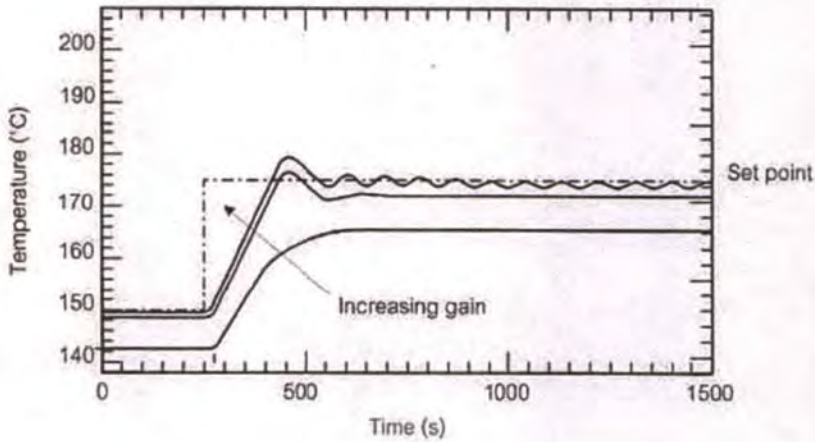
m คือ ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุม เมื่อความคลาดเคลื่อนเป็นศูนย์หรือค่าไบอัส

คุณสมบัติของกริยาการควบคุมความร้อนแบบ P แสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงคุณสมบัติของกริยาการควบคุมความร้อนแบบ Proportional

จากรูปที่ 2.10 แสดงให้เห็นว่าจะเกิดการอิมิตัวของค่าความคลาดเคลื่อน คือ เมื่อเอาต์พุตสูงถึง 100% ขณะที่ค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิยังคงเพิ่มขึ้น ไปอีกค่าเอาต์พุตจะไม่สามารถเพิ่มขึ้นตามได้ ในลักษณะเดียวกันเมื่อค่าเอาต์พุตเท่ากับ 0% ขณะที่ค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมียังคงลดลงไปอีกค่า เอาต์พุตก็ไม่สามารถลดลงตามได้ ซึ่งช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างที่เอาต์พุตมีค่าจาก 0% ถึง 100% เรียกว่า Proportion Band (PB) โดยค่า PB มีผลต่ออัตราขยายของตัวควบคุม กล่าวคือ เมื่อ PB สูงขึ้นค่าอัตราขยายของตัวควบคุมจะลดลง เนื่องจาก $K_p = 100/PB$ และเมื่ออัตราขยายของตัวควบคุม ลดลงจะทำให้ระบบที่ทำการควบคุมอุณหภูมิเกิดออฟเซ็ทที่มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของระบบควบคุมอุณหภูมิแบบ Proportional

2.5.3 การควบคุมความร้อนแบบ Proportional-Integral (PI)

การควบคุมความร้อนแบบ PI จะนิยมใช้ในการควบคุมกระบวนการทางความร้อนที่ต้องการความเที่ยงตรงที่สูงและมีระยะเวลาในการเข้าสู่อุณหภูมิตarget ที่นานได้ เป็นวิธีการควบคุมที่ใช้กันมากกับระบบควบคุมความร้อนที่มีขนาดความจุไม่มากนัก จากที่ทราบกันว่า การควบคุมความร้อนแบบ P นั้น จะเกิดการแกว่งของอุณหภูมิขึ้นเมื่อใช้อัตราขยายของตัวควบคุมที่สูง หรือมีออฟเซตเกิดขึ้นเมื่อต้องการผลตอบสนองของระบบควบคุมอุณหภูมิที่เร็ว ซึ่งการกำจัดค่าออฟเซตนั้นสามารถทำได้โดยการเพิ่มกรียา การควบคุมแบบ I มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าการควบคุมแบบรีเซ็ต (Reset Control) โดยการควบคุมจะพิจารณาค่าคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นทั้งหมด ซึ่งการหาค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิ ในกริยาการควบคุมแบบ I นี้จะต้องหาค่าพื้นที่ทั้งหมดภายใต้กราฟของค่าความคลาดเคลื่อนต่อเวลา จากนั้นนำไปคูณกับค่าคงที่ เรียกว่า อัตราขยายของตัวควบคุมแบบ I (Integral Gain) ซึ่งหาค่าเอาท์พุท ได้ดังสมการที่ (2.12)

$$m_I(t) = K_I \int_0^t e(t) dt + \bar{m}_I(0) \quad (2.12)$$

เมื่อ

$m_I(t)$ คือ ค่าเอาท์พุทของตัวควบคุมแบบ Integral

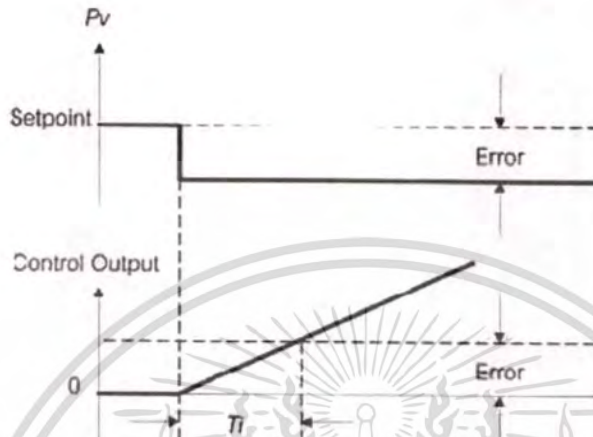
K_I คือ อัตราขยายของตัวควบคุมแบบ Integral

$\bar{m}_I(0)$ คือ ค่าเอาท์พุทของตัวควบคุมที่เวลา t มีค่าเป็นศูนย์

$\int_0^t e(t) dt$ คือ พื้นที่ทั้งหมดของความคลาดเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของกริยาการควบคุมแบบ I นี้ จะทำให้ไม่เกิดออฟเซ็ทขึ้นในระบบและลดค่าพุ่งเกินของระบบควบคุมอุณหภูมิลงได้ แต่ถ้ากริยาการควบคุมมีค่าสูงเกินไปจะทำให้ผลตอบสนองของกระบวนการช้าลง ผลตอบสนองของกริยาการควบคุมแบบ I แสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แสดงผลตอบสนองของกริยาการควบคุมแบบ Integral

ดังนั้นสมการสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมความร้อนแบบ PI จะเป็นไปตามสมการที่ (2.13)

$$m_{PI}(t) = \bar{m} + K_p e(t) + K_p K_I \int_0^t e(t) dt$$

หรือ

$$m_{PI}(t) = \bar{m} + K_C e(t) + \frac{K_C}{T_I} \int_0^t e(t) dt \quad (2.13)$$

เมื่อ

$m_{PI}(t)$ คือ ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบ Proportional-Integral

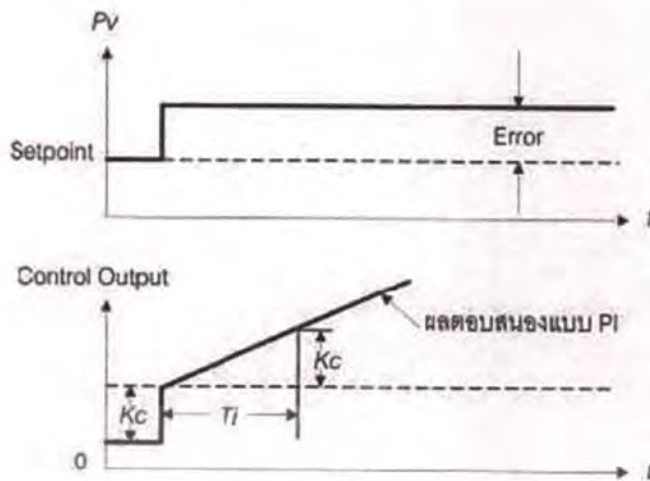
K_C คือ K_p อัตราขยายของตัวควบคุม

K_I คือ $1/T_I$

T_I คือ เวลาในการอินทิเกรตหรือเวลารีเซท (Integral or Reset Time)

ดังนั้น ผลตอบสนองของกริยาการควบคุมความร้อนแบบ PI แสดงดังรูปที่ 2.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



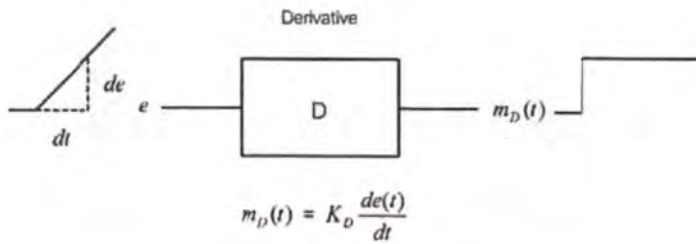
รูปที่ 2.13 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของกิริยาการควบคุมแบบ PI (Direct Action)

นอกจากกิริยาการควบคุมความร้อนแบบ PI จะทำให้ค่าออฟเซตที่สถานะคงที่เป็นศูนย์แล้วยังช่วยลด ค่าพุ่งเกินและการแกว่ง (Oscillation) ของระบบควบคุมอุณหภูมิลงได้ แต่จะทำให้ Rise Time และ Setting Time มีค่ามากขึ้น

2.5.4 การควบคุมความร้อนแบบ Proportional-Integral-Derivative (PID)

การควบคุมความร้อนแบบ PID จะนิยมใช้ในการควบคุมกระบวนการทางความร้อนที่ต้องการความเที่ยงตรงที่สูงและต้องการระยะเวลาในการเข้าสู่อุณหภูมิเป้าหมายที่เร็ว การควบคุมความร้อนแบบ PID เป็นวิธีการควบคุมที่ใช้กันมากกับระบบควบคุมความร้อนที่มีขนาดความจุไม่มากนัก จากที่ทราบกันว่า กิริยาการควบคุมแบบ PI นั้น ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่สถานะคงที่ลดลงหรือหมดไปแต่ทำให้เสถียรภาพสัมพัทธ์ลดลง (Rise Time และ Setting Time มีค่ามากขึ้น) ดังนั้นในบางครั้งเพื่อให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมอุณหภูมิมีสมาธนะเป็นไปตามต้องการจึงต้องมีการประยุกต์ใช้กิริยาการควบคุมแบบ D (Derivative) ร่วมกับกิริยาการควบคุมความร้อนแบบ PI ก็เพื่อทำให้ผลตอบสนองของระบบรวดเร็วขึ้น ซึ่งจะทำให้ได้กิริยาการควบคุมความร้อนแบบ PID โดยกิริยาควบคุมแบบ D สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมจะขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความคลาดเคลื่อนต่อเวลา (Time Rate of Change of Error) จะเห็นได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนนี้มีโอกาสเป็นศูนย์ได้ และค่าเอาต์พุตก็สามารถเปลี่ยนแปลง ซึ่งเรียกการกระทำดังกล่าวนี้ว่าอัตรากระทำ (Rate Action) ตามตัวอย่างดังรูปที่ 2.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 แสดงตัวอย่างคุณสมบัติของกริยาการควบคุมแบบ Derivative

จากรูปที่ 2.14 จะเห็นว่าที่ค่าความคลาดเคลื่อนเป็นศูนย์ มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของความชันสูง ผลของการเปลี่ยนแปลงนี้ทำให้ค่าเอาต์พุตเกิดการเปลี่ยนแปลงสูงตามไปด้วย ซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความคลาดเคลื่อนสามารถประมาณได้โดยการหาค่าความแตกต่างระหว่างค่าความคลาดเคลื่อน 2 ค่า และหารด้วยเวลาระหว่าง 2 ค่านี้ แล้วนำไปคูณกับค่าคงที่ที่เรียกว่า อัตราขยายของตัวควบคุมแบบ D (Derivative Gain) เพื่อหาค่าสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมดังกล่าว สมการ (2.14)

$$m_D(t) = K_D \frac{[e(t) - e(t_0)]}{(t - t_0)}$$

หรือ

$$m_D(t) = K_D \frac{de(t)}{dt}$$

(2.14)

เมื่อ

$m_D(t)$ คือ ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบ Derivative ที่เวลา t

K_D คือ อัตราขยายของตัวควบคุมแบบ derivative

$e(t)$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่เวลา t

$e(t_0)$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่เวลา t_0

กริยาการควบคุมแบบ D เหมาะสำหรับกระบวนการที่มีเวลาหน่วง (Time Lag) มากๆ เพราะสามารถ แก้ค่าความคลาดเคลื่อน โดยการกระทำล่วงหน้าก่อนที่จะมีการกระทำเกิดขึ้น จึงช่วยให้ผลตอบสนอง ของกระบวนการควบคุมอุณหภูมิเร็วขึ้นแต่มีข้อเสียคือ กริยาการควบคุมมีความไวต่อสัญญาณค่าความคลาดเคลื่อนมาก โดยเฉพาะกรณีที่ T_D หรือ K_D มีค่ามาก ซึ่งจะทำให้เกิดค่าพุ่งสูงเกินได้ ดังนั้น จึงไม่เหมาะสมกับกระบวนการควบคุมอุณหภูมิที่มีค่าเวลาหน่วงน้อยๆ และกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงได้ง่าย กริยาการควบคุมแบบ D ไม่สามารถนำไปใช้งานโดดเดี่ยว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ เพราะว่าเมื่อค่าความคลาดเคลื่อนเป็นศูนย์จะทำให้สัญญาณเอาต์พุทของตัวควบคุมเป็นศูนย์ด้วย ดังนั้นเมื่อมีการประยุกต์ใช้การควบคุมแบบ D ร่วมกับกริยาควบคุมความร้อนแบบ PI (กริยาการควบคุมแบบ PID) ทำให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมอุณหภูมิรวดเร็วขึ้น ซึ่งจะทำได้ กริยาการควบคุมแบบ PID ที่มีสมการสัญญาณเอาต์พุท ดังสมการ (2.15)

$$m_{PID}(t) = \bar{m} + K_p e(t) + K_p K_I \int_0^1 e(t) dt + K_p K_D \frac{de(t)}{dt}$$

หรือ

$$m_{PID}(t) = \bar{m} + K_C e(t) + \frac{K_C}{T_I} \int_0^1 e(t) dt + K_C T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.15)$$

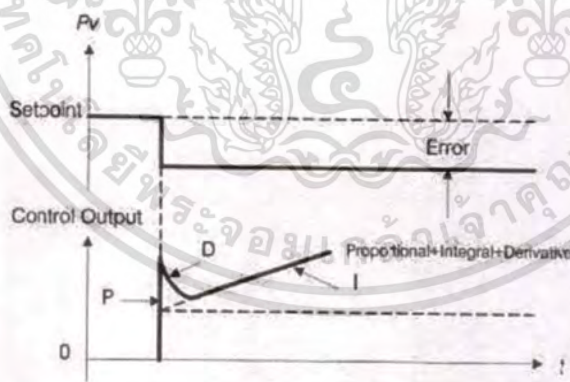
เมื่อ

$m_{PID}(t)$ คือ ค่าเอาต์พุทของตัวควบคุมแบบ Proportional-Integral-Derivative

K_D คือ T_d

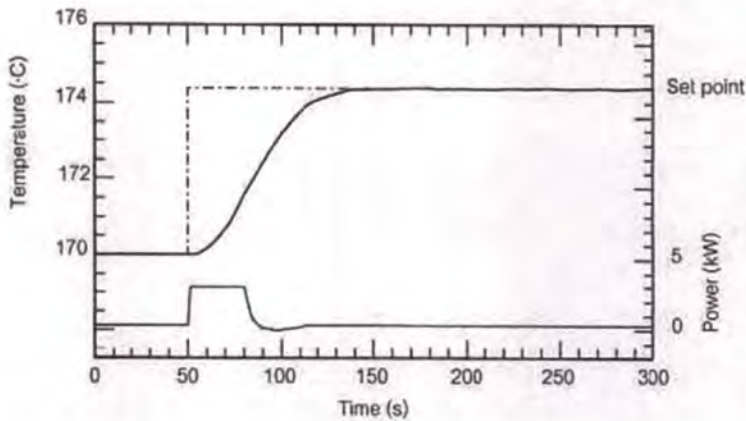
T_d คือ ค่าของ Derivative or Rate Time

ผลตอบสนองของกริยาการควบคุมแบบ PID และตัวอย่างผลตอบสนองของระบบควบคุมอุณหภูมิแบบ PID แสดงดังรูปที่ 2.15 และ 2.16 ตามลำดับ



รูปที่ 2.15 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของกริยาการควบคุมแบบ PID

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 แสดงตัวอย่างผลตอบสนองของระบบควบคุมอุณหภูมิแบบ PID

2.6 ทฤษฎีการเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอโดยเทคนิคพีซีอาร์

เทคนิคพีซีอาร์ มีชื่อเต็มว่า เทคนิคปฏิกิริยาลูกโซ่โพลีเมอเรส (Polymerase Chain Reaction) เป็นเทคนิคที่ใช้เพิ่มจำนวนดีเอ็นเอ ให้มีปริมาณมากเป็นล้านเท่า ในระยะเวลาอันรวดเร็ว โดยอาศัยหลักการจำลองตัวของสายดีเอ็นเอ (DNA Replication) เลียนแบบกระบวนการสังเคราะห์ดีเอ็นเอในสิ่งมีชีวิตตามธรรมชาติ ที่มีการสร้างสายดีเอ็นเอสายใหม่อีกหนึ่งสายจากดีเอ็นเอสายเดิม

เทคนิคนี้พัฒนาขึ้นเมื่อปี 2528 โดยเกร์ มุลลิส (Kary B. Mullis) และคณะ แห่งบริษัทซีตัส (Cetus Corporation) สหรัฐอเมริกา ทำให้ให้เขาได้รับรางวัลโนเบลในปี 2537 ปัจจุบันเทคนิค PCR ได้รับการปรับปรุงและพัฒนาจนสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลายด้าน และได้รับการยอมรับว่าเป็นเทคโนโลยีที่สำคัญมากต่องานวิจัยด้านเทคโนโลยีชีวภาพ

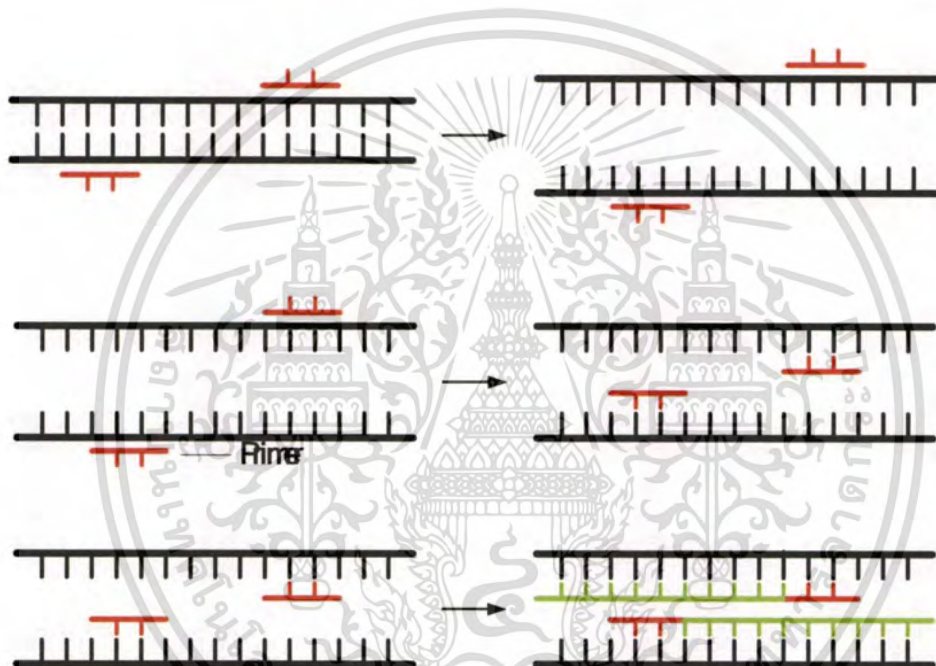
2.6.1 หลักการของเทคนิคพีซีอาร์

เทคนิคพีซีอาร์ใช้หลักการพื้นฐานในการสังเคราะห์ดีเอ็นเอสายใหม่จากสายดีเอ็นเอที่เป็นต้นแบบหนึ่งสายด้วยเอนไซม์ DNA polymerase ซึ่งใช้กันอยู่ทั่วไปในการติดฉลากดีเอ็นเอ และการศึกษาวิเคราะห์ลำดับเบส แต่พีซีอาร์ สามารถสังเคราะห์ดีเอ็นเอได้คราวละ 2 สายพร้อมกัน โดยใช้ไพรเมอร์ (primer) 1 คู่ ปฏิกิริยาพีซีอาร์ มี 3 ขั้นตอน และหมุนเวียนต่อเนื่องกันไป ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมของแต่ละขั้นตอน

ขั้นแรก เรียกว่า denaturing เป็นการแยกสายดีเอ็นเอ ที่เป็นต้นแบบจากสภาพที่เป็นเส้นคู่ ให้เป็นเส้นเดี่ยวโดยใช้อุณหภูมิในช่วง 90-95 °C

ขั้นที่สอง เรียกว่า annealing เป็นขั้นตอนที่ลดอุณหภูมิลงและจัดให้ไพรเมอร์ ซึ่งเป็นดีเอ็นเอสายสั้น ๆ (ประกอบด้วยนิวคลีโอไทด์จำนวน 14-23 เบส) ที่มีลำดับเบสเป็นคู่สมกับดีเอ็นเอที่เป็นต้นแบบจับคู่กัน ซึ่งนิยมใช้อุณหภูมิในช่วง 45-60 °C

ขั้นที่สาม เรียกว่า extension เป็นขั้นตอนการสังเคราะห์ดีเอ็นเอสายใหม่โดยสังเคราะห์ต่อจากส่วนปลาย 5' ของไพรเมอร์ตามข้อมูลบนดีเอ็นเอที่เป็นต้นแบบแต่ละสายโดยอาศัยการทำงานของเอนไซม์ดีเอ็นเอโพลิเมอร์เรส (DNA polymerase) ซึ่งเอนไซม์นี้สามารถทำงานได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 70-75 °C เอนไซม์ดีเอ็นเอโพลิเมอร์เรสที่ใช้ควรจะสามารถจับคู่อยู่ได้ภายใต้สภาวะของปฏิกิริยาตลอดทั้งสามขั้นตอน



รูปที่ 2.17 แสดงหลักการพื้นฐานในการสังเคราะห์ดีเอ็นเอสายใหม่จากสายดีเอ็นเอที่เป็นต้นแบบในแต่ละขั้นตอน denaturing, annealing และ extension

จากขั้นตอนที่ 1-3 ซึ่งนับเป็นจำนวน 1 รอบ จะให้ผลผลิตเป็นดีเอ็นเอสายคู่ที่มีลำดับเบสเป็นคู่สมกับดีเอ็นเอที่เป็นต้นแบบเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า เมื่อให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่จากขั้นที่ 1 ถึง 3 หมุนเวียน ไปอีกหลาย ๆ รอบจะเพิ่มจำนวนของดีเอ็นเอได้มาก ประมาณว่าปฏิกิริยา 20 รอบสามารถเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอได้มากกว่า 100,000 เท่า

2.6.2 อุณหภูมิที่ใช้ในการทำพีซีอาร์

ขั้นตอน Initial denaturing เป็นขั้นตอนเริ่มต้นก่อนเข้าวงจรลูกโซ่ จะใช้อุณหภูมิ 90-95 °C เป็นเวลาประมาณ 2 นาที เพื่อให้สายแม่พิมพ์แยกกันอย่างสมบูรณ์ เป็นผลให้ primer สามารถเข้าจับกับแม่พิมพ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่ออุณหภูมิลดลง ในทางกลับกันการใช้อุณหภูมิที่ต่ำไปหรือสั้นไป การแยกสายแม่พิมพ์จะเกิดไม่สมบูรณ์ ประสิทธิภาพการเข้าจับกับแม่พิมพ์เพื่อสร้างสายดีเอ็นเอใหม่ของ primer จะลดลง

ขั้นตอน denaturing ในรอบการทำพีซีอาร์ เป็นลักษณะทำนองเดียวกับขั้นตอน initial denaturing ในขั้นตอนนี้ ถ้าใช้อุณหภูมิต่ำหรือสั้นเกินไป จะทำให้การแยกสายแม่พิมพ์ไม่สมบูรณ์ เป็นผลให้ประสิทธิภาพการทำพีซีอาร์ลดลง โดยทั่วไปการ denature ที่ 90-95 °C เป็นเวลา 20 วินาทีก็เพียงพอสำหรับการแยกสายดีเอ็นเอแม่พิมพ์อย่างสมบูรณ์ แต่ในทางปฏิบัติจริงๆ เวลาที่ใช้อาจปรับเปลี่ยนตามความเหมาะสมขึ้นกับลักษณะความซับซ้อน (complexity) ของแม่พิมพ์ ลักษณะและขนาดของหลอดพีซีอาร์ ปริมาตรของปฏิกิริยาพีซีอาร์ ตลอดจนชนิดของเครื่องควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ ในกรณีแม่พิมพ์ที่มี GC content สูงอาจต้องใช้เวลา denature นานขึ้น หรือใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตามก็ดีพยายามหลีกเลี่ยงการใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไปหรือนานเกินไป เนื่องจากจะทำให้การทำงานของเอ็นไซม์ polymerase ลดลง

ขั้นตอน Annealing เป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อประสิทธิภาพและความจำเพาะในการทำพีซีอาร์ อุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสมในช่วงนี้ขึ้นกับ GC content ความยาวและความเข้มข้นของ primer โดยทั่วไปๆ สามารถทดสอบหาอุณหภูมิที่เหมาะสม โดยการหาค่า T_m ของ primer โดยการใช้โปรแกรมหรือสูตรคำนวณง่าย ๆ ดังนี้

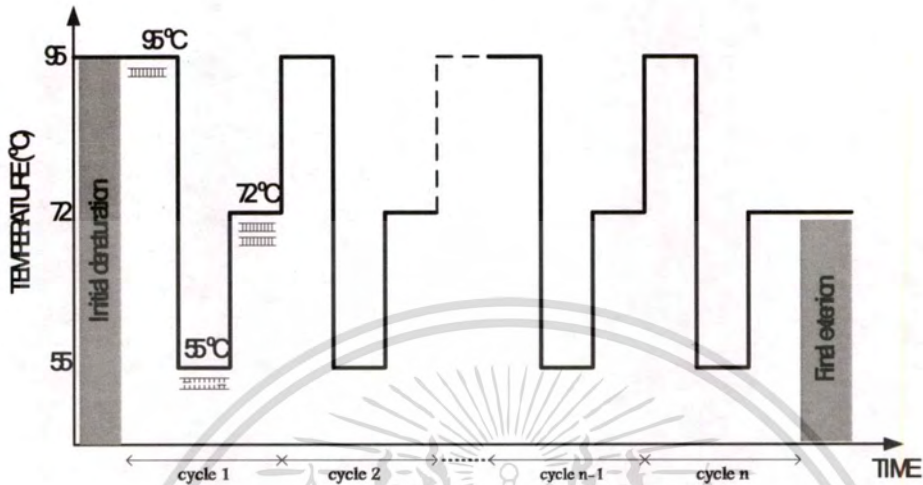
$$T_m = 4(G + C) + 2(A + T) \quad (2.15)$$

ซึ่งจะได้ค่า T_m อย่างคร่าว ๆ จากนั้นเปรียบเทียบการทำพีซีอาร์ โดยใช้อุณหภูมิ annealing ที่ต่างกัน (ประมาณ 2°C) หลาย ๆ อุณหภูมิ โดยใช้ค่า $T_m - 5^\circ\text{C}$ เป็นอุณหภูมิหลักการใช้อุณหภูมิต่ำเกินไป ทำให้การ annealing อย่างไม่จำเพาะเกิดขึ้นอย่างมากมาย ในขณะที่ถ้าใช้อุณหภูมิสูงไป การ annealing จะเกิดขึ้นน้อยหรือไม่เกิด

ขั้นตอน extension ช่วงเวลาที่ใช้ขึ้นกับความยาวและความเข้มข้นของสายแม่พิมพ์ รวมถึงอุณหภูมิที่ใช้ในปฏิกิริยาด้วย โดยทั่วไปเวลาที่ใช้ในช่วง extension ประมาณ 45 วินาที ก็เพียงพอสำหรับ Taq DNA polymerase ในการเพิ่มจำนวน PCR product ขนาด 1 kb ที่ 72°C โดยจากอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในแต่ละขั้นตอน เป็นค่าที่ใช้กับเครื่อง Conventional PCR อย่างไรก็ตาม เวลาที่ใช้อาจปรับเปลี่ยนตามลักษณะแม่พิมพ์ที่แตกต่างกันออกไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอน final extension โดยทั่วไปในรอบสุดท้ายของพีซีอาร์ มักใช้เวลา 5-15 นาทีที่ 72 °C เพื่อช่วยให้การสร้างสาย PCR product เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์



รูปที่ 2.18 แสดงช่วงของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำพีซีอาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

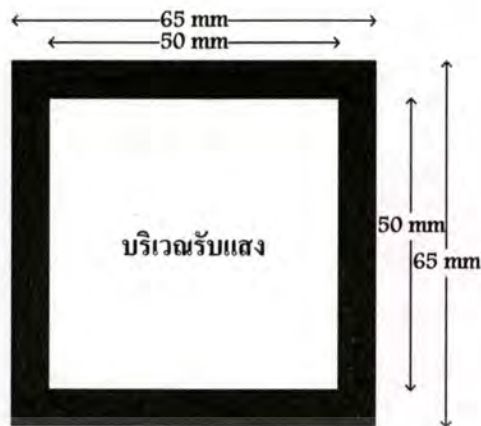
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเริ่มต้นจากการศึกษางานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการใช้ไมโครฮีทเตอร์สำหรับชิพเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอด้วยเทคนิคพีซีอาร์ เพื่อจะทราบถึงหลักการทำงานของอุปกรณ์ ขั้นตอนในการสร้างและแนวทางสำหรับการดำเนินงานวิจัย ขั้นตอนถัดไปก็จะทำการออกแบบไมโครฮีทเตอร์และตัวตรวจวัดอุณหภูมิ จากนั้นก็จะเป็นการดำเนินการสร้างตัวอุปกรณ์ไมโครฮีทเตอร์และตัวตรวจวัดอุณหภูมิพร้อมทั้งการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพสมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติทางความร้อนของตัวอุปกรณ์ หลังจากนั้นจะนำอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นไปประกอบรวมกับระบบควบคุมอุณหภูมิสำหรับชิพเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอ และนำไปประยุกต์ใช้งานสำหรับชิพเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอ

3.1 แนวคิดที่ในการออกแบบไมโครฮีทเตอร์ที่มีตัวตรวจวัดอุณหภูมิ

ในส่วนนี้จะเป็นการอธิบายถึงแนวคิดที่ใช้ในการออกแบบไมโครฮีทเตอร์ที่มีตัวตรวจวัดอุณหภูมิรวมอยู่ด้วยสำหรับชิพเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอชนิดของเหลวอยู่ไม่มีการเคลื่อนที่ (Stationary PCR chip)

3.1.1 การกำหนด layout ของการออกแบบ

สำหรับแนวคิดที่ใช้ในการออกแบบก็จะขึ้นอยู่กับกระบวนการสร้าง ที่จะใช้ในงานวิจัยนี้ รวมทั้งเครื่องมือที่จะใช้ในการดำเนินการสร้าง โดยสิ่งที่ต้องคำนึงถึงอันดับแรกสำหรับการออกแบบคือขั้นตอนของการสร้างสวดลายด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี ในส่วนของเครื่องฉายแสงและปรับซ็อนมาสก์ (mask aligner) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องฉายแสงและปรับซ็อนมาสก์ของศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ซึ่งช่องที่แสงยูวีสามารถที่จะผ่านมาถึงชิ้นงานนั้นจะมีขนาดดังที่แสดงในรูป 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงขนาดของ Layout ที่จะใช้สำหรับการออกแบบมาสก์
สำหรับเครื่อง mask aligner ที่ TMEC

จากรูปจะเห็นได้ว่าบริเวณที่รับแสงนั้นจะมีขนาดประมาณ 50x50 มิลลิเมตร ซึ่งจะเป็นบริเวณที่แสงก่อนข้างจะมีความสม่ำเสมอ เพื่อให้ความเข้มของแสงที่ผ่านมาสก์เท่ากันทุกบริเวณ ดังนั้นในการออกแบบมาสก์ เราจึงต้องออกแบบให้อยู่ภายในบริเวณที่รับแสง ถือได้ว่าเป็นข้อจำกัดของการออกแบบอีกข้อหนึ่ง ซึ่งในหนึ่งมาสก์ของเราจึงต้องบรรจุลวดลายลงไปให้ได้มากที่สุดเพื่อประหยัดต้นทุน และขั้นตอนในการสร้าง

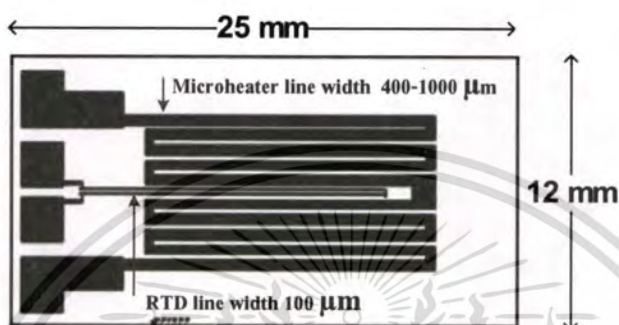
3.1.2 การออกแบบไมโครฮีตเตอร์ที่มีตัวตรวจวัดอุณหภูมิ

จากหลักการทำงานของ ไมโครฮีตเตอร์ที่มีตัวตรวจวัดอุณหภูมินั้นอาศัยหลักการของความเป็นตัวต้านทาน จึงมีแนวคิดที่จะออกแบบให้ไมโครฮีตเตอร์มีตัวตรวจวัดอุณหภูมิอยู่ด้วย เพื่อสามารถที่จะติดตามอุณหภูมิที่เกิดจากไมโครฮีตเตอร์ได้ต่อเนื่องและแม่นยำ

จากการศึกษางานวิจัยทางด้านอุปกรณ์สำหรับเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอด้วยเทคนิคพีซีอาร์ พบว่าสามารถที่จะนำไมโครฮีตเตอร์ไปเป็นตัวทำความร้อนสำหรับการเพิ่มขยายจำนวนดีเอ็นเอได้ และในงานวิจัยนี้ ได้เพิ่มส่วนของตัวตรวจวัดอุณหภูมิให้รวมอยู่ในชิพเดียวกัน ในการออกแบบจึงพยายามที่จะออกแบบไมโครฮีตเตอร์เพื่อนำไปใช้งานเป็นตัวทำความร้อนสำหรับอุปกรณ์เพิ่มจำนวนดีเอ็นเอแบบที่ของเหลวอยู่กับที่และทำการเปลี่ยนช่วงของอุณหภูมิตามหลักของพีซีอาร์ดังที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 2 โดยการออกแบบก็จะต้องสอดคล้องกับส่วนที่เป็นห้องที่เก็บของของเหลวจะขอเรียกว่า "chamber" ขนาดโดยรวมของทั้งสองส่วนจะต้องสอดคล้องกัน ซึ่งรายละเอียดในส่วนการสร้าง chamber จะไม่ขอกล่าวถึงในรายงานวิจัยฉบับนี้

โดยการออกแบบนั้นก็พยายามที่จะกำหนดให้ขั้วของไมโครฮีตเตอร์และตัวตรวจวัดอุณหภูมิอยู่ทางด้านเดียวกัน เพื่อง่ายต่อการนำไปใช้งานและกักรต่อขั้วไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 3.2 การคำนวณคร่าวๆของขนาดของชิพและของเหลวที่ใส่ในชิพ ซึ่งการคำนวณคร่าวๆนี้เป็นการคำนวณคร่าวๆที่ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งแสดงให้เห็นว่าจะมีทั้งไมโครฮีตเตอร์และตัวตรวจวัดอุณหภูมิอยู่บนชิพเดียวกัน โดยขนาดรวมของชิพจะกว้าง 12 มิลลิเมตรและยาว 25 มิลลิเมตร โดยที่ไมโครฮีตเตอร์จะมี 6 รูปแบบโดยมีขนาดของลวดลายที่ต่างกันระหว่าง 400-1000 ไมโครเมตรซึ่งจะมีผลทำให้ค่าความต้านทานของไมโครฮีตเตอร์แต่ละตัวมีค่าต่างกันตามทฤษฎี ส่วนตัวตรวจวัดอุณหภูมิจะมีเพียงรูปแบบเดียว โดยขนาดของลวดลายจะเป็น 100 ไมโครเมตร



รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะการออกแบบให้ไมโครฮีตเตอร์และตัวตรวจวัดอุณหภูมิอยู่บนชิพเดียวกัน

จากที่กล่าวมาข้างต้นว่าชิพสำหรับเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอจะประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือส่วนที่เป็นตัวทำความร้อน และส่วนสำหรับบรรจุของเหลว ซึ่งในการออกแบบก็จะต้องให้มีความสอดคล้องกัน โดยส่วนของ chamber ก็จะมีขนาดกว้าง 12 มิลลิเมตร ยาว 25 มิลลิเมตร เท่ากับขนาดของตัวทำความร้อนดังแสดงดังรูปที่ 3.3

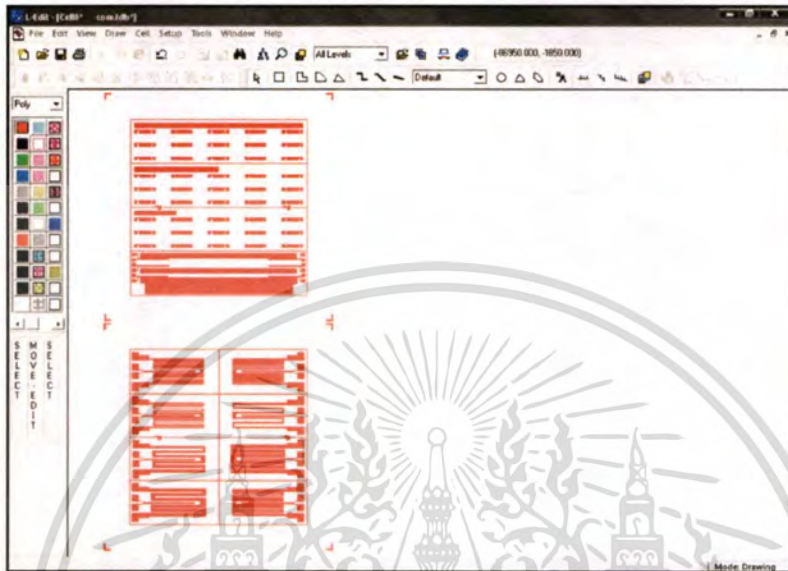


รูปที่ 3.3 แสดงส่วนของการออกแบบ chamber โดยมีขนาดโดยรวม 12x25 มิลลิเมตร

โดยขั้นตอนการออกแบบจะแสดงได้ดังต่อไปนี้

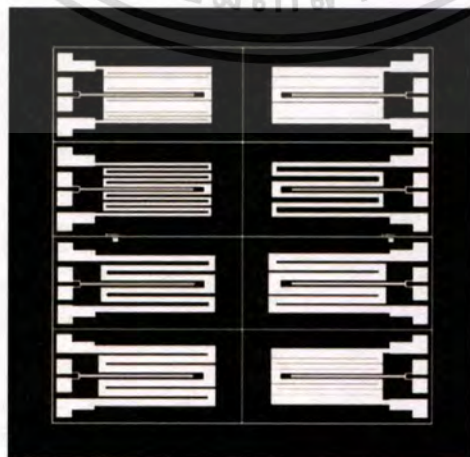
1. เริ่มการใช้งานโปรแกรม L-Edit ซึ่งจะใช้สำหรับการออกแบบไมโครฮีตเตอร์และตัวตรวจวัดอุณหภูมิ
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. กำหนดหน่วยที่ใช้ในการออกแบบตามต้องการ โดยในงานวิจัยนี้จะใช้หน่วยไมครอน
3. กำหนดเลเยอร์ของการใช้งาน โดยสามารถที่จะกำหนดสี ลวดลาย ได้ตามต้องการ
4. ทำการเขียนแบบตาม layout และขนาดของอุปกรณ์ตามที่ได้ออกแบบไว้



รูปที่ 3.4 หน้าต่างของซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ

5. สำหรับการออกแบบนั้น ไฟล์ที่ได้จะมีนามสกุลเป็น .tdb ซึ่งจะต้องทำการแปลงไฟล์ให้มียนามสกุลเป็น .pdf เพื่อที่จะทำเป็นฟิล์มพลาสติกความละเอียดสูง
6. จะได้ฟิล์มพลาสติกความละเอียดสูงสำหรับใช้เป็นหน้ากากสำหรับการสร้างลวดลายในกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ฟิล์มพลาสติกความละเอียดสูงสำหรับใช้เป็นหน้ากากในกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 การคำนวณค่าความต้านทานของอุปกรณ์ที่ออกแบบ

ในการออกแบบไมโครฮีเตอร์และตัวตรวจวัดอุณหภูมินั้นจะต้องมีการคำนวณค่าความต้านทานของอุปกรณ์เบื้องต้นก่อน เพราะจะทำให้เราพอจะทราบถึงแนวทางและการนำไปใช้งานได้ถูกต้อง ซึ่งงานวิจัยของเราพยายามที่จะสร้างอุปกรณ์ให้สามารถที่จะใช้งานภายนอกห้องแลปได้ ดังนั้นเรื่องของแหล่งจ่ายไฟฟ้าจึงเป็นสิ่งที่ต้องพิจารณา เนื่องจากหลักการของฮีเตอร์จะใช้หลักการของการจ่ายแรงดันผ่านตัวต้านทานแล้วทำให้เกิดความร้อนขึ้น ซึ่งถ้าตัวต้านทานหรือไมโครฮีเตอร์ที่สร้างขึ้นมีความต้านทานมากเกินไปก็จะส่งผลให้ เราต้องหาแหล่งจ่ายไฟที่มีค่าแรงดันสูงขึ้นตาม

โดยพารามิเตอร์หลักที่ใช้ในการคำนวณค่าความต้านทานของอุปกรณ์ที่ออกแบบไว้ก็จะมีค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุที่ใช้ทำไมโครฮีเตอร์ (ρ ของแพลทินัม คือ $1.05 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$) ความหนาของฟิล์มโลหะที่ใช้ทำเป็นไมโครฮีเตอร์คือ 200 nm ขนาดของลวดลายและความยาวรวมของแต่ละรูปแบบจะแสดงตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สรุปเงื่อนไขการออกแบบแต่ละรูปแบบของไมโครฮีเตอร์

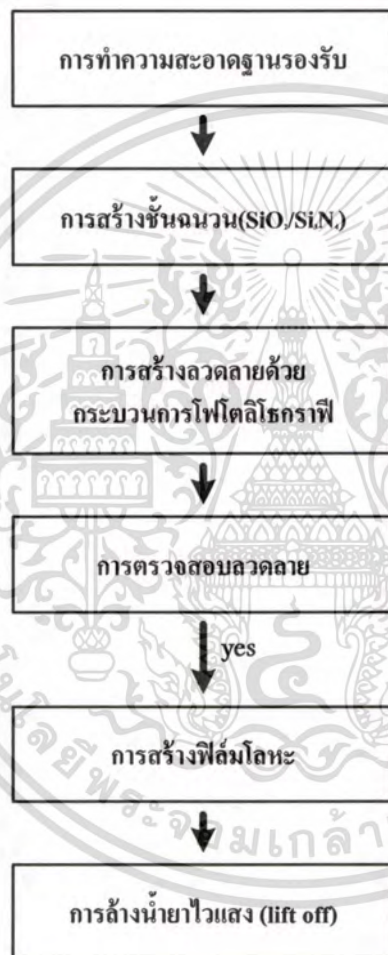
รูปแบบ	ขนาดของลวดลาย (μm)	ระยะห่าง (μm)	ความยาวรวม (cm)	ความต้านทาน จากคำนวณ (Ω)
1	400	100	20.07	263
2	600	100	14.67	192
3	600	700	9.05	128
4	800	500	9.15	79.2
5	1000	300	9.25	60
6	1000	200	9.20	48.3

จากค่าความต้านทานที่ได้จากการคำนวณนั้นอาจจะมีการคลาดเคลื่อนได้ เนื่องจากค่าความต้านทานจำเพาะของแพลทินัมที่ใช้ในการคำนวณเป็นค่ามาตรฐานของเนื้อโลหะแพลทินัม ซึ่งอาจจะไม่เท่ากับแพลทินัมที่ใช้ในระบบประเหยสาร

3.2 ขั้นตอนที่ใช้ในการสร้างไมโครอิเล็กทรอนิกส์ที่มีตัวตรวจวัดอุณหภูมิ

การสร้างจะใช้เทคโนโลยีของ CMOS Technology ทำให้สามารถที่จะควบคุมการผลิตเพื่อให้ได้ครั้งละจำนวนมากๆ สามารถทำซ้ำได้ เพื่อประยุกต์สู่ภาคอุตสาหกรรมได้

กระบวนการสร้างหลักของ CMOS จะประกอบไปด้วย การทำความสะอาด การสร้างชั้นฉนวนฟิล์มบาง การสร้างลวดลาย การตรวจสอบลวดลาย การบรรจุภัณฑ์ เป็นต้น



รูปที่ 3.6 แสดงขั้นตอนและกระบวนการสร้างไมโครอิเล็กทรอนิกส์และตัวตรวจวัดอุณหภูมิ

3.2.1. การเตรียมฐานรองรับ

เป็นขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญ เพราะในกระบวนการต่างๆ สิ่งแปลกปลอมจะเกิดขึ้นได้อย่างง่ายดาย ผลกระทบของสิ่งแปลกปลอมที่อยู่บนผิวหน้าของแผ่นเวเฟอร์ สามารถสร้างความเสียหาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้กับการผลิต เนื่องจากในปัจจุบันสิ่งแปลกปลอมจะมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับลวดลายวงจรที่มีขนาดเล็กลงเรื่อยๆ

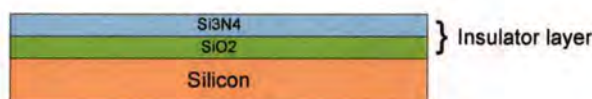
สำหรับการเตรียมฐานรองรับจะเริ่มจากการทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ขนาด 6 นิ้ว ชนิดพี (100) โดยขั้นตอนการทำความสะอาดดังนี้

1. ล้างแผ่นซิลิกอนด้วยสารละลายระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) กับกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ด้วยอัตราส่วน คือ 1: 3 ตามลำดับ เป็นเวลา 5 นาที
2. ล้างด้วยน้ำปลอดประจุ (deionization water) นาน 10 นาที
3. ล้างด้วยกรดกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 นาที เพื่อทำการลอกชั้นของ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติออกไป
4. ล้างด้วยน้ำปลอดประจุ (deionization water) นาน 5 นาที
5. เป่าให้แห้งด้วยไนโตรเจน

3.2.2 สร้างชั้นฉนวน

1. การสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นขั้นตอนที่จำเป็นต้องใช้ในเกือบทุกกระบวนการ โดยซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) สามารถปลูกลงบนผิวหน้าของแผ่นซิลิกอนได้ เพื่อใช้เป็นชั้นกัน หรือชั้นฉนวน หรือใช้ในการแยกโคดสิ่งประดิษฐ์ตัวหนึ่งออกจากสิ่งประดิษฐ์ตัวอื่นในวงจรรวม (ซึ่งเรียกว่า oxide isolation) หรือใช้เป็นส่วนประกอบในโครงสร้าง CMOS โดยทั่วไปการปลูกชั้นออกไซด์สามารถกระทำได้หลายวิธี โดยในงานวิจัยนี้จะใช้เทคนิคการทำออกซิเดชันด้วยกระบวนการทางความร้อน โดยกำหนดความหนา 650 นาโนเมตร

2. การสร้างชั้นซิลิกอนไนไตรด์ (Si_3N_4) จะใช้เทคนิคการสร้างฟิล์มซิลิกอนไนไตรด์ ด้วยเครื่องปลูกฟิล์มบางด้วยไอระเหยสารเคมีในสถานะความดันต่ำ (Low Pressure Chemical Vapor Deposition: LPCVD) ซึ่งเป็นเทคนิคการปลูกชั้นฟิล์มที่มีความบริสุทธิ์สูง มีความเครียดที่เกิดกับชิ้นงานน้อย สามารถทำการปลูกบนผิวที่มีลักษณะสูงต่ำได้ และมีความหนาที่สม่ำเสมอ โดยกำหนดความหนา 500 นาโนเมตร ซึ่งเหตุผลที่เลือกใช้วิธีนี้เนื่องจากได้ทำการทดลองในตอนแรกซึ่งเนื่องจากการสร้างโดยใช้เทคนิคของ Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD) นั้นฟิล์มที่ได้จะมีความสามารถในการทนอุณหภูมิได้ไม่สูง เมื่อนำไปแอนนัลที่อุณหภูมิ $900^\circ C$ พบว่าฟิล์มเกิดการแตกและหลุดออก



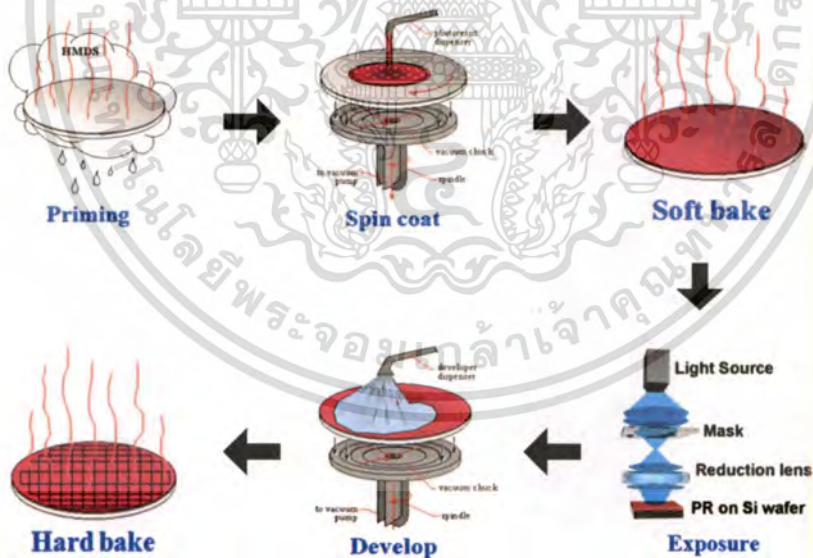
รูปที่ 3.7 แสดงโครงสร้างของการสร้างชั้นฟิล์มฉนวน SiO_2/Si_3N_4 บนฐานรองรับซิลิกอน

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการสร้างชั้นฟิล์ม SiO_2 และ Si_3N_4 จะใช้เงื่อนไขในการสร้างชั้นฟิล์มของศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ซึ่งจะต้องมีการตรวจสอบความหนาและความสม่ำเสมอของฟิล์มทุกครั้งด้วยเครื่องอิลลิปโซมิเตอร์ (Ellipsometer) รุ่น Rudolph FEIII ซึ่งเป็นการวัดแบบไม่ทำลายพื้นผิวของฟิล์มอีกทั้งยังมีความแม่นยำสูง

3.2.3 สร้างลวดลายด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography Process) เป็นกระบวนการสร้างลวดลายและการกัดชั้นสารหรือวัสดุใดๆ ในบางส่วนหรือบริเวณที่ต้องการโดยใช้เทคนิคทางแสง กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี เป็นขั้นตอนที่สำคัญขั้นตอนหนึ่งในการสร้างวงจรรวม โดยจะประกอบด้วยขั้นตอนหลัก คือ การทำความสะอาดผิวชิ้นงาน (Cleaning) การอบชิ้นงานเพื่อเพิ่มการยึดเกาะของพื้นผิว (Vapor priming) การเคลือบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง (Photoresist coating) การอบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง ให้แห้ง (Prebake) การฉายแสงเพื่อถ่ายแบบลายวงจร (Exposure) การล้างน้ำยาไวแสง (Develop) การอบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง หลังการล้างลายวงจร (Postbake) และการกัดลายวงจร (Etching) โดยมีขั้นตอนหลักดังนี้



รูปที่ 3.8 แสดงกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography Process)

1. การอบไล่ความชื้น นำแผ่นฐานรองรับที่จะเคลือบน้ำยาไวแสง มาทำการอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 60 วินาที จากนั้นจะทำการเคลือบสารเคมี Hexamethyldisilazane (HMDS) ที่อุณหภูมิ 80°C นาน 80 วินาที เพื่อเพิ่มการยึดเกาะ เนื่องจากโดยทั่วไป น้ำยาไวแสงจะแยกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูญาติหน้าไปไซประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยึดเกาะกับวัสดุที่มีผิวมันได้ไม่ดี จึงอาจเกิดการหลุดร่อนของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงในระหว่างกระบวนการถ่ายภาพ ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องใช้สารเคมี เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดเกาะระหว่างน้ำยาไวแสงกับผิวชิ้นงาน โดยโมเลกุลของ HMDS จะเข้าไปแทนที่โมเลกุลของน้ำหลังจากนั้นลดอุณหภูมิมาที่ 23°C และคงที่ไว้นาน 60 วินาที

2. การเคลือบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง มีอยู่หลายวิธี เช่น การหมุนเคลือบ การเคลือบด้วยสเปรย์ และการเคลือบด้วยลูกกลิ้ง เป็นต้น แต่วิธีที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมคือ วิธีการหมุนเคลือบ (Spin Coating) โดยใช้เครื่อง Spinner เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย ราคาถูก ประหยัดเวลา และสามารถควบคุมความหนาของชั้นฟิล์ม ให้มีความสม่ำเสมอได้

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก (positive photoresist) เมื่อโดนแสงแล้วจะสามารถถูกล้างออกด้วยสารเคมีสำหรับล้างน้ำยาไวแสง โดยจะทำการเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยเครื่องหมุนเคลือบ (spin coater)

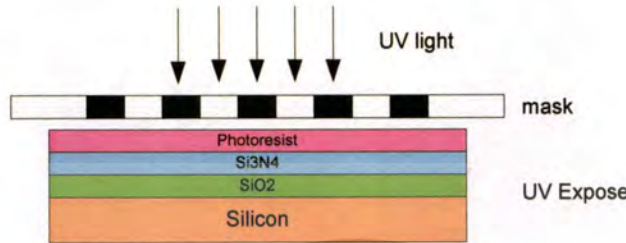
ในส่วนของการเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยเครื่องหมุนเคลือบจะต้องมีการทดลองเพื่อหาค่าอัตราเร็วรอบที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ชั้นความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงตามที่ต้องการ โดยจะทำการเคลือบด้วยความเร็วรอบ 2 ระดับ เริ่มจากหยคน้ำยาไวแสงลงบนฐานรองรับ ทำการเคลือบด้วยความเร็วรอบของมอเตอร์ ประมาณ 500 rpm เพื่อให้ น้ำยาไวแสงกระจายหรือเกลี่ยให้ทั่วแผ่นฐานรองรับและจะทำการหมุนเคลือบด้วยความเร็วสูงประมาณ 3000 rpm เพื่อที่จะทำให้ฟิล์มนั้นมีความเรียบและมีความสม่ำเสมอทั่วกันทั้งแผ่น ดังนั้นปริมาณสารไวแสงที่หยดลงไป และความเร็วรอบของการเคลือบจะเป็นตัวแปรที่ต้องทำการทดลองและบันทึกค่าไว้เพื่อให้สามารถกลับมาทำให้ได้เหมือนเดิมในครั้งถัดไป ซึ่งโครงสร้างของฐานรองรับที่มีการเคลือบน้ำยาไวแสงจะแสดงดังรูปที่ 3.9 หลังจากเคลือบเสร็จจะทำการอบ (soft bake) ที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 100 วินาที เพื่อทำการอบแห้ง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะทำให้ตัวทำละลาย (solvent) ในน้ำยาไวแสงระเหยออกไป ทำให้ชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง มีความแห้ง แข็งตัวและคงรูปอยู่ได้เมื่อผ่านกระบวนการฉายแสง ซึ่งจะช่วยให้การยึดเกาะระหว่างผิวของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงกับผิวของชิ้นงาน นอกจากนี้ยังเป็นกระบวนการทางความร้อน เพื่อลดความเครียด (stress) ที่เกิดขึ้นในชั้นฟิล์ม โดยมีปัจจัยที่ต้องควบคุมคือ อุณหภูมิและเวลา



รูปที่ 3.9 แสดงโครงสร้างของการเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยเครื่องหมุนเคลือบ

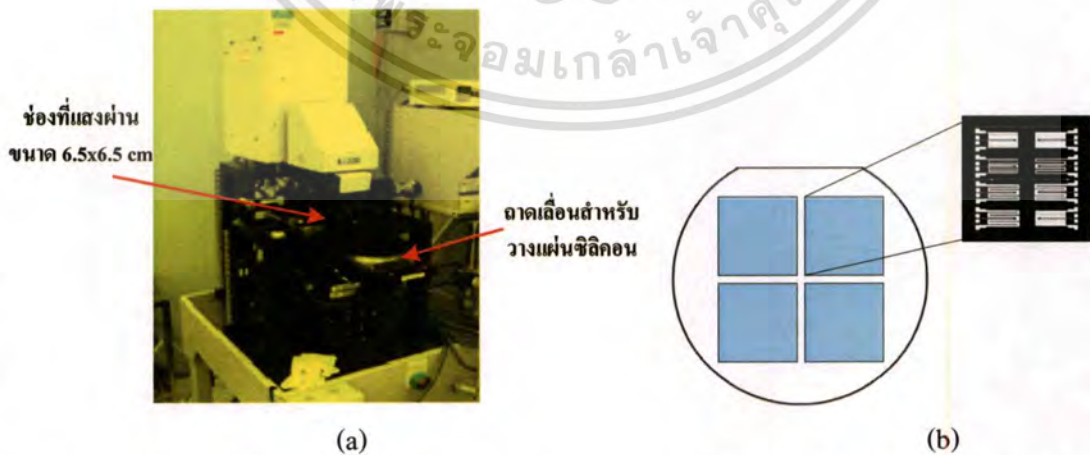
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การฉายแสงยูวีเพื่อถ่ายแบบลายวงจร โดยจะทำการฉายแสงยูวีผ่านฟิล์มหน้ากากพลาสติกความละเอียดสูง (mask) ที่ได้ทำการออกแบบไว้ ด้วยเครื่องฉายแสงยูวีและเครื่องปรับซ็อนมาร์ค ลักษณะโครงสร้างของการฉายแสงจะแสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แสดงลักษณะของการฉายแสงยูวีผ่านฟิล์มมาร์คที่ทำการออกแบบไว้

โดยการเตรียมฟิล์มหน้ากากสำหรับฉายแสงนั้น จะนำฟิล์มพลาสติกความละเอียดสูงที่ได้จากขั้นตอนของการออกแบบ มาประกบติดกับแผ่นควอทซ์ให้แนบสนิทที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อให้ได้ลวดลายที่คมชัด และขนาดเท่ากับแบบฟิล์มมาร์คที่ออกแบบไว้ จากนั้นนำแผ่นฟิล์มมาร์คที่ติดกับแผ่นควอทซ์ไปติดบริเวณช่องสำหรับแสงผ่านของเครื่องฉายแสง และใช้ปั๊มสุญญากาศดูดเอาไว้เพื่อให้ติดกับช่องที่แสงผ่านของเครื่อง และนำแผ่นซิลิคอนที่ผ่านการเคลือบน้ำยาไวแสงไปวางบริเวณถาดเลื่อน โดยตัวของถาดเลื่อนจะถูกควบคุมการเคลื่อนทางแกน x y และ z โดยควบคุมผ่านโปรแกรม Labview ซึ่งสามารถกำหนดพิกัดได้ตามต้องการ ในที่นี้จะทำการเลื่อนและฉายแสงตามพิกัด 4 จุด ดังรูปที่ 3.11(b)

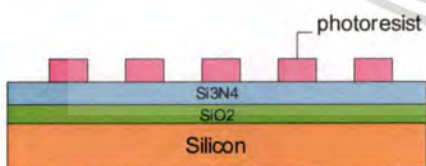


รูปที่ 3.11 แสดงระบบที่ใช้ในการฉายแสง โดย (a) แสดงตำแหน่งของช่องที่แสงผ่านและถาดเลื่อนสำหรับวางแผ่นซิลิคอน, (b) แสดงถึงลักษณะพิกัดของตำแหน่งที่ทำการฉายแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับเวลาที่ใช้ในการฉายแสงก็จะต้องมีการทดลองหาค่าที่เหมาะสมสำหรับความหนาของชั้นน้ำยาไวแสง ซึ่งในงานวิจัยนี้ชั้นน้ำยาไวแสงจะมีความหนาประมาณ 1.0 ไมโครเมตร และจะใช้เวลาในการฉายแสงประมาณ 20 วินาที (เครื่องฉายแสงจะมีความเข้มประมาณ 10.6 mW/cm^2 ซึ่งจะคิดเป็น ความเข้มต่อพื้นที่กับเวลา (Dose) ก็จะใช้ความเข้มคูณกับเวลาที่ใช้ในการฉายแสง) โดยสามารถกำหนดเวลาได้จากตัวเครื่อง จะทำการฉายแสงจนครบสี่ตำแหน่งดังแสดงในรูป 3.1

4. การล้างน้ำยาไวแสง เมื่อผ่านขั้นตอนการฉายแสงมาแล้ว ก่อนที่จะทำการล้างน้ำยาไวแสงจะต้องทำการอบที่อุณหภูมิ 110°C นาน 60 วินาที และลดอุณหภูมิลงมาอยู่ที่ 23°C เป็นเวลา 60 วินาที จึงจะเริ่มใช้น้ำยา (developer) ในการล้างน้ำยาไวแสงออกจะมีตัวแปรที่ต้องควบคุมก็คือเวลาที่ใช้ และชนิดของน้ำยา โดยจากรูปที่ 3.12 จะเห็นได้ว่าน้ำยาไวแสงในส่วนที่โดนแสง (สลายของไมโครฮาร์ดเตอร์และตัวตรวจวัดอุณหภูมิ) จะถูกล้างออกด้วยน้ำยา developer จะเหลือเฉพาะบริเวณที่ไม่โดนแสง ทิ้งไว้หลังจากนั้นทำการอบเป็นครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 120°C นาน 80 วินาที เนื่องจากภายหลังจากกระบวนการล้างลายวงจร ชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เกิดเป็นลายวงจรจะมีสมบัติอ่อนนุ่ม ไม่สามารถทนทานต่อการกัดลาย (Etching) ได้ และมีความชื้นเกิดขึ้นในชั้นฟิล์มฯ จึงต้องทำการอบชั้นฟิล์มฯ เพื่อไล่ความชื้นและก่อให้เกิดการเชื่อมพันธะกันระหว่างโมเลกุล (Cross linked) ของน้ำยาไวแสง ทำให้ชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะทนต่อการกัดลายวงจรได้ โดยเงื่อนไขที่ต้องควบคุมคือ อุณหภูมิและเวลา หลังจากนั้นลดอุณหภูมิลงจนถึงอุณหภูมิห้อง ซึ่งจะทำให้ได้สลายของน้ำยาไวแสงบนฐานรองรับที่เตรียมไว้ ถึงขั้นตอนนี้เป็นการเสร็จสิ้นในส่วนของการกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี



(a)



(b)

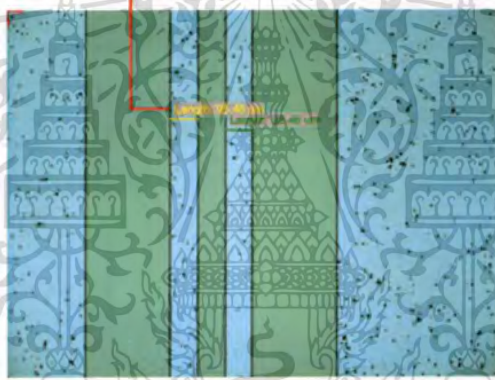
รูปที่ 3.12 (a) แสดงลักษณะ โครงสร้างสลายของน้ำยาไวแสงบนฐานรองรับ,
(b) ภาพถ่ายชิ้นงานจริงที่มีลวดลายของน้ำยาไวแสงบนฐานรองรับ 6 นิ้ว

5. การตรวจสอบลวดลายหลังจากผ่านกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ขั้นตอนนี้ถือว่าเป็นขั้นตอนสำคัญที่จะขาดไม่ได้ หลังจากที่ทำขั้นตอนของโฟโตลิโธกราฟี เรียบร้อยแล้ว เพราะขั้นตอนนี้ถือได้ว่าเป็น การตรวจสอบในกระบวนการถัดไปด้วย เพราะถ้าเกิดลวดลายส่วนใดส่วนไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนึ่งเกิดการขาด หรือขนาดไม่ได้ตามที่ออกแบบไว้ ถ้าไม่มีการตรวจสอบ ก็จะทำให้เกิดการผิดพลาดกับกระบวนการต่อจากนี้ทุกกระบวนการ โดยจะทำการตรวจสอบลวดลายด้วยกล้องจุลทรรศน์สำหรับตรวจสอบลวดลาย ถ้าเกิดปัญหาก็จะต้องไปเริ่มที่ขั้นตอนของการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ตั้งแต่ขั้นตอนแรก

ดังนั้นในกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีจึงต้องทำการทดลองในหลายขั้นตอน ได้แก่ ความเร็วรอบที่ใช้ในการสร้างน้ำยาไวแสงเพื่อให้ได้ความหนาของน้ำยาไวแสงตามที่ต้องการ รวมถึง ตำแหน่งในการปรับซ็อนมาส์ก เวลาในการฉายแสง (Exposure) ต้องเหมาะสมกับชั้นของน้ำยาไวแสง เพื่อที่จะทำให้ได้ขนาดของลวดลายเท่ากับตัวแบบที่ออกแบบไว้ และที่สำคัญอีกขั้นตอนหนึ่งก็คือเวลาที่ใช้ในการล้างน้ำยาไวแสงเพราะในขั้นตอนนี้ถ้าล้างน้ำยาไวแสงออกไม่หมดจะทำให้เกิดความเสียหายต่อขั้นตอนถัดไป

Length 95.46 micron

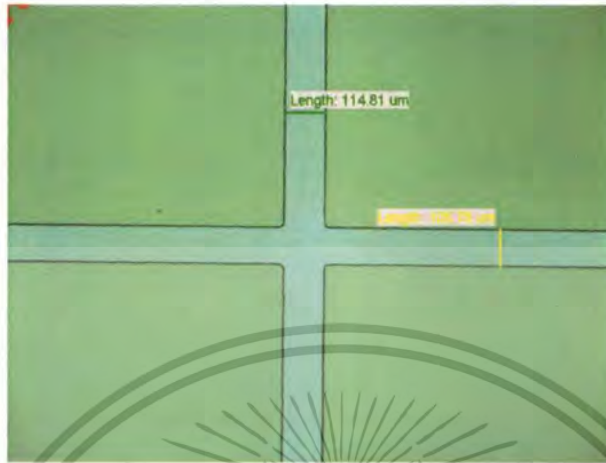


รูปที่ 3.13 แสดงลักษณะของลวดลายน้ำยาไวแสงกรณีที่ใช้เวลาในการฉายแสงน้อยเกินไป

จากรูปที่ 3.13 เป็นภาพที่ได้จากการตรวจสอบลวดลายของฟิล์มน้ำยาไวแสงหลังจากที่ผ่านการล้างน้ำยาไวแสง เพื่อตรวจสอบลวดลาย ซึ่งจากรูปพบว่าลักษณะของฟิล์มบริเวณที่เป็นลวดลายของอุปกรณ์นั้น จะสังเกตเห็นว่ามีจุดดำเล็กมากมายและขนาดของลวดลายจะเล็กกว่าที่ออกแบบไว้ ซึ่งลักษณะที่เป็นแบบนี้ เนื่องมาจากการใช้เวลาในการฉายแสงที่น้อยเกินไป ทำให้หลังจากขั้นตอนการล้างน้ำยาไวแสงแล้วน้ำยาไวแสงหลุดออกไม่หมด ดังนั้นถ้าเรานำชิ้นงานนี้ไปเป็นหน้ากากในการระเหยชั้นโลหะ เมื่อถึงขั้นตอนการ lift off น้ำยาไวแสง ทำให้ชั้นฟิล์มโลหะที่ปลุกหลุดตามชั้นของน้ำยาไวแสงไปด้วยทำให้เสียเวลาในการดำเนินงานวิจัย

ในกรณีที่ใช้เวลาในการฉายแสงมากเกินไป (over expose) ดังรูปที่ 3.14 จะเห็นได้ว่าจุดสีดำๆ บริเวณลวดลาย ไม่มีน้ำยาไวแสงเหลืออยู่แล้ว ก็แสดงว่าเวลาที่ใช้ในการฉายแสงค่อนข้างที่จะเหมาะสมแล้ว แต่พอมาวัดขนาดของลวดลายด้วยกล้องจุลทรรศน์พบว่าขนาดของลวดลายใหญ่กว่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ออกแบบไว้ ก็เกิดจากการที่ใช้ เวลาในการฉายแสงมากเกินไป ดังนั้นในงานวิจัยควรที่จะหาเวลาที่ เหมาะสมเพราะจะทำให้ได้ขนาดของลวดลายตามที่ออกแบบไว้



รูปที่ 3.14 แสดงลักษณะของลวดลายของน้ำยาไวแสงกรณีที่ใช้เวลาในการฉายแสงมากเกินไป

เมื่อผ่านกระบวนการ โฟโตลิโธกราฟีจะทำให้ได้หน้าภาคที่เป็นน้ำยาไวแสงบนฐานรองรับ ซิลิคอนขนาด 6 นิ้ว ที่มีลวดลายตามที่ออกแบบไว้ ในขั้นตอนต่อไปก็จะนำหน้าภาคน้ำยาไวแสงนี้ ไปเป็นหน้าภาคสำหรับระเหยฟิล์มโลหะด้วยระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศ

3.2.4 การสร้างฟิล์มโลหะด้วยระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศ

จากขั้นตอนที่ผ่านมาจะได้ ลวดลายของน้ำยาไวแสงบนฐานรองรับที่ได้เตรียมไว้ใน ขั้นตอนนี้ จะนำแผ่นของชิ้นงานที่ได้จากขั้นตอนที่แล้ว มาทำการระเหยฟิล์มโลหะเพื่อที่จะให้ได้ ลักษณะฟิล์มโลหะตามลวดลาย

หลักการของการระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศ (Electron Beam Evaporator System: E-beam) คือ การบังคับลำอิเล็กตรอนด้วยสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าให้ตกลงบนสาร กิ่งตัวนำซึ่งบรรจุอยู่ภายในเบ้าหลอมสาร (Crucible) ลำอิเล็กตรอนเกิดจากการป้อนกระแสไฟฟ้า โดยมีค่าความต่างศักย์สูงประมาณ 5kV-20kV โดยทั่วไปแล้วปืนลำอิเล็กตรอนจะทำงานที่กำลัง ประมาณ 10kW-50kW เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดทั้งสแตเจนจนเกิดปรากฏการณ์เทอร์มิโอนิกอิมิสชันของอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนจะหลุดออกมาจากขดลวดแล้วลำอิเล็กตรอนก็จะถูกเร่งและ โฟกัสด้วยสนามแม่เหล็กเพื่อให้ตกกระทบบนสารตั้งต้นที่ต้องการระเหย เมื่อลำอิเล็กตรอนชน เข้ากับผิวหน้าของสารกิ่งตัวนำจะเกิดการถ่ายเทพลังงานจลน์ที่มีอยู่ในตัวเป็นพลังงานความร้อน จากนั้นสารกิ่งตัวนำจะเกิดการระเหยขึ้นไปเกาะบนแผ่นฐานรองรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 ระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศ

ในขั้นตอนนี้จะทำการระเหยโลหะ โครเมียมและแพลทินัมด้วยระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศ ซึ่งจะประกอบด้วยขั้นตอนย่อยหลายขั้นตอน คือ การเตรียมฐานรองรับ การเตรียม ห้องสุญญากาศ (chamber) การเตรียมสารตั้งต้นในที่นี้ก็คือโครเมียม แพลทินัม การทำสุญญากาศ และการระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน

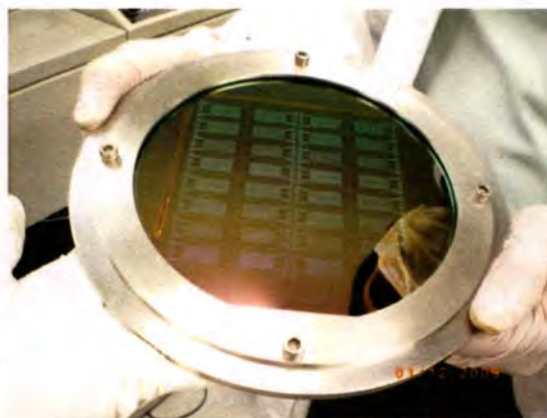
1.การเตรียมฐานรองรับ ปกติจะต้องทำความสะอาดฐานรองรับแต่ในงานวิจัยนี้จะใช้แผ่นฐานรองรับที่มีน้ำยาไวแสง เป็นหน้าฉาก จึงไม่ต้องทำความสะอาด

2.การเตรียมห้องสุญญากาศทุกๆ ครั้งในการระเหยสารใหม่ด้วยระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน ต้องทำความสะอาดห้องสุญญากาศของระบบ โดยการถอดอุปกรณ์ภายในห้องสุญญากาศทุกชิ้นออกมาทำความสะอาดด้วยวิธี เช่น ขัด ฟันทราย แช่สารเคมี ล้าง อบ รวมทั้งผนังของห้องสุญญากาศ และที่วางชิ้นงาน กำจัดฝุ่นละออง ตรวจสอบความเรียบร้อยของอุปกรณ์ต่างๆ ภายใน จากนั้นใช้ Isopropyl alcohol (IPA) เช็ดทำความสะอาดให้ทั่วอีกครั้งหนึ่ง

3.การเตรียมสารตั้งต้น นำวัสดุแพลทินัม (Pt) มาชั่งน้ำหนักก่อนนำวางในถ้วยใส่สาร อาจจะทำการใช้ความร้อนไล่ความชื้นออกก่อนด้วย Hot Plate ที่ 120°C ถ้วยใส่สารที่ใช้ระเหยแพลทินัม ในการทดลองนี้จะใช้ Fabmate Graphite แต่ต้องระวังไม่ให้ลำอิเล็กตรอนไปโดนที่ถ้วย

4.นำแผ่นชิ้นงานที่ต้องการจะสร้างชั้นฟิล์มติดกับ holder ของเครื่องดังรูปที่ 3.16 โดยในขณะที่ทำการระเหยสารนั้นจะทำการหมุน holder ไปด้วยเพื่อเพิ่มความสม่ำเสมอของฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 แสดงลักษณะของการติดแผ่นของชิ้นงานกับตัว holder ของเครื่อง E-Beam

ตรวจเช็คตำแหน่งและการทำงานของอุปกรณ์ภายใน ใส่สารแพลทินัม (Pt) ลงในถ้วยระเหยสาร (Crucible) ให้เรียบร้อยก่อนทำการปิดฝาของห้องสุญญากาศ

5. การทำสุญญากาศ เมื่อเตรียมห้องสุญญากาศ สาร และชิ้นงานวางในห้องสุญญากาศดีแล้ว ทำการปั๊มให้เป็นสุญญากาศที่ประมาณ 5×10^{-7} มิลลิบาร์ จึงจะเริ่มทำการยิงลำอิเล็กตรอน

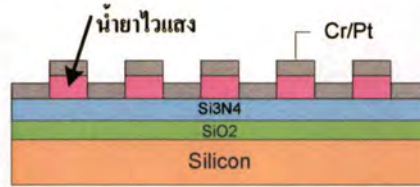
6. การระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน โดยปกติแพลทินัมจะยึดเกาะกับฐานรองรับชนิดต่างๆ ไม่ค่อยดี ดังนั้นในบางกรณีถ้าต้องการปลูกฟิล์มบางของแพลทินัมให้ยึดแน่นกับฐานรองรับ จึงจำเป็นต้องสร้างชั้นฟิล์มบางโครเมียม (Cr) บนฐานรองรับชั้นหนึ่งก่อนแล้วจึงปลูกฟิล์มแพลทินัม ซึ่งแพลทินัมจะยึดเกาะกับโครเมียมได้ดี ซึ่งในงานวิจัยนี้จะปลูกฟิล์มโครเมียม 20 nm และฟิล์มแพลทินัม 200 nm ตามลำดับ โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการระเหยสารด้วยระบบระเหยสารในสุญญากาศจะแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างฟิล์มแพลทินัมด้วยระบบระเหยสารในสุญญากาศ

Base pressure	$\sim 5 \times 10^{-7}$ mbar
Power source	5.04 kV
Beam current	100-200 mA
Deposition rate	0.01 nm/sec
Crucible to substrate distance	20 cm
Substrate temperature	100°C
Substrate	Silicon 6 inch.
Film thickness	200 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

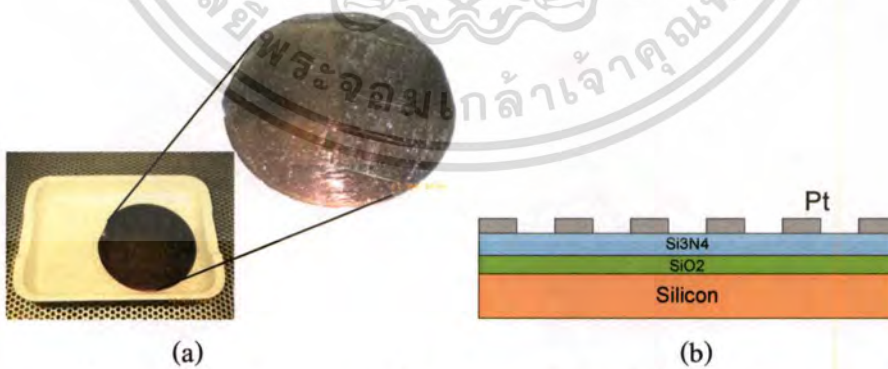
จากการระเหยสารด้วยระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศนั้นจะทำให้ได้ฟิล์ม Cr/P บนฐานรองรับที่มีลวดลายของน้ำยาไวแสงดังรูปที่ 3.17 อยู่ซึ่งในขั้นตอนถัดไปก็จะทำการล้าง น้ำยาไวแสงออก ก็จะทำให้เหลือแต่ลวดลายของไมโครฮิตเตอร์กับตัวตรวจวัดอุณหภูมิบนฐานรองรับซิลิคอน 6 นิ้ว



รูปที่ 3.17 แสดง โครงสร้างของลักษณะชั้นฟิล์มโลหะบนลวดลายของน้ำยาไวแสง

3.2.5 การล้างน้ำยาไวแสงหลังจากการระเหยฟิล์มโลหะ

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการล้างน้ำยาไวแสงในส่วนที่อยู่ใต้ฟิล์มโลหะตามรูปที่ 3.17 ออกโดยใช้สารเคมีอะซิโตน โดยจะนำแผ่นชิ้นงานมาแช่ในสารละลายอะซิโตนเพื่อให้สารละลายค่อยๆ ซึมลงไปทำปฏิกิริยากับตัวของน้ำยาไวแสง ทำให้โลหะที่อยู่บนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงเริ่มที่จะหลุดออกดังรูปที่ 3.18(a) สุดท้ายจะได้เฉพาะลวดลายของโลหะบนฐานรองรับดังรูปที่ 3.18(b) ในขั้นตอนนี้ถ้าฟิล์มโลหะที่สร้างไว้ยึดเกาะไม่ดี ก็จะทำให้หลุดออกมาทั้งหมด โดยหลังจากขั้นตอนนี้ก็จะต้องนำไปตรวจสอบลวดลายด้วยกล้องจุลทรรศน์อีกครั้งหนึ่ง



รูปที่ 3.18 (a) แสดงลักษณะของชิ้นงานขณะที่ทำการล้างน้ำยาไวแสง,
(b) โครงสร้างลวดลายของโลหะบนฐานรองรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.6 การแอนนีสเพื่อปรับปรุงสมบัติของฟิล์ม

จากทฤษฎีในบทที่ 2 เกี่ยวกับการใช้โลหะเพลทินัมเป็นตัวตรวจวัดอุณหภูมิจะต้องทำการแอนนีสเพื่อให้ฟิล์มเพลทินัมมีความบริสุทธิ์มากขึ้น ซึ่งจะต้องทำการแอนนีสด้วยอุณหภูมิที่เหมาะสมค่าหนึ่ง จากการศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับช่วงของอุณหภูมิที่ใช้ในการแอนนีสฟิล์มเพลทินัมจะอยู่ในช่วง 600-1100 °C [42] โดยจากการศึกษาจากหลายๆ งานวิจัยก็จะพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสม สำหรับการแอนนีสฟิล์มเพลทินัมจะขึ้นอยู่กับระบบที่ใช้เตรียมฟิล์ม เช่น ระบบสปีดเตอริง ระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ก็จะศึกษาถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ใช้สำหรับการแอนนีสของระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศ โดยจะเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ใช้ในการแอนนีสเป็น 600, 900 และ 1200 °C ที่เวลาเท่ากันคือ 120 นาที ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน โดยจะทำการควบคุมอัตราการเพิ่มความร้อนอยู่ที่ 5 °C/นาที ซึ่งการแอนนีสด้วยอุณหภูมิสูงนี้จะใช้เตาแอนนีสแบบแนวนอน ที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) รุ่น SVG THERMCO TMX2604 Diffusion Furnace ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 เตาแอนนีสแบบแนวนอนที่ TMEC รุ่น SVG THERMCO TMX2604 Diffusion Furnace

3.3 การบรรจุภัณฑ์ (Packaging)

3.3.1 การตัดแยกอุปกรณ์ออกเป็นแต่ละตัว

จากหัวข้อที่ 3.2.6 จะผ่านกระบวนการสร้างไมโครฮีตเตอร์แล้ว โดยขั้นตอนนี้ก็จะเป็นการตัดแยกอุปกรณ์ออกเพื่อจะนำไปใช้งานให้แยกออกจากกันเป็นแต่ละตัวดังรูปที่ 3.20 โดยใช้เครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Wafer Dicing Saw ของบริษัทดิสโก รุ่น DAD 3350 ที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC)



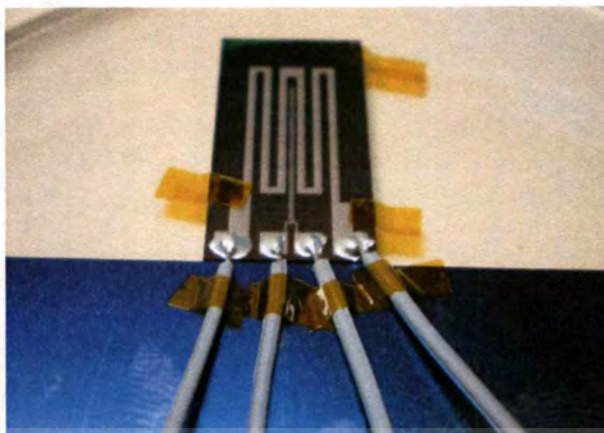
รูปที่ 3.20 แสดงลักษณะของอุปกรณ์หลังจากที่ตัดด้วยเครื่อง Dicing Saw

โดยในการตัดด้วยเครื่อง Dicing Saw จะต้องทำการเตรียมชิ้นงานก่อนเข้าเครื่องตัด โดยจะทำการเคลือบฟิล์มสำหรับการตัดแผ่นเวเฟอร์ทางด้านหลังของแผ่นชิ้นงานเพื่อเป็นตัวยึดแผ่นชิ้นงานด้วย ในการเคลือบจะใช้อุณหภูมิประมาณ $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยทำการเคลือบให้เรียบที่สุด จากรูปจะเห็นได้ว่าหลังจากถูกตัดแล้ว ชิ้นงานก็ยังคงติดอยู่กับฟิล์ม และสามารถดึงออกสำหรับการนำไปใช้งานได้อย่างสะดวก

3.3.2 การต่อขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์

การต่อขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์ เป็นอีกขั้นตอนที่สำคัญมากเพราะจะเป็นตัวที่จะกำหนดได้ว่า ชิ้นงานนั้นจะนำไปใช้งานได้หรือไม่ ในงานวิจัยนี้ได้พยายามที่จะต่อขั้วไฟฟ้าด้วยตะกั่ว กับบริเวณขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์ ซึ่งก็ได้พยายามทดลองอยู่ค่อนข้างนาน ซึ่งพบว่าสามารถที่จะบัดกรีได้ แต่ประสิทธิภาพและความแน่นอนในการบัดกรีไม่ค่อยดีเท่าที่ควร จึงพยายามที่จะหาวิธีที่จะต่อขั้วไฟฟ้า ซึ่งก็พบว่าการใช้กาวเงิน (CMOS-Grade) สำหรับติดขาของไอซีเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับการต่อขั้วไฟฟ้า โดยการต่อขั้วไฟฟ้าด้วยการเงินจะเริ่มจากนำกาวเงินซึ่งจะต้องอยู่ในตู้แช่แข็ง ($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$) มาติดบริเวณขั้วไฟฟ้ากับสายไฟที่ต้องการจะนำมาต่อดังรูปที่ 3.21 หลังจากนั้นจะต้องนำไปอบที่อุณหภูมิ $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 3 นาที เพื่อให้กาวแข็ง พร้อมทั้งจะนำไปใช้งานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 แสดงลักษณะการต่อขั้วไฟฟ้าโดยใช้กาวเงิน

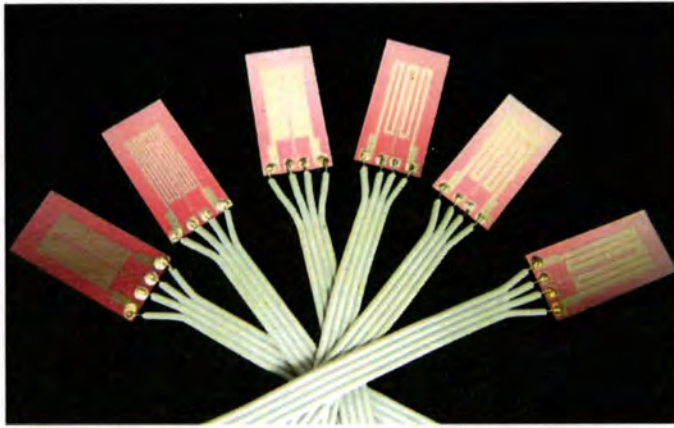
3.4 ผลของการสร้างอุปกรณ์

จากการสร้างอุปกรณ์ไมโครฮีตเตอร์ที่มีตัววัดอุณหภูมิบนฐานรองรับซิลิคอนขนาด 6 นิ้ว ซึ่งในหนึ่งแผ่นของซิลิคอนจะได้ไมโครฮีตเตอร์ที่มีตัวตรวจวัดอุณหภูมิทั้งหมด 32 ชิ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.22 ซึ่งจะถูกตัดเพื่อแยกออกจากกัน

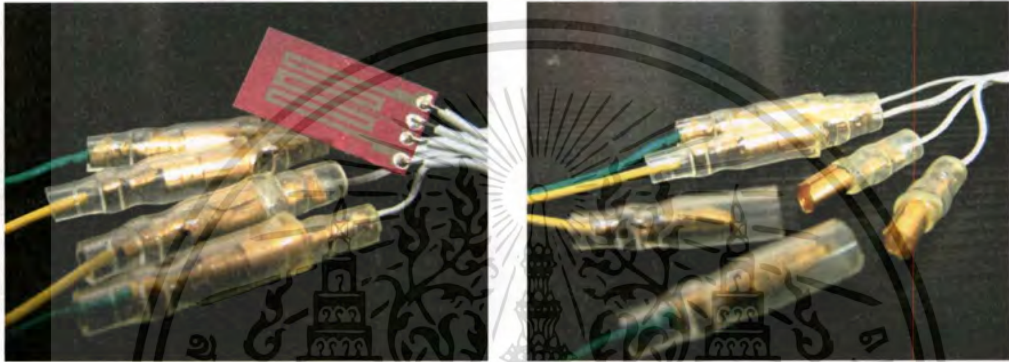


รูปที่ 3.22 แสดงไมโครฮีตเตอร์ที่มีตัวตรวจวัดอุณหภูมิจำนวน 32 ชิ้นบนแผ่นซิลิคอนขนาด 6 นิ้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(b)

(c)

รูปที่ 3.23 แสดงลักษณะของไมโครชิปเตอร์ที่ถูกตัดแบ่งเป็นแต่ละชิปแล้ว
 (a) ไมโครชิปเตอร์ 6 รูปแบบ (b) ไมโครชิปเตอร์ที่ทำการต่อสายไฟพร้อมใช้งาน
 (c) ลักษณะของขั้วไฟฟ้าที่จะนำไปต่อใช้งาน

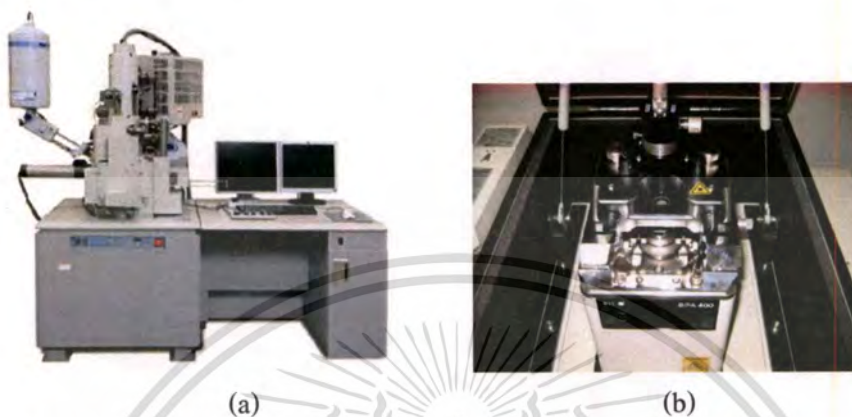
3.5 การตรวจสอบสมบัติของอุปกรณ์

จากขั้นตอนที่ผ่านมา ทำให้ได้อุปกรณ์ไมโครชิปเตอร์ที่มีตัวตรวจวัดอุณหภูมิ ที่ถูกตัดแยกออกเป็นแต่ละตัว และทำการต่อขั้วไฟฟ้าพร้อมที่จะสามารถนำไปใช้งานได้ ซึ่งการที่จะนำไปใช้งานได้นั้น จะต้องมีการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติทางความร้อนของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น เพื่อกำหนดลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์ และตรวจสอบว่ามีสมบัติตามที่ได้ออกแบบไว้

3.5.1 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ

การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพนั้นก็จะศึกษาลักษณะของฟิล์มบาง โลหะที่สร้างขึ้น เช่น ความหนา ลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม ซึ่งจะทำให้ทราบถึงความสม่ำเสมอของฟิล์มที่สร้างขึ้น โดยการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพก็จะใช้เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscopy: FE-SEM) และกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic force microscope: AFM)



รูปที่ 3.24 เครื่องมือที่ใช้ตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ (a) FE-SEM, (b) AFM

3.5.2 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า

จากอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจะต้องแสดงสมบัติความเป็นตัวต้านทานที่ดี ทั้งเมื่อก่อนทำการต่อขั้วไฟฟ้าและหลังต่อขั้วไฟฟ้า ดังนั้นจึงต้องมีการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า เพื่อดูความเป็นตัวต้านทานที่ดี โดยการวัดสมบัติกระแส-แรงดันของตัวอุปกรณ์ ด้วยระบบวัดค่ากระแสและความต่างศักย์ (Current-Voltage Measurement System) ที่จัดขึ้นในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ Agilent E4980A 20Hz-2MHz Precision LCR Meter ดังรูป 3.25



รูปที่ 3.25 ระบบวัดค่ากระแส-ความต่างศักย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.3 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อน

สำหรับการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของไมโครฮีตเตอร์นั้น ก็จะทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับตัวไมโครฮีตเตอร์ที่มีตัวตรวจวัดอุณหภูมิ ซึ่งก็จะทำการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันอินพุตที่จ่ายให้กับไมโครฮีตเตอร์และบันทึกค่าของอุณหภูมิที่เกิดขึ้น ด้วยตัวตรวจวัดอุณหภูมิ โดยที่ตัวตรวจวัดอุณหภูมิจะต้องผ่านการสอบเทียบมาตรฐานมาแล้ว จากการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของไมโครฮีตเตอร์ จะทำให้ทราบถึงลักษณะเฉพาะของตัวอุปกรณ์นั้น

นอกจากจะทำการตรวจสอบด้วยระบบที่ได้สร้างขึ้นเองภายในห้องปฏิบัติการแล้ว ซึ่งทำให้ทราบถึงผลการตอบสนองทางความร้อนของไมโครฮีตเตอร์ แต่สิ่งที่จำเป็นจะต้องทำการทดสอบเพื่อช่วยยืนยันผลของความร้อนในเชิงความสม่ำเสมอของอุณหภูมิของไมโครฮีตเตอร์ด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน (FLIR Systems Cameras: Thermo Vision A40) ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากหน่วยปฏิบัติการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีโฟโตนิกส์ (PTL)



รูปที่ 3.26 กล้องถ่ายภาพความร้อน รุ่น FLIR Systems Cameras: Thermo Vision A40

ในส่วนของการใช้งานกล้องถ่ายภาพความร้อน รุ่น FLIR Systems Cameras: Thermo Vision A40 การใช้งานส่วนใหญ่ของทางห้องปฏิบัติการที่ได้ให้ความอนุเคราะห์มีความชำนาญในด้านการใช้กล้องถ่ายภาพเพื่อบันทึกภาพบุคคลหรือเครื่องมือขนาดใหญ่ ซึ่งภาพที่ได้ออกมาทีจะมีพื้นที่ขนาดใหญ่ ทำให้ภาพที่ได้ออกมาค่อนข้างที่จะมีความแม่นยำมาก แต่ในงานวิจัยนี้ นำมาใช้กับชิ้นงานที่มีขนาดเล็ก ซึ่งอาจจะทำให้ความแม่นยำในการวัดอุณหภูมิตดลง ดังนั้นจึงจะต้องทำการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้กับงานวิจัยนี้ โดยตัวแปรที่สำคัญจะประกอบไปด้วย ระยะโฟกัส การตั้งค่าการแผ่ความร้อน การเปลี่ยนอุณหภูมิที่สะท้อน และการปรับความร้อน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะขอกล่าวถึงวิธีการที่ใช้ในการตรวจวัด ผลการตรวจวัด และการวิเคราะห์สมบัติของอุปกรณ์ ทั้งทางด้านกายภาพ ทางด้านไฟฟ้า และทางด้านความร้อน โดยจะอธิบายถึงระบบที่ใช้สำหรับการตรวจวัดหรือการสอบเทียบตัวตรวจวัดอุณหภูมิ ระบบที่ใช้สำหรับการตรวจวัดของตัวไมโครฮีทเตอร์ รวมถึงการนำไมโครฮีทเตอร์ที่มีตัวตรวจวัดอุณหภูมิไปใช้งานกับระบบควบคุมอุณหภูมิที่สร้างขึ้น และจะอธิบายถึงผลการวิเคราะห์สมบัติของอุปกรณ์

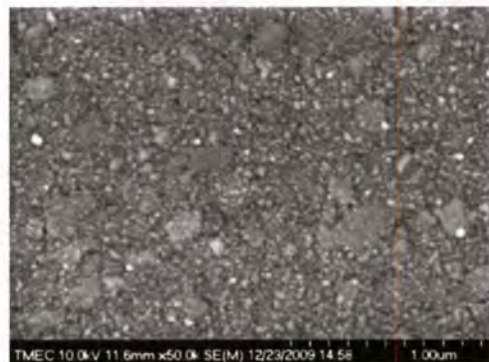
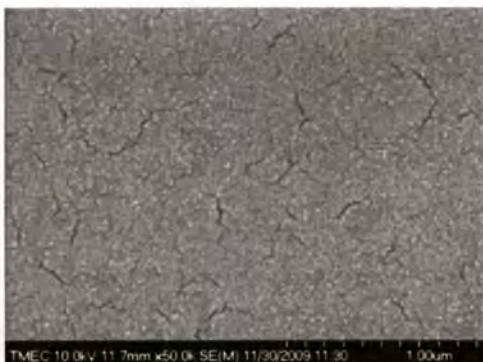
4.1 การตรวจวัดสมบัติทางกายภาพของฟิล์มบางแพลทินัม

ในหัวข้อนี้จะเป็นการตรวจวัดสมบัติทางกายภาพของลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางแพลทินัมที่สร้างขึ้น โดยระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศ และนำไปแอนนีสที่อุณหภูมิต่างกัน คือ 600, 900 และ 1200 °C ตามลำดับ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscopy: FE-SEM) และกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic force microscope: AFM) ในการตรวจสอบลักษณะของพื้นผิว

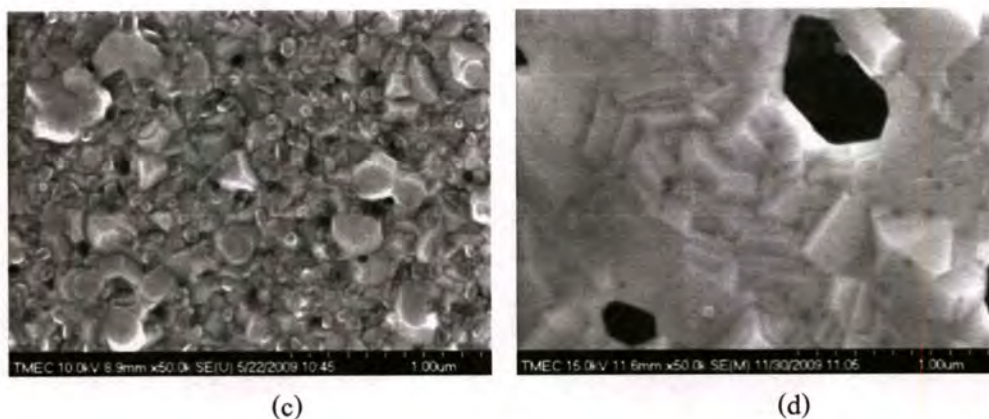
4.1.1 ผลการตรวจสอบฟิล์มบางแพลทินัมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

4.1.1.1 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิว

โดยทั่วไปสำหรับการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มจะทำการศึกษาถึงความขรุขระและความสม่ำเสมอของฟิล์ม ในส่วนนี้จะแสดงให้เห็นถึงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเงื่อนไขไม่ได้แอนนีส และเงื่อนไขเมื่อทำการแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆ กัน ซึ่งจะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

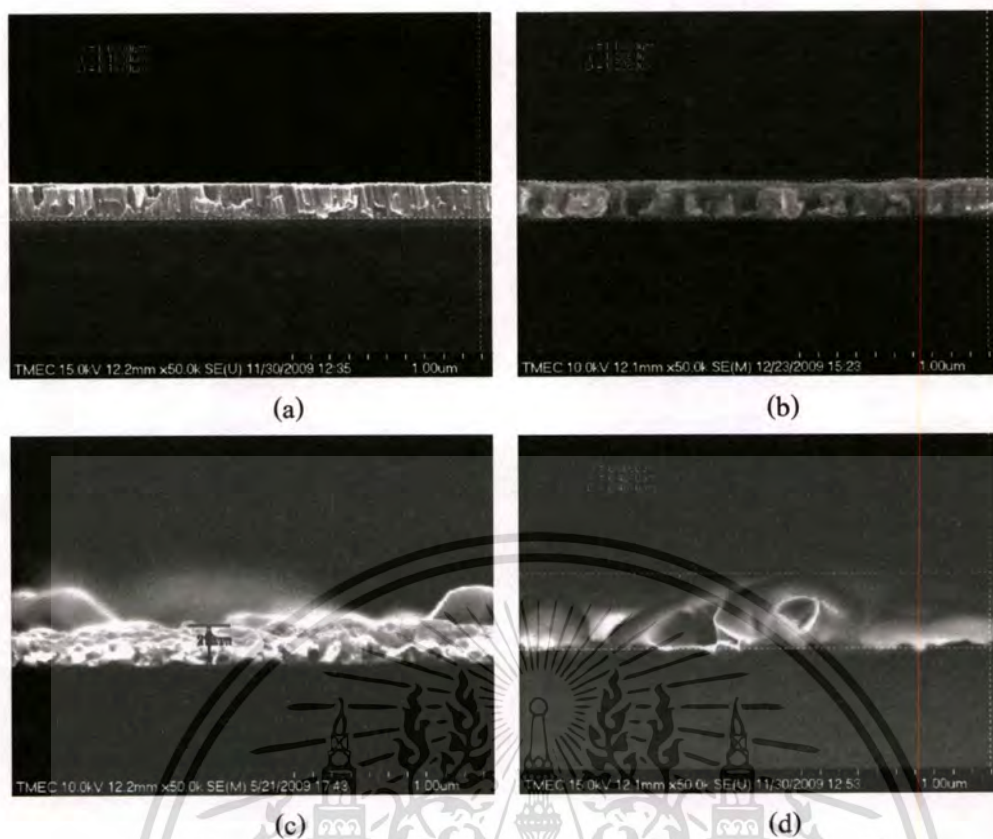


รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะผิวของฟิล์มบางแพลทินัมจากการตรวจสอบด้วยเครื่อง FE-SEM ,
(a) กรณีไม่ได้แอนนีสล, (b) แอนนีสล 600 °C, (c) แอนนีสล 900 °C และ (d) แอนนีสล 1200 °C

สำหรับลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางเมื่อทำการตรวจสอบด้วยเครื่อง FE-SEM ของศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ที่กำลังขยาย 50,000 เท่า ตามรูปที่ 4.1 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าขนาดของผลึกจะมีขนาดที่โตขึ้นหลังจากที่ทำการแอนนีสล โดยที่ 4.1(a) เป็นฟิล์มบางแพลทินัมที่ไม่ได้ทำการแอนนีสลจะเห็นได้ว่าผิวฟิล์มมีความเรียบสม่ำเสมอ และเมื่อนำไปแอนนีสลที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 120 นาที ดังรูปที่ 4.1(b) พบว่าเริ่มจะมีเม็ดผลึกเริ่มโตขึ้นให้เห็นบ้างบางตำแหน่ง และเกิดรูเล็กขนาดนาโนเมตร (nano-size holes) หลายตำแหน่งและเมื่อแอนนีสลด้วยอุณหภูมิที่สูงขึ้นเป็น 900 °C และ 1200 °C พบว่าความหนาแน่นของ pinholes มีจำนวนลดน้อยลง[44] ในขณะที่ขนาดของ pinholes เพิ่มขึ้น และเกิดการโตขึ้นบริเวณขอบของ pinholes ที่ใหญ่ขึ้น ดังรูปที่ 4.1(c) และ 4.2(d) ตามลำดับ

4.1.1.2 การตรวจสอบความหนา

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการตรวจสอบความหนาของชั้นฟิล์มแพลทินัมที่ปลูกด้วยระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูง ซึ่งในขณะที่ทำการระเหยนั้น ค่าความหนาของฟิล์มสามารถตรวจสอบได้โดยเครื่องอ่านความหนา แต่ถึงอย่างไรก็ตามจะต้องทำการตรวจสอบด้วยเครื่อง FE-SEM อีกครั้งเพื่อเปรียบเทียบกับความหนาจากระบบระเหยสาร และจากการตรวจสอบด้วยเครื่อง FE-SEM จะทำให้ทราบถึงความหนาของฟิล์มที่เงื่อนไขของอุณหภูมิแอนนีสลต่างกัน ซึ่งจะแสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงความหนาของฟิล์มบางแพลทินัมจากการตรวจสอบด้วยเครื่อง FE-SEM ,
(a) กรณีไม่ได้แอนนีส, (b) แอนนีส 600 °C, (c) แอนนีส 900 °C และ (d) แอนนีส 1200 °C

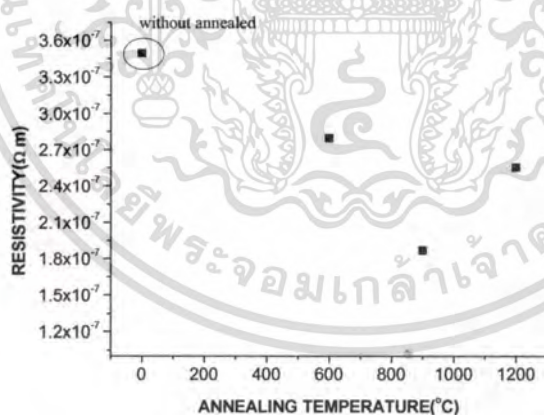
ความหนาของฟิล์มบางแพลทินัมที่อ่านได้จากเครื่องวัดความหนาของระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศนั้นอ่านค่าความหนาได้ประมาณ 200 nm แต่จากการตรวจสอบลักษณะของฟิล์มบางจากเครื่อง FE-SEM ตามรูปที่ 4.2(a) นั้นมีความหนาเท่ากับ 187 nm และลักษณะพื้นผิวของฟิล์มมีความเรียบและมีความสม่ำเสมอ (uniform) จากการตรวจสอบและวิเคราะห์พบว่าความหนาของเครื่องวัดความหนาในระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศนั้นควรที่จะเท่ากับการวัดด้วยกล้อง FE-SEM เนื่องจากได้ทำการวัดเทียบมาก่อนหน้านี้แล้ว แต่จากการทดลองนี้พบว่าค่าความหนาที่มีความคลาดเคลื่อน ซึ่งอาจจะมาจากการระเหยโลหะแพลทินัมด้วยระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนนั้นค่อนข้างยาก เพราะแพลทินัมมีค่าความหนาแน่นที่สูง (density) ประมาณ 21.45 g/cm^3 [43] ทำให้การปลูกฟิล์มที่ความหนา 200 nm นั้นจะเป็นการทำหลายๆ ชั้นซ้อนกันไปที่ละความหนารวมกันเพื่อให้ได้ความหนา 200 nm

จากรูปที่ 4.2 แสดงภาพตัดขวางของฟิล์มบางแพลทินัมเมื่อแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆ โดยการทดลอง ก็จะนำฟิล์มบางแพลทินัมที่เงื่อนไขความหนาเท่ากันตามรูปที่ 4.2(a) ไปทำการแอนนีสด้วยอุณหภูมิ 600 °C 900 °C และ 1200 °C ตามลำดับ เป็นเวลา 120 นาที ในบรรยากาศของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในโตรเจน จากรูปที่ 4.2(b-d) จะพบว่าความหนาของฟิล์มที่เปลี่ยนแปลงจะเกิดจากการโตขึ้นของผลึกเมื่อแอนนัลด้วยอุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ความหนาบริเวณที่เกิดการโตของผลึกมีค่ามากขึ้น และในขณะเดียวกันบริเวณที่เกิดรู ความหนาก็จะลดลง

จากการศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับการปรับปรุงสมบัติของฟิล์มด้วยวิธีการแอนนัล [44-47] พบว่าการนำฟิล์มแพลทินัมที่สร้างจากระบบระเหยสารหรือระบบสปัตเตอร์ริงไปทำการแอนนัลที่อุณหภูมิสูงจะช่วยปรับปรุงสมบัติของฟิล์ม ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์มมีค่าลดลง [46]

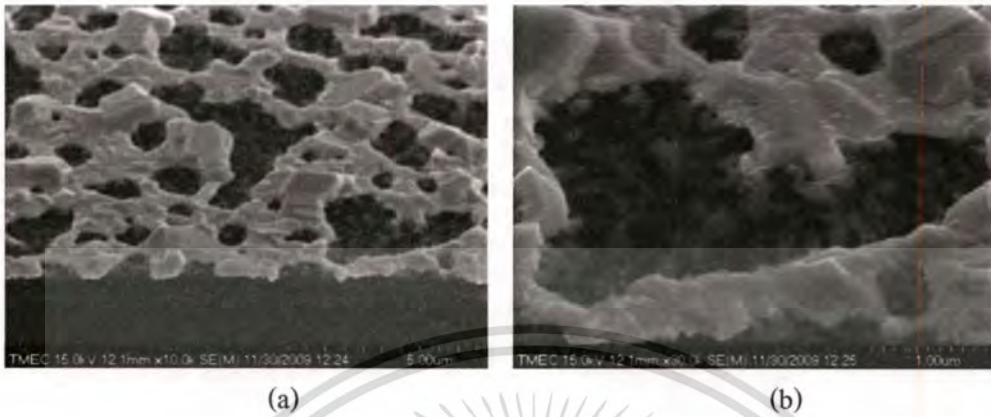
ในงานวิจัยนี้พยายามที่จะใช้การแอนนัลด้วยอุณหภูมิสูงมาช่วยปรับปรุงสมบัติของฟิล์ม โดยจากที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 ว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการแอนนัลของฟิล์มจะขึ้นอยู่กับวิธีการสร้างฟิล์มรวมถึงระบบที่ใช้ในการสร้าง ดังนั้นเราจึงจะต้องหาอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการแอนนัลฟิล์มแพลทินัมที่เตรียมโดยระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศ ซึ่งงานวิจัยของเราได้ใช้ฟิล์มแพลทินัมเป็นโมโนคริสตัลความต้านทานและตัวตรวจวัดอุณหภูมิชนิดตัวต้านทาน ดังนั้นจึงจะศึกษาเฉพาะการแอนนัลที่ส่งผลต่อค่าของความต้านทาน ซึ่งจากการทดลองเราพบว่าเมื่อแอนนัลด้วยอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้ค่าความต้านทานจำเพาะ (resistivity) ของฟิล์มแพลทินัมมีค่าลดลงและมีแนวโน้มเข้าใกล้กับค่ามาตรฐานที่อุณหภูมิห้องของโลหะแพลทินัม[42]



รูปที่ 4.3 แสดงค่าความต้านทานจำเพาะ (resistivity) กับอุณหภูมิที่ใช้ในการแอนนัลของแพลทินัมที่สร้างจากระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศ

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานจำเพาะ (resistivity) ลดลงเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการแอนนัลเพิ่มมากขึ้น และจะลดต่ำสุดเมื่อแอนนัลด้วยอุณหภูมิ 900 °C และมีค่าเพิ่มเมื่อแอนนัลด้วยอุณหภูมิที่ 1200 °C โดยจากการวิเคราะห์หน้าจะเกิดจากลักษณะของ pinholes ที่มีขนาดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากขึ้นทำให้ฟิล์มบางส่วนขาดหายไป จึงส่งผลให้ค่าความต้านทานจำเพาะซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของฟิล์มมีค่าที่เพิ่มขึ้น โดยจะสังเกตได้ชัดเจนจากรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แสดงภาพจากเครื่อง FE-SEM ของฟิล์มแพลทินัมเมื่อแอนนัลที่อุณหภูมิ 1200 °C
(a) กำลังขยาย 10,000 เท่า, (b) กำลังขยาย 50,000 เท่า

จากรูปที่ 4.4(a) เป็นการตรวจสอบลักษณะของพื้นผิวในลักษณะของมุมเอียงด้วยเครื่อง FE-SEM ของฟิล์มแพลทินัมเมื่อแอนนัลด้วยอุณหภูมิ 1200 °C ซึ่งพบว่าฟิล์มมีลักษณะที่แยกออกจากกันบางส่วนและเกิดการโตมากขึ้นบริเวณขอบๆ ของหลุมที่เกิดขึ้น เกิดเป็นลักษณะเกาะ (hemispherical islands) และเมื่อตรวจสอบด้วยกำลังขยายที่สูงขึ้น จะสังเกตได้ชัดเจนว่าฟิล์มแพลทินัมได้แยกหายไปจริง ลักษณะการเกิดลักษณะนี้มีแนวโน้มที่จะเกิดจากผลของความเครียด (strain) ของฟิล์มแพลทินัมเอง ค่าความเครียด (strain) ของฟิล์มแพลทินัมจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดการอัดหรือการแอนนัลที่อุณหภูมิสูง [44,48]

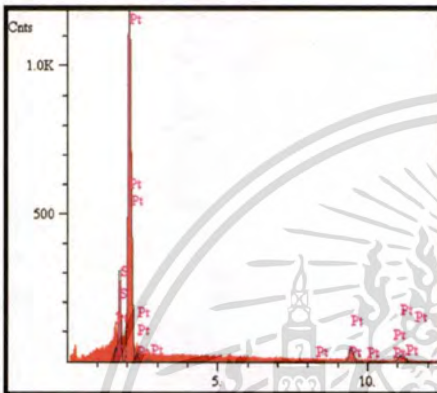
จากโครงสร้างของฟิล์มที่มีชั้นของโครเมียมเป็นชั้นยึดเกาะระหว่างชั้นแพลทินัมกับฐานรองรับ โดยที่อุณหภูมิห้องฟิล์มแพลทินัมและฟิล์มโครเมียมก็จะมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่แตกต่างกันอยู่แล้ว จากค่าที่แตกต่างกันของการขยายตัวทางความร้อนจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการแยกกันของฟิล์มนั่นเอง โดยรูปที่ 4.4(b) เมื่อทำการขยายบริเวณหลุมของ pinhole ที่เกิดขึ้นจะแสดงลักษณะของฟิล์มโครเมียมที่มีลักษณะคล้ายก้อนเมฆ (Cr cloud) กระจายอยู่ภายในหลุม โดยจะยืนยันได้จากตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ลักษณะของธาตุ (energy dispersive spectroscopy: EDS) ซึ่งผลแสดงได้ดังรูป 4.5



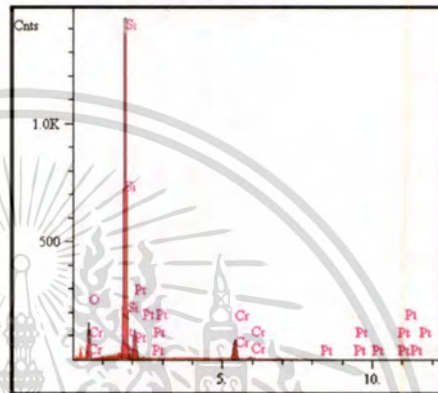
(a)



(b)



(c)



(d)

รูปที่ 4.5 แสดงตำแหน่งและผลการวิเคราะห์ของการตรวจวัดด้วยเครื่อง EDS โดย (a) ตำแหน่งที่ 1 บริเวณที่เป็นฟิล์มแพลทินัม, (b) ตำแหน่งที่ 2 บริเวณที่เป็น pinhole, (c) ผลการวิเคราะห์ของตำแหน่งที่ 1 และ (d) ผลการวิเคราะห์ของตำแหน่งที่ 2

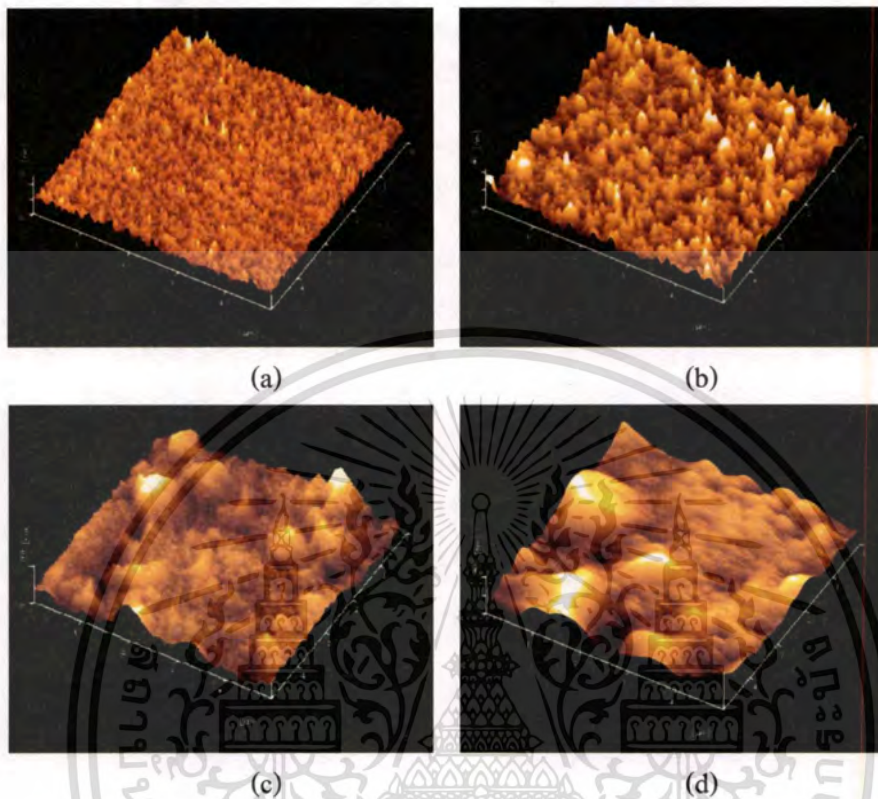
จากตำแหน่งและผลการวิเคราะห์ในรูปที่ 4.5 จะเป็นข้อมูลยืนยันได้ว่าฟิล์มบริเวณที่เป็นการโตขึ้นของผลึกในบริเวณตำแหน่งที่ 1 ตามรูปที่ 4.5(a) จะได้ผลการวิเคราะห์ตามรูปกราฟที่ 4.5(c) ซึ่งจะเห็นได้ว่าเส้นกราฟที่มีค่าความเข้มมากที่สุดจะเป็นของแพลทินัม ซึ่งก็จะตรงกับลักษณะของฟิล์มเรา จากนั้นเปลี่ยนตำแหน่งของการวิเคราะห์มาที่บริเวณรู (pinhole) ในตำแหน่งที่ 2 ดังรูปที่ 4.5(b) โดยผลการวิเคราะห์จะเป็นไปตามรูปที่ 4.5(d) จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟที่มีค่าความเข้มสูงสุดจะเป็นของซิลิคอนและมีเส้นกราฟของโครเมียมรวมอยู่ด้วย ซึ่งก็จะเป็นไปตามที่ได้วิเคราะห์ไว้ตั้งแต่ก่อนหน้า

4.1.2 ผลการตรวจสอบฟิล์มบางแพลทินัมด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการตรวจสอบพื้นผิวของฟิล์มแพลทินัมด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงลักษณะความเรียบและความสม่ำเสมอของฟิล์มอีกทั้งยังจะช่วยยืนยัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับผลที่ได้จากเครื่อง FE-SEM โดยในการวัดทุกครั้งจะกำหนดพื้นที่ที่ใช้ในการวัดอยู่ที่ $5 \times 5 \mu\text{m}$ ผลการวัดจะแสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะผิวของฟิล์มบางแพลทินัมจากการตรวจสอบด้วยเครื่อง AFM ,

(a) กรณีไม่ได้แอนนัลค่าความขรุขระ 1.37 nm, (b) แอนนัล 600°C ค่าความขรุขระ 5.23 nm ,
(c) แอนนัล 900°C ค่าความขรุขระ 28.99 nm และ (d) แอนนัล 1200°C ค่าความขรุขระ 52.98 nm

จากรูปที่ 4.6 สามารถที่จะทราบถึงค่าความขรุขระ (Root Mean Square: RMS) ของพื้นผิวฟิล์มที่เงื่อนไขต่าง ๆ โดยรูปที่ 4.6(a) แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มแพลทินัมกรณีที่ไม่ได้ทำการแอนนัลจะมีค่าความขรุขระ 1.37 nm ซึ่งจะเห็นได้ว่าฟิล์มมีความขรุขระน้อย ในกรณีของฟิล์มที่ทำการแอนนัลนั้น ค่าความขรุขระจะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 5.23-52.98 nm ตามอุณหภูมิแอนนัลที่สูงขึ้น ซึ่งจะแสดงได้ดังรูปที่ 4.6(b-d) ตามลำดับ ซึ่งจะสอดคล้องกับการตรวจสอบด้วยกล้อง FE-SEM

จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น เมื่อทำการแอนนัลด้วยอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าความต้านทานจำเพาะ (resistivity) มีค่าลดลง เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของขนาดผลึก แต่จะพบว่าถ้าอุณหภูมิที่ใช้ในการแอนนัลสูงเกินไปก็จะทำให้เกิดการแยกกันหรือเกิดรูที่ฟิล์มได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การตรวจวัดสมบัติทางไฟฟ้า

ในขั้นตอนนี้ก็จะนำอุปกรณ์ที่ทำการต่อขั้วไฟฟ้าเรียบร้อยแล้วมาทำการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าเบื้องต้น เช่น ค่าความต้านทานของอุปกรณ์ สมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดอุณหภูมิ ชนิดความต้านทาน เป็นต้น

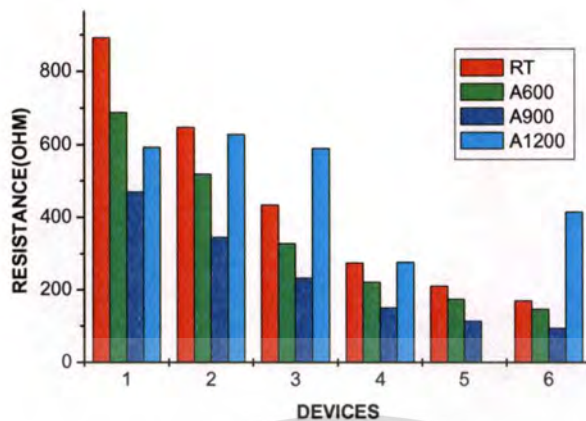
4.2.1 ผลการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของไมโครฮีเตอร์

สำหรับไมโครฮีเตอร์นั้นการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าส่วนใหญ่ก็จะสนใจเฉพาะในส่วนของความต้านทาน ซึ่งค่าความต้านทานของไมโครฮีเตอร์จะมีความสัมพันธ์กับเงื่อนไขของอุณหภูมิที่ใช้ในการแอนนัลด้วย ซึ่งค่าความต้านทานของแต่ละเงื่อนไขจะแสดงดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 สรุปค่าความต้านทานที่วัดได้ของไมโครฮีเตอร์เมื่อแอนนัลด้วยอุณหภูมิต่างๆ

รูปแบบ	ความต้านทานที่วัดได้ (Ω)				
	การคำนวณ	ไม่ได้แอนนัล	แอนนัล 600 °C	แอนนัล 900 °C	แอนนัล 1200 °C
1	263	892	688	477	593
2	192	647	518	346.8	589
3	128	433	326.6	238.5	628
4	79.2	274	220.4	149.9	275
5	60	210	173	112.6	-
6	48.3	169	145.5	92.2	413

ผลจากตารางที่ 4.1 จะแสดงให้เห็นว่าค่าความต้านทานที่วัดได้ของไมโครฮีเตอร์ที่แอนนัลด้วยอุณหภูมิต่างๆ จะมีค่าไม่เท่ากับค่าที่คำนวณได้ ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่เงื่อนไขแอนนัลด้วยอุณหภูมิ 900 °C ค่าความต้านทานที่วัดได้จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้มากที่สุด โดยจะเห็นได้ชัดเจนจากรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แสดงแนวโน้มค่าความต้านทานของไมโครฮีตเตอร์แต่ละรูปแบบ เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิต่างกัน

จากรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าหลังจากทำการแอนนัลด้วยอุณหภูมิ 600°C และ 900°C ค่าความต้านทานของไมโครฮีตเตอร์แต่ละรูปแบบจะลดลงเป็นแนวโน้มเดียวกันเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ได้แอนนัล ซึ่งจะพบว่าที่ 900°C นั้นค่าความต้านทานของไมโครฮีตเตอร์จะลดลงมากที่สุดหลังจากที่ทำการแอนนัล ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากรูปที่ 4.3 ซึ่งจะเกี่ยวเนื่องจากความต้านทานจำเพาะ แต่ในกรณีที่แอนนัลด้วยอุณหภูมิ 1200°C นั้น ค่าความต้านทานของไมโครฮีตเตอร์แต่ละรูปแบบเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม มีทั้งลดลงจากเดิมและเพิ่มขึ้นจากเดิม

4.2.2 ผลการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดอุณหภูมิ

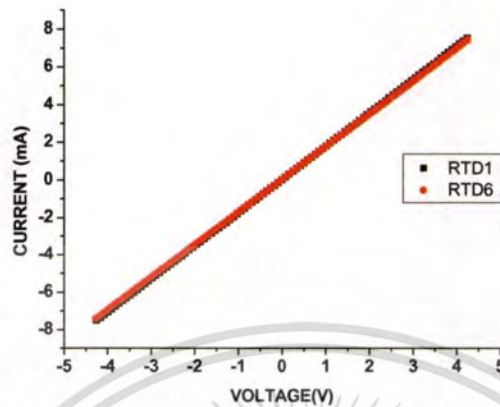
การตรวจวัดสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์จะใช้เครื่อง Agilent E4980A 20Hz-2MHz Precision LCR Meter ซึ่งเป็นระบบที่ใช้ในการตรวจวิเคราะห์สมบัติทางด้านกระแส-แรงดันของตัวอุปกรณ์

4.2.2.1 เจื่อนไซท์ที่ไม่ได้ทำการแอนนัล

โดยทำการตรวจวัดสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดอุณหภูมิชนิดความต้านทาน (RTD) ซึ่งจะต้องแสดงสมบัติของความเป็นตัวต้านทาน ซึ่งเส้นกราฟความสัมพันธ์ของกระแส-แรงดันจะต้องมีความเป็นเชิงเส้น ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานเฉลี่ยของตัวตรวจวัดอุณหภูมิ (RTD) เท่ากับ 559.33Ω เนื่องจากค่าความชันที่ได้จากกราฟจะเป็นส่วนกลับของความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

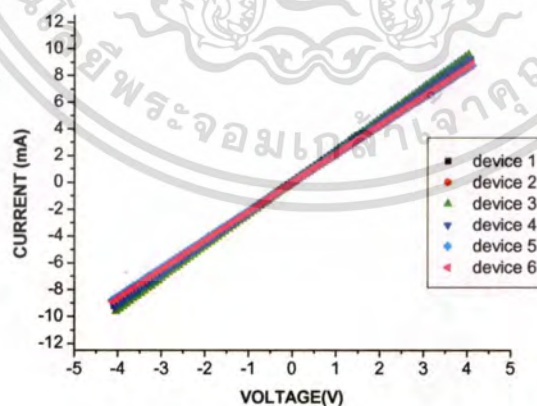
โดยในการวัดนั้นจะกำหนดช่วงของแรงดันตั้งแต่ -5V ถึง +5V เพื่อจะจ่ายให้กับอุปกรณ์และทำการบันทึกค่าของกระแสต่างๆ ช่วงเวลาตามที่ตั้งไว้ ผลการวัดจะแสดงได้ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดอุณหภูมิ เจ็อน ไช ไม ได้ แอน นีล

4.2.2.2 เจ็อน ไช เมื่อทำการแอน นีล ที่อุณหภูมิ 600 °C

หลังจากทำการแอน นีล ด้วยอุณหภูมิ 600 °C ยังจะสังเกตเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดัน ของตัวตรวจวัดอุณหภูมิ (RTD) ยังคงมีค่าความชันของกราฟใกล้เคียงกัน มีความเป็นเชิงเส้นสูง ดังรูปที่ 4.9 ซึ่งก็แสดงให้เห็นว่าค่าความต้านทานก็จะมีค่าใกล้เคียงกัน แต่จะมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับค่าก่อนการแอน นีล โดยค่าความต้านทานเฉลี่ยของทั้ง 6 ตัวจะมีค่า 447.16 Ω

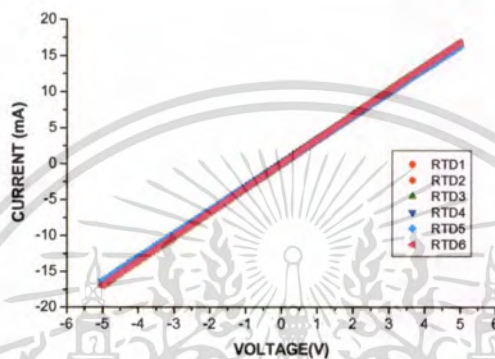


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดอุณหภูมิ เมื่อแอน นีล ที่อุณหภูมิ 600 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2.3 เงื่อนไขเมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 900 °C

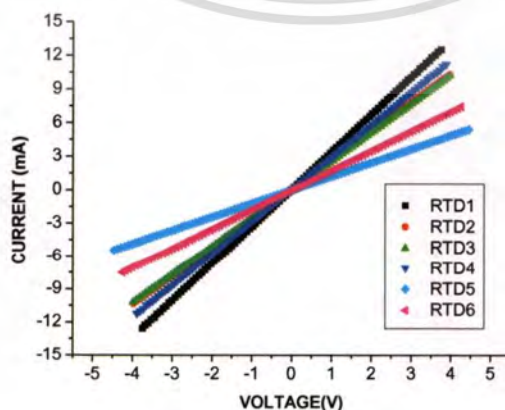
เมื่อแอนนัลด้วยอุณหภูมิ 900 °C ค่าความต้านทานของตัวตรวจวัดอุณหภูมิยังคงลดลงเหมือนเดิมแต่ค่าของความชันจะมีค่ามากขึ้นเมื่อเทียบกับการแอนนัลด้วย 600 °C ซึ่งจะพบว่าค่าความต้านทานเฉลี่ยจะมีค่าประมาณ 302.18 Ω โดยความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแรงดันจะแสดงดังรูปที่ 4.10 และกราฟแต่ละเส้นค่อนข้างที่จะทับกันซึ่งก็จะแสดงให้เห็นว่าความต้านทานของแต่ละตัวจะใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดอุณหภูมิเมื่อแอนนัลที่อุณหภูมิ 900 °C

4.2.2.4 เงื่อนไขเมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 1200 °C

ในกรณีของการแอนนัลด้วยอุณหภูมิ 1200 °C นั้นจากรูปที่ 4.11 จะเห็นได้ว่ากราฟของตัวตรวจวัดอุณหภูมิจะไม่ทับกันเหมือนกรณีที่แอนนัลด้วยอุณหภูมิ 600 °C และ 900 °C ซึ่งก็จะแสดงให้เห็นว่าค่าความต้านทานของตัวตรวจวัดอุณหภูมิที่ควรจะทำกันทุกตัว แต่จากผลจะเห็นได้ว่าความชันของเส้นกราฟแตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าค่าความต้านทานของตัวตรวจวัดอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม



เอก **รูปที่ 4.11** ความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดอุณหภูมิเมื่อแอนนัลที่อุณหภูมิ 1200 °C ด้านการค่า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การตรวจวัดสมบัติทางความร้อน

ในขั้นตอนของการตรวจวัดสมบัติทางความร้อนนั้น จำเป็นต้องมีการสอบเทียบมาตรฐานตัวตรวจวัดอุณหภูมิที่ได้ทำการสร้างขึ้นก่อน จากนั้นจะใช้ตัวตรวจวัดอุณหภูมิที่สร้างขึ้นสำหรับวัดอุณหภูมิที่เกิดจากไมโครฮีทเตอร์เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้า

4.3.1 การสอบเทียบมาตรฐานของตัวตรวจวัดอุณหภูมิ

งานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างตัวตรวจวัดอุณหภูมิชนิดความต้านทาน (Resistance Temperature Detector: RTD) โดยใช้วัสดุแพลทินัม ซึ่งจะเป็นตัวตรวจวัดอุณหภูมิแบบฟิล์มบางบนฐานรองรับซิลิกอน ซึ่งจะใช้เป็นตัวตรวจวัดอุณหภูมิสำหรับไมโครฮีทเตอร์ ในการวัดอุณหภูมิ ถ้าจะทำให้ค่าของอุณหภูมิที่วัดได้มีความน่าเชื่อถือ ตัวตรวจวัดอุณหภูมินั้นต้องได้รับการสอบเทียบกับหัววัดอุณหภูมิที่เป็นตัวมาตรฐาน

4.3.1.1 ระบบที่ใช้ในการสอบเทียบมาตรฐาน

ระบบที่สำหรับการสอบเทียบมาตรฐานที่ใช้ในการสอบเทียบตัวตรวจวัดอุณหภูมิที่เป็นฟิล์มบางแพลทินัมที่สร้างขึ้นนั้น เป็นระบบที่ใช้สำหรับสอบเทียบหัววัดมาตรฐานของหน่วยวิจัยมาตรวิทยา ภาควิชาวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง โดยระบบจะประกอบด้วยส่วนหลักๆ ที่สำคัญคือ

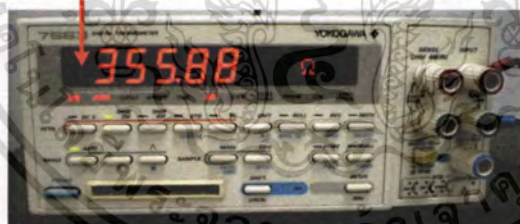
1. FLUKE 7103 MICRO BATH เป็นเครื่องทำอุณหภูมิมาตรฐานแบบอ่างของเหลว สามารถที่จะทำอุณหภูมิอยู่ในช่วง -30°C ถึง 125°C ความสามารถในการตั้งค่าละเอียด (resolution) 0.01°C ค่าความผิดพลาด (accuracy) $\pm 0.25^{\circ}\text{C}$ ค่าความเสถียรของการทำอุณหภูมิ (stability) $\pm 0.03^{\circ}\text{C}$ ที่อุณหภูมิ -25°C และ $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ ที่อุณหภูมิ 125°C [49] โดยลักษณะของเครื่องจะแสดงดังรูปที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าเป็นลักษณะของอ่างขนาดเล็กซึ่งภายในจะถูกบรรจุ silicone oil เพื่อใช้สำหรับงานทางด้านนี้โดยเฉพาะซึ่งจะไม่นำไฟฟ้า และทางด้านบนของเครื่องจะมีช่องสำหรับใส่ตัวตรวจวัดอุณหภูมิที่ต้องการจะสอบเทียบลงไป จากนั้นก็จะทำการต่อสายจากตัวตรวจวัดอุณหภูมิเพื่อจะทำการบันทึกค่าของความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง และมีจอสำหรับแสดงอุณหภูมิทางด้านหน้า



รูปที่ 4.12 เครื่องทำอุณหภูมิมาตรฐานแบบอ่างของเหลว (Fluke 7103 Micro Bath)

2. ดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์ (YOKOGAWA 7563 Digital Thermometer) เป็นเครื่องมาตรฐานที่ใช้สำหรับการวัดอุณหภูมิ แสดงดังรูปที่ 4.13 ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้เป็นตัววัดค่าความต้านทานของตัวตรวจวัดอุณหภูมิแพลทินัมที่สร้างขึ้น

จอแสดงค่าความต้านทานที่อ่านได้จากตัววัดอุณหภูมิ



รูปที่ 4.13 ดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์ (YOKOGAWA 7563 Digital Thermometer)

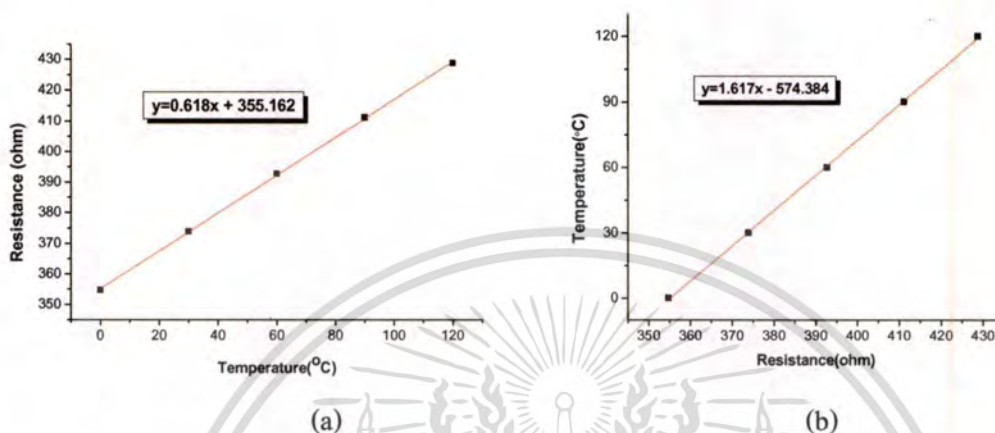
4.3.1.2 การสอบเทียบตัวตรวจวัดอุณหภูมิแพลทินัมที่สร้างขึ้น

ในการสอบเทียบมาตรฐานของตัวตรวจวัดอุณหภูมิที่สร้างขึ้นนั้นจะใช้อุณหภูมิในช่วง 30°C ถึง 120°C โดยทำการเพิ่มของอุณหภูมิกครั้งละ 10°C โดยเวลาที่อุณหภูมิแต่ละช่วงจะนิ่งนั้นอยู่ที่จุดละประมาณ 30 นาที ซึ่งต้องใช้เวลาค่อนข้างนานมากในการเทียบมาตรฐานของตัวตรวจวัดอุณหภูมิหนึ่งตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1.3 การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการสอบเทียบ

เมื่อทำการสอบเทียบในช่วงอุณหภูมิที่ต้องการครบแล้ว จะทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่อ่านได้จากตัวเครื่องกับค่าความต้านทานของตัวตรวจวัดอุณหภูมิดังแสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิที่ได้จากการสอบเทียบ

จากรูปที่ 4.14(a) จะทำให้ได้ค่าความชัน ($\Delta R/\Delta T$) หรือค่า sensitivity ของตัวอุปกรณ์เท่ากับ 0.618 ซึ่งก็จะหมายความว่า ค่าความต้านทานของตัวตรวจวัดอุณหภูมิจะเปลี่ยนไป 0.618 Ω เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป 1 $^{\circ}\text{C}$ และเมื่อได้ข้อมูลตามรูปที่ 4.14(a) มาแล้วนั้น ก็จะสามารถทำนายค่าความต้านทานของตัวตรวจวัดอุณหภูมิ ณ เวลาใดๆ ได้ หรืออีกนัยก็คือเมื่อรู้อุณหภูมิก็จะรู้ค่าของความต้านทาน โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ $y = 0.618x + 355.162$ ส่วนข้อมูลจากรูป 4.15(b) ก็ จะแสดงให้เห็นว่าเมื่อเราทราบค่าของความต้านทานก็จะสามารถที่จะรู้อุณหภูมิได้ ซึ่งการนำตัวตรวจวัดอุณหภูมิไปใช้งานนั้น เราก็เพียงแก้ค่าความต้านทานจากตัวตรวจวัดอุณหภูมิ แล้วก็นำมาคำนวณตามสมการ $y = 1.617x - 574.384$ ก็จะทำให้เราทราบอุณหภูมิได้ทันที ซึ่งนับได้ว่าเป็นหลักการที่ง่าย อีกทั้งยังมีความแม่นยำที่สูงอีกด้วย

4.3.2 ผลการสอบเทียบมาตรฐานของตัวตรวจวัดอุณหภูมิ

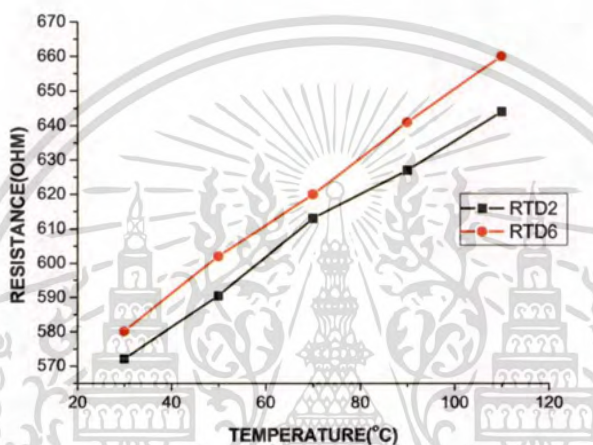
สำหรับตัวตรวจวัดอุณหภูมินั้น การตรวจสอบหลักที่จำเป็นอย่างหนึ่งก็คือการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าเพื่อศึกษาถึงผลของการต่อขั้วไฟฟ้าและความเป็นตัวต้านทาน และสิ่งที่สำคัญอีกอย่างก็คือการสอบเทียบมาตรฐาน ซึ่งผลของการสอบเทียบของแต่ละเงื่อนไขจะแสดงได้ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2.1 เงื่อนไขที่ไม่ได้ทำการแอนนีสล

ในความเป็นจริงแล้วตัวตรวจวัดอุณหภูมิในเงื่อนไขจะมีทั้งหมด 6 ตัว แต่ในการทดลองเริ่มต้นจึงเลือกนำมาสอบเทียบแค่สองตัว

ผลการสอบเทียบมาตรฐานของตัวตรวจวัดอุณหภูมิกรณีที่ไม่ได้ทำการแอนนีสล โดยความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานจะแสดงได้ดังรูปที่ 4.15 จะเห็นว่าถ้าเป็นกรณีในอุดมคตินั้นเส้นกราฟทั้งสองเส้นควรจะทับกันพอดี แต่จากผลถือว่าทั้งสองตัวมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก และมีค่า sensitivity ใกล้เคียงกันดังตารางที่ 4.2 ซึ่งจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $0.947 \pm 0.065 \Omega/^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 4.15 ผลการสอบเทียบของตัวตรวจวัดอุณหภูมิเงื่อนไขที่ไม่ได้ทำการแอนนีสล

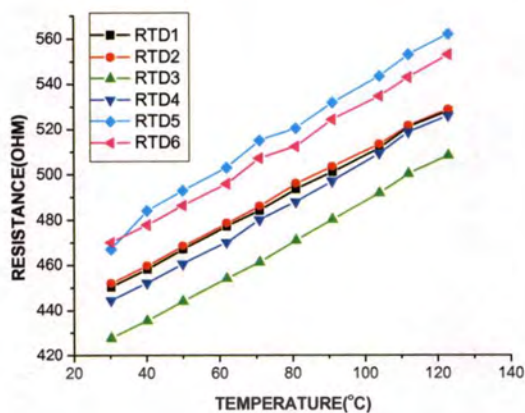
ตารางที่ 4.2 แสดงค่า sensitivity ของตัวตรวจวัดอุณหภูมิเงื่อนไขที่ไม่ได้ทำการแอนนีสล

ตัวที่	Sensitivity ($\Omega/^{\circ}\text{C}$)
2	0.902 ± 0.038
6	0.994 ± 0.016

4.3.2.2 เงื่อนไขเมื่อทำการแอนนีสลที่อุณหภูมิ 600 °C

จากผลของการสอบเทียบมาตรฐานของตัวตรวจวัดอุณหภูมิกรณีที่แอนนีสลด้วยอุณหภูมิ 600 °C แสดงดังรูปที่ 4.16 จะเห็นได้ว่าพฤติกรรมของตัววัดทุกตัวมีลักษณะเป็นไปในทางเดียวกันซึ่งสังเกตได้จากค่าความชันของกราฟที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งก็พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความต้านทานยังคงมีความเป็นเชิงเส้นอยู่ โดยจะมีค่า sensitivity ดังตารางที่ 4.3 ซึ่งจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $0.892 \pm 0.053 \Omega/^{\circ}\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



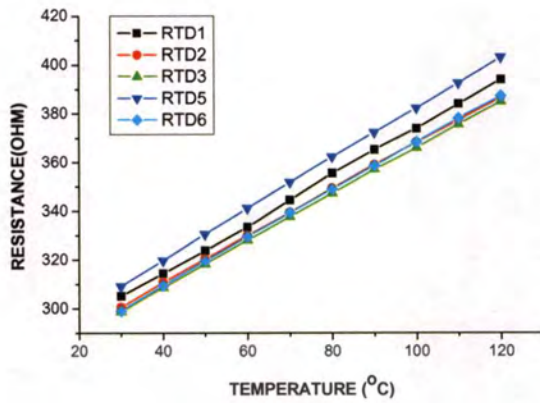
รูปที่ 4.16 ผลการสอบเทียบของตัวตรวจวัดอุณหภูมิเงิน ไชเมื่อแอนนีสที่อุณหภูมิ 600 °C

ตารางที่ 4.3 แสดงค่า sensitivity ของตัวตรวจวัดอุณหภูมิเงิน ไชเมื่อแอนนีสที่อุณหภูมิ 600 °C

ตัวที่ 1	Sensitivity ($\Omega/^{\circ}\text{C}$)
1	0.845±0.008
2	0.840±0.008
3	0.883±0.009
4	0.898±0.012
5	0.986±0.026
6	0.899±0.014

4.3.2.3 เงิน ไชเมื่อทำการแอนนีสที่อุณหภูมิ 900 °C

จากผลการวิเคราะห์ไม่ว่าจะเป็นทางด้านกายภาพ ทางด้านไฟฟ้า ก็จะพบว่าฟิล์มแพททินัมที่แอนนีสด้วยอุณหภูมิ 900 °C แสดงสมบัติที่เหมาะสม ซึ่งในกรณีผลของการสอบเทียบมาตรฐานของตัวตรวจวัดอุณหภูมิก็ยังคงจะมีความเป็นเชิงเส้นที่สูงเมื่อเทียบกับเงิน ไชข้างต้น โดยจะแสดงได้ดังรูปที่ 4.17 โดยจะมีค่า sensitivity ดังตารางที่ 4.4 ซึ่งจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $0.986\pm 0.035 \Omega/^{\circ}\text{C}$ ซึ่งค่าการเบี่ยงเบนจะมีค่าน้อยกว่าเงิน ไชที่ไม่ได้แอนนีสหนึ่งเท่า



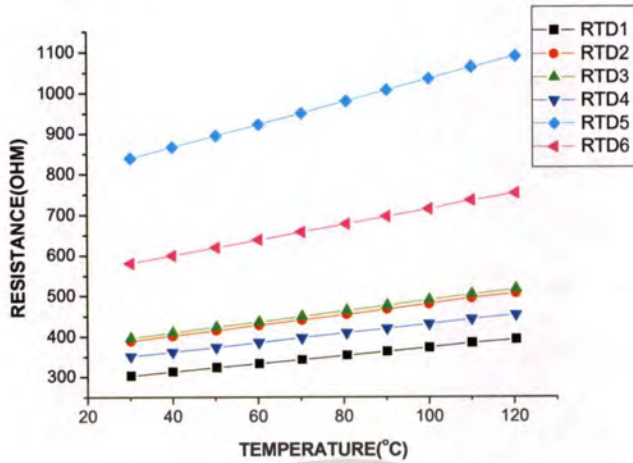
รูปที่ 4.17 ผลการสอบเทียบของตัวตรวจวัดอุณหภูมิเงิน ไชเมื่อนีลที่อุณหภูมิ 900 °C

ตารางที่ 4.4 แสดงค่า sensitivity ของตัวตรวจวัดอุณหภูมิเงิน ไชเมื่อนีลที่อุณหภูมิ 900 °C

ตัวที่ 1	Sensitivity ($\Omega/^{\circ}\text{C}$)
1	0.996 ± 0.008
2	0.956 ± 0.005
3	0.957 ± 0.003
4	-
5	1.040 ± 0.005
6	0.979 ± 0.004

4.3.2.4 เงิน ไชเมื่อนีลทำการแอนนิลที่อุณหภูมิ 1200 °C

จากผลการสอบเทียบมาตรฐานของตัวตรวจวัดอุณหภูมิกรณีที่ทำแอนนิลด้วยอุณหภูมิ 1200 °C จะสังเกตเห็นได้จากรูปที่ 4.18 เส้นกราฟค่อนข้างที่จะไม่ใกล้เคียงกันเหมือนกับกรณีก่อนหน้านี้ ซึ่งก็ตรงกับผลการวิเคราะห์ทางกายภาพ และการวัดค่าความต้านทานของไมโครฮีเตอร์ ซึ่งค่าของ sensitivity จะแสดงได้ดังตารางที่ 4.5 โดยมีค่าเฉลี่ย $1.587 \pm 0.671 \Omega/^{\circ}\text{C}$ ซึ่งค่าของการเบี่ยงเบนค่อนข้างที่จะสูงเมื่อเทียบกับเงิน ไชอื่น



รูปที่ 4.18 ผลการสอบเทียบของตัวตรวจวัดอุณหภูมิเงื่อน ไชเมื่อแอนนีสที่อุณหภูมิ 1200 °C

ตารางที่ 4.5 แสดงค่า sensitivity ของตัวตรวจวัดอุณหภูมิเงื่อน ไชเมื่อแอนนีสที่อุณหภูมิ 1200 °C

ตัวที่ 1	Sensitivity ($\Omega/^{\circ}\text{C}$)
1	1.012±0.005
2	1.311±0.007
3	1.334±0.006
4	1.144±0.003
5	2.800±0.008
6	1.924±0.008

4.3.2.5 สรุปลงเงื่อน ไชที่เหมาะสมสำหรับตัวตรวจวัดอุณหภูมิแพลทินัมที่สร้างขึ้น

จากผลการตรวจสอบสมบัติทางด้านไฟฟ้าและผลการสอบเทียบตัวตรวจวัดอุณหภูมิในเบื้องต้นพบว่า เงื่อน ไชของการแอนนีสด้วยอุณหภูมิ 900°C นาน 120 นาที ในบรรยากาศของไนโตรเจนเป็นเงื่อน ไชที่เหมาะสม สำหรับการสร้างตัวตรวจวัดอุณหภูมิแพลทินัม ด้วยระบบประหยาสรด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศ เนื่องจากหลายเหตุผล เช่น การแอนนีสด้วยอุณหภูมิ 900 °C นั้นเมื่อดูจากผลของการสอบเทียบจะเห็นได้ว่า ค่าที่ได้จากการสอบเทียบมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก และยังเป็นลักษณะของข้อมูลที่เป็นกลุ่มเดียวกันเมื่อเทียบกับเงื่อน ไชอื่น ซึ่งทำให้เห็นได้ว่าสามารถที่จะพัฒนาให้เข้าสู่การผลิตที่เป็นอุตสาหกรรมได้ เนื่องจากถ้าข้อมูลค่อนข้างที่จะเป็นกลุ่ม เมื่อทำการสร้างในจำนวนที่มากขึ้น ก็จะทำให้สามารถที่จะสุ่มมาสอบเทียบเพียงบางตัวเท่านั้น และสามารถที่จะใช้ค่าที่ได้จากการสุ่มตรวจเป็นค่าเฉลี่ยในการนำไปใช้งานได้

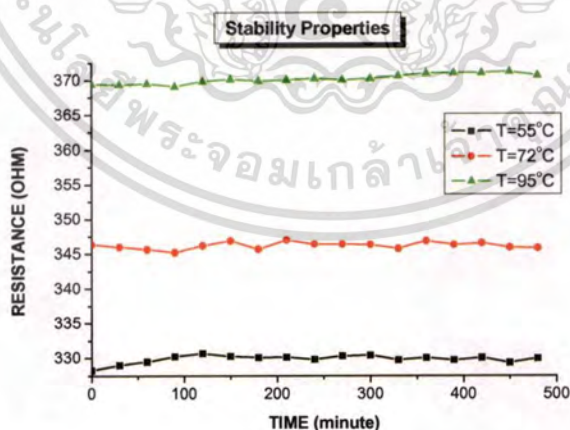
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสาเหตุอีกอย่างที่จะมาช่วยสนับสนุนแนวความคิดข้างต้น คือการที่คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของความต้านทานกับอุณหภูมิ (Temperature Coefficient Resistivity: TCR) ซึ่งจากการแอนนัลพบว่าจะช่วยปรับปรุงค่าของ TCR ให้มีค่าเพิ่มขึ้นและเข้าใกล้ค่าที่เป็นมาตรฐานแพลทินัม ($0.003927\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) [42] ซึ่งค่าที่ได้จะแสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลการคำนวณค่าของ TCR ของอุปกรณ์แต่ละเงื่อนไข

อุณหภูมิแอนนัล ($^{\circ}\text{C}$)	ค่า TCR ของตัวตรวจวัดอุณหภูมิแพลทินัม ($\square\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)
ไม่ได้แอนนัล	0.001646
600	0.001981
900	0.003269
1200	0.003337

เมื่อได้ตัวตรวจวัดอุณหภูมิที่มีสมบัติเหมาะสมสำหรับการนำไปพัฒนาต่อหรือแม้กระทั่งการนำไปใช้งานก็จะต้องมีการทดสอบค่าที่เป็นมาตรฐานเฉพาะของแต่ละอุปกรณ์ เช่น ค่าความเสถียรภาพ ซึ่งเราก็นำตัวตรวจวัดอุณหภูมิเงื่อนไขของการแอนนัลที่อุณหภูมิ $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ มาทำการตรวจสอบซึ่งจะได้ผลตามรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 แสดงผลการทดสอบค่าความเสถียรภาพของตัวตรวจวัดอุณหภูมิ

จากผลในรูปที่ 4.19 จะแสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพของตัวตรวจวัดอุณหภูมิเมื่อให้อุณหภูมิคงที่แล้วสังเกตค่าความต้านทานเมื่อเวลาผ่านไปโดยจะทำการบันทึกค่าความต้านทานทุกๆ 30 นาทีนานเป็นเวลา 8 ชั่วโมง ซึ่งพบว่าค่าความต้านทานของตัวตรวจวัดอุณหภูมิก่อนข้างจะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใดไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

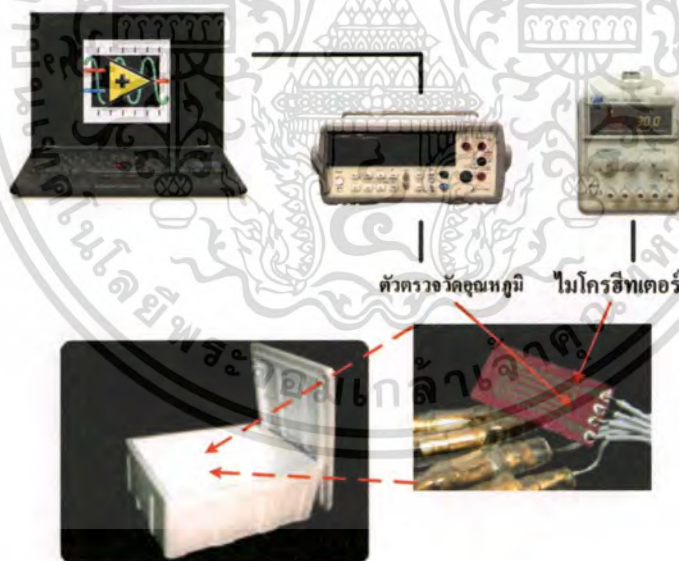
คงที่เมื่อเวลาผ่าน ที่อุณหภูมิค่าหนึ่ง โดยที่อุณหภูมิ 95 °C ค่าความต้านทานจะเปลี่ยนแปลงไปในช่วง $\pm 0.410 \Omega$ ที่อุณหภูมิ 72 °C เปลี่ยนแปลงไป $\pm 0.240 \Omega$ และที่อุณหภูมิ 55 °C เปลี่ยนแปลงไป $\pm 0.347 \Omega$ ซึ่งถ้าแปลงไปเป็นอุณหภูมิก็จะเปลี่ยนแปลงไปน้อยกว่า 0.5 องศา

4.3.3 การตรวจวัดผลทางความร้อนของไมโครฮีทเตอร์ที่มีตัวตรวจวัดอุณหภูมิ

สำหรับการตรวจวัดผลทางความร้อนของไมโครฮีทเตอร์นั้น จะเป็นการศึกษาถึงค่าของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับไมโครฮีทเตอร์เพื่อสามารถกำเนิดความร้อนตามอุณหภูมิที่ต้องการได้ โดยความร้อนที่เกิดขึ้นจากตัวไมโครฮีทเตอร์เมื่อมีการจ่ายแรงดันไฟฟ้า จะถูกตรวจวัดด้วยตัวตรวจวัดอุณหภูมิที่สร้างขึ้นพร้อมกับไมโครฮีทเตอร์ ที่ผ่านการสอบเทียบมาตรฐานมาแล้วนั่นเอง ซึ่งทำให้สามารถวัดอุณหภูมิได้โดยตรงจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากไมโครฮีทเตอร์

4.3.3.1 ระบบที่ใช้สำหรับการวัดผลทางความร้อนของไมโครฮีทเตอร์

ระบบที่ใช้ในการวัดสมบัติทางความร้อนของไมโครฮีทเตอร์ดังรูปที่ 4.20 เป็นระบบที่ได้สร้างขึ้นเองซึ่งจะประกอบด้วยส่วนสำคัญหลักๆ ได้แก่



รูปที่ 4.20 ระบบที่ใช้ในการตรวจวัดผลทางความร้อนของไมโครฮีทเตอร์

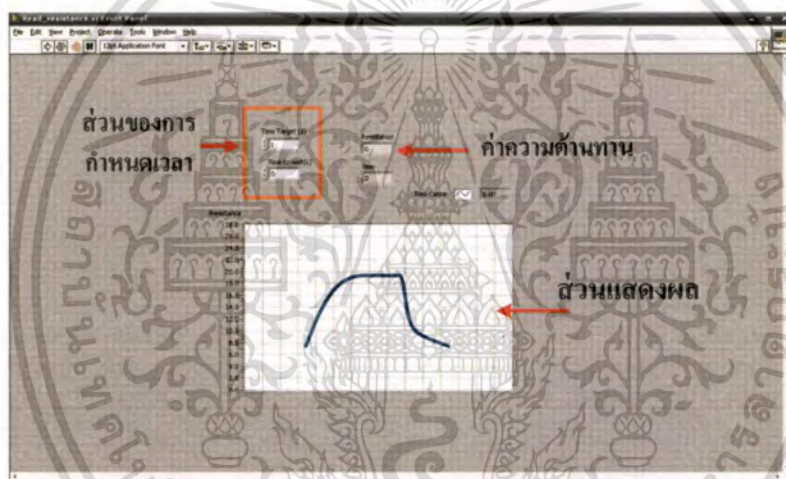
1. กล่องโฟม ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวป้องกัน การรบกวนของอุณหภูมิจากภายนอกที่จะส่งผลต่อการทดลอง ในการทดลองก็จะนำไมโครฮีทเตอร์ที่มีตัวตรวจวัดอุณหภูมิ ใส่ไว้ในกล่อง และพยายามควบคุมให้อุณหภูมิเริ่มต้นมีค่าเท่ากันทุกเงื่อนไขการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. แหล่งจ่ายแรงดัน (Power Supply) จะใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่สามารถปรับค่าของแรงดันได้ตามต้องการ โดยจะเชื่อมต่อกับไมโครฮีตเตอร์

3. มัลติมิเตอร์ จะเชื่อมต่อกับตัวตรวจวัดอุณหภูมิ เพื่อใช้สำหรับการวัดค่าความต้านทานของตัวตรวจวัดอุณหภูมิ และสามารถที่จะเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ตมาตรฐาน (General Purpose Interface Bus: GPIB)

4. คอมพิวเตอร์ จะใช้ร่วมกับโปรแกรม Labview เพื่อที่จะบันทึกค่าของความต้านทานที่อ่านได้จากเครื่องมัลติมิเตอร์ โดยหน้าต่างของโปรแกรมที่สร้างขึ้น จะแสดงดังรูปที่ 4.21 ซึ่งจะสามารถที่จะกำหนดเวลาที่ใช้ในการบันทึกค่าความต้านทานได้ ว่าต้องการบันทึกค่าทุกๆ กี่วินาที และสามารถที่จะกำหนดเวลาสิ้นสุดการทดลองได้ จะมีส่วนแสดงผลซึ่งจะแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับเวลา



รูปที่ 4.21 แสดงหน้าต่างของโปรแกรม Labview ที่ใช้วัดผลทางความร้อนของไมโครฮีตเตอร์

ในการทดลองนั้นจะทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าค่าต่างๆ ให้กับไมโครฮีตเตอร์ ซึ่งการบันทึกข้อมูลก็จะมีสองส่วนคือส่วนแรกจะเป็นการจ่ายแรงดันไฟฟ้าพร้อมกับการบันทึกค่าความต้านทานของตัวตรวจวัดอุณหภูมิ ซึ่งเป็นช่วงของการเพิ่มของอุณหภูมิไปเป็นเวลาค่าหนึ่ง และจะหยุดจ่ายแรงดันไฟฟ้าเพื่อดูพฤติกรรมการลดลงของอุณหภูมิ โดยจะทำการทดลองกับไมโครฮีตเตอร์ทุกรูปแบบเพื่อที่จะได้สมบัติเฉพาะของแต่ละอุปกรณ์

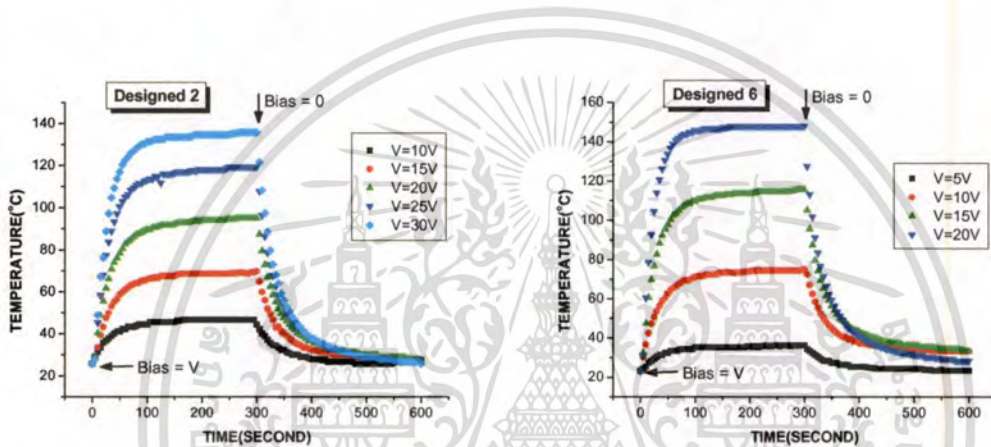
4.3.4 ผลการวัดผลทางความร้อนของไมโครฮีตเตอร์ที่มีตัวตรวจวัดอุณหภูมิ

ในส่วนของการวัดผลทางความร้อนของไมโครฮีตเตอร์นั้น จะแบ่งออกตามเงื่อนไขของอุณหภูมิที่ใช้ในการแอนนิล รวมทั้งผลของไมโครฮีตเตอร์แต่ละรูปแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ซึ่งการแจ้งให้ผู้อื่นทราบเพื่อเผยแพร่ข้อมูลนั้นจะถือว่าผิดกฎหมายและจะถูกลงโทษตามกฎหมายที่เกี่ยวข้อง หากท่านใดต้องการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.4.1 เงื่อนไขที่ไม่ได้ทำการแอนนีสล

1. ค่าคงที่ของเวลาที่ทำให้อุณหภูมิคงที่ที่แรงดันค่าหนึ่ง ในขั้นตอนนี้จะเป็นขั้นตอนแรกที่ใช้สำหรับการตรวจสอบผลทางความร้อนของไมโครฮีตเตอร์ซึ่งจะถูกตรวจสอบด้วยระบบที่กล่าวข้างต้น โดยจะเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันที่จ่ายให้กับไมโครฮีตเตอร์พร้อมกับการวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากไมโครฮีตเตอร์ โดยใช้ตัวตรวจวัดอุณหภูมิชนิดความต้านทานที่ได้ทำการสร้างขึ้นพร้อมกับไมโครฮีตเตอร์ โดยจะทดลองกับไมโครฮีตเตอร์ 2 รูปแบบคือ แบบที่ 2 และ แบบที่ 6 โดยผลการวัดจะแสดงดังรูปที่ 4.22



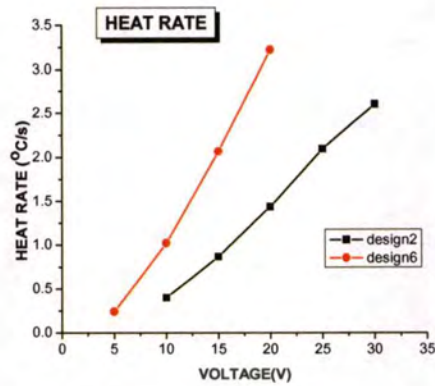
รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของไมโครฮีตเตอร์เงื่อนไขไม่ได้แอนนีสล

จะเห็นได้ว่าเมื่อจ่ายค่าแรงดันให้กับไมโครฮีตเตอร์ที่ค่าต่างๆ อุณหภูมิของไมโครฮีตเตอร์ก็จะเริ่มที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 10 วินาทีแรก และเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 50 วินาที อุณหภูมิของไมโครฮีตเตอร์เริ่มที่จะคงที่ ซึ่งรูปแบบที่ 2 นั้นจะมีค่าความต้านทานมากกว่าแบบที่ 6 ดังนั้นเมื่อจ่ายแรงดันค่าเดียวกันให้กับไมโครฮีตเตอร์ทั้งสองรูปแบบ ไมโครฮีตเตอร์รูปแบบที่ 6 จะให้อุณหภูมิที่สูงกว่า แบบที่ 2 ซึ่งก็จะแสดงให้เห็นได้ว่าแบบที่ 6 จะใช้พลังงานน้อยกว่า และเมื่อหยุดป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับไมโครฮีตเตอร์ก็จะทำให้ได้ลักษณะของการลดลงของอุณหภูมิของแต่ละกรณีดังรูป ซึ่งมีลักษณะที่เป็นแนวโน้มเดียวกันทุกค่าแรงดัน

2. อัตราการทำความร้อน (Heat rate) ในส่วนนี้ก็จะทำการตรวจสอบอัตราการเพิ่มอุณหภูมิของไมโครฮีตเตอร์แต่ละรูปแบบ ซึ่งผลจะแสดงได้ดังรูปที่ 4.23

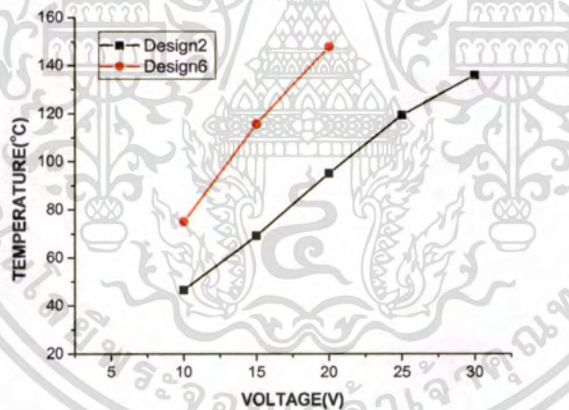
จากผลดังกล่าวทำให้สามารถที่จะทำนายได้ว่าเมื่อจ่ายแรงดันค่าหนึ่งให้กับไมโครฮีตเตอร์ แล้วจะต้องใช้เวลาเท่าใดถึงจะได้อุณหภูมิตามต้องการ ซึ่งจะสะดวกต่อการนำไปใช้งาน เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับไมโครฮีตเตอร์ต่างกัน ค่าของอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิจึงจะต่างกัน โดยถ้าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายมีค่ามากขึ้น ค่าอัตราการทำความร้อนก็จะมากขึ้นตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 แสดงอัตราการเพิ่ม (heating rate) อุณหภูมิของไมโครฮีตเตอร์
เจือไนไมได้แอนนิต แต่ละรูปแบบ

3.สรุปลักษณะเฉพาะเจือไน ผลการตรวจสอบของไมโครฮีตเตอร์แต่ละรูปแบบที่จะนำไปใช้งานนั้น นอกจากจะต้องรู้ค่าคงที่ของเวลา อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ อีกส่วนหนึ่งที่สำคัญก็คือ ค่าอุณหภูมิสูงสุดที่แรงดันค่าหนึ่ง ซึ่งจะแสดงได้ดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 ค่าอุณหภูมิสูงสุดที่แรงดันค่าต่างๆ ของไมโครฮีตเตอร์
เจือไนไมได้แอนนิตแต่ละรูปแบบ

4.3.4.2 เจือไนเมื่อทำการแอนนิตที่อุณหภูมิ 600 °C

1.ค่าคงที่ของเวลาที่ทำให้อุณหภูมิกงที่ที่แรงดันค่าหนึ่ง โดยแต่ละรูปแบบจะแสดงดังรูปที่ 4.25 จะเห็นได้ว่าทุกรูปแบบจะมีลักษณะความสัมพันธ์ที่เป็นลักษณะเดียวกันทุกรูปแบบ ซึ่งรูปแบบที่ 1 จะมีค่าความต้านทานสูงที่สุด และลดลงตามลำดับ

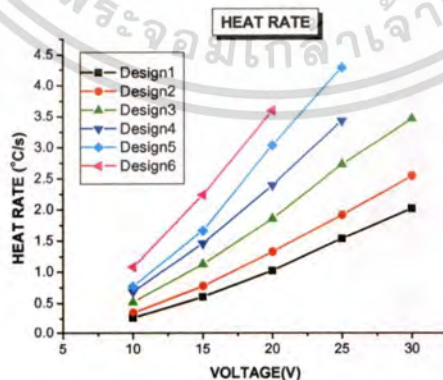
ไมโครฮีทเตอร์ด้วยค่าที่สูงขึ้น จะทำให้ได้ค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ไมโครฮีทเตอร์จะทำได้ที่แรงดันค่าหนึ่งๆ โดยจะเห็นได้ว่าถึงแม้จะเปลี่ยนแปลงรูปแบบของไมโครฮีทเตอร์ แต่แนวโน้มของการตอบสนองยังคงเป็นไปในแนวโน้มเดียวกัน

จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อทำการจ่ายแรงดันค่าหนึ่งให้กับไมโครฮีทเตอร์ ก็จะทำให้ได้อุณหภูมิสูงสุดค่าหนึ่ง โดยการตอบสนองในช่วงเริ่มต้นของการจ่ายแรงดัน อุณหภูมิที่อ่านได้จากตัวตรวจวัดอุณหภูมิมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และจะเริ่มช้าลงเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 30 วินาที ซึ่งก็คือค่าเวลาคงตัวของไมโครฮีทเตอร์ตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นนั่นเอง

จากผลที่ได้จะทำให้มีประโยชน์ต่อการนำไปใช้งาน ยกตัวอย่างเช่น ในการทำการวิจัยเรื่องหนึ่งที่ต้องเกี่ยวกับการควบคุมอุณหภูมิ สมมุติว่าต้องการอุณหภูมิ 70°C ก็สามารที่จะออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิได้ว่า ถ้าจะใช้ไมโครฮีทเตอร์รูปแบบที่ 1 นั้นควรจะทำการจ่ายแรงดันให้กับไมโครฮีทเตอร์เป็นอย่างไรค่า 20 โวลต์ ทำให้ง่ายและสะดวกต่อการที่จะนำไมโครฮีทเตอร์ ไปใช้งานในด้านต่างๆ ต่อไป

2. อัตราการทำความร้อน (Heat rate)

จากผลการทดลองสามารถที่จะทราบว่า จะต้องใช้แรงดันอินพุตค่าใด ที่จะทำให้ได้อุณหภูมิตามต้องการ ซึ่งนับว่าเป็นส่วนสำคัญ แต่อีกส่วนหนึ่งที่สำคัญก็คือค่าของอัตราการทำความร้อน หรืออัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ โดยจะทำการหาค่าเฉลี่ยของอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิในช่วง 30 วินาทีแรก จากรูปที่ 4.26 จะเห็นว่าเมื่อจ่ายแรงดันอินพุตให้กับไมโครฮีทเตอร์ด้วยค่าที่มากขึ้น อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิก็จะเพิ่มสูงตามไปด้วยเช่นเดียวกับกรณีที่กำหนดค่าแรงดันค่าหนึ่งให้กับไมโครฮีทเตอร์ ซึ่งจะให้เห็นได้ว่าไมโครฮีทเตอร์รูปแบบที่มีค่าความต้านทานต่ำจะมีค่าของอัตราการทำความร้อนที่สูงกว่ารูปแบบที่มีค่าความต้านทานสูง

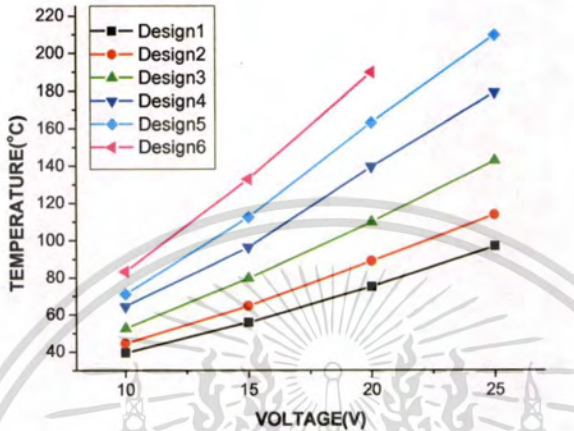


รูปที่ 4.26 แสดงอัตราการเพิ่ม (heating rate) อุณหภูมิของไมโครฮีทเตอร์
เงื่อนไขแอมป์ 600 mA แต่ละรูปแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยประโยชน์ของการที่ทราบค่าอัตราการทำความร้อน ทำให้ในการนำไปใช้งานสามารถที่จะทำนายเวลาตั้งแต่เริ่มจ่ายแรงดันจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการว่าจะใช้เวลาเท่าใด

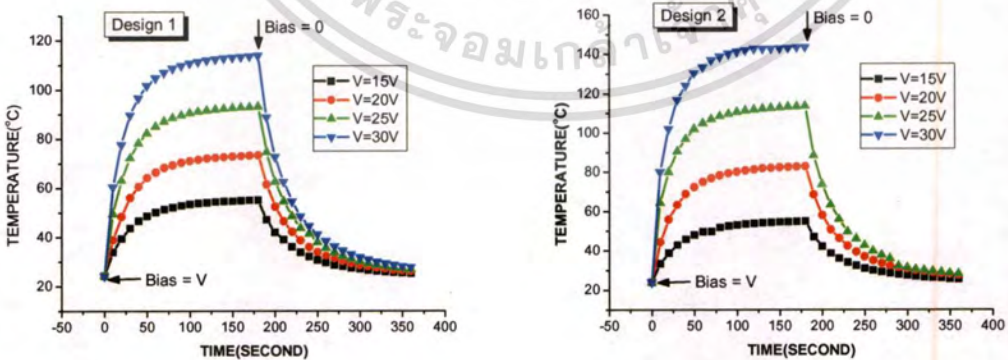
3.สรุปลักษณะเฉพาะเงื่อนไข



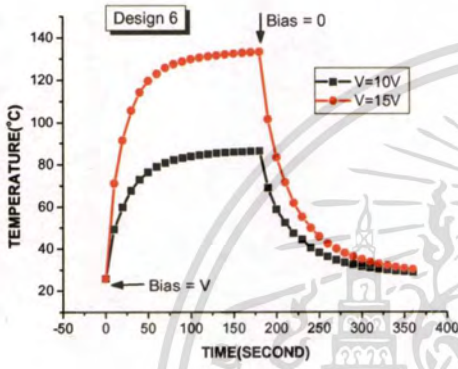
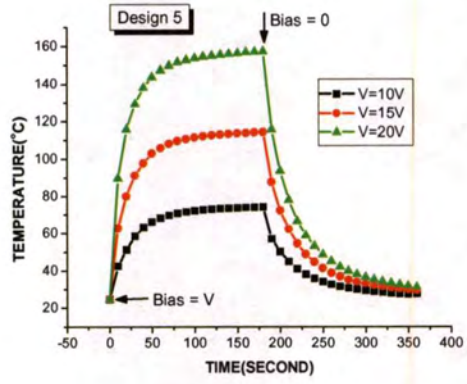
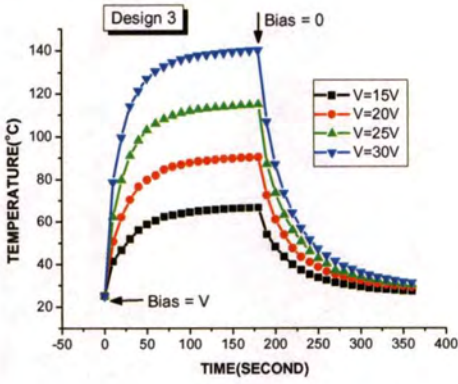
รูปที่ 4.27 ค่าอุณหภูมิสูงสุดที่แรงดันค่าต่างๆ ของไมโครฮีตเตอร์เงื่อนไขแอนนีส 600 °C แต่ละรูปแบบ

4.3.4.3 เงื่อนไขเมื่อทำการแอนนีสที่อุณหภูมิ 900 °C

1.ค่าคงที่ของเวลาที่ทำให้อุณหภูมิกงที่ที่แรงดันค่าหนึ่ง



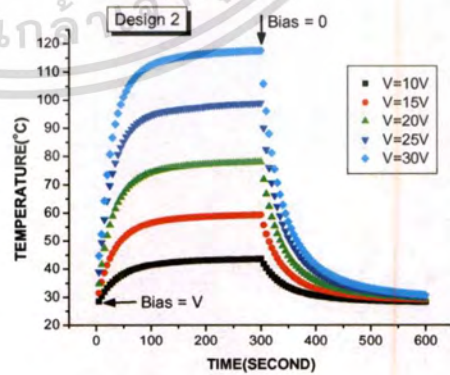
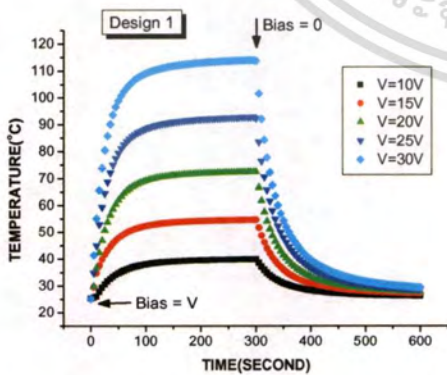
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



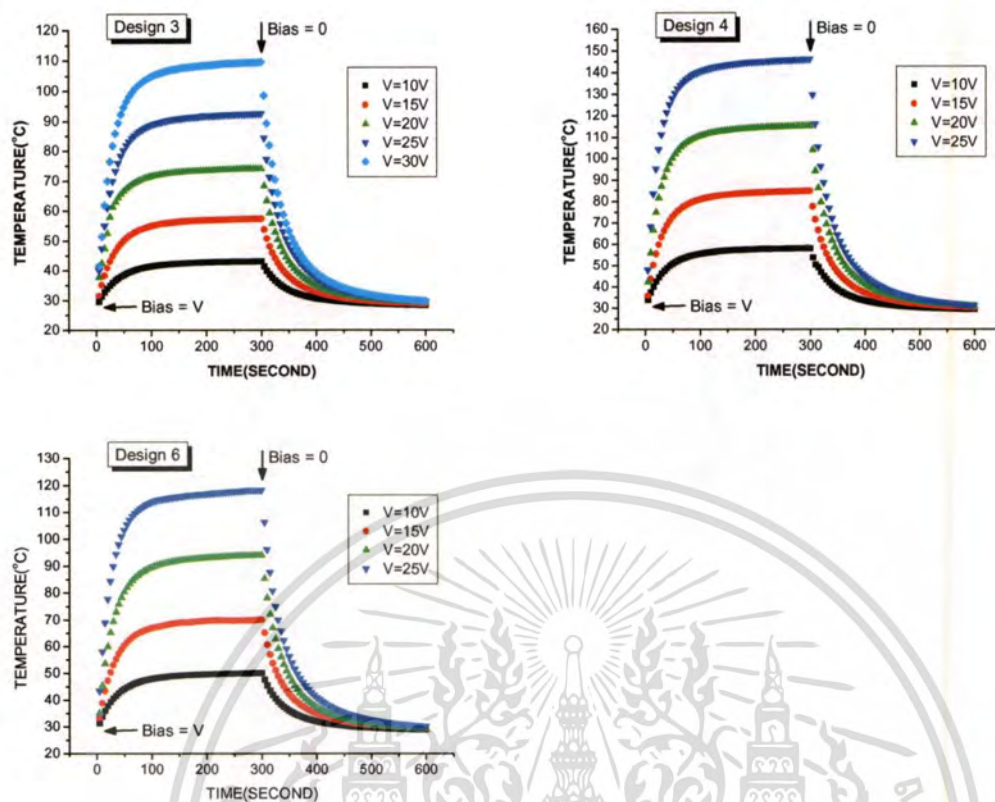
รูปที่ 4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของไมโครฮีตเตอร์
เงื่อนไขแอนเนล 900 °C แต่ละรูปแบบ

4.3.2.4 เงื่อนไขเมื่อทำการแอนเนลที่อุณหภูมิ 1200 °C

1. ค่าคงที่ของเวลาที่ทำให้อุณหภูมิคงที่ที่แรงดันค่าหนึ่ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของไมโครฮีตเตอร์
เงื่อนไขแอนนัล 1200 °C แต่ละรูปแบบ

จากผลการทดลองจะพบว่าผลของการแอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆ จะมีผลต่อตัวตรวจวัด
อุณหภูมิมากกว่า ซึ่งจากการสังเกตในกรณีที่เป็นไมโครฮีตเตอร์ การแอนนัลจะมีผลต่อค่าความ
ต้านทานของไมโครฮีตเตอร์ ดังนั้นผลการตอบสนองทางความร้อนของแต่ละเงื่อนไข ก่อนข้างที่จะ
มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน ซึ่งความสัมพันธ์ก็จะเป็นดังผลที่ได้อธิบายไว้ในเงื่อนไขข้างต้น

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองเกี่ยวกับค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ (Power consumption)

อุณหภูมิ (°C)	กำลังไฟฟ้าที่ใช้ (watt)
55	0.315±0.052
75	0.552±0.073
95	0.847±0.126

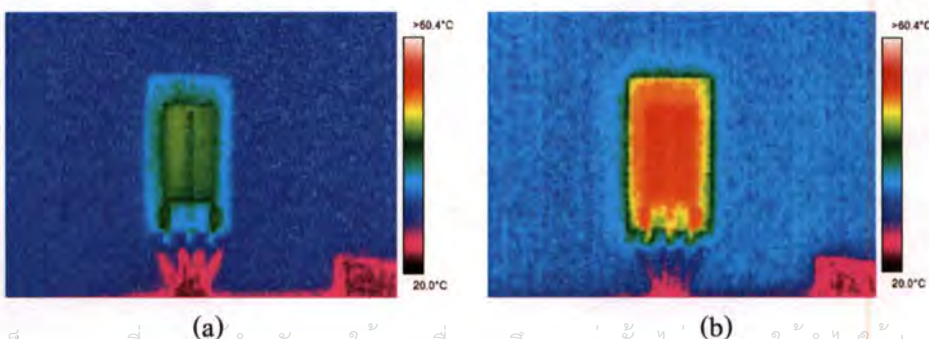
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการออกแบบและสร้างไมโครฮีทเตอร์ที่มีตัวตรวจวัดอุณหภูมิ รวมทั้งการตรวจวัดสมบัติต่างๆ ซึ่งจะทำให้ทราบถึงค่าความต้านทานของไมโครฮีทเตอร์ ค่าแรงดันอินพุตที่จะจ่ายให้กับไมโครฮีทเตอร์ จากค่าดังกล่าวจะทำให้สามารถที่จะคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้สำหรับไมโครฮีทเตอร์เพื่อให้ได้อุณหภูมิตามต้องการดังตารางที่ 4.7 ซึ่งจะได้จากความสัมพันธ์ของ $P=V^2/R$ ซึ่ง P ก็คือค่าของกำลังไฟฟ้านั่นเอง โดยที่อุณหภูมิ 55 °C จะต้องใช้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยประมาณ 0.315±0.052 วัตต์ โดยบริเวณที่เกิดความร้อนจะมีขนาด 1.2x2.5 cm² ซึ่งถ้าคิดเป็นค่ากำลังไฟฟ้าต่อพื้นที่ก็จะประมาณ 0.105 วัตต์/cm² เป็นต้น

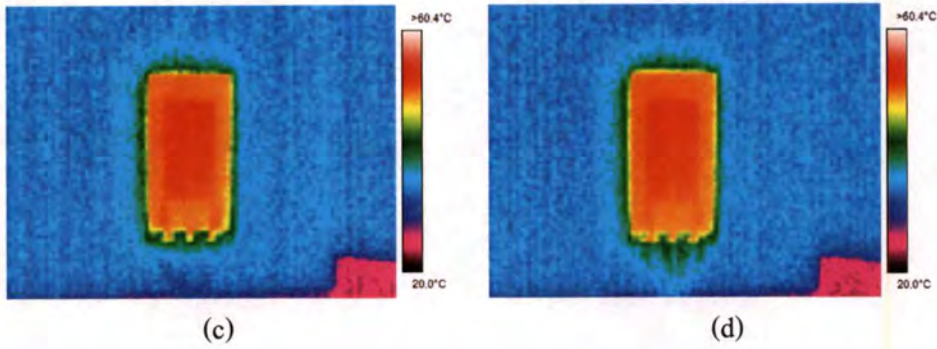
4.4 การวิเคราะห์ผลด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน

เนื่องจากการวิจัยทางการสร้างไมโครฮีทเตอร์หรือทางด้านเซนเซอร์ต่างๆ ควรจะมีการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายผลการสร้าง ก่อนที่จะทำการสร้างจริงแต่จากงานวิจัยนี้ ได้ทำการสร้างโดยที่ไม่ได้ผ่านการสร้างแบบจำลอง จึงทำให้งานวิจัยมีความสมบูรณ์น้อยลง ถึงอย่างไรก็ตามผู้วิจัยได้คำนึงถึงปัญหานี้มาโดยตลอด จึงพยายามที่จะหาวิธีการหรือแนวทางที่จะมาช่วยเพิ่มความเชื่อถือของผลการวิจัย อีกทั้งยังสามารถที่จะบอกถึงความสม่ำเสมอของอุณหภูมิบนชิพที่สร้างขึ้น ได้เป็นอย่างดี ซึ่งวิธีการที่เลือกมาใช้ก็คือการใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน (FLIR Systems Cameras: Thermo Vision A40) ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากหน่วยปฏิบัติการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีโฟโตนิกส์ (PTL)

สำหรับกล้องถ่ายภาพความร้อน เป็นการวัดอุณหภูมิในอีกระดับหนึ่งแทนที่จะใช้ตัวเลขบอกค่าอุณหภูมิ โดยสามารถบันทึกภาพถ่ายที่แสดงความแตกต่างของอุณหภูมิที่ โดยจะเป็นเทคนิคการสร้างภาพจากแสงอินฟราเรดที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า ที่มีการแผ่กระจายออกจากวัตถุโดยการใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนสามารถทำการสแกนพื้นผิวของวัตถุ โดยที่ไม่มีการทำลายพื้นผิวของวัตถุ กล้องถ่ายภาพความร้อนจะมองไม่เห็นภาพจริง แต่จะจับพลังงานรังสีอินฟราเรด (IR) ที่ถ่ายทอดออกมาจากวัตถุ ไปสู่สิ่งแวดล้อมและสร้างภาพแถบสี ที่วัตถุที่ร้อนกว่าจะแสดงสีสว่าง และวัตถุที่เย็นกว่าจะแสดงสีมืดกว่า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30 แสดงภาพถ่ายทางความร้อนของไมโครฮีตเตอร์ที่เวลาต่างๆ (a) ที่เวลา 0 วินาที (b) ที่เวลา 5 วินาที (c) ที่เวลา 10 วินาที และ (d) ที่เวลา 15 วินาที

จากผลที่ได้จากการถ่ายด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนที่เวลาต่างๆ เมื่อทำการจ่ายแรงดันอินพุต 15 โวลต์ ให้กับไมโครฮีตเตอร์ ซึ่งพบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นอุณหภูมิก็สูงขึ้นตาม จะเป็นการยืนยันผลของการวัดที่ได้จากตัวตรวจวัดอุณหภูมิ แต่สิ่งที่สังเกตได้ชัดเจนอีกอย่างคือความสม่ำเสมอของความร้อนที่มีการกระจายบนชิพขนาด 12x25 มิลลิเมตร ก่อนข้างที่จะมีความสม่ำเสมอมาก ซึ่งก็จะเป็นข้อดีของการใช้ฐานรองรับที่เป็นซิลิคอน

4.5 การนำไปใช้งานกับระบบควบคุมอุณหภูมิ

สำหรับการนำไปใช้งานกับระบบควบคุมอุณหภูมิก็จะประกอบด้วยส่วนหลัก คือ ไมโครฮีตเตอร์ที่มีตัวตรวจวัดอุณหภูมิ ที่ผ่านการตรวจสอบและวิเคราะห์สมบัติเรียบร้อยแล้ว และระบบควบคุมอุณหภูมิที่สร้างขึ้นและพัฒนาโดย ผศ. โกศล ทรายู ซึ่งรายละเอียดของการทำงานจะขอกล่าวรายละเอียดในภาคผนวก



รูปที่ 4.31 ผลการนำไมโครฮีตเตอร์ที่มีตัวตรวจวัดอุณหภูมิมาใช้งาน

ร่วมกับระบบควบคุมอุณหภูมิที่สร้างขึ้น
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้จะทำการออกแบบและสร้างไมโครฮีทเตอร์ร่วมกับตัวตรวจวัดอุณหภูมิด้วยวัสดุเพลทินัมสำหรับชีพเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอ ซึ่งในการดำเนินงานวิจัยก็ต้องทำการศึกษาค้นคว้าและทำการวิจัยอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะขอสรุปเป็นแต่ละหัวข้อที่สำคัญดังต่อไปนี้

1. การออกแบบ จากการที่ได้ทำการศึกษางานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับไมโครฮีทเตอร์ ตัวตรวจวัดอุณหภูมิ และชีพสำหรับเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอ ดังนั้นในการออกแบบของงานวิจัยนี้ จึงพยายามที่จะนำหลักการของแต่ละส่วนมารวมกันให้อยู่ภายในอุปกรณ์ที่เป็นชิ้นเดียวกัน ซึ่งได้ออกแบบไมโครฮีทเตอร์ให้มีตัววัดอุณหภูมิอยู่ด้วย เพื่อให้สามารถที่จะทราบอุณหภูมิที่เกิดจากไมโครฮีทเตอร์ไปพร้อมกัน และจากความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้ทำให้สามารถที่จะออกแบบตัวทำความร้อนให้มีขนาดและอยู่บริเวณตำแหน่งตามต้องการของอุปกรณ์ Lab on chip ได้

2. การสร้าง จากกระบวนการที่ใช้ในการสร้างไมโครฮีทเตอร์ที่มีตัวตรวจวัดอุณหภูมิสำหรับชีพเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอ นั้น ใช้เทคโนโลยีพื้นฐานของ CMOS ซึ่งทำให้สามารถที่พัฒนาเพื่อจะออกสู่อุตสาหกรรมได้ สำหรับไมโครฮีทเตอร์และตัวตรวจวัดอุณหภูมินั้นจะสร้างจากวัสดุเพลทินัม จึงทำให้ทนต่อสารเคมี ไม่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน มีความสามารถในการทำซ้ำ

3. เมื่อทำการสร้างไมโครฮีทเตอร์และตัวตรวจวัดอุณหภูมิเสร็จแล้วก็จะทำการตรวจสอบสมบัติด้านต่างๆ เช่น ทางด้านกายภาพด้วยเครื่อง FE-SEM, AFM, EDS ซึ่งจะพบว่าการแอนนัลที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่จะนำไปพัฒนาเพื่อใช้เป็นไมโครฮีทเตอร์ที่มีตัวตรวจวัดอุณหภูมิสำหรับชีพเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอ และจากการตรวจสอบจะทำให้ได้ค่าเฉพาะของอุปกรณ์ สำหรับตัวตรวจวัดอุณหภูมิก็คจะทำให้ทราบค่า sensitivity และสมการที่จะใช้แปลงค่าความต้านทานไปเป็นอุณหภูมิ และค่าความเสถียร ส่วนไมโครฮีทเตอร์ก็จะทำให้ทราบค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ อัตราการทำความร้อน เป็นต้น

4. ในการนำไมโครฮีทเตอร์และตัวตรวจวัดอุณหภูมิไปใช้งานนั้นก็จะต้องทำการ Packaging ให้และมีข้อมูลเฉพาะของอุปกรณ์แต่ละตัวเพื่อให้สะดวกต่อการนำไปใช้งาน ซึ่งก็จะนำไปใช้งานร่วมกับระบบควบคุมอุณหภูมิแบบพีไอดี โดยใช้เวลาน้อยกว่า 3 วินาทีในการเพิ่มอุณหภูมิจาก 55°C ไปเป็น 72°C ค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ และมีความสม่ำเสมอของอุณหภูมิเป็นอย่างดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อเสนอแนะของงานวิจัย

จากการดำเนินงานวิจัย ทำให้สามารถที่จะออกแบบและสร้างไมโครฮีทเตอร์ที่มีตัวตรวจวัดอุณหภูมิด้วยวัสดุที่เป็นโลหะแพลทินัมสำหรับชีพเพิ่มจำนวนคีเอ็นเอ ซึ่งจากความรู้และประสบการณ์ที่ได้รับจากการดำเนินงานวิจัยทำให้สามารถที่จะนำมาพัฒนางานวิจัยให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น โดยจะเสนอแนะในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยหรือการพัฒนางานวิจัย ดังหัวข้อต่อไปนี้

1. ด้านการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างไมโครฮีทเตอร์ การสร้างตัวตรวจวัดอุณหภูมิ วัสดุที่นิยมใช้คือ โลหะแพลทินัมซึ่งเป็นวัสดุที่เหมาะสม แต่เนื่องจากแพลทินัมยังมีราคาที่สูง ดังนั้นแนวทางที่จะพัฒนางานวิจัยนี้ควรที่จะศึกษาถึงวัสดุชนิดอื่นๆ ที่สามารถจะนำมาใช้ทำเป็นไมโครฮีทเตอร์และตัวตรวจวัดอุณหภูมิเพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน

2. ด้านการออกแบบสำหรับงานวิจัยนี้การออกแบบไมโครฮีทเตอร์และตัวตรวจวัดอุณหภูมินั้นจะเห็นได้ว่าบริเวณที่ใช้ในการต่อขั้วไฟฟ้ากับบริเวณที่ต้องการให้เกิดความร้อนอยู่ใกล้กันมาก ดังนั้นในการออกแบบควรที่จะให้บริเวณที่ใช้ในการต่อขั้วไฟฟ้ากับบริเวณที่ต้องการให้เกิดความร้อนมีระยะห่างกัน เพื่อป้องกันผลของความร้อนที่เกิดขึ้นซึ่งจะส่งผลกระทบต่อค่าความต้านทานบริเวณผิวสัมผัสของขั้วไฟฟ้าและสิ่งที่สำคัญในการเลือกฐานรองรับ ค่าการนำความร้อนเพราะจะมีผลต่อการออกแบบลวดลายของไมโครฮีทเตอร์

3. ด้านการสร้างอุปกรณ์ ผลจากงานวิจัยจะเห็นได้ว่าผลของฟิล์มแพลทินัมที่ความหนา 200 nm ซึ่งสร้างด้วยระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศ และทำการแอนนิลฟิล์มแพลทินัมด้วยอุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงในบรรยากาศของไนโตรเจน พบว่าเกิดรูบนพื้นผิวของฟิล์ม และมีฟิล์มบางตำแหน่งแยกออกจากกัน ซึ่งจากการศึกษาและปรึกษากับผู้เชี่ยวชาญได้เสนอแนะแนวทางแก้ไขโดยอาจจะทดลองลดเวลาที่ใช้ในการแอนนิล เพื่อป้องกันการแตกและแยกของฟิล์ม หรือนำฟิล์มที่เกิดขึ้นไปประเหยด้วยโลหะแพลทินัมอีกครั้งหนึ่งด้วยความหนาน้อยๆ เพื่อช่วยเติมเต็มบริเวณรูที่เกิดขึ้น โดยงานวิจัยนี้สร้างฟิล์มโดยใช้ระบบระเหยสารซึ่งจะเป็นข้อจำกัดทางเครื่องมือในการสร้างฟิล์มแพลทินัม ดังนั้นในการพัฒนาอาจจะเปลี่ยนเครื่องมือหรือระบบที่ใช้ในการสร้างฟิล์มแบบอื่น เช่น ระบบสปัตเตอริง เป็นต้น

4. สำหรับระบบควบคุมอุณหภูมินั้นควรที่จะมีการพัฒนาต่อในส่วนในช่วงที่ต้องการให้อุณหภูมิลดลงและสามารถที่จะนำไปใช้งานได้สะดวกและง่าย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Zhang,C.S., Xu,J.L., Ma,W.L. and Zheng,W.L. (2006) PCR microfluidic devices for DNA amplification. *Biotechnol. Adv.*, 24: 243–284.
- [2] Chunsun Zhang and Da Xing. (2007) Miniaturized PCR chips for nucleic acid amplification and analysis: latest advances and future trends. *Nucleic Acids Research*, Vol. 35, No. 13: 4223–4237
- [3] Roper,M.G., Easley,C.J. and Landers,J.P. (2005) Advances in polymerase chain reaction on microfluidic chips. *Anal. Chem.*, 77: 3887–3894.
- [4] Auroux,P.-A., Koc,Y., deMello,A., Manz,A. and Day,P.J.R. (2004) Miniaturized nucleic acid analysis. *Lab Chip*, 4: 534–546.
- [5] Gnanappa AK, Cathy K, Slattery O, Sheehan M. Thermal performance analysis of a silicon microreactor for rapid DNA analysis. (2006), *The Tenth Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronics Systems (ITHERM'06)*: San Diego, CA, USA: 1330–1335.
- [6] Hataoka Y, Zhang LH, Yukimasa T, Baba Y. Rapid microvolume PCR of DNA confirmed by microchip electrophoresis. *Anal. Sci.* (2005) 21: 53–56.
- [7] Matsubara Y, Kerman K, Kobayashi M, Yamanura S, Morita Y, Tamiya E. Microchamber array based DNA quantification and specific sequence detection from a single copy via PCR in nanoliter volumes 20. *Biosens. Bioelectron* (2005): 1482–1490.
- [8] Noh J, Sung SW, Jeon MK, Kim SH, Lee LP, Woo SI. In situ thermal diagnosis of the micro-PCR system using liquid crystals, *Sens. Actuators A Phys* (2005) 122: 196–202.
- [9] Yan WP, Du LQ, Wang J, Ma LZ, Zhu JB. Simulation and experimental study of PCR chip based on silicon, *Sens. Actuators B Chem* (2005) 108: 695–699.
- [10]Gong H, Ramalingam N, Chen L, Che J, Wang Q, Wang Y, Yang X, Yap PHE, Neo CH. Microfluidic handling of PCR solution and DNA amplification on a reaction chamber array biochip. *Biomed. Microdevices* (2006) 8: 167–176.
- [11]Li SF, Fozdar DY, Ali MF, Li H, Shao DB, Vykoukal DM, Vykoukal J, Floriano PN, Olsen M, et al. A continuous-flow polymerase chain reaction microchip with regional velocity control, *J. Microelectromech. Syst* (2006) 15: 223–236.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [12]Liu CN, Toriello NM, Mathies RA. Multichannel PCR-CE microdevice for genetic analysis, *Anal Chem* (2006) 78: 5474–5479
- [13]Hsieh TM, Luo CH, Lee GB, Liao CS, Huang FC. A micromachined low-power-consumption portable PCR system, *J. Med. Biol. Eng* (2006) 26: 43–49.
- [14]Hu GQ, Xiang Q, Fu R, Xu B, Venditti R, Li DQ. Electrokinetically controlled real-time polymerase chain reaction in microchannel using Joule heating effect, *Anal. Chim. Acta* (2006) 557: 146–151
- [15]Jia XY, Niu ZQ, Chen WY, Zhang WP, Polydimethylsiloxane (PDMS)-based spiral channel PCR chip, *Electron. Lett* (2005) 41: 890–891
- [16]Kim JA, Lee JY, Seong S, Cha SH, Lee SH, Kim JJ, Park TH. Fabrication and characterization of a PDMS-glass hybrid continuous-flow PCR chip. *Biochem. Eng. J* (2006) 29: 91–97
- [17]Lien KY, Lee WC, Lei HY, Lee GB. Integrated reverse transcription polymerase chain reaction systems for virus detection. *Biosens. Bioelectron* (2007) 22: 1739–1748
- [18]Niu ZQ, Chen WY, Shao SY, Jia XY, Zhang WP. DNA amplification on a PDMS-glass hybrid microchip. *J. Micromech. Microeng* (2006) 16: 425–433
- [19]Xiang Q, Xu B, Fu R, Li D. Real time PCR on disposable PDMS chip with a miniaturized thermal cycler. *Biomed. Microdevices* (2005) 7: 273–279
- [20]Chen ZY, Wang J, Qian SZ, Bau HH. Thermally-actuated, phase change flow control for microfluidic systems. *Lab Chip* (2005) 5: 1277–1285
- [21]Wang H, Chen JF, Zhu L, Shadpour H, Hupert ML, Soper SA. Continuous flow thermal cycler microchip for DNA cycle sequencing. *Anal. Chem* (2006) 78: 6223–6231
- [22]Yao LY, Liu BA, Chen T, Liu SB, Zuo TC. Micro flow-through PCR in a PMMA chip fabricated by KrF excimer laser. *Biomed. Microdevices* (2005) 7: 253–257
- [23]Tsai NC, Sue CY. SU-8 based continuous-flow RT-PCR bio-chips under high-precision temperature control. *Biosens. Bioelectron* (2006) 22: 313–317

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [24]Northrup MA, Ching MT, White RM, Watson RT. DNA amplification in a microfabricated reaction chamber. (1993) Proceedings of the 7th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers '93), 7–10 June: Yokohama, Japan: 924–926.
- [25]Yu HM, Chien CH. Miniaturized PCR-chip for DNA amplification with an external peristaltic pump. *J. Mech. Med. Biol* (2005) 5:81–87
- [26]Shen KY, Chen XF, Guo M, Cheng J. A microchip-based PCR device using flexible printed circuit technology. *Sens. Actuators B Chem* (2005) 105: 251–258
- [27]Kopp MU, de Mello AJ, Manz A. Chemical amplification: continuous-flow PCR on a chip. *Science* (1998) 280: 1046–1048
- [28]Zhao Y, Zhang X. A novel pressure indicator for continuous flow PCR chip using micro molded PDMS pillar arrays. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc* (2005) 845:AA5.10.1–AA5.10.6.
- [29]Tsai NC, Sue CY. SU-8 based continuous-flow RT-PCR bio-chips under high-precision temperature control. *Biosens. Bioelectron* (2006) 22: 313–317
- [30]Zhang CS, Xu JL, Wang JQ, Wang HP. Continuous-flow polymerase chain reaction microfluidics by using spiral capillary channel embedded on copper. *Anal. Lett* (2007) 40: 497–511
- [31]Wang W, Li ZX, Guo ZY. Numerical simulation of micro flow-through PCR chip. *Microscale Therm. Eng* (2005) 9: 281–293
- [32]M. Bu, T. Melvin, G. Ensell, J.S. Wilkinson and A.G.R. Evans, Design and theoretical evaluation of a novel microfluidic device to be used for PCR, *J Micromech Microeng* 13 (2003): S125–S130
- [33]D.S. Lee, S.H. Park, H. Yang, K.H. Chung, T.H. Yoon and S.J. Kim et al., Bulk-micromachined submicroliter-volume PCR chip with very rapid thermal response and low power consumption, *Lab Chip* 4 (2004): 401–407
- [34]C.G.J. Schabmueller, A.G.R. Evans, A. Brunnschweiler, G.J. Ensell, D.L. Leslie and M.A. Lee, Design, fabrication and packaging of closed chamber PCR-chips for DNA amplification, *Proc SPIE* 4019 (2000): 362–369

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

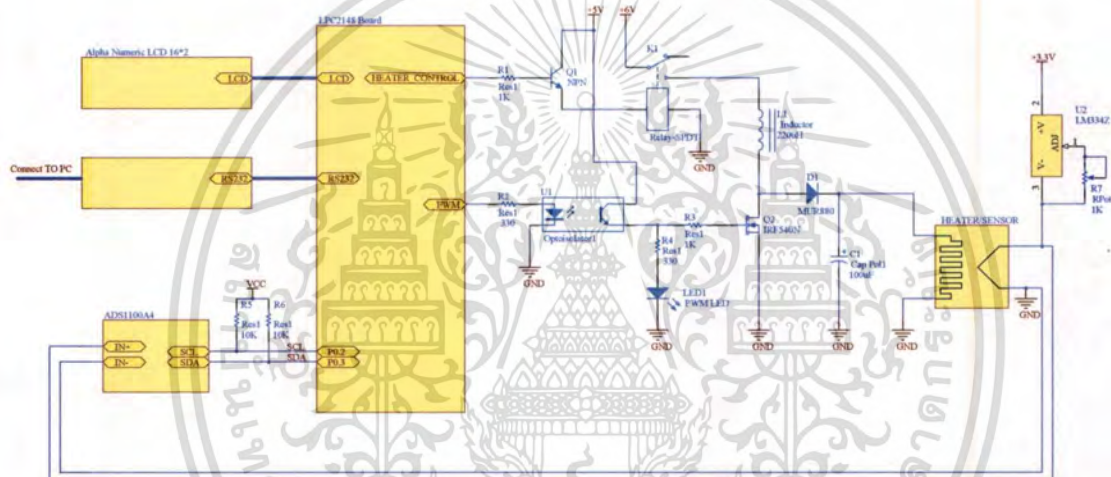
เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [35]D.S. Yoon, Y.S. Lee, Y. Lee, H.J. Cho, S.W. Sung and K.W. Oh et al., Precise temperature control and rapid thermal cycling in a micromachined DNA polymerase chain reaction chip, *J Micromech Microeng* 12 (2002), pp. 813–823
- [36]Z. Zhao, Z. Cui, D. Cui and S. Xia, Monolithically integrated PCR biochip for DNA amplification, *Sens Actuators A Phys* 108 (2003), pp. 162–167.
- [37]I. Rodriguez, M. Lesaichere, Y. Tie, Q. Zou, C. Yu and J. Singh et al., Practical integration of polymerase chain reaction amplification and electrophoretic analysis in microfluidic devices for genetic analysis, *Electrophoresis* 24 (2003), pp. 172–178.
- [38]Chiyang Yu, Wenshan Liang, Iching Kuan, Chehung Wei, Weiguo Gu, Fabrication and characterization of a flow-through PCR device with integrated chromium resistive heaters, *Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineers* 38 (2007): 333–339
- [39]K. Sun, A. Yamaguchi, Y. Ishida, S. Matsuo and H. Misawa, A heater-integrated transparent microchannel chip for continuous-flow PCR, *Sens Actuators B Chem* 84 (2002), pp. 283–289
- [40]T.M.H. Lee, M.C. Carles and I.M. Hsing, Microfabricated PCR-electrochemical device for simultaneous DNA amplification and detection, *Lab Chip* 3 (2003), pp. 100–105
- [41]Weinberg, F.J., 1986, *Advance Combustion Method*, London, Academic Press, pp. 183-236.
- [42]Gwiy-SangChung, Chael-HanKim, RTD characteristicsformicro-thermalsensors, *MicroelectronicsJournal* 39 (2008): 1560–1563.
- [43]Smithells. *Metals Reference Book*. 6th. Edn.
- [44]M. Sreemany, S. Sen. / *Applied Surface Science* 253 (2006): 2739-2746
- [45]Y. Mo, Y. Okawa, M. Tajima, T. Nakai, N.Yoshiike and K. Natukawa, *Sens. Actuators, B, Chem.* 79 (2001), p. 175
- [46]R.M. Tiggelaar et al. / *Sensors and Actuators A* 152 (2009): 39–47
- [47]S.L. Firebaugh, K.F. Jensen and M.A.Schmidt, *J. Microelectromech. Syst.* 7 (1998),pp. 128.
- [48]A. Ehrlich, U. Weiß, W. Hoyer and T.Gebner, *Thin Solid Films* 300 (1997), pp. 122
- [49]Fluke Hart Scientific, 7103 Micro-Bath User's Guide

ภาคผนวก ก

ระบบควบคุมอุณหภูมิ

ระบบควบคุมอุณหภูมิสำหรับการทำพีซีอาร์ถือเป็นส่วนสำคัญอีกส่วนหนึ่งที่จะทำให้อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอด้วยเทคนิคพีซีอาร์เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ โดยเทคนิคที่เลือกมาใช้สำหรับการควบคุมอุณหภูมิจะใช้เทคนิคการควบคุมแบบพีไอดี โดยจะมีไมโครซีทเตอร์เป็นตัวทำความร้อน และมีตัวตรวจวัดอุณหภูมิชนิดความต้านทาน (RTD) สำหรับตรวจวัดอุณหภูมิ โดยรายละเอียดในแต่ละส่วนจะเป็นไปตามนี้



1. LPC2148 เป็นบอร์ดทดลอง ARM ของบริษัท อีทีที จำกัด บรรจุโปรแกรมที่ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของ hardware ทั้งหมดคือ
 - วัดอุณหภูมิ โดยการอ่านค่าจาก ADC เมอร์ ADS1100A4 (ผ่านบัสแบบ I²C)
 - ควบคุมระดับแรงดันที่จ่ายให้แก่ heater โดยใช้ซอฟต์แวร์ PID controller ร่วมกับ PWM ภายใน CPU
2. มอสเฟตกำลัง Q2 ทำหน้าที่เป็นวงจรยกระดับแรงดันกระแสตรง (boost converter) โดยทำงานร่วมกับ L1, D1 และ C1
3. ทรานซิสเตอร์ Q1 ทำหน้าที่ควบคุมการเปิด/ปิด การจ่ายกระแสไฟไปยัง heater เนื่องจากธรรมชาติของวงจร boost converter จะมีแรงดันเริ่มต้นที่ VS ในที่นี้คือ 6 โวลต์ จึงต้องใช้ Q1 ตัดวงจรในกรณีที่ไม่ต้องการจ่ายแรงดันให้ Heater
4. Optoisolator U1 ทำหน้าที่แยกระบบไฟฟ้าแรงดันสูงและไฟเลี้ยง CPU ออกจากกัน เพื่อป้องกันการเสียหายของ CPU ที่อาจเกิดจากวงจร boost converter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ไอซี LM334Z (U2) ทำหน้าที่จ่ายกระแสคงที่ 1 mA เพื่อแปลงกระแสที่ไหลผ่าน temperature sensor จากรูปกระแสให้อยู่ในรูปของแรงดัน

วงจรในภาพนี้จะทำหน้าที่เป็น PID controller เพียงอย่างเดียว ในเครื่องต้นแบบรุ่นปัจจุบัน การตั้งค่าอุณหภูมิในแต่ละ cycle จะทำมาจาก โปรแกรมบนเครื่อง PC

ในเครื่องต้นแบบรุ่นนี้ โปรแกรมบน PC จะอ่านค่าอุณหภูมิจากเครื่องต้นแบบผ่านพอร์ต RS232 จากนั้นจึงทำการคำนวณฟังก์ชัน PID แล้วส่งข้อมูลมาควบคุมวงจรในรูปแบบของ Duty cycle ที่เหมาะสม ในอัตรา 2 ครั้งต่อวินาที

โดยโปรแกรมที่ใช้กับวงจรควบคุมการทำงานจะพัฒนาโดย ผศโกศล ตราขุ. ซึ่งได้ช่วยแนะนำ รวมถึงข้อเสนอแนะเกี่ยวกับระบบควบคุมอุณหภูมิ



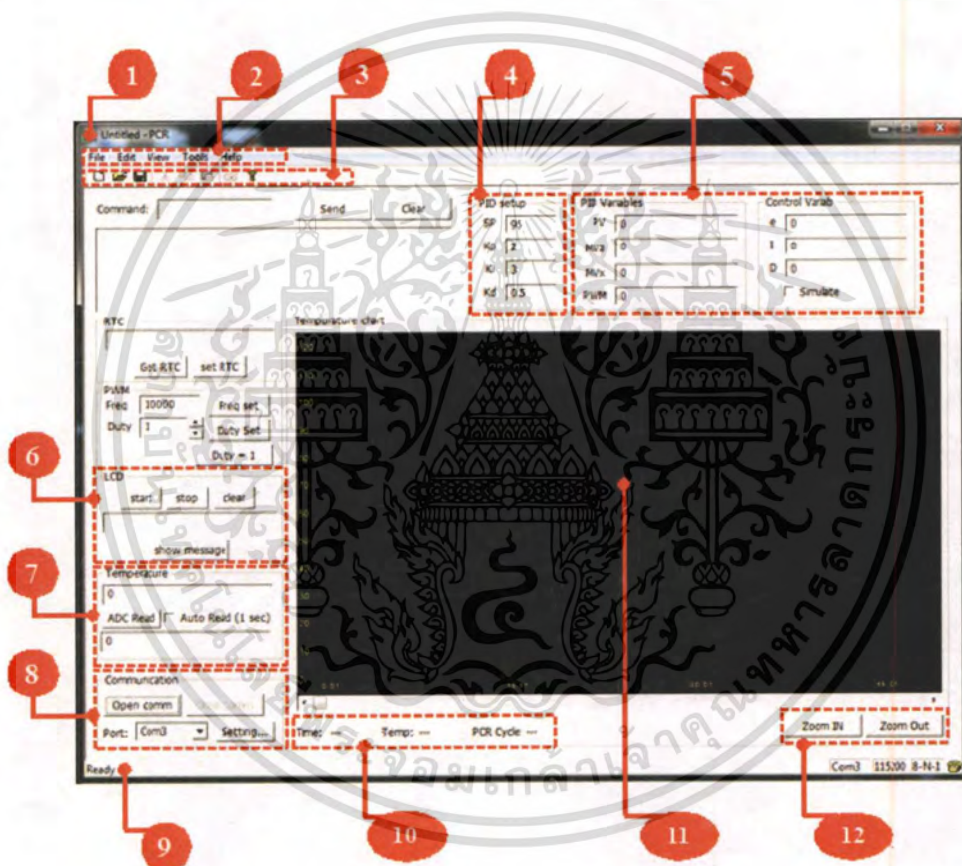
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

โปรแกรมสำหรับระบบควบคุมอุณหภูมิ

1. ส่วนประกอบของโปรแกรม

เมื่อเปิดใช้งาน โปรแกรมควบคุมอุณหภูมิขึ้นมาแล้ว คุณจะพบกับ โปรแกรมที่มีส่วนประกอบดังนี้



1. แถบหัวเรื่อง (Title bar) แสดงชื่อโปรแกรมและชื่อไฟล์งาน
2. เมนู (Menu) เป็นที่รวบรวมคำสั่งทั้งหมดสำหรับสั่งให้โปรแกรมทำงาน
3. แถบเครื่องมือ (Toolbar) เป็นแถบเครื่องมือที่เป็นลักษณะทางลัด ซึ่งจะเป็นคำสั่งที่ถูกเรียกใช้งานบ่อย
4. ช่องปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID setup) จะเป็นช่องที่แสดงค่าของอุณหภูมิที่ตั้งไว้ รวมถึงพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการควบคุม
5. ส่วนแสดงผลการควบคุมอุณหภูมิ รวมทั้งแสดงผลของพารามิเตอร์แต่ละค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ส่วนของคำสั่งที่จะทำการแสดงผลบนจอ แอลซีดี (LCD)
7. ส่วนการแสดงผลค่าของอุณหภูมิที่อ่านได้ และค่าที่ได้จาก ADC
8. ส่วนของการเลือกช่องทางสำหรับการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์
9. แถบแสดงสถานะของโปรแกรมพร้อมใช้งาน
10. ส่วนของการแสดงเวลา อุณหภูมิที่ตั้งไว้ รวบรวมถึงจำนวนรอบที่กำลังดำเนินการ
11. เป็นหน้าจอที่จะแสดงกราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่ได้จากการควบคุมกับเวลา
12. เป็นส่วนที่ใช้สำหรับการ ย่อ-ขยาย กราฟในหน้าจอข้อที่ 11

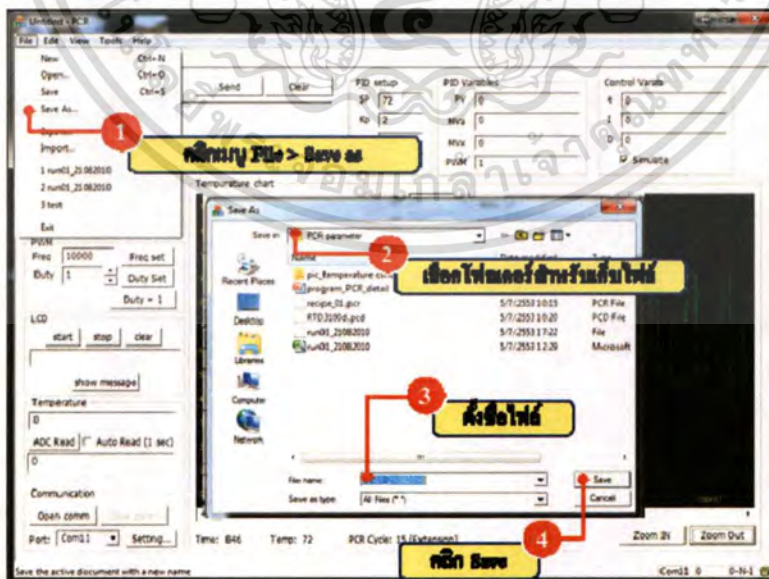
โดยรายละเอียดของการใช้งานในแต่ละส่วนจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

2. การบันทึกและการนำข้อมูลออก (Save & Export)

เมื่อเราทำการทดลอง เสร็จเรียบร้อยแล้วนั้น เราก็ควรจะทำกรบันทึกข้อมูลที่ได้จากการทดลอง กราฟของอุณหภูมิ หรือแม้กระทั่งการนำข้อมูลไปเพื่อใช้ในกราฟวิเคราะห์ผลการทดลอง ซึ่งนับว่าจะเป็นส่วนที่สำคัญสำหรับการทดลอง

2.1 การบันทึกข้อมูลลงเครื่องคอมพิวเตอร์ (Save)

เมื่อต้องการจะเก็บข้อมูลลงเครื่องให้ทำตามขั้นตอนดังนี้



1. คลิกเมนู เลือก File > Save As... เพื่อทำการบันทึกข้อมูล ซึ่งจะใช้กับกรณีทำการบันทึกข้อมูลเป็นครั้งแรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

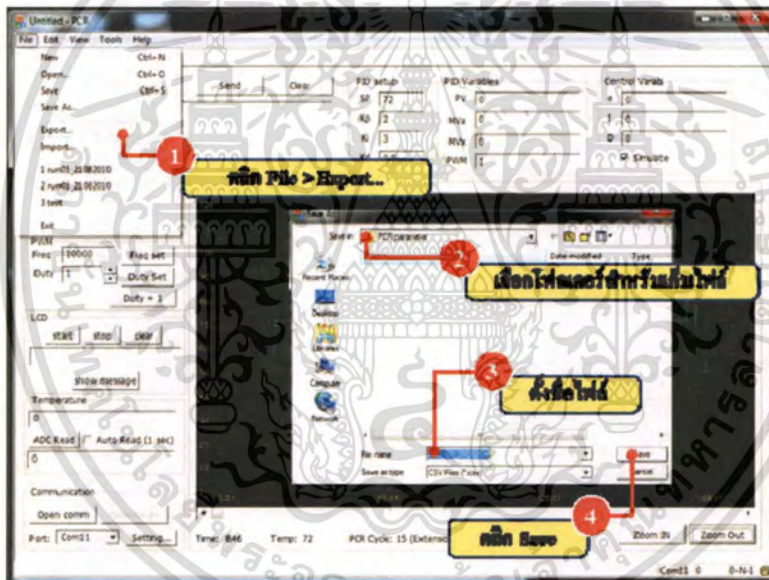
3. ตั้งชื่อไฟล์

4. คลิก Save เพื่อบันทึกข้อมูล

ดังนั้นในการใช้งานครั้งต่อไปเราสามารถที่จะเปิดไฟล์ที่บันทึกไว้ มาวิเคราะห์ผลการทดลอง หรือทำการทดลองซ้ำ ก็จะทำให้ได้เงื่อนไขเหมือนเดิม

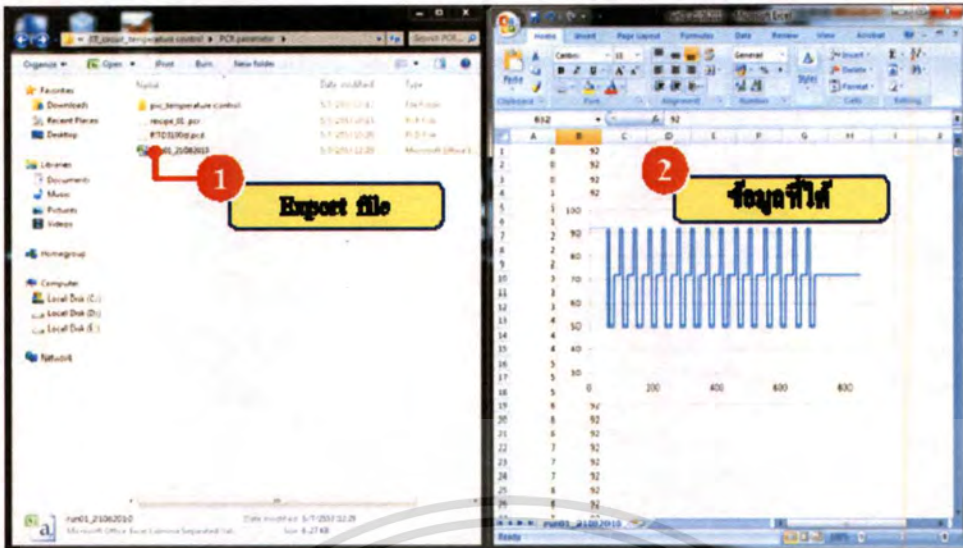
2.2 การนำข้อมูลออกจากโปรแกรม (Export)

หลังจากที่ทำการบันทึกรูปภาพ และเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองแล้ว ขั้นตอนนี้จะเป็นการนำข้อมูลดิบ หรือข้อมูลเชิงตัวเลข เพื่อนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์ผลการทดลองที่จำเพาะยิ่งขึ้น โดยตัวโปรแกรมสามารถที่จะนำข้อมูลออก ในนามสกุล .csv ซึ่งจะสามารถนำไปใช้กับโปรแกรม Excel, Origin เป็นต้น สำหรับการนำข้อมูลออกจะทำได้ดังนี้



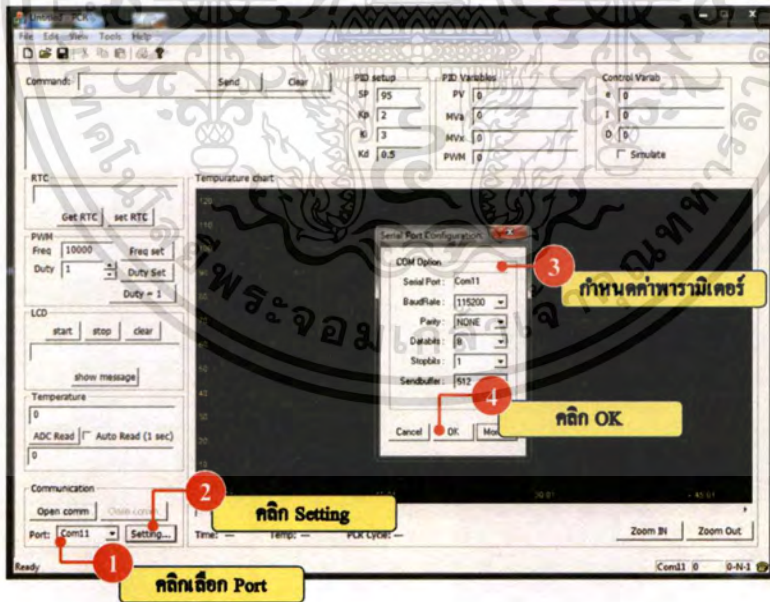
1. คลิกเลือก File > Export... ก็จะมีหน้าต่างปรากฏขึ้นมา
2. เลือกไฟล์เดอร์สำหรับใช้เก็บไฟล์ข้อมูล
3. ตั้งชื่อไฟล์
4. คลิกเลือก Save โปรแกรมก็จะทำการ Export จากที่เห็นเป็นลักษณะของกราฟ ออกไปเป็นตัวเลขและเก็บไว้ในไฟล์เดอร์ที่กำหนดไว้ ซึ่งสามารถนำไปใช้งานกับ โปรแกรม Excel ได้ทันที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



3. การเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์

สำหรับการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ จะใช้การติดต่อทางพอร์ตอนุกรม RS232 สำหรับการรับ-ส่งข้อมูลระหว่างระบบควบคุมอุณหภูมิกับคอมพิวเตอร์ โดยการตั้งค่าการเชื่อมต่อจะมีวิธีการดังนี้



1. คลิกเลือก Port ให้ตรงกับช่องเสียบ USB ที่ใช้เชื่อมต่อกับระบบควบคุมอุณหภูมิ
2. คลิกที่ Setting... จะปรากฏหน้าต่างเล็กๆ ดังรูป
3. จากนั้นทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น การเลือก port, Baudrate, Databits
4. คลิก OK เพื่อเป็นการยืนยันการตั้งค่า

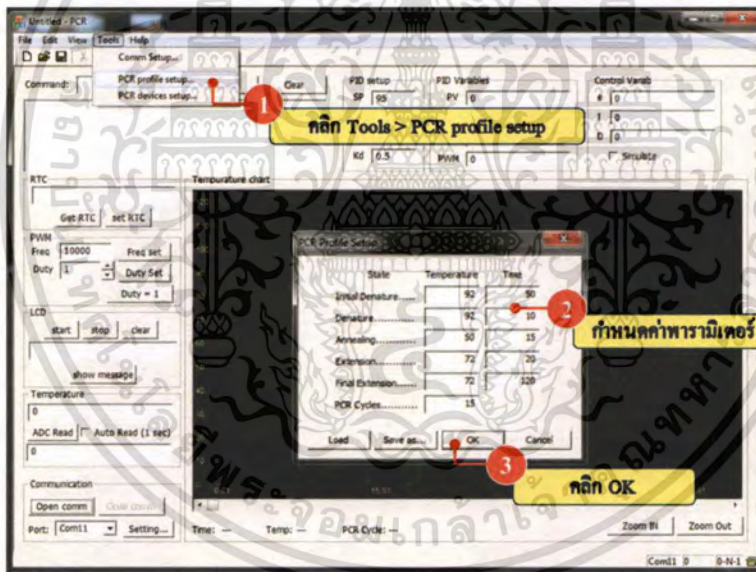
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าที่กำหนดไว้จะถูกบันทึกไว้ สำหรับการใช้งานในครั้งต่อไป ในกรณีที่เปลี่ยนช่องเสียบ USB จากเครื่องคอมพิวเตอร์นั้น ตัวโปรแกรมจะทำการตรวจสอบและแจ้งให้ทราบสำหรับการกำหนดค่าใหม่

4. การกำหนดค่าสั่งในแถบเครื่องมือ

4.1 การกำหนดอุณหภูมิในการทำพีซีอาร์ (PCR profile setup)

ในการทำพีซีอาร์นั้นจะอาศัยการเปลี่ยนช่วงของอุณหภูมิเพื่อทำการเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอ สำหรับโปรแกรมนี้อาจสามารถกำหนดค่าของอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ ในแต่ละช่วงของการทำพีซีอาร์ได้ตามต้องการ เพียงแค่ทำการป้อนค่าที่ต้องการลงในโปรแกรม ซึ่งการกำหนดค่าของอุณหภูมิในแต่ละช่วงจะทำได้ดังต่อไปนี้



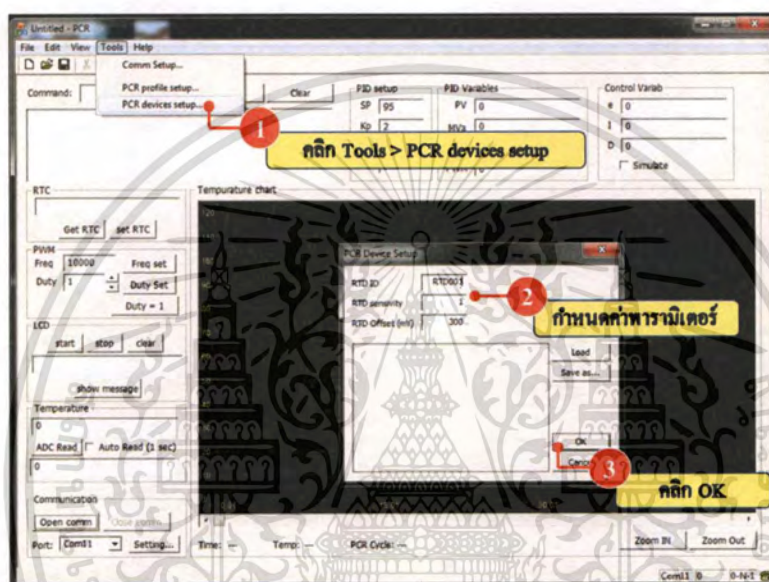
1. คลิก Tools > PCR profile setup จะปรากฏหน้าต่างสำหรับการป้อนค่าของอุณหภูมิและเวลาสำหรับการทำพีซีอาร์ ในแต่ละช่วง รวมถึงจำนวนรอบที่จะใช้สำหรับการทำพีซีอาร์
2. กำหนดค่าพารามิเตอร์ตามต้องการ โดยในขั้นตอนนี้ผู้ทดลอง สามารถที่จะบันทึกเงื่อนไขในการทำในแต่ละครั้งโดยทำการ คลิกที่ปุ่ม Save as... เพื่อบันทึกเงื่อนไขไว้ หรือผู้ใช้สามารถที่จะเรียกข้อมูลที่ใช้สำหรับการทำครั้งก่อน มาทำการทดลองอีกครั้ง โดยกดที่ปุ่ม Load... เมื่อทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์เรียบร้อยแล้ว
3. คลิก OK เพื่อยืนยัน โปรแกรมก็จะจำเงื่อนไขไปตลอดจนกว่าจะมีการกำหนดเงื่อนไข

ใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวอุปกรณ์

สำหรับโปรแกรมนี้ได้สร้าง เพื่อให้การใช้งานสะดวกและง่ายต่อการนำไปใช้งานสำหรับผู้ทดลองเอง โดยโปรแกรมสามารถที่จะกำหนดพารามิเตอร์สำหรับอุปกรณ์นั้นๆ ได้ โดยที่ตัวโปรแกรมจะทำการคำนวณและปรับให้เหมาะสมกับอุปกรณ์นั้นๆ ซึ่งนับว่าเป็นข้อดีที่สามารถนำไปใช้กับอุปกรณ์ในเงื่อนไขต่างๆ ได้ โดยที่ไม่จำเพาะกับเฉพาะบางอุปกรณ์เท่านั้น โดยการกำหนดค่าจะทำได้ดังนี้

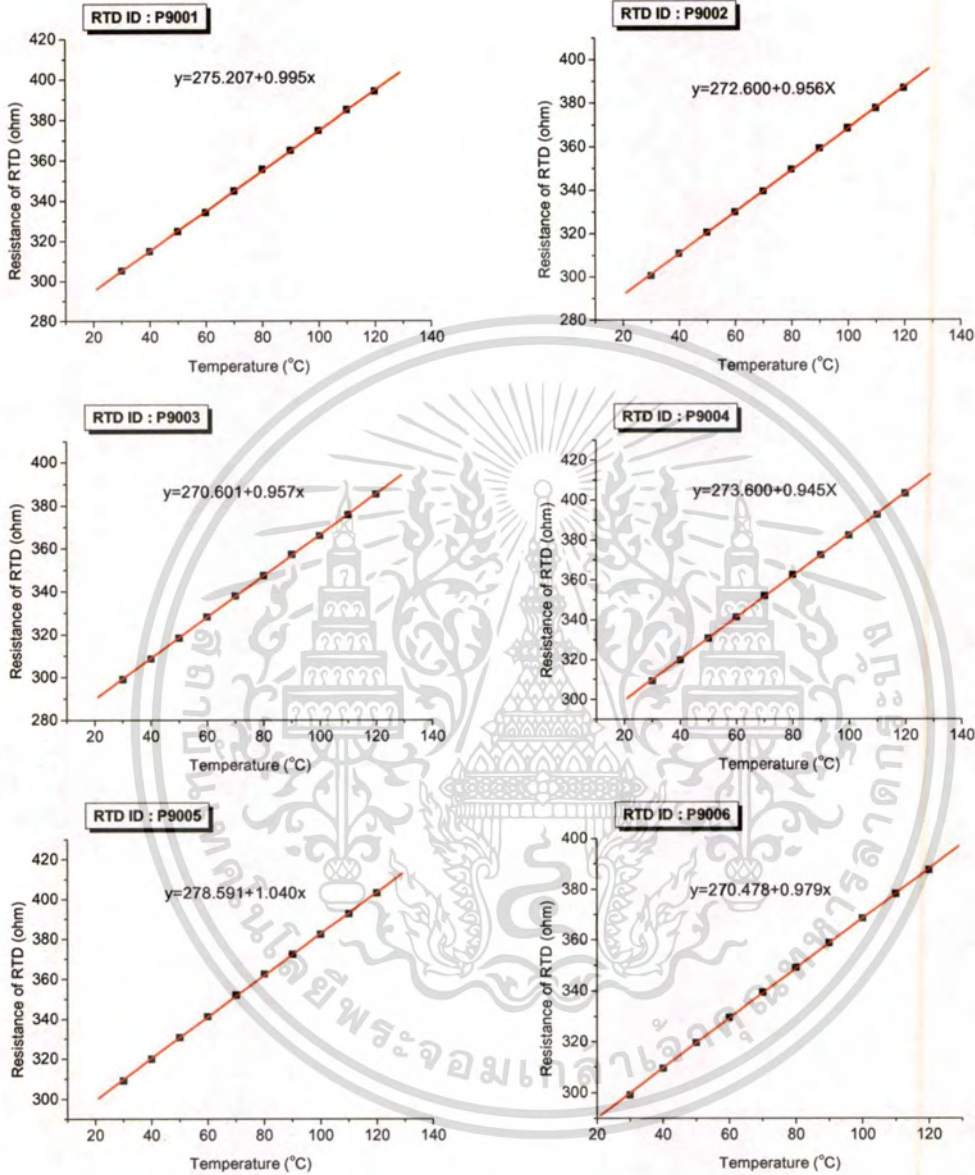


1. คลิก Tools > PCR devices setup... จะปรากฏหน้าต่างสำหรับการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ (RTD)
2. กำหนดค่าพารามิเตอร์ตามลักษณะของตัวตรวจวัดอุณหภูมิ เช่น RTD ID, RTD sensitivity, RTD offset และผู้ใช้สามารถที่จะบันทึกเงื่อนไขใหม่ หรือเรียกใช้เงื่อนไขเดิมมาใช้งานเหมือนกับกรณีของการกำหนดอุณหภูมิ
3. คลิก OK เพื่อยืนยัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

สมบัติของตัวตรวจวัดอุณหภูมิ



RTD ID	RTD Sensitivity	RTD Offset
P9001	0.995	275.207
P9002	0.956	272.600
P9003	0.957	270.601
P9004	0.945	273.600
P9005	1.040	278.591
P9006	0.979	270.478

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ (ภาษาไทย) นายวิศรุต ศรีพุ่มไข่
ชื่อ (ภาษาอังกฤษ) Witsaroot Sripumkhai
วันเดือนปีเกิด 21 สิงหาคม 2528 ที่จังหวัดนครปฐม
ที่อยู่ 31 หมู่ 1 ต. ลำพญา อ. บางเลน จ. นครปฐม 73130
โทรศัพท์ 084-6463358

ประวัติการศึกษา

ปริญญาตรี คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สาขา โขลิตสเทท
อิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปริญญาโท วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สาขา นา
โนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบัง

ความสนใจเฉพาะด้าน

- 1) การออกแบบและสร้างไมโครฮีตเตอร์
- 2) ระบบไมโครฟลูอิดิก (Microfluidic systems)
- 3) งานทางด้าน Lab On Chip

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

1. **W. Sripumkhai**, A. Lekwichai, W. Bunjongpru, S. Porntheeraphat, B. Tunhoo, E. Ratanaudomphisut, T. Kamsri, C. Hruanun, A. Poyai AND J. Nukeaw, "On-Chip Platinum Micro-Heater with Platinum Temperature Sensor for A Fully Integrated Disposable PCR Module", Advanced Materials Research, Vols. 93-94, 2010, pp 129-132.
2. A. LEKWICHAI, S. PORNTHEERAPHAT, W. BUNJONGPRU, **W. SRIPUMKHA**I, J. SUPADECH, S.RAHONG, C.HRUANUN, A. POYAI, AND J. NUKEAW," A Disposable Polydimethylsiloxane Microdevice for DNA Amplification", Advanced Materials Research, Vols. 93-94, 2010, pp 105-108.

ผลงานที่ได้นำเสนอในที่ประชุมวิชาการ

1. **W. Sripumkhai**, A. Lekwichai, W. Bunjongpru, S. Porntheeraphat, E. Ratanaudomphisut, T. Kamsri, S. Rahong and J. Nukeaw, "Single-Step Fabrication and Characterizations of Pt Thin Film Microheater and RTD Sensor Utilized for Micro PCR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Device" Proceeding of the 4th International Conference on Sensors, July, 29-31 2009, Bangkok, Thailand. (Oral presentation)
2. A. Lekwichai, S. Porntheeraphat, W. Bunjongpru, J. Supadech, K. Tantanasiriwong, **W.Sripumkhai**, S. Rahong, and J. Nukeaw, "The Study of the Optimum Condition for PDMS Bonding with Several Substrates in Microfluidic Application" Proceeding of the 4th International Conference on Sensors, July, 29-31 2009, Bangkok, Thailand. (Poster presentation)
 3. **W. Sripumkhai**, A. Lekwichai, W. Bunjongpru, S. Porntheeraphat, B. Tunhoo, E. Ratanaudomphisut, T. Kamsri, C. Hruanun, A. Poyai AND J. Nukeaw, "On-Chip Platinum Micro-Heater with Platinum Temperature Sensor for A Fully Integrated Disposable PCR Module" International conference on FUSEM (2009), Bangkok, Thailand. (Oral presentation)
 4. A. LEKWICHAI, S. PORNTHEERAPHAT, W. BUNJONGPRU, **W. SRIPUMKHA**I, J. SUPADECH, S. RAHONG, C. HRUANUN, A. POYAI, AND J. NUKEAW, " A Disposable Polydimethylsiloxane Microdevice for DNA Amplification" International conference on FUSEM (2009), Bangkok, Thailand. (Poster presentation)
 5. **W. Sripumkhai**, S. Porntheeraphat, B. Saekow, W. Bunjongpru, S. Rahong and J. Nukeaw, "Effect of Annealing Temperature on Platinum Thin Films Prepared by Electron Beam Evaporation" Proceeding of the 27th Conference of The Microscopy Society of Thailand, MST27 (2010), Surat Thani, Thailand (Poster presentation)
 6. Onuma Ketchart, Supanit Porntheerapat, **Witsaroot Sripumkhai** and Kanokporn Sompornpailin, " Titanium Dioxide Thin films on PCR tube deposited by Electron Beam Evaporation Technique" Proceeding of the 27th Conference of The Microscopy Society of Thailand, MST27 (2010), Surat Thani, Thailand (Poster presentation)
 7. **Witsaroot Sripumkhai**, Praphaphan Wipatawit, Supanit Porntheerapat, Amornrat Lekwichai, Sirapat Patontep, Yossawat Rayanasukha, Win Bunjongpru, Amporn Poyai and Jiti Nukeaw, " Thermal Sensor Array for Temperature Profile and Flow rates Measurement in Fluidic PDMS Microchannel" The 16th International Conference on Flow Injection Analysis, April, 25-30 2010, Pattaya, Thailand. (Oral presentation)
 8. Amornrat Lekwichai, Supanit Porntheerapat, **Witsaroot Sripumkhai**, Win Bunjongpru, Praphaphan Wipatawit, Sakon Rahong, Amporn Poyai, and Jiti Nukeaw,

16th International Conference on Flow Injection Analysis, April, 25-30 2010, Pattaya, Thailand. (poster presentation)

9. Kanjana Saeteaw, Pattasuda Duangkaew, Roungruj Maolanon, Gamolwan Tumchareem, **Witsaroot Sripumkhai**, Thanakorn Jiemsakul, Supanit Porntheeraphat, Jiti Nukeaw, Sirapat Pratontep, "Detection of Potassium Ions in Water using In-line Microchamber with Electrochemical Electrode Array" The 16th International Conference on Flow Injection Analysis, April, 25-30 2010, Pattaya, Thailand. (poster presentation)

