

บทที่ 4

ผลการทดลอง

การสร้างตัวตรวจรู้อัตราการไหลของก๊าซแบบความต้านทานโดยการใช้เทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค โดยการเริ่มสร้างไดอะแฟรมบางซิลิคอนเทคโนโลยีกลไฟฟ้าจุลภาค(MEMS) โดยอาศัยเทคนิคการกัดเนื้อซิลิคอน ด้วยสารละลาย EPD เพื่อให้เกิดไดอะแฟรมบาง ด้วยเทคนิคการจับเวลา โดยมีซิลิคอนไดออกไซด์เป็นหน้ากปกป้องกัน

เมื่อได้ไดอะแฟรมบางซิลิคอนบางแล้วใช้เทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำซิลิคอน ในการสร้างฟิล์มบางโลหะ ซึ่งจะได้ไมโครฮีตเตอร์ และแถบความต้านทาน อยู่บนไดอะแฟรมบางซิลิคอน ต่อจากนั้นทดสอบคุณสมบัติทางความร้อน และการตรวจรู้อัตราการไหลของก๊าซ

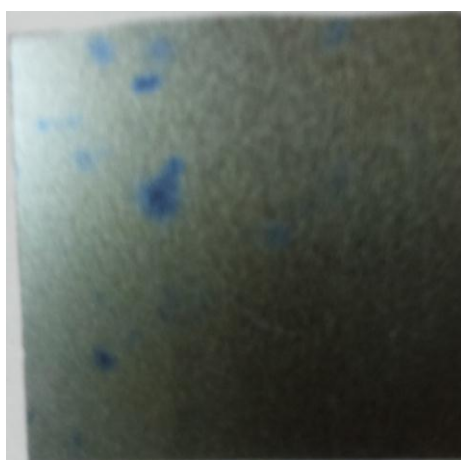
4.1 การสร้างไดอะแฟรม

การสร้างตัวตรวจรู้อัตราการไหลของก๊าซ เริ่มจากการสร้างไดอะแฟรมบางซิลิคอนใช้กระบวนการกัดซิลิคอน ซึ่งได้จากการกัดซิลิคอนในสารละลาย โดยไดอะแฟรมซิลิคอนถูกกัดให้เป็นรูสี่เหลี่ยมตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยการกัดสารละลายเอชอีลีนไดอะมีน(E) ผสมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์(P) และน้ำบริสุทธิ์(D)

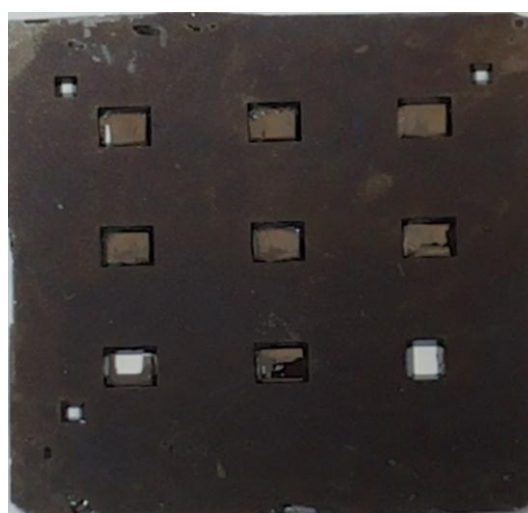
เอชอีลีนไดอะมีนเป็นของเหลวเหลวใสไม่มีสี ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นเกล็ดของแข็งมีสีเทาวันบุหรือนำมาผสมกัน เอชอีลีนไดอะมีน(E) ผสมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์(P) และน้ำบริสุทธิ์(D) ทำให้ได้สารละลายสีน้ำตาลเข้ม ที่เรียกว่า สารละลาย EPD

การสร้างไดอะแฟรมด้วยการกัดด้วยสารละลาย EPD เริ่มจากการเตรียมสารละลาย EPD ในปิกรอร์และให้ความร้อนโดยใช้ Hot plate ทำการกวนสารละลายตลอดเวลา ที่อุณหภูมิ 95-100 °C นำแผ่นซิลิคอนชนิด P ระบาย(100) ซึ่งมีสภาพความต้านทาน 8-12 โอห์ม เซนติเมตร หน้า 450 ไมครอน มาสร้างซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการออกซิชั่นแบบแห้ง 3 ชั่วโมง แล้วตามด้วยแบบชื้น 3 ชั่วโมง และแบบแห้ง 1 ชั่วโมง ตามลำดับ ได้ความหนาของซิลิคอนไดออกไซด์ประมาณ 1 ไมครอน ไปผ่านกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเพื่อเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์ และก่อนนำแผ่นซิลิคอนมากัด ต้องทำความสะอาดด้วยการล้างไขมันด้วยไตรคลอโรเอทิลีนและอะซิโตนด้วยน้ำ DI และเป่า

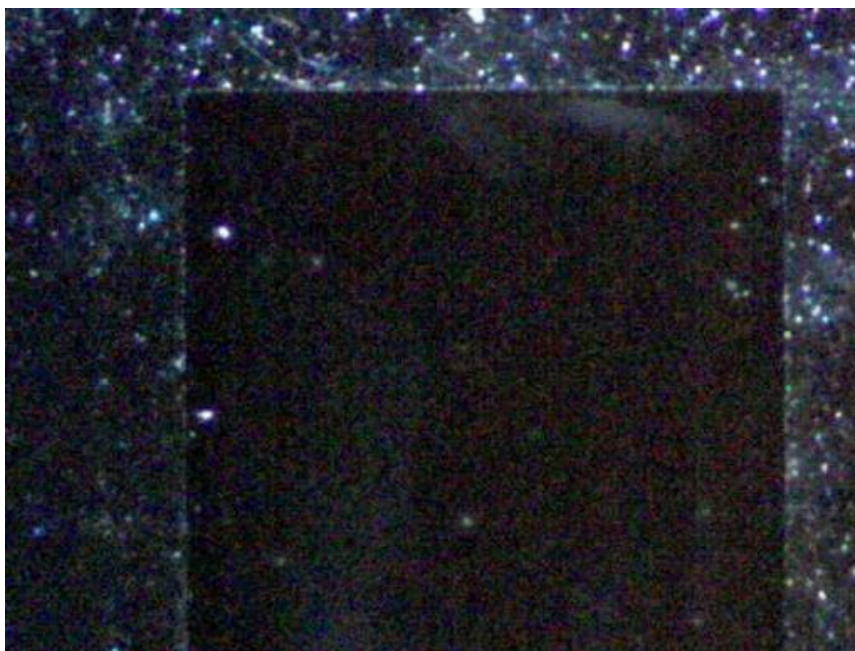
แห้ง จุ่มด้วยสารละลาย HF 5% ล้างด้วย DI และเป่าแห้ง แล้วนำแผ่นซิลิคอนไปจุ่มในสารละลาย EPD โดยเทคนิคการจับเวลา ซึ่งมีอัตราการกัดเนื้อซิลิคอนประมาณ 1 ไมครอน/นาที่ แสดงดังภาพที่ 4.1 ซึ่งได้ความหนาประมาณ 20 ไมครอน และขนาดไดอะแฟรม 1400x1800 ไมครอนxไมครอน หลังจากได้ไดอะแฟรมซิลิคอนแล้วนำแผ่นซิลิคอนมาลอกชั้นออกไซด์ออกด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ (Buffer) เนื่องจากชั้นไดออกไซด์เก่าไม่สะอาด จากนั้นทำความสะอาด และสร้างซิลิคอนไดออกไซด์ใหม่หนา 5000 Å ด้วยกระบวนการออกซิชั่นแบบแห้ง 3 ชั่วโมง แล้วตามด้วยแบบชื้น 1 ชั่วโมง และแบบแห้ง 1 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งการเป่าแห้งต้องใช้ความระมัดระวังอย่างมาก โดยมีผลต่อความเสียหายของไดอะแฟรมอย่างมาก



(ก) แผ่นซิลิคอนชนิด พี ด้านหลัง



(ข) แผ่นซิลิคอนชนิด พี ด้านหลังที่สร้างไดอะแฟรมด้วยการกัดด้วยสารละลาย EPD



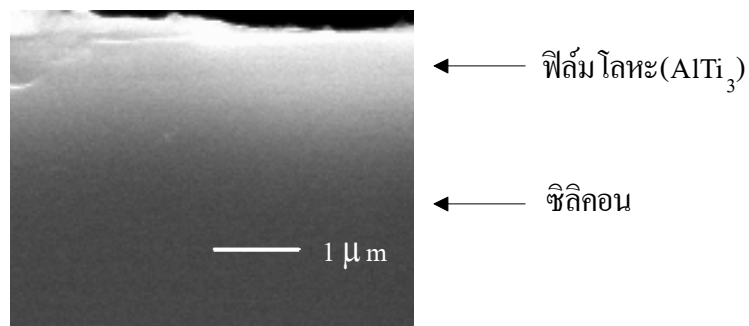
(ค) ภาพขนาดโตอะแฟรม ขนาด 60X

ภาพที่ 4.1 แสดงลักษณะของโตอะแฟรมที่ได้จากการกัดด้วยสารละลาย EPD

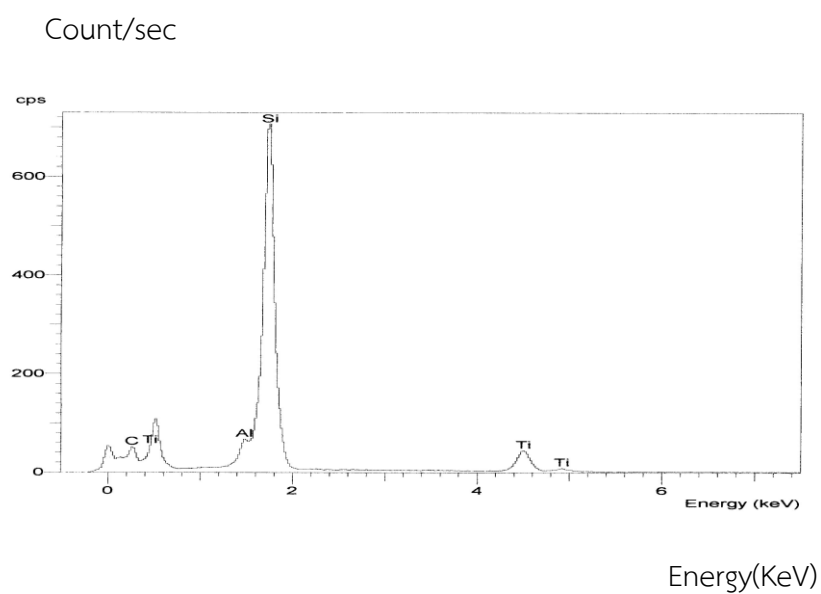
4.2 การศึกษาอลูมิเนียมไมโครฮีตเตอร์บนฐานรองซิลิคอน

4.2.1 การวิเคราะห์วัสดุไมโครฮีตเตอร์ Al-Ti

นำแผ่นซิลิคอนที่ได้จากการสร้างโตอะแฟรมมาทำการสร้างฟิล์มโลหะไททาเนียมและอลูมิเนียม ซึ่งจะถูกระเหยในระบบสุญญากาศ โดยการระเหยไททาเนียมและตามด้วยการระเหยอลูมิเนียม ซึ่งลักษณะเนื้อฟิล์มของไททาเนียมจะมีสีเทาและถ้านำไปขึ้นเตอร์ริงในบรรยากาศของไนโตรเจนจะเกิดปฏิกิริยาได้เป็นสารประกอบไททาเนียมไนไตรด์(TiN) ซึ่งมีสีทอง ต่อจากนั้นนำแผ่นไปผ่านกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี หลังจากนั้นนำฟิล์มไททาเนียมและอลูมิเนียม ไปขึ้นเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 10 นาที จะได้อัลลอยด์ของ TiAl_3 โดยอยู่ระหว่างฟิล์มไททาเนียมและอลูมิเนียม สีผิวของอลูมิเนียมฟิล์มยังเป็นสีเงินซึ่งเป็นสีของอลูมิเนียมฟิล์ม แสดงได้ว่าที่ผิวด้านบนยังเป็นฟิล์มโลหะอลูมิเนียม ภาพที่ 4.2 แสดงการถ่ายภาพตัดขวางถ่ายด้วยเครื่อง SEM (Scanning Electron Microscopy) ได้ความหนาของฟิล์มอลูมิเนียม 0.8 ไมครอน และไททาเนียม 0.4 ไมครอน และภาพที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ฟิล์มโลหะ(AlTi_3) ด้วย EDS (Energy Dispersive Spectrometer)



ภาพที่ 4.2 แสดงภาพถ่ายตัดขวางของฟิล์มโลหะด้วย SEM



ภาพที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์ฟิล์มโลหะด้วย EDS

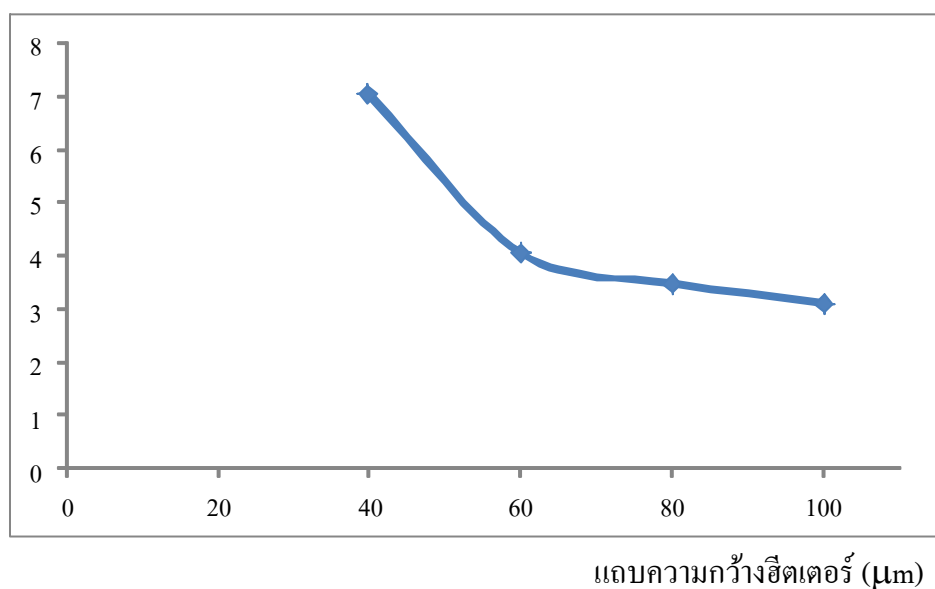
4.3.2 ผลขนาดโครงสร้างไมโครฮิตเตอร์

ในการทดลองนี้ได้ทำการออกแบบขนาดความกว้างไมโครฮิตเตอร์ให้มีขนาดต่างกันคือ 40, 60, 80 และ 100 ไมครอน ตามลำดับ และมีขนาดความยาวเท่ากันทั้ง 4 ชุด คือ 1400 ไมครอน ที่ขนาดไมโครฮิตเตอร์ต่างกันทำให้ค่าความต้านทานต่างกัน แสดงดังตารางที่ 4.1 และภาพที่ 4.4

ตารางที่ 4.1 ค่าความต้านทานของไมโครฮีตเตอร์อลูมิเนียม

ไมโครฮีตเตอร์ชุดที่	ขนาดความกว้างไมโครฮีตเตอร์ (μm)	ค่าความต้านทาน (Ω)
1	40	7.03072
2	60	4.05873
3	80	3.48872
4	100	3.12810

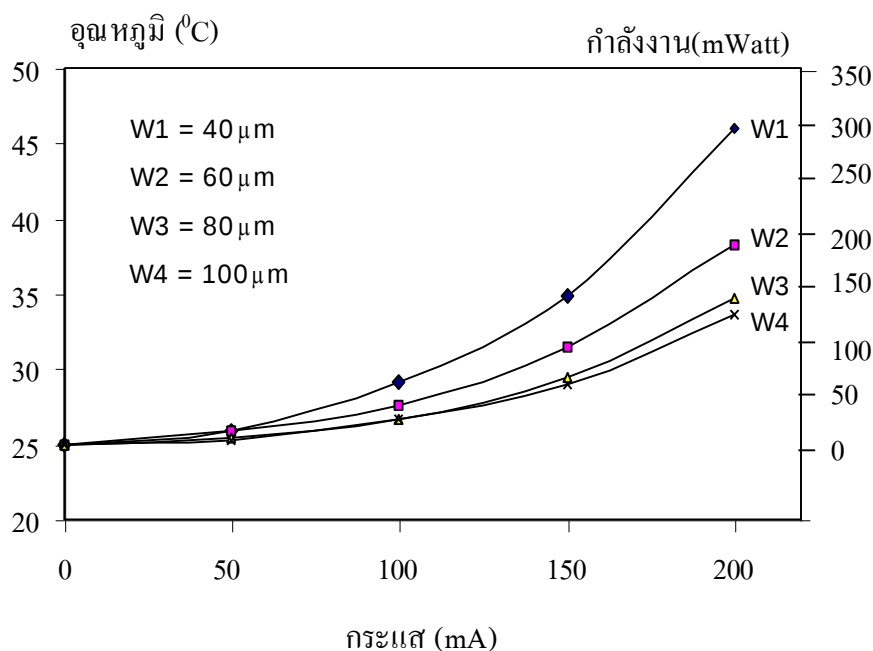
ค่าความต้านทาน (Ω)



ภาพที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความกว้างไมโครฮีตเตอร์และค่าความต้านทาน

4.3.3 ผลขนาดโครงสร้างไมโครฮีตเตอร์และอุณหภูมิ

ไมโครฮีตเตอร์ก็คือตัวความต้านทาน เมื่อให้กระแสไหลผ่านตัวความต้านทานจะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานความร้อน โดยการทดลองนี้จ่ายกระแสในช่วง 0 – 200 mA และความหนาไดอะแฟรม 25 ไมครอน แสดงดังภาพที่ 4.5 อุณหภูมิบนไดอะแฟรมที่ไมโครฮีตเตอร์มีขนาดความกว้างต่างกันคือ 40, 60, 80 และ 100 ไมครอน ตามลำดับ ในช่วงแรกของกระแสจะไม่ค่อยเห็นความแตกต่างของอุณหภูมิ แต่เมื่อให้กระแสสูงขึ้นจะเห็นความแตกต่างของอุณหภูมิ ที่ขนาดความกว้าง 40 ไมครอน จะให้อุณหภูมิและพลังงานสูงสุด [13]



ภาพที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและอุณหภูมิและกำลังงานของไมโครฮีตเตอร์

ที่มีขนาดความกว้าง (W) ต่างกัน ที่ความหนาไดอะแฟรม 25 ไมครอน

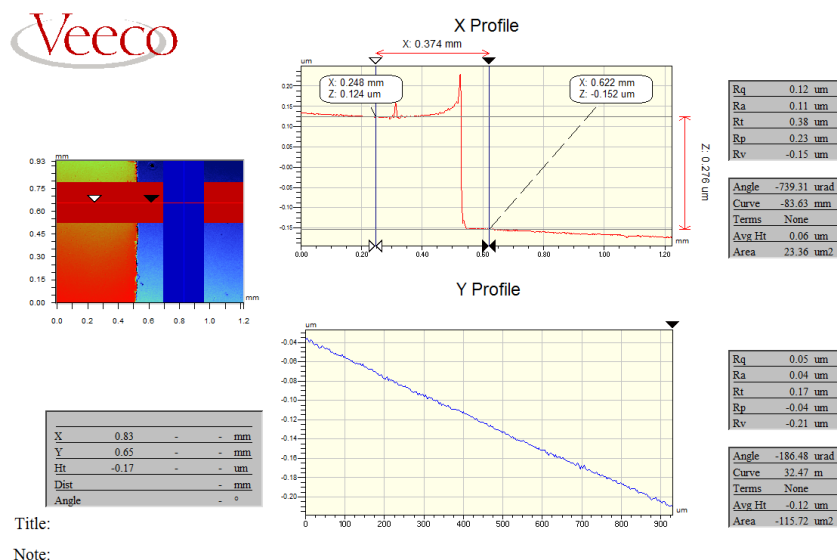
ไมโครฮีตเตอร์เป็นตัวแทนความต้านทาน ที่แปลงพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานความร้อน โดยไมโครฮีตเตอร์ประกอบด้วยโลหะ 2 ชนิด คือ อลูมิเนียม และ ไททาเนียม ถูกกระเหยในระบบสุญญากาศ มีผลให้ไมโครฮีตเตอร์สามารถทนกระแสได้สูงขึ้น โดยโครงสร้างไมโครฮีตเตอร์อยู่บนไดอะแฟรมหนา 25 ไมครอน และไมโครฮีตเตอร์ขนาด 40 ไมครอน ให้อุณหภูมิสูงสุด 45.5 °C

4.3 การศึกษาทองคำไมโครฮีตเตอร์บนฐานรองซิลิคอน

4.3.1 การวิเคราะห์วัสดุไมโครฮีตเตอร์ Au-Ti

นำแผ่นซิลิคอนที่ได้จากการสร้างไดอะแฟรมมาการสร้างฟิล์มโลหะไททาเนียมและทองคำ ซึ่งจะถูกกระเหยในระบบสุญญากาศ โดยการระเหยไททาเนียมและตามด้วยการระเหยทองคำ แล้วนำฟิล์มไททาเนียมและทองคำไปผ่านกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี หลังจากนั้นนำไปขึ้นเตอร์รี่ที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 10 นาที สีที่ผิวของทองคำ ฟิล์มยังเป็นสีทองซึ่งเป็นสีของทองคำฟิล์ม แสดงได้ว่าที่ผิวด้านบนยังเป็นฟิล์มโลหะทองคำ

ไมโครฮีเตอร์ที่สร้างจากชั้นฟิล์ม Ti/Au มีความหนาประมาณ 0.276 ไมครอน เคลือบบนฐานซิลิคอนไดออกไซด์ ภาพที่ 4.6 ระดับความหนาที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง veeco optical profiler



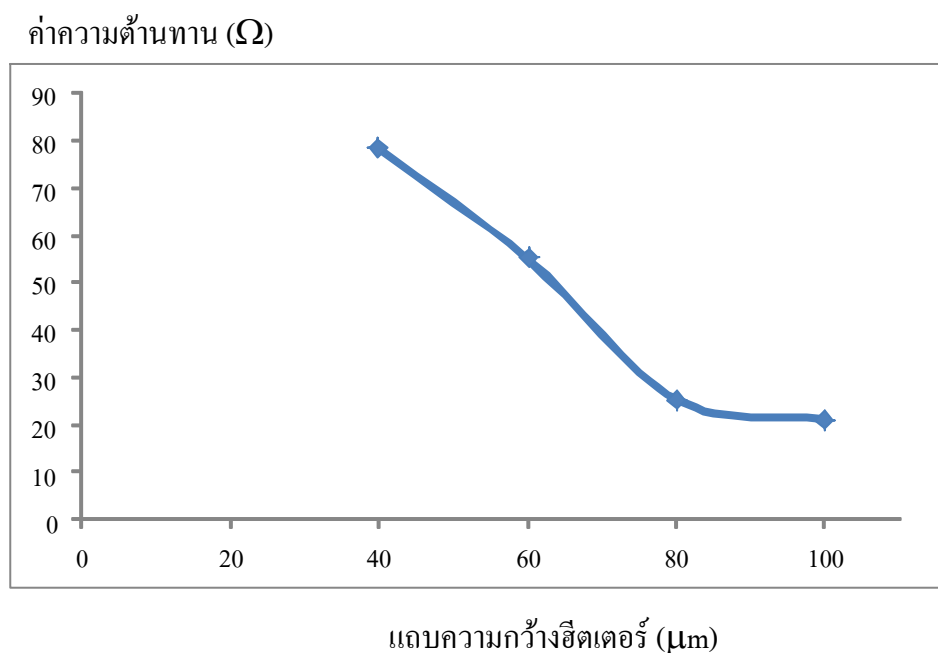
ภาพที่ 4.6 แสดงภาพถ่ายตัดขวางของฟิล์มโลหะด้วย เครื่อง veeco optical profiler

4.3.2 ผลขนาดโครงสร้างไมโครฮีเตอร์

ในการทดลองนี้ได้ทำการออกแบบขนาดความกว้างไมโครฮีเตอร์ให้มีขนาดต่างกันคือ 40, 60, 80 และ 100 ไมครอน ตามลำดับ และมีขนาดความยาวเท่ากันทั้ง 4 ชุด คือ 1400 ไมครอน ที่ขนาดไมโครฮีเตอร์ต่างกันทำให้ค่าความต้านทานต่างกัน แสดงดังตารางที่ 4.2 และภาพที่ 4.7

ตารางที่ 4.2 ค่าความต้านทานของไมโครฮีเตอร์ทองคำ

ไมโครฮีเตอร์ชุดที่	ขนาดความกว้างไมโครฮีเตอร์ (μm)	ค่าความต้านทาน (Ω)
1	40	78.25
2	60	55
3	80	25.4
4	100	21.14

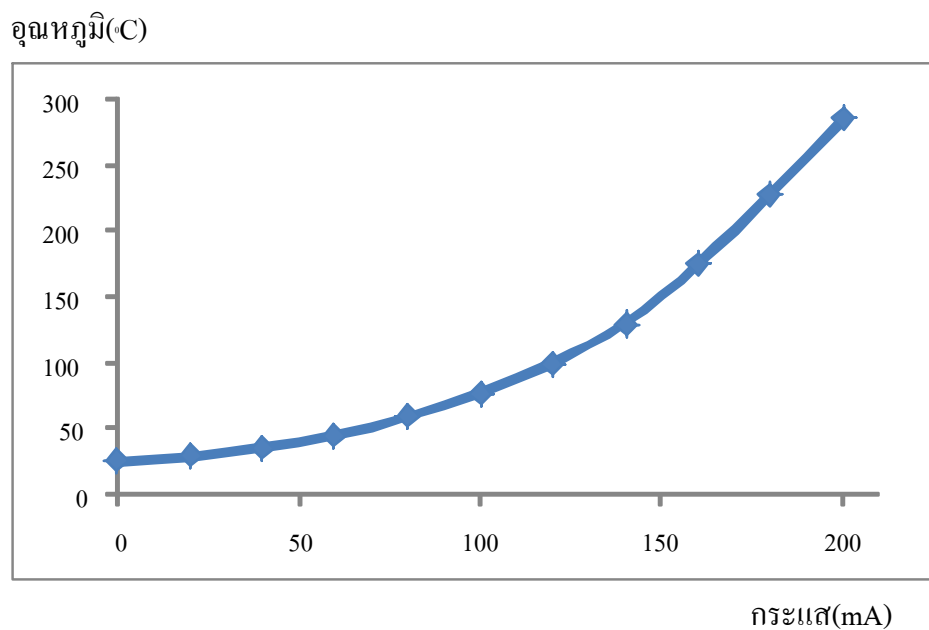


ภาพที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความกว้างไมโครฮีตเตอร์และค่าความต้านทาน

4.3.3 ผลขนาดโครงสร้างไมโครฮีตเตอร์และอุณหภูมิ

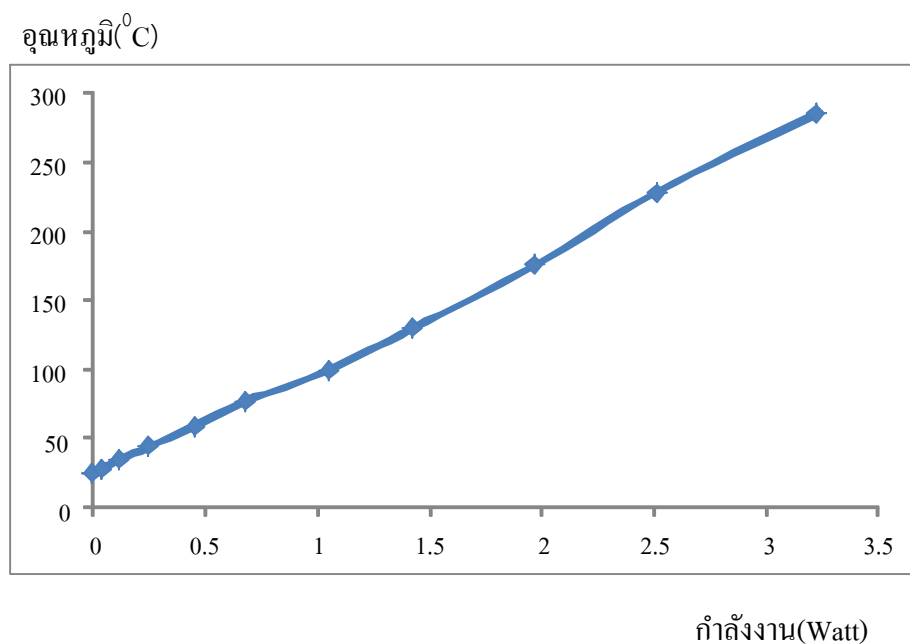
ในการทดสอบคุณสมบัติของไมโครฮีตเตอร์ ซึ่งไมโครฮีตเตอร์มีขนาดต่างๆ กัน คือ 40, 60, 80 และ 100 ไมครอน โดยการทดลองนี้จะจ่ายกระแสให้กับไมโครฮีตเตอร์ในช่วง 0-200 mA ที่ความหนาไดอะแฟรมซิลิคอน 20 ไมครอน เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

จากภาพที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และอุณหภูมิ พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและอุณหภูมิ ในช่วงกระแสน้อย จะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้อยมาก แต่เมื่อให้กระแสมากกว่า 80 mA การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมาก และให้อุณหภูมิสูง 295°C



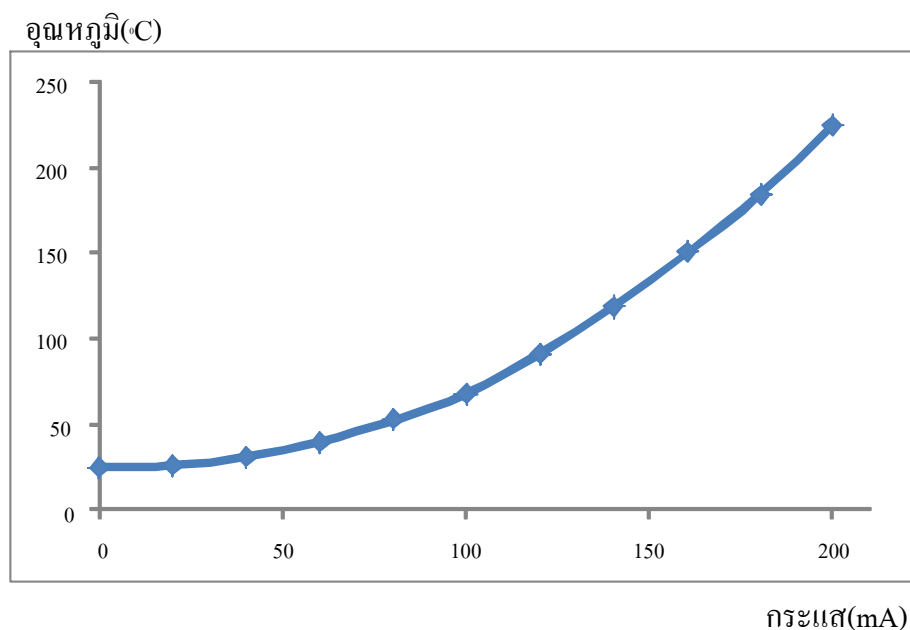
ภาพที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และอุณหภูมิ ที่ขนาดไมโครฮิตเตอร์ 40 ไมครอน

จากภาพที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงาน และอุณหภูมิ พบว่าความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นกราฟเส้นตรง ให้อุณหภูมิสูง 295 °C ที่กำลังงาน 3.22 watt



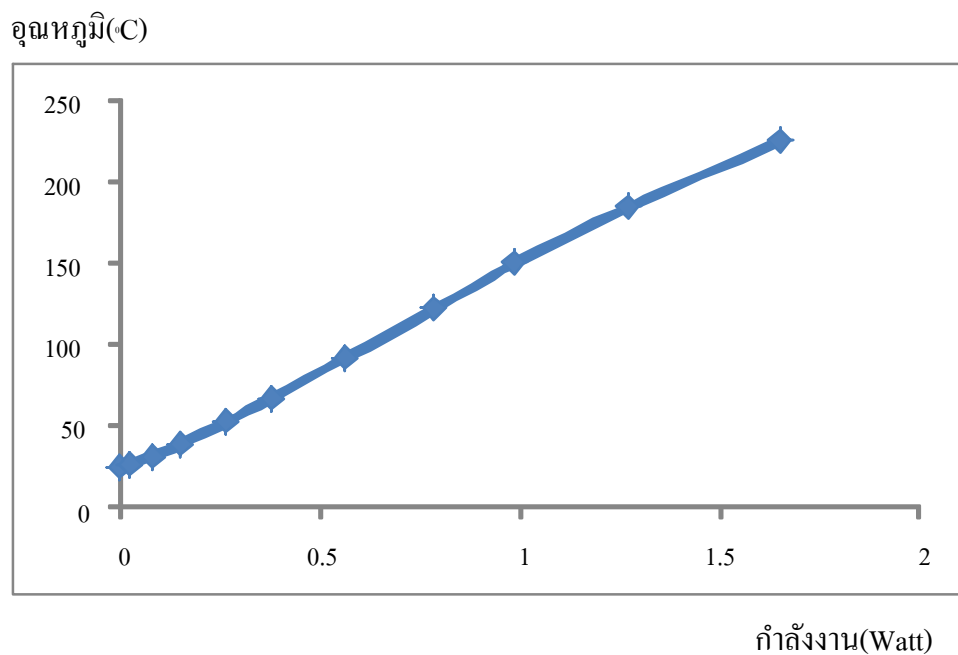
ภาพที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานและอุณหภูมิ ที่ขนาดไมโครฮิตเตอร์ 40 ไมครอน

จากภาพที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และอุณหภูมิ พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและอุณหภูมิ ในช่วงกระแสน้อย จะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้อยมาก แต่เมื่อให้กระแสมากกว่า 80 mA การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมาก และให้อุณหภูมิสูง 230°C



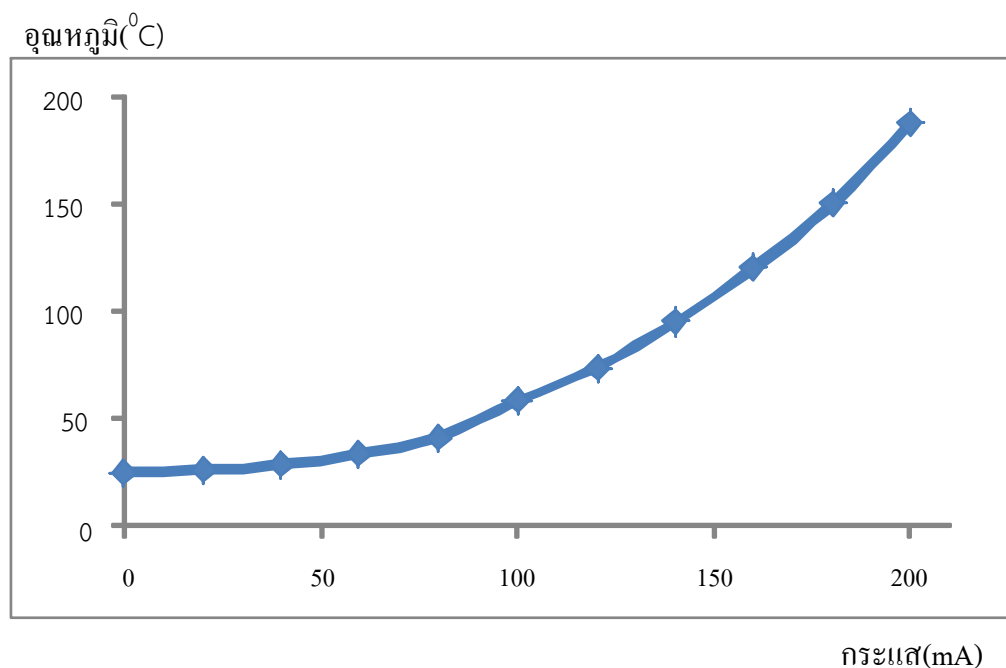
ภาพที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และอุณหภูมิ ที่ขนาดไมโครฮีตเตอร์ 60 ไมครอน

จากภาพที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงาน และอุณหภูมิ พบว่าความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นกราฟเส้นตรง ให้อุณหภูมิสูง 230°C ที่กำลังงาน 1.65 watt



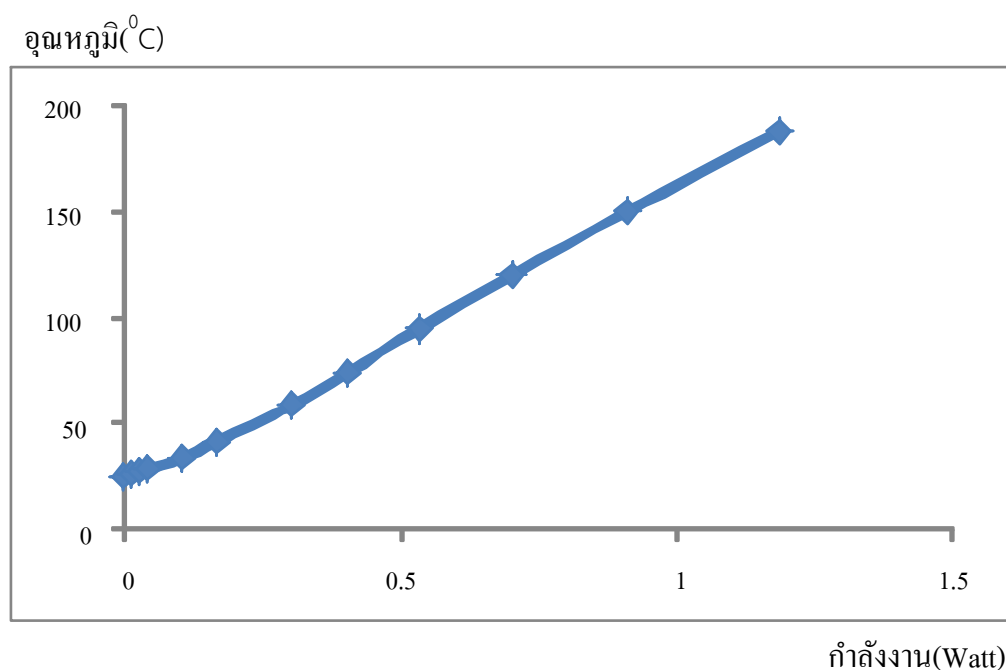
ภาพที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานและอุณหภูมิ ที่ขนาดไมโครฮิตเตอร์ 60 ไมครอน

จากภาพที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และอุณหภูมิ พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและอุณหภูมิ ในช่วงกระแสน้อย จะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้อยมาก แต่เมื่อให้กระแสมากกว่า 80 mA การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมาก และให้อุณหภูมิสูง 190°C



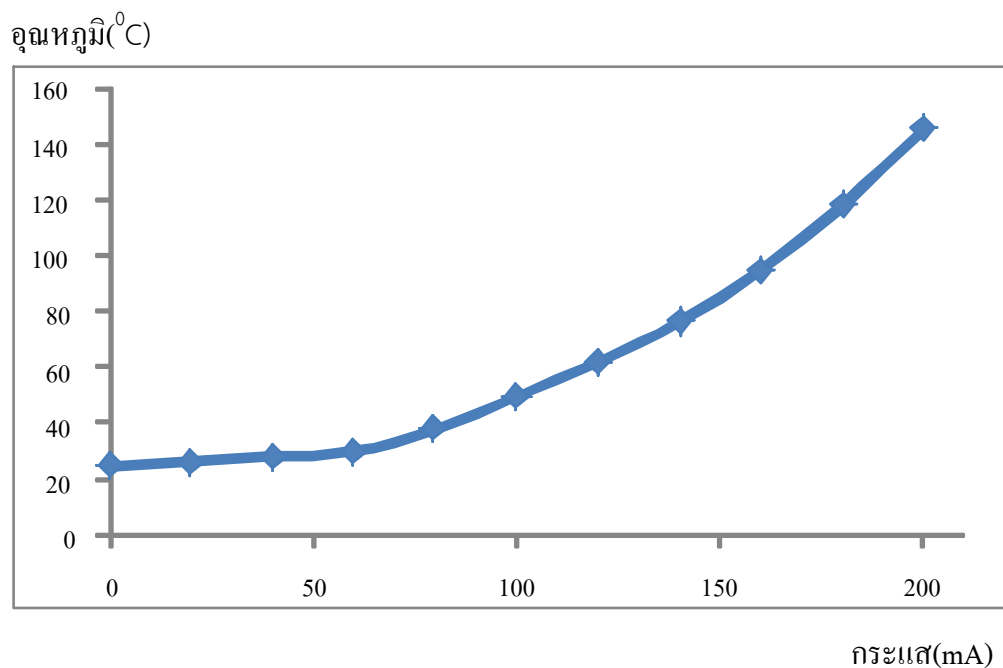
ภาพที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และอุณหภูมิ ที่ขนาดไมโครฮิตเตอร์ 80 ไมครอน

จากภาพที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงาน และอุณหภูมิ พบว่าความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นกราฟเส้นตรง ให้อุณหภูมิสูง 190°C ที่กำลังงาน 1.19 watt



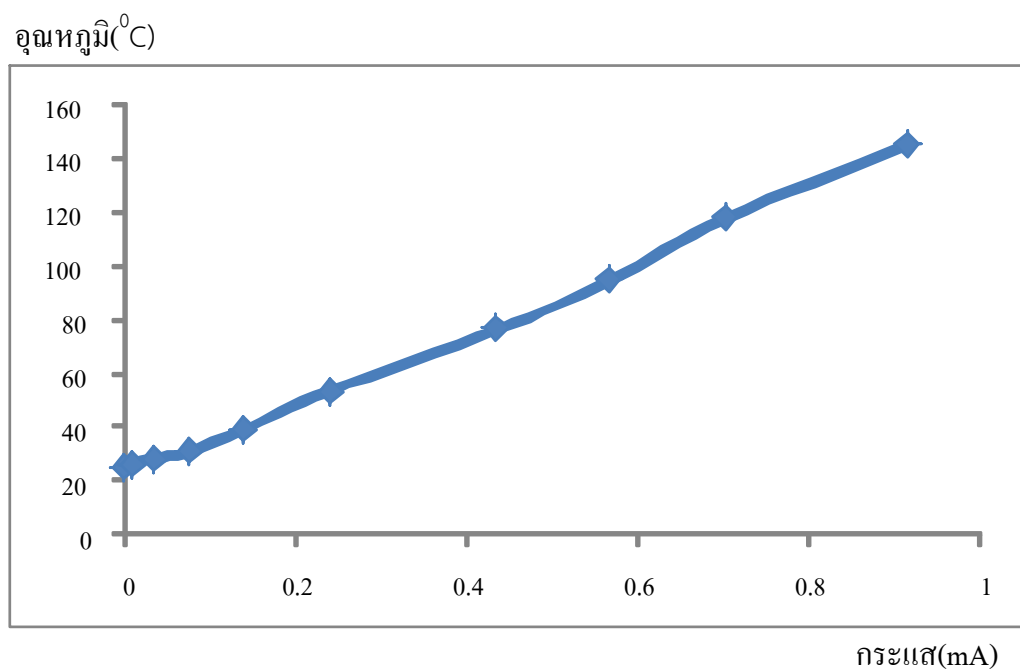
ภาพที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานและอุณหภูมิ ที่ขนาดไมโครฮีตเตอร์ 80 ไมครอน

จากภาพที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และอุณหภูมิ พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและอุณหภูมิ ในช่วงกระแสน้อย จะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้อยมาก แต่เมื่อให้กระแสมากกว่า 80 mA การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมาก และให้อุณหภูมิสูง 145°C



ภาพที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และอุณหภูมิ ที่ขนาดไมโครฮีตเตอร์ 100 ไมครอน

จากภาพที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงาน และอุณหภูมิ พบว่าความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นกราฟเส้นตรง ให้อุณหภูมิสูง 145 °C ที่กำลังงาน 0.92 watt



ภาพที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานและอุณหภูมิ ที่ขนาดไมโครฮีตเตอร์ 100 ไมครอน

4.4 การประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจรู้อัตราการไหลของก๊าซ

ในการวัดอัตราการไหลของก๊าซ โดยการวัดทั้งหมดจะใช้ก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้ช่วงอัตราการไหลของก๊าซ 0 – 1000 sccm ซึ่งเป็นท่อซิลิโคนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ที่ขนาดความหนาไดอะแฟรม 20 ไมครอน และไมโครฮีตเตอร์ขนาด 40 ไมครอน เป็นการวัดอุณหภูมิและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ขณะก๊าซไหลผ่านตัวตรวจรู้อัตราการไหลของก๊าซแบบตัวความต้านทาน(RTD) ก็จะมีผลทำให้อุณหภูมิของไดอะแฟรมซิลิโคนลดลงเนื่องจากการพาความร้อนแบบบังคับไปของก๊าซซึ่งจะขึ้นกับอุณหภูมิและอัตราการไหลของก๊าซที่ไหลผ่านตัวตรวจรู้แสดงดังภาพที่ 4.16

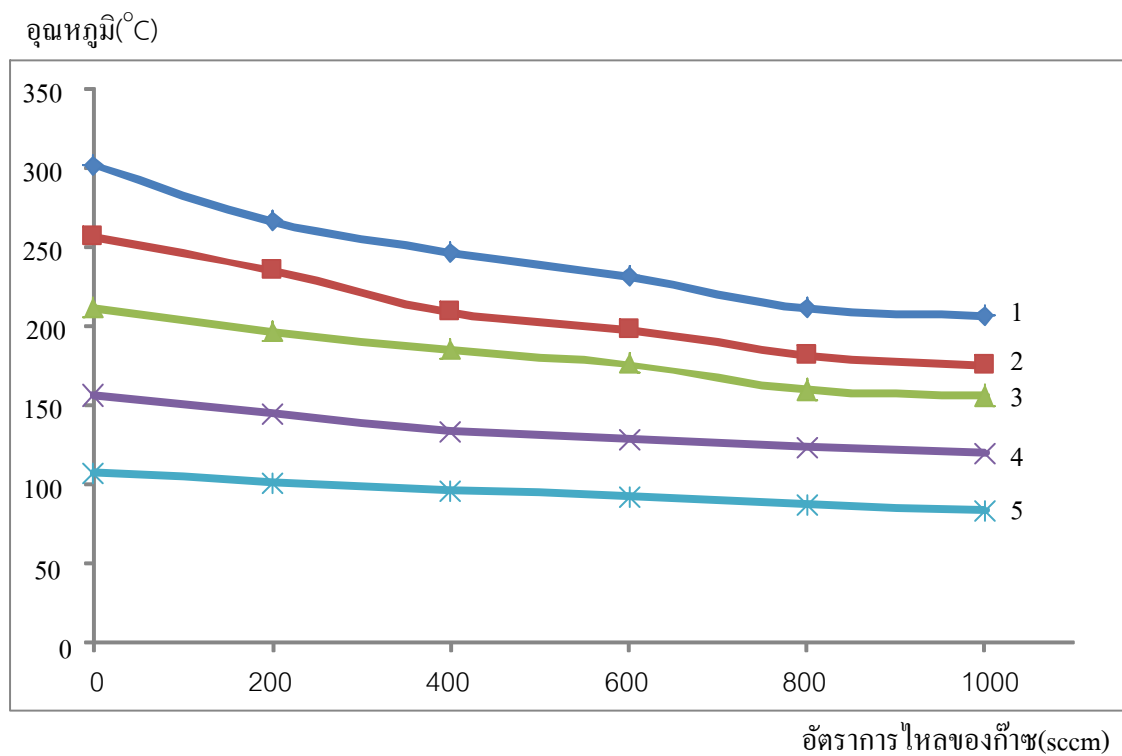
เส้นที่ 1 เริ่มที่อุณหภูมิ 302 °C มีช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 302 – 205 °C มีอัตราการลดลงเฉลี่ยของอุณหภูมิ 10.4 °C/100 sccm ในช่วงอัตราการไหลของก๊าซ 0 – 400 sccm มีอัตราการลดลงเฉลี่ยของอุณหภูมิ 13.75 °C/100 sccm

เส้นที่ 2 เริ่มที่อุณหภูมิ 257 °C มีช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 257 – 165 °C มีอัตราการลดลงเฉลี่ยของอุณหภูมิ 9.2 °C/100 sccm ในช่วงอัตราการไหลของก๊าซ 0 – 400 sccm มีอัตราการลดลงเฉลี่ยของอุณหภูมิ 12 °C/100 sccm

เส้นที่ 3 เริ่มที่อุณหภูมิ 212 °C มีช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 212 – 146 °C มีอัตราการลดลงเฉลี่ยของอุณหภูมิ 6.6 °C/100 sccm ในช่วงอัตราการไหลของก๊าซ 0 – 400 sccm มีอัตราการลดลงเฉลี่ยของอุณหภูมิ 6.5 °C/100 sccm

เส้นที่ 4 เริ่มที่อุณหภูมิ 157 °C มีช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 157 – 114 °C มีอัตราการลดลงเฉลี่ยของอุณหภูมิ 4.3 °C/100 sccm ในช่วงอัตราการไหลของก๊าซ 0 – 400 sccm มีอัตราการลดลงเฉลี่ยของอุณหภูมิ 5.75 °C/100 sccm

เส้นที่ 5 เริ่มที่อุณหภูมิ 109 °C มีช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 109 – 79 °C มีอัตราการลดลงเฉลี่ยของอุณหภูมิ 3.0 °C/100 sccm ในช่วงอัตราการไหลของก๊าซ 0 – 400 sccm มีอัตราการลดลงเฉลี่ยของอุณหภูมิ 3.0 °C/100 sccm



ภาพที่ 4.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซกับอุณหภูมิของไมโครฮีตเตอร์

ทองคำบนฐานรองซิลิคอน