

การออกแบบและจำลองตัวตรวจจับก๊าซพลังงานต่ำขนาดไมโครเมตร



นางสาวทิวาภรณ์ เปลี่ยนศักดิ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

DESIGN AND SIMULATION OF LOW POWER MICRO-GAS SENSORS

Miss Tiwaporn Pliensak

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การออกแบบและจำลองตัวตรวจจับก๊าซพลังงานต่ำขนาด  
ไมโครเมตร

โดย

นางสาวทิวากรณ์ เปลี่ยนศักดิ์

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. มานะ ศรียุทธศักดิ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อาภรณ์ อธิมณฑลศรี)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร. มานะ ศรียุทธศักดิ์)

.....กรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. ปราโมทย์ เดชะอำไพ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร. สิริสุนทร สุโพธิณะ)

วิทยานิพนธ์ เปลี่ยนศักดิ์ : การออกแบบและจำลองตัวตรวจจับก๊าซพลังงานต่ำขนาดไมโครเมตร.  
(DESIGN AND SIMULATION OF LOW POWER MICRO-GAS SENSORS) อ.ที่ปรึกษา  
วิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. มานะ ศรียุทธศักดิ์, 98 หน้า.

ตัวตรวจจับก๊าซชนิดสารกึ่งตัวนำมีข้อดีหลายประการได้แก่ ขนาดเล็ก ความไวสูง และราคาถูก แต่มีข้อเสีย คือ ใช้พลังงานสูงเนื่องจากทำงานที่อุณหภูมิสูงหลายร้อยองศาเซลเซียส การลดพลังงานที่ใช้ของตัวตรวจจับก๊าซชนิดสารกึ่งตัวนำจึงเป็นสิ่งที่ต้องได้รับการพัฒนา วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์และออกแบบตัวให้ความร้อนในตัวตรวจจับก๊าซที่ใช้พลังงานต่ำ การคำนวณค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนตัวให้ความร้อนและประสิทธิภาพของตัวให้ความร้อนทำโดยใช้หลักการการถ่ายเทความร้อน 3 ส่วนคือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสี ในการศึกษาได้ทำการตรวจสอบค่าอุณหภูมิของตัวให้ความร้อน 2 วิธี คือ การวิเคราะห์เชิงวิเคราะห์ (Analytical analysis) และการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical analysis) โดยใช้หลักการไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

เนื่องจากการถ่ายเทความร้อน จะมีผลของรูปร่าง สมบัติของวัสดุ และสภาวะแวดล้อมเข้ามาเกี่ยวข้อง ในการศึกษาจึงกำหนดใช้แพลตินัมเป็นวัสดุที่ใช้ทำตัวให้ความร้อน โดยในเบื้องต้นกำหนดโครงสร้างของตัวให้ความร้อนเป็นรูปแท่งสี่เหลี่ยม สำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิบนตัวให้ความร้อนจะเริ่มจากการกำหนดให้สภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าคงที่ และทำการประมาณสมการการแผ่รังสีให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นตรง

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างพื้นฐานที่มีขนาดกว้าง×หนา×สูง เท่ากับ  $50 \mu\text{m} \times 0.1 \mu\text{m} \times 2,000 \mu\text{m}$  พบว่าเมื่อพิจารณาเฉพาะการนำความร้อนและการพาความร้อน ผลการวิเคราะห์จะอุณหภูมิสูงกว่าผลจากการวิเคราะห์ที่รวมทั้งสามส่วนประมาณ 9% และเมื่อพิจารณาเฉพาะการนำความร้อนและการแผ่รังสี ผลการวิเคราะห์จะสูงกว่าผลจากการวิเคราะห์ที่รวมทั้งสามส่วนประมาณ 41% และเมื่อวิเคราะห์ผลของการแผ่รังสีโดยใช้รูปสมการเชิงเส้นพบว่าจะทำให้ค่าอุณหภูมิต่ำกว่าที่ควรจะเป็นประมาณ 5% นอกจากนี้พบว่าการวิเคราะห์อุณหภูมิในตัวให้ความร้อนโดยกำหนดให้สภาพต้านทานไฟฟ้าของตัวให้ความร้อนมีค่าคงที่จะให้ค่าอุณหภูมิสูงกว่าการวิเคราะห์เมื่อให้สภาพต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิประมาณ 21%

นอกจากนี้ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์หารูปแบบโครงสร้างของตัวให้ความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูง โดยแปรขนาดความยาวในช่วง  $0.1 \text{ mm} - 10 \text{ mm}$  ความกว้างในช่วง  $0.1 \mu\text{m} - 100 \mu\text{m}$  และความหนาในช่วง  $0.1 \mu\text{m} - 10 \mu\text{m}$  พบว่าการออกแบบตัวให้ความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงจะต้องออกแบบให้มีขนาดความกว้างและความหนาที่น้อยโดยคำนึงถึงความสะดวกในการใช้งานจริง ในขณะที่ความยาวที่เหมาะสมจะถูกกำหนดโดยความกว้าง ความหนา และสมบัติของสารของตัวให้ความร้อน ซึ่งจะได้ขนาดตัวให้ความร้อนที่เหมาะสมมีขนาดกว้าง  $50 \mu\text{m}$  หนา  $0.1 \mu\text{m}$  และยาว  $2,540 \mu\text{m}$  และเมื่อป้อนแรงดัน  $0.2 \text{ V}$  จะได้อุณหภูมิสูงสุด  $617\text{K}$  ที่จุดกึ่งกลาง และใช้พลังงาน  $0.7 \text{ mW}$

นอกจากนี้ผลการศึกษาได้แสดงให้เห็นว่าการออกแบบตัวให้ความร้อนที่บริเวณกึ่งกลางมีขนาดเล็กและบริเวณขั้วไฟฟ้ามีขนาดใหญ่จะทำให้สะดวกต่อการใช้งาน ใช้พลังงานต่ำ และมีประสิทธิภาพสูง

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อ นิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ปีการศึกษา 2556

# # 5670211521 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: GAS SENSOR / LOW POWER / MICRO-HEATER / DESIGN AND SIMULATION / COMSOL MULTIPHYSICS

TIWAPORN PLIENSAK: DESIGN AND SIMULATION OF LOW POWER MICRO-GAS SENSORS.  
ADVISOR: ASSOC. PROF. MANA SRIYUDTHSAK, Ph.D., 98 pp.

Semiconductor gas sensor has many advantages such as small size, high sensitivity and low cost. However, it also has demerit that it has high power consumption due to operational temperature at several hundreds degrees Celsius. Techniques to reduce power consumption for the semiconductor gas sensor are required to be developed. This thesis presents an analysis and a design of a low power consumption heater for the gas sensor. Calculation of the temperature and efficiency of the heater were based on three principles of heat transfer theory which are conduction, convection, and radiation. Analysis of the temperature was done by two methods which are analytical analysis and numerical analysis using Finite Element Method (FEM) in COMSOL Multiphysics.

Since heat transfer depends on structures, properties of material, and environment, platinum was used as the heating material in which the initial structure of the heater is a rectangular rod. For the temperature analysis on the heater, a constant electrical resistivity and a linearized model of the radiation equation were assumed first.

The results for the analysis of the structure of the heater with the dimension (width×thickness×length) of  $50\ \mu\text{m} \times 0.1\ \mu\text{m} \times 2,000\ \mu\text{m}$  indicated that if the radiation or the convection were neglected, the temperature are 9% and 41% higher than that of when all the three principles were considered, respectively. It was also found that the linearization of the radiation equation will lead to the decrease of temperature by 5%. In addition, by the estimation of constant resistivity, the temperature will be 21% higher than that of the temperature dependent resistivity.

Moreover, this thesis presents the analysis of the efficiency, the ratio between temperatures to power consumption. The length, width and thickness were varied in the range of  $0.1\ \text{mm} - 10\ \text{mm}$ ,  $0.1\ \mu\text{m} - 100\ \mu\text{m}$ , and  $0.1\ \mu\text{m} - 10\ \mu\text{m}$ , respectively. From this condition, the most efficient structure of heater should be designed with the smallest sizes of width and thickness where implementation condition should be considered. While the optimal length will be defined by the width, thickness and properties of the heating material. In conclusion, the optimal dimension (width×thickness×length) for the heater should be  $50\ \mu\text{m} \times 0.1\ \mu\text{m} \times 2,540\ \mu\text{m}$ . For the applied voltage of 0.2 V, the maximum temperature of 617K will be obtained at the middle of the heater while the power of 0.7 mW will be consumed.

In addition, the result indicated that the heater with dimension that is small at the middle and large at the electrode terminal is preferred for the ease of use, high efficiency and low power consumption.

Department: Electrical Engineering

Student's Signature .....

Field of Study: Electrical Engineering

Advisor's Signature .....

Academic Year: 2013

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.มานะ ศรียุทธศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่คอยให้ความช่วยเหลือและคำปรึกษาตลอดการทำวิจัยครั้งนี้ อาทิเช่น การกำหนดแนวทางวิจัย ให้คำแนะนำ และช่วยแก้ปัญหาในการทำวิจัย จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษาในระดับมหาบัณฑิตตลอดปีการศึกษา และให้ทุนสนับสนุนสำหรับการไปนำเสนอผลงานที่งานประชุมวิชาการ The 6th AUN/SEED-Net Regional Conference on Electrical Engineering 2014 ณ ประเทศมาเลเซีย

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร. ปราโมทย์ เดชะอำไพ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อาภรณ์ อธิมงคลรัศมี และดร. สิทธิสุนทร สุโพธิณะ ที่สละเวลาอันมีค่ามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และให้คำปรึกษา

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์ และนายธारा จิวานุรักษ์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้คำแนะนำและเอื้อเพื่อไปรณรงค์คอมพิวเตอร์สำหรับการศึกษาในระดับมหาบัณฑิต

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ เดโซ ทองอร่าม ภาควิชาวิศวกรรมนิเวศศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือไฟโรมิเตอร์พร้อมทั้งให้คำแนะนำสำหรับการศึกษาระดับมหาบัณฑิต

ขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ทุนสนับสนุนการไปนำเสนอผลงานที่งานประชุมวิชาการ The 29th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications ณ ประเทศไทย

ขอขอบพระคุณ งานประชุมวิชาการ The 29th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications ที่ให้ทุนสนับสนุนสำหรับการไปนำเสนอผลงาน

ขอขอบคุณ พี่ เพื่อน และน้อง ในห้องปฏิบัติการวิจัย Bioelectronic Research Laboratory (BERL) ที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และเป็นกำลังใจตลอดการศึกษาในระดับมหาบัณฑิต

ขอขอบคุณ นายรติศ สมัญญาหิรัญ ที่ให้คำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหา และเป็นกำลังใจตลอดทั้งการศึกษาในระดับมหาบัณฑิต

และสุดท้ายขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ญาติพี่น้อง และเพื่อนของข้าพเจ้า ที่ให้คำปรึกษา และเป็นกำลังใจตลอดการศึกษาในระดับมหาบัณฑิตนี้

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 ทบทวนวรรณกรรม.....	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 ขั้นตอนในการดำเนินงาน.....	4
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	4
บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ตัวตรวจจับก๊าซ (Gas sensor).....	5
2.2 การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer) [32].....	7
2.2.1 การนำความร้อน (Conduction heat transfer).....	7
2.2.2 การพาความร้อน (Convection heat transfer).....	8
2.2.3 การแผ่รังสี (Radiation heat transfer).....	10
2.3 ไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM).....	10
2.4 คอมโซลต์มัลติฟิสิกส์ (COMSOL Multiphysics) [33].....	10
บทที่ 3 การวิเคราะห์อุณหภูมิภายในตัวให้ความร้อน.....	13
3.1 สมการอุณหภูมิเมื่อพิจารณาผลของการนำความร้อนและการพาความร้อน.....	13
3.2 ผลของการจำลองอุณหภูมิตัวให้ความร้อนเมื่อพิจารณาการนำความร้อนและการพาความร้อน.....	16
3.3 สมการอุณหภูมิเมื่อพิจารณาผลของการแผ่รังสี.....	19
3.3.1 การประมาณการแผ่รังสี.....	20

3.3.1.1 การประมาณพจน์การแผ่รังสี.....	21
3.3.1.2 การประมาณพจน์การพาความร้อนและการแผ่รังสี.....	23
3.3.2 สมการอุณหภูมิบนตัวให้ความร้อนเมื่อใช้ผลของการแผ่รังสีแบบประมาณ.....	25
3.4 ผลของการจำลองอุณหภูมิบนตัวให้ความร้อนเมื่อพิจารณาการแผ่รังสี.....	26
3.5 สรุป.....	29
บทที่ 4 การออกแบบตัวให้ความร้อน .....	31
4.1 พลังงานกับความกว้าง ความยาว และความหนาของตัวให้ความร้อน .....	33
4.1.1 พลังงานกับความกว้าง.....	34
4.1.2 พลังงานกับความหนา.....	37
4.1.3 พลังงานกับความยาว.....	40
4.2 ความยาวที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด .....	42
4.3 การออกแบบและจำลองผลตัวให้ความร้อนโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	45
4.3.1 โครงสร้างตัวให้ความร้อน .....	45
4.3.2 โครงสร้างตัวตรวจจับก๊าซ.....	52
4.3.3 โครงสร้างตัวตรวจจับก๊าซที่ลดการใช้ฉนวน .....	55
4.4 สรุป.....	60
บทที่ 5 การวิเคราะห์เมื่อสภาพต้านทานไฟฟ้าไม่คงที่.....	61
5.1 การวิเคราะห์สมการเมื่อสภาพต้านทานไฟฟ้าไม่คงที่ .....	61
5.2 การจำลองผลตัวให้ความร้อนเมื่อสภาพต้านทานไฟฟ้าไม่คงที่ .....	65
5.3 สรุป.....	67
บทที่ 6 การเปรียบเทียบผลการจำลองโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับการวัดค่าจริง .....	69
6.1 โครงสร้างตัวให้ความร้อน .....	69
6.2 การจำลองผลโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ .....	70
6.3 การวัดค่าตัวให้ความร้อนโดยเครื่องไพโรมิเตอร์ชนิดวัดการแผ่รังสีความร้อน .....	73
6.4 เปรียบเทียบผลการจำลองและผลการวัด .....	75
6.5 สรุป.....	84
บทที่ 7 สรุป.....	85



7.1 สมการอนุกรมของตัวให้ความร้อน .....	85
7.2 ความกว้าง ความยาว และความหนาในการออกแบบ .....	88
7.3 โครงสร้างตัวตรวจจับก๊าซ .....	89
7.4 สมการอนุกรมเมื่อสภาพด้านทานไม่คงที่ .....	90
7.5 การเปรียบเทียบการจำลองโดยโปรแกรมกับการวัด .....	92
7.6 ข้อเสนอแนะ .....	92
รายการอ้างอิง .....	93
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	98



## สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างประโยชน์ของตัวตรวจจับก๊าซ [30] .....	5
ตารางที่ 2.2 ชนิดของตัวตรวจจับก๊าซกับการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่ใช้ในการตรวจจับ [30].....	6
ตารางที่ 2.3 การนำความร้อนของวัสดุที่อุณหภูมิ 293 K .....	8
ตารางที่ 2.4 สัมประสิทธิ์การพาความร้อน .....	9
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของแพลทินัม .....	16
ตารางที่ 3.2 ค่าอัตราการถ่ายเทพลังงานเปรียบเทียบระหว่างการพาความร้อนและการแผ่รังสี .....	20
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของแพลทินัม .....	35
ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง .....	46
ตารางที่ 4.3 ผลการจำลองตัวให้ความร้อนรูปแบบต่างๆโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ .....	51
ตารางที่ 4.4 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการจำลองตัวตรวจจับก๊าซ .....	53
ตารางที่ 4.5 ขนาดของตัวตรวจจับความร้อนที่ใช้จำลองผล .....	53
ตารางที่ 4.6 ค่าพารามิเตอร์ของโครงสร้างลดฉนวนที่ใช้ในการจำลอง .....	56
ตารางที่ 4.7 ผลการจำลองตัวตรวจจับก๊าซที่มีโครงสร้างลดฉนวน .....	57
ตารางที่ 5.1 ผลการจำลองจากทฤษฎีและโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่แรงดันต่างๆ .....	66
ตารางที่ 6.1 สมบัติของสารที่ใช้ในการจำลอง .....	70
ตารางที่ 6.2 ผลการจำลองตัวให้ความร้อนโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ .....	73
ตารางที่ 6.3 ผลการวัดอุณหภูมิด้วยเครื่องไพโรมิเตอร์ที่แรงดันต่างๆ .....	74
ตารางที่ 6.4 ผลการจำลองโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เมื่อกำหนดให้แผ่นฐานมีอุณหภูมิ 300 K .....	77
ตารางที่ 6.5 ผลการจำลองจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์เมื่อกำหนดค่า $h$ เท่ากับ 3300 [W/m <sup>2</sup> ·K] .....	81

## สารบัญภาพ

ภาพที่ 1.1 โครงสร้างทั่วไปของตัวตรวจจับก๊าซ.....	1
ภาพที่ 1.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความไวในการตอบสนองกับอุณหภูมิของ SnO <sub>2</sub> [1] .....	2
ภาพที่ 2.1 ขนาดช่องว่างระดับพลังงานของสารแต่ละชนิด ฉนวน(ซ้ายสุด) สารกึ่งตัวนำ(ตรงกลาง) ตัวนำ(ขวาสุด) [31] .....	6
ภาพที่ 2.2 หน้าจอการใช้งานของโปรแกรมคอมโซล .....	11
ภาพที่ 3.1 โครงสร้างตัวให้ความร้อนที่ใช้ในการวิเคราะห์ .....	13
ภาพที่ 3.2 ตัวให้ความร้อนที่ใช้วิเคราะห์เมื่อพิจารณาเป็นชิ้นเล็ก $dx$ .....	14
ภาพที่ 3.3 อุณหภูมิที่เปลี่ยนไปบนตัวให้ความร้อนในแต่ละตำแหน่งความยาว .....	17
ภาพที่ 3.4 ค่าและตำแหน่งที่ป้อนเงื่อนไขภายในโปรแกรมคอมโซล.....	17
ภาพที่ 3.5 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนตัวให้ความร้อนขนาดยาว ( $W$ ) 2 mm กว้าง ( $D$ ) 50 $\mu m$ และหนา ( $H$ ) 0.1 $\mu m$ .....	18
ภาพที่ 3.6 กราฟอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปบนตัวให้ความร้อนที่ตำแหน่งความยาวต่างๆ โดย โปรแกรมคอมโซล .....	18
ภาพที่ 3.7 ค่าความผิดพลาดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงของโปรแกรมคอมโซลเทียบกับทฤษฎี.....	19
ภาพที่ 3.8 กราฟสมการการแผ่รังสีระหว่างทฤษฎีและการประมาณการถดถอยเชิงเส้น .....	22
ภาพที่ 3.9 กราฟความผิดพลาดของการประมาณสมการการแผ่รังสีแบบวิเคราะห์ การถดถอยเชิงเส้น เทียบกับทฤษฎี (ก)ความผิดพลาด (ข)ความผิดพลาดเป็นเปอร์เซ็นต์.....	23
ภาพที่ 3.10 กราฟสมการการพาความร้อนรวมกับการแผ่รังสีระหว่างทฤษฎี และการประมาณการ ถดถอยเชิงเส้น.....	24
ภาพที่ 3.11 กราฟความผิดพลาดของการประมาณสมการการพาความร้อนรวมกับการแผ่รังสี แบบ วิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นเทียบกับทฤษฎี (ก)ความผิดพลาด (ข)ความผิดพลาดเป็นเปอร์เซ็นต์ ....	25
ภาพที่ 3.12 กราฟอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปบนตัวให้ความร้อนที่ตำแหน่งความยาวต่างๆ .....	27
ภาพที่ 3.13 ค่าและตำแหน่งที่ป้อนเงื่อนไขภายในโปรแกรมคอมโซล .....	27
ภาพที่ 3.14 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนตัวให้ความร้อนเมื่อพิจารณาผลของการแผ่รังสี คำนวณโดย โปรแกรมคอมโซล .....	28
ภาพที่ 3.15 กราฟอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปจากการใช้การประมาณเปรียบเทียบกับ การจำลองโดย คอมโซล .....	28
ภาพที่ 3.16 กราฟความผิดพลาดของการประมาณเทียบจากการจำลองโดยคอมโซล ที่ตำแหน่งความ ยาวต่างๆ.....	29
ภาพที่ 3.17 กราฟเปรียบเทียบผลของการวิเคราะห์อุณหภูมิต่อตัวให้ความร้อนที่เงื่อนไขต่างๆ.....	30

ภาพที่ 3.18 กราฟความผิดพลาดกรณีละเลยผลการแผ่รังสี ละเลยผลการพาความร้อน และการพิจารณาผลการแผ่รังสีโดยใช้หลักการถดถอยเชิงเส้น .....	30
ภาพที่ 4.1 โครงสร้างตัวให้ความร้อนที่ใช้ในการออกแบบ .....	33
ภาพที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับความกว้าง .....	36
ภาพที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับความกว้าง .....	36
ภาพที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับความกว้าง .....	37
ภาพที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับความหนา .....	38
ภาพที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับความหนา .....	39
ภาพที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับความหนา .....	39
ภาพที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับความยาว .....	40
ภาพที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับความยาว .....	41
ภาพที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับความยาว .....	41
ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับความยาวตามสมการที่ (4-21).....	44
ภาพที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับความยาวที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงต่างๆ .....	45
ภาพที่ 4.13 โครงสร้างและพารามิเตอร์ตัวให้ความร้อนที่ลดการใช้พลังงาน (มุมมองด้านบน) .....	46
ภาพที่ 4.14 โครงสร้างตัวให้ความร้อนที่ลดการใช้พลังงาน (3 มิติ).....	46
ภาพที่ 4.15 ค่าและตำแหน่งที่ป้อนเงื่อนไขภายในโปรแกรมคอมโซลของโครงสร้างรูปแบบ ก-จ .....	47
ภาพที่ 4.16 โครงสร้าง (ด้านซ้าย) และผลการจำลอง (ด้านขวา) โครงสร้างรูปแบบต่างๆ.....	49
ภาพที่ 4.17 กราฟแสดงอุณหภูมิตัวให้ความร้อนของโครงสร้างรูปแบบต่างๆ .....	51
ภาพที่ 4.18 โครงสร้างภาพตัดขวางตัวตรวจจับก๊าซ.....	53
ภาพที่ 4.19 ผลการจำลองตัวให้ความร้อนโดยโปรแกรมคอมโซล .....	54
ภาพที่ 4.20 ผลการจำลองตัวตรวจจับก๊าซโดยโปรแกรมคอมโซล.....	54
ภาพที่ 4.21 โครงสร้างตัวตรวจจับก๊าซที่ลดการใช้ฉนวน .....	55
ภาพที่ 4.22 โครงสร้างและพารามิเตอร์ของตัวตรวจจับก๊าซที่ลดการใช้ฉนวน โดยแสดงเฉพาะส่วนตัวให้ความร้อนและฉนวน (ก)ฉนวน 1 ชั้น (ข)ฉนวน 2 ชั้น (ค)ฉนวน 3 ชั้น และ (ง)ฉนวน 5 ชั้น....	56
ภาพที่ 4.23 ผลการจำลองตัวตรวจจับก๊าซจากโปรแกรมคอมโซล ก) โครงสร้างรูปแบบ ก(5), ข) โครงสร้างรูปแบบ ข(1), ค) โครงสร้างรูปแบบ ค(1) และ ง) โครงสร้างรูปแบบ ง(1).....	59
ภาพที่ 5.1 โครงสร้างตัวให้ความร้อนที่ใช้ในการวิเคราะห์ .....	62
ภาพที่ 5.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแส.....	65
ภาพที่ 5.3 ค่าและตำแหน่งที่ป้อนเงื่อนไขภายในโปรแกรมคอมโซล.....	65

ภาพที่ 5.4 ผลการจำลองจากโปรแกรมคอมโซล (ก)การจำลองตัวให้ความร้อนเมื่อสภาพด้านทานคงที่ (ข)การจำลองตัวให้ความร้อนเมื่อสภาพด้านทานไม่คงที่ ..... 67

ภาพที่ 5.5 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนตัวให้ความร้อนเมื่อกำหนดให้สภาพด้านทานคงที่ และสภาพด้านทานขึ้นกับอุณหภูมิ ..... 68

ภาพที่ 5.6 กราฟความผิดพลาดเมื่อกำหนดให้สภาพด้านทานคงที่ ..... 68

ภาพที่ 6.1 โครงสร้างและขนาดตัวให้ความร้อน (มุมมองบน) ..... 69

ภาพที่ 6.2 โครงสร้างตัวให้ความร้อนแบบสามมิติ ..... 70

ภาพที่ 6.3 ค่าและตำแหน่งที่ป้อนเงื่อนไขภายในโปรแกรมคอมโซล..... 71

ภาพที่ 6.4 ผลการจำลองโดยโปรแกรมคอมโซลที่แรงดันค่าต่างๆ..... 72

ภาพที่ 6.5 ตัวให้ความร้อนที่ประดิษฐ์โดยวิธีพิมพ์สกรีน ..... 73

ภาพที่ 6.6 ไพโรมิเตอร์ชนิดวัดการแผ่รังสีความร้อน..... 74

ภาพที่ 6.7 ตัวให้ความร้อนที่ใช้ในการวัด..... 74

ภาพที่ 6.8 กราฟเปรียบเทียบผลการจำลองโดยโปรแกรมและการวัดค่า ..... 75

ภาพที่ 6.9 ค่าความผิดพลาดของโปรแกรมเทียบกับการวัดจริง ..... 76

ภาพที่ 6.10 ค่าและตำแหน่งที่ป้อนเงื่อนไขภายในโปรแกรมคอมโซล ..... 77

ภาพที่ 6.11 กราฟเปรียบเทียบผลการวัดกับการจำลองที่กำหนดแผ่นฐาน 300 K ..... 78

ภาพที่ 6.12 กราฟความผิดพลาดเมื่อกำหนดอุณหภูมิแผ่นฐาน 300 K ..... 78

ภาพที่ 6.13 ค่าและตำแหน่งที่ป้อนเงื่อนไขภายในโปรแกรมคอมโซล ..... 79

ภาพที่ 6.14 กราฟเปรียบเทียบผลการวัดกับการจำลองที่กำหนดแผ่นฐาน 323 K ..... 79

ภาพที่ 6.15 กราฟความผิดพลาดเมื่อกำหนดอุณหภูมิแผ่นฐาน 323 K ..... 80

ภาพที่ 6.16 ค่าและตำแหน่งที่ป้อนเงื่อนไขภายในโปรแกรมคอมโซล ..... 81

ภาพที่ 6.17 กราฟเปรียบเทียบผลการจำลองที่  $h$  เท่ากับ 3300 [ $W/m^2 \cdot K$ ] และการวัดค่า ..... 82

ภาพที่ 6.18 กราฟความผิดพลาดที่  $h$  เท่ากับ 3300 [ $W/m^2 \cdot K$ ] ..... 82

ภาพที่ 6.19 ค่าและตำแหน่งที่ป้อนเงื่อนไขภายในโปรแกรมคอมโซล ..... 83

ภาพที่ 6.20 กราฟเปรียบเทียบผลการจำลองที่  $h$  เท่ากับ 6000 [ $W/m^2 \cdot K$ ] และการวัดค่า ..... 83

ภาพที่ 6.21 กราฟความผิดพลาดที่  $h$  เท่ากับ 6000 [ $W/m^2 \cdot K$ ] ..... 84

ภาพที่ 7.1 โครงสร้างตัวให้ความร้อน ..... 85

ภาพที่ 7.2 กราฟเปรียบเทียบผลของการวิเคราะห์อุณหภูมิบนตัวให้ความร้อนที่เงื่อนไขต่างๆ..... 87

ภาพที่ 7.3 กราฟความผิดพลาดกรณีละเลยผลการแผ่รังสี และการพิจารณาผลการแผ่รังสีโดยใช้หลักการถดถอยเชิงเส้น ..... 87

ภาพที่ 7.4 โครงสร้างตัวตรวจจับก๊าซ (เฉพาะตัวให้ความร้อน)..... 89

ภาพที่ 7.5 โครงสร้างตัวตรวจจับก๊าซที่ลดการใช้ฉนวน .....	90
ภาพที่ 7.6 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนตัวให้ความร้อนเมื่อกำหนดให้สภาพต้านทานคงที่ และสภาพต้านทานขึ้นกับอุณหภูมิ .....	91
ภาพที่ 7.7 กราฟความผิดพลาดเมื่อกำหนดให้สภาพต้านทานคงที่ .....	91



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

# บทที่ 1

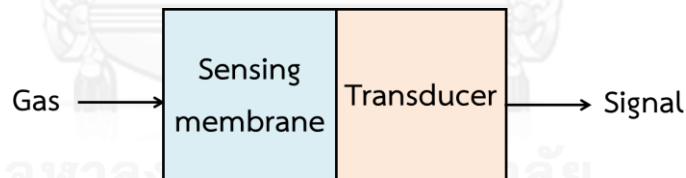
## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

เซนเซอร์ คือ อุปกรณ์สำหรับตรวจจับและวัดปริมาณทางกายภาพ ทางเคมี หรือทางชีวภาพ เช่น แรง ความเร็ว แรงดัน อุณหภูมิ การไหล การสั่น ค่า pH ก๊าซน้ำตาล ไขมัน และเชื้อโรค เป็นต้น หลังจากนั้นเซนเซอร์จะนำปริมาณที่ตรวจวัดได้มาเปลี่ยนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าเพื่อนำไปประมวลผลต่อไป

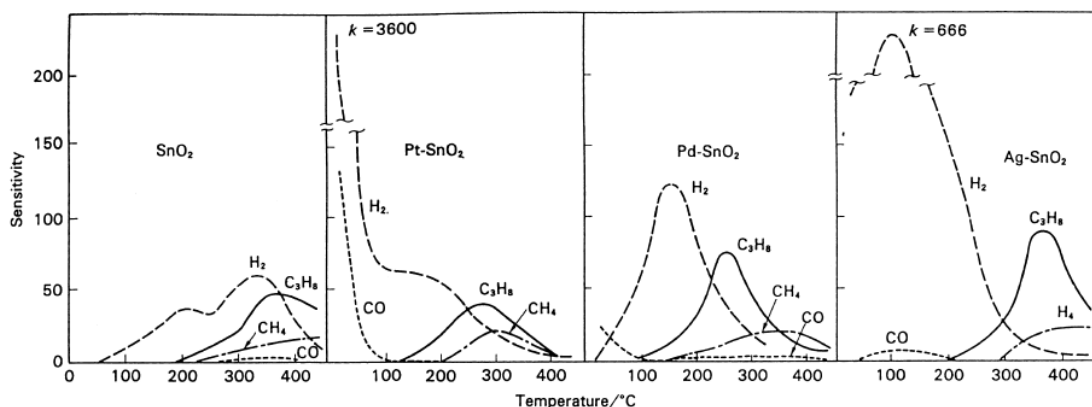
ตัวตรวจจับก๊าซ คือ เซนเซอร์ชนิดหนึ่ง ใช้สำหรับตรวจวัดปริมาณก๊าซและจำแนกชนิดของก๊าซ มีประโยชน์ใช้งานหลากหลายด้าน อาทิเช่น ด้านยานพาหนะ ได้แก่ เครื่องวัดปริมาณแอลกอฮอล์ ด้านความปลอดภัย ได้แก่ การตรวจจับก๊าซพิษในโรงงานอุตสาหกรรม ด้านการผลิต ได้แก่ จมูกอิเล็กทรอนิกส์ในอุตสาหกรรมน้ำหอม ด้านการแพทย์ ได้แก่ การวิเคราะห์ลมหายใจ เป็นต้น วิธีตรวจจับก๊าซสามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือการใช้สารกึ่งตัวนำจำพวกโลหะออกไซด์ เช่น  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{WO}_3$  เป็นต้น เนื่องจากการใช้สารกึ่งตัวนำจำพวกโลหะออกไซด์มีข้อดี คือ ราคาถูกเมื่อเทียบกับตัวตรวจจับก๊าซชนิดอื่น

ส่วนประกอบพื้นฐานของตัวตรวจจับก๊าซประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักคือ ส่วนที่จับก๊าซ (Sensing membrane) และส่วนที่วัดการเปลี่ยนแปลง (Transducer) ดังภาพที่ 1.1 โดยส่วนที่จับก๊าซจะทำหน้าที่ตรวจจับหรือทำปฏิกิริยาเคมีกับก๊าซที่เราต้องการวัด และส่วนที่วัดการเปลี่ยนแปลงจะทำหน้าที่แปลงปริมาณที่เกิดขึ้นจากส่วนจับก๊าซไปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าเพื่อทำการวัดโดยสองส่วนนี้อาจรวมเป็นส่วนเดียวกันได้



ภาพที่ 1.1 โครงสร้างทั่วไปของตัวตรวจจับก๊าซ

ตัวตรวจจับก๊าซแบบสารกึ่งตัวนำจำพวกโลหะออกไซด์จะใช้สารกึ่งตัวนำจำพวกโลหะออกไซด์เป็นส่วนที่จับก๊าซ โดยมีหลักการทำงานพื้นฐาน คือ ปกติแล้วสารกึ่งตัวนำจำพวกโลหะออกไซด์จะสามารถนำไฟฟ้าได้น้อย แต่เมื่อสารกึ่งตัวนำจำพวกโลหะออกไซด์จับกับก๊าซจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานภายในสารกึ่งตัวนำจำพวกโลหะออกไซด์ทำให้มีการนำไฟฟ้ามากขึ้น สามารถนำความเปลี่ยนแปลงนี้ไปประมวลผลต่อไป อย่างไรก็ตามสารกึ่งตัวนำจำพวกโลหะออกไซด์จะไม่สามารถทำงานดีที่อุณหภูมิห้องแต่จะสามารถทำงานได้ก็ต่อเมื่ออยู่ในสถานะที่มีอุณหภูมิสูงเช่น  $\text{SnO}_2$  (ภาพที่ 1.2) จึงจำเป็นที่จะต้องมีส่วนให้ความร้อน (Heater) เพื่อให้ความร้อนแก่สารกึ่งตัวนำ ซึ่งทำให้ต้องใช้พลังงานในการสร้างอุณหภูมิมาก นอกจากนี้ตัวตรวจจับก๊าซส่วนมากมีขนาดใหญ่ส่งผลให้มีการใช้พลังงานที่มาก ตอบสนองต่อการตรวจจับก๊าซช้า และมีราคาสูง



ภาพที่ 1.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความไวในการตอบสนองกับอุณหภูมิของ SnO<sub>2</sub> [1]

จากปัญหาข้างต้นจึงมีการนำเทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์เข้ามาช่วยแก้ปัญหา เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็กระดับไมโครเมตรถึงนาโนเมตร ซึ่งสามารถตอบสนองต่อความต้องการในด้านการลดพลังงาน เพิ่มความรวดเร็วในการตอบสนอง และราคาต่ำ ทำให้ได้รับความนิยมในอุตสาหกรรมเป็นอย่างสูง

ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอเกี่ยวกับการออกแบบและจำลองตัวตรวจจับก๊าซ โดยเน้นไปที่การออกแบบตัวให้ความร้อนที่มีขนาดเล็กเพื่อลดการใช้พลังงานให้น้อยลง เพื่อนำไปสร้างตัวตรวจจับก๊าซที่มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

## 1.2 ทบทวนวรรณกรรม

ในงานวิจัยที่ผ่านมา [2]-[24] การพัฒนาตัวตรวจจับก๊าซในด้านการพัฒนาตัวให้ความร้อนได้รับความสนใจและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยหัวข้อในการวิจัยนั้นมีหลากหลายรูปแบบ เช่น การวิเคราะห์อุณหภูมิ การวิเคราะห์พลังงาน การพัฒนาความสม่ำเสมอของการกระจายตัวอุณหภูมิ การพัฒนาวัสดุที่ใช้ เป็นต้น โดยวิธีการวิจัยสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบหลักๆ คือ การประดิษฐ์ตัวตรวจจับก๊าซขึ้นมาทดสอบ และการจำลองผลจากโปรแกรม โดยตัวตรวจจับก๊าซที่ได้รับความสนใจในงานวิจัยคือตัวตรวจจับก๊าซชนิดสารกึ่งตัวนำจำพวกโลหะออกไซด์เนื่องจากเป็นที่นิยมในวงการอุตสาหกรรมเพราะราคาถูก ประเด็นที่ได้รับความสนใจมากที่สุดก็คือการลดการใช้พลังงาน แต่อย่างไรก็ตามการวิจัยส่วนใหญ่ไม่ได้กล่าวถึงวิธีการออกแบบที่ชัดเจนว่ารูปร่างหรือขนาดที่เลือกมาใช้วิจัยนั้นมีสาเหตุมาจากอะไร

Rebecka Domeij Backryd, Lars Elden 2005 [25] ศึกษาและจำลองผลของการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer) ที่เกิดขึ้นภายในตัวตรวจจับก๊าซ โดยพิจารณาทั้งตัวเซนเซอร์ แผ่นฐาน รวมไปถึงสายที่เชื่อมระหว่างตัวเซนเซอร์และแผงวงจร วิเคราะห์ลักษณะของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนตัวตรวจจับก๊าซโดยใช้หลักการนำความร้อน (Conduction) การพาความร้อน (Convection) การแผ่รังสีความร้อน (Radiation) และจำลองผลที่เกิดขึ้นโดยใช้หลักการไฟไนติเอลิเมนต์ (Finite element method, FEM) ในโปรแกรมคอมโซล จากการศึกษาพบว่าการจำลองผลยังไม่ตรงกับที่ทดลองอย่างสมบูรณ์ แต่อยู่ในค่าที่แม่นยำเพียงพอ จำเป็นต้องกำหนดค่าตัวแปรในการจำลองเพิ่มเติม



Vineet Bansal, Anil Gurjar, Dinesh Kumar, B. Prasad 2011 [26] ศึกษาและออกแบบตัวให้ความร้อนรูปแบบเส้นขด (Spiral) โดยออกแบบและจำลองผลแบบ 3 มิติในลักษณะแตกต่างกันเพื่อหารูปแบบที่เหมาะสมและมีพลังงานต่ำ ควบคุมขนาดและรูปร่างของตัวให้ความร้อนแบบขด อีกทั้งปรับหรือเพิ่มเติมส่วนต่างๆ เช่น เจาะรูที่แผ่นฐาน เป็นต้น ในการศึกษาได้ใช้ Joule heating and electro-thermal ในโปรแกรมคอมโซล ในการจำลองผลพบว่าการออกแบบโดยเพิ่มการเจาะรูที่แผ่นฐานจะช่วยให้ตัวให้ความร้อนมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับตัวให้ความร้อนแบบไม่เจาะรูที่ฐาน

Woo-Jin Hwang, Kyu-Sik Shin, Ji-Hyoung Roh, Dae-Sung Lee, and Sung-Hoon Choa 2011 [27] ศึกษาและเปรียบเทียบลักษณะของตัวให้ความร้อนระหว่างตัวให้ความร้อนที่มีการชดเชยพลังงานกับไม่มีการชดเชยพลังงานว่ารูปแบบใดมีการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ดีกว่า โดยใช้หลักการ FEM ในโปรแกรม ANSYS11 ในการจำลองผล หลังจากนั้นจึงทำการประดิษฐ์ตัวตรวจจับสนิทเพื่อเปรียบเทียบกับผลจำลองที่ได้ ผลการศึกษาพบว่าตัวให้ความร้อนแบบมีการชดเชยพลังงานเหมาะสมสำหรับตัวตรวจจับสนิทแบบสารกึ่งตัวนำมากกว่าตัวให้ความร้อนแบบไม่ชดเชยพลังงาน

Bijoy Kantha, Subhashis Roy and Subir Kumar Sarkar 2012 [28] ศึกษาและวิเคราะห์ผลของตัวให้ความร้อนในตัวตรวจจับสนิทโดยใช้ Electro-Thermo-Mechanical ในโปรแกรม CoventorWare™ (โปรแกรมสำหรับการออกแบบและจำลองผล MEMS) โดยเปรียบเทียบการใช้วัสดุของตัวให้ความร้อนระหว่าง Poly Silicon กับแพลทินัม (Platinum) ที่อุณหภูมิและความหนาเท่ากันว่าชนิดใดมีการขยายตัวเนื่องจากความร้อนมากกว่า ซึ่งพบว่า Poly Silicon มีการขยายตัวที่น้อยกว่าในอุณหภูมิที่ต้องการ และมีราคาถูกกว่าการใช้ตัวให้ความร้อนจากแพลทินัม

Kantha, B. และคณะ [29] ศึกษาและออกแบบตัวให้ความร้อนขนาดไมโครเมตร โดยวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบเพื่อหาจุดที่เหมาะสมโดยวัดหาจุดเหมาะสมจากพลังงานที่ใช้ไปในตัวให้ความร้อน การวิเคราะห์ใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic algorithm) ในการหาจุดเหมาะสมของพารามิเตอร์สำหรับการออกแบบตัวให้ความร้อนที่มีพลังงานต่ำที่สุด โดยวิเคราะห์พารามิเตอร์ 3 ตัวคือ พื้นที่ทำงาน อุณหภูมิของตัวให้ความร้อน และแรงดันที่ป้อน ใช้การจำลองผลที่เกิดขึ้นด้วยโปรแกรม Intellisuite v8.2

### 1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ออกแบบตัวตรวจจับสนิทที่ใช้พลังงานต่ำ โดยออกแบบตัวตรวจจับสนิทให้มีขนาดเล็กเพื่อลดการป้อนพลังงาน

### 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. ออกแบบตัวตรวจจับสนิทที่มีขนาดดังนี้
  - 1.1 ความยาวของตัวตรวจจับสนิท 4000-7000  $\mu m$
  - 1.2 ความหนาของตัวตรวจจับสนิทแต่ละชั้น 1-5  $\mu m$
  - 1.3 ความกว้างของตัวตรวจจับสนิทแต่ละส่วน 50-100  $\mu m$
2. ตัวตรวจจับสนิทใช้พลังงานน้อยกว่า 100 mW

3. อุณหภูมิในตัวตรวจจับก๊าซมากกว่า 600 K
4. ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ในการออกแบบและจำลองผล
5. วิเคราะห์ผลของอุณหภูมิโดยใช้หลักการถ่ายเทความร้อน

#### 1.5 ขั้นตอนในการดำเนินงาน

1. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาเรื่องการถ่ายเทความร้อน
3. วิเคราะห์ผลปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิและพลังงานที่เกิดขึ้นภายในตัวตรวจจับก๊าซ
4. เปรียบเทียบผลทางทฤษฎีและการจำลองโดยโปรแกรม
5. ออกแบบตัวตรวจจับก๊าซที่ใช้พลังงานต่ำ
6. ปรับปรุงการออกแบบเพื่อให้ได้ตัวตรวจจับก๊าซที่ใช้พลังงานต่ำที่สุด
7. รวบรวมผลและจัดทำวิทยานิพนธ์

#### 1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

ได้วิธีการออกแบบตัวให้ความร้อนในตัวตรวจจับก๊าซที่ใช้พลังงานต่ำ

## บทที่ 2

### ความรู้พื้นฐานและหลักการที่เกี่ยวข้อง

ในบทที่ 2 นี้ จะกล่าวถึงหลักการงานทั่วไปของตัวตรวจจับก๊าซ จากนั้นจะกล่าวถึงทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer) ที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์และประเมินการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นบนตัวให้ความร้อน และใช้ในการวิเคราะห์การใช้พลังงานในตัวให้ความร้อน ส่วนสุดท้ายของบทที่ 2 นี้จะกล่าวถึงหลักการไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method, FEM) และหลักการที่จะใช้ในโปรแกรมคอมโซลต์มัลติฟิสิกส์ (COMSOL multiphysics) ที่จะใช้ในการวิเคราะห์และจำลองผลตัวตรวจจับก๊าซ

#### 2.1 ตัวตรวจจับก๊าซ (Gas sensor)

ตัวตรวจจับก๊าซเป็นอุปกรณ์ไว้สำหรับตรวจจับและวัดปริมาณก๊าซ มีประโยชน์หลากหลายด้าน ตัวอย่างแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างประโยชน์ของตัวตรวจจับก๊าซ [30]

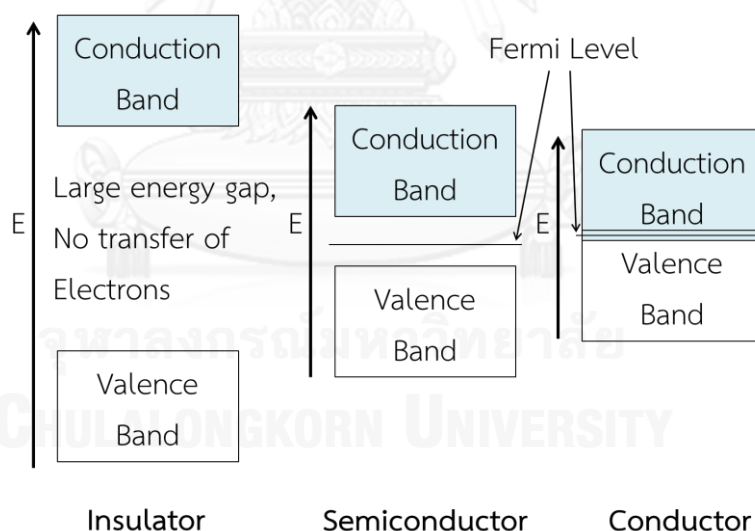
ประโยชน์	ตัวอย่าง
ด้านความปลอดภัย	สัญญาณไฟไหม้
	การตรวจสอบรอยรั่ว
	การตรวจจับก๊าซพิษ
	การควบคุมหม้อไอน้ำ
ด้านยานพาหนะ	ตรวจวัดระดับแอลกอฮอล์
	การควบคุมการระบายอากาศรถยนต์
	การควบคุมการกรอง
คุณภาพอากาศภายในร่ม	เครื่องฟอกอากาศ
	การระบายอากาศ
การควบคุมสิ่งแวดล้อม	สถานีสภาพอากาศ
	การตรวจสอบมลพิษ
ด้านการแพทย์	การวิเคราะห์ลมหายใจ
	การตรวจหาโรค

การตรวจจับก๊าซสามารถทำได้หลายวิธีดังตารางที่ 2.2 แต่วิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุด คือ การใช้สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor gas sensors) เนื่องจากมีราคาถูก แต่ว่าตัวตรวจจับก๊าซชนิดสารกึ่งตัวนำมีข้อเสียคือใช้พลังงานมาก

ตารางที่ 2.2 ชนิดของตัวตรวจจับก๊าซกับการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่ใช้ในการตรวจจับ [30]

ชนิดตัวตรวจจับก๊าซ	การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ
สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor gas sensors)	การนำไฟฟ้า
เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric gas sensors)	มวล
แสง (Optical gas sensors)	การดูดกลืนแสง สะท้อน เรืองแสง ดัชนีหักเห
เคมีไฟฟ้า (Electrochemical gas sensors)	แรงเคลื่อนไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าในเซลล์ไฟฟ้าเคมี

การทำงานของตัวตรวจจับก๊าซสารกึ่งตัวนำจะใช้หลักการนำไฟฟ้าในการตรวจจับก๊าซ สารกึ่งตัวนำมีขนาดช่องว่างของระดับพลังงานปานกลางเมื่อเทียบกับตัวนำและฉนวนดังภาพที่ 2.1 [31] ทำให้ในสภาวะปกติแล้วสารกึ่งตัวนำจะสามารถนำไฟฟ้าได้น้อยมาก แต่เมื่อสารกึ่งตัวนำมีก๊าซมากระตุ้น จะทำให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างก๊าซกับสารกึ่งตัวนำ ทำให้ความต้านทานเปลี่ยนแปลงและเกิดการนำไฟฟ้าขึ้นได้



ภาพที่ 2.1 ขนาดช่องว่างระดับพลังงานของสารแต่ละชนิด  
ฉนวน(ซ้ายสุด) สารกึ่งตัวนำ(ตรงกลาง) ตัวนำ(ขวาสุด) [31]

แต่อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิห้องสารกึ่งตัวนำจะมีอิเล็กตรอนในแถบการนำไฟฟ้าต่ำ ทำให้ที่อุณหภูมิห้องแม้จะมีก๊าซมากระตุ้นสารกึ่งตัวนำก็นำไฟฟ้าได้น้อย จึงจำเป็นต้องมีการให้ความร้อนแก่สารกึ่งตัวนำเพื่อให้มีจำนวนอิเล็กตรอนที่เพียงพอสำหรับการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างสารกึ่งตัวนำและก๊าซ เพื่อทำให้เกิดการนำไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้น จากสาเหตุนี้เองตัวตรวจจับก๊าซชนิดสารกึ่งตัวนำ

จึงต้องมีตัวให้ความร้อน (Heater) ซึ่งในส่วนนี้ทำให้ตัวตรวจจับก๊าซชนิดนี้ใช้พลังงานมาก พลังงานที่ใช้ในตัวตรวจจับก๊าซจะเป็นดังสมการที่ (2-1) และ (2-2)

$$Power = \frac{v^2}{R} \quad (2-1)$$

$$R = \rho_E \frac{l}{A} \quad (2-2)$$

เมื่อ	$v$	คือ แรงดันที่ป้อนแก่ตัวตรวจจับก๊าซ [V]
	$R$	คือ ความต้านทาน [ $\Omega$ ]
	$\rho_E$	คือ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า [ $\Omega \cdot m$ ] มีค่าเป็นส่วนกลับของค่าสภาพนำไฟฟ้า ( $\sigma_E$ ) [S/m]
	$l$	คือ ความยาววัสดุที่รับแรงดัน (ความยาวตัวต้านทาน) [m]
	$A$	คือ พื้นที่หน้าตัดที่รับแรงดัน (พื้นที่หน้าตัดตัวต้านทาน) [ $m^2$ ]

## 2.2 การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer) [32]

การถ่ายเทความร้อนเป็นการถ่ายโอนพลังงานที่เกิดขึ้นระหว่างวัสดุที่มีอุณหภูมิที่แตกต่างกัน โดยพยายามอธิบายถึงวิธีที่ความร้อนถูกถ่ายโอนรวมไปถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงความร้อนที่เกิดขึ้น ซึ่งแตกต่างกับอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamic) ที่อธิบายเฉพาะสภาวะสมดุล การถ่ายเทความร้อนแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ

- การนำความร้อน (Conduction heat transfer)
- การพาความร้อน (Convection heat transfer)
- การแผ่รังสี (Radiation heat transfer)

### 2.2.1 การนำความร้อน (Conduction heat transfer)

คือ การถ่ายเทพลังงานความร้อนภายในวัตถุหนึ่งหรือระหว่างวัตถุสองชิ้นที่สัมผัสกัน มีทิศทางการถ่ายโอนพลังงานจากตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงไปยังตำแหน่งที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยที่ตัวกลางในการนำความร้อนไม่มีการเคลื่อนที่ การนำความร้อนสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในสภาวะของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ตัวอย่างการนำความร้อน เช่น การนำมือจับเหล็กที่ร้อนแล้วรู้สึกถึงความร้อนเนื่องจากความร้อนจากเหล็กเกิดการนำความร้อนมายังมือ จากหลักการของฟูเรียร์ (Fourier's law) อัตราการถ่ายเทความร้อนของการนำความร้อนจะเป็นไปตามสมการที่ (2-3)

$$q_x = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2-3)$$

เมื่อ	$q_x$	คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน [W]
	$\partial T / \partial x$	คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเทียบกับตำแหน่ง (Temperature gradient) [ $K/m$ ]

$k$  คือ ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) [ $W/m \cdot K$ ]

$A$  คือ พื้นที่ในการนำความร้อน [ $m^2$ ]

อัตราการถ่ายเทความร้อนขึ้นกับปัจจัยหลายชนิด เช่น พื้นที่หน้าตัด วัสดุตัวกลาง ความแตกต่างของอุณหภูมิ เป็นต้น ค่าการนำความร้อน ( $k$ ) เป็นสมบัติเฉพาะของวัสดุ โดยวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนมากก็จะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนมาก ค่าการนำความร้อนเป็นค่าที่ได้จากการทดลอง ปัจจัยที่มีผลต่อค่าการนำความร้อนมีหลายด้าน หนึ่งในนั้นก็คืออุณหภูมิ ตัวอย่างค่าการนำความร้อนของวัสดุดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การนำความร้อนของวัสดุที่อุณหภูมิ 293 K

Material	Thermal conductivity ( $k$ ) [ $W/m \cdot K$ ]
Metals:	
Silver (pure)	410
Copper (pure)	385
Aluminum (pure)	202
Nickel (pure)	93
Iron (pure)	73
Nonmetallic solids:	
Diamond	2300
Quartz, parallel to axis	41.6
Glass, window	0.78
Liquids:	
Mercury	8.21
Water	0.556
Gases:	
Hydrogen	0.175

## 2.2.2 การพาความร้อน (Convection heat transfer)

คือ การถ่ายเทพลังงานความร้อนผ่านตัวกลางที่เป็นของไหล เช่น ของเหลวหรือก๊าซ โดยที่ตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนมีการเคลื่อนที่ ตัวอย่างการพาความร้อน เช่น การต้มน้ำ โดยตัวกลางในการพาความร้อนคือน้ำ เมื่อได้รับความร้อนจะทำให้เกิดการขยายตัวลอยสูงขึ้นไปยังด้านบน ส่วนน้ำที่เย็นกว่าก็จะลงมาแทนที่ เป็นเช่นนี้ไปจนกว่าจะร้อนทั่วกัน การพาความร้อนสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบหลักๆ คือ

- กรณีของไหลถูกบังคับทิศทาง (Forced convection) เช่น พัดลมเป่า
- กรณีของไหลไม่ได้ถูกบังคับทิศทาง (Natural/Free convection) เช่น อากาศปกติ

จากกฎของนิวตัน (Newton's law) อัตราการถ่ายเทความร้อนของการพาความร้อนจะเป็นดังสมการที่ (2-4)

$$q = hA(T_w - T_\infty) \quad (2-4)$$

เมื่อ	$q$	คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน [W]
	$h$	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convection heat-transfer coefficient) [W/m <sup>2</sup> ·K]
	$A$	คือ พื้นที่ในการพาความร้อน [m <sup>2</sup> ]
	$T_w$	คือ อุณหภูมิผิวที่เกิดการพาความร้อน [K]
	$T_\infty$	คือ อุณหภูมิของไหล [K]

สัมประสิทธิ์การพาความร้อนไม่ใช่สมบัติของสาร แต่เป็นค่าที่ได้จากการทดลอง ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น รูปทรงของวัสดุ ความเร็วของของไหล ทิศทางของของไหล เป็นต้น ตัวอย่างสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สัมประสิทธิ์การพาความร้อน

Mode	Convection heat-transfer coefficient ( $h$ ) [W/m <sup>2</sup> ·K]
ของไหลไม่ถูกบังคับทิศทาง, $\Delta T = 30^\circ\text{C}$	
แผ่นแนวตั้งสูง 0.3 m ในอากาศ	0.087
ทรงกระบอกแนวนอนรัศมี 2.5 cm ในอากาศ	6.5
ทรงกระบอกแนวนอนรัศมี 1 cm ในน้ำ	890
ลวดรัศมี 0.01 mm ในอากาศ $\Delta T = 55^\circ\text{C}$	490
ของไหลถูกบังคับทิศทาง	
อากาศความเร็ว 2 m/s เหนือแผ่นจัตุรัส 0.2 m	12
อากาศความเร็ว 35 m/s เหนือแผ่นจัตุรัส 0.75 m	75
อากาศความเร็ว 50 m/s ผ่านท่อทรงกระบอกรัศมี 2.5 cm	180
น้ำเดือด	
ในภาชนะ	2500-35,000
ของไหลในท่อ	5000-100,000

### 2.2.3 การแผ่รังสี (Radiation heat transfer)

คือ การถ่ายเทพลังงานความร้อนในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จะแตกต่างจากการนำความร้อนและการพาความร้อนเนื่องจากไม่มีตัวกลางในการถ่ายเทพลังงาน เช่น พลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์ที่แผ่รังสีมายังโลก เป็นต้น อัตราการถ่ายเทความร้อนของการแผ่รังสีเป็นดังสมการที่ (2-5)

$$q = \varepsilon \sigma A(T_1^4 - T_2^4) \quad (2-5)$$

เมื่อ	$q$	คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน [W]
	$\varepsilon$	คือ สภาพการแผ่รังสีของผิววัตถุ (Emissivity function)
	$\sigma$	คือ ค่าคงที่ Stefan-Boltzmann = $5.669 \times 10^{-8}$ [W/m <sup>2</sup> · K <sup>4</sup> ]
	$A$	คือ พื้นที่ในการแผ่ความร้อน [m <sup>2</sup> ]
	$T_1$	คือ อุณหภูมิของวัตถุที่แผ่รังสี [K]
	$T_2$	คือ อุณหภูมิของบริเวณที่รับรังสี [K]

สภาพการแผ่รังสี ( $\varepsilon$ ) เป็นสมบัติของสารจะมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดยหากเป็นวัตถุดำ (blackbody) จะมีสภาพการแผ่รังสีเป็น 1

การคำนวณอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจะต้องรวมปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนทั้งสามอย่างเอาไว้ด้วยกัน แต่จากสมการจะพบว่าสมการการแผ่รังสีเป็นสมการอันดับสี่ ซึ่งทำให้มีความยากในการวิเคราะห์ ดังนั้นในบางกรณีการวิเคราะห์ส่วนมากจะละเลยผลของการแผ่รังสีไป และพิจารณาเพียงผลของการนำความร้อนและการพาความร้อนเท่านั้น

### 2.3 ไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM)

ไฟไนต์เอลิเมนต์ คือ วิธีการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อแก้ปัญหาที่อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ที่มีความซับซ้อน เช่น การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าระหว่างตัวนำ พฤติกรรมการไหลของของไหล การถ่ายเทความร้อน เป็นต้น

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์อาศัยหลักการประมาณสมการเชิงอนุพันธ์ด้วยสมการเชิงเส้น โดยทำการแบ่งรูปร่างของสิ่งที่ต้องการทำการศึกษากออกเป็นองค์ประกอบย่อย (Element) สร้างสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์โดยสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์หลักที่ต้องการศึกษา นำแต่ละเอลิเมนต์ที่ได้มารวมกันเป็นระบบสมการ จากนั้นกำหนดค่าขอบเขต ก่อนจะนำไปแก้ระบบสมการ โดยคำตอบของระบบสมการที่ได้จะเป็นคำตอบโดยประมาณของระบบสมการ

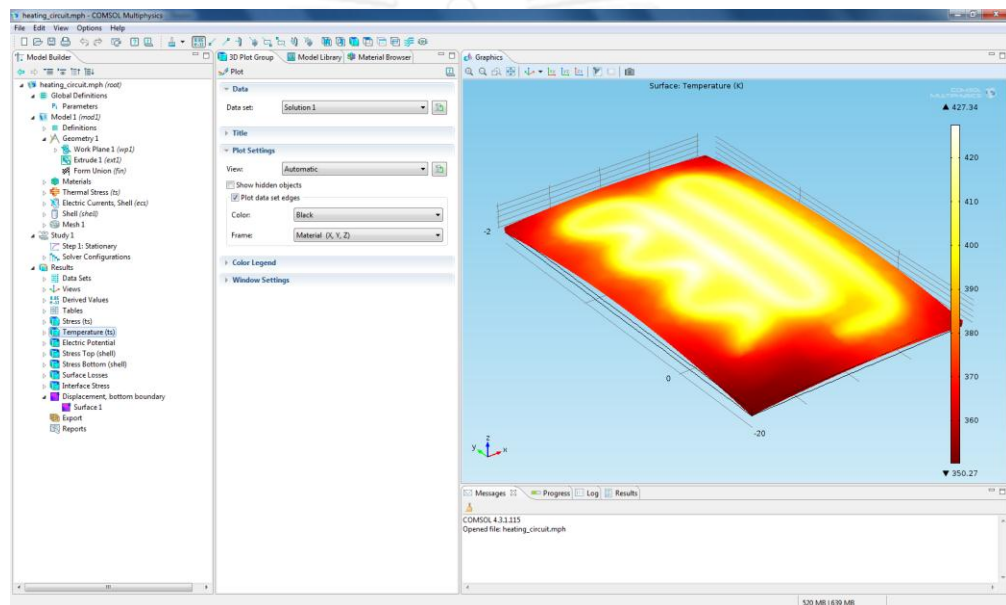
### 2.4 คอมโซลต์ติฟิสิกส์ (COMSOL Multiphysics) [33]

คอมโซลต์ติฟิสิกส์ (COMSOL Multiphysics) คือ โปรแกรมสำหรับการคำนวณและจำลองการออกแบบงานทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method, FEM) โดยโปรแกรมมีประโยชน์ในการคำนวณและจำลองผลหลายด้าน ยกตัวอย่างเช่น



- เสียง (Acoustic)
- ชีววิทยาศาสตร์ (Bioscience)
- ปฏิกิริยาเคมี (Chemical reactions)
- การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer)
- ระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค (Micro-electromechanical systems, MEMS)

ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้โหมดความร้อนจากพลังงานไฟฟ้า (Joule heating) ของการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer) ในการจำลอง



ภาพที่ 2.2 หน้าจอการใช้งานของโปรแกรมคอมโซล

### ความร้อนจากพลังงานไฟฟ้า (Joule heating)

รูปแบบที่ใช้ในการคำนวณหรือจำลองผลในโปรแกรม เป็นการรวมคุณสมบัติทางด้านกระแสไฟฟ้าและการถ่ายเทความร้อนไว้ด้วยกัน โดยการคำนวณใช้สมการเดียวกับการถ่ายเทความร้อนในของแข็งดังสมการที่ (2-6)

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q \quad (2-6)$$

- เมื่อ
- $\rho$  คือ ความหนาแน่น [ $kg/m^3$ ]
  - $C_p$  คือ ความจุความร้อน [ $J/kg \cdot K$ ]
  - $Q$  คือ แหล่งจ่ายความร้อน [ $W/m^3$ ]
  - $\partial T/\partial t$  คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเทียบกับเวลา

สำหรับการคำนวณในสภาวะคงตัวอุณหภูมิจะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา พจน์แรกจึงเป็นศูนย์

ค่าความนำไฟฟ้า (Electrical conductivity,  $\sigma_E$ ) เป็นค่าเฉพาะของวัสดุที่เลือกใช้ โดยในโปรแกรมสามารถเลือกได้ระหว่างค่าคงที่หรือขึ้นอยู่กับอุณหภูมิด้วยดังสมการที่ (2-7)

$$\sigma_E = 1/(\rho_0(1 + \alpha(T - T_{ref}))) \quad (2-7)$$

เมื่อ	$\sigma_E$	คือ ค่าความนำไฟฟ้า [S/m]
	$\rho_0$	คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้า ณ อุณหภูมิที่อ้างอิง [ $\Omega \cdot m$ ]
	$\alpha$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิความต้านทานไฟฟ้า [1/K]
	$T_{ref}$	คือ อุณหภูมิที่ใช้อ้างอิง [K]

หลักการและความรู้พื้นฐานภายในบทที่ 2 นี้ จะนำไปใช้ในบทต่อไป โดยจะเริ่มจากการนำสมการการถ่ายเทความร้อนมาวิเคราะห์ในเรื่องของอุณหภูมิ พลังงาน และประสิทธิภาพ ก่อนจะนำผลการวิเคราะห์ไปใช้ในการออกแบบตัวให้ความร้อนที่ใช้พลังงานต่ำที่สุด ต่อจากนั้นจะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการจำลองผลทั้งตัวตรวจจับก๊าซเพื่อวิเคราะห์และปรับปรุงการออกแบบต่อไป

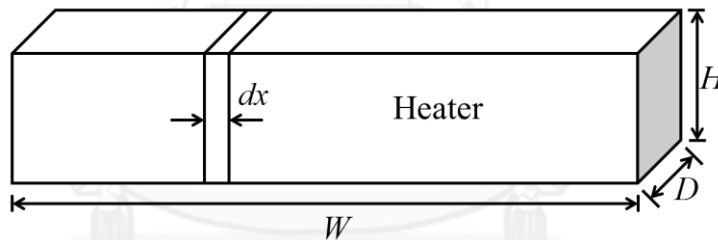
### บทที่ 3

#### การวิเคราะห์อุณหภูมิภายในตัวให้ความร้อน

การหาค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนก๊าซเซรามิกสามารถทำได้โดยใช้หลักการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) มาทำการวิเคราะห์ อย่างไรก็ตามเนื่องจากอุณหภูมิมิมีผลต่อสมบัติของสารเช่น ค่าการนำความร้อน(Thermal Conductivity) ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า(Electrical resistivity) เป็นต้น ทำให้เป็นการยากที่จะวิเคราะห์ตัวแปรที่อยู่ในรูปตัวแปรที่ซ้อนตัวแปรอีกชั้นหนึ่ง ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงวิเคราะห์อุณหภูมิที่เกิดขึ้นโดยกำหนดให้ค่าสมบัติของสารต่างๆไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ และจะทำการวิเคราะห์เฉพาะส่วนตัวให้ความร้อน (Heater) เนื่องจากตัวให้ความร้อนเป็นส่วนที่ใช้พลังงานมากที่สุด และเพื่อความง่ายต่อการเข้าใจภาพรวมทั้งหมด โดยในบทนี้จะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ การวิเคราะห์อุณหภูมิในตัวให้ความร้อนเมื่อพิจารณาเฉพาะผลของการนำความร้อน และการพาความร้อน และการวิเคราะห์อุณหภูมิตัวให้ความร้อนเมื่อรวมผลของการแผ่รังสี

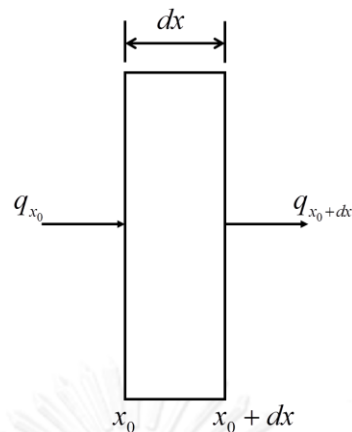
#### 3.1 สมการอุณหภูมิเมื่อพิจารณาผลของการนำความร้อนและการพาความร้อน

กำหนดให้ตัวให้ความร้อนมีรูปแบบดังภาพที่ 3.1 ป้อนแรงดันทางด้านซ้ายและต่อลงดินทางด้านขวาของภาพ ขั้วทั้งสองด้านมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง ( $300\text{ K}$ ) พื้นที่ผิวส่วนอื่นคือบริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนไปยังอากาศและการนำความร้อนจะเกิดขึ้นในตัวให้ความร้อน



ภาพที่ 3.1 โครงสร้างตัวให้ความร้อนที่ใช้ในการวิเคราะห์

เมื่อพิจารณาเป็นชิ้นเล็ก ( $dx$ ) ดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 ตัวให้ความร้อนที่ใช้วิเคราะห์เมื่อพิจารณาเป็นชั้นเล็ก  $dx$  ที่สภาวะคงตัวความร้อนที่เข้าต้องเท่ากับความร้อนที่ออก จากภาพที่ 3.2 จะได้ว่า

$$\dot{q}(HDdx) + q_{x_0} = q_{x_0+dx} + q_{conv} \quad (3-1)$$

เมื่อ	$\dot{q}$	คือ อัตราพลังงานความร้อนที่ชั้นงานสร้างขึ้นต่อปริมาตร [ $W/m^3$ ]
	$q_{conv}$	คือ อัตราพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทโดยการพา [ $W$ ]
	$q_{x_0}$	คือ อัตราพลังงานความร้อนที่นำเข้ามายังชั้นงาน [ $W$ ]
	$q_{x_0+dx}$	คือ อัตราพลังงานความร้อนที่นำออกจากชั้นงาน [ $W$ ]
	$H$	คือ ความหนาของชั้นงาน [ $m$ ]
	$D$	คือ ความกว้างของชั้นงาน [ $m$ ]
	$dx$	คือ ความยาวของชั้นงานเมื่อพิจารณาเป็นชั้นเล็ก [ $m$ ]

$$q_{conv} = hP(T - T_\infty)dx \quad (3-2)$$

เมื่อ	$P$	คือ เส้นรอบวงในการแผ่ความร้อน ( $2H + 2D$ ) [ $m$ ]
	$h$	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convection heat-transfer coefficient) [ $W/m^2 \cdot K$ ]
	$T$	คือ อุณหภูมิตัวให้ความร้อน [ $K$ ]
	$T_\infty$	คือ อุณหภูมิอากาศ [ $K$ ]

$$q_{x_0} = -kA \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=x_0} \quad (3-3)$$

$$q_{x_0+dx} = -kA \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=x_0+dx} \quad (3-4)$$

- เมื่อ  $k$  คือ ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity)  $[W/m \cdot K]$   
 $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดในการนำความร้อน  $(DH)$   $[m^2]$   
 $\partial T/\partial x$  คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเทียบกับตำแหน่ง (Temperature gradient)

จากสมการที่ (3-1) (3-2) (3-3) และ (3-4) ทำการจัดรูปใหม่จะได้ว่า

$$\frac{\dot{q}}{k} + \frac{d^2T}{dx^2} = \frac{hP}{kA}(T - T_\infty) \quad (3-5)$$

กำหนดให้  $\theta = T - T_\infty$  เพื่อสะดวกต่อการคำนวณ จัดรูปสมการใหม่จะได้ดังสมการที่ (3-6)

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} - \frac{hP}{kA}\theta + \frac{\dot{q}}{k} = 0 \quad (3-6)$$

แก้สมการโดยใช้วิธีการแปลงลาปราช จากสูตรการแปลงลาปราช

$$L\{f^{(n)}(t)\} = s^n F(s) - s^{n-1}f(0) - s^{n-2}f'(0) - \dots - f^{(n-1)}(0)$$

จะสามารถแปลงลาปราชสมการที่ (3-6) ได้ดังสมการที่ (3-7)

$$s^2\theta(s) - s\theta_{x=0} - \theta'_{x=0} - \frac{hP}{kA}\theta(s) + \frac{\dot{q}}{ks} = 0 \quad (3-7)$$

กำหนดให้ด้านที่ป้อนแรงดันและต่อลงดินมีอุณหภูมิเท่ากับ  $300\text{ K}$  ดังนั้นที่  $x=0$ ,  $T=300\text{ K}$  จะได้  $\theta=0$  จะได้ว่า

$$s^2\theta(s) - \theta'_{x=0} - \frac{hP}{kA}\theta(s) + \frac{\dot{q}}{ks} = 0 \quad (3-8)$$

เมื่อจัดสมการที่ (3-8) ให้อยู่ในรูป  $\theta(s)$  จะได้ดังสมการที่ (3-9)

$$\theta(s) = \frac{\theta'_{x=0}}{s^2 - \frac{hP}{kA}} - \frac{\frac{\dot{q}}{ks}}{s^2 - \frac{hP}{kA}} \quad (3-9)$$

จากสูตรการแปลงลาปราชผกผัน

$$L^{-1}\left\{\frac{a}{s^2 - a^2}\right\} = \sinh(at)$$

$$L^{-1}\{s^{-1}F(s)\} = \int_0^t f(\tau) d\tau$$

และเงื่อนไขที่  $x=W$ ,  $T=300K$  มีค่า  $\theta=0$  จะสามารถแก้สมการที่ (3-9) ได้สมการอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปในตัวให้ความร้อนดังสมการที่ (3-10) และ (3-11)

$$\theta(x) = \frac{\dot{q}A}{hP} \left[ \frac{\cosh(CW)\sinh(Cx)}{\sinh(CW)} - \frac{\sinh(Cx)}{\sinh(CW)} - \cosh(Cx) + 1 \right] \quad (3-10)$$

$$C = \sqrt{\frac{hP}{kA}} \quad (3-11)$$

### 3.2 ผลของการจำลองอุณหภูมิบนตัวให้ความร้อนเมื่อพิจารณาการนำความร้อนและการพาความร้อน

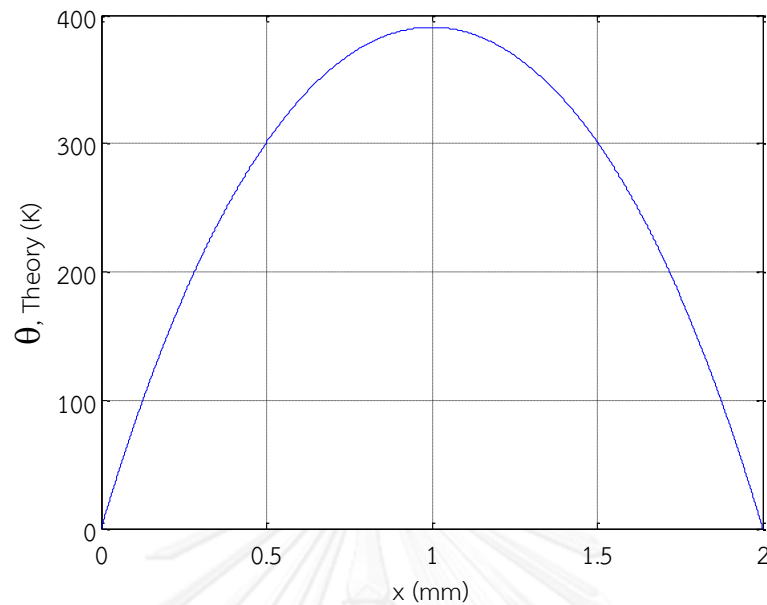
การจำลองของผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนตัวให้ความร้อนใช้โครงสร้างดังภาพที่ 3.1 วัสดุที่ใช้คือแพลทินัม (Platinum, Pt) มีค่าคงที่ดังตารางที่ 3.1 กำหนดค่าต่างๆดังต่อไปนี้

1. กำหนดตัวให้ความร้อนมีขนาดยาว ( $W$ ) 2 mm กว้าง ( $D$ ) 50  $\mu\text{m}$  และหนา ( $H$ ) 0.1  $\mu\text{m}$
2. ป้อนแรงดัน 0.2 V ที่ด้านซ้ายของชิ้นงาน และด้านขวาต่อลงดิน
3. อุณหภูมิขั้วทั้ง 2 ด้านเท่ากับอุณหภูมิห้อง (300 K)
4. มีการพาความร้อนและแผ่รังสีไปยังอากาศอุณหภูมิ 300 K
5. สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h$ ) ไปยังอากาศเท่ากับ 5 [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ]

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของแพลทินัม

Properties	Value	Unit
Electrical resistivity ( $\rho_E$ )	$1.12 \times 10^{-7}$	$\Omega \cdot \text{m}$
Thermal conductivity ( $k$ )	71.6	$\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$
Emissivity function ( $\varepsilon$ )	0.05	–
Density	21450	$\text{kg}/\text{m}^3$
Thermal capacity	133	$\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$
Coefficient of thermal expansion	$8.80 \times 10^{-6}$	$1/\text{K}$
Young's modulus	$168 \times 10^9$	$\text{Pa}$
Poisson's ratio	0.38	–

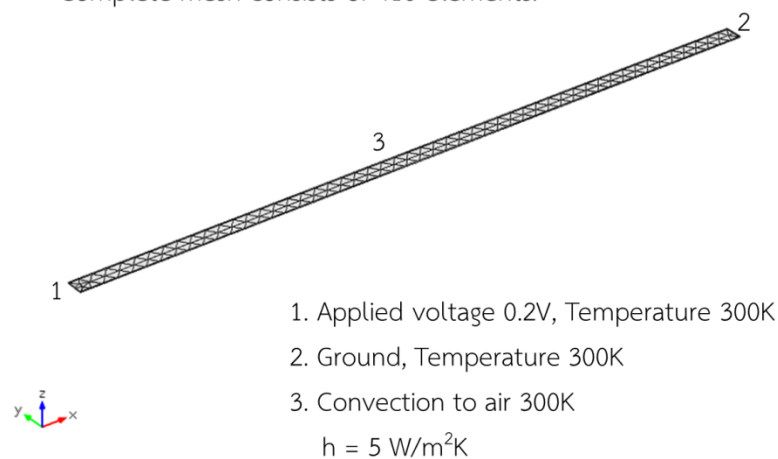
อัตราการพลังงานความร้อนที่ชิ้นงานสร้างขึ้นต่อปริมาตร ( $\dot{q}$ ) เป็นอัตราการพลังงานที่เกิดจากการป้อนกำลังไฟฟ้าให้แก่ตัวให้ความร้อน จากนั้นจึงเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าที่ได้ไปเป็นพลังงานความร้อน โดย  $\dot{q} = \frac{\text{Power}}{\text{Volume}} \rightarrow \dot{q} = \frac{v^2/R}{Al}$  และจาก  $R = \rho_E \frac{l}{A}$  จะได้ว่า  $\dot{q} = \frac{v^2}{\rho_E l^2}$  เมื่อ  $v$  คือ แรงดันที่ป้อน [V]  $l$  คือ ความยาววัสดุที่ได้รับแรงดัน [m] และ  $\rho_E$  คือ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า [ $\Omega \cdot \text{m}$ ] ดังนั้นจากสมการที่ (3-10) และ (3-11) จะได้ผลของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปในตัวให้ความร้อนดังภาพที่ 3.3



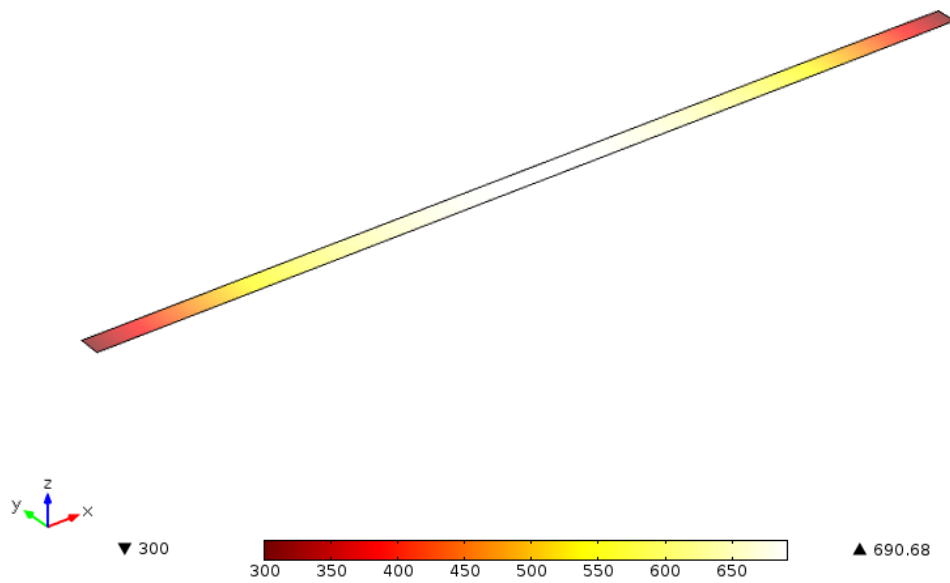
ภาพที่ 3.3 อุณหภูมิที่เปลี่ยนไปบนตัวให้ความร้อนในแต่ละตำแหน่งความยาว

จำลองผลตัวให้ความร้อนด้วยโปรแกรมคอมโซล โดยใช้เงื่อนไขเดียวกับการวิเคราะห์ด้วยสมการในการจำลองผลด้วยโปรแกรมคอมโซล (ดังแสดงในภาพที่ 3.4) จะใช้โหมดความร้อนจากพลังงานไฟฟ้า (Joule Heating) ในหมวดการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) สำหรับการจำลองผล โดยพิจารณาผลที่สภาวะคงตัวได้ผลดังภาพที่ 3.5 และภาพที่ 3.6

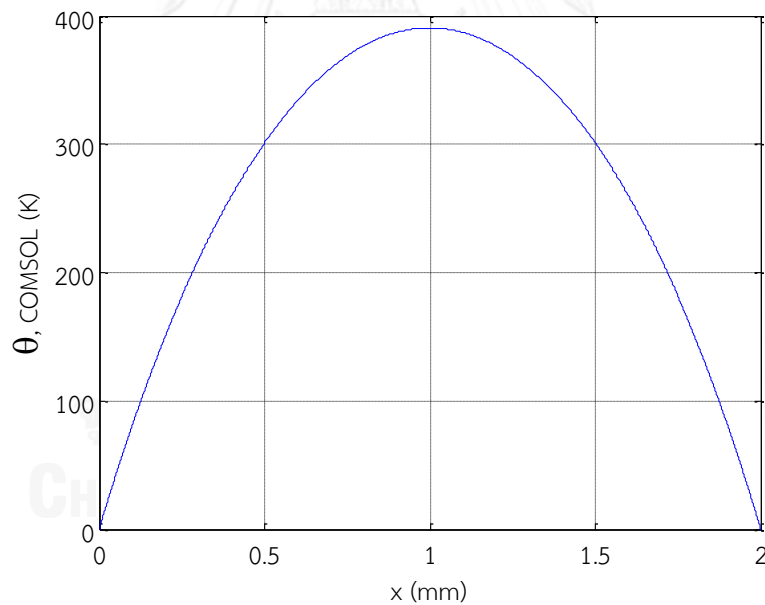
Complete mesh consists of 416 elements.



ภาพที่ 3.4 ค่าและตำแหน่งที่ป้อนเงื่อนไขภายในโปรแกรมคอมโซล



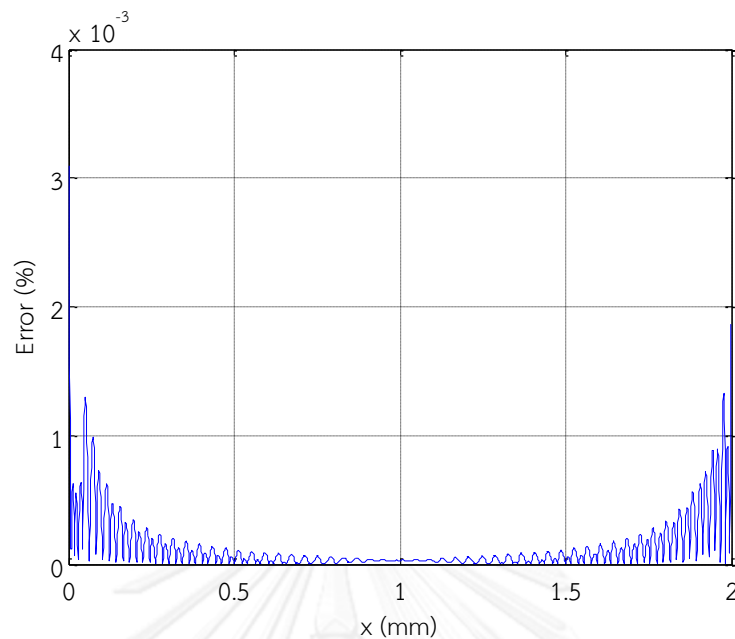
ภาพที่ 3.5 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนตัวให้ความร้อนขนาดยาว ( $W$ ) 2 mm  
กว้าง ( $D$ ) 50  $\mu\text{m}$  และหนา ( $H$ ) 0.1  $\mu\text{m}$



ภาพที่ 3.6 กราฟอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปบนตัวให้ความร้อนที่ตำแหน่งความยาวต่างๆ  
โดยโปรแกรมคอมโซล

เมื่อพิจารณาหาความผิดพลาดของโปรแกรมคอมโซลเทียบกับค่าที่ได้จากทฤษฎีจะสามารถหาความผิดพลาดของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ( $\theta$ ) ได้ดังภาพที่ 3.7





ภาพที่ 3.7 ค่าความผิดพลาดของวิธีที่เปลี่ยนแปลงของโปรแกรมคอมพิวเตอร์เทียบกับทฤษฎี

ค่าความผิดพลาดที่ได้เป็นค่าที่เกิดจากการคำนวณทางเลขของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จะเห็นว่าค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยในระดับ 0.001% สามารถละเลยได้ จึงสรุปได้ว่าค่าที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีค่าที่สอดคล้องกับทางทฤษฎี

### 3.3 สมการอุณหภูมิเมื่อพิจารณาผลของการแผ่รังสี

การวิเคราะห์อุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนตัวให้ความร้อนเมื่อเพิ่มผลของการแผ่รังสี จะทำการวิเคราะห์คล้ายกับการวิเคราะห์ในหัวข้อ 3.1 โดยใช้โครงสร้างของตัวให้ความร้อนดังภาพที่ 3.1 กำหนดให้ป้อนแรงดันทางด้านซ้ายและต่อลงดินทางด้านขวาของชิ้นงาน พื้นที่ส่วนอื่นคือบริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนและแผ่รังสี จากสมการที่ (3-1) สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ (3-12)

$$\dot{q}(HDdx) + q_{x_0} = q_{x_0+dx} + q_{conv} + q_{rad} \quad (3-12)$$

เมื่อ  $q_{rad}$  คือ พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทโดยการแผ่รังสี [W]

$$q_{rad} = \varepsilon\sigma P(T^4 - T_\infty^4)dx \quad (3-13)$$

เมื่อ  $\varepsilon$  คือ สภาพการแผ่รังสีของผิววัตถุ (Emissivity function)

$\sigma$  คือ ค่าคงที่ Stefan-Boltzmann =  $5.669 \times 10^{-8}$  [W/m<sup>2</sup> · K<sup>4</sup>]

จากเงื่อนไขการนำความร้อนและการพาความร้อนเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.1 จะเขียนสมการ (3-12) ใหม่ดังสมการที่ (3-14)

$$\frac{\dot{q}}{k} + \frac{d^2T}{dx^2} = \frac{hP}{kA}(T - T_\infty) + \frac{\varepsilon\sigma P}{kA}(T^4 - T_\infty^4) \quad (3-14)$$

จากสมการที่ (3-14) จะพบว่าการแก้สมการให้ได้สมการที่แน่ชัดนั้นสามารถทำได้แต่สมการจะมีความซับซ้อนมาก เนื่องจากมีพจน์อันดับ 4 ของการแผ่รังสีอยู่ แต่หากละเลยผลของการแผ่รังสีไปอาจทำให้เกิดความผิดพลาดได้ในบางกรณี ตารางที่ 3.2 เป็นตารางเปรียบเทียบผลของอัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างการพาความร้อนและการแผ่รังสี ภายใต้เงื่อนไขข้อตัวให้ความร้อนวัสดุเป็นแพลทินัมมีสมบัติดังตารางที่ 3.1 ขนาดยาว 2 mm กว้าง 50  $\mu\text{m}$  และหนา 0.1  $\mu\text{m}$  มีการพาความร้อนและแผ่รังสีไปยังอากาศอุณหภูมิ 300 K สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h$ ) ไปยังอากาศเท่ากับ 5 [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ]

ตารางที่ 3.2 ค่าอัตราการถ่ายเทพลังงานเปรียบเทียบระหว่างการพาความร้อนและการแผ่รังสี

อุณหภูมิ [K]	การพาความร้อน [mW]	การแผ่รังสี [mW]	การแผ่รังสีต่อการพาความร้อน [%]
400	0.1002	0.0099	10
500	0.2004	0.0309	15
600	0.3006	0.0690	23
700	0.4008	0.1318	33
800	0.5010	0.2281	46
900	0.6012	0.3681	61
1000	0.7014	0.5634	80

จากตารางจะพบว่าในช่วงอุณหภูมิต่ำ (400 K - 500 K) ยังอัตราส่วนการแผ่รังสีต่อการพาความร้อนยังน้อยอยู่ (ประมาณ 10%) ทำให้สามารถละเลยผลของการแผ่รังสีได้ แต่ที่ช่วงอุณหภูมิสูง (มากกว่า 500 K) อัตราส่วนมีค่าสูง (เกิน 50%) ทำให้ไม่สามารถละเลยผลของการแผ่รังสีได้ ดังนั้นจึงใช้วิธีการประมาณพจน์ของการแผ่รังสีให้เป็นสมการอันดับ 1 เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิตัวให้ความร้อน

### 3.3.1 การประมาณการแผ่รังสี

การประมาณการแผ่รังสีให้เป็นสมการอันดับ 1 จะใช้หลักการถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression) มาใช้ในการประมาณ

หลักการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear regression)

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นเป็นการวิเคราะห์ตัวแปรอิสระ 1 ตัว และตัวแปรตาม 1 ตัว โดยรูปแบบการวิเคราะห์จะทำการวิเคราะห์ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงดังสมการที่ (3-15)

$$y = \alpha + \beta x \quad (3-15)$$

เมื่อ  $y$  คือ ตัวแปรตาม

- $\alpha$  คือ จุดตัดแกน  $y$  ของสมการถดถอยเชิงเส้น  
 $\beta$  คือ ความชันของสมการถดถอยเชิงเส้น  
 $x$  คือ ตัวแปรอิสระ

จากสมการ (3-15) เนื่องจากไม่ทราบค่าตัวแปร  $\alpha$  และ  $\beta$  จึงต้องใช้ในการประมาณข้อมูลที่รวบรวมมา โดยสมการการประมาณจะเป็นดังสมการที่ (3-16)

$$\hat{y} = \hat{\alpha} + \hat{\beta}x \quad (3-16)$$

เมื่อ  $\hat{\beta}$  และ  $\hat{\alpha}$  มีค่าตามสมการที่ (3-17) และ (3-18) ตามลำดับ

$$\hat{\beta} = \frac{\overline{xy} - \bar{x}(\bar{y})}{x^2 - (\bar{x})^2} \quad (3-17)$$

$$\hat{\alpha} = \bar{y} - \hat{\beta}\bar{x} \quad (3-18)$$

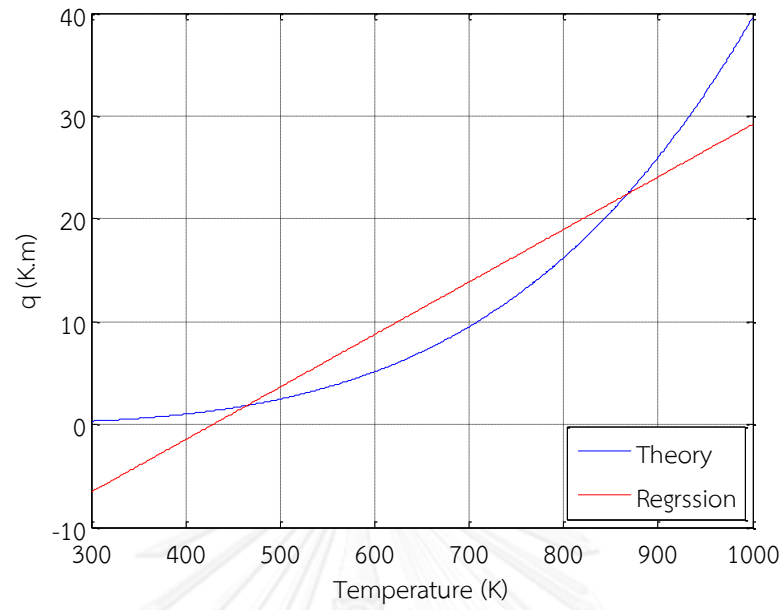
ในการประมาณสมการเมื่อพิจารณาผลของการแผ่รังสีด้วยนั้น จะทำการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น 2 แบบ คือ การประมาณพจน์การแผ่รังสี และการประมาณพจน์การพาความร้อนรวมกับการแผ่รังสี

### 3.3.1.1 การประมาณพจน์การแผ่รังสี

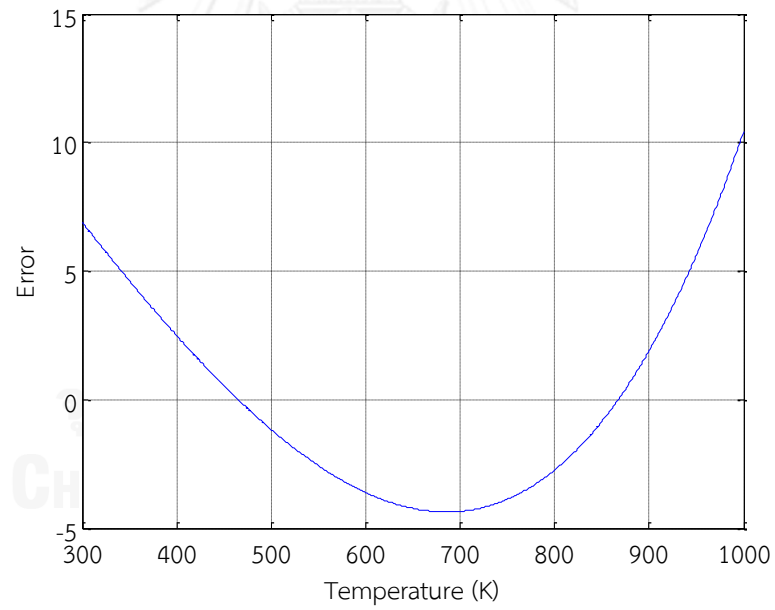
จากสมการที่ (3-14) จะทำการประมาณพจน์อันดับ 4 ให้เหลืออันดับ 1 เพื่อจะได้สามารถแก้สมการได้ โดยทำการประมาณพจน์  $q = \frac{\epsilon\sigma}{k}T^4$  ในช่วงอุณหภูมิ 300-1000 K กำหนดวัสดุตัวให้ความร้อนเป็นแพลทินัมมีค่าคงที่ดังตารางที่ 3.1 จากสมการที่ (3-17) และ (3-18) จะได้สมการในการประมาณพจน์การแผ่รังสีดังสมการที่ (3-19)

$$\hat{q} = -21.9 + 0.0511T \quad (3-19)$$

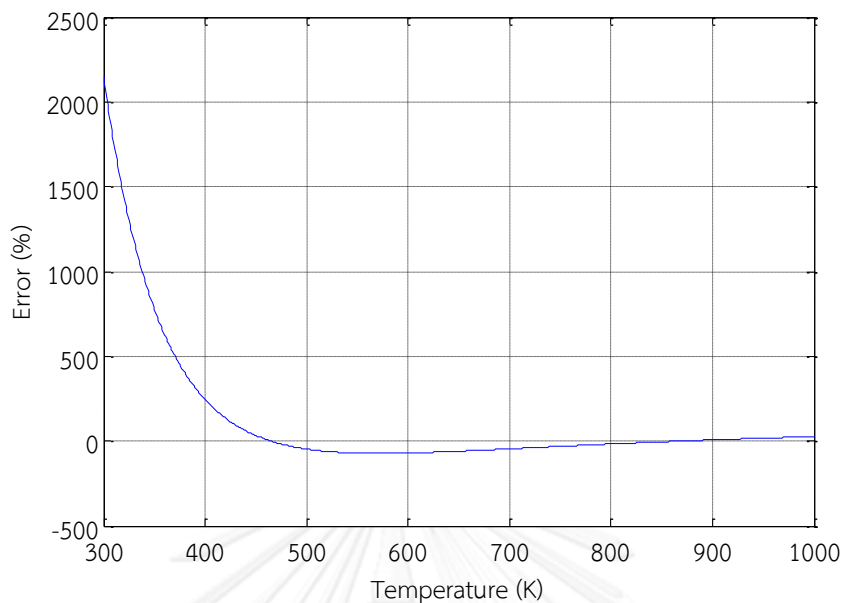
เมื่อนำสมการมาพล็อตกราฟ จะได้กราฟสมการการแผ่รังสีและกราฟค่าความผิดพลาดของการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นดังภาพที่ 3.8 และภาพที่ 3.9 ตามลำดับ



ภาพที่ 3.8 กราฟสมการการแผ่รังสีระหว่างทฤษฎีและการประมาณการถดถอยเชิงเส้น



(ก)



(ข)

ภาพที่ 3.9 กราฟความผิดพลาดของการประมาณสมการการแผ่รังสีแบบวิเคราะห์ การถดถอยเชิงเส้นเทียบกับทฤษฎี (ก)ความผิดพลาด (ข)ความผิดพลาดเป็นเปอร์เซ็นต์

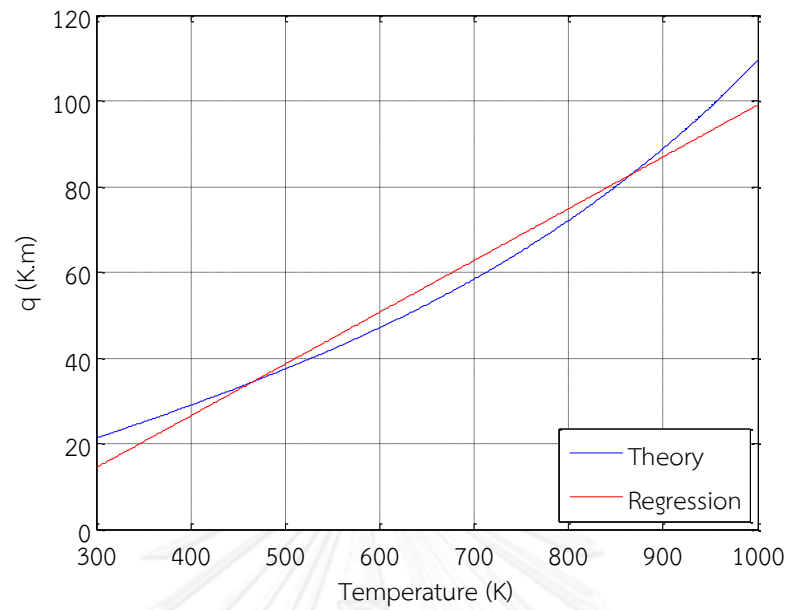
จากกราฟความผิดพลาดจะพบว่าผลของการประมาณในช่วงแรก (อุณหภูมิน้อยกว่า 500 K) เนื่องจากตามหลักการการวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้นจะต้องประมาณเพื่อพยายามหาจุดตัดแกน y ทำให้ค่าจุดตัดแกน y ที่ได้ออกมามีค่าติดลบ แต่ตามทฤษฎีแล้วสมการการแผ่รังสีอันดับ 4 จะต้องตัดแกน y ที่จุดกำเนิด จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความผิดพลาดในช่วงแรกมาก ดังนั้นเพื่อความแม่นยำที่มากขึ้นอาจจำเป็นต้องประมาณพจน์ของการพาความร้อนและการแผ่รังสีเข้าด้วยกัน

### 3.3.1.2 การประมาณพจน์การพาความร้อนและการแผ่รังสี

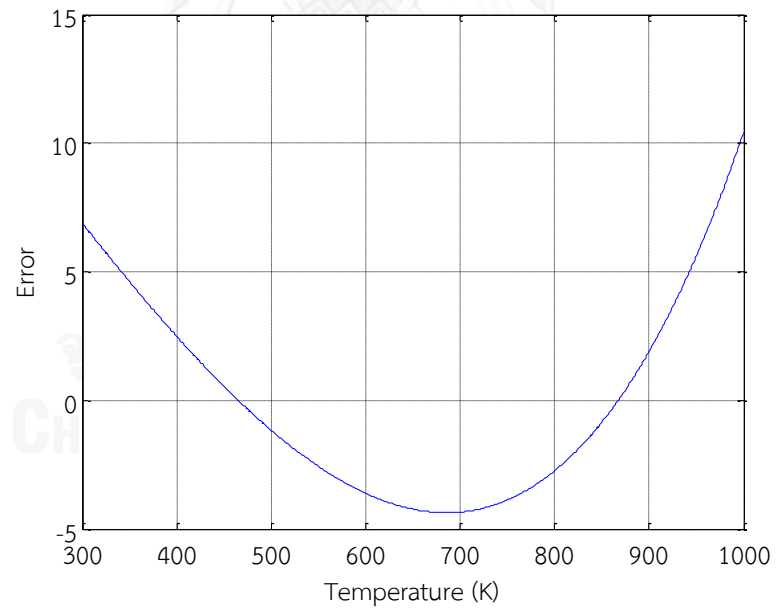
จากหัวข้อ 3.3.1.1 การประมาณเพียงพจน์การแผ่รังสีทำให้เกิดค่าผิดพลาดในช่วงแรกมาก จึงประมาณพจน์การพาความร้อนและการแผ่รังสีให้เป็นพจน์เดียวกันเพื่อเพิ่มความแม่นยำ โดยทำการประมาณพจน์  $q = \frac{h}{k}T + \frac{\epsilon\sigma}{k}T^4$  ในสมการที่ (3-14) ภายใต้เงื่อนไขเดียวกับหัวข้อที่ 3.3.1.1 จะได้สมการประมาณด้วยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นดังสมการที่ (3-20)

$$\hat{q} = -21.9 + 0.121T \quad (3-20)$$

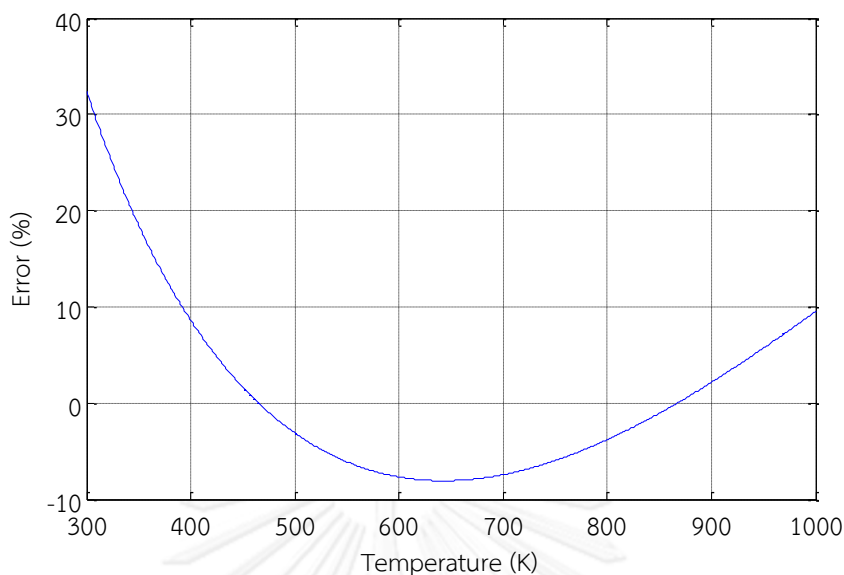
เมื่อนำสมการมาพล็อตกราฟ จะได้กราฟสมการการแผ่รังสีและกราฟค่าความผิดพลาดของการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นดังภาพที่ 3.10 และภาพที่ 3.11 ตามลำดับ



ภาพที่ 3.10 กราฟสมการการพาความร้อนรวมกับการแผ่รังสีระหว่างทฤษฎี และการประมาณการถดถอยเชิงเส้น



(ก)



(ข)

ภาพที่ 3.11 กราฟความผิดพลาดของการประมาณสมการการพาความร้อนรวมกับการแผ่รังสีแบบวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นเทียบกับทฤษฎี (ก)ความผิดพลาด (ข)ความผิดพลาดเป็นเปอร์เซ็นต์

จากกราฟจะพบว่าเมื่อนำพจน์ของการพาความร้อนมาใช้ประมาณสมการร่วมกับพจน์ของการแผ่รังสีจะช่วยให้ความผิดพลาดน้อยลง โดยที่ตำแหน่งที่ผิดพลาดมากที่สุด (300 K) เกิดความผิดพลาดน้อยลง 98% เมื่อเทียบกับการประมาณด้วยพจน์การแผ่รังสีเพียงอย่างเดียว

ดังนั้นการวิเคราะห์สมการอนุกรมที่เกิดขึ้นบนตัวให้ความร้อนเมื่อพิจารณาผลของการแผ่รังสี เพื่อให้สามารถแก้สมการที่แน่ชัดได้ควรใช้การประมาณให้เป็นอันดับ 1 เข้ามาช่วยวิเคราะห์ และเพื่อความแม่นยำในการใช้การวิเคราะห์แบบถดถอยเชิงเส้นควรประมาณพจน์ของการพาความร้อนและการแผ่รังสีรวมกัน

### 3.3.2 สมการอนุกรมบนตัวให้ความร้อนเมื่อใช้ผลของการแผ่รังสีแบบประมาณ

จากหัวข้อ 3.3.1 จะพบว่าสมการการแผ่รังสีให้เป็นสมการอันดับ 1 โดยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น แบบรวมทั้งผลของการพาความร้อนและการแผ่รังสี (หัวข้อ 3.3.1.2) มีค่าผิดพลาดน้อยกว่า ดังนั้นในการวิเคราะห์อนุกรมจะใช้การประมาณตามหัวข้อ 3.3.1.2

จากสมการที่ (3-14) เมื่อนำมาเขียนใหม่โดยใช้สมการการพาความร้อนและการแผ่รังสีแบบประมาณ จะสามารถเขียนสมการได้ใหม่ดังสมการที่ (3-21)

$$\frac{\dot{q}}{k} + \frac{d^2T}{dx^2} = \frac{P}{A}(\alpha + \beta T) - \frac{P}{A} \left( \frac{h}{k} T_\infty + \frac{\varepsilon\sigma}{k} T_\infty^4 \right) \quad (3-21)$$

เมื่อ  $\alpha, \beta$  คือ สัมประสิทธิ์ที่ได้จากการประมาณพจน์การพาความร้อนและการแผ่รังสีรวมกัน ซึ่งเป็นค่าเฉพาะของวัสดุ หากเปลี่ยนวัสดุจะต้องทำการประมาณใหม่

เพื่อให้การแก้สมการเป็นไปในทำนองเดียวกับการแก้สมการอุณหภูมิที่ละเลยผลของการแผ่รังสี (หัวข้อ 3.1) จาก  $\theta = T - T_\infty$  จะสามารถเขียนสมการ (3-21) ใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{\dot{q}}{k} + \frac{d^2\theta}{dx^2} = \frac{P}{A}(\alpha + \beta\theta + \beta T_\infty) - \frac{P}{A} \left( \frac{h}{k} T_\infty + \frac{\varepsilon\sigma}{k} T_\infty^4 \right) \quad (3-22)$$

เพื่อให้สะดวกต่อการพิจารณา กำหนดให้  $\gamma = \alpha + \beta T_\infty - \frac{h}{k} T_\infty - \frac{\varepsilon\sigma}{k} T_\infty^4$  เนื่องจากเป็นค่าคงที่ทั้งหมด (ได้มาจากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น) ดังนั้นจะสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังสมการที่ (3-23) และจัดรูปได้ดังสมการที่ (3-24)

$$\frac{\dot{q}}{k} + \frac{d^2\theta}{dx^2} = \frac{P}{A}(\gamma + \beta\theta) \quad (3-23)$$

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} - \frac{P\beta}{A}\theta + \left( \frac{\dot{q}}{k} - \frac{P\gamma}{A} \right) = 0 \quad (3-24)$$

ในทำนองเดียวกันกับการแก้สมการอุณหภูมิแบบละเลยผลของการแผ่รังสี จะสามารถแก้สมการ (3-24) ได้สมการอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ( $\theta$ ) ดังสมการที่ (3-25)

$$\theta(x) = \left( \frac{\dot{q}A}{Pk\beta} - \frac{\gamma}{\beta} \right) \left[ \frac{\left( \cosh \left( \sqrt{\frac{P}{A}} \beta \cdot W \right) - 1 \right) \sinh \left( \sqrt{\frac{P}{A}} \beta \cdot x \right)}{\sinh \left( \sqrt{\frac{P}{A}} \beta \cdot W \right)} - \cosh \left( \sqrt{\frac{P}{A}} \beta \cdot x \right) + 1 \right] \quad (3-25)$$

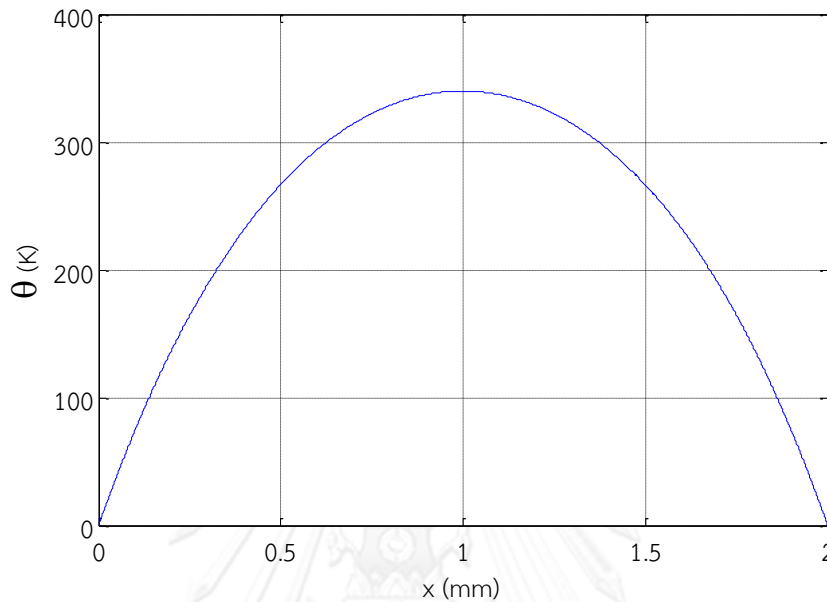
### 3.4 ผลของการจำลองอุณหภูมิบนตัวให้ความร้อนเมื่อพิจารณาการแผ่รังสี

ในการจำลองผลของอุณหภูมิใช้รูปแบบตัวให้ความร้อนเช่นเดียวกับภาพที่ 3.1 กำหนดค่าต่างๆดังต่อไปนี้

1. ตัวให้ความร้อนวัสดุเป็นแพลทินัมมีสมบัติดังตารางที่ 3.1
2. ตัวให้ความร้อนมีขนาดยาว ( $W$ ) 2 mm กว้าง ( $D$ ) 50  $\mu\text{m}$  และหนา ( $H$ ) 0.1  $\mu\text{m}$
3. ป้อนแรงดัน 0.2 V ที่ด้านซ้ายของภาพ และด้านขวาต่อลงดิน
4. อุณหภูมิขั้วทั้ง 2 ด้านเท่ากับอุณหภูมิห้อง (300 K)
5. มีการพาความร้อนและแผ่รังสีไปยังอากาศอุณหภูมิ 300 K
6. สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h$ ) ไปยังอากาศเท่ากับ 5 [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ]

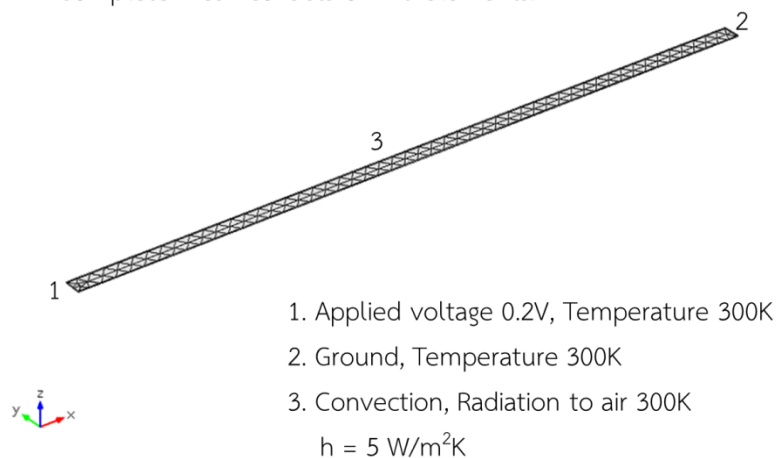


ใช้การประมาณแบบรวมการพาความร้อนและการแผ่รังสี (หัวข้อ 3.3.1.2) โดยทำการประมาณช่วงอุณหภูมิ 300-1000 K จากสมการที่ (3-25) จะได้กราฟแสดงอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปบนตัวให้ความร้อน ดังภาพที่ 3.12

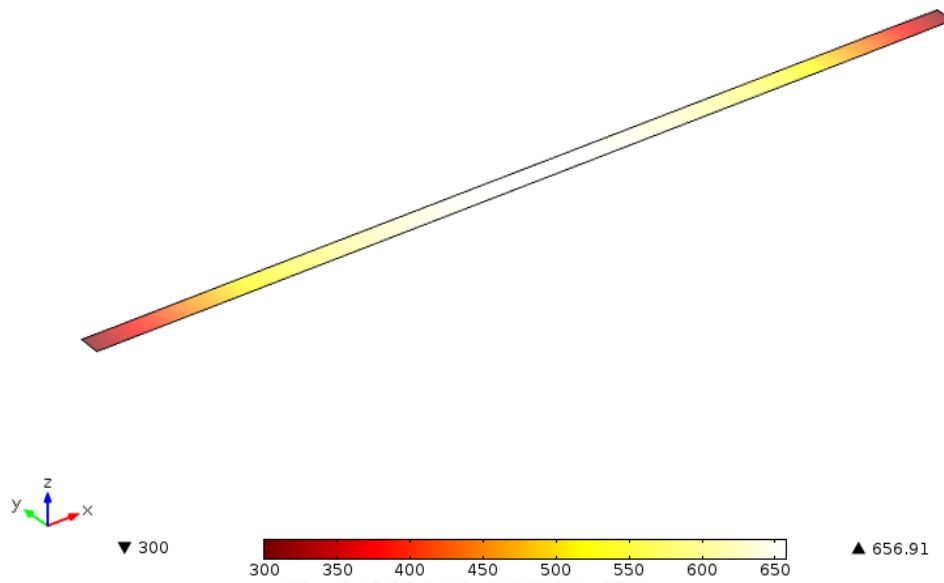


ภาพที่ 3.12 กราฟอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปบนตัวให้ความร้อนที่ตำแหน่งความยาวต่างๆ ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน ทำการจำลองผลโดยใช้โปรแกรมคอมโซล (ดังแสดงในภาพที่ 3.13) ได้ผลการจำลองและกราฟอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปบนตัวให้ความร้อนดังภาพที่ 3.14 และภาพที่ 3.15 ตามลำดับ หาค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปจากการจำลองโดยใช้สมการที่ (3-21) เทียบกับการจำลองจากโปรแกรมคอมโซลดังภาพที่ 3.16

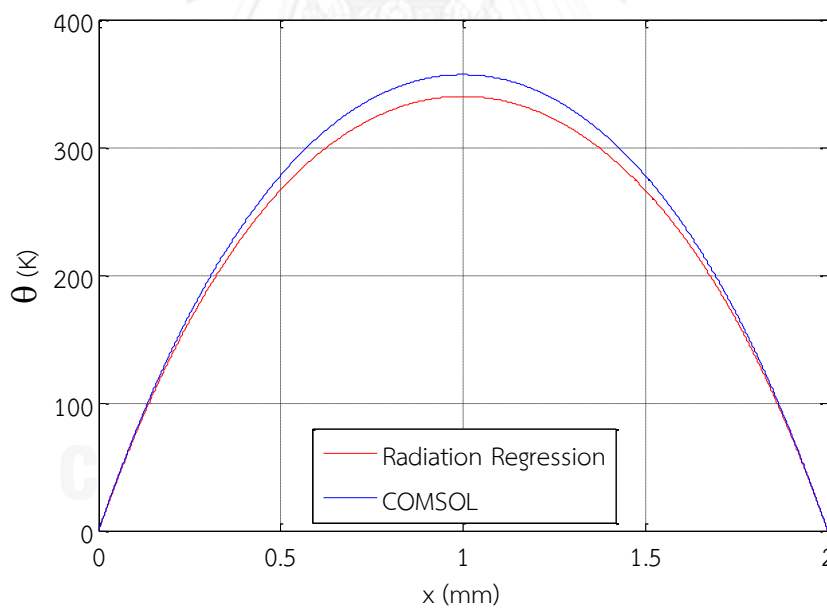
Complete mesh consists of 416 elements.



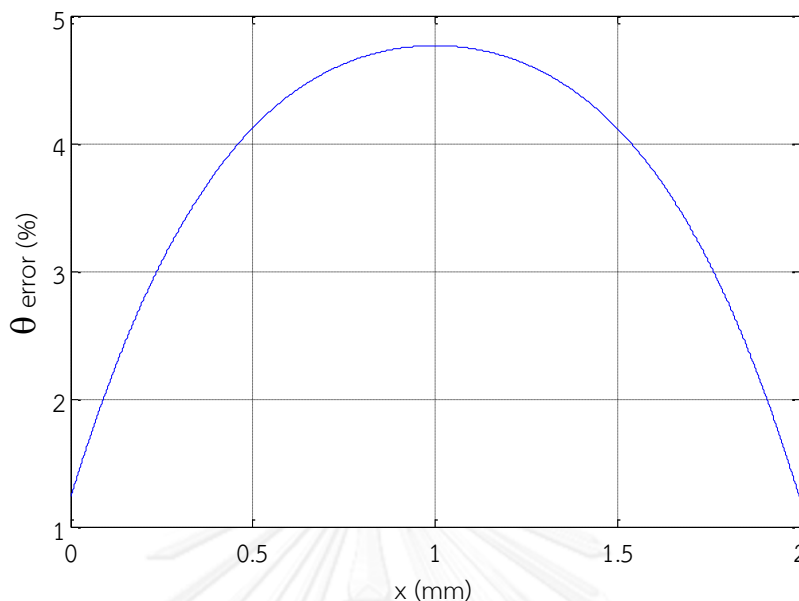
ภาพที่ 3.13 ค่าและตำแหน่งที่ป้อนเงื่อนไขภายในโปรแกรมคอมโซล



ภาพที่ 3.14 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนตัวให้ความร้อนเมื่อพิจารณาผลของการแผ่รังสี  
คำนวณโดยโปรแกรมคอมโซล



ภาพที่ 3.15 กราฟอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปจากการใช้การประมาณเปรียบเทียบกับ  
การจำลองโดยคอมโซล



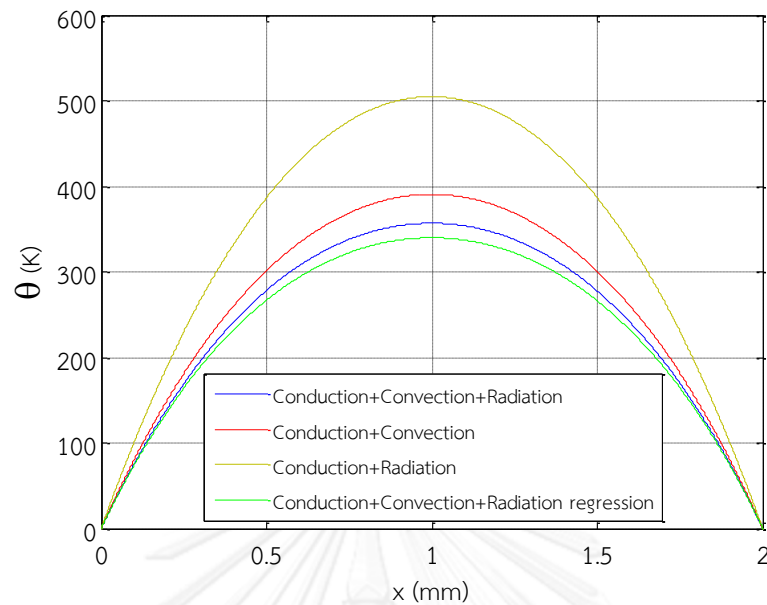
ภาพที่ 3.16 กราฟความผิดพลาดของการประมาณเทียบจากการจำลองโดยคอมพิวเตอร์ ที่ตำแหน่งความยาวต่างๆ

จากกราฟความผิดพลาดจะพบว่าการใช้สมการอนุกรมที่เปลี่ยนแปลงไปโดยใช้วิธีการประมาณผลของการพาความร้อนและการแผ่รังสีรวมกัน ทำให้การคำนวณที่ได้ผิดพลาดไปจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์มากที่สุดคือบริเวณกึ่งกลางของตัวให้ความร้อน โดยผิดพลาดมากที่สุดประมาณ 5%

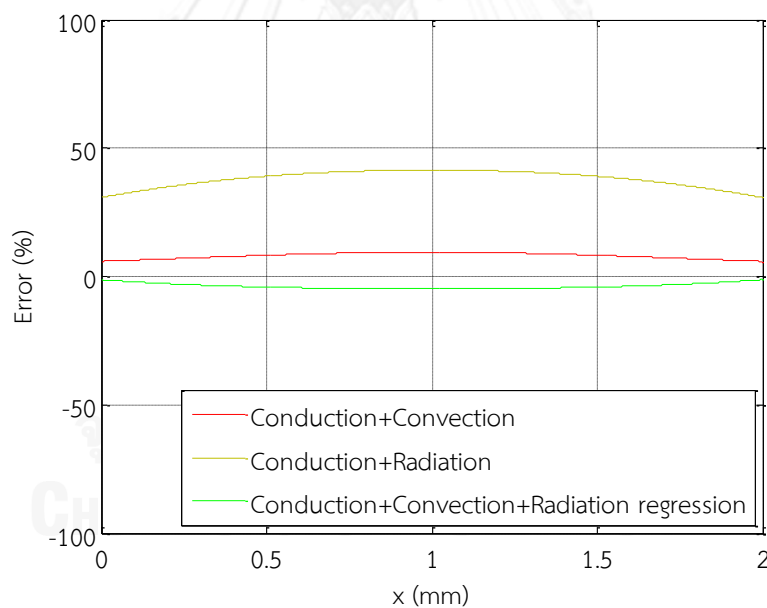
### 3.5 สรุป

การวิเคราะห์อุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนตัวให้ความร้อนที่สภาวะคงตัว เมื่อกำหนดให้สมบัติของวัสดุเป็นค่าคงที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ ในกรณีที่ละเลยผลของการแผ่รังสี จะพบว่าค่าที่ได้จากการวิเคราะห์สมการโดยหลักการถ่ายเทความร้อนกับค่าที่ได้การจำลองผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีค่าตรงกัน สามารถยืนยันได้ว่าค่าที่กำหนดในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ถูกต้องตามทฤษฎี ดังนั้นจึงสามารถนำการจำลองผลจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ไปใช้กับการจำลองผลทั้งตัวตรวจจับความร้อนได้

ส่วนการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นของสมการที่พิจารณาผลการแผ่รังสีจากสมการอันดับสี่ให้เป็นสมการอันดับหนึ่ง จะพบว่าค่าที่ได้จากการประมาณเป็นสมการอันดับหนึ่งมีค่าความผิดพลาดไปจากการจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้สมการอันดับสี่ในค่าที่ยอมรับได้ จึงสามารถนำสมการอันดับหนึ่งที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นไปใช้สำหรับการวิเคราะห์การออกแบบต่อไปได้



ภาพที่ 3.17 กราฟเปรียบเทียบผลของการวิเคราะห์อุณหภูมิบนตัวให้ความร้อนที่เงื่อนไขต่างๆ



ภาพที่ 3.18 กราฟความผิดพลาดกรณีละเลยผลการแผ่รังสี ละเลยผลการพาความร้อน และการพิจารณาผลการแผ่รังสีโดยใช้หลักการถดถอยเชิงเส้น

จากภาพที่ 3.17 และภาพที่ 3.18 จะพบว่าการวิเคราะห์อุณหภูมิบนตัวให้ความร้อนโดยละเลยผลของการแผ่รังสีจะทำให้เกิดความผิดพลาดประมาณ 9% การละเลยผลการพาความร้อนจะทำให้เกิดความผิดพลาด 41% และการวิเคราะห์ผลของการแผ่รังสีโดยใช้หลักการถดถอยเชิงเส้นจะก่อให้เกิดความผิดพลาดประมาณ -5%

## บทที่ 4

### การออกแบบตัวให้ความร้อน

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการวิเคราะห์การออกแบบตัวให้ความร้อนที่อุณหภูมิที่กำหนด โดยจะหาภาวะที่ใช้พลังงานน้อยที่สุด โดยจะมีการวิเคราะห์หาขนาดของตัวให้ความร้อนที่ทำให้มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด และการจำลองผลทั้งตัวตรวจจับก๊าซพร้อมปรับปรุงการออกแบบ

การวิเคราะห์หาโครงสร้างของตัวให้ความร้อนที่ใช้พลังงานที่น้อยที่สุดนั้น ขั้นตอนแรกจะวิเคราะห์จากอุณหภูมิที่สูงที่สุด จากสมการอุณหภูมิที่กล่าวในบทที่ 3 ที่พิจารณาเฉพาะการนำความร้อนและการพาความร้อน

$$\theta(x) = \frac{\dot{q}A}{hP} \left[ \frac{\cosh(CW) \sinh(Cx)}{\sinh(CW)} - \frac{\sinh(Cx)}{\sinh(CW)} - \cosh(Cx) + 1 \right] \quad (3-10)$$

$$C = \sqrt{\frac{hP}{kA}} \quad (3-11)$$

จะสามารถหาตำแหน่งที่ตัวให้ความร้อนมีอุณหภูมิสูงสุดได้จาก  $\frac{d\theta}{dx} = 0$  ซึ่งจะได้ว่า

$$\frac{\dot{q}A}{hP} \left[ \frac{C \cdot \cosh(CW) \cosh(Cx)}{\sinh(CW)} - \frac{C \cdot \cosh(Cx)}{\sinh(CW)} - C \cdot \sinh(Cx) \right] = 0 \quad (4-1)$$

$$\cosh(CW) \cosh(Cx) - \cosh(Cx) - \sinh(CW) \sinh(Cx) = 0 \quad (4-2)$$

$$\cosh(CW - Cx) = \cosh(Cx) \quad (4-3)$$

$$x = \frac{W}{2} \quad (4-4)$$

ดังนั้นตำแหน่งที่ตัวให้ความร้อนมีอุณหภูมิสูงสุดคือตำแหน่ง ณ กึ่งกลางของตัวให้ความร้อน  $\left(x = \frac{W}{2}\right)$  ซึ่งจะสามารถหาสมการอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงที่สูงที่สุดบนตัวให้ความร้อนได้จาก

$\theta_{\max} = \theta\left(x = \frac{W}{2}\right)$  ดังนั้นจะทำให้ได้สมการอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในตัวให้ความร้อนสูงที่สุดดังสมการที่

(4-5)

$$\theta_{\max} = \frac{\dot{q}A}{hP} \left[ 1 - \frac{1}{\cosh\left(\frac{CW}{2}\right)} \right] \quad (4-5)$$

ด้วยวิธีการเดียวกัน จะสามารถหาสมการของของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงเมื่อพิจารณาผลของการแผ่รังสี (สมการประมาณการแผ่รังสี) จากสมการอุณหภูมิที่กล่าวในบทที่ 3 เมื่อพิจารณาผลการแผ่รังสี ดังนี้

$$\theta(x) = \left( \frac{\dot{q}A}{Pk\beta} - \frac{\gamma}{\beta} \right) \left[ \frac{\left( \cosh \left( \sqrt{\frac{P}{A}} \beta \cdot W \right) - 1 \right) \sinh \left( \sqrt{\frac{P}{A}} \beta \cdot x \right)}{\sinh \left( \sqrt{\frac{P}{A}} \beta \cdot W \right)} - \cosh \left( \sqrt{\frac{P}{A}} \beta \cdot x \right) + 1 \right] \quad (3-25)$$

สามารถหาตำแหน่งที่ตัวให้ความร้อนมีอุณหภูมิสูงสุดได้จาก  $\frac{d\theta}{dx} = 0$  ซึ่งจะได้ว่า

$$\left( \frac{\dot{q}A}{Pk\beta} - \frac{\gamma}{\beta} \right) \left[ \frac{\sqrt{\frac{P}{A}} \beta \cosh \left( \sqrt{\frac{P}{A}} \beta \cdot x \right) \left[ \cosh \left( \sqrt{\frac{P}{A}} \beta \cdot W \right) - 1 \right]}{\sinh \left( \sqrt{\frac{P}{A}} \beta \cdot W \right)} - \sqrt{\frac{P}{A}} \beta \sinh \left( \sqrt{\frac{P}{A}} \beta \cdot x \right) \right] = 0 \quad (4-6)$$

$$\cosh \left( \sqrt{\frac{P}{A}} \beta \cdot W - \sqrt{\frac{P}{A}} \beta \cdot x \right) = \cosh \left( \sqrt{\frac{P}{A}} \beta \cdot x \right) \quad (4-7)$$

$$x = \frac{W}{2} \quad (4-8)$$

ซึ่งตำแหน่งที่ตัวให้ความร้อนมีอุณหภูมิสูงสุดคือตำแหน่ง ณ กึ่งกลางของตัวให้ความร้อน  $\left( x = \frac{W}{2} \right)$

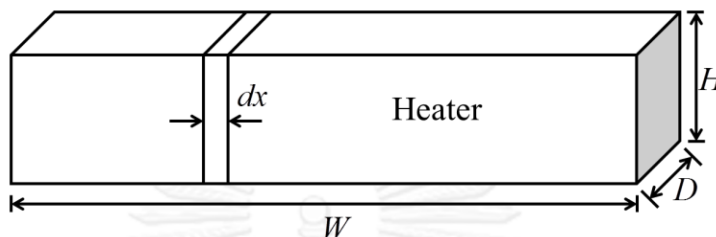
เช่นเดียวกับกรณีพิจารณาเฉพาะผลการนำความร้อนและการพาความร้อน ดังนั้นในทำนองเดียวกัน จะได้สมการอุณหภูมิสูงสุดเมื่อพิจารณาผลการแผ่รังสีตั้งสมการที่ (4-9)

$$\theta_{\max} = \left( \frac{\dot{q}A}{Pk\beta} - \frac{\gamma}{\beta} \right) \left[ 1 - \frac{1}{\cosh \left( \sqrt{\frac{P}{A}} \beta \cdot \frac{W}{2} \right)} \right] \quad (4-9)$$

เนื่องจากสมการที่พิจารณาเฉพาะผลการนำความร้อนและการพาความร้อนกับสมการที่พิจารณาผลการแผ่รังสีนั้นมีรูปแบบของสมการที่เหมือนกัน แตกต่างกันที่สัมประสิทธิ์บางตัวเท่านั้น ดังนั้นการวิเคราะห์ต่อจากนี้จะแสดงให้เห็นการวิเคราะห์เฉพาะสมการที่พิจารณาผลของการนำความร้อนและการพาความร้อนเป็นหลัก และจะสรุปการวิเคราะห์สมการที่พิจารณาผลการแผ่รังสีในตอนท้าย

#### 4.1 พลังงานกับความกว้าง ความยาว และความหนาของตัวให้ความร้อน

ในหัวข้อนี้จะทำการวิเคราะห์การออกแบบตัวให้ความร้อนเมื่อพิจารณาเฉพาะการนำความร้อนและการพาความร้อน โดยหาขนาดที่ทำให้ตัวให้ความร้อนมีการใช้พลังงานน้อยที่สุด ในการออกแบบจะใช้โครงสร้างตัวให้ความร้อนเช่นเดียวกับบัพที่ผ่านมา ดังภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 โครงสร้างตัวให้ความร้อนที่ใช้ในการออกแบบ

พลังงานในตัวให้ความร้อนที่ใช้พิจารณาเป็นดังสมการที่ (4-10) และ (4-11)

$$Power = \frac{v^2}{R} \quad (4-10)$$

$$R = \rho_E \frac{l}{A} \quad (4-11)$$

เมื่อ	$v$	คือ แรงดัน [V]
	$R$	คือ ความต้านทาน [ $\Omega$ ]
	$\rho_E$	คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า [ $\Omega \cdot m$ ]
	$A$	คือ พื้นที่ในการนำไฟฟ้า [ $m^2$ ]
	$l$	คือ ความยาว (ในที่นี้มีค่าเท่ากับ $w$ ) [m]

จากสมการที่ (4-10) และ (4-11) จะสามารถเขียนสมการพลังงานใหม่ได้ดังสมการที่ (4-12)

$$Power = \frac{v^2 A}{\rho_E W} \quad (4-12)$$

ประสิทธิภาพของตัวให้ความร้อนคืออัตราส่วนระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับพลังงานที่ใช้  $\left( efficiency = \frac{\theta}{Power} \right)$  เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงมากที่สุด จากสมการที่ (4-5) และ (4-12) จะสามารถหาสมการประสิทธิภาพของตัวให้ความร้อนได้ดังสมการที่ (4-13)

$$efficiency = \frac{\dot{q}W\rho_E}{v^2hP} \left[ 1 - \frac{1}{\cosh\left(\sqrt{\frac{hP}{kA}} \cdot \frac{W}{2}\right)} \right] \quad (4-13)$$

จากที่กล่าวในบทที่ 3 (หัวข้อ 3.2) ว่า  $\dot{q}$  คือ อัตราพลังงานความร้อนที่ชิ้นงานสร้างขึ้นต่อปริมาตร ( $\dot{q} = \frac{Power}{volume}$ ) จากสมการที่ (4-12) จะสามารถเขียนสมการ  $\dot{q}$  ได้ดังสมการที่ (4-14)

$$\dot{q} = \frac{v^2}{\rho_E W^2} \quad (4-14)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (4-13) และ (4-14) จะสามารถเขียนสมการประสิทธิภาพใหม่ได้ดังสมการที่ (4-15)

$$efficiency = \frac{1}{hPW} \left[ 1 - \frac{1}{\cosh\left(\sqrt{\frac{hP}{kA}} \cdot \frac{W}{2}\right)} \right] \quad (4-15)$$

#### 4.1.1 พลังงานกับความกว้าง

จากสมการที่ (4-1) เราทราบว่า  $\dot{q} = \frac{v^2}{\rho_E W^2}$ ,  $P = 2(D+H)$  และ  $A = DH$  ดังนั้นเราจะสามารถเขียนสมการที่ (4-1) ใหม่ได้ดังนี้

$$\theta_{max} = \frac{v^2 DH}{2h\rho_E W^2 (D+H)} \left[ 1 - \frac{1}{\cosh\left(\sqrt{\frac{2h(D+H)}{kDH}} \cdot \frac{W}{2}\right)} \right] \quad (4-16)$$

เมื่อ	$\theta_{max}$	คือ อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งมีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นลบอุณหภูมิห้อง ( $T - T_{\infty}$ ) [K]
	$v$	คือ แรงดัน [V]
	$D$	คือ ความกว้างของตัวให้ความร้อน [m]
	$W$	คือ ความยาวของตัวให้ความร้อน [m]
	$H$	คือ ความหนาของตัวให้ความร้อน [m]
	$h$	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน [ $W / m^2 \cdot K$ ]



$\rho_E$  คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า [ $\Omega \cdot m$ ]

$k$  คือ ค่าการนำความร้อน [ $W/m \cdot K$ ]

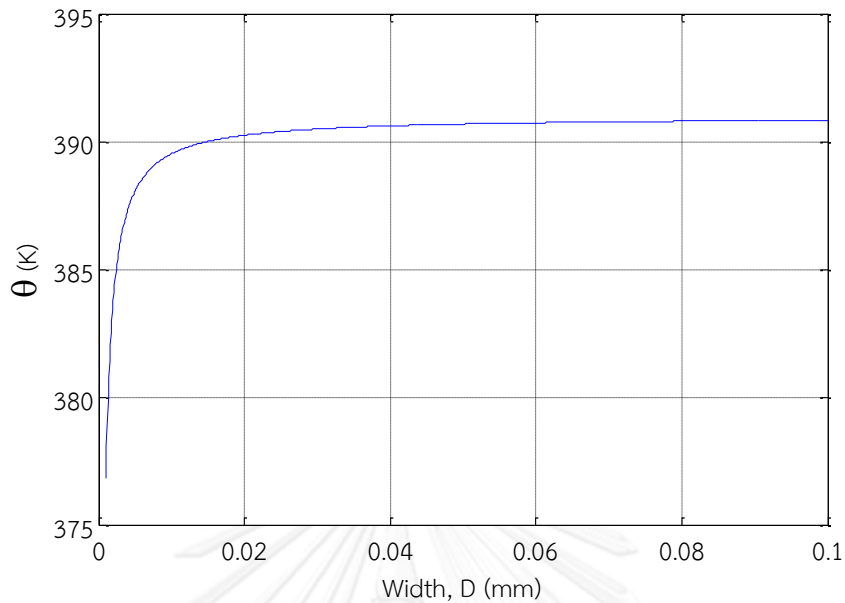
จากสมการเมื่อกำหนดค่าต่างๆดังต่อไปนี้

- กำหนดขนาดตัวให้ความร้อนให้มีความยาว ( $W$ ) และความหนา ( $H$ ) คงที่ที่  $2\text{ mm}$  และ  $0.1\ \mu\text{m}$  ตามลำดับ ส่วนความกว้าง ( $D$ ) มีขนาดตั้งแต่  $1\ \mu\text{m}$ - $0.1\text{ mm}$  โดยสาเหตุที่เลือกตัวให้ความร้อนมีความยาวดังกล่าวเพื่อความสะดวกต่อการนำไปใช้งานและมีความกว้างกับความหนาขนาดดังกล่าวเนื่องจากความสามารถในการผลิต
- ป้อนแรงดัน  $0.2\text{ V}$
- วัสดุเป็นแพลทินัมมีสมบัติดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของแพลทินัม

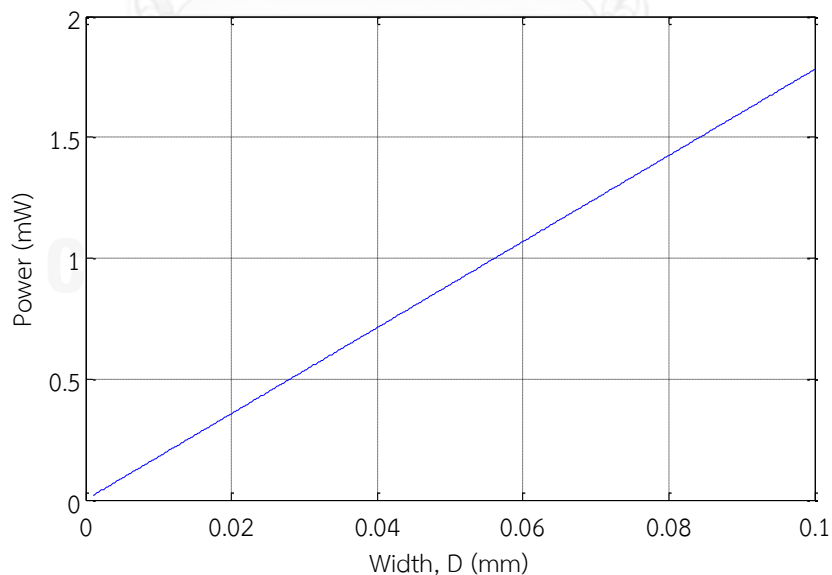
Properties	Value	Unit
Electrical resistivity ( $\rho_E$ )	$1.12 \times 10^{-7}$	$\Omega \cdot m$
Thermal conductivity ( $k$ )	71.6	$W/m \cdot K$
Emissivity function ( $\varepsilon$ )	0.05	–
Density	21450	$kg/m^3$
Thermal capacity	133	$J/kg \cdot K$
Coefficient of thermal expansion	$8.80 \times 10^{-6}$	$1/K$
Young's modulus	$168 \times 10^9$	$Pa$
Poisson's ratio	0.38	–

- สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h$ ) ไปยังอากาศเท่ากับ  $5\ [W/m^2 \cdot K]$   
จะสามารถหาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับความกว้างได้ดังภาพที่ 4.2

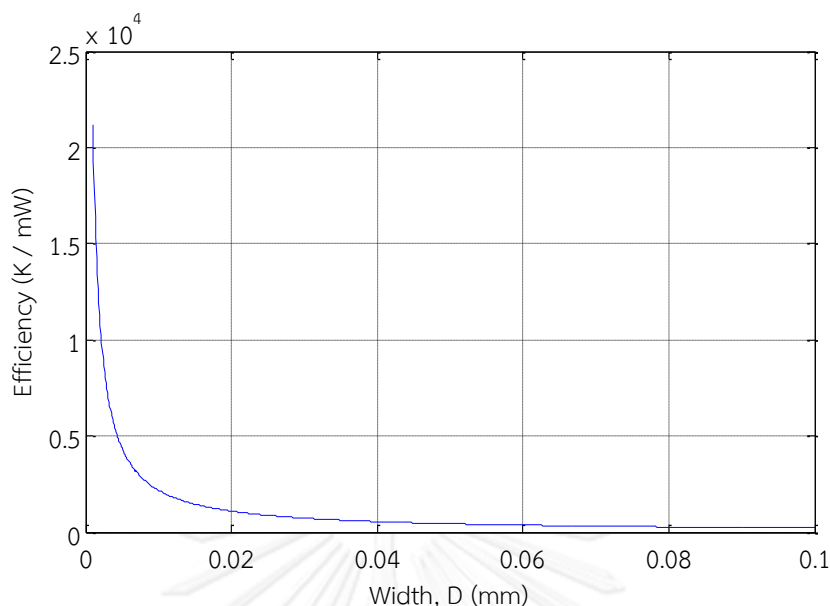


ภาพที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับความกว้าง

จะพบว่าเมื่อตัวให้ความร้อนมีขนาดกว้างขึ้น จะทำให้ได้อุณหภูมิที่มากขึ้นไปด้วย แต่จะมากขึ้นมากแค่เฉพาะช่วงแรก ก่อนที่จะเริ่มเพิ่มทีละน้อยจนเข้าใกล้คงที่ จากสมการพลังงานที่ใช้ในตัวให้ความร้อนสมการที่ (4-12) จะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับความกว้างได้ดังภาพที่ 4.3 และหาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับความกว้างได้ดังภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับความกว้าง



ภาพที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับความกว้าง

เมื่อพิจารณากราฟพลังงานจะพบว่า เมื่อความกว้างเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้พลังงานเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นเมื่อวิเคราะห์จากภาพที่ 4.2 และภาพที่ 4.3 จะเห็นว่าการเลือกสร้างตัวให้ความร้อนมีขนาดกว้างมากไม่เกิดประโยชน์ เพราะในช่วงความกว้างมากกว่า  $0.02\text{ mm}$  อุณหภูมิเปลี่ยนไปน้อยมาก เมื่อเทียบกับการใช้พลังงานที่มากขึ้น จากกราฟที่ความกว้าง  $0.05\text{ mm}$  อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจากอุณหภูมิห้อง  $390.7\text{ K}$  ใช้พลังงานไป  $0.89\text{ mW}$  ในขณะที่ความกว้าง  $0.1\text{ mm}$  อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจากอุณหภูมิห้อง  $390.8\text{ K}$  ใช้พลังงานไป  $1.78\text{ mW}$  จะเห็นว่าการเพิ่มความกว้างจาก  $0.05\text{ mm}$  เป็น  $0.1\text{ mm}$  ได้อุณหภูมิเพิ่มเพียง  $0.03\%$  แต่ต้องใช้พลังงานเพิ่มขึ้น  $50\%$  และจากกราฟประสิทธิภาพ (ภาพที่ 4.4) จะพบว่าความกว้างมากขึ้นประสิทธิภาพจะน้อยลง

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น จึงไม่เกิดประโยชน์ในการเพิ่มความกว้างของตัวให้ความร้อนมากเกินไป เพราะอุณหภูมิที่ได้เพิ่มนั้นไม่คุ้มกับพลังงานที่ต้องเสียไป แต่ทว่าการเลือกใช้ความกว้างที่น้อยจะส่งผลให้ไม่สะดวกต่อการนำไปใช้งาน ดังนั้นจึงเลือกใช้ความกว้างขนาด  $50\ \mu\text{m}$  เนื่องจากเป็นขนาดที่ไม่เล็กจนไม่สะดวกต่อการนำไปใช้งาน และมีประสิทธิภาพอยู่ในค่าที่ยอมรับได้

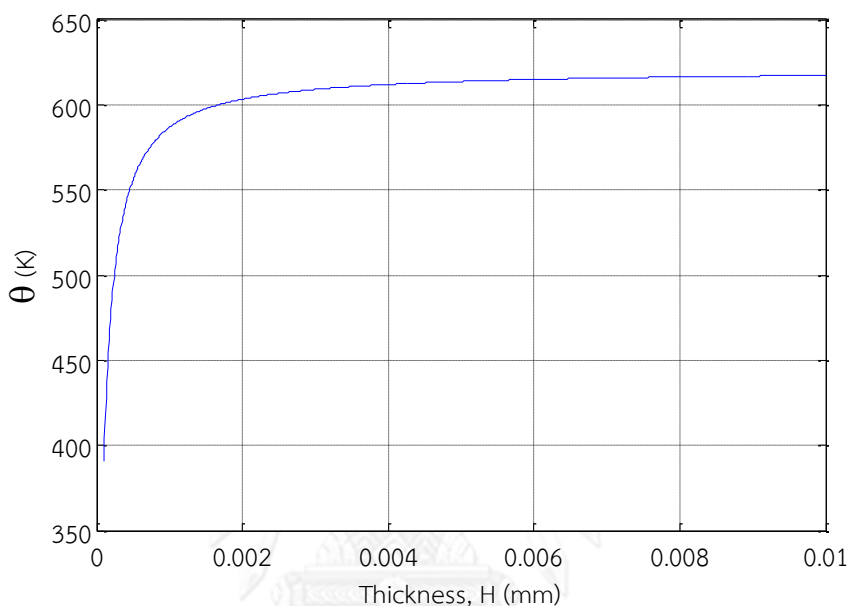
#### 4.1.2 พลังงานกับความหนา

ขั้นตอนการวิเคราะห์เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ความกว้าง จากสมการที่ (4-16) เมื่อกำหนดค่าต่างๆดังต่อไปนี้

1. กำหนดขนาดตัวให้ความร้อนให้มีความยาว ( $W$ ) และความกว้าง ( $D$ ) คงที่ที่  $2\text{ mm}$  และ  $50\ \mu\text{m}$  ตามลำดับ ส่วนความหนา ( $H$ ) มีขนาดตั้งแต่  $0.1\ \mu\text{m}$  -  $10\ \mu\text{m}$

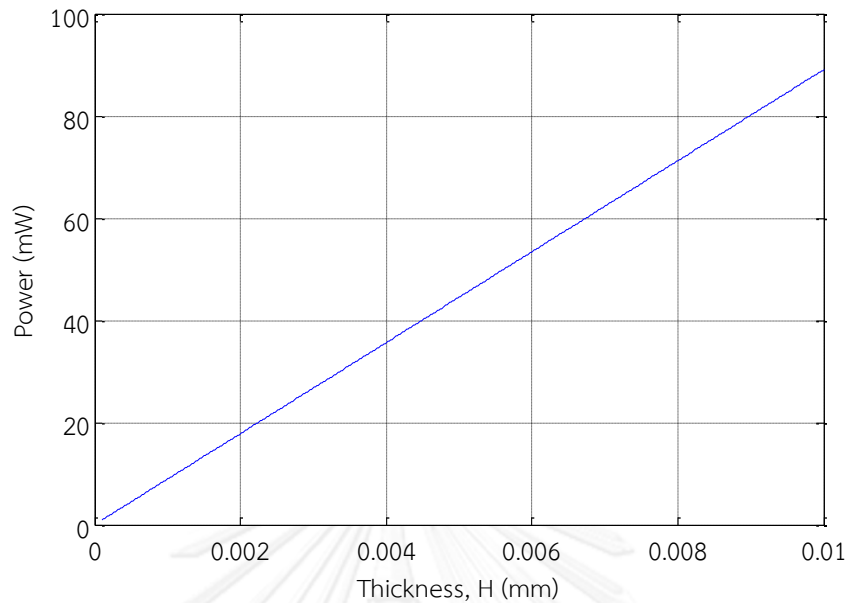
2. ป้อนแรงดัน 0.2V
3. วัสดุเป็นแพลทินัมมีสมบัติดังตารางที่ 4.1
4. สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h$ ) ไปยังอากาศเท่ากับ 5 [ $W/m^2 \cdot K$ ]

จะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับความหนาได้ดังภาพที่ 4.5

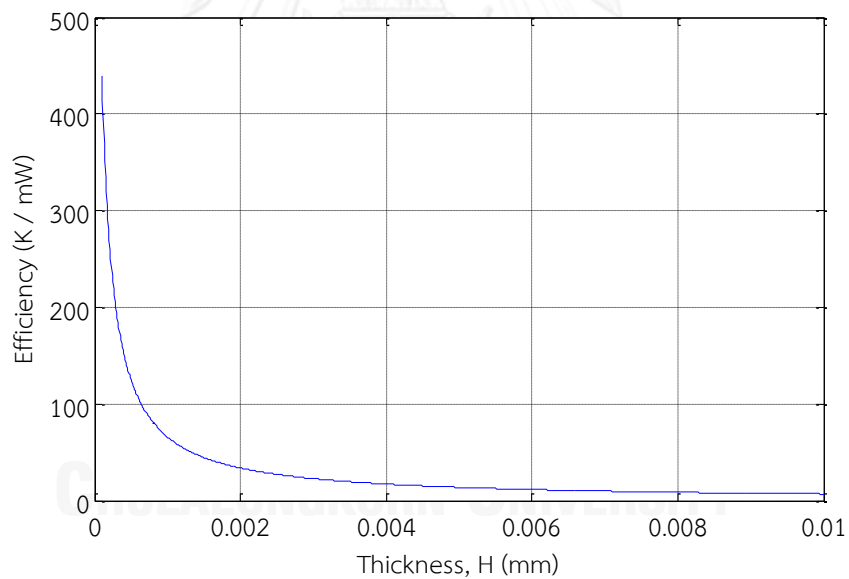


ภาพที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับความหนา

จะพบว่าเมื่อตัวให้ความร้อนมีขนาดหนาขึ้น จะทำให้ได้อุณหภูมิที่มากขึ้นไปด้วย แต่จะมากขึ้นมากแค่เฉพาะช่วงแรก ก่อนที่จะเริ่มเพิ่มทีละน้อยจนเข้าใกล้ค่าคงที่ ลักษณะกราฟเช่นเดียวกับความกว้างจากสมการพลังงานที่ใช้ในตัวให้ความร้อนจะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับความหนาได้ดังภาพที่ 4.6 และหาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับความหนาได้ดังภาพที่ 4.7



ภาพที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับความหนา



ภาพที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับความหนา

จากกราฟพลังงานและกราฟประสิทธิภาพจะเห็นว่ามีลักษณะเช่นเดียวกับกราฟความกว้าง กล่าวคือ เมื่อความหนาเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้การใช้พลังงานเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นเมื่อวิเคราะห์จากภาพที่ 4.5 และภาพที่ 4.6 จะเห็นว่า การเลือกสร้างตัวให้ความร้อนมีขนาดหนามากไม่เกิดประโยชน์ เพราะในช่วงความหนามากกว่า  $0.002 \text{ mm}$  อุณหภูมิเปลี่ยนไปน้อยมาก เมื่อเทียบกับการใช้พลังงานที่มากขึ้น จากกราฟที่ความหนา  $0.1 \mu\text{m}$  อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจากอุณหภูมิห้อง  $391 \text{ K}$  ใช้พลังงานไป

0.89 mW ในขณะที่ความหนา  $10 \mu\text{m}$  อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจากอุณหภูมิห้อง  $617 \text{ K}$  ใช้พลังงานไป  $89 \text{ mW}$  จะเห็นว่าการเพิ่มความหนาจาก  $0.1 \mu\text{m}$  เป็น  $10 \mu\text{m}$  ได้อุณหภูมิเพิ่ม 58% แต่ต้องใช้พลังงานเพิ่มขึ้นมากถึง 8800% และจากกราฟประสิทธิภาพ (ภาพที่ 4.7) จะพบว่าความหนามากขึ้น ประสิทธิภาพจะน้อยลง

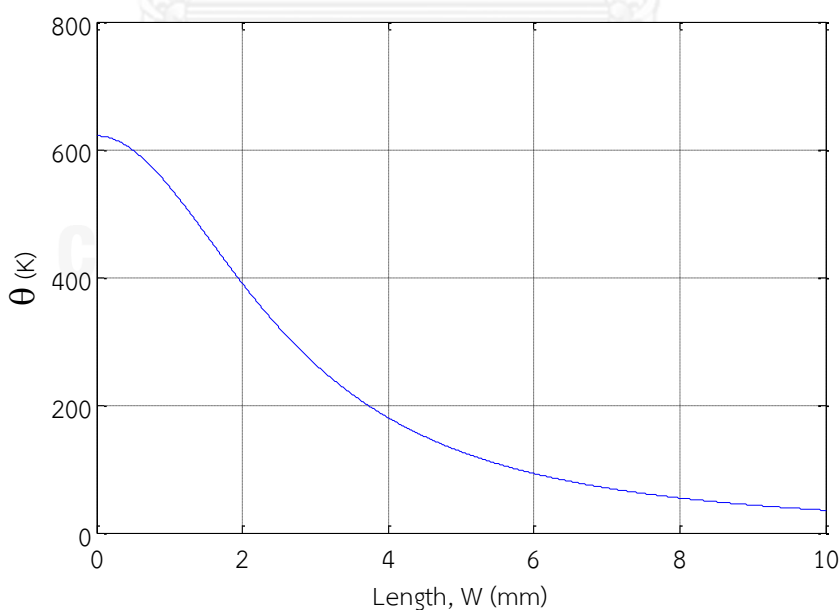
จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น จึงไม่เกิดประโยชน์ในการเพิ่มความหนาของตัวให้ความร้อนมากเกินไปจนความจำเป็น เพราะอุณหภูมิที่ได้เพิ่มนั้นไม่คุ้มกับพลังงานที่ต้องเสียไป ดังนั้นจึงเลือกใช้ความหนาขนาด  $0.1 \mu\text{m}$  เนื่องจากเป็นขนาดที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดในที่สามารถผลิตได้

#### 4.1.3 พลังงานกับความยาว

ขั้นตอนการวิเคราะห์เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ความกว้างและความหนา จากสมการที่ (4-6) เมื่อกำหนดค่าต่างๆดังต่อไปนี้

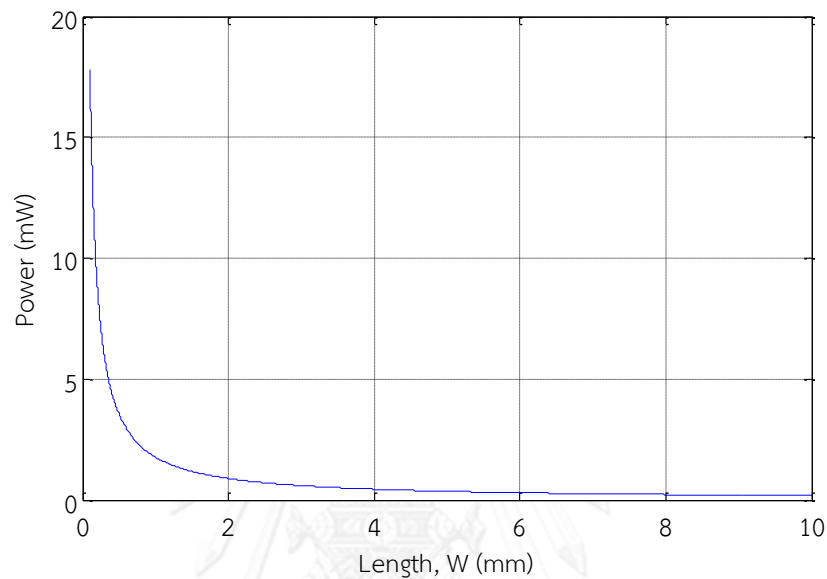
1. กำหนดขนาดตัวให้ความร้อนให้มีความกว้าง ( $D$ ) และความหนา ( $H$ ) คงที่ที่  $50 \mu\text{m}$  และ  $0.1 \mu\text{m}$  ตามลำดับ ส่วนความยาว ( $W$ ) มีขนาดตั้งแต่  $100 \mu\text{m} - 10 \text{ mm}$
2. ป้อนแรงดัน  $0.2 \text{ V}$
3. วัสดุเป็นแพลทินัมมีสมบัติดังตารางที่ 4.1
4. สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h$ ) ไปยังอากาศเท่ากับ  $5 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K]}$

จะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับความยาวได้ดังภาพที่ 4.8

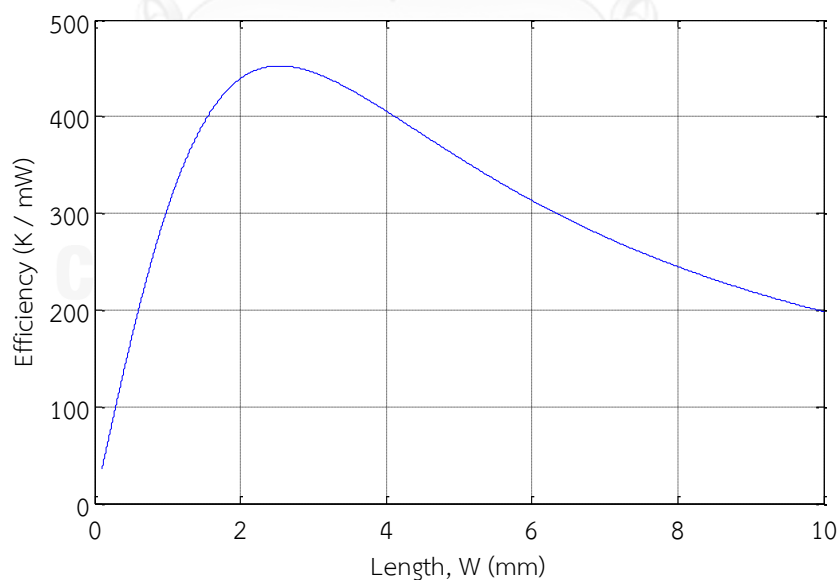


ภาพที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับความยาว

จากกราฟอุณหภูมิจะเห็นว่ากราฟความยาวจะแตกต่างจากกราฟความกว้างและความหนา กล่าวคือ เมื่อความยาวเพิ่มขึ้นอุณหภูมิจะลดลง จากสมการพลังงานและสมการประสิทธิภาพจะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับความยาว และความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับความยาวได้ดังภาพที่ 4.9 และภาพที่ 4.10 ตามลำดับ



ภาพที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับความยาว



ภาพที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับความยาว

จากกราฟพลังงานจะพบว่าเมื่อความยาวเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ใช้พลังงานน้อยลงตามไปด้วย ดังนั้นเมื่อวิเคราะห์จากภาพที่ 4.9 จะเห็นว่าทางเลือกสร้างตัวให้ความร้อนมีขนาดยาวจะดีกว่าสร้างให้ตัวให้ความร้อนมีขนาดสั้น เพราะตัวให้ความร้อนที่มีขนาดยาวนอกจากจะพลังงานน้อยกว่าแล้วยังสะดวกต่อการนำใช้งานอีกด้วย จากกราฟที่ความยาว  $0.1 \text{ mm}$  อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจากอุณหภูมิห้อง  $621 \text{ K}$  ใช้พลังงานไป  $17.8 \text{ mW}$  ในขณะที่ความยาว  $2 \text{ mm}$  อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจากอุณหภูมิห้อง  $391 \text{ K}$  ใช้พลังงานไป  $0.89 \text{ mW}$  จะเห็นว่า การเพิ่มความยาวจาก  $0.1 \text{ mm}$  เป็น  $2 \text{ mm}$  อุณหภูมิลดลง  $37\%$  แต่ใช้พลังงานลดลงถึง  $95\%$  และจากกราฟประสิทธิภาพจะพบว่ากราฟความยาวแตกต่างจากกราฟความกว้างและความหนา โดยกราฟประสิทธิภาพกับความยาวนี้มีจุดที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ดังนั้นเราสามารถหาความยาวที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพที่ดีที่สุดได้ โดยจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

#### 4.2 ความยาวที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด

จากกราฟประสิทธิภาพกับความยาวในหัวข้อที่แล้ว แสดงให้เห็นว่ามีความยาวที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพที่ดีที่สุดได้ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะทำการวิเคราะห์หาความยาวที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพที่ดีที่สุด จากสมการประสิทธิภาพ (4-15) สามารถหาความยาวที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพที่ดีที่สุดได้โดย

การหาอนุพันธ์ของประสิทธิภาพเทียบกับความยาว  $\left(\frac{d(\text{efficiency})}{dW} = 0\right)$  จะได้ว่า

$$\frac{1}{hP} \left[ \frac{-1}{W^2} + \frac{\left( \sqrt{\frac{hPW^2}{4kA}} \cdot \sinh\left(\sqrt{\frac{hPW^2}{4kA}}\right) + \cosh\left(\sqrt{\frac{hPW^2}{4kA}}\right) \right)}{W^2 \cosh^2\left(\sqrt{\frac{hPW^2}{4kA}}\right)} \right] = 0 \quad (4-17)$$

$$\cosh^2\left(\sqrt{\frac{hPW^2}{4kA}}\right) - \cosh\left(\sqrt{\frac{hPW^2}{4kA}}\right) - \sqrt{\frac{hPW^2}{4kA}} \sinh\left(\sqrt{\frac{hPW^2}{4kA}}\right) = 0 \quad (4-18)$$

กำหนดให้  $x = \sqrt{\frac{hPW^2}{4kA}}$  จะได้ว่า

$$\cosh^2(x) - \cosh(x) - x \sinh(x) = 0 \quad (4-19)$$

$$x = 1.5055 \quad (4-20)$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$W = 3.011 \sqrt{\frac{kA}{hP}} \quad (4-21)$$



จากสมการประสิทธิภาพ (4-15) จะทำการหาอนุพันธ์อันดับ 2 เพื่อตรวจสอบว่าเป็นค่าความยาวในสมการที่ (4-21) เป็นค่าที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดหรือต่ำสุด จากสมการที่ (4-18) ซึ่งเป็นสมการอนุพันธ์ของสมการประสิทธิภาพ เมื่อนำมาหาอนุพันธ์อันดับ 2 และแทนค่าตามสมการที่ (4-21) แล้วจะได้ว่า

$$\left. \frac{d^2(\text{efficiency})}{dW^2} \right|_{W=3.011 \sqrt{\frac{kA}{hP}}} = \frac{-0.01966}{kA} \cdot \sqrt{\frac{hP}{kA}} \quad (4-22)$$

จากสมการที่ (4-22) จะพบว่าค่าอนุพันธ์อันดับ 2 เมื่อแทนค่าความยาวด้วยสมการ (4-21) มีค่าเป็นลบ ซึ่งหมายความว่าค่าความยาวในสมการที่ (4-21) เป็นค่าความยาวที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด และเป็นค่าความยาวที่ทำให้ตัวให้ความร้อนใช้พลังงานน้อยที่สุด

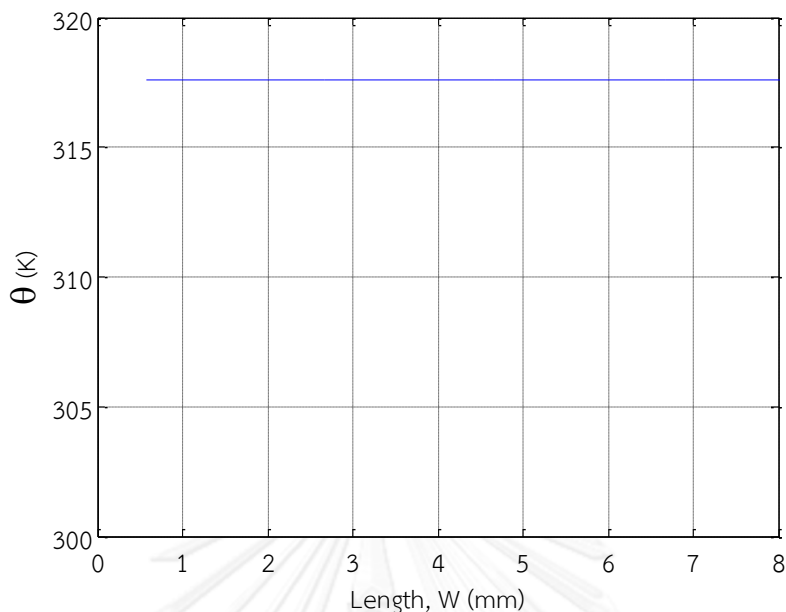
เมื่อนำค่าความยาวจากสมการที่ (4-21) ลงไปแทนในสมการที่ (4-5) จะได้ว่า

$$\theta_{\max} = \frac{v^2}{9\rho k} \left[ 1 - \frac{1}{\cosh(1.5)} \right] \quad (4-23)$$

$$\theta_{\max} = 0.06388 \frac{v^2}{\rho_E k} \quad (4-24)$$

จะพบว่าหากเลือกสร้างตัวให้ความร้อนด้วยเงื่อนไขความยาวตามสมการที่ (4-21) แล้ว(กำหนดความกว้างและความหนา ก่อน แล้วจึงนำมาหาความยาว) ค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจะขึ้นกับสมบัติของสารและแรงดันที่ป้อน

จากสมการที่ (4-5) เมื่อกำหนดค่าความกว้างและความหนา และสร้าง ความยาวตามเงื่อนไขสมการที่ (4-21) จะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับความยาวได้ดังภาพที่ 4.11



ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับความยาวตามสมการที่ (4-21)

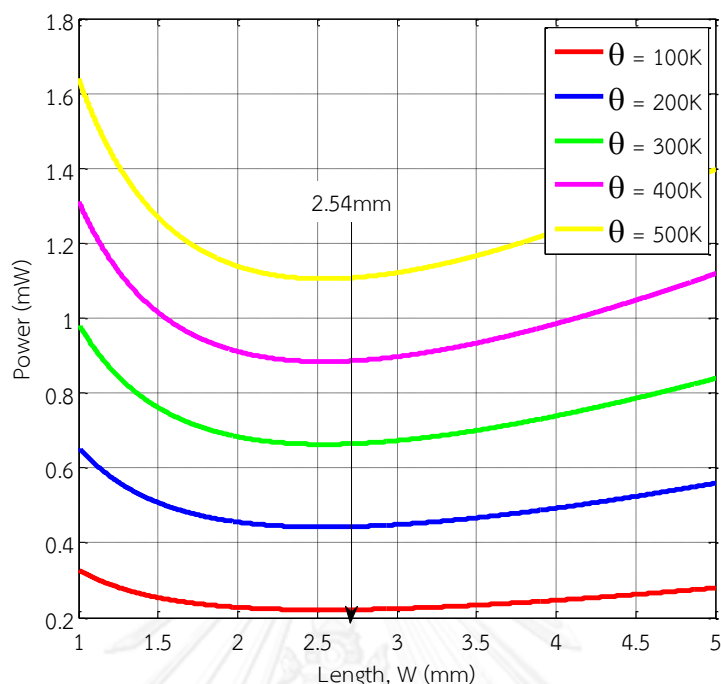
จากภาพจะพบว่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงจะไม่ขึ้นกับความยาวเมื่อใช้เงื่อนไขความยาวตามสมการที่ (4-21) เป็นจริง

พิจารณาด้านพลังงาน เมื่อนำค่าความยาวตามสมการที่ (4-21) แทนลงไปในสมการพลังงาน (4-12) จะได้สมการพลังงานใหม่ดังสมการที่ (4-25)

$$Power = \frac{v^2}{3\rho_E} \sqrt{\frac{hPA}{k}} \quad (4-25)$$

จะเห็นว่าเมื่อเลือกสร้างตัวให้ความร้อนที่มีความยาวตามสมการที่ (4-21) แล้ว พลังงานที่เกิดขึ้นจะขึ้นกับความกว้างและความหนาที่เลือกใช้เท่านั้น ดังนั้นเพื่อให้ตัวให้ความร้อนใช้พลังงานน้อยที่สุด จะต้องเลือกสร้างตัวให้ความร้อนที่มีขนาดความกว้างและหนาน้อยที่สุดเท่าที่กระบวนการผลิตจะทำได้ โดยพลังงานเมื่อสร้างความยาวตามเงื่อนไขแล้วจะเป็นพลังงานที่น้อยที่สุดที่ตัวให้ความร้อนใช้ในการสร้างอุณหภูมิหนึ่งๆ

จากสมการอุณหภูมิ (4-5) และสมการพลังงาน (4-12) กำหนดให้อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงมีค่า 100 K -500 K วัสดุเป็นแพลทินัมมีค่าคงที่ดังตารางที่ 4.1 ตัวให้ความร้อนมีขนาดกว้าง 50.0  $\mu m$  และหนา 0.100  $\mu m$  สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับความยาวที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงต่างๆ ได้ดังภาพที่ 4.12



ภาพที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับความยาวที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงต่างๆ

จากกราฟจะพบว่าภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงที่เท่ากัน ความยาวที่ทำให้ใช้พลังงานต่ำที่สุด จะมีค่าเท่ากับ  $2.54 \text{ mm}$  ซึ่งมีค่าตรงตามสมการ  $W = 3.011 \sqrt{\frac{kA}{hP}}$

ดังนั้นหากต้องการสร้างตัวให้ความร้อนที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดและพลังงานต่ำ ต้องสร้างตัวให้ความร้อนตามสมการ  $W = 3.011 \sqrt{\frac{kA}{hP}}$  โดยต้องเลือกให้มีความกว้างและความหนาแน่นน้อยที่สุดเท่าที่สามารถจะทำได้ โดยพลังงานที่ใช้ในตัวให้ความร้อนตามเงื่อนไขนั้น จะเป็นตัวให้ความร้อนที่ใช้พลังงานน้อยที่สุดสำหรับความกว้าง ความหนา และอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงนั้น

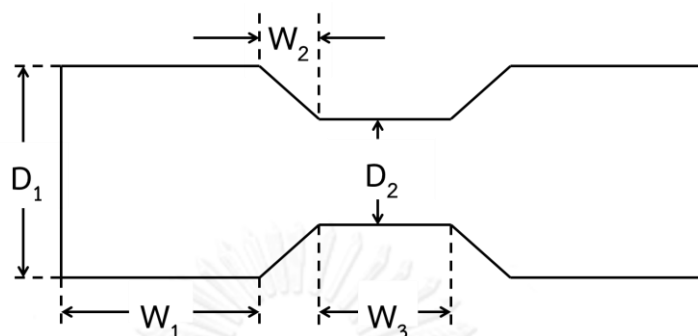
### 4.3 การออกแบบและจำลองผลตัวให้ความร้อนโดยโปรแกรมคอมโซล

จากหัวข้อที่ผ่านมาเป็นการวิเคราะห์เฉพาะตัวให้ความร้อนโดยใช้การวิเคราะห์จากสมการ เนื่องจากโครงสร้างตัวให้ความร้อนเป็นทรงสี่เหลี่ยมที่ง่ายต่อการวิเคราะห์ ตั้งแต่หัวข้อนี้เป็นต้นไปจะเริ่มวิเคราะห์ผลการออกแบบตัวให้ความร้อนที่มีรูปทรงอื่นโดยใช้โปรแกรมคอมโซล รวมไปถึงการออกแบบและจำลองผลทั้งตัวตรวจจับก๊าซ เนื่องจากรูปแบบยากต่อการวิเคราะห์โดยสมการ

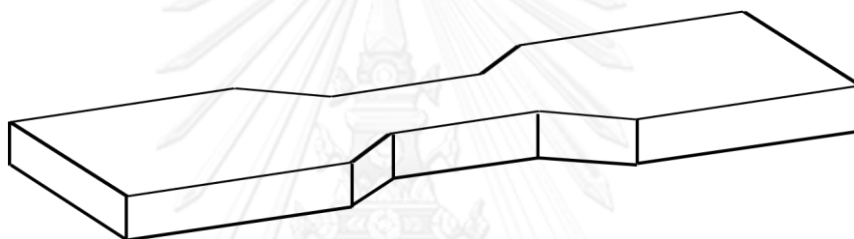
#### 4.3.1 โครงสร้างตัวให้ความร้อน

จากหัวข้อ 4.2 ที่กล่าวว่าหากต้องการสร้างตัวให้ความร้อนที่มีการใช้พลังงานต่ำ จะต้องสร้างตัวให้ความร้อนมีความกว้างขนาดเล็ก แต่ในการใช้งานจริงความกว้างที่มีขนาดเล็กจะทำให้ยากต่อการใช้งาน (เช่น การเชื่อมต่อวงจร) ดังนั้นจึงออกแบบตัวให้ความร้อนที่มีพลังงานต่ำและสะดวกต่อ

การใช้งานดังภาพที่ 4.13 และภาพที่ 4.14 คือออกแบบให้ด้านปลายมีขนาดใหญ่เพื่อให้ง่ายต่อการใช้งานและบริเวณตรงกลางมีขนาดเล็กเพื่อลดการใช้พลังงาน



ภาพที่ 4.13 โครงสร้างและพารามิเตอร์ตัวให้ความร้อนที่ลดการใช้พลังงาน (มุมมองด้านบน)



ภาพที่ 4.14 โครงสร้างตัวให้ความร้อนที่ลดการใช้พลังงาน (3 มิติ)

ในการจำลองผลโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะกำหนดค่าดังต่อไปนี้

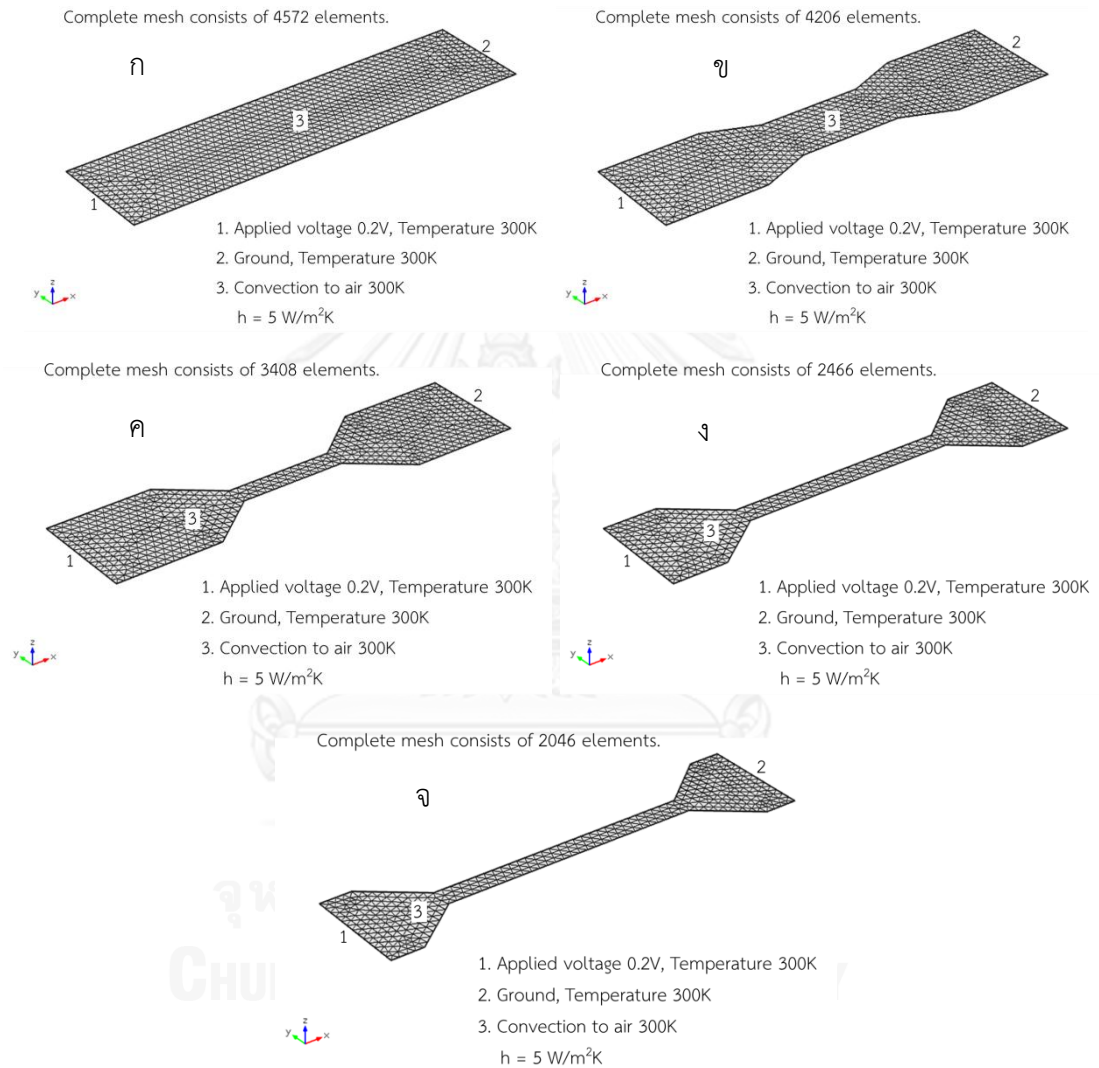
1. ตัวให้ความร้อนทุกแบบมีขนาดรวมทั้งหมดยาว ( $W$ )  $200 \mu\text{m}$  กว้าง ( $D$ )  $50.0 \mu\text{m}$  และหนา ( $H$ )  $0.100 \mu\text{m}$  โดยค่าความยาวที่ใช้มีขนาดเล็กกว่าที่ใช้ในการวิเคราะห์ก่อนหน้า (การวิเคราะห์ก่อนหน้าจะอยู่ที่  $2.00 \text{ mm}$ ) ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการจำลองและเห็นภาพรวม เพราะเป้าหมายการจำลองของหัวข้อนี้อยู่ที่ขนาดความกว้าง
2. กำหนดให้พารามิเตอร์ในภาพที่ 4.13 ที่จะจำลองดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง

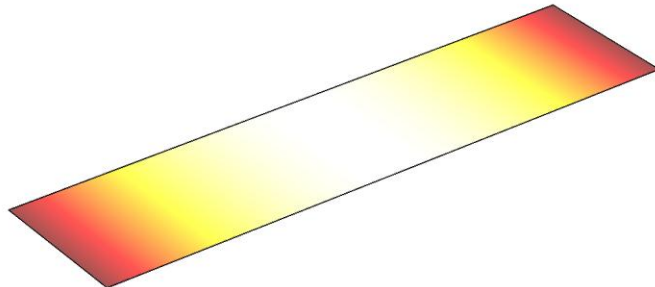
รูปแบบ	พารามิเตอร์ [ $\mu\text{m}$ ]				
	$D_1$	$D_2$	$W_1$	$W_2$	$W_3$
ก	50.0	50.0	50.0	25.0	50.0
ข	50.0	30.0	50.0	25.0	50.0
ค	50.0	10.0	50.0	25.0	50.0
ง	50.0	10.0	25.0	25.0	100
จ	50.0	10.0	15.0	25.0	120

3. ป้อนแรงดัน  $0.2V$  ที่ด้านซ้ายของตัวให้ความร้อน อีกด้านต่อลงดิน
4. พื้นผิวที่เหลือมีการพาความร้อนไปยังอากาศอุณหภูมิ  $300K$  มีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเท่ากับ  $5 [W/m^2 \cdot K]$
5. วัสดุเป็นแพลทินัมมีสมบัติดังตารางที่ 4.1

ดังแสดงในภาพที่ 4.15



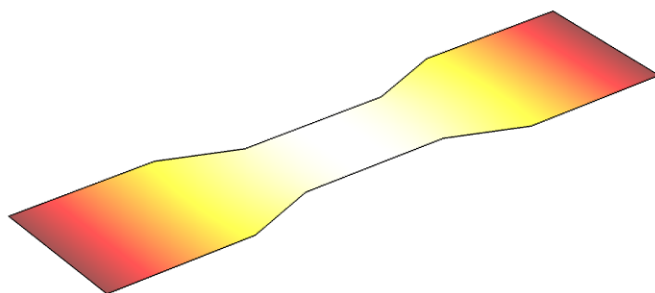
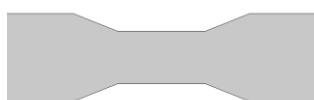
ภาพที่ 4.15 ค่าและตำแหน่งที่ป้อนเงื่อนไขภายในโปรแกรมคอมโซลของโครงสร้างรูปแบบ ก-จ  
ได้ผลการจำลองดังภาพที่ 4.16 และภาพที่ 4.17



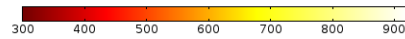
▼ 300



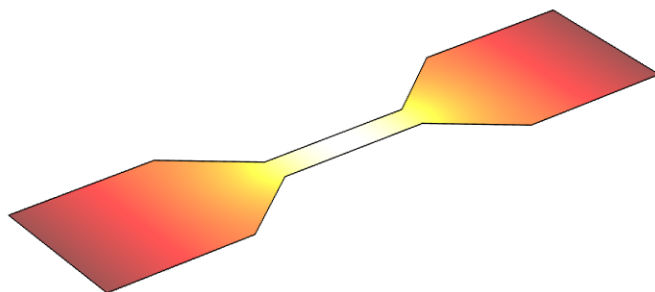
▲ 917.91



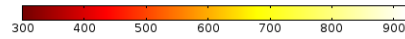
▼ 300



▲ 918.86

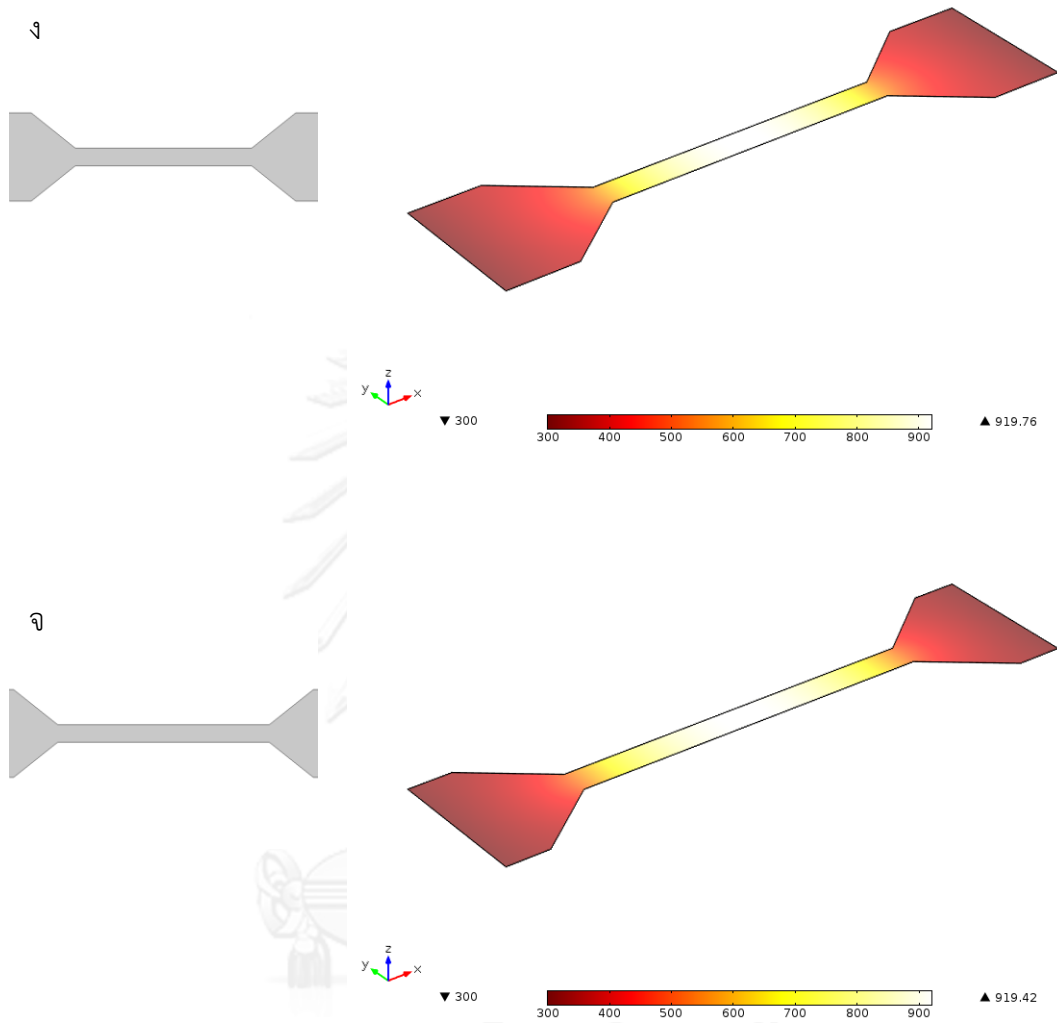


▼ 300

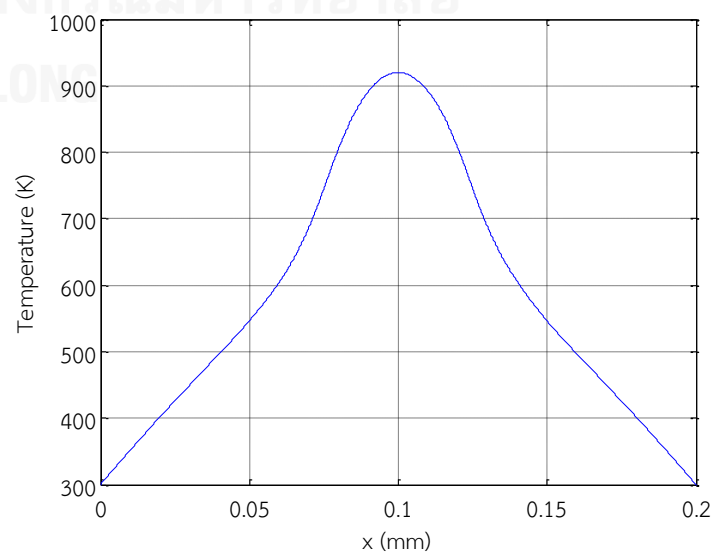
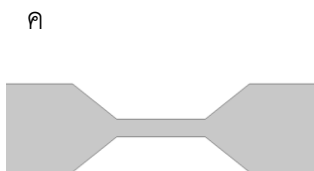
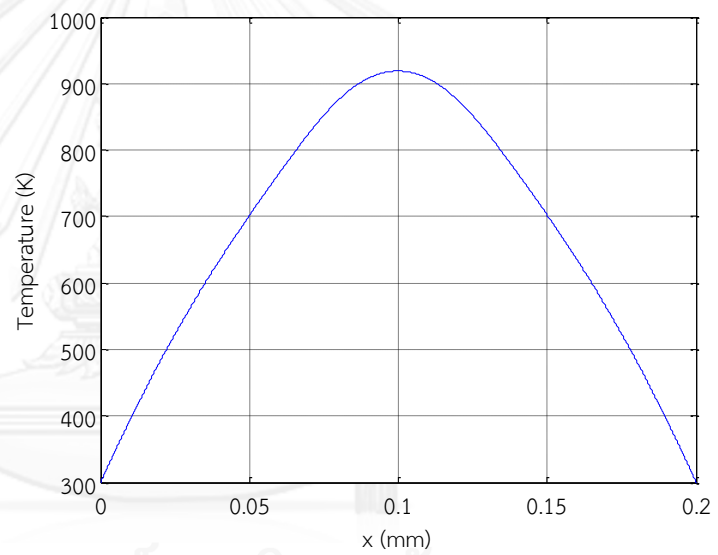
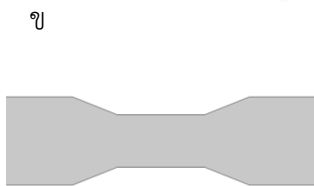
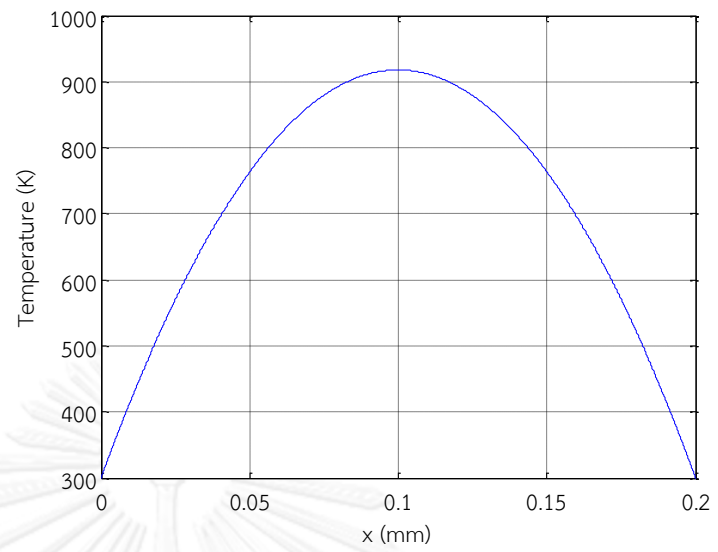


▲ 920.09

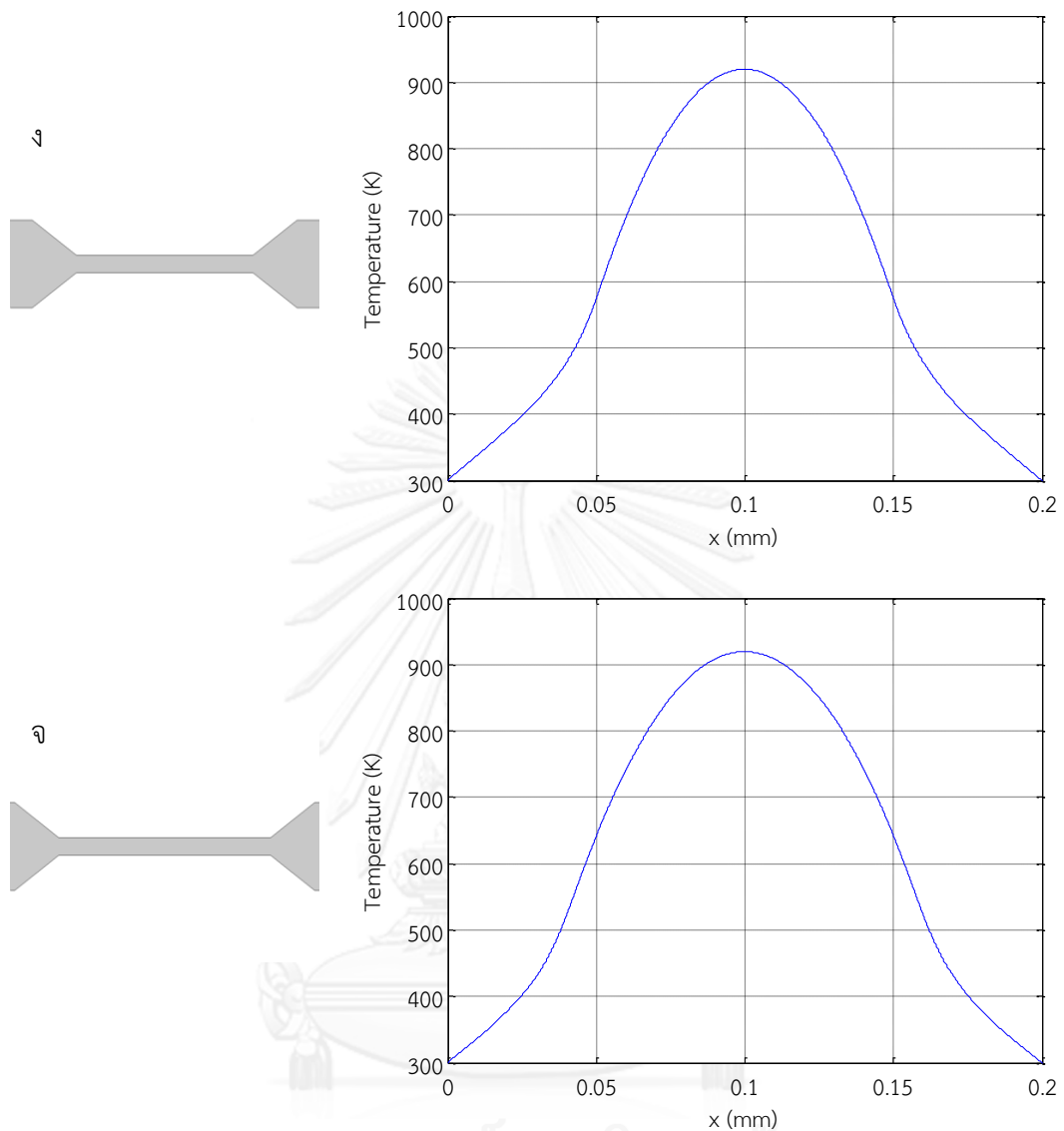
จุฬาล  
CHULAL



ภาพที่ 4.16 โครงสร้าง (ด้านซ้าย) และผลการจำลอง (ด้านขวา) โครงสร้างรูปแบบต่างๆ







ภาพที่ 4.17 กราฟแสดงอุณหภูมิบนตัวให้ความร้อนของโครงสร้างรูปแบบต่างๆ

จากผลการจำลองสามารถสรุปค่าได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการจำลองตัวให้ความร้อนรูปแบบต่างๆโดยโปรแกรมคอมโซล

รูปแบบ	อุณหภูมิมากที่สุด [K]	พลังงาน [mW]	ความหนาแน่นพลังงานที่จุดกึ่งกลาง [W / m <sup>3</sup> ]
ก	918	8.90	$8.90 \times 10^{12}$
ข	919	7.12	$1.58 \times 10^{13}$
ค	920	3.81	$4.08 \times 10^{13}$
ง	920	2.67	$2.00 \times 10^{13}$
จ	919	2.38	$1.59 \times 10^{13}$

จากตารางจะแบ่งการอธิบายผลออกเป็น 2 กลุ่มดังนี้

กลุ่มที่ 1 รูปแบบ ก ข และ ค ในกลุ่มนี้จะศึกษาผลของการลดความกว้าง  $D_2$  ของโครงสร้างตัวให้ความร้อนว่าจะส่งผลต่อการใช้พลังงานอย่างไร ส่วนพารามิเตอร์อื่นมีค่าเท่ากัน จากผลการจำลองจะพบว่าเมื่อลดขนาดความกว้าง  $D_2$  ( $g > x > c$ ) จะส่งผลให้มีอุณหภูมิสูงสุดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ( $c > x > g$ ) แต่จะมีพลังงานที่ลดลง ( $g > x > c$ )

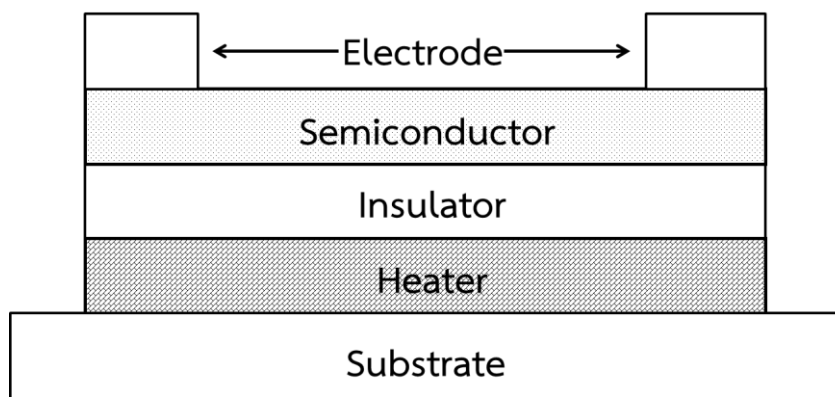
กลุ่มที่ 2 รูปแบบ ค ง และ จ ในกลุ่มนี้จะศึกษาผลของการลดขนาดบริเวณปลายของตัวให้ความร้อน ( $W_1$ ) โดยความกว้างบริเวณ  $D_2$  และพารามิเตอร์  $W_2$  เท่ากันทุกโครงสร้าง จากผลการจำลองพบว่าเมื่อลดขนาด  $W_1$  ( $c > g > j$ ) จะส่งผลให้มีอุณหภูมิสูงสุดลดลงเล็กน้อย ( $c > g > j$ ) แต่จะมีพลังงานที่ลดลง ( $c > g > j$ )

จากสมการพลังงาน (4-3) และ (4-4) จะพบว่าโครงสร้างรูปแบบ ก-จ มีความต้านทานที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ ส่งผลให้ใช้พลังงานน้อยลงตามลำดับด้วยเช่นกัน ซึ่งตรงกับผลการจำลองโดยโปรแกรมคอมโซล ส่วนเรื่องอุณหภูมิถือว่าการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมากจึงพิจารณาได้ว่าอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างรูปแบบ ก-จ โครงสร้างรูปแบบ จ จะมีประสิทธิภาพดีที่สุด เนื่องจากใช้พลังงานน้อยที่สุดเพื่อให้ได้อุณหภูมิที่เท่ากัน

#### 4.3.2 โครงสร้างตัวตรวจจับก๊าซ

หัวข้อที่ผ่านมาเป็นการออกแบบและวิเคราะห์ตัวให้ความร้อน แต่ในหัวข้อนี้จะทำการออกแบบและจำลองผลทั้งตัวตรวจจับก๊าซ และทำการปรับปรุงการออกแบบให้มีพลังงานต่ำ

โครงสร้างตัวตรวจจับก๊าซที่ใช้ในหัวข้อนี้จะประกอบไปด้วย แผ่นฐาน (Substrate) ตัวให้ความร้อน (Heater) ฉนวน (Insulator) สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) และขั้วไฟฟ้า (Electrode) ดังแสดงในภาพที่ 4.18 โดยวัสดุที่ใช้ในโครงสร้างแต่ละชั้นคือ อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminum oxide,  $Al_2O_3$ ) แพลทินัม (Platinum, Pt) ซิลิคอนไนไตรด์ (Silicon Nitride,  $Si_3Ni_4$ ) ทินไดออกไซด์ (Tin oxide,  $SnO_2$ ) และแพลทินัมตามลำดับ มีคุณสมบัติของสารดังแสดงในตารางที่ 4.4



ภาพที่ 4.18 โครงสร้างภาพตัดขวางตัวตรวจจับก๊าซ

ตารางที่ 4.4 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการจำลองตัวตรวจจับก๊าซ

Properties	Material			
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	SnO <sub>2</sub>	Pt
Electrical conductivity ( $\sigma_E$ ) [ $S/m$ ]	$1 \times 10^{-18}$	$1 \times 10^{-18}$	50	$8.9 \times 10^6$
Thermal conductivity ( $k$ ) [ $W/m \cdot K$ ]	35	20	10	71.6
Density ( $\rho$ ) [ $kg/m^3$ ]	3965	3100	2200	21450
Thermal capacity ( $c$ ) [ $J/kg \cdot K$ ]	730	700	730	133

กำหนดค่าในการจำลองผลด้วยโปรแกรมคอมโซลดังต่อไปนี้

- กำหนดให้แต่ละชั้นมีขนาดดังตารางที่ 4.5 โดยอ้างอิงโครงสร้างรูปแบบ ก จากหัวข้อ 4.3.1 (ขนาดที่ใช้ในการจำลองผลเป็นขนาดที่สมมติขึ้นเพื่อเปรียบเทียบให้เห็นความแตกต่างระหว่างการจำลองที่มีตัวให้ความร้อนกับการจำลองทั้งตัวตรวจจับก๊าซ)

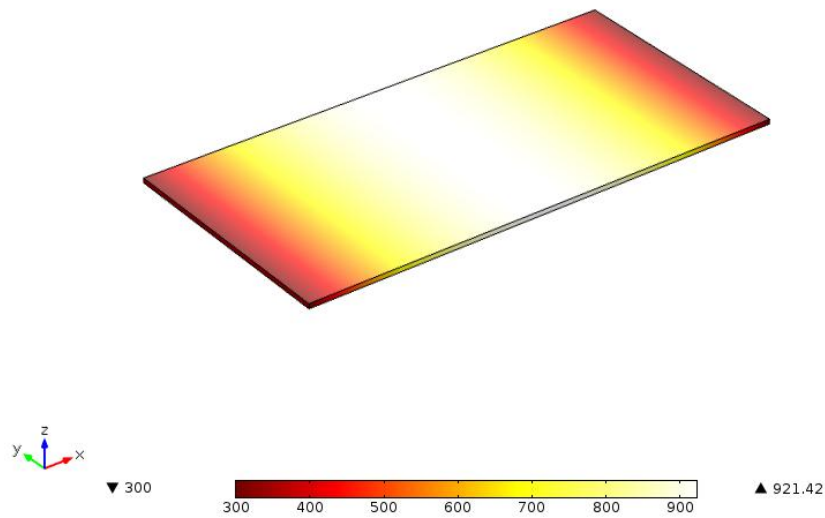
ตารางที่ 4.5 ขนาดของตัวตรวจจับความร้อนที่ใช้จำลองผล

ชั้น	ขนาด		
	กว้าง [ $\mu m$ ]	ยาว [ $\mu m$ ]	หนา [ $\mu m$ ]
แผ่นฐาน	70	120	1
ตัวให้ความร้อน	50	100	1
ฉนวน	50	100	1
สารกึ่งตัวนำ	50	100	1
ขั้วไฟฟ้า (2 ชั้น)	50	25	1

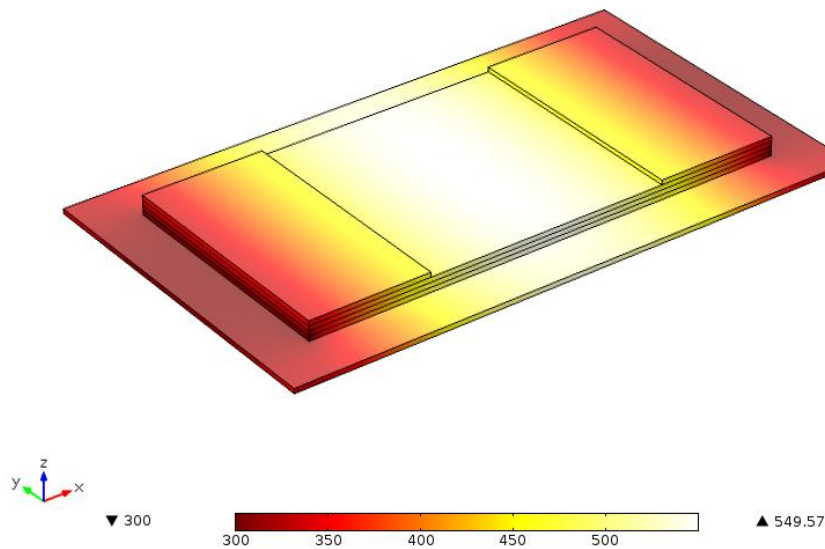
- ป้อนแรงดัน 0.2V ที่ปลายด้านซ้ายของตัวให้ความร้อน อีกด้านต่อลงดิน

3. พื้นที่ผิวด้านที่เหลือมีการพาความร้อนไปยังอากาศอุณหภูมิ  $300\text{ K}$  มีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเท่ากับ  $5\text{ [W/m}^2\cdot\text{K]}$
4. ละเลยผลการแผ่รังสี
5. กำหนดให้สภาพต้านทานไฟฟ้าไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ
6. สมบัติของวัสดุมีค่าดังตารางที่ 4.4

ได้ผลการจำลองดังเฉพาะตัวให้ความร้อนดังภาพที่ 4.19 และจำลองทั้งตัวตรวจจักษ์ก๊าซดังภาพที่ 4.20



ภาพที่ 4.19 ผลการจำลองตัวให้ความร้อนโดยโปรแกรมคอมโซล

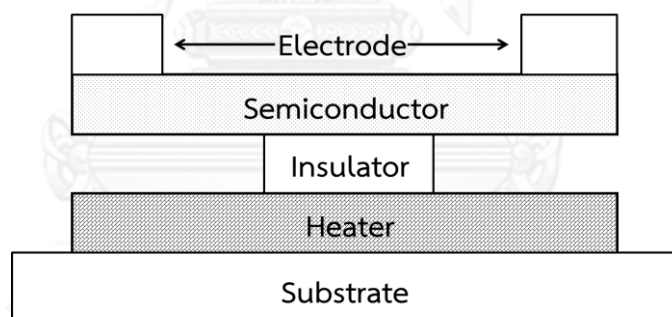


ภาพที่ 4.20 ผลการจำลองตัวตรวจจักษ์ก๊าซโดยโปรแกรมคอมโซล

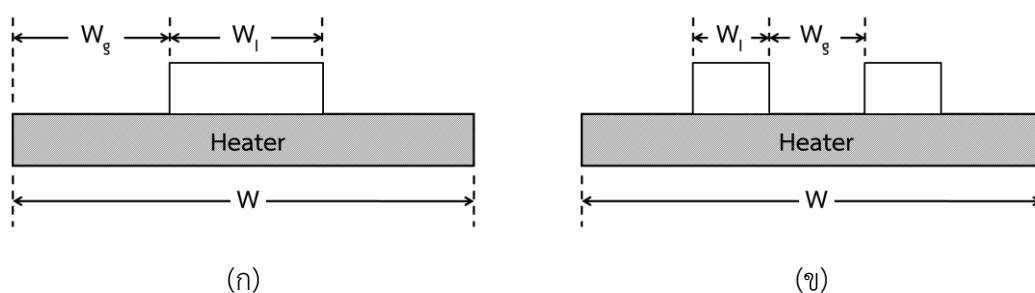
จากผลการจำลองอุณหภูมิมากที่สุดบนตัวให้ความร้อนในภาพที่ 4.19 มีอุณหภูมิ 921 K ส่วนอุณหภูมิมากที่สุดบนตัวให้ความร้อนในภาพที่ 4.20 มีอุณหภูมิ 550 K จะพบว่าเมื่อจำลองทั้งตัวตรวจจับก๊าซจะทำให้ได้อุณหภูมิที่น้อยลงเมื่อเทียบกับการจำลองเฉพาะตัวให้ความร้อน ทั้งนี้เนื่องจากการสูญเสียความร้อนไปในแต่ละชั้น จึงเกิดแนวความคิดว่าหากสามารถลดการสูญเสียความร้อนในแต่ละชั้นได้ ก็จะสามารถทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นได้ ซึ่งเป็นการลดการใช้พลังงานอีกด้าน จากโครงสร้างจะพบว่ามีชั้นของฉนวนอยู่ ซึ่งในส่วนนี้ทำให้เกิดการสูญเสียความร้อน แต่ตัวตรวจจับก๊าซจำเป็นต้องมีฉนวนเพื่อช่วยป้องกันการลัดวงจรระหว่างตัวให้ความร้อนและสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นหากสามารถออกแบบให้ตัวตรวจจับก๊าซมีการใช้ฉนวนที่ลดลงก็จะสามารถทำให้อุณหภูมิของตัวตรวจจับก๊าซเพิ่มขึ้น และช่วยลดการใช้พลังงานของตัวตรวจจับก๊าซได้

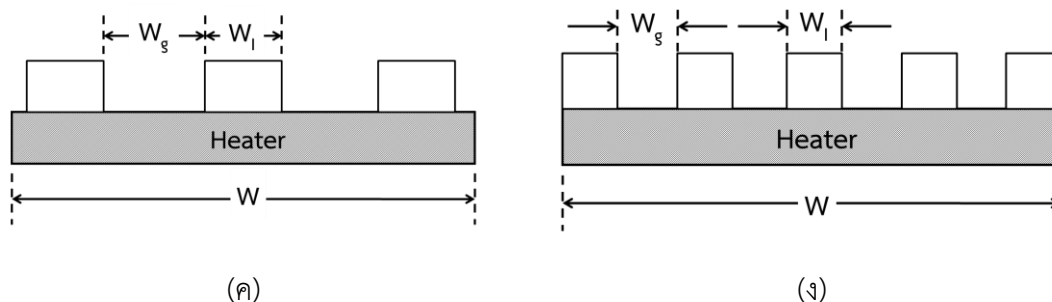
#### 4.3.3 โครงสร้างตัวตรวจจับก๊าซที่ลดการใช้ฉนวน

จากหัวข้อที่ผ่านมาที่ต้องการออกแบบตัวตรวจจับก๊าซที่ลดการใช้ฉนวนเพื่อลดการใช้พลังงานของตัวตรวจจับก๊าซ โดยออกแบบให้โครงสร้างของตัวตรวจจับก๊าซที่ลดการใช้ฉนวน (แสดงเฉพาะส่วนตัวให้ความร้อนและฉนวน) เป็นดังภาพที่ 4.21 และภาพที่ 4.22 และเพื่อความสมมาตรของโครงสร้างก๊าซเซนเซอร์ในกรณีที่มีฉนวนเป็นเลขคี่จะมีฉนวนอยู่ตรงกลางหนึ่งชั้นแล้วกระจายออกไป ถ้ากรณีที่มีฉนวนเป็นเลขคู่ จะมีช่องว่างอยู่ตรงกลางและฉนวนกระจายตัวออกไป



ภาพที่ 4.21 โครงสร้างตัวตรวจจับก๊าซที่ลดการใช้ฉนวน





ภาพที่ 4.22 โครงสร้างและพารามิเตอร์ของตัวตรวจจับก๊าซที่ลดการใช้ฉนวน โดยแสดงเฉพาะส่วน  
ตัวให้ความร้อนและฉนวน (ก)ฉนวน 1 ชั้น (ข)ฉนวน 2 ชั้น (ค)ฉนวน 3 ชั้น และ (ง)ฉนวน 5 ชั้น

กำหนดค่าในการจำลองผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ดังต่อไปนี้

1. กำหนดให้แต่ละชั้นมีขนาดดังตารางที่ 4.5 (หัวข้อ 4.3.2)
2. กำหนดพารามิเตอร์สำหรับชั้นฉนวนที่ใช้ในการจำลอง (ภาพที่ 4.22) ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าพารามิเตอร์ของโครงสร้างลดฉนวนที่ใช้ในการจำลอง

โครงสร้าง		พารามิเตอร์ [ $\mu\text{m}$ ]		
		$W$	$W_l$	$W_g$
ก	(1)	100	100	0
	(2)	100	50	25
	(3)	100	30	35
	(4)	100	20	40
	(5)	100	10	45
ข	(1)	100	10	10
	(2)	100	10	30
	(3)	100	10	90
ค	(1)	100	10	10
	(2)	100	10	20
	(3)	100	10	35
ง	(1)	100	10	5
	(2)	100	10	10
	(3)	100	10	12.5

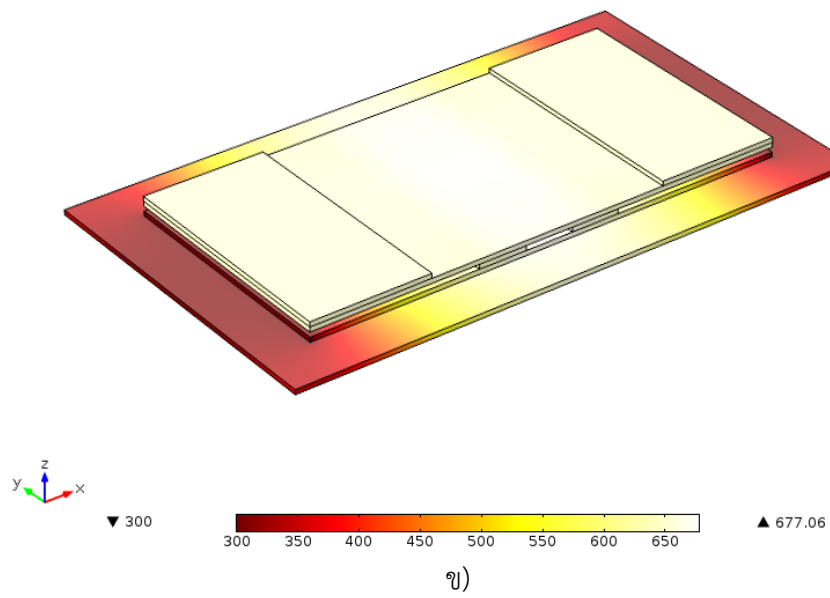
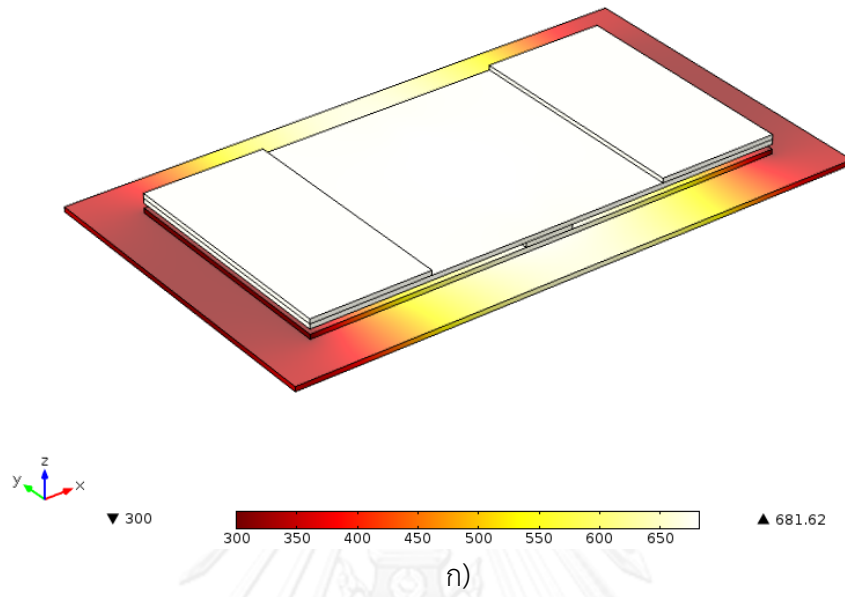
3. ป้อนแรงดัน 0.2 V ที่ปลายด้านซ้ายของตัวให้ความร้อน อีกด้านต่อลงดิน
4. พื้นที่ผิวด้านที่เหลือนี้อาศัยการพาความร้อนไปยังอากาศอุณหภูมิ 300 K มีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเท่ากับ 5 [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ]

5. ละเลยผลการแผ่รังสี
6. กำหนดให้สภาพด้านทานไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ
7. สมบัติของวัสดุมีค่าดังตารางที่ 4.4

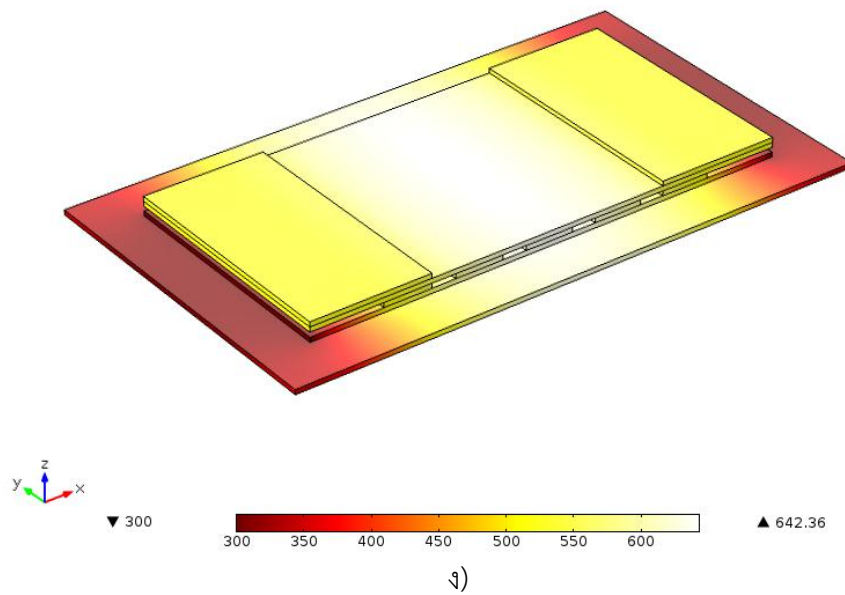
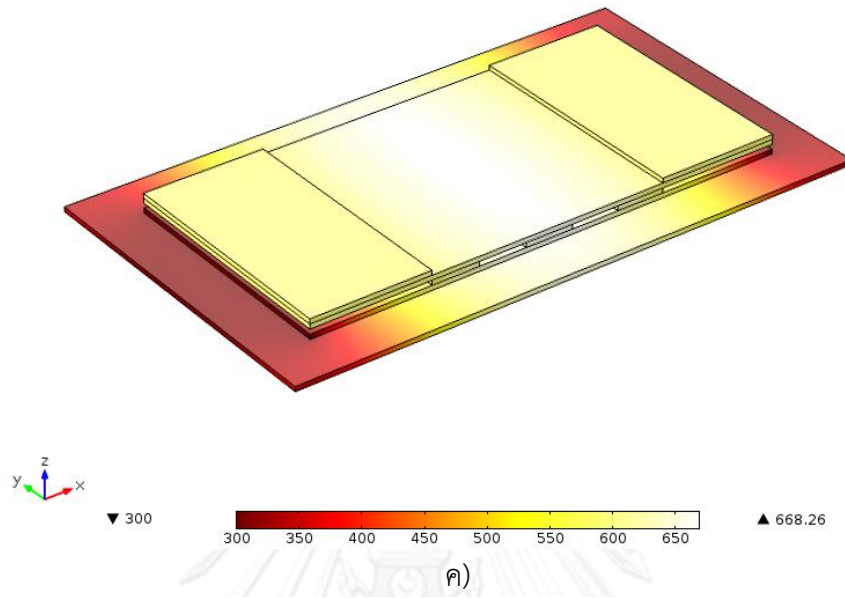
ได้ผลการจำลองตารางที่ 4.7 และภาพที่ 4.23

ตารางที่ 4.7 ผลการจำลองตัวตรวจจับก๊าซที่มีโครงสร้างลดฉนวน

โครงสร้าง		อุณหภูมิมากที่สุด บนสารกึ่งตัวนำ [K]	อุณหภูมิมากที่สุด บนตัวให้ความร้อน [K]
ก	(1)	549	550
	(2)	664	664
	(3)	675	676
	(4)	679	679
	(5)	681	682
ข	(1)	671	677
	(2)	634	672
	(3)	384	644
ค	(1)	668	668
	(2)	648	648
	(3)	609	610
ง	(1)	642	642
	(2)	598	598
	(3)	564	564







ภาพที่ 4.23 ผลการจำลองตัวตรวจจับก๊าซจากโปรแกรมคอมโซล ก) โครงสร้างรูปแบบ ก(5),  
 ข) โครงสร้างรูปแบบ ข(1), ค) โครงสร้างรูปแบบ ค(1) และ ง) โครงสร้างรูปแบบ ง(1)  
 จากผลการจำลองจะแบ่งการอธิบายออกเป็น 2 กลุ่มดังนี้

กลุ่มที่ 1 ขนาดของฉนวนที่มีผลต่ออุณหภูมิ จากตารางที่ 4.7 โครงสร้างลดฉนวนรูปแบบ ก(1)-ก(5) ซึ่งเป็นโครงสร้างตัวตรวจจับก๊าซที่มีขนาดฉนวนลดลงตามลำดับ จะพบว่าเมื่อขนาดของฉนวนลดลงจะส่งผลให้อุณหภูมิในชั้นสารกึ่งตัวนำเพิ่มขึ้น เนื่องจากขนาดของฉนวนที่น้อยลงจะส่งผลให้มีการสูญเสียความร้อนไปในชั้นฉนวนน้อยลง จึงทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น

กลุ่มที่ 2 ตำแหน่งของฉนวนที่มีผลต่ออุณหภูมิ จากตารางที่ 4.7 โครงสร้างลดฉนวนรูปแบบ ก(4) กับรูปแบบ ข, รูปแบบ ก(3) กับรูปแบบ ค, และรูปแบบ ก(2) กับรูปแบบ ง จะพบว่ารูปแบบที่มีขนาดของฉนวนเท่ากันแต่ตำแหน่งการวางแตกต่างกันจะมีอุณหภูมิแตกต่างกัน โดยการวางฉนวนใกล้บริเวณกึ่งกลางของตัวให้ความร้อนจะมีอุณหภูมิที่มากกว่าการวางฉนวนที่บริเวณขั้วของตัวให้ความร้อน เนื่องจากที่บริเวณกึ่งกลางของตัวให้ความร้อนเป็นตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงสุด ทำให้การวางฉนวนบริเวณกึ่งกลางสามารถรับอุณหภูมิได้มากกว่าบริเวณขั้ว จึงทำให้ถ่ายเทความร้อนไปยังบริเวณสารกึ่งตัวนำได้มากกว่า จึงทำให้การวางฉนวนบริเวณกึ่งกลางมีอุณหภูมิสูงกว่า

ดังนั้นโครงสร้างตัวตรวจจับก๊าซที่มีการลดฉนวนจะทำให้ตัวตรวจจับก๊าซมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น โดยตำแหน่งการวางของฉนวนที่บริเวณกึ่งกลางจะทำให้ตัวให้ความร้อนมีอุณหภูมิมาก นอกจากนี้เมื่อด้านการใช้พลังงานของตัวตรวจจับก๊าซ ที่อุณหภูมิเดียวกันโครงสร้างที่มีฉนวนน้อยจะทำให้ตัวตรวจจับก๊าซใช้พลังงานน้อย

#### 4.4 สรุป

การออกแบบตัวให้ความร้อนเมื่อกำหนดให้ป้อนแรงดันที่ด้านหนึ่งของโครงสร้างอีกด้านหนึ่งต่อลงดิน ส่วนพื้นที่ผิวที่เหลือมีการพาความร้อนและการแผ่รังสีไปยังอากาศนั้น ควรออกแบบให้มีความกว้างและความหนาที่น้อย ส่วนความยาวควรออกแบบให้มีขนาดที่เหมาะสมดังที่กล่าวไว้ในบท เพื่อให้ตัวให้ความร้อนที่ออกแบบมีประสิทธิภาพสูงและใช้พลังงานต่ำ โดยมีขนาดของตัวให้ความร้อนที่เหมาะสม คือ มีขนาดความกว้าง  $50 \mu m$  หนา  $0.1 \mu m$  และยาว  $2.54 mm$  ซึ่งเมื่อป้อนแรงดัน  $0.2 V$  จะได้อุณหภูมิบนตัวให้ความร้อน  $617 K$  โดยใช้พลังงานไป  $0.7 mW$  และการลดขนาดโครงสร้างตัวให้ความร้อน จะเป็นการเพิ่มความต้านทานให้แก่ตัวให้ความร้อน ส่งผลให้มีการใช้พลังงานที่น้อยลง

ตัวตรวจจับก๊าซจะทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนไปในแต่ละชั้น ทำให้อุณหภูมิที่ได้มีค่าน้อยลงกว่าตัวให้ความร้อนเพียงอย่างเดียว การลดขนาดฉนวนสามารถช่วยลดการสูญเสียความร้อนในแต่ละชั้นฉนวนได้ ส่งผลให้ตัวตรวจจับก๊าซมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิเดียวกันแล้ว ตัวตรวจจับก๊าซที่มีโครงสร้างที่ลดฉนวนจะใช้พลังงานน้อยกว่าตัวตรวจจับก๊าซที่ไม่ลดการใช้ฉนวน

## บทที่ 5

### การวิเคราะห์เมื่อสภาพต้านทานไฟฟ้าไม่คงที่

ในบทที่ผ่านมาเป็นการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างตัวตรวจจับความร้อนโดยกำหนดให้สภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าคงที่ เนื่องจากในความเป็นจริงนั้นอุณหภูมิมีผลต่อค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าดังแสดงในสมการที่ (5-1)

$$\rho_E = \rho_0 (1 + \alpha (T - T_{ref})) \quad (5-1)$$

เมื่อ	$\rho_E$	คือ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า [ $\Omega \cdot m$ ]
	$\rho_0$	คือ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ณ อุณหภูมิอ้างอิง [ $\Omega \cdot m$ ]
	$\alpha$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิความต้านทานไฟฟ้า [ $1/K$ ]
	$T_{ref}$	คือ อุณหภูมิอ้างอิง [ $K$ ]

แต่เป็นการยากที่จะคำนวณตัวแปรซ้อนตัวแปรจึงได้ละลายไว้ในบทที่ผ่านมา แต่หากพิจารณาวัสดุแพลทินัมที่มีค่าสมบัติดังนี้

$\rho_{293K}$  คือ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ 293 K มีค่า  $1.05 \times 10^{-7}$  [ $\Omega \cdot m$ ]

$\alpha_{293K}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิความต้านทานไฟฟ้าที่ 293 K มีค่า  $3.93 \times 10^{-3}$  [ $1/K$ ]

จากสมการที่ (5-1) จะสามารถคำนวณค่า  $\rho_E$  ที่อุณหภูมิต่างๆได้ดังนี้

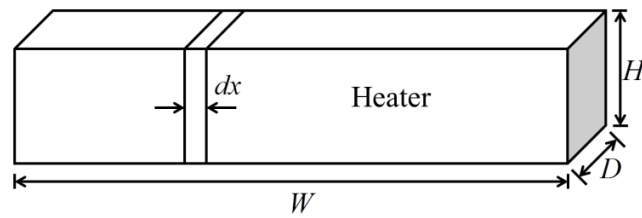
$\rho_{300K} = 3.50 \times 10^{-7}$  [ $\Omega \cdot m$ ] และ  $\rho_{600K} = 4.74 \times 10^{-7}$  [ $\Omega \cdot m$ ]

จะพบว่าค่า  $\rho_E$  ที่ 600 K ต่างจากที่ 300 K คิดเป็น 35.4%

ดังนั้นเพื่อให้เกิดความแม่นยำที่มากขึ้น จึงต้องคำนวณสมการอุณหภูมิโดยคำนึงถึงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนตามอุณหภูมิด้วย ในบทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์โดยคิดค่าสภาพต้านทานไม่คงที่ โดยแบ่งเป็นการวิเคราะห์สมการอุณหภูมิในตัวให้ความร้อน การจำลองผลตัวให้ความร้อนโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และการจำลองผลทั้งตัวตรวจจับก๊าซตามลำดับ

#### 5.1 การวิเคราะห์สมการเมื่อสภาพต้านทานไฟฟ้าไม่คงที่

ในหัวข้อนี้จะวิเคราะห์สมการอุณหภูมิเมื่อค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าไม่คงที่ โดยจะวิเคราะห์สมการเฉพาะตัวให้ความร้อน โครงสร้างที่ใช้ในการวิเคราะห์จะเป็นโครงสร้างเดียวกับที่วิเคราะห์ในบทที่ 3 ดังภาพที่ 5.1 โดยกำหนดให้ป้อนแรงดันที่ด้านซ้ายของโครงสร้างอีกด้านต่อลงดิน ทั้งสองด้านมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง ส่วนพื้นที่ผิวที่เหลือมีการพาความร้อนไปยังอากาศ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเท่ากับ  $5$  [ $W / m^2 \cdot K$ ]



ภาพที่ 5.1 โครงสร้างตัวให้ความร้อนที่ใช้ในการวิเคราะห์

เมื่อใช้หลักการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อนและการพาความร้อน จากสมการการถ่ายเทความร้อนในบทที่ 3 ซึ่งจะได้

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} - \frac{hP}{kA}\theta + \frac{\dot{q}}{k} = 0 \quad (3-6)$$

จากเดิมที่ค่าความต้านทานไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ จะได้ว่า  $\dot{q} = \frac{v^2}{\rho W^2}$  แต่เมื่อค่าความต้านทานขึ้นกับอุณหภูมิแล้วจะได้สมการความต้านทานใหม่คือ

$$R = \frac{\rho_0(1 + \alpha(T - T_\infty))W}{A} \quad (5-2)$$

เนื่องจากแต่ละตำแหน่งตามความยาวตัวให้ความร้อนมีอุณหภูมิไม่เท่ากัน ทำให้ความต้านทานในแต่ละตำแหน่ง (ตามแนวแกน  $x$ ) ไม่เท่ากัน ส่งผลให้ผลต่างแรงดันไม่คงที่ การคำนวณโดยใช้แรงดัน ( $v$ ) จะทำให้เกิดตัวแปรที่อยู่ในรูปตัวแปรที่ซ้อนตัวแปรอีกชั้นหนึ่ง แต่หาคำนวณโดยใช้กระแส ( $I$ ) จะพบว่าความต้านทานในแต่ละตำแหน่งที่ไม่เท่ากันจะเหมือนต่อแบบอนุกรมอยู่ทำให้มีกระแสคงที่ เมื่อคำนวณโดยใช้กระแสจะไม่เกิดตัวแปรที่ซ้อนตัวแปร จาก  $Power = \frac{v^2}{R} = I^2 R$  ดังนั้นจะได้สมการ  $\dot{q}$  ใหม่ที่อยู่ในรูปกระแสและความต้านทานไม่คงที่ดังนี้

$$\dot{q} = \frac{I^2}{A^2} \rho_0(1 + \alpha(T - T_\infty)) \quad (5-3)$$

โดยกำหนดให้  $\theta = T - T_\infty$  ดังนั้นจะสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังสมการที่ (5-4)

$$\dot{q} = \frac{I^2}{A^2} \rho_0(1 + \alpha\theta) \quad (5-4)$$

เมื่อนำไปแทนค่าในสมการการถ่ายเทความร้อนจะได้ว่า

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} + \left( \frac{I^2 \alpha \rho_0}{kA^2} - \frac{hP}{kA} \right) \theta + \frac{I^2 \rho_0}{kA^2} = 0 \quad (5-5)$$

จะเห็นว่ารูปแบบของสมการเหมือนกับสมการอุณหภูมิที่พิจารณาผลการถ่ายเทความร้อนของการนำความร้อนและการพาความร้อนที่แก้ในบทที่ 3 ดังนั้นในทำนองเดียวกันจะสามารถแก้สมการที่ (5-5) ได้ดังนี้

$$\theta(x) = \frac{C_2}{C_1} \cdot \frac{(1 - \cos(\sqrt{C_1}W))}{\sin(\sqrt{C_1}W)} \cdot \sin(\sqrt{C_1}x) + \frac{C_2}{C_1} \cdot \cos(\sqrt{C_1}x) - \frac{C_2}{C_1} \quad (5-6)$$

เมื่อทำการจัดรูปโดยใช้สูตรตรีโกณมิติจะได้ว่า

$$\theta(x) = \frac{C_2}{C_1} \left[ \frac{\cos\left(\frac{\sqrt{C_1}x - \sqrt{C_1}W}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\sqrt{C_1}W}{2}\right)} - 1 \right] \quad (5-7)$$

$$C_1 = \frac{I^2 \alpha \rho_0}{kA^2} - \frac{hP}{kA} \quad (5-8)$$

$$C_2 = \frac{I^2 \rho_0}{kA^2} \quad (5-9)$$

เมื่อ	$\theta$	คือ อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงมีค่าเท่ากับ $T - T_\infty$ [K]
	$T$	คือ อุณหภูมิตัวให้ความร้อน [K]
	$T_\infty$	คือ อุณหภูมิอากาศ (อุณหภูมิที่ใช้อ้างอิง) [K]
	$I$	คือ กระแสไฟฟ้า [A]
	$k$	คือ ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) [ $W/m \cdot K$ ]
	$A$	คือ พื้นที่หน้าตัดในการนำความร้อน (DH) [ $m^2$ ]
	$h$	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convection heat-transfer coefficient) [ $W/m^2 \cdot K$ ]
	$P$	คือ เส้นรอบวงในการแผ่ความร้อน ( $2H + 2D$ ) [m]
	$\rho_0$	คือ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ณ อุณหภูมิอ้างอิง [ $\Omega \cdot m$ ]
	$\alpha$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิความต้านทานไฟฟ้า [1/K]

ในการใช้งานจริงจำเป็นต้องป้อนแรงดันให้แก่ตัวให้ความร้อน แต่จากสมการมีเพียงค่ากระแส ดังนั้นจึงต้องหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน โดยจากสมการความต้านทานเมื่อสภาพต้านทานขึ้นกับอุณหภูมิ (5-2) เนื่องจากอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งไม่เท่ากัน ทำให้ความต้านทานในแต่ละตำแหน่งไม่เท่ากัน ดังนั้นในการหาความต้านทานรวมของตัวให้ความร้อนจึงจำเป็นต้องใช้วิธีการ

หาปริพันธ์ในการคำนวณหาความต้านทานของตัวให้ความร้อน เมื่อความต้านทานขึ้นกับอุณหภูมิจะสามารถหาค่าความต้านทานได้ว่า

$$R = \int_0^W \frac{\rho_0}{A} (1 + \alpha\theta(x)) dx \quad (5-10)$$

$$R = \frac{\rho_0}{A} \left[ W + \frac{2\alpha C_2}{C_1 \sqrt{C_1}} \left( \tan \left( \frac{\sqrt{C_1} W}{2} \right) - \frac{\sqrt{C_1} W}{2} \right) \right] \quad (5-11)$$

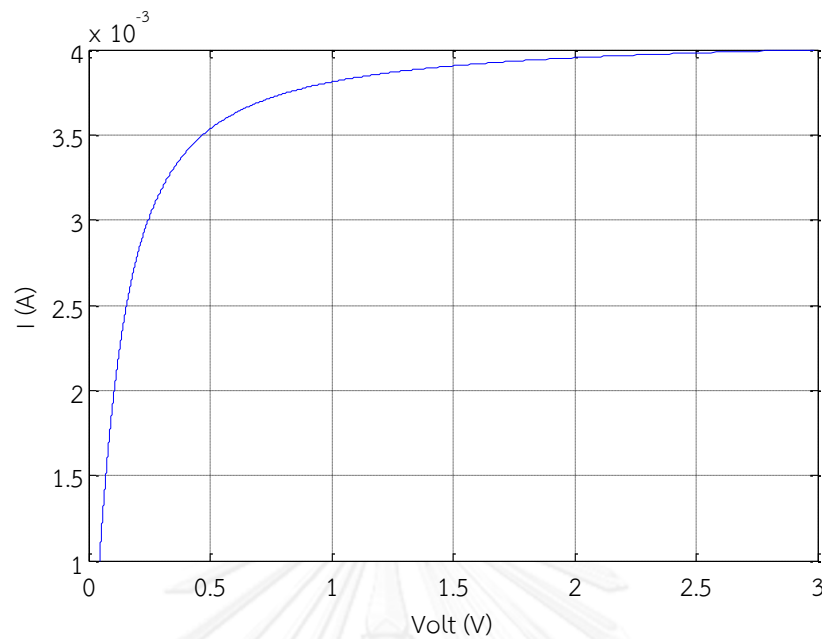
จากกฎของโอห์ม  $v = IR$  จะได้ว่า

$$v - \frac{I\rho_0}{A} \left[ W + \frac{2\alpha C_2}{C_1 \sqrt{C_1}} \left( \tan \left( \frac{\sqrt{C_1} W}{2} \right) - \frac{\sqrt{C_1} W}{2} \right) \right] = 0 \quad (5-12)$$

จากสมการ (5-12) จะสามารถแก้สมการเพื่อหาค่ากระแสที่จะนำไปใส่ในสมการ (5-8) และ (5-9) เมื่อป้อนแรงดันค่าต่างๆได้ ยกตัวอย่างเช่น ตัวให้ความร้อนขนาดยาว  $2 \text{ mm}$  กว้าง  $50 \mu\text{m}$  และหนา  $0.1 \mu\text{m}$  มีค่าคงที่ดังนี้

1. ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ณ อุณหภูมิอ้างอิง  $293 \text{ K}$  ( $\rho_0$ ) เท่ากับ  $1.05 \times 10^{-7} [\Omega \cdot \text{m}]$
2. ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิความต้านทานไฟฟ้า ณ อุณหภูมิอ้างอิง  $293 \text{ K}$  ( $\alpha$ ) เท่ากับ  $3.93 \times 10^{-3} [1/\text{K}]$
3. ค่าการนำความร้อน ( $k$ )  $71.6 [\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}]$
4. สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ( $h$ )  $5 [\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}]$

จะสามารถหาค่ากระแสที่แรงดันต่างๆ ได้ความสัมพันธ์ดังภาพที่ 5.2



ภาพที่ 5.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแส

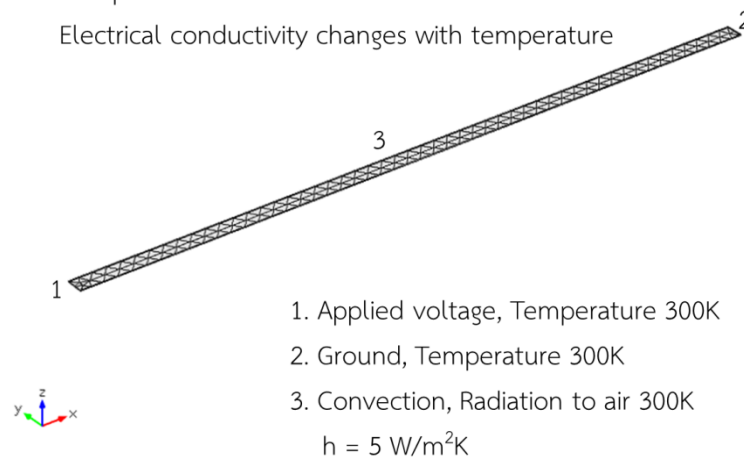
จากภาพที่ 5.2 จะสามารถหาค่ากระแสเมื่อป้อนแรงดันที่ต้องการได้ เพื่อนำไปหาค่าอุณหภูมิตามสมการต่อไป

## 5.2 การจำลองผลตัวให้ความร้อนเมื่อสภาพต้านทานไฟฟ้าไม่คงที่

กำหนดให้ตัวให้ความร้อนที่จะใช้ในการจำลองจากสมการและโปรแกรมคอมโซลมีค่าดังตัวอย่างด้านบน (ดังแสดงในภาพที่ 5.3) จากภาพที่ 5.2 เมื่อนำค่ากระแสที่ได้มาหาอุณหภูมิจะได้ผลดังตารางที่ 5.1

Complete mesh consists of 416 elements.

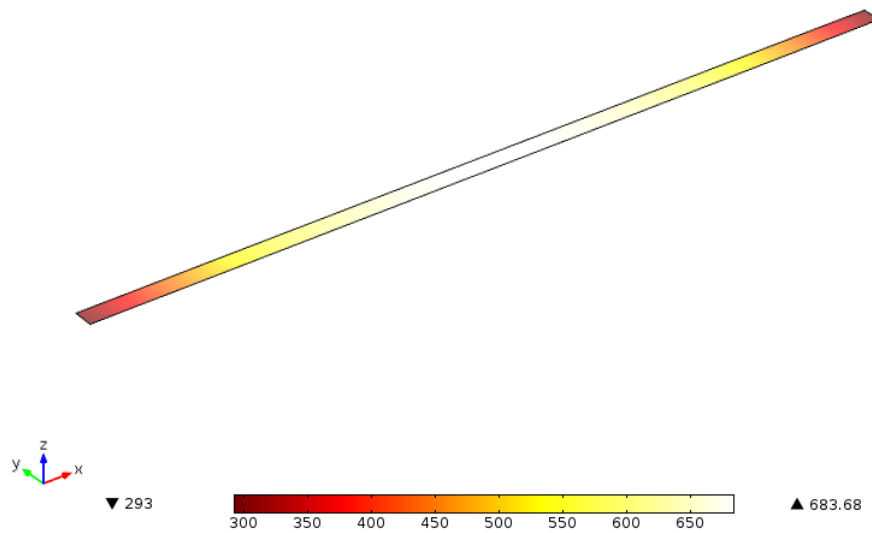
Electrical conductivity changes with temperature



ภาพที่ 5.3 ค่าและตำแหน่งที่ป้อนเงื่อนไขภายในโปรแกรมคอมโซล

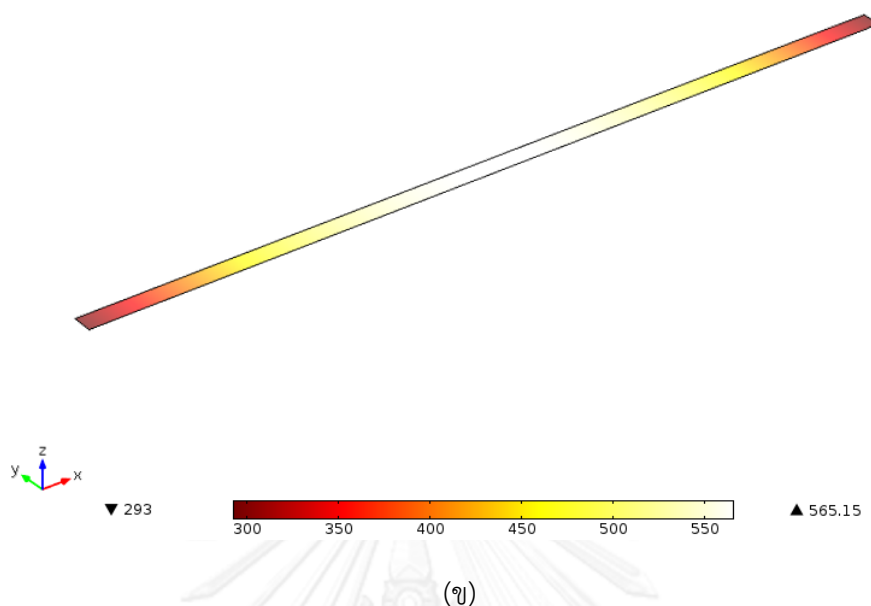
ตารางที่ 5.1 ผลการจำลองจากทฤษฎีและโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่แรงดันต่างๆ

แรงดัน [V]	ทฤษฎี		โปรแกรมคอมพิวเตอร์	
	กระแส [mA]	อุณหภูมิสูงสุด [K]	กระแส [mA]	อุณหภูมิสูงสุด [K]
0.2	2.788	565.2	2.788	565.1
0.5	3.533	1222	3.533	1222
0.8	3.741	1908	3.741	1908
1	3.811	2369	3.812	2368



(ก)



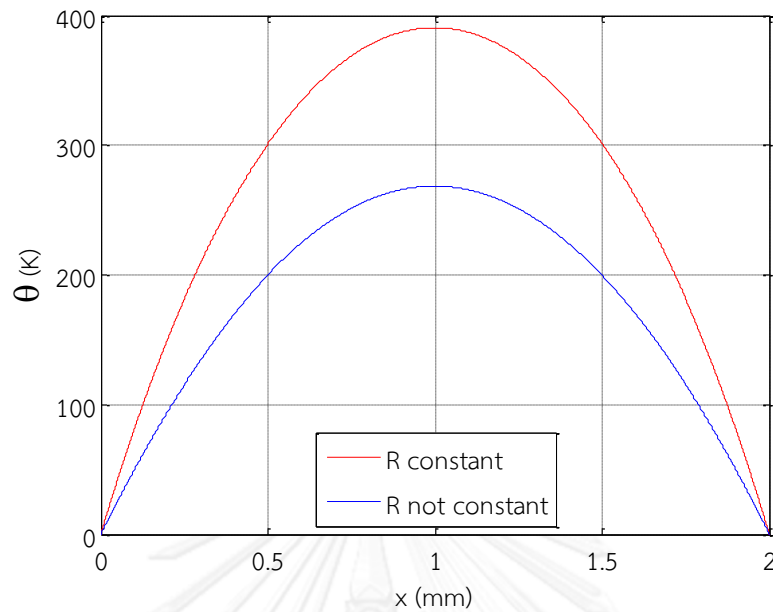


ภาพที่ 5.4 ผลการจำลองจากโปรแกรมคอมโซล (ก)การจำลองตัวให้ความร้อยเมื่อสภาพด้านทานคงที่  
(ข)การจำลองตัวให้ความร้อนเมื่อสภาพด้านทานไม่คงที่

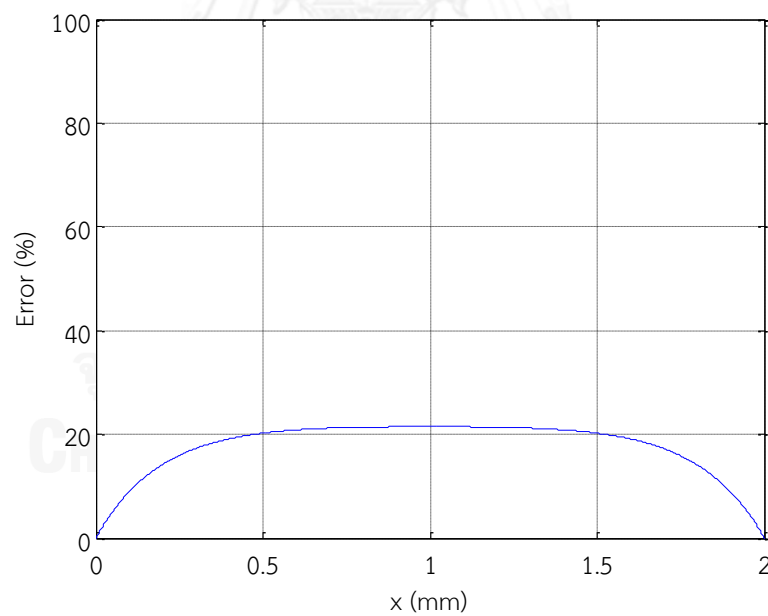
จากตารางที่ 5.1 จะพบว่าค่าที่ได้จากสมการกับค่าที่ได้จากโปรแกรมคอมโซลมีค่าตรงกัน แตกต่างกันเล็กน้อยเนื่องจากการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ แต่อย่างไรก็ตามยังถือว่ามีความแม่นยำ

### 5.3 สรุป

การวิเคราะห์อุณหภูมิเมื่อสภาพด้านทานขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสามารถหาสมการที่แน่ชัดเพื่อนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์ได้ โดยจะต้องแก้สมการเพื่อหาค่ากระแสจากแรงดันที่ป้อน ก่อนจะนำไปวิเคราะห์อุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนตัวให้ความร้อนต่อไป และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างการวิเคราะห์อุณหภูมิที่กำหนดให้สภาพด้านทานไฟฟ้าคงที่กับการวิเคราะห์อุณหภูมิที่กำหนดให้สภาพด้านทานไฟฟ้าขึ้นกับอุณหภูมิดังภาพที่ 5.5 และภาพที่ 5.6



ภาพที่ 5.5 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนตัวให้ความร้อนเมื่อกำหนดให้สภาพต้านทานคงที่ และสภาพต้านทานขึ้นกับอุณหภูมิ



ภาพที่ 5.6 กราฟความผิดพลาดเมื่อกำหนดให้สภาพต้านทานคงที่

จากภาพที่ 5.5 และภาพที่ 5.6 จะพบว่าเมื่อกำหนดให้สภาพต้านทานคงที่จะทำให้เกิดความผิดพลาดในการวิเคราะห์อุณหภูมิบนตัวให้ความร้อน 21%

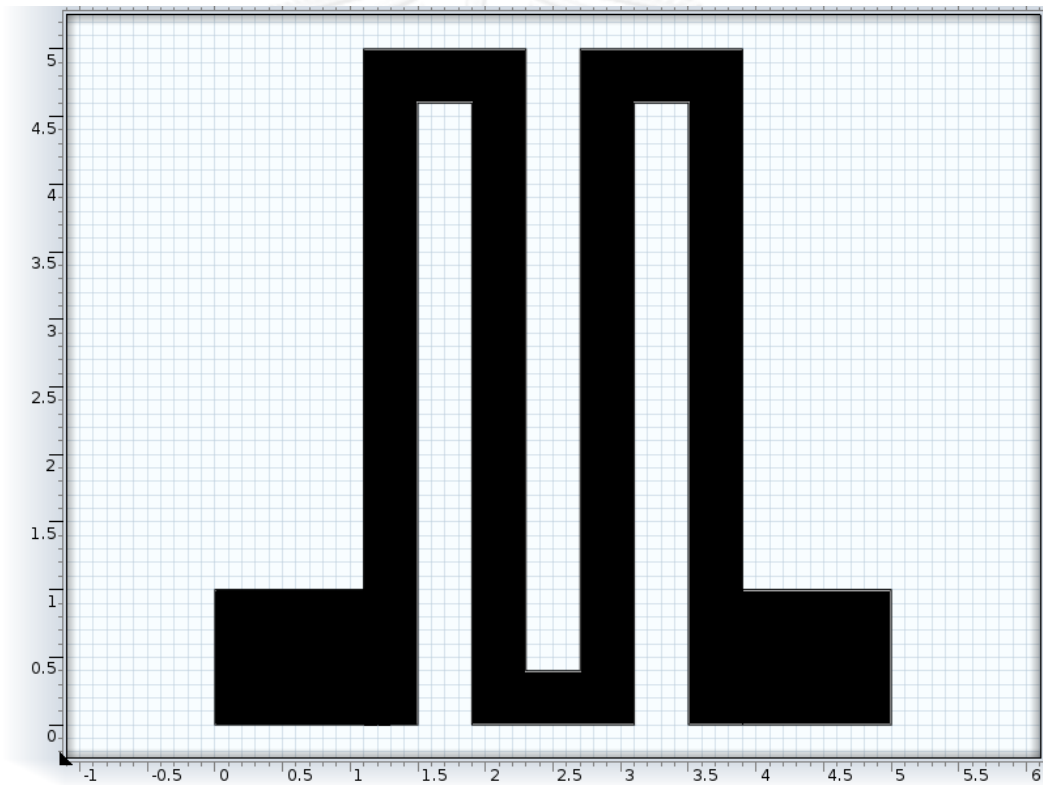
## บทที่ 6

### การเปรียบเทียบผลการจำลองโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับการวัดค่าจริง

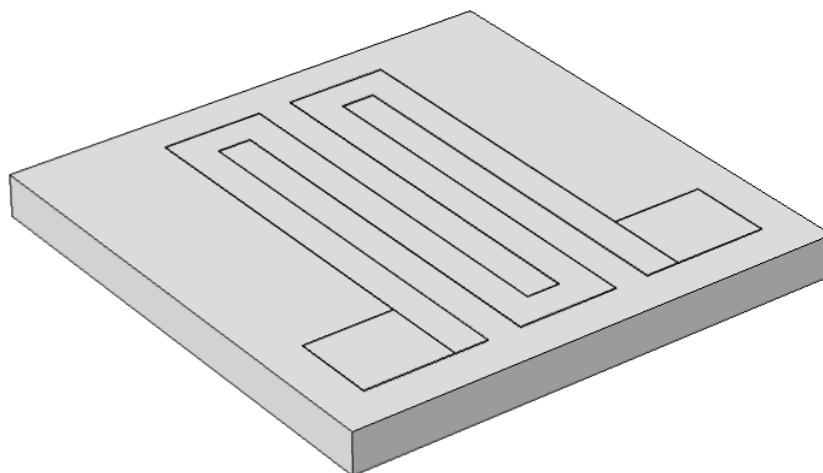
ในบทนี้จะกล่าวถึงการเปรียบเทียบผลการวัดจากตัวให้ความร้อนที่ประดิษฐ์ขึ้นมากับค่าที่ได้จากการจำลองผลโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อทำการตรวจสอบว่าผลการจำลองโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีค่าตรงกับการใช้งานจริง

#### 6.1 โครงสร้างตัวให้ความร้อน

โครงสร้างตัวให้ความร้อนที่จะใช้ในการเปรียบเทียบแสดงดังภาพที่ 6.1 โดยมีขนาดตัวให้ความร้อน  $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$  และมีความหนา  $10\ \mu\text{m}$  สร้างบนแผ่นฐานที่มีขนาดกว้าง  $6\text{ mm}$  ยาว  $6\text{ mm}$  และหนา  $0.5\text{ mm}$  ดังแสดงในภาพที่ 6.2



ภาพที่ 6.1 โครงสร้างและขนาดตัวให้ความร้อน (มุมมองบน)



ภาพที่ 6.2 โครงสร้างตัวให้ความร้อนแบบสามมิติ

โดยกำหนดให้วัสดุของตัวให้ความร้อนและแผ่นฐานคือ แพลทินัม(Platinum, Pt) และอะลูมิเนียมออกไซด์(Aluminum oxide,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ตามลำดับ มีสมบัติดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 สมบัติของสารที่ใช้ในการจำลอง

Properties	Material	
	$\text{Al}_2\text{O}_3$	Pt
Electrical conductivity ( $\sigma_E$ ) [ $S/m$ ]	$1 \times 10^{-18}$	$8.9 \times 10^6$
Thermal conductivity ( $k$ ) [ $W/m \cdot K$ ]	35	71.6
Density ( $\rho$ ) [ $kg/m^3$ ]	3965	21450
Thermal capacity ( $c$ ) [ $J/kg \cdot K$ ]	730	133

## 6.2 การจำลองผลโดยโปรแกรมคอมโซล

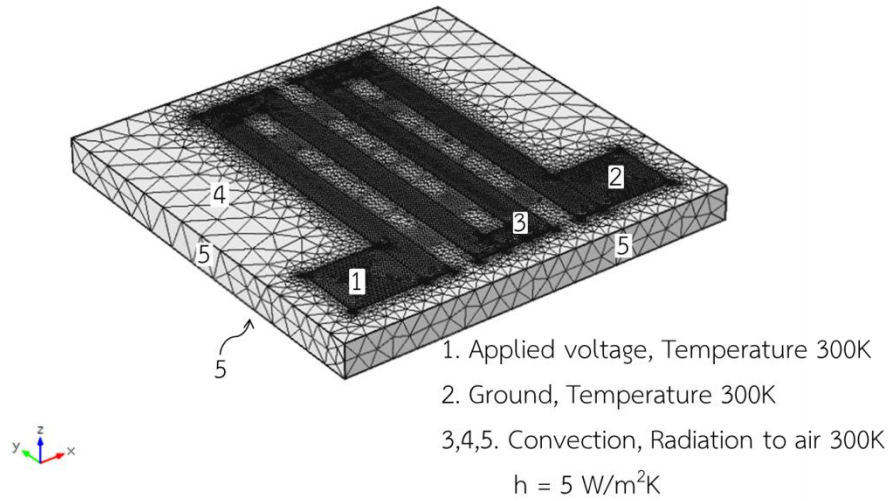
ในการจำลองผลโดยโปรแกรมคอมโซล จะใช้โหมดความร้อนจากพลังงานไฟฟ้า (Joule Heating) ในการจำลอง โดยกำหนดค่าในการจำลองดังต่อไปนี้

1. สร้างตัวให้ความร้อนพร้อมแผ่นฐานตามที่กำหนดในหัวข้อ 6.2
2. ป้อนแรงดันที่ด้านซ้ายของโครงสร้างตัวให้ความร้อน อีกด้านต่อลงดิน โดยกำหนดค่าแรงดันที่ป้อนคือ  $0.0\text{ V} - 4.5\text{ V}$
3. อุณหภูมิขั้วทั้งสองด้านคือ  $300\text{ K}$
4. พื้นที่ผิวที่เหลือมีการพาความร้อนและการแผ่รังสีไปยังอุณหภูมิห้อง ( $300\text{ K}$ ) โดยมีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนไปยังอากาศเท่ากับ  $5\text{ [W/m}^2 \cdot \text{K]}$

## 5. สภาพต้านทานของแพลทินัมขึ้นกับอุณหภูมิ

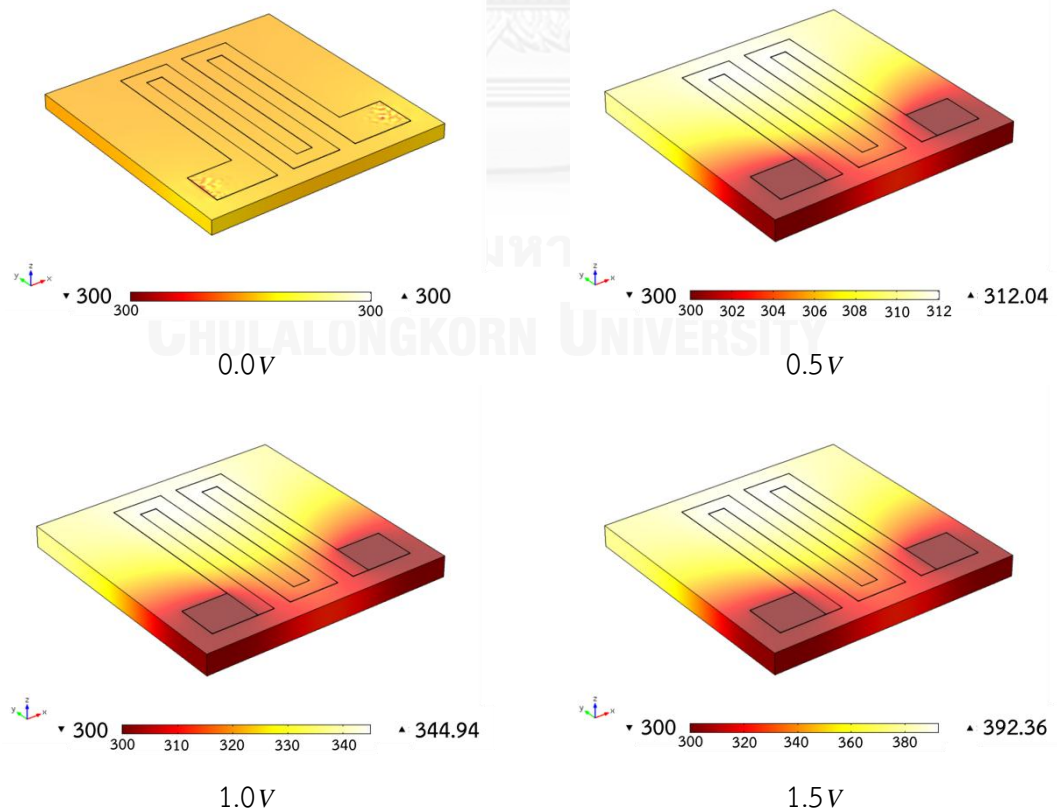
ดังแสดงในภาพที่ 6.3

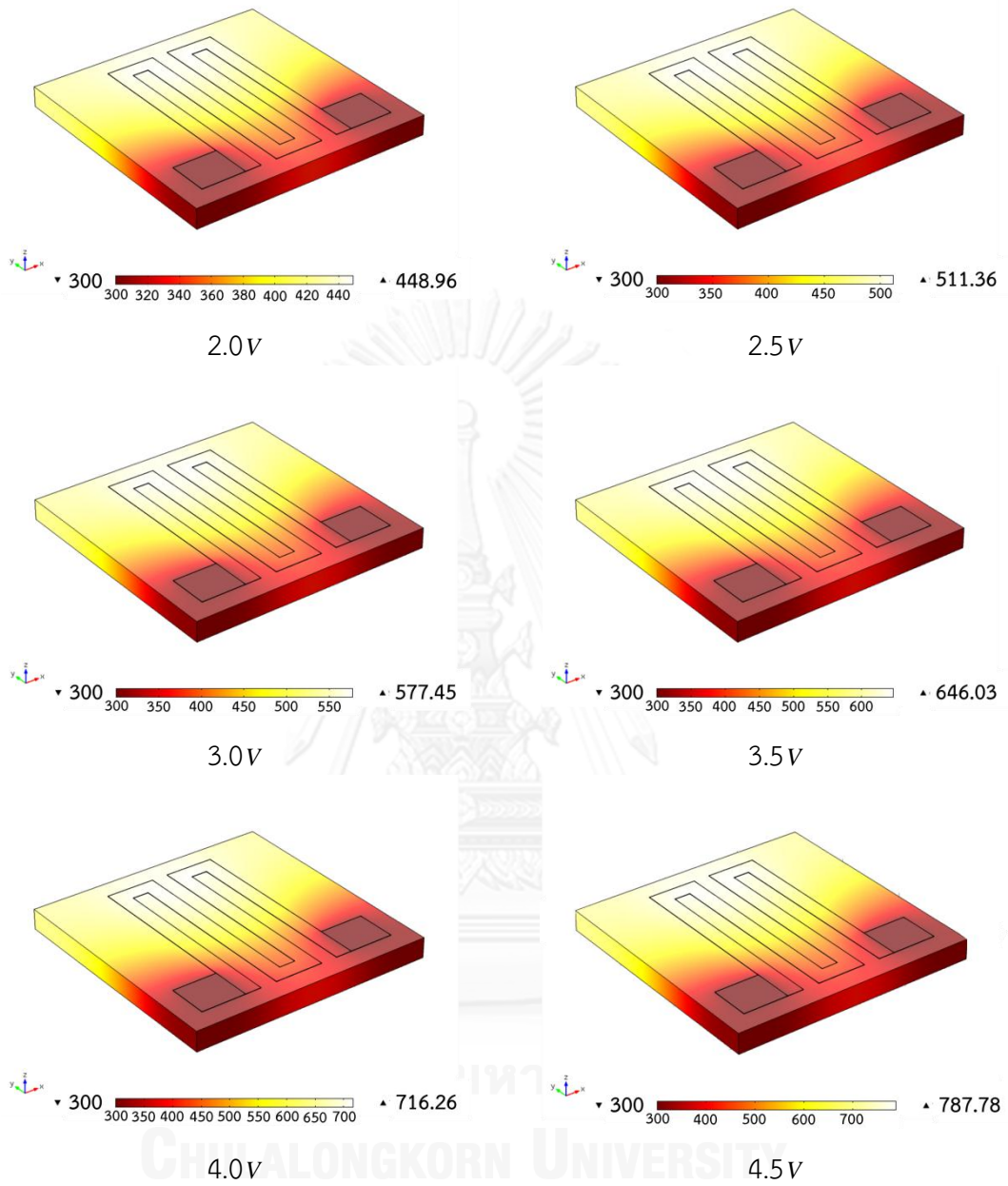
Complete mesh consists of 123589 elements.



ภาพที่ 6.3 ค่าและตำแหน่งที่ป้อนเงื่อนไขภายในโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ได้ผลการจำลองดังภาพที่ 6.4 และตารางที่ 6.2





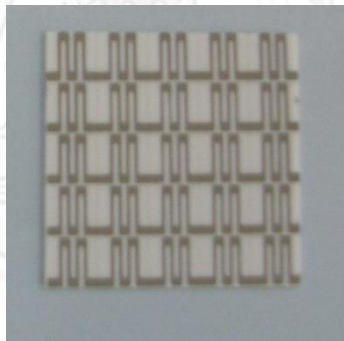
ภาพที่ 6.4 ผลการจำลองโดยโปรแกรมคอมโซลที่แรงดันค่าต่างๆ

ตารางที่ 6.2 ผลการจำลองตัวให้ความร้อนโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

แรงดัน [V]	อุณหภูมิมากที่สุด [K]
0.0	300
0.5	312
1.0	345
1.5	392
2.0	449
2.5	511
3.0	577
3.5	646
4.0	716
4.5	788

### 6.3 การวัดค่าตัวให้ความร้อนโดยเครื่องไพโรมิเตอร์ชนิดวัดการแผ่รังสีความร้อน

ตัวให้ความร้อนที่จะใช้ในการวัดค่าจะใช้วิธีการประดิษฐ์โดยวิธีการพิมพ์สกรีน (screen printing method) ตัวให้ความร้อนลงไปบนแผ่นฐานตามขนาดในหัวข้อ 6.1 ดังแสดงในภาพที่ 6.5

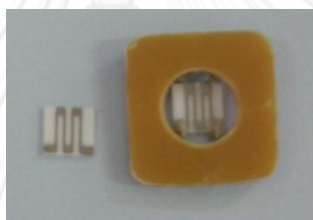


ภาพที่ 6.5 ตัวให้ความร้อนที่ประดิษฐ์โดยวิธีพิมพ์สกรีน

ในการวัดอุณหภูมิจะใช้เครื่องไพโรมิเตอร์ชนิดวัดการแผ่รังสีความร้อน (thermal radiation pyrometer) ยี่ห้อ Prokits รุ่น MT-4002 ในการวัด คือเครื่องมือที่อาศัยหลักการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุมาประมวลผลแล้วจึงแปลงค่าออกมาเป็นอุณหภูมิ โดยเครื่องไพโรมิเตอร์ที่ใช้ในการวัดแสดงดังภาพที่ 6.6 และตัวให้ความร้อนที่ใช้ในการวัดแสดงดังภาพที่ 6.7



ภาพที่ 6.6 ไพโรมิเตอร์ชนิดวัดการแผ่รังสีความร้อน



ภาพที่ 6.7 ตัวให้ความร้อนที่ใช้ในการวัด

ป้อนแรงดันที่ด้านซ้ายของโครงสร้างตัวให้ความร้อน อีกด้านต่อลงดิน โดยกำหนดค่าแรงดันที่ป้อนคือ  $0.0\text{ V} - 4.5\text{ V}$  เมื่อทำการวัดค่าอุณหภูมิที่แรงดันค่าต่างๆด้วยเครื่องไพโรมิเตอร์จำนวน 4 รอบแล้วหาค่าเฉลี่ยจะได้ผลการวัดดังตารางที่ 6.3

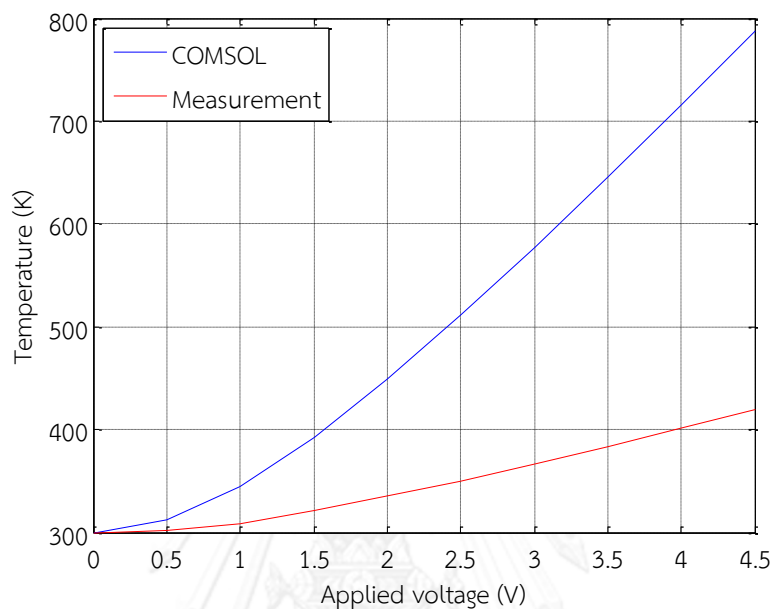
ตารางที่ 6.3 ผลการวัดอุณหภูมิด้วยเครื่องไพโรมิเตอร์ที่แรงดันต่างๆ

แรงดัน [V]	อุณหภูมิเฉลี่ย [K]
0.0	300
0.5	302
1.0	309
1.5	321
2.0	335
2.5	350
3.0	366
3.5	383
4.0	401
4.5	420



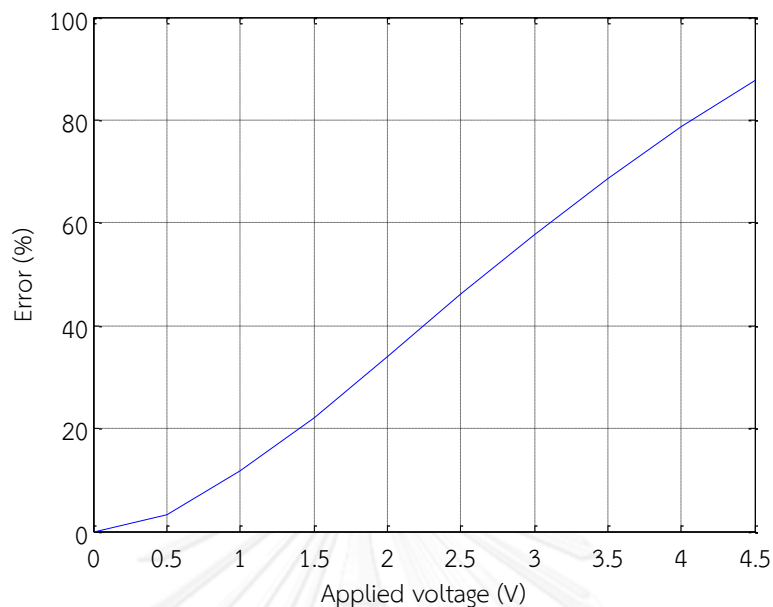
#### 6.4 เปรียบเทียบผลการจำลองและผลการวัด

จากผลการจำลองและการวัดอุณหภูมิ (ตารางที่ 6.2 และตารางที่ 6.3 ตามลำดับ) จะสามารถนำมาพล็อตกราฟเปรียบเทียบได้ดังภาพที่ 6.8



ภาพที่ 6.8 กราฟเปรียบเทียบผลการจำลองโดยโปรแกรมและการวัดค่า

จากภาพที่ 6.8 จะพบว่าค่าอุณหภูมิจากการจำลองมีค่ามากกว่าอุณหภูมิที่วัดได้จริง เมื่อนำมาหาค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิที่ได้จากการจำลองเทียบกับอุณหภูมิที่วัดได้จริงจะได้ดังภาพที่ 6.9



ภาพที่ 6.9 ค่าความผิดพลาดของโปรแกรมเทียบกับการวัดจริง

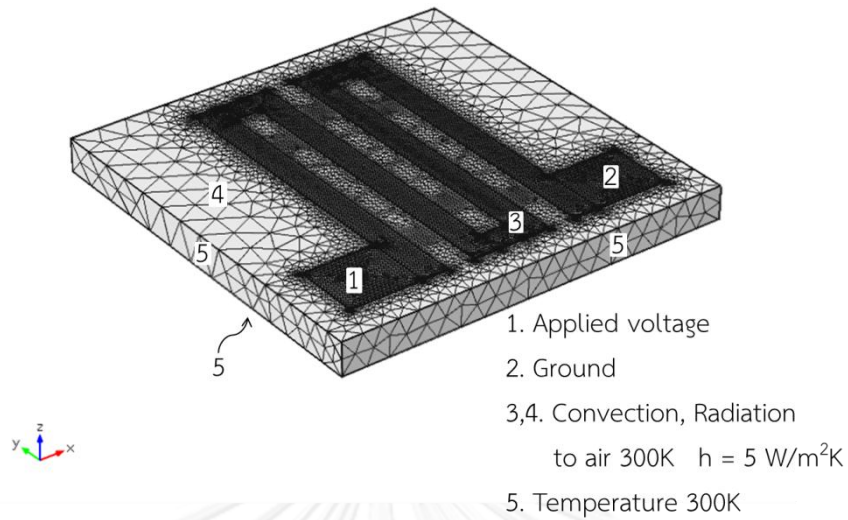
จะพบว่าค่าอุณหภูมิที่ได้จากการจำลองในช่วงแรงดันน้อย ( $0.0\text{ V} - 1.5\text{ V}$ ) มีค่าความผิดพลาดอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ (น้อยกว่า 20%) แต่ในช่วงแรงดันที่มากกว่า  $1.5\text{ V}$  เริ่มมีความผิดพลาดมาก โดยสาเหตุที่ค่าจากการจำลองกับค่าที่วัดจริงแตกต่างกันเกิดจากหลายสาเหตุ แบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่คือ

1. ความผิดพลาดจากโปรแกรม เนื่องจากการจำลองผลโดยใช้หลักการถ่ายเทความร้อนมีค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองหลายค่า เช่น ค่าการนำความร้อน ( $k$ ) ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h$ ) เป็นต้น และค่าเหล่านี้ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น อุณหภูมิ รูปทรง เป็นต้น ซึ่งในการจำลองใช้ค่าที่เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลองในรูปทรงหลายแบบ ทำให้ค่าที่นำมาใช้ในการจำลองเป็นค่าที่ผิดพลาดไปจากค่าของรูปทรงที่นำมาวัด จึงทำให้อุณหภูมิที่ได้ผิดพลาดไปจากการวัดจริง
2. ความผิดพลาดจากการวัด เนื่องจากตัวให้ความร้อนที่นำมาใช้ในการวัดมีขนาดเล็ก ทำให้เวลาวัดจะหาจุดสำหรับการวัดได้ยาก จึงทำให้เวลาวัดอาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้

ดังนั้นหากเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองจะสามารถช่วยให้ค่าจากการจำลองกับค่าที่วัดใกล้เคียงกันมากขึ้นได้

พิจารณาที่บริเวณที่กำหนดอุณหภูมิ  $300\text{ K}$  จากเดิมกำหนดให้ที่ขั้วไฟฟ้าของตัวให้ความร้อนมีอุณหภูมิ  $300\text{ K}$  อาจไม่ตรงกับความเป็นจริงจึงทำให้ค่าที่ได้จากการจำลองผิดพลาด ดังนั้นจึงกำหนดให้ที่แผ่นฐานของตัวให้ความร้อน (ยกเว้นด้านที่มีตัวให้ความร้อน) มีอุณหภูมิ  $300\text{ K}$  แทนการกำหนดที่ขั้วดังแสดงในภาพที่ 6.10 ได้ผลการจำลองดังตารางที่ 6.4

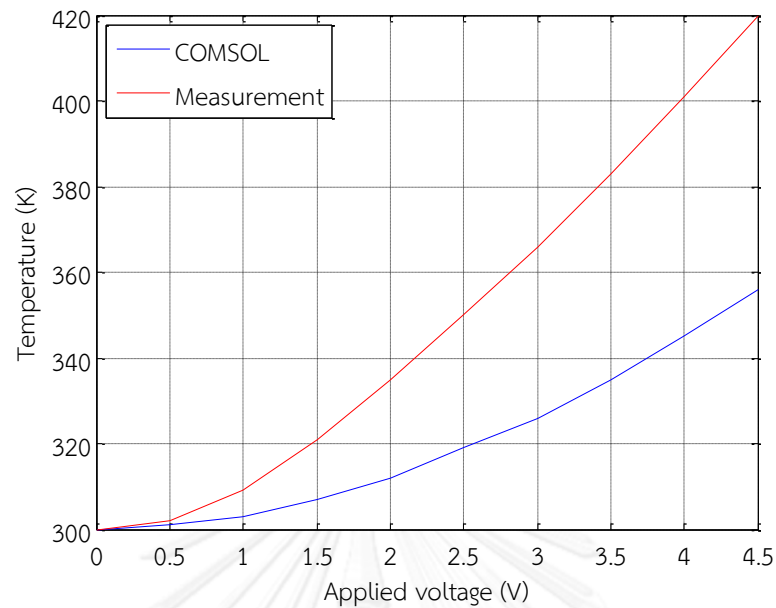
Complete mesh consists of 123589 elements.



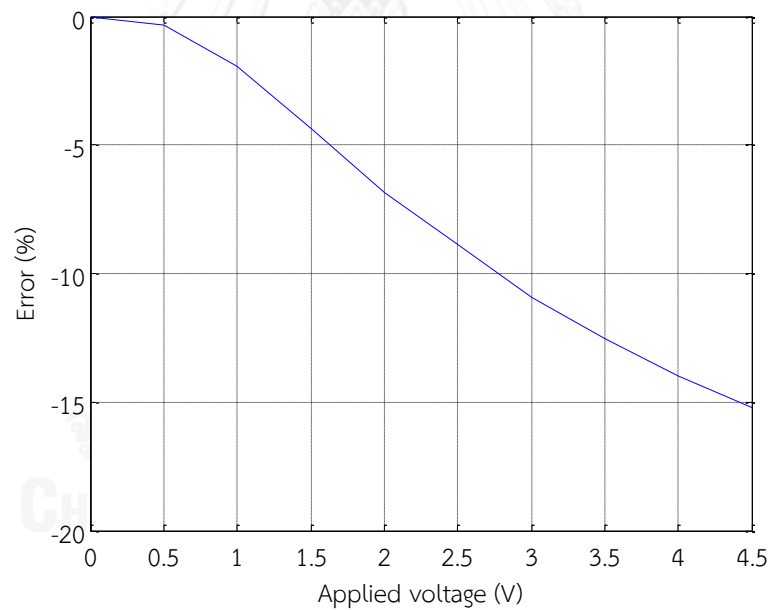
ภาพที่ 6.10 ค่าและตำแหน่งที่ป้อนเงื่อนไขภายในโปรแกรมคอมโซล  
ตารางที่ 6.4 ผลการจำลองโดยโปรแกรมคอมโซลเมื่อกำหนดให้แผ่นฐานมีอุณหภูมิ 300 K

แรงดัน [V]	อุณหภูมิสูงสุดจากโปรแกรมเมื่อกำหนดที่ฐาน [K]
0.0	300
0.5	301
1.0	303
1.5	307
2.0	312
2.5	319
3.0	326
3.5	335
4.0	345
4.5	356

เมื่อพล็อตกราฟเปรียบเทียบกับกราฟที่ได้จะดังภาพที่ 6.11 และค่าความผิดพลาดดังภาพที่ 6.12



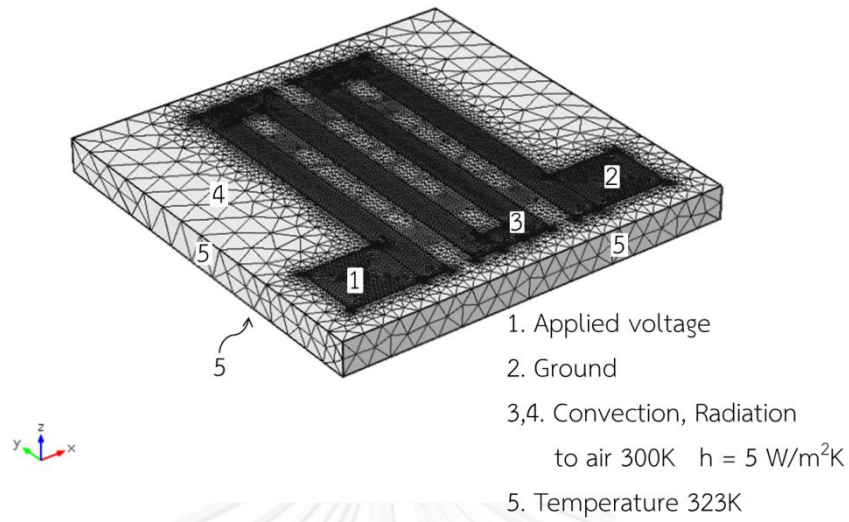
ภาพที่ 6.11 กราฟเปรียบเทียบผลการวัดกับการจำลองที่กำหนดแผ่นฐาน 300 K



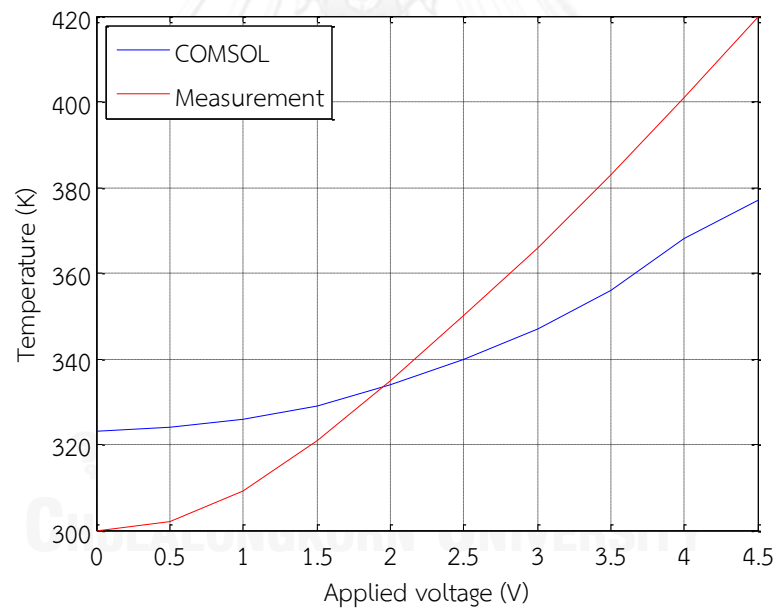
ภาพที่ 6.12 กราฟความผิดพลาดเมื่อกำหนดอุณหภูมิแผ่นฐาน 300 K

จากกราฟจะเห็นว่า การกำหนดอุณหภูมิที่แผ่นฐาน 300 K มีความผิดพลาดน้อยกว่าการกำหนดที่อุณหภูมิที่ชั่ว แต่อย่างไร้ผิดพลาดอยู่ เนื่องจากอุณหภูมิที่ได้จากการจำลองน้อยกว่าอุณหภูมิที่วัดจึงเปลี่ยนการกำหนดอุณหภูมิ 300 K เป็นอุณหภูมิ 323 K แทน (ดังแสดงในภาพที่ 6.13) ได้ผลการจำลองดังภาพที่ 6.14 และความผิดพลาดดังภาพที่ 6.15

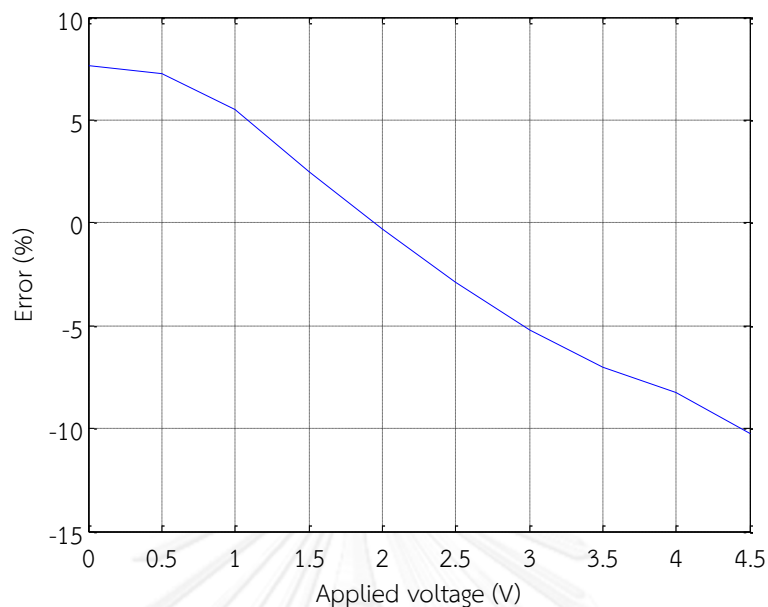
Complete mesh consists of 123589 elements.



ภาพที่ 6.13 ค่าและตำแหน่งที่ป้อนเงื่อนไขภายในโปรแกรมคอมโซล



ภาพที่ 6.14 กราฟเปรียบเทียบผลการวัดกับการจำลองที่กำหนดแผ่นฐาน 323 K

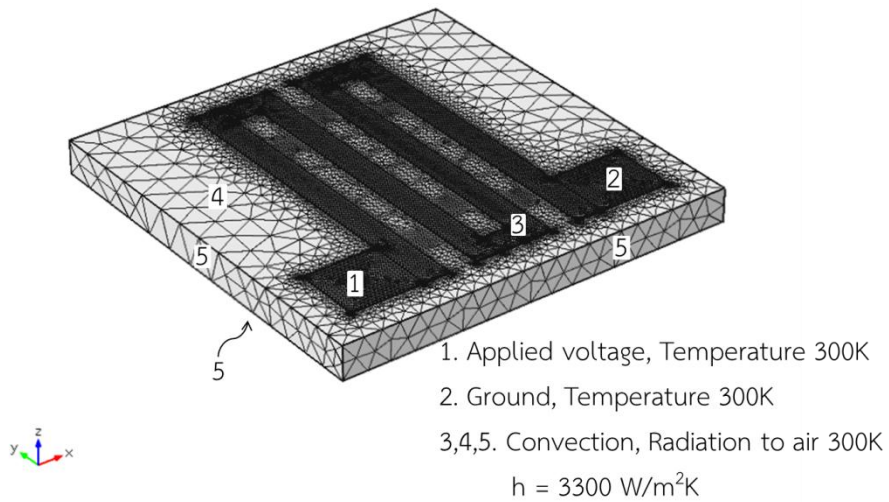


ภาพที่ 6.15 กราฟความผิดพลาดเมื่อกำหนดอุณหภูมิแผ่นฐาน 323 K

จากกราฟจะพบว่าการกำหนดอุณหภูมิแผ่นฐาน 323 K จะส่งผลให้อุณหภูมิช่วงแรกมีความผิดพลาดที่เพิ่มขึ้น แต่ความผิดพลาดทั้งหมดมีค่าน้อยลง แต่อย่างไรก็ตามการที่ผลการวัดกับค่าที่ได้จากการจำลองยังมีค่าความผิดพลาดอาจมีสาเหตุจากการกำหนดค่าอื่น เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

พิจารณาที่ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน เนื่องจากเป็นค่าที่ได้จากการทดลองและมีความเกี่ยวข้องกับรูปทรง ดังนั้นจึงเป็นค่าพารามิเตอร์หลักที่ทำให้เกิดความผิดพลาด ทำการจำลองตามหัวข้อ 6.2 แต่เปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเป็น  $3300 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K]}$  (ดังแสดงในภาพที่ 6.16) จะได้ผลการจำลองดังตารางที่ 6.5

Complete mesh consists of 123589 elements.

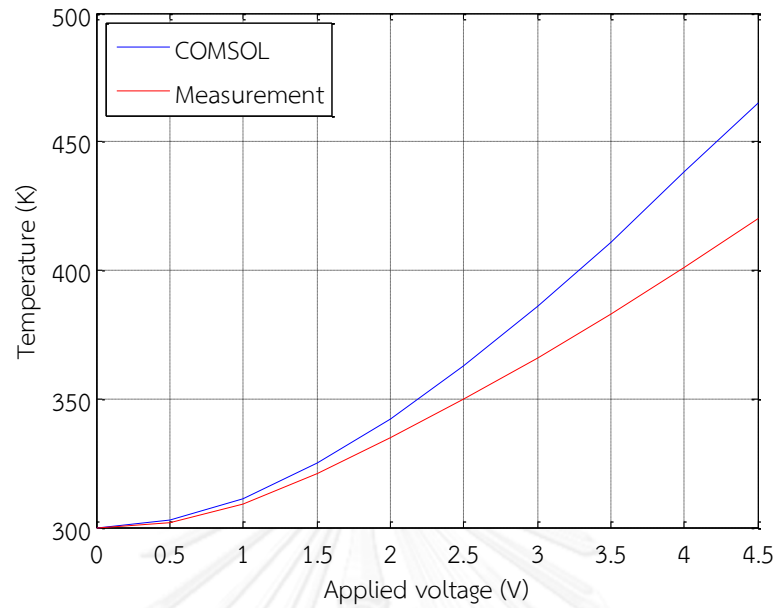


ภาพที่ 6.16 ค่าและตำแหน่งที่ป้อนเงื่อนไขภายในโปรแกรมคอมโซล

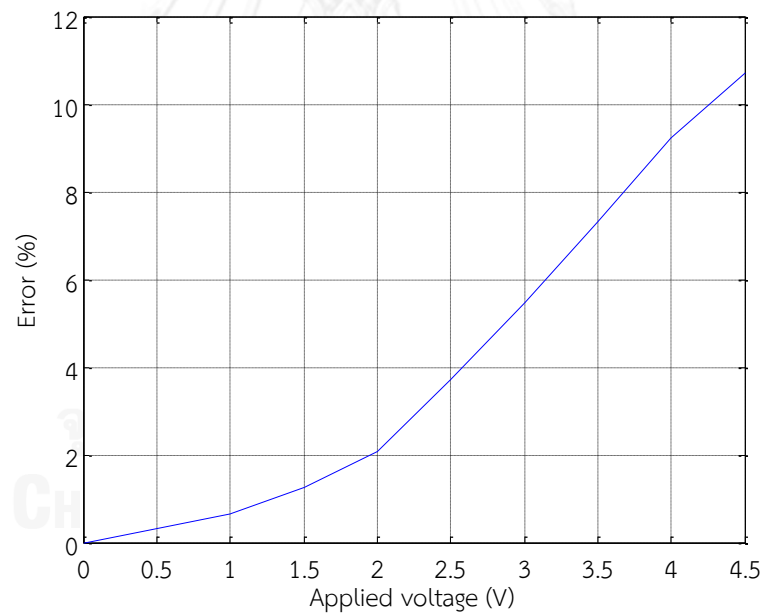
ตารางที่ 6.5 ผลการจำลองจากโปรแกรมคอมโซลเมื่อกำหนดค่า  $h$  เท่ากับ  $3300 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K]}$

แรงดัน [V]	อุณหภูมิเฉลี่ย [K]
0.0	300
0.5	303
1.0	311
1.5	325
2.0	342
2.5	363
3.0	386
3.5	411
4.0	438
4.5	465

เมื่อพล็อตกราฟเปรียบเทียบกับกราฟวัดจะได้ดังภาพที่ 6.17 และค่าความผิดพลาดดังภาพที่ 6.18



ภาพที่ 6.17 กราฟเปรียบเทียบผลการจำลองที่  $h$  เท่ากับ  $3300 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K]}$  และการวัดค่า

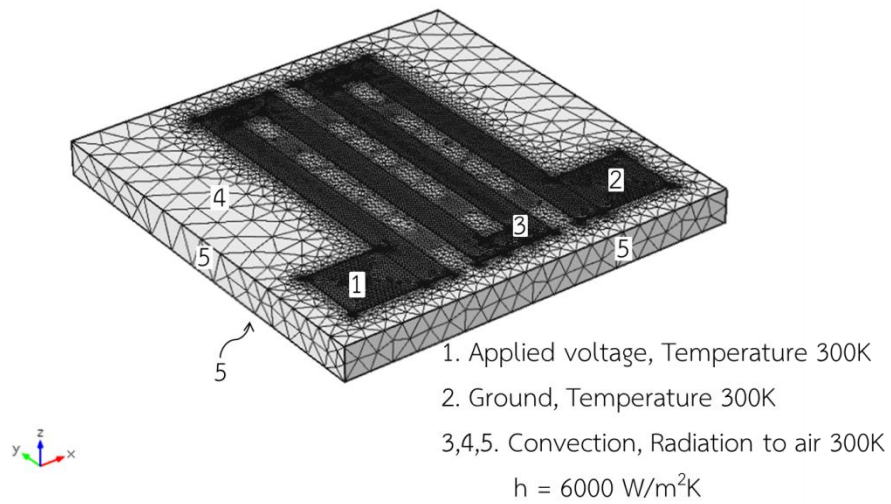


ภาพที่ 6.18 กราฟความผิดพลาดที่  $h$  เท่ากับ  $3300 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K]}$

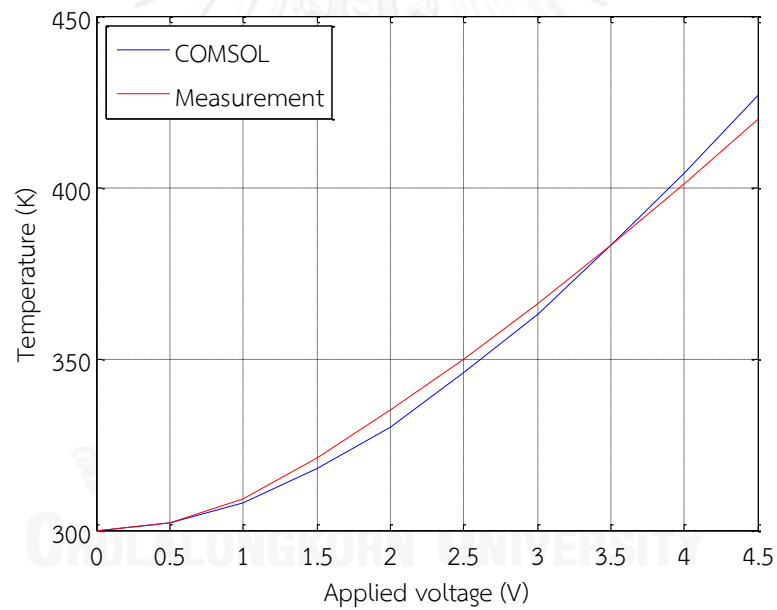
จากภาพจะพบว่าการเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในการจำลองจะช่วยให้ค่าความผิดพลาดลดลงได้ และเมื่อจำลองผลโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเท่ากับ  $6000 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K]}$  (ดังแสดงในภาพที่ 6.19) จะพบว่าค่าที่ได้จากการจำลองโดยจะมีค่าตรงกับการวัดดังแสดงในภาพที่ 6.20 และภาพที่ 6.21



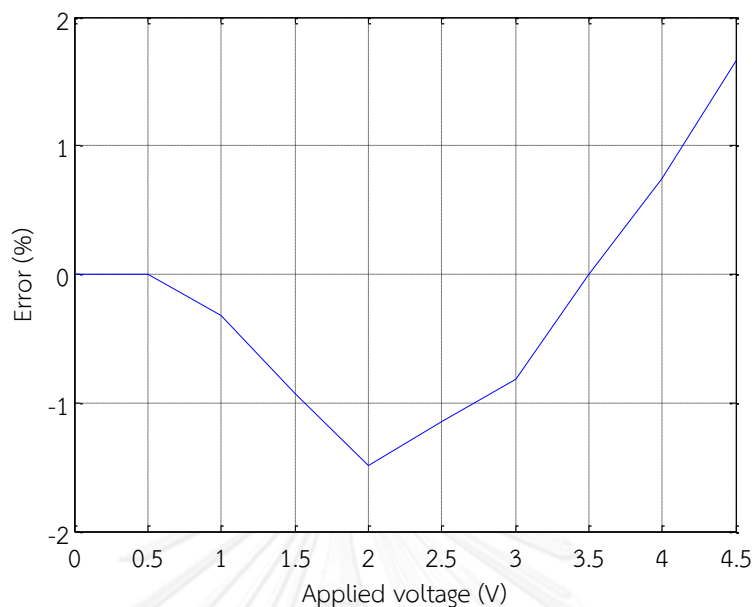
Complete mesh consists of 123589 elements.



ภาพที่ 6.19 ค่าและตำแหน่งที่ป้อนเงื่อนไขภายในโปรแกรมคอมโซล



ภาพที่ 6.20 กราฟเปรียบเทียบผลการจำลองที่  $h$  เท่ากับ  $6000 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K]}$  และการวัดค่า



ภาพที่ 6.21 กราฟความผิดพลาดที่  $h$  เท่ากับ  $6000 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K]}$

ซึ่งค่าที่ได้มีค่าความผิดพลาดในระดับที่น้อยสามารถละเลยได้ แต่อย่างไรก็ตามการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  $6000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  ถือว่ามีค่าสูงเกินความเป็นจริง ดังนั้นการกำหนดอุณหภูมิที่ฐาน  $323 \text{ K}$  จึงเหมาะสมกว่า

## 6.5 สรุป

การจำลองผลโดยโปรแกรมคอมโซลสำหรับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเท่ากับ  $5 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K]}$  ถือว่ามีความแม่นยำในระดับแรงดันน้อย และการกำหนดอุณหภูมิที่แผ่นฐานจะทำให้มีค่าแม่นยำมากกว่าการกำหนดอุณหภูมิที่ขั้ว โดยความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมาจากหลายสาเหตุ เช่น ความผิดพลาดจากการใช้พารามิเตอร์ในการจำลอง หรือความผิดพลาดจากการวัด เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อความแม่นยำในการจำลองที่มากขึ้น จะต้องหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแก่การจำลองต่อไป

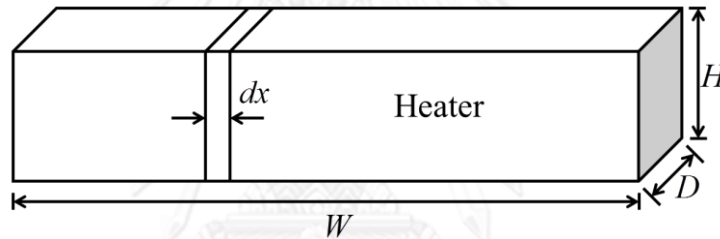
## บทที่ 7

### สรุป

การออกแบบตัวตรวจจับก๊าซที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้กล่าวถึงการออกแบบตัวตรวจจับก๊าซพลังงานต่ำที่ออกแบบให้มีโครงสร้างขนาดเล็กเพื่อลดการใช้พลังงาน โดยใช้หลักการถ่ายเทความร้อน (การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสี) ในการวิเคราะห์ สามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้ดังต่อไปนี้

#### 7.1 สมการอุณหภูมิของตัวให้ความร้อน

ในการวิเคราะห์และจำลองผลตัวให้ความร้อนในตัวตรวจจับก๊าซ เมื่อกำหนดให้มีโครงสร้างดังภาพที่ 7.1 ป้อนแรงดันที่ด้านซ้ายของโครงสร้างและด้านขวาต่อลงดิน มีอุณหภูมิที่ขั้วทั้งสองด้านเท่ากับอุณหภูมิห้อง พื้นที่ผิวที่เหลือนี้อุณหภูมิพาความร้อนไปยังอากาศ และสภาพต้านทานไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ



ภาพที่ 7.1 โครงสร้างตัวให้ความร้อน

จากบทที่ 3 เมื่อละเลยผลของการแผ่รังสีจะได้สมการอุณหภูมิคือ

$$\theta(x) = \frac{\dot{q}A}{hP} \left[ \frac{\cosh(CW) \sinh(Cx)}{\sinh(CW)} - \frac{\sinh(Cx)}{\sinh(CW)} - \cosh(Cx) + 1 \right] \quad (3-10)$$

$$C = \sqrt{\frac{hP}{kA}} \quad (3-11)$$

เมื่อ	$\theta_{\max}$	คือ อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งมีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นลบอุณหภูมิห้อง $(T - T_{\infty})$ [K]
	$\dot{q}$	คือ อัตราพลังงานความร้อนที่ขึ้นงานสร้างขึ้นต่อปริมาตร [ $W/m^3$ ]
	A	คือ พื้นที่หน้าตัดในการนำความร้อน (DH) [ $m^2$ ]
	h	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convection heat-transfer coefficient) [ $W/m^2 \cdot K$ ]
	P	คือ เส้นรอบวงในการแผ่ความร้อน (2H + 2D) [m]
	k	คือ ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) [ $W/m \cdot K$ ]

โดยอัตราพลังงานความร้อนที่ขึ้นงานสร้างขึ้นต่อปริมาตร ( $\dot{q}$ ) เป็นอัตราพลังงานที่เกิดจากการป้อนกำลังไฟฟ้าให้แก่ตัวให้ความร้อน โดย  $\dot{q} = \frac{\text{Power}}{\text{Volume}} \rightarrow \dot{q} = \frac{v^2/R}{Al}$  และจาก  $R = \rho_E \frac{l}{A}$  จะได้ว่า  $\dot{q} = \frac{v^2}{\rho_E l^2}$  เมื่อ  $v$  คือ แรงดันที่ป้อน[V]  $l$  คือ ความยาววัสดุที่ได้รับแรงดัน[m] และ  $\rho_E$  คือ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า [ $\Omega \cdot m$ ]

ส่วนกรณีที่พิจารณาผลของการแผ่รังสี จะใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นมาช่วยในการวิเคราะห์ เพื่อที่จะได้สามารถหาสมการที่แน่ชัดได้ โดยจะมีสมการอุณหภูมิเมื่อพิจารณาผลการแผ่รังสีคือ

$$\theta(x) = \left( \frac{\dot{q}A}{Pk\beta} - \frac{\gamma}{\beta} \right) \left[ \frac{\left( \cosh \left( \sqrt{\frac{P}{A}} \beta \cdot W \right) - 1 \right) \sinh \left( \sqrt{\frac{P}{A}} \beta \cdot x \right)}{\sinh \left( \sqrt{\frac{P}{A}} \beta \cdot W \right)} - \cosh \left( \sqrt{\frac{P}{A}} \beta \cdot x \right) + 1 \right] \quad (3-25)$$

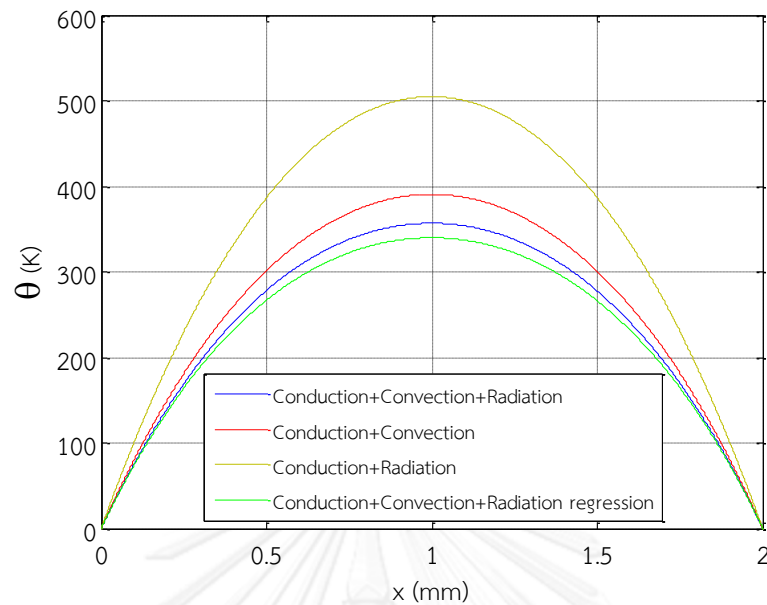
เมื่อ  $\gamma$  คือ ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ  $\alpha + \beta T_\infty - \frac{h}{k} T_\infty - \frac{\varepsilon \sigma}{k} T_\infty^4$

$\alpha, \beta$  คือ สัมประสิทธิ์ที่ได้จากการประมาณพจน์การพาความร้อนและการแผ่รังสีรวมกัน โดยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น ซึ่งเป็นค่าเฉพาะของวัสดุ หากเปลี่ยนวัสดุ จะต้องทำการประมาณใหม่

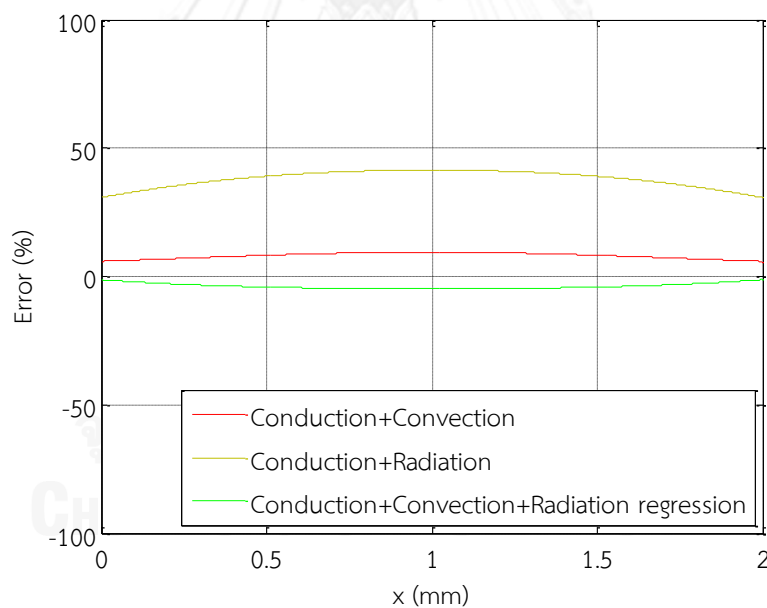
$\varepsilon$  คือ สภาพการแผ่รังสีของผิววัตถุ (Emissivity function)

$\sigma$  คือ ค่าคงที่ Stefan-Boltzmann =  $5.669 \times 10^{-8} [W/m^2 \cdot K^4]$

โดยค่าที่ได้จากการคำนวณสมการอุณหภูมิมิมีค่าตรงกับการจำลองผลจากโปรแกรมคอมโซล ดังนั้นจึงสามารถใช้การคำนวณจากคอมโซลเพื่อเปรียบเทียบได้



ภาพที่ 7.2 กราฟเปรียบเทียบผลของการวิเคราะห์อุณหภูมิบนตัวให้ความร้อนที่เงื่อนไขต่างๆ



ภาพที่ 7.3 กราฟความผิดพลาดกรณีละเลยผลการแผ่รังสี และการพิจารณาผลการแผ่รังสีโดยใช้หลักการถดถอยเชิงเส้น

และจากการวิเคราะห์ (ภาพที่ 7.2 และภาพที่ 7.3) พบว่าการวิเคราะห์อุณหภูมิบนตัวให้ความร้อน โดยละเลยผลการแผ่รังสีจะก่อให้เกิดความผิดพลาด 9% การละเลยผลการพาความร้อนจะก่อให้เกิดความผิดพลาด 41% และการวิเคราะห์โดยพิจารณาผลจากแผ่รังสีจากหลักการถดถอยเชิงเส้นจะก่อให้เกิดความผิดพลาด -5%

## 7.2 ความกว้าง ความยาว และความหนาในการออกแบบ

ในการออกแบบตัวให้ความร้อนในตัวตรวจจับก๊าซให้ใช้พลังงานต่ำจะออกแบบให้มีขนาดเล็ก เพื่อลดการใช้พลังงาน โดยวิเคราะห์การออกแบบจากสมการอุณหภูมิสูงสุดซึ่งจะมีตำแหน่งอยู่ ณ กึ่งกลางของตัวให้ความร้อน (จากบทที่ 4) สมการอุณหภูมิสูงสุดตั้งสมการที่ (4-5) จะใช้พลังงานและมีประสิทธิภาพตั้งสมการที่ (4-12) และ (4-13) ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพของตัวให้ความร้อนวัดจาก อัตราส่วนระหว่างอุณหภูมิกับพลังงานที่ใช้ ( $efficiency = \frac{\theta}{Power}$ )

$$\theta_{max} = \frac{\dot{q}A}{hP} \left[ 1 - \frac{1}{\cosh\left(\frac{CW}{2}\right)} \right] \quad (4-5)$$

$$Power = \frac{v^2 A}{\rho_E W} \quad (4-12)$$

$$efficiency = \frac{\dot{q}W\rho_E}{v^2 hP} \left[ 1 - \frac{1}{\cosh\left(\sqrt{\frac{hP}{kA}} \cdot \frac{W}{2}\right)} \right] \quad (4-13)$$

จากการวิเคราะห์เรื่องอุณหภูมิ พลังงาน และประสิทธิภาพของตัวให้ความร้อน จะได้วิธีการ ออกแบบตัวให้ความร้อนที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดในแง่การใช้พลังงานน้อยที่สุด คือมีความกว้างและความ หนาที่น้อย เนื่องจากการเพิ่มความกว้างและความหนาจะไม่เกิดประโยชน์เพราะอุณหภูมิที่ได้จะเข้า ใกล้ค่าที่เมื่อเทียบกับการใช้พลังงานที่มากขึ้น ส่วนความยาวจะมีค่าที่เหมาะสมที่ทำให้ใช้พลังงานต่ำ โดยค่าความยาวที่เหมาะสมจะขึ้นกับความกว้างและความหนา ดังสมการในบทที่ 4 (สมการที่ 4-21) ซึ่งเป็นสมการที่ยังไม่รวมผลของการแผ่รังสีและมีค่าสภาพต้านทานคงที่

$$W = 3.011 \sqrt{\frac{kA}{hP}} \quad (4-21)$$

เมื่อใช้ค่าความยาวตามสมการที่ (4-21) จะได้สมการอุณหภูมิและสมการพลังงานดังสมการที่ (4-24) และ (4-25) ตามลำดับ

$$\theta_{max} = 0.06388 \frac{v^2}{\rho_E k} \quad (4-24)$$

$$Power = \frac{v^2}{3\rho_E} \sqrt{\frac{hPA}{k}} \quad (4-25)$$

ดังนั้นหากต้องการตัวให้ความร้อนที่ใช้พลังงานต่ำจะต้องออกแบบให้มีความกว้างและความหนาที่น้อยที่สุด และใช้เงื่อนไขความยาวตามสมการที่ (4-21) โดยขนาดของตัวให้ความร้อนที่เหมาะสมคือมีขนาดกว้าง  $50 \mu\text{m}$  หนา  $0.1 \mu\text{m}$  และยาว  $2.54 \text{mm}$  เมื่อป้อนแรงดัน  $0.2 \text{V}$  จะได้อุณหภูมิบนตัวให้ความร้อน  $617 \text{K}$  และใช้พลังงานไป  $0.7 \text{mW}$

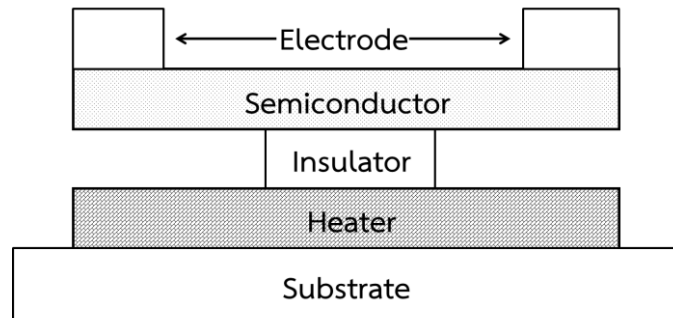
### 7.3 โครงสร้างตัวตรวจจับก๊าซ

ในการออกแบบตัวตรวจจับก๊าซให้มีขนาดเล็กจะทำให้ยากต่อการนำไปใช้งาน ดังนั้นในการออกแบบควรคำนึงถึงการนำไปใช้งานด้วย โดยรูปร่างของตัวตรวจจับก๊าซที่ออกแบบ จะออกแบบให้บริเวณปลายทั้งสองของโครงสร้างมีขนาดใหญ่กว่าบริเวณกึ่งกลางของตัวตรวจจับก๊าซ ดังภาพที่ 7.4 ซึ่งการออกแบบโครงสร้างในลักษณะนี้จะช่วยให้ตัวตรวจจับก๊าซมีการใช้พลังงานที่น้อยลง และยังสะดวกต่อการนำไปใช้งาน เนื่องจากบริเวณหัวทั้งสองด้านมีขนาดที่ใหญ่ต่อการเชื่อมต่อวงจร



ภาพที่ 7.4 โครงสร้างตัวตรวจจับก๊าซ (เฉพาะตัวให้ความร้อน)

นอกจากการออกแบบเรื่องรูปทรงของตัวตรวจจับก๊าซแล้ว การคำนึงถึงโครงสร้างในแต่ละชั้นของตัวตรวจจับก๊าซก็มีผลต่ออุณหภูมิและการใช้พลังงานด้วยเช่นกัน โครงสร้างโดยทั่วไปของตัวตรวจจับก๊าซจำเป็นจะต้องมีชั้นฉนวนเพื่อป้องกันการลัดวงจรระหว่างชั้นตัวให้ความร้อนและชั้นสารกึ่งตัวนำ แต่ในส่วนของฉนวนนี้เองทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนเกิดขึ้น ส่งผลให้ทั้งตัวตรวจจับก๊าซมีอุณหภูมิที่น้อยลง ทำให้จำเป็นต้องมีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นเพื่อให้ได้อุณหภูมิที่เท่ากัน (เปรียบเทียบระหว่างตัวให้ความร้อนเพียงอย่างเดียวกับตัวตรวจจับก๊าซ) ดังนั้นการลดการใช้ฉนวน (ดังภาพที่ 7.5) จะสามารถช่วยลดการใช้พลังงานได้ โดยการใช้ฉนวนที่น้อยจะทำให้ได้อุณหภูมิที่มากกว่าการใช้ฉนวนที่มาก และตำแหน่งการวางฉนวนก็ส่งผลต่ออุณหภูมิเช่นกัน โดยการวางฉนวนบริเวณกึ่งกลางของตัวให้ความร้อนจะช่วยให้ตัวตรวจจับก๊าซมีอุณหภูมิมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับวางฉนวนที่บริเวณอื่น เนื่องจากบริเวณกึ่งกลางของตัวให้ความร้อนเป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงที่สุด ทำให้การวางฉนวนบริเวณนั้นจะส่งความร้อนไปได้มากที่สุด



ภาพที่ 7.5 โครงสร้างตัวตรวจจับก๊าซที่ลดการใช้ฉนวน

#### 7.4 สมการอุณหภูมิเมื่อสภาพต้านทานไม่คงที่

จากโครงสร้างตัวให้ความร้อนดังภาพที่ 7.1 เมื่อกำหนดให้สภาพต้านทานขึ้นกับอุณหภูมิ แล้วกำหนดค่าให้การวิเคราะห์เช่นเดียวกับกรณีสภาพต้านทานคงที่ จากบทที่ 5 จะได้สมการอุณหภูมิดังสมการที่ (5-7) (5-8) และ (5-9)

$$\theta(x) = \frac{C_2}{C_1} \left[ \frac{\cos\left(\sqrt{C_1}x - \frac{\sqrt{C_1}W}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\sqrt{C_1}W}{2}\right)} - 1 \right] \quad (5-7)$$

$$C_1 = \frac{I^2 \alpha \rho_0}{kA^2} - \frac{hP}{kA} \quad (5-8)$$

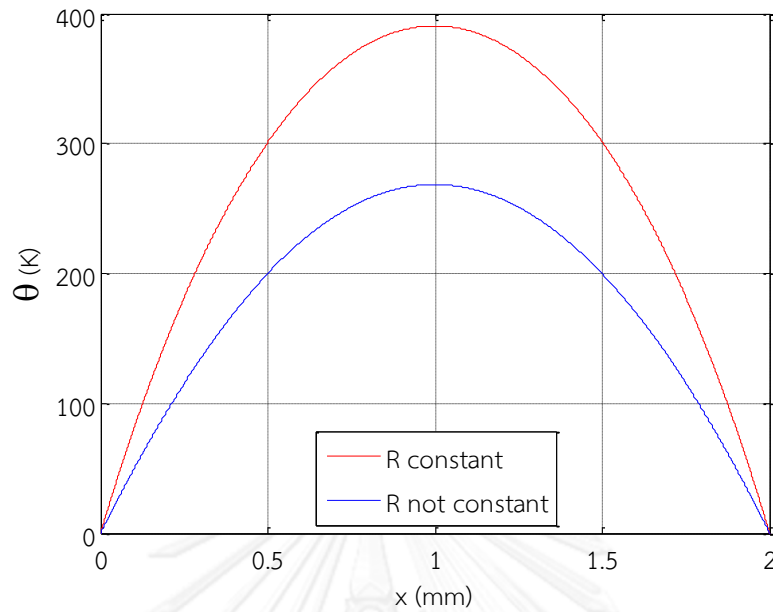
$$C_2 = \frac{I^2 \rho_0}{kA^2} \quad (5-9)$$

เมื่อป้อนแรงดันแก่ตัวให้ความร้อน จะสามารถหาค่ากระแสเพื่อนำไปวิเคราะห์หาอุณหภูมิตามสมการด้านบน โดยค่ากระแสจะสามารถหาได้จากการแก้สมการที่ (5-12)

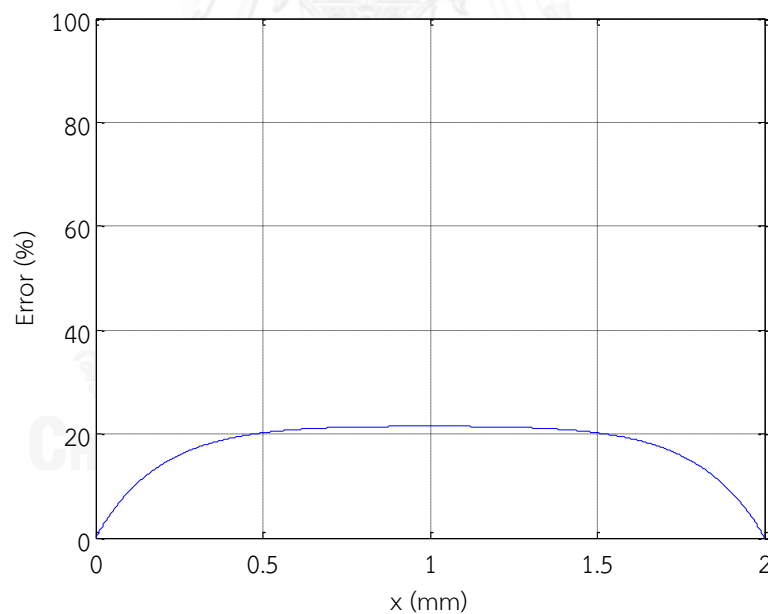
$$v - \frac{I\rho_0}{A} \left[ W + \frac{2\alpha C_2}{C_1 \sqrt{C_1}} \left( \tan\left(\frac{\sqrt{C_1}W}{2}\right) - \frac{\sqrt{C_1}W}{2} \right) \right] = 0 \quad (5-12)$$

ซึ่งค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าตรงกับการจำลองผลจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์





ภาพที่ 7.6 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนตัวให้ความร้อนเมื่อกำหนดให้สภาพต้านทานคงที่ และสภาพต้านทานขึ้นกับอุณหภูมิ



ภาพที่ 7.7 กราฟความผิดพลาดเมื่อกำหนดให้สภาพต้านทานคงที่

และจากการวิเคราะห์ (ภาพที่ 7.6 และภาพที่ 7.7) จะพบว่าหากพิจารณาให้สภาพต้านทานของตัวให้ความร้อนเป็นค่าคงที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิจะทำให้เกิดความผิดพลาด 21%

## 7.5 การเปรียบเทียบการจำลองโดยโปรแกรมกับการวัด

การออกแบบโดยใช้การจำลองผลจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ถือว่ามีความแม่นยำตรงความเป็นจริง แต่ทั้งนี้ความแม่นยำในการจำลองผลจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ที่ป้อนด้วย โดยหากใช้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเท่ากับ  $5 [W/m^2 \cdot K]$  จะได้ค่าการจำลองที่ตรงกับการวัดที่ช่วงแรงดันต่ำ และการกำหนดอุณหภูมิที่แผ่นฐานจะทำให้ค่าที่ได้จากการจำลองมีความแม่นยำมากกว่าการกำหนดอุณหภูมิที่ขั้ว แต่หากจะให้แม่นยำที่ทุกค่าแรงดันจะต้องมีการวิเคราะห์เรื่องค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองเพิ่มเติม เช่น ค่าความนำไฟฟ้า เป็นต้น เนื่องจากเป็นค่าที่ได้จากการทดลองที่ขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น รูปทรง อุณหภูมิ เป็นต้น ทำให้เป็นการยากที่จะหาค่าที่แน่นอนได้

อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์การออกแบบในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างตัวตรวจจับก๊าซที่ใช้พลังงานต่ำเพียงรูปแบบเดียว คือ โครงสร้างรูปทรงสี่เหลี่ยม ดังนั้นเพื่อประสิทธิภาพที่ดีขึ้นของตัวตรวจจับก๊าซ สามารถใช้แนวคิดในการวิเคราะห์จากวิทยานิพนธ์นี้เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างรูปแบบอื่น และปรับปรุงการออกแบบต่อไป

## 7.6 ข้อเสนอแนะ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการวิเคราะห์อุณหภูมิที่เกิดขึ้น และพลังงานที่ใช้บนตัวให้ความร้อน โครงสร้างพื้นฐาน คือ โครงสร้างรูปทรงสี่เหลี่ยม ดังนั้นเพื่อให้การออกแบบตัวให้ความร้อนมีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น ควรเพิ่มเติมการพิจารณาตัวให้ความร้อนโครงสร้างรูปแบบอื่น เช่น โครงสร้างแบบขด เป็นต้น นอกจากนี้ควรเพิ่มเติมในการศึกษาเรื่องการจำลองผลโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เช่น การออกแบบเอลิเมนต์ (element) การออกแบบรูปร่างตาราง (mesh) เป็นต้น เนื่องจากเป็นส่วนที่ส่งผลต่อการจำลองว่ามีความแม่นยำมากน้อยเพียงใด

## รายการอ้างอิง

- [1] N. Yamazoe and N. Miura, "Some basic aspects of semiconductor gas sensors," *Chemical Sensor Technology*, vol. 4, pp. 19-42, 1992.
- [2] Zili Zhang, Chenbo Yin, Chunmin Tao, Bin Zhu, Ningning Dong, "Design and optimization of planar structure micro-hotplate," *Procedia Engineering*, Volume 12, 2011, Pages 105-110, ISSN 1877-7058.
- [3] A Wisitsoraat and A Tuantranont and T Lomas, "Design and Simulation of Electro-fabricated MEMS Microhotplate for Gas Sensor," *Journal of Physics Conference Series*, Volume 34, 2006, pp.643, ISSN 1742-6596.
- [4] Monika and Dr. Arti Arora, "Design and Simulation of MEMS based Microhotplate as Gas Sensor," *International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET)*, Volume 2 Issue 8, August 2013, Pages 2487-2492, ISSN 2278 – 1323.
- [5] F. Udrea, J.W. Gardner, D. Setiadi, J.A. Covington, T. Dogaru, C.C. Lu, W.I. Milne, "Design and simulations of SOI CMOS micro-hotplate gas sensors," *Sensors and Actuators B: Chemical*, Volume 78, Issues 1–3, 30 August 2001, Pages 180-190, ISSN 0925-4005.
- [6] Wan-Young Chung, Jun-Woo Lim, Duk-Dong Lee, "Studies on thermal properties of a micro gas sensing element array with central single heater," *Sensors and Actuators B: Chemical*, Volume 83, Issues 1–3, 15 March 2002, Pages 281-284, ISSN 0925-4005.
- [7] Ding-jun Xu; Zheng-Yong Zhang; Zhen Yu, "Analysis on thermal balance and design principles of catalytic combustion gas sensor," *Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*, 2009. NEMS 2009. 4th IEEE International Conference on , vol., no., pp.898,903, 5-8 Jan. 2009
- [8] Addy, D. P.; Gehman, T. D.; Rashid, M. H., "Bioelectronics: Biosensors," *Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)*, 2011 IEEE , vol., no., pp.1,4, 9-13 Oct. 2011
- [9] Hiskia; Siregar, M.R.T.; Muljono, M., "Design and Fabrication of Micromachined Gas Sensors," *Semiconductor Electronics*, 2006. ICSE '06. IEEE International Conference on , vol., no., pp.98,101, Oct. 29 2006-Dec. 1 2006

- [10]Dzung Viet Dao; Ling-Han Li; Hashishin, T.; Tamaki, J.; Shibuya, K.; Sugiyama, S., "Development of a miniaturized NO<sub>2</sub> gas sensor based on nanoparticles WO<sub>3</sub> thin film on interdigitated electrodes," *Sensors*, 2010 IEEE , vol., no., pp.1254,1257, 1-4 Nov. 2010
- [11]Tamaki, J.; Niimi, J.; Ogura, S.; Konishi, S., "Effect of micro-gap on sensing properties to dilute chlorine gas of indium oxide thin film microsensors," *Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems*, 2005. Digest of Technical Papers. TRANSDUCERS '05. The 13th International Conference on , vol.2, no., pp.1931,1934 Vol. 2, 5-9 June 2005
- [12]Roy, S.; Majhi, T.; Sinha, S.; Sarkar, C.K.; Saha, H., "Electro thermal analysis and fabrication of low cost microheater using a nickel alloy for low temperature MEMS based gas sensor application," *Industrial Electronics, Control & Robotics (IECR)*, 2010 International Conference on , vol., no., pp.59,64, 27-29 Dec. 2010
- [13]Gwiy-Sang Chung, "Fabrication and characterization of micro-heaters with low-power consumption using SOI membrane and trench structures," *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 112, Issue 1, 15 April 2004, Pages 55-60, ISSN 0924-4247.
- [14]Sung-Jei Hong; Han, Jeong-In, "Low-temperature catalyst adding for tin-oxide nanostructure gas sensors," *Sensors Journal*, IEEE , vol.5, no.1, pp.12,19, Feb. 2005
- [15]Li Qiu, Stefan Hein, Ernst Obermeier, Axel Schubert, "Micro gas-flow sensor with integrated heat sink and flow guide," *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 54, Issues 1–3, June 1996, Pages 547-551, ISSN 0924-4247
- [16]J.F. Creemer, D. Briand, H.W. Zandbergen, W. van der Vlist, C.R. de Boer, N.F. de Rooij, P.M. Sarro, "Microhotplates with TiN heaters," *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 148, Issue 2, 3 December 2008, Pages 416-421, ISSN 0924-4247
- [17]Isolde Simon, Nicolae Bărsan, Michael Bauer, Udo Weimar, "Micromachined metal oxide gas sensors: opportunities to improve sensor performance," *Sensors and Actuators B: Chemical*, Volume 73, Issue 1, 25 February 2001, Pages 1-26, ISSN 0925-4005
- [18]Trontelj, J.; Smid, B.; Podhraki, M., "Simulation and Modeling of Microsensor Structures Using Multiphysics Tool," *Computer Modeling and Simulation (EMS)*, 2012 Sixth UKSim/AMSS European Symposium on , vol., no., pp.483,489, 14-16 Nov. 2012

- [19]Far, A.; Guo, B.; Flitti, F.; Bermak, A., "Temperature Modulation for Tin-Oxide Gas Sensors," *Electronic Design, Test and Applications*, 2008. DELTA 2008. 4th IEEE International Symposium on , vol., no., pp.378,381, 23-25 Jan. 2008
- [20]Andrew P Lee, Brian J Reedy, "Temperature modulation in semiconductor gas sensing," *Sensors and Actuators B: Chemical*, Volume 60, Issue 1, 2 November 1999, Pages 35-42, ISSN 0925-4005
- [21]Carole Rossi, Emmanuel Scheid, Daniel Estève, "Theoretical and experimental study of silicon micromachined microheater with dielectric stacked membranes," *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 63, Issue 3, December 1997, Pages 183-189, ISSN 0924-4247
- [22]Chunmin Tao; Chenbo Yin; Maoxian He; Shandong Tu, "Thermal analysis and design of a micro-hotplate for Si-substrated micro-structural gas sensor," *Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*, 2008. NEMS 2008. 3rd IEEE International Conference on , vol., no., pp.284,287, 6-9 Jan. 2008
- [23]Andrew Pike, Julian W Gardner, "Thermal modelling and characterisation of micropower chemoresistive silicon sensors," *Sensors and Actuators B: Chemical*, Volume 45, Issue 1, November 1997, Pages 19-26, ISSN 0925-4005
- [24]Courbat, J.; Canonica, M.D.; Briand, D.; de Rooij, N.-F.; Teyssieux, Damien; Thiery, Laurent; Cretin, Bernard, "Thermal simulation and characterization for the design of ultra-low power micro-hotplates on flexible substrate," *Sensors*, 2008 IEEE , vol., no., pp.74,77, 26-29 Oct. 2008
- [25]Rebecka Domeij Bäckryd, Lars Eldén, "A Simulation of Heat Transfer on a Gas Sensor Component," *Proceedings of the COMSOL Multiphysics User's Conference*, 2005.
- [26]Vineet Bansal, et al., "3-D Design, Electro-Thermal Simulation and Geometrical Optimization of spiral Platinum Micro-heaters for Low Power Gas sensing applications using COMSOLTM," *Proceedings of the COMSOL Multiphysics User's Conference*, 2011.
- [27]Woo-Jin Hwang, et al., "Development of Micro-Heaters with Optimized Temperature Compensation Design for Gas Sensors," *Sensors*, pp. 2580-2591, 2011.
- [28]Bijoy Kantha, et al., "Electro-Thermo-Mechanical analysis of MEMS based Micro-hotplate for gas sensor application," *International Journal of Applied Engineering Research*, vol.7, no.11, 2012.

- [29]Kantha, B.; Roy, S.; Ghosh, A.; Khan, A.; Bag, J.; Sarkar, S.K., “Designing a micro-heater with Genetic Algorithm based optimized parameters and study its performance,” Communications, Devices and Intelligent Systems (CODIS), 2012 International Conference on , vol., no., pp.576,579, 28-29 Dec. 2012
- [30]S. Capone.; A. Forleo.; L. Francioso.; R. Rella.; P. Siciliano.; J. Spadavecchia.; D. S. Presicce.; A. M. Taurino., “Solid state gas sensors: state of the art and future activities,” Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, vol. 5, No. 5, pp. 1335 - 1348, 2003.
- [31]George F. Fine, Leon M. Cavanagh, Ayo Afonja and Russell Binions, “Metal Oxide Semi-Conductor Gas Sensors in Environmental Monitoring,” Department of Chemistry, University College
- [32]Jack P. Holman, Heat Transfer, 10th ed., New York: McGraw-Hill, 2010.
- [33]COMSOL Multiphysics User’s Guide, May, 2012.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวทิวาภรณ์ เปลี่ยนศักดิ์ เกิดวันจันทร์ที่ 1 เมษายน พ.ศ. 2534 ณ จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต วิศวกรรมไฟฟ้า คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2555 และศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรม ศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี การศึกษา 2556 ผลงานทางวิชาการที่ได้นำเสนอในงานประชุมวิชาการได้แก่ งาน The 6th AUN/SEED-Net Regional Conference on Electrical Engineering 2014 วันที่ 4-5 มีนาคม 2557 ณ ประเทศมาเลเซีย ในหัวข้อ "Design and Simulation of Low power Consumption Micro-gas sensor" และงาน The 29th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications วันที่ 1-4 กรกฎาคม 2557 ณ ประเทศไทย ในหัวข้อ "Length Optimization of Rectangular Micro-heater for the Lowest Power Consumption" หน้า 396-398



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**