

การศึกษาการกระจายความร้อนของโลหะภายใต้อัตราการให้ความร้อนคงที่



นายสว่าง เก่งเกรียงไกร

นาย ปิติ รุ่งทรัพย์ทวีคุณ

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2542

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 38555
วัน, เดือน, ปี..... 5 ส.ค. 2544

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของหอสมุดฯ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
โดยไม่ได้รับอนุญาต หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยเป็นอย่างสูง และขอแจ้งให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A Study of Heat Distribution in Metal under Uniform Heat Flux

Mr. Sawang Kangkriangkrai

Mr. Piti Rungsubthweekoon

**A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the
Requirement for the Degree of Bachelor of Science**

Department of Applied Physics

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

1999

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ :	การศึกษาการกระจายความร้อนของโลหะภายใต้อัตรา การให้ความร้อนคงที่	
นักศึกษาผู้รับผิดชอบโครงการ :	นาย สว่าง	เก่งเกรียงไกร
	นาย ปิติ	รุ่งทรัพย์ทวีคุณ
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ :	อาจารย์ วิษณุ	เพชรภา
ภาควิชา :	ฟิสิกส์ประยุกต์	
ปีการศึกษา :	2542	

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ศึกษาการกระจายความร้อนในโลหะ ภายใต้อัตราความร้อนคงที่ และโดยการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของสมการการนำความร้อนตามเงื่อนไขเริ่มต้น และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดขึ้น การแก้สมการดังกล่าวทำได้โดยการปริวรรตลาปลาซ โดยที่คำตอบของสมการเป็นค่าอุณหภูมิของโลหะซึ่งอยู่ในรูปของเวลา ตำแหน่ง และค่าคงที่ต่างๆที่เป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของโลหะ เช่น ค่าการกระจายความร้อน ค่าการนำความร้อน ค่าการดูดกลืนความร้อน และแบบจำลองดังกล่าวเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองพบว่าค่าเหล่านี้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิ ณ ตำแหน่ง $x = -d$

Special Project Title : A Study of Heat Distribution in Metal under
Uniform Heat Flux

Name : Mr. Sawang Kangkriangkrai
Mr. Piti Rungsubthweekoon

Special Project Advisor : Mr. Wisanu Pecharapa

Department : Applied Physics

Academic Year : 1999



Abstract

This project is established to study temperature distribution of metals under constant heat flux. The mathematical model of heat conduction is developed. Few assumptions are made in order to simplify the equation. Laplace transform is employed to solve the equation explicitly. Obtained result is the temperature distribution in the form of given parameters such as position, time thermal conductivity and thermal diffusivity. This model is compared to the experiential data varying position and time. The comparison has shown a good fit at limited time.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเนื่องจากความอนุเคราะห์ของบุคคลหลายๆท่านด้วยกันดังนี้

1. อาจารย์ วิษณุ เพชรภา อ.ที่ปรึกษาผู้ซึ่งให้ความรู้และแนะนำแนวทางในการปฏิบัติงานจนทำให้โครงการนี้สำเร็จ
2. ดร. จิติ หนูแก้ว ผู้ซึ่งให้ใช้ห้องสำหรับทำโครงการนี้
3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วราวุฒิ เกาสักดา ผู้ซึ่งให้ใช้กล้องดิจิทัลและได้ติดตามผลงานมาโดยตลอด
4. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จูตินัย และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ งามนิตย์ แก้วแดง ผู้ซึ่งให้ยืมเครื่องมือในการป้องกันอันตรายจากการเผาตะกั่ว
5. อาจารย์ ธวัชชัย ขาวประเสริฐ และบุคลากรภายในอาคารซ่อมสร้างเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ
6. พี่อภิชาติ ผู้ซึ่งให้คำแนะนำและให้ยืมเครื่องใช้ต่างๆมากมาย
7. พี่เจน ผู้ซึ่งให้ยืมใช้เครื่องมือวัดมัลติมิเตอร์เชิงตัวเลข (digital multimeter)

สุดท้ายขอขอบคุณ ทุกคนที่ให้คำแนะนำและให้กำลังใจ และ ให้ความช่วยเหลือในการโครงการในทุกๆด้านเป็นอย่างดี

ปิติ รุ่งทรัพย์ทวีคุณ
สว่าง เก่งเกรียงไกร
ผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อปัญหาพิเศษภาษาไทย	ก
บทคัดย่อปัญหาพิเศษภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญรูป	ง-จ
สารบัญตาราง	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโรงงานพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโรงงาน	1
1.3 ขอบเขตของโรงงาน	1
บทที่ 2 ทฤษฎีนำความร้อนและเลเซอร์	2
2.1 หลักการถ่ายเทความร้อน(Principles of Heat Transfer)	2
2.1.1 การถ่ายเทความร้อน โดยการนำหรือการนำความร้อน (Conduction Heat Transfer)	2
2.1.2 การถ่ายเทโดยการพาความร้อน (Convection Heat Transfer)	2
2.1.2.1 การพาความร้อนแบบอิสระ(Free Convection)	2
2.1.2.2 การพาความร้อนแบบบังคับ(Force Convection)	2
2.1.3 การแผ่รังสี(Radiation)	3
2.2 การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน	3
2.3 ค่าการนำความร้อน(Thermal Conductivity, k)	3
2.4 ค่าการแพร่กระจายความร้อน(Thermal Diffusivity, α)	3
2.5 สภาวะสม่ำเสมอ และไม่สม่ำเสมอ(Steady State and Unsteady State)	3
2.6 สมการการนำความร้อนแบบหนึ่งมิติ	4
2.7 พื้นฐานของเลเซอร์	6
2.7.1 โมโนโครมาติกส์(Monochromatic)	6
2.7.2 แสงที่มีทิศทางที่แน่นอน(Directionality)	6
2.7.3 ไดเวอร์เจนซ์(Divergence)	7
2.7.4 ความเจิดจ้า(Brightness)	7
2.7.5 โคฮีเรนซ์(Coherence)	7
2.7.6 พัลส์ที่แคบมาก(Ultrashort Pulses)	7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.7 โพราไลเซชัน(Polarization)	7
2.8 กระบวนการเกิดเลเซอร์	8
2.8.1 การดูดกลืนและการปลดปล่อยพลังงานในระบบอะตอม	8
2.8.2 การกระโดดข้ามของอะตอม	8
2.8.2.1 สติมูเลตเตดแอบซอร์พชัน(Stimulated Absorption)	8
2.8.2.2 สปอนทาเนียสอีมิชชัน(Spontaneous emission)	9
2.8.2.3 สติมูเลตเตดอีมิชชัน(Stimulated emission)	9
2.9 ส่วนประกอบของเลเซอร์	9
2.9.1 สารเลเซอร์(LASER Medium)	10
2.9.2 สภาพประชากรผกผัน(Population Inversion)	10
2.9.2.1 Two-level pumping	10
2.9.2.2 Three-level optical pumping	10
2.9.2.3 Four-level optical pumping	11
2.9.3 Feedback Optical Resonator	12
2.10 เลเซอร์โหมด(Laser Mode)	12
2.10.1 แอกเซียล โหมด(Axial Modes)	13
2.10.2 ลองจิจูดินัล-ทรานเวิร์ส โหมด(Longitudinal-Tranverse Modes)	13
บทที่ 3 แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์	15
บทที่ 4 การทดลอง และวิธีการทดลอง	20
4.1 อุปกรณ์การทดลอง	20
4.2 วิธีทดลอง	20
บทที่ 5 ผลการทดลอง	23
บทที่ 6 วิเคราะห์ผลการทดลอง	43
บทที่ 7 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	45
บทที่ 8 แผนงานในอนาคต	46
ประวัติผู้เขียน	47
หนังสืออ้างอิง	48
ภาคผนวก	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงการแพร่ผ่านของความร้อน	4
รูปที่ 2.2 เป็นการเกิดซึ่งทำการกระตุ้น โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยมี การปล่อยพลังงานออกมาเรียกว่าสติมูเลตเตดแอบซอร์ปชั่น (Stimulated absorption)	8
รูปที่ 2.3 เป็นการเกิดซึ่งมีการปลดปล่อยโฟตอนออกมาโดยที่ไม่มีสนามไฟฟ้ามาเกี่ยวข้องเรียกว่าสปอนทาเนียสอิมิชัน (Spontaneous emission)	9
รูปที่ 2.4 เป็นการเกิดซึ่งเป็นลักษณะที่อะตอมปลดปล่อยโฟตอนออกมาโดยที่มีสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามาเกี่ยวข้องเรียกว่าสติมูเลตเตดอิมิชัน (Stimulated emission)	9
รูปที่ 2.5 เป็นชั้นระดับพลังงานต่างๆเมื่อมีการกระตุ้นสารเลเซอร์มีเดียม	11
รูปที่ 2.6 เป็นกระบวนการการกระตุ้นสารเลเซอร์มีเดียม และได้แสงเลเซอร์ออกมา ซึ่งเป็นลักษณะของสารเลเซอร์มีเดียม 4 ระดับพลังงาน	11
รูปที่ 2.7 เป็นกระบวนการกระตุ้นสารเลเซอร์มีเดียม และได้แสงเลเซอร์ออกมา ซึ่งเป็นลักษณะของสารเลเซอร์มีเดียม 4 ระดับพลังงาน	12
รูปที่ 2.9 เป็นลักษณะของโหมดต่างๆของเลเซอร์	14
รูปที่ 3.1 แสดงการให้ความร้อนแก่โลหะที่ตำแหน่ง $x = 0$	15
รูปที่ 5.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอลูมิเนียม เมื่อความหนาของโลหะคงที่	25
รูปที่ 5.2ก แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอลูมิเนียม เมื่อความหนาของโลหะที่ 2.4 มม. โดยเปลี่ยนค่าการดูดความร้อนตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	27
รูปที่ 5.2ข แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอลูมิเนียม เมื่อความหนาของโลหะที่ 3.6 มม. โดยเปลี่ยนค่าการดูดความร้อนตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	28
รูปที่ 5.2ค แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอลูมิเนียม เมื่อความหนาของโลหะที่ 4.8 มม. โดยเปลี่ยนค่าการดูดความร้อนตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	29

รูปที่ 5.3ก	แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอลูมิเนียม ที่เวลาน้อยๆเมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาของโลหะ	31
รูปที่ 5.3ข	แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอลูมิเนียม ที่เวลามากๆเมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาของโลหะ	32
รูปที่ 5.4	แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของทองเหลือง เมื่อความหนาของโลหะคงที่	34
รูปที่ 5.5ก	แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของทองเหลือง ที่เวลาน้อยๆเมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาของโลหะ	36
รูปที่ 5.5ข	แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของทองเหลือง ที่เวลามากๆเมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาของโลหะ	37
รูปที่ 5.6	แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเหล็ก เมื่อความหนาของโลหะคงที่	39
รูปที่ 5.7ก	แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของทองเหลือง ที่เวลาน้อยๆเมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาของโลหะ	41
รูปที่ 5.7ข	แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของทองเหลือง ที่เวลามากๆเมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาของโลหะ	42

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 5.1	เปรียบเทียบอุณหภูมิเมื่อความหนาของอลูมิเนียมคงที่เมื่อค่าการดูดความร้อนเป็นค่าเฉลี่ย	24
ตารางที่ 5.2	เปรียบเทียบอุณหภูมิเมื่อความหนาของอลูมิเนียมคงที่เมื่อค่าการดูดความร้อนเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป	26
ตารางที่ 5.3	เปรียบเทียบอุณหภูมิเมื่อเวลาให้ความร้อนแก่อลูมิเนียมคงที่เมื่อค่าการดูดความร้อนเป็นค่าเฉลี่ย	30
ตารางที่ 5.4	เปรียบเทียบอุณหภูมิเมื่อความหนาของทองเหลืองคงที่	33
ตารางที่ 5.5	เปรียบเทียบอุณหภูมิเมื่อเวลาให้ความร้อนแก่ทองเหลืองคงที่	35
ตารางที่ 5.6	เปรียบเทียบอุณหภูมิเมื่อความหนาของเหล็กคงที่	38
ตารางที่ 5.7	เปรียบเทียบอุณหภูมิเมื่อเวลาให้ความร้อนแก่เหล็กคงที่	40

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการพิเศษ

ปัจจุบันงานในระบบอุตสาหกรรมต่างๆต้องการความเป็นมาตรฐานสากลและผลงานที่ออกมาต้องเป็นที่ยอมรับเช่นเดียวกันงานทางด้าน โลหะซึ่งต้องการความละเอียดของชิ้นงานมากซึ่งวิธีการทางเลเซอร์ก็เป็นวิธีการหนึ่งที่น่ามาใช้งานอย่างแพร่หลายทั้งงานตัด,เจาะเพื่อให้ได้คุณภาพตามที่ต้องการ จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาถึงคุณสมบัติทางความร้อนของโลหะแต่ละชนิด ทั้งนี้การวิจัยโดยการสร้างแบบจำลองทางความร้อนเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่สามารถนำไปใช้วิเคราะห์และทำนายผลการเปลี่ยนแปลงภายใน โลหะได้ดี

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 เพื่อศึกษาเกี่ยวกับพื้นฐานของเลเซอร์
- 1.2.2 เพื่อศึกษาคุณสมบัติเฉพาะของโลหะชนิดต่างๆ
- 1.2.3 เพื่อศึกษาถึงกระบวนการการนำความร้อนภายในเนื้อโลหะ
- 1.2.4 นำไปประยุกต์การใช้งานที่เกี่ยวกับความร้อนที่เปลี่ยนแปลงต่อเวลา และความหนา
- 1.2.5 นำไปประยุกต์ในเชิงอุตสาหกรรมต่อไป

1.3 ขอบเขตของโครงการ

- 1.3.1 ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนในหนึ่งมิติ
- 1.3.2 ออกแบบ และสร้างอุปกรณ์ที่ทำการทดลอง
- 1.3.3 ศึกษาพื้นฐานเลเซอร์เบื้องต้น
- 1.3.4 เทียบค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าของทฤษฎี

สถานะไม่สม่ำเสมอ(unsteady state หรือ transient state) หมายความว่า อุณหภูมิที่จุดๆหนึ่ง ในวัตถุยังเปลี่ยนแปลงอยู่เมื่อมีเวลาเปลี่ยนไป หรืออาจเขียนอยู่ในรูปสมการได้ว่า

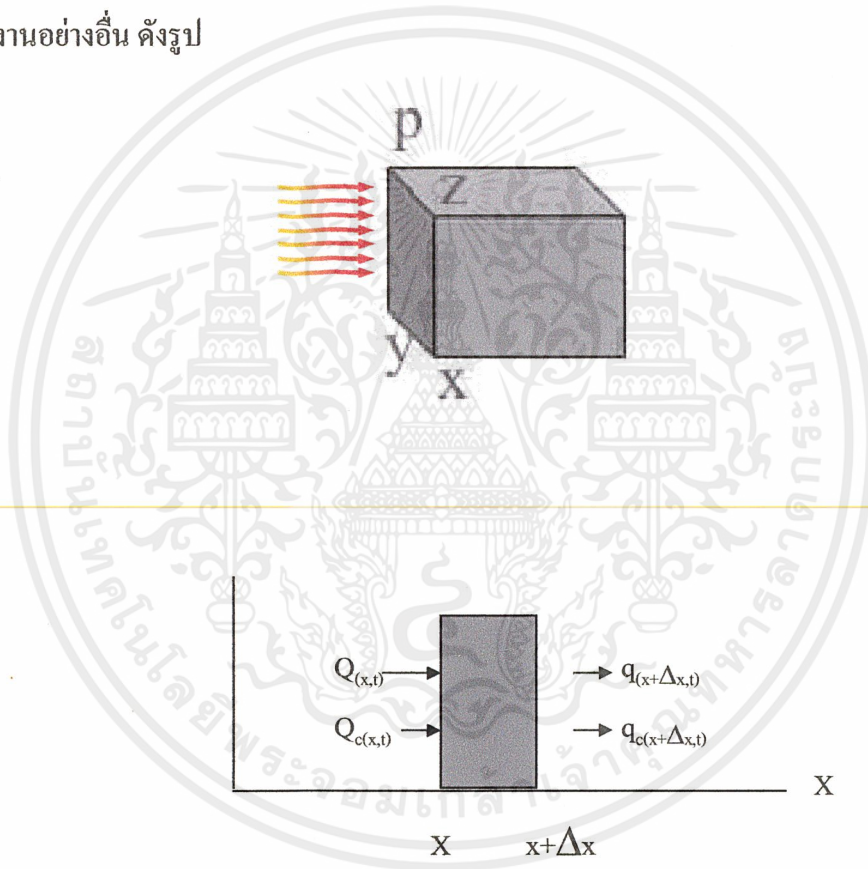
$$\frac{\partial T}{\partial t} \neq 0 \quad (2.2)$$

2.6 สมการการนำความร้อนแบบหนึ่งมิติ

การนำความร้อนผ่านผนังราบ

ผนังชั้นเดียว

ในลักษณะนี้เราพิจารณาเฉพาะการเคลื่อนที่ของความร้อนในทิศทางของ x ซึ่งกล่าวได้ว่า อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงเฉพาะในทิศ x เท่านั้น และอุณหภูมิมียค่าคงที่ในทิศทางของ y และในผนังก็ไม่มีแหล่งพลังงานอย่างอื่น ดังรูป



รูปที่ 2.1 แสดงการแพร่ผ่านของความร้อน

พิจารณาเมื่ออุณหภูมิไม่มีการเปลี่ยนแปลงในทิศ y และ z มีแต่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงใน

แนวแกน x

พื้นที่ผิวหน้า $xypz = A$ เมื่อพิจารณาที่เวลาน้อยๆ (Δt) และปริมาตรที่ขนาด Δx และพื้นที่ตัดของของพื้นที่ A

เมื่อ $T_{(x,t)}$ เป็นค่าอุณหภูมิของโลหะที่จุด x ใดๆที่เวลาใดๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$T_{(x+\Delta x,t)}$ เป็นค่าอุณหภูมิของโลหะที่จุด $x+\Delta x$ ที่เวลาใดๆ

$Q_{c(x,t)}$ เป็นค่าความเข้มความร้อนจากการนำความร้อนในทิศทาง x ที่ตำแหน่งและเวลาใดๆ

$Q_{c(x,t)}$ เป็นค่าความเข้มความร้อนจากการกระจายความร้อนในทิศ x ที่ตำแหน่งและเวลาใดๆ

$S_{(x,t)}$ เป็นความร้อนที่เกิดที่วัสดุต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลาที่ตำแหน่งและเวลาใดๆ

ρ เป็นค่าความหนาแน่นของวัสดุ

C_p เป็นค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุ

K เป็นค่าการนำความร้อน

จากเงื่อนไขเหล่านี้ และจากสภาวะสม่ำเสมอ ณ ที่สมมูลย์ความร้อนได้ว่า
พลังงานที่เหลือ = พลังงานที่ให้แก่วัตถุ-พลังงานที่ออกจากวัตถุ

$$\rho C_p [T_{(x,t+\Delta t)} - T_{(x,t)}] A \Delta x = \{q_{(x,t)} + q_{c(x,t)}\} A \Delta t + \dot{S} A \Delta x \Delta t - \{q_{(x+\Delta x,t)} + q_{c(x+\Delta x,t)}\} A \Delta t$$

หารด้วย $A \Delta x \Delta t$ ทั้งสองข้างและใส่ limit ที่ $\Delta x \rightarrow 0, \Delta t \rightarrow 0$

$$\rho C_p \lim_{\substack{\Delta t \rightarrow 0 \\ \Delta x \rightarrow 0}} \frac{T_{(x,t+\Delta t)} - T_{(x,t)}}{\Delta t} = - \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{q_{(x+\Delta x,t)} - q_{(x,t)}}{\Delta x} - \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{q_{c(x+\Delta x,t)} - q_{c(x,t)}}{\Delta x} + \dot{S}$$

จากการคำนวณได้

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = - \left[\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial q_c}{\partial x} \right] + \dot{S} \quad (2.3)$$

แต่ $q = -k \Delta t = -k \frac{\partial t}{\partial x}$ เป็นสมการสำหรับการวิเคราะห์ในทิศ x

$q_c = \rho C_p T v_x$ โดยที่ v_x เป็นความเร็วในการนำความร้อนในทิศ x

สำหรับใน 1 มิติ $v_y, v_z = 0$ โดยที่ $v_x \neq 0$
ดังนั้น

$$\rho C_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} \right] = \frac{k \partial^2 T}{\partial x^2} + \dot{s} \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\dot{s}}{\rho C_p} \quad (2.5)$$

เมื่อ $\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$ เป็นค่า Thermal differential

เมื่อ $V_x = 0$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\dot{s}}{\rho C_p} \quad (2.6)$$

เมื่อ $\dot{s} = 0$

ดังนั้น

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2.7)$$

2.7 พื้นฐานของเลเซอร์

แสงเลเซอร์มีคุณลักษณะที่มีความเจิดจ้าสูงและมีทิศทางเคลื่อนที่ที่แน่นอน และยังมีความถี่เป็นแสงความถี่เดียว (Monochromatic) และยังเป็นคลื่นแสงที่มีลักษณะที่เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ซึ่งคุณสมบัติต่างๆของแสงเลเซอร์สรุปได้ดังนี้

2.7.1 โมโนโครมาติกส์ (Monochromatics)

ลำแสงแบบโมโนโครมาติกส์ (Monochromatic) นั้นเป็นลำแสงที่มีความถี่เดียวแต่ในความเป็นจริงแล้วแสงเลเซอร์นั้นแสงที่ออกมาไม่ได้เป็นความถี่เดียวแบบโมโนโครมาติกส์แต่มีการกระจายของความถี่ $\Delta \nu$ ซึ่งจากข้างต้นเราทราบว่า การที่แสงเลเซอร์เป็นโมโนโครมาติกส์นั้นขึ้นกับ $\Delta \nu$

2.7.2 แสงที่มีทิศทางที่แน่นอน (Directionality)

คุณสมบัตินี้แสดงให้เห็นว่าแสงเลเซอร์นั้นเป็นแสงที่ถูกผลิตออกมาที่มีทิศทางที่แน่นอน โดยการที่แสงเลเซอร์นั้นเกิดขบวนการสดีมิเลตเตดอิมิชัน (Stimulated Emission) และมีออปติคัลเรโซเนเตอร์ (Optical resonator) เป็นกระจกที่มีค่าสะท้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Reflectivity)สูงโดยที่กระจกทำหน้าที่คอร็ลิมคิงอาร์พีเจอร์(Collimating aperture)และแสงถูกขยายโดยสะท้อน ไปมาจนเป็นแสงที่มีความเข้มสูงและออกมาเป็นเลเซอร์

2.7.3 ไคเวอร์เจน(Divergence)

แสงเลเซอร์ที่ออกมา นั้นมีลักษณะเป็น ไคเวอร์เจนซึ่งเป็นParallel Beam โดยที่แสงเลเซอร์ที่ออกมา นั้นมีค่าไคเวอร์เจนน้อย

2.7.4 ความเจิดจ้า(Brightness)

แสงเลเซอร์นั้นมีความเจิดจ้ามาก ซึ่งความเจิดจ้า นั้นเป็นคุณลักษณะที่เฉพาะของเลเซอร์

2.7.5 โคฮีเรนซ์(Coherence)

แสงเลเซอร์นั้น มีลักษณะของ โคฮีเรนซ์(Coherence)ที่มีทิศทางเดียวและเป็นระเบียบในการเคลื่อนที่

2.7.6 พัลส์ที่แคบมาก(Ultrashort Pulses)

แสงเลเซอร์นั้นเกิดจากการที่มีการกระตุ้นอะตอมในสารเลเซอร์ โดยใช้ Flash lamp ซึ่งในการกระตุ้นนั้นเราสามารถกำหนดการกระตุ้นได้ ทำให้ระยะห่างกันเท่าใดซึ่งระยะห่างในการกระตุ้นนั้นแบ่งได้ดังนี้

$$\text{Microsecond} = 10^{-6} \text{ Second}$$

$$\text{Nanosecond} = 10^{-9} \text{ Second}$$

$$\text{Picosecond} = 10^{-12} \text{ Second}$$

$$\text{Femto-second} = 10^{-15} \text{ Second}$$

2.7.7 โพรลาไลเซชัน(Polarization)

แสงเลเซอร์นั้นมีความเป็น โพรลาไลเซชัน(Polarization)นั้นน้อยมากและถ้าเราต้องการที่ทำให้เลเซอร์นั้นมีความเป็น โพรลาไลเซชัน(Polarization)สูงเราทำโดยการตัดปลายหลอดหรือแท่งผลึกให้เอียงทำมุมบริวเตอร์(Brewster's Angle) กับแนวแกนของหลอดเลเซอร์ ทำให้แสงที่ออกมา นั้นมีค่าความเป็น โพรลาไลเซชัน(Polarization)สูง และบริสุทธิ์มาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 กระบวนการเกิดเลเซอร์

ในการเกิดเลเซอร์นั้นมียุ่หลายกระบวนการในการเกิดเลเซอร์ ซึ่งแต่ละกระบวนการนั้นแตกต่างกันไปดังนี้

2.8.1 การดูดกลืนและการปลดปล่อยพลังงานในระบบอะตอม

(Absorption and Emission of Energy by atomic System)

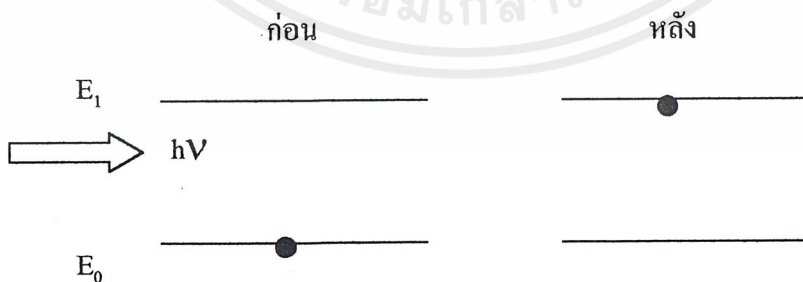
ในสภาวะของแถบพลังงานนั้นแถบพลังงานแบ่งเป็นช่วงๆที่ไม่ต่อเนื่องกัน โคนสภาวะของระบบนั้นเรียกว่า Eigen state

2.8.2 การกระโดดข้ามของอะตอม

การที่ทำให้เกิดเลเซอร์นั้นต้องมีการกระโดดข้ามของอะตอมซึ่งแบ่งเป็น 3 ลักษณะดังนี้

2.8.2.1 สติมูลเตเตดแอปซอพซัน(Stimulated Absorption)

เป็นลักษณะที่อะตอมที่อยู่ในระดับพลังงานที่ 1 รับพลังงานหรือมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านดูดกลืนโฟตอนและกระโดดไประดับพลังงานที่ 2 โดยกระบวนการดูดกลืนและเมื่อมีการกระโดดข้ามขึ้นพลังงานอยู่ในระยะเวลาหนึ่งและอะตอมตกลงมาพร้อมทั้งมีการปลดปล่อยโฟตอนออกมาโดยที่กระบวนการนี้ไม่ต้องใช้การกระตุ้นเรียกว่า Spontaneous emission และถ้ามีการกระตุ้นโดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยมีการปล่อยพลังงานออกมา $\Delta E_{21} = h\nu_{21}$ เราเรียกว่า Stimulated emission ดังรูปแบบ



รูปที่ 2.2 เป็นการเกิดซึ่งทำการกระตุ้น โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยมีการปล่อยพลังงานออกมาเรียกว่า สติมูลเตเตดแอปซอพซัน (Stimulated absorption)

2.8.2.2 สปอนทาเนียสอิมิชัน(Spontaneous emission)

ในกระบวนการของSpontaneous emissionนั้นมีการปลดปล่อยโฟตอนออกมาโดยที่ไม่มีสนามไฟฟ้ามาเกี่ยวข้องดังรูป



รูปที่ 2.3 เป็นการเกิดซึ่งมีการปลดปล่อยโฟตอนออกมาโดยที่ไม่มีสนามไฟฟ้ามาเกี่ยวข้องเรียกว่าสปอนทาเนียสอิมิชัน(Spontaneous emission)

2.8.2.3 สติมูเลตเตดอิมิชัน(Stimulated emission)

เป็นลักษณะที่อะตอมปลดปล่อยโฟตอนออกมาโดยที่มีสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามาเกี่ยวข้องด้วยดังรูป



รูปที่ 2.4 เป็นการเกิดซึ่งเป็นลักษณะที่อะตอมปลดปล่อยโฟตอนออกมาโดยที่มีสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามาเกี่ยวข้องเรียกว่าสติมูเลตเตดอิมิชัน(Stimulated emission)

2.9. ส่วนประกอบของเลเซอร์

เลเซอร์ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันนี้มีองค์ประกอบส่วนใหญ่อยู่ 3 อย่างคือ

2.9.1 สารเลเซอร์(LASER Medium)

สารเลเซอร์นั้นเป็นระบบอะตอมหรือระบบ โมเลกุล โดยมีการผ่านของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในและเกิดกระบวนการstimulated emission (Stimulated emission) โดยเราเรียกสารเลเซอร์ที่เป็นตัวกลางแบบนี้ว่า แอกทีฟเลเซอร์มีเดียม(Active LASER Medium) และจากที่กล่าวมาว่า เมื่อมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าวิ่งผ่านสารเลเซอร์มีเดียมนั้นค่าความเข้ม(Intensity) เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

2.9.2 สภาพประชากรผกผัน(Population Inversion)

สภาพประชากรผกผันนั้นหมายถึง การที่ทำให้ N_2 มีค่ามากกว่า N_1 โดยที่ทำการเกิดการขยายแอมพลิจูดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากการstimulated emission ในสารเลเซอร์มีเดียมนั้นๆซึ่งค่าของ $E_2 > E_1$ และในการเกิดประชากรผกผันนั้นเราต้องให้พลังงานในชั้นที่สูงกว่าเพื่อให้ในชั้นที่สูงกว่านั้นมีจำนวนอะตอมมากกว่าชั้นที่ต่ำกว่า โดยการที่ทำให้จำนวนอะตอมเปลี่ยนแปลง ได้นั้นเราต้องทำการปั๊มพื้ง(Pumping) ซึ่งเป็นการเพิ่มพลังงานให้แก่อะตอมในสารเลเซอร์มีเดียมและวัตถุนั้นอยู่ในสถานะที่ไม่สมดุลความร้อน และในการปั๊มพื้งนั้นทำได้หลายวิธีดังนี้

- **Optical Pumping** เป็นการเร่งอะตอมโดยใช้แสงที่มีความเข้มสูง
 - **Electron discharge** เป็นการ ใช้อิเล็กตรอนยิงเข้าไปที่ผลึกเลเซอร์มีเดียม
 - **Fast exothermic chemical reaction** เป็นการ ใช้ปฏิกิริยาเคมีที่ให้พลังงานมากและรวดเร็ว
 - **LASER pumping** การใช้เลเซอร์พัมป์
 - **Gas dynamic discharge** เป็นลักษณะการขยายตัวของแก๊ส
- ซึ่งวิธีต่างๆที่กล่าวมาข้างต้นนั้นเกี่ยวข้องกับระดับพลังงาน โดยแบ่งได้ใหญ่ๆดังนี้

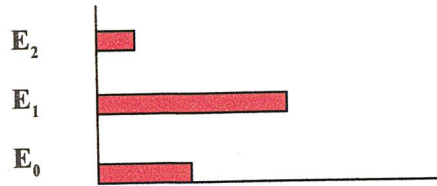
2.9.2.1 Two-level pumping

เป็นการเกี่ยวข้องกับระดับพลังงาน 2 ระดับ

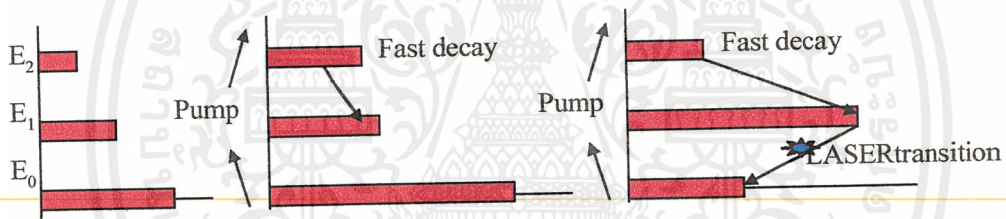
2.9.2.2 Three-level optical pumping

เป็นการเกี่ยวข้องกับระดับพลังงาน 3 ระดับ ซึ่งเป็นการใช้ Xenon Flashlamp ที่ให้ความเข้มสูง และมีความกว้างของสเปกตรัมมาก โดยในการใช้แบบนี้ต้องรู้ถึงค่าการดูดกลืน(Absorption) และการปลดปล่อย(Emission) ของ

เลเซอร์มีเดียม และในการกระตุ้นสารเลเซอร์มีเดียมนั้น ได้ดังรูประดับพลังงานดังนี้



รูปที่ 2.5 เป็นชั้นระดับพลังงานต่างๆเมื่อมีการกระตุ้นสารเลเซอร์มีเดียม
ได้ว่า $N_1 > N_0 > N_2$ ซึ่งเป็นลักษณะของสารเลเซอร์มีเดียม 4 ระดับพลังงาน
จาก $N_1 > N_0 > N_2$ เพราะเรากระตุ้นโดยการใส่พลังงานเข้าไปที่เลเซอร์
มีเดียมทำให้อะตอมที่ N_0 กระโดดไปที่ N_2 และอะตอมที่อยู่ในชั้น N_2 จะมีการตก
อย่างรวดเร็วมาที่ N_1 ซึ่งที่ N_1 นั้นเมื่ออะตอมตกลงมาอยู่ได้นานกว่าที่ N_2 ดังรูป

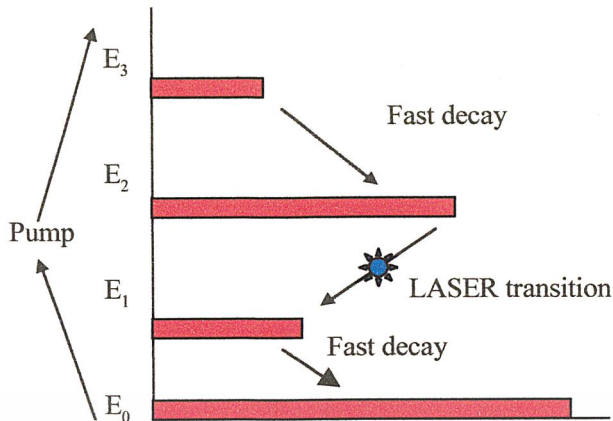


รูปที่ 2.6 เป็นกระบวนการการกระตุ้นสารเลเซอร์มีเดียม และได้แสงเลเซอร์ออกมา
ซึ่งเป็นลักษณะของสารเลเซอร์มีเดียม 4 ระดับพลังงาน

แต่ในแบบ Three-level pumping นั้นมีปัญหาตรงที่ว่าต้องป้อนกระแสไฟฟ้า
ฟ้าให้แก่ Xenon Flashlamp มาก เมื่อนานไปทำให้อุปกรณ์เสียหายได้

2.9.2.3 Four-level optical pumping

เป็นการเกี่ยวข้องกับระดับพลังงาน 4 ระดับ ซึ่งในลักษณะนี้เราต้องการ
สารเลเซอร์ที่มีระดับพลังงาน 4 ระดับ โดยที่ ระดับ $E_3 > E_2$ และ $E_1 > E_0$ และ
อะตอมในชั้น E_3 และ E_1 ต้องตกลงมาในระดับชั้นที่ต่ำกว่าอย่างรวดเร็วดังรูป



รูปที่ 2.7 เป็นกระบวนการกระตุ้นสารเลเซอร์มีเดียม และได้แสงเลเซอร์ออกมา ซึ่งเป็นลักษณะของสารเลเซอร์มีเดียม 4 ระดับพลังงาน

จากทั้ง 2 แบบนั้นสรุปได้ว่าแบบ Four-level pumping ดีกว่าเพราะชื้ออายุการใช้งานแก่อุปกรณ์ภายใน ซึ่งทั้ง 2 แบบนั้นเป็นแบบ nonradiative transition คือ ไม่มีการปลดปล่อยโฟตอนออกมา

2.9.3 Feedback Optical Resonator

ในหัวข้อนี้เราต้องคำนึงถึงออปติคัลเรโซเนเตอร์(Optical Resonator) โดยที่เมื่อมีการขยายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแล้วมีกระจก M_1 และ M_2 ป้อนกลับหรือสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้กระทบไปมาหลายรอบ ทำให้ความเข้มแสงของเลเซอร์ขยายมากขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยที่กระจก M_1 และ M_2 มีค่าการสะท้อนกลับ(Reflectivity) และที่กระจก M_1 และ M_2 เคลือบด้วยสารไดอิเล็กตริก(Dielectric) ซึ่งกระจกทั้ง 2 อันนั้นเป็นกระจกโค้งเว้า หรือกระจกระนาบขั้วเรียบ และที่ M_1 มีค่าการสะท้อน 100 % และกระจก M_2 มีค่าการสะท้อน 70 – 98 %

2.10. Laser Mode

จากระบบเลเซอร์นั้นเมื่อออปติคัลเรโซเนเตอร์(Optical Resonator)ที่ทำหน้าที่ขยายความเข้มของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยที่ออปติคัลเรโซเนเตอร์(Optical resonator)นั้นเป็นแบบ ฟาบริเพอร์โรอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์(Fabry-perol inter Ferometer) โดยแสงที่สะท้อนไปมานั้นมีหลายความถี่ที่เหมาะสมกับสภาพเรโซแนนท์ของ ฟาบริเพอร์โรอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์(Fabry-perol inter Ferometer) ซึ่งในกรณีนี้แสงเลเซอร์ประกอบด้วยโหมดต่างๆ 2 แบบคือ แอ็กเซียล โหมด(Axial Modes) และ ทรานเวอร์ซอล โหมด(Transversal Mode)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.1 แอ็กเซียล โหมด(Axial Modes)

ในระบบของเลเซอร์นั้นเมื่อออปติคัลเรโซเนเตอร์(optical rasonator) ซึ่งมีหน้าที่ขยายความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งในสภาพเรโซเนนทนั้นประกอบด้วยค่า Q ถ้าค่า Q มีค่ามากทำให้ระบบนั้นมีประสิทธิภาพสูง ซึ่งค่า Q นี้เรียกว่า Quality Factor ซึ่งเมื่อค่า Q สูงทำให้ค่า $\Delta\nu$ มีค่าน้อยลง และได้ตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$Q = \frac{\nu}{\Delta\nu}$$

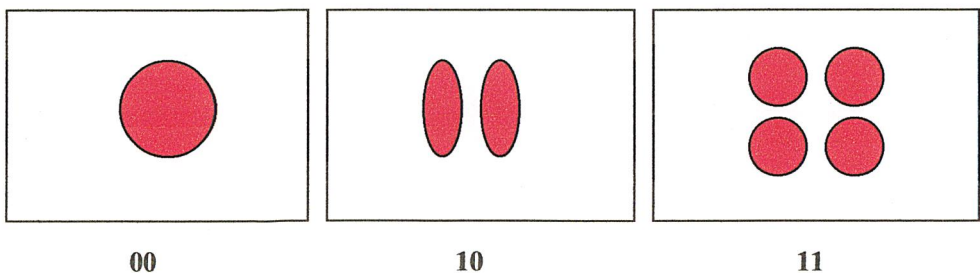
โดยที่ ν เป็นความถี่ของเลเซอร์

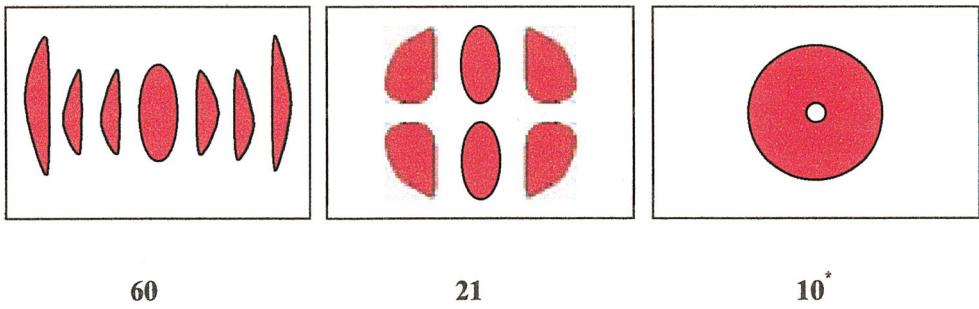
ν เป็นค่าความถี่หลายค่าที่เกิดขึ้นภายในเรโซเนเตอร์

และเมื่อมีการเกิดเรโซเนนทออกมาหลายๆค่า ทำให้เกิดลักษณะของการกระจายของความหนาแน่นของพลังงานภายในเรโซเนเตอร์ และลักษณะของการกระจายความหนาแน่นของพลังงานเราเรียกว่า ลองจิจูดินัล โหมด(Longitudinal Modes) หรือ แอ็กเซียล โหมด(Axial Modes)

2.10.2 ลองจิจูดินัล-ทรานเวอร์สโหมด(Longitudinal-Tranverse Modes)

ในระบบของเลเซอร์มีกระจก M_1 และ M_2 ซึ่งอยู่ห่างกันเป็นระยะ L ดังนั้นเรโซเนเตอร์จึงมี 3 มิติ จึงทำให้มีทรานเวอร์ส โหมด(Tranverse Modes) เกิดขึ้น และมีความถี่เรโซเนนท ν มาเกี่ยวข้องด้วย ทำให้ผลรวมในการเกิดเรโซเนนทของออปติคัลเรโซเนเตอร์(optical rasonator) ประกอบด้วย แอ็กเซียล โหมด(Axial Modes) และทรานเวอร์ส โหมด(Tranverse Modes) ซึ่งผลที่ได้มีค่า q ตัวเดียวไม่เพียงพอเพราะเป็น 3 มิติดังนั้นค่าโหมดที่ออกมาจึงเขียนได้เป็น TEM_{mnq} เรียกว่า ทรานเวอร์ส อิเล็กโตร-แมกเนตริก(Transverse Electro-Magnetic)ซึ่งค่าโหมดนั้นมีลักษณะแตกต่างกันดังรูปนี้



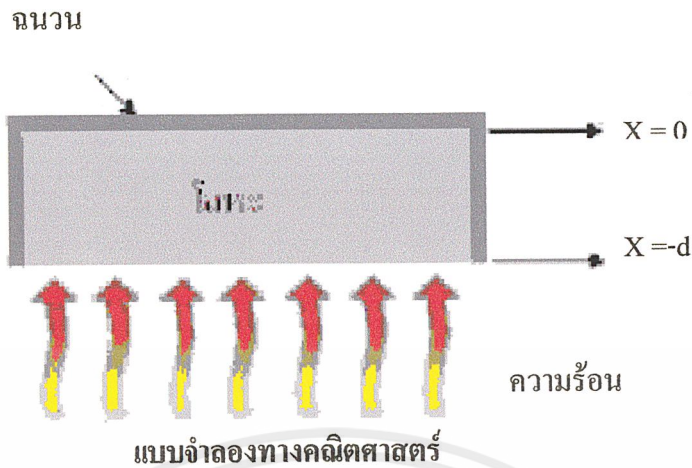


รูปที่ 2.9 เป็นลักษณะของโหมคต่างๆของเลขเซอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3



รูปที่ 3.1 แสดงการให้ความร้อนแก่โลหะที่ตำแหน่ง $x = 0$

จากรูปที่ 3.1 เป็นการให้ความร้อนแก่โลหะความหนา d มิลลิเมตร โดยมีจนวนหุ้มทุกด้าน ยกเว้นด้านที่ให้ความร้อนซึ่งเปรียบเสมือนให้ความร้อนเพียง 1 มิติและสามารถทำความเข้าใจได้โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากสมการความร้อนใน 1 มิติดังนี้

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) \quad (3.1)$$

สมการที่(3.1) เป็นสมการความร้อนใน 1 มิติเมื่อ α คือค่าการกระจายความร้อนที่สถานะเริ่มต้นอุณหภูมิของโลหะเท่ากับอุณหภูมิห้องหรือ $T_{(x,0)} = T_0$ และมีเงื่อนไขของขอบเขตดังนี้

บริเวณผิวหน้าของวัสดุซึ่งเป็นบริเวณที่สัมผัสกับความร้อนโดยตรงหรือที่ $x = 0$ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 มีสถานะเป็น

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0 \quad (3.2)$$

2. ที่ตำแหน่ง $x = -d$ ดังรูปที่ 3.1 เป็นบริเวณที่ถูกปิดกั้นด้วยจนวนเพื่อไม่ให้ความร้อนถูกถ่ายเทออกสู่สิ่งแวดล้อม มีสถานะเป็น

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=-d} = IA \quad (3.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (3.2) และ (3.3) เป็นสภาวะที่ตำแหน่ง $x = 0$ และ $x = -d$ ตามลำดับ

โดยที่ I คือ ค่าความเข้มของความร้อน (W/m^2)

A คือ ค่าสภาพการดูดกลืนความร้อนของวัสดุ

d คือ ความหนาของวัสดุ (m)

x คือ ตำแหน่งใดๆ ในวัสดุ (m)

k คือ ค่าการนำความร้อนของวัสดุใดๆ (W/mK)

จากสมการที่(3.1)สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งและเวลาได้โดยใช้วิธีการแก้สมการทางคณิตศาสตร์ได้หลายวิธีแต่ในที่นี้แสดงวิธีการแก้โดยวิธีการปริวรรตลาปลาซโดยที่

$$L\{f(t)\} = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt \quad \text{_____ (3.4)}$$

ให้

$$\bar{T}_s(x) = \int_0^{\infty} T_{(x,t)} e^{-st} dt \quad \text{_____ (3.5)}$$

นำสมการที่ (3.5) ไปแทนลงในสมการที่ (3.1) ได้

$$\int_0^{\infty} \frac{\partial T}{\partial t} e^{-st} dt = \int_0^{\infty} \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} e^{-st} dt \quad \text{_____ (3.6)}$$

เมื่อทำการอินทิกรัลทั้ง 2 ข้างของสมการ โดยวิธีการตามส่วน ได้ดังสมการ

$$T_{(x,t)} e^{-st} \Big|_0^{\infty} - \int_0^{\infty} T_{(x,t)} (-s) e^{-st} dt = \alpha \frac{\partial^2}{\partial x^2} \int_0^{\infty} T e^{-st} dt \quad \text{_____ (3.7)}$$

$$- T_{(x,0)} + s \int_0^{\infty} T_{(x,t)} e^{-st} dt = \alpha \frac{\partial^2}{\partial x^2} \int_0^{\infty} T e^{-st} dt \quad \text{_____ (3.8)}$$

จากสมการ (3.5) ทำการลดรูปได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$-T_{(x,0)} + s\bar{T}_{s(x)} = \alpha \frac{d^2}{dx^2} \bar{T}_{s(x)} \quad \text{_____ (3.9)}$$

สมการ (3.9) อยู่ในรูปของสมการไม่เป็นเอกพันธ์เมื่อนำมาแก้สมการอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$\bar{T}_s = \frac{T_0}{s} + C_1 e^{-x\sqrt{s/\alpha}} + C_2 e^{x\sqrt{s/\alpha}} \quad \text{_____ (3.10)}$$

จากสมการ (3.2) และ (3.3) ซึ่งแสดงเงื่อนไขของขอบเขต เมื่อนำมาทำการปริวรรตลาปลาซได้ดังสมการ (3.11) และ (3.12) ตามลำดับ ดังนี้

$$-k \left. \frac{\partial \bar{T}_{s(x)}}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad \text{_____ (3.11)}$$

$$-k \left. \frac{\partial \bar{T}_{s(x)}}{\partial x} \right|_{x=-d} = \frac{IA}{s} \quad \text{_____ (3.12)}$$

นำสมการที่ (3.10) มาแทนลงในสมการที่ (3.11) ที่เงื่อนไข $x = 0$ ได้ดังนี้

$$-k \left. \frac{\partial \bar{T}_{s(x)}}{\partial x} \right|_{x=0} = kC_1 \sqrt{s/\alpha} - kC_2 \sqrt{s/\alpha} = 0 \quad \text{_____ (3.13)}$$

นำสมการ (3.10) แทนในสมการ(3.12)

$$-k \left. \frac{\partial \bar{T}_{s(x)}}{\partial x} \right|_{x=-d} = kC_1 \sqrt{s/\alpha} e^{d\sqrt{s/\alpha}} - kC_2 \sqrt{s/\alpha} e^{-d\sqrt{s/\alpha}} = \frac{IA}{s} \quad \text{_____ (3.14)}$$

จากสมการ(3.13) และ (3.14) หาค่า C_1 และ C_2 ได้ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_1 = C_2 = \frac{IA\sqrt{\alpha}}{ks\sqrt{s}(e^{d\sqrt{s/\alpha}} - e^{-d\sqrt{s/\alpha}})} = \frac{IA\sqrt{\alpha}}{2ks\sqrt{s} \sinh(d\sqrt{s/\alpha})} \quad (3.15)$$

นำสมการ(3.15)ไปแทนลงในสมการที่ (3.10) ได้

$$\bar{T}_s = \frac{T_0}{s} + \frac{IA\sqrt{\alpha}}{2ks\sqrt{s} \sinh(d\sqrt{s/\alpha})} \left[e^{-x\sqrt{s/\alpha}} + e^{x\sqrt{s/\alpha}} \right] \quad (3.16)$$

หรือ

$$\bar{T}_s = \frac{T_0}{s} + \frac{IA\sqrt{\alpha} \operatorname{cosech}(d\sqrt{s/\alpha})}{2ks\sqrt{s}} e^{-x\sqrt{s/\alpha}} + \frac{IA\sqrt{\alpha} \operatorname{cosech}(d\sqrt{s/\alpha})}{2ks\sqrt{s}} e^{x\sqrt{s/\alpha}} \quad (3.17)$$

จากสมการ(3.17)ไม่นำเทอมที่3มาคิดเพราะพจน์ $e^{x\sqrt{s/\alpha}}$ มีค่าเข้าสู่อินฟินิตี้ ดังนั้น

$$\bar{T}_s = \frac{T_0}{s} + \frac{IA\sqrt{\alpha} \operatorname{cosech}(d\sqrt{s/\alpha})}{2ks\sqrt{s}} e^{-x\sqrt{s/\alpha}} \quad (3.18)$$

จากสมการ(3.18)สามารถกระจายเทอม $\operatorname{Cosech}(x)$ โดยใช้วิธี Power series ได้ดังนี้

$$\operatorname{cosech}(y) = \frac{1}{y} - \frac{y}{6} + \frac{7y^3}{360} - \frac{31y^5}{15120} + \dots \quad (3.19)$$

โดย $y = d\sqrt{s/\alpha}$ และคิดการกระจายจนถึงพจน์ที่ 3 เพราะพจน์ต่อไปค่าเข้าสู่อินฟินิตี้ดังนี้

$$\bar{T}_s = \frac{T_0}{s} + \frac{IA\sqrt{\alpha} e^{-x\sqrt{s/\alpha}}}{2ks\sqrt{s}} \left[\frac{\sqrt{\alpha}}{d\sqrt{s}} + \frac{d\sqrt{s}}{6\sqrt{\alpha}} + \frac{7d^3s\sqrt{s}}{360\alpha\sqrt{\alpha}} \right] \quad (3.20)$$

นำสมการที่ (3.20) มาทำการปริวรรตลาปลาซย้อนกลับได้สมการที่ขึ้นกับตำแหน่ง (x) และ เวลา (t) ดังนี้

$$T_{(x,t)} = (T_0) + \frac{7Ald^3 xe^{-\frac{x^2}{4t\alpha}}}{1440 k\sqrt{\pi}\sqrt{t^3\alpha^3}} + \frac{Aldx\alpha \left[-1 + \operatorname{Erf}\left(\sqrt{\frac{x^2}{\alpha}}/2\sqrt{t}\right) \right]}{12k\alpha\sqrt{x^2}}$$

$$+ \frac{IAx \left[2\sqrt{\pi} - \frac{4e^{-\frac{x^2}{4t\alpha}}}{\sqrt{\frac{x^2}{t\alpha}}} + \frac{4t\alpha\sqrt{\pi}}{x^2} - 2\sqrt{\pi}\operatorname{Erf}\left[\frac{1}{2}\sqrt{\frac{x^2}{t\alpha}}\right] - \frac{\left\{ 4t\alpha\sqrt{\pi}\operatorname{Erf}\left[1/2\sqrt{t}\sqrt{\frac{\alpha}{x^2}}\right]\right\}}{x^2} \right]}{4dk\sqrt{\frac{\pi}{x^2}}}$$

(3.21)

- เมื่อ
- A คือ ค่าสภาพการดูดกลืนความร้อนของวัสดุ
 - I คือ ค่าความเข้มของความร้อน ($W/m^2 K$)
 - T_0 คือ อุณหภูมิเริ่มต้น (K)
 - t คือ เวลาใดๆของการให้ความร้อนแก่วัสดุ (s)
 - x คือ ตำแหน่งใดๆของวัสดุ (m)
 - d คือ ความหนาของวัสดุ (m)
 - k คือ ค่าการนำความร้อนของวัสดุใดๆ ($W/m K$)
 - α คือ ค่าการกระจายความร้อนของวัสดุใดๆ (W/m^2)

เมื่อได้ค่าที่แทนในสมการแล้วนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองซึ่งผลได้กล่าว
ในบทต่อไป

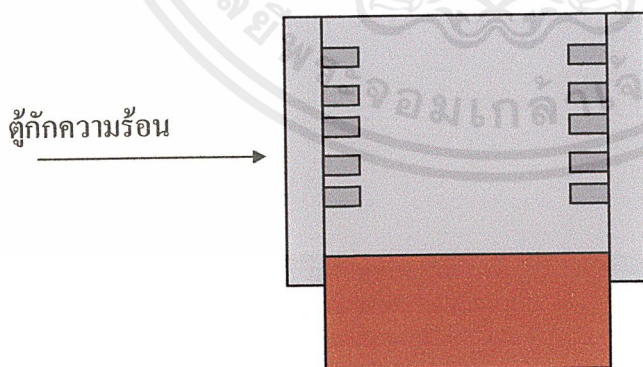
บทที่ 4 การทดลอง

4.1 อุปกรณ์การทดลอง

1. ตู้กักความร้อน	1	ตู้
2. มิเตอร์วัดอุณหภูมิ	2	เครื่อง
3. เทอร์โมคัปเปิล	2	อัน
4. นาฬิกาจับเวลา	1	เรือน
5. เต้าไฟฟ้า 1500 วัตต์	1	เต้า
6. แผ่นรองวัสดุ	1	แผ่น
7. กระดาษฟลอย	1	แผ่น
8. จนวนใยแก้วกันความร้อน	1	แผ่น
9. แผ่นอลูมิเนียม	5	แผ่น
10. แผ่นสังกะสี	5	แผ่น
11. แผ่นเหล็ก	5	แผ่น
12. แผ่นทองเหลือง	5	แผ่น

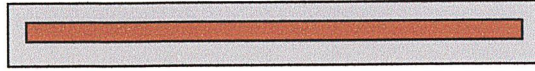
4.2 วิธีทดลอง

- นำตู้กักความร้อนมาวางคร่อมเต้าไฟฟ้าดังรูป

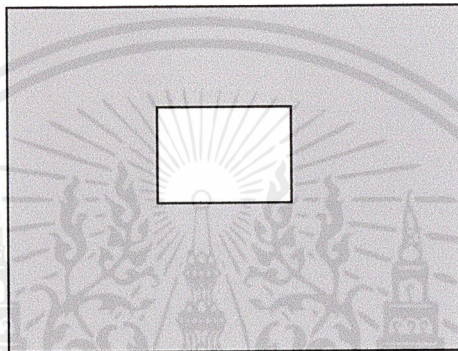


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- นำแผ่นรองวัสดุมาห่อด้วยกระดาษฟลอยด์จากรูป



โดยที่ตรงกลางแผ่นรองวัสดุมีรูขนาด 5×5 เซนติเมตร ดังรูป



- นำแผ่นรองวัสดุที่ห่อกระดาษฟลอยด์ไปสอดในชั้นของตู้กักความร้อน
- นำแผ่นสังกะสีมาวางที่ด้านบนแผ่นรองวัสดุ
- นำใยแก้วกันความร้อนมาเจาะรูเพื่อสอดเทอร์โมคัปเปิลดังรูป



- นำเทอร์โมคัปเปิลมาสอดด้านล่างเพื่อวัดระดับอุณหภูมิที่ผิวด้านล่าง
- จากนั้นนำใยแก้วกันความร้อนมากดทับลงไปบนแผ่นวัสดุโดยที่มีเทอร์โมคัปเปิลเปิดตรวจวัด
- จากนั้นเปิดเตาไฟฟ้า และวัดระดับอุณหภูมิพร้อมกับจับเวลา และบันทึกค่าทุกๆ 10 วินาทีเป็นเวลา 150 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. ทำการทดลองซ้ำข้อ 6 - 8 โดยเพิ่มแผ่นวัสดุเป็น 2 ถึง 5 แผ่นตามลำดับ
10. ทำการทดลองซ้ำข้อ 4 - 9 โดยเปลี่ยนแผ่นวัสดุเป็นอลูมิเนียม, เหล็ก และทองเหลืองตามลำดับ
11. นำค่าที่ได้มาคำนวณเทียบทฤษฎี และวาดกราฟ
12. สรุปผลการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการทดลอง

ในส่วนของการทดลองนั้นใช้โลหะ ต่างๆกัน 3 ชนิดคือ อลูมิเนียม, ทองเหลือง และ เหล็ก โดยค่าความเข้มความร้อนจากเตาไฟฟ้าที่ใช้ $(i) = 74 \times 10^4 \text{ W / m}^2$ และที่อุณหภูมิห้องเดียวกันคือที่ 29°C ซึ่งโลหะแต่ละชนิดมีคุณสมบัติเฉพาะที่แตกต่างกันดังนี้

อลูมิเนียม

$$\text{ค่าการดูดความร้อน}(A) = 0.004$$

$$\text{ค่าการกระจายความร้อน}(\alpha) = 8.42 \times 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$\text{ค่าการนำความร้อน}(K) = 240 \text{ W / m K}$$

ทองเหลือง

$$\text{ค่าการดูดความร้อน}(A) = 0.004$$

$$\text{ค่าการกระจายความร้อน}(\alpha) = 3.42 \times 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$\text{ค่าการนำความร้อน}(K) = 111 \text{ W / m K}$$

เหล็ก

$$\text{ค่าการดูดความร้อน}(A) = 0.004$$

$$\text{ค่าการกระจายความร้อน}(\alpha) = 1.67 \times 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$\text{ค่าการนำความร้อน}(K) = 51 \text{ W / m K}$$

จากบทที่ 3 เป็นการกล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการกระจายความร้อนใน 1 มิติ และแก้สมการทางคณิตศาสตร์ โดยวิธีการปริวรรตลาปลาซจนได้ผลสุดท้ายซึ่งเป็นสมการการกระจายความร้อนที่ขึ้นอยู่กับตำแหน่ง(x) และ เวลา(t) จากคุณสมบัติเฉพาะของวัสดุแต่ละชนิดซึ่งได้แก่ค่าการกระจายความร้อน(α) และค่าการนำความร้อน(k)และค่าคงที่ต่างๆเช่นค่าอุณหภูมิ,เวลา, ความหนาของวัสดุเป็นต้น เมื่อนำค่าต่างๆแทนในสมการ(3.21)และนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองดังตาราง

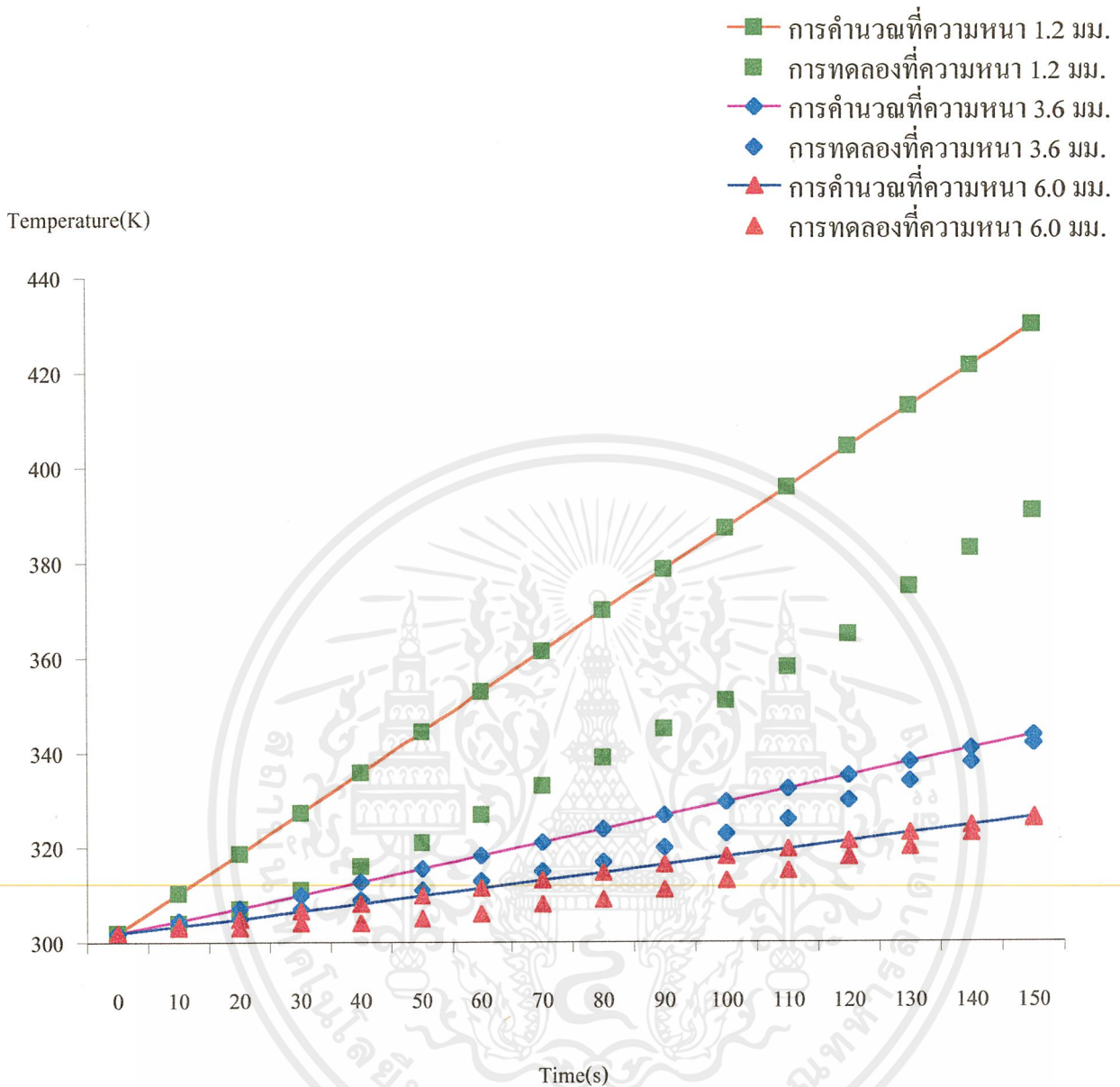
ตารางที่ 5.1 แสดงค่าเปรียบเทียบระหว่างการคำนวณกับการทดลองของอลูมิเนียม ซึ่งมีค่า $\alpha = 8.42 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, $k = 240 \text{ W/mK}$ ณ เวลาและความหนาต่างๆ

เวลา(วินาที)	ความหนา 1.2 ม.ม.		ความหนา 2.4 ม.ม.		ความหนา 3.6 ม.ม.		ความหนา 4.8 ม.ม.		ความหนา 6.0 ม.ม.	
	คำนวณ	ทดลอง	คำนวณ	ทดลอง	คำนวณ	ทดลอง	คำนวณ	ทดลอง	คำนวณ	ทดลอง
0	302.0	302.0	302.0	302.0	302.0	302.0	302.0	302.0	302.0	302.0
10	310.3	304.0	306.0	303.0	304.5	304.0	303.8	303.0	303.4	303.0
20	318.7	307.0	310.1	305.0	307.2	305.0	305.8	303.0	304.9	303.0
30	327.3	311.0	314.3	308.0	310.0	307.0	307.8	304.0	306.5	304.0
40	335.8	316.0	318.5	310.0	312.7	309.0	309.9	305.0	308.1	304.0
50	344.4	321.0	322.7	314.0	315.5	311.0	311.9	306.0	309.8	305.0
60	352.9	327.0	327.0	317.0	318.3	313.0	314.0	307.0	311.4	306.0
70	361.5	333.0	331.2	322.0	321.1	315.0	316.1	309.0	313.1	308.0
80	370.1	339.0	335.5	326.0	323.9	317.0	318.2	311.0	314.7	309.0
90	378.7	345.0	339.7	331.0	326.8	320.0	320.2	314.0	316.4	311.0
100	387.3	351.0	344.0	335.0	329.6	323.0	322.4	316.0	318.1	313.0
110	395.9	358.0	348.3	340.0	332.4	326.0	324.5	319.0	319.7	315.0
120	404.5	365.0	352.5	345.0	335.2	330.0	326.6	321.0	321.4	318.0
130	413.0	375.0	356.8	350.0	338.1	334.0	328.7	324.0	323.1	320.0
140	421.6	383.0	361.1	355.0	340.9	338.0	330.8	327.0	324.7	323.0
150	430.2	391.0	365.4	360.0	343.7	342.0	332.9	330.0	326.4	326.0

จากตารางที่ 1 เมื่อนำค่าที่ได้จากการคำนวณและการทดลองมาเปรียบเทียบกันในรูปแบบของกราฟ ดังรูป

ที่ 5.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา(วินาที)กับอุณหภูมิ(K) โดยใช้ข้อมูลจากตารางที่ 5.1 และแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแต่ละค่าความหนาของอลูมิเนียมที่เวลาในการให้ความร้อนแก่อลูมิเนียมต่างๆกัน โดยให้ค่าการดูดความร้อนของโลหะเป็น 0.004

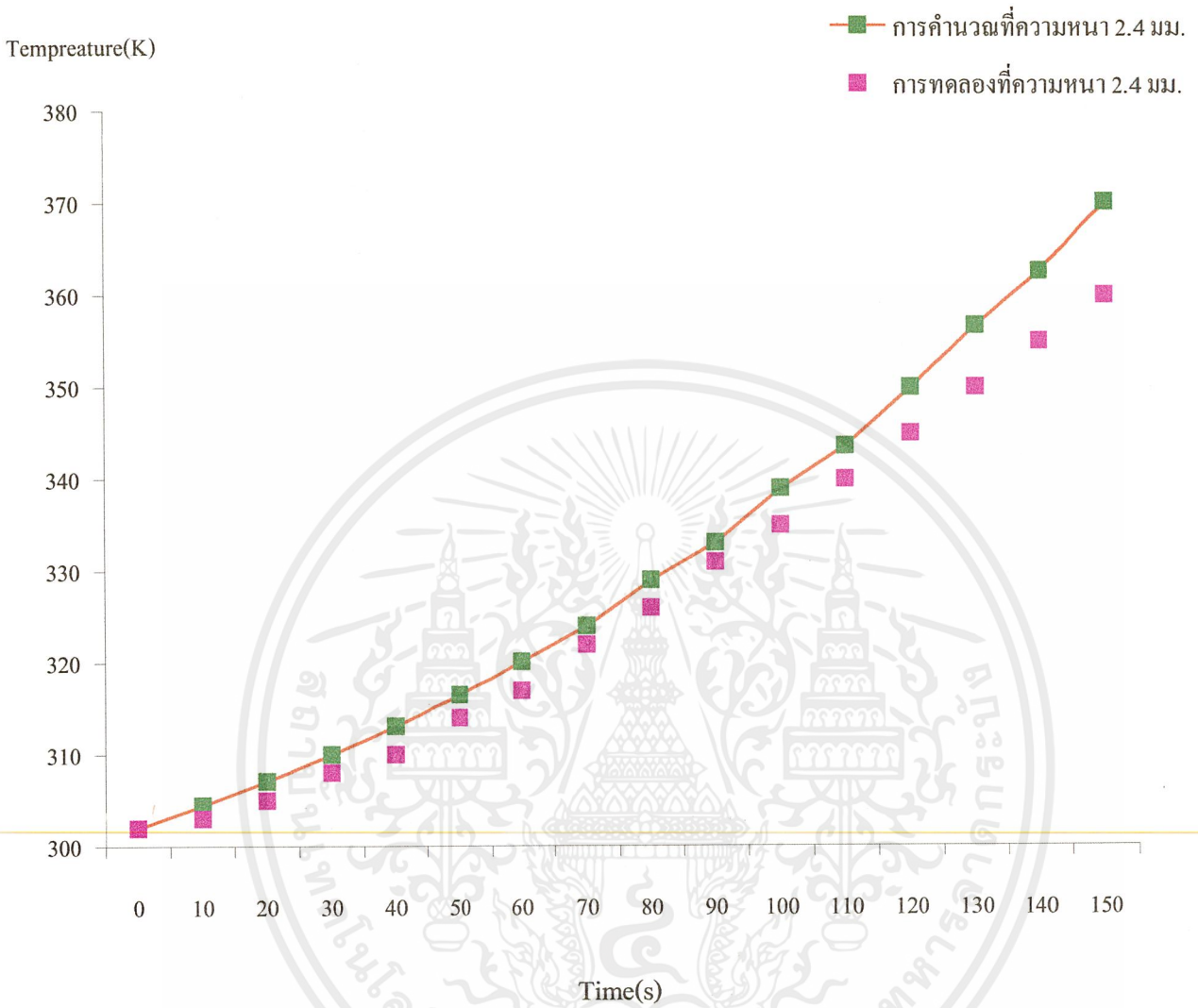
จากรูปที่ 5.1 เห็นได้ว่าทุกๆค่าความหนาของโลหะมีค่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นเมื่อเวลาในการให้ความร้อนแก่โลหะเปลี่ยนแปลงมากขึ้นซึ่งเป็นไปตามค่าที่คำนวณได้คือมีค่าอุณหภูมิมากขึ้นเมื่อเวลามากขึ้นและจากรูปที่ 5.1 เหตุที่ค่าจากการคำนวณเป็นเส้นตรงนั้นเนื่องมาจากค่าคุณสมบัติของโลหะเองนั่นคือ ค่าการดูดความร้อนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิดังสมการ $A = A_0 + A_1T$ แต่จากการคำนวณนั้นใช้ค่าการดูดความร้อนเป็นค่าเฉลี่ยซึ่งค่าที่ใช้คือ 0.004 และเมื่อใช้ค่าการดูดความร้อนเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปได้ค่าดังตารางที่ 5.2

ตาราง 5.2 แสดงค่าเปรียบเทียบระหว่างการคำนวณกับการทดลองของอลูมิเนียม ซึ่งมีค่า $\alpha = 8.42 \times 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}$, $k = 240 \text{ W / m K}$ ณ เวลาและความหนาต่างๆ

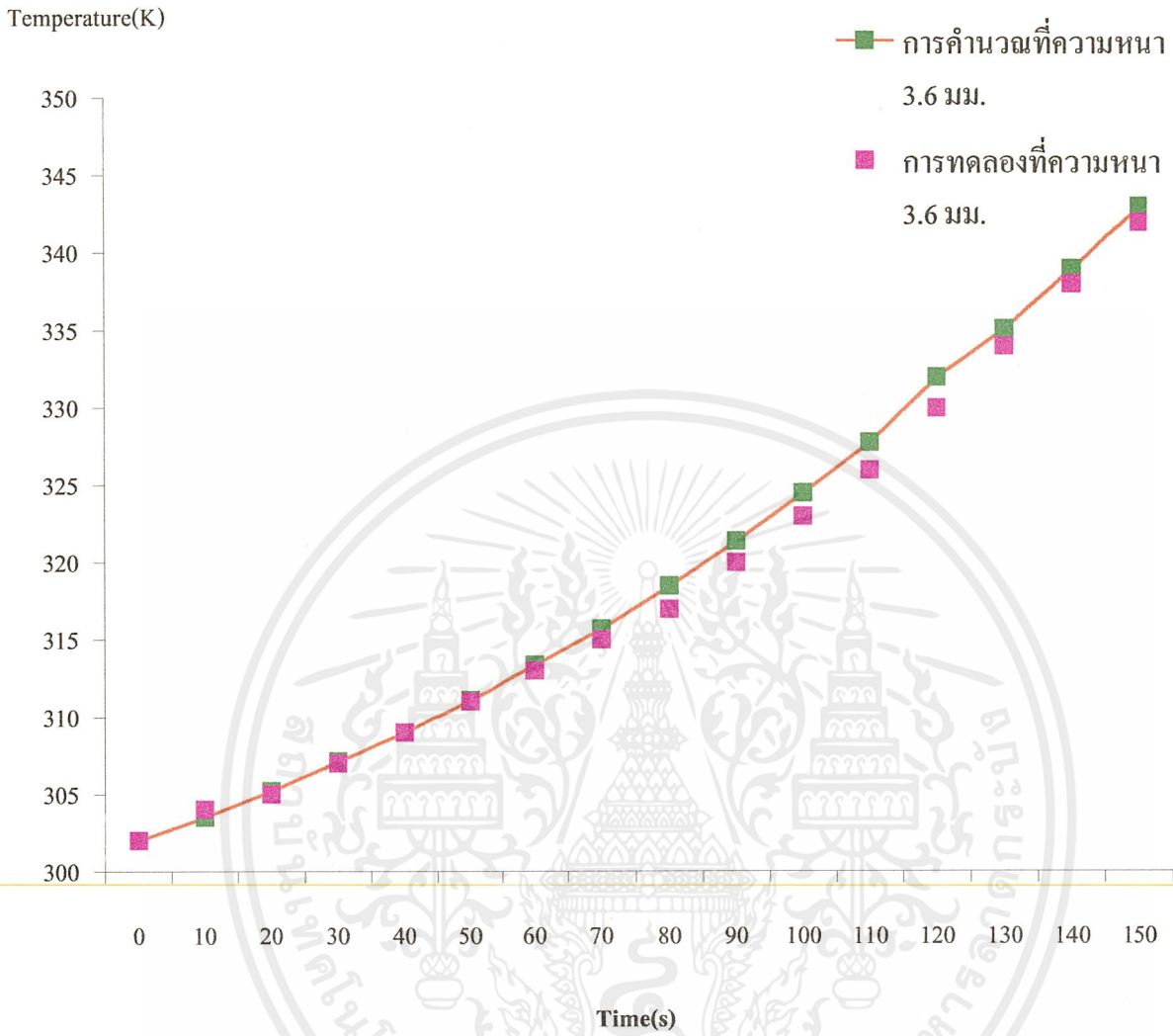
เวลา(วินาที)	ความหนา 1.2 ม.ม.		ความหนา 2.4 ม.ม.		ความหนา 3.6 ม.ม.		ความหนา 4.8 ม.ม.		ความหนา 6.0 ม.ม.	
	คำนวณ	ทดลอง	คำนวณ	ทดลอง	คำนวณ	ทดลอง	คำนวณ	ทดลอง	คำนวณ	ทดลอง
0	302.0	302.0	302.0	302.0	302.0	302.0	302.0	302.0	302.0	302.0
10	307.0	304.0	304.5	303.0	303.5	304.0	303.1	303.0	302.8	303.0
20	312.6	307.0	307.1	305.0	305.2	305.0	304.3	303.0	303.8	303.0
30	318.9	311.0	310.0	308.0	307.1	307.0	305.6	304.0	304.8	304.0
40	326.0	316.0	313.1	310.0	309.0	309.0	306.9	305.0	305.8	304.0
50	333.7	321.0	316.5	314.0	311.1	311.0	308.3	306.0	306.8	305.0
60	342.6	327.0	320.1	318.0	313.4	313.0	309.8	307.0	307.9	306.0
70	352.4	333.0	324.0	322.0	315.7	315.0	311.2	309.0	309.2	308.0
80	362.9	339.0	329.0	326.0	318.5	317.0	312.8	311.0	310.3	309.0
90	374.2	345.0	333.1	331.0	321.4	320.0	314.7	314.0	311.6	311.0
100	386.4	351.0	339.0	335.0	324.5	323.0	316.5	316.0	313.0	313.0
110	400.3	358.0	343.6	340.0	327.8	326.0	318.5	319.0	314.4	315.0
120	414.9	365.0	350.0	345.0	332.0	330.0	320.4	321.0	316.1	318.0
130	433.3	375.0	356.7	350.0	335.1	334.0	322.7	324.0	317.6	320.0
140	451.2	383.0	362.6	355.0	339.0	338.0	325.0	327.0	319.4	323.0
150	470.0	391.0	370.1	360.0	343.0	342.0	327.4	330.0	321.3	326.0

และเมื่อนำค่าที่ได้จากตารางที่ 5.2 มาวิเคราะห์ได้ดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

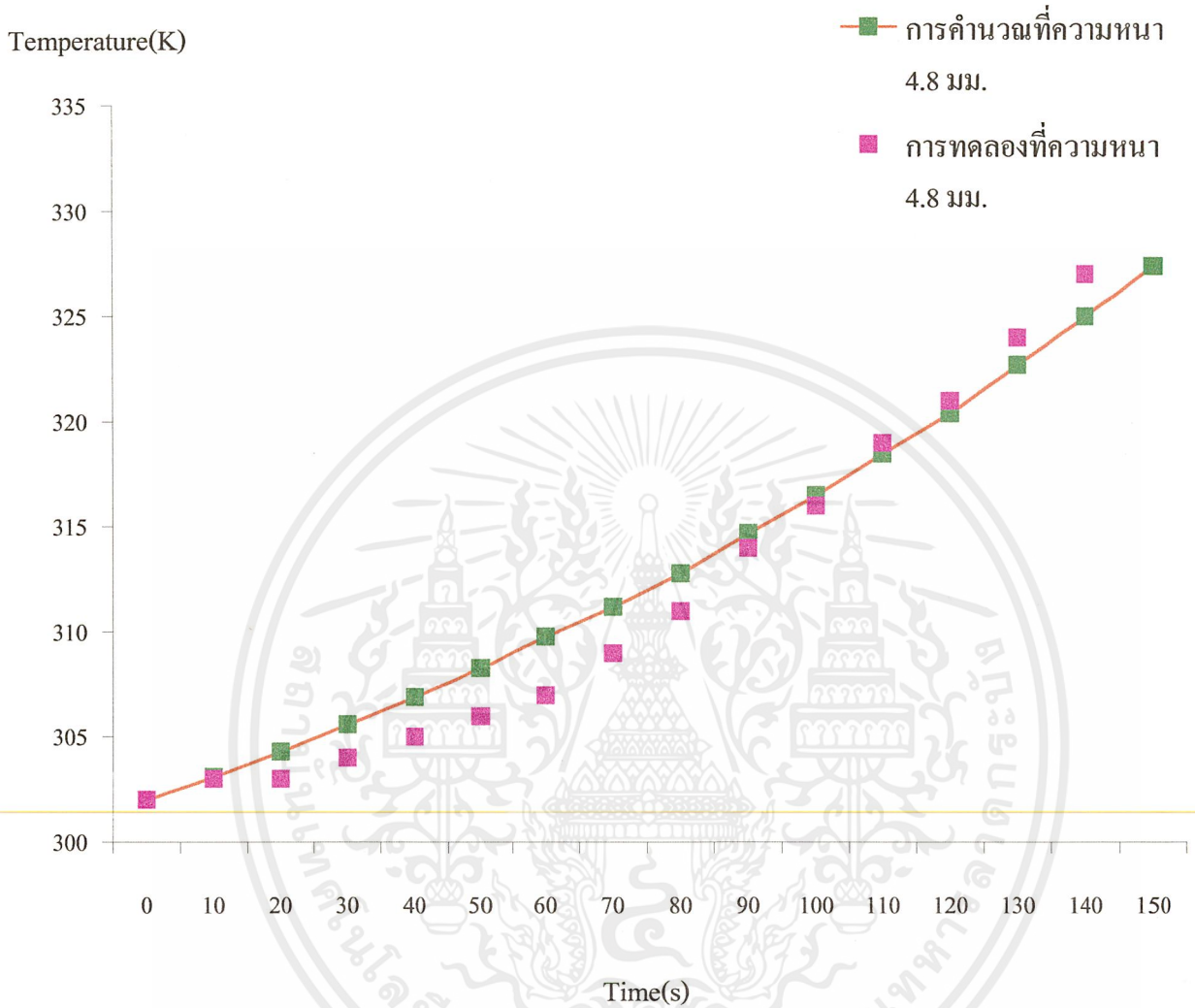


รูปที่ 5.2ก แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา(วินาที)กับอุณหภูมิ(k)ของอลูมิเนียม โดยใช้ค่าจากตารางที่ 5.2 และใช้ค่าการดูดความร้อนเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป ที่ความหนา 2.4 มม.เปรียบเทียบการคำนวณกับการทดลอง



รูปที่ 5.2 ข แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา(วินาที)กับอุณหภูมิ(k)ของ อลูมิเนียม โดยใช้ค่าจากตารางที่ 5.2 และใช้ค่าการดูดความร้อนเปลี่ยนแปลงตาม อุณหภูมิที่เปลี่ยนไป ที่ความหนา 3.6 มม.เปรียบเทียบการคำนวณกับการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2ค แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา(วินาที)กับอุณหภูมิ(k)ของอลูมิเนียม โดยใช้ค่าจากตารางที่ 5.2 และ ใช้ค่าการดูคความร้อนเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป ที่ความหนา 4.8 มม.เปรียบเทียบการคำนวณกับการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 5.2ก, 5.2ข และ 5.2ค เห็นได้ว่าเมื่อใช้ค่าการดูดความร้อนของโลหะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปค่าที่ได้มีค่าเป็นไปตามค่าที่ได้จากการทดลองไปในทิศทางเดียวกันมากขึ้น ซึ่งต่างกับใช้ค่าการดูดความร้อนเป็นค่าเฉลี่ย

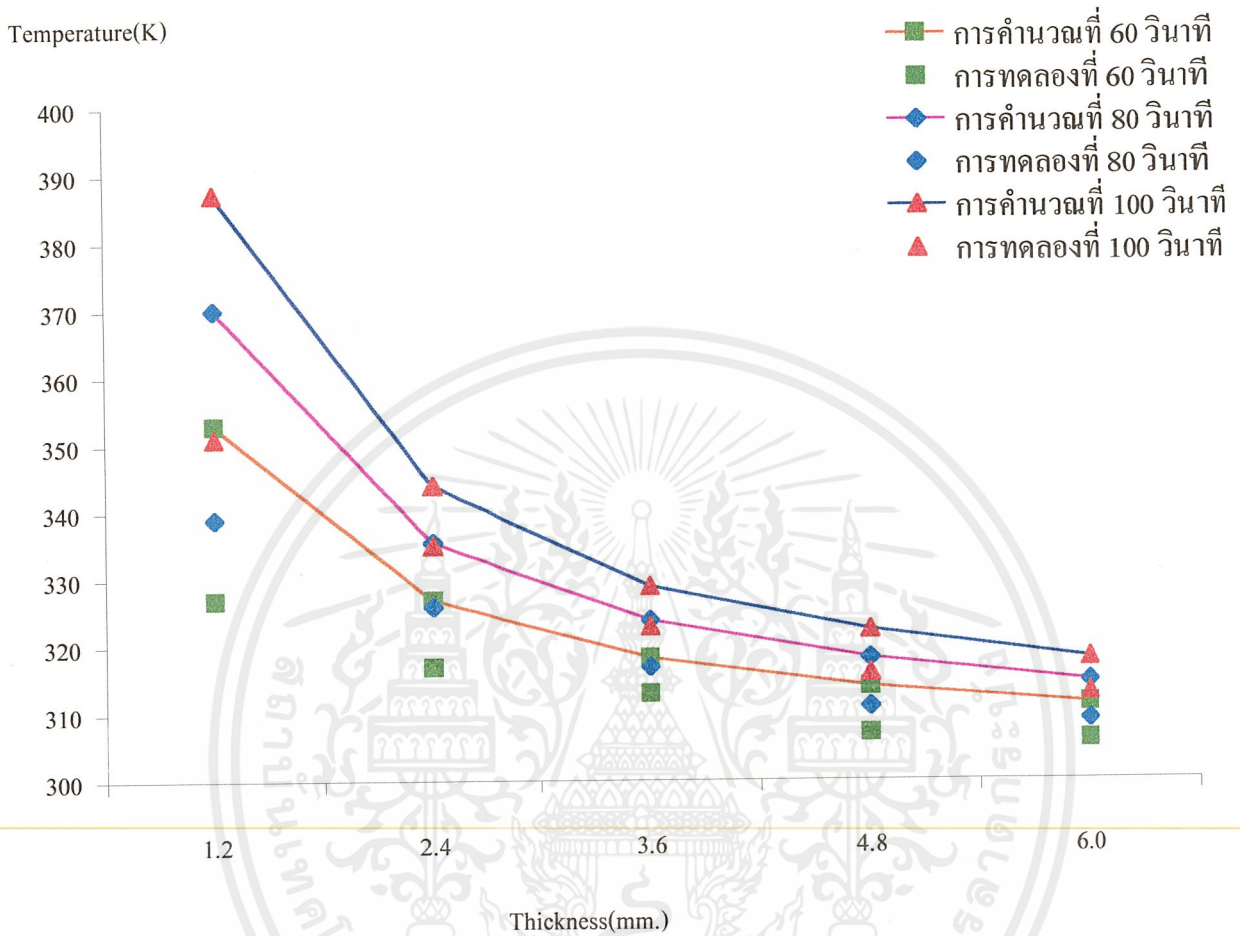
ตารางที่ 5.3 แสดงค่าเปรียบเทียบระหว่างการคำนวณกับการทดลองของอุณหภูมินิยม ซึ่งมีค่า $\alpha = 8.42 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, $k = 240 \text{ W/mK}$ ณ เวลาและความหนาต่างๆ

เวลา(วินาที)	60 วินาที		70 วินาที		80 วินาที		90 วินาที		100 วินาที	
ความหนา(มม.)	คำนวณ	ทดลอง	คำนวณ	ทดลอง	คำนวณ	ทดลอง	คำนวณ	ทดลอง	คำนวณ	ทดลอง
1.2	352.9	327.0	361.5	333.0	370.1	339.0	378.8	345.0	387.3	351.0
2.4	327.0	317.0	331.2	320.0	335.5	326.0	339.7	331.0	344.0	335.0
3.6	318.3	313.0	321.1	315.0	323.9	317.0	326.8	320.0	329.0	323.0
4.8	314.0	307.0	316.1	309.0	318.2	311.0	320.2	314.0	322.4	316.0
6.0	311.4	306.0	313.1	308.0	314.7	309.0	316.4	311.0	318.1	313.0

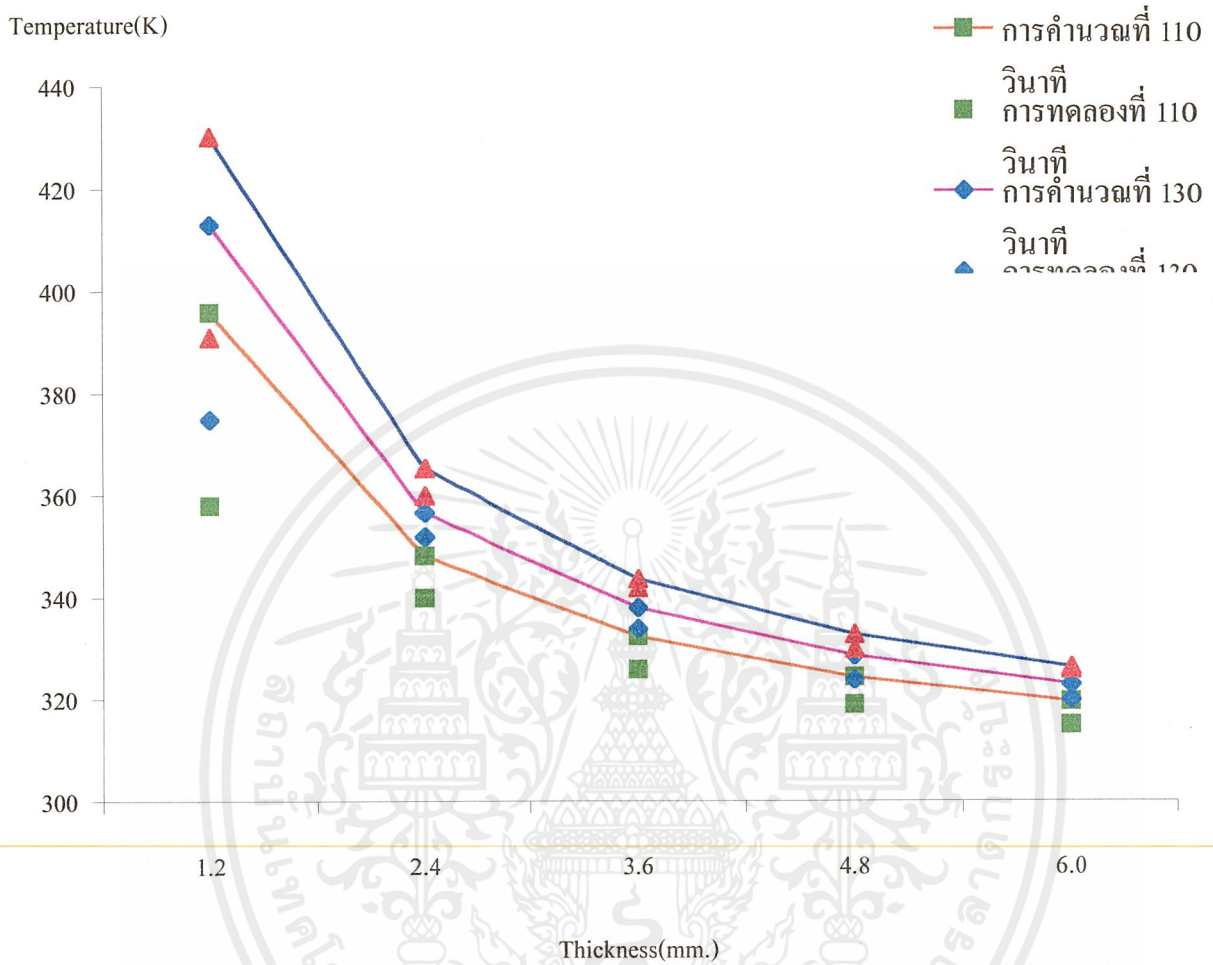
เวลา(วินาที)	110 วินาที		120 วินาที		130 วินาที		140 วินาที		150 วินาที	
ความหนา(มม.)	คำนวณ	ทดลอง	คำนวณ	ทดลอง	คำนวณ	ทดลอง	คำนวณ	ทดลอง	คำนวณ	ทดลอง
1.2	395.9	358.0	404.5	365.0	413.0	375.0	421.6	383.0	430.2	391.0
2.4	348.3	340.0	352.5	345.0	356.8	348.0	361.1	355.0	365.4	360.0
3.6	332.4	326.0	335.2	330.0	338.1	334.0	340.9	338.0	343.7	342.0
4.8	324.5	319.0	326.6	321.0	328.7	324.0	330.8	327.0	332.9	330.0
6.0	319.7	315.0	321.4	318.0	323.1	320.0	324.7	323.0	326.4	326.0

จากตารางที่ 5.3 เป็นการแสดงค่าของอุณหภูมิที่การเปลี่ยนแปลงความหนาของโลหะเมื่อเวลาเป็นค่าหนึ่งๆ เมื่อนำมาวิเคราะห์ที่ได้ดังรูปที่ 5.3ก และ 5.3ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3ก แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนา(ม.ม.)ของวัสดุกับอุณหภูมิ(k) ของอลูมิเนียมที่เวลาน้อยๆเปรียบเทียบระหว่างการคำนวณกับการทดลองซึ่งใช้ค่าจากตารางที่ 5.3



รูปที่ 5.3 ข แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนา(ม.ม.)ของวัสดุกับอุณหภูมิ(k) ของอลูมิเนียมที่เวลามากๆ โดยเปรียบเทียบระหว่างการคำนวณกับการทดลองซึ่งใช้ค่าจากตารางที่ 5.3

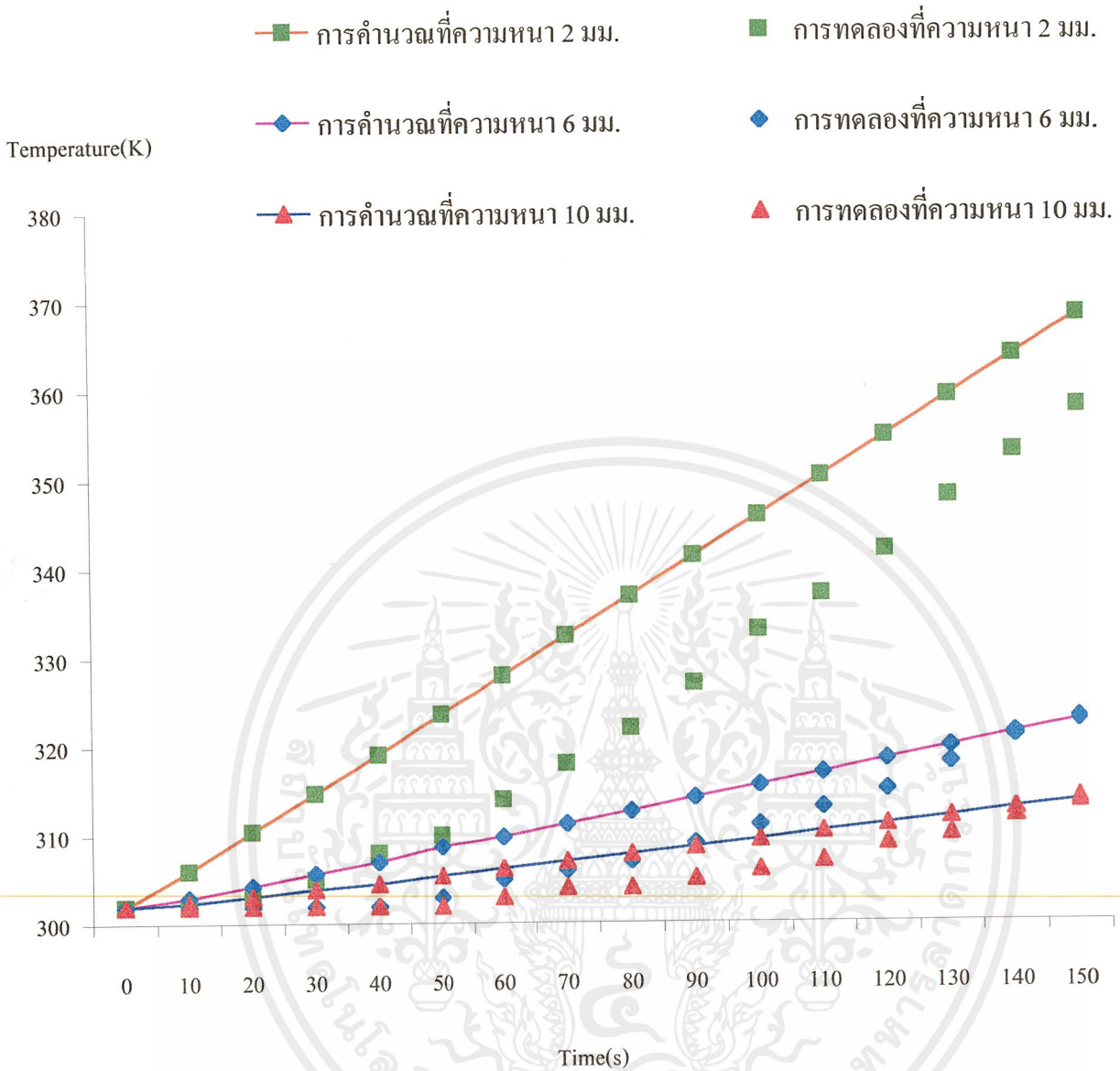
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.3ก, 5.3ข และ 5.3ค เป็นการแสดงค่าของอุณหภูมิที่ค่าความหนาต่างๆกัน โดยใช้เวลาในการให้ความร้อนแก่โลหะเป็นค่าคงที่ เห็นได้ว่า ณ เวลาหนึ่งๆเมื่อค่าความหนาของโลหะมีค่าความหนามากอุณหภูมิที่ผิวหน้าของโลหะมีอุณหภูมिन้อยกว่าที่ผิวหน้าของโลหะที่มีความหนาน้อยกว่า จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ในส่วนของโลหะอีก 2 ชนิดผลที่ได้อยู่ในรูปแบบเดียวกันดังนี้

ตารางที่ 5.4 ทองเหลือง

เวลา(วินาที)	ความหนา 2 ม.ม.		ความหนา 4 ม.ม.		ความหนา 6 ม.ม.		ความหนา 8 ม.ม.		ความหนา 10 ม.ม.	
	คำนวณ	การทดลอง	คำนวณ	การทดลอง	คำนวณ	การทดลอง	คำนวณ	การทดลอง	คำนวณ	การทดลอง
0	302.0	302.0	302.0	302.0	302.0	302.0	302.0	302.0	302.0	302.0
10	306.0	302.0	303.8	302.0	303.0	302.0	302.7	302.0	302.4	302.0
20	310.4	303.0	305.8	302.0	304.3	302.0	303.6	302.0	303.1	302.0
30	314.7	305.0	307.9	303.0	305.7	302.0	304.5	302.0	303.9	302.0
40	319.1	308.0	310.0	304.0	307.0	302.0	305.5	302.0	304.5	302.0
50	323.6	310.0	312.2	305.0	308.7	303.0	306.5	303.0	305.4	302.0
60	328.0	314.0	314.4	307.0	309.8	305.0	307.5	304.0	306.2	303.0
70	332.5	318.0	316.5	309.0	311.2	306.0	308.6	305.0	307.0	304.0
80	336.9	322.0	318.7	311.0	312.6	307.0	309.6	306.0	307.8	304.0
90	341.4	327.0	320.9	314.0	314.1	309.0	310.7	308.0	308.6	305.0
100	345.9	333.0	323.1	316.0	315.5	311.0	311.7	310.0	309.4	306.0
110	350.3	337.0	325.3	319.0	316.9	313.0	312.8	311.0	310.3	307.0
120	354.8	342.0	327.5	323.0	318.4	315.0	313.8	313.0	311.1	309.0
130	359.3	348.0	329.7	326.0	319.8	318.0	314.9	315.0	311.9	310.0
140	363.8	353.0	331.9	330.0	321.3	321.0	315.9	317.0	312.8	312.0
150	368.3	358.0	334.1	334.0	322.7	323.0	317.0	319.0	313.6	314.0

จากตารางแสดงค่าของอุณหภูมิที่เวลาในการให้ความร้อนแก่โลหะต่างๆกัน โดยใช้ความหนาของโลหะเป็นค่าๆหนึ่งซึ่งวิเคราะห์ได้ดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา(วินาที)กับอุณหภูมิ(K)โดยใช้ข้อมูลจากตารางที่ 5.4 ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแต่ละค่าความหนาของทองเหลืองที่เวลาในการให้ความร้อนแก่ทองเหลืองๆกัน โดยให้ค่าการดูดความร้อนของโลหะเป็น 0.0025

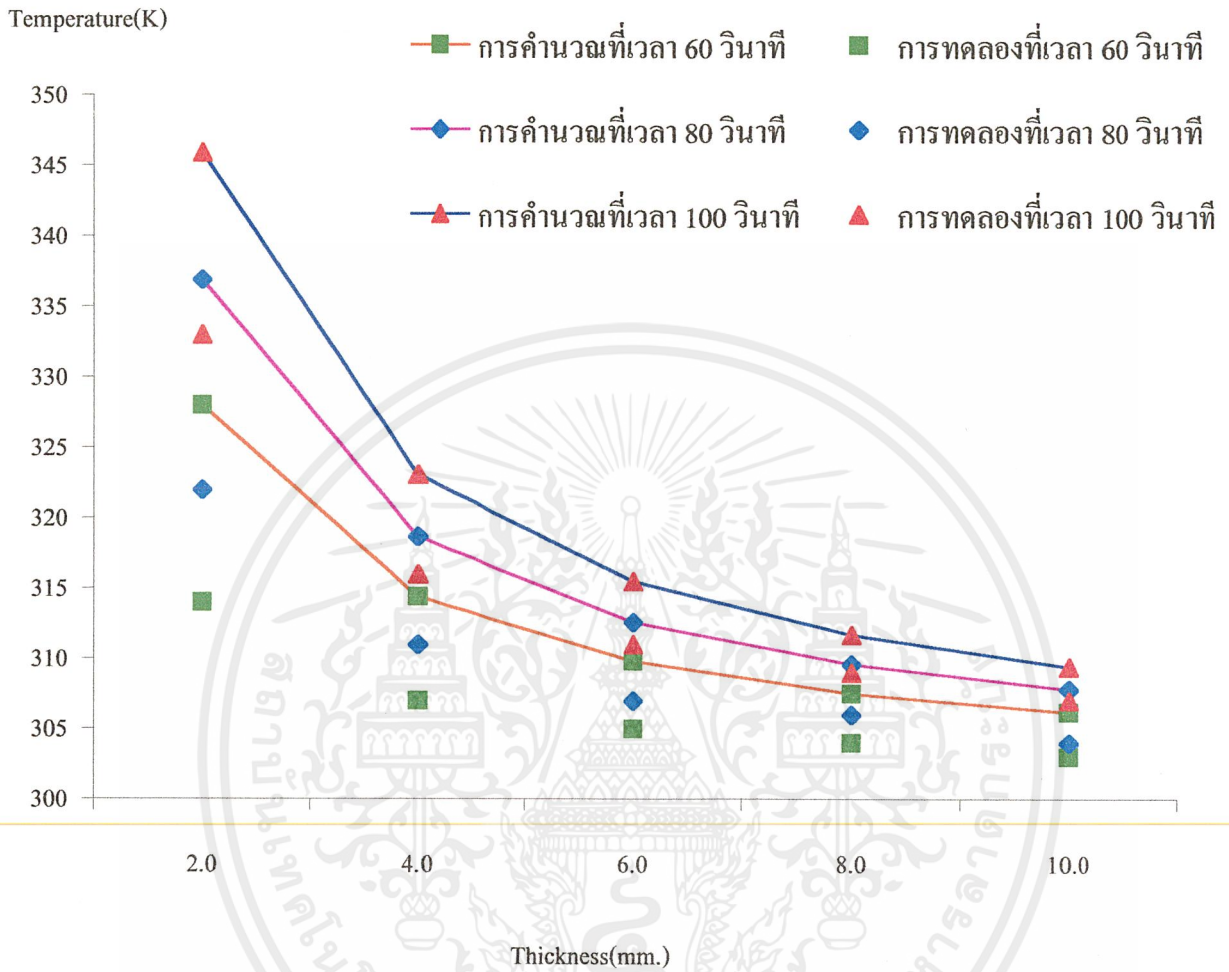
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.5

เวลา(วินาที)	60 วินาที		70 วินาที		80 วินาที		90 วินาที		100 วินาที	
ความหนา(มม.)	คำนวณ	การทดลอง	คำนวณ	การทดลอง	คำนวณ	การทดลอง	คำนวณ	การทดลอง	คำนวณ	การทดลอง
2.0	328.0	314.0	332.5	318.0	336.9	322.0	341.4	327.0	345.9	333.0
4.0	314.4	307.0	316.5	309.0	318.7	311.0	320.9	314.0	323.1	316.0
6.0	309.8	305.0	311.2	306.0	312.6	307.0	314.4	309.0	315.5	311.0
8.0	307.5	304.0	308.6	305.0	309.6	306.0	310.7	308.0	311.7	309.0
10.0	306.2	303.0	307.0	304.0	307.8	304.0	308.6	305.0	309.4	307.0
เวลา(วินาที)	110 วินาที		120 วินาที		130 วินาที		140 วินาที		150 วินาที	
ความหนา(มม.)	คำนวณ	การทดลอง	คำนวณ	การทดลอง	คำนวณ	การทดลอง	คำนวณ	การทดลอง	คำนวณ	การทดลอง
2.0	350.3	337.0	354.8	342.0	359.3	348.0	363.8	353.0	368.3	358.0
4.0	325.3	319.0	327.5	323.0	329.7	326.0	331.9	330.0	334.1	334.0
6.0	316.9	313.0	318.4	315.0	319.8	318.0	321.3	321.0	322.7	323.0
8.0	312.8	311.0	313.8	313.0	314.9	315.0	315.9	317.0	317.0	319.0
10.0	310.3	307.0	311.1	309.0	311.9	310.0	312.8	312.0	313.6	314.0

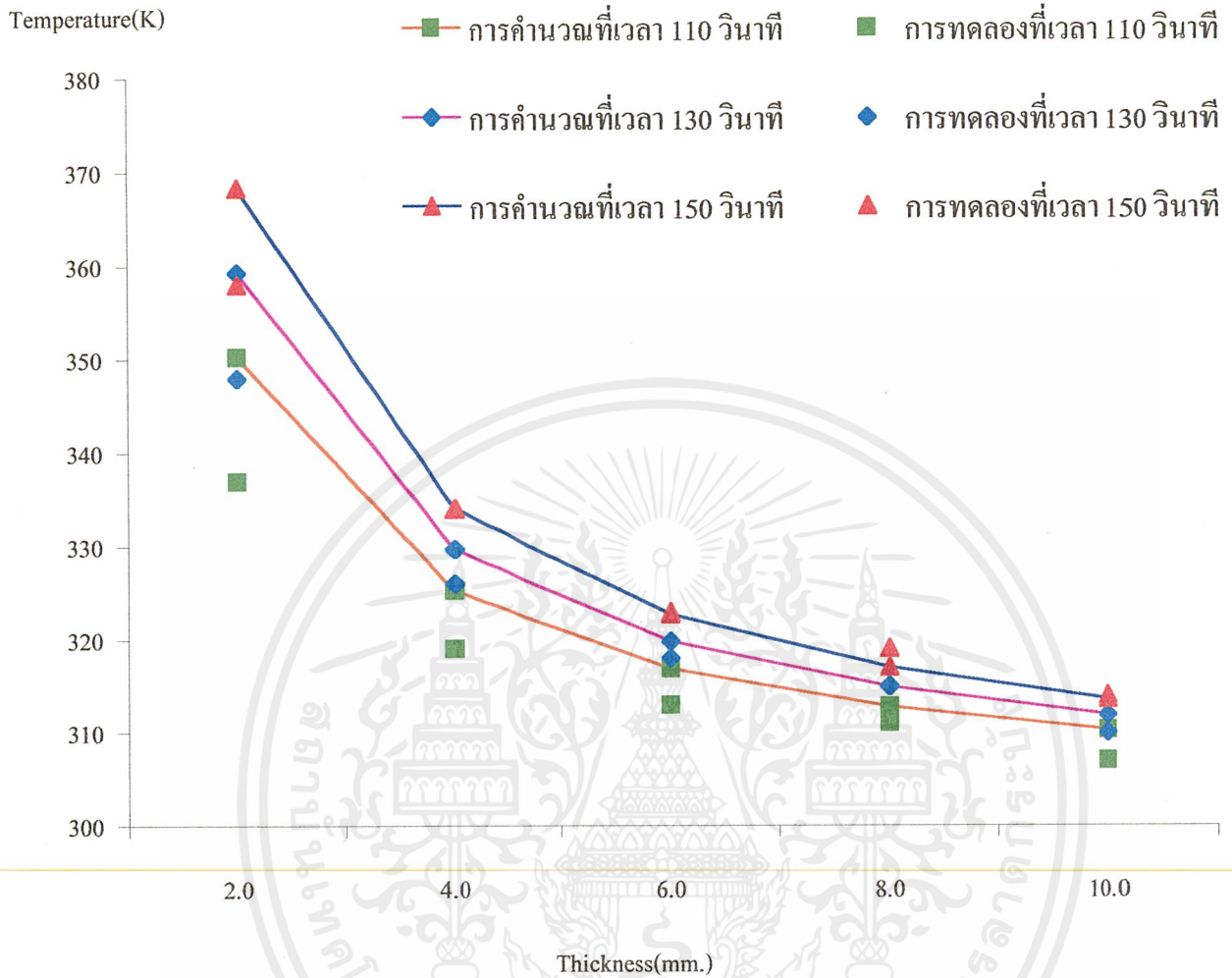
จากตารางที่ 5.5 สามารถนำมาวิเคราะห์ได้ดังรูปที่ 5.5ก และ 5.2ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5k แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนา(ม.ม.)ของวัสดุกับอุณหภูมิ(k) ของทองเหลืองที่เวลาน้อยๆ โดยเปรียบเทียบการคำนวณกับการทดลองซึ่งใช้ค่า จากตารางที่ 5.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนา(ม.ม.)ของวัสดุกับอุณหภูมิ(k)ของทองเหลืองที่เวลาน้อยๆ โดยเปรียบเทียบการคำนวณกับการทดลองซึ่งใช้ค่าจากตารางที่ 5.5

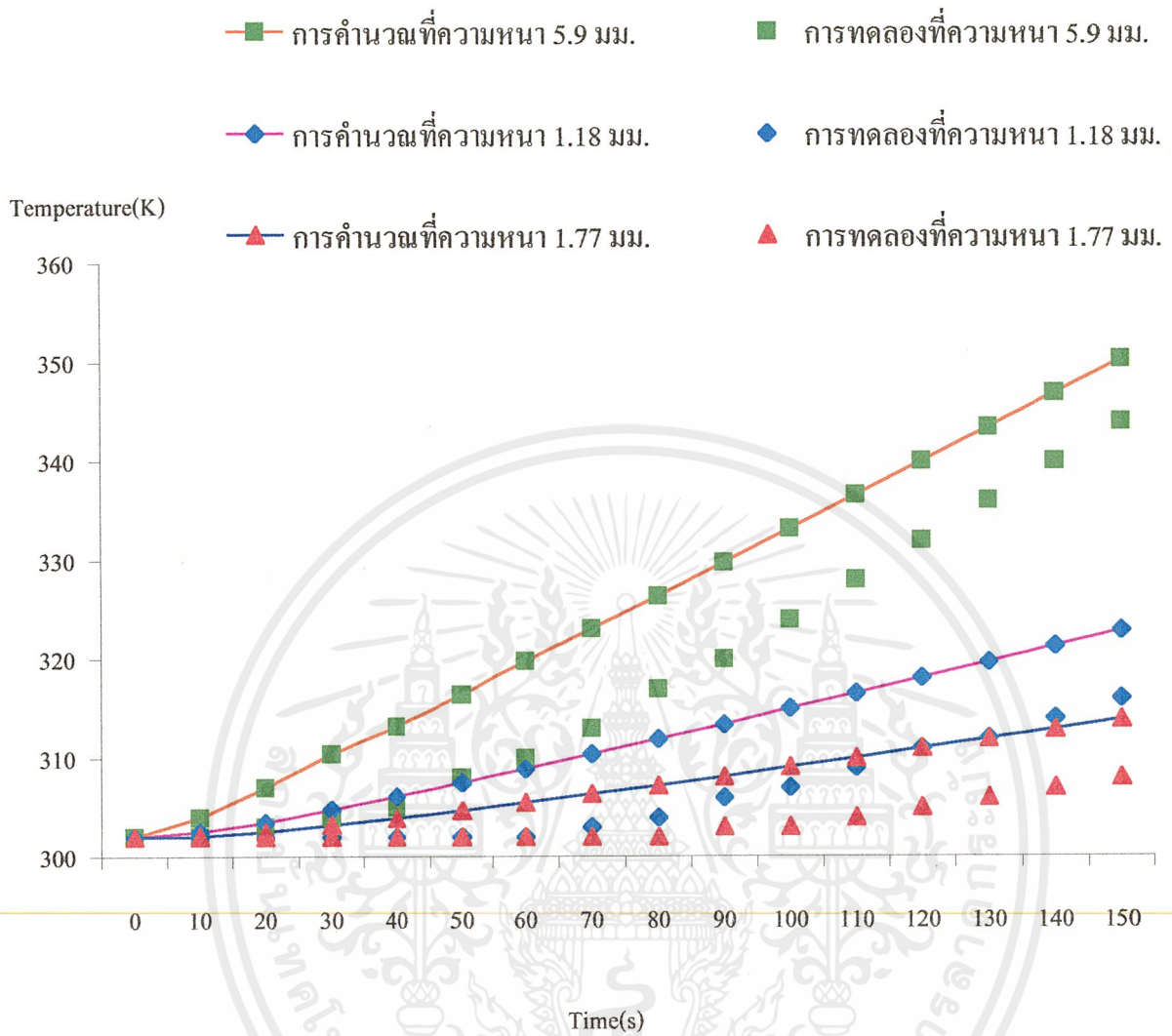
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.6

เวลา(วินาที)	ความหนา 0.59 ม.ม.		ความหนา 1.18 ม.ม.		ความหนา 1.77 ม.ม.	
	คำนวณ	การทดลอง	คำนวณ	การทดลอง	คำนวณ	การทดลอง
0	302.0	302.0	302.0	302.0	302.0	302.0
10	304.0	302.0	302.5	302.0	302.1	302.0
20	307.0	303.0	303.5	302.0	302.5	302.0
30	310.4	304.0	304.8	302.0	303.2	302.0
40	313.2	305.0	306.1	302.0	303.9	302.0
50	316.4	308.0	307.5	302.0	304.7	302.0
60	319.8	310.0	308.9	302.0	305.5	302.0
70	323.1	313.0	310.4	303.0	306.4	302.0
80	326.4	317.0	311.9	304.0	307.2	302.0
90	329.8	320.0	313.4	306.0	308.1	303.0
100	333.2	324.0	315.0	307.0	309.1	303.0
110	336.6	328.0	316.5	309.0	310.0	304.0
120	340.0	332.0	318.1	311.0	311.0	305.0
130	343.4	336.0	319.7	312.0	311.9	306.0
140	346.9	340.0	321.3	314.0	312.9	307.0
150	350.3	344.0	322.9	316.0	313.9	308.0

จากตารางสามารถนำมาวิเคราะห์ได้ดังรูปที่ 5.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา(วินาที)กับอุณหภูมิ(K) โดยใช้ข้อมูลจากตารางที่ 5.6 และแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแต่ละค่าความหนาของเหล็กที่เวลาในการให้ความร้อนแก่เหล็กต่างๆกัน โดยให้ค่าการดูดความร้อนของโลหะเป็น 0.003

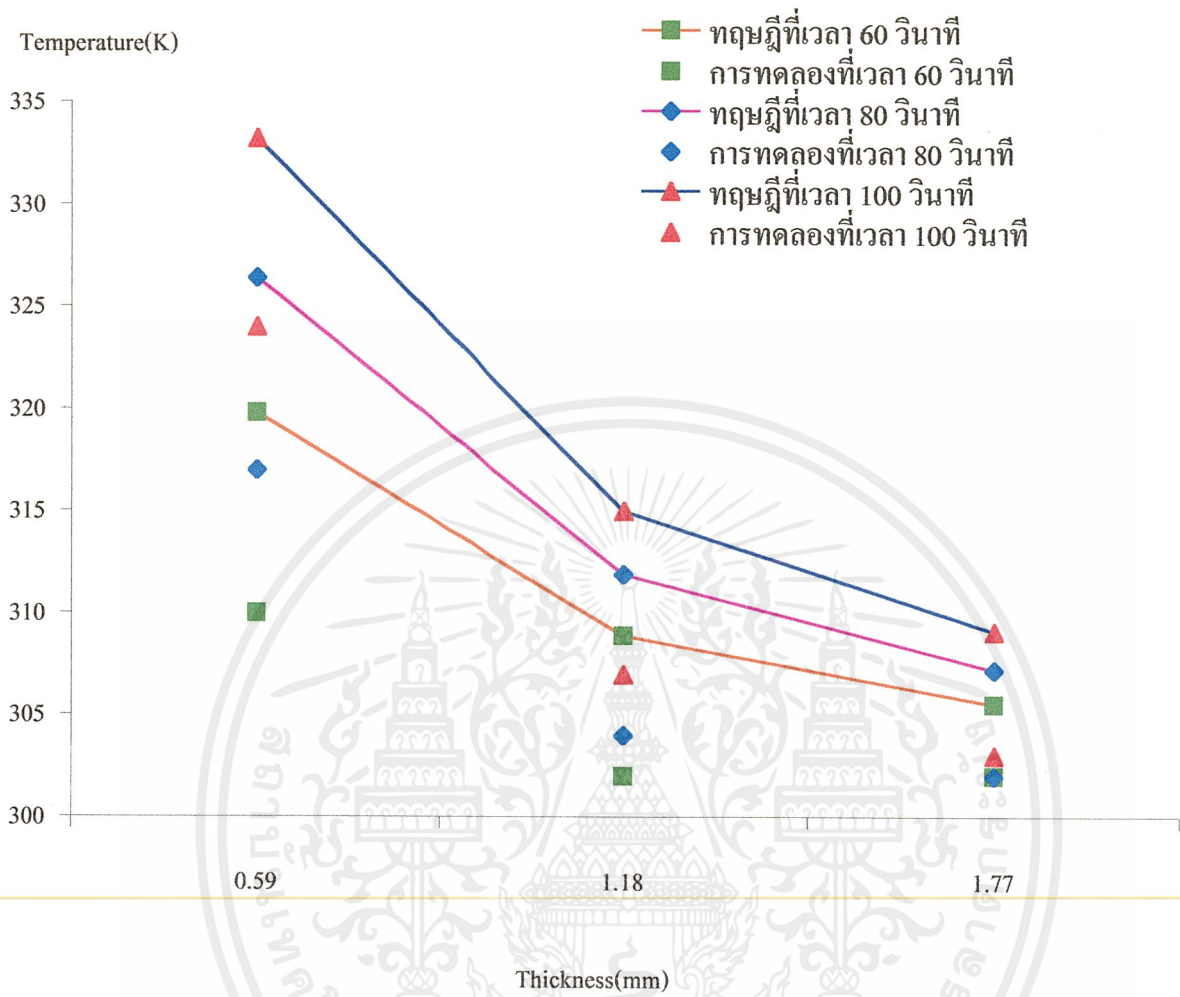
ตารางที่ 5.7

ความหนา(มม.)	60 วินาที		70 วินาที		80 วินาที		90 วินาที		100 วินาที	
	คำนวณ	การทดลอง	คำนวณ	การทดลอง	คำนวณ	การทดลอง	คำนวณ	การทดลอง	คำนวณ	การทดลอง
0.59	319.8	310.0	323.1	313.0	326.4	317.0	329.8	320.0	333.2	324.0
1.18	308.9	302.0	310.4	303.0	311.9	304.0	313.4	306.0	315.0	307.0
1.77	305.5	302.0	306.4	302.0	307.2	302.0	308.1	303.0	309.1	303.0

ความหนา(มม.)	110 วินาที		120 วินาที		130 วินาที		140 วินาที		150 วินาที	
	คำนวณ	การทดลอง	คำนวณ	การทดลอง	คำนวณ	การทดลอง	คำนวณ	การทดลอง	คำนวณ	การทดลอง
0.59	336.6	328.0	340.0	332.0	343.4	336.0	346.9	340.0	350.3	344.0
1.18	316.5	309.0	318.1	311.0	319.7	312.0	321.3	314.0	322.9	316.0
1.77	310.0	304.0	311.0	305.0	311.9	306.0	312.9	307.0	313.9	308.0

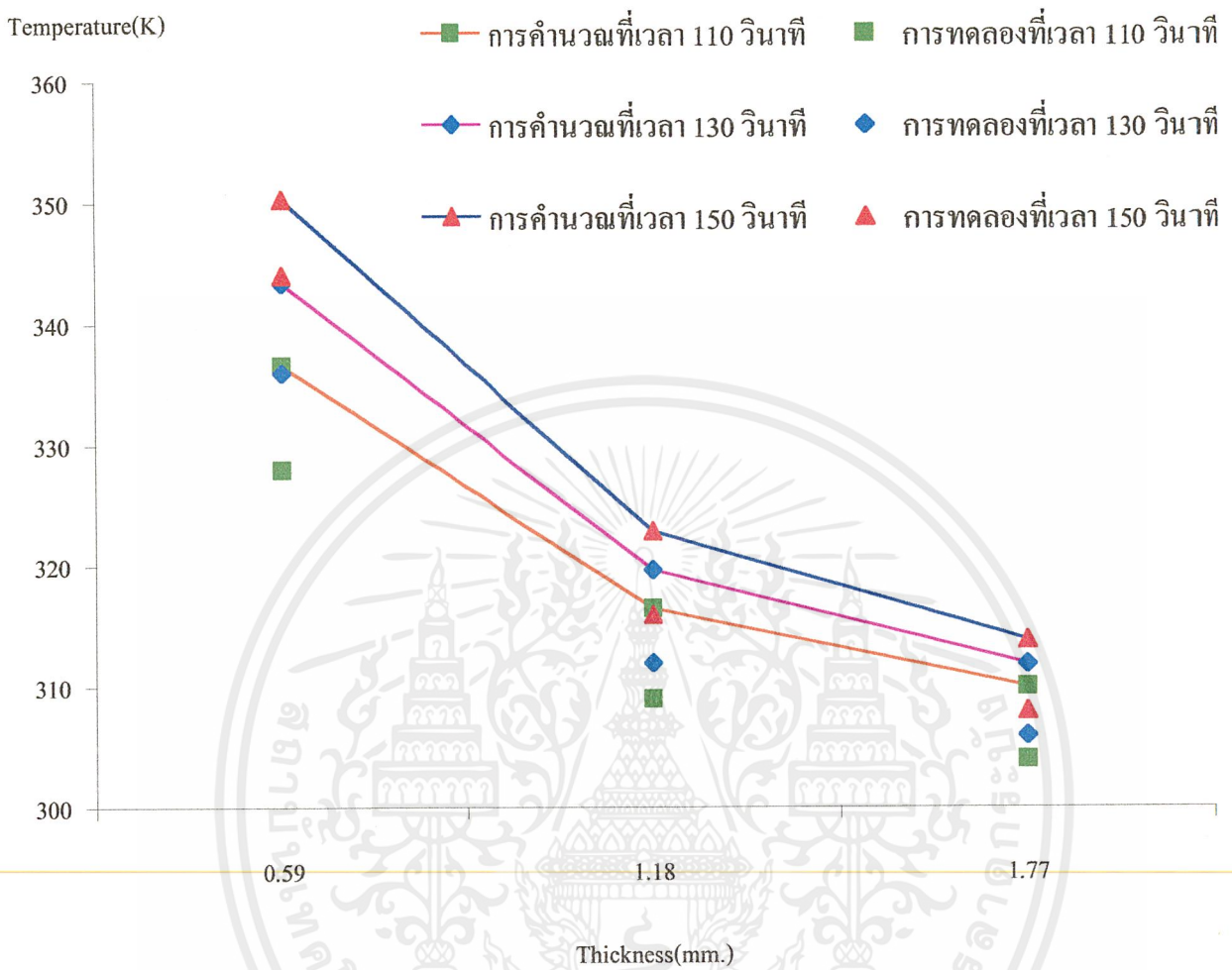
จากตารางสามารถนำมาวิเคราะห์ได้ดังรูปที่ 5.7ก และ 5.7ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7ก .แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนากับอุณหภูมิของเหล็กที่เวลาน้อยๆเปรียบเทียบกับค่าการคำนวณกับการทดลองซึ่งใช้ค่าจากตารางที่ 5.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 ข แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนา(ม.ม.)กับอุณหภูมิ(k)ของเหล็กที่เวลานานมากๆเปรียบเทียบเทียบการคำนวณกับการทดลองซึ่งใช้ค่าจากตารางที่ 5.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองการนำความร้อน โดยวัสดุที่ใช้มีอยู่ 3 ชนิด คือ อลูมิเนียม,ทองเหลือง,เหล็ก โดยใช้ค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติของวัสดุคุณสมบัติที่กล่าวมามีดังนี้

1. ค่าการดูดกลืนความร้อน(Thermal absorptivity)
2. ค่าการนำความร้อน(Thermal conductivity) ซึ่งมีหน่วยเป็น $W / m K$
3. ค่าการกระจายความร้อน(Thermal diffusivity) ซึ่งมีหน่วยเป็น W / m^2

โดยส่วนของการทดลองนั้นให้นำค่าที่ได้มาหาความสัมพันธ์ 2 ส่วน คือ

1. ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา คือ วัดค่าอุณหภูมิของแต่ละความหนาของวัสดุ ณ เวลาต่างๆ
2. ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความหนา คือ วัดค่าอุณหภูมิ ณ เวลาต่างๆของวัสดุ ที่ค่าความหนาต่างๆ

จากการทดลองผลการทดลองที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณ โดยสมการทางคณิตศาสตร์ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน ซึ่งค่าที่ได้จากสมการนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองสามารถสรุปได้ 2 หัวข้อใหญ่คือ

1. ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ณ ค่าความหนาเดียวกัน (ตำแหน่ง $x = -d$) ของวัสดุชนิดเดียวกัน เมื่อเวลามากขึ้น มีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากคุณสมบัติของวัสดุ

2. ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความหนา ณ เวลาเดียวกันของวัสดุชนิดเดียวกัน ค่าอุณหภูมิของวัสดุที่บางกว่ามีค่ามากกว่าวัสดุที่หนากว่า

โดยค่าที่ได้นั้นตามจริงแล้วทฤษฎีควรมีค่าที่มากกว่าเพราะองค์ประกอบบางตัวอาจไม่นำมาคิดแต่จากการทดลองเมื่อเวลาผ่านไปมากกว่าค่าอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณสาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะองค์ประกอบบางอย่าง เช่น อุณหภูมิมีผลต่อค่าคุณสมบัติเฉพาะของวัสดุนั้นเช่นที่อุณหภูมิ $300 K(27^{\circ}C)$ ค่าการนำความร้อน(k)มีค่าเป็น $237 W / m K$ และที่ $400 K(127^{\circ}C)$ มีค่าเป็น $240 W / m K$ ซึ่งส่งผลต่อค่าที่วัดได้โดยจากการคำนวณค่าคุณสมบัติของวัสดุใช้ค่าเฉลี่ย

ด้วยเหตุนี้จึงทำการทดลองโดยที่ใช้ค่าการดูดกลืนความร้อน (Thermal absorptivity)เปลี่ยนตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปโดยใช้ความสัมพันธ์

$$A = A_0 + A_1 T \quad \text{โดยที่ } A_0 = 1.47 \times 10^{-3}$$

$$A_1 = 3.2 \times 10^{-5}$$

โดยค่า A_0 และ A_1 เป็นค่าเฉพาะของวัสดุแต่ละชนิดแต่ละชนิดซึ่งจากการทดลองแนวโน้มของค่าที่ได้ใกล้เคียงกับการทดลองที่ได้ดังรูปที่ 5.2ก, 5.2ข และ 5.2ค และสาเหตุที่ทำการทดลองเพียงอลูมิเนียมเพราะไม่สามารถหาค่า A_0 และ A_1 ของโลหะชนิดอื่นได้เนื่องจากค่าของความแตกต่างของการดูดกลืนความร้อนมีค่าน้อยมากๆ

จากการทดลองสิ่งที่วัดแบ่งได้ 2 แบบคือ

1. วัดค่าอุณหภูมิที่ค่าความหนาของโลหะคงที่ แต่เพิ่มเวลาการให้ความร้อนแก่โลหะ ผลที่ได้คือ เมื่อให้ความร้อนแก่โลหะเป็นเวลานานขึ้นอุณหภูมิที่ผิวหน้าของโลหะมีค่าสูงขึ้นตามด้วยทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ คุณสมบัติเฉพาะของโลหะแต่ละชนิด

2. วัดค่าอุณหภูมิ ที่เวลาการให้ความร้อนแก่โลหะคงที่โดยเพิ่มความหนาของโลหะ ผลที่ได้คือ ที่เวลาการให้ความร้อนแก่โลหะค่าหนึ่ง โลหะที่มีความหนามากกว่าจะมีอุณหภูมิที่ผิวน้อยกว่าโลหะที่มีความหนาน้อยกว่า

ซึ่งผลที่ได้แนวโน้มเป็นเช่นเดียวกันใน โลหะทุกๆชนิด



บทที่ 7

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 จากการวิจัยทั้งหมดสามารถแยกกล่าวได้ดังนี้

7.1.1 การทดลองนี้มีเงื่อนไขคือ ไม่มีการถ่ายเทความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อม

7.1.2 ค่าการกระจายความร้อน, ค่าการดูดกลืนความร้อน, ค่าการสะท้อนความร้อน, ค่าความเข้มความร้อน มีความสำคัญต่อผลการทดลองมาก

7.1.3 จากการวิจัยซึ่งได้สมการหาอุณหภูมิที่นำมาเทียบกับผลการทดลองดังนี้

$$T_{(x,t)} = (T_0) + \frac{7AId^3xe^{-\frac{x^2}{4t\alpha}}}{1440k\sqrt{\pi}\sqrt{t^3}\alpha^3} + \frac{AIdx\alpha\left[-1 + \operatorname{Erf}\left(\sqrt{\frac{x^2}{\alpha}}/2\sqrt{t}\right)\right]}{12k\alpha\sqrt{x^2}}$$
$$+ \frac{IAx\left[2\sqrt{\pi} - \frac{4e^{-\frac{x^2}{4t\alpha}}}{\sqrt{\frac{x^2}{t\alpha}}} + \frac{4t\alpha\sqrt{\pi}}{x^2} - 2\sqrt{\pi}\operatorname{Erf}\left[\frac{1}{2}\sqrt{\frac{x^2}{t\alpha}}\right] - \frac{\left\{4t\alpha\sqrt{\pi}\operatorname{Erf}\left[1/2\sqrt{t}\sqrt{\frac{\alpha}{x^2}}\right]\right\}}{x^2}\right]}{4dk\sqrt{\frac{\pi}{x^2}}}$$

7.2 การแก้ไขปัญหาในการวิจัย

7.2.1 ในบางสมการนั้นเราสามารถโปรแกรม Mathematica 4 คำนวณออกมาได้

7.2.2 ในการวิจัยนั้นมีข้อผิดพลาด เช่น มีการแผ่ความร้อนขึ้นมา โดยการผ่านความร้อนจากชั้นวางแผ่นวัสดุ ซึ่งต้องทำการแก้ไข โดยการนำแผ่นใยแก้วกันความร้อนมาหุ้มไว้

7.2.3 ในการวิจัยนั้นมีการแผ่ความร้อนผ่านแผ่นวัสดุ ดังนั้นต้องนำแผ่นใยแก้วกันความร้อนมากดทับแผ่นวัสดุทางด้านบนไว้

บทที่ 8

แผนงานในอนาคต

จากการวิจัยนี้สามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาประยุกต์ใช้ในการทำงานที่มีความเกี่ยวข้องกับเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ทั้งในทางอุตสาหกรรม และในทางวิชาการ ซึ่งสามารถทำความเข้าใจได้ง่าย นอกจากนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานที่มีความเกี่ยวข้องกับความร้อน เช่น เลเซอร์

ในการวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัดบางประการคือ ในการทดลองต้องไม่ให้อุณหภูมิเคลื่อนที่ผ่านออกนอกแผ่นวัสดุ ที่เป็นเงื่อนไขสำคัญในแบบจำลองของสมการทางคณิตศาสตร์

ในการวิจัยนี้ยังมีข้อบกพร่องที่ทำให้ผลทดลองออกมาผิดพลาดเนื่องจาก ระบบที่นำมาทดลอง ไม่ได้เป็นระบบปิด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นาย ปิติ รุ่งทรัพย์ทวีคุณ เกิดเมื่อวันที่ 23 มีนาคม พ.ศ. 2521 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนนวมินทรียมอุดมศึกษา น้อมเกล้า และได้เข้าศึกษาต่อในระดับอุดมศึกษาที่ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และจบการศึกษาในปีการศึกษา 2542

นาย สว่าง เก่งเกรียงไกร เกิดเมื่อวันที่ 8 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2521 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนเทพศิรินทร์ และได้เข้า ศึกษาต่อในระดับอุดมศึกษาที่ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระ จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และจบการศึกษาในปีการศึกษา 2542



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

1. วุทธิ พันธุมนาวิน , เลเซอร์ ฟิสิกส์ , โรงพิมพ์ มิตรนราการพิมพ์ , 2532
2. นกสิทธิ์ คูวัฒนาชัย , การถ่ายเทความร้อน , สำนักพิมพ์ ฟิสิกส์เซ็นเตอร์ , หน้า. 300
3. Sidney S. Charschan , Guide to Laser Material Processing , Laser Institute of America , 1993.
4. Jame F. Shackelford , William Alexander and Jun S. Park ,CRC Materials science and engineering hand book , 2nd edition , pp. 269-276 ,1994.

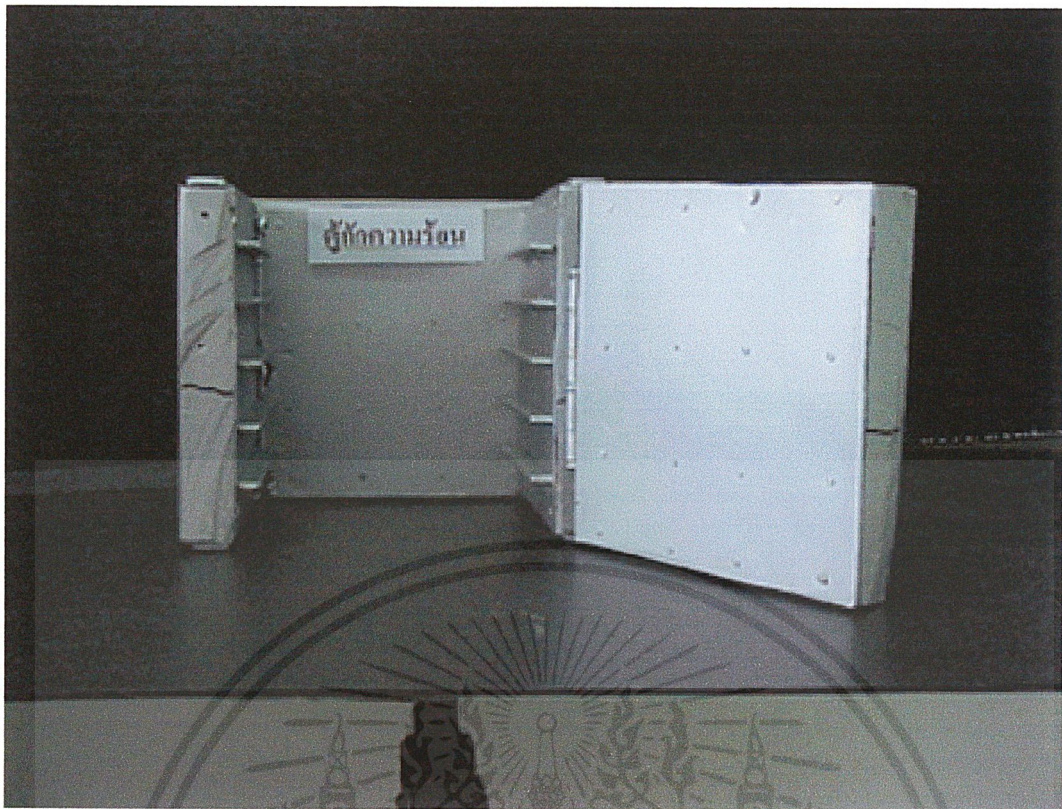


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

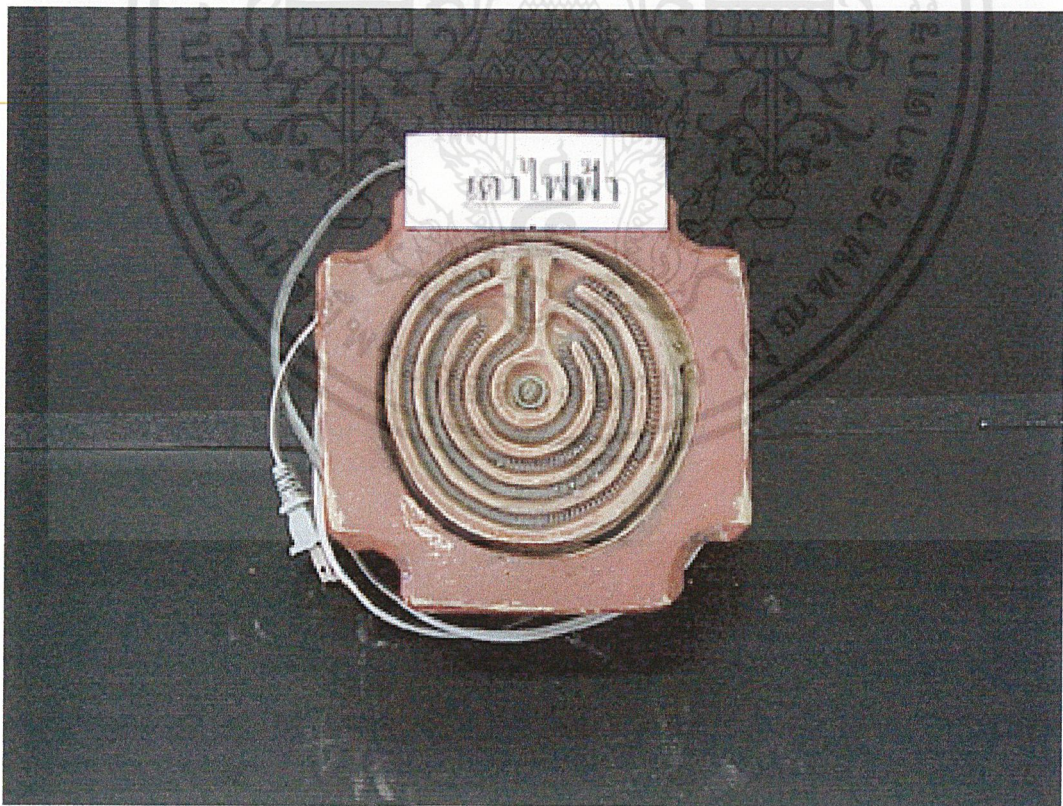
ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1 ตู้กักความร้อน



รูปที่ 2 เตาไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3 เทอร์โมคัปเปิล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5 แผ่นทองเหลือง



รูปที่ 6 แผ่นเหล็กรองวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7 แผ่นเหล็ก



รูปที่ 8 แผ่นอลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในหอสมุดเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้