



ใบรับรองปัญหาพิเศษ

เรื่อง
การวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอาหาร ด้วยวิธีวัดแบบลวดความร้อน
(Food Thermal Conductivity Measurement With Line Heat Source Method)

จัดทำโดย

นายชาญชัย ดิลกสวัสดิกุล รหัสนักศึกษา 44040786

นางสาวนฤชยา สาดแพ่ง รหัสนักศึกษา 44040791

ได้รับการพิจารณาเห็นชอบจาก

..... ๒๑ / ๒๕ / ๕๙ อาจารย์ที่ปรึกษาปัญหาพิเศษ
(ดร.กิตติชัย บรรจง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

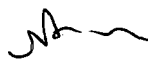
ชาญชัย คิลกสวัสดิกุล ,นฤชชา สาทแพง ,2547 : การวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอาหาร ด้วยวิธีวัดแบบลวดความร้อน (Food Thermal Conductivity Measurement With Line Heat Source Method).
โครงการคณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

อาจารย์ที่ปรึกษา : ดร.กิตติชัย บรรจง

บทคัดย่อ

การวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ณ สภาวะไม่คงตัวด้วยหลักการวัดแบบลวดความร้อน ใช้เครื่องมือวัดที่ออกแบบและสร้างขึ้นจากสมมติฐานและหลักการคำนวณที่เสนอ โดย Blackwell (1954) ซึ่งคุณสมบัติของเครื่องมือวัดประกอบด้วยกระบอกใส่ตัวอย่างทำจากแก้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 62 มิลลิเมตร สูง 120 มิลลิเมตร เครื่องแปลงศักย์ไฟฟ้า 3-15 โวลต์ 0-3 แอมแปร์ หัววัดหุ้มด้วยท่อหดรขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.8 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 3 มิลลิเมตร ยาว 95 มิลลิเมตร ทนความร้อนในช่วง 0-120 องศาเซลเซียส ภายในบรรจุลวดให้ความร้อนทำจากลวดนิโครม และเทอร์โมคัปเปิลชนิด k เมื่อทดสอบอุปกรณ์วัดกับตัวอย่าง 4 ชนิดคือน้ำ ไข่ขาว ไข่แดงและกลีเซอรอล ที่อุณหภูมิ 30 ± 1 องศาเซลเซียส ระดับอัตราความร้อนต่อความยาวหัววัดที่เหมาะสมคือ 15 วัตต์ต่อเมตร เนื่องจากจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของตัวอย่างทั้ง 4 ชนิดมีค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนต่ำสุด

ชาญชัย คิลกสวัสดิกุล



21/3/48

นฤชชา สาทแพง

ลายมือชื่อนักศึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

วัน เดือน ปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอาหารด้วยวิธีวัดแบบลวดความร้อนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ ดร.กิตติชัย บรรจง อาจารย์ผู้ควบคุมปัญหาพิเศษนี้ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่ามาให้แนวคิด คำแนะนำ ตลอดจนให้แนวทางการแก้ไขปัญหาอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง ซึ่งทำให้ปัญหาพิเศษฉบับนี้มีความถูกต้องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น และกราบขอบพระคุณ อาจารย์ทุกท่านที่คอยแนะนำ และช่วยให้ปัญหาพิเศษครั้งนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้กำลังใจทำงานให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่ทำให้กำลังใจโดยตลอด

นายชาญชัย ดิลกสวัสดิคุณ

นางสาวนฤชยา สาดแพง

20 มีนาคม 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญตาราง	ง
สารบัญภาพ	จ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาของปัญหาพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปัญหาพิเศษ	2
1.3 ขอบเขตของปัญหาพิเศษ	2
บทที่ 2 ทฤษฎี	3
2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน	3
2.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนด้วยหลักการวัดแบบลวดความร้อน	4
2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอาหาร โดยการ ใช้หัววัดแบบลวดความร้อน	5
2.4 การออกแบบหัววัด	11
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	15
3.1 ส่วนประกอบของอุปกรณ์วัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน	15
3.2 หลักการทำงานของเครื่องมือ	19
3.3 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง	19
3.4 การออกแบบการทดลอง	19
3.5 ขั้นตอนการทดลอง	20
3.6 การคำนวณการทดลอง	22
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล	24
4.1 ผลของระยะเวลาสูงสุดในการทดลอง	24
4.2 ผลของการทดสอบหาค่าความถูกต้องของเครื่องมือ	25
4.3 ผลของการทดสอบหาค่าความเที่ยงตรงของเครื่องมือ	27
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	28
เอกสารอ้างอิง	29
ภาคผนวก	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	13
3.1	23
4.1	27
ข.1	31
ข.2	32
ข.3	33
ข.4	34
ข.5	35
ข.6	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า	
1	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของนม, น้ำผลไม้, ไม้, ไม้กระบอก ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	3
2	ผลของความต้านทานความร้อนจากการสัมผัสที่มีต่อกราฟ T กับ $\ln(t)$ ของสมการวัดแบบแท่งความร้อน เปรียบเทียบกับสมการที่มีได้ตัดทอนของลวดความร้อน	5
3	ความสัมพันธ์ของ T กับ $\ln(t)$ จากการทำการจำลองแบบเชิงตัวเลข เมื่อใช้อากาศเป็นตัวเติมในหัววัด และตัวอย่างที่ใช้ทดสอบเป็นกถิเซอร์อล	6
4	ผลของขอบเขตของตัวอย่าง ในการทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของหัววัดในตัวอย่างมันฝรั่งรูปทรงกระบอกที่สภาวะแวดล้อมเป็นอากาศที่นิ่งและน้ำที่มีการกวนตลอดเวลา	7
5	การกระจายอุณหภูมิในตัวอย่างน้ำที่ระยะเวลาในการทดสอบ 10 วินาที	9
6	การกระจายอุณหภูมิในตัวอย่างน้ำที่มีปริมาณความร้อนคงที่ 5 W/m	9
7	ผลของการพาความร้อนที่เกิดขึ้นจากการทดสอบน้ำและกถิเซอร์อิน($t_1=1$ s, $Q=11$ W/m)	10
8	ส่วนประกอบของหัววัดที่ใช้ในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน	14
9	ส่วนประกอบและขนาดอุปกรณ์วัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน โดยวิธีใช้หัววัดที่ออกแบบ	16
10	หัววัดและกระบอกใส่ตัวอย่าง	17
11	เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า	17
12	แอมมิเตอร์	18
13	โวลต์มิเตอร์	18
14	เครื่องอ่านค่าอุณหภูมิชนิด Type k	18
15	การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้วัดระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ	20
16	ชุดอุปกรณ์การทดลองแบบสมบูรณ์	21
17	แสดงเครื่องวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนด้วยวิธีวัดแบบลวดความร้อน	24
18	ความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิ กับ เวลา ของตัวอย่างน้ำที่ 25W/m	25
19	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชันที่วัดได้กับความชันอ้างอิง	26

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาของปัญหาพิเศษ

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเป็นคุณสมบัติทางความร้อนที่สำคัญของวัสดุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาหารซึ่งเป็นวัสดุชีวภาพหลักของประเทศ ซึ่งยังมีข้อมูลอยู่อย่างจำกัด การทราบคุณสมบัติทางความร้อนของอาหารที่ถูกต้องแม่นยำ เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับนักวิจัยและนักออกแบบในกระบวนการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับความร้อนให้เป็นไปอย่างถูกต้อง เช่น การทำนายอัตราการอบแห้งที่ต่างกัน ในสภาวะการให้ความร้อนนั้นจำเป็นต้องทราบปริมาณการถ่ายเทความร้อน เพื่อที่จะสามารถออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนอย่างเหมาะสม แต่ที่ผ่านมาข้อมูลเหล่านี้ยังมีไม่มากพอและมีความหลากหลายแตกต่างกันออกไป ซึ่งอาจขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ หลายประการด้วยกัน เช่น องค์ประกอบทางเคมีของอาหาร ลักษณะโครงสร้างทางกายภาพ และอุณหภูมิ เป็นต้น การประมาณค่า หรือการสมมุติค่าคุณสมบัติทางความร้อนอาจได้ค่าที่ไม่ถูกต้อง และไม่ตรงกับค่าจริง เมื่อนำค่าที่ได้จากการประมาณไปใช้ อาจทำให้การออกแบบอุปกรณ์ การทำนายค่าต่าง ๆ มีความผิดพลาด หรือต้องออกแบบเพื่อความผิดพลาดมากเกินความจำเป็น ซึ่งไม่เป็นผลดีในหลาย ๆ ด้าน เช่น ต้นทุนที่สูงขึ้น คุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ด้อยลง

อุปกรณ์วัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอาหาร มีการประดิษฐ์และพัฒนาหลายรูปแบบ เพื่อให้สามารถวัดค่าได้อย่างแม่นยำ ซึ่งแต่ละแบบจะมีข้อจำกัดแตกต่างกันออกไป การวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนโดยวิธีการวัดแบบลวดความร้อน เป็นการวัดในขณะที่สภาวะไม่คงตัวที่ได้รับความนิยม เนื่องจากสะดวก รวดเร็ว และให้ค่าที่แม่นยำเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น ๆ การวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่สภาวะคงตัว ต้องใช้เวลานาน ดังนั้นหากวัสดุมีความชื้นสูงจะเกิดการเคลื่อนที่ของความชื้น โดยการพาความร้อนเนื่องจากผลต่างของอุณหภูมิที่แหล่งให้กำเนิดความร้อนกับจุดที่ทำการวัด ดังนั้นจึงมีการพัฒนาวิธีการวัดแบบสภาวะไม่คงตัว โดยใช้หลักการของการวัดแบบลวดความร้อน ที่มีแหล่งให้กำเนิดความร้อนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก ๆ และมีความยาวมาก ๆ อยู่ตรงกลางของตัวอย่างวัสดุที่มีเนื้อเป็นเอกพันธ์ และมีขนาดใหญ่มาก เพื่อให้สอดคล้องกับสมมติฐานของสมการที่ใช้คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ที่พิจารณาให้การไหลของความร้อนเป็นไปในทิศทางรัศมีเท่านั้น ในปัญหาพิเศษนี้จะพิจารณาการพัฒนาอุปกรณ์แบบหัววัด เนื่องจากสามารถใช้กับตัวอย่างที่มีลักษณะค่อนข้างแข็งได้ดี ซึ่งจะใช้เวลาในการทดสอบเพียงสั้น ๆ ก็สามารถหาค่าได้อย่างถูกต้อง วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ จะเป็นการศึกษาถึงหลักการวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนด้วยวิธีวัดแบบหัววัด และใช้หลักการดังกล่าวออกแบบและสร้างอุปกรณ์ที่มีราคาไม่แพง สร้างได้ไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยากรวมทั้งกำหนดวิธีการวัดของอุปกรณ์ที่สอดคล้องกับสมการ เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องแม่นยำ และสามารถนำไปใช้วัดกับตัวอย่างอาหารที่ต้องการได้

1.2 วัตถุประสงค์ของปัญหาพิเศษ

1.2.1 ศึกษาวิธีการวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน โดยใช้หลักการของการวัดแบบหัววัด
ลดความร้อน

1.2.2 ออกแบบและสร้างอุปกรณ์วัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอาหาร

1.2.3 ทดสอบความสามารถในการใช้งานและความถูกต้องของอุปกรณ์ ที่อุณหภูมิเหนือจุดเยือก
แข็งของตัวอย่าง รวมทั้งกำหนดวิธีการวัดที่ให้ค่าที่ถูกต้องแม่นยำ

1.3 ขอบเขตของปัญหาพิเศษ

1.3.1 ศึกษาที่มาและสมมติฐานของสมการ ที่ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนโดย
วิธีการใช้หัววัด

1.3.2 ออกแบบและสร้างอุปกรณ์วัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่สอดคล้องกับสมมติฐานของ
หลักการทางทฤษฎีของวิธีการใช้หัววัด

1.3.3 ทดสอบความถูกต้องและความสามารถในการใช้งาน ของอุปกรณ์ที่ออกแบบ โดยใช้ตัวอย่าง
ที่ทราบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนแล้วจากเอกสารอ้างอิง ที่อุณหภูมิเหนือจุดเยือกแข็งของตัวอย่าง
ซึ่งในปัญหาพิเศษนี้ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ 4 ชนิดคือ น้ำ ไข่ขาว ไข่แดง และ
กลีเซอรอล

1.3.4 กำหนดวิธีวัดและการใช้งานที่เหมาะสม เพื่อให้สามารถวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน
ของตัวอย่างอาหารที่ต้องการทดสอบได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

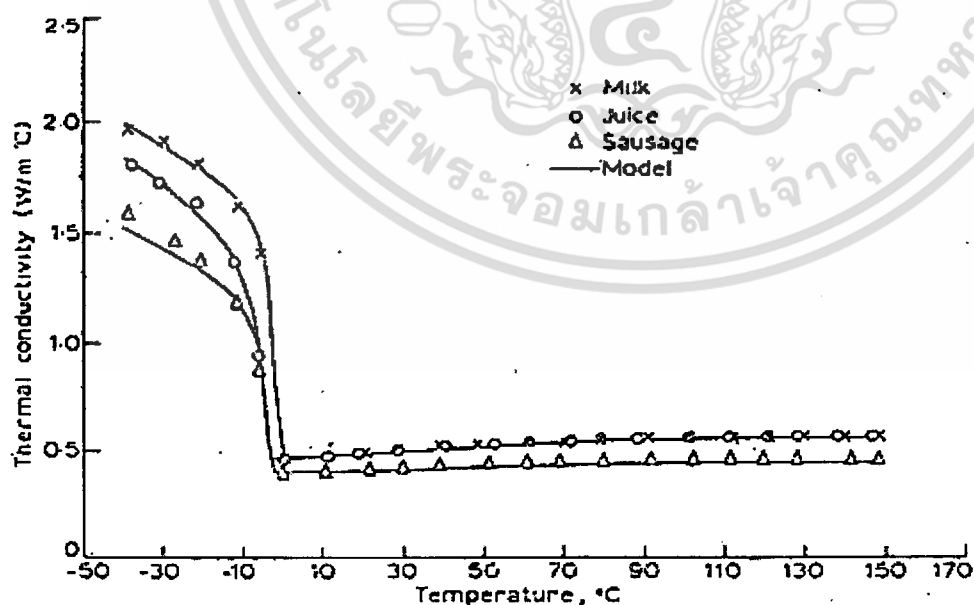
ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอาหารมีการเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะ และปัจจัยต่าง ๆ ซึ่งผลของปัจจัยดังกล่าวมีดังนี้ (Mohsenin , 1980)

1. ผลของโครงสร้างกายภาพ

โครงสร้างทางกายภาพ เช่น ความหนาแน่น จะเปลี่ยนแปลงเสมอระหว่างที่อาหารอยู่ในกระบวนการผลิต เช่น กระบวนการแช่เยือกแข็ง ของเหลวที่มีอยู่ในชิ้นอาหารจะเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเปลี่ยนแปลง สำหรับกระบวนการอบแห้ง น้ำในชิ้นอาหารจะระเหยออกทำให้มีโครงสร้างเป็นรูพรุนมากขึ้น ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเปลี่ยนแปลงเช่นกัน

2. ผลของอุณหภูมิ

ในกระบวนการผลิตอาหาร โดยทั่วไปอุณหภูมิที่ใช้จะอยู่ในช่วง -50°C ถึง 150°C ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจะแตกต่างกัน และด้วยเหตุที่ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการผลิตอยู่ในช่วงที่กว้าง จึงมีความจำเป็นต้องทราบถึงค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ



ภาพที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของนม, น้ำผลไม้, ไส้กรอก ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ที่มา : Choi และ Okos(1986)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Choi และ Okos(1986) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของ นม, น้ำผลไม้, ไข่กรอก โดยใช้อุปกรณ์วัดแบบหัววัด จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอาหาร ทั้ง 3 ชนิดที่อุณหภูมิต่าง ๆ มีค่าไม่เท่ากัน และที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่ามากกว่าที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็งประมาณ 4 เท่า เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของเหลว เป็นของแข็งขององค์ประกอบต่าง ๆ ในอาหาร

3. ผลขององค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมี ประกอบด้วย มวลของน้ำ, โปรตีน, คาร์โบไฮเดรต, ไขมัน, เกล็ด เป็นต้น ซึ่งอาหารแต่ละประเภทมีองค์ประกอบทางเคมีไม่เท่ากัน จึงมีผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนแตกต่างกันไปด้วย

4. ผลของความชื้น

ปริมาณความชื้นถือว่าเป็นองค์ประกอบหลักในอาหาร ดังนั้นอาหารที่มีปริมาณความชื้นสูง ส่วนใหญ่จะมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงกว่าอาหารที่มีปริมาณความชื้นต่ำ นอกจากนี้ปริมาณความชื้นในอาหารยังมีผลต่อการวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน กล่าวคือในระหว่างการวัดมีการเปลี่ยนแปลงความชื้นซึ่งเกิดขึ้น เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิจะทำให้เกิดการระเหยและถ่ายเทมวลของไอน้ำจากที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปยังอุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่ามากกว่าปกติ

2.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนด้วยหลักการวัดแบบลวดความร้อน (line heat source Method)

การหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนโดยการใช้หัววัดแบบลวดความร้อน เป็นการพิจารณาอุณหภูมิของหัววัดขนาดเล็กและยาวมาก ที่ฝังอยู่ในตัวอย่างขนาดใหญ่และมีลักษณะเนื้อเป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อมีการป้อนอัตราความร้อนให้หัววัดในระดับคงที่ อุณหภูมิของหัววัดที่เพิ่มขึ้นกับเวลาจะสามารถนำมาหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของตัวอย่าง ได้จากค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ(T)และเวลา(lnt) ซึ่งนำมาคำนวณโดยสมการ

$$K = \frac{Q \ln(t_2/t_1)}{4 \pi (T_2 - T_1)}$$

$$= \frac{Q}{4 \pi \text{ Slope}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยมีสมมติฐานของสภาวะในการทดสอบ คือ

1. ทิศทางการไหลของความร้อนจะไหลในแนวรัศมีเท่านั้น
2. ตัวอย่างต้องมีเนื้อเป็นเอกพันธ์และมีขนาดเป็นอนันต์
3. อัตราความร้อนที่ป้อนต่อความยาวหัววัดจะต้องมีค่าคงที่

2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอาหาร โดยการใช้หัววัดแบบ ลวดความร้อน(line heat source probe method)

1. ผลที่เกิดจากสมมติฐานของหลักการวัดแบบลวดความร้อน

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนด้วยอุปกรณ์แบบหัววัด มีปัจจัยที่ทำให้สภาวะในการทดสอบไม่เป็นไปตามสมมติฐานของหลักการวัดแบบลวดความร้อน ซึ่งแบ่งพิจารณาเป็น 2 ส่วนคือ

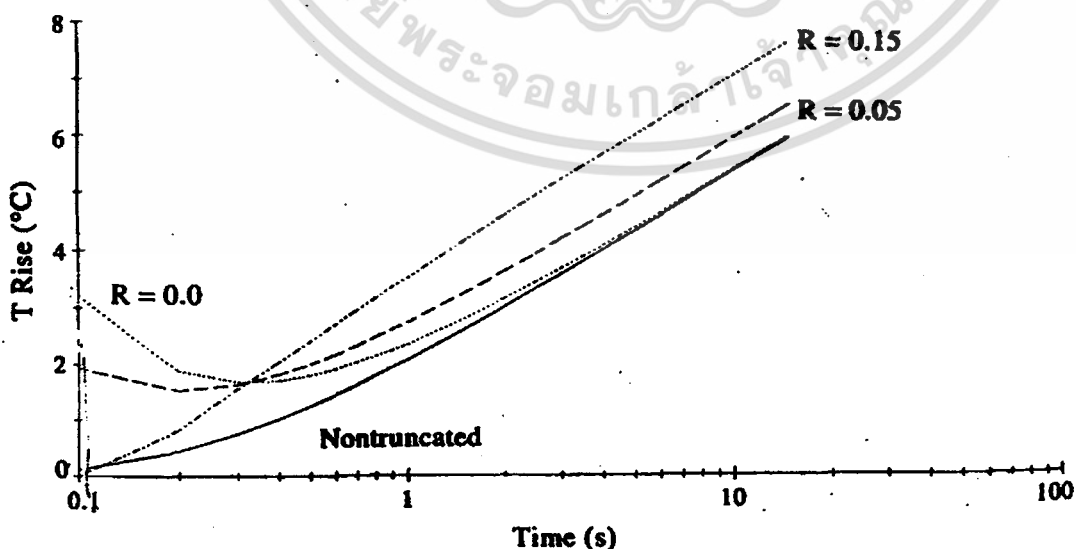
1.1 ผลที่เกิดจากการใช้หัววัดเป็นแหล่งให้ความร้อน

1.1.1 ความต้านทานความร้อนจากการสัมผัส(R)

แบ่งตามตำแหน่งที่พิจารณาได้ 2 ตำแหน่งดังนี้

1.1.1.1 พิจารณาตำแหน่งผิวสัมผัสของหัววัดกับตัวอย่าง

จากอุปกรณ์แบบหัววัดในลักษณะของแท่งวัดความร้อน ที่มีค่าการนำความร้อนที่ดีมาก เป็นเหตุให้เกิดการพิจารณาการเกิดความต้านทานความร้อนจากการสัมผัสที่ภายนอกหัววัดระหว่างผิวหัววัดกับตัวอย่าง ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ในกรณีที่หัววัดและตัวอย่างไม่แนบสนิทกันทำให้เกิดช่องว่างระหว่างผิวสัมผัส Murakami และคณะ(1996)จึงศึกษาปัจจัยนี้โดยการจำลองสมการวัดแบบแท่งความร้อน และสมการวัดแบบลวดความร้อนที่มีได้ตัดทอนเป็นสมการอ้างอิง แล้วทำการทดสอบที่ค่า R ต่าง ๆ กัน



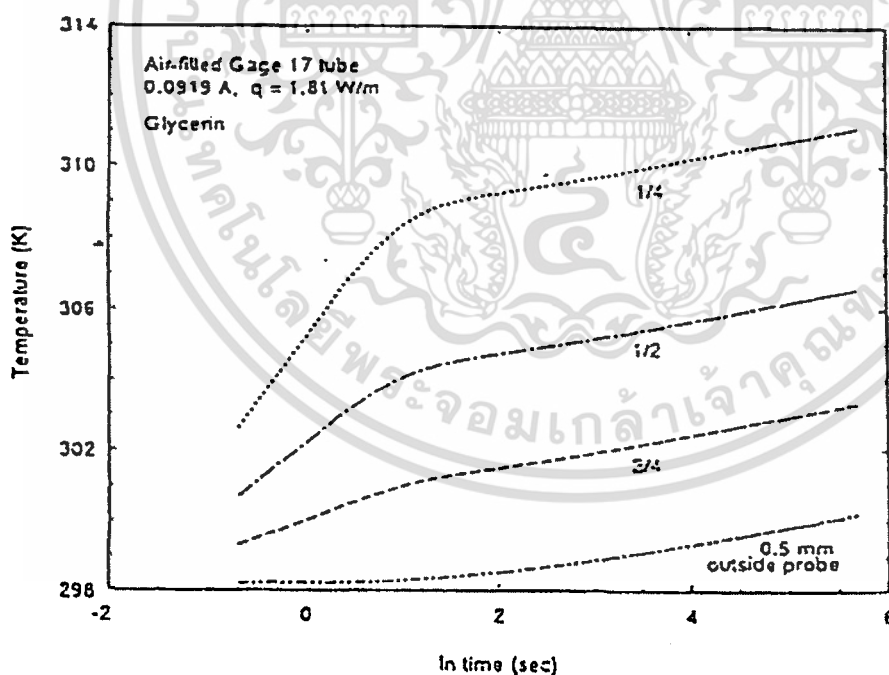
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 2 ผลของความต้านทานความร้อนจากการสัมผัสที่มีต่อกราฟ T กับ $\ln(t)$ ของสมการวัดแบบแท่งความร้อน เปรียบเทียบกับสมการที่มีได้ตัดทอนของลวดความร้อน
ที่มา : Murakami และคณะ (1996)

จากกราฟพบว่าค่า R ที่สูงขึ้นจะทำให้อุณหภูมิของหัววัดสูงกว่า R ที่มีค่าต่ำโดยที่ไม่มีผลกระทบต่อค่าความชันของกราฟ กล่าวคือเมื่อเวลาผ่านไปช่วงหนึ่งอัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าคงที่ ในขณะที่ความร้อนจะถ่ายเทไปยังตัวอย่างได้ยากขึ้นเมื่อค่า R สูงขึ้น ทำให้อุณหภูมิของหัววัดสูงกว่า R ที่มีค่าต่ำ

1.1.1.2 พิจารณาค่าแห่งภายในหัววัดระหว่างลวดให้ความร้อนและผิวหัววัดด้านใน

ในการประยุกต์ใช้งานจริงหัววัดจะมีลักษณะกลวง ภายในประกอบด้วยลวดให้ความร้อนและตัววัดอุณหภูมิ ซึ่งจะมีช่องว่างเกิดขึ้นระหว่างลวดให้ความร้อนและผิวหัววัดด้านใน ทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิ ซึ่งขัดกับหลักการวัดแบบลวดความร้อน ดังนั้น Karwe และ Tong (1992) จึงทำการพิจารณาอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ณ ตำแหน่งภายในหัววัด 3 ตำแหน่งคือ $1/4$, $1/2$ และ $3/4$ ห่างจากลวดให้ความร้อนมายังผิวหัววัดด้านในและระยะ 0.5 mm ห่างจากผิวนอกหัววัด



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ของ T กับ $\ln(t)$ จากการทำการจำลองแบบเชิงตัวเลข เมื่อใช้อากาศเป็นตัวเติมในหัววัด และตัวอย่างที่ใช้ทดสอบเป็นกาลีเซอรอล

ที่มา : Karwe และ Tong (1992)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Karwe และ Tong (1992) พบว่าอุณหภูมิตำแหน่งที่ใกล้กับลวดให้ความร้อนจะมีค่าสูงกว่าจุดอื่น ๆ และลดลงตามระยะทางที่ห่างออกมา และเมื่อเวลาผ่านไปช่วงหนึ่งความชันของกราฟ T กับ $\ln(t)$ จะไม่เปลี่ยนแปลง แสดงว่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงภายในหัววัดจากตำแหน่งในการวัดที่ต่างกัน ไม่มีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนแต่อย่างใด ซึ่งหมายความว่าถึง ผลของความต้านทานความร้อนจากการสัมผัสทั้งที่อาจเกิดขึ้นภายในหรือภายนอกหัววัดจะไม่มีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่วัดได้

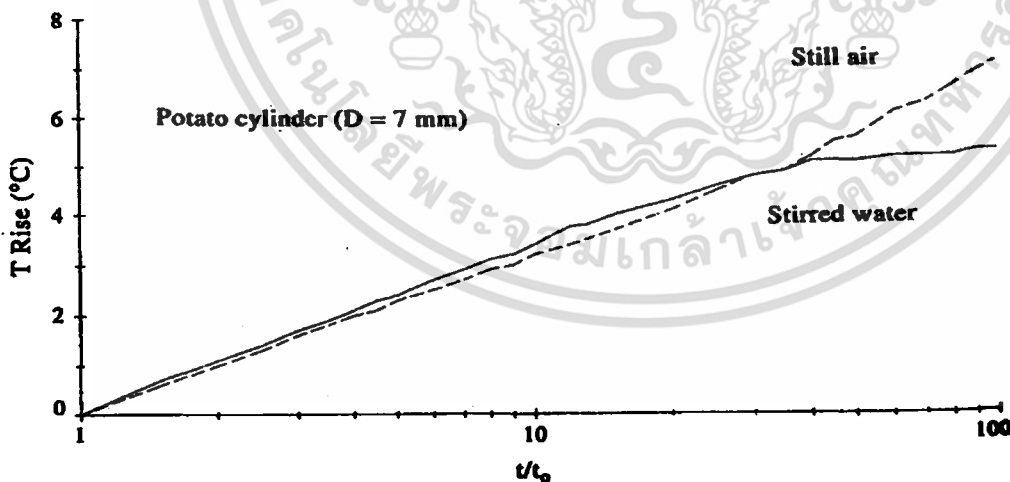
1.2 ผลที่เกิดจากสมมติฐานอื่น ๆ

1.2.1 ผลกระทบจากขอบเขตของตัวอย่าง

กรณีที่มีขนาดตัวอย่างมีค่าน้อยเกินไป หรือใช้เวลาในการทดสอบมากเกินไปจนทำให้ความร้อนถ่ายเทไปจนถึงขอบของตัวอย่าง จะเกิดการส่งผ่านความร้อนบริเวณขอบนอกของตัวอย่าง ซึ่งจะมีผลต่ออุณหภูมิของหัววัดที่เพิ่มขึ้นกับเวลาในลักษณะใดนั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยดังต่อไปนี้

1.2.1.1 สภาพแวดล้อมภายนอกขอบเขตของตัวอย่าง

Mirakami และคณะ(1996) ทำการเปรียบเทียบสภาพแวดล้อมที่มีค่าการนำความร้อนต่างกัน โดยสภาวะที่มีการนำความร้อนต่ำจะทดสอบกับอากาศที่อยู่นิ่ง ($k = 0.0244 \text{ W/m}^\circ\text{C}$) สภาวะที่มีการนำความร้อนสูงจะทดสอบกับน้ำที่มีการกวนตลอดเวลา ($k \geq 0.6 \text{ W/m}^\circ\text{C}$) และตัวอย่างที่ใช้ทดสอบคือ มันฝรั่งรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.7 mm ($k = 0.56 \text{ W/m}^\circ\text{C}$)



ภาพที่ 4 ผลของขอบเขตของตัวอย่าง ในการทดสอบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของหัววัดในตัวอย่างมันฝรั่งรูปทรงกระบอกที่สภาวะแวดล้อมเป็นอากาศที่นิ่งและน้ำที่มีการกวนตลอดเวลา ($Q=11\text{W/m}$)

ที่มา : Murakami และคณะ (1996)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบแสดงดังภาพที่ 4 พบว่าสภาพแวดล้อมที่มีค่าการนำความร้อนต่ำ จะส่งผลให้ค่าความชันของกราฟระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่มีค่าสูงขึ้นทันทีที่ความร้อนไหลไปถึงขอบของตัวอย่าง ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่คำนวณได้มีค่าต่ำกว่าความเป็นจริง การที่ความชันของกราฟมีค่าสูงขึ้นเมื่อความร้อนไหลไปถึงขอบของตัวอย่าง เนื่องจากอากาศซึ่งมีค่าการนำความร้อนต่ำกว่าตัวอย่างจะเป็นเหมือนฉนวน ป้องกันการไหลของความร้อนทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิภายในตัวอย่างมีค่าลดลง ส่งผลให้ความร้อนสะสมภายในหัววัดมากขึ้นกว่าที่ควรจะเป็น ค่าความชันของกราฟจึงสูงขึ้น ในทางกลับกันกรณีสภาพแวดล้อมมีค่าการนำความร้อนสูง จะส่งผลให้ค่าความชันของกราฟมีค่าต่ำลง เนื่องจากบริเวณขอบของตัวอย่างจะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูง ซึ่งเป็นการเพิ่มการนำความร้อนภายในตัวอย่าง การสะสมของอุณหภูมิภายในหัววัดจะน้อยกว่าที่ควรจะเป็น ค่าความชันของกราฟจึงลดลงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่คำนวณได้มีค่าสูงกว่าความเป็นจริง ในการทดลองจำเป็นต้องมีการกำหนดขอบเขตที่แน่นอนชัดเจน เพื่อไม่ให้ความร้อนไหลไปถึงขอบตัวอย่าง

1.2.1.2 ขนาดของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ

Vos(1995) เสนอสมการออกแบบขนาดของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบดังนี้

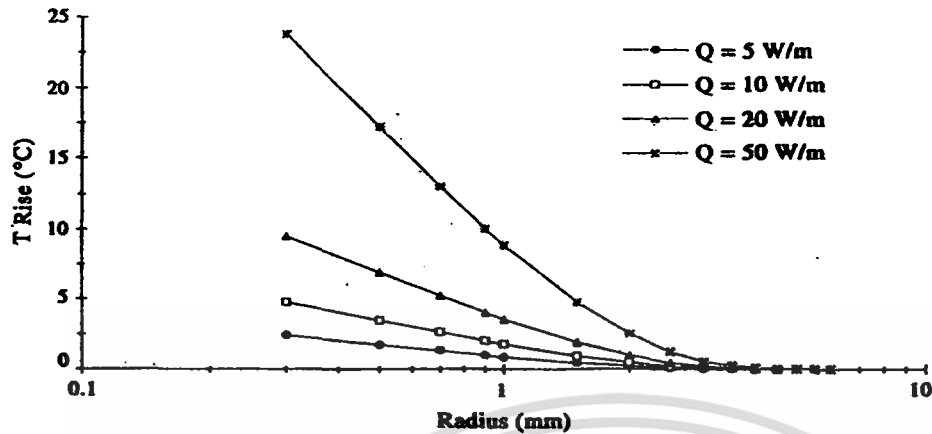
$$\frac{1}{\beta^2} < 0.6, \beta = \frac{r}{2\sqrt{\alpha_s t}}$$

สมการดังกล่าวจะไม่มีเทอมของอัตราความร้อนที่ป้อนให้ต่อความยาวหัววัด และยังคงทราบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนของตัวอย่าง (α_s) ในการคำนวณหาระยะออกมา สมการนี้จึงเหมาะกับการใช้ระดับอัตราความร้อนที่ป้อนในระดับต่ำ ๆ เท่านั้น

1.2.1.3 อัตราความร้อนที่ป้อนให้ต่อความยาวหัววัด(Q)

ค่าความชันของอุณหภูมิผ่านหน้าตัดของตัวอย่าง สามารถคำนวณได้โดย

$$\frac{dT}{dr} = - \frac{1}{2\pi k r} [Q]$$

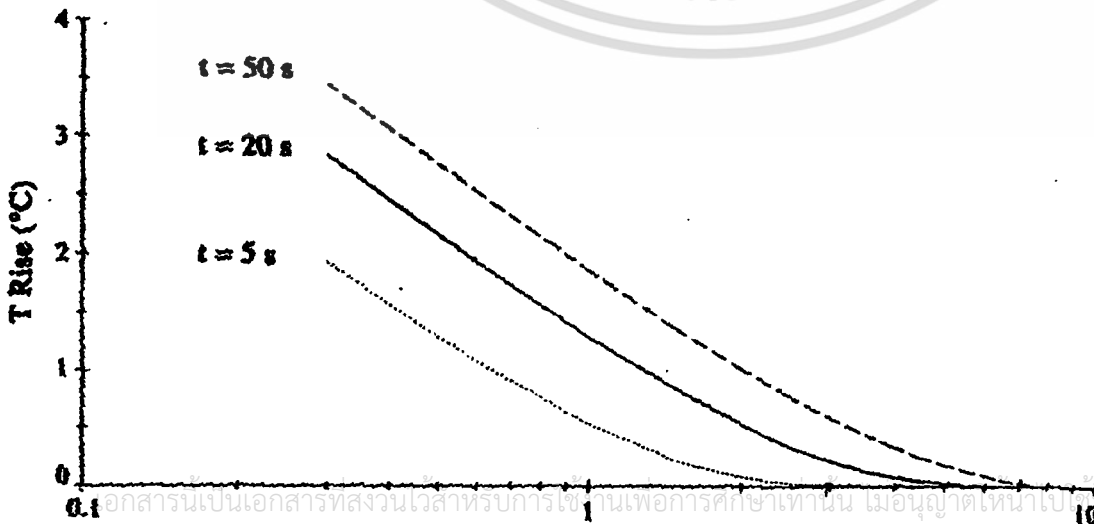


ภาพที่ 5 การกระจายอุณหภูมิในตัวอย่างน้ำที่ระยะเวลาในการทดสอบ 10 วินาที
ที่มา : Murakami และคณะ (1996)

Murakami และคณะ (1996) อธิบายภาพที่ 5 ว่าอุณหภูมิมีแนวโน้มลดลงตามระยะรัศมีของตัวอย่าง และค่าความชันจะมีผลกระทบจากอัตราความร้อนที่ป้อนให้ต่อความยาวหัววัด , ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของตัวอย่าง , ระยะทางที่ห่างจากแหล่งให้ความร้อน

ความร้อนจากหัววัดจะเป็นตัวทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนไปตามรัศมีของตัวอย่าง ซึ่งผลของอัตราความร้อนที่ป้อนให้แก่หัววัดที่มีต่อระยะรัศมีของตัวอย่างทดสอบ โดยการคำนวณการกระจายอุณหภูมิในตัวอย่างน้ำ โดยใช้สมการที่ไม่ได้ตัดทอนของหลักการวัดแบบลวดความร้อน หรือสมการ(1) ระดับอัตราความร้อนที่ใช้ทดสอบอยู่ในช่วง 5 – 50 W/m , พิจารณาระยะห่างจากผิวหัววัด 4.2 – 5.5 mm ในระยะเวลา 10 วินาที ผลการคำนวณแสดงจากภาพที่ 8 พบว่า อัตราความร้อนที่ป้อนให้หัววัดมีผลต่อระยะทางที่ความร้อนเคลื่อนตัวจากหัววัด ไปยังตัวอย่างน้อยมาก โดยเมื่อค่าปริมาณความร้อนเพิ่มขึ้น 900%แต่ระยะห่างเพิ่มขึ้นเพียง 31%

1.2.2.4 ระยะเวลาที่ใช้ทดสอบ (Test duration) , t



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นใบระเบียบด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

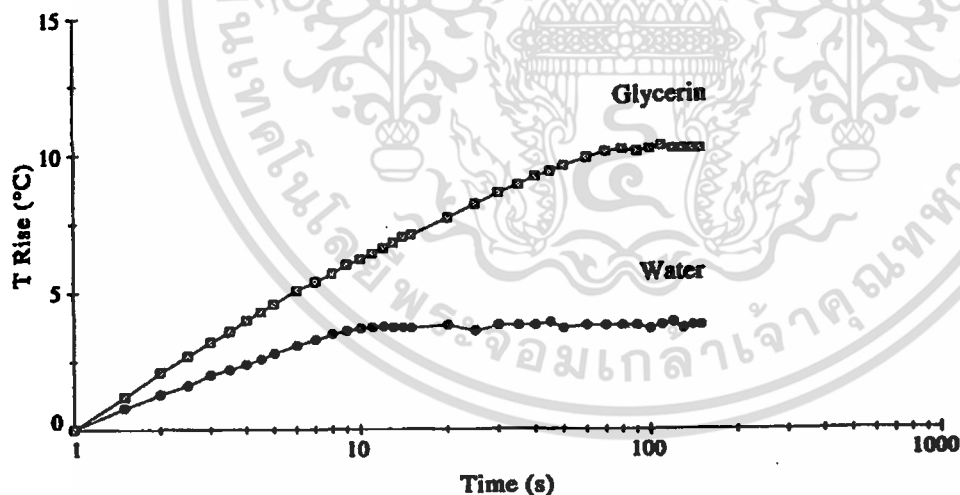
ภาพที่ 6 การกระจายอุณหภูมิในตัวอย่งน้ำที่มีปริมาณความร้อนคงที่ 5 W/m

ที่มา : Murakami และคณะ (1996)

จากกราฟกำหนดอัตราความร้อนที่ป้อนให้หัววัดมีค่า 5 W/m การกระจายอุณหภูมิของน้ำที่เวลา 5,20,50 วินาที พบว่าระยะเวลาที่ใช้ทดสอบจะมีผลต่อระยะที่ความร้อนเคลื่อนตัวจากหัววัดไปยังตัวอย่างมากกว่าระดับอัตราความร้อนที่ป้อนให้หัววัด โดยเมื่อเวลาทดสอบเพิ่มขึ้น 900% จะทำให้ระยะห่างจากผิวหัววัดเพิ่มขึ้นถึง 167% ดังนั้น Murakami และคณะ (1996) จึงสรุปว่าการลดผลกระทบที่เกิดขึ้นเนื่องจากขอบเขตของตัวอย่าง ในกรณีที่มีขนาดของตัวอย่างมีค่าจำกัดค่าหนึ่งควรพิจารณาการลดระยะเวลาในการทดสอบเป็นอันดับแรก

1.2.3 การพาความร้อน(Convection)

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของตัวอย่าง ถ้ามีผลของการพาความร้อนเกิดขึ้นด้วยจะส่งผลให้อัตราการส่งผ่านความร้อนผ่านตัวอย่างมีค่ามากขึ้นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ได้มีค่าไม่ถูกต้อง Murakami และคณะ(1996)จึงทดสอบการพาความร้อนที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างน้ำและกลีเซอรอล โดยใช้ปริมาณความร้อน 11 W/m ระยะเวลาในการทดสอบ 110 วินาที



ภาพที่ 7 ผลของการพาความร้อนที่เกิดขึ้นจากการทดสอบน้ำและกลีเซอริน($t_f=1$ s, $Q=11$ W/m)

ที่มา : Murakami และคณะ(1996)

จากกราฟพบว่า การพาความร้อนของน้ำจะเกิดขึ้นหลังจากเวลาผ่านไป 10 วินาที ส่วนกลีเซอรินจะเกิดหลังจาก 70 วินาที เนื่องจากความหนืดของกลีเซอรินมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นซึ่งการพาความร้อนนี้จะเกิดขึ้นโดยสังเกตได้จากค่าความชันที่เปลี่ยนแปลงนั่นเอง Murakami และคณะ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(1996) สรุปภาพที่ 10 ว่าสามารถตัดผลของการพาความร้อนออกได้โดยการจำกัดข้อมูล ก็คือให้พิจารณาหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนในช่วงกราฟที่เป็นเส้นตรง แต่ถ้าการพาความร้อนเกิดขึ้นเร็วมาก จำนวนข้อมูลในช่วงกราฟที่เป็นเส้นตรงอาจไม่เพียงพอ และปัญหานี้หลีกเลี่ยงได้โดยการใช้อัตราความร้อนที่ป้อนต่อความยาวหัววัดที่ระดับต่ำ ๆ หรือการลดเวลาในการทดสอบ

2. ผลที่เกิดจากการทดลอง

2.1 ค่าปรับเทียบ(Calibration Factor)หรือค่าปรับแก้(Correction Factor)

เป็นค่าคงที่ค่าหนึ่งที่ใช้ในการเพิ่มความถูกต้องของค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนซึ่งเป็นตัวปรับของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อความชันของกราฟ T กับ $\ln(t)$ เช่น อัตราส่วนของมวลความร้อน (M) และความไม่ถูกต้องในการวัดอัตราความร้อนต่อความยาวหัววัด (Q) โดยค่าปรับเทียบสามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนของค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจากค่าอ้างอิง (k_{ref}) กับค่าที่ได้จากการวัด (k_{exp})

ค่าปรับเทียบอาจมีผลกระทบจากค่ามวลความร้อนของวัสดุที่ใช้ปรับเทียบ Murakami และคณะ(1996) จึงแนะนำให้เลือกวัสดุปรับเทียบที่มีค่าความชันใกล้เคียงกับตัวอย่างที่จะทดสอบให้มากที่สุด นอกจากนี้ระดับของ Q จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟ โดยความชันจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ Q มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นความไม่ถูกต้องในการหาค่า Q จะมีผลกระทบโดยตรงต่อการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ซึ่งรวมถึงความละเอียดของค่ากระแสไฟฟ้าที่อ่านได้ ตำแหน่งของลวดให้ความร้อน ควรมีค่าคงที่และถูกต้องอย่างเพียงพอ

2.4 การออกแบบหัววัด(Probe)

การออกแบบหัววัดในช่วงแรกถูกออกแบบโดยVander Held และ Van Drunen(1949) ซึ่งประยุกต์ใช้เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาของการเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีระหว่างลวดให้ความร้อนกับสารตัวอย่างที่เป็นของเหลว ดังนั้นจึงใช้ลวดให้ความร้อน และเทอร์โมคัปเปิล(Thermocouple)สอดใส่ไว้ในแท่งแก้ว ต่อมาHooper และ Lepper ได้สร้างหัววัดที่พกพาได้สำหรับใช้หาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของดิน ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัววัด(D) 4.8×10^{-3} m และความยาวของหัววัด(L) 0.5 m ตัวหัววัดทำจากอะลูมิเนียมซึ่งสามารถที่จะแทรกเข้าไปในพื้นที่ดินระหว่างการวัดได้ หลังจากนั้น D'Eustacio และคณะ(1952) ได้สร้างหัววัดที่มีขนาดเล็กกว่า($D = 7.62 \times 10^{-4}$ m , $L = 0.1$ m) จากสแตนเลสตีล และต่อมาSweat และ Haugh ได้สร้างหัววัดที่มีขนาดเล็กกว่าอีกโดยใช้เข็มฉีดยา(Hypodermic Needles)($D = 6.6 \times 10^{-4}$ m , $L = 3.9 \times 10^{-3}$ m) ซึ่งมีการประยุกต์ใช้กันมากในการวัดค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอาหารชนิดต่าง ๆ ในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถใช้กับตัวอย่างที่มีขนาดเล็กและมีปริมาณน้อย ๆ ได้

Murakami และคณะ ได้แนะนำการออกแบบพารามิเตอร์สำหรับหัววัดที่จะใช้วัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอาหารที่สภาวะเหนือจุดเยือกแข็ง โดยได้รวบรวมเอาข้อมูลการออกแบบของผู้วิจัยบางท่าน ซึ่งสรุปได้ดังนี้

2.4.1 หัววัด ควรทำจากเข็มฉีดยาชนิดสเตนเลสตีล(Hypodermic Needle) เนื่องจากจะมีฐานขนาดใหญ่ ทำให้การยึดสายเทอร์โมคัปเปิลเป็นไปได้ง่ายขึ้น และยิ่งไปกว่านั้นยังมีความแข็งแรงกว่าเหล็กธรรมดาทั่ว ๆ ไป นอกจากนี้ขนาดรัศมี และอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของหัววัด จะต้องมีการออกแบบให้มีผลกระทบต่อสมมติฐานของหลักการวัดแบบลวดความร้อนดังนี้

2.4.1.1 ขนาดรัศมีของหัววัด

ควรจะมีขนาดเล็กที่สุด เท่าที่จะทำให้ค่ามวลความร้อน(S_p) มีค่าน้อยที่สุด เนื่องจากขนาดของมวลความร้อนที่มากจะดูดซับความร้อนที่ป้อนเข้าไปปริมาณหนึ่ง ซึ่งเป็นสาเหตุของความล่าช้าในการกระจายความร้อนไปสู่วัสดุที่ทดสอบ และจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟ $T-\ln(t)$

2.4.1.2 ค่าL/Dของหัววัด

หลักการของการวัดแบบลวดความร้อน จะสมมติให้การไหลของความร้อนเกิดในทิศทางรัศมีเท่านั้น และความยาวของลวดความร้อนจะมีระยะเป็นอนันต์ แต่ในความเป็นจริงความยาวของหัววัดจะมีค่าจำกัดค่าหนึ่ง การไหลของความร้อนจึงเกิดขึ้นทั้งในแนวรัศมีและแนวแกน Blackwell(1995) ได้เสนอสมการที่ใช้ออกแบบหัววัดให้การไหลของความร้อนในทิศทางแกนมีค่าต่ำมากพอที่จะสามารถตัดทิ้งได้ เมื่อเทียบกับการไหลในแนวรัศมี ซึ่งจะมีสัมพันธ์กับค่า L/Dของหัววัด(λ) ดังนี้

$$\left| \Delta R_{\max} \right| = \frac{100[5.64 + 0.0068\sigma\lambda^2(\varepsilon - \eta)]}{\lambda \exp(0.01 \lambda^2)}$$

โดยที่ $\left| \Delta R_{\max} \right|$ = ค่าความผิดพลาดสูงสุดของการไหลของความร้อนในแนวแกน
 λ = อัตราส่วนระหว่างความยาวกับเส้นผ่านศูนย์กลางของหัววัด(L/D)
 σ = สี่เท่าของความหนาของผนังหัววัดต่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของหัววัด($4 \cdot \text{Probewall Thickness}/\text{OD}$)
 ε = อัตราส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของหัววัดกับตัวอย่าง (k_p/k_s)
 η = อัตราส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนของหัววัดกับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนของตัวอย่าง ($k_p \alpha_s / k_s \alpha_p$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 ตัววัดอุณหภูมิ(Temperature Sensor)

ปกติทั่ว ๆ ไปจะใช้เทอร์โมคัปเปิล แม้จะพบว่ามิตัววัดอุณหภูมิชนิดอื่นสามารถนำมาวัดได้ดีกว่า แต่เนื่องจากเทอร์โมคัปเปิลสามารถใช้ได้ในช่วงอุณหภูมิกว้าง ติดตั้งง่าย ราคาไม่แพง และความถูกต้องของเทอร์โมคัปเปิลสามารถทำได้โดยการปรับเทียบ จึงมีผู้นิยมใช้กันมาก ชนิดของเทอร์โมคัปเปิลที่ Murakami และคณะ แนะนำให้ใช้คือ type-E (Chromel-Constantan) เนื่องจากเป็นชนิดที่ไวที่สุด โดยมีค่า Seeback Coefficient สูงที่สุด ($162\mu\text{V}/\text{C}$) ทำให้อุณหภูมิที่วัดได้มีความละเอียดและแม่นยำมากกว่าเมื่อเทียบกับชนิดอื่น และขนาดของเทอร์โมคัปเปิลควรมีขนาดเล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อให้เวลาในการตอบสนองต่ออุณหภูมิ (Time constant) สั้นที่สุด

2.4.3 ลวดให้ความร้อน(Heater Wire)

ชนิดที่แนะนำให้ใช้คือ Constantan (TC grade) เนื่องจากมีค่าความต้านทานไฟฟ้าคงที่และ Temperature Coefficient มีค่าต่ำกว่าตัวอื่น ๆ

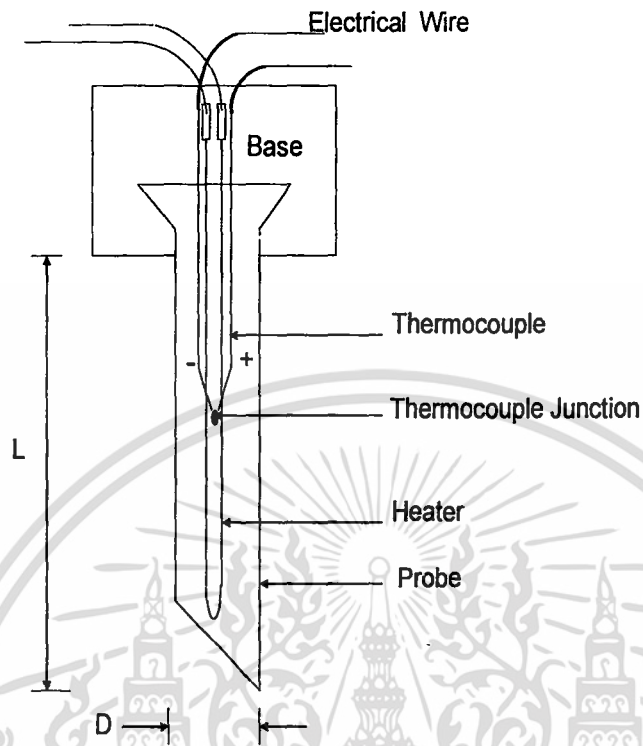
จากส่วนที่ 2.4.1-2.4.3 Murakami และคณะ(1996) แนะนำการออกแบบหัววัด โดยยึดหลักการออกแบบของ Sweat และ Haugh ซึ่งสรุปได้ ดังตารางที่ 2.1

ส่วนประกอบ	รายละเอียด	ต้นแบบ
ฐาน(Base)	ตัวเชื่อมกับเทอร์โมคัปเปิล type E	ขนาดเล็ก
ลวดให้ความร้อน (Heater Wire)	Constantan หุ้มฉนวน	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D = 0.0762 mm) ความยาว(L ≤ 0.1m)
เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)	type E หุ้มฉนวน	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D = 0.0508 m)
หัววัด(Probe)	เข็มฉีดยา (Stainless Steel Hypodermic Needle)	Gauge 22 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ภายนอก(OD) = 0.71 mm , ความหนา (d) = 0.15 mm

ตารางที่ 2.1 คำแนะนำในการออกแบบหัววัดสำหรับวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

ที่มา : Murakami และคณะ(1996)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 8 ส่วนประกอบของหัววัดที่ใช้ในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านกรรค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 ส่วนประกอบของอุปกรณ์วัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

เพื่อให้ได้อุปกรณ์วัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่มีความถูกต้องและเหมาะสมโดยใช้หลักการวัดด้วยหัววัด จึงทำการออกแบบอุปกรณ์โดยคำนึงถึงสมมติฐานรวมทั้งความถูกต้องของส่วนประกอบอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในการวัด

3.1.1 ชุดอุปกรณ์วัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ประกอบด้วย

ก. หัววัด (Probe) หุ้มด้วยท่อหอดที่ทนอุณหภูมิได้ในช่วง $0-125\text{ }^{\circ}\text{C}$ มีฐานพลาสติกตรงปลาย ด้านบนที่ใหญ่พอจะทำให้สะดวกในการยึดตัวหัววัดให้อยู่ตรงกลางกระบอกตัวอย่างได้ หัววัดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (OD) 3.0 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (ID) 2.8 มิลลิเมตร และความยาว 95 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 10

ข. ตัววัดอุณหภูมิ ใช้เทอร์โมคัปเปิล Type K เนื่องจากหาซื้อได้ง่าย ราคาถูก และนิยมใช้อย่างแพร่หลายมากที่สุดขนาดที่ใช้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.4 มิลลิเมตร การใช้งานจะใช้เป็นเทอร์โมคัปเปิลเปลี่ยนโดยจุดวัดบิตเป็นเกลียว ดังภาพที่ 14

ค. ลวดให้ความร้อน เป็นลวดนิโครม เนื่องจากหาซื้อได้ง่าย ราคาถูก ใช้ในช่วงอุณหภูมิที่ไม่เกิน $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของลวดนิโครมจะมีค่าคงที่ โดยไม่เปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิ

ง. สายไฟ (Electrical Wire) เป็นตัวเชื่อมระหว่างลวดให้ความร้อนกับเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า จะใช้เป็นลวดทองแดง เนื่องจากมีค่าความต้านทานไฟฟ้านำ ราคาถูก

จ. ฉนวน (Insulation) สำหรับตัววัดอุณหภูมิจะใช้ท่อหอดหุ้มไว้เป็นฉนวนไว้ เพื่อป้องกันการเสียดสีและการลัดวงจรระหว่างตัววัดอุณหภูมิกับลวดนิโครม

ฉ. กระบอกใส่ตัวอย่าง (Sample Holder) ทำจากแก้วมีความโปร่งแสง สามารถเห็นผลิตภัณฑ์ได้ง่าย หาซื้อง่าย ราคาถูก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 62 มิลลิเมตร สูง 120 มิลลิเมตร มีฝาปิดอะคริลิกด้านบนเจาะรูตรงกลางเพื่อใส่หัววัด และฝาปิดอะคริลิกด้านล่างเพื่อยึดไม่ให้กระบอกใส่ตัวอย่างเคลื่อนเมื่อทำการทดลอง ดังภาพที่ 10

3.1.2 เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (Regulator AC-DC)

เป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแล้วจ่ายให้กับลวดความร้อน มีช่วงปรับค่าความต่างศักย์ $0-15\text{ V}$ ช่วงปรับกระแส $0-3\text{ A}$ ดังภาพที่ 11

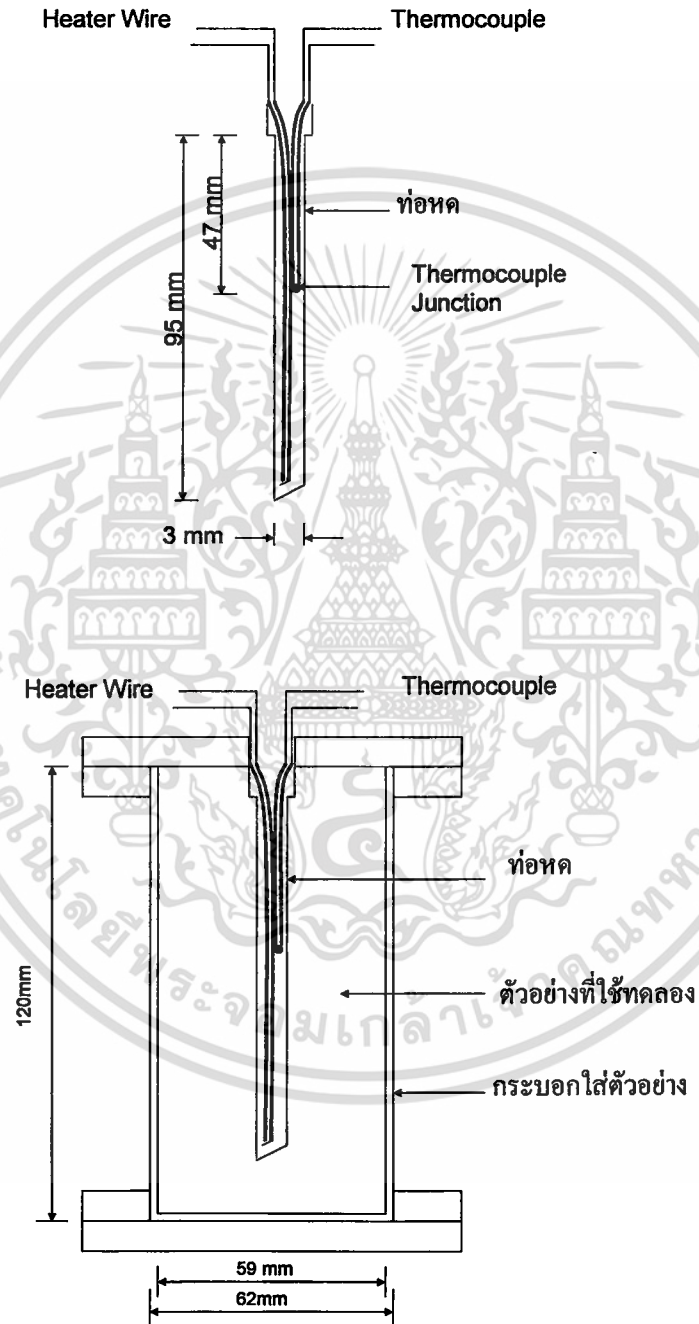
3.1.3 แอมมิเตอร์และโวลต์มิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัดความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า ดังภาพที่ 12 , 13

3.1.5 เครื่องอ่านค่าอุณหภูมิชนิด Type K

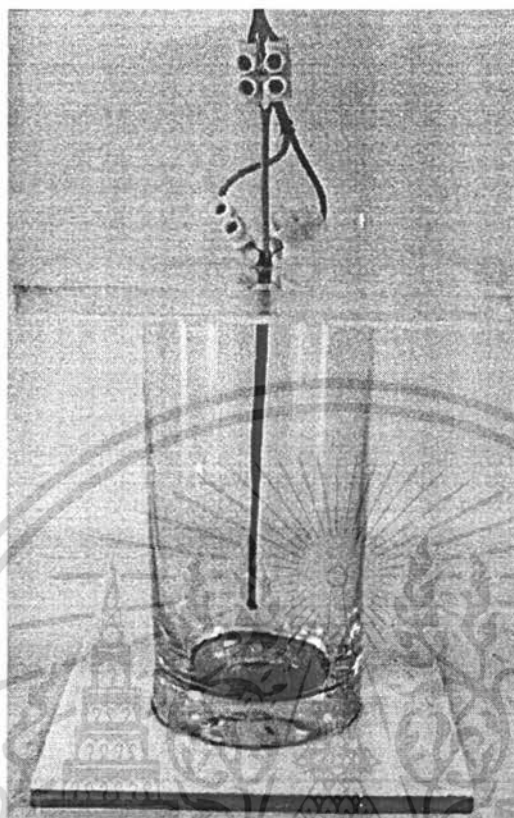
ซึ่งแสดงผลของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อทำการทดลอง



ภาพที่ 9 ส่วนประกอบและขนาดอุปกรณ์วัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนโดยวิธีใช้หัววัดที่

ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



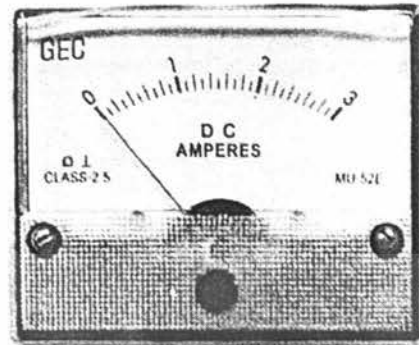
ภาพที่ 10 หัววัดและกระบอกใส่ตัวอย่าง



ภาพที่ 11 เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

96930



ภาพที่ 12 แอมมิเตอร์



ภาพที่ 13 โวลต์มิเตอร์



ภาพที่ 14 เครื่องอ่านค่าอุณหภูมิชนิด Type k

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 หลักการทํางานของเครื่องมือ

เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับหลอดความร้อนซึ่งปรับกระแสได้ในช่วง 0-15 โวลต์ 0-3 แอมแปร์ ความร้อนที่ปรับค่ากระแสไฟฟ้าให้อยู่ในระดับคงที่แล้วจะเคลื่อนที่ผ่านตัวอย่าง โดยจะแสดงผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองออกมาที่เครื่องอ่านค่าอุณหภูมิชนิด Type K ทำการบันทึกผลเพื่อนำมาคำนวณหาค่าความชันของอุณหภูมิและเวลา จากสมการที่ใช้คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่อไป

3.3 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

3.3.1 น้ำ เนื่องจากปริมาณน้ำในอาหาร จะเป็นตัวที่มีอิทธิพลหลักต่อค่าสัมประสิทธิ์การนำ ความร้อนของอาหาร โดยอาหารที่มีปริมาณความชื้นสูงจะมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงกว่าอาหารที่มีปริมาณความชื้นที่ต่ำกว่า ดังนั้นอาหาร โดยส่วนใหญ่จะมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนไม่เกินค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของน้ำ และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของน้ำเท่ากับ $0.628 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ (Murdia : 1989)

3.3.2 กลีเซอรอล เป็นอีกตัวอย่างหนึ่งที่นักวิจัยส่วนใหญ่นิยมใช้ในการสอบเทียบอุปกรณ์ สำหรับกรณีตัวอย่างที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ต่ำลงมา โดยกลีเซอรอลที่อุณหภูมิ 30°C มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเท่ากับ $0.289 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ (Maroulis : 1991) กลีเซอรอลเป็นสารละลาย ก่อนข้างหนืด ควรเทอย่างต่อเนื่อง เพื่อลดการเกิดฟองขึ้นในสารละลาย ซึ่งจะมีผลต่อการหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนได้

3.3.3 ไข่ขาวและไข่แดง เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของทั้งสองอยู่ภายในช่วงทำการทดลองโดย ไข่ขาวมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเท่ากับ $0.577 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ และไข่แดงมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเท่ากับ $0.388 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ (R.Paul Singh & Dennis R Heidman)

3.4 การออกแบบการทดลอง

แบ่งการทดลองเป็น 3 ตอน ดังนี้

3.4.1 การทดสอบหาระยะเวลาสูงสุดในการทดลอง เพื่อไม่ให้ความร้อนจากหัววัดเกินขอบเขตของตัวอย่างที่ใช้ทดลอง เนื่องจากจะมีผลต่อเนื่องไปถึงการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ทำให้มีค่าคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง

3.4.2 การทดสอบหาค่าความถูกต้องของเครื่องมือ ที่แต่ละระดับอัตราความร้อนต่อความยาวหัววัด โดยพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจากระยะเวลาที่เหมาะสม และวิเคราะห์หาค่าปรับแก้ของ

อุปกรณ์เพื่อนำไปใช้หาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแต่ละระดับอัตราความร้อนต่อความยาวหัววัด และวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Error Mean Square)

3.4.3 การทดสอบหาค่าความเที่ยงตรงของเครื่องมือ โดยการนำข้อมูลจากตอนที่ 2 มาใช้ทำการทดลองวัดตัวอย่างซ้ำแล้วนำมาวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน (Coefficient of variation)

3.5 ขั้นตอนการทดลอง

3.5.1 การทดสอบหาระยะเวลาสูงสุดในการทดลอง

ก. เตรียมตัวอย่างน้ำ

ข. ติดตั้งคังภาพที่ 15 ต่อชุดอุปกรณ์ในการวัดให้เรียบร้อยซึ่งแสดงรายละเอียดคังภาพที่ 16

ค. กำหนดระดับกระแสไฟฟ้าที่ต้องใช้เพื่อให้ได้ปริมาณความร้อนต่อความยาวหัววัดในระดับที่ต้องการทดสอบ โดยคำนวณจากสมการ

$$I = (Q/R)^{1/2}$$

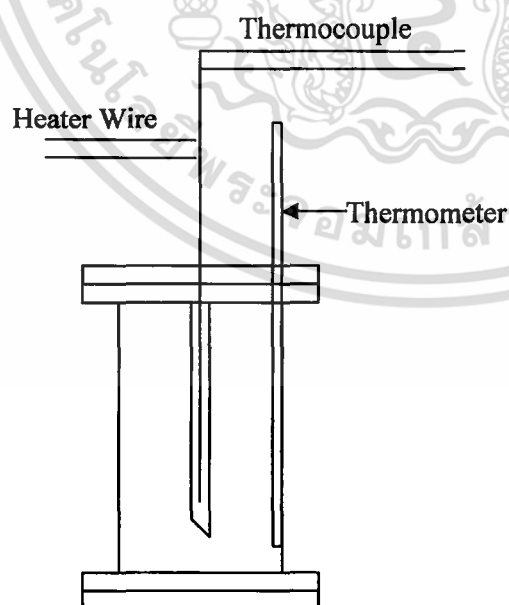
โดย R = ค่าความต้านทานต่อความยาวหัววัด

Q = อัตราความร้อนที่ป้อนให้ต่อความยาวหัววัด (W/m)

I = ระดับกระแสไฟฟ้า (A)

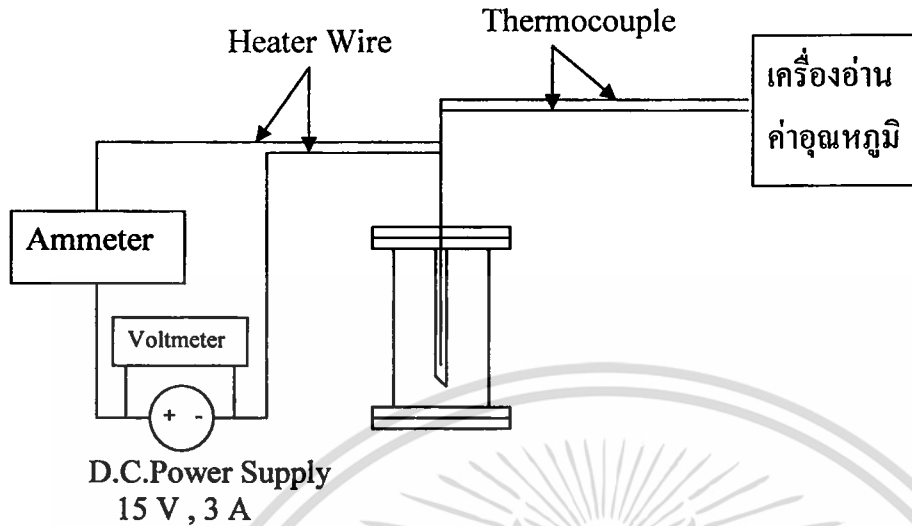
ง. เริ่มทำการวัด โดยเปิดสวิตช์เพื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าจากเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าเข้าสู่หัววัด และจับเวลาบันทึกทุก ๆ 10 วินาที

จ. หยุดทำการทดลองเมื่อเวลาผ่านไป 180 วินาที



ภาพที่ 15 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้วัดระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 16 ชุดอุปกรณ์การทดลองแบบสมบูรณ

3.5.2 การทดสอบหาค่าความถูกต้องของเครื่องมือ

- ก. บรรจุตัวอย่างอาหารลงในกระบอกใส่ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง
- ข. ปิดฝาซึ่งมีหัววัดยึดติดอยู่ตรงกลาง โดยหัววัดจุ่มลงไปในตัวอย่างอาหาร
- ค. เปิดสวิตช์เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าเครื่องวัด โดยกำหนดระดับกระแสไฟฟ้าที่ 15 W/m, 20 W/m, 25 W/m ตามลำดับ บันทึกข้อมูลของอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปตามเวลาทุก ๆ 1 วินาที โดยระยะเวลาที่เหมาะสม หรือเมื่ออุณหภูมิคงที่
- ง. ปิดสวิตช์เพื่อหยุดการปล่อยกระแสไฟฟ้า และหยุดการบันทึกข้อมูล
- จ. นำค่าของอุณหภูมิและเวลามาคำนวณหาค่าความชัน
- ฉ. คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของตัวอย่างอาหารแต่ละชนิด โดยใช้สมการ

$$K = \frac{Q}{4 \pi \text{ Slope}}$$

- ซ. ทำการวัดซ้ำของตัวอย่างเดิมอย่างละ 3 ซ้ำ
- ช. วิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Error Mean Square)

3.5.3 การทดสอบหาค่าความเที่ยงตรงของเครื่องมือ

- ก. พิจารณาระดับอัตราความร้อนต่อความยาวหัววัดที่เหมาะสมจากข้อ 3.5.2
 - ข. ทำการทดลองเหมือนข้อ 3.5.2 เป็นจำนวน 10 ซ้ำ 2 ตัวอย่าง น้ำ และกลีเซอรอลตามลำดับ
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค. นำค่าที่คำนวณเป็นค่าความชันมาแทนลงในสมการที่มีค่าปรับแก้ของอุปกรณ์แล้วจากข้อ

3.5.2

ง. วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน (Coefficient of variation)

3.6 การคำนวณจากการทดลอง

3.6.1 คำนวณระดับกระแสไฟฟ้า

เมื่อกำหนดระดับอัตราความร้อนต่อความยาวหัววัด (Q) ที่ 15W/m, 20W/m ,25W/m

ความต้านทานต่อความยาวหัววัด (R) เท่ากับ 2.57 Ω/m

จากสมการ $I = (Q/R)^{1/2}$

3.6.2 คำนวณค่าความชันที่แท้จริงของแต่ละตัวอย่าง

จากสมการ $\text{slope} = Q/4\pi k$

จะได้ค่าความชันจริงดังแสดงในตารางที่ 3.1

3.6.3 คำนวณค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Error Mean Square)

$$EMS = \sqrt{\frac{\Sigma(K_{วัด} - K_{จริง})^2}{N}}$$

3.6.4 คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน (Coefficient of variation)

$$CV = \frac{SD}{\bar{X}} \times 100$$

$$SD = \sqrt{\frac{\Sigma(X_i - \bar{X})^2}{N}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$Q=15\text{W/m}$ ตัวอย่าง ที่ใช้ในการทดลอง	k อ้างอิง($\text{W/m}^{\circ}\text{C}$) ณ 30°C	slope จริง
น้ำ	0.628	1.899971
ไข่ม้วน	0.577	2.067906
ไข่ม้วน	0.338	3.530124
กาลีเซอรอล	0.289	4.128657

$Q=20\text{W/m}$ ตัวอย่าง ที่ใช้ในการทดลอง	k อ้างอิง($\text{W/m}^{\circ}\text{C}$) ณ 30°C	slope จริง
น้ำ	0.628	2.533295
ไข่ม้วน	0.577	2.757208
ไข่ม้วน	0.338	4.706832
กาลีเซอรอล	0.289	5.504876

$Q=25\text{W/m}$ ตัวอย่าง ที่ใช้ในการทดลอง	k อ้างอิง($\text{W/m}^{\circ}\text{C}$) ณ 30°C	slope จริง
น้ำ	0.628	3.166618
ไข่ม้วน	0.577	3.44651
ไข่ม้วน	0.338	5.88354
กาลีเซอรอล	0.289	6.881095

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าความชันที่แท้จริงของระดับอัตราความร้อนต่อความยาวหัววัดที่

15 W/m, 20 W/m, 25W/m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล

จากการออกแบบเครื่องมือวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนตามบทที่ 3 เครื่องมือวัด สามารถวัดได้ในช่วงอุณหภูมิ $0-100^{\circ}\text{C}$ เนื่องจากความสามารถของสวดความร้อนที่จะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าคงที่ที่ ในช่วงอุณหภูมินั้นๆ อุปกรณ์วัดถูกทดสอบโดยการทดสอบวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของน้ำ ไข่ขาวไข่แดงและกลีเซอรอล เพื่อนำข้อมูลมาปรับปรุงวิธีการวัดที่เหมาะสม และเพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการวัด ตลอดจนเป็นข้อมูลสำหรับการกำหนดแนวทางการวิเคราะห์ข้อมูลอย่างละเอียด เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเป็นค่าที่ไม่สามารถวัดได้โดยตรงแต่ได้จากการคำนวณมาจากข้อมูลพื้นฐานที่วัดด้วยอุปกรณ์นั่นเอง

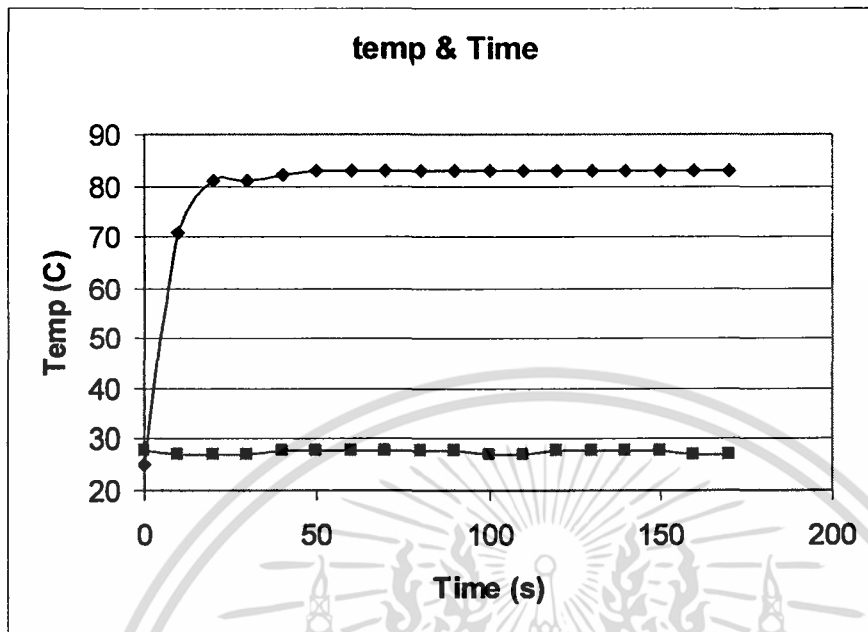


ภาพที่ 17 แสดงเครื่องวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนด้วยวิธีวัดแบบลวดความร้อน

4.1 ผลของระยะเวลาสูงสุดในการทดลอง

จากการทดลองวัดค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปของเทอร์โมมิเตอร์ที่ติดอยู่บริเวณขอบของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง พบว่า ณ เวลาที่ทำการทดลองที่ 180 วินาที ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น จึงเป็นผลให้วิเคราะห์ได้ว่าระยะเวลาที่สั้นที่สุดและไม่ส่งผลกระทบต่อไปถึงการหาค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (T) กับเวลา (time) คือที่ 180 วินาที สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้กับการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนครั้งต่อไปจึงใช้ระยะเวลาที่ 30 วินาทีก็เพียงพอสำหรับตัวอย่างทั้ง 4 ชนิดเนื่องจากค่าความเป็นเส้นตรงเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลานี้

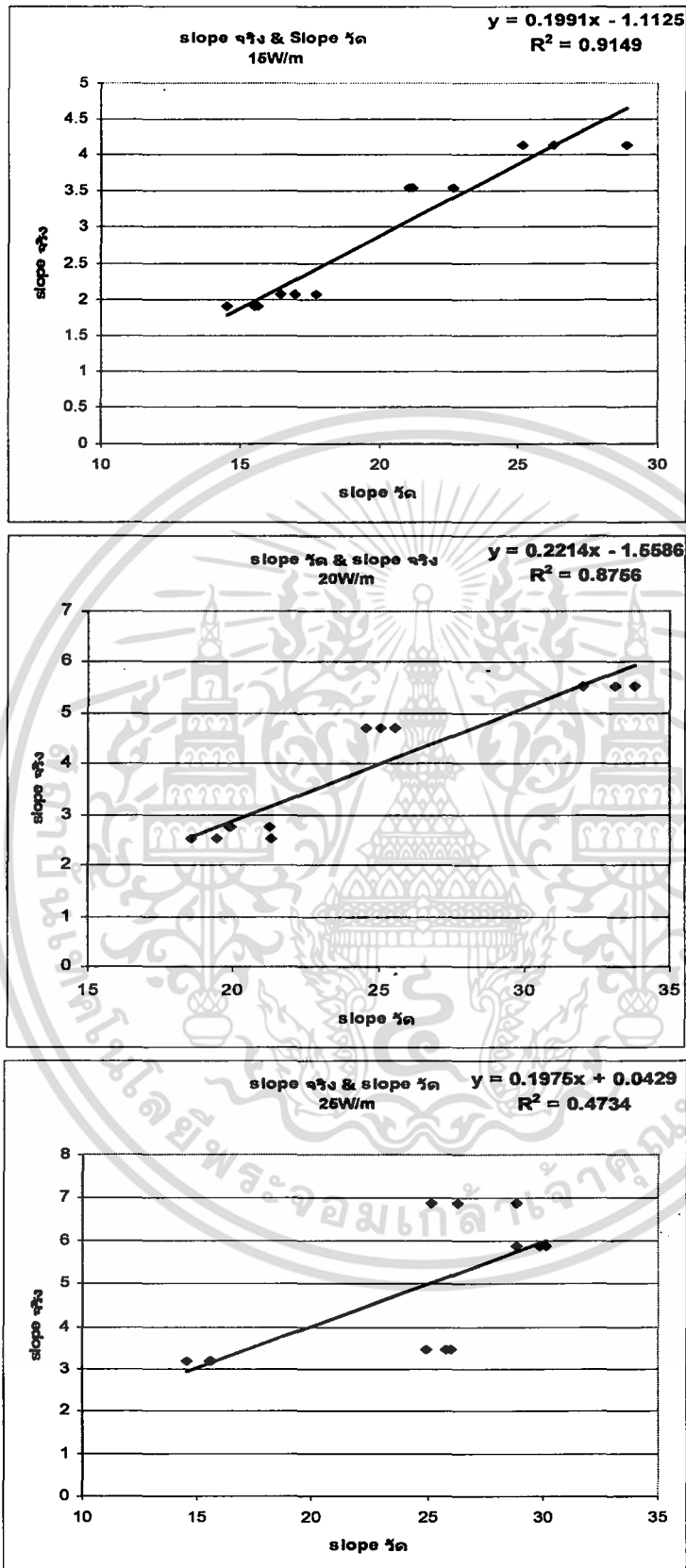
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิ กับ เวลา ของตัวอย่างน้ำที่ 25W/m

4.2 ผลของการทดสอบหาค่าความถูกต้องของเครื่องมือ

จากการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของตัวอย่างทั้ง 4 ชนิด ที่ระดับอุณหภูมิ 30 °c โดยใช้ระดับอัตราความร้อนต่อความยาวหัววัดเท่ากับ 15 W/m, 20 W/m, 25 W/m เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 30 วินาที พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจากการทดสอบมีค่าผิดไปจากค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนอ้างอิง อาจเนื่องมาจากค่าผิดพลาดของอุปกรณ์วัดและจากการวัดของผู้วัดด้วย ดังนั้นจึงมีการคิดหาค่าปรับแก้ใส่เข้าไปในสมการการคำนวณเพื่อให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่วัดจากอุปกรณ์มีความถูกต้องเมื่อเทียบจากสัมประสิทธิ์การนำความร้อนอ้างอิงมากขึ้น โดยตัวอย่างแต่ละชนิดจะวัดซ้ำอย่างละ 3 ซ้ำ เมื่อนำผลของความชันที่คำนวณจากความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ตั้งแต่เวลา 4 วินาทีขึ้นไป เนื่องจากที่ช่วงเวลา 4 วินาที แรกค่าความชันที่ได้เป็นค่าความชันจากการนำความร้อนของตัวหัววัดไม่ใช่ค่าความชันจากการนำความร้อนของตัวอย่าง จากนั้นนำความชันที่คำนวณได้มาเทียบกับความชันจากอ้างอิงแล้วพลอตกราฟออกมาดังแสดงในภาพที่ 19



ภาพที่ 19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชันที่วัดได้กับความชันอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟจะได้สมการค่าปรับแก้รูปทรงของแต่ละระดับความร้อนต่อความยาวออกมา จากนั้นจึงทำการทดสอบสมการ โดยการคำนวณค่าผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง ผลที่ได้ดังตารางที่ 4.1

อัตราความร้อนต่อความยาวหัววัด(W/m)	สมการค่าปรับแก้รูปทรง	ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อน
15	$Y=0.1991X-1.1125$	0.0491
20	$Y=0.2214X-1.5586$	0.0719
25	$Y=0.1975X+0.0429$	0.0987

ตารางที่ 4.1 แสดงผลสรุปที่ได้จากการคำนวณจากตารางที่ ข.2-ข.4

เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อน ของอัตราความร้อนต่อความยาวหัววัดทั้ง 3 ระดับพบว่าที่ 15 W/m มีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด ทำให้วิเคราะห์ได้ว่าระดับนี้เป็นระดับที่เหมาะสมที่สุดที่จะนำมาใช้ในการทดลอง

4.3 ผลของการทดสอบหาค่าความเที่ยงตรงของเครื่องมือ

เมื่อทำการทดลองตัวอย่างน้ำและกลีเซอรอลจำนวนอย่างละ 10 ซ้ำที่ระดับอัตราความร้อนต่อความยาวหัววัด 15 W/m พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันของกลุ่มข้อมูลน้ำ (CV) ซึ่งเป็นตัวแทนของตัวอย่างอาหารที่มีปริมาณน้ำในอาหารมากที่สุด เท่ากับ 1.79% และค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันของกลุ่มข้อมูลกลีเซอรอล ซึ่งเป็นตัวแทนของตัวอย่างอาหารที่มีปริมาณน้ำน้อยที่สุด (CV) เท่ากับ 3.64 % แสดงว่าอุปกรณ์วัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนชุดนี้เมื่อนำไปวัดตัวอย่างอาหารใด ๆ จะมีค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันอยู่ที่ช่วง 1.79 - 3.64%

บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองการวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอาหารด้วยวิธีวัดแบบลวดความร้อน อุปกรณ์วัดสามารถวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนได้ดีที่ อุณหภูมิ 0-120 องศาเซลเซียส ค่าความต่างศักย์ 3-15 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 0-3 แอมแปร์ และ จำเป็นต้องใช้สมการปรับแก้(Corrective Equation) การวัดสามารถวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ระดับอัตราความร้อนต่อความยาวหัววัดที่เหมาะสม คือ 15 W/m โดยมีระยะเวลาในการทดสอบสูงสุดที่ 180 วินาที โดยมามีค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันอยู่ที่ช่วง 1.79 - 3.64%

ข้อเสนอแนะ

การนำปัญหาพิเศษไปพัฒนาต่อ ผู้จัดทำแนะนำให้ทดลองเปลี่ยนหัววัดเนื่องมาจากสมการค่าปรับแก้มีค่ามากเป็น เพราะหัววัดมีค่าความต้านทานความร้อนและการออกแบบหัววัดผิดไปจากทางทฤษฎีมาก

เอกสารอ้างอิง

- Murakami E.G. , sweat V.E. , Sastry S.K , Kolbe E , Hayakawa K . and Datta A . 1996.
 “ Recommended design parameters for thermal conductivity probe for non-frozen food materials” Journal of food Engineering , Vol. 27 , No. 6 , pp. 109-123.
- Blackwell ,J.H. . 1954. “ A Transient – Flow Method for Determination of thermal constants of insulating material in bulk” Journal of applied physic , Vol.25 No.2 pp.137-144.
- Murakami E.G , Sweat V.E. , Sastry S.K. and Kolbe E. .1996. “Analysis of various design and operating parameter of the thermal conductivity probe” . Journal of food engineering , Vol.30 ,No. 2 ,pp. 209-225.
- Wang J. and Hayakawa K. 1993. “Maximum slope Method for Evaluating Thermal Conductivity Probe Data” Journal of Food Science , Vol.58 , No. 6 , pp. 1340-1345.
- Sweat, V.E. and Haugh, C.G. .1974. “A Thermal Conductivity probe for small food particles” Transaction of the American Society Agriculture Engineering , Vol. 17 , No. 1 , pp. 56-58.
- อังฉรา นิต์สนักกุล . 2541. “การพัฒนาอุปกรณ์วัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอาหาร โดย Line heat Source (Probe) Method ที่สภาวะเหนือจุดเยือกแข็ง” วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี.
- มนิรัตน์ ศรีชมภู .2543. “การวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอาหารที่ความดันสูง”. สัมมนาหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- สมศักดิ์ กิรติวุฒิสเรษฐ .2541. หลักการและการทำงานของเครื่องมือวัดอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย – ญี่ปุ่น)
- Hooper, F.C. and Lepper, F.R. 1950. “Transcient Heat Flow Apparatus for the Determination of Thermal Conductivities” Journal of Heating,Piping and Air Conditioning , Vol.22 , No.8 , pp.129-134.
- Murdia, L.K. and Verma, R.D. 1989. “Line Heat Source Method for Thermal Conductivity of Dairy Products” Indian Journal of Dairy Science , Vol.42 , No.1 , pp.42-46
- Maloulis, Z.B., Shah, K.K. and Saravacos, G.D. 1991. “Thermal Conductivity of Gelatinized Starches” Journal of Food Science , Vol.56, No.3 , pp.773-777.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ข.1 แสดงผลของระยะเวลาสูงสุดในการทดลอง

เวลา (วินาที)	อุณหภูมิ(°c)	
	หัววัด	เทอร์โมมิเตอร์
0	25	28
10	71	27
20	81	27
30	81	27
40	82	28
50	83	28
60	83	28
70	83	28
80	83	28
90	83	28
100	83	27
110	83	27
120	83	28
130	83	28
140	83	28
150	83	28
160	83	27
170	83	27
180	83	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ข.2 แสดงผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ระดับ $Q = 15 \text{ W/m}$

เวลา	ก๊lixเซอรอล			ไข่แดง			ไข่ขาว			น้ำ		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	29	28	30	25	27	30	27	29	29	28	27	27
1	30	30	32	26	28	31	27	29	29	28	28	28
2	40	39	43	29	36	34	29	30	31	38	38	39
3	50	50	54	38	38	43	39	34	41	40	40	41
4	52	52	55	40	40	45	40	43	42	43	43	44
5	54	54	58	43	44	48	43	44	45	52	46	54
6	58	64	61	46	47	51	45	46	47	53	55	55
7	61	66	70	55	50	53	48	49	50	56	56	57
8	65	68	71	56	53	57	50	51	52	58	64	58
9	67	70	73	58	56	59	52	54	55	60	63	61
10	71	73	75	60	67	61	54	55	56	62	63	62
11	73	74	71	62	66	64	56	58	58	64	64	64
12	74	77	79	64	66	66	57	59	60	65	64	65
13	78	80	80	66	67	68	59	61	62	65	65	66
14	80	82	82	68	68	70	60	62	63	66	66	66
15	82	83	84	70	69	72	62	64	64	67	66	67
16	85	86	85	72	70	73	63	65	66	67	67	67
17	87	88	87	73	72	74	64	66	67	68	67	67
18	95	89	88	75	73	76	65	67	68	68	68	68
19	95	91	90	76	74	77	67	68	69	68	68	68
20	96	93	92	77	75	78	67	69	70	69	68	68
21	96	94	100	78	76	79	68	69	70	69	68	68
22	98	96	100	80	77	81	68	70	71	69	69	68
23	99	97	100	80	78	81	69	71	72	69	69	69
24	101	99	99	81	78	83	70	71	73	69	69	69
25	102	100	101	82	79	84	70	71	73	69	69	69
26	104	102	102	83	80	84	70	71	73	69	69	69
27	105	103	103	84	82	84	70	71	73	69	69	69
28	106	104	104	85	82	84	70	71	73	69	69	69
29	107	105	105	86	82	84	70	71	73	69	69	69
30	109	107	107	87	82	84	70	71	73	69	69	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ข.3 แสดงผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ระดับ $Q = 20 \text{ W/m}$

เวลา	กาลีเซอรอล			ไข่แดง			ไข่ขาว			น้ำ		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	30	31	31	31	30	31	29	29	30	28	28	29
1	41	40	32	32	31	31	30	30	30	29	29	30
2	51	51	42	41	41	42	39	39	42	39	40	40
3	62	61	45	44	43	44	41	41	43	48	51	49
4	63	62	55	54	52	54	44	51	46	51	53	52
5	74	72	57	56	54	56	53	52	56	60	56	61
6	75	79	59	58	57	58	54	54	57	62	58	63
7	78	77	69	62	65	62	57	57	58	64	62	64
8	80	85	70	71	67	64	59	59	61	67	65	67
9	83	86	73	72	69	68	70	62	63	69	68	69
10	85	88	74	73	71	70	69	64	65	72	70	72
11	89	91	78	75	74	74	70	67	67	73	73	73
12	96	94	80	77	76	76	70	68	69	75	82	75
13	98	102	83	79	79	79	72	71	71	76	80	76
14	99	103	85	81	81	80	73	72	73	77	80	77
15	102	105	89	83	83	83	74	74	74	77	80	77
16	104	106	91	84	85	85	76	75	76	77	80	77
17	114	109	94	87	87	87	77	77	77	77	80	77
18	114	112	96	88	89	89	78	78	79	77	80	77
19	115	114	100	91	91	91	78	79	80	77	80	77
20	116	117	103	92	91	92	78	79	81	77	80	77
21	118	119	104	94	91	92	78	79	81	77	80	77
22	120	121	107	95	91	92	78	79	81	77	80	77
23	128	124	109	97	91	92	78	79	81	77	80	77
24	128	126	111	98	91	92	78	79	81	77	80	77
25	129	128	128	100	91	92	78	79	81	77	80	77
26	129	128	128	100	91	92	78	79	81	77	80	77
27	129	128	128	100	91	92	78	79	81	77	80	77
28	129	128	128	100	91	92	78	79	81	77	80	77
29	129	128	128	100	91	92	78	79	81	77	80	77
30	129	128	128	100	91	92	78	79	81	77	80	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4 แสดงผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ระดับ $Q = 25 \text{ W/m}$

เวลา	กลีเซอรอล			ไข่แดง			ไข่ขาว			น้ำ		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	29	28	30	32	30	31	30	29	30	28	27	27
1	30	30	32	32	32	32	31	29	31	28	28	28
2	40	39	43	44	32	41	42	31	42	38	38	39
3	50	50	54	54	53	55	45	42	45	40	40	41
4	52	52	55	56	55	56	51	51	54	43	43	44
5	54	54	58	65	65	66	57	54	57	52	46	54
6	58	64	61	68	66	68	67	63	60	53	55	55
7	61	66	70	77	75	77	68	65	69	56	56	57
8	65	68	71	78	77	78	70	67	70	58	64	58
9	67	70	73	80	80	81	73	70	73	60	63	61
10	71	73	75	83	88	83	76	73	75	62	63	62
11	73	74	71	86	90	86	78	76	78	64	64	64
12	74	77	79	94	91	94	80	79	79	65	64	65
13	78	80	80	95	94	95	83	81	82	65	65	66
14	80	82	82	98	96	97	85	83	84	66	66	66
15	82	83	84	99	97	97	85	85	87	67	66	67
16	85	86	85	99	97	97	85	87	89	67	67	67
17	87	88	87	99	97	97	85	90	89	68	67	67
18	95	89	88	99	97	97	85	90	89	68	68	68
19	95	91	90	99	97	97	85	90	89	68	68	68
20	96	93	92	99	97	97	85	90	89	69	68	68
21	96	94	100	99	97	97	85	90	89	69	68	68
22	98	96	100	99	97	97	85	90	89	69	69	68
23	99	97	100	99	97	97	85	90	89	69	69	68
24	101	99	99	99	97	97	85	90	89	69	69	68
25	102	100	101	99	97	97	85	90	89	69	69	68
26	104	102	102	99	97	97	85	90	89	69	69	68
27	105	103	103	99	97	97	85	90	89	69	69	68
28	106	104	104	99	97	97	85	90	89	69	69	68
29	107	105	105	99	97	97	85	90	89	69	69	68
30	109	107	107	99	97	97	85	90	89	69	69	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ข.5 แสดงผลการทดสอบค่าความเที่ยงตรงของเครื่องมือที่ระดับ $Q=15 \text{ W/m}$
โดยใช้น้ำเป็นตัวอย่างในการทดลอง

เวลา	อุณหภูมิ									
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	ครั้งที่ 7	ครั้งที่ 8	ครั้งที่ 9	ครั้งที่ 10
0	27	27	27	28	28	28	29	28	29	29
1	28	28	27	29	29	28	29	28	29	30
2	29	30	31	31	31	31	32	32	32	32
3	39	40	40	40	40	41	41	40	41	42
4	41	41	42	42	42	42	43	42	43	43
5	43	44	44	44	44	45	45	44	45	46
6	46	46	47	47	47	47	48	48	47	48
7	48	49	49	49	49	49	50	50	50	51
8	51	51	52	52	52	52	53	53	52	52
9	53	54	54	54	54	55	55	54	55	55
10	56	55	56	56	57	56	57	57	57	57
11	57	57	58	58	58	59	59	58	59	59
12	59	59	59	60	60	60	60	60	60	60
13	60	60	61	61	61	61	61	61	61	61
14	61	61	62	62	62	62	63	62	62	62
15	62	62	62	62	63	63	63	63	63	63
16	62	62	63	63	63	64	64	64	64	64
17	63	63	64	64	64	64	65	64	64	64
18	63	63	64	64	64	65	65	64	65	65
19	63	64	64	64	64	65	65	65	65	65
20	63	64	64	64	64	65	65	65	65	65
21	63	64	64	64	64	65	65	65	65	65
22	63	64	64	64	64	65	65	65	65	65
23	63	64	64	64	64	65	65	65	65	65
24	63	64	64	64	64	65	65	65	65	65
25	63	64	64	64	64	65	65	65	65	65
26	63	64	64	64	64	65	65	65	65	65
27	63	64	64	64	64	65	65	65	65	65
28	63	64	64	64	64	65	65	65	65	65
29	63	64	64	64	64	65	65	65	65	65
30	63	64	64	64	64	65	65	65	65	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ข.6 แสดงผลการทดสอบค่าความเที่ยงตรงของเครื่องมือที่ระดับ $Q=15 \text{ W/m}$
โดยใช้กลีเซอรอลเป็นตัวอย่างในการทดลอง

เวลา	อุณหภูมิ									
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	ครั้งที่ 7	ครั้งที่ 8	ครั้งที่ 9	ครั้งที่ 10
0	26	29	26	29	29	29	27	29	29	29
1	27	29	27	30	29	29	28	30	29	30
2	37	31	29	32	32	31	38	33	41	33
3	38	40	38	41	42	41	40	42	41	42
4	41	43	40	43	43	43	43	45	44	45
5	49	45	44	47	47	46	52	47	46	47
6	51	49	53	49	50	55	53	51	56	51
7	53	52	54	53	52	56	55	59	57	53
8	56	55	57	56	56	58	58	61	59	57
9	59	58	59	60	57	61	69	62	61	60
10	62	61	62	62	62	71	68	65	64	63
11	64	63	63	65	64	70	69	66	66	65
12	66	67	65	65	67	71	70	69	68	68
13	68	68	68	70	69	72	71	71	71	70
14	71	71	70	72	72	73	73	73	73	73
15	72	73	72	74	74	75	74	74	74	74
16	75	75	75	75	76	76	76	77	78	76
17	76	76	76	77	77	78	77	78	78	78
18	78	78	77	79	79	79	79	80	80	80
19	79	80	79	81	80	81	80	81	81	81
20	81	82	81	82	82	82	82	83	83	83
21	81	82	81	82	82	82	82	83	83	83
22	81	82	81	82	82	82	82	83	83	83
23	81	82	81	82	82	82	82	83	83	83
24	81	82	81	82	82	82	82	83	83	83
25	81	82	81	82	82	82	82	83	83	83
26	81	82	81	82	82	82	82	83	83	83
27	81	82	81	82	82	82	82	83	83	83
28	81	82	81	82	82	82	82	83	83	83
29	81	82	81	82	82	82	82	83	83	83
30	81	82	81	82	82	82	82	83	83	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้