การศึกษาการนำความร้อนในสภาวะไม่คงที่ของแท่งโลหะในรูปแบบ 1 มิติ

A Study of One Dimensional Transient State of Heat Conduction in Metal Rods

สำราญ ย่องดำ

Samran Yongdam

เลขหมู่ QC320.3 ส64 2543 ฉ.2
Bib Key 206298
25 ม.ค. 2544

วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

Master of Science Thesis in Physics

Prince of Songkla University

2543

ชื่อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการนำความร้อนในสภาวะไม่คงที่ของแท่งโลหะในรูปแบบ 1 มิติ
ผู้เขียน	นายสำราญ ย่องดำ
สาขาวิชา	ฟิสิกส์

คณะกรรมการที่ปรึกษา

.....................................ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ บุญเหลือ พงศ์ดารา)

.....................................กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธวัช ชิตตระการ)

.....................................กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ธนิต แก้วนพรัตน์)

คณะกรรมการสอบ

.....................................ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ บุญเหลือ พงศ์ดารา)

.....................................กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธวัช ชิตตระการ)

.....................................กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ธนิต แก้วนพรัตน์)

.....................................กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรวุฒิ โลหะวิจารณ์)

.....................................กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกริกชัย ทองหนู)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

....
(รองศาสตราจารย์ ดร. ปิติ ทฤษฎิคุณ)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการนำความร้อนในสภาวะไม่คงที่ของแท่งโลหะในรูปแบบ 1 มิติ
ผู้เขียน	นายสำราญ ย่องดำ
สาขาวิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2543

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้กล่าวถึงการใช้คอมพิวเตอร์พร้อมชุดเชื่อมโยงที่สร้างขึ้น เพื่อวัดค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งและเวลาของการนำความร้อนในสภาวะไม่คงที่ของแท่งโลหะในรูปแบบ 1 มิติ ที่มีน้ำแข็งเป็นตัวดูดความร้อน และนำเอาผลของค่าอุณหภูมิที่วัดได้ไปทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้ในทางทฤษฎีที่ใช้การคำนวณเชิงตัวเลขตามแบบวิธี Finite difference ผลปรากฏว่าในการทดลองวัดค่าอุณหภูมิของแท่งโลหะจำนวน 3 ชนิด คือ ทองเหลือง อะลูมิเนียม และเหล็ก โดยมีค่าความแตกต่างไม่เกิน 15% จากผลทางทฤษฎี

หอสมุด คุณหญิงหลง อรรถกระวีสุนทร
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
วิทยาเขตหาดใหญ่
ได้รับจาก บัณฑิตวิทยาลัย มอ.
วันที่ 25 เดือน มี.ค. พ.ศ. 2544

Thesis Title	A Study of One Dimensional Transient State of Heat Conduction in Metal Rods
Author	Mr. Samran Yongdam
Major Program	Physics
Academic Year	2000

Abstract

This thesis describes how to use a microcomputer with a home made interfacing unit to measure the temperatures which depends on positions and times of one dimensional transient state of heat conduction in metal rods with ice water heat absorber at one end of rods. Experimental results of three metal rods ; brass, aluminium and iron show good agreement with numerical data obtained from finite difference method , with less than 15% difference.

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยความช่วยเหลือและได้รับความอนุเคราะห์จากหลายฝ่าย จึงขอขอบคุณหน่วยงานที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้ คือ โรงเรียนระโนดวิทยา อำเภอระโนด จังหวัดสงขลา สำนักงานสามัญศึกษาจังหวัดสงขลา ที่อนุญาตให้ลาศึกษาต่อ กรมสามัญศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ ที่สนับสนุนด้านทุนการศึกษา บัณฑิตวิทยาลัยและภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนด้านทุนวิจัย หมวดวิชาวิทยาศาสตร์และฝ่ายวิชาการ โรงเรียนระโนดวิทยา ที่เอื้อเฟื้อให้ใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ สำหรับวิเคราะห์ผลการวิจัยและงานพิมพ์วิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ รศ.บุญเหลือ พงศ์ดารา ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่ทำให้ผู้เขียนได้รู้จักและสัมผัสกับการใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อเชื่อมโยงเข้ากับชุดการทดลองทางฟิสิกส์ พร้อมทั้งการให้คำปรึกษาแนะแนวทางในการค้นคว้าและตรวจสอบแก้ไขต้นฉบับจนทำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จด้วยดี พร้อมทั้งขอขอบคุณ Prof.Dr.Terry Freeman ที่ให้คำปรึกษาในการเขียนโปรแกรมสำหรับสร้างรูปแบบจำลองของการนำความร้อนในวัตถุในรูปแบบ 1 มิติ

ขอขอบคุณ รศ.ดร.ธวัช ชิตตระการ พร้อมทั้ง ผศ. ธนิต แก้วนพรัตน์ กรรมการที่ปรึกษาร่วม และ ผศ.ดร.วรวุฒิ โลหะวิจารณ์ ผู้ประสานงานหลักสูตร ที่ให้คำปรึกษาด้วยดีตลอดมา พร้อมทั้งขอขอบคุณ ผศ.ดร.เกริกชัย ทองหนู กรรมการสอบ ที่ให้คำแนะนำแก้ไขเพิ่มเติม

ขอขอบคุณ บุคลากรฝ่ายเทคนิคของภาควิชาฟิสิกส์ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในการยืมอุปกรณ์และเครื่องมือบางอย่างที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ คณะครูหมวดวิทยาศาสตร์ โรงเรียนระโนดวิทยา ที่เอื้อเฟื้อคอยสนับสนุนและให้กำลังใจในการทำงานตลอดมา

ขอขอบคุณ คุณอุไรรัตน์ ย่องดำ ที่เป็นกำลังใจในการทำงานวิทยานิพนธ์ตลอดมา

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้ทุนทรัพย์ และครูอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิประสาทวิชาความรู้ตลอดจนอุปถัมภ์ในทุกด้านด้วยดีตลอดมา

สำราญ ย่องดำ

สารบาญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
Abstract	(4)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบาญ	(6)
รายการตาราง	(7)
รายการภาพประกอบ	(8)
บทที่	
1. บทนำ	1
บทนำต้นเรื่อง	1
การตรวจเอกสาร	3
วัตถุประสงค์	6
2. ทฤษฎีการนำความร้อนในสภาวะไม่คงที่ของวัตถุในรูปแบบ 1 มิติ	7
สมการของการนำความร้อนในสภาวะไม่คงที่ของแท่งโลหะในรูปแบบ 1 มิติ	8
การประมาณค่าสมการการนำความร้อนในสภาวะไม่คงที่ ด้วยวิธี Finite difference	14
3. วิธีการวิจัย	22
วัสดุ	22
อุปกรณ์	22
วิธีดำเนินการ	27
4. ผลและอภิปรายผล	40
5. บทวิจารณ์และสรุป	76
บรรณานุกรม	78
ภาคผนวก	80
ประวัติผู้เขียน	128

รายการตาราง

ตาราง หน้า

1. แสดงค่าพารามิเตอร์ทางความร้อนที่เกี่ยวข้องของสสารที่ใช้ในการศึกษา 40
2. แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งในแท่งโลหะทองเหลืองที่วัดได้ ณ เวลาที่ 90 นาที 46
3. แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งในแท่งโลหะทองเหลืองที่ถูกปรับแก้ให้มีความเหมาะสม เวลา 90 นาที 47
4. แสดงรหัสแอดเดรสในการเลือกช่องสัญญาณอนาลอก IN0 ถึง IN15 84
5. แสดงค่าความต้านทานของตัวเทอร์มิสเตอร์ที่ขึ้นกับอุณหภูมิในช่วง 0-25 องศาเซลเซียส 121
6. แสดงตัวอย่างผลของการปรับเทียบค่าอุณหภูมิของตัวเทอร์มิสเตอร์ในวงจรตัวตรวจวัดอุณหภูมิที่เชื่อมโยงเข้ากับคอมพิวเตอร์ 122
7. แสดงค่าข้อมูลที่ได้รับในรูปแบบค่าดิจิตอลเอาท์พุท ของแท่งโลหะทองเหลือง 123

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ หน้า

1. การนำความร้อนในสภาวะไม่คงที่ของแท่งโลหะในรูปแบบ 1 มิติ ที่เวลา $t_1, t_2, \ldots$ และเข้าสู่สภาวะคงที่ที่เวลา $t = \infty$ (เมื่อโลหะรับความร้อน) 8
2. การนำความร้อนในสภาวะไม่คงที่ของแท่งโลหะในรูปแบบ 1 มิติ ที่เวลา $t_1, t_2, \ldots$ และเข้าสู่สภาวะคงที่ที่เวลา $t=\infty$(เมื่อโลหะคายความร้อน) 9
3. แสดงวิธีหาค่าเกรเดียนท์ของอุณหภูมิที่ตำแหน่ง x และ x+dx เนื่องจากผลของการไหลของพลังงานความร้อนเข้าและออกในส่วนของความยาวสั้นๆ dx 11
4. ตำแหน่งของอุณหภูมิ(Temperature Grid) 16
5. แสดงการทดลองเพื่อวัดค่าความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์ที่อุณหภูมิ 0-25°C 28
6. ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln R_T$ กับ 1/T ที่ใช้วิธีเชิงเส้นกำลังสองน้อยที่สุด 29
7. แสดงวงจรแบบแบ่งศักย์ไฟฟ้าสำหรับตัวเทอร์มิสเตอร์ 30
8. การเชื่อมโยงวงจรของตัวตรวจวัดอุณหภูมิเข้ากับตัว ADC0816 32
9. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ที่ป้อนให้กับตัวA/D กับค่าอุณหภูมิ 34
10. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดิจิตอลที่ได้รับกับอุณหภูมิ 35
11. แสดงระยะและตำแหน่งของการเจาะแท่งโลหะสำหรับฝังเทอร์มิสเตอร์ 36
12. แสดงความยาวของการหุ้มฉนวนและการฝังเทอร์มิสเตอร์ในตำแหน่งที่ตรงตามรูปแบบจำลองโปรแกรม 37
13. แสดงชุดการทดลองวัดอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งและเวลาของการนำความร้อนภายในแท่งโลหะในสภาวะไม่คงที่ในรูปแบบ 1 มิติ 39
14. แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งที่เวลาใดๆ ของแท่งโลหะทองเหลืองตามรูปแบบจำลองของโปรแกรม 41
15. แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลาที่ตำแหน่งใดๆ ของแท่งโลหะทองเหลืองตามรูปแบบจำลองของโปรแกรม 42
16. แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งที่เวลาใดๆ ของแท่งโลหะทองเหลืองตามรูปแบบจำลองของโปรแกรมที่มีตำแหน่งตรงกับการทดลองวัด 43

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
17. แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลาที่ตำแหน่งใดๆ ของแท่งโลหะทองเหลือง ตามรูปแบบจำลองของโปรแกรมที่ตรงกับการทดลองวัด	43
18. แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งที่เวลาห่างกัน 1 นาที ของแท่งโลหะทองเหลือง ที่ได้รับจากการทดลองวัด	44
19. แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลาที่ตำแหน่งห่างกัน 0.015 เมตร ของแท่งโลหะทองเหลือง ที่ได้รับจากการทดลองวัด	45
20 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งของแท่งโลหะทองเหลือง ที่เหมาะสม ณ เวลา 90 นาที เมื่อใช้วิธีพาราโบลากำลังสองน้อยที่สุด	47
21. แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งที่เวลาใดๆ ของแท่งโลหะทองเหลือง ที่ได้จากการทดลองวัดที่มีการปรับแก้ข้อมูลแล้ว	48
22. แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลาที่ตำแหน่งใดๆ ของแท่งโลหะทองเหลือง ที่ได้จากการทดลองวัดที่มีการปรับแก้ข้อมูลแล้ว	49
23. แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งของแท่งโลหะทองเหลือง ณ เวลา 2.0 นาที	50
24. แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งของแท่งโลหะทองเหลือง ณ เวลา 8.0 นาที	51
25. แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งของแท่งโลหะทองเหลือง ณ เวลา 32.0 นาที	51
26. แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งของแท่งโลหะทองเหลือง ณ เวลา 120.0 นาที	52
27. แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลา ณ ตำแหน่ง i=12 ของแท่งโลหะทองเหลือง	53
28. แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลา ณ ตำแหน่ง i=36 ของแท่งโลหะทองเหลือง	53

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
29. แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลา ณ ตำแหน่ง i=60 ของแท่งโลหะทองเหลือง	54
30. แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลา ณ ตำแหน่ง i=84 ของแท่งโลหะทองเหลือง	54
31. แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งที่เวลาใดๆ ของแท่งโลหะอะลูมิเนียม ตามรูปแบบจำลองของโปรแกรม	56
32. แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลาที่ตำแหน่งใดๆ ของแท่งโลหะอะลูมิเนียม ตามรูปแบบจำลองของโปรแกรม	56
33. แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งที่เวลาใดๆ ของแท่งโลหะอะลูมิเนียม ตามรูปแบบจำลองของโปรแกรมที่มีตำแหน่งตรงกับการทดลอง	57
34. แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลาที่ตำแหน่งใดๆ ของแท่งโลหะอะลูมิเนียม ตามรูปแบบจำลองของโปรแกรมที่มีตำแหน่งตรงกับการทดลอง	57
35. แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งที่เวลาห่างกัน 1.0 นาที ของแท่งโลหะอะลูมิเนียม ที่ได้รับจากการทดลอง	58
36. แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลาที่ตำแหน่งห่างกัน 0.015 เมตร ของแท่งโลหะอะลูมิเนียม ที่ได้รับจากการทดลอง	58
37. แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งของแท่งโลหะอะลูมิเนียม ที่เหมาะสม ณ เวลา 90 นาที เมื่อใช้วิธีพาราโบลากำลังสองน้อยที่สุด	59
38. แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งที่เวลาห่างกัน 1.0 นาที ของแท่งโลหะอะลูมิเนียม ที่ได้รับจากการทดลองวัดที่ปรับแก้ข้อมูลแล้ว	60
39. แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลาที่ตำแหน่งใด ๆ ของแท่งโลหะอะลูมิเนียม ที่ได้รับจากการทดลองวัดที่ปรับแก้ข้อมูลแล้ว	61
40. แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่ง ณ เวลา 2.0 นาที. ของแท่งโลหะอะลูมิเนียม	62

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
41. แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่ง ณ เวลา 8.0 นาที. ของแท่งโลหะอะลูมิเนียม	62
42 แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่ง ณ เวลา 32.0 นาที. ของแท่งโลหะอะลูมิเนียม	63
43. แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่ง ณ เวลา 120.0 นาที. ของแท่งโลหะอะลูมิเนียม	63
44. แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลา ณ ตำแหน่ง i=12 ของแท่งโลหะอะลูมิเนียม	64
45. แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลา ณ ตำแหน่ง i=36 ของแท่งโลหะอะลูมิเนียม	64
46. แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลา ณ ตำแหน่ง i=60 ของแท่งโลหะอะลูมิเนียม	65
47. แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลา ณ ตำแหน่ง i=84 ของแท่งโลหะอะลูมิเนียม	65
48. แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งที่เวลาใดๆ ของแท่งโลหะเหล็ก ตามรูปแบบจำลองของโปรแกรม	66
49. แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลาที่ตำแหน่งใดๆ ของแท่งโลหะเหล็ก ตามรูปแบบจำลองของโปรแกรม	66
50. แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งที่เวลาใดๆ ของแท่งโลหะเหล็ก ตามรูปแบบจำลองของโปรแกรมที่มีตำแหน่งตรงกับการทดลองวัด	67
51. แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลาที่ตำแหน่งใดๆ ของแท่งโลหะเหล็ก ตามรูปแบบจำลองของโปรแกรมที่มีตำแหน่งตรงกับการทดลองวัด	67
52. แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งที่เวลาห่างกัน 1.0 นาที ของแท่งโลหะเหล็ก ที่ได้รับจากการทดลองวัด	68

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ หน้า

53. แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลาที่ตำแหน่งห่างกัน 0.015 เมตร ของแท่งโลหะเหล็ก ที่ได้รับจากการทดลองวัด 68

54. แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งของแท่งโลหะอะลูมิเนียม ที่เหมาะสม ณ เวลา 90 นาที เมื่อใช้วิธีพาราโบลากำลังสองน้อยที่สุด 69

55. แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งที่เวลาห่างกัน 1.0 นาที ของแท่งโลหะเหล็ก ที่ได้รับจากการทดลองวัดที่ปรับแก้ข้อมูลแล้ว 70

56. แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลาที่ตำแหน่งใด ๆ ของแท่งโลหะเหล็ก ที่ได้รับจากการทดลองวัดที่ปรับแก้ข้อมูลแล้ว 70

57. แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่ง ณ เวลา 2.0 นาที. ของแท่งโลหะเหล็ก 71

58. แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่ง ณ เวลา 8.0 นาที. ของแท่งโลหะเหล็ก 72

59 แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่ง ณ เวลา 32.0 นาที. ของแท่งโลหะเหล็ก 72

60. แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่ง ณ เวลา 120.0 นาที. ของแท่งโลหะเหล็ก 73

61. แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลา ณ ตำแหน่ง i=12 ของแท่งโลหะเหล็ก 73

62. แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลา ณ ตำแหน่ง i=36 ของแท่งโลหะเหล็ก 74

63. แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลา ณ ตำแหน่ง i=60 ของแท่งโลหะเหล็ก 74

64. แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลา ณ ตำแหน่ง i=84 ของแท่งโลหะเหล็ก 75

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ หน้า

65. แสดงโครงสร้างภายในของ ADC 0816 81
66. ตำแหน่งขาต่างๆ ของ ADC 0816 แบบ DIP 40 ขา 82
67. แสดงองค์ประกอบภายในของ MCS-51 86
68. แสดงแผนภาพการใช้คำสั่งของ MCS-51 87
69. แสดงบล็อกไดอะแกรมและการจัดเรียงขาสัญญาณของ 8255(PPI) 89
70. แสดงบิตต่างๆ ของรหัสควบคุมของ 8255(PPI) 91
71. แสดงแผนภูมิสายงานโปรแกรมหลักของ 8031ที่ใช้งาน(มีต่อ) 93
71. แสดงแผนภูมิสายงานโปรแกรมหลักของ 8031ที่ใช้งาน 94
72. แสดงแผนภูมิสายงานโปรแกรมย่อย connect 95
73. แสดงแผนภูมิสายงานโปรแกรมย่อย send 96
74. แสดงแผนภูมิสายงานโปรแกรมย่อย get data (มีต่อ) 97
74. แสดงแผนภูมิสายงานโปรแกรมย่อย get data 98
75. แสดงแผนภูมิสายงานโปรแกรมย่อย adc0816 (มีต่อ) 99
75. แสดงแผนภูมิสายงานโปรแกรมย่อย adc0816 100
76. แสดงแผนภูมิสายงานโปรแกรมย่อย delay1(มีต่อ) 101
76. แสดงแผนภูมิสายงานโปรแกรมย่อย delay1 102
77. แสดงแผนภูมิสายงานโปรแกรมย่อย delay1 103
78. แสดงแผนภูมิสายงานโปรแกรมบริการอินเทอร์รัพท์แบบอนุกรม 104
79. แสดงแผนภูมิสายงานโปรแกรมหลักที่เขียนขึ้นจากภาษา C (มีต่อ) 105
79. แสดงแผนภูมิสายงานโปรแกรมหลักที่เขียนขึ้นจากภาษา C (มีต่อ) 106
79. แสดงแผนภูมิสายงานโปรแกรมหลักที่เขียนขึ้นจากภาษา C (มีต่อ) 107
79. แสดงแผนภูมิสายงานโปรแกรมหลักที่เขียนขึ้นจากภาษา C 108
80. แสดงแผนภูมิสายงานโปรแกรมย่อย CONDUCTION MODEL (มีต่อ) 109
80. แสดงแผนภูมิสายงานโปรแกรมย่อย CONDUCTION MODEL (มีต่อ) 110
80. แสดงแผนภูมิสายงานโปรแกรมย่อย CONDUCTION MODEL 111

บทที่ 1

บทนำ

บทนำต้นเรื่อง

ในการศึกษาปรากฏการณ์ทางด้านวิทยาศาสตร์ทั้งที่เป็นผลที่เกิดขึ้นเองในธรรมชาติและที่มนุษย์ออกแบบขึ้นสำหรับการทดลองในห้องปฏิบัติการโดยปรากฏการณ์(Phenomenon)แต่ละอย่างมักเรียกรวมกันว่าระบบ(System) เช่น ระบบไฟฟ้า ระบบคอมพิวเตอร์ ระบบเครื่องจักรกล ระบบการถ่ายโอนความร้อน เป็นต้น ถึงแม้ว่าระบบต่างๆเหล่านี้จะมีธรรมชาติที่แตกต่างกันทั้งในแง่ขององค์ประกอบที่รวมกันเป็นระบบและในแง่ของการใช้งานแต่เมื่อพิจารณาอย่างชัดเจนจะพบว่าทุกระบบจะต้องมีสัญญาณจากภายนอกระบบเข้าไปภายในระบบ ซึ่งเรียกว่าสัญญาณด้านเข้า(Input signal) ในขณะเดียวกันตัวระบบมีการเคลื่อนไหวเปลี่ยนแปลงเนื่องจากสิ่งที่ระบบรับเข้าไปที่เรียกว่า ระบบมีการตอบสนอง(Response) ต่อสิ่งที่รับเข้ามา โดยการตอบสนองนี้จะให้ผลออกมาในรูปของสัญญาณอันเนื่องมาจากการตอบสนองของระบบที่เรียกว่าสัญญาณด้านออก(Output signal) อันเป็นข้อมูล(Data)ที่จำเป็นมากสำหรับใช้อธิบายและสรุปผลของปรากฏการณ์นั้นๆที่ศึกษาอยู่และการที่จะให้ได้มาของข้อมูลเหล่านั้นจำเป็นต้องอาศัยเครื่องมือวัดที่มีประสิทธิภาพและมีลักษณะเฉพาะตัวเหมาะสมกับงานหรือการทดลองนั้นๆด้วย

ปัจจุบันการวัดสัญญาณทางฟิสิกส์ที่ไม่ใช่สัญญาณไฟฟ้าสามารถพิจารณาได้ถึง 5 สัญญาณหลัก คือ สัญญาณเชิงกล(Mechanical signal) สัญญาณแม่เหล็ก(Magnetic signal) สัญญาณเคมี(Chemical signal) สัญญาณการแผ่รังสี(Radiation signal)และสัญญาณความร้อน(Thermal signal) การวัดสัญญาณเหล่านี้นิยมทำโดยใช้อุปกรณ์การวัดที่เรียกว่าตัวตรวจวัดสัญญาณหรือทรานสดิวเซอร์(Transducer)ที่อาศัยพลังงานไฟฟ้าในการทำงานสำหรับเป็นตัวเปลี่ยนสัญญาณทางฟิสิกส์ที่ทำการวัดให้อยู่ในรูปของสัญญาณไฟฟ้า(Electrical signal)ที่มีลักษณะต่อเนื่องในรูปแบบสัญญาณอนาลอก(Analog signal) โดยทั่วไปจะพิจารณาและทำการวัดในลักษณะของค่ากระแสไฟฟ้าหรือค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เวลาใดๆ เพื่อนำเอาผลทางเอาท์พุทที่อยู่ในรูปของสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้ไปใช้ในการปรับเทียบค่า(Calibration)เพื่อทำให้ทราบถึงปริมาณทางฟิสิกส์ที่ทำการวัดต่อไป

สำหรับในงานวิทยานิพนธ์นี้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสัญญาณความร้อนภายในแท่งโลหะยาวรูปทรงกระบอกตันที่ผิวด้านข้างถูกหุ้มด้วยฉนวนป้องกันการสูญเสียความร้อนในลักษณะการนำความร้อนในสภาวะไม่คงที่(Transient State) ของแท่งโลหะในรูปแบบ 1 มิติ โดยทำการวัดอุณหภูมิภายในแท่งโลหะที่มีค่าขึ้นกับตำแหน่งและเวลาอย่างต่อเนื่องตามเงื่อนไขและช่วงเวลาที่กำหนดในการทดลอง จากการพิจารณาระบบดังกล่าวจะเห็นว่าหากมีการใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบเทอร์โมมิเตอร์ชนิดปรอทหลายๆอันมาวัดอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งและเวลาในรูปแบบเดิมตามวิธีการของฟอร์บีส์ (Worsnop and Flint,1969) จำเป็นต้องอาศัยความรวดเร็วของผู้ทดลองในการจดบันทึกข้อมูลซึ่งค่อนข้างทำลำบากและมีขีดจำกัดในการอ่านค่าและสังเกตไม่ทันกับการเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาสั้นๆและจะเหน็ดเหนื่อยต่อการทำการทดลองที่เก็บข้อมูลในช่วงเวลาที่นาน ดังนั้นเพื่อความสะดวกรวดเร็วและแม่นยำในการวัดและทดลอง จึงประยุกต์ใช้ตัวเทอร์มิสเตอร์(Thermistor)ที่มีคุณสมบัติของค่าความต้านทานลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็นตัวตรวจวัดสัญญาณความร้อน โดยนำไปเชื่อมโยงเข้ากับไมโครคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการควบคุมการวัดและเก็บข้อมูลอย่างอัตโนมัติพร้อมทั้งการวิเคราะห์และแสดงผลข้อมูลบนคอมพิวเตอร์ในช่วงเวลาเดียวกันเพื่อช่วยลดขั้นตอนในการทำงานที่ซ้ำซ้อน ในการประยุกต์ใช้ระบบนี้จะต้องมีชุดเชื่อมโยงเพื่อทำการแปลงสัญญาณไฟฟ้าแบบอนาลอกที่ออกจากตัวตรวจวัดสัญญาณไปเป็นสัญญาณไฟฟ้าแบบดิจิตอล โดยได้เลือกใช้ตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล(Analog to Digital Convertor:ADC) เบอร์ ADC0816 ขนาด 8 บิต ที่มีระบบมัลติเพลกเซอร์(Multiplexer system) แบบ 16 ช่องสัญญาณเข้าอยู่ในตัว เพื่อให้เกิดความสะดวกในการใช้งานสำหรับเชื่อมโยงเข้ากับตัวตรวจวัดสัญญาณความร้อนแบบเทอร์มิสเตอร์จำนวน 16 ตัว แล้วเชื่อมโยงบัสข้อมูล (Data bus)ของ ADC 0816 เข้ากับชิปเบอร์ 8255 ที่เชื่อมต่อเข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 เบอร์ 8031 และใช้การติดต่อสื่อสารระหว่าง 8031 กับไมโครคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ตสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรม(Serial port) นอกจากนี้แล้วในการทำงานของชุดระบบการวัดและเก็บข้อมูล (Data Acquisition) ดังกล่าวจำเป็นต้องอาศัยซอฟต์แวร์ที่เขียนขึ้นเองในรูปแบบโปรแกรมมอนิเตอร์(Monitor) สำหรับใช้ควบคุมการทำงานของชุดเชื่อมโยงที่มีไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 เบอร์ 8031 เป็นซีพียู โดยใช้ภาษาโปรแกรมแอสเซมบลี้(Assembly)เป็นภาษาปฏิบัติการและนำการโปรแกรมดังกล่าวไปเชื่อมโยงเข้ากับโปรแกรมภาษาระดับสูงที่เป็นโปรแกรมภาษา C เพื่อเชื่อมโยงกับผู้ใช้(User) อีกทีหนึ่ง

ในการออกแบบระบบการทดลองนี้ผู้วิจัยมีจุดมุ่งหมายเน้นการประยุกต์ระบบการเชื่อมโยงการวัดปริมาณทางฟิสิกส์ของค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งและเวลาเข้ากับไมโครคอมพิวเตอร์ในระดับของวิชาฟิสิกส์พื้นฐานเพื่อใช้เป็นสื่อการเรียนการสอนและต้องการให้ผู้เรียนได้เห็นถึงผลของการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งและเวลาที่เป็นรูปธรรมที่ชัดเจนยิ่งขึ้นนอกจากนี้ยังได้ใช้แหล่งกำเนิดความร้อนที่เป็นอากาศที่อุณหภูมิห้องประมาณ 25 องศาเซลเซียส และใช้แหล่งกำเนิดความเย็นที่เป็นน้ำแข็งที่อุณหภูมิประมาณ 0 องศาเซลเซียส เป็นตัวดูดความร้อนในแท่งโลหะรูปทรงกระบอกตันที่ผิวด้านข้างมีการห่อหุ้มด้วยฉนวนที่วางตัวในแนวตั้ง ซึ่งการใช้แหล่งกำเนิดความร้อนและความเย็นในระดับอุณหภูมิดังกล่าวจะไม่ก่อให้เกิดอันตรายใดๆ และมีความปลอดภัยกว่าการใช้วิธีต้มน้ำหรือเผาให้ร้อน และอุปกรณ์ต่างๆ ที่นำมาใช้ในงานทดลองสามารถหาได้ง่ายในท้องถิ่น นอกจากนี้ในการศึกษายังมีจุดมุ่งหมายเพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้รับกับผลที่ได้ในทางทฤษฎีโดยใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข(Numerical method) เพื่อนำเอารูปแบบการทดลองในแนวของงานวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้ในการวัดอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมทั่วๆไป เช่น นำไปประยุกต์ใช้ในการวัดอุณหภูมิในชั้นดินที่ระยะต่างๆในระดับตื้นของพื้นผิวโลกเพื่อศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนหรืออุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งและเวลาในช่วงเวลาหนึ่งๆ ตามที่กำหนดได้ หรือนำไปใช้วัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ตำแหน่งด้านในและด้านนอกของผนังอาคารแบบต่างๆ เพื่อศึกษาถึงผลกระทบทางความร้อนภายนอกที่มีต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบการทำความเย็นเพื่อนำไปสู่การเลือกชนิดของวัสดุที่มีลักษณะเป็นฉนวนความร้อนในการสร้างผนังอาคาร เป็นต้น

การตรวจเอกสาร

การศึกษาการนำความร้อนของสสารส่วนใหญ่กระทำเพื่อกำหนดค่าคุณสมบัติทางความร้อนของสสารโดยเฉพาะการวัดค่าสภาพการนำความร้อน(Thermal conductivity) และการวัดค่าสภาพการกระจายความร้อน(Thermal diffusivity) ของสสาร ในการวัดค่าเหล่านี้สามารถกระทำได้หลายช่วงอุณหภูมิด้วยกันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของการนำเอาสสารไปประยุกต์ใช้งานโดยแนวทางในการทำการทดลองเราสามารถที่จะพิจารณาได้ 2 แนวทาง คือแนวทางแรกเป็นการวัดค่าสภาพการนำความร้อนด้วยการใช้วิธีที่สภาวะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมีค่าที่คงที่ (Static methods of measuring thermal conductivity)ซึ่งเป็นการศึกษาระบบในสภาวะคงที่ (Steady state)นั่นเองและแนวทางที่สองเป็นการศึกษาการวัดค่าสภาพการนำความร้อนในสภาวะ

ที่การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิยังขึ้นกับเวลา(Dynamic methods of measuring thermal conductivity) ซึ่งในแนวทางนี้สามารถแบ่งย่อยได้อีก 2 ลักษณะคือวิธีการเปลี่ยนแปลงแบบเป็นคาบของเวลา(Periodic method) และวิธีการเปลี่ยนแปลงแบบไม่เป็นคาบของเวลา(Transitory method)(Parrott and Stuckes,1975) จากการศึกษาในฟิสิกส์ความร้อนพื้นฐานของชุดการทดลองการวัดสภาพการนำความร้อนของเซียร์ล(Searle's heat conductivity apparatus) (Harris,1963) ก็เป็นอีกวิธีที่เลือกใช้แนวทางแรก โดยใช้วิธีการต้มน้ำเพื่อใช้เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนให้กับปลายของแท่งโลหะที่มีการหุ้มด้วยฉนวนความร้อนตลอดความยาวของแท่งแล้วใช้เทอร์โมมิเตอร์แบบปรอทเพียง 2 อัน สำหรับการวัดอุณหภูมิในแท่งโลหะ ณ ตำแหน่งที่กำหนดและใช้เทอร์โมมิเตอร์อีก 2 อันวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งปลายสุดทั้งสองของแท่งโลหะในส่วนที่จุ่มอยู่ในน้ำร้อนและน้ำเย็นตามลำดับแล้วพิจารณาระบบที่สภาวะคงที่เพื่อนำเอาข้อมูลอุณหภูมิที่ได้รับไปคำนวณค่าสภาพการนำความร้อนของแท่งโลหะและในการกำหนดค่าสภาพการนำความร้อนของแท่งโลหะโดยวิธีของอังสตรอม(The determination of the conductivity of a bar of metal by Angstrom's method) (Worsnop and Flint,1969) เขาใช้วิธีการให้แหล่งกำเนิดความร้อนแบบสลับและทำการวัดอุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมคัพเปิล 2 ตัว ต่อเข้ากับมิเตอร์เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ 2 ตำแหน่ง เขาพบว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะมีลักษณะเป็นคาบของเวลา ซึ่งผู้วิจัยไม่ได้ใช้ในแนวทางนี้ และสำหรับในวิธีการของฟอร์บีส์ของการกำหนดค่าสภาพการนำความร้อนของแท่งโลหะ(Forbes's method of the conductivity of a metal bar) (Worsnop and Flint,1969) ได้ศึกษาตามวิธีการเปลี่ยนแปลงแบบไม่เป็นคาบ โดยในการทดลองส่วนแรกเขาได้ใช้เทอร์โมมิเตอร์แบบปรอทจำนวน 6 อัน ฝังไว้ในแท่งโลหะที่ไม่มีการหุ้มด้วยฉนวนที่ระยะห่างเท่า ๆ กันโดยปลายข้างหนึ่งถูกทำให้โค้งงอเพื่อนำไปจุ่มลงในแหล่งกำเนิดความร้อนที่เป็นโลหะเหลวในที่นี้ใช้ตะกั่วเหลวและแท่งโลหะวางตัวในแนวระดับเขาทำการบันทึกอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งจนกระทั่งระบบเข้าสู่สภาวะคงที่และสำหรับในการทดลองส่วนที่สองเขาได้ใช้แท่งโลหะแบบเดียวกันแต่สั้นกว่าห่อด้วยกระดาษหลายๆชั้นแล้วนำไปจุ่มลงในตะกั่วเหลวทั้งหมดจากนั้นนำขึ้นมาวางในอากาศที่สภาวะแวดล้อมเดียวกับการทดลองส่วนแรกแล้วใช้เทอร์โมมิเตอร์หนึ่งอันวัดอุณหภูมิที่ลดลงตามเวลาที่สภาวะไม่คงที่โดยได้รับค่าอุณหภูมิที่อยู่ในช่วงของการวัดอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งของส่วนแรก แล้วคำนวณอัตราของการเย็นตัวลงของแท่งโลหะโดยใช้ค่าอุณหภูมิเฉพาะที่พิจารณาตรงกับอุณหภูมิของแต่ละตำแหน่งในการทดลองส่วนแรกเพื่อหาค่าอัตราการสูญเสียของความร้อนตลอดความยาวของแท่งโลหะที่ให้กับอากาศโดยรอบเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับอัตราการไหลของความร้อนภายในแท่งโลหะในส่วนของตำแหน่งใดๆ ที่

ทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ เหตุผลเพื่อใช้สำหรับกำหนดค่าสภาพการนำความร้อนของแท่งโลหะ จากรูปแบบการทดลองที่กล่าวมาส่วนใหญ่จะอาศัยแหล่งกำเนิดความร้อนที่มีอุณหภูมิค่อนข้างสูง และจะใช้วิธีการจดบันทึกข้อมูลอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งและเวลาซึ่งจะต้องอาศัยความรวดเร็วของผู้ทำการทดลองเองผู้วิจัยคิดว่าวิธีการเก็บข้อมูลดังกล่าวทำให้ช้าในการจัดเก็บข้อมูลของค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งและเวลา ประกอบกับปัจจุบันการวิจัยเกี่ยวกับการกำหนดค่าคุณสมบัติทางความร้อนของสสารส่วนใหญ่จะทำกันเฉพาะในห้องปฏิบัติการขั้นสูงซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ทดลองค่อนข้างมีราคาแพง ซึ่งไม่เหมาะกับการทดลองในระดับฟิสิกส์พื้นฐานสำหรับนักศึกษาชั้นปีที่ 1 จากเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้ผู้วิจัยได้แนวคิดที่จะออกแบบและสร้างชุดการทดลองทางความร้อนเพื่อให้เหมาะสมกับนักศึกษาชั้นปีที่ 1 โดยใช้น้ำแข็งเป็นตัวดูดความร้อนออกจากแท่งโลหะที่เป็นตัวนำความร้อนซึ่งถูกหุ้มด้วยฉนวนป้องกันการสูญเสียความร้อนในแนวรัศมีตลอดความยาวของแท่งโลหะที่วางตัวในแนวดิ่งโดยกำหนดให้มีเงื่อนไขเริ่มต้น(Initial condition)เดียวกับอุณหภูมิห้องของอากาศที่ 25 องศาเซลเซียส และกำหนดเงื่อนไขขอบเขต(Boundary condition) ทั้งหมด 2 เงื่อนไข อยู่ที่ตำแหน่งปลายแรกสุดของแท่งโลหะในส่วนที่จุ่มอยู่ในน้ำแข็งและที่ตำแหน่งปลายสุดท้ายของแท่งโลหะที่สัมผัสกับอากาศภายในห้องที่อยู่นิ่งแล้วทำการวัดอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งและเวลาของแท่งโลหะเพื่อศึกษาการนำความร้อนในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบไม่คงที่ในรูปแบบ 1 มิติ ที่ดัดแปลงมาจากการทดลองของเซียร์ลและของฟอร์บีส์ตามลำดับและเกี่ยวข้องกับอุณหภูมิในช่วง 0-25 องศาเซลเซียส โดยจะไม่ก่อให้เกิดอันตรายใดๆ และในส่วนของระบบการวัดและเก็บข้อมูลจะใช้ตัวเทอร์มิสเตอร์(Dally,Rilly and McConnell,1984) ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำมาทำเป็นตัวตรวจวัดอุณหภูมิภายในแท่งโลหะจำนวน 14 ตัวแล้วฝังไว้ในแท่งโลหะที่ระยะห่างเท่าๆกันและใช้เทอร์มิสเตอร์อีก 2 ตัว สำหรับวัดอุณหภูมิในน้ำแข็งและในอากาศที่ใช้สำหรับเงื่อนไขขอบเขตแล้วนำเอาสัญญาณอนาลอกที่ได้รับจากเทอร์มิสเตอร์ทั้งหมด 16 ตัว ต่อเชื่อมโยงเข้ากับตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลเบอร์ 0816 ที่มีระบบมัลติเพลกเซอร์(Multiplexer) 16 ช่องสัญญาณอยู่ในตัวแล้วนำไปเชื่อมโยงเข้ากับชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลMCS-51 เบอร์ 8031 เป็นตัวควบคุมการทำงานโดยใช้การขียนโปรแกรมแอสเซมบลี้(Ayala,1991)เป็นโปรแกรมมอนิเตอร์ สำหรับกำหนดการวัดและการจัดเก็บข้อมูลไว้ที่หน่วยความจำภายนอก(External RAM) แล้วต่อเชื่อมโยงผ่านพอร์ตสื่อสารแบบอนุกรมเข้ากับไมโครคอมพิวเตอร์สำหรับเป็นตัวจัดเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลที่ใช้การขียนโปรแกรมด้วยภาษา C สุดท้ายก็นำผลการทดลองที่วัดได้ไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้รับจากการคำนวณด้วยวิธีเชิงตัวเลข ที่ใช้วิธี Finite Difference(Ozisik,1980) ในการหาคำตอบของสมการการนำความร้อนในสภาวะไม่คงที่ของแท่งโลหะในรูปแบบ 1 มิติ จากรูป

แบบการทดลองดังกล่าวเป็นการใช้วิธีการวัดและเก็บข้อมูลโดยอัติโนมัติพร้อมทั้งสามารถวิเคราะห์ข้อมูลในช่วงเวลาเดียวกันได้โดยใช้คอมพิวเตอร์ ซึ่งการทำงานในลักษณะแบบจะสะดวกรวดเร็วแม่นยำยิ่งขึ้น และเป็นแนวทางหนึ่งสำหรับการใช้พัฒนาชุดการทดลองทางฟิสิกส์พื้นฐานสำหรับนักศึกษาชั้นปีที่ 1 ต่อไป

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.เพื่อศึกษาการนำความร้อนในแท่งโลหะในรูปแบบ 1 มิติโดยใช้น้ำแข็งเป็นตัวดูดความร้อน
2.เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้ตามทฤษฎีที่อาศัยวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

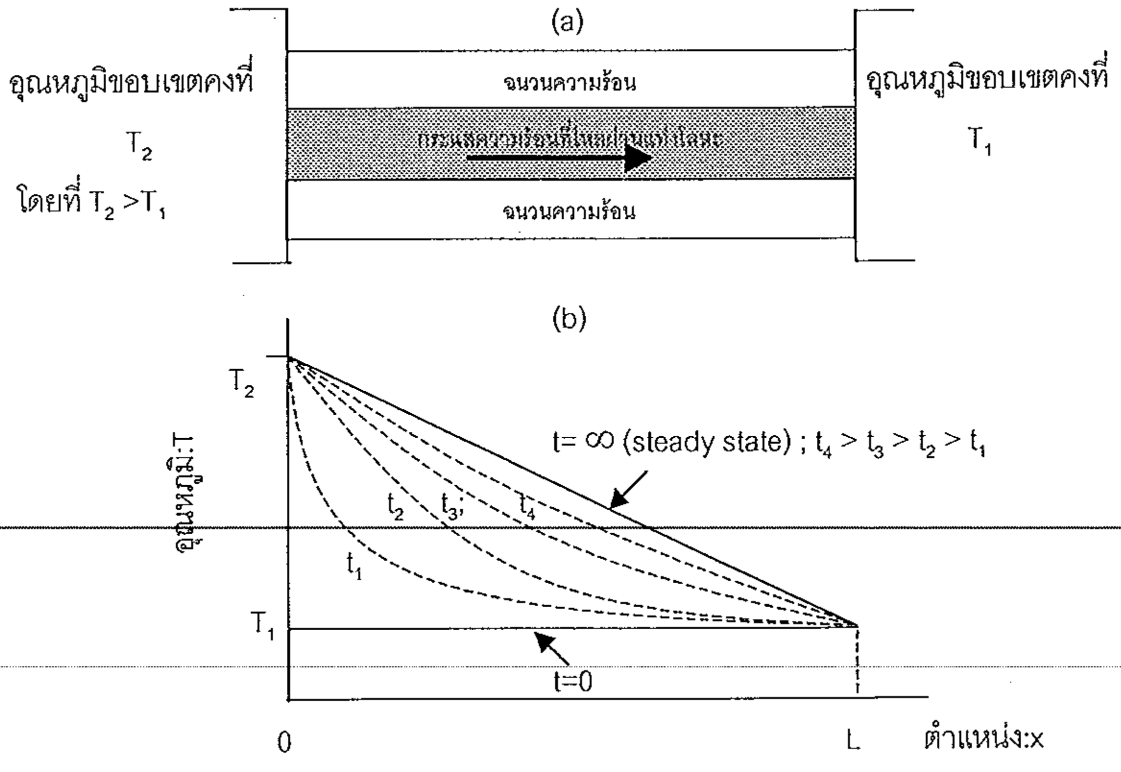
บทที่ 2

ทฤษฎีการนำความร้อนในสภาวะไม่คงที่ของวัตถุในรูปแบบ 1 มิติ

การนำความร้อน(Heat conduction) เป็นปรากฏการณ์ทางกายภาพอย่างหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการถ่ายเทพลังงานความร้อนที่อาศัยตัวกลางในการส่งผ่านพลังงานโดยตัวกลางหยุดนิ่งไม่มีการเคลื่อนย้ายมวลไปกับพลังงานความร้อนที่ถูกถ่ายเท การนำความร้อนในตัวกลางใดๆ มีหลักการที่เหมือนกันคือ เกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิของสสารที่ตำแหน่งต่างๆไม่เท่ากัน ความหนาแน่นกระแสพลังงานความร้อนจะไหลไปในทิศทางที่อุณหภูมิของสารมีค่าลดลงหรือพลังงานความร้อนถูกถ่ายเทจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยเป็นไปตามกฎของฟูเรียร์(Fourier's law) และกฎการอนุรักษ์พลังงาน(Conservation of energy) อันนำไปสู่การอธิบายและใช้สร้างรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวกับการนำความร้อนต่อไปนอกจากนี้พบว่าการนำความร้อนจะเกิดขึ้นได้ดีสำหรับตัวนำความร้อนที่เป็นโลหะเพราะว่าการส่งผ่านพลังงานความร้อนจะอาศัยการสั่นของอะตอมและอิเลคตรอนอิสระซึ่งมีอยู่จำนวนมากเป็นตัวส่งผ่านพลังงานความร้อนไปสู่อะตอมและอิเลคตรอนอิสระที่อยู่ถัดออกไปจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าตามหลักการที่กล่าวข้างต้น สำหรับในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาการนำความร้อนในสภาวะไม่คงที่ของแท่งโลหะในรูปแบบ 1 มิติ ที่ประกอบด้วยการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น 1 เงื่อนไขและเงื่อนไขขอบเขต 2 เงื่อนไข ของโลหะ 3 ชนิด คือ ทองเหลือง อะลูมิเนียม และเหล็ก และในการอธิบายหรือการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีเพื่อหาคำตอบของค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งและเวลาในโลหะแต่ละชนิดนั้นทำได้โดยอาศัยการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical analysis) ในรูปแบบวิธี Finite difference เป็นตัวสร้างรูปแบบจำลองการนำความร้อนดังกล่าวโดยอาศัยการเขียนโปรแกรมคำนวณซ้ำด้วยคอมพิวเตอร์แล้วนำผลที่ได้รับไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้ในการทดลองต่อไป

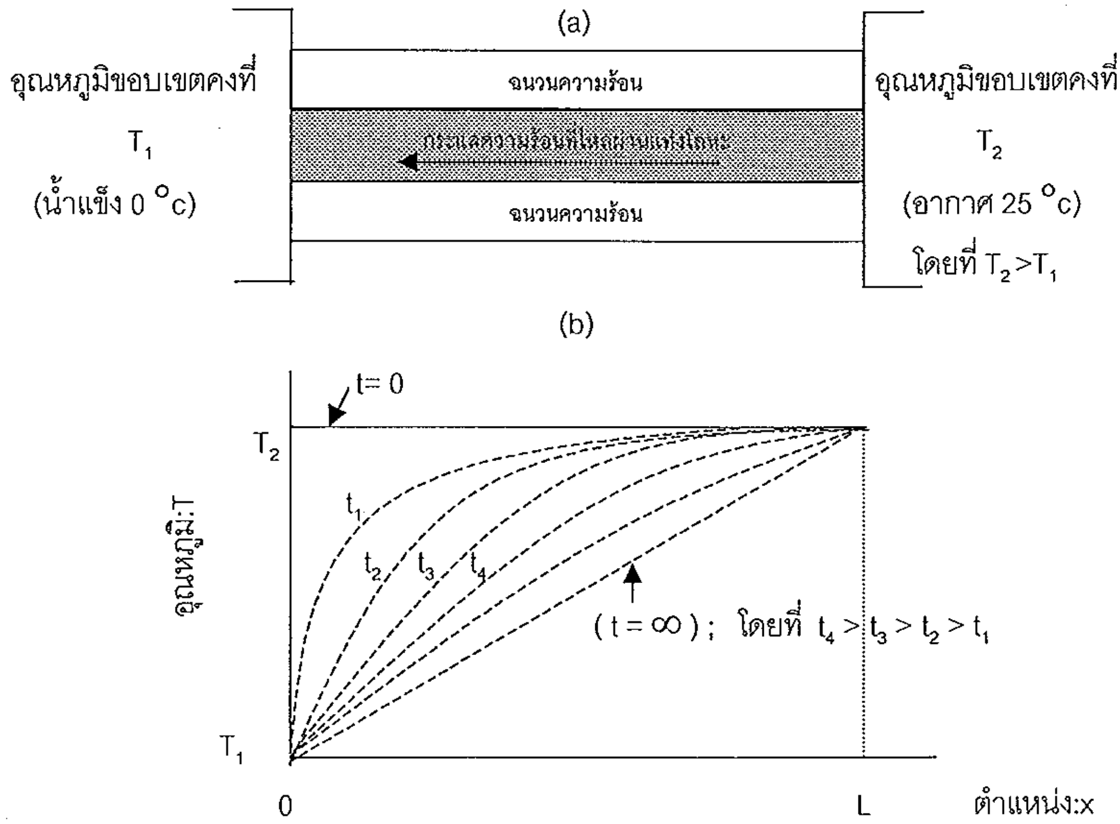
1. สมการของการนำความร้อนในสภาวะไม่คงที่ของแท่งโลหะในรูปแบบ 1 มิติ (Sears,1958 : 521-526)

สำหรับการพิจารณาการนำความร้อนภายในแท่งโลหะตันในรูปแบบ 1 มิติ ที่มีความยาว L มีค่าพื้นที่หน้าตัดสม่ำเสมอ A ค่าสภาพการนำความร้อน k ค่าความหนาแน่น ρ และค่าความจุความร้อนจำเพาะ c และไม่มีแหล่งกำเนิดความร้อนภายในแท่งโลหะ ที่ถูกหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อนที่ผิวด้านข้างดังภาพประกอบ 1 (a) เมื่อพิจารณาที่เวลาเริ่มต้น t= 0 กำหนดให้ทุกตำแหน่งที่อยู่ในแท่งโลหะรูปแบบ 1 มิติ มีค่าอุณหภูมิเริ่มต้นเป็น T_1 และที่ปลายสุดทางด้านขวามือกำหนดให้มีอุณหภูมิขอบเขตคงที่เป็น T_1 ส่วนที่ปลายสุดทางด้านซ้ายมือกำหนดให้มีอุณหภูมิขอบเขตคงที่เป็น T_2 โดยที่ $T_2 > T_1$ เมื่อทำการวัดค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งบนแท่งโลหะที่ถูกหุ้มฉนวนที่เวลาต่างๆ เช่น $t_1, t_2, t_3, \ldots$ สามารถพิจารณาได้ดังภาพประกอบ 1 (b)



ภาพประกอบ 1 การนำความร้อนในสภาวะไม่คงที่ของแท่งโลหะในรูปแบบ 1 มิติ ที่เวลา $t_1, t_2, \ldots$ และเข้าสู่สภาวะคงที่ที่เวลา $t = \infty$ (เมื่อโลหะรับความร้อน)

เมื่อพิจารณาการไหลของกระแสความร้อนในตำแหน่งตรงกันข้ามกับภาพประกอบ 1 และเป็นระบบของแท่งโลหะที่คายความร้อนโดยมีน้ำแข็งเป็นตัวดูดความร้อนเอาไว้ สามารถพิจารณาได้ใหม่ดังภาพประกอบ 2



ภาพประกอบ 2 การนำความร้อนในสภาวะไม่คงที่ของแท่งโลหะในรูปแบบ 1 มิติ
ที่เวลา $t_1, t_2, \ldots$ และเข้าสู่สภาวะคงที่ที่เวลา $t = \infty$
(เมื่อโลหะคายความร้อน)

ดังนั้นเมื่อพิจารณาการนำความร้อนของแท่งโลหะในสภาวะไม่คงที่ ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง ดังภาพประกอบ 1(b) สามารถพิจารณาได้โดยกำหนดให้

T=T(x,t) เป็น ฟังก์ชันของอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่ง x และเวลา t

dQ/dt เป็น อัตราการถ่ายเทพลังงานความร้อนหรือพลังงานความร้อนที่ไหล(dQ)ต่อหนึ่งหน่วยเวลา(dt)

และนิยามเกรเดียนท์ของอุณหภูมิกล่าวว่าเป็นอัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิต่อหนึ่งหน่วยความยาวของตัวนำ ดังนั้น เมื่อ พิจารณาความยาวของตัวนำที่มีค่าน้อยๆ เป็น dx และ มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ จะเขียนนิยามของเกรเดียนท์อุณหภูมิเป็นสมการได้ดังนี้

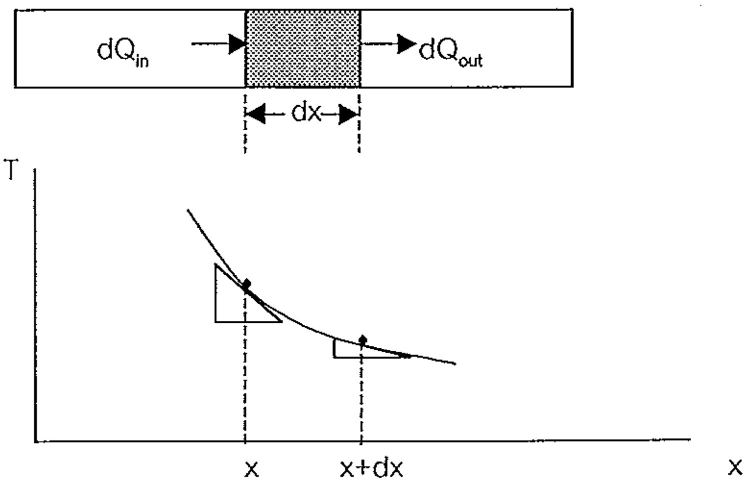
$$\text{เกรเดียนท์ของอุณหภูมิ} = dT/dx \qquad (2.1)$$

สำหรับอัตราการถ่ายเทพลังงานความร้อนหรือค่ากระแสความร้อน(Heat current:H) ที่ไหลผ่านตัวนำที่มีพื้นที่หน้าตัดสม่ำเสมอ A ความยาว สั้นๆ dx และมีค่าสภาพการนำความร้อน k สามารถเขียนในเทอมของเกรเดียนท์ของอุณหภูมิ และเขียนในรูปสมการทั่วไปได้ว่า

$$H = dQ/dt = -kA(dT/dx) \qquad (2.2)$$

เครื่องหมายลบ(-) แสดงถึงทิศทางการไหลของพลังงานความร้อนจากตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่ตำแหน่งที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า

จากภาพประกอบ 1(b) เมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับตำแหน่ง ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง ในสภาวะไม่คงที่ เพื่อพิจารณาค่าเกรเดียนท์ของอุณหภูมิและสมการของการนำความร้อนในสภาวะไม่คงที่ของโลหะในรูปแบบ 1 มิติ สามารถทำได้โดยการแบ่งความยาวของแท่งโลหะให้เป็นช่วงสั้นๆ ที่มีค่า dx ระหว่างพื้นที่หน้าตัดสม่ำเสมอที่ตำแหน่ง x และ x+dx แล้วหาค่าเกรเดียนท์ของอุณหภูมิที่ตำแหน่ง x และ ตำแหน่ง x+dx ตามลำดับ ดังภาพประกอบ 3



ภาพประกอบ 3 แสดงวิธีหาค่าเกรเดียนท์ของอุณหภูมิที่ตำแหน่ง x และ x+dx เนื่องจากผลของการไหลของพลังงานความร้อนเข้าและออกในส่วนของความยาวสั้นๆ dx

จากภาพประกอบ 3 ค่าความชันของกราฟระหว่าง T กับ x คือ ค่าเกรเดียนท์ของอุณหภูมินั่นเอง และพิจารณาได้ว่าค่าเกรเดียนท์ของอุณหภูมิที่ตำแหน่ง x มีค่ามากกว่าค่าเกรเดียนท์ของอุณหภูมิที่ตำแหน่ง x +dx ดังนั้นปริมาณความร้อนที่ไหลเข้าต่อหนึ่งหน่วยเวลาที่ตำแหน่ง x ย่อมมีค่ามากกว่าปริมาณความร้อนที่ไหลเข้าต่อหนึ่งหน่วยเวลาที่ตำแหน่ง x+dx ดังนั้น เมื่อกำหนดให้

dQ_{in}/dt คือ อัตราพลังงานความร้อนที่ไหลเข้าสู่ปริมาตร Adx ที่ตำแหน่ง x

dQ_{out}/dt คือ อัตราพลังงานความร้อนที่ไหลออกจากปริมาตร Adx ที่ตำแหน่ง x+dx

จะได้ dT/dx เป็นค่าเกรเดียนท์ของอุณหภูมิที่ตำแหน่ง x และอัตราพลังงานความร้อนที่ไหลเข้าสู่ปริมาตร Adx ที่ตำแหน่ง x คือ dQ_{in}/dt และมีค่าดังนี้

$$dQ_{in}/dt = -kA(dT/dx) \qquad (2.3)$$

และพลังงานความร้อนที่ไหลเข้าในวลา dt คือ

$$dQ_{in} = -kA(dT/dx)dt \quad (2.4)$$

ส่วนค่าเกรเดียนท์ของอุณหภูมิที่ตำแหน่ง x+dx จะมีค่าเท่ากับค่าเกรเดียนท์ของอุณหภูมิที่ตำแหน่ง x บวกกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของเกรเดียนท์ของอุณหภูมิที่เทียบกับระยะ dx ของความยาว dx

$$dT/dx+[d(dT/dx)/dx]dx= dT/dx+(d^2T/ dx^2)dx \quad (2.5)$$

และจะได้อัตราพลังงานความร้อนที่ไหลออกจากปริมาตร Adx ที่ตำแหน่ง x+dx คือ dQ_{out}/dt และมีค่าดังนี้

$$dQ_{out}/dt= -kA[(dT/dx)+(d^2T/ dx^2)dx] \quad (2.6)$$

และพลังงานความร้อนที่ไหลออกในเวลา dt คือ

$$dQ_{out} = -kA[(dT/dx)+(d^2T/ dx^2)dx]dt \quad (2.7)$$

ดังนั้นพลังงานความร้อนสุทธิที่ไหลเข้าสู่ปริมาตร Adx คือ dQ ซึ่งจะได้ว่า

$$dQ = dQ_{in}- dQ_{out} \quad (2.8)$$

หรือ $$dQ = kA(d^2T/ dx^2)dxdt \quad (2.9)$$

และกล่าวได้ว่าพลังงานความร้อนสุทธิ dQ ที่ไหลเข้าสู่ปริมาตร Adx จะทำให้สสารที่มีมวล m ความหนาแน่น ρ และค่าความจุความร้อนจำเพาะ c มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น dT เขียนได้ว่า

$$dQ = mcdT \tag{2.10}$$

$$dQ = \rho(Adx)cdT \tag{2.11}$$

พิจารณาสมการ(2.9) มีค่าเท่ากับสมการ(2.11) จะได้ว่า

$$\rho(Adx)cdT = kA(d^2T/dx^2)dxdt \tag{2.12}$$

จัดรูปใหม่สุดท้ายจะได้ว่า

$$dT/dt = (k/\rho c)(d^2T/dx^2) \tag{2.13}$$

เมื่อ $\alpha = k/\rho c$; โดยที่ α คือค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อน
หรือเขียนได้ว่า

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \tag{2.14}$$

สมการ (2.14) เรียกว่า สมการของการนำความร้อนในสภาวะไม่คงที่ของแท่งโลหะในรูปแบบ 1 มิติ

2. การประมาณค่าสมการการนำความร้อนในสภาวะไม่คงที่ ด้วยวิธี Finite difference (Ozisik,1980:471-479)

2.1 สมการที่ใช้สำหรับคำนวณอุณหภูมิที่ขึ้นตำแหน่งและเวลาในแท่งโลหะที่หุ้มฉนวน

ในการประมาณค่าสมการของการนำความร้อนในสภาวะไม่คงที่ภายในแท่งโลหะในรูปแบบ1 มิติในสมการ (2.14) ของความยาวที่จำกัดโดยที่ $0 < x < L$ เมื่อ L เป็นความยาวของแท่งโลหะที่หุ้มฉนวนกั้นความร้อนที่อยู่ระหว่างตำแหน่งที่มีเงื่อนไขขอบเขตของค่าอุณหภูมิต่างกัน และเป็นส่วนที่ใช้สำหรับศึกษาค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งและเวลาที่ $t>0$ เมื่อมีการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นที่เวลา $t=0$ ของทุกตำแหน่งที่อยู่บนแท่งโลหะมีอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส และกำหนดเงื่อนไขขอบเขตแต่ละด้านของปลายโลหะโดยให้ปลายแรกของแท่งโลหะที่ไม่หุ้มฉนวนกั้นความร้อนจุ่มลงไปในน้ำแข็งที่มีอุณหภูมิประมาณ 0 องศาเซลเซียส และปลายสุดท้ายของแท่งโลหะที่ไม่หุ้มฉนวนเช่นเดียวกันวางตัวในอากาศที่มีอุณหภูมิประมาณ 25 องศาเซลเซียส ตามแนวดิ่ง ดังนั้นในการหาคำตอบในทางทฤษฎีของการนำความร้อนในสภาวะไม่คงที่ตามรูปแบบสมการ(2.14) สามารถทำได้โดยใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขตามวิธีFinite difference ที่มีการประมาณค่าสมการ(2.14) แล้วใช้วิธีนำค่าอุณหภูมิที่เวลาเริ่มต้นและที่เวลาเดิมที่รู้ค่า มาคำนวณค่าของอุณหภูมิที่เวลาใหม่ก็จะทำให้ทราบค่าอุณหภูมิของแต่ละตำแหน่งที่ขึ้นกับเวลาใหม่ได้ โดยวิธีการนี้จะต้องทำการแบ่งตำแหน่งในวัตถุออกเป็นช่องเล็กๆโดยมีขนาดระยะก้าวละ Δx จำนวน N ช่องตามแนวแกน x พร้อมทั้งแบ่งแกน y ซึ่งแทนเวลา t โดยมีระยะก้าวของเวลาเท่ากับ Δt (ดูภาพประกอบ 4) โดยได้ความสัมพันธ์ของตำแหน่งและเวลาของระบบพิกัด x และ t ดังนี้

$$x = i\Delta x \qquad \text{เมื่อ } i = 0,1,2,3,\ldots,N \quad \text{และ } L=N\Delta x \tag{2.15}$$

$$t = j\Delta t \qquad \text{เมื่อ } j = 0,1,2,3,\ldots \tag{2.16}$$

และค่าอุณหภูมิ T(x,t) เราเขียนใหม่ได้ว่า

$$T(x,t) = T(i\Delta x, j\Delta t) \equiv T_i^j \tag{2.17}$$

สำหรับการประมาณค่าเทอม $[\partial^2 T/\partial x^2]$ ทางขวามือของสมการ(2.14) ที่ตำแหน่ง i ใดๆ และสำหรับเวลาที่ j โดยใช้วิธีกึ่งกลาง (central difference) จะได้ว่า

$$[\partial^2 T/\partial x^2] = \{T_{i-1}^{j} - 2T_i^j + T_{i+1}^{j}\}/\Delta x^2 \tag{2.18}$$

และการประมาณค่าเทอม $[\partial T/\partial t]$ ทางซ้ายมือของสมการ(2.14) จะใช้วิธีไปข้างหน้า (forward difference) จะได้ว่า

$$[\partial T/\partial t] = \{T_i^{j+1} - T_i^j\}/\Delta t \tag{2.19}$$

นำค่าที่ได้ในสมการ (2.18) และ (2.19) แทนกลับลงในสมการ(2.14) จะได้ว่า

$$\{T_i^{j+1} - T_i^j\}/\Delta t = \propto\{T_{i-1}^{j} - 2T_i^j + T_{i+1}^{j}\}/\Delta x^2 \tag{2.20}$$

จัดรูปใหม่

$$T_i^{j+1} = T_i^j + (\propto\Delta t/\Delta x^2)\{T_{i-1}^{j} - 2T_i^j + T_{i+1}^{j}\} \tag{2.21}$$

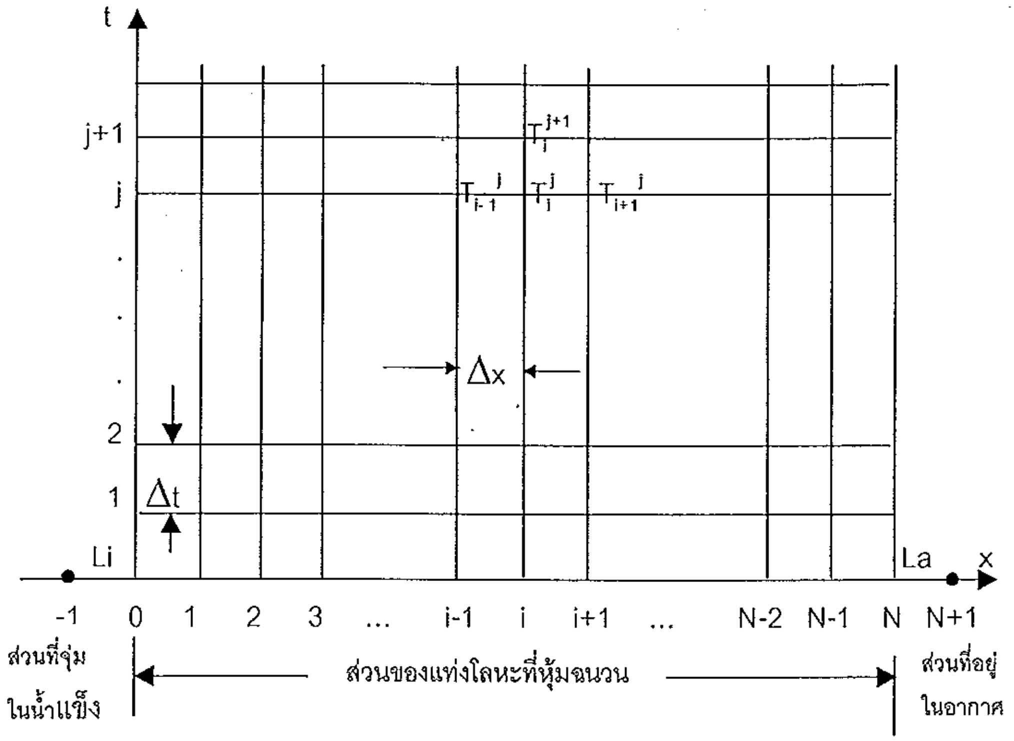
หรือ

$$T_i^{j+1} = T_i^j + r\{T_{i-1}^{j} - 2T_i^j + T_{i-1}^{j}\} \quad \text{เมื่อ } i = 1,2,3,\ldots,N-1 \tag{2.22}$$

เมื่อ $r = \propto\Delta t/\Delta x^2$ (2.23)

~~r เรียกว่า ตัวเลขฟูเรียร์(The Fourier number)~~

สมการ(2.22) เป็นสมการที่ใช้คำนวณค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งและเวลาของการนำความร้อนของวัตถุในรูปแบบ 1 มิติ ของการวิเคราะห์เชิงตัวเลขตามวิธี Finite difference



ภาพประกอบ 4 ตำแหน่งของอุณหภูมิ(Temperature Grid)
(ที่มา : ดัดแปลงจาก Ozisik,1980)

2.2 สมการสำหรับคำนวณอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลาของตำแหน่งขอบเขต

จากภาพประกอบ 4 กำหนดให้ตำแหน่ง i= -1 เป็นตำแหน่งในแท่งโลหะที่อยู่ในน้ำแข็งซึ่งมีระยะห่างจากจุด i= 0 เป็นระยะ Li และอุณหภูมิ T[-1] = 0 (องศาเซลเซียส(°C) ส่วนตำแหน่ง i=N+1 เป็นตำแหน่งปลายของแท่งโลหะที่อยู่ในอากาศซึ่งอยู่ห่างจากตำแหน่ง i= N เป็นระยะ La มีอุณหภูมิ T[N+1]= 25 °C และตำแหน่งที่ต้องพิจารณาต่อไปคือตำแหน่ง i=0 กับตำแหน่ง i= N ซึ่งเป็นตำแหน่งของขอบเขตในแท่งโลหะที่ถูกหุ้มฉนวนที่สัมผัสกับน้ำแข็งและสัมผัสกับอากาศตามลำดับ และในวิธีพิจารณาในทางทฤษฎีเพื่อจำลองรูปแบบการนำความร้อนของตำแหน่งทั้งสองดังกล่าวจำเป็นต้องกำหนดค่า Li เพื่อใช้ในการคำนวณค่าอุณหภูมิ T[0] และกำหนดค่า La เพื่อใช้ในการคำนวณค่าอุณหภูมิ T[N] โดยพิจารณาในรายละเอียดได้ดังนี้

2.2.1 อุณหภูมิขอบเขตที่ตำแหน่ง i=0

สำหรับรูปแบบอุณหภูมิของเงื่อนไขขอบเขตที่ตำแหน่ง i=0 พิจารณาได้ว่าที่เวลาหนึ่ง อัตราพลังงานความร้อนที่ไหลเข้าสู่บริเวณสุดท้ายของแท่งโลหะที่หุ้มฉนวนที่ตำแหน่ง i=0 มีค่าเท่ากับ H_{in} โดยที่

$$H_{in} = kA(T_1^j - T_0^j)/ dx \tag{2.24}$$

ในขณะเดียวกันอัตราพลังงานความร้อนที่ไหลออกจากตำแหน่ง i=0 มีค่าเท่ากับ H_{out} โดยที่

$$H_{out} = k_1A(T_0^j - T_{-1}^j) /Li \tag{2.25}$$

ดังนั้นเมื่อกำหนดให้อัตราพลังงานความร้อนสุทธิหรือกระแสความร้อนสุทธิที่ผ่านตำแหน่ง i=0 มีค่าเท่ากับ H จะได้ว่า

$$H= H_{in} - H_{out} \tag{2.26}$$

หรือ

$$H= [kA(T_1^j - T_0^j)/ dx] - [k_1A(T_0^j - T_{-1}^j) /Li] \tag{2.27}$$

และกล่าวได้ว่ากระแสความร้อนสุทธินี้ถูกสะสมอยู่ในส่วนครึ่งหนึ่งของความยาว Li ที่อยู่ในน้ำแข็ง (โดยประมาณว่าส่วนของแท่งโลหะที่มีความยาว Li เป็นส่วนเดียวกับน้ำแข็งที่มีค่าความหนาแน่น ρ_1 และค่าความจุความร้อนจำเพาะ c_1) และสะสมอยู่ในส่วนครึ่งหนึ่งของความยาว dx ที่เป็นส่วนของแท่งโลหะที่มีค่าความหนาแน่น ρ และค่าความจุความร้อนจำเพาะ c ที่หุ้มฉนวน นั่นคือกระแสความร้อนสุทธิทั้งหมดจะถูกสะสมในส่วนของความยาวที่พิจารณาและปิดล้อมตำแหน่งที่ i=0 และส่งผลให้ตำแหน่งนี้มีอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงและมีค่ากระแสความร้อนที่ไหลผ่านหรืออัตราพลังงานความร้อนที่ไหลผ่านเป็นไปตามสมการ(2.28) ดังนี้

$$H= [\rho_1 c_1 A(L_i / 2) +\rho\, cA(dx / 2)] (T_0^{j+1} - T_0^j) / dt \tag{2.28}$$

และสมการ(2.27) มีค่าเท่ากับสมการ(2.28) ดังนั้น เขียนสมการได้ใหม่ว่า

$$[\rho_1 c_1 A(L_1/2) + \rho cA(dx/2)](T_0^{j+1} - T_0^j)/dt = [kA(T_1^j - T_0^j)/dx] - [k_1 A(T_0^j - T_{-1}^j)/L_i]$$

$$[(\rho_1 c_1 L_1 + \rho c\, dx)/2](T_0^{j+1} - T_0^j)/dt = [k(T_1^j - T_0^j)/dx] - [k_1(T_0^j - T_{-1}^j)/L_i] \qquad (2.29)$$

โดยที่ $(\rho_1 c_1 L_1 + \rho c\, dx)/2) = d_1$

เมื่อ ρ_1 = ความหนาแน่นของน้ำแข็ง ρ = ความหนาแน่นของโลหะ

c_1 = ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำแข็ง c = ความจุความร้อนจำเพาะของโลหะ

k_1 = ค่าสภาพนำความร้อนของน้ำแข็ง k = ค่าสภาพนำความร้อนของโลหะ

จากสมการ (2.29) เมื่อแทนค่า $T_{-1}^j = T[-1] = 0$ และ $(\rho_1 c_1 L_1 + \rho c\, dx)/2) = d_1$ สามารถเขียนได้ใหม่คือ

$$T_0^{j+1} - T_0^j = k\, dt/dx/d1\,(T_1^j - T_0^j) - k_1\, dt/L_i/d1\,(T_0^j - 0) \qquad (2.30)$$

โดยที่ $A_1 = k\, dt/dx/d1$ และ $B_1 = k_1\, dt/L_i/d1$

$$T_0^{j+1} = T_0^j + A_1(T_1^j - T_0^j) - B_1(T_0^j - 0) \qquad (2.31)$$

สมการ (2.31) ใช้สำหรับคำนวณค่าอุณหภูมิขอบเขตที่ตำแหน่ง i=0

2.2.2 อุณหภูมิขอบเขตที่ตำแหน่ง i=N

สำหรับรูปแบบอุณหภูมิของเงื่อนไขขอบเขตที่ตำแหน่ง i=N พิจารณาได้ว่าที่เวลาหนึ่ง อัตราพลังงานความร้อนที่ไหลเข้าสู่บริเวณสุดท้ายที่ตำแหน่ง i=N มีค่าเท่ากับ H_{in} โดยที่

$$H_{in} = k_2 A(T_{N+1}^{j} - T_{N}^{j}) / La \tag{2.32}$$

ในขณะเดียวกันอัตราพลังงานความร้อนที่ไหลออกจากบริเวณสุดท้ายที่ตำแหน่ง i=N มีค่าเท่ากับ H_{out} โดยที่

$$H_{out} = kA(T_{N}^{j} - T_{N-1}^{j}) / dx \tag{2.33}$$

ดังนั้นอัตราพลังงานความร้อนสุทธิหรือกระแสความร้อนสุทธิที่ผ่านตำแหน่ง i=N จะมีค่าเท่ากับ H โดยที่

$$H = H_{in} - H_{out} \tag{2.34}$$

หรือ
$$H = [k_2 A(T_{N+1}^{j} - T_{N}^{j}) / La] - [kA(T_{N}^{j} - T_{N-1}^{j}) / dx] \tag{2.35}$$

ในทำนองเดียวกันกล่าวได้ว่ากระแสความร้อนสุทธินี้ถูกสะสมอยู่ในส่วนครึ่งหนึ่งของความยาว La ที่อยู่ในอากาศ(โดยประมาณว่าส่วนของแท่งโลหะที่มีความยาว La เป็นส่วนเดียวกับอากาศ ที่มีค่าความหนาแน่น ρ_2 และค่าความจุความร้อนจำเพาะ c_2) และถูกสะสมอยู่ในส่วนครึ่งหนึ่งของความยาว dx ที่เป็นส่วนของแท่งโลหะที่มีค่าความหนาแน่น ρ และค่าความจุความร้อนจำเพาะ c ที่หุ้มฉนวน นั่นคือกระแสความร้อนสุทธิทั้งหมดจะถูกสะสมในส่วนของความยาวที่พิจารณาและปิดล้อมตำแหน่งที่ i=N และส่งผลให้ตำแหน่งนี้มีอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงและมีค่ากระแสความร้อนที่ไหลผ่านหรืออัตราพลังงานความร้อนที่ไหลผ่านเป็นไปตามสมการ(2.36) ดังนี้

Central Library
Prince of Songkhla University

$$H = [\rho_2 c_2 A(L_a/2) + \rho cA(dx/2)]\,(T_N^{j+1} - T_N^{j})/dt \qquad (2.36)$$

และสมการ(2.35) มีค่าเท่ากับ สมการ(2.36) ดังนั้น เขียนสมการได้ใหม่ว่า

$$[\rho_2 c_2 A(L_a/2) + \rho cA(dx/2)]\,(T_N^{j+1} - T_N^{j})/dt = [k_2 A(T_{N+1}^{j} - T_N^{j})/dx] - [kA(T_N^{j} - T_{N-1}^{j})/L_a]$$

$$[(\rho_2 c_2 L_a + \rho c\,dx)/2]\,(T_N^{j+1} - T_N^{j})/dt = [k_2(T_{N+1}^{j} - T_N^{j})/dx] - [k(T_N^{j} - T_{N-1}^{j})/L_a] \qquad (2.37)$$

โดยที่ $(\rho_2 c_2 L_a + \rho c\,dx)/2 = d_2$

เมื่อ ρ_2 = ความหนาแน่นของอากาศ ρ = ความหนาแน่นของโลหะ

c_2 = ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ c = ความจุความร้อนจำเพาะของโลหะ

k_2 = ค่าสภาพนำความร้อนของอากาศ k = ค่าสภาพนำความร้อนของโลหะ

จากสมการ 2.36 เมื่อแทนค่า $T_{N+1}^{j} = T[N+1] = 25\ ^{\circ}C$ และ $(\rho_2 c_2 L_a + \rho c\,dx)/2 = d_2$ สามารถเขียนได้ใหม่คือ

$$T_N^{j+1} - T_N^{j} = k_2\,dt/dx/d_2\,(25 - T_N^{j}) - k\,dt/L_a/d_2\,(T_N^{j} - T_{N-1}^{j}) \qquad (2.38)$$

โดยที่ $A_2 = k_2\,dt/dx/d_2$ และ $B_2 = k\,dt/L_a/d1$

$$T_N^{j+1} = T_N^{j} + A_2(25 - T_N^{j}) - B_2(T_N^{j} - T_{N-1}^{j}) \qquad (2.39)$$

สมการ (2.39) ใช้สำหรับคำนวณค่าอุณหภูมิขอบเขตที่ตำแหน่ง i=N

จะเห็นได้ว่าการใช้วิธี Finite Difference สำหรับการคำนวณหาคำตอบเชิงตัวเลขของสมการการนำความร้อนในสภาวะไม่คงที่ภายในแท่งโลหะในรูปแบบ 1 มิติ นั้นเป็นวิธีการคำนวณหาค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งและเวลานั่นเอง การคำนวณด้วยวิธีนี้จำเป็นต้องมีการเขียนโปรแกรมเพื่อจำลองปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจริงสำหรับคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์แล้วนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้ในการทดลองต่อไป

2.2.3 สมการสำหรับคำนวณค่า Li และค่า La

สำหรับการกำหนดค่า Li และ La เพื่อนำไปใช้ในการหาค่าอุณหภูมิ T[0] และ T[N] ทั้งสองในรูปแบบจำลองของโปรแกรม สามารถที่จะคำนวณค่า Li และ La ได้เมื่อพิจารณาระบบที่สภาวะคงที่โดยกล่าวได้ว่า ณ ตำแหน่งใดๆในระบบอัตราการไหลของพลังงานความร้อนเข้ามีค่าเท่ากับอัตราการไหลของพลังงานความร้อนออก โดยสามารถเขียนสมการได้ดังต่อไปนี้

ที่ตำแหน่ง ; i=0 พิจารณาได้ว่าสมการ(2.24) มีค่าเท่ากับสมการ(2.25) และค่าอุณหภูมิของตำแหน่งจะไม่ขึ้นกับเวลา นั่นคือ

$$kA(T_1 - T_0)/dx = k_1A(T_0 - T_{-1})/Li \qquad (2.40)$$

ดังนั้น

$$Li = [k_1 dx(T_0 - T_{-1})]/[k(T_1 - T_0)] \qquad (2.41)$$

ที่ตำแหน่ง ; i=N พิจารณาได้ว่าสมการ(2.32) มีค่าเท่ากับสมการ(2.33) และค่าอุณหภูมิของตำแหน่งจะไม่ขึ้นกับเวลา นั่นคือ

$$k_2A(T_{N+1} - T_N)/La = kA(T_N - T_{N-1})/dx \qquad (2.42)$$

ดังนั้น

$$La = [k_2 dx(T_{N+1} - T_N)]/[k(T_N - T_{N-1})] \qquad (2.43)$$

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

วิธีการในการทำวิจัยเพื่อศึกษาลักษณะการนำความร้อนในสภาวะไม่คงที่ของแท่งโลหะในรูปแบบ 1 มิติ โดยใช้วิธีการวัดอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งและเวลาภายในแท่งโลหะ จำเป็นต้องใช้วัสดุอุปกรณ์และวิธีดำเนินการ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

วัสดุ

วัสดุที่จำเป็นต้องใช้ในการศึกษาเรื่องการนำความร้อนในสภาวะไม่คงที่ของแท่งโลหะในรูปแบบ 1 มิติ มีดังต่อไปนี้

1. น้ำและน้ำแข็ง
2. ตะกั่วสำหรับเชื่อมและบัดกรี
3. สารซิลิโคนแบบเจล(Silicon Gel) โดยมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า แต่มีลักษณะเป็นตัวนำความร้อนที่ดีใช้สำหรับหุ้มตัวตรวจวัดอุณหภูมิแบบเทอร์มิสเตอร์
4. ฉนวนหุ้มท่อแอร์ขนาด 1/3 นิ้ว ใช้สำหรับหุ้มแท่งโลหะที่ใช้ทดลองเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนออกทางผิวด้านข้างให้กับสิ่งแวดล้อม
5. แท่งโลหะตันรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.0 เซนติเมตร ความยาว 30.0 เซนติเมตร จำนวน 3 ชนิด คือ ทองเหลือง อลูมิเนียม และเหล็ก

อุปกรณ์

อุปกรณ์ที่จำเป็นต้องใช้ในการศึกษาเรื่องการนำความร้อนในสภาวะไม่คงที่ของแท่งโลหะในรูปแบบ 1 มิติ สามารถแยกพิจารณาได้ตามขั้นตอนของวิธีดำเนินการ 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการปรับเทียบค่าของตัวตรวจวัดอุณหภูมิ ขั้นตอนการออกแบบระบบฮาร์ดแวร์เพื่อเชื่อมโยงชุดการวัดเข้ากับคอมพิวเตอร์ และขั้นตอนในการเขียนโปรแกรม โดยพิจารณาได้ดังนี้

1. อุปกรณ์ที่ใช้ในขั้นตอนการปรับเทียบค่าของตัวตรวจวัดอุณหภูมิ

1.1 ตัวเทอร์มิสเตอร์ (Dally,Riley and McConell,1984)

เทอร์มิสเตอร์(Thermistor)เป็นคำที่มาจากชื่อเต็มว่า Thermally sensitive resistors จัดเป็นตัวตรวจวัดความร้อน(Thermal transducer) ชนิดหนึ่งซึ่งมีความไวมากต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ(Temperature sensitive resistor) และสามารถแปรค่าความต้านทานได้ตามอุณหภูมิที่ได้รับ โดยค่าความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์จะเปลี่ยนไปประมาณ -3% ถึง -5% ต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทุกๆ 1 องศาเซลเซียส และมีเสถียรภาพดีเยี่ยมในระยะยาวกล่าวคือคุณสมบัติจะเปลี่ยนไปเพียง ±0.3%ต่อปีเท่านั้น โดยปกติแล้วค่าความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์จะมีค่าตั้งแต่ 0.5 โอห์ม ถึง 75 เมกะโอห์ม ในย่านของอุณหภูมิที่ใช้งานในช่วง -150องศาเซลเซียส ถึง +350 องศาเซลเซียส เทอร์มิสเตอร์เป็นชิ้นส่วนขนาดเล็กที่ทำมาจากสารกึ่งตัวนำเช่นออกไซด์ของนิกเกิล โคบอลต์หรือแมงกานีส กับ ซัลไฟด์ของเหล็ก อลูมิเนียมหรือทองแดง การจับคู่กันของสารกึ่งตัวนำเหล่านี้เช่น แมงกานีส-นิกเกิล แมงกานีส-นิกเกิล-โคบอลต์ หรือ แมงกานีส-นิกเกิล ทำให้ได้เทอร์มิสเตอร์ที่มีเสถียรภาพ(Stability)ที่ดีขึ้น เทอร์มิสเตอร์จะมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิชนิดอื่นๆ และมีรูปร่างหลายแบบให้เลือกใช้ตามความเหมาะสมของงานในงานครั้งนี้ได้เลือกใช้เทอร์มิสเตอร์แบบจานแบน(Disc)ที่ถูกสร้างขึ้นมาโดยใช้แรงกดอัดอย่างสูงเพื่ออัดผงออกไซด์ให้เป็นแผ่นจานคล้ายกับการอัดยาชนิดเม็ด โดยมากมักจะเป็นจานแบน(Disc)ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 1-25 มิลลิเมตร และหนาประมาณ 0.25-6.35 มิลลิเมตร เทอร์มิสเตอร์ที่ใช้กันแพร่หลายโดยทั่วไปมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าคือ ค่าความต้านทานของตัวมันเองจะลดลงเมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นหรือกล่าวได้ว่าเป็นแบบที่มีสัมประสิทธิ์ของค่าอุณหภูมิเป็นลบหรือแบบ NTC (NegativeTemperature Coefficient) ซึ่งในงานวิจัยได้เลือกใช้เทอร์มิสเตอร์ที่มีคุณสมบัติดังที่กล่าว

โดยคุณสมบัติของค่าความต้านทานที่อุณหภูมิใดๆของเทอร์มิสเตอร์ชนิด NTC สามารถเขียนได้ดังนี้

$$R_T = R_0 \exp(\beta / T) \qquad (3.1)$$

หรือ

$$\ln R_T = \beta / T + \ln R_0 \qquad (3.2)$$

เมื่อ R_T คือ ความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์ที่อุณหภูมิ T ใดๆ

R_0 คือ ความต้านทานอ้างอิง

β คือ ค่าคงที่ของวัสดุที่นำมาทำเทอร์มิสเตอร์

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

สำหรับค่าพารามิเตอร์ β จะมีค่าอยู่ระหว่าง 3500 ถึง 4600 เคลวิน (K)โดยปกติจะใช้ค่า 4000 K ค่าของβ นี้นอกจากดูได้จากสเปกที่ระบุโดยบริษัทผลิตแล้ว ยังสามารถหาได้จากการทดลอง (ดูในรายละเอียดของวิธีดำเนินการในขั้นตอนการปรับเทียบค่าตัวตรวจวัดอุณหภูมิ)

1.2 เทอร์โมมิเตอร์ชนิดปรอท ที่มีสเกล 0-100 องศาเซลเซียส โดยที่ 1 ช่อง เท่ากับ 0.1 องศาเซลเซียส ใช้สำหรับเป็นตัวเฝ้าปรับเทียบค่าอุณหภูมิของตัวเทอร์มิสเตอร์

1.3 แหล่งกำเนิดความร้อนแบบ Hot plate ทีใช้กำลังไฟฟ้า 750 วัตต์

1.4 บิกเกอร์ ขนาด 1000 มิลลิลิตร

1.5 มัลติมิเตอร์สำหรับวัดค่าทางไฟฟ้า

1.6 ขาตั้งพร้อมที่จับ

1.7 สายไฟพร้อมปากคีบ

2. อุปกรณ์ที่ใช้ในขั้นตอนการออกแบบระบบฮาร์ดแวร์

2.1 อุปกรณ์สำหรับการออกแบบวงจรของตัวตรวจวัดอุณหภูมิ มีดังนี้

1. เทอร์มิสเตอร์ชนิด NTC จำนวน 16 ตัว
2. ตัวต้านทานแบบมีค่าคงที่ขนาด 16.0 กิโลโอห์ม จำนวน 16 ตัว
3. ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ขนาด 10.0 กิโลโอห์ม จำนวน 16 ตัว

2.2 อุปกรณ์การแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล

สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้เป็นตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เบอร์ ADC0816 ที่ผลิตโดยบริษัทเนชันเนล เซมิคอนดักเตอร์ จำกัด ที่มีคุณสมบัติพิเศษโดยรวมระบบมัลติเพลกเซอร์สำหรับช่องรับสัญญาณเข้า 16 ช่องสัญญาณ รายละเอียดดูในภาคผนวก ก สำหรับการแปลงสัญญาณอนาลอกให้เป็นสัญญาณดิจิตอลนั้นอาศัยหลักการของการเทียบค่าหรือวิธีการเทียบกำลังงานเพื่อให้ได้เป็นค่าในลักษณะของเลขฐานสอง ที่เรียกว่าการควอนไตเซชั่น (Quantization)

2.2.1 ความละเอียดในการแปลงค่า(Resolution)มีค่าขึ้นกับจำนวนบิตเอาท์พุท(Output bit) ของวงจรส่วนแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล โดยในงานนี้เลือกใช้ ADC0816 โดยมีจำนวนบิตเอาท์พุทขนาด 8 บิต ที่มีความละเอียดในการแปลงค่าเป็น 1 ใน 2^8 หรือ 1/256 เมื่อประยุกต์ใช้กับความต่างศักย์ 5.0 โวลต์ จะให้ความละเอียดในการแปลงค่าถึง 19.5 มิลลิโวลต์ต่อบิต และสามารถแยกแยะสัญญาณเข้าในระดับที่ใช้งานประมาณ 20 มิลลิโวลต์ต่อ 0.33องศาเซลเซียส ซึ่งมีความละเอียดเพียงพอสำหรับการประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้และถ้าต้องการค่าความละเอียดของการแปลงมากขึ้นให้เลือกตัวADC ที่มีจำนวนบิตเอาท์พุทมากขึ้นด้วย เช่น 10,12,16 บิต ตามลำดับ แต่ทั้งนี้ยังขึ้นอยู่กับความละเอียดของเทอร์มิสเตอร์ด้วย

2.2.2 ความเร็วในการแปลงค่าสัญญาณ(Conversion time) เป็นตัวที่บ่งบอกความเร็วในการแปลงค่าสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล หากตัวเลขที่กำหนดความเร็วในการแปลงค่ามีค่าน้อยก็บ่งบอกว่าความเร็วในการแปลงข้อมูลทำได้เร็วกว่า สำหรับตัว ADC0816 ใช้เวลาในการแปลงค่าประมาณ 100 ไมโครวินาที ซึ่งเพียงพอสำหรับการใช้งานนี้

2.3 แหล่งกำเนิดสัญญาณนาฬิกาแบบผลึก เบอร์ MB-12C 6E ขนาดความถี่ 2.00 MHz และไอซีเบอร์ 74LS90N ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ประยุกต์ในวงจรนับเลขฐานสิบ(Decade Counter) แต่ในงานนี้ใช้เป็นตัวหารความถี่ด้วย 5 สำหรับสร้างสัญญาณนาฬิกาขนาด 400 MHz ให้กับ ADC0816

2.4 บอร์ดพัฒนา PC-SB31

บอร์ดพัฒนาที่เรียกว่า "PC-SB31" หรือ Single Board 31 on PC ที่ผลิตโดยบริษัท อีอีที จำกัด ได้ถูกออกแบบขึ้นมาเพื่อใช้สำหรับงานควบคุมที่มีขนาดเล็กโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 เป็นซีพียู ในงานนี้ได้เลือกใช้เบอร์ 8031 เป็นซีพียูและใช้ชิปสนับสนุน 8255 สำหรับทำหน้าที่ขยายพอร์ต พร้อมทั้งใช้บอร์ดวงจร ET-EM ของบริษัทศิลารีเสิร์ท จำกัด สำหรับทำหน้าที่แทนตัวอีพรอม(Eprom Emulator) สำหรับใช้ทดลองการทำงานของโปรแกรมมอนิเตอร์ที่

เขียนขึ้นโดยภาษาแอสเซมบลี้ให้กับซีพียู 8031 โดยมีชิปแรม 6264 เป็นหน่วยความจำข้อมูลภายนอกซึ่งอ้างอิงได้ถึง 64 กิโลบิต สำหรับรายละเอียดการทำงานของบอร์ด PC-SB31 สามารถดูรายละเอียดได้ในภาคผนวก ข

2.5 สายเชื่อมต่อสัญญาณ RS-232

การสื่อสารข้อมูลอนุกรมระหว่างบอร์ด PC-SB31 กับพอร์ต COM1 หรือ COM2 ของไมโครคอมพิวเตอร์หรือ PC นั้นใช้สัญญาณเพียง 3 เส้น คือ TXD (TRANSMITTED DATA), RXD (RECEIVED DATA) และ GND (GROUND) แต่ในการส่งรับข้อมูลของ PC โปรแกรมจะทำแฮนด์เช็คทางฮาร์ดแวร์ด้วยแต่เนื่องจาก PC-SB31 ไม่มีสัญญาณที่จะทำแฮนด์เช็คโดยตรง จึงจำเป็นต้องหลอก PC ด้วยการทำการป้อนกลับสัญญาณนี้ให้กับตัวเองโดยต่อขา RTS (REQUEST TO SEND) เข้ากับขา CTS (CLEAR TO SEND) และต่อขา DSR (DATA SET READY) เข้ากับ DTR (DATA TERMINAL READY) ในอุปกรณ์คอนเน็กเตอร์ที่ใช้สำหรับต่อเข้ากับ COM1 หรือ COM2

3. อุปกรณ์ที่ใช้ในขั้นตอนการเขียนโปรแกรม

3.1 ภาษาซี โดยใช้คอมไพเลอร์ของ Borland International (Turboc C Version 2.0)

3.2 A51 Assembler ของบริษัท Binary Technology Inc.

3.3 Q-Editor Version 2.07 ของบริษัท Semware จำกัด

วิธีดำเนินการ

ในการศึกษาวิจัยการนำความร้อนในสภาวะไม่คงที่ของแท่งโลหะในรูปแบบ 1 มิติ ในครั้งนี้ได้แบ่งวิธีดำเนินการออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้ คือ

ตอนที่ 1 การหาค่าคงที่ของตัวเทอร์มิสเตอร์ที่ใช้เป็นตัวตรวจวัดอุณหภูมิ

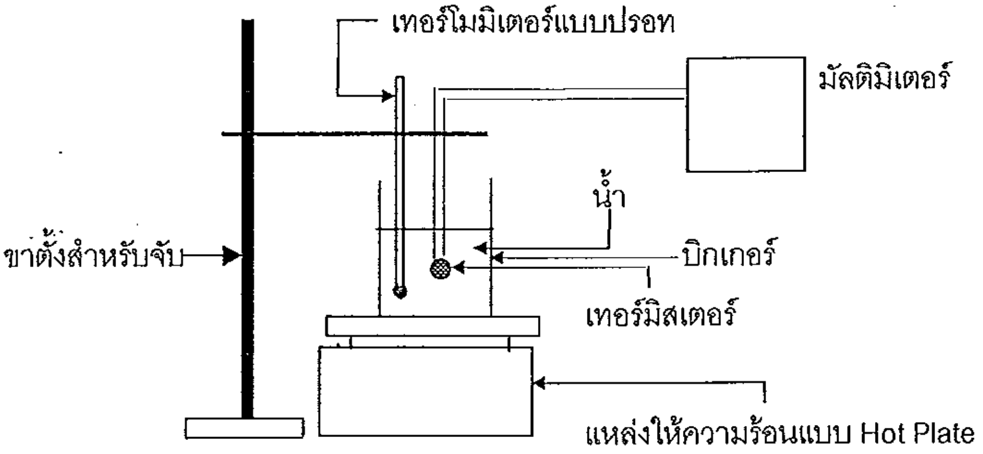
ตอนที่ 2 การออกแบบระบบฮาร์ดแวร์และการปรับเทียบค่าอุณหภูมิตัวตรวจวัด

ตอนที่ 3 การเขียนโปรแกรม

ตอนที่ 4 การทดลองวัดอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งและเวลาของการนำความร้อนในสภาวะไม่คงที่ของแท่งโลหะในรูปแบบ 1 มิติ

ตอนที่ 1 การหาค่าคงที่ของตัวเทอร์มิสเตอร์

สำหรับในขั้นตอนนี้เป็นการปรับเทียบค่าตัวเทอร์มิสเตอร์ชนิด NTC เพื่อใช้เป็นตัวตรวจวัดอุณหภูมิของการทดลองวัดอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งและเวลาของการนำความร้อนในสภาวะไม่คงที่ของแท่งโลหะในรูปแบบ 1 มิติ โดยในการนำเทอร์มิสเตอร์ชนิดNTC มาประยุกต์ใช้งานเรามีความจำเป็นที่จะต้องรู้ค่าพารามิเตอร์ β หรือค่าคงที่ของวัสดุที่นำมาใช้ทำเทอร์มิสเตอร์ที่แท้จริง โดยปกติแล้วสามารถหาค่าβ ได้จากสเปกของผู้ผลิต แต่ในงานนี้เราต้องการทราบค่าจริงของตัวเทอร์มิสเตอร์นั้นๆเพื่อประโยชน์ในการปรับเทียบค่าอุณหภูมิหรือใช้ในการคำนวณดังนั้นจึงต้องอาศัยผลที่ได้รับจากการทดลองตามภาพประกอบ 5



ภาพประกอบ 5 แสดงการทดลองเพื่อวัดค่าความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์ที่อุณหภูมิ 0-25°C

โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1.1 เลือกเทอร์มิสเตอร์ 1 ตัว ในกลุ่มของตัวเทอร์มิสเตอร์ที่มีลักษณะเดียวกัน ไปต่อเข้ากับมัลติมิเตอร์แล้วปรับฟังก์ชันการใช้งานสำหรับวัดความต้านทาน เพื่อที่จะวัดค่าความต้านทานที่อุณหภูมิต่างๆในช่วงที่จะนำไปใช้ประยุกต์ใช้งานคือในช่วง 0 ถึง 25 องศาเซลเซียส

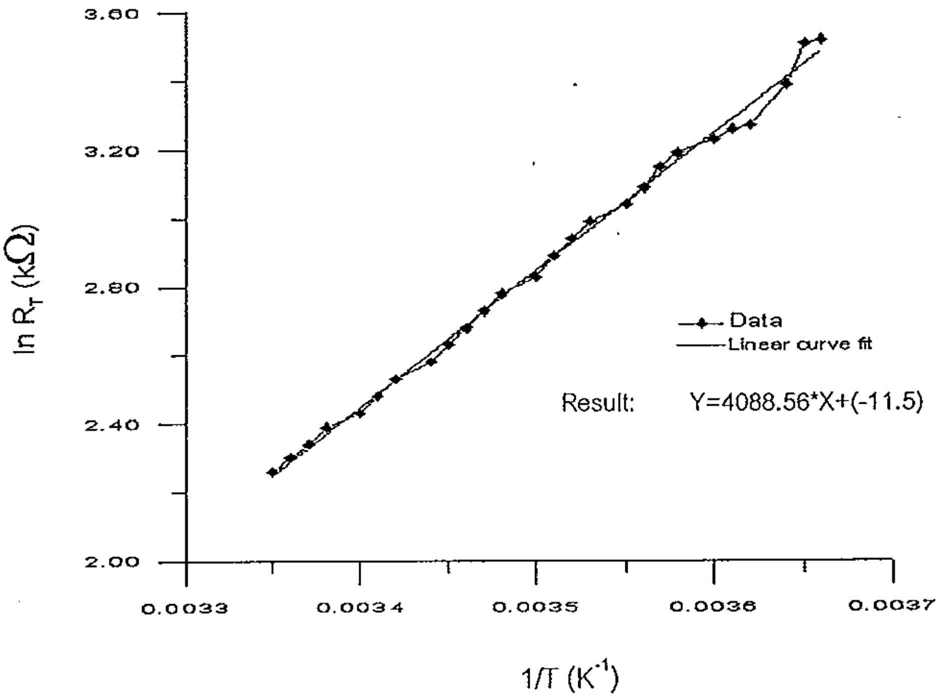
1.2 นำเทอร์มิสเตอร์ดังกล่าวจุ่มลงไปในน้ำเย็นปริมาตร 300 มิลลิลิตรในบิกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร ที่มีอุณหภูมิเริ่มต้น 0 องศาเซลเซียส แล้ววัดค่าความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์ที่ 0 °C แล้วให้ความร้อนแก่น้ำเย็นเพื่อทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นแล้ววัดค่าความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์ที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นทุกๆ 1°C จนกระทั่งถึง 25°C แล้วบันทึกค่าความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์ในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวสำหรับการวัดครั้งที่ 1

1.3 ทำการทดลองซ้ำตามข้อที่1.1และข้อที่1.2แล้วบันทึกค่าความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์ในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวสำหรับการวัดครั้งที่ 2

1.4 นำค่าความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์ที่วัดได้ในแต่ละครั้งที่อุณหภูมิเดียวกันมาคำนวณหาค่าความต้านทานเฉลี่ย(R_T)

1.5 นำข้อมูลค่าความต้านทานเฉลี่ย R_T ที่วัดได้ไปคำนวณค่า $\ln R_T$ แล้วนำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln R_T$ กับ $1/T$ เพื่อวิเคราะห์หาค่าความชันของกราฟซึ่งจะบอกค่าพารามิเตอร์β และนอกจากนี้แล้วยังสามารถหาค่า $\ln R_0$ จากจุดตัดแกนY ซึ่งจะบอกค่าความต้านทาน R_0 ที่เป็นความต้านทานที่น้อยที่สุดของเทอร์มิสเตอร์ (ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ศูนย์) ที่อุณหภูมิสูงมาก ๆ

จากข้อมูลในตาราง 5 ของภาคผนวก จ ที่แสดงค่าความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์ (R_T)ที่ขึ้นกับอุณหภูมิ(T) และเมื่อนำข้อมูลของค่า ln R_T กับ 1/T ไปหาความสัมพันธ์โดยเขียนกราฟเชิงเส้น แล้วใช้วิธีเชิงเส้นกำลังสองน้อยที่สุด(Linear least square curve fit) หาความสัมพันธ์ที่เหมาะสม ผลที่ได้รับแสดงดังภาพประกอบ 6



ภาพประกอบ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln R_T กับ 1/T ที่ใช้วิธีเชิงเส้นกำลังสองน้อยที่สุด

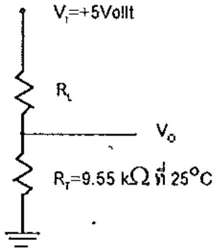
จากภาพประกอบ 6 สามารถหาค่า β ได้เท่ากับ 4088.56 เคลวิน หรือใช้ค่าประมาณเท่ากับ 4089 เคลวิน ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในช่วงระหว่าง 3500 ถึง 4600 ตรงตามค่าที่นิยมนำมาใช้งานจริง นอกจากนี้แล้วยังหาค่า ln R_0 ได้เท่ากับ -11.5 ซึ่งนำมาคำนวณหาค่า R_0 ได้เท่ากับ 10.7 มิลลิโอห์ม (mΩ)สำหรับใช้เป็นค่าความต้านทานอ้างอิง เพื่อที่จะนำค่าคงที่ทั้งสองดังกล่าวไปใช้ในขั้นตอนของการคำนวณค่าอุณหภูมิที่ต้องปรับเทียบจากค่าดิจิตอลเอาท์พุทที่ได้มาจากการตรวจวัดอุณหภูมิโดยตัวเทอร์มิสเตอร์ในส่วนของวงจรแบบแบ่งศักย์ไฟฟ้าเชื่อมโยงสัญญาณไฟฟ้าแบบอนาลอกในช่วง 0-5 โวลต์ เข้ากับตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลขนาด 8 บิต สำหรับเชื่อมโยงเข้ากับคอมพิวเตอร์ รายละเอียดในการดำเนินการพิจารณาได้ในตอนที่ 2 ในส่วนการออกแบบระบบฮาร์ดแวร์ที่เกี่ยวกับวงจรแบบแบ่งศักย์ไฟฟ้าสำหรับตัวเทอร์มิสเตอร์ที่เชื่อมโยงเข้ากับตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลขนาด 8 บิต ต่อไป

ตอนที่ 2 การออกแบบระบบฮาร์ดแวร์ และการปรับเทียบค่าอุณหภูมิ

สำหรับในขั้นตอนนี้เป็นการออกแบบวงจรสำหรับตัวเทอร์มิสเตอร์ที่ใช้เป็นตรวจวัดอุณหภูมิ รายละเอียดพิจารณาได้ตามขั้นตอนดังนี้

2.1 การออกแบบวงจรแบบแบ่งศักย์ไฟฟ้าสำหรับตัวเทอร์มิสเตอร์

ในการออกแบบวงจรแบบแบ่งศักย์(Divider voltage circuit) ถือได้ว่าเป็นวงจรพื้นฐานที่ใช้ตัวต้านทาน 2 ตัวต่ออนุกรมกันและประกอบด้วยค่าความต้านทานไฟฟ้าเพียง 2 ส่วน โดยในที่นี้พิจารณาได้ในส่วนของค่าความต้านทานที่มีค่าคงที่ R_L และในส่วนความต้านทานที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิซึ่งก็คือความต้านทานของตัวเทอร์มิสเตอร์ R_T นั่นเอง โดยลักษณะการต่อวงจรแสดงดังภาพประกอบ 7



ภาพประกอบ 7 แสดงวงจรแบบแบ่งศักย์ไฟฟ้าสำหรับตัวเทอร์มิสเตอร์

เมื่อ V_I = ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมหรือป้อนเข้าสู่วงจรแบบแบ่งศักย์ไฟฟ้า มีค่าเท่ากับ 5 โวลต์

V_O= ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมหรือออกจากตัวเทอร์มิสเตอร์

R_L= ความต้านทานที่มีค่าคงตัว

R_T= ความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์โดยมีค่าขึ้นกับอุณหภูมิ

จากภาพประกอบ 7 สามารถพิจารณาคุณลักษณะของวงจรโดยอาศัยรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่าง V_I กับ V_O ได้ดังนี้

$$V_O = (R_T V_I) / (R_L + R_T) \qquad (3.3)$$

โดยที่ในการออกแบบวงจรดังกล่าวนี้จะต้องมีการกำหนดค่า R_L ที่จะนำไปต่ออนุกรมกับค่า R_T ที่จะส่งผลให้ช่วงความกว้างของความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวเทอร์มิสเตอร์หรือ V_O มีความเหมาะสมและตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงในช่วงของอุณหภูมิต่ำสุดและอุณหภูมิสูงสุดได้ดีตามที่กำหนดในช่วงการวัด 0 ถึง 30 องศาเซลเซียส(โดยขยายช่วงอุณหภูมิในการใช้งานในการทดลองออกไปเล็กน้อยเพื่อความเหมาะสม)สำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในงานการทดลองต่อไปและสำหรับการคำนวณหาค่า R_L สามารถพิจารณาได้โดยมีเงื่อนไขว่าช่วงความกว้างของความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวเทอร์มิสเตอร์ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงไป(ΔV_O)ในช่วงของอุณหภูมิต่ำสุดและอุณหภูมิสูงสุดนั่นคือ

$$\Delta V_O = \left[(R_{Tmax} V_I)/(R_L + R_{Tmax})\right] - \left[(R_{Tmin} V_I)/(R_L + R_{Tmin})\right] \qquad (3.4)$$

เมื่อต้องการหาค่า R_L ที่ทำให้ ΔV_O มีค่าสูงสุด จะได้ว่า

$$d(\Delta V_O)/dR_L = 0 \qquad (3.5)$$

เมื่อนำค่า ΔV_O ในสมการ(3.4) แทนค่าลงไปในสมการ(3.5) แล้วแก้สมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งเทียบกับ dR_L จะได้ว่า

$$R_L = \sqrt{R_{Tmax} R_{Tmin}} \qquad (3.6)$$

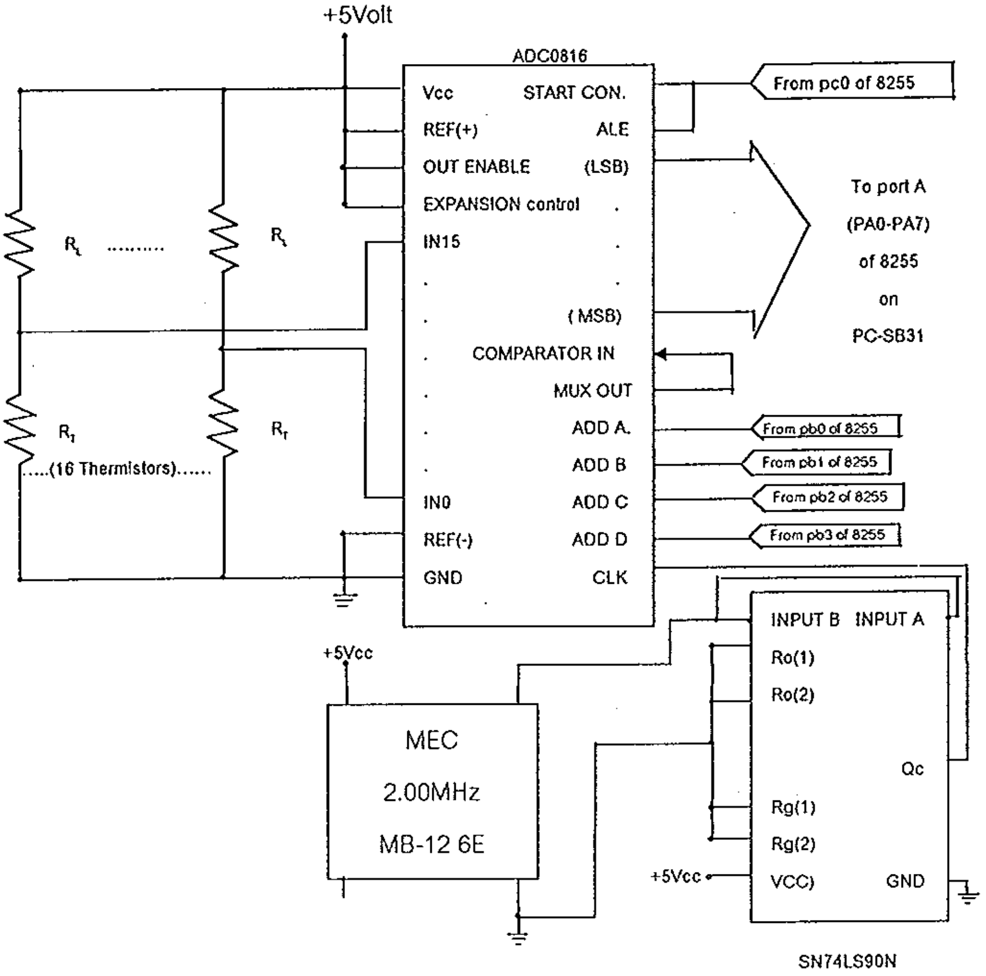
จากการทดลองวัดค่า R_{Tmin} และ R_{Tmax} ที่อุณหภูมิ 0 และ 30 องศาเซลเซียส ตามลำดับจะได้ค่าดังต่อไปนี้

$$R_{(0^\circ C)เฉลี่ย} \cong 33.93 \text{ กิโลโอห์ม และ } R_{(30^\circ C)เฉลี่ย} \cong 8.15 \text{ กิโลโอห์ม}$$

แล้วนำค่าดังกล่าวแทนลงไปในสมการ(3.6) เพื่อคำนวณหาค่า R_L โดยจะได้ค่า R_L เท่ากับ 16.6 กิโลโอห์ม ซึ่งเป็นค่าที่นำไปใช้ในการออกแบบวงจรแบบแบ่งศักย์ไฟฟ้าสำหรับใช้เป็นวงจรของตัวตรวจวัดอุณหภูมิดังที่กล่าวข้างต้น

2.2 การเชื่อมโยงวงจรของตัวตรวจวัดอุณหภูมิเข้ากับตัว ADC0816

สำหรับการเชื่อมโยงส่วนเอาท์พุทของวงจรของตัวตรวจวัดอุณหภูมิเข้ากับ ADC0816 และการต่อ ADC0816 เข้ากับ 8255 ของ PC-SB31 สามารถพิจารณาวงจรได้ดังภาพประกอบ 8



ภาพประกอบ 8 การเชื่อมโยงวงจรของตัวตรวจวัดอุณหภูมิเข้ากับตัว ADC0816 และ 8255 บนบอร์ด PC-SB31

การเชื่อมโยง ADC0816 เข้ากับ 8255 ทำได้โดยเชื่อมบัสข้อมูล(Data bus) ของ 0816 จากค่า D0 (LSB) ถึง D7 (MSB) จำนวน 8 บิตเข้ากับ พอร์ตA(PA0-PA7) ของ 8255 นอกจากนี้ยังใช้ 8255 ในส่วนของพอร์ต C ล่าง(PC0) เป็นตัวกำหนดสัญญาณ Start conversion และ ALE และใช้พอร์ต B ตั้งแต่ PB0-PB4 เป็นตัวกำหนดแอดเดรสของสัญญาณอนาลอกอินพุทสำหรับนำค่าไปแปลงเป็นสัญญาณดิจิตอลและส่งผ่านบัสข้อมูลไปยังพอร์ตA ของ 8255 และนำข้อมูลดังกล่าวไป

เก็บไว้ในหน่วยความจำภายนอกของ 6264 โดยผ่านรีจีสเตอร์ A ของซีพียู 8031 รายละเอียดการย้ายข้อมูลสามารถดูในภาพประกอบ 68 ในภาคผนวก ข

ส่วนการคำนวณค่าความละเอียด(Resolution)ในการแปลงสัญญาณของADC0816 พิจารณาได้ดังนี้

$$\text{Resolution} = \text{Analog input range}/\ 2^{N} \quad (3.7)$$

เมื่อ N = จำนวนบิต(ซึ่งในที่นี้เท่ากับ 8 บิต)

Analog input range = 5 โวลต์

ดังนั้น

$$\text{Resolution} = 5/2^{8} = 0.0195 \text{ โวลต์/บิต}$$

หรือ $\cong 0.02$ โวลต์/บิต = 20 มิลลิโวลต์/บิต (3.8)

และ

$$D = (1/\text{Resolution})\ V_{in} \quad (3.9)$$

ในที่นี้เมื่อ V_{in} = ความต่างศักย์ของสัญญาณไฟฟ้าอนาลอกที่ป้อนเข้าสู่ IN0 ถึง IN15 ของตัวA/Dโดยเป็นค่าเอาท์พุทโวลเตจที่ตกคร่อมตัวเทอร์มิสเตอร์ที่ออกมาจากวงจรแบบแบ่งศักย์ (ดูสมการ (3.3) ประกอบ นั่นคือ $V_{in} = V_O$)

D = ค่าดิจิตอล ที่อยู่ระหว่าง 0 ถึง 255

เมื่อนำค่าของ $V_{in} = V_O$ ในสมการ(3.3) นำค่า V_i = +5โวลต์ และนำค่า Resolution ในสมการ (3.8) แทนลงไปในสมการ(3.9) จะได้ว่า

$$D = \left[R_T/\ (R_L + R_T)\right]*256 \quad (3.10)$$

และนำค่า R_T ที่ได้ในสมการ(3.1) แทนลงในสมการ(3.10) แล้วจัดรูปสมการใหม่จะได้ว่า

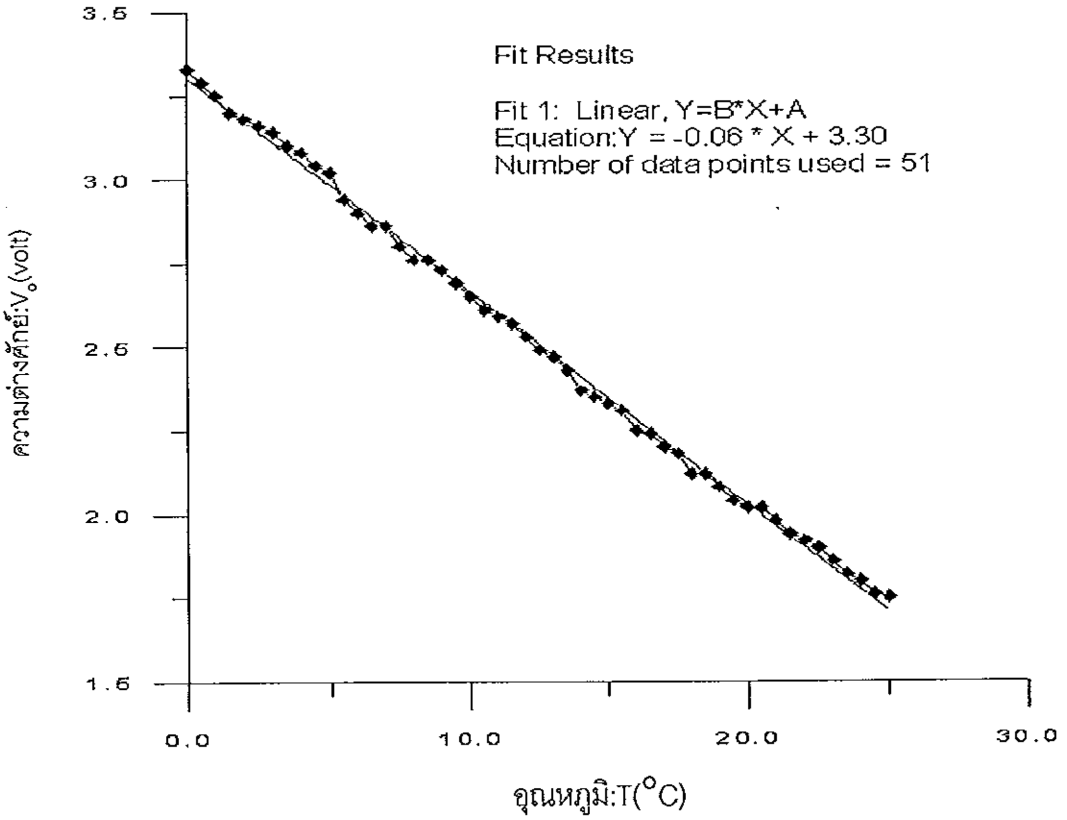
$$T(K) = \beta/\left[\ln(DR_L/(256 - D)) - \ln R_o\right] \quad (3.11)$$

หรือ

$$T(^{\circ}C) = \left[\beta/\left[\ln(DR_L/(256 - D)) - \ln R_o\right]\right] - 273.2 \quad (3.12)$$

จากสมการ (3.11) หรือ สมการ (3.12) ใช้สำหรับคำนวณค่าอุณหภูมิที่ได้จากการวัดในหน่วยเคลวินและหน่วยองศาเซลเซียสตามลำดับ โดยในที่นี้ได้เลือกใช้หน่วยองศาเซลเซียส

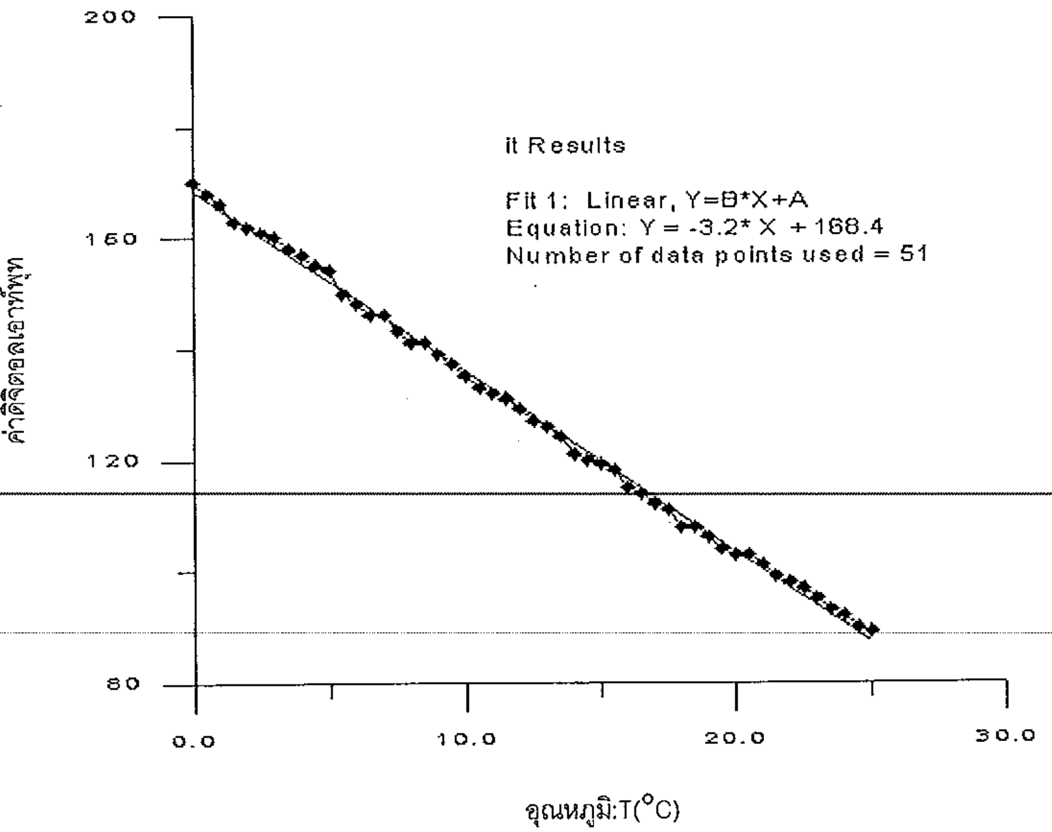
จากการทดลองวัดค่าความต่างศักย์เอาท์พุทที่ออกมาจากวงจรของตัวตรวจวัดอุณหภูมิสำหรับป้อนให้กับตัวA/D ในช่วงอุณหภูมิ 0-25 องศาเซลเซียส ได้รับข้อมูลดังแสดงในตาราง 6 ของภาคผนวก จ เมื่อนำมาหาความสัมพันธ์ของความต่างศักย์เอาท์พุท V_o กับอุณหภูมิ T จะได้รับดังภาพประกอบ 9



ภาพประกอบ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ที่ป้อนให้กับตัวADC กับค่าอุณหภูมิ

จากภาพประกอบ 9 แสดงให้เห็นว่าลักษณะกราฟมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นในลักษณะที่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวเทอร์มิสเตอร์หรือที่ป้อนให้กับตัว ADC ลดลงจริง และเมื่อใช้วิธีการเชิงเส้นกำลังสองน้อยที่สุด(Linear least square curve fit) หาความสัมพันธ์ที่เหมาะสมที่สุดของข้อมูลทำให้สามารถหาความชันของกราฟที่บ่งบอกถึงค่าความต่างศักย์ที่เปลี่ยนแปลงไปต่อหนึ่งหน่วยอุณหภูมิ จากการวิเคราะห์จะได้ค่าประมาณเท่ากับ 0.06 โวลต์ต่อ

หนึ่งหน่วยองศาเซลเซียส หรือ 60 มิลลิโวลต์ต่อองศาเซลเซียส หากพิจารณาการทำงานของตัว ADC ขนาด 8 บิต ที่ใช้กับความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์ จะให้ความละเอียดของการแปลงค่าเท่ากับ 20 มิลลิโวลต์ต่อบิต เมื่อนำค่าดังกล่าวไปเปรียบเทียบกับค่าความต่างศักย์เอาท์พุทที่ได้จากวงจรของตัวตรวจวัดสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ 60 มิลลิโวลต์ต่อองศาเซลเซียส ป้อนให้กับตัว ADC ดังกล่าวแล้วทำการทดลองวัดออกมาในรูปแบบค่าดิจิตอลที่ได้รับกับอุณหภูมิ แสดงข้อมูลดังตาราง 6 ของภาคผนวก จ และเมื่อนำข้อมูลดังกล่าวมาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าดิจิตอลที่ได้รับกับอุณหภูมิโดยแสดงดังภาพประกอบ 10 ปรากฏว่าระดับค่าดิจิตอลจะเปลี่ยนไปถึง 3 ค่าต่อ 1 องศาเซลเซียส หรือสรุปได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปเพียง 1/3 องศาเซลเซียส หรือ 0.33 องศาเซลเซียส จะทำให้ระดับค่าในบิตเปลี่ยนแปลงไปเพียง 1 ค่าของบิตเท่านั้น และกล่าวได้ว่าระบบการวัดค่าอุณหภูมิของวงจรแบบแบ่งศักย์ไฟฟ้าของตัวเทอร์มิสเตอร์ที่เชื่อมโยงเข้ากับตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลขนาด 8 บิต ในงานวิทยานิพนธ์นี้มีค่าความละเอียดของการแปลงค่าในการวัดถึง 0.33 องศาเซลเซียสต่อบิต



ภาพประกอบ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดิจิตอลที่ได้รับกับอุณหภูมิ

ตอนที่ 3 การเขียนโปรแกรม

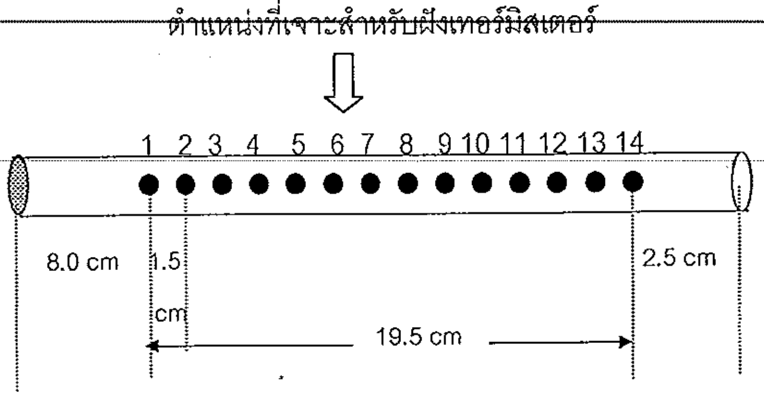
ในการเขียนโปรแกรมเพื่อใช้งานในระบบการวัดและจัดเก็บข้อมูลของงานวิทยานิพนธ์นี้จำเป็นต้องมีการเขียนแผนภูมิสายงานการทำงานของโปแกรม โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

1. ส่วนของแผนภูมิสายงานการทำงานของโปรแกรมควบคุมระบบการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์8031 บนบอร์ดPC-SB31 แสดงในหัวข้อ 1 ของภาคผนวก ค และสามารถนำไปเขียนโดยใช้โปรแกรมภาษาแอสเซมบลี้ดังรายละเอียดในภาคผนวก ง
2. ส่วนของแผนภูมิสายงานการทำงานของโปรแกรมที่ติดต่อกับผู้ใช้ (User) ที่นำไปเขียนด้วยโปรแกรมภาษาC.สำหรับการจัดเก็บข้อมูลและสร้างรูปแบบจำลองของการนำความร้อนแสดงในหัวข้อ 2 ของภาคผนวก ค

ตอนที่ 4 การทดลองวัดอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งและเวลาของการนำความร้อน ในสภาวะไม่คงที่ของแท่งโลหะในรูปแบบ 1 มิติ โดยคอมพิวเตอร์

สำหรับในขั้นตอนนี้เป็นการทดลองวัดอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งและเวลาของการนำความร้อนในสภาวะไม่คงที่ของแท่งโลหะในรูปแบบ 1 มิติ โดยใช้คอมพิวเตอร์เป็นตัวควบคุมการวัดและเก็บข้อมูลซึ่งมีวิธีดำเนินการดังนี้

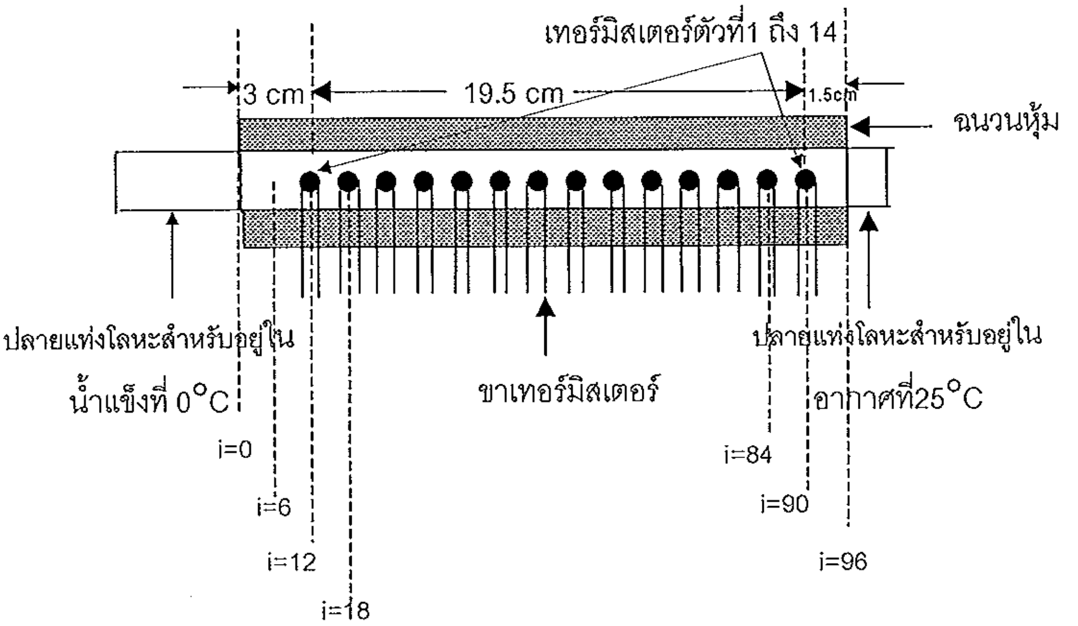
1. เตรียมแท่งโลหะรูปทรงกระบอกตันเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.0 เซนติเมตร ความยาว 30 เซนติเมตร จำนวน 3 ชนิด คือ ทองเหลือง อะลูมิเนียม และ เหล็ก แล้วนำไปเจาะด้วยสว่าน 3/8 นิ้ว ตามตำแหน่งที่กำหนดให้มีความลึกโดยประมาณ 0.35 มิลลิเมตร ดังภาพประกอบ 11



ภาพประกอบ 11 แสดงระยะและตำแหน่งของการเจาะแท่งโลหะสำหรับฝังเทอร์มิสเตอร์

2. นำตัวเทอร์มิสเตอร์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร หนา 0.25 มิลลิเมตร ฝังลงไปในตำแหน่งที่เจาะดังรูปที่ 12 โดยอยู่ห่างกันเป็นระยะ 1.5 เซนติเมตร แล้วใช้สารซิลิโคนแบบเจลปิดทับลงไปโดยระวังไม่ให้ขาทั้งสองของตัวเทอร์มิสเตอร์สัมผัสกันและไม่ให้ขาทั้งสองของเทอร์มิสเตอร์ไปสัมผัสกับเนื้อของโลหะในเวลาเดียวกันอีกด้วยเพราะจะทำให้กระแสไฟฟ้าในชุดเชื่อมโยงการวัดเกิดการลัดวงจรดังนั้นวิธีที่ป้องกันการลัดวงจรที่จุดนี้ได้ดีคือใช้สารซิลิโคนแบบเจลหุ้มไว้สำหรับเป็นฉนวนไฟฟ้า(แต่มีคุณสมบัตินำความร้อนได้ดี) เมื่อปิดทับด้วยสารซิลิโคนแบบเจลเสร็จเรียบร้อยจะต้องทิ้งไว้ให้แห้งสนิทเพื่อให้ตัวเทอร์มิสเตอร์อยู่ตัวสำหรับเคลื่อนย้าย

3. นำฉนวนสำหรับหุ้มท่อแอร์ขนาด 1/3 นิ้ว ไปหุ้มรอบแท่งโลหะในลักษณะดังภาพประกอบ 12



ตำแหน่งที่ตรงกับรูปแบบจำลองโปรแกรม

เมื่อกำหนดระยะ X = iΔx โดยที่Δx=0.25cm หรือ 0.0025 m และ i=0,1,2,3,...,96

เช่น ที่ตำแหน่ง i=0 ; X = 0 cm , i=6 ; X = 1.5 cm , i=12 ; X = 3.0 cm,
i=18 ; X = 4.5 cm , i=24 ; X = 6.0 cm ,..., i=96 ; X = 24.0 cm

ภาพประกอบ 12 แสดงความยาวของการหุ้มฉนวนและการฝังเทอร์มิสเตอร์ในตำแหน่งที่ตรงตามรูปแบบจำลองโปรแกรม

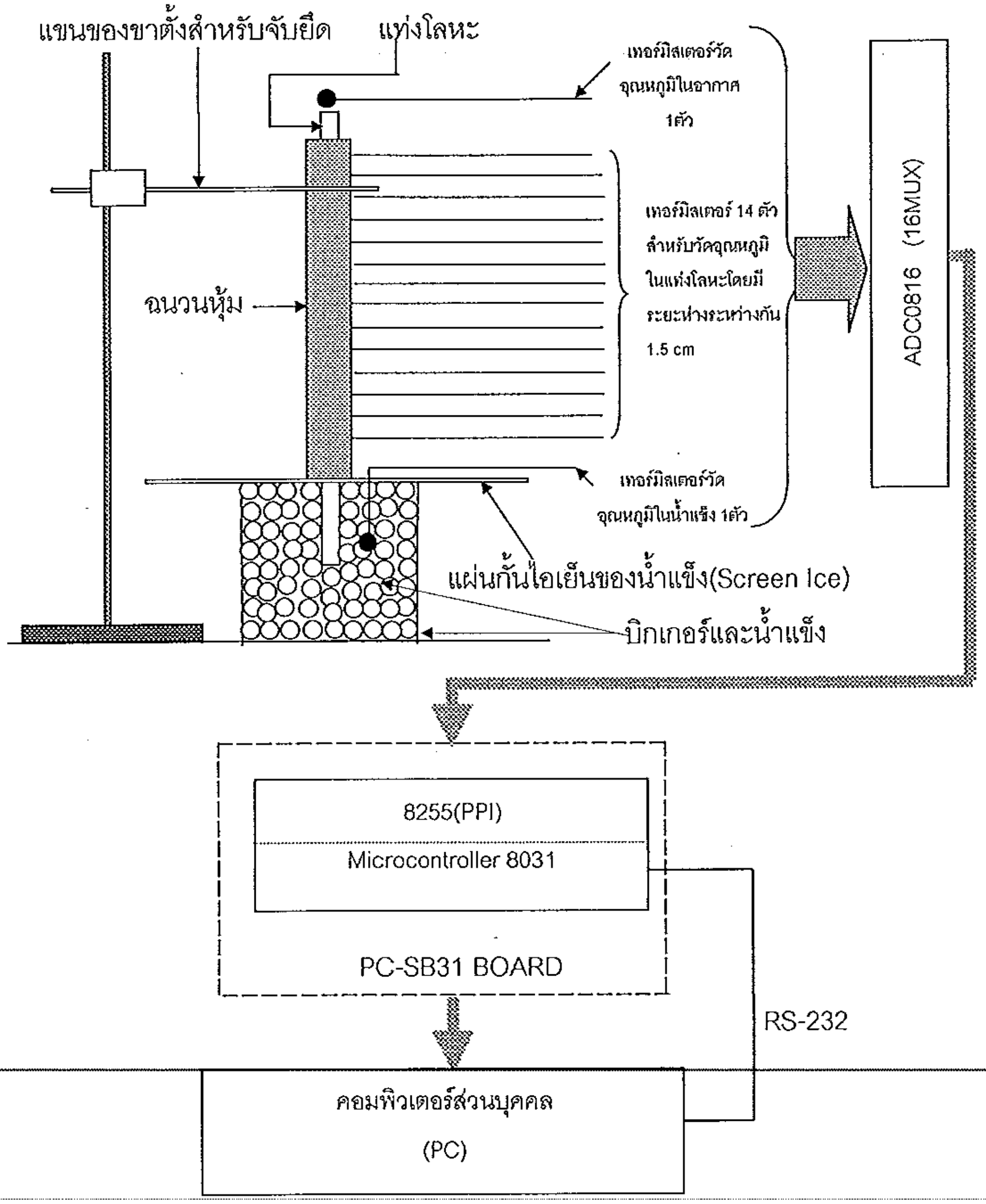
4.นำเทอร์มิสเตอร์จากส่วนของวงจรแบบแบ่งศักย์ที่ฝังในแท่งโลหะและหุ้มฉนวนจนเรียบร้อยแล้ว ดังภาพประกอบ 12 ประกอบกับเทอร์มิสเตอร์อีก 2 ตัวสำหรับใช้วัดอุณหภูมิที่เงื่อนไขขอบเขตในน้ำแข็งและในอากาศไปเชื่อมโยงเข้ากับวงจรของตัวADC0816(ดูภาพประกอบ 8) และเชื่อมโยงเข้ากับบอร์ด PC-SB31 และคอมพิวเตอร์

5.กำหนดการวัดอุณหภูมิโดยใช้คอมพิวเตอร์เป็นตัวควบคุมการวัดและเก็บข้อมูลตามช่วงเวลาที่กำหนดในที่นี้จะทำการวัดอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งและเวลาทุก 1 นาที ในเวลา 2 ชั่วโมง

6.ใช้ขาตั้งที่มีแขนสำหรับจับแท่งโลหะตรงจุดที่มีฉนวนไว้ในอากาศที่อุณหภูมิห้อง 25°C เพื่อกำหนดให้ทุกตำแหน่งภายในแท่งโลหะมีอุณหภูมิเริ่มต้นเป็น 25°C สำหรับเงื่อนไขเริ่มต้นโดยดูค่าจากคอมพิวเตอร์เทียบกับค่าจากเทอร์โมมิเตอร์แบบปรอท

7. นำปลายด้านหนึ่งของแท่งโลหะตามข้อที่ 5 จุ่มลงไปในน้ำแข็งที่มีอุณหภูมิ 0 °C แล้วใช้แขนของขาตั้งจับไว้ในแนวดิ่งโดยปลายด้านบนสัมผัสกับอากาศที่อุณหภูมิห้อง25° สำหรับกำหนดเงื่อนไขขอบเขต 2 เงื่อนไข ดังแสดงในภาพประกอบ 13

8. ทำการวัดและเก็บข้อมูลในช่วงเวลาที่กำหนดเมื่อเสร็จเรียบร้อยแล้วให้นำข้อมูลทั้งหมดจัดเก็บลงในไฟล์ข้อมูล แล้วทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนชนิดโลหะจนครบทั้ง 3 ชนิด ตามที่กำหนดในข้อที่ 1 แล้วนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์ผลในลำดับต่อไป



ภาพประกอบ 13 แสดงชุดการทดลองวัดอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งและเวลาของการนำความร้อนภายในแท่งโลหะในสภาวะไม่คงที่ในรูปแบบ 1 มิติ

บทที่ 4

ผลและการอภิปรายผล

ในบทนี้จะเป็นการนำเสนอผลการทดลองและการอภิปรายผลของข้อมูลที่ได้รับจากการทดลองวัดค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งและเวลาของการนำความร้อนในสภาวะไม่คงที่ของแท่งโลหะในรูปแบบ 1 มิติ โดยเปรียบเทียบกับผลที่ได้รับในทางทฤษฎีตามรูปแบบจำลองของโปรแกรมที่อาศัยการคำนวณเชิงตัวเลขตามวิธี Finite difference ผลการทดลองที่ได้รับจะมีอยู่ด้วยกัน 3 ชุด คือ ของโลหะทองเหลือง อะลูมิเนียม และเหล็ก สำหรับการนำเสนอผลในการทดลองในแต่ละชุดสามารถพิจารณาได้ตามลำดับดังต่อไปนี้

1. ผลที่ได้รับในทางทฤษฎีตามรูปแบบจำลองของโปรแกรม
2. ผลที่ได้รับจากการทดลองวัด
3. ผลที่ได้รับจากการทดลองวัดที่มีการปรับแก้แล้ว
4. การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดกับผลที่ได้รับในทางทฤษฎี

สำหรับการอภิปรายถึงผลของการนำความร้อนในโลหะแต่ละชนิดที่ศึกษาต้องมีข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติและพารามิเตอร์ทางความร้อนที่เกี่ยวข้องบางอย่างดังแสดงในตาราง 1

ตาราง 1 แสดงค่าพารามิเตอร์ทางความร้อนที่เกี่ยวข้องของสสารที่ใช้ในการศึกษา

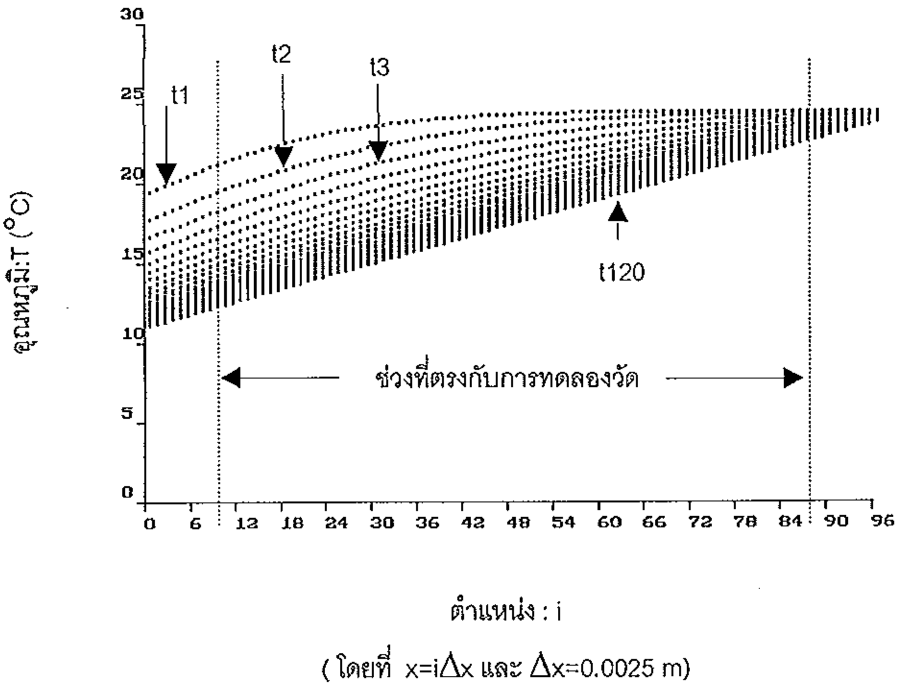
ชนิดสาร	t (^{o}C)	ρ (kg m^{-3})	c_p (kJ kg^{-1} K^{-1})	$c_p\rho$ (MJ m^{-3} K^{-1})	k (WK^{-1} m^{-1})	$k/c_p\rho$ (mm^2 s^{-1})
อะลูมิเนียม	20	2707	0.896	2.425	204	84.18
ทองเหลือง	20	8522	0.385	3.281	111	34.12
เหล็ก	20	7897	0.452	3.570	73	20.26
น้ำแข็ง	0	913	1.93	1.76	2.22	1.26
อากาศแห้ง	20	1.2042	1.0064	1.21	0.02638	16.01

(ที่มา : Meijer and Herwaarden,1992 :286-287)

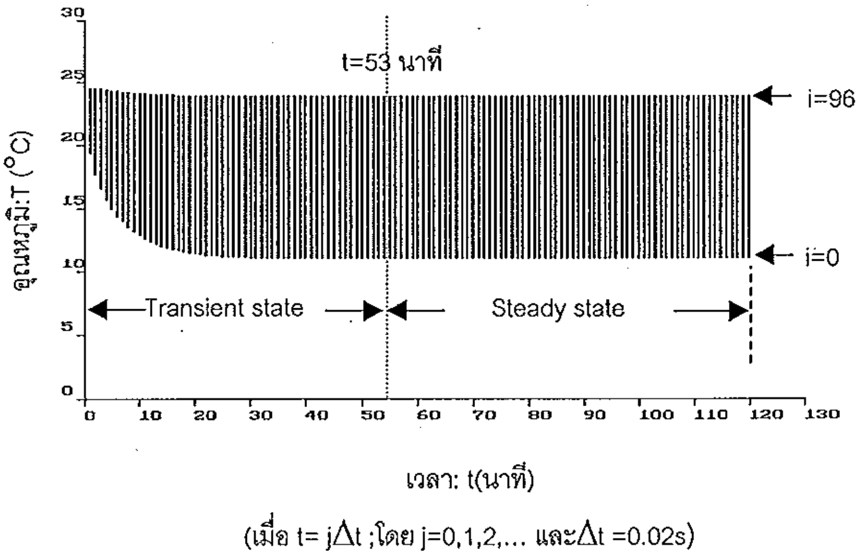
4.1 ผลและลักษณะการนำความร้อนของแท่งโลหะทองเหลืองในรูปแบบ 1 มิติ

4.1.1 ผลที่ได้รับในทางทฤษฎีตามรูปแบบจำลองของโปรแกรม

แสดงผลที่ได้รับในทางทฤษฎีตามรูปแบบจำลองของโปรแกรมของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับตำแหน่งและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาดังภาพประกอบ 14 และภาพประกอบ 15 ตามลำดับ



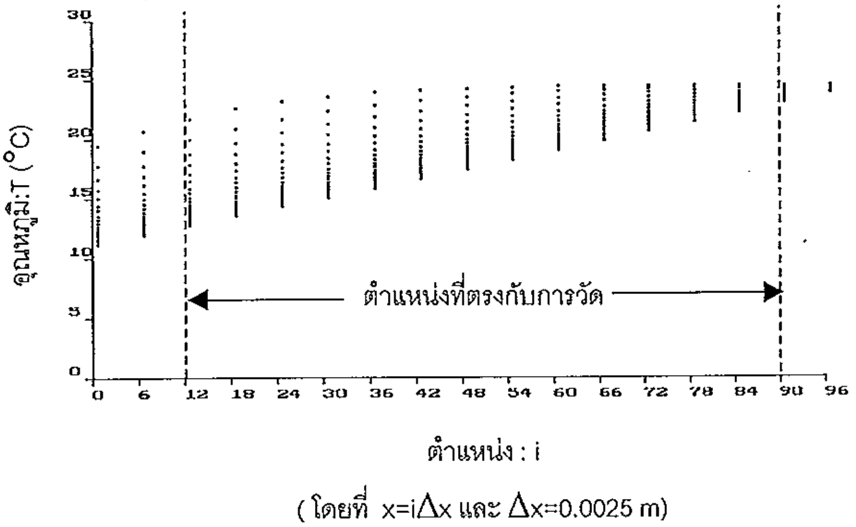
ภาพประกอบ 14 แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งที่เวลาใดๆ ของแท่งโลหะทองเหลือง ตามรูปแบบจำลองของโปรแกรม



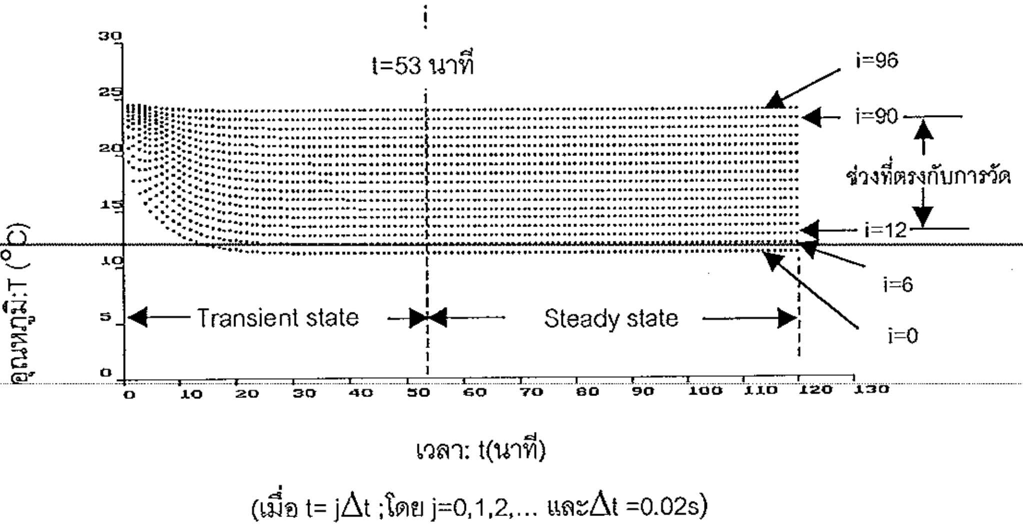
ภาพประกอบ 15 แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลาที่ตำแหน่งใดๆ ของแท่งโลหะทองเหลือง ตามรูปแบบจำลองของโปรแกรม

จากผลการคำนวณโดยรูปแบบจำลองของโปรแกรมซึ่งเป็นการวิเคราะห์เชิงตัวเลขนั้นเป็นการจำลองแบบ(Simulation)หรือหาคำตอบของปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจริง โดยในที่นี้เป็นการศึกษาการนำความร้อนในสภาวะไม่คงที่ของแท่งโลหะในรูปแบบ 1 มิติ โดยในการพิจารณาข้อมูลของค่าอุณหภูมิจากรูปแบบจำลองที่ได้รับดังภาพประกอบ 14 และภาพประกอบ 15 จะพบว่าการนำความร้อนในแท่งโลหะทองเหลืองในช่วงเวลาแรก 0 ถึง 53 นาที มีลักษณะการนำความร้อนที่อยู่ในสภาวะไม่คงที่โดยกล่าวได้ว่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งใดๆยังมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา หรือค่าเกรเดียนท์ของอุณหภูมิมีค่าไม่คงที่ และเมื่อเวลาดำเนินไปในช่วงหลังระหว่าง 53 ถึง120 นาที พบว่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งใดๆภายในแท่งโลหะมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาหรือค่าเกรเดียนท์ของอุณหภูมิมีค่าคงที่นั่นคือการนำความร้อนของแท่งโลหะดำเนินอยู่ในสภาวะคงที่ และเริ่มต้นเข้าสู่สภาวะคงที่ ที่เวลา 53 นาที จากเวลาเริ่มต้นโดยประมาณ จะเห็นได้ว่าในการคำนวณโดยใช้วิธี Finite Difference สำหรับหาคำตอบของสมการของการนำความร้อนในวัตถุ 1 มิติ ที่อยู่ในสภาวะไม่คงที่ พบว่าสามารถแสดงผลของคำตอบครอบคลุมไปถึงการนำความร้อนที่เข้าสู่สภาวะคงที่ได้อีกด้วยและจากภาพประกอบ14 และภาพประกอบ 15 สามารถเขียนได้ใหม่โดยแสดงข้อมูลของ

แบบจำลองที่ได้รับที่ตรงกับตำแหน่งของการทดลองวัดดังภาพประกอบ 16 และภาพประกอบ 17 ตามลำดับ



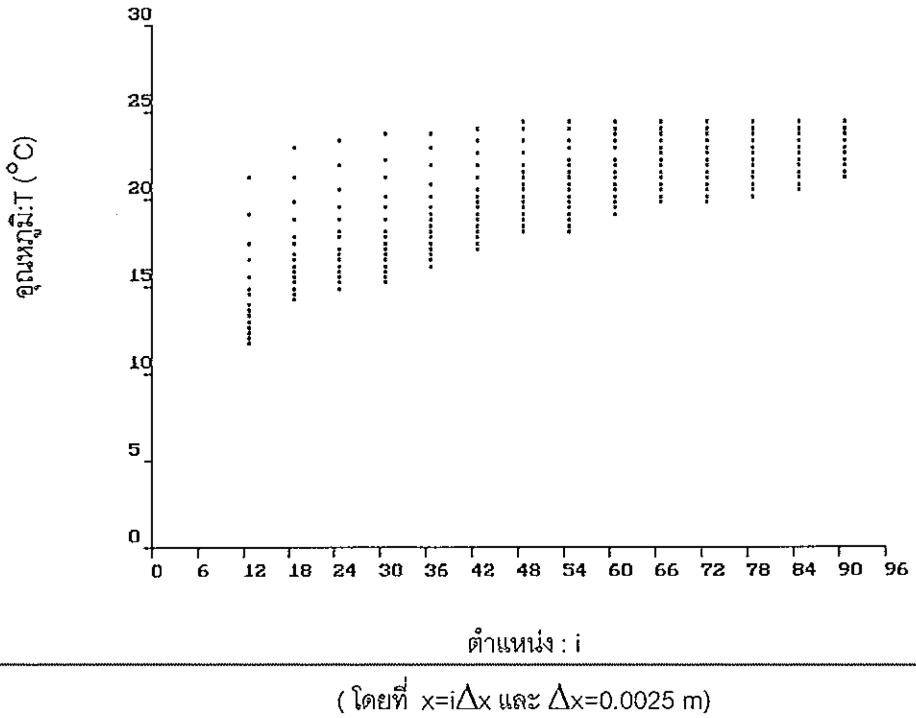
ภาพประกอบ 16 แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งที่เวลาใดๆ ของแท่งโลหะทองเหลือง ตามรูปแบบจำลองของโปรแกรมที่มีตำแหน่งตรงกับการทดลองวัด



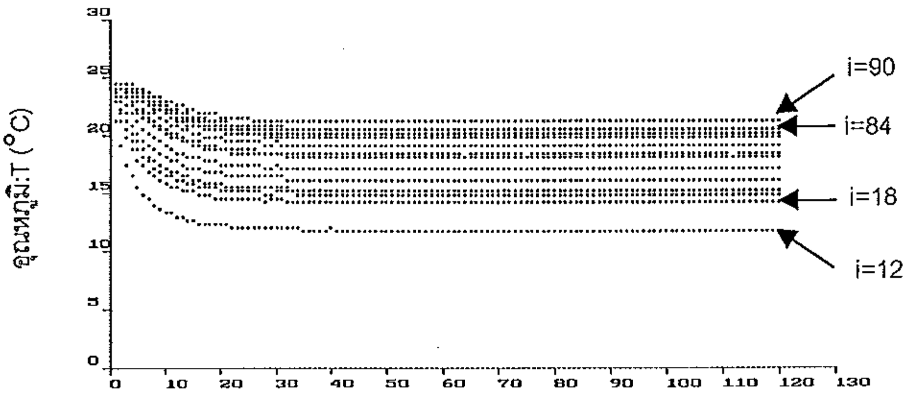
ภาพประกอบ 17 แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลาที่ตำแหน่งใดๆ ของแท่งโลหะทองเหลือง ตามรูปแบบจำลองของโปรแกรมที่ตรงกับการทดลองวัด

4.1.2 ผลที่ได้รับจากการทดลอง

สำหรับผลการทดลองที่ได้รับจากการวัดตามลักษณะการทดลองดังภาพประกอบ 14 จะได้ข้อมูลของการวัดในรูปแบบค่าดิจิตอลเอาท์พุท ดังแสดงในภาคผนวก ฉ แล้วปรับเทียบค่าดิจิตอลเอาท์พุทที่ได้รับเป็นค่าอุณหภูมิในหน่วยองศาเซลเซียส โดยแสดงในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับตำแหน่งและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาดังภาพประกอบ 18 และภาพประกอบ 19 ในลักษณะเดียวกับผลที่ได้รับในทางทฤษฎีตามรูปแบบจำลองของโปรแกรม ตามลำดับ



ภาพประกอบ 18 แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งที่เวลาห่างกัน 1 นาที ของแท่งโลหะทองเหลืองที่ได้รับจากการทดลอง



ภาพประกอบ 19 แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลาที่ตำแหน่งห่างกัน 0.015 เมตร ของแท่งโลหะทองเหลืองที่ได้รับจากการทดลองวัด

จากผลการทดลองที่ได้รับจะเห็นว่าค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งและเวลายังมีลักษณะที่ไม่ราบเรียบและไม่สม่ำเสมอทั้งนี้มีสาเหตุที่เกิดจากการปรับเทียบค่าอุณหภูมิที่ยังไม่แม่นยำนักในส่วนของระบบการวัดที่ใช้วงจรแบบแบ่งศักย์ไฟฟ้าสำหรับตัวตรวจวัดอุณหภูมิที่ทำงานร่วมกับตัว ADC ชนิด 8 บิต ซึ่งใช้กับความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์ สำหรับแปลงสัญญาณอนาลอกในรูปแบบโวลเตจเอาท์พุทที่ออกมาจากวงจรแบบแบ่งศักย์ไฟฟ้าไปเป็นสัญญาณดิจิตอลที่ให้ความละเอียดในการแปลงค่าประมาณ 0.3 °C ถึง 0.4 °C ต่อบิต ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ (2.2) และพบว่าการทำงานของระบบดังกล่าวจะมีความไม่แน่นอนของการวัดเกิดขึ้นในช่วงประมาณ ± 0.4 °C เสมอ ดังนั้นเพื่อแก้ไขความผิดพลาดของข้อมูลที่ได้จากการวัดที่เกิดขึ้นในลักษณะดังกล่าวให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้นจึงทำการปรับแก้ข้อมูลโดยใช้วิธีการดังรายละเอียดที่กล่าวในหัวข้อ(4.1.3) ต่อไป

4.1.3 ผลที่ได้รับจากการทดลองวัดที่ทำการปรับแก้แล้ว

วิธีการปรับแก้ข้อมูลให้ถูกต้องยิ่งขึ้นในที่นี้จะอาศัยวิธีพาราโบลากำลังสองน้อยที่สุดหาความสัมพันธ์ของข้อมูลอุณหภูมิกับตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดเพราะลักษณะกราฟความสัมพันธ์เป็นเส้นโค้ง โดยใช้วิธีหาความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ยของค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งที่เวลาผ่านไปมากๆ โดยถือได้ว่าที่เวลานี้ระบบเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ และค่าความไม่แน่นอนของการทดลองที่เกิดขึ้นมีน้อยกว่าในช่วงเวลาแรกและถือได้ว่าความไม่แน่นอนเกิดจากระบบการวัดอย่างเดียว ดังนั้นเมื่อพิจารณาข้อมูลค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งที่วัดได้ในช่วงเวลา 90 นาที ถึง120 นาที ดังแสดงในภาคผนวก ฉ พบว่าในช่วงเวลานี้ ค่าอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งจะมีค่าคงที่ตลอดและไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังนั้นค่าเฉลี่ยอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งที่คำนวณได้ย่อมมีค่าคงที่เช่นกันซึ่งสามารถเลือกใช้ข้อมูลชุดใดก็ได้ในช่วงเวลาดังกล่าว ในที่นี้จะเลือกใช้ชุดข้อมูลที่เวลา 90 นาที เพื่อนำไปหาความสัมพันธ์ของข้อมูลอุณหภูมิกับตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดตามวิธีพาราโบลากำลังสองน้อยที่สุดในรูปแบบสมการทั่วไป $Y=A+BX+CX^2$ โดยสามารถพิจารณาชุดข้อมูลอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งที่เวลา 90 นาที ได้ดังตาราง 2

ตาราง 2 แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งในแท่งโลหะทองเหลืองที่วัดได้ ณ เวลาที่ 90 นาที

ค่าดิจิตอลเอาท์พุทที่ได้รับ

t(min)	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13
(90)	129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	104	103	102	100

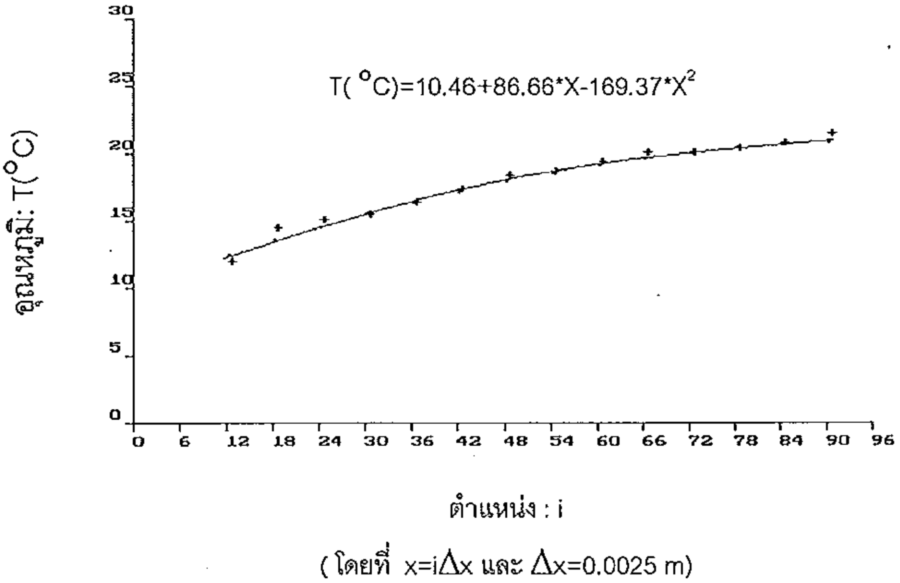
เมื่อปรับเทียบค่าดิจิตอลเอาท์พุทที่ได้รับ(D0 ถึง D13)ไปเป็นค่าอุณหภูมิในหน่วย(^{o}C)

โดยใช้สมการ $T(^{o}C)=[4089.0/ [\ln(16.6*D/(256-D)) - (-11.5)]]-273.2$

จะได้เป็นค่า(T12 ถึง T90)ตามลำดับดังนี้

T12	T18	T24	T30	T36	T42	T48	T54	T60	T66	T72	T78	T84	T90
12.2	14.8	15.4	15.7	16.7	17.7	18.7	19.0	19.7	20.3	20.3	20.7	21.0	21.7

จากข้อมูลอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่ง ณ เวลาที่ 90 นาที ในตาราง 2 สามารถหาความสัมพันธ์ที่เหมาะสมที่สุดโดยวิธีพาราโบลากำลังสองน้อยที่สุด ดังแสดงในภาพประกอบ 20 โดยได้รับผลของสมการดังนี้ T (°C) = 10.46+86.66*X-169.37 *X^2 เมื่อ X คือ ตำแหน่งในแท่งโลหะบริเวณที่หุ้มด้วยฉนวนที่ทำการวัดอุณหภูมิ มีหน่วยเป็น เมตร



ภาพประกอบ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งของทองเหลืองที่เหมาะสม ณ เวลา 90 นาที เมื่อใช้วิธีพาราโบลากำลังสองน้อยที่สุด

จากสมการที่ได้รับจากภาพประกอบ 20 เมื่อป้อนค่าตำแหน่งที่ตรงกับการวัดและคำนวณค่าอุณหภูมิใหม่ พบว่าจะได้ค่า ดังแสดงในตาราง 3

ตาราง 3 แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งที่ถูกปรับแก้ให้มีความเหมาะสมที่สุด ณ เวลา 90 นาที

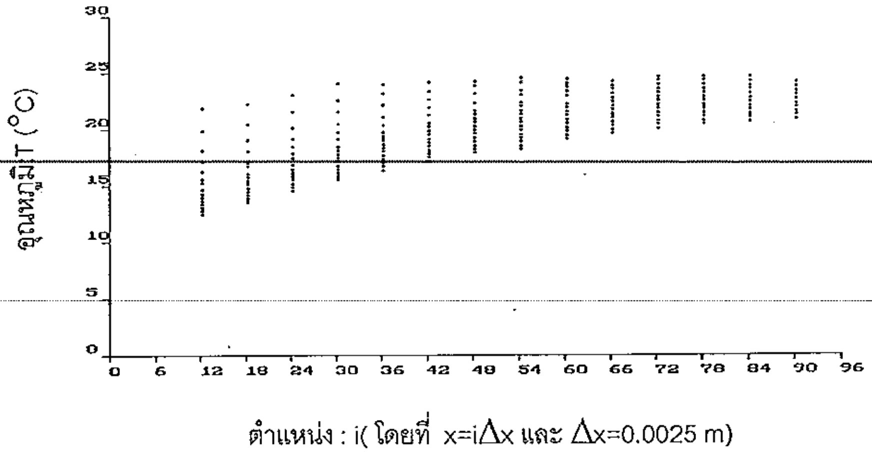
X *10^{-2}(m)	3.0	4.5	6.0	7.5	9.0	10.5	12.0	13.5	15.0	16.5	18.0	19.5	21.0	22.5
T(°C)	12.9	14.0	15.0	16.0	16.9	17.7	18.4	19.1	19.6	20.1	20.6	20.9	21.2	21.4

และเมื่อนำไปคำนวณหาผลต่างของค่าอุณหภูมิใหม่ในตาราง 3 กับค่าอุณหภูมิที่วัดได้ในตาราง 2 จนครบทุกตำแหน่งตามลำดับ ก็จะได้ค่าความเบี่ยงเบนหรือความผิดพลาด โดยในที่นี้จะเรียกว่า ค่าที่ใช้ในการปรับแก้(Correction) อันเป็นค่าที่สามารถนำไปใช้ปรับแก้ค่าข้อมูลอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งในทุกๆ เวลาได้ ยกเว้นข้อมูลในเวลาเริ่มต้นที่ t=0 เพราะทุกตำแหน่งต่างก็มีอุณหภูมิเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส โดยค่าที่ใช้ปรับแก้ของแต่ละตำแหน่งที่คำนวณได้ที่เวลา 90 นาที แสดงค่าได้ดังนี้

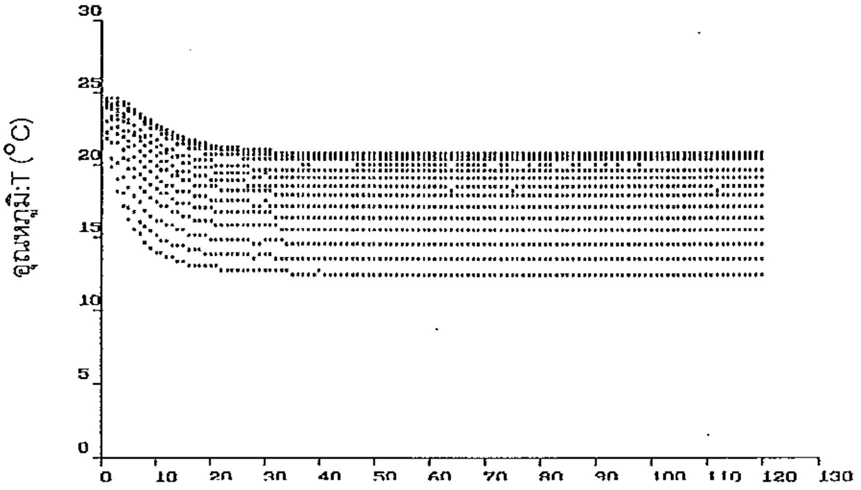
Correction = [0.7 - 0.8 - 0.4 0.3 0.2 0 - 0.3 0.1 - 0.1 - 0.2 0.3 0.2 0.2 - 0.3]

เมื่อนำค่าที่ใช้ในการปรับแก้ของข้อมูลชุดนี้ไปทำการปรับแก้ข้อมูลอุณหภูมิของทุกเวลาที่ตำแหน่งตรงกัน โดยการนำค่านี้ไปบวกกับค่าอุณหภูมิที่วัดได้ในตำแหน่งเดียวกันจนครบทุกค่าในที่สุดก็จะได้รับข้อมูลอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งและเวลาที่มีความแม่นยำและเหมาะสมยิ่งขึ้น

สำหรับข้อมูลของค่าอุณหภูมิที่ได้รับการปรับแก้ดังกล่าวแล้วจะมีความเหมาะสมและเห็นลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่สม่ำเสมอยิ่งขึ้น โดยพิจารณาได้ในข้อมูลกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับตำแหน่งและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาดังภาพประกอบ 21 และภาพประกอบ 22 ได้ตามลำดับดังนี้



ภาพประกอบ 21 แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งที่เวลาใดๆของแท่งโลหะทองเหลือง ที่ได้จากการทดลองวัดที่มีการปรับแก้อุณหภูมิแล้ว



(เมื่อ t= jΔt ;โดย j=0,1,2,... และΔt =0.02s)

ภาพประกอบ 22 แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลาที่ตำแหน่งใดๆ ของแท่งโลหะทองเหลือง ที่ได้รับจากการทดลองวัดที่ปรับแก้ข้อมูลแล้ว

4.1.4 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดกับผลที่ได้รับในทางทฤษฎี

สำหรับการเปรียบเทียบผลที่ได้จาการทดลองวัดกับผลที่ได้รับในทางทฤษฎีสามารถพิจารณาได้เป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งที่เวลาใดๆ และส่วนที่สองเป็นการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลาที่ตำแหน่งใดๆ โดยในการเปรียบเทียบผลที่ได้รับของอุณหภูมิทั้งสองส่วนนี้จะทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการวัดโดยตรงกับค่าการวัดที่มีการปรับแก้โดยใช้วิธีพาราโบลากำลังสองน้อยที่สุด และกับค่าที่คำนวณได้ในทางทฤษฎีตามรูปแบบจำลองของโปรแกรมที่อาศัยวิธี Finite Difference ซึ่งประกอบไปด้วยข้อมูล 3 ชุด สำหรับเปรียบเทียบกัน โดยมีเหตุผลเพื่อเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ได้รับจากการทดลองที่ออกแบบกับผลทางทฤษฎีที่ได้จากการคำนวณโดยใช้รูปแบบจำลองของโปรแกรม และในการหาผลที่สอดคล้องกันจำเป็นต้องคำนวณค่าความยาว Li และ La ที่จุ่มในน้ำแข็งและอากาศตามลำดับ โดยการหาค่า Li และ La จะอาศัยการคำนวณจากผลอุณหภูมิที่วัดได้เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่หรือค่าเกรเดียนท์ของอุณหภูมิมีค่าคงตัวซึ่งกล่าวได้ว่า อัตราพลังงานความร้อนที่ไหลเข้ามีค่าเท่ากับอัตราพลังงานความร้อนที่ไหลออกจากแท่งโลหะ และเมื่อพิจารณาชุดข้อมูลที่เวลา 90 นาที

ในตาราง 2 ที่ถือว่าระบบอยู่ในสภาวะคงที่ จะคำนวณค่า Li ได้เท่ากับ 0.0046 เมตร และ La ได้เท่ากับ 0.00001 เมตร แล้วนำค่าดังกล่าวกำหนดลงในโปรแกรมแล้วคำนวณค่าทางทฤษฎี แล้วเปรียบเทียบผลของข้อมูลได้ดังต่อไปนี้

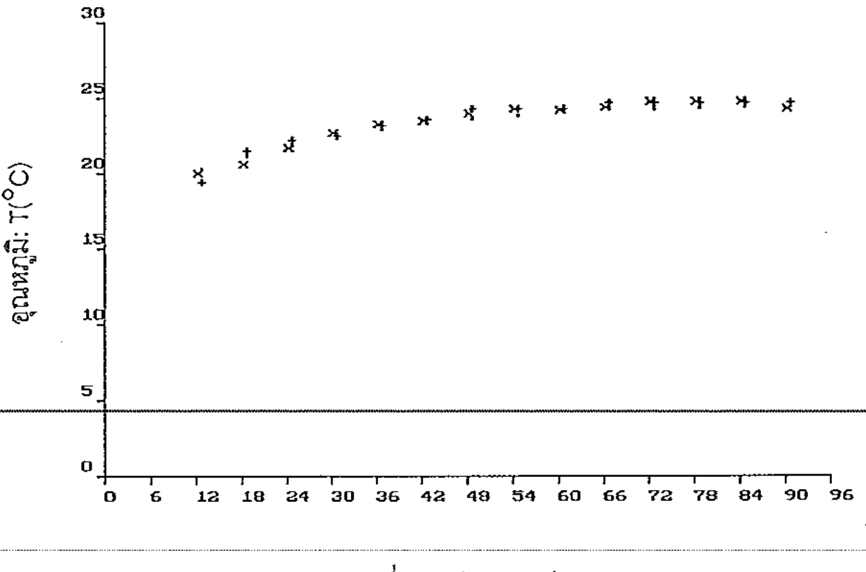
1. การเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งที่เวลาใดๆ

ค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งในที่นี้จะยกตัวอย่างการเปรียบเทียบค่าที่เวลา 2,8,32, และ120 นาที ตามลำดับ ดังแสดงในภาพประกอบ 23 ถึง ภาพประกอบ 26 และกำหนดเครื่องหมายหรือสัญลักษณ์แทนข้อมูลดังนี้

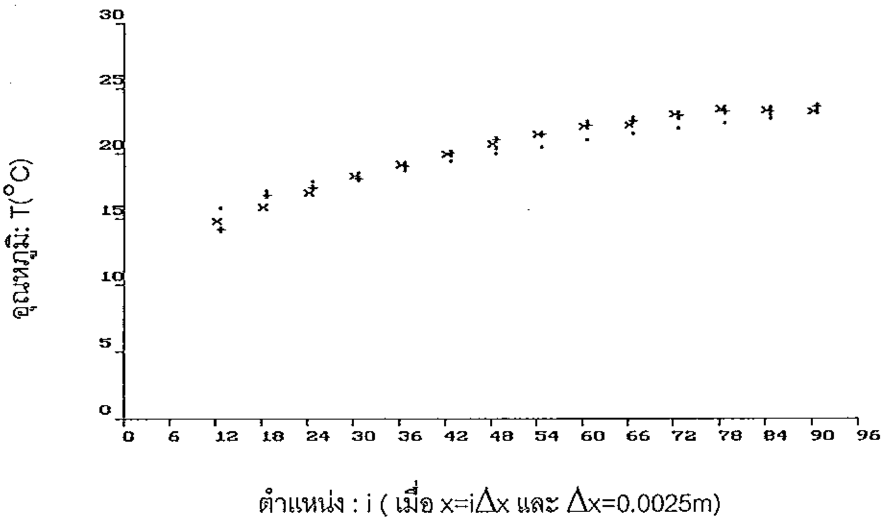
\+ แทน ค่าอุณหภูมิที่ได้จากการวัดโดยตรง

× แทน ค่าอุณหภูมิที่ได้การวัดที่มีการปรับแก้โดยใช้วิธีพาราโบลากำลังสองน้อยที่สุด

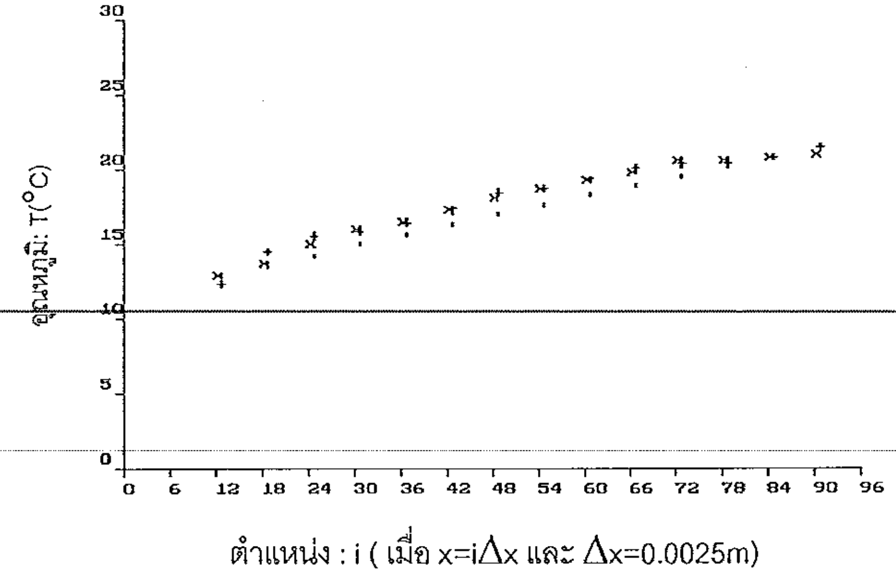
• แทน ค่าอุณหภูมิที่คำนวณได้ในทางทฤษฎีตามรูปแบบจำลองของโปรแกรมที่อาศัยวิธี Finite Difference



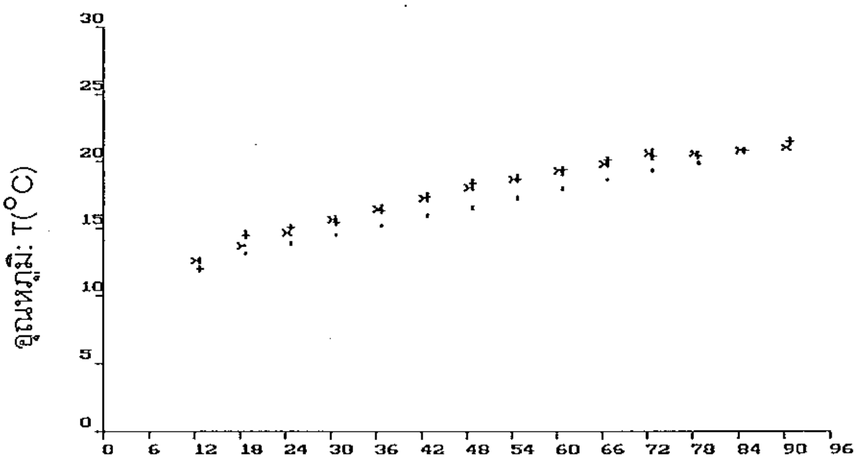
ภาพประกอบ 23 แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งของแท่งโลหะทองเหลือง ณ เวลา 2.0 นาที



ภาพประกอบ 24 แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งของแท่งโลหะทองเหลือง ณ เวลา 8.0 นาที



ภาพประกอบ 25 แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งของแท่งโลหะทองเหลือง ณ เวลา 32.0 นาที



ตำแหน่ง : i (เมื่อ x=iΔx และ Δx=0.0025m)

ภาพประกอบ 26 แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งของแท่งโลหะทองเหลือง ณ เวลา 120.0 นาที

จากการเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้รับกับผลที่ได้ในทางทฤษฎีตามรูปแบบจำลองของการนำความร้อนในแท่งโลหะทองเหลืองในรูปแบบ 1 มิติ พบว่าที่เวลา 2 และ 8 นาที ค่าอุณหภูมิจากการวัดกับค่าอุณหภูมิที่ผ่านการปรับแก้แล้วเมื่อเปรียบเทียบกับผลในทางทฤษฎีดังกล่าวจะมีลักษณะค่าและแนวโน้มที่ใกล้เคียงกันมาก และที่เวลาเพิ่มขึ้นเป็น 32 และ120 นาที พบว่าที่ตำแหน่ง i=18,24,30,36,42,48,54,60,66และ 72 ลักษณะของผลที่วัดได้มีค่าสูงกว่าผลทางทฤษฎีเล็กน้อย ทั้งนี้เป็นผลที่เกิดจากความร้อนที่มีในอากาศรอบแท่งโลหะไหลผ่านฉนวนความร้อนเข้าสู่แท่งโลหะได้บ้างเล็กน้อยเพราะว่าฉนวนกั้นความร้อนมีค่าประสิทธิภาพต่ำ และถือได้ว่าผลการทดลองที่ได้จากการวัดมีลักษณะที่เป็นไปตามทฤษฎี

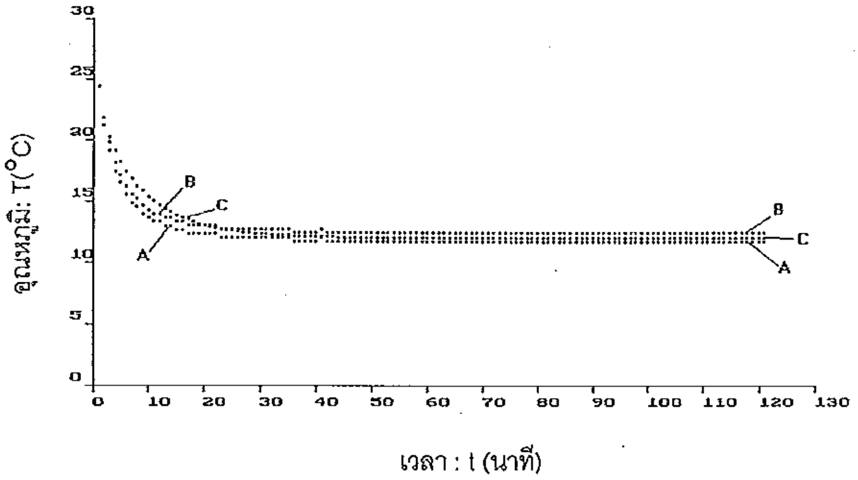
2. การเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลาที่ตำแหน่งใดๆ

ค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลาในที่นี้จะยกตัวอย่างการเปรียบเทียบที่ตำแหน่งตรงกับการวัดคือ ที่ i=12,36,60 และ84 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพประกอบ 27 ถึง ภาพประกอบ 30 ดังต่อไปนี้และกำหนดสัญลักษณ์แทนข้อมูลดังนี้

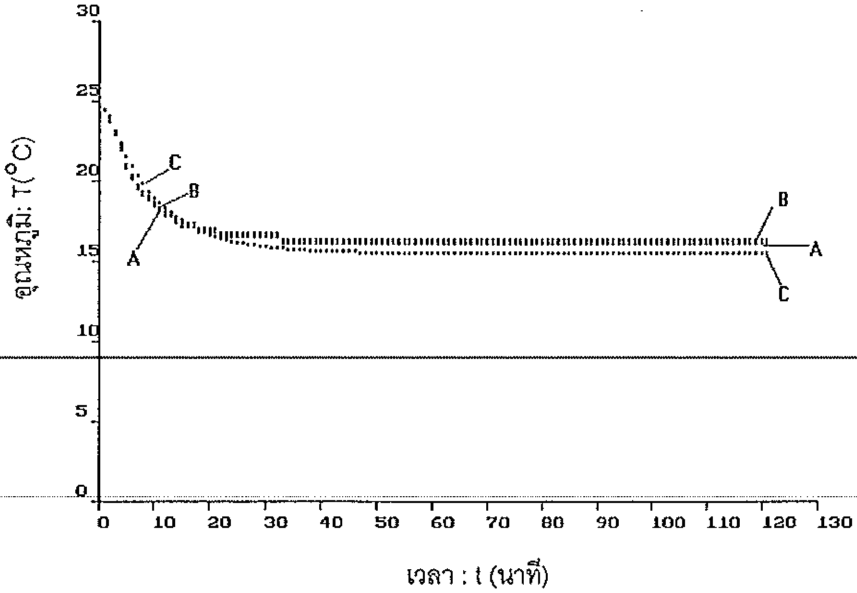
A แทน ค่าอุณหภูมิที่ได้จากการวัดโดยตรง

B แทน ค่าอุณหภูมิที่ได้การวัดที่มีการปรับแก้โดยใช้วิธีพาราโบลากำลังสองน้อยที่สุด

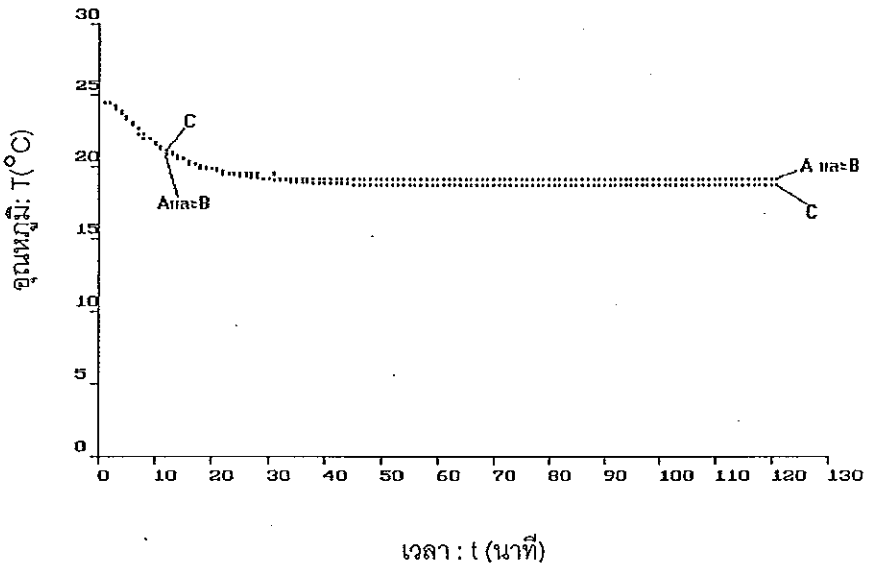
C แทน ค่าอุณหภูมิที่คำนวณได้ในทางทฤษฎีตามรูปแบบจำลองของโปรแกรมที่อาศัยวิธี Finite Difference



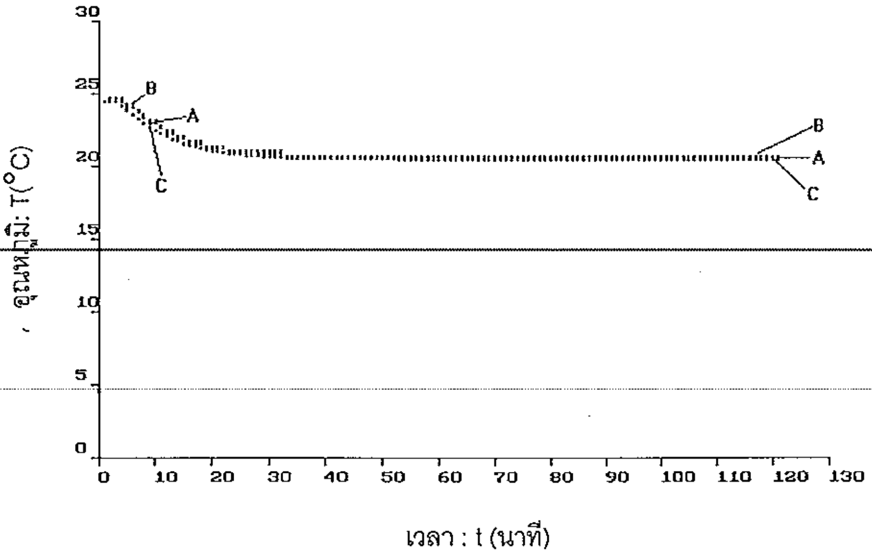
ภาพประกอบ 27 แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลา ณ ตำแหน่ง i=12 ของแท่งโลหะทองเหลือง



ภาพประกอบ 28 แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ขึ้นเวลา ณ ตำแหน่ง i=36 ของแท่งโลหะทองเหลือง



ภาพประกอบ 29 แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลา ณ ตำแหน่ง i=60 ของแท่งโลหะทองเหลือง



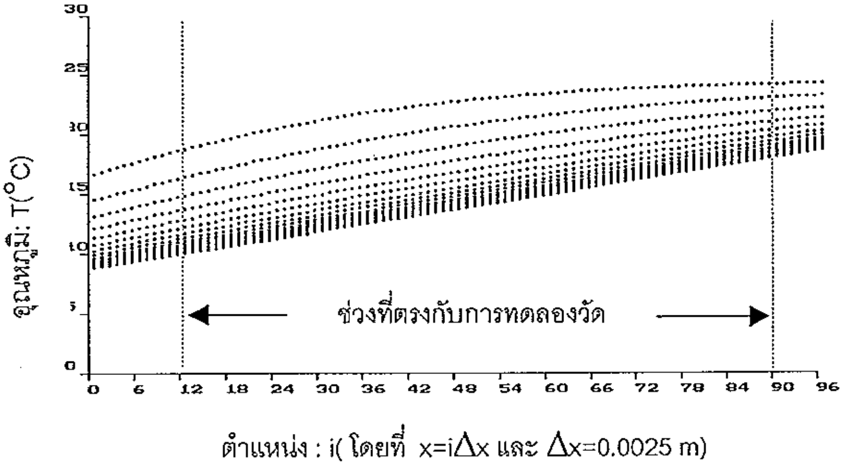
ภาพประกอบ 30 แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ขึ้นเวลา ณ ตำแหน่ง i=84 ของแท่งโลหะทองเหลือง

จากผลของการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลาที่ตำแหน่งต่างๆ ดังกล่าวจะเห็นได้ว่าลักษณะผลการทดลองที่ได้รับจากการวัดและผลการทดลองที่ปรับแก้แล้วมีลักษณะความสัมพันธ์และแนวโน้มเป็นไปตามผลที่ได้รับในทางทฤษฎี เมื่อพิจารณาตำแหน่งที่ i=12 ดังภาพประกอบ 27 พบว่าอุณหภูมิจะต่ำกว่าผลทางทฤษฎีเล็กน้อย เพราะตำแหน่งนี้อยู่ใกล้กับน้ำแข็งมากที่สุดส่งผลให้ความร้อนไหลออกเร็วกว่าตำแหน่งส่วนปลาย ส่วนที่ตำแหน่ง i=36 60 และ 84 พบว่า ผลของอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลาจะมีค่าสูงกว่าผลทางทฤษฎีเล็กน้อยเพราะตำแหน่งที่อยู่ส่วนปลายจะได้รับผลกระทบจากความร้อนของอากาศที่ไหลผ่านฉนวนเข้าสู่ด้านข้างของแท่งโลหะดังเหตุผลที่กล่าวข้างต้น และยังถือว่าผลจากการวัดมีค่าใกล้เคียงกับผลทางทฤษฎี

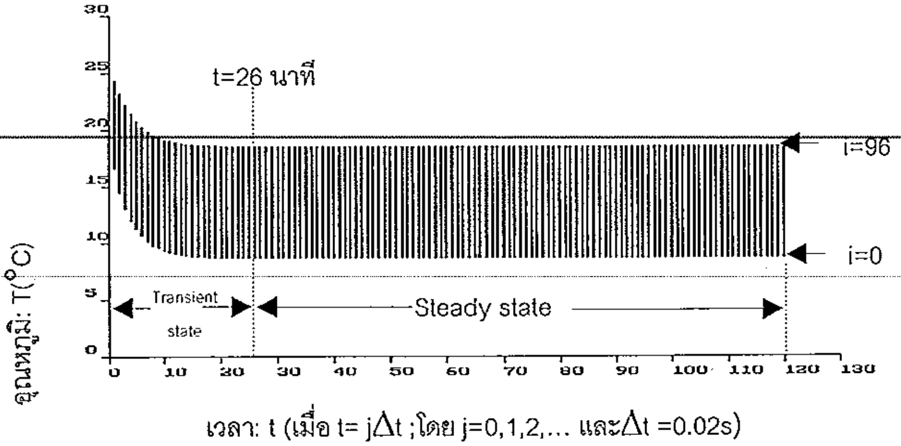
4.2 ผลและลักษณะการนำความร้อนของแท่งโลหะอะลูมิเนียมในรูปแบบ 1 มิติ

การพิจารณาผลการนำความร้อนของแท่งโลหะอะลูมิเนียมสามารถศึกษาและทำได้ในทำนองเดียวกันกับแท่งโลหะทองเหลือง โดยแสดงผลที่ได้รับดังต่อไปนี้

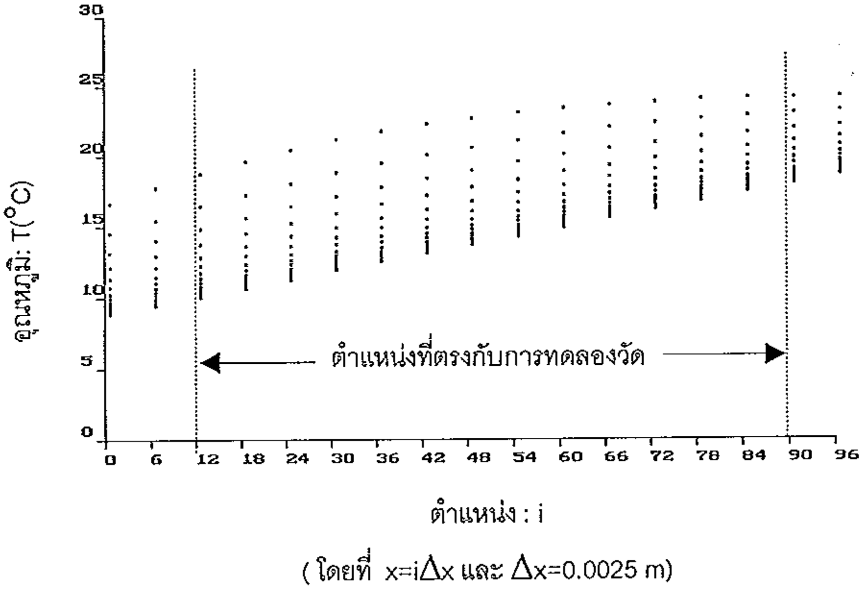
4.2.1 ผลที่ได้รับในทางทฤษฎีตามรูปแบบจำลองของโปรแกรม



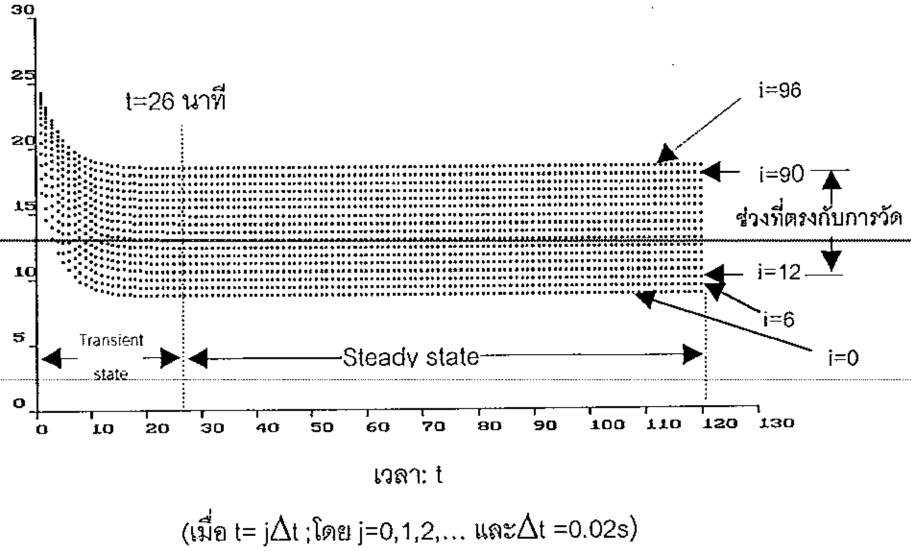
ภาพประกอบ 31 แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งที่เวลาใดๆ ของแท่งโลหะอะลูมิเนียมตามรูปแบบจำลองของโปรแกรม



ภาพประกอบ 32 แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลาที่ตำแหน่งใดๆ ของแท่งโลหะอะลูมิเนียมตามรูปแบบจำลองของโปรแกรม

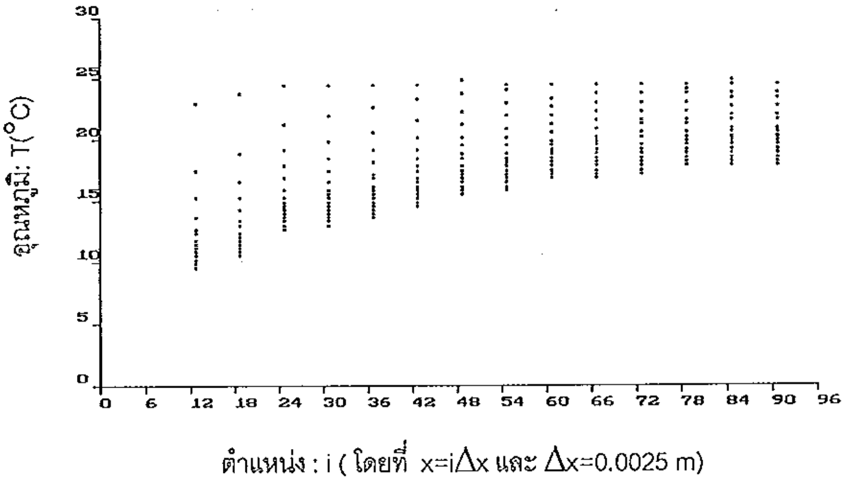


ภาพประกอบ 33 แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งที่เวลาใดๆ ของแท่งโลหะอะลูมิเนียม ตามรูปแบบจำลองของโปรแกรมที่มีตำแหน่งตรงกับการทดลอง

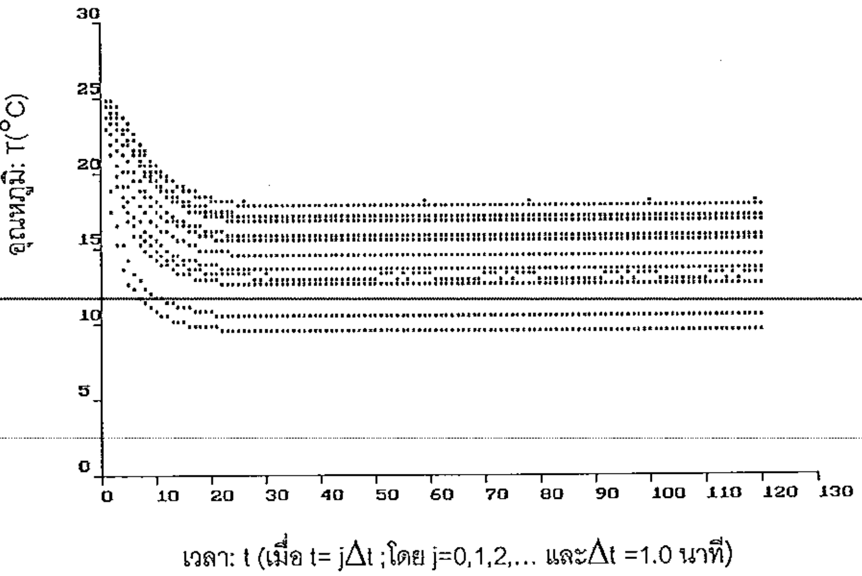


ภาพประกอบ 34 แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลาที่ตำแหน่งใดๆ ของแท่งโลหะอะลูมิเนียม ตามรูปแบบจำลองของโปรแกรม

4.2.2 ผลที่ได้รับจากการทดลองวัด



ภาพประกอบ 35 แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งที่เวลาห่างกัน1 นาที ของแท่งโลหะอะลูมิเนียมที่ได้รับจากการทดลอง

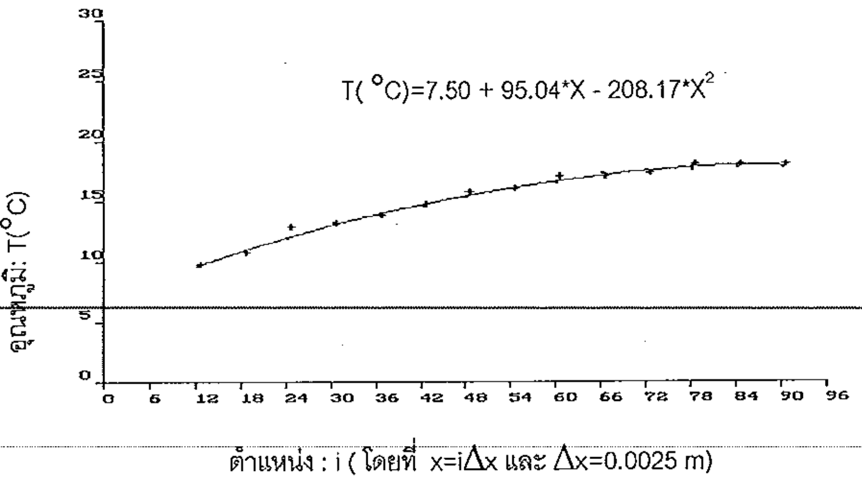


ภาพประกอบ 36 แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลาที่ตำแหน่งห่างกัน 0.015 เมตร ของแท่งโลหะอะลูมิเนียมที่ได้รับจากการทดลอง

จากผลการทดลองที่ได้รับตามภาพประกอบ 36 จะเห็นว่า ช่วงกว้างของค่าอุณหภูมิของแต่ละตำแหน่งที่วัดได้ ณ เวลาใด ๆ มีค่าไม่สม่ำเสมอโดยเฉพาะระหว่างตำแหน่ง i=18 กับ i=24 ทั้งนี้อาจจะเกิดจากความผิดพลาดของการทดลอง ดังนั้นเพื่อปรับแก้ข้อมูลให้เรียบขึ้นจึงใช้วิธีการพิจารณาดังที่กล่าวในหัวข้อ 4.2.3 ต่อไป

4.2.3 ผลที่ได้รับจากการทดลองวัดที่ทำการปรับแก้แล้ว

ในการปรับแก้ข้อมูลให้เรียบยิ่งขึ้นจะใช้ค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งที่เป็นค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่เวลาผ่านไปมากๆ ในช่วงเวลา 90 นาที ถึง 120 นาที ดังเหตุผลที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1.3 โดยพบว่าค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งที่วัดได้ ในช่วงเวลา 90 นาที ถึงเวลา 120 นาที จะมีค่าคงที่ตลอดและไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังนั้นค่าเฉลี่ยที่คำนวณได้ก็คือค่าของข้อมูลชุดใดชุดหนึ่งในช่วงเวลาดังกล่าว ในที่นี้เลือกใช้ชุดข้อมูลที่เวลา 90 นาที เพื่อนำไปหาความสัมพันธ์ของข้อมูลอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งโดยใช้วิธีพาราโบลากำลังสองน้อยที่สุด ดังภาพประกอบ 37 แล้วหาค่าความเบี่ยงเบนเพื่อนำไปใช้ในการปรับแก้ค่าอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งของช่วงเวลาข้างต้น ยกเว้นข้อมูลที่เวลาเริ่มต้น(t=0) และวิธีดังกล่าวสามารถคำนวณโดยใช้การโปรแกรมภาษา C และผลการทดลองวัดที่ทำการปรับแก้แล้วแสดงดังภาพประกอบ 38 และภาพประกอบ 39 ตามลำดับ

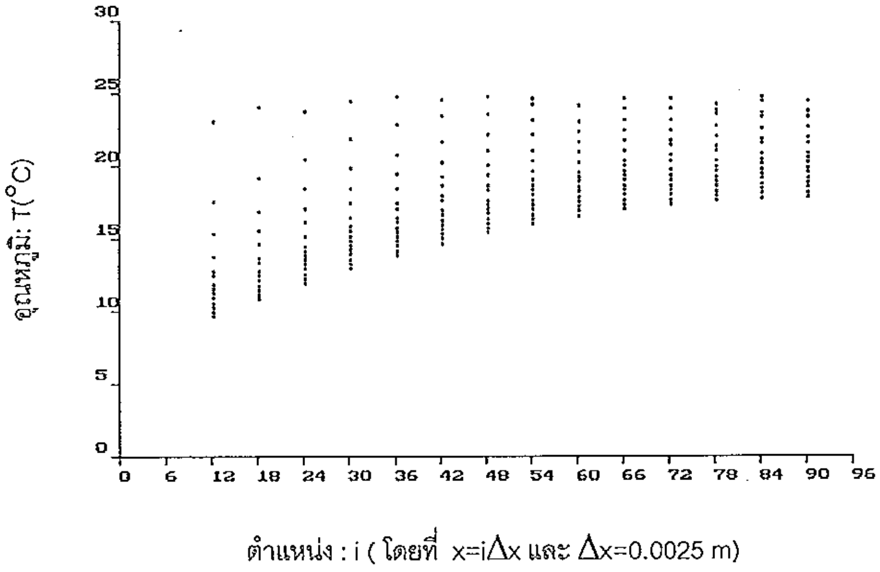


ภาพประกอบ 37 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งที่เหมาะสม ณ เวลา 90 นาที ของแท่งโลหะอะลูมิเนียม เมื่อใช้วิธีพาราโบลากำลังสองน้อยที่สุด

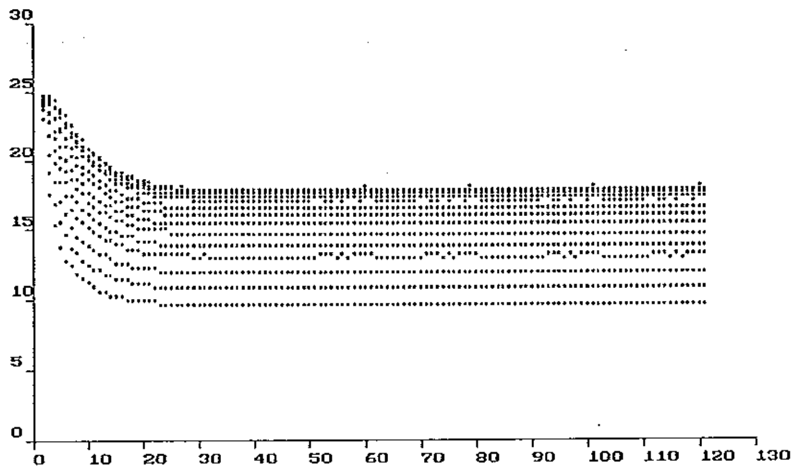
จากภาพประกอบ 37 จะได้ค่าที่ใช้ในการปรับแก้(Correction) อันเป็นค่าที่สามารถนำไปใช้ปรับแก้ค่าข้อมูลอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งในทุกๆ เวลาได้ ยกเว้นข้อมูลในเวลาเริ่มต้นที่ t=0 โดยค่าที่ใช้ปรับแก้ของแต่ละตำแหน่งที่คำนวณได้ที่เวลา 90 นาที แสดงค่าได้ดังนี้

Correction = [0.1 0.4 - 0.7 -0.03 0.3 0.1 - 0.1 0.2 - 0.3 0.2 0.2 -0.2 -0.04 0.03]

และผลที่ได้รับของการปรับแก้ข้อมูลแสดงดังภาพประกอบ 38 และภาพประกอบ 39 ดังนี้



ภาพประกอบ 38 แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งที่เวลาใดๆ ของแท่งโลหะอะลูมิเนียมที่ได้รับจากการทดลองวัดที่ปรับแก้ข้อมูลแล้ว



เวลา: t (เมื่อ t= jΔt ;โดย j=0,1,2,... และΔt =1.0 นาที)

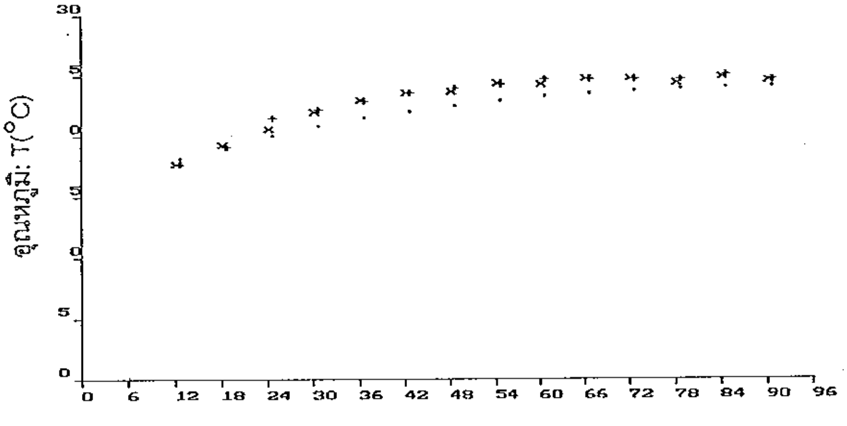
ภาพประกอบ 39 แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลาที่ตำแหน่งใดๆ ของแท่งโลหะอะลูมิเนียม ที่ได้รับจากการทดลองวัดที่ปรับแก้ข้อมูลแล้ว

4.2.4 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดกับผลที่ได้รับในทางทฤษฎี

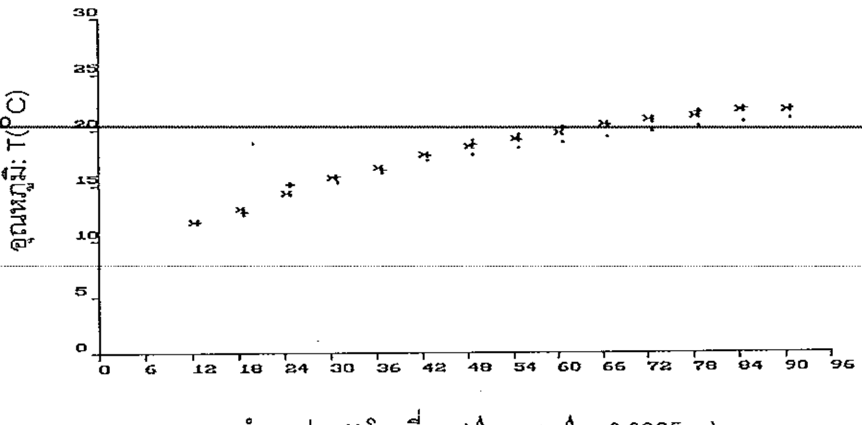
สำหรับการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองวัดกับผลที่ได้รับในทางทฤษฎีสามารถพิจารณาได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งที่เวลาใดๆและส่วนที่สองเป็นการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลาที่ตำแหน่งใดๆและในการคำนวณโดยใช้รูปแบบจำลองของโปรแกรมเพื่อหาผลที่สอดคล้องกันกับผลการทดลองสิ่งที่ทำได้ในโปรแกรมของตอนนี้ คือ การกำหนดค่าพารามิเตอร์ k , ρ และ c_p ของแท่งโลหะอะลูมิเนียม โดยใช้เหตุผลในการอธิบายและเงื่อนไขขอบเขตของปลายแท่งโลหะ เหมือนกับหัวข้อ (4.1.4) เพียงแต่เปลี่ยนค่าความยาว Li และ La ที่ห่างจากตำแหน่งขอบเขตของแท่งโลหะที่จุ่มในน้ำแข็งและอากาศตามลำดับ โดยในกรณีนี้สามารถคำนวณค่า Li จากผลการทดลองได้เท่ากับ 0.0023 เมตร และ La ได้เท่ากับ 0.00001 เมตร และสามารถเปรียบเทียบผลของข้อมูลของแต่ละส่วนได้ดังต่อไปนี้

1. การเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งที่เวลาใดๆ

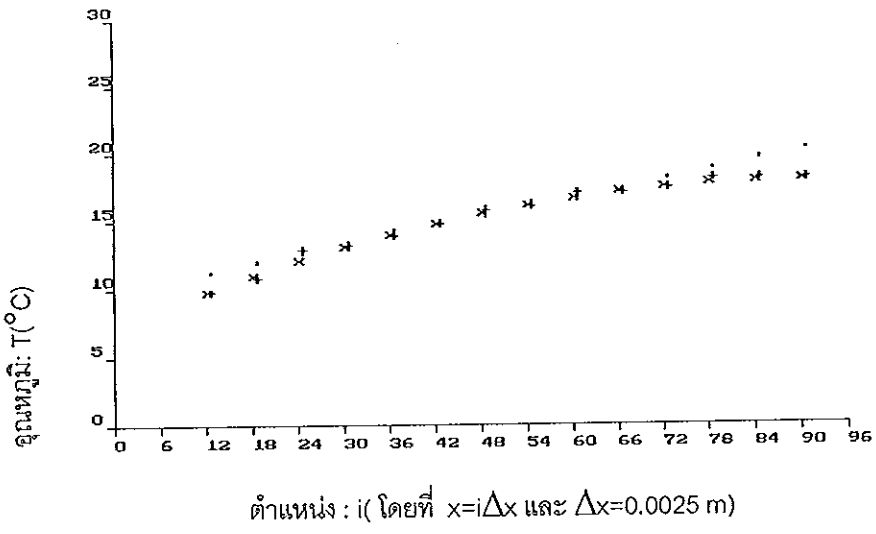
ค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งในที่นี้จะยกตัวอย่างการเปรียบเทียบค่าที่เวลา 2,8,32 และ 120 นาที ตามลำดับ ดังแสดงในภาพประกอบ 40 ถึง ภาพประกอบ 43 และกำหนดสัญลักษณ์แทนข้อมูลเหมือนหัวข้อ 4.1.4 (1) ดังต่อไปนี้



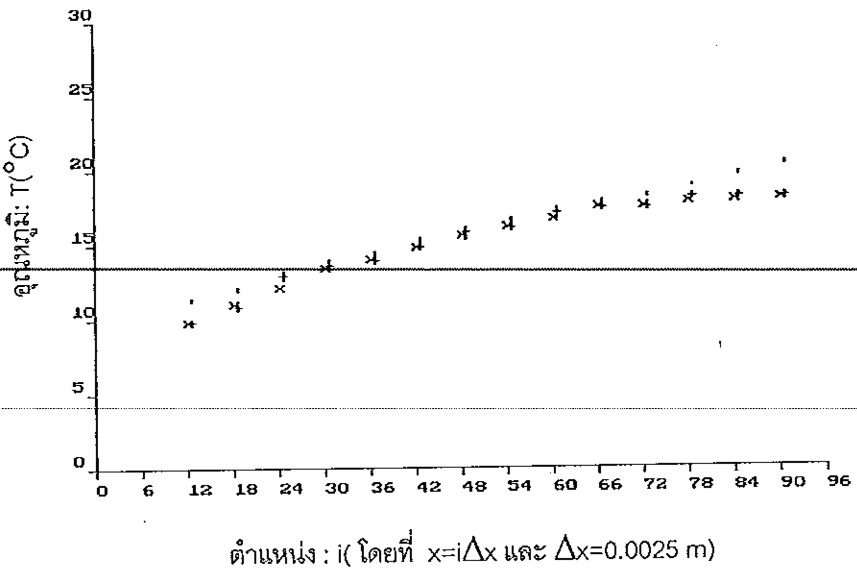
ภาพประกอบ 40 แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่ง ณ เวลา 2.0 นาที ของแท่งโลหะอะลูมิเนียม



ภาพประกอบ 41 แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่ง ณ เวลา 8.0 นาที ของแท่งโลหะอะลูมิเนียม



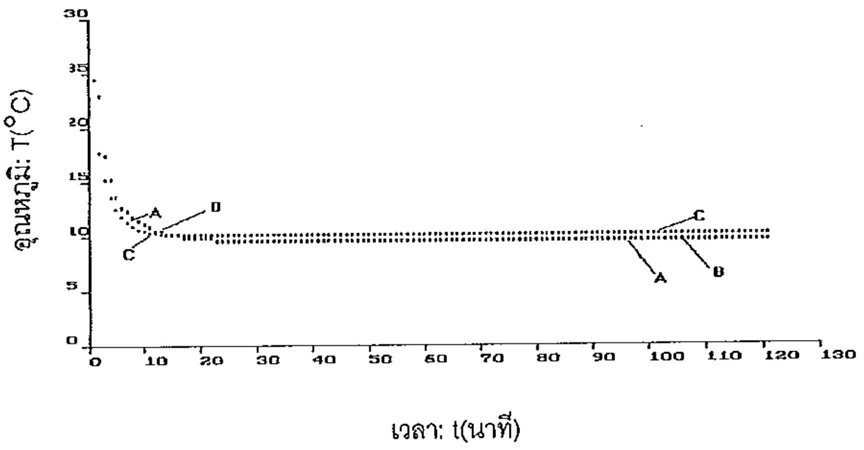
ภาพประกอบ 42 แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่ง ณ เวลา 32.0 นาที ของแท่งโลหะอะลูมิเนียม



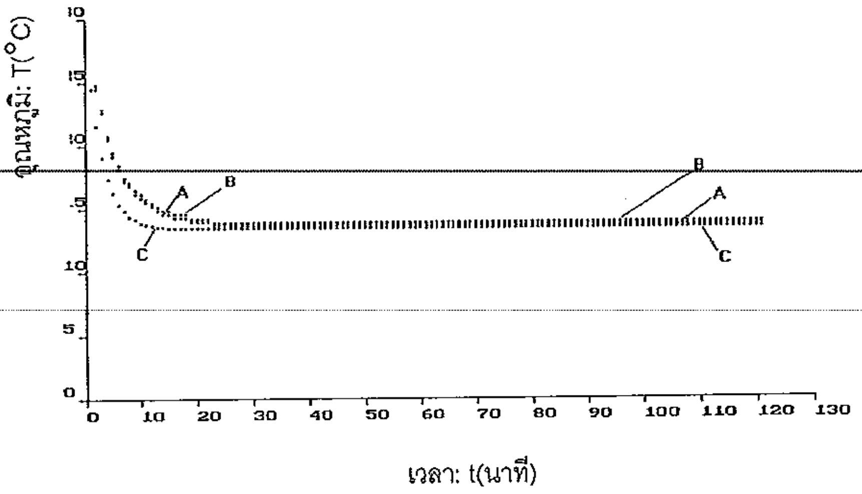
ภาพประกอบ 43 แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่ง ณ เวลา 120.0 นาที ของแท่งโลหะอะลูมิเนียม

2. การเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลาที่ตำแหน่งใดๆ

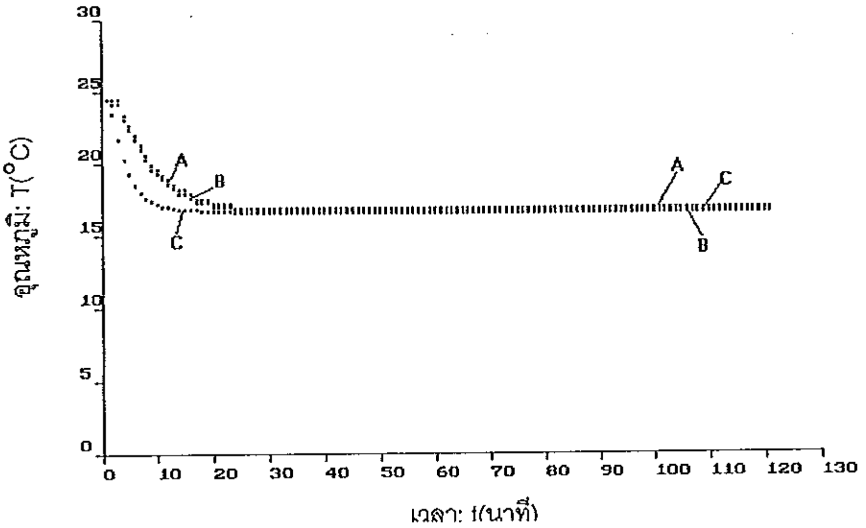
ค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลาในที่นี้จะยกตัวอย่างการเปรียบเทียบที่ตำแหน่งตรงกับการวัดคือ ที่ i=12,36,60 และ84 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพประกอบ 44 ถึง ภาพประกอบ 47 และกำหนดสัญลักษณ์แทนข้อมูลเหมือนกับหัวข้อ 4.1.4 (2) ดังต่อไปนี้



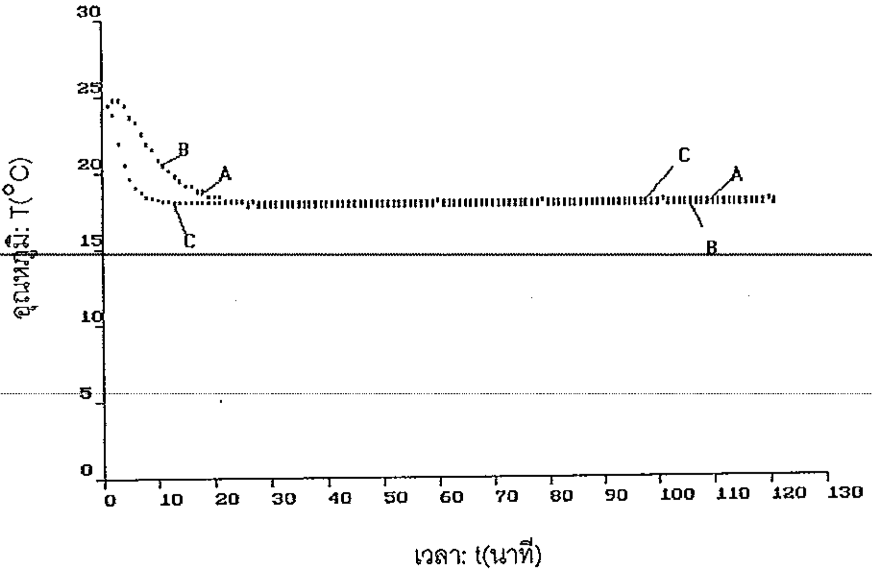
ภาพประกอบ 44 แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ขึ้นเวลา ณ ตำแหน่ง i=12 ของแท่งโลหะอะลูมิเนียม



ภาพประกอบ 45 แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ขึ้นเวลา ณ ตำแหน่ง i=36 ของแท่งโลหะอะลูมิเนียม



ภาพประกอบ 46 แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ขึ้นเวลา ณ ตำแหน่ง i=60 ของแท่งโลหะอะลูมิเนียม

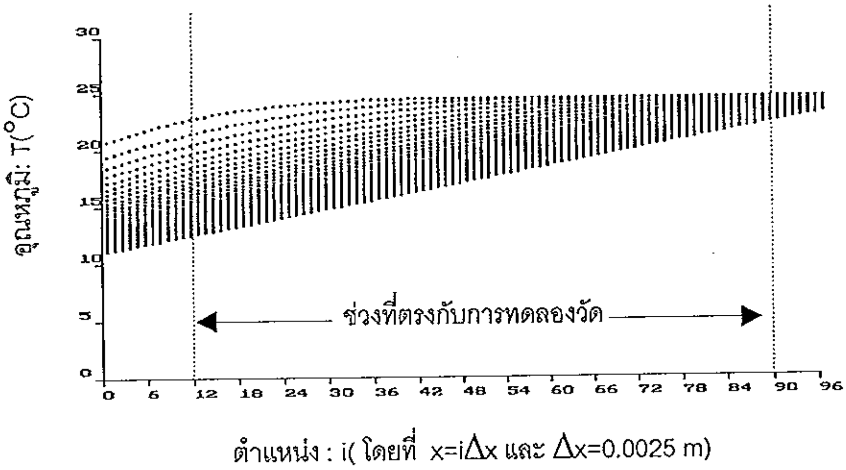


ภาพประกอบ 47 แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ขึ้นเวลา ณ ตำแหน่ง i=84 ของแท่งโลหะอะลูมิเนียม

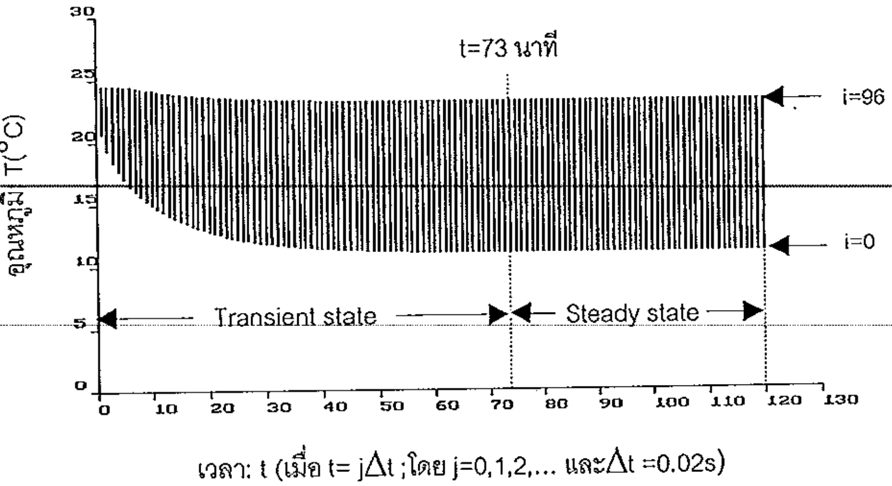
4.3 ผลและลักษณะการนำความร้อนของแท่งโลหะเหล็กในรูปแบบ 1 มิติ

การพิจารณาผลการนำความร้อนของแท่งโลหะเหล็กสามารถศึกษาและทำได้ในทำนองเดียวกันกับแท่งโลหะทองเหลือง และอลูมิเนียม โดยแสดงผลที่ได้รับดังต่อไปนี้

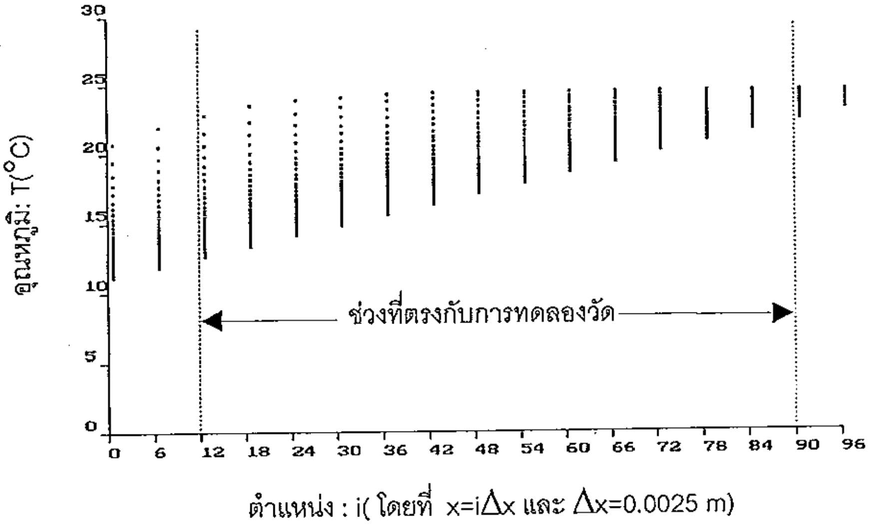
4.3.1 ผลที่ได้รับในทางทฤษฎีตามรูปแบบจำลองของโปรแกรม



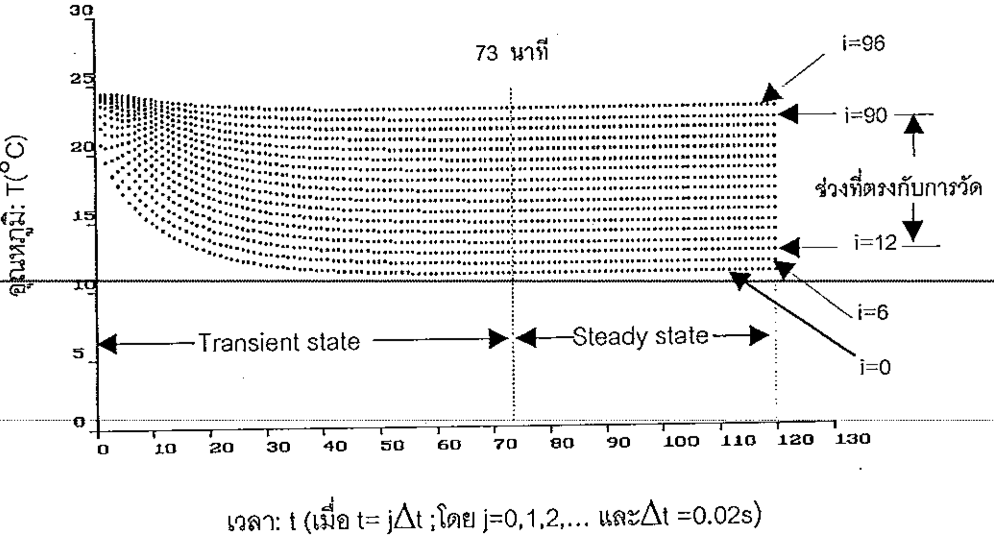
ภาพประกอบ 48 แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งที่เวลาใดๆ ของแท่งโลหะเหล็กตามรูปแบบจำลองของโปรแกรม



ภาพประกอบ 49 แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลาที่ตำแหน่งใดๆ ของแท่งโลหะเหล็กตามรูปแบบจำลองของโปรแกรม

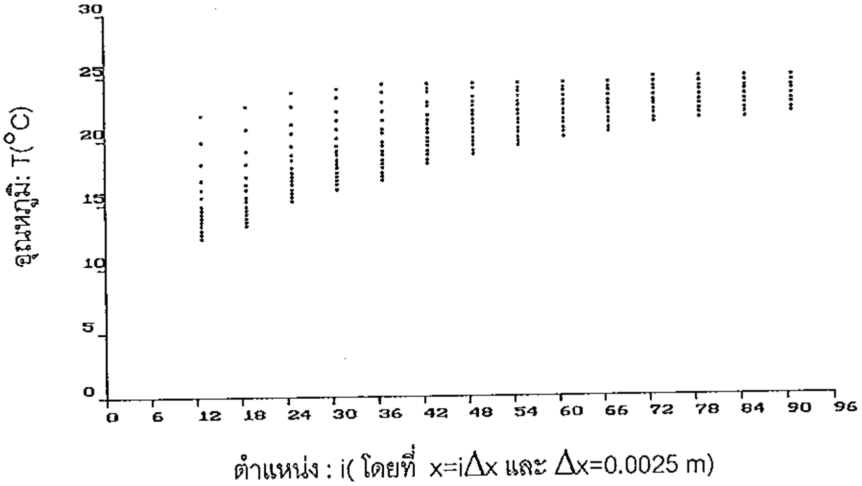


ภาพประกอบ 50 แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งที่เวลาใดๆ ของแท่งโลหะเหล็ก ตามรูปแบบจำลองของโปรแกรมที่มีตำแหน่งตรงกับการทดลองวัด

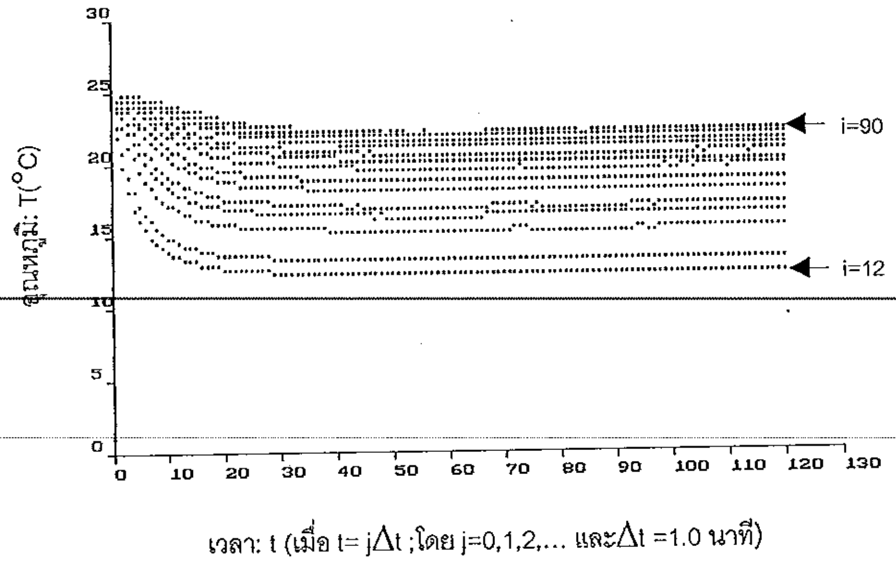


ภาพประกอบ 51 แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลาที่ตำแหน่งใดๆ ของแท่งโลหะเหล็ก ตามรูปแบบจำลองของโปรแกรมที่มีตำแหน่งตรงกับการทดลองวัด

4.3.2 ผลที่ได้รับจากการทดลองวัด



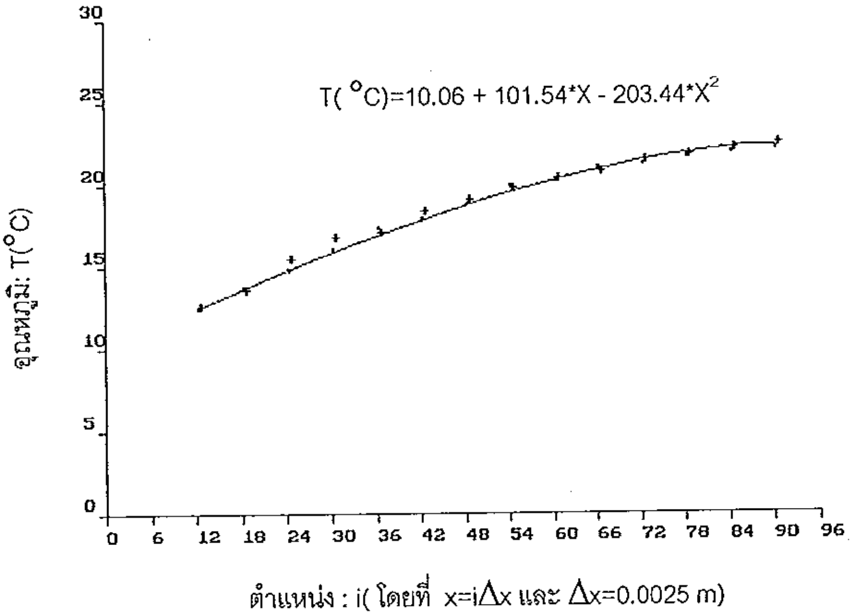
ภาพประกอบ 52 แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งที่เวลาห่างกัน 1 นาที ของแท่งโลหะเหล็กที่ได้รับจากการทดลองวัด



ภาพประกอบ 53 แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลาที่ตำแหน่งห่างกัน 0.015 เมตร ของแท่งโลหะเหล็กที่ได้รับจากการทดลองวัด

4.3.3 ผลที่ได้รับจากการทดลองวัดที่ทำการปรับแก้แล้ว

ในการปรับแก้ข้อมูลให้เรียบยิ่งขึ้นจะใช้เหตุผลดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1.3 และหัวข้อ 4.2.3 โดยเลือกใช้ชุดข้อมูลที่เวลา 90 นาที เพื่อนำไปหาความสัมพันธ์ของข้อมูลอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งโดยใช้วิธีพาราโบลากำลังสองน้อยที่สุด ดังภาพประกอบ 54 แล้วหาค่าความเบี่ยงเบนเพื่อนำไปใช้ในการปรับแก้ค่าอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งของช่วงเวลาข้างต้น ยกเว้นข้อมูลที่เวลาเริ่มต้น(t=0) และผลการทดลองวัดที่ทำการปรับแก้แล้วแสดงดังภาพประกอบ 55 และภาพประกอบ 56 ตามลำดับ

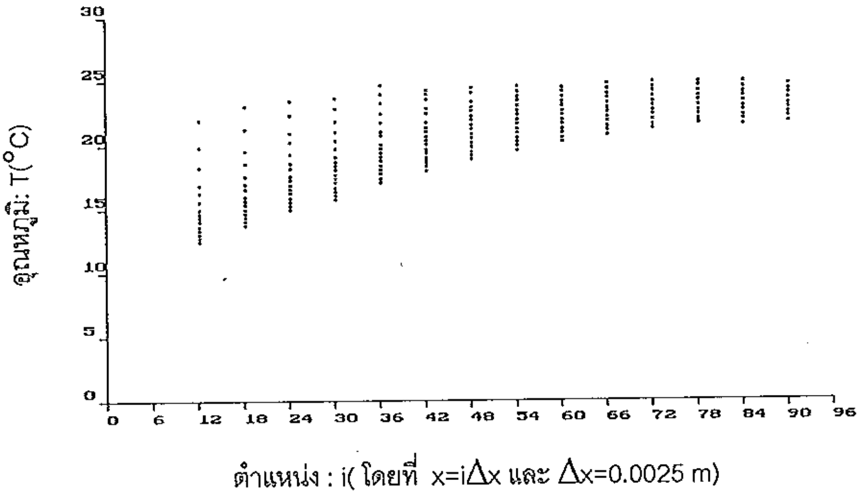


ภาพประกอบ 54 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งที่เหมาะสม ณ เวลา 90 นาที ของแท่งโลหะเหล็ก เมื่อใช้วิธีพาราโบลากำลังสองน้อยที่สุด

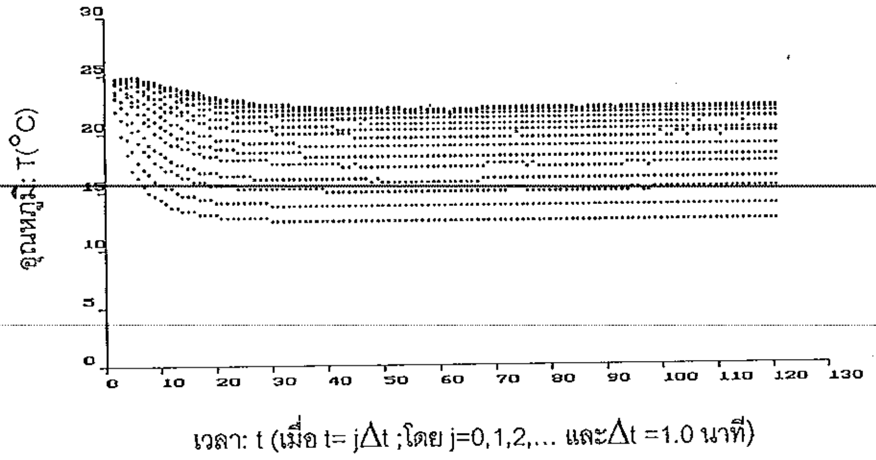
จากภาพประกอบ 54 จะได้ค่าที่ใช้ในการปรับแก้อันเป็นค่าที่สามารถนำไปใช้ปรับแก้ค่าข้อมูลอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งในทุกๆ เวลาได้ ยกเว้นข้อมูลในเวลาเริ่มต้นที่ t=0 โดยค่าที่ใช้ปรับแก้ของแต่ละตำแหน่งที่คำนวณได้ที่เวลา 90 นาที แสดงค่าได้ดังนี้

Correction = [0.1 0.4 - 0.3 -0.5 0.2 -0.2 - 0.01 0.1 - 0.03 0.3 0.03 0.1 -0.01 -0.2]

และผลที่ได้รับของการปรับแก้ข้อมูลแสดงดังภาพประกอบ 55 และภาพประกอบ 56 ดังนี้



ภาพประกอบ 55 แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งที่เวลาใดๆ ของแท่งโลหะเหล็กที่ได้รับจากการทดลองวัดที่ปรับแก้ข้อมูลแล้ว



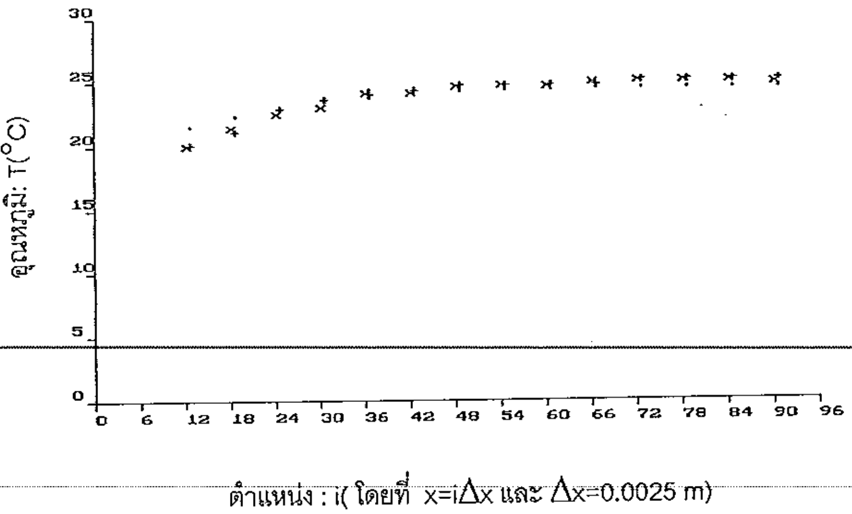
ภาพประกอบ 56 แสดงค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลาที่ตำแหน่งใดๆ ของแท่งโลหะเหล็กที่ได้รับจากการทดลองวัดที่ปรับแก้ข้อมูลแล้ว

4.3.4 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดกับผลที่ได้รับในทางทฤษฎี

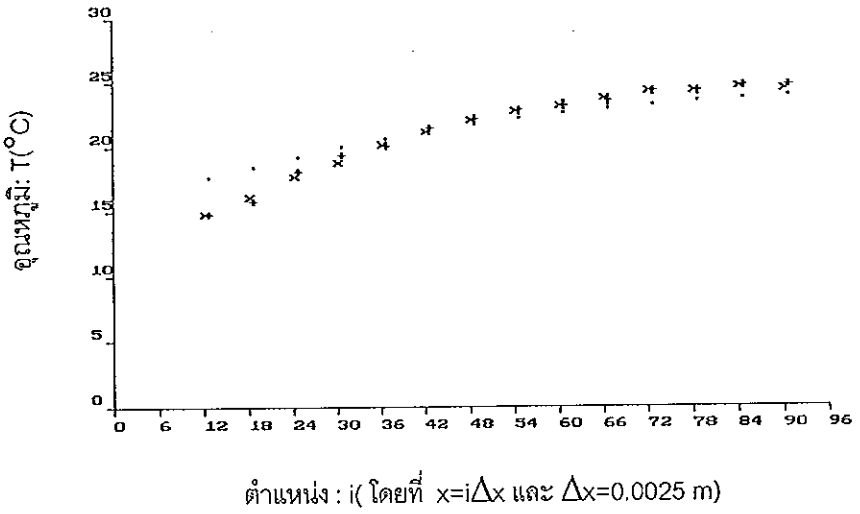
สำหรับการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองวัดกับผลที่ได้รับในทางทฤษฎีสามารถพิจารณาได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งที่เวลาใดๆและส่วนที่สองเป็นการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลาที่ตำแหน่งใดๆและในการคำนวณโดยใช้รูปแบบจำลองของโปรแกรมเพื่อหาผลที่สอดคล้องกันกับผลการทดลองสิ่งที่ทำได้ในโปรแกรมของตอนนี้ คือ การกำหนดค่าพารามิเตอร์ k , ρ และ c_p ของแท่งโลหะเหล็ก และกำหนดค่าความยาว Li และ La ที่ห่างจากตำแหน่งขอบเขตของแท่งโลหะที่จุ่มในน้ำแข็งและอากาศตามลำดับ โดยในกรณีนี้สามารถคำนวณค่า Li จากผลการทดลองได้เท่ากับ 0.0069 เมตร และ La ได้เท่ากับ 0.00001 เมตร และสามารถเปรียบเทียบผลของข้อมูลของแต่ละส่วนได้ดังต่อไปนี้

1. การเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งที่เวลาใดๆ

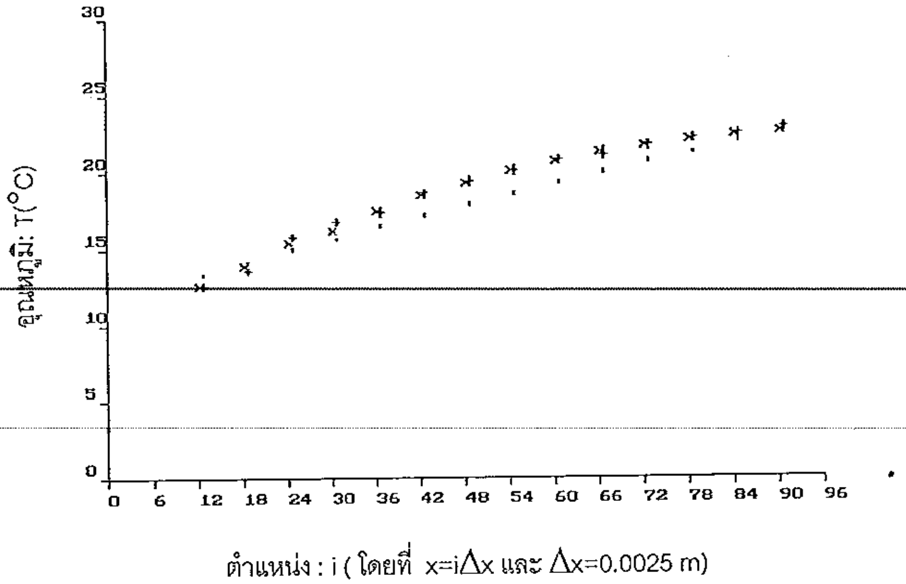
ค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งในที่นี้จะยกตัวอย่างการเปรียบเทียบค่าที่เวลา 2,8,32 และ120 นาที ตามลำดับ ดังแสดงในภาพประกอบ 57ถึง ภาพประกอบ 60 และใช้สัญลักษณ์ในการเปรียบเทียบเหมือนกับหัวข้อ 4.1.4 (1) ดังต่อไปนี้



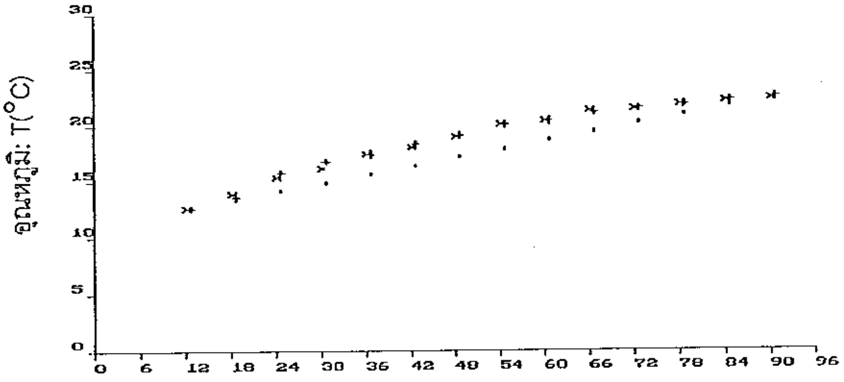
ภาพประกอบ 57 แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่ง ณ เวลา 2.0 นาที ของแท่งโลหะเหล็ก



ภาพประกอบ 58 แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่ง ณ เวลา 8.0 นาที ของแท่งโลหะเหล็ก



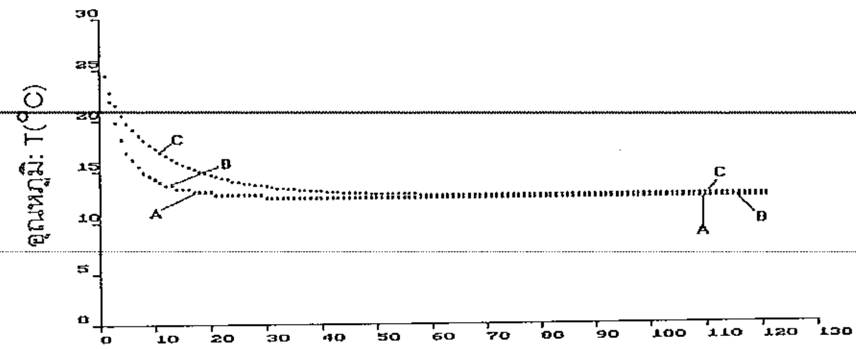
ภาพประกอบ 59 แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่ง ณ เวลา 32.0 นาที ของแท่งโลหะเหล็ก



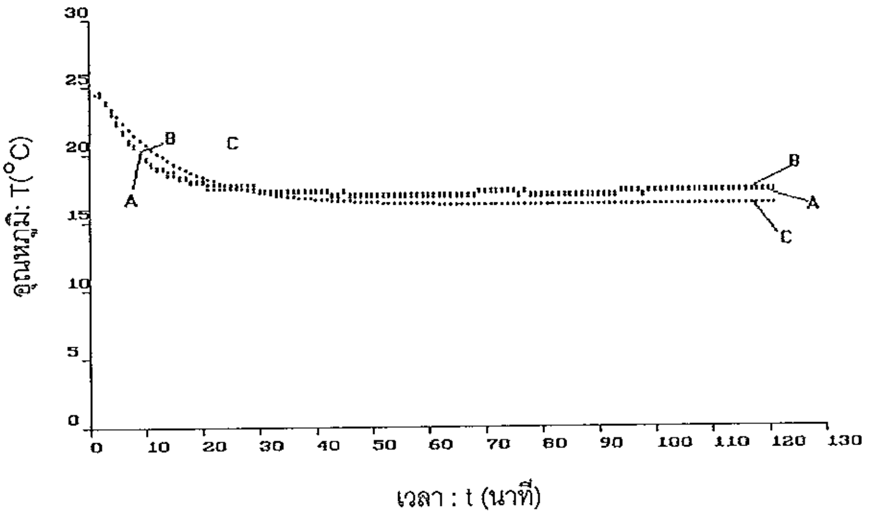
ภาพประกอบ 60 แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่ง ณ เวลา 120.0 นาที ของแท่งโลหะเหล็ก

2. การเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลาที่ตำแหน่งใดๆ

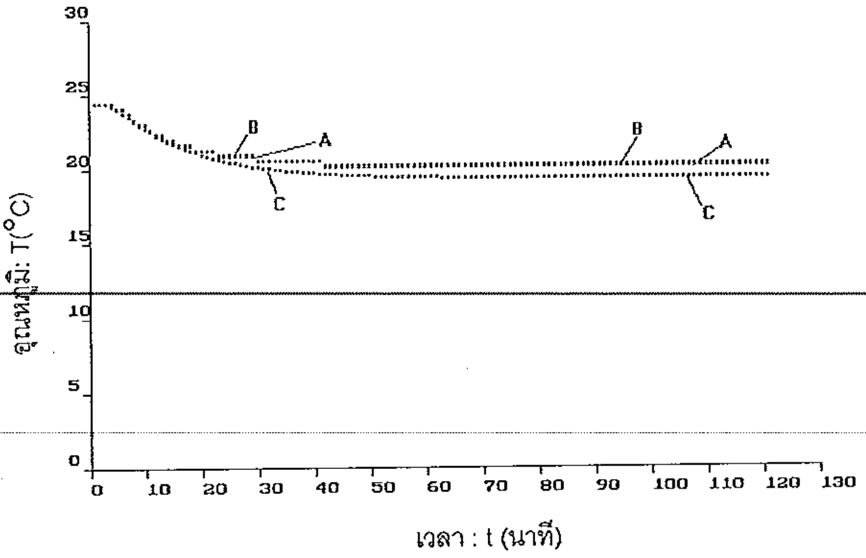
ค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับเวลาที่ตำแหน่งใดๆในแท่งเหล็ก สามารถพิจารณาและยกตัวอย่างการเปรียบเทียบที่ตำแหน่งตรงกับการวัดคือ ที่ i=12,36,60 และ84 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพประกอบ 61 ถึง ภาพประกอบ 64 และกำหนดสัญลักษณ์แทนข้อมูลเหมือนหัวข้อ 4.1.4(2)ดังต่อไปนี้



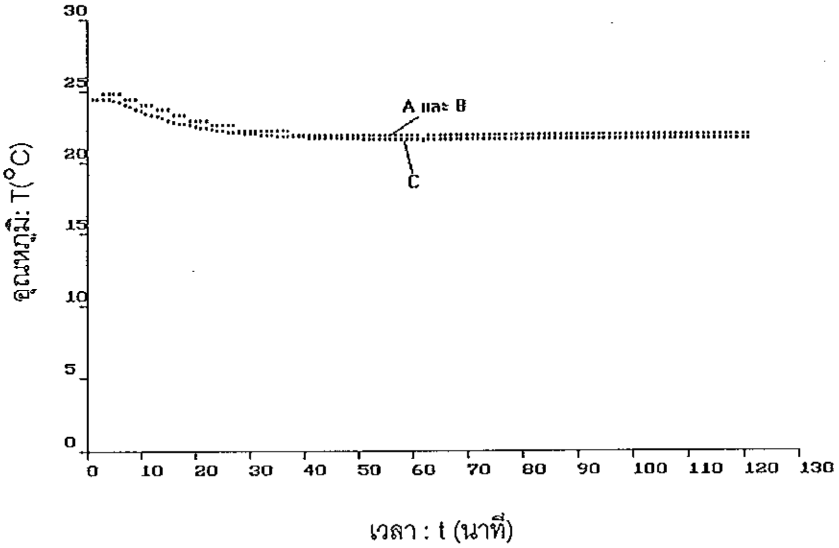
ภาพประกอบ 61 แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ขึ้นเวลา ณ ตำแหน่ง i=12 ของแท่งโลหะเหล็ก



ภาพประกอบ 62 แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ขึ้นเวลา ณ ตำแหน่ง i=36 ของแท่งโลหะเหล็ก



ภาพประกอบ 63 แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ขึ้นเวลา ณ ตำแหน่ง i=60 ของแท่งโลหะเหล็ก



ภาพประกอบ 64 แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ขึ้นเวลา ณ ตำแหน่ง i=84 ของแท่งโลหะเหล็ก

จากผลการทดลองวัดค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งและเวลาของแท่งโลหะอะลูมิเนียมและเหล็ก ปรากฏว่าลักษณะของค่าข้อมูลที่ได้รับมีลักษณะคล้ายกับผลการทดลองกับแท่งโลหะทองเหลือง โดยเมื่อพิจารณาค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งที่อยู่ใกล้กับน้ำแข็ง พบว่าจะมีค่าต่ำกว่าผลทางทฤษฎีเล็กน้อยและเมื่อพิจารณาค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งปลายของแท่งโลหะพบว่าจะมีค่าสูงกว่าผลทางทฤษฎีเล็กน้อย โดยอาศัยเหตุผลเดียวกับการอภิปรายผลการทดลองของแท่งโลหะทองเหลือง และจากการเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้รับของแท่งโลหะอลูมิเนียมและเหล็กกับผลทางทฤษฎี พบว่ามีแนวโน้มและค่าที่ใกล้เคียงกันเช่นเดียวกับผลการเปรียบเทียบในแท่งโลหะทองเหลือง

บทที่ 5

บทวิจารณ์และสรุป

จากการออกแบบและทดลองวัดค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งและเวลาของการนำความร้อนในสภาวะไม่คงที่ของแท่งโลหะในรูปแบบ 1 มิติ โดยใช้วิธีเชื่อมโยงชุดการทดลองของกานนำความร้อนเข้ากับระบบการวัดที่ใช้วงจรแบบแบ่งศักย์ไฟฟ้าสำหรับตัวเทอร์มิสเตอร์ในการทำหน้าที่เป็นตัวตรวจวัดอุณหภูมิที่ต่อเข้ากับตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลเบอร์ 0816 ขนาด 8 บิต ที่ใช้กับความต่างศักย์ไฟฟ้าขนาด 5.0 โวลต์ โดยมีระบบมัลติเพลกเซอร์ขนาด 16 ช่องสัญญาณเข้าอยู่ในตัว และเชื่อมโยงเข้ากับบอร์ด PC-SB31 ที่มีไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ 8031 เป็นตัวควบคุมพร้อมทั้งมีชิปแรมเบอร์ 6264 สำหรับทำหน้าที่เป็นหน่วยความจำภายนอกในการเก็บค่าบิตข้อมูลที่วัดได้ถึง 64 กิโลบิต และใช้การติดต่อสื่อสารระหว่าง 8031 กับไมโครคอมพิวเตอร์โดยผ่านทางพอร์ตสื่อสารแบบอนุกรม นอกจากนี้พบว่าการใช้ระบบการวัดและเก็บข้อมูลอุณหภูมิดังกล่าวโดยระบบคอมพิวเตอร์สามารถทำได้รวดเร็วและทุ่นแรงกว่าการใช้เทอร์โมมิเตอร์แบบปรอทวัด และให้ค่าความแม่นยำในการวัดถึง $\pm$ 0.4 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นค่าที่ยังไม่ละเอียดมากนักแต่ในงานวิจัยนี้ถือว่าสามารถทำงานได้ดีในระดับหนึ่ง

ในการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งและเวลาที่ได้จากการวัดกับผลที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลขด้วยวิธี Finite Difference พบว่าในการสร้างรูปแบบจำลองของการนำความร้อนในสภาวะไม่คงที่ของแท่งโลหะดังกล่าวในรูปแบบ 1 มิติ โดยใช้วิธี Finite Difference นอกจากจะกำหนดพารามิเตอร์ทางความร้อนของโลหะและน้ำแข็งกับอากาศที่ใช้เป็นเงื่อนไขขอบเขตที่สัมผัสกับโลหะแล้ว ยังต้องแบ่งความยาวของแท่งโลหะออกเป็นส่วนสั้นๆ dx ในที่นี้กำหนดค่า dx=0.0025 เมตร และแบ่งเวลาเป็นช่วงเวลาสั้นๆ dt สำหรับการคำนวณในแต่ละครั้งเป็น 0.02 วินาที นอกจากนี้ต้องกำหนดส่วนของความยาวของแท่งโลหะที่จุ่มลงในน้ำแข็งเป็นระยะ(Li)และส่วนของความยาวของแท่งโลหะที่อยู่ในอากาศเป็นระยะ(La) โดยระยะ Li และ La สามารถคำนวณได้จากผลการวัดค่าอุณหภูมิที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่แล้ว เช่น ที่เวลา 90 นาที สามารถคำนวณค่า Li ของโลหะอะลูมิเนียม ทองเหลือง และเหล็ก ได้เท่ากับ 0.0023,0.0046 และ 0.0069 เมตร ตามลำดับส่วนค่า La ของโลหะทั้งสามจะมีค่าใกล้เคียงกันโดยประมาณเท่ากับ 0.00001 เมตร และจากการพิจารณาผลการคำนวณเชิงตัวเลขพบว่าโลหะอะลูมิเนียม ทองเหลือง และเหล็กจะอยู่ในสภาวะไม่คงที่ในเวลาประมาณ 26 53 73 นาที ตามลำดับ ส่วนผลของการวัดพบว่าโลหะ

อะลูมิเนียม ทองเหลือง และเหล็ก จะอยู่ในสภาวะไม่คงที่ในเวลาประมาณ 26 36 48 นาที ตามลำดับ นั่นแสดงว่าตามผลการคำนวณโลหะอะลูมิเนียม ทองเหลือง และเหล็ก จะเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ ณ เวลาประมาณ 26 53 73 นาที ตามลำดับ และในผลการวัดโลหะอะลูมิเนียม ทองเหลือง และเหล็ก จะเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ ณ เวลาประมาณ 26 36 48 นาที ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนของโลหะอะลูมิเนียม ทองเหลือง และเหล็ก พบว่ามีค่าลดลงตามลำดับ และพบว่าสารที่มีค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อนสูง จะนำความร้อนได้ดีกว่าและอุณหภูมิเพิ่มสูงกว่า เมื่อดูดความร้อนเข้าไปในทางกลับกัน ถ้าทำให้สารดังกล่าวคายความร้อนออกมา มันจะคายความร้อนได้ดีกว่าและอุณหภูมิลดต่ำกว่า ทำให้อุณหภูมิของสารเข้าสู่สภาวะคงที่ได้เร็วกว่าเช่นกัน จากการเปรียบเทียบดังกล่าวปรากฏว่าผลที่ได้รับทั้งสองเป็นจริง โดยโลหะอะลูมิเนียมจะเข้าสู่สภาวะคงที่ก่อนทองเหลือง และเหล็ก ตามลำดับ และในการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ขึ้นกับตำแหน่งของโลหะอะลูมิเนียม ทองเหลือง และเหล็ก ที่ได้จากการวัดและการคำนวณเชิงตัวเลขตามแบบวิธี Finite difference ปรากฏว่าได้รับผลที่ใกล้เคียงกัน โดยผลจากการวัดมีค่าความแตกต่างไม่เกิน 15% จากผลทางการคำนวณดังกล่าว

ข้อเสนอแนะ

1. ในการใช้ระบบการวัดอุณหภูมิที่เชื่อมโยงกับคอมพิวเตอร์ ถ้าต้องการค่าที่ละเอียดขึ้นควรเลือกใช้ตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลขนาด 10 บิต

2. ในการศึกษาการนำความร้อนในรูปแบบ 1 มิติ ตามลักษณะนี้ สามารถนำไปประยุกต์ออกแบบผนังอาคาร หน้าต่างที่ใช้แผ่นกระจก โดยใช้วัสดุบางชนิดหรืออากาศคั่นตรงกลาง เพื่อช่วยลดสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ซึ่งวิธีนี้สามารถทำให้อุณหภูมิภายในห้องต่ำและคงที่ตลอดเวลา ซึ่งช่วยประหยัดค่าไฟฟ้าในเครื่องปรับอากาศได้

3. การศึกษาการนำความร้อนในแท่งโลหะที่มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก ควรพิจารณาผลที่ถูกต้องยิ่งขึ้นโดยใช้วิธีการพิจารณาในระบบ 2 มิติ

บรรณานุกรม

จิรศักดิ์ ชัยวิริยะกุล, พรชัย จักรธำรงค์ และ ศิวัฒน์ ศิวะบวร. 2536. การประยุกต์ใช้งานภาษาซี. กรุงเทพมหานคร : ซีเอ็ดยูเคชั่น.

Ayala, K.J.1992. The 8051 Microcontroller Architecture,Programming,and Application. Minnesota: West Publishing.

Dally,J.W.,Riley,W.F. and McConnell,K.G.1984.Instrumentation for Engineering Measurement.Singapore:John Wiley and Sons.

Harris,N.C.1963."Heat Transfer-Conductivity",In Experiment in Applied Physics: for College and Technical Institutes,pp121-123.New York:McGraw-Hill.

Meijer, G.C.M. and Herwaarden, A.W. 1994. "Thermal Sensors".In Appendix A Thermal Material Data,pp.286-292.London:IOP Publishing.

Ozisik,M.N.1980." Numerical Methods of Solution",In Heat Conduction.pp.471-491. New York:John Wiley and Sons

Parrott, J.E. and Stuckes, A.D. 1975. Thermal Conductivity of Solids. London:Pion.

Sears,F.W.1958." Transfer of Heat",In Mechanics Wave Motion and Heat.pp.521-526. Massachusetts:Addison- Wesley Publishing Company.

Worsnop,B.L. and Flint,H.T. 1969."Forbes's Method of Determining the Conductivity of a Metal Bar",In Advanced Practical Physics for Students,pp.223-226. 9th ed.rev.London:Methuen Educational.

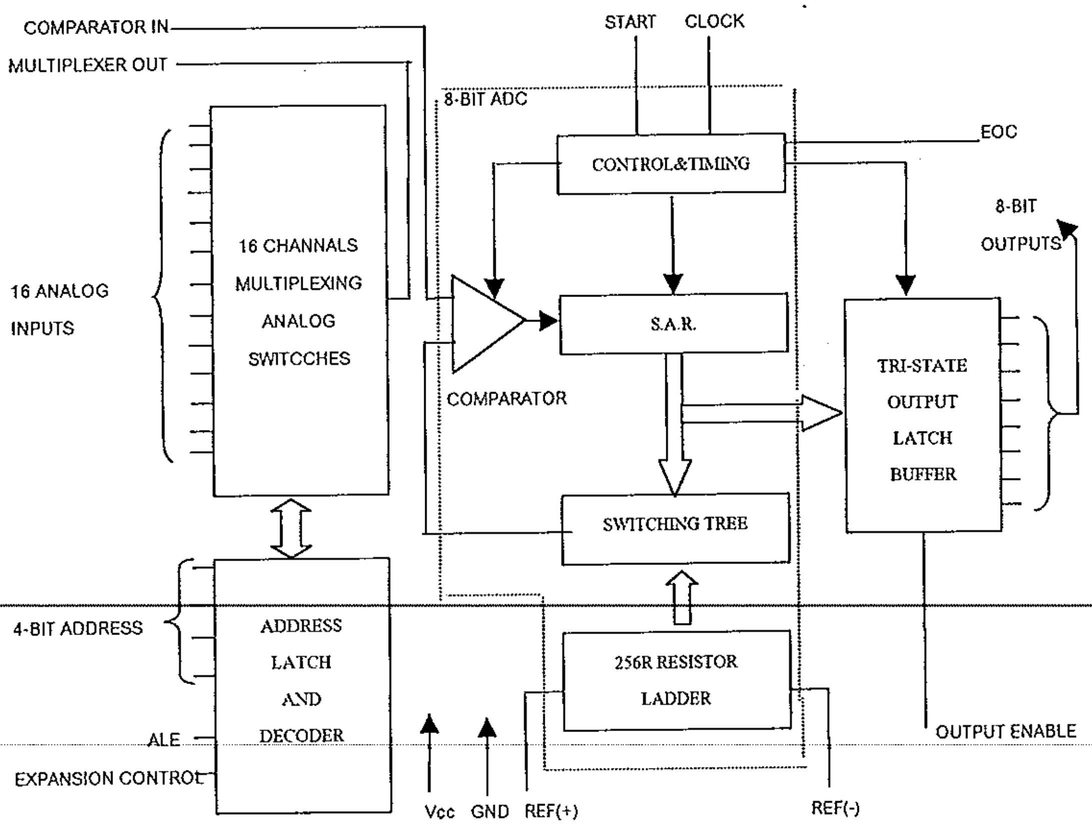
Worsnop,B.L. and Flint,H.T. 1969."The Determining of the Conductivity of a Bar of Metal by Angstrom's Method",In Advanced Practical Physics for Students,pp.226-235.9th ed.rev.London:Methuen Educational.

ภาคผนวก

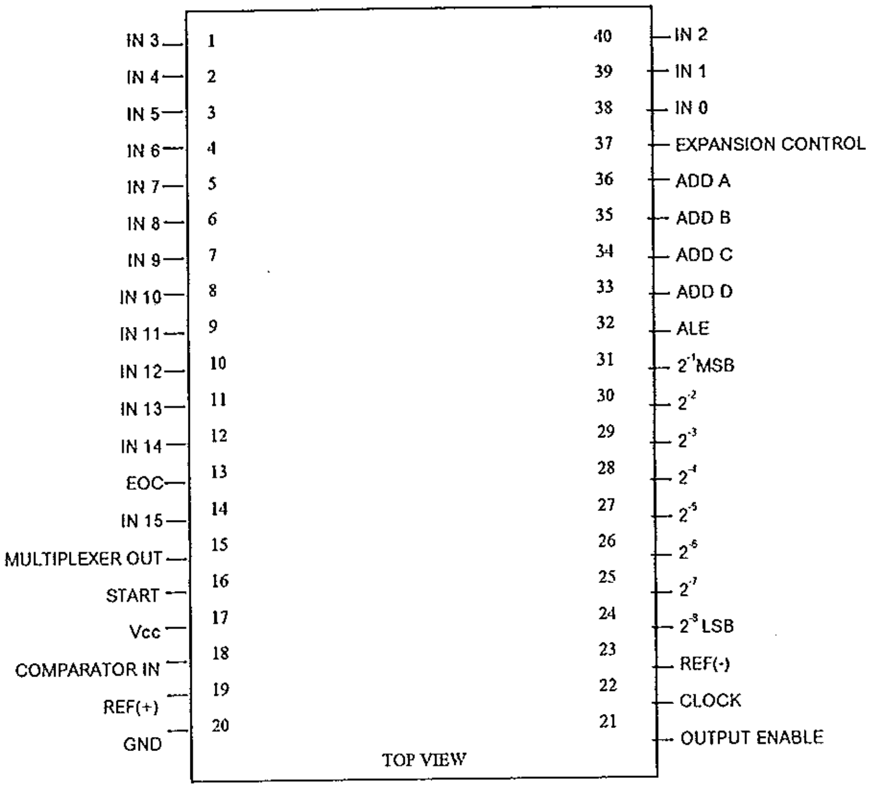
ภาคผนวก ก

ตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล เบอร์ 0816

ตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล(Analog to Digital Converter : ADC) เบอร์ 0816 เป็นไอซีแบบ Dual In Package ที่ใช้เทคโนโลยีแบบซีมอส (CMOS) ที่มีการแปลงสัญญาณอนาลอกไปเป็นสัญญาณแบบดิจิตอล ขนาด 8 บิต และมีระบบมัลติเพลกเซอร์แบบ 16 ช่องสัญญาณอินพุทของสัญญาณอนาลอก อยู่ภายในตัว ใช้กำลังไฟฟ้าต่ำสุด 15 mW และมีเวลาในการแปลงค่าสัญญาณ(Conversion Time) 100 ไมโครวินาที (µS) สำหรับรายละเอียดลักษณะโครงสร้างภายในแสดงดังภาพประกอบ 65 และขาสัญญาณต่างๆ แสดงดังภาพประกอบ 66



ภาพประกอบ 65 แสดงโครงสร้างภายในของ ADC 0816



ภาพประกอบ 66 ตำแหน่งขาต่าง ๆของ ADC 0816 แบบ DIP 40 ขา

รายละเอียดของขาสัญญาณ

IN0-IN15 เป็นขาสำหรับรับสัญญาณอินพุทที่เป็นสัญญาณอนาลอกที่ต้องการแปลงไปสัญญาณแบบดิจิตอล

ADD A-ADD D เป็นขาสำหรับรับสัญญาณอินพุทแบบบิทของสัญญาณแอดเดรสในการกำหนดหรือเลือกรับช่องสัญญาณ IN0-IN15

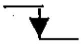
2^{-8}(LSB)- 2^{-1}(MSB) ตั้งแต่ขาที่ 24-31 เป็นขาสำหรับให้สัญญาณเอาท์พุทที่เป็นสัญญาณแบบบิทขนาด 8 บิท ตั้งแต่ค่า 00000000 –11111111 หรือตั้งแต่ค่า 0-255 ของค่าดิจิตอล ซึ่งให้ค่าออกมาจำนวนทั้งหมด 2^8 หรือ 256 ค่า

MULTIPLEXER OUT เป็นขาที่ 15 ให้สัญญาณเอาท์พุทของสัญญาณอนาลอกตั้งแต่ IN0 ถึง IN15 ที่ผ่านการเลือกและถูกกำหนดโดย ADD A-ADD D แล้ว

COMPARATOR IN เป็นขาที่18 สำหรับรับสัญญาณจากขา MULTIPLEXER OUT เพื่อส่งเข้าไปยังส่วนของการแปลงสัญญาณเป็นสัญญาณดิจิตอลแบบ 8 บิท

EXPANSION CONTROL เป็นขาที่ 37 สำหรับสัญญาณอินพุท โดยต้องมีสถานะทางลอจิกเป็น H(High) หรือ 1 เสมอ สำหรับทำงานร่วมกับสัญญาณแอดเดรสในการกำหนดหรือเลือกช่องสัญญาณอนาลอกตั้งแต่ IN0 ถึง IN15

ALE (ADDRESS LATCH ENABLE) เป็นขาที่ 32 ทำหน้าที่ส่งสัญญาณควบคุมการLatch ค่าแอดเดรสในการเลือกช่องสัญญาณIN0 ถึง IN15

START CONVERSION เป็นขาที่16 ทำหน้าที่ในการส่งสัญญาณเริ่มต้นในการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล สำหรับ ADC0816 ต้องให้สัญญาณขอบขาขึ้น (The rising edge pulse) ก่อนแล้วเปลี่ยนเป็นสัญญาณขอบขาลง (The falling edge pulse)  จำนวน 1 ลูกก่อนจึงทำการอ่านข้อมูลเข้ามาได้ หรืออาจกล่าวได้ว่าต้องให้ค่าลอจิก 1 แก่ขาที่ 16 ก่อนแล้วเปลี่ยนเป็นค่าลอจิก 0 ในการ Toggle สัญญาณ เพื่อทำการอ่านข้อมูลเข้ามา

END OF CONVERSION หรือ EOC เป็นขาที่ 13 ทำหน้าที่กำหนดเวลาที่สิ้นสุดในการแปลงสัญญาณ

OUTPUT ENABLE เป็นขาที่ 21 ทำหน้าที่กำหนดหรือยินยอมให้มีข้อมูลแบบ 8-BIT OUTPUTS ออกมาทางขาที่ 24-31 เมื่อสถานะทางลอจิกเป็น 1 เท่านั้น

REF(+) และ REF(-) เป็นขาที่ 19 และ 23 ทำหน้าที่รับสัญญาณแรงดันอ้างอิง(+) และแรงดันอ้างอิง(-) ตามลำดับ มีค่าในช่วง 0-5 โวลต์

CLOCK เป็นขาที่ 22 สำหรับสัญญาณอินพุทในการกำหนดจังหวะการทำงานของ ADC 0816

GND เป็นขาที่ 20 ทำหน้าที่เป็นกราวน์ของ ADC 0816

Vcc เป็นขาที่ 17 ทำหน้าที่ต่อ +5 Vdc เพื่อจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับตัว ADC

สำหรับรายละเอียดของฟังก์ชันในการเลือกช่องสัญญาณอินพุทอนาลอกตั้งแต่ IN0 ถึง IN15 สามารถถอดรหัสแอดเดรสของขา ADD D – ADD A และ Expansion Control ได้ดังตาราง 4

ตาราง 4 แสดงรหัสแอดเดรสในการเลือกช่องสัญญาณอนาลอก IN0 ถึง IN15

Selected Analog Channel	Address Line				Expansion Control
	D	C	B	A	
IN0	L	L	L	L	H
IN1	L	L	L	H	H
IN2	L	L	H	L	H
IN3	L	L	H	H	H
IN4	L	H	L	L	H
IN5	L	H	L	H	H
IN6	L	H	H	L	H
IN7	L	H	H	H	H
IN8	H	L	L	L	H
IN9	H	L	L	H	H
IN10	H	L	H	L	H
IN11	H	L	H	H	H
IN12	H	H	L	L	H
IN13	H	H	L	H	H
IN14	H	H	H	L	H
IN15	H	H	H	H	H
All Channels OFF	X	X	X	X	L

X = don' t care

(ที่มา: National Semiconductor Corporation, 1995)

ภาคผนวก ข

บอร์ดพัฒนา PC-SB31 (SINGLE BOARD 31 ON PC)

1. ส่วนประกอบของบอร์ดพัฒนา PC-SB31

PC-SB31 ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้ในงานควบคุมซึ่งตรงกับหน้าที่หลักของซีพียูในตระกูล MCS-51 คือเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์โดยโครงสร้างทางกายภาพของบอร์ดประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่สำคัญดังนี้

1.1 หน่วยประมวลผลกลางหรือซีพียู เบอร์ 8031 หรือเลือกใช้ 8032 ,8052 และ 8751 ทั้งนี้ขึ้นกับลักษณะการประยุกต์ใช้งาน

1.2 หน่วยความจำ ซึ่งผู้ใช้สามารถเลือกได้อย่างอิสระตลอด 128 กิโลไบต์(KB) โดยการเลือกเซทจัมเปอร์(Jumper) ให้ถูกต้อง

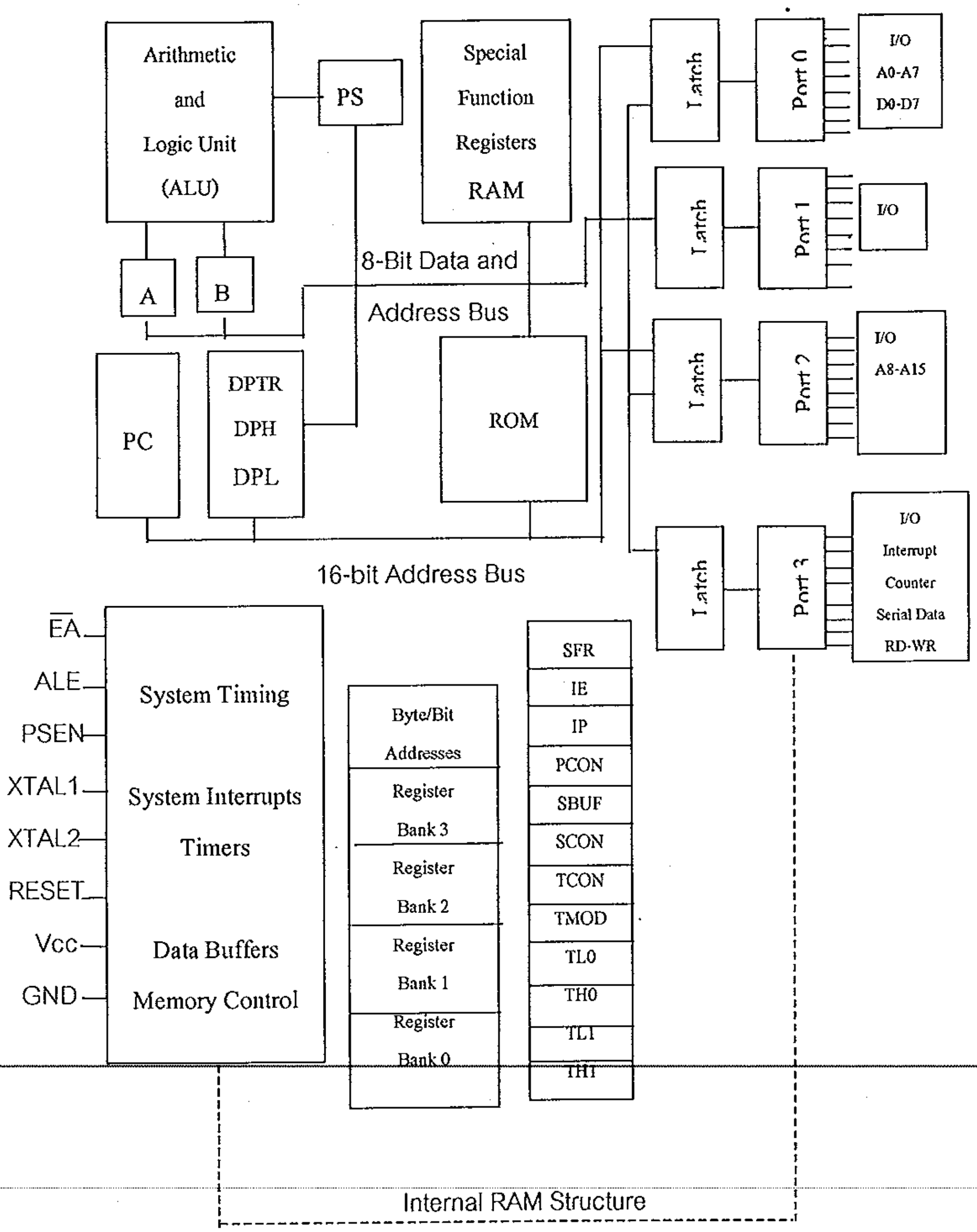
1.3 พอร์ต I/O ของชิปสนับสนุน 8255 (Programable Peripheral Interface:PPI) 1 ตัว จำนวน 3 พอร์ต และ PORT1 ของซีพียูอีก 1 พอร์ต

1.4 พอร์ตสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรม ตามมาตรฐานRS-232 จำนวน 1 ช่องสัญญาณ ใช้ติดต่อกับคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล โดยผ่านทาง COM1 หรือ COM2

1.5 Power Supply Jack ขนาด 10 Vdc และ (Regulate) 7805 On Board ขนาด 5 Vdc

2. โครงสร้างและการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ 8031

ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ 8031 ชนิด DIP 40 ขามีส่วนประกอบและโครงสร้างภายในดังภาพประกอบ 67 และในการทำงานจำเป็นต้องใช้กลุ่มคำสั่งการเคลื่อนย้ายข้อมูลที่เกี่ยวกับ Instruction Addressing Mode หรือการเคลื่อนย้ายข้อมูลระหว่างแอคคิวมูเลเตอร์ (Accumulator) กับ รีจีสเตอร์ หน่วยความจำข้อมูลภายใน หน่วยความจำข้อมูลภายนอก และหน่วยความจำสำหรับเก็บโปรแกรมภายนอก โดยแบ่งออกเป็น 2 ชุดคำสั่ง คือ ชุดคำสั่งเคลื่อนย้ายข้อมูลในหน่วยความจำข้อมูลภายใน กับชุดคำสั่งเคลื่อนย้ายข้อมูลในหน่วยความจำข้อมูลภายนอกและหน่วยความจำโปรแกรมภายนอก โดยพิจารณาได้ดังภาพประกอบ 68



ภาพประกอบ 67 แสดงองค์ประกอบภายในของ MCS-51

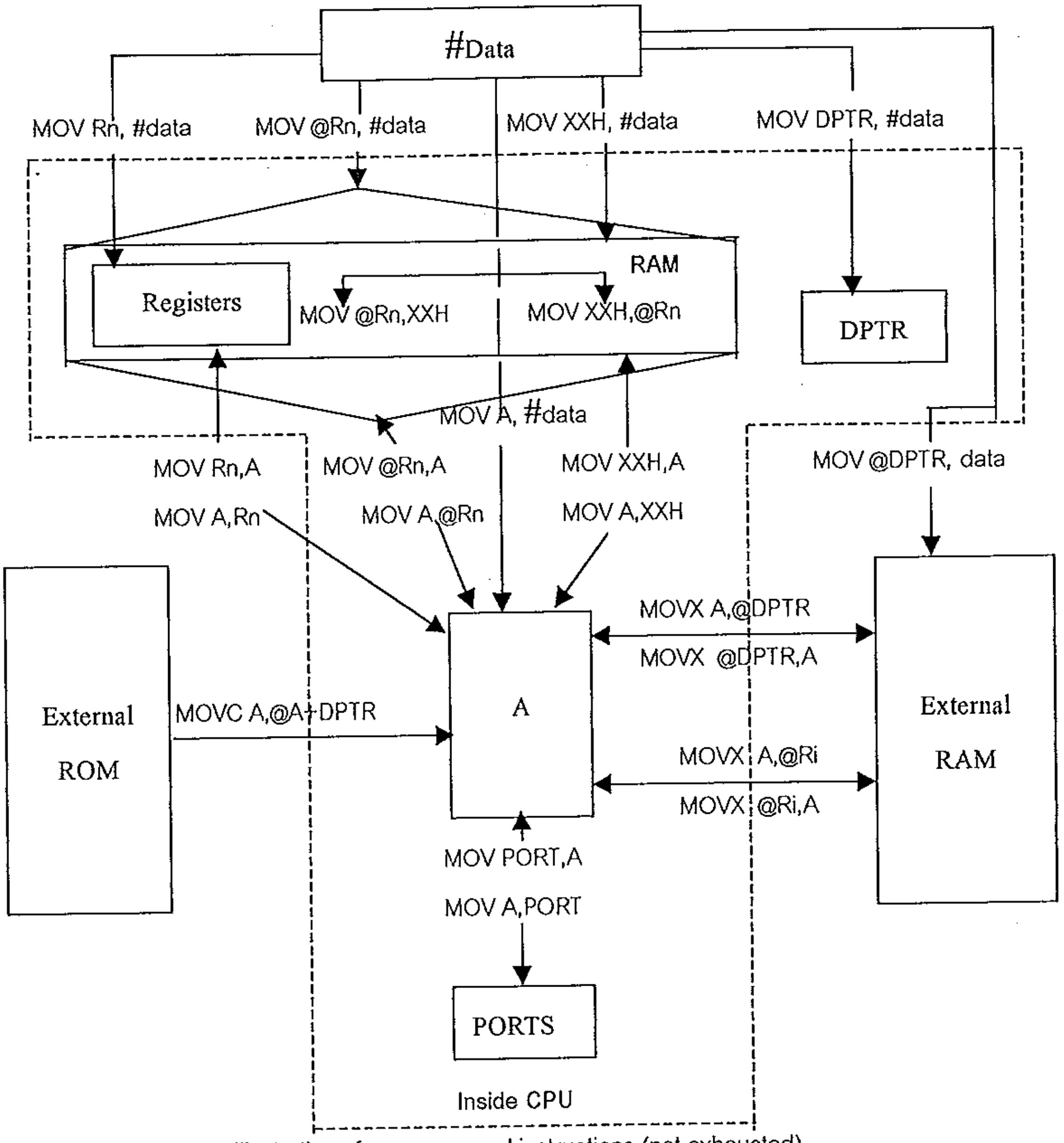


Illustration of common used instructions (not exhausted)

หมายเหตุ 1.เครื่องหมาย @ หมายถึง เก็บข้อมูลไว้ภายในแอดเดรส(Address)นั้นๆ

2.DPTR คือ Data Pointer Register ขนาด 16 บิท ก่อนที่จะใช้ DPTR นั้นจะต้องกำหนดค่าเริ่มต้น โดยใช้คำสั่ง MOV DPTR,#data ซึ่ง #data คือ ตำแหน่งที่ ต้องการใช้ Pointer ชี้ไป

ภาพประกอบ 68 แสดงแผนภาพการใช้คำสั่งของ MCS-51

2. คุณลักษณะพิเศษของ PC-SB31 มีดังนี้

2.1 หน่วยความจำสามารถเลือกได้ทั้งขนาด ตำแหน่งและลักษณะการทำงานแบบ DATA MEMORY, CODE MEMORY, CODE&DATA MEMORY (ดูในการติดตั้งหน่วยความจำ)

2.2 สามารถพัฒนาโปรแกรมได้ทั้งภาษาแอสเซมบลี้(ร่วมกับ SB31-DEBUGGER) หรือภาษาเบสิก(เพื่อใช้ 8052 AH-BASIC) หรือ ET-8051 EM หรือใช้ ET EPROM EMULATOR ก็ได้ (ในวิทยานิพนธ์เลือกใช้ ET EPROM EMULATOR)

2.3 ต่อกับ LCD ได้ทันที โดยไม่ต้องใช้ I/O พอร์ท

2.4 มี I/O พอร์ท ขนาด 8 บิท ถึง 4 พอร์ท

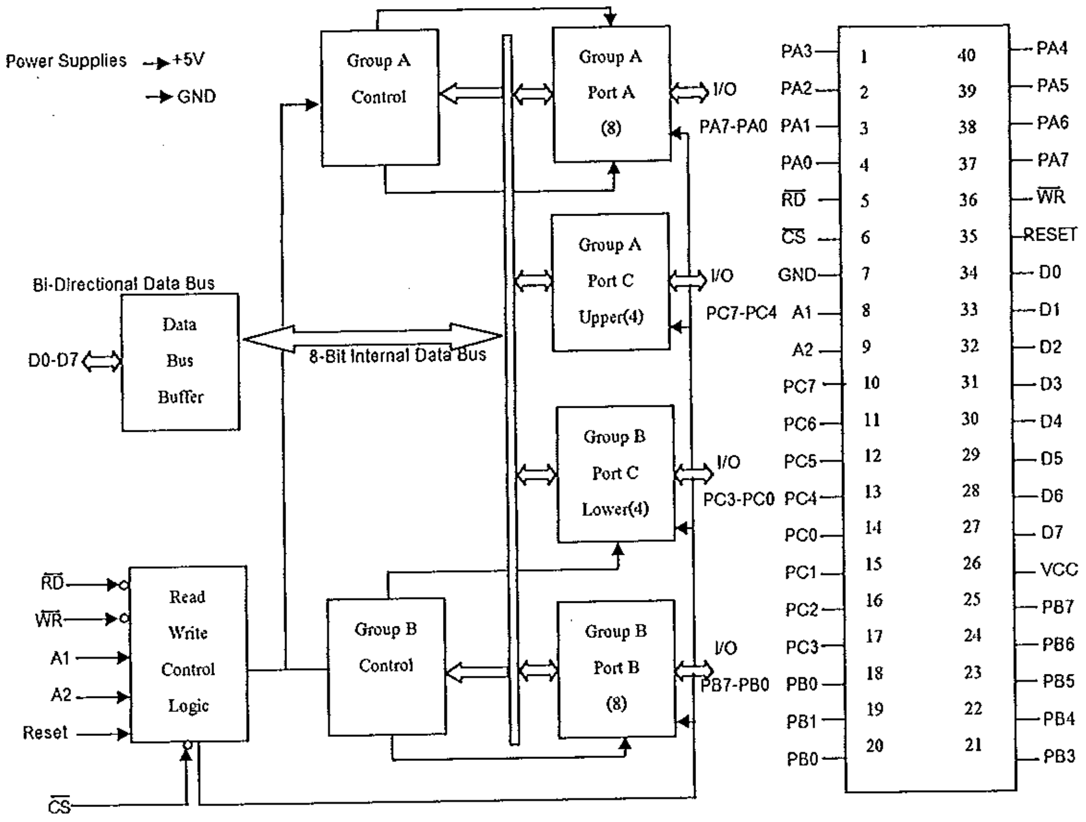
3. การติดตั้งหน่วยความจำให้กับ PC-SB31

เนื่องจาก PC-SB31 ถูกสร้างมาให้เป็นอิสระในการเลือกใช้หน่วยความจำได้หลายขนาดทั้ง EPROM และ RAM รวมทั้งตำแหน่งแอดเดรสของหน่วยความจำผู้ใช้สามารถกำหนดได้ตามต้องการซึ่งทั้งหมดนี้ขึ้นอยู่กับการใส่ตำแหน่งของจัมเปอร์(JUMPER)ต่างๆให้ถูกต้องโดยวิธีกำหนด U3 และ U4 ในการใช้งานที่มีการควบคุมด้วยการติดตั้งตัวจัมเปอร์ ต่างๆที่เกี่ยวข้อง โดยมีรายละเอียดดังนี้

กรณี U3	JP3	เลือกเบอร์ของชิปหน่วยความจำที่ใส่อยู่บน U3 (เช่นเบอร์ 2764,27256,27512,6264,62556)
	JP4	สำหรับเลือกว่าจะให้หน่วยความจำที่ U3 เป็น DATA MEMORY หรือ CODE MEMORYหรือเป็นทั้งCODEและDATA MEMORY
	JP7	เลือกตำแหน่งเริ่มต้นและขนาดของหน่วยความจำ U3
กรณี U4	JP5	เลือกเบอร์ของชิปหน่วยความจำที่ใส่อยู่บน U4 (เช่นเบอร์ 27256 ,6116,6264,62556) โดยในงานนี้เลือกใช้ เบอร์ 6264
	JP6	สำหรับเลือกลักษณะการทำงานของ U4 ให้เป็น DATA MEMORY หรือ CODE MEMORYหรือเป็นทั้งCODEและDATA MEMORY
	JP8	เลือกตำแหน่งเริ่มต้นและขนาดของหน่วยความจำ U4
	JP9	เลือกว่าจะอนุญาตให้มีการใช้ I/O พอร์ต(8255) ภายนอกอีกหรือไม่ ถ้าไม่มีพอร์ตภายนอก U4 จะมีขนาดสูงสุดได้ถึง 32 KB

4. การใช้งาน 8255 บนบอร์ด CP-SB31

ชิปสนับสนุน 8255 (Programable Peripheral Interface : PPI) เป็นไอซี แบบ DIP 40 ขา ที่สามารถทำงานเป็นอินพุทหรือเอาท์พุทข้อมูล รายละเอียดโครงสร้างแสดงดังภาพประกอบ 69



ภาพประกอบ 69 แสดงบล็อกไดอะแกรมและการจัดเรียงขาสัญญาณของ 8255(PPI)

สำหรับบนบอร์ด PC-SB31 มี 8255 อยู่ 1 ตัว ซึ่งถูกออกแบบขึ้นมาสำหรับใช้ขยายพอร์ตของซีพียู 8031 โดยใช้วิธี "I/O Map Memory" คือการให้ ซีพียู มองหน่วยความจำตำแหน่งหนึ่งเป็นพอร์ตโดยในบอร์ดนี้กำหนดแอดเดรสของหน่วยความจำตำแหน่ง E000H จากไบต์สูง (A8 ถึง A15) เป็นตำแหน่งที่ซีพียูมองหรือใช้ติดต่อกับพอร์ตต่างๆของ 8255 ซึ่งถูกถอดรหัส(Decode) ด้วยการกำหนด

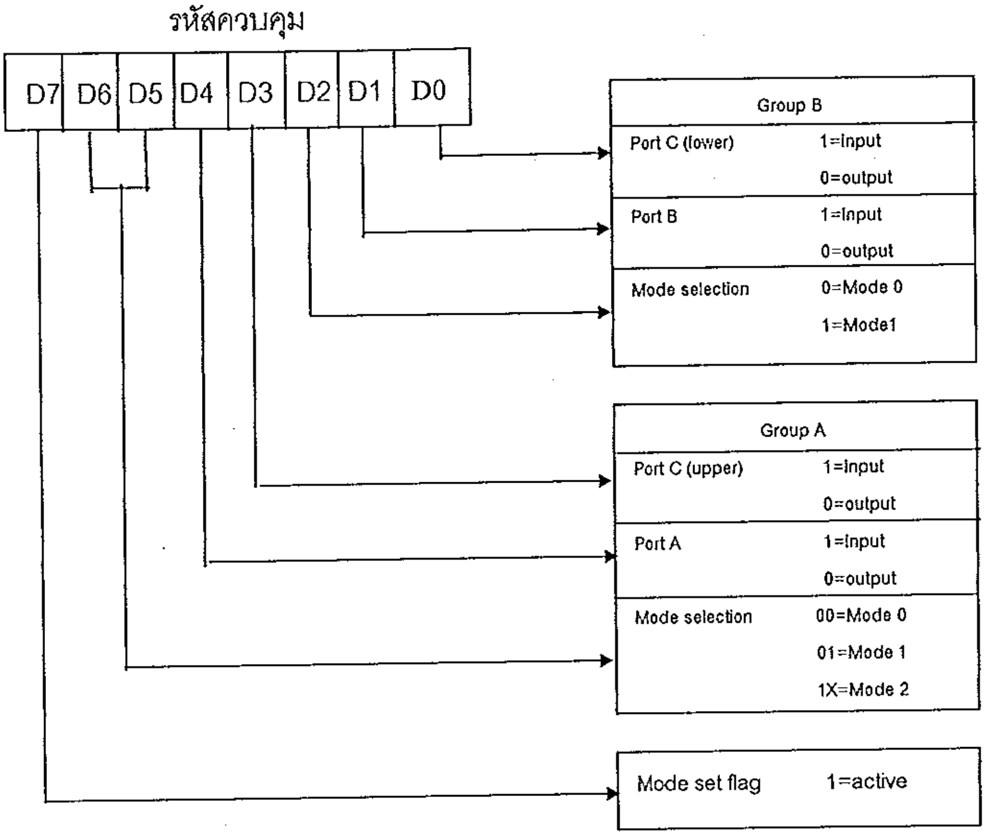
ค่าแอดเดรสไบต์ต่ำ (A5 ถึง A7) ด้วยสัญญาณลอจิก 1 ทั้งหมดผ่านตัวดีโค้ดเบอร์ 74LS138 (ที่ U6) เพื่อให้ได้เอาท์พุทที่ขา Y7ออกมาเท่ากับ 1 เท่านั้นสำหรับต่อเข้ากับขา CS ของ 8255 เพื่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถอ่านหรือเขียนข้อมูลกับ 8255 ได้ และใช้แอดเดรส A0 และ A1 เป็นตัวเลือกพอร์ตที่ใช้เป็นอินพุทหรือเอาท์พุทบนตัว 8255 ได้ดังนี้

A1	A0	
0	0	เลือก Port A
0	1	เลือก Port B
1	0	เลือก Port C
1	1	เลือก Control Port

ดังนั้นตำแหน่งของพอร์ตต่างๆ ของ 8255 จะถูกถอดรหัสแอดเดรสขนาด 16 บิท หรือ 2 ไบต์ไว้ดังนี้

Port A	=	E0E0H
Port B	=	E0E1H
Port C	=	E0E2H
Control Port	=	E0E0H

การเลือกพอร์ตของ 8255 ที่มีอยู่ 3 พอร์ต คือ พอร์ตA (PA0-PA4) พอร์ต B (PB0-PB7) และพอร์ต C ที่สามารถแบ่งได้เป็น พอร์ต C ล่าง (PC0-PC3) และ พอร์ต C บน (PC4-PC7) สำหรับใช้งานเป็นพอร์ตอินพุทและพอร์ตเอาต์พุท ผู้ใช้สามารถจะกำหนดให้ 8255 ทำงานในโหมดที่แตกต่างกันได้ถึง 3 โหมด(Mode) ซึ่งขึ้นอยู่กับวิธีการกำหนดในรายละเอียดและความหมายของแต่ละบิทของรีจีสเตอร์ควบคุม (ดังภาพประกอบ 70)



ภาพประกอบ 70 แสดงบิทต่างๆ ของรหัสควบคุมของ 8255(PPI)

ตัวอย่างของคำสั่งควบคุมที่สั่งให้ 8255 ทำงานในโหมด 0 ที่เลือกใช้ในงานวิทยานิพนธ์คือ กำหนดให้พอร์ต A พอร์ต C 4 บิทบน เป็นพอร์ตอินพุท ส่วน พอร์ต B และพอร์ต C 4 บิทล่าง เป็นพอร์ตเอาท์พุท โดยเขียนคำสั่งควบคุมได้ดังนี้

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	
1	0	0	1	1	0	0	0	= 98h

ภาคผนวก ค

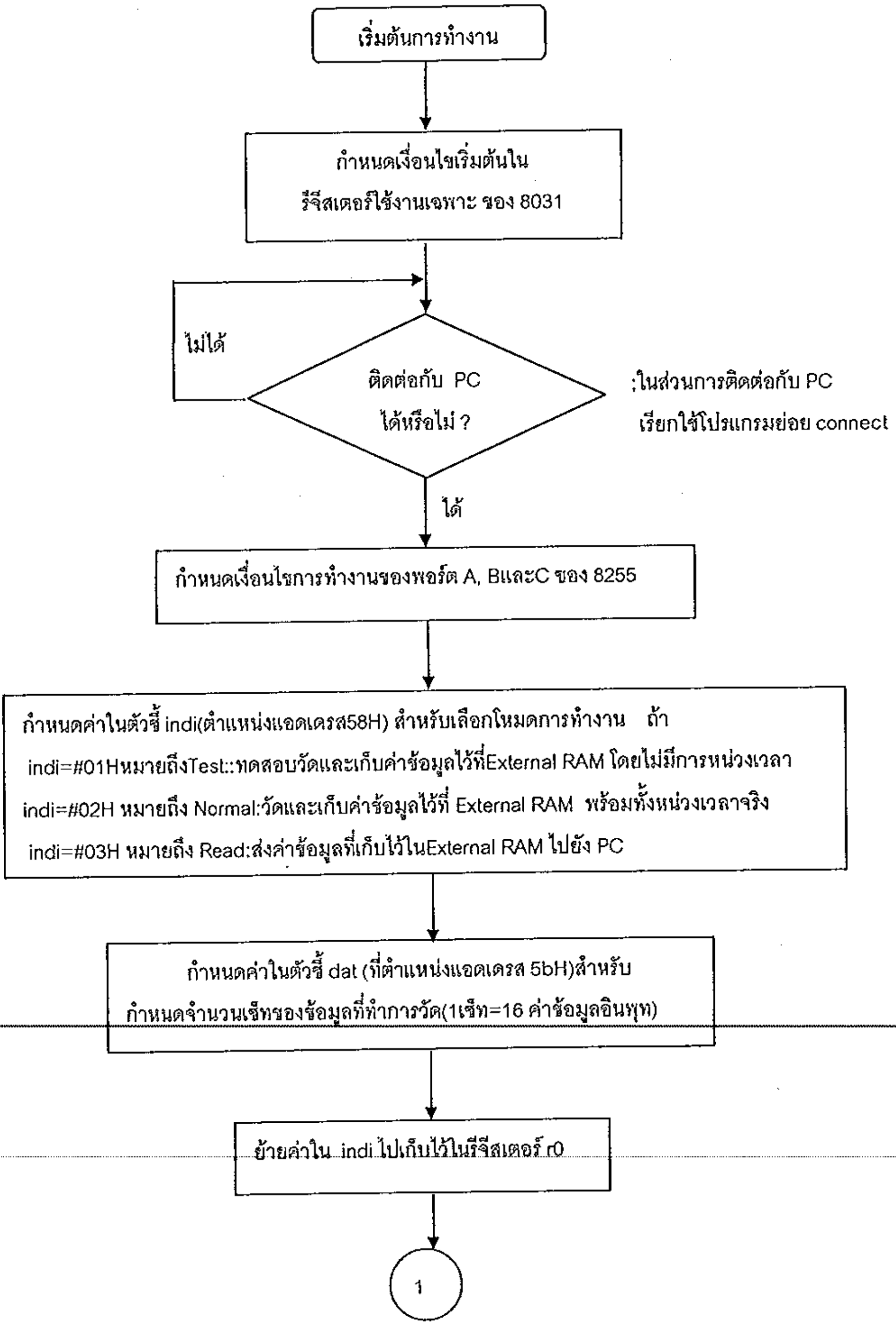
การเขียนแผนภูมิสายงานโปรแกรม

ในการเขียนโปรแกรมเพื่อใช้งานในระบบการวัดและจัดเก็บข้อมูลจำเป็นต้องมีการเขียนแผนภูมิสายงานโปรแกรมโดยพิจารณาได้ดังต่อไปนี้

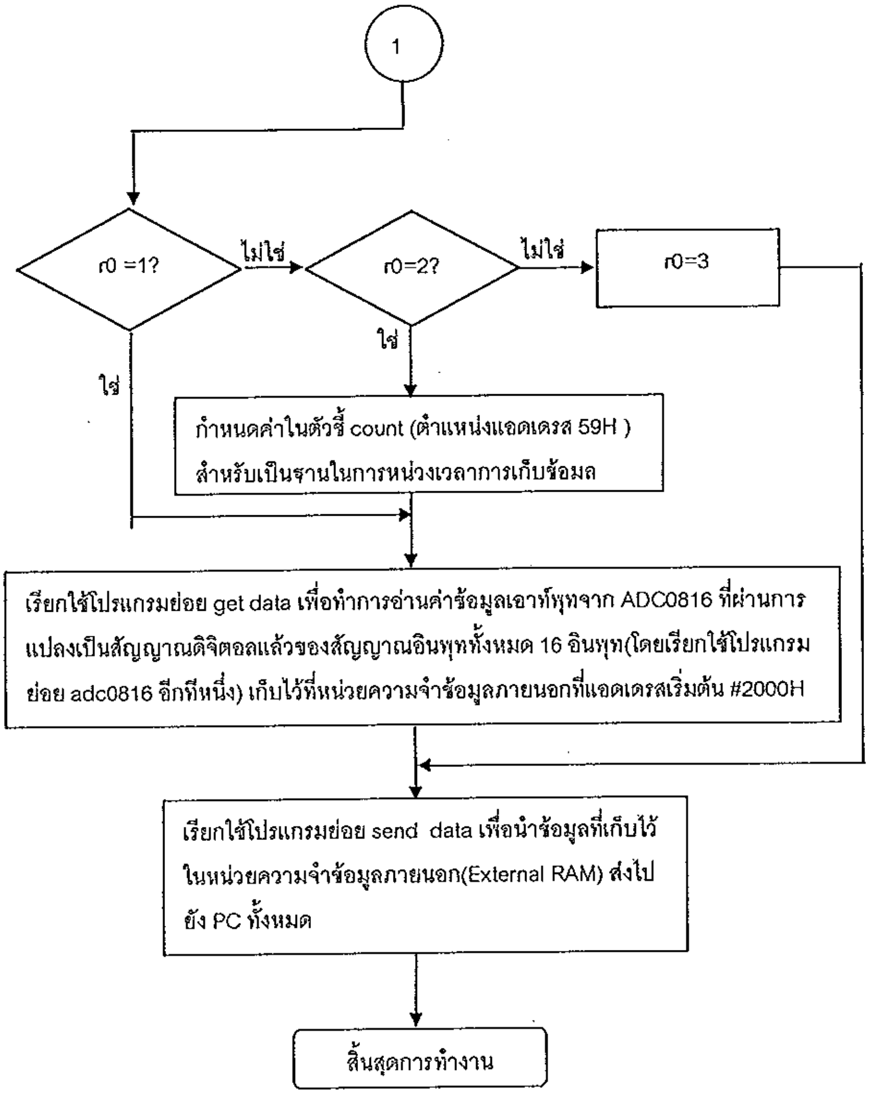
1. แผนภูมิสายงานโปรแกรมควบคุมการทำงานไมโครคอนโทรลเลอร์ 8031

โดยทั่วๆไปในการเขียนสายงานโปรแกรมเพื่อควบคุมการทำงานของระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 สามารถจัดโครงสร้างของสายงานโปรแกรมออกเป็นสองส่วนคือ สายงานโปรแกรมควบคุมหลัก(Main Program) และสายงานโปรแกรมบริการอินเทอร์รัพท์ (Interrupt Program) โดยขั้นตอนในการทำงานของระบบไมโครคอนโทรลเลอร์MCS-51 นั้นหลังจากที่ระบบถูกรีเซ็ท(Reset) ด้วยลอจิก 1 ที่ขาหมายเลข 9(RESET) ไมโครคอนโทรลเลอร์จะเริ่มอ่านคำสั่งควบคุมการทำงานโดยที่สถานะของตัวชี้ตำแหน่งคำสั่ง(PROGRAM COUNTER) จะชี้ไปยังตำแหน่งแอดเดรสหมายเลข 0000H และในกรณีที่ระบบควบคุม ต้องการใช้สายงานโปรแกรมบริการอินเทอร์รัพท์ด้วย โครงสร้างของไมโครคอนโทรลเลอร์MCS-51 ใช้หลักการให้บริการอินเตอร์รัพท์แบบเวกเตอร์ คือ เมื่อเกิดการอินเทอร์รัพท์จากแหล่งกำเนิดใดๆจะมีผลทำให้ตัวชี้ตำแหน่งคำสั่งชี้ไปยังแอดเดรสที่เฉพาะเจาะจงต่อแหล่งกำเนิดนั้นๆ เช่น เมื่อมีแหล่งกำเนิดอินเทอร์รัพท์แบบอนุกรม(Serial Interrupt) ตัวชี้ตำแหน่งคำสั่งจะชี้ไปยังตำแหน่งแอดเดรสหมายเลข 0023H เป็นต้น สำหรับในงานวิทยานิพนธ์นี้มีการเขียนโปรแกรมทั้ง 2 ลักษณะดังกล่าว โดยเฉพาะเจาะจงที่สายงานโปรแกรมควบคุมหลัก(ดูภาพประกอบ 71) และสายงานโปรแกรมบริการอินเทอร์รัพท์แบบอนุกรม (ดูภาพประกอบ 78) ซึ่งเขียนแผนภูมิสายงานได้ดังนี้

1.1 แผนภูมิสายงานโปรแกรมหลักที่ใช้งาน



ภาพประกอบ 71 แสดงแผนภูมิสายงานโปรแกรมหลักของ 8031ที่ใช้งาน(มีต่อ)

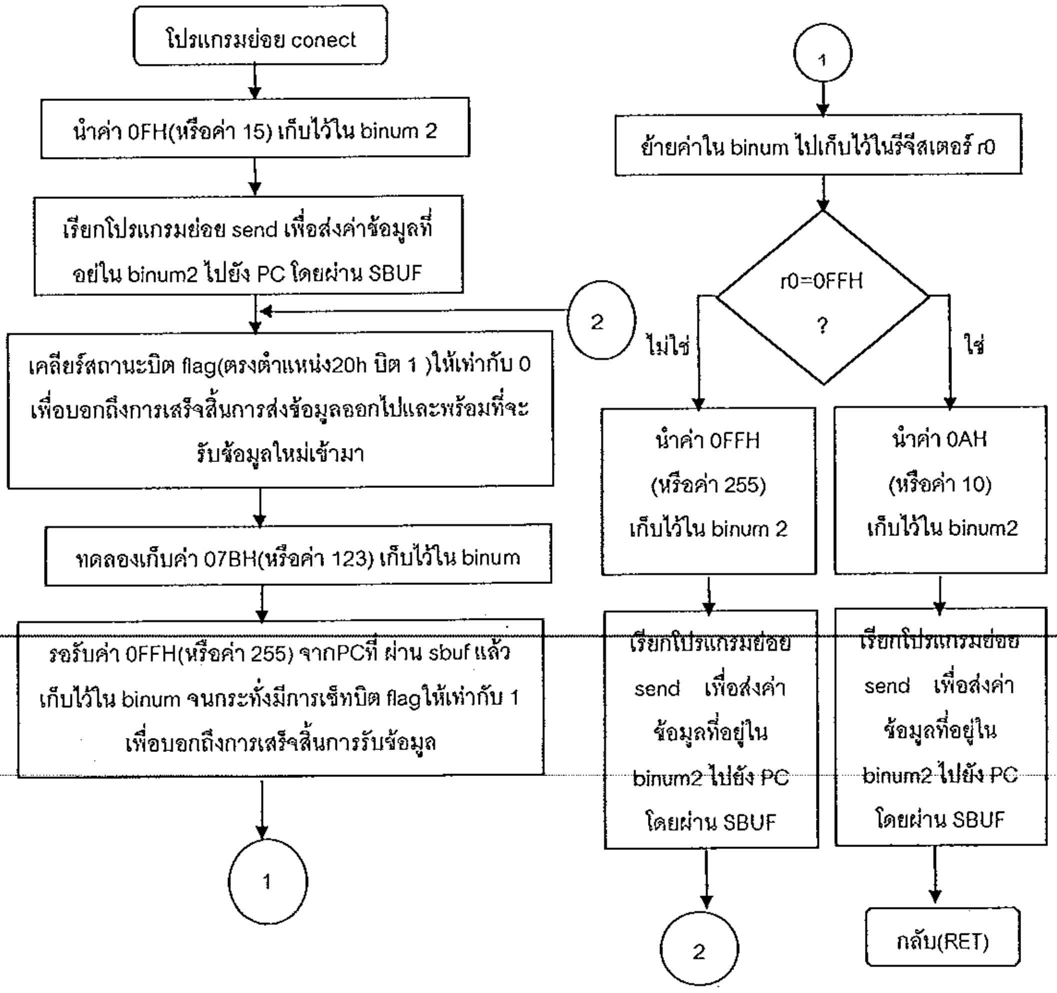


ภาพประกอบ 71 แสดงแผนภูมิสายงานโปรแกรมหลักของ 8031ที่ใช้งาน

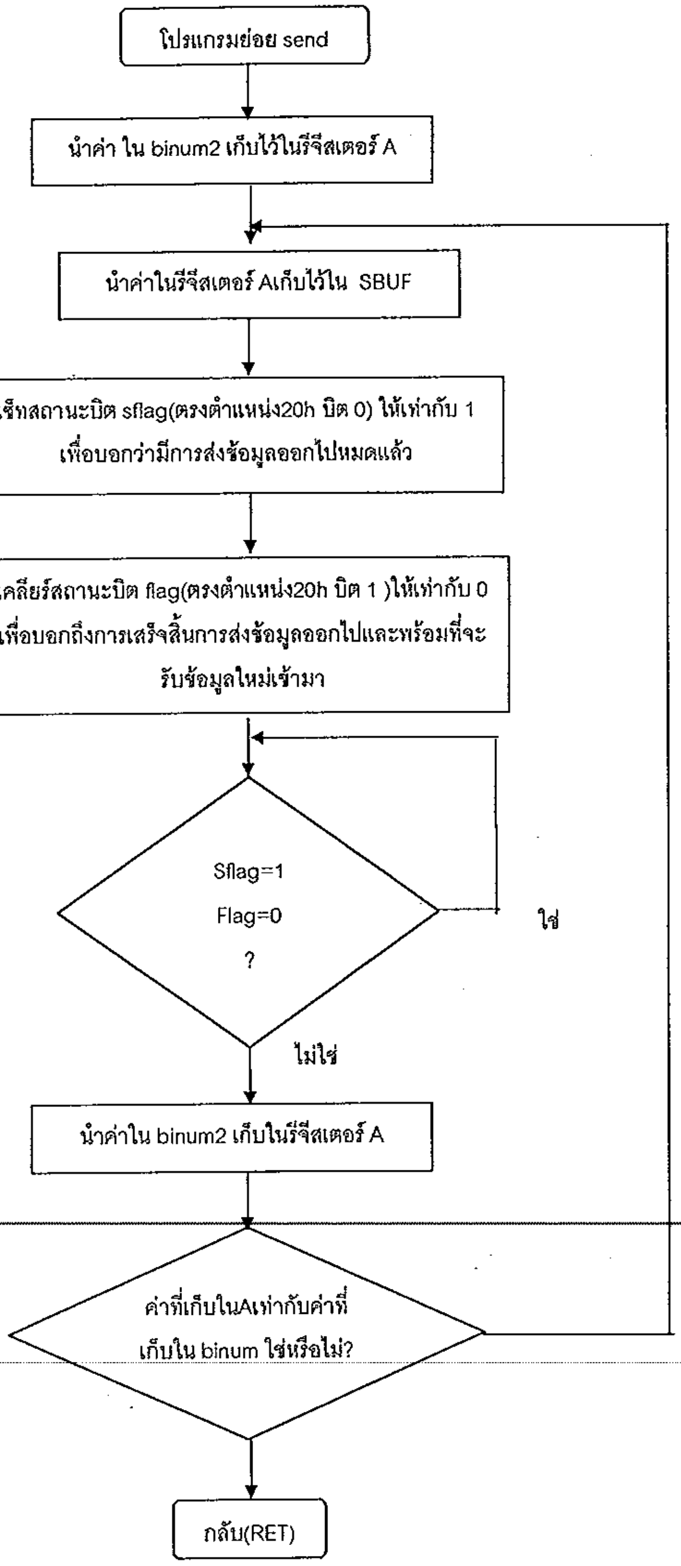
จากแผนภูมิสายงานโปรแกรมหลักจะเห็นได้ว่าจะมีบางขั้นตอนในแผนภูมิที่มีความจำเป็นต้องเรียกใช้โปรแกรมย่อยทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการเขียนโปรแกรมและให้โปรแกรมทำงานตามขั้นตอนที่ผู้ใช้ได้กำหนดเอาไว้นั่นเอง โดยในส่วนของโปรแกรมย่อยต่างๆ สามารถพิจารณารายละเอียดขั้นตอนการทำงานตามแผนภูมิสายงานได้ดังต่อไปนี้

1.1.1 แผนภูมิสายงานโปรแกรมย่อย connect และโปรแกรมย่อย send

สำหรับโปรแกรมย่อย connect นี้ใช้ในการติดต่อกับคอมพิวเตอร์หรือPCโดยอาศัยโปรแกรมย่อย send ตัวชี้ binum และตัวชี้ binum2 ที่กำหนดขึ้นเองตรงกับตำแหน่งแอดเดรส 50H และ 57H ตามลำดับ และยังต้องอาศัยการทำงานของโปรแกรมบริการอินเทอร์รัพท์แบบอนุกรม(ดูรายละเอียดในหัวข้อ1.2)อีกด้วย โดยในการรับส่งข้อมูลกับ PC จะต้องผ่านข้อมูลไปทางรีจีสเตอร์พิเศษที่ชื่อว่าSBUF ที่ตำแหน่งแอดเดรส 99H ซึ่งทำหน้าที่เป็นได้ทั้งบัฟเฟอร์เพื่อพักข้อมูลก่อนส่งออกไปสู่ระบบภายนอกและเป็นบัฟเฟอร์รับข้อมูลในกรณีระบบของ 8031 ต้องการรับข้อมูลจากภายนอกเข้ามาภายในระบบ สำหรับรายละเอียดแผนภูมิสายงานโปรแกรมย่อยconnect และโปรแกรมย่อย send ดูในภาพประกอบ 72 และภาพประกอบ 73 ตามลำดับ



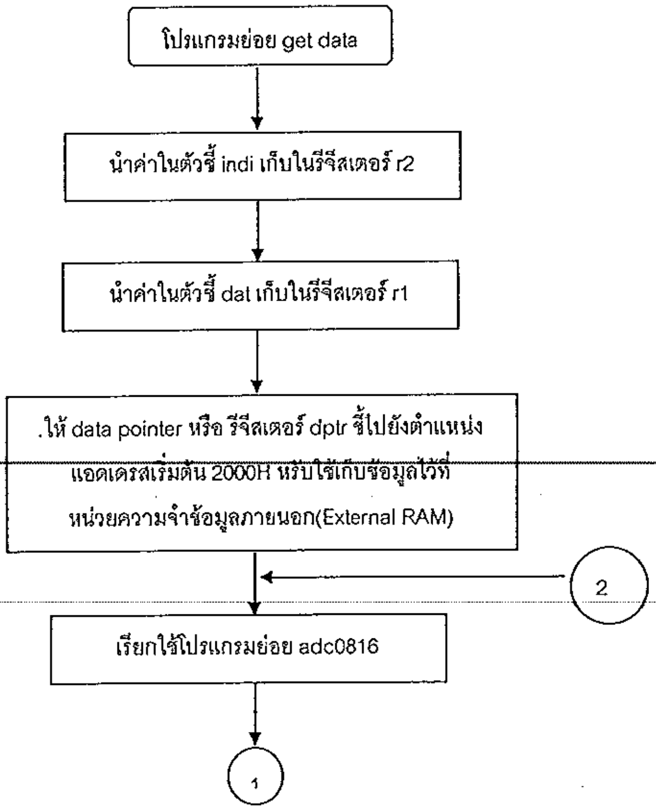
ภาพประกอบ 72 แสดงแผนภูมิสายงานโปรแกรมย่อย connect



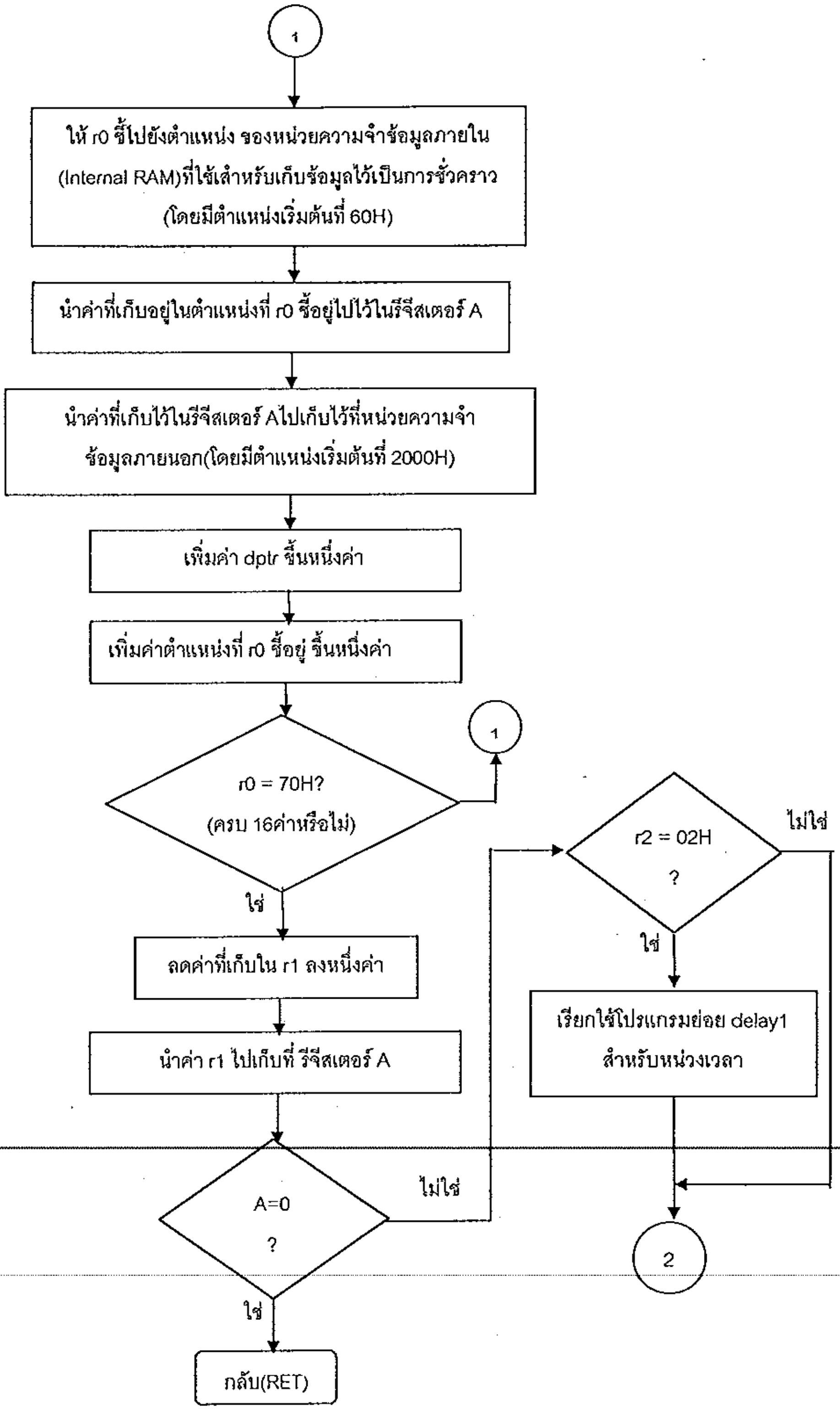
ภาพประกอบ 73 แสดงแผนภูมิสายงานโปรแกรมย่อย send

1.1.2 แผนภูมิสายงานโปรแกรมย่อย get data และโปรแกรมย่อย adc0816

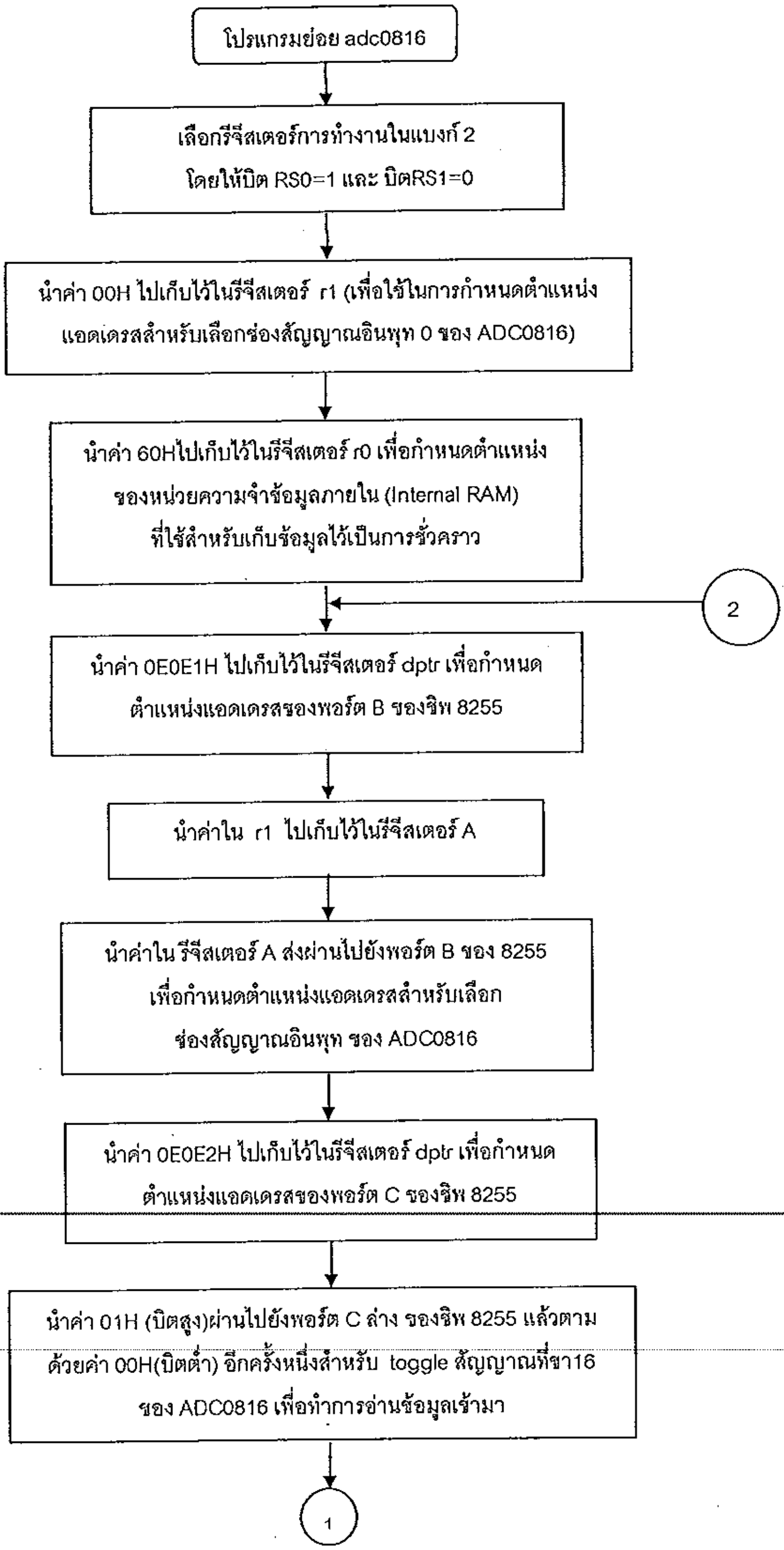
ในส่วนโปรแกรมย่อย get data จะทำหน้าที่ในการเก็บข้อมูลสัญญาณดิจิตอลที่ผ่านการแปลงจากสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลครั้งละขนาด 8 บิต ไว้ในหน่วยความจำข้อมูลภายนอกที่ตำแหน่งแอดเดรสเริ่มต้น #2000H โดยในการแปลงข้อมูลแต่ละครั้งจะต้องมีการเรียกใช้โปรแกรมย่อย adc0816 เพื่อกำหนดหรือเลือกช่องอินพุทของสัญญาณอนาลอกในตัว ADC0816 ที่ใช้ระบบมัลติเพลกเซอร์อยู่ภายในตัวขนาด 16 ช่องสัญญาณอินพุทตั้งแต่ IN0ถึง IN15 โดยใช้วิธีการกำหนดค่าในตำแหน่งแอดเดรส A B C และ D (รายละเอียดดูในภาคผนวก ก) และในการอ่านสัญญาณดิจิตอลที่ผ่านการแปลงในแต่ละครั้งจะทำได้ทีละช่องสัญญาณอินพุทจนครบตามจำนวนช่องอินพุทที่กำหนดในช่วงเวลาที่น้อยมากๆ ซึ่งดูเสมือนว่าสามารถให้ข้อมูลดิจิตอลของทุกอินพุทในเวลาเดียวกันได้ สำหรับรายละเอียดการทำงานในแต่ละส่วนของโปรแกรมย่อยสามารถพิจารณาในภาพประกอบ 74 และภาพประกอบ 75 ตามลำดับ



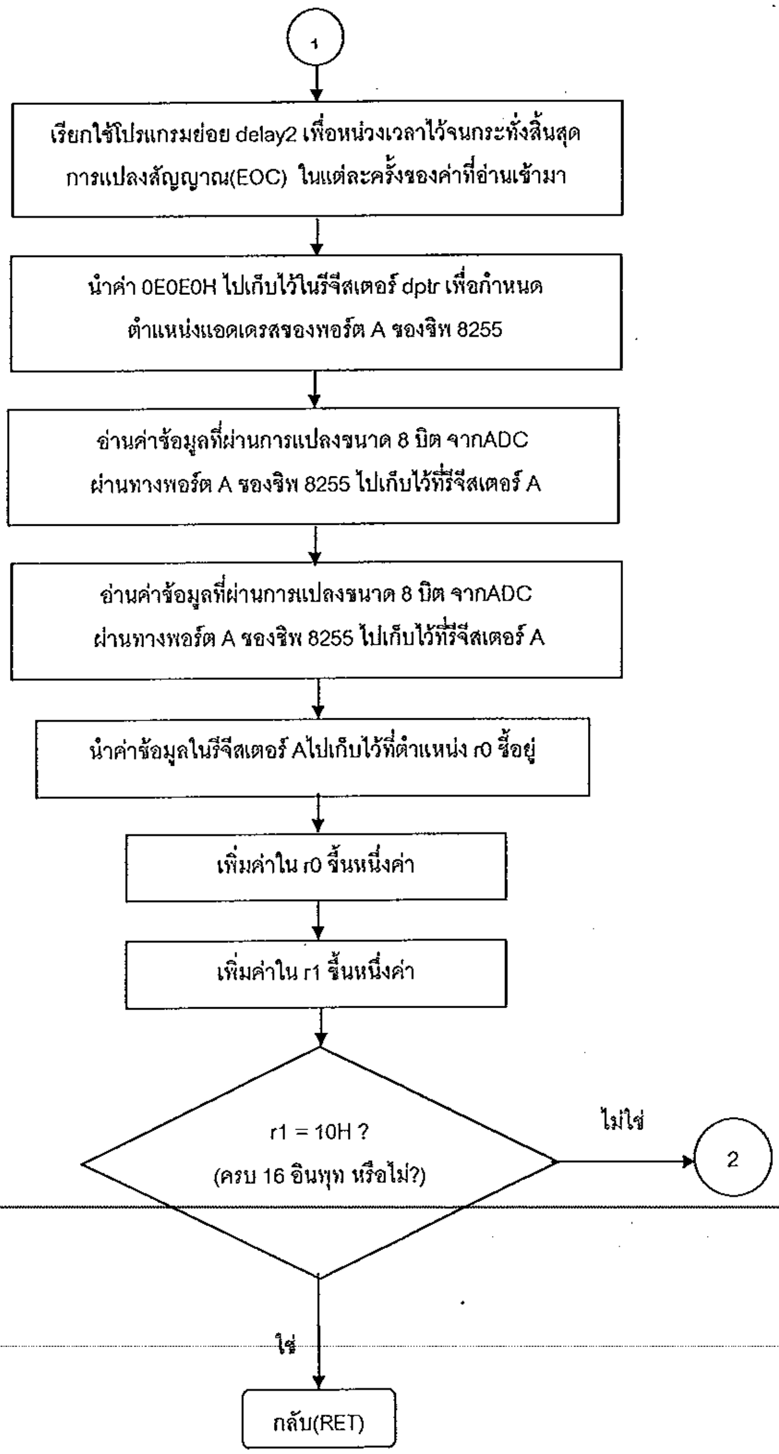
ภาพประกอบ 74 แสดงแผนภูมิสายงานโปรแกรมย่อย get data (มีต่อ)



ภาพประกอบ 74 แสดงแผนภูมิสายงานโปรแกรมย่อย get data



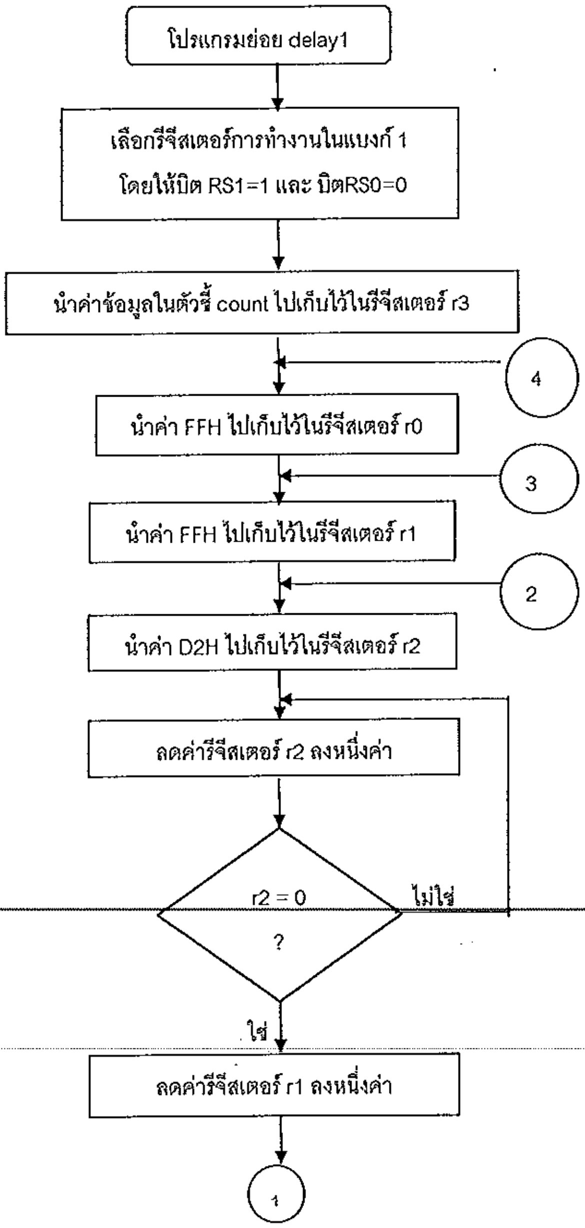
ภาพประกอบ 75 แสดงแผนภูมิสายงานโปรแกรมย่อย adc0816 (มีต่อ)



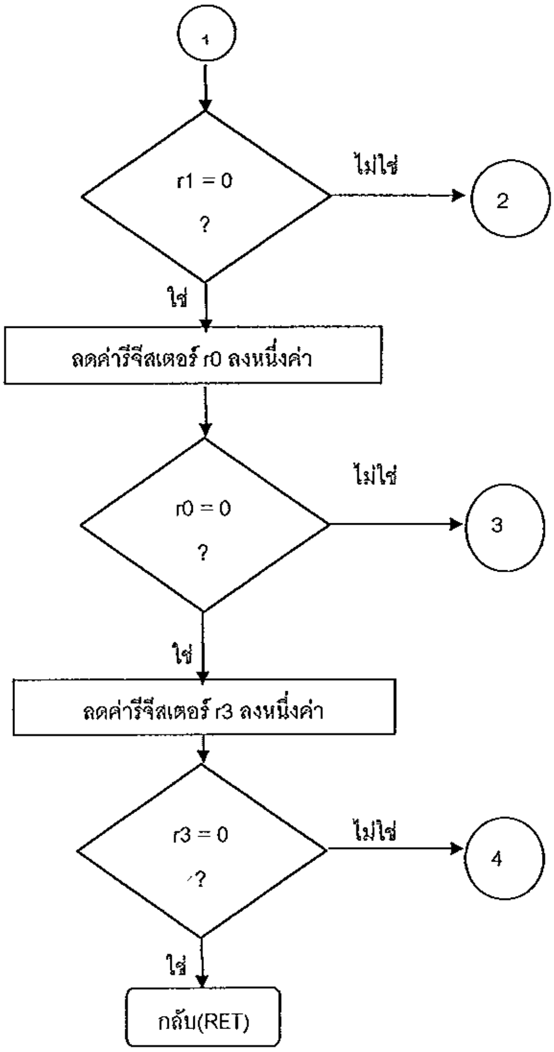
ภาพประกอบ 75 แสดงแผนภูมิสายงานโปรแกรมย่อย adc0816

1.1.3 แผนภูมิสายงานโปรแกรมย่อย delay1 และโปรแกรมย่อย delay2

สำหรับการทำงานของโปรแกรมย่อย delay1 นั้นจะใช้สำหรับการหน่วงเวลาในแต่ละครั้งของการทดลองวัดข้อมูลจริงโดยกำหนดฐานเวลาต่ำสุดเท่ากับ 30 วินาทีหรือ 0.5 นาที เมื่อกำหนดค่าในตัวชี้ count เท่ากับ 1 โดยรายละเอียดแผนภูมิสายงานโปรแกรมย่อย delay1 แสดงในภาพประกอบ 76



ภาพประกอบ 76 แสดงแผนภูมิสายงานโปรแกรมย่อย delay1(มีต่อ)

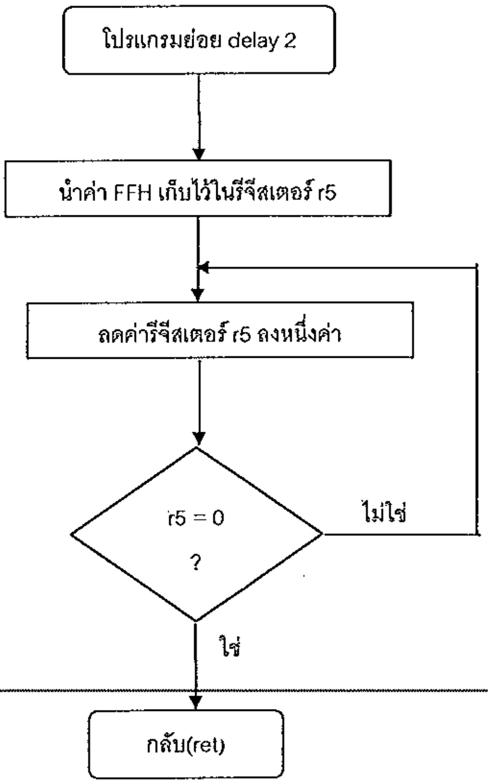


ภาพประกอบ 76 แสดงแผนภูมิสายงานโปรแกรมย่อย delay1

จากการทำงานของโปรแกรม delay1 เป็นการหน่วงเวลาโดยใช้ซอฟต์แวร์(Software) ซึ่งใช้วิธีการลดค่าในรีจีสเตอร์ที่กำหนดแล้วทำการวนลูปถ้าค่าในรีจีสเตอร์ไม่เป็นศูนย์ จนกระทั่งค่าในรีจีสเตอร์เป็นศูนย์จึงจะจบการทำงาน และค่าเวลาในการหน่วงข้างต้นสามารถที่จะคำนวณได้จากค่าจำนวนแมชชีนไซเกิล(Machine cycle) คูณกับเวลาที่ทำงานในแต่ละแมชชีนไซเกิล โดยที่ 1 แมชชีนไซเกิลมีค่าเท่ากับ 12 คาบสัญญาณออสซิลเลเตอร์ และสำหรับในงานวิทยานิพนธ์ได้

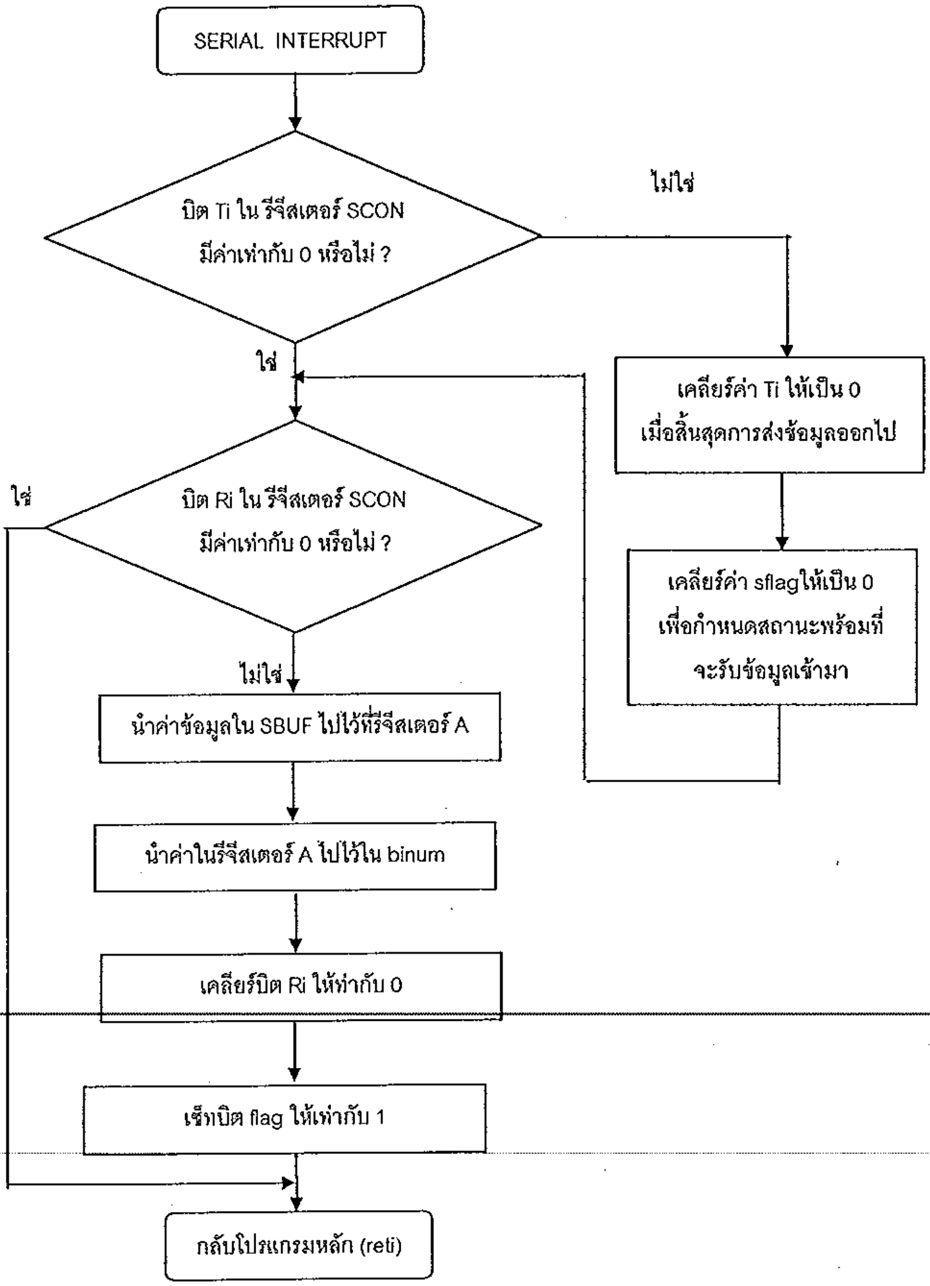
ใช้คริสตอลที่มีความถี่11.0592 เมกะเฮิรตซ์ สำหรับป้อนให้กับซีพียู ดังนั้นในแต่ละแมชชีนไซเกิลของการทำงานจะใช้เวลาประมาณ1.085 ไมโครวินาที

สำหรับการทำงานของโปรแกรมย่อยdelay2ได้ใช้หลักการหน่วงเวลาเช่นเดียวกับการทำงานในโปรแกรมย่อย delay1 ซึ่งถูกเรียกใช้งานโดยโปรแกรมย่อย adc0816 อีกทีหนึ่งเพื่อใช้หน่วงเวลาการทำงานให้กับซีพียู 8031 หรือรอจนกระทั่งมีการสิ้นสุดในการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลของแต่ละครั้งของค่าที่รับเข้ามา แล้วจึงจะยินยอมให้ซีพียูอ่านค่าไปเก็บได้ สำหรับรายละเอียดของแผนภูมิสายงานโปรแกรมย่อย delay2 พิจารณาได้ดังภาพประกอบ 77



ภาพประกอบ 77 แสดงแผนภูมิสายงานโปรแกรมย่อย delay2

1.2 แผนภูมิสายงานโปรแกรมบริการอินเทอร์รัพท์แบบอนุกรม

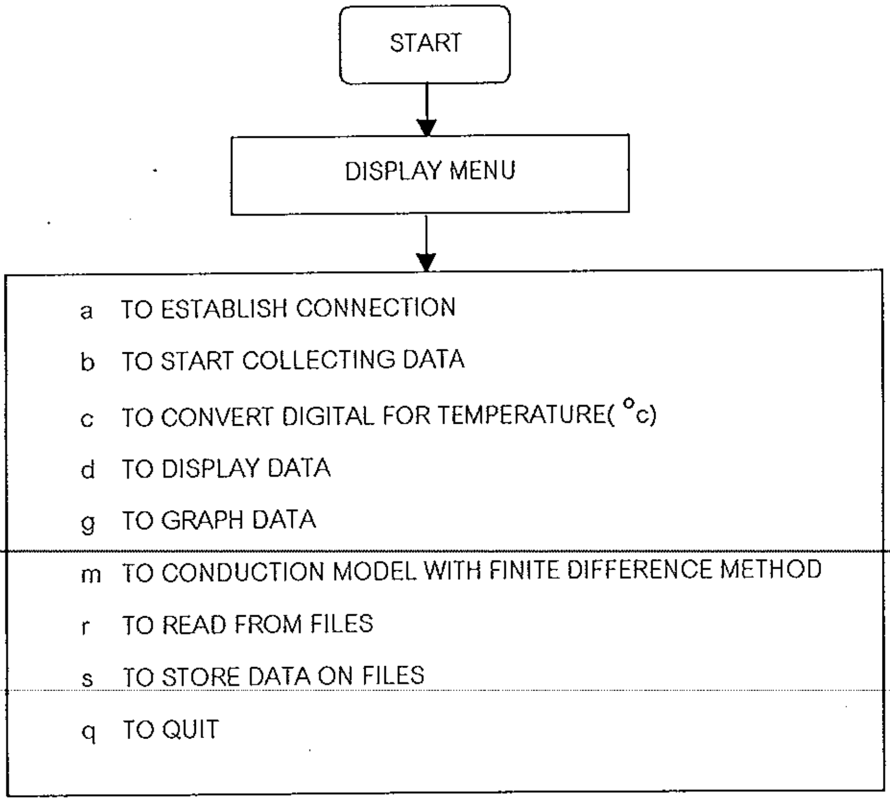


ภาพประกอบ 78 แผนภูมิสายงานโปรแกรมบริการอินเทอร์รัพท์แบบอนุกรม

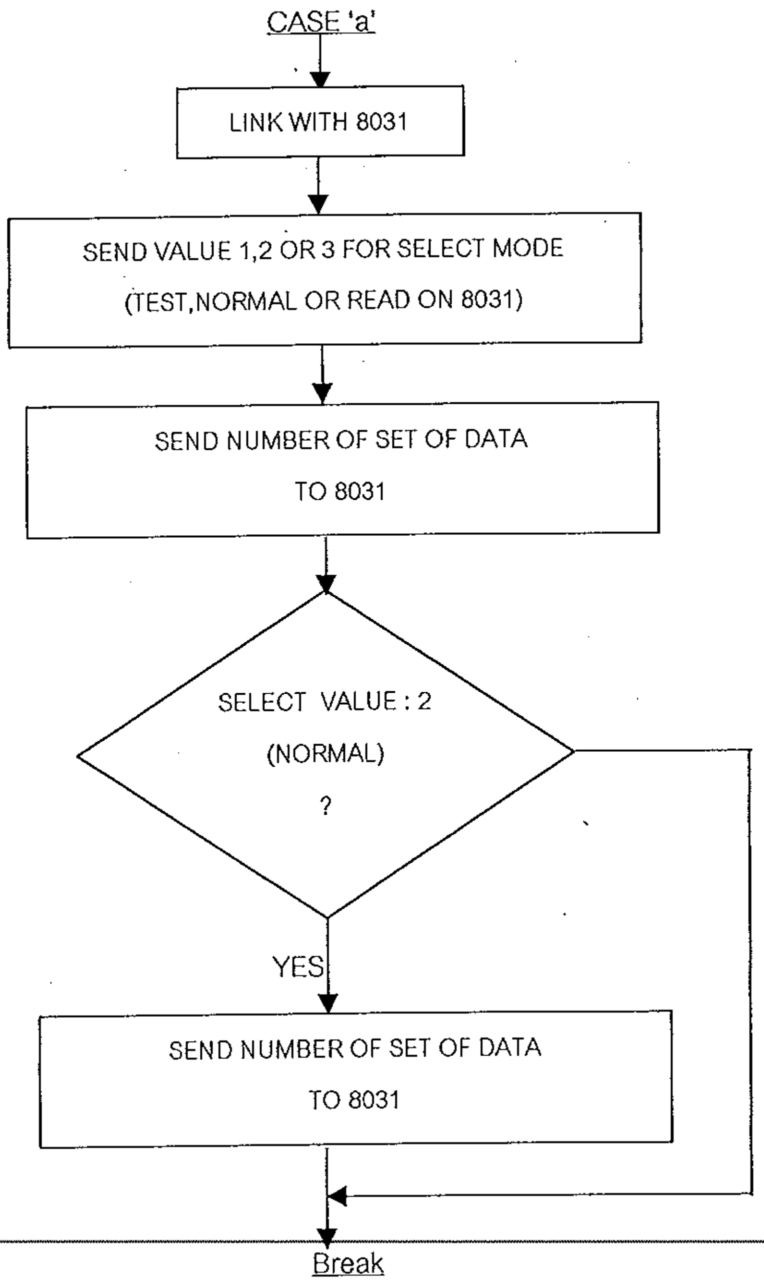
2. แผนภูมิสายงานโปรแกรมเชื่อมโยงสำหรับภาษา C

สำหรับการเขียนโปรแกรมด้วยภาษา C ในส่วนนี้เป็นการเขียนขึ้นมาเพื่อใช้สำหรับเป็นโปรแกรมติดต่อสื่อสารกับโปรแกรมควบคุมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ 8031 ที่เขียนขึ้นด้วยภาษาแอสเซมบลี้ ผ่านทางพอร์ตอนุกรมของ 8031 ตามมาตรฐานการสื่อสาร RS-232 และนอกจากนี้แล้วยังใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลจากการทดลองไว้ในไฟล์ที่กำหนดเพื่อนำข้อมูลในไฟล์นั้นๆมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับผลทางทฤษฎีที่อาศัยการจำลองแบบโดยใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขแบบ Finite difference ที่เขียนขึ้นด้วยภาษา C เช่นเดียวกัน โดยลักษณะขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมสามารถพิจารณาในรายละเอียดตามแผนภูมิสายงานโปรแกรมหลักได้ดังภาพประกอบ 79 คือ

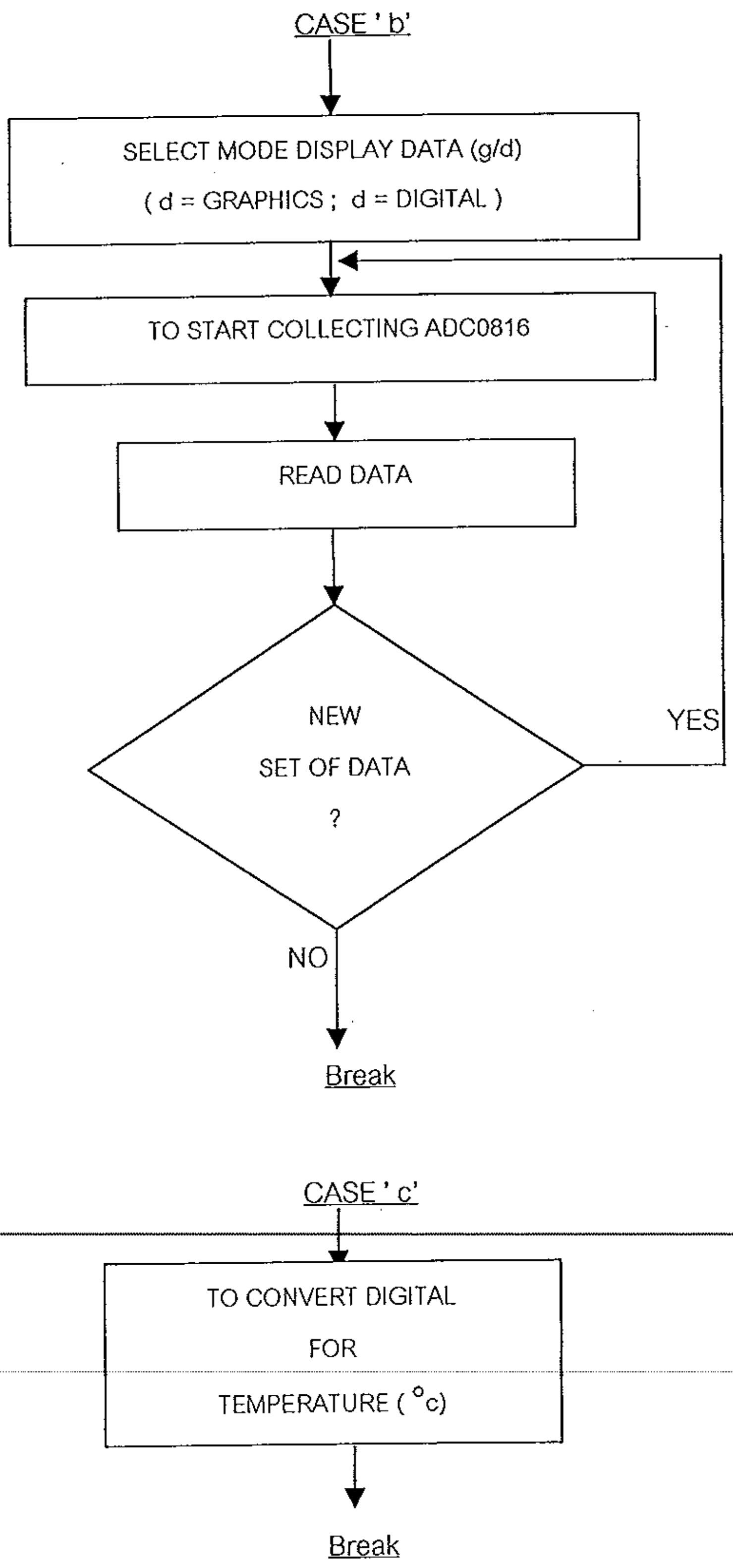
1.1 แผนภูมิสายงานโปรแกรมหลัก



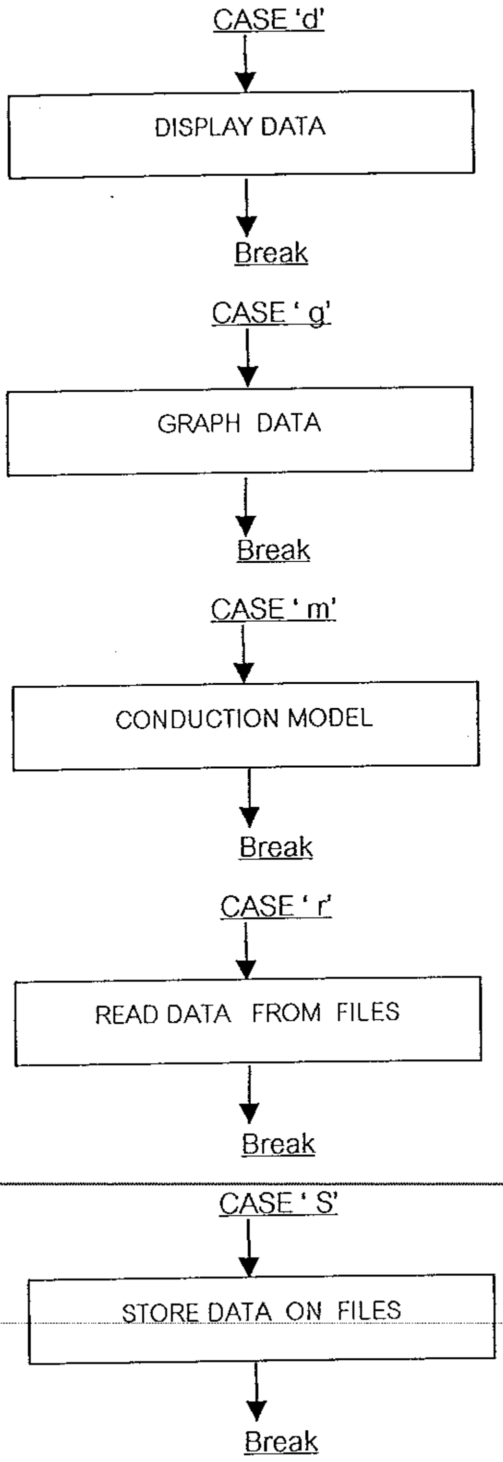
ภาพประกอบ 79 แสดงแผนภูมิสายงานโปรแกรมหลักที่เขียนขึ้นจากภาษา C (ต่อ)



ภาพประกอบ 79 แสดงแผนภูมิสายงานโปรแกรมหลักที่เขียนขึ้นจากภาษา C (ต่อ)



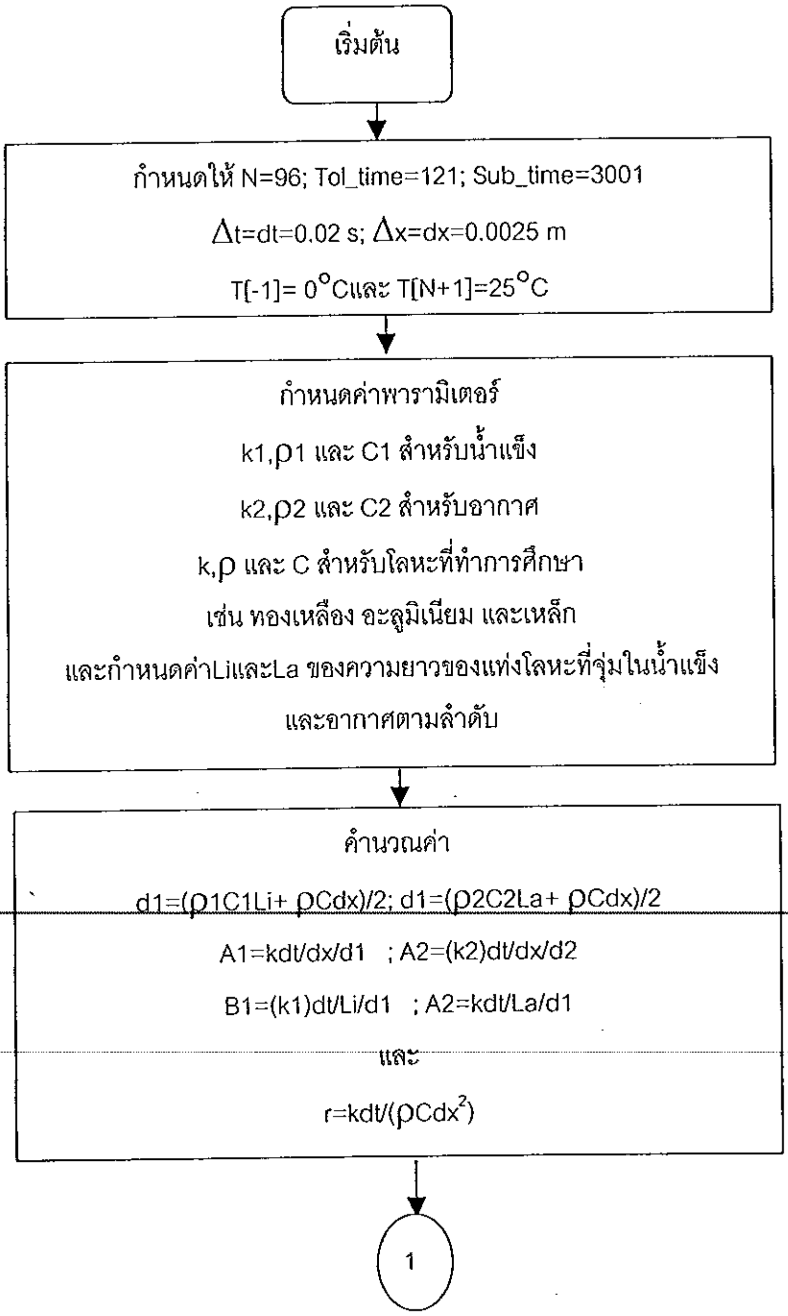
ภาพประกอบ 79 แสดงแผนภูมิสายงานโปรแกรมหลักที่เขียนขึ้นจากภาษา C (ต่อ)



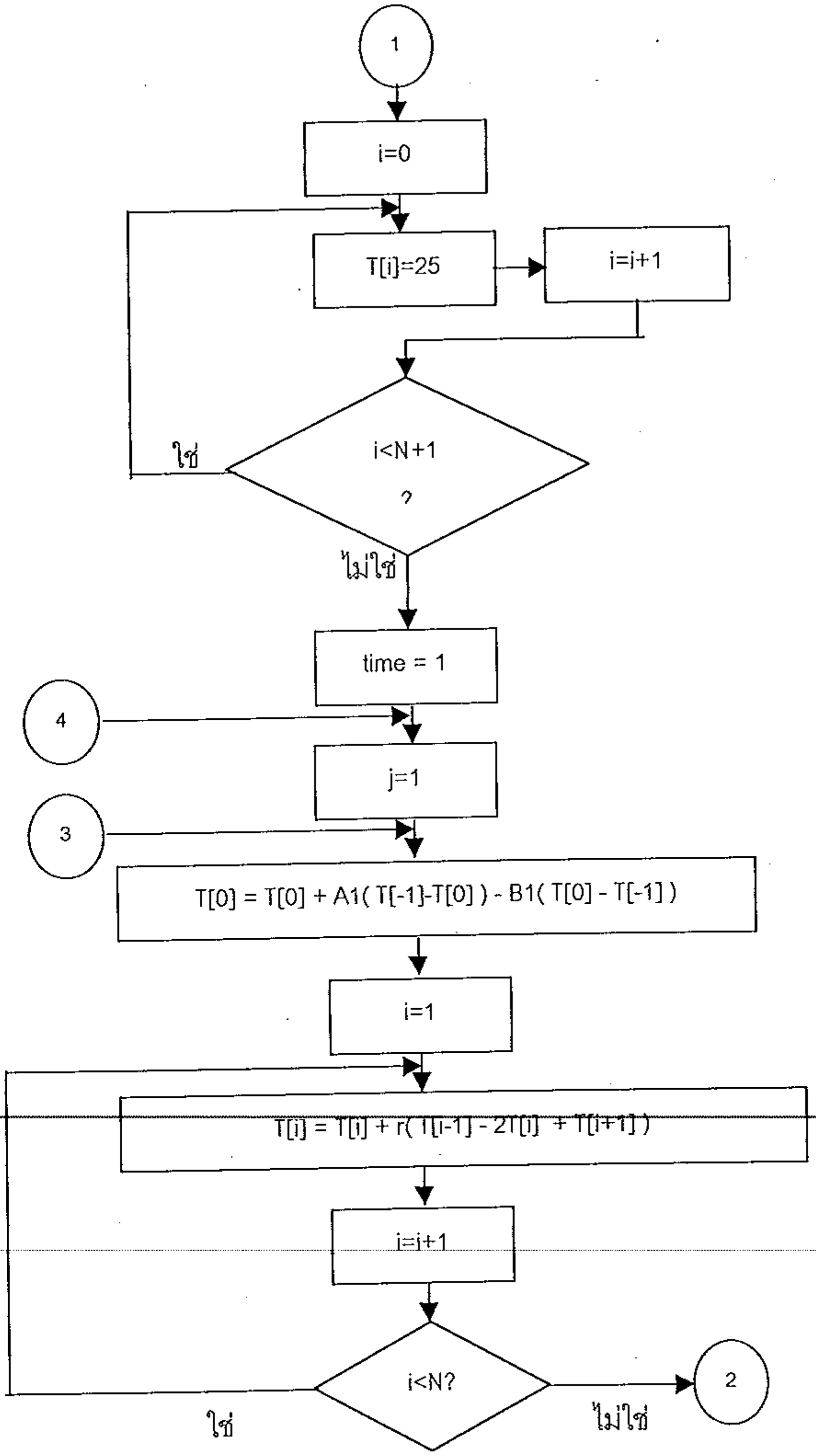
ภาพประกอบ 79 แสดงแผนภูมิสายงานโปรแกรมหลักที่เขียนขึ้นจากภาษา C

2.2 แผนภูมิสายงานโปรแกรมย่อย CONDUCTION MODEL

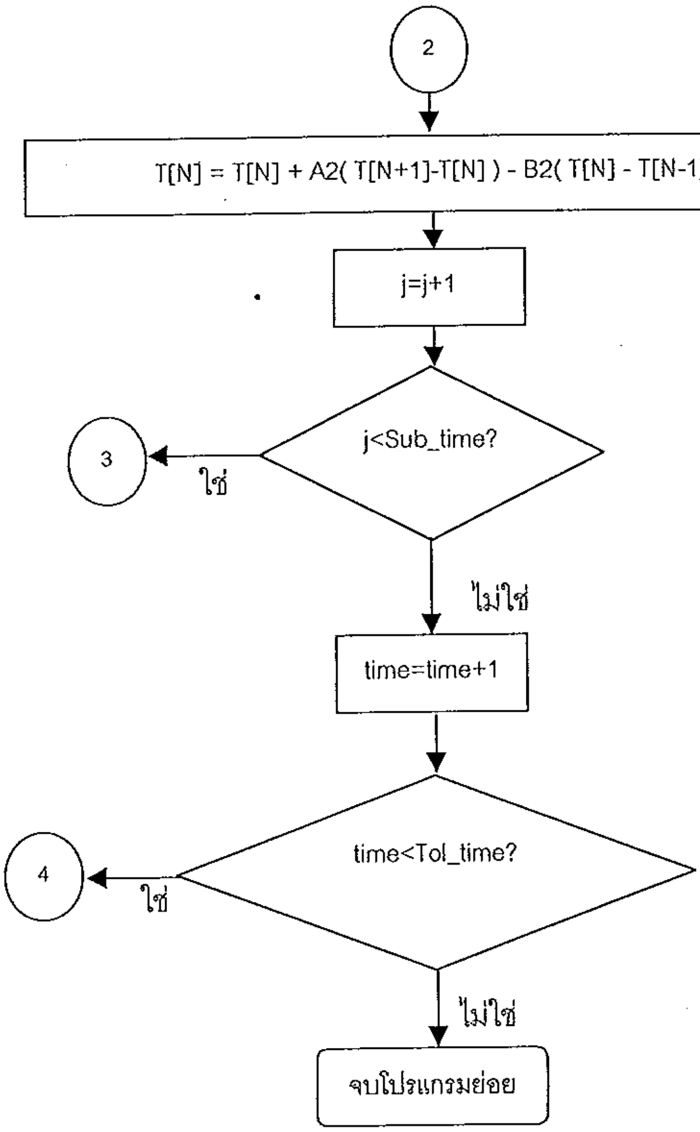
ในการเขียนแผนภูมิสายงานโปรแกรมย่อย CONDUCTION MODEL สำหรับจำลองรูปแบบของการนำความร้อนของแท่งโลหะในสภาวะไม่คงที่ในรูปแบบ 1 มิติ โดยใช้การคำนวณเชิงตัวเลขที่ใช้วิธี Finite difference (ดังภาพประกอบ 4) สามารถพิจารณาและเขียนแผนภูมิสายงานโปรแกรมได้ดังภาพประกอบ 80



ภาพประกอบ 80 แสดงแผนภูมิสายงานโปรแกรมย่อย CONDUCTION MODEL (ต่อ)



ภาพประกอบ 80 แสดงแผนภูมิสายงานโปรแกรมย่อย CONDUCTION MODEL (ต่อ)



ภาพประกอบ 80 แสดงแผนภูมิสายงานโปรแกรมย่อย CONDUCTION MODEL

ภาคผนวก ง

โปรแกรมมอนิเตอร์สำหรับควบคุมการทำงานของ 8031เขียนโดยใช้ภาษาแอสเซมบลี้

```
;===========================================================
;Thesis's SAMRAN
;Modified program from Asst. prof. BOONLUA Pongdara
;Works with S411.c
;S411 with data stored on External RAM started add. #2000h still works with S411.c
;ADC routine for multiplexer 16 inputs
;ADC0816 with pc0 (8255) to reset on the positive edge of  start conversion pulse
;Used time delay base 30 seconds( sub. Program delay1) for get data
;===========================================================
binum   equ 50h
binum2  equ 57h
indi    equ 58h
count   equ 59h
dat     equ 5bh
flag bit 20h.1
sflag bit 20h.0
;
        org 0000h
        sjmp main
        org 0023h
        ljmp serial
```

```
;main: ;- - - - - - - - - - - - - -Start Initialization 8031- - - - - - - - - - - - - - - -
            mov sp,#30h                 ;Stack pionter #30h
            mov tmod,#22h               ; Initial timer1 mode 2
            mov tcon,#0ddh              ; Initial timer control
            mov scon,#50h               ; Initial serial port control for mode 1
            mov pcon,#00h               ; Initial power control (normal)
            mov tl1,#0fdh               ; Reload value for desired baud rate
            mov th1,#0fdh               ; 9600bit/s
            setb ea                     ; Interrupt enable
            setb tr1                    ; Start timer1
            setb es                     ; Enable serial interrupt
           / clr flag
;- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - End of  Initialization 8031-- - - - - - - - - - - - - - - -

            acall connect               ; A call sub program connect

initial: ;- - - - - - - - - - - - - - - - - - Start Initialization 8255 - - - - - - - - - - - - - - - - -
            mov dptr,#0E0E3h            ; Control port
            mov a,#098h                 ; Port A input,B and C(low) output
            movx @dptr,a                ; Mode 0 (BasicI/O)
            mov dptr,#0E0E2h            ; Set pc0 low (For start conv)
            movx @dptr,a
            mov a,#00h
            mov dptr,#0E0E1h            ; Port B
            movx @dptr,a                ; A,B,C and D= 0, point at IN0 of 0816
; - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - End of Initialization 8255 - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
```

```
indicator:- - - - - - - - - - - - Wait receive value from PC - - - - - - - - - - - - - - - -
            clr flag                    ; Wait for indi for select mode 1,2,3
            jnb flag,$
            clr flag                    ;Get indi
            mov indi,binum              ;Save indi
            jnb flag,$
            clr flag                    ; Wait value amount set of data
            mov dat,binum               ; Store at dat
            mov dptr,#0E0E2h            ; Point at port c
            mov r0,indi
Test:
            cjne r0,#01h,normal
            sjmp more
Normal:
            cjne r0,#02h,read
            acall get_time              ; Only for r0=2 :Normal
            sjmp more
Read:
            clr flag
            jnb flag,$                  ;Wait for PC
            acall send_data
            sjmp read
more:
            clr flag
            jnb flag,$
            acall adc
            acall send_data
            sjmp more
```

```
;--------------------- Connect with PC --------------------------
connect:     push psw
             push acc
     wait0:  mov binum2,#0fh
             acall send
             clr flag
             mov binum,#0fh
     wait:   jnb flag,$                    ; Wait value  255 from PC
             mov r0,binum
             cjne r0,#0ffh,noteq
             mov binum2,#0ah               ; Send back A to acknowledge
             acall send
             pop acc
             pop psw
             ret
     noteq:  mov binum2,#0ffh
             acall send
             sjmp wait
;---------------------------------------------------------------
get_time:    push psw
             push acc
             clr flag                ; Wait for time
             jnb flag,$
             clr flag                ; Get time delay
             mov count,binum         ;Store at count
             pop acc
             pop psw
             ret
;---------------------------------------------------------------
```

```
;-------------------- Save data on External RAM ------------------
get_data:
            push psw
            push acc
            mov r2,indi                 ;See if Test or Normal
            mov r1,dat
            mov dptr,#02000h            ; Starting address External RAM
L20:
            acall adc0816
            mov r0,#060h                ; Point at temp. data
L21:
            mov a,@r0
            movx @dptr,a                ;Store data on External RAM
            inc dptr
            inc r0
            cjne r0,#070h,L21           ; Total 16 data?
            dec r1
            mov a,r1
            jz engh                     ; Enough data
            cjne r2,#02h,L20            ; If not Normal, no delay
            acall delay1                ;for Normal
            sjmp L20
     engh:
            pop acc
            pop psw
            ret
;---------------------------------------------------------------------
```

```
;------------------ ------ADC0816 working ------------------------
Adc0816:
        push psw                ;Get the 8 ch. data
        push acc
        push dph
        push dpl
        setb rs0
         clr rs1
        mov r1,#00h             ; I Index  the IN0 input
        mov r0,#060h            ; For temporary data
    L11:
        mov dptr,#0E0E1h        ;  Point at Port B
        mov a,r1
        movx @dptr,a            ; Select IN
    L10:
        mov dptr,#0E0E2h        ; Toggle pc0
        mov a,#01h              ;  Bit high
        movx @dptr,a
        mov a,#00h              ; Bit low (working high--->low)
        movx @dptr,a
        acall delay2            ; Wait for EOC signal
    L12:
         mov dptr,#0E0E0h       ;  Read value 8 bit ADC  from port A
        movx a,@dptr
         mov @r0,a              ; Store temp. data d0-d7 at $60++
        inc r0
        inc r1
        cjne,r1,#010h,L11       ; Up to IN15
```

```
        pop dpl
        pop dph
        pop acc
        pop psw
        ret
;---------------------------------------------------------------
;-----------------------Time delay for get data---------------------
delay1:
        push acc
        push psw
        setb rs1                ; Select bank2:rs1=1,rs0=0 !!!!
        clr rs0
        mov r3,count   ;Should be count here, delay time=count/2 min
sec:    mov r0,#0ffh
m0:     mov r1,#0ffh
m1:     mov r2,#0d2h
m2:     djnz r2,m2
        djnz r1,m1
        djnz r0,m0
        djnz r3,sec
        pop psw
        pop acc
        ret
;---------------------------------------------------------------
```

```
;------------------- --Time delay for EOC signal---- ----------------
delay2:
            push psw
            push acc
L3:         mov r5,#0ffh
L5:         djnz r5,$
            pop acc
            pop psw
            ret
;-----------------------------------------------------------------
send_data:
            push psw
            push acc
            mov r1,dat              ;Set of data
            mov dptr,#02000h
set:        mov r0,#00h             ; 16 data for one set
again1:     movx a,@dptr
            mov binum2,a
            acall send
            inc dptr
            inc r0
            cjne r0,#010h,again1
            dec r1
            cjne r1,#00h,set
            pop acc
            pop psw
            ret
;-----------------------------------------------------------------
```

```
; ------------------- Interrupt  Serial port --------------------------- -
serial:
            push psw
            push acc
            jnb ti,nxt              ; Is bit transmit set
            clr ti                  ; Clear  it ,clear status of transmit
            clr sflag               ; (Busy) flag
nxt:        jnb ri,bye              ; If it is not  a transmit process
            mov a,sbuf              ; Iit should be a recieve process
            mov binum,a             ; get data
            clr ri                  ; Clear recieve flag
            setb flag
bye:        pop acc
            pop psw
            reti                    ;End of interrupt
; -----------------------------------------------------------------------
send:
            push acc                ;Save acc
            mov a,binum2
again:       mov sbuf,a             ; Send what is in a
            setb sflag              ; Set flag for busy status
            clr flag
slp:        jb sflag,slp            ; Wait for interrupt to change flag
echo:        jnb flag,$
            mov a,binum2
            cjne a,binum,again      ;check with echo
            pop acc                 ;o.k.
             ret
            end                     ;End of main Program
; -----------------------------------------------------------------------
```

ภาคผนวก จ

ข้อมูลความต้านทานของตัวเทอร์มิสเตอร์และการปรับเทียบค่าอุณหภูมิ

ตาราง 5 แสดงค่าความต้านทานของตัวเทอร์มิสเตอร์ที่ขึ้นกับอุณหภูมิในช่วง 0-25 องศาเซลเซียส

t	T	$1/T \times 10^{-3}$	ค่าความต้านทานของตัวเทอร์มิสเตอร์($k\Omega$)			$\ln R_T$
(^{o}C)	(K)	(K^{-1})	R_{1T}	R_{2T}	$R_T = (R_{1T} + R_{2T})/2$	($k\Omega$)
0	273	3.66	33.72	34.14	33.93	3.52
1	274	3.65	33.5	33.12	33.31	3.51
2	275	3.64	28.08	31.5	29.79	3.39
3	276	3.62	27.81	25.05	26.43	3.27
4	277	3.61	27.31	24.55	25.93	3.26
5	278	3.6	26.65	23.9	25.28	3.23
6	279	3.58	25.76	22.68	24.22	3.19
7	280	3.57	24.73	21.7	23.22	3.15
8	281	3.56	23.49	20.46	21.98	3.09
9	282	3.55	22.26	19.35	20.81	3.04
10	283	3.53	21.15	18.63	19.89	2.99
11	284	3.52	20.12	17.53	18.83	2.94
12	285	3.51	19.11	16.75	17.93	2.89
13	286	3.5	18.09	15.91	17	2.83
14	287	3.46	17.16	14.95	16.06	2.78
15	288	3.47	16.36	14.32	15.34	2.73
16	289	3.46	15.48	13.68	14.58	2.68
17	290	3.45	14.81	12.9	13.86	2.63
18	291	3.44	14.02	12.25	13.14	2.58
19	292	3.42	13.35	11.76	12.56	2.53
20	293	3.41	12.75	11.05	11.9	2.48
21	294	3.4	12.17	10.65	11.41	2.43
22	295	3.38	11.6	10.2	10.9	2.39
23	296	3.37	11.02	9.64	10.33	2.34
24	297	3.36	10.65	9.22	9.94	2.3
25	298	3.35	10.17	8.92	9.55	2.26

ตาราง 6 แสดงตัวอย่างผลของการปรับเทียบค่าอุณหภูมิของตัวเทอร์มิสเตอร์ในวงจรตัวตรวจวัดอุณหภูมิที่เชื่อมโยงเข้ากับคอมพิวเตอร์

อุณหภูมิ(°C)	V_{in}(โวลต์)	ค่าดิจิตอลเอาท์พุท
0	3.31	169
1	3.24	165
2	3.18	162
3	3.14	160
4	3.06	156
5	3.00	153
6	2.94	150
7	2.84	146
8	2.76	141
9	2.73	139
10	2.66	135
11	2.67	131
12	2.53	129
13	2.45	125
14	2.37	121
15	2.32	118
16	2.27	116
17	2.22	113
18	2.14	109
19	2.06	105
20	2.02	103
21	1.96	100
22	1.90	97
23	1.86	95
24	1.80	93
25	1.74	91

ภาคผนวก ฉ

ตัวอย่างข้อมูลที่ได้รับจากการทดลองวัดการนำความร้อนในแท่งโลหะในรูปแบบ 1 มิติ

ตาราง 7 แสดงค่าข้อมูลที่ได้รับในรูปแบบค่าดิจิตอลเอาท์พุท ของแท่งโลหะทองเหลือง

D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	Di	Da
91	91	91	90	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91	168	91
100	95	94	93	93	92	91	91	91	91	91	91	91	91	171	91
106	100	98	97	95	94	92	92	92	91	91	91	91	91	172	90
111	104	102	100	98	96	94	94	93	92	92	92	91	91	172	89
114	107	105	103	101	98	96	95	94	93	92	92	92	91	172	89
117	110	107	105	103	100	98	97	95	94	93	93	92	92	172	89
119	111	109	107	105	102	99	98	97	95	94	94	93	92	172	89
120	113	110	109	106	103	100	99	98	96	95	95	94	93	172	89
122	114	112	110	107	104	101	100	98	97	96	95	95	94	172	89
123	115	113	111	108	105	102	101	99	97	97	96	95	94	172	89
124	116	114	112	109	106	103	102	100	98	97	97	96	95	172	89
124	117	114	113	110	107	104	103	101	99	98	97	97	95	172	89
125	117	115	113	110	108	104	103	101	100	99	98	97	96	172	89
125	118	115	114	111	108	105	104	102	100	99	99	98	96	172	89
126	118	116	114	112	109	105	105	102	101	100	99	98	97	172	89
126	118	116	115	112	109	106	105	103	101	100	100	99	97	172	89
127	119	117	115	112	109	106	105	103	101	101	100	99	98	172	89
127	119	117	116	113	110	107	106	104	102	101	100	99	98	172	89
127	119	117	116	113	110	107	106	104	102	101	101	100	98	172	88
127	120	117	116	113	110	107	106	104	102	102	101	100	98	172	89
127	120	118	116	113	111	107	107	104	102	102	101	100	99	172	89
127	120	118	117	114	111	107	107	105	103	102	101	100	99	172	89

128	120	118	117	114	111	108	107	105	103	102	102	101	99	172	89
128	120	118	117	114	111	108	107	105	103	102	102	101	99	172	89
128	120	118	117	114	111	108	107	105	103	102	102	101	99	172	89
128	120	118	117	114	111	108	107	105	103	102	102	101	99	172	89
128	120	118	117	114	111	108	107	105	103	103	102	101	100	172	89
128	120	118	117	114	111	108	108	105	103	103	102	101	100	172	89
128	121	119	117	114	112	108	108	106	104	103	102	101	100	173	89
128	120	119	117	114	112	108	108	106	104	103	102	101	100	172	88
128	120	118	117	114	111	108	108	105	104	103	102	101	100	172	88
128	120	118	117	114	112	108	108	106	104	103	102	101	100	172	88
128	121	118	117	115	112	109	108	106	104	103	103	102	100	172	89
128	121	118	118	115	112	109	108	106	104	103	103	102	100	172	89
128	121	119	118	115	112	109	108	106	104	103	103	102	100	172	89
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	103	103	102	100	172	89
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	103	103	102	100	173	89
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	104	103	102	100	173	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	104	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	103	103	102	100	172	89
128	121	119	118	115	112	109	108	106	104	103	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	103	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	103	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	103	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	103	103	102	100	172	89
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	103	103	102	100	172	89
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	103	103	102	100	172	89
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	104	103	102	100	172	89
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	104	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	104	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	104	103	102	100	172	89

129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	104	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	104	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	104	103	102	100	173	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	104	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	104	103	102	100	172	89
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	104	103	102	100	173	89
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	104	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	104	103	102	100	173	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	104	103	102	100	173	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	104	103	102	100	173	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	104	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	104	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	104	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	109	106	104	103	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	104	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	104	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	104	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	104	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	104	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	104	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	103	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	103	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	104	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	104	103	102	100	173	88
129	121	119	118	115	112	109	109	106	104	103	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	103	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	103	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	104	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	103	103	102	100	172	88

129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	104	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	104	103	102	100	173	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	104	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	103	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	103	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	103	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	104	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	104	103	102	100	173	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	103	103	102	100	173	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	103	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	104	103	102	100	173	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	103	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	104	103	102	100	173	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	103	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	104	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	103	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	103	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	103	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	104	103	102	100	172	87
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	103	103	102	100	173	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	103	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	103	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	103	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	103	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	103	103	102	100	173	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	103	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	103	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	103	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	103	103	102	100	173	88

129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	103	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	103	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	103	103	102	100	172	87
129	121	119	118	115	112	109	109	106	104	103	103	102	100	172	87
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	103	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	103	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	103	103	102	100	172	88
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	103	103	102	100	172	87
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	103	103	102	100	172	87
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	103	103	102	100	172	87
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	103	103	102	100	172	87
129	121	119	118	115	112	109	108	106	104	103	103	102	100	172	87

หมายเหตุ

1. ค่าของข้อมูลในลักษณะของแถว(ในแนวนอนจากซ้ายไปขวา) จาก D0 ถึง D13 เป็นค่าที่ขึ้นกับตำแหน่งภายในแท่งโลหะ(โดยที่ D0 เป็นค่าที่ได้จากตำแหน่งแรกของการวัดซึ่งอยู่ใกล้กับปลายของโลหะที่จุ่มในน้ำแข็ง ส่วน D13 เป็นค่าที่ได้จากตำแหน่งสุดท้ายของการวัดซึ่งอยู่ใกล้กับปลายของโลหะที่อยู่ในอากาศ
2. ค่าของข้อมูล Di และ Da เป็นค่าที่วัดในน้ำแข็งและในอากาศ ตามลำดับ
3. ค่าของข้อมูลในลักษณะคอลัมน์(ในแนวตั้งจากบนลงล่าง) เป็นค่าที่ขึ้นกับเวลา
4. ค่าของข้อมูลในรูปแบบดิจิตอลเอาท์พุทที่ได้รับในตาราง 1.1 สามารถปรับเทียบเป็นค่าของอุณหภูมิในหน่วยองศาเซลเซียสได้โดยใช้สมการในการปรับเทียบค่าดังนี้ คือ

$$T(^{\circ}C) = \left[\beta / \left[\ln\left(DR_L / (256 - D)\right) - \ln R_0\right]\right] - 273.2$$

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นายสำราญ ย่องดำ

วัน เดือน ปีเกิด 18 กรกฎาคม 2510

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตรบัณฑิต (ศึกษาศาสตร์)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2533

ทุนการศึกษา

ทุนกรมสามัญศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ

ตำแหน่งและสถานที่ทำงาน

อาจารย์ 2 ระดับ 6 โรงเรียนระโนดวิทยา อำเภอระโนด จังหวัดสงขลา