

กระทรวงพาณิชย์  
การกักตุนสินค้าเกษตรอินทรีย์  
Cereals Drying Control



วัน เดือน ปี..... 11. ส.ค. 2541  
เลขทะเบียน..... 038880  
เลขเรียกหนังสือ..... ท. 2012A น 277 ก.

ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมระบบควบคุม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ปีการศึกษา 2540  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้ง 038880

# การควบคุมการอบแห้งเมล็ดธัญพืช

## Cereals Drying Control



อาจารย์ที่ปรึกษา

อ. กงศักดิ์ อนันตศิริวัฒน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโท ปีการศึกษา 2540

ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การควบคุมการอบแห้งเมล็ดธัญพืช

ผู้จัดทำ

1. นาย ประทีป ลิขิตศิริวิทย์ รหัส 37014232
2. นาย พีระพัฒน์ เกษมพรกุล รหัส 37014296



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การควบคุมการอบแห้งเมล็ดพืช

นาย ประทีป ลิขิตศิริวิทย์ รหัส 37014232

นาย พีระพัฒน์ แกษมพรกุล รหัส 37014296

อ. คงศักดิ์ อนันตศิริวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2540

### บทคัดย่อ

การทำโปรเจกต์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาด้านระบบควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับระบบควบคุมภาวะอากาศสำหรับใช้ในการอบแห้งสิ่งที่เราต้องการ ซึ่งเราเน้นศึกษาการอบแห้งเมล็ดพืช โดยในขั้นแรกเราจะทำการควบคุมอุณหภูมิให้ได้ตามที่เรากำหนด เริ่มจากวงจรของ Thermistor รับค่าอุณหภูมิของกระบวนการ ซึ่งอยู่ในช่วง  $0-100^{\circ}\text{C}$  โดยที่จะได้ผลลัพธ์ของวงจรเป็นโวลต์ตรง  $0-10\text{ V}$  กล่าวคือ ทุก  $1$  โวลต์ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น  $10^{\circ}\text{C}$  จากนั้นนำโวลต์ที่ได้แปลงค่าเป็นกระแสในช่วง  $4-20\text{ mA}$  เมื่อได้กระแสจะป้อนกระแสเข้าวงจรควบคุมอุณหภูมิเพื่อให้ได้อุณหภูมิตามที่เรากำหนด ในส่วนของวงจรควบคุมความชื้นเราได้ออกแบบวงจรที่ใช้วัดความชื้นเพียงเท่านั้น

### ABSTRACT

This project has a purpose to study Control Electronics. By studying with an air conditioning system for a desired drying process that studies in cereals drying. First we'll control temperature. By Thermister circuit receives process's temperature in the range  $0-100^{\circ}\text{C}$  and gives a voltage output in the range  $0-10\text{ V}$ . That means when increasing  $1$  volt make temperature increase  $10^{\circ}\text{C}$ . Then we convert voltage to current in the range  $4-20\text{ mA}$ . After that we bias current to temperature controller circuit for a desired temperature. In the part of humidity controller, we only design a humidity-measured circuit.

## คำนำ

การทำปริยญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของวิชาเรียน ในภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุมและวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งศึกษาเรื่องการควบคุมการอบแห้งเมล็ดพืช โดยมุ่งเน้นการใช้พื้นฐานความรู้ทางด้าน Electronics มาใช้ในการควบคุม เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป

ทางคณะผู้จัดทำหวังว่าปริยญาานิพนธ์นี้จะประโยชน์กับผู้ที่ได้อ่าน หรือผู้ที่ต้องการนำความรู้นี้ไปประยุกต์ใช้ไม่มากก็น้อย



คณะผู้จัดทำ

นาย ประทีป ลิขิตศิริวิทย์

นาย พีระพัฒน์ เกษมพรกุล

	หน้า
สารบัญตาราง	
สารบัญรูป	
บทนำ ระบบการอบแห้งเมล็ดพืช	1
บทที่ 1 ทฤษฎีและหลักการ	5
1. Thermal transducers	
1.1 Thermocouple	5
1.2 Resistance Thermometers	18
1.3 Thermistor	22
2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งเมล็ดพืช	
2.1 แบบจำลองของ Brooker et al.	29
- แบบจำลองการอบแห้งแบบชั้นเมล็ดพืชอยู่กับที่	30
- แบบจำลองการอบแห้งแบบไหลขวาง	32
- แบบจำลองการอบแห้งแบบไหลตาม	33
- แบบจำลองการอบแห้งแบบไหลสวนทาง	34
2.2 แบบจำลองของ Bakker Arkema et al.	35
2.3 แบบจำลองลอการิทึมมิก ( Logarithmic Model )	35
2.4 แบบจำลองของ Thompson et al.	38
2.5 แบบจำลอง Hukill	40
3. ความชื้นและตัวจับความชื้น ( Humidity and Moisture )	
3.1 นิยามทั่วไป	48
3.2 หน่วยในการวัด	48
3.3 วิธีการในการตรวจจับ	49
- Hygrometric Sensing Methods	49
- Psychrometric Sensing Methods	52
- Dew-Point Sensing Methods	52
- Remote Moisture-Sensing Methods	54
3.4 การออกแบบและปฏิบัติงาน	55
- Hygrometrics	55
- Psychrometrics	58

- Dew-Point Sensor	58
3.5 Transducer characteristics	62
3.6 การประยุกต์ใช้งาน	64
<b>บทที่ 2 การออกแบบและการทดลอง</b>	<b>65</b>
1. การทดลองและผลการทดลอง	67
2. วงจร Voltage-to-Current	68
3. การควบคุมความชื้น	70
4. Linear True-Mean-Square Temperature Controller	71
<b>บทที่ 3 สรุปผลและวิจารณ์</b>	<b>76</b>
<b>กิตติกรรมประกาศ</b>	<b>89</b>
<b>หนังสืออ้างอิง</b>	<b>90</b>



## สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1-1 ตารางแสดงคุณลักษณะของ Thermocouple	6
ตาราง 1-2 ตารางคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นตัวตรวจวัดความร้อน	13
ตารางคุณสมบัติของหัววัดความชื้น	70
ตารางคุณสมบัติ Triacs	77
ตารางคุณสมบัติ Triac Trigger Optocoupler	81
ตาราง Type J Thermocouple	85
ตาราง Resistance versus Temperature: Platinum	87



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

หน้า

รูป 1-1	การประยุกต์ใช้ Thermocouple อย่างง่าย	5
รูป 1-2	วงจรเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าของ Thermocouple กับค่าแรงดันไฟฟ้าที่รู้ค่า	7
รูป 1-3	potentionmeter สำหรับวัดค่าแรงดันไฟฟ้าของ Thermocouple	7
รูป 1-4	Seeback effect	8
รูป 1-5	การเกิดกระแสไหลเมื่อลวดได้รับความร้อน	9
รูป 1-6	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้ากับอุณหภูมิ	9
รูป 1-7	Peltier effect	10
รูป 1-8	ผลของความร้อนในด้านกลับของ Thompson	11
รูป 1-9	ก) รูปแสดง $emf C = emf A + emf B$ ข) กฎของอุณหภูมิแทรกของ Thermocouple	12 13
รูป 1-10	กฎของโลหะแทรก ก) การนำเส้นลวดชนิดที่สามมาต่อ ข) การต่อมิลลิโวลต์มิเตอร์	13 14
รูป 1-11	Radiation pyrometer	14
รูป 1-12	โครงสร้างของสารกึ่งตัวนำชนิด P และชนิด N ก) สารกึ่งตัวนำชนิด P และชนิด N ข) เมื่อให้ความร้อนกับสารกึ่งตัวนำชนิด P และชนิด N	15 16
รูป 1-13	แสดงแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังการให้ความร้อน	17
รูป 1-15	Resistance Thermometer	21
รูป 1-16	วงจรบริดจ์ที่ใช้ร่วมกับ resistance thermometer ในการวัดอุณหภูมิ	21
รูป 1-17	คุณลักษณะที่สำคัญของ Thermistor ก) คุณลักษณะของความต้านทาน-อุณหภูมิ ข) คุณลักษณะของแรงดัน-กระแสไฟฟ้า ค) คุณลักษณะของกระแส-เวลา	23 24 24
รูป 1-18	การวัดอุณหภูมิโดยใช้ Thermistor ต่อ โนวงจรบริดจ์	25
รูป 1-19	การควบคุมอุณหภูมิโดยใช้ Thermistor	26
รูป 1-20	การชดเชยผลของอุณหภูมิที่มีต่อทองแดงโดยใช้ Thermistor	27
รูป 1-21	การวัดการเป็นสื่อนำความร้อนโดยใช้ Thermistor	28

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูป 1-22 รูปแสดงปริมาตรบังคับ	31
รูป 1-23 ผลการทดลองและการจำลองสภาพการอบแห้งข้าวฟ่างสเกลใหญ่ ( ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ), 100 m <sup>3</sup>	42
รูป 1-24 ผลการทดลองและการจำลองสภาพการอบแห้งข้าวฟ่างสเกลใหญ่ ( ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และมีการกวนเมล็ดพืช ), 100 m <sup>3</sup>	42
รูป 1-25 ผลการทดลองและการจำลองสภาพการอบแห้งข้าวฟ่างสเกลเล็ก ( ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ )	43
รูป 1-26 ผลการทดลองและการจำลองสภาพการอบแห้งข้าวฟ่างสเกลเล็ก ( ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ )	44
รูป 1-27 ผลการทดลองและการจำลองสภาพการอบแห้งข้าวฟ่างสเกลเล็ก ( ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ )	45
รูป 1-28 Hygrometer sensing element	51
รูป 1-29 Psychrometric sensing element	53
รูป 1-30 Dew-point detection element	53
รูป 1-31 Saturated-solution dew-point sensing element	54
รูป 1-32 Relative-humidity/temperature sensor probe	56
รูป 1-33 Aluminum-oxide hygrometer	56
รูป 1-34 Electrolytic hygrometer system with P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> sensor	59
รูป 1-35 Psychrometric chart	59
รูป 1-36 Dew-point sensor with electro-optical condensation detection	60
รูป 1-37 Dew-point sensor system with using saturated-lithium-chloride-solution sensor	61
วงจร Instrumenting linearized thermistor with op amps-resistance mode	65
รูปความสัมพันธ์ระหว่าง temp กับ R <sub>t</sub>	67
รูปความสัมพันธ์ระหว่าง R <sub>t</sub> กับ V <sub>out</sub>	67
รูปความสัมพันธ์ระหว่าง V กับ I	67
รูปความสัมพันธ์ระหว่าง R <sub>t</sub> กับ I	67

กราฟผลการทดลองวงจร V-to-I Converter 69

เอกสารนี้เป็นเอกสารทวงวนวิชาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

วงจร V-to-I Converter 69

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
วงจรวัดความชื้น	70
วงจรร Linear True-Mean-Square Temperature Controller	73
แบบจำลองเครื่องอบแห้งเมล็ดพืช	75



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทนำ

### ระบบการอบแห้งเมล็ดพืช

เนื่องจากผลผลิตของข้าว ข้าวโพด และพืชอื่น ๆ จะมีเป็นฤดูกาล การที่จะเก็บผลผลิตพืชไว้บริโภคตลอดปีจำเป็นต้องมีการเก็บรักษาที่ดีเพื่อรักษาทั้งคุณภาพและปริมาณ ปัจจัยสำคัญในการเก็บรักษาที่สำคัญอันหนึ่งก็คือเมล็ดพืชเหล่านี้จะต้องมีปริมาณความชื้นที่เหมาะสม คือ ไม่สูงเกินไป ระยะเวลาของการเก็บรักษาได้โดยปลอดภัยขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นของเมล็ดพืช ถ้าปริมาณความชื้นต่ำก็จะเก็บรักษาได้นาน แต่การที่จะอบแห้งเมล็ดพืชให้แห้งมาก ๆ นั้นก็ไม่มีประโยชน์ เพราะนอกจากจะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการอบแห้งเพิ่มมากขึ้นโดยไม่จำเป็นแล้ว ยังทำให้เกิดความเสียหายระหว่างการขนถ่ายเมล็ดพืช ( เมล็ดแตกหัก ) ได้ง่ายและทำให้สูญเสียน้ำหนักในเชิงพาณิชย์อีกด้วย ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการเก็บรักษามีค่าระหว่าง 13 - 15%\* สำหรับเมล็ดพืชพวกแป้ง และประมาณ 10% สำหรับเมล็ดพืชน้ำมัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ต้องการเก็บรักษาและชนิดของเมล็ดพืช

### วิธีการอบแห้งที่ใช้ในปัจจุบัน

โดยปกติปริมาณความชื้นเมล็ดพืชขณะเก็บเกี่ยวจะมีค่าสูงกว่า 15% ดังนั้นจึงต้องมีการอบแห้งเพื่อลดความชื้น การอบแห้งซึ่งเกษตรกรปฏิบัติกันอยู่ อาศัยธรรมชาติคือพลังงานแสงอาทิตย์ โดยเกษตรกรจะเกี่ยวข้าวในขณะที่ปริมาณความชื้นเมล็ดข้าวไม่สูงนัก แล้ววางรวงข้าวไว้ในนาทิ้งตากแดดไว้ประมาณ 2 - 3 วัน เพื่อให้เมล็ดแห้งและให้ฟางยุบตัว หลังจากนั้นจะใช้ดอกมัดฟ่อนในตอนเช้าหรือเย็นเพื่อป้องกันไม่ให้เมล็ดข้าวร่วงจากรวงมาก แล้วทยอยขนฟ่อนข้าวเก็บเข้าลานนวด สำหรับข้าวนาปรังนั้นวิธีการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างไปจากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ทั้งนี้เนื่องจากการเก็บเกี่ยวข้าวนาปรังจะตรงกับฤดูฝน เมื่อเกษตรกรเกี่ยวข้าวก็จะทำการมัดฟ่อนทันทีแล้ววางไว้บนตอซังเพื่อให้พื้นน้ำ หรือ พื้นดินที่เปียกชื้น โดยให้ทางรวงข้าวห้อยลงมา เพื่อให้น้ำไหลลงเร็วขณะฝนตก เกษตรกรบางรายจะเกี่ยวและมัดฟ่อนแล้วขนย้ายเข้าลานนวดทันทีเพื่อทำการตากให้แห้ง แต่มักประสบปัญหาเนื่องจากฝนตกและพื้นที่สำหรับตากแห้งมีไม่เพียงพอ ปัญหาเมล็ดข้าวขึ้นจะเกิดกับข้าวนาปรังเป็นส่วนใหญ่ เมล็ดข้าวขึ้นเมื่อเก็บไว้จะมีอุณหภูมิสูงทำให้ข้าวเป็นพิษ ( มีจุดสีเหลืองในเมล็ด ) ทำให้ขายไม่ได้ราคา สำหรับการเก็บเกี่ยวข้าวโพดนั้นเกษตรกร

---

\* ในบทนี้ปริมาณความชื้นเมล็ดพืชจะมีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ( ยกเว้นจะบอกไว้เป็นอย่างอื่น ) ซึ่งเป็นที่นิยมกันในวงการค้า แต่ไม่สะดวกสำหรับการคำนวณทางทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิยมปล่อยให้ข้าวโพดแก่จัดแห้งคั่ว และจะเก็บเกี่ยวในวันที่มีแสงแดดจัด เมื่อเก็บเกี่ยวแล้วจะขนย้ายเข้าในโรงเก็บทันที ในกรณีที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยวตรงกับฤดูฝนข้าวโพดจะไม่แห้งคั่ว ดังนั้นต้องใช้เวลาในการทำให้แห้งในโรงเก็บที่มักจะโปร่ง และมีลมโกรกได้ดีแต่ข้าวโพดมักจะแห้งไม่ได้มาตรฐานในการซื้อขาย

จากที่กล่าวมาแล้วจะเห็นว่าวิธีการปฏิบัติของเกษตรกรทำให้การสูญเสียมีมาก เนื่องจากเมล็ดพืชถูกทิ้งไว้ในไร่นานานเกินควร การสูญเสียอาจเนื่องจากนก หนู แมลง ลม ฝน และแสงแดดเป็นต้น การเก็บเกี่ยวข้าวขณะที่มีปริมาณความชื้นต่ำทำให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากเมล็ดข้าวร่วงหล่นจากรวงมาก การร่วงหล่นของเมล็ดอาจเกิดขึ้นก่อนการเก็บเกี่ยวด้วย เมล็ดข้าวที่ทิ้งไว้ในไร่นาเป็นเวลานานมีโอกาสเกิดวงจรเปียก - แห้งภายในเมล็ดได้ง่าย กล่าวคือในเวลากลางวันเมล็ดพืชจะแห้ง และจะเปียกในเวลากลางคืนหรือขณะที่มีฝนตก ทำให้เปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดหลังการสีต่ำ ดังนั้นการเก็บเกี่ยวควรจะทำให้เร็วที่สุดเท่าที่จะทำได้ ปริมาณความชื้นของเมล็ดพืชที่เหมาะสมขณะเก็บเกี่ยวอาจอยู่ระหว่าง 20 - 23% เนื่องจากเมล็ดพืชยังมีปริมาณความชื้นสูงอยู่ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีเครื่องอบแห้งเพื่อลดปริมาณความชื้นของเมล็ดพืชให้ถึงระดับที่ปลอดภัยภายในระยะเวลาที่สมควร

โรงสีข้าวโดยทั่ว ๆ ไปมักจะไม่ม่เครื่องอบแห้ง การทำให้ข้าวแห้งใช้วิธีตากแดดบนลานคอนกรีตซึ่งต้องใช้แรงงานมาก ปัจจุบันโรงสีต่าง ๆ มักจะประสบปัญหาค้นแรงงานโดยเฉพาะการตากข้าวนี้ สำหรับข้าวโพดนั้นพ่อค้าคนกลางเป็นผู้รับซื้อผลผลิตจากเกษตรกรเช่นเดียวกับผลผลิตอื่น ๆ และนำไปขายให้ผู้รับซื้อรายใหญ่ ข้าวโพดส่วนใหญ่จะต้องผ่านกระบวนการอบแห้งในเครื่องอบขนาดใหญ่ ซึ่งใช้อากาศร้อนเป่าผ่านเมล็ดข้าวโพดก่อนในไซโลเพื่อรอการส่งออกหรือนำไปแปรสภาพเป็นแป้งหรืออาหารสัตว์ต่อไป

### ระยะเวลาการอบแห้งที่ปลอดภัย

เมื่อเก็บเมล็ดพืชขึ้นที่รวมกันอยู่เป็นปริมาณมากไว้ระยะเวลาหนึ่ง จุลินทรีย์ต่าง ๆ เช่น เชื้อราจะเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว เชื้อราบางอย่างอาจสร้างสารพิษซึ่งให้โทษต่อคนหรือสัตว์ที่กินเข้าไป เมล็ดพืชและจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในเมล็ดพืชมีการหายใจโดยการเผาผลาญคาร์โบไฮเดรตกับออกซิเจน ทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และความร้อน เป็นผลให้คาร์โบไฮเดรตในเมล็ดพืชลดลง เรียกว่าการสูญเสียมวลแห้ง มีผู้เชื่อกันว่าความร้อนที่เกิดขึ้นในเมล็ดข้าวเป็นสาเหตุของการเกิดข้าวพันหนู ( มีจุดสีเหลืองในเมล็ด )

Steele et al. รายงานว่า การสูญเสียมวลแห้งของเมล็ดข้าวโพดขึ้นอยู่กับเวลา ปริมาณความชื้น อุณหภูมิ และเปอร์เซ็นต์การแตกหักของเมล็ดข้าวโพด ถ้าข้าวโพดมีปริมาณความชื้นสูง อุณหภูมิพอเหมาะและเปอร์เซ็นต์การแตกหักสูง จะทำให้การสูญเสียมวลแห้งมีมาก Saul and Steele แนะนำว่าการสูญเสียมวลแห้งของข้าวโพดที่นวดในไร้นัดจะเก็บเกี่ยวไม่ควรสูงกว่า 0.5% ข้าวโพดที่นวดในไร้นัดจะเก็บเกี่ยวที่ปริมาณความชื้น 28% จะมีการแตกหักของเมล็ดข้าวโพดประมาณ 30% รายละเอียดวิธีการคำนวณหาระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการเก็บข้าวโพดขึ้นสามารถหาอ่านได้จาก Steele et al.

Seib et al. สร้างสมการจากผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสูญเสียมวลแห้งของข้าวเปลือกและเวลา ปริมาณความชื้นและอุณหภูมิของข้าวเปลือก ซึ่งสามารถเขียนได้ดังต่อไปนี้

$$DML = 1 - \exp(-TERM)$$

$$TERM = A (t / 1000)^C \cdot \exp [ D (1.8T - 28) ] \cdot \exp [ E (M_w - 0.14) ]$$

เมื่อ DML = การสูญเสียมวลแห้ง, เศษส่วน

t = เวลา, h

T = อุณหภูมิ, °C

$M_w$  = ปริมาณความชื้น, % มาตรฐานเปียก

A = 0.000914

C = 0.6540

D = 0.03756

E = 33.61

Arboleda and Manalo แนะนำว่าข้าวเปลือกที่มีปริมาณความชื้นตั้งแต่ 24% จะต้องเริ่มให้แห้งภายใน 1 วัน ข้าวที่มีปริมาณความชื้นระหว่าง 21 - 23.9% จะต้องเริ่มอบให้แห้งภายใน 2 วัน และข้าวที่มีปริมาณความชื้นต่ำกว่า 20.9% จะต้องเริ่มอบให้แห้งภายใน 3 วัน ถ้าไม่อบให้แห้งในระยะเวลาที่กำหนดจะทำให้ข้าวมีคุณภาพต่ำ ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งข้าวเปลือกโดยปลอดภัยของ Arboleda and Manalo น้อยกว่าของ Seib et al.

### ผลของอุณหภูมิอากาศอบแห้งต่อคุณภาพของเมล็ดพืช

อุณหภูมิของอากาศอบแห้งมีผลต่อคุณภาพของเมล็ดพืชมาก การใช้อุณหภูมิสูงเกินไปอาจทำให้เมล็ดร้าวอันเนื่องมาจากความเค้นที่เกิดขึ้นภายในเมล็ด เกิดการเปลี่ยนสีและแยกแป้งและน้ำมันได้น้อยลง คุณภาพของโปรตีนต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิของอากาศอบแห้งและอุณหภูมิของเมล็ดพืชจะแตกต่างกัน อุณหภูมิของเมล็ดพืชอาจจะสูงเท่ากับอุณหภูมิของอากาศอบแห้ง แต่ในกรณีของเครื่องอบแห้งแบบไหลตาม ( concurrent-flow dryer ) อุณหภูมิของเมล็ดพืชจะต่ำกว่าอุณหภูมิของอากาศอบแห้งเสมอ อุณหภูมิของเมล็ดพืชจะเป็นตัวกำหนดคุณภาพของเมล็ดพืช

อุณหภูมิสูงสุดที่สามารถใช้อบเมล็ดพืชขึ้นอยู่กับความต้องการในการใช้งานของเมล็ดพืช ปริมาณความชื้นของเมล็ดพืช และชนิดของเมล็ดพืช ถ้าต้องการเก็บเมล็ดพืชไว้ทำพันธุ์ต้องอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ โดยทั่วไปไม่ควรเกิน  $43^{\circ}\text{C}$  ถ้าต้องการทำแป้ง อุณหภูมิที่ใช้อบไม่ควรเกิน  $60^{\circ}\text{C}$  ในกรณีใช้ทำอาหารสัตว์สามารถใช้อุณหภูมิได้สูงถึง  $100^{\circ}\text{C}$  แต่ควรอบในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ เท่านั้น ในกรณีของข้าวมักต้องการให้เปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดหลังการสีสูง เรืองศรี สีหะวงษ์ พบว่าอุณหภูมิของอากาศอบแห้งไม่ควรสูงกว่า  $49^{\circ}\text{C}$  ถ้าจะให้ผลดียิ่งขึ้นควรใช้อุณหภูมิต่ำกว่า  $43^{\circ}\text{C}$  ค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งที่กล่าวมาทั้งหมดนี้เป็นค่าโดยประมาณที่สามารถนำมาใช้ได้ผลดี

#### หลักการอบแห้งเมล็ดพืช

โดยทั่ว ๆ ไปเรามักใช้อากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำเป็นตัวกลางในการอบแห้ง อากาศที่ใช้อาจจะถูกทำให้ร้อนขึ้นเพื่อ ใช้อบแห้ง ได้เร็วและได้ปริมาณความชื้นเมล็ดพืชหลังอบแห้งต่ำกว่าหรือเท่ากับ 14% อุณหภูมิของอากาศอบแห้งจะสูงเท่าใดนั้นขึ้นอยู่กับว่าเมล็ดพืชนั้นจะถูกนำไปใช้งานในลักษณะใด ซึ่งมักจะเลือกเอาอุณหภูมิสูงสุดที่ยอมให้ได้เพื่อที่จะสามารถอบแห้งได้เร็วที่สุด อากาศอบแห้งนี้จะถูกส่งผ่านชั้นเมล็ดพืชในถังเก็บ เมล็ดพืชจะไหลหรือไม่ก็ได้ อากาศที่ไหลผ่านเมล็ดพืชจะต้องกระจายผ่านเมล็ดพืชอย่างสม่ำเสมอ เพื่อให้การอบแห้งเป็นไปอย่างทั่วถึง ขณะที่อากาศอบแห้งไหลผ่านเมล็ดพืชการถ่ายเทความร้อนและมวลของน้ำจะเกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน ความร้อนจะถ่ายเทจากอากาศอบแห้ง ไปยังผิวของเมล็ดพืชซึ่งเย็นกว่าพร้อม ๆ กันนั้นน้ำที่ผิวของเมล็ดพืชจะระเหยและถ่ายเทไปยังอากาศที่ไหลผ่านซึ่งมีความดันไอน้ำต่ำกว่า อากาศอบแห้งจะมีอุณหภูมิลดลงและมีอัตราส่วนความชื้นหรือความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้น พร้อม ๆ กันนั้นปริมาณความชื้นของเมล็ดพืชจะลดลง เมื่อเมล็ดพืชดีแล้วอาจต้องผ่านกรรมวิธีบางอย่าง

## THERMAL TRANSDUCERS

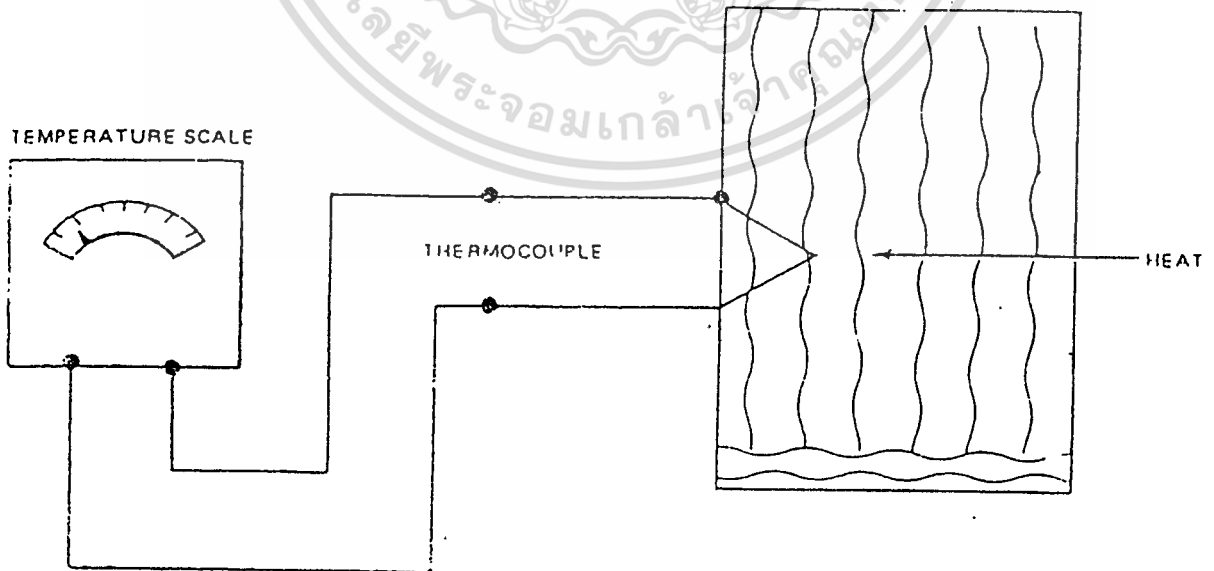
### THERMOCOUPLE

Thermocouples มีบทบาทที่สำคัญมากในวงการอุตสาหกรรมโดยเป็น transducers ที่ผลิตแรงเคลื่อนไฟฟ้า จึงสามารถใช้ได้โดยตรงในเครื่องมือวัดและบันทึกอุณหภูมิ เครื่องควบคุมต่าง ๆ เป็นต้น

Thermocouple เป็นอุปกรณ์ที่มีความไวต่ออุณหภูมิมากและจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป thermocouple ประกอบด้วยเส้นลวดโลหะต่างชนิดกันสองเส้นต่อเข้าด้วยกันที่ปลายข้างหนึ่ง ส่วนปลายอีกข้างหนึ่งจะถูกนำไปต่อกับมิเตอร์หรือวงจรอื่น ๆ ต่อไป ปลายของเส้นลวดที่ต่อเข้าด้วยกันนี้เรียกว่า hot junction ส่วนอีกปลายหนึ่งจะเรียกว่า cold junction เมื่อ hot junction ได้รับความร้อนจะเกิดแรงดันไฟฟ้า (voltage) ที่สามารถวัดค่าได้ที่ cold junction

โดยการเลือกเส้นลวดที่เหมาะสม แรงดันไฟฟ้าจะแปรค่าไปตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ทำการวัด เนื่องจากคุณสมบัติในการแปลงพลังงานความร้อนไปเป็นพลังงานไฟฟ้านี้ thermocouple จึงสามารถถือได้ว่าเป็น thermoelectric transducer รูป 1-1 เป็นวงจรอย่างง่าย ๆ ที่แสดงถึงการใช้ thermocouple ในการบันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในเตาอบ

เมื่อ hot junction ของ thermocouple ได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นในขณะที่ cold junction ยังได้รับอุณหภูมิเดิมอยู่ ความแตกต่างของอุณหภูมิของ junctions ทั้งสองนี้จะทำให้เกิดกระแสไหล ค่าของกระแสที่มิเตอร์แสดงนี้สามารถจะปรับเทียบให้เป็นค่าของอุณหภูมิได้



รูป 1-1 การประยุกต์ใช้ thermocouple อย่างง่าย ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุที่ใช้ประกอบกันเป็น thermocouple นั้นส่วนมากจะได้แก่ Iron - Constantan , Copper - Constantan , Chromel - Alumel และ Platinum / Rhodium - Platinum ตาราง 1-1 แสดงถึงช่วงของอุณหภูมิของ thermocouple แต่ละแบบ ตลอดจนเอาต์พุตเฉลี่ยในหน่วยมิลลิโวลต์ต่อองศาฟาเรนไฮต์

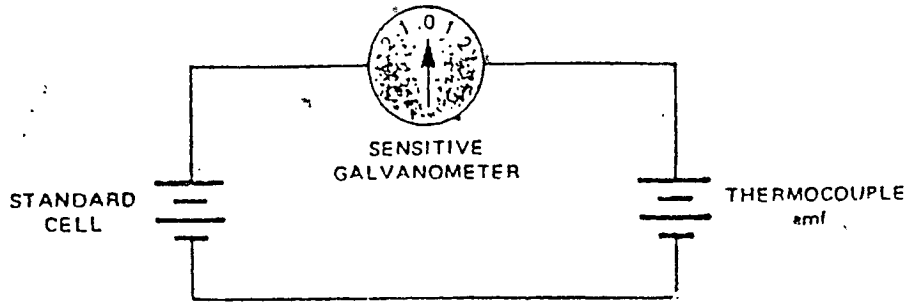
ในตาราง 1-1 นั้น ชื่อของวัสดุตัวแรกจะเป็นขั้วบวกไฟฟ้า ส่วนวัสดุชนิดหลังจะเป็นขั้วลบ

ตาราง 1-1 ตารางแสดงคุณสมบัติของ thermocouple

ชนิดของ thermocouple	ช่วงของอุณหภูมิ (° F)	เอาต์พุต (mV / ° F)
Iron - Constantan	0° - 1400°	0.03
Chromel - Alumel	500° - 2300°	0.023
Platinum / Rhodium - Platinum	1000° - 2700°	0.005
Copper - Constantan	-300° - + 700°	0.025

มิเตอร์ที่ใช้กับ thermocouple นั้นจะเป็นมิลลิโวลต์มิเตอร์แบบ permanent - magnet moving coil ที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของความดันไฟฟ้าเพียงเล็กน้อย ค่าที่มิเตอร์แสดงจะเป็นค่าของแรงดันไฟฟ้าที่ thermocouple สร้างขึ้น และเนื่องจากค่าของแรงดันไฟฟ้าของ thermocouple นี้สัมพันธ์โดยตรงกับอุณหภูมิ ดังนั้นสเกลของแรงดันไฟฟ้าจึงสามารถปรับเทียบให้เป็นหน่วยของอุณหภูมิได้ โดยที่จะต้องระมัดระวังในการปรับเทียบให้ดีเพราะค่าของศักดาไฟฟ้านี้เป็นมิลลิโวลต์ ฉะนั้นค่าความผิดพลาดเพียงหนึ่งมิลลิโวลต์อาจจะทำให้ค่าอุณหภูมิผิดไปถึง 50 - 100 องศา

ในการวัดเอาต์พุตของ thermocouple ให้แม่นยำมักจะใช้ potentiometer แทนมิลลิโวลต์มิเตอร์ potentiometer จะไม่ใช้แรงดันไฟฟ้าจาก thermocouple ไปทำให้มิเตอร์แสดงค่า แต่จะใช้วิธีการเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าของ thermocouple กับค่าแรงดันของแบตเตอรี่ รูป 1-2 เป็นวงจรเปรียบเทียบค่าอย่างง่าย ๆ



รูป 1-2 วงจรเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าของ thermocouple กับแรงดันไฟฟ้าที่รู้ค่า

เมื่อมิเตอร์ชี้ที่ศูนย์แสดงว่าศักดาไฟฟ้าทั้งสองข้างของมิเตอร์มีค่าเท่ากัน จากรูป 1-2 จะได้ว่า

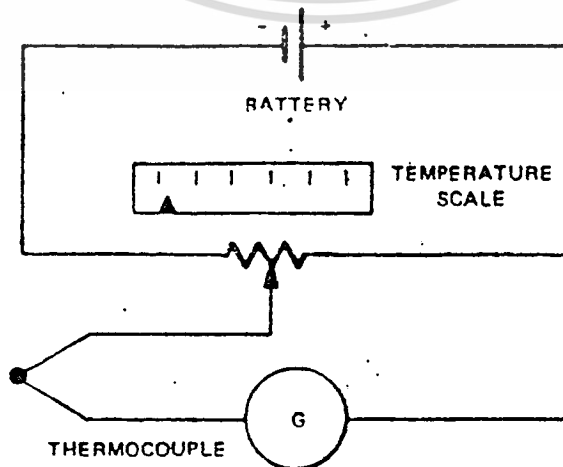
$$I = \frac{E}{R} = \frac{E_1 - E_2}{R_{\text{meter}}}$$

เมื่อ  $I = 0$  แสดงว่า  $E_1 = E_2$  เมื่อทราบค่าของ  $E_1$  อยู่แล้วก็จะทราบค่าของ  $E$  ด้วยเช่นกัน สำหรับรูป 1-3 นั้นเป็นวงจรอีกแบบหนึ่งที่ใช้ potentiometer เพื่อวัดค่าเอาต์พุตของ thermocouple

รูป 1-3 นี้ก็คล้ายกันกับรูป 1-2 แต่จะใช้ slide wire เป็นตัวปรับค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าทั้งสองข้างของมิเตอร์ให้เท่ากัน

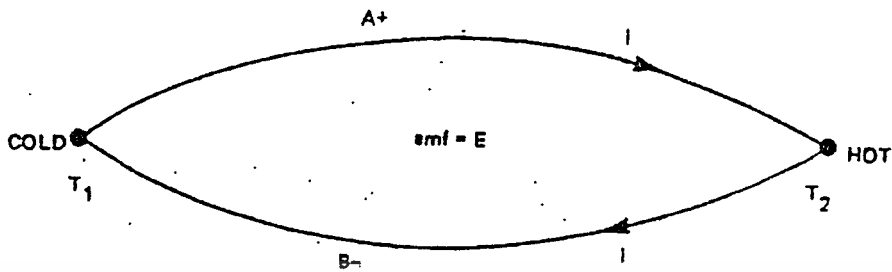
ปรากฏการณ์ที่สำคัญเกี่ยวกับคุณสมบัติของ thermocouple นั้นมีอยู่ 3 อย่างคือ

1. Seeback effect
2. Peltier effect
3. Thomson effect



รูป 1-3 potentiometer สำหรับวัดค่าแรงดันไฟฟ้าของ thermocouple

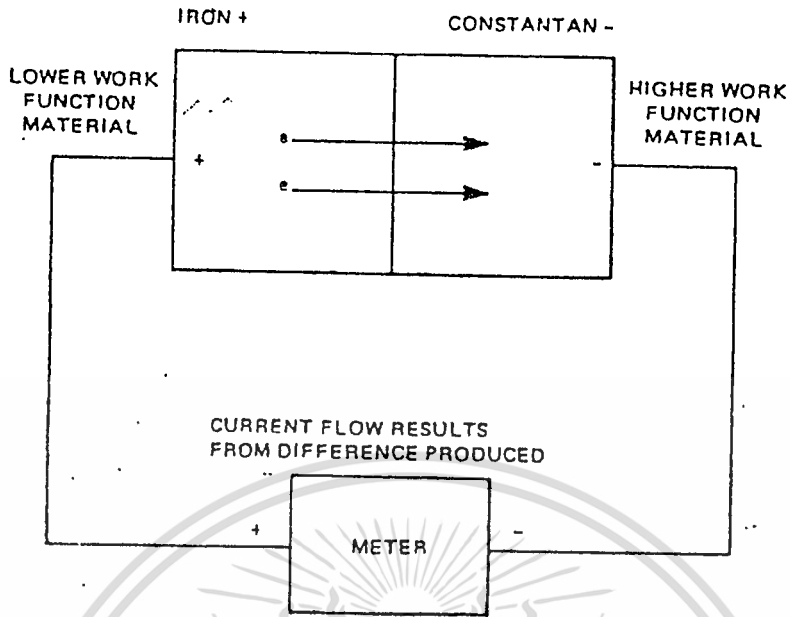
Thomas Seeback นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมันเป็นผู้ค้นพบอุณหภูมิต่อแรงดันไฟฟ้าจากความร้อนขึ้นเป็นครั้งแรกโดยที่ไม่คาดคิดมาก่อนในเวลานั้น เขานำลวดโลหะต่างชนิดกันสองเส้นมาต่อปลายเข้าด้วยกันคั้งแสดงในรูปที่ 1-4



รูป 1-4 Seeback effect

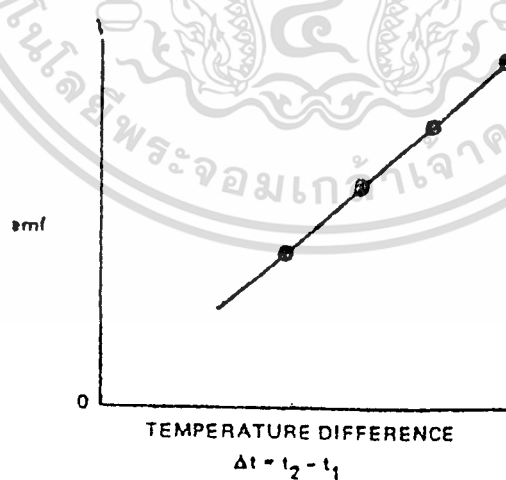
Seeback effect อธิบายไว้ว่าถ้าให้ความร้อนที่ปลายข้างหนึ่งของเส้นลวดโลหะต่างชนิดกันที่ติดกันอยู่ กระแสที่ไหลจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าของอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่าง hot junction กับ cold junction

การไหลของกระแส นั้นเกิดจากความปั่นป่วนของอิเล็กตรอน เมื่อหน้าสัมผัสได้รับความร้อน โดยที่วัสดุที่ใช้จะต้องเป็นวัสดุที่มีฟังก์ชันการทำงานไม่เท่ากัน วัสดุที่มีฟังก์ชันการทำงานต่ำ ( lower - work function material ) จะให้อิเล็กตรอนได้เร็วกว่าวัสดุที่มีฟังก์ชันการทำงานสูง ( higher work function ) ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น อิเล็กตรอนจะถูกปล่อยออกจากวัสดุที่มีฟังก์ชันการทำงานต่ำ ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดประจุบวกขึ้น ที่ระดับอุณหภูมิต่ำที่ จำนวนของอิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยออกมากจะมีจำนวนคงที่และกระแสจะไหลสม่ำเสมอ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยออกมากจะมีมากขึ้น กระแสก็จะไหลมากขึ้น รูป 1-5 แสดงถึงการเกิดกระแสขึ้นมา



รูป 1-5 การเกิดกระแสไหลเมื่อลวดได้รับความร้อน

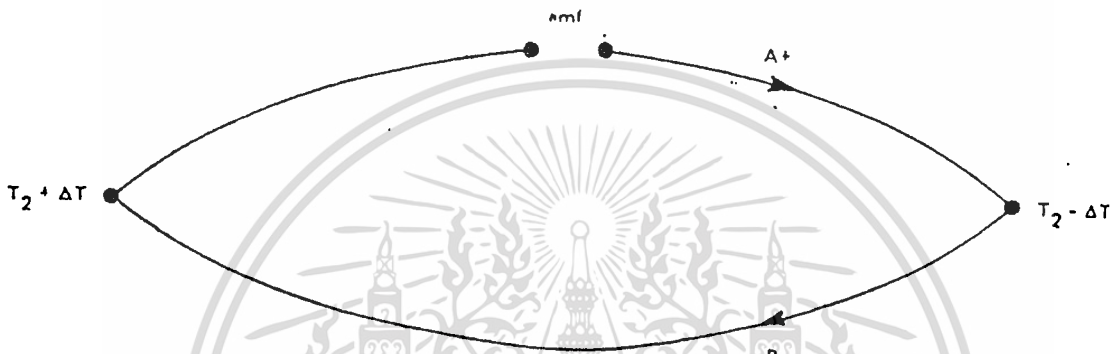
กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะคงไหลอยู่ตลอดเวลา ถ้าที่จุดต่อทั้งสองยังมีอุณหภูมิแตกต่างกัน แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ทำให้เกิดกระแสนี้คือแรงเคลื่อนไฟฟ้าความร้อน Seeback ( Seeback thermal emf ) สำหรับรูป 1-6 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้ากับค่าของอุณหภูมิที่ต่างกันระหว่าง hot junction กับ cold junction



รูป 1-6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้ากับอุณหภูมิ

ในปี ค.ศ. 1834 Jean C.A Peltier ได้ค้นพบว่าเมื่อกระแสไหลผ่านจุดเชื่อมต่อของเส้น  
 ตัวที่ต่างชนิดกันที่ปลายข้างหนึ่งจะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นในขณะที่ปลายอีกข้างหนึ่งจะมีอุณหภูมิลด  
 ลง รูป 1-7 แสดงถึงผลของ Peltier

ตัวอย่างเช่นในกรณีของเส้นตัวแบบ iron - constantan นั้น ความร้อนจะถูกดูดกลืนเมื่อ  
 กระแสไหลผ่าน hot junction ในทิศทางจาก constantan ไปหา iron iron จะเป็นขั้วบวก  
 ไฟฟ้าความร้อนเมื่อเทียบกับ constantan ปริมาณความร้อนที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงเมื่อประจุไฟฟ้า  
 หนึ่งคูลอมบ์ (coulomb) ตกคล่อมจุดเชื่อมต่อนั้นเรียกว่าผลของ Peltier ของอุณหภูมิที่จุดเชื่อม  
 ต่อนั้น



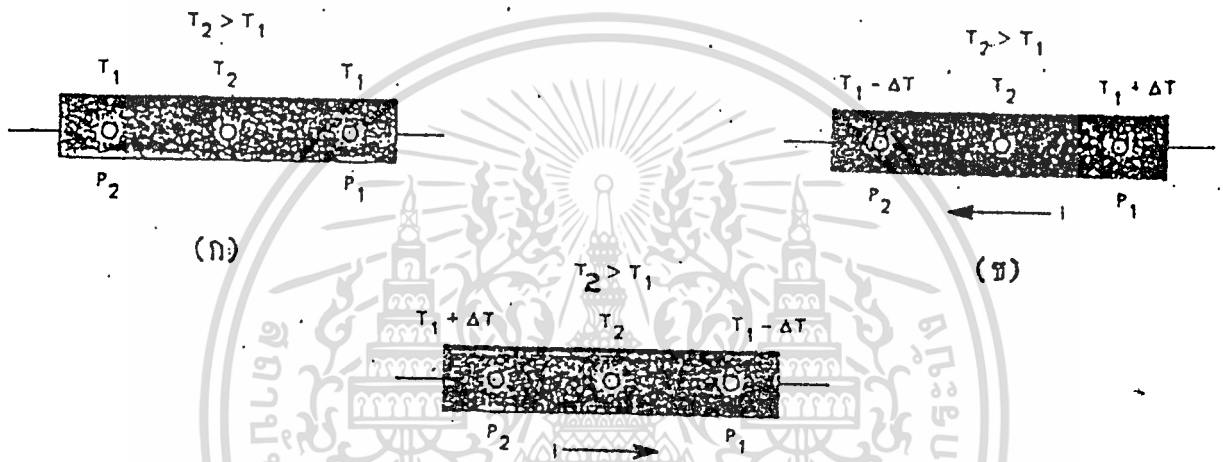
รูป 1-7 Peltier effect

ดังที่กล่าวมาแล้วว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวงจร ( โดยที่ cold junction นั้นถูก  
 รักษาให้มีอุณหภูมิต่ำ ) นั้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างของอุณหภูมิตระหว่าง hot  
 junction และ cold junction แต่อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติแล้วไม่เป็นความจริงเสมอไป ใน  
 กรณีที่วงจรประกอบด้วยเส้นตัวที่เป็นเหล็กและทองแดง โดยที่ cold junction อยู่ที่จุด  
 melting ice นั้น แรงเคลื่อนไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ hot junction เพิ่มขึ้น และจะเพิ่ม  
 ขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงค่าสูงสุด จากนั้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะมีค่าลดลงในขณะที่อุณหภูมิยังเพิ่มขึ้น  
 เรื่อย ๆ แรงเคลื่อนไฟฟ้านี้จะลดลงจนเป็นศูนย์หรือเป็นค่าลบก็ได้ ผลในทางตรงข้ามของ  
 อุณหภูมิอันนี้จะนำไปสู่ผลของ Thomson

W.T.Thomson เป็นนักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ เขาค้นพบว่าเมื่ออุณหภูมิแตกต่างกัน  
 แรงเคลื่อนไฟฟ้าสามารถจะเกิดขึ้นได้ไม่เฉพาะกรณีของเส้นตัวโลหะต่างชนิดกันเท่านั้น แต่ยัง  
 สามารถเกิดขึ้นภายในเส้นตัวเส้นเดียวที่มีอุณหภูมิต่างกันด้วย เขาพบว่าเมื่อกระแสไหลผ่านเส้น  
 ตัวทองแดงซึ่งมีอุณหภูมิต่างกันไม่เท่ากัน ที่จุด P ใด ๆ ความร้อนจะลดลงถ้ากระแสที่ไหล  
 ผ่านนั้นไหลไปในทิศทางตรงกันข้ามแล้วที่จุด P จะมีความร้อนเพิ่มขึ้น แต่ในกรณี  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของเส้นลวดเหล็กนั้น ที่จุด P ใด ๆ จะมีความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสไหลในทิศทางการไหลของความร้อน และความร้อนจะลดลงเมื่อกระแสไหลในทิศทางตรงกันข้าม

รูป 1-8 ( ก ) เป็นแท่งโลหะที่ตรงจุดกึ่งกลางถูกทำให้มีอุณหภูมิ  $T_2$  และที่จุด  $P_1$  และ  $P_2$  นั้นจะมีอุณหภูมิเป็น  $T_1$  เท่ากัน ( อุณหภูมิ  $T_1$  มีค่าน้อยกว่า  $T_2$  ) เมื่อป้อนกระแสจากด้านกำเนิดภายนอกให้แท่งโลหะนี้ในทิศทางตามรูป 1-8 ( ข ) อุณหภูมิที่จุด  $P_1$  และ  $P_2$  จะเปลี่ยนเป็น  $T_1 + \Delta T$  และ  $T_1 - \Delta T$  ตามลำดับ แต่เมื่อกระแสไหลในทิศทางตรงกันข้าม อุณหภูมิที่จุด  $P_1$  และ  $P_2$  จะกลายเป็น  $T_1 - \Delta T$  และ  $T_1 + \Delta T$  ตามลำดับ ดังแสดงในรูป 1-8 ( ก ) นั่นคือแท่งโลหะนี้จะมีคุณสมบัติเช่นเดียวกับทองแดงนั่นเอง



รูป 1-8 ผลความร้อนในด้านกลับของ Thomson

ผลความร้อนในด้านกลับของ Thomson นั้นต่างกับผลของ Peltier ตรงที่ว่าผลนี้เกิดขึ้นในตัวนำชนิดเดียวกันแทนที่จะเป็นจุดเชื่อมต่อของตัวนำต่างชนิดกัน

แรงดันไฟฟ้าที่สร้างกระแส Seeback นั้นเป็นผลรวมของแรงเคลื่อนไฟฟ้า Peltier ที่จุดเชื่อมต่อกับแรงเคลื่อนไฟฟ้า Thomson บนเส้นลวดที่ต่างกันทั้งสองเส้น ถ้า  $E$  เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าของ thermocouple หรือแรงเคลื่อน Seeback แล้วจะได้ว่า

$$E = C(T_1 - T_2) + K(T_1^2 - T_2^2)$$

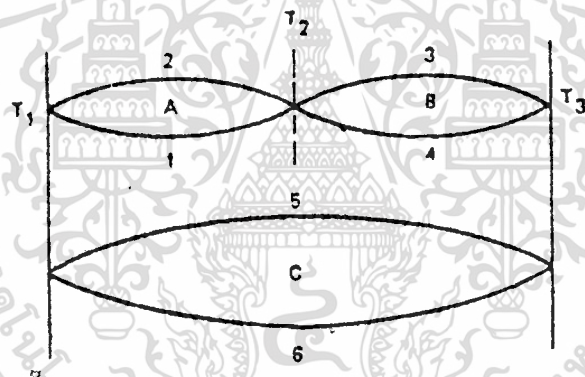
โดยที่  $C$  = สัมประสิทธิ์ของ Thomson

$K$  = ค่าความนำความร้อน ( thermal conductivity ) ของโลหะที่ใช้

นอกจากนี้ยังมีกฎที่สำคัญเกี่ยวกับ thermocouple ที่ควรจะกล่าวถึงอีก 2 กฎ คือ กฎของอุณหภูมิแทรก ( law of intermediate temperatures ) และกฎของโลหะแทรก ( law of intermediate metals )

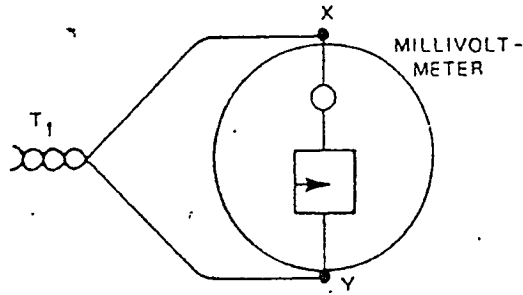
กฎของอุณหภูมิแทรกกล่าวไว้ว่าถ้าโลหะต่างชนิดกันสองชนิดทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นเมื่อจุดเชื่อมต่อดำอุณหภูมิเป็น  $T_1$  และ  $T_2$  และเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า  $E_2$  เมื่อจุดเชื่อมต่อดำอุณหภูมิเป็น  $T_2$  และ  $T_3$  ตามลำดับแล้ว แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเมื่อจุดเชื่อมต่อทั้งสองมีค่าอุณหภูมิเป็น  $T_1$  และ  $T_3$  จะมีค่าเท่ากับ  $E_1 + E_2$

ผลของกฎนี้ก็หมายถึงว่าผลรวมของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจาก thermocouples สองอันโดยที่ thermocouple อันหนึ่งมีค่าอุณหภูมิที่จุดเชื่อมต่อเป็น  $T_1$  และ  $T_2$  และ thermocouple อีกอันหนึ่งมีค่าอุณหภูมิที่จุดเชื่อมต่อเป็น  $T_2$  และ  $T_3$  นั้น จะมีค่าเท่ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้าของ thermocouple อันเดียวที่มีอุณหภูมิที่จุดเชื่อมต่อเป็น  $T_1$  และ  $T_3$  รูป 2-9 ( ก ) และรูป 1-9 ( ข ) แสดงถึงความสัมพันธ์นี้



( ก )  $emf C = emf A + emf B$

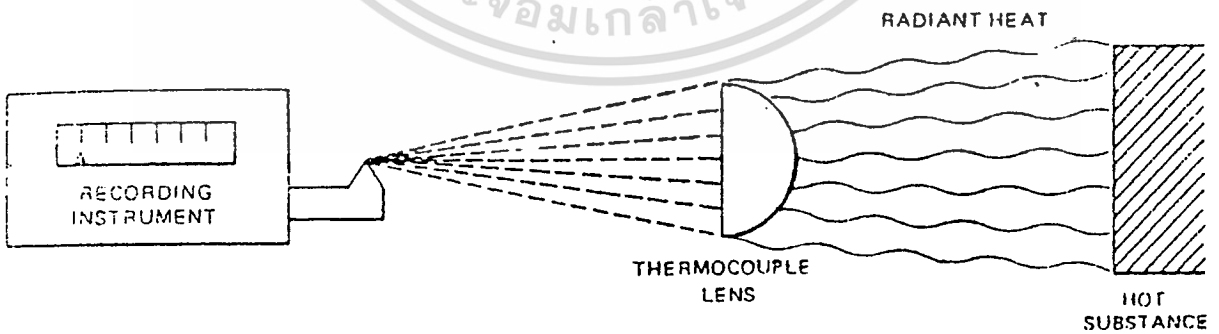




( ข ) การต่อมิลลิโวลต์มิเตอร์

รูป 1-10 แสดงถึงกฎของโลหะแทรก

Thermocouple สามารถนำไปใช้ได้อย่างกว้างขวาง เช่นใช้ในการควบคุมอุณหภูมิในเตาเผา หรืออาจจะใช้ในเครื่องมือวัดและบันทึกค่าอุณหภูมิ เพื่อเป็นตัวอย่างในที่นี้จะกล่าวถึง radiation pyrometer ในขบวนการอุตสาหกรรมเกี่ยวกับความร้อนสูง ๆ นั้นจำเป็นจะต้องใช้เครื่องวัดอุณหภูมิแบบพิเศษเพราะเครื่องวัดอุณหภูมิโดยทั่ว ๆ ไปเช่นเครื่องวัดอุณหภูมิแบบปรอท นั้นจะเสียหายเมื่อใช้วัดอุณหภูมิสูง ๆ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้เครื่องวัดที่ไม่ต้องนำไปสัมผัสกับวัตถุที่ต้องการวัดอุณหภูมิซึ่งได้แก่ pyrometer มีสองชนิดคือ radiation pyrometer และ optical pyrometer ในกรณีของ optical pyrometer นั้นไม่ได้ใช้ thermocouple แต่สำหรับ radiation pyrometer นั้นใช้ thermocouple รูป 1-11 แสดงถึง radiation pyrometer



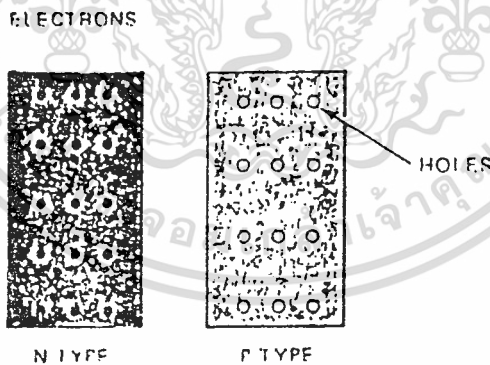
รูป 1-11 Radiation pyrometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

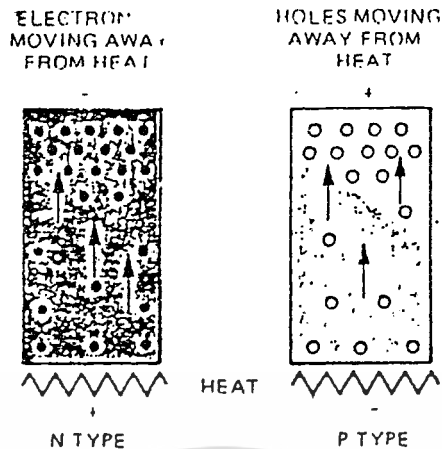
Radiation pyrometer นี้จะใช้เลนส์รับรังสีความร้อนและปรับโฟกัสให้คลื่นความร้อนไปตกบน thermocouple ที่บรรจุอยู่ในหลอดสูญญากาศ และใช้ potentiometer เป็นตัวบันทึกค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดจาก thermocouple โดยที่เราสามารถจะปรับเทียบสเกลให้เป็นค่าของอุณหภูมิได้ สำหรับการทำงานของ thermocouple นี้ก็เหมือนกับ thermocouple ที่นำไปสัมผัสกับวัตถุที่ต้องการวัดความร้อนโดยตรงเช่นเดียวกัน

เนื่องจาก thermocouple จะผลิตแรงดันไฟฟ้าที่เป็นสัดส่วนกับค่าความแตกต่างของอุณหภูมิตั้งระหว่าง hot junction และ cold junction ดังนั้นจึงต้องระมัดระวังในการเลือกขนาดของวัตถุและชนิดของหลอดป้องกัน (protective tube) อย่างถูกต้อง การส่งถ่ายความร้อนอาจจะเข้าเกินไปถ้า hot junction ใหญ่เกินไปหรือหลอดป้องกันมีขนาดไม่ถูกต้องทำให้ผลตอบสนองทางไฟฟ้าจะช้าไปด้วย hot junction จึงต้องมีขนาดเล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้และหลอดป้องกันที่เลือกใช้ก็ควรจะมีการลดทอนและช่วงการ delay น้อยที่สุด

เมื่อไม่นานมานี้สารกึ่งตัวนำได้ถูกนำมาใช้เป็น thermocouple กันมากขึ้น ในการที่จะผลิตไฟฟ้าจากอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำจำเป็นจะต้องใช้สารกึ่งตัวนำสองชนิดคือชนิด P ( P-type ) และชนิด N ( N-type ) ดังแสดงในรูป 1-12 ( ก ) สารกึ่งตัวนำชนิด N จะมีจำนวนของอิเล็กตรอนอิสระอยู่ สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิด P นั้นจะมีอิเล็กตรอนไม่เพียงพอซึ่งหมายถึง holes อยู่นั่นเอง



( ก ) สารกึ่งตัวนำชนิด P และชนิด N

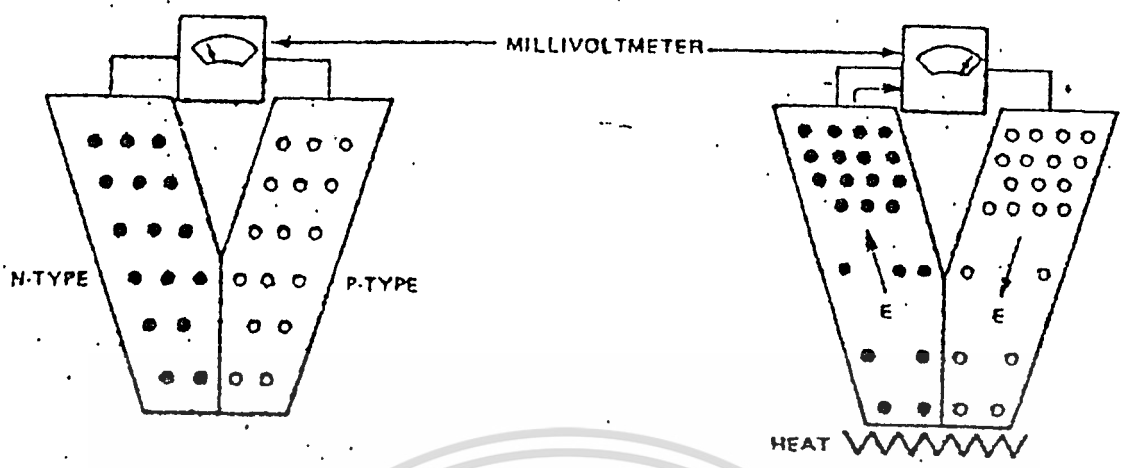


( ข ) เมื่อให้ความร้อนกับสารกึ่งตัวนำชนิด P และชนิด N

รูป 1-12 โครงสร้างของสารกึ่งตัวนำชนิด P และชนิด N

เมื่อให้ความร้อนเข้ากับสารกึ่งตัวนำชนิด N อิเล็กตรอนจะเกิดการปั่นป่วนและวิ่งไปรวมกันอยู่ทางด้านบนที่มีอุณหภูมิเย็นกว่า ดังนั้นที่ปลายด้านเย็นนั้นจะมีอิเล็กตรอนรวมตัวกันมากกว่าทางด้านร้อน นั่นคือจะกลายเป็นประจุลบเมื่อเทียบกับปลายด้านร้อน สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิด P เมื่อได้รับความร้อนก็เช่นเดียวกัน holes (majority carriers) จะเคลื่อนที่ไปรวมอยู่ทางด้านเย็น เนื่องจาก holes นั้นแสดงถึงการขาดอิเล็กตรอนจึงเกิดประจุบวกขึ้นที่ปลายอีกข้างหนึ่งที่ไม่ได้รับความร้อนของสารกึ่งตัวนำนั้น รูป 1-13 ( ข ) แสดงให้เห็นว่าสารกึ่งตัวนำชนิด N จะกลายเป็นประจุลบที่ปลายด้านเย็นและเป็นประจุบวกที่ปลายด้านร้อน ส่วนสารกึ่งตัวนำชนิด P นั้นจะกลายเป็นประจุบวกที่ปลายด้านเย็นและประจุลบที่ปลายด้านร้อน

ถ้านำสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดมาต่อเข้าด้วยกันดังแสดงในรูป 1-13 ( ก ) แล้วจะมีเส้นทาง การไหลของอิเล็กตรอนเกิดขึ้นเมื่อได้รับความร้อนดังแสดงในรูป 1-13 ( ข )



(ก)

(ข)

รูป 1-13 (ก) ก่อนให้ความร้อน

(ข) แรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นเนื่องจากการให้ความร้อน



## RESISTANCE THERMOMETERS

Resistance thermometer จัดเป็น transducer อีกแบบหนึ่งที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิได้โดยใช้วัสดุที่มีค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลงไปตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ วัสดุเหล่านี้โดยทั่วไปได้แก่ platinum , ทองแดง และ nickel ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานของเส้นลวดตัวนำเหล่านี้กับอุณหภูมิสามารถจะคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้คือ

$$R_t = R_{ref} (1 + \alpha \Delta t)$$

โดยที่  $R_f$  = ค่าความต้านทานของตัวนำที่อุณหภูมิ  $t^\circ C$  ใด ๆ  
 $R_{ref}$  = ค่าความต้านทานของตัวนำที่อุณหภูมิอ้างอิง. ( โดยทั่วไปคือ  $0^\circ C$  )  
 $\alpha$  = สัมประสิทธิ์ของค่าความต้านทานต่ออุณหภูมิของโลหะตัวนำ  
 $\Delta t$  = ค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิ  $t^\circ C$  ใด ๆ กับอุณหภูมิอ้างอิง

โลหะตัวนำโดยทั่ว ๆ ไปนั้น สัมประสิทธิ์ของค่าความต้านทานต่ออุณหภูมิเป็นบวก กล่าวคือค่าความต้านทานของโลหะตัวนำจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่วัสดุบางอย่างเช่น คาร์บอน , ger-manium นั้นจะมีสัมประสิทธิ์ของค่าความต้านทานต่ออุณหภูมิเป็นลบ นั่นคือค่าความต้านทานของวัสดุเหล่านี้จะลดลงถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปแล้วควรจะใช้วัสดุที่มีค่า  $\alpha$  สูงเพราะหมายถึงว่าค่าความต้านทานของโลหะตัวนำจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างเห็นได้ชัดถึงแม้ว่าอุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยก็ตาม ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปนี้สามารถจะวัดได้โดยใช้ Wheatstone bridge และปรับเทียบให้แสดงค่าเป็นค่าของอุณหภูมิได้ รูป 1-14 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานของโลหะตัวนำหลาย ๆ แบบเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป จะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานของ platinum และทองแดงนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นเชิงเส้นกับอุณหภูมิ ในขณะที่ nickel นั้นมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ค่อยจะเป็นเชิงเส้นนัก โดยทั่ว ๆ ไปจึงนิยมใช้ platinum เป็นตัวตรวจวัดอุณหภูมิมากที่สุด ตาราง 1-2 จะสรุปถึงคุณลักษณะของโลหะตัวนำที่ใช้กันอยู่สามแบบคือ platinum , ทองแดง และ nickel เส้นลวด platinum นั้นจะนิยมใช้ในงานทางอุตสาหกรรม



ตาราง 1-2 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นค่าอุณหภูมิ

ชนิด	ช่วงใช้งาน	ความเที่ยงตรง	ข้อดี	ข้อเสีย
Platinum	- 300 ° F ถึง + 1500 ° F	$\pm 1$ ° F	- ราคาถูก - เสถียรภาพสูง - ใช้งานได้ในช่วงกว้าง	- ผลตอบสนองค่อนข้างช้า
ทองแดง	- 325 ° F ถึง + 250 ° F	$\pm 0.5$ ° F	- มีคุณสมบัติเชิงเส้นสูง - เสถียรภาพสูงในช่วงอุณหภูมิปกติ	- ใช้วัดอุณหภูมิได้ในช่วงจำกัด
Nickel	+ 32 ° F ถึง + 150 ° F	$\pm 0.5$ ° F	- ทนทาน - ความไวสูง - สัมประสิทธิ์ต่ออุณหภูมิสูง	- มีคุณสมบัติไม่ค่อยเป็นเชิงเส้น - ใช้วัดอุณหภูมิได้ในช่วงจำกัด

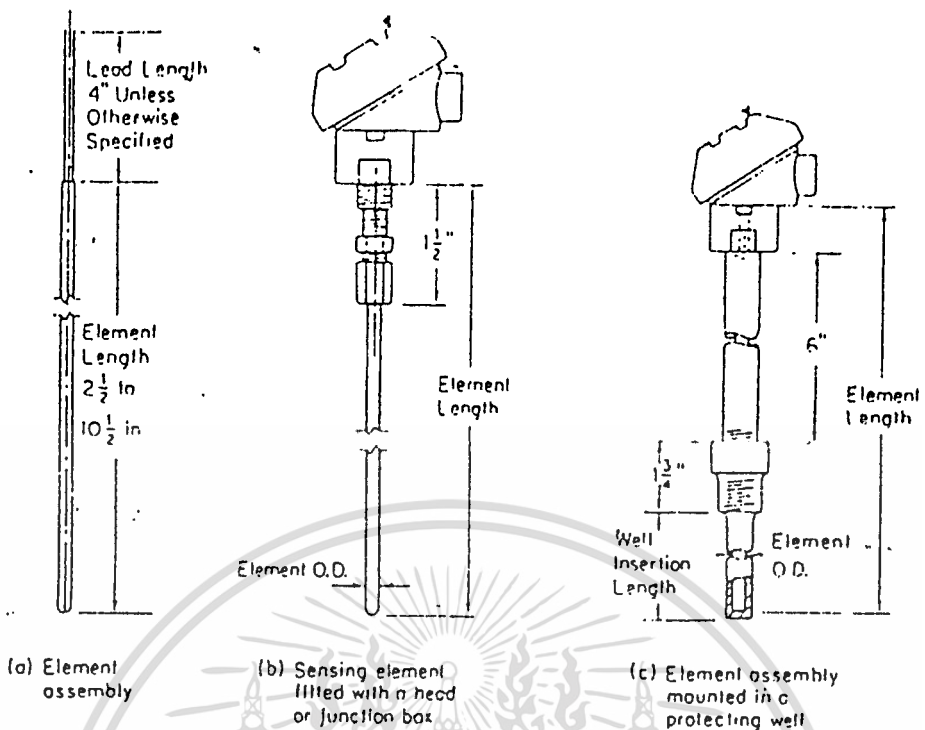
Resistance thermometer ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมนั้นมักจะติดตั้งไว้ใน protecting tube หรือ protecting well เสมอเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นต่ออุปกรณ์ตรวจวัด และยังใช้ป้องกันความสกปรกซึ่งอาจจะมีผลต่อการวัดหรือควบคุมอุณหภูมิได้ โดยทั่วไปแล้วจะใช้ protecting tube ในระดับความดันบรรยากาศ ส่วน protecting well นั้นจะใช้ในกรณีของการวัดหรือควบคุมอุณหภูมิของของเหลวหรือแก๊สที่ความดันสูง ๆ เช่นในท่อ , steam power plants , pumping station และอื่น ๆ protecting well นี้มักจะใช้เมื่อความดันในของเหลวหรือแก๊สที่ต้องการวัดอุณหภูมินั้นมีค่าสูงกว่า 3 เท่าของความดันบรรยากาศ protecting well นี้จะทำจาก stainless steel หรือ carbon steel และมีอุปกรณ์ตรวจวัดบรรจุอยู่ภายใน รูป 1-15 แสดงถึง resistance thermometer ที่มี junction box สำหรับต่อสายไปยังเครื่องวัดติดอยู่ที่ส่วนบนของ protecting tube หรือ well junction box นี้จะต้องกันน้ำได้เพื่อป้องกันมิให้น้ำเข้าในกรณีที่ใช้วัดอุณหภูมิของของเหลว

รูป 1-16 เป็นวงจรบริดจ์ที่ใช้ร่วมกับ resistance thermometer ในการวัดค่าความต้านทาน แต่เนื่องจากว่าค่าความต้านทานของอุปกรณ์ตรวจวัดจะมีความสัมพันธ์อย่างเป็นเชิงเส้นกับอุณหภูมิ ดังนั้นจึงสามารถปรับเทียบให้ค่าที่อ่านได้เป็นค่าของอุณหภูมิ จากรูป  $R_t$  จะเป็นค่าความต้านทาน

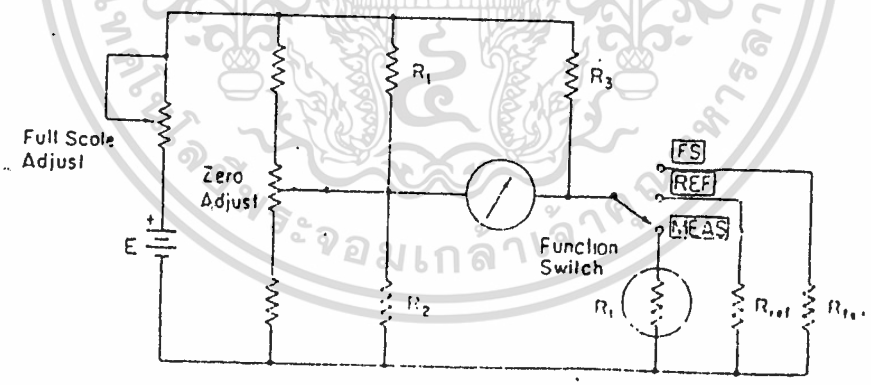
ของ resistance thermometer ที่อุณหภูมิ  $t^{\circ}\text{C}$  ใด ๆ ที่ต้องการวัด  $R_{\text{Ref}}$  เป็นตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานคงที่ซึ่งมีค่าความต้านทานของ resistance thermometer ที่อุณหภูมิอ้างอิง ( $^{\circ}\text{C}$ ) ส่วน  $R_{\text{Fs}}$  นั้นจะเป็นตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานคงที่อีกตัวหนึ่ง ค่าความต้านทาน  $R_{\text{Fs}}$  นี้จะมีค่าเท่ากับค่าความต้านทานของ resistance thermometer ที่ทำให้มิเตอร์แสดงค่ากระแสชี้ค่าเต็มสเกล ซึ่งก็หมายถึงค่าอุณหภูมิสูงสุดเช่นกัน เพราะค่าความต้านทานของ resistance thermometer นั้นสัมพันธ์อย่างเป็นเชิงเส้นกับอุณหภูมิ

ก่อนที่จะทำการวัดอุณหภูมินั้นจะต้องทำการปรับเทียบเครื่องมือวัดนี้ก่อน กล่าวคือขั้นแรกให้สวิตช์ไปอยู่ที่ตำแหน่ง "REF" และปรับค่าความต้านทานของตัวต้านทาน "zero adjust" จนมิเตอร์ชี้ที่ศูนย์ ซึ่งหมายถึงอุณหภูมิศูนย์องศาแน่นอน ต่อไปสับสวิตช์ให้ไปอยู่ ณ ตำแหน่ง "FS" และปรับค่าความต้านทานของตัวต้านทาน "full scale adjust" จนมิเตอร์แสดงค่า full scale พอดี ที่ตำแหน่ง full scale นี้จะเป็นค่าสูงสุดของอุณหภูมิของวงจรนี้สามารถวัดได้ จากนั้นก็สามารถนำเครื่องวัดนี้ไปวัดอุณหภูมิได้

เมื่อจะทำการวัดค่าของอุณหภูมิ  $t^{\circ}\text{C}$  ใด ๆ สวิตช์จะถูกกลับไปอยู่ที่ตำแหน่ง "MEAS" ซึ่งต่ออยู่กับ resistance thermometer เข็มของมิเตอร์ก็จะชี้แสดงค่าใดค่าหนึ่งบนสเกลซึ่งถูกปรับเทียบให้เป็นค่าของอุณหภูมิแล้วตามวิธีการปรับเทียบที่กล่าวมาแล้วข้างต้น อย่างไรก็ตามข้อเสียของเครื่องมือวัดที่ใช้ Wheatstone bridge ก็จะมีค่าความต้านทานของหน้าสัมผัสของวงจรบริดจ์เข้ามารวมกับค่าความต้านทานของ resistance thermometer หรือค่าความต้านทานของตัวต้านทานและเส้นลวดในวงจรอาจจะเปลี่ยนแปลงไปตามความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสที่ไหลในวงจร ทำให้การวัดอาจจะผิดพลาดไปได้ แต่อย่างไรก็ตามข้อเสียนี้สามารถแก้ไขได้โดยการใช้วงจรบริดจ์แบบ Kelvin double bridge แทน



รูป 1-15 Resistance thermometer



รูป 1-16 วงจรบริคต์ที่ใช้ร่วมกับ resistance thermometer ในการวัดอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## THERMISTOR

Thermistor หรือ thermal resistor เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีค่าสัมประสิทธิ์ของความต้านทานต่ออุณหภูมิเป็นลบ นั่นคือถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น ค่าความต้านทานของ thermistor จะลดลง ใน thermistor บางแบบนั้นค่าความต้านทานของมันที่อุณหภูมิห้องอาจจะลดลงถึง 6% ต่ออุณหภูมิแต่ละองศาเซลเซียสที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ว่า thermistor มีความไว (sensitivity) ต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิดีมาก ดังนั้นจึงนิยมใช้ thermistor ในการวัดและการควบคุมตลอดจนการชดเชยอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิต่ำ ๆ ตั้งแต่  $-100^{\circ}\text{C}$  ถึง  $300^{\circ}\text{C}$

โลหะออกไซด์ที่ใช้ทำเป็น thermistor นั้นได้แก่ manganese, nickel, cobalt, uranium, ทองแดง และเหล็ก เป็นต้น ค่าความต้านทานของ thermistor จะอยู่ในช่วง 0.5 โอห์ม ถึง  $75 \times 10^6$  โอห์ม ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับรูปร่างและชนิดของมัน thermistor ที่มีขนาดเล็กที่สุดจะเป็นแบบลูกปัดหรือลูกประคำ (bead) ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 0.15 มม. ถึง 1.25 มม. thermistor แบบนี้จะติดตั้งอยู่ที่ปลายของแท่งแก้วแข็งเพื่อสะดวกแก่การใช้งาน ส่วน thermistor แบบอื่น ๆ นั้นได้แก่ thermistor แบบแผ่นกลม (disk) และแบบวงแหวน (washer) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 2.5 มม. ถึง 25 มม.

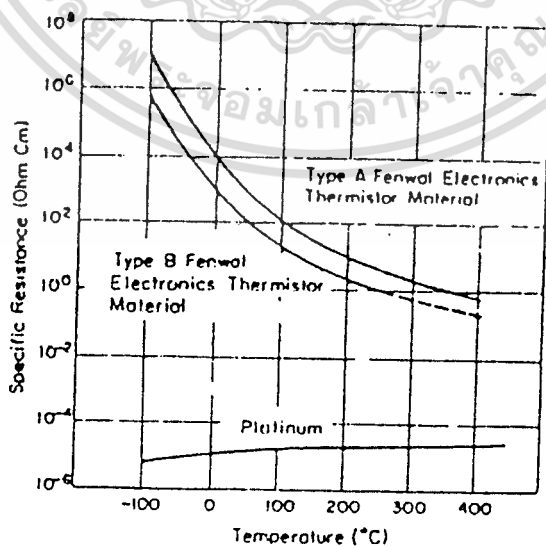
Thermistor มีคุณลักษณะที่สำคัญสามประการ ซึ่งทำให้ thermistor สามารถใช้ได้อย่างกว้างขวางในการวัดและการควบคุมอุณหภูมิ คุณลักษณะทั้งสามประการนี้ได้แก่

1. คุณลักษณะของค่าความต้านทาน - อุณหภูมิ
2. คุณลักษณะของแรงดัน - กระแสไฟฟ้า
3. คุณลักษณะของกระแส - เวลา

รูป 1-17 ( ก ), ( ข ) และ ( ค ) แสดงถึงคุณลักษณะที่สำคัญทั้งสามประการนี้ จากรูป 1-17 ( ก ) จะเห็นว่าสัมประสิทธิ์ของค่าความต้านทานต่ออุณหภูมิของ thermistor ซึ่งเป็นแบบลบ (negative) นั้นมีค่าสูงมาก คุณลักษณะอันนี้ทำให้ thermistor เป็น transducer ที่นิยมใช้ในการวัดอุณหภูมิ นอกจากนี้ในรูป 1-17 ( ก ) ยังเปรียบเทียบถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานต่ออุณหภูมิของวัสดุสองชนิดที่นิยมใช้ในการวัดอุณหภูมิในงานอุตสาหกรรม วัสดุดังกล่าวนี้ได้แก่ platinum ซึ่งนิยมใช้เป็นวัสดุสำหรับ resistance thermometer และวัสดุแบบ A หรือ B ซึ่งใช้ทำเป็น thermistor จะเห็นว่าในช่วง  $-100^{\circ}\text{C}$  ถึง  $+400^{\circ}\text{C}$  นั้นค่าความต้านทานของวัสดุแบบ A ที่ใช้ทำเป็น thermistor นั้นจะเปลี่ยนแปลงตั้งแต่  $10^7$  โอห์ม-ซม. ถึง 1 โอห์ม-ซม. ในขณะที่ค่าความต้านทานของ platinum นั้นเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น สำหรับรูป 1-17 ( ข ) นั้นแสดงให้เห็นว่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อม thermistor จะเพิ่มขึ้นตามกระแสที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อถึงจุด ๆ หนึ่งแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อม thermistor นี้จะลดลงในขณะที่กระแสก็ยังคงเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งส่วนนี้ thermistor จะมีคุณลักษณะของค่าความต้านทานเป็นลบ ถ้าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับ thermistor มีค่าน้อย กระแสก็จะมิต่ำด้วย ดังนั้นความร้อนที่เกิดจากกระแสนี้ก็จะมีจำนวนไม่

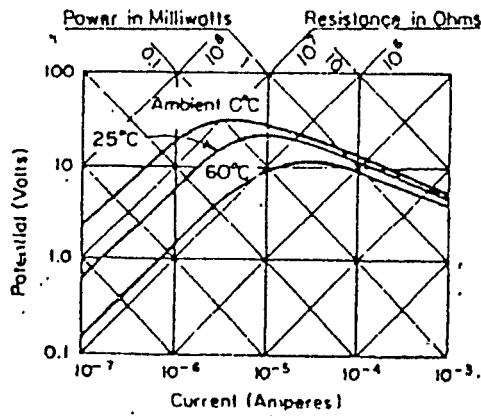
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์ ไม่อนุญาตให้นำไป  
 ไม่ควรกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพียงพอที่จะทำให้อุณหภูมิของ thermistor มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมในขณะนั้นได้ ภายใต้อุณหภูมิต่ำจะกระแสจะเป็นสัดส่วนกับแรงดันไฟฟ้าตามกฎของ Ohm เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้ thermistor มีค่ามากขึ้น กระแสก็จะมีค่ามากขึ้นด้วย และทำให้เกิดความร้อนพอที่จะทำให้ อุณหภูมิของ thermistor สูงเกินกว่าอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมในขณะนั้น และค่าความต้านทานของ thermistor จะลดลง ซึ่งผลอันนี้จะทำให้กระแสไหลมากขึ้นและค่าความต้านทานก็ยังคงลดลงไปเรื่อย ๆ กระแสก็จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่ง heat dissipation ของ thermistor เท่ากับกำลังงานที่ป้อนให้ นั่นก็คือภายใต้อุณหภูมิของสภาพแวดล้อมที่คงที่ ค่าความต้านทานของ thermistor จะเป็นฟังก์ชันของกำลังงานที่สิ้นเปลืองไปภายในตัวมันเอง ซึ่งหมายถึงว่าจะต้องมี กำลังงานอย่างเพียงพอที่จะทำให้อุณหภูมิของมันสูงกว่าอุณหภูมิของสภาพแวดล้อม ในช่วงการทำงานบางครั้งนั้นอุณหภูมิของ thermistor อาจจะเพิ่มถึง  $100^{\circ}\text{C}$  หรือ  $200^{\circ}\text{C}$  และค่าความต้านทานของมันอาจจะลดลงเหลือเพียง  $1 / 1,000$  ของค่าความต้านทานเมื่อกระแสมีค่าน้อย ๆ คุณลักษณะของ self - heat ของ thermistor อันนี้ทำให้สามารถประยุกต์ใช้ thermistor ในการควบคุมระดับของแรงดันหรือกำลังงานไฟฟ้าได้นอกเหนือจากการใช้ในการวัดและควบคุมอุณหภูมิ ส่วนรูป 1-17 (ค) นั้นแสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะของกระแสต่อเวลา กระแสจะมีค่าสูงสุดเมื่อเวลาผ่านไปเล็กน้อยแต่ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้ด้วย เมื่อเกิด self heat ขึ้นในวงจร thermistor ก็จะต้องใช้เวลาชั่วขณะหนึ่งที่จะทำให้ อุณหภูมิสูงขึ้นและกระแสก็จะมีค่าคงที่ ช่วงระยะเวลานี้จะเป็นช่วงเวลาที่คงที่เมื่อค่าพารามิเตอร์ของวงจรคงที่ แต่อย่างไรก็ตามช่วงเวลานี้อาจจะแปรผันไปได้ตามแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้หรือแปรผันไปตามค่าความต้านทานของตัวต้านทานที่ต่ออนุกรมกับแหล่งจ่ายแรงดัน

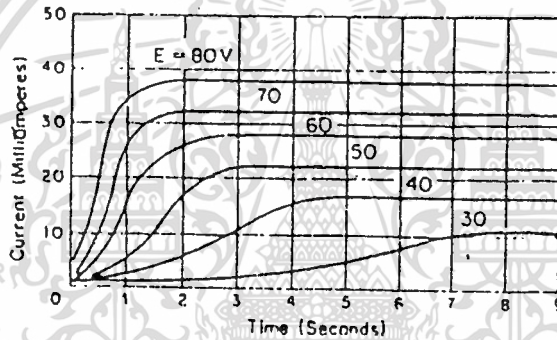


(ค) คุณลักษณะของค่าความต้านทาน - อุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



( ข ) คุณลักษณะของแรงดัน - กระแสไฟฟ้า

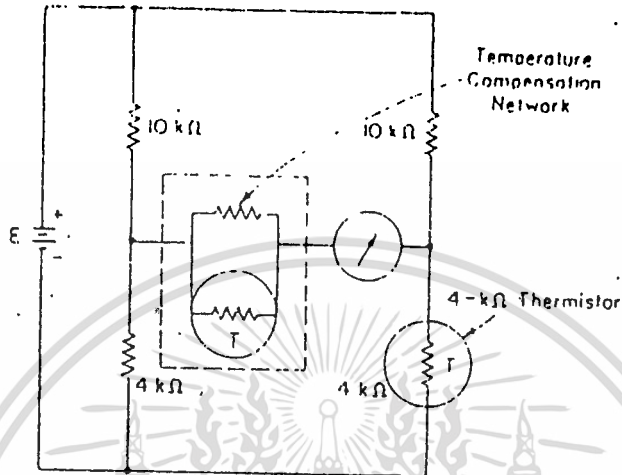


( ค ) คุณลักษณะของกระแส - เวลา

รูป 1-17 คุณลักษณะที่สำคัญตามประการของ thermistor ( อ้างถึง Fenwel Electronics Inc. )

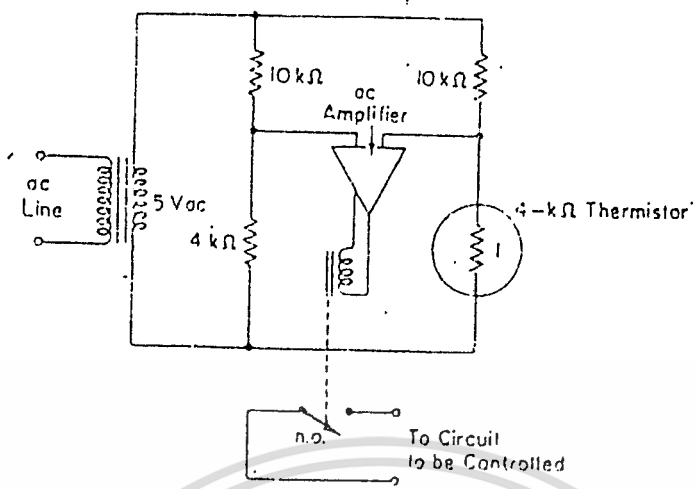
Thermistor ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมนั้นโดยทั่วไปจะมีค่าความต้านทาน 2,000 โอห์มที่  $25^{\circ}C$  และมีค่าสัมประสิทธิ์เท่ากับ  $2.9\% / ^{\circ}C$  ซึ่งก็หมายถึงว่าค่าความต้านทานของมันจะเปลี่ยนไป 58 โอห์มต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทุก ๆ  $1^{\circ}C$  thermistor อาจจะนำมาใช้ในการวัดอุณหภูมิได้อย่างง่าย ๆ ก็อน่า thermistor มาต่ออนุกรมกับแบตเตอรี่และไมโครแอมมิเตอร์ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปค่าความต้านทานของ thermistor ก็จะเปลี่ยนแปลงไป นั่นคือกระแสที่ไหลในวงจรก็จะเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังนั้นค่าของกระแสบนไมโครแอมมิเตอร์จึงสามารถปรับเทียบให้เป็นค่าของอุณหภูมิได้ อย่างไรก็ตามการวัดค่าอุณหภูมิโดยใช้ thermistor นั้นนิยมใช้ร่วมกับวงจรบริดจ์ซึ่งจะทำให้มีความไวสูง รูป 1-18 แสดงถึงการวัดอุณหภูมิโดยใช้ thermistor

ขนาด  $4 \times 10^3$  โอห์ม ร่วมกับวงจรบริดจ์ วงจรในรูปนี้สามารถวัดค่าของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปได้อย่างละเอียดถึง  $0.005^\circ \text{C}$



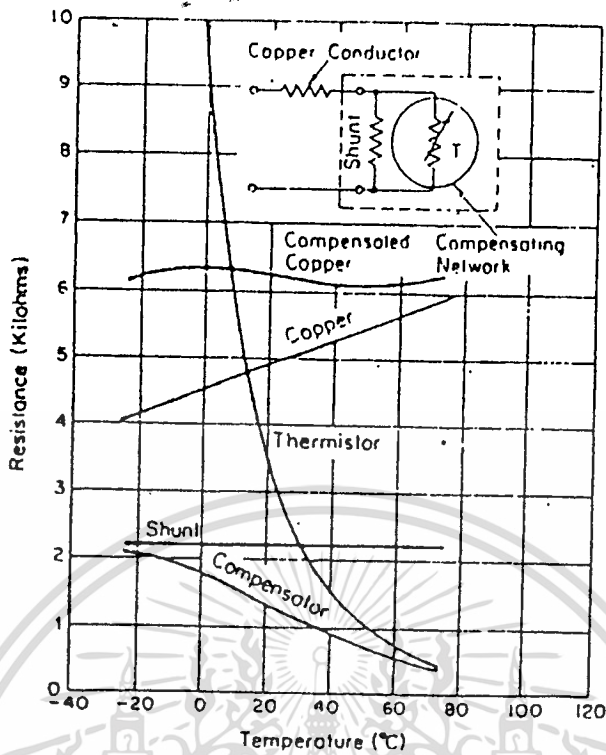
รูป 1-18 การวัดอุณหภูมิโดยใช้ thermistor ต่อในวงจรบริดจ์

รูป 1-19 เป็นตัวอย่างง่าย ๆ ของการใช้ thermistor ในการควบคุมอุณหภูมิ thermistor ที่ต่ออยู่ในวงจรบริดจ์นี้จะเป็นตัววัดอุณหภูมิในระบบที่ต้องการควบคุมอุณหภูมิ และวงจรบริดจ์นี้จะถูกปรับให้อยู่สภาวะสมดุลสำหรับค่าอุณหภูมิที่ต้องการ เมื่อวงจรบริดจ์สมดุล รีเลย์ก็จะไม่ทำงาน แต่เมื่ออุณหภูมิของระบบเปลี่ยนแปลงไป วงจรบริดจ์ก็จะไม่สมดุล รีเลย์ก็จะทำงาน หน้าสัมผัสของรีเลย์ ซึ่งต่ออยู่วงจรของระบบที่ถูกควบคุมก็จะทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของ heater ซึ่งการควบคุมแบบนี้จะเป็นการควบคุมแบบเปิด-ปิด (ON-OFF)



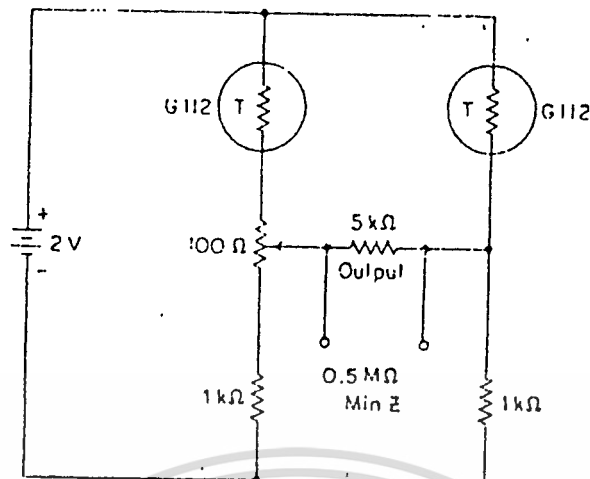
รูป 1-19 การควบคุมอุณหภูมิโดยใช้ thermistor

เนื่องจาก thermistor มีสัมประสิทธิ์ของค่าความต้านทานต่ออุณหภูมิเป็นแบบลบ ซึ่งจะตรงกันข้ามกับตัวนำไฟฟ้าหรือสารกึ่งตัวนำอื่น ๆ ดังนั้นจึงนิยมใช้ thermistor ในการชดเชยผลของอุณหภูมิที่มีต่อส่วนประกอบในวงจร วิธีการชดเชยผลของอุณหภูมินั้นทำได้โดยการเลือก thermistor ที่เหมาะสมไปติดไว้ใกล้ ๆ กับส่วนประกอบของวงจร เช่นที่ขดลวดทองแดงของมอเตอร์ ตัวชดเชยนั้นจะประกอบไปด้วย thermistor และตัวต้านทานอีกตัวหนึ่งที่ต่อขนานกันกับ thermistor รูป 1-20 แสดงถึงการชดเชยอุณหภูมิของทองแดงโดยใช้วงจร thermistor ในกรณีนี้สัมประสิทธิ์ต่ออุณหภูมิของตัวชดเชย ซึ่งเป็นแบบลบจะมีค่าใกล้เคียงกับสัมประสิทธิ์ต่ออุณหภูมิของขดลวดซึ่งเป็นแบบบวก เมื่อยังไม่มีอาการชดเชย ขดลวดซึ่งมีค่าความต้านทาน 5,000 โอห์มที่ 20 ° c จะมีการเปลี่ยนค่าความต้านทานอยู่ในช่วง 4,500 โอห์มที่ 0 ° c ถึง 5,700 โอห์มที่ 60 ° c หรือมีการเปลี่ยนแปลงประมาณ ±12 % แต่เมื่อเพิ่มตัวชดเชยเข้าไป ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปจะลดลงเหลือเพียง ±15 โอห์ม หรือ 1 / 4% และถ้าใช้ตัวชดเชยมากกว่าหนึ่งจุด การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของขดลวดอันเนื่องมาจากอุณหภูมิก็น้อยลงอีก ซึ่งก็เป็นประโยชน์ของ thermistor อีกอย่างหนึ่ง



รูป 1-20 การชดเชยผลของอุณหภูมิที่มีต่อทองแดงโดยใช้ thermistor

Thermistor สามารถนำมาใช้ในการวัดคุณสมบัติของการเป็นสื่อนำความร้อนของตัวกลางใด ๆ ได้ดังแสดงในรูป 1-21 ซึ่งเป็นวงจร Wheatstone bridge ที่ประกอบด้วย thermistor สองตัวต่ออยู่ แรงดันไฟฟ้าของวงจรบริดจ์นี้มีค่าสูงพอที่จะทำให้อุณหภูมิของ thermistors สูงกว่าอุณหภูมิของสภาพแวดล้อม โดยทั่วไปแล้วจะยกกระดบอุณหภูมิได้สูงถึง  $150^{\circ}\text{C}$  thermistors ในวงจรบริดจ์นี้จะใช้เป็นตัวชดเชยอุณหภูมิหนึ่งตัว และ thermistor อีกหนึ่งตัวจะถูกนำไปติดตั้งไว้ในตัวกลางที่ต้องการวัดการเป็นสื่อนำความร้อน thermistor ก็จะเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังนั้นอุณหภูมิของมันก็จะเปลี่ยนแปลงไป เอาท์พุทของวงจรบริดจ์จึงสามารถปรับเทียบให้เป็นหน่วยที่เหมาะสมตามต้องการได้



รูป 1-21 การวัดการเป็นสื่อนำความร้อนโดยใช้ thermistor

Thermistor ยังสามารถประยุกต์ไปใช้ในการวัดหรือวิเคราะห์คาร์บอนไดออกไซด์ได้โดยใช้ thermistors สองตัวต่อรวมกันอยู่ในวงจรบริดจ์ดังรูป 1-21 นำ thermistor แต่ละตัวไปใส่ไว้ในช่องของกล่องทองเหลือง เมื่อในช่องทั้งสองยังมีแต่อากาศ วงจรบริดจ์ก็จะสมดุล แต่ถ้าช่องใดช่องหนึ่งถูกคาร์บอนไดออกไซด์บริสุทธิ์ ซึ่งมีความเป็นสื่อนำต่ำกว่าอากาศเข้ามาแทนที่อากาศแล้ว วงจรบริดจ์จะไม่สมดุลเพราะ thermistor จะร้อนขึ้นและค่านำความต้านทานจะลดลง เอาท์พุทของวงจรบริดจ์จะถูกปรับเทียบให้แสดงถึงเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนไดออกไซด์ 100% ถ้าให้คาร์บอนไดออกไซด์บริสุทธิ์เข้าไปแทนที่อากาศ 50% แล้ว เอาท์พุทของวงจรบริดจ์ก็จะถูกปรับเทียบให้แสดงถึงคาร์บอนไดออกไซด์จำนวน 50% ดังนั้นเครื่องมือวัดนี้สามารถจะปรับเทียบสเกลเพื่อนำไปวัดจำนวนของคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ ณ บริเวณใด ๆ ได้ นอกจากนี้ thermistor ยังสามารถนำไปวัดอัตราการไหลของอากาศได้เช่นกัน โดยต่อ thermistors สองตัวเข้ากับวงจรบริดจ์ดังในรูป 1-21 และให้นำ thermistor ตัวหนึ่งไปใส่ไว้ในที่ที่ไม่มีอากาศเข้าได้ ส่วน thermistor อีกตัวหนึ่งนั้นให้นำไปติดตั้งไว้ในท่อเล็ก ๆ เพื่อใช้วัดอัตราการไหลของอากาศ เมื่อไม่มีอากาศไหลผ่านท่อ วงจรบริดจ์จะอยู่ในสภาวะสมดุล ถ้ามีอากาศไหลผ่านท่อ thermistor ก็จะเย็นลงและค่านำความต้านทานของมันจะเพิ่มขึ้น ทำให้วงจรบริดจ์ไม่สมดุล และปริมาณความเย็นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการไหลของอากาศ ดังนั้นอัตราการไหลของอากาศจึงสามารถวัดได้โดยการปรับเทียบสเกลของมิเตอร์สำหรับวัดกระแสไม่สมดุลในวงจรบริดจ์ให้เป็นสเกลของอัตราการไหล  $\text{cm}^3 / \text{นาที}$  ได้

## แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งเมล็ดพืช

จากการศึกษาพื้นฐานการอบแห้งวัสดุที่มีโครงสร้างภายในที่มีลักษณะเป็นรูพรุน ซึ่งได้แก่วัสดุจากสิ่งมีชีวิตทั่ว ๆ ไป เช่น เมล็ดพืชและอาหาร เป็นต้น พื้นฐานดังกล่าวใช้อธิบายกลไกการอบแห้งชั้นบางเท่านั้น ( อากาศเมื่อไหลผ่านวัสดุมีสถานะเกือบไม่เปลี่ยนแปลง ) ในการอบแห้งโดยทั่วไป วัสดุอบแห้งจะอยู่ในลักษณะชั้นหนา ทำให้สถานะอากาศที่ไหลผ่านวัสดุเปลี่ยนไปตามระยะทางที่อากาศเคลื่อนที่ผ่านวัสดุ ในบทนี้จะกล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งเมล็ดพืชในลักษณะชั้นหนา โดยเริ่มที่แบบจำลองที่ค่อนข้างซับซ้อน และจะทำให้แบบจำลองนี้ง่ายขึ้นโดยการตั้งข้อสมมติฐานเพิ่มขึ้น

### แบบจำลองของ Brooker et al.

แบบจำลองแรกที่จะกล่าวถึงนี้เป็นของ Brooker et al. หรือเรียกกันว่าแบบจำลองแบบไม่มีความสมดุล ( ไม่มีความสมดุลทางความร้อนและความชื้นระหว่างเมล็ดพืชและอากาศ ) การพัฒนาแบบจำลองใช้ข้อสมมติฐานดังต่อไปนี้

1. ไม่มีการหดตัวของปริมาตรระหว่างการอบแห้ง
2. ไม่มีเกรเดียนต์อุณหภูมิในเมล็ดพืชแต่ละเมล็ด
3. ไม่มีการนำความร้อนระหว่างเมล็ด
4. การไหลของอากาศและเมล็ดพืชเป็นแบบลูกสูบหรือจุกอุด ( plug type )
5.  $\frac{\partial T}{\partial t}$  และ  $\frac{\partial W}{\partial t}$  มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ  $\frac{\partial T}{\partial x}$  และ  $\frac{\partial W}{\partial x}$
6. เครื่องอบแห้งหุ้มด้วยฉนวนความร้อนหนาพอ และไม่มี ความจุความร้อน
7. ความร้อนจำเพาะของอากาศชื้น และของเมล็ดพืชมีค่าคงที่ในช่วงเวลาสั้น ๆ
8. มีสมการการอบแห้งชั้นบางที่ถูกต้อง

ในการอบแห้งเมล็ดพืชโดยทั่วไป การหดตัวของปริมาตรของชั้นเมล็ดพืชอาจสูงกว่า 10% ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดพืช และความหนาแน่นปรากฏของเมล็ดพืช ถ้าต้องการให้แบบจำลองนี้มีความถูกต้องมากขึ้น อาจจำเป็นต้องคำนึงถึงผลที่เกิดจากการหดตัวของปริมาตรด้วย

### แบบจำลองการอบแห้งแบบชั้นเมล็ดพืชอยู่กับที่

เพื่อให้ผู้อ่านสามารถทำความเข้าใจกับสมการต่าง ๆ ได้โดยง่าย จึงขออธิบายสัญลักษณ์ และสัญลักษณ์กำกับล่างที่ใช้ในแบบจำลองของ Brooker et al. ก่อน

#### สัญลักษณ์

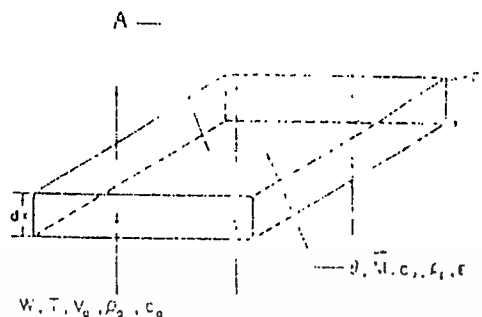
a	พื้นที่ของเมล็ดพืชที่สัมผัสกับอากาศต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร, $m^2 / m^3$
c	ความร้อนจำเพาะ, $kJ / kg \text{ } ^\circ c$
$h'$	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, $kJ / m^2 \text{ } ^\circ c h$
$h'_{fg}$	ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำในเมล็ดพืช, $kJ / kg$
t	เวลา, h
x	ระยะ, m
y	ระยะ, m
A	พื้นที่, $m^2$
G	ความเร็วเชิงมวล, $kg / h m^2$
M	ปริมาณความชื้นเมล็ดพืช มาตรฐานแห้ง, เศษส่วน
$\bar{M}$	ปริมาณความชื้นเฉลี่ยของเมล็ดพืช มาตรฐานแห้ง, เศษส่วน
T	อุณหภูมิของอากาศ, $^\circ c$
V	ความเร็ว, m / h
W	อัตราส่วนความชื้น, kg water / kg dry air
$\rho$	ความหนาแน่น, $kg / m^3$
$\varnothing$	อุณหภูมิของเมล็ดพืช, $^\circ c$

#### สัญลักษณ์กำกับล่าง

a	อากาศแห้ง
eq	สมดุล
p	เมล็ดพืชแห้ง
v	ไอน้ำ
w	น้ำ

เราสามารถที่จะทำสมดุลทางความร้อน และมวลบนปริมาตรบังคับ ณ ตำแหน่งใด ๆ ในชั้นอบแห้ง ( รูปที่ 1-22 ) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1-22 รูปแสดงปริมาตรบังคับ

## 1. สำหรับเอนทัลปีของอากาศ

ความร้อนที่ถ่ายเทโดยการพาจากอากาศไปที่เมล็ดพืช มีค่าเท่ากับความแตกต่างของเอนทัลปีของอากาศขณะเข้าและออกจากปริมาตรบังคับ ซึ่งสามารถเขียนได้ว่า

$$h' a (T - \theta) A dx dt = -(\rho_a V_a c_a + \rho_a V_a W c_w) A \frac{\partial T}{\partial x} dx dt \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = - \frac{h' a}{G_a c_a + G_a c_w W} (T - \theta) \quad (1.2)$$

## 2. สำหรับเอนทัลปีของเมล็ดพืช

ความร้อนที่ถ่ายเทโดยการพาจากอากาศไปที่เมล็ดพืชมีค่าเท่ากับผลบวกของเอนทัลปีที่ใช้ในการทำให้เมล็ดพืชร้อน เอนทัลปีที่ใช้ในการระเหยน้ำจากเมล็ดพืช และเอนทัลปีที่ใช้ในการทำให้ไอน้ำที่ระเหยร้อนขึ้นในปริมาตรบังคับ ซึ่งสามารถเขียนได้ว่า

$$h' a A dx (T - \theta) dt = (\rho_p c_p + \rho_p c_w M) A dx \frac{\partial \theta}{\partial t} dt + [h_{fg} + c_v (T - \theta)] G_a A dx dt \quad (1.3)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{h' a (T - \theta)}{\rho_p c_p + \rho_p c_w M} - \frac{h_{fg} + c_v (T - \theta) G_a}{\rho_p c_p + \rho_p c_w M} \frac{\partial w}{\partial x} \quad (1.4)$$

### 3. สำหรับความชื้นของอากาศ

ความแตกต่างของน้ำที่พาโดยอากาศที่เข้าและออกจากปริมาตรบังคับมีค่าเท่ากับความชื้นที่สูญเสียโดยเมล็ดพืชในปริมาตรบังคับ ซึ่งสามารถเขียนได้ว่า

$$G_a A \frac{\partial W}{\partial x} dx dt = - \rho_p A dx \frac{\partial \overline{M}}{\partial t} dt \quad (1.5)$$

$$\frac{\partial W}{\partial x} = - \frac{\rho_p}{G_a} \frac{\partial \overline{M}}{\partial t} \quad (1.6)$$

### 4. สำหรับความชื้นของเมล็ดพืช

$$\frac{\partial \overline{M}}{\partial t} = \text{สมการอบแห้งชั้นบาง} \quad (1.7)$$

ภาวะเริ่มต้นและภาวะพรมแดนมีดังต่อไปนี้

$$T(0, t) = T(\text{inlet}) \quad (1.8)$$

$$\emptyset(x, 0) = \emptyset(\text{initial}) \quad (1.9)$$

$$W(0, t) = W(\text{inlet}) \quad (1.10)$$

$$M(x, 0) = M(\text{initial}) \quad (1.11)$$

### แบบจำลองการอบแห้งแบบไหลขวาง

ในเครื่องอบแบบไหลขวาง อากาศไหลในทิศทางแกน  $x$  และเมล็ดพืชไหลในทิศทางแกน  $y$  เราสามารถเขียนสมการแสดงความสมดุลทางความร้อนและมวลสำหรับปริมาตรบังคับ ( $dx dy$ ) ณ ตำแหน่งใด ๆ ในชั้นเมล็ดพืชที่เคลื่อนที่โดยวิธีการคล้ายกันกับชั้นเมล็ดพืชอยู่กับที่ โดยการใช้ข้อสมมติฐานเช่นเดียวกัน และสำหรับการอบแห้งที่สภาวะคงที่สม่ำเสมอ สามารถเขียนแบบจำลองสำหรับการอบแห้งแบบไหลขวางได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial T}{\partial x} = - \frac{h' a}{G_a c_a + G_a c_v W} (T - \emptyset) \quad (1.12)$$

$$\frac{\partial \emptyset}{\partial y} = \frac{h' a}{G_p c_p + G_p c_w \overline{M}} (T - \emptyset) - \frac{h_{fg} + c_v (T - \emptyset) G_a}{G_p c_p + G_p c_w \overline{M}} \frac{\partial W}{\partial x} \quad (1.13)$$

$$\frac{\partial W}{\partial x} = - \frac{G_p}{G_a} \frac{\partial \overline{M}}{\partial y} \quad (1.14)$$

$$\frac{\partial \overline{M}}{\partial t} = \text{สมการการอบแห้งชั้นบาง} \quad (1.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาวะเริ่มต้นและภาวะพรมแดนมีดังต่อไปนี้

$$T(o, y) = T(\text{inlet}) \quad (1.16)$$

$$\varnothing(x, o) = \varnothing(\text{initial}) \quad (1.17)$$

$$W(o, y) = W(\text{inlet}) \quad (1.18)$$

$$M(x, o) = M(\text{initial}) \quad (1.19)$$

### แบบจำลองการอบแห้งแบบไหลตาม

ด้วยข้อสมมติฐานเดียวกัน สมการแสดงสมดุลย์ทางความร้อนและมวลบนปริมาตรบังคับ ( $A dx$ ) สำหรับการอบแห้งแบบไหลตามที่สภาวะคงที่สม่ำเสมอสามารถเขียนได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{dT}{dx} = - \frac{h' a (T - \varnothing)}{G_a c_a + G_a c_v W} \quad (1.20)$$

$$\frac{d\varnothing}{dx} = \frac{h' a (T - \varnothing)}{G_p c_p + G_p c_w M} - \frac{h'_{fg} + c_v (T - \varnothing) G_a}{G_p c_p + G_p c_w M} \frac{dW}{dx} \quad (1.21)$$

$$\frac{dW}{dx} = - \frac{G_p}{G_a} \frac{dM}{dx} \quad (1.22)$$

$$\frac{dM}{dt} = \text{สมการการอบแห้งชั้นบาง} \quad (1.23)$$

ภาวะเริ่มต้นและภาวะพรมแดนมีดังต่อไปนี้

$$T(o) = T(\text{inlet}) \quad (1.24)$$

$$\varnothing(o) = \varnothing(\text{initial}) \quad (1.25)$$

$$W(o) = W(\text{inlet}) \quad (1.26)$$

$$M(o) = M(\text{initial}) \quad (1.27)$$

### แบบจำลองการอบแห้งแบบไหลสวนทาง

แบบจำลองนี้คล้ายกับแบบจำลองการอบแห้งแบบไหลตาม ถ้าสมมติให้การไหลของเมล็ดพืชเป็นไปในทิศทางบวก และของอากาศเป็นลบ เราสามารถเขียนแบบจำลองการอบแห้งแบบไหลสวนทางได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{dT}{dx} = \frac{h' a}{G_a c_a + G_a c_v W} (T - \emptyset) \quad (1.28)$$

$$\frac{d\emptyset}{dx} = \frac{h' a}{G_p c_p + G_p c_w \overline{M}} (T - \emptyset) + \frac{h' f_{fg} + c_v (T - \emptyset) G_a dW}{G_p c_p + G_p c_w \overline{M}} \quad (1.29)$$

$$\frac{dW}{dx} = \frac{G_p}{G_a} \frac{dM}{dx} \quad (1.30)$$

$$\frac{dM}{dt} = \text{สมการการอบแห้งชั้นบาง} \quad (1.31)$$

ภาวะเริ่มต้นและภาวะพรมแดนมีดังต่อไปนี้

$$T(L) = T(\text{inlet}) \quad (1.32)$$

$$\emptyset(o) = \emptyset(\text{initial}) \quad (1.33)$$

$$W(L) = W(\text{inlet}) \quad (1.34)$$

$$M(o) = M(\text{initial}) \quad (1.35)$$

การแก้แบบจำลองทั้งสี่ที่กล่าวมาแล้วนี้จำเป็นต้องรู้สมการแสดงปริมาณความชื้นสมดุลย์ของเมล็ดพืช และสมการแสดงความสัมพันธ์ของคุณสมบัติของอากาศชื้น เพื่อหาคุณสมบัติของอากาศชื้นในแต่ละชั้น และตรวจสอบว่ามีการควบแน่นของไอน้ำหรือไม่ สมการต่าง ๆ ของแต่ละแบบจำลองจะต้องแก้พร้อม ๆ กันโดยใช้วิธีการเชิงเลขเข้าช่วย โดยอาจใช้เทคนิคของ finite differences ในการแก้สมการดิฟเฟอเรนเชียล คอมพิวเตอร์เป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้เพราะการคำนวณมีมากและสลับซับซ้อน ในบางกรณีต้องใช้เวลาของเครื่องคอมพิวเตอร์สูงมาก สรุปแล้วแบบจำลองของ Brooker et al. ไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติมากนักแม้ว่าจะมีความถูกต้องสูง เราจะทำให้แบบจำลองนี้ง่ายขึ้นโดยสมมติเงื่อนไขบางอย่างเพิ่มขึ้นในตอนที่กล่าวถึงต่อไป

**แบบจำลองของ Bakker Arkema et al :**

Bakker - Arkema et al . ได้ทำการจำลองแบบการอบแห้งแบบดั่งเก็บ ( อบแห้งด้วย อัตราการไหลของอากาศต่ำ และที่อุณหภูมิต่ำ ) โดยใช้แบบจำลองของ Brooker et al . พบว่า เวลาที่คอมพิวเตอร์ใช้ในการคำนวณมีค่าสูงมาก เนื่องจากต้องสมมติให้  $\Delta x$  มีค่าน้อย และต้องใช้ double precision เพื่อให้การคำนวณมีความละเอียดพอ ดังนั้นเขาจึงทำให้แบบจำลองของ Brooker et al . ง่ายขึ้นโดยการสมมติว่า  $\frac{\partial \theta}{\partial t} \approx \frac{\partial T}{\partial t}$  (หมายความว่า  $h'$  มีค่าสูงมาก และการ

ระเหยของน้ำเป็นไปแบบจำกัด ทำให้เกิดความสมดุลย์ทางความร้อน แต่ไม่มีความสมดุลย์ทาง ความชื้น แบบจำลองของ Bakker - Arkema et al . เรียกกันโดยทั่วไปว่าแบบจำลองแบบใกล้ สมดุลย์) ถ้าแทนค่า  $\frac{\partial \theta}{\partial t}$  ด้วย  $\frac{\partial T}{\partial t}$  ในสมการ ( 1.4 ) แล้วรวมสมการ ( 1.2 ) และ ( 1.4 )

เข้าด้วยกัน และสมมติว่า  $c_v (T - \theta)$  มีค่าน้อยมากจนตัดทิ้งได้ จะได้ว่า

$$\rho_p (c_p + Mc_w) \frac{\partial T}{\partial t} + G_a (c_a + Wc_v) \frac{\partial T}{\partial x} + G_a h' fg \frac{\partial W}{\partial x} = 0 \quad (1.36)$$

ส่วนอีก 2 สมการ ( 1.6 และ 1.7 ) ยังคงเหมือนเดิม

$$\frac{\partial W}{\partial x} = - \frac{\rho_p}{G_a} \frac{\partial M}{\partial t} \quad (1.6)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \text{สมการการอบแห้งชั้นบาง} \quad (1.7)$$

Bakker - Arkema et al. พบว่าแบบจำลองนี้ให้ผลใกล้เคียงกับแบบจำลองของ Brooker et al. เมื่ออัตราการไหลของอากาศต่ำ และเวลาที่คอมพิวเตอร์ใช้ในการคำนวณก็ต่ำกว่ากันมาก

**แบบจำลองลอการิทึม ( Logarithmic Model )**

Hukill ได้สร้างแบบจำลองการอบแห้งชั้นหนาแบบเมล็ดพืชอยู่กับที่โดยการสมมติว่า ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำจากเมล็ดพืชในชั้นบางมีค่าเท่ากับการเปลี่ยนแปลงของความร้อนสัมผัสของอากาศที่ไหลผ่านเมล็ดพืชในชั้นบางนั้น ซึ่งสามารถเขียนได้ว่า

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{G_a c_a}{\rho_p h' fg} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ  $\bar{M}$  = ปริมาณความชื้นเฉลี่ยในชั้นบาง มาตรฐานแห้ง, เศษส่วน  
 $T$  = อุณหภูมิ, °C  
 $G_a$  = ความเร็วเชิงมวลของอากาศ, kg/h m<sup>2</sup>  
 $c_a$  = ความร้อนจำเพาะของอากาศ, kJ/kg °C  
 $\rho_p$  = ความหนาแน่นปรากฏของเมล็ดพืชแห้ง, kg/m<sup>3</sup>  
 $h'_{fg}$  = ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำในวัสดุ, kJ/kg  
 $t$  = เวลา, h  
 $x$  = ระยะทาง, m

ภาวะเริ่มต้นและภาวะพรมแดนมีดังต่อไปนี้

$$t = 0, \bar{M} = \bar{M}_{in} \text{ และ } T = (T_{in} - T_g) e^{-Cx} + T_g \quad (1.38)$$

$$t = \infty, \bar{M} = \bar{M}_{eq} \quad (1.39)$$

$$x = 0, T = T_{in} \text{ และ } \bar{M} = (\bar{M}_{in} - \bar{M}_{eq}) e^{-kt} + \bar{M}_{eq} \quad (1.40)$$

$$x = \infty, T = T_g \quad (1.41)$$

เมื่อ  $T_g$  คืออุณหภูมิของอากาศที่สมดุลทั้งความร้อนและความชื้นกับเมล็ดพืชที่ตรงทางออกของเครื่องอบแห้ง ซึ่งหาได้จากจุดตัดของเส้นอุณหภูมิกะเปาะเปียก (หรือเส้นเอนทัลปีคงที่) และเส้นปริมาณความชื้นสมดุลของเมล็ดพืชคงที่ เมื่อพล็อตลงบนแผนภูมิอากาศชื้น

สมการ (1.37) สามารถที่จะได้มาจากการทำให้แบบจำลอง Bakker-Arkema et al. ง่ายขึ้นโดยการสมมติว่า  $\frac{\partial \theta}{\partial t} = 0, W_{c_v} = 0$  ( $W_{c_v}$  มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับ  $c_a < 2\%$ ) และ

$$c_v (T - \theta) = 0 \quad (c_v (T - \theta) \text{ มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับ } h'_{fg})$$

คำตอบของแบบจำลองของ Hukill (ซึ่งได้มาจากการสืบเสาะเพราะไม่สามารถหาคำตอบทางคณิตศาสตร์ได้เนื่องจากขาดสมการดิฟเฟอเรนเชียลอีกหนึ่งสมการ ภายหลัง Barre et al. ได้ให้สมการที่ขาดหายไป) สามารถเขียนได้ว่า

$$MR = \frac{e^{Cx}}{e^{Cx} + e^{kt} - 1} \quad (1.42)$$

และ

$$TR = \frac{e^{kt}}{e^{Cx} + e^{kt} - 1} \quad (1.43)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ  $e^{Cx} + e^{kt}$  การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{เมื่อ } MR = \text{อัตราส่วนปริมาณความชื้น} = \frac{M - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}}$$

$$TR = \text{อัตราส่วนอุณหภูมิ} = \frac{T - T_g}{T_{in} - T_g}$$

$$C = \frac{k \rho_p h' fg (M_{in} - M_{eq})}{G_a C_a (T_{in} - T_g)} \quad (1.44)$$

$k$  = ตัวคงที่ของการอบแห้ง

$M_{eq}$  = ปริมาณความชื้นสมดุล มาตรฐานแห้ง , เศษส่วน

$M_{in}$  = ปริมาณความชื้นเริ่มต้น มาตรฐานแห้ง , เศษส่วน

$T_{in}$  = อุณหภูมิอากาศตรงทางเข้าเครื่องอบแห้ง , °C

สมการ (1.42) สามารถเขียนให้อยู่ในอีกรูปแบบหนึ่งได้ดังต่อไปนี้

$$MR = \frac{2^D}{2^D + 2^Y - 1} \quad (1.45)$$

เมื่อ  $D$  และ  $Y$  คือตัวแปรที่ไม่มีหน่วยของความสูงและเวลาตามลำดับ และสามารถเขียน  
ได้ว่า

$$D = \frac{\rho_p h' fg (M_{in} - M_{eq}) x}{H G_a c_a (T_{in} - T_g)} \quad (1.46)$$

$$Y = t/H \quad (1.47)$$

เมื่อ  $H$  คือเวลาที่ใช้ในการทำให้  $MR$  มีค่าลดลงจาก 1 (ที่  $t = 0$ ) เหลือ 0.5 (ที่  $t = H$ ) จากสมการการอบแห้งข้างบน  $MR = e^{-kt}$  แทนค่า  $MR = 0.5$  และ  $t = H$  จะได้ว่า  $e^{-kH} = 0.5$  หรือ  $e^{kH} = 2$

ถ้า integrate สมการ (2.3.6) เพื่อหาค่าเฉลี่ยของ  $MR$  (ของมวลทั้งหมดในเครื่องอบแห้ง) จะได้ว่า

$$\overline{MR} = \frac{1}{D'} \ln \left( \frac{e^{D'} + e^{Y'} - 1}{e^{Y'}} \right) \quad (1.48)$$

และสามารถเขียนได้ว่า  $D'$  และ  $Y'$  เป็นตัวแปรที่ไม่มีหน่วยความสูงและเวลาตาม

เอกสารสำคัญ เอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D' = \left[ \frac{k \rho_p h'_{fg} (M_{in} - M_{eq})}{G_a c_a (T_{in} - T_g)} \right] X = CX \quad (1.49)$$

$$Y' = kt \quad (1.50)$$

เมื่อ  $X$  คือความหนารวมของชั้นเม็ดคัพซิม, m

สมการ (1.48) เรียกว่าแบบจำลองของ Barre et al. ถ้า  $e^{(D' - Y')} \gg (1 - e^{-Y'})$

สมการ (1.48) สามารถเขียนให้ง่ายขึ้นดังต่อไปนี้

$$\overline{MR} = 1 - Y' / D' \quad (1.51)$$

หรือ

$$(M_{in} - M) \rho_p X h'_{fg} = G_a c_a (T_{in} - T_g) t \quad (1.52)$$

หรือ

$$m_w h'_{fg} = m c_a (T_{in} - T_g) t$$

เมื่อ  $m_w$  = มวลของน้ำที่ระเหย, kg

$$m = \text{อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ, kg/h}$$

จะเห็นได้ว่าความร้อนแฝงของการระเหยน้ำจากเม็ดคัพซิมมีค่าเท่ากับความร้อนสัมผัสของอากาศที่เปลี่ยนไป ซึ่งเหมือนกับสมมติฐานของแบบจำลองของ Hukill ต่างกันตรงที่ว่าสมการ (1.53) เป็นผลของสมดุลย์ทางความร้อนของมวลทั้งหมดในเครื่องอบแห้ง สมการ (1.53) จะเป็นจริงก็ต่อเมื่อ  $(M_{in} - M_{eq})$  มีค่ามาก หรือ  $(T_{in} - T_g)$  มีค่าน้อย หรืออัตราการไหลของอากาศต่ำ เป็นต้น

แบบจำลองของ Hukill และ Barre et al. จะยุ่งยากน้อยกว่าแบบจำลองของ Brooker et al. และแบบจำลองของ Bakker-Arkema et al. แต่ก็สามารถทำนายการอบแห้งได้ถูกต้องพอสมควร อย่างไรก็ตามแบบจำลองของ Hukill กับ Barre et al. ไม่ได้คำนึงถึงผลของอุณหภูมิของเม็ดคัพซิมขณะจะเริ่มอบแห้งซึ่งอาจสูงหรือต่ำกว่าอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ออบแห้ง นอกจากนี้สถานะของอากาศอบแห้งต้องคงที่ และปริมาณความชื้นเริ่มต้นของเม็ดคัพซิมในแต่ละชั้นต้องเท่ากัน

**แบบจำลองของ Thompson et al.**

Thompson et al. ได้สร้างแบบจำลองการอบแห้งเม็ดคัพซิมชั้นหนาโดยพิจารณาที่ชั้นบาง ณ ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งในเครื่องอบแห้งและแบ่งชั้นตอนการอบแห้ง (เป็นชั้นตอนที่ไม่เป็นจริง แต่ใช้ประโยชน์ในการคำนวณ) ดังต่อไปนี้

1. สมมติว่าอากาศชั้นตรงทางเข้าชั้นบางจะสมดุลย์ทางความร้อนกับเม็ดคัพซิมในชั้นนั้น
- ดังนั้น 
$$c_a T_0 + W_0 (2502.3 + c_v T_0) + R_{cpw} =$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลอกได้ส่ง +  $W_0 (2502.3 + c_v T) + R_{cpw} T_{eq}$  อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (1.54) การค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{หรือ } T = \frac{(c_a + c_v W_o) T_o + c_{pw} R}{c_a + c_v W_o + c_{pw} R} \quad (1.55)$$

สัญลักษณ์กำกับต่าง ๆ และ eq หมายถึง เงื่อนไขก่อนอบแห้งและเงื่อนไขหลังสมดุล  
ทางความร้อนตามลำดับ

$$R \text{ คืออัตราส่วนของมวลของเมล็ดพืชแห้งต่อมวลของอากาศ} = \frac{\rho_p \Delta x}{G_a \Delta t}$$

เมื่อรู้ว่า  $T_{eq}$  แล้วก็สามารถคำนวณหาค่า  $\phi_{eq}$  และ  $M_{eq}$  ได้ตามลำดับ

2. คำนวณปริมาณความชื้นของเมล็ดพืชโดยใช้สมการอบแห้งชั้นบาง ซึ่งโดยทั่วไปอัตรา  
ส่วนปริมาณความชื้นเป็นฟังก์ชันของเวลาและอุณหภูมิและหรืออุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์  
โดยคำนวณหาเวลาการอบแห้งที่เทียบเท่าถ้าเมล็ดพืชถูกอบแห้งจากปริมาณความชื้นเริ่มต้น ( ก่อน  
อบแห้ง ) จนเหลือปริมาณความชื้นที่ต้นเวลาของช่วง  $\Delta T$  ที่กำลังพิจารณาด้วยสภาวะของ  
อากาศในช่วงเวลาเดียวกัน สมมติว่าเวลาที่คำนวณได้เท่ากับ  $t$  ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการอบแห้งนับ  
จากเวลาที่  $t$  เท่ากับศูนย์จนถึงปลายเวลาของช่วง  $\Delta T$  ที่กำลังพิจารณาจะเท่ากับ  $t + \Delta T$  นำไป  
แทนค่าลงในสมการอบแห้งชั้นบางเพื่อคำนวณหาปริมาณความชื้นที่ปลายเวลาของช่วง  $\Delta T$

3. คำนวณอัตราส่วนความชื้นและอุณหภูมิของอากาศหลังอบแห้งโดยใช้สมมติฐานที่ว่า  
ความชื้นของอากาศที่เปลี่ยนไปเท่ากับน้ำที่ระเหยออกจากเมล็ดพืช และเอนทัลปีของระบบก่อน  
อบแห้งเท่ากับเอนทัลปีของระบบหลังอบแห้ง ดังนั้น

$$W_f = W_o = (\overline{M}_o - \overline{M}_f) R \quad (1.56)$$

$$\text{หรือ } W_f = (\overline{M}_o - \overline{M}_f) R + W_o \quad (1.57)$$

เมื่อ  $f$  หมายถึงเงื่อนไขหลังอบแห้ง

$$\text{และ } c_a T_{eq} + W_o (2502.3 + c_v T_{eq}) + R c_{pw} T_{eq} + c_w (W_f - W_o) T_{eq} = \\ c_a T_f + W_f (2502.3 + c_v T_f) + R c_{pw} T_f + \Delta L (W_f - W_o) \quad (1.58)$$

เมื่อ  $\Delta L$  คือความแตกต่างของความร้อนแฝงของการระเหยน้ำในเมล็ดพืชและของน้ำที่  
อยู่อิสระ

สมการ (1.57) และ (1.58) มีส่วนคล้ายคลึงกับสมการ (1.6) และ (1.36) มากถ้า  
ใช้เทคนิค finite differences ในการแก้สมการดิฟเฟอเรนเชียล แบบจำลองของ Thompson et al.  
สามารถเรียกแบบบหนึ่งว่าแบบจำลองโกลด์สมคูลย์ คือสมคูลย์ทางความร้อนแต่ไม่สมคูลย์ทาง  
ความชื้น

หลังจกที่คำนวณ  $W_f$  และ  $T_f$  ได้แล้วต้องตรวจสอบว่าที่สภาวะนี้เป็นไปได้จริงหรือไม่ ถ้าไม่ได้ ( $\phi > 1$ ) ก็จำเป็นต้องฟอร์มสมการอีกสมการหนึ่งที่แสดงสมดุลย์ทางความร้อน เพื่อใช้ทำการจำลองสภาพการควบแน่นของไอน้ำ ถ้าใช้สัญลักษณ์  $T_o$ ,  $W_o$  และ  $M_o$  สำหรับสภาวะที่เป็นไปไม่ได้ของอากาศและเมล็ดพืชหลังอบแห้ง และ  $T_f$ ,  $W_f$  และ  $M_f$  สำหรับสภาวะที่แก้ไข จะสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$c_a T_o + W_o (2502.3 + c_v T_o) + R c_{pw} T_o + (W_f - W_o) c_w T_o = c_a T_f + W_f (2502.3 + c_v T_f) + R c_{pw} T_f \quad (1.59)$$

$$\text{และ } \overline{M_f} = \overline{M_o} = (W_f - W_o) / R \quad (1.60)$$

สมการ (1.59) ประกอบด้วยตัวที่ไม่รู้ค่า 2 ตัว คือ  $T_f$  และ  $W_f$  แต่รู้ว่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหลังไอน้ำควบแน่นมีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้นเราสามารถแทนค่า  $W_f$  ด้วย  $f(T_f)$

เมื่อการคำนวณของชั้นบางชั้นหนึ่งสิ้นสุดลง เราสามารถทำการคำนวณสำหรับชั้นบางที่อยู่ถัดไป โดยสมมติว่าอากาศตรงทางออกของชั้นบางอันก่อนเป็นอากาศตรงทางเข้าของชั้นบางที่อยู่ถัดไป การคำนวณจะดำเนินไปเช่นนี้จนกว่าจะถึงชั้นบนสุด

ยังมีแบบจำลองการอบแห้งที่เรียกกันว่า แบบจำลองแบบสมดุล คือ สมมติให้มีสมดุลย์ทางความร้อนและความชื้น (Sutherland et al.) อัตราการอบแห้งที่คำนวณได้จากการใช้แบบจำลองแบบสมดุลจะสูงกว่าของแบบจำลองแบบใกล้สมดุลย์และแบบจำลองแบบไม่สมดุลย์

### การจำลองแบบ Hukill

แบบจำลองของ Hukill และของ Barre et al. พัฒนามาจากการอบแห้งแบบชั้นเมล็ดพืชอยู่กับที่ แต่ก็สามารถนำมาใช้กับเครื่องอบแห้งแบบไหลขวางที่สภาวะคงที่สม่ำเสมอ ถ้าการไหลของเมล็ดพืชเป็นแบบลูกสูบหรือจุกจุก เมื่อรู้ว่าเมล็ดพืชไหลด้วยความเร็วเท่าใดก็สามารถที่จะคำนวณได้ว่าเมล็ดพืช ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ถูกสุบไปนานเท่าใด จากข้อมูลนี้สามารถคำนวณหาปริมาณความชื้นของเมล็ดพืช ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในเครื่องอบแห้งได้

แบบจำลองของ Bakker - Arkema และ Thompson et al. พัฒนามาจากการอบแห้งแบบชั้นเมล็ดพืชอยู่กับที่เช่นกัน แต่ก็สามารถนำมาใช้กับการอบแห้งแบบชั้นเมล็ดพืชไหล ในกรณีของเครื่องอบแห้งแบบไหลขวาง วิธีการก็คล้าย ๆ กับที่อธิบายไว้แล้วข้างต้น สำหรับการอบแห้งแบบไหลตามที่สภาวะคงที่สม่ำเสมอ ถ้าเลือกค่า  $\Delta t$  ให้เหมาะสมกับค่า  $\Delta x$  ที่เลือกไว้ จะได้ว่าอากาศที่ออกจากชั้นบางชั้นแรกในช่วงเวลาแรกจะผ่านเข้าไปในชั้นบางชั้นถัดไปในช่วงเวลาที่สอง ซึ่งชั้นบางชั้นที่อยู่ถัดไปก็คือชั้นบางชั้นแรกที่ไหลลงมาแทนที่นั่นเอง สำหรับชั้นถัด ๆ ไป ก็เป็นไปในลักษณะเดียวกัน การคำนวณจะดำเนินไปเรื่อย ๆ จนถึงความหนาของชั้น

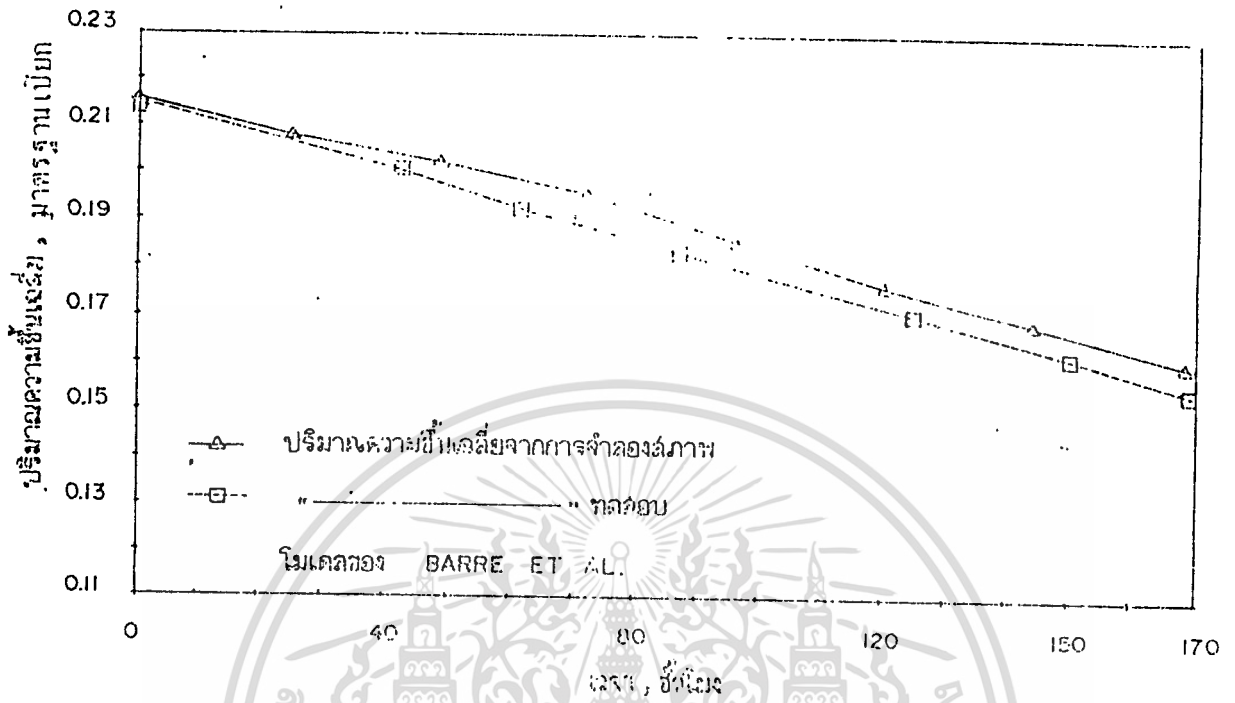
เมล็ดพืชที่เราต้องการ

ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

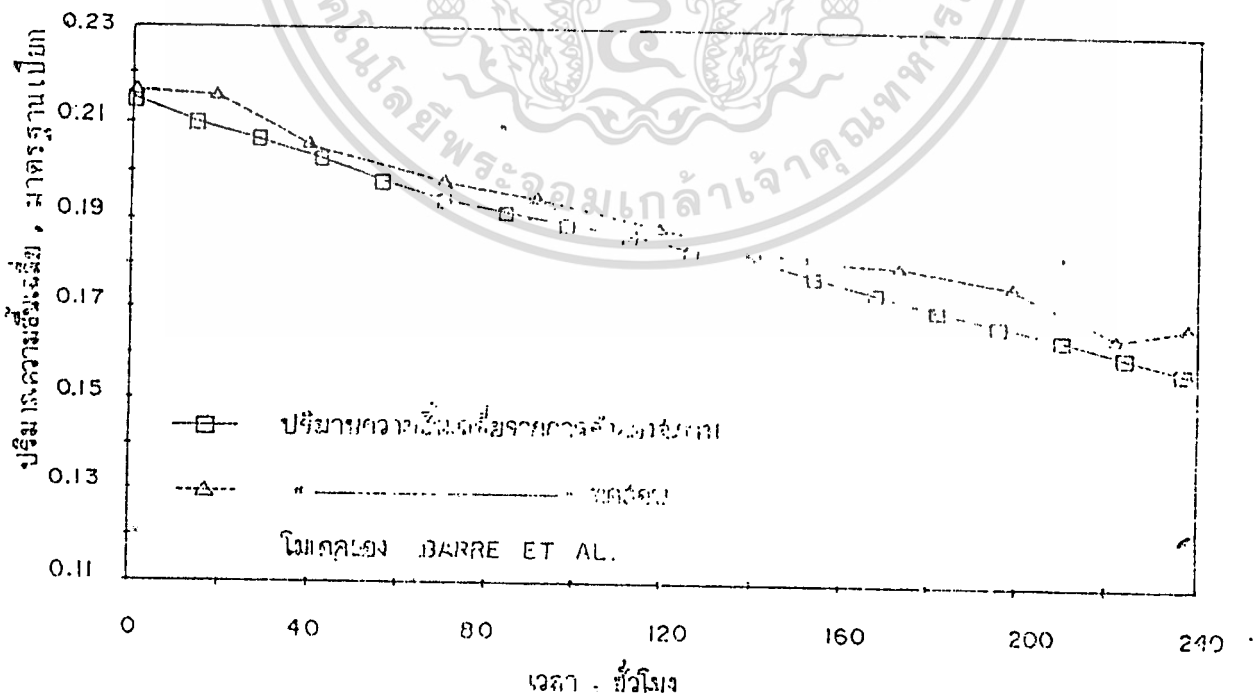
สำหรับการอบแห้งแบบไหลสวนทางที่สภาวะคงที่สม่ำเสมอ การคำนวณไม่สามารถทำได้โดยง่ายเนื่องจากเราไม่รู้ภาวะเริ่มต้นเพียงพอ กล่าวคือไม่รู้ภาวะของอากาศอบแห้งที่อยู่ชั้นบนของเครื่องอบแห้ง และไม่รู้ภาวะของเมล็ดพืชที่อยู่ชั้นล่างของเครื่องอบแห้ง ดังนั้นจำเป็นต้องทำการคำนวณซ้ำกันหลายครั้ง โดยทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณครั้งหลังสุด และครั้งก่อนหน้านั้น ถ้าผลไม่ต่างกันมากก็เป็นอันว่าได้คำตอบ

Thompson et al. ได้ทำการเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งทางทฤษฎีและอัตราการอบแห้งจากผลการทดลอง สำหรับเครื่องอบแห้งแบบไหลขวาง ไหลตาม และไหลสวนทางว ผลการทดลองและผลทางทฤษฎีมีค่าใกล้เคียงกันมาก อย่างไรก็ตามการทดลองเป็นเพียงเครื่องอบแห้งขนาดเล็กเท่านั้น

Soponronnarit and Peyre ได้ทำการจำลองแบบการอบแห้งข้าวฟ่างแบบดั่งเก็บ ( เมล็ดพืชอยู่กับที่ ) ที่อุณหภูมิค่าที่อัตราการไหลของอากาศ ( ประมาณ  $2.5 \text{ m}^3 / \text{min} - \text{m}^3 \text{ of grain}$  ) โดยใช้แบบจำลองของ Barre et al. ของ Bakker - Arkema et al. และของ Thompson et al. และเปรียบเทียบกับผลการทดลอง พบว่าแบบจำลองทั้งสามให้ผลใกล้เคียงกันและใกล้เคียงกับผลการทดลองด้วยแม้ว่าอัตราการอบแห้งเฉลี่ยทางทฤษฎีจะสูงกว่าอัตราการอบแห้งจากผลการทดลองเล็กน้อย แบบจำลองของ Barre et al. ใช้เวลาในการคำนวณน้อยมาก ( ใช้เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ ภาษาเบสิก ) เมื่อเทียบกับของแบบจำลองที่เหลือ ( รูปที่ 1-23 - 1-27 ) ค่า  $n$  ในรูปที่ 1-25 - 1-27 ได้นิยามไว้ พารามิเตอร์ของอากาศที่ใช้ในการจำลองแบบโดยใช้แบบจำลองของ Barre et al. เป็นค่าเฉลี่ยสะสม นอกจากนั้นยังได้ทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองโดยการใช้พารามิเตอร์ของอากาศแบบต่าง ๆ เช่น พารามิเตอร์ของอากาศทุก ๆ 1 ชั่วโมง 3 ชั่วโมง และค่าเฉลี่ยใน 24 ชั่วโมงที่ได้จากพารามิเตอร์ทุก ๆ 1 ชั่วโมง หรือ 3 ชั่วโมง พบว่าผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน

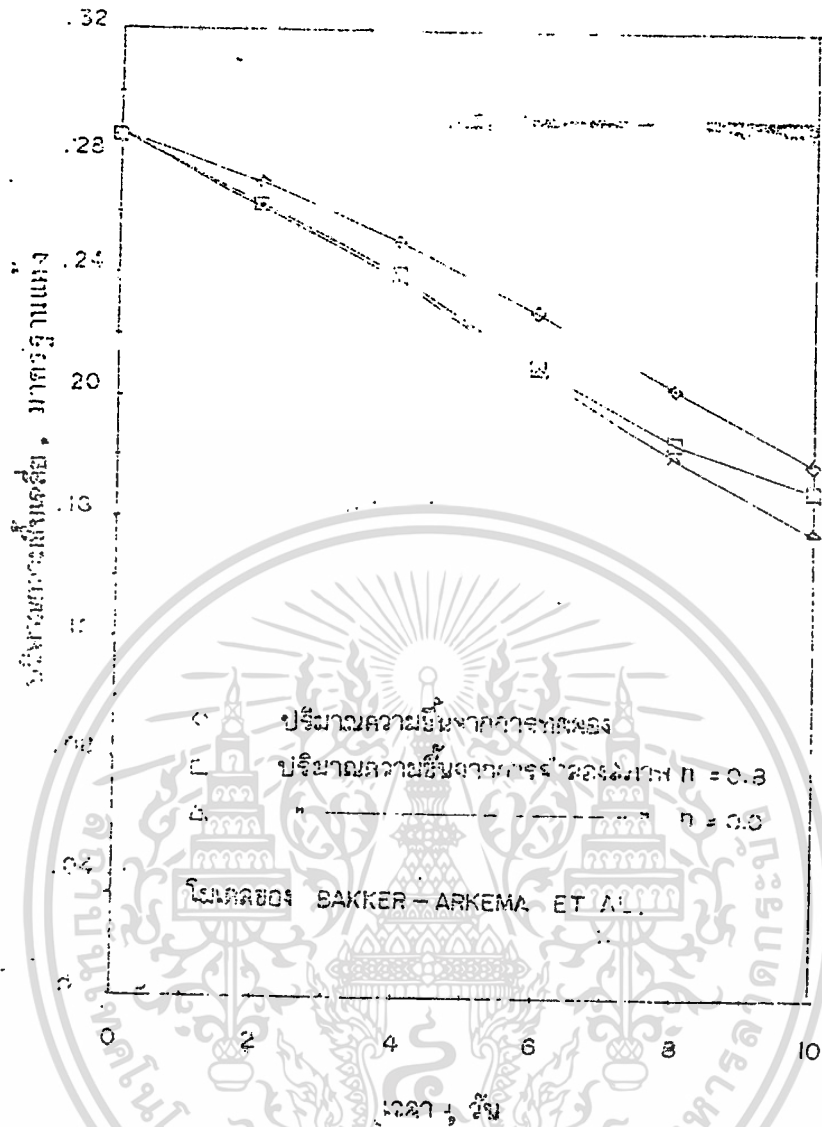


รูปที่ 1-23 ผลการทดลองและการจำลองสภาพการอบแห้งข้าวฟ่างสเกลใหญ่  
( ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ), 100 m<sup>3</sup>

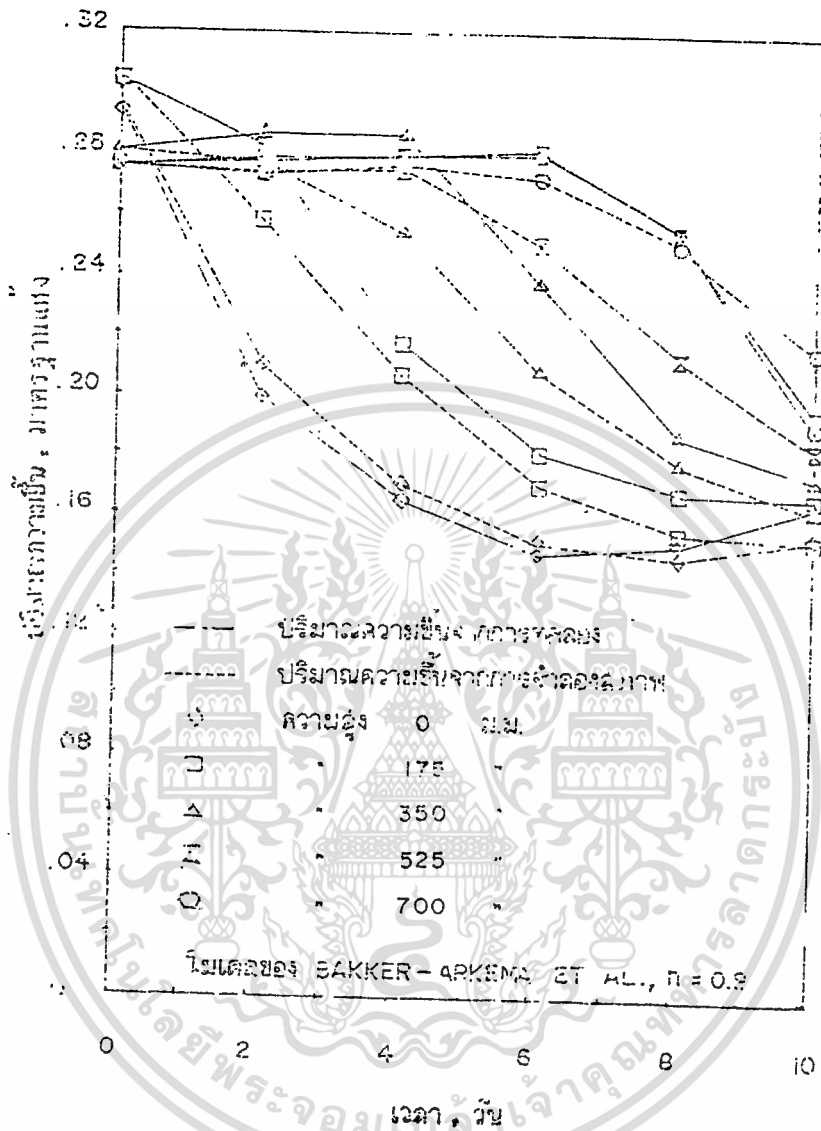


รูปที่ 1-24 ผลการทดลองและการจำลองสภาพการอบแห้งข้าวฟ่างสเกลใหญ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
( ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และมีตัวควบคุมเมลลิกซ์ ), 100 m<sup>3</sup>  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1-25 ผลการทดลองและการจำลองสภาพการอบแห้งข้าวฟ่างสเกลเล็ก ( ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ )



รูปที่ 1-26 ผลการทดลองและการจำลองสภาพการอบแห้งข้าวฟ่างสเกลเล็ก ( ค่ายพลังงานแสงอาทิตย์ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### สัญลักษณ์

a	พื้นที่ของเมล็ดพืชที่สัมผัสกับอากาศต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร , $m^2 / m^3$
c	ความร้อนจำเพาะ , $kJ / kg \cdot c$
$h'$	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน , $kJ / m^2 \cdot c \cdot h$
$h'_{fg}$	ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำในเมล็ดพืช , $kJ / kg$
k	ตัวคงที่ของการอบแห้ง , $1 / h$
$m_w$	มวลของน้ำที่ระเหย , $kg$
m	อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ , $kg / h$
t	เวลา , h
x	ระยะ , m
y	ระยะ , m
A	พื้นที่ , $m^2$
D	ตัวแปรที่ไม่มีหน่วยของความสูง นิยามไว้ในสมการ ( 2.3.9 )
$D'$	ตัวแปรที่ไม่มีหน่วยของความสูง นิยามไว้ในสมการ ( 2.3.13 )
G	ความเร็วเชิงมวล , $kg / h \cdot m^2$
$\underline{M}$	ปริมาณความชื้นของเมล็ดพืช มาตรฐานแห้ง , เศษส่วน
$\overline{M}$	ปริมาณความชื้นเฉลี่ยของเมล็ดพืช มาตรฐานแห้ง , เศษส่วน
MR	อัตราส่วนปริมาณความชื้น = $(M - M_{eq}) / (M_{im} - M_{eq})$
$\overline{MR}$	อัตราส่วนปริมาณความชื้นเฉลี่ย ( ของมวลทั้งหมดในเครื่องอบแห้ง )
P	ความดัน kPa
R	อัตราส่วนของมวลของเมล็ดพืชแห้งต่อมวลของอากาศ
T	อุณหภูมิของอากาศ , $^{\circ}c$
$T_g$	อุณหภูมิของอากาศที่สมดุลย์ทางความร้อนและความชื้นกับเมล็ดพืชตรงทางออกของเครื่องอบแห้ง , $^{\circ}c$
V	ความเร็ว , $m / h$
W	อัตราส่วนความชื้นของอากาศ , $kg \text{ water} / kg \text{ dry air}$
Y	ตัวแปรที่ไม่มีหน่วยของเวลา นิยามไว้ในสมการ ( 2.3.11 )
$Y'$	ตัวแปรที่ไม่มีหน่วยของเวลา นิยามไว้ในสมการ ( 2.3.14 )
$\emptyset$	ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ , เศษส่วน
$\rho$	ความหนาแน่น , $kg / m^3$

## คุณหมุมิของเมตติพิช , ' c

### สัญลักษณ์กำกับล่าง

a	อากาศแห้ง
eq	สมคูลย์
f	ภาวะหลังอบแห้ง
in	เริ่มต้น , ทางเข้า
o	ภาวะก่อนอบแห้ง
p	เมตติพิชแห้ง
pw	เมตติพิชชื้น
v	ไอน้ำ
vs	ไอน้ำอ้อมตัว
w	น้ำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ความชื้นและตัวตรวจจับความชื้น (Humidity and Moisture)

## นิยามทั่วไป (BASIC DEFINITIONS)

ความชื้น (Humidity) คือ ค่าที่วัดได้ของไอน้ำในอากาศ

ความชื้นสมบูรณ์ (Absolute humidity) คือ ปริมาณมวลไอน้ำในปริมาตรหนึ่งหน่วย

ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity) คือ ค่าอัตราส่วนระหว่างความดันไอน้ำที่มีอยู่กับความดันไอน้ำในสถานะอิ่มตัว ณ อุณหภูมิ

ความชื้นจำเพาะ (Specific humidity) คือ ค่าอัตราส่วนระหว่างมวลของไอน้ำในอากาศที่เรากำลังพิจารณากับมวลของอากาศนั้น

อัตราส่วนผสมความชื้น (The humidity mixing ratio) คือ ปริมาณมวลของไอน้ำต่อปริมาณมวลหนึ่งหน่วยของส่วนผสมที่แห้ง

ความชื้น (Moisture) คือ จำนวนของน้ำ (ถ้าเป็นของเหลวชนิดอื่นต้องบอกเจาะจงมา) ที่ถูกดูดซึมหรือซึมซับโดยของแข็ง, ของเหลว หรือในสารเคมีที่อยู่ในรูปของเหลว

จุดน้ำค้าง (Dew point) คือ ค่าอุณหภูมิ ณ จุดที่ค่าความดันไอน้ำอิ่มตัวมีค่าเท่ากับความดันบางส่วนของไอน้ำในบรรยากาศ

ค่าอุณหภูมิต่ำกว่าจุดน้ำค้างนั้นจะเกิดการกลั่นตัวของน้ำ นั่นแสดงให้เห็นว่าจุดน้ำค้าง คือ ค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่แท้จริงของไอน้ำในบรรยากาศที่เพียงพอต่อการอิ่มตัวของบรรยากาศกับไอน้ำ

ที่จุดน้ำค้างจะมีค่าความชื้นสัมพัทธ์ 100 %

## หน่วยในการวัด

ความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity) นั้นจะอธิบายในรูปของ % (" % R")

ความชื้นสมบูรณ์ (absolute humidity) นั้นโดยทั่วไปจะมีหน่วยคือ หนึ่งหน่วยมวลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร

ความชื้น (moisture) อธิบายในรูปของ % โดยปริมาตร หรือ % โดยน้ำหนัก(ผลรวมทั้งหมดของส่วนผสมอื่น หรือ ความแห้งโดยน้ำหนัก )

จุดน้ำค้าง ใช้หน่วยของการวัดอุณหภูมิโดยทั่วไป เช่น °C

### วิธีการในการตรวจนับ

ในการตรวจนับความชื้นมีวิธีการในการตรวจนับอยู่ 4 วิธี

- 1) ใช้ ไฮโกรมิเตอร์ (hygrometer) ในการวัดซึ่งจะให้ค่าการวัดในรูป %RH
- 2) ใช้ไซโครมิเตอร์ (psychrometer) ให้ค่าอุณหภูมิสองค่า จากนั้นใช้ตารางไซโครมิเตอร์ซึ่งพิจารณาความสัมพันธ์ของค่าอุณหภูมิที่อ่านได้กับ %RH หรือความชื้น(โดยน้ำหนักหรือโดยปริมาตร)
- 3) ใช้การตรวจนับจุดน้ำค้างให้ค่าอุณหภูมิ ซึ่งสามารถหาค่าความชื้นได้จากตาราง ค่าจุดน้ำค้าง (หรือจุดน้ำค้างแข็ง) นั้นสามารถเป็นตัวบอกค่าได้
- 4) ใช้ระบบการตรวจนับระยะไกล (remote sensing systems) ให้ค่าของความชื้นโดยมวลหรือโดยปริมาตร

### **1. วิธีการตรวจนับแบบไฮโกรเมตริก (Hygrometric Sensing Methods)**

ในยุคแรกของการใช้ไฮโกรมิเตอร์ จะใช้อุปกรณ์ทางกล (mechanical elements) ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงความยาวหรืออื่นๆ เมื่อมีค่าความชื้นเพิ่มขึ้น สิ่งที่เปลี่ยนแปลง เช่น เส้นผมของมนุษย์, พังผืดในสัตว์บางชนิดและพลาสติกบางชนิดที่มีคุณสมบัติอุปกรณ์ทางกลนั้นเป็นอุปกรณ์ที่ล้าสมัยไปแล้วสำหรับตัวตรวจนับความชื้นแบบสมัยใหม่แต่ยังคงใช้งานอย่างกว้างขวางในงานตรวจหาความชื้นที่มีอยู่

ไฮโกรมิเตอร์แบบใช้ค่าความจุไฟฟ้า (Capacitive hygrometer) ทำงานโดยใช้หลักการของ fixed - electrode/ variable - dielectric ในตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 1-28(a) ไฮโกรสโคปิคฟิล์ม (hygroscopic film) แผ่นบางๆจะทำหน้าที่เป็นสาร dielectric ระหว่างขั้ว electrode ทั้งสองที่อยู่ส่วนล่างกับขั้ว electrode ที่อยู่ส่วนบน ที่ขั้ว electrode ส่วนบนซึ่งเป็น porous electrode จะมีรูให้น้ำซึมเข้าสู่แผ่นฟิล์มได้ แผ่นฟิล์มที่โดนน้ำซึมเข้าไบนั้นจะมีค่าคุณลักษณะของ dielectric เปลี่ยนไป ทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของขั้ว electrode ทั้งส่วนบนและส่วนล่างเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย และค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขั้ว electrode ตัวบนกับขั้ว electrode ตัวล่างอีกตัวก็จะเปลี่ยนตามไปด้วย เป็นผลทำให้ค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขั้ว electrode ตัวล่างทั้งสองขั้วมีค่าเปลี่ยนไป

ไฮโกรมิเตอร์แบบใช้ค่าความต้านทาน (resistive hygrometer) เป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง ทั้งในแบบเป็นแผ่นบางและแบบเป็นรูปทรงกระบอก

ในแบบแรกที่มีการใช้อย่างได้ผลสำหรับไฮโกรมิเตอร์แบบใช้ความต้านทาน คือ ใช้ไฮโกรสโคปิคฟิล์ม ซึ่งประกอบด้วยสารละลายของ lithium chloride (LiCl) 2- 5 % และสาย electrode 2 สาย เมื่อค่าความต้านทานของแผ่นฟิล์มมีการเปลี่ยนแปลงไบนั้นเนื่องจากค่าความชื้นที่เปลี่ยนไบนั่นเอง ซึ่งทำให้เราสามารถวัดค่าความชื้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฮโกรมิเตอร์แบบนี้ถูกพัฒนาขึ้นครั้งแรกโดย F.W. Dunmore ในปี 1938 ที่ National Bureau of Standard ในรัฐ Washington และถึงแม้ว่าจะมีการพัฒนาต่อมา แต่ยังคงเรียกว่าเป็น "วิธีการของ Dunmore (Dunmore element) " หรือ Dunmore hygrometer สาย electrode ทั้งสองสายนั้นพันรอบแกนของฉนวน ( เช่น polystyrene ) หรือ foil electrode นำมาพันแบบซิกแซกบนฐานของวัตถุที่คล้ายคลึงกัน ซึ่งสายของ electrode นั้นจะถูกคลุมด้วย hygroscopic - salt film (ในรูป 1-28(b) ) ไฮโกรมิเตอร์แบบนี้ใกล้เคียงกันใช้การเปลี่ยนแปลงของผิวหน้าของตัวมันเองทำให้ค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลงไปโดยปราศจากการใช้ hyscopic film ยกตัวอย่างเช่น polystyrene กระทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟูริก เพื่อออกแบบคุณลักษณะความต้านทานของผิวหน้า (surface - resistivity characteristics)

sulfonated polystyrene บางครั้งถูกเรียกว่า " Pobe element ( or " Pope cell " ) หลังจากมีการพัฒนา

ใช้ Aluminium - oxid เป็นส่วนประกอบใช้ในการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานและค่าความจุทางไฟฟ้า เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์กับความชื้น อุปกรณ์ชนิดนี้จะประกอบด้วย aluminium ที่เป็นส่วนสำคัญ โดยมี ส่วนผิวหน้าเป็นขั้วบวกและมีชั้น aluminium oxide บางๆห่อหุ้ม ส่วนโครงสร้างของฟิล์มนั้นเป็นเส้นใยที่มีรูมากมาย (ในรูปที่ 1-28(c) ) มีฟิล์มสีทองที่บางมากๆและมีสุญญากาศสะสมที่ผิวด้านนอกของชั้น aluminium oxide เป็นเสมือนขั้ว electrode ขั้วหนึ่ง ( ฟิล์มบางจนสามารถซึมได้ ) และส่วนของ aluminium เป็นขั้ว electrode อีกขั้วหนึ่ง วงจรเสมือนของแต่ละช่วงอธิบายดังในภาพ ใอน้ำจะถ่ายเทผ่านชั้นสีทองอย่างสม่ำเสมอ โดยมีฟังก์ชันที่สัมพันธ์กับความดันไอน้ำที่บรรยากาศรอบๆ จำนวนโมเลกุลของน้ำที่ซึมผ่านโครงสร้างของ oxide หาได้จากการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ภายในของอุปกรณ์นี้

อุปกรณ์แบบใช้ Oscillating - Crystal ( รูปที่ 1-28(c) ) ประกอบด้วย quartz crystal ที่คลุมด้วย hygroscopic ผลึกคริสตัลนั้นจะเชื่อมต่อกับ อุปกรณ์ควบคุมความถี่ ( frequency - controlling element ) ในวงจรออสซิลเลเตอร์ มวลของผลึกคริสตัลมีการเปลี่ยนแปลงตามจำนวนของน้ำที่ตัวคลุมได้สัมผัส การที่ผลึกคริสตัลมีการเปลี่ยนแปลงทำให้เกิดมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ขึ้น และค่าเอทท์พุทที่เป็นความถี่ซึ่งเป็นสัดส่วนกับค่าความชื้นจะถูกให้โดยวงจร hygroscopic polymers ที่ใช้ต้องมีความเหมาะสมอย่างมากในการหุ้มผลึก

อุปกรณ์แบบใช้ Electrolytic hygrometer ( รูปที่ 1-28(e) ) ใช้แหล่งจ่ายพลังงานกระแสจากปฏิกิริยาไฟฟ้าของไอน้ำ ใน hydrogen กับ oxygen ไอน้ำจะถูกดูดซึมโดยสิ่งที่ดูดความชื้นได้ เช่นแผ่นฟิล์มบางๆ ของ phosphorus pentaoxide ซึ่งใช้สาย electrode คู่พันรอบ อีกแบบหนึ่งคือใช้แผ่นแก้วที่มีรูสำหรับดูดซึม ( porous glass disk ) ซึ่งมีขั้ว electrode ที่ผิวหน้าทั้งสองด้าน ไอน้ำจะถูกดูดซึมจากชั้นผนังที่มีรู ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงไปตาม

ไอน้ำที่ถูกดูดซึม ทำให้สามารถหาค่าความชื้นได้จากกระแสไฟฟ้าที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจจับเองจะ  
ซึ่งค่าบอกความชื้น

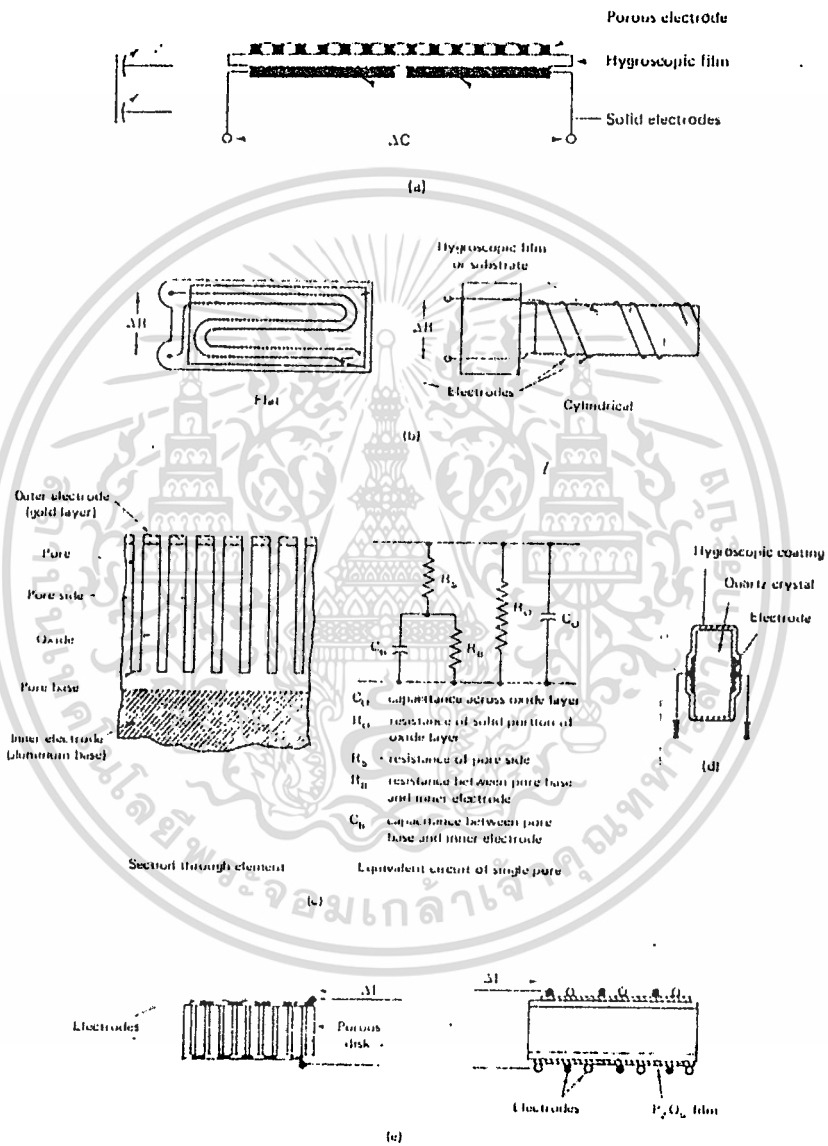


FIGURE 1-28 . Hygrometer sensing elements: (a) capacitive; (b) resistive; (c) capacitive/resistive (aluminum oxide); (d) oscillating-crystal; (e) electrolytic.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. วิธีการตรวจจับแบบไซโครเมตริก ( Psychrometric Sensing Methods )

อุปกรณ์ตรวจจับแบบ psychrometric นั้นเป็นอุปกรณ์แบบจับค่าอุณหภูมิ ประกอบด้วย อุปกรณ์สองส่วนที่แยกจากกัน "dry bulb " (มีลักษณะเป็นหัวกลมแห้ง) ใช้วัดอุณหภูมิของบรรยากาศรอบๆ อีกส่วนหนึ่ง "wet bulb" (มีลักษณะเป็นหัวกลมเปียก) เป็นไส้ตะเกียงที่จุ่มอยู่ในน้ำที่บ่มจนอิมตัวสอดอยู่ (ในรูปที่ 1-29) อากาศที่มีความชื้นจะถูกตรวจวัดโดยแรงที่กระทำกับไส้ตะเกียง เมื่อน้ำรอบๆ ไส้ตะเกียงมีการระเหย กระบวนการในการระเหยนี้ ไส้ตะเกียงและอุปกรณ์ตรวจจับจะอยู่ภายใต้กระบวนการนี้ด้วย หลังจากนั้นจึงตรวจจับอุณหภูมิของบรรยากาศรอบๆ กระบวนการในการระเหยจะขึ้นกับความดันไอ หรือ ความชื้นที่มีอยู่ในอากาศ (หรือจากการวัดก๊าซชนิดอื่นๆ หรือ ก๊าซผสม) ค่าความชื้น ( Humidity ) นั้นจะหาได้จากการอ่านหัววัดอุณหภูมิทั้งสอง หากค่าจากการใช้ตาราง psychrometric

โดยทั่วไปการที่จะระบายอากาศของ wet bulb ได้อย่างมีประสิทธิภาพ คือใช้มือหมุนส่วนของ wet bulb เป็นวงกลม อาจใช้ sling psychrometer อีกวิธีหนึ่ง คือ ใช้ small blower (aspirate psychrometer) ไส้ตะเกียงจะทำจากฝ้าย และมีปลอกเซรามิกที่มีรู (หุ้มบนอุปกรณ์ตรวจจับ) ตัวตรวจจับอุณหภูมิที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง คือแบบใช้ค่าความดันทาน

## 3. วิธีการตรวจจับแบบใช้จุดน้ำค้าง ( Dew - Point Sensing Methods )

จุดน้ำค้าง คือ ค่าอุณหภูมิของเหลวและไอที่อยู่ในสภาพของไหลมีค่าเท่ากัน (ค่าอุณหภูมิที่ไอและของแข็งมีค่าเท่ากัน โดยปกติเรียก จุดน้ำค้างแข็ง) ที่จุดน้ำค้างมีค่าความดันไอน้ำอิมตัวเพียงค่าเดียว ค่าความชื้นสมสมบูรณ์สามารถหาได้จากค่าอุณหภูมิเช่นเดียวกับค่าความดัน

วิธีการวัดค่าที่ใช้กันอย่างกว้างขวางของอุปกรณ์แบบจุดน้ำค้าง คือ ทำให้ผิวหน้าเย็นลง เมื่อเริ่มมีการวัดค่าอุณหภูมิ จนถึงเริ่มมีหยดน้ำ หรือ หยดน้ำแข็งจนกระทั่งถึงจุด cooling cycle ค่าอุณหภูมิที่ผิวหน้าอ่านได้ วิธีการตรวจจับของวิธีวัดแบบจุดน้ำค้างจะให้ค่าสองฟังก์ชัน ซึ่งจะตรวจจับค่าอุณหภูมิของผิวสัมผัสเมื่อเริ่มเย็น และจะมีการเปลี่ยนสถานะจากไอไปสู่ของเหลว ( หรือของแข็ง )

อุปกรณ์ความต้านทาน หรือ เทอร์โมอิเล็กตริก ( resistive or thermoelectric elements ) โดยปกติจะใช้การตรวจวัดค่าอุณหภูมิ การตรวจจับการควบแน่นนั้นสามารถทำได้หลายวิธีการ (ในรูปที่ 1-30) โดยทุกวิธีการต้องการผิวหน้าการกลั่น เช่น ประเภทที่ใช้แผ่น disk หรือ ใช้แผ่น plate ที่มีความร้อนต่อกับเครื่องมือความเย็น ที่นิยมใช้เป็นเครื่องมือความเย็น ก็ได้แก่ thermoelectric ( Pelier - effect ) cooler

วิธีการแบบ photo electric เป็นวิธีที่ใช้กันมาก ผิวหน้าการกลั่นนั้นจะถูกขัดให้เงา เพื่อให้เอกสารถักเกิดการสะท้อนได้อย่างมีคุณภาพและฉายแสงไปที่กระจกและจะมีการกลั่นตัวเป็นน้ำ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากหรือน้อยขึ้นกับปริมาณที่สะท้อนกลับไปได้ของตัวตรวจจับแบบที่ใช้ตัวตรวจสอบการกลั่นด้วยความต้านทาน ใช้ผิวหน้าสัมผัสที่มีการฝัง metal - electrode ความต้านทานที่ผิวหน้าจะเกิดขึ้นเมื่อมีการกลั่นตัว ( ในรูปที่ 1-30 (b) ) ในการใช้ตัวตรวจสอบการกลั่นแบบ nucleonic จะมีตัวปล่อยรังสี alpha หรือ beta อยู่ที่ผิวหน้าการกลั่นและมีตัวตรวจจับการแผ่รังสีอยู่เหนือขึ้นไปคอยตรวจจับ ฟลักซ์ที่แผ่ออกมาจากการกลั่นตัว ซึ่งเป็นแหล่งปล่อยรังสี ( ในรูป 1-30 (c) )

นอกจากนี้ยังมีวิธีการอื่นที่ใช้จุดน้ำค้างในการตรวจจับ คือ ใช้อุปกรณ์ตรวจจับแบบ heated saturated - salt - solution กล่าวคือเป็นวิธีการแบบ "energy balance" ปกติเกลือที่ใช้คือ lithium chloride ตัวตรวจจับชนิดนี้ยังรู้จักในชื่อของตัวตรวจจับจุดน้ำค้างแบบ saturated heated lithium chloride ตัวตรวจจับนี้ ( ในรูปที่ 1-31 ) ประกอบด้วยแท่งโลหะบางๆที่คลุมโดยเปลือกยาสังเคราะห์ ซึ่งเชื่อมในสารละลาย lithium chloride มี bifilar winding อยู่ที่บริเวณเปลือกที่เชื่อมต่อซึ่งใช้สำหรับตัวตรวจจับความร้อน transducer อุณหภูมิ ช่างในหลอดเมื่อมีอุณหภูมิที่เหมาะสมจะให้ค่าจุดน้ำค้างตัวตรวจจับจะได้รับความร้อนจนกระทั่งความดันไอของสารละลาย lithium chloride มีค่าเท่ากับความดันไอของของไหล ( เช่น อากาศโดยรอบ ) ซึ่งจะได้ค่าจุดน้ำค้างที่จุดนั้น

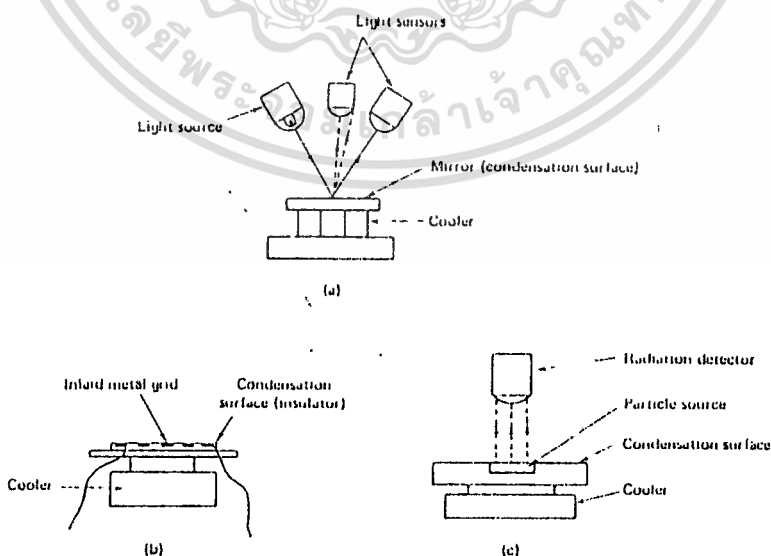
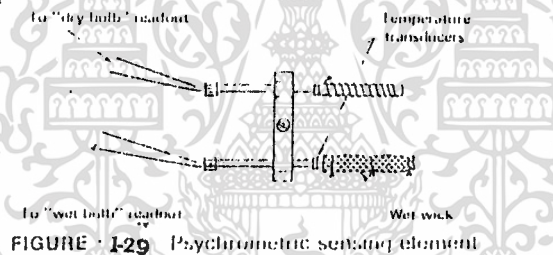


FIGURE 1-30 Dew-point condensation detection elements. (a) photoelectric; (b) resistive; (c) nucleonic.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

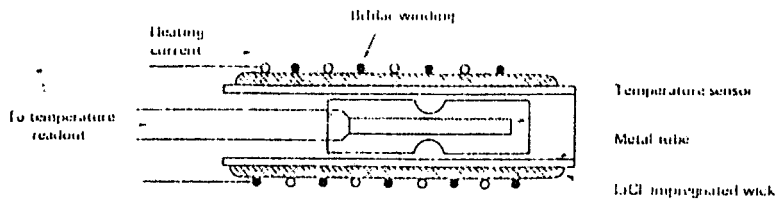


FIGURE 1-31 Saturated-solution dew-point sensing element.

ความต้านทานของ salt solution จะบอกค่าของจุดน้ำค้างเมื่อถึงอุณหภูมิที่กำหนดค่าเอาที่พูดของ ตัวตรวจจับอุณหภูมินั้นจะแสดงค่าและมีความสัมพันธ์กับความดันไอที่จุดน้ำค้าง ( จำเป็นต้องรู้ ความดันไอสำหรับ lithium chloride ที่อิ่มตัว )

#### 4. วิธีการตรวจจับความชื้นระยะไกล ( Remote Moisture - Sensing Methods )

วิธีการตรวจจับความชื้นระยะไกล ใช้เทคนิคของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในการส่งคลื่นวิทยุส่ง ไปถึงพื้นที่ที่สามารถรับได้ ใช้ความถี่ในระดับ ultraviolet , microwave และ infrared เครื่องมือที่ใช้ วิธีการนี้สามารถแสดงให้เห็นถึงความชื้นที่ประกอบอยู่ใน ก๊าซ , ของเหลว และ ของแข็ง ในรูป อัตราส่วนปริมาตร ( % ) หรือ อัตราส่วนมวล ( ส่วนต่อล้าน ) เครื่องมือบางชนิดจะใช้การดูดซึม คลื่น microwave ในการบอกค่าความชื้นที่มีอยู่ เมื่อมีการซึมซับมากขึ้นตามความชื้นที่มีอยู่ เป็น ผลให้พลังงานที่อยู่ระหว่างแหล่งกำเนิดกับตัวตรวจจับมีความเบาบางลง

เครื่องมือที่ใช้กันโดยทั่วไปอาศัยระยะคลื่นในธรรมชาติ การปฏิบัติงานใช้พื้นฐานเลือก บางส่วนของการดูดซึ่มการแผ่รังสี เนื่องจากปริมาณความชื้นแต่ละค่ามีความยาวคลื่นที่แน่นอน ความยาวคลื่นนั้นหาได้ตามการส่งออกมาของ แสง ultraviolet , infrared รวมถึงแสงที่เรา สามารถมองเห็นได้ ในทางการค้ามักใช้ระบบการตรวจจับความชื้นโดยใช้แสง infrared ด้วยเหตุ ผลดังนี้ การดูดซึ่มแสง infrared นั้นจะอยู่ในค่าความยาวคลื่นที่จำเพาะ ทำให้สามารถหาค่า ของไหลที่เราต้องการจากปริมาตรที่เรานำมาตรวจสอบ โดยอ้างอิงของไหลที่เรารู้ค่าความชื้น ที่ประกอบอยู่ ซึ่งค่าที่เราอ่านได้นำมาเปรียบเทียบกัน ในระบบอื่นใช้ความยาวคลื่นจำเพาะสอง คลื่น ในการวัดของไหลและเปรียบเทียบการเบาบางลง (attenuation) (พลังงานของ infrared ที่อยู่ บน photodetector) ของ " dip " ทั้งสองใน special curve จะมีเพียง dip อันหนึ่งที่มีการเปลี่ยนแปลงการดูดซึ่มเกิดขึ้น ส่วน dip อีกอันนั้นจะเป็นตัวอ้างอิงความยาวคลื่น คุณลักษณะช่วงการ ดูดซึ่มของความชื้นที่มีอยู่สามารถสังเกตได้จากความถี่ของคลื่น microwave และ submillimeter - wave เครื่องมือที่ใช้ช่วงความถี่ และความยาวคลื่นที่มีความจำเพาะ (multispectral microwave radiometers) ใช้สำหรับการตรวจจับความชื้นที่มีอยู่ในบรรยากาศระยะไกลด้วยดาวเทียม

## การออกแบบและปฏิบัติงาน

### 1. ไฮโกรมิเตอร์ ( Hygrometers )

ผลิตภัณฑ์ไฮโกรมิเตอร์แบบ electronic แรกสุดนั้นเกิดจากความต้องการตรวจจับความชื้นของอุปกรณ์ radiosondes ( อุปกรณ์ที่ใช้ในงานรวบรวมและส่งข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยา มีลักษณะเป็นบอลูน ) ที่ใช้ในงานอุตุนิยมวิทยา battery - powered telemetry packages ขนาดเล็กจะถูกส่งขึ้นฟ้าโดยบอลูน และตรวจเส้นทางโดย radar ตัวตรวจจับที่ส่งขึ้นไปจะตรวจวัดค่า อุณหภูมิ , ความดัน และ ความชื้นและข้อมูลจากการส่งบอลูนขึ้นไปจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับสถานที่ ที่บอลูนลอยผ่าน ช่วงเวลาที่เปลี่ยนไป สถานที่ ความเร็วลมและเส้นทางที่ใช้ สามารถแสดงให้เห็นได้เช่นกันในการออกแบบอุปกรณ์ radiosondes ตัวตรวจจับในอุปกรณ์ใช้หลักการการส่งกำลังเหมือนกันทั้งหมดทำให้สามารถใช้งานวงจร telemetry ได้อย่างมีมาตรฐาน

ในประเทศฟินแลนด์ ตัวตรวจจับของอุปกรณ์ radiosondes จะใช้หลักการของการเก็บประจุไฟฟ้าทั้งหมด ไฮโกรมิเตอร์แบบที่ใช้หลักการเก็บประจุไฟฟ้าซึ่งออกแบบสำหรับใช้งานประกอบด้วยส่วนที่ตัวที่เป็นแก้ว ซึ่งมีขั้ว electrode 2 ขั้ว ขั้ว electrode ที่อยู่ส่วนล่างมีผิวหน้าที่ทำจากโลหะ ฟิล์มโพลีเมอร์บางๆ ( ประมาณ 1 ไมโครเมตร ) เคลือบที่ขั้ว electrode นี้ ส่วนขั้ว electrode ด้านบนนั้น ใสน้ำสามารถซึมผ่านได้ ดังนั้นจะมีสุญญากาศสะสมบนแผ่นฟิล์มทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการนำไฟฟ้า ( dielectric ) เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงการดูดซึมน้ำบนแผ่นฟิล์ม จะทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจจับเปลี่ยนไปซึ่งตัวตรวจจับนี้จะต่อไปยังวงจร ac ความถี่สูง ( high - frequency ac circuit ) ตัวตรวจจับชนิดนี้มีชื่อทางการค้าว่า HUMUCAP ( ลงทะเบียนเครื่องหมายการค้าที่ Visala OY , Helsinki , Finland ) มีขนาด 6 x 4 x 0.2 มิลลิเมตร และใช้งานหลายอย่างนอกจากการใช้กับ radiosondes เนื่องจากการใช้งานที่หลากหลาย จึงทำให้มีการออกแบบตัวตรวจจับพื้นฐาน ซึ่งสามารถติดตั้งใช้งานในงานต่างๆ ตัวตรวจจับที่รวมกัน ( package sensor ) เชื่อมต่อกับสายเคเบิลของหน่วย electronic ซึ่งสามารถติดตั้งแสดงผลได้

ในสหรัฐอเมริกาอุปกรณ์ radiosondes เข้ามาในปี 1930 ( และเริ่มใช้ในหลายปีถัดมา ) ตัวตรวจจับทั้งหมดที่ใช้เป็นแบบใช้ค่าความต้านทาน ซึ่งเป็นตัวตรวจจับแบบ hygroscopic salt resistive ของ Dunmore วงจร telemetry ถูกออกแบบให้ใช้ตัวต้านทานขนาด 5 megohm ถึง 5 kohm สำหรับช่วงความชื้น 15 ถึง 100% RH ช่วงค่าความต้านทานนี้ยังคงใช้สำหรับตัวตรวจจับความชื้น ที่ใช้สาร lithium chloride ต่อมาอย่างยาวนาน การใช้งานของตัวตรวจจับชนิดนี้ได้แพร่จากการใช้กับอุปกรณ์ radiosondes ไปยังงานประเภทต่างๆ และมีการพัฒนา ปรับปรุง แก้ไขอย่างหลากหลายในการออกแบบต่อมา ยกตัวอย่าง เช่น การใช้งานประเภทที่ไม่ต้องการวัดค่า

ความชื้นในย่านที่กว้าง ตัวตรวจจับแบบใช้ hygroscopic - salt ถูกปรับปรุงให้มีช่วงแคบลงกว่า 15% ไม่ว้ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 100 % RH เมื่อมีการปรับปรุงทำให้เกิดการใช้งานในย่านต่างๆมากมาย ตัวตรวจจับหลายแบบที่มีย่านความชื้นแคบนั้นสามารถนำมาใช้งานร่วมกันได้ เมื่อมีการพัฒนาตัวตรวจจับ electronic มาเรื่อยๆ ทำให้มีตัวตรวจจับแบบอื่นที่ใช้กับอุปกรณ์ radiosondes นอกเหนือจากแบบที่ใช้ lithium chloride

ตัวตรวจจับความชื้น แบบ Hygroscopic - salt มีลักษณะโครงสร้างเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า และเป็นรูปทรงกระบอก ชนิดแผ่นนั้นโดยส่วนใหญ่มักทำจากพลาสติกเช่น polystyrene ขั้ว electrode นั้น จะถูกพิมพ์ติดบนตัวแผ่นทั้งสองข้าง และส่วนประกอบที่ใช้ในการเคลือบ ส่วนตรวจจับความชื้น นี้เป็นสารละลายของ hyscopic - salt ที่เก็บอยู่ในพลาสติกบนผิวหน้าทั้งสอง ขั้ว electrode ที่ติดอยู่นั้นจะวางในลักษณะซิกแซก เพื่อให้การเปลี่ยนแปลงความต้านทานของตัวตรวจจับเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพที่สุด probe ที่ใช้ทำจากสาย paradium คู่ม้วนที่กระสวย polystyrene ที่ซุบสารละลาย hygroscopic - salt ที่สาย ตัวตรวจจับแบบ hygrometric ใช้การเปลี่ยนแปลงความต้านทาน เนื่องจากอิออนมีการเปลี่ยนแปลง ผิวหน้าที่ทำจาก sulfonate polystyrene นั้นมีแผ่นที่มีขั้ว electrode วางซิกแซกติดอยู่ด้านหนึ่งด้านใดหรือทั้งสองด้าน หรือเราสามารถเลือกใช้แบบที่เป็นทรงกระบอก ตัว probe นั้นอยู่ในรูปที่ 1-32 มีลักษณะที่เป็นแบบมีการรวมกันของอุปกรณ์หลายชนิด เป็น thermister ที่ใช้ชดเชยค่าอุณหภูมิ ( temperature compensating thermistor ) เทอร์มิมิเตอร์ ที่ใช้ตัวต้านทาน platinum ร่วมกับอุปกรณ์ตรวจจับความชื้น ดังนั้นจึงสามารถวัดค่าได้ ทั้งอุณหภูมิ และ ความชื้นสัมพัทธ์ มี stainless ที่เจาะรูรอบๆ ครอบอุปกรณ์ตรวจจับความชื้นเพื่อป้องกันความเสียหาย

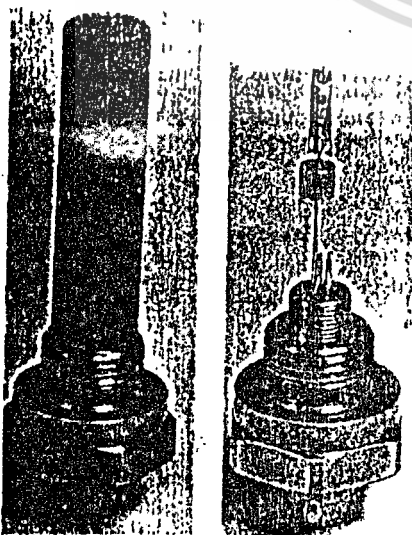


FIGURE 1-32 Relative-humidity/temperature sensor probe: sulfonated-polystyrene hygrometer element is mounted on the rear of the element assembly, which shows the platinum resistance thermometer mounted to its front side. (Courtesy of General Eastern Corp.)

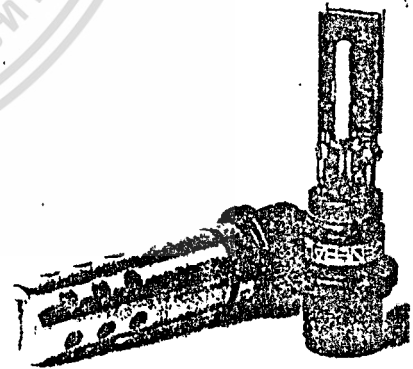


FIGURE 1-33 Aluminum-oxide hygrometer: (a) probe assembly with sintered stainless-steel end cap protecting the sensor assembly; (b) sensing element, with lead wires, on its mechanical mount (Courtesy of Panametrics, Inc.)

เอกสารนี้เป็น (a) สารที่สวนงไวสำ (b) รับการใช้ (Courtesy of Panametrics, Inc.) อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฮโกรมิเตอร์แบบใช้ความต้านทานฟิล์มคาร์บอน (carbon - film) ถูกใช้ในงานของอุปกรณ์ radiosondes ต่างๆ ส่วนที่เป็นแผ่นหรือ รูปทรงกระบอกทำจากพลาสติกอะครีลิก โดยมีขั้ว electrode ที่เป็นโลหะและเคลือบด้วยแป้งคาร์บอนซึ่งมีอยู่ใน gelatinous cellulose ค่าความต้านทานของตัวตรวจจับจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ ความชื้นสัมพัทธ์มีค่าเพิ่มขึ้น และลดลงในตัวตรวจจับแบบที่ใช้ hygroscopic - salt อย่างไรก็ตามตัวตรวจจับแบบ carbon - film มีช่วงค่าความต้านทานในระดับที่อุปกรณ์แบบ radiosondes ต้องการใช้แต่มีค่าความต้านทานต่ำสุด ( ประมาณ 15 kohm ) ที่ 10%RH การพัฒนายังมีในประเภทต่างๆของ อุปกรณ์ resistive hygrometer เช่น แก้ว lead iodide , polyelectrolyte รวมกับ ion exchange resins และ ceriums titanate อย่างไรก็ตามการพัฒนาที่เป็นอยู่นั้นได้ผลไม่เป็นที่น่าพอใจในการออกแบบผลิตภัณฑ์

aluminium - oxide ( resistive - capacitive ) hygrometer มีการพัฒนาขึ้นจากแนวคิดในช่วงก่อนปี 1960 อุปกรณ์ชนิดนี้ในปัจจุบันมีลักษณะเล็กมาก ( รูปที่ 1-33 ) จากสัญญาสภาวะและค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือสามารถชี้ค่า จุดน้ำค้างและจุดน้ำค้างแข็ง หรือส่วนประกอบของไอน้ำในหน่วย ส่วนต่อล้าน โดยน้ำหนัก ตัวตรวจจับชนิดนี้จะไม่แสดงผลกระทบเมื่อเจอความดันที่นอกเหนือจากช่วงที่วัดได้และสามารถใช้งานในการวัดได้ทั้งกับก๊าซและของเหลว

Electrolytic hygrometers ใช้ในการวัดค่าความชื้นที่มีอยู่ในก๊าซต่างๆ ใช้ ตัวตรวจจับแบบ phosphorous pentoxide สำหรับหาปฏิกิริยาไฟฟ้าของไอน้ำในก๊าซที่เราต้องการ อุปกรณ์ที่กล่าวมา แสดง ในรูปที่ 1-34 ตัวตรวจจับแบบ phosphorous pentoxide ใช้ได้สำหรับก๊าซเกือบทุกประเภทยกเว้น ก๊าซที่มีการกัดกร่อน เช่น alcohol ammonia หรือ สารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว ( ของไหลที่รวมตัว หรือ มีปฏิกิริยา กับ phosphorous pentoxide ) ช่องทางเข้าออกของก๊าซนั้นจะอยู่ที่ช่องด้านท้าย และวาล์วที่ควบคุมการไหลซึ่งอยู่ที่ช่องทางด้านหน้า ตัวตรวจจับจะมีหน่วยด้านในที่ใช้ต่อกับ พอร์ต , วาล์ว และ regulator ที่เปรียบเทียบความดันโดยการปั๊ม ตัวตรวจจับจะประกอบด้วยคู่สายของขั้ว inert electrode พันบนแท่ง fluorinated hydrocarbon ที่เคลือบด้วยฟิล์ม hydrate phosphorous pentoxide บางๆบางส่วน กระแสไฟฟ้าที่ได้มาจาก phosphorous pentoxide ที่แยกจาก hydrogen และ oxygen ที่ซึมซับน้ำ กระแสไฟฟ้าที่ได้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนโมเลกุลของน้ำที่ทำปฏิกิริยาทางไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าจะถูกแสดงผลในหน่วย ส่วนต่อล้านส่วน โดยปริมาตร ที่อัตราการไหลเฉพาะของก๊าซที่เราหา

Oscillating - crystal humidity sensor อาศัยการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่รับจาก quartz crystal ซึ่งเคลือบ hygroscopic เป็นการปฏิบัติการ ผลึก crystal จะต่อกับวงจร oscillator ชั้น crystal สามารถใช้กับเครื่องมือทางพอร์ตขาเข้าและขาออกสำหรับหาการไหลของก๊าซ ความถี่จาก oscillator สามารถอ่านได้โดยตรง หรือ ใช้การอ้างอิงผลึก crystal ในการอ่านค่าความถี่ออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2. ไฮโครมิเตอร์ ( Psychrometers )

เมื่อมีตัวตรวจจับหลายประเภท ในแบบของ hygrometers และจุดน้ำค้างที่สามารถนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ไฮโครมิเตอร์ จึงไม่เป็นที่นิยมในการใช้งาน อย่างไรก็ตามยังถูกใช้ในงานบางประเภท และ สำหรับผู้ที่เคยชินกับการใช้ ไฮโครมิเตอร์ เมื่อเปรียบเทียบการใช้งาน ไฮโครมิเตอร์มีข้อเสียที่เห็นได้ชัดเจนสองข้อ คือ จำเป็นต้องใช้ chart psychrometer ในการอ่านค่า และ ต้องมีการระบายอากาศ ค่าอุณหภูมิที่อ่านได้สองค่า ( จาก dry bulb และ wet bulb thermometer ) ต้องใช้ psychrometric chart ในการหาความชื้น ตัวอย่าง chart ในรูปที่ 1-35 หัว bulb นั้นต้องอยู่ในช่องหลอดที่ใช้ในระบบ thermometer ของ ไฮโครมิเตอร์ มากกว่า หนึ่งวัน dry bulb จะตรวจจับอุณหภูมิรอบๆ ขณะที่ wet bulb thermometer ถูกคลุมโดยไส้ตะเกียงที่มีน้ำอ้อมตัว และวัดค่าอุณหภูมิที่ต่ำกว่าสภาพแวดล้อม เนื่องจากการระเหยของความชื้น ผลต่างระหว่างค่าอุณหภูมินี้ เรียกว่า wet - bulb depression และ ความชื้นสัมพัทธ์ ที่ความดันบรรยากาศมาตรฐานที่ 1 atm นอกจากนี้ยังสามารถหาจากตารางpsychrometric ซึ่งจำเป็นต้องใช้ค่า ของ dry - bulb temperature ส่วน % RH นั้นเป็นฟังก์ชันของ wet - bulb depression ที่ค่าความดันบรรยากาศ อื่นๆ ค่าความชื้นที่ถูกต้อง ต้องใช้ alternative table ประกอบการพิจารณาด้วย

เพื่อที่จะได้ค่าอุณหภูมิของ wet - bulb ที่ถูกต้อง จำเป็นต้องพิจารณาถึงผลของการระบายอากาศ สำหรับ sling psychrometer ในช่วงปลายศตวรรษที่ 19 นั้นเป็นต้นแบบ โดยเป็น thermometer แบบที่ใช้ปรอทในหลอดแก้วซึ่งเป็นเครื่องมือที่สามารถใช้มือจับและหมุนได้ อัตราในการระบายอากาศ ควรจะอยู่ในที่ค่าประมาณ 300 m/min สำหรับ electronic psychrometer สามารถใช้ตัวหมุน หรือ พัดลม เมื่อเครื่องมือต่างๆ ถูกประกอบกับชิ้นส่วนตรวจจับจะเรียกว่า aspiration หรือ aspirated psychrometer

electronic psychrometer ส่วนมากค่าอุณหภูมิ wet - bulb และ dry - bulb จะได้จากตัวตรวจจับแบบ resistive temperature ( สาย platinum, สาย nickle หรือ thermistor ) ในการออกแบบใช้ อุปกรณ์แบบความต้านทานสำหรับหาค่าอุณหภูมิของ dry - bulb ต่อร่วมกับ thermopile differential เพื่อวัดค่า wet - bulb depression อีกแบบจะใช้รอยต่อ thermopile คลุมกับไส้ตะเกียง ในขณะที่แบบอื่นจะใช้อุปกรณ์ที่ใกล้เคียงกับ dry - bulb resistive

### 3. ตัวตรวจจับแบบจุดน้ำค้าง ( Dew - Point Sensor )

ใน electronic dew - point sensor ทั้งประเภท cooled - condensation surface และ saturated - lithium - chloride - solution หลักการ , รูปแบบ , เทคนิค ถูกพัฒนาในช่วงศตวรรษที่ 19 รวมทั้งผิวหน้าเงินมันที่ใช้สำหรับการควบแน่นด้วย การสังเกตกระบวนการการควบแน่นและวัดค่าอุณหภูมิของผิวสัมผัสนั้นจะใช้ thermometer แบบปรอท เครื่องมือสมัยใหม่ที่ใช้พื้นฐานของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

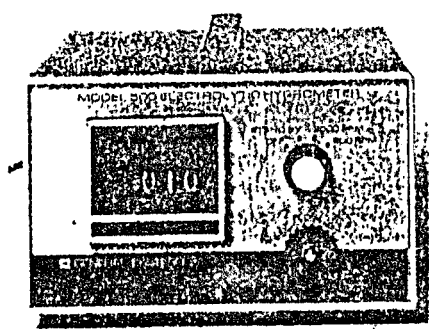


FIGURE I-34 Electrolytic hygrometer system with internal P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> sensor. (Courtesy of General Eastern Corp.)

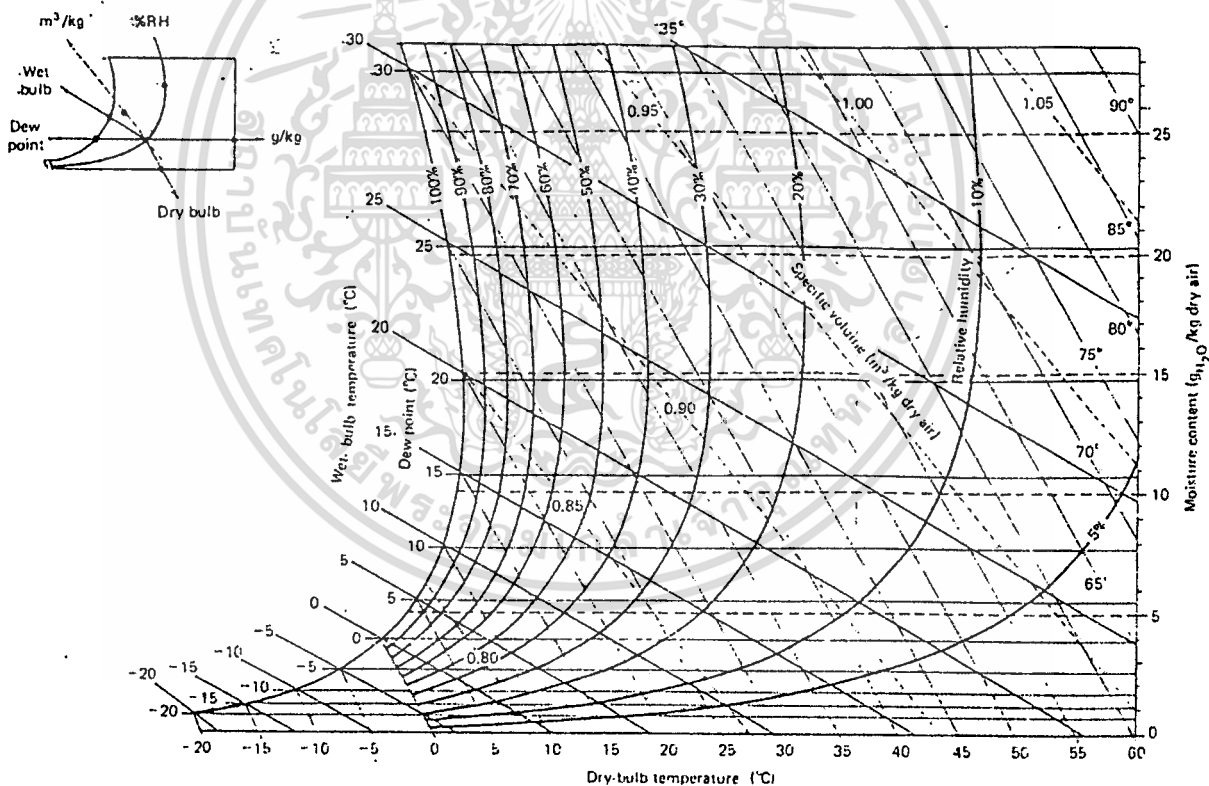


FIGURE I-35 Psychrometric chart (at 101.32 kPa barometric pressure).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการนี้ไม่สามารถให้ค่าอุณหภูมิที่ถูกต้องที่สุดของผิวหน้า ในขณะที่เกิดการควบแน่นครั้งแรก  
 สุดของตัวทำความเย็น ( จุดน้ำค้าง ) แต่เรายังสามารถติดตามค่าจุดน้ำค้างที่มีการเปลี่ยนแปลง  
 โดยการใช้การควบคุมตัวทำความเย็นแบบวงปิด การวัดของไหลนี้ใช้ได้กับก๊าซมากมายหลาย  
 ประเภทและมีความดันประมาณ 2,000 kPa

การปฏิบัติงานของ dew - point sensor นี้แสดง ใน รูปที่ 1-36 ตัวกระจก  
 thermoelectrically cooled (Peltier effect) สะท้อนแสงของ emitting diodes (EDS) ที่ปล่อยออกมา  
 ไปยัง light sensor ( phototransistors ) เมื่อผิวหน้ากระจกแห้ง กระจกจะมีความเย็นจนกระทั่งเกิด  
 การควบแน่นขึ้นบนตัวมัน การเกิดน้ำที่ควบแน่นบนผิวหน้า จะทำให้เกิดการกระเจิงของแสง ตัว  
 ตรวจจับ optical sensing bridge จะได้รับค่าที่เปลี่ยนไปของระดับแสง และ ผลิตสัญญาณขึ้นเพื่อ  
 ใช้ควบคุมแบบเป็นสัดส่วนของระบบควบคุมแบบวงปิด อุณหภูมิของกระจกจะมีค่าที่คงที่ ณ  
 จุดน้ำค้าง และการเปลี่ยนแปลงของจุดน้ำค้างจะถูกตรวจจับต่อไป ค่าอุณหภูมิของกระจกถูก  
 ตรวจจับโดยสายตัวต้านทานแบบ platinum ที่มี thermometer ผิงอยู่ ค่าเอาต์พุตของตัวตรวจ

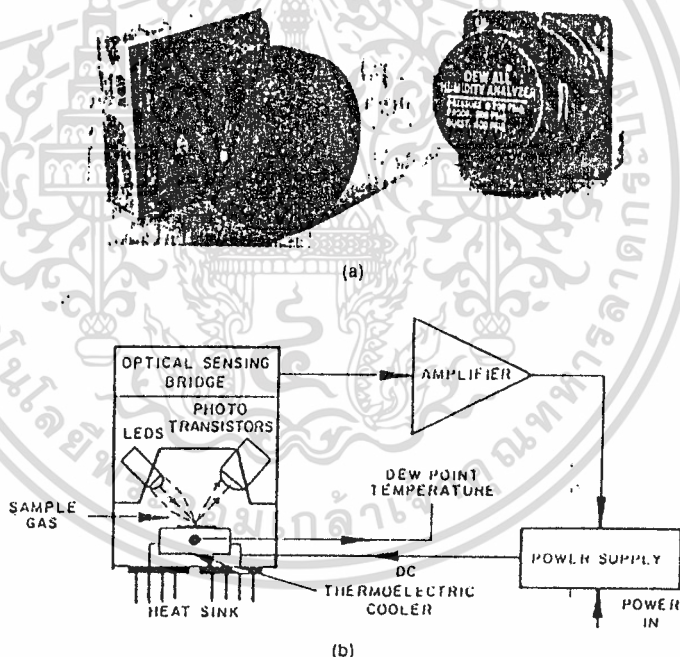


FIGURE 1-36 Dew-point sensor with electro-optical condensation detection: (a) sensor configurations; (b) sensing-system block diagram. (Courtesy of E G & G Environmental Equipment Div.)

จับอุณหภูมิ กับสัญญาณสถานะที่เหมาะสมที่ส่งออกมา จะแสดงค่าจุดน้ำค้างอย่างต่อเนื่อง  
 Peltier effect ของตัว cooler จะทำให้มีลักษณะแบบ heater โดยการกลับขั้วของ dc current ที่เป็น  
 แหล่งจ่ายไปยังอุปกรณ์ นอกจากนี้การออกแบบในระบบต่างๆ อุปกรณ์ทำความร้อนจะมีค่า  
 ความต้านทานแยกจากกันสำหรับค่าฟังก์ชันนี้ โครงสร้างของตัวตรวจจับสองตัวมีทั้งพอร์ตขาเข้า  
 และขาออก สำหรับก๊าซที่นำมาใช้ ตัวตรวจจับทางซ้ายที่ร้อยเข้ากับ spin - off cover เป็น  
 เครื่องมือที่ใช้กับ coolant jacket ( มีสองพอร์ตที่เห็นยื่นมาจากตัวตรวจจับทางซ้าย ) และเครื่องมือ  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่างๆที่เลือกใช้ ส่วนของแหล่งจ่ายพลังงานกับวงจรควบคุม ถูกใส่อยู่ในหน่วยแสดงผลแบบ electronic ระบบสามารถขยายเพิ่มเติมได้โดยอุปกรณ์ ambient - temperature sensor และ ไมโครโปรเซสเซอร์ ที่ใช้คำนวณ % RH สามารถแสดงผลและแยกจากหน่วย electronic ได้

electro - optical ซึ่งใช้วิธีการแบบ chilled - mirror condensation detection เป็นแบบที่ นิยมใช้เช่นกัน การออกแบบใช้แผ่นโลหะฝังในกระจกที่เป็นฉนวน การควบแน่นจะถูกตรวจจับ โดย ตัวความต้านทานที่ไวอยู่บนแผ่นโลหะ ผิวสัมผัสกระจกที่แผ่รังสีอ่อนๆ เชื่อมต่อตัวตรวจจับ รังสีที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ ใช้ในการ condensation detector เช่นกัน ส่วนที่มีการดูดซึมรังสี ( alpha หรือ beta ) จะทำให้เกิดการควบแน่น ตัวตรวจจับจะให้ค่าเอาท์พุตตกลง การเปลี่ยนแปลงของเอาท์พุตนำไปใช้สำหรับ closed - loop Peltier - cooler control และการติดตามค่าจุดน้ำค้าง

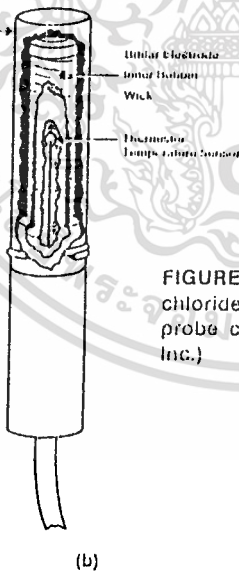
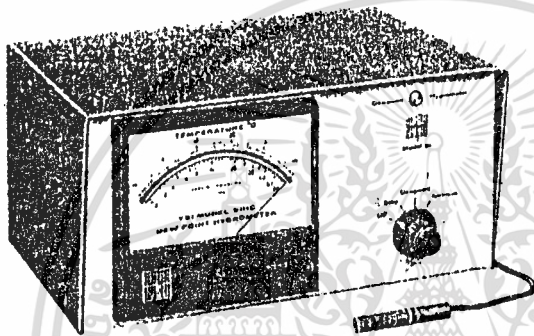


FIGURE 1-37 Dew-point sensing system using saturated-lithium-chloride-solution sensor: (a) electronics/display unit with probe; (b) probe construction. (Courtesy of Yellow Springs Instrument Co., Inc.)

ในรูปที่ 1-37 แสดง ตัวตรวจจับแบบจุดน้ำค้าง ชนิด saturate - lithium - chloride solution สายคู่ electrode พันบนไส้ตะเกียงที่คลุมกระสวยกลวงอยู่ ตัวไส้ตะเกียงแช่อยู่ในสารละลายอิม ตัวของ lithium chloride เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน electrode และ สารละลายอิมตัวของ lithium chloride ไส้ตะเกียงจะร้อน ทำให้ความชื้นที่มีอยู่ในอากาศเกิดการระเหยเนื่องจากความร้อนด้วย ค่าความต้านทานของไส้ตะเกียงจะเพิ่มขึ้น และ การระเหยจะลดลงเมื่อความร้อนลดลงด้วย ไส้ ตะเกียง (และ ตัวกระสวย ) จะเริ่มเย็นและมีน้ำเพิ่มขึ้นอีกครั้ง รวมถึงจะเกิดความชื้นเพิ่มขึ้นอีก ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครั้ง วัฏจักรเหล่านี้จะเกิดซ้ำแล้วซ้ำเล่าจนกระทั่งถึงจุดที่ ความร้อน ความชื้นอยู่ในสภาวะที่คงที่ อุณหภูมิที่คงที่จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับ จุดน้ำค้าง ตัว thermistor thermometer ในตัว กระสวยเป็นตัวตรวจจับค่าอุณหภูมินี้ และการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานเป็นเหตุให้ค่าเอาท์พุทของวงจร electronic มีการเปลี่ยนแปลงไปจะแสดงในรูปของอุณหภูมิจุดน้ำค้าง ในการออกแบบสามารถใช้ platinum resistance thermometer แทน thermistor thermometer ได้ ตัวกัน ความร้อนของตัวกระสวยซึ่งเกิดจากการที่ความร้อนไหลผ่านไหลคืนนั้น มีความสำคัญมากในการ ออกแบบคุณสมบัติของระบบ นอกจากนี้อุปกรณ์ในการวัดค่าอุณหภูมิจึงโดยรอบ ยังถูกนำไปใช้ใน ระบบการตรวจจับอย่างสม่ำเสมอ

### TRANSDUCER CHARACTERISTICS

ค่าคุณลักษณะของความชื้น นั้นจะ มีค่าหลากหลาย ขึ้นอยู่กับตัวตรวจจับ ไฮโกรมิเตอร์ , ไฮโครมิเตอร์ , ตัวตรวจจับแบบจุดน้ำค้าง หรือ ตัวตรวจจับความชื้นระยะใกล้เฉพาะ คุณ ลักษณะทางกล นั้นจะแสดงให้เห็นโครงสร้างของตัวตรวจจับขนาดต่างๆทั้งหมด ( เช่นเดียวกัน ใน วงจร electronic ที่แยกออกไปก็มีการแสดงให้เห็น ) สำหรับตัวตรวจจับที่มีการเพิ่มเติม ( มีพอร์ต เชื่อมต่อ ) ส่วนที่ต่อเข้าโดยตรงนั้น ทำให้ต้องรู้ค่าต่างๆเพิ่มขึ้น เช่น รู , ท่อต่างๆ , probe ของตัว ตรวจจับ ขนาดต่างๆควรจะต้องแสดงให้เห็นอย่างเด่นชัด สำหรับการวัดของไหลที่นอกเหนือจาก อากาศเปิด ต้องมีการติดตั้งค่าความดันของไหล และ ตัวตรวจจับที่ใช้เข้ากันได้กับระบบการวัดได้ ส่วนคุณลักษณะทางไฟฟ้า เช่น ช่วงค่าความต้านทานของอุปกรณ์ ( และตัวต้านทานที่ให้ค่า ความชื้น และ อุณหภูมิ ) , แหล่งจ่ายกำลังที่ต้องการ, เวลาที่ใช้ในการเตรียมพร้อม ( warm-up time ) และ ค่าคุณลักษณะของเอาท์พุท ต้องแสดงสำหรับตัวตรวจจับที่มีการต่อโดยตรงกับ สภาวะสัญญาณที่และวงจรที่ทำงาน ในบางแบบที่ตัวตรวจจับมีการต่อรวมกันของวงจรต่างๆ และ เครื่องมือกระตุ้น , รักษาสภาวะและแสดงผล ซึ่งทำโดยมือ ในกรณี line voltage power ที่ ต้องการจะแสดงให้เห็น ( หรือชนิดของ battery ถ้าตัวตรวจจับตัวนั้นใช้ battery ในการปฏิบัติงาน ) อย่างไรก็ตาม ค่าจำกัดต่างๆที่สำคัญของสภาพแวดล้อม เช่น electrostatic และ electromagnetic ควรจะบอกมาด้วย

Performance characteristics ประกอบด้วย ช่วงเริ่มต้น , อุณหภูมิจากการวัดของไหล และ เอาท์พุท ค่าคุณลักษณะที่ถูกต้องสำหรับตัวตรวจจับแบบไฮโกรมิเตอร์ ช่วงค่าโดยปกติจะแสดง ในรูปของ % RH สำหรับตัวตรวจจับแบบไฮโครมิเตอร์ แสดงในรูปอุณหภูมิของ wet - bulb และ dry - bulb สำหรับตัวตรวจจับแบบจุดน้ำค้าง แสดงในค่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง ในตัวตรวจจับ จุดน้ำค้างหลายๆชนิดและไฮโกรมิเตอร์บางชนิด รวมถึงตัวตรวจจับความชื้นแบบอื่นๆ (

infrared, microwave ) ช่วงค่าจะแสดงในรูปส่วนประกอบของความชื้น ในหน่วย ppm (parts per million) ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

million) หรือ หน่วย กรัมของน้ำ ต่อ กิโลกรัมของอากาศแห้ง สำหรับตัวตรวจจับแบบไฮโครมิเตอร์  
ช่วงของ wet - bulb depression (dry - bulb temperature ลบด้วย wet - bulb temperature ) ถูก  
แสดงด้วยกระบวนการทำงานที่ให้ช่วงค่าอุณหภูมิ

ปริมาณต่างๆที่มีความสัมพันธ์ในการใช้หาช่วงค่า แสดงใน psychrometric chart ในรูปที่ 8  
โดย chart นี้ ใช้กับค่าความดันที่ 1 บรรยากาศ แสดงให้เห็นการหาค่าปริมาณต่างๆโดยอาศัย  
ความรู้ จากค่าที่หาได้สองค่า ยกตัวอย่างเช่น ถ้า อุณหภูมิของ dry - bulb ( วัดที่อุณหภูมิของไหล  
) มีค่า 35 องศาเซลเซียส และค่าจุดน้ำค้างวัดได้ที่ 15 องศาเซลเซียส ดังนั้นจุดที่เส้นสองเส้นตัด  
กัน ค่าความชื้นที่อ่านได้ คือ 30 % RH ถ้าใช้ค่า อุณหภูมิ wet - bulb แทนค่าที่จุดน้ำค้าง ค่า  
อุณหภูมิที่ได้จะมีค่าประมาณ 21.5 องศาเซลเซียส ( การใช้งาน psychrometric chart ที่ถูกต้องมี  
ขั้นตอนมากกว่าที่แสดงให้เห็นในตัวอย่าง แต่วิธีการคร่าวๆเป็นดังนี้ ) ยิ่งกว่านั้น psychrometric  
chart สามารถใช้หาค่าส่วนประกอบความชื้นได้ จำนวนที่วัดได้สองค่า ที่ 10.8 กรัม/กิโลกรัม จุดน้ำ  
ค้าง ( ที่ความดันมาตรฐาน ) มีค่าความสัมพันธ์โดยตรงกับ ส่วนประกอบความชื้น ตัวอย่างเช่น  
เส้นจุดน้ำค้างที่ลากตามแนวขวางใน chart อุณหภูมิจุดน้ำค้างที่ -10 องศาเซลเซียส จะได้ค่าส่วน  
ประกอบความชื้นที่ 1.6 กรัม/กิโลกรัม ( 1600 ppm ) นอกจากนี้ สำหรับจุดน้ำค้างและอุณหภูมิ dry  
- bulb มีค่าประมาณ +8 องศาเซลเซียส ปริมาตรจำเพาะสามารถอ่านค่าได้ 0.8 ลูกบาศก์เมตร/  
กิโลกรัม สำหรับอากาศที่มีความดันบรรยากาศ การวัดหาค่าจุดน้ำค้างแข็งทำได้เช่นเดียวกับจุด  
น้ำค้าง

ค่าเอาต์พุตของตรวจจับสามารถแสดงให้เห็นในรูปของ intrinsic transduction  
characteristics ( ค่าความต้านทานของอุปกรณ์ , ค่าอิมพีแดนซ์ , ความถี่ที่ใช้ , กระแสไฟฟ้า ,  
ความต่างศักย์ ) ของสถานะความชื้น หรือ ช่วงความชื้น ในตัวตรวจจับส่วนใหญ่ ช่วงที่จำกัด  
นั้นจุดสุดท้ายไม่ได้หมายถึง 0 % และ 100 % RH (หรือค่าอื่นสำหรับอุปกรณ์ชนิดอื่น ) ใน  
ไฮโครมิเตอร์บางชนิดที่มีช่วงค่า 5 % , 10 % , 90 % หรือ 95 % เป็นประเภทที่ใช้กันมาก นอก  
จากช่วงเหล่านี้จะอยู่ในรูป stated accuracy characteristics ในตัวตรวจจับแบบเดียวกัน  
differential accuracy characteristics จะใช้สำหรับการเชื่อมต่อพอร์ตช่วงค่าที่วัดได้เหนือหรือต่ำกว่า  
ช่วงที่จำกัดได้ และเนื่องจากค่า output - vs. - measurand characteristics ของตัวตรวจจับ  
ความชื้นส่วนใหญ่ไม่เป็นเชิงเส้น การที่จะได้ค่าคุณลักษณะที่ถูกต้องนั้นต้องใช้เวลาทำซ้ำ และ  
hysteresis

dynamic performance characteristics แสดงในรูปของ time constant , บางทีก็อยู่ในรูป  
rise time หรือ response time ค่าเวลาเหล่านี้จะแตกต่างกันสำหรับการเพิ่ม หรือ การลดของความชื้น  
และขึ้นกับอุณหภูมิเช่นกัน และมีผลอย่างมากจากอัตราการไหล (หรือ การระบายอากาศ ) โดยที่  
สภาพอื่น ๆ ที่ใช้งานควรให้ค่าได้ measured fluid temperature range ควรจะแสดงให้เห็นด้วย

ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และค่าจำกัดของอุณหภูมิแวดล้อมที่หัวของ immersion probe ( จุ่มในของไหลที่มีความดัน ) ต้องแสดงให้เห็นด้วยและแสดงค่าสภาวะอื่นๆที่อาจมีผลกับตัว probe ค่าสภาวะที่เก็บไว้ของไฮโกรมิเตอร์ จะมีการเก็บค่าของตัวตรวจจับในสภาวะที่บรรจุอยู่กับตัวดูดความชื้น เช่น silica gel เป็นต้น

### การประยุกต์ใช้งาน

ตัวตรวจจับความชื้นส่วนใหญ่จะใช้ในการวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ ในพื้นที่สองแบบ ที่ มีการใช้ตัวตรวจจับความชื้นอย่างกว้างขวาง คือ ในงานทางอุตุนิยมวิทยา ( outdoor air ) , ทำความร้อนและใช้กับ air condition ( indoor air ) ในงานทางอุตุนิยมวิทยา ตัวตรวจจับความชื้น ( ไฮโกรมิเตอร์แบบแรกเริ่ม ) ใช้ในสถานีภูมิอากาศที่ตั้งอยู่บนพื้นดิน , ทะเล และ บอลลูนของอุปกรณ์ radiosondes อุปกรณ์การบินบางชนิดถูกใช้เป็นเครื่องมือดูสภาพอากาศ เช่น กัน สถานีภูมิอากาศที่ตั้งอยู่บนพื้นดินส่วนมากจะปฏิบัติงานแบบอัตโนมัติ และส่งข้อมูลไป เช่นเดียวกับ ทะเล และ อุปกรณ์ radiosondes

ในระบบให้ความร้อนและ air condition การวัดค่าความชื้นทำในส่วนของ comfort control เป็นส่วนมาก อย่างไรก็ตาม วิศวกรจะใช้การควบคุมความชื้นในพื้นที่เฉพาะ ซึ่งความชื้น ( และ อุณหภูมิ ) มีค่าอยู่ในช่วงใดระดับจำเพาะ ( specific level ) , เหนือระดับจำเพาะ หรือในช่วงที่จำเพาะ เช่น ในพิพิธภัณฑ์ ( โดยเฉพาะอย่างยิ่งพิพิธภัณฑ์ศิลปะ ) , ห้องสมุด , ห้องทดลองการวัดและตรวจสอบ , โกดัง , โรงเพาะชำและ โรงงานที่ใช้ฝีมือในการผลิต เช่น ชิ้นส่วน electronic , ภาควาดต่างๆ , สิ่งที่ถูกห่อด้วยฟิล์มพลาสติก , งานพิมพ์ , สินค้าสิ่งทอ , การอบแห้ง , กระบวนการผลิตยา และ ห้องที่ต้องการความสะอาดอย่างมาก

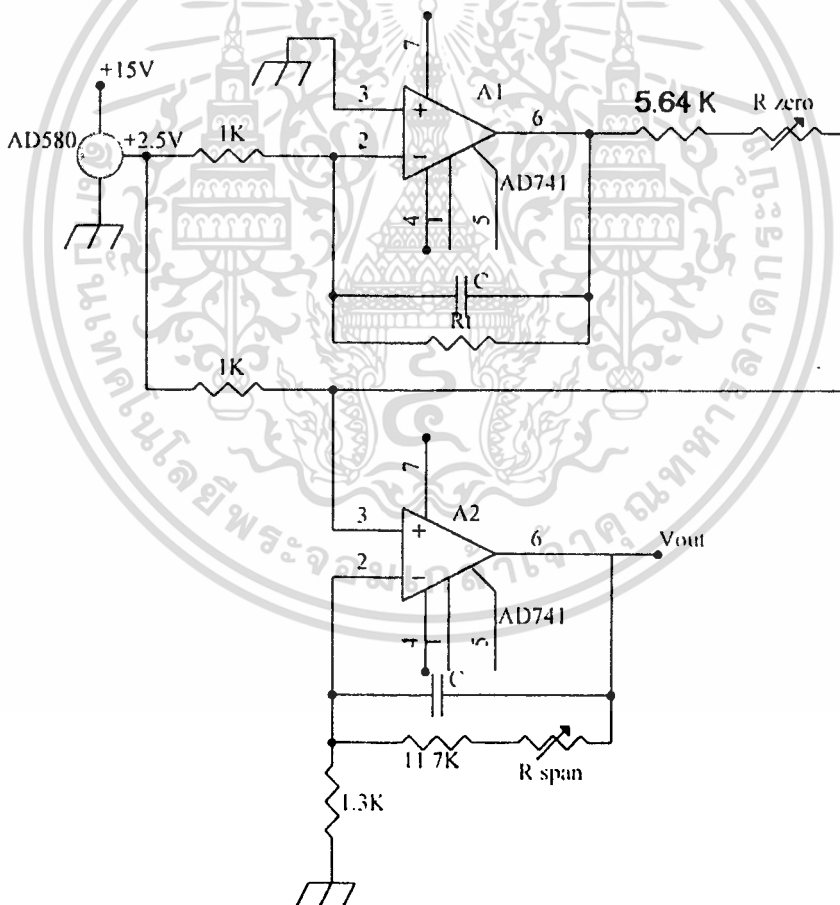
การวัดค่าความชื้นในช่วงแรกใช้ในงานกระบวนการทางอุตสาหกรรมที่มีความชื้นประกอบอยู่ในก๊าซ , ของเหลวที่ไม่ละลายน้ำ และ ของแข็ง ซึ่งจำเป็นต้องรู้ค่าความชื้นเพื่อควบคุม การวัดค่าส่วนมากจะทำกับตัวอย่างที่ใช้เป็นหลักเกณฑ์ แต่การเพิ่มขึ้นของไอน้ำจำเป็นต้องใช้หลักเกณฑ์พื้นฐานเพิ่มขึ้น ระบบการตรวจจับความชื้นระยะไกลใช้เป็นส่วนหนึ่งในการวัดค่าความชื้นที่ประกอบอยู่อย่างต่อเนื่องซึ่งมีวัสดุที่สัมผัสกับตัวตรวจจับ ตัวอย่างเช่น วัสดุบนสายพาน , เส้นใยกระดาษและสิ่งทอ , ไอน้ำที่แท้จริงของกระบวนการของเหลว พื้นที่ต่างๆนอกเหนือจากนี้ที่ต้องการใช้ค่าส่วนประกอบความชื้น เช่น soil mechanics , เกษตรกรรม และ การทำสวนดอกไม้ ซึ่งใช้การวัดค่าแบบระยะไกล

## บทที่ 2

### การออกแบบและการทดลอง

ในการอบแห้งเมล็ดพืช ภาวะอากาศที่ใช้ในการอบแห้งมีความสัมพันธ์กับคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และระยะเวลาในการอบแห้ง การควบคุมภาวะอากาศโดยทั่วไปหมายถึง การควบคุมอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และอัตราการไหลของอากาศ ซึ่งอัตราการไหลของอากาศในกระบวนการอบแห้งมักมีค่าคงที่เสมอ

สำหรับการควบคุมอุณหภูมิเราได้เลือกใช้ Thermistor มาใช้ในการตรวจจับอุณหภูมิ โดยหลักการทำงานของ Thermistor ได้อธิบายไว้แล้ว เริ่มจากวงจร Instrumenting linearized thermistors with op amps-resistance mode



วงจรง 5 Instrumenting linearized thermistors with op amps-resistance mode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของวงจร เมื่อเราป้อนโวลต์เตจ +15V ให้ AD580 ( IC reference ) จะได้โวลต์เตจออกมา +2.5V ซึ่งป้อนให้กับขา - ของ op amp (A1) โดยที่  $V_{out}$  ของ A1 จะเท่ากับ

$$V_{out1} = -R_T / R \quad ; R = 1k\Omega$$

$R_T$  = ความต้านทานของ thermistor ( จากการทดลอง และการคำนวณ )

$$= 5.2752 + (-0.015136) T \text{ } ^\circ C$$

เราต้องการหา  $V_{in}$  ของ op amp(A2)โดยที่จรรยาจาก +2.5V ไป  $V_{out1}$  จะเกิดกระแสเท่ากับ

$$I = \frac{+2.5 - V_{out1}}{R + 5.64K}$$

ดังนั้นโวลต์เตจที่ขา + ของ A2 เท่ากับ

$$V_+ = 2.5 - IR$$

จากคุณสมบัติ op amp จะได้  $V_+ = V_-$  เราจะได้  $V_{out2}$  ของ A2 เท่ากับ

$$V_{out2} = V_+ * (1.3K - 11.7K)$$

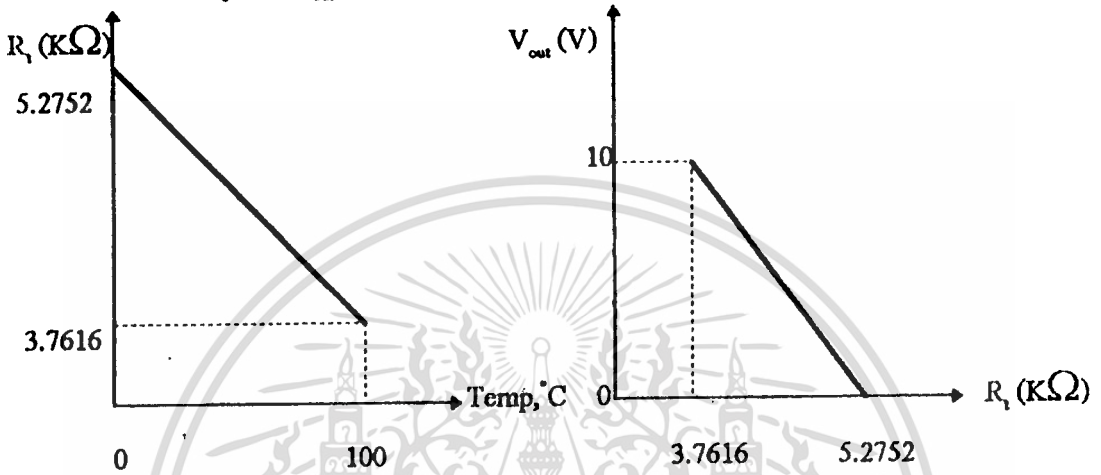
$$V_{out2} = 10V_+$$

ซึ่ง  $V_{out2}$  จะอยู่ในช่วง 0-10V

เนื่องจากการทำงานของวงจรที่ใช้สำหรับควบคุมอุณหภูมิ ( Linear True-Mean-Square Temperature Controller ) ต้องการ input เป็นกระแสในช่วง 4-20mA เราจึงต้องทำการแปลงค่าโวลต์เตจ 0-10 V เป็นกระแส 4-20 mA โดยใช้หลักการ V-to-I Converter

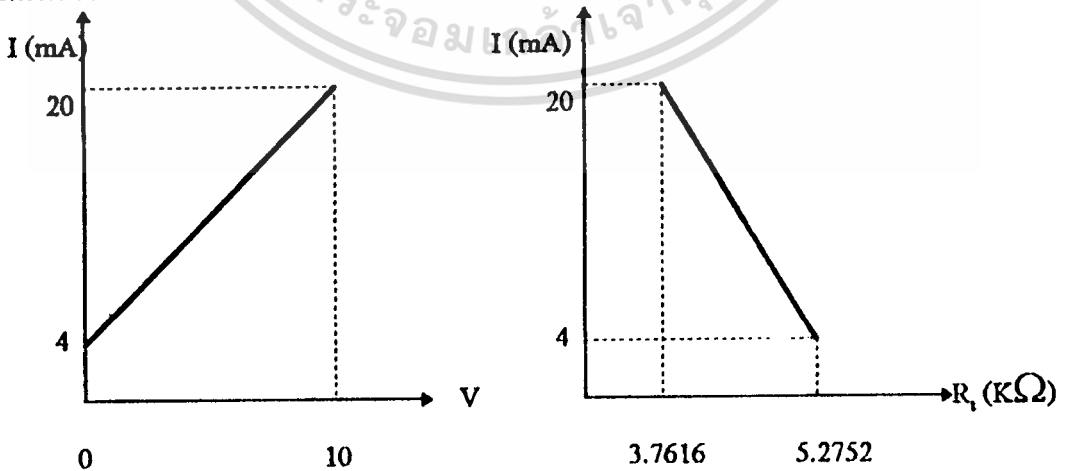
**การทดลองและผลการทดลอง**

ในการทดลองวงจร Instrumenting linearized thermistors with op amps-resistance mode เราได้ใช้ R ปรับค่าได้แทน R ของ thermistor ในขั้นแรก โดยปรับค่าความต้านทานให้อยู่ในช่วงการทำงานของชนิด thermistor ในวงจร ซึ่งปรากฏว่าได้สัญญาณ output ที่เป็นโวลต์เดจไม่ดีพอ กล่าวคือ ไม่ได้ตามที่เรต้องการ คือ 0-10 V เราจึงได้เปลี่ยน R,  $R_{zero}$  และ  $R_{span}$  ใหม่ โดยใช้ความรู้ทาง amplifier op amp มาปรับปรุงค่า  $V_{out}$  ให้ได้ตามที่เราต้องการ เนื่องจากในการตรวจจับอุณหภูมิต้องการความแม่นยำสูง ซึ่ง  $V_{out}$  จะมีความสัมพันธ์กับความต้านทานของ thermistor



ความสัมพันธ์ระหว่าง Temp กับ  $R_t$       ความสัมพันธ์ระหว่าง  $R_t$  กับ  $V_{out}$

สำหรับการทดลองวงจร V-to-I Converter เราทำการป้อน Input (โวลต์เดจ) 0-10 V เข้าวงจรตามรูป จากการวิเคราะห์ห้วงจรนี้จะได้กระแส output 4-20 mA แต่เมื่อวัดกระแส output จะได้แค่ค่าใกล้เคียง 4-20 mA เมื่อเราตรวจสอบดูแล้วเป็นเพราะความผิดพลาดของอุปกรณ์ แต่เราสามารถปรับปรุง output ได้ เนื่องจากเราต่อ output ของวงจร Instrumenting linearized thermistors with op amps-resistance mode เป็น input ของวงจร V-to-I Converter ซึ่งได้กระแส output 4-20 mA สัมพันธ์กับความต้านทานของ thermistor



ความสัมพันธ์ระหว่าง V กับ I

ความสัมพันธ์ระหว่าง  $R_t$  (K $\Omega$ ) กับ I

## วงจร Voltage-to-Current

วงจร V to I นี้ ประกอบด้วย Inverting summing amplifier (สร้างจากออปแอมป์  $U_1$  และ  $U_2$ ) และ Voltage-to-Current Converter โดยอินพุตของวงจร Inverting summing amplifier คือ  $E_1$  ซึ่ง  $U_1$  จะทำหน้าที่เป็น summing amplifier และ  $U_2$  จะทำหน้าที่เป็น inverting amplifier โดยมีค่าถึงขยายเท่ากับ -1 จากนั้นเอาท์พุทที่ได้จะเข้าไปในส่วนของ Voltage-to-Current converter ในส่วนนี้จะทำหน้าที่แปลง voltage input ที่รับเข้ามาเป็น current output ค่าของกระแส จะขึ้นกับ  $R_1$  และ  $R_2$  ส่วน  $Q_1$  นั้นจะทำหน้าที่เป็น current amplifier โดยทำให้ voltage input 0-10 v เป็น current output 0-20 mA

เอาท์พุทของวงจร Inverting summing amplifier

$$E_o = R_f/R_i (E_1) + R_f/R_{os}(V)$$

โดย

$$V = 15 \text{ v}$$

$$R_{os} = 150 \text{ k}\Omega$$

$$R_f = 20 \text{ k}\Omega$$

$$R_{comp} = 24 \text{ k}\Omega$$

$$R_i = 25 \text{ k}\Omega$$

$$R = 20 \text{ k}\Omega$$

เอาท์พุทของวงจร Voltage-to-Current Converter

$$I_o = E_o / R_{15} + R_{16}$$

โดย

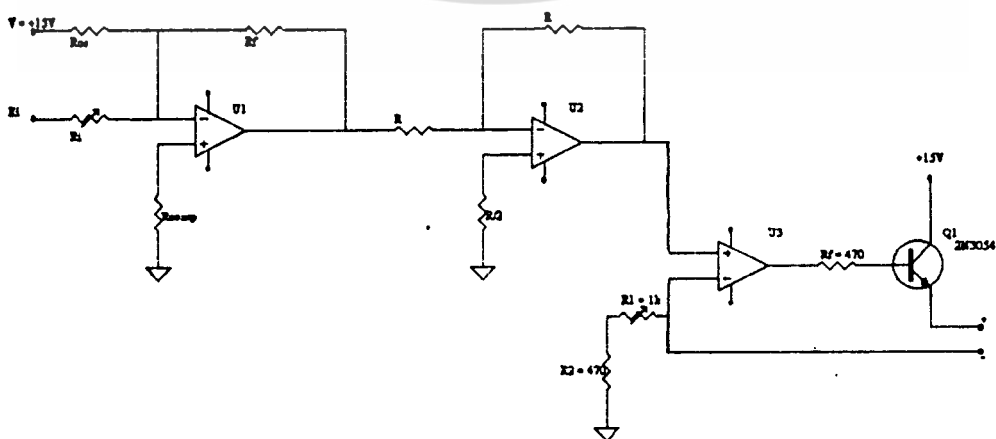
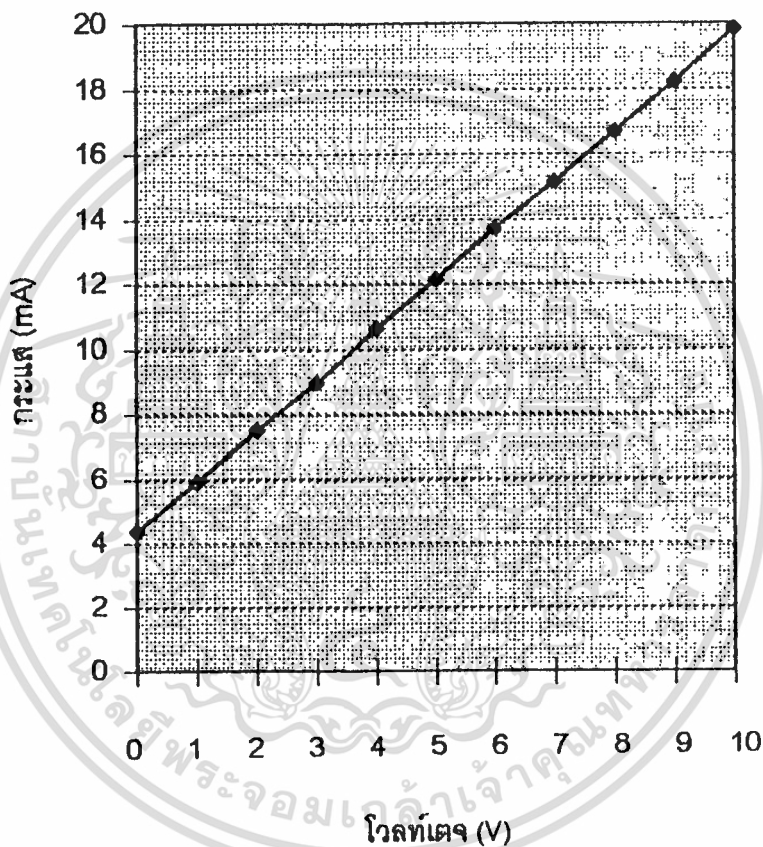
$$R_1 + R_2 = 500 \Omega$$

ดังนั้นจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับองค์กรซึ่งใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0	4.36
1	5.9
2	7.49
3	8.99
4	10.62
5	12.13
6	13.73
7	15.15
8	16.71
9	18.22
10	19.82

ผลการทดลองวงจร V-to-I



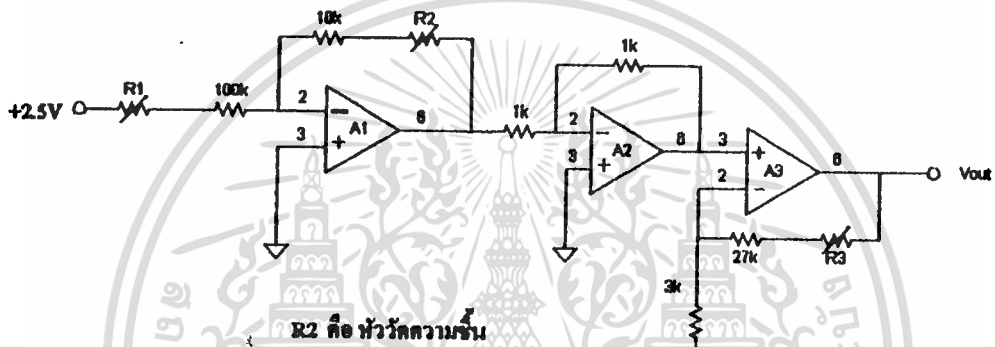
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

U1,U2,U3 = 3 \* LM741

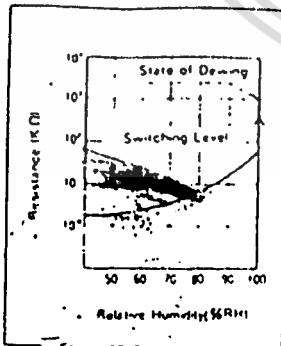
# การควบคุมความชื้น

ในการวัดค่าความชื้น เราได้ใช้หัววัดความชื้นแบบ Dewing Sensor เมื่อพิจารณากราฟคุณสมบัติของหัววัดความชื้น พบว่าเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานของหัววัดความชื้นจะเพิ่มขึ้น กล่าวคือเป็นไปในทิศทางเดียวกัน เราต้องการสัญญาณไปใช้ในการควบคุมความชื้นซึ่งเราออกแบบให้ได้โวลต์เฉจ 0-10 โวลต์ สำหรับ 0 - 100 % RH

พิจารณาจากตารางจะได้ 75%RH ที่ความต้านทาน 20 KΩ ก็ต้องการโวลต์เฉจ 7.5 V เราจึงนำมาออกแบบวงจรโดยใช้คุณสมบัติ OP-AMP



โดยที่ A2 , A3 เป็น Unity-gain และ Non-inverting Amp. ตามลำดับ และ A1 ปรับแต่ง gain จนได้ตามที่ต้องการ



Part Number	HOS103	HOS104
Operating Voltage	DC0.8Vmax.	
Resistance	75% RH (at 25°C)	10KΩ max. 20KΩ max.
	When Dewing	200KΩ min. 100KΩ min.
Speed of Response	0°C - 25°C 75%RH 60sec. max.	
Operating Temperature Range	0 ~ +60°C	
Operating Humidity	0 ~ 100%RH	
Switching Level	100KΩ	

- Features
- 1. Resistance changes instantaneously to more than 100KΩ when dewing.
- 2. It works accurately.
- Adhesive Use Cony Set AG11 (Manufactured by Konishi Corporation)
- Lead wire socket or bracket can be attached upon your request.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Linear True-Mean-Square Temperature Controller

เหมาะสำหรับการควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ heater ขนาดใหญ่กว่า 1 kw โดยป้อนโดยตรงจาก ac main ซึ่งง่ายและมีประสิทธิภาพ แต่บางครั้งก็มีปัญหา เช่น เทคนิคการทำความร้อน standard time-proportional on/off cyclic ซึ่งใช้ใน Power Control ความสัมพันธ์ระหว่างคำสั่ง output สำหรับควบคุมอุณหภูมิ (4-to-20-mA current loop) และการส่งค่าความร้อนจะเป็นแบบเชิงเส้น แต่ on/off cycle period (ประมาณหลายวินาที) อาจยาวเกินไปเมื่อเปรียบเทียบกับ thermal time constant ของ fast-thermostated system ซึ่งจะเกิด temperature ripple

ถ้าเรานำทฤษฎีเรื่อง thyristor conduction angle มาใช้จะสามารถกำจัด temperature ripple ได้ แต่การส่งค่าความร้อนจะไม่เป็นเชิงเส้นกับ controller output ซึ่งอาจทำให้การทำงานของ PID loop-control parameter ไม่ได้ผลในช่วงใช้งานของ setpoint และสาเหตุจากผลกระทบของการเปลี่ยนแปลง ac line-voltage ซึ่งการเปลี่ยนแปลง 5% หรือมากกว่าของ rms line voltage จะเป็นปกติ แต่การเปลี่ยนแปลง 5% ในทันทีทันใดจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความร้อน ( $V^2/R$ ) 10% จากนั้นอุณหภูมิจะลดลงจนกระทั่งเกิด consequent deviation และแก้ไขโดยใช้ primary thermal control loop ซึ่งจากผลกระทบทั้งหมดอาจทำให้เกิด error budget ของ high-performance thermostat

จากปัญหาดังกล่าวเราจึงได้ออกแบบวงจรโดย output ของ true-mean-square power จะเกิดจาก 4-to-20-mA current-loop control input ซึ่งการส่งค่า power จะทำงานได้แน่นอนโดยปราศจาก line-voltage variation รวมทั้งยังมี 8.33 ms timebase ซึ่งทำให้ thermal ripple หดไป

การทำงานของวงจรเริ่มจาก 4-to-20-mA control input ถูกเปลี่ยนเป็น  $-(20-100)\mu A(I1)$  โดย A3 และ Q5 แล้ว  $I5(+20\mu A)$  รวมกับ  $I1$  ได้ 0 ถึง  $-80\mu A$  ป้อนให้กับ summing point ของ A1 integrator จากนั้น A4 จะทำการเปรียบเทียบผลรวม integral กับ 2.5 V reference tap จาก VR1 เมื่อ integral เพิ่มขึ้นมากกว่าจะเกิด 3043 triac trigger optocoupler โดยที่ Zero-cross switching ของ Q8 triac จะลดการเกิดสัญญาณรบกวน โดย Ac half-cycle จะผ่าน Q8 ทำให้  $R_L$  ร้อน และผลึก load-monitor current  $I2$  ผ่าน LED E2

การทำให้ผลของ Q7 photocurrent เสมุด โดย A2 ให้  $I3$  ซึ่งทำให้เกิด matching conduction ใน E1/Q6 optocoupler ปิด tracking ระหว่างส่วนของ 4N36 optocoupler เพื่อให้แน่ใจว่าเกิด good proportionality ระหว่าง  $I2$  และ  $I3$  เพราะ  $I3$  ป้อนให้กับ series-connected Q2/Q3 จะเกิดโวลท์ที่ขา base ของ Q4 ซึ่งเท่ากับ  $2[X \log(Y*12) + Z]$  โดยที่ X และ Z เป็นค่าคงที่ common ของ transistor ทั้ง 5 ตัวใน 3045 monolithic array และ Y มาจากการปรับค่า Fullscale Cal ซึ่งทำให้กระแส emitter ของ Q4 ประมาณ  $(Y*12)^2/16$  เมื่อทำการ Integrate โดย A1 ซึ่งให้ Power ที่ dissipate ใน  $R_L$  ที่แม่นยำ

การทำงานป้อนกลับโดยปรับค่า duty cycle ของ Q8 เพื่อให้ R<sub>1</sub> Power มาทำการควบคุม อุณหภูมิให้แม่นยำ และเป็นเชิงเส้นกับ 4-to-20-mA control input การทำงานของ Power ในวงจรจะถูกเปลี่ยนจาก 4-to-20-mA loop current และกำจัดความต้องการบางอย่างของ Power source อื่นๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### การทดลองวงจร Linear True-Mean-Square Temperature Controller

ในการทดลองวงจร Linear True-Mean-Square Temperature Controller ซึ่งเป็นวงจรที่ต้องการอินพุตเป็นกระแส 4-20 mA สำหรับทำการควบคุมอุณหภูมิ เราทำการทดลองโดยใช้โหลดเป็นหลอดไฟ 100 W เพื่อดูว่าวงจรนี้สามารถจ่ายกระแสให้กับโหลดได้หรือไม่ ซึ่งปรากฏว่าวงจรที่ได้มาในครั้งแรกไม่สามารถจ่ายกระแสให้กับโหลด เนื่องจากไม่มีกระแสมาทริก Triac เราจึงศึกษาส่วนที่กำเนิดกระแสสำหรับทริก Triac คือ Triac Trigger Optocoupler ทำให้ได้วงจรใหม่ซึ่งสามารถจ่ายกระแสให้กับโหลดได้ โดยที่ input 12 mA ได้

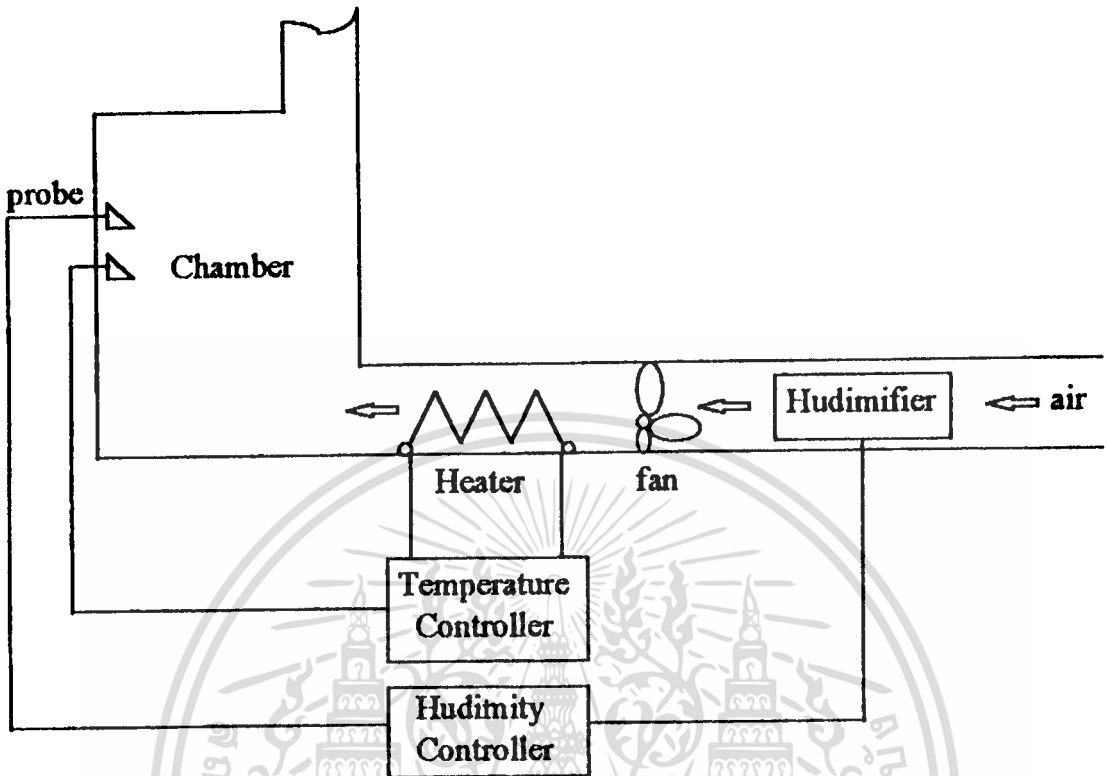
กระแสที่ไหลเข้าหลอดหลอดไฟ 100 W = 0.447 A (ac)

กระแสที่ไหลเข้า R ปรับค่าได้ 1M = 0.156 - 0.453 mA (ac)

เราทำการเปลี่ยนโหลดเป็น Heater 1000 W และเมื่อทำการวัดกระแสที่จ่ายให้กับโหลดไม่สามารถวัดได้ เนื่องจากสายที่ทำการวัดกระแสจากมิเตอร์ขาดในทันทีที่จ่ายไฟ 220 V(ac) จึงไม่ได้ทำการทดลอง เพราะเกรงว่ากระแสน้ำย้อนกลับเข้าวงจรควบคุมจะเป็นอันตรายกับอุปกรณ์อื่นๆ



เราได้ลองออกแบบระบบโดยรวมสำหรับห้องอบแห้งเมล็ดพืชไว้ ดังรูป



แบบจำลองเครื่องอบแห้งเมล็ดพืช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

#### รูปผลและวิจารณ์

ในการทำปริญญานิพนธ์เรื่อง การควบคุมการอบแห้งเมล็ดพืช สิ่งที่เราต้องทำการควบคุม มีอยู่ 3 สิ่งได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น และอัตราการไหลของอากาศ ซึ่งอัตราการไหลของอากาศเรากำหนดให้คงที่ สำหรับการควบคุมความชื้นเราเพียงแต่ทำการออกแบบวงจรที่ใช้วัดความชื้นเท่านั้น เนื่องจากปัญหาด้านอุปกรณ์ที่ใช้เป็นตัวให้ความชื้นและตัวควบคุมความชื้น

สำหรับการควบคุมอุณหภูมิ ในที่นี้เราใช้วงจรที่มีสัญญาณอินพุตเป็นกระแส 4-20 mA ซึ่งเป็นสัญญาณมาตรฐาน จากวงจรที่ได้มาในครั้งแรกวงจรมีปัญหาในส่วนของ Triac Trigger Optocoupler กับ Triac เราจึงศึกษาการใช้งานของ Triac Trigger Optocoupler ทำให้ได้วงจรใหม่ โครงรูปก่อนหน้านี้ ทำให้เราสามารถจ่ายพลังงานให้กับ load ได้ แต่เรายังไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ตามต้องการ เนื่องจากปัญหาการปรับค่ากระแสที่จ่ายให้กับ load



# Triacs

## Silicon Bidirectional Thyristors

**MAC15FP  
Series  
MAC15AFP  
Series**

... designed primarily for full-wave ac control applications, such as solid-state relays, motor controls, heating controls and power supplies; or wherever full-wave silicon gate controlled solid-state devices are needed. Triac type thyristors switch from a blocking to a conducting state for either polarity of applied anode voltage with positive or negative gate triggering.

- Blocking Voltage to 800 Volts
- All Diffused and Glass Passivated Junctions for Greater Parameter Uniformity and Stability
- Small, Rugged, Thermowatt Construction for Low Thermal Resistance, High Heat Dissipation and Durability
- Gate Triggering Guaranteed in Three Modes (MAC15FP Series) or Four Modes (MAC15AFP Series)

**ISOLATED TRIACS  
THYRISTORS  
15 AMPERES RMS  
200 thru 800 VOLTS**



**CASE 221C-02  
STYLE 3**



### MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Repetitive Peak Off-State Voltage, Note 1 ( $T_J = -40$ to $+125^\circ\text{C}$ ) 1/2 Sine Wave 50 to 60 Hz, Gate Open MAC15-4FP, MAC15A4FP MAC15-6FP, MAC15A6FP MAC15-8FP, MAC15A8FP MAC15-10FP, MAC15A10FP	$V_{DRM}$	200 400 600 800	Volts
On-State RMS Current ( $T_C = +80^\circ\text{C}$ ), Note 2 Full Cycle Sine Wave 50 to 60 Hz ( $T_C = +95^\circ\text{C}$ )	$I_T(\text{RMS})$	15 12	Amps
Peak Nonrepetitive Surge Current (One Full Cycle, 60 Hz, $T_C = +80^\circ\text{C}$ ) preceded and followed by rated current	$I_{TSM}$	150	Amps
Peak Gate Power ( $T_C = +80^\circ\text{C}$ , Pulse Width = 2 $\mu\text{s}$ )	$P_{GM}$	20	Watts
Average Gate Power ( $T_C = +80^\circ\text{C}$ , $t = 8.3$ ms)	$P_{G(AV)}$	0.5	Watt
Peak Gate Current	$I_{GM}$	2	Amps
Peak Gate Voltage	$V_{GM}$	10	Volts
RMS Isolation Voltage ( $T_A = 25^\circ\text{C}$ , Relative Humidity $\leq 20\%$ )	$V(\text{ISO})$	1500	Volts
Operating Junction Temperature	$T_J$	-40 to +125	$^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range	$T_{stg}$	-40 to +150	$^\circ\text{C}$

Notes: 1. Ratings apply for open gate conditions. Thyristor devices shall not be tested with a constant current source for blocking capability such that the voltage applied exceeds the rated blocking voltage.  
2. The case temperature reference point for all  $T_C$  measurements is a point on the center lead of the package as close as possible to the plastic body.

### THERMAL CHARACTERISTICS

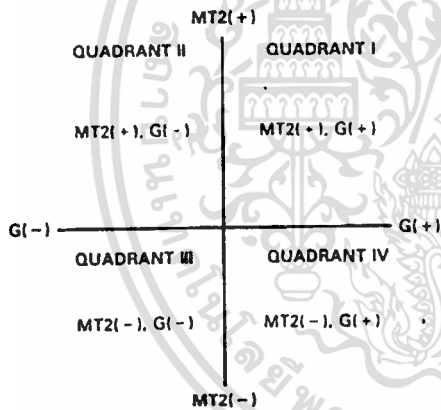
Characteristic	Symbol	Max	Unit
Thermal Resistance, Junction to Case	$R_{\theta JC}$	2	$^\circ\text{C/W}$
Thermal Resistance, Case to Sink	$R_{\theta CS}$	2.2 (typ)	$^\circ\text{C/W}$
Thermal Resistance, Junction to Ambient	$R_{\theta JA}$	60	$^\circ\text{C/W}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ( $T_C = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Peak Blocking Current (Either Direction) $T_J = 25^\circ\text{C}$ Rated $V_{DRM}$ @ $T_J = +125^\circ\text{C}$ , Gate Open	$I_{DRM}$	—	—	10 2	$\mu\text{A}$ mA
Peak On-State Voltage (Either Direction) $I_{TM} = 21\text{ A Peak}$ ; Pulse Width = 1 to 2 ms, Duty Cycle $\leq 2\%$	$V_{TM}$	—	1.3	1.6	Volts
Gate Trigger Current (Continuous dc) Main Terminal Voltage = 12 Vdc, $R_L = 100\ \Omega$ MT2(+), G(-) MT2(+), G(-) MT2(-), G(-) MT2(-), G(+) "A" SUFFIX ONLY	$I_{GT}$	—	—	50 50 50 75	mA
Gate Trigger Voltage (Continuous dc) Main Terminal Voltage = 12 Vdc, $R_L = 100\ \Omega$ MT2(+), G(-) MT2(+), G(-) MT2(-), G(-) MT2(-), G(+) "A" SUFFIX ONLY Main Terminal Voltage = Rated $V_{DRM}$ , $R_L = 10\ \text{k}\Omega$ , $T_J = +110^\circ\text{C}$ MT2(+), G(+), MT2(+), G(-), MT2(-), G(-) MT2(-), G(+) "A" SUFFIX ONLY	$V_{GT}$	—	0.9 0.9 1.1 1.4	2 2 2 2.5	Volts
Holding Current (Either Direction) Main Terminal Voltage = 12 Vdc, Gate Open. Inching Current = 200 mA	$I_H$	—	6	40	mA
Turn-On Time Rated $V_{DRM}$ , $I_{TM} = 17\text{ A}$ , $I_{GT} = 120\text{ mA}$ , Rise Time = 0.1 $\mu\text{s}$ , Pulse Width = 2 $\mu\text{s}$	$t_{gt}$	—	1.5	—	$\mu\text{s}$
Critical Rate of Rise of Commutation Voltage Rated $V_{DRM}$ , $I_{TM} = 21\text{ A}$ , Commutating $di/dt = 8\text{ A/ms}$ , Gate Unenergized, $T_C = +80^\circ\text{C}$	$dv_{dt}(c)$	—	5	—	V/ $\mu\text{s}$

**QUADRANT DEFINITIONS**



Trigger devices are recommended for gating on Triacs. They provide:

1. Consistent predictable turn-on points.
2. Simplified circuitry.
3. Fast turn-on time for cooler, more efficient and reliable operation.

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS of RECOMMENDED BIDIRECTIONAL SWITCHES**

Usage	General	
Part Number	MBS4991	MBS4992
$V_S$	6-10 V	7.5-9 V
$I_S$	350 $\mu\text{A Max}$	120 $\mu\text{A Max}$
$V_{S1}-V_{S2}$	0.5 V Max	0.2 V Max
Temperature Coefficient	0.02%/°C Typ	

1. Ratings apply for open gate conditions. Thyristor devices shall not be tested with a constant current source for blocking capability such that the voltage applied exceeds the rated blocking voltage.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TYPICAL CHARACTERISTICS

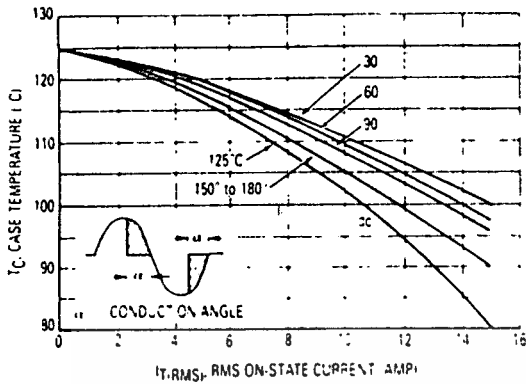


Figure 1. RMS Current Derating

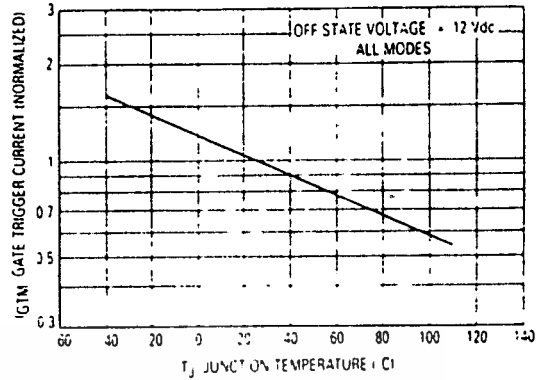


Figure 4. Typical Gate Trigger Current

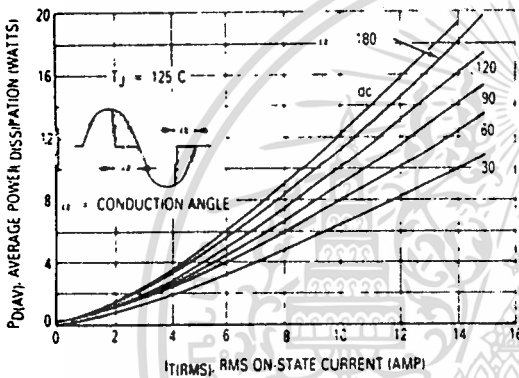


Figure 2. On-State Power Dissipation

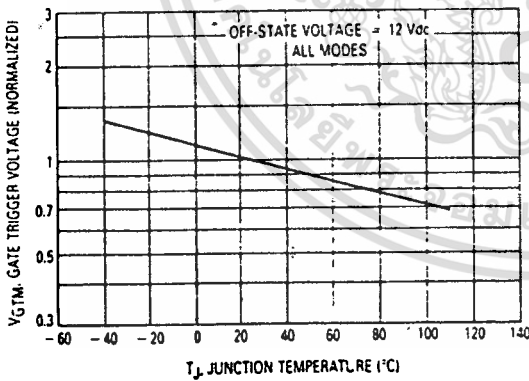


Figure 3. Typical Gate Trigger Voltage

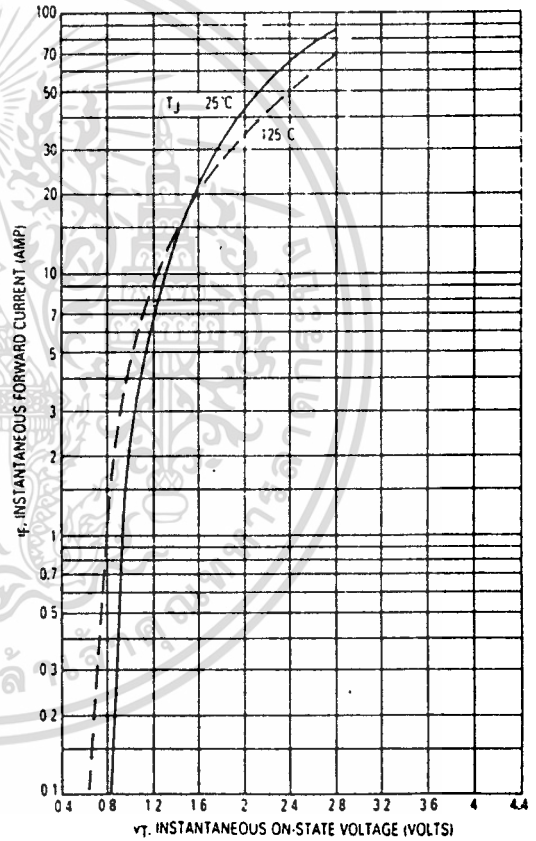


Figure 5. Maximum On-State Characteristics

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

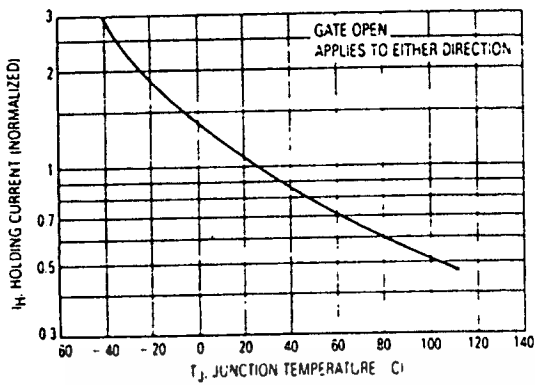


Figure 6. Typical Holding Current

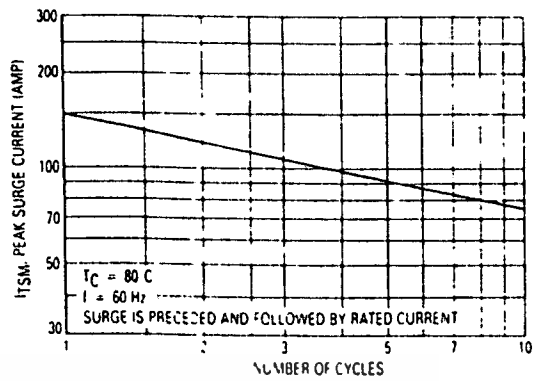


Figure 7. Maximum Nonrepetitive Surge Current

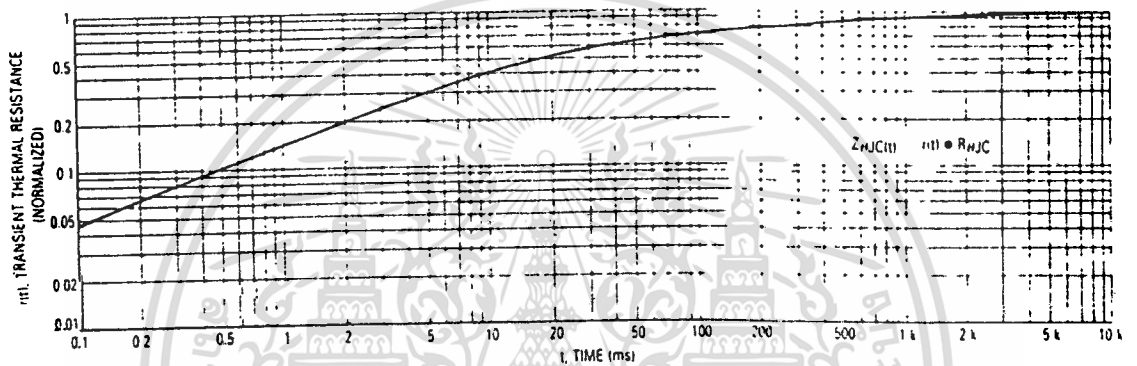
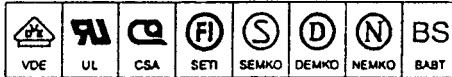


Figure 8. Thermal Response

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**MOTOROLA**  
**SEMICONDUCTOR**  
**TECHNICAL DATA**



**6-Pin DIP Optoisolators**  
**Triac Driver Output (400 Volts)**

The MOC3041, MOC3042 and MOC3043 devices consist of gallium arsenide infrared emitting diodes optically coupled to a monolithic silicon detector performing the function of a Zero Voltage Crossing bilateral triac driver.

They are designed for use with a triac in the interface of logic systems to equipment powered from 115 Vac lines, such as solid-state relays, industrial controls, motors, solenoids and consumer appliances, etc.

- Simplifies Logic Control of 115 Vac Power
- Zero Voltage Crossing
- dv/dt of 2000 V/μs Typical, 1000 V/μs Guaranteed

**Applications**

- Solenoid/Valve Controls
- Lighting Controls
- Static Power Switches
- AC Motor Drives
- Temperature Controls
- E.M. Contactors
- AC Motor Starters
- Solid State Relays

**MAXIMUM RATINGS** ( $T_A = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise noted)

Rating	Symbol	Value	Unit
--------	--------	-------	------

**INFRARED EMITTING DIODE**

Reverse Voltage	$V_R$	6	Volts
Forward Current — Continuous	$I_F$	60	mA
Total Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Negligible Power in Output Driver Derate above $25^\circ\text{C}$	$P_D$	120	mW
		1.41	mW/°C

**OUTPUT DRIVER**

Off-State Output Terminal Voltage	$V_{DRM}$	400	Volts
Peak Repetitive Surge Current (PW = 100 μs, 120 pps)	$I_{TSM}$	1	A
Total Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above $25^\circ\text{C}$	$P_D$	150	mW
		1.76	mW/°C

**TOTAL DEVICE**

Isolation Surge Voltage (1) (Peak ac Voltage, 60 Hz, 1 Second Duration)	$V_{ISO}$	7500	Vac
Total Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above $25^\circ\text{C}$	$P_D$	250 2.94	mW mW/°C
Junction Temperature Range	$T_J$	-40 to +100	°C
Ambient Operating Temperature Range (2)	$T_A$	-40 to +85	°C
Storage Temperature Range	$T_{stg}$	-40 to +150	°C
Soldering Temperature (10 s)	$T_L$	260	°C

(1) Isolation surge voltage.  $V_{ISO}$  is an internal device dielectric breakdown rating. For this test, Pins 1 and 2 are common, and Pins 4, 5 and 6 are common.

(2) Refer to Quality and Reliability Section for test information.

**MOC3041\***

[IFT = 15 mA Max]

**MOC3042**

[IFT = 10 mA Max]

**MOC3043\***

[IFT = 5 mA Max]

\*Motorola Preferred Devices  
**STYLE 6 PLASTIC**



**STANDARD THRU HOLE**  
**CASE 730A-04**



**"T" LEADFORM**  
**WIDE SPACED 0.4"**  
**CASE 730D-05**

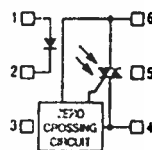


**"S"/"F" LEADFORM**  
**SURFACE MOUNT**  
**CASE 730C-04**  
**(STANDARD PROFILE)**



**CASE 730F-04**  
**(LOW PROFILE)**

**COUPLER SCHEMATIC**



1. ANODE
2. CATHODE
3. NC
4. MAIN TERMINAL
5. SUBSTRATE  
DO NOT CONNECT
6. MAIN TERMINAL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# MOC3041, MOC3042, MOC3043

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ( $T_A = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
<b>INPUT LED</b>					
Reverse Leakage Current ( $V_R = 6\text{ V}$ )	$I_R$	—	0.05	100	$\mu\text{A}$
Forward Voltage ( $I_F = 30\text{ mA}$ )	$V_F$	—	1.3	1.5	Volts
<b>OUTPUT DETECTOR (<math>I_F = 0</math> unless otherwise noted)</b>					
Leakage with LED Off, Either Direction (Rated $V_{DRM}$ , Note 1)	$I_{DRM1}$	—	2	100	nA
Peak On-State Voltage, Either Direction ( $I_{TM} = 100\text{ mA Peak}$ )	$V_{TM}$	—	1.8	3	Volts
Critical Rate of Rise of Off-State Voltage (Note 3)	$dv/dt$	1000	2000	—	$\text{V}/\mu\text{s}$
<b>COUPLED</b>					
LED Trigger Current, Current Required to Latch Output (Main Terminal Voltage = 3 V, Note 2)	$I_{FT}$	—	—	15	mA
	MOC3041	—	—	10	
	MOC3042	—	—	5	
	MOC3043	—	—	5	
Holding Current, Either Direction	$I_H$	—	100	—	$\mu\text{A}$
Isolation Voltage ( $f = 60\text{ Hz}$ , $t = 1\text{ sec}$ )	$V_{ISO}$	7500	—	—	Vac(pk)
<b>ZERO CROSSING</b>					
Inhibit Voltage ( $I_F = \text{Rated } I_{FT}$ , MT1-MT2 Voltage above which device will not trigger.)	$V_{IH}$	—	5	20	Volts
Leakage in Inhibited State ( $I_F = \text{Rated } I_{FT}$ , Rated $V_{DRM}$ , Off State)	$I_{DRM2}$	—	—	500	$\mu\text{A}$

- Notes: 1. Test voltage must be applied within  $dv/dt$  rating.  
 2. All devices are guaranteed to trigger at an  $i_c$  value less than or equal to max.  $i_c$ . Therefore, recommended operating  $i_c$  lies between max  $I_{FT}$  (15 mA for MOC3041, 10 mA for MOC3042, 5 mA for MOC3043) and absolute max  $i_c$  (60 mA).  
 3. This is static  $dv/dt$ . See Figure 7 for test circuit. Commutating  $dv/dt$  is a function of the load-driving thyristor  $\alpha$ .

## TYPICAL ELECTRICAL CHARACTERISTICS

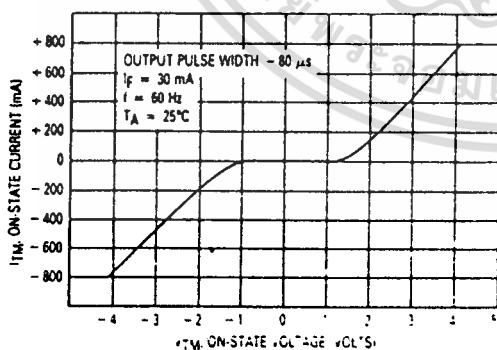


Figure 1. On-State Characteristics

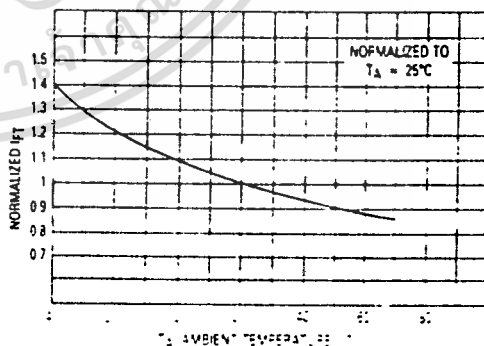


Figure 2. Trigger Current versus Temperature

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MOC3041, MOC3042, MOC3043

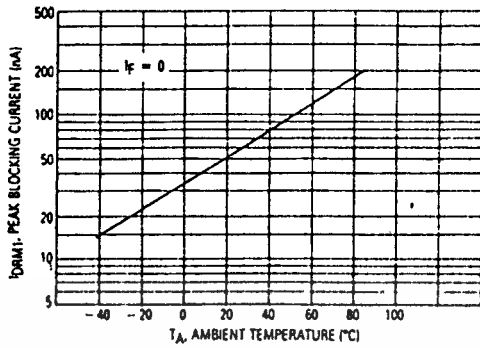


Figure 3. I<sub>DRM1</sub>, Peak Blocking Current versus Temperature

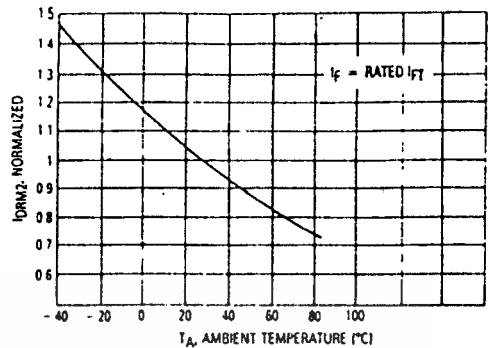


Figure 4. I<sub>DRM2</sub>, Leakage in Inhibit State versus Temperature

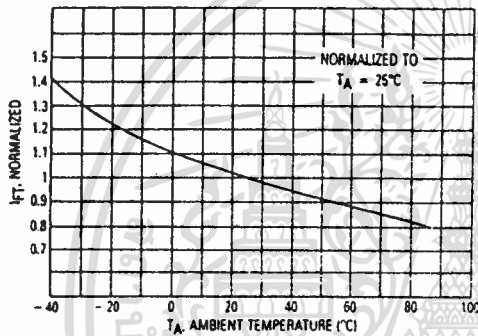


Figure 5. Trigger Current versus Temperature

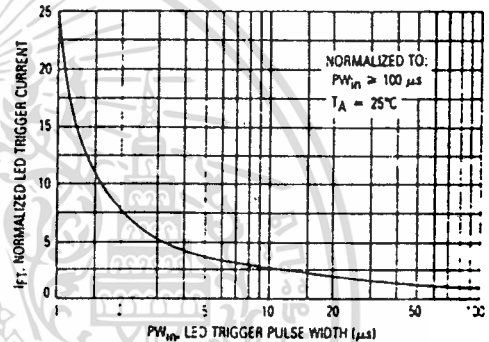
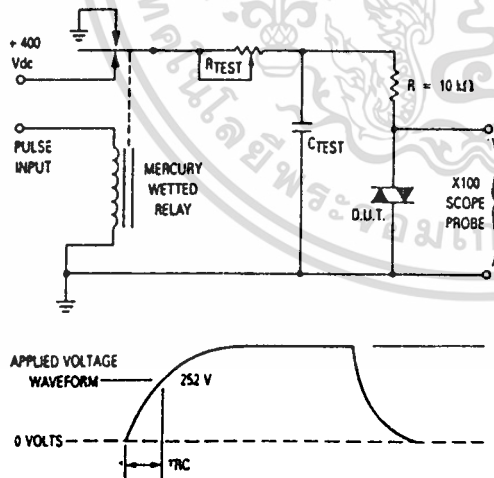


Figure 6. LED Current Required to Trigger versus LED Pulse Width

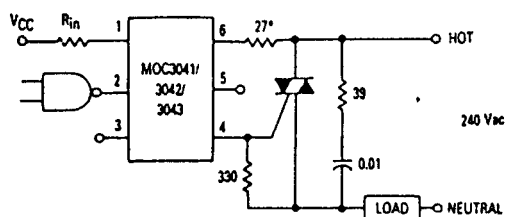


1. The mercury wetted relay provides a high speed repeated pulse to the D.U.T.
2. 100x scope probes are used, to allow high speeds and voltages.
3. The worst-case condition for static dv/dt is established by triggering the D.U.T. with a normal LED input current, then removing the current. The variable R<sub>TEST</sub> allows the dv/dt to be gradually increased until the D.U.T. continues to trigger in response to the applied voltage pulse, even after the LED current has been removed. The dv/dt is then decreased until the D.U.T. stops triggering. τ<sub>RC</sub> is measured at this point and recorded.

Figure 7. Static dv/dt Test Circuit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## MOC3041, MOC3042, MOC3043

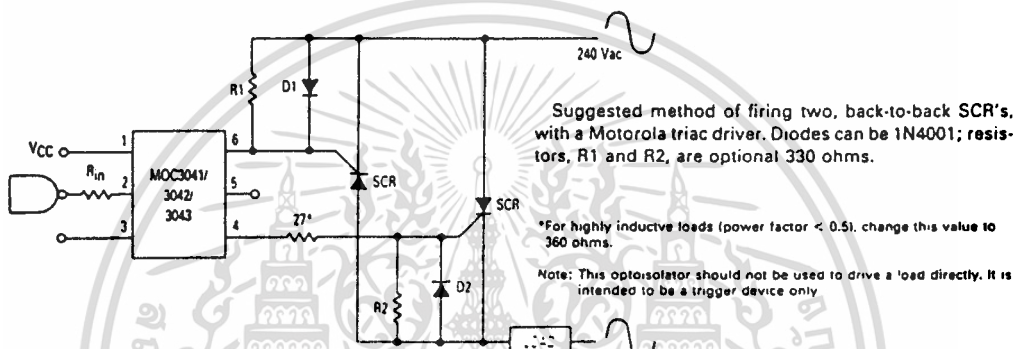


Typical circuit for use when hot line switching is required. In this circuit the "hot" side of the line is switched and the load connected to the cold or neutral side. The load may be connected to either the neutral or hot line.

$R_{in}$  is calculated so that  $I_F$  is equal to the rated  $I_{FT}$  of the part, 5 mA for the MOC3043, 10 mA for the MOC3042, or 15 mA for the MOC3041. The 39 ohm resistor and 0.01  $\mu F$  capacitor are for snubbing of the triac and may or may not be necessary depending upon the particular triac and load used.

\*For highly inductive loads (power factor < 0.5), change this value to 360 ohms.

Figure 8. Hot-Line Switching Application Circuit



Suggested method of firing two, back-to-back SCR's, with a Motorola triac driver. Diodes can be 1N4001; resistors, R1 and R2, are optional 330 ohms.

\*For highly inductive loads (power factor < 0.5), change this value to 360 ohms.

Note: This optoisolator should not be used to drive a load directly. It is intended to be a trigger device only.

Figure 9. Inverse-Parallel SCR Driver Circuit

# TYPE J THERMOCOUPLE TABLE

Thermoelectric Voltage in Absolute Millivolts												
DEG												DEG
F	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	F
-350	-8.137											350
-340	-8.030	-8.041	-8.052	-8.063	-8.074	-8.085	-8.096	-8.106	-8.117	-8.127	-8.137	-340
-330	-7.915	-7.927	-7.938	-7.950	-7.962	-7.973	-7.985	-7.996	-8.008	-8.019	-8.030	-330
-320	-7.791	-7.803	-7.816	-7.829	-7.841	-7.853	-7.866	-7.878	-7.890	-7.903	-7.915	-320
-310	-7.659	-7.672	-7.686	-7.699	-7.712	-7.726	-7.739	-7.752	-7.765	-7.778	-7.791	-310
-300	-7.519	-7.533	-7.548	-7.562	-7.576	-7.590	-7.604	-7.618	-7.631	-7.645	-7.659	-300
-290	-7.372	-7.387	-7.402	-7.417	-7.432	-7.447	-7.461	-7.476	-7.490	-7.505	-7.519	-290
-280	-7.218	-7.234	-7.250	-7.265	-7.281	-7.296	-7.311	-7.327	-7.342	-7.357	-7.372	-280
-270	-7.057	-7.074	-7.090	-7.106	-7.122	-7.139	-7.155	-7.171	-7.187	-7.202	-7.218	-270
-260	-6.890	-6.907	-6.924	-6.941	-6.958	-6.974	-6.991	-7.008	-7.024	-7.041	-7.057	-260
-250	-6.716	-6.734	-6.751	-6.769	-6.786	-6.804	-6.821	-6.838	-6.856	-6.873	-6.890	-250
-240	-6.536	-6.554	-6.572	-6.591	-6.609	-6.627	-6.645	-6.663	-6.680	-6.698	-6.716	-240
-230	-6.350	-6.369	-6.388	-6.407	-6.425	-6.444	-6.462	-6.481	-6.499	-6.518	-6.536	-230
-220	-6.159	-6.178	-6.198	-6.217	-6.236	-6.255	-6.274	-6.293	-6.312	-6.331	-6.350	-220
-210	-5.962	-5.982	-6.002	-6.022	-6.041	-6.061	-6.081	-6.100	-6.120	-6.139	-6.159	-210
-200	-5.760	-5.780	-5.801	-5.821	-5.841	-5.861	-5.882	-5.902	-5.922	-5.942	-5.962	-200
-190	-5.553	-5.574	-5.594	-5.615	-5.636	-5.657	-5.678	-5.698	-5.719	-5.739	-5.760	-190
-180	-5.341	-5.362	-5.383	-5.405	-5.426	-5.447	-5.468	-5.490	-5.511	-5.532	-5.553	-180
-170	-5.124	-5.146	-5.168	-5.190	-5.211	-5.233	-5.255	-5.276	-5.298	-5.319	-5.341	-170
-160	-4.903	-4.925	-4.948	-4.970	-4.992	-5.014	-5.036	-5.058	-5.080	-5.102	-5.124	-160
-150	-4.678	-4.700	-4.723	-4.746	-4.768	-4.791	-4.813	-4.836	-4.858	-4.881	-4.903	-150
-140	-4.448	-4.471	-4.494	-4.517	-4.540	-4.563	-4.586	-4.609	-4.632	-4.655	-4.678	-140
-130	-4.215	-4.238	-4.262	-4.285	-4.309	-4.332	-4.355	-4.379	-4.402	-4.425	-4.448	-130
-120	-3.978	-4.001	-4.025	-4.049	-4.073	-4.097	-4.120	-4.144	-4.168	-4.191	-4.215	-120
-110	-3.737	-3.761	-3.785	-3.809	-3.833	-3.858	-3.882	-3.906	-3.930	-3.954	-3.978	-110
-100	-3.492	-3.517	-3.541	-3.566	-3.590	-3.615	-3.639	-3.664	-3.688	-3.712	-3.737	-100
-90	-3.245	-3.270	-3.294	-3.319	-3.344	-3.369	-3.394	-3.418	-3.443	-3.468	-3.492	-90
-80	-2.994	-3.019	-3.044	-3.069	-3.094	-3.120	-3.145	-3.170	-3.195	-3.220	-3.245	-80
-70	-2.740	-2.765	-2.791	-2.816	-2.842	-2.867	-2.892	-2.918	-2.943	-2.968	-2.994	-70
-60	-2.483	-2.509	-2.534	-2.560	-2.586	-2.612	-2.637	-2.663	-2.689	-2.714	-2.740	-60
-50	-2.223	-2.249	-2.275	-2.301	-2.327	-2.353	-2.379	-2.405	-2.431	-2.457	-2.483	-50
DEG												DEG
F	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	F
-40	-1.960	-1.987	-2.013	-2.039	-2.066	-2.092	-2.118	-2.144	-2.171	-2.197	-2.223	20
-30	-1.695	-1.722	-1.748	-1.775	-1.802	-1.828	-1.855	-1.881	-1.908	-1.934	-1.960	30
-20	-1.428	-1.455	-1.481	-1.508	-1.535	-1.562	-1.589	-1.615	-1.642	-1.669	-1.695	20
10	-1.158	-1.185	-1.211	-1.239	-1.266	-1.293	-1.320	-1.347	-1.374	-1.401	-1.428	10
0	-0.885	-0.913	-0.940	-0.967	-0.995	-1.022	-1.049	-1.076	-1.103	-1.130	-1.158	0
0	-0.885	-0.858	-0.831	-0.803	-0.776	-0.748	-0.721	-0.694	-0.666	-0.639	-0.611	0
10	-0.611	-0.583	-0.556	-0.528	-0.501	-0.473	-0.445	-0.418	-0.390	-0.362	-0.334	10
20	-0.334	-0.307	-0.279	-0.251	-0.223	-0.195	-0.168	-0.140	-0.112	-0.084	-0.056	20
30	-0.056	-0.028	0.000	0.028	0.056	0.084	0.112	0.140	0.168	0.196	0.224	30
40	0.224	0.253	0.281	0.309	0.337	0.365	0.394	0.422	0.450	0.478	0.507	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

50	0.507	0.535	0.563	0.592	0.620	0.648	0.677	0.705	0.734	0.762	0.791	50
60	0.791	0.819	0.848	0.876	0.905	0.933	0.962	0.990	1.019	1.048	1.076	60
70	1.076	1.105	1.134	1.162	1.191	1.220	1.248	1.277	1.306	1.335	1.363	70
80	1.363	1.392	1.421	1.450	1.479	1.507	1.536	1.565	1.594	1.622	1.651	80
90	1.652	1.681	1.710	1.739	1.768	1.797	1.826	1.855	1.884	1.913	1.942	90
100	1.942	1.971	2.000	2.029	2.058	2.087	2.117	2.146	2.175	2.204	2.233	100
110	2.233	2.263	2.292	2.321	2.350	2.380	2.409	2.438	2.467	2.497	2.526	110
120	2.526	2.555	2.585	2.614	2.644	2.673	2.702	2.732	2.761	2.791	2.820	120
130	2.820	2.849	2.879	2.908	2.938	2.967	2.997	3.026	3.056	3.085	3.115	130
140	3.115	3.145	3.174	3.204	3.233	3.263	3.293	3.322	3.352	3.381	3.411	140
150	3.411	3.441	3.470	3.500	3.530	3.560	3.589	3.619	3.649	3.678	3.708	150
160	3.708	3.738	3.768	3.798	3.827	3.857	3.887	3.917	3.947	3.976	4.006	160
170	4.006	4.036	4.066	4.096	4.126	4.156	4.186	4.216	4.245	4.275	4.305	170
180	4.305	4.335	4.365	4.395	4.425	4.455	4.485	4.515	4.545	4.575	4.605	180
190	4.605	4.635	4.665	4.695	4.725	4.755	4.786	4.816	4.846	4.876	4.906	190
200	4.906	4.936	4.966	4.996	5.026	5.057	5.087	5.117	5.147	5.177	5.207	200
210	5.207	5.238	5.268	5.298	5.328	5.358	5.389	5.419	5.449	5.479	5.509	210
220	5.509	5.540	5.570	5.600	5.630	5.661	5.691	5.721	5.752	5.782	5.812	220
230	5.812	5.843	5.873	5.903	5.934	5.964	5.994	6.025	6.055	6.085	6.116	230
240	6.116	6.146	6.176	6.207	6.237	6.268	6.298	6.328	6.359	6.389	6.420	240
250	6.420	6.450	6.481	6.511	6.541	6.572	6.602	6.633	6.663	6.694	6.724	250
260	6.724	6.755	6.785	6.816	6.846	6.877	6.907	6.938	6.968	6.999	7.029	260
270	7.029	7.060	7.090	7.121	7.151	7.182	7.212	7.243	7.274	7.304	7.335	270
280	7.335	7.365	7.396	7.426	7.457	7.488	7.518	7.549	7.579	7.610	7.641	280
290	7.641	7.671	7.702	7.732	7.763	7.794	7.824	7.855	7.885	7.916	7.947	290
300	7.947	7.977	8.008	8.039	8.069	8.100	8.131	8.161	8.192	8.223	8.253	300
310	8.253	8.284	8.315	8.345	8.376	8.407	8.437	8.468	8.499	8.530	8.560	310
320	8.560	8.591	8.622	8.652	8.683	8.714	8.745	8.775	8.806	8.837	8.867	320
330	8.867	8.898	8.929	8.960	8.990	9.021	9.052	9.083	9.113	9.144	9.175	330
340	9.175	9.206	9.236	9.267	9.298	9.329	9.359	9.390	9.421	9.452	9.483	340
350	9.483	9.513	9.544	9.575	9.606	9.636	9.667	9.698	9.729	9.760	9.790	350
360	9.790	9.821	9.852	9.883	9.914	9.944	9.975	10.006	10.037	10.068	10.098	360
370	10.098	10.129	10.160	10.191	10.222	10.252	10.283	10.314	10.345	10.376	10.407	370
380	10.407	10.437	10.468	10.499	10.530	10.561	10.592	10.622	10.653	10.684	10.715	380
390	10.715	10.746	10.777	10.807	10.838	10.869	10.900	10.931	10.962	10.992	11.023	390
400	11.023	11.054	11.085	11.116	11.147	11.177	11.208	11.239	11.270	11.301	11.332	400
410	11.332	11.363	11.393	11.424	11.455	11.486	11.517	11.548	11.578	11.609	11.640	410
420	11.640	11.671	11.702	11.733	11.764	11.794	11.825	11.856	11.887	11.918	11.949	420
430	11.949	11.980	12.010	12.041	12.072	12.103	12.134	12.165	12.196	12.226	12.257	430
440	12.257	12.288	12.319	12.350	12.381	12.411	12.442	12.473	12.504	12.535	12.566	440
450	12.566	12.597	12.627	12.658	12.689	12.720	12.751	12.782	12.813	12.844	12.874	450
460	12.874	12.905	12.936	12.967	12.998	13.029	13.059	13.090	13.121	13.152	13.183	460
470	13.183	13.214	13.244	13.275	13.306	13.337	13.368	13.399	13.430	13.460	13.491	470
480	13.491	13.522	13.553	13.584	13.615	13.645	13.676	13.707	13.738	13.769	13.800	480
490	13.800	13.830	13.861	13.892	13.923	13.954	13.985	14.015	14.046	14.077	14.108	490

DEG	D.F.											DEG
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
500	14.108	14.139	14.170	14.201	14.231	14.262	14.293	14.324	14.355	14.385	14.416	500
510	14.416	14.447	14.478	14.509	14.539	14.570	14.601	14.632	14.663	14.694	14.724	510
520	14.724	14.755	14.786	14.817	14.848	14.878	14.909	14.940	14.971	15.002	15.032	520
530	15.032	15.063	15.094	15.125	15.156	15.186	15.217	15.248	15.279	15.310	15.340	530
540	15.340	15.371	15.402	15.433	15.464	15.494	15.525	15.556	15.587	15.617	15.648	540
550	15.648	15.679	15.710	15.741	15.771	15.802	15.833	15.864	15.894	15.925	15.956	550
560	15.956	15.987	16.018	16.048	16.079	16.110	16.141	16.171	16.202	16.233	16.264	560
570	16.264	16.294	16.325	16.356	16.387	16.417	16.448	16.479	16.510	16.540	16.571	570
580	16.571	16.602	16.633	16.663	16.694	16.725	16.756	16.786	16.817	16.848	16.879	580
590	16.879	16.909	16.940	16.971	17.001	17.032	17.063	17.094	17.124	17.155	17.186	590
600	17.186	17.217	17.247	17.278	17.309	17.339	17.370	17.401	17.432	17.462	17.493	600

\*Converted from degrees Celsius 1968

Note: Temperature in degrees F. reference junction at 32 F

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# RESISTANCE VERSUS TEMPERATURE: PLATINUM TABLE

°C	Ohm	Diff. °C	°C	Ohm	Diff. °C	°C	Ohm	Diff. °C	°C	Ohm	Diff. °C	°C	Ohm	Diff. °C
0	100.00	0.39	+60	123.24	0.38	-120	146.06	0.38	-180	168.47	0.37	-240	190.46	0.36
1	100.39	0.39	61	123.62	0.38	121	146.44	0.38	181	168.84	0.37	241	190.82	0.36
2	100.78	0.39	62	124.01	0.39	122	146.81	0.37	182	169.21	0.37	242	191.18	0.36
3	101.17	0.39	63	124.39	0.38	123	147.19	0.38	183	169.58	0.37	243	191.55	0.37
4	101.56	0.39	64	124.77	0.38	124	147.56	0.37	184	169.95	0.37	244	191.91	0.36
5	101.95	0.39	65	125.16	0.39	125	147.94	0.38	185	170.32	0.37	245	192.27	0.36
6	102.34	0.39	66	125.54	0.38	126	148.32	0.38	186	170.68	0.36	246	192.63	0.36
7	102.73	0.39	67	125.92	0.38	127	148.69	0.37	187	171.05	0.37	247	192.99	0.36
8	103.12	0.39	68	126.30	0.38	128	149.07	0.38	188	171.42	0.37	248	193.36	0.37
9	103.51	0.39	69	126.69	0.39	129	149.44	0.37	189	171.79	0.37	249	193.72	0.36
10	103.90	0.39	70	127.07	0.38	130	149.82	0.38	190	172.16	0.37	250	194.08	0.36
11	104.29	0.39	71	127.45	0.38	131	150.20	0.38	191	172.53	0.37	251	194.44	0.36
12	104.68	0.39	72	127.83	0.38	132	150.57	0.37	192	172.90	0.37	252	194.80	0.36
13	105.07	0.39	73	128.22	0.39	133	150.95	0.38	193	173.26	0.36	253	195.17	0.37
14	105.46	0.39	74	128.60	0.38	134	151.32	0.37	194	173.63	0.37	254	195.53	0.36
15	105.85	0.39	75	128.98	0.38	135	151.70	0.38	195	174.00	0.37	255	195.89	0.36
16	106.23	0.38	76	129.36	0.38	136	152.07	0.37	196	174.37	0.37	256	196.25	0.36
17	106.62	0.39	77	129.74	0.38	137	152.45	0.38	197	174.74	0.37	257	196.61	0.36
18	107.01	0.39	78	130.13	0.39	138	152.82	0.37	198	175.10	0.36	258	196.98	0.37
19	107.40	0.39	79	130.51	0.38	139	153.20	0.38	199	175.47	0.37	259	197.34	0.36
20	107.79	0.39	80	130.89	0.38	140	153.57	0.37	200	175.84	0.37	260	197.70	0.36
21	108.18	0.39	81	131.27	0.38	141	153.95	0.38	201	176.21	0.37	261	198.06	0.36
22	108.57	0.39	82	131.65	0.38	142	154.32	0.37	202	176.57	0.36	262	198.42	0.36
23	108.95	0.38	83	132.03	0.38	143	154.70	0.38	203	176.94	0.37	263	198.78	0.36
24	109.34	0.39	84	132.41	0.38	144	155.07	0.37	204	177.31	0.37	264	199.14	0.36
25	109.73	0.39	85	132.80	0.39	145	155.45	0.38	205	177.68	0.37	265	199.50	0.36
26	110.12	0.39	86	133.18	0.38	146	155.82	0.37	206	178.04	0.36	266	199.86	0.36
27	110.51	0.39	87	133.56	0.38	147	156.20	0.38	207	178.41	0.37	267	200.22	0.36
28	110.89	0.38	88	133.94	0.38	148	156.57	0.37	208	178.78	0.37	268	200.58	0.36
29	111.28	0.39	89	134.32	0.38	149	156.95	0.38	209	179.14	0.36	269	200.94	0.36
30	111.67	0.39	90	134.70	0.38	150	157.32	0.37	210	179.51	0.37	270	201.30	0.36
31	112.06	0.39	91	135.08	0.38	151	157.69	0.37	211	179.88	0.37	271	201.66	0.36
32	112.44	0.38	92	135.46	0.38	152	158.07	0.38	212	180.24	0.36	272	202.02	0.36
33	112.83	0.39	93	135.84	0.38	153	158.44	0.37	213	180.61	0.37	273	202.37	0.35
34	113.22	0.39	94	136.22	0.38	154	158.81	0.37	214	180.97	0.36	274	202.73	0.36
35	113.61	0.39	95	136.60	0.38	155	159.19	0.38	215	181.34	0.37	275	203.09	0.36
36	113.99	0.38	96	136.98	0.38	156	159.56	0.37	216	181.71	0.37	276	203.45	0.36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

°C	Ohm	Diff.	°C	Ohm	Diff.	°C	Ohm	Diff.	°C	Ohm	Diff.	°C	Ohm	Diff.
37	114.38	0.39	97	137.36	0.38	157	159.93	0.37	217	182.07	0.36	277	203.81	0.36
38	114.77	0.39	98	137.74	0.38	158	160.30	0.37	218	182.44	0.37	278	204.16	0.35
39	115.15	0.38	99	138.12	0.38	159	160.68	0.38	219	182.80	0.36	279	204.52	0.36
40	115.54	0.39	100	138.50	0.38	160	161.05	0.37	220	183.17	0.37	280	204.88	0.36
41	115.93	0.39	101	138.88	0.38	161	161.42	0.37	221	183.54	0.37	281	205.24	0.36
42	116.31	0.38	102	139.26	0.38	162	161.79	0.37	222	183.90	0.36	282	205.60	0.36
43	116.70	0.39	103	139.63	0.37	163	162.16	0.37	223	184.27	0.37	283	205.95	0.35
44	117.08	0.38	104	140.01	0.38	164	162.53	0.37	224	184.63	0.36	284	206.31	0.36
45	117.47	0.39	105	140.39	0.38	165	162.91	0.38	225	185.00	0.37	285	206.67	0.36
46	117.86	0.39	106	140.77	0.38	166	163.28	0.37	226	185.36	0.36	286	207.03	0.36
47	118.24	0.38	107	141.15	0.38	167	163.65	0.37	227	185.73	0.37	287	207.39	0.36
48	118.63	0.39	108	141.52	0.37	168	164.02	0.37	228	186.09	0.36	288	207.74	0.35
49	119.01	0.38	109	141.90	0.38	169	164.39	0.37	229	186.46	0.37	289	208.10	0.36
50	119.40	0.39	110	142.28	0.38	170	164.76	0.37	230	186.82	0.36	290	208.46	0.36
51	119.78	0.38	111	142.66	0.38	171	165.13	0.37	231	187.18	0.36	291	208.82	0.36
52	120.17	0.39	112	143.04	0.38	172	165.50	0.37	232	187.55	0.37	292	209.17	0.35
53	120.55	0.38	113	143.41	0.37	173	165.87	0.37	233	187.91	0.36	293	209.53	0.36
54	120.94	0.39	114	143.79	0.38	174	166.24	0.37	234	188.28	0.37	294	209.89	0.36
55	121.32	0.38	115	144.17	0.38	175	166.62	0.38	235	188.64	0.36	295	210.25	0.36
56	121.70	0.38	116	144.55	0.38	176	166.99	0.37	236	189.00	0.36	296	210.60	0.35
57	122.09	0.39	117	144.93	0.38	177	167.36	0.37	237	189.37	0.37	297	210.96	0.36
58	122.47	0.38	118	145.30	0.37	178	167.73	0.37	238	189.73	0.36	298	211.32	0.36
59	122.86	0.39	119	145.68	0.38	179	168.10	0.37	239	190.10	0.37	299	211.67	0.35



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์ungskศักดิ์ อนันตศิริวัฒน์ ผู้ให้คำปรึกษาและให้หนังสือมาใช้ในการทำ  
ปริญญานิพนธ์นี้ ขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านที่สละเวลาให้คำปรึกษาและความรู้ บรรดาเพื่อนทั้ง  
หลาย ทั้งภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ ,ภาควิชาโทรคมนาคม ,ภาควิชาวิศวกรรม และที่  
สำคัญภาควิชาระบบควบคุม ที่เป็นกำลังใจให้

ขอขอบคุณ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## หนังสืออ้างอิง

กิตติ ตีระเศรษฐ Transducers กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2525

สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์ , ผศ.ดร. การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหาร กรุงเทพมหานคร: คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี , 2528

Martin Newton. Industrol Electronics and Controls , Singapore: John Wiley & Sons Inc. , 1986

Daniel H. Shcingold. Transducer Interfacing Handbook , U.S.A.: Analog Device Inc. , 1980

Norton , Harry N. Handbook of transducer , U.S.A. : Englewood Cliff's , NJ : Prentice Hall , c 1989

