



ปีการศึกษา 2532

ปริญญาโท

เรื่อง

WATER RHEOSTAT

โดย

นายชาติ พชรกรรมา 291311

นายสำราญ ดนุภักดา 291323

อาจารย์ปริญญา

นศ. ทองใบ อรรถเสรมฐ์

รศ. ศุภี บรรจงจิตร



ปริญญาโทบริหารการศึกษา 2532

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง WATER RHEOSTAT

ผู้จัดทำ

1. นายชาติพร จรรยา 291311
2. นายสำราญ จุนนุกตา 291323



.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(นศ.ทองใบ อรรถเศรษฐ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ. ศุภี บรรจงจิตร)

สารบัญ

หน้าที่

บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ส่วนประกอบของวงจรไฟฟ้า	1
1.2 ความต้านทานไฟฟ้า	2
1.2.1 ความต้านทานชนิดคงที่	3
1.2.2 ความต้านทานแบบปรับค่าได้	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	9
2.1 วัตถุประสงค์ในการสร้าง	9
2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์	9
2.2.1 สารประกอบไอออนิก	9
2.2.2 การเลือกชนิดของสารละลาย	10
2.2.3 สารประกอบแคลเซียมคลอไรด์	11
2.3 หลักการสร้าง water rheostat	12
2.4 หลักการระบายความร้อน	13
2.4.1 การระบายความร้อนออกจากน้ำยาอิเล็กโทรไลต์	13
2.4.2 หลักการทำงานของเครื่องทำความเย็น	14
บทที่ 3 การคำนวณและการสร้าง	16
3.1 การคำนวณและการสร้าง water rheostat	16
3.1.1 พิกัดของ water rheostat	16
3.1.2 วัสดุที่ใช้ทำ water rheostat	16
3.2 การคำนวณเกี่ยวกับน้ำยาอิเล็กโทรไลต์	16
3.2.1 การหาค่าความต้านทานจำเพาะของน้ำยาอิเล็กโทรไลต์	16
3.2.2 การคำนวณหามวลของสารละลาย	18
3.2.3 การคำนวณเกี่ยวกับความร้อนที่เกิดขึ้น	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

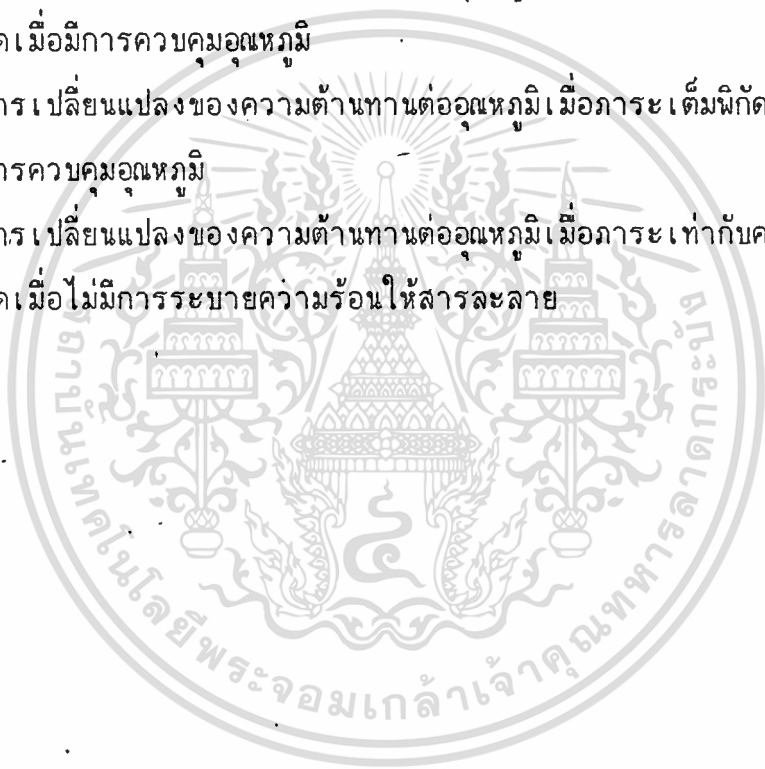
หน้าที่

3.2.4 การหาค่าความจุความร้อนจำเพาะ	21
3.3 การคำนวณเกี่ยวกับความร้อน	22
3.3.1 การคำนวณหาอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นใน water rheostat	22
3.3.2 การคำนวณหาขนาดเครื่องทำความเย็น	23
3.3.3 พิกัดจองเครื่องทำความเย็น	23
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	24
4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง	24
4.2 วงจรการทดลอง	24
4.3 การทดลองปรับเปลี่ยนค่าความต้านทาน	25
4.3.1 วัตถุประสงค์ในการทดลอง	25
4.3.2 ลำดับขั้นในการทดลอง	25
4.3.3 ผลการทดลอง	28
4.4 การทดลองหาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเมื่อใช้งาน water rheostat	28
4.4.1 วัตถุประสงค์ในการทดลอง	28
4.4.2 ลำดับขั้นในการทดลอง	28
4.4.3 ผลการทดลอง	32
4.5 ปัญหาที่เกิดขึ้นในการใช้งาน water rheostat	33
บทที่ 5 วิจารณ์และสรุป	34
5.1 วิจารณ์	34
5.2 บทสรุป	35
ภาคผนวก ก. สัญลักษณ์ และ การอ่านค่าสีของความต้านทาน	36
ภาคผนวก ข. ขนาดของความต้านทานแบบต่างๆ	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้าที่
3.1 แสดงค่าความต้านทานจำเพาะของสารละลายน้ำ NaCl ขนาด 80 ppm.	18
3.2 แสดงค่าความต้านทานจำเพาะของสารละลายน้ำ NaCl ขนาด 43 ppm.	19
4.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานเมื่อทำการปรับแผ่นเพลท	26
4.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานต่ออุณหภูมิเมื่อภาระเท่ากับครึ่งหนึ่งของพิกัดเมื่อมีการควบคุมอุณหภูมิ	29
4.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานต่ออุณหภูมิเมื่อภาระเต็มพิกัดเมื่อมีการควบคุมอุณหภูมิ	30
4.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานต่ออุณหภูมิเมื่อภาระเท่ากับครึ่งหนึ่งของพิกัดเมื่อไม่มีการระบายความร้อนให้สารละลาย	31



สารบัญรูปภาพ

หน้าที่

รูปที่ 1.1	ส่วนประกอบของวงจรไฟฟ้า	1
รูปที่ 1.2	ความต้านทานชนิดต่างๆ	2
รูปที่ 1.3	โครงสร้างของความต้านทานแบบถ่าน	3
รูปที่ 1.4	โครงสร้างของความต้านทานแบบวาววาวด์	4
รูปที่ 1.5	ความต้านทานแบบวาววาวด์ชนิดต่างๆ	5
รูปที่ 1.6	ส่วนประกอบของความต้านทานแบบฟิล์ม	6
รูปที่ 1.7	แสดงรูปร่างของความต้านทานแบบปรับค่าได้ชนิดต่างๆ	7
รูปที่ 1.8	รีโอสตาทขนาด 50, 25 และ 12.5 วัตต์	8
รูปที่ 2.1	แสดงลักษณะการละลายน้ำของเกลือแกง	10
รูปที่ 2.2	ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการละลายของสารประกอบแต่ละชนิด	11
รูปที่ 2.3	โครงสร้างสารประกอบไอออนิกแบบโซเดียมคลอไรด์	12
รูปที่ 2.4	วัฏจักรทางเทอร์โมไดนามิกส์ของระบบทำความเย็น	13
รูปที่ 3.1	แสดงการจัดวางแผ่นเพลทของแต่ละขั้วอิเล็กโทรด	17
รูปที่ 3.2	กราฟแปลงค่าความนำไฟฟ้าเป็นค่าสารละลาย	18
รูปที่ 3.3	แสดงการหาค่าความจุความร้อนจำเพาะของสารละลาย	22
รูปที่ 4.1	วงจรการทดลอง	24
รูปที่ 4.2	วงจรการทดลอง	24
รูปที่ 4.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับความลึกของแผ่นเพลท	27
รูปที่ 4.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส, ความต้านทาน และอุณหภูมิต่อเวลา	33

สัญลักษณ์

A	พื้นที่หน้าตัด
C	ค่าความจุความร้อนจำเพาะ
$^{\circ}\text{C}$	องศาเซลเซียส
e	อิเล็กตรอน
h, H	ความลึก, ความสูง
i, I	กระแสไฟฟ้า
J	หน่วยพลังงานความร้อน
k _s	หน่วยของน้ำหนัก
K	องศาเคลวิน
l	ความยาว, ระยะห่าง
m	มวล, นาที
P	กำลังไฟฟ้า
p	โปรตอน
Q	ปริมาณความร้อน
R	ความต้านทานไฟฟ้า
t	เวลา, ระยะเวลา
T	อุณหภูมิ
v, V	ศักดาไฟฟ้า, แรงดันไฟฟ้า
w	ความกว้าง
W	พลังงาน, กำลัง
α	ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ
ρ	ค่าความต้านทานจำเพาะ
	ค่าความนำไฟฟ้าจำเพาะ
Ω	หน่วยของความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

WATER RHEOSTAT

ชาตรี นรจรรยา 291311
สำราญ ลุนบุตรดา 291323
รศ. ศุภี บรรจงจิต อาจารย์ที่ปรึกษา
อ.ทองใบ อรรถเศรษฐ์ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2532

บทคัดย่อ

ปริศณานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ถูกเรียบเรียงขึ้นจากการทดลองใช้เกลือแกง (NaCl) นำไปละลายในน้ำ (H_2O) ทำเป็นน้ำยาอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) ของตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้ (rheostat) โดยอาศัยหลักการเลื่อนแผ่นตัวนำ (plate) ให้จุ่มอยู่ในน้ำยาอิเล็กโทรไลต์มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความต้องการค่ามากน้อยของความต้านทาน แผ่นตัวนำจะแยกออกเป็นสองชุดคือ ชุดที่อยู่กับที่และชุดที่ปรับค่าได้ โดยแผ่นตัวนำทั้งสองชุดนี้เรียกว่าแผ่นอิเล็กโทรด (electrodes) จะนำไปต่อเข้ากับขั้วต่อ (terminals) เพื่อที่จะนำไปต่อใช้งาน อาศัยหลักการที่ว่าค่าความต้านทานแปรผกผันกับค่าพื้นที่หน้าตัดของแผ่นตัวนำ ดังนั้นการปรับหรือเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานก็สามารถทำได้โดยการเลื่อนแผ่นตัวนำขึ้นลงจากน้ำยาอิเล็กโทรไลต์ถ้าพื้นที่ของแผ่นตัวนำของชุดที่ปรับได้จุ่มอยู่ในน้ำยาอิเล็กโทรไลต์เป็นส่วนมากค่าความต้านทานก็จะมีค่าต่ำ ในทางตรงกันข้ามถ้าแผ่นตัวนำจุ่มอยู่ในน้ำยาอิเล็กโทรไลต์น้อยค่าความต้านทานก็จะมีค่าสูงขึ้น และเนื่องจากผลของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านความต้านทานจะทำให้เกิดความร้อนสะสมในน้ำยาอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งจะเป็นผลให้ค่าความต้านทานเกิดการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการรักษาอุณหภูมิของน้ำยาให้มีค่าคงที่ โดยการใช้น้ำแบบรังผึ้งพร้อมทั้งพัดลมดูดระบายอากาศร่วมกับการใช้เครื่องทำความเย็นขนาดเล็กเป็นตัวรักษาอุณหภูมิ ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้โดยใช้สารละลายเกลือแกงเป็นน้ำยาอิเล็กโทรไลต์ได้สร้างขึ้นมาเพื่อพัฒนาความต้านทานที่ทนกำลังไฟฟ้าได้สูงๆ

WATER RHEOSTAT

Chatree Pornjunya 291311

Samran Lunbudda 291323

Associate Prof.Sulee Banchongjit Advisor

Tongbai Ath-taseth Advisor

2532

Abstract

This project is arranged from the experiment by dissolving sodium chloride (NaCl) into pure water (H_2O) to generate electrolyte for rheostat, by immersing the conductance plates into electrolyte. The level of liquid depends on the required resistance. The conductance plates are divided into two series which are stationary plates and movable plate. Both of them are called electrodes. These electrodes are connected to terminals which can be connected to the load, depending on the principle that resistance range reverse varies with cross-section area therefore, the adjustment or changing of resistance value can be made by immersing the electrodes into the electrolyte. If most of the electrode area of moving plates are in the electrolyte, the resistance value will be lower. On the other hand, if the electrodes are less immersed in the electrolyte, the resistance value will be higher. When electric flows through the resistance, it will store heat in the electrolyte and causes electrolyte temperature to rise. Thus, it is necessary to control constant a boiler with shunted pole motor to co-operate with refrigeration. Rheostat gained by sodium chloride solution as electrolyte have been developed for a large range of resistance.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

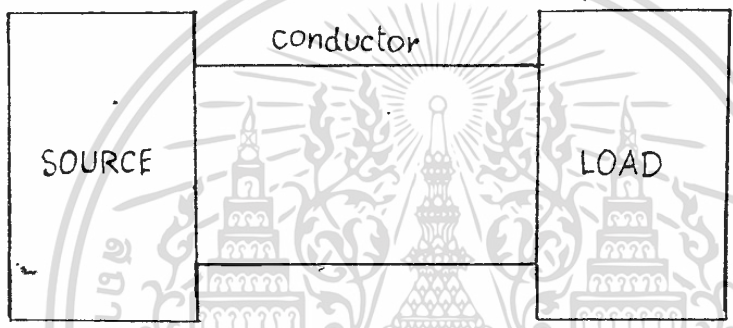
แม้ว่าการแก้ไขทั้งต้นฉบับก็ยังมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ส่วนประกอบของวงจรไฟฟ้า

ในวงจรไฟฟ้าจะมีองค์ประกอบอยู่ 3 อย่าง อย่างแรกคือแหล่งจ่ายไฟฟ้าซึ่งเป็นตัวจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่วงจร อย่างที่ 2 คือสายตัวนำไฟฟ้าซึ่งเป็นตัวกลางยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าสู่อุปกรณ์ไฟฟ้าให้ได้ดีที่สุด และอย่างที 3 คืออุปกรณ์ไฟฟ้าซึ่งเป็นตัวทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานรูปอื่นที่ต้องการ เช่นมอเตอร์ไฟฟ้าซึ่งจะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล รูปที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบของวงจรไฟฟ้า



รูปที่ 1.1 ส่วนประกอบของวงจรไฟฟ้า

เมื่อปี ค.ศ.1827 ยอจซ์ ซีมอน โอห์ม (Gorge Simon Ohm) นักฟิสิกส์ชาวเยอรมันได้ตั้งทฤษฎีเกี่ยวกับกฎของโอห์มไว้ว่า "แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมวัสดุตัวนำไฟฟ้าใดๆ จะแปรค่าโดยตรงกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านวัสดุตัวนำนั้น" นั่นคือ

$$v = RI \text{ ----- (1.1)}$$

เมื่อ v คือแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมวัสดุตัวนำนั้น มีหน่วยเป็น โวลต์ (volt)

i คือกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวนำนั้น มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (ampere)

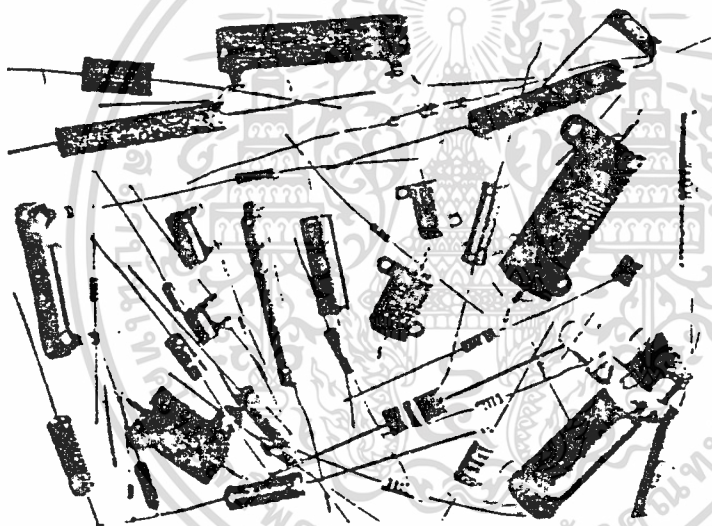
ดังนั้นจะได้ค่าคงที่ของการเปลี่ยนแปลงเป็นปฏิภาคตรงคือ R เรียกว่าความต้านทานไฟฟ้า (resistance) หน่วยของความต้านทานคือ โอห์ม(Ohm)ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 V/A และใช้อักษรย่อเป็นสัญลักษณ์ของโอเมกา(Ω)

จากรูปที่ 1.1 ในส่วนที่เป็นตัวนำไฟฟ้าจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำให้มีความต้านทานไฟฟ้าต่ำที่สุด เพื่อที่จะให้กระแสไหลเข้าสู่อุปกรณ์ไฟฟ้าได้ดีที่สุดนั่นเองแต่บางครั้งก็มีความจำเป็นที่จะต้องกำจัดกระแสให้ไหลในวงจรไฟฟ้าที่ไหลในวงจร ซึ่งก็สามารถ

ทำได้โดยสองกรณีคือโดยการลดแรงดันของแหล่งจ่ายในวงจร อีกอย่างก็คือนำความต้านทานมาต่ออนุกรมเข้ากับวงจร โดยความต้านทานจะต้องมีค่าและขนาดโตพอที่จะทนกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่จะเกิดขึ้นได้ ซึ่งกำลังไฟฟ้าสูญเสียจะแปรค่าตามกระแสยกกำลังสอง หรือ $P = I^2 R$ นั้นเอง

1.2 ความต้านทานไฟฟ้า

ความต้านทานเป็นส่วนประกอบอย่างหนึ่งในวงจรไฟฟ้า ทำหน้าที่เป็นตัวจำกัดกระแสที่ไหลในวงจรต่างๆในวงจรไฟฟ้า โดยทั่วไปความต้านทานจะมีโครงสร้างพื้นฐานอยู่ 3 แบบคือ แบบค่าคงที่ (fixed), แบบโพเทนทิโอมิเตอร์ (potentiometer) และแบบรีโอสตาท (reostat) รูปที่ 1.2 เป็นความต้านทานชนิดต่างๆ



รูปที่ 1.2 ความต้านทานชนิดต่างๆ

ความต้านทานแบบค่าคงที่จะมีขั้วต่ออยู่ 2 ขั้วและมีค่าคงที่ค่าใดค่าหนึ่งตามขนาดที่บอกไว้ แบบโพเทนทิโอมิเตอร์จะมีขั้วต่อ 3 ขั้ว ขั้วขั้วต้นและปลายจะมีค่าเท่ากับขนาดของความต้านทานนั้น ส่วนขั้วกลางจะเปลี่ยนค่าตามการปรับ แบบรีโอสตาทสามารถเปลี่ยนค่าได้โดยไม่ต้องเปิดวงจร (open circuit) ขณะที่ทำการปรับค่า โดยทั่วไปแบบโพเทนทิโอมิเตอร์และแบบรีโอสตาทมีโครงสร้างเหมือนกันแต่ต่างกันที่การใช้งาน ถ้าใช้กับพวกกระแสต่ำเรียกโพเทนทิโอมิเตอร์ ถ้าใช้กับกระแสสูงเรียกรีโอสตาท

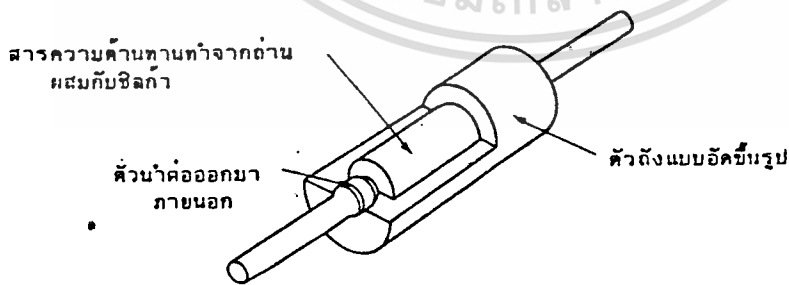
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2.1 ความต้านทานแบบค่าคงที่ (fixed resistance)

ความต้านทานแบบค่าคงที่มีมากมายหลายค่าและหลายขนาด ซึ่งขึ้นอยู่กับการทำงานที่จะนำไปใช้งานทั้งนี้จะต้องพิจารณาให้ค่าความต้านทานที่มีหน่วยเป็นโอห์ม(Ω) และกำลังไฟฟ้า (วัตต์) รูปที่ 1.3 เป็นค่าความต้านทานแบบค่าคงที่แบบต่างๆ ในรูปส่วนมากเป็นความต้านทานที่ใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป มีตั้งแต่ขนาด 1/8 วัตต์ไปจนถึง 20 วัตต์ ความต้านทานแบบค่าคงที่ที่ถูกสร้างมาจากสารหลายชนิด ขึ้นอยู่กับการทนกำลังไฟฟ้าและค่าเปอร์เซ็นต์-ความผิดพลาด(error) ถ้าหากทนกำลังไฟฟ้าต่ำๆ เช่นขนาดตั้งแต่ 1/8 วัตต์ถึง 2 วัตต์ส่วนมากทำมาจากถ่าน(carbon) และออกไซด์ของโลหะเรียกว่าเมทอล ออกไซด์ (metal oxide) ส่วนขนาดที่ทนกำลังไฟฟ้าเกิน 2 วัตต์อาจจะทำด้วยขดลวดแบบวายาวด์ (wire wound) โดยมีเซรามิกส์เคลือบภายนอกซึ่งมีขนาดทนกำลังไฟฟ้าสูงเป็น 10 วัตต์ 50 วัตต์ และ 100 วัตต์ ชนิดของสารที่ใช้ทำความต้านทานที่ควรทราบมีดังต่อไปนี้

ก. แบบถ่าน (carbon)

ความต้านทานแบบนี้จะเห็นได้ตามท้องตลาดมากที่สุดเพราะมีราคาถูกมีโครงสร้างภายในทำมาจากผงถ่านหรือกราไฟท์(graphite) อัดร่วมกับซิลิกา(silica) และมีลวดตัวนำต่อที่ปลายทั้งสองด้านออกมาใช้งาน แล้วจุ่มในอีพ็อกซี(epoxy) เพื่อทำเป็นรูปร่างภายนอก ลักษณะภายในได้แสดงดังรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 โครงสร้างของความต้านทานแบบถ่าน

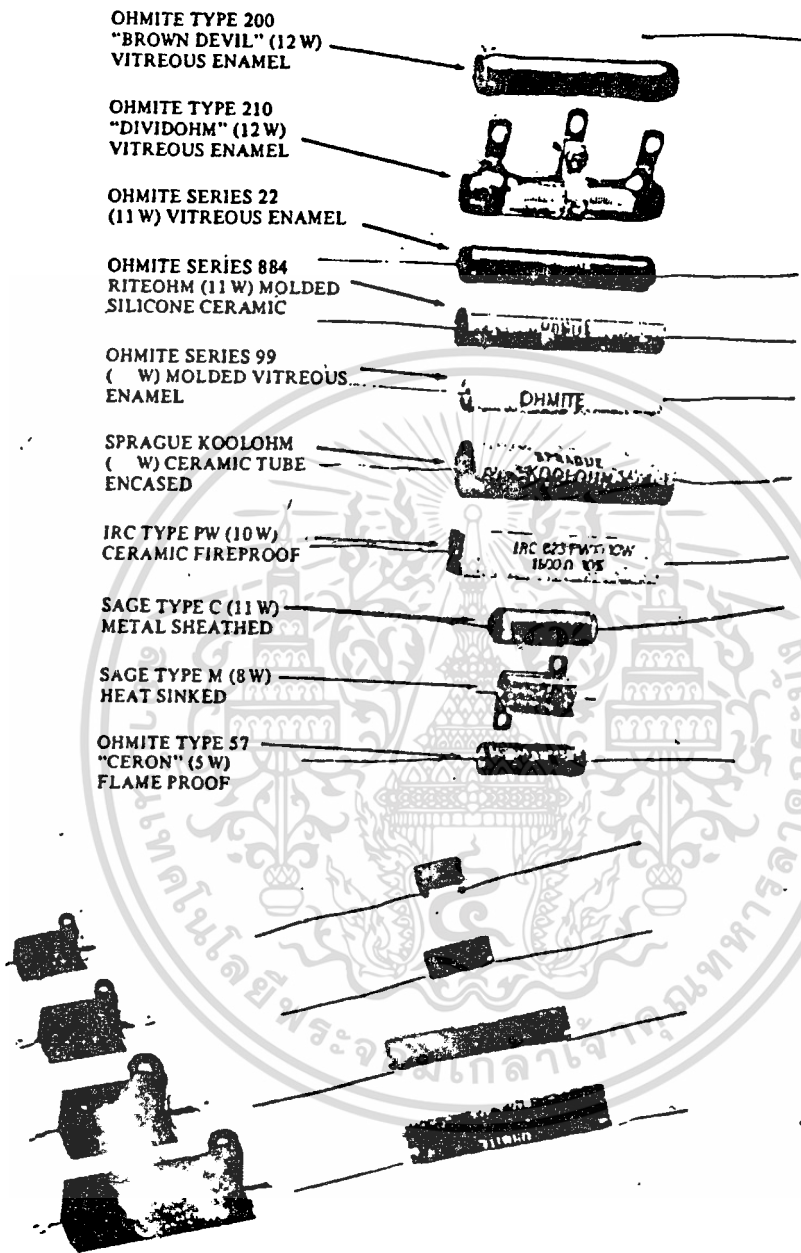
ช. แขนววายาววอด์ (wire wound)

ความต้านทานแบบนี้สามารถสร้างขึ้นให้มีค่าความต้านทาน, ความผิดพลาด, การทนกำลังไฟฟ้า และโครงสร้างทางเคมีได้ดีกว่าความต้านทานแบบอื่นๆ ลักษณะภายนอกโดยทั่วไปแสดงดังรูปที่ 1.4 โครงสร้างภายนอกทำจากลวดความต้านทานพันอยู่ในรูปทรงกระบอก แล้วต่อลวดตัวนำที่ปลายทั้งสองด้านออกมาภายนอกแล้วนำมาบรรจุในตัวถังตามการใช้งาน ถัดทนกำลังไฟฟ้าต่ำจะจุ่มในอีพ็อกซี ถัดทนกำลังสูงจะใช้ซิลิโคน (silicone) หรือเซรามิกไฟร์พروف (ceramic fireproof) หุ้มภายนอก แต่ถัดมีกำลังไฟฟ้ามกๆ จะใช้อลูมิเนียม (aluminium) เป็นตัวหุ้มซึ่งจะเป็นตัวระบายความร้อน (heatsink) ด้วย โครงสร้างการทำงานสามารถดูได้จากรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.4 โครงสร้างความต้านทานแบบววายาววอด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

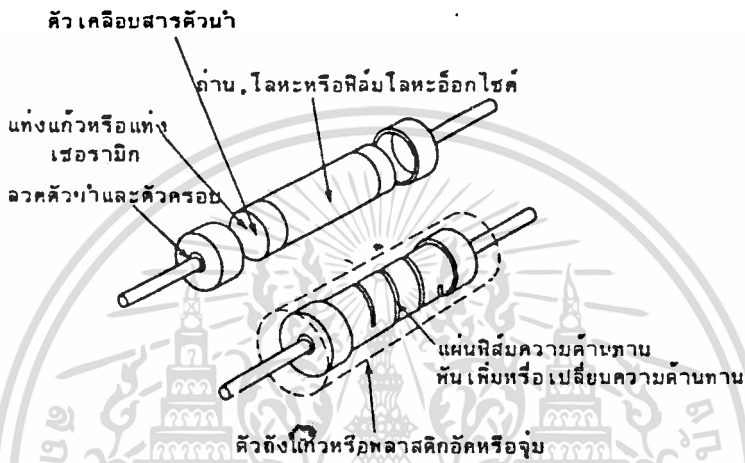


รูปที่ 1.5 ความต้านทานแบบวาววอดซ์ชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค. แบบฟิล์ม (film)

หลักการคล้ายแบบสายวาวด์ แต่ไม่ใช่ลวดต้านทานแต่ใช้ถ่านทำเป็นแผ่นบางๆ แล้วนำมาพันเป็นรูปทรงกระบอกหรืออาจใช้สารประเภทโลหะทำเป็นแผ่นบางๆ เรียกว่าเมทัลฟิล์ม (metal film) มาทำลักษณะเดียวกัน ต่อจากนั้นก็หุ้มด้วยแก้ว, อีพ็อกซีหรือสารฉนวนประเภทอื่นๆ ลักษณะส่วนประกอบแสดงดังรูปที่ 1.6

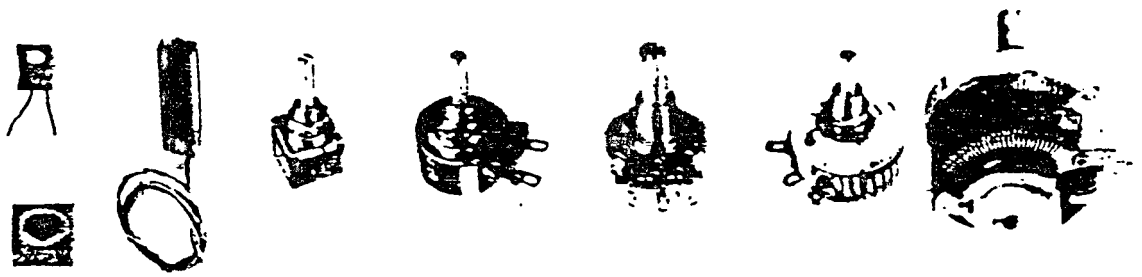


รูปที่ 1.6 ส่วนประกอบของความต้านทานแบบฟิล์ม

ความต้านทานแบบนี้ใช้ได้ดีมากในย่านความถี่สูงๆ โดยเกิดการรบกวนน้อยมาก (low noise) และข้อดีอีกอย่างก็คือทำงานในลักษณะฟิล์มของวงจรไฟฟ้าได้ เพราะเมื่อเกินขนาดกำลังที่ทนได้ฟิล์มจะขาดทันที ดังนั้นจึงนิยมใช้ในเครื่องมือวัด, คอมพิวเตอร์ และอุปกรณ์ทางการแพทย์ เป็นต้น

1.2.2 ความต้านทานแบบปรับค่าได้ (variable resistor)

ความต้านทานแบบปรับค่าได้รู้จักกันในชื่อ โปเทนทิโอมิเตอร์หรือพอทส์ (pots) นอกจากนั้นยังมีทริมเมอร์ (trimmers) และรีโอสตาท รูปที่ 1.7 แสดงรูปร่างของความต้านทานแบบปรับค่าได้ชนิดต่างๆ



รูปที่ 1.7 แสดงรูปร่างของความต้านทานแบบปรับค่าได้ชนิดต่างๆ

ลักษณะโดยทั่วไปจะมีการทำงานเหมือนกันคือมีขั้วต่อ 3 ขั้ว ขั้วต้นและปลายเป็นค่า
 นิเกิ้ลของความต้านทานนั้น แต่ขั้วกลางค่าของความต้านทานจะเปลี่ยนไปตามการปรับ ซึ่งพอ
 จำแนกการสร้างออกมาได้ดังนี้

ก. แบบคาร์บอนคอมโพสิชัน โปเทนทิโอมิเตอร์
 (carbon composition potentiometer)

โครงสร้างความต้านทานสามารถทำได้สองแบบคือ แบบแรกจะฉาบผงถ่านที่เป็น
 ความต้านทานไว้บนผิวในของฉนวนรูปวงแหวนและมีแกนพาตัวสัมผัสซึ่งต่ออยู่กับขั้วกลาง
 ลากไปบนผิวของผงถ่านที่ฉาบไว้ อีกแบบจะนำผงถ่านที่เป็นความต้านทานอัดเป็นวงแหวนลง
 ในแท่งฉนวน (model) และมีตัวสัมผัสจากบนผิวของผงถ่านดังแบบแรก ซึ่งความต้านทาน
 แบบคาร์บอนคอมโพสิชัน โปเทนทิโอมิเตอร์นี้งานส่วนมากใช้เป็นตัวปรับแต่งภายนอก
 แผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ตัวอย่างเช่น ตัวเร่ง, เบาเสียงในเครื่องรับวิทยุ เป็นต้น

ข. แบบขดลวดโพเทนทิโอมิเตอร์ (wire wound potentiometer)

โครงสร้างคล้ายกับแบบคาร์บอน แต่ใช้ลวดต้านทานพันรอบฉนวนแทนการฉาบผิวด้วย
 คาร์บอนทำให้ทนกำลังไฟฟ้าได้สูงกว่าแบบคาร์บอนมาก

ค. แบบ คอนดักทีฟ พลาสติก โปเทนทิโอมิเตอร์
 (conductive plastic potentiometer)

การทำงานเหมือนแบบถ่าน แต่เปลี่ยนตัวฉาบเป็นสารเชิงพลาสติก ขนาดที่ทำได้
 ขนาดเล็กๆ นิยมเรียกว่าทริมเมอร์ และพอสส์ เป็นแบบที่ใช้ประกอบลงในแผ่นวงจรพิมพ์
 อิเล็กทรอนิกส์ (print circuit board)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ



2.1 วัตถุประสงค์ในการสร้าง

เนื่องจากว่าความต้านทานที่มีจำหน่ายอยู่โดยทั่วไปตามท้องตลาด เป็นความต้านทานที่ใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งทนกำลังไฟฟ้าได้ต่ำมากคือมีขนาดตั้งแต่ $1/8$ วัตต์ ถึง 10 วัตต์ เป็นอย่างมาก แต่ WATER RHEOSTAT ที่จะทำในโครงการนี้เป็นความต้านทานขนาด 3000 วัตต์ 1 เฟส ซึ่งในปัจจุบันความต้านทานที่ทนกำลังไฟฟ้าสูงขนาดนี้หาไม่ได้เลยในท้องตลาดและในการสร้างครั้งนี้ยังอาจเป็นต้นแบบที่จะนำไปพัฒนาทำเป็น WATER RHEOSTAT ระบบ 3 เฟสในโอกาสต่อไป วัตถุประสงค์หลักในการสร้างคือ

- 2.1.1 ใช้เป็นภาระ (load) ในการทดสอบเครื่องกำเนิดและหม้อแปลงขนาดเล็กที่มีมอดูลประกอบกำลังไฟฟ้า (power factor) ประมาณ 1
- 2.1.2 ใช้ในการสตาร์ท (start) มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
- 2.1.3 ใช้ในการปรับความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรมขนาดใหญ่
- 2.1.4 ใช้ทดลองและทดสอบหาคุณลักษณะสมบัติของฟิล์มและตัดตอนอัตโนมัติ

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์

WATER REOSTAT ก็คือความต้านทานชนิดที่ปรับค่าได้โดยการใช้น้ำเป็นตัวต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้า แต่เนื่องจากน้ำบริสุทธิ์ (H_2O) ไม่สามารถนำกระแสได้หรือกล่าวได้ว่ามีความต้านทานไฟฟ้าสูงมาก จึงจำเป็นต้องหาสารประกอบมาละลายในน้ำ เพื่อที่จะทำให้น้ำสามารถนำกระแสไฟฟ้าได้ ซึ่งสารประกอบที่จะนำมาใช้ต้องเป็นสารประกอบไอออนิก (ionic compound) เท่านั้น

2.2.1 สารประกอบไอออนิก

สารประกอบไอออนิกเกิดจากกลุ่มของอะตอมซึ่งมีการให้และรับอิเล็กตรอน ทำให้กลุ่มอะตอมเหล่านั้นอยู่ในสภาพไอออนและเกาะกันด้วยพันธะไอออนิกซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแกร่ง การที่สารประกอบไอออนิกประกอบด้วยไอออน ทำให้น้ำนำไฟฟ้าได้ดี สารประกอบไอออนิกถึงแม้ว่าเมื่ออยู่ในสภาพของแข็งจะไม่นำกระแส (ยกเว้น MA_3I_2 ซึ่ง M ในที่นี้คือ K Rb และ NH₄ ที่เมื่อเป็นของแข็งก็นำไฟฟ้าได้) แต่เมื่ออยู่ในสภาพของเหลวหรือสารละลายจะนำไฟฟ้าได้ดีทั้งนี้เพราะไอออนมีอิสระในการเคลื่อนที่ภายในสนามไฟฟ้า สามารถเคลื่อนที่ไปยังขั้วบวกและลบได้ สำหรับของแข็งไอออนจะยึดเหนี่ยวกันไว้อย่างแข็งแกร่งยากแก่การ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุก 026964 ใช้

เคลื่อนที่ ข้อดีอีกอย่างของสารประกอบไอออนิกคือละลายได้ดีในตัวนำที่มีค่าไดอิเล็กทริกคอนสแตนท์ (dielectric constant) สูง คือตัวทำละลายที่เป็นโพลาร์ (polar solvent) เช่นน้ำ (H_2O)

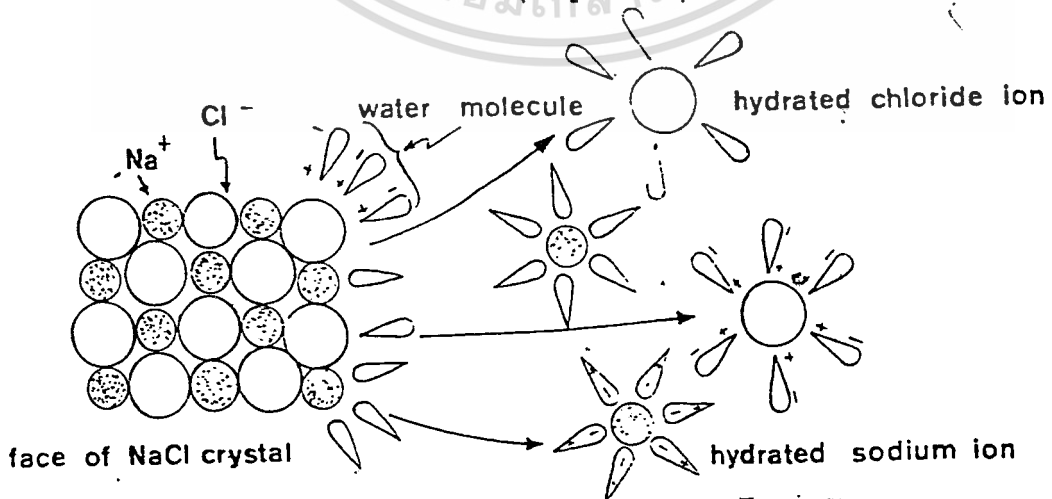
เมื่อสารประกอบไอออนิกละลายในน้ำปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นอย่างแรกคือไอออนที่เรียงตัวกันเป็นระเบียบในผลึกของของแข็งจะแตกออก ไอออนจะแยกออกจากกันและกระจายไม่เป็นระเบียบในสารละลาย น้ำ (H_2O) ซึ่งจัดเป็นสารละลายโพลาร์ จะรวมตัวได้แข็งแรงกับไอออนส่วนใหญ่ การรวมตัวแบบนี้เรียกว่าไอออนไดโพล (ion dipole interaction) โมเลกุลของน้ำและไอออนจะคูดึงกันและกันด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic force)

การละลายของสารไอออนิกในน้ำนั้น โมเลกุลของน้ำ (ซึ่งเป็นโพลาร์โมเลกุล) ด้านที่มีประจุลบจะคูดึงกับไอออนที่มีประจุบวกและด้านที่มีประจุบวกจะคูดึงกับไอออนที่มีประจุลบ โมเลกุลของน้ำซึ่งอยู่รอบๆไอออนจะไปบัง (shield) ไอออนที่มีประจุต่างกันนั้นเสียจึงเป็นการส่งเสริมให้ไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามแยกออกจากกันได้ง่าย หรือกล่าวว่าการละลายได้ดีขึ้น

2.2.2 การเลือกชนิดของสารไอออนิก

สารประกอบไอออนิกนั้นมีมากมายหลายชนิดในการเลือกใช้สารไอออนิกมาใช้เป็นตัวถูกละลายนั้นควรพิจารณาถึงองค์ประกอบหลายๆอย่างดังนี้

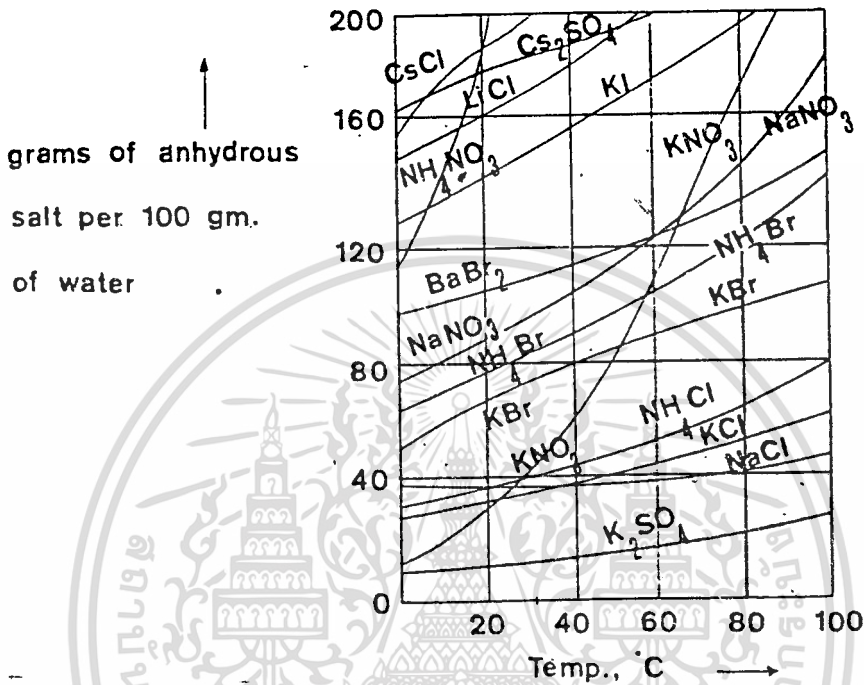
- หาง่าย ราคาถูก
- ละลายน้ำได้ดีที่อุณหภูมิห้อง
- การแตกตัวของไอออนมีผลต่ออุณหภูมิน้อยที่สุด



รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะการละลายน้ำของ โซเดียม คลอไรด์

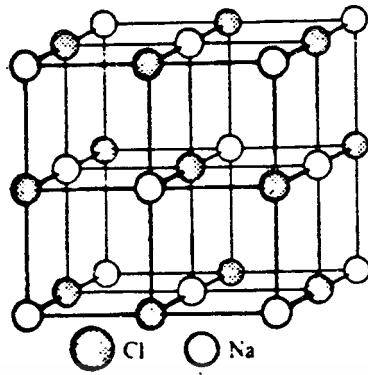
2.2.3 สารประกอบ โขเคียม คลอไรด์ (NaCl)

เมื่อนิยามสารประกอบหลายๆชนิดแล้วจะเห็นได้ว่าเกลือแกง(NaCl) เป็นสารประกอบไอออนิกที่น่าจะนำมาใช้มากที่สุดเนื่องจากเกลือแกงหาง่ายมีจำหน่ายตามท้องตลาดทั่วไป ทั้งยังมีราคาถูกและสามารถละลายน้ำได้ดีที่อุณหภูมิห้อง(25°C) รูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นถึงผลของอุณหภูมิที่มีต่อการละลายของสารไอออนิกในน้ำ



รูปที่ 2.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการละลายของสารประกอบไอออนิกแต่ละชนิด

Na^+ และ Cl^- ซึ่งเป็นไอออนบวกและไอออนลบ(positive and negative ions) ตามลำดับจะอยู่ด้วยกันเป็นผลึกของสารประกอบไอออนิกซึ่งจะมีโครงสร้างแบบโซเดียมคลอไรด์(sodium chloride structure)การจัดเรียงตัวของไอออนในผลึกแบบนี้ถือเอาไอออนใดไอออนหนึ่งเป็นหลัก เช่น Na^+ (แคตไอออน(cation))จะมี 8 ไอออนอยู่ตามมุมต่างๆทั้ง 8 ของลูกบาศก์มุมละ 1 ไอออน ส่วนอีก 6 ไอออน(ชนิดเดียวกับ 8 ไอออนแรก)จะอยู่ตรงกลางของแต่ละหน้า(force)ของลูกบาศก์ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.3

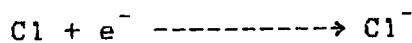
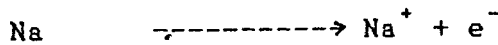


รูปที่ 2.3 โครงสร้างสารประกอบไอออนิกแบบโซเดียมคลอไรด์

ทั้งแคตไอออนและแอนไอออน (anion) จะมีโคออดิเนชันนัมเบอร์ (coordination number) เท่ากับ 6 กล่าวคือแคตไอออน 1 ไอออนจะถูกล้อมโดยแอนไอออน 6 ไอออน และในทำนองเดียวกัน แอนไอออน 1 ไอออนก็ถูกล้อมโดยแคตไอออน 6 ไอออน ดังนั้นอัตราส่วนของโคออดิเนชันนัมเบอร์ของแคตไอออน:แอนไอออน เท่ากับ 6:6 หรือ 1:1

Na^+ เป็นโลหะหมู่ IA มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเป็น 1 มีการจัดเรียงอิเล็กตรอน (electronic configuration) เป็น 2, 8, 1 (โปรตอน = 11, อิเล็กตรอน = 11) เมื่อให้อิเล็กตรอนไป การจัดเรียงตัวอิเล็กตรอนจะเป็น 2, 8 (p = 11, e = 10) ในขณะที่อิเล็กตรอนลดลงเป็น 10 นั้นโปรตอนยังเป็น 11 เท่าเดิมจึงเป็นโซเดียมไอออน Na^+

Cl^- เป็นอโลหะหมู่ VIIA มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเป็น 7 การจัดเรียงอิเล็กตรอนเป็น 2, 8, 7 (p = 17, e = 17) เมื่อรับอิเล็กตรอนมา 1 แล้วจะเพิ่มอิเล็กตรอนเป็น 18 ในขณะที่โปรตอนเป็น 17 เท่าเดิม จึงเป็นคลอไรด์ไอออน Cl^-



2.3 หลักการสร้าง WATER RHEOSTAT

ในการสร้าง water rheostat จะอาศัยหลักการที่ว่าพลังงานไฟฟ้าจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของพลังงานความร้อน โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าลงไปในของเหลวหรือน้ำยาอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งในที่นี้คือสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความต้านทานระหว่างขั้วอิเล็กโทรดจะสามารถปรับได้โดย การเลื่อนให้แผ่นเพลทเลื่อนขึ้นลงจากน้ำยาอิเล็กโทรไลต์เพื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้วยประการ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปลี่ยนแปลงค่าพื้นที่หน้าตัด จากสมการที่ 2.1

$$R = \rho \cdot l/A \text{ -----(2.1)}$$

- เมื่อ R คือ ความต้านทาน หน่วย โอห์ม
- ρ คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของสารละลาย หน่วย โอห์ม-ซม.
- l คือ ค่าความยาวของส่วนที่กระแสไหลผ่านระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง หน่วย ซม.
- A คือ ค่าพื้นที่หน้าตัดของแผ่นเพลทที่จุ่มลงไปในน้ำยาอิเล็กโทรไลต์ หน่วย ซม²

จากบทที่ 1 เราได้ทราบมาแล้วว่า รีโอสตาท คือความต้านทานที่สามารถปรับหรือเปลี่ยนค่าได้โดยไม่ต้องเปิดวงจรไฟฟ้า เพราะฉะนั้น water rheostat ก็หมายความว่าความต้านทานที่สามารถปรับหรือเปลี่ยนค่าได้ โดยการใช้น้ำหรือของเหลวเป็นตัวต้านทานไฟฟ้านั้นเอง เมื่อพิจารณาตามสมการที่ 2.1 จะเห็นว่าค่าความต้านทานจะแปรค่าตามความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ(ρ) และค่าระยะห่าง(l)ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง แต่มีค่าแปรผกผันกับค่าพื้นที่หน้าตัดของแผ่นตัวนำ(A)ของขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง เมื่อเราต้องการจะค่าความต้านทานก็สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนแปลง ค่าความต้านทานจำเพาะ ค่าระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด หรือค่าพื้นที่หน้าตัดที่จุ่มอยู่ในน้ำยาอิเล็กโทรไลต์ของแผ่นตัวนำอย่างใดอย่างหนึ่ง หรืออาจจะเปลี่ยนแปลงหลายๆอย่างพร้อมกันก็ได้แต่ก็เป็นเรื่องยุ่งยากในการควบคุมเมื่อมีการเปลี่ยนค่าตัวแปรมากกว่า 1 ตัว สำหรับในโครงการนี้ การปรับค่าความต้านทานได้เลือกใช้การเปลี่ยนแปลงค่าพื้นที่หน้าตัดของแผ่นตัวนำ ส่วนค่าความต้านทานจำเพาะ และค่าระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดพยายามรักษาให้มีค่าคงที่ โดยการทำให้แผ่นตัวนำชุดใดชุดหนึ่งสามารถปรับให้เคลื่อนที่ขึ้นลงจากน้ำยาอิเล็กโทรไลต์ได้ และอีกชุดหนึ่งให้จุ่มอยู่ในน้ำยาอิเล็กโทรไลต์ตลอดเวลาโดยไม่มีการเคลื่อนที่ ถ้าเราปรับให้แผ่นตัวนำชุดที่เคลื่อนที่ได้จุ่มลงในน้ำยาอิเล็กโทรไลต์จนสุดก็จะได้ค่าความต้านทานมีค่าต่ำสุด

(R_{min}) ในทำนองเดียวกันถ้าเราเลื่อนแผ่นตัวนำชุดที่เคลื่อนที่ได้ขึ้นมาจากน้ำยาอิเล็กโทรไลต์ให้สูงที่สุดก็จะได้ค่าความต้านทานมากที่สุด(R_{max}) เช่นเดียวกัน

2.4 หลักการระบายความร้อน

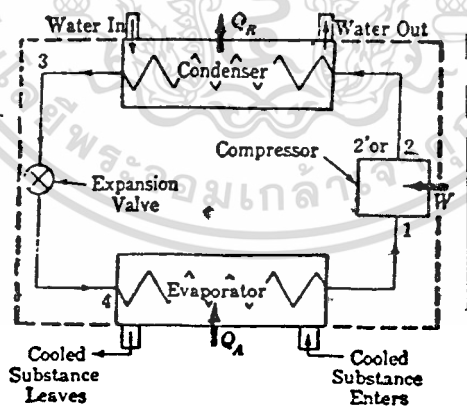
2.4.1 การระบายความร้อนออกจากน้ำยาอิเล็กโทรไลต์

เมื่อนำ water rheostat ไปใช้งานน้ำยาอิเล็กโทรไลต์จะถูกทำให้ไหลวน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีใช้งานเพื่อไปใช้งานน้ำยาอิเล็กโทรไลต์ในตู้ควบคุมค่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(circulate) อยู่ตลอดเวลาทั้งนี้เพื่อเป็นการระบายความร้อน โดยจะมีมอเตอร์ปั๊มเป็นตัวทำให้น้ำยาอิเล็กทรอนิกส์ไหลวน หลักการก็คือมอเตอร์ปั๊มจะปัมน้ำยาอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกทำให้เย็นตัวลงจากคอยล์เย็น (evaporator) ของเครื่องทำความเย็นขึ้นไปยังกล่องบรรจุ เพื่อให้ น้ำยาอิเล็กทรอนิกส์ที่เย็นตัวแล้วนี้เข้าไปแทนที่น้ำยาอิเล็กทรอนิกส์ในกล่องบรรจุ ซึ่งได้รับความร้อนจากการใช้งานของ water rheostat น้ำยาอิเล็กทรอนิกส์ที่ร้อนนี้จะล้นออกมาทางช่องระบายของกล่องบรรจุลงมากในคอยล์เย็นของเครื่องทำความเย็นแทนที่น้ำยาอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกปั๊มขึ้นไป น้ำยาที่ร้อนนี้จะถูกระบายความร้อนให้กับคอยล์เย็นแล้วถูกปั๊มขึ้นไปในกล่องบรรจุอีกครั้งหนึ่ง การทำงานก็จะเป็นวัฏจักรเช่นนี้เรื่อยไปจนกว่าจะหยุดใช้งาน

2.4.2 หลักการทำงานของเครื่องทำความเย็น

ระบบทำความเย็นที่จะกล่าวถึงในที่นี้คือ ระบบทำความเย็นแบบอัดแก๊ส หลักการทำงานของระบบทำความเย็นแบบอัดแก๊สคือ ทำให้น้ำยาซึ่งจะเรียกว่าสารตัวกลางสำหรับถ่ายเทความร้อน กลายเป็นไอ โดยการดูดซึมความร้อนเข้าสู่ตัวเองขณะที่มีอุณหภูมิและความดันต่ำ หลังจากนั้นจะกลั่นตัวกลายเป็นของเหลวอีกครั้งขณะที่มีความดันและอุณหภูมิสูง โดยการคายความร้อนออกจากตัวเอง วัฏจักรทางเทอร์โมไดนามิกส์ของระบบทำความเย็นแบบอัดแก๊สเป็นวัฏจักรทวนเข็มนาฬิกา ดังแสดงในรูป 2.4



รูป 2.4 วัฏจักรทางเทอร์โมไดนามิกส์ของระบบทำความเย็นแบบอัดแก๊ส

การทำงานของวัฏจักรของระบบอัดแก๊สชนิดมาตรฐานจะเป็นไปดังนี้ น้ำยาออกจากคอนเดนเซอร์ (condenser) ในลักษณะเป็นของเหลวอิ่มตัว (ของเหลวที่มีอุณหภูมิเท่ากับจุดเดือด) ที่จุด 3 ด้วยความดันสูง หลังจากนั้นเคลื่อนที่ผ่านลิ้นลดความดันตามช่วงไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3-4 โดยขบวนการทรอททลิ่ง (trotting process) ขณะที่น้ำยาผ่านลิ้นลดความดันนี้ ความดันของน้ำยาจะลดลงและเกิดการขยายตัวขึ้นมีผลทำให้อุณหภูมิของตัวมันลดลงด้วย น้ำยาหลังผ่านลิ้นลดความดันจะมีสภาพเป็นละอองของเหลว

เมื่อละอองน้ำยาเคลื่อนที่ต่อผ่านไปจะผ่านเข้าไปยังอีวาโปเรเตอร์ (evaporator) เพื่อรับความร้อนจากสิ่งของที่ต้องการลดอุณหภูมิ (ในที่นี้คือน้ำยาอโรเลคโทรไลต์) ทำให้อุณหภูมิของน้ำยาเพิ่มขึ้นและกลายเป็นไอ ขบวนการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในอีวาโปเรเตอร์นี้เป็น ขบวนการที่มีความดันคงที่ (isobaric process) ตามช่วง 4-1 ตามหลักการแล้ว การถ่ายเทความร้อนในอีวาโปเรเตอร์จะสิ้นสุดลงเมื่อน้ำยากลายเป็นไอหมดพอดี

ไอของน้ำยาภายหลังออกจากอีวาโปเรเตอร์แล้ว จะถูกดูดเข้าไปในคอมเพรสเซอร์ (compressor) และอัดให้มีความดันสูงขึ้น ตามช่วง 1-2 ด้วยขบวนการไอเซนโทรปิก (isentropic process)

น้ำยาในช่วงที่อยู่ในคอมเพรสเซอร์จะมีสภาพเป็นไอดอง (superheat vapor)

ลำดับต่อไปน้ำยามีสภาพเป็นไอ ภายหลังออกจากคอมเพรสเซอร์แล้วจะผ่านเข้าไปยังคอนเดนเซอร์ เพื่อถ่ายเทความร้อนออกจากตัวเอง คอนเดนเซอร์จะมีการหล่อเย็นด้วยอากาศหรือน้ำ เพื่อรับความร้อนออกจากน้ำยา เมื่อไอน้ำถ่ายเทความร้อนออกจะกลายเป็นของเหลวอีกครั้งหนึ่ง ขบวนการที่เกิดการถ่ายเทความร้อนภายในคอนเดนเซอร์ เป็นขบวนการที่มีความดันคงที่ และเกิดขึ้นในช่วง 2-3 ตามหลักการแล้วการถ่ายเทความร้อนภายในคอนเดนเซอร์จะสิ้นสุดลงเมื่อ ไอน้ำยากลายเป็นของเหลวที่มีอุณหภูมิเท่ากับจุดเดือดพอดี

บทที่ 3

การคำนวณและการสร้าง

3.1 การคำนวณและการสร้าง WATER RHEOSTAT

3.1.1 พิกัดของ WATER RHEOSTAT

พิกัด (rated) ของ water rheostat ที่จัดทำในโครงการนี้ มีขนาดทนกำลังไฟฟ้าได้ 3000 วัตต์ และมีข้อมูลรายละเอียดดังต่อไปนี้

ทนกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด	:	3000	วัตต์
ที่แรงดันไฟฟ้า	:	220	โวลต์
กระแสไหลผ่านสูงสุด	:	14	แอมแปร์
ขนาดกล่องบรรจุ	:	33(w)x70(l)x22(h)	ซม.
ค่าความต้านทาน	:	16 ถึง มากกว่า 700	โอห์ม

3.1.2 วัสดุที่ใช้ทำ WATER RHEOSTAT

ในโครงสร้างของ water rheostat ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ 3 ส่วนใหญ่ๆ โดยแต่ละส่วนก็ทำมาจากวัสดุซึ่งต่างชนิดกัน ในการออกแบบโครงการนี้ได้ใช้วัสดุดังต่อไปนี้

กล่องบรรจุน้ำยา	:	ใช้ไม้เนื้อแข็งตีกรอบอัดด้วยชั้นกันน้ำรั่ว
แผ่นอิเล็กทรอนิกส์	:	ใช้แผ่นสแตนเลสขนาด 1.5 มม.
ขั้วอิเล็กทรอนิกส์	:	ทองเหลืองหนา 3.2 มม.
น้ำยาอิเล็กทรอนิกส์	:	สารละลายน้ำโซเดียมคลอไรด์

3.2 การคำนวณเกี่ยวกับน้ำยาอิเล็กทรอนิกส์

3.2.1 การหาค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของน้ำยาอิเล็กทรอนิกส์

จากการกำหนดให้ขนาดของ water rheostat ที่จะทำในโครงการนี้ สามารถทนกำลังไฟฟ้าได้ 3 กิโลวัตต์ ที่แรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ ดังนั้นจะได้ค่ากระแสที่ไหลผ่านเท่ากับ $3000/220$ ประมาณ 14 แอมแปร์ เมื่อกำหนดให้ปริมาตรของกล่องบรรจุน้ำยาเท่ากับ 50 ลิตร (น้ำหนักประมาณ 50 กิโลกรัม) ซึ่งในการออกแบบได้กำหนดขนาดของกล่องบรรจุดังนี้

กว้าง = 33 ซม.

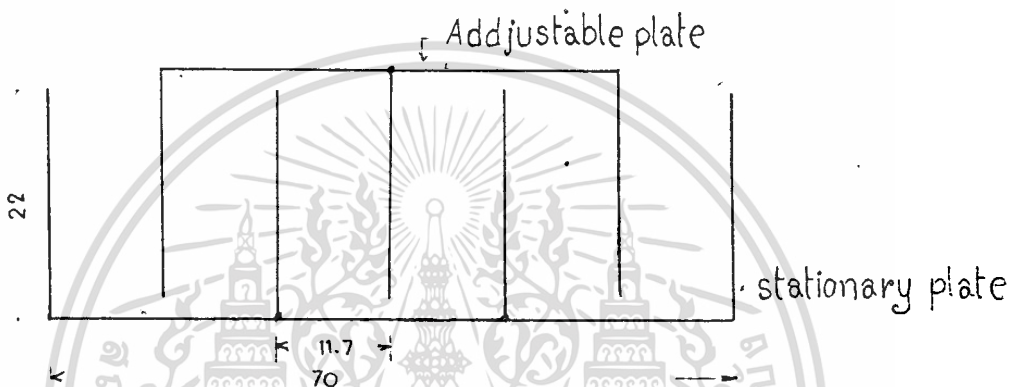
ยาว = 70 ซม.

สูง = 22 ซม.

เมื่อดูตามขนาดของกล่องบรรจุแล้วจะได้ขนาดพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของแผ่นเพลท

$$A = 33 \times 22 \text{ ตร.ซม.}$$

ในการจัดวางขั้วอิเล็กโทรดแต่ละขั้วจะมีแผ่นเพลท 3 แผ่น (6 active area/ขั้ว) ซึ่งจัดวางระยะความห่างของแผ่นเพลทแต่ละแผ่นห่างเท่ากัน เพราะฉะนั้นความห่างของแผ่นเพลท เท่ากับ $70/6$ เท่ากับ 11.5 เซ็นติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงการจัดวางแผ่นเพลทของแต่ละขั้วอิเล็กโทรด

ความต้านทานต่ำสุด (R_{min}) ของ water rheostat จะมีค่าเท่ากับ

$$R_{min} = \frac{E^2}{p} \quad (3.1)$$

$$= \frac{(220)^2}{3000}$$

$$= 16 \quad \Omega$$

จากความสัมพันธ์ $R = \rho l/A$

เมื่อ $R_{min} = 16 \quad \Omega$

$l = 11.7 \quad \text{ซม.}$

$A = (22 \times 33 \times 6)$

จะได้ค่า $\rho = \frac{R_{min} \times A}{l}$

$= \frac{16 (33 \times 22 \times 6)}{11.7}$

$= 5975 \quad \Omega\text{-ซม.}$

หรือคิดประมาณเท่ากับ 6000 โอห์ม-เซ็นติเมตร

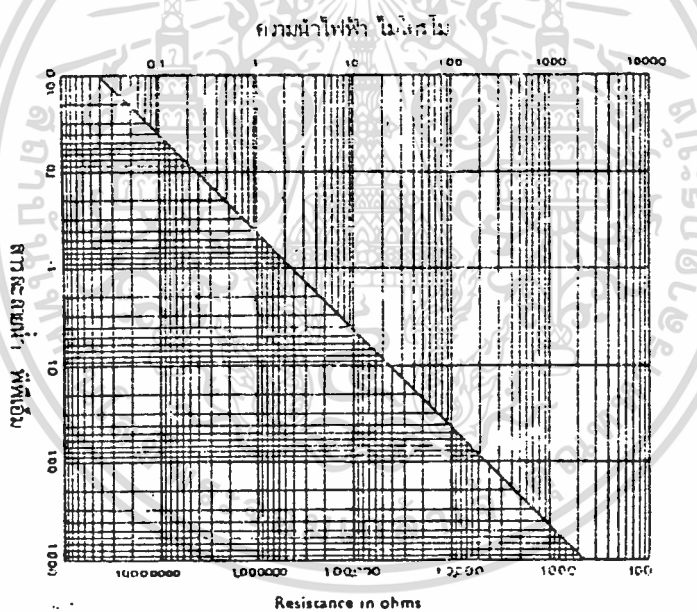
หรือเราจะได้อ่านค่าความนำไฟฟ้าจำเพาะ (specific conductivity) ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ()

$$= 1/6000$$

$$= 157 \text{ ไมโครโมห์-เซนติเมตร}$$

3.2.2 การคำนวณหาผลของสารละลาย

สารละลายที่ใช้ทำน้ำยาอิลคโตรไลต์ในที่นี้ก็คือสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ซึ่งมวลของ NaCl ที่จะใช้ละลายลงในน้ำเพื่อให้ได้อ่านค่าความต้านทานจำเพาะเท่ากับที่เราต้องการคือ 6000 โอห์ม-เซนติเมตร สามารถประมาณได้จากกราฟแปลงค่าความนำไฟฟ้าเป็นค่าของสารละลายน้ำดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 กราฟแปลงค่าความนำไฟฟ้าเป็นค่าสารละลายน้ำ

จากรูปที่ 3.2 ถ้าต้องการความต้านทานจำเพาะเท่ากับ 6000 โอห์ม-เซนติเมตร จะได้อ่านค่าของสารละลายน้ำประมาณ 80 ppm. (หรือ 80 มิลลิกรัม/ลิตร) ดังนั้นถ้าน้ำในกล่องบรรจุมีมวล 50 กิโลกรัม จะต้องผสมโซเดียมคลอไรด์ 4 กรัม และจากการทดลองผสมโซเดียมคลอไรด์ขนาด ๕๐ ppm.

จะได้ผลการทดลองดังตารางที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1

แสดงค่าความต้านทานจำเพาะของสารละลายน้ำ NaCl ขนาด 80 ppm.

อุณหภูมิ (°C)	กระแส (A)	แรงดัน (V)	ความต้านทานจำเพาะ (Ω -cm.)
29	0.25	250	1000
40	0.27	250	926
45	0.28	250	893
50	0.31	250	806
55	0.33	250	757
60	0.37	250	676
65	0.39	250	641
70	0.41	250	610
75	0.43	250	581
80	0.47	250	532
85	0.49	250	510
90	0.52	250	481
95	0.57	250	439
100	0.54	250	463

จากตารางที่ 3.1 จะเห็นว่าค่าความต้านทานจำเพาะของน้ำยาอิเล็กโทรไลต์ที่มีค่าต่ำเกินไปทั้งนี้ เป็นเพราะว่าน้ำที่ใช้ในการทดลองไม่บริสุทธิ์มีส่วนผสมของสารละลายน้ำอย่างอื่นปนอยู่แล้ว ดังนั้นจึงได้ทดลองหาอัตราส่วนที่จะทำให้ได้ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะใกล้เคียงกับที่ได้คำนวณไว้ คือ 6000 โอห์ม-เซนติเมตร ซึ่งผลจากการทดลองได้ค่าที่ใกล้เคียงมากที่สุดคือใช้อัตราส่วนของเกลือโซเดียมคลอไรด์เท่ากับ 43 มิลลิกรัมต่อน้ำ 1 ลิตรดังแสดงผลการทดลองไว้ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2

แสดงค่าความต้านทานจำเพาะของสารละลายน้ำ NaCl ขนาด 43 ppm.

อุณหภูมิ (°C)	กระแส (A)	แรงดัน (V)	ความต้านทานจำเพาะ (Ω -cm.)
27	0.28	220	7071
30	0.285	220	6947
35	0.29	220	6828
40	0.307	220	6450
45	0.31	220	6387
50	0.326	220	6074
55	0.33	220	6000
60	0.345	220	5740
65	0.354	220	5590
70	0.36	220	5500
75	0.37	220	5351
80	0.378	220	5280
85	0.42	220	4714
90	0.43	220	4607

หมายเหตุ การทดลองในตารางที่ 3.1 ใช้แผ่นสแตนเลสขนาด 1×1 ซม.² วางห่างกัน 1 ซม. จุ่มอยู่ในสารละลาย ส่วนในตารางที่ 3.2 ใช้แผ่นสแตนเลสขนาด 3×3 ซม.² วางห่างกัน 1 ซม. ดังนั้นค่าความต้านทานจำเพาะจะต้องคูณด้วย 3 จึงจะถูกต้อง

3.2.3 การคำนวณเกี่ยวกับความร้อนที่จะเกิดขึ้นใน WATER RHEOSTAT

กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน water reostat จะทำให้เกิดพลังงานสูญเสีย ซึ่งจะเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อนทั้งหมด ดังนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้อุณหภูมิของน้ำยาอิเล็กโทรไลต์สูงขึ้น และจากผลการทดลองในตารางที่ 3.1 และ 3.2 เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะเปลี่ยนแปลงสูงขึ้นตามอุณหภูมิ ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นเลย ดังนั้นเราจะต้องทำการรักษาอุณหภูมิให้มีค่าคงที่โดยการระบายความร้อนถ้าไม่ทำการนี้โดยทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกไปเพื่อที่จะรักษาความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (ρ) ให้มีค่าคงที่

3.2.4 การหาค่าความจุความร้อนจำเพาะ

เราสามารถหาค่าความจุความร้อนจำเพาะ (C) ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ขนาด 43 ppm. ที่นำมาใช้เป็นน้ำยาอิลคโมโรไลท์ได้โดยการทดลอง โดยใช้กระแสไฟฟ้า และแคลอรีมิเตอร์ โดยทำการต่อวงจรดังรูปที่ 3.3 ในการป้อนพลังงานความร้อนให้กับ แคลอรีมิเตอร์จะอาศัยการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน โดยการใช้ ไล่ลวดความร้อนไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันต่ำ และทำการวัดกำลังไฟฟ้าด้วยวิธี โวลท์-แอมป์มิเตอร์ ความร้อนจากขดลวดทำความร้อนจะทำให้อุณหภูมิของสารละลายสูงขึ้น โดยทั่วไปนิยมให้สูงขึ้นประมาณ 10 C ในเวลาไม่เกิน 5 นาที จากการทดลองได้ข้อมูลดังต่อไปนี้

<u>การวัด</u>	มวลของแคลอรีมิเตอร์และเครื่องคน	$m_1 = 90.12$	g.
	มวลของสารละลาย	$m_2 = 119.88$	g.
	อุณหภูมิเดิมของสารละลาย	$\theta_1 = 28.4$	C
	อุณหภูมิท้ายของสารละลาย	$\theta_2 = 39.8$	C
	เพราะฉะนั้น อุณหภูมิแตกต่าง	$\theta = 11.4$	K
	กำลังไฟฟ้า	$VI = 21.9875$	Js^{-1}
	เวลา	$t = 300$	s
	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของทองแดง	$C_1 = 386$	$\text{Jk}^{-1}\text{K}^{-1}$

การคำนวณ พลังงานที่ได้จากเครื่องทำความร้อน $Q = VI t$ ----- (3.2)

$$= 21.9875 \times 300 \text{ J}$$

ให้ความจุความร้อนจำเพาะของสารละลาย = C

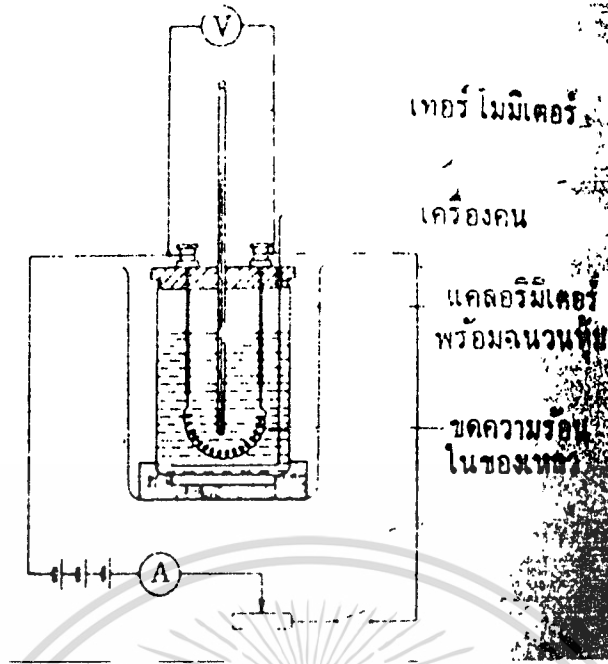
สารละลายได้รับความร้อน $(Q) = m_2 C \theta$ ----- (3.3)

แคลอรีมิเตอร์ได้รับความร้อน $(Q) = m_1 C_1 \theta$

$$m_1 C_1 \theta + m_2 C \theta = VI t$$

$$C = (VI t - m_1 C_1 \theta) / m_2 \theta$$

$$= 4536.47 \text{ Jk}^{-1}\text{K}^{-1}$$



รูปที่ 3.3 แสดงการหาค่าความจุความร้อนจำเพาะของสารละลาย NaCl

3.3 การคำนวณเกี่ยวกับความร้อน

3.3.1 การคำนวณหาอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นใน water rheostat

$$\begin{aligned}
 \text{พลังงานความร้อนสูงสุดทั้งหมด (Q)} &= Pt \text{ ----- (3.2)} \\
 &= 3000 \text{ Watt-hr} \\
 &= 3000 \times 3600 \text{ Joule}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ถ้ำมวลของสารละลาย (m)} &= 50 \text{ k} \\
 \text{ความจุความร้อนจำเพาะ (C)} &= 4536.7 \text{ Jk}^{-1}\text{K}^{-1}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{จาก } Q &= mCe \\
 e &= Q/mC \\
 &= (3000 \times 3600) / 50 \times 4536.7 \\
 &= 47.6 \text{ }^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

นั่นหมายความว่าในเวลา 1 ชั่วโมง อุณหภูมิของสารละลายจะเพิ่มขึ้น 47.61 °C

เพราะฉะนั้นอุณหภูมิเพิ่มขึ้น = 47.61/60

= 0.8 °C/นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 0.8 \text{ }^{\circ}\text{C/นาท}$$

จากการทดลองและการคำนวณจะเห็นว่าถ้าต้องการรักษาอุณหภูมิของ water rheostat ให้มีค่าคงที่ จำเป็นจะต้องระบายความร้อนออกจากน้ำยาอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งในที่นี้คือสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ในโครงการนี้ได้เลือกวิธีการระบายความร้อนด้วยเครื่องทำความเย็น

3.3.2 การคำนวณหาขนาดเครื่องทำความเย็น

ในระบบทำความเย็นและปรับอากาศนิยมใช้หน่วยของพลังงานความร้อนในระบบอังกฤษคือ Btu. (British thermal unit) พลังงานความร้อน 1 Btu. หมายความว่า "ความร้อนที่สามารถทำให้น้ำหนัก 1 ปอนด์ มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศาฟาเรนไฮต์ โดย

$$1 \text{ Btu.} = 1055.1 \text{ Joule}$$

พลังงานความร้อนจะแปรค่าตามกระแสยกกำลังสอง (I^2R) เมื่อพิกัดกำลังไฟฟ้าของ water rheostat เท่ากับ 3000 วัตต์ หมายความว่าพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นสูงสุด (Q_{max}) คือ

$$\begin{aligned} Q_{max} &= P_{max} t \quad \text{watt-hr.} \\ \text{เมื่อ } P_{max} &= \text{กำลังไฟฟ้าที่พิกัดของ water rheostat} \\ t &= \text{เวลา} \\ Q_{max} &= 3000 \times 3600 \quad \text{J} \\ &= 10.8 \times 10^6 \quad \text{J} \end{aligned}$$

ในโครงการนี้ใช้เครื่องทำความเย็นเป็นตัวระบายความร้อน เราต้องใช้เครื่องทำความเย็นไม่ต่ำกว่า $= 10.8 \times 10^6 / 1055.1$

$$= 10235.9 \text{ Btu./hr.}$$

3.3.3 พิกัดของเครื่องทำความเย็น

คอมเพรสเซอร์ : แรงดัน 220 โวลต์
กระแส 6.2 แอมแปร์
เฟส 1
เอ๊าท์พุท 3/4 แรงม้า

ความสามารถในการทำความเย็น = 6200 Btu/hr.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

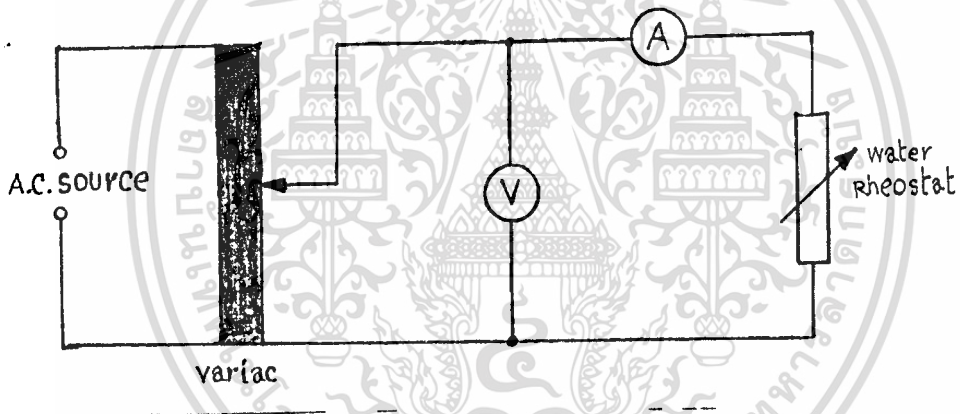
บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

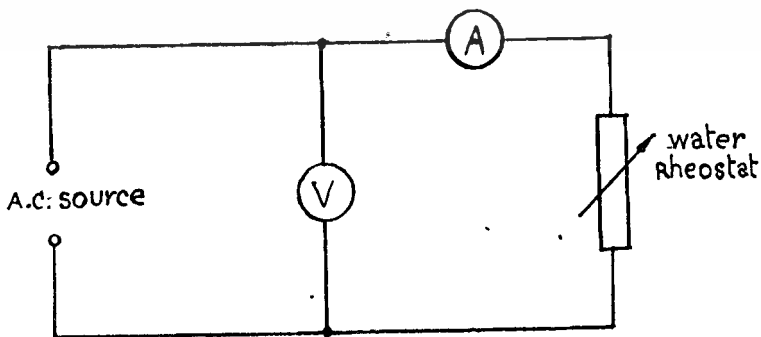
4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง

1. หม้อแปลงแบบปรับค่าได้ (variac) 220/0-260 V., 5 Amp. 2 ตัว
2. ดิจิตอล มิลลิเมตร DM. 6335 2 ตัว
3. water rheostat
4. สายต่อวงจร
5. เทอร์โมมิเตอร์

4.2 วงจรการทดลอง



รูปที่ 4.1 วงจรการทดลอง



รูปที่ 4.2 วงจรการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การทดลองปรับ เปลี่ยนค่าความต้านทานของ water rheostat

4.3.1 วัตถุประสงค์ในการทดลอง

- เพื่อหาค่าความต้านทานต่ำสุดและสูงสุดของ water rheostat
- เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความสูงในการปรับแผ่นตัวนำกับความต้านทาน

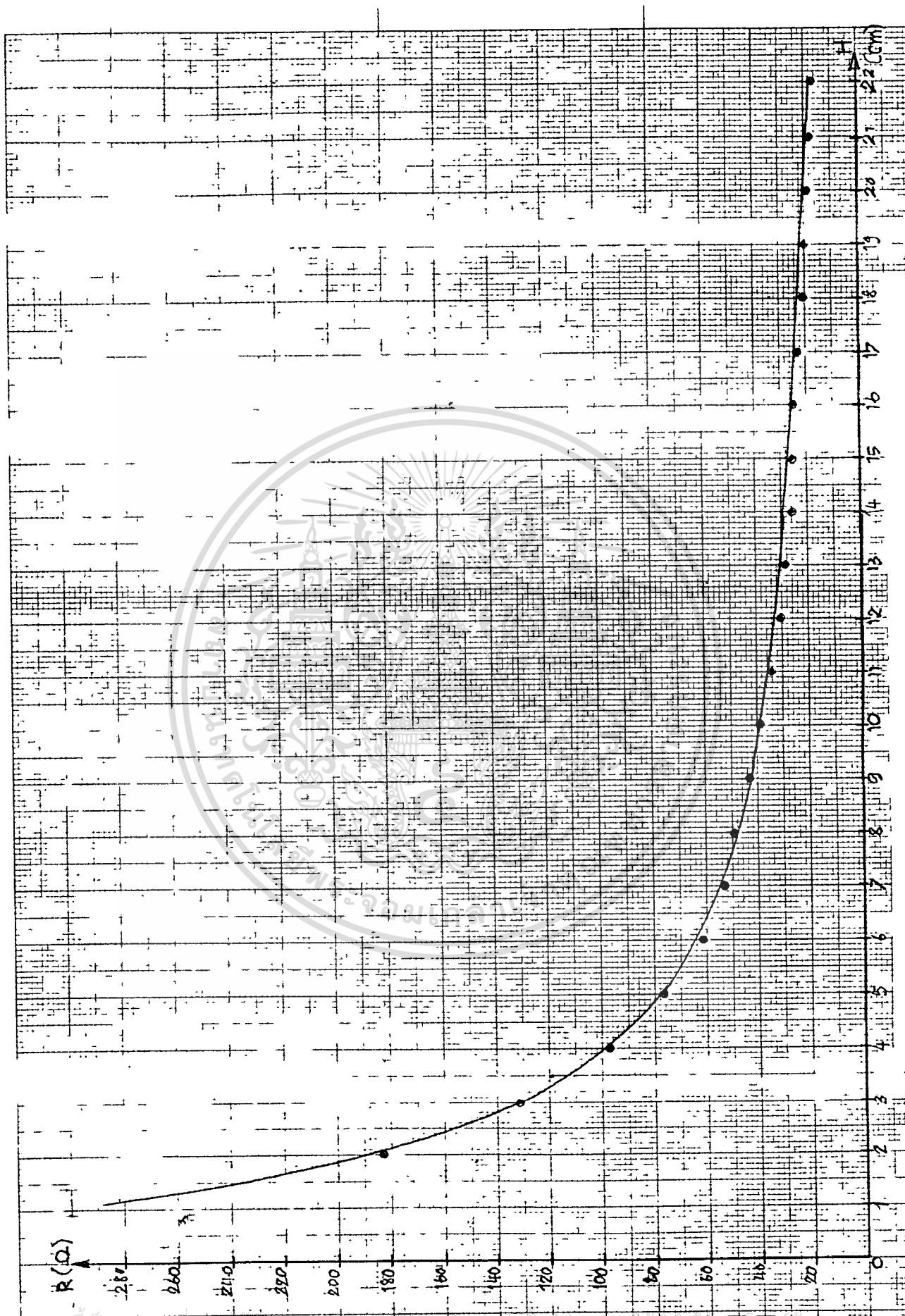
4.3.2 ลำดับขั้นในการทดลอง

1. ต่อบริเวณตามรูปที่ 4.1
2. ปรับ วาริแอก ไว้ที่ตำแหน่ง 0 โวลท์
3. จ่ายไฟฟ้าให้กับวงจรระบบทำความเย็นและปั้มน้ำ
4. ปรับตัวหมุนของตัว water rheostat ให้แผ่นตัวนำชุดที่เคลื่อนที่ได้ยู่พ้นจาก น้ำยาอิเล็กโทรไลต์
5. ปรับตัวหมุนให้แผ่นตัวนำชุดที่เคลื่อนที่ได้จุ่มลงไปใ้ในน้ำยาอิเล็กโทรไลต์ตามตาราง ที่ 4.1
6. ปรับวาริแอกเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้น อ่านค่ากระแสและแรงดัน บันทึกค่าลงใน ตารางที่ 4.1
7. กลับไปทำตามข้อ 5 และ 6 จนทำการทดลองครบทุกค่าที่ให้ไว้ในตาราง
8. คำนวณค่าความต้านทานใส่ในตารางที่ 4.1
9. เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับความลึกของแผ่นตัวนำ ที่จุ่มอยู่ในน้ำยาอิเล็กโทรไลต์

ตารางที่ 4.1
ผลการทดลองปรับค่าความต้านทาน

ความสูง (cm)	กระแส (A)	แรงดัน (V)	ความต้านทาน (Ω)
1	0.5	200.5	401
2	1	183.7	183.7
3	1	131.4	131.4
4	1	97.7	97.7
5	1	76.9	76.9
6	1	61.2	61.2
7	1	53.1	53.1
8	1	49.6	49.6
9	1	43.2	43.2
10	1	38.9	38.9
11	1	34.5	34.5
12	1	30.1	30.1
13	1	28.8	28.8
14	2	53.4	26.7
15	2	32.08	26.04
16	2	48.4	24.72
17	2	46.6	23.3
18	2	41.8	20.9
19	2	40.4	20.2
20	2	38.6	19.3
21	2	36.2	18.1
22	2	34.6	17.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่วนวิชาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกไปเผยแพร่ และต้องแจ้งไปยังเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณีใดๆ

4.3.3 ผลการทดลอง

เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานที่ปรับได้ จะแปรผกผันกับค่าของความลึกของแผ่นตัวนำ คือเมื่อตัวนำจุ่มอยู่ในน้ำยาอิเล็กโทรไลต์น้อยค่าของความต้านทานจะสูง และค่าของความต้านทานจะค่อยๆลดลงเมื่อแผ่นตัวนำจุ่มอยู่ในน้ำยาอิเล็กโทรไลต์มากขึ้น จนมีค่าน้อยที่สุด เมื่อแผ่นตัวนำอยู่ในจุ่มอยู่ในน้ำยาอิเล็กโทรไลต์ทั้งหมด และจากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของ water rheostatไม่เป็นเชิงเส้น

4.4 การทดลองหาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

4.4.1 วัตถุประสงค์ในการทดลอง

- เพื่อหาความสามารถในการรักษาอุณหภูมิของเครื่องทำความเย็น
- เพื่อทดสอบการจ่ายโหลด (load) ของ water rheostat
- เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแส, ความต้านทาน และอุณหภูมิต่อเวลา

4.4.2 ลำดับขั้นตอนในการทดลอง

1. ต่อวงจรตามรูปที่ 4.2
2. จ่ายไฟฟ้าให้กับวงจรระบบเครื่องทำความเย็นและมอเตอร์ปั๊ม
3. ปรับตัวหมุนเลื่อนแผ่นตัวนำขึ้นให้พ้นจากน้ำยาอิเล็กโทรไลต์
4. ป้อนไฟ 220 โวลท์ให้กับวงจรที่ 4.2
5. ค่อย ๆ ปรับแผ่นตัวนำให้เลื่อนลงมาจนกระทั่งอ่านค่ากำลังไฟฟ้า ($P = VI$) ประมาณ 1500 วัตต์
6. สังเกตการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและกระแส แล้วบันทึกค่าลงในตารางที่ 4.2
7. คำนวณค่าความต้านทาน ($R = E/I$) ทุกค่าลงในตาราง
8. ทำการทดลองตามลำดับขั้นที่ 1- 6 อีกครั้งหนึ่งแต่เปลี่ยนให้อ่านกำลังไฟฟ้าได้ประมาณเท่ากับ 3000 วัตต์บันทึกค่าลงในตารางที่ 4.3
9. ทำการทดลองตามลำดับขั้น 1- 6 อีกครั้ง แต่ไม่ต้องจ่ายไฟฟ้าให้กับวงจรทำความเย็นและมอเตอร์ปั๊ม (เลิกจ่ายไฟ) โดยให้อ่านค่ากำลังไฟฟ้าได้ประมาณ 1500 วัตต์ บันทึกค่าลงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.2

แสดงการเปลี่ยนแปลงกระแส, ความต้านทาน และอุณหภูมิเมื่อมีการระบายความร้อน
เมื่อใช้งาน water rheostat ที่ครึ่งพิกัดของการทำงาน

เวลา (ม)	กระแส (A)	แรงดัน (V)	กำลังไฟฟ้า (W)	ความต้านทาน (Ω)	อุณหภูมิ (°C)
0	6.57	228.2	1500	34.73	28.4
5	6.57	228.2	1500	34.73	28.1
10	6.56	228.2	1497	34.78	27.9
15	6.55	228.2	1497	34.84	27.5
20	6.54	228.2	1492	35.38	26.7
25	6.52	228.2	1487	35	26.6
30	6.5	228.2	1483	35.11	26.7
35	6.5	228.2	1483	35.11	26.7
40	6.48	228.2	1478	35.22	26.1
45	6.48	228.2	1478	35.22	25.9
50	6.45	228.2	1477	35.34	25.6
55	6.48	228.2	1476	35.27	25.4
60	6.45	228.2	1472	35.34	25.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3

แสดงการเปลี่ยนแปลงกระแส, ความต้านทาน และอุณหภูมิเมื่อมีการระบายความร้อน
เมื่อใช้งาน water rheostat ที่พิกัดของการทำงาน

เวลา (m)	กระแส (A)	แรงดัน (V)	กำลังไฟฟ้า (W)	ความต้านทาน (Ω)	อุณหภูมิ ($^{\circ}$ C)
0	12.98	231.1	2990	17.81	29.2
5	13.01	230.6	3000	17.72	30.4
10	13.1	230.7	3022	17.61	31.8
15	13.25	230.9	3059	17.42	33.6
20	13.44	229.2	3080	17.05	35.1
25	13.7	229.6	3145	16.79	37.2
30	13.9	230.4	3202	16.57	38.8
35	14.15	230.6	3263	16.27	40.1
40	14.5	230.6	3344	15.9	41.5
45	14.75	230.8	3404	15.64	43.7
50	14.95	230.2	3441	15.39	44.4
55	15.15	228.3	3458	15.06	46.4
60	15.44	228.6	3530	14.80	47.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4

แสดงการเปลี่ยนแปลงกระแส, ความต้านทาน และอุณหภูมิเมื่อไม่มีการระบายความร้อน
เมื่อใช้งาน water rheostat ที่คร้งนิกัถของการทำงาน

เวลา (m)	กระแส (A)	แรงดัน (V)	กำลังไฟฟ้า (W)	ความต้านทาน (Ω)	อุณหภูมิ ($^{\circ}$ C)
0	6.6	228.4	1057	34.61	29.4
5	7.2	228.4	1644	31.72	30.1
10	7.9	228.4	1804	28.91	32.6
15	8.5	228.4	1941	26.87	34.3
20	9.3	228.4	2124	24.56	36.3
25	9.95	228.4	2273	22.95	38.7
30	10.5	228.3	2398	21.75	41.0
35	11.1	228.4	2535	20.57	43.2
40	12.1	228.4	2764	18.87	45.6
45	12.8	228.4	2924	17.84	47.2
50	13.25	228.4	3026	17.24	49.3
55	13.9	228.4	3175	16.43	52.2
60	14.6	228.4	3334	15.64	54.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3 ผลการทดลอง

จากการทดลองหาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของ water rheostat ขณะใช้งาน จากตารางที่ 4.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงของกระแส, ความต้านทานและอุณหภูมิเมื่อมีการระบายความร้อนให้กับ water rheostat ทำงานที่มีกระแสเท่ากับครึ่งหนึ่งของพิกัด คือมีกำลังสูญเสียเกิดขึ้นเท่ากับ 1500 วัตต์ จากเวลาที่ทำการทดลอง 1 ชั่วโมง water rheostat สามารถทำงานได้ตามปกติ โดยมีการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานน้อยมากทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่าสามารถควบคุมอุณหภูมิได้นั่นเอง

จากตารางที่ 4.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงกระแส ความต้านทานและอุณหภูมิขณะที่ water rheostat ทำงานที่พิกัดพอดี จะเห็นว่าค่าของความต้านทานและกระแสไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงไปบ้างทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่าตัวระบายความร้อนซึ่งในที่นี้คือเครื่องทำความเย็นมีขนาดเล็กจึงไม่เพียงพอต่อการระบายความร้อน แต่อย่างไรก็ตาม จากเวลาที่ใช้ในการทดลอง 1 ชั่วโมงก็ยังคงกล่าวได้ว่า water rheostat ยังสามารถทำงานที่เต็มพิกัดได้

จากตารางที่ 4.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงกระแส ความต้านทานและอุณหภูมิ ขณะที่ water rheostat ทำงานที่ ครึ่งหนึ่งของพิกัดโดยไม่มีการระบายความร้อน จะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลงอย่างมากมาย ทั้งนี้เพราะผลเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเมื่อความร้อนไม่ได้ถูกระบายออกมาจากน้ำยาอิลเลคโตรไลต์ ก็ทำให้เกิดความร้อนสะสมขึ้นเรื่อยๆ ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นจึงเป็นผลให้ความต้านทานเปลี่ยนแปลงอย่างมากมาย จากตารางจะเห็นได้ว่าแม้จะทำงานที่เพียงครึ่งหนึ่งของพิกัด แต่เมื่อไม่มีการระบายความร้อนจะทำให้ค่ากระแสที่ไหลเปลี่ยนแปลงมากกว่าสองเท่าในระยะเวลาเพียง 1 ชั่วโมง จึงสามารถกล่าวได้ว่า ถ้าไม่มีการระบายความร้อนแล้ว water rheostat ก็ยังไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้งาน

เมื่อพิจารณาจากกราฟที่ 4.4 ซึ่งเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส ความต้านทานกับอุณหภูมิของการทดลองที่ 4.4 ทั้งหมดจะเห็นว่าเมื่อมีการระบายความร้อนค่าของความต้านทานจะเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเท่านั้น เป็นผลให้กระแสคงที่ด้วย แต่เมื่อไม่มีการระบายความร้อนค่าของความต้านทานและกระแสเปลี่ยนแปลงอย่างมากมาย

บทที่ 5

บทวิจารณ์ และ สรุป

5.1 วิจารณ์

WATER RHEOSTAT ที่ได้จัดทำขึ้นมาในโครงการนี้ได้สร้างขึ้นมาโดยการใส่สารโซเดียมคลอไรด์ น้ำหนัก 43 มิลลิกรัม ต่อ น้ำ 1 ลิตร (43 ppm.) เป็นน้ำยาอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจะทำให้ค่าความต้านทานจำเพาะสูงมากคือ ประมาณ 6000 โอห์ม-ซม. ดังนั้นถ้าต้องการให้ใช้งานได้ที่กระแสสูง ๆ จำเป็นต้องให้พื้นที่หน้าตัดของขั้วอิเล็กทรอนิกส์มีค่ามาก ๆ ข้อดีของการให้ค่าความต้านทานจำเพาะสูงก็คือทำให้ลดปัญหาการแตกตัวของสารละลายไอออนิก ต่อ อุณหภูมิลดน้อยลงไปและอีกอย่างก็คือทำให้เกิดปฏิกิริยากัดกร่อน หรือการเกิดสนิมของแผ่นตัวนำน้อยลงด้วย

อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าการใส่สารละลายในอัตราส่วนที่น้อยจะแก้ปัญหาค่าความต้านทานของไอออนได้แต่ก็เพียงเล็กน้อยเท่านั้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจึงทำให้ค่าความต้านทาน จำเพาะลดลงดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการระบายความร้อนออกจากน้ำยาอิเล็กทรอนิกส์ด้วย ในโครงการนี้ได้ใช้เครื่องทำความเย็นขนาด 6200 บีทียู.ต่อ ชั่วโมง และจากผลการทดลองจะเห็นว่าการทำงานของ WATER RHEOSTAT ถ้าใช้งานอยู่ในช่วงครึ่งพิกัด WATER RHEOSTAT สามารถใช้งานได้ดีมาก การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานก็เกิดขึ้นน้อยมาก เมื่อใช้งานที่เต็มพิกัด ค่าความต้านทานจะเปลี่ยนแปลงอีกเล็กน้อยนั้นหมายความว่าความสามารถในการระบายความร้อนไม่เพียงพอ

ข้อดีของ WATER RHEOSTAT นี้ก็คือ สามารถทนกระแสสูง ๆ ได้มากกว่าความต้านทานทั่ว ๆ ไปจึงสามารถประยุกต์ใช้งานกับวงจรกำลังได้ แต่ข้อเสียก็คือการที่ใช้งานต้องจัดเตรียมให้ดีพอ เริ่มตั้งแต่ส่วนผสมของสารละลาย ระบบทำความเย็น รวมทั้งการบำรุงรักษาแผ่นเพลท อีกทั้งการเคลื่อนย้าย WATER RHEOSTAT ก็ทำได้ลำบากเพราะขนาดที่โตมากนั่นเอง

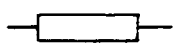
5.2 บทสรุป

WATER RHEOSTAT เป็นความต้านทานแบบปรับค่าได้ที่มีขนาดทนกำลังไฟฟ้าได้สูงถึง 3000 วัตต์ ซึ่งเมื่อเทียบกับความต้านทานแบบปรับค่าได้ที่มีใช้อยู่ทั่วไปแล้ว ส่วนมากจะมีค่าไม่เกิน 100 หรือ 200 วัตต์ เป็นอย่างมาก นั่นหมายความว่า WATER RHEOSTAT ที่ได้สร้างขึ้นนี้ สามารถนำไปใช้งานกับกระวงจรที่มีกระแสไหลผ่านสูงๆได้ เช่นใช้ในการทดลองเป็นภาระให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือหม้อแปลงขนาดเล็กได้ ใช้ในการเริ่มเดินมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาดใหญ่ๆ ใช้ในการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และยังสามารถนำไปใช้ประลองหาค่าคุณลักษณะสมบัติของสวิตซ์ตัดตอนอัตโนมัติและฟิวส์ได้เป็นอย่างดี และข้อดีอีกอย่างของ WATER RHEOSTAT ตัวนี้ก็คือ ช่วงการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานมีความกว้างมาก คือสามารถปรับได้ตั้งแต่ 16 โอห์ม ไปจนถึง 700 โอห์ม หรืออาจกล่าวได้ว่ายอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ตั้งแต่ 0.3 แอมแปร์ไปจนถึง 14 แอมแปร์ นอกจากนั้นยังสามารถเปลี่ยนแปลงย่านของความต้านทานให้มีค่าสูงมากขึ้นกว่านี้ได้ตามความต้องการของผู้ใช้โดยการลดปริมาณของสารประกอบ โซเดียมคลอไรด์ ให้น้อยลงกว่า 43 ppm. ข้อเสียของ WATER RHEOSTAT ที่สร้างขึ้นนี้มีขนาดโตเกินไปไม่เหมาะที่จะเคลื่อนย้ายบ่อย ๆ อีกทั้งการใช้งานแต่ละครั้งจะต้องจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่มอเตอร์คอมเพรสเซอร์ และ มอเตอร์ปั๊มด้วยเพราะเนื่องจากต้องมีการระบายความร้อนให้กับน้ำยาอิลีคโตรไลต์ ซึ่งเป็นระบบทำความเย็นแบบอัดแก๊ส ข้อบกพร่องอีกอย่างก็คือ เกิดการผุกร่อนของแผ่นอิลีคโตรไลต์ ถ้าใช้งานไปนาน ๆ จะตั้งมีการบำรุงรักษาด้วยการถอดออกมาทำความสะอาดแต่เมื่อพิจารณาให้ถี่ถ้วนแล้วประโยชน์ของ WATER RHEOSTAT ก็ยังมีมากกว่าที่จะสร้างขึ้นเพื่อใช้งาน

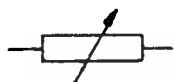
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

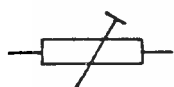
สัญลักษณ์ของความต้านทาน



แบบคงที่



แบบปรับค่าใช้ติดตั้งมีปุ่มยื่นออกมาจอกภาพ



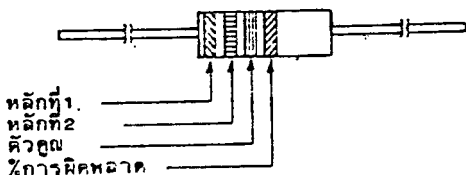
แบบปรับค่าชนิดติดตั้งในแผ่นวงจร เช่น ทริมเมอร์

การอ่านค่าบนความต้านทาน

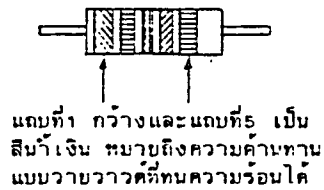
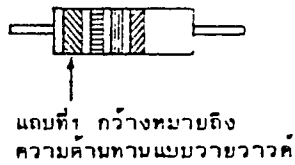
ค่าความต้านทานจะบอกไว้บนตัว 2 ลักษณะคือ บอกเป็นตัวอักษร และบอกเป็นรหัสสี การบอกเป็นตัวอักษรจะนิยมบอกค่าความต้านทาน กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้งานและเปอร์เซ็นต์การผิดพลาด การบอกค่าความต้านทานนิยมเขียนบอกดังนี้

0.22 Ω	ค่าความต้านทาน	0.22 Ω
2 Ω	ค่าความต้านทาน	2 Ω
2k2 Ω	ค่าความต้านทาน	2200 Ω

การบอกเป็นรหัสสี ดูได้จากรูปที่ ผ.1 ซึ่งจะมีโค๊ดรหัสสีที่ใช้ทั้งทางทหาร (Military, MIL) และใช้ทางสมาคมอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Industries Association, EIA)



(ก) รหัสสีของความต้านทานแบบทั่วไป

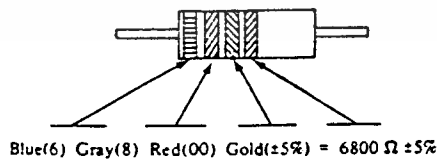


รูปที่ ผ.1 ความต้านทานบอกค่าเป็นรหัสสี

(ข) รหัสสีของความต้านทานแบบวาวววด์

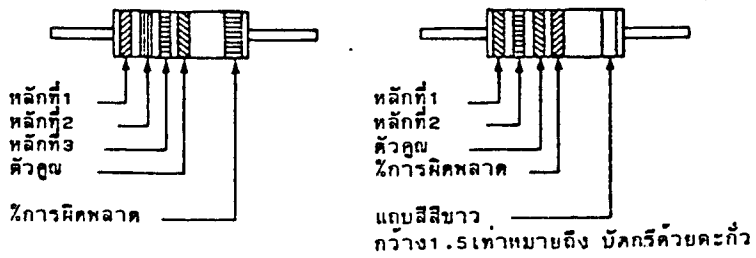
สี	ตัวเลขความ	แถบสี	ตัวคูณ	%การผิดพลาด
Black	0		1	-
Brown	1		10	-
Red	2		100	-
Orange	3		1000	-
Yellow	4		10,000	-
Green	5		100,000	-
Blue	6		1,000,000	-
Violet	7		10,000,000	-
Gray	8		-	-
White	9		-	-
Gold	-		-	± 5%
Silver	-		-	± 10%
No color	-		-	± 20%

ตัวอย่าง



รูปที่ ผ.2 รหัสสีความต้านทาน EIA/MIL สำหรับความผิดพลาด 5%, 10% และ 20%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รหัสสีของความต้านทานอุตสาหกรรม
ที่มี %การผิดพลาด 1% และดีกว่านี้

รหัสสีของ %การผิดพลาด

Black	-
Brown	± 1%
Red	± 2%
Orange	-
Yellow	-
Green	±0.5%
Blue	±0.25%
Violet	±0.1%
Gray	±0.05%
White	-
Gold	± 5%
Silver	±10%

รูปที่ ๘.3 รหัสสีความต้านทานทางอุตสาหกรรม
สำหรับค่าผิดพลาด 1% และต่ำกว่า และระบบความต้านทานของ MIL

ภาคผนวก ข.

ค่ามาตรฐานการผลิตความต้านทานแบบคงที่

ตารางที่ ผ.1

ตารางความต้านทานมาตรฐาน EIA/MIL แบบค่าคงที่ทั่วไป

A 20 % and 10% value

1.0†	10	100	1000	10 k	100 k	1.0 M	10 M
1.2†	12	120	1200	12 k	120 k	1.2 M	12 M
1.5†	15	150	1500	15 k	150 k	1.5 M	15 M
1.8†	18	180	1800	18 k	180 k	1.8 M	18 M
2.2†	22	220	2200	22 k	220 k	2.2 M	22 M
2.7	27	270	2700	27 k	270 k	2.7 M	
3.3	33	330	3300	33 k	330 k	3.3 M	
3.9	39	390	3900	39 k	390 k	3.9 M	
4.7	47	470	4700	47 k	470 k	4.7 M	
5.6	56	560	5600	56 k	560 k	5.6 M	
6.8	68	680	6800	68 k	680 k	6.8 M	
8.2	82	820	8200	82 k	820 k	8.2 M	

B 5% value

1.0†	10	100	1000	10 k	100 k	1.0 M	10 M
1.1†	11	110	1100	11 k	110 k	1.1 M	11 M
1.2†	12	120	1200	12 k	120 k	1.2 M	12 M
1.3†	13	130	1300	13 k	130 k	1.3 M	13 M
1.5†	15	150	1500	15 k	150 k	1.5 M	15 M
1.6†	16	160	1600	16 k	160 k	1.6 M	16 M
1.8†	18	180	1800	18 k	180 k	1.8 M	18 M
2.0†	20	200	2000	20 k	200 k	2.0 M	20 M
2.2†	22	220	2200	22 k	220 k	2.2 M	22 M
2.4†	24	240	2400	24 k	240 k	2.4 M	
2.7	27	270	2700	27 k	270 k	2.7 M	
3.0	30	300	3000	30 k	300 k	3.0 M	
3.3	33	330	3300	33 k	330 k	3.3 M	
3.6	36	360	3600	36 k	360 k	3.6 M	
3.9	39	390	3900	39 k	390 k	3.9 M	
4.3	43	430	4300	43 k	430 k	4.3 M	
4.7	47	470	4700	47 k	470 k	4.7 M	
5.1	51	510	5100	51 k	510 k	5.1 M	
5.6	56	560	5600	56 k	560 k	5.6 M	
6.2	62	620	6200	62 k	620 k	6.2 M	
6.8	68	680	6800	68 k	680 k	6.8 M	
7.5	75	750	7500	75 k	750 k	7.5 M	
8.2	82	820	8200	82 k	820 k	8.2 M	
9.1	91	910	9100	91 k	910 k	9.1 M	

† Industrial grade only

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

1. จันทิรา ชัยมงคล, "อินทรีเคมิ", โรงพิมพ์ชวนพิมพ์,
451 หน้า, 2523
2. ชัยสวัสดิ์ เทียนวิบูลย์, "การทำความเย็นและปรับอากาศ", โรงพิมพ์ ก.วิวรรธน์,
420 หน้า, 2523
3. ชนกกาญจน์ ภักธกาจณ์, "ฟิลิกส์ระดับต้น", สำนักพิมพ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
พระนครเหนือ, 565 หน้า, 2525
4. ประกิจ นิยม. และคณะ, "อิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป", กราฟิคอาร์ท(1977),
178 หน้า, 2528
5. มั่นสิน ตันทกุลเวศน์, "วิศวกรรมการประปา", ก.วิวรรธน์,
435 หน้า, 2527
6. วิโรจน์ ปิยวัชรพันธ์, "อินทรีเคมิ 1", สามเจริญพานิช,
356 หน้า, 2524
7. ภาควิชาเคมิ คณะวิทยาศาสตร์, "เคมิทั่วไป เล่ม 1", จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,
506 หน้า, 2526
8. Richard L. Elliott, JR., "Water Rheostat For Shipyard Use"
IEEE. Trans.on Industry Application, Vol. IA-18,
No. 5, 1982, pp 568-572
9. William H. Hayt, Jr and Jack E. Kemmerly, "Engineering Circuit
Analysis", McGraw-Hill International Edition, 653p.,
1987

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้