

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

028739

12.๑๓.๒๕๓๔

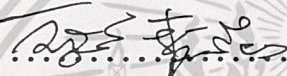
ปริญญาโท ประจำปีการศึกษา 2533

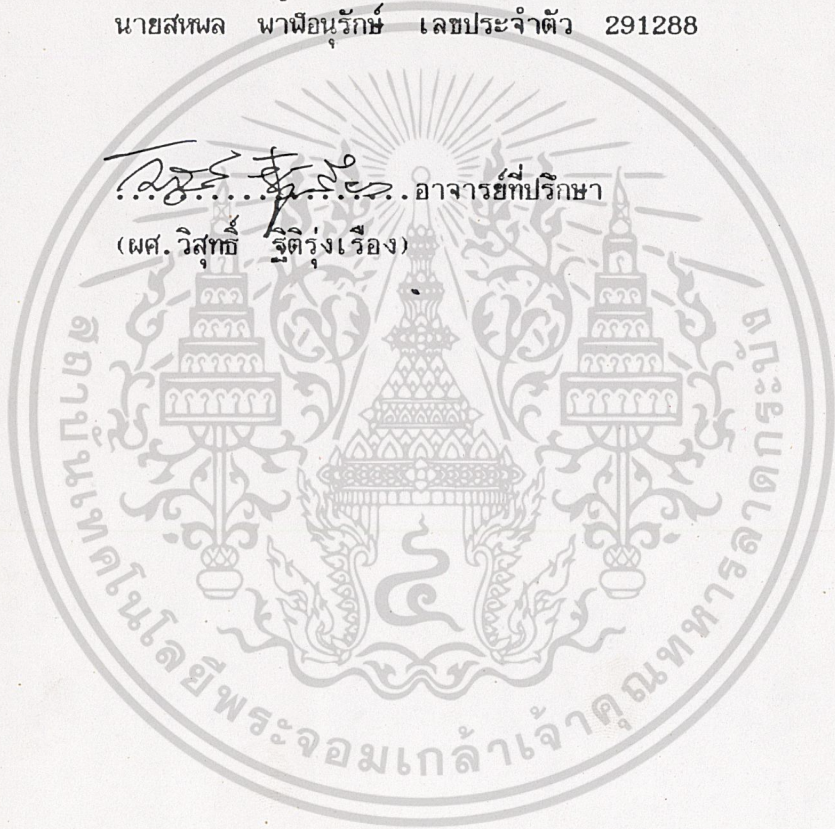
ภาควิชา วิศวกรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
เรื่อง ตัวย้ายยชวด การสร้าง การทดสอบ และการประยุกต์

ผู้จัดทำ.....

นายสหพล พาณิชูรกิจ เลขประจำตัว 291288


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผศ. วิสิทธิ์ ลีตัญญูเรื่อง)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

028739

สารบัญ

	หน้า
บทนำ	1
บทที่ 1	วิธีการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด
บทที่ 2	คุณสมบัติและการทดสอบ
บทที่ 3	แบบจำลองโครงสร้างแบบมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด
บทที่ 4	การหาค่าเปอร์เซ็นต์ต่อปริมาตรของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด
บทที่ 5	การตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด
บทที่ 6	เครื่องมือวัดอุณหภูมิวิกฤตและการทดสอบ
เอกสารอ้างอิง	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทนำ

สารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด (SUPERCONDUCTOR)

นักวิทยาศาสตร์ของไทยได้ให้ชื่อซูเปอร์คอนดักเตอร์ (SUPERCONDUCTOR) ว่า "สารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด" ซึ่งมีความหมายคือ เป็นตัวนำไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติพิเศษสามารถนำไฟฟ้าหรือยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวมันไปได้โดยไม่สูญเสียพลังงานไปในรูปของความร้อนเลย

ตัวนำไฟฟ้าต่าง ๆ ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันไม่ว่าจะเป็นสารกึ่งตัวนำ (SEMI CONDUCTOR) หรือสายไฟฟ้าทองแดงที่ใช้ในอาคารทั่วไป เป็นที่รู้กันว่าอิเล็กตรอนที่มีขนาดเล็กมากรวมตัวกันเป็นกระแสไฟฟ้าเมื่อไหลผ่านตัวนำไฟฟ้าเหล่านั้นไป จะต้องพบกับความต้านทานไฟฟ้าการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนและอะตอมของสารตัวนำนั้นก่อให้เกิดความร้อนขึ้น ซึ่งหมายถึงการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าไปในรูปของพลังงานความร้อน เมื่ออุณหภูมิยิ่งสูงการต้านทานก็ยิ่งมีมากขึ้น และกระแสไฟฟ้าที่ไหลไปจะต้องพบกับความต้านทานโดยตลอด ดังเช่นคนเดินพลุกพล่านมาก เขาต้องใช้ความพยายามที่จะฝ่าฝูงคนออกไป ซึ่งแม้จะผ่านไปได้อีกก็ต้องออกแรงอย่างมาก

แต่ในสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดหรือซูเปอร์คอนดักเตอร์นี้ กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านไปได้ โดยไร้การต้านทานใด ๆ ทั้งสิ้น หรือกล่าวได้ว่าแรงต้านทานเป็นศูนย์ ดังนั้นกระแสไฟฟ้าสามารถเคลื่อนผ่านไปได้เป็นระยะทางยาวไกล ปราศจากการสูญเสียพลังงาน ดังที่กล่าวมาแล้วเหมือนกับผู้ที่เดินอยู่ในงานเทศกาล นอกจากจะเดินเที่ยวได้อย่างสบาย โดยไม่มีผู้คนมากกีดขวางทางแล้ว เขายังได้พบกับคนรู้จักกัน ซึ่งแข็งแรงมาช่วยอุ้มเขาไปเมื่อเขาเกิดอาการเหนื่อยอีกด้วย ที่เป็นเช่นนั้นเพราะโครงสร้างผลึกของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด จะมีปฏิกิริยาต่ออิเล็กตรอนที่ไหลผ่านมาโดยการจัดระเบียบให้เห็นคู่ ๆ โดยไม่ให้มีอิเล็กตรอนกระจัดกระจายไป ปฏิกิริยาการนำไฟฟ้ายิ่งยวดนี้ เรียกว่าซูเปอร์คอนดักติวิตี (SUPERCONDUCTIVITY) หรือเรียกว่าสภาวะการนำไฟฟ้ายิ่งยวด

นักวิทยาศาสตร์ได้ค้นพบปรากฏการณ์ หรือสภาวะการนำไฟฟ้ายิ่งยวดของสารบางอย่าง ที่อุณหภูมิลดลงสู่ศูนย์องศาสัมบูรณ์ (ศูนย์องศาเคลวิน) ซึ่งเป็นอุณหภูมิต่ำมาก คือเท่ากับลบ 273 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมินี้จะปราศจากความร้อนโดยสิ้นเชิง โครงสร้างผลึกโมเลกุลของสารตัวนำจะมีการเคลื่อนหรือสั่นไหวน้อยที่สุดทำให้ไม่มีแรงต้านทาน อิเล็กตรอนจึงไหลผ่านไปได้โดยสะดวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การค้นพบสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

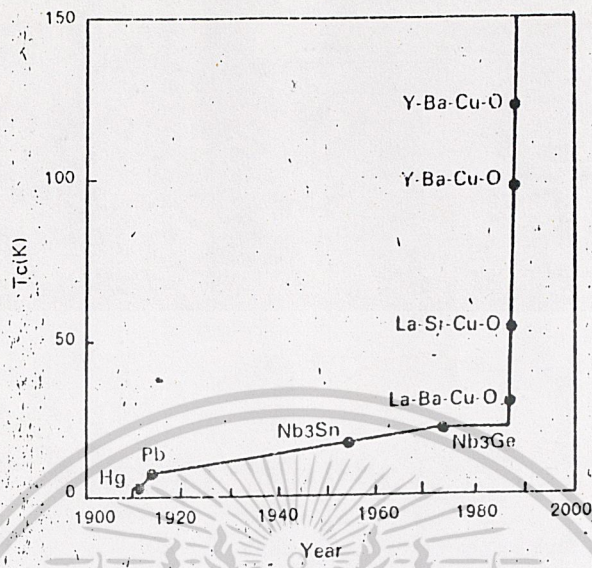
ในปี ค.ศ.1911 นักฟิสิกส์ ชาวดัตช์ ชื่อ ไฮก์ คาเมอร์ลิงก์ ออนเนส (Heike Kamerlingh Onnes) ได้เป็นผู้ค้นพบปรากฏการณ์การนำไฟฟ้ายิ่งยวดเป็นคนแรก โดยการทดลองใช้ปรอทแช่ในฮีเลียมเหลวที่อุณหภูมิ 4.2 องศาเคลวิน หรือประมาณ -269 องศาเซลเซียส (ที่อุณหภูมินี้ฮีเลียมจะเปลี่ยนจากแก๊สไปเป็นของเหลว) นำมาเป็นตัวนำไฟฟ้า เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าไปพบว่า ปรอทแช่แข็งนั้นจะสูญเสียการต้านทานไปและสามารถนำไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี ทั้งนี้ ในอุณหภูมิปกติแล้วปรอทจะมีความต้านทานไฟฟ้าอยู่

จากการค้นพบของออนเนสในครั้งนั้นได้ก่อให้เกิดการศึกษาค้นคว้าต่อมา โดยออนเนสได้ทดลองนำโลหะอื่น เช่น ตะกั่วแช่แข็งในฮีเลียมเหลวมาเป็นตัวนำไฟฟ้า โดยมุ่งที่จะให้มีอุณหภูมิที่สารตัวนำจะอยู่ในสภาวะการนำไฟฟ้ายิ่งยวด หรือเรียกว่าอุณหภูมิวิกฤติ (critical temperature, T_c) สูงขึ้นกว่าเดิม ผลการทดลองปรากฏว่าค่าอุณหภูมิวิกฤตินั้นสูงขึ้นมาเล็กน้อย

นับตั้งแต่ปี ค.ศ.1911 เป็นต้นมาผู้ศึกษาค้นคว้า ทำให้อุณหภูมิวิกฤตสูงขึ้นโดยเปลี่ยนสารตัวนำไปเป็นชนิดต่าง ๆ ถึงปี 1973 มีการนำโลหะผสมประกอบด้วยนีโอเบียม (niobium) และเยอรมาเนียม (germanium) มาใช้เป็นตัวนำ (มีสูตรว่า $Nb_3 Ge$) ก็ยังปรากฏว่าไม่สามารถทำให้ค่าอุณหภูมิวิกฤตสูงขึ้นไปกว่า 23 องศาเคลวินได้ ในเวลาช่วงปีนั้นเอง มีนักวิทยาศาสตร์ 3 คน ได้กำหนดทฤษฎี BCS (Bardeen, Cooper, Schrieffer) ขึ้น เพื่ออธิบายสภาวะการนำไฟฟ้าแบบยิ่งยวด ซึ่งทฤษฎีนี้มีผู้ยอมรับกันโดยทั่วไปจนถึงขั้นได้รับรางวัลโนเบลประจำปี 1972 ทฤษฎีนี้ได้แสดงให้เห็นว่าขีดจำกัด (limit) สูงสุดของอุณหภูมิวิกฤตของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีค่าอยู่ประมาณไม่เกิน 40 องศาเคลวิน ซึ่งนักวิทยาศาสตร์ทั่วไปก็เข้าใจมาโดยตลอดว่าทฤษฎีนี้ถูกต้อง และไม่มีวัสดุใดที่จะทำให้มีอุณหภูมิวิกฤตสูงไปกว่านี้ได้

เมื่อมาพิจารณาอัตราการค้นพบสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดระหว่างเวลาและอุณหภูมิวิกฤตที่ค้นพบ ตามรูปที่ 1 จะเห็นว่าอุณหภูมิวิกฤตจะเพิ่มขึ้น ในลักษณะเชิงเส้นตรง (linear) กับเวลาที่ผ่านมา นับตั้งแต่ปี 1911 ถึงปี 1973 ซึ่งถ้าอัตราการค้นพบอุณหภูมิวิกฤตของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดยังคงเป็นไปในอัตราเดิม คงจะเป็นเวลาอีกประมาณถึง 200 ปีที่ค่าอุณหภูมิวิกฤตจะเพิ่มขึ้นสูงเท่ากับอุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว (ประมาณ 77 องศาเคลวิน) และคงจะเป็นเวลาอีกประมาณ 1,000 ปี ที่จะพบสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งสามารถใช้งานได้ ในอุณหภูมิห้อง (room temperature) หรืออุณหภูมิปกติ (ประมาณ 25 องศาเซลเซียส) แสดงให้เห็นได้ว่าในช่วงเวลานั้นการศึกษาวิจัยสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดค่อนข้างจะตกต่ำอยู่มาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

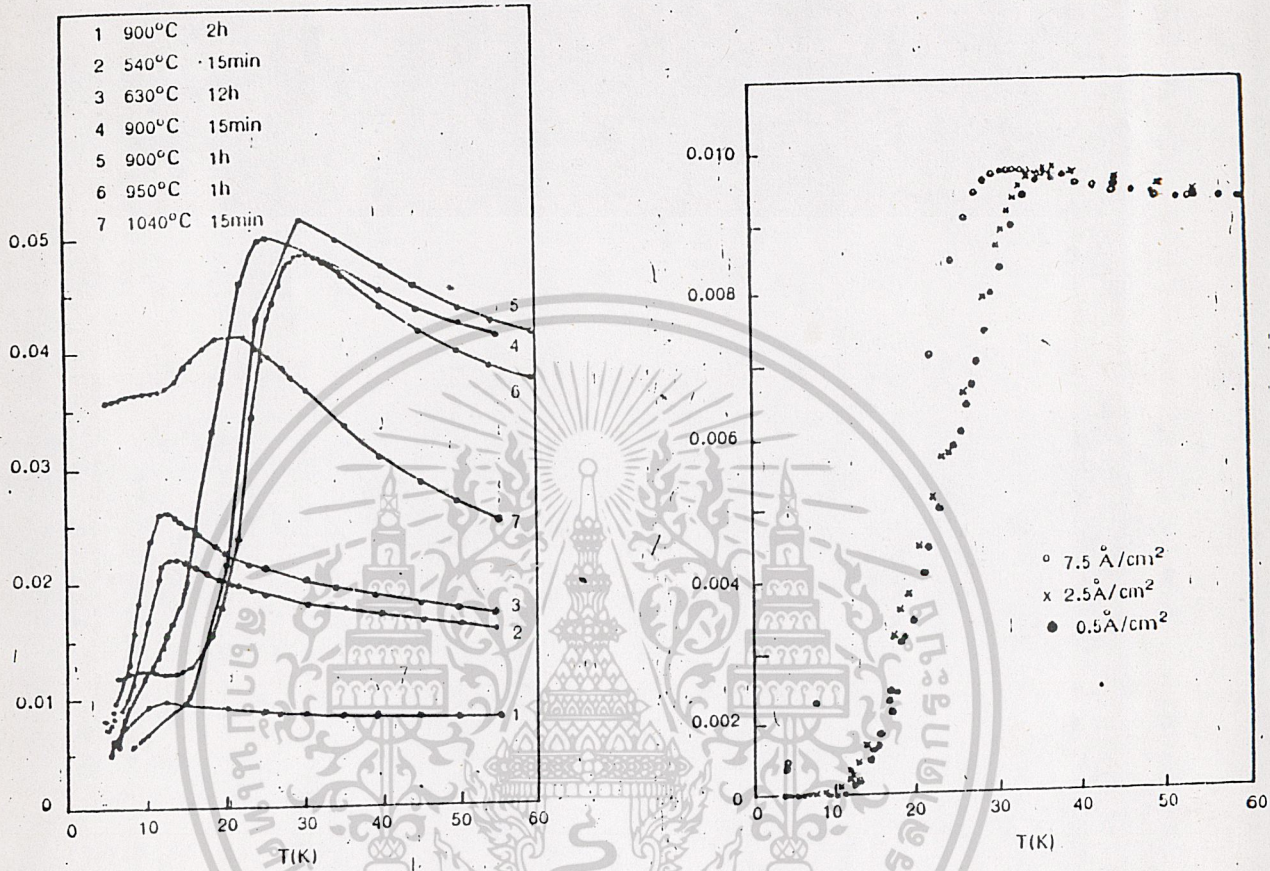


รูปที่ 1 แสดงอัตราการค้นพบสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดในช่วงเวลาต่าง ๆ

แต่แล้วแนวความคิดและสภาวะต่าง ๆ ตามทฤษฎีนั้นก็ต้องเปลี่ยนไป เมื่อมีผู้ค้นพบสารชนิดใหม่ที่น่าสนใจเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ โดยนักวิจัยแห่งห้องปฏิบัติการวิจัยซูริค (zurich Research Laboratory) ของบริษัท ไอบีเอ็ม นำโดย คาร์ ลอเล็กซ์ มุลเลอร์ (Karl Alex Muller) ร่วมกับโยฮันส์ จอร์จ เบดเนอร์ซ (Johannes Georg Bednorz) ทำการทดลองโดยใช้สารจำพวกเซรามิก (ceramic) มาเป็นตัวนำไฟฟ้าแทนโลหะผสม (alloy) ที่เคยใช้กันอยู่ สารเซรามิกนี้ประกอบด้วย ธาตุเบเรียม (barium), ธาตุแลนทาเนียม (lanthanum), ทองแดง (copper) และออกซิเจน (oxygen) โดยให้ความร้อนสูงจนกลายเป็นเซรามิก สารนี้ในสภาวะอุณหภูมิห้องมันจะมีสภาพเป็นฉนวน จากการทดลองนี้ มุลเลอร์และเบดเนอร์ซ ได้จัดทำรายงานเสนอต่อสาธารณชนในชื่อว่า "Possibilities of High Temperature Superconductive Oxides of Ba-La-Cu" รูปที่ 2 แสดงให้เห็นถึงผลการทดลอง ที่ปรากฏอยู่ในรายงานฉบับนั้น แสดงว่าสามารถทำให้สารเซรามิกนั้นมีสภาพนำไฟฟ้าอย่างยิ่งยวดได้ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลวิน

และจากหลักการของมุลเลอร์และเบดเนอร์ซที่มีอยู่ในรายงานนั้น ศาสตราจารย์ทานากะ (Professure Tanaka) และผู้ร่วมงานวิจัย แห่งคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยโตเกียว ได้ทำการทดลองตาม โดยใช้สารแบบเดียวกัน และยืนยันถึงผลการทดลองของมุลเลอร์และเบดเนอร์ซว่า จะเริ่มมีสภาวะการนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลวิน และยังได้รายงานอีกว่าช่วงที่มีสภาวะนำไฟฟ้ายิ่งยวด สารตัวนำจะเรียงตัวกันเป็นชั้นแบบ Perovskite Structure

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับนอร์โงเวจเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Low-temperature resistivity of samples with $x(\text{Ba}) = 1.0$, an-nealed at O_2 partial pressure of 0.2 bar (curve 1) and 0.2×10^{-4} bar (curves 2 to 7).

Low-temperature resistivity of a sample with $x(\text{Ba}) = 0.75$, recorded for different current densities

รูปที่ 2 แสดงสภาวะการนำไฟฟ้ายิ่งยวดของ La-Ba-Cu oxides จากการทดลองของ Bednorz-Muller

ข่าวสารวิจัยในครั้งนี้ได้กระจายอย่างรวดเร็วไปทั่วโลก การแข่งขันกันเพื่อที่จะพัฒนาสารตัวนำให้สามารถนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ในอุณหภูมิสูงขึ้น ได้มีอยู่ทั่วไปทั้งในประเทศสหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น และจีน

ในเวลาต่อมาไม่กี่เดือน ทีมนักวิจัยของห้องปฏิบัติการเบลของบริษัท เอทีแอนด์ที ก็ได้ประสบความสำเร็จในการพัฒนาสารเซรามิคสูตรเดียวกันนั้น ให้สามารถนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ที่

อุณหภูมิสูงถึง 38 องศาเซลเซียส เอกสารนี้ยังเป็นที่สนใจสำหรับหน่วยงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในเดือนธันวาคม ปี ค.ศ. 1986 คณะนักวิจัยชั้นนำของมหาวิทยาลัยโตเกียว และนักวิจัยของสถาบันฟิสิกส์ในกรุงปักกิ่งสามารถทำสารเซรามิคสูตรเดียวกัน ให้เกิดสภาวะการนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ที่อุณหภูมิ 39 องศาเซลวิน หรือ ลบ 233 องศาเซลเซียส ในเดือนกุมภาพันธ์ ปี ค.ศ. 1987 นี้ นักวิจัยแห่งมหาวิทยาลัยฮิวตัน นำโดย พล. ชี. ดับบลิว. จู (Paul C.W. Chu) ได้ทดลองสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิคสูตรนี้ ภายใต้ความกดดัน 10,000-12,000 เท่าของความกดดันของบรรยากาศปกติ ปรากฏว่าสามารถทำให้เกิดสภาวะการนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ที่อุณหภูมิสูงขึ้นถึง 52 องศาเซลวิน

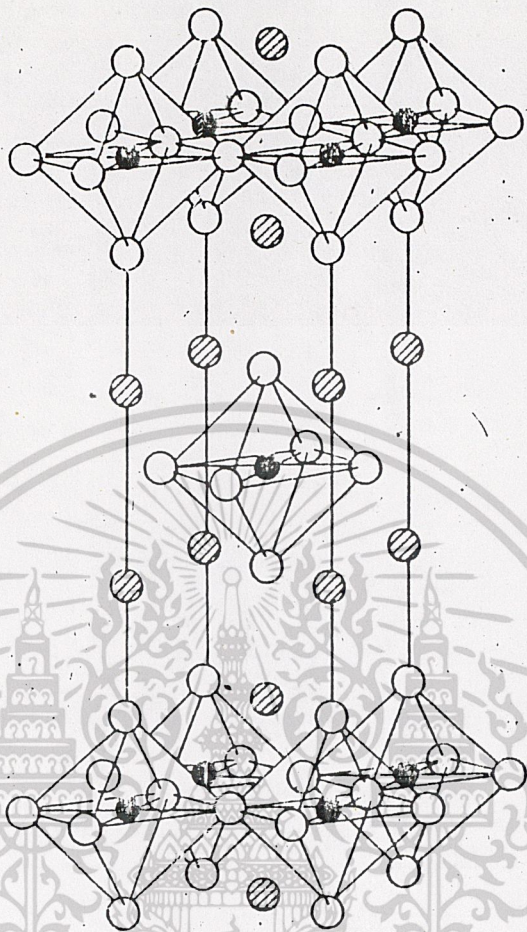
หลังจากการทดลองครั้งนั้น พล. ชี. ดับบลิว. จู ก็ได้ทำการทดลองต่อไปอีก โดยเปลี่ยนเอา สตรอนเชียม (Sr) ซึ่งมีโครงสร้างทางเคมีเหมือนกันแต่มีโครงสร้างอะตอมเล็กกว่าใส่เข้าไปแทนเบเรียม ผลปรากฏว่าได้ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 54 องศาเซลวิน ต่อมา พล. ชี. ดับบลิว. จู ได้ร่วมมือกับ มอร์-แคเรน วู แห่งมหาวิทยาลัยฮันสวิลล์ รัฐอลาบามา ซึ่งเป็นลูกศิษย์เก่าเปลี่ยนเอา ธาตุอิตเทรียม (Yt-trium) เข้าแทน ธาตุแลนทาเนียม ซึ่งทำให้อุณหภูมิวิกฤตเพิ่มขึ้นเป็น 98 องศาเซลวิน ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่าจุดเดือดของไนโตรเจนเหลวคือ 77 องศาเซลวิน นับเป็นผลการวิจัยที่สำคัญมาก เพราะหมายถึงความสามารถที่จะใช้ในไนโตรเจนเหลวเป็นสารทำความเย็นแทนฮีเลียมเหลวได้ ซึ่งฮีเลียมเหลวค่อนข้างจะหายาก ยุ่งยากในการใช้ และมีราคาแพงคือ 11 ดอลลาร์ต่อแกลลอน ส่วนไนโตรเจนเหลวมีราคาเพียง 22 เซนต์ต่อแกลลอนเท่านั้น

จากนี้มาอุณหภูมิวิกฤตของสารตัวนำที่มีสภาวะการนำไฟฟ้ายิ่งยวด ก็ได้มีผู้ค้นพบในอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว จนในปัจจุบันมีรายงานว่า ค่าอุณหภูมิวิกฤตสูงสุดทำได้ถึง 225 องศาเซลวินแล้ว และนักวิจัยบางรายสามารถทำได้สูงถึงอุณหภูมิห้องประมาณ 25 องศาเซลเซียส แต่ผลที่ไม่เป็นที่น่าเชื่อถือนัก แต่ก็ได้แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่จะพัฒนาให้สารตัวนำยิ่งยวด สามารถใช้งานได้ในสภาวะอุณหภูมิปกติ หรืออุณหภูมิห้องได้ในอนาคต

สารเซรามิค (Ceramic)

จากการที่ทีมวิจัยของบริษัท IBM ได้ค้นคิดสูตรสารประกอบของเซรามิคขึ้นมาได้ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลง และเพิ่มอุณหภูมิวิกฤตของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้อย่างรวดเร็ว นักวิทยาศาสตร์อื่น ๆ ได้นำไปดัดแปลงทดลองต่อไปอีก จากสูตรของบริษัท IBM ซึ่งประกอบด้วยธาตุเบเรียม, แลนทาเนียม, ทองแดง และออกซิเจน ต่อมาก็ได้มีผู้ค้นคิดดัดแปลงโดยใช้ธาตุอิตเทรียม เข้าแทนธาตุแลนทาเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3 โครงสร้างผลึกของ $(La, Ba)_2CuO_4$, : La หรือ Ba, : Cu, : Oxygen

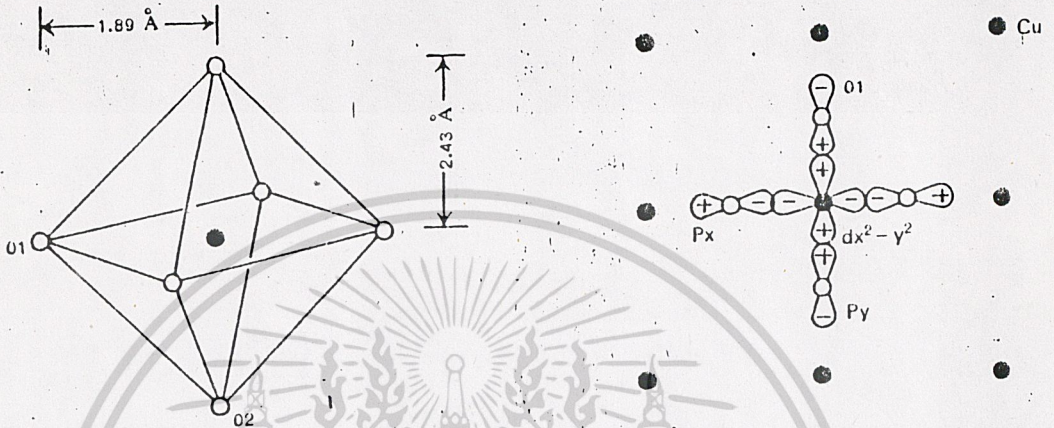
สารเซรามิกที่ได้รับรายงานว่าเป็นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อุณหภูมิสูงที่น่าสนใจคือ La-oxide และ Y-oxide โดย La-oxide จะมีสภาวะนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อุณหภูมิตั้งแต่ประมาณ 40 องศาเซลเซียส และ Y-oxide จะมีสภาวะนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อุณหภูมิตั้งแต่ประมาณ 90 องศาเซลเซียส

La-oxide

La_2CuO_4 เป็นสารประกอบที่มีสภาพเป็นฉนวน มีโครงสร้างทางเคมีเป็นออร์โธโรมบิก (orthorhombic) เมื่อผสมแบเรียม (Ba) เข้าไปแทนส่วนของแลนทาเนียม (La) ในเปอร์เซ็นต์ที่สูง สารประกอบนั้นจะกลายเป็นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด โดยมีโครงสร้างทางเคมีเป็นแบบเตตราโกนอล (Tetragonal) รูปที่ 3 แสดงถึงรูปโครงสร้างผลึกของ $(La, Ba)_2CuO_4$

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์ ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ในการค้าขาย

ซึ่งเป็นโครงสร้างแบบ Perovskite Structure จะเห็นว่าอะตอมของทองแดง (Cu) เป็นแกนหลักรูปตาข่าย ลักษณะแบบเตตระทราโกนอล แต่ละอะตอมของทองแดงจะล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจน (O) 6 อะตอม ในรูปลักษณะรูปเหลี่ยมแปดด้าน (octahedron) อะตอมของทองแดงจะเรียงกันเป็นชั้นในระหว่างอะตอมของทองแดง จะมีอะตอมของแลนทาเนียม (La) แทรกอยู่



รูปที่ 4 ก. โครงสร้าง Octahedral Structure รูปที่ 4 ข. Wave functions ของออกซิเจน จุดดำกึ่งกลางคือทองแดง ทองแดงและออกซิเจนบนแนวระนาบ

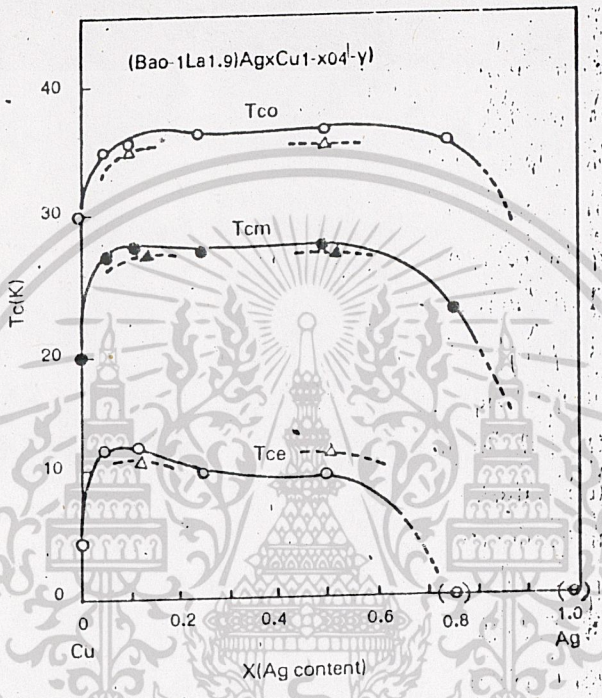
อย่างไรก็ตามอะตอม 6 ตัว ของออกซิเจนที่อยู่รอบอะตอมของทองแดง ก็ไม่ได้วางตัวเป็นรูปแปดด้านที่เท่ากันทั้งหมดทุกด้าน ระยะระหว่างอะตอมของออกซิเจนในแนวระนาบค่อนข้างจะอยู่ใกล้ชิดกันมาก (ประมาณ 1.89 Å) เมื่อเปรียบเทียบกับอะตอมของออกซิเจนในแนวตั้ง (ประมาณ 2.43 Å) ดังรูปที่ 4 ก. อาจจะเป็นเหตุที่ว่าเมื่ออะตอมของทองแดง และอะตอมของออกซิเจนได้เคลื่อนตัวมาซ้อนทับกันในแนวระนาบ ทำให้มีผลเกิดสภาวะการนำไฟฟ้าแบบยิ่งยวดขึ้นในระนาบนั้น ดังรูปที่ 4 ข.

ต่อมาได้มีผู้ศึกษาเอาธาตุแบเรียม (Ba), สตรอนเชียม (Sr) และแคลเซียม (Ca) ซึ่งมีโครงสร้างทางเคมีเหมือนกัน แต่ต่างกันในเรื่องโครงสร้างของอะตอมมาใช้เป็นสารเซรามิคอยู่ในรูปของ $(Ba, Sr, Ca)_2LaCuO_4$ จากการศึกษาอย่างละเอียดได้ผลว่าค่าอุณหภูมิวิกฤตของสตรอนเชียม (Sr) จะมีค่าสูงที่สุด และรองลงมาคือแบเรียม (Ba) และแคลเซียม (Ca)

แต่ก่อนเชื่อกันว่าการเคลื่อนตัวของอะตอมของเหลว และอะตอมของออกซิเจนมีบทบาทมากและจะขาดเสียมิได้ในโครงสร้างรูปแปดด้านของสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด แต่จากการทดลองที่ผ่านมาได้มีผู้ใช้ธาตุเงิน (Silver, Ag) เข้ามาแทนทองแดง โดยใช้อัตราส่วนของแบเรียมต่อแลนทาเนียม (Ba:La) คงที่คือ 0.1 : 1.9 ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5 จะเห็น

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศแห่งชาติ ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศแห่งชาติ

ว่าเมื่อนำ Ag (silver) เข้าแทน ตั้งแต่ $X = 0$ ค่าอุณหภูมิวิกฤต (T_c) จะเริ่มสูงขึ้นในช่วง $0.05 < X < 0.75$ ซึ่งสูงกว่า เมื่อ $X = 0$ เชื่อว่าค่าอุณหภูมิวิกฤตที่สูงขึ้น เมื่อผสม Ag เข้าไปด้วยนั้น เนื่องมาจากโครงสร้างของสารมีความเหมาะสมมากขึ้น จากความแตกต่างของเรเดียส (radius) ของ Ag และทองแดงและวาเลนซ์ของ Ag แต่อย่างไรก็ตามก็ยังไม่ชัดเจนนักว่าอะตอมของ Ag ทั้งหมดเข้าแทนในตำแหน่งของอะตอมทองแดง หรือว่าอะตอมของ Ag เข้าแทนในตำแหน่งของอะตอมแบเรียมและแลนทาเนียม ซึ่งข้อสงสัยนี้เป็นหัวข้อหนึ่งที่กำลังมีการศึกษาต่อไป



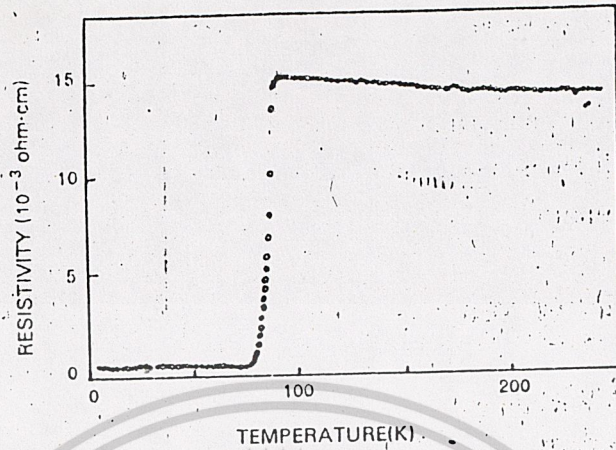
รูปที่ 5 ค่าอุณหภูมิวิกฤต (T_c) ที่ได้จากการทดลองใช้ Ag แทน Cu

Y-oxide

หนังสือพิมพ์ญี่ปุ่น ฉบับประจำวันที 17 กุมภาพันธ์ 1987 ได้รายงานว่ กลุ่มวิจัยนำโดย ค็อกเตอร์ พอล ซี. ดับบลิว. จู (Paul C. W. Chu) แห่งมหาวิทยาลัยฮุสตัน สหรัฐอเมริกา ได้ค้นพบสารออกไซด์ซึ่งเป็นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ที่อุณหภูมิ 98 องศาเซลวิน แต่ก็ไม่ได้แจ้งว่เป็นสารชนิดใด จากนั้น 1 อาทิตย์ ศาสตราจารย์ ฮิกามิ (Professor Higami) แห่งมหาวิทยาลัยโตเกียวได้ประกาศว่ กลุ่มวิจัยของเขาได้ค้นพบสารออกไซด์ ที่สามารถนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว และต่อมาก็เป็นที่ทราบชั้วว่ สารออกไซด์นั้นคือ Y-Ba-Cu-Oxides ซึ่งก็คือ La-oxide นั้นเอง แต่เปลี่ยนเอาธาตุอิตเทรียม (Yttrium, Y)

เข้าไปแทนธาตุแลนทาเนียม รูปที่ 6 แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัตินำไฟฟ้ายิ่งยวดของ Y-oxide

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6 คุณสมบัติในการนำไฟฟ้าของ Y-Ba-Cu oxide

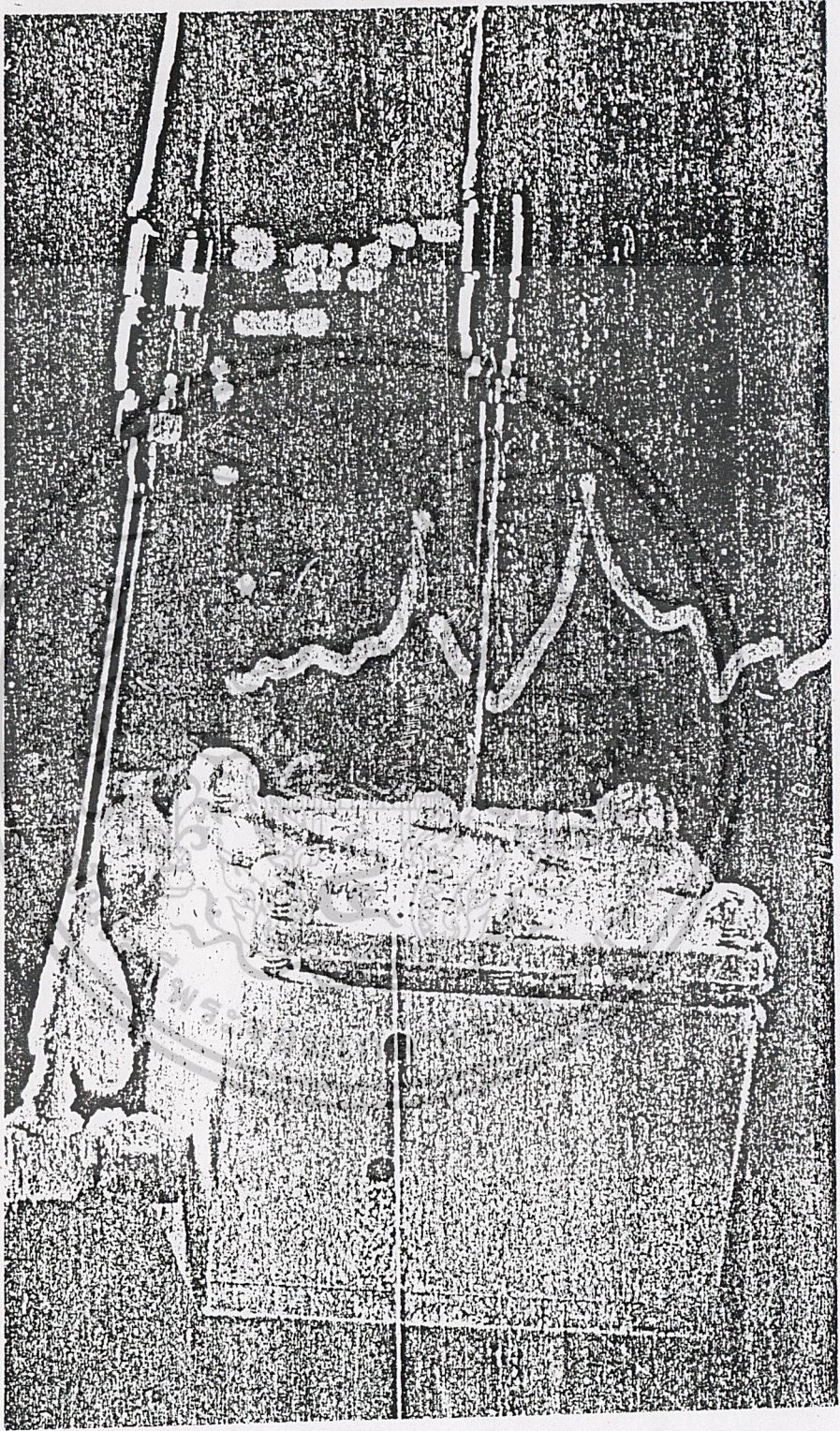
การวิจัยต้องประสบกับปัญหายุ่งยากในการกำหนดโครงสร้างผลึกของ Y-oxide ซึ่งค่อนข้างจะซับซ้อนกว่าที่กำหนดให้กับ La-oxide ในตอนแรกเป็นที่เข้าใจว่ามันน่าจะมีสภาวะนำไฟฟ้ายิ่งยวดเมื่อมันมีโครงสร้างแบบ Brown millerite (Ca_2AlFeO_5) structure ต่อมาก็คิดกันว่ามันน่าจะเป็น double-layered perovskite structure แต่จากการทดลองหลายครั้งก็เป็นที่แน่ใจว่าโครงสร้างของมันคือ $YBa_2Cu_3O_{7-y}$ และมีลักษณะคล้ายกับโครงสร้างแบบ tetragonal [erpsilote (มีการรายงานว่าค่า y มีค่าเท่ากับ 0.3) และในอัตราส่วนของ Y และ Ba เท่ากับ 1 : 2 จากการทดลองจะให้ค่าอุณหภูมิวิกฤตที่สูงที่สุด

ปัจจุบันค่าอุณหภูมิสูงสุดสำหรับ Y-oxide ที่จะมีสภาวะนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ที่ทดลองอยู่ในปัจจุบัน คือประมาณ 100 องศาเซลวิน ซึ่งคาดว่าจะได้สูงกว่านี้ไม่ช้า

การศึกษาทดลองเพื่อการประยุกต์ใช้สารเซรามิค

สารเซรามิคที่เป็นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีคุณสมบัติแข็งเปราะ และไม่สามารถตัดหรือทำให้ชดงอได้ การศึกษาวิจัยเพื่อหาวิธีแก้ไขข้อเสียนี้ เพื่อเป็นประโยชน์ในการใช้งาน เป็นสิ่งหนึ่งที่นักวิทยาศาสตร์กำลังกระทำกันอยู่

ศาสตราจารย์ มัสสุโมโต (Professor Masumoto) แห่งสถาบันวิจัยวัสดุ มหาวิทยาลัยโตโฮกุ (Institute for Materials Research, Tohoku University) ได้ประสบความสำเร็จในการทำสารเซรามิคให้อยู่ในรูปเส้นเทป โดยนำเอาแกนทาเนียม, สตรอนเชียม



รูปที่ 7 ซูเปอร์คอนดักเตอร์ ซึ่งอยู่ในแบบกำลังถูกทำให้เย็นตัวในอุณหภูมิ -320 F
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่วนวิศวกรรมการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ด้วยไนโตรเจนเหลว
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และทองแดง มาหลอมเข้าด้วยกันในอุณหภูมิสูง ๆ เป็นโลหะผสม และทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็ว โดยชุบลงในโลหะผสมอีกชนิดหนึ่ง จากนั้นนำมาหลอมรวมกับออกซิเจนเพื่อให้เป็นออกไซด์ เส้นเทปออกไซด์นี้จะมีสภาพเป็นสารตัวนำไฟฟ้าที่ยืดได้ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลวิน

กลุ่มของตาชิกาวา (Tachigawa group) แห่งสถาบันวิจัยโลหะแห่งชาติ (National Reserch Institute for Metals) กำลังอยู่ในระหว่างการทดสอบทำวัสดุคล้ายเส้นลวด (Wire) กว้าง 5 มิลลิเมตร และหนา 0.3 มิลลิเมตร โดยการดึงเย็บที่ Cu-Ni โรยด้วยผงออกไซด์ของแลนทาเนียม-สตรอนเชียม-ทองแดง มีรายงานว่าวัสดุนี้จะมีสภาพการนำไฟฟ้าที่ยืดที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลวิน และสามารถดัดงอได้ง่าย

บริษัท โตชิบา ได้พัฒนาวัสดุเส้นลวด (Wire) และเส้นเทป ซึ่งจะเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ยืดได้ที่อุณหภูมิ 93.5 องศาเซลวิน นับว่าเป็นวัสดุชิ้นแรกที่อยู่ในรูปของเส้นลวดและเส้นเทปที่อยู่ในสภาวะการนำไฟฟ้าที่ยืดได้ที่อุณหภูมิใกล้ 100 องศาเซลวิน วัสดุตัวนำไฟฟ้าที่ยืดดังกล่าวมีส่วนผสมประกอบด้วยอิตเทรียม (0.4), แบเรียม (0.6), ทองแดง (1) และออกซิเจน (2.3)

ศาสตราจารย์ โคอิอูมา (Professor Koinuma) แห่งมหาวิทยาลัยโตเกียว ได้ประกาศความสำเร็จในการพัฒนาเพื่อผลิตแผ่นฟิล์มบาง (thin-film) ซึ่งเป็นสารเซรามิคโดยผสมสารทำละลายลงไปในออกไซด์ของอิตเทรียม, แบเรียมและทองแดง ทำให้กลายเป็นสารที่คล้ายแป้งเปียก และเคลงในแม่พิมพ์ Zirconia oxide จากนั้นปล่อยให้เย็น จากตัวอย่างได้แสดงให้เห็นว่าวัสดุนี้จะนำไฟฟ้าที่ยืดได้ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลวิน นับว่าเป็นสารตัวนำไฟฟ้าที่ยืดในรูปของแผ่นบาง (thin film) ที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงที่สุด

ประโยชน์ที่จะได้รับจากสารตัวนำไฟฟ้าที่ยืด

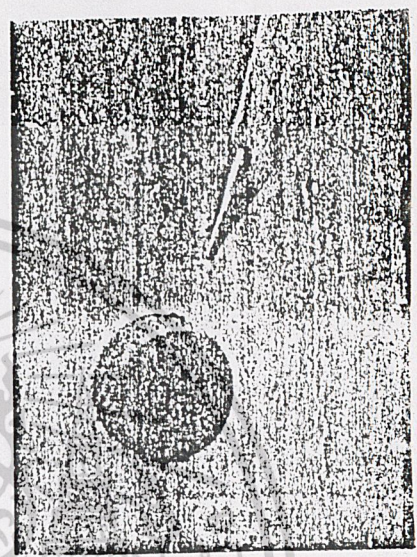
การค้นพบสารตัวนำไฟฟ้าที่ยืดเป็นอีกขั้นหนึ่งหลังจากมีการค้นพบสารกึ่งตัวนำในปี ค.ศ. 1847 และพัฒนามาเป็นทรานซิสเตอร์ใช้แทนหลอดสุญญากาศ จากนั้นก็มีการพัฒนาไอซี แผงวงจรรวมขนาดเล็ก ซึ่งการพัฒนาที่ผ่านมามีทำให้วงการอิเล็กทรอนิกส์ เปลี่ยนโฉมหน้าไปอย่างรวดเร็ว สารตัวนำไฟฟ้าที่ยืดจะเป็นอีกตัวหนึ่งที่จะมาสร้างการเปลี่ยนแปลงให้เกิดขึ้นกับวงการอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านธุรกิจ
นำไฟฟ้าที่ยืดไปใช้ในอุปกรณ์การแพทย์ เช่น เครื่องตรวจสมอง ซึ่งเป็นการวัดปฏิกิริยาแม่เหล็ก
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นหากมีเหตุที่เปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสมอง อุปกรณ์ชิ้นนี้จะมีขนาดเล็กและมีราคาถูก เพราะในปัจจุบันอุปกรณ์ยังคงใช้ฮีเลียม (ซึ่งมีราคาแพงมาก) มาเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดสภาวะซูเปอร์คอนดักติวิตี อุปกรณ์นี้สามารถ ตรวจเช็คคลื่นแม่เหล็กจากสมอง และหาเซลล์ผิดปกติของคนไข้โรคจิต หรือคนเป็นโรคมะเร็ง จะ ช่วยในการวินิจฉัยโรคได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 8 ด็อกเตอร์ พอล ซี. ดับบลิว. จู แห่งมหาวิทยาลัยฮุสตันกับซูเปอร์คอนดักเตอร์ชิ้นแรกที่เขาได้ศึกษาค้นคว้าขึ้นมาได้



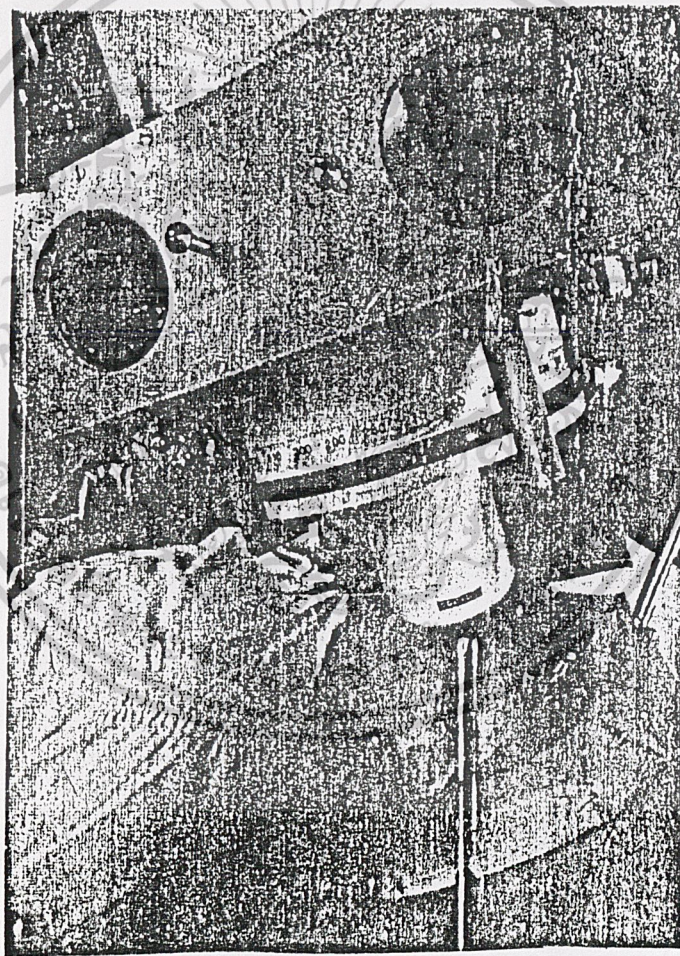
รูปที่ 9 สนามแม่เหล็กถ่วงผลึกออกจากซูเปอร์คอนดักเตอร์ ทำให้แท่งแม่เหล็กลอยอยู่บนอากาศได้

ทางด้านอาหาร ทหารเรือต้องการอุปกรณ์ตรวจจับหาเรือดำน้ำของศัตรูที่ซ่อนลึกลงในมหาสมุทร ทหารอากาศต้องการอุปกรณ์เรดาร์ความถี่สูงตลอดจนระบบสื่อสารในอากาศ โดยเฉพาะในโครงการสตาร์วอล์ส ตามนโยบายป้องกันของสหรัฐอเมริกา อุปกรณ์เหล่านี้หากมีการนำตัวนำไอน้ำที่ยังยวดยมาใช้จะทำให้มีระบบเล็กกว่าเดิม และลดความต้องการพลังงานลงได้ เนื่องจากเปลี่ยนมาใช้ไนโตรเจนเหลวแทนระบบคอมพิวเตอร์ภาคพื้นดินสามารถทำการวิเคราะห์ได้เป็นพันล้านข้อมูล เกี่ยวกับจรวดหรืออาวุธอื่นที่พุ่งเข้ามาและสามารถป้องกันได้อย่างฉับพลัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในแง่พาณิชย์ตัวนำไฟฟ้าที่ยาวอาจช่วยในการสร้างรถไฟวิ่งเหนือราง โรงไฟฟ้าประสิทธิภาพสูง หรือโรงไฟฟ้าปฏิกริยานิวเคลียร์ รถไฟวิ่งเหนือราง ต้นแบบที่ใช้ระบบขั้วเปอร์คอนดักเตอร์ของญี่ปุ่นสามารถเดินทางได้เร็วถึง 300 ไมล์ต่อชั่วโมง มันทำงานโดยอาศัยการผลักดันของขั้วแม่เหล็กและด้วยแรงอำนาจศาลของแรงต้านของแม่เหล็กนี้เอง จะช่วยให้ยกรถไฟลอยขึ้นได้ แต่ทว่าระบบแม่เหล็กที่ใช้กับรถไฟญี่ปุ่นคันนี้ ยังคงใช้อีเลียมเหลวเป็นตัวทำให้เย็นอยู่ ซึ่งต้องการคอมเพรสเซอร์ขนาดใหญ่ที่จะทำให้อีเลียมที่มีราคาแพงนี้ไม่ระเหยไปหมด หากมีการนำไนโตรเจนเหลวที่มีราคาถูกกว่ามาใช้แทน จะช่วยให้รถไฟไฟฟ้าน้ำหนักเบา และประหยัดค่าใช้จ่ายมากกว่า

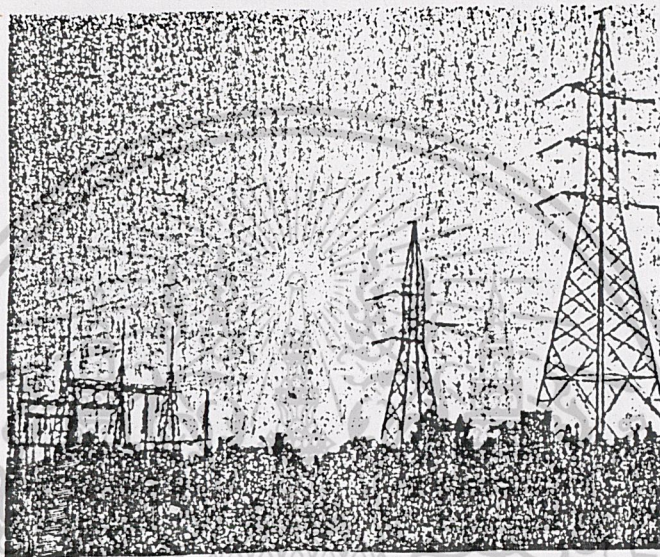


รูปที่ 10 เครื่องตรวจคลื่นสมองในปัจจุบัน ซึ่งค่อนข้างจะมีขนาดใหญ่และราคาแพง

หากนำซูเปอร์คอนดักเตอร์มาใช้ จะมีขนาดเล็กลงและราคาไม่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปโดยไม่ระบายนัดด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นักวิจัยของบริษัทเวสต์ติ่งเฮาส์กำลังศึกษาวิจัย เพื่อสร้างเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า ด้วยซูเปอร์คอนดักเตอร์ ซึ่งจะได้กำลังผลิตสูงกว่าแบบธรรมดาถึง 2 เท่า หัวหน้านักวิจัย นายจอห์น ฮิวเลน (John Hulen) ได้กล่าวว่า สายส่งกระแสไฟฟ้าสามารถส่งกระแสไฟไปได้ในระยะทางไกล โดยไม่มีการสูญเสียพลังงานไปเลย เปรียบเทียบกับปัจจุบันที่ต้องเสียพลังงานไปถึง 8% ในการส่งตัวนำไฟฟ้าที่ยาวจะช่วยให้ประหยัดไปได้ถึงร้อยล้านดอลลาร์ต่อปี ในค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงและค่าใช้จ่ายอื่น ๆ



รูปที่ 11 ซูเปอร์คอนดักเตอร์จะช่วยให้ประหยัดพลังงานได้เป็นร้อย ๆ ล้านดอลลาร์

บทสรุป

จากการค้นคว้าสามารถทำให้อุณหภูมิวิกฤตของสารตัวนำไฟฟ้าที่ยาว ในรูปของสารเซรามิคสูงกว่าอุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว จึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้ในโตรเจนเหลวซึ่งมีราคาต่ำ และสามารถทำให้เย็นได้อย่างคงที่ เป็นการเปิดโอกาสอย่างกว้างขวางในการประยุกต์ใช้สารตัวนำไฟฟ้าที่ยาว

การแข่งขันกันพัฒนาเพื่อมุ่งที่จะให้อุณหภูมิวิกฤตของสารตัวนำไฟฟ้าที่ยาวเท่ากับอุณหภูมิของไนโตรเจน ในปัจจุบันก็ได้ล่วงไปด้วยดีแล้ว แต่ความจำเป็นในการศึกษาถึงคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของ La-oxide และ Y-oxide ที่จะนำมาเป็นสารตัวนำไฟฟ้าที่ยาวให้เข้าใจละเอียดอย่างแท้จริงก็ยังคงดำเนินต่อไป ตลอดจนการแก้ปัญหาว่าทำอย่างไรที่จะแก้ไขข้อเสียที่สารเซรามิค

มีความแข็งและเปราะ
เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์สงวนสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 12 การทดลองป้อนกระแสไฟฟ้าผ่านซูเปอร์คอนดักเตอร์

ศาสตราจารย์ ทานากะ แห่งมหาวิทยาลัยโตเกียว ได้กล่าวไว้ว่า "ซูเปอร์คอนดักเตอร์เปรียบไปก็เหมือนกับเพชรพลอยที่ฝังอยู่ในดิน เราต้องระมัดระวังในการนำมาใช้ มันไม่อาจถูกยึดครองโดยบุคคลคนเดียว บริษัทเดียว หรือประเทศเดียว"

คำกล่าวของศาสตราจารย์ ทานากะ จะคงอยู่ไปอีกนานสักเท่าไรไม่มีใครรู้ได้ แต่หากมีการค้ำประกันเฉพาะในเชิงการค้าแล้ว ความคิดอันสูงส่งนี้ก็จะสูญสิ้นไปอย่างแน่นอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

การสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

จากการทดลองสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดโดยใช้อัตราส่วนผสมของธาตุ Y:Ba:Cu ต่าง ๆ กัน ในที่นี้เราจะใช้อัตราส่วน Y:Ba:Cu = 1:2:3 ขบวนการสร้างจะเริ่มตั้งแต่การเตรียมสาร โดยการคำนวณหาอัตราส่วน และขั้นตอนต่าง ๆ ตามลำดับดังที่แสดงด้วยรูป 1-1

1.1 การคำนวณหาอัตราส่วน

ในการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้นเราใช้อัตราส่วนของธาตุ Y:Ba:Cu = 1:2:3 สารที่เราใช้ในการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดก็คือ Y_2O_3 , $BaCO_3$, CuO [Y = 88.9, O = 15.9, Ba = 137.34, C = 12, Cu = 63.54]

$$\begin{aligned} \text{สาร } Y_2O_3 & \quad 1 \text{ โมล หนัก } (88.9 \times 2) + (15.9 \times 3) & = 225.5 \text{ g} \\ \text{สาร } BaCO_3 & \quad 1 \text{ โมล หนัก } 137.34 + 12 + (15.9 \times 3) & = 197.04 \text{ g} \\ \text{สาร } CuO & \quad 1 \text{ โมล หนัก } 63.54 + 15.9 & = 79.44 \text{ g} \end{aligned}$$

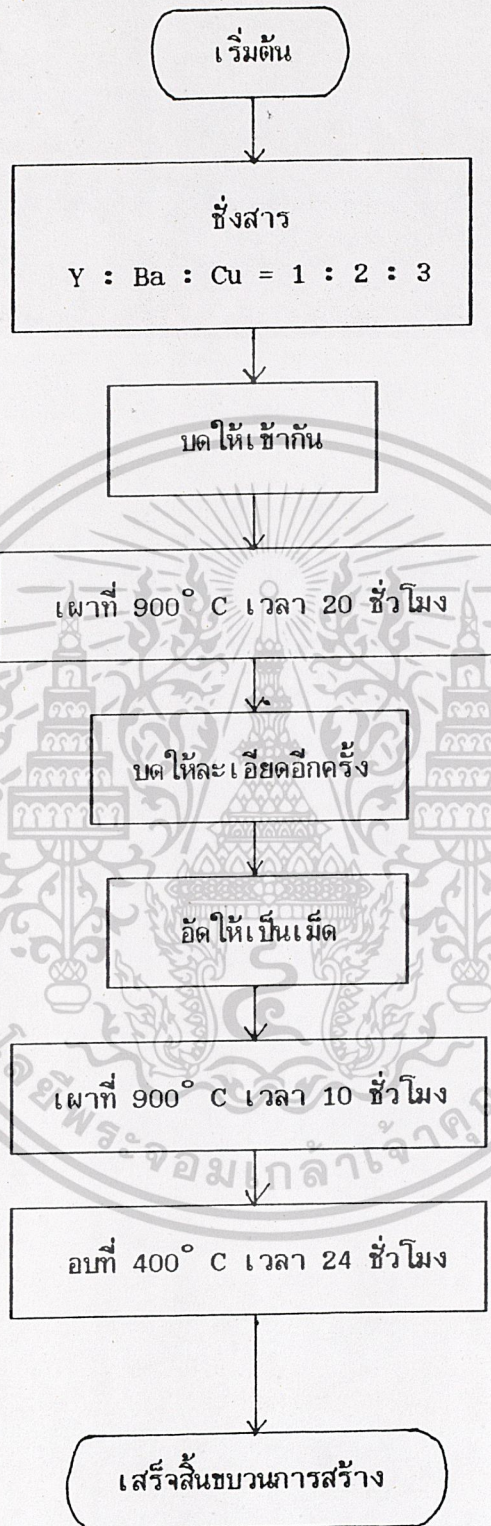
$$\begin{aligned} \text{สาร } Y_2O_3 & \quad 1 \text{ โมล (225.5 g) จะมี Y } 2 \text{ โมล ต้องการ Y } 1 \text{ โมล ต้องใช้ } Y_2O_3 = \\ & 225.5/2 = 112.75 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{สาร } BaCO_3 & \quad 1 \text{ โมล (197.04 g) จะมี Ba } 1 \text{ โมล ต้องการ Ba } 2 \text{ โมล ต้องใช้ } BaCO_3 = \\ & 197.04 \times 2 = 394.08 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{สาร } CuO & \quad 1 \text{ โมล (79.44 g) จะมี Cu } 1 \text{ โมล ต้องการ Cu } 3 \text{ โมล ต้องใช้ } CuO = \\ & 79.44 \times 3 = 238.32 \text{ g} \end{aligned}$$

ดังนั้นอัตราส่วนของ Y:Ba:Cu = 1:2:3 ก็คืออัตราส่วนของ Y_2O_3 : $BaCO_3$: CuO เท่ากับ 112.75 g : 394.08 g : 238.32 g ซึ่งในการสร้างเราจะใช้อัตราส่วนนี้คือ Y_2O_3 : $BaCO_3$: CuO เท่ากับ 112.75 g : 394.08 g : 238.32 g ถ้าต้องการสร้างเป็นปริมาณมากหรือน้อยเราก็เพิ่มหรือลดลงไปตามอัตราส่วนดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 1-1 แสดงกระบวนการสร้างสารตัวนำยิ่งยวด
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

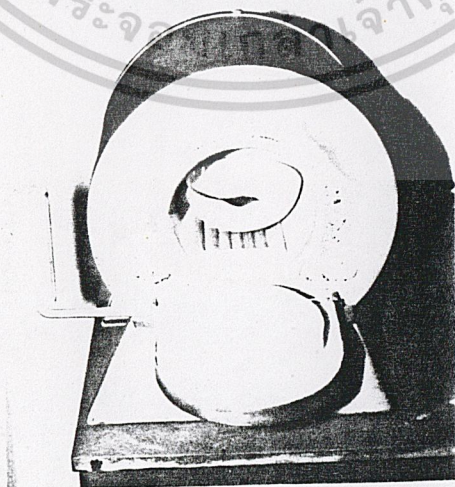
1.2 กรรมวิธีในการสร้าง

1. นำสารอิทเทรียมออกไซด์, แบเรียมคาร์บอเนต และคอปเปอร์ออกไซด์ ผสมกันให้ได้อัตราส่วนของ Y : Ba : Cu เป็น 1 : 2 : 3 โดยใช้ $Y_2O_3 = 2.25 \text{ g}$ $BaCO_3 = 7.88 \text{ g}$ $CuO = 4.76 \text{ g}$ แล้วนำมาผสมและบดให้ละเอียดเป็นเนื้อเดียวกันดังรูป



รูปที่ 1-2 แสดงเนื้อสารที่บดละเอียดแล้ว

2. นำไปเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลานาน 20 ชั่วโมง ดังรูป



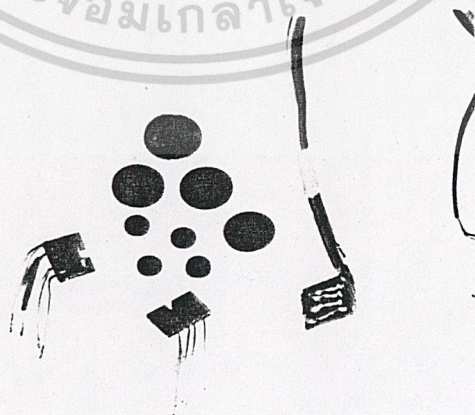
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 1-3 แสดงการนำสารไปเผาในเตาเผาให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. นำสารที่ได้จากการเผา มาบดให้ละเอียดอีกครั้งแล้วอัดเป็นเม็ด เพื่อให้อยู่ในสภาพที่สามารถนำมาทดสอบได้โดยสะดวก ดังรูป



รูปที่ 1-4 แสดงสารตัวนำซึ่งขูดที่อัดเป็นเม็ด

4. หลังจากที่อัดเป็นเม็ดเรียบร้อยแล้ว จะถูกนำไปเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสอีกครั้ง โดยใช้เวลาในการเผาไหม้ 10 ชั่วโมง
5. เมื่อเผาครบ 10 ชั่วโมงแล้ว จะทำการอบที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสอีกประมาณ 24 ชั่วโมง
6. ลดอุณหภูมิจนถึงอุณหภูมิห้อง จะได้สารเซรามิคมีลักษณะดังรูป ซึ่งพร้อมที่นำไปทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 1-5 แสดงสารตัวนำซึ่งขูดที่สร้างเสร็จแล้ว
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

คุณสมบัติและการทดสอบ

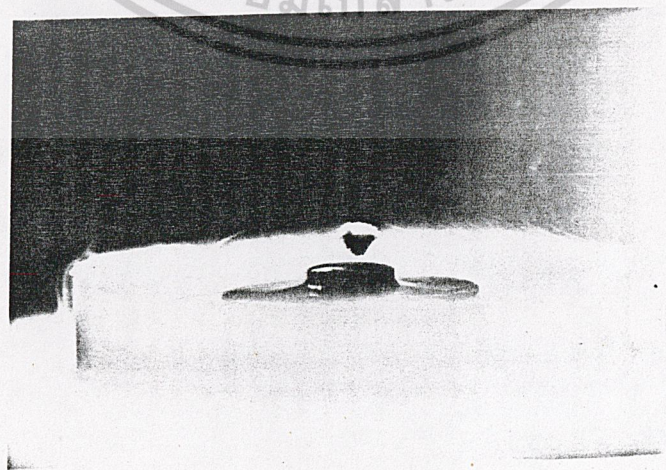
ตัวนำไฟฟ้าที่ยาวที่สร้างขึ้น จะเกิดสภาพการนำไฟฟ้าที่ยาวได้ก็ต่อเมื่อมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต (ประมาณ 77 องศาเซลวิน) ขณะที่เกิดสภาพการนำไฟฟ้าที่ยาวนั้น ตัวนำไฟฟ้าที่ยาวจะมีคุณสมบัติเฉพาะชั้นคือ ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ ปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน และปรากฏการณ์ซีลสปี ปรากฏการณ์เหล่านี้เราต้องทำการทดสอบเพื่อแสดงว่าตัวนำไฟฟ้าที่ยาวที่สร้างขึ้นมีความสมบูรณ์มากน้อยเพียงใด

2.1 ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์

ถ้าตัวนำไฟฟ้าที่ยาวถูกทำให้เย็นต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตของมัน จะไม่ยอมให้สนามแม่เหล็กผ่านภายในตัวมันได้ ถ้าตัวนำไฟฟ้าที่ยาวถูกรุกไล่โดยสนามแม่เหล็ก screening current จะถูกสร้างขึ้นที่ผิวของมัน และ screening current จะสร้างสนามแม่เหล็ก ซึ่งมีขนาดเท่ากันแต่มีทิศตรงข้ามกับทิศของสนามแม่เหล็กที่รุกไล่ ทำให้สนามแม่เหล็กรวมเป็นศูนย์ภายในตัวนำไฟฟ้าที่ยาว อย่างไรก็ตามถ้าสนามแม่เหล็กมีกำลังสูงเกินไป ตัวนำไฟฟ้าที่ยาวก็จะกลับคืนสู่สภาพปกติ แม้ว่ามันจะถูกทำให้เย็นต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต

การทดสอบ

นำตัวอย่างตัวนำไฟฟ้าที่ยาวจากทั้ง 4 ชุด แชนไนโคโรเจนเหลวซึ่งมีจุดเดือดที่ 77 องศาเซลวิน จากนั้นนำแม่เหล็กมาวางเหนือตัวนำไฟฟ้าที่ยาว ตัวนำไฟฟ้าที่ยาวจะแสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ คือไม่ยอมให้เส้นแรงแม่เหล็กผ่านตัวมัน จึงทำให้แม่เหล็กถูกผลักลอยอยู่เหนือตัวนำไฟฟ้าที่ยาวได้ ดังรูป 2-1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 2-1 แสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

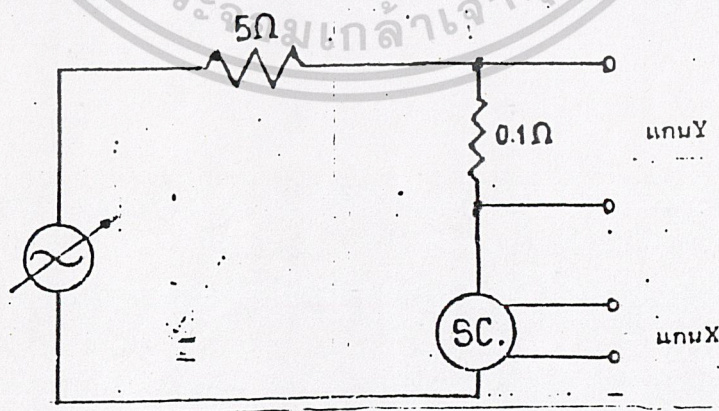
2.2 ปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน

ปรากฏการณ์ที่สารเซรามิกที่ได้จะสูญเสียความต้านทานทางไฟฟ้าทั้งหมด และเกิดการนำไฟฟ้ายิ่งยวด นั่นคือมันสามารถนำไฟฟ้าได้โดยไม่สูญเสียพลังงาน นักวิทยาศาสตร์ใช้ทฤษฎีบีซีเอสอธิบายว่า เมื่ออุณหภูมิต่ำลงการสั่นของโครงสร้างผลึกภายในสารจะน้อยลง และที่อุณหภูมิก่อเกิดภาวะตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด การสั่นสะเทือนจะต่ำสุด ในขณะที่อิเล็กตรอนอิสระที่ทำหน้าที่นำกระแสจะจับคู่อย่างเป็นระเบียบ ซึ่งทำให้สามารถวิ่งผ่านโครงสร้างตาข่ายของผลึกไปได้โดยไม่มีสิ่งใดขวางกั้น นั่นหมายถึงการเกิดกระแสไหลโดยปราศจากความต้านทาน

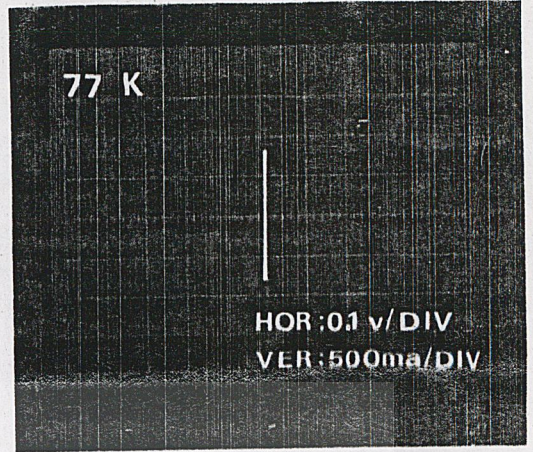
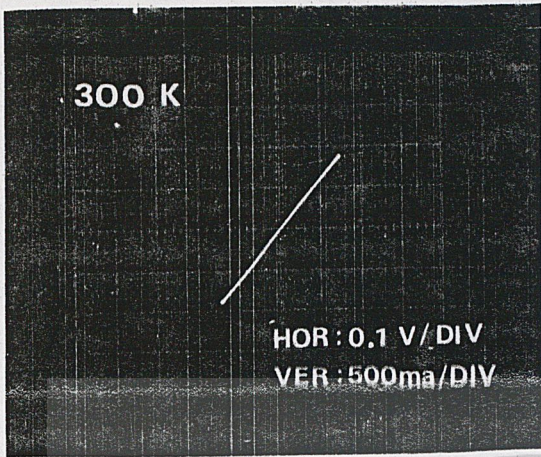
การทดสอบ

ใช้วงจรตามรูป 2-2 โดยใช้แหล่งจ่ายกระแสเป็นแหล่งจ่ายกำลัง (Power Supply) แล้ววัดแรงดันที่ตกคร่อมตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อุณหภูมิห้อง ชั้นสารที่ทดลองจะมีค่าความชันซึ่งสามารถคำนวณเป็นค่าความต้านทาน ได้ดังรูป 2-3

จุ่มชั้นสารลงในไนโตรเจนเหลวจะสังเกตเห็นว่า กราฟคุณสมบัติระหว่างกระแสกับแรงดันจะตั้งชันในแกน y นั่นแสดงว่าไม่มีความต่างศักย์เกิดขึ้นเลยมีแต่กระแสไฟฟ้า นั่นคือความต้านทานมีค่าเป็นศูนย์ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 2-4



เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับอาจารย์ผู้สอนเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น โดยไม่หวังผลตอบแทนด้านการค้า
รูปที่ 2-2 แสดงวงจรการวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส กับแรงดันที่อุณหภูมิปกติ (25°)

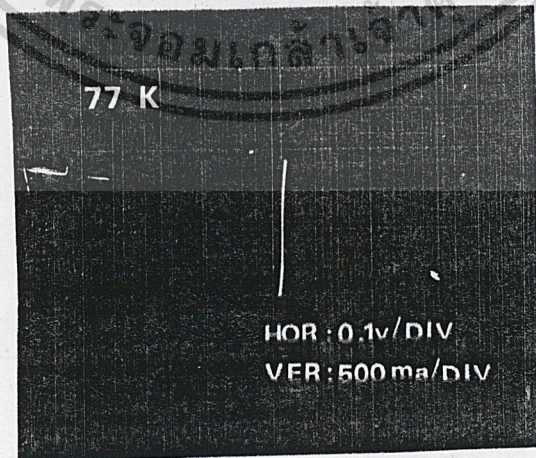
รูปที่ 2-4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส กับแรงดันที่อุณหภูมิต่ำ 77 K (-196°)

2.3 ปรากฏการณ์ชิลลีย์

ปรากฏการณ์ที่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเสียสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด อาจเนื่อง จากกระแสหรือสนามแม่เหล็กผ่านเข้าไปเกิดค่าวิกฤต

การทดสอบ

ใช้วงจรตามรูปที่ โดยแรงแม่เหล็กไฟฟ้ายิ่งยวดในไนโตรเจนเหลว จะปรากฏเส้น กราฟในจอของออสซิลโลสโคปอยู่ในแกน y จากนั้นค่อยเพิ่มกระแสให้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอีก สิ่ง เกิดเส้นกราฟจะค่อย ๆ เบนออกจากแกน y แสดงว่าเกิดความต่างศักย์ขึ้นในเนื้อสารตัวนำไฟฟ้า ยิ่งยวด นั่นคือสภาพตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเริ่มถูกทำลายแล้วดังรูปที่ 2-5



รูปที่ 2-5 แสดงภาพความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันขณะที่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

บทนี้ นำเสนอสมมติฐานแบบจำลองโครงสร้างมหภาค ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Y-Ba-Cu-O แบบเซรามิก เพื่อใช้อธิบายผลการทดลองวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของชั้นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ในการทดลองเพื่อสนับสนุนสมมติฐานแบบจำลองดังกล่าวได้ จัดเตรียมตัวอย่างชั้นสารที่มีรูปร่างเรขาคณิตต่าง ๆ กัน ผลการทดลองในครั้งนี้สามารถใช้สมมติฐานแบบจำลองโครงสร้างมหภาคดังกล่าว อธิบายคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันได้เป็นอย่างดี

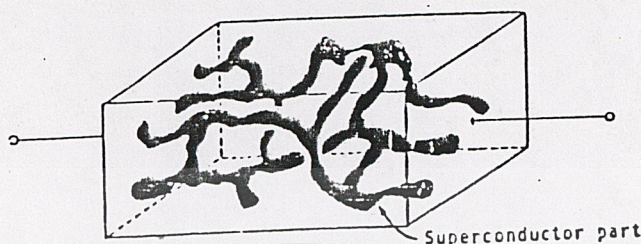
3.1 สมมติฐานแบบจำลองโครงสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

เนื่องจากตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอุณหภูมิสูงที่ทางห้องปฏิบัติการตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดสร้างขึ้นมานั้น มีลักษณะเนื้อสารเป็นเซรามิกหรือวัสดุประเภทกระเบื้อง ดังนั้นจึงพิจารณาตั้งเป็นสมมติฐานแบบจำลองโครงสร้างของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิกได้ว่า ในเนื้อสารที่สร้างขึ้นนั้นประกอบด้วยส่วนของเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ประปนอยู่กับส่วนที่ไม่เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด และจากการที่เม็ดสารสามารถแสดงสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้แสดงว่า จะต้องมีส่วนตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดต่อเชื่อมกันอยู่ระหว่างจุดที่ทำการวัดนั้น ซึ่งอาจแสดงแบบจำลองให้เห็นได้ในรูปที่ และในส่วนของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเอง ยังเชื่อมต่อกันอย่างไม่เป็นระเบียบ กล่าวคือ มีทั้งที่เชื่อมกันอย่างแข็งแรง และเชื่อมกันอย่างหลวม ๆ อันเนื่องมาจากการอัดผงสารเข้าด้วยกัน จึงทำให้โมเลกุลของสารประกอบมาชิดกันอย่างไม่เป็นระเบียบ ดังแสดงในรูปที่ โดยส่วนคออดนี้หมายถึงส่วนที่เชื่อมกันอย่างหลวม ๆ ดังกล่าว ในลักษณะนี้ทำให้เส้นทางเชื่อมต่อของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีโอกาสถูกทำลายได้ง่าย ที่บริเวณจุดที่มีการยึดกันอย่างหลวมนั้น ซึ่งสาเหตุที่ทำให้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดถูกทำลายได้นั้นเป็นที่ทราบกันดีว่ามี 3 วิธี กล่าวคือ

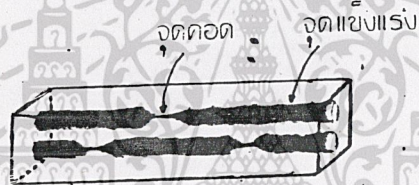
1. เพิ่มอุณหภูมิให้สูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต (T_c)
2. การเพิ่มสนามแม่เหล็กเข้าไปมาก ๆ จนมากกว่าค่าสนามแม่เหล็กวิกฤต [$H_c(T)$] ซึ่งค่าของสนามแม่เหล็กวิกฤตนี้จะแปรตามอุณหภูมิ
3. เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจำนวนมาก (ถ้ามีกระแสไฟฟ้าไหลมากจะทำให้สนามแม่เหล็กเกิดขึ้นมาก และถ้ามีมากกว่าค่าสนามวิกฤตแล้ว สภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดก็จะถูกทำลายด้วยกระแสนี้)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองโครงสร้างภายใน



รูปที่ 3-1 แสดงแบบจำลอง โครงสร้างภายในของเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด



รูปที่ 3-2 แสดง โครงสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ขยายให้เห็นบริเวณจุดคอดและบริเวณที่แข็งแรง

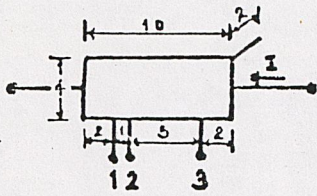
3.2 วิธีการทดลอง

ในการทดลองเพื่อยืนยันสมมติฐานแบบจำลองดังกล่าว ได้จัดเตรียมเม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดรูปทรงแบบต่าง ๆ ดังรูปที่ 3-3 ซึ่งเป็นการจำลองสภาพการไหลของกระแสในเนื้อสาร ส่วนที่เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ในการทดลองจะทำการต่อขั้วออกมา 5 ขั้ว โดยขั้วค่อนอกทำหน้าที่ให้กระแสเข้าและออก ส่วนขั้วที่จะใช้ตรวจสอบแรงดันคือ ขั้ว 1, 2 และ 3 จากนั้นก็ทำการวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งใช้วงจรดังรูป 3-4 ทำการวัดค่าแรงดันระหว่างขั้ว 2-1, 3-2 และ 3-1 การทดลองดังกล่าวจะทำที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 77 K โดยเริ่มจากชิ้นสารที่มีรูปทรงเป็นแท่งสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 3-3 (ก) แล้วจึงทำการตะไบแต่งชิ้นสารให้มียอวยบากเป็นรูปตัวไอ ดังแสดงในรูปที่ 3-3 (ข) จากนั้นจึงทำการตะไบแต่งรอยบากนั้นให้เป็นรูปตัววีและยู ดังรูปที่ 3-3 (ค) และ 3-3 (ง) ตามลำดับ ผลการทดลองแต่ละครั้งจะ

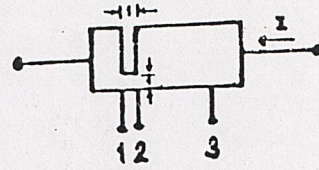
ถูกบันทึกลงบนกระดาษกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

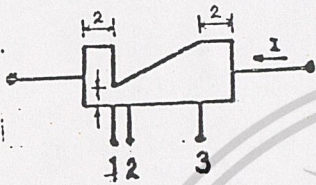
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



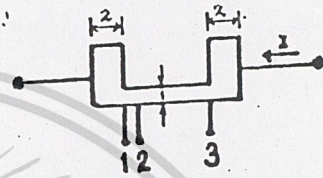
3-3 (ก) แท่งสี่เหลี่ยมยาว



3-3 (ข) แท่งสี่เหลี่ยมยาวมากเป็นร่องรูปตัวไอ

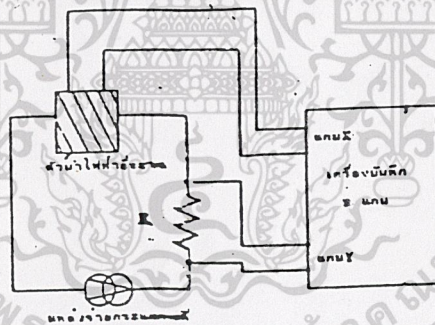


3-3 (ค) แท่งสี่เหลี่ยมยาวมากเป็นร่องรูปตัววี



3-3 (ง) แท่งสี่เหลี่ยมยาวมากเป็นร่องรูปตัวยู

รูปที่ 3-3 แสดงรูปแบบต่าง ๆ ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ใช้ทดลอง

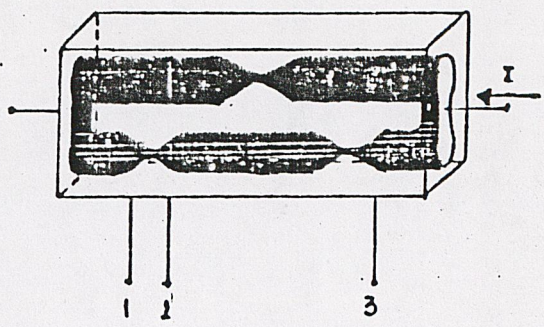
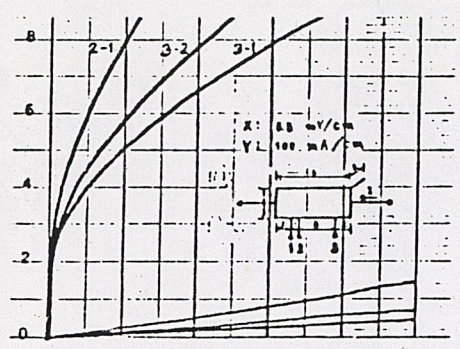


รูปที่ 3-4 แสดงวงจรที่ใช้วัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน

3.3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลอง ดังรูปที่ 3-1 เพื่อให้ง่ายต่อการเข้าใจ จะสมมติให้ส่วนของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ไม่เป็นระเบียบนั้น ถูกแทนด้วยท่อนำกระแสไฟฟ้ายิ่งยวด 2 ท่อ ลักษณะเดียวกับในรูปที่ 3-2 ซึ่งจะเห็นว่าส่วนของ เนื้อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดในท่อบนมีบริเวณคอด 1 จุดที่ตรงตรง และในท่อล่างจะมีบริเวณคอด 2 จุด ที่ริมทั้งด้านซ้ายและด้านขวา ผลที่ได้สามารถใช้สมมติฐานแบบจำลองดังกล่าวมาอธิบายคุณสมบัติ ทางไฟฟ้าได้ดังนี้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ก็ตาม ห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-5 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับ แรงดันของขึ้นสารในรูป 3-3(ก)

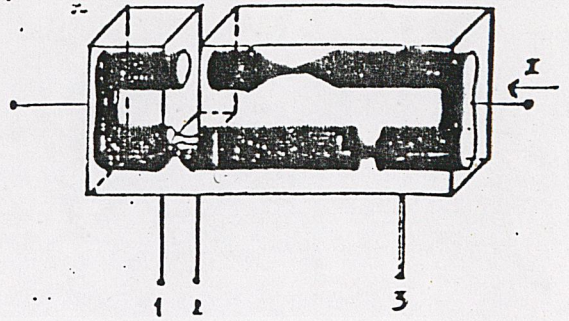
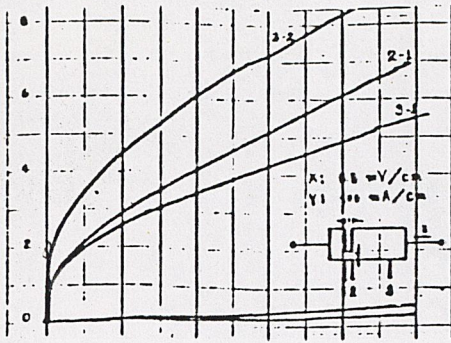
รูปที่ 3-5 (ข) แบบจำลองโครงสร้างมหภาค ของขึ้นสารในรูป 3-3 (ก)

เมื่อใช้ขึ้นสารดังรูปที่ 3-3 (ก) จะได้ผลการทดลองแสดงดังกราฟรูปที่ 3-5 (ก) จะสังเกตเห็นว่าค่ากระแสลิวทิตมีค่าประมาณ 200 mA เท่ากันทุกขั้วที่ทำการตรวจสอบ ส่วนความต้านทานขณะที่สูญเสียสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดยิ่งนั้น ระหว่างขั้ว 3-1 จะมากกว่าขั้ว 3-2 และขั้ว 3-2 จะมากกว่าขั้ว 2-1 ซึ่งเมื่อนำค่าแรงดันที่กระแสเดียวกันของขั้ว 2-1 กับขั้ว 3-2 มารวมกันทาง นิซคณิตพบว่า มีค่าเท่ากับค่าแรงดันตกคร่อมขั้ว 3-1 พอดี ผลที่ได้สามารถอธิบายด้วยแบบจำลอง โครงสร้างดังรูปที่ 3-5 (ข) ดังนี้

ขณะที่กระแสที่ไหลผ่านตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีปริมาณน้อยกว่า 200 mA บริเวณจุดคอด ยังคงเชื่อมกันอยู่ จึงทำให้ไม่ปรากฏค่าแรงดันตกคร่อมระหว่างขั้วใด ๆ เลย แต่เมื่อมีปริมาณกระแสที่ไหลผ่านเกิน 200 mA ทำให้บริเวณจุดคอดขาดออกจากกัน จึงเกิดเป็นความต้านทานขึ้น จะเห็นได้ว่าระหว่างขั้ว 3-2 จะมีจุดขาด หรือนั่นก็คือ ความต้านทานมากกว่าระหว่างขั้ว 2-1 และ ในทำนองเดียวกันระหว่างขั้ว 3-1 ก็จะมีจุดขาดมากกว่าระหว่างขั้ว 3-2 ด้วย ดังนั้นที่ปริมาณ กระแสค่าหนึ่ง ๆ ผลรวมของค่าแรงดันตกคร่อมระหว่างขั้ว 2-1 กับ 3-2 จึงมีค่าเท่ากับแรงดัน ตกคร่อมระหว่างขั้ว 3-1 นั้นเอง

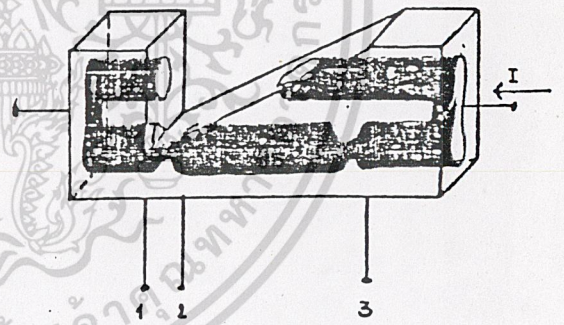
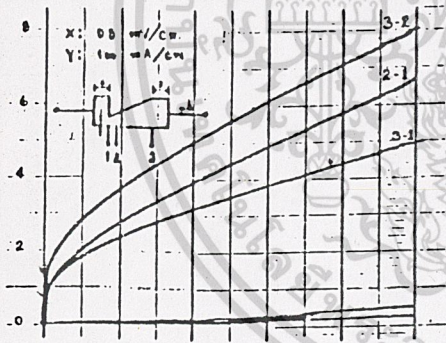
จากนั้นเมื่อขึ้นสารถูกตะไบแต่งให้มีรูปทรงดังรูปที่ 3-3 (ข) เพื่อตัดการเชื่อมต่อ ของเนื้อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด จะได้ผลการทดลองแสดงดังกราฟ รูปที่ 3-6 (ก) จะเห็นได้ว่าปริมาณกระแสลิวทิตระหว่างขั้ว 2-1 จะมีค่าลดลงเหลือเพียง 60 mA และเนื่องจากขั้วที่ 2 อยู่ที่ ขอบของร่องบากพอดีจึงมีผลให้ปริมาณกระแสลิวทิตระหว่างขั้ว 3-2 ลดลงเล็กน้อยเหลือเป็น 160 mA ดังนั้นกระแสลิวทิตระหว่างขั้ว 3-1 จึงมีค่าเพียง 60 mA อย่างไรก็ตาม ค่าแรงดันตกคร่อม ระหว่างขั้ว 2-1 รวมกับขั้ว 3-2 ยังคงมีค่าเท่ากับค่าแรงดันตกคร่อมระหว่างขั้ว 3-1 เช่นเดิม นอกจากนี้ค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นระหว่างขั้ว 3-1 จะมากกว่าขั้ว 2-1 และระหว่างขั้ว 2-1

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เด็ดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-6 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับ แรงดันของขั้วในรูป 3-3(ข) รูปที่ 3-6 (ข) แบบจำลองโครงสร้างมหภาค ของขั้วในรูป 3-3 (ข)

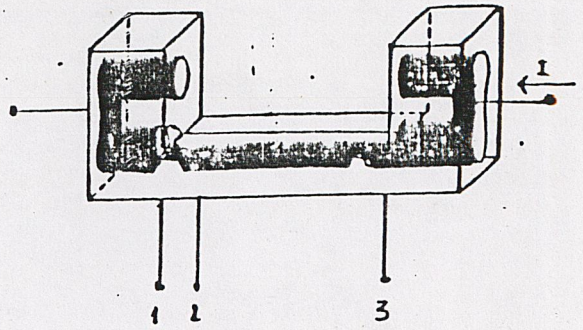
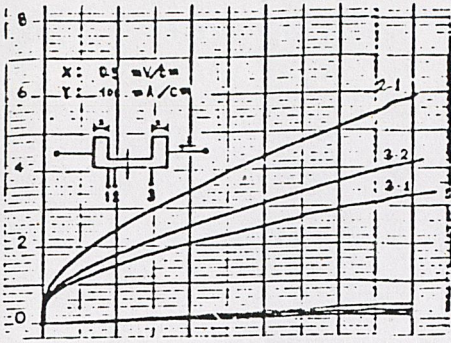
จะมากกว่าขั้ว 3-2 ผลดังกล่าวนี้สามารถอธิบายได้โดยใช้แบบจำลองข้างต้น ดังแสดงในรูปที่ 3-6 (ข) จะเห็นว่าระหว่างขั้ว 2-1 จะมีจุดยอดที่มากกว่าเดิม ดังได้ปริมาณกระแสลัดวงจรมีค่าน้อยลง และเมื่อเปรียบเทียบความต้านทานหรือจุดขาดระหว่างขั้ว 3-2 กับขั้ว 2-1 พบว่าจุดขาดระหว่างขั้ว 2-1 จะมีมากกว่า ซึ่งตรงกับผลที่วัดได้จากการทดลอง



รูปที่ 3-7 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับ แรงดันของขั้วในรูป 3-3(ค) รูปที่ 3-7 (ข) แบบจำลองโครงสร้างมหภาค ของขั้วในรูป 3-3 (ค)

เมื่อทำการตะไบแต่งร่องปากให้รูปทรงดังรูปที่ 3-3 (ค) จะได้ผลการทดลองแสดงดังกราฟรูปที่ 3-7 (ก) จะเห็นได้ว่าปริมาณกระแสลัดวงจรระหว่างขั้ว 2-1 และขั้ว 3-1 ยังคงมีค่าคงเดิมเป็น 60 mA แต่ระหว่างขั้ว 3-2 จะมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยเหลือเพียง 120 mA สำหรับลักษณะของความต้านทานระหว่างขั้วต่าง ๆ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับกัน ยังคงมีแนวโน้มเหมือนกับผลการทดลองในรูปที่ 3-6 (ก) ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยใช้สมมติฐานแบบจำลองเดิม

โดยการตัดส่วนของแบบจำลองในบริเวณร่องปากทั้งเช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 3-7 (ข) ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-8 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับ แรงดันของขั้วในรูป 3-3 (ง) รูปที่ 3-8 (ข) แบบจำลองโครงสร้างมหภาค ของขั้วในรูป 3-3 (ง)

และเมื่อทำการตะไบแต่งร่องบากให้มีรูปทรงดังรูปที่ 3-3 (ง) จะได้ผลการทดลอง แสดงดังกราฟรูปที่ 3-8 (ก) จะเห็นว่าลักษณะรูปทรงของขั้วนำไฟฟ้ายิ่งยวดในบริเวณที่ทำการวัดค่าแรงดันขณะนี้คล้ายกับรูปทรงในรูปที่ 3-3 (ก) เพียงแต่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดของการนำ กระแสลดลงเท่านั้น ดังนั้นผลการทดลองที่ได้จึงมีแนวโน้มเช่นเดียวกับผลการทดลองรูปที่ 3-5 (ก) โดยที่ค่ากระแสสวิกฤตลดลงเหลือเพียง 60 mA ซึ่งอธิบายได้โดยใช้แบบจำลองเดิม ดัง แสดงในรูปที่ 3-8 (ข) จะเห็นว่าความต้านทานหรือจุดขาดมีมากขึ้น ดังนั้นเมื่อพิจารณาค่าความ ต้านทานระหว่างขั้ว 2-1 ในผลการทดลองรูปที่ 3-8 (ก) จึงมีค่ามากกว่าในรูปที่ 3-5 (ก) นั้น เอง

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองสามารถอธิบายพฤติกรรมทางไฟฟ้า ในแต่ละช่วงของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบเซรามิก โดยใช้สมมติฐานแบบจำลอง โครงสร้างมหภาคที่นำเสนอในครั้งนี้ได้ดังต่อไปนี้

1. ที่กระแสต่ำกว่าค่ากระแสสวิกฤต จะไม่เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขั้วในรูป 3-3 (ก) เนื่องจากส่วนของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดยังเชื่อมกันดีอยู่
2. ที่กระแสเท่ากับค่ากระแสสวิกฤต ส่วนคอตัดนั้นพร้อมจะขาดแล้วแต่ยังไม่ขาด จึงไม่ แสดงค่าแรงดันตกคร่อมขั้วในรูป 3-3 (ก) ออกมา
3. เมื่อกระแสมากกว่าค่ากระแสสวิกฤต ส่วนคอตัดดังกล่าวจะขาดจากกัน จึงเกิดมี แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขั้วในรูป 3-3 (ก) ขึ้น และเมื่อกระแสเพิ่มมากขึ้น ส่วนที่ขาดนั้นก็จะมีมากขึ้นด้วย ทำให้ค่า ความต้านทานเพิ่มมากขึ้น ดังจะสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟ

ไม่ว่าการณ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ผลของรูปร่างทางเรขาคณิตที่ต่างกันนั้น ยังมีผลต่อค่ากระแสวิกฤตด้วย ส่วนของชิ้นสารที่มีความคอดน้อยจะถูกทำลายด้วยกระแสได้ยาก ทำให้มีค่าของกระแสวิกฤตสูง ส่วนของชิ้นสารที่มีความคอดมากจะถูกทำลายได้ง่าย กระแสวิกฤตจึงมีค่าต่ำ

จะเห็นได้ว่า จากการทดลองที่ผ่านมาทั้งหมด สามารถใช้สมมติฐานแบบจำลองโครงสร้างมหภาคดังกล่าวนี้มาอธิบายคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นสารรูปทรงต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี ซึ่งประโยชน์จากการศึกษาแบบจำลองโครงสร้างนี้ ทำให้เกิดแนวความคิดในการออกแบบตัวนำไฟฟ้าที่มีอยู่แล้ว ให้มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าตามต้องการได้ โดยอาศัยการปรับแต่งรูปทรงของชิ้นสารแทนการปรับกระบวนการสร้าง ซึ่งเป็นการช่วยให้นำไปประยุกต์ใช้งานได้สะดวกยิ่งขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

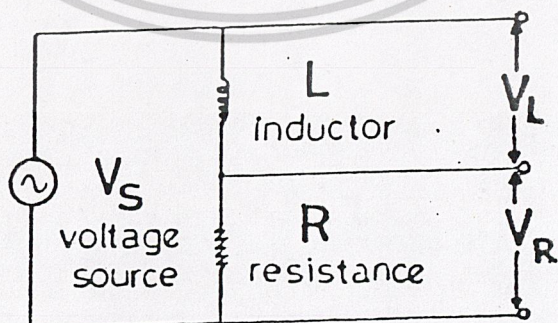
การหาค่าเปอร์เซ็นต์ต่อปริมาตรของตัวนำยิ่งยวด

การศึกษาปริมาณของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Y-Ba-Cu-O โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ในเนื้อสารแบบเซรามิก สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การคำนวณจากน้ำหนักของธาตุที่มีในเนื้อสารแบบเซรามิกที่ใช้เครื่อง Energy Dispersive X-ray Analysis (EDAX) เป็นต้น สำหรับบทนี้จะเสนอการหาโดยใช้อัตราส่วนของค่าอินดักแตนซ์ของขดลวด ที่มีตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอยู่ในเปรียบเทียบกับค่าอินดักแตนซ์ของขดลวดในขณะที่มีอุณหภูมิเดียวกัน โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของค่าความแตกต่างของการเหนี่ยวนำ ซึ่งค่าของปริมาณของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดในเนื้อสารแบบเซรามิกที่หาได้โดยวิธีนี้ มีค่าใกล้เคียงกับวิธีคำนวณจากน้ำหนักของธาตุในเนื้อสารแบบเซรามิกที่กล่าวมาข้างต้น

การทดลองและผลการทดลอง

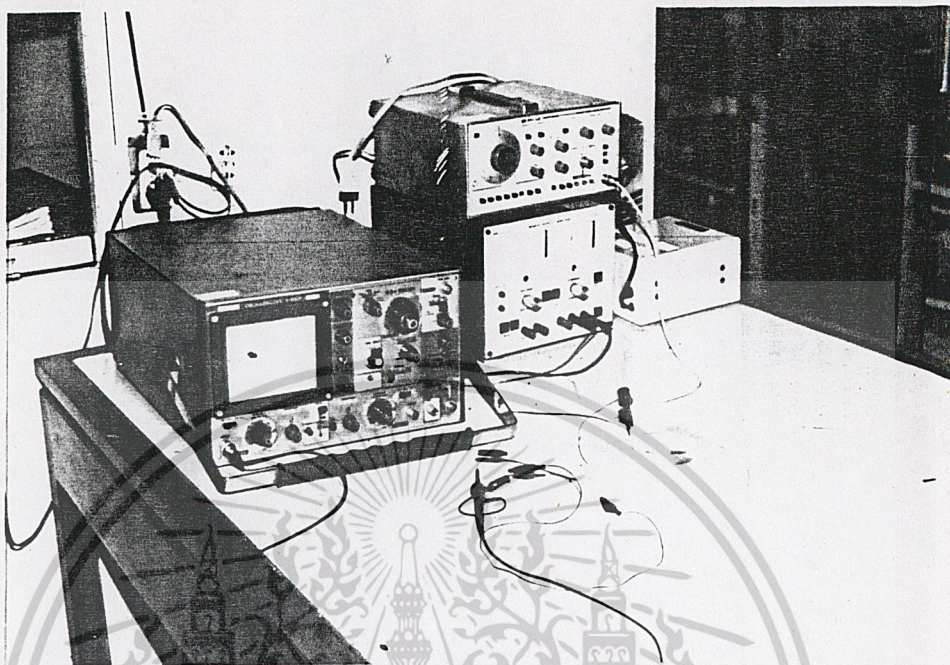
1. ก่อนที่จะทำการหาปริมาณตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ในเนื้อสารแบบเซรามิกของชิ้นสารตัวอย่างที่เตรียมขึ้น จำเป็นต้องนำชิ้นสารนี้มาตรวจสอบคุณสมบัติการเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เพื่อให้มั่นใจว่าสารตัวอย่างนั้นมีตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอยู่ โดยการตรวจสอบปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner effect) และปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน (Zero resistance) ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2

2. จากนั้นจึงทำการทดลองเพื่อหาปริมาณของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ในชิ้นสารตัวอย่างที่แสดงคุณสมบัติดังที่กล่าวมาข้างต้น โดยจะจัดเครื่องมือการทดลองตามวงจรที่ 4-1 (ก-ข)



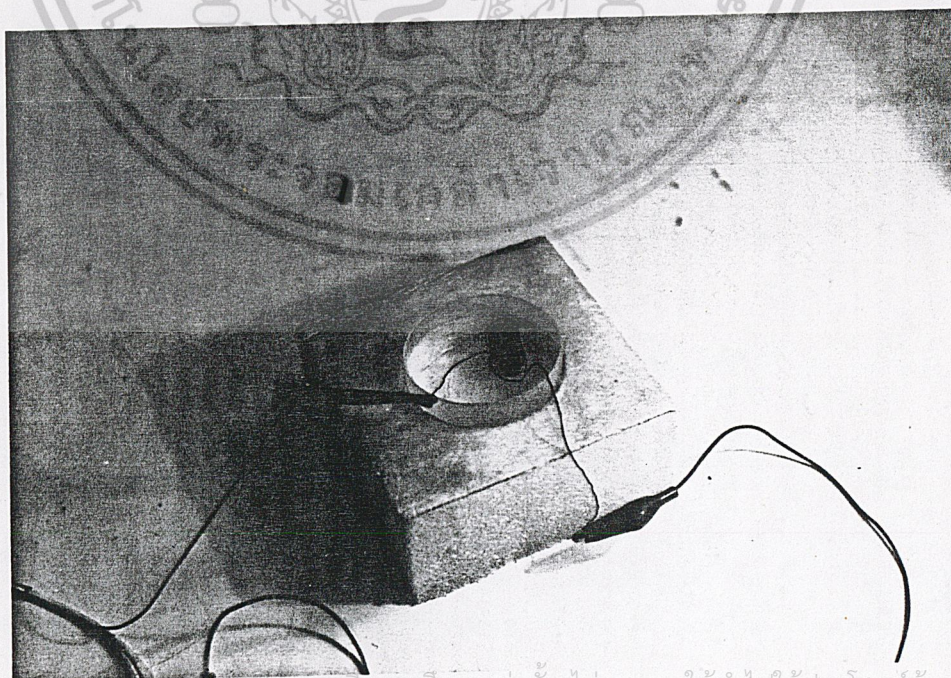
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4-1 (ก) แสดงวงจรที่ใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-2 (ข) แสดงการจัดเครื่องมือ

ในเวลาทดลองจะต้องให้ขดลวด (coil) มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ต้องการตรวจสอบนั้น โดยจุ่มขดลวดลงในไนโตรเจนเหลวดังรูป 4-2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4-2 แสดงขดลวดที่จุ่มในไนโตรเจนเหลว
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่แบบสงวนเนื้อหาและตัวอย่างไปยังเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ให้แรงดันขาเข้ามีขนาดต่าง ๆ กัน ทำการบันทึกค่าแรงดันขอดีงขอดี (V_{PP}) ที่คร่อมขดลวด (V_L) และตัวต้านทาน (V_R) ลงในตารางที่ 1 ก. โดยให้ความต้านทานมีค่า 10 โอห์ม และความถี่มีค่า 100 kHz

V_{in} (mV)	V_L (mV)	V_R (mV)
200	170	58
300	250	86
400	332	113
500	415	142
600	488	167

ตารางที่ 1 ก. แสดงค่าแรงดันอินพุต แรงดันตกคร่อมขดลวด และแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานที่วัดได้จากการทดลอง ขณะที่ไม่มีตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

4. จัดวงจรเหมือนดังรูปที่ 4-1 แต่ใส่ไฟฟ้ายิ่งยวดที่ต้องการวัดใส่ไว้ในขดลวด โดยตัวต้านทาน ความถี่ และอุณหภูมิคงเดิม บันทึกผลดังตารางที่ 1 ข

V_{in} (mV)	V_L (mV)	V_R (mV)
200	160	66
300	248	103
400	329	135
500	393	163
600	479	199

ตารางที่ 1 ข แสดงค่าแรงดันอินพุต แรงดันตกคร่อมขดลวด และแรงดันตกคร่อม

ตัวต้านทานที่วัดได้จากการทดลอง ขณะที่ใส่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. สามารถคำนวณหาค่าอินดักแตนซ์ของขดลวดจากสมการ

$$L = [V_L/V_R] \times [R/2\pi f]$$

เมื่อ L_o เป็นค่าที่คำนวณโดยใช้ V_L และ V_R ได้จากตารางที่ 1ก

และ L_u เป็นค่าที่คำนวณโดยใช้ V_L และ V_R ได้จากตารางที่ 1ข

ค่าของ L_o และ L_u สามารถนำมาเขียนได้เป็นตารางที่ 2

V_{in} (mV)	L_o (μH)	L_u (μH)
200	4.66	3.86
300	4.63	3.83
400	4.68	3.87
500	4.65	3.84
600	4.65	3.83

ตารางที่ 2 แสดงค่าแรงดันอินพุต ค่าอินดักแตนซ์ของขดลวดขณะที่ไม่มีตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด และค่าอินดักแตนซ์ของขดลวด ขณะที่มิตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

6. นำค่าเฉลี่ย L_o และ L_u มาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดในเนื้อเซรามิกได้ จากสมการ

$$\% Vol. = [1 - (L_u/L_o)] \times 100 \%$$

โดย L_o = ค่าอินดักแตนซ์ของขดลวดขณะที่ไม่มีตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอยู่ภายใน

L_u = ค่าอินดักแตนซ์ของขดลวดขณะที่มิตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอยู่ภายใน ที่อุณหภูมิเดียวกันกับการวัดหาค่า L_o

จากตารางที่ 2 จะได้ค่าเฉลี่ย $L_o = 4.655 \mu H$ และ $L_u = 3.85 \mu H$ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ % Vol. สำเนา [1 - (3.85/4.655)] x 100 อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ 17.29% มีอาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. เปลี่ยนขดลวดที่มีอินดักแตนซ์ค่าอื่น แล้วทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ต้น คำนวณหาปริมาณของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดในเนื้อเซรามิกเป็นเปอร์เซ็นต์ ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 3 ก ตารางที่ 3 ข และตารางที่ 4 และปริมาณของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดในเซรามิกในสารตัวอย่างเดิมที่ได้จากการทดลอง โดยเปลี่ยนขดลวดใหม่มีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} \% \text{ Vol.} &= [1 - (3.403/4.12) \times 100 \\ &= 17.40 \% \end{aligned}$$

V_{in} (mV)	V_L (mV)	V_R (mV)
200	162	62
300	239	92
400	322	125
500	404	157
600	478	185

ตารางที่ 3 ก แสดงค่าแรงดันอินพุต แรงดันตกคร่อมขดลวด และแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานที่วัด ได้จากการทดลอง ขณะที่ไม่มีตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

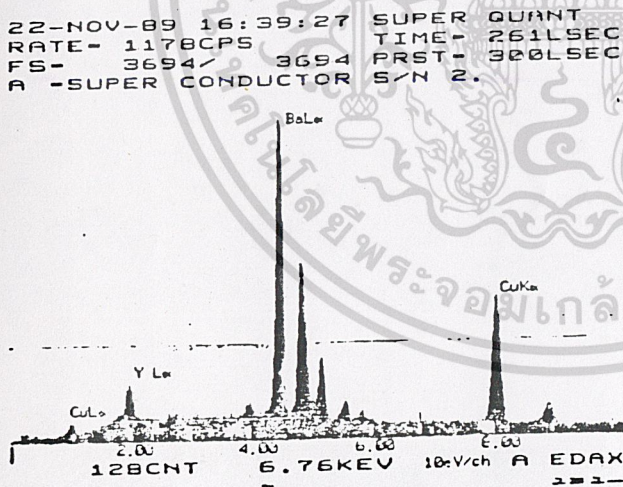
V_{in} (mV)	V_L (mV)	V_R (mV)
200	154	72
300	232	108
400	310	145
500	382	180
600	467	218

เอกสารนี้เป็นตารางที่ 3 ข แสดงค่าแรงดันอินพุต แรงดันตกคร่อมขดลวด และแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานที่วัด ได้จากการทดลอง ขณะที่ไม่มีตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

V_{in} (mV)	L_o (μH)	L_s (μH)
200	4.66	3.86
300	4.63	3.83
400	4.68	3.87
500	4.65	3.84
600	4.65	3.83

ตารางที่ 4 แสดงค่าแรงดันอินพุต ค่าอินดักแตนซ์ของขดลวดขณะที่ไม่มีตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด และค่าอินดักแตนซ์ของขดลวด ขณะที่ใส่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

8. จากตารางที่ 4 จะได้ค่าเฉลี่ย $L_o = 4.12 \mu H$ และ $L_s = 3.402 \mu H$ จากนั้นจึงนำชิ้นสารดังกล่าวนี้ไปทำการทดสอบเพื่อหาปริมาณของธาตุ โดยใช้เครื่อง EDAX ผลจากการวัดแสดง ได้ดังรูปที่ 4-3



รูปที่ 4-3

แสดงผลการทดลองจากเครื่อง EDAX

เมื่อ	Y (L)	=	4.86 %
	Ba (L)	=	57.91 %
	Cu (K)	=	31.62 %
	Cu (L)	=	5.61 %

9. จากข้อมูลที่ได้นี้สามารถนำมาคำนวณเพื่อหาเปอร์เซ็นต์ของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดดังกล่าวได้ โดยการพิจารณาว่า ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่สร้างขึ้นมานั้นมีอัตราส่วนของ Y:Ba:Cu เป็น 1:2:3 โดยโมเลกุล แต่จากผลการวัดด้วยเครื่อง EDAX จะบอกปริมาณของเนื้อสารเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเปลี่ยนให้เป็นจำนวนโมเลกุล แล้วนำมาคำนวณหาปริมาณ

ของธาตุที่ทำให้อัตราส่วนโดยโมเลกุลเป็น 1:2:3 จะได้ $(Y_1Ba_2Cu_3)$ / น้ำหนักของชิ้นสาร =
 $[(4.86 + 2.57 + 10.42)/100][100] = 17.65 \%$

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตีแบบส่งเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทสรุปการทดลอง

การคำนวณหาปริมาณของตัวนำไฟฟ้าที่ยึดในเนื้อเซรามิก เป็นเปอร์เซ็นต์โดยใช้ข้อมูลจากตารางที่ 1(ก), 1(ข) และตารางที่ 2 มีค่าเท่ากับ 17.29 % และเมื่อเปลี่ยนค่าอินดิคแตนต์แล้วทำการวัด และคำนวณหาปริมาณของตัวนำไฟฟ้าที่ยึดในเนื้อเซรามิกเป็นเปอร์เซ็นต์ โดยใช้ข้อมูลจากตารางที่ 2(ก), 2(ข) และตารางที่ 4 มีค่าเท่ากับ 17.40 % ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันมาก เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัดหาเปอร์เซ็นต์ด้วยเครื่อง EDAX มีค่าเป็น 17.65 % จะเห็นได้ว่าค่าเปอร์เซ็นต์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

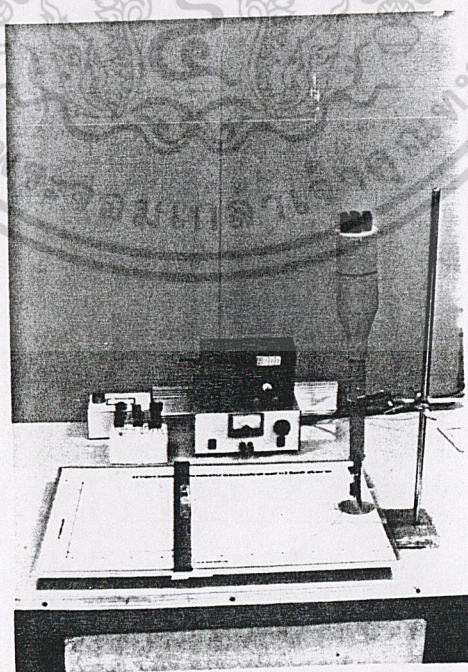
บทที่ 5

การตรวจจับสนามแม่เหล็ก โคสตัวนำยิ่งยวด

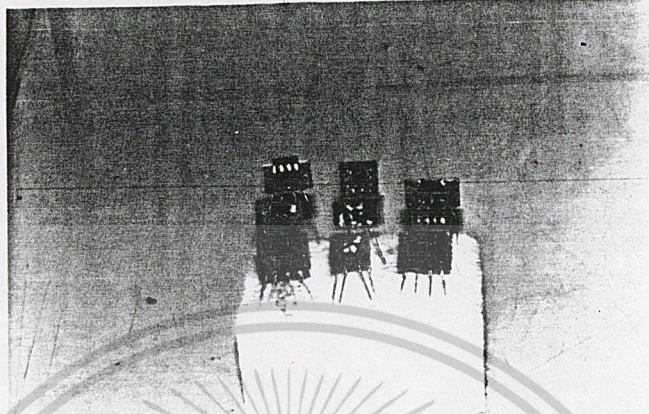
การศึกษาปรากฏการณ์การจําสํานแม่เหล็ก ไฟฟ้าในตัวนำยิ่งยวดชนิด Y-Ba-Cu-O โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า พบว่าเมื่อมีสนามแม่เหล็กจากภายนอกมากระทบ จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเนื้อสารตัวนำยิ่งยวด และค่าแรงดันนั้นจะยังมีปรากฏอยู่ ถึงแม้ว่าสนามแม่เหล็กภายนอกนั้นจะหมดไปแล้วก็ตาม ปรากฏการณ์ดังกล่าวถูกพิจารณาว่าเป็นผลของการจําสํานแม่เหล็ก ไฟฟ้าของตัวนำ ไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Y-Ba-Cu-O ค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเนื้อสารตัวนำ ไฟฟ้ายิ่งยวดนั้นจะมีขนาดเพิ่มขึ้น เมื่อเส้นแรงแม่เหล็กที่มากระทบนั้นมีค่ามากขึ้น แต่จะเริ่มมีค่าคงที่เมื่อความเข้มของสนามแม่เหล็กที่มากระทบมีค่า 10^{-12} เทสลา (10^2 เกาส์)

การทดลองและผลการทดลอง

จากการสังเกตพบปรากฏการณ์การตรวจจับสนามแม่เหล็กของตัวนำ ไฟฟ้ายิ่งยวด ที่สร้างขึ้นในขณะทดสอบคุณสมบัติเรื่อง Silsbee effect นี้ จึงได้จัดทำชุดทดลองที่ทราบค่าความเข้มสนามแม่เหล็กมาตรฐานแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 5-1 (ก) ส่วนชิ้นตัวนำ ไฟฟ้ายิ่งยวดที่เตรียมขึ้นเพื่อการทดลองนี้แสดงในรูปที่ 5-1 (ข)



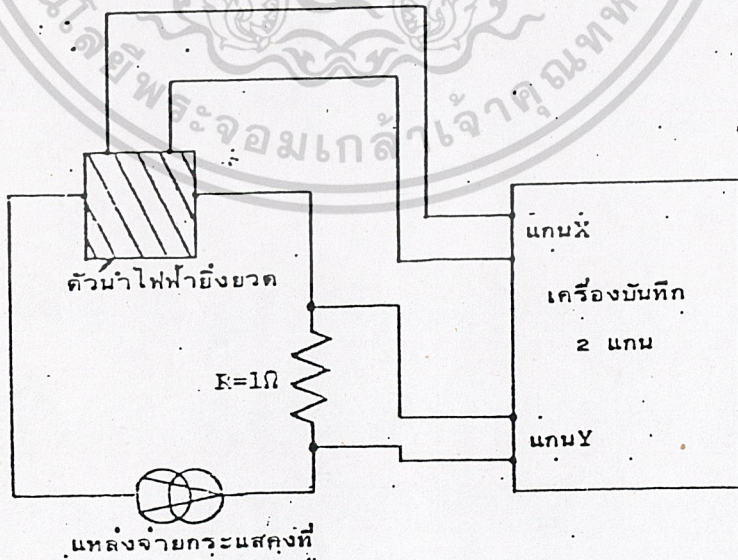
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุตบแต่งสงวนและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-1 (ข) ชิ้นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ใช้ทดลอง

จัดเครื่องมือการทดลองตามวงจรรูปที่ 5-2 โดยให้แสดงผลการทดลองบนเครื่องบันทึก 2 แกน (x-y Recorder)

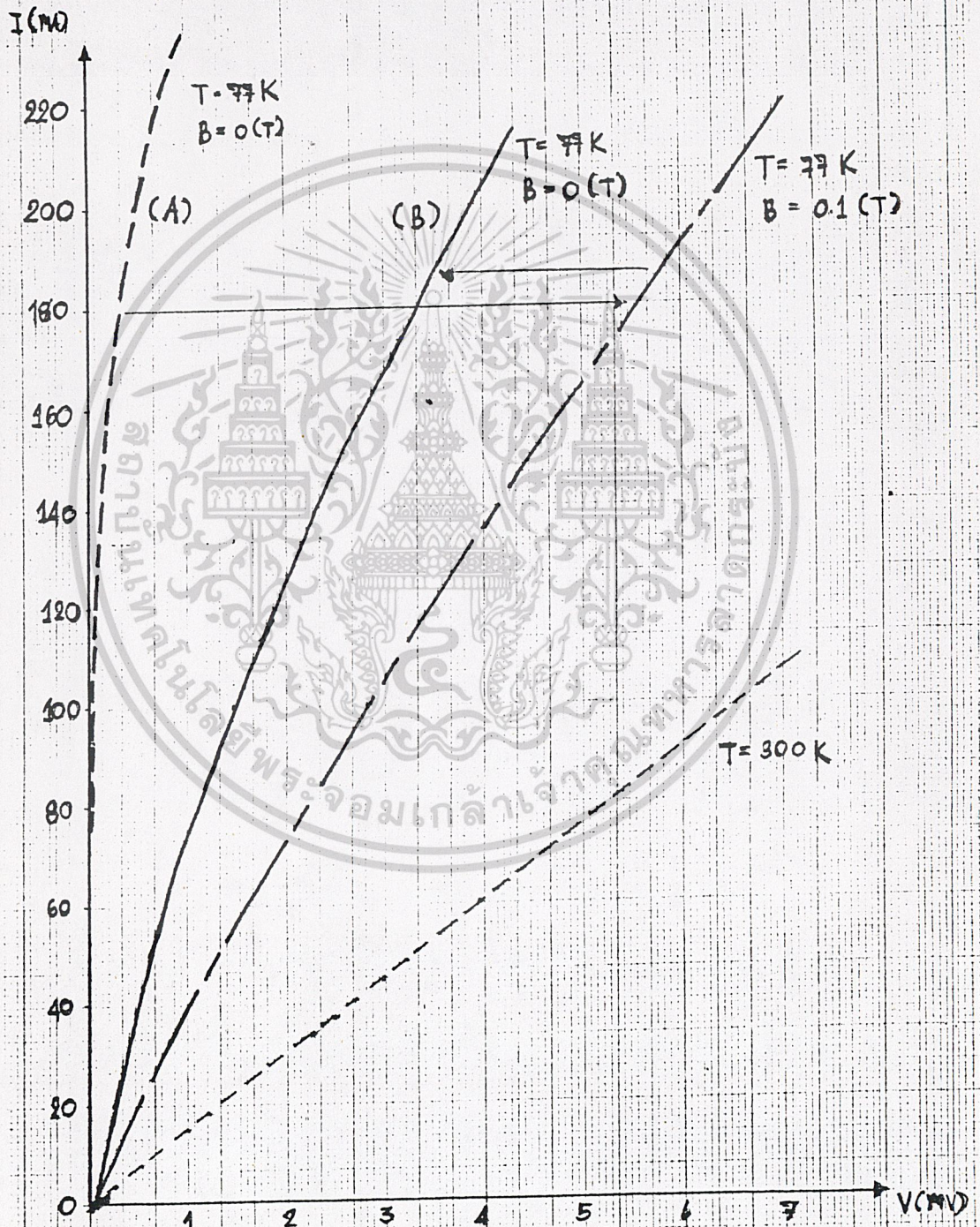
ทีก 2 แกน (x-y Recorder)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 5-2 วงจรของชุดทดลองการตรวจจับสนามแม่เหล็กด้วยตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทำการทดลองดังนี้

- วัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ที่สร้าง
ขึ้นในขณะที่มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง ($T=300\text{ K}$) บันทึกผลที่ได้ลงบนกระดาษกราฟ ดังแสดงใน
รูปที่ 5-3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีรูปที่ 5-3 แสดงกราฟระหว่างกระแสและแรงดันของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่อุณหภูมิต่าง ๆ

2. วัดคุณสมบัติความสัมพัทธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ที่ส่วข้าง
ขึ้น ในขณะที่มีอุณหภูมิ 77 K (แช่ไว้ในไนโตรเจนเหลว) บันทึกผลที่ได้ลงในกระดาษกราฟแผ่นเดิม
เพื่อค่ากระแสวิกฤต (I_c) สูงสุด ขณะที่ไม่ได้รับอิทธิพลของสนามแม่เหล็กภายนอกเลย

3. ให้สนามแม่เหล็กภายนอกที่มีความเข้ม 1000 เกาส์ ($B = 1000$ gauss) แก่
ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดตัวเดิมขึ้น ขณะที่อุณหภูมิ 77 K วัดคุณสมบัติความสัมพัทธ์ระหว่างกระแสกับแรง
ดัน บันทึกผลที่ได้ในกระดาษกราฟแผ่นเดิม เพื่อเปรียบเทียบผลของสนามแม่เหล็กต่อค่ากระแสวิกฤต

4. นำสนามแม่เหล็กภายนอกชิ้นหนึ่งออกไป แล้ววัดคุณสมบัติความสัมพัทธ์ระ
หว่างกระแสกับแรงดันอีกครั้ง บันทึกผลที่ได้ในกระดาษกราฟแผ่นเดิม

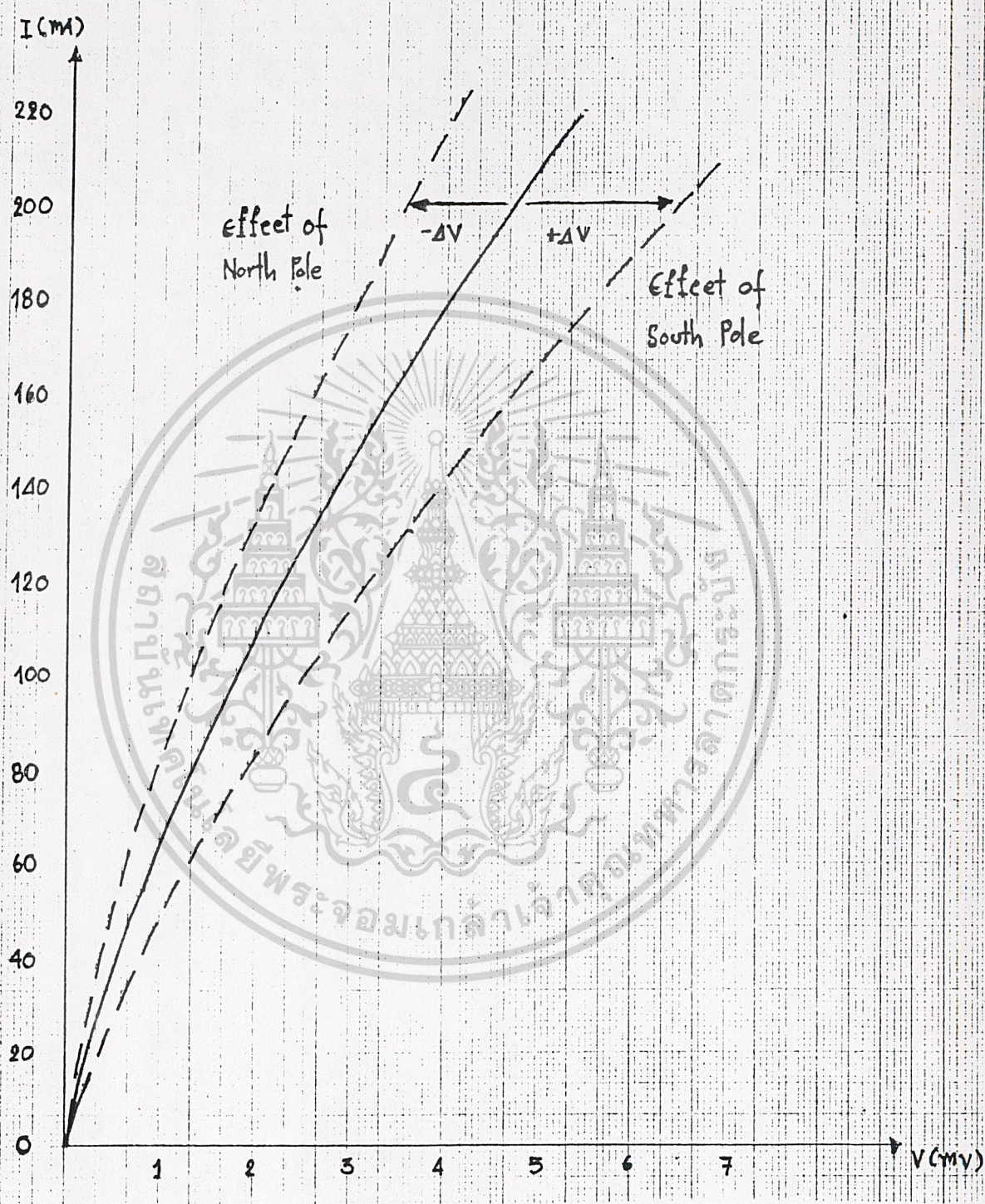
5. บันทึกผลที่ได้จากข้อ 4 ลงบนกระดาษกราฟแผ่นใหม่อีกครั้ง ดังรูปที่ 5-4

6. นำแม่เหล็กอ่อนชิ้นหนึ่งเข้ามาใกล้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้น ทำการวัดคุณสมบัติ
ความสัมพัทธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน บันทึกผลที่ได้ลงในกระดาษกราฟ รูปที่ 5-4

7. เปลี่ยนแม่เหล็กอ่อนเป็นชิ้นอื่น แล้วทำการบันทึกผลเช่นเดียวกับข้อ 5-4

ผลการทดลองดังกล่าวข้างต้นแสดงให้เห็นว่า ขณะที่สารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีอุณหภูมิ
300 K จะมีคุณสมบัติเหมือนตัวต้านทานไฟฟ้าทั่ว ๆ ไป ซึ่งคำนวณเป็นค่าความต้านทานได้ประมาณ
60 $m\Omega$ และสามารถวัดค่ากระแสวิกฤตในขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกได้ประมาณ 90 mA แต่
เมื่อมีอิทธิพลจากสนามแม่เหล็กภายนอก 1000 เกาส์ จะทำให้กระแสวิกฤตลดลงเป็นศูนย์ และ
เมื่อนำสนามแม่เหล็กภายนอกนั้นออกไป พบว่า คุณสมบัติของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะไม่กลับสู่สภาพ
เดิมอย่างสมบูรณ์ โดยจะยังคงมีค่าแรงดันตกคร่อมเนื้อสารอยู่ ถึงแม้กระแสที่ไหลผ่านมีเพียง 50
mA ก็ตาม ซึ่งจากการทดลองพบว่าค่าของกระแสวิกฤตขณะนั้นเปลี่ยนเป็นประมาณ 5 mA

จากการทดลองในข้อ 5-7 พบว่า เมื่อมีสนามแม่เหล็กอ่อนชิ้นหนึ่งเข้ามาใกล้
กราฟคุณสมบัติความสัมพัทธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันจะตั้งชันมากขึ้น แต่เมื่อมีสนามแม่เหล็กอ่อน
ชิ้นอื่นเข้ามาใกล้ กราฟคุณสมบัตินั้นจะนอนลง



รูปที่ 5-4 แสดงกราฟระหว่างกระแสและแรงดันของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

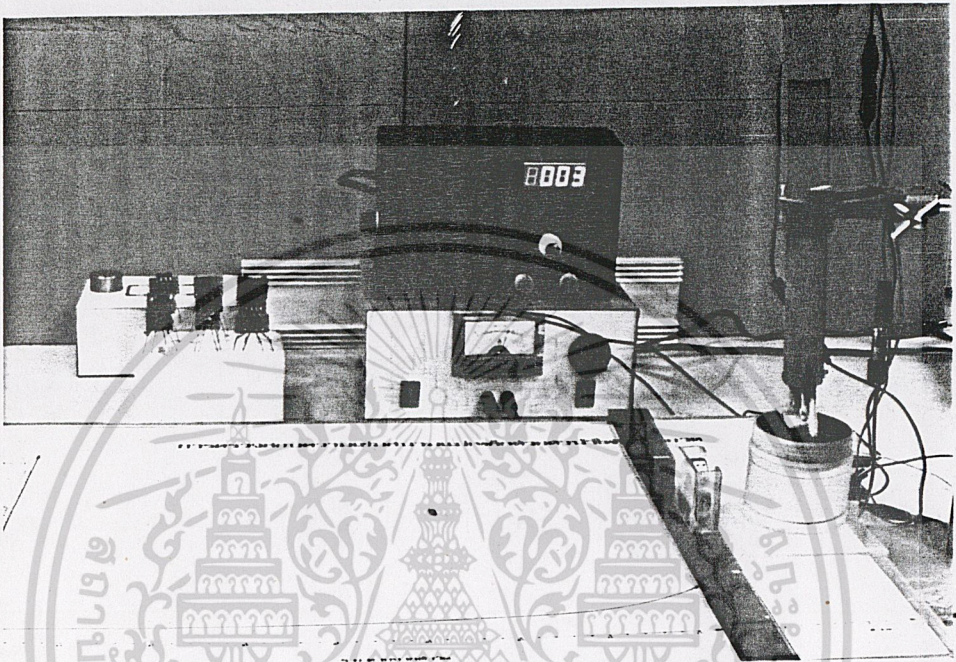
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า และอิทธิพลจากสนามแม่เหล็ก

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

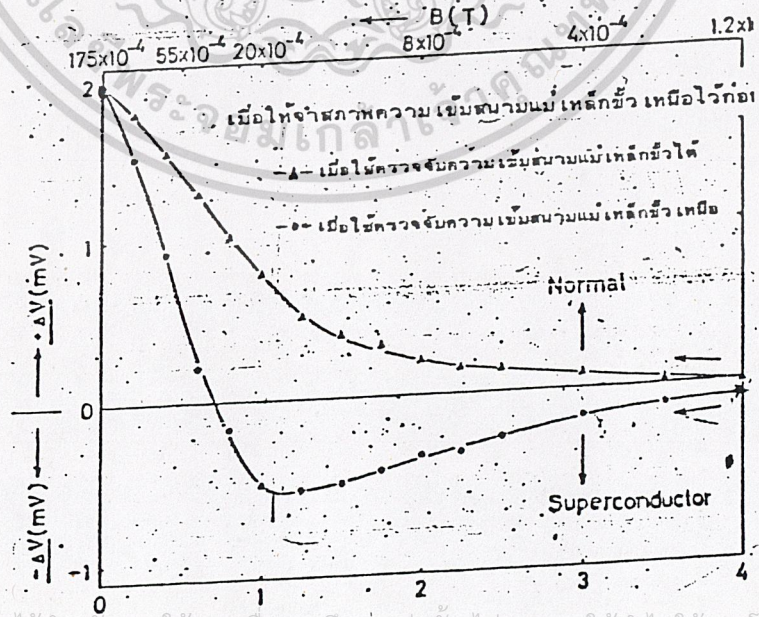
สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองในรูปที่ 5-3 จะเห็นได้ว่าขณะที่ขึ้นสารมีอุณหภูมิ 300 K นั้นจะไม่แสดงคุณสมบัติของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเลย นั่นคือจะแสดงคุณสมบัติเป็นตัวความต้านทานที่มีค่าน้อยมาก ๆ เท่านั้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองวัดหาค่าอุณหภูมิวิกฤต แต่เมื่อมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต ($T_c = 90$ K) เช่นที่ 77 K จะเห็นได้ว่าขณะที่กระแสไหลผ่านมีค่าไม่มาก (ในที่นี่พิจารณาที่กระแสมีค่าน้อยกว่า 1 แอมป์) จะไม่มีแรงดันตกคร่อมขึ้นสารเลย แสดงว่าขณะนั้นมีคุณสมบัติของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเกิดขึ้น แต่เมื่อให้กระแสไหลมากขึ้น (ในที่นี่พิจารณาที่กระแสมีค่ามากกว่า 1 แอมป์) จะเกิดค่าแรงดันตกคร่อมขึ้นสารขึ้น ทั้งนี้อาจพิจารณาได้ว่า เป็นผลเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไหลผ่านตัวนำไฟฟ้า ตามกฎของแมกซ์เวลล์ ซึ่งสนามแม่เหล็ก ไฟฟ้าดังกล่าว จะทำลายสภาพการเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดบางส่วนไป ทำให้เกิดเป็นเสมือนความต้านทานขึ้น จึงเกิดมีค่าแรงดันตกคร่อมขึ้นสารขึ้นขึ้นนั่นเอง

ผลจากการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่สร้างขึ้น สามารถประยุกต์ไปใช้งานเป็นตัวตรวจจับความเข้มสนามแม่เหล็กได้ โดยแสดงให้เห็นเป็นค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่ตกคร่อมขึ้นสารนั่นเอง และยังสามารถบอกว่าเป็นสนามจากขั้วเหนือหรือขั้วใต้ได้อีกด้วย ซึ่งถ้านำค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันดังกล่าวไปแสดงโดยวงจรรีเลคทรอนิกส์ สำหรับอ่านค่าแรงดันดังกล่าว ไปแสดงโดยวงจรรีเลคทรอนิกส์สำหรับอ่านค่าแรงดัน แล้วทำการปรับ (Adjust) ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเป็นตัวตรวจจับความเข้มสนามแม่เหล็ก ดังแสดงรูปชุดเครื่องมือดังกล่าวในรูปที่ 5-5



รูปที่ 5-5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น รูปที่ 5-6 แสดงผลการทดสอบความเข้มสนามแม่เหล็กค่าต่าง ๆ

บทที่ 6

เครื่องมือวัดอุณหภูมิวิกฤตและการทดสอบ

อุณหภูมิวิกฤตคือ อุณหภูมิขณะที่เกิดการเปลี่ยนแปลงทำให้สารธรรมดาที่มีความต้านทานเกิดสภาวะนำไฟฟ้ายิ่งยวด หมายความว่าสามารถนำไฟฟ้าได้โดยไม่สูญเสียพลังงานเลย เพราะไม่มีความต้านทาน

อุณหภูมิวิกฤตเป็นหนึ่งในคุณสมบัติที่สำคัญของสารตัวนำยิ่งยวด นักวิจัยทั่วโลกต่างแข่งขันกัน เพื่อสามารถเพิ่มอุณหภูมิวิกฤต ซึ่งหากอุณหภูมิของตัวนำยิ่งยวดสามารถเพิ่มมาจนถึงอุณหภูมิห้องแล้ว ย่อมนำไปสู่การพลิกโฉมหน้าของโลก ไปอีกรูปหนึ่งทันที

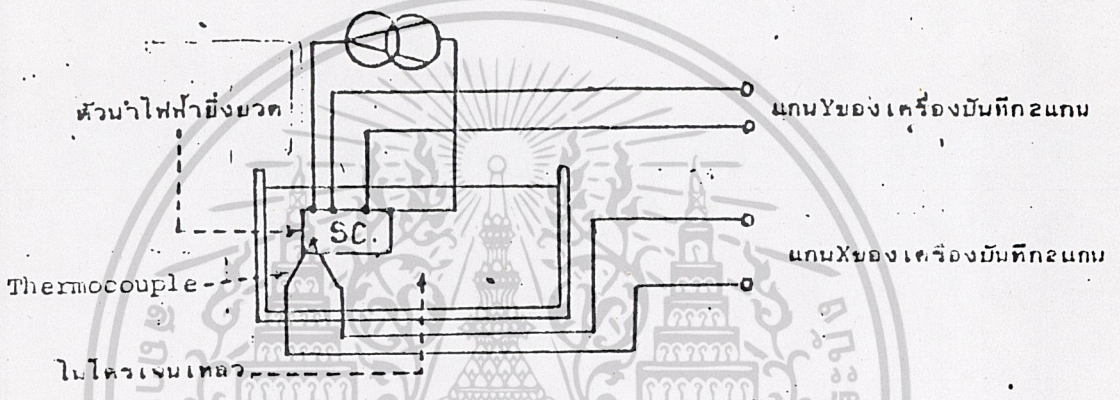
จากความสำคัญของอุณหภูมิวิกฤตดังกล่าวมา เมื่อสร้างสารตัวนำยิ่งยวดเสร็จแล้ว เราต้องทำการวัดมัน เนื่องจากเครื่องมือในการวัดของแต่ละประเทศมีราคาแพง จึงนำไปสู่สร้างเครื่องมือวัดไว้ใช้เอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการเบื้องต้นในการวัดอุณหภูมิวิกฤต และแบบแปลนของเครื่องมือพร้อม ทั้งวงจรไฟฟ้าที่ควบคุมการทำงานของส่วนต่าง ๆ นอกจากนี้ยังมีการทดสอบเครื่องมือที่สร้างขึ้น ในทุกระดับความเร็วในการวัดและทดสอบส่วนอื่น ๆ ของเครื่องมือวัดนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1 หลักการวัดอุณหภูมิวิกฤต

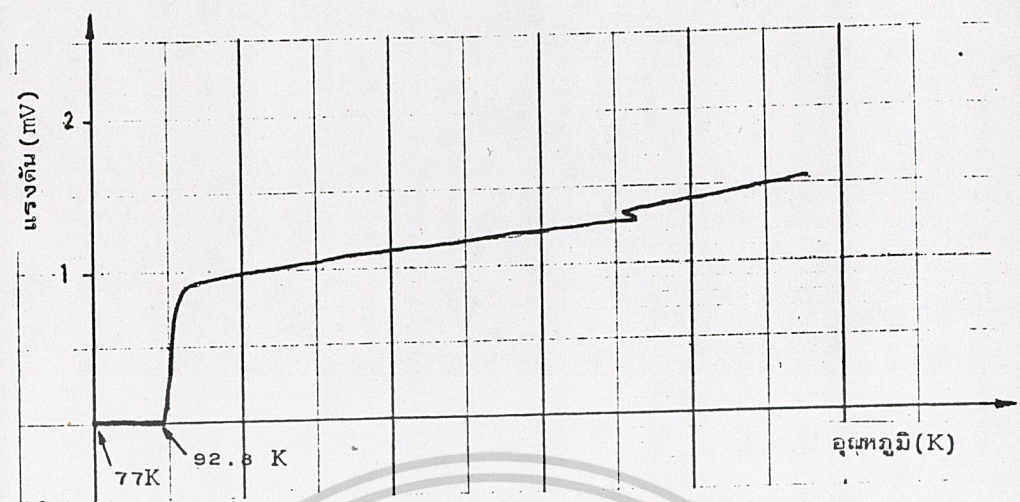
จากความสำคัญของอุณหภูมิวิกฤตดังที่อธิบายในตอนต้น ทำให้การวัดเพื่อหาอุณหภูมิวิกฤตเป็นส่วนจำเป็นที่ต้องทำ หลังจากที่ได้สร้างเม็ดสารตัวนำยิ่งยวดสำเร็จตามกระบวนการสร้างในบทที่ 1



รูปที่ 6-1 แสดงวงจรที่ใช้สำหรับวัดเพื่อหาอุณหภูมิวิกฤต

ในการวัดอุณหภูมิวิกฤต วงจรแสดงได้ดังรูป 6-1 เป็นวงจรที่ใช้สำหรับวัดเพื่อหาอุณหภูมิวิกฤต ประกอบไปด้วยส่วนหัววัดเทอร์โมคัปเปิล ถึงเก็บความเย็น ไนโตรเจนเหลว แหล่งจ่ายกระแส และเครื่องบันทึกสองแกน การวัดทำได้โดยต่อวงจรตามรูป 6-1 แล้วค่อย ๆ ยกหัววัดขึ้นด้วยมือ ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป นั่นคืออุณหภูมิที่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะค่อย ๆ สูงจนถึงอุณหภูมิวิกฤต และเครื่องบันทึกสองแกนจะแสดงผลออกมาดังรูปที่ 6-2 นั่นคือเกิดแรงดันเพิ่มขึ้นอย่างกระทันหัน แสดงว่าเกิดความต้านทานขึ้นที่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะสูญเสียสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด แต่เราจะยกหัววัดขึ้นมาอีกผ่านค่าอุณหภูมิวิกฤต จนกระทั่งถึงอุณหภูมิห้อง นั่นคือหัววัดอยู่พ้นถึงเก็บความเย็นแล้วเราจึงยุติการยก จากกราฟที่เครื่องพล็อตออกมาเราจะดูที่แกน x ว่ามีกี่ช่อง เราให้จุดเริ่มต้นของกราฟบนแกน x คือ อุณหภูมิ 77 องศาเซลวิน เพราะเป็นจุดที่หัววัดสัมผัสไนโตรเจนเหลวพอดี และจุดเดือดของไนโตรเจนเหลวคือ 77 องศาเซลวิน และเราให้จุดสุดท้ายของกราฟบนแกน x คือ อุณหภูมิห้องซึ่งเราสามารถวัดได้ แล้วเราจะนำค่าอุณหภูมิห้องลบด้วย 77 องศาเซลวิน นำค่าที่ได้มาหารด้วยจำนวนช่องบนแกน x ของกราฟที่พล็อต

ได้เราก็จะสามารถประมาณค่าอุณหภูมิวิกฤตได้ ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6-2 แสดงกราฟการวัดอุณหภูมิวิกฤต

6.2 การออกแบบ

เนื่องจากการวัดอุณหภูมิวิกฤตตามที่กล่าวมาในหัวข้อก่อน ใช้การยกหัววัดด้วยมือ ซึ่งในแต่ละครั้งที่ทำการทดลองวัด ความเร็วในการดึงมักจะแตกต่างกัน และการดึงขึ้นไม่เป็นไปโดยสม่ำเสมอ เป็นผลให้อุณหภูมิวิกฤตที่หาได้คลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงที่ควรเป็น

การดึงหัววัดซึ่งมีตัวอย่างติดอยู่นั้น ควรจะถูกดึงขึ้นหรือลงอย่างช้า ๆ และสม่ำเสมอ เพื่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ทั้งที่ตัวอย่างและหัววัดตรงกัน การดึงขึ้นหรือเร็วเกินไปจะทำให้ อุณหภูมิที่ตัวอย่างกับหัววัดคลาดเคลื่อนจากกัน เป็นผลให้อุณหภูมิวิกฤตที่ได้จากการวัด ไม่ตรงกับความเป็นจริง

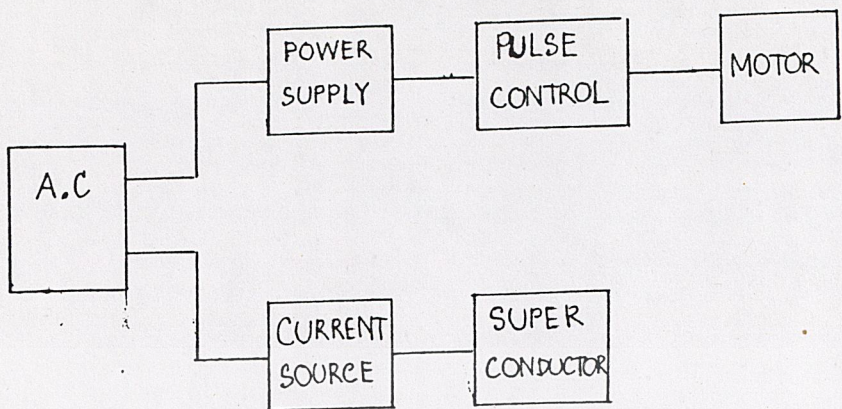
จากปัญหาที่ได้กล่าวมานั้น เราจึงใช้เครื่องมือกลมาช่วยในการยกหัววัดขึ้นหรือลงแทน ซึ่งจะเป็นการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นได้ เครื่องมือกลที่ใช้จะยกหัววัดขึ้นด้วยความเร็วสม่ำเสมอ ความเร็วในการดึงนี้ปรับได้ตามความต้องการ

ส่วนประกอบหลักของเครื่องแบ่งเป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ ส่วนประกอบทางกล และ ส่วนประกอบทางวงจรไฟฟ้า ซึ่งเราจะแสดงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

6.2.1 แบบวงจรไฟฟ้า

วงจรไฟฟ้าของเครื่องนี้แบ่งเป็นภาคต่างๆ เช่น ภาคไฟเลี้ยง ภาคควบคุมความเร็ว ภาคจ่ายกระแส แสดงดังบล็อกไดอะแกรมรูป 6-3

ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม หากมีข้อสงสัยหรือข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยเป็นอย่างสูงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



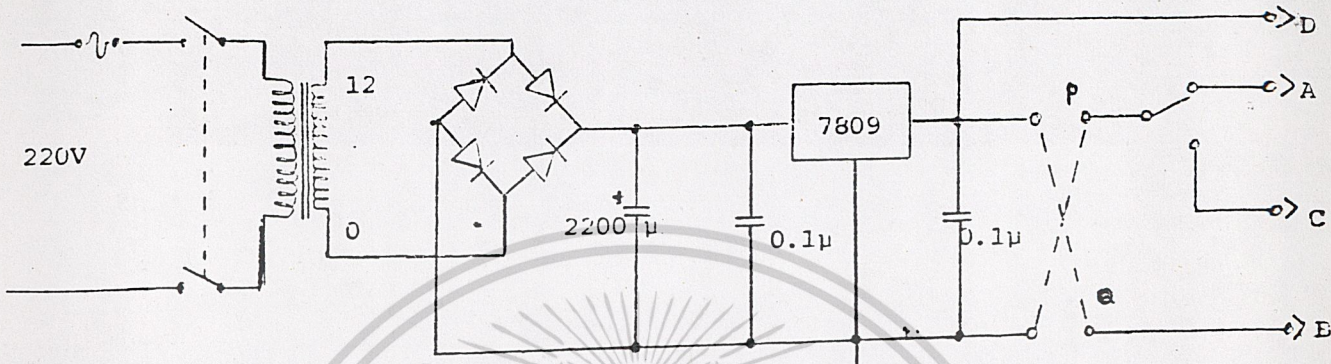
รูปที่ 6-3 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรไฟฟ้า

6.2.1.1 ภาคไฟเลี้ยง

หน้าที่ของภาคนี้คือแปลงไฟสลับขนาด 12 V จากหม้อแปลงเป็นไฟตรง แล้วจ่ายให้แก่วงจรภาค Voltage Pulse Control โดยต้องรักษาระดับแรงดัน (Voltage) ให้คงที่ด้วย

จากวงจรในรูป 6-4 เราเลือกใช้ Full wave rectifier แบบบริดจ์ เพราะประหยัดหม้อแปลง วงจรอิเล็กทรอนิกส์นั้นต้องการไฟเลี้ยงเป็นกระแสตรงที่เรียบ ยิ่งเรียบยิ่งดี ฉะนั้นเราต่อตัวเก็บประจุที่ออกมา เพื่อกรองกระแสให้เรียบขนาดของตัวเก็บประจุต้องมีค่ามากพอ ในที่นี้เราเลือกใช้ตัวเก็บประจุขนาด 2200 ไมโครฟารัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6-4 แสดงวงจรภาคไฟเลี้ยง

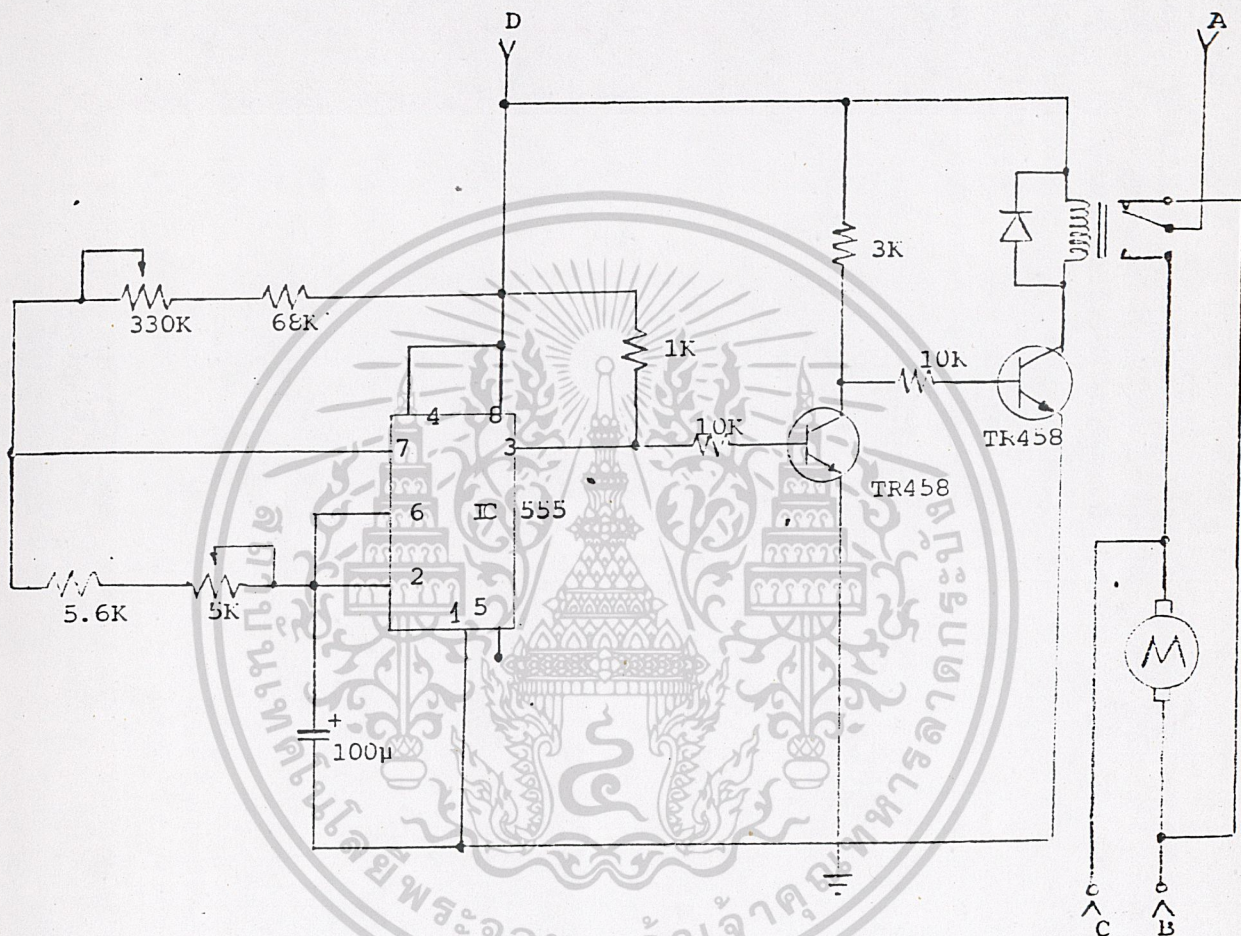
โดยหลักการแล้วแหล่งจ่ายไฟควรมีแรงดันคงที่ และไม่มีการกระเพื่อมเลยหรือน้อยที่สุด ซึ่งทำได้โดยให้วงจรควบคุมแรงดัน (Voltage Regulator) โดยเราเลือกใช้ไอซีเรกูเลเตอร์เบอร์ 7809 เป็นไอซี 3 ขา เรียงจากซ้ายมาขวาคือขาอินพุท ขากาวนด และขาเอาต์พุท ให้แรงดันเอาต์พุท 9 โวลต์ และจ่ายกระแสได้ไม่เกิน 1.5 แอมป์

สำหรับเส้นประที่เห็นคือสวิตช์ปรับทิศทางการหมุนขึ้น-ลงของมอเตอร์ เอาต์พุทจากภาคจ่ายไฟนี้จะแบ่งไปเข้าตามจุดต่าง ๆ ของวงจร ที่จุด D ถูกส่งไปให้ไอซี 555 จุด A เข้าขาหนึ่งของรีเลย์ จุด C ไปยังขั้วหนึ่งของมอเตอร์ และจุด B ก็เข้าอีกขั้วของมอเตอร์

6.2.1.2 ภาค Voltage Pulse Control

จุดประสงค์ของเราต้องการให้มอเตอร์เคลื่อนที่ในลักษณะมีการหยุดเป็นช่วง ๆ สลับกับการทำงาน โดยเปลี่ยนความเร็วได้หลายระดับ เราจึงเลือกใช้ไอซีเบอร์ 555 ต่อเป็นวงจรผลิตสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม (Pulse) ซึ่งมีการ ON และ OFF สลับกันไป เรียงวงจรนี้ว่าวงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ สัญญาณ Pulse จากเอาต์พุทที่ขา 3 ของไอซี 555 ดังรูป 6-5 จะส่งไปยังทรานซิสเตอร์ 2 ตัวที่ต่อกันแบบไดเรคต์บัลลิ่งอยู่เพื่อขยายสัญญาณให้มีความแรงพอจะ drive รีเลย์ที่ต่อกับขาคอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์ตัวที่สอง

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6-5 แสดงวงจรมอเตอร์ Voltage Pulse Control

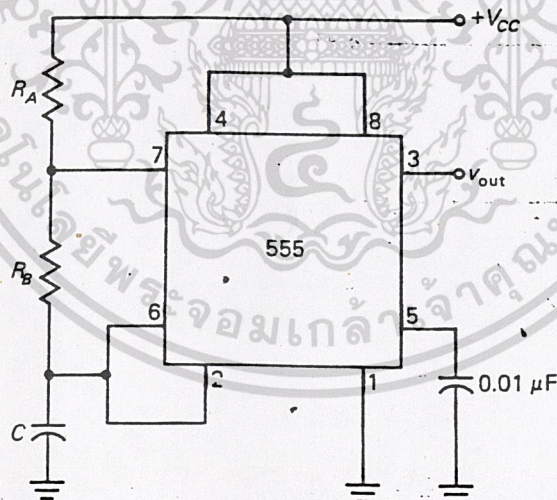
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pulse ที่จ่ายออกมาทำให้รีเลย์ทำงานโดยช่วง t_{ON} ของ pulse จะสร้างฟลักซ์แม่เหล็กไปเหนี่ยวนำให้ขากลางของรีเลย์ ซึ่งปกติติดกับขั้ว B ทำให้มอเตอร์ไม่ทำงานถูกคุมมาติดกับขั้ว C ทำให้มอเตอร์ทำงาน เราสามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์โดยการเปลี่ยนค่าความต้านทาน และตัวเก็บประจุในวงจรอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ ซึ่งจะมีผลต่อความยาวของ Pulse ที่ออกมา จะเห็นได้ชัดเจนจากสมการที่ยกมาดังนี้

$$t_{ON} = 0.693 (R_a + R_b) C$$

$$t_{OFF} = 0.693 R_a C$$

โดยเราเทียบจากรูปมาตรฐานของวงจรอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ดังรูป 6-6 กับวงจรในรูป 6-5 ค่า R_a ก็คือ ความต้านทานที่ต่อระหว่างขา 7 และ 8 ส่วน R_b คือความต้านทานที่ต่อระหว่างขา 7 และ 6

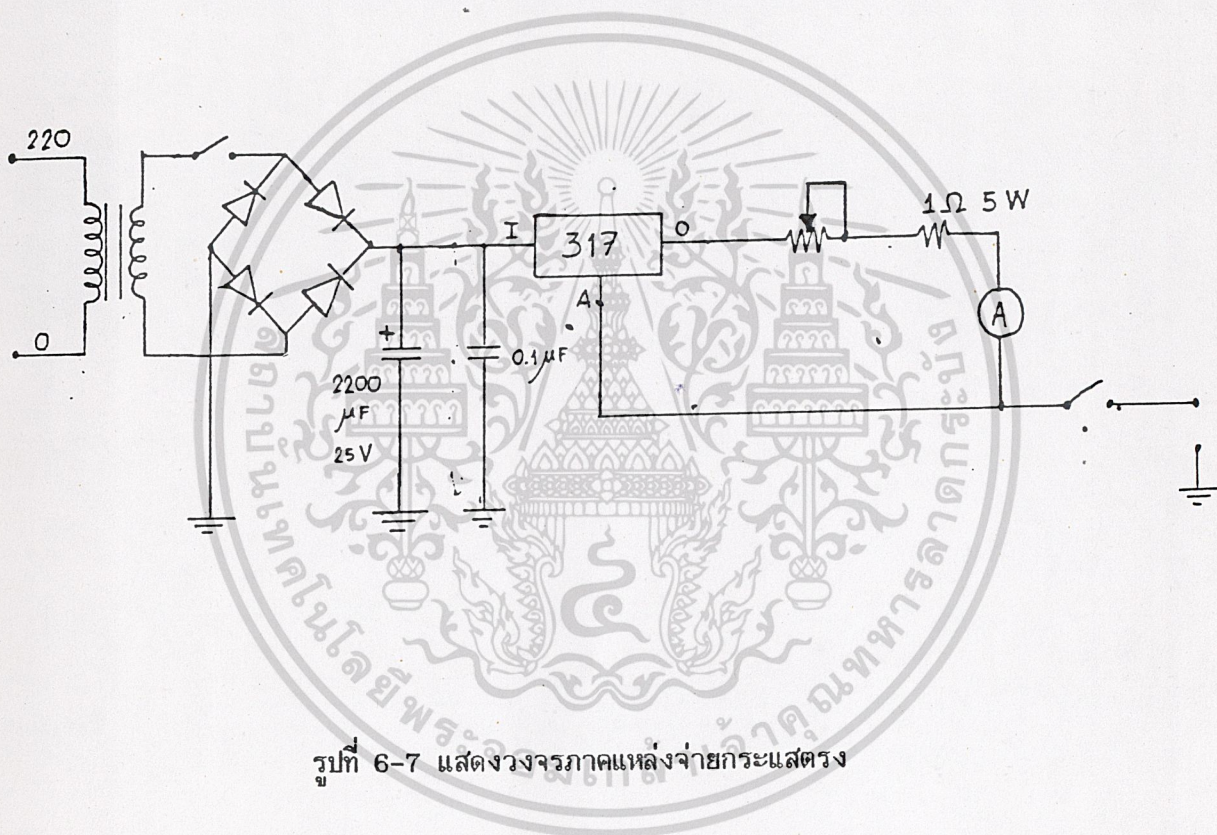


รูปที่ 6-6 แสดงวงจรอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.1.3 ภาคแหล่งจ่ายกระแสตรง

ภาคนี้แปลง ไฟสลับเป็น ไฟตรงด้วย Full wave rectifier แบบบริดจ์ กรองไฟตรงที่ได้ให้เรียบขึ้นด้วยตัวเก็บประจุ แล้วต่อไอซี 317 ซึ่งเป็นไอซีเรกูเลเตอร์ชนิดปรับค่าได้ซึ่งทนกระแสได้สูง 1.5 แอมป์ แล้วต่อความต้านทานปรับค่าได้ที่ทนกระแสได้สูง อนุกรมกับเอาท์พุทของ LM 317 เพื่อปรับค่ากระแส ส่วนตัวเก็บประจุที่ต่อจากอินพุทของ LM 317 ลงกราวนด์ เพื่อป้องกันอาการออสซิลเลท รายละเอียดทั้งหมดอยู่ในวงจรดังรูป 6-7

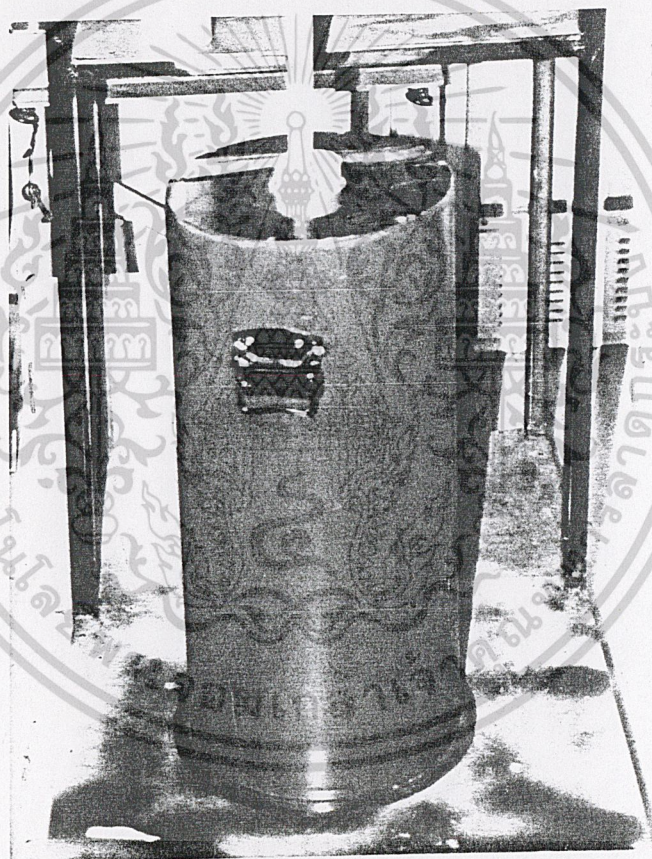


รูปที่ 6-7 แสดงวงจรภาคแหล่งจ่ายกระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

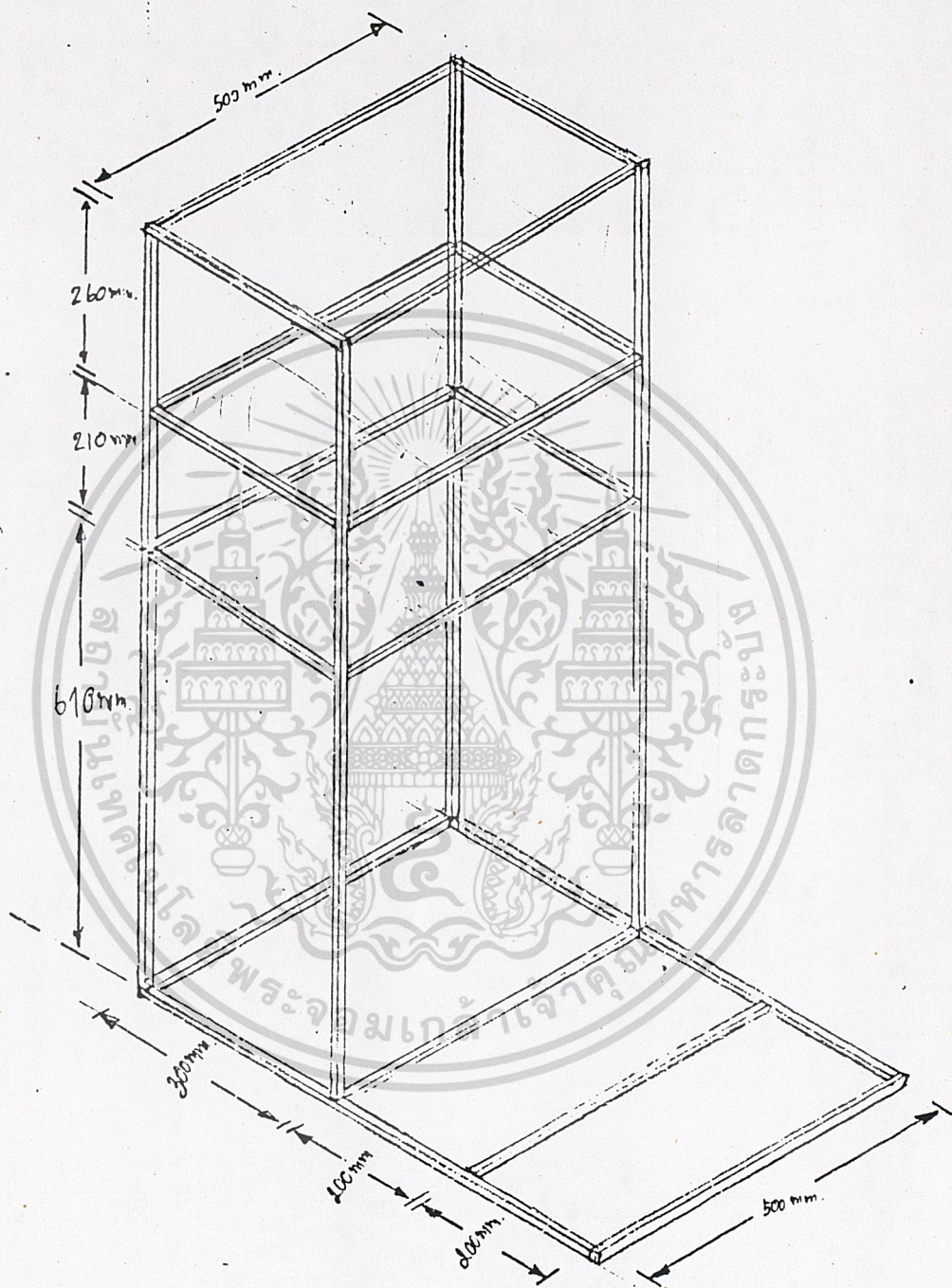
6.2.2 แบบทางกล

สำหรับโครงเหล็กของเครื่องวัดอุณหภูมิวิกฤตเครื่องนี้ มีรูปภาพไอโซเมตริก แสดงให้ดูพร้อมทั้งขนาดกำกับในแต่ละส่วนดังรูป 6-9 ในหน้าถัดไป ส่วนแผ่นเหล็กที่นำมาประกอบกับตัวเครื่องก็มีรูปภาพแสดงไว้แล้วทุกด้านพร้อมขนาดกำกับในรูป 6-10 นอกจากนี้ส่วนนี้แล้วยังมีมอเตอร์ซึ่งเป็นแบบเกลียวหมุนเลื่อนขึ้น-ลงได้ ดังรูป 6-11 สำหรับถังที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิวิกฤตนี้ เป็นถังที่สร้างจากท่อไฟเบอร์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 10 นิ้ว ชั้นในเป็นเหล็กตรงกลาง ส่วนที่เห็นแรเงาในรูปเป็นโฝมที่เราอัดใส่ เส้นผ่าศูนย์กลางชั้นในประมาณ 4 นิ้ว ดังรูปข้างล่างนี้

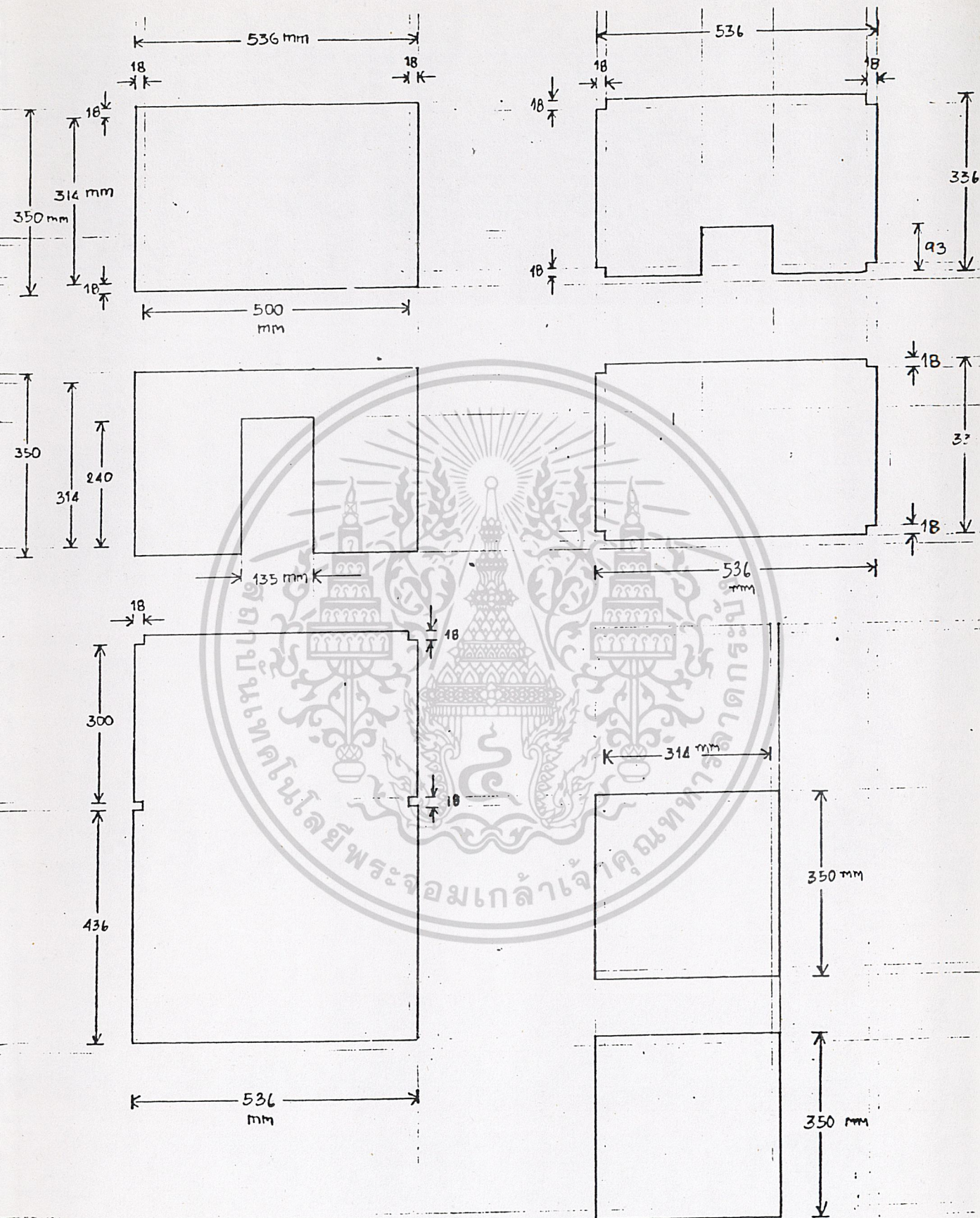


รูปที่ 6-8 แสดงถังที่ใช้ในการวัด

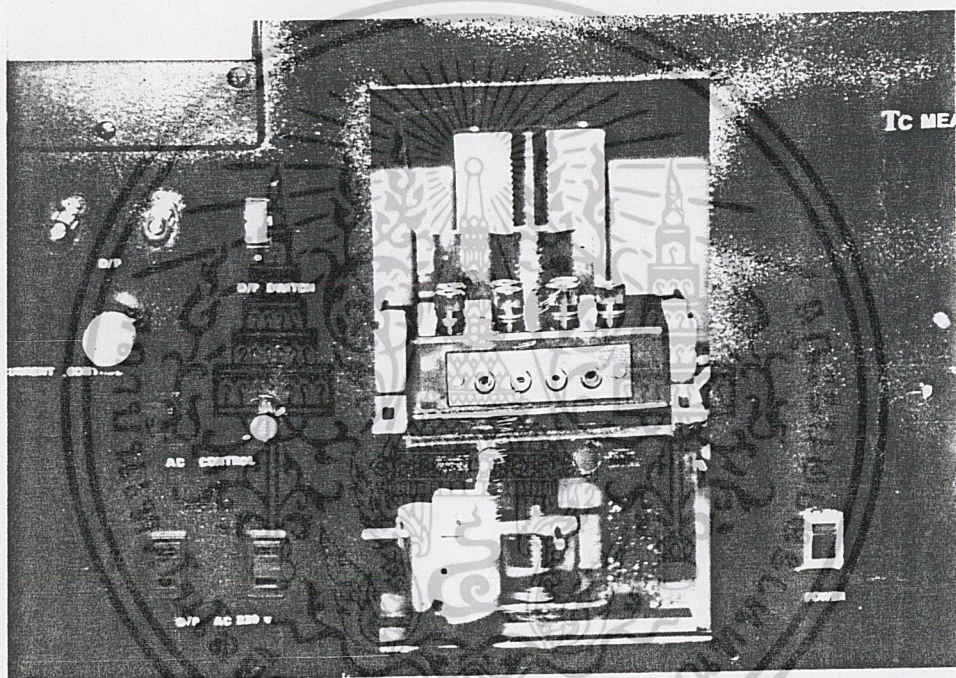
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 6-9 แสดงภาพไอโซเมตริกของ โครงสร้างเหล็กภายในเครื่อง
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น ห้ามมิให้คัดแบบลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

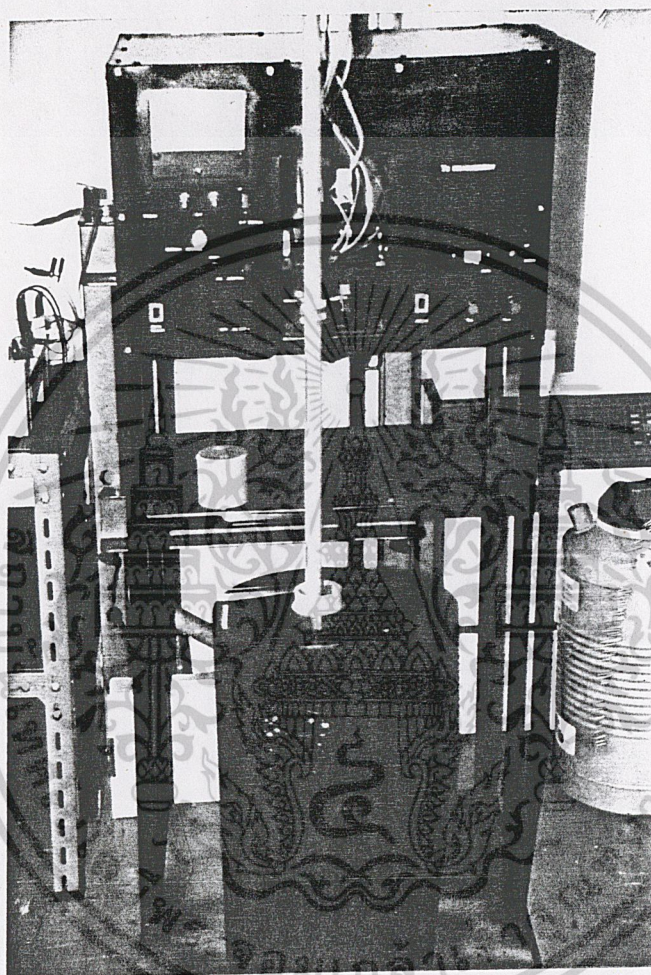


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น รูปที่ 6-10 ภาพแสดงขนาดแผ่นเหล็กที่นำมาประกอบกับโครงเหล็ก



รูปที่ 6-11 ภาพถ่ายด้านหน้าของมอเตอร์แบบเกลียวตัวหนอนที่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6-12 ภาพถ่ายด้านหน้าของเครื่องวัดอุณหภูมิวิกฤต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3 การทดสอบเครื่องวัดอุณหภูมิวิกฤต

เป็นสิ่งจำเป็นที่เราต้องทดสอบเครื่องวัดที่สร้างขึ้นมา เพื่อให้ทราบว่าเครื่องสามารถวัดผลได้จริงหรือไม่ หากได้ใกล้เคียงเพียงใด มีข้อบกพร่องประการใด จะได้นำไปปรับปรุงตัวเครื่องให้ทำงานได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

การทดสอบแบ่งเป็น 3 ประการคือ การวัดอุณหภูมิวิกฤต การวัด I-V Curve และการทดสอบหัววัดเทอร์โมคัปเปิล แต่ในการทดสอบ 2 อย่างแรก เราต้องใช้ตัวนำยิ่งยวด จึงมีขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างที่นำมาทดสอบก่อน โดยอะแกรมแสดงกระบวนการสร้างดังรูป 6-13

6.3.1 การเตรียมตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

(1) นำสารอิทเทรียมออกไซด์ แบเรียมคาร์บอเนต และคอปเปอร์ออกไซด์ ผสมกันให้ได้อัตราส่วนของ Y:Ba:Cu เป็น 1:2:3 โดยใช้ $Y_2O_3 = 2.75$ g $BaCO_3 = 9.75$ g และ $CuO = 5.75$ g

(2) บดให้ละเอียดเป็นเนื้อเดียวกันใช้เวลาประมาณ 1 ชม. แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ $900^\circ C$ เป็นเวลา 20 ชม.

(3) นำสารที่ได้จากการเผามาบดให้ละเอียดอีกครั้งประมาณ 40 นาที

(4) แบ่งเป็น 3 ส่วน ๆ ละ 6 g แล้วนำส่วนแรก และส่วนที่สองมาผสมกับ Y:Ba:Cu = 1:2:4 หนัก 1.2 g และ 1.8 g ตามลำดับ แล้วนำส่วนสุดท้ายมาผสมกับ Ag_2O หนัก 1.8 g

(5) บดแต่ละส่วนให้เข้ากันประมาณ 1 ชม. แล้วนำไปอัดเม็ด

(6) นำไปเผาอีกที่อุณหภูมิ $900^\circ C$ เป็นเวลา 10 ชม.

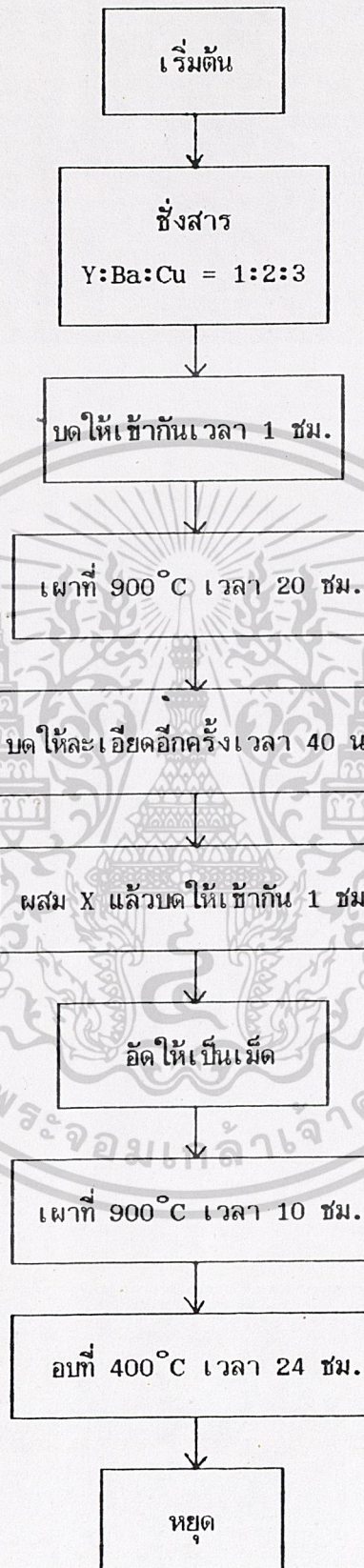
(7) ลดอุณหภูมิลงเหลือ $400^\circ C$ แล้วอบนาน 24 ชม.

(8) ลดอุณหภูมิจนถึงอุณหภูมิห้อง รอให้สารเซรามิกทั้ง 3 ส่วนเย็นตัว

(9) นำทั้ง 3 ส่วนไปทดสอบปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ เพื่อดูว่ามีคุณสมบัติของตัวนำยิ่งยวดหรือไม่ บันทึกผลการทดสอบ

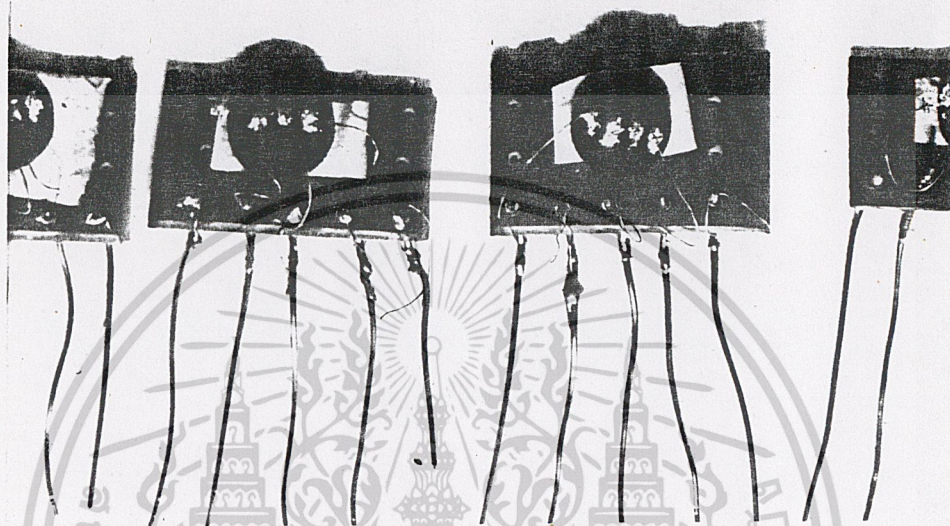
(10) คัดเลือกตัวที่แสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ได้ชัดเจน จากทั้ง 3 ส่วนมาบันทึกสถิติกับฐานดังรูป 6-13 ก็จะได้ตัวอย่างที่พร้อมจะนำไปทดสอบวัดอุณหภูมิวิกฤต และ IV Curve

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



X คือ (1) สาร Y:Ba:Cu
เท่ากับ 1:2:4
(2) Ag_2O

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 6-13 แสดงกระบวนการสร้าง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6-14 แสดงตัวนำยิ่งยวดที่บดกรัตต์กับฐาน

ผลการทดสอบปรากฏการณ์ไมส์เนอร์

	124 (20%)	124 (30%)	Ag ₂ O (30%)
1	ลอยทั้ง 2 ด้าน	ลอยทั้ง 2 ด้าน	ไม่ลอย
2	ลอยด้านเดียว	ไม่ลอย	ไม่ลอย
3	ไม่ลอย	ลอยด้านเดียว	ไม่ลอย
4	ลอยได้ทั้ง 2 ด้าน	ลอยทั้ง 2 ด้าน	ไม่ลอย
5	ลอยทั้ง 2 ด้าน	ลอยด้านเดียว	ไม่ลอย
6	ลอยด้านเดียว	ไม่ลอย	ไม่ลอย

จากผลการทดสอบ ส่วนที่สามที่ผสม Ag₂O (30%) ไม่แสดงคุณสมบัติเป็นตัวนำยิ่งยวด จึงเลือกตัวอย่างเพื่อนำมาบดกรี๊ จากส่วนที่ 1 และส่วนที่ 2 เท่านั้น

6.3.2 การวัดอุณหภูมิวิกฤต

- (1) เลือกตัวนำยิ่งยวดตัวที่ดีที่สุดมาเสียบไว้ที่ปลายท่อวัด
- (2) ต่อวงจรวัดอุณหภูมิวิกฤตตามรูป 6-1 ต่อขั้ว Temp เข้ากับแกน X ของ X-Y recorder และ ขั้ว V_o เข้ากับแกน Y ของ X-Y recorder
- (3) ปรับค่ากระแสที่แหล่งจ่ายกระแสที่ค่าเท่ากับ 20 mA
- (4) เทไนโตรเจนเหลวใส่ถึง สอดกระดาดเข้าเครื่อง X-Y recorder ปรับตำแหน่งเริ่มต้นให้เหมาะสม
- (5) ปรับปุ่มควบคุมความเร็ว T_{ON} และ T_{OFF} ให้ได้ความเร็วที่ต้องการ
- (6) ปรับท่อวัดให้มีระดับที่เหมาะสม แล้วกดปุ่มให้เครื่องเริ่มดึงท่อวัดลงไป
- (7) ย้อนกลับไปที่ค่าตั้งแต่ 3-5 เปลี่ยนระดับความเร็ว แล้วบันทึกผล

ผลการวัดอุณหภูมิวิกฤต

HOR : 0.5 mv / DIV

VER : 1 mv / DIV

๗๗ 123.6

300

รูปที่ 6-15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับแรงดันที่

$T_{ON} : T_{OFF}$ เท่ากับ 0.4 : 0.45 s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HOR : 0.5 mv / DIV

VER : 1 mv / DIV



รูปที่ 6-16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างออกหมึกกับแรงดันที่ $T_{ON} : T_{OFF}$
 เท่ากับ 3.1 : 0.45 s

HOR : 0.5 mv / DIV

VER : 1 mv / DIV



รูปที่ 6-17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างออกหมึกกับแรงดันที่ $T_{ON} : T_{OFF}$
 เท่ากับ 9.7 : 0.45 s

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์หรือการเชิงอื่นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HOR : 0.5 mv / DIV

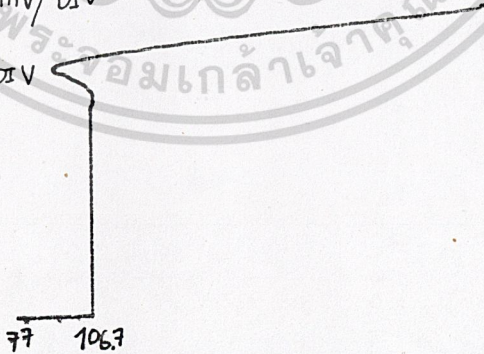
VER : 1 mv / DIV



รูปที่ 6-18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับแรงดันที่ $T_{ON} : T_{OFF}$
 เท่ากับ 27.7 : 0.45 s

HOR : 0.6 mv / DIV

VER : 1 mv / DIV



รูปที่ 6-19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับแรงดันที่ $T_{ON} : T_{OFF}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HOR : 0.5 mv/DIV

VER : 1 mv/DIV

77 165.2

300

รูปที่ 6-20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างออกหมึกกับแรงดันที่ $T_{ON} : T_{OFF}$
เท่ากับ 3.1 : 3.2 s

HOR : 0.5 mv/DIV

VER : 1 mv/DIV

77 115.2

300

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของโรงเรียนเพื่อใช้ในการเรียนการสอน
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HOR : 0.5 mv/DIV

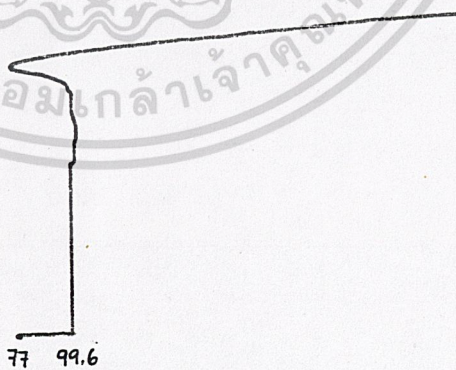
VER : 1 mv/DIV



รูปที่ 6-22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับแรงดันที่ $T_{ON} : T_{OFF}$
 เท่ากับ 27.7 : 3.2 s

HOR : 0.5 mv/DIV

VER : 1 mv/DIV



รูปที่ 6-23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับแรงดันที่ $T_{ON} : T_{OFF}$
 เท่ากับ 3.1 : 10.1 s

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ข้อมูลนี้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าพนักงาน
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ข้อมูลนี้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าพนักงาน

HOR : 0.5 mv / DIV

VER : 1 mv / DIV

77

105.5

300

รูปที่ 6-24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับแรงดันที่ $T_{ON} : T_{OFF}$
เท่ากับ 9.7 : 10.1 s

HOR : 0.5 mv / DIV

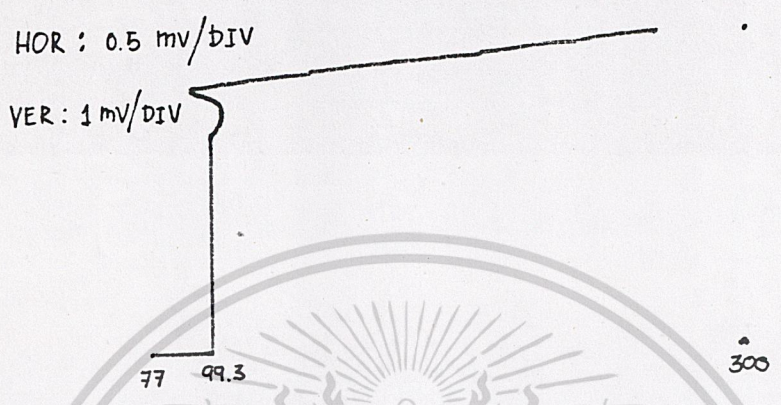
VER : 1 mv / DIV

77

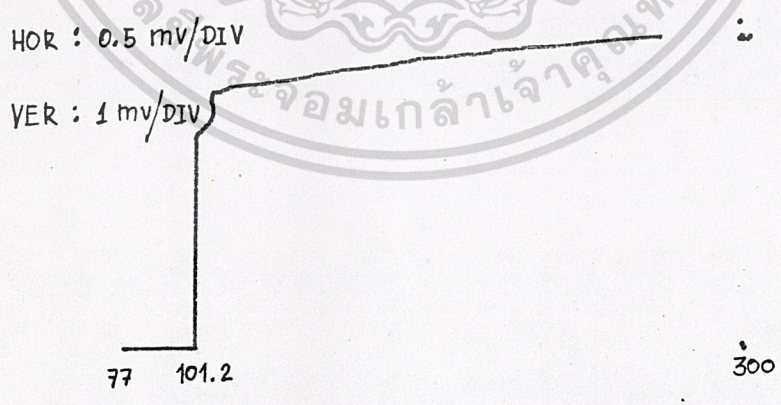
108.5

300

รูปที่ 6-25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับแรงดันที่ $T_{ON} : T_{OFF}$
เท่ากับ 27.7 : 10.1 s



รูปที่ 6-26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับแรงดันที่ $T_{ON} : T_{OFF}$
 เท่ากับ 9.7 : 28.4 s



เอกสารนี้เป็นรูปที่ 6-27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับแรงดันที่ $T_{ON} : T_{OFF}$ โยชนด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งให้ที่เปลืองเนื้อที่และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดสอบเครื่องวัดอุณหภูมิวิกฤต

จากการปรับระดับความเร็วให้ต่างกัน ทำให้ได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและแรงดันที่ไม่เหมือนกัน เพราะฉะนั้นเพื่อให้การสรุปเป็นไปอย่างสมเหตุผล เราจึงต้องวัดความเร็วของระดับความเร็วทุกระดับบนปุ่มปรับ โดยจะเรียงจากเร็วไปหาช้าพร้อมทั้งค่า T_c เพื่อเปรียบเทียบ

ลำดับที่	หมายเลขของปุ่มปรับ t_{on} ต่อของ t_{off}	$t_{on} : t_{off}$	เวลาต่อระยะทาง 1 ซม.	T_c (K)	หมายเหตุ
1	4 : 1	27.7 : 0.45	9.5 s	-	รูปกราฟเพี้ยน
2	3 : 1	9.7 : 0.45	11 s	-	" "
3	2 : 1	3.1 : 0.45	19 s	135.6	
4	1 : 1	0.4 : 0.45	25 s	123.6	
5	4 : 2	27.7 : 3.20	30.5s	118.8	
6	3 : 2	9.7 : 3.20	42 s	115.2	
7	4 : 3	27.7 : 10.10	64 s	108.5	
8	3 : 3	9.7 : 10.10	97 s	105.5	
9	2 : 2	3.1 : 3.20	126 s	105.2	
10	4 : 4	27.7 : 28.40	165 s	101.2	
11	1 : 2	0.4 : 3.20	188 s	106.7	จุดหักมุมเพี้ยนไป
12	2 : 3	3.1 : 10.10	317 s	99.6	" "
13	3 : 4	9.7 : 28.40	330 s	99.3	" "
14	1 : 3	0.4 : 10.10	460 s	-	ช้าเกินไป
15	2 : 4	3.1 : 28.40	1025 s	-	ช้าเกินไป
16	1 : 4	0.4 : 28.40	1688 s	-	ช้าเกินไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อมูลทั้งหมดเราสามารถสรุปได้ว่า

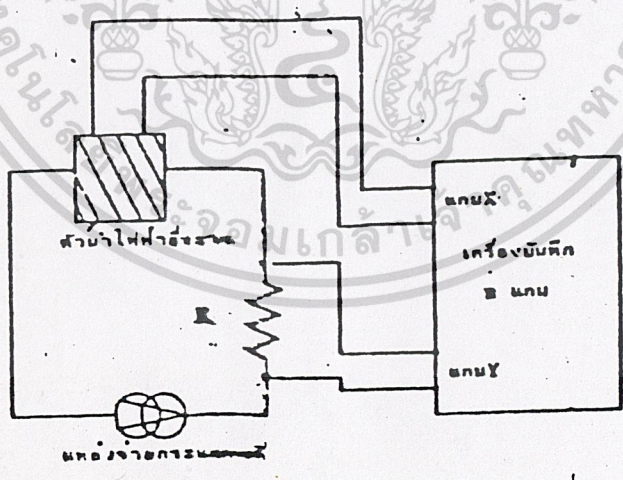
- (1) เครื่องวัดอุณหภูมิวิกฤต สามารถวัดค่าอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำยิ่งยวดได้
- (2) ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นคือ การที่วัดได้ค่า T_c ที่สูงกว่าค่าที่ควรจะได้ แต่เราสามารถลดความคลาดเคลื่อนนี้โดยลดความเร็วการดึงหัววัดลง
- (3) เมื่อลดความเร็วการดึงหัววัดจนช้ามาก จะทำให้ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับแรงดันที่ผิดเพี้ยนไปตรงจุดหักมุม ขณะแรงดันเริ่มเปลี่ยนเข้าสู่ศูนย์ ดังผลการทดลองในรูป 6-19, 6-23, 6-26
- (4) ความเร็วที่เหมาะสมที่สุดในการวัดคืออัตรา $t_{ON} : t_{OFF} = 4 : 4$ เพราะว่าวัดได้ค่า T_c ที่ต่ำที่สุด โดยรูปกราฟไม่เพี้ยน
- (5) ที่ระดับความเร็วที่เร็วที่สุด 2 ลำดับแรกได้รูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับอุณหภูมิที่เพี้ยนไปมาก จึงไม่หาค่า T_c แต่เราสามารถใช้เป็นตัวชี้ว่าเป็นตัวนำยิ่งยวดหรือไม่
- (6) ระดับความเร็วที่เร็วที่สุด 3 ลำดับหลังไม่ทำการวัด เพราะมีผลกระทบจากการกระเษยของไนโตรเจนเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.3 การวัด I-V Curve

- (1) เลือกตัวนำยิ่งยวดที่สร้างจากขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างมา 3 ตัว
- (2) ต่อดวงจรวัด I-V Curve ตามรูป 6-28 และต่อหัว I_{in} เข้ากับแกน Y ของเครื่อง X-Y Recorder และต่อหัว V_o เข้ากับแกน X ด้วย
- (3) นำตัวนำยิ่งยวดที่บดกรีกกับฐานเรียบร้อยแล้วมาเสียบไว้ตรงปลายท่อวัดของเครื่อง
- (4) เทไนโตรเจนเหลวใส่ถึง เลื่อนท่อวัดลงไป ให้ปลายของมันแช่ในไนโตรเจนเหลว
- (5) สอดกระดาษกราฟบันทึกผลที่เครื่อง X-Y Recorder แล้วปรับตำแหน่งของหัวแสดงผลให้เหมาะสม
- (6) ปรับปุ่มที่แหล่งจ่ายกระแสให้เพิ่มขึ้นอย่างนุ่มนวลจนสุดมาตรวัด
- (7) หลังจากได้ผลการทดลองแล้ว เปลี่ยนตัวนำยิ่งยวดที่ปลายท่อวัด แล้วทำซ้ำข้อ

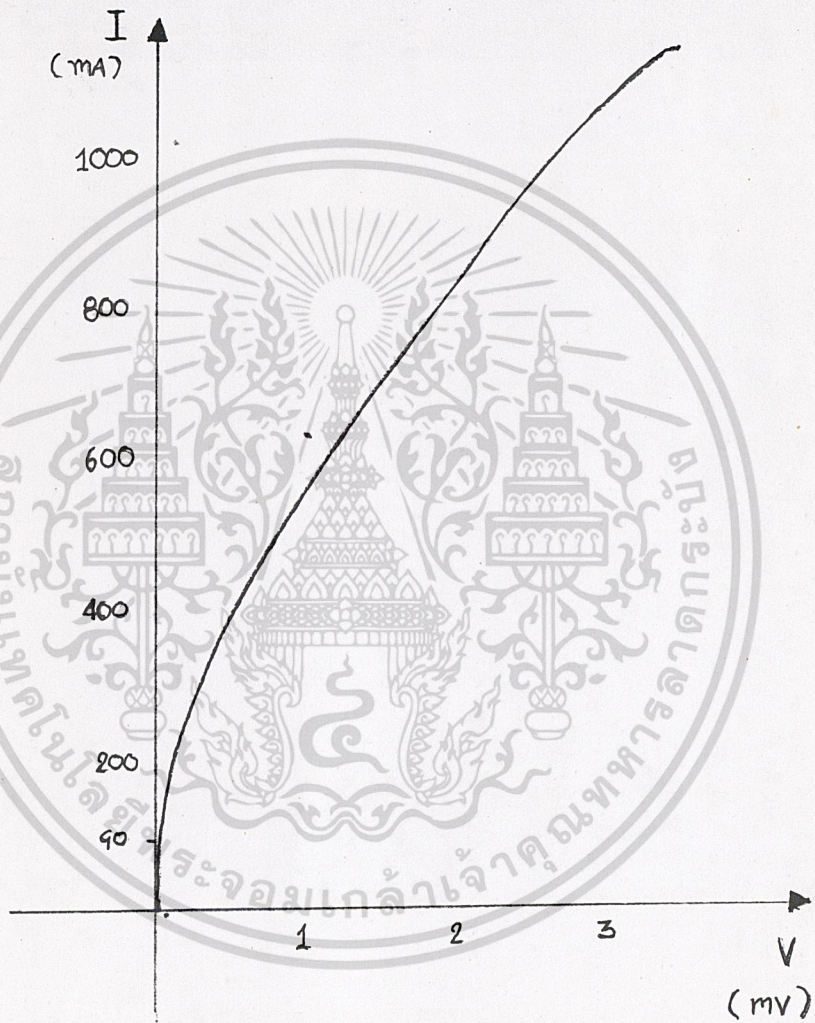
3-6



รูปที่ 6-28 แสดงวงจรวัด I-V Curve

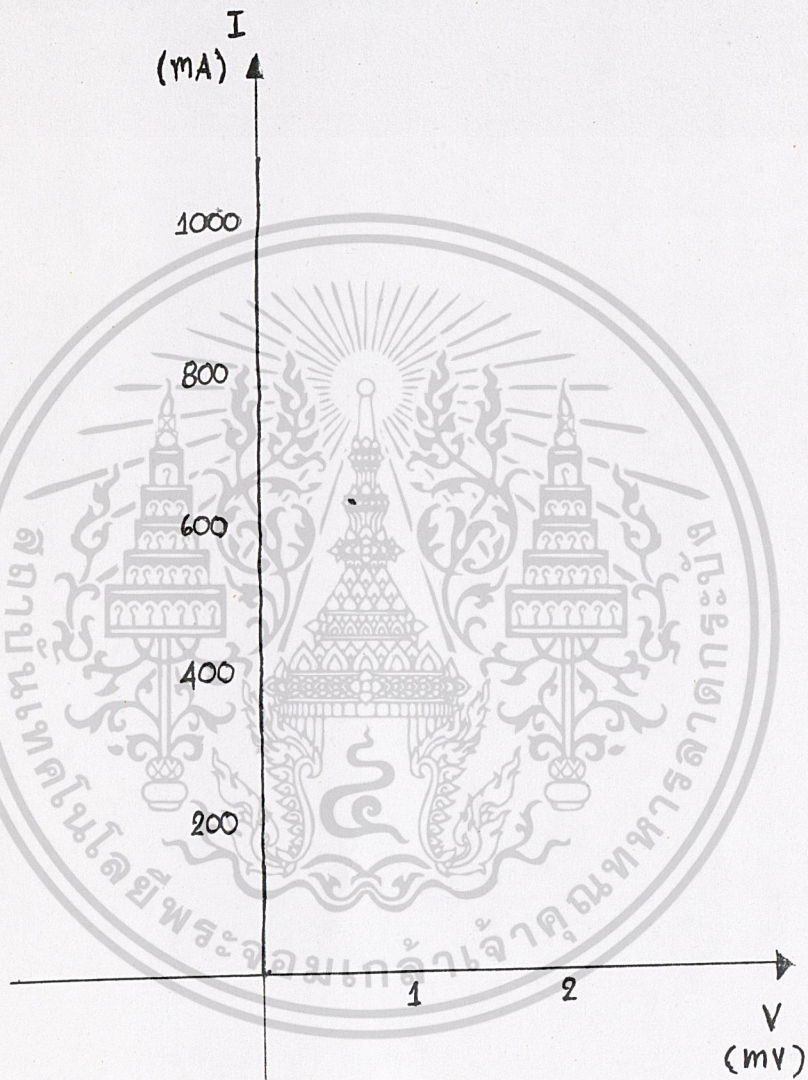
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลอง



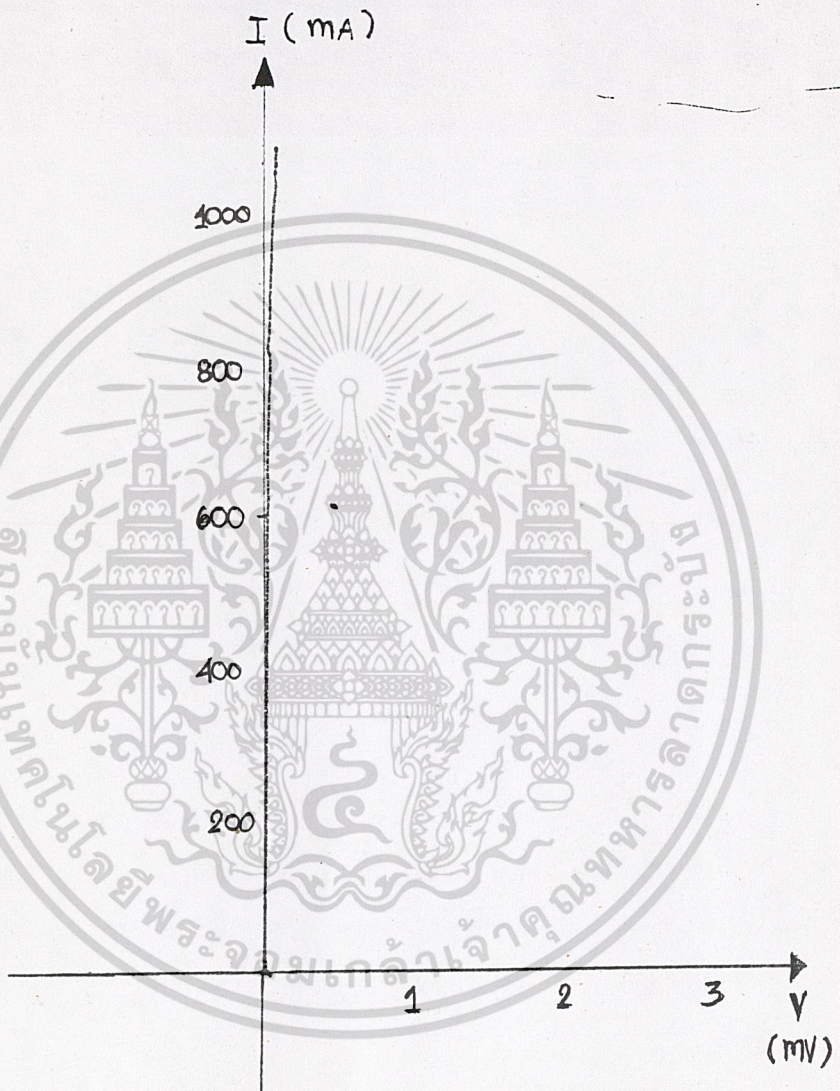
รูปที่ 6 - 29 กราฟแสดงการวัด I-V Curve ของตัวนำยิ่งยวดตัวอย่างที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6-30 กราฟแสดง I-V Curve ของตัวอย่างที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6-31 กราฟแสดง I-V Curve ของตัวอย่างที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการวัด I-V Curve

จากรูป 6-25 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของตัวนำยิ่งยวดตัวที่ 1 เมื่อค่ากระแสมีค่าเพิ่มจากศูนย์ ไม่มีค่าแรงดันตกคร่อมขึ้นसारเลย แสดงว่าเกิดสภาพไร้ความต้านทาน จนกระทั่งกระแสมีค่าเท่ากับ 90 mA กราฟจึงเริ่มโค้งออกมา นั่นหมายถึงมีแรงดันตกคร่อมขึ้นसारแล้ว เพราะฉะนั้นค่ากระแสวิกฤตของตัวนำยิ่งยวดตัวที่ 1 เท่ากับ 90 mA

จากรูป 6-30 และรูป 6-31 ซึ่งเป็นรูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของตัวนำยิ่งยวดตัวที่สาม ก็เช่นเดียวกันกับตัวที่ 1 เริ่มแรกไม่มีค่าแรงดันตกคร่อม ไปจนถึงจุด ๆ หนึ่ง ซึ่งเป็นจุดที่เริ่มมีแรงดันตกคร่อม กราฟจะเริ่มโค้งออกมา จุดนี้เรียกว่าค่ากระแสวิกฤต สำหรับตัวที่ 3 ค่ากระแสวิกฤตเท่ากับ 600 mA ส่วนตัวที่ 2 มีคุณสมบัติที่ดีมาก ค่ากระแสวิกฤตมีค่าสูงกว่า 1050 mA

สรุปแล้วเครื่องวัดอุณหภูมิวิกฤตเครื่องนี้ สามารถใช้พล็อตกราฟความสัมพันธ์กระแสและแรงดันได้

6.3.4 การทดสอบหัววัด

- (1) ต่อหัว Temp ของเครื่องวัดอุณหภูมิวิกฤตเข้ากับหัววัดของดิจิตอลมิเตอร์ แล้วเลือกระดับความเร็วที่ $t_{ON} : t_{OFF} = 1 : 1$
- (2) เทไนโตรเจนเหลวใส่ถัง แล้วปรับให้มิเตอร์เลื่อนลงมาต่ำสุด แล้วปรับระดับของท่อวัดให้หัววัดอยู่ที่ก้นถัง
- (3) อ่านค่าจากมิเตอร์แล้วบันทึก จากนั้นถอดสวิทช์ให้มิเตอร์เลื่อนขึ้น คอยอ่านค่าทุกครั้งที่มีมิเตอร์เลื่อนไป 1 cm บันทึกข้อมูลไว้จนครบ 10 ครั้ง
- (4) นำข้อมูลที่ได้ซึ่งเป็นค่าแรงดัน นำไปเปลี่ยนค่าเป็นอุณหภูมิโดยเทียบจากตารางเทียบค่าอุณหภูมิ-แรงดัน นำไปเปลี่ยนค่าเป็นอุณหภูมิโดยเทียบจากตารางเทียบค่าอุณหภูมิ-แรงดันของเทอร์โมคัปเปิลชนิดนี้ จากนั้นเปลี่ยนค่าอุณหภูมิที่ได้จากองศาเซลเซียสเป็นองศาเคลวิน นำไปเขียนตารางและพล็อตกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

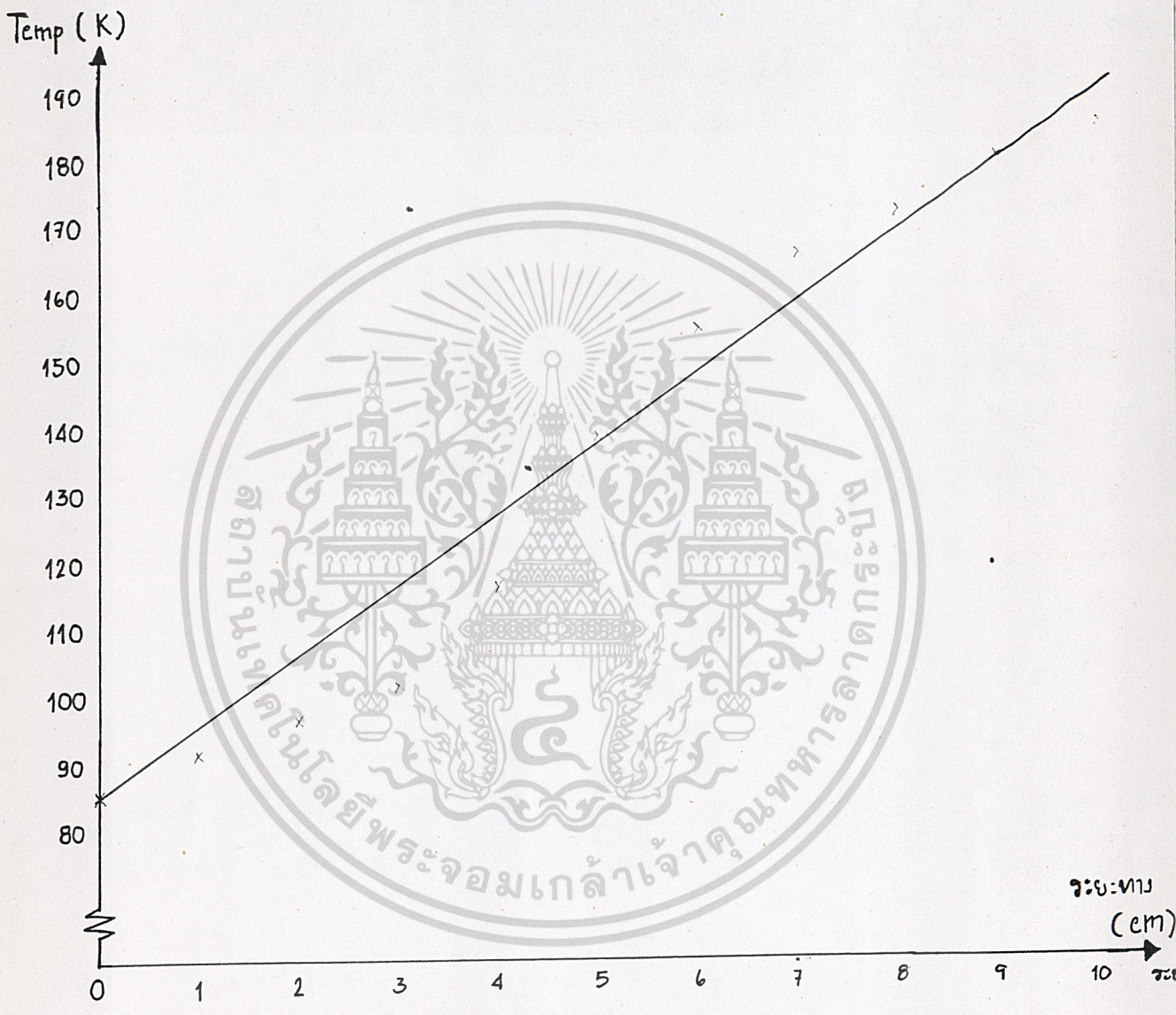
$t^{\circ}\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90'
-200	-5.603	-5.753	-5.889	-6.007	-6.105	-6.181	-6.232	-6.258		
-100	-3.378	-3.656	-3.923	-4.177	-4.419	-4.648	-4.865	-5.069	-5.261	-5.439
(-)0	0.00	-0.383	-0.757	-1.121	-1.475	-1.819	-2.152	-2.475	-2.788	-3.089
(+)0	0.00	0.391	0.789	1.196	1.611	2.035	2.467	2.908	3.357	3.813
100	4.277	4.749	5.227	5.712	6.204	6.702	7.207	7.718	8.235	8.757
200	9.286	9.820	10.360	10.905	11.456	12.011	12.572	13.137	13.707	14.281
300	14.860	15.443	16.030	16.621	17.217	17.816	18.420	19.027	19.638	20.252
400	20.869									

รูปที่ 6-32 ตารางเทียบค่าอุณหภูมิ-แรงดันของเทอร์โมคัปเปิล

ผลการทดสอบและสรุปผล

ระยะทาง	แรงดัน (V)	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	อุณหภูมิ (K)
0	-5.4	-188	85
1	-5.3	-182	91
2	-5.2	-177	96
3	-5.1	-172	101
4	-4.8	-157	116
5	-9.3	-135	138
6	-3.9	-119	154
7	-3.6	-108	165
8	-3.4	-102	171
9	-3.2	-94	179
10	-3.0	-84	184

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



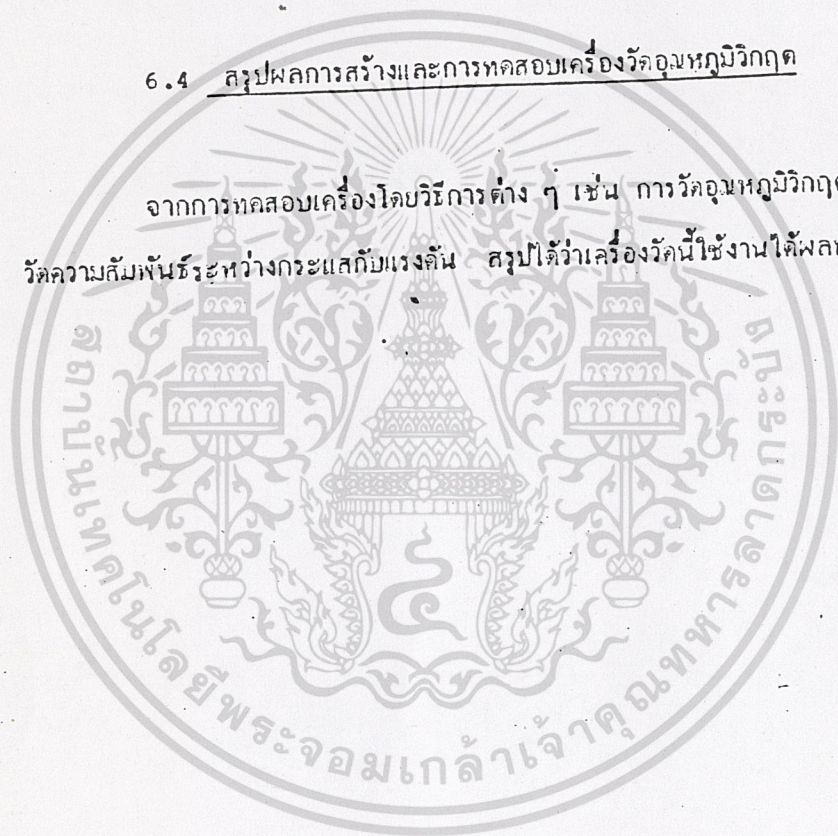
รูปที่ 6-33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทางที่หัววัดเคลื่อนจากกันถึง
ขึ้นมา 10 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อเท็จจริงว่ากันถึงมีโนโครเจนเหลวอยู่ เมื่อวัดที่จุดนั้นก็ควรให้อุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิของโนโครเจนเหลว และเมื่อวัดที่ระยะห่างออกมาเรื่อย ๆ อุณหภูมิก็ควรจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เช่นกัน ซึ่งจากผลการทดลองทั้งที่แสดงเป็นตารางและกราฟ ก็มีลักษณะที่สอดคล้องกับข้อเท็จจริงที่ว่า คือ กราฟระหว่างอุณหภูมิกับระยะทางโดย อุณหภูมิเป็นแกน และระยะทางเป็นแกน มีความชันเป็นบวก นั้นหมายความว่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น เมื่อระยะทางมากขึ้น เพราะฉะนั้นสามารถสรุปว่าหัววัดของเราสามารถใช้งานได้

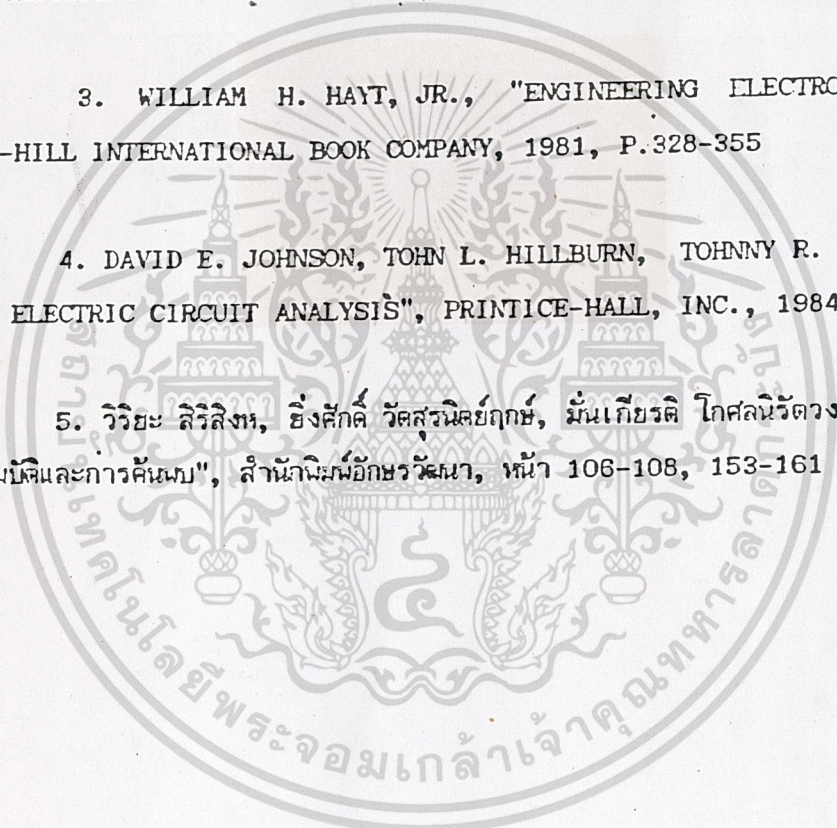
6.4 สรุปผลการสร้างและการทดสอบเครื่องวัดอุณหภูมิวิกฤต

จากการทดสอบเครื่องโดยวิธีการต่าง ๆ เช่น การวัดอุณหภูมิวิกฤต การทดสอบหัววัด การวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน สรุปได้ว่าเครื่องวัดนี้ใช้งานได้ผลน่าพอใจ



เอกสารอ้างอิง

1. วิสาข์ ฐิติรุ่งเรือง, ศุภวัฒน์ จอมแสง และ รศ.ดร.สมเกียรติ ศุภาเดช, "การสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่พหุอะตอมเกลือลาตทอเรต", การประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ๑ สถาบันอุดมศึกษาครั้งที่ 11, เล่มที่ 2, หน้า 5.1.1-5.1.12, ธันวาคม 2531
2. YUKIO AKIBA, WISUT TITIROONGRUANG, TATEKI KUROSU, MASAMURI IIDA AND TERUTARO NAKAMURA, "ELECTROMAGNETIC MEMORY EFFECT IN SUPERCONDUCTING Y-BA-CU-O SYSTEM", OYOBUTSURI, VOL. 58, NO.1, 1989
3. WILLIAM H. HAYT, JR., "ENGINEERING ELECTROMAGNETICS", MCGRAW-HILL INTERNATIONAL BOOK COMPANY, 1981, P.328-355
4. DAVID E. JOHNSON, JOHN L. HILLBURN, TOHNNY R. JOHNSON, "BASIC ELECTRIC CIRCUIT ANALYSIS", PRINTICE-HALL, INC., 1984, P.182-184
5. วิวิยะ ลีวิสิงห์, ชัยศักดิ์ วัฒนชัยฤกษ์, มั่นเกียรติ โทศลนวิรัตน์, "110 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและการคำนวณ", สำนักพิมพ์อักษรวิวัฒนา, หน้า 106-108, 153-161



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

๒๕๖๕