บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

2.1 บทนำ

ในปัจจุบันได้มีการวิจัยและพัฒนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดทั้งแบบอุณหภูมิต่ำ (Low Temperature Superconductor: LTSC) และแบบอุณหภูมิสูง (High Temperature Superconductor: HTSC) กันอย่างต่อเนื่อง ซึ่งอาจอยู่ในรูปของเส้นลวด เส้นเทป ฟิล์มหนาและฟิล์มบาง เป็นต้น ซึ่งให้ค่า J_C ค่อนข้างสูงอยู่ระหว่าง 103 – 10^7 A/cm^2 ทำให้เหมาะแก่การนำไปใช้งานทางด้านไฟฟ้ากำลัง และด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์เป็นอย่างยิ่ง

ที่ห้องปฏิบัติการตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าและการประยุกต์ใช้งานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-X}$ (Y:Ba:Cu = 1:2:3) แบบเซรามิก ที่ได้จากกระบวนการสร้างมาตรฐาน ซึ่งมีข้อดีคือ มีกระบวนการสร้างที่ง่ายไม่ซับซ้อน สะดวกต่อการเตรียมเครื่องมือ อีกทั้งอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไม่สูงมากและใช้ต้นทุนในการวิจัยไม่สูงนัก

2.2 กระบวนการสร้างมาตรฐานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-X}$ [4]

2.2.1 การเตรียมสารเคมีของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-X}$

สำหรับธาตุที่ใช้ในการสร้างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิดนี้ประกอบด้วย อิทเทรียม แบเรียม และทองแดง ธาตุเหล่านี้ได้มาจากสารประกอบ ดังนี้ อิทเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) แบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) ซึ่งสารแต่ละชนิดมีความบริสุทธิ์ 99.99% จากนั้นนำสารประกอบทั้งสามชนิดมาผสมกันโดยใช้อัตราส่วนโดยอะตอม Y: Ba: Cu เป็น 1: 2: 3 อัตราส่วนนี้ได้มีการทดลองมาแล้วว่าให้คุณสมบัติความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ดีที่สุด

ปฏิกิริยาเคมีของสารประกอบทั้ง 3 เขียนสมการได้ดังนี้

$$1/2Y_2O_3 + 2\,BaCO_3 + 3CuO + 1/4O_2 \longrightarrow YBa_2Cu_3O_{7-X} + 2CO_2 \qquad (2.1)$$

จากตารางธาตุจะได้มวลอะตอมของธาตุต่างๆ ดังนี้ Y = 88.905 กรัม, Ba = 137.34 กรัม
Cu = 63.546 กรัม, C = 12.011 กรัม, O = 15.99 กรัม

มวลของสารประกอบตั้งต้นคือ

Y_2O_3 = (2×88.905) + (3×15.99) = 225.807 กรัม/โมล

$BaCO_3$ = 137.34 + 12.011 + (3×15.99) = 197.348 กรัม/โมล

CuO = 63.546 + 15.99 = 79.545 กรัม/โมล

การคำนวณจากสมการเคมี

1) Y_2O_3	1	โมล	ต้องเตรียมสาร = 225.807	กรัม
ถ้า	½	โมล	ต้องเตรียมสาร = 112.9035	กรัม
2) $BaCO_3$	1	โมล	ต้องเตรียมสาร = 197.348	กรัม
ถ้า	2	โมล	ต้องเตรียมสาร = 394.696	กรัม
3) CuO	1	โมล	ต้องเตรียมสาร = 79.545	กรัม
ถ้า	3	โมล	ต้องเตรียมสาร = 238.635	กรัม

มวลโมเลกุลของสารตั้งต้นทั้งหมด = 112.9035 + 394.696 + 238.635

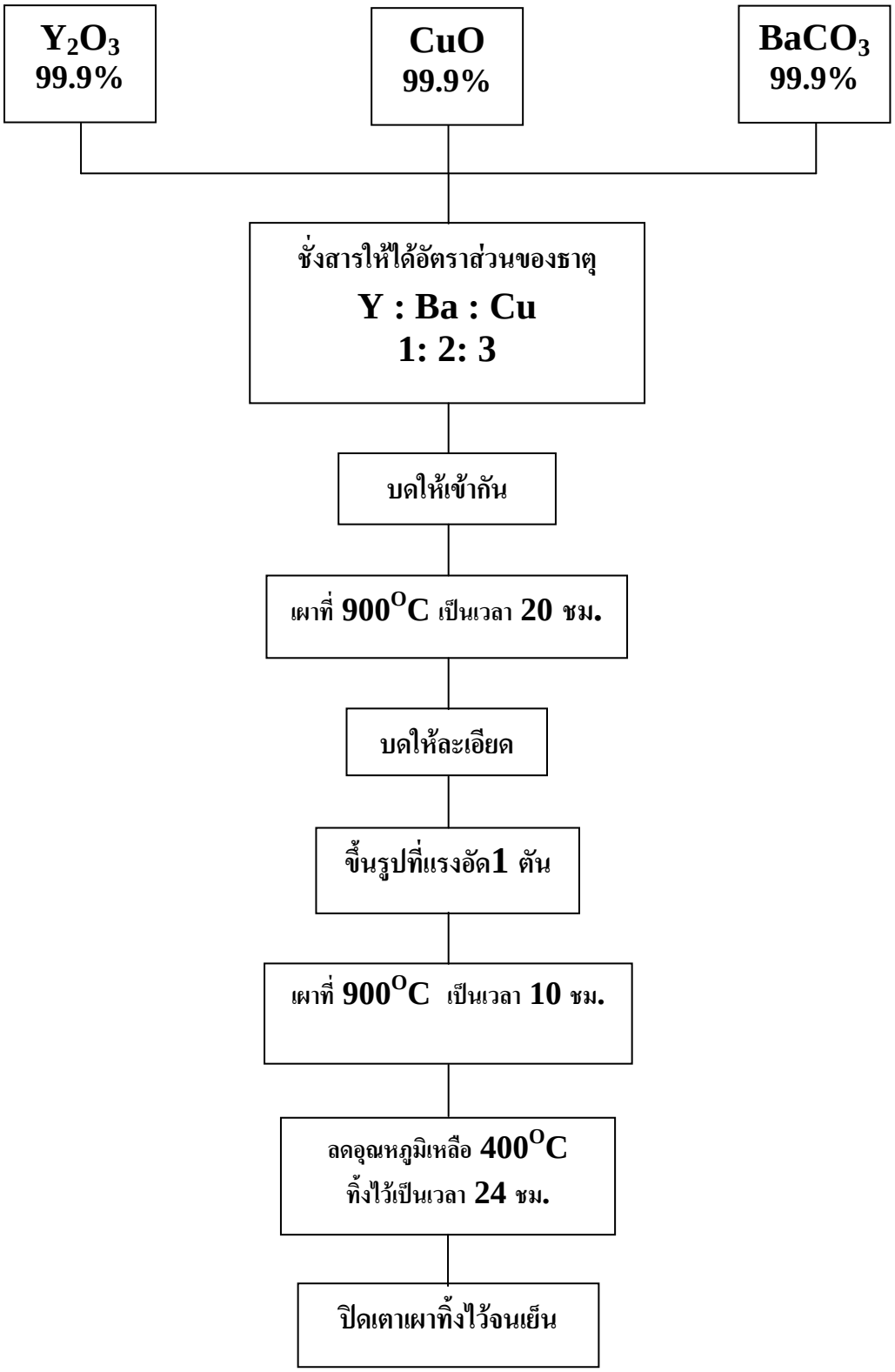
= 746.2345 กรัม

ซึ่งหมายความว่าจะได้สาร $YBa_2Cu_3O_{7-X}$ = 746.2345 กรัม

ปริมาณ x หมายถึง ปริมาณของออกซิเจนที่มีโอกาสเป็นไปได้หลายค่าตามแต่การเกิดปฏิกิริยาเคมี จากสารตั้งต้นทั้งหมด 746.2345 กรัม ถ้าต้องการ $YBa_2Cu_3O_{7-X}$ ปริมาณ 10 กรัม ต้องใช้ อิทเทรียมออกไซด์ 1.513 กรัม แบเรียมคาร์บอเนต 5.289 กรัม และคอปเปอร์ออกไซด์ 3.198 กรัม

2.2.2 ขั้นตอนกระบวนการเผา

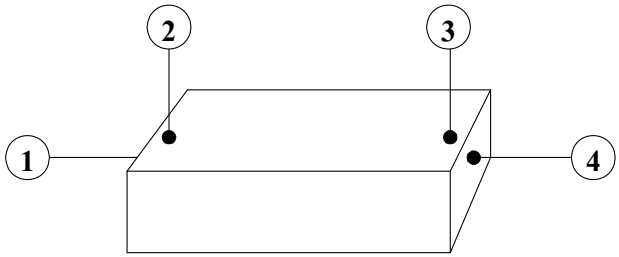
1. ชั่งสารประกอบ ชั่งสารประกอบ Y_2O_3 , $BaCO_3$ และ CuO โดยใช้อัตราส่วน Y : Ba : Cu เป็น 1 : 2 : 3
2. นำสารประกอบทั้งสามชนิดมาบดให้เข้ากัน โดยใช้เวลาบดประมาณ 1 ชั่วโมง
3. นำสารที่ได้ตักใส่ถ้วยทนความร้อน นำไปเผาที่อุณหภูมิ 900^{O}C (อุณหภูมิ Calcination)ใช้เวลาในการเผา 20 ชั่วโมง
4. นำสารที่ได้มาบดให้ละเอียดเป็นผง นำผงสารจำนวน 0.7 กรัม นำไปอัดด้วยแรงอัด 1 ตัน ให้เป็นเม็ด มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร
5. นำเม็ดสารที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ 900^{O}C (อุณหภูมิ Sintering)เป็นเวลา 10 ชั่วโมง
6. ลดอุณหภูมิลงเหลือ 400^{O}C อบทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง
7. ปิดเตาเผา
8. นำเม็ดสารตัวอย่างที่ได้ไปทดสอบปรากฏการณ์ไมส์เนอร์และวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าเมื่อไม่มีและมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำ



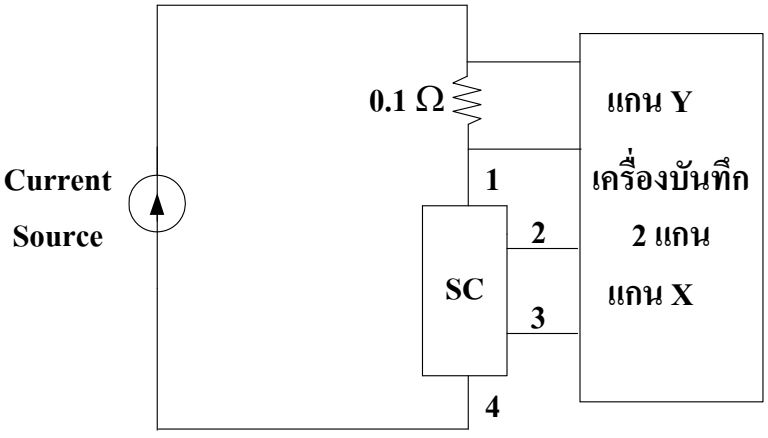
รูปที่ 2.1 กระบวนการสร้างมาตรฐานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด $YBa_2Cu_3O_{7-X}$

2.3 การวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

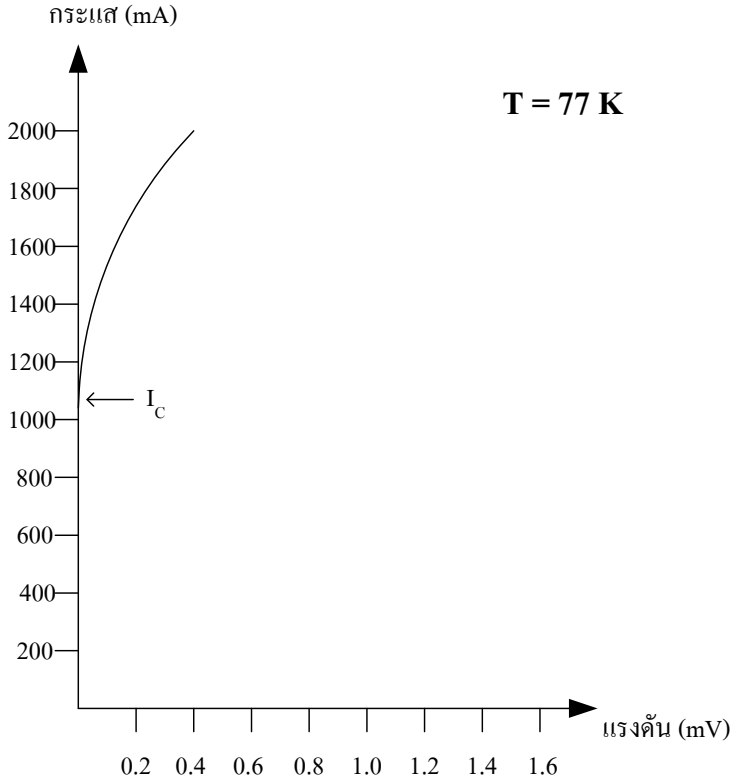
หลังจากที่ได้เม็ดสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจากกระบวนการสร้างเรียบร้อยแล้ว นำมาตัดแต่งให้ได้รูปทรง ดังรูป 2.2 จากนั้นนำชิ้นสารไปทำการวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า โดยใช้วงจรดังรูป 2.3 โดยที่กระแสจะไหลเข้า – ออก จากชิ้นสารที่ขั้ว 1 และ 4 ตามลำดับ และวัดแรงดันตกคร่อมชิ้นสารที่ขั้ว 2 และ 3 ในขณะทำการทดลอง ชิ้นสารจะแช่อยู่ในไนโตรเจนเหลว ที่อุณหภูมิ 77 เคลวิน ซึ่งคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะถูกบันทึกลงในเครื่องบันทึกสองแกน (X-Y Recorder) ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.2 ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ผ่านการตัดแต่งรูปทรง



รูปที่ 2.3 วงจรที่ใช้วัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า



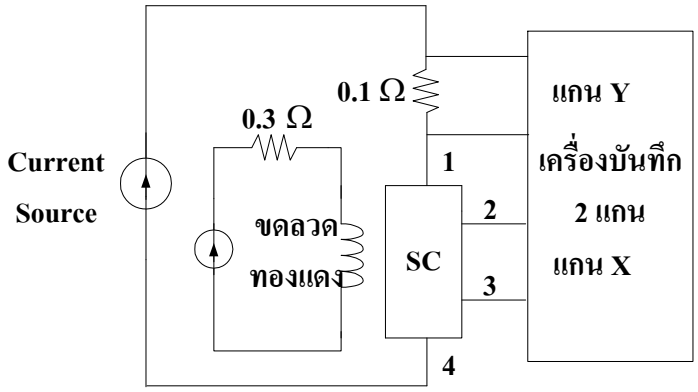
รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

ซึ่งจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าจะเห็นได้ว่ากระแสวิกฤตของชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีค่าเท่ากับ 1.08 Aดังนั้นถ้าป้อนกระแสเกินกว่า 1.08 A ชิ้นสารจะเสียสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด จึงทำให้มีแรงดันตกคร่อมชิ้นสารเกิดขึ้น

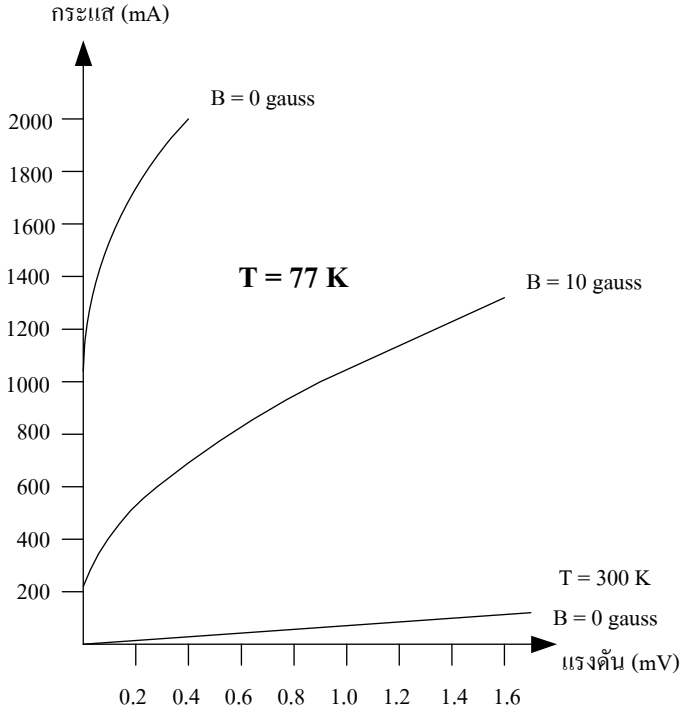
2.4 ผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

จากการสังเกตปรากฏการณ์ซิลสบี (Silsbee effect) ที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ในขณะที่ชิ้นสารกำลังเสียสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด พบว่าสาเหตุที่ทำให้ชิ้นสารเสียสภาพนั้นเกิดจากผลของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับชิ้นสาร เป็นตัวเข้าไปทำลายสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวดทำให้ชิ้นสารเสียสภาพไป จึงทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมชิ้นสารขึ้น ซึ่งในการทดลองผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เราจะใช้วงจรดังรูป 2.5 โดยแสดงผลการทดลองลงบนเครื่องบันทึกสองแกน

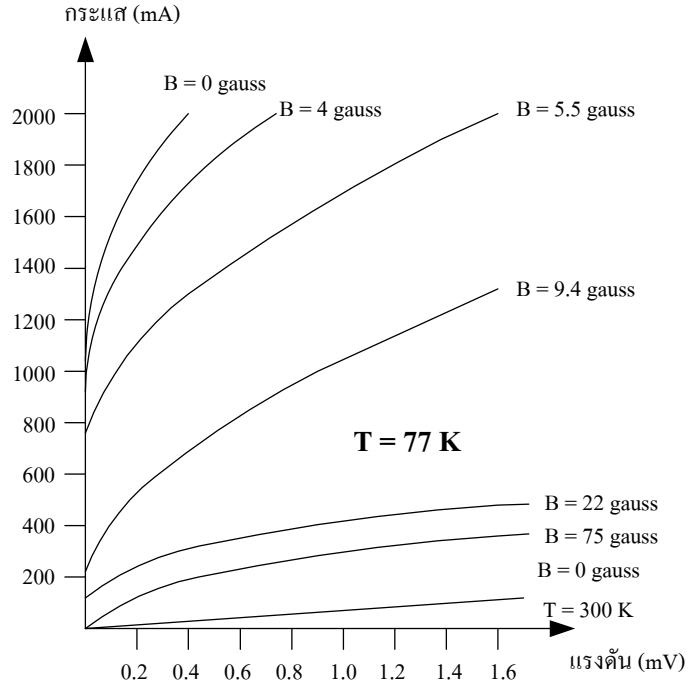
จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าที่แสดงไว้ดังรูปที่ 2.6 แสดงให้เห็นว่า ขณะที่ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอยู่ที่อุณหภูมิ 300 K จะมีคุณสมบัติเหมือนกับตัวต้านทานทั่วไป แต่เมื่ออยู่ที่อุณหภูมิ 77 K ในขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกสามารถวัดค่ากระแสวิกฤตได้ประมาณ



รูปที่ 2.5 วงจรที่ใช้ทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอก



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเมื่อได้รับสนาม

และเมื่อพิจารณาคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชิ้นเดิมที่อุณหภูมิ 77 K โดยให้สนามแม่เหล็กค่าต่างๆกันและผลที่ได้แสดงดังรูป 2.7 ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อสนามแม่เหล็กมีค่ามากขึ้นจะทำให้กระแสวิกฤตมีค่าลดลง

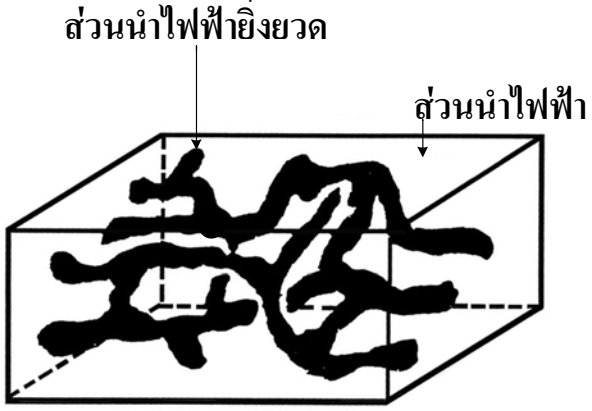
เราสามารถสรุปถึงผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ดังนี้ พิจารณาจากรูปที่ 2.6 จะเห็นได้ว่าชิ้นสารที่อยู่ในอุณหภูมิ 300 K นั้น จะไม่แสดงคุณสมบัติความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด แต่จะแสดงคุณสมบัติเป็นตัวต้านทานทางไฟฟ้าที่มีค่าต่ำๆเท่านั้น แต่เมื่อชิ้นสารอยู่ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต (T_C = 92 K) อย่างเช่นที่อุณหภูมิ 77 K ชิ้นสารจะแสดงคุณสมบัติความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งจะเห็นได้ว่า ในขณะที่ทำการป้อนกระแสให้กับชิ้นสารต่ำกว่าค่ากระแสวิกฤต (ต่ำกว่า 1.08 แอมป์แปร์) จะไม่มีแรงดันตกคร่อมชิ้นสารเกิดขึ้น แต่เมื่อป้อนกระแสสูงกว่ากระแสวิกฤต (สูงกว่า 1.08 แอมป์แปร์) ชิ้นสารจะเสียสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจึงทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมชิ้นสารขึ้น ทั้งนี้อาจพิจารณาได้ว่าเป็นผลมาจากสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านชิ้นสารเป็นตัวทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดบางส่วนไป ทำให้เกิดความต้านทานขึ้นจึงทำให้มีแรงดันตกคร่อมชิ้นสาร

จากแนวความคิดที่ว่าสนามแม่เหล็กเป็นตัวทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดสามารถยืนยันได้โดยการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้กับชิ้นสาร ซึ่งจะเห็นได้จากผลการ

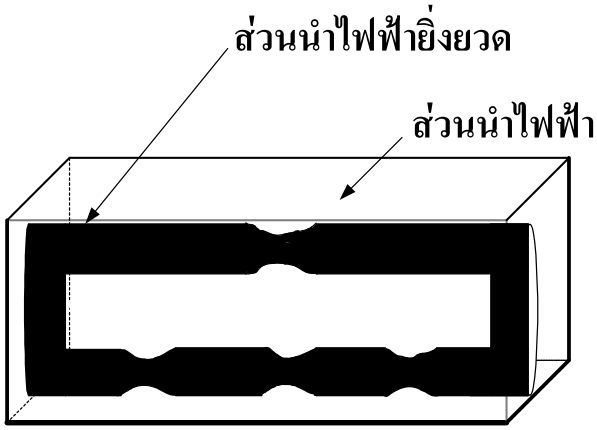
2.5 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Y–Ba–Cu–O แบบเซรามิก [5]

2.5.1 แบบจำลองโครงสร้างมหภาค

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Y–Ba–Cu–O ที่สร้างขึ้นมีลักษณะเนื้อสารเป็นแบบเซรามิกหรือวัสดุประเภทกระเบื้อง ซึ่งจากสมมติฐานแบบจำลองโครงสร้างมหภาคในรูปที่ 2.8 แสดงให้เห็นว่าภายในเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักๆ คือ ส่วนแรกเป็นส่วนของเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแสดงด้วยส่วนที่เป็นสีดำ โดยอยู่ปะปนกับส่วนที่ไม่เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดซึ่งเราพิจารณาว่าเป็นส่วนที่สามารถนำไฟฟ้าได้แสดงในส่วนที่ไม่เป็นสีดำ ดังนั้นการที่ชิ้นสารจะสามารถแสดงความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้นั้น ในส่วนของเนื้อสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะต้องเชื่อมต่อกันอยู่ และจากรูปที่ 2.8 จะเห็นได้ว่าในส่วนของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะมีลักษณะการเชื่อมต่อที่ไม่สม่ำเสมอ กล่าวคือ มีทั้งการเชื่อมต่ออย่างแข็งแรงและการเชื่อมต่อแบบหลวมๆ หรือที่เรียกว่า จุดคอด และเพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจเกี่ยวกับแบบจำลองโครงสร้างมหภาค จึงพิจารณาในรูปที่ 2.9 ซึ่งเป็นแบบจำลองโครงสร้างมหภาคอย่างง่าย โดยการนำเอาส่วนที่เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดใน



รูปที่ 2.8 แบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Y-Ba-Cu-O



รูปที่ 2.9 แบบจำลองโครงสร้างอย่างง่ายของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

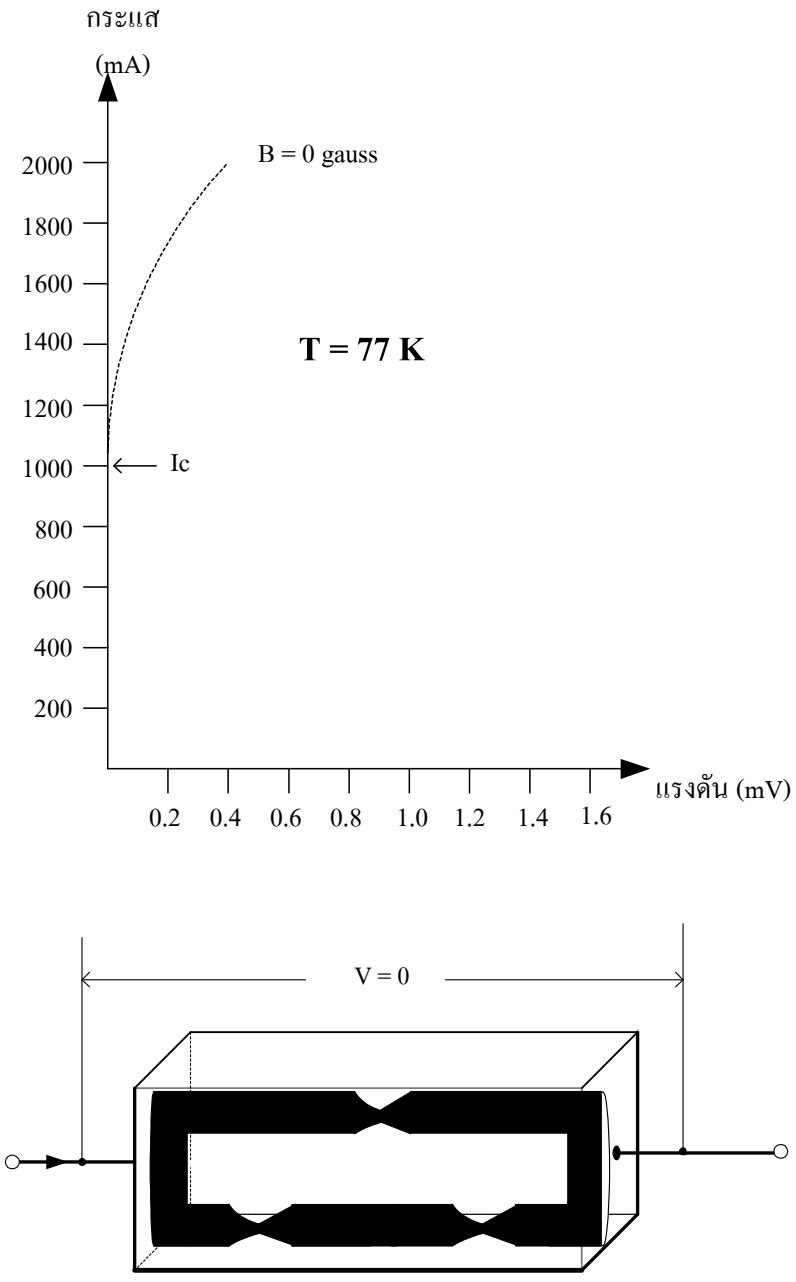
รูปที่ 2.8 มาแทนด้วยท่อนำไฟฟ้ายิ่งยวด 2 ท่อ ซึ่งปลายท่อทั้งสองเชื่อมต่อกัน สำหรับท่อนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้นจะมีลักษณะที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งจะเห็นว่ามีจุดคอดเกิดขึ้น 1 จุด ที่บริเวณกลางท่อตัวนำด้านบนและจุดคอดอีก 3 จุดจะอยู่ในส่วนของท่อตัวนำด้านล่าง สำหรับจุดคอดที่เกิดขึ้นในรูปที่ 2.9 นั้นมีอยู่จริงในชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เพราะในขณะที่ทำการอัดเม็ดสาร เนื้อสารจะอัดตัวชิดติดกัน และเมื่อนำเม็ดสารไปทำการเผาก็จะทำให้เนื้อสารนั้นหลอมตัวชิดติดกันมากยิ่งขึ้นและกลายเป็นโครงสร้างของเซรามิกขึ้น แต่ก็ยังพบว่ามีบางจุดที่เนื้อสารยังไม่หลอมตัวเป็นเนื้อเดียวกันจึงเกิดเป็นจุดคอดขึ้นมา

จากแบบจำลองโครงสร้างอย่างง่ายในรูปที่ 2.9 พิจารณาได้ว่า ในขณะที่ชิ้นสารยังอยู่ในสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้น ท่อนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะเชื่อมต่อกันอยู่ แต่ถ้าชิ้นสารเกิดการเสียสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดขึ้น ในส่วนของท่อนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะขาดออกจากกัน ซึ่งส่วนของท่อตัวนำบริเวณที่ขาดก่อนก็คือส่วนของจุดคอด และในหัวข้อต่อไปจะเป็นการนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดชนิด Y – Ba – Cu – O

2.5.2 การนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้ารวมถึงผลของสนามแม่เหล็กภายนอก

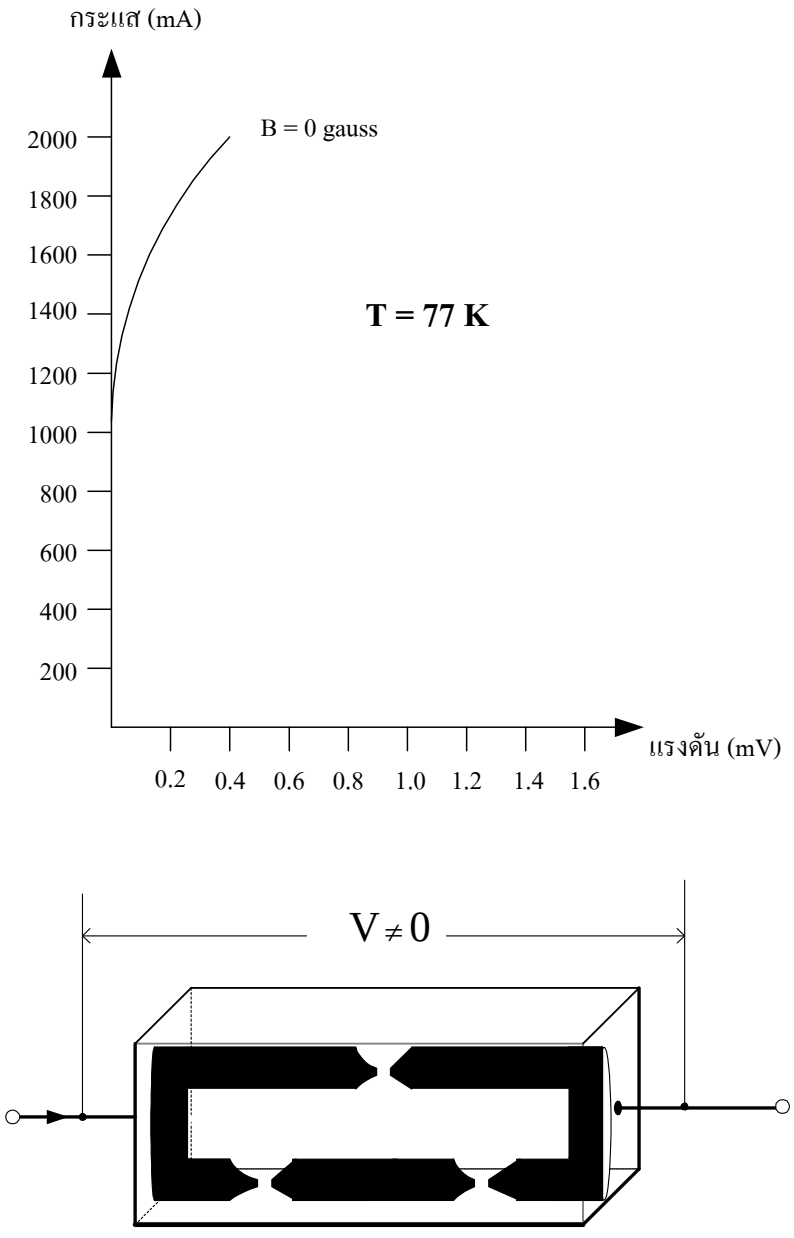
2.5.2.1 การอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าโดยใช้แบบจำลองโครงสร้างมหภาค

จากผลการทดลองในรูปที่ 2.4 สามารถนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายได้ดังนี้ พิจารณารูปที่ 2.10 จะเป็นการนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าในขณะที่ป้อนกระแสให้กับชิ้นสารน้อยกว่าหรือเท่ากับกระแส



รูปที่ 2.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าและแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเมื่อกระแสมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับกระแสวิกฤต

พิจารณารูปที่ 2.11 เป็นการนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าในขณะที่ป้อนกระแสให้กับชิ้นสารมากกว่าค่ากระแสวิกฤต (I_C)

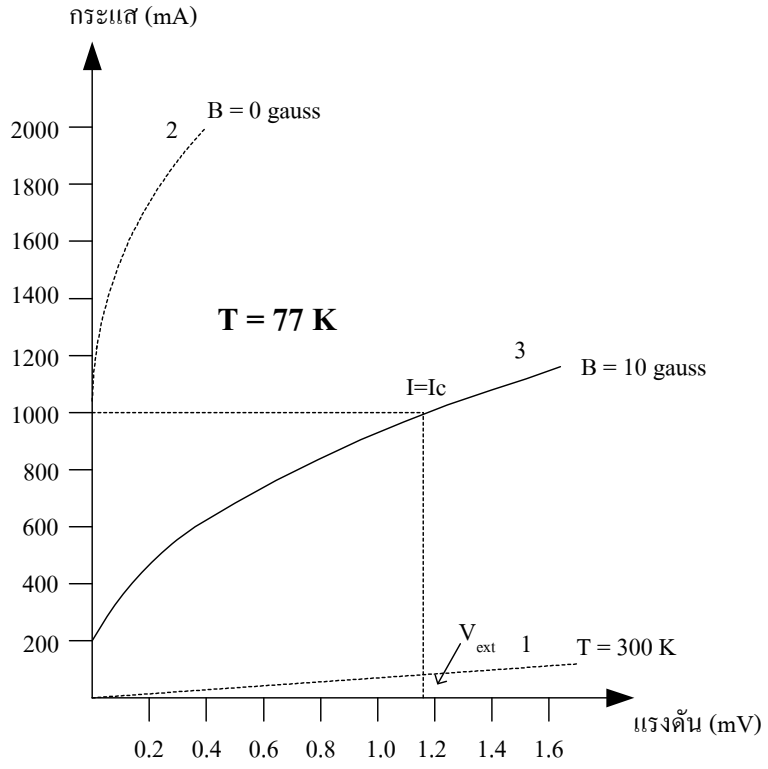


รูปที่ 2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าและแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเมื่อกระแสมีค่ามากกว่ากระแสวิกฤต

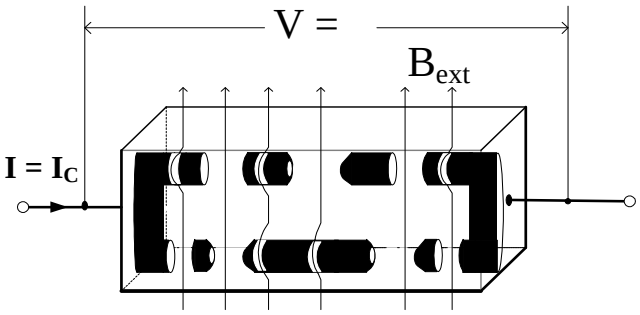
2.5.2.2 การอธิบายผลของสนามแม่เหล็กโดยใช้แบบจำลองโครงสร้างมหภาค

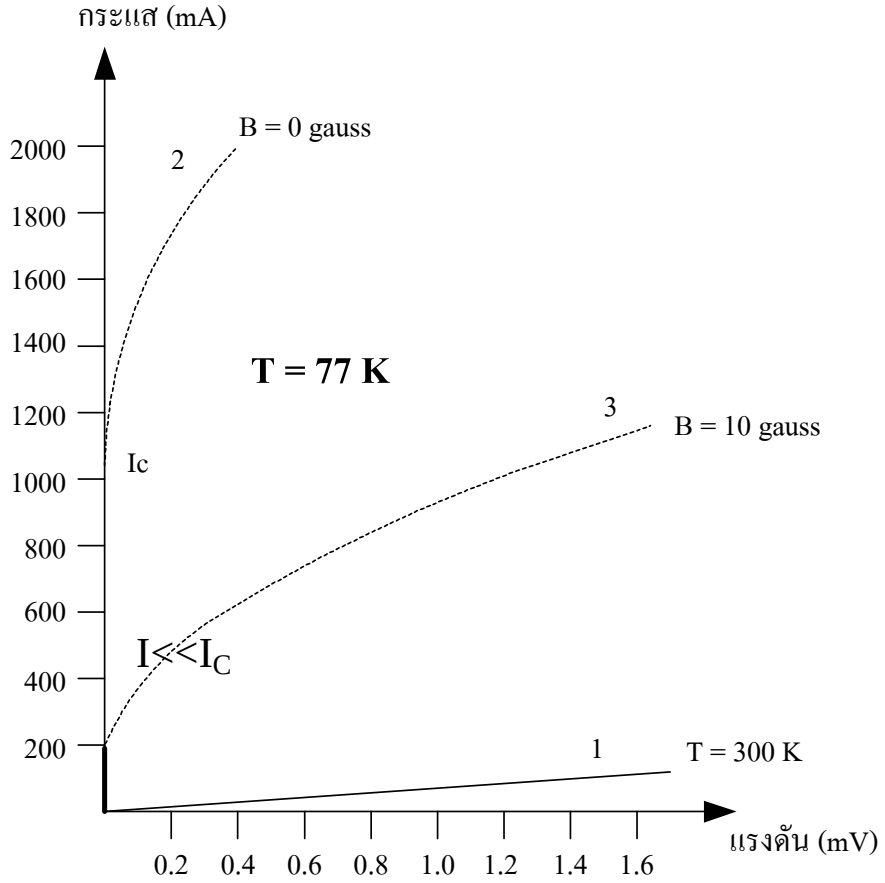
ในหัวข้อนี้จะเป็นการนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคมาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าในขณะที่ทำการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกค่าต่างๆให้กับชิ้นสาร

จากหัวข้อ 2.5.2.1 ได้อธิบายเกี่ยวกับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าเส้นที่ 2 ของรูปที่ 2.12 ไปแล้ว ต่อไปจะเป็นการพิจารณากราฟเส้นที่ 3 ของรูป 2.12 ซึ่งเป็นผลการทดลองในหัวข้อ 2.4.1 ดังนี้ เมื่อมีการป้อนสนามแม่เหล็กค่าต่ำๆ (10G) ให้กับชิ้นสารในสภาวะนำไฟฟ้ายิ่งยวด ภายในชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดบางส่วนจะถูกทำลาย โดยเฉพาะส่วนที่เป็นจุดคอดและส่วนที่ไม่สมบูรณ์จะขาดออกและเกิดแรงดันตกคร่อมชิ้นสารขึ้น (V_{ext}) แต่อย่างไรก็ตามแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมชิ้นสารอันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กภายนอก จะไม่ปรากฏแรงดันตกคร่อมชิ้นสาร (V=0) ถ้ากระแสที่เราป้อนให้กับชิ้นสารมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับกระแสวิกฤต (I_C) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูป 2.13 และจากที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ชิ้นสารจะเสียสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมากขึ้นได้ ก็โดยการป้อนสนามแม่เหล็กให้กับชิ้นสารเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.14 –2.17

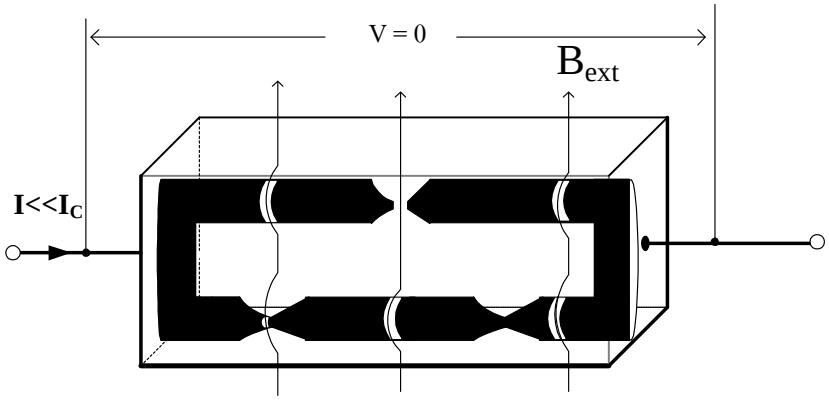


รูปที่ 2.12 แบบจำลองที่นำมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน (เส้นที่ 3) เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำที่กระแสไบอัสเท่ากับหรือมากกว่ากระแสวิกฤต

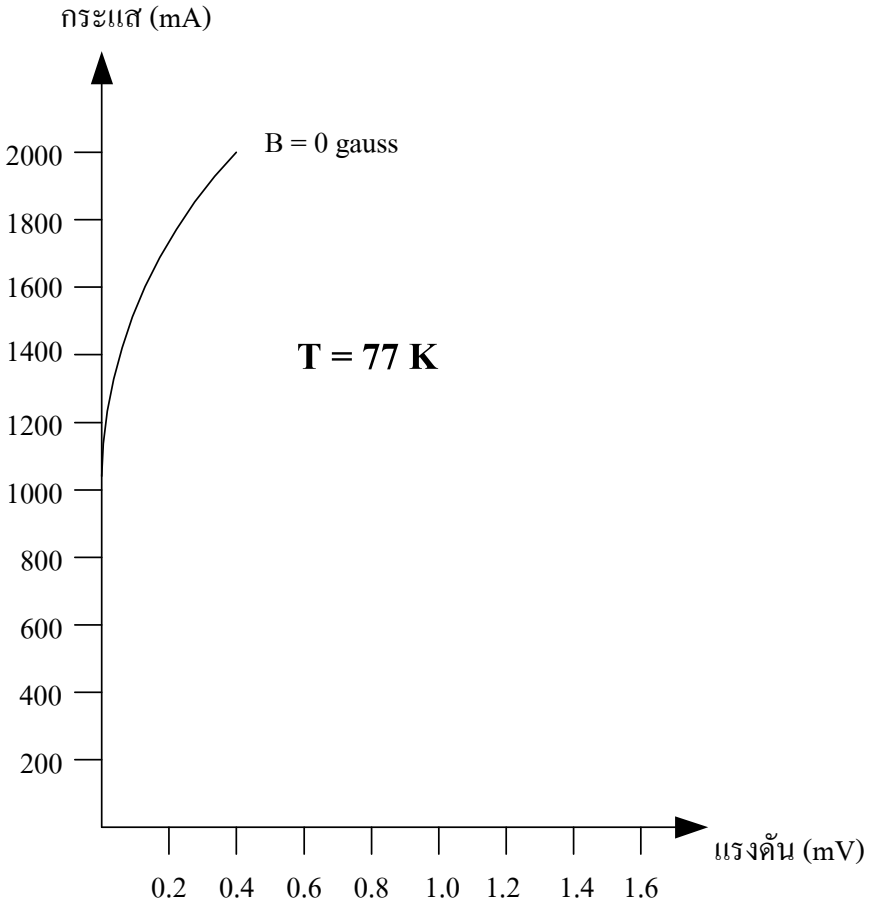




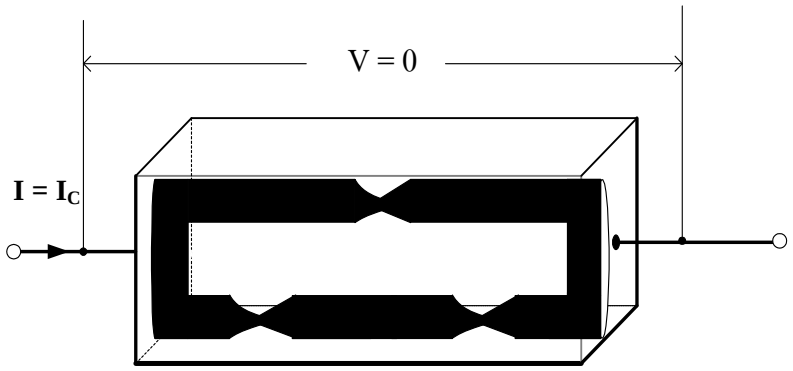
รูปที่ 2.13 แบบจำลองที่นำมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน (เส้นที่ 3) เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำที่กระแสไบอัสน้อยกว่ากระแสวิกฤต



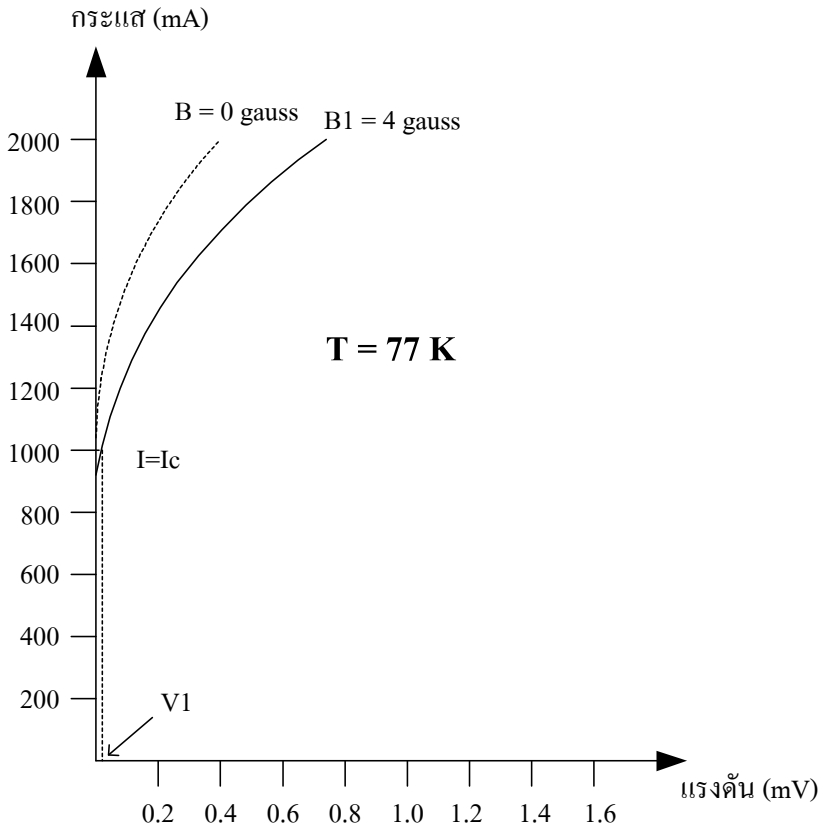
รูปที่ 2.13 (ต่อ)



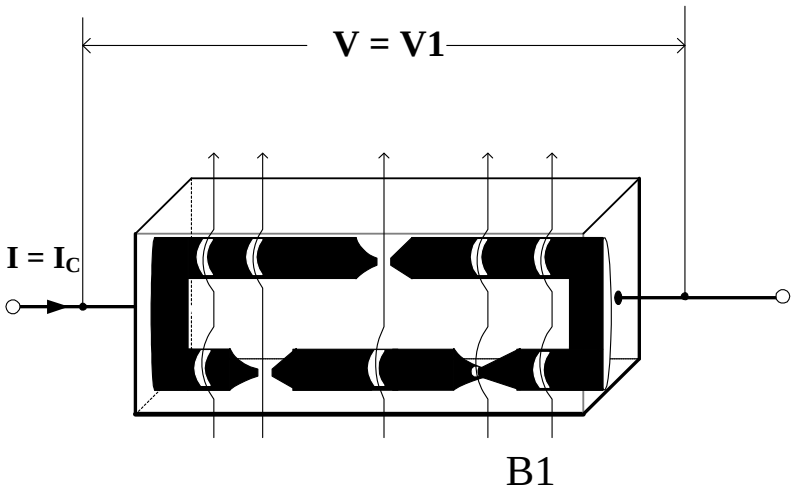
รูปที่ 2.14 แบบจำลองที่นำมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก (B = 0) ที่กระแสเท่ากับกระแสวิกฤต



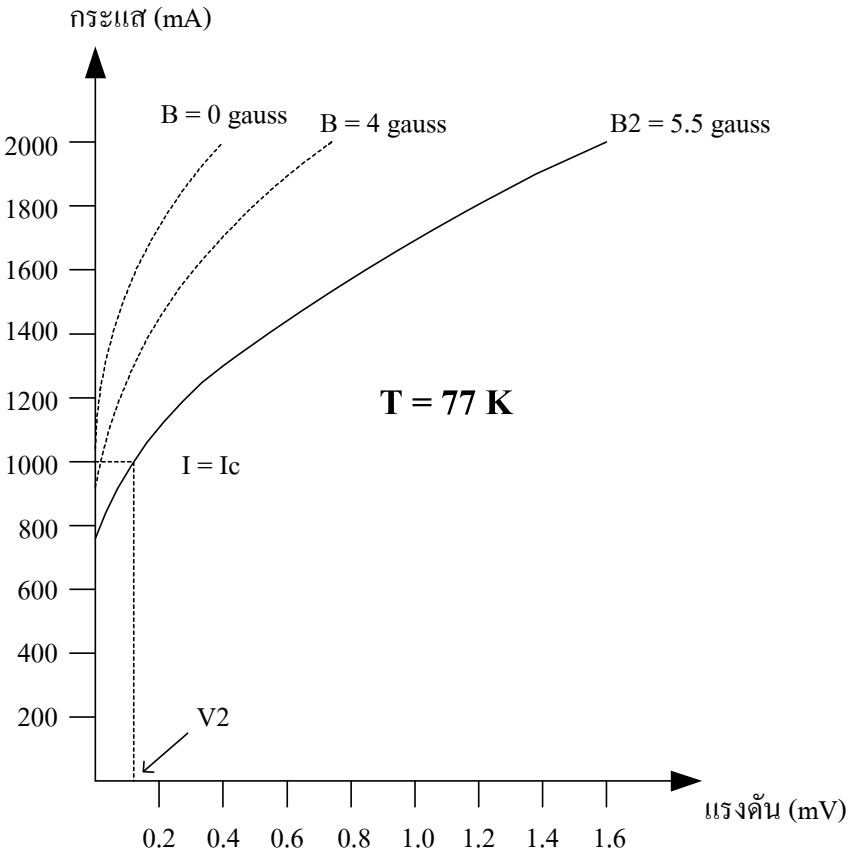
รูปที่ 2.14 (ต่อ)



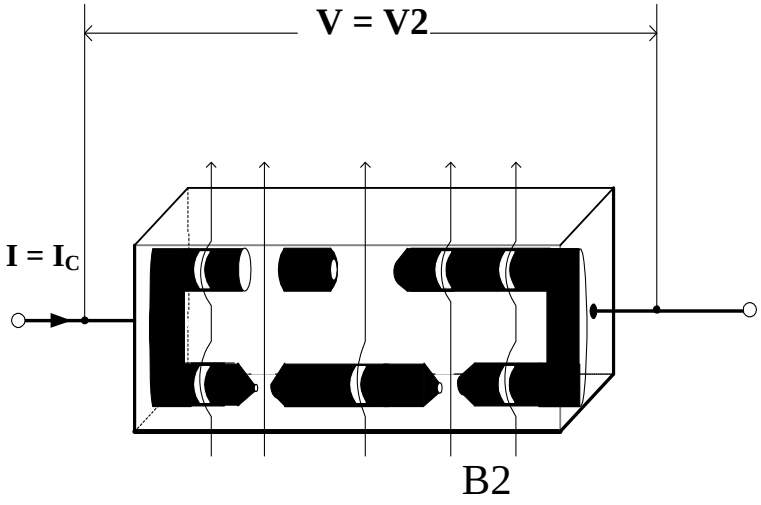
รูปที่ 2.15 แบบจำลองที่นำมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอก B1 = 4 gauss ที่กระแสเท่ากับกระแสวิกฤต



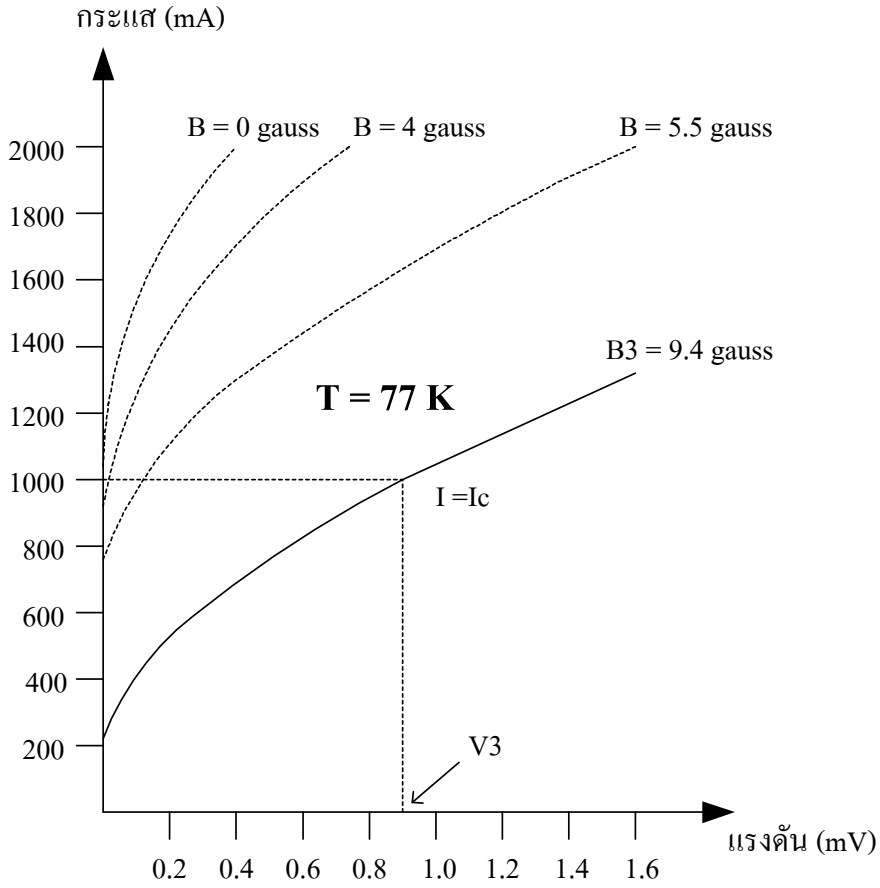
รูปที่ 2.15 (ต่อ)



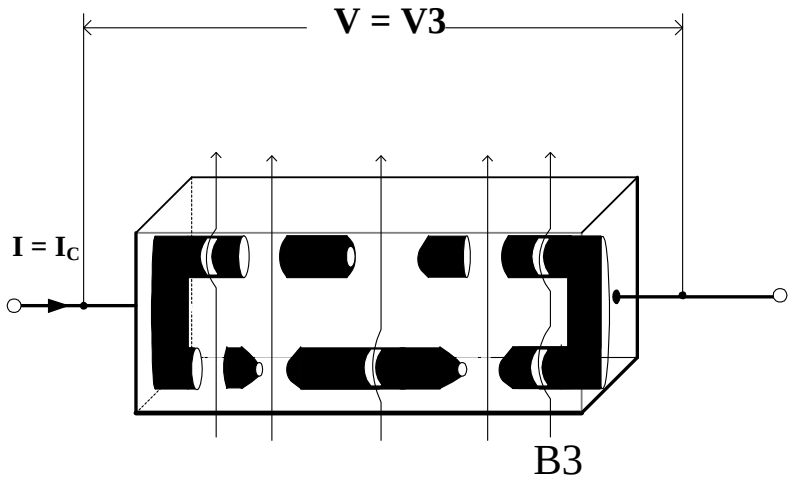
รูปที่ 2.16 แบบจำลองที่นำมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอก B2 = 5.5 gauss ที่กระแสเท่ากับกระแสวิกฤต



รูปที่ 2.16 (ต่อ)



รูปที่ 2.17 แบบจำลองที่นำมาอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอก B3 = 9.4 gauss ที่กระแสเท่ากับกระแสวิกฤต



รูปที่ 2.17 (ต่อ)