

# บทที่ 1

## บทนำ

วันที่ 18 มีนาคม ค.ศ.1987 ณ ห้องจัดค้นบอลรูม โรงแรมนิวยอร์กฮิลตัน ประเทศสหรัฐอเมริกา นักฟิสิกส์ นักข่าว และผู้สนใจงานด้านฟิสิกส์ จำนวนมากถึง 3,800 คน ได้ไปเข้าร่วมประชุมงานสมาคมนักฟิสิกส์อเมริกัน ในสาขาคอนเดนส์เมตเตอร์ฟิสิกส์ เป็นเรื่องที่ตื่นเต้นที่สุดในรอบหลายทศวรรษที่ผ่านมา นั่นคือ การรายงานผลการค้นพบ "ซูเปอร์คอนดักเตอร์ อุณหภูมิสูง" (High - temperature superconductor)

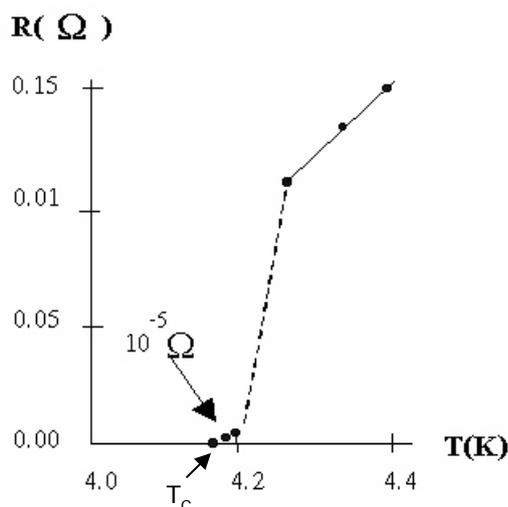
นับแต่นั้นมา ข่าวคราวเกี่ยวกับเรื่อง "ซูเปอร์คอนดักเตอร์" หรือ ที่คนไทย เรียกกันว่า "ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด" นั้นเป็นที่เรียกรวากันมากทั่วโลก และในขณะนี้ ก็กำลังมีการแข่งขันกันอย่างมาก เพื่อช่วงชิงตลาดผลิตภัณฑ์ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไม่ว่าจะเป็น สหรัฐ, ญี่ปุ่น หรือ จีน เนื่องจากตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดกำลังจะเข้ามามีบทบาทในวงการไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์มากขึ้น เพราะเมื่อไม่นานมานี้ นักวิทยาศาสตร์กลุ่มหนึ่ง ได้ประสบความสำเร็จในการทำให้ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดใช้งานได้ ในอุณหภูมิที่สูงขึ้น ซึ่งนั่นหมายความว่า จะช่วยลดต้นทุนในการใช้งานตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนี้และทำให้แพร่หลายมากขึ้นรวมทั้งคุ้มกับการทำเพื่อการค้า

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้น แต่ก่อนรู้จักกันในสภาพของสารตัวนำจำพวกโลหะ ซึ่งจะปล่อยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านโดยไม่สูญเสียความร้อน และไม่ต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าได้ ก็เฉพาะเมื่อสารตัวนำนั้นอยู่ในอุณหภูมิต่ำมากๆ ชนิดที่เรียกว่า ตีลบ 273 องศาเซลเซียส หรือลบ 460 องศาฟาเรนไฮต์ หรือที่เรียกกันว่า ศูนย์องศาสัมบูรณ์หรือศูนย์องศาเคลวิน ซึ่งถือกันว่าเป็นอุณหภูมิต่ำปราศจากความร้อนโดยสิ้นเชิง

เมื่อสารตัวนำโลหะ อยู่ในสภาพแช่แข็งที่ศูนย์องศาสัมบูรณ์นี้ มันจะสูญเสียความต้านทานทางไฟฟ้าทั้งหมด และเกิดปรากฏการณ์ "ซูเปอร์คอนดักติวิตี" หรือ "การนำไฟฟ้ายิ่งยวด" ซึ่งในสภาพการนำไฟฟ้าดังกล่าวนี้ สามารถนำไฟฟ้าโดยไม่มีการสูญเสียพลังงาน ซึ่งนั่นหมายถึงว่า หากนำตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไปทำสายไฟฟ้าแทนลวดทองแดง ก็จะนำไฟฟ้าได้ดีโดยไม่ต้องมีหม้อแปลงไฟฟ้าช่วยเลย หรือถ้านำไป พันมอเตอร์ ก็จะได้มอเตอร์ขนาดเล็กลงกว่าที่ใช้ในปัจจุบันนี้อย่างมากทีเดียวหรือพูดง่าย ๆ ก็คือตัวนำชนิดนี้ สามารถปฏิวัติโลกอิเล็กทรอนิกส์ปัจจุบัน ไปทั้งหมดได้เลย

## 1.1 ประวัติการค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

สภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ถูกค้นพบครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1911 [1] โดยนาย Heike Kamerlingh Onnes ชาวเนเธอร์แลนด์ ได้ทำการทดลองวัดความต้านทานไฟฟ้าของโลหะที่อุณหภูมิต่ำมาก ๆ พบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าของปรอท (mercury, Hg) ลดลงอย่างรวดเร็วจนกระทั่งเป็นศูนย์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 4.2 เคลวิน ดังแสดงได้ในรูปที่ 1.1 และเรียกสภาวะที่เกิดขึ้นนี้ว่า สภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด และเรียกอุณหภูมิที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์นี้ว่า อุณหภูมิวิกฤต ( $T_c$ )



รูปที่ 1.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานทางไฟฟ้ากับอุณหภูมิของปรอทจากการทดลองของ Heike Kamerlingh Onnes

หลังจากนั้นก็ยังมีนักวิทยาศาสตร์จำนวนมากหันมาสนใจและทำการทดลองเพื่อหาทฤษฎีมาอธิบายการเกิดสภาพการนำไฟฟ้ายิ่งยวด และค้นหาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีอุณหภูมิวิกฤตที่สูงกว่าเดิม ในปี ค.ศ. 1941 ได้ค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีอุณหภูมิวิกฤต 15 เคลวิน จากโลหะผสมของธาตุไนโอเบียม (Niobium) และในปี ค.ศ. 1969 สามารถเพิ่มอุณหภูมิวิกฤตสูงขึ้นเป็น 20 เคลวิน และสามารถใส่ไนโตรเจนเหลว (จุดเดือดอยู่ที่ 20 เคลวิน) ทำเป็นตัวหล่อเย็นแทนฮีเลียมเหลวได้สำเร็จเป็นครั้งแรก

ในปี ค.ศ. 1987 นาย C.W. Chu และทีมวิจัยจากมหาวิทยาลัย Houston ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้ทดลองสารสตรอนเทียม (Sr) ปรากฏว่า อุณหภูมิวิกฤตมีค่าสูงถึง 54 เคลวิน จากนั้นกลุ่มวิจัยของนาย C.W. ได้ทำการทดลองกับธาตุิตเทรียม (Y) สามารถวัดอุณหภูมิวิกฤตได้สูงขึ้นเป็น 95 เคลวิน ซึ่งสร้างความตื่นเต้นแก่วงการฟิสิกส์ทั่วโลก เนื่องจากสามารถที่จะใช้ไนโตรเจนเหลวซึ่งมีจุดเดือดอยู่ที่ 77 เคลวิน (ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่นาย C.W. Chu ทดลอง) เป็นตัวหล่อเย็น ซึ่งไนโตรเจนเหลวนี้มีราคาถูกมากและสามารถจัดเตรียมได้ง่าย

กว่าตัวหล่อเย็นชนิดอื่น สารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ค้นพบใหม่นี้เป็นสารประกอบของธาตุในกลุ่มอิตเทรียม-แบเรียม-ทองแดง-ออกซิเจน (ซึ่งมีสูตรทางเคมีเป็น  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ) เรามักเรียกตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงเช่นนี้ว่า HTSC และหลังจากนั้นก็ได้มีการคิดค้นและพัฒนาตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ โดยตั้งเป้าหมายไว้ว่าจะพัฒนาจนกระทั่งนำตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมาใช้ที่อุณหภูมิห้องหรือประมาณ 300 เคลวินให้ได้

## 1.2 คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญ

การรักษาสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดของสารขึ้นอยู่กับ ค่าสนามแม่เหล็ก กระแสไฟฟ้า และอุณหภูมิ ซึ่งต้องมีค่าต่ำกว่าค่าวิกฤต (Critical values) ซึ่งค่าต่างๆ เหล่านี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของสารหรือวัสดุ ในทางปฏิบัติเราคงต้องการปริมาณกระแสและอุณหภูมิวิกฤตที่มีค่าสูง และในบางกรณีจำเป็นที่จะต้องมีค่าของสนามแม่เหล็กวิกฤตที่สูง เพื่อสามารถนำไปใช้งานได้กว้างขึ้น

### 1.2.1 อุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature: $T_c$ )

อุณหภูมิวิกฤต คือ อุณหภูมิสูงสุดที่ทำให้วัสดุหรือสารยังคงสภาพความนำไฟฟ้ายิ่งยวดอยู่ได้ ซึ่งโดยทั่วไปในการนำไปประยุกต์ใช้งาน วัสดุต่างๆ ต้องทำงานที่สามในสี่ของอุณหภูมิวิกฤตหรือต่ำกว่า จะเห็นได้ว่า ที่อุณหภูมิประมาณ  $\frac{3}{4} T_c$  นั้น ค่าสนามแม่เหล็กวิกฤตจะลดลงเหลือเพียงครึ่งหนึ่งโดยประมาณของขีดจำกัดที่อุณหภูมิต่ำ ส่วนความหนาแน่นของกระแสวิกฤตนั้นลดลงเหลือเพียงหนึ่งในสี่ของขีดจำกัดเท่านั้น [1] ดังนั้นถ้าเราต้องการนำเอาชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไปใช้ที่อุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว (77 K) ชิ้นสารนั้นจะต้องมีค่า  $T_c$  เข้าใกล้ 100 K อย่างเช่นชิ้นสารที่ใช้มีค่า  $T_c \approx 95$  K ก็สามารถนำมาใช้งานได้

ถ้าเราต้องการนำชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไปใช้งานที่อุณหภูมิห้อง (300 K) ชิ้นสารนั้นต้องมีอุณหภูมิ  $T_c$  มากกว่า 400 K อันเป็นสิ่งที่วงการทางวิทยาศาสตร์ต้องการและกำลังวิจัยและพัฒนากันอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการปฏิรูปเทคโนโลยีอย่างแท้จริงต่อไป

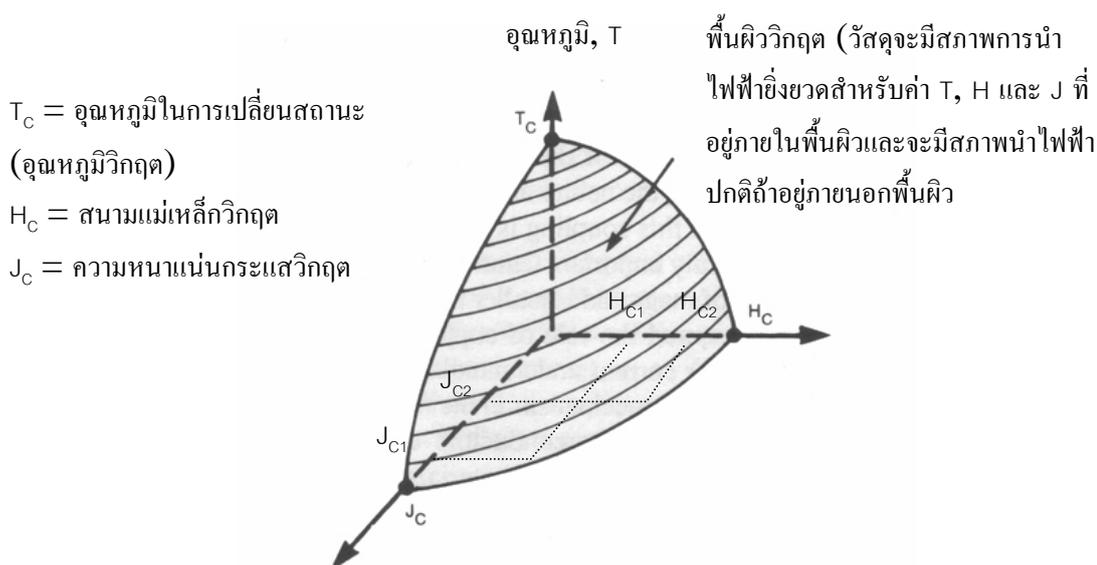
### 1.2.2 สนามแม่เหล็กวิกฤต (Critical Magnetic Field: $H_c$ )

เมื่อมีสนามแม่เหล็กมากกระทำกับตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด พบว่าสนามแม่เหล็กสามารถทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ ค่าของสนามแม่เหล็กที่น้อยที่สุดที่สามารถทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เราเรียกว่า สนามแม่เหล็กวิกฤต (Critical Magnetic Field :  $H_c$ ) หรือสามารถวัดได้ในรูปของ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กวิกฤต (Critical Magnetic Flux density :  $B_c$ )

### 1.2.3 ความหนาแน่นกระแสวิกฤต (Critical Current Density: $J_C$ )

ในสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เมื่อมีการป้อนกระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่านเป็นปริมาณเพียงพอที่จะทำให้สารนั้นเสียสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด นั่นคือมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมชิ้นสาร หรือมีความต้านทานเกิดขึ้น เราจะเรียกค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านนี้ว่า กระแสวิกฤต (Critical Current:  $I_C$ )

โดยทั่วไปการพิจารณาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้น มักพิจารณาในรูปของความหนาแน่นวิกฤต (Critical Current Density;  $J_C$ ) ซึ่งความหนาแน่นกระแสวิกฤต คือ อัตราส่วนระหว่างกระแสวิกฤตกับพื้นที่หน้าตัดของชิ้นสารที่กระแสไหลผ่าน



**รูปที่ 1.2** ความสัมพันธ์ของสถานะการนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ, สนามแม่เหล็ก และความหนาแน่นกระแส

จากรูปที่ 1.2 ถ้าเราพิจารณาขณะป้อนกระแสไบอัสให้กับชิ้นสาร โดยมีปริมาณความหนาแน่นกระแสน้อยกว่าความหนาแน่นกระแสวิกฤต  $J_C$  เล็กน้อย เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกแก่ชิ้นสารเป็น  $H_{C1}$  ค่า  $J_C$  จะมีขนาดลดลงเป็น  $J_{C1}$  และเมื่อให้สนามแม่เหล็กเป็น  $H_{C2}$  ค่า  $J_C$  ก็จะลดลงเหลือ  $J_{C2}$  ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ค่าสนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นกระแสวิกฤตลดลง หรืออาจกล่าวได้ว่า สนามแม่เหล็กจะทำให้สภาพตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดถูกทำลายมากขึ้น เป็นผลให้สภาพความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นด้วย

### 1.3 การทดสอบคุณสมบัติความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

ปรากฏการณ์สำคัญที่แสดงถึงสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดของวัสดุหรือสารต่างๆ ได้แก่ ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner Effect) ปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน (Zero Resistance) และ ปรากฏการณ์ซิลสบี (Silsbee Effect)

#### 1.3.1 ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner Effect)

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดที่สำคัญคือ ความต้านทานไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์ และมีปรากฏการณ์ที่น่าสนใจอีกอย่างหนึ่ง ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางแม่เหล็กกล่าวคือ ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะมีการผลักสนามแม่เหล็กออกจากตัวมัน นั่นคือ ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดนั้นจะไม่ยอมให้สนามแม่เหล็กหรือเส้นแรงแม่เหล็กทะลุผ่านตัวมันได้ แสดงว่าภายในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะมีสนามแม่เหล็กเป็นศูนย์ ซึ่งเป็นคุณสมบัติของสารแม่เหล็กไดอะ (Diamagnetic) เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner Effect) รูปที่ 1.3 แสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ ซึ่งเกิดขึ้นขณะที่ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแช่อยู่ในไนโตรเจนเหลวเพื่อหล่อเย็นที่อุณหภูมิ 77 K

จากคุณสมบัติทางแม่เหล็ก ซึ่งมีสมการ คือ

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad (1.1)$$

โดยที่  $\vec{M} = \chi_m \vec{H}$  (1.2)

$$\mu_r = (1 + \chi_m) \quad (1.3)$$

โดยที่ B คือความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก

H คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก

M คือ สภาพซึมซับได้ทางแม่เหล็ก (Magnetization)

$\chi_m$  คือ สภาพอ่อนไหวของแม่เหล็ก (Magnetic susceptibility)

$\mu_0$  คือ ความซึมซับได้ในสุญญากาศ (Permeability of free space)

$\mu_r$  คือ ความซึมซับสัมพัทธ์ (Relative Permeability)

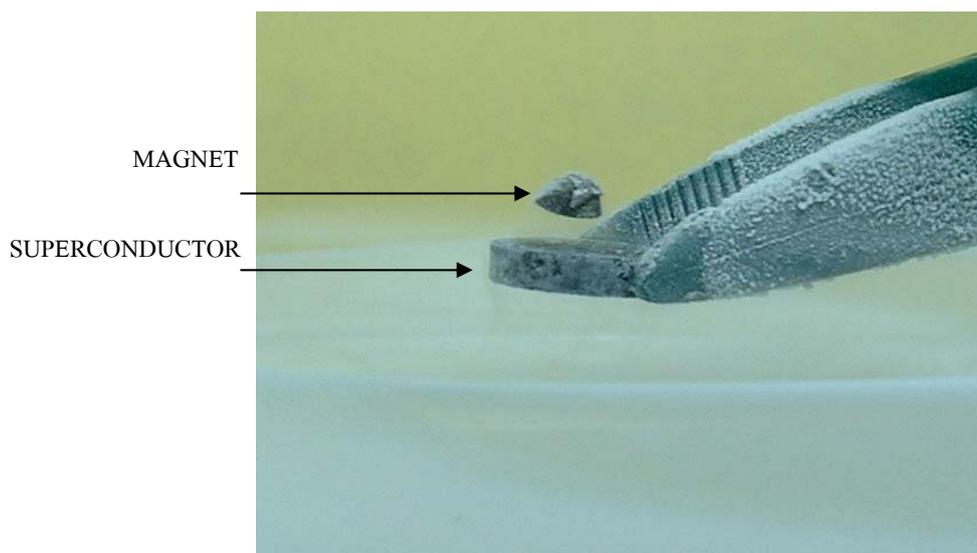
เนื่องจากภายในชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะต้องไม่มีเส้นแรงแม่เหล็กทะลุผ่านได้  $B = 0$

ทำให้

$$\vec{M} = -\vec{H} \quad (1.4)$$

$$\chi_m = -1 \quad (1.5)$$

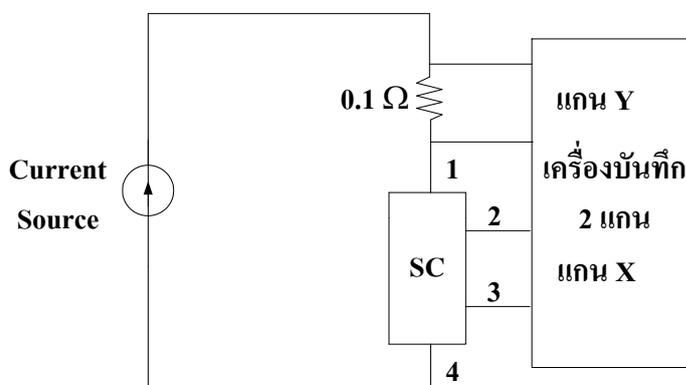
$$\mu_r = 0 \quad (1.6)$$



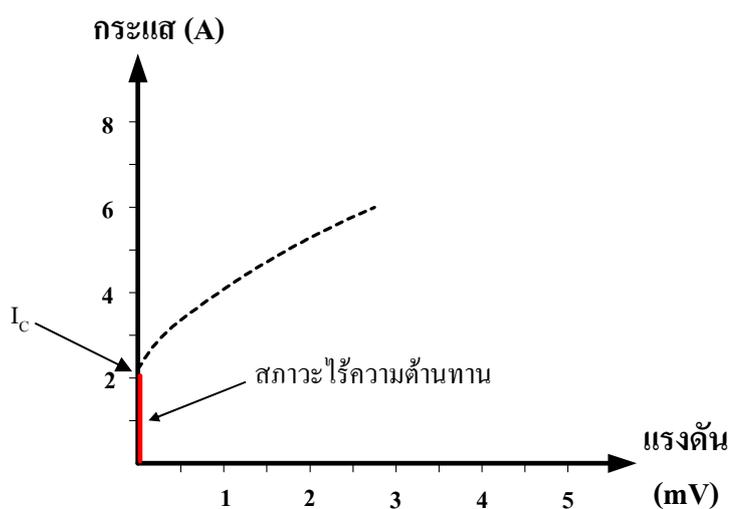
รูปที่ 1.3 ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์

### 1.3.2 ปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน (Zero Resistance)

ชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เมื่อวางอยู่ในอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต ( $T_c$ ) ชิ้นสารนั้นจะมีสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเกิดขึ้น นั่นคือความต้านทานภายในชิ้นสารจะมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งเราสามารถแสดงให้เห็นได้โดยการทดลองตามวงจรรูปที่ 1.4 โดยใช้แหล่งจ่ายกระแสคงที่ที่ปรับค่าได้ (Constant Current Source) จากนั้นทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด (ชิ้นสารที่ทดลองเป็นสารชนิด  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ) ซึ่งในขณะที่ทำการวัดนั้น ชิ้นสารได้ถูกแช่อยู่ในไนโตรเจนเหลว ซึ่งมีจุดเดือดประมาณ 77 เคลวิน จะสังเกตเห็นว่ากราฟคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ได้ในช่วงที่ตั้งขึ้นในแนวแกน  $y$  นั้น ไม่มีแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน นั่นคือความต้านทานมีค่าเป็นศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.4 วงจรการทดลองเพื่อแสดงปรากฏการณ์ไร้ความต้านทาน



รูปที่ 1.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้า

### 1.3.3 ปรัชญาการนำซิลสบี (Silsbee Effect)

จากรูปที่ 1.4 เมื่อทำการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับขั้วนำไฟฟ้าที่ยังยวดยกจนกระทั่งเกินกว่าค่ากระแสวิกฤต ( $I_C = 2 \text{ A.}$ ) จะทำให้เกิดมีแรงดันตกคร่อมขั้วนำหรือเกิดมีความต้านทานเกิดขึ้น เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์ซิลสบี ซึ่งจากกราฟรูปที่ 1.5 จะเห็นว่าเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขั้วนำเกินกว่ากระแสวิกฤต เส้นกราฟจะค่อยๆ เบี่ยงออกจากแกน y นั้นแสดงว่าสภาพนำไฟฟ้าที่ยังยวดได้ถูกทำลายด้วยกระแสไฟฟ้าจำนวนนี้

## 1.4 คุณสมบัติทางแม่เหล็กของตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวด

### 1.4.1 การทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวดด้วยสนามแม่เหล็ก

การทำลายสภาพนำไฟฟ้าที่ยังยวดวิธีหนึ่ง คือการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต ( $T_C$ ) และอีกวิธีหนึ่งก็คือ การป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้กับขั้วนำจนกระทั่งมากกว่าสนามแม่เหล็กวิกฤต  $H_C(T)$  ซึ่งมีค่าแปรตามอุณหภูมิจะสามารถทำลายสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ยังยวดได้ ที่อุณหภูมิวิกฤตสนามแม่เหล็กวิกฤตมีค่าเป็นศูนย์ นั่นคือ  $H_C(T_C) = 0$  สนามแม่เหล็กและอุณหภูมิวิกฤตมีความสัมพันธ์กันดังนี้

เมื่อ	$T < T_C$	สนามแม่เหล็กภายนอก	$H_a = 0$	เป็นสภาพนำไฟฟ้าที่ยังยวด
	$T < T_C$	สนามแม่เหล็กภายนอก	$H_c > H_a > 0$	เป็นสภาพนำไฟฟ้าที่ยังยวด
	$T < T_C$	สนามแม่เหล็กภายนอก	$H_a > H_c$	เสียสภาพนำไฟฟ้าที่ยังยวด

จะเห็นได้ว่าในขณะที่  $T = T_C$  เมื่อให้สนามแม่เหล็กเพียงเล็กน้อยเข้าไปก็สามารถทำลายสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้ ( $T = T_C$  ได้  $H_C = 0$ ) แต่ถ้า  $T \ll T_C$  ต้องใช้สนามแม่เหล็กค่ามากๆ จึงจะทำลายได้

ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กวิกฤตและอุณหภูมิสามารถเขียนได้เป็น

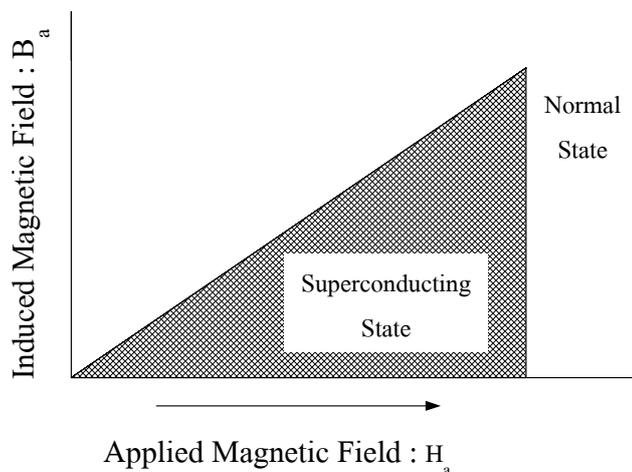
$$H_C(T) = H_C(0) \left[ 1 - \left( \frac{T}{T_C} \right)^2 \right] \quad (1.7)$$

เมื่อ  $H_C(T) =$  สนามแม่เหล็กวิกฤต  
 $H_C(0) =$  สนามแม่เหล็กวิกฤตที่ศูนย์เคลวิน

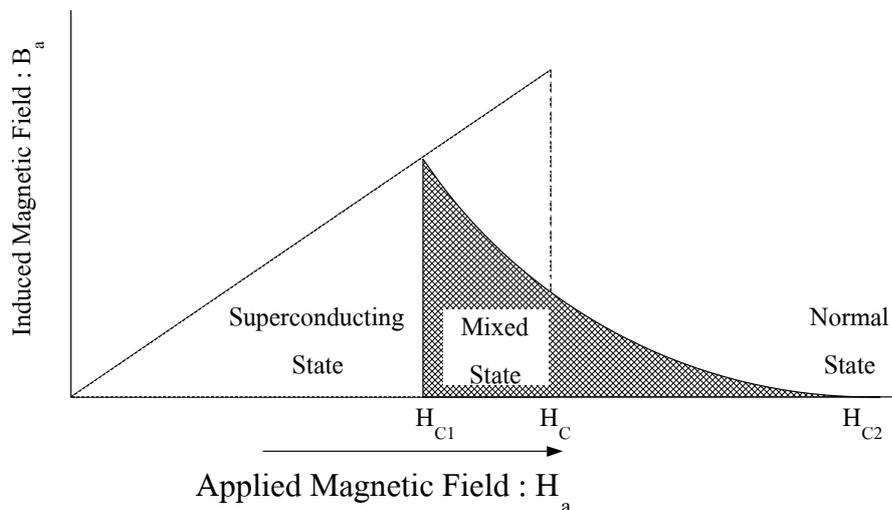
### 1.5 ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 และประเภทที่ 2

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะไม่ยอมให้สนามแม่เหล็กทะลุผ่านตัวมัน นั้นแสดงว่า เมื่อป้อนสนามแม่เหล็กเข้าไปให้กับชิ้นสาร จะเหนี่ยวนำทำให้เกิด Magnetization ขึ้น ซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกับทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอก ( $\vec{M} = -\vec{H}_a$ ) ซึ่งตรงกับปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ และมีคุณสมบัติเป็น ไดอะแมกเนติกที่สมบูรณ์

ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 ส่วนมากมักจะเป็นพวกโลหะบริสุทธิ์ เช่น ปรอท (Hg) กาโดลิเนียม (Gd) อะลูมิเนียม (Al) เป็นต้น ส่วนตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 2 มักจะเป็นพวกโลหะผสมและอัลลอย เช่น  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ,  $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ ,  $HgBa_2CuO_4$  เป็นต้น ความแตกต่างระหว่างตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 กับประเภทที่ 2 อยู่ที่คุณสมบัติทางแม่เหล็กหรือปรากฏการณ์ไมส์เนอร์นั่นเอง



ก) ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1



### ข) ตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 2

**รูปที่ 1.6** ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กที่ป้อนจากภายนอกและ Induced Magnetic Field ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด ก) ประเภทที่ 1 ข) ประเภทที่ 2

พิจารณารูปที่ 1.6 เมื่อเราป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก ( $H_0$ ) ให้กับชิ้นสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดแล้วค่า Magnetization ( $M$ ) ภายในวัสดุตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดมีค่าดังนี้

ถ้าเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 1 สนามแม่เหล็กภายนอกที่ป้อนมีค่าน้อยกว่าสนามแม่เหล็กวิกฤต ( $H_C$ ) สนามแม่เหล็กจะไม่สามารถทะลุผ่านเข้ามาภายในชิ้นสารได้ นั่นแสดงว่าสถานะนี้ได้แสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์อย่างสมบูรณ์ และเมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกมีค่าสูงกว่าค่าสนามแม่เหล็กวิกฤต สภาพตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดจะถูกทำลายอย่างทันทีทันใด สนามแม่เหล็กภายนอกจะทะลุผ่านเข้าไปในชิ้นสารได้ทั้งหมด

ถ้าเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดประเภทที่ 2 จะไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกทะลุผ่านได้จนกระทั่งถึงสนามแม่เหล็ก  $H_{C1}$  หลังจากนั้นสนามแม่เหล็กภายนอกสามารถเข้าไปได้บางส่วน แต่ชิ้นสารนั้นยังคงมีสภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวดอยู่ จนกระทั่งสนามแม่เหล็กที่ป้อนมีค่าสูงกว่า  $H_{C2}$  สนามแม่เหล็กจะสามารถทะลุผ่านเข้าไปในชิ้นสารได้ทั้งหมด ทำให้เสียสภาพความเป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดไป

## 1.6 ขอบเขตงานวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้กล่าวถึงการศึกษาถึงการพัฒนาคุณสมบัติของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด เซรามิกชนิด  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  โดยการผสม  $\text{Y}_2\text{BaCuO}_5$  ที่อัตราส่วน  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} : \text{Y}_2\text{BaCuO}_5$  (Y123 : Y211) ต่างๆ รวมถึงการนำเสนอแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเซรามิกชนิด  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 6 บท คำโครงของแต่ละบทกล่าวโดยสังเขปได้ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 ซึ่งเป็นบทนำ ได้กล่าวถึงประวัติการค้นพบตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญซึ่งเป็นพื้นฐานของการนำไฟฟ้ายิ่งยวด

บทที่ 2 ได้กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดอันได้แก่ กระบวนการสร้างพื้นฐานของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเซรามิกชนิด  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  รวมถึงแบบจำลองโครงสร้างมหภาคที่สามารถนำไปใช้อธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด และผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

บทที่ 3 เป็นการทดลองเกี่ยวกับกระบวนการสร้างที่อัตราส่วน  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} : \text{Y}_2\text{BaCuO}_5$  (Y123 : Y211) ต่างๆ รวมถึงอุณหภูมิการเผาที่ใช้ในกระบวนการสร้าง รวมถึงผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อค่ากระแสวิกฤตในตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด และการวัดอุณหภูมิวิกฤต

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

บทที่ 5 เป็นการนำเสนอแบบจำลองโครงสร้างมหภาคของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเซรามิกชนิด  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  และการนำแบบจำลองโครงสร้างมหภาคที่ได้นำเสนอมาอธิบายผลการทดลองที่เกิดขึ้นจากการทดลองในบทที่ 3 รวมถึงการศึกษาเกี่ยวกับผลของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวดเซรามิกชนิด  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

บทที่ 6 เป็นบทสรุปและวิจารณ์