

## บทความวิชาการ

# สารนำยวดยิ่งที่มีอิตเทรียมเป็นองค์ประกอบ

จิตติพงษ์ เครือหงส์\*

### บทคัดย่อ

Y123, Y124, Y247 และ Y358 เป็นตัวนำยวดยิ่งในกลุ่มที่มีอิตเทรียมเป็นองค์ประกอบ ซึ่งให้ค่าของอุณหภูมิวิกฤตที่ต่างกันกับจำนวนอะตอมของอิตเทรียม แบริยม จำนวนพันธะของทองแดง และออกซิเจน และจำนวนระนาบของ  $\text{CuO}_2$  ในโครงสร้างผลึก ปัจจุบันได้มีการปรับปรุงและพัฒนาการสังเคราะห์ตัวนำยวดยิ่งโดยอาศัยลักษณะพื้นฐานของตัวนำยวดยิ่ง Y123 และ Y358 เป็นตัวอ้างอิง เนื่องจากให้ค่าอุณหภูมิวิกฤตที่สูง ซึ่งบทความนี้ให้ความสนใจเกี่ยวกับการค้นพบลักษณะโครงสร้างที่ทำให้เกิดสภาพนำยวดยิ่ง แนวทางการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิวิกฤต รวมถึงการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของตัวนำยวดยิ่งกลุ่มใหม่

คำสำคัญ: ตัวนำยวดยิ่งกลุ่มคิวเพรท อุณหภูมิวิกฤต ปฏิบัติงานของแข็ง

# The Superconducting Phase with Yttrium Compound

Thitipong Kruaehong\*

---

## ABSTRACT

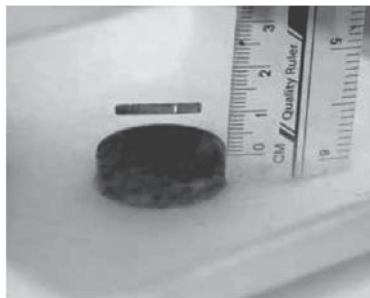
Y123, Y124, Y247 and Y358 were the superconductor consisting of yttrium moiety. The different critical temperatures were based on number of yttrium and barium atom, number of Cu-O bond and number of CuO<sub>2</sub> plane existing in their crystal structure. The synthetic path of superconductor has been developed in recently using Y123 and Y358 as references due to their high critical temperature. This article is focus on the discover of the structure causing characteristic of superconductor, the increasing of critical temperature and the improvement of physical properties of the new superconductor.

**Keywords:** Cuprate Superconductors, Critical Temperature, Solid State Reaction

## บทนำ

ตัวนำยวดยิ่งเป็นสารที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในวงการฟิสิกส์ของแข็งเนื่องจากมีสมบัติที่น่าสนใจหลายประการและมีแนวโน้มในการพัฒนาอย่างกว้างขวางโดยอาศัยสมบัติพื้นฐาน คือ มีความต้านทานไฟฟ้าเป็นศูนย์ และปรากฏการณ์ลอยตัวเหนือแม่เหล็ก เป็นต้น ศึกษายวดยิ่งได้ถูกค้นพบครั้งแรกในปี 2454 โดยนักฟิสิกส์ชาวเนเธอร์แลนด์ชื่อ คาร์เมอร์ลิงก์ ออนเนส [1] เขาได้ทำการทดลองวัดความต้านทานไฟฟ้าของปรอทบริสุทธิ์ แล้วแช่ลงในฮีเลียมเหลวเพื่อใช้เป็นสารหล่อเย็นทำให้อุณหภูมิของปรอทลดลงอย่างสม่ำเสมอจนกระทั่งถึงอุณหภูมิ 4.2 เคลวิน ความต้านทานไฟฟ้าของปรอทมีค่าเป็นศูนย์อย่างทันทีทันใดเรียกสภาพเช่นนี้ว่า สภาพนำยวดยิ่ง (Superconductivity) และเรียกอุณหภูมิที่ทำให้ปรอทปราศจากความต้านทานไฟฟ้านี้ว่า อุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature,  $T_c$ ) การทดลองของเขาเป็นการทดลองที่มีระเบียบแบบแผนทำให้ออนเนส [2] มองเห็นถึงความสำคัญของการค้นพบจึงค้นหาสมบัติพื้นฐานของสารเพิ่มเติมโดยการใส่กระแสไฟฟ้าเข้าไป และพบว่าสารนี้สามารถนำไฟฟ้าได้โดยไม่เกิดการสูญเสียพลังงานถ้าค่ากระแสมีค่าต่ำกว่าค่ากระแสหนึ่ง ในทางตรงข้ามถ้ากระแสมีค่าสูงกว่าค่ากระแสนี้กระแสไฟฟ้าก็จะสามารถทำลายสภาพนำยวดยิ่งได้เรียกกระแสนี้ว่า กระแสวิกฤต (Critical Current,  $J_c$ ) และสนามแม่เหล็กก็มีลักษณะเช่นเดียวกับกระแส กล่าวคือ ถ้าสนามแม่เหล็กมีค่ามากกว่าค่าสนามแม่เหล็กค่าหนึ่งแล้วสนามแม่เหล็กก็จะสามารถทำลายสภาพนำยวดยิ่งได้เช่นกัน เรียกสนามแม่เหล็กนี้ว่า สนามแม่เหล็กวิกฤต (Critical Magnetic Fields,  $H_c$ )

ในปี 2476 ไมส์เนอร์และออกเซนเฟลด์ [3] ได้ค้นพบสมบัติพื้นฐานที่สำคัญของตัวนำยวดยิ่งอีกประการหนึ่งว่า ถ้าลดอุณหภูมิของสารต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตแล้วให้สนามแม่เหล็กภายนอกเข้าไปสนามแม่เหล็กจะไม่สามารถทะลุผ่านเข้าไปในเนื้อของตัวนำยวดยิ่งได้ เนื่องจากสนามแม่เหล็กภายนอกทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นที่ผิวของตัวนำยวดยิ่งและกระแสไฟฟ้างี้จะสร้างสนามแม่เหล็กที่มีทิศทางตรงข้ามกับสนามแม่เหล็กที่เข้าไปทำให้สนามแม่เหล็กภายในของสารมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นตัวนำยวดยิ่งจึงมีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็กไดอาแบบสมบูรณ์ (Perfect Diamagnetic) เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ (Meissner Effect) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่นิยมใช้ในการสาธิตให้เห็นว่าสารนั้นมีสภาพนำยวดยิ่งดังรูปที่ 1 และในทางกลับกันถ้าอุณหภูมิของสารสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตทำให้สนามแม่เหล็กภายนอกสามารถทะลุผ่านเข้าไปในเนื้อของสารได้



รูปที่ 1 แสดงแม่เหล็กลอยตัวขณะเป็นตัวนำยวดยิ่ง [4]

จนกระทั่งปี 2517 นักวิทยาศาสตร์ได้ค้นพบโลหะผสมของไนโอเบียม (Niobium, Nb) และเจอร์มาเนียม (Germanium, Ge) [5] ซึ่งมีอุณหภูมิวิกฤตเท่ากับ 23.2 เคลวิน จากนั้นการค้นคว้าวิจัยได้มีอย่างต่อเนื่องแต่ไม่พบตัวนำยวดยิ่งที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงกว่าค่านี้ จึงทำให้เชื่อว่าตัวนำยวดยิ่งในธรรมชาติน่าจะไม่มีอุณหภูมิวิกฤตที่จำกัดประมาณ 35 เคลวิน และเรียกตัวนำยวดยิ่งชนิดนี้ว่า “ตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิต่ำ” (Low Temperature Superconductor) หรือ “ตัวนำยวดยิ่งแบบดั้งเดิม” (Conventional Superconductor) การใช้งานตัวนำยวดยิ่งประเภทนี้มีความยุ่งยากในการทดลองเพราะต้องใช้ฮีเลียมเหลวเป็นสารลดอุณหภูมิ เนื่องจากฮีเลียมเป็นสารหล่อเย็นที่มีจุดเดือดต่ำมาก ดังนั้นในการใช้งานต้องมีระบบกันความร้อนเป็นอย่างดี เพื่อที่จะรักษาอุณหภูมิต่ำๆ นี้ไว้ได้อีกทั้งฮีเลียมเหลวเป็นสารที่ผลิตยากและมีราคาแพง

ในปี 2529 เบททอสและมูลเลอร์ [6] ได้ค้นพบตัวนำยวดยิ่งใหม่เป็นสารประกอบของธาตุแลนทานัม (La) แบเรียม (Ba) ทองแดง (Cu) และออกซิเจน (O) เรียกตัวนำยวดยิ่งที่มีองค์ประกอบของธาตุทองแดงและออกซิเจนว่าตัวนำยวดยิ่งกลุ่มคิวเพรท โดยสารกลุ่มนี้มีอุณหภูมิวิกฤตที่ 35 เคลวิน

จากนั้นในปี 2530 กลุ่มวิจัยของวูและคณะ [7] ได้ค้นพบตัวนำยวดยิ่งกลุ่มคิวเพรทอีกกลุ่มหนึ่งที่มีธาตุิตเทรียม (Y) เป็นองค์ประกอบและมีอุณหภูมิวิกฤตที่ 93 เคลวิน ซึ่งสูงกว่าจุดเดือดของไนโตรเจนเหลว ทำให้การใช้งานตัวนำยวดยิ่งชนิดนี้สามารถทำได้ง่ายขึ้นโดยใช้ไนโตรเจนเหลวเป็นสารหล่อเย็น เนื่องจากไนโตรเจนเหลวเป็นสารหล่อเย็นที่หาง่ายและราคาถูกกว่าฮีเลียมเหลวหลายเท่าตัว และเรียกตัวนำยวดยิ่งที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงกว่า 35 เคลวินว่าเป็นตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิต่ำสูง (High Temperature Superconductor)

ในปี 2552 ได้ค้นพบตัวนำยวดยิ่งที่มีอิตเทรียมเป็นองค์ประกอบอีกกลุ่มหนึ่งและมีอุณหภูมิวิกฤตสูงถึง 102 เคลวิน การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิวิกฤตสามารถนำตัวนำยวดยิ่งประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ได้อีกมาก เช่น การนำไปใช้กับเครื่องเร่งอนุภาคซึ่งเป็นเครื่องมือที่ต้องการค่าความเข้มสนามแม่เหล็กสูงประมาณ 10-15 เทสลา จึงจำเป็นต้องนำตัวนำยวดยิ่งมาใช้ในการกำเนิดสนามแม่เหล็กความเข้มสูงนี้ เครื่องเรโซแนนซ์แม่เหล็ก (MRI) และรถไฟ Maglev ซึ่งเป็นรถไฟความเร็วที่สุดในโลกโดยอาศัยสมบัติการลอยตัวของตัวนำยวดยิ่งมาประยุกต์ใช้งาน เป็นต้น

การเกิดสภาพนำยวดยิ่งยังคงเป็นประเด็นข้อสงสัยของนักวิทยาศาสตร์ จึงมีความพยายามที่จะอธิบายกลไกการเกิดสภาพนำยวดยิ่งซึ่งมีทฤษฎีที่ยอมรับกัน 2 ทฤษฎี คือ ทฤษฎีบีซีเอส (BCS Theory) เป็นทฤษฎีที่แสดงถึงความล้มเหลวของวิชาทฤษฎีควอนตัมเป็นอย่างมากได้ถูกนำเสนอโดย บาร์ดีน คูเปอร์ และชริฟเฟอร์ (Bardeen, Cooper and Schrieffer) [8] ในปี 2500 ทฤษฎีนี้สามารถอธิบายกลไกการเกิดสภาพนำยวดยิ่งสำหรับตัวนำยวดยิ่งแบบดั้งเดิมได้ดี แต่สำหรับตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิต่ำสูงยังไม่สอดคล้องกับผลการทดลอง อีกทฤษฎีหนึ่ง คือ ทฤษฎีกินซ์เบิร์กและแลนดาว [9] เป็นทฤษฎีที่ใช้อธิบายสมบัติของตัวนำยวดยิ่งเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก จึงได้ละเว้นการพิจารณาอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนแต่ดูผลที่เกิดแทนและสามารถอธิบายปรากฏการณ์ของตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิต่ำสูงได้ดี แต่จะสอดคล้องกับผลการทดลองรอบๆ อุณหภูมิวิกฤตเท่านั้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าทั้งสองทฤษฎีมีจุดมุ่งหมายที่จะอธิบายกลไกการเกิดสภาพนำยวดยิ่งเหมือนกัน แต่มีแนวคิดเริ่มต้นต่างกัน โดยทฤษฎีบีซีเอสจะพิจารณาในระดับจุลภาค (Microscopic) ส่วนทฤษฎีกินซ์เบิร์กและแลนดาวจะพิจารณาในระดับมหภาค (Macroscopic)

จากสมบัติที่น่าสนใจของตัวนำยวดยิ่งที่มีอิตเทรียมเป็นองค์ประกอบจึงมีงานวิจัยในด้านการทดลองเป็นจำนวนมากในระยะเวลาสามทศวรรษที่ผ่านมา ผู้เขียนจึงมองเห็นถึงความสำคัญของการเพิ่ม

อุณหภูมิวิกฤตของสารกลุ่มนี้ ซึ่งขึ้นกับจำนวนอะตอมของอิตเทรียม (Y) จำนวนอะตอมของแบเรียม (Ba) จำนวนพันธะของทองแดงกับออกซิเจน (Cu-O) และจำนวนระนาบของ  $\text{CuO}_2$  ในหน่วยเซลล์ของตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y123 ที่ถูกค้นพบในปี 2530 ตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y124 และ Y247 ที่ถูกค้นพบในปี 2531 ตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y358 ที่ถูกค้นพบในปี 2552 และตัวนำยวดยิ่งที่มีอิตเทรียมเป็นองค์ประกอบใหม่ที่ถูกค้นพบในปี 2553 ตามลำดับ

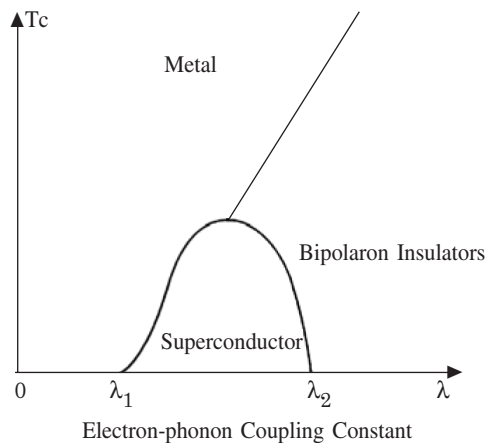
## เนื้อหา

ก่อนการค้นพบตัวนำยวดยิ่งที่มีแลนทานัมเป็นองค์ประกอบ ในปี 2516 จอห์นสตัน และคณะ [10] ได้ค้นพบตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม  $\text{Li}_{1+x}\text{Ti}_{2-x}\text{O}_4$  ถัดจากนั้นอีกสองปี สไลด์ และคณะ [11] ได้ค้นพบตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม  $\text{Ba}(\text{Pa}_{1+x}\text{Bi}_x)\text{O}_3$  โดยสารทั้งสองกลุ่มเป็นสารประกอบโลหะออกไซด์ มีลักษณะโครงสร้างแบบเพอร์รอฟสไกต์ (Perovskite) และมีอุณหภูมิวิกฤตเท่ากันประมาณ 14 เคลวิน ซึ่งมีค่าอุณหภูมิวิกฤตยังคงต่ำอยู่ จึงทำให้เบททอนสและมุลเลอร์ได้ตั้งสมมติฐานว่าสารที่มีโครงสร้างแบบเพอร์รอฟสไกต์ น่าจะมีโอกาสทำให้เกิดสภาพนำยวดยิ่งได้ โดยสารที่พวกเขาสนใจ คือ  $\text{La}_2\text{CuO}_4$  ก็มีลักษณะโครงสร้างแบบนี้เช่นกัน แต่ไม่พบสภาพนำยวดยิ่ง ดังนั้นพวกเขาจึงพยายามศึกษาสิ่งที่ทำให้สารเกิดสภาพนำยวดยิ่ง จนกระทั่งปี 2526 จากรายงานของฮูคและคณะ [12] ได้เสนอแบบจำลองแกนเทลเลอร์โพลารอน (Jahn Teller Polaron) ว่าตัวการสำคัญที่ทำให้สารที่มีองค์ประกอบของทองแดงและออกซิเจนสามารถเกิดสภาพนำยวดยิ่งได้ คือ โพลารอน (Polaron) โพลารอนเกิดจากการที่เบททอนสและมุลเลอร์ได้ใส่ธาตุแบเรียม (Ba) [13, 14] เข้าไปในอัตราส่วนต่อแลนทานัมที่ต่างๆ กัน โดยสารตัวอย่างหนึ่งพวกเขาได้พบสภาพนำยวดยิ่ง และมีอุณหภูมิวิกฤตประมาณ 11 เคลวิน ทำให้มีความหวังว่าจะได้ค่าอุณหภูมิวิกฤตที่สูงขึ้น จากนั้นได้เพิ่มแบเรียมด้วยอัตราส่วนต่างๆ กัน ตั้งแต่ 0.05 โมล จนกระทั่งถึง 0.27 โมล และพบว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดคือ 0.16 โมล [15] ซึ่งจะให้อุณหภูมิวิกฤตของสารกลุ่มนี้มีค่าสูงสุดที่ 35 เคลวิน และอีกประการหนึ่ง การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิวิกฤตเกิดจากการทำให้โครงสร้างของสารมีระนาบของ  $\text{CuO}_2$  จะเป็นแหล่งที่อยู่ของพาหะนำประจุหรือโพลารอนและจะเกิดขึ้นในระนาบนี้เท่านั้น อย่างไรก็ตามโครงสร้างของสารกลุ่มนี้มีระนาบของ  $\text{CuO}_2$  เพียงหนึ่งระนาบต่อหน่วยเซลล์ [16] ทำให้โพลารอนที่เกิดขึ้นมีจำนวนน้อย จึงไม่สามารถให้อุณหภูมิวิกฤตสูงกว่าจุดเดือดของไนโตรเจนเหลวได้

ดังนั้นจึงได้ข้อสรุปว่าตัวการที่สำคัญของการเพิ่มอุณหภูมิวิกฤตและการเกิดสภาพนำยวดยิ่งของตัวนำยวดยิ่งกลุ่มคิวเพรทนั้นเกิดจากโพลารอนโดยมีพาหะนำประจุที่เกิดจากไอออนของทองแดงอยู่สองชนิดคือ  $\text{Cu}^{2+}$  และ  $\text{Cu}^{3+}$  ไอออนของทองแดงแต่ละชนิดถูกเรียกว่า โพลารอน ซึ่งจะทำอันตรกิริยากับโฟนอนแทนอิเล็กตรอนในทฤษฎีบีซีเอส โดยทฤษฎีบีซีเอสมีแนวคิดว่าการเกิดสภาพนำยวดยิ่งเกิดจากการดึงดูดกันระหว่างอิเล็กตรอนสองตัวโดยอาศัยโฟนอนเป็นสื่อกลางในการจับคู่ของอิเล็กตรอน ดังนั้นทฤษฎีนี้จึงใช้ในการอธิบายกลไกการเกิดสภาพนำยวดยิ่งสำหรับตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิต่ำกว่า 35 เท่านั้น อีกทั้งลักษณะโครงสร้างของตัวนำยวดยิ่งเหล่านี้มีลักษณะโครงสร้างไม่ซับซ้อนมากนัก

จากความพยายามที่จะใช้โพลารอนเป็นตัวแทนอิเล็กตรอนในการเกิดสภาพนำยวดยิ่งของตัวนำยวดยิ่งกลุ่มคิวเพรทและโพลารอนเป็นตัวการสำคัญที่ทำให้สาร  $\text{La}_2\text{CuO}_4$  เกิดการเปลี่ยนสภาพจากโลหะ (Metal) เป็นตัวนำยวดยิ่ง (Superconductor) และฉนวน (Insulator) ดังรูปที่ 2 ในขณะที่สารที่เป็นโลหะ

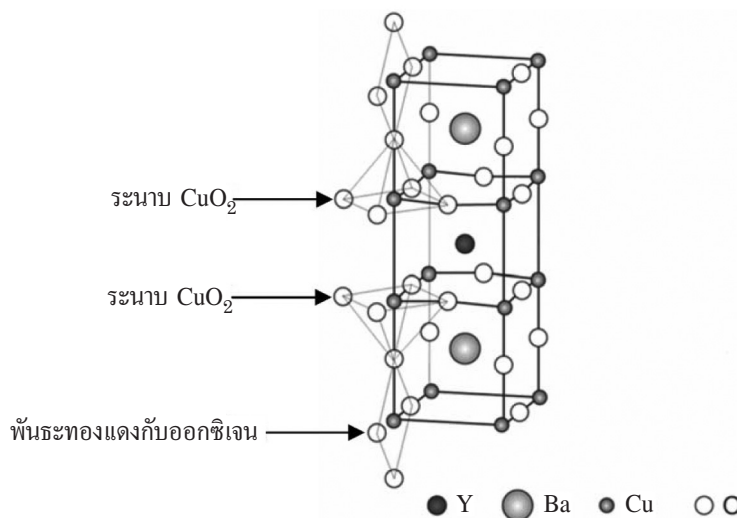
จะประกอบด้วยโพลารอนของ  $\text{Cu}^{2+}$  เพียงอย่างเดียวเป็นโพลารอนอิสระเกิดขึ้นเมื่อไม่ใส่สารเจือของแบเรียม ซึ่งจะทำอันตรกิริยากับโฟนอนน้อยที่สุด เมื่อใส่แบเรียมจะทำให้เกิดสภาพนำยวดยิ่งและมีโพลารอนของ  $\text{Cu}^{3+}$  เกิดขึ้น การเกิดสภาพนำยวดยิ่งจะเกิดจากการจับคู่กันระหว่างโพลารอนของทองแดงทั้งสอง [17] เช่นเดียวกับการจับคู่ของอิเล็กตรอนในทฤษฎีบีซีเอส โดยโพลารอนจะทำอันตรกิริยากับโฟนอนที่ทำให้เกิดสภาพนำยวดยิ่งมีช่วงที่จำกัดและอาจมีแวนเดอร์วาลส์สามารถทำให้อุณหภูมิวิกฤตสูงขึ้นได้ เมื่อเพิ่มปริมาณของสารเจือของแบเรียมมากกว่า 0.27 โมล จะทำให้โพลารอนทำอันตรกิริยากับโฟนอนมากขึ้น ทำให้โพลารอนที่จับคู่กันถูกกักขัง (Bound State) มีระยะห่างระหว่างโพลารอนแต่ละตัวน้อยลง และเรียกโพลารอนทั้งสองว่าไบโพลารอน (Bipolaron) ซึ่งจะทำให้สารเกิดสภาพเป็นฉนวนและตัวการที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์แฉกเทลเลอร์โพลารอนของ  $\text{Cu}^{2+}$  ซึ่งจะทำให้โครงสร้างของสารเกิดการบิดเบี้ยวชั่วขณะ (Spontaneous Distort) นอกจาก  $\text{Cu}^{2+}$  แล้วยังพบว่าไอออนของธาตุอื่น เช่น  $\text{Ni}^{3+}$  [18] และ  $\text{Fe}^{3+}$  [19] สามารถทำให้เกิดปรากฏการณ์นี้ได้เช่นเดียวกัน การเกิดปรากฏการณ์แฉกเทลเลอร์โพลารอนจะเกิดขึ้นกับโครงสร้างโมเลกุลของสารที่มีความซับซ้อน โดยตัวนำยวดยิ่งกลุ่มนี้มีระนาบของ  $\text{CuO}_2$  ทำหน้าที่แบ่งโครงสร้างของสาร ทำให้โครงสร้างมีลักษณะเป็นชั้นๆ และอะตอมของธาตุต่างๆ ดังรูปที่ 3, 4, 5 และ 6 นอกจากนี้การเกิดสภาพนำยวดยิ่งยังเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้ลักษณะโครงสร้างที่เป็นชั้นๆ นี้ และพันธะของทองแดงกับออกซิเจนเกิดการบิดเบี้ยวตามไปด้วย



รูปที่ 2 อันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนหรือโพลารอนกับโฟนอน [20]

นอกจากจะต้องทำให้เกิดโพลาไรซันแล้ววิธีการเตรียมสารก็เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการเกิดโพลาไรซันด้วย โดยแบบทอสและมูลเลอร์ได้ใช้วิธีการเตรียมสารด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid State Reaction) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้สารเกิดเป็นชั้นของโครงสร้าง และมีอีกกลุ่มวิจัยหนึ่งที่ประเทศฝรั่งเศสใช้วิธีการเตรียมสารด้วยวิธี Wet Chemical Process แต่ไม่สามารถทำให้เกิดชั้นของโครงสร้างได้ ทำให้ไม่พบสภาพนำยวดยิ่ง [21] ต่อมาจึงได้ข้อสรุปว่าการเตรียมด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งเป็นเงื่อนไขที่สำคัญที่จะทำให้เกิดสภาพนำยวดยิ่งสำหรับตัวนำยวดยิ่งกลุ่มที่มีอิตเทรียมเป็นองค์ประกอบทุกกลุ่มด้วย

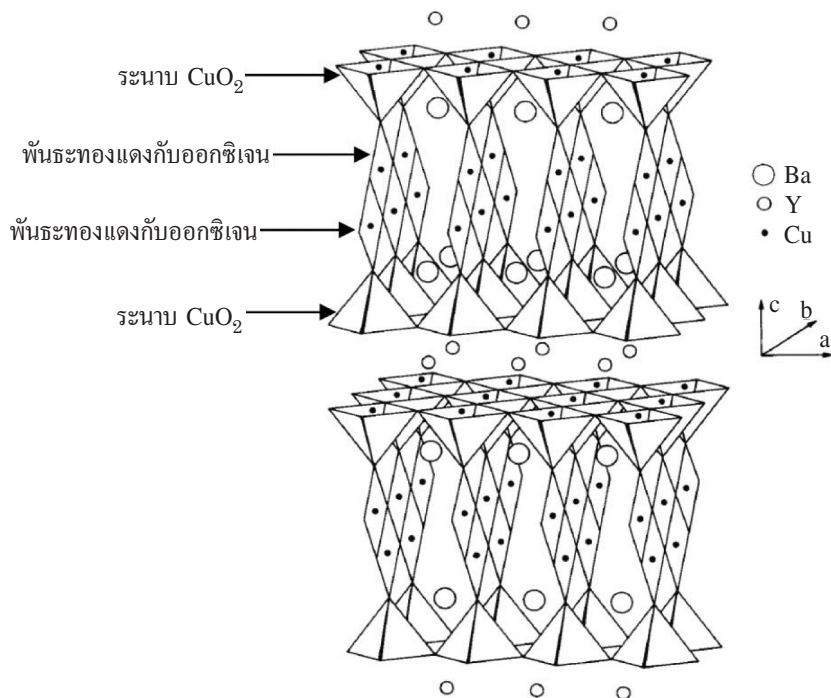
จากนั้นในเดือนกุมภาพันธ์ปี 2530 กลุ่มวิจัยของวูและคณะ ค้นพบตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงเป็นสารประกอบใหม่ที่มีอิตเทรียมเป็นองค์ประกอบ คือ  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  หรือ Y123 และมีอุณหภูมิวิกฤตที่เสถียรที่ 93 เคลวิน แนวความคิดของการเพิ่มอุณหภูมิวิกฤตของสารกลุ่มนี้คือ การเพิ่มจำนวนระนาบ  $\text{CuO}_2$  ต่อหน่วยเซลล์ โดยหน่วยเซลล์ของสารกลุ่มนี้มีรูปแบบโครงสร้างแบบออร์ทอโรมบิก (Orthorhombic) มีค่าคงตัวของหน่วยเซลล์ (Lattice Constant) เท่ากับ  $a = 3.8219 \text{ \AA}$ ,  $b = 3.8844 \text{ \AA}$  และ  $c = 11.6862 \text{ \AA}$  [22] ซึ่งประกอบด้วยจำนวนอะตอมของอิตเทรียม 1 อะตอม อะตอมของแบเรียม 2 อะตอม พันธะของทองแดงกับออกซิเจน 1 พันธะ และมีระนาบของ  $\text{CuO}_2$  2 ระนาบ ดังรูปที่ 3 จากข้อมูลข้างต้นเมื่อพิจารณาจากสูตรทางเคมีของสารกลุ่มนี้เกิดจากผลรวมของจำนวนอะตอมของอิตเทรียมกับจำนวนอะตอมของแบเรียมเท่ากับจำนวนอะตอมของทองแดง และมีจำนวนอะตอมของอิตเทรียมเท่ากับจำนวนพันธะของทองแดงกับออกซิเจน และมีจำนวนอะตอมของแบเรียมเท่ากับจำนวนระนาบของ  $\text{CuO}_2$  ตามลำดับ จำนวนระนาบที่เพิ่มขึ้นจะทำให้อุณหภูมิเกิดความเสถียรกว่าตัวนำยวดยิ่งกลุ่มแลนทานัม และจะเกิดพาหะนำประจุหรือโพลาไรซันมากกว่า โดยมีอะตอมของอิตเทรียมและแบเรียมทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้าและแบ่งชั้นของโครงสร้างเกิดเป็นระนาบของการนำไฟฟ้าเกิดขึ้น



รูปที่ 3 ลักษณะโครงสร้าง 3 มิติ ของตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y123 ใน 1 หน่วยเซลล์ [23]



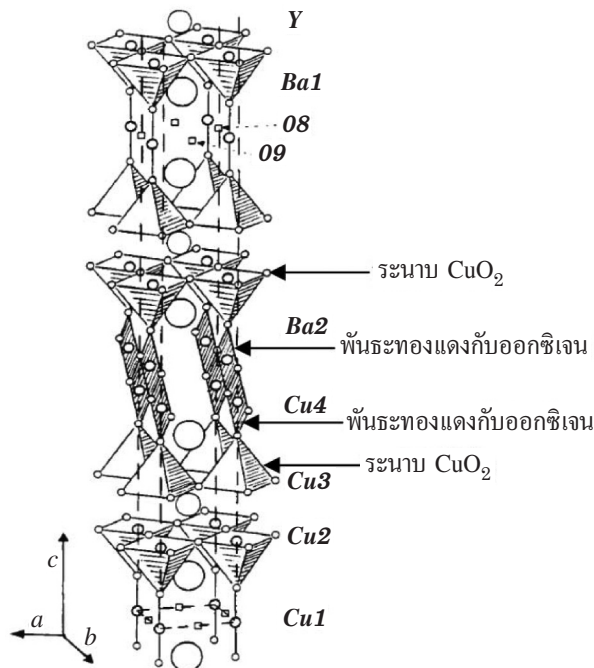
ถัดจากนั้นอีกหนึ่งปี มาร์ช และคณะ [24] ได้ค้นพบตัวนำยวดยิ่งที่มีอิตเทรียมเป็นองค์ประกอบอีกกลุ่มหนึ่ง คือ  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  หรือ Y123 มีอุณหภูมิวิกฤตเท่ากับ 80 เคลวิน โดยพบว่าตัวนำยวดยิ่งกลุ่มนี้เกิดจากความบกพร่องของโครงสร้างของตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y123 จึงทำให้มีอุณหภูมิวิกฤตที่ต่ำกว่า หน่วยเซลล์ของสารกลุ่มนี้มีรูปแบบโครงสร้างแบบออโทโรมบิก มีค่าคงตัวของหน่วยเซลล์เท่ากับ  $a = 3.8610 \text{ \AA}$ ,  $b = 3.8710 \text{ \AA}$  และ  $c = 27.2460 \text{ \AA}$  และมีองค์ประกอบของจำนวนอะตอมของอิตเทรียม 1 อะตอม อะตอมของแบเรียม 2 อะตอม พันธะของทองแดงกับออกซิเจน 2 พันธะ และระนาบ  $\text{CuO}_2$  2 ระนาบ ดังรูปที่ 4 จากสูตรทางเคมีของสารกลุ่มนี้จะมีจำนวนอะตอมของอิตเทรียมรวมกับจำนวนอะตอมของแบเรียมไม่เท่ากับจำนวนอะตอมของทองแดง และเมื่อพิจารณาจากองค์ประกอบของระนาบและพันธะพบว่าจำนวนระนาบ  $\text{CuO}_2$  สอดคล้องกับจำนวนอะตอมของแบเรียมและมีพันธะของทองแดงกับออกซิเจนไม่สอดคล้องกับจำนวนอะตอมของอิตเทรียม ตามลำดับ



รูปที่ 4 ลักษณะโครงสร้าง 3 มิติ ของตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y123 ใน 1 หน่วยเซลล์ [24]

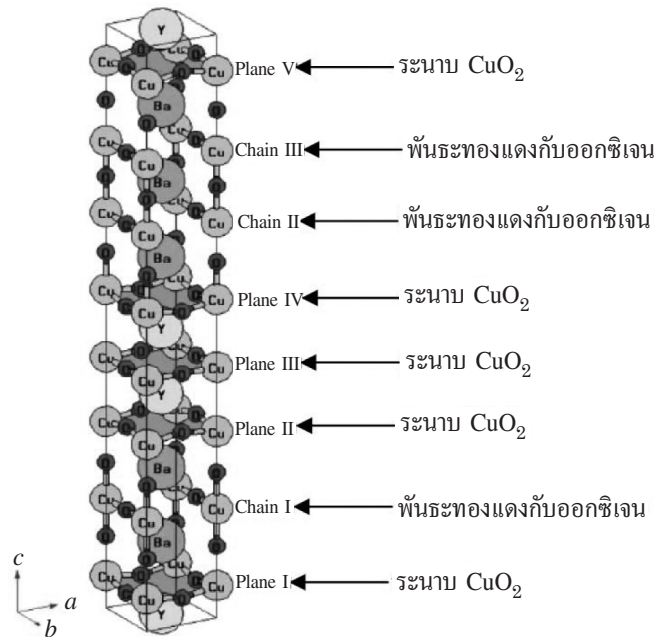
ในปีเดียวกันกับการค้นพบตัวนำยวดยิ่ง Y123 บอเดต และคณะ [25] ได้ค้นพบตัวนำยวดยิ่งอีกกลุ่มหนึ่ง คือ  $\text{Y}_2\text{Ba}_4\text{Cu}_7\text{O}_{14+x}$  หรือ Y247 มีอุณหภูมิวิกฤตเท่ากับ 40 เคลวิน รูปแบบโครงสร้างของหน่วยเซลล์เป็นแบบออโทโรมบิก และมีค่าคงตัวของหน่วยเซลล์เท่ากับ  $a = 3.8511 \text{ \AA}$ ,  $b = 3.8690 \text{ \AA}$  และ  $c = 50.2920 \text{ \AA}$  และได้สร้างแบบจำลองโครงสร้างของสารพบว่า 1 หน่วยเซลล์ของสารประกอบด้วยจำนวนอะตอมของอิตเทรียม 1 อะตอม อะตอมของแบเรียมจำนวน 2 อะตอม พันธะของทองแดงกับออกซิเจนจำนวน 2 พันธะ และมี  $\text{CuO}_2$  2 ระนาบ เมื่อพิจารณาจากสูตรทางเคมีพบว่าสารกลุ่มนี้มีจำนวนอะตอมของอิตเทรียมรวมกับจำนวนอะตอมของแบเรียมมีค่าไม่เท่ากับจำนวนอะตอมของทองแดง และมีจำนวนอะตอมของอิตเทรียมมีค่าไม่สอดคล้องกับจำนวนพันธะของทองแดงกับออกซิเจน แต่มีจำนวนอะตอมของแบเรียมสอดคล้องกับจำนวนระนาบของสาร ดังรูปที่ 5





รูปที่ 5 ลักษณะโครงสร้าง 3 มิติ ของตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y247 ใน 1 หน่วยเซลล์ [25]

เป็นเวลามากกว่าสองทศวรรษจากการค้นพบตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y247 ที่ไม่มีการค้นพบตัวนำยวดยิ่งที่มีอุณหภูมิเป็นองค์ประกอบ จนกระทั่งปี 2552 กลุ่มวิจัยของ อะไลบาดี และคณะ [26] ได้ค้นพบตัวนำยวดยิ่งที่มีองค์ประกอบของอิตเทรียมอีกครั้งหนึ่ง คือ  $Y_3Ba_5Cu_8O_{18}$  หรือ Y358 มีอุณหภูมิวิกฤต สูงถึง 102 เคลวิน โดยสารกลุ่มนี้มีรูปแบบโครงสร้างแบบออร์ทอโรมบิกและมีค่าคงตัวของหน่วยเซลล์เท่ากับ  $a = 3.8880 \text{ \AA}$ ,  $b = 3.8230 \text{ \AA}$  และ  $c = 31.0130 \text{ \AA}$  ในปีเดียวกัน ทาวานา และคณะ [27] ได้ใช้ทฤษฎีฟังก์ชันความหนาแน่น (Density Functional Theory) จำลององค์ประกอบของสารใน 1 หน่วยเซลล์ ซึ่งประกอบด้วยจำนวนอิตเทรียม 3 อะตอม อะตอมของแบเรียม 5 อะตอม พื้นระนาบของทองแดงกับออกซิเจน 3 พื้นระนาบ และมีระนาบของ  $CuO_2$  5 ระนาบ ดังรูปที่ 6 ซึ่งจากสูตรทางเคมีจะเห็นว่า สารกลุ่มนี้เกิดจากอะตอมของอิตเทรียมรวมกับจำนวนอะตอมของแบเรียมเท่ากับจำนวนอะตอมของทองแดง และมีจำนวนอะตอมของอิตเทรียมและจำนวนของแบเรียมสอดคล้องกับจำนวนพื้นระนาบของทองแดงกับออกซิเจนและจำนวนระนาบของสาร ตามลำดับ



รูปที่ 6 ลักษณะโครงสร้าง 3 มิติ ของตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y358 ใน 1 หน่วยเซลล์ [27]

จากข้อมูลข้างต้นพบว่าตัวนำยวดยิ่งที่มีอิตเทรียมเป็นองค์ประกอบ ประกอบด้วยตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y123, Y124, Y247 และ Y358 และข้อมูลของลักษณะโครงสร้างผลึกพบว่าสารทั้ง 4 กลุ่ม มีโครงสร้างแบบออร์โทโรมบิกและค่าคงตัวของหน่วยเซลล์  $a$  และ  $b$  ที่มีค่าใกล้เคียงกัน แต่มีค่าที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน คือ ค่า  $c$  โดยตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y123 มีค่าของ  $c$  ที่น้อยที่สุด มีสูตรทางเคมีที่มีจำนวนอะตอมของอิตเทรียมรวมกับจำนวนอะตอมของแบเรียมเท่ากับจำนวนอะตอมของทองแดง และมีอุณหภูมิวิกฤตเท่ากับ 93 เคลวิน ตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y124 และ Y247 มีค่า  $c$  มากกว่า Y123 มีสูตรทางเคมีที่มีจำนวนอะตอมของอิตเทรียมรวมกับจำนวนอะตอมของแบเรียมมีค่าไม่เท่ากับจำนวนอะตอมของทองแดง โดยตัวนำยวดยิ่งทั้งสองกลุ่มมีอุณหภูมิวิกฤตน้อยกว่าอุณหภูมิวิกฤตตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y123 ตัวนำยวดยิ่งที่ค้นพบใหม่คือ ตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y358 มีค่า  $c$  มีค่ามากกว่าค่า  $c$  ของตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y123 และ Y124 แต่น้อยกว่าค่า  $c$  ของตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y247 มีจำนวนอะตอมของอิตเทรียมรวมกับจำนวนอะตอมของแบเรียมเท่ากับจำนวนอะตอมของทองแดงเช่นเดียวกับ Y123 และมีค่าอุณหภูมิวิกฤตสูงที่สุดที่ 102 เคลวิน

### การค้นพบตัวนำยวดยิ่งที่มีอิตเทรียมเป็นองค์ประกอบใหม่

เมื่อพิจารณาจากสูตรทางเคมีของตัวนำยวดยิ่งทุกกลุ่มซึ่งมีลำดับตัวเลขสามตัว โดยตัวเลขตัวแรก คือ จำนวนอะตอมของอิตเทรียม ตัวเลขตัวที่สอง คือ จำนวนอะตอมของแบเรียม และตัวเลขตัวที่สาม คือ จำนวนอะตอมของทองแดง ดังนั้นจึงพบว่าตัวนำยวดยิ่งที่มีสูตรทางเคมีที่เป็นผลรวมของจำนวนอะตอมของอิตเทรียมกับจำนวนอะตอมของแบเรียมเท่ากับจำนวนอะตอมของทองแดงจะสามารถทำให้อุณหภูมิวิกฤตสูงขึ้นได้ และเป็นสมมติฐานสำคัญที่สามารถเพิ่มอุณหภูมิวิกฤต จนกระทั่งในปี 2553 อุดมสมบูรณ์ทรัพย์และคณะ [28] ได้นำสมมติฐานนี้เตรียมตัวนำยวดยิ่งสูตรใหม่ประกอบด้วยตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม 156,

3-8-11, 5-8-13, 7-11-18 และ 13-20-33 และได้สร้างแบบจำลองของตัวนำยวดยิ่งกลุ่มใหม่โดยใช้รูปแบบโครงสร้างของตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y123 ซึ่งประกอบด้วยอะตอมของอิตเทรียมหนึ่งอะตอม และมีอะตอมของแบเรียมสองอะตอมอยู่สลับกันระหว่างอะตอมของอิตเทรียมดังรูปที่ 3 ในการสร้างแบบจำลองโครงสร้างจะวางอะตอมของแบเรียมก่อนแล้วนำอะตอมของอิตเทรียมเข้าไปตรงที่ว่างของแบบจำลอง ตัวอย่างเช่น ตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y156 มีจำนวนอะตอมของแบเรียม 5 อะตอม ดังนั้นจะมีตำแหน่งที่ว่างของอะตอมอิตเทรียมอยู่ 4 ตำแหน่ง ซึ่งตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y156 มีอะตอมของอิตเทรียมเพียงหนึ่งอะตอมจึงนำไปแทนที่ตำแหน่งของอะตอมอิตเทรียมที่ว่าง 1 ตำแหน่งทำให้โครงสร้างของ Y156 มีตำแหน่งที่ว่างของอะตอมอิตเทรียมลดลงเหลือเพียง 3 ตำแหน่ง ดังนั้นอะตอมของอิตเทรียมที่ว่างต่ออะตอมของแบเรียมมีอัตราส่วนเท่ากับ 3:5 เป็นต้น เมื่อใช้รูปแบบนี้จำลองนี้กับตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y123 จะไม่พบการว่างของอะตอมของอิตเทรียมในโครงสร้างของ Y123 แต่จะพบการว่างของอะตอมของอิตเทรียมเกิดขึ้นกับสารสูตรใหม่จึงสามารถคำนวณหาอัตราส่วนและคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ของการว่างของอะตอมอิตเทรียมต่อจำนวนอะตอมแบเรียมได้ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราส่วนและเปอร์เซ็นต์ของอะตอมของอิตเทรียมที่ว่างต่ออะตอมของแบเรียม [28]

ตัวนำยวดยิ่ง	อะตอมของอิตเทรียมที่ว่างต่ออะตอมของแบเรียม	เปอร์เซ็นต์ของอะตอมของอิตเทรียมที่ว่างต่ออะตอมของแบเรียม
Y156	3 : 5	60
Y3-8-11	4 : 8	50
Y5-8-13	2 : 8	25
Y7-11-18	3 : 11	27
Y13-20-33	6 : 20	30

การขาดอะตอมของอิตเทรียมในโครงสร้างจึงน่าที่จะมีโอกาสทำให้ตัวนำยวดยิ่งกลุ่มใหม่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงกว่าตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y123 ได้ เนื่องจากเกิดช่องว่างระหว่างอะตอมเพิ่มมากขึ้น และการนำไฟฟ้าน่าจะดีกว่า จากนั้นนำตัวนำยวดยิ่งสูตรใหม่ทั้ง 5 สูตรทดสอบปรากฏการณ์ไมส์เนอร์พบว่าตัวนำยวดยิ่งสูตรใหม่สามารถแสดงปรากฏการณ์ไมส์เนอร์ได้อย่างชัดเจน เมื่อทำการวัดอุณหภูมิวิกฤตด้วยวิธีการวัดแบบสี่ขั้ว (Four-Probes Measurement) ซึ่งจะต้องทำการวัดความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง โดยพบว่าตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y156 มีความต้านทานไฟฟ้าสูงสุด และมีข้อมูลด้านเทคนิคของการวัดความต้านทานไฟฟ้างดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำยวดยิ่งที่อุณหภูมิห้อง

ตัวนำยวดยิ่ง	ความต้านทานไฟฟ้า (โอห์ม)
Y156	1,050
Y3-8-11	2
Y5-8-13	1.5
Y7-11-18	1.8
Y13-20-33	2.1

จากตารางตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y156 มีความต้านทานไฟฟ้าสูงที่สุดจึงไม่สามารถวัดอุณหภูมิวิกฤตได้และตัวนำยวดยิ่งสูตรอื่นๆ ก็มีอุณหภูมิวิกฤตใกล้เคียงกับตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y123 จากนั้นอุดมสมุทรทริบูล และคณะ นำตัวนำยวดยิ่งสูตรใหม่ศึกษาโครงสร้างด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction) พบว่าการเกิดสเปกตรัมหลักๆ ยังคงมีตำแหน่งใกล้เคียงกับสเปกตรัมของตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y123 จึงเชื่อมั่นว่าค่าคงตัวของหน่วยเซลล์น่าจะมีค่าใกล้เคียงกับ Y123 ด้วย ซึ่งตรงข้ามกับรายงานผลการทดลองด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y358 ซึ่งมีค่า  $c$  มากกว่าค่า  $c$  ของ Y123 ถึง 3 เท่า ในปี 2554 สุจิน พรหม และคณะ [29] นำผลการทดลองวิเคราะห์อีกครั้งโดยใช้โปรแกรมฟูลพรอฟ [30] ด้วยการนำข้อมูลจากการทดลองเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐานของ ICDD (The International Centre for Diffraction Data) [31] สามารถจำแนกเปอร์เซ็นต์ของส่วนผสมของสารได้เป็น 2 ชนิด คือ สารนำยวดยิ่ง (Superconducting Phase) และสารปกติ (Normal Phase) จากผลการวัดพบว่า ตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y156 มีปริมาณของสารปกติมากที่สุด และจะสอดคล้องกับผลการทดลองการวัดความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องที่มีความต้านทานไฟฟ้าสูงสุด โดยสารปกติที่เกิดขึ้นเกิดจากกระบวนการเตรียมสารที่จะต้องผ่านกระบวนการเผาแบบผง (Calcination) และวิธีการเผาขึ้นรูป (Sintering) ที่อุณหภูมิสูงจึงอาจมีสารบางส่วนเกิดการเปลี่ยนสภาพเป็นสารปกติได้ 3 ชนิด ดังตารางที่ 3 สามารถตรวจสอบสเปกตรัมและคำนวณเปอร์เซ็นต์ของสารปกติได้จากการเปรียบเทียบจากฐานข้อมูลมาตรฐาน

ตารางที่ 3 จำนวนเปอร์เซ็นต์ของสารนำยวดยิ่งและสารปกติ [29]

ตัวนำยวดยิ่ง	สารนำยวดยิ่ง	สารปกติ		
		$Y_2BaCuO_5$ (Y211)	$BaCuO_2$	$Ba_2Cu_3O_6$
Y156	17	-	19	64
Y3-8-11	21	-	2	77
Y5-8-13	28	12	12	48
Y7-11-18	66	34	-	-
Y13-20-33	74	26	-	-

จากนั้นนำข้อมูลของสารนำยวดยิ่งและสารปกติวิเคราะห์รูปแบบโครงสร้าง ค่าคงตัวของหน่วยเซลล์โดยเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐานอีกครั้ง พบว่าสารนำยวดยิ่งมีรูปแบบโครงสร้างแบบออร์ทอโรมบิก ทั้งหมดและมีค่า  $a$  และ  $b$  ใกล้เคียงกับ ค่า  $a$  และ  $b$  ของ Y123 แต่มีค่า  $c$  ที่มีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนอะตอมทองแดง ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าคงตัวของหน่วยเซลล์ของสารนำยวดยิ่ง [29]

ตัวนำยวดยิ่ง	ค่าคงตัวของหน่วยเซลล์		
	$a(\text{Å})$	$b(\text{Å})$	$c(\text{Å})$
Y156	3.8217	3.8886	23.3562
Y3-8-11	3.8143	3.8847	42.6992
Y5-8-13	3.819	3.8978	50.4607
Y7-11-18	3.8237	3.8800	69.8702
Y13-20-33	3.8154	3.8776	128.1163

จากตารางที่ 3 สารปกติที่เกิดขึ้นประกอบด้วย Y211 ซึ่งเป็นองค์ประกอบของตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y5-8-13, Y7-11-18 และ Y13-20-33 มีรูปแบบโครงสร้างแบบออร์ทอโรมบิก สารปกติ  $\text{BaCuO}_2$  มีรูปแบบโครงสร้างแบบคิวบิกเป็นองค์ประกอบในตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y156, Y3-8-11 และ Y5-8-13 และสารปกติ  $\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_6$  มีรูปแบบโครงสร้างแบบออร์ทอโรมบิกเป็นองค์ประกอบในตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y156, Y3-8-11 และ Y5-8-13 ซึ่งมีรายละเอียดของค่าคงตัวของหน่วยเซลล์ของสารปกติ 3 ชนิด ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าคงตัวของหน่วยเซลล์ของสารปกติ 3 ชนิด [29]

ตัวนำยวดยิ่ง	หน่วยเซลล์ของสารปกติทั้งสามชนิด								
	$\text{Y}_2\text{BaCuO}_5$ (Y211)			$\text{BaCuO}_2$			$\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_6$		
	$a(\text{Å})$	$b(\text{Å})$	$c(\text{Å})$	$a(\text{Å})$	$b(\text{Å})$	$c(\text{Å})$	$a(\text{Å})$	$b(\text{Å})$	$c(\text{Å})$
Y156	-	-	-	18.3095	18.3095	18.3095	13.0412	20.6141	11.4276
Y3-8-11	-	-	-	18.3470	18.3470	18.3470	13.0269	20.5786	11.4145
Y5-8-13	12.1866	5.6662	7.1276	18.3646	18.3646	18.3646	13.0509	20.6664	11.4343
Y7-11-18	12.1576	5.6494	7.1230	-	-	-	-	-	-
Y13-20-33	12.1649	5.6434	7.1274	-	-	-	-	-	-

จากแนวคิดที่ว่าตัวนำยวดยิ่งที่มีผลรวมของจำนวนอะตอมของอิตเทรียมกับจำนวนอะตอมของแบเรียมเท่ากับจำนวนอะตอมของทองแดงจะสามารถทำให้อุณหภูมิวิกฤตสูงขึ้นได้ จากผลการทดลองพบว่าค่าของอุณหภูมิวิกฤตของสารกลุ่มใหม่นี้ยังคงใกล้เคียงกับ Y123 ดังนั้นการเตรียมด้วยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งทำให้มีสารปกติปริมาณมากจึงจะต้องลดปริมาณของสารปกติให้มีปริมาณน้อยลง ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถเพิ่มอุณหภูมิวิกฤต ดังนั้นอาจจะเปลี่ยนวิธีการเตรียมสารโดยใช้วิธีการนำสารตั้งต้นมาตกตะกอน (Co-Precipitation) จึงเป็นอีกวิธีที่สามารถลดปริมาณสารปกติได้และทำให้เกิดชั้นโครงสร้างของสารได้เช่นเดียวกับวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง จากรายงานวิจัยของบอลซาน และคณะ [32] ที่ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบวิธีการเตรียมสารทั้งสองวิธีพบว่า วิธีการเตรียมสารด้วยวิธีการตกตะกอนจะลดปริมาณของสารปกติมากกว่าวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งเป็นปริมาณมาก

นอกจากการค้นพบตัวนำยวดยิ่งที่มีอิตเทรียมเป็นองค์ประกอบแล้วนักวิทยาศาสตร์ยังให้ความสนใจกับตัวนำยวดยิ่งกลุ่มคิวเพอร์ทอีกหลายกลุ่มในหมู่ธาตุหายาก (Rare Earth Element) ซึ่งมีโครงสร้างเช่นเดียวกันกับ Y123 ประกอบด้วย สแกนเดียม (Sc), นีโอโดเมียม (Nd), โพรมิเทียม (Pm), ซาเมเรียม (Sm), ยูโรเพียม (Eu), แกโดลิเนียม (Gd), เทอร์เบียม (Tb), ดิสโพรเซียม (Dy), โฮลเมียม (Ho), เออร์เบียม (Er), ทูเลียม (Tm), อิตเทอร์เบียม (Yb) และลูทีเนียม (Lu) แทนที่อิตเทรียม (Y) โดยมีค่าอุณหภูมิวิกฤตใกล้เคียงกับ Y123 ยกเว้น ซีเรียม (Ce) และเพรซีโอม (Pr) และมีความพยายามใช้ธาตุต่างๆ เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงการใช้ธาตุหายากและเป็นตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงเช่นกัน ในปี 2531 มีดา และคณะ [33] ได้ค้นพบสภาพนำยวดยิ่งของกลุ่มอนุกรมของธาตุหมู่ 5 คือ บิสมัท (Bi) ในรูปของสารประกอบของ  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+4}$  (BSCCO หรือ  $\text{Bi}22(n-1)n$ ) มีอุณหภูมิวิกฤตสูงถึง 110 เคลวิน เมื่อ  $n = 1, 2, 3, \dots$  และเซงและเฮอร์แมน [34] ได้ค้นพบสภาพนำยวดยิ่งของกลุ่มอนุกรมเทลลูเรียม (Tl) คือ  $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_n\text{Cu}_n\text{O}_{2n+4}$  (TBCCO หรือ  $\text{Tl}22(n-1)$ ) มีค่าอุณหภูมิวิกฤตถึง 125 เคลวิน เมื่อ  $n = 1, 2, 3, \dots$  จนกระทั่งปี 2536 ซิลลิง และคณะ [35] ได้ค้นพบสภาพนำยวดยิ่งในสารประกอบของปรอท คือ  $\text{HgBa}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+3}$  (HBCCO) ต่อมาภายหลังได้ค้นพบสภาพนำยวดยิ่งของปรอททุกกลุ่ม การเพิ่มอุณหภูมิวิกฤตของสารกลุ่มนี้จะต้องเพิ่มความดันให้กับสารด้วยจึงจะทำให้ค่าอุณหภูมิวิกฤตมีค่าสูงสุดเท่ากับ 164 เคลวิน ที่  $n = 3$  โดยตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม BSCCO, TBCCO, HBCCO ถ้ามีค่า  $n$  มากกว่า 3 จะทำให้อุณหภูมิวิกฤตลดลงซึ่งจะตรงข้ามกับตัวนำยวดยิ่งที่มีอิตเทรียมเป็นองค์ประกอบ การเพิ่มอุณหภูมิของสารกลุ่มนี้จะขึ้นอยู่กับปริมาณการเพิ่มจำนวนอะตอมของ  $\text{CuO}_2$  และพันธะของทองแดงกับออกซิเจนให้สอดคล้องกับจำนวนอะตอมของแบเรียมและจำนวนอะตอมของอิตเทรียม ตามลำดับ และไม่ต้องเพิ่มความดัน การปรับปรุงสภาพของสารสามารถนำสารอื่นเจือเข้าไปโดยสารหนึ่งที่นิยม คือ ออกไซด์ของเงิน ( $\text{AgO}$ ) [36] เพื่อทำให้เกิดการเพิ่มจำนวนผลึก (Crystal Growth) นอกจากนี้สารกลุ่มนี้สามารถเตรียมในรูปแบบฟิล์มบาง (Thin Film) [37] จะทำให้มีค่ากระแสวิกฤต ( $J_c$ ) และสนามแม่เหล็กวิกฤต ( $H_c$ ) ที่สูงขึ้น [38] จากการค้นพบตัวนำยวดยิ่งกลุ่มที่มีอิตเทรียมเป็นองค์ประกอบใหม่ จึงทำให้ตัวนำยวดยิ่งกลุ่มนี้ยังคงเป็นทางเลือกของตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูงโดยสามารถนำวัสดุนี้มาประยุกต์ใช้กับชีวิตประจำวันและเปลี่ยนแปลงชีวิตความเป็นอยู่ของมนุษยชาติได้อย่างมากมาย ในปัจจุบันมีการวิจัยและพัฒนาการอย่างสม่ำเสมอเพื่อสั่งสมองค์ความรู้ก่อนที่จะนำวัสดุนี้ไปใช้ทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในอนาคต

## สรุป

การค้นพบตัวนำยวดยิ่งกลุ่มคิวเพรทของเบทนอสและมูลเลอร์ในปี 2529 ที่อุณหภูมิวิกฤต 35 เคลวิน โดยลักษณะโครงสร้างของสารกลุ่มนี้ประกอบด้วยระนาบของ  $\text{CuO}_2$  เพียงระนาบเดียว ทำให้การเกิดพาหะนำประจุหรือโพลารอนมีน้อย จึงไม่สามารถมีอุณหภูมิวิกฤตสูงกว่าจุดเดือดของไนโตรเจนเหลวได้ อีกหนึ่งปีถัดมา วู และคณะ ได้ค้นพบตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y123 โดยมีแนวคิดว่าจะต้องเพิ่มจำนวนระนาบของ  $\text{CuO}_2$  สารกลุ่มนี้มีระนาบของ  $\text{CuO}_2$  2 ระนาบต่อหน่วยเซลล์จึงทำให้อุณหภูมิวิกฤตมีความเสถียรมากกว่ากลุ่มแลนทานัม และมีจำนวนระนาบสอดคล้องกับจำนวนอะตอมของแบเรียมและจำนวนพันธะของทองแดงกับออกซิเจนจะสอดคล้องกับจำนวนอะตอมของอิตเทรียม ในปี 2531 ได้ค้นพบตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y124 และ Y247 ซึ่งตัวนำยวดยิ่งสองกลุ่มนี้มีจำนวนระนาบมากกว่าหรือเท่ากับ Y123 แต่จำนวนระนาบและจำนวนพันธะของทองแดงกับออกซิเจนไม่สอดคล้องกับจำนวนอะตอมของแบเรียมและอิตเทรียม และมีความบกพร่องของโครงสร้าง ทำให้อุณหภูมิวิกฤตมีค่าต่ำกว่า Y123 ในปี 2552 ได้ค้นพบตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y358 ซึ่งอุณหภูมิสูงถึง 102 เคลวิน ลักษณะโครงสร้างของสารกลุ่มนี้ประกอบด้วยระนาบของ  $\text{CuO}_2$  5 ระนาบต่อหน่วยเซลล์ จำนวนระนาบที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดโพลารอนมากกว่า Y123 และมีอุณหภูมิวิกฤตที่สูงและเสถียรมากกว่า และมีจำนวนพันธะของทองแดงกับออกซิเจน 3 พันธะ จำนวนอะตอมของแบเรียมและอิตเทรียมซึ่งสอดคล้องกับจำนวนระนาบและพันธะของทองแดงและออกซิเจนเช่นเดียวกับ Y123

ดังนั้นตัวนำยวดยิ่งที่น่าสนใจ คือ ตัวนำยวดยิ่งกลุ่ม Y123 และ Y358 ซึ่งมีสูตรทางเคมีที่เกิดจากผลรวมจำนวนอะตอมของอิตเทรียมกับจำนวนอะตอมของแบเรียมเท่ากับจำนวนอะตอมของทองแดง ดังนั้นในปี 2553 อุดมสมุทรหิรัญ และคณะ จึงได้แนวคิดนี้มาสังเคราะห์เป็นตัวนำยวดยิ่งกลุ่มใหม่และสุจินพรัหม และคณะ พบว่าสารกลุ่มนี้มีค่า  $c$  เพิ่มขึ้นตามจำนวนอะตอมของทองแดง อย่างไรก็ตามค่าของอุณหภูมิวิกฤตยังคงใกล้เคียงกับ Y123 จึงได้ข้อสรุปว่าตัวนำยวดยิ่งใหม่ที่มีสูตรทางเคมีที่เป็นผลรวมจำนวนอะตอมของอิตเทรียมกับจำนวนอะตอมของแบเรียมเท่ากับจำนวนอะตอมของทองแดงสามารถเพิ่มค่าอุณหภูมิวิกฤตได้ โดยการลดปริมาณสารปกติและตรวจหาจุดบกพร่อง (Defect) ที่มีในโครงสร้างและใช้เครื่องมือที่มีความละเอียดสูง เช่น ARPES (Angle-Resolved Photo-Emission Spectra) [39, 40] ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สามารถตรวจสอบองค์ประกอบของจำนวนของระนาบของ  $\text{CuO}_2$  ให้สอดคล้องกับจำนวนอะตอมของแบเรียมเพื่อเป็นแนวทางการเพิ่มจำนวนโพลารอนและพันธะของทองแดงกับออกซิเจนให้สอดคล้องกับจำนวนอะตอมอิตเทรียม นอกจากนี้อาจเพิ่มการทดลองในส่วนของการละเอียดเข้าไป เช่น การเตรียมในท่อควอซท์ [41] เพื่อทำให้สารเกิดผลึกเดี่ยว (Single Crystal) หรือใช้กระบวนการเผาแบบหลอม (Melt Process) [42] เพื่อที่จะค้นพบสมบัติใหม่ๆ ได้ ดังนั้นงานวิจัยทางด้านตัวนำยวดยิ่งที่มีอิตเทรียมเป็นองค์ประกอบยังเปิดโอกาสให้กับนักวิจัยที่สนใจเป็นจำนวนมาก

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์แก้ว อุดมสมุทรหิรัญ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ สำหรับคำแนะนำการเขียนบทความวิชาการนี้



## เอกสารอ้างอิง

1. Onnes, H. K. 1911. The Disappearance of the Resistivity of Mercury. *Communication Laboratory of Leiden*. 120 b: 3.
2. Hughes, D. D. 2001. The Critical Current of Superconductors: An Historical Review. *Low Temperature Physics* 27(9-10): 713-722.
3. Meissner, W., and Ochsenfeld, R. 1933. *Naturwissenschaften* 21: 787.
4. Kruaehong, T., Nilkamjon, T., Ratreng, S., Theamyim, N., Tambamrung, P., Doung, S., and Udomsamuthirun, P. 2012. The Construction of Maglev Train Model. *Srinakharinwirot Science Journal* 25(2): 91-100. (in Thai).
5. Testardi, L. R., Wernick, J. H., and Royer, C. K. 1974. Superconductivity with Onset Above 23 K in Nb-Ge Sputtered Films. *Solid State Communications* 15(1):1-4.
6. Bednorz, J. G., and MEüller, K. A. 1986. Possible High  $T_c$  Superconductivity in the Ba-La-Cu-O System. *Zeitschrift fur Physik B Condensed Matter* 64(1):189-193.
7. Wu, M. K., Ashburn, J. R., Torng, C. J., Hor, P. H., Meng, R. L., Gao, L., Huang, Z. J., Wang, Y. Q., and Chu, C. W. 1987. Superconductivity at 93 K in a New Mixed-Phase Y-Ba-Cu-O Compound System at Ambient Pressure. *Physical Review Letter* 58(9): 908-910.
8. Bardeen, J., Cooper, N., and Schrieffer, J. R. 1957. Theory of Superconductivity. *Physical Review* 108 (5): 1175-1204.
9. Fetter, A. L., and Walecka, J. D. 1995. Quantum Theory of Many-Particle System. 1<sup>st</sup> Edition. Taiwan. McGraw-Hill, Inc. p. 430.
10. Johnston, D. C., Prakash, H., Zahariassen, W. H., and Viswanathan, R. 1973. High Temperature Superconductivity in the  $Li_{1+x}Ti_{2-x}O_4$  Ternary System. *Materials Research Bulletin* 8: 777-784.
11. Sleight, A. W., Gillson, J. L., and Bierstedt, P. E. 1975. High Temperature Superconductivity in the  $BaPb_{1+x}Bi_xO_3$  System. *Solid State Communication* 17: 27-28.
12. Hock, K. H., Nickisch, H., and Thomas, H. 1983. Evidence for Jahn-Teller Polaron Formation in Cuprate Superconductor. *Helvetica Physica Acta* 56: 237-243.
13. Tanaka, S. 2001. High Temperature Superconductivity History and Outlook. *Japanese Journal of Applied Physics* 4:17-22.
14. Chu, C. W. 2008. A Possible Path to RTS. *Association of Asia Pacific Physical Societies Bulletin* 18(4): 9-21.
15. Tahir-Kheli, J., and Goddard III, W. A. 2009. The Chiral Plaquette Polaron Paradigm (CPPP) for High Temperature Cuprate Superconductor. *Chemical Physics Letter* 472: 153-165.
16. Stern, E. A., Han, S. W., and Haskel, D. 2004. Dynamic Inhomogeneities in the  $La_2CuO_4$ -Based Superconductors. *Journal of Superconductivity: Incorporating Novel Magnetism* 17(1): 97-102.

17. Vanderah, T. A. 1992. Chemistry of Superconductor Materials. New Jersey. NoYes Publications. p. 88.
18. Sherman, D. M., and Waite, T. D. 1985. Electronic Spectra of  $\text{Fe}^{3+}$  Oxide and Oxide Hydroxide in the near IR to near UV. *American Mineralogist* 70: 1262-1269.
19. Dompablo, M. E., and Ceder, G. 2003. On the Original the Monoclinic Distortion in  $\text{Li}_x\text{NiO}_2$ . *Chemistry Material* 15: 63-67.
20. Chakraverty, B. K. 1983. Bipolaron and Superconductivity. *Journal Physique* 42: 1351-1356.
21. Bednorz, J. G., and Müller, K. A. 1987. Perovskite-Type Oxide -The New Approach to High- $T_c$  Superconductivity. *Nobel Lecture* 8 December: 427.
22. Buckel, W. 1991. Superconductivity: Fundamental and Application. Weinheim. VCH. p. 295.
23. Huijben, M., Koster, G., Blank, H. A., and Rijnders, G. 2008. Interface Engineering and Strain in  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  Thin Film. *Phase Transition* 81: 703-716.
24. Marsh, P., Fleming, R. M., Mandich, M. L., Desantolo, A. M., Kwo, J., Hong, M., and Martinez-Miranda, L. J. 1988. Crystal Structure of the 80 K Superconductor  $\text{YBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$ . *Nature* 334: 141-143.
25. Bordet, P., Chailout, C., Chenavas, J., Hodeau, J. L., Marezio, M., Karpinski, J., and Kaldis, E. 1988. Structure Determination of New High-Temperature Superconductor  $\text{YBa}_2\text{Cu}_7\text{O}_{14+x}$ . *Nature* 334: 596-598.
26. Aliabadi, A., Farshchi, A., and Akhavan, M. 2009. A New Y-Based HTSC with  $T_c$  above 100 K. *Physica C* 469: 2012-2014.
27. Tavana, A., and Akhavan, M. 2010. How  $T_c$  Can Go above 100 K in the Family. *Euro Physics Journal B* 73: 79-83.
28. Udomsamuthirun, P., Kruaehong, T., Nilkamjon, T., and Ratreng, S. 2010. The New Superconductors of YBaCuO Materials. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* 23: 1377-1380.
29. Sujinnapram, S., Udomsamuthirun, P., Kruaehong, T., Nilkamjon, T., and Ratreng, S. 2011. The XRD Spectra of New YBaCuO Superconductor. *Bulletin of Materials Science* 34: 1053-1057.
30. Rodriguez-Carvajal, J. 2001. An Introduction to the Program Fullprof. Laboratoire Leon Brillouin. Laboratoire Leon Brillouin. France. p. 10.
31. Fawcett, T. 2012. The International Centre for Diffraction Data. Available from URL: <http://www.icdd.com/product/pdf/4.html>. 1 July 2012.
32. Bolzan, A. A., Millar, G. J., Bhargava, A., Mackinnon, D. R., and Fredericks, P. M. 1996. A Spectroscopic Comparison of YBaCuO Superconductors Synthesized by Solid-State and Co-Precipitation Method. *Materials Letters* 28(1): 27-32.

33. Maeda, H., Tanaka, Y., Fukutomi, M., and Asano, T. 1988. A New High-Tc Oxide Superconductor without a Rare Earth Element. *Japanese Journal of Applied Physics* 27: 209-210.
34. Sheng, Z. Z., and Hermann, A. M. 1988. Superconductivity in the Rare-Earth-Free Tl-Ba-Cu-O System above Liquid-Nitrogen Temperature. *Nature* 332: 55-58.
35. Schilling, A., Cantoni, M., Guo, J. D., and Ott, H. R. 1993. Superconductivity above 130 K in the Hg-Ba-Ca-Cu-O System. *Nature* 363: 56-58.
36. Cai, C., Mori, H., Fujimoto, H., Liu, H., and Dou, S. 2001. Crystal Growth Patterns in MgO Seed  $Y_{1.8}Ba_{2.4}Cu_{3.4}O_y$ /Ag Melt-Texturing Process. *Physica C* : 734-737.
37. Yao, X., Hu, J., Izumi, T., and Shiohara, Y. 2004. Direct Evidence and the Mechanism of Superheating in YBCO Thin Film. *Journal of Physics: Condensed Matter* 16: 3819-3826.
38. Chu, C. W. 2012. A Possible Approach from BCS through HTS to RTS with Three Examples. *Physica C* 482: 33-44.
39. Shen, Z. X., and Dessau, D. S. 1995. Electronic Structure and Photoemission Studies of Late Transition-Metal Oxide-Mott-Insulators and High-Temperature Superconductor. *Physica Report* 253. 1-162.
40. Dent, C. J., and Alexandrov, A. S. 2000. Angle-Resolved Photo-Emission in  $YBa_2Cu_3O_7$  and  $YBa_2Cu_4O_7$ . *Physica C* : 2107-2108.
41. Kumagai, T., Manabe, T., Kondo, W., Murayama, K., Hashimoto, T., Kobayashi, Y., Yamaguchi, I., Sohma, M., Tsuchiya, T., Tsukada, K., and Mizuta, S. 2002. Characterization of 50-mm-diameter Y123 film Prepared by a Coating-Pyrolysis Process Using an Infrared Image Furnace. *Physica C* 378-381: 1236-1240.
42. Murakami, M. 1999. Melt Process High-Temperature Superconductor. Singapore. World Scientific Publishing. p. 25.

ได้รับบทความวันที่ 31 กรกฎาคม 2555  
ยอมรับตีพิมพ์วันที่ 15 พฤศจิกายน 2555



