



ผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

การปลูกเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ด้วยกระบวนการออกซิเดชัน  
Growth of CuO Nanowires by Oxidation Process

จัดทำโดย

ผศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

นายรังสรรค์ เมืองเหนือ

RCR  
TA  
492  
.พ7  
ด854ก

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 116873  
วันเดือนปี 6 ส.ย. 2554

ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประจำปีงบประมาณ 2551

12329162  
b.....  
i.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยดี ขอกราบขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ทุนอุดหนุนในการศึกษาและทำวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ คุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องวิเคราะห์ฟิล์มโลหะ และ ดร. นราธิป วิทยากร ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สจล.

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์และเจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือจนกระทั่งงานวิจัยนี้สำเร็จสมบูรณ์

สุรศักดิ์ เนียมเจริญ  
รังสรรค์ เมืองเหลือ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทคัดย่อ

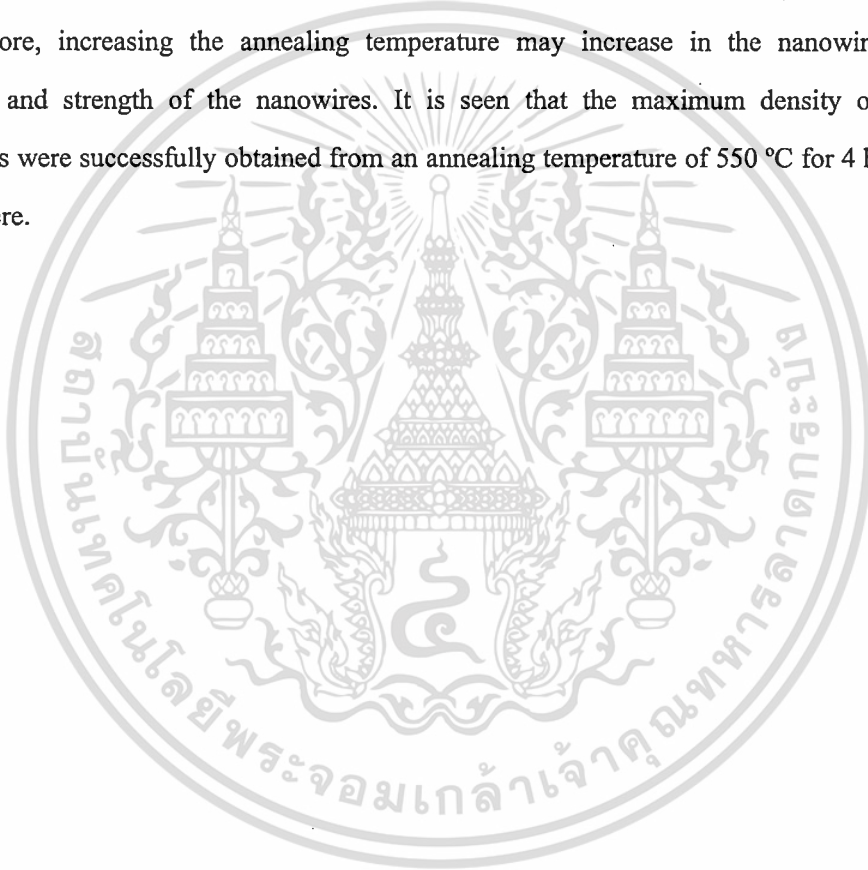
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ ด้วยเทคนิคการเกิดออกซิเดชันทางความร้อน และทำการศึกษาผลของสภาวะที่ใช้ในการเผาแผ่นคอปเปอร์ อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการเผาแผ่นคอปเปอร์ ที่มีต่อความหนาแน่นของเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้น ลักษณะของเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ โดยการนำไปศึกษาทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จากการศึกษาพบว่าสภาวะที่ใช้ อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้เผาแผ่นคอปเปอร์นั้นมีผลต่อการเกิดและลักษณะของเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้น โดยการเผาในสภาวะออกซิเจนจะทำให้มีความหนาแน่นของเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์มากที่สุด และจากการเผาที่อุณหภูมิ 400 ถึง 700 องศาเซลเซียส จะได้เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่มีความกว้าง 57 ถึง 68 นาโนเมตร และยาว 2 ถึง 3 ไมโครเมตร ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเผาแผ่นคอปเปอร์ในสภาวะออกซิเจน คือ ที่อุณหภูมิ 550



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Abstract

In this study, CuO nanowires have been synthesized by thermal oxidation of copper foils. The nanowires density, morphology and microstructure of the nanowires were studied as a function of atmosphere, temperature and annealing time using scanning electron microscopy (SEM). The atmosphere, temperature and annealing time have been found to have a pronounced effect on the nanowires formation and morphology. The maximum nanowires density was observed by annealing in oxygen atmosphere. Within the temperature range of 400-700 °C, the nanowires formed has straight with diameters between 57-68 nm and lengths between 2-3 μm. Furthermore, increasing the annealing temperature may increase in the nanowires density, diameter and strength of the nanowires. It is seen that the maximum density of the CuO nanowires were successfully obtained from an annealing temperature of 550 °C for 4 h in oxygen atmosphere.



# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	2
1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	3
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	4
2.1 ความหมายของนาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology)	4
2.2 สมบัติของวัสดุนาโน (Property of nanomaterials)	4
2.3 โลหะทองแดง (Copper)	7
2.4 คอปเปอร์ออกไซด์ (Copper oxide)	10
บทที่ 4 วิธีดำเนินการวิจัย	22
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	22
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	22
3.3 กระบวนการเตรียมกรดเจือจาง	23
3.4 กระบวนการเตรียมแผ่นคอปเปอร์	23
3.5 กระบวนการเผาแผ่นคอปเปอร์	24
3.6 การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด (SEM)	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.7 การหาขนาดเกรนด้วยวิธี Mean Linear Intercept Method	26
3.8 การหาค่าอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง (Aspect ratio)	27
บทที่ 4 ผลการทดลอง	28
4.1 ลักษณะทางกายภาพ 28	
4.2 ผลจากการทดสอบทางสัณฐานวิทยา 32	
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	45
บรรณานุกรม	49



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติทั่วไปของโลหะทองแดงที่ค่อนข้างบริสุทธิ์	8
2.2 สมบัติของโลหะทองแดงที่ค่อนข้างบริสุทธิ์เมื่อเกิดปฏิกิริยา	9
4.1 ค่าความหนาแน่นของแต่ละสภาวะที่ใช้ในการเผาแผ่นคอปเปอร์	35
5.1 ผลการทดลองของการเผาแผ่นคอปเปอร์ในสภาวะออกซิเจน สภาวะอากาศ องศาเซลเซียส ที่เวลาต่าง ๆ กัน	45
5.2 ผลการทดลองของการเผาแผ่นคอปเปอร์ในสภาวะออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 400 ถึง 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	46
5.3 ผลการทดลองของการเผาแผ่นคอปเปอร์ในสภาวะออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ที่เวลาต่าง ๆ กัน	47



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ความสัมพันธ์ขององค์ประกอบทั้งสี่ของวัสดุที่เกี่ยวข้องกันเป็นเส้นตรง	5
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับพลังงานกับความหนาแน่นของสถานะอิเล็กทรอนิกส์ของวัสดุต่างๆที่เปลี่ยนไป	6
2.3 โครงสร้างของทองแดง (Structure of Copper)	7
2.4 โครงสร้างของคอปเปอร์ออกไซด์ (Copper (I) oxide)	11
2.5 โครงสร้างของคอปเปอร์ออกไซด์ (Copper (II) oxide)	11
2.6 อุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าไฟฟ้าเคมี	12
2.7 โครงสร้างของเครื่องดักจับก๊าซ 13	
2.8 โครงสร้างผลึกของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด $YBa_2Cu_3O_7$ 14	
2.9 แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO nanorods) 15	
2.10 แท่งนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO nanorods) 16	
2.11 แสดงอนุภาคนาโนของคอปเปอร์ออกไซด์ที่มีลักษณะเป็น Shuttle-like 17	
2.12 แสดงเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ 18	
2.13 เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ 18	
2.14 แสดงเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์เผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส 19	
2.15 ลักษณะของพื้นผิวที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย SEM 20	
2.16 เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่ได้ 20	
2.17 แสดงลักษณะพื้นผิวที่มีเส้นลวดนาโนทินออกไซด์เกิดขึ้น 21	
2.18 แสดงบริเวณปลายของเส้นลวดนาโนทินออกไซด์ที่ได้ 21	
3.1 เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonication) 23	
3.2 แผนผังการเผาเคลือบของแผ่นคอปเปอร์ 24	
3.3 เตาเผา รุ่น Vester furnaces 25	
3.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 26	
4.1 แผ่นคอปเปอร์ที่ขัดเสร็จแล้วก่อนนำไปเผา 28	
4.2 แผ่นคอปเปอร์หลังเผา ในสภาวะออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 400 ถึง 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง 29	

## สารบัญญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 แผ่นคอปเปอร์หลังเผาในสภาวะอากาศและออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 400 ถึง 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	30
4.4 แผ่นคอปเปอร์หลังเผาในสภาวะไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 400 ถึง 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	31
4.5 เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ จากการเผาในสภาวะออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง	32
4.6 เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ จากการเผาในสภาวะอากาศและออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง	33
4.7 ลักษณะของแผ่นคอปเปอร์ที่นำไปเผาในสภาวะไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	34
4.8 ลักษณะเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ ได้	36
4.9 เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่ได้จากการเผาในสภาวะออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง	37
4.10 เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่ได้จากการเผาในสภาวะออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง	38
4.11 ลักษณะของแผ่นคอปเปอร์ที่ได้จากการเผาในสภาวะออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง	38
4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความหนาแน่น โดยเผาในสภาวะออกซิเจน ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	40
4.13 แสดงเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่ได้ จากการเผาในสภาวะออกซิเจน อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส 15 นาที	41
4.14 แสดงเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่ได้จากการเผา ในสภาวะออกซิเจน อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที	42
4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความหนาแน่น ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส	43
4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับค่า Aspect ratio	44

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของโครงการวิจัย

คำว่า นาโน (Nano) มีรากศัพท์มาจากภาษากรีก แปลว่า คนแคระ หมายถึง หนึ่งในพันล้านหน่วยหรือหนึ่งในพันล้านเมตรแต่นิยมเรียกกันโดยทั่วไปว่า นาโนเมตร (Nanometer) ซึ่งหมายถึง สิบล้านส่วนหนึ่งเมตร ( $1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$ ) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าแองสตรอมยูนิต ( $1\text{Å} = 10^{-10}\text{m}$ ) ดังนั้น นาโนศาสตร์และนาโนเทคโนโลยี (Nanoscience and Nanotechnology) จึงหมายถึง การศึกษาวิชาการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับนาโนเมตร และการนำความรู้เหล่านี้ไปประยุกต์ใช้ใน วิชาการแขนงใหม่ ที่ว่าด้วยเรื่องของเทคโนโลยีในการประกอบ และการผลิตสิ่งต่าง ๆ ขึ้นมาจากการจัดเรียงอะตอม หรือโมเลกุลด้วยความแม่นยำและถูกต้องในระดับนาโนเมตร ซึ่งสามารถเรียกวัสดุที่มีขนาดเล็กอยู่ในระดับนาโนเมตรที่เกี่ยวข้องกับนาโนศาสตร์และนาโนเทคโนโลยีว่า เป็น วัสดุนาโน (nanomaterials)

เอกสารทางวิชาการที่ผ่านมา พบว่า สมบัติของวัสดุนาโนนั้นไม่ว่าจะเป็น ขนาด รูปร่าง ความแข็ง จุดหลอมเหลว และความสามารถในการเป็นสื่อนำไฟฟ้า จะแตกต่างจากวัสดุโมโครอย่างสิ้นเชิง ถึงแม้ว่าจะเป็นวัสดุชนิดเดียวกันก็ตาม ซึ่งลักษณะเด่นดังกล่าวของวัสดุนาโนนี้เองที่ทำให้สมบัติพื้นฐาน และกลไกต่าง ๆ แตกต่างไป จากที่พบเห็นในระดับมหภาค ตัวอย่างเช่น วงจรไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนนั้นไม่จำเป็นต้องเป็นไปตามกฎของโอห์ม ดังเช่นที่พบในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในระดับธรรมดาทั่วไป ด้วยลักษณะพิเศษดังกล่าว ทำให้เมื่อไม่กี่ปีที่ผ่านมาได้มีการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับวัสดุนาโนมากมาย ไม่ว่าจะเป็น การพยายามเตรียมท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube) และการเตรียมวัสดุนาโนของซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ซึ่งวัสดุนาโนสองชนิดนี้ สามารถเตรียมให้เกิดเป็นวัสดุนาโนที่มีรูปร่างต่าง ๆ ได้มากมาย เช่น ลักษณะที่เป็นแท่ง (rod) เส้นลวด (wire) หรือแผ่น (plate) เป็นต้น ซึ่งลักษณะที่ต่างกันก็ให้สมบัติที่ต่างกันด้วย จึงเหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้งานที่แตกต่างกันไป แต่วัสดุนาโนที่มีชื่อเสียงมากที่สุด คือ ท่อนาโนคาร์บอน เนื่องจากเป็นวัสดุนาโนตัวแรกที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริง โดยนำไปใช้เป็นสื่อนำไฟฟ้า ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ อย่างไรก็ตามท่อนาโนคาร์บอนยังมีจุดด้อย คือ กระบวนการนำท่อนาโนคาร์บอนมาใช้งานนั้นค่อนข้างยุ่งยาก มีการประยุกต์ใช้งานในวงแคบและไม่สามารถเจือธาตุอื่นลงไปเพื่อทำวิจัยต่อยอดได้ นอกจากนี้ยังมีกระบวนการสังเคราะห์ที่ยุ่งยากซับซ้อน และใช้งบประมาณสูงอีกด้วย อย่างไรก็ตามวัสดุอีกตัวหนึ่งที่มีความสำคัญไม่แพ้กันที่เหมาะจะนำไปเตรียมวัสดุนาโน เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งาน นั่นก็คือ คอปเปอร์ออกไซด์ ( $\text{CuO}$ ) เนื่องจากมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติทางไฟฟ้าที่ดีเทียบเท่ากับโลหะออกไซด์อื่น ๆ ที่กล่าวมาข้างต้น นอกจากนี้คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) สามารถแสดงความเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-type semiconductor) ได้อีกด้วย ซึ่งสามารถเจือธาตุชนิดอื่นลงไปแล้วนำไปประยุกต์ใช้งานเป็น รอยต่อของสารกึ่งตัวนำ (P-N junction) เพื่อนำไปพัฒนาเป็นตัวตรวจจับก๊าซพิษ (Gas sensor) ต่อไป นอกจากนี้ คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) สามารถหาซื้อได้ง่ายตามท้องตลาดทั่วไปและมีราคาถูกอีกด้วย

อย่างไรก็ตามการเตรียมวัสดุที่เลือกให้เป็นวัสดุนาโนนั้นทำได้ยาก เนื่องจากธรรมชาติของสาร เมื่อผ่านกระบวนการทางความร้อนจะมีพลังงานภายในเกิดขึ้น ระบบจะต้องพยายามรักษาพลังงานภายในของระบบให้สมดุล ดังนั้น จึงเกิดมีแรงขับเคลื่อนที่ก่อให้เกิดการเติบโตของวัสดุ เพื่อรักษาพลังงานภายในของระบบให้สมดุลขึ้น ทำให้การคงสภาพวัสดุภายหลังจากผ่านกระบวนการเตรียมให้มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรนั้นเป็นไปได้ยาก จึงต้องมีการศึกษาหาเงื่อนไข เทคนิค และวิธีการที่เหมาะสม เพื่อให้สามารถควบคุมการเติบโตของวัสดุ และสามารถคงสภาพขนาดของวัสดุให้มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรอยู่ได้ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ได้เลือกทำการศึกษาและพัฒนา วิธีการเตรียมคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) เป็นเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO nanowire) ด้วยเทคนิคออกซิเดชันทางความร้อน (Thermal oxidation) พร้อมทั้งศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเผา จากนั้นจะทำการตรวจสอบลักษณะ โครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้น ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ ด้วยเทคนิคการออกซิเดชันทางความร้อน
2. หาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ ด้วยเทคนิคการออกซิเดชันทางความร้อน

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ทำการสังเคราะห์เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ โดยการเผาในสภาวะออกซิเจน สภาวะอากาศและออกซิเจน (21%) และสภาวะไนโตรเจน
2. ทำการสังเคราะห์เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา แต่ใช้เวลาในการเผาเท่ากัน
3. ทำการสังเคราะห์เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ โดยการเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในการเผาแต่ใช้อุณหภูมิเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีดำเนินงาน

1. รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย
2. จัดซื้อวัสดุอุปกรณ์
3. นำแผ่นทองแดงที่เตรียมได้ไปเผา
4. เมื่อเผาเสร็จนำแผ่นทองแดงไปตรวจสอบ การเกิดเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
5. หาขนาดของเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่เตรียมได้ในสภาวะต่างๆ
6. อภิปรายและสรุปผลการทดลอง

#### 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถสังเคราะห์เส้นลวดคอปเปอร์ออกไซด์ ด้วยเทคนิคการเกิดออกซิเดชันทางความร้อนได้ ซึ่งคอปเปอร์ออกไซด์ที่ได้เป็นคอปเปอร์ออกไซด์ที่มีราคาถูกลงและเป็นเทคนิคที่ใช้ต้นทุนการผลิตต่ำ เนื่องจากแผ่นคอปเปอร์ที่ใช้ในการวิจัยนี้สามารถหาได้ง่ายและราคาถูกลง
2. ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ เพื่อต่อยอดความรู้ในการพัฒนาการกำหนดขนาดของเส้นลวดนาโนที่เตรียมได้
3. เข้าใจและเพิ่มพูนความรู้เกี่ยวกับกระบวนการเกิดเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์
4. ลดต้นทุนและความยุ่งยากในการผลิตเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 ความหมายของนาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology)

ความหมายของนาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology) นิยามขึ้นโดยมูลนิธิวิทยาศาสตร์แห่งชาติ (National Science Foundation, NSF) ของสหรัฐอเมริกา มี 3 มุมมอง ดังนี้

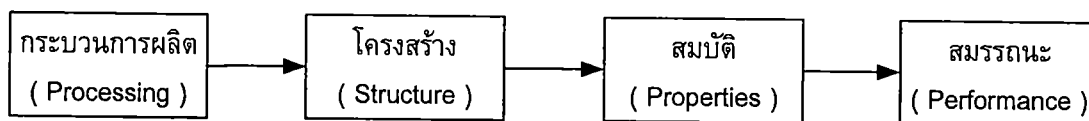
1. การวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีในระดับอะตอม (Atom) โมเลกุล (Molecule) หรือ โมเลกุลมหภาค (Macromolecule) ที่มีขนาดเล็กในช่วง 1 ถึง 100 นาโนเมตร
2. การสร้างและการใช้ประโยชน์จากโครงสร้าง อุปกรณ์ หรือระบบต่าง ๆ ที่มีสมบัติและหน้าที่ใหม่เกิดขึ้น อันเนื่องมาจากความเล็กในระดับนาโน (Nanoscale) ของสิ่งต่าง ๆ เหล่านั้น
3. ความสามารถในการควบคุม การจัดการได้อย่างถูกต้อง และมีความแม่นยำ ในระดับอะตอม ดังนั้น ความหมายโดยรวมของนาโนเทคโนโลยี ก็คือ การจัดการ การสร้าง การสังเคราะห์วัสดุ อุปกรณ์และระบบต่าง ๆ ที่มีขนาดเล็กอยู่ในช่วง 1 ถึง 100 นาโนเมตร ด้วยความถูกต้องและแม่นยำ จะส่งผลให้วัสดุหรืออุปกรณ์ต่าง ๆ นั้นมีสมบัติพิเศษขึ้น จึงทำให้เกิดประโยชน์ต่อผู้ใช้และเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจได้

#### 2.2 สมบัติของวัสดุนาโน (Property of nanomaterials)

โครงสร้างของวัสดุเกี่ยวข้องกับการจัดเรียงองค์ประกอบภายในวัสดุ โครงสร้างในระดับเล็กกว่าอะตอม จะประกอบด้วยอิเล็กตรอนที่อยู่ในแต่ละอะตอมนั้น และปฏิสัมพันธ์ระหว่างอิเล็กตรอนกับนิวเคลียส โครงสร้างในระดับอะตอม หมายถึง การจัดกลุ่มของอะตอม หรือ โมเลกุลเข้าด้วยกัน ในระดับโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้น หมายถึงระดับของกลุ่มใหญ่ๆ ของอะตอมมารวมกันเป็นกลุ่มก้อน ซึ่งสามารถเรียกโครงสร้างในระดับนี้ว่า ระดับจุลภาค หมายถึงระดับที่ต้องมองด้วยกล้องจุลทรรศน์ และส่วนประกอบที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เรียกว่า ระดับมหภาค สมบัติของวัสดุ คือ ลักษณะเฉพาะของวัสดุในเชิงของชนิด และปริมาณของการตอบสนองที่มีต่อสิ่งกระตุ้นจากภายนอก โดยสมบัติของวัสดุนั้นจะถูกกำหนดขึ้น โดยที่ไม่ขึ้นอยู่กับรูปร่างและขนาดของวัสดุ สมบัติที่สำคัญของวัสดุสามารถแบ่งออกได้ 6 กลุ่ม ได้แก่ สมบัติทางกล ทางไฟฟ้า ทางความร้อน ทางแม่เหล็ก ทางแสง และทางการเสื่อมสภาพ สมบัติของวัสดุแต่ละชนิดนั้น จะมีลักษณะของสิ่งกระตุ้นภายนอกที่แตกต่างกันไป โดยจะส่งผลต่อการตอบสนองของวัสดุในลักษณะที่แตกต่างกัน นอกจากโครงสร้างและสมบัติแล้วยังมีองค์ประกอบของวัสดุที่สำคัญอีก 2 ประการ คือ กระบวนการ (Processing) และ สมรรถนะ (Performance) เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ขององค์ประกอบทั้งสี่ของวัสดุ พบว่าความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกันระหว่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต การค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการ โครงสร้าง สมบัติ และสมรรถนะ มีลักษณะเป็นแบบเส้นตรง กล่าวคือ โครงสร้างของวัสดุจะขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิต จากนั้นสมรรถนะจะเป็นฟังก์ชันของสมบัติวัสดุนั้น ๆ ดังรูปที่ 2.1

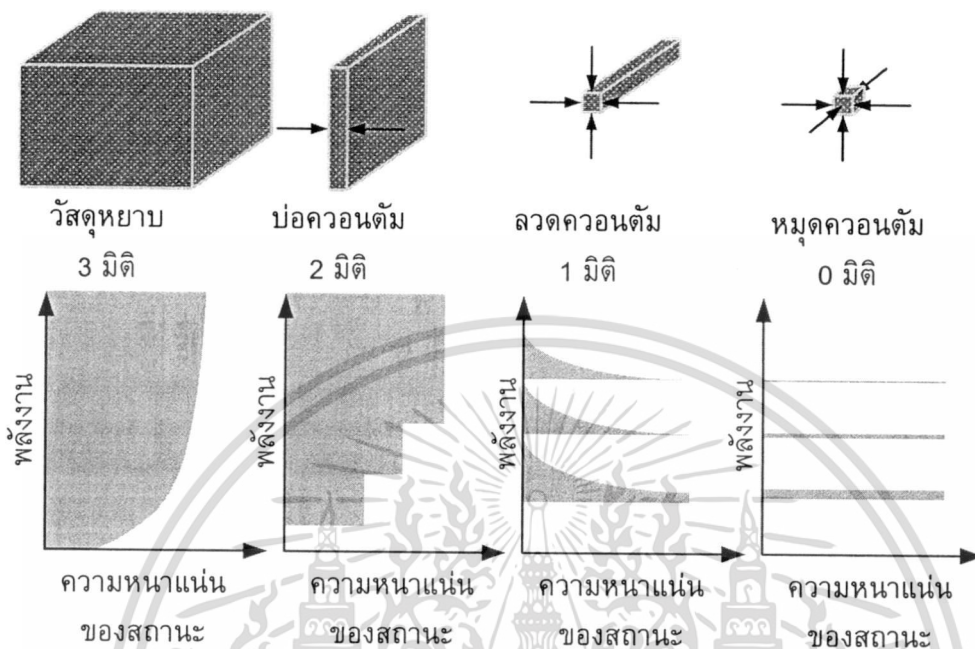


รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ขององค์ประกอบทั้งสี่ของวัสดุที่เกี่ยวข้องกันเป็นเส้นตรง  
(สุวินชัย พงษ์สุกิจวัฒน์ , 2548:752)

วัสดุประเภทต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นพอลิเมอร์ (Polymer) เซรามิกส์ (Ceramics) โลหะ (Metal) และคอมโพสิต (Composite) ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน วัสดุเหล่านี้สังเคราะห์มาจากวัตถุดิบและกรรมวิธีที่มีความบกพร่องอยู่ โดยที่ความบกพร่องของวัสดุเหล่านี้ จะนำไปสู่ความเสียหายอย่างใดอย่างหนึ่งได้ ตัวอย่างเช่น การที่พลาสติกแตกเปราะและไม่สามารถป้องกันการซึมผ่านของก๊าซได้ การแตกตัวและหลุดออกของพอลิเมอร์ การแตกร้าวและความเปราะของเซรามิกส์ การเกิดสนิมของโลหะ เป็นต้น ข้อบกพร่องของวัสดุเหล่านี้อาจลดลงได้โดยการนำนาโนเทคโนโลยีเข้ามาช่วยพัฒนาวัสดุแบบใหม่ ที่เรียกว่า วัสดุนาโน (nanomaterials) วัสดุหรือโครงสร้างที่มีขนาดในระดับนาโน (Nanoscale) ถูกจัดว่าเป็นโครงสร้างที่มีระบบมิติต่ำ (Low-dimensional systems , LDSs) ทั้งนี้เนื่องจากมิติทางกายภาพ (ความกว้าง ความยาว และความสูง) ของวัสดุหรือโครงสร้างนาโนอย่างน้อยหนึ่งมิตินั้นจะถูกจำกัดขนาด อยู่ในช่วง 1 ถึง 100 นาโนเมตรเท่านั้น ซึ่งจะทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในวัสดุหรือโครงสร้างนาโน จึงแตกต่างไปจากวัสดุแบบก้อนใหญ่ (Bulk materials) โดยวัสดุหรือโครงสร้างที่มีระบบมิติต่ำ (Low-dimensional System , LDSs) จะมีสถานะอิเล็กตรอนิกส์ที่มีลักษณะไม่ต่อเนื่อง แต่จะมีค่าได้อย่างจำเพาะเท่านั้น ดังรูปที่ 2.2 ลักษณะเช่นนี้จะเรียกว่า ควอนไทเซชัน (Quantization) การเกิดควอนไทเซชันของสถานะอิเล็กตรอนิกส์นั้น จะนำไปสู่การเกิดสมบัติ และการเกิดปรากฏการณ์ใหม่ ๆ ขึ้น ตัวอย่างเช่น การแสดงผลของปรากฏการณ์ทางควอนตัมที่ถูกกักขังไว้ (Quantum confinement effects) ปรากฏการณ์การขยับเคลื่อนของสเปกตรัม (Spectrum shift) อิทธิพลอิเล็กตรอนเดี่ยว (Single electron effect) การปิดกั้นแรงระหว่างประจุไฟฟ้า (Coulomb blockade) การควอนไทเซชันของโฟนอน (Phonon quantization) การกักขังเอ็กซิตอน (Exciton confinement) เป็นต้น ความสัมพันธ์ระหว่างระดับพลังงานกับความหนาแน่นของสถานะ (density of states, DOS) อิเล็กตรอนิกส์ของวัสดุต่าง ๆ ที่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามการลดขนาดมิติใดมิติหนึ่งของวัสดุให้มีขนาดอยู่ในระดับนาโน ยกตัวอย่างเช่น หนุมควอนตัม (quantum dot) ซึ่งเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุนาโนที่มีมิติทางกายภาพทั้งสามมิติอยู่ในระดับนาโน จะมีลักษณะความหนาแน่นของสถานะอิเล็กทรอนิกส์ แยกออกจากกันเป็นชั้น ๆ อย่างชัดเจน คล้ายกับลักษณะที่พบในอะตอม ซึ่งจะแตกต่างไปจากวัสดุชนิดเดียวกันที่มีขนาดใหญ่ ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับพลังงาน กับ ความหนาแน่นของสถานะ (Density of states, DOS) อิเล็กทรอนิกส์ของวัสดุต่างๆที่เปลี่ยนไป (www.dek-d.com)

ตัวอย่างเช่น ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube) เกิดจากธาตุคาร์บอน (C) ซึ่งเป็นธาตุชนิดเดียวกับเพชร ถ้ำถ่าน และกราไฟต์ โดยเพชรจะมีโครงสร้างของอะตอมคาร์บอนล้อมรอบอยู่ 4 อะตอม จึงมีความแข็งแรงและมีความคงทนมากที่สุด กราไฟต์ (Graphite) จะมีอะตอมคาร์บอนล้อมรอบอยู่ 3 อะตอม และมีการจัดเรียงตัวเป็นแผ่น คล้ายกับรังผึ้ง (Honeycomb) และผงซีเมนต์ หรือถ่านจากการเผาไหม้นั้นจะมีโครงสร้างคล้ายกับกราไฟต์ มีการจัดเรียงตัวที่ไม่เป็นระเบียบ ขณะที่ท่อนาโนคาร์บอนจะมีรูปร่างเป็นโครงตาข่ายของคาร์บอน ม้วนเชื่อมติดกันเป็นรูปทรงกระบอก โดยจะมีลักษณะเป็นท่อกลวง มีความยาวประมาณ 10 ไมโครเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 ถึง 50 นาโนเมตร ถ้ามีการม้วนด้วยมุมบิดที่ต่างกัน ก็จะได้ท่อนาโนคาร์บอนที่มีลวดลายตามผนังท่อที่แตกต่างกัน เช่น อาจจะมีลวดลายที่ตรงและเป็นระเบียบหรือเฉียงคล้ายขั้นบันได และความแตกต่างที่เกิดขึ้นจะมีผลต่อคุณสมบัติทั้งทางไฟฟ้าและเชิงกล กล่าวคือ ท่อนาโนคาร์บอนนั้นสามารถเป็นได้ทั้งเส้นลวดนำไฟฟ้า หรือเป็นสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) นอกจากนี้ท่อนาโนคาร์บอนมีคุณสมบัติที่แข็งแรงและยืดหยุ่นมากกว่าเหล็กกล้า ทนต่อแรงดึงมากกว่าเหล็ก 20 เท่า และมีความแข็งแรงทนต่อการบิดเบี้ยวมากกว่าเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

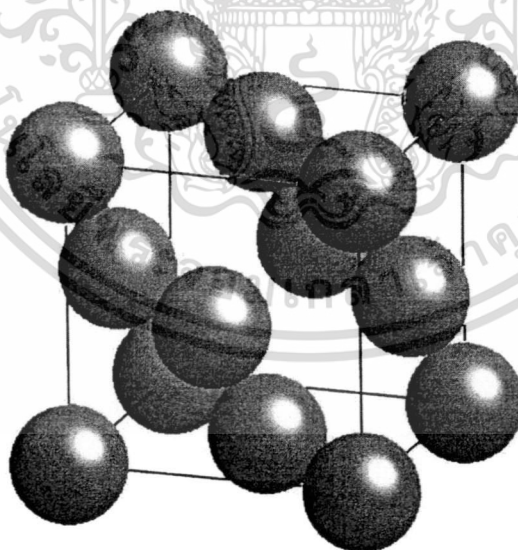
10 เท่า จึงสามารถที่จะนำมาประยุกต์ใช้ได้อย่างกว้างขวาง เช่น การนำมาใช้เป็นสายไฟขนาดเล็กในเครื่องใช้ไฟฟ้า(Nanoelectronics) หรือนำมาใช้ทอเป็นเส้นลวดที่มีความละเอียดสูง เป็นต้น

## 2.3 โลหะทองแดง (Copper)

ทองแดง หรือ Copper (Cu) สันนิษฐานว่า มาจากคำว่า Cuprum ในภาษาละติน บางทฤษฎีกล่าวว่า มาจากคำว่า Kyprios ในภาษากรีก ซึ่งทั้งสองคำหมายถึง ชื่อเกาะ Cyprus ในทะเลเมดิเตอร์เรเนียน ซึ่งเป็นแหล่งผลิตทองแดงที่สำคัญ การค้นพบในตอนแรกเป็นการนำทองแดงมาใช้โดยตรง ต่อมาพบว่าเมื่อผสมกับดีบุกทำให้แข็งและใช้งานได้ดีกว่าการนำทองแดงมาใช้โดยตรง ทำให้ได้ทองสัมฤทธิ์หรือทองบรอนซ์ แหล่งแร่ทองแดงที่สำคัญของประเทศไทย คือ ที่อำเภอเชียงคาน บริเวณภูเขาทองแดง จังหวัดเลย และจังหวัดขอนแก่น

### 2.3.1 โครงสร้างของทองแดง (Structure of Copper)

ทองแดง (Cu) จัดเป็นโลหะทรานซิชัน (Transition metal) โดยอะตอมของทองแดงแต่ละอะตอมนั้นจะยึดกันด้วยพันธะโลหะ (Metallic bond) ซึ่งเป็นพันธะแบบไม่มีทิศทาง และไม่มีข้อจำกัดของจำนวนและตำแหน่งของอะตอมข้างเคียง จึงสามารถมีอะตอมข้างเคียงได้มาก ทำให้การเรียงของอะตอมที่ยึดกันด้วยพันธะโลหะค่อนข้างแน่น มีการจัดเรียงโครงสร้างของหน่วยเซลล์มีลักษณะเป็นลูกบาศก์ที่มีอะตอมที่มุม และกึ่งกลางหน้าลูกบาศก์ ซึ่งเรียกการจัดเรียงของโครงสร้างแบบนี้ว่า เฟสเซ็นเตอร์คิวบิก หรือ FCC (Face Center Cubic) ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของทองแดง (Cu)

([www.phys.nara-wu.ac.jp/in\\_kamoku/suzuki/images\\_kinzoku/CS\\_of\\_Cu.jpg](http://www.phys.nara-wu.ac.jp/in_kamoku/suzuki/images_kinzoku/CS_of_Cu.jpg))

### 2.3.2 สมบัติของทองแดง (Properties of Copper)

ทองแดงและโลหะผสมของทองแดง มีสมบัติเด่นหลายประการ เช่น

1. มีความแข็งแรงในช่วงที่ใช้งานได้ทั้งยังสามารถปรับปรุงสมบัติทางกลได้หลายระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ความเหนียวของทองแดงสูงมาก จึงสามารถขึ้นรูปโดยไม่เสี่ยงต่อการแตกหัก
3. เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีมาก
4. เป็นตัวนำความร้อนที่ดีมาก
5. เมื่อผสมธาตุบางตัวเข้าไปสามารถกลึงไสเข้ารูปง่าย
6. ต้านทานความล้าได้ดีพอสมควร
7. ไม่เป็นสารแม่เหล็ก
8. ทนทานการกัดกร่อน โดยเฉพาะเมื่อใช้กับเหล็กและน้ำทะเล
9. ทนทานต่อการสึกกร่อนได้ดีพอสมควร
10. มีสีส้มสวยงาม

ตารางที่ 2.1 สมบัติทั่วไปของโลหะทองแดงที่ค่อนข้างบริสุทธิ์

สมบัติของทองแดง	มีค่า
หมายเลขอะตอม (Atomic number)	29
น้ำหนักอะตอม (Atomic weight)	63.57
วาเลนซ์	1 หรือ 2
โครงสร้างของผลึก	fcc
มิติของแลตทิซ (Lattice dimension)	3.6078
ความหนาแน่นที่ 20 °C (g/cm <sup>3</sup> )	8.96
อุณหภูมิหลอมเหลว (°C)	1083
จุดเดือด (°C)	2595
ความแข็ง	2.5 – 3.0
ความถ่วงจำเพาะ	8.8
ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (cal/g)	50.6
การหดตัวขณะแข็ง (Solidification shrinkage) (%)	4.92

(ชาญวูตมิ ตังจิตวิทยา และ สาโรช จูติเกียรติพงษ์, 2521:197)

## ตารางที่ 2.2 สมบัติของ โลหะทองแดงที่ค่อนข้างบริสุทธิ์เมื่อเกิดปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาเคมีกับ	รายละเอียด
ออกซิเจน (O <sub>2</sub> )	ทำปฏิกิริยากับอากาศแห้งที่ 180 °C หรือที่อุณหภูมิต่ำกว่า ถ้าหากมี CO <sub>2</sub> และ H <sub>2</sub> O อยู่ด้วย
ไนโตรเจน (N <sub>2</sub> )	ไม่มีปฏิกิริยา
กำมะถัน (S)	ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิเดียวกับออกซิเจน
ไฮโดรเจน (H <sub>2</sub> )	ไม่เกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง แต่ละลายในทองแดงหลอมเหลวได้ดี
กรดอินทรีย์	กรดเกลือ และกรดกำมะถันบริสุทธิ์ ไม่กัดทองแดง กรดไนตริก (HNO <sub>3</sub> ) สามารถกัดทองแดงได้
ด่าง	ต่างทั่วไปไม่กัดทองแดง แต่แอมโมเนียกับอากาศเมื่อรวมกันจะทำปฏิกิริยากับทองแดงทันที
เกลือ	กัดทองแดงได้บ้าง
กรดอินทรีย์	ที่เจือจางจะกัดทองแดงช้าๆ

(ชาญวุฒิ ตั้งจิตวิทยา และ สาโรช จิตติเกียรติพงศ์, 2521:197)

### 2.3.3 การนำไปใช้งานของทองแดง (Application of Copper)

การนำทองแดงไปใช้งานพอจำแนกได้ดังนี้

1. เครื่องอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ นับตั้งแต่สายไฟฟ้า โทรศัพท และ อื่นๆ มากมาย
2. ใช้ทำโลหะผสมต่าง ๆ หลายชนิด โลหะผสมที่ใช้มากและสำคัญมากที่สุด ได้แก่ ทองสัมฤทธิ์ (ทองแดงกับดีบุก) ทองเหลือง (ทองแดงกับสังกะสี) เป็นต้น
3. ใช้ในงานก่อสร้าง เช่น ท่อน้ำ ชายคา สายล่อฟ้า เป็นต้น
4. ใช้ในเครื่องครัวเรือน
5. ใช้เคลือบรองผิวโลหะเรียบ (Electroplating) ชั้นใน ก่อนชุบโลหะชนิดอื่น เช่น การชุบโครเมียม
6. ทำเหรียญกษาปณ์
7. เป็นโลหะยุทธปัจจัยใช้ทำอาวุธต่างๆ
8. สารประกอบของทองแดงใช้ในอุตสาหกรรมเคมีต่าง ๆ

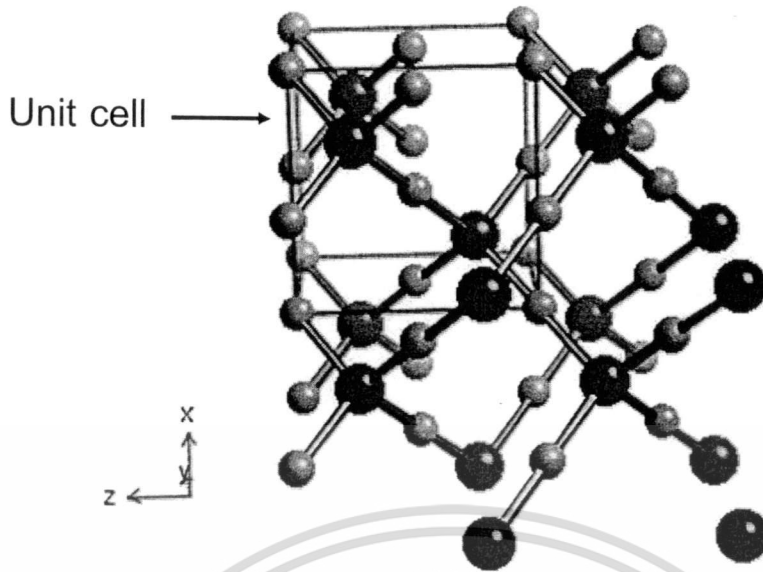
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 คอปเปอร์ออกไซด์ (Copper oxide)

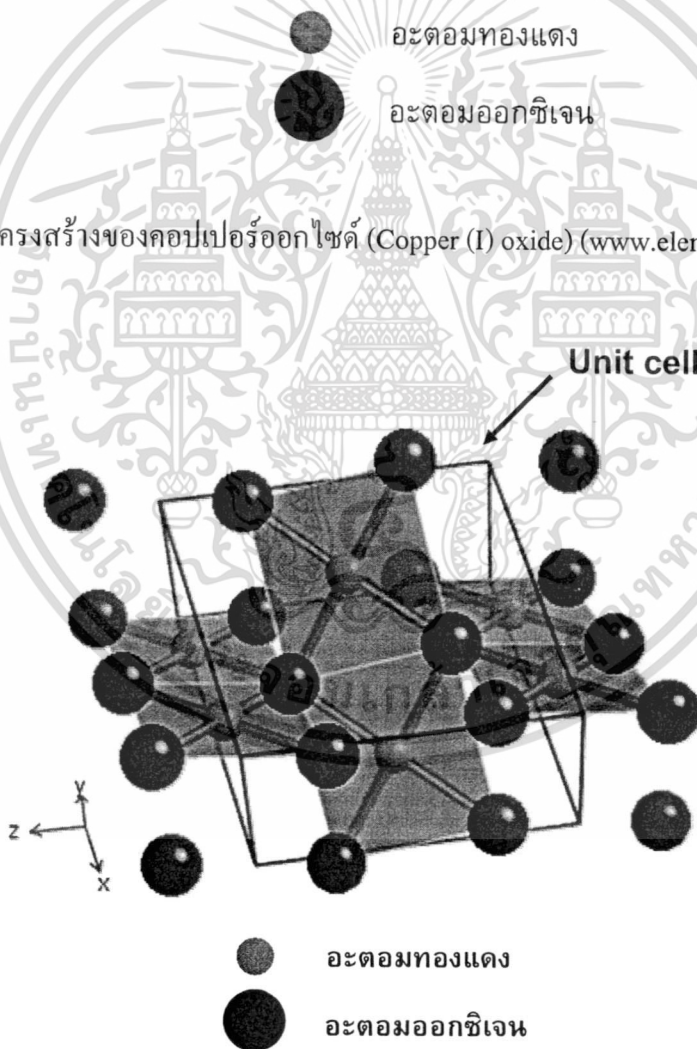
ในธรรมชาติทองแดงส่วนใหญ่นั้นจะอยู่ในรูปของแร่ซัลไฟด์ (sulfides) และแร่ออกไซด์ (oxides) แร่ที่สำคัญของทองแดง คือ แร่คาลโคไพไรต์ (Chalcopyrite) หรือ คอปเปอร์ไพไรต์ (Copperpyrite) นอกจากนี้มีแร่อื่น ๆ เช่น คาลโคไซต์ (Chalcocite) คิวไพไรต์ (Cuprite) มาลาไคต์ (Malachite) บอร์ไนต์ (Bornite) เป็นต้น การสกัดโลหะทองแดงออกจากแร่โดยทั่ว ๆ ไป มักจะนำแร่มาเผาในอากาศให้เป็นออกไซด์และซัลไฟด์ แล้วเผาต่อจนได้โลหะทองแดง หรือนำมาเผากับคาร์บอน ทองแดงเป็นโลหะที่มีสีน้ำตาลแดง มีลักษณะค่อนข้างอ่อน จึงสามารถนำมาตีแผ่เป็นแผ่นและดึงเป็นเส้น หรือทำให้เป็นรูปต่าง ๆ ได้ง่าย เป็นธาตุที่นำความร้อนและนำไฟฟ้าได้ดีรองจากเงิน (Silver) จุดหลอมเหลวและจุดเดือดค่อนข้างสูง เลขออกซิเดชันที่สำคัญคือ +1 และ +2 เมื่ออยู่ในน้ำจะไม่เสถียร ทองแดงสามารถทำปฏิกิริยากับธาตุโลหะบางชนิด และเกิดเป็นสารประกอบได้ เช่น ออกซิเจน (Oxygen) เกิดเป็นสารประกอบของคอปเปอร์ออกไซด์ (Copper oxide) และคลอไรด์ (Chloride) เกิดเป็นสารประกอบของคอปเปอร์คลอไรด์ (Copper chloride) เป็นต้น

### 2.4.1 โครงสร้างคอปเปอร์ออกไซด์ (Structure of Copper oxide)

คอปเปอร์ออกไซด์ (Copper oxide) ที่พบส่วนมาก จะอยู่ในรูปของคิวปริสออกไซด์ (Cuprous oxide) และคิวปริคออกไซด์ (Cupric oxide) คอปเปอร์ออกไซด์ที่อยู่ในรูปของคิวปริสออกไซด์ (Cuprous oxide) มีสูตรโมเลกุลทางเคมี คือ  $\text{Cu}_2\text{O}$  โครงสร้างของคิวปริสออกไซด์นั้น มีลักษณะเป็นแบบคิวบิก (Cubic) และโครงสร้างของหน่วยเซลล์ (Unit cell) มีลักษณะดังรูปที่ 2.4 โดยที่อะตอมของทองแดง ( $\text{Cu}^+$ ) 2 อะตอม จะยึดกันด้วยพันธะเดียวกับอะตอมออกซิเจน ( $\text{O}^{2-}$ ) 1 อะตอม และคอปเปอร์ออกไซด์ที่อยู่ในรูปของคิวปริคออกไซด์ (Cupric oxide) มีสูตรโมเลกุลทางเคมี คือ  $\text{CuO}$  โครงสร้างของคอปเปอร์ออกไซด์ มีลักษณะเป็นแบบโมนอคลินิก (Monoclinic) และโครงสร้างของหน่วยเซลล์ (Unit cell) มีลักษณะดังรูปที่ 2.5 โดยที่อะตอมของทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ ) 1 อะตอม จะยึดกันด้วยพันธะเดียวกับอะตอมออกซิเจน ( $\text{O}^{2-}$ ) 1 อะตอม โดยทั้งคิวปริสออกไซด์และคิวปริคออกไซด์นั้น จัดอยู่ในกลุ่มของสารประกอบประเภทออกไซด์ของโลหะ (Metal oxide)



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของคอปเปอร์ออกไซด์ (Copper (I) oxide) (www.elements.com)



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของคอปเปอร์ออกไซด์ (Copper (II) oxide) (www.elements.com)

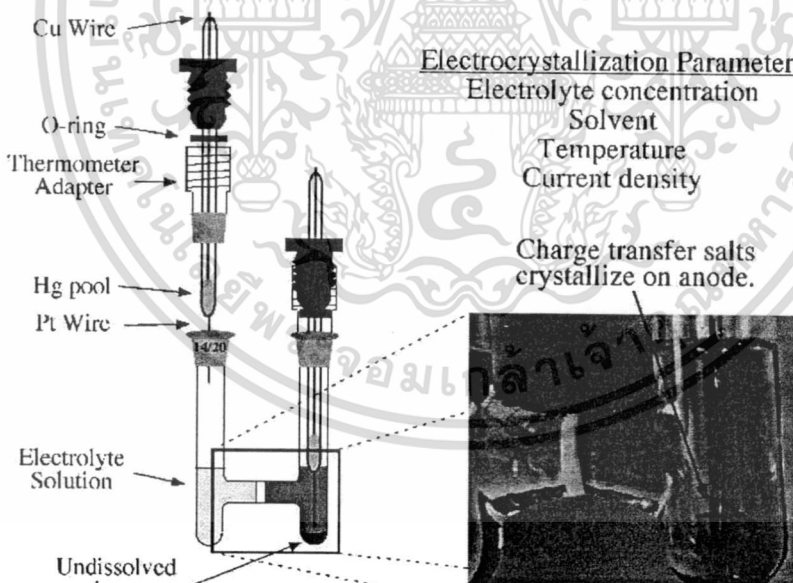
**2.4.2 สมบัติของคอปเปอร์ออกไซด์ (Properties of Copper oxide)**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คิวปริสออกไซด์ ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) มีน้ำหนักโมเลกุล (Formula weight) มีค่าเท่ากับ 143.09 กรัมต่อโมล ความหนาแน่น (Density) 6.0 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting point) 1235 องศาเซลเซียส มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-type semiconductor) และช่วงว่างระหว่างชั้นพลังงาน (Energy band gap) มีค่าประมาณ 2.21 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) ส่วนคิวปริกออกไซด์ ( $\text{CuO}$ ) นั้น มีน้ำหนักโมเลกุล (Formula weight) เท่ากับ 79.545 กรัมต่อโมล ความหนาแน่น (Density) เท่ากับ 6.31 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting point) 1200 ถึง 1300 องศาเซลเซียส มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-type semiconductor) และช่วงว่างระหว่างชั้นพลังงาน (Energy band gap) มีค่าประมาณ 1.85 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) ทั้งคิวปริสออกไซด์ ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) และคิวปริกออกไซด์ ( $\text{CuO}$ ) ไม่สามารถละลายน้ำได้ เนื่องจากคอปเปอร์ออกไซด์นั้นเป็นสารประกอบประเภทออกไซด์ของโลหะ (Metal oxide)

### 2.4.3 การประยุกต์ใช้งานคอปเปอร์ออกไซด์ (Application of copper oxide)

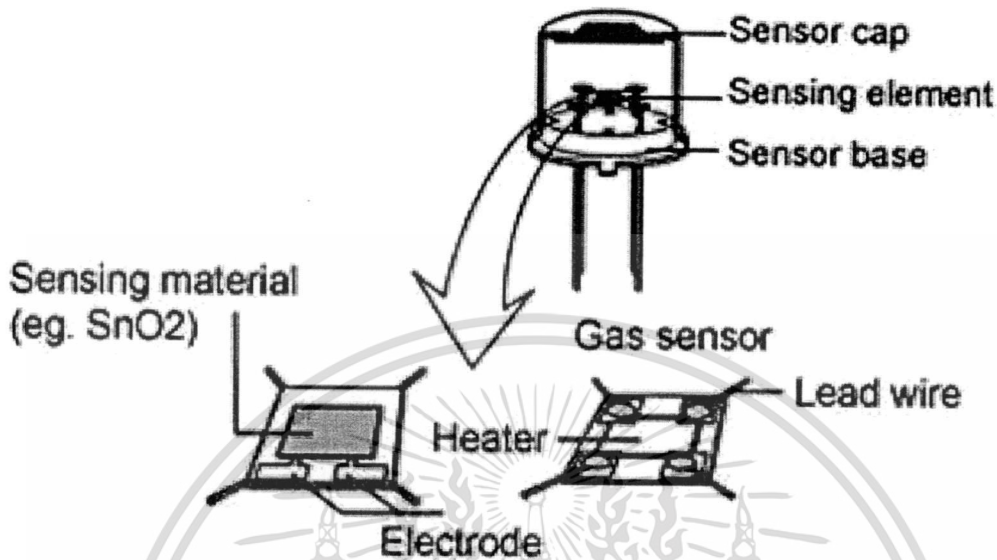
2.4.3.1 มีการนำคอปเปอร์ออกไซด์นาโน มาทำเป็นเซลล์อิเล็กโทรไลต์เคมี หรือทำเป็นลิเทียมคอปเปอร์ออกไซด์แบตเตอรี่ เนื่องจากคอปเปอร์ออกไซด์นั้นสามารถเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้ จึงมีการส่งผ่านอิเล็กตรอนในเซลล์ปริมาณมาก และมีค่าความจุที่ทนได้ในบริเวณที่กว้าง



รูปที่ 2.6 อุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าไฟฟ้าเคมี ([www.chemistry.uah.edu](http://www.chemistry.uah.edu))

2.4.3.2 นำไปทำเป็นตัวดักจับก๊าซพิษ (Gas sensor) เนื่องจากคอปเปอร์ออกไซด์มีจุดเด่นคือ เป็นสารกึ่งตัวนำที่สามารถเจือธาตุชนิดอื่นลงไปได้ จึงมีการนำคอปเปอร์ออกไซด์ไปผสมกับวัสดุอื่น เช่น ทินออกไซด์:คอปเปอร์ออกไซด์ ( $\text{SnO}_2:\text{CuO}$ ) แล้วทำเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี-เอกซอร์เป็นเอกซอร์ที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอ็น และเครื่องส่งสัญญาณที่ได้ยังมีราคาถูก ใช้พลังงานต่ำ และสามารถนำไปใช้งานกับระบบไฟฟ้าที่ใช้อุปกรณ์ขนาดเล็กได้

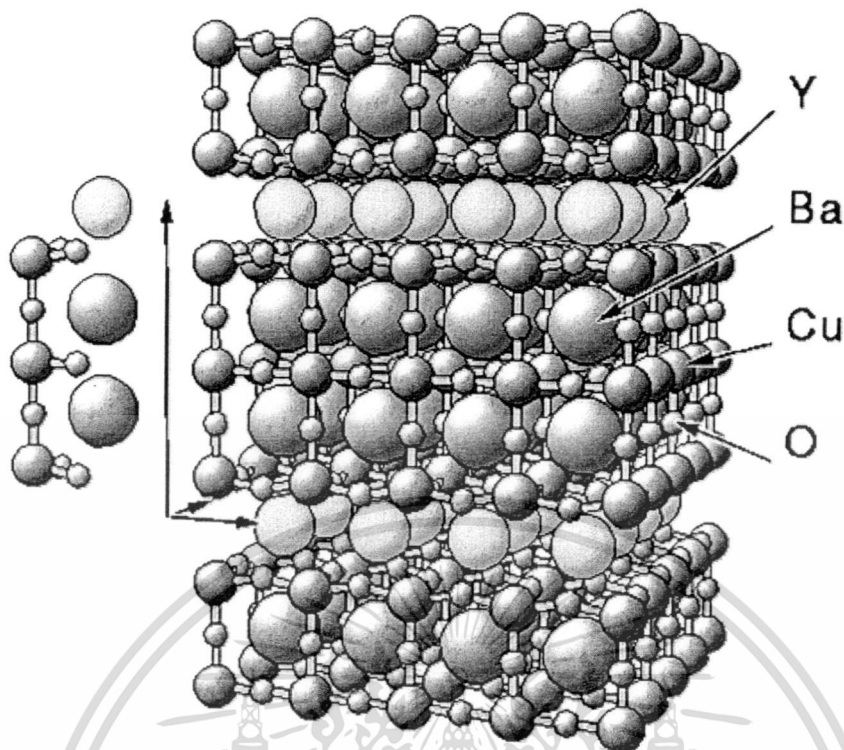


รูปที่ 2.7 โครงสร้างของเครื่องดักจับก๊าซ (www.figaro.co.jp)

หลักการทำงาน คือ เมื่อโลหะออกไซด์ ( $\text{SnO}_2:\text{CuO}$ ) ถูกให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่ออกซิเจนจะดูดซับบนพื้นผิวผลึก ซึ่งมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็นกลาง ดังนั้น ตัวให้อิเล็กตรอนที่พื้นผิวผลึก จะถูกส่งไปที่ออกซิเจนที่ถูกดูดซับไว้ จึงทำให้ไฟฟ้าเคลื่อนที่นำอิเล็กตรอนออกมาได้มาก

2.4.3.3 นำไปทำตัวนำไฟฟ้าที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูง ( $\text{High-T}_c$  superconductors) เนื่องจากคอปเปอร์ออกไซด์ เป็นตัวนำไฟฟ้าที่มีอุณหภูมิสูงถึง 130 องศาเคลวิน ซึ่งมีระยะทางโดยประมาณเป็นครึ่งหนึ่ง ระหว่างอุณหภูมิห้อง กับ อุณหภูมิศูนย์สัมบูรณ์ สารตัวนำไฟฟ้าที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงนี้ สามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นรูปไฟฟ้าได้ รูปที่ 2.8 แสดงตัวอย่างโครงสร้างผลึกของสารประกอบคอปเปอร์ออกไซด์ ที่เป็นตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



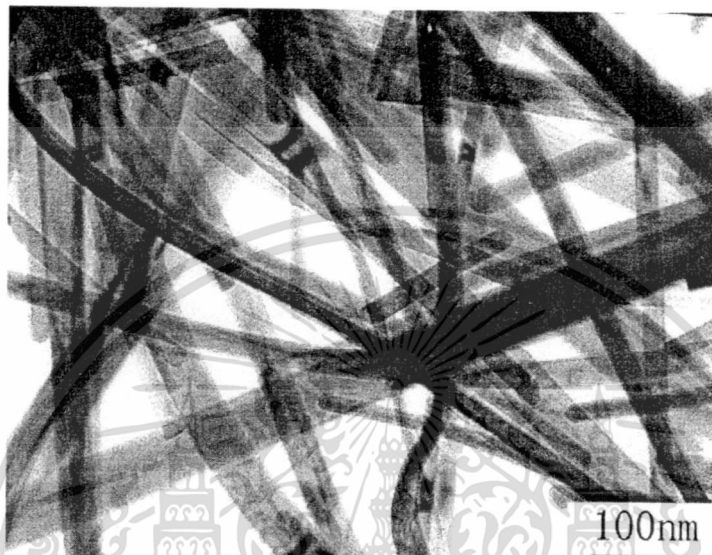
รูปที่ 2.8 โครงสร้างผลึกของตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  (.3) lattice  
([www.fhi-berlin.mpg.de/th/personal/hermann/YBaCuO.gif](http://www.fhi-berlin.mpg.de/th/personal/hermann/YBaCuO.gif))

#### 2.4.4 เทคนิคการสังเคราะห์ (Technique of Synthesis)

##### 2.4.4.1 เทคนิคการสลายตัวทางความร้อน (Thermal Decomposition) โดยมีสารประกอบโลหะ (Metal compound) เป็น Precursors

ในปี ค.ศ. 2002 Congkang Xu, และคณะ (Xu 2002) ศึกษาการเตรียมและสมบัติของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO nanorods) ด้วยเทคนิคการสลายตัวทางความร้อน (Thermal Decomposition) โดยการใช้ซิงค์อะซิโตนอะซิโตน (ZnC<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) เป็น Precursors เตรียมจากนำซิงค์อะซิเตด (Zn(CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O) และกรดออกซาลิก (H<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O) มาผสมกับโนนิลฟีนีลอีเทอร์ (Nonyl Phenyl ether) ซึ่งทำหน้าที่เป็น Surfactant จากนั้นนำไปอบ ที่อุณหภูมิ 50 ถึง 60 องศาเซลเซียส นาน 6 ชั่วโมง เมื่ออบเสร็จแล้วจะได้ ซิงค์อะซิโตนอะซิโตน (ZnC<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) ซึ่งใช้เป็น Precursors ในการเตรียมแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO nanorods) หลังจากนั้นนำซิงค์อะซิโตนอะซิโตน (ZnC<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) ที่เตรียมได้มาผสมกับโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) แล้วนำไปเผา ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง เมื่อเผาเสร็จแล้ว นำแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO nanorods) ที่ได้ไปล้างให้สะอาดด้วยน้ำกลั่น สารละลายเอทานอล และสารละลายเอทิลอีเทอร์ ตามลำดับ จากนั้นนำไปแยกแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO nanorods) ออกด้วยเอกซานีนเป็นเอกซานีนที่สวมน้ำสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

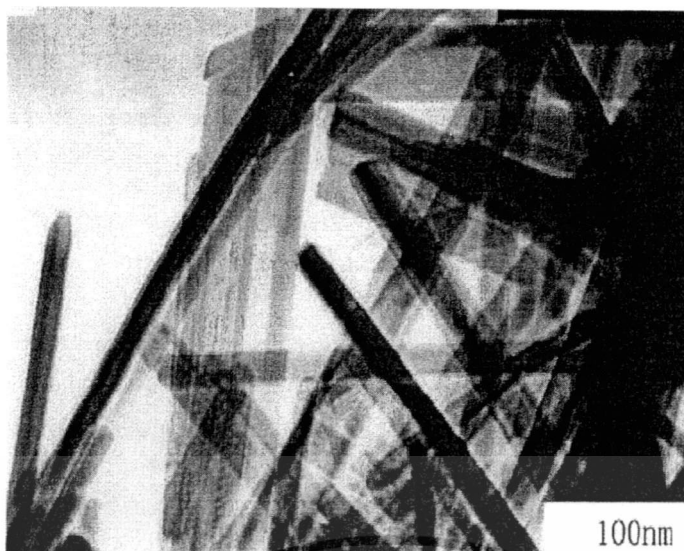
อ่างอัลตราโซนิก (Ultrasonic bath) จากนั้นนำไปทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TEM พบว่าแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO nanorods) ที่ได้ มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 ถึง 60 นาโนเมตร และมีความยาว 1 ถึง 3 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 2.9 โดยลักษณะของการเกิดแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO nanorods) นั้นเป็นแบบ Vapor - Solid Growth Mechanism (VS)



รูปที่ 2.9 แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO nanorods) (Xu 2002)

ในปีเดียวกัน Congkang Xu. และคณะ (Xu 2002) ได้ศึกษาการเตรียมและสมบัติของแท่งนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO nanorods) ด้วยเทคนิคการสลายตัวทางความร้อน (Thermal Decomposition) โดยการใช้คอปเปอร์อะซิโตนอะซิโตนเตตระไฮไดรเอต ( $\text{CuC}_2\text{O}_4$ ) เป็น Precursors โดยจะเปลี่ยนสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมจากซิงค์อะซิเตต ( $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) เป็นคอปเปอร์อะซิเตต ( $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) และเมื่อนำไปทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TEM จะพบว่าแท่งนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO nanorods) ที่ได้นั้น มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 30 ถึง 100 นาโนเมตร ดังรูปที่ 2.10 โดยลักษณะของการเกิดแท่งนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO nanorods) นั้นเป็นแบบ Vapor - Solid Growth Mechanism (VS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

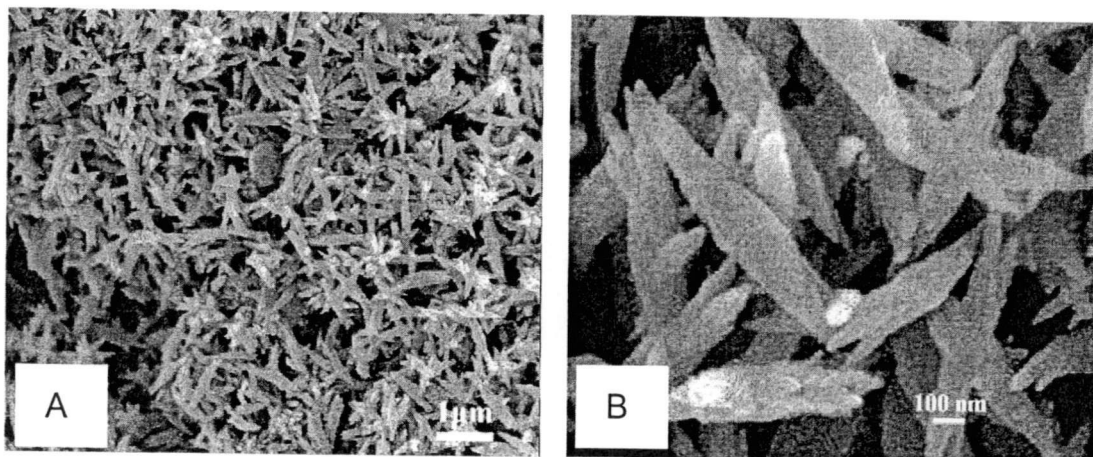


รูปที่ 2.10 แท่งนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO nanorods) (Xu 2002)

#### 2.4.4.2 เทคนิคการสลายตัวทางความร้อน (Hydrothermal Decomposition)

ในปี ค.ศ. 2003 Di Chen และคณะ (Chen 2003) ทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO nanoparticles) ด้วยเทคนิคการสลายตัวทางความร้อน โดยมีน้ำเป็นตัวกลาง (Media) สามารถเตรียมได้จากนาโนคอปเปอร์คลอไรด์ ( $\text{CuCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) มาผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) จะได้คอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ ( $\text{Cu}(\text{OH})_2$ ) นำไปทำการตกตะกอน (Centrifuged) จนกว่าปฏิกิริยาจะเกิดสมบูรณ์ ล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่นจนสะอาดแล้วนำตะกอนซึ่งกระจายตัวอยู่ในน้ำกลั่นไปปั่นควนนาน 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นเทลงใน Teflon line autoclave นำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 10 ชั่วโมง ก็จะมีผงสีดำเกิดขึ้น ซึ่งก็คือ คอปเปอร์ออกไซด์อนุภาคนาโน จากนั้นทำการแยกผงสีดำที่เกิดขึ้นออก ล้างให้สะอาดด้วยน้ำกลั่น และนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง เมื่อนำไปศึกษาลักษณะของคอปเปอร์ออกไซด์ที่ได้ด้วยเทคนิค FE-SEM พบว่า รูปร่างของคอปเปอร์ออกไซด์ที่ได้นั้น มีรูปร่างที่ใกล้เคียงกัน คือเป็นลักษณะ Shuttle-like และมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

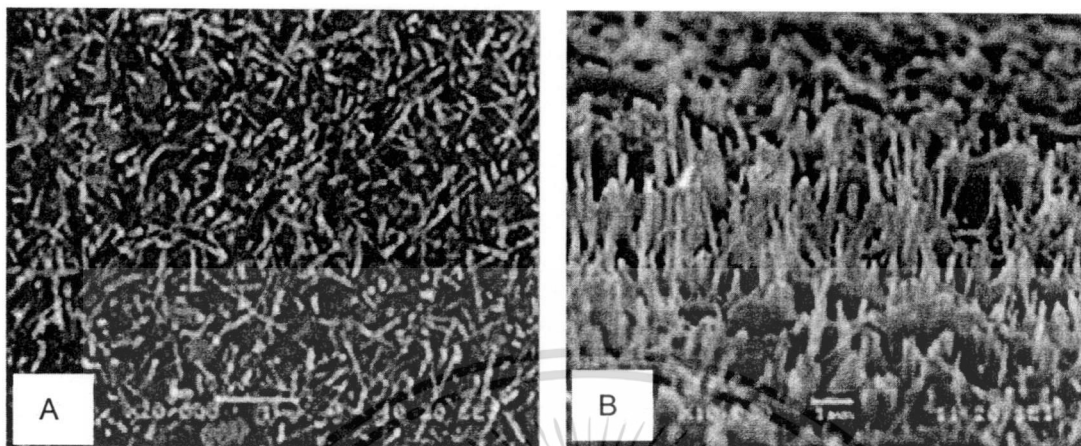


รูปที่ 2.11 A) และ B) แสดงอนุภาคนาโนของคอปเปอร์ออกไซด์ที่เตรียมได้ มีลักษณะเป็น Shuttle-like (Chen 2003)

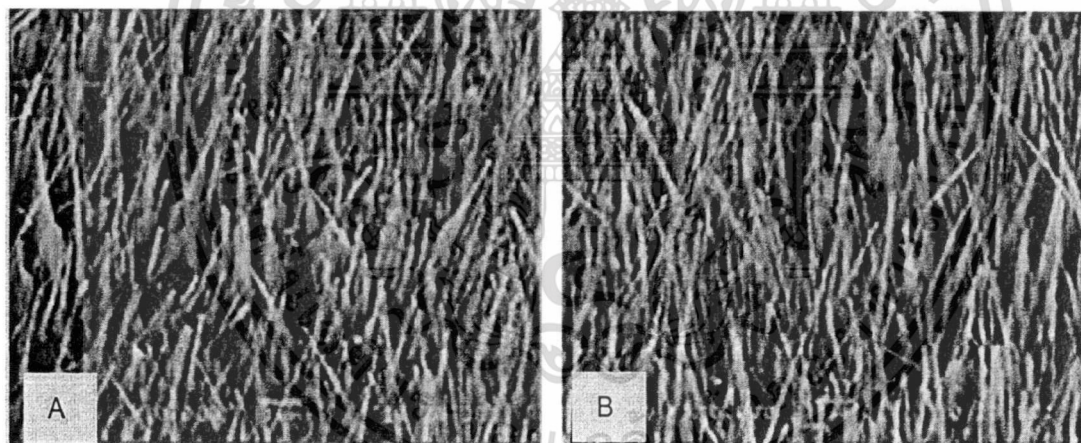
#### 2.4.4.3 เทคนิคออกซิเดชันทางความร้อน (Thermal oxidation)

ค.ศ. 2003 L.S. Huang และคณะ (Huang 2004) ได้สังเคราะห์เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO nanowires) ด้วยเทคนิคออกซิเดชันทางความร้อน (Thermal oxidation) ภายใต้สภาวะก๊าซออกซิเจน (Oxygen gas) โดยนำแผ่นทองแดงขนาดกว้าง 2 เซนติเมตร ยาว 2 เซนติเมตร ล้างให้สะอาดด้วยสารละลายเอทานอล (Ethanol) โดยใช้อ่างอัลตราโซนิค (Ultrasonic bath) นาน 5 นาที แล้วล้างอีกครั้งด้วยน้ำปราศจากไอออน ทำให้แห้งด้วยการเป่าก๊าซอาร์กอน จากนั้นนำแผ่นทองแดงที่เตรียมได้ไปวางบริเวณกึ่งกลางของควอตซ์ทิวบ์ (Quartz tube) จากนั้นจะทำการเผาที่อุณหภูมิประมาณ 300 ถึง 900 องศาเซลเซียส เมื่อเผาแล้วจะเกิดเป็นชั้นสีด่างบาง ๆ เกิดขึ้น ซึ่งก็คือ เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นบนแผ่นทองแดง จากการศึกษาพบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเผามีผลต่อการเกิดเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ทั้งขนาดและจำนวนที่เกิดขึ้น ดังนี้ ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส นาน 40 ชั่วโมง จะได้เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter) เท่ากับ 40 นาโนเมตร ยาว 1 ไมโครเมตร แต่ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่ได้นั้น มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 นาโนเมตร ดังรูปที่ 2.12 และเมื่ออุณหภูมิที่ใช้เผาเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ขนาดของเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่ได้ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลดลง ดังนี้ ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และ 600 องศาเซลเซียส เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 80 และ 70 นาโนเมตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.13 แต่ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส พบว่า เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่ได้นั้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 120 นาโนเมตร ซึ่งเป็นขนาดของเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์มีขนาดใหญ่ที่สุดที่สามารถสังเคราะห์ขึ้นได้ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.14 ดังนั้น ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส จึงเป็น

สภาวะที่เหมาะสมที่สุด ในการสังเคราะห์เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ เพื่อให้ได้เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุด



รูปที่ 2. 12 แสดงเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ A) เเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และ B) เเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส (Huang 2004)



รูปที่ 2. 13 เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ A) เเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และ B) เเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส (Huang 2004)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



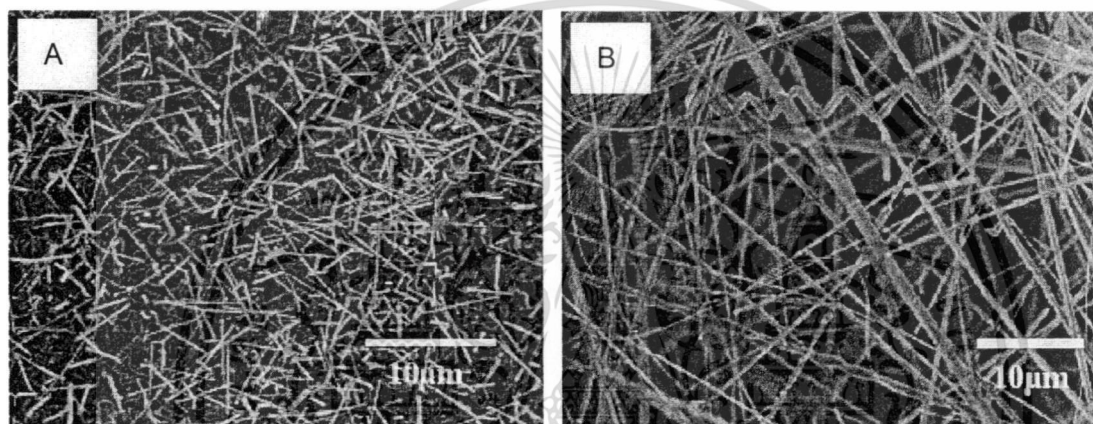
รูปที่ 2.14 เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์  
โดยเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส (Huang 2004)

ค.ศ. 2004 C.H. Xu และคณะ (Xu 2004) ศึกษาการสังเคราะห์เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO nanowires) ด้วยเทคนิคการเกิดออกซิเดชันทางความร้อน (Thermal oxidation) ทำการศึกษาโดย นำแผ่นทองแดงไปเผาที่อุณหภูมิ 400 ถึง 700 องศาเซลเซียส ในสถานะอากาศที่มีไอน้ำอยู่ โดยมีความดัน 1 บรรยากาศ นาน 4 ชั่วโมง เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นนั้น มีลักษณะแตกต่างกัน กล่าวคือ มีลักษณะที่เป็นเส้นตรง (Straight) และไม่เป็นเส้นตรง (Curved) โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) มีผลโดยตรงต่อเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ โดยเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นนั้น จะเกิดอยู่บริเวณบนพื้นผิวของแผ่นทองแดง ซึ่งจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 50 ถึง 400 นาโนเมตร และความยาว 1 ถึง 15 ไมโครเมตร จากรูปที่ 2.15 A) เมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส จะไม่มีเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์เกิดขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส รูปที่ 2.15 B) เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นนั้นมีลักษณะไม่เป็นเส้นตรง แต่เกิดขึ้นในปริมาณมาก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 50 ถึง 100 นาโนเมตร และยาวประมาณ 1 ถึง 3 ไมโครเมตร เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และ 600 องศาเซลเซียส พบว่า เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นนั้น มีลักษณะเป็นเส้นตรง เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่ได้ จากการเผาที่ 500 องศาเซลเซียส และ 600 องศาเซลเซียส จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 70 ถึง 200 นาโนเมตร และยาวประมาณ 1 ถึง 15 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 2.16 A) และ B) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

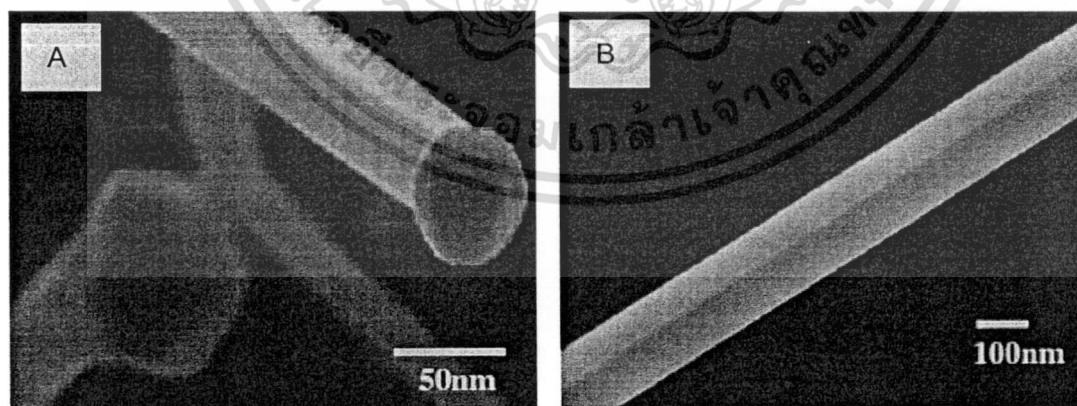


จากนั้นจะนำไปวิเคราะห์ลักษณะเส้นลวดนาโนทินออกไซด์ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของ Substrate ด้วย SEM ดังรูปที่ 2.17 A) และ B) ตามลำดับ โดยเส้นลวดนาโนทินออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$  nanowires) ที่ได้นั้นจะมีความยาวหลายร้อยไมโครเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 100 นาโนเมตร แต่ลักษณะของพื้นผิวของเส้นลวดนาโนทินออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$  nanowires) ที่ได้ จากการเกิดออกซิเดชันทางความร้อน โดยมีทองคำเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (ตัวอย่าง A) จะมีลักษณะเรียบมากกว่าพื้นผิวของเส้นลวดนาโนทินออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$  nanowires) ที่ไม่มีทองคำเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (ตัวอย่าง B) และบริเวณปลายของเส้นลวดนาโนทินออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$  nanowires) ของตัวอย่าง A มีลักษณะคล้ายหัวไม้ขีด แต่เส้นลวดนาโนทินออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$  nanowires) ของตัวอย่าง B มีลักษณะเป็นเส้นตรงตลอดทั้งเส้น ดังรูปที่ 2.18 A) และ B) ตามลำดับ



รูปที่ 2.17 แสดงลักษณะพื้นผิวที่มีเส้นลวดนาโนทินออกไซด์เกิดขึ้น

A) ตัวอย่าง A และ B) ตัวอย่าง B (Luo 2005)



รูปที่ 2.18 แสดงบริเวณปลายของเส้นลวดนาโนทินออกไซด์ที่ได้

A) ตัวอย่าง A และ B) ตัวอย่าง B (Luo 2005)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์และสถานะที่เหมาะสม ในการสังเคราะห์เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ ด้วยเทคนิคการออกซิเดชันทางความร้อน โดยเริ่มจากการเตรียมแผ่นคอปเปอร์ แล้วนำไปเผาที่สถานะที่เตรียมไว้จากนั้นนำไปศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค เพื่อศึกษาถึงอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เส้นใยนาโนคอปเปอร์ออกไซด์

#### 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1 กระจกบอขวด ขนาด 100 มิลลิลิตร
- 3.1.2 บีกเกอร์ ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 3.1.3 บีกเกอร์ ขนาด 50 มิลลิลิตร
- 3.1.4 กระจาดทรายเบอร์ 600 1000 และ 1200
- 3.1.5 ผงขัดอะลูมินา
- 3.1.6 ถ้วยอะลูมินา (Alumina crucible)
- 3.1.7 แท่งแก้วคนสาร
- 3.1.8 หลอดหยด
- 3.1.9 กระจกใส่น้ำกลั่น
- 3.1.10 ถุงมือ
- 3.1.11 เตาเผา รุ่น Vester furnaces
- 3.1.12 เครื่อง Ultrasonication ผลิตโดย บริษัท NDI รุ่น 136H
- 3.1.13 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) ยี่ห้อ LEO รุ่น 1455 VP บริษัท พรพล อินสตรูเมนต์ จำกัด

#### 3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1 ออกซิเจน ( $O_2$  21%) เกรด HP
- 3.2.2 แอซิโตน ( $CH_3COCH_3$ ) ผลิตโดย บริษัท Carlo eaba เกรด reagent
- 3.2.3 กรดไนตริก ( $HNO_3$ ) ผลิตโดยบริษัท Lab-scan เกรด analytical
- 3.2.4 แผ่นคอปเปอร์ขนาด 10 X 10 ตารางมิลลิเมตร

#### 3.2.5 น้ำกลั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 กระบวนการเตรียมกรดไนตริกเจือจาง

ตวงน้ำกลั่นมา 130 มิลลิลิตร เติมกรดไนตริกลงไป 10 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันจะได้ความเข้มข้นของสารละลายกรดไนตริก 0.05 โมลต่อลิตร หลังจากนั้นเก็บไว้เพื่อนำไปล้างแผ่นคอปเปอร์

### 3.4 กระบวนการเตรียมแผ่นคอปเปอร์

ทำการเตรียมแผ่นคอปเปอร์ โดยนำแผ่นคอปเปอร์มาขัดโดยใช้กระดาษทรายเบอร์ 400 ขัดจนเหมือนเลขแปด จนพื้นผิวมีลักษณะเรียบเสมอกัน จากนั้นใช้กระดาษทรายเบอร์ 1000 ขัดจนเงาแล้วตามด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1200 เมื่อขัดเสร็จแล้วก็ใช้ผงอะลูมินาขัดจนเงา จากนั้นตัดแผ่นคอปเปอร์ให้มีความกว้าง 10 มิลลิเมตร ยาว 10 มิลลิเมตร แล้วนำไปล้างด้วยสารละลายกรดไนตริกที่เจือจาง ให้สะอาดเพื่อไล่ออกไซด์ที่พื้นผิว และเป็นการกำจัดสิ่งสกปรกบริเวณพื้นผิวแผ่นคอปเปอร์ออก แล้วนำแผ่นคอปเปอร์ที่ล้างด้วยสารละลายกรดไนตริกจนสะอาดแล้วไปทำอัลตราโซนิก (Ultrasonication) ในสารละลายเอซิโตนนาน 5 นาที เพื่อกำจัดไอออนต่างๆ ที่อยู่บริเวณพื้นผิวออก ก็จะได้แผ่นคอปเปอร์ที่บริสุทธิ์



รูปที่ 3.1 เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonication)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

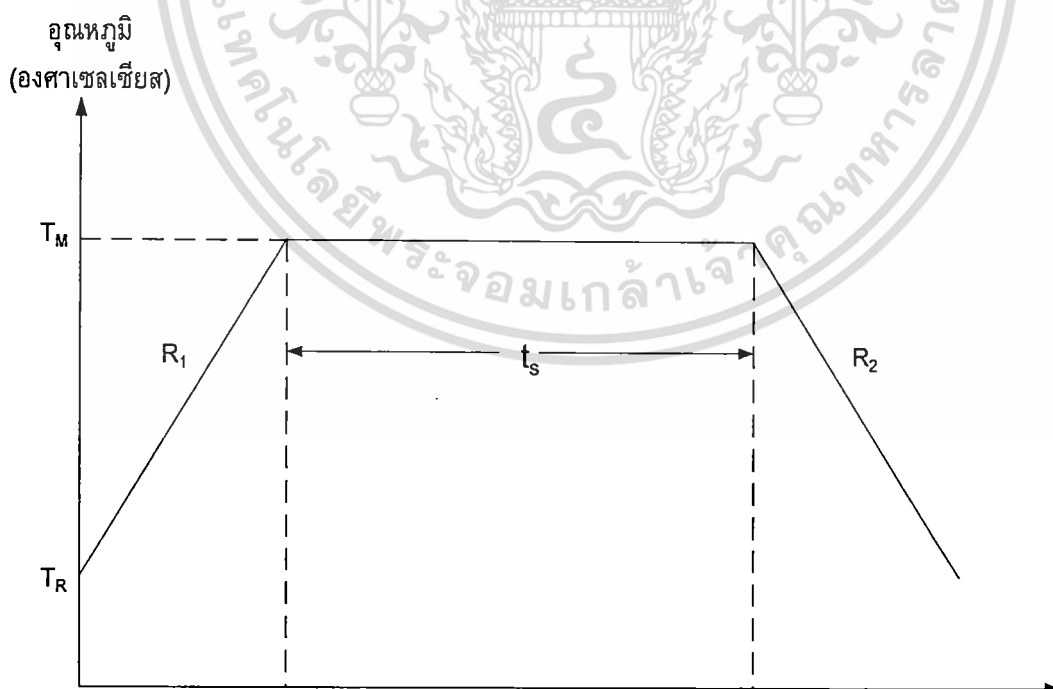
### 3.5 กระบวนการเผาแผ่นคอปเปอร์

#### 3.5.1 การเผาแผ่นคอปเปอร์โดยใช้สภาวะที่ต่างกัน

นำแผ่นคอปเปอร์ที่เตรียมเสร็จแล้วใส่ลงในถ้วยอะลูมินานำไปเผาแคลไซน์ โดยทำการเผาในบรรยากาศออกซิเจน อากาศและออกซิเจน และ โนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง และมีการให้ความร้อนด้วยอัตราการให้ความร้อน 6 องศาเซลเซียสต่อนาที จากนั้นจึงนำแผ่นคอปเปอร์ที่ได้ ไปตรวจสอบการเกิดเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จะทำให้ทราบอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเกิดเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์

#### 3.5.2 การเผาแผ่นคอปเปอร์โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแล้วให้เวลาคงที่

นำแผ่นคอปเปอร์ที่เตรียมเสร็จแล้วใส่ลงในถ้วยอะลูมินานำไปเผาแคลไซน์ โดยทำการเผาในบรรยากาศออกซิเจนที่อุณหภูมิ 400 ถึง 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมงและมีการให้ความร้อนด้วยอัตราการให้ความร้อน 6 องศาเซลเซียสต่อนาที (รูปที่ 3.2) เพื่อให้เกิดการออกซิเดชันที่สมบูรณ์ จากนั้นจึงนำแผ่นคอปเปอร์ที่ได้ไปตรวจสอบการเกิดเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะทำให้ทราบอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเกิดเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์



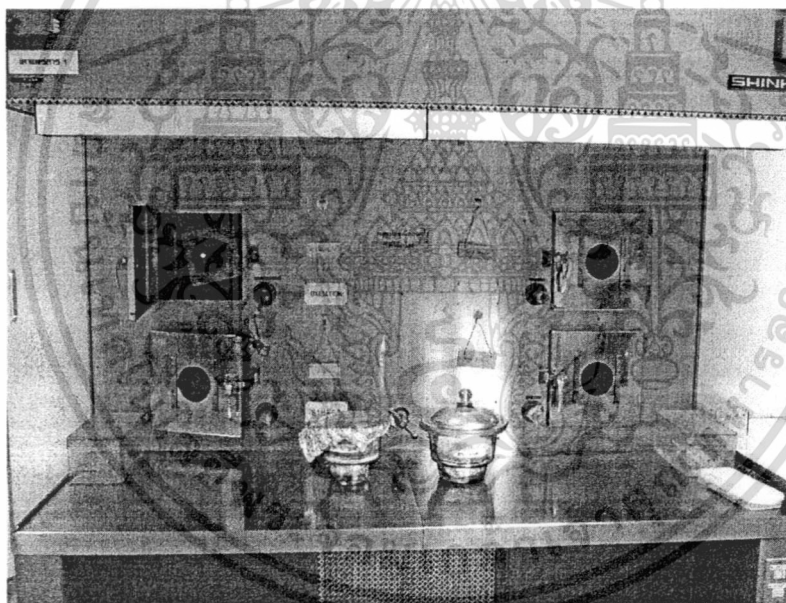
รูปที่ 3.2 แผนผังการเผาแคลไซน์ของแผ่นคอปเปอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	$T_M$	คือ	อุณหภูมิแคลไซน์
	$T_R$	คือ	อุณหภูมิห้องประมาณ 25 ถึง 30 องศาเซลเซียส
	$t_s$	คือ	ระยะเวลาเผาแซ่
	$R_1$	คือ	อัตราการเพิ่มขึ้นของ
	$R_2$	คือ	อัตราการลดลงของอุณหภูมิ

### 3.5.3 การเผาแผ่นคอปเปอร์โดยเปลี่ยนแปลงเวลาแล้วให้อุณหภูมิคงที่

นำแผ่นคอปเปอร์ที่เตรียมเสร็จแล้วใส่ลงในถ้วยอะลูมินาเข้าไปเผาแคลไซน์ ในสภาวะออกซิเจน ที่อุณหภูมิที่เตรียมได้จากวิธี 3.5.1 เผาแซ่ไว้ 15 และ 30 นาที และให้ความร้อนด้วยอัตราการให้ความร้อน 6 องศาเซลเซียสต่อนาที จากนั้นจึงนำแผ่นคอปเปอร์ที่ได้ไปตรวจสอบลักษณะการเกิดเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ก็จะทราบเวลาที่เหมาะสมในการเกิดเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์



รูปที่ 3.3 เตาเผา รุ่น Vester furnaces

### 3.6 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

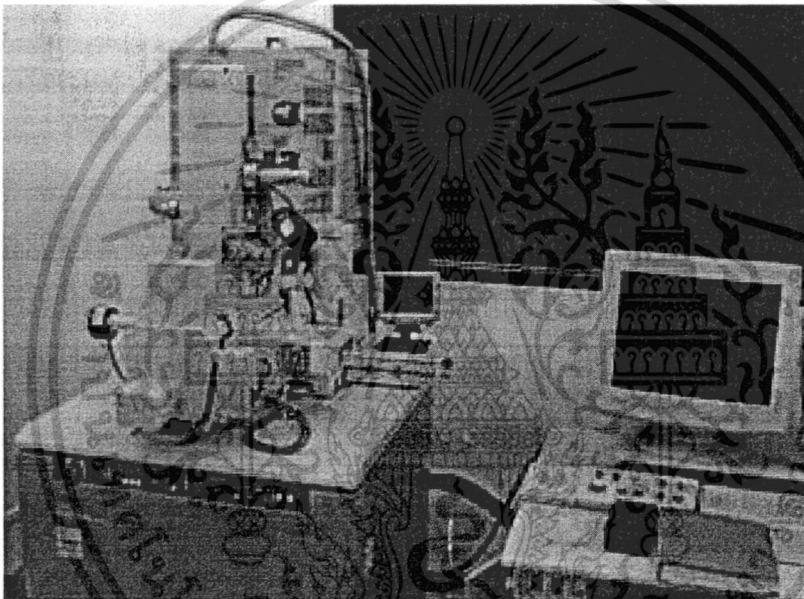
สำหรับการศึกษาโครงสร้างจุลภาคนั้น สามารถทำได้โดยการนำแผ่นคอปเปอร์ที่ผ่านการเผาแล้ว ด้วยเงื่อนไขของอุณหภูมิที่แตกต่างกัน มาตรวจสอบด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยนำสารตัวอย่างไปใส่ไว้ในช่องใส่สารตัวอย่าง ของกล้อง SEM หลักการทำงาน เกิดจากการที่ Primary electron วิ่งไปกระทบพื้นผิวของวัตถุ ทำให้มีการสะท้อนกลับของพลังงานในรูปแบบต่างๆ เช่น back-scatter electron X-ray หรือ Secondary electron เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

electron เป็นต้น และภายในกล้อง SEM จะมีตัวรับสัญญาณ ทำหน้าที่รับและเปลี่ยน Secondary electron ให้เป็น Electrical signal แล้วส่งสัญญาณไปยังจอภาพ (Cathode ray tube) เพื่อทำให้เกิดภาพที่ตามองเห็นได้ โดยภาพที่ออกมาจะเป็นลักษณะ 3 มิติ จากนั้นจะบันทึกภาพลง Photographic

ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน

3.6.1 นำแผ่นคอปเปอร์ที่เผาแล้ว ไปติดบนแท่งทองเหลือง (stub) ด้วยเทปกาวยสองหน้า โดยจัดให้บริเวณที่เป็นลักษณะของผิวหน้า วางตัวอยู่ในแนวที่เหมาะสมแก่การตรวจสอบ

3.6.2 นำชิ้นงานที่เตรียมได้ ไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด (SEM) เพื่อทำการศึกษาลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ได้ต่อไป



รูปที่ 3.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

### 3.7 การหาขนาดเกรนด้วยวิธี Mean Lineal Intercept Method

วิธีการหาขนาดเกรนด้วย Mean Lineal Intercept หรือ Heyn's technique นั้นเป็นมาตรฐานที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยเส้นตรงเฉลี่ยนี้เกิดจากการลากเส้นตรงผ่านเกรน โดยจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรน

สามารถหาได้โดย การลากเส้นตรงแบบสุ่มผ่านเกรน แล้วนับจำนวนขอบเกรนที่เส้นตรงนั้นตัดผ่าน และสามารถคำนวณหาได้จากสมการ

$$\bar{L}_L = \frac{1}{N_L} = \frac{L_T}{PM}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย	$N_L$	คือ	จำนวนจุดตัด ต่อ ระยะทางรวมของเส้นที่ขีดผ่าน ( $L_T$ )
	P	คือ	จำนวนของจุดที่ผ่านเกรน
	M	คือ	กำลังขยาย

มาตรฐาน ASTM E 112-88

1. กำลังขยาย

เส้นตรงที่ลากผ่านควรใช้กำลังขยายที่สามารถเกิดจุดตัดได้มากกว่า 50 จุดตัด หากไม่สามารถใช้กำลังขยายที่สามารถเกินจุดตัด 50 จุดได้ให้เพิ่มจำนวนเส้นตรงที่ลากผ่านแทน

2. วิธีการนับจุดตัด

จุดตัด คือ ส่วนของเส้นตรงที่ลากผ่าน 1 เกรน

นับ 1 สำหรับจุดตัดแต่ละจุดและ ½ สำหรับเส้นตรงที่ลากตรงเกรนพอดี

นับ 1 สำหรับจุดตัดที่ผ่านขอบเกรนพอดี

นับ 1 สำหรับจุดตัดที่ตัดแล้วทำมุม

นับ ½ สำหรับจุดตัดที่ตกตรงขอบเกรนพอดี

นับ ½ สำหรับจุดตัดที่ตกตรงสามแยก

3. สำหรับการลากเส้นควรลากเส้นอย่างน้อย 8-12 เส้น เพื่อความแม่นยำและลดความคลาดเคลื่อน

### 3.8 การหาอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง (Aspect ratio)

อัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง (Aspect ratio) นั้น สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\text{Aspect ratio} = \frac{L}{D}$$

โดย L = ความยาวเส้นลวดที่วัดได้

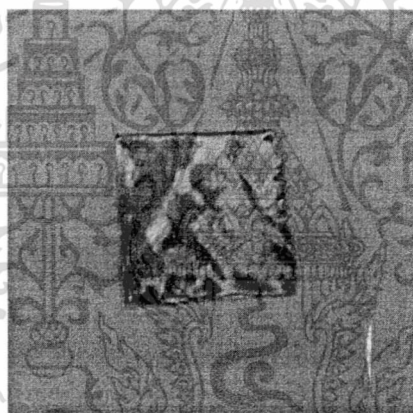
D = ความกว้างเส้นลวดที่วัดได้

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

ในบทนี้จะนำเสนอผลการทดลองที่ได้ จากการเตรียมเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ ด้วยเทคนิคออกซิเดชันทางความร้อน (Thermal oxidation) โดยการนำแผ่นคอปเปอร์ที่ได้ จากการเผาในสภาวะต่าง ๆ โดยการใช้เวลา และอุณหภูมิในการเผาแผ่นคอปเปอร์ที่แตกต่างกัน แบ่ง ออกเป็น ลักษณะทางกายภาพของแผ่นคอปเปอร์ที่เผาในสภาวะต่าง ๆ ดังนี้ ออกซิเจน อากาศ และออกซิเจน และไนโตรเจน ตามลำดับ และลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่ได้จากการส่องด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

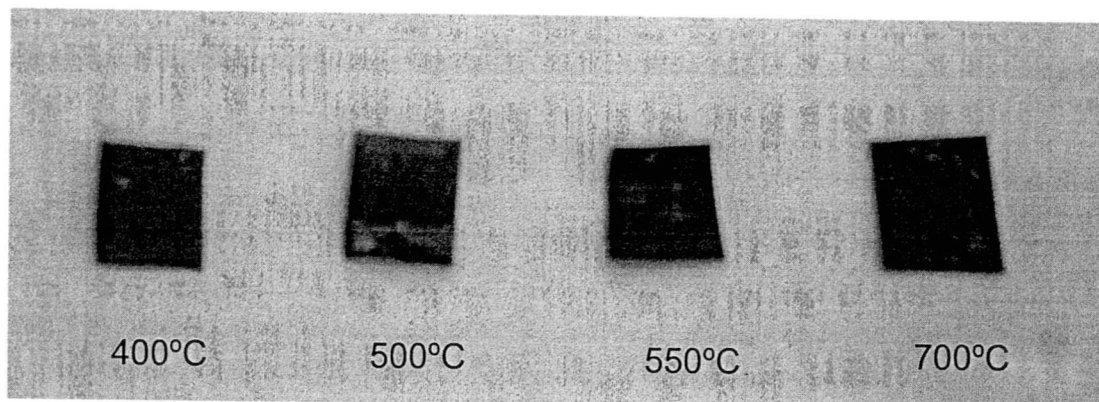
#### 4.1 ลักษณะทางกายภาพ



รูปที่ 4.1 แผ่นคอปเปอร์ที่จัดเสร็จแล้วก่อนนำไปเผา

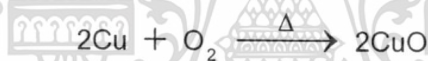
จากรูปที่ 4.1 แผ่นคอปเปอร์ที่ผ่านการจัดผิวหน้าออกแล้ว เพื่อกำจัดโลหะออกไซด์และสิ่งสกปรกที่อยู่บนพื้นผิวของแผ่นคอปเปอร์ เนื่องจากแผ่นคอปเปอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแผ่นคอปเปอร์ที่หาซื้อได้ตามท้องตลาดทั่วไป ไม่ใช่แผ่นคอปเปอร์บริสุทธิ์ จึงอาจมีโลหะออกไซด์อยู่บนพื้นผิวได้ จากนั้นจึงนำไปทำอัลตราโซนิกในเอซิโตน เพื่อกำจัดคราบไขมันที่ติดอยู่บนผิวของแผ่นคอปเปอร์ และกำจัดโลหะออกไซด์ให้หมด แผ่นคอปเปอร์ที่จัดเสร็จแล้วจะมีลักษณะ ดังรูปที่ 4.1 แผ่นคอปเปอร์ที่ได้จะเป็นสีทอง และมีพื้นผิวมันเงา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แผ่นคอปเปอร์หลังเผาในสภาวะออกซิเจน  
ที่อุณหภูมิ 400 ถึง 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.2 แสดงแผ่นคอปเปอร์ที่เผาในสภาวะของออกซิเจน เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ได้ผลดังนี้ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส แผ่นคอปเปอร์จะมีเขม่าสีดำติดอยู่ ซึ่งเขม่าที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง

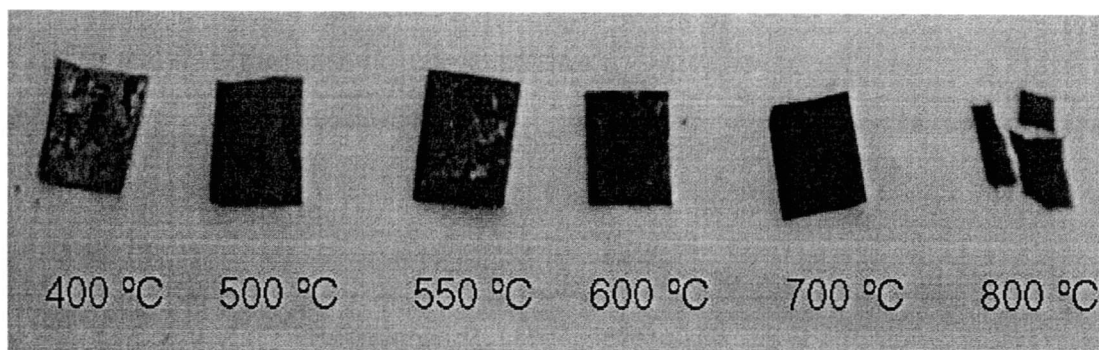


หรือ



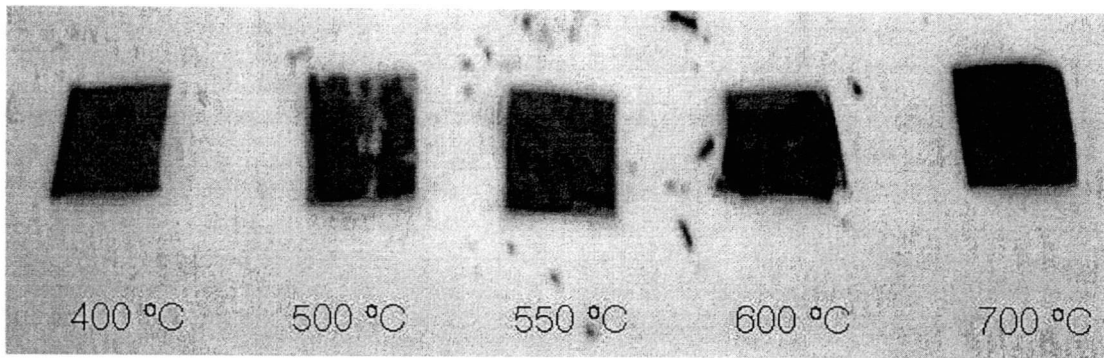
แต่เขม่าที่เกิดขึ้นนั้นเกิดไม่ทั่วทุกบริเวณ เนื่องจากแผ่นคอปเปอร์ มีพื้นผิวไม่เรียบ มีพื้นผิวที่ขรุขระ ชัดแผ่นคอปเปอร์ไม่สะอาด หรืออุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแผ่นคอปเปอร์ต่ำเกินไป ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส แผ่นคอปเปอร์จะมีเขม่าสีดำติดอยู่มากกว่าการเผาแผ่นคอปเปอร์ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เนื่องจากแผ่นคอปเปอร์มีพื้นผิวที่ขรุขระหรือชัดไม่สะอาด ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส แผ่นคอปเปอร์จะมีเขม่าสีดำติดอยู่มากกว่าที่อุณหภูมิ 500 และ 400 องศาเซลเซียส และเขม่าที่เกิดขึ้นนั้นจะกระจายอยู่ทุกบริเวณของพื้นผิวแผ่นคอปเปอร์ ขณะที่การเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส แผ่นคอปเปอร์จะมีเขม่าสีดำติดอยู่แต่มีเขม่าติดอยู่ไม่ทั่วทุกบริเวณ เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแผ่นคอปเปอร์สูงเกินไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แผ่นคอปเปอร์หลังเผา ในสภาวะอากาศและออกซิเจน  
ที่อุณหภูมิ 400 ถึง 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.3 แผ่นคอปเปอร์ที่ผ่านการเผาในสภาวะอากาศและออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 400 ถึง 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ได้ผลดังนี้ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีเขม่าสีเทาเกิดขึ้น เนื่องจากในสภาวะอากาศและออกซิเจน มีปริมาณออกซิเจนอยู่น้อย จึงทำให้ที่อุณหภูมิต่ำๆ ไม่เกิดเขม่าสีดำ แต่ในสภาวะออกซิเจนจะมีเขม่าสีดำเกิดขึ้น ตั้งแต่การเผาแผ่นคอปเปอร์ที่อุณหภูมิต่ำถึงอุณหภูมิสูง เนื่องจากในสภาวะออกซิเจน มีปริมาณออกซิเจนมากกว่าปริมาณออกซิเจนในสภาวะอากาศและออกซิเจน โดยเขม่าที่ติดที่แผ่นคอปเปอร์นั้นมีปริมาณน้อย เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้อาจจะต่ำเกินไป หรือแผ่นคอปเปอร์มีพื้นผิวที่ขรุขระไม่เรียบเสมอกัน ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เกิดเขม่าสีเทาติดที่แผ่นคอปเปอร์อยู่ทุกบริเวณของพื้นผิวบนแผ่นคอปเปอร์ อาจเป็นเพราะอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาสูงขึ้น หรือจัดแผ่นคอปเปอร์ได้สะอาด ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส มีเขม่าสีเทาติดอยู่ที่แผ่นคอปเปอร์ แต่เขม่าไม่เกิดทุกบริเวณของพื้นผิวแผ่นคอปเปอร์ เนื่องจากอาจจัดแผ่นคอปเปอร์ไม่สะอาด และเขม่าที่เกิดขึ้นมีความแข็งแรงต่ำ สามารถสังเกตได้จากเมื่อเอามือไปจับเขม่าที่เกิดขึ้นก็จะทำให้เกิดการแตกหักได้ ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เขม่ามีสีเทาเข้มเกือบดำ และมีเขม่าติดอยู่ทุกบริเวณบนแผ่นคอปเปอร์ แต่เขม่าที่เกิดขึ้นมีความแข็งแรงต่ำ สังเกตได้จากเอามือไปจับเขม่าก็แตก ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เขม่าที่เกิดขึ้นมีสีดำ และมีเขม่าติดอยู่ทุกบริเวณบนแผ่นคอปเปอร์ ซึ่งอาจจะเกิดจากการใช้อุณหภูมิสูงในการเผาแผ่นคอปเปอร์ ส่วนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เกิดเขม่าสีเทา และเขม่าที่เกิดขึ้นมีความแข็งแรงต่ำเปราะ แตกหักได้ง่าย สามารถสังเกตได้จาก เอามือไปจับเขม่าที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวแผ่นคอปเปอร์ก็จะทำให้เขม่าเกิดการแตกหักได้



รูปที่ 4.4 แผ่นคอปเปอร์หลังเผา ในสภาวะไนโตรเจน  
ที่อุณหภูมิ 400 ถึง 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.4 แสดงแผ่นคอปเปอร์ เมื่อผ่านการเผาในบรรยากาศของไนโตรเจน เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ได้ผลดังนี้ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เกิดเขม่าสีเทาติดที่แผ่นคอปเปอร์อยู่ทุกบริเวณของพื้นผิวบนแผ่นคอปเปอร์ อาจจะเป็นเพราะแผ่นคอปเปอร์ได้สะอาด ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เกิดเขม่าสีเทาติดที่แผ่นคอปเปอร์ แต่เขม่าที่เกิดขึ้นนั้น ติดอยู่บนแผ่นคอปเปอร์เป็นบางบริเวณ และเขม่าที่เกิดขึ้นนั้นมีความแข็งแรงน้อย เพราะ เกิดการแตกหักได้ง่าย สามารถสังเกตได้จากเอามือไปจับแผ่นคอปเปอร์เขม่าก็แตก ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส มีเขม่าสีเทาติดอยู่ที่แผ่นคอปเปอร์ แต่เขม่าเกิดขึ้นบนแผ่นคอปเปอร์เป็นบางบริเวณ อาจจะเป็นผลมาจาก การขัดแผ่นคอปเปอร์ที่ไม่สะอาด และเขม่ามีความแข็งแรงน้อย เพราะ เกิดการแตกหักได้ง่าย ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เกิดเขม่าสีเทาขึ้นบนแผ่นคอปเปอร์เป็นบางบริเวณ และเขม่ามีความแข็งแรงน้อย เพราะ เกิดการแตกหักได้ง่าย และที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เขม่าที่เกิดขึ้นจะมีสีเทาเข้ม และเกิดขึ้นทั่วทุกบริเวณบนแผ่นคอปเปอร์ เนื่องจากใช้อุณหภูมิในการเผาแผ่นคอปเปอร์สูง และสามารถขัดแผ่นคอปเปอร์ได้สะอาด การนำแผ่นคอปเปอร์ไปเผาในสภาวะไนโตรเจนนี้ จะเกิดเขม่าที่มีสีอ่อนกว่าเขม่าที่เกิดขึ้นบนแผ่นคอปเปอร์ที่เผาในสภาวะออกซิเจน และสภาวะอากาศและออกซิเจน เนื่องมาจากในสภาวะไนโตรเจนนั้น ไม่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบอยู่ จึงไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างออกซิเจนกับคอปเปอร์ที่บริเวณพื้นผิวแผ่นคอปเปอร์ได้ ดังนั้น ลักษณะทางกายภาพที่สามารถสังเกตได้อย่างชัดเจน คือ สีของเขม่าที่เกิดขึ้นบนแผ่นคอปเปอร์ที่เผาในสภาวะไนโตรเจนนี้ จะมีสีอ่อนกว่าการเผาในสภาวะออกซิเจน และการเผาในสภาวะอากาศและออกซิเจน ดังรูปที่ 4.4

## 4.2 ผลจากการทดสอบทางสัณฐานวิทยา

### 4.2.1 ผลของสภาวะที่ใช้ในการเผาแผ่นคอปเปอร์

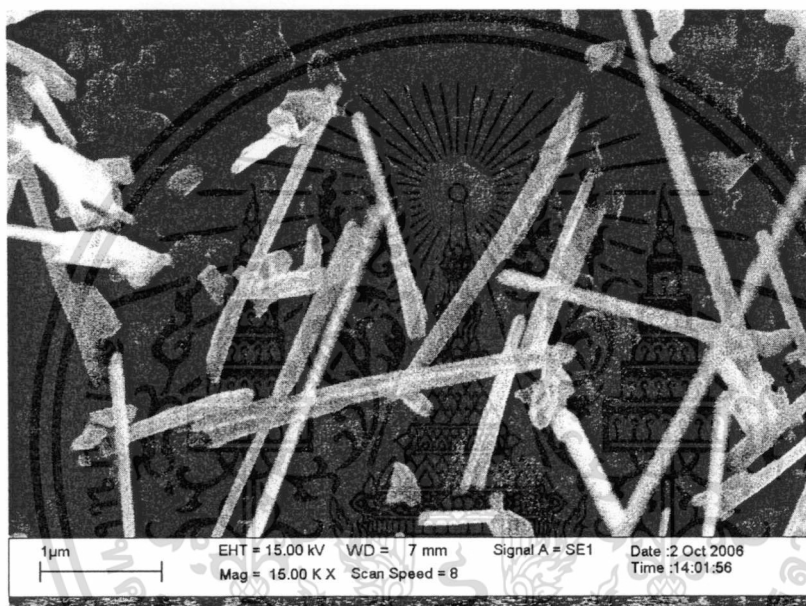


รูปที่ 4.5 เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่สังเคราะห์จากการเผาในสภาวะออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.5 แสดงเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ เผาในสภาวะออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ได้ผลดังนี้ เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นมีความกว้างเฉลี่ย 57.36 นาโนเมตร ความยาวเฉลี่ย 2.47 ไมโครเมตร และมีค่า Aspect ratio เท่ากับ 45.38 การเกิดเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์จะเกิดขึ้นอยู่ทั่วทุกบริเวณ โดยมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.01 ล้านเส้นต่อตารางมิลลิเมตร เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวแผ่นคอปเปอร์ เกิดขึ้นจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างคอปเปอร์กับออกซิเจนและเมื่อได้รับพลังงานอย่างคงที่ เนื่องจากมีการให้ความร้อนนาน 4 ชั่วโมง ส่งผลให้เกิดการโตของเกรน (Grain growth) บริเวณพื้นผิวของแผ่นคอปเปอร์ขึ้น โดยขนาดของเกรนจะขยายตัวออกทุกทิศทุกทาง เมื่อแต่ละเกรนไม่สามารถขยายตัวได้อีกก็จะเกิดขึ้นเป็นลักษณะแท่ง (rod) และเกิดเป็นเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ขึ้นอีกทั้งลักษณะการเกิดเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์นี้ สามารถเกิดขึ้นได้ทั่วทุกบริเวณนั้น อาจจะเป็นผลมาจากการที่ทุกบริเวณของพื้นผิวแผ่นคอปเปอร์นั้น มีออกซิเจนเข้าไปทำปฏิกิริยากับคอปเปอร์ในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน จึงทำให้ทุกบริเวณบนพื้นผิวของแผ่นคอปเปอร์ มีโอกาสในการเกิดเส้นลวดนาโนคอปเปอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกไซด์ใกล้เคียงกัน หรืออาจจะเป็นผลมาจากการเตรียมแผ่นคอปเปอร์ที่สามารถกำจัดโลหะออกไซด์ หรือสิ่งสกปรกออกจากพื้นผิวได้สะอาด และมีพื้นผิวที่เรียบไม่ขรุขระ ทำให้ออกซิเจนที่มีอยู่นั้น สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดี ดังนั้น เมื่อนำไปทดสอบทางสัณฐานวิทยาพบว่า มีเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์เกิดขึ้นทุกบริเวณของพื้นผิวแผ่นคอปเปอร์ แต่เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์มีขนาด และความยาวที่แตกต่างกัน อาจเกิดจากการจัดเรียงตัวของโครงสร้างภายในของแผ่นคอปเปอร์นั้น มีโครงสร้างของธาตุหรือโลหะชนิดอื่นแทรกอยู่ภายในโครงสร้างของคอปเปอร์ จึงทำให้เมื่อเกิดเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์แล้ว มีขนาดและความยาวแตกต่างกัน



รูปที่ 4.6 เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่สังเคราะห์

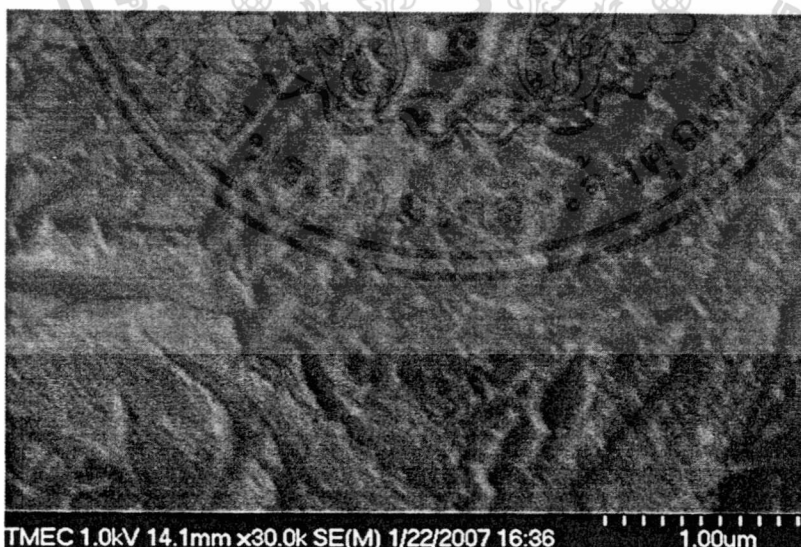
จากการเผาในสภาวะอากาศและออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.6 เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ เผาในสภาวะอากาศและออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ได้ผลดังนี้ เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นมีขนาดเส้นที่ใหญ่ มีความกว้างเฉลี่ย 115.26 นาโนเมตร ความยาวเฉลี่ย 2.37 ไมโครเมตรและมีค่า Aspect ratio เท่ากับ 20.86 จากรูปที่ 4.6 พบว่าลักษณะการเกิดของเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์นั้นเกิดกระจุกกระจายไปทั่วทุกบริเวณของพื้นผิวคอปเปอร์ ความหนาแน่นของเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ มีค่าเท่ากับ 0.59 ล้านเส้นต่อตารางมิลลิเมตร ในสภาวะอากาศและออกซิเจนนี้มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบอยู่ ซึ่งทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เกิดเป็นเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ได้ ดังรูปที่ 4.6 แต่เนื่องจากในสภาวะอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และออกซิเจนนี้ มีปริมาณออกซิเจนน้อยกว่าในสภาวะออกซิเจน จึงทำให้โอกาสที่จะเกิดเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ขึ้นที่บริเวณพื้นผิวของแผ่นคอปเปอร์นั้น มีน้อยกว่าการเกิดเส้นลวดคอปเปอร์ออกไซด์ในสภาวะออกซิเจน ซึ่งมีปริมาณออกซิเจนมากกว่า แต่การเกิดเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์นั้นเกิดได้ทั่วทุกบริเวณ เนื่องจากทุกบริเวณของแผ่นคอปเปอร์มีออกซิเจนเข้าไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชันในปริมาณใกล้เคียงกัน ลักษณะของเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้น มีขนาดและความยาวที่แตกต่างกัน อาจเกิดจากการจัดเรียงโครงสร้างภายในของคอปเปอร์ไม่สมบูรณ์ เนื่องจากแผ่นคอปเปอร์ที่ใช้ในการสังเคราะห์เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์นั้น ไม่ใช่แผ่นคอปเปอร์บริสุทธิ์ จึงอาจจะมีโครงสร้างของโลหะหรือธาตุชนิดอื่น เช่น สังกะสี เหล็ก แทรกอยู่ภายในโครงสร้างของแผ่นคอปเปอร์ ส่งผลให้ลักษณะของเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นนั้น จึงแตกต่างกันทั้งขนาดและความยาว

จากรูปที่ 4.7 แสดงลักษณะของแผ่นคอปเปอร์ที่เผาในสภาวะไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง ได้ผลดังนี้ คือ ไม่เกิดเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ เนื่องจากสภาวะที่ใช้จะไม่เหมาะสม กล่าวคือ ในการเกิดเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์นั้นสามารถเกิดขึ้นได้ จากการเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างคอปเปอร์กับออกซิเจน แต่ในสภาวะที่ใช้ในการเผาเป็นสภาวะไนโตรเจน ซึ่งไม่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบจึงไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับคอปเปอร์ แล้วเกิดเป็นเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ได้ ดังนั้น ลักษณะของพื้นผิวของแผ่นคอปเปอร์ที่ได้ จากการทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา จึงไม่พบเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์เกิดขึ้น



รูปที่ 4.7 ลักษณะของแผ่นคอปเปอร์ที่นำไปเผาในสภาวะไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

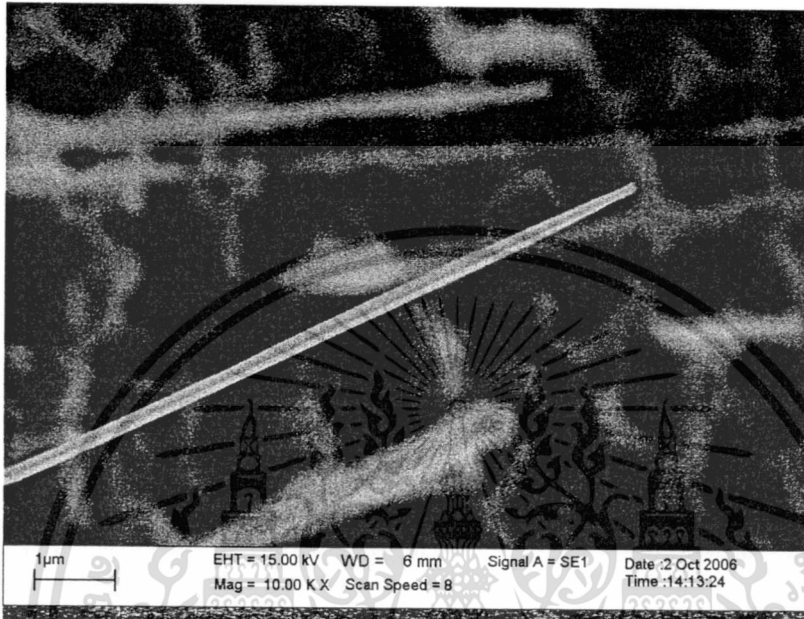
เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้น บริเวณพื้นผิวของแผ่นคอปเปอร์นั้น เกิดขึ้นจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) ระหว่างออกซิเจนกับแผ่นคอปเปอร์เมื่อได้รับความร้อน (ขณะที่ทำการเผา) ในสภาวะออกซิเจน และสภาวะอากาศและออกซิเจน แต่ถ้านำแผ่นคอปเปอร์ไปเผาในสภาวะไนโตรเจน จึงทำให้ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เกิดเป็นเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ได้ ดังนั้น เมื่อนำแผ่นคอปเปอร์ที่เผาในสภาวะไนโตรเจน ไปตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จึงไม่มีเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์เกิดขึ้น ซึ่งแตกต่างจากการนำแผ่นคอปเปอร์ที่เผาในสภาวะออกซิเจน และในสภาวะอากาศและออกซิเจน กล่าวคือ เมื่อนำแผ่นคอปเปอร์ที่เผาในสภาวะทั้งสองไปตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา จะพบว่าไม่มีเส้นลวดคอปเปอร์ออกไซด์เกิดขึ้นที่บริเวณพื้นผิวของแผ่นคอปเปอร์ ทั้งนี้เป็นผลจากทั้งสองสภาวะนี้มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบอยู่ จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นได้แต่ทั้งสองสภาวะนี้มีปริมาณออกซิเจนที่แตกต่างกัน โอกาสในการเกิดเส้นลวดคอปเปอร์ออกไซด์จึงแตกต่างกันด้วย ทั้งนี้เป็นผลมาจากโอกาสในการเกิดเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์บนพื้นผิวแผ่นคอปเปอร์ ขึ้นอยู่กับปริมาณออกซิเจนที่สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับคอปเปอร์ได้ ดังนั้น การนำแผ่นคอปเปอร์ไปเผาในสภาวะออกซิเจน จึงมีโอกาสเกิดเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ มากกว่าการนำไปเผาในสภาวะอากาศและออกซิเจน และสภาวะไนโตรเจน แล้วเมื่อนำไปแผ่นคอปเปอร์ที่ได้จากการเผาในสภาวะต่างๆ ไปตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา จะพบว่า แผ่นคอปเปอร์ที่นำไปเผาในสภาวะออกซิเจน มีความหนาแน่นมากที่สุด เท่ากับ 1.01 ล้านเส้นต่อตารางมิลลิเมตร รองลงมา คือ สภาวะอากาศและออกซิเจน เท่ากับ 0.58 ล้านเส้นต่อตารางมิลลิเมตร และสภาวะไนโตรเจนไม่มีเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์เกิดขึ้น ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าความหนาแน่นของแต่ละสภาวะที่ใช้ในการเผาแผ่นคอปเปอร์

สภาวะที่ใช้ในการเผาแผ่นคอปเปอร์	ความหนาแน่น (ล้านเส้นต่อตารางมิลลิเมตร)
ออกซิเจน	1.01
อากาศและออกซิเจน	0.58
ไนโตรเจน	0

ลักษณะของเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้น มีขนาดเล็กและเรียวยาว ปลายแหลมคล้ายเข็มเย็บผ้า ลักษณะทั่วไปของเส้นลวดนาโนของโลหะออกไซด์ชนิดอื่น ๆ ที่เกิดขึ้น เช่น ซิงค์ออกไซด์ แมงกานีสออกไซด์ เป็นต้น จะมีลักษณะกลม แต่เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้นี้ มีลักษณะเป็นเหลี่ยม ดังรูปที่ 4.8 อาจจะเป็นผลมาจากโครงสร้างของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอปเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นเป็นเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์นั้น มีโครงสร้างเป็นแบบคิวบิก จึงทำให้เมื่อเกิดการโตของเกรนขึ้น จะเป็นลักษณะการจัดเรียงตัวของโครงสร้างแบบคิวบิกต่อกันไปเรื่อยๆ ทำให้ความยาวเพิ่มมากขึ้น และส่งผลให้ลักษณะของเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้นั้นเป็นเหลี่ยม



รูปที่ 4.8 ลักษณะเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้

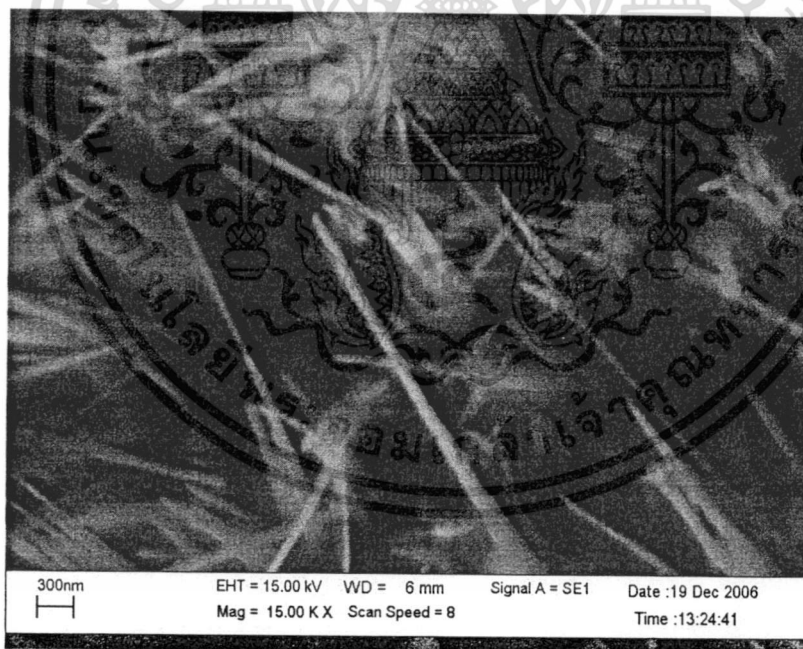
#### 4.2.2 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแผ่นคอปเปอร์

จากรูปที่ 4.5 แสดงเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่ได้ จากการเผาในสภาวะออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ลักษณะของเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่พบ มีความกว้างเฉลี่ย 57.36 นาโนเมตร ความยาวเฉลี่ย 2.47 ไมโครเมตร และมีค่า Aspect ratio เท่ากับ 45.38 การเกิดของเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์กระจายทุกบริเวณอย่างหนาแน่น ซึ่งความหนาแน่นของเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ มีค่าเท่ากับ 1.01 ล้านเส้นต่อตารางมิลลิเมตร

เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่ได้ จากการเผาในสภาวะออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ลักษณะของเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่พบนั้นจะมีลักษณะเล็กและยาว ซึ่งจะมีความยาวมากกว่าเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่ได้ จากการเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส แต่มีขนาดใกล้เคียงกัน โดยมีความกว้างเฉลี่ย 62.72 นาโนเมตร ความยาวเฉลี่ย 2.77 ไมโครเมตร และ ค่า Aspect ratio มีค่าเท่ากับ 49.46 ซึ่งพบว่า มีค่ามากกว่าการเผาแผ่นคอปเปอร์ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส และมีการกระจายตัวเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

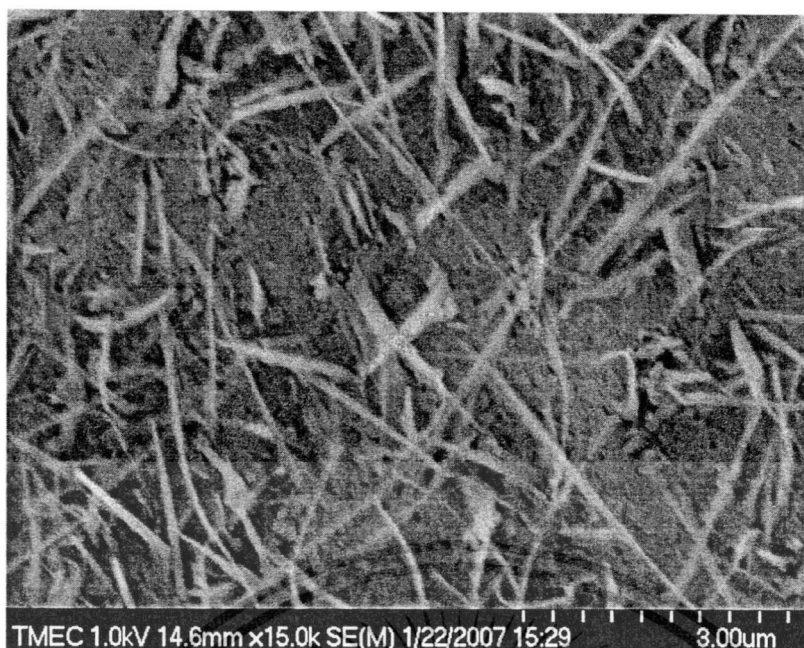
ของเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ทุกบริเวณอย่างหนาแน่น ความหนาแน่นของเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ เท่ากับ 1.68 ล้านเส้นต่อตารางมิลลิเมตร ซึ่งมีค่ามากกว่าการเผาแผ่นคอปเปอร์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.9

จากรูปที่ 4.10 จะแสดงลักษณะของเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้น บนบริเวณพื้นผิวของแผ่นคอปเปอร์ โดยการนำแผ่นคอปเปอร์ไปเผาในสภาวะออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ลักษณะของเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่พบนั้นจะมีขนาดเล็ก และมีความยาวมากกว่าเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่เกิดจากการนำแผ่นคอปเปอร์ไปเผา ที่อุณหภูมิ 400 และ 500 องศาเซลเซียส ตามลำดับ มีความกว้างเฉลี่ย 68 นาโนเมตร และความยาวเฉลี่ย 3.09 ไมโครเมตร มีค่า Aspect ratio เท่ากับ 53.69 ซึ่งมีค่ามากกว่าการเผาแผ่นคอปเปอร์ที่อุณหภูมิ 400 และ 500 องศาเซลเซียส โดยลักษณะการเกิดเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่บริเวณพื้นผิวของแผ่นคอปเปอร์นั้น จะมีความหนาแน่นของเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์มากกว่า ความหนาแน่นของเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้น ที่อุณหภูมิ 400 และ 500 องศาเซลเซียส ซึ่งค่าความหนาแน่นของเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ มีค่าเท่ากับ 2.47 ล้านเส้นต่อตารางมิลลิเมตร

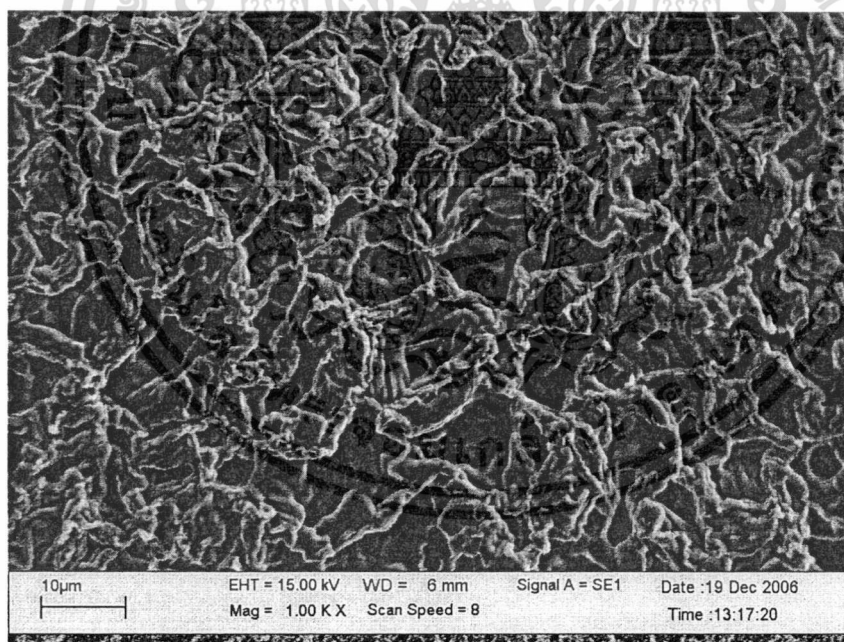


รูปที่ 4.9 เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่ได้จากการเผาในสภาวะออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่ได้จากการเผาในสภาวะออกซิเจน  
ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง

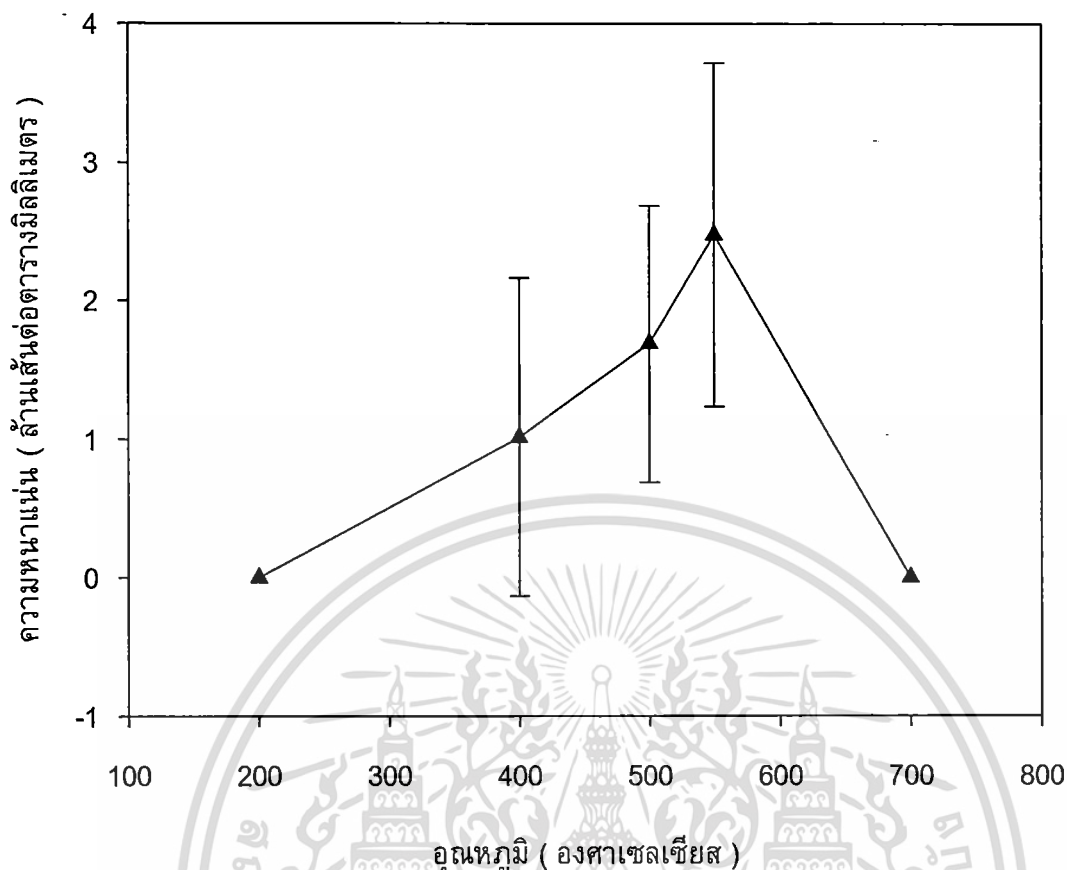


รูปที่ 4.11 ลักษณะของแผ่นคอปเปอร์ที่ได้จากการเผาในสภาวะออกซิเจน  
ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.11 แสดงลักษณะของแผ่นคอปเปอร์ที่ได้ จากการเผาในสภาวะออกซิเจน ที่ อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่า ไม่มีการเกิดเส้นลวดนาโนคอป แอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปอร์ออกไซด์ขึ้น ที่บริเวณพื้นผิวของแผ่นคอปเปอร์ เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแผ่นคอปเปอร์ เพื่อสังเคราะห์เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์นั้นสูงเกินไป จึงทำให้บริเวณพื้นผิวของแผ่นคอปเปอร์เกิดหลอม แต่ไม่ถึงกับละลายเป็นของเหลว ที่เป็นเช่นนี้ เพราะว่าแผ่นคอปเปอร์ที่ใช้ในการทดลอง เป็นแผ่นคอปเปอร์ที่หาซื้อได้ทั่วไปตามท้องตลาด ซึ่งจะมีการเจือธาตุชนิดอื่นเจือลงไป เพื่อเพิ่มสมบัติต่าง ๆ ของคอปเปอร์ เช่น ดีบุก สังกะสี เป็นต้น ดังนั้น แผ่นคอปเปอร์ที่ใช้ในการสังเคราะห์เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์นั้นไม่ใช่คอปเปอร์บริสุทธิ์ จึงทำให้จุดหลอมเหลวของแผ่นคอปเปอร์ มีค่าต่ำกว่า 1083 องศาเซลเซียส ซึ่งจุดหลอมเหลวของคอปเปอร์บริสุทธิ์ มีค่าเท่ากับ 1083 องศาเซลเซียส (ชาญวุฒิ ตังจิตวิทยา และ สาโรช ฐิติเกียรติพงศ์, 2521:197)

เมื่อนำแผ่นคอปเปอร์ไปเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น พบว่า มีเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์เกิดขึ้นมากกว่าการเผาที่อุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้เนื่องจาก เกรนของคอปเปอร์ที่บริเวณพื้นผิวของแผ่นคอปเปอร์ได้รับพลังงานสูงขึ้น จึงทำให้เกิดการโตของเกรน (Grain growth) ขึ้นซึ่งการโตของเกรนจะเกิดขึ้น เมื่อได้รับพลังงาน หรือการได้รับความร้อนในการเผา และเมื่อมีอุณหภูมิในการเผาสูงขึ้น จึงทำให้มีการโตของเกรนเกิดขึ้นมาก แต่ทั้งนี้เนื่องมาจากเกรนจะพยายามขยายตัวออกทุกทิศทุกทาง แต่เมื่อเกรนไม่สามารถขยายตัวได้อีก จึงทำให้เกรนโตขึ้นในลักษณะที่เป็นแท่ง (rod) และเมื่อได้รับพลังงานอย่างต่อเนื่อง จึงเกิดเป็นเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่บริเวณพื้นผิวของแผ่นคอปเปอร์ โดยความยาวของเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกซ์จะเพิ่มมากขึ้น แต่ถ้าหากได้รับพลังงานเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ก็อาจจะทำให้เส้นลวดคอปเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นนั้นมีโอกาสหลุดออกจากพื้นผิวของแผ่นคอปเปอร์ จึงทำให้มีเขม่าหลุดร่อนออกจากแผ่นคอปเปอร์ อย่างไรก็ตามการเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นนี้ สามารถเกิดการหลอมรวมของเกรนที่ใกล้เคียงกันได้ พร้อมกับมีการโตของเกรนเกิดขึ้น ส่งผลให้บางบริเวณของแผ่นคอปเปอร์ ไม่เกิดเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ ดังนั้น การเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น จึงทำให้มีการเกิดเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ลดลง และเมื่อนำแผ่นคอปเปอร์ไปเผาที่อุณหภูมิสูงมากเกินไป พบว่า ที่บริเวณพื้นผิวของแผ่นคอปเปอร์นั้น มีการหลอมเกิดขึ้น สังเกตได้จากการนำไปทดสอบทางสัณฐานวิทยาด้วย การศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงดังรูปที่ 4.11 ซึ่งทำให้การเผาที่อุณหภูมิสูงมากเกินไป จึงไม่สามารถทำให้สังเคราะห์เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ได้ จากผลการทดลอง พบว่า อุณหภูมิที่ไม่สามารถใช้ในการสังเคราะห์เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ คือ ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิจึงกับความหนาแน่น โดยเผาในสภาวะออกซิเจน ที่อุณหภูมิจึงต่างๆ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.12 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิจึงกับความหนาแน่น โดยการเผาแผ่นคอปเปอร์ ในสภาวะออกซิเจน เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ได้ผลการทดลอง ดังนี้ ช่วงอุณหภูมิจึง 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส จะมีอัตราการเกิดของเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์น้อยกว่าช่วงอุณหภูมิจึง 500 ถึง 550 องศาเซลเซียส โดยพิจารณาได้จากค่าความชัน คือ ช่วงอุณหภูมิจึง 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส มีความชันเท่ากับ  $6.75 \times 10^{-3}$  ด้านเส้นต่อ(ตารางมิลลิเมตร×องศาเซลเซียส) กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิจึงเพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียส จะมีเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์เกิดขึ้น 6750 เส้นต่อตารางมิลลิเมตร ขณะที่ช่วงอุณหภูมิจึง 500 ถึง 550 องศาเซลเซียส มีความชันเท่ากับ 0.02 ด้านเส้นต่อ(ตารางมิลลิเมตร×องศาเซลเซียส) กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิจึงเพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียส จะมีเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์เกิดขึ้น 20000 เส้นต่อตารางมิลลิเมตร จากรูปที่ 4.12 จะได้ จุดสูงสุดของกราฟ คือ ที่อุณหภูมิจึง 550 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่นมากที่สุด มีค่าเท่ากับ 2.47 ด้านเส้นต่อตารางมิลลิเมตร หลังจากช่วงอุณหภูมิจึง 550 องศาเซลเซียส อาจจะมีการเกิดเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่บริเวณพื้นผิวของแผ่นคอปเปอร์ลดลง เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์นั้นสูงเกินไป จึงทำให้บริเวณพื้นผิวของแผ่นคอปเปอร์หลอม แต่ไม่ละลายเป็นของเหลว ดังนั้นที่อุณหภูมิสูงขึ้นไป จะทำให้ไม่สามารถสังเคราะห์เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ได้

#### 4.2.3 ผลของเวลาที่ใช้ในการเผาแผ่นคอปเปอร์



รูปที่ 4.13 แสดงเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่ได้จากการเผาในสถานะออกซิเจน อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส 15 นาที

จากรูปที่ 4.13 แสดงเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่ได้จากการเผาในสถานะออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที พบว่าเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของแผ่นคอปเปอร์นั้นมีปริมาณน้อย โดยมีความกว้างเฉลี่ย 60.52 นาโนเมตร ความยาวเฉลี่ย 1.47 ไมโครเมตร และค่า Aspect ratio เท่ากับ 24 เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ จะเกิดขึ้นบางบริเวณของแผ่นคอปเปอร์ ซึ่งมีความหนาแน่น 0.96 ล้านเส้นต่อตารางมิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



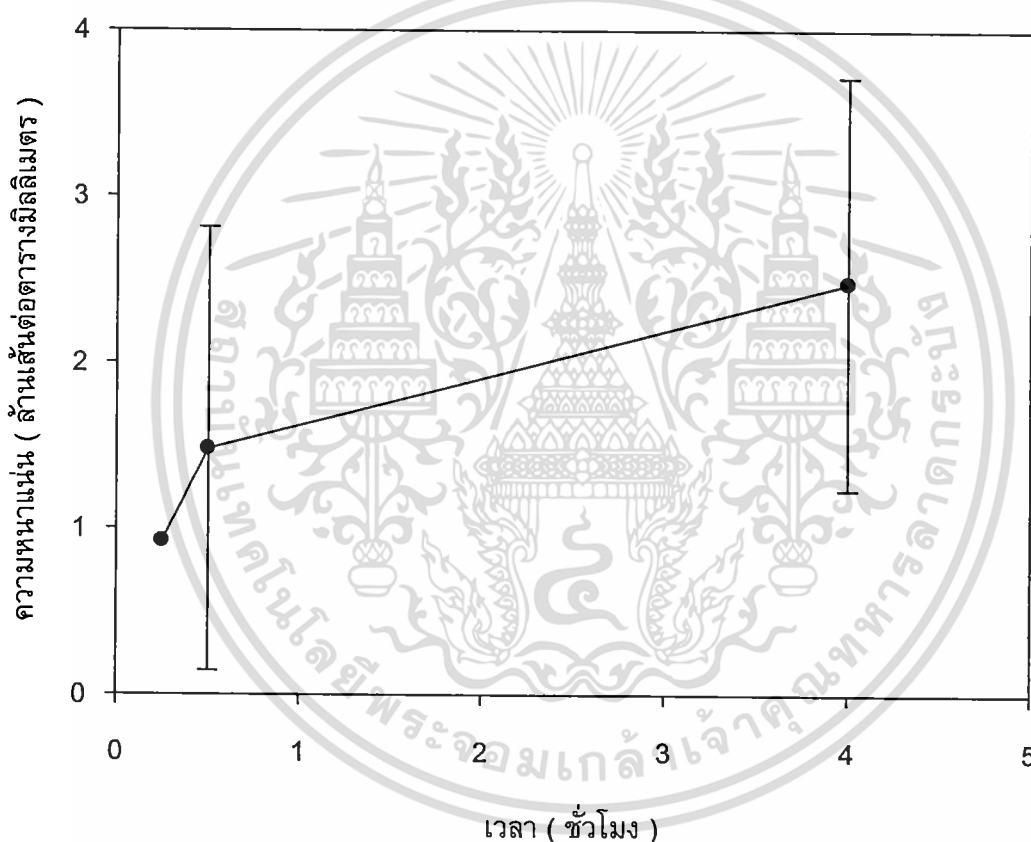
รูปที่ 4.14 แสดงเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่ได้จากการเผาในสถานะออกซิเจน อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

จากรูปที่ 4.14 แสดงเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่ได้ จากการเผาในสถานะออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที พบว่าจะเกิดเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่บริเวณพื้นผิวของแผ่นคอปเปอร์ มีปริมาณน้อยแต่ใกล้เคียงกับที่เวลา 15 นาที ลักษณะของเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ มีความกว้างเฉลี่ย 76.67 นาโนเมตร ความยาวเฉลี่ย 1.87 ไมโครเมตร และ ค่า Aspect ratio เท่ากับ 25.27 การเกิดเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์นั้นจะเกิดขึ้นเป็นบางบริเวณของแผ่นคอปเปอร์ ความหนาแน่นของเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้น มีค่าเท่ากับ 1.47 ล้านเส้นต่อตารางมิลลิเมตร

จากรูปที่ 4.10 แสดงเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่ได้ จากการเผาในสถานะออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้น มีความกว้างเฉลี่ย 68 นาโนเมตร และความยาวเฉลี่ย 3.09 ไมโครเมตร ซึ่งมีขนาดเล็กและมีความยาวมากกว่า ที่เวลา 15 และ 30 นาที ค่า Aspect ratio เท่ากับ 53.69 ซึ่งมากกว่าที่เวลา 15 และ 30 นาที การเกิดเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์จะเกิดกระจายทั่วทุกบริเวณ และมีค่าความหนาแน่นของเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ เท่ากับ 2.47 ล้านเส้นต่อตารางมิลลิเมตร

ลักษณะของเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้น จะมีความยาวมากขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาที่ใช้ในการเผาแผ่นคอปเปอร์ ในการทดลองนี้จะทำการเผาที่เวลา 15 นาที 30 นาที และ 4 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั่วโมง ตามลำดับ ทั้งนี้จะเป็นผลมาจากเวลาที่ใช้ในการเผาที่มีผลโดยตรงต่อปริมาณความร้อน หรือพลังงานที่แต่ละเกรนได้รับ แล้วเกิดการสะสมของพลังงานขึ้นภายในเกรน ถ้าเกรนมีการสะสมของพลังงานเพิ่มมากขึ้นก็จะทำให้เกรนพยายามขยายตัวออกทุกทิศทุกทางมากขึ้น และเมื่อเกรนไม่สามารถขยายตัวได้แล้ว จึงเกิดเป็นลักษณะแท่งขึ้น ปริมาณพลังงานที่เกิดการสะสมภายในเกรนเพิ่มมากขึ้น จะทำให้เมื่อเกิดเป็นลักษณะแท่งขึ้นแล้วก็จะนำพลังงานที่สะสมไว้ไปใช้ในการเพิ่มความยาวของเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ ดังนั้น เวลาที่ใช้ในการเผาเป็น 4 ชั่วโมง เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้นั้น จะมีความยาวมากกว่าการสังเคราะห์ที่เวลาในการเผาเป็น 15 และ 30 นาที



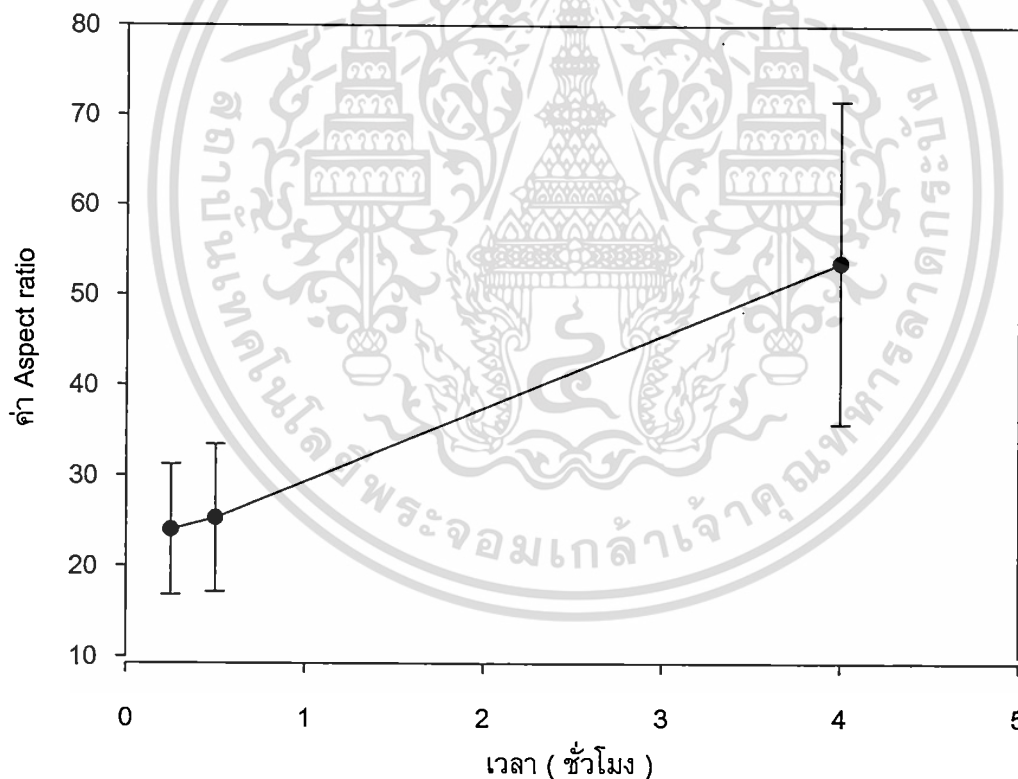
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความหนาแน่น โดยเผาในสภาวะออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.15 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความหนาแน่น โดยการเผาแผ่นคอปเปอร์ในสภาวะออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ช่วงแรกของเส้นกราฟ จะมีความชันมากซึ่งความชันของกราฟมีค่าเท่ากับ 2.23 ล้วนเส้นต่อ(ตารางมิลลิเมตร×ชั่วโมง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล่าวคือ เมื่อเวลาที่ใช้ในการเผาเพิ่มขึ้น 1 ชั่วโมง จะมีเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์เกิดขึ้น 2.23 ล้านเส้นต่อตารางมิลลิเมตร ขณะที่กราฟช่วงเวลา 30 นาที ถึง 4 ชั่วโมง เส้นกราฟจะมีความชันลดลง โดยความชันของกราฟมีค่าเท่ากับ 0.29 ล้านเส้นต่อ(ตารางมิลลิเมตร×ชั่วโมง) กล่าวคือ เมื่อเวลาที่ใช้ในการเผาเพิ่มขึ้น 1 ชั่วโมง จะมีเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์เกิดขึ้น 2.9 แสนเส้นต่อตารางมิลลิเมตร แสดงว่าช่วงเวลา 15 ถึง 30 นาที อัตราการเกิดเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้น ขณะที่ช่วงเวลา 30 นาที ถึง 4 ชั่วโมง อัตราการเกิดเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์จะลดลงจากช่วงแรก

จากรูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับค่า Aspect ratio พบว่า อัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง (Aspect ratio) จะเพิ่มขึ้นเกือบเป็นเส้นตรง โดยความชันมีค่าเท่ากับ 7.91 ชั่วโมง<sup>-1</sup> กล่าวคือ เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้นั้นจะมีค่าอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างเพิ่มขึ้น เท่ากับ 7.91 ต่อเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป 1 ชั่วโมง เมื่อใช้เวลาในการเผาเพิ่มมากขึ้น เส้นลวดนาโนที่เกิดขึ้นจะมีความยาวมากขึ้นแต่มีขนาดเล็กลง



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับค่า Aspect ratio

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### สรุปผล

##### ผลของสภาวะที่ใช้ในการเผาแผ่นคอปเปอร์

จากการทดลองเริ่มจากนำแผ่นคอปเปอร์ที่ขัดเสร็จแล้ว ไปเผาในสภาวะต่าง ๆ คือ สภาวะ ออกซิเจน สภาวะอากาศและออกซิเจน และสภาวะไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ผลการทดลองของการเผาแผ่นคอปเปอร์ในสภาวะออกซิเจน สภาวะอากาศและ ออกซิเจน และสภาวะไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

สภาวะ	ความกว้างเฉลี่ย (nm)	ความยาวเฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ )	Aspect ratio	ความหนาแน่น (ล้านเส้นต่อตาราง มิลลิเมตร)
ออกซิเจน	57.36	2.47	45.38	1.01
อากาศและออกซิเจน	115.26	2.37	20.86	0.58
ไนโตรเจน	-	-	-	-

จากตารางที่ 5.1 พบว่า ในสภาวะออกซิเจนนั้นมีการเกิดเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ ออกไซด์มากที่สุด โดยพิจารณาจากค่าความหนาแน่น ซึ่งการเผาในสภาวะออกซิเจนนั้นมีความ หนาแน่นมากที่สุด มีค่าเท่ากับ 1.01 ล้านเส้นต่อตารางมิลลิเมตร รองลงมา คือ ในสภาวะ ของอากาศและออกซิเจน ส่วนในสภาวะของไนโตรเจนนั้นไม่พบว่า มีเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ ออกไซด์เกิดขึ้น

ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า สภาวะออกซิเจน เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการ สังเคราะห์เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์

### ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแผ่นคอปเปอร์

จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 5.1.1 จึงทราบว่า สภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการเผาแผ่นคอปเปอร์ คือ สภาวะออกซิเจน ดังนั้น จึงทำการทดลองต่อโดยทำการเปลี่ยนแปลง เวลาที่ใช้ในการเผาเป็น 400 ถึง 700 องศาเซลเซียส ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ผลการทดลองของการเผาแผ่นคอปเปอร์ ในสภาวะออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 400 ถึง 700 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความกว้างเฉลี่ย (nm)	ความยาวเฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ )	Aspect ratio	ความหนาแน่น (ล้านเส้นต่อ ตารางมิลลิเมตร)
400	57.36	2.47	45.38	1.01
500	62.72	2.77	49.46	1.68
550	68	3.09	53.69	2.47
700	-	-	-	-

จากตารางที่ 5.2 ได้ผลการทดลองว่า ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส จะมีความหนาแน่นของเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์มากที่สุด คือ 2.47 ล้านเส้นต่อตารางมิลลิเมตรและเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้น มีขนาดเล็กและยาว โดยมีความกว้าง 68 นาโนเมตร ความยาว 3.09 ไมโครเมตร และค่า Aspect ratio เท่ากับ 53.69 ซึ่งมากกว่าเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่ได้ จากการนำแผ่นคอปเปอร์ไปเผา ที่อุณหภูมิ 400 และ 500 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส จะไม่พบการเกิดเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ขึ้นที่บริเวณพื้นผิวของแผ่นคอปเปอร์

ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ในสภาวะออกซิเจน เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการสังเคราะห์เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์

### ผลของเวลาที่ใช้ในการเผาแผ่นคอปเปอร์

จากผลการทดลองในหัวข้อ 5.1.2 จึงทราบว่าอุณหภูมิในการเผาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ คือ การเผาแผ่นคอปเปอร์ ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ดังนั้น จึงทำการทดลองต่อโดยเผาแผ่นคอปเปอร์ ในสภาวะออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส โดยเปลี่ยนแปลงเวลาเป็น 15 และ 30 นาที ตามลำดับ ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 5.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 ผลการทดลองของการเผาแผ่นคอปเปอร์ ในสถานะออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ที่เวลาต่าง ๆ กัน

เวลา	ความกว้างเฉลี่ย (nm)	ความยาวเฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ )	Aspect ratio	ความหนาแน่น (ล้านเส้นต่อ ตารางมิลลิเมตร)
15 นาที	60.52	1.47	24	0.92
30 นาที	76.67	1.87	25.27	1.48
4 ชั่วโมง	68	3.09	53.69	2.47

จากตารางที่ 5.3 ได้ผลการทดลอง ดังนี้ การนำแผ่นคอปเปอร์ไปเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ที่เวลา 4 ชั่วโมง จะเกิดเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ได้มากที่สุด โดยมีความหนาแน่น 2.47 ล้านเส้นต่อตารางมิลลิเมตร และเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นนั้น มีขนาดเล็กและยาวโดย มีความกว้าง 68 นาโนเมตร ความยาว 3.09 ไมโครเมตร และมีค่า Aspect ratio เท่ากับ 53.69 ซึ่งมีความกว้างและความยาวมากกว่าเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้น จากการเผาแผ่นคอปเปอร์ ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 และ 30 นาที ตามลำดับ ซึ่งแสดงค่าที่ได้จากการคำนวณ ดังตารางที่ 5.3

ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า การเผาแผ่นคอปเปอร์ในสถานะออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เป็นสถานะที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการสังเคราะห์เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์

จากผลการทดลองที่ได้ จากหัวข้อที่ 5.1.1 ซึ่งเป็นการศึกษาผลของสถานะที่ใช้ในการเผาแผ่นคอปเปอร์ที่มีผลต่อ ความหนาแน่นของเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวแผ่นคอปเปอร์ หัวข้อที่ 5.1.2 จะเป็นการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการสังเคราะห์เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ และหัวข้อที่ 5.1.3 จะเป็นการศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการเผาแผ่นคอปเปอร์ ที่มีต่อการเกิดเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ ตามลำดับ จึงทำให้ทราบว่าสถานะที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการสังเคราะห์เส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ คือ การนำแผ่นคอปเปอร์ไปเผาในสถานะออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

### ข้อเสนอแนะ

1. ในการจัดแผ่นคอปเปอร์ควรจัดให้สะอาดจนเงา เพราะถ้าแผ่นคอปเปอร์สกปรกจะทำให้เส้นลวดคอปเปอร์ออกไซด์ขึ้นน้อยและขึ้นเป็นบางบริเวณ
2. ควรจะควบคุมอัตราการไหลของก๊าซให้เหมาะสม เพื่อให้ทุกบริเวณของพื้นผิวได้รับปริมาณก๊าซได้เท่ากัน
3. แผ่นคอปเปอร์ที่เตรียมได้นั้น ควรมีลักษณะเป็นแผ่นเรียบ ไม่มีพื้นผิวหรือบริเวณที่ขรุขระ เพราะจะทำให้บริเวณนี้ไม่เกิดเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ขึ้น
4. ขณะที่จัดแผ่นคอปเปอร์ควรสวมถุงมือ เพื่อป้องกันไม่ให้มีคราบไขมันไปติดที่แผ่นคอปเปอร์ ซึ่งจะทำให้โอกาสในการเกิดเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ลดลง
5. ทำการตรวจสอบความบริสุทธิ์ของแผ่นคอปเปอร์ ทั้งก่อนและหลังการเผาในสภาวะต่าง ๆ โดยการนำไปตรวจสอบด้วยเทคนิค XRD
6. ทำการตรวจสอบโครงสร้างของเส้นลวดนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้น ที่บริเวณพื้นผิวของแผ่นคอปเปอร์ ด้วยเทคนิค XRF เนื่องจากคอปเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นนั้นมีหลายโครงสร้าง เช่น คิวปริกออกไซด์ คิวปริสออกไซด์ ([www.elements.com](http://www.elements.com)) เป็นต้น

## บรรณานุกรม

1. [www.figaro.co.jp](http://www.figaro.co.jp).
2. [www.dek-d.com](http://www.dek-d.com).
3. [www.chemistry.uah.edu](http://www.chemistry.uah.edu).
4. [www.webelements.com](http://www.webelements.com).
5. [www.fhi-berlin.mpg.de/th/personal/hermann/YBaCuO.gif](http://www.fhi-berlin.mpg.de/th/personal/hermann/YBaCuO.gif).
6. [www.phys.nara-wu.ac.jp/in\\_kamoku/suzuki/images\\_kinzoku/CS\\_of\\_Cu.jpg](http://www.phys.nara-wu.ac.jp/in_kamoku/suzuki/images_kinzoku/CS_of_Cu.jpg).
7. Xu, C.H., Formation of CuO nanowires on Cu foil, Chemical Physics Letters, 2004. 399: p. 62-66.
8. Chen, D., Large-scale synthesis of CuO shuttle-like crystals via a convenient hydrothermal decomposition route. Journal of Crystal Growth, 2003. 254: p. 225-228.
9. Willian D.Callister, J., Materials Science and Engineering An Introduction. 2005: Top Publishing Co.,Ltd. 752.
10. Xu, C., Preparation and characterization of CuO nanorods by thermal decomposition of  $\text{CuC}_2\text{O}_4$  precursor Material Research Bullen, 2002. 37: p. 2365-2372.
11. Huang, L.S., Preparation of large-scale cupric oxide nanowires by thermal evaporation method. Journal of Crystal Growth, 2004. 260: p. 130-135.
12. Xu, C., A Simple and novel route for the preparation of ZnO nannorods. Solid State Communications, 2002. 122: p. 175-179.