

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาระบบการสร้างตัวตรวจวัดความชื้น



นาย คมสัน สุภักโยธิน
นาย อภิชา ทับทิมแก้ว

เลขหม.....
เลขทะเบียน 47282
วัน, เดือน, ปี 27 ส.ย. 2546

b.....
i.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Study on Fabrication of Humidity Sensor System



A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of
Bachelor of Science
Department of Applied Physics
Faculty of Science
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Academic Year 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษเรื่อง การศึกษาระบบการสร้างตัวตรวจวัดความชื้น

นักศึกษา 1. นายคมสัน สุภคโยธิน
2. นายอภิชา ทับทิมแก้ว

ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์
สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. อารีย์ วิเชียรฉาย

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ	ผศ.ดร.ปรีชา เทียนสมประสงค์
กรรมการ	รศ.ดร. อารีย์ วิเชียรฉาย
กรรมการ	ผศ. วิชาญ เตชิตธีระ
กรรมการ	ผศ.ดร. วราวุฒิ เถาlátดา

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิชาญ เตชิตธีระ)

หัวหน้าภาควิชา

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษ เรื่อง การศึกษาระบบการสร้างหิววัดความชื้น

นักศึกษา นาย คมสัน สุภักโยธิน
นาย อภิชา ทับทิมแก้ว

ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์

สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

ปีการศึกษา 2545

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. อารีย์ วิเชียรฉาย

บทคัดย่อ

เนื้อหาของโครงการพิเศษนี้เป็นการนำเสนอถึงการศึกษาเกี่ยวกับความเป็นไปได้ของระบบการสร้างหิววัดความชื้น โดยสร้างหิววัดจากผงทังสเตนออกไซด์(WO_3) ด้วยวิธีการอัดขึ้นรูปแบบแห้ง และเผาอบผนึก ซึ่งจะมีทั้งการสร้างอุปกรณ์ ที่จำเป็นใน การวัด และปรับเทียบ โดยเน้นหลักการจากทฤษฎีพื้นฐาน และจะทำการวัดค่าความต้านทาน เทียบกับความชื้นที่เปลี่ยนแปลง โดยงานวิจัยชิ้นนี้ มีความเป็นไปได้ในการใช้ WO_3 เป็นหิววัดความชื้น ที่เงื่อนไขการเตรียม $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ อัดด้วยความดัน 2 ตัน/ซม^2 สามารถตอบสนองกับความชื้นได้อย่างมีนัยสำคัญโดยมีค่าความชัน $242\text{ }\Omega/\%RH$ ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นตัวตรวจวัดความชื้น ด้วยหลักการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานได้ สำหรับการนำไปใช้งานจริง จะต้องปรับปรุงและพัฒนาต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title Study on Fabrication of Humidity Sensor System

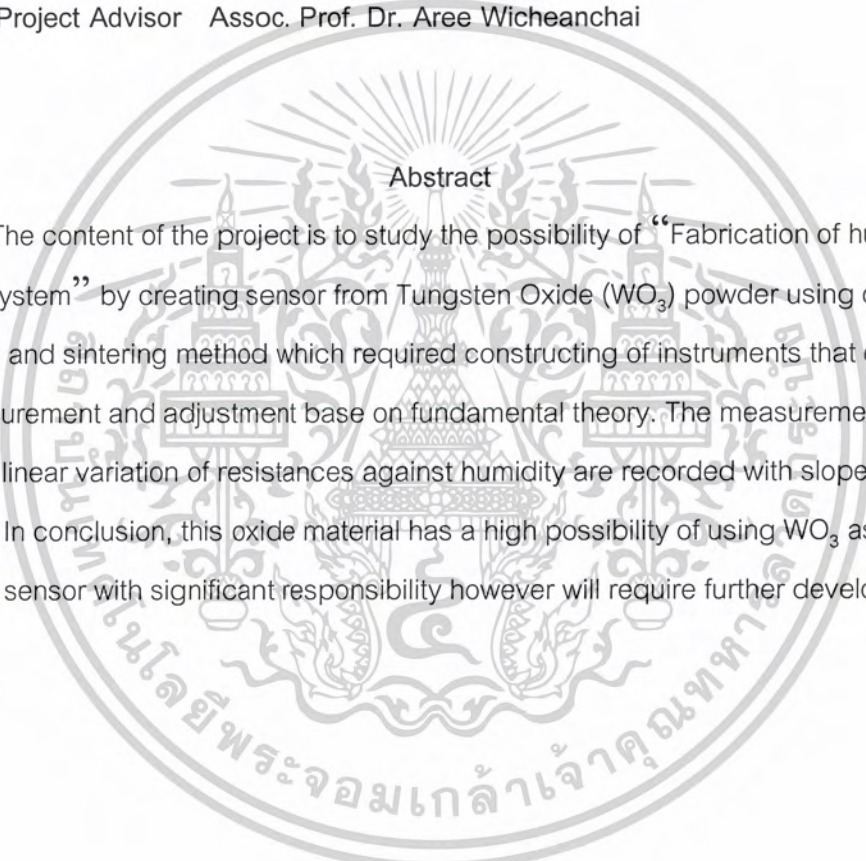
Name Mr. Apicha Tuptimkaew
Mr. Komsan Supukyothin

Department Applied Physics

Program Applied Physics

Academic Year 2545

Special Project Advisor Assoc. Prof. Dr. Aree Wicheanchai



Abstract

The content of the project is to study the possibility of “Fabrication of humidity sensor system” by creating sensor from Tungsten Oxide (WO_3) powder using dry pressing and sintering method which required constructing of instruments that essential for measurement and adjustment base on fundamental theory. The measurements of the average linear variation of resistances against humidity are recorded with slope at $242 \Omega/\%RH$. In conclusion, this oxide material has a high possibility of using WO_3 as a humidity sensor with significant responsibility however will require further development.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อารีย์ วิเชียรฉาย อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ และ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้ข้อมูล คำแนะนำ และชี้แนะแนวทาง ซึ่งเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยเป็นอย่างมาก ทำให้สามารถดำเนินการวิจัยได้ราบรื่น และประสบผลสำเร็จ ผู้วิจัยรู้สึกเป็นพระคุณอย่างสูง

ขอบคุณ รศ.ดร. วิฑิตินัย แก้วแดง และ รศ.งามนิตย์ แก้วแดง อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ รวมถึงการสนับสนุนด้านอุปกรณ์

ขอบคุณพี่มี และ อ.ภัทรียา กิตติเดชาชาญ อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ ตลอดจนอุปกรณ์ต่าง ๆ

ขอบคุณ พี่หวัง พี่ประจักษ์ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ที่ช่วยให้การสนับสนุนทางด้านเครื่องมือต่าง ๆ รวมทั้งให้คำแนะนำ

ขอบคุณพี่วิน สำหรับคำปรึกษา เรื่อง XRD

ขอบคุณ ณัฐ ที่เอื้อเฟื้อกล้อง Digital ถ่ายภาพสวย ๆ ในโครงการ และเพื่อน ๆ ห้อง Microcomputer ที่ให้กำลังใจตลอดมา

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่คอยเป็นกำลังใจ และให้ความสนับสนุนในทุกสิ่งทุกอย่างด้วยดีตลอดมา

สารบัญ

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	1
1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	
2.1 ความชื้นและการวัดความชื้น	3
2.2 เทคนิคการวัดความชื้น	8
2.3 การอัดขึ้นรูป	10
2.4 การเผาอบผง	12
2.5 การเลือกสารเพื่อทดลองสร้างหัววัดความชื้น	14
2.6 ความนำไฟฟ้าของหัววัดความชื้น	16
2.7 การวิเคราะห์สมบัติของตัวอย่าง ด้วยวิธี X-Ray Diffraction	17
2.8 ข้อมูลที่เกี่ยวข้อง	20
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	
3.1 การดำเนินการโครงการวิจัยที่ได้ดำเนินการมา มีขั้นตอนการทำงานดังนี้	21
3.2 ผลที่ได้จากศึกษาการวัดความชื้นภาคทฤษฎีพื้นฐาน	22
3.3 วิธีการสร้างไซโครมิเตอร์กระเปาะเปียกกระเปาะแห้ง	23
3.4 ผลที่ได้จากการค้นหารูปแบบการวัดความชื้นของหัววัด(sensor)	24
3.5 สร้างอุปกรณ์ที่จำเป็นขึ้นใหม่	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

3.6	สร้างตัวอย่างหัตถ์ความชื้น	29
3.7	ตรวจวัดลักษณะเฉพาะของตัวอย่างหัตถ์ความชื้น	29
3.8	ตรวจวัดค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปตามความชื้นของตัวอย่างหัตถ์ความชื้น	30
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล		
4.1	ผลการตรวจวิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffractometer	31
4.2	อภิปรายผลการตรวจวิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffractometer	38
4.3	ผลการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่าง ที่ค่าความชื้นต่าง ๆ	38
4.4	อภิปรายผลการตอบสนองต่อความชื้นของตัวอย่าง	46
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอนะ		
	เอกสารอ้างอิง	47
	ภาคผนวก	50
		51



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบหน่วยการวัดน้ำหนัก	8
ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบข้อดีข้อด้อยของการวัดในรูปแบบต่าง ๆ	9
ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบระบบการสร้างห้ววัดความชื้นต่าง ๆ	10
ตารางที่ 2.4 แสดงตัวอย่างของตัวตรวจวัดที่ตอบสนองกับตัวแปรต่าง ๆ	15
ตารางความกดไอน้ำอิ่มตัวเป็นมิลลิเมตรปรอท	51



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1	ขั้นตอนการอัดขึ้นรูปแบบแห้ง	11
รูปที่ 2.2	กลไกต่าง ๆ ในการอัดผงอนุภาคที่เกาะตัวกันเป็นก้อน	11
รูปที่ 2.3	เครื่องอัดขึ้นรูป ผงสาร	12
รูปที่ 2.4	โครงสร้างทางจุลภาคในระหว่างกระบวนการเผาอบผง	13
รูปที่ 2.5	เตาเผาอบผง	14
รูปที่ 2.6	กราฟการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในเตาเทียบกับเวลา	14
รูปที่ 2.7	WO ₃ monoclinic	16
รูปที่ 2.8	WO ₂ Orthorhombic	16
รูปที่ 2.9	X-Ray diffractometer	17
รูปที่ 2.10	การตกกระทบและการสะท้อนของรังสีเอกซ์	18
รูปที่ 2.11	รูปแบบของการเลี้ยวเบน	19
รูปที่ 3.1	ผังสรุปขั้นตอนการทำงาน	22
รูปที่ 3.2	ไซโครเมตรมิเตอร์กระเปาะเปียกกระเปาะแห้ง	23
รูปที่ 3.3	แบบอัดขึ้นรูปเมื่อใช้งาน	25
รูปที่ 3.4	ส่วนประกอบของแบบอัดขึ้นรูป	25
รูปที่ 3.5	ห้องควบคุมสภาวะที่ความชื้นสูง ขนาดกว้างxยาวxสูง 30.5x59.5x15.5cm.	26
รูปที่ 3.6	เครื่องกำเนิดหมอก	26
รูปที่ 3.7	Chamber ควบคุมที่ความชื้นต่ำ	27
รูปที่ 3.8	Humidity Sensor แบบ C ของ Phillips	28
รูปที่ 3.9	ผิวสัมผัสของแท่นวัด	28
รูปที่ 3.10	แท่นวัดขณะใช้งาน	28
รูปที่ 4.1	ผล XRD ของผงทั้งสแตนด์ออกไซด์ (WO ₃)	32
รูปที่ 4.2	ผล XRD ของตัวอย่างที่แรงอัด 2 ตัน ยังไม่ผ่านการเผาอบผง	33
รูปที่ 4.3	ผล XRD ของตัวอย่างที่แรงอัด 2 ตัน เผาอบผงที่ 200 °C	34
รูปที่ 4.4	ผล XRD ของตัวอย่าง ที่แรงอัด 2 ตัน เผาอบผงที่ 800 °C	35
รูปที่ 4.5	ผล XRD ของตัวอย่างที่แรงอัด 2 ตัน เผาอบผงที่ 1100 °C	36
รูปที่ 4.6	ผล XRD ของตัวอย่างที่แรงอัด 3 ตัน เผาอบผงที่ 800 °C	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบแสดงแนวโน้มการตอบสนองต่อความชื้น	39
รูปที่ 4.8 กราฟระหว่างความชื้นกับความต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่างที่สร้างด้วยแรงอัด 2 ตัน ยังไม่ผ่านการเผาอบผืนึก	40
รูปที่ 4.9 กราฟระหว่างความชื้นกับความต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่างที่สร้างด้วยแรงอัด 2 ตัน เผาอบผืนึกที่ 200 °C	41
รูปที่ 4.10 กราฟระหว่างความชื้นกับความต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่างที่สร้างด้วยแรงอัด 2 ตัน เผาอบผืนึกที่ 400 °C	42
รูปที่ 4.11 กราฟระหว่างความชื้นกับความต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่างที่สร้างด้วยแรงอัด 2 ตัน เผาอบผืนึกที่ 600 °C	43
รูปที่ 4.12 กราฟระหว่างความชื้นกับความต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่างที่สร้างด้วยแรงอัด 2 ตัน เผาอบผืนึกที่ 800 °C	44
รูปที่ 4.13 กราฟระหว่างความชื้นกับความต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่างที่สร้างด้วยแรงอัด 3 ตัน เผาอบผืนึกที่ 800 °C	45
รูปที่ 4.14 กราฟระหว่างความชื้นกับความต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่างที่สร้างด้วยแรงอัด 2 ตัน เผาอบผืนึกที่ 800 °C โดยทำการวัดซ้ำในช่วงการลดความชื้น 4 รอบ ได้ค่าความชื้นเฉลี่ย 242 Ω/%RH	46
รูปที่ ผ.1 ขึ้นสารตัวอย่างขึ้นรูปด้วยแรงอัด 2 ตัน ยังไม่ผ่านการเผาอบ	53
รูปที่ ผ.2 ขึ้นสารตัวอย่างขึ้นรูปด้วยแรงอัด 2 ตัน เผาอบที่อุณหภูมิ 200°C	53
รูปที่ ผ.3 ขึ้นสารตัวอย่างขึ้นรูปด้วยแรงอัด 2 ตัน เผาอบที่อุณหภูมิ 400°C	54
รูปที่ ผ.4 ขึ้นสารตัวอย่างขึ้นรูปด้วยแรงอัด 2 ตัน เผาอบที่อุณหภูมิ 600°C	54
รูปที่ ผ.5 ขึ้นสารตัวอย่างขึ้นรูปด้วยแรงอัด 2 ตัน เผาอบที่อุณหภูมิ 800°C	54
รูปที่ ผ.6 ขึ้นสารตัวอย่างขึ้นรูปด้วยแรงอัด 2 ตัน เผาอบที่อุณหภูมิ 1000°C	54
รูปที่ ผ.7 ขึ้นสารตัวอย่างขึ้นรูปด้วยแรงอัด 2 ตัน เผาอบที่อุณหภูมิ 1100°C	54
รูปที่ ผ.8 ขึ้นสารตัวอย่างขึ้นรูปด้วยแรงอัด 3 ตัน เผาอบที่อุณหภูมิ 200°C	54
รูปที่ ผ.9 ขึ้นสารตัวอย่างขึ้นรูปด้วยแรงอัด 3 ตัน เผาอบที่อุณหภูมิ 800°C	55
รูปที่ ผ.10 ขึ้นสารตัวอย่างขึ้นรูปด้วยแรงอัด 3 ตัน เผาอบที่อุณหภูมิ 800°C impurity	55
รูปที่ ผ.11 ขึ้นสารตัวอย่างขึ้นรูปด้วยแรงอัด 2 ตัน เผาอบที่อุณหภูมิ 800°C ทำซ้ำด้วยทองคำ	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่ ผ.12	ขึ้นสารตัวอย่างขึ้นรูปด้วยแรงอัด 3 ตัน เผอบที่อุณหภูมิ 800°C ทำขึ้นด้วยทองคำ	55
รูปที่ ผ.13	ขึ้นสารตัวอย่างขึ้นรูปด้วยแรงอัด 2 ตัน เผอบที่อุณหภูมิ 1100°C ทำขึ้นด้วยทองคำ ชั้นที่ 1	55
รูปที่ ผ.14	ขึ้นสารตัวอย่างขึ้นรูปด้วยแรงอัด 2 ตัน เผอบที่อุณหภูมิ 1100°C ทำขึ้นด้วยทองคำ ชั้นที่ 2	55



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

ความขึ้นเป็นตัวแปรที่มีผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์ของงานในหลาย ๆ สาขา เช่น เกษตรกรรม อุตสาหกรรม การศึกษาวิจัยต่าง ๆ เป็นต้น ซึ่งปัจจุบันการวัดความขึ้นมีความจำเป็น และมีความสำคัญสูงขึ้นเรื่อย ๆ แต่ในความเป็นจริงแล้วระบบตรวจวัดความขึ้นที่ถูกต้องแม่นยำในปัจจุบันยังคงมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูง จึงเป็นอุปสรรคในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมความขึ้นของประเทศ ที่ผ่านมาในประเทศไทยยังไม่มีการศึกษาค้นคว้า เพื่อทำห้ววัดความขึ้นอย่างจริงจัง และยังต้องนำเข้าจากต่างประเทศ คณะผู้วิจัยเห็นความสำคัญ ในการศึกษาเพื่อจะค้นหาวัสดุที่เหมาะสม นำมาพัฒนาเป็นห้ววัดความขึ้นขึ้น โดยมีเป้าหมายในระยะยาวคือพยายามทำให้ห้ววัดความขึ้นมีต้นทุนต่ำ แต่มีประสิทธิภาพ เพื่อที่จะเกิดการนำไปใช้งานภายในประเทศอย่างแพร่หลาย ซึ่งจะเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่จะทำให้สามารถผลิตเครื่องมือวัดความขึ้นที่มีราคาถูก ใช้งานง่าย จะทำให้เกิดการใช้งานอย่างแพร่หลายมากขึ้น ทั้งยังจะเป็นประโยชน์ต่องานหลาย ๆ ด้านของอุตสาหกรรมในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาและสร้างห้ววัดความขึ้นโดยใช้การวิเคราะห์จากหลักการพื้นฐานและวิธีการดำเนินการอย่างเรียบง่าย ไม่ยุ่งยาก แต่มีประสิทธิภาพ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาและทดลองสร้างอุปกรณ์อย่างง่าย เพื่อให้ได้เป็นห้ววัดความขึ้นที่มีต้นทุนต่ำ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาไปสู่การผลิตต้นแบบการผลิตเพื่อใช้งานจริงได้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 สร้างอุปกรณ์วัดความขึ้นอย่างง่าย เพื่อการเปรียบเทียบ
- 1.3.2 สร้างแบบเพื่ออัดขึ้นรูปแบบแห้ง (dry pressing)
- 1.3.3 นำผงทังสเตนออกไซด์ (WO_3) มาอัดขึ้นรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.3.4 เผาอบผง (sintering) ขึ้นสารที่ได้จากการอัดขึ้นรูป
- 1.3.5 สร้าง chamber ควบคุมความชื้นที่สภาวะต่าง ๆ
- 1.3.6 สร้างแท่นวัดขึ้นสาร
- 1.3.7 ศึกษาความต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปตามความชื้นของตัวอย่างหัตถ์
- 1.3.8 ศึกษาลักษณะเฉพาะ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงแต่ละขั้นตอนของการทำตัวอย่าง
- 1.3.9 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างช่วงแรงอัด และช่วงอุณหภูมิการเผาอบผง ที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ และโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน

1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและการดำเนินงาน

- 1.4.1 ศึกษาระบบหัตถ์ความชื้นชนิดต่าง ๆ
- 1.4.2 เปรียบเทียบคุณสมบัติของหัตถ์แต่ละชนิด
- 1.4.3 สำรองอุปกรณ์ และเครื่องมือที่สามารถนำมาสร้างหัตถ์
- 1.4.4 สำรองเครื่องมือวิเคราะห์สมบัติหัตถ์
- 1.4.5 เลือกทดลองสร้างและศึกษา ชนิดหัตถ์ที่มีความพร้อมในการสร้างและวิเคราะห์
- 1.4.6 ดำเนินการสร้างและวิเคราะห์
- 1.4.7 สรุป และรายงานผล

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 สามารถสร้างตัวอย่างหัตถ์ความชื้นที่มีการตอบสนองต่าง ๆ อย่างมีนัยสำคัญ ที่สภาวะความชื้นที่เปลี่ยนไป
- 1.5.2 ได้แนวทางการทำหัตถ์ความชื้นที่ง่าย ต้นทุนต่ำ ได้คุณภาพในระดับยอมรับได้ เพื่อนำไปสู่การพัฒนาต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ความชื้น และการวัดความชื้น

ความชื้นในบรรยากาศเกิดการเปลี่ยนแปลงได้เกิดจาก อุณหภูมิ ความดัน ความเร็วลม เช่น เมื่อ อุณหภูมิสูงขึ้นอากาศจะสามารถเก็บกักไอน้ำไว้ได้มากขึ้น และสามารถปลดปล่อยออกเมื่ออุณหภูมิลดลง หรือลมเป็นสาเหตุหนึ่ง ที่สามารถพัดพาเอาความชื้นไปได้ด้วยได้ เนื่องจากเมื่อ ความเร็วลมสูงขึ้น ได้พัดพาเอาความชื้นที่บริเวณนั้นออกไป ทำให้ความดันลดลง และสามารถรับไอน้ำเพิ่มขึ้นได้ ดังนี้ ถ้าต้องการทราบความชื้น จำเป็นจะต้องทราบปริมาณไอน้ำในอากาศ ซึ่งมีการวัดได้หลายวิธี ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

การวัดการวัดปริมาณไอน้ำในอากาศมีหลายวิธีดังนี้ คือ วัดความกดไอน้ำหรือความดันไอ^[1] (Vapor Pressure) ความกดไอน้ำส่วนหนึ่งของอากาศเกิดจากการขยายตัวที่เกิดจากไอน้ำ ที่อุณหภูมิของอากาศและความชื้นสัมพัทธ์ค่าหนึ่งโดยสามารถนำมาเปรียบเทียบได้ เมื่อทราบค่าทั้งหมดในครั้งแรกและทำเป็นกราฟไว้สำหรับในครั้งต่อไปก็ไม่จำเป็นต้องทราบค่าทั้งหมดก็สามารถเทียบได้ โดยทราบเพียงอุณหภูมิและความชื้นเท่านั้นก็จะทราบความดันไอน้ำจะเป็นได้

ความชื้นสัมพัทธ์^[1,2] (Relative Humidity) คืออัตราส่วนสัมพัทธ์ของมวลไอน้ำที่มีอยู่จริงในอากาศบริเวณที่ต้องการวัดกับมวลไอน้ำอิ่มตัว ณ อุณหภูมินั้นโดยคิดเป็นอัตราส่วนหรือเปอร์เซ็นต์

โดยจะเขียนเป็นสูตรได้ดังนี้

$$\text{ความชื้นสัมพัทธ์} = \frac{\text{มวลอากาศจริง}}{\text{มวลไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมินั้น}} \times 100 \quad (2.1)$$

โดยถ้าไอน้ำถูกเพิ่มมากขึ้นจะรวมตัวกันเป็นหยดน้ำ นั่นคืออากาศไม่สามารถเก็บกักไอน้ำไว้ได้อีกต่อไปนั่นเอง ซึ่งมีแนวความคิดในการหาความชื้นสัมพัทธ์ด้วยวิธีสัดส่วนโมล ดังความสัมพันธ์ตาม สมการที่ 2.2

$$\chi_v = \frac{n_v}{n_a + n_v} \quad (2.2)$$

เมื่อ χ_v คือ สัดส่วนโมลของไอน้ำ

n_v คือ โมลของน้ำ

n_a คือ โมลของอากาศ

ถ้า p คือความดันบรรยากาศ ความดันของไอน้ำคือ

$$p_v = \chi_v p \quad (2.3)$$

เมื่อ p_v คือความดันย่อย (partial pressure) ของไอน้ำ ในอากาศ

โมลรวมของอากาศประกอบด้วย สัดส่วนโมลของไอน้ำรวมกับอากาศแห้ง มีค่าเท่ากับ 1 ดังแสดงในสมการที่ 2.4

$$\chi_v + \chi_a = 1 \quad (2.4)$$

เมื่อ χ_v คือ สัดส่วนโมลของไอน้ำ (mole fraction of water vapor)

χ_a คือ สัดส่วนโมลของอากาศ (mole fraction of dry air)

ถ้าหากไอน้ำเพิ่มขึ้นจนถึงจุดอิ่มตัว จะเป็นสภาวะที่ไอน้ำอิ่มตัวเหนือน้ำดังสมการที่ 2.5

$$\chi_v = \chi_{vw} \quad (2.5)$$

เมื่อ χ_{vw} คือ สัดส่วนโมลของไอน้ำที่สภาวะอิ่มตัวเหนือน้ำ

(mole fraction of water vapor at saturation over water)

ดังนั้น ความชื้นสัมพัทธ์จะมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.6

$$U(p,t) = 100 \chi_v / \chi_{vw} \quad (2.6)$$

เมื่อ $U(p,t)$ คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity) ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิและความดันซึ่งเป็นเปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสถานะที่ไอน้ำอยู่ในสภาวะสมดุลกับน้ำ e_w คือ ความดันไออิ่มตัวซึ่งจะขึ้นกับอุณหภูมิเท่านั้น ในขั้นแรกคาดได้ว่าเป็นส่วนความดันย่อยของไอน้ำที่อิ่มตัวในอากาศ $p_{vw} = \chi_{vw} p$ มีค่าเป็น e_w ดังแสดงในสมการที่ 2.7

$$p_{vw} = \chi_{vw} p = f_w(p, t) e_w(t) \quad (2.7)$$

เมื่อ f_w คือ enhancement factor ที่ความดันไม่สูงมากจะมีค่าประมาณ 1.04

เป็นค่าเบี่ยงเบนจากก๊าซอุดมคติ

p_{vw} คือ ค่าความไอน้ำดันอิ่มตัวเหนือน้ำ

(pressure of water vapor at saturation over water)

e_w คือ ความดันไออิ่มตัวที่สภาวะสมดุลเหนือน้ำ

(saturation vapor pressure at saturation over water)

สมการ(2.7) ใช้ได้ถ้าหากความดัน (p) ไม่น้อยกว่าค่าความกดไอน้ำอิ่มตัว (f_w)

คูณด้วยค่าเบี่ยงเบน (e_w) ดังสมการที่ 2.8

$$p \geq f_w e_w \quad (2.8)$$

จุดควบแน่น^[1,2] (Dew Point) หมายถึงอากาศและไอน้ำ ถูกทำให้เย็นลงที่ความดันคงที่จะเกิดการควบแน่นขึ้น ซึ่งการลดลงของอุณหภูมิเป็นเหตุที่ทำให้เกิดการควบแน่นนี้เรียกว่า จุดที่ไอน้ำอิ่มตัว โดยสัดส่วนโมลของไอน้ำ จะเท่ากับ สัดส่วนโมลไอน้ำที่อิ่มตัวเหนือน้ำ ซึ่งแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิและความดัน ดังสมการที่ 2.9

$$\chi_w = \chi_{vw}(p, t_d) \quad (2.9)$$

$$= f_w(p, t_d) e_w(t_d)$$

$$\approx \frac{e_w(t_d)}{p} \quad (2.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.10 เป็นการประมาณค่าที่ดี ที่ความดันบรรยากาศ (จากสมการที่ 2.6 และ 2.9) ซึ่งจะมีความสัมพันธ์ระหว่างจุดควบแน่น กับ ความชื้นสัมพัทธ์ได้ซึ่งขึ้นกับความดันและอุณหภูมิ ดังสมการที่ 2.11 โดยสมการที่ 2.12 จะเป็นการประมาณค่าที่ดีกว่าสมการที่ 2.10 เนื่องจากไม่ต้องใช้ค่าเบี่ยงเบนอีกต่อไป

$$U = 100\chi_{vw}(p, t_d) \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} & \chi_{vw}(p, t) \\ &= \frac{100f_w(p, t_d)e_w(t_d)}{f_w(p, t)e_w(t)} \\ &\approx \frac{100e_w(t_d)}{e_w(t)} \end{aligned} \quad (2.12)$$

สัดส่วนโมลของไอน้ำ หรืออากาศในอากาศชื้น แสดงได้ดังสมการที่ 2.13

$$\begin{aligned} \chi_v &= \chi_{vw}(p, t_d) = \chi_v(p, t) \\ \chi_v &= n_v / (n_a + n_v) = n_v / n \\ \chi_a &= n_a / n \\ n_v &= m_v / M_v \\ n_a &= m_a / M_a \\ \chi_v &= r [(M_v / M_a) + r] = r / (0.62198 + r) \end{aligned}$$

เมื่อ m_v คือ มวลของไอน้ำในอากาศ

m_a คือ มวลของอากาศแห้ง

r คือ Mixing ratio

ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่อุณหภูมิและความดันต่าง ๆ กัน สามารถอธิบายได้สมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} U &= 100\chi_v \\ &= \frac{100f_w(p, t_d) e_w(t_d)}{f_w(p, t) e_w(t)} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 &= \frac{100f_i(p,t_f) e_i(t_f)}{f_i(p,t_f) e_i(t_f)} \\
 &\approx \frac{100e_w(t_d)}{e_w(t)} \\
 &\approx \frac{100e_w(t_f)}{e_w(t)}
 \end{aligned}$$

เมื่อ t_d คือ dew point temperature

t_f คือ frost point temperature

e_i คือ saturation vapor pressure at saturation over ice

f_i คือ enhancement factor at saturation over ice

Mixing ratio ^[2]

$$\begin{aligned}
 r &= m/m_a \\
 &= \frac{M_v \chi_v}{M_a (1-\chi_v)} = \frac{0.62198 \chi_v}{(1-\chi_v)}
 \end{aligned}$$

โดย $M_v = 18.015 \text{ g/mole}$

$M_a = 28.965 \text{ g/mole}$

อุณหภูมิตุ้มเปียก วัดได้โดยใช้ไซโครมิเตอร์ (Psychrometer) ตุ้มเปียก-ตุ้มแห้ง โดยใช้ผ้าที่เก็บกักความชื้นได้ง่าย เช่นผ้ามีสลลิน ชุบน้ำแล้วไปพันไว้ที่กระเปาะด้านล่างของไซโครมิเตอร์ตุ้มเปียก นำไปวางไว้ในบริเวณที่ต้องการวัดปริมาณความชื้นในอากาศ แล้วน้ำจะระเหย โดยหลักการทั่วไปของการระเหยของน้ำได้จะต้องการพลังงานความร้อนช่วยในการระเหย แหล่งความร้อนที่จะใช้คือความร้อนจากที่ใกล้ตัว ซึ่งดึงความร้อนจากบริเวณใกล้กระเปาะเทอร์โมมิเตอร์ และที่บริเวณเทอร์โมมิเตอร์นั่นเอง จึงส่งผลทำให้ไซโครมิเตอร์ตุ้มเปียกมีอุณหภูมิต่ำกว่าไซโครมิเตอร์ตุ้มแห้งเพราะได้ดึงเอาปริมาณความร้อนออกไปใช้ในการระเหยน้ำ เมื่อถึงไว้ระยะหนึ่ง อัตราการระเหยจะค่อย ๆ ลดลง เพราะไอน้ำบริเวณกระเปาะเปียกเริ่มมีปริมาณเพิ่มขึ้น ทำให้เห็นความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างกระเปาะเปียกกระเปาะแห้งคงที่ ทำให้สามารถอ่านความแตกต่างของอุณหภูมิได้ เนื่องจากโดยธรรมชาติจะพยายามทำให้เกิดความสมดุลโดยถ้าเอาน้ำมาตั้งไว้มันก็จะระเหยจนบรรยากาศระบบปิดรอบข้างอิ่มตัวโดยอัตราการระเหยจะช้าลงเรื่อยๆเมื่ออากาศใกล้อิ่มตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความชื้นสัมบูรณ์ ^[1] (Absolute Humidity) คือความหนาแน่นเป็นน้ำหนักของไอน้ำตามปกติใช้วัดเป็นกรัมต่อคิวบิกเมตร หรือเกรนต่อคิวบิกฟุต จะได้ความสัมพันธ์ว่า

$$\text{ความชื้นสัมบูรณ์} = (10^5 \times \text{ความกดไอน้ำ} / R \text{ water vapor}) \times \text{อุณหภูมิ (g m}^{-3}\text{)}$$

เมื่อ R คือ ค่าก๊าซคงที่ของไอน้ำ

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบหน่วยการวัดน้ำหนัก

กรัม	เกรน	ออนซ์	ปอนด์
g	gr.	oz.	lb.
1	15.4321	0.03527	0.0022
0.0648	1	0.00229	0.00014

จุดน้ำค้าง หรือ จุดควบแน่น ^[1] (Dew Point) อากาศและไอน้ำ ถูกทำให้เย็นลงที่ความดันคงที่ จะเกิดการควบแน่นขึ้น ซึ่งการลดลงของอุณหภูมิเป็นเหตุที่ทำให้เกิดการควบแน่นนี้ เรียกว่า จุดที่ไอน้ำอิ่มตัว ดังจะเห็นได้ในชีวิตประจำวันเมื่อเรารินน้ำเย็นใส่แก้วแล้วทิ้งไว้เห็นไอน้ำเกาะข้างแก้ว หรือวันที่เราเห็นหมอกนั่นก็เป็นปรากฏการณ์ที่มีการควบแน่นของไอน้ำเกิดขึ้นเช่นกัน

ความชื้นจำเพาะ ^[1] (Specific Humidity) คืออัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของน้ำต่ออากาศแห้ง คิดจากความหนาแน่นของไอน้ำต่อความหนาแน่นของอากาศโดย ทำความเข้าใจก่อนว่า ในความเป็นจริงแล้วอากาศ ประกอบด้วยอากาศแห้งรวมกับไอน้ำ โดยในกรณีนี้ใช้ได้เฉพาะกรณีที่ไม่มีไอน้ำเพิ่มหรือหายไปจากระบบ

2.2 เทคนิคการวัดความชื้น ^[3]

การวัดความชื้นมีเทคนิคที่ใช้เป็นหลักการวัดอยู่ด้วยกันหลายแบบ แต่ละแบบมีข้อดีข้อเสียต่างกัน การเลือกเทคนิคและวิธีการวัดนั้น ขึ้นอยู่กับความเหมาะสม ในการนำไปใช้งาน ซึ่งแต่ละเทคนิคได้สรุปไว้ในตารางที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบข้อดีข้อด้อยของการวัดในรูปแบบต่าง ๆ

	Price	Dimension	Electronic interface	Maintenance	Precision	Measurement range
Dew point	*	*	**	**	****	0-100% RH
Psychrometer	**	**	***	**	***	0-100% RH
Sorption LiCl	*	*	*	**	***	12-100% RH
Hair	****	**	**	***	*	0-100% RH
Impedance	****	****	***	***	**	0-100% RH

หมายเหตุ

* = แย่

**** = ดีมาก

ในการพิจารณารูปแบบการวัดนั้น จากตารางที่ 2.2 จะเห็นได้ว่า การวัดจุดควบแน่นหรือ Dew point นั้น แม้จะมีความแม่นยำมาก แต่ยังคงมีราคาสูงขนาดไม่กระทัดรัดและไม่คงทน ด้านไซโครมิเตอร์ ความแม่นยำจะอยู่ในระดับกลาง ๆ เช่นเดียวกับแบบ Sorption LiCl แต่ LiCl จะแพงกว่า และจำเป็นต้องเชื่อมต่อกับอิเล็กทรอนิกส์ แต่การวัดค่าความต้านทานนั้น สามารถทำได้ในราคาถูก ซึ่งเป็นจุดสำคัญสำหรับการพัฒนานี้ นอกจากนี้ยังมีขนาดเล็ก มีความคงทน และมีช่วงการวัดที่กว้าง ถึงแม้ว่าระดับความแม่นยำจะด้อยกว่าเล็กน้อย จึงทำให้ผู้วิจัย สนใจที่จะศึกษาหาวัดความชื้นโดยการวัดจากความต้านทานดังกล่าว

สำหรับระบบในการสร้างหัววัด มีอยู่หลายวิธี โดยผู้วิจัยได้ทำการรวบรวม และวิเคราะห์จากปัจจัยประกอบหลาย ๆ ด้าน ไม่ว่าจะเป็นเทคโนโลยีของระบบ ต้นทุนการผลิต ลักษณะของสารตั้งต้น ระดับความปลอดภัยขณะดำเนินการวิจัย และความพร้อมของเครื่องมือที่จะทำการผลิต จากตาราง 2.3 จะเห็นได้ว่า วิธีที่เหมาะสมที่สุด คือวิธีการอัดขึ้นรูปแบบแห้ง และเผาอบผนึก (Dry pressing and sintering) ซึ่งไม่ใช้เทคโนโลยีระดับสูงในการผลิต มีความปลอดภัย และมีความพร้อมของเครื่องมือ รวมถึงสารตั้งต้นมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

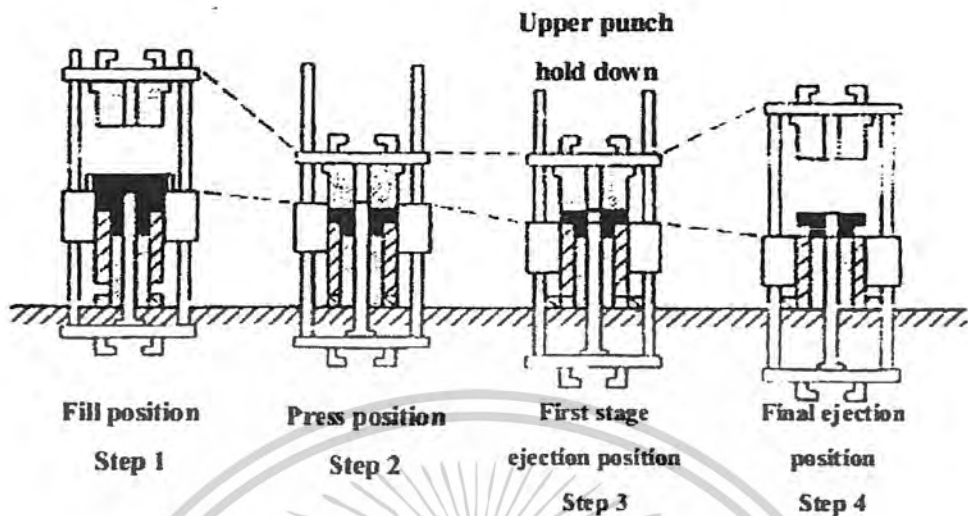
ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบระบบการสร้างหัววัดความชื้นด้วยเทคนิคต่าง ๆ

ระบบการสร้าง	Technology	ต้นทุนการผลิต	สารตั้งต้น	ความปลอดภัย	เครื่องมือที่มี
Evaporate	สูง	แพง	จุดหลอมเหลวต่ำ	ต้องควบคุม	พร้อม
Sputtering	สูง	แพง	จุดหลอมเหลวสูง	ต้องควบคุม	ไม่พร้อม
Electrode Plating	ต่ำ	ถูก	สารละลาย, ค่า E_0	ต้องควบคุม	จัดหาได้ง่าย
Dry pressing & Sintering	ต่ำ	ถูก	เป็นผง สามารถ อัดเม็ดได้	ปลอดภัย	พร้อม
Chemical bath	ต่ำ	ถูก	สารละลาย	ต้องควบคุม	จัดหาได้
Hot Plate	ต่ำ	ถูก	ของเหลว	ต้องควบคุม	จัดหาได้ง่าย

2.3 การอัดขึ้นรูป (forming process) ^[4]

การอัดขึ้นรูป เป็นการเลือกระบบการสร้างหัววัดความชื้นแบบหนึ่งในหลายแบบ โดยอาศัยหลักการขึ้นรูปในกระบวนการเซรามิก ที่ต้องการให้อนุภาคอยู่ใกล้ชิดกัน พร้อมทั้งจะทำปฏิกิริยาเคมีได้ง่าย มีการจัดเรียงตัวกันสูงและมีความสม่ำเสมอ ลดความพรุนเพื่อให้ความหนาแน่นสูง เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีรูปทรงใกล้เคียงกับชิ้นงานหลังการเผาอบผง ซึ่งเทคนิคในการขึ้นรูปมีหลายวิธีเช่น การอัดแบบแห้ง, การอัดแบบให้แรงเท่ากันทุกทิศทาง(isostatic pressing), การหล่อแบบ (slip casting) เป็นต้น ในการวิจัยนี้เลือกใช้การขึ้นรูปแบบแห้ง เพราะเป็นเทคนิคที่ง่ายและใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเซรามิกที่มีการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปทรงไม่ซับซ้อนและมีขนาดเล็ก

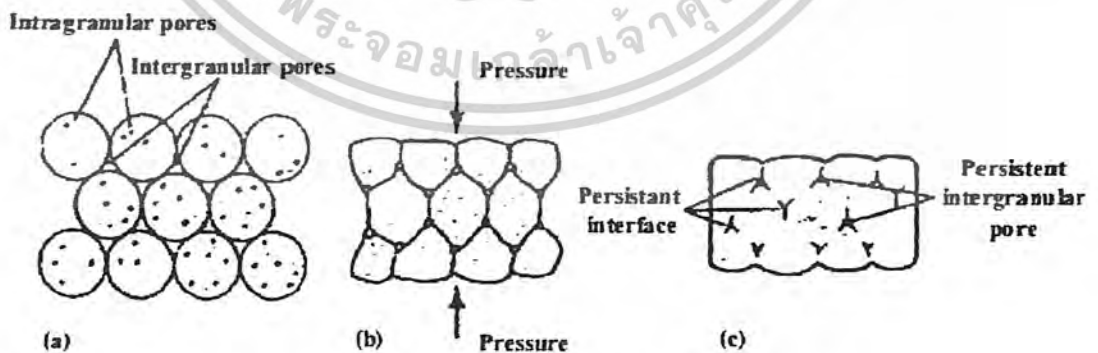
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 แสดงขั้นตอนการอัดขึ้นรูปแบบแห้งมี 4 ขั้นตอนคือ
บรรจุ อัด เริ่มต้นออก และนำชิ้นงานออก

จากรูปที่ 2.1 สามารถอธิบายขั้นตอนการอัดขึ้นรูปได้ดังนี้

1. เติมผงสารลงในแม่แบบให้มีปริมาณที่เหมาะสม เข้าไปภายในกระบอกบรรจุสาร
2. ให้แรงอัดกับผงสาร จะทำให้ผงสารมีการจัดเรียงตัวกันใหม่ (rearrangement) เพื่อลดขนาดช่องว่าง ซึ่งได้แสดงไว้ดังรูปที่ 2.2
3. การดันชิ้นงานออกจากแม่แบบ ชิ้นงานจะเกิดการขยายตัว เนื่องจากมีการปลดปล่อยความเค้นตกค้าง (residual stress) ภายในชิ้นงานออกมา เรียกว่าเกิด spring back การใช้แรงอัดที่สูงมากเกินไปจะทำให้เกิดปัญหาตามมา เช่น การแยกตัวเป็นชั้นภายในชิ้นงาน เป็นต้น



รูปที่ 2.2 กลไกต่าง ๆ ในการอัดผงอนุภาคที่เกาะตัวกันเป็นก้อน

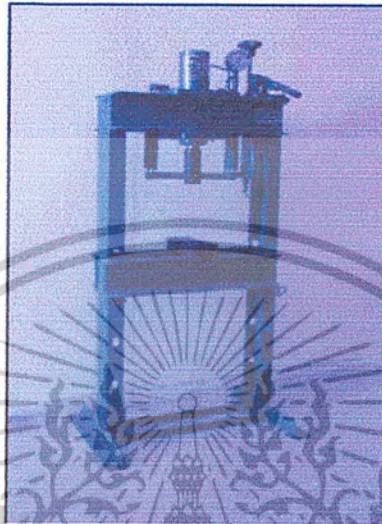
(a) การจัดเรียงตัวของเม็ดผง

(b) การผิดรูปของเม็ดผง เมื่อถูกอัดด้วยความดันสูง

(c) ชิ้นงานที่ผ่านการอัดและให้อุณหภูมิจะมีปริมาณรูพรุนลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนูญาติเห็นว่าใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องอัด ที่ใช้ขึ้นรูปผงสารในงานวิจัยครั้งนี้ แสดงดังรูปที่ 2.3 โดยเครื่องสามารถอัดได้ที่แรงอัด สูงสุดมากถึง 12 ตัน

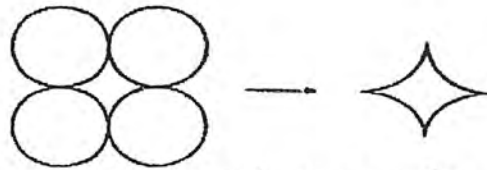


รูปที่ 2.3 เครื่องอัดขึ้นรูป ผงสาร

2.4 การอบผนึก^[4] (Sintering)

ผงที่ผ่านการขึ้นรูป จะนำมาเผาอบผนึกเพื่อกำจัดรูพรุนออกจากอนุภาคของชิ้นงาน โดยมีการเชื่อมติดกันระหว่างอนุภาคที่สัมผัสกัน จุดสัมผัสระหว่างอนุภาคที่อยู่ใกล้กันนี้ มีความสำคัญต่อการสร้างขอบเกรน (grain boundary) เพราะขอบเกรนเป็นบริเวณที่อะตอมมีการเคลื่อนที่สูง ทำให้มีการถ่ายเทมวล โดยอนุภาคที่มีแรงขับเคลื่อนในการแพร่สูง จะทำให้อะตอมเกิดการเคลื่อนที่สูง เพื่อลดพลังงานพื้นผิวของอนุภาคที่มีค่าสูงให้ต่ำลง เป็นผลให้พื้นที่ผิวโดยรวมลดลง การเชื่อมติดกันระหว่างอนุภาคโตมากขึ้น อะตอมมีการเคลื่อนที่จากขอบเกรนสู่รูพรุน ทำให้เกิดการหดตัว มีความหนาแน่นสูงขึ้น และมีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบมากขึ้นเป็นขั้นตอนโดยสรุปได้ 3 ขั้นตอน ซึ่งจะแสดงไว้ในรูปที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปร่างของรูพรุนก่อนการเผาอบผง



รูปร่างของรูพรุนเผาอบผงขั้นแรก

การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของรูพรุน



(a) จุดสัมผัสระหว่างอนุภาค



(b) ขั้นแรก



(c) ขั้นกลาง



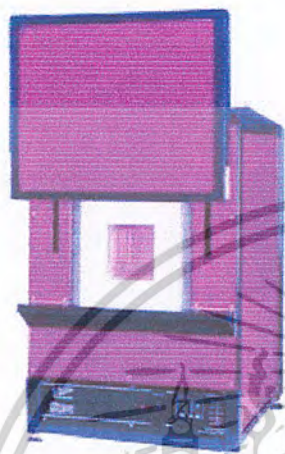
(d) ขั้นสุดท้าย

รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางจุลภาคในระหว่างกระบวนการเผาอบผง

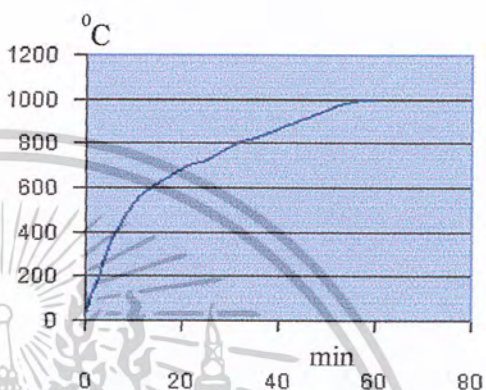
1. ขั้นแรก (initial stage) อนุภาคสัมผัสกัน เกิดการถ่ายเทมวลจากส่วนโค้ง สู่ส่วนแนว ทำให้อนุภาคที่อยู่ติดกัน เชื่อมติดกันมากขึ้น
2. ขั้นกลาง (intermediate stage) โครงสร้างของรูพรุน เป็นแบบร่างแห เป็นรูพรุนเปิดที่ต่อเนื่องกัน อนุภาคเคลื่อนที่เข้าใกล้กัน นำไปสู่การหดตัว โดยมีการสร้างขอบเกรน และขอบเกรนเกิดการเคลื่อนที่ทำให้เกรนโตขึ้น
3. ขั้นสุดท้าย (final stage) รูพรุนมีปริมาณเล็กลง และเป็นรูพรุนปิด มีรูปร่างกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เตา(furnace) ที่ใช้สำหรับการเผาอบ แสดงดังรูป 2.5 สามารถให้อุณหภูมิได้สูงสุดถึง 1200 °C ควบคุมด้วยระบบ Digital controller สามารถให้อุณหภูมิสูง 1000°C ภายใน 1 ชั่วโมง ดังแสดงโดยกราฟรูป 2.6 ซึ่งแสดงถึงอุณหภูมิขาขึ้นของเตา เทียบกับเวลา



รูปที่ 2.5 เตาเผาอบหมึก (furnace)



รูปที่ 2.6 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในเตา เทียบกับเวลา

2.5 การเลือกสารเพื่อทดลองสร้างหัววัดความชื้น^[3,5]

หัววัดความชื้นที่ใช้หลักการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานนั้น ทำจากสารละลายออกไซด์ของโลหะชนิดต่าง ๆ ซึ่งแบ่งออกได้เป็นชนิดหลักคือ ใช้และไม่ใช้ความร้อนในการคืนสภาพ ซึ่งสรุปได้ดังนี้

- ใช้ตัวทำความร้อนช่วยในการคืนสภาพ

หัววัดความชื้นประเภทนี้ จะใช้แหล่งความร้อนที่สร้างขึ้น ช่วยไล่ความชื้นออกไปหลังจากที่วัดค่าความชื้นได้แล้ว และก่อนที่จะวัดความชื้นจุดใหม่

เป็นสารประกอบจำพวก $\text{TiO}_2\text{-V}_2\text{O}_5$, $\text{MgCr}_2\text{O}_4\text{-TiO}_2$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-SnO}_2$, $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$

- ไม่ใช้ตัวทำความร้อนช่วยในการคืนสภาพ

หัววัดประเภทนี้แตกต่างจากประเภทแรก คือไม่ต้องใช้ความร้อนช่วยไล่ความชื้นออกไป จะอาศัยหลักการสมดุลกับสภาพแวดล้อม เข้ามาช่วย

เป็นสารประกอบจำพวก LiVO_4 , $\text{ZnCr}_2\text{O}_4\text{-LiZnVO}_4$, $\text{NiO-Cr}_2\text{O}_3$, $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$,

$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_2$, $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2\text{-K}_2\text{O}$

จากข้อมูลทั้ง 2 กลุ่ม ได้แสดงดังตารางที่ 2.4 ในส่วนของการวัดความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

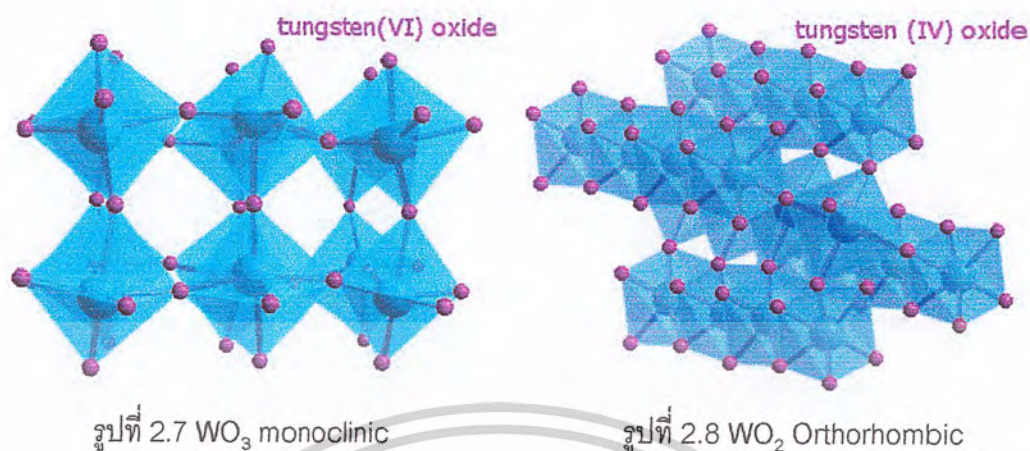
ตารางที่ 2.4 แสดงตัวอย่างของตัวตรวจวัดที่ตอบสนองกับตัวแปรต่าง ๆ

ชนิดที่วัด	วัสดุที่ใช้สร้างหัววัด	Sensor Function
1. อุณหภูมิ	(Mn,Cu) (Mn,Co,Ni) ₂ O ₄ , CoAl ₂ O ₄ NiAl ₂ O ₄ , Mg(Al,Cr,Fe) ₂ O ₄ , SiC BaTiO ₃ VO ₂ , (Mn,Zn)FeO ₄	NTC thermistor PTC thermistor Temperature switch
2. ความชื้น	MgCr ₂ O ₄ -TiO ₂ , V ₂ O ₅ -TiO ₂ ZnCr ₂ O ₄ -LiZnVO ₄ , Al ₂ O ₃ Ca ₁₀ (PO ₄) ₆ (OH) ₂ ZrO ₂ -MgO	H ₂ O (Ionic conduction) H ₂ O (Electronic conduction)
3. ก๊าซ	SnO ₂ , ZnO, γ-Fe ₂ O ₃ α-Fe ₂ O ₃ TiO ₂ , CoO-MgO ZrO ₂ -CaO, MgO, Y ₂ O ₃	CH ₄ , i-C ₄ H ₁₀ , etc - (Electronic conduction) O ₂ (Electronic conduction) O ₂ (Ionic conduction)
4. Ion	AgX (x: Cl, Br, I, CN, SCN) PbS-Ag ₂ S, CdS-AgS, LaF ₃	Ion selective electrode
5. Position Velocity	Pb (Zr, Ti) O ₃	Piezoelectricity
6. Optic	PbTiO ₃ , LiTaO ₃ , LiNbO ₃ Pb(Zr,Ti)O ₃ CaF ₂ , Li ₂ B ₄ O ₇	Pyroelectricity (infrared detection) Thermoluminescence

(Reproduced with permission by Nitta, T., Denshi Zaiyo, 21 (11) 75 (1982).)

จะเห็นได้ว่า โลหะออกไซด์ WO₃ โครงสร้างภายในมีลักษณะรูพรุนมาก แต่ยังไม่มีความสนใจนำมาทำเป็นตัวตรวจวัดความชื้น ทั้งที่มี oxidation state ของทั้งสเต็มหลายค่า ผู้วิจัยจึงสนใจและคาดว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงไปกับความชื้นได้ ซึ่งผู้วิจัยจะใช้ผงสำเร็จอัดขึ้นรูปเป็นเม็ดยามาทำการศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



2.6 ความนำไฟฟ้าของหัววัดความชื้น^[3,5]

การตอบสนองต่อความชื้นของหัววัดประเภทเซรามิกโดยส่วนใหญ่ ที่อาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงค่าความนำไฟฟ้า สามารถอธิบายได้ดังนี้คือ ค่าความนำไฟฟ้าของทั้งชั้นสาร หรือผิวหน้าของสาร จะแปรผกผันกับสภาพความชื้นรอบข้าง ซึ่งจะเกิดขึ้นกับความนำทางไฟฟ้าภายในสารอยู่ 2 ชนิดคือ ความนำเนื่องจากไอออน (ionic conduction) มาจากการซึมซับทางกายภาพ (physisorption) ของน้ำ เข้ามาในรูปแบบของไอออนบวก และไอออนลบ หัววัดบางชนิดอาจใช้การเปลี่ยนแปลงในลักษณะความนำเนื่องจากอิเล็กตรอนภายใน (electronic conduction) คล้ายกับการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานโดยการเติมสารเจือให้กับสารกึ่งตัวนำ แต่สารเจือที่เติมนี้ มีการเปลี่ยนแปลงตามปริมาณความชื้นที่วัด ซึ่งเป็นผลจากการซึมซับทางเคมี (chemisorption) รอบ ๆ อุณหภูมิห้อง แต่โดยปกติทั่วไปแล้ว วัสดุชนิดเซรามิกส่วนมาก ที่นำมาทำเป็นหัววัดความชื้น ที่อาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานนั้น มักจะเป็นแบบ ionic ซึ่งง่ายต่อการเกิดรูปแบบกลุ่ม hydrophilic hydroxyl บนผิวหน้าที่มีความไวต่อการตอบสนองต่อไอน้ำ ดังนั้นเมื่อความชื้นที่หัววัดเพิ่มขึ้น จะเป็นผลให้ค่าความต้านทานของหัววัดนั้นลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 การวิเคราะห์สมบัติของตัวอย่าง ด้วยวิธี X-Ray Diffraction^[6]

การศึกษาโครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ใช้วิธี ดิฟแฟรกโทมิเตอร์ (Diffractometer Method) เทคนิคนี้ใช้รังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดียว (Cu = target ความยาวคลื่น 0.1542 nm) ตกกระทบตัวอย่าง ซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือวัสดุหลายผลึกก็ได้ ซึ่งสารตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม θ ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรังสีเอกซ์ (X-ray detector) จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม 2θ เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ ลักษณะภายนอกของเครื่องมือที่ใช้เป็นดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 X-Ray diffractometer

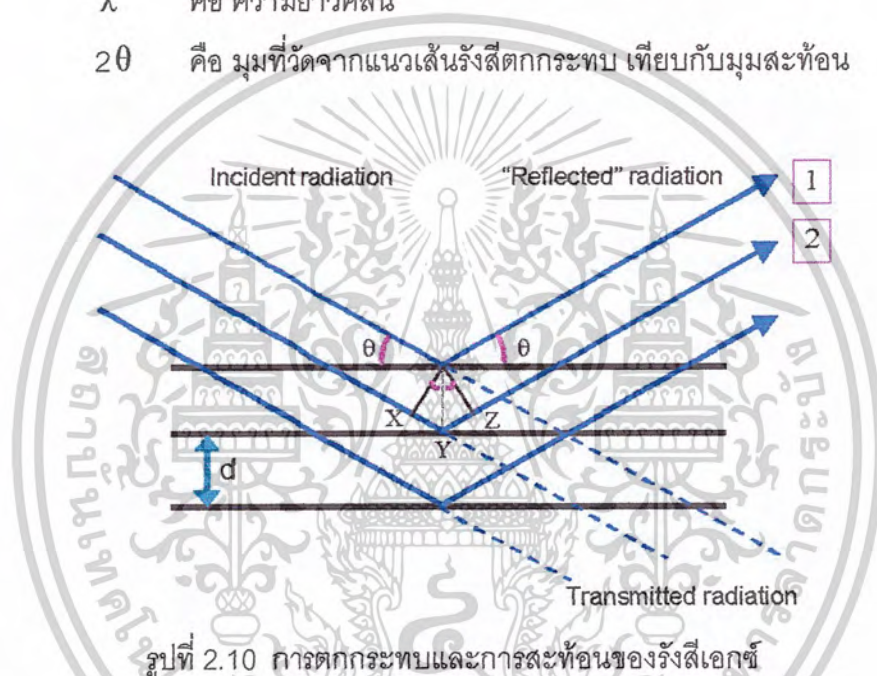
2.7.1 กฎของแบรกก์

ในปี พ.ศ. 2455 (ค.ศ. 1912) W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดที่ว่า เราสามารถมองว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น(layer) หรือ ระนาบ(plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ โดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน ทั้งนี้ลำคลื่นที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่างๆ ดังกล่าวจะมีความเข้มสูง ถ้าหากความแตกต่างระหว่างระยะเดินทาง(path difference) ของคลื่นที่สะท้อนจากระนาบที่อยู่ข้างเคียง จะมีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบ ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลง 47282 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$2 d_{hkl} \sin \theta = n \lambda$$

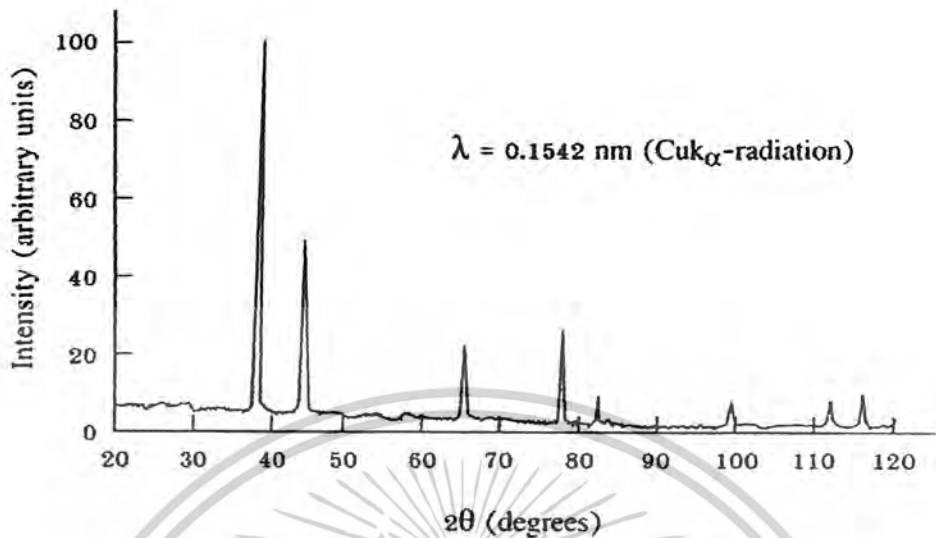
- เมื่อ d_{hkl} คือ ระยะระหว่างระนาบ
- θ คือ มุมสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอกซ์ซึ่งจะเท่ากับมุมตกกระทบ
- n คือ อันดับการเลี้ยวเบน มีค่าตั้งแต่ 1,2,3...
- λ คือ ความยาวคลื่น
- 2θ คือ มุมที่วัดจากแนวเส้นรังสีตกกระทบ เทียบกับมุมสะท้อน



รูปที่ 2.10 การตกกระทบและการสะท้อนของรังสีเอกซ์

ระนาบต่างๆของผลึกไม่ได้ก่อให้เกิดการสะท้อนเสมอไป ระนาบใดที่รังสีเอกซ์ตกกระทบแล้วกระเจิงออกมาอย่างสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่าระนาบแบรกก์ (Bragg plane) และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับแนวที่ขนานกับรังสีตกกระทบเรียกว่ามุมเลี้ยวเบน (diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมสะท้อน กราฟระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ระนาบต่าง ๆ ของผลึกกับมุม 2θ ของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบและสะท้อน แสดงดังรูปที่ 2.10 เมื่อนำผลการวัดความเข้มของรังสีเอกซ์ตกกระทบเทียบกับมุม 2θ สามารถแสดงผลได้ดังรูปที่ 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 รูปแบบของการเลี้ยวเบนจากรังสีเอกซ์
ที่ห้วงวัดรังสีเอกซ์กับมุม 2θ ที่กวาดไป

จากรูปที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์และมุมเลี้ยวเบน เรียกว่า รูปแบบของการเลี้ยวเบน (Diffraction pattern) ซึ่งสำหรับธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกันก็จะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ต่างกัน ซึ่งสังเกตได้จากยอด (peak) ในรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกนั้น สามารถทำได้โดยการคำนวณ หรือตรวจสอบข้อมูลที่ได้จาก Diffraction pattern กับ Powder Diffraction File (PDF) ซึ่งเป็นฐานข้อมูลเกี่ยวกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของวัสดุที่ได้ จากการรวบรวมรายงานการศึกษาและวิเคราะห์วัสดุด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟร็กชัน โดยข้อมูลส่วนใหญ่จะมาจากเอกสารทางวิชาการต่างๆ ก่อนจะตีพิมพ์ในหนังสือ หรือ CD-ROM เป็นประจำทุกปี เพื่อให้เป็นข้อมูลมาตรฐานสำหรับการอ้างอิง

บัตรข้อมูล PDF ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญดังนี้คือ

1. เซตและหมายเลขไฟล์ (set and file number)
2. พีคที่มีความเข้มมากที่สุด 3 ลำดับแรก (three strongest lines)
3. พีคที่ตำแหน่งมุมต่ำที่สุด (lowest-angle line)
4. สูตรเคมีและชื่อสาร (chemical formula and name of substance)
5. ข้อมูลวิธีการเลี้ยวเบนที่ใช้ (data on diffraction method used) เช่น แหล่งกำเนิด

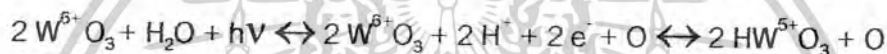
เอกซเรย์และฟิลเตอร์ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

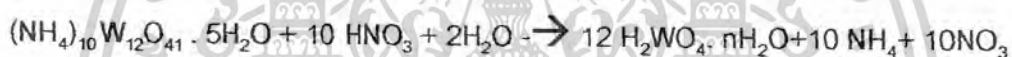
6. ข้อมูลทางผลึกวิทยา (crystallographic data) เช่น รูปร่างผลึก และ ขนาดหน่วยเซลล์ เป็นต้น
7. ข้อมูลทางแสงและอื่นๆ (optical and other data)
8. ข้อมูลของตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์ (data on specimen)
9. รูปแบบการกระเจิงรังสีเอกซเรย์ของวัสดุ จะบอกค่าความเข้มสัมพัทธ์ (I/I_1) ซึ่งแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ของพีคที่มีความเข้มสูงสุด และระนาบผลึก (hkl)

2.8 ข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

ในกรณีที่ไม่มีผงสาร ทั้งสแตนออกไซด์ (WO_3) อยู่ก่อนสามารถเตรียม WO_3 ขึ้นด้วยวิธีต่าง ๆ ดังนี้



หรืออีกวิธีหนึ่ง [7]



สังเคราะห์จากแอมโมเนียมทั้งสเตรท โดยทำปฏิกิริยากับกรดไนตริก แล้วนำไปอบเพื่อระเหยน้ำที่อุณหภูมิประมาณ $200^\circ C$ [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การดำเนินการโครงการวิจัยที่ได้ดำเนินการมา มีขั้นตอนการทำงานดังนี้

1. ศึกษาการวัดความชื้นภาคทฤษฎีพื้นฐาน
2. ทำอุปกรณ์การวัดความชื้นอย่างง่าย
3. ค้นหารูปแบบการวัดความชื้นด้วยหัววัดแบบโซลิดสเตท
4. เลือกชนิดที่จะสร้าง
5. สำรวจเครื่องมือที่จำเป็นและศึกษาวิธีใช้งาน
6. สำรวจเครื่องมือวัดภายในคณะ
7. ตัดสินใจสร้างหัววัดที่มีความพร้อมที่สุด
8. สร้างอุปกรณ์ที่ยังขาดและต้องการใช้
 - 8.1 แบบอัดขึ้นรูป
 - 8.2 chamber ควบคุมความชื้นที่สถานะต่างๆ
 - 8.3 แท่นวัดขึ้นสาร
9. ทดลองสร้างหัววัด
10. วิเคราะห์คุณสมบัติของตัวอย่างหัววัดที่สร้างได้
11. ปรับปรุงกระบวนการสร้างหัววัด
12. ดำเนินการสร้างหัววัด และตรวจสอบ
13. สรุป และรายงานผล

สามารถสรุปเป็นขั้นตอนหลักที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย แสดงเป็นแผนภาพลำดับขั้นตอน
ได้ดังรูปที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 ผังสรุปขั้นตอนการทำงาน

จากรูปที่ 3.1 จะเห็นได้ว่าในขั้นตอนการสร้างทวีดความชื้นและตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติของทวีดนั้นต้องมีการปรับปรุงแก้ไขหลายครั้ง ซึ่งอาจต้องใช้ระยะเวลา

3.2 ผลที่ได้จากการวัดความชื้นภาคทฤษฎีพื้นฐาน

จากการค้นคว้าและศึกษาระบบการวัดความชื้นในอากาศ ประกอบด้วยหลายวิธีด้วยกัน เมื่อสรุปเป็นหลักการ

พื้นฐานการวัดปริมาณไอน้ำในอากาศมี 7 วิธีคือ

1. ความกดไอน้ำหรือความดันไอ(Vapor Pressure)
2. ความชื้นสัมพัทธ์(Relative Humidity)
3. อุณหภูมิตุ้มเปียก(Wet Bulb temperature)
4. ความชื้นแท้(Absolute Humidity)
5. จุดน้ำค้าง(Dew Point)
6. ความชื้นจำเพาะ(Specific humidity)

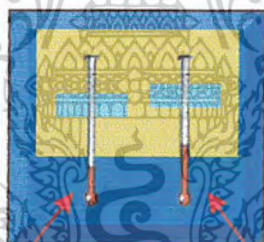
7. มิกซิง เรโซ(Mixing Ratio)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในแต่ละวิธีการจะเหมาะสมในแต่ละสภาพแวดล้อม ซึ่งการเลือกใช้วิธีใดนั้นขึ้นกับความเหมาะสมของการนำไปใช้งานสำหรับในโครงการวิจัยนี้ เลือกวิธีการวัดความชื้นสัมพัทธ์ โดยใช้ อุปกรณ์ไฮโครมิเตอร์ กระเปาะเปียก กระเปาะแห้ง เป็นพื้นฐานในการเปรียบเทียบ ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป

3.3 วิธีการสร้างไฮโครมิเตอร์กระเปาะเปียกกระเปาะแห้ง

ก่อนที่จะพัฒนาสร้างหัววัดความชื้นจะต้องคำนึงตัวตรวจวัดความชื้นที่จะนำมาตรวจสอบหรือเปรียบเทียบได้ ไฮโครมิเตอร์ชนิดกระเปาะเปียกกระเปาะแห้งซึ่งเป็นเครื่องมือวัดความชื้นพื้นฐานที่มีความน่าเชื่อถือและนำมาเปรียบเทียบได้ ดังนั้นการวิจัยนี้ซึ่งต้องดำเนินการจัดสร้างชุดดังกล่าวขึ้นเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ โดยการนำเทอร์โมมิเตอร์ 2 อันมายึดไว้ด้วยกัน นำใย Cotton ชุบน้ำไปพันที่กระเปาะเทอร์โมมิเตอร์ 1 อัน ทำให้เป็นไฮโครมิเตอร์ตุ้มเปียก และตุ้มแห้ง และนำมาประกอบดังรูป3.2



เทอร์โมมิเตอร์กระเปาะเปียก (พันฝ้ายมีสลิน)

เทอร์โมมิเตอร์กระเปาะแห้ง

รูปที่ 3.2 ไฮโครมิเตอร์กระเปาะเปียกกระเปาะแห้ง

จากรูปที่ 3.2 แสดงถึงไฮโครมิเตอร์ ซึ่งประกอบด้วยเทอร์โมมิเตอร์ 2 ชิ้น โดยด้านซ้ายมือจะเป็นกระเปาะเปียก สืบเนื่องจากระดับการวัดอุณหภูมิของปรอท ที่ต่ำกว่า และด้านขวามือ จะเป็นกระเปาะแห้ง ซึ่งวัดอุณหภูมิตามปกติ

ข้อควรระวัง เทอร์โมมิเตอร์ทั้งคู่ (ก่อนพันใยCotton) ต้องอ่านอุณหภูมิได้เท่ากัน หากไม่เท่ากัน ต้องบันทึกผลต่างไว้ เพื่อเป็นการเปรียบเทียบ ก่อนทำการวัดทุกครั้งและในการวัดความชื้นได้แต่ละจุดจะต้องใช้เวลามาก การวัดความชื้นด้วยไฮโครมิเตอร์ไม่เหมาะกับการวัดบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงความชื้นอย่างรวดเร็ว และยิ่งยากต่อการนำมาใช้เป็นชุดตรวจวัดและนำสัญญาณไปควบคุมแบบป้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ผลที่ได้จากการค้นหาารูปแบบการวัดความชื้นแบบหัววัด (sensor)

จากการค้นคว้าตัวตรวจวัดความชื้นชนิด Solid-state sensor พบว่ามีหลักการตรวจวัดความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปกับพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงด้วยกัน 2 ลักษณะได้แก่

1. วัดจากความต้านทาน (R)
2. วัดจากค่าความเก็บประจุ (C)

สำหรับโครงการวิจัยที่คณะผู้วิจัยได้เลือกศึกษาและพัฒนาหัววัดความชื้น ที่วัดจากความต้านทาน เนื่องจากมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้น ตัวตรวจวัดชนิดอื่นการตอบสนองช้ากว่า ซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่อาจจะนำไปใช้งานด้านการวัดคุมได้งายอีกทั้งในเรื่องของการสร้างและการตรวจวัดยังง่ายอีกด้วย ไม่ต้องมีเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดยุ่งยากซับซ้อน

3.5 สร้างอุปกรณ์ที่จำเป็นขึ้นใหม่

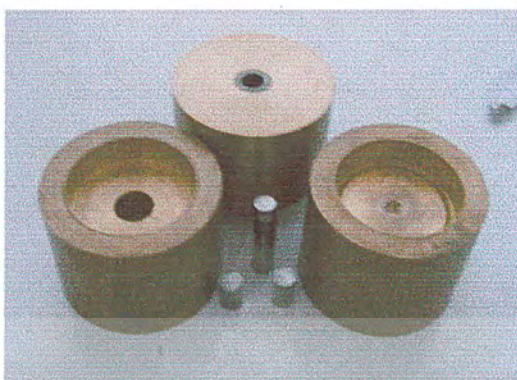
เนื่องจกงานวิจัยนี้ เป็นงานเริ่มแรก อุปกรณ์และเครื่องมือพื้นฐานต่าง ๆ ยังมีไม่พร้อม ซึ่งจำเป็นต้องสร้างขึ้นมาเองใหม่ ซึ่งต้องใช้เวลาส่วนหนึ่ง มาทำการสร้างเครื่องมือ และอุปกรณ์พื้นฐานขึ้นเอง ซึ่งผู้วิจัยได้รับความรู้และประโยชน์เป็นอย่างมาก โดยอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นใหม่ มีดังนี้

3.5.1 ชุดอัดขึ้นรูปเม็ดยา

จากที่ผู้วิจัยสำรวจแล้วพบว่ามีความจำเป็นต้องใช้แม่พิมพ์ในการอัดขึ้นรูป แต่ยังไม่มียังจำเป็นต้องสร้างขึ้นเอง โดยใช้ก้านวาล์ว และปลอกวาล์ว ซึ่งทนต่อแรงอัดได้สูง ภายในมีความเรียบลื่น สามารถทำให้เกิดการไหลตัวได้ดี ใช้ทองเหลืองเป็นตัวประกอบป้องกันการคดงอ ทำโดยการอัดปลอกวาล์วไปเป็นแกนแท่งทองเหลือง จากนั้นตัดก้านวาล์วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร เป็นข้อ ๆ เพื่อใช้อัดให้ได้สารตัวอย่างที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 8 มิลลิเมตร ในลักษณะกลมแบน ลักษณะคล้ายเม็ดยาแบน โดยเมื่อประกอบใช้จะแสดงดังรูปที่ 3.3 และส่วนประกอบต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 แบบอัดขึ้นรูปเมื่อใช้งาน

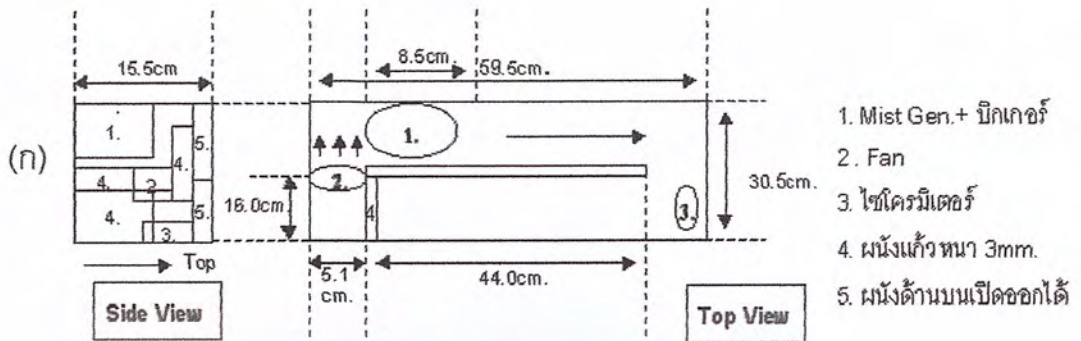


รูปที่ 3.4 ส่วนประกอบของแบบอัดขึ้นรูป

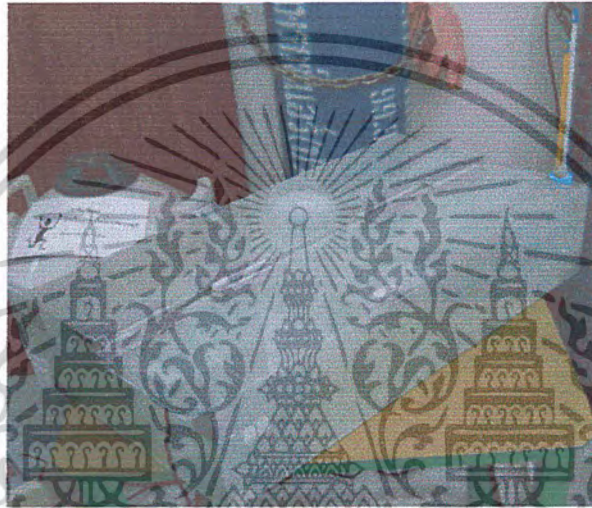
3.5.2 การสร้างห้องที่สามารถควบคุมสภาวะความชื้นภายในได้

เราใช้แผ่นกระจกนำมาสร้างห้องควบคุมความชื้น โดยต่อกันเป็นห้องปิด ซึ่งแสดงโครงร่างดังรูปที่ 3.5 (ก.) และรูปจริงที่ประกอบขึ้นจากวัสดุที่เป็นกระจกดังรูปที่ 3.5 (ข.) ซึ่งสามารถควบคุมความชื้นได้โดยใช้เครื่องกำเนิดหมอก ซึ่งทำจากแผ่น Piezoelectric บิดด้วยแรงดันไฟฟ้าความถี่สูง กระแสสลับ ทำให้เกิดพลังงานกลอัดขยายกับน้ำ ทำให้เกิดเป็นไอน้ำขนาดเล็ก ฟูกระจายออกมา โดยมีขนาดความสูง 2.5 เซนติเมตร และ เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.0 เซนติเมตร มีตัวแผ่น piezoelectric มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร (รูปที่ 3.6) และ ติดพัดลมเพื่อกระจายความชื้นใน ห้องควบคุมความชื้นให้ทั่วถึง

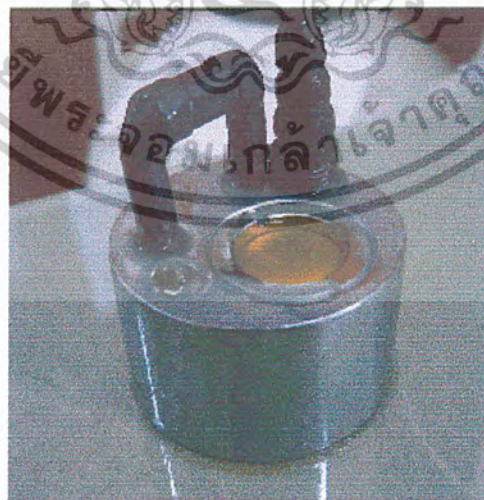
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)



รูปที่ 3.5 ห้องควบคุมสภาวะที่ความชื้นสูง ขนาดกว้างxยาวxสูง 30.5x59.5x15.5cm.



รูปที่ 3.6 เครื่องกำเนิดหมอก ทำจากแผ่น Piezoelectric

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

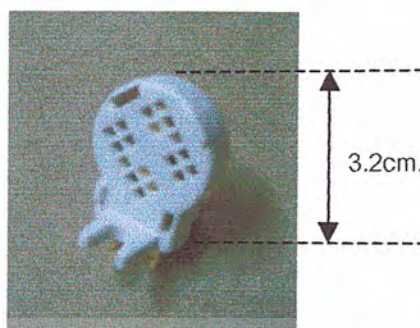
เนื่องจากห้องควบคุมความชื้นที่สร้างขึ้น สามารถควบคุมความชื้นได้ตั้งแต่ระดับความชื้นในบรรยากาศปกติ ไปจนถึงความชื้นสูง 100% เพราะเป็นการเติมปริมาณไอน้ำเข้าไปในระบบห้องควบคุมได้ แต่ถ้าต้องการความชื้นที่ต่ำกว่าความชื้นในบรรยากาศ ไม่สามารถทำได้ ดังนั้น ผู้วิจัยได้สร้างห้องควบคุมความชื้นต่ำ ขึ้นมาอีกห้องหนึ่งที่จะนำมาใช้วัดห้วงวัดที่ความชื้นต่ำกว่าความชื้นบรรยากาศ ไปจนถึงความชื้นน้อยที่สุด ดังรูปที่ 3.7 ซึ่งอาศัยสารดูดความชื้นเป็นตัวช่วยเช่น Silica gel เป็นต้น



รูปที่ 3.7 ห้องควบคุมสถานะที่ความชื้นต่ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10cm สูง 114.5cm.

จากรูปที่ 3.7 เป็นห้องควบคุมความชื้นต่ำ สร้างขึ้นจากการใช้วัสดุ Silica gel เพื่อวัดที่ความชื้นต่ำ โดยเทียบวัดกับตัว Sensor แบบ C ของ Phillips (รูปที่ 3.8) ซึ่งจะช่วยนำมาแก้ปัญหาการหาค่าความชื้นที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วได้ แต่อย่างไรก็ตาม ก่อนที่จะนำมาใช้งาน ก็ได้มีการตรวจวัด เปรียบเทียบกับกราฟที่ให้มา กับชุดกระเปาะเปียกกระเปาะแห้งแล้ว ซึ่งได้ผลสอดคล้องกับกราฟที่ให้มา เนื่องจากถ้าหากใช้ไซโครมิเตอร์จะทำให้มีความชื้นเพิ่มรบกวนระบบ และได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของตัวเก็บประจุที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าตามความชื้นกับไซโครมิเตอร์ ด้วยวิธีใช้วัดจริงในสถานะความชื้นต่างๆกันซึ่งได้ปรับแก้ในตอนสร้างอุปกรณ์วัดทำให้ได้ค่าตามที่ระบุมาจากโรงงานโดยพิจารณาปรับแก้จากช่องและสายต่อและทำการทดสอบซ้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 ตัวตรวจวัดความชื้นแบบใช้หลักการเปลี่ยนแปลงประจุไฟฟ้า (C) ของ Phillips

3.5.3 สร้างแท่นวัดขึ้นสาร

ระบบการวัดสารตัวอย่างที่ใช้หลักการวัดค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไป กับค่าตัวแปรที่ต้องการวัดนั้น หลักสำคัญในการกำจัดความคลาดเคลื่อน คือบริเวณผิวสัมผัส ohmic ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้พัฒนา สร้างชุดจับชิ้นงานที่มีขั้วไฟฟ้า สัมผัสชิ้นงานได้มั่นคง โดยทำการสร้างแท่นวัดขึ้นสาร ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกระบอก แบ่งเป็นสองส่วน บนและล่าง และมีหน้าสัมผัสทองแดงทั้งสองด้าน คือด้านบน-ล่าง อยู่ด้านใน และทำการเชื่อมสายไฟออกมาด้านนอก เพื่อใช้วัดค่าความต้านทาน โดยขึ้นสารจะอยู่ตรงกลางแท่นวัด และสัมผัสกับหน้าทองแดง ทำให้สามารถวัดค่าได้สะดวกมากยิ่งขึ้น รูปภายในและภายนอก แสดงไว้ดังรูปที่ 3.9 และ รูปที่ 3.10



รูปที่ 3.9 ผิวสัมผัสของแท่นวัดด้านบนและล่างทำด้วยทองแดง



รูปที่ 3.10 แท่นวัดขณะใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้งานเอกสารฉบับนี้เป็นการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 สร้างตัวอย่างหิวัดความชื้น

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยชนิดบุกเบิก ดังนั้นการคัดเลือกวัสดุที่จะนำมาใช้เป็นตัวตรวจวัดนั้น เป็นแนวทางที่สำคัญ ซึ่งในที่นี้ได้เลือกโลหะออกไซด์ ของทั้งสแตน ด้วยเหตุผลที่ว่า Oxidation state ของโลหะทั้งสแตนมีหลายค่า และมีคุณสมบัติเป็น non-stoichiometry properties และคาดว่าคุณสมบัติทางไฟฟ้า จะแปรเปลี่ยนไปกับปริมาณความชื้นที่จะเข้ามาเกาะ การนำผงทั้งสแตนออกไซด์(WO_3) มาสร้างเป็น ตัวอย่างหิวัดความชื้น เมื่อเตรียมสารประกอบ WO_3 จากลักษณะเป็นผง (Powder) นำมาอัดขึ้นรูปเป็นเม็ดยา มีลำดับขั้นตอนการสร้างหิวัดความชื้นดังนี้

1. ทำความสะอาดแม่พิมพ์ เพื่อป้องกันฉนวนต่าง ๆ
2. ใส่ผงสารลงไปแม่พิมพ์ (กำหนดให้ใช้ปริมาณเท่ากันทุกครั้ง คือ 0.2 กรัม)
3. อัดผงสารเพื่อขึ้นรูป(dry pressing) ด้วยแรงอัด 2 ตัน และ 3 ตัน
4. นำไปเผา(sintering) ที่อุณหภูมิ 200, 400, 600, 800, 1000 และ 1100 °C เป็นเวลา 1 ชม.

หมายเหตุ เพื่อการทดลองปรับปรุงผิวสัมผัสทางไฟฟ้า ก่อนอัดผงสารที่จะนำไปเผาที่อุณหภูมิ 800 และ 1100 °C จะใส่แผ่นทองคำเปลวเพื่อทดลองทำเป็นขั้วไฟฟ้าในบางตัวอย่าง

3.7 ตรวจวัดลักษณะเฉพาะของตัวอย่างหิวัดความชื้น

เนื่องจากสารตัวอย่าง WO_3 ยังไม่มีข้อมูลรองรับการนำมาตัวตรวจวัดความชื้น การตรวจวัดลักษณะของหิวัดความชื้น เริ่มตรวจวัดตั้งแต่วัตถุดิบที่นำมาใช้สร้าง(ผง WO_3) และหลังจากผ่านกระบวนการ sintering แล้ว และผ่าน XRD วิเคราะห์โครงสร้างสารแล้วว่าจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางด้านโครงสร้าง เกิดขึ้นกับสาร

3.8 ตรวจวัดค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปตามความชื้นของตัวอย่างหัตถ์ความชื้น

ทำการตรวจวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า ที่สภาพความชื้นต่าง ๆ กัน โดยจะแบ่งสภาวะความชื้นออกเป็น 3 สภาวะ คือ ความชื้นต่ำ ความชื้นปกติ(ความชื้นห้อง) และความชื้นสูง ซึ่งเป็นการดูแลแนวโน้มการตอบสนองของตัวอย่างหัตถ์ จากนั้นทำการตรวจวัดที่สภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงความชื้นอย่างต่อเนื่อง จากความชื้นบรรยากาศภายในห้องไปสู่ความชื้นสูง ทำการวัดไปกลับ เพื่อตรวจสอบสมบัติการวัดซ้ำ และความไวในการตอบสนอง เนื่องจากไม่สามารถควบคุมความชื้นภายในห้องได้ แต่สมมติว่า มีค่าเปลี่ยนไปเล็กน้อยโดยตรวจดูจาก ไฮโครมิเตอร์วัดความชื้น ซึ่งได้แสดงผลการวัดในบทที่ 4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

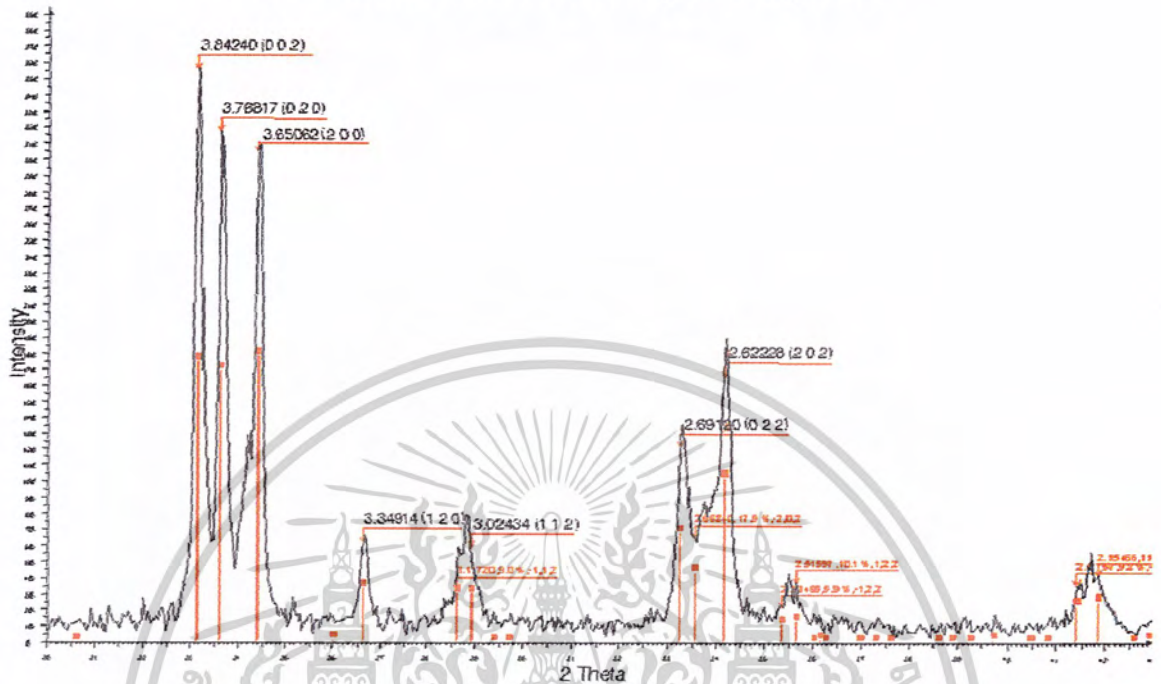
จากการที่ได้ทดลองสร้างตัวอย่างหัววัดแล้ว ผู้วิจัยต้องการทราบถึงการเปลี่ยนแปลง ในระดับโครงสร้างของชั้นสาร ซึ่งอาจเป็นผลมาจากสภาวะการสร้างที่แรงอัด และอุณหภูมิการเผาอบ ที่ต่างกัน โดยได้นำชั้นสารตัวอย่าง ไปวิเคราะห์ด้วยวิธี X-Ray Diffraction จากนั้น นำตัวอย่างหัววัด ไปทำการวัดค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปต่อความชื้นต่าง ๆ กัน

4.1 ผลการตรวจวิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffractometer

ครั้งแรกนำ WO_3 ชนิดผง (Powder) ที่ยังไม่ผ่านกระบวนการสร้างใด ๆ มาวิเคราะห์ผล ด้านโครงสร้างด้วย XRD ก่อน เพื่อใช้เป็นส่วนเปรียบเทียบกับผลการตรวจของชั้นสารตัวอย่าง ที่ทำขึ้นในสภาวะเงื่อนไขการสร้างต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.1



ผล XRD ของผงทั้งสเดนออกไซด์ (WO_3) แสดงดังรูปที่ 4.1



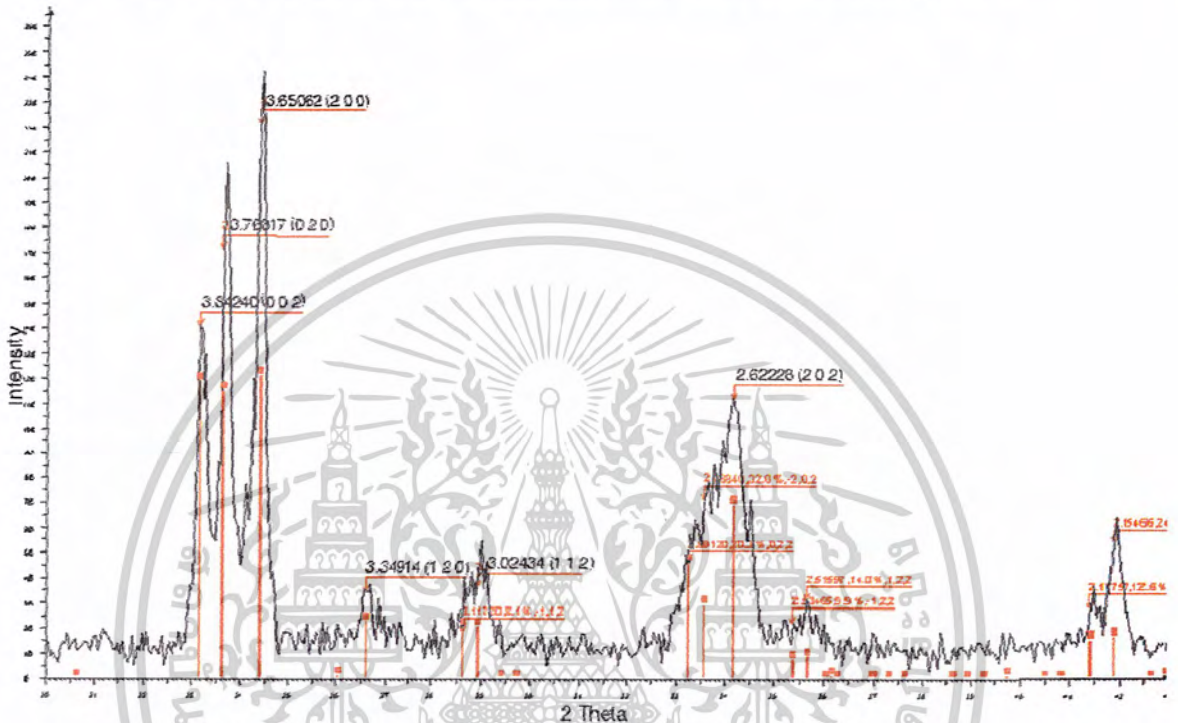
รูปที่ 4.1 ผล XRD ของผงทั้งสเดนออกไซด์ (WO_3)

สังเกตยอดสัญญาณ (Peak) ที่ค่า	$d_{(hkl)}$	ความเข้ม
	$d_{(002)} = 3.84240$	ความเข้ม 100%
	$d_{(020)} = 3.76817$	ความเข้ม 89.1%
	$d_{(200)} = 3.65062$	ความเข้ม 85.4%
	$d_{(120)} = 3.34914$	ความเข้ม 17.4%
	$d_{(112)} = 3.02434$	ความเข้ม 16.5%
	$d_{(022)} = 2.69120$	ความเข้ม 33.9%
	$d_{(202)} = 2.62228$	ความเข้ม 46.5%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากที่เตรียม WO_3 ชนิด Powder มาอัดขึ้นรูปเป็นเม็ดยาที่ค่าความแรง 2 ตัน ยังไม่ผ่านการ sintering ได้นำมาวิเคราะห์ผลด้านโครงสร้างและสารเจือต่าง ๆ ด้วย XRD ดังรูปที่ 4.2

ผล XRD ของตัวอย่างที่แรงอัด 2 ตัน ยังไม่ผ่านการเผาอบผนึก แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ผล XRD ของตัวอย่างที่แรงอัด 2 ตัน ยังไม่ผ่านการเผาอบผนึก

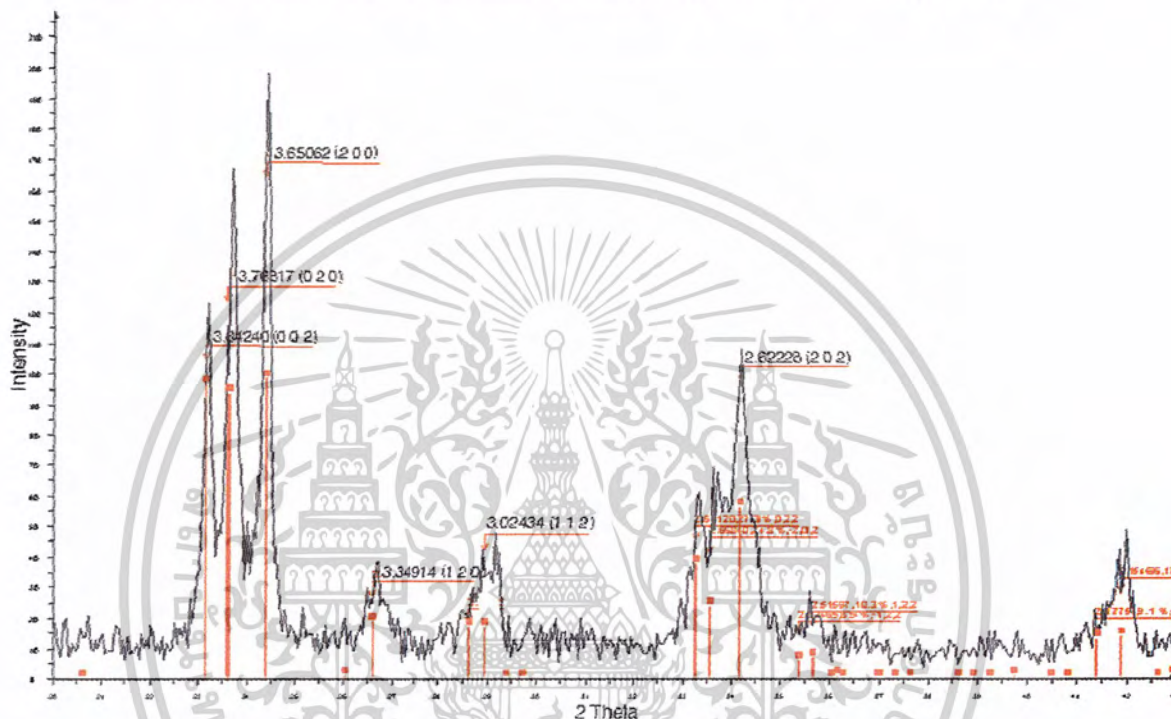
สังเกตยอดสัญญาณ (Peak) ที่ค่า	$d_{(hkl)}$	ความเข้ม
	$d_{(002)} = 3.84240$	ความเข้ม 63.8%
	$d_{(020)} = 3.76817$	ความเข้ม 77.5%
	$d_{(200)} = 3.65062$	ความเข้ม 100%
	$d_{(120)} = 3.34914$	ความเข้ม 15.3%
	$d_{(112)} = 3.02434$	ความเข้ม 16.2%
	$d_{(022)} = 2.69120$	ความเข้ม 32.0%
	$d_{(202)} = 2.62228$	ความเข้ม 50.5%

สังเกตว่ายอดสัญญาณ (Peak) คมชัดน้อยลงจากเมื่อเป็นผง และพบระนาบ (200) มากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากที่เตรียม WO_3 ชนิด Powder มาอัดขึ้นรูปเป็นเม็ดยาที่ค่าความแรง 2 ตัน ผ่านการ sintering ที่อุณหภูมิ 200°C ได้นำมาวิเคราะห์ผลด้านโครงสร้างและสารเจือต่าง ๆ ด้วยวิธี XRD ดังรูปที่ 4.3

ผล XRD ของตัวอย่างที่แรงอัด 2 ตัน เมาอบที่อุณหภูมิ 200°C แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ผล XRD ของตัวอย่างที่แรงอัด 2 ตัน เมาอบหนึ่งที่ 200°C

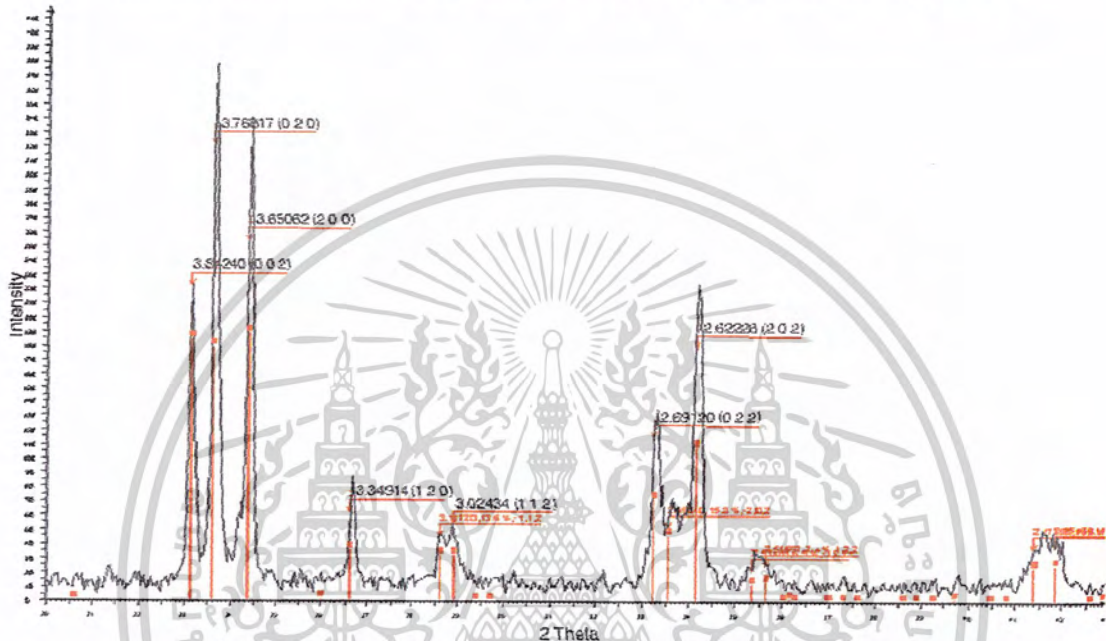
สังเกตยอดสัญญาณ (Peak) ที่ค่า	$d_{(hkl)}$	ความเข้ม
	$d_{(002)} = 3.84240$	ความเข้ม 63.6%
	$d_{(020)} = 3.76817$	ความเข้ม 75.2%
	$d_{(200)} = 3.65062$	ความเข้ม 100%
	$d_{(120)} = 3.34914$	ความเข้ม 16.4%
	$d_{(112)} = 3.02434$	ความเข้ม 25.5%
	$d_{(022)} = 2.69120$	ความเข้ม 27.3%
	$d_{(202)} = 2.62228$	ความเข้ม 59.4%

เมื่อนำไปเผาแล้ว ทำให้ยอดสัญญาณคมชัดขึ้นกว่าก่อนการเผา ซึ่งลำดับความเข้มมีลักษณะเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากที่เตรียม WO_3 ชนิด Powder มาอัดขึ้นรูปเป็นเม็ดยาที่ค่าความแรง 2 ตัน ผ่านการ sintering ที่อุณหภูมิ 800°C ได้นำมาวิเคราะห์ผลด้านโครงสร้างและสารเจือต่าง ๆ ด้วยวิธี XRD ดังรูปที่ 4.4

ผล XRD ของตัวอย่างที่แรงอัด 2 ตัน เผอบที่อุณหภูมิ 800°C แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ผล XRD ของตัวอย่าง ที่แรงอัด 2 ตัน เผอบผนึกที่ 800°C

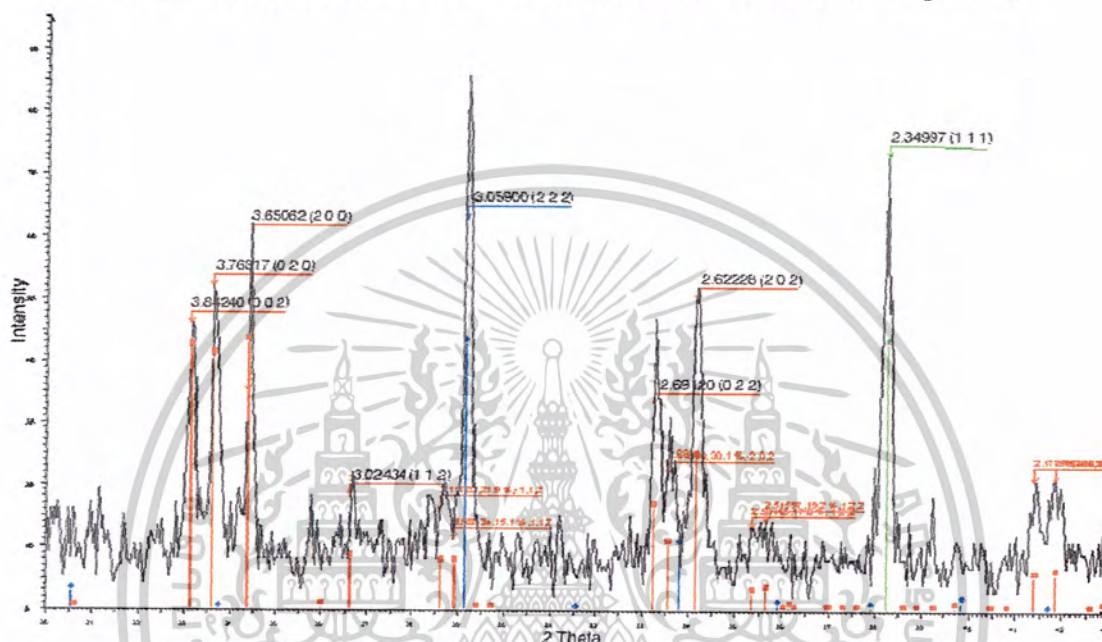
สังเกตยอดสัญญาณ (Peak) ที่ค่า	$d_{(hkl)}$	ความเข้ม
	$d_{(002)} = 3.84240$	ความเข้ม 69.1%
	$d_{(020)} = 3.76817$	ความเข้ม 100%
	$d_{(200)} = 3.65062$	ความเข้ม 79.8%
	$d_{(120)} = 3.34914$	ความเข้ม 19.2%
	$d_{(112)} = 3.02434$	ความเข้ม 16.4%
	$d_{(022)} = 2.69120$	ความเข้ม 35.6%
	$d_{(202)} = 2.62228$	ความเข้ม 55.4%

เห็นได้ว่ากราฟมีความคมชัดมากขึ้น และช่วงของยอดสัญญาณแคบ คมชัด หมายถึงเกรนผลึกที่ใหญ่ขึ้นกว่าการเผาที่อุณหภูมิต่ำ และมีการเปลี่ยนแปลงลำดับความเข้ม ซึ่งระนาบ (020) เข้มที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากที่เตรียม WO_3 ชนิด Powder มาอัดขึ้นรูปเป็นเม็ดยาที่ค่าความแรง 2 ตัน ผ่านการ sintering ที่อุณหภูมิ 1100°C ได้นำมาวิเคราะห์ผลด้านโครงสร้างและสารเจือต่าง ๆ ด้วยวิธี XRD ดังรูปที่ 4.5

ผล XRD ของตัวอย่างที่แรงอัด 2 ตัน เผาอบที่อุณหภูมิ 1100°C แสดงดังรูปที่ 4.5



รูป 4.5 ผล XRD ของตัวอย่างที่แรงอัด 2 ตัน เผาอบผงที่ 1100°C

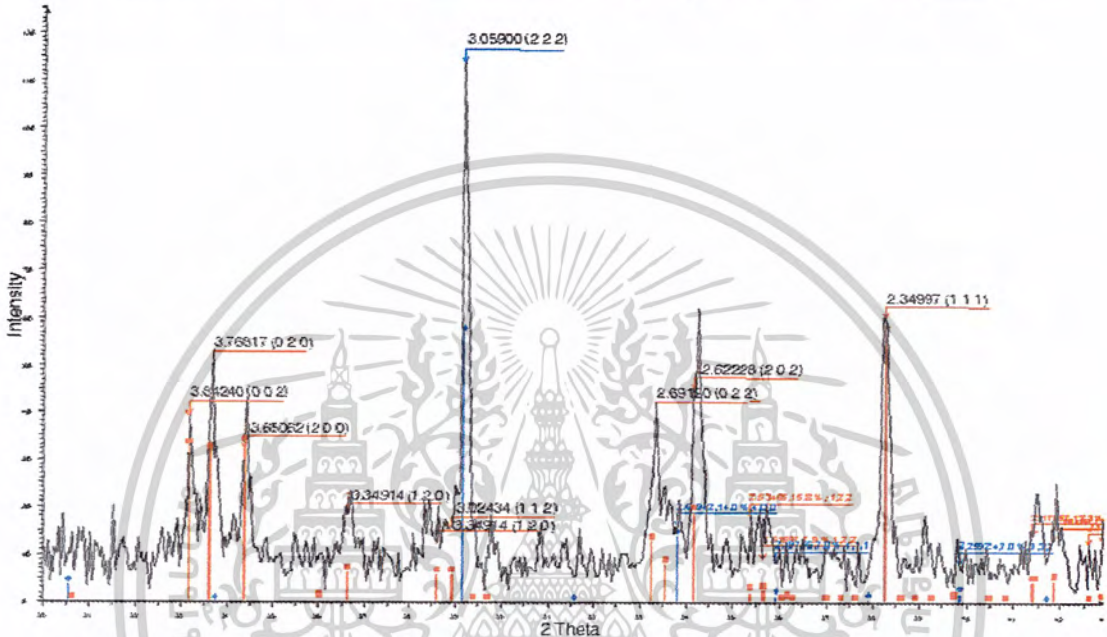
สังเกตยอดสัญญาณ (Peak) ที่ค่า	$d_{(hkl)}$	ความเข้ม
	$d_{(002)} = 3.84240$	ความเข้ม 47.9%
	$d_{(020)} = 3.76817$	ความเข้ม 63.0%
	$d_{(200)} = 3.65062$	ความเข้ม 71.2%
	$d_{(120)} = 3.34914$	ความเข้ม 24.7%
	$d_{(222)} = 3.05900$	ความเข้ม 100%
	$d_{(112)} = 3.02434$	ความเข้ม 15.1%
	$d_{(022)} = 2.69120$	ความเข้ม 45.2%
	$d_{(202)} = 2.62228$	ความเข้ม 69.5%
	$d_{(111)} = 2.34997$	ความเข้ม 96.3%

จากที่ได้เห็น สังเกตได้ว่ายอดสัญญาณ ต่ำลง และสัญญาณความคมชัดน้อยเนื่องจากการปนเปื้อน ในขั้นตอนการอัดขึ้นรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากที่เตรียม WO_3 ชนิด Powder มาอัดขึ้นรูปเป็นเม็ดยาที่ค่าความแรง 3 ตัน ผ่านการ sintering ที่อุณหภูมิ $800\text{ }^\circ\text{C}$ ได้มาวิเคราะห์ผลด้านโครงสร้างและสารเจือต่าง ๆ ด้วยวิธี XRD ดังรูปที่ 4.6

ผล XRD ของตัวอย่างที่แรงอัด 3 ตัน เผาอบที่อุณหภูมิ $800\text{ }^\circ\text{C}$ แสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ผล XRD ของตัวอย่างที่แรงอัด 3 ตัน เผาอบที่ $800\text{ }^\circ\text{C}$

สังเกตยอดสัญญาณ (Peak) ที่ค่า	d	ความเข้ม
$d_{(002)}$	$= 3.84240$	ความเข้ม 34.2%
$d_{(020)}$	$= 3.76817$	ความเข้ม 36.0%
$d_{(200)}$	$= 3.65062$	ความเข้ม 28.1%
$d_{(120)}$	$= 3.34914$	ความเข้ม 15.8%
$d_{(222)}$	$= 3.05900$	ความเข้ม 100%
$d_{(112)}$	$= 3.02434$	ความเข้ม 13.2%
$d_{(022)}$	$= 2.69120$	ความเข้ม 21.9%
$d_{(202)}$	$= 2.62228$	ความเข้ม 39.5%
$d_{(111)}$	$= 2.34997$	ความเข้ม 52.6%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ : ยอดสัญญาณที่เพิ่มเข้ามา ที่ระนาบ (222) คือ Yttrium Tungsten Oxide ($Y_2O_3-WO_3$) ซึ่งเป็นผลมาจากสารเจือปนเข้ามาระหว่างกระบวนการเตรียมอัด และยอดสัญญาณที่ระนาบ (111) คือ เงิน (Ag) และทอง (Au) ซึ่งเกิดจากการทำซ้ำ

4.2 อภิปรายผลการตรวจวิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffractometer

จากการวิเคราะห์โครงสร้างของตัวอย่างหั่ววัด ด้วยวิธี X-Ray Diffraction แล้ว ทำให้สามารถสรุปได้ว่า ที่สภาวะการสักร่างต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นแรงอัด หรืออุณหภูมิการเผาอบที่สูงขึ้น ไม่ได้มีผลทำให้โครงสร้างของทั้งสเดนออกไซด์ เปลี่ยนไปแต่อย่างใด ยังคงเป็น WO_3 เช่นเดิม โดยการเผาอบที่อุณหภูมิสูงจะเห็นว่า Peak แคบลงและชัดเจนขึ้น หมายถึงความเป็นผลึกสูงขึ้น ซึ่งมีความคงรูปอยู่ได้เพียงพอที่จะนำมาตรวจวัดและสามารถนำมาสร้างเป็นหั่ววัดความชื้นได้

4.3 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่าง ค่าความชื้นต่าง ๆ

ในการวัดค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไป ต่อสภาวะความชื้นต่าง ๆ ได้ทำการแบ่งการวัด ออกเป็น 3 ลักษณะ ดังนี้

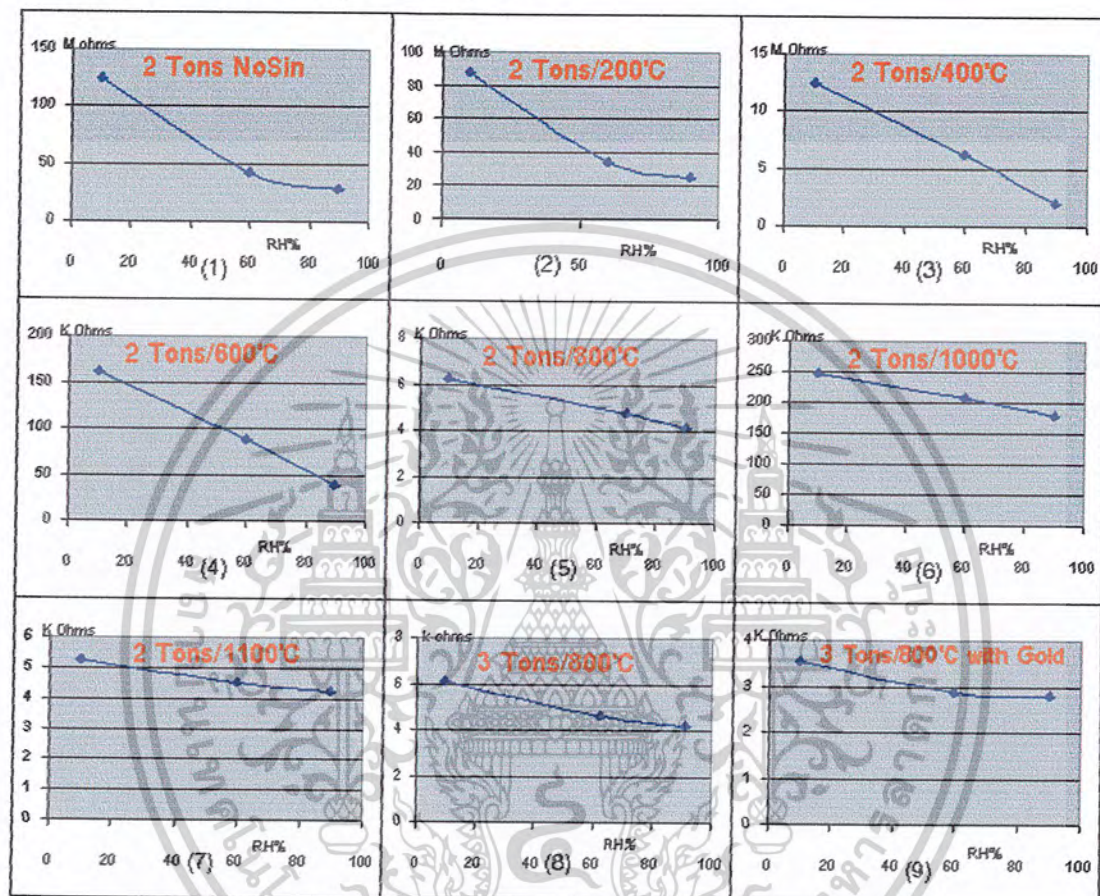
4.2.1 จะทำการวัดค่าความต้านทานที่สภาวะความชื้น เพียง 3 สภาวะ คือ ความชื้นต่ำ ความชื้นบรรยากาศที่อุณหภูมิห้อง และความชื้นสูง แล้วทำการวาดกราฟเปรียบเทียบ เพื่อศึกษาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลง ทั้งนี้ เนื่องจากการทำการวัดที่การเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากความชื้นห้องไปสู่ความชื้นต่ำนั้น ทำได้ยาก จึงได้สร้างห้องทดลองเพื่อใช้วัดความชื้นต่ำ ขึ้นอีก 1 ห้อง แยกจากเดิมที่เป็นห้องวัดความชื้นสูง

4.2.2 ทำการวัดค่าความต้านทานที่การเปลี่ยนแปลงความชื้นอย่างต่อเนื่อง จากความชื้นบรรยากาศ ที่อุณหภูมิห้อง ไปสู่สภาวะความชื้นสูง และได้ทำการวัดซ้ำ

4.2.3 ทำการวัดที่สภาวะการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่ค่าต่าง ๆ ลักษณะเดียวกัน เป็นจำนวน 4 ครั้ง โดยเลือกวัดจากตัวอย่างที่วิเคราะห์ว่ามีสมบัติการตอบสนองต่อความชื้นดี และน่าจะเป็นเงื่อนไขในการเตรียมสสารตัวอย่างที่ดีและเหมาะสม ภายใต้เงื่อนไขการสักร่างที่แรงอัด 2 ตัน และเผาอบที่อุณหภูมิ $800\text{ }^{\circ}\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อ 4.2.1 ได้รวบรวมผลการวัดค่าความชื้นของตัวตรวจวัดที่ได้เตรียมขึ้น แสดงเป็นผลการวัดค่าความต้านทานที่สภาวะความชื้น 3 สภาวะ คือ ความชื้นต่ำ ความชื้นบรรยากาศที่อุณหภูมิห้อง และที่ความชื้นสูง แสดงดังรูปที่ 4.7



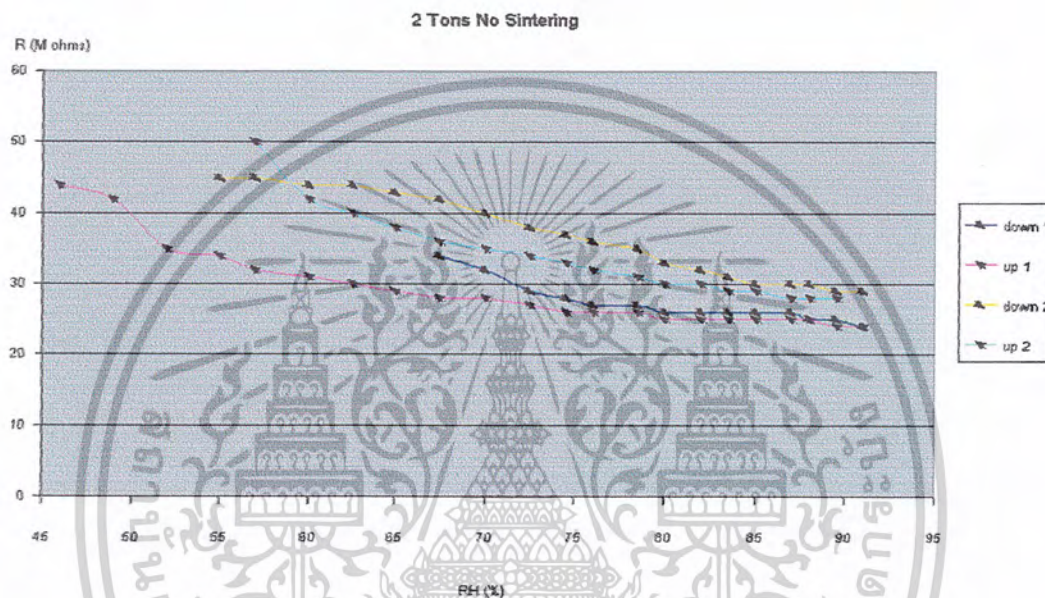
รูปที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบแสดงแนวโน้มการตอบสนองต่อความชื้น

ด้านแกน X คือค่าความชื้น RH และด้านแกน Y คือ ค่าความต้านทาน

สังเกตได้ว่า แนวโน้มการตอบสนองของตัวอย่างหัววัด ซึ่งวัดจากค่าความต้านทานต่อสภาวะความชื้นต่าง ๆ จะเป็นในลักษณะผกผัน จากกราฟ(แนวนอนคือค่าความชื้น (%RH) และแนวตั้งคือค่าความต้านทาน) สังเกตว่าที่ความชื้นสูง ค่าความต้านทานจะต่ำ และที่ความชื้นต่ำ ค่าความต้านทานจะสูง ช่วงความต้านทานของตัวอย่างหัววัด ที่ยังไม่ผ่านการเผาอบ (sintering) หรือเผาที่อุณหภูมิต่ำ(หมายเลข 1 และ 2) จะยังมีค่าสูงอยู่ในระดับ M ohms แต่เมื่อเผาอบที่อุณหภูมิสูงขึ้น(หมายเลข 4-9) ค่าความต้านทานจะลดลงอยู่ในช่วง K ohms โดยแรงดันที่สูงขึ้น ส่งผลน้อยต่อการตอบสนองการเปลี่ยนแปลงความชื้นกับความต้านทาน และในการทดลองใช้ทองคำทำขั้ว แม้ว่าทำให้ความต้านทานลดลง แต่การตอบสนองต่อความชื้นสูงนั้น กลับมีการเปลี่ยนแปลง

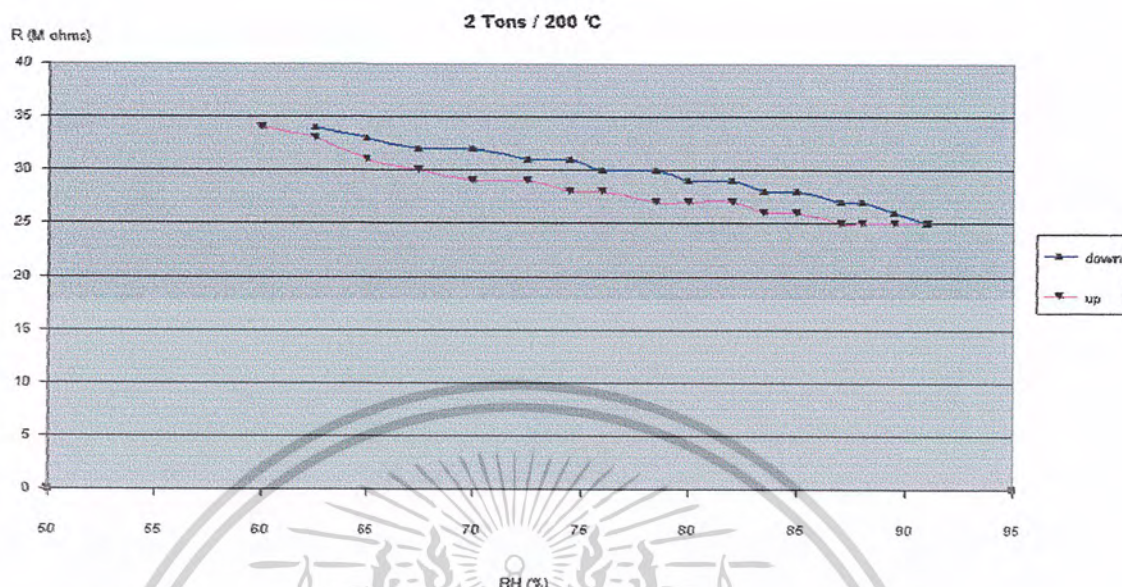
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้อย จึงคาดว่าวิธีนี้อาจไม่เหมาะสม เพราะทองอาจจะแพร่เข้าไปบรรจุในรูพรุน WO₃ ได้ ทำให้ความชื้นไม่สามารถเข้าบรรจุในรูพรุนได้ อย่างไรก็ตามในขั้นตอนนี้ เป็นเพียงการวัดเพื่อสังเกตแนวโน้มเท่านั้น ผู้วิจัยจะได้ทำการวัดวิเคราะห์ที่การเปลี่ยนแปลงความชื้น ซึ่งได้ผลของตัวอย่างที่สร้างด้วยแรงอัด 2 ตัน ยังไม่ผ่านการเผาอบแสดงดังรูปที่ 4.8 ผลที่ได้ยังไม่มีเสถียรภาพ สังเกตจากการเกิด ฮีสเทอรีซิสในวงกว้าง



รูปที่ 4.8 กราฟระหว่างความชื้นกับความต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่างที่สร้างด้วยแรงอัด 2 ตัน ยังไม่ผ่านการเผาอบผนัง

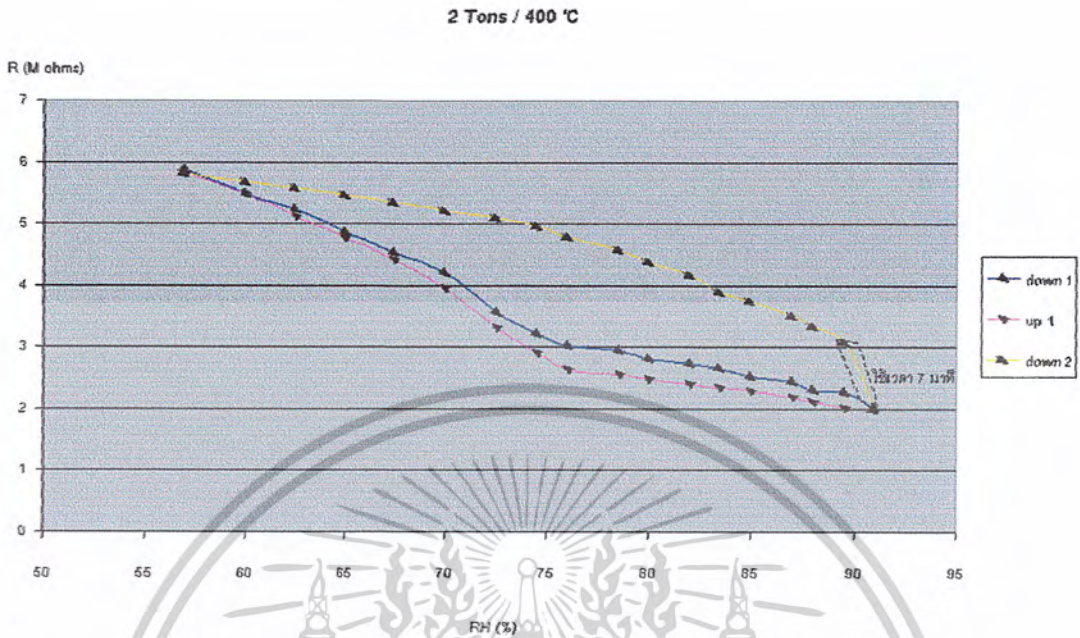
ตัวอย่างหัตถ์นี้ ยังไม่เหมาะสมสำหรับใช้ทำหัตถ์ความชื้น เนื่องจากยังไม่มีเสถียรภาพเพียงพอ อีกทั้งขาดความคงทนด้านเชิงกล ยังไม่แข็งแรง แตกหักง่าย ดังนั้นจึงได้ทำการ sintering ภายใต้อุณหภูมิเริ่มจาก 200°C และขึ้นรูปด้วยแรงอัด 2 ตัน ผลของตัวอย่างที่สร้างด้วยแรงอัด 2 ตัน เผาอบที่อุณหภูมิ 200°C แสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 กราฟระหว่างความชื้นกับความต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่าง
ที่สร้างด้วยแรงอัด 2 ตัน เผาอบผนังที่ 200 °C

ตัวอย่างหัววัดที่เงื่อนไซนี้ มีการตอบสนองต่อความชื้นได้ดีขึ้น และมีฮิสเทอรีซิสแคบลงเมื่อเทียบกับก่อนการเผาอบผนัง แต่ยังคงมีค่าความต้านทานสูงในระดับ 25-35 MΩ เนื่องจากอบที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งได้ทำการเพิ่มอุณหภูมิการอบขึ้นอีก เป็น 400 °C ซึ่งผลของตัวอย่างที่สร้างด้วยแรงอัด 2 ตัน เผาอบที่อุณหภูมิ 400°C แสดงดังรูปที่ 4.10

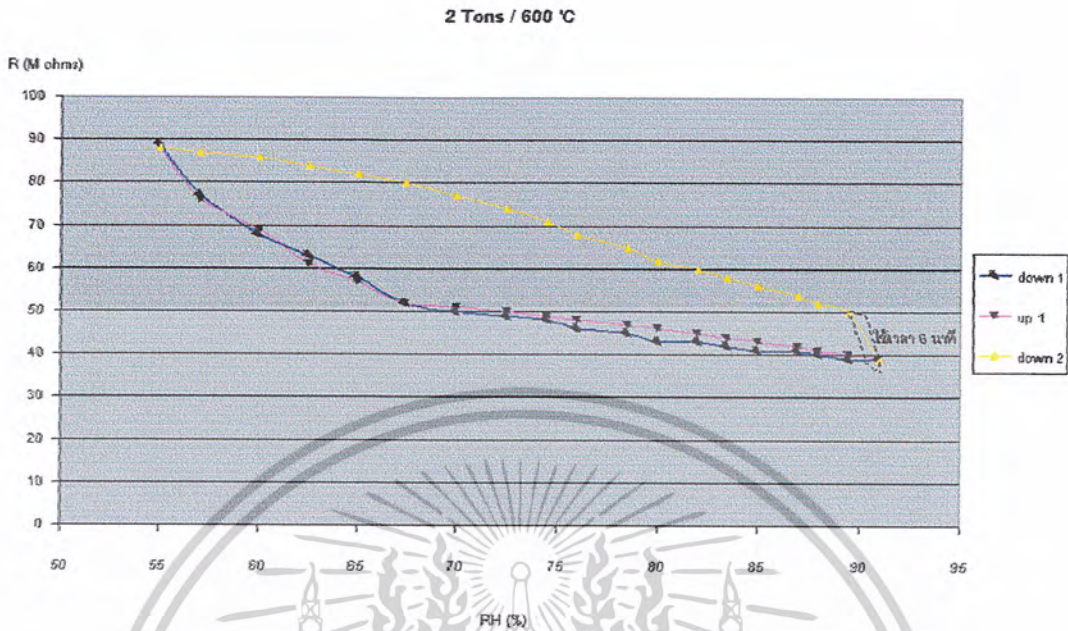
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 กราฟระหว่างความถี่กับความต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่าง
ที่สร้างด้วยแรงอัด 2 ตัน เคาบผนังที่ 400 °C

การวัดค่าความต้านทานที่ความถี่เพิ่มขึ้นและลดลงอย่างต่อเนื่องในสองรอบแรกจะเห็นว่าค่าที่ใกล้เคียงกันได้ผลดีขึ้น แต่เมื่อถึงรอบที่ 3 เห็นได้ว่าจับความถี่ได้ช้าลง จะเห็นว่าหลังจากค่าความถี่สูงสุด แล้ว ต้องใช้เวลานานถึง 7 นาที จึงจะได้ค่าความต้านทานตรงกับสองรอบแรก วิเคราะห์ว่าช่วงเวลานี้ เป็นส่วนหนึ่งของช่วงเวลาในการคืนสภาพ (Recovery) ของชิ้นสาร ซึ่งต้องมีการปรับปรุงต่อไป จากนั้นได้ทำการเพิ่มอุณหภูมิการเผาอบขึ้นอีก ที่ 600 °C ซึ่งผลของตัวอย่างที่สร้างด้วยแรงอัด 2 ตัน เคาบที่อุณหภูมิ 600 °C แสดงดังรูปที่ 4.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

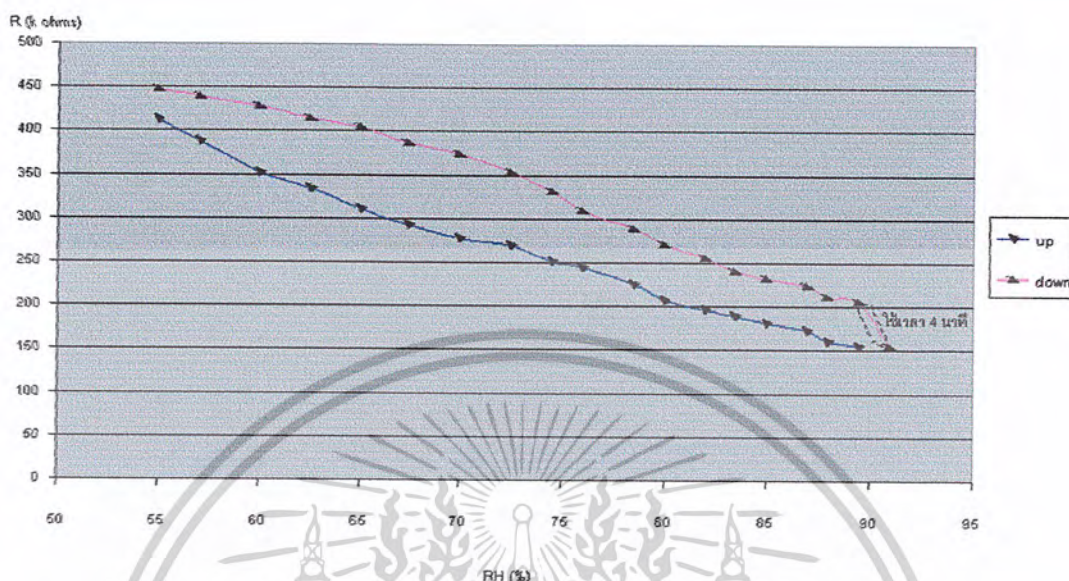


รูปที่ 4.11 กราฟระหว่างความขึ้นกับความต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่าง
ที่สร้างด้วยแรงอัด 2 ตัน เผาอบผนังที่ 600 °C

การวัดค่าความต้านทานที่ความชื้นเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างต่อเนื่องได้ผลดีขึ้น โดยพิจารณาจากรูป
ฮิสเทอรีซิสแคบลงกว่าเดิม และมีลักษณะเดียวกับกับตัวอย่างที่เผาด้วยอุณหภูมิ 400 °C แต่ช่วง
เวลาในการคืนสภาพ (Recovery) เร็วขึ้นเล็กน้อย โดยใช้เวลา 6 นาที จึงจะได้ค่าความต้านทานที่
ความชื้นสูงสุด เท่ากับ สองรอบแรก เมื่อเห็นทิศทางที่ดีขึ้น จึงได้ทำการเพิ่มอุณหภูมิการ sintering
ขึ้นอีก เป็น 800 °C ได้ผลของตัวอย่างที่สร้างด้วยแรงอัด 2 ตัน เผาอบที่อุณหภูมิ 800 °C แสดงดัง
รูปที่ 4.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

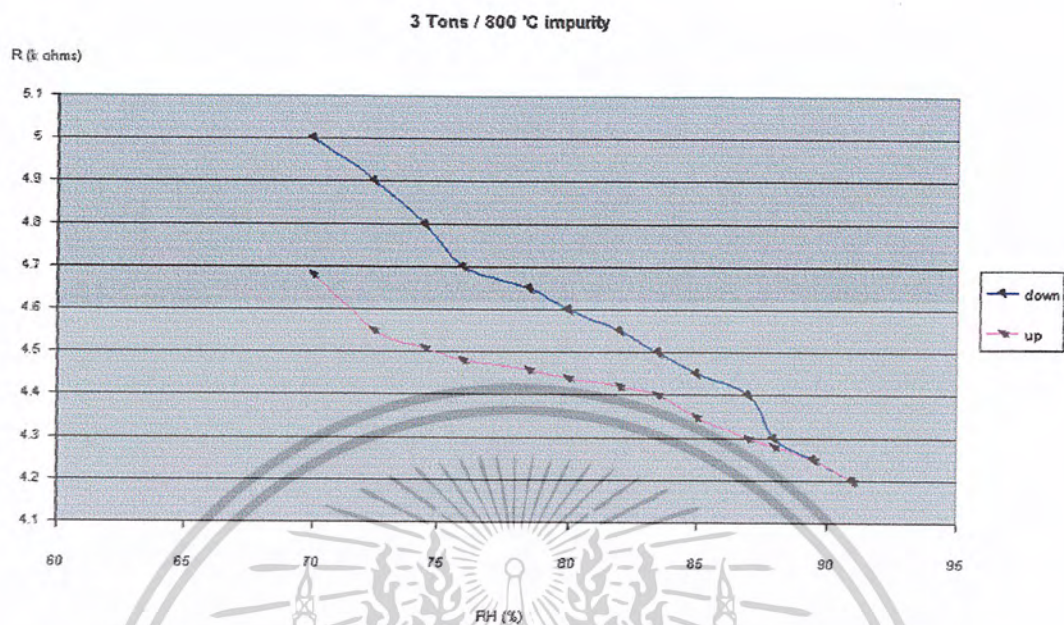
2 Tons / 800 °C



รูปที่ 4.12 กราฟระหว่างความชื้นกับความต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่างที่สร้างด้วยแรงอัด 2 ตัน เผาอบผนึกที่ 800 °C

การเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ค่าความต้านทานลดต่ำลง จากระดับ M ohms ลงมาอยู่ที่ระดับ k ohms และความสัมพันธ์กับความชื้นมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงมากขึ้น และมีช่วงเวลาในการคืนสภาพ (Recovery) เร็วขึ้น ซึ่งเมื่อความชื้นสูงสุด จะใช้เวลาเพียง 4 นาที เทียบกับการทำที่อุณหภูมิจากเผา ที่ 400 °C และ 600 °C จากนั้นทดลองเพิ่มแรงอัดเป็น 3 ตัน เพื่อเพิ่มความแข็งแรง ไม่แตกหักง่าย และเลือกการ sintering ที่คาดว่าจะได้ผลลัพธ์ที่ดี ดังได้ผลของตัวอย่างที่สร้างด้วยแรงอัด 3 ตัน เผาอบที่อุณหภูมิ 800 °C แสดงดังรูปที่ 4.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

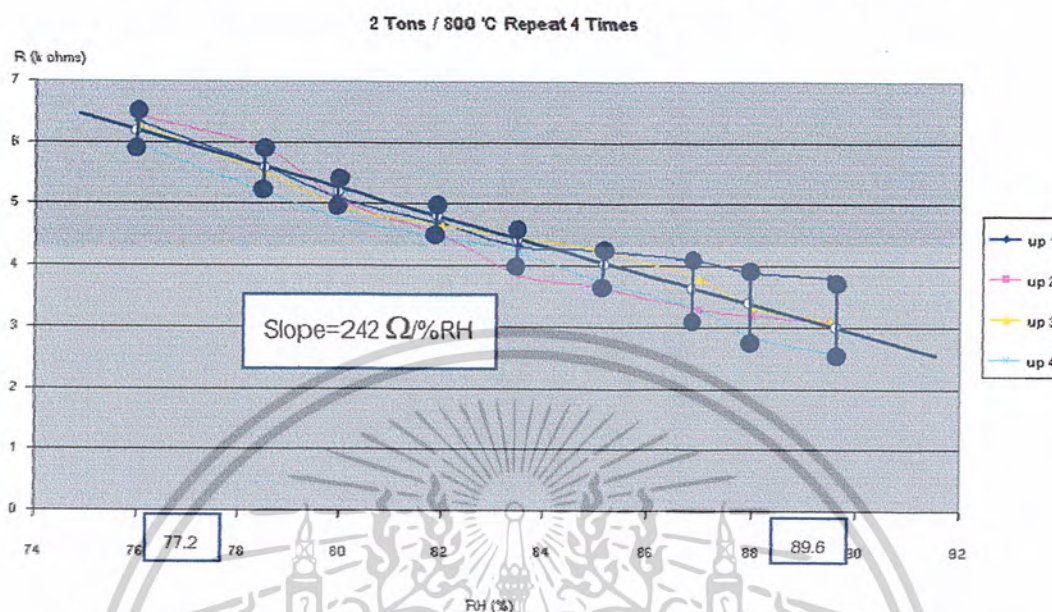


รูปที่ 4.13 กราฟระหว่างความถี่กับความต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่าง
ที่สร้างด้วยแรงอัด 3 ตัน เมาอบผนึกที่ 800 °C

จะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงแคบ ๆ ค่าความต้านทานต่ำ เนื่องจากการ
ทดลองใช้ทองคำทำขั้ว อีกทั้งมีการปนเปื้อน(สังเกตผล XRD) ทำให้ตอบสนองต่อความถี่ขึ้นได้ไม่ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดซ้ำที่สภาวะการเปลี่ยนแปลงความชื้นเดียวกัน 4 ครั้ง แสดงดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 กราฟระหว่างความชื้นกับความต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่างที่สร้างด้วยแรงอัด 2 ตัน เคาบผนึกที่ 800 °C โดยทำการวัดซ้ำในช่วงการลดความชื้น 4 รอบได้ค่าความชันเฉลี่ย 242 Ω/%RH

จากกราฟจะสังเกตเห็นได้ว่า จากการวัดซ้ำ ๆ กันนั้น ค่าความต้านทานที่ตอบสนองต่อความชื้นของตัวอย่างหั่วัด มีค่าที่ใกล้เคียงกัน

4.4 อภิปรายผลการตอบสนองต่อความชื้นของตัวอย่าง

การอัดและเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ความสามารถในการตอบสนองต่อความชื้นมีเสถียรภาพกว่าและแม่นยำกว่า และใช้เวลาในการคืนสภาพ(Recovery) น้อยกว่า วิเคราะห์ว่าเนื่องจากรูปพรุนเล็กกลวง แต่ช่วงความต้านทานที่วัดจะมีการเปลี่ยนแปลงได้ไม่มากเท่ากับการอบที่อุณหภูมิต่ำ ข้อเสียของการเผาอบที่อุณหภูมิต่ำ คือ จะมีความคลาดเคลื่อนของรอบการวัด(Hysteresis loop) มากกว่า ซึ่งจะยังคงมีแนวโน้ม ใกล้เคียงกัน แต่ไม่ใช่ค่าเดียวกันในขาขึ้นและขาลง สารตัวอย่างที่เตรียมขึ้นพบว่า เส้นองศาที่ดีคือ ที่แรงอัด 2 ตัน อบที่ 800 °C ได้ความชันของกราฟ เฉลี่ย 242 Ω/%RH และมีฮิสเทอรีซิสแคบสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอนแนะ

โครงการพิเศษนี้ ได้ศึกษา การเลือกหาวัสดุมาทำห้วงวัดความชื้น โดยเลือกออกไซด์ของโลหะทั้งสแตนมาศึกษา ซึ่งเป็นวัสดุที่ใหม่ ยังไม่มีใครทดลองทำมาก่อน ผลจากการศึกษาระบบการสร้างห้วงวัดความชื้นด้วยเทคนิคต่าง ๆ พิจารณาเลือกใช้ระบบการสร้างโดยใช้การอัดขึ้นรูปและทำการเผาอบ โดยเลือกที่จะศึกษาทดลองการสร้างห้วงวัดความชื้นขึ้น โดยนำมาอัดขึ้นรูปเป็นเม็ดแล้วเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างของทั้งสแตนออกไซด์ ด้วยวิธี X-Ray Diffraction ทำให้ทราบว่าโครงสร้างที่สภาวะเงื่อนไขต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นแรงอัด หรืออุณหภูมิการเผาอบ ไม่มีผลทำให้รูปแบบของโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไป (ยังคงเป็น WO_3 เช่นเดิม) โดยการเผาที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เกรนผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้น ขึ้นสารมีความคงทนแข็งแรงมากขึ้น ส่วนผลการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าเทียบกับค่าความชื้นต่าง ๆ จะเห็นได้ว่า ขึ้นสารที่ยังไม่ได้รับการเผานั้น มีความไวในการตอบสนองมาก ($M\Omega/\%RH$) แต่ยังขาดเสถียรภาพในขณะทำการวัดแต่เมื่อทำการเผาอบแล้วตั้งแต่ $200 - 800^\circ C$ ทำให้ตอบสนองต่อความชื้นได้ดีขึ้น มีเสถียรภาพมากขึ้น และมีฮิสเทอรีซิสแคบลง โดยเมื่อความชื้นสูงขึ้น ขึ้นสารจะมีค่าความต้านทานต่ำลง ซึ่งมีแนวโน้มเป็นไปตามทฤษฎี แม้ว่าตัวอย่างห้วงวัดในการศึกษาวิจัยครั้งนี้สามารถตอบสนองต่อความชื้นได้อย่างมีนัยสำคัญ ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปกับความชื้นที่เตรียมขึ้นจากเงื่อนไขต่าง ๆ สามารถสรุปได้ตามดังนี้

สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้น(x) และค่าความต้านทานไฟฟ้า(y) ของตัวอย่างห้วงวัด ขึ้นรูปที่แรงอัด 2 ตัน เผาอบที่อุณหภูมิ $200^\circ C$

$$\text{ช่วงการลดความชื้น} \quad y = 0.0061x^2 - 1.1991x + 83.752$$

$$\text{ช่วงการเพิ่มความชื้น} \quad y = -0.0031x^2 + 0.1989x + 33.349$$

สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้น(x) และค่าความต้านทานไฟฟ้า(y) ของตัวอย่างห้วงวัด ขึ้นรูปที่แรงอัด 2 ตัน เผาอบที่อุณหภูมิ $400^\circ C$

ช่วงการเพิ่มความชื้นครั้งที่ 1

$$y = 8E-08x^6 - 4E-05x^5 + 0.0067x^4 - 0.6668x^3 + 37.003x^2 - 1087x + 13214$$

ช่วงการลดความชื้นครั้งที่ 1

$$y = 9E-08x^6 - 4E-05x^5 + 0.0077x^4 - 0.7633x^3 + 42.298x^2 - 1240.5x + 15051$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วงการเพิ่มความชื้นครั้งที่ 2

$$y = -8E-06x^4 + 0.0023x^3 - 0.2397x^2 + 11.166x - 187.69$$

สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้น(x) และค่าความต้านทานไฟฟ้า(y) ของตัวอย่าง
หัววัด ขึ้นรูปที่แรงอัด 2 ตัน เผอบที่อุณหภูมิ 600 °C

ช่วงการเพิ่มความชื้นครั้งที่ 1

$$y = 7E-05x^4 - 0.0212x^3 + 2.564x^2 - 138.47x + 2874.6$$

ช่วงการลดความชื้นครั้งที่ 1

$$y = 6E-05x^4 - 0.0208x^3 + 2.5712x^2 - 141.27x + 2961.1$$

ช่วงการเพิ่มความชื้นครั้งที่ 2

$$y = -0.0218x^2 + 1.9474x + 47.008$$

สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้น(x) และค่าความต้านทานไฟฟ้า(y) ของตัวอย่าง
หัววัด ขึ้นรูปที่แรงอัด 2 ตัน เผอบที่อุณหภูมิ 800 °C

ช่วงการลดความชื้น

$$y = 0.0004x^4 - 0.1073x^3 + 11.965x^2 - 596.81x + 11612$$

ช่วงการเพิ่มความชื้น

$$y = -0.0961x^2 + 6.1879x + 402.28$$

ซึ่งพอที่จะนำมาเป็นตัวตรวจวัดความชื้นได้ในระดับเบื้องต้น

สรุปความสัมพันธ์ของเงื่อนไขการเตรียม WO_3 ที่นำมาใช้เป็นตัวตรวจวัดความชื้นได้ดี
อย่างดีพอควร คือสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้น(x) และค่าความต้านทานไฟฟ้า(y) ของ
ตัวอย่างหัววัด ขึ้นรูปที่แรงอัด 2 ตัน เผอบที่อุณหภูมิ 800 °C มี ความชันของกราฟคือ 242
 $\Omega./\%RH$ แต่ยังคงมีปัญหาด้านเสถียรภาพในการทำซ้ำ ซึ่งควรมีการศึกษาแนวทางเพื่อพัฒนาต่อ
ไป

ข้อเสนอแนะ

1. ชิ้นสารที่ยังไม่ได้เผาอบผนึก หรือเผาที่อุณหภูมิต่ำ จะมีความเปราะบางมาก ทำให้เสียหายในขั้นตอนการวัดเป็นจำนวนมาก ควรให้ความระมัดระวังเป็นพิเศษ
2. ควรใช้แทนอัดสารที่มีคุณภาพ และทำความสะอาดอย่างดี เพื่อลดปัญหาการปนเปื้อน
3. ในการวัดที่มีการเปลี่ยนแปลงความชื้นมาก ๆ อย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน จะทำให้ความไวในการตอบสนองต่ำลง ควรทดลองให้ความร้อนเพื่อคืนสภาพ (Recovery) ก่อนนำมาวัดอีกครั้ง
4. การแปรเปลี่ยนความชื้นต่อเนื่องในช่วงความชื้นต่ำจะยังคงทำได้ยาก ทำให้การวัดยังไม่ครอบคลุมในช่วงกว้าง ควรพัฒนาอุปกรณ์การวัดในด้านนี้เพิ่มเติม
5. ควรมีการควบคุมอุณหภูมิขณะการวัด หรือทดลองวัดที่อุณหภูมิต่าง ๆ เพื่อเปรียบเทียบผล
6. ควรพัฒนาให้ตัวอย่างหั่ววัดมีขนาดเล็กลง จะทำให้ไวต่อการตอบสนองมากขึ้น
7. ในระยะยาวควรพัฒนาให้มีสมบัติที่ดีของหั่ววัดความชื้นในอุดมคติ ซึ่งมีดังนี้
 1. ตอบสนองรวดเร็ว (fast response)
 2. ไม่มีความต่างกันในช่วงการวัด (no hysteresis)
 3. มีความสามารถในการทำซ้ำ (good reproducibility)
 4. มีความเสถียรในระยะยาว (long-term stability)
 5. มีช่วงการตอบสนองกว้าง เช่น 0% -100% RH
 6. ทนต่อความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. สุวพันธ์ นิลายน , 2534 , อุดุนิยมวิทยา , กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. Robin E. Bentley , 1998 ,Temperature and Humidity Measurement V.1
3. Noboru Yamazoe, 1988 , Chemical sensor technology V.3 , Tokyo: Kodansha Ltd.
4. นส. อรณูช บุญทั้ง ,2544, อิทธิพลของอนุภาคต่ออุณหภูมิการอบผืนก , THESIS MT105 , มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
5. Tetsuro Seiyama ,1992 , Chemical sensor technology V.4 , Tokyo: Kodansha Ltd.
6. ผศ.ดร. จิติ หนูแก้ว ,2544, เครื่องมือวัดสมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ
7. มานะ ศรียุทธศักดิ์,2545, Tungsten Oxide and its Application to Alcohol Gas sensors
8. www-soem.ecu.edu.au/units/scp3313/Hycaltut.pdf



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ตารางความกดไอน้ำอิ่มตัวเป็นมิลลิเมตรปรอท^[1]

อุณหภูมิ	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9
0	4.58	4.61	4.65	4.68	4.72	4.75	4.79	4.82	4.86	4.89
1	4.93	4.96	5.00	5.03	5.07	5.11	5.14	5.18	5.22	5.26
2	5.29	5.33	5.37	5.41	5.45	5.49	5.52	5.56	5.60	5.64
3	5.68	5.73	5.77	5.81	5.85	5.89	5.93	5.97	6.02	6.06
4	6.10	6.14	6.19	6.23	6.27	6.32	6.36	6.41	6.45	6.50
5	6.54	6.50	6.64	6.68	6.73	6.78	6.82	6.87	6.92	6.97
6	7.01	7.06	7.11	7.16	7.21	7.26	7.31	7.36	7.41	7.46
7	7.51	7.57	7.62	7.67	7.72	7.78	7.83	7.83	7.94	7.99
8	8.05	8.10	8.16	8.21	8.27	8.32	8.38	8.44	8.49	8.55
9	8.61	8.67	8.73	8.79	8.85	8.91	8.97	9.03	9.09	9.15
10	9.21	9.27	9.33	9.40	9.46	9.52	9.59	9.65	9.71	9.78
11	9.84	9.91	9.98	10.04	10.11	10.18	10.24	10.31	10.38	10.45
12	10.52	10.59	10.66	10.73	10.80	10.87	10.94	11.01	11.09	11.16
13	11.23	11.31	11.38	11.45	11.53	11.61	11.68	11.76	11.83	11.91
14	11.00	12.07	12.14	12.22	12.30	12.38	12.46	12.55	12.63	12.71
15	12.79	12.87	12.96	13.04	13.12	13.21	13.29	13.38	13.46	13.55
16	13.64	13.72	13.81	13.90	13.99	14.08	14.17	14.26	14.35	14.44
17	14.53	14.62	14.72	14.81	14.91	15.00	15.10	15.19	15.29	15.38
18	15.48	15.58	15.68	15.78	15.88	15.97	16.08	16.18	16.28	16.38
19	16.48	16.58	16.69	16.70	16.90	17.00	17.11	17.22	17.32	17.43
20	17.54	17.65	17.76	17.87	17.98	18.09	18.20	18.31	18.42	18.54
21	18.66	18.77	18.88	19.00	19.12	19.24	19.35	19.47	19.59	19.71
22	19.83	19.95	20.08	20.20	20.32	20.44	20.57	20.70	20.82	20.95
23	21.07	21.20	21.33	21.46	21.59	21.72	21.85	21.98	22.12	22.25
24	22.38	22.52	22.65	22.79	22.92	23.06	23.20	23.34	23.48	23.62
25	23.76	23.90	24.05	24.19	24.19	24.33	34.48	24.77	24.92	25.07
26	25.22	25.37	25.52	25.67	25.82	25.97	26.13	26.18	26.44	26.59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปตีพิมพ์เผยแพร่ในที่สาธารณะ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

27	26.75	26.90	27.06	27.22	27.38	27.54	27.07	27.87	27.03	28.18
28	28.36	28.52	28.69	28.86	29.03	29.19	29.30	29.54	29.71	29.88
29	30.05	30.23	30.40	30.58	30.75	30.93	31.11	31.29	31.47	31.65
30	31.83	32.02	32.20	32.38	32.57	32.76	32.95	33.13	33.32	33.51
31	33.71	33.90	34.09	34.29	34.48	34.68	34.88	35.07	35.27	35.47
32	35.67	35.88	36.08	36.28	36.49	36.69	36.90	37.11	37.22	37.53
33	37.74	37.95	38.17	38.38	38.60	38.81	39.03	39.25	39.47	39.69
34	39.91	40.13	40.36	40.58	40.81	41.04	41.26	41.49	41.72	41.95
35	42.19	42.42	42.66	42.90	43.14	43.38	43.62	43.86	44.10	44.34
36	44.58	44.83	45.07	45.35	45.57	45.81	46.06	46.30	46.57	46.82
37	47.08	47.34	47.59	47.85	48.11	48.38	48.64	48.91	49.17	49.44
38	49.71	49.97	50.24	50.52	50.79	51.07	51.35	51.62	51.90	52.18
39	52.46	52.74	53.02	53.31	53.59	53.88	54.17	54.46	54.46	55.04
40	55.34	55.63	55.93	56.23	56.53	56.83	57.14	57.44	57.74	58.05
41	58.30	58.67	58.98	59.29	59.60	59.92	60.24	60.65	60.88	61.20
42	61.52	61.85	62.17	62.50	62.82	63.15	63.49	63.82	64.15	64.49
43	64.82	65.16	65.50	65.84	66.19	66.53	66.88	67.32	67.58	67.93
44	68.28	68.63	68.99	69.35	69.71	70.08	70.44	70.80	71.17	77.53

ความชื้นสัมพัทธ์คำนวณได้ดังนี้

$$R.H. = \frac{E - 1/2 (t - t') \times 100}{E}$$

เมื่อ t เป็นอุณหภูมิตุ้มแห้ง ($^{\circ}\text{C}$)

t' เป็นอุณหภูมิตุ้มเปียก ($^{\circ}\text{C}$)

E เป็นความกดไอน้ำอิ่มตัว ณ อุณหภูมิตุ้มแห้ง

E' เป็นความกดไอน้ำอิ่มตัว ณ อุณหภูมิตุ้มเปียก

ซึ่งเป็นสูตรประยุกต์ใช้อำนวยความสะดวกในการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาความดันไอน้ำ^[8]

- การคำนวณค่าความชื้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0°C ที่ -148 to 32 °F

เมื่อ p_{ws} = saturation pressure, psia

T = absolute temperature

$$\ln(P_{ws}) = C_1/T + C_2 + C_3T + C_4T^2 + C_5T^3 + C_6T^4 + C_7 \ln(T)$$

เมื่อ

$C_1 = -1.0214165E+04$	$C_4 = 1.9702377E-07$
$C_2 = -4.8932428E+00$	$C_5 = 3.5575832E-10$
$C_3 = -5.3765794E-03$	$C_6 = -9.0344688E-14$
$C_7 = 4.1635019E+00$	

- การคำนวณค่าความชื้นที่อุณหภูมิสูงกว่า 0°C 32 to 392 °F (ใช้หาค่าความชื้นอิ่มตัว)

$$\ln(P_{ws}) = C_8/T + C_9 + C_{10}T + C_{11}T^2 + C_{12}T^3 + C_{13} \ln(T)$$

เมื่อ

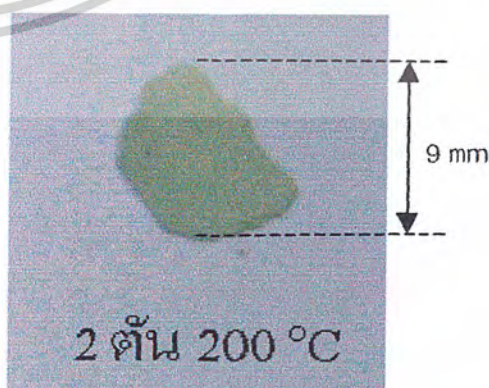
$C_8 = -1.0440397E+04$	$C_{11} = 1.2890360E-05$
$C_9 = -1.1294650E+01$	$C_{12} = -2.4780681E-09$
$C_{10} = -2.7022355E-02$	$C_{13} = 6.5459673$

รูปตัวอย่างหัววัด ที่นำผง WO_3 มาอัดขึ้นรูปที่ 2 และ 3 ตัน และเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ



2 ตัน ไม่อบพ่น

รูปที่ ผ.1 ชิ้นสารตัวอย่างขึ้นรูปด้วยแรงอัด 2 ตัน



2 ตัน 200 °C

รูปที่ ผ.2 ชิ้นสารตัวอย่างขึ้นรูปด้วยแรงอัด 2 ตัน

ยังไม่ผ่านการเผาอบ

เผาอบที่อุณหภูมิ 200°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๓.3 ชิ้นสารตัวอย่างขึ้นรูปด้วยแรงอัด 2 ตัน

เผาอบที่อุณหภูมิ 400°C



รูปที่ ๓.4 ชิ้นสารตัวอย่างขึ้นรูปด้วยแรงอัด 2 ตัน

เผาอบที่อุณหภูมิ 600°C



รูปที่ ๓.5 ชิ้นสารตัวอย่างขึ้นรูปด้วยแรงอัด 2 ตัน

เผาอบที่อุณหภูมิ 800°C



รูป ๓.6 ชิ้นสารตัวอย่างขึ้นรูปด้วยแรงอัด 2 ตัน

เผาอบที่อุณหภูมิ 1000°C



รูปที่ ๓.7 ชิ้นสารตัวอย่างขึ้นรูปด้วยแรงอัด 2 ตัน

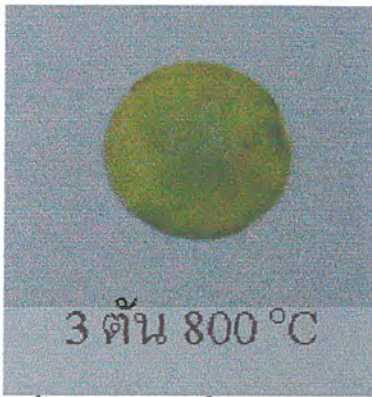
เผาอบที่อุณหภูมิ 1100°C



รูปที่ ๓.8 ชิ้นสารตัวอย่างขึ้นรูปด้วยแรงอัด 3 ตัน

เผาอบที่อุณหภูมิ 200°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๘.9 ชิ้นสารตัวอย่างขึ้นรูปด้วยแรงอัด 3 ตัน
เผาอบที่อุณหภูมิ 800°C



รูปที่ ๘.10 ชิ้นสารตัวอย่างขึ้นรูปด้วยแรงอัด 2 ตัน
เผาอบที่อุณหภูมิ 800°C (impurity)



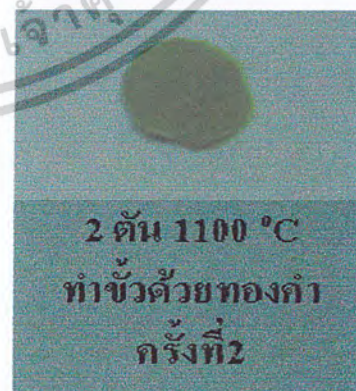
รูป ๘.11 ชิ้นสารตัวอย่างขึ้นรูปด้วยแรงอัด 2 ตัน
เผาอบที่อุณหภูมิ 800°C



รูปที่ ๘.12 ชิ้นสารตัวอย่างขึ้นรูปด้วยแรงอัด 3 ตัน
เผาอบที่อุณหภูมิ 800°C



รูปที่ ๘.13 ชิ้นสารตัวอย่างขึ้นรูปด้วยแรงอัด 2 ตัน
เผาอบที่อุณหภูมิ 1100°C ชั้นที่ 1



รูปที่ ๘.14 ชิ้นสารตัวอย่างขึ้นรูปด้วยแรงอัด 2 ตัน
เผาอบที่อุณหภูมิ 1100°C ชั้นที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะเฉพาะของทังสเตน

Name : Tungsten
 Symbol : W
 Atomic number : 74
 Group : Transition Metal
 Atomic weight : 183.84
 Crystal Structure : Cubic
 Shells : [Xe] 4f14 5d4 6s
 Orbitals : 2,8,18,32,12,2
 Melting point [C] : 3410C 20
 Boiling point [C] : 5660?
 Electronegativity : 2.36
 Covalent radius [A] : 1.30
 Ionic radius [A] : .60 (+6)
 Atomic radius [A] : 2.02
 Atomic volume [cm/mol] : 9.53
 1st ionization potential [V] : 7.98
 2nd ionization potential [V] : --
 3rd ionization potential [V] : --
 Oxydation states : (6),5,4,3,2
 Density @ 293 K [g/cm] : 19.3
 Specific heat [J/gK] : 0.13
 Heat of vaporization [kJ/mol] : 824.0
 Heat of fusion [kJ/mol] : 35.40
 Elec. conduct. [$10^6/cm$ ohm] : 0.189
 Thermal conductivity [W/cmK] : 1.74
 Modulus of elasticity [10MPa] : 401
 Coeff. of therm.exp. [$10^{-6}/K$] : 4.5
 Valence : 3,1653
 Lattice parm. a : --
 Lattice parm. b : --
 Lattice parm. c, axis angle : 2,3,4,5,6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MIST MAKER UNIT INSTRUCTIONS

This unit utilizes electrical oscillation at ultrasonic frequencies. The ceramic changes electrical oscillation into mechanical oscillation, which creates the mist and water spray. This oscillation also produces negative ions, which help to freshen air and the mist will add humidity to a room. Adding a few drops of your favorite scent to the water will produce an effect similar to an incense burner.

SAFETY INSTRUCTIONS, READ BEFORE INITIAL OPERATION

1. For indoor use only. Do not use outdoors.
2. Use only the transformer supplied with the product.
3. Do not touch the ceramic of mist unit while in operation.
4. Do not touch response switch of mist maker while remove mist unit from water in operation.
5. Always disconnect the power supply before moving or maintenance.
6. Do not allow power supply to get wet or gather moisture.
7. Do not allow the mist unit electrical plug connector to get wet.
8. Do not place a container, cup or any other object over the mist unit that completely covers the mist maker. Water must be allowed to circulate to cool the unit.

INSTRUCTIONS FOR USE

1. Place the mist unit into a water container placidly. No matter the size of the container, there should be only approximately $1\frac{1}{2}$ inches of water above the ceramic of Mist Unit. (If the unit is too far under the water, it will not produce the mist. Meantime if water is not enough to drown the crossbeam of water lever response switch, it will stop producing the mist automatically).
2. Connect the power cable leading from the mist unit to the power cable of the transformer unit.
3. Plug the transformer unit into the A/C power socket. A red light on the mist unit indicates the mist unit in on. If installed properly, it will begin producing the mist immediately.

GENERAL SUGGESTIONS FOR OPTIMUM USE

1. Do not operate more than 8 hours per day. Connecting the transformer to a timer will insure your mist unit operates only when needed.
2. The mist unit sends up small jets of water while in operation. Your container

not place the unit where water spillage or condensation will cause damage to furniture, electronic products or floors.

3. Use of clean water is recommended. When the water is dirty change it with clean water in time (dirty water will affect production the mist).
4. Do not use household abrasive cleaners on any part of the mist unit. You may clear it with soft cloth in clean water.

MAINTENANCE & CERAMIC REPLACEMENT

PLEASE NOTE * * CERAMIC REPLACEMENT KIT SOLD SEPARATELY

1. After operating the mist unit for some time, you may notice a decrease in the amount of mist produced or it may stop working altogether. At that time, you should either clean or replace the ceramic piece.
 - a. Unplug the unit and remove from water container.
 - b. Using the key tools, insert the key into the winding ring and turn counter clockwise.
 - c. Remove the filler piece (washer) and ceramic.
IMPORTANT, note that there is a front and back of the ceramic. Be sure to re-install with the correct side (no black color ring side) facing up.
 - d. Clean chemical deposits on the ceramic with a soft cloth and re-install or proceed to install a new ceramic in the reverse order of the above. Refer to exploded view of mist unit for proper installation of parts.
 - e. The inside area of the unit cavity must be completely dry before the parts are installed.

PARAMETER OF MIST MAKER UNIT

Input voltage: A/C 24V

Input electric current: < 1.2A

Limited temperature: +5 ~ 40°C

Run out of water: app. 80ml. Per hour

Depth of water limited: 50 ~ 60 mm..

Length of wire: 1.8 m.

Have certificate of CE (EMC)

MATCHING TRANSFORMER:

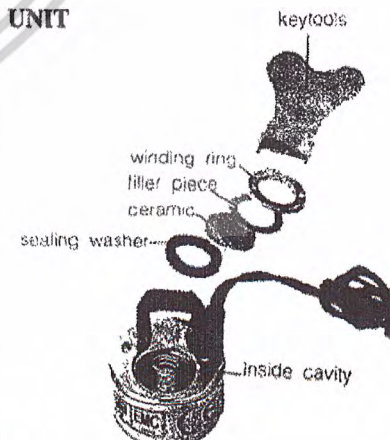
Input voltage: AC220V 50Hz/

230V 50Hz / 120V 60Hz

Rated power: 36W

Output voltage: AC 24V

Output electric current: 1.2A



Humidity sensor

2322 691 90001

APPLICATIONS

- Humidity measurements in electronic hygrometers for domestic use
- Self-regulating air humidifiers, etc.

DESCRIPTION

This capacitive atmospheric humidity sensor consists of a non-conductive foil, which is covered on both sides with a layer of gold. The dielectric constant of the foil changes as a function of the relative humidity of the ambient atmosphere and, accordingly, the capacitance value of the sensor is a measure for relative humidity. The foil is clamped between contact springs and assembled in a plastic housing. It is provided with two connecting pins which fit printed-circuit boards with a grid pitch of 2.54 mm, provision is also made for fastening with 3 mm bolts. The characteristics are not affected by incidental water condensation on the sensor foil. It should not be exposed to either acetone or chlorine vapours.

QUICK REFERENCE DATA

PARAMETER	VALUE	UNIT
Humidity range (RH)	10 to 90	%
Capacitance at +25 °C; 43% RH; 100 kHz	122 ±15%	pF
Sensitivity between 12 and 75% RH	0.4 ±0.05	pF/%RH
Frequency	1 to 1000	kHz
Maximum AC or DC voltage	15	V
Storage humidity range (RH)	0 to 100	%
Ambient temperature range:		
operating	0 to +85	°C
storage	-25 to +85	°C
Drop test:		
height of free fall	1	m
Mass	≈1.3	g

Humidity sensor

2322 691 90001

MECHANICAL DATA

Marking

PHILIPS H1.

Mounting

The device can be soldered directly on to a printed-circuit board or fastened with 3 mm bolts.

Soldering

Solderability: $\leq 240\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\leq 4\text{ s}$.

Resistance to heat: $\leq 240\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\leq 4\text{ s}$.

Robustness of terminations

Tensile strength: 10 N.

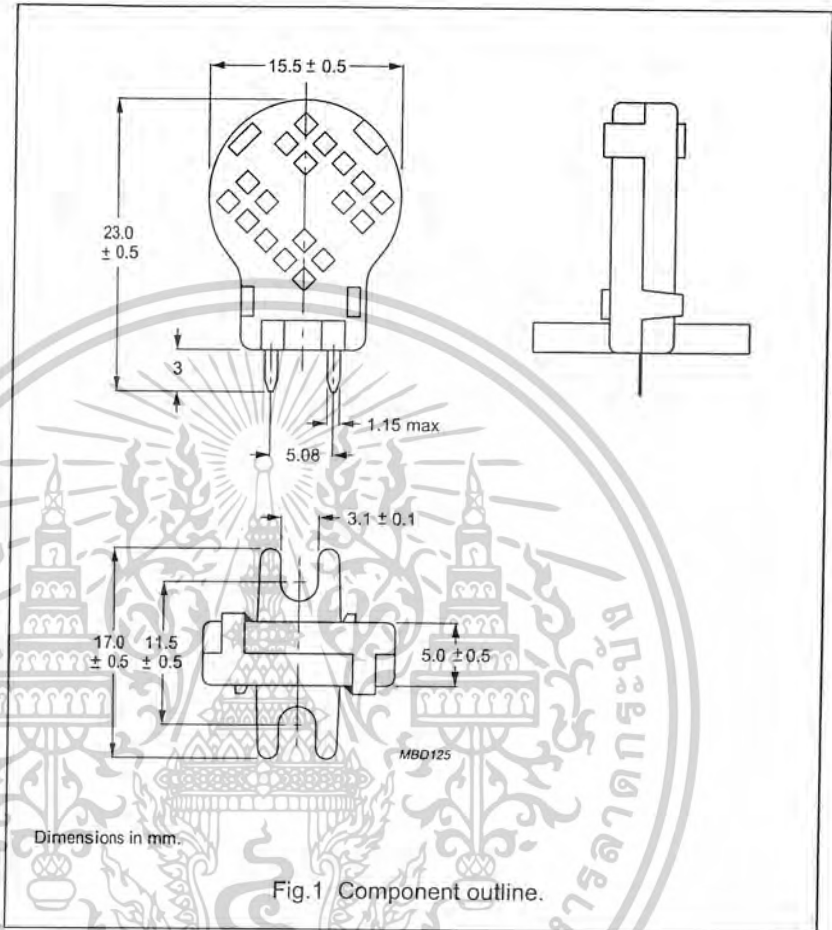


Fig.1 Component outline.

Humidity sensor

2322 691 90001

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Unless otherwise stated, measurements are in accordance with "IEC publication 539". Stability is in accordance with "CECC 43000" and "IEC 68-2".

PARAMETER	VALUE	UNIT
Humidity range (RH)	10 to 90	%
Capacitance at +25 °C; 43% RH; 100 kHz	122 ±15%	pF
Tan δ at +25 °C; 100 kHz; 43% RH	≤0.035	
Sensitivity between 12 and 75% RH	0.4 ±0.05	pF/%RH
Frequency range	1 to 1000	kHz
Temperature dependence	0.1	%RH/K
Response time in minutes (to 90% of indicated RH change at +25 °C, in circulating air):		
between 10 and 43% RH	<3	
between 43 and 90% RH	<5	
Hysteresis (for RH excursion of 10 to 90 to 10%)	≈3	%
Maximum AC or DC voltage	15	V
Storage humidity range (RH)	0 to 100	%
Ambient temperature range:		
operating	0 to +85	°C
storage	-25 to +85	°C
Mass	≈1.3	g

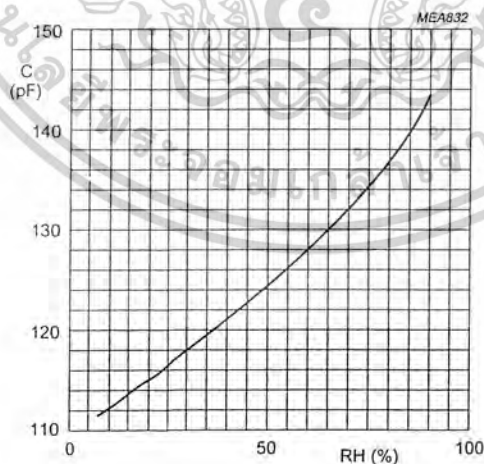


Fig.2 Typical capacitance as a function of relative humidity.

Pattern : 82-728

Radiation = 1.540600

Quality : Calculated

W O₂

Tungsten Oxide

Lattice : Orthorhombic

S.G. : Pnma (62)

a = 9.71640

b = 8.43800

c = 4.75640

a/b = 1.15151

c/b = 0.56369

Z = 12

Mol. weight = 215.85

Volume [CD] = 389.96

Dx = 11.029

I/cor = 10.43

ICSD COLLECTION CODE : 074774

REMARKS FROM ICSD : REM RVP.

TEMPERATURE FACTOR : ITF

REMARKS FROM ICSD : REM PRE Mentioned.

d (Å)	l	h	k	l	d (Å)	l	h	k	l
4.85820	2	2	0	0	1.34922	2	3	2	3
4.27201	13	1	0	1	1.34604	1	6	3	1
4.21900	3	0	2	0	1.33854	<1	6	0	2
*4.21900	3	2	1	0	1.33581	<1	1	6	1
4.14346	1	0	1	1	1.33248	1	7	0	1
3.81137	100	1	1	1	1.32851	<1	2	3	3
3.39870	<1	2	0	1	1.32418	1	2	5	2
3.18547	<1	2	2	0	*1.32418	1	4	4	2
3.15258	<1	2	1	1	1.31617	1	7	1	1
3.00185	23	1	2	1	1.29948	<1	2	6	1
2.87708	4	3	0	1	1.28454	<1	6	4	0
2.64673	<1	2	2	1	1.27051	2	7	2	1
2.55174	19	3	1	1	*1.27051	2	3	5	3
2.43415	39	2	3	0	1.26667	1	4	2	3
2.42910	37	4	0	0	*1.26667	1	4	4	3
2.37520	14	0	0	2	1.25676	2	1	3	3
2.34921	4	1	1	1	1.24500	<1	3	6	4
2.31001	1	1	3	0	1.23079	1	5	5	1
2.26043	13	3	2	1	1.22847	<1	5	0	3
2.22803	<1	1	2	1	1.22636	<1	2	4	3
2.16688	2	2	3	2	1.21708	2	4	6	0
2.16331	1	4	0	1	1.21566	3	5	1	0
2.13800	<1	2	0	2	1.21455	2	8	0	3
2.10950	1	0	4	0	1.21052	2	0	6	2
2.10512	1	4	2	4	1.20865	4	6	3	2
2.09554	<1	4	1	1	1.20123	<1	1	6	2
2.07173	1	0	2	2	*1.20123	<1	4	3	3
*2.07173	1	2	2	2	1.19745	<1	4	5	2
2.02618	<1	1	2	2	1.18910	2	0	0	4
1.93915	1	3	3	1	1.18689	1	7	1	2
1.93496	1	2	4	0	1.18026	3	3	4	3
1.91692	<1	3	0	2	*1.18026	3	5	2	3
1.89146	13	1	4	1	1.17679	1	8	0	1
1.86929	<1	3	1	2	1.17461	<1	2	6	2
1.83941	1	4	3	0	1.16995	<1	2	7	0
1.78993	1	5	0	1	1.16846	<1	6	7	1
1.78233	<1	2	4	1	*1.16846	<1	0	5	0
1.78513	<1	1	3	2	1.16715	<1	8	2	1
1.75939	12	5	1	1	1.16551	<1	8	1	0
1.70108	31	2	3	2	1.16013	2	1	7	1
*1.70108	31	4	0	2	1.15316	<1	7	2	2
1.65691	12	3	4	1	1.14743	<1	1	5	3
1.61940	1	6	0	0	1.14434	<1	0	2	4
1.59416	1	2	5	0	*1.14434	<1	2	1	4
*1.59416	1	4	4	0	1.13965	<1	1	2	4
1.59038	1	0	5	1	*1.13965	<1	2	7	1
*1.59038	1	6	1	0	1.13391	<1	3	6	2
1.58402	<1	3	3	2	*1.13391	<1	8	2	1
1.57813	1	0	4	2	1.12656	3	7	4	1
1.56957	1	1	5	1	*1.12656	3	5	3	3
1.56477	1	1	0	3	1.12314	1	4	4	3
1.55820	<1	0	1	3	*1.12314	1	5	3	2
*1.55820	1	1	4	2	1.11503	<1	6	6	0
1.53654	5	1	1	3	1.10795	<1	6	5	1
1.51548	1	5	3	0	1.10661	<1	3	3	4
1.51185	1	6	4	0	1.10281	<1	7	1	2
*1.51185	1	4	4	1	1.09914	1	3	7	1
1.50723	<1	4	1	1	1.09414	<1	6	2	3
*1.50723	<1	6	0	3					
1.50480	<1	5	0	2					
1.50092	<1	2	4	2					
1.48375	<1	1	3	2					
1.48142	<1	5	1	2					
1.46712	1	1	2	3					
1.45449	1	4	3	2					
1.44082	<1	6	2	1					
1.42781	1	3	5	1					
1.42400	1	3	0	3					
1.41938	<1	2	2	3					
1.41734	<1	5	2	0					
1.40633	3	0	6	0					
1.40341	8	3	1	3					
*1.40341	8	3	0	0					
1.38595	<1	4	5	0					
1.38115	<1	0	3	3					
1.36880	2	5	4	1					

*Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997) primary reference :

Pattern : 2-1098

Radiation = 1.540600

Quality : Deleted

Ag	2th	l	h	k	l
	38.269	100	1	1	1
Silver	44.142	70	2	0	0
	60.026	70			
	77.549	100	3	1	1
	81.506	70	2	2	2
	95.578	50			
	98.085	50	4	0	0
	99.401	50			

Lattice : Face-centered cubic

Mol. weight = 107.87

S.G. : Fm3m (225)

Volume [CD] = 67.78

a = 4.07720

Dx = 10.571

Dm = 10.100

Z = 4

DELETED AND REJECTED BY : Delete: Weissmann parcel of September 1958.
MELTING POINT : 960.5
COLOR : Silver white

*British Museum (Natural History), primary reference :

Pattern : 1-1174

Radiation = 1.540600

Quality : Deleted

Au	2th	l	h	k	l
	38.269	100	1	1	1
Gold	44.600	75	2	0	0
	64.678	75	2	2	0
	77.549	88	3	1	1
	82.352	62	2	2	2
	98.085	38	4	0	0
	111.845	75	3	3	1
	115.662	75	4	2	0
	136.273	50	4	2	2

Latitude : Face-centered cubic

S.G. : Fm3m (225)

a = 4.06400

Z = 4

Mol. weight = 196.97

Volume [CD] = 67.12

Dx = 19.491

Dm = 19.370

DELETED AND REJECTED BY : Deleted by NBS card.
COLOR : Gold yellow
MELTING POINT : 1062.4

*Phys. Rev., volume 25, page 753, (1925) primary reference :
Davy

Pattern : 86-1326

Radiation = 1.540600

Quality : Calculated

Y₂O₃

Yttrium Oxide

Lattice : Body-centered cubic

S.G. : Ia3 (206)

a = 10.59810

Z = 16

Mol. weight = 225.81

Volume [CD] = 1190.38

Dx = 5.040

l/lcor = 9.29

ICSD COLLECTION CODE : 082420
 TEMPERATURE FACTOR : ATF
 REMARKS FROM ICSD : REM DEN.

d (Å)	l	h	k	l
5.29905	<1	2	0	0
4.32666	6	2	1	1
3.74699	<1	2	2	0
3.05941	100	2	2	2
2.83246	<1	3	2	1
2.64952	24	4	0	0
2.49800	2	4	1	1
2.36981	1	4	2	0
2.25952	3	3	3	2
2.16333	<1	4	2	2
2.07846	4	1	3	4
1.93494	1	1	2	5
1.87350	38	4	4	0
1.81756	1	4	3	3
1.76635	<1	6	0	0
1.71924	2	6	1	1
1.67571	1	0	2	6
1.63532	2	5	4	1
1.59772	13	6	2	2
1.56260	3	1	3	6
1.52970	4	4	4	4
1.49880	1	5	4	3
1.46969	1	0	4	6
1.44222	1	7	2	1
1.41623	1	6	4	2
1.34596	1	7	3	2
1.32476	4	8	0	0
1.30454	2	8	1	1
1.28521	1	8	2	0
1.26672	1	3	5	6
1.24900	1	8	2	2
1.23200	1	8	3	1
1.21569	3	6	6	2
1.20000	<1	7	5	2
1.18490	4	0	4	8
1.17036	<1	8	3	3
1.15635	<1	2	4	8
1.14282	1	7	6	1
1.12976	<1	6	6	4
1.11714	1	1	5	8
1.09311	1	7	6	3

*Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997) primary reference :

