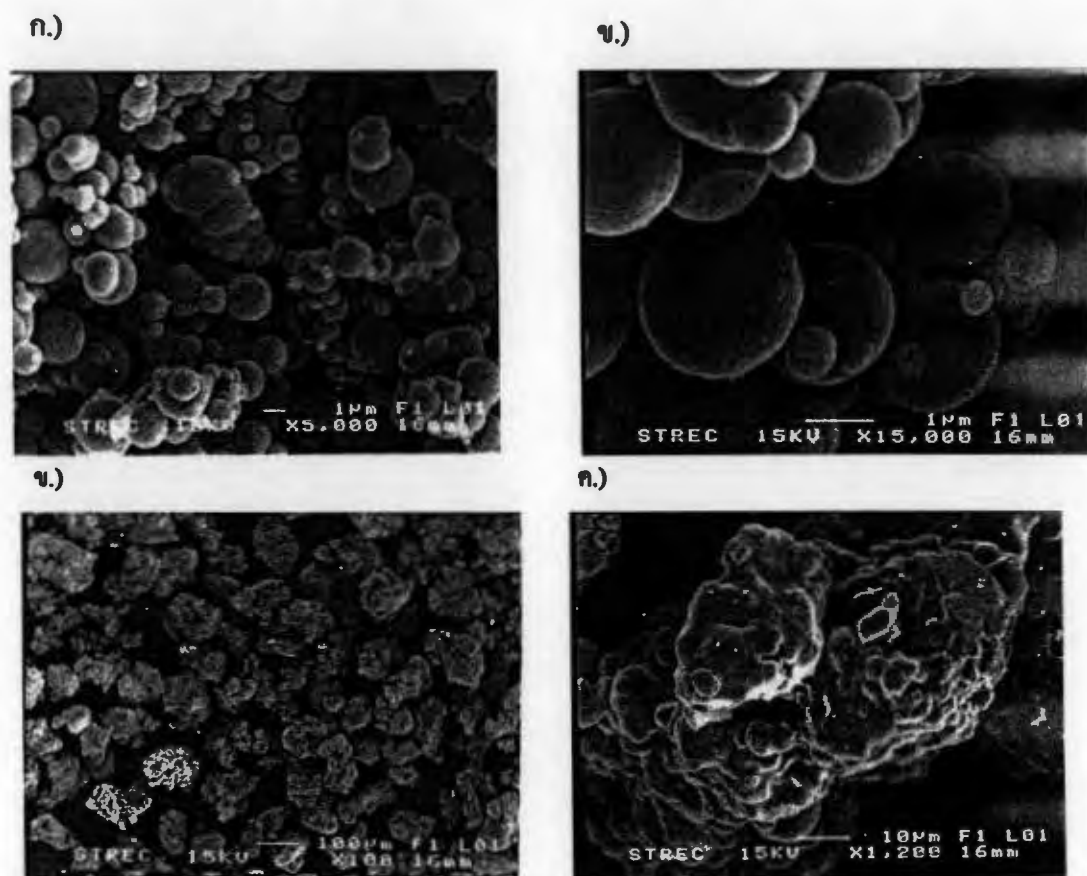


บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

ความชื้นและสภาพแวดล้อมมีผลต่อกระบวนการทางโลหะผง ทำให้เกิดการยึดติดกัน (Adhesion force) ระหว่างอนุภาคโลหะผง ซึ่งส่งผลเสียต่อกรรมวิธีการผลิตทางโลหะผงในงานอุตสาหกรรม ทำให้คุณสมบัติต่างๆของโลหะผงลดลง ได้แก่ คุณสมบัติในเรื่องของแรงยึดติดระหว่างอนุภาค ความสามารถในการไหล และความสามารถในการอัดตัวของโลหะผง ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของความชื้นที่มีผลทำให้เกิดแรงยึดติดระหว่างอนุภาคของโลหะผง ในการทดลองเพื่อหาคุณสมบัติของโลหะผงนี้กระทำโดยการใช้เทคนิคแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเพื่อวัดแรงยึดติดระหว่างอนุภาค วัดความสามารถในการไหลด้วยเทคนิคการวัด Angle of Repose และเครื่องมือวัดการไหลของผง (Flow meter) วัดความสามารถในการอัดตัวกระทำโดยการอัดตัวด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกส์ การวัดความหนาแน่นของชิ้นงาน การเผาผนึก (Partial sintering) การวิเคราะห์โครงสร้างรูพรุนด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและการวัดความแข็ง (Hardness) ของชิ้นงาน งานวิจัยนี้ยังศึกษาความเป็นไปได้ที่จะนำขี้เถ้าแกลบ (Rice husk ash) ที่ได้จากการเผาแกลบข้าวมาดูดซับความชื้นในโลหะผง โดยการศึกษาคุณลักษณะของขี้เถ้าแกลบ ได้แก่ การหาส่วนประกอบทางเคมีด้วย X-Ray Fluorescence (XRF), การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วย X-Ray Diffractometer (XRD), การวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนด้วย Thermogravimetric Analyzer (TGA), การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยวิธี BET Method, การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วย Scanning Electron Microscope (SEM) และ การวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคด้วย Laser Particle Size Analyzer

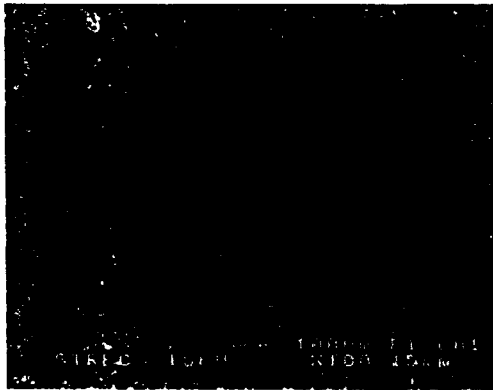
4.1 ผลการวิเคราะห์ขนาด รูปร่างและลักษณะพื้นผิวของวัสดุผง



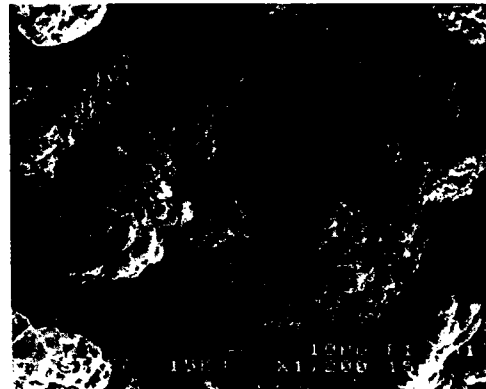
รูปที่ 4.1 ภาพถ่าย SEM ของผงเหล็ก ก.) ขนาด 5-10 ไมครอนกำลังขยาย 5000 เท่า ข.)ขนาด 5-10 ไมครอนกำลังขยาย 5000 เท่า ค.)ขนาด 110 ไมครอนกำลังขยาย 100 เท่า ง.) ขนาด 110 ไมครอนกำลังขยาย 1200 เท่า

ผงเหล็กขนาดเฉลี่ย 10 ไมครอน(รูปที่ 4.1 ก.และ ข.) และขนาดเฉลี่ย 110 ไมครอน (รูปที่ 4.1 ค. และ ง.) ที่ได้จากการวิเคราะห์รูปร่างและลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด แสดงให้เห็นว่าผงเหล็กขนาดเฉลี่ย 10 ไมครอนมีการกระจายขนาดแตกต่างกันมาก ซึ่งมีรูปร่างของอนุภาคเป็นทรงกลม (Spherical) และมีอนุภาคขนาดเล็กเกาะอยู่บนอนุภาคขนาดใหญ่เป็นลักษณะดาวเทียม (Satellite) ในขณะที่ผงเหล็กขนาดเฉลี่ย 110 ไมครอนมีขนาดอนุภาคที่ใกล้เคียงกันมากและรูปร่างของอนุภาคเป็น Irregular มากกว่าผงขนาดเล็กแต่ยังคงความเป็นเม็ดผงอยู่

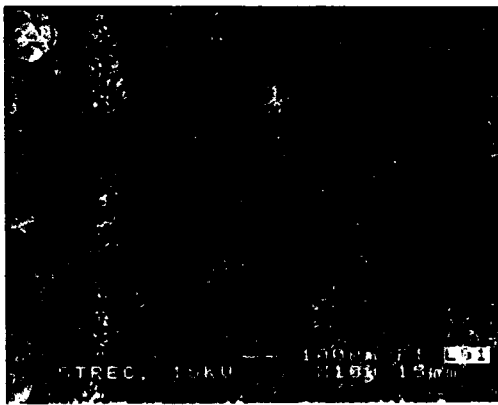
ก.)



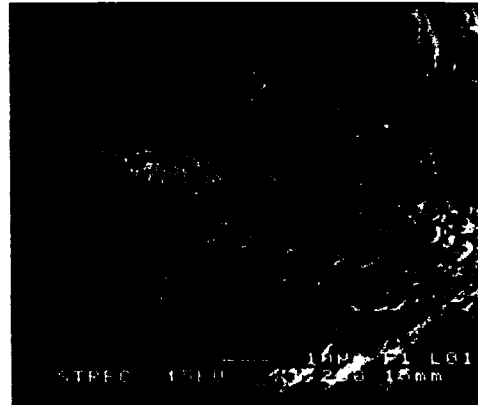
ข.)



ค.)



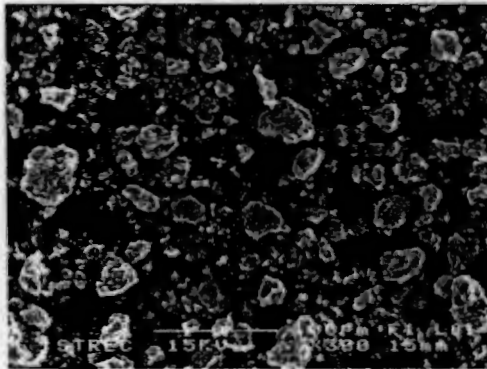
ง.)



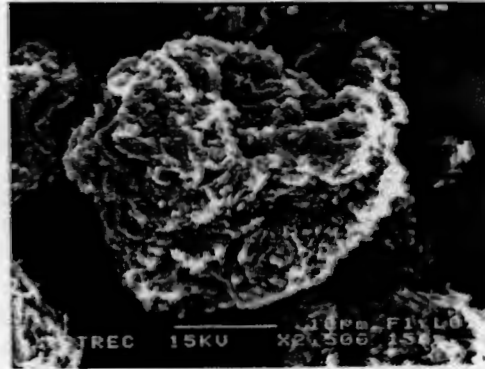
รูปที่ 4.2 ภาพถ่าย SEM ของ ก.) ผงทองแดงขนาด 33 ไมครอนกำลังขยาย 100 เท่า ข.) ผงทองแดงขนาด 33 ไมครอนกำลังขยาย 1200 เท่า ค.) ผงทองแดงขนาด 74 ไมครอนกำลังขยาย 100 เท่า ง.) ผงทองแดงขนาด 74 ไมครอนกำลังขยาย 1200 เท่า

จากรูปที่ 4.2 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของอนุภาคผงทองแดงขนาด 33 ไมครอนและขนาด 74 ไมครอน โดยรวมแล้วผงทั้งสองขนาดมีรูปร่างที่ใกล้เคียงกัน คือ Irregular แต่จะมีความแตกต่างกันเล็กน้อย นั่นคือผงทองแดงขนาด 33 ไมครอนมีรูปร่างเกาะตัวกันเป็นลักษณะขาวรี แต่ผงขนาด 74 ไมครอน มีรูปร่างเป็นกิ่งก้านสาขา เหมือนกิ่งสน ทำให้ผงขนาดใหญ่มีความเป็น Irregular มากกว่า ซึ่งจะส่งผลที่ผิวจำเพาะที่แตกต่างกันด้วย

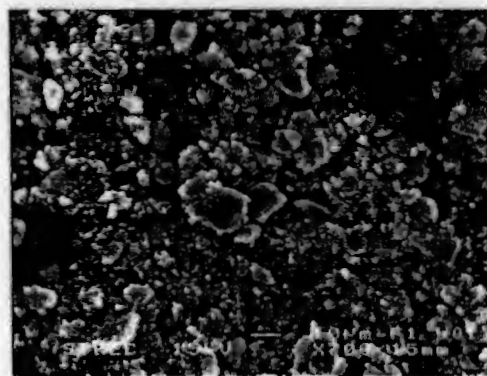
ก.)



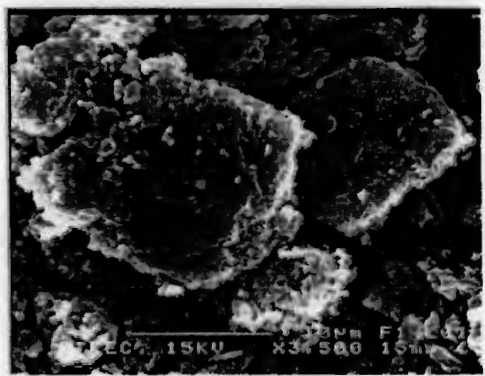
ข.)



ค.)



ง.)

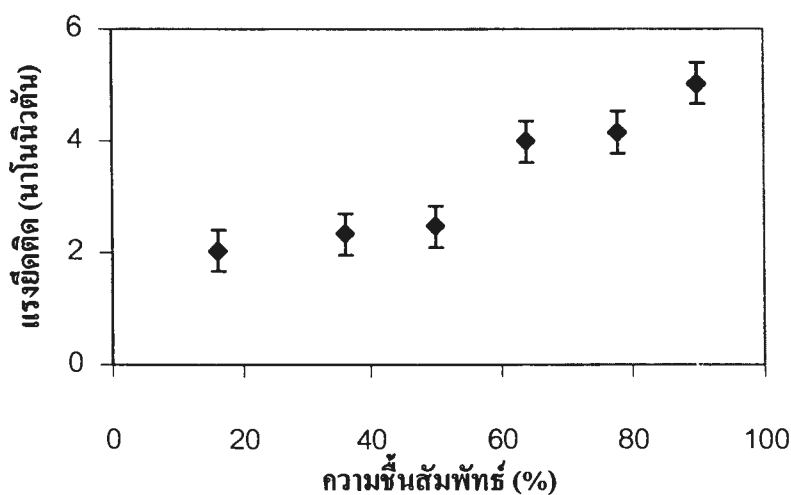


รูปที่ 4.3 ภาพถ่าย SEM ของ ก.) ผงคาร์บอนขนาด 50 ไมครอนกำลังขยาย 100 เท่า ข.) คาร์บอนขนาด 45 ไมครอนกำลังขยาย 3500 เท่า ค.) ผง Zinc stearate ขนาด 3 ไมครอนกำลังขยาย 700 เท่า ง.) ผง Zinc stearate ขนาด 3 ไมครอนกำลังขยาย 3500 เท่า

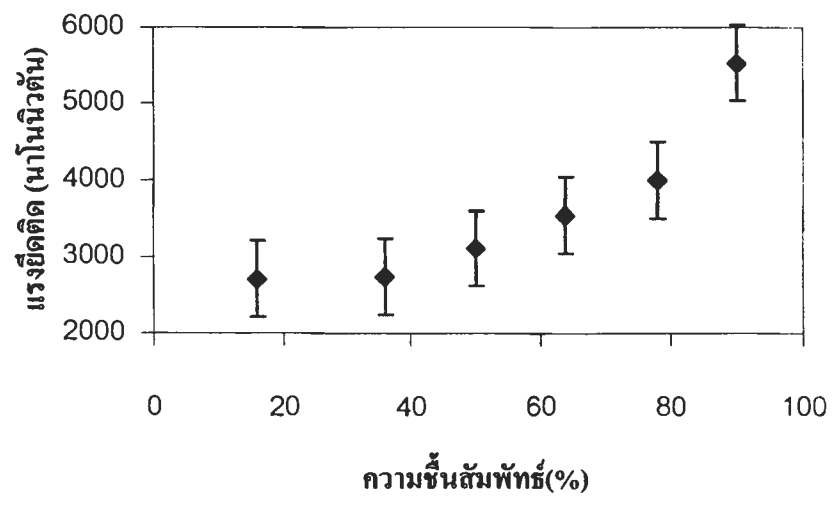
จากรูปที่ 4.3 สำหรับผงที่ใช้เป็นตัวเติมในโลหะผง ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารหล่อลื่น (Lubricant) Zinc stearate ซึ่งมีขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยเท่ากับ 3 ไมครอน ซึ่งการกระจายขนาดมีมาก รูปร่างอนุภาคเป็น Irregular แต่ผิวอนุภาคมีความเงาวาวเล็กน้อย ในส่วนของผงคาร์บอนรูปร่างใกล้เคียงกัน Zinc stearate แต่ผิวมีลักษณะมีแผ่นเล็กๆ เกาะอยู่บนผิว ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับสายคาแล้วลักษณะผิวของผงทั้งสองชนิดแล้ว ผิวที่เรียบเงาวาวของผง Zinc stearate น่าจะมีความสามารถในการหล่อลื่น (Lubrication) ดีกว่า

4.2 ผลการศึกษาการยึดติระหว่างอนุภาคโดยวิธีแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง

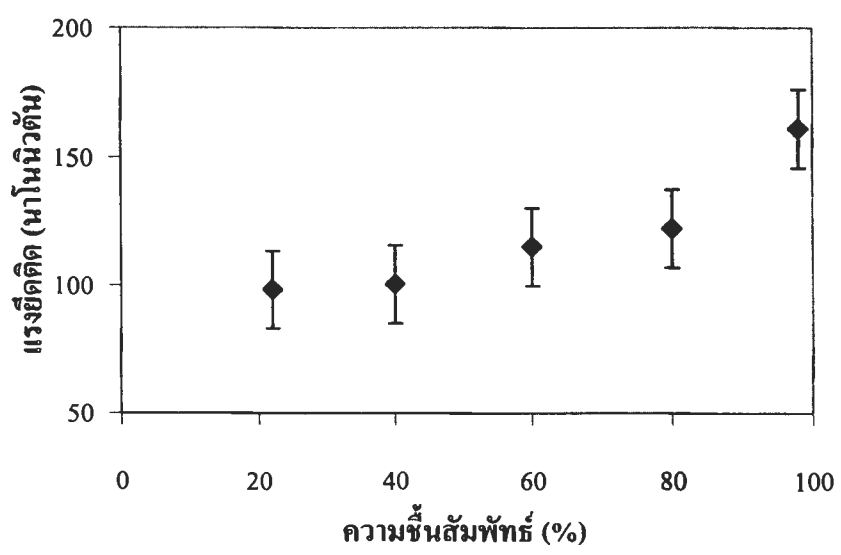
แรงยึดติระหว่างอนุภาคโลหะผงที่วัดด้วยวิธีแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ผงโลหะแต่ละชนิดจะเกิดแรงระหว่างอนุภาคไม่เท่ากัน ซึ่งขึ้นกับชนิด ขนาด รูปร่างและลักษณะของอนุภาค แรงที่ได้จากการวัดด้วยวิธีนี้ไม่ได้มีแต่แรงยึดติระหว่างอนุภาคเท่านั้น แต่ยังมีผลเนื่องมาจากแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคเกิดขึ้นด้วยโดยแรงเสียดทานของอนุภาคแต่ละชนิดมีขนาดของแรงต่างกันขึ้นอยู่กับขนาดและลักษณะของผิวอนุภาค ซึ่งขนาดของแรงระหว่างอนุภาคที่เกิดขึ้นของแต่ละตัวอย่างจะมีขนาดแตกต่างกัน โดยจะสูงขึ้นตามขนาดของอนุภาค ตั้งแต่ระดับ 2 นาโนนิวตันของผงเหล็กขนาด 10 ไมครอนซึ่งมีอนุภาคขนาดเล็ก(ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 20 เปอร์เซ็นต์) จนถึงขนาดของแรง 5500 นาโนนิวตันของผงเหล็กขนาด 110 ไมครอนซึ่งอนุภาคมีขนาดใหญ่กว่า (ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 98 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งแรงระหว่างอนุภาคนี้ไม่สามารถที่จะแยกแยะชนิดของแรงออกจากกันได้ แต่ในการศึกษาครั้งนี้ต้องการเปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากความชื้นสัมพัทธ์ที่มีการเปลี่ยนแปลง จากรูปที่ 4.1 ถึง รูปที่ 4.4 ทั้งผงเหล็กและผงทองแดงแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงค่าของแรงยึดติเป็นไปในแนวทางเดียวกัน คือค่าของแรงยึดติจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ (น้อยกว่า 60 เปอร์เซ็นต์)และค่าของแรงยึดติจะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในช่วงความชื้นสัมพัทธ์สูง (มากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์)



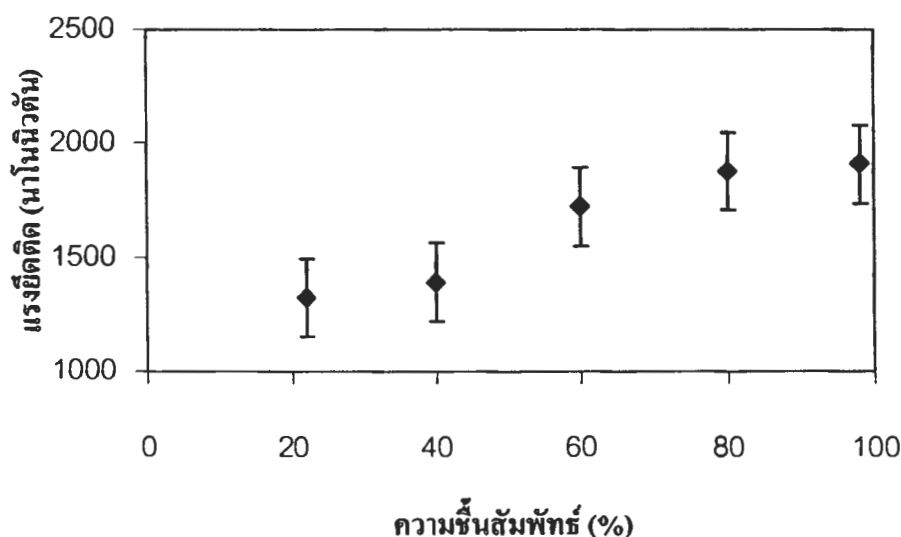
รูปที่ 4.4 แรงยึดติระหว่างอนุภาคผงเหล็กขนาด 10 ไมครอนที่ระดับความชื้นต่างกัน



รูปที่ 4.5 แรงยึดติดระหว่างอนุภาคผงเหล็กขนาด 110 ไมครอนที่ระดับความชื้นต่างกัน



รูปที่ 4.6 แรงยึดติดระหว่างอนุภาคผงทองแดงขนาด 33 ไมครอนที่ระดับความชื้นต่างกัน



รูปที่ 4.7 แรงยึดติดระหว่างอนุภาคผงทองแดงขนาด 74 ไมครอนที่ระดับความชื้นต่างกัน

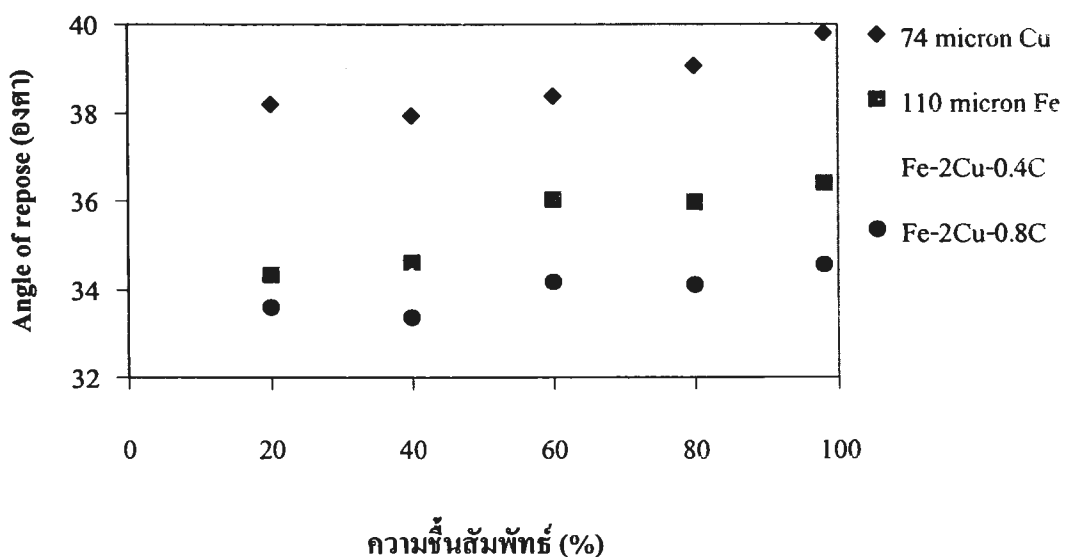
แรงที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาค ทั้งผงเหล็กและผงทองแดง ที่เพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นในช่วงระดับความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ เพราะว่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศมีน้อย การควบแน่นของไอน้ำบนผิวโลหะจะเกิดเพียงเล็กน้อยและไม่มีความต่อเนื่องกันของฟิล์มของของเหลว แม้ว่าความชื้นจะเพิ่มขึ้น แต่ในช่วงระดับความชื้นสูงปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจะมีปริมาณสูงมากพอที่จะทำให้เกิดการควบแน่นลงบนผิวของผงโลหะเพิ่มขึ้นและมีความต่อเนื่องของฟิล์มของของเหลวบนผิวโลหะ เมื่อผงที่อยู่ติดกันเกิดฟิล์มที่ต่อเนื่องกันจะทำให้เกิดแรงระหว่างอนุภาคเนื่องจากสะพานของเหลว (Liquid bridge) เกาะติดอยู่หรือที่เรียกว่า แรงแคปิลลารี (Capillary force) ซึ่งเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นทำให้มุมสัมผัส (Contact angle) ระหว่างของเหลว (ฟิล์มของไอน้ำ) และของแข็ง (ผงโลหะ) สูงขึ้นด้วย มีผลให้เกิดแรงระหว่างอนุภาคสูงขึ้นด้วยเช่นกัน ตามสมการ 2.7 ซึ่งจากการทดลองนี้ยังมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Fridrun Podezeck และคณะ⁽¹²⁾ ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อการยึดติดระหว่างอนุภาคระดับไมครอน โดยใช้เทคนิคแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifuge technique) วัดแรงยึดติดระดับนาโนนิวตัน โดยการควบคุมระดับความชื้นตั้งแต่ 35-95%RH ซึ่งที่ระดับความชื้นสูงจะมีค่าแรงยึดติดที่สูงเนื่องจากแรงแคปิลลารี และที่ระดับความชื้นต่ำแรงแคปิลลารีจะหายไปทำให้ค่าของแรงยึดติดลดลง และยังมีงานวิจัยของ O H Pakarinen และคณะ⁽¹⁶⁾ ทำการวัดแรงยึดติดระหว่าง ปลาย Tip ซิลิกอนของ

AFM บนผิวซิลิกาที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ต่างกันค่าของแรงยึดติด(ซึ่งประกอบด้วยแรงแม่เหล็กไฟฟ้ารีและแรงแวนเดอร์วาลส์) ประมาณ 11 นาโนนิวตัน ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 0-18 เปอร์เซ็นต์โดยที่แรงยึดติดมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเมื่อระดับความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น จนถึงที่ความชื้น 98 เปอร์เซ็นต์ ค่าของแรงยึดติดประมาณ 20 นาโนนิวตัน

4.3 ผลการวัดความสามารถในการไหลของผงโลหะ (Flowability of Metal Powder)

4.3.1 ผลการวัด Angle of Repose

การวัด Angle of Repose ของผงโลหะเป็นตัวบ่งบอกถึงความสามารถในการไหลของผงโลหะ



รูปที่ 4.8 ผลการวัด Angle of repose ของผงโลหะชนิดต่างๆที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ต่างกัน

จากรูปที่ 4.8 ผลการวัด Angle of repose ของผงโลหะที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ต่างกัน ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ต่ำค่ามุม Angle of repose ต่ำ โดยผงทองแดงจะมีค่ามุม Angle of repose สูงที่สุด ผงเหล็ก ผง Fe-2Cu-0.4C และ ผง Fe-2Cu-0.8C มีค่ามุม Angle of repose น้อยลงตามลำดับ โดยตัวอย่างทั้ง 4 ตัวอย่าง ค่ามุม Angle of repose จะมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ (น้อยกว่า 60 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งค่ามุมจะอยู่ที่ 33-34.5 องศา สำหรับผงเหล็กและผงเหล็กผสม

และค่ามุมประมาณ 38 องศาสำหรับผงทองแดง ในช่วงที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์สูง (มากกว่า 60 %) เห็นได้ชัดว่าเมื่อระดับความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้นค่ามุม Angle of repose มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมาก ค่ามุมของผงเหล็กและผงเหล็กผสมมีค่าประมาณ 34-36 องศา การเปลี่ยนแปลงประมาณ 6 เปอร์เซ็นต์นั้นจะลดการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อส่วนผสมของคาร์บอนเพิ่มขึ้น ค่ามุม Angle of repose ของผงทองแดงมีค่าประมาณ 40 องศา มีการเปลี่ยนแปลงประมาณ 4 เปอร์เซ็นต์ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 98 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น แนวโน้มของการเพิ่มขึ้นของผงเหล็กและผงเหล็กผสมทั้ง 3 ชนิดจะไปในทางเดียวกันคือจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ ในส่วนของผงทองแดงมีค่ามุม Angle of repose เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ

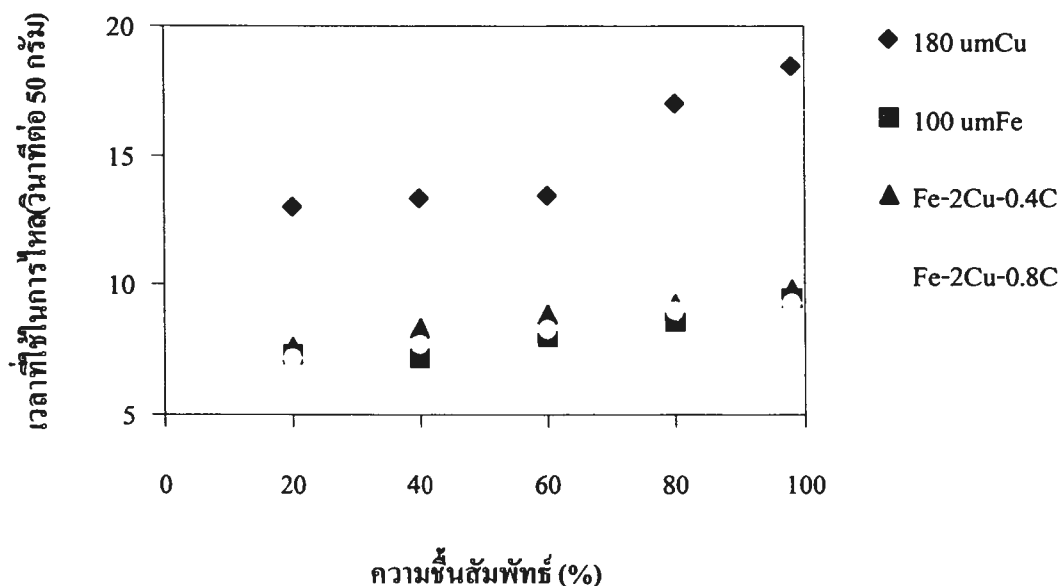
สำหรับผงเหล็กขนาด 5 ไมครอนและผงทองแดงขนาด 33 ไมครอน ไม่สามารถวัดค่า Angle of repose ได้เนื่องจากผงที่มีขนาดเล็กมาก ซึ่งมีพื้นที่ผิวสูงจึงมีพลังงานพื้นผิวสูงด้วย ทำให้ผงขนาดเล็กมากไม่สามารถไหลผ่านเครื่องวัดได้

ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าเมื่อระดับความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศเพิ่มขึ้นซึ่งสามารถควบแน่นลงบนผิวโลหะเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน เกิดเป็นลักษณะฟิล์มของเหลวซึ่งมีแรงดึงดูดผิวของเหลวกระทำบนผิวโลหะทำให้เกิดการเกาะติดกันของอนุภาคโลหะผงเพิ่มมากขึ้น การเกาะติดกันทำให้ผงเกิดการเคลื่อนตัวได้น้อยลง การที่ผงจะเคลื่อนที่ตกจากจุดยอดสุดของกองผงลงมาตำแหน่งด้านล่างของฐานมีค่าน้อยจึงทำให้กองผงวัสดุมีสัดส่วนความสูงมากเมื่อเทียบกับความกว้างของฐานด้านล่าง นั่นคือกองผงจะมีมุม Angle of repose สูงนั่นเอง ซึ่งทำให้ทราบว่าความสามารถในการไหลหรือการเคลื่อนตัวของโลหะผงมีความสัมพันธ์กับค่า Angle of repose คือ เมื่อค่าของมุม Angle of repose สูงความสามารถในการไหลหรือการเคลื่อนตัวของผงจะต่ำ ในทางตรงข้ามเมื่อค่ามุม Angle of repose ต่ำ ความสามารถในการไหลหรือการเคลื่อนตัวของผงจะสูง จากรูปที่ 4.8 เห็นได้ว่าที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์เดียวกัน ค่ามุม Angle of repose ของผงเหล็กจะมีค่าต่ำกว่าค่ามุม Angle of repose ของผงทองแดง นั่นคือความสามารถในการไหลตัวของผงเหล็กจะดีกว่าผงทองแดง แต่เมื่อระดับความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น ผงเหล็กกลับมีค่าสูงขึ้นในอัตราที่สูงกว่าผงทองแดง ซึ่งสาเหตุมาจากความสามารถในการดูดความชื้นของผงเหล็กจะสูงกว่าผงทองแดง เนื่องจากผงเหล็กมีพลังงานพื้นผิว (Surface Energy) สูง (โดยเฉลี่ยประมาณ 2.29 จูล์นต่อตารางเมตร)⁽¹⁷⁾ ความสามารถในการดูดซับความชื้นจะสูงกว่าผงทองแดงซึ่งมีพลังงานพื้นผิวต่ำกว่า (โดยเฉลี่ยประมาณ 1.643×10^{-4} จูล์นต่อตารางเมตร)⁽¹⁸⁾

สำหรับผงเหล็กที่มีทองแดงและคาร์บอนผสม ค่ามุม Angle of repose ก็ยังคงมีค่าเพิ่มขึ้นตามความชื้นสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้น แต่จะเห็นความแตกต่างจากผงเหล็กที่มีความบริสุทธิ์สูง นั่นคือ แทนที่ค่า

ของมุมจะเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดเมื่อความชื้นสัมพัทธ์มากกว่า 60% แต่ค่าของมุมจะเพิ่มขึ้นในอัตราส่วนที่ลดลงเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากการเติมผงทองแดงลงไปในส่วนผสม ทำให้อัตราการดูดซับความชื้นลดลง ผงเหล็กที่มีทองแดงผสมในปริมาณเท่าเดิม แต่ส่วนผสมของคาร์บอนเพิ่มขึ้นจาก 0.4 เป็น 0.8 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่าเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นถึง 98 เปอร์เซ็นต์ การเปลี่ยนแปลงของมุม Angle of repose ลดลงจาก 6 เปอร์เซ็นต์ เป็น 3 เปอร์เซ็นต์ของการเปลี่ยนแปลง อาจเป็นผลเนื่องมาจากการเติมคาร์บอนสามารถทำหน้าที่เป็น Lubricant ด้วยทำให้เพิ่มความสามารถในการไหลของผงค่าของมุม Angle of repose จึงลดลง เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการไหลด้วยมุม Angle of repose ของผงชนิดต่างๆกัน จะเห็นได้ว่าค่ามุม Angle of repose ของทองแดงมีค่าสูงสุด นั่นคือความสามารถในการไหลจะน้อยกว่าผงเหล็กที่มีค่ามุมต่ำกว่า แต่เมื่อเติมคาร์บอนลงไป โลหะผสมความสามารถในการไหลจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นด้วย

4.3.2 ผลการวัดอัตราการไหล (Flow Rate)



รูปที่ 4.9 ผลการวัดอัตราการไหลของผงโลหะชนิดต่างๆที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ต่างกัน

จากรูปที่ 4.9 เวลาที่ใช้ในการไหลของโลหะผงที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ต่างกัน โดยที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ (น้อยกว่า 60 เปอร์เซ็นต์) พฤติกรรมการไหลของผงโลหะจะแตกต่างกันเพียง

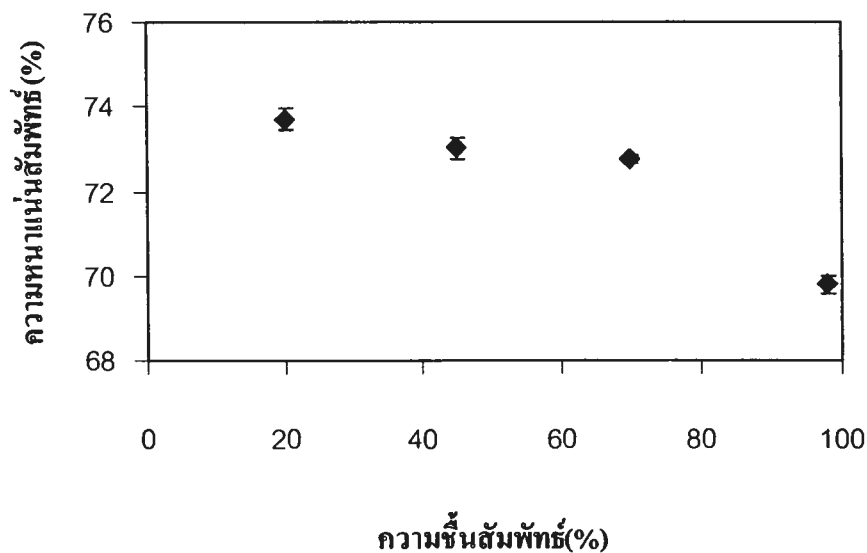
เล็กน้อย นั่นคือเวลาในการไหลของผงจะใกล้เคียงกันเมื่อระดับความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น ในช่วงที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์สูง (มากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์) ความชื้นจะมีผลต่อการไหลของผงโลหะมาก สังเกตได้จากเวลาที่ใช้ในการไหลจะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับการไหลที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ และในช่วงที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ใกล้เคียงจุดอิ่มตัว (90-100 เปอร์เซ็นต์) การไหลของผงเหล็กจะใช้เวลานานมาก หรือเกือบจะไม่มี การไหลเกิดขึ้น ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของระดับความชื้นสัมพัทธ์จะทำให้เวลาในการไหลของผงเหล็กเพิ่มขึ้นซึ่งมีผลน้อยในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ และ จะมีผลต่อความสามารถในการไหลมากช่วงที่ความชื้นสัมพัทธ์สูง จากรูปผงทองแดงจะใช้เวลาในการไหลมากกว่าผงเหล็กและผงโลหะผสม สำหรับผงโลหะผสมเหล็ก ทองแดง และคาร์บอน การวัดความสามารถในการไหล ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ต่างกัน เวลาที่ใช้ในการไหลของผงจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆเมื่อระดับความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น แต่จะเพิ่มขึ้นอย่างช้าลงโดย ทั้งสองตัวอย่างจะเห็นการเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะเดียวกันกับผงเหล็กโดยที่ผงโลหะผสมที่มีปริมาณคาร์บอน 0.4 เปอร์เซ็นต์ จะมีการเปลี่ยนแปลงสูงกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับผงโลหะผสมที่มีปริมาณคาร์บอน 0.8 เปอร์เซ็นต์

ผงเหล็กขนาด 10 ไมครอนและผงทองแดงขนาด 33 ไมครอนที่มีขนาดเล็กเมื่อวัดความสามารถในการไหลด้วยเครื่องวัด จะไม่มีการไหลตัวของผงขนาดเล็ก เนื่องจากผงที่มีขนาดเล็กจะมีพลังงานพื้นผิวสูงจึงมีแรงยึดติดระหว่างกันมาก ทำให้ไม่สามารถไหลผ่านเครื่องวัดได้

การที่ผงโลหะใช้เวลาในการไหลน้อย นั่นคือความสามารถในการไหลดีในช่วงความชื้นต่ำ เป็นเพราะว่าแรงที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคยังเป็นแรงที่เกิดเนื่องจากแรงไฟฟ้าสถิตย์ หรือแรงแวนเดอร์วาลส์ ยังไม่มีผลเนื่องจากแรงแคปิลลารีมากนัก เนื่องจากที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำความชื้นหรือไอน้ำในมีน้อย การควบแน่นบนผิวโลหะก็น้อยเช่นกัน แต่เมื่อระดับความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มมากขึ้น แรงแคปิลลารีนี้จะมีผลกับการไหลของผงโลหะมากขึ้น ทำให้เวลาที่ใช้ในการไหลเพิ่มขึ้น เนื่องจากแรงยึดติดระหว่างอนุภาคเพิ่มขึ้น ผงทองแดงที่ใช้เวลาในการไหลมากกว่าผงเหล็ก เป็นเพราะว่าผงทองแดงมีรูปร่างเป็น Irregular มาก (จากรูปที่ 4.2) ขณะที่ผงเหล็กมีรูปร่าง Irregular น้อยกว่า (หรือเกือบเป็นทรงกลม) ทำให้การไหลของอนุภาคที่เป็นทรงกลมกว่ามีการไหลตัวที่ดีกว่า ทำให้ผงเหล็กมีความสามารถในการไหลดีกว่าผงทองแดงการเติมคาร์บอนในปริมาณที่มากขึ้นจะช่วยเพิ่มความสามารถในการไหลได้อีกด้วย

4.4 ผลการศึกษาความสามารถในการอัดตัวของโลหะผง

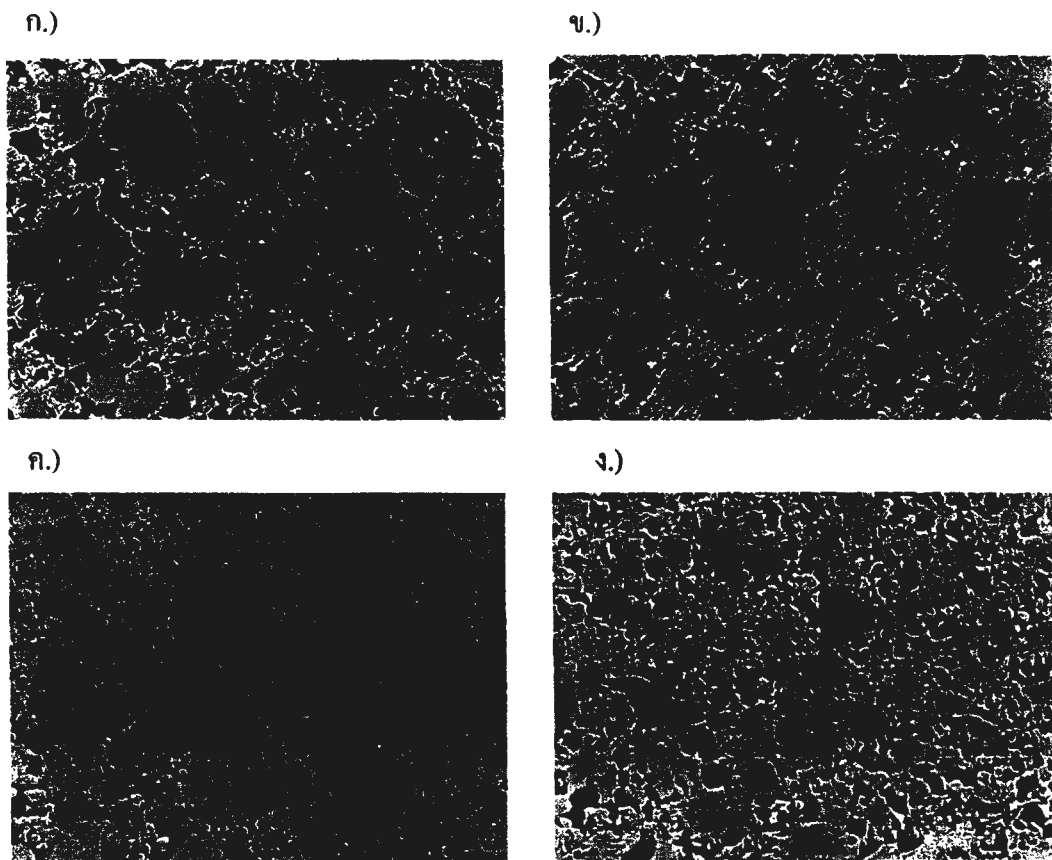
4.4.1 ความสามารถในการอัดตัวของผงเหล็ก



รูปที่ 4.10 ผลการวัดความหนาแน่น Green compact ของผงเหล็กขนาด 110 ไมครอน ที่ระดับความชื้นต่างกัน

จากรูปที่ 4.10 ผงเหล็กขนาด 110 ไมครอนที่ผ่านการอัดที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ต่างกัน จะเห็นว่าที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ (20 เปอร์เซ็นต์) ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานที่วัดได้ประมาณ 73.7 เปอร์เซ็นต์และความหนาแน่นสัมพัทธ์มีค่าลดลงเมื่อระดับความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นความหนาแน่นสัมพัทธ์ลดลงมาถึง 69.7 เปอร์เซ็นต์ ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 98 เปอร์เซ็นต์

ความหนาแน่นสัมพัทธ์สามารถบอกถึงความสามารถในการอัดตัวของโลหะผงได้ โดยที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ความหนาแน่นของชิ้นงานจะสูงนั่นคือ ความสามารถในการอัดตัวสูง และความหนาแน่นสัมพัทธ์จะลดลงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้น นั่นคือความสามารถในการอัดตัวจะลดลง เพราะว่าเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น ความสามารถในการไหลตัวของผงจะลดลง (จากหัวข้อ 4.3) เมื่อความสามารถในการไหลลดลงทำให้การไหลลงแม่พิมพ์ของผงไม่ดี การที่ผงจะไหลลงไปแทนที่ช่องว่างระหว่างก็ไม่ดีทำให้การอัดตัวมีประสิทธิภาพลดลงด้วย ดังนั้นความสามารถในการอัดตัวของผงเหล็กขนาด 110 ไมครอนจะลดลงเมื่อระดับความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น

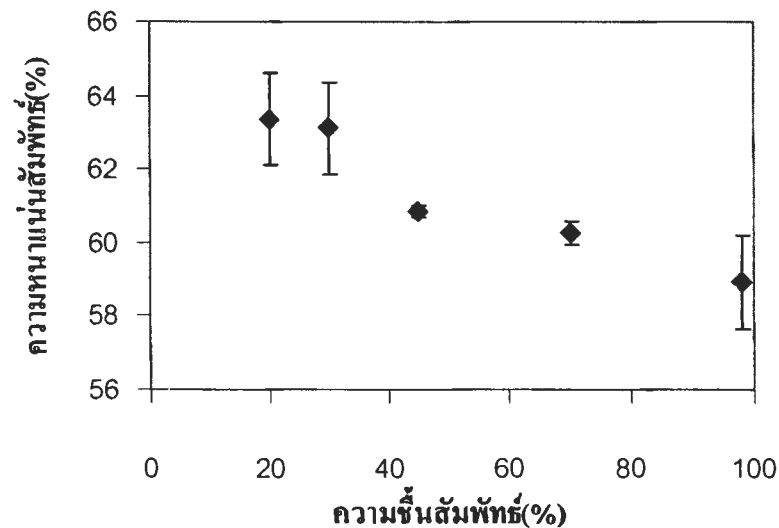


รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค(กำลังขยาย 50 เท่า) ชี้นงาน Compact ของผงเหล็ก แสดงให้เห็นการกระจายรูพรุนที่ระดับความชื้นต่างกันคือ ก.) ความชื้นสัมพัทธ์ 20% ข.) ความชื้นสัมพัทธ์ 45% ค.) ความชื้นสัมพัทธ์ 70% ง.) ความชื้นสัมพัทธ์ 98%

จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชี้นงานผงเหล็กที่ผ่านการอัดตัวที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 20% 45% 70% และ 98 % แล้วนำไปเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1050°C เป็นเวลา 60 นาทีเพื่อให้เกิดพันธะกัน เป็นบางส่วนแล้วนำมาขัดผิวชี้นงานเพื่อดูการกระจายและลักษณะของรูพรุน ซึ่งชี้นงาน Compact ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 20% รูพรุนจะมีลักษณะต่อเนื่องกันเป็นโครงข่าย และที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นเป็น 45% ความต่อเนื่องของรูพรุนจะเริ่มลดลง จนเริ่มเป็นรูพรุนที่ไม่มีความต่อเนื่องกันและการกระจายรูพรุนมากขึ้นที่ระดับความชื้น สัมพัทธ์ 70 % ในที่สุดรูพรุนก็แทบจะไม่มีต่อเนื่องกันให้เห็น เกิดเป็นรูพรุนลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆกระจายเต็มพื้นที่ของรูป

ความต่อเนื่องของรูพรุนลดลง มีผลต่อกระบวนการเผาผนึกเมื่อทำการเผาผนึกจนเสร็จสิ้นกระบวนการ เพื่อเป็นการไล่อุณหภูมิออกจากชี้นงานทำให้ชี้นงานมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น การที่รูพรุนมี

ความต่อเนื่องกันเป็นโครงข่ายก็คือมีช่องว่างที่สามารถจะไล่ก๊าซภายในชิ้นงานออกสู่ภายนอก (Open pore) ได้ง่ายกว่ารูพรุนที่ไม่มีความต่อเนื่องกันและเกิดเป็นลักษณะรูพรุนปิด (Close pore) ซึ่งการไล่ก๊าซที่เกิดขึ้นภายในรูพรุนที่ปิดจะเป็นไปได้ยาก ทำให้รูพรุนตกค้างในชิ้นงานมากกว่า เป็นผลให้ความหนาแน่นของชิ้นงานลดลง นั่นคือ ความชื้นสัมพัทธ์ที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้ความสามารถในการอัดตัวของผงเหล็กลดลง



รูปที่ 4.12 ผลการวัดความหนาแน่น Green compact ของผงเหล็กขนาด 10 ไมครอน ที่ระดับความชื้นต่างกัน

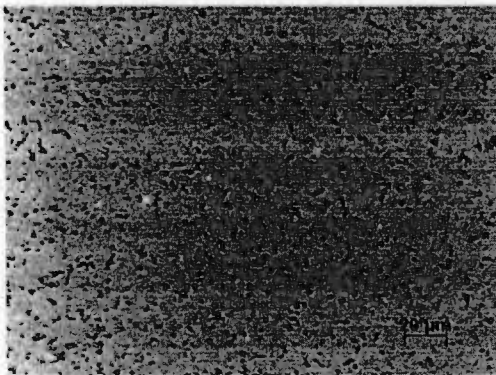
จากรูปที่ 4.12 ผงเหล็กขนาด 10 ไมครอนที่ผ่านการอัดตัวที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ต่างกัน ซึ่งที่ความชื้นสัมพัทธ์ 20 เปอร์เซ็นต์ และ 40 เปอร์เซ็นต์ ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงาน มีค่าประมาณ 63 เปอร์เซ็นต์ และค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์เริ่มลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อระดับความชื้นสัมพัทธ์มากกว่า 45 เปอร์เซ็นต์ จนถึงระดับความชื้นสัมพัทธ์ 98 เปอร์เซ็นต์ทำให้ความหนาแน่นสัมพัทธ์ลดลงมาถึง 59 เปอร์เซ็นต์

ผงเหล็กขนาด 10 ไมครอน เมื่ออัดขึ้นรูปโดยใช้แรงอัดเท่ากับผงเหล็กขนาด 110 ไมครอน (ที่ 206.56 MPa หรือ 29.95 ksi) ซึ่งความสามารถในการอัดตัวของผงเหล็กขนาด 100 ไมครอน จะสามารถอัดตัวได้ดีกว่าผงเหล็กขนาด 10 ไมครอน เกือบ 10 เปอร์เซ็นต์ เป็นผลเนื่องจากผงเหล็กขนาด 110 ไมครอน มีรูปร่างเป็น Irregular เมื่อได้รับแรงอัดความขรุขระของผิวอนุภาคจะเกิดการเกาะติดกัน

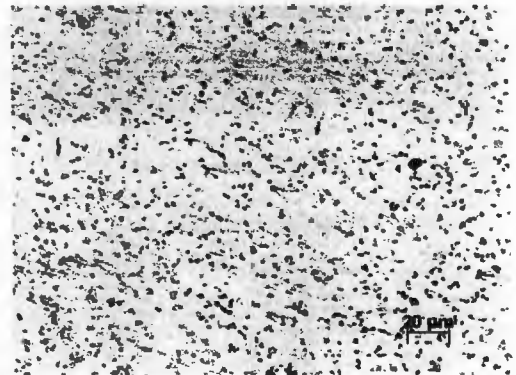
ด้วย Mechanical Locking และตำแหน่งของการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคจะมีมากกว่า ในขณะที่ผงเหล็กขนาด 10 ไมครอน ซึ่งมีรูปร่างเป็นทรงกลมซึ่งจะมีความสามารถที่จะเกิดการเกาะกันด้วย Mechanical Locking ได้น้อย⁽¹⁸⁾ และลักษณะทรงกลมของอนุภาคทำให้จำนวนตำแหน่งของการสัมผัสระหว่างอนุภาคจะมีน้อยกว่าผงที่มีรูปร่างเป็น Irregular ซึ่งทำให้ตำแหน่งของการเชื่อมติดกันน้อยกว่าด้วย จึงทำให้ความสามารถในการอัดตัวของผงเหล็กขนาด 110 ไมครอน ดีกว่าผงเหล็กขนาด 10 ไมครอน

ในทำนองเดียวกันผงเหล็กทั้งสองขนาดมีความสามารถในการอัดตัวจะลดลงเมื่อระดับความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นซึ่งพิจารณาได้จากความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานที่ได้จากการอัดผงเหล็ก แต่ความสามารถในการอัดตัวของผงเหล็กขนาด 110 ไมครอนจะลดลงประมาณ 6 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ผงเหล็กขนาด 10 ไมครอน จะลดลงประมาณ 4 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งความแตกต่างกันเกิดจากลักษณะรูปร่างที่ต่างกันของผงเหล็กทั้ง 2 ขนาด ซึ่งผงเหล็กที่มีรูปร่างเป็น Irregular ทำให้ความสามารถในการดูดซับความชื้นได้ดีกว่าผงซึ่งมีลักษณะทรงกลม เป็นผลให้ความชื้นที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อความสามารถในการอัดตัวสูงกว่าด้วย

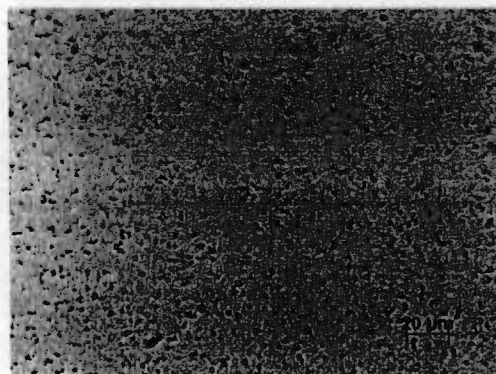
ก.)



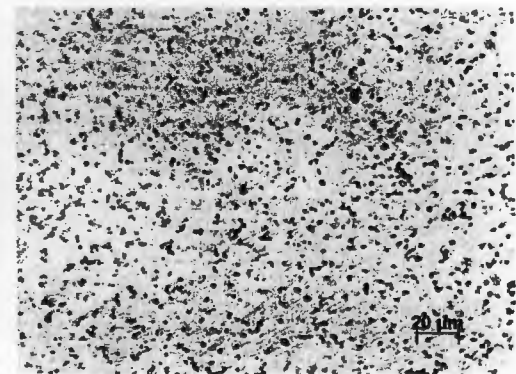
ข.)



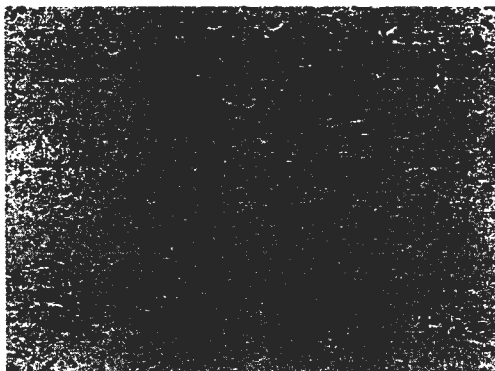
ค.)



ง.)



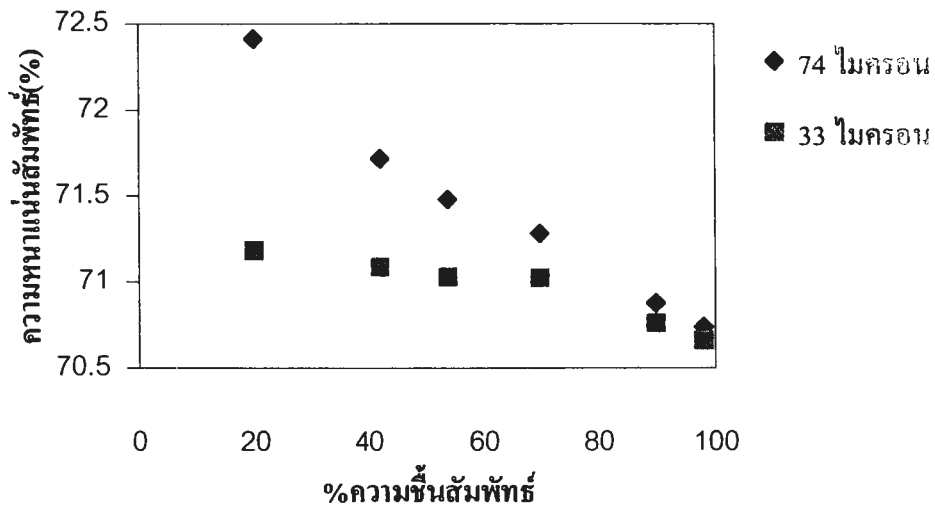
จ.)



รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค(กำลังขยาย 200 เท่า) ชีงงาน Compact ของผงเหล็กขนาด 10 ไมครอน แสดงให้เห็นการกระจายรูพรุนที่ระดับความชื้นต่างกันคือ ก.) ความชื้นสัมพัทธ์ 20% ข.) ความชื้นสัมพัทธ์ 30% ค.) ความชื้นสัมพัทธ์ 45% ง.) ความชื้นสัมพัทธ์ 70% จ.) ความชื้นสัมพัทธ์ 98%

จากรูปที่ 4.12 โครงสร้างรูพรุนของชีงงาน Compact ของผงเหล็กขนาด 10 ไมครอน ยากต่อการวิเคราะห์ความแตกต่างที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ต่างกัน โครงสร้างของรูพรุนต่างกันเล็กน้อยแต่ไหน จากรูปที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ทุกสภาวะโครงสร้างของรูพรุนไม่แตกต่างกันมาก เนื่องจากผงมีขนาดเล็กมาก การอัดตัวจึงทำให้ขนาดรูพรุนไม่แตกต่างกัน แต่สามารถวิเคราะห์รูปด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ทำให้ทราบว่าสัดส่วนของรูพรุนของแต่ละสภาวะไม่มีความแตกต่างกันมากเช่นกัน แต่สามารถเปรียบเทียบด้วย ความหนาแน่นสัมพัทธ์ ซึ่งจะเห็นภาพได้ชัดเจนมากกว่า

4.4.2 ความสามารถในการอัดตัวของผงทองแดง

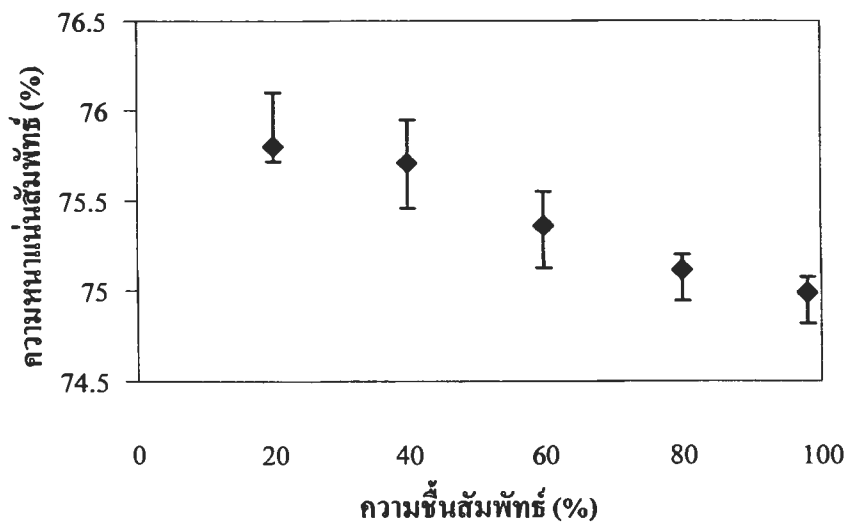


รูปที่ 4.13 ผลการวัดความหนาแน่น Green compact ของผงทองแดง ที่ระดับความชื้นต่างกัน

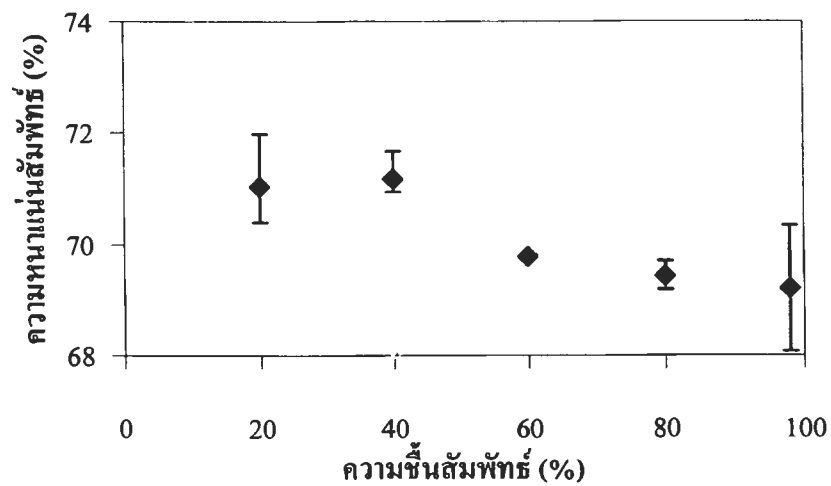
ความสามารถในการอัดตัวของผงทองแดงทั้งสองขนาดคือขนาด 74 ไมครอน และ 33 ไมครอน ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ต่างกัน ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 20 เปอร์เซ็นต์ ชีงงานของผงทองแดงขนาด 74 ไมครอนมีความหนาแน่นสัมพัทธ์มากกว่าชีงงานของผงขนาด 33 ไมครอนประมาณ 1.2 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อระดับความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชีงงานจะลดลง จนระดับความชื้นสัมพัทธ์สูงสุด (98 เปอร์เซ็นต์) ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชีงงานผงขนาด 74 ไมครอนและ 33 ไมครอนมีค่าใกล้เคียงกัน และมีการเปลี่ยนแปลง ประมาณ 1.5 และ 0.5 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

เนื่องจากผงทั้งสองขนาดมีความแตกต่างกันและรูปร่างของอนุภาคต่างก็เป็น Irregular เหมือนกันแต่ก็ยังมีลักษณะอนุภาคที่ต่างกัน พื้นที่ในการดูดซับความชื้นก็ต่างกันมาก ทำให้ความสามารถในการจับความชื้นของทั้งสองขนาดต่างกัน แต่เนื่องจากทองแดงซึ่งมีพลังงานพื้นผิวต่ำ ความสามารถในการดูดซับความชื้นต่ำ (เมื่อเทียบกับผงเหล็ก) ซึ่งสัมพันธ์กับความสามารถในการไหลของผงทองแดงซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนักเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของระดับความชื้นสัมพัทธ์ ดังนั้นผงทองแดงขนาดใหญ่กว่าความสามารถในการอัดตัวจะสูงกว่าที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ แต่เมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้นความสามารถในการอัดตัวจะมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้นเนื่องจากความชื้นมีผลต่ออนุภาคผงขนาดใหญ่กว่าเพราะว่าผิวมีความขรุขระมากกว่าอนุภาคเล็ก (จากรูปที่ 4.2)

4.4.3 ความสามารถในการอัดตัวของผงเหล็กผสม ทองแดงและคาร์บอน



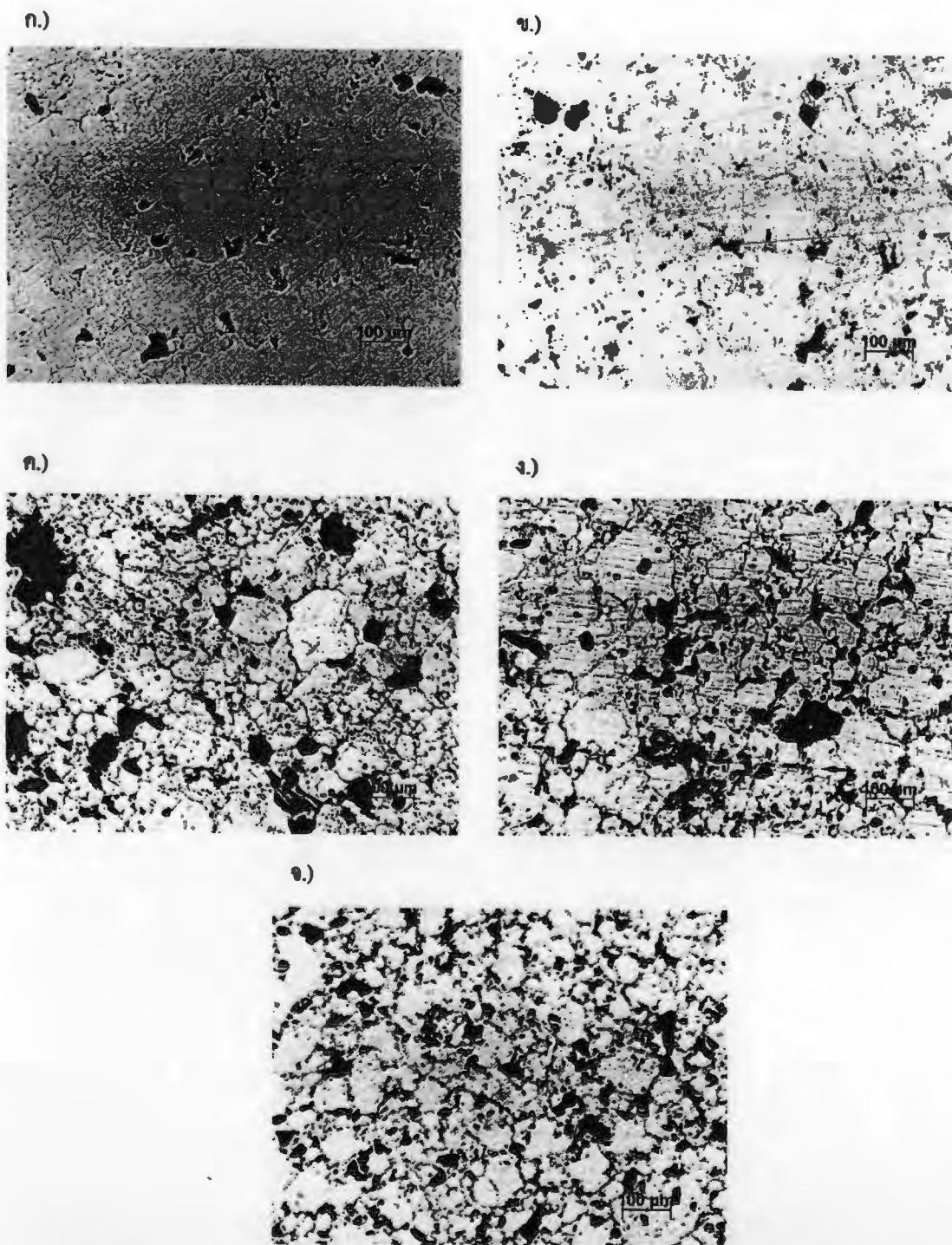
รูปที่ 4.14 ผลการวัดความหนาแน่นGreen compact ของผงโลหะผสม Fe-2Cu-0.4C ที่ระดับความชื้นต่างกัน



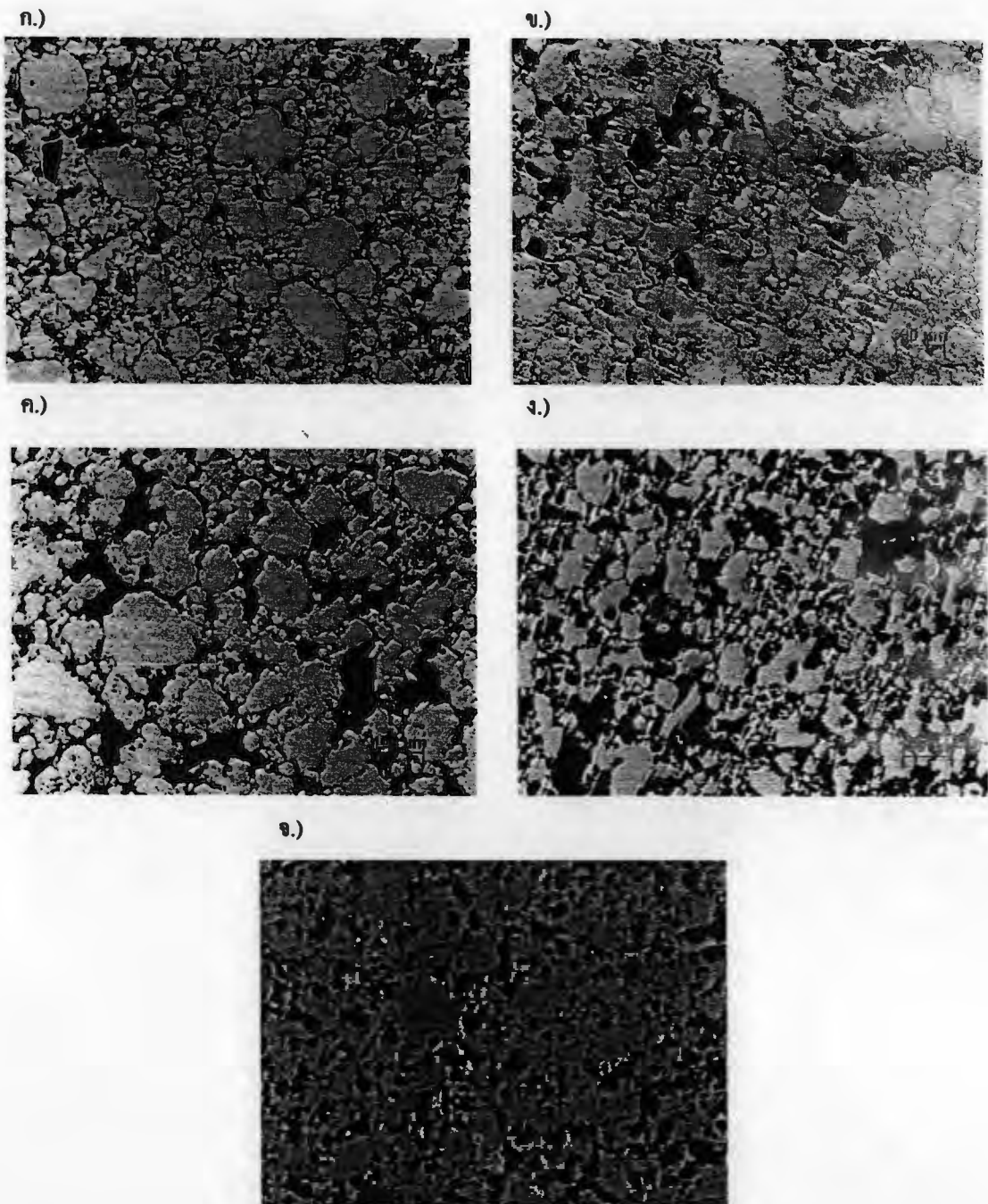
รูปที่ 4.15 ผลการวัดความหนาแน่นGreen compact ของผงโลหะผสม Fe-2Cu-0.8C ที่ระดับความชื้นต่างกัน

จากรูปที่ 4.14 และ 4.15 ความสามารถในการอัดตัวของผงเหล็กผสมทองแดงที่มีปริมาณคาร์บอน 0.4 % และ 0.8 % ตามลำดับ ผงเหล็กผสมทองแดง ที่มีปริมาณคาร์บอน 0.4 % มีความหนาแน่นสัมพัทธ์จะสูงกว่าผงเหล็กผสมทองแดงปริมาณคาร์บอน 0.8 % ประมาณ 4.7 % ของความหนาแน่นสัมพัทธ์ (ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 20 %) เมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้น ทำให้ความหนาแน่นของผงเหล็กผสมทองแดงลดลง เมื่อระดับความชื้นสัมพัทธ์สูงสุด ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของผงเหล็กผสมทองแดงที่มีปริมาณคาร์บอน 0.4 % และ 0.8 % มีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 0.8 % และ 1.8 % ตามลำดับ

การที่ผงเหล็กผสมทองแดงที่มีปริมาณคาร์บอน 0.4 % และ 0.8 % มีค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ต่างกันขณะที่ใช้แรงในการอัดเท่ากันคือ 206.56 MPa (29.95 ksi) เพราะว่าการเติมคาร์บอนจะเพิ่มความต้านทานในการอัดตัวของผง ซึ่งต้องใช้แรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่อต้องการให้ได้ความหนาแน่นเท่าเดิม จึงทำให้ผงเหล็กผสมทองแดงที่มีปริมาณคาร์บอนมากกว่าจะได้รับความหนาแน่นสัมพัทธ์น้อยกว่า ผลกระทบที่เกิดจากระดับความชื้นสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความหนาแน่นของผงเหล็กผสมทองแดงที่มีคาร์บอนทั้งสองตัวอย่างจะมีค่าลดลง ทำให้ความสามารถในการอัดตัวลดลงด้วย เห็นได้ชัดที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่า 60 % เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เปลี่ยนแปลงผงเหล็กผสมทองแดงที่มีปริมาณคาร์บอน 0.4 % และ 0.8 % ความหนาแน่นสัมพัทธ์ลดลงโดยมีการเปลี่ยนแปลงไม่เท่ากัน เพราะคาร์บอนเป็นตัวดูดซับความชื้นที่ดี ทำให้ผงเหล็กผสมทองแดงที่มีปริมาณคาร์บอนมากกว่ามีผลมาจากความชื้นมากกว่า ความสามารถในการอัดตัวจึงลดลงมากกว่าด้วย



รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค (กำลังขยาย 50 เท่า) ชิ้นงาน Compact ของผงโลหะผสม Fe-2Cu-0.4C แสดงให้เห็นการกระจายรูพรุนที่ระดับความขึ้นต่างกันคือ ก.) ความขึ้นสัมพัทธ์ 20% ข.) ความขึ้นสัมพัทธ์ 40% ค.) ความขึ้นสัมพัทธ์ 60% ง.) ความขึ้นสัมพัทธ์ 80% จ.) ความขึ้นสัมพัทธ์ 98%



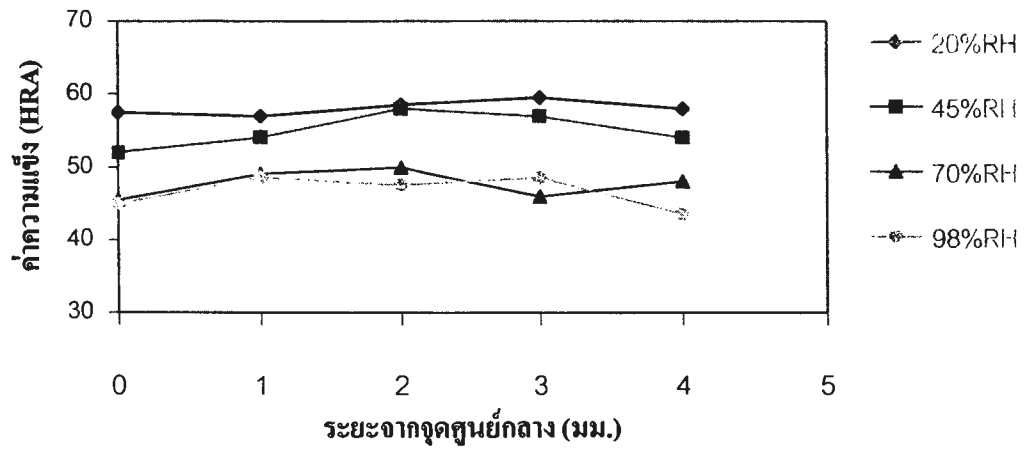
รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค (กำลังขยาย 50 เท่า) ชิ้นงาน Compact ของ ผงโลหะผสม Fe-2Cu-0.8C แสดงให้เห็นการกระจายรูพรุนที่ระดับความชื้นต่างกันคือ ก.) ความชื้นสัมพัทธ์ 20% ข.) ความชื้นสัมพัทธ์ 40% ค.) ความชื้นสัมพัทธ์ 60% ง.) ความชื้นสัมพัทธ์ 80% จ.) ความชื้นสัมพัทธ์ 98%

จากรูปที่ 4.16 โครงสร้างรูพรุนของชิ้นงาน Compact ของผงโลหะผสม Fe-2Cu-0.4C จะเห็นว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ (20 เปอร์เซ็นต์ และ 40 เปอร์เซ็นต์) ปริมาตรรูพรุนมีเพียงเล็กน้อยและรูพรุนมีขนาดเล็ก แต่เมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้นไป 60 เปอร์เซ็นต์ รูพรุนขนาดใหญ่ขึ้นเริ่มมีการกระจายตัวในพื้นที่บางส่วนและกระจายไปทั่วทั้งพื้นที่เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ 80 เปอร์เซ็นต์และ 98 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สำหรับรูปที่ 4.17 โครงสร้างรูพรุนของชิ้นงาน Compact ของผงโลหะผสม Fe-2Cu-0.8C มีแนวโน้มใกล้เคียงกับชิ้นงาน Fe-2Cu-0.4C เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น รูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้นและการกระจายรูพรุนเพิ่มขึ้นทั่วพื้นที่ แต่จะเห็นความแตกต่างของปริมาณรูพรุนของผงโลหะผสม Fe-2Cu-0.4C มีขนาดรูพรุนโดยรวมแล้วน้อยกว่า Fe-2Cu-0.8C

โครงสร้างรูพรุนของชิ้นงาน Fe-2Cu-0.4C ในระดับความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ จะแสดงให้เห็นว่ามีความหนาแน่นสูง และความหนาแน่นจะลดลงเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นโดยสังเกตจากปริมาณรูพรุนที่เพิ่มขึ้น ส่วนโครงสร้างรูพรุนของชิ้นงาน Fe-2Cu-0.8C ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ต่ำโดยส่วนใหญ่แล้วอนุภาคจะชนกันติดกันและมีรูพรุนขนาดเล็กและมีความต่อเนื่องกัน เมื่อระดับความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นขนาดรูพรุนใหญ่ขึ้นแต่ก็ยังคงมีความต่อเนื่องของรูพรุนอยู่ จนเมื่อระดับความชื้นสัมพัทธ์ 98 เปอร์เซ็นต์ รูพรุนมีขนาดใหญ่กระจายเต็มพื้นที่แต่ไม่มีความต่อเนื่องกันซึ่งความไม่ต่อเนื่องของรูพรุนจะส่งผลเสียเมื่อมีการเผาขึ้นอย่างสมบูรณ์ คือรูพรุนแบบปิด การไล่ก๊าซออกจากรูพรุนเป็นไปได้ยาก ทำให้รูพรุนตกค้างในชิ้นงานมากกว่า เป็นผลให้ความหนาแน่นของชิ้นงานสุดท้ายลดลง นั่นคือความชื้นสัมพัทธ์ที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้ความสามารถในการอัดตัวของผงโลหะลดลง

4.4.4 ค่าความแข็งของชิ้นงานผงเหล็กอัด (Hardness of Iron compaction)

เมื่อนำผงเหล็กขนาด 110 ไมครอนที่ผ่านการอัดตัวภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆกัน ผ่านการเผาขึ้นที่ 1050 °C เป็นเวลา 60 นาที ภายใต้บรรยากาศก๊าซอาร์กอนวัดค่าความแข็งโดยใช้เครื่องวัดความแข็งแบบ Rockwell Scale A ซึ่งเป็นการทดสอบคุณสมบัติทางกลอย่างหนึ่งของชิ้นงาน จากรูปที่ 4.18 ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ระยะต่างๆจากจุดศูนย์กลางของชิ้นงานมีค่าใกล้เคียงกันที่ระดับความชื้นเดียวกัน และค่าความแข็งมีค่าลดลงเมื่อระดับความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น โดยค่าความแข็งที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 70% และ 98% มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ก็ต่ำกว่าที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 20% และ 45% ซึ่งชิ้นงานที่ผ่านการอัด ค่าความหนาแน่นจะส่งผลถึงค่าความแข็งด้วยเช่นกัน โดยที่ชิ้นงานที่มีความหนาแน่นต่ำ ค่าความแข็งจะต่ำด้วยเนื่องจากการเกิดพันธะระหว่างอนุภาคมีน้อยกว่าชิ้นงานที่มีความหนาแน่นสูง โดยจะมีค่าความแข็งสูงด้วยเนื่องจากพันธะที่เกิดขึ้นทำให้วัสดุมีความแข็งแรงมากขึ้นด้วย



รูปที่ 4.18 ค่าความแข็งของชิ้นงาน Fe sintered compact ขนาดผง 110 ไมครอนที่ระดับความชื้นต่างกัน

4.5 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของซีเมนต์

4.5.1 ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของซีเมนต์

ตารางที่ 4.1 ส่วนประกอบทางเคมีของซีเมนต์

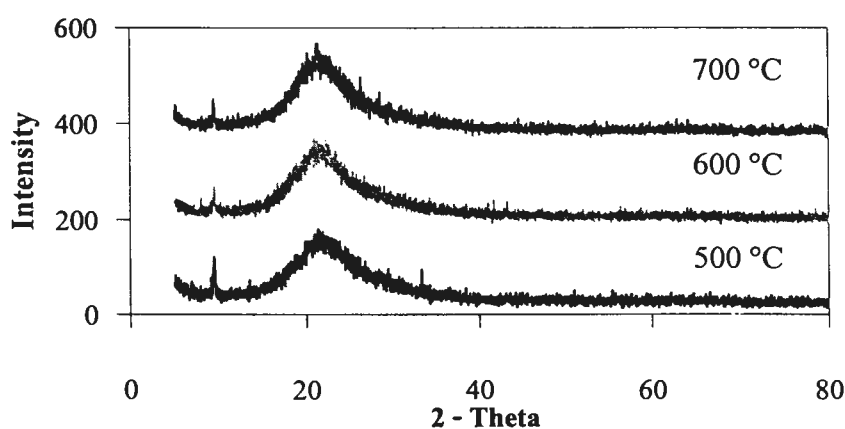
ชนิดสารประกอบ	RRH 500	RRH 600	RRH 700	TRH 500	TRH 600	TRH 700
SiO ₂	94.204	94.181	94.315	99.625	99.628	99.693
K ₂ O	2.833	2.637	2.826	0.06	0.052	0.056
CaO	0.725	0.791	0.714	0.072	0.067	0.074
Na ₂ O	0.464	0.238	0.302	0.133	0.07	
P ₂ O ₅	0.624	0.603	0.719			0.037
SO ₃	0.372	0.428	0.424	0.087	0.086	
MgO	0.415	0.388	0.395			
Al ₂ O ₃	0.058	0.488	0.072		0.033	0.172
MnO ₂	0.177	0.169	0.171			
Fe ₂ O ₃	0.068	0.06	0.062	0.019		0.036
Cl	0.05	0.057				
CuO	0.011					

จากผลการวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบในขี้เถ้าแกลบด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) พบว่าขี้เถ้าแกลบที่ไม่ได้ผ่านการต้มกรด 3 mol HCl และเผาที่ 500 °C, 600°C และ 700°C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5°C / นาที ได้ปริมาณซิลิกา (SiO₂) บริสุทธิ์ ประมาณ 94 % โดยน้ำหนัก และมีสารเจือปน (Impurity) ได้แก่ Na₂O, P₂O₅, MgO, Al₂O₃, SO₃, K₂O, CaO, MnO₂, Fe₂O₃, Cl และ CuO ดังตารางที่ 4.1

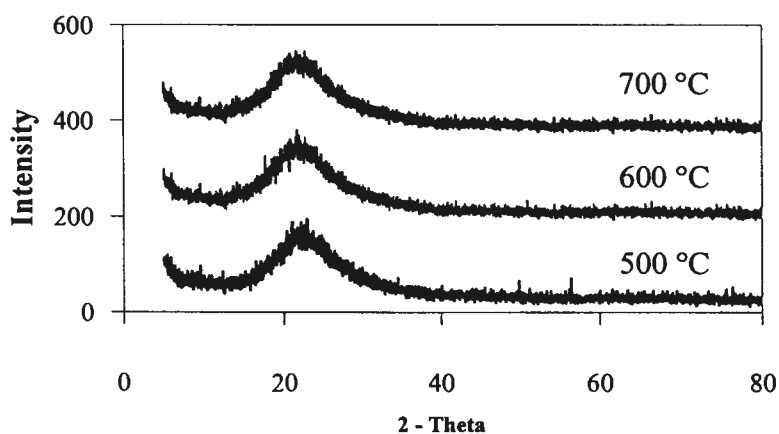
ส่วนขี้เถ้าแกลบที่ได้จากการต้มกรด 3 mol HCl และเผาที่ 500 °C, 600°C และ 700°C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5°C / นาที ได้ปริมาณซิลิกา (SiO₂) บริสุทธิ์สูงมากกว่า 99 % โดยน้ำหนัก (ในการทดลองของ Yalcin และคณะ⁽⁹⁾ ได้ความบริสุทธิ์ของซิลิกา 99.66 %) และมีสารเจือปน (Impurity) ได้แก่ Na₂O, P₂O₅, Al₂O₃, SO₃, K₂O, CaO และ Fe₂O₃ ดังตารางที่ 4.1

สำหรับการต้มกรด 3 mol HCl ทำให้สามารถกำจัดสารเจือปนออกไปจากแกลบข้าวได้บางส่วน อาทิ MgO, MnO₂, Fe₂O₃, Cl และ CuO และการเพิ่มอุณหภูมิการเผาแกลบข้าวยังสามารถกำจัดสารเจือปนออกไปบางส่วนอีกด้วยทำให้ปริมาณสารเจือปนลดลงและเพิ่มความบริสุทธิ์ของซิลิกาในขี้เถ้าแกลบ

4.5.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของขี้เถ้าแกลบ



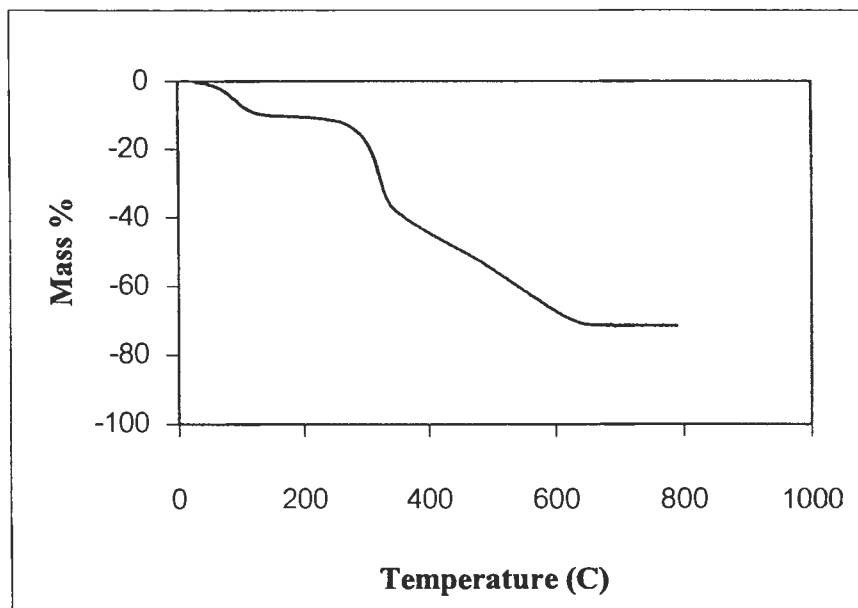
รูปที่ 4.19 ผลการวิเคราะห์ XRD ขี้เถ้าแกลบที่ไม่ผ่านการต้มกรด (Raw Rice Husk Ash)



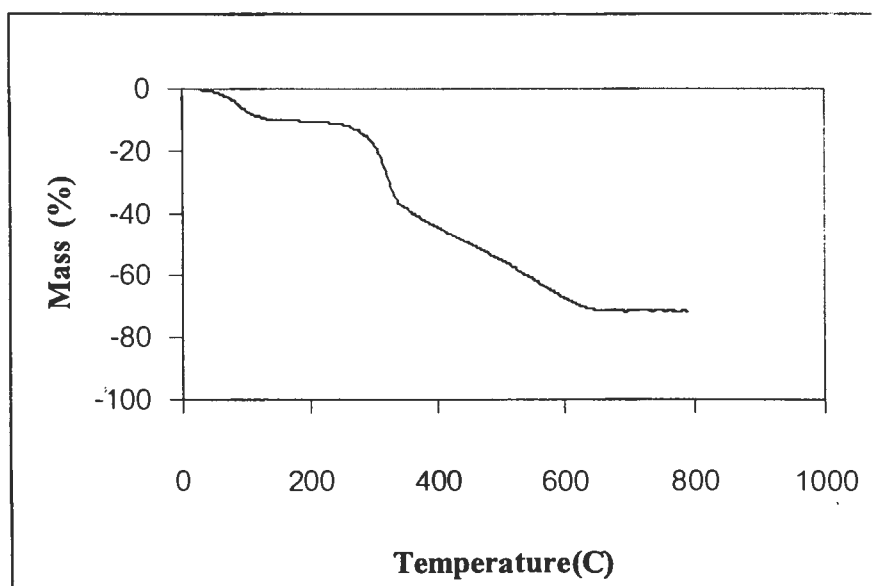
รูปที่ 4.20 ผลการวิเคราะห์ XRD ซี้้เถ้าแกลบที่ผ่านการต้มกรด (Treated Rice Husk Ash)

จากผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ของซี้้เถ้าแกลบที่ได้จากการต้มกรด 3 mol HCl (รูปที่ 4.20) และไม่ได้ผ่านการต้มกรด (รูปที่ 4.19) กราฟที่ได้แสดงให้เห็นอัญรูปของซิลิกา (Amorphous Silica) ในช่วงที่มุม 2-Theta ตั้งแต่ 15 – 35 เป็นยอดกราฟกว้าง (Broad peak) และมียอดกราฟสูงอยู่ที่ 2-Theta เท่ากับ 22.5 องศา⁽⁷⁾ เมื่อเทียบกับซิลิกาเจลดูความชันทางการค้าแล้วให้ลักษณะของ XRD Pattern เช่นเดียวกัน⁽¹⁹⁾ ซึ่งทั้งสองรูปผลกราฟที่ได้ใกล้เคียงกัน ในส่วนของซี้้เถ้าแกลบที่ไม่ผ่านการต้มกรด (Raw Rice Husk Ash) จะพบยอดกราฟที่มุม 2-Theta เท่ากับ 9.5 ซึ่งเป็นสารประกอบของ CaO และยอดของกราฟมีความเข้มลดลงเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการเผาเพิ่มขึ้น โดยสารเจือปนชนิดอื่นไม่สามารถวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ได้ เนื่องจากสารเจือปนมีปริมาณน้อยไม่สามารถตรวจพบในการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ได้

4.5.3 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของแกลบข้าว



รูปที่ 4.21 การสูญเสียน้ำหนักของ Raw Rice Husk



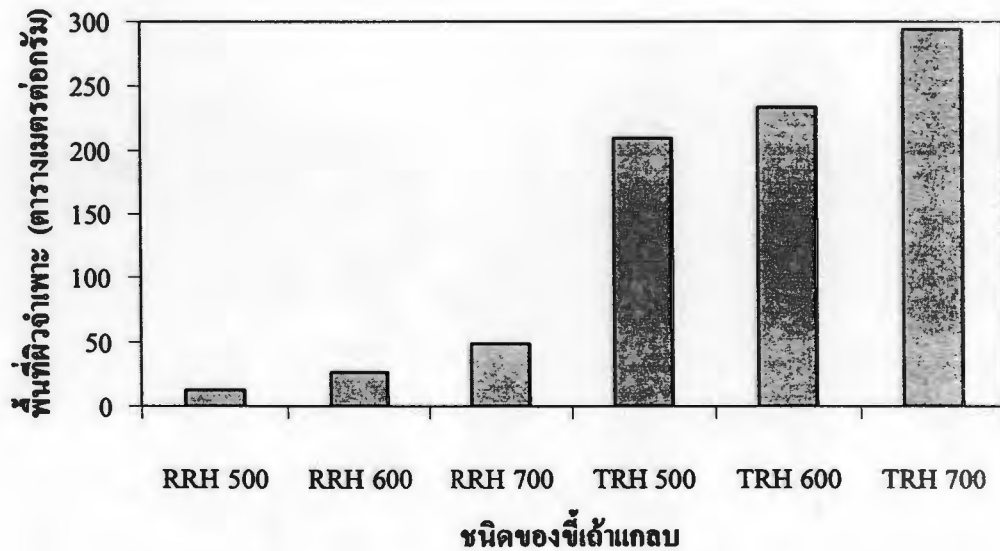
รูปที่ 4.22 การสูญเสียน้ำหนักของ Treated Rice Husk

จากกราฟผลการวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของแกลบข้าวคืบ และแกลบข้าวที่ผ่านการต้มกรด 3 mol HCl แล้วนำไปเผาที่ช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 20 °C จนถึง 800°C แสดงให้เห็นกราฟการสูญเสียน้ำหนักจะมีความชัน 3 ช่วงที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งในช่วงแรกเป็นการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไล่ความชื้นที่ยังคงตกค้างอยู่ในแกลบข้าวที่ช่วงอุณหภูมิ 20°C ถึง 200°C ช่วงที่ 2 เป็นการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไล่สารอินทรีย์ (Organic Matter) ได้แก่ เซลลูโลสและลิกนิน ที่มีอยู่ในแกลบข้าวที่ช่วงอุณหภูมิ 200°C ถึง 350°C และช่วงสุดท้าย เป็นการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไล่สารประกอบโลหะ (Metallic Impurities) ที่ช่วงอุณหภูมิ 350°C ถึง 650°C⁽¹⁰⁾ ซึ่งเป็นการสูญเสียน้ำหนักมากที่สุด และที่อุณหภูมิมากกว่า 650°C จะไม่มีการสูญเสียน้ำหนักอีก เมื่อเปรียบเทียบกราฟทั้งสองจะเห็นว่าแกลบข้าวที่ผ่านการต้มกรดแล้วมีค่าการสูญเสียน้ำหนักช่วงที่เป็นสารอินทรีย์ และสารประกอบเชิงโลหะมีค่า 61.0 เปอร์เซ็นต์โดยมวลซึ่งมีค่าน้อยกว่าแกลบข้าวที่ไม่ได้ต้มกรดที่มีค่า 69.2 เปอร์เซ็นต์โดยมวลซึ่งแสดงให้เห็นว่าในระหว่างการต้มด้วยกรด 3 mol HCl จะมีการสูญเสียสารอินทรีย์ และสารเจือปนบางส่วนออกไป การสูญเสียน้ำหนักรวมของแกลบข้าวที่ไม่ได้ต้มกรด 77.1 เปอร์เซ็นต์โดยมวลซึ่งมีซิลิกาและสารเจือปนรวม 22.9 เปอร์เซ็นต์โดยมวล สำหรับแกลบที่ผ่านการต้มกรดการสูญเสียน้ำหนักรวม 71.4 เปอร์เซ็นต์โดยมวลซึ่งมีซิลิกาและสารเจือปน รวม 28.6 เปอร์เซ็นต์โดยมวล

4.5.4 ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะของซีเถ้าแกลบด้วยวิธี BET Method

จากการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะโดยใช้วิธี BET Method จากรูปที่ 4.22 จะเห็นว่าซีเถ้าแกลบที่ผ่านการต้มกรดมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่า 200 m²/g และสูงถึง 294.53 m²/g ที่การเผา 700°C แต่ซีเถ้าแกลบที่ไม่ได้ต้มกรดจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำ อยู่ที่ 12-50 m²/g โดยพื้นที่ผิวจำเพาะจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการเผาสูงขึ้น (ดูตารางที่ 1 หน้า ๖๖ ข.)

พื้นที่ผิวจำเพาะของซีเถ้าแกลบที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิในการเผา เพราะว่าที่อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะช่วยกำจัดสารเจือปนออกจากผิวของซีเถ้าแกลบทำให้ที่ผิวเกิดความขรุขระและรูพรุนมากขึ้น พื้นที่ผิวจำเพาะก็เพิ่มขึ้นด้วย โดยการต้มกรดจะมีผลอย่างมากทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะสูง เพราะว่าผิวของแกลบข้าวจะถูกทำลายเป็นอย่างมากด้วยการต้มกรด



รูปที่ 4.23 พื้นที่ผิวจำเพาะของซีเอ็นแอล

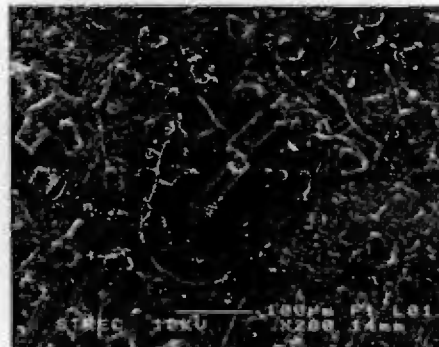
4.5.5 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของซีเอ็นแอล

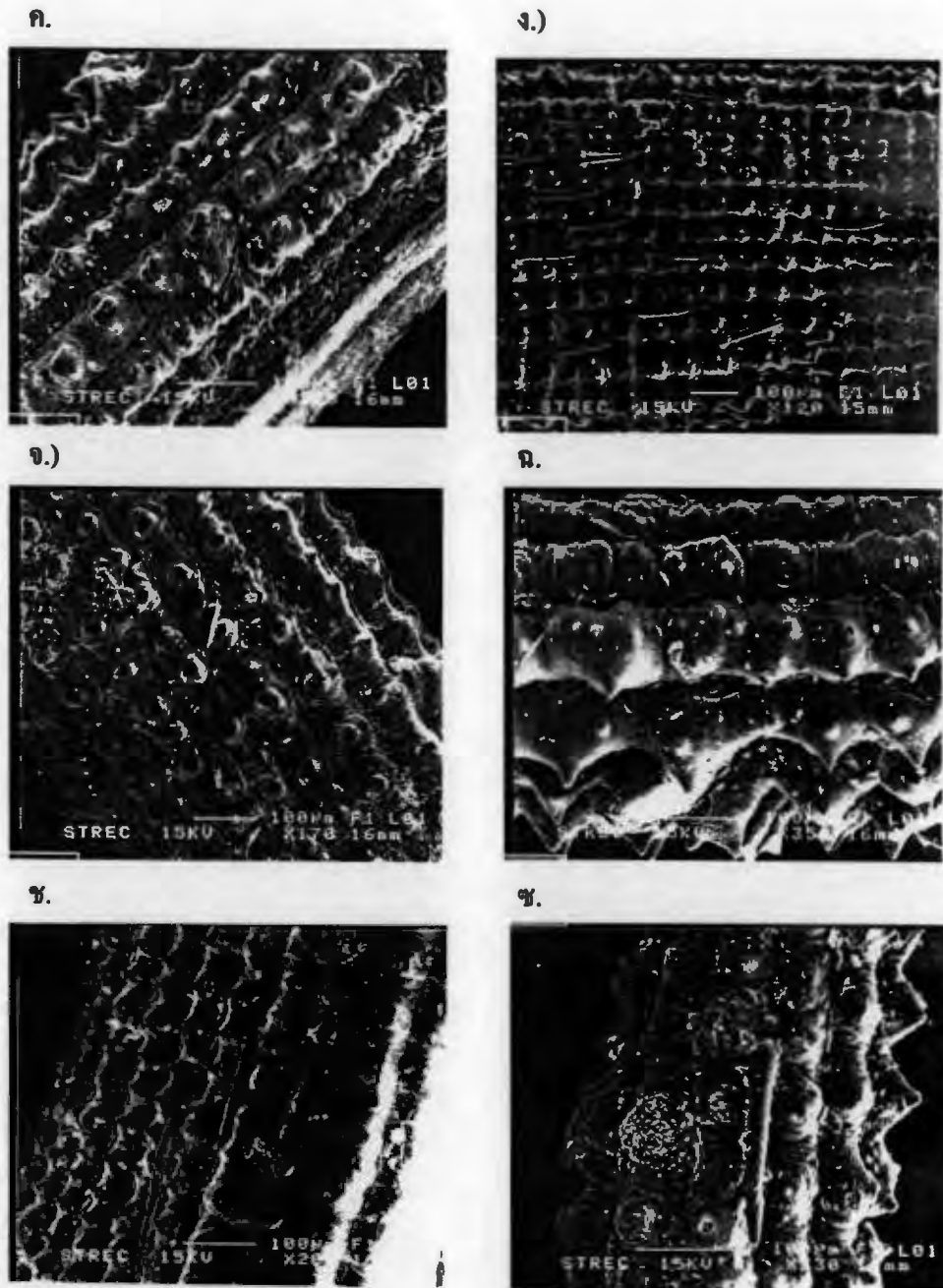
จากรูปที่ 4.24 การวิเคราะห์พื้นผิวด้วย Scanning Electron Microscope (SEM) ของแอลข้าวที่ไม่ผ่านการต้มกรด (รูปด้านซ้ายมือ) และที่ผ่านการต้มกรด (รูปด้านขวามือ) ซึ่งผลจากการต้มกรด จะเห็นว่าพื้นผิวของแอลข้าวจะถูกทำลาย สังเกตจากขน (Hair) ของแอลข้าวจะหักออกและผิวจะไม่ราบเรียบเหมือนแอลข้าวที่ยังไม่ต้มกรด ในส่วนของซีเอ็นแอลที่เผาที่อุณหภูมิต่างๆ มีพื้นผิวที่ถูกทำลายไปเพราะการเผาเช่นเดียวกัน แต่ลักษณะผิวทุกสภาวะที่มีการเผาก็จะไม่แตกต่างกันนัก

ก.



ข.

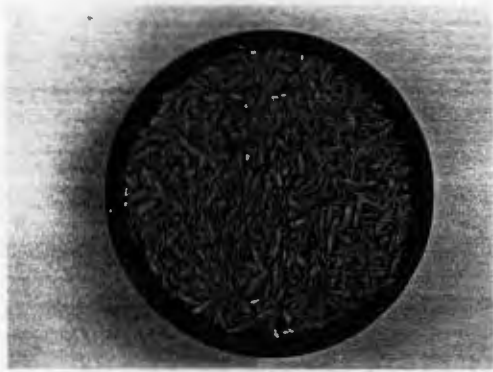




รูปที่ 4.24 ลักษณะพื้นผิวของขี้ผึ้งเคลือบ ก.) แกลบข้าวดิบที่ไม่ต้มกรดและไม่เผา X200 ข.) แกลบข้าวดิบที่ผ่านการต้มกรด X200 ค.) ไม่ผ่านการต้มกรดและเผาที่ 500°C X220 ง.) ผ่านการต้มกรดและเผาที่ 500°C X120 จ.) ไม่ผ่านการต้มกรดและเผาที่ 600°C X170 ฉ.) ผ่านการต้มกรดและเผาที่ 600°C X350 ช.) ไม่ผ่านการต้มกรดและเผาที่ 700°C X200 ซ.) ผ่านการต้มกรดและเผาที่ 700°C X330

4.5.6 ผลการวิเคราะห์ลักษณะ สีของแกลบข้าวและซีเถ้าแกลบ

ก.)

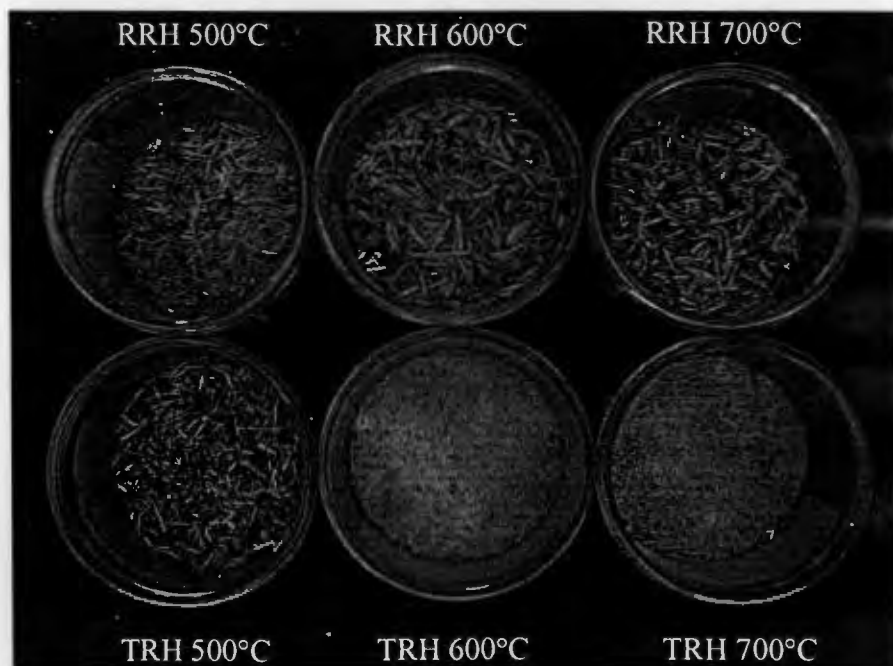


ข.)



รูปที่ 4.25 ก.) แกลบข้าวดิบ ข.) แกลบข้าวที่ผ่านการคั่ว

จากรูปที่ 4.25 สีของแกลบข้าวที่คั่วแล้วเมื่อเปรียบเทียบกับแกลบข้าวดิบ จะสังเกตเห็นของแกลบข้าวที่คั่วด้วยกรดไฮโดรคลอริกจะมีสีเข้มกว่าสีของแกลบดิบ (มีสีเหลืองทองสว่าง) เป็นการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากขณะคั่ว เมื่อกรดเข้าไปทำลายผิวของแกลบข้าว ทำให้สีของแกลบข้าวเปลี่ยนไปด้วย

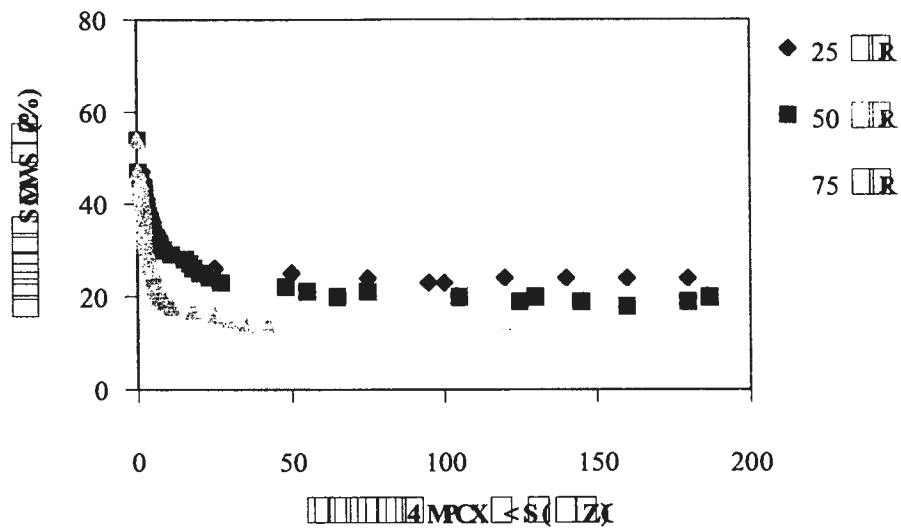


รูปที่ 4.26 ลักษณะและสีของซีเถ้าแกลบ

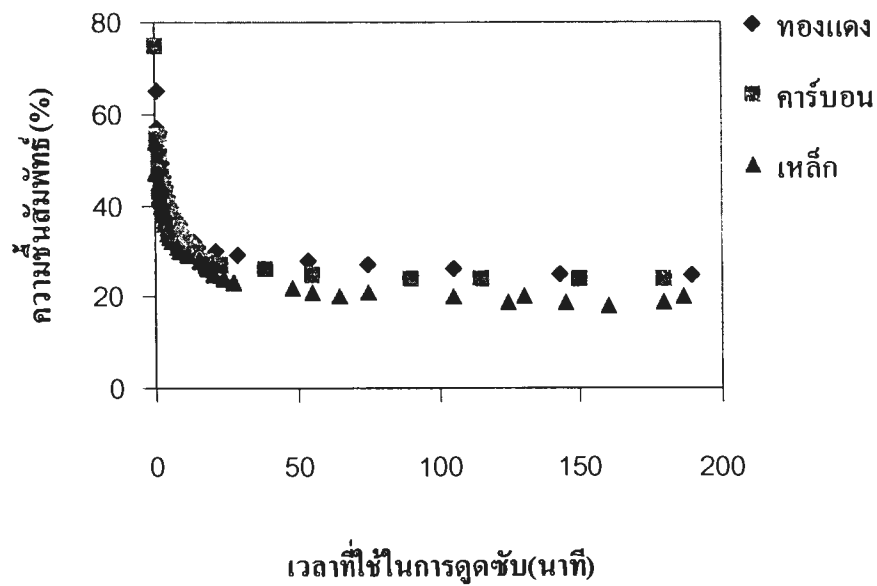
ซีเด้าแกลบที่ได้จากการต้มกรด 3 mol HCl และไม่ต้มกรดแล้วเผาที่อุณหภูมิ 500°C, 600°C และ 700°C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5°C / นาที จะได้ซีเด้าแกลบที่มีสีต่างกันทั้งสีดำ สีเทา และสีขาว ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของการต้มกรดและอุณหภูมิการเผา โดยสีของแกลบขาวที่ยังไม่ต้มกรดแล้วเผา สีจะค่อนข้างเข้ม สีเทาดำ และจะมีสีขาวปะปนมากขึ้นเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น และซีเด้าแกลบที่ผ่านการต้มกรดแล้วเผาที่ 500°C สียังมีส่วนที่เป็นสีดำอยู่มาก และจะเริ่มขาวนวลเมื่อเผาที่ 600°C และ 700°C ซึ่งจากการวิเคราะห์หาคุณลักษณะของซีเด้าแกลบจะได้ว่าซีเด้าแกลบที่มีปริมาณซิลิกาปริมาณสูงของซีเด้าแกลบจะขาวนวลมากขึ้น และซีเด้าแกลบที่มีปริมาณคาร์บอนและสารเจือปนอื่นๆ ในปริมาณสูงจะมีสีเข้มก่อน ไปทางสีดำมากขึ้นเช่นกัน

4.6 ความสามารถในการดูดความชื้นในโลหะผงของซีเด้าแกลบ

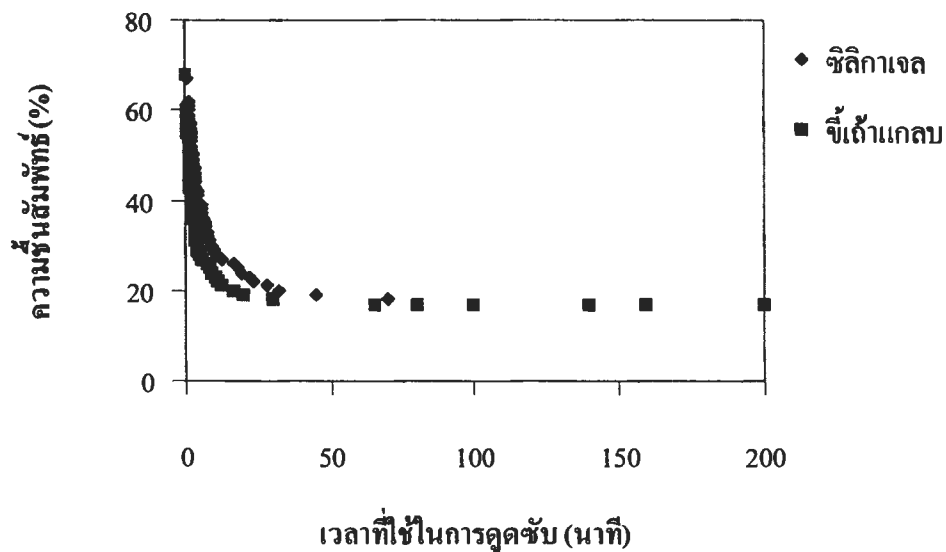
จากการศึกษาความเป็นไปได้ในการดูดความชื้นในโลหะผงของซีเด้าแกลบ ได้ศึกษาโดยการทดสอบกับผงเหล็กขนาด 110 ไมครอน ซึ่งจากการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของซีเด้าแกลบ ซึ่งมีซิลิกาเป็นส่วนประกอบหลัก ซึ่งอนุภาคซิลิกามีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ซึ่งเกิดจากการมีรูพรุนขนาดเล็กอยู่ทั่วไปภายในอนุภาคซีเด้าแกลบ และจากการศึกษาความสามารถในการดูดซับบนผิวซิลิกา ทำให้ซิลิกาจากซีเด้าแกลบมีความสามารถในการดูดซับความชื้นในบรรยากาศได้ดี ซึ่งจากการทดสอบการดูดความชื้นโดยการวัดระดับความชื้นเมื่อเวลาผ่านไป ในบรรยากาศที่มีปริมาตร 600 มิลลิลิตร โดยใช้ซีเด้าแกลบในปริมาณที่ต่างกันเป็นตัวดูดซับ ซึ่งภายในบรรจุผงเหล็กขนาด 110 ไมครอนจำนวน 20 กรัม



รูปที่ 4.27 แสดงความสามารถในการดูดซับความชื้นของซีดีเถ้าเคลือบปริมาณต่างกัน ในผงเหล็กจำนวน 20 กรัม



รูปที่ 4.28 ความสามารถในการดูดซับความชื้นของซีดีเถ้าเคลือบปริมาณ 50 กรัม ในวัสดุผงแต่ละชนิด จำนวน 20 กรัม



รูปที่ 4.29 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดความชื้นในโลหะผงด้วยซีดีเอ้แอลบและซีลีกาเจล

จากรูปที่ 4.27 ผลจากการทดสอบการดูดซับความชื้นของซีดีเอ้แอลบ จะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาผ่านไป ในช่วงแรกระดับความชื้นสัมพัทธ์ลดลงอย่างรวดเร็ว ในช่วงเวลา 25 นาทีแรก และระดับความชื้นจะลดลงอย่างช้าๆและเกือบคงที่เมื่อเวลาผ่านไป(หลังจาก 25 นาที) ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณซีดีเอ้แอลบที่ใช้ในการดูดซับ โดยที่ปริมาณของซีดีเอ้แอลบที่เพิ่มขึ้น ทำให้สามารถดูดซับความชื้นได้มากขึ้น ซึ่งขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของสารดูดซับที่ใช้ในการดูดซับเพิ่มขึ้น(ปริมาณซีดีเอ้แอลบเพิ่มขึ้น)ทำให้สามารถดูดซับความชื้นได้มากขึ้นเช่นกัน (ซึ่งการดูดซับเป็นไปตามหลักการการดูดซับแบบอูมกวมิกงที่ของแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm) ซึ่งเป็นการดูดซับบนผิวในชั้นแรกของตัวดูดซับ)

ตามรูปที่ 4.28 เมื่อนำซีดีเอ้แอลบปริมาณเท่ากันคือ 50 กรัมมาดูดซับความชื้นในโลหะผงที่บรรจุในภาชนะขนาด 600 มิลลิลิตร ได้แก่ ผงเหล็ก ผงทองแดงและผงคาร์บอนในปริมาณ 20 กรัมเท่ากัน จะเห็นว่าเมื่อเวลาผ่านไปในช่วงแรก ระดับความชื้นสัมพัทธ์จะลดลงอย่างรวดเร็วจนถึงเวลา 25 นาทีแรก ระดับความชื้นจะลดอัตราการเปลี่ยนแปลง จนในที่สุดระดับความชื้นสัมพัทธ์คงที่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 75 นาที โดยความชื้นสัมพัทธ์สุดท้ายของวัสดุผงทั้งสามชนิดใกล้เคียงกัน โดยความชื้นในผงเหล็กมีค่าต่ำสุด ซึ่งการที่ซีดีเอ้แอลบดูดความชื้นในผงวัสดุได้ไม่เท่ากัน เนื่องจากผงแต่ละชนิดมีความสามารถในการดูดซับความชื้นไม่เท่ากัน วัสดุผงที่มีความสามารถในการดูดซับสูงกว่าจะทำให้ความสามารถในการดูดซับความชื้นของผงซีดีเอ้แอลบลดลง

จากรูปที่ 4.29 เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับความชื้นระหว่างซิลิกาเจลและซีดีเถ้าแกลบ โดยนำซิลิกาเจลและซีดีเถ้าแกลบอย่างละ 25 กรัม ไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วนำมาดูดซับความชื้นในผงทองแดง 20 กรัม ซึ่งบรรจุอยู่ในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร จับเวลาที่ใช้ในการดูดซับและบันทึกค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ลดลง จากผลการทดลองในรูปที่ 4.28 เห็นได้ว่าการลดลงของระดับความชื้นสัมพัทธ์เมื่อเวลาในการดูดซับความชื้นผ่านไป แนวโน้มมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองในรูปที่ 4.26 และ 4.27 โดยความชื้นสัมพัทธ์จะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการดูดซับและการลดลงจะเริ่มช้าลงเมื่อเวลาผ่านไป 25 นาที จนกระทั่งที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 17 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งทั้งสองการทดลองให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์สุดท้ายเท่ากัน แต่ซีดีเถ้าแกลบจะสามารถดูดซับความชื้นได้เร็วกว่าการใช้ซิลิกาเจล สืบเนื่องมาจากค่าความชันของกราฟในช่วง 25 นาทีแรก โดยกราฟที่มีความชันมากกว่า คือ ซีดีเถ้าแกลบ ดังนั้นซีดีเถ้าแกลบจึงดูดซับความชื้นได้เร็วกว่าซิลิกาเจล

หลังจากการดูดซับความชื้นในผงเหล็กขนาด 110 ไมครอนด้วยซีดีเถ้าแกลบ แล้วนำผงเหล็กมาอัดขึ้นรูป (ด้วยแรงอัดเท่ากับการทดสอบการอัดที่ระดับความชื้นต่างกัน ในหัวข้อ 4.2.2) ในบรรยากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 20% และบรรยากาศปกติในประเทศไทย (ความชื้น 55 %) ผลที่ได้ความหนาแน่นของชิ้นงาน Fe compact ที่ผ่านการดูดความชื้นด้วยซีดีเถ้าแกลบมีค่า 5.812 g/cm^3 (73.94%) และ 5.728 g/cm^3 (72.87%) ซึ่งใกล้เคียงกับชิ้นงานผงเหล็กอัด ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 20% และระดับความชื้น 45% ซึ่งค่าความหนาแน่นของชิ้นงานทั้งสองมีค่าต่างกันเล็กน้อย อาจเนื่องจากการอัดผงเหล็กที่ผ่านการดูดซับความชื้นที่บรรยากาศปกติซึ่งมีความชื้นประมาณ 55 % ความชื้นในส่วนนี้อาจจะเข้าไปจับบนผิวของผงเหล็กในขณะที่ป้อนผงเหล็กลงแม่พิมพ์ซึ่งในช่วงเวลาเพียงเล็กน้อย พื้นผิวโลหะก็สามารถดูดซับความชื้นบนผิวได้เช่นกันเพราะว่าในช่วงแรกจะสามารถดูดซับได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นการควบคุมความชื้นตลอดกระบวนการผลิต ตั้งแต่ความชื้นในผงโลหะจนถึงบริเวณที่มีการอัดผงขึ้นรูปในแม่พิมพ์ จึงมีความจำเป็นอย่างมาก เพื่อลดความเสียหายในการอัดขึ้นรูปของโลหะผง