

**การศึกษาเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงเฟส โครงสร้างทางจุลภาค
และสมบัติของเนื้อดินไตรแอกเซียลพอร์ซเลนที่เตรียมโดยใช้ดินขาวลำปาง
และดินขาวนราธิวาส**

**A Comparative Study of Changes on Phase, Microstructure and
Properties of Triaxial Porcelain Bodies Prepared from Lampang and
Narathiwat China Clay**

เจี๋ยชานู แสงทอง¹, ดร.ณิ วัฒนศิริเวช^{1*}, สุธิ วัฒนศิริเวช^{1*}, ธรรมรัตน์ ปัญญธรรมาภรณ์²

^{1*} สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง 333 ม.1 ต.ท่าสุต อ.เมือง จ.เชียงราย 57100 โทร 053-916263

โทรสาร 053-916776 E-mail: d.wattanasiriwech@sci.mfu.ac.th

² ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ 114 อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงเฟส โครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติของเนื้อดินไตรแอกเซียลพอร์ซเลน ซึ่งเตรียมโดยใช้ควอตซ์เฟลด์สปาร์และดินขาวจากแหล่งในประเทศสองแหล่ง คือ ดินขาวลำปางและดินขาวนราธิวาส ซึ่งดินขาวทั้งสองแหล่งนี้มีแร่เด่นที่แตกต่างกัน กล่าวคือ ในดินขาวลำปางประกอบด้วยแร่หลักๆ คือ อิลไลต์ เคโอลิไนต์และควอตซ์ ในขณะที่ดินขาวนราธิวาส ประกอบด้วย แร่เคโอลิไนต์เป็นแร่หลักเพียงแร่เดียว โดยมีแร่อื่นๆ อีกเล็กน้อย จากการศึกษาด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์และจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด พบว่าในเนื้อดินที่เตรียมโดยใช้ดินขาวลำปาง (ชื่อย่อ: LM) ยอดของมูลไลต์ปฐมภูมิเริ่มเกิดขึ้นที่อุณหภูมิเพียง 1000 °ซ. และเกิดมูลไลต์ทุติยภูมิที่อุณหภูมิ 1150 °ซ. ในขณะที่เนื้อดินที่เตรียมโดยใช้ดินขาวนราธิวาส (ชื่อย่อ: NM) พบการเกิดทั้งมูลไลต์ปฐมภูมิและทุติยภูมิที่อุณหภูมิประมาณ 1100 °ซ. เนื้อดินที่เตรียมโดยใช้ดินขาวลำปางเกิดวิตรฟิเคชันอย่างสมบูรณ์ หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1250 °ซ. เป็นเวลา 30 นาที และมีค่าความแข็งแรงเชิงกลสูงกว่าเนื้อดินที่เตรียมโดยใช้ดินขาวนราธิวาส ซึ่งเกิดวิตรฟิเคชันอย่างสมบูรณ์หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1300 °ซ. เป็นเวลา 30 นาที ทั้งนี้เนื่องจากการที่แร่อิลไลต์ที่มีในดินขาวลำปาง เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็น (ก) ของเหลว ซึ่งช่วยให้การวิตรฟิเคชันเกิดขึ้นได้ดีและ(ข) ผลึกมูลไลต์ซึ่งช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้แก่เนื้อดิน

คำสำคัญ: ไตรแอกเซียลพอร์ซเลน, ดินขาวลำปาง, ดินขาวนราธิวาส, วิตรฟิเคชัน

Abstract

This research aims to study changes on phase, microstructure and properties of triaxial porcelain bodies prepared from quartz, feldspar and two different types of china clays containing different dominant minerals. Lampang china clay comprises of illite, kaolinite and quartz while Narathiwas china clay mainly contains kaolinite with minor amounts of other minerals. X-ray Diffraction and Scanning Electron Microscopy analysis showed that in the body containing Lampang china clay, denoted as LM, primary mullite emerges at around 1000 °C while secondary mullite is found at around 1150 °C. These mullite crystals are found at around 1100-1150 °C in the body containing Narathiwas china clay which is denoted as NM. Complete vitrification of the LM body occurs after firing at 1250 °C for 30 minutes with better flexural strength than the NM body whose complete vitrification occurs after firing at 1300 °C for 30 minutes. This is due to the ability of illite in Lampang china clay in (a) transformation to liquid and assists vitrification and (b) mullite formation which gives rise to strength in the body.

Keywords: Triaxial porcelain body, Lampang china clay, Narathiwas china clay, vitrification

1. บทนำ

เนื้อดินไตรเอกเซียลพอร์ซเลนคือเนื้อดินที่มีความขาว โปร่งแสง ไม่มีการดูดซึมน้ำ และมีความแข็งแรงเชิงกลสูง ดังนั้นจึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายประการ เช่น ลูกถ้วยไฟฟ้า ครอบฟันเทียม ลูกบิดและเครื่องถ้วยชามชั้นสูง (ASTM, C 240-01) เนื้อดินพอร์ซเลนก่อนการเผาประกอบด้วยผลึกของควอตซ์และเฟลด์สปาร์ ซึ่งเป็นแร่ที่มีขนาดใหญ่กระจายตัวอยู่ในผลึก ของแร่ดินที่มีขนาดเล็กกว่าและทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์ (Iqbal, 1999) ในการทำให้เกิดการอบผนึกของอนุภาคดินและให้ความแข็งแรงแก่นเนื้อดิน จะต้องกำจัดรูพรุนในเมทริกซ์เสียก่อนซึ่งโดยปกติกลไกนี้ จะเกิดขึ้นโดยการทำงานของเฟลด์สปาร์เมื่อมีการหลอมเหลวผ่านกระบวนการที่เรียกว่า “การซินเทอร์แบบการไหลของของเหลวที่หนืด” (Kingery, 1991) ในการเผาเนื้อดินพอร์ซเลนนั้น องค์ประกอบต่าง ๆ ของเนื้อดินจะเกิดปฏิกิริยาทางความร้อนที่อุณหภูมิแตกต่างกันไป และสามารถสรุปได้ ดังนี้ (ดรุณี, 2551; Dana, 2004) ช่วงอุณหภูมิ 450-600 °ซ. เกิดปฏิกิริยาจัดกลุ่มไฮดรอกซิลของแร่เคโอลินไนต์ และมีการเปลี่ยนโครงสร้างกลายเป็นมีคาเคโอลิน ที่อุณหภูมิ 980 °ซ. มีคาเคโอลินมีการปลดปล่อยซิลิกาอสัณฐานและเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างกลายเป็นสปิเนล ช่วงอุณหภูมิ 1100-1200 °ซ. สปิเนลมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นมุลไลต์ซึ่งขนาดเล็กและสั้น เรียกว่ามุลไลต์ชนิดปฐมภูมิ ที่อุณหภูมิ 1150 °ซ. เฟลด์สปาร์เกิดการหลอมละลาย ทำให้แอลคาไลเคลื่อนที่ออกจาก

จากโครงสร้างของเฟลด์สปาร์ และเกิดการตกผลึกใหม่เป็นมุลไลต์ซึ่งมีพื้นฐานรูปเข็มเรียกว่ามุลไลต์ทุติยภูมิ (Wattanasiriwech, 2009) อย่างไรก็ตาม ในบางงานวิจัยเชื่อว่าผลึกมุลไลต์ทุติยภูมิไม่สามารถเกิดจากการสลายตัวของเฟลด์สปาร์เพียงลำพังเนื่องจาก มีปริมาณไอออนของอะลูมิเนียมไม่เพียงพอ แต่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างบริเวณแร่ดินเดิมกับเฟลด์สปาร์ที่หลอมตัวนี้ (Iqbal 1999; Lee, 2001; Tavompanich, 2008) การเติบโตของผลึกมุลไลต์ชนิดนี้จะเติบโตจากบริเวณที่เป็นขอบของรอยเฟลด์สปาร์เข้าไปในบริเวณตรงกลางของรอยเฟลด์สปาร์

จากการทบทวนเอกสารจะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงเฟสและโครงสร้างทางจุลภาคของเนื้อดินพอร์ซเลนโดยใช้แร่ดินขาวซึ่งมีความบริสุทธิ์สูงในแหล่งต่างประเทศได้มีการศึกษากันอย่างกว้างขวางแต่อย่างไรก็ตามการศึกษาดังกล่าวนั้น อาจไม่เกิดประโยชน์แก่อุตสาหกรรมเซรามิกของประเทศไทยมากนัก เนื่องจากดินขาวเป็นแร่ธรรมชาติ ดังนั้นสามารถมีความแตกต่างกันได้ ทั้งคุณสมบัติของผลึกและความบริสุทธิ์ ซึ่งทั้งสองปัจจัยนี้เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเฟสโครงสร้างทางจุลภาค วัฏริฟิเคชันและสมบัติของเนื้อดิน งานวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายที่จะศึกษาการเปลี่ยนแปลงเฟสและโครงสร้างทางจุลภาค รวมทั้งสมบัติของเนื้อดินพอร์ซเลน ซึ่งเตรียมโดยใช้แร่ดินขาวจากแหล่งในประเทศที่สำคัญและมีการนำไปใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม เซรามิกสองแหล่ง คือ ดินขาวลำปางและดินขาวนราธิวาส ซึ่งจากการศึกษาเบื้องต้นพบว่าดินขาวลำปางประกอบด้วยแร่ อิลไลต์ เคโอลิไนต์และควอตซ์ ในขณะที่ดินขาว นราธิวาส ประกอบด้วยแร่เคโอลิไนต์เป็นแร่หลัก โดยมีแร่อื่นๆ อีกเล็กน้อย (Saengthong, 2010) ตัวอย่างการศึกษาดินเหนียวจากแหล่งอียิปต์ ประเทศมาเลเซีย ซึ่งเป็นแหล่งดินมีแร่อิลไลต์อยู่สูง พบว่า อิลไลต์ มีการสลายตัวเป็นแร่เซริไซต์ซึ่งมีโครงสร้างคล้ายกับอิลไลต์ แล้วจึงค่อยเปลี่ยนเฟสเป็น มุลไลต์โดยไม่มีการเกิดผลึกของสปีเนลและมีการหลอมตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่าเฟลด์สปาร์ประมาณ 100-200 °ซ. ดังนั้น จึงทำให้เกิดการอบผนึกของเซรามิกเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิต่ำ (Wattanasiriwech, 2009) ในขณะที่เอกสารอ้างอิงบางแห่งกล่าวว่าการสลายตัวของอิลไลต์อาจจะเกิดผ่านเฟสของสปีเนลและมุลไลต์เช่นเดียวกับการสลายตัวของเคโอลิไนต์ (Aras, 2004) คณะวิจัยมีความมุ่งหวังที่จะศึกษาการเปลี่ยนแปลงด้านต่าง ๆ ของเนื้อดินพอร์ซเลนที่เตรียมโดยใช้ดินขาวจากแหล่งในประเทศที่มีแร่ประกอบต่างกันไป เพื่อให้เกิดความเข้าใจอันถ่องแท้ อันนำไปสู่ประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมเซรามิกในประเทศอย่างกว้างขวาง

2. วิธีการทดลอง

วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองนี้ประกอบด้วยดินขาวลำปาง (ชื่อย่อ: LP) ดินขาวนราธิวาส (ชื่อย่อ: NR) ควอตซ์และเฟลด์สปาร์ชนิดโพแทช มาจากแหล่งภายในประเทศทั้งหมด ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและองค์ประกอบทางแร่ของวัตถุดิบด้วยเทคนิครังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF)

และเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ตามลำดับ เนื้อดินพอร์ซเลนมีอัตราส่วน โดยน้ำหนักของ วัตถุดิบคือ ดินขาวลำปาง หรือดินขาวนาธิวาส 50% ควอตซ์และเฟลด์สปาร์ อย่างละ 25% และให้ ชื่อย่อเนื้อดินทั้งสองเป็น LM และ NM ตามลำดับ เตรียมเนื้อดินโดยนำวัตถุดิบมาผสมและบดด้วย หม้อบดชนิดบอลมิลเป็นเวลา 16 ชั่วโมง ก่อนนำมาอบเป็นเวลา 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 110 °ซ. และ ร้อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 325 เมช จากนั้นทำการขึ้นรูป เป็นชิ้นตัวอย่างแบบเม็ดกลมด้วยการอัด ด้วยเครื่องอัดแบบไฮดรอลิกชนิดแรงดันด้านเดียวที่ ความดัน 50 MPa ก่อนนำมาเผาในช่วงอุณหภูมิ ระหว่าง 900 จนถึง 1300 หรือ 1350 °ซ. เป็นเวลา 30 นาที แล้วจึงวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเฟสด้วย เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (PANalytical รุ่น X'Pert PRO MPD) ในช่วงมุม 2θ เท่ากับ 5-60 ° โดย มีความละเอียดของการเพิ่มมุม (Step size) ครั้งละ 0.0167 ° และเวลาในการรับสัญญาณในแต่ละมุม (Time/Step) เป็น 5 วินาที วิเคราะห์ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด หรือ SEM (JEOL รุ่น JSM-5410LV) โดยใช้โหมดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron mode) และให้แรงเคลื่อนไฟฟ้า 20 kV แก่ส่วนกำเนิดอิเล็กตรอน สำหรับชิ้นงานตัวอย่างที่ นำมาวิเคราะห์ การเปลี่ยนแปลงทางจุลภาคต้องนำขัดด้วยเครื่องขัดหยาบและละเอียดก่อนนำมากัด ด้วยกรดไฮโดรฟลูออริกความเข้มข้น 4% เป็นเวลา 2 นาที เพื่อกัดเฟสแก้วที่ปกคลุมผิวหน้าออก เสียก่อน วัดสมบัติทางกายภาพหลังการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ อันได้แก่ ค่าการดูดซึมน้ำและความ หนาแน่นทำตามมาตรฐานอเมริกัน (ASTM C 373-88) การหัดวัดเชิงเส้นโดยเทียบกับขนาดของ ชิ้นงานหลังขึ้นรูป ส่วนค่าความแข็งแรงเชิงกลแบบดัดวัดด้วยเครื่องทดสอบ (UTM: Instron 5566) โดยมีระยะห่างของตัวรองรับเท่ากับ 80 มม. และความเร็วของหัววัด 5 มม./นาที ค่าความแข็งแรง เชิงกลแบบดัดสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 1

$$\sigma = 3/2 [(FL)/bd^2] \quad (1)$$

โดยที่ σ คือความแข็งแรงเชิงกลแบบดัด (MPa) F คือ แรงที่กด (N) L คือระยะห่างของตัวรองรับ (mm) b และ d คือความกว้างและความหนาของชิ้นงาน (mm)

3. ผลการทดลอง

ตารางที่ 1 แสดงผลการศึกษารายละเอียดประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์ ของวัตถุดิบแต่ละชนิดและเนื้อดินพอร์ซเลนทั้งสองผลการทดลองพบว่าในแร่ควอตซ์ประกอบด้วย สารประกอบ SiO_2 ถึง ~95% และมี Al_2O_3 เป็นสารประกอบรอง ในขณะที่แร่เฟลด์สปาร์ ดินขาว ลำปางและดินขาวนาธิวาส ประกอบไปด้วยสารประกอบหลักคือ K_2O , SiO_2 , Al_2O_3 คล้ายคลึงกัน แต่พบในปริมาณที่แตกต่างกัน ผลการศึกษารายละเอียดประกอบทางแร่ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

ของดินขาวทั้งสองแหล่งแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งพบว่าดินขาวลำปางมีแร่หลัก คือ แร่โอลิไนด์ เควอตซ์ และมีแร่อัลไบต์ซึ่งเป็นแร่เฟลด์สปาร์ชนิดโซดาอีกเล็กน้อย ในขณะที่ดินขาวนราธิวาสประกอบด้วยแร่โอลิไนด์เป็นแร่หลัก โดยมีแร่ไมโครไคลน์ซึ่งเป็นแร่เฟลด์สปาร์ชนิดโพแทชโอลิไนด์ และควอตซ์อีกเล็กน้อย การคำนวณเชิงตรรกะจากผลการศึกษาร่วมกันประกอบทางเคมีด้วยเทคนิครังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์และเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ตามหลักการของ Griffiths และ Radford (1964) เพื่อหาปริมาณของแร่แต่ละชนิดโดยประมาณ ซึ่งต่อมาได้มีการปรับปรุงและเผยแพร่โดย Wattanasiriwech (2009) โดยกำหนดให้ เควอไลต์ อัลไบต์ และไมโครไคลน์ มีสูตรเคมีเป็น $\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$, $\text{K}_y\text{Al}_{4-y}\text{Si}_{8-y}\text{Al}_y\text{O}_{20}(\text{OH})_4$ โดยให้ $y = 1.5$ (Deer, 1963) $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ และ $\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ ตามลำดับ ผลการคำนวณแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งพบว่าในดินขาวลำปางประกอบไปด้วยแร่ดินหลัก 2 ชนิด คือ เควอไลต์และโอลิไนด์และมีควอตซ์สูงถึง 22% ในขณะที่ดินขาวนราธิวาสประกอบด้วยแร่โอลิไนด์เป็นแร่หลักและมีแร่อื่น ๆ เพียงเล็กน้อยเท่านั้น จากการวิเคราะห์พื้นฐานผลึกดังแสดงในรูปที่ 2 พบว่าผลึกของแร่ดินขาวนราธิวาสค่อนข้างมีความสมบูรณ์และแสดงลักษณะของผลึกที่ซ้อนกันได้ดี ในขณะที่ผลึกของแร่ดินขาวลำปางมีการแตกหักกระจายตัวออกจากกัน

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงเฟสของเนื้อดิน LM และ NM หลังการเผาที่อุณหภูมิ 900-1300 หรือ 1350 °ซ. โดยมีช่วงห่าง 50 °ซ. ด้วยเทคนิค XRD แสดงในรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ ในเนื้อดิน LM หลังการเผาที่ 900 °ซ. พบเพียงเฟสของโอลิไนด์ เฟลด์สปาร์และควอตซ์ เนื่องจากโอลิไนด์เกิดปฏิกิริยาจัดกลุ่มไฮดรอกซิลและมีการสลายตัวเปลี่ยนโครงสร้างกลายเป็นมีตาเควอไลต์ ซึ่งเป็นสารออสซิลาน ในช่วง 450-600 °ซ. เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผา พบว่าฟลักของแร่โอลิไนด์มีความเข้มข้นลดลงและหายไปหลังการเผาที่ 1050 °ซ. ในช่วงอุณหภูมิ 1000 °ซ. เริ่มปรากฏฟลักของผลึกมุลไลต์ขึ้น ซึ่งจากการทบทวนเอกสารพบว่าทั้งโอลิไนด์และเควอไลต์สามารถสลายตัวกลายเป็น มุลไลต์ได้ ซึ่งจากรายงานพบว่าเกิดที่อุณหภูมิ 1000 °ซ. และ 1100 °ซ. ตามลำดับ (Lee, 2001; Wattanasiriwech, 2011) ดังนั้นฟลักของผลึกมุลไลต์ที่พบที่อุณหภูมินี้ จึงน่าจะเกิดจากการสลายตัวของแร่โอลิไนด์ที่พบว่ามีอยู่มากในดินลำปางที่นำมาใช้นี้ ส่วนแร่เฟลด์สปาร์ยังคงปรากฏอยู่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาเป็น 1200 °ซ. และหายไปเมื่อเผาต่อไป โดยผลึกสุดท้ายที่ปรากฏหลังการเผาที่ 1300 °ซ. คือมุลไลต์และควอตซ์

ในเนื้อดิน NM พบว่าที่ 900 °ซ. มีเพียงผลึกของโอลิไนด์ เฟลด์สปาร์และควอตซ์คล้ายกับในเนื้อดิน LM เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาเป็น 950-1000 °ซ. ผลึกโอลิไนด์เกิดการสลายไปและปรากฏฟลักของผลึกมุลไลต์ขึ้นหลังการเผาในช่วงอุณหภูมิ 1100-1150 °ซ. ทั้งนี้เนื่องจากการสลายตัวของแร่โอลิไนด์เป็นหลัก เนื่องจากแร่โอลิไนด์ที่มีในเนื้อดินนี้มีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

เมื่อสลายตัวกลายเป็นมูลไคต์ จึงไม่ปรากฏฟีดที่ชัดเจนนัก ผลึกสุดท้ายที่ปรากฏหลังการเผาที่ 1300 °ซ. ก็อุมูลไคต์และควอตซ์ เช่นเดียวกัน

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคของเนื้อดิน LM และ NM หลังการเผาที่อุณหภูมิ 900-1300 °ซ. โดยมีช่วงห่าง 50 °ซ. ด้วยเทคนิค SEM แสดงในรูปที่ 5-6 จากผลการศึกษาพบว่าเนื้อดิน LM หลังการเผาที่ 900 °ซ. (รูป 5a) เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะของผิวหน้าของอนุภาคดิน ดังเห็นได้จากลักษณะที่ขรุขระ และการเปลี่ยนแปลงจะสังเกตเห็นได้ชัดเจนมากขึ้น โดยเห็นเป็นผลึกขนาดเล็กบนพื้นผิวหลังการเผาที่ 1000 °ซ. (รูป 5c) ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่าเป็นการเกิดขึ้นของผลึกมูลไคต์จากการสลายตัวของแร่โอลิไคต์ ที่อุณหภูมิ 1100 °ซ. (รูป 5e) จะเริ่มเห็นการหลอมตัวของผลึกเฟลด์สปาร์ขนาดใหญ่ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นต่อไปจะพบผลึกของมูลไคต์ที่มีสัณฐานต่างกัน 2 ชนิด คือ ผลึกมูลไคต์ ปฐมภูมิ ซึ่งเกิดขึ้นก่อนแต่มีขนาดเล็ก ทั้งนี้เนื่องจากผลึกนี้เกิดจากการสลายตัวของแร่โอลิไคต์-โอลิไคต์ และเนื่องจากมีปริมาณของเหลวที่ช่วยในการโตของผลึกน้อยผลึกจึงมีขนาดเล็ก ผลึกมูลไคต์ ชนิดที่ 2 มีสัณฐานเป็นรูปแท่งเข็มยาว เรียกว่ามูลไคต์ทุติยภูมิ ซึ่งเกิดขึ้นภายหลังจากการหลอมตัวของเฟลด์สปาร์ และเนื่องจากปริมาณของเหลวที่มีอยู่สูงทำให้ผลึกเกิดการโตเป็นแท่งยาว

เนื้อดิน NM หลังการเผาที่ 900 °ซ. (รูป 6a) มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะของผิวหน้าของอนุภาคดิน ดังเห็นได้จากลักษณะที่ขรุขระและการเปลี่ยนแปลงจะสังเกตเห็นได้ชัดเจนมากขึ้น โดยเห็นเป็นผลึกขนาดเล็กบนพื้นผิวหลังการเผาที่ 1000 °ซ. (รูป 6c) ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่าในช่วงนี้ยังไม่พบการเกิดผลึกมูลไคต์ ดังนั้นลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่เห็นน่าจะเกิดจากการสลายตัวของแร่โอลิไคต์ ซึ่งในช่วงอุณหภูมินี้เป็นการสลายตัวเป็นเฟสสปิเนล (Chen, 2000; Tavornpacnich, 2008) ที่อุณหภูมิ 1000 °ซ. (รูป 6c) จะเริ่มเห็นการหลอมตัวของผลึกเฟลด์สปาร์ขนาดใหญ่และผลึกมูลไคต์เกิดขึ้นบนก้อนผลึก จนกระทั่งที่อุณหภูมิ 1150 °ซ. (รูป 6f) ยังคงเห็นผลึกเฟลด์สปาร์ที่หลอมตัวแต่ยังคงรูปผลึกไว้ ทั้งนี้เนื่องจากความหนืดที่สูงของเฟลด์สปาร์นี้เอง การหลอมและไหลตัวอย่างสมบูรณ์ของเฟลด์สปาร์สามารถสังเกตเห็นได้หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1200 °ซ. (รูป 6g) และสามารถพบผลึกมูลไคต์ทั้งชนิดปฐมภูมิและทุติยภูมิ เช่นเดียวกัน

ผลการทดสอบค่าการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพต่อการแปลงอุณหภูมิในการเผาแสดงในรูปที่ 7 จากผลการทดลองพบว่าเนื้อดิน LM มีค่าการหดตัวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและสูงกว่าเนื้อดิน NM หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1100 °ซ. (รูป 7a) และมีค่าการหดตัวสูงสุดที่อุณหภูมิ 1250 °ซ. เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นเนื้อดินมีการขยายตัวเนื่องจากการดันตัวของฟองอากาศ ซึ่งจากงานวิจัยที่มีมาก่อนหน้าพบว่าฟองอากาศนี้มีผลทำให้ความแข็งแรงของเนื้อดินลดลง (Wattanasiriwech,

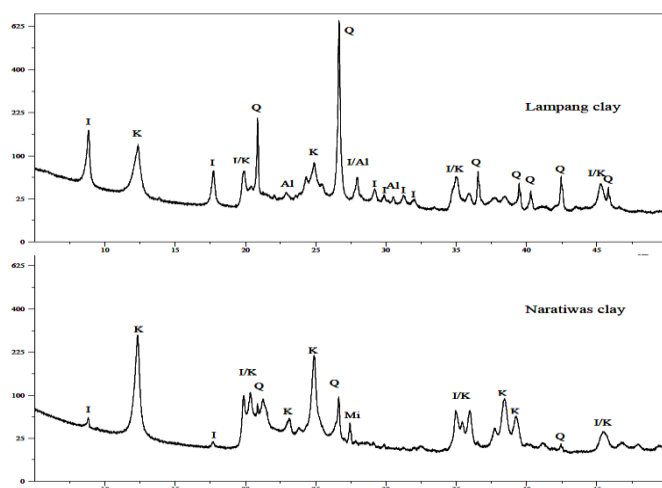
2007) ในเนื้อดิน NM การหดตัวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเช่นกันและสูงสุดที่อุณหภูมิ 1300 °ซ. ก่อนเริ่มมีการขยายตัวเล็กน้อยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิต่อไป ในขณะที่การดูดซึมน้ำของเนื้อดิน LM และ NM แสดงแนวโน้มในทิศทางตรงกันข้าม กล่าว คือ ลดลงอย่างต่อเนื่องและมีค่าต่ำสุดที่อุณหภูมิ 1250 °ซ. และ 1300 °ซ. ตามลำดับ (รูป 7b) การเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นในเนื้อดินทั้งสองพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาเช่นกันและมีค่าสูงสุดเมื่อค่าการหดตัวสูงสุด (รูป 7c) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาพบว่าเนื้อดินทั้งสองมีการพัฒนาค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยในเนื้อดินลำปางมีค่าความแข็งแรงสูงสุดที่อุณหภูมิ 1250 °ซ. และสูงกว่าค่าแข็งแรงสูงสุดของเนื้อดินนราธิวาสหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1300 °ซ. ก่อนที่จะเกิดการลดลงอย่างต่อเนื่องเนื่องจากฟองอากาศที่อยู่ภายในการที่เนื้อดินลำปางสามารถพัฒนาค่าความแข็งแรงขึ้นได้ อย่างมากนี้อาจเนื่องจาก สาเหตุ คือ (a) ปริมาณของแร่ควอตซ์ซึ่งมีเหลืออยู่มากกว่าและเพิ่มความแข็งแรงตามสมมติฐาน (Carty, 1998) (b) การวิตรีฟิเคชันที่เกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์กว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า

ตารางที่ 1 แสดงผลการศึกษาค่าองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิครังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์ของ วัสดุดิบแต่ละชนิดและเนื้อดินพอร์ซเลน

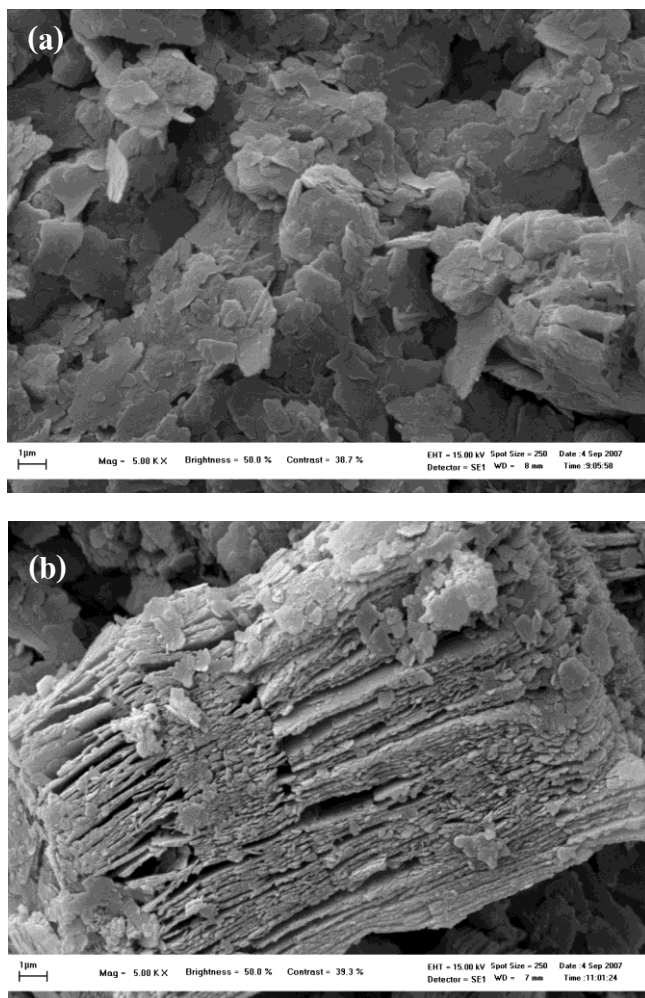
Materials	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	LOI*
Quartz	94.52	3.88	0.04	0.77	0.05	0.13	0.50	0.03	0.08
Feldspar	69.64	17.08	10.87	0.30	0.12	0.94	0.43	0.03	0.59
LP	60.27	27.25	4.05	0.46	0.00	0.16	0.98	0.06	6.28
NR	53.05	33.34	0.83	0.00	0.00	0.04	0.73	0.92	11.08
LM	72.69	16.70	4.69	0.74	0.00	0.31	0.47	0.05	4.36
NM	68.10	20.85	3.26	0.29	0.00	0.28	0.37	0.44	6.40

ตารางที่ 2 แสดงผลการคำนวณเชิงตรรกะเพื่อหาปริมาณแร่ประกอบในดินขาวลำปาง (LP) และดิน ขาวนราธิวาส (NR) โดยประมาณ

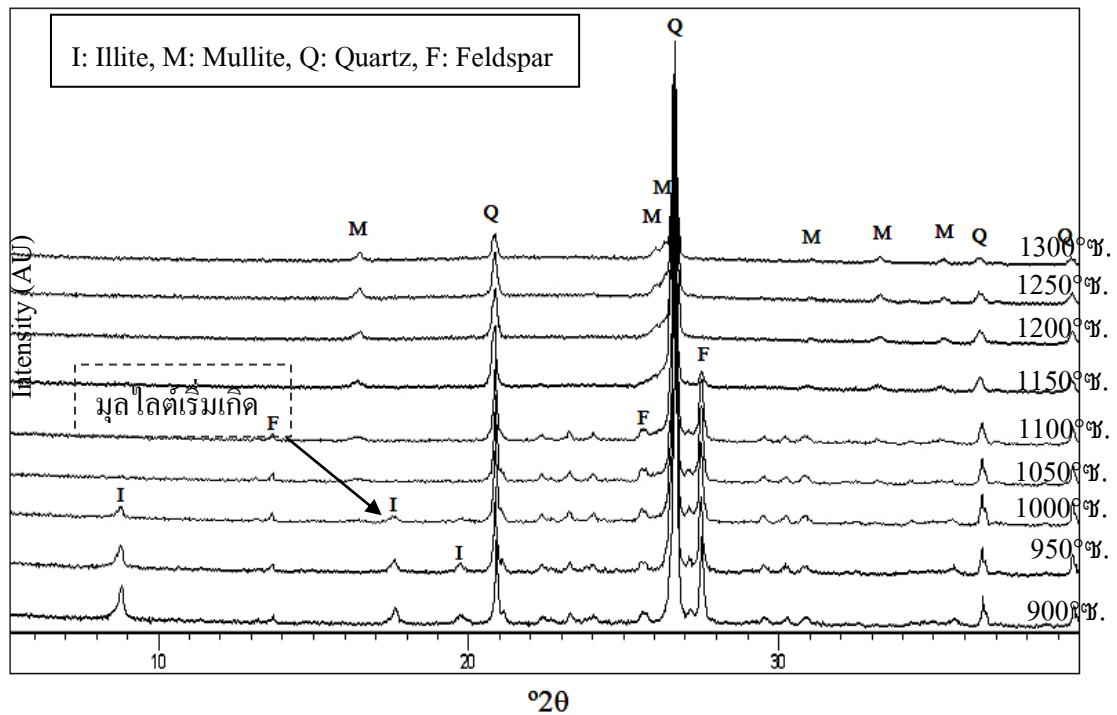
Minerals	LP	NR
Illite	31.08	7.77
kaolinite	39.26	77.29
Quartz	22.72	13.14
Albite	5.25	-
Microcline	-	Trace
Other	1.69	1.80



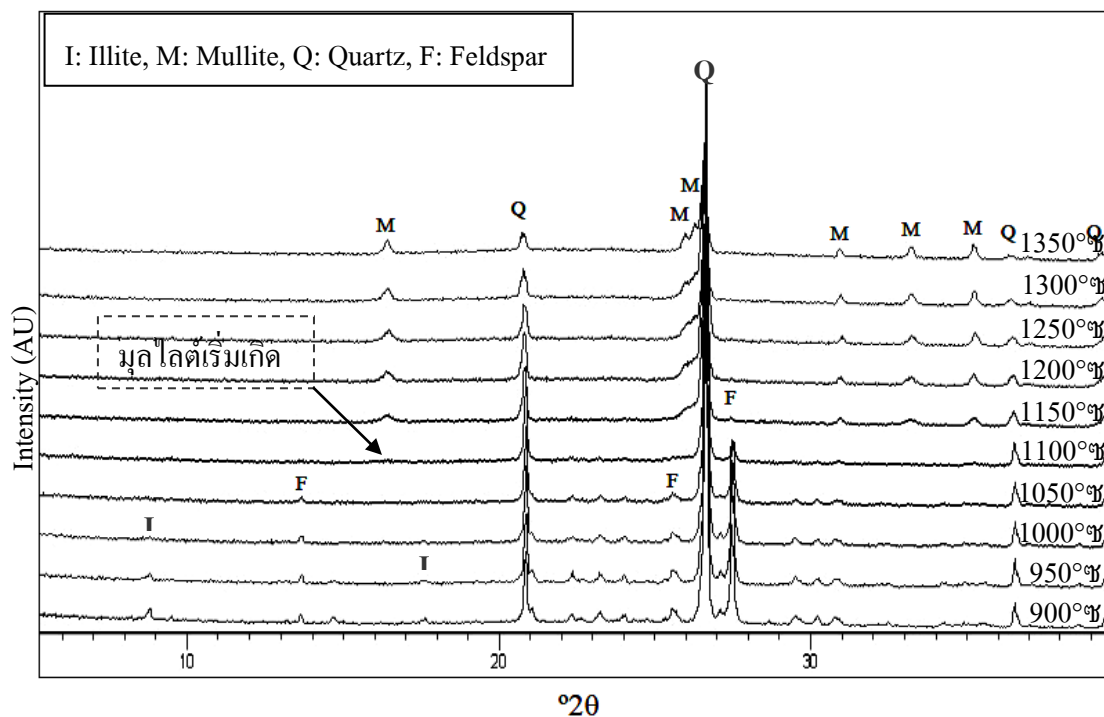
รูปที่ 1 แสดงผลการศึกษารูปแบบทางแร่ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของดินขาวทั้งสองแหล่ง (K: Kaolinite, I: Illite, Mi: Microcline, Al: Albite, Q: Quartz)



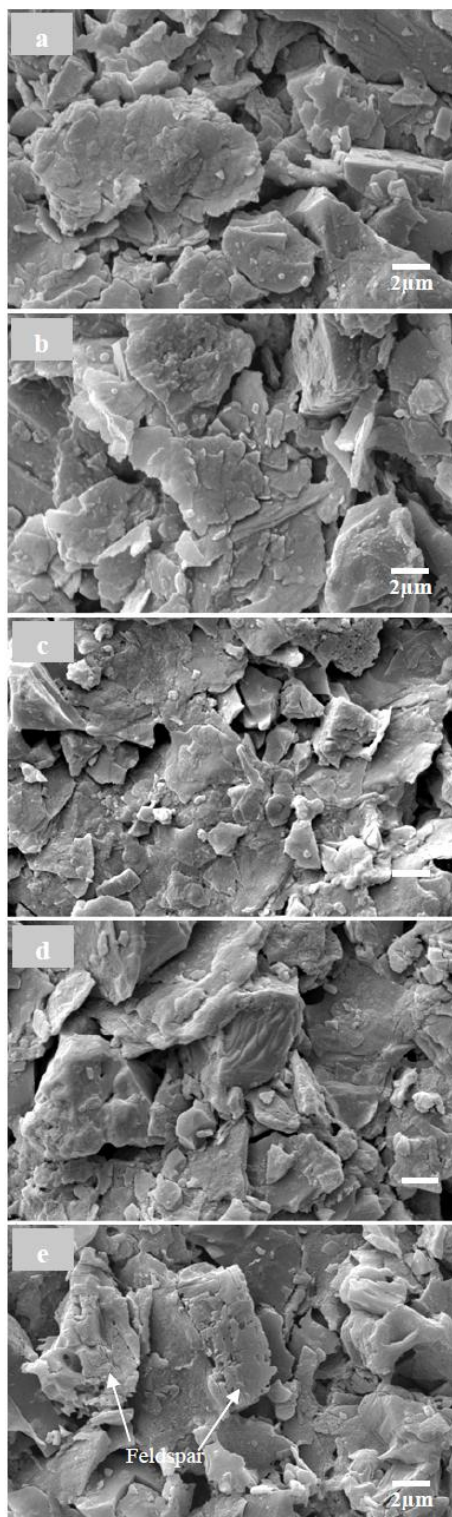
รูปที่ 2 ภาพ SEM แสดงผลึกของดินขาว (a) ลำปาง (b) นราธิวาส



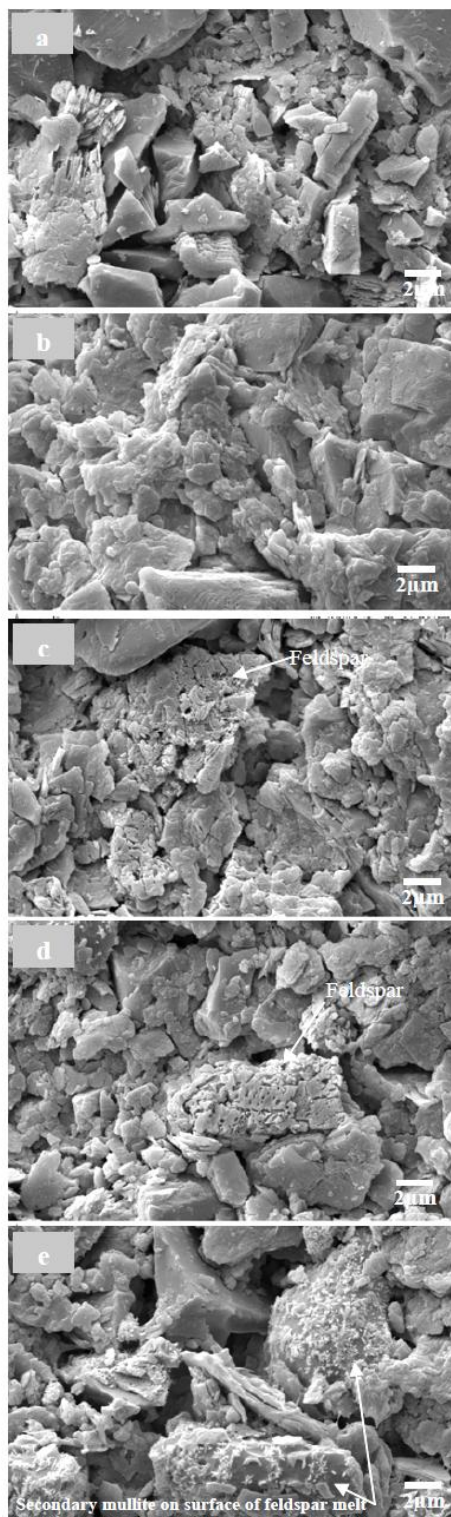
รูปที่ 3 แสดงผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงเฟสของเนื้อดิน LM ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ หลังการเผาที่อุณหภูมิ 900-1300 °ซ. โดยมีช่วงห่าง 50 °ซ.



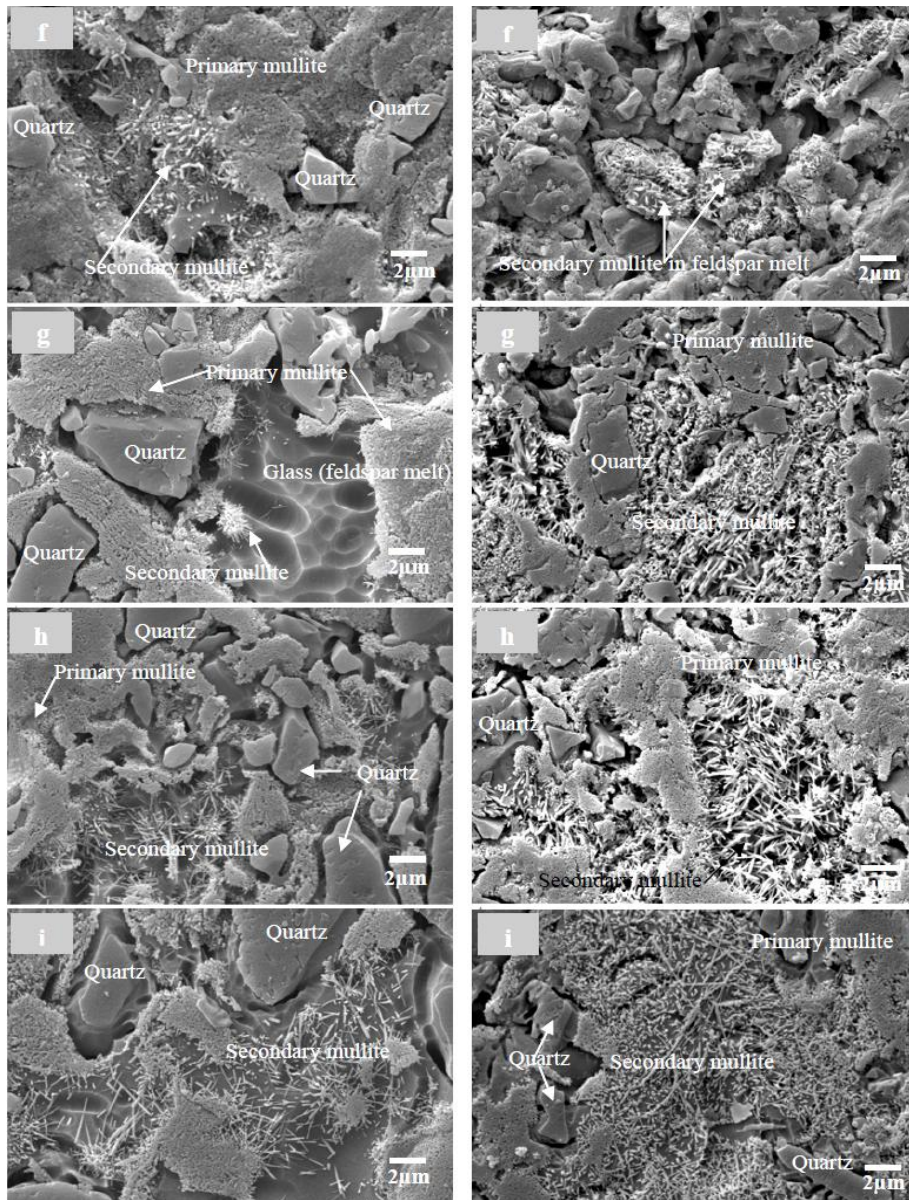
รูปที่ 4 แสดงผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงเฟสของเนื้อดิน NM ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบน รังสีเอ็กซ์ หลังการเผาที่อุณหภูมิ 900-1350 °ซ. โดยมีช่วงห่าง 50 °ซ.



รูปที่ 5 แสดงการเปลี่ยนโครงสร้างทางจุลภาคของเนื้อดิน LM หลังการเผาที่อุณหภูมิ 900-1100 °ซ. โดยมีช่วงห่าง 50 °ซ. (a-e)

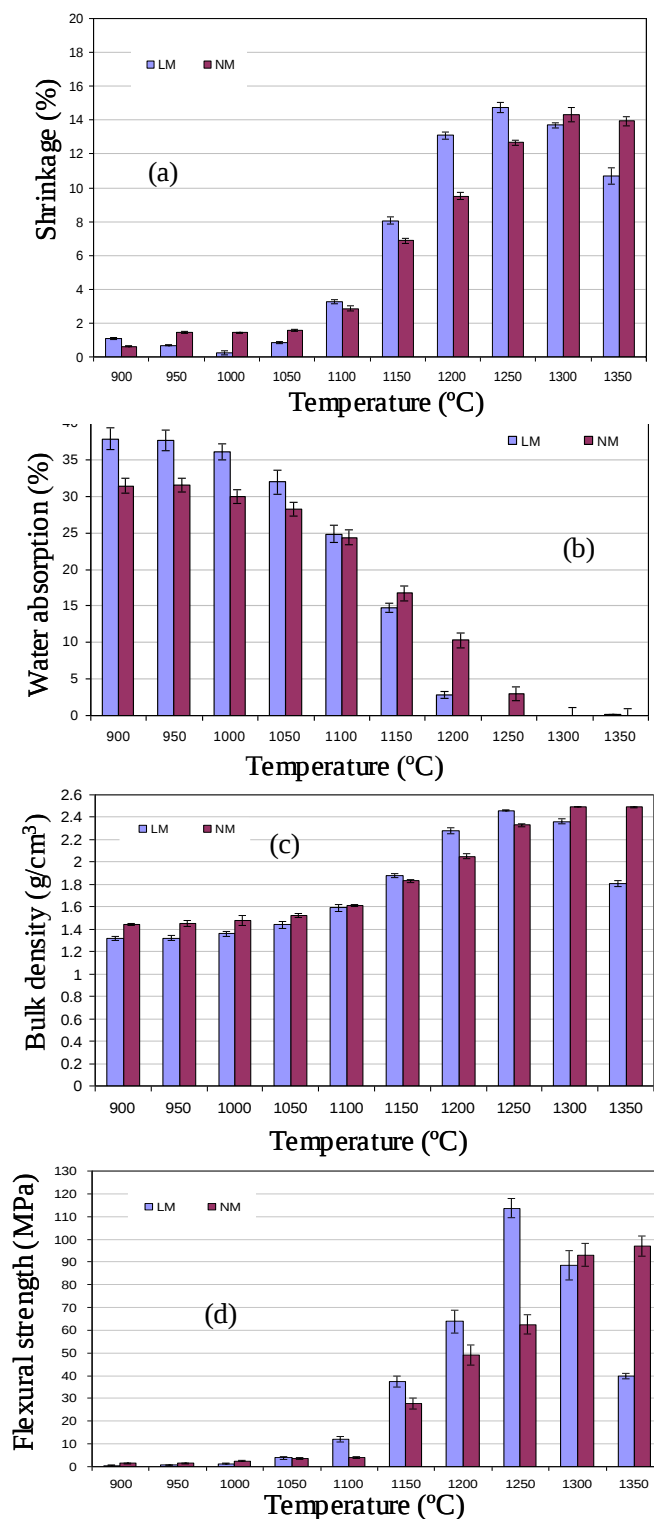


รูปที่ 6 แสดงการเปลี่ยนโครงสร้างทางจุลภาคของเนื้อดิน NM หลังการเผาที่อุณหภูมิ 900-1100 °ซ. โดยมีช่วงห่าง 50 °ซ. (a-e)



รูปที่ 5 แสดงการเปลี่ยนโครงสร้างทางจุลภาคของเนื้อดิน LM หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1150-1300 °ซ. โดยมีช่วงห่าง 50 °ซ. (f-i)

รูปที่ 6 แสดงการเปลี่ยนโครงสร้างทางจุลภาคของเนื้อดิน NM หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1150-1300 °ซ. โดยมีช่วงห่าง 50 °ซ. (f-i)



รูปที่ 7 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าสมบัติทางกายภาพของเนื้อดินพอร์ซเลนเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการเผา (a) การหดตัว (b) การดูดซึมน้ำ (c) ความหนาแน่น (d) ความแข็งแรงเชิงกล

4. อภิปรายและสรุปผลการทดลอง

จากผลงานวิจัยนี้พบว่าดินขาวจากแหล่งลำปางและนราธิวาสซึ่งมีแร่ประกอบต่างกัันนี้ทำให้เนื้อดินเซรามิกชนิดไตรแอกเซียลพอร์ซเลน ซึ่งเตรียมขึ้นโดยใช้ดินขาวทั้งสอง มีการเปลี่ยนแปลงเฟสโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกัน แร่โอลิไต์ที่ประกอบอยู่ในดินขาวลำปางมีบทบาทสำคัญต่อการวิดธิฟิเคชันของเนื้อดินและทำให้เนื้อดิน เกิดการแน่นตัวได้เร็วขึ้นและมีผลต่อการเพิ่มความหนาแน่น ความแข็งแรงของเนื้อดินได้ดีกว่าเนื้อดินนราธิวาสซึ่งมีปริมาณแร่โอลิไต์อยู่ต่ำและมีแร่หลักเพียงแร่เคโอลินในตัวอย่างเดียว

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากโครงการสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทยและงบประมาณแผ่นดิน มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง คณะวิจัยขอขอบคุณอย่างสูง

6. บรรณานุกรม

ดรุณี วัฒนศิริเวช และสุธี วัฒนศิริเวช. (2551). การวิเคราะห์แร่ดิน เกลือบและตำหนิในเซรามิก.

สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์. กรุงเทพฯ.

American Society for Testing and Materials (2002). **Standard terminology of ceramic whiteware and related products**, ASTM, West Conshohocken, PA.

American Society for Testing and Materials (2002). **Standard test method for water absorption, bulk density, apparent density and apparent specific gravity of fired whiteware products**, ASTM, West Conshohocken, PA.

Aras, A., (2004). **The Change of Phase Composition in Kaolinite and Illite-Rich Clay-Base Ceramic Bodies**. *Applied Clay Science*. 24, pp. 257-269.

Carty, W.M., and Senapati, U. (1998). **Porcelain Raw Materials, Processing, Phase Evolution and Mechanical behavior**, *J. Am. Ceram. Soc.* 81, pp. 3-20.

Chen, C. Y., Lan G. S. and Tuan, W. H. (2000). **Microstructural Evolution of Mullite During the Sintering of Kaolin Powder Compacts**, *Ceramics International*, 26, (7), pp.715-720.

Dana, K., Das, S. K., (2004). **Evolution of Microstructure in Fly Ash Containing Porcelain body on Heating at Different Temperatures**. *Bull. Mater. Sci.* 27(2), pp. 183-188.

Deer, W.A., Howie, R.A., Zussman, M.A. (1963). **Rock Forming Minerals**, volume 3 Sheet Silicate, Longmans, UK.

- Griffiths, R. and Radford, C. (1965). ***Calculations in Ceramics***, Livesey LTD., UK. Iqbal, Y., and Lee, W.E. (1999). Fired Porcelain Microstructures Revisited. *J. Am. Ceram. Soc.* 82(12), pp. 3584-3590.
- Kingery, W.D., Bowen, H.K., Uhlman, D.R., (1991). 2nd ed. *Introduction to Ceramics*. John Wiley & Sons, Singapore.
- Lee, W.E., Iqbal, Y. (2001). **Influence of Mixing on Mullite Formation in Porcelain**. *J. Euro. Ceram. Soc.* 21, pp. 2583-2586.
- Saengthong, C. (2010). **Characterisation of Lampang and Narathiwat China Clay**, paper presented in the *Pure and Applied Chemistry International Conference*, Ubon Ratchathani University, Thailand.
- Tarvornpanich, T. Souza, G. P., Lee, W. E. (2008). **Microstructural Evolution in Clay-Based Ceramics I: Single Components and Binary Mixtures of Clay, Flux, and Quartz Filler**, *American Ceramics Society*, 91(7), pp. 2264-2271.
- Wattanasiriwech D, Sangtong, C., Wattanasiriwech S. (2007). **Characterisation of Vieng Kalong Clays and Relation Between Physical Properties and Bloating**, *Science Asia*, 33, pp.125-130.
- Wattanasiriwech, D., Srijan, K., Wattanasiriwech S. (2009). **Vitrification of illitic clay from Malaysia**, *Applied Clay Science*, 43 (1), 57-62.