b 14491

รายงานการวิจัย

การศึกษาและปรับปรุงคุณสมบัติของเนื้อดินเซรามิก จากแหล่งดินเวียงกาหลง

(Studies and Modifications of Clays from Wieng Ka Long)

โดย
อ. ดร. ดรุณี วัฒนศิริเวช มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง
อ. ดร. สุธี วัฒนศิริเวช มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง
อ. ดร. อภินนท์ นันทิยา มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณรายจ่ายประจำปี 2546
มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง

บทคัดย่อ

คณะวิจัยได้คัดเลือกดินจาก 3 แหล่งในตำบลเวียงกาหลง อ. เวียงป่าเป้า จ. เชียงราย โดยใช้รหัสย่อคือ ดิน BTC, BRC และ BHC เพื่อมาทำการวิเคราะห์ทดสอบศึกษาลักษณะเฉพาะ เช่น ทดสอบความเป็นพลาสติกเมื่อผสมน้ำปริมาณต่างๆกัน การศึกษากระแสวิทยาของน้ำดิน เช่นความหนืด ทิกโซโทรปีที่ pH ต่างๆ กัน การสลายตัวเชิงความร้อนโดยใช้เทคนิค TGA/SDTA วิเคราะห์ขนาดอนุภาคโดยใช้การร่อนผ่านตะแกรง ศึกษาองค์ประกอบทางแร่โดยใช้เทคนิค XRD ควบคู่กับเทคนิค XRF ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนชนิดส่องกราด รวมถึงศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพหลังการเผา เช่น สี ค่าการแอ่นตัว การหดตัว ความพรุนตัว และความแข็งแรงเชิงกล ซึ่งจากการทดลองพบว่าดินแต่ละแหล่งมีลักษณะโดยทั่วไปดังนี้

ดิน BTC เป็นดินที่มีสีดำและมักจะมีกรวดขนาดค่อนข้างใหญ่ปะปนอยู่ แต่มีปริมาณของควอทซ์น้อยกว่าดินอื่นๆ คือมีประมาณ 28 เปอร์เซ็นต์ มีขนาดอนุภาคเล็กจึงมีความเป็นพลาสติกสูงแต่มีพื้นที่ผิวมากและมีค่า Plastic viscosity และปริมาณสารอินทรีย์สูงกว่าดินอีก 2 ตัวอย่าง นอกจากนี้ยังมีแร่มัสโคไวท์และซานิดีนปะปนอยู่เป็นปริมาณมาก (ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์) และมีลักษณะเป็นก้อนขนาดใหญ่จึงมักทำให้เกิดปัญหาของตำหนิประเภทเนื้อดินปูดพองเป็นตุ่มเล็กๆ หลังการเผาที่แกร่ง ปัญหานี้สามารถแก้ไขโดยการบดดินให้มีขนาดเล็กลงและมีความสม่ำเสมอกว่าเดิม เมื่ออยู่ในสภาพน้ำดิน ดินแหล่งนี้ไม่แสดงพฤติกรรมแบบทิกโซโทรปีแต่จะแสดงพฤติกรรมแบบรีโอเปกซีในทุกช่วง pH ที่ปริมาณของของแข็งในสารแขวนลอย 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่า ดิน BTC และดิน BRC จะมีค่าความหนืดลดลงเมื่อมีสภาวะความเป็นเบสมากขึ้น เมื่อทำการขึ้นรูปเป็นแท่งทดสอบโดยการเทหล่อ หลังการเผาที่ 1250 องศาเซลเซียสมีการหดตัวสูง (ประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์) แต่มีการดูดซึมน้ำต่ำ (ประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์) มีค่าการแอ่นตัวสูง (ประมาณ 3-4 ม.ม.) และมีค่าความแข็งแรงเชิงกล (Bending strength) ประมาณ 200 kg/cm^2 มีสีขาวอมเหลือง ดินทั้งสามมีลักษณะการสลายตัวทางความร้อนคล้ายคลึงกันคือมีการเสียมวลประมาณ 4-8 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงอุณหภูมิ 300-650 องศาเซลเซียส

ดิน BRC เป็นดินที่มีสีเทาและมีลักษณะสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน มีปริมาณของควอทซ์มากกว่าดินอื่นๆ คือมีประมาณ 52 เปอร์เซ็นต์ มีความเป็นพลาสติกต่ำกว่าดินอื่น และแสดงพฤติกรรมแบบทิกโซโทรปีโดยที่ค่าทิกโซโทรปีจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของของแข็งในสารแขวนลอยและเมื่อ pH ลดลง เนื่องจากเกิดการรวมกันของอนุภาคแบบ Edge-Face ซึ่งทำให้เกิดโครงสร้างแบบ cardhouse เมื่อทำการขึ้นรูปเป็นแท่งทดสอบโดยการเทหล่อ หลังการเผาที่ 1250 องศาเซลเซียส จะมีการหดตัวน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งดินอื่น (ประมาณ 8 เปอร์เซ็นต์) แต่มีค่าการดูดซึมน้ำสูง (ประมาณ 8 เปอร์เซ็นต์) มีค่าการแอ่นตัวต่ำ (ประมาณ 1 ม.ม.) แสดงให้

เห็นลักษณะการทนไฟ และมีค่าความแข็งแรงเชิงกลสูงที่สุดในกลุ่ม โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 240 kg/cm^2 มีสีขาวอมเหลือง

ดิน BHC เป็นดินที่มีสีน้ำตาลและมีลักษณะสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน มีปริมาณของควอทซ์ปานกลาง คือมีประมาณ 34 เปอร์เซ็นต์ มีความเป็นพลาสติกดี เมื่อทำการขึ้นรูปเป็นแท่งทดสอบโดยการเทหล่อ หลังการเผาที่ 1250 องศาเซลเซียสมีการหดตัวประมาณ 9 เปอร์เซ็นต์ แต่มีการดูดซึมน้ำ ประมาณ 6 เปอร์เซ็นต์ มีค่าการแอ่นตัวประมาณ 2 ม.ม. และมีค่าความแข็งแรงเชิงกลประมาณ 213 kg/cm^2 มีสีขาวอมเหลือง

จากการศึกษาทำให้ทราบว่าดินจากทั้ง 3 แหล่งมีองค์ประกอบทางเคมี สมบัติและลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกันไป ดังนั้นการนำมาใช้งานจึงต้องมีกระบวนการในการเตรียมและการปรับปรุงสมบัติของดินที่แตกต่างกัน รวมทั้งอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาต้องเลือกให้เหมาะสมเนื่องจากดินทั้ง 3 แหล่งมีความทนไฟแตกต่างกัน

กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง จ. เชียงราย โดยเฉพาะอย่างยิ่งคณะกรรมการส่งเสริมและพัฒนาการวิจัยสำหรับการสนับสนุนทุนวิจัย ขอขอบคุณเจ้าหน้าจากฝ่ายบริการงานวิจัยที่ช่วยอำนวยความสะดวกและประสานงานด้านทุนวิจัย และขอขอบคุณ คุณเกียรติพงษ์ ได้การ เจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง และคุณนงคราญ ไชยวงศ์ เจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในการอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ นอกจากนี้ยังขอขอบคุณนายเชี่ยวชาญ แสงทอง นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาสาขาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเซรามิก มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง และนาย สิทธิศักดิ์ ประสานพันธ์ นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในการช่วยเก็บตัวอย่างดินและดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้สำเร็จลงได้ด้วยดีเนื่องจากความอนุเคราะห์ตัวอย่างดินจาก คุณสุรัตน์ วังเวียงกาหลง และกลุ่มเวียงกาหลงเซรามิก วิสาหกิจชุมชนกองงานอุดมธรรม ทางคณะวิจัยต้องขอขอบคุณอย่างสูงมา ณ ที่นี้

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	i
บทคัดย่อ	ii
สารบัญ	iv
บทที่ 1 คำนำ	1
บทที่ 2 ทบทวนเอกสาร	
2.1 วัตถุดิบสำหรับการเตรียมเซรามิก	3
2.2 การเตรียมเนื้อดินเซรามิก	9
2.3 การศึกษาลักษณะเฉพาะของดินและสมบัติอื่นๆ	14
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย	
3.1 การเตรียมดิน	27
3.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของดิน และการสลายตัวเชิงความร้อน	27
3.3 การหาขนาดอนุภาคของเนื้อดินโดยวิธีผ่านตะแกรงร่อน	27
3.4 การทดสอบความเป็นพลาสติก	28
3.5 การขึ้นรูปเซรามิก การอบแห้งและการเผาและการทดสอบ สมบัติหลังการเผา	28
3.6 การศึกษาสมบัติคอลลอยด์และการไหลตัวของน้ำดิน	30
บทที่ 4 ผลการทดลองตอนที่ 1 และการอภิปรายผลการทดลอง	32
4.1 ลักษณะทางกายภาพของดินและกากค้างตะแกรง	32
4.2 ผลการวิเคราะห์ทดสอบทางเคมีทางแร่และทางความร้อน	33
4.3 การทดสอบทางกายภาพ	39
4.4 การศึกษาตำหนิที่เกิดขึ้นหลังการเผา	44
บทที่ 5 ผลการทดลองตอนที่ 2 และการอภิปรายผลการทดลอง	
5.1 ผลของเปอร์เซ็นต์ค้างตะแกรงของดิน BTC และดิน BRC	47
5.2 ผลของปริมาณสารอินทรีย์และ pH	47
5.3 ผลของการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและปริมาณรูพรุน	48
5.4. ผลของการวัดพฤติกรรมการไหลของน้ำดิน	51
5.5 ผลการทดลองหล่อแบบ	56
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง	58
เอกสารอ้างอิง	59

บทที่ 1
คำนำ

ในภาคเหนือตอนบนมีแหล่งของวัตถุดิบสำคัญในการผลิตเซรามิกอยู่หลายแห่ง หนึ่งในจำนวนนั้นคือแหล่งดินเวียงกาหลง ในอำเภอเวียงป่าเป้า จังหวัดเชียงราย หมู่บ้านเวียงกาหลงเป็นบริเวณที่มีการค้นพบหลักฐานทางประวัติศาสตร์อันได้แก่ซากเตาโบราณและเครื่องถ้วยโบราณทั้งที่สมบูรณ์และเศษที่แตกหักเสียหาย ทำให้ทราบว่าประมาณช่วงพุทธศตวรรษที่ 21 บริเวณนี้เป็นแหล่งผลิตเครื่องถ้วยเวียงกาหลง [สุมิตร 2544] ซึ่งมีลักษณะพิเศษคือเป็นเครื่องถ้วยที่มีน้ำหนักเบา เพราะมีเนื้อผลิตภัณฑ์ที่บางกว่าเครื่องถ้วยที่ผลิตจากแหล่งเตาอื่น มีการเอนโกบด้วยน้ำดินสีขาวลงบนผิวผลิตภัณฑ์ก่อนเขียนลาย ลวดลายตกแต่งบนผิวมีสีดำหรือสีน้ำตาลเข้ม สีของเคลือบมีความหลากหลายเช่น เคลือบใส เคลือบเขียวเซลาดล เคลือบสีน้ำตาลเข้ม รูปทรงที่พบได้แก่ จาน แจกัน และโถมีฝา ก้นไม่เคลือบ ตัวจานมักจะตกแต่งด้วยลายกลีบบัว ภายในจานมักจะเขียนลายกาหรือลายดอกไม้ต่าง ๆ [มัลลิกา 2546]

จากการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นพบว่าในปัจจุบันหลายชุมชนในหมู่บ้านเวียงกาหลงได้พยายามฟื้นฟูการผลิตเครื่องถ้วยเวียงกาหลง เพื่อเป็นการสร้างอาชีพและรายได้ให้กับสมาชิกในชุมชนและเพื่อเผยแพร่ศิลปะของบรรพบุรุษให้สืบทอดต่อไป โดยใช้วัตถุดิบในการผลิตจากในท้องถิ่นเสียเป็นส่วนใหญ่ ชุมชนเหล่านี้ได้รับการสนับสนุนจากศูนย์พัฒนาเครื่องเคลือบดินเผา จังหวัดลำปาง ในรูปแบบของการฝึกอบรม เช่น การพัฒนาเทคนิคการเคลือบ การเผา และเทคนิคการขึ้นรูปด้วยแป้นหมุน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องเคลือบดินเผาเวียงกาหลงให้มีรูปแบบใกล้เคียงของเดิมมากที่สุด

แม้การผลิตเครื่องเคลือบดินเผาเวียงกาหลงโดยกลุ่มต่างๆ ได้มีการพัฒนารูปแบบจนเริ่มเป็นที่รู้จักแล้วก็ตาม แต่จากการสำรวจพบว่า ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตขึ้นโดยช่างปัจจุบันยังมีความแตกต่างจากตัวอย่างเครื่องถ้วยเวียงกาหลงแบบดั้งเดิม เช่น เนื้อผลิตภัณฑ์ที่ทำขึ้นในปัจจุบันยังหนากว่าเครื่องถ้วยเวียงกาหลงโบราณอยู่มาก ทำให้ผลิตภัณฑ์มีน้ำหนักมาก ผลิตภัณฑ์บางชิ้นยังไม่สุกตัว แต่ผลิตภัณฑ์บางชิ้นก็ยุบตัวและบิดเบี้ยว ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากสมบัติของดินที่แตกต่างกันในแต่ละแหล่งและเทคนิคการขึ้นรูป ตลอดจนอุณหภูมิในการเผายังไม่เหมาะสมเป็นต้น

การศึกษาวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาลักษณะเฉพาะและสมบัติของแหล่งดินในตำบลเวียงกาหลง ซึ่งปัจจุบันมีการนำมาใช้เพื่อผลิตเซรามิกในลักษณะการเลียนแบบเซรามิกเวียงกาหลงแบบดั้งเดิม ตลอดจนการวิเคราะห์ทดสอบลักษณะทางจุลภาค องค์ประกอบของดิน ลักษณะทางกระแสวิทยา การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเมื่อให้ความร้อน เพื่อเป็นข้อมูลที่นำไปสู่ความรู้ความเข้าใจในเชิงวิทยาศาสตร์ของการขึ้นรูป การเผา และการทำผลิตภัณฑ์ เพื่อให้การพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องเคลือบดินเผาเวียงกาหลงเป็นไปอย่างยั่งยืน

บทที่ 2
ทบทวนเอกสาร

2.1 วัตถุดิบสำหรับการเตรียมเซรามิก

วัตถุดิบที่ใช้งานเซรามิกโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ใหญ่ๆ คือ

1. วัตถุดิบประเภทมีความเหนียว (Plastic raw materials) เช่น ดินต่างๆ ดินเหนียว และดินขาว เป็นต้น

2. วัตถุดิบประเภทที่ไม่มีความเหนียว (Non-plastic raw material) เช่นควอทซ์ เฟลด์สปาร์ อลูมินา เป็นต้น

ดินและแร่ดิน

ดินและแร่ดินจัดว่าเป็นทรัพยากรที่สำคัญ และมีการนำมาใช้ประโยชน์มากมายหลายด้าน เช่นในด้านเกษตรกรรม สิ่งแวดล้อม ด้านวิศวกรรมและอุตสาหกรรม [Murray 2000] อุตสาหกรรมที่มีการนำดินและแร่ดินไปใช้ประโยชน์มากอุตสาหกรรมหนึ่งคืออุตสาหกรรมเซรามิก โดยเฉพาะการผลิตเครื่องถ้วยชาม กระเบื้อง เครื่องประดับตบแต่ง สุขภัณฑ์ และอื่น ๆ อีกมากมาย การวิจัยและพัฒนาดินและแร่ดินได้มีการทำมาอย่างต่อเนื่องทั้งจากภาครัฐบาลและเอกชน อันนำมาสู่การพัฒนาการประยุกต์ใช้ดินและแร่ดินได้แพร่หลายกว้างขวางมากขึ้น เช่นใช้ในในอุตสาหกรรมกระดาษ การคอมโพสิตกับพอลิเมอร์อุตสาหรรมเครื่องสำอางและยาเป็นต้น [Carretero 2002]

ดินที่เราเรียกกันนั้นก็คือ Kaolinite ($Ai_2O_3.2SiO_2.2H_2O$) ซึ่งเป็นสารประกอบ Hydrous alumino silicate เกิดจากการสลายตัวและผุผังของหิน Granite หินฟันม้า และ Igneous rock ซึ่งพวก Alkaline จะถูกชะล้างออกไปคงเหลือแต่ Quartz , Mica และดิน สิ่งที่จะช่วยให้เกิดการผุผังของหิน ได้แก่ น้ำ ลม และการเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติ ดังสมการ

$$KNaO.Al_2O_3.6SiO_2.2H_2O + CO_2 \longrightarrow Al_2O_3.2SiO_2.2H_2O + KNaCO_3 + 4SiO_2$$

การเกิดของดินมี 2 ช่วง ในช่วงแรก หิน Granite ที่ผุผังแล้วจะทับถมอยู่ที่แหล่งดินเดิมซึ่งเรียกว่า Primary clay หรือ Residual clay ดินพวกนี้ค่อนค้างบริสุทธิ์และขาว แต่ความละเอียดจะน้อย ส่วนดินอีกประเภทที่เกิดในช่วงที่สอง เกิดจากการพัดพาของลมและกระแสน้ำเคลื่อนย้ายออกไปจากแหล่งหินที่ผุพังเดิมและทับถมกันเป็นชั้นๆ จะมีลักษณะเป็นเม็ดละเอียดและเหนียวพร้อมกับมีสารอินทรีย์ สารเจือปน ซึ่งเรียกว่า Secondary clay หรือ Transported clay หรือ Sedimentary clay โดยลักษณะต่างๆของดินทั้ง 2 ประเภทพิจารณาได้จากตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบ Primary clay กับ Secondary clay

ลักษณะที่พบ	Primary clay	Secondary clay
ความขาว	ขาวกว่า	ขาวน้อยกว่า
สิ่งเจือปน	Quartz ,Mica ,แร่	สารอินทรีย์และแร่ธาตุอื่นๆ
ขนาด	หยาบกว่า	ละเอียดกว่า
ความเหนียว	น้อยกว่า	มากกว่า
ความแข็งเมื่อแห้ง	น้อยกว่า	แข็งกว่า
การหดตัวเมื่อแห้ง	น้อยกว่า	มากกว่า

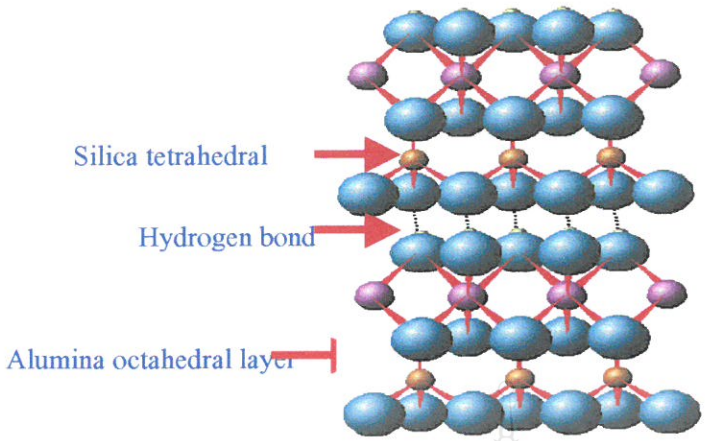
2.1.1 ดินขาวหรือดินเกาลิน (Kaolin)

ดินขาว (Kaolin ,China clay) : เป็นดินที่เกิดในช่วงแรก (Primary clay) คำว่า Kaolin สันนิษฐานมาจากคำในภาษาจีนว่า "Kao-ling" ซึ่งหมายถึง "สันเขาสูง"

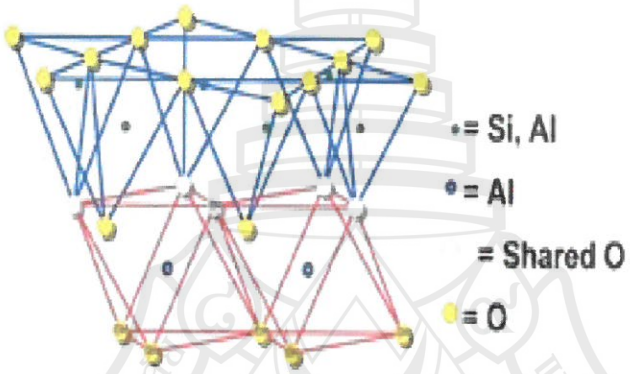
ดินขาว (Kaolin ,China clay) หมายถึง ดินที่มีสีขาวหรือสีซีดจาง ทั้งในสภาพที่ยังไม่ได้เผาและเผาแล้ว ดินขาวมีส่วนประกอบส่วนใหญ่เป็นแร่ดินกลุ่ม Kaolinite และมีความสัมพันธ์กับมัสโควท์ ไมกา อิลไลท์ ควอตซ์ และอาจมีมอนต์มอริลโลไนท์ ดินเกาลินถือว่าเป็นวัตถุดิบที่เป็นหลักสำคัญที่ให้โครงสร้างของของดินปั้น เมื่อเผาแล้วจะเกิด Mullite สร้างความแข็งแรงให้กับผลิตภัณฑ์ ดินเกาลินถือว่าเป็นแร่ชนิดหนึ่ง (Clay mineral) ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติประกอบด้วยผลึกเล็กๆ ของแร่ Kaolinite มีสูตรเคมีเป็น $Al_2O_3.2SiO_2.2H_2O$ ส่วนประกอบทางเคมีจะประกอบไปด้วย ซิลิกา 46% อะลูมินา 40% และน้ำ 14% นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยแร่ที่เป็นพวก ไฮดรัส อลูมินัส ซิลิเกต (Hydous aluminous silicate) และสารประกอบอัลคาไลน์ เหล็กออกไซด์ เฟลสปาร์ ฟลูออไรด์ รวมทั้งมีสารประกอบของติเตเนียมและควอทซ์เม็ดเล็กๆปนอยู่ด้วยเสมอ ดินเกาลินเมื่อบริสุทธ์จะมีสีขาว แต่เมื่อมีสิ่งสกปรกเจือปนอยู่ก็อาจจะมีสีต่างๆได้ เช่น สีเหลือง น้ำตาล และแดง ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับปริมาณสิ่งสกปรกที่เจือปนอยู่ในดิน ดินเกาลินจะมีความเหนียวต่ำ (Low plasticity) และมีความทนไฟสูง (Refractoriness 1750 – 1770 ^{0}C) โดยจะแสดงโครงสร้างของ Kaolinite ดังรูปที่ 2.1-2.2 ดินขาวที่พบโดยทั่วไป จะมีอยู่ 2 แหล่ง คือ

1. ดินขาวแหล่งกำเนิด (Residual kaolin) จะพบตกค้างอยู่ในหิน Pegmatite ส่วนใหญ่ประกอบไปด้วย หินฟันม้า (Feldspar) และ ควอทซ์ (Quart)

2.ดินขาวตกตะกอน (Sedimentary kaolin) ประกอบไปด้วยอนุภาคของดินที่ถูกพัดพา (Transport) มาจากแหล่งกำเนิด เช่น อาจถูกพามาด้วยกระแสน้ำแล้วตกตะกอนในที่ที่มีน้ำนิ่ง



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของ Kaolinite



รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างสามมิติของ Kaolinite

กระบวนการเกิดดินขาว มีขั้นตอนดังนี้

1. $K_2O.Al_2O_3.6SiO_2 + H_2O \xrightarrow{\text{Hydrolysis}} Al_2O_3.6SiO_2.H_2O + 2KOH$

   Feldspar

2. $Al_2O_3.6SiO_2.H_2O \xrightarrow{\text{Desilication}} Al_2O_3.4SiO_2.H_2O + 2SiO_2$

3. $Al_2O_3.6SiO_2.H_2O \xrightarrow{\text{Desilication}} Al_2O_3.2SiO_2.H_2O + 4SiO_2$

   Kaolinite

4. $Al_2O_3.2SiO_2.H_2O + H_2O \xrightarrow{\text{Hydration}} Al_2O_3.2SiO_2.2H_2O$

   Diaspore

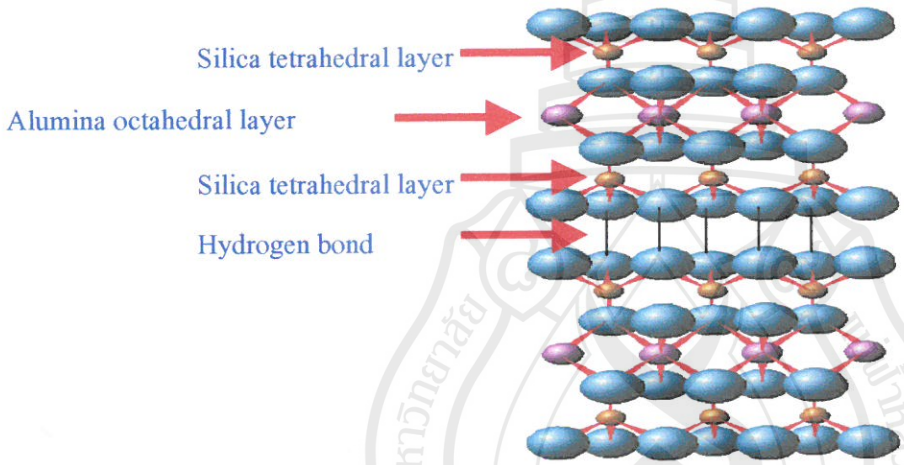
5. $Al_2O_3.2SiO_2.2H_2O \xrightarrow{\text{Desilication}} Al_2O_3.H_2O + 2SiO_2$

   Gibbsite

6. $Al_2O_3.H_2O + 2H_2O \xrightarrow{\text{Hydration}} Al_2O_3.3H_2O$

2.1.2 ดินเหนียว (Ball Clay)

ดินเหนียวเป็นดินที่เกิดจากการตกตะกอนทับถมกันของดินขาวเกาลิน และมีแร่อื่นๆปะปนอยู่ด้วยเช่นไมก้า และควอทซ์ โดยมีเปอร์เซ็นต์ในช่วงดังต่อไปนี้ แร่ดิน (kaolinite) 20-80% ไมก้า/อิลไลต์ 10-25% และควอทซ์ 6-65% และอาจจะมีแร่อื่นๆปะปนอยู่อีกเล็กน้อย สารอินทรีย์ที่พบในดินดำ ได้แก่ Humus Hydro- carbon Cellulose และ lignin เกลือต่างๆ (Soluble salts) เกลือที่พบในดินดำได้แก่ เกลือซัลเฟต (Sulphate) และเกลือคลอไรด์ (Chloride) ของ Al, Fe, Ca, K และ Na เป็นต้น เนื่องจากปริมาณแร่ธาตุที่แตกต่างกันทำให้ดินเหนียวในแต่ละแหล่งมีสมบัติและสีแตกต่างกันออกไปด้วยแต่โดยทั่วไปจะเป็นดินที่มีขนาดอนุภาคเล็กว่าดินขาว มีความเป็นพลาสติกสูง การหดตัวและความแข็งแรงเชิงกลสูงเนื่องจากมีแร่ที่ปะปนอยู่ได้หลากหลายชนิดดินเหนียวจึงมีได้หลากสีเช่นกัน โดยทั่วไปดินเหนียวเพียงอย่างเดียวสามารถนำมาใช้ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้ นอกจากนี้ยังมักจะนำมาใช้ร่วมกับดินขาวเพื่อทำเนื้อดินอื่นเช่นเนื้อดินพอร์ซเลนอีกด้วย



รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างของ Ball clay

สมบัติทางกายภาพของดินดำ (Physical property of ball clay)

1. ขนาดของเม็ดดิน (Particle size) ดินดำจะมีขนาดเม็ดดินที่ละเอียดกว่าดินขาว เพราะถูกบดย่อยตามธรรมชาติมานาน

2. ความเหนียวของดิน (Plasticity) ดินดำจะมีความเหนียวมากกว่าดินขาว เหมาะที่จะผสมกับวัตถุดิบอื่นๆ เพื่อเป็นเนื้อดินปั้นผลิตภัณฑ์ประเภทต่างๆ

3. การหดตัวเมื่อแห้ง (Drying shrinkage) ดินดำโดยทั่วไปจะมีการหดตัวเมื่อแห้งมาก แต่บางแห่งจะมีการหดตัวน้อย ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณซิลิกา (SiO_2) ที่เจือปนในดิน ถ้าซิลิกาในเนื้อดินมากมากจะหดตัวน้อย แต่ถ้าในเนื้อดินมีสารอินทรีย์สูงจะหดตัวมากถึง 15 %

4. ความแข็งแรงเมื่อแห้ง (Green strength) ดินดำจะมีความแข็งแรงเมื่อแห้งมากกกว่าดินขาวเพราะมีความเหนียวและขนาดอนุภาคเล็กกว่าจึงนิยมใช้ผสมกับเนื้อดินชนิดอื่นๆ เพื่อให้ทรงรูปอยู่ได้ ไม่เปราะ โดยเฉลี่ยความแข็งแรงเมื่อแห้งของดินดำควรอยู่ในระหว่าง 160-180 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

5. สมบัติหลังเผา (Fired properties) ดินดำเป็นวัตถุดิบที่มีสมบัติพิเศษ คือ เมื่อยังไม่เผาจะปรากฏสีดำหรือสีเทา แต่หลังจากเผาที่อุณหภูมิสูงจะปรากฏสีขาวหรือสีครีม การที่ดินดำจะปรากฏสีขาวมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับปริมาณธาตุเหล็กในเนื้อดินดำด้วย

ประโยชน์ของดินดำในอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา

1. เพื่อเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปของเนื้อดินปั้นให้ดีขึ้น

2. พัฒนาผลิตภัณฑ์ก่อนเผาให้มีความแข็งแรงมากขึ้น ซึ่งทำให้การสูญเสียเนื่องจากการแตกหักของผลิตภัณฑ์ที่ยังไม่ได้เผาในขณะที่มีการเคลื่อนย้ายลดลง

3. ช่วยให้เนื้อดินผสมกระจายตัวได้ดีในน้ำ

4. ดินดำบางชนิดมีความสามารถช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างมวลสาร ในเนื้อดินปั้นขณะทำการเผา เป็นผลทำให้ผลิตภัณฑ์มีเนื้อแน่น เป็นเนื้อเดียวกันตลอด

2.1.3 **ควอทซ์**

ควอทซ์ มีสูตรเคมีคือ SiO_2เป็นแร่ที่มักจะพบปะปนอยู่ในดินเสมอ การที่ดินมีควอทซ์ปะปนอยู่เป็นจำนวนมากจะทำให้มีการขยายตัวเชิงความร้อนสูงเนื่องจากการขยายตัวจากการที่ควอทซ์เปลี่ยนสัณฐานจากแอลฟา (α quartz)เป็นเบต้า (β quartz) ที่อุณหภูมิ 573 องศาเซลเซียส และจากเบต้า เป็นทริดิไมท์ที่อุณหภูมิสูง [Lawrence 1972] การเติมควอทซ์ลงไปในเนื้อดินจะช่วยเป็นตัวเติม (Filler) เพื่อช่วยลดการแตกร้าวในระหว่างการอบแห้งและช่วยลดการบิดเบี้ยวเสียรูปทรงของผลิตภัณฑ์ระหว่างการเผา [Dana 2003] นักวิจัยหลายกลุ่มได้ทำการศึกษาผลของปริมาณของควอทซ์ที่เหลืออยู่ และขนาดของอนุภาคของควอทซ์ที่มีผลต่อความแข็งแรงของเนื้อดินหลังเผา โดยเฉพาะเนื้อดินพอร์ซเลน ต่อความแข็งแรงเชิงกลและพบว่ามีผลดังต่อไปนี้

การศึกษาโดย Prasad และคณะ [Prasad 2002] พบว่า การแทนที่ควอทซ์ด้วยซิลิกาฝุ่น ซึ่งมีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร จะทำให้พอร์ซเลนมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นและมีอุณหภูมิในการสุกตัวต่ำลงถึง 50 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามการศึกษาผลขนาดอนุภาคของควอทซ์ที่มีต่อค่าสมบัติเชิงกลของพอร์ซเลน โดย Stathisและคณะ [Stathis 2003] พบว่าเมื่อขนาดอนุภาคของควอทซ์อยู่ในช่วง 5-20 μm ค่า bending strength ของพอร์ซเลนมีค่าสูงที่สุด เมื่อขนาดอนุภาคของควอทซ์

เล็กกว่าช่วงนี้ปรากฏการณ์ pre-stressing ซึ่งเชื่อว่าเป็นปรากฏการณ์ที่ทำให้เกิดค่าความแข็งแรงเชิงกลในพอร์ซเลนจะไม่เกิดขึ้น ทำให้ bending strength ของพอร์ซเลนมีค่าต่ำลง แต่เมื่อเพิ่มขนาดอนุภาคของควอทซ์ จะทำให้มีช่องว่างมากขึ้น bending strength ของพอร์ซเลนจึงมีค่าต่ำลงเช่นกัน ซึ่งการศึกษานี้สอดคล้องกับการศึกษาค่าสมบัติเชิงกลของพอร์ซเลน โดยการเปลี่ยนขนาดอนุภาคของควอทซ์เป็น 3 ช่วงคือ 0-5, 5-10 และ 10-20 μm ของ Ece และคณะ [Ece 2002] Ece รายงานว่า bending strength ของพอร์ซเลนมีค่าสูงสุดเมื่อขนาดอนุภาคของควอทซ์อยู่ในช่วง10-20 μm

การศึกษาผลของขนาดอนุภาคของของควอทซ์ในตอนเริ่มต้นและปริมาณของควอทซ์ที่เหลืออยู่ต่อสมบัติเชิงกล ที่กล่าวมาข้างต้นนั้นเป็นการศึกษาโดยใช้เนื้อดินพอร์ซเลน แต่แนวโน้มดังกล่าวน่าจะสามารถนำมาอธิบายแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลของเนื้อดินอื่นๆ ที่เป็น triaxial body ได้เช่นเดียวกัน

2.1.4 **เฟลด์สปาร์** (Feldspar)

เป็นแร่ที่มักจะพบปะปนอยู่ในดินเช่นกัน เฟลด์สปาร์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มคือ *plagioclase* และ *alkali feldspar*

Plagioclase คือกลุ่มที่เป็นสารละลายของแข็งสมบูรณ์ระหว่าง anorthite ($CaAl_2SiO_8$) และ albite ($NaAlSi_3O_8$) ส่วนกลุ่ม alkali feldspar คือกลุ่มที่เป็นสารละลายของแข็งสมบูรณ์ระหว่าง albite and orthoclase/microcline ($KAlSi_3O_4$)

บทบาทของเฟลด์สปาร์คือช่วยลดอุณหภูมิในการเผาเซรามิกเนื่องจากผลของ Na และ K และยังช่วยเพิ่มความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์หลังเผาเนื่องจากการที่มี Al อยู่อีกด้วย ในดินดำโดยทั่วๆไป มักพบว่ามีเฟลด์สปาร์ปะปนอยู่เป็นปริมาณค่อนข้างมากกว่าดินขาว จึงทำให้ดินดำมักจะมีอุณหภูมิที่สุกตัวต่ำกว่าดินขาว

จากการศึกษาผลของการใช้เฟลด์สปาร์ 2 ชนิด คือ โพแทชและโซเดียมเฟลด์สปาร์ ต่อการหลอมตัวและความหนาแน่นของเนื้อดินพอร์ซเลนโดย Das และคณะ [Das 2003] พบว่าหลังการเผาที่ 1200 °C เนื้อดินที่มีโซเดียมเฟลด์สปาร์จะมีความหนาแน่นสูงกว่า สมบัติเชิงกลที่ดีกว่า และอุณหภูมิที่หลอมตัวต่ำกว่าเนื้อดินที่มีโพแทชเฟลด์สปาร์เป็นส่วนผสม จากการทดลองพบว่าในตอนแรกนั้นเนื้อดินทั้งสองแบบมีขั้นตอนของปฏิกิริยาคล้ายคลึงกันจนถึงอุณหภูมิ 1000 °C ที่อุณหภูมิสูงกว่านี้เฟลด์สปาร์จะเกิดปฏิกิริยาและหลอม โดยเนื้อดินที่มีโซเดียมเฟลด์สปาร์มีอัตราการเกิด

densification สูงสุดที่ 1171 °C ในขณะที่เนื้อดินที่มีโพแทชเฟลด์สปาร์เป็นส่วนผสม มีอัตราการเกิด densification สูงสุดที่ 1195 °C

2.1.5 ไมก้า (Mica)

ไมก้าไม่จัดว่าเป็นแร่ดินเนื่องจากเมื่อผสมกับน้ำแล้วไม่มีความเป็นพลาสติกแต่มีสูตรโครงสร้างใกล้เคียงกับ montmorillonite มาก มีสูตรโดยทั่วไปคือ $M[Al_2(Si_3Al)O_{10}(OH)_2]$ เมื่อ M เป็นโพแทสเซียมจะเรียกว่า muscovite หรือ potash mica เมื่อ M เป็นแคลเซียมจะเรียกว่า magarite หรือ calcium mica นอกจากนี้ยังมีแร่อีกชนิดหนึ่งซึ่งมีปริมาณของโพแทสเซียมน้อยกว่า muscovite แต่มีปริมาณน้ำมากกว่า เรียกว่าอิลไลต์ (Illite)หรือ hydrous mica

การศึกษาของ Aras [2004] โดยการใช้อิลไลต์แทนที่ดินขาว พบว่าโครงสร้างของอิลไลต์ แตกออกและมีเฟสของเหลวเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 900-950 °C และอุณหภูมิในการเกิด mullite ต่ำกว่าการใช้ดินขาว เนื่องมาจากการที่ในอิลไลต์ มี K สูงกว่าในดินขาว

ดังนั้นจึงเป็นที่น่าสนใจว่าถ้าหากเนื้อดินมีปริมาณไมก้าหรืออิลไลต์มากน่าจะทำให้อุณหภูมิในการสุกตัวของเนื้อดินต่ำลงได้

2.2 การเตรียมเนื้อดินเซรามิก

การเตรียมเนื้อดินเซรามิก จะต้องผสมวัตถุดิบที่ใช้เตรียมเป็นเนื้อดินเข้าด้วยกัน โดยการชั่งวัตถุดิบต่างๆ ให้ได้ตามสัดส่วนที่กำหนดแล้วบดรวมกันภายในหม้อบด ซึ่งต้องมีการควบคุมปริมาณของน้ำที่ใช้ ขนาดและปริมาณของลูกบด ชนิดของลูกบด จำนวนรอบของการหมุน และเวลา เพื่อให้วัตถุดิบเกิดการผสมอย่างทั่วถึงและได้ความละเอียดที่เหมาะสม น้ำดินที่ได้อาจนำไปใช้ในการขึ้นรูปโดยตรงด้วยวิธีการเทหล่อ หรืออาจนำไปผ่านกระบวนการแยกน้ำออกให้ได้ลักษณะเป็นเนื้อชนิดเหนียวสำหรับการขึ้นรูปด้วย แป้นหมุน จิกเกอร์ จอลลี่ หรือโรลเลอร์แมชชีน ซึ่งต้องมีการทดสอบสมบัติของเนื้อดิน เช่น ค่าความชื้น ค่าความละเอียดของอนุภาค ค่าความเหนียว ค่าความหดตัว และสีหลังเผาก่อนการนำไปใช้งานเสมอเพื่อควบคุมคุณภาพและความสม่ำเสมอของเนื้อดินก่อนที่จะไปสู่ขั้นตอนต่อไป ในการเตรียมน้ำดินนั้นน้ำและไอออนต่างๆที่ปะปนมามีผลอย่างยิ่งต่อสมบัติของน้ำดิน จากการศึกษาของ Çetin Güller และ Ender Balci [Güller 1998] พบว่าค่าความหนืดของน้ำดินที่เตรียมโดยผสม เฟลด์สปาร์ 20% ควอต์ซ 15% เคโอลิน 32% และ ดินเหนียว 33% โดยน้ำหนัก มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของเกลือไอออนิกของเฟอริกคลอไรด์ ($FeCl_3$), โปแตสเซียมคลอไรด์

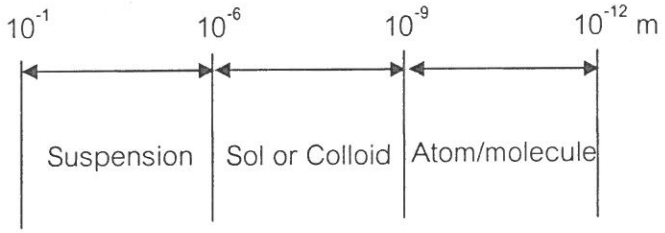
(KCl), NaCl, $FeSO_4$, K_2SO_4 และ Na_2SO_4 เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าคลอไรด์ไอออนทำให้ค่าความหนืดของน้ำดินเปลี่ยนแปลงไปมากกว่าซัลเฟตไอออน

จากการวิจัยของ Diz และ Rand [Diz 1990] พบว่าพฤติกรรมการไหลตัวของดินขึ้นอยู่กับปริมาณสารอินทรีย์ เช่น กรดฮิวมิก และสารพวกลิกนินซึ่งเป็นสารประกอบในธรรมชาติที่มีอยู่ในดิน และจากการทดลองของ Heath และ Tadros [1983] ยังพบว่า การกระจายตัวของน้ำดินยังขึ้นอยู่กับ pH และสารอิเลคโตรไลท์ที่มีอยู่ในสารแขวนลอย นอกจากปัจจัยที่ได้กล่าวมาแล้วยังมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้สรุปเกี่ยวกับการกระจายตัวของน้ำดินยังขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นของแข็งในสารแขวนลอย (solid content) ขนาดอนุภาค ปริมาณสารช่วยในการแขวนลอย (deflocculant)จากการทดลองของ Rand และ Melton [1977] พบว่าเมื่อมีการใช้ปริมาณสารอิเลคโตรไลท์ ในการเติมลงไปในน้ำดินและทำการวัดความหนืด และวัดค่า Zeta potential จะทำให้สามารถหาค่า IEP (isoelectric point) ของดินชนิดนั้นได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะหาค่า IEP ของดินแต่ละชนิด เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการทำการผสมดินจากแหล่งต่างๆ เพื่อให้ได้คุณสมบัติในของไหลตัวมีเหมาะสมกับการเทหล่อ

2.2.1 การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์โดยการหล่อแบบ

การหล่อแบบผลิตภัณฑ์เซรามิกเป็นกระบวนการขึ้นรูปอย่างหนึ่งที่น่าศึกษา การหล่อแบบคือการนำเอาส่วนผสมของวัตถุดิบที่มีความเหนียว เช่น ดิน และวัตถุดิบที่ไม่มีความเหนียว พร้อมด้วยสารเคมีที่ทำให้ดินเกิดการกระจายตัว ในอัตราส่วนที่ทำให้เกิดคุณสมบัติที่เหมาะสม และเทน้ำดินที่ได้ลงในแบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์ ซึ่งมีรูปร่างตามที่ต้องการ โดยน้ำดิน (Clay slip) ที่เทลงในแบบพิมพ์จะประกอบด้วยน้ำประมาณ 25 เปอร์เซ็นโดยปริมาตร น้ำในน้ำดินจะถูกแบบพิมพ์ดูดด้วยแรงที่เกิดจากรูพรุนในแบบ Capillary force น้ำดินบริเวณผิวแบบจะข้นขึ้นเรื่อยๆจนในที่สุดก็จะเหลือแต่เนื้อดินที่สะสมที่ผิวแบบกลายเป็นผนังของผลิตภัณฑ์ ผนังผลิตภัณฑ์จะหนามากขึ้นตามเวลาที่ผ่านไป หลังจากนั้นจะปล่อยให้แห้ง แกะออกจากแบบพิมพ์ อบให้แห้งสนิทแล้วจึงนำไปเผาเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จ

ขนาดของอนุภาคของเนื้อสารที่เป็นของแข็งต่างๆในน้ำเนื้อดินปั้นจะมีขนาดแตกต่างกัน จากขนาดใหญ่ถึงเล็กกว้างพอสมควร ขนาดของอนุภาคของวัตถุดิบเซรามิกที่ใช้ผสมเป็นน้ำเนื้อดินปั้นมีขนาดระหว่าง 5,000 ไมครอน ถึง 0.001 ไมครอน (μm) ขนาดของอนุภาคของวัตถุดิบเซรามิกในช่วงที่กล่าวมานี้ ส่วนหนึ่งสามารถแยกได้ด้วยตะแกรงร่อน อนุภาคขนาดระหว่าง 0.2 ถึง 0.001 ไมครอน เรียกว่าเป็นขนาดของ "คอลลอยด์ (Colloid) และอนุภาคที่เล็กกว่า 0.001 ไมครอน เรียกว่าเป็นขนาดโมเลกุล โดยรูปที่ 2.4 จะแสดงช่วงขนาดอนุภาคของดิน

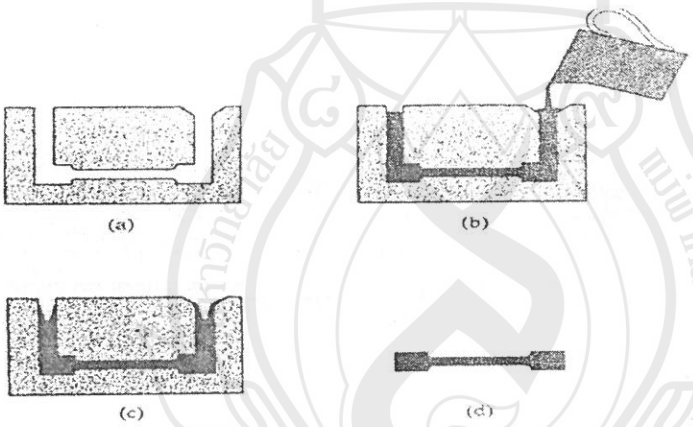


รูปที่ 2.4 แสดงช่วงขนาดของอนุภาคของดิน

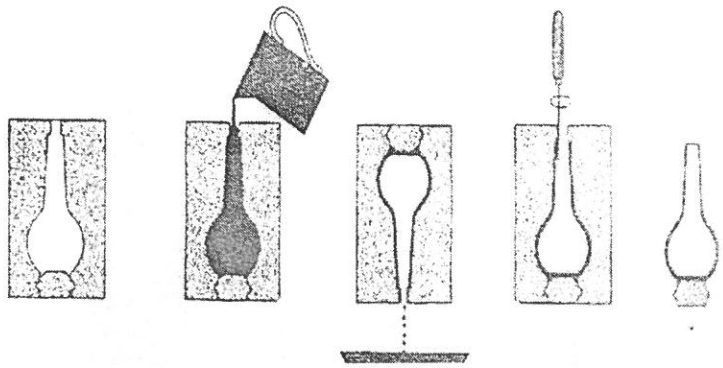
กระบวนการเทแบบ มี 2 วิธี ดังนี้

1. การเทแบบโดยให้น้ำดินแข็งตัวอยู่ในแบบเลย เรียกว่า Solid casting ซึ่งเหมาะกับการเทแบบผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างแปลกๆ โดยเติมน้ำดินลงในแบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์จนเต็มโดยไม่มีการเทออก ดังรูป 2.5

2. การเทแบบโดยมีการเทน้ำดินที่เหลือทิ้ง เรียกว่า Drain casting ซึ่งเหมาะกับผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะกลวง ผนังบาง และต้องการความหนาอย่างสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 แสดงการเทแบบชนิด Solid casting , (a) แบบที่ประกอบแล้ว (b) เทน้ำดินลงแบบ (c) ปล่อยน้ำดินไว้ในแบบ (d) ผลิตภัณฑ์ดิบที่ตกแต่งเรียบร้อยแล้ว



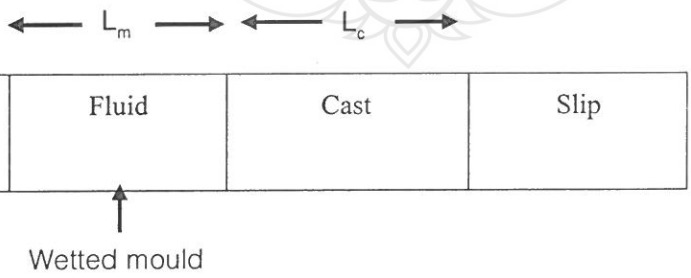
รูปที่ 2.6 แสดงการเทแบบชนิด Drain casting

(a) แบบที่ประกอบแล้ว
(b) เทน้ำดินลงในแยบ
(c) เทน้ำดินที่เหลือออกจากแบบ
(d) ตัดแต่งปากผลิตภัณฑ์
(e) ผลิตภัณฑ์หลังจากถอดแบบ

ขั้นตอนและกลไกในการหล่อแบบ

1. เทน้ำดินลงในแบบพิมพ์
2. น้ำในดินจะถูกแบบพิมพ์ดูดด้วยแรงที่เกิดจากรูพรุนในแบบ (Capillary force)
3. จะเกิดการสะสมเป็นชั้นของดินขึ้น ซึ่งความหนาจะขึ้นกับอุณหภูมิ
4. เทน้ำดินออกจากแบบพิมพ์
5. ปล่อยให้แห้ง
6. ทำการแกะออกจากพิมพ์
7. นำไปอบ
8. ทำการเผาที่อุณหภูมิตามต้องการ

จากรูปที่ 2.7 จะแสดงลักษณะการเกิดชั้นต่างๆ ขณะทำการหล่อแบบ



รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะการเกิดชั้นต่างๆ ขณะทำการหล่อแบบ

ความหนาของผนังผลิตภัณฑ์จะสัมพันธ์กับเวลา ดังสมการ

$$L^2_c = C.\Delta P.t \qquad (2.1)$$

ΔP = Driving pressure (Suction pressure + any applied pressure)

L_c = The cast thickness

L_M = The mould thickness

C = Casting constant (is the function of the cast permeability)

T = Time

2.2.2 **น้ำดิน** (Clay)

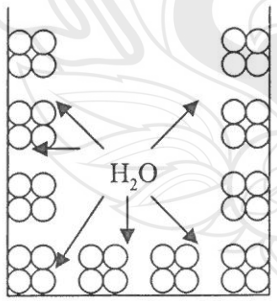
คือ ส่วนผสมที่กระจายตัว (Dispersion) และแขวนลอย (Suspention) อยู่ในน้ำตัวอย่างสม่ำเสมอ โดยมีสัดส่วนระหว่างเนื้อผสมต่อน้ำ (Concentration) ความหนืด (Viscosity) การไหลตัว (Fluidity) ที่เหมาะสมในการนำไปขึ้นรูปด้วยการหล่อแบบ (Casting)

น้ำดินที่ดี (Requirement of slip)

1. มีการกระจายตัวที่ดี สามารถเทลงในแบบพิมพ์ได้ง่าย โดยมีปริมาณ Solid content ที่สูง
2. ไม่มีการแยกชั้นระหว่างของเหลวกับของแข็งที่มีขนาดอนุภาคโต
3. มีอัตราการหล่อแบบที่เร็ว แต่ไม่ควรจะเร็วจนเกินไป ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ ดังนี้

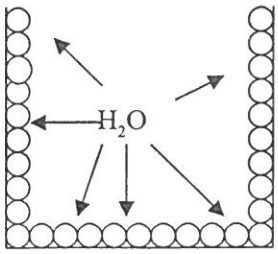
3.1 น้ำดินที่มีลักษณะรวมตัวกัน (Flocculated slip) ซึ่งจะทำให้การหล่อแบบเกิดได้เร็ว ดังรูปที่ 2.8

3.2 น้ำดินที่มีลักษณะการกระจายตัวที่ดี (Deflocculated slip) ซึ่งมีปริมาณ Solid content สูงกว่า ดังรูปที่ 2.9



น้ำดินจะผ่านเข้าไปในรูพรุนของแบบพิมพ์อย่างรวดเร็ว

รูปที่ 2.8 แสดงการหล่อแบบของน้ำดินที่มีลักษณะรวมตัวกัน (Flocculated slip)



น้ำดินจะผ่านเข้าไปในรูพรุนของแบบพิมพ์
ได้ช้ากว่าแต่จะมีความหนาแน่นมากกว่า

รูปที่ 2.9 แสดงการหล่อแบบของน้ำดินที่มีลักษณะการกระจายตัวที่ดี (Deflocculated slip)

4. น้ำดินจะต้องไม่มีฟองอากาศ
5. เทน้ำดินออกจากแบบได้ง่าย (Good drainage)
6. ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะต้องมีความหนาแน่นมากและมีความแข็งแรงสูง (High green strength)

อัตราเร็วในการเทแบบหรืออัตราในการเพิ่มความหนาของผนังผลิตภัณฑ์ จะเริ่มลดลงตามเวลาที่ผ่านไป ด้วยเหตุผล 2 ประการ คือ

1. น้ำจะซึมผ่านเข้าแบบได้ยากขึ้น เพราะว่าผนังของผลิตภัณฑ์จะต้านเอาไว้
2. แบบชื้นมากขึ้น อัตราการดูดซึมก็จะลดลง

นอกจากนี้ ความละเอียดของเนื้อดินปั้นยังมีส่วนช่วยเร่งในการเทแบบ คือ เนื้อดินปั้นยิ่งหยาบ อัตราการเทแบบจะเร็วขึ้น

น้ำดินสำหรับการเทแบบจะประกอบด้วย ดินและวัสดุอื่นๆ ซึ่งกระจายลอยตัวอยู่ในน้ำ น้ำในดินควรมีเปอร์เซ็นต์ต่ำเท่าที่จะเป็นไปได้ แต่น้ำดินก็ต้องมีการไหลตัวดี การที่จะทำให้น้ำดินมีคุณสมบัติเช่นนี้ จะต้องนำสารเคมีซึ่งมีคุณสมบัติช่วยทำให้กลุ่มดินมีการกระจายและลอยตัวได้ดี ใส่ลงไปช่วย

2.3 การศึกษาลักษณะเฉพาะของดินและสมบัติอื่นๆ

2.3.1 การเปลี่ยนแปลงเฟสเชิงความร้อน

โดยทั่วไปปฏิกิริยาเชิงความร้อนของดินจะเกิดเป็นช่วงๆ ดังนี้

ช่วงที่ 1 อุณหภูมิ 50-200 องศาเซลเซียส เป็นการหายไปของมวลสารเนื่องจากการสูญเสียน้ำที่เกาะที่ผิวอนุภาคดิน มีการดูดกลืนพลังงานความร้อน โดยเฉพาะในดินเหนียวจะเห็นการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างชัด

ช่วงที่ 2 อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นการหายไปของมวลสารเนื่องจากการสลายตัวของ kaolin กลายเป็น meta-kaolin ดังสมการ 2.2 ในช่วงนี้อาจจะมีการสลายตัวของสารอินทรีย์ร่วมด้วย

$$Al_2O_3.2SiO_2.2H_2O \rightarrow Al_2O_3.2SiO_2 + 2H_2O \qquad (2.2)$$

(kaolin) (meta-kaolin)

ช่วงที่ 3 การเปลี่ยนสัณฐานของควอทซ์ ที่ 573 องศาเซลเซียส ไม่มีการเปลี่ยนแปลงมวล แต่มีการเปลี่ยนปลงพลังงานความร้อนเล็กน้อย ซึ่งจะสามารถสังเกตเห็นได้ชัดขึ้นถ้าสารมีปริมาณมากและอัตราการให้ความร้อนสูงพอ

ช่วงที่ 4 อุณหภูมิประมาณ 1000 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของ meta-kaolin กลายเป็น spinel โดยการปล่อยซิลิกาออกจากโครงสร้าง ไม่มีการสูญเสียมวลแต่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงาน

ช่วงที่ 5 อุณหภูมิประมาณ 1100 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของ spinel กลายเป็น mullite โดยการปล่อยซิลิกาออกจากโครงสร้าง และมีการหลอมของเฟลด์สปาร์ ไม่มีการสูญเสียมวลแต่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานเนื่องจากกระบวนการดังกล่าวทั้งสอง

2.3.2 ความเป็นพลาสติก

นิยามของความเป็นพลาสติกคือสมบัติในการยอมให้วัสดุมีการเปลี่ยนรูปโดยปราศจากการแตกร้าวภายใต้แรงกระทำ และสามารถรักษารูปร่างใหม่ไว้ได้เมื่อไม่มีแรงกระทำ [Ryan 1978] โดยทั่วไป ดินแสดงสมบัติความเป็นพลาสติกสูงเมื่อมีการผสมน้ำลงไป เนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็ก พื้ที่ผิวสูงและการมีประจุที่ผิวหน้าทำให้สามารถดึงดูดกับโมเลกุลที่มีขั้วของน้ำได้ดี ดินที่มีความเป็นพลาสติกมากมักจะมีการหดตัวสูง และมีความแข็งแรงเชิงกลหลังอบแห้งสูงเช่นกัน

2.3.3 ความแข็งแรงเชิงกล

ความแข็งแรงเชิงกลของดินแบ่งออกเป็น ความแข็งแรงหลังขึ้นรูปและตากแห้ง ความแข็งแรงขณะเผาร้อน และความแข็งแรงหลังการเผา

เมื่อดินถูกนำมาขึ้นรูปและตากแห้ง ดินนั้นจะต้องมีความแข็งแรงมาพอที่จะทนต่อความเค้นที่เกิดขึ้นขณะขนย้ายและจัดวางได้ วัสดุจำพวกควอทซ์หรือเฟลด์สปาร์จะมีความแข็งแรงหลังตากแห้งน้อยมาก ดินที่มีขนาดอนุภาคเล็กเช่นดินเหนียวจะยิ่งแสดงค่าสมบัติเชิงกลหลังตากแห้งสูง ชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยการอัดแห้งผงดินก็จะแสดงค่าความแข็งแรงเชิงกลต่ำ เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่มีความชื้นอยู่แล้วปล่อยให้แห้ง ทั้งนี้อาจจะเป็นเพราะน้ำมีค่าความตึงผิวสูงขณะแห้งจะเกิดแรงดึงอนุภาคดินเข้าหากันทำให้เกิดความแข็งแรงขึ้น [Dinsdale 1986]

ความแข็งแรงเชิงกลคือการที่ผลิตภัณฑ์สามารถคงรูปร่างอยู่ได้โดยไม่ยุบตัวหรือบิดเบี้ยวขณะเผา จากการศึกษาพบว่าองค์ประกอบที่พบในดินเช่นทัลค์หรือสารกลุ่มไมก้า ถ้าหากมีอยู่มากเกินไปจะทำให้ผลิตภัณฑ์เสียรูปได้ขณะเผา

ความแข็งแรงเชิงกลหลังการเผาของเนื้อดินโดยทั่วไป ไม่มีการศึกษาการศึกษาอย่างละเอียดมากนัก แต่จะพบเอกสารเผยแพร่เกี่ยวกับการศึกษาสมบัติเชิงกลของเนื้อดินพอร์ซเลน เป็นจำนวนมากและมีหลายทฤษฎี แต่ยังไม่มีข้อสรุปที่แน่ชัดว่าความแข็งแรงเชิงกลของเนื้อดินพอร์ซเลนเกิดจากปัจจัยใด อย่างไรก็ตามทฤษฎีเหล่านั้น น่าจะพอนำมาใช้กับเนื้อดินบางชนิดเช่นเนื้อดินสโตนแวร์หรือเอิร์ทเทนแวร์หรือ ได้เช่นกันเนื่องจากองค์ประกอบคล้ายคลึงกันอยู่บางส่วน ทฤษฎีซึ่งอธิบายความแข็งแรงเชิงกลของเนื้อดินพอร์ซเลนมีด้วยกัน 3 ทฤษฎีดังนี้

1. **ทฤษฎีมัลไลต์** กล่าวว่าความแข็งแรงเชิงกลของพอร์ซเลนเกิดจากการล็อกกันของผลึกมัลไลต์ ซึ่งถ้าเพิ่มการล็อกกันของผลึกมัลไลต์ ก็จะสามารถเพิ่มความแข็งแรงเชิงกลได้ [Sane 1951, Schroeder 1951, Mattyasovsky-Zsolnay, 1957]
2. **ทฤษฎีการเสริมแรงโดยการเฟสที่กระจายตัว** กล่าวว่าการที่มีอนุภาคของควอทซ์และมัลไลต์ กระจายตัวอยู่ในเฟสแก้วสามารถยับยั้งการโตของรอยร้าวแบบกริฟฟิธ (Griffith 's Flaw) และเพิ่มความแข็งแรงเชิงกล [Hasselman 1966]
3. **การเสริมแรงของแมทริกซ์**กล่าวว่าการความเค้นซึ่งเกิดขึ้นในเฟสแก้ว เกิดจากการที่สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงความร้อนของเฟสที่เป็นผลึกที่กระจายตัวอยู่(ควอทซ์และมัลไลต์) และเฟสแก้วมีค่าต่างกัน [Hamano 1991, Tomizaki 1995]

นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าขนาดอนุภาคของวัตถุดิบ หรือปริมาณของควอทซ์ที่เหลืออยู่ก็มีส่วนสำคัญต่อความแข็งแรงเชิงกลของเซรามิกเป็นอย่างยิ่ง ดังกล่าวมาแล้วในเรื่องของควอทซ์

2.3.5 สมบัติคอลลอยด์ของดิน

เป็นการศึกษาลักษณะทางเคมีของระบบที่ประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็ก(0.001-1.0 μm) ซึ่งลักษณะเฉพาะของพื้นที่ผิวอนุภาคจะเป็นตัวควบคุมพฤติกรรมของระบบ

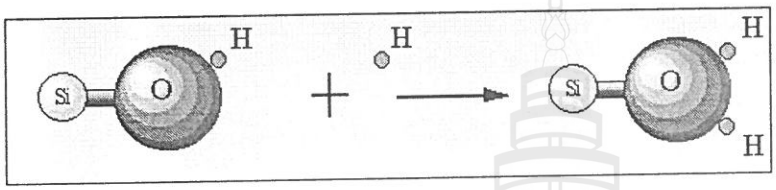
โดยทั่วไปการแบ่งอนุภาคจะแบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ

1. อนุภาคช่วงแขวนลอย (Suspension)
   ขนาดอนุภาคใหญ่กว่า 1 μm
2. อนุภาคช่วงคอลลอยด์ (Colloidal particle)
   ขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.001-1.00 μm
3. อนุภาคช่วงอะตอมและโมเลกุล (Atom and molecules)
   ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 0.0005 μm

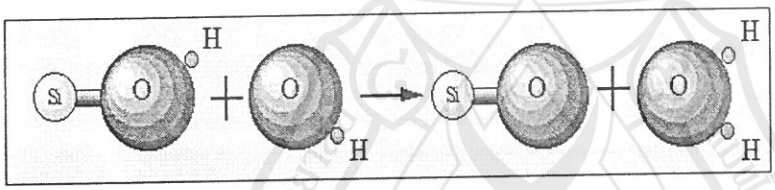
2.3.5.1 **ประจุที่ผิวของอนุภาค**

การปรับเปลี่ยนประจุที่พื้นที่ผิวของอนุภาค (Development of surface charge)

อนุภาคของออกไซด์ (Oxide) ในสารละลายจะเกิด Hydroxylated surface ซึ่งพื้นที่ผิวดังกล่าวจะดูดซับ H^+ และ OH^- เช่น SiO_2 เมื่ออยู่ในสารละลายที่มีสภาพเป็นกรด จะเกิดการดูดซับ H^+ ในสารละลายทำให้พื้นที่ผิวอนุภาคมีประจุเป็นบวก ในทางกลับกันเมื่ออยู่ในสารละลายที่มีสภาพเป็นด่าง H^+ จะหลุดจากพื้นที่ผิวอนุภาค ทำให้พื้นที่ผิวอนุภาคมีประจุเป็นลบ ดังรูปที่ 2.10-2.11



รูปที่ 2.10 แสดงการดูดซับประจุที่ผิวของอนุภาค SiO_2 เมื่ออยู่ในสภาวะที่มีความเป็นกรด



รูปที่ 2.11 แสดงการดูดซับประจุที่ผิวของอนุภาค SiO_2 เมื่ออยู่ในสภาวะที่มีความเป็นด่าง

สารละลายในบาง pH จะมีการดูดซับ H^+ และ OH^- เท่ากัน ทำให้พื้นที่ผิวอนุภาคมีความเป็นกลาง (Neutral) เรียก pH ที่จุดนี้ว่า " Point of zero charge (pH_{pzc})"

ซึ่งแสดงได้ตามสมการของ Nernst

$$\psi_o = f(pH_{pzc} - pH)$$

เมื่อ ψ_o คือ Surface electrical potential

pH_{pzc} คือ pH ที่ Point of zero charge

สารละลายที่ประกอบด้วย SiO_2 กับ Al_2O_3 ซึ่งมีค่า pH_{pzc} เท่ากับ 2 และ 9 ตามลำดับการที่จะทราบว่าน้ำดินมีการเกาะรวมตัวกันหรือไม่ สามารถทำได้โดยการปรับค่า pH เช่น ถ้าสารละลายผสมของ SiO_2 และ Al_2O_3 มีค่า pH เท่ากับ 6

จากสมการของ Nernst จะได้

$$\psi_o(SiO_2) = \qquad 2\text{-}6$$

$= \quad -4$

$\psi_o(Al_2O_3) = \quad 9-6$

$= \quad +3$

จะเห็นว่าอนุภาคของ SiO_2 และ Al_2O_3 มีประจุแตกต่างกันจึงเกิดการดึงดูดกันด้วยแรงทางไฟฟ้า (Electrostatic attraction) ดังนั้นเพื่อไม่ให้อนุภาคเกิดการเกาะรวมตัวกัน (Flocculation) จึงมีการปรับเปลี่ยนประจุที่ผิวของอนุภาคโดยการปรับสภาพความเป็นกรด-ด่าง (pH) ดังนี้

กรณีที่1 ปรับ pH ของสารละลายให้มีค่าเท่ากับ 1

จะได้ $\psi_o(SiO_2) = \quad 2-1$

$= \quad +1$

$\psi_o(Al_2O_3) = \quad 9-1$

$= \quad +8$

กรณีที่ 2 ปรับ pH ของสารละลายให้มีค่าเท่ากับ 10

จะได้ $\psi_o(SiO_2) = \quad 2-10$

$= \quad -8$

$\psi_o(Al_2O_3) = \quad 9-10$

$= \quad -1$

จะเห็นว่าทั้ง 2 กรณี อนุภาคของ SiO_2 และ Al_2O_3 จะเกิดการผลักกันเนื่องจากแรงทางไฟฟ้า (Electrostatic repulsion) ดังนั้น ถ้าต้องการให้สารละลายผสมดังกล่าวมีการกระจายตัวที่ดี (Deflocculation) จึงควรปรับค่า pH ของสารละลายผสมให้มีค่าน้อยกว่า 2 หรือมากกว่า 9

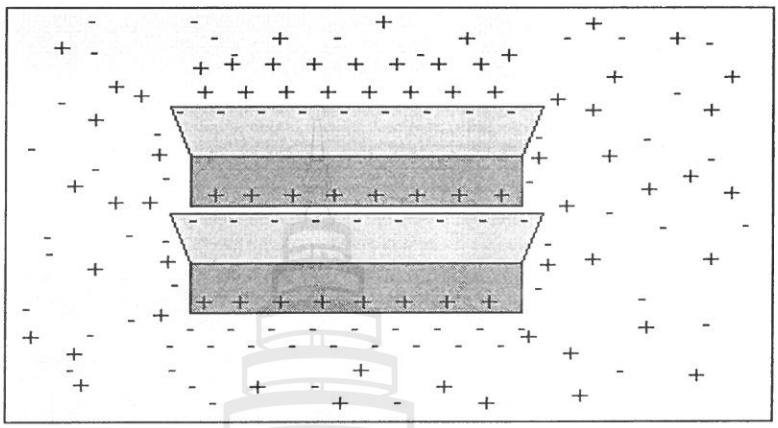
The electrical double layers

เมื่อพิจารณาอนุภาคของดินที่ดึงดูดอนุภาค M (Cation M) เป็น M-Clay โดยประจุของดินสามารถแสดงให้จากการจุ่มขั้วไฟฟ้า (Elactrode) 2 อัน ลงในสารละลายแขวนลอยของดินและจ่ายกระแสไฟฟ้าตรงในสารละลายนี้ สมการแสดงการแตกตัวของดินที่เกิดในน้ำ สามารถแสดงได้ดังนี้

$$M\text{-clay} \leftrightarrow M^+ + Clay^-$$

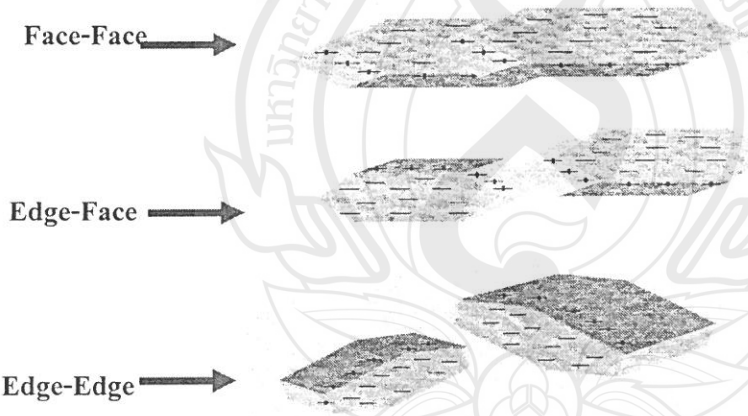
และอนุภาคที่มีประจุเป็นลบ สามารถที่จะวิ่งเข้าขั้วไฟฟ้าที่เป็นบวก ในขณะที่อนุมูล M^- จะเคลื่อนเข้าไปหาขั้วไฟฟ้าที่เป็นลบ ดังนั้นสามารถอธิบายได้ว่า โดยทั่วไป ดินจะมีลักษณะของ

สมดุลอนุมูล (Balancing Charge) กันระหว่างอนุมูลดินกับอนุมูลบวก ซึ่งจะเกิดการดึงดูดกันระหว่าง Counter ions กับประจุที่พื้นผิวของอนุภาคดิน และการดึงดูดนี้จะถูกขัดขวางโดยการเคลื่อนที่ระหว่างอนุภาคด้วยกันเองในสารละลาย ทำให้การเกิดของพันธะของ Counter ions ไม่สามารถเกิดใกล้กับพื้นที่ผิวอนุภาคได้ แต่จะเกิดการแพร่ของชั้นบางๆของประจุรอบๆพื้นที่ผิวอนุภาค ดังสมการในรูป 2.12



รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะการเกิดประจุล้อมรอบอนุภาคของดิน

เมื่อพิจารณาลักษณะของอนุภาคดินที่เป็นแบบแผ่น การจัดเรียงประจุบวกและลบบริเวณผิวของอนุภาคดิน จะทำให้เกิดการรวมกันของอนุภาค ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงการจัดเรียงตัวของประจุบวกและลบบริเวณผิวของอนุภาคดินทำให้เกิดการรวมกันของอนุภาค

Counter ions คือ ประจุที่มีเครื่องหมายตรงกันข้ามกับประจุที่ผิวของอนุภาคดิน ซึ่งในที่นี้จะมีประจุเป็นบวก

Co-ions คือ ประจุที่มีเครื่องหมายเหมือนกันกับประจุที่ผิวของอนุภาคดิน ซึ่งในที่นี้จะมีประจุเป็นลบ

Zeta potential

ความสามารถที่อนุภาคดินจะดึงดูดอนุมูลมาเกาะรอบๆ ตัวนั้น ขึ้นอยู่กับค่า Zeta potential (ζ) ซึ่งจะแสดงได้จากรูปที่ 2.14 โดยรูปที่ 2.14 จะแสดงถึงชั้นต่างๆที่เกิดขึ้นรอบๆอนุภาคของดิน โดยชั้นที่เกิดขึ้นจะแบ่งได้ดังนี้

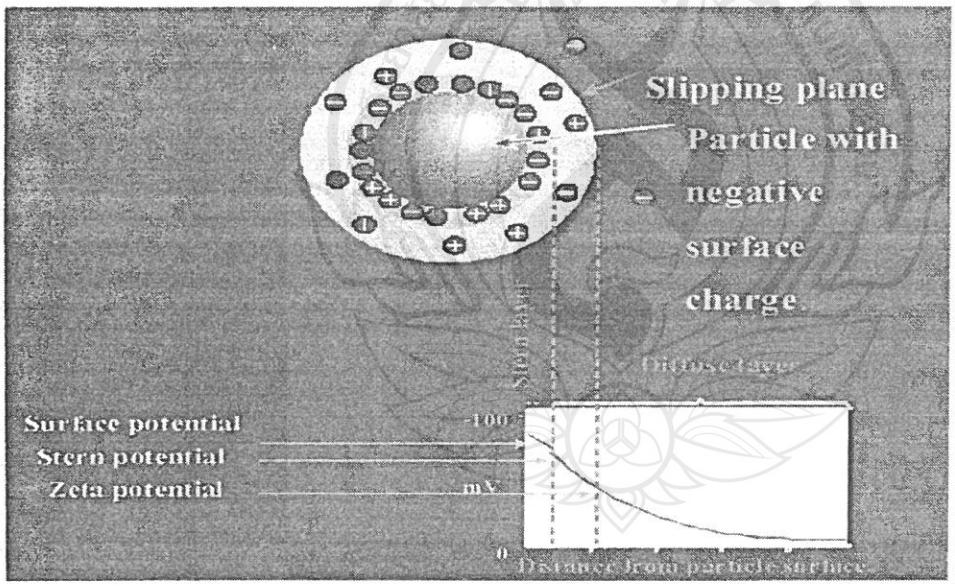
Stern layer จะเป็นตำแหน่งจากพื้นผิวของอนุภาคถึงจุดศูนย์กลางของ Counter ions

Slipping plane จะเป็นตำแหน่งจากพื้นที่ผิวของอนุภาคดินถึงตำแหน่งนอกสุดของ Electrical double layer

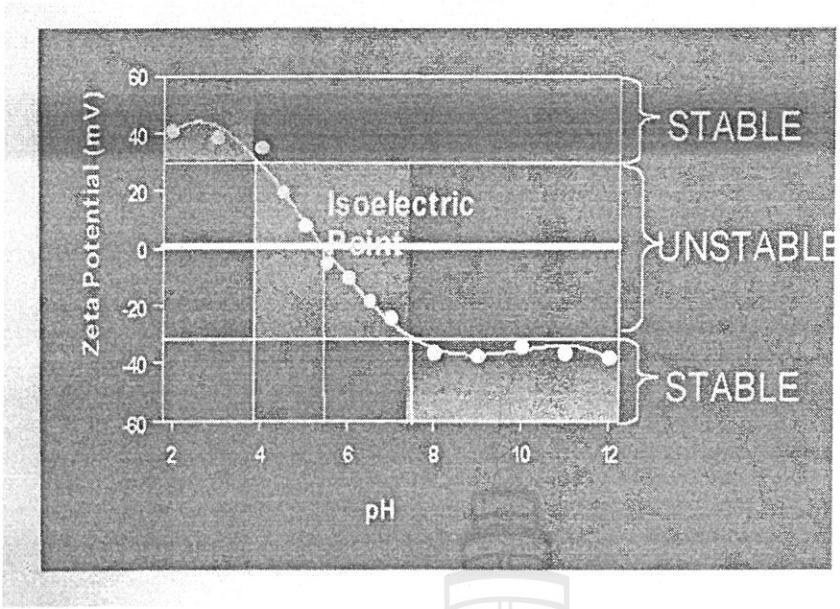
Surface potential (ψ_o) คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จากพื้นที่ผิวของอนุภาค

Stern potential (ψ_δ) คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จากชั้นของ Stern layer

Zeta potential (ζ) คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จากชั้นของSlipping plane



รูปที่ 2.14 แสดงชั้นต่างๆที่เกิดขึ้นรอบๆผิวอนุภาคของดิน



รูปที่ 2.15 แสดงค่า Zeta potential ที่แสดงถึงความเสถียรหรือไม่เสถียรของน้ำดิน

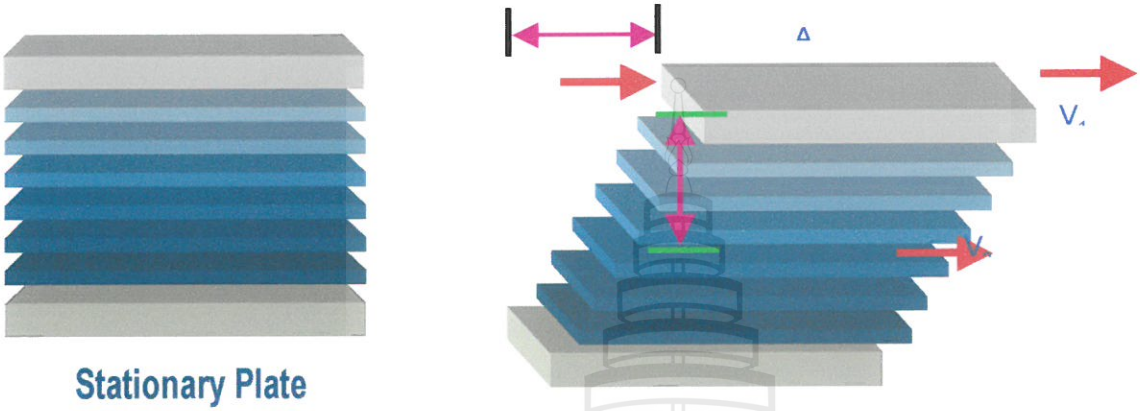
จากรูปที่ 2.15 จะแสดงถึงค่า Zeta potential ของอนุภาคของดินที่บอกถึงความเสถียร หรือความไม่เสถียรของน้ำดิน ถ้าค่า Zeta potential มีค่าเป็นบวกหรือลบ จะแสดงว่าน้ำดินมีความเสถียร เกิดการหรือไม่กระจายตัวได้ดี (Deflocculation) แต่ถ้าค่า Zeta potential มีค่าเป็นศูนย์ จะแสดงว่าน้ำดินมีความไม่เสถียร เกิดการรวมตัวกันขึ้น (Flocculation) ซึ่งจะตรงกับจุด "Point of zero charge"

ค่า Zeta potential จะขึ้นอยู่กับอนุมูลที่เข้ามาเกาะอนุภาคของดิน อนุมูลพวก H^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} จะดึงดูดอนุภาคดินได้อย่างแข็งแรง ทำให้ระยะห่างระหว่างผิวอนุภาคกับอนุมูลมีค่าน้อย ค่า Zeta potential ที่ได้จึงมีค่าต่ำ ทำให้แรงดึงดูดของอนุภาคดินกับอนุมูลบวกรอบข้างมากกว่าแรงผลักระหว่างชั้นบางของอนุมูลบวกรอบข้างอื่นๆ โดยชั้นอนุมูลบวกรอบข้างอื่นๆจะเป็นของอีกอนุภาคหนึ่ง ลักษณะเช่นนี้ทำให้เกิดการตกจม (Flocculation) ในน้ำดิน สำหรับประจุพวก Li^+ , Na^+ และ K^+ จะดึงดูดอนุภาคดินได้อ่อนกว่า ทำให้ระยะห่างระหว่างผิวอนุภาคมีค่ามาก ค่า Zeta potential ที่ได้จะมีค่าสูง ทำให้แรงผลักระหว่างชั้นบางของอนุมูลกับอนุมูลบวกรอบข้างอื่นๆส่งผลมากกว่า แรงดึงดูดระหว่างอนุภาคดินกับอนุมูลบวกรอบข้างอื่นๆเกิดแรงผลักกันระหว่างอนุภาคหนึ่งกับอีกอนุภาคหนึ่ง ลักษณะนี้ทำให้เกิดการลอยตัว (Deflocculation) ในน้ำดิน

2.3.6 Rheology

การไหลตัวเป็นพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของของไหลเนื่องมาจากแรงกระทำ เมื่อมีแรงเข้ามากระทำกับของไหล ของไหลด้านล่างจะมีแรงต้านจากพื้นไม่ให้ของไหลเกิดการ

การไหลตัวเป็นพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของของไหลเนื่องมาจากแรงกระทำ เมื่อมีแรงเข้ามากระทำกับของไหล ของไหลด้านล่างจะมีแรงต้านจากพื้นไม่ให้ของไหลเกิดการเคลื่อนที่ โดยแรงต้านที่เกิดขึ้นจะลดลงเรื่อยๆเมื่อชั้นของเหลวอยู่สูงห่างจากพื้น ดังนั้นความ เร็วในแต่ละชั้นของของไหลจะไม่เท่ากัน ซึ่งชั้นบนสุดจะมีความเร็วสูงสุด และเคลื่อนที่ได้มากกว่าชั้นที่ต่ำลงมา ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะการไหลของของไหลเมื่อมีแรงมากระทำ

สำหรับการกวนน้ำดินจะแสดงออกเหมือนกับการไหลของของไหล คือ ความเร็วของน้ำดินด้านบนจะมีความเร็วมากกว่าด้านล่าง โดยการวัดการไหลตัวของไหลมักจะแสดงเป็นค่าความหนืด

ค่าความหนืด คือ ผลที่ได้จากการวัดแรงเสียดทานภายในของไหล (Fluid) โดยแรงเสียดทานจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อชั้นของของไหลมีการเคลื่อนที่สัมพันธ์กัน แรงเสียดทานยิ่งมีค่ามากเท่าใดก็ยิ่งต้องใช้แรงในการเคลื่อนที่มากขึ้นเท่านั้น แรงที่กล่าวถึงนี้เรียกว่า ความเค้นเฉือน (Shear stress) โดยปกติแล้วการเฉือน (Shearing) จะเกิดขึ้นเสมอเมื่อวัตถุมีการเคลื่อนที่ ดังนั้นของไหลที่มีความหนืดสูงจึงต้องการแรงมากกว่าของไหลที่มีความหนืดต่ำ

เซอร์ไอแซกนิวตัน (Sir Isaac Newton) ได้อธิบายในเรื่องความหนืดโดยอาศัยแบบ จำลองดังรูปที่ 2.16

เมื่อระนาบของของไหลสองชั้นที่ขนานกันและมีพื้นที่เท่ากันคือ A ถูกแยกออกจากกันเป็นระยะทาง dx เคลื่อนที่ในทางทิศเดียวกันด้วยความเร็วที่ต่างกันคือ V1 และ V2 นิวตันได้สมมติว่ามีแรงที่ต้องใช้ในการรักษาความแตกต่างของความเร็วจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างของความเร็วตลอดของไหลหรือเกรเดียนต์ความเร็ว ซึ่งแสดงได้ดังนี้

โดย η คือ ค่าคงที่ เรียกว่า ค่าความหนืด

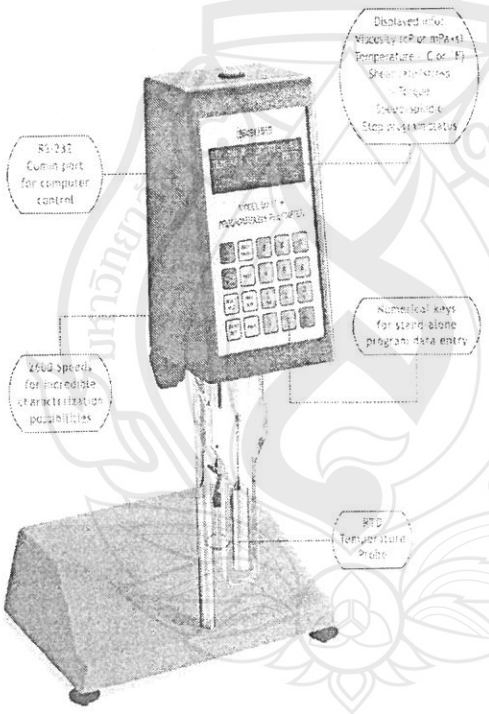
dv/dx คือ ค่าเกรเดียนต์ความเร็ว เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า อัตราเฉือน (Shear rate) เขียนแทนด้วย γ มีหน่วยเป็น วินาที$^{-1}$

F/A คือ แรงต่อหน่วยพื้นที่ ที่ต้องการในการทำให้เกิดการเฉือน เรียกว่า ความเค้นเฉือน เขียนแทนด้วย τ มีหน่วยเป็น ไดน์ตารางเซนติเมตร หรือ นิวตันต่อตารางเมตรในระบบ SI ดังนั้น

$$\eta = \frac{\tau}{\gamma} \qquad (2.4)$$

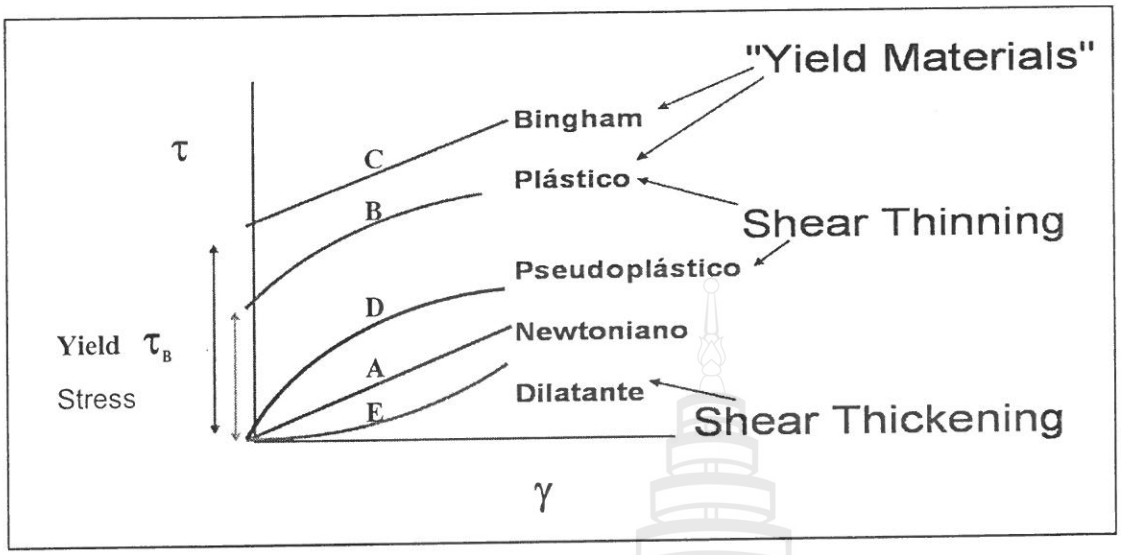
ปกติหน่วยของความหนืด คือ พอยส์ หรือ เซนติพอยส์ แต่บางครั้งอาจพบในรูปของหน่วย พาสคัล-วินาที หรือ มิลลิพาสคัล-วินาที ซึ่งเป็นหน่วยในระบบ SI 1 mPa.S = 1 cP

จากรูปที่ 2.17 จะแสดงเครื่องมือวัดพฤติกรรมการไหลตัวของน้ำดิน



รูปที่ 2.17 แสดงเครื่องมือที่ใช้วัดพฤติกรรมการไหล (Rheology)

ลักษณะการไหลตัวของน้ำดินสามารถแบ่งออกเป็น 5 ประเภท



รูปที่ 2.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Shear rate (γ) และ Shear stress (τ)

จากรูปที่ 2.18

เส้นกราฟ A: พฤติกรรมการไหลแบบง่ายที่สุดของการไหล ซึ่งจะพบในน้ำและในสารแขวนลอยที่มีการกระจายตัว จากสมการ 2.4

$$\tau = \eta\gamma \text{ หรือ } \eta = \tau/\gamma$$

ถ้าสัดส่วน τ/γ เป็นค่าคงที่ η จะเรียกเป็นค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดและสามารถใช้กำหนดเป็นค่า Single point measurement ได้

เส้นกราฟ B: ใช้อธิบายการไหลตัวแบบอุดมคติ จากสมการของ Bingham

$$\tau - \tau_B = \eta_P\gamma \qquad (2.5)$$

เมื่อ Bingham yield stress (τ_B) การไหลตัวจะเกิดคล้ายกับกรณีของการไหลตัวอย่างง่ายของของเหลว ในทางปฏิบัติพบว่า การไหลตัวมักไม่เป็นไปตามกฎของ Bingham มากนัก บ่อยครั้งที่พบว่าลักษณะการไหลตัวจะแบบ Shear thinning หรือ Pseudoplastic ดังรูปเส้นกราฟ C และ D

เส้นกราฟ C: จะพบในระบบที่มี Shear stress ต่ำและมีบริเวณที่เป็นเส้นตรงที่สามารถสันนิษฐานได้ว่า Shear rate เป็นศูนย์ ซึ่งค่าที่ได้ คือ Bingham yield stress (τ_B)

เส้นกราฟ D: มีลักษณะเป็น Shear thinning ความหนืดลดลงเมื่อ Shear stress เพิ่มขึ้น

เส้นกราฟ E: มีลักษณะเป็น Shear thickening ความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อ Shear stress เพิ่มขึ้น

ปรากฏการณ์ที่เป็นอิสระจากเวลา (Time independent phenomena)

ระบบของ Bingham คล้ายคลึงกับระบบ Newtonian ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงระหว่าง Shear stress และ Shear rate อย่างไรก็ตามระบบจะไม่สามารถเกิดการไหลได้จนกว่าจะมีการให้แรงที่มากพอค่า Yield stress (τ_B) ดังรูปเส้นกราฟ B

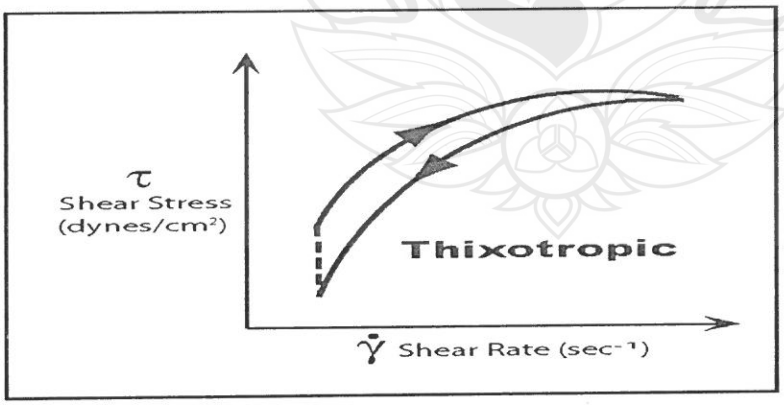
ระบบ Pseudo-Plastic (Shear-Thinning) เป็นลักษณะพิเศษของการไหลตัวของเส้นกราฟ C เมื่อความหนืดลดลง พบว่า Shear rate จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการแตกหักของจุดเชื่อมระหว่างอนุภาค หรือการเพิ่มขึ้นของอนุภาคในทิศทางการให้แรง

ระบบ Shear thickening จะแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของความหนืด เมื่อ Shear rate เพิ่มขึ้น แต่เทอม Dilatant จะถูกใช้แทนคำว่า Shear thickening โดย Dilatant จะใช้กับระบบที่มีปริมาตรระหว่างอนุภาคมากขึ้น เมื่อมีการให้แรง Shear ซึ่งผลกระทบจะทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของอนุภาคเปลี่ยนแปลงไป เมื่อสัดส่วนของปริมาตรของแข็งเพิ่มขึ้น ของเหลวไม่สามารถแทรกเข้าไปเติมในส่วนที่เป็นรูพรุนได้ และความหนืดจะเพิ่มขึ้นเมื่อ Shear rate เพิ่มขึ้น

ปรากฏการณ์ที่ขึ้นกับเวลา (Time dependent phenomena)

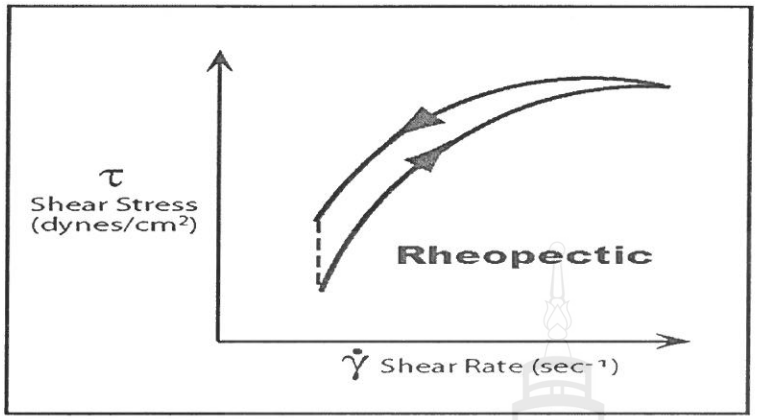
Thixotropy หมายถึง พฤติกรรมของน้ำสลิปที่มีแนวโน้มที่จะมีความหนืดเพิ่มขึ้น เมื่อตั้งทิ้งไว้เฉื่อยๆที่เป็นเช่นนี้เพร่ว่าในน้ำสลิปเกิดโครงสร้างขึ้นมาในน้ำสลิป และโครงสร้างนี้ถูกทำลายโดยวิธีการกวน ค่า Thixotropy วัดโดยใช้ค่าการเปลี่ยนแปลงความหนืดในช่วงเวลาหนึ่ง

Thixotropy ในบางระบบ ความหนืดจะลดลงภายใต้แรงดัน Shear และจะค่อยๆลดลงเมื่อตั้งทิ้งไว้ ระบบที่แสดงพฤติกรรมเปลี่ยนไปตามเวลา เรียกว่า "Thixotropic" โดยเกิดจากการแตกหักของการเชื่อมภายในโครงสร้างทั้ง 3 มิติ ภายใต้แรง Shear แต่สามารถกับมารวมตัวกันได้เมื่อตั้งทิ้งไว้ กราฟที่เป็นระบบนี้จะแสดงดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress กับ Shear rate ในสารแขวนลอยที่เกิด Thixotropy

Rheopexy system (Anti-thixotropic) เป็นระบบที่ตรงกันข้ามกับ Thixotropy คือ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ความหนืดจะเพิ่มขึ้นภายใต้แรง Shear ดังรูป 2.20



รูปที่ 2.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress และ Shear rate ในสารแขวนลอยที่เกิด Rheopexy

บทที่ 3
ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 การเตรียมดิน

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาสมบัติต่างๆของดินโดยเลือกดินที่ได้จากตำบลเวียงกาหลงเป็นหลัก โดยใช้ดิน 3 แหล่งจาก 3 หมู่บ้าน และกำหนดชื่อดินจากทั้ง 3 แหล่งดังนี้ คือ BTC, BRC และ BHC

การเตรียมดินเพื่อใช้ในการทดลองจะเตรียมเลียนแบบกลุ่มผู้ผลิตเซรามิกเวียงกาหลง โดยนำดินที่เป็นก้อนมาทำการบดย่อยให้แตกเป็นผงด้วยไม้หรือค้อนแล้วกรองผ่านตะแกรงขนาด 35 เมช จากนั้นนำไปอบไล่ความชื้นที่มีอยู่ในดินออกที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลาประมาณ 3 ชั่วโมง ก่อนนำไปวิเคราะห์ทดสอบ ซึ่งในการทดสอบอาจต้องทำการเตรียมหรือบดเพิ่ม ขึ้นอยู่กับเครื่องมือหรือวิธีการที่ใช้ทดสอบนั้นๆ

3.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของดิน และการสลายตัวเชิงความร้อน

เพื่อให้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการศึกษาสมบัติทางกายภาพของดินและการปรับปรุงคุณภาพของดิน จึงจำเป็นที่จะต้องตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของดินเสียก่อน การวิเคราะห์องค์ประกอบของเนื้อดินสามารถทำได้โดยใช้เทคนิค X-ray Fluorescence (XRF) ร่วมกับเทคนิคการเบี่ยงเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) [Philips: X Perd Pro MPD, Netherlands] และศึกษาการสลายตัวเชิงความร้อนของดินโดยใช้ TGA/SDTA (Mettler Toledo: 851^{e} STAR^{e} Thermobalance, Switzerland) ตัวอย่างดินที่จะใช้ทำการวิเคราะห์จะต้องผ่านการอบแห้งเพื่อไล่ความชื้นในเตาอบที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นตัวในตู้ดูดความชื้นจากนั้นนำไปวิเคราะห์โดยกำหนดให้ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการศึกษาอยู่ระหว่าง 50 °C ถึง 1,000°C และกำหนดให้อัตราความร้อนที่ให้กับตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบเป็น 20 °C ต่อนาที

3.3 การหาขนาดอนุภาคของเนื้อดินโดยวิธีผ่านตะแกรงร่อน

เป็นการหาขนาดอนุภาคของดินแบบง่ายๆโดยการกรองผ่านตะแกรงขนาด 35 60 100 200 และ 325 เมช ด้วยวิธีกวนผสมแบบเปียกคิดเป็นน้ำหนักของน้ำต่อดินในสัดส่วน 3 ต่อ 1 โดยมวล ผลของการทดสอบจะบอกถึงปริมาณของอนุภาคหรือกากค้างตะแกรงและปริมาณของอนุภาคดินที่ผ่านตะแกรง

3.4 การทดสอบความเป็นพลาสติก

3.4 การทดสอบความเป็นพลาสติก

นำดินจากแหล่งมาบดย่อยให้มีขนาดเล็กละเอียดเป็นผงกรองผ่านตะแกรงขนาด 35 เมช อบที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ปล่อยให้ดินเย็นตัวลง แบ่งตัวอย่างดินออกเป็น 5 ตัวอย่างๆ ละ 50 กรัม เพื่อทำการทดสอบหาค่าความเหนียวในเบื้องต้นก่อนว่าควรใช้น้ำในปริมาณมากน้อยเพียงใด โดยกำหนดปริมาณร้อยละมวลของน้ำที่ใช้อยู่ในช่วง 20-40 และให้ร้อยละของช่วงห่างของน้ำที่ใช้ห่างกันช่วงละ 5 จากนั้นกำหนดการทดลองครั้งที่ 2 โดยการกำหนดช่วงร้อยละของปริมาณน้ำที่ใช้เตรียมตัวอย่างดินให้มีความถี่เพิ่มมากขึ้นคือให้ห่างกันช่วงละ 2 จากนั้นชั่งดินตัวอย่างละ 500 กรัม ผสมกับน้ำตามที่กำหนด นำไปรีดเป็นเส้นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องรีดดินแบบใช้มือกด โดยกำหนดให้ความยาวของเส้นดินเท่ากัน คือ 6 เซนติเมตร หลังจากรีดเสร็จทำการม้วนปลายของเส้นดินทั้งสองข้างเข้าหากันเป็นรูปวงกลมทันที

3.5 การขึ้นรูปเซรามิก การอบแห้งและการเผาและการทดสอบสมบัติหลังการเผา

การขึ้นรูปชิ้นทดสอบสามารถทำโดยการเทหล่อชิ้นงานเป็นรูปแท่งทดสอบให้มีความยาว 10 ซ.ม. ชิ้นงานที่ขึ้นรูปแล้วจะต้องอบแห้งเพื่อไล่ความชื้นก่อนนำไปเผาที่อุณหภูมิต่างๆกันในเตาไฟฟ้า [Carbolite, UK] แล้วทำการศึกษาสมบัติต่างๆของชิ้นทดสอบดังนี้

3.5.1 การทดสอบความหดตัว (Shrinkage)

การทดสอบการหดตัวจะวัดความยาวตามแนวเส้นตรงหลังอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 °C และหลังการเผาที่อุณหภูมิ 800 °C 1,000 °C 1,200 °C และ 1,250 °C ในการเตรียมดินเพื่อทดสอบการหดตัวก่อนเผาจะเตรียม โดยการนำดินผงที่กรองผ่านตะแกรงขนาด 35 เมช มาผสมกับน้ำแล้วทำการผสมและนวดด้วยมือ จากนั้นอัดขึ้นรูปเป็นตัวอย่างแท่งทดสอบด้วยแบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์ที่เตรียมไว้ มีขนาดความยาว 12 เซนติเมตร กว้าง 2 เซนติเมตร หนา 1 เซนติเมตร โดยมีเส้นเพื่อใช้วัดการหดตัวมีความยาวเริ่มต้นเท่ากับ 10 เซนติเมตร ปล่อยทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้ววัดค่าการหดตัวหลังอบแห้งและหลังเผา โดยคำนวณหาค่าความหดตัวเป็นร้อยละ ตามสูตร

$$\text{ร้อยละของการหดตัวเมื่อแห้ง} = \frac{\text{ความยาวเปียก-ความยาวอบแห้ง}}{\text{ความยาวเปียก}} \times 100 \quad \text{.....(3.1)}$$

$$\text{ร้อยละของการหดตัวหลังเผา} = \frac{\text{ความยาวเมื่อแห้ง- ความยาวหลังเผา}}{\text{ความยาวเมื่อแห้ง}} \times 100 \quad \text{.....(3.2)}$$

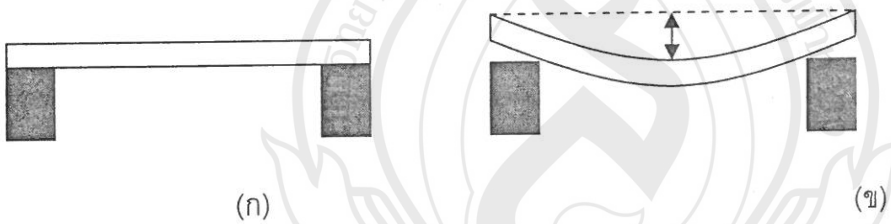
3.5.2 **การดูดซึมน้ำ** (Water Absorption)

การทดสอบการดูดซึมน้ำของเนื้อดินจะวัดจากร้อยละของน้ำที่แท่งทดสอบดูดซับไว้ การเตรียมตัวอย่างดินเพื่อใช้ในการทดสอบมีวิธีการเตรียมเช่นเดียวกันกับการเตรียมตัวอย่างดินเพื่อใช้วัดการหดตัวหลังเผา การวัดการดูดซึมน้ำจะวัดที่อุณหภูมิ 800 °C 1,000 °C 1,200 °C และ 1,250 °C ซึ่งใช้สูตรในการคำนวณ ดังนี้

$$\text{ร้อยละการดูดซึมน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักหลังต้ม} - \text{น้ำหนักก่อนต้ม}}{\text{น้ำหนักก่อนต้ม}} \times 100 \quad \text{.....(3.3)}$$

3.5.3 **ความทนไฟ**

การทดสอบความทนไฟจะวัดจากค่าความโค้งงอของแท่งทดสอบหลังทำการเผา ซึ่งการเตรียมตัวอย่างดินเพื่อใช้ในการทดสอบมีวิธีการเตรียมเช่นเดียวกันกับการเตรียมตัวอย่างดินเพื่อใช้วัดการหดตัวหลังเผา หลังจากนั้นนำแท่งทดสอบเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 1,200 °C 1,250 °C และ 1,280 °Cโดยให้แท่งทดสอบวางอยู่บนแท่งดินที่เตรียมไว้ให้ปลายทั้งสองข้างของแท่งทดสอบมีระยะห่างเท่าๆกันดังภาพที่ 3.1(ก) หลังการเผานำมาวัดค่าโค้งงอที่เกิดจากการอ่อนตัว ดังภาพที่ 3.1 (ข)



(ก) (ข)

ภาพที่ 3.1 (ก)แสดงการวางแท่งทดสอบก่อนการเผา (ข) แสดงการวัดความโค้งงอหลังการเผา

3.5.4 **ความแข็งแรง** (Bending Strength)

การทดสอบความต้านทานต่อแรงดัด(Bending strength) ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรง (Universal Testing Machine : UTM, Instron) จะทดสอบหลังอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 °C และหลังการเผาที่อุณหภูมิ 800 °C 1,000 °C 1,200 °C และ 1,250 °C การเตรียมดินมีวิธีการเตรียมเช่นเดียวกันกับการเตรียมดินเพื่อใช้วัดการหดตัวของเนื้อดิน ซึ่งการวัดเป็นการวัดแบบสามจุด(Three point) โดยกำหนดให้ระยะห่างของลิ่มเป็น 8 เซนติเมตร และอัตราเร็วของแรงที่ใช้กดแท่งทดสอบคงที่คือ 5 มิลลิเมตร ต่อ 60 วินาที เมื่อได้ค่าแรงที่ใช้กดแล้วนำไปคำนวณหาค่าความแข็งแรงของแท่งทดสอบแบบเหลี่ยม ตามสูตร

$$\text{ความแข็งแรง} = \frac{3LD}{2bd^2} \qquad \text{.....(3.4)}$$

โดย L = ค่าน้ำหนักแรงกดที่หัก D = ระยะห่างของลิ่มที่รองรับแผ่นทดสอบ

b = ความกว้างของแผ่นทดสอบ d = ความหนาของแผ่นทดสอบ

3.5.5 สีของชิ้นทดสอบ

สี จะดูด้วยตาเปล่าทั้งหลังอบแห้งและหลังการเผาที่อุณหภูมิ 800 °C 1,000 °C 1,200 °C และ 1,250 °C

3.5.6 การเปลี่ยนแปลงครงสร้าง

การเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิต่างๆโดยใช้กล้องจุลทรรศน์เชิงแสง [Zeiss: Axiotech, Germany] โครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างที่สนใจศึกษาอาจนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราด (SEM) [Leo 1450 VP]

3.6 การศึกษาสมบัติคอลลอยด์และการไหลตัวของน้ำดิน

นำดิน BRC และดิน BTC มาหาเปอร์เซ็นต์ค้างตะแกรงแบบ wet sieve โดยร่อนผ่านขนาดตะแกรง 60, 100, 230 และ 325 เมช (Bunsekifurui รุ่น Jig style wire screen) จากนั้นนำตัวอย่างดินดำมาล้างโดยผ่านตะแกรง 325 เมช แล้วนำไปเกรอะเพื่อดูดน้ำออกเหลือแต่เนื้อดิน นำเนื้อดินที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส และบดด้วยเครื่อง Hammer mill ทำการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสด้วยเตาไฟฟ้า เพื่อหาเปอร์เซ็นต์สารอินทรีย์ และสีหลังเผาในเนื้อดิน หาพื้นที่ผิวดินดำวัดและดินดำบ้านร้องด้วยเครื่อง BET (Autosorb)

เตรียมตัวอย่างดินในช่วงปริมาณของของแข็งในสารแขวนลอย 45-55 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในน้ำกลั่น โดยทำการผสมด้วยเครื่อง Electric mixer เป็นเวลา 10 นาที และวัดความหนืดและทิกโซโทรปีด้วยเครื่อง Viscometer (Brookfield viscometer, Model DV-III+)

เตรียมตัวอย่างดินในปริมาณของของแข็งในสารแขวนลอย 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในน้ำกลั่น แล้วทำการปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 2-10 โดยใช้ PH meter (Mettler-Toledo GmbH Schwerzenbach, Switzerland) ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 0.5 โมลาร์ (Merck เกรด AR) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 โมลาร์ (S.T. Baker เกรด AR) โดยทำการผสมด้วยเครื่อง Electric mixer เป็นเวลา 10 นาที และวัดความหนืดและทิกโซโทรปี (Brookfield viscometer, Model DV-III+)

เตรียมตัวอย่างดินในปริมาณของของแข็งในสารแขวนลอย 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในน้ำกลั่น ที่มีการเติมสารช่วยกระจายตัวโซเดียมซิลิเกต (Merck เกรด AR) โดยทำการผสมด้วยเครื่อง Electric mixer (Cole-Parmer Instrument Company, Model 50002-07) เป็นเวลา 10 นาที และหาปริมาณสารช่วยกระจายตัวด้วยเครื่อง Brookfield viscometer Model DV-III+ เลือกปริมาณสารช่วยกระจายตัวของดินดำทั้ง 2 แหล่ง มาทำการเตรียมน้ำดิน และหล่อแบบ

หมายเหตุ น้ำที่ใช้ในการทดลองนี้คือน้ำปราศจากไอออน (deionised water)

บทที่ 4
ผลการทดลองตอนที่ 1 และการอภิปรายผลการทดลอง

จากการที่คณะวิจัยได้ทำการวิเคราะห์ทดสอบคุณสมบัติของดินจากแหล่งเวียงกาหลงตามวิธีการทดลองในบทที่ 3 ตอนที่ 1 สามารถแบ่งผลการทดลองออกเป็นหัวข้อดังนี้

4.1 ลักษณะทางกายภาพของดินและกากค้างตะแกรง

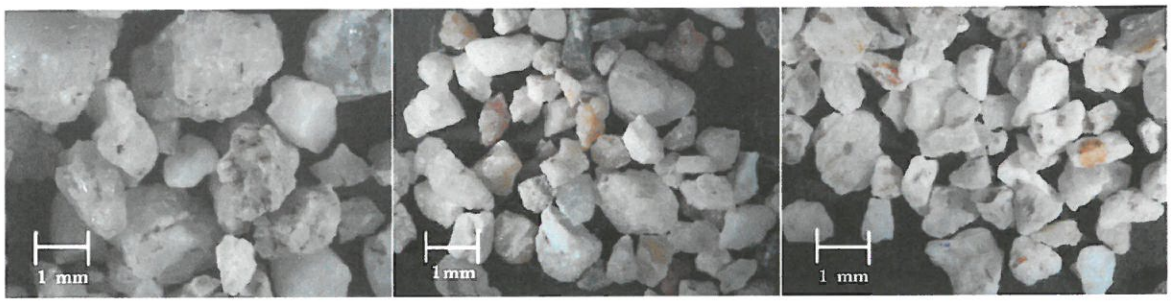
4.1.1 ลักษณะทางกายภาพของดิน

ดินที่นำมาศึกษานี้นี้แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มตัวอย่าง ซึ่งลักษณะของตัวอย่างดินเมื่อดูด้วยตาเปล่าจะเห็นความแตกต่างทั้ง สี และสิ่งที่เจือปนมากับดิน(ดังแสดงในภาพที่ 4.1) ดังนี้คือ ตัวอย่างดิน BTC เป็นดินที่มีสีดำ และมีเม็ดกรวดผสมอยู่เป็นจำนวนมาก มีขนาดประมาณ 1 ถึง 5 มิลลิเมตร ตัวอย่างดิน BRC สีของเนื้อดินเมื่อแห้งจะเป็นสีเทา ลักษณะของก้อนดินมองเห็นเป็นเนื้อเดียวกันไม่มีก้อนกรวดขนาดใหญ่เจือปน ตัวอย่างดิน BHC สีของเนื้อดินเมื่อแห้งจะเป็นสีน้ำตาลอ่อนๆ ก้อนดินมองเห็นเป็นเนื้อเดียวกันทั้งก้อน มีทรายปนบ้างเล็กน้อย

ภาพที่ 4.1 แสดงลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างดินจากแหล่งก่อนทำการบด (ก) ตัวอย่างดิน BTC (ข) ตัวอย่างดิน BRC และ (ค) ตัวอย่างดิน BHC

4.1.2 กากค้างตะแกรง

ผลจากการเตรียมดินของทั้ง 3 ตัวอย่าง พบว่า ในตัวอย่างดิน BTC มีปริมาณของกากค้างตะแกรงขนาด 35 เมช ค่อนข้างมากและมีอนุภาคขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับตัวอย่างดิน BRC และ BHC (ดังภาพที่ 4.2) ซึ่งขนาดของกากค้างตะแกรงหรือกรวดที่พบมีขนาดตั้งแต่ 0.5 ถึง 5 มิลลิเมตร ส่วนในตัวอย่างดิน BRC และ BHC มีปริมาณกากค้างตะแกรงที่น้อยและมีขนาดอนุภาคของกากค้างตะแกรงประมาณ 0.5 ถึง 1มิลลิเมตร เท่านั้น



(ก) (ข) (ค)

ภาพที่ 4.2 แสดงลักษณะทางกายภาพของกากค้างตะแกรงขนาด 35 เมช (ก) ตัวอย่างดินBTC (ข) ตัวอย่างดินBRC และ (ค) ตัวอย่างดิน BHC

4.2 ผลการวิเคราะห์ทดสอบทางเคมีทางแร่และทางความร้อน

4.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของธาตุ

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของธาตุโดยใช้เครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) เพื่อศึกษาชนิดและปริมาณของธาตุในดิน ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์จะแสดงในรูปของสารประกอบออกไซด์ ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินจากแหล่งต่างๆที่ใช้ในการวิจัย

ตัวอย่างดิน	SiO_2	Al_2O_3	K_2O	CaO	Fe_2O_3	TiO_2	L.O.I
BTC	63.46	24.19	2.50	0.26	1.43	0.75	7.41
BRC	75.17	17.06	0.81	0.44	1.32	1.43	3.77
BHC	67.59	22.91	2.08	0.21	2.03	0.61	4.57

* หมายเหตุ ค่า L.O.I. ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าดินทั้งสามตัวอย่างมีปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักอยู่ 6 ชนิด คือ ซิลิกา อลูมินัม โพแทสเซียม แคลเซียม เหล็ก และไทเทเนียม แต่ซิลิกาและอลูมินัมที่ได้จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นนั้น ไม่สามารถบอกได้ว่าเป็นธาตุประกอบของแร่ชนิดใด ซิลิกาอาจจะเป็นธาตุประกอบของ แร่ดิน แร่เฟลด์สปาร์หรือซิลิกาอิสระก็เป็นได้ ฉะนั้นจึงต้องนำผลวิเคราะห์ทางเคมีที่ได้ดังกล่าวไปคำนวณหาส่วนประกอบของแร่ต่างๆในดิน เพื่อจะได้รู้ว่าซิลิกาอิสระหรือแร่ที่พบในแต่ละตัวอย่างดินนั้นมีอยู่มากน้อยเท่าใด ซึ่งในการคำนวณจะต้องใช้ข้อมูลจากผลการวิเคราะห์ทางแร่ด้วยเครื่อง XRD ร่วมด้วย

4.2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่

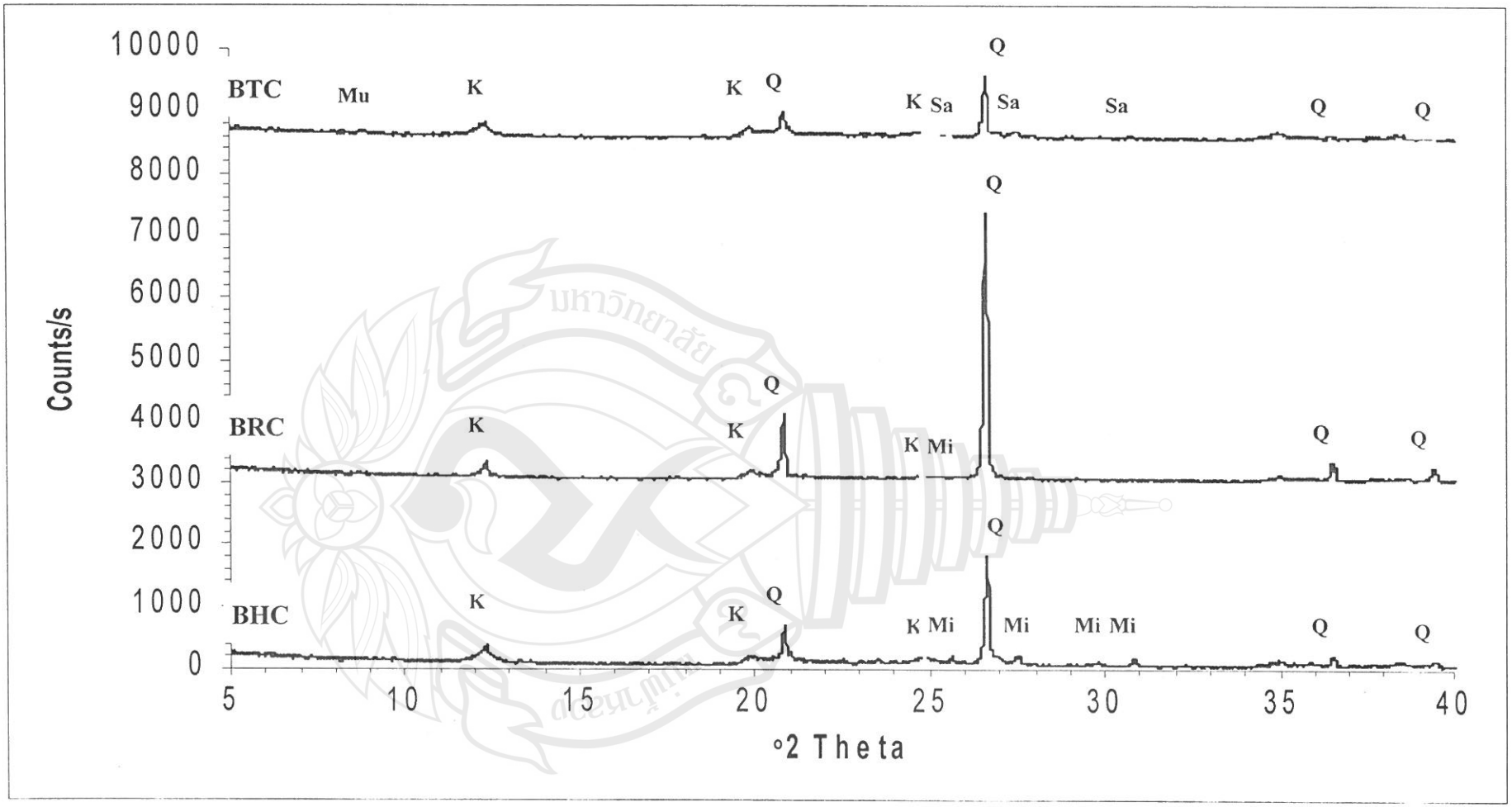
ภาพที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่มีอยู่ในดินทั้ง 3 ชนิด จากผลการทดลองพบว่าในทุกตัวอย่างดินมีแร่ที่เหมือนกันคือแร่ควอตซ์ (Quartz) และแร่เคโอลิไนท์ (Kaolinite) ส่วนแร่ที่ต่างกันคือแร่ในกลุ่มของไมกาและเฟลด์สปาร์ ซึ่งในตัวอย่างดิน BTC จะพบอยู่ 2 ชนิด คือมัสโคไวต์ (muscovite) และซานิดีน (sanidine) ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของเฟลด์สปาร์ แร่ทั้งสองชนิดนี้มีโพแทสเซียมเป็นองค์ประกอบและมีโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลีนิค (monoclinic) เหมือนกัน ส่วนในตัวอย่างดิน BRC และ BHC จะพบแร่ไมโครไคลน์ (Microcline) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบไตรคลีนิค (triclinic) (Chris Pallant, 1992)

จากผลวิเคราะห์ทางเคมี (ตารางที่ 4.1)และผลวิเคราะห์ทางแร่ สามารถนำไปคำนวณปริมาณของแร่ต่างๆ ที่มีในดินโดยประมาณ โดยใช้วิธีการคำนวณจาก ปรีดา พิมพ์ขาวขำ (2539: 105) ซึ่งวิธีคำนวณอยู่ในภาคผนวกที่ 1 และผลการคำนวณของแต่ละตัวอย่างดินแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณแร่ที่ได้จากการคำนวณ

แร่	ตัวอย่างดิน		
	BTC	BRC	BHC
Quartz	28.43	52.02	34.36
Kaolinite	37.66	40.15	50.90
Muscovite	16.82	-	-
Microcline	-	4.70	-
Sanidine	14.67	-	-
Calcium	0.26	0.43	0.20
Ferric	1.42	1.30	1.98
Titanium	0.74	1.40	0.59
รวม	100.00	100.00	100.00

จากผลการคำนวณพบว่า ในตัวอย่างดิน BRC มีปริมาณของซิลิกาอิสระมากกว่าตัวอย่างดิน BHC และ BTC ซึ่งผลของปริมาณซิลิกาอิสระที่มีอยู่ในเนื้อดินจะอธิบายไว้ในผลการทดสอบทางกายภาพของดิน



ภาพที่ 4.3 แสดงพีคของแร่จากผลการวิเคราะห์XRD ของดิน BTC BRC และ BHC

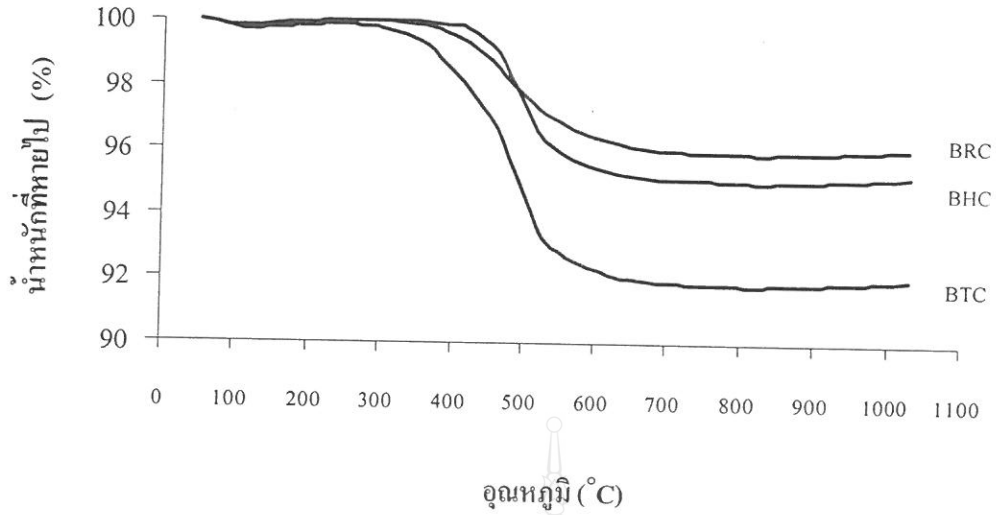
4.2.3 การวิเคราะห์ทางความร้อน

ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนโดยใช้เทคนิค TGA/SDTA เพื่อศึกษาน้ำหนักที่หายไปหลังการเผา (Loss on ignition :LOI) และการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อน ณ ช่วงอุณหภูมิต่างๆ ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4.4 และ 4.5

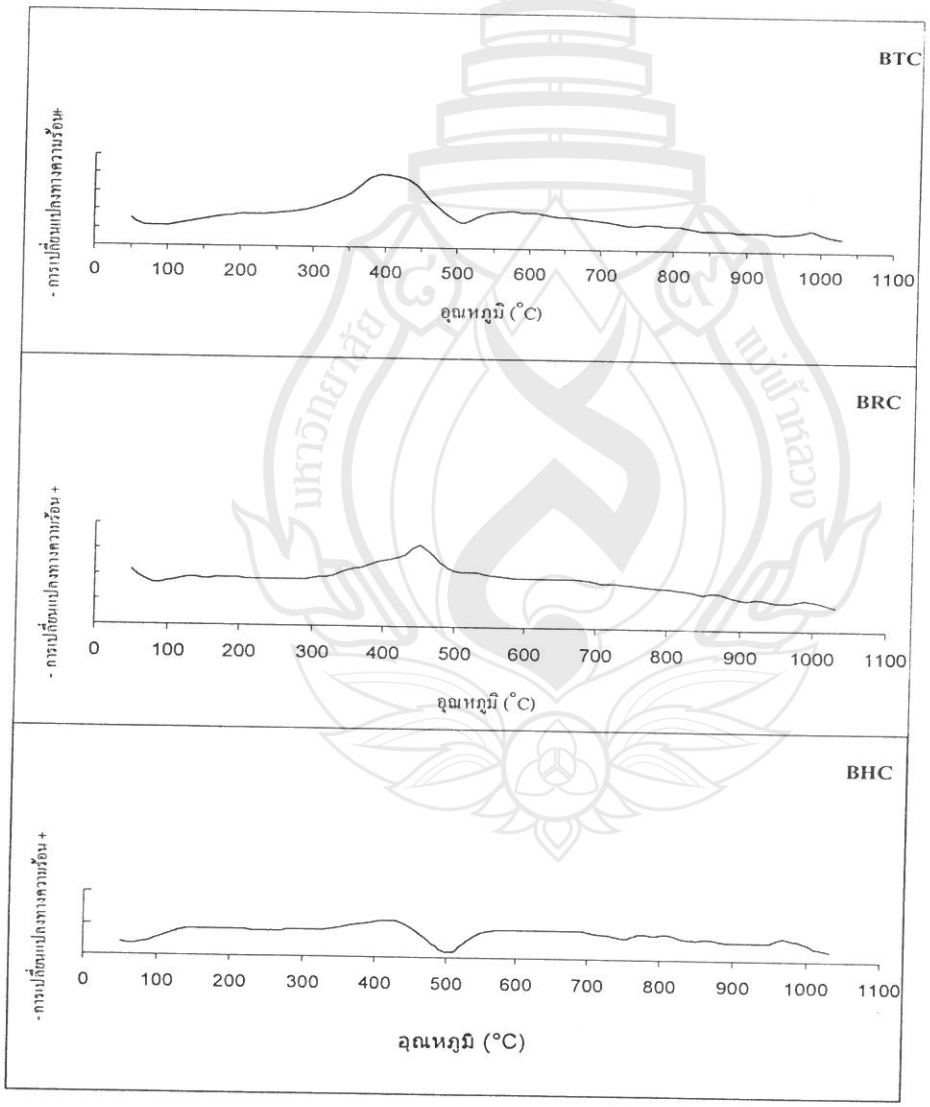
จากผลการวิเคราะห์ โดยใช้ TGA ในภาพที่ 4.4 จะสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักเกิดขึ้นอยู่ 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรกจะเกิดที่ช่วงอุณหภูมิ 100 °C ถึง 200 °C ซึ่งน่าจะเป็นการหายไปของน้ำหรือความชื้นที่อยู่ระหว่างอนุภาคของดิน ส่วนขั้นตอนที่ 2 จะเกิดที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 400 °C ถึง 700 °C น่าจะเป็นการหายไปของน้ำที่อยู่ในโครงสร้างผลึกของดินและอินทรีย์สารที่มีอยู่ในดิน ซึ่งน้ำหนักที่หายไปของทั้งสามตัวอย่างดิน พบว่า ตัวอย่างดิน BTC น้ำหนักหายไปหลังการเผามากที่สุดคือร้อยละ 8 รองลงมาคือตัวอย่างดิน BHC ร้อยละ 4.79 และ BRC ร้อยละ 3.92 ตามลำดับ

ส่วนผลของ SDTA (ภาพที่ 4.5) พบว่าตัวอย่างดิน BTC ที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 100 °C ถึง 200 °C ดินมีการดูดความร้อนเนื่องจากการเสียสูญความชื้นที่อยู่ระหว่างอนุภาคหรือผิวของดิน ที่ช่วงอุณหภูมิ 300°C ถึง 450°C ดินมีการการคายความร้อนออกมาเนื่องจากการเผาไหม้ของพวกอินทรีย์สารที่มีอยู่ในดิน ซึ่งในตัวอย่างดินนี้จะได้กราฟที่แสดงลักษณะของการคายพลังงานได้ชัดเจนกว่าตัวอย่างดิน BRC และ BHC อาจเนื่องมาจากตัวอย่างดินนี้มีปริมาณของอินทรีย์สารที่มากกว่าก็เป็นได้ ที่อุณหภูมิ 450 °C ถึง 550 °C เป็นการสูญเสียน้ำที่อยู่ในโครงสร้างผลึกของดิน ทำให้โครงสร้างผลึกเปลี่ยนเป็นเมตะเคโอลิน และที่อุณหภูมิ 980 °C เกิดการสลายตัวของของสปิเนล (Spinel) ร่วมกับการคายพลังงาน

ในตัวอย่างดิน BRC การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนในแต่ละช่วงอุณหภูมิจะมีลักษณะที่คล้ายกับตัวอย่างดิน BTC ยกเว้นการเปลี่ยนแปลงในช่วงอุณหภูมิประมาณ 450 °C ถึง 550 °C จะแสดงกราฟของการดูดพลังงานหรือกราฟที่แสดงการหายไปของน้ำที่อยู่ในโครงสร้างผลึกของดินที่ไม่ชัดเจน อาจเนื่องมาจากตัวอย่างดินนี้มีปริมาณแร่เคลิไนต์น้อยกว่าดินอื่นๆ ส่วนการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของตัวอย่างดิน BHC ในแต่ละช่วงอุณหภูมิมีความคล้ายคลึงกับตัวอย่างดิน BTC อาจจะมีความแตกต่างบ้างในส่วนของค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานในแต่ละช่วงอุณหภูมิ



ภาพที่ 4.4 แสดงผลการสลายตัวเชิงความร้อนของตัวอย่างดิน



ภาพที่ 4.5 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของตัวอย่างดิน โดยใช้เทคนิค SDTA

4.2.4 การหาขนาดอนุภาคของดิน

ผลการหาค่าความละเอียดของดินจากการกรองด้วยตะแกรงที่มีความละเอียดต่างกันได้ผลของการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณกากค้างตะแกรงของดินโดยวิธีกวนน้ำดินกรองผ่านตะแกรงขนาดต่างๆ

ตัวอย่างดิน	ขนาดตะแกรง (เมช)	น้ำหนักแห้ง (กรัม)	กากค้างตะแกรง (กรัม)
BTC	60	100	9.17
	100		2.90
	200		3.50
	325		2.74
ผลรวมของอนุภาคดินที่ค้างตะแกรง			18.31
ร้อยละของอนุภาคดินที่ล้างได้			81.69
BRC	60	100	5.46
	100		3.96
	200		8.25
	325		5.82
ผลรวมของอนุภาคดินที่ค้างตะแกรง			23.49
ร้อยละของอนุภาคดินที่ล้างได้			76.51
BHC	60	100	2.87
	100		2.07
	200		6.14
	325		8.41
ผลรวมของอนุภาคดินที่ค้างตะแกรง			19.49
ร้อยละของอนุภาคดินที่ล้างได้			80.51

จากตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างดิน BTC มีผลรวมของอนุภาคดินที่ผ่านตะแกรงมากที่สุดคือร้อยละ 81.69 รองลงมาคือตัวอย่างดิน BHC ร้อยละ 80.51 และตัวอย่างดิน BRCร้อยละ 76.51ตามลำดับ ในทางตรงกันข้ามหากอนุภาคของดินที่ค้างตะแกรงมากย่อมมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่าอนุภาคของดินที่ค้างตะแกรงน้อยๆ

4.3 การทดสอบทางกายภาพ

4.3.1 การทดสอบความเหนียวหรือสภาพพลาสติก

จากผลการทดลองพบว่าดินในแต่ละแหล่งจะมีช่วงของการใช้น้ำเพื่อเพิ่มความเหนียวอยู่ในช่วงที่ต่างกัน และเมื่อทำการรีดออกมาเป็นเส้นแล้วทำการม้วนดินเป็นรูปวงกลม ได้ผลการทดลองดังตาราง 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงผลสรุปของการทดสอบความเหนียวของดินโดยการใช้น้ำเป็นส่วนผสม

ตัวอย่างดิน	ร้อยละของช่วงการใช้น้ำ	ร้อยละของน้ำที่นำไปใช้จริง
BTC	26-32	30
BRC	22-24	24
BHC	26-28	26

จากตารางที่ 4.4 จะเห็นว่า ผลของการใช้น้ำเพื่อเพิ่มความเหนียวของตัวอย่างดินจะใช้ในปริมาณที่ต่างกัน ตัวอย่างดิน BTC จะใช้น้ำมากที่สุดและช่วงของการใช้น้ำจะกว้างคืออยู่ในช่วงร้อยละ 26-32 รองลงมาคือตัวอย่างดิน BHC ร้อยละ 26-28 และตัวอย่างดิน BRC ร้อยละ 22-24 ตามลำดับ การใช้น้ำเพื่อเพิ่มความเหนียวในปริมาณที่ต่างกันอาจเนื่องมาจากในดินมีส่วนประกอบที่ต่างกัน เช่น ปริมาณซิลิกาอิสระที่อยู่ในดิน หากมีในปริมาณที่มากจะทำให้ปริมาณการใช้น้ำเพื่อเพิ่มความเหนียวน้อย ซึ่งจากผลการคำนวณหาปริมาณซิลิกาอิสระของตัวอย่างดินพบว่าตัวอย่างดิน BRC มีปริมาณซิลิกาอิสระมากที่สุดคือร้อยละ 53 และเมื่อนำมาทดสอบความเหนียว พบว่า ปริมาณการใช้น้ำเพื่อทำให้เกิดความเหนียวน้อยที่สุด น่าจะมีสาเหตุจากการซิลิกาอิสระที่ว่านี้เป็นวัตถุดิบที่ไม่มีความเหนียว จึงทำให้การดูดซับน้ำที่น้อยกว่าดินที่มีส่วนผสมของซิลิกาอิสระน้อย

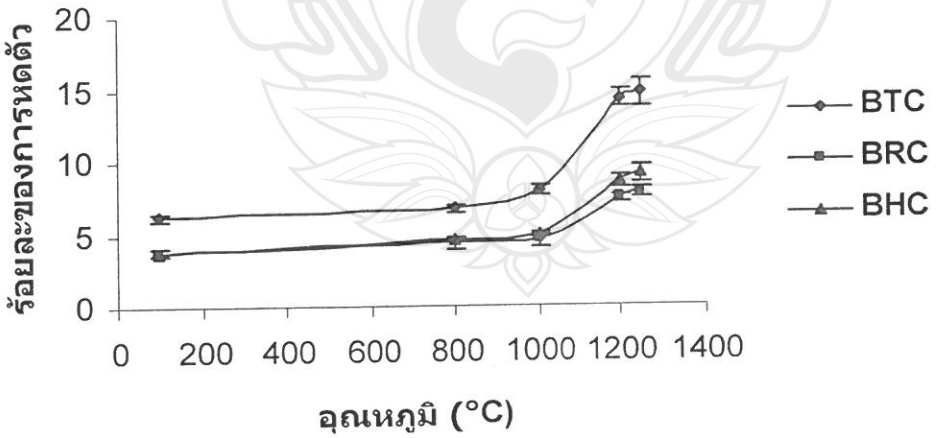
4.3.3 การทดสอบการหดตัว

ผลการทดสอบการหดตัวของเนื้อดินหลังการอบแห้งและหลังการเผาแสดงในตารางที่ 4.5 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับการหดตัวแสดงอยู่ในภาพที่ 4.6

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าการหดตัวของเนื้อดินหลังอบแห้งและหลังเผา

ตัวอย่างดิน	ร้อยละของการหดตัว				
	หลังอบแห้ง	หลังเผา			
		800 °C	1,000 °C	1,200 °C	1,250 °C
BTC	6.20 ±0.27	6.70 ±0.27	8.00 ±0.35	14.30 ±0.22	14.70 ±0.27
BRC	3.80 ±0.27	4.40 ±0.42	4.50 ±0.35	7.40 ±0.22	7.80 ±0.27
BHC	3.80 ±0.27	4.50 ±0.00	4.90 ±0.22	8.60 ±0.42	9.10 ±0.55

จากตารางที่ 4.5 จะเห็นว่าค่าความหดตัวของตัวอย่างดิน BTC จะมีค่าการหดตัวมากกว่าเนื้อดิน BRC และ BHC ทั้งก่อนเผาและหลังเผา การหดตัวของเนื้อดินจะเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น การหดตัวหลังอบแห้งและหลังการเผาที่อุณหภูมิ 800 °C (ดังภาพที่ 4.6) พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันมากนักเนื่องจากการเปลี่ยนโครงสร้างของดินหลังอบแห้งและหลังเผาที่อุณหภูมิดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงของน้ำที่ใช้ในการเพิ่มความเหนียวและน้ำที่อยู่ในโครงสร้างผลึกเท่านั้น ซึ่งน้ำที่ใช้เพื่อให้เกิดความเหนียวจะระเหยไปในช่วงอุณหภูมิ 100 ถึง 200 °C ส่วนน้ำที่อยู่ในโครงสร้างผลึกจะสลายไปในช่วงอุณหภูมิ 450 ถึง 550 °C ในตัวอย่างดิน BTC ใช้น้ำเพื่อให้เกิดความเหนียวมากที่สุดจึงทำให้การหดตัวมากขึ้นด้วย ส่วนการหดตัวของเนื้อดินที่อุณหภูมิ 1,200 ถึง 1,250 °C อาจเนื่องมาจากการผนึกตัวของเนื้อดินแน่นมากขึ้นเกิดเป็นเฟสแก้ว ทำให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคลดลงจึงเกิดการหดตัวมากขึ้น



ภาพที่ 4.6 กราฟแสดงร้อยละการหดตัวของเนื้อดินหลังอบแห้งและหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ

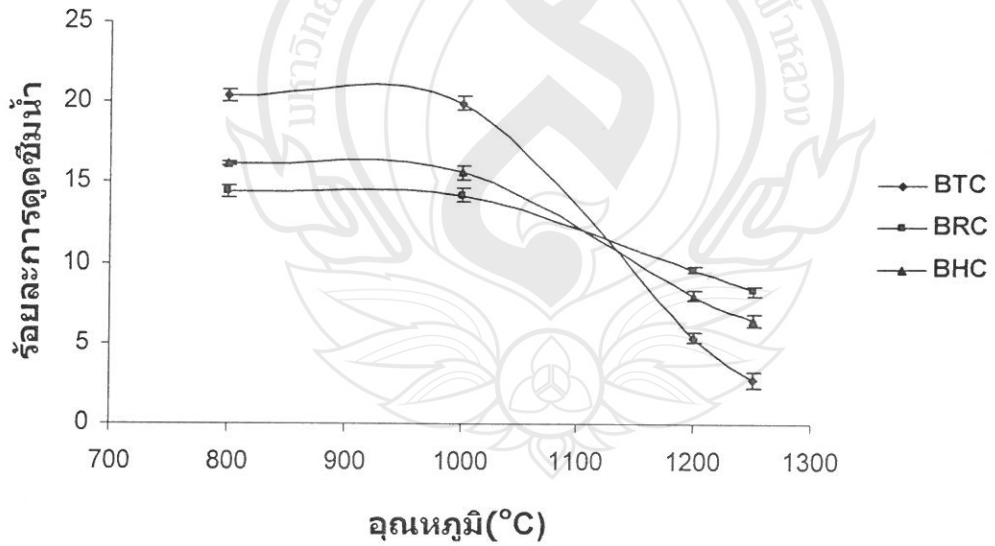
4.3.4 การทดสอบการดูดซึมน้ำ

การดูดซึมน้ำของเนื้อดินวัดจากร้อยละของน้ำที่แห่งทดสอบดูดซับไว้ ซึ่งค่าความพรุนตัวแสดงในตารางที่ 4.6 และ ภาพที่ 4.7

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าร้อยละของการดูดซึมน้ำของเนื้อดินหลังการเผา

ตัวอย่างดิน	ร้อยละของการดูดซึมน้ำ			
	800°C	1,000°C	1,200°C	1,250°C
BTC	20.36 ±0.33	20.23 ±0.43	5.40 ±0.33	2.80 ±0.49
BRC	14.18 ±0.36	14.49 ±0.42	9.63 ±0.14	8.29 ±0.30
BHC	16.18 ±0.11	15.65 ±0.44	7.98 ±0.32	6.45 ±0.39

จากตารางที่ 4.6 ในช่วงอุณหภูมิ 800 °C ถึง 1,000 °C ตัวอย่างดินทั้งสามไม่มีการเปลี่ยนแปลงร้อยละของการดูดซึมน้ำมากนัก แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 1,200 °C ร้อยละของการดูดซึมน้ำของตัวอย่างดินทั้งสามจะลดลงอย่างรวดเร็วอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเพิ่มอุณหภูมิต่อไปจนถึง 1250 °C ตัวอย่างดินทั้งสามยังคงดูดซับน้ำได้เพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย หลังการเผาที่ 1250 °C พบว่าตัวอย่างดิน BTC จะมีร้อยละของการดูดซึมน้ำน้อยที่สุดคือประมาณร้อยละ 2 ส่วนตัวอย่างดิน BHC และดิน BRC มีร้อยละของการดูดซึมน้ำค่อนข้างสูงคือประมาณร้อยละ 6



ภาพที่ 4.7 กราฟแสดงร้อยละความพรุนตัวของเนื้อดินหลังการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ

4.3.5 การทดสอบความทนไฟ

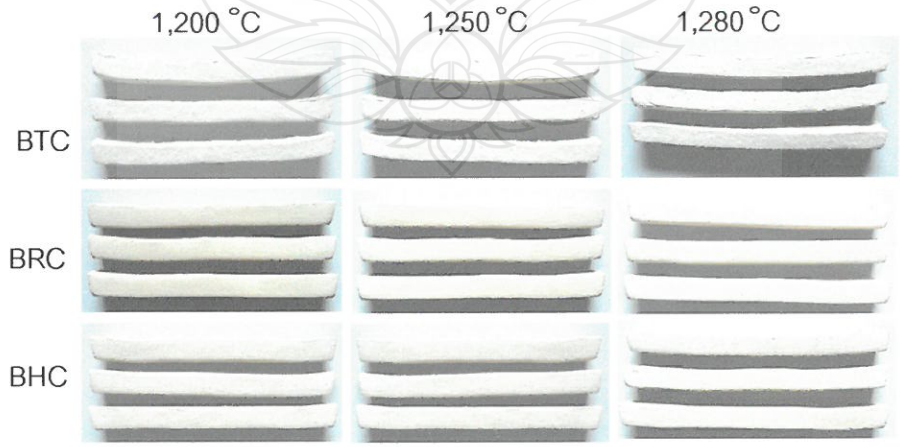
ผลของความทนไฟของเนื้อดินโดยอาศัยค่าความโค้งงอของเนื้อดินหลังทำการเผา เนื้อดินที่มีช่วงของการเผายาวเมื่อสุกตัวแล้วค่าความโค้งงอจะมีน้อย ค่าความโค้งงอแสดงในตารางที่ 4.7 และการโค้งงอของชิ้นทดลองหลังเผาแสดงในภาพที่ 4.8

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าความโค้งงอของเนื้อดินหลังเผา

ตัวอย่างดิน	ค่าความโค้งงอ (มิลลิเมตร)		
	1,200 °C	1,250 °C	1,280 °C
BTC	0.33 ±0.29	3.33 ±0.58	3.50 ±1.00
BRC	0.00 ±0.00	0.00 ±0.00	1.33 ±0.29
BHC	0.0 0±0.00	1.33 ±0.29	2.33 ±0.58

จากตารางที่ 4.7 หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,200 °C ตัวอย่างดิน BTC เริ่มมีการโค้งงอเล็กน้อย ส่วนตัวอย่างดิน BRC และ BHC ยังไม่มีการโค้งงอ หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,250 °C ความโค้งงอของตัวอย่างดิน BTC มีค่ามากขึ้นส่วนตัวอย่างดิน BHC เริ่มมีการโค้งงอเล็กน้อย ในขณะที่ดิน BRC ยังไม่แสดงการโค้งงอ และเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1,280 °C ความโค้งงอของดินทั้งสามมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

ผลของค่าความโค้งงอที่ได้แสดงให้เห็นว่า ตัวอย่างดิน BRC มีความทนไฟมากที่สุด รองลงมาคือตัวอย่างดิน BHC และ BTC ความทนไฟของเนื้อดินน่าจะมาจากปริมาณของวัตถุดิบที่มีตัวทนไฟในเนื้อดินค่อนข้างสูงคือซิลิกา และวัตถุดิบที่เป็นตัวช่วยหลอมมีในปริมาณที่น้อย ซึ่งจากผลวิเคราะห์ทางเคมีและการคำนวณหาปริมาณซิลิกาอิสระในเนื้อดินพบว่าตัวอย่างดิน BRC มีปริมาณของซิลิกาอิสระมากที่สุดและมีตัวหลอมละลายพวกเฟลด์สปาร์ที่น้อย ส่วนตัวอย่างดิน BTC และ BHC มีตัวหลอมละลายค่อนข้างมากจึงเป็นผลให้เนื้อดินมีความทนไฟที่น้อยกว่า



ภาพที่ 4.8 แสดงการโค้งงอของดินหลังการเผา

4.3.6 การทดสอบความแข็งแรง

ผลการวัดความต้านทานต่อแรงดัด (Bending strength) ของแท่งทดสอบซึ่งผ่านการอบแห้งและผ่านการเผาแสดงในตารางที่ 4.8

จากผลการทดสอบความแข็งแรงของเนื้อดินหลังอบแห้งและหลังเผาที่อุณหภูมิ 800 °C ถึง 1,000 °C ตัวอย่างดินมีค่าความแข็งแรงไม่แตกต่างกันมากนัก โดยที่ตัวอย่างดิน BTC มีความแข็งแรงน้อยที่สุด แต่เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1,200 °C ถึง 1,250 °C พบว่า ตัวอย่างดิน BRC มีความแข็งแรงมากที่สุดรองลงมาคือตัวอย่างดิน BHC และ BTC ตามลำดับ โดยทั่วไปแล้วเนื้อดินที่มีความความพรุนตัวน้อยและมีความหนาแน่นมากน่าจะมีความแข็งแรงที่มากกว่า แต่ปรากฏว่าตัวอย่างดิน BTC ที่มีความพรุนตัวน้อยและความหนาแน่นมากกลับมีความแข็งแรงน้อยกว่าตัวอย่างดิน BRC และ BHC โดยทั่วไปความแข็งแรงเชิงกลของดินเป็นผลมาจากปัจจัยต่างๆ ซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในการทบทวนเอกสารเช่นขนาดอนุภาคของควอทซ์ การเกิดการล็อกกันของผลึกมัลไลต์ การกระจายตัวของผลึกควอทซ์และมัลไลต์ในเฟสแก้ว นอกจากนี้ตำหนิที่เกิดขึ้นในเนื้อดินก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่อาจมีผลกระทบต่อความแข็งแรงของเนื้อดินหลังการเผา ซึ่งจากการศึกษาในเบื้องต้นพบว่า เนื้อดิน BTC มีตุ่มซึ่งมีลักษณะเป็นฟองอากาศเล็กๆ ซ้อนกันภายในหนึ่งก้อนใหญ่และโดนกักไว้ภายในเนื้อดินในบางส่วน ซึ่งตำหนิดังกล่าวอาจมีผลทำให้ความแข็งแรงของเนื้อดินลดลง อย่างไรก็ตามการศึกษาการเปลี่ยนแปลงเฟสหลังการเผาจะช่วยให้เกิดความกระจ่างชัดต่อผลการทดลองนี้ยิ่งขึ้น

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าความแข็งแรงของเนื้อดินหลังอบแห้งและหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ

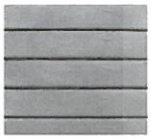
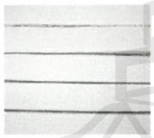
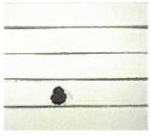
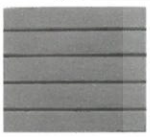
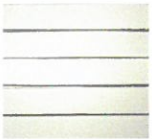
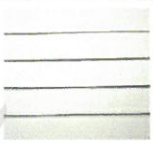
ตัวอย่างดิน	ค่าความแข็งแรง(kg/cm^2)				
	หลังอบแห้ง	หลังเผา (°C)			
		800°C	1,000°C	1,200°C	1,250°C
BTC	32.70 ±2.68	65.67 ±5.74	103.02 ±4.92	170.16 ±10.04	196.96 ±13.33
BRC	42.61 ±4.90	47.42 ±3.31	82.96 ±6.31	218.70 ±4.30	240.56 ±16.60
BHC	33.37 ±5.94	60.83 ±1.75	96.49 ±9.15	196.89 ±16.18	213.48 ±5.86

4.3.8 สีของเนื้อดิน

การศึกษาลักษณะสีของเนื้อดินโดยการดูด้วยตาเปล่าจากสีหลังเผาด้วยบรรยากาศออกซิเดชันที่อุณหภูมิต่างๆดังแสดงในตารางที่ 4.9 ซึ่งลักษณะของสีจะมีความแตกต่างกัน สีของเนื้อดินหลังอบแห้งหรือก่อนเผาของตัวอย่างดิน BTC จะเป็นสีดำ ตัวอย่างดิน BRC และ BHC เป็นสีน้ำตาล ซึ่งสีของดินก่อนเผาน่าจะขึ้นอยู่กับชนิดหรือปริมาณของอินทรีย์สารและอนินทรีย์สารที่ผสมอยู่

เนื้อดิน แต่เมื่อหลังเผาพวกอินทรีย์สารและอนินทรีย์สารจะสลายให้ออกไซด์ของโลหะนั้นๆออกมา ซึ่งการสลายตัวไปขึ้นอยู่กับชนิดของอินทรีย์สารหรืออนินทรีย์สารนั้นๆ สีหลังเผาของตัวอย่างดินที่อุณหภูมิ 800 °C ตัวอย่างดิน BTC และ BRC จะเป็นสีขาวอมชมพู ส่วนตัวอย่างดิน BHC จะเป็นสีน้ำตาลแดง ซึ่งความแตกต่างของสีในตัวอย่างดิน BHC เนื่องมาจากมีปริมาณของเหล็กออกไซด์ที่มากกว่าเล็กน้อย การเผาที่อุณหภูมิที่สูงขึ้นสีของเนื้อดินก็จะเปลี่ยนไปด้วย จากตัวอย่างดินทั้งสามตัวอย่างหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,250 °C พบว่า สีของเนื้อดินไม่แตกต่างกันมากนัก คือจะเป็นสีขาวอมเหลือง เนื่องจากปริมาณเหล็กออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่พบในเนื้อดินไม่ต่างกันมากนัก สีหลังการเผาจึงมีลักษณะดังกล่าว

ตารางที่ 4.9 แสดงสีของเนื้อดินหลังอบแห้งและหลังการเผาบรรยากาศออกซิเดชัน

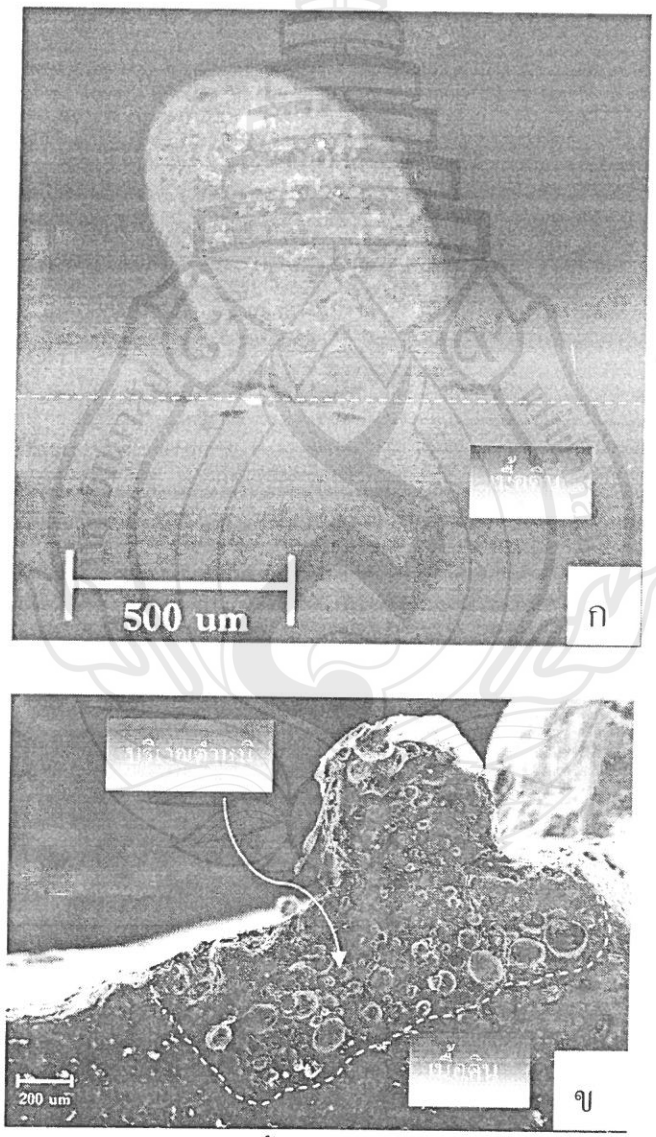
ตัวอย่างดิน	สีหลังอบแห้ง	สีหลังเผา			
		800°C	1,000°C	1,200°C	1,250°C
BTC					
BRC					
BHC					

4.4 การศึกษาตำหนิที่เกิดขึ้นหลังการเผา

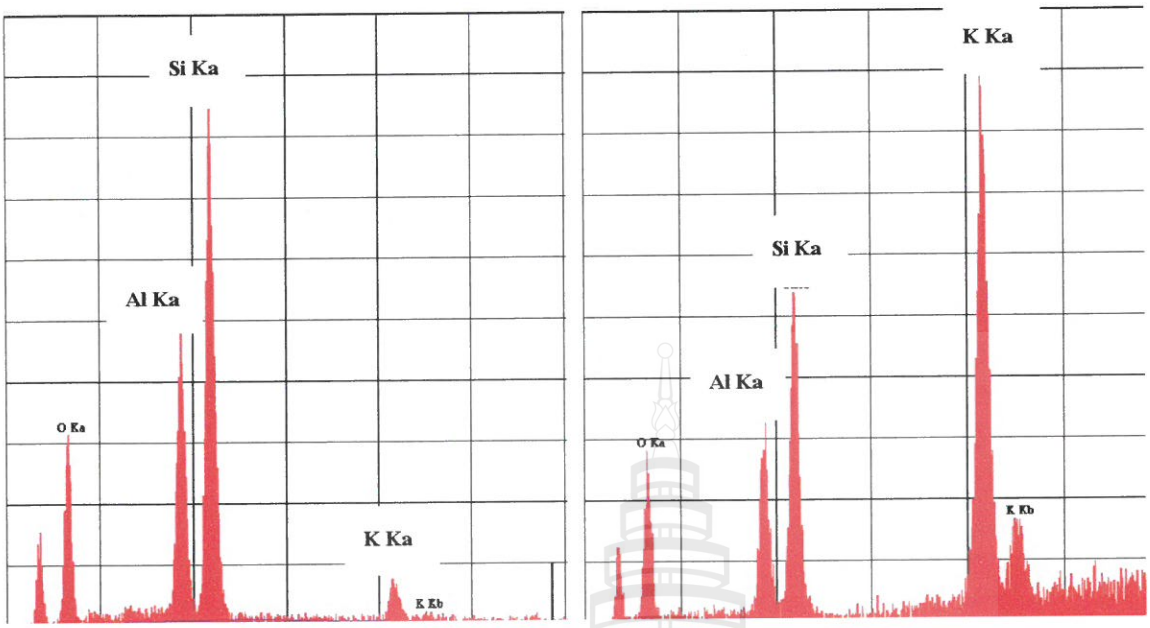
ผลจากการทดสอบสมบัติทางกายภาพของเนื้อดินทั้งสามตัวอย่างหลังการเผาพบว่า ในตัวอย่างดิน BTC และ BHC หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,250 °C มีตำหนิเกิดขึ้น (ดังภาพที่ 4.9 ก) ซึ่งลักษณะของตำหนิที่พบเหมือนฟองอากาศผุดออกมาจากผิวของเนื้อดินและพบในตัวอย่างดิน BTC มากที่สุด เมื่อศึกษาโดยการเตรียมตัวอย่างแบบตัดขวางจะเห็นลักษณะของตำหนิที่พบนั้นเริ่มมีขึ้นภายในเนื้อดิน (ภาพ 4.9 ข) และภายในเนื้อดินยังพบตำหนิที่เป็นฟองอากาศอยู่กระจายไปทั่ว เมื่อทำการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDX บริเวณที่เป็นตำหนิเปรียบเทียบกับบริเวณที่เป็นเนื้อดินทั่วไปของแท่งทดสอบเดียวกันพบว่า บริเวณที่เป็นตำหนิมีปริมาณของโพแทสเซียม (K) ที่สูงกว่าบริเวณที่เป็นเนื้อดินทั่วไป (ดังภาพที่ 4.10)

สาเหตุของการเกิดตำหนิในลักษณะดังกล่าวน่าจะมาจากขนาดของแร่ที่เป็นตัวหลอมละลายในเนื้อดินตัวอย่างนี้มีขนาดค่อนข้างใหญ่ การหลอมตัวอาจจะใช้เวลานานกว่าแร่ที่มีขนาดเล็ก เมื่อนำมาขึ้นรูปและเผาที่อุณหภูมิ 1,250 °C จนเนื้อดินเกิดการ vitrify แล้วแก๊สที่เกิดขึ้นจากการหลอมตัวจึงไม่สามารถหลุดหนีออกมาได้ง่ายนัก ทำให้เกิดการดันตัวของฟองแก๊สดังรูป

เพื่อพิสูจน์ให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงในลักษณะดังกล่าวจึงได้ทำการทดสอบโดยการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างเนื้อดินที่ทำการบดกับไม่บดอัดขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบแห้งเป็นรูปทรงกระบอก (ดังภาพที่ 4.11) แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1,250 °C หลังการเผาพบว่าดินที่ผ่านการบดจะไม่พบลักษณะของตำหนิแต่ดินที่ไม่ผ่านการบดจะพบตำหนิในลักษณะดังกล่าวอยู่เป็นจำนวนมาก แสดงให้เห็นว่าขนาดของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่เป็นสาเหตุของการเกิดตำหนิในลักษณะดังกล่าว

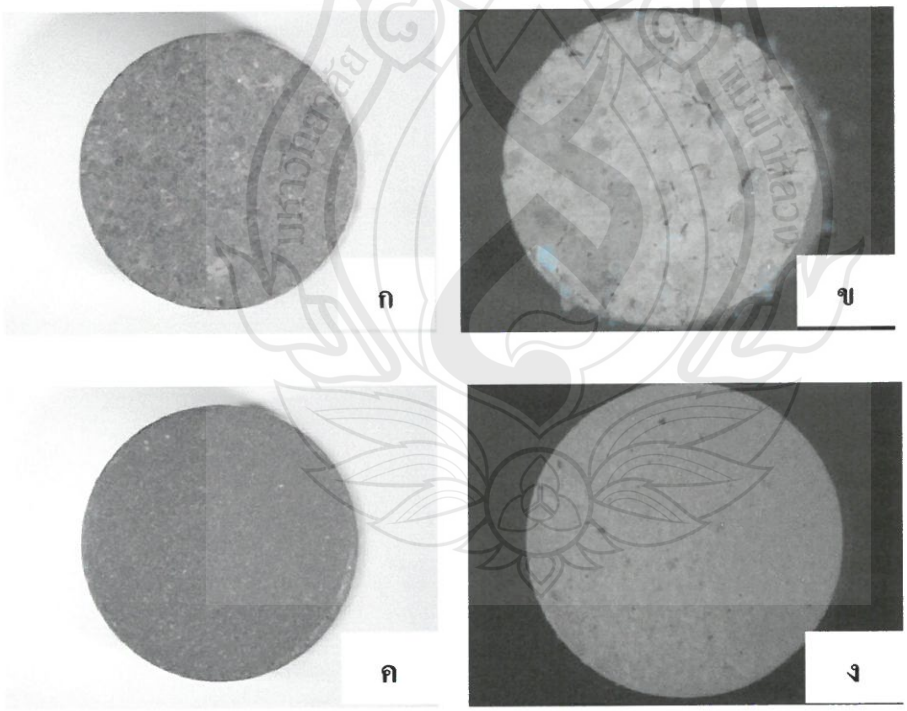


ภาพที่ 4.9 แสดงลักษณะตำหนิหลังการเผาของเนื้อดิน BTC (ก) ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงแสดงตำหนิที่ดันตัวออกมาจากเนื้อดิน (ข) ภาพถ่าย SEM แสดงภาพตัดขวางของตำหนิ



(ก) (ข)

ภาพที่ 4.10 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX (ก) บริเวณเนื้อดินทั่วไป (ข) บริเวณตำหนิ



ภาพที่ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบของเนื้อดินก่อนเผา (ก, ค) และหลังเผา ที่อุณหภูมิ 1,250 °C (ข, ง) ซึ่งเตรียมโดยการไม่บดและบดด้วยโกร่งตามลำดับ

บทที่ 5
ผลการทดลองตอนที่ 2 และการอภิปรายผลการทดลอง

5.1 ผลของเปอร์เซ็นต์ค้างตะแกรงของดิน BTC และดิน BRC

เมื่อนำดิน BTC และดิน BRC ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 60, 100, 230 และ 325 mesh แบบเปียก (Wet) ดังตารางที่ 5.1 พบว่า เปอร์เซ็นต์ค้างตะแกรงที่ขนาด 60, 100, 230 และ 325 mesh ของดิน BTC เท่ากับ 1.55, 4.51, 3.88 และ 18.98 ตามลำดับ และดิน BRC เท่ากับ 4.40, 3.45, 8.74 และ 5.48 ตามลำดับ ส่วนเปอร์เซ็นต์เนื้อดิน BTC และดิน BRC เท่ากับ 71.08 และ77.92 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ค้างตะแกรงของดิน BTC และดิน BRC

ชนิดของดินดำ	เปอร์เซ็นต์ค้างตะแกรงในแต่ละขนาด				เปอร์เซ็นต์เนื้อดิน
	60 mesh	100 mesh	230 mesh	325 mesh	
BTC	1.55	4.51	3.88	18.98	71.08
BRC	4.40	3.45	8.74	5.48	77.92

5.2 ผลของปริมาณสารอินทรีย์และ pH

เมื่อนำดิน BTC และดิน BRC ไปเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส พบว่าดิน BTC (11.60%) มีปริมาณสารอินทรีย์มากกว่าดิน BRC (6.80%) และ pH ของดิน BTC และดิน BRC เท่ากับ 4.8 และ 5.3 ตามลำดับ ดังตารางที่ 5.2

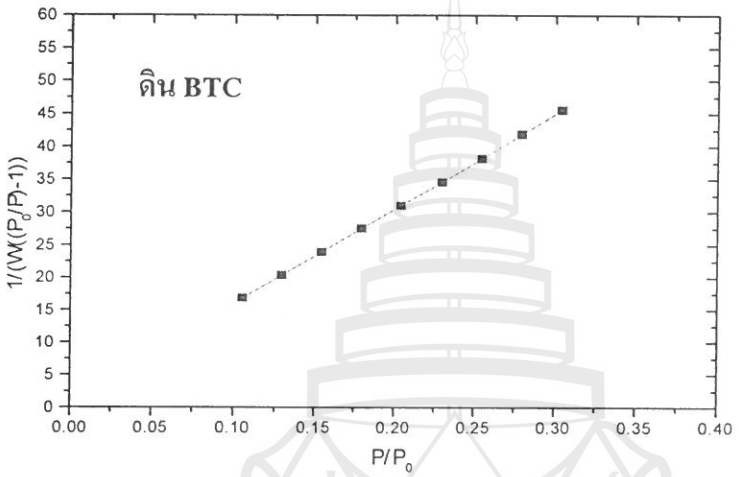
ตารางที่ 5.2 แสดงปริมาณสารอินทรีย์และ pH ของดิน BTC และดิน BRC

ชนิดของดินดำ	ปริมาณสารอินทรีย์ (%)	pH
BTC	11.60	4.8
BRC	6.80	5.3

5.3 ผลของการวิเคราะห์พื้นที่ของดิน BTC และดิน BRC โดยใช้เครื่อง BET

5.3.1 ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว

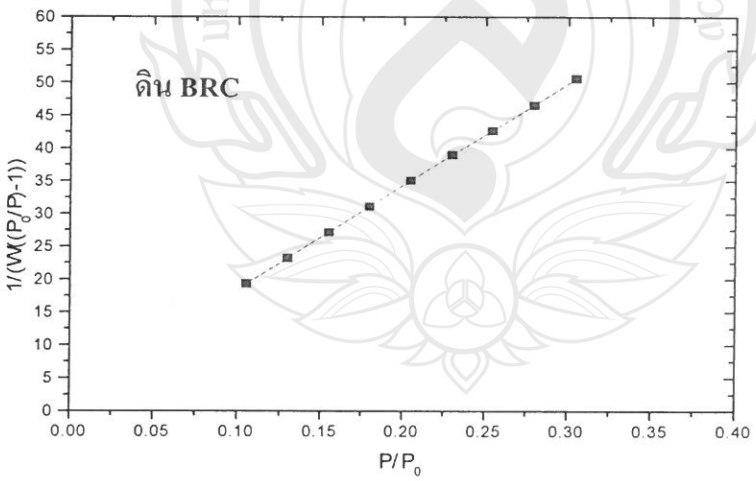
เมื่อนำดิน BTC และดิน BRC มาวิเคราะห์ด้วย BET พบว่า ดิน BTC มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 23.94 (m^2/g) และดิน BRC มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 21.82 (m^2/g) ดังรูปที่ 5.1 และ 5.2 ดังนั้นจึงสรุปว่าดิน BTC มีพื้นที่ผิวมากกว่าดิน BRC ซึ่งผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของดินดำทั้ง 2 แหล่ง จะสอดคล้องกับผลการวัดขนาดอนุภาค คือ ดิน BTC มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าดิน BRC จึงทำให้มีพื้นที่ผิวมาก ส่วนดิน BRC มีขนาดอนุภาคใหญ่จึงทำให้มีพื้นที่ผิวน้อย



Area = 23.94 (m^2/g), Slope = 1.438×10^2 Y – Intercept = 1.697,

Correlation Coefficient = 1.0000, C = 85.70

รูปที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง P/P_0 กับ $1/(W((P_0/P)-1))$ ของดิน BTC



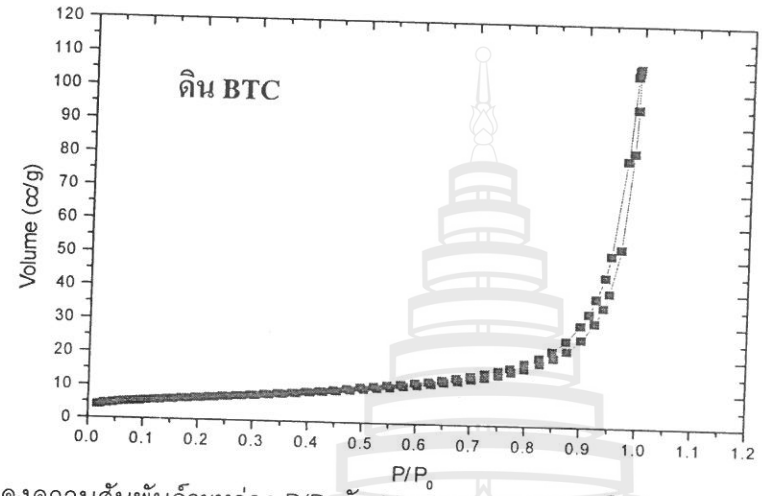
Area = 21.82 (m^2/g), Slope = 1.567×10^2 Y – Intercept = 2.890,

Correlation Coefficient = 1.0000, C = 55.23

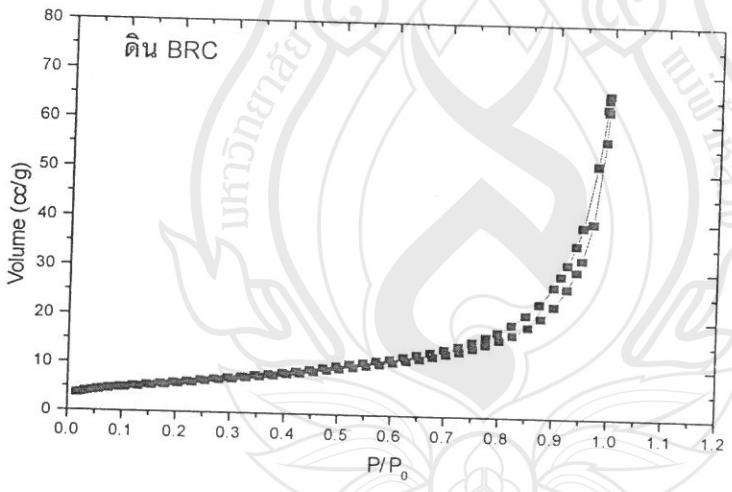
รูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง P/P_0 กับ $1/(W((P_0/P)-1))$ ของดิน BRC

5.3.2 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณรูพรุน

จากการวิเคราะห์ปริมาณรูพรุนที่อยู่ในรูปของ Isotherm 5.3-5.4 และการกระจายตัวของขนาดรูพรุนดังรูปที่ 5.5-5.6 ของดิน BTC และดิน BRC ด้วยเครื่อง Autosorb พบว่าดิน BTC และดิน BRC มีปริมาณรูพรุนและการกระจายตัวของขนาดรูพรุนไม่แตกต่างกันมาก

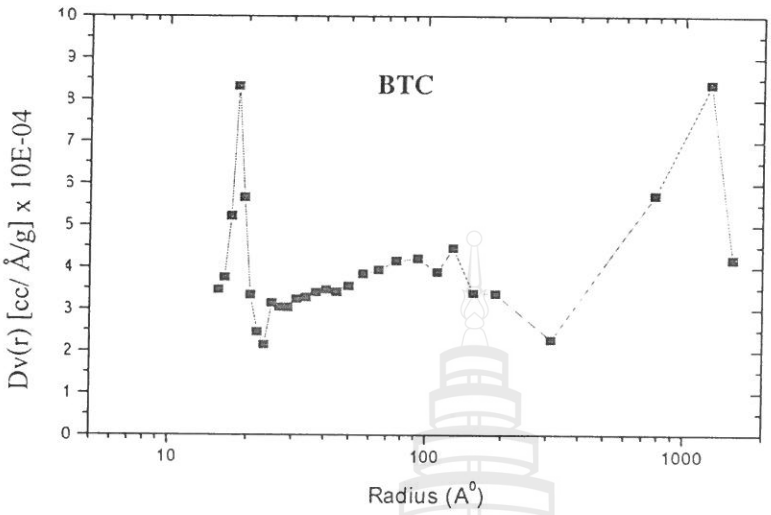


รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง P/P_0 กับ Volume (cc/g)ของดิน BTC

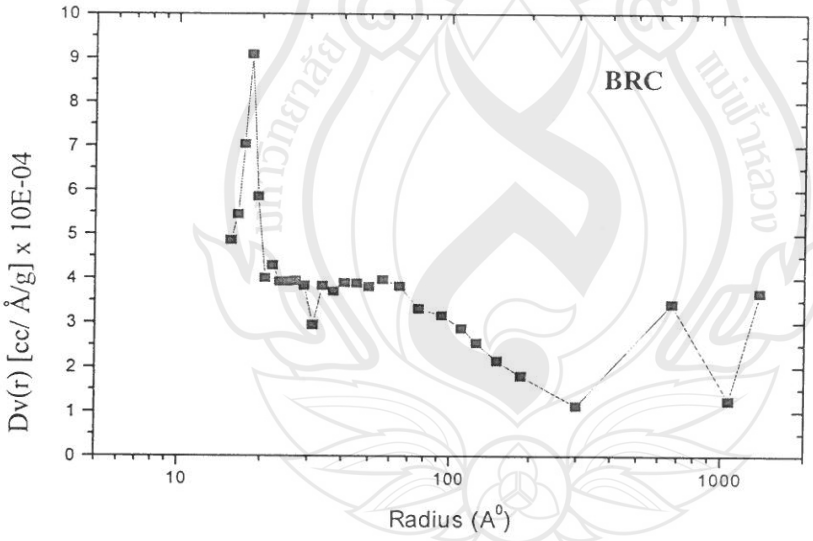


รูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง P/P_0 กับ Volume (cc/g)ของดิน BRC

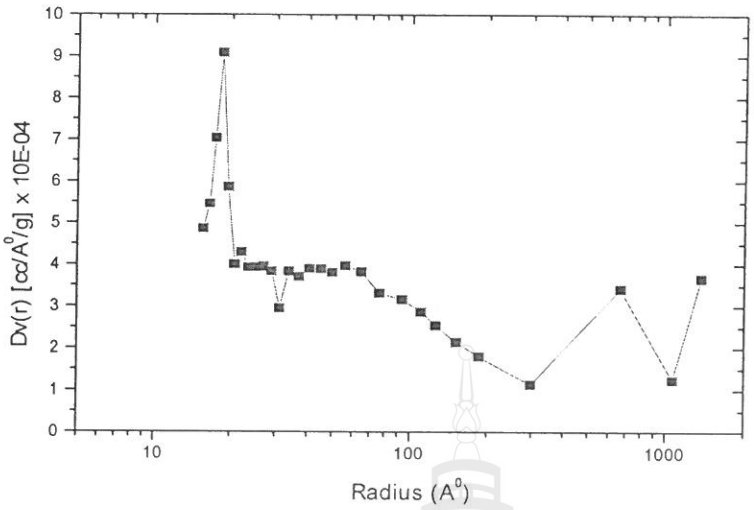
5.3.3 ผลการวิเคราะห์หาการกระจายตัวของขนาดรูพรุน



รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Radius (Å) กับ Dv(r) [c/Å /g) ของดิน BTC



รูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Radius (Å) กับ Dv(r) [c/Å /g)] ของดิน BRC

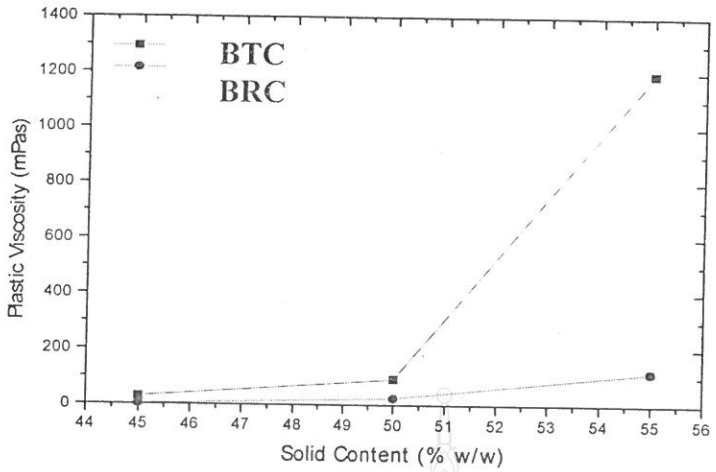


รูปที่ 5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Radius (Å) กับ Dv(r) [c/Å /g)]

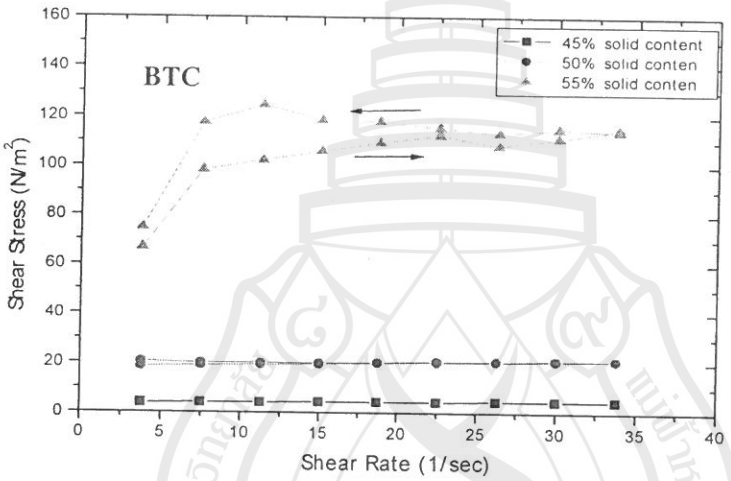
5.4. ผลของการวัดพฤติกรรมการไหลของดิน BTC และ BRC

5.4.1 ผลของการวัดความหนืดและทิกโซโทรปีที่ปริมาณของของแข็งในสารแขวนลอย 45, 50 และ55%w/w แสดงอยู่ในรูป 5.8-5.10 เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองปริมาณของของแข็งในสารแขวนลอย ดังรูปที่ 5.8 พบว่า ค่า Plastic viscosity ของดินตัวอย่างทั้ง 2 แหล่งจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในช่วงปริมาณของของแข็งในสารแขวนลอย 45, 50 และ 55 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่เมื่อเปรียบเทียบดินทั้ง 2 แหล่ง พบว่า ดิน BTC มีค่า Plastic viscosity สูงกว่าดิน BRC ที่มีปริมาณของของแข็งในสารแขวนลอยที่เท่ากัน ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าดิน BTC มีขนาดเล็ก จะทำให้เกิดการจัดเรียงตัวที่มีความหนาแน่นสูง จึงทำให้น้ำแทรกเข้าไปในช่องว่างระหว่างอนุภาคได้ยาก

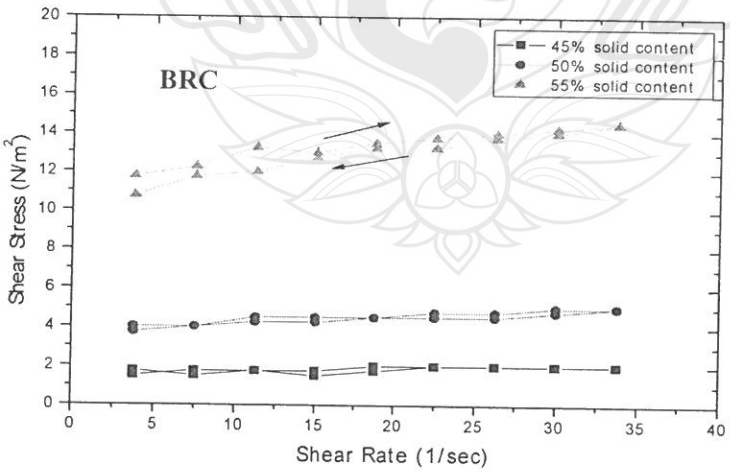
ปริมาณของของแข็งในสารแขวนลอยในน้ำดินจะมีผลต่อปรากฏการณ์ที่ขึ้นกับเวลา หรือทิกโซโทรปี โดยที่ค่าทิกโซโทรปีจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของของแข็งในสารแขวนลอย คือ เมื่อปริมาณของของแข็งในสารแขวนลอยเพิ่มขึ้นค่าทิกโซโทรปีจะเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งจากผลการทดลองของดิน BTC ดังรูปที่ 5.9 พบว่าจะไม่แสดงพฤติกรรมแบบทิกโซโทรปี แต่จะแสดงพฤติกรรมแบบรีโอเปกซี (Rheopexy) ส่วนดิน BRC จะแสดงพฤติกรรมแบบทิกโซโทรปี ดังรูปที่ 5.10 โดยที่ค่าทิกโซโทรปีจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของของแข็งในสารแขวนลอย ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อปริมาณของของแข็งในสารแขวนลอยเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดการจัดเรียงตัวที่มีความหนาแน่นสูงและใกล้ชิดกัน จึงทำให้เกิดการดึงดูดกันระหว่างอนุภาคค่าทิกโซโทรปีจึงเพิ่มขึ้น สาเหตุที่ดิน BTC ไม่แสดงพฤติกรรมแบบทิกโซโทรปี อาจจะเป็นเพราะผลปริมาณสารอินทรีย์ในเนื้อดิน ซึ่งจากผลการทดลองการหาปริมาณสารอินทรีย์พบว่า ดิน BTC มีปริมาณสารอินทรีย์มากกว่าดิน BRC



รูปที่ 5.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Solid content (%w/w) กับ Plastic viscosity (mPas)



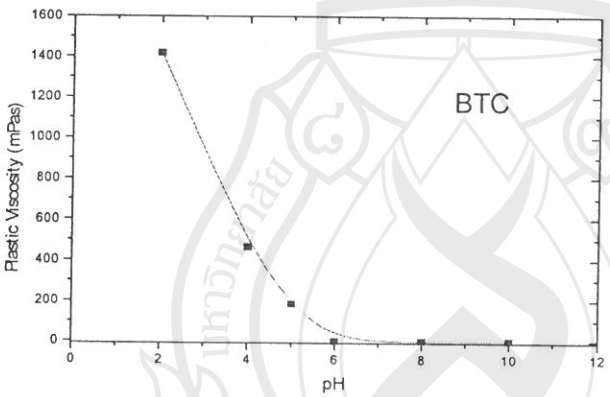
รูปที่ 5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Rate (1/sec) กับ Shear Stress ของดิน BTC



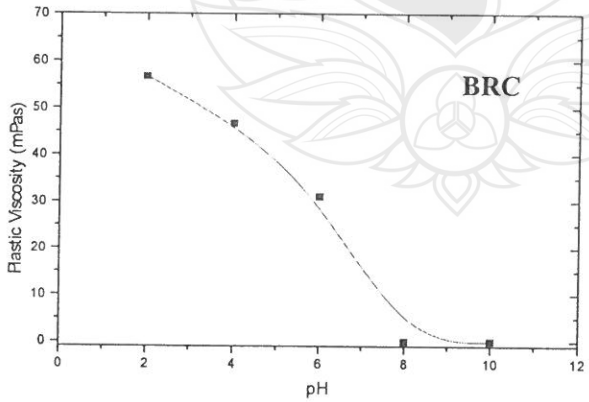
รูปที่ 5.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Rate กับ Shear Stress ของดิน BRC

5.4.2 **ผลการเปรียบเทียบ pH ของน้ำดิน** ที่ปริมาณของของแข็งในสารแขวนลอย 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากการศึกษาผลของ pH ที่มีผลต่อความหนืด ดังรูปที่ 5.11-5.14 พบว่า ดิน BTC และดิน BRCจะมีค่าความหนืดลดลงเมื่อมีสภาวะความเป็นเบสมากขึ้น เนื่องจากที่ pH ต่ำ ที่ขอบของอนุภาคดินจะถูกเปลี่ยนให้เป็นประจุบวก จึงเกิดการรวมกันของอนุภาคแบบ Edge-Face ซึ่งทำให้เกิดโครงสร้างแบบ Card-house และค่าความหนืดจะเพิ่มขึ้น ส่วนที่ pH สูง ขอบของอนุภาคดินจะถูกเปลี่ยนให้เป็นประจุลบ อนุภาคดินจึงเกิดการกระจายตัวที่ดี และค่าความหนืดจะลดลง

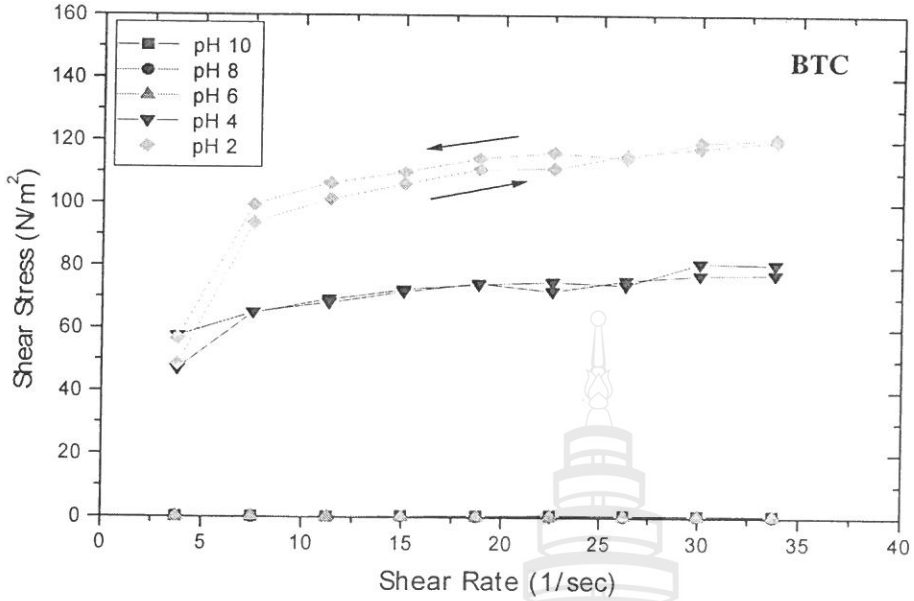
จากผลการทดลอง pH ที่มีผลต่อค่าทิกโซโทรปี พบว่าดิน BTC จะไม่แสดงพฤติกรรมแบบทิกโซโทรปีทุกสภาวะความเป็นกรดและเบสดังรูปที่ 5.13 แต่จะแสดงพฤติกรรมแบบรีโอเปกซี (Rheopexy) ส่วนดิน BRC จะแสดงพฤติกรรมแบบทิกโซโทรปี ดังรูปที่ 5.14 โดยที่ค่าทิกโซโทรปีจะเพิ่มขึ้นเมื่อ pH ลดลง เนื่องจากเกิดการรวมกันของอนุภาคแบบ Edge-Face ซึ่งทำให้เกิดโครงสร้างแบบ Card-house แต่สาเหตุที่ดิน BTC ไม่แสดงพฤติกรรมแบบทิกโซโทรปี อาจเป็นเพราะผลปริมาณสารอินทรีย์ในเนื้อดิน



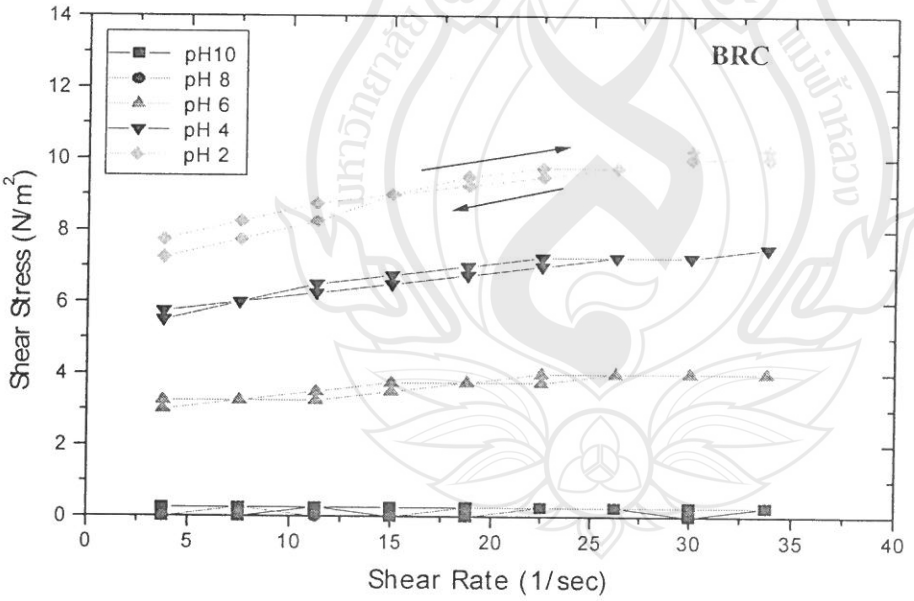
รูปที่ 5.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง pH กับ Plastic viscosity (mPas)



รูปที่ 5.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง pH กับ Plastic viscosity (mPas) ของดิน BRC

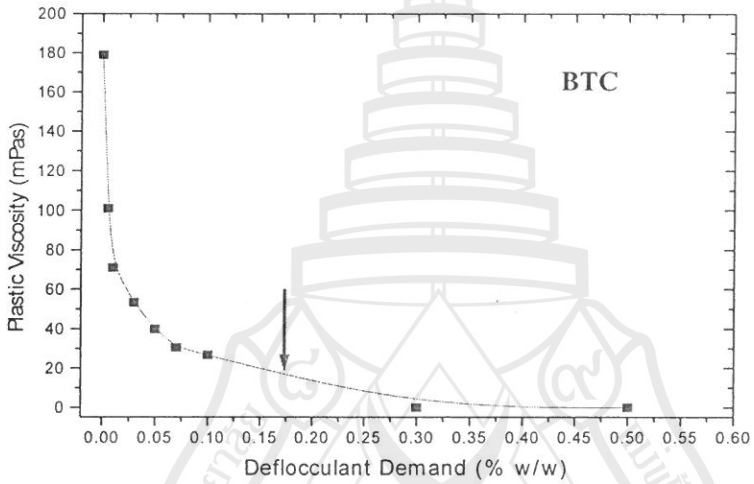


รูปที่ 5.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Rate กับ Shear Stress ของดิน BTC

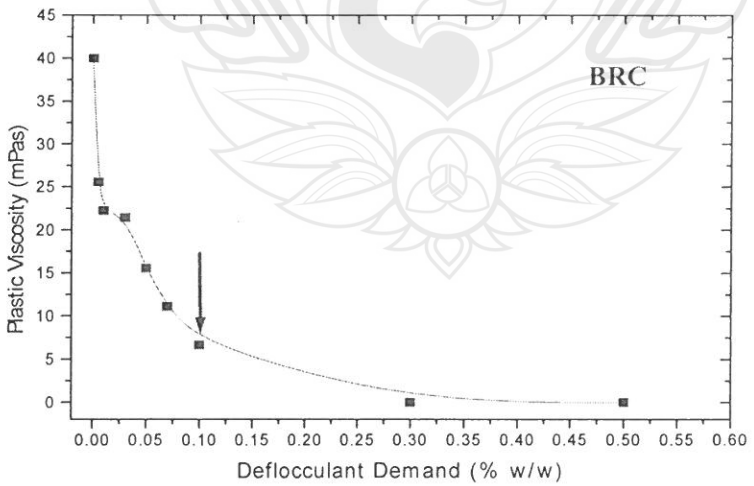


รูปที่ 5.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Rate กับ Shear Stress ของดิน BRC

5.4.3 **ผลของการหาปริมาณสารช่วยกระจายตัว**ที่ปริมาณของของแข็งในสารแขวนลอย 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากการทดลองพบว่า เมื่อเติมโซเดียมซิลิเกตที่เป็นสารช่วยกระจายตัวลงไปในน้ำดินเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ค่าความหนืดจะลดลงอย่างรวดเร็ว เพราะว่าผลของ Anionic deflocculant จะเพิ่มประจุลบที่ขอบของอนุภาคดิน จึงทำให้เกิดการกระจายตัวที่ดี และปริมาณสารช่วยกระจายตัวของดิน BTC และดิน BRC จะมีค่าเท่ากับ 0.15 และ 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ดังรูปที่ 5.15-5.16 สาเหตุที่ทำให้ดิน BRC ใช้ปริมาณสารช่วยกระจายตัวมากกว่าดิน BTC ซึ่งน่าจะเกิดจากปริมาณซิลิกา (ทรายละเอียด) ที่อยู่ในเนื้อดินของดินดำ BRC มากกว่าดิน BTC ซึ่งจะสอดคล้องกับอัตราการหล่อแบบในหัวข้อ 5.5



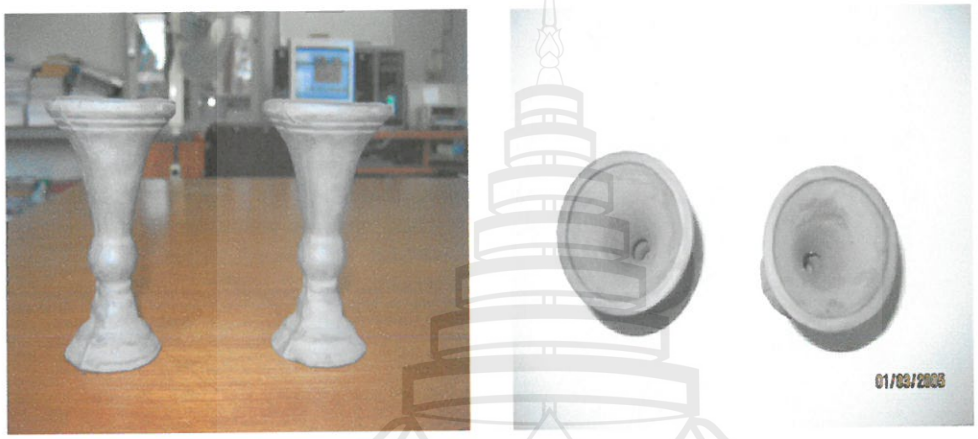
รูปที่ 5.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Deflocculant Demand กับ Plastic Viscosity



รูปที่ 5.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Deflocculant Demand กับ Plastic Viscosity

5.5 ผลการทดลองหล่อแบบที่ปริมาณของของแข็งในสารแขวนลอย 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

จากการทดลองหล่อแบบ พบว่า ดิน BTC สามารถใช้หล่อแบบได้ เนื่องจากมีปริมาณเนื้อดินมากและซิลิกาน้อย จึงทำให้มีความเหนียว และผลิตภัณฑ์ไม่แตกดังรูปที่ 5.17 ส่วนดิน BRC ไม่สามารถที่จะใช้หล่อแบบได้ด้วยตัวเอง เพราะว่า ดิน BRC มีปริมาณเนื้อดินน้อยกว่าดิน BTC ซิลิกามาก จึงทำให้มีความเหนียวน้อย และผลิตภัณฑ์จะแตกตั้งแต่อยู่ในแบบ ดังรูปที่ 5.18

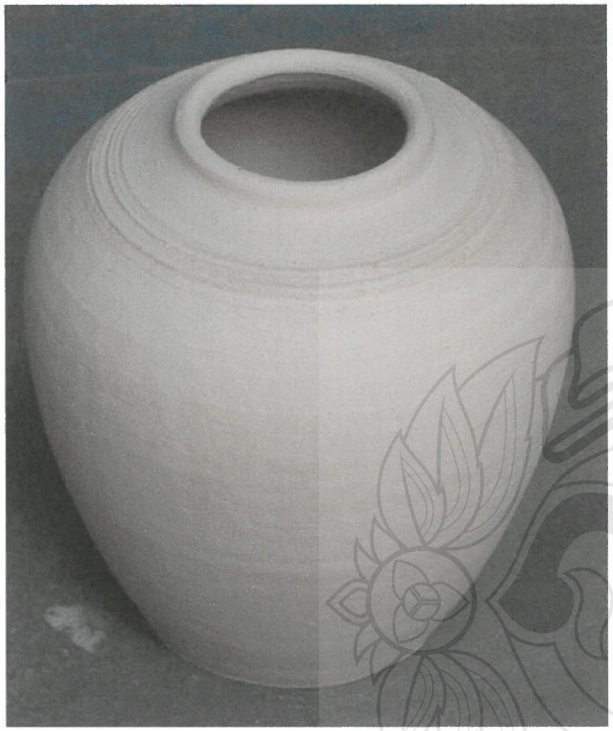


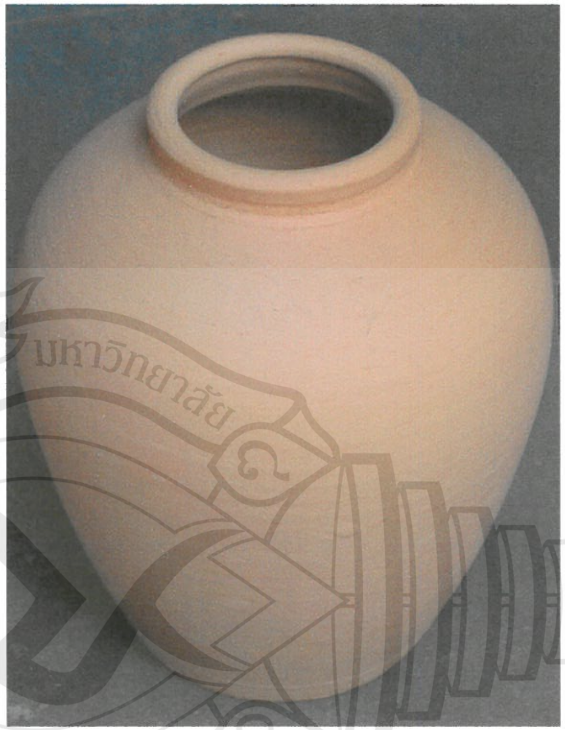
รูปที่ 5.17 แสดงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการขึ้นรูปโดยใช้ดิน BTC

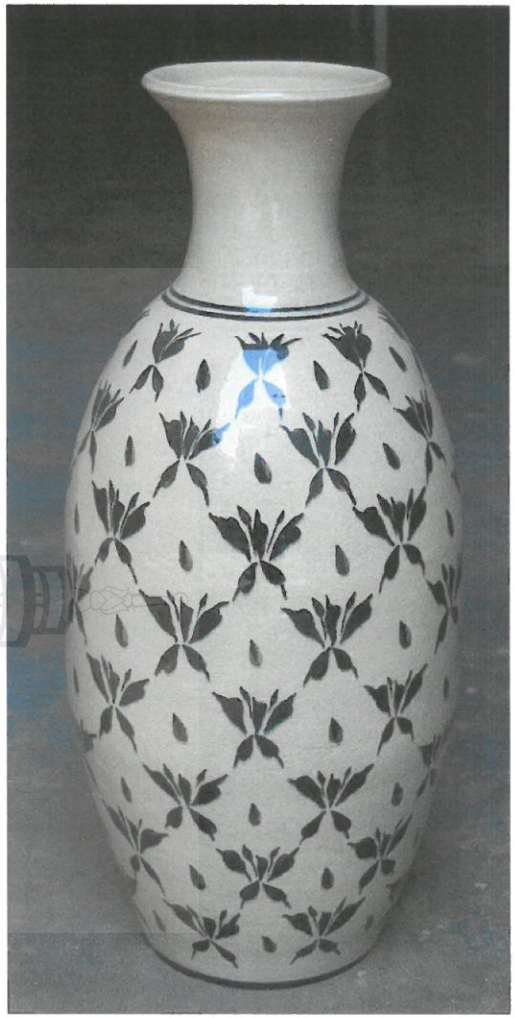
รูปที่ 5.18 แสดงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการขึ้นรูปโดยใช้ดิน BRC

5.6 การขึ้นรูปด้วยแป้นหมุน

การทดลองขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ด้วยแป้นหมุนโดยใช้ดินจากทั้ง 3 แหล่ง พบว่าสามารถขึ้นรูปได้ดี แต่ผลิตภัณฑ์จากดิน BTC มีการหดตัวค่อนข้างมาก ทำให้มักจะมีการแตกร้าวเกิดขึ้นในบางชิ้น ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปโดยด้วยแป้นหมุนแสดงดังรูปหน้า 57







ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ซึ่งขึ้นรูปด้วยแป้นหมุน โดยใช้ดินจาก 3 แหล่ง ในตำบลเวียงกาหลง (ซ้าย) ดิน BHC (กลาง) ดิน BRC ผ่านเพียงการเผาบิสกิตและไม่เคลือบ (ขวา) ดิน BTC ผสมกับดินขาว 20 เปอร์เซ็นต์โดยมวล เคลือบและเผาแกร่งที่ 1250 องศาเซลเซียส

บทที่ 6
สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาสมบัติและลักษณะเฉพาะของดินจากทั้ง 3 แหล่ง ในตำบลเวียงกาหลงสามารถสรุปผลได้ดังนี้

ดิน BTC เป็นดินที่มีขนาดอนุภาคละเอียด มีความเป็นพลาสติกสูงสามารถนำมาขึ้นรูปด้วยแป้นหมุนเป็นผลิตภัณฑ์ขนาดใหญ่ได้ แต่มักมีปัญหาการแตกร้าวเนื่องจากมีค่าการหดตัวที่ค่อนข้างสูง การแก้ไขปัญหานี้สามารถทำได้โดยการผสมกับดินชนิดอื่น เช่น ดินขาวในปริมาณ 20% เพื่อลดการหดตัวลง หลังการเผาแกร่งมีการดูดซึมน้ำต่ำ แต่มักจะมีแร่อื่นๆ ซึ่งรวมตัวตัวกันเป็นก้อนขนาดค่อนข้างใหญ่ ทำให้เกิดปัญหาการปูดพองของเนื้อดินมีลักษณะคล้ายผดหลังการเผาและยังเป็นสาเหตุให้ค่าความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ลดลงอีกด้วย เพื่อแก้ไขปัญหานี้ควรมีการบดและร่อนดินที่ได้ก่อนนำมาขึ้นรูป เนื้อดินมีปริมาณของแร่ที่ช่วยลดจุดสุกตัวอยู่ค่อนข้างมากจึงสามารถเผาที่อุณหภูมิต่ำกว่าดินอื่นได้ ดินหลังการเผามีสีขาวอมเหลือง และเนื่องจากมีปริมาณซิลิกาอยู่น้อยจึงสามารถนำมาขึ้นรูปผลิตภัณฑ์โดยวิธีการเทหล่อได้โดยไม่มีการแตกร้าว แต่การเผาแกร่งควรทำที่อุณหภูมิประมาณ 1200 องศาเซลเซียสเพื่อหลีกเลี่ยงการบิดงอเสียรูป น้ำดินแสดงพฤติกรรมแบบรีโอเปกซีในทุกช่วง pH

ดิน BRC เป็นดินที่มีควอทซ์ละเอียดปะปนอยู่เป็นปริมาณมากทำให้เนื้อดินมีความเหนียวน้อยและมีการหดตัวหลังการเผาต่ำ มีความทนไฟสูงและการแอ่นตัวหลังเผาต่ำ สามารถเผาได้ถึงอุณหภูมิ 1280 องศาเซลเซียสโดยไม่เสียรูป การขึ้นรูปโดยใช้แป้นหมุนสามารถทำได้โดยไม่แตกร้าว สีหลังการเผาแกร่งเป็นสีขาวอมเหลือง การขึ้นรูปโดยวิธีการเทหล่อทำได้ยากมักเกิดการแตกร้าวขณะแห้งตัวเนื่องจากมีปริมาณแร่ดินอยู่น้อย น้ำดินแสดงพฤติกรรมแบบทิกโซโทรปีโดยที่ค่าทิกโซโทรปีจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของของแข็งในสารแขวนลอยเพิ่มขึ้นและเมื่อ pH ลดลง การปรับปรุงน้ำดินสำหรับการเทหล่อควรเพิ่มปริมาณแร่ดินลงไป

ดิน BHC เป็นดินที่มีควอทซ์ละเอียดปะปนอยู่ใกล้เคียงกับดิน BTC แต่เนื้อดินมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า มีความทนไฟสูงและการแอ่นตัวหลังเผาต่ำ สามารถเผาได้ถึงอุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียสโดยไม่เสียรูปและสามารถขึ้นรูปด้วยแป้นหมุนได้ดีโดยไม่แตกร้าว สีหลังการเผาเป็นขาวอมเหลือง เนื่องจากมีปริมาณดินจากแหล่งนี้จำกัดจึงไม่ได้ทำการศึกษาสมบัติทางกระแสวิทยาและการขึ้นรูปโดยวิธีการเทหล่อ

จากการศึกษาดินพบว่าดินทั้ง 3 แหล่งมีองค์ทางเคมี ทางแร่ และสมบัติทางกายภาพ เช่นสี ขนาดอนุภาค ความทนไฟ ที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดถึงแม้ว่าจะเป็นดินที่มาจากตำบลเดียวกัน ฉะนั้นเมื่อผู้ผลิตต้องการนำดินจากแหล่งใหม่มาใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ จึงควรมีการทดสอบสมบัติต่างๆ ของดินนั้นเสียก่อน เพื่อให้สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีได้

เอกสารอ้างอิง

ร.ศ.สุมิตร ปิติพัฒน์ อ.ปริวรรต ธรรมาปรีชากร อ. สมพจน์ สุขาบูลย์. *เวียงกาหลง มหัศจรรย์เครื่องถ้วยล้านนา*. บ. แอคมี่ พริ้นติ้งจำกัด. พิมพ์ครั้งที่ 1 (2544).

มัลลิกา ชัยชนะ. การวิจัยและพัฒนาเครื่องเคลือบดินเผาเลียนแบบผลิตภัณฑ์เครื่องถ้วยวียงกาหลง จังหวัดเชียงราย. *เอกสารประกอบการประชุมทางวิชาการเพื่อนำเสนอผลงานวิจัยและพัฒนา*. หน่วยเทคโนโลยี. เนื้อดิน ศูนย์พัฒนาเครื่องเคลือบดินเผาลำปาง. 64-83(2546)

Brindley, G.W., and Brown, G., *Crystal Structures of Clay Minerals and their X-ray Identification*, Mineralogical Soc. Monograph No.5, Spottiswoode Ballantyne Ltd., London(1980).

Carretero, M. Isabel, Clay Minerals and Their Beneficial Effects Up on Human Health: A Review, *Applied Clay Science*, 21(2002), 155-163.

Carroll, D., *"Clay Minerals: A Guide to their X-ray Identification"*, Geological Society of America, 1970.

Dana, K., Das, S. K., Partial Substitution of Feldspar by B.F. Slag in Triaxial Porcelain: Phase and Microstructural Evolution, *J. Euro. Ceram. Soc.*, 2003, **24**, 3933- 3839.

Das, Swapan Kr., Dana, Kausik, Differences in Densification Behaviour of K-and Na-Feldspar-Containing Porcelain Bodies, *Thermochimica Acta*, 2003, **406**, 199-206.

Dinsdale, A., Poterry Science:Matrials Process and Products, John Wiley and Sons, 1986.

Diz, H.M.M., Rand, B., The Mechanism of Deflocculation of Kaolinite by Polyanions, *J. Br. Ceram. Tran,s* **89**, 1990, 77-82.

Ece, O.I., Nakagawa, Z., Bending Strength of Porcelains, *Ceramics International*, 2002, **28**, 131-140.

Grim, R.E., (1968), *Clay Mineralogy*, 2nd Edn., McGraw-Hill, New York.

Grimshaw, R.W., *The Chemistry and Physics of Clays and Allied Ceramic Materials*, 4th Edn., John Wiley & Sons., New York (1971).

Güller, C. and Balci, E., Effects of Some Salts on the Viscosity of Slip Casting, *Applied Clay Science*, **13**, 213-218, (1998).

Hamano, K., Wu, Y.-H., Nakagawa, Z., and Hasegawa, M., Effects of Grain Size of Quartz on Mechanical Strength of Porcelain Bodies, *J. Ceram. Soc. Jap. Int.*, 1991, **99**, 149-153.

Hasselman, D., P., and Fulrath, R. M., Proposed Fracture Theory of a Dispersion Strengthen Glass Matrix, *J. Am. Cer. Soc.*, 1966, **42**(2), 68-72.

Heath, D., Tadros, TH. F., Influence of pH, Electrolyte, and Poly(Vinyl Alcohol) Addition on the Rheological Behaviour of Aqueous Silica (Aerosil) Dispersions, *J. Colloid Interface Sci.*, **93**, 320-328 (1983).

Lawrence, W.G.: Ceramic Science for the Potter, Pennsylvania, Chilton Book Company, 1972: 55.

Mattyasovsky-zsolnay, L., Mechanical Strength of Porcelain, *J. Am. Cer. Soc.*, 1957, **40**(9), 299-306.

Murray, Haydn H. Traditional and New Applications for Kaolin, Smectite and Palygorskite: *A General Overview*, *Applied Clay Science*, 17(2000), 207-221.

Prasad C.S., Maiti, K.N., Venugopal, R., Effects of Silica Fume Addition on the Properties of Whiteware Compositions, *Ceramics International*, 2002, **28**, 9-15.

Rand, B., Melton, I.E., Particle Interactions in Aqueous kaolinite Suspensions (1. Effect of pH and Electrolyte upon the Mode of Particle Interaction in Homo Sodium Kaloinite Suspension, *J. Colloid Interface Sci.*, **60**, 308-320(1977).

Ryan, W., *Properties of Ceramic Raw Materials* 2nd edition, Pergamon Press, Oxford, 1978, p13.

Sane, S. C., and Cook, R. L., Effects of Grinding and Firing Treatment on the Crystalline and Glass Content and Physical Properties of Whiteware Bodies, *J. Am. Cer. Soc.*, 1951, **34(5)**, 145-151.

Schroeder, J., E., Inexpensive High Strength Electrical Porcelain, *Am, Cer. Soc. Bull.*, 1951, **57**, 526.

Stathis G., Ekonomakou, A., Stournaras, C.J., Ftikos., C., Effects of Firing Conditions, Filler Grain Size and Quartz Content on Bending Strength and Physical Properties of Sanitaryware Porcelain, *J. Euro., Cer. Soc.*, 2004, **24**, 2357-2366.

Tomizaki, M. F., and Sugiyama, T., Studies on High Silica Porcelain Bodies, (Effects of Siliceous Stone Grain Size), *Interceram.*, 1995, **44(4)**, 223-228.

Van Olphen, H., (1977), *An Introduction to Clay Colloid Chemistry*, 2nd Edn., John Wiley and Sons, New York.

Worrall, W.E., *Clays and Ceramic Raw Materials*, Applied Science Publishers(1975).