

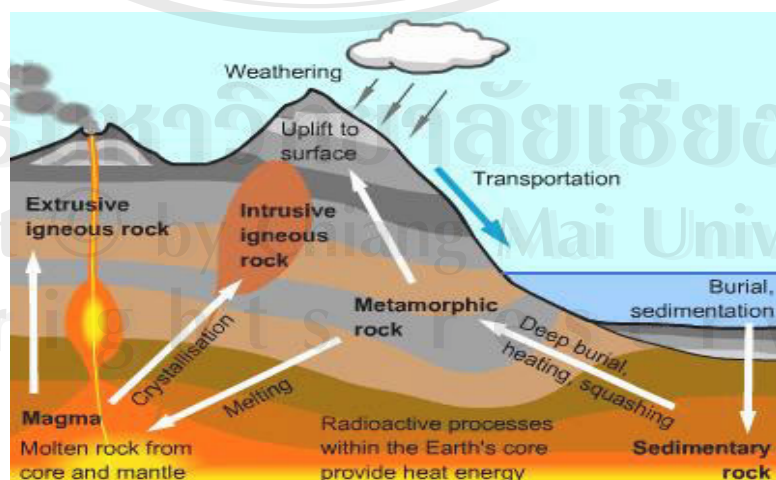
บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

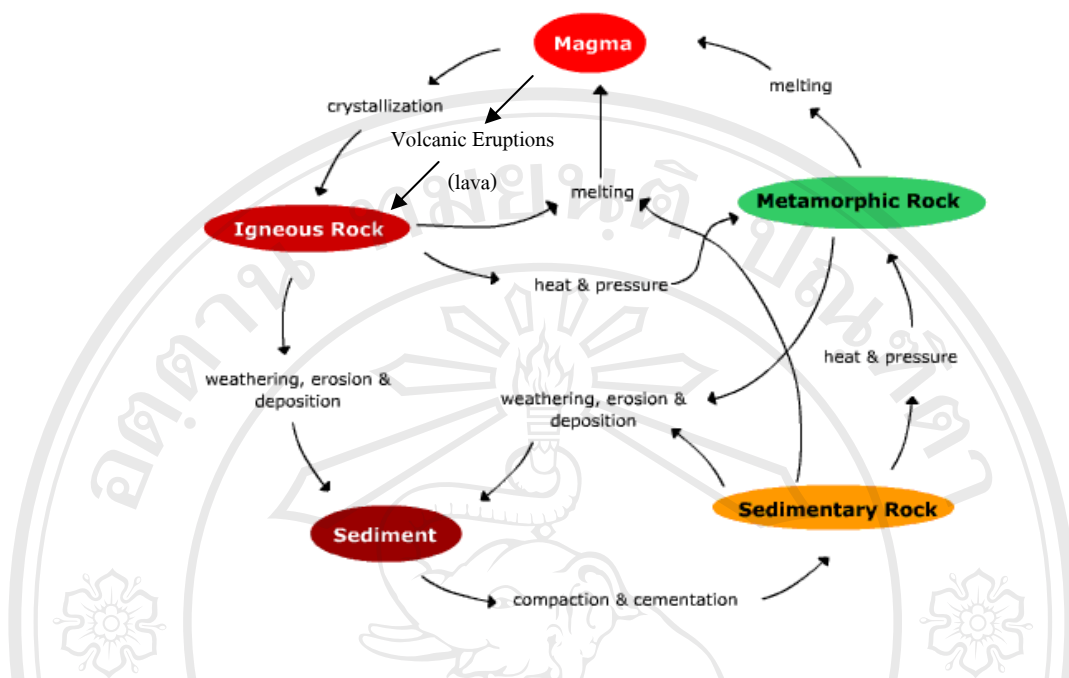
2.1 การกำเนิดและวัฏจักรของหิน

วัฏจักรของหินจะแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของหินที่อยู่ในรูปของแร่ที่อยู่เหนือและใต้พื้นผิวโลก [1, 2 และ 3] จากรูปที่ 2.1 และ 2.2 จะพบว่าหินที่ถูกหลอมด้วยความร้อนสูงๆ จนกลายเป็นของเหลว เรียกว่า หินหนืด (Magma) จะเย็นตัว แข็งตัว และเกิดการตกผลึกใต้ผิวโลก กลายเป็นหินอัคนี (Igneous rock) ซึ่งหินอัคนีที่เกิดขึ้นในลักษณะนี้เรียกว่า หินอัคนีระดับลึก (Plutonic rock) หรือหินอัคนีแทรกซอน (Intrusive rock) นอกจากนี้หินอัคนียังเกิดจากการเย็นตัว และแข็งตัวของลาวา (Lava) ซึ่งหินอัคนีที่เกิดขึ้นในลักษณะนี้เรียกว่า หินภูเขาไฟ (Volcanic rock) หรือหินอัคนีพุ (Extrusive rock) หินอัคนีที่ได้กล่าวมาเมื่ออยู่ในสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน จะถูกแปรสภาพให้อยู่ในสถานะที่ไม่เหมือนกัน ดังนี้

- เมื่อหินอัคนีถูกทับถมเป็นเวลานานๆ อยู่ใต้ผิวโลก จะเกิดความกดดันและมีความร้อนสูง หินอัคนีจึงเกิดการหลอมกลายเป็นหินหนืดอีกครั้ง
- เมื่อหินอัคนีถูกทับถมเป็นเวลานานๆ อยู่ใต้ผิวโลก จะเกิดความกดดันและมีความร้อนพอเหมาะ และจะถูกแปรสภาพเป็นหินแปร (Metamorphic rock)
- เมื่อหินอัคนีเกิดการผุพัง ถูกกัดกร่อน และแตกสลาย ด้วยกระแสลม และน้ำ แล้วเกิดเป็นตะกอน ซึ่งตะกอนที่เกิดขึ้นดังกล่าวเกิดการทับถมเป็นเวลานานจนแข็งและแน่น แล้วเกิดการรวมตัวกันเป็นหินตะกอน (Sedimentary rock)



รูปที่ 2.1 วัฏจักรของหิน[1]



รูปที่ 2.2 วัฏจักรของหิน[2]

หินตะกอน [1, 2 และ 3] เกิดจากฝุ่นผง เกิดการกักต้อน และแตกสลายของหินอัคนี หินแปร หรือหินตะกอนที่อายุเก่าแก่ถูกพัดพามาโดยน้ำ ลม หรือธารน้ำแข็ง ในรูปของเศษหิน ดิน ทราย ขนาดต่างๆ หรือในรูปสารละลาย แล้วจะตกจมสะสมกันอยู่ โดยอาจจะมีซากหรือชิ้นของซากดึกดำบรรพ์สะสมรวมอยู่เป็นเวลานานจึงทำให้เกิดแรงดันและความร้อนที่สูงจึงทำให้เกิดหินตะกอน หินตะกอนมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า หินชั้น เพราะหินตะกอนเหล่านี้ส่วนใหญ่จะมีการสะสมเรียงตัวเป็นชั้นๆ หินตะกอนที่ได้กล่าวมาเมื่ออยู่ในสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน จะถูกแปรสภาพให้อยู่ในสถานะที่ไม่เหมือนกัน ดังนี้

- เมื่อหินตะกอนถูกทับถมเป็นเวลานานๆ อยู่ใต้ผิวโลก จะเกิดความกดดันและความร้อนสูง หินตะกอนจึงเกิดการหลอมกลายเป็นหินหนืดอีกครั้ง
- เมื่อหินตะกอนเกิดการผุพัง ถูกกักต้อน และแตกสลาย ด้วยกระแสลม และน้ำ แล้วเกิดเป็นตะกอน ซึ่งตะกอนที่เกิดขึ้นดังกล่าวเกิดการทับถม แล้วเกิดการรวมตัวกันเป็นหินตะกอนอีกครั้ง
- เมื่อหินตะกอนถูกทับถมเป็นเวลานานๆ อยู่ใต้ผิวโลก จะเกิดความกดดันและความร้อนพอเหมาะ จะถูกแปรสภาพเป็นหินแปร

หินแปร[1, 2, 3 และ 4] เป็นหินที่มีการแปรสภาพ มาจากหินเดิม ซึ่งอาจเป็นหินอัคนี หินตะกอน หรือแม้แต่หินแปรเอง โดยการกระทำของความร้อน ความดัน และปฏิกิริยาเคมี หินแปรส่วนใหญ่มีส่วนประกอบทางเคมีเหมือนหินเดิมและอาจแสดงลักษณะของหินเดิม ในขณะเดียวกันจะพัฒนาเนื้อหินชนิดใหม่และอาจเกิดแร่ใหม่ ซึ่งสามารถบ่งบอกถึงสภาวะของการแปรสภาพได้ และมีหลักฐานว่ามีการตกผลึกใหม่ในสภาพที่เป็นของแข็งอยู่ ซึ่งไม่มีตกผลึกมาจากแมกมาหรือลาวา ดังเช่นในหินอัคนี นอกจากนี้หินพวกนี้บางจำพวกยังแสดงลักษณะที่เป็นแถบเป็นริ้วคล้ายคลึงกับลักษณะเป็นชั้นในหินตะกอน แต่ลักษณะเป็นแถบเป็นริ้วเหล่านี้ ไม่ได้เกิดจากการตกตะกอน หากแต่เป็นลักษณะที่เกิดจากการขนานกันของเม็ดแร่ อันเป็นผลสืบเนื่องมาจากการปรับตัวให้เข้ากับสภาพสิ่งแวดล้อมในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นในหิน และขบวนการที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นในหินนั้นเรียกว่า กระบวนการแปรสภาพ (Metamorphism) ซึ่งอาจจะให้คำจำกัดความอย่างคร่าวๆ ไว้ว่าเป็นการเปลี่ยนแปลงทางแร่ (Mineralogical) ลักษณะเนื้อหินและลักษณะโครงสร้าง (Texture and structural) ที่เกิดขึ้นในหินในสภาพที่หินยังเป็นของแข็งอยู่ และการเปลี่ยนแปลงนี้มีปัจจัยสำคัญคือความร้อนและ/หรือความกดดันที่มีต่อหิน และสารว่องไวต่อปฏิกิริยาทางเคมีบางชนิดเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย หินแปรที่ได้กล่าวมาเมื่ออยู่ในสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน จะถูกแปรสภาพให้อยู่ในสถานะที่ไม่เหมือนกัน ดังนี้

- เมื่อหินแปรเกิดการผุพัง ถูกกัดกร่อน และแตกสลาย ด้วยกระแสลม และน้ำ แล้วเกิดเป็นตะกอน ซึ่งตะกอนที่เกิดขึ้นดังกล่าวเกิดการทับถม แล้วเกิดการรวมตัวกันเป็นหินตะกอนอีกครั้ง
- เมื่อหินแปรถูกทับถมเป็นเวลานานๆ อยู่ใต้ผิวโลก จะเกิดความกดดันและมีความร้อนสูง หินแปรจึงเกิดการหลอมกลายเป็นหินหนืดอีกครั้ง

จากการกำหนดหินที่ได้กล่าวมาข้างบนสามารถจำแนกหินออกเป็น 3 ประเภท [1 , 2, 3, 4 และ 5] คือ

1. หินอัคนี ซึ่งเกิดจากการเย็นตัวและแข็งตัวของหินหนืด เมื่อหินหนืดเย็นตัวลงจะเกิดการตกผลึกกลายเป็นแร่ต่างๆ ในหินอัคนี การตกผลึกของแร่และขนาดของแร่จะถูกควบคุมโดยอัตราการเย็นตัวของหินหนืด ถ้าหินหนืดเย็นตัวอย่างช้า ดังเช่นในกรณีของหินอัคนีแทรกซอน อะตอมของธาตุต่างๆ มีเวลาเคลื่อนตัวมาจับกันเป็นผลึกแร่ขนาดใหญ่ ก่อนที่หินหนืดจะแข็งตัวหมด ถ้าหินหนืดเย็นตัวอย่างรวดเร็วเช่นหินอัคนีฟู อะตอมของธาตุต่างๆ มีเวลาเคลื่อนตัวมาจับกันเป็นผลึกแร่น้อยก่อนที่หินหนืดจะแข็งตัวหมด ดังนั้นหินอัคนีสามารถจำแนกออกเป็น 2 ประเภท คือ

- หินอัคนีแทรกซอน ซึ่งประกอบด้วยแร่หลายชนิด ได้แก่

- หินแกรนิต (Granite) ประกอบด้วยแร่ควอตซ์ เฟลด์สปาร์พวอกอร์โทเคลส และ

ไมกา

- หินไดออไรต์ (Diorite) ประกอบด้วยแร่เฟลด์สปาร์พวกเพลจิโอเคลส
- หินแกบโบร (Gabbro) ประกอบด้วยแร่เฟลด์สปาร์พวกเพลจิโอเคลส
- หินเพกมาไทต์ (Pegmatite) คือแกรนิตที่มีขนาดผลึกใหญ่ ประกอบด้วยแร่ควอตซ์ เฟลด์สปาร์พวกออร์โทเคลส และไมกา
- หินเพอริโดไทต์ (Peridotite) ประกอบด้วยแร่โอลิวีน ไพรอกซีน ฮอนเบลนด์ และไบโอไทต์
- หินไซอีไนต์ (Syenite) ประกอบด้วยแร่เฟลด์สปาร์
- หินแอไฟลต์ ประกอบด้วยแร่ควอตซ์ เฟลด์สปาร์พวกออร์โทเคลส และไมกา
- หินอัคนี ซึ่งประกอบด้วยแร่หลายชนิด ได้แก่
 - หินไรโอไลต์ (Rhyolite) ประกอบด้วยแร่ควอตซ์ เฟลด์สปาร์
 - หินแอนดีไซต์ (Andesite) ประกอบด้วยแร่เฟลด์สปาร์พวกเพลจิโอเคลส
 - บะซอลต์ (Basalt) ประกอบด้วยแร่เฟลด์สปาร์พวกเพลจิโอเคลส
 - หินออบซิเดียน (Obsidian) ประกอบด้วยแร่ควอตซ์ เฟลด์สปาร์พวกออร์โทเคลส และไมกา
 - หินพัมมิช (Pumice) ประกอบด้วยแร่ซิลิกา

2. หินตะกอนหรือหินชั้น เกิดจากฝุ่นผง เกิดการกักตุน และแตกสลายของหินอัคนี หินแปรหรือหินตะกอนที่อายุเก่าแก่ถูกพัดพามาโดยน้ำ ลม หรือธารน้ำแข็ง ในรูปของเศษหิน ดิน ทราย ขนาดต่างๆ หรือในรูปสารละลาย แล้วจะตกจมสะสมกันอยู่เป็นเวลานานนับล้านปีจึงเกิดเป็นหินตะกอนหรือหินชั้น หินที่อยู่ในกลุ่มหินตะกอนหรือหินชั้นประกอบด้วย หินทราย (Sandstone) หินดินดาน (Shale) หินปูน (Limestone) หินกรวดมน (Conglomerate) และ ยิปซัม (Gypsum)

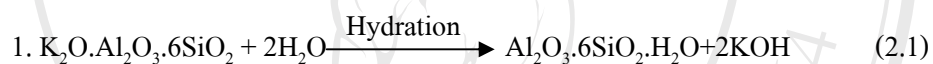
3. หินแปร เกิดจากการแปรสภาพมาจากหินเดิม ซึ่งอาจเป็นหินอัคนี หินตะกอน หรือแม้แต่หินแปรเอง โดยการกระทำของความร้อน ความดัน และปฏิกิริยาเคมี หินที่อยู่ในกลุ่มหินแปรประกอบด้วย หินชนวน (Slate) หินฟิลไลต์ (Phyllite) หินชีสต์ (Schist) หินไนส์ (Gneiss) หินไมโลไนต์ (Mylonite) หินอ่อน (Marble) หินควอร์ตไซต์ (Quartzite) หินฮอร์นเฟลส์ (Hornfels) และ แกรนูไลต์ (Granulite)

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นหินสามารถจำแนกได้ 3 ประเภท คือ หินอัคนี หินตะกอนหรือหินชั้น และหินแปร ซึ่งหินที่สำคัญคือหินอัคนีเพราะว่าหินอัคนีจะประกอบด้วยแร่ควอตซ์ เฟลด์สปาร์พวกออร์โทเคลส และไมกาเป็นส่วนมาก โดยเฉพาะหินแกรนิต ในองค์ประกอบของหินแกรนิต

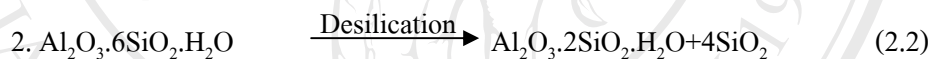
เฟลด์สปาร์จะมีความเสถียรน้อยที่สุด เมื่อเฟลด์สปาร์เกิดจากผลึก เกิดการกัดกร่อน และแตกสลายด้วยการกระทำของความร้อน ความดัน และปฏิกิริยาเคมี จึงทำให้เกิดเป็นดินต่อไป

2.2 การกำเนิดของดิน [6 และ 7]

ดินเกิดจากการผุพังของหินอัคนี เช่น หินแกรนิต ซึ่งหินแกรนิตเกิดจากการเย็นตัวและแข็งตัวจากแมกมาและลาวาที่ประทุออกมาจากปล่องภูเขาไฟ หินแกรนิตจะประกอบด้วยแร่ไมกา ($K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$) ควอตซ์ (SiO_2) และเฟลด์สปาร์ ($K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$) ซึ่งเฟลด์สปาร์จะมีความเสถียรน้อยที่สุดเมื่อสัมผัสกับอากาศและน้ำ นอกจากนี้เมื่อเฟลด์สปาร์ทำปฏิกิริยากับน้ำและอากาศเป็นระยะเวลายาวนานจะทำให้เกิดการแตกสลายและเกิดปฏิกิริยาเคโอลิไนเซชัน (Kaolinitisation) จึงนำไปสู่การเกิดดินเคโอลิไนท์ การเกิดดินเคโอลิไนท์ สาเหตุเกิดจากโปแตสเซียมทั้งหมดและซิลิกาบางส่วนในเฟลด์สปาร์ถูกละลายออกมา คงเหลือแต่ผลึกอะลูมินา ซิลิกา และน้ำรวมตัวกันอยู่ที่เดิม ดังแสดงในสมการที่ 2.1-2.3



Feldspar



Kaolinite

ดินในตามธรรมชาติสามารถแบ่งออกตามลักษณะการเกิดได้เป็น 2 ประเภทคือ

1. ดินที่เกิดในแหล่งภูเขาหรือดินปฐมภูมิ (Primary or residual clay)

ดินที่เกิดในแหล่งภูเขาหรือดินปฐมภูมิเกิดจากการผุพังของเฟลด์สปาร์แล้วทับถมกันอยู่โดยไม่เคลื่อนย้ายไปจากแหล่งเดิม ดินที่เกิดในแหล่งภูเขาหรือดินปฐมภูมิเป็นดินที่มีความบริสุทธิ์สูง เมื่อดินมีขนาดใหญ่ เนื้อดินมีความละเอียดน้อย ได้แก่ดินกลุ่มเคโอลิน

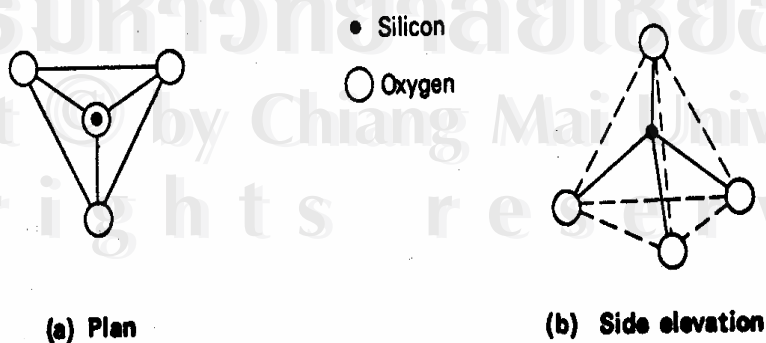
2. ดินที่เกิดในที่ราบลุ่มหรือดินตะกอนหรือดินทุติยภูมิ (Sedimentary or secondary clay)

ดินที่เกิดในที่ราบลุ่มหรือดินตะกอนหรือดินทุติยภูมิเกิดจากอนุภาคดินในแหล่งต้นกำเนิดถูกพัดพาออกไปจากแหล่งเดิมด้วยกระแสน้ำ แล้วเกิดการตกตะกอนร่วมกับสารอินทรีย์ และแร่ธาตุอื่นที่ไหลผ่าน เราจึงเรียกดินชนิดนี้ว่าดินย้ายถิ่น เนื้อดินจะมีความละเอียดมากกว่าดินที่เกิดในแหล่งภูเขา เนื่องจากโดนน้ำพัดพาไปไกลจากแหล่งเดิม ในระหว่างที่ดินภูเขาไหลไปตามน้ำ ได้ถูกบดให้

2.3.1 โครงสร้างพื้นฐานของดิน [6]

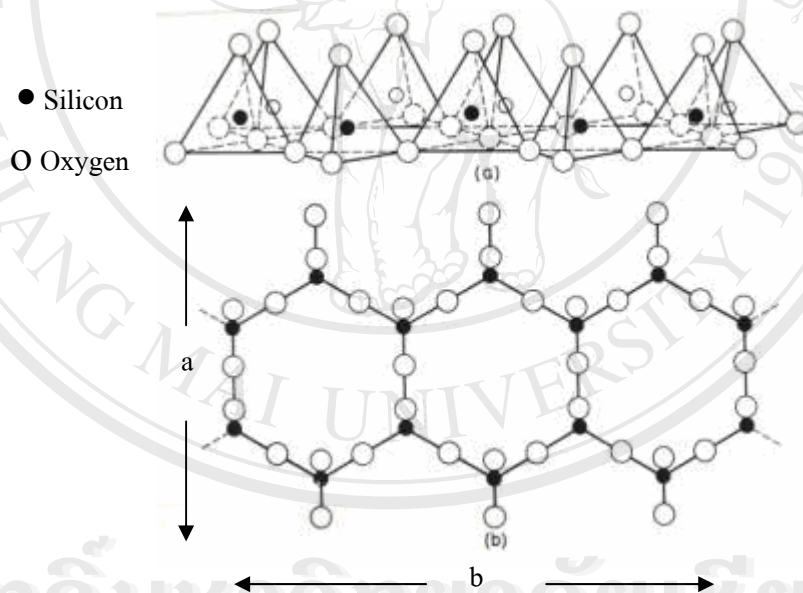
ชั้นชิลิกา

ซิลิกอนหนึ่งอะตอมถูกล้อมรอบด้วยออกซิเจนสี่อะตอม โดยที่อะตอมของออกซิเจนจะอยู่ที่มุมของโครงสร้างเตตระฮีดรอน เมื่อมองโครงสร้างเตตระฮีดรอนจากมุมบนลงล่าง ดังแสดงในรูปที่ 2.3a จะพบว่าอะตอมของออกซิเจนสามอะตอมที่สร้างพันธะกันจะเกิดมุมสามมุม ซึ่งจะเกิดเป็นฐานของโครงสร้างเตตระฮีดรอน และอะตอมของออกซิเจนสามอะตอมจะอยู่ในระดับต่ำกว่าอะตอมของซิลิกอนและออกซิเจนที่อยู่ด้านบนสุด รูปที่ 2.3b แสดงด้านข้างของโครงสร้างเตตระฮีดรอนและจะเห็นตำแหน่งของทุกอะตอมทุกตำแหน่งอย่างชัดเจน



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของเตตระฮีดรอน [6]

ชั้นซิลิกาเกิดจากอะตอมของออกซิเจนที่เป็นฐานของโครงสร้างเตตระไฮดรอน ($[\text{SiO}_4]^{4-}$) จะสร้างพันธะร่วมกับอะตอมของออกซิเจนของโครงสร้างเตตระไฮดรอนที่อยู่ใกล้เคียงกัน จึงทำให้เกิดเป็นแผ่นอย่างต่อเนื่องของชั้นซิลิกา ดังแสดงในรูปที่ 2.4a นอกจากนี้โครงสร้างของชั้นซิลิกาสามารถต่อไปได้อีกในทิศทาง a และ b ดังแสดงในรูปที่ 2.4b เนื่องจากอะตอมของออกซิเจนที่เป็นฐานของโครงสร้างเตตระไฮดรอนยังมีเวเลนซ์ที่สามารถรับอิเล็กตรอนได้อีกหนึ่งตัว ดังนั้นอะตอมของออกซิเจนที่เป็นฐานของโครงสร้างเตตระไฮดรอนจึงสามารถสร้างพันธะกับอะตอมของซิลิกอนสองอะตอม จึงทำให้เกิดการเชื่อมโยงกันระหว่างโครงสร้างเตตระไฮดรอน และการเชื่อมโยงของเตตระไฮดรอนซ้ำๆ กันจะทำให้มีลักษณะ โครงสร้างเป็นหกเหลี่ยม นอกจากนี้อะตอมของออกซิเจนที่อยู่ด้านบนสุดในแต่ละโครงสร้างของเตตระไฮดรอนสามารถรับอิเล็กตรอนได้อีกหนึ่งตัว จึงทำให้ออกซิเจนดังกล่าวเป็นส่วนที่จะไปสร้างพันธะร่วมกับชั้นกิบไซต์ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าโครงสร้างพื้นฐานของชั้นซิลิกาหรือชั้นเตตระไฮดรอนคือ $[\text{Si}_2\text{O}_5]^{2-}$



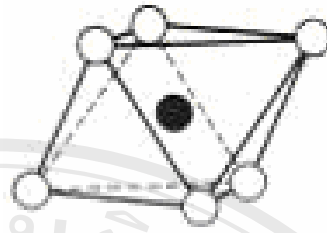
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของชั้นเตตระไฮดรอน [6]

ชั้นกิบไซต์

โครงสร้างพื้นฐานของชั้นกิบไซต์จะประกอบด้วยอะตอมของอะลูมิเนียมถูกล้อมรอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลหกหมู่ ซึ่งหมู่ไฮดรอกซิลจะอยู่ที่มุมของโครงสร้างออกเตไฮดรอน ดังแสดงในรูปที่

● Aluminium

○ Hydroxyl

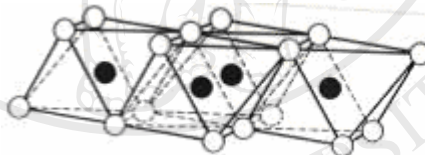


รูปที่ 2.5 โครงสร้างของออกตะฮีดรอน [6]

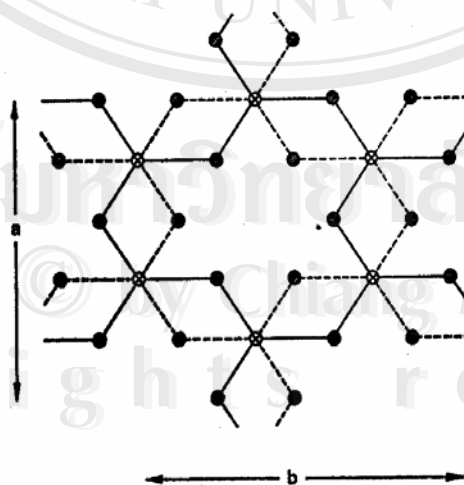
ชั้นกิบไซต์จะคล้ายกับชั้นซิลิกา เนื่องจากโครงสร้างออกตะฮีดรอน ($\text{Al}(\text{OH})_6^{3-}$) จะไปเชื่อมโยงกับโครงสร้างออกตะฮีดรอนที่อยู่ใกล้เคียง การเชื่อมโยงกันระหว่างออกตะฮีดรอนเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลหนึ่งหมู่จะรับ เวเลนอิเล็กตรอนครึ่งหนึ่งจากอะตอมของอะลูมิเนียมที่มีประจุบวกสามสองอะตอม จึงทำให้เกิดเป็นแผ่นอย่างต่อเนื่องของชั้นกิบไซต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.6a นอกจากนี้โครงสร้างของชั้นกิบไซต์สามารถต่อไปได้อีกในทิศทาง a และ b ดังแสดงในรูปที่ 2.6b และการเชื่อมโยงของออกตะฮีดรอนซ้ำๆ กันจะทำให้มีลักษณะโครงสร้างเป็นหกเหลี่ยมเหมือนกับชั้นซิลิกา ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าโครงสร้างพื้นฐานของชั้นกิบไซต์หรือชั้นออกตะฮีดรอนคือ $\text{Al}(\text{OH})_3$

● Aluminium

○ Hydroxyl



a



b

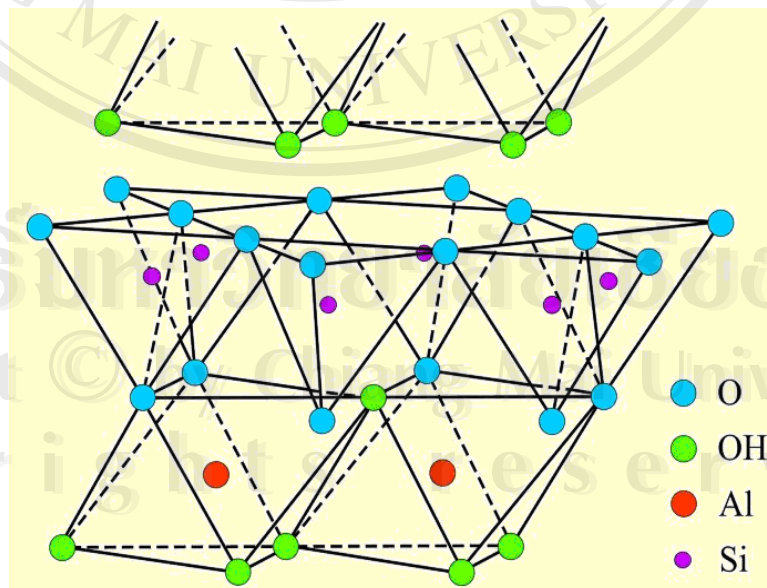
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของชั้นออกตะฮีดรอน [6]

2.3.2 โครงสร้างผลึกของดินเคโอลิน [6 และ 8]

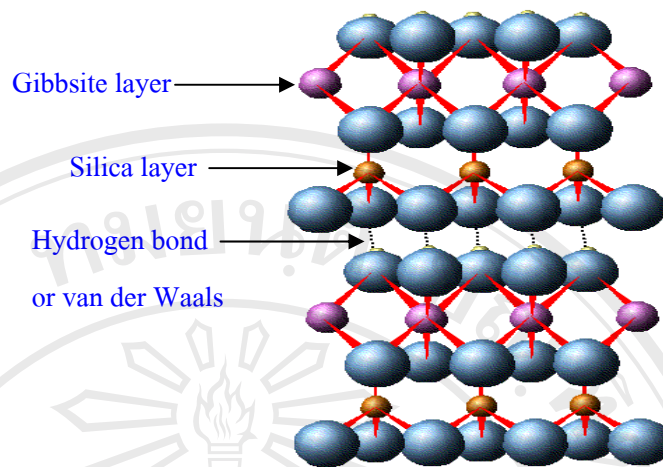
โครงสร้างเคโอลินเกิดจากการเชื่อมโยงกันระหว่างชั้นซิลิกา($[\text{Si}_2\text{O}_5]^{2-}$)และชั้นกิบไซต์ ($\text{Al}(\text{OH})_3$) ที่มีลักษณะรูปร่างของโครงสร้างเป็นหกเหลี่ยมเหมือนกัน การเชื่อมโยงกันระหว่างชั้นซิลิกาและชั้นกิบไซต์ เกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลที่สร้างพันธะกับอะตอมของอะลูมิเนียมสองอะตอม ในโครงสร้างชั้นกิบไซต์จะถูกกำจัดออก แล้วถูกแทนที่ด้วยอะตอมของออกซิเจนที่อยู่ในระนาบบนสุดของโครงสร้างซิลิกา โดยที่อะตอมของออกซิเจนของชั้นซิลิกาจะรับเวเลนซ์จากหมู่ไฮดรอกซิล จึงนำไปสู่การเกิดสมดุลทางประจุขึ้น และเกิดโครงสร้างเคโอลินคือ $[\text{Al}_2(\text{OH})_4]^{2+}[\text{Si}_2\text{O}_5]^{2-}$ หรือ $\text{Al}_2(\text{OH})_4\text{Si}_2\text{O}_5$ หรือ $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 และโครงสร้างดินเคโอลินที่ประกอบด้วยชั้นซิลิกาและชั้นกิบไซต์เรียกว่า โครงสร้างดินแบบ 1:1 หรือเรียกว่าโครงสร้างแบบ T-O

โดยทั่วไปในตามธรรมชาติผลึกดินเคโอลินจะไม่อยู่เป็นผลึกเดี่ยว แต่จะชอบรวมอยู่ด้วยกันเป็นกลุ่ม ดังนั้นการเชื่อมโยงกันระหว่างผลึกจะมีแรง 2 แรงที่มาเกี่ยวข้องคือ

1. แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals forces) อนุภาคดินเคโอลินจะเกิดการเชื่อมโยงกันระหว่างผลึกด้วยแรงดึงดูดของแวนเดอร์วาลส์แบบอ่อนๆ เมื่ออนุภาคอยู่ใกล้ชิดกันมากๆ
2. พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonds) อนุภาคดินเคโอลินเกิดการเชื่อมโยงกันระหว่างผลึกด้วยพันธะไฮโดรเจนแบบอ่อน เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลในชั้นกิบไซต์จะไปเชื่อมโยงกับออกซิเจนในชั้นซิลิกาที่อยู่ถัดไป ดังแสดงในรูปที่ 2.8

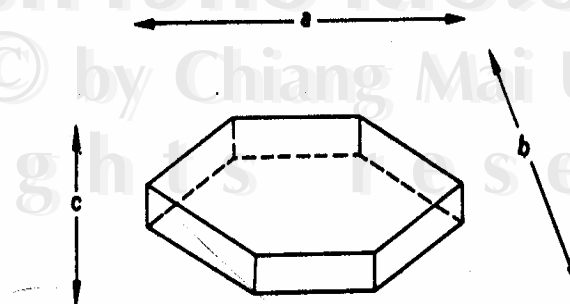


รูปที่ 2.7 โครงสร้างของเคโอลิน (9)



รูปที่ 2.8 การเชื่อมโยงของพันธะไฮโดรเจนและแรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างผลึกเคโอลิน (10)

พันธะไฮโดรเจนระหว่างผลึกเคโอลินจะเป็นพันธะแบบอ่อนๆ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้จำนวนผลึกเคโอลินสามารถเชื่อมโยงกันระหว่างผลึกไม่มีขีดจำกัด และผลึกดินจะบางโดยดูจากทิศทาง C ดังแสดงในรูปที่ 2.9 นอกจากนี้โครงสร้างผลึกของดินเคโอลินจะมีลักษณะเป็นแผ่นหกเหลี่ยม เพราะว่าโครงสร้างพื้นฐานของชั้นซิลิกาและชั้นกิบไซต์มีลักษณะเป็นหกเหลี่ยมนั่นเอง นอกจากนี้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างผลึกเคโอลินแม้ว่าจะเป็นแรงยึดเหนี่ยวแบบอ่อนๆ แต่มีความแข็งแรงพอที่จะยึดเหนี่ยวระหว่างผลึกดินให้อยู่ตำแหน่งที่คงที่ได้ ดังนั้นจึงทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นของผลึกดินคงที่ด้วย (Basal spacing) ดังนั้นดินเคโอลินจึงมีระยะห่างระหว่างชั้นของผลึก เท่ากับ 7.2 Å การวัดระยะห่างระหว่างชั้นของผลึกดินจะวัดจากอะตอมของซิลิกอนของผลึกเคโอลินหนึ่งไปยังอะตอมของซิลิกอนของผลึกเคโอลินที่อยู่ชั้นถัดไป หรือวัดจากอะตอมของอะลูมิเนียมของผลึกเคโอลินไปยังอะตอมของอะลูมิเนียมของผลึกเคโอลินที่อยู่ชั้นถัดไป เป็นต้น

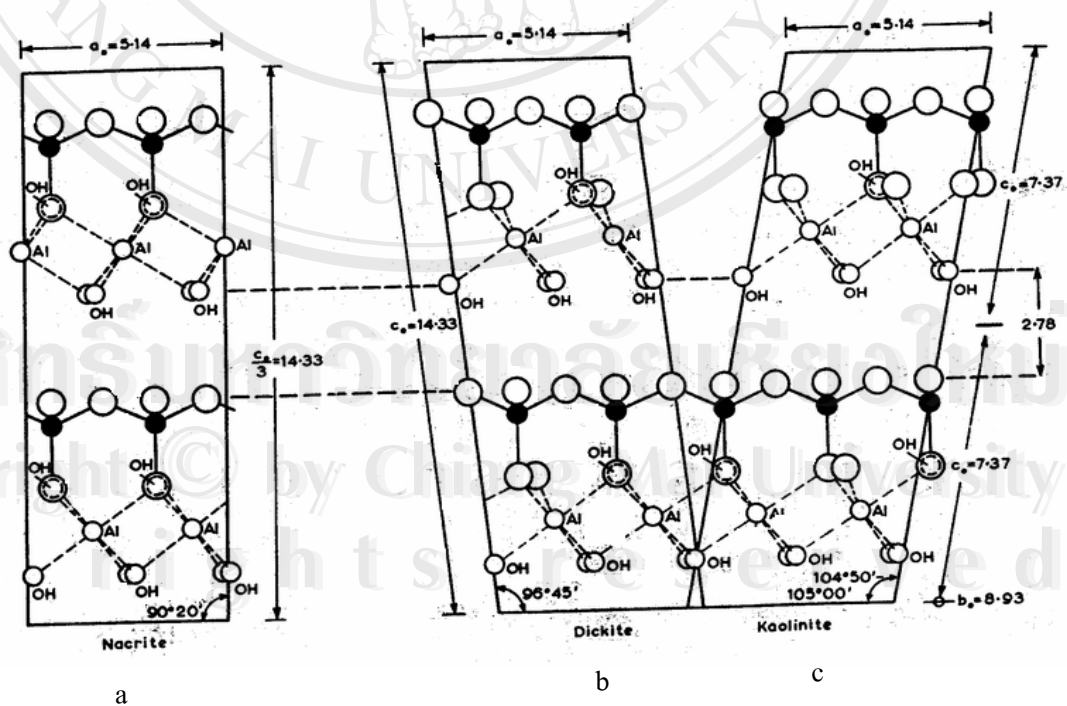


รูปที่ 2.9 ผลึกเคโอลิน (6)

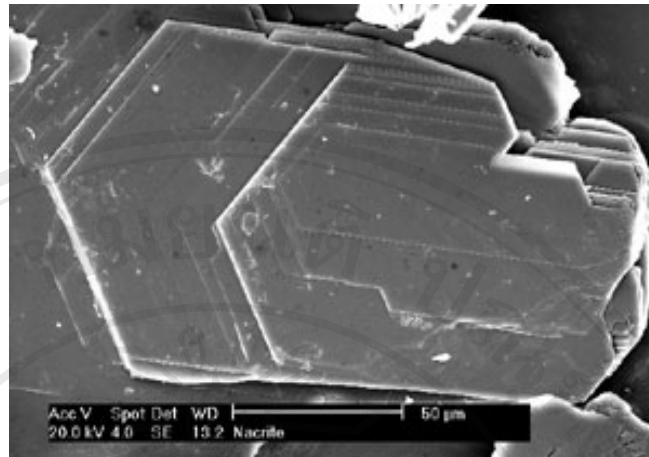
แร่ดินในกลุ่มเคโอลินจะประกอบด้วย นาไครท์ (Nacrite) ดิกไคท์ (Dickite) เคโอลิไนท์ (Kaolinite) และฮาล์ลอยไซต์ (Halloysite) แร่ดินทั้งสี่ชนิดจะมีสูตรทางเคมีที่คล้ายกัน แต่การจัดเรียงของโครงสร้างผลึกจะแตกต่างกัน

โครงสร้างผลึกของนาไครท์ ($\text{Al}_2(\text{OH})_4\text{Si}_2\text{O}_5$) อะตอมที่เหมือนกันจะมีตำแหน่งที่ตรงกันที่อยู่ระหว่างผลึกสองผลึก เช่น อะตอมของอะลูมิเนียมในโครงสร้างผลึกนาไครท์จะไปตรงกับอะตอมของอะลูมิเนียมที่อยู่ในโครงสร้างผลึกนาไครท์อยู่ในชั้นถัดไป ดังแสดงในรูปที่ 2.10a ซึ่งโครงสร้างผลึกของนาไครท์เป็นโครงสร้างที่เสถียร จึงส่งผลให้มีขนาดผลึกใหญ่ และรูปร่างผลึกของนาไครท์มีลักษณะเป็นแผ่นหกเหลี่ยมดังแสดงในรูปที่ 2.11a

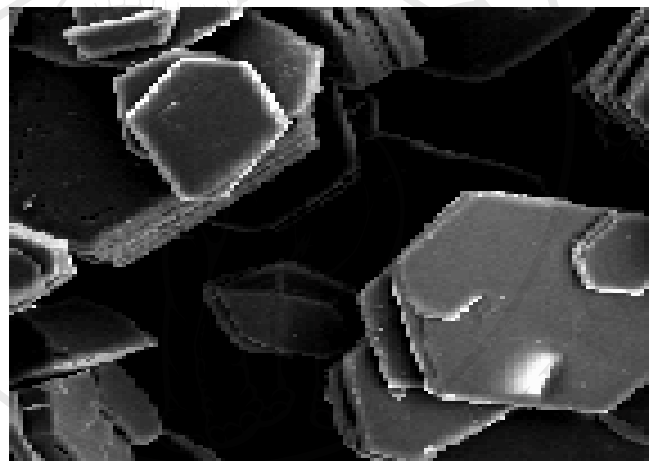
โครงสร้างผลึกของดิกไคท์ และเคโอลิไนท์ ($\text{Al}_2(\text{OH})_4\text{Si}_2\text{O}_5$) จะมีบางตำแหน่งอะตอมเคลื่อนที่ไปจากตำแหน่งเดิม จึงทำให้อะตอมที่เหมือนกันมีตำแหน่งที่ไม่ตรงกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.10b และ 2.10c จึงทำให้โครงสร้างผลึกของดิกไคท์และเคโอลิไนท์ เกิดความไม่เสถียร แต่ขนาดผลึกยังมีขนาดใหญ่ และลักษณะรูปร่างผลึกของดิกไคท์และเคโอลิไนท์ มีลักษณะเป็นแผ่นหกเหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 2.11b และ 2.11c ในทางตรงกันข้ามถ้าโครงสร้างผลึกของเคโอลิไนท์มีอะตอมเคลื่อนที่ไปจากตำแหน่งเดิมมาก โครงสร้างผลึกจะมีความเสถียรน้อยกว่าโครงสร้างผลึกของนาไครท์และดิกไคท์ ดังนั้นขนาดอนุภาคของผลึกอาจจะมีความเล็ก



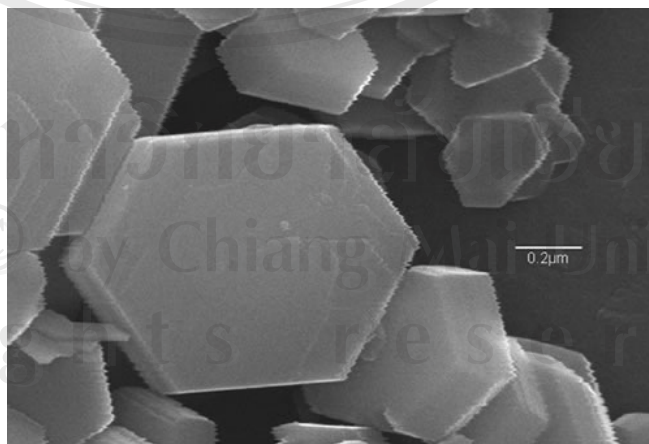
รูปที่ 2.10 โครงสร้างผลึกของนาไครท์ (a) ดิกไคท์ (b) และเคโอลิไนท์ (c) [7]



a



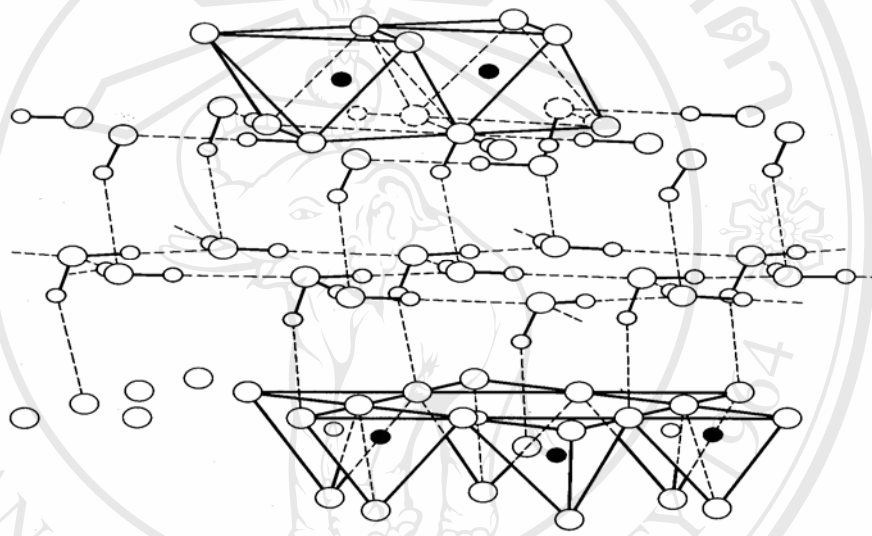
b



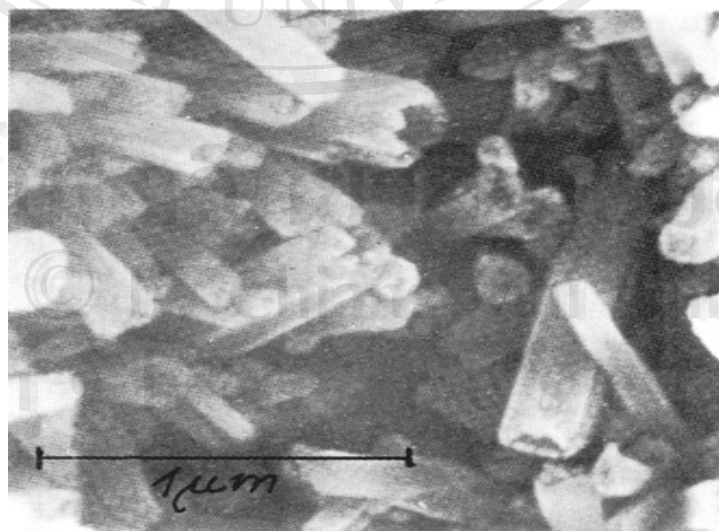
a

รูปที่ 2.11 ลักษณะรูปร่างผลึกของนาไครท์ (a) [11] ดิกไคท์ (b) [12] และเคโอไลไนท์ (c) [13]

โครงสร้างฮาโลยไซต์ ($\text{Al}_2(\text{OH})_4\text{Si}_2\text{O}_5 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) อะตอมทุกตำแหน่งจะเคลื่อนที่ไปจากตำแหน่งเดิม จึงทำให้อะตอมที่เหมือนกันมีตำแหน่งที่ไม่ตรงกัน จึงทำให้โครงสร้างผลึกของฮาโลยไซต์เกิดความไม่เสถียร ดังนั้นขนาดผลึกจึงมีขนาดเล็ก นอกจากนี้โครงสร้างผลึกของฮาโลยไซต์จะแตกต่างจากนาไครต์ ดิกโคท์ และเคโอลิไนท์ เนื่องจากจะมีน้ำอยู่ในช่องว่างระหว่างผลึก จึงทำให้การดึงดูดกันระหว่างผลึกต่ำ และแต่ละผลึกมีโอกาที่จะมีวันตัวและก่อให้เกิดโครงสร้างผลึกที่มีลักษณะเหมือนท่อ (Tube) ซึ่งเรียกว่า Tubular Halloysite โครงสร้างผลึกและลักษณะรูปร่างผลึกของฮาโลยไซต์ดังแสดงในรูปที่ 2.12 และ 2.13 ตามลำดับ



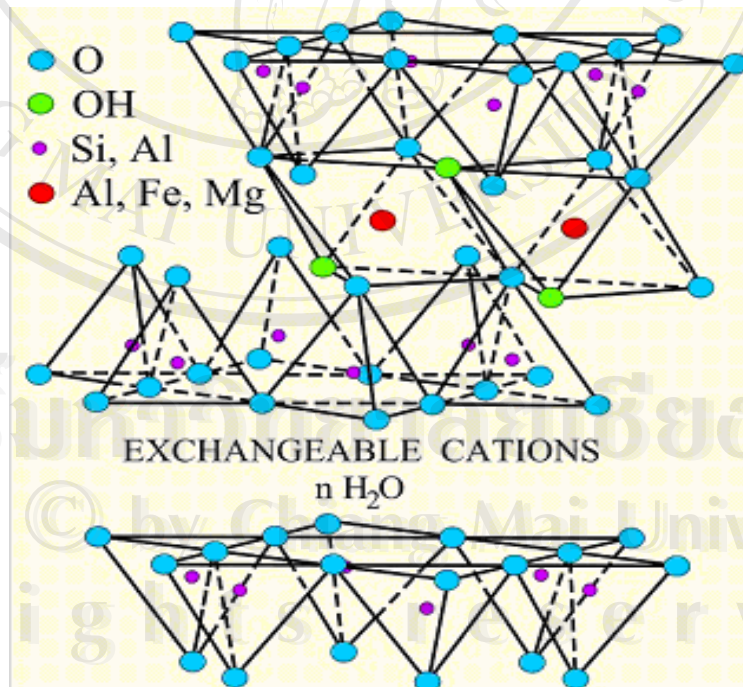
รูปที่ 2.12 โครงสร้างผลึกของฮาโลยไซต์ [8]



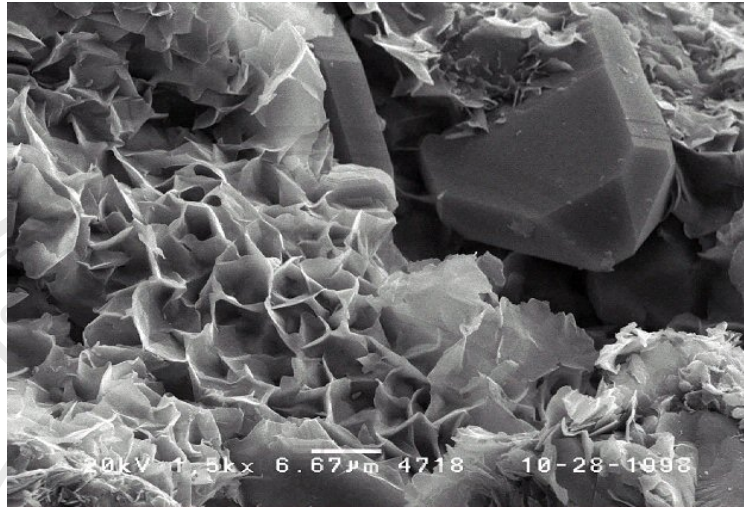
รูปที่ 2.13 ลักษณะรูปร่างผลึกของฮาโลยไซต์ [14]

2.3.3 โครงสร้างผลึกของสเมคไทท์ [6 และ 8]

โครงสร้างสเมคไทท์จะประกอบด้วย 3 ชั้น ชั้นแรกคือชั้นซิลิกา ชั้นที่สองคือชั้นกิบไซต์ ชั้นที่สามคือชั้นซิลิกา ชั้นกิบไซต์จะมีระนาบของหมู่ไฮดรอกซิลอยู่เหนือและต่ำกว่าอะตอมของอะลูมิเนียม ดังนั้นระนาบของหมู่ไฮดรอกซิลของชั้นกิบไซต์จะไปเชื่อมโยงกับชั้นซิลิกาทั้งด้านบนและล่าง โดยที่หมู่ไฮดรอกซิลของชั้นกิบไซต์จะถูกแทนที่ด้วยอะตอมของออกซิเจนของชั้นซิลิกา จึงทำให้เกิดโครงสร้างสเมคไทท์ ซึ่งโครงสร้างสเมคไทท์จะเป็นโครงสร้างแบบ 2:1 หรือเรียกว่าโครงสร้างแบบ T-O-T แร่ดินในกลุ่มนี้จะประกอบด้วย มอนต์โมริลโลไนท์ (Montmorillonite) ไพโรฟิลไลต์ (Pyrophyllite) ทัล (Talc) เป็นต้น มอนต์โมริลโลไนท์ และไพโรฟิลไลต์ จะมีสูตรเคมีคือ $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ แต่ทัลจะมีสูตรเคมีคือ $3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ซึ่งจะแตกต่างจากสูตรเคมีของมอนต์โมริลโลไนท์ และไพโรฟิลไลต์ เนื่องจากโครงสร้างของทัลจะประกอบด้วยชั้นซิลิกาสองชั้น และชั้นบรูไซต์ ($\text{Mg}(\text{OH})_2$ หรือ $\text{Fe}(\text{OH})_2$) หนึ่งชั้น ซึ่งชั้นบรูไซต์คือชั้นกิบไซต์ ที่มีแมกนีเซียมหรือเหล็กที่มีประจุบวกสองสามอะตอมเข้าไปแทนที่อะตอมของอะลูมิเนียมที่มีประจุบวกสามสองอะตอมของโครงสร้างไพโรฟิลไลต์ จึงทำให้เกิดสมดุลทางประจุขึ้น ซึ่งโครงสร้างผลึกและลักษณะรูปร่างผลึกของสเมคไทท์ แสดงในรูปที่ 2.14 และ 2.15 ตามลำดับ



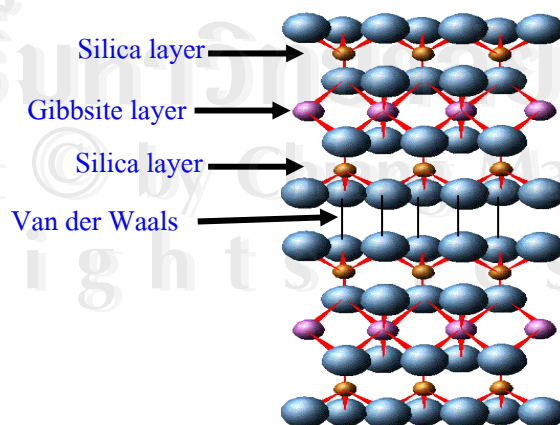
รูปที่ 2.14 โครงสร้างผลึกของสเมคไทท์ [15]



รูปที่ 2.15 ลักษณะรูปร่างผลึกของสเมคไทท์ [16]

ในโครงสร้างเคโอลินจะมีแรง 2 แรงที่ยึดเหนี่ยวระหว่างผลึก คือ แรงแวนเดอวาล์ว และพันธะไฮโดรเจน แต่โครงสร้างสเมคไทท์เป็นไปไม่ได้ที่ผลึกสองผลึกจะยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะไฮโดรเจน เนื่องจากชั้นนอกสุดของโครงสร้างสเมคไทท์คือ ชั้นซิลิกา ซึ่งจะไม่มีการไฮดรอกซิลที่จะไปสร้างพันธะไฮโดรเจนกับโครงสร้างผลึกที่อยู่ถัดไป ดังนั้นโครงสร้างสเมคไทท์จึงยึดเหนี่ยวกันระหว่างผลึกด้วยแรงแวนเดอวาล์ว และแรงยึดเหนี่ยวจะอ่อนกว่าโครงสร้างเคโอลิน ดังแสดงในรูปที่ 2.16

สมบัติเด่นๆ ของโครงสร้างสเมคไทท์คือการบวมตัวด้วยน้ำ เมื่อดินในกลุ่มสเมคไทท์อยู่ในน้ำโครงสร้างจะแยกออกจากกัน เนื่องจากโมเลกุลของน้ำเข้าไปแทรกในระหว่างโครงสร้างผลึกลักษณะดังกล่าวจึงนำไปสู่การบวมตัว และระยะห่างระหว่างโครงสร้างผลึกก็จะเปลี่ยนแปลงไป โดยจะอยู่ในช่วง 9.8-18 Å ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่ดูดซับ



รูปที่ 2.16 การเชื่อมโยงของแรงแวนเดอวาล์วระหว่างผลึกสเมคไทท์ [10]

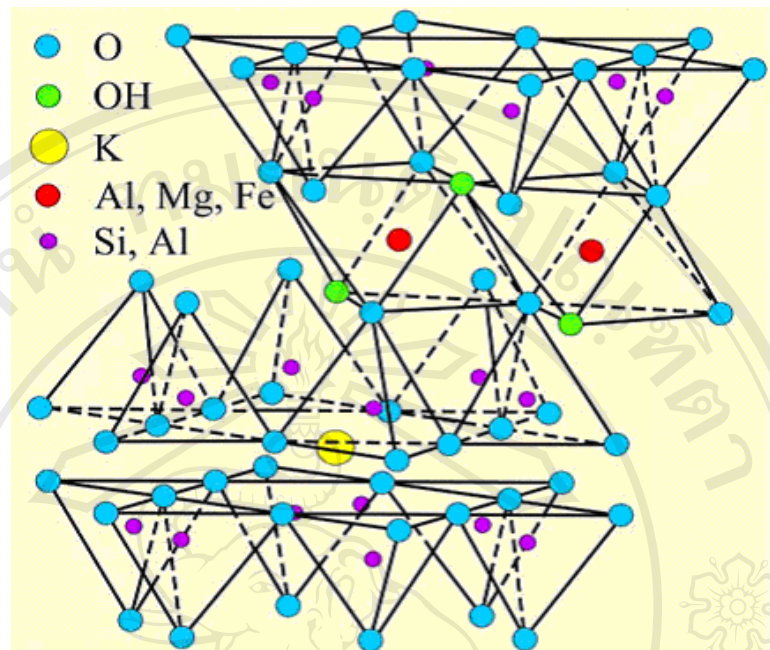
2.3.4 โครงสร้างผลึกของไมกาและอิลไลต์ [6 และ 8]

ไมกาไม่จัดอยู่ในจำพวกดิน เพราะว่ามีกาไม่มีความเหนียวเมื่อเติมน้ำลงไปในระบบ โครงสร้างไมกาจะเหมือนกับโครงสร้างของกลุ่มสเมคไทต์ โดยทั่วไปสูตรเคมีของไมกาคือ ไพโรฟิลไลต์ที่มีอะตอมของซิลิกอนหนึ่งในสี่ถูกแทนด้วยอะตอมของอะลูมิเนียม ดังนั้นสูตร โครงสร้างพื้นฐานของไมกา คือ $M^+[Al_2[Si_3Al]O_{10}(OH)_2]$ และโครงสร้างไมกาจะเป็นโครงสร้าง แบบ 2:1 หรือเรียกว่าโครงสร้างแบบ T-O-T ดังแสดงในรูปที่ 2.17 แร่ดินในกลุ่มนี้ได้แก่ มัสโคไนท์ อิลไลต์ และมาร์กาไรต์ เป็นต้น

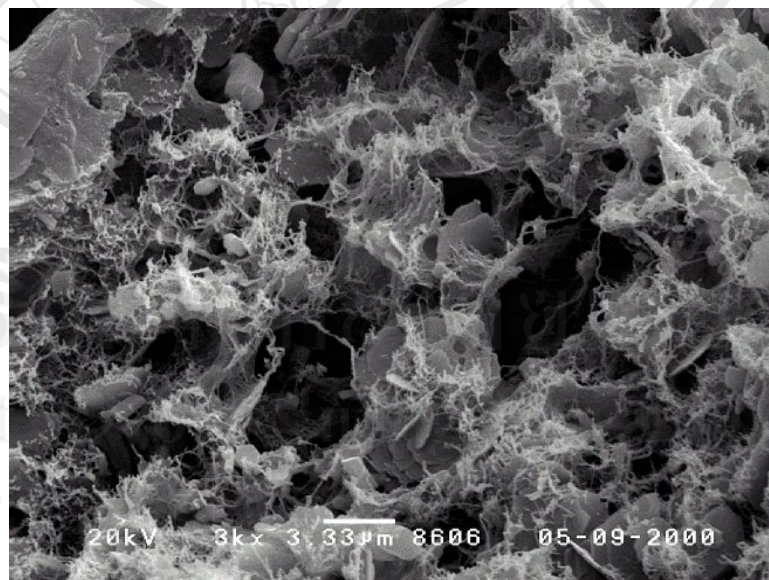
โครงสร้างของมัสโคไนท์คือ ไพโรฟิลไลต์ที่มีอะตอมของอะลูมิเนียมที่มีประจุบวกสามหนึ่ง อะตอมเข้าไปแทนที่อะตอมของซิลิกอนที่มีประจุบวกสี่หนึ่งอะตอม ซึ่งการแทนที่ของอะตอม ดังกล่าวจะทำให้ขาดประจุบวกที่จะไปสร้างพันธะกับออกซิเจนที่มีประจุเป็นลบ ดังนั้นประจุบวก ในโครงสร้างไมกาหรือมัสโคไนท์ที่ทำให้เกิดสมดุลคือ โปแตสเซียมไอออน เพราะฉะนั้นสูตรเคมี ของไมกา คือ $K.Al_2[Si_3Al]O_{10}(OH)_2$ หรือ $K_2O.3Al_2O_3. 6SiO_2.2H_2O$ นอกจากนี้โครงสร้างไมกา หรือมัสโคไนท์จะพบโปแตสเซียมไอออนอยู่ในระหว่างโครงสร้างผลึก ซึ่งโปแตสเซียมไอออนที่มี ประจุบวกจะดึงดูดกับประจุลบของอะตอมออกซิเจนที่อยู่ในโครงสร้างผลึก จึงส่งผลให้ค่า ระยะห่างระหว่างโครงสร้างผลึกมีค่าคงที่ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 10 Å และไมกาจะไม่เกิดการบวมตัวด้วย น้ำ

โครงสร้างแคลเซียมไมกาคือ ไพโรฟิลไลต์ที่มีอะตอมของซิลิกอนสองในสี่ถูกแทนที่ด้วย อะตอมของอะลูมิเนียม จึงทำให้ขาดประจุบวกสองประจุที่จะไปสร้างพันธะกับออกซิเจน ดังนั้น ประจุบวกใน โครงสร้างแคลเซียมไมกาที่ทำให้เกิดสมดุลคือ แคลเซียมไอออน นอกจากนี้ โครงสร้างแคลเซียมไมกาจะพบแคลเซียมไอออนอยู่ในระหว่างโครงสร้างผลึก ซึ่งทำหน้าที่ เหมือนกับโปแตสเซียมไอออน

โครงสร้างของอิลไลต์จะเหมือนกับโครงสร้างของไมกา แต่โครงสร้างของอิลไลต์จะมี ปริมาณโปแตสเซียมน้อย แต่มีปริมาณน้ำมากกว่าโครงสร้างมัสโคไนท์ สาเหตุอาจเกิดจาก ไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) เข้าไปแทนที่โปแตสเซียมไอออนในช่องว่างระหว่างโครงสร้างผลึก ลักษณะรูปร่างผลึกของอิลไลต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.18



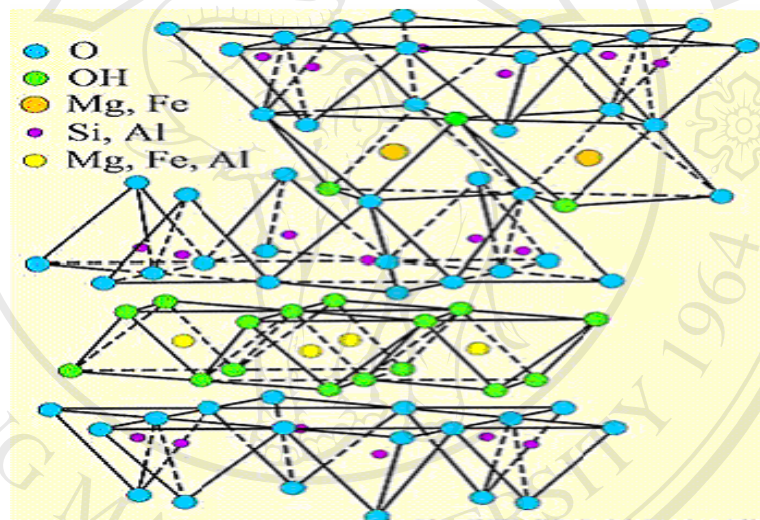
รูปที่ 2.17 โครงสร้างผลึกของไมกาและอิลไลต์ [17]



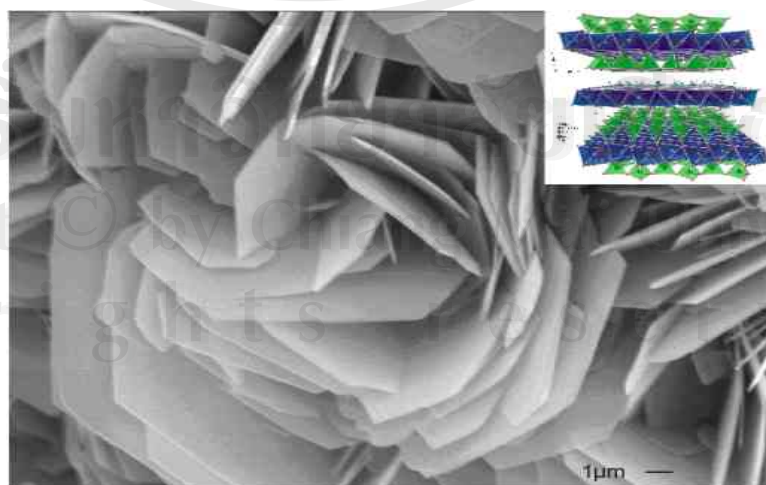
รูปที่ 2.18 ลักษณะรูปร่างผลึกของอิลไลต์ [18]

2.3.5 โครงสร้างผลึกของคลอไรท์ [6 และ 8]

คลอไรท์เป็นแร่ดินที่มีขนาดอนุภาคเล็กและมีสีเขียว โครงสร้างพื้นฐานของคลอไรท์เกิดจากโครงสร้างของทาลัสต์กับโครงสร้างของบรูไซต์ โดยที่โครงสร้างของบรูไซต์จะมีประจุบวกเนื่องจากอะตอมของแมกนีเซียมถูกแทนที่ด้วยอะตอมของอะลูมิเนียม และโครงสร้างของทาลัสต์จะมีประจุลบ เนื่องจากอะตอมของอะลูมิเนียมเข้าไปแทนที่อะตอมของซิลิกอน เมื่อโครงสร้างทาลัสต์และโครงสร้างของบรูไซต์เกิดการเชื่อมโยงกันจะเกิดเป็นโครงสร้างคลอไรท์ที่มีสูตรเคมีคือ $\{\text{Mg}_2\text{Al}(\text{OH})_6\}^+ \{\text{Mg}_3(\text{Al}, \text{Si}_3)\text{O}_{10}(\text{OH})_2\}^-$ โครงสร้างคลอไรท์จะเป็นโครงสร้างแบบ 2:1:1 และมีระยะห่างระหว่างโครงสร้างผลึกเท่ากับ 14 Å โครงสร้างผลึกและลักษณะรูปร่างผลึกของคลอไรท์ดังแสดงในรูปที่ 2.19 และ 2.20 ตามลำดับ



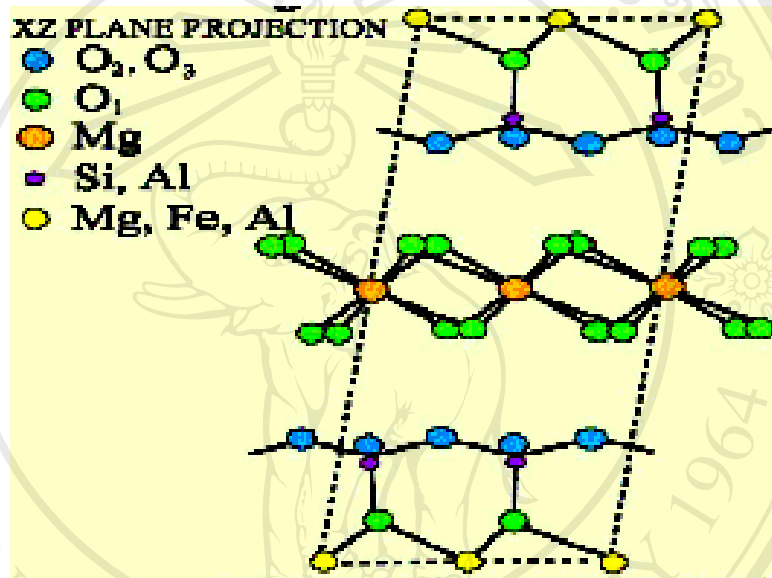
รูปที่ 2.19 โครงสร้างผลึกของคลอไรท์ [19]



รูปที่ 2.20 ลักษณะรูปร่างผลึกของคลอไรท์ [20]

2.3.6 โครงสร้างผลึกของเวอร์มิคูไลต์ [6 และ 8]

โครงสร้างเวอร์มิคูไลต์จะเหมือนกับโครงสร้างคลอไรต์ แต่โครงสร้างเวอร์มิคูไลต์จะมีน้ำและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ในช่องว่างระหว่างโครงสร้างผลึกมาก จึงทำให้โครงสร้างเวอร์มิคูไลต์เกิดการขยายเมื่ออยู่ในน้ำมากกว่าโครงสร้างคลอไรต์ แต่น้อยกว่าโครงสร้างของส멕ไทต์ โครงสร้างเวอร์มิคูไลต์จะเป็นโครงสร้างแบบ 2:1 และมีระยะห่างระหว่างโครงสร้างผลึกเท่ากับ 10-15 Å โครงสร้างผลึกและลักษณะรูปร่างผลึกของเวอร์มิคูไลต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.21 และ 2.22 ตามลำดับ



รูปที่ 2.21 โครงสร้างผลึกของเวอร์มิคูไลต์ [21]

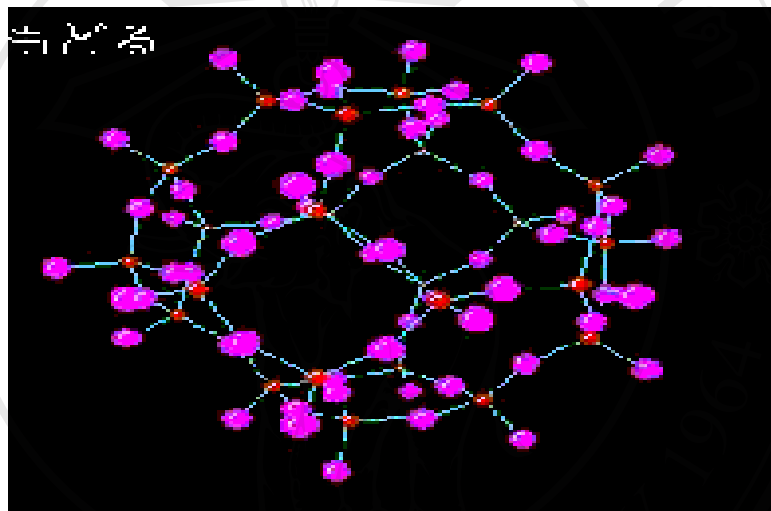


รูปที่ 2.22 ลักษณะรูปร่างผลึกของเวอร์มิคูไลต์ [22]

2.4 โครงสร้างผลึกของควอตซ์และเฟลด์สปาร์

2.4.1 โครงสร้างผลึกของควอตซ์ [23]

โครงสร้างพื้นฐานของควอตซ์ประกอบด้วยอะตอมของซิลิกอนหนึ่งอะตอมที่ถูกล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนสี่อะตอม ซึ่งอะตอมของซิลิกอนจะอยู่จุดกึ่งกลางระหว่างออกซิเจน จึงทำให้เกิดโครงสร้างเตตระฮีดรอน ซึ่งเมื่อโครงสร้างเตตระฮีดรอนแต่ละหน่วยใช้ออกซิเจนที่ทำหน้าที่เป็นฐานร่วมกันจะทำให้เกิดโครงสร้างควอตซ์ที่มีลักษณะสามมิติ ดังแสดงในรูปที่ 2.23 และลักษณะรูปร่างผลึกของควอตซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.23 โครงสร้างผลึกของควอตซ์ [24]

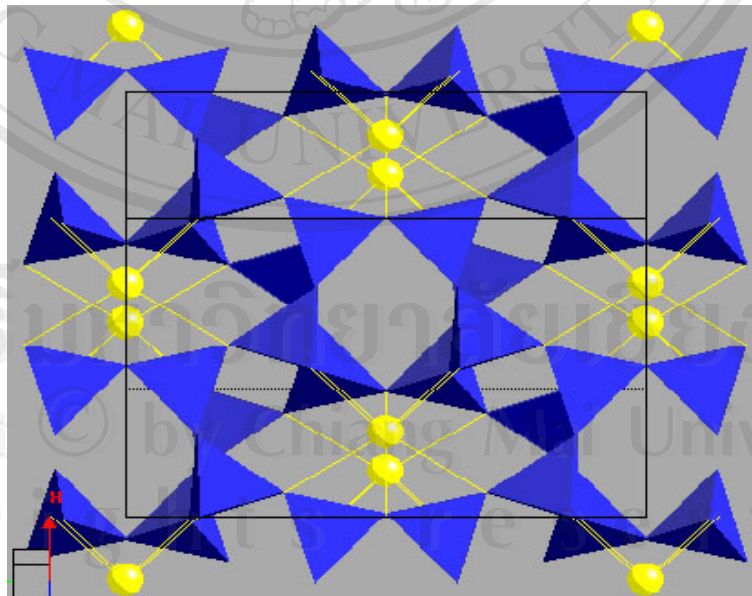


รูปที่ 2.24 ลักษณะรูปร่างผลึกของควอตซ์ [25]

2.4.2 โครงสร้างผลึกของเฟลด์สปาร์ [26]

โครงสร้างพื้นฐานของเฟลด์สปาร์เกิดจากโครงสร้างเตตระฮีดรอนสี่หน่วยเชื่อมโยกันเป็นวง โดยการเชื่อมโยงเกิดจากการใช้ออกซิเจนที่ทำหน้าที่เป็นฐานร่วมกัน ซึ่งหนึ่งในสี่ของโครงสร้างเตตระฮีดรอนที่เชื่อมโยกัน จะมีอะตอมของซิลิกอนที่มีประจุบวกสี่จะถูกแทนที่ด้วยอะตอมของอะลูมิเนียมที่มีประจุบวกสาม จึงทำให้เกิดความไม่สมดุลหรือขาดประจุบวกหนึ่งประจุ ซึ่งประจุบวกที่ขาดหายไปจะทำให้เกิดสมดุลด้วยการแทนที่ของอะตอมของโปแตสเซียมและโซเดียมที่มีประจุบวกหนึ่งภายในโครงสร้าง ดังนั้นจึงทำให้เกิดโครงสร้างเฟลด์สปาร์ที่เรียกว่า โปแตสเซียมเฟลด์สปาร์หรือ ออร์โทเคลส (Orthoclase) และโซเดียมเฟลด์สปาร์หรืออัลไบท์ (Albite)

นอกจากโปแตสเซียมเฟลด์สปาร์และโซเดียมเฟลด์สปาร์ ยังมีแคลเซียมเฟลด์สปาร์หรืออะนอร์ไทต์ ซึ่งแคลเซียมเฟลด์สปาร์จะแตกต่างจากโปแตสเซียมเฟลด์สปาร์และโซเดียมเฟลด์สปาร์ เนื่องจากสองในสี่ของโครงสร้างเตตระฮีดรอนที่เชื่อมโยกัน จะมีอะตอมของซิลิกอนที่มีประจุบวกสี่ถูกแทนที่ด้วยอะตอมของอะลูมิเนียมที่มีประจุบวกสาม จึงทำให้เกิดความไม่สมดุลหรือขาดประจุบวกสองประจุ ซึ่งประจุบวกที่ขาดหายไปจะเกิดสมดุลด้วยการแทนที่ของอะตอมของแคลเซียมที่มีประจุบวกสอง จึงทำให้เกิดโครงสร้างเฟลด์สปาร์ที่เรียกว่า แคลเซียมเฟลด์สปาร์หรืออะนอร์ไทต์ (Anorthite) โครงสร้างผลึกและลักษณะรูปร่างผลึกของเฟลด์สปาร์ แสดงในรูปที่ 2.25 และ 2.26 ตามลำดับ



รูปที่ 2.25 โครงสร้างผลึกของเฟลด์สปาร์ [27]



รูปที่ 2.26 ลักษณะรูปร่างผลึกของเฟลด์สปาร์ [28]

2.5 การเกิดประจุและไอโซมอร์ฟัสซัปปะติตวิชัน (Isomorphous substitution) บนโครงสร้างผลึกของดิน ควอตซ์ และเฟลด์สปาร์

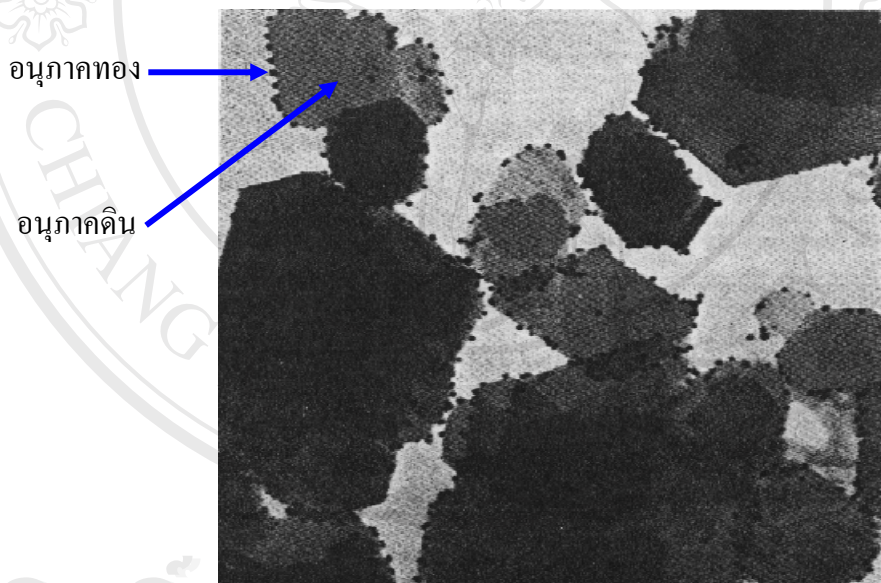
2.5.1 การเกิดประจุและไอโซมอร์ฟัสซัปปะติตวิชันบนโครงสร้างผลึกของดิน [6, 29 และ 30]

อนุภาคดินที่กระจายตัวในน้ำส่วนมากจะมีประจุลบ ซึ่งสามารถพิสูจน์ให้เห็นว่าดินส่วนใหญ่มีประจุเป็นลบโดยทำการจุ่มอิเล็กโทรดขั้วบวกและขั้วลบลงในน้ำดินและจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังขั้วของอิเล็กโทรดทั้งสองขั้ว จะพบว่าอนุภาคดินจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วอิเล็กโทรดที่เป็นขั้วบวก ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าดินส่วนมากมีประจุเป็นลบ ซึ่งประจุบนบนโครงสร้างผลึกของดินเกิดจากไอโซมอร์ฟัสซัปปะติตวิชัน ไอโซมอร์ฟัสซัปปะติตวิชันคือ ไอออนบวกที่มีขนาดและเวเลนซ์ต่ำเข้าไปแทนที่ไอออนบวกที่มีขนาดและเวเลนซ์ที่มีขนาดใหญ่กว่าภายในโครงสร้างผลึกของดิน ยกตัวอย่างเช่น ในแร่ดินเคโอลิไนท์ที่มีสูตร โครงสร้างคือ $\text{Si}_2\text{O}_5 \cdot \text{Al}_2(\text{OH})_4$ อะตอมของอะลูมิเนียมที่มีประจุบวกสามเข้าไปแทนที่อะตอมของซิลิกอนที่มีประจุบวกสี่ในชั้นซิลิกา หรือบางครั้งอะตอมของอะลูมิเนียมที่มีประจุบวกสามถูกแทนที่ด้วยอะตอมของแมกนีเซียมและเฟอร์ริกที่มีประจุบวกสองในชั้นกิบไซต์ การแทนที่ของอะตอมในโครงสร้างผลึกดินจะส่งผลให้โครงสร้างเกิดความไม่เสถียร เกิดการบิดเบี้ยว และโครงสร้างผลึกดินไม่สมบูรณ์ ดินที่มีโครงสร้างผลึกไม่สมบูรณ์ขนาดอนุภาคจะเล็ก ความเหนียวสูง ความแข็งแรงและการหดตัวมาก

นอกจากนี้กลไกการเกิดประจุในโครงสร้างผลึกของดินยังสามารถเกิดจากการแตกหักของพันธะ โดยเฉพาะที่ขอบของผลึกดิน การแตกหักของพันธะที่ขอบของอนุภาคดินนั้นจะส่งผลให้เกิด

ประจุลบและบวก Thiessen (1942) ได้ทำการทดลอง โดยนำสารแขวนลอยของดินเคโอลินในน้ำผสมกับอนุภาคทองที่มีประจุลบ และเตรียมชิ้นงานไปศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscopy) ซึ่งจะพบว่าอนุภาคทองจะเกาะที่ขอบของอนุภาคดิน และผิวหน้าของอนุภาคดินจะไม่เกาะ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าที่ผิวหน้าของอนุภาคดินมีประจุเป็นลบ ส่วนที่ขอบของอนุภาคดินมีประจุเป็นบวก ดังแสดงในรูปที่ 2.27

นอกจากนี้ประจุที่ขอบของอนุภาคดินจะเปลี่ยนไปตามสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงพีเอช ถ้าค่าพีเอชเพิ่มขึ้นประจุลบที่ผิวดินจะเพิ่มขึ้นด้วย ดังแสดงในสมการที่ 2.4 แต่ถ้าค่าพีเอชลดลงประจุลบที่ผิวของอนุภาคดินจะลดลงหรือมีประจุบวกเพิ่มขึ้น ดังสมการที่ 2.5



รูปที่ 2.27 อนุภาคทองเกาะที่โครงสร้างผลึกของดินเคโอลิน [29]

2.5.2 การเกิดประจุบนโครงสร้างผลึกของควอตซ์ [23] และเฟลด์สปาร์ [31]

เมื่ออนุภาคควอตซ์และเฟลด์สปาร์ถูกบดจะก่อให้เกิดจากการแตกหักของพันธะระหว่างอะตอมของซิลิกอนกับออกซิเจน (Si-O bond) นอกจากนี้เฟลด์สปาร์ยังมีการแตกหักของพันธะระหว่างอะตอมของโซเดียมกับออกซิเจน โพแทสเซียมกับออกซิเจน แคลเซียมกับออกซิเจน และอะลูมิเนียมกับออกซิเจน จึงส่งผลให้เกิดประจุบวกและลบที่ผิวของอนุภาคควอตซ์และเฟลด์สปาร์ ประจุบวกของควอตซ์เกิดจากอะตอมของซิลิกอน แต่ประจุบวกของเฟลด์สปาร์เกิดจากอะตอมของ

ซิลิกอน โปแตสเซียม โซเดียม แคลเซียม และอะลูมิเนียม ส่วนประจุลบของควอตซ์และเฟลด์สปาร์เกิดจากอะตอมของออกซิเจน เมื่ออนุภาคควอตซ์และเฟลด์สปาร์อยู่ในน้ำและมีการปรับพีเอช ประจุที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนไปตามสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงพีเอช ถ้าค่าพีเอชเพิ่มขึ้นประจุลบที่ผิวของอนุภาคควอตซ์และเฟลด์สปาร์จะเพิ่มขึ้นด้วย ดังแสดงในสมการที่ 2.6 แต่ถ้าค่าพีเอช ลดลงประจุลบที่ผิวของควอตซ์และเฟลด์สปาร์จะลดลงหรือมีประจุบวกเพิ่มขึ้น ดังแสดงในสมการที่ 2.7



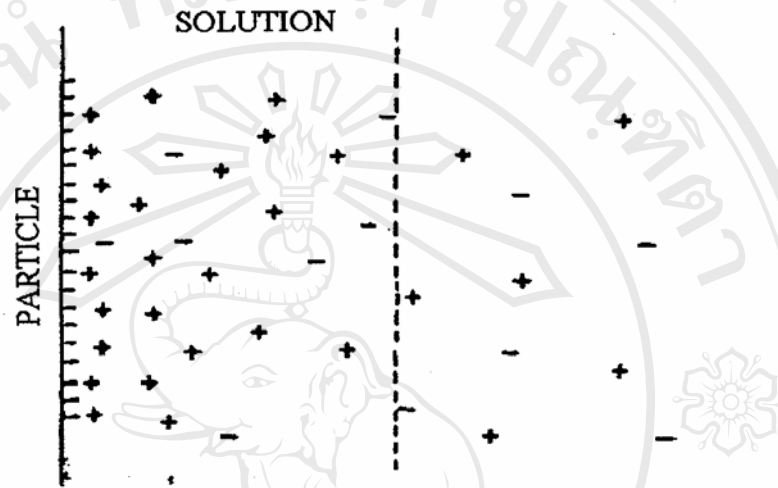
2.6 อิเล็กทริกคอลลัมเบิลเลเยอร์ (Electrical double layer) [32, 33 และ 34]

เมื่ออนุภาคดินแขวนลอยอยู่ในน้ำ จะเกิดกระจายตัวเมื่ออนุภาคเกิดการผลักกัน ซึ่งการผลักกันระหว่างอนุภาคจะขึ้นอยู่กับแรงผลักทางประจุไฟฟ้า และอาจเกิดการรวมกันของอนุภาคดินด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์เมื่ออนุภาคเข้าใกล้กันมากๆ การผลักและการรวมกันระหว่างอนุภาคจะบ่งบอกถึงความเสถียร ความไม่เสถียร และสมบัติการไหลของสารแขวนลอย ซึ่งสมบัติความเสถียร ความไม่เสถียร และสมบัติการไหลของสารแขวนลอยจะขึ้นอยู่กับอิเล็กทริกคอลลัมเบิลเลเยอร์ (Electrical double layer)

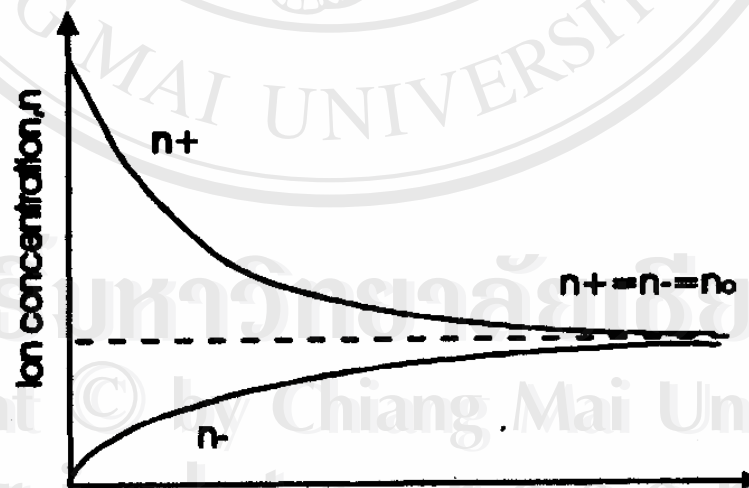
อิเล็กทริกคอลลัมเบิลเลเยอร์

เมื่ออนุภาคดินกระจายตัวในน้ำ พื้นผิวของอนุภาคดินส่วนมากจะมีประจุเป็นลบ ซึ่งประจุลบเกิดจากไอโซมอร์ฟิสม์ระดับอะตอม โครงสร้างผลึก การเกิดไอโซมอร์ฟิสม์ระดับอะตอม โครงสร้างผลึกจะทำให้เกิดความไม่สมดุลทางประจุคือ ขาดประจุบวกและเกิดประจุลบที่ผิวของอนุภาคดิน เมื่ออนุภาคดินกระจายตัวอยู่ในน้ำประจุลบบนอนุภาคดินจะถูกทำให้เกิดสมดุลด้วยการดูดซับประจุบวกที่หายไป โดยที่อนุภาคดินที่มีประจุลบจะดึงดูดกับไอออนบวกที่อยู่ใกล้เคียง ซึ่งไอออนบวกที่มีประจุตรงกันข้ามกับประจุลบบนผิวดินเรียกว่า เคาเตอร์ไอออน (Counter ion) การดึงดูดกันระหว่างอนุภาคดินที่มีประจุลบกับเคาเตอร์ไอออนจะเกิดการแพร่เป็นชั้นบางๆ รอบพื้นที่ผิวของอนุภาค ซึ่งจะเรียกว่า ดิฟฟิวส์ดับเบิลเลเยอร์ (Diffuse double layer) ดังแสดงในรูปที่ 2.28 ในดิฟฟิวส์ดับเบิลเลเยอร์ปริมาณของเคาเตอร์ไอออนที่แพร่อยู่ใกล้กับพื้นที่ผิวของอนุภาคดินจะสูงและลดลงเมื่อระยะห่างจากพื้นที่ผิวของอนุภาคดินเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.29 นอกจากนี้ประจุที่แพร่อยู่ใกล้ๆ กับพื้นผิวของอนุภาคดินไม่ได้ประกอบด้วยเคาเตอร์ไอออนเพียงอย่างเดียว แต่ยังมีโคไอออน (Co-ion) อยู่ใกล้กับพื้นผิวของอนุภาคดินเช่นกัน โคไอออนคือ ไอออนที่ประจุทางไฟฟ้า

เป็นลบเหมือนกับอนุภาคดิน โคลิออนจะไม่ได้อยู่ใกล้ชิดกับพื้นผิวของอนุภาคดินมากเท่ากับ
เคาเตอร์ไอออน เพราะว่าอนุภาคดินและโคลิออนจะเกิดการผลัก และนอกจากนี้โคลิออนที่แพร่
อยู่รอบๆ อนุภาคดิน จะมีปริมาณสูงและจะลดลงเมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.28 แบบจำลองดิฟฟิวส์ดับเบิลเลเยอร์ของ Gouy [34]



รูปที่ 2.29 การกระจายของประจุบวก (n^+) และลบ (n^-) ในแบบจำลองดิฟฟิวส์ดับเบิลเลเยอร์ [33]

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการแพร่ของเคาเตอร์ไอออนในสารแขวนลอยหรือเรียกว่า ดิฟฟิวส์ดับเบิลเลเยอร์ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นได้ถูกพัฒนาขึ้นด้วย Gouy (1910) และ Chapman (1913) ตามลำดับ ซึ่ง Gouy และ Chapman ได้ทำนายว่าค่าศักย์ไฟฟ้า (ψ) จะลดลงโดยประมาณ จากเอกโพแนนเชียลที่มีระยะห่างเท่ากับ x จากพื้นผิวที่มีลักษณะเป็นระนาบจนถึงสารละลายที่อยู่ ถัดออกไป ดังแสดงในสมการที่ 2.8

$$\psi = \psi_0 \exp(-kx) \quad (2.8)$$

โดยที่ ψ_0 คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่พื้นผิวของอนุภาค k^{-1} คือ ความหนาของดับเบิลเลเยอร์ จากสมการ ที่ 2.8 จะแสดงให้เห็นว่าเมื่อระยะห่างจากพื้นผิวของอนุภาค ค่าศักย์ไฟฟ้าจะต่ำและค่าเอกโพแนนเชียล จะลดลง

ค่า $\frac{1}{k}$ หาได้จาก

$$\frac{1}{k} = \sqrt{\frac{\epsilon_0 RT}{F^2 \sum_{i=n} c_i z_i^2}} \quad (2.9)$$

เมื่อ F คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (Faraday constant)

c_i คือ ความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte concentration)

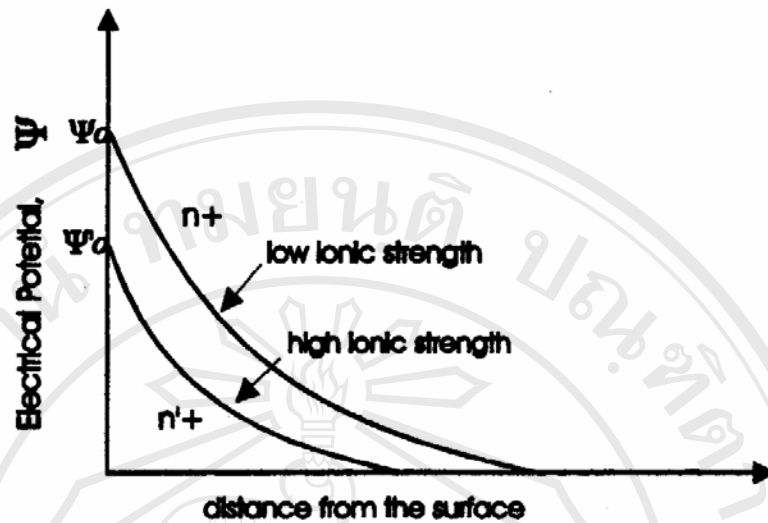
z_i คือ เวเลนซ์ของไอออน (Valence of the ion)

ϵ_0 คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสารตัวกลาง (Dielectric constant of the medium)

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (atm/molK) (Gas constant)

T คือ อุณหภูมิ (K) (Absolute temperature)

จากสมการที่ 2.9 จะพบว่า เมื่อความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์หรือความแรงไอออนเพิ่มขึ้น ความ หนาของดิฟฟิวส์ดับเบิลเลเยอร์จะลดลงเนื่องจากเกิดการกดอัด การกดอัดของดับเบิลเลเยอร์ ดัง แสดงในรูปที่ 2.30 นอกจากนี้จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ แต่ยังขึ้นอยู่กับเวเลนซ์ ของไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามกับพื้นผิวของอนุภาคดิน ถ้าไอออนที่มีเวเลนซ์สูง จะเกิดการกดอัด ดับเบิลเลเยอร์มากกว่าไอออนที่มีเวเลนซ์ต่ำ

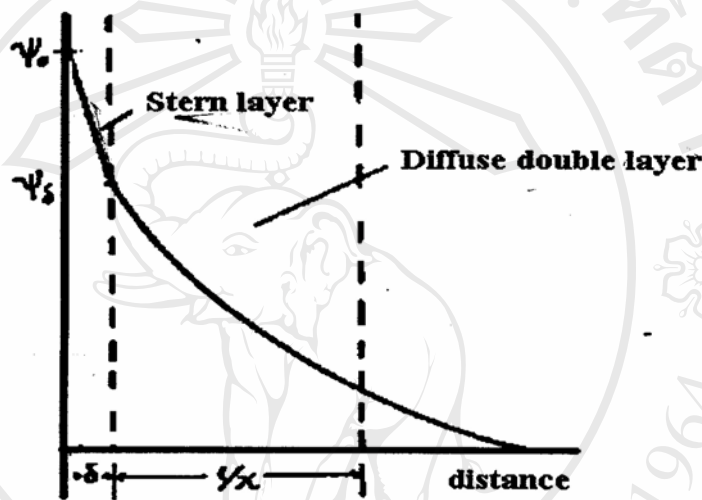


รูปที่ 2.30 การเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้า และความเข้มข้นของไอออนบวก เมื่อมีระยะห่างจากพื้นผิว อนุภาคที่ความแรงของไอออนต่ำและสูง [33]

ในทฤษฎีของ Gouy และ Chapman ยังมีข้อด้อย เพราะว่าสมมติให้เคาเตอร์ไอออนเป็นประจุที่อยู่เดี่ยวๆ ในสารแขวนลอย โดยจะไม่ทำปฏิกิริยากันระหว่างผิวที่มีลักษณะเป็นแนวราบกับเคาเตอร์ไอออน ต่อมา Stern (1924) ได้ปรับปรุงทฤษฎีของ Gouy และ Chapman โดย Stern ได้อธิบายว่า ขนาดของเคาเตอร์ไอออนจะมีขอบเขต จึงทำให้ระยะห่างของเคาเตอร์ไอออนที่อยู่ใกล้กับประจุที่ผิวมีขีดจำกัดเช่นกันซึ่งจะเท่ากับรัศมีของไอออน ดังนั้นแบบจำลองอิเล็กทริกคอลลด์แบบเฮลล์ของ Stern ประกอบด้วยสองส่วน ส่วนที่หนึ่งได้แก่ส่วนที่อยู่ชั้นในสุดคือชั้น Stern ส่วนที่สองคือ ดิฟฟิวส์ลเเยอร์ของ Gouy และ Chapman ดังแสดงในรูปที่ 2.31 เมื่อวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของ อิเล็กทริกคอลลด์แบบเฮลล์ จะพบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าในชั้น Stern จะลดลงเป็นแนวเส้นตรงที่มีระยะทางเท่ากับ δ ซึ่งวัดจากศักย์ไฟฟ้าที่ผิว (ψ_0) จนถึงศักย์ไฟฟ้า Stern (ψ_s) และเมื่อวัดค่าศักย์ไฟฟ้า Stern จนถึงดิฟฟิวส์ลเเยอร์ค่าศักย์ไฟฟ้าจะลดลงเรื่อยๆ จนมีค่าเท่ากับศูนย์ นอกจากนี้ในระหว่างชั้น Stern และดิฟฟิวส์ลเเยอร์จะมีระนาบอีกระนาบหนึ่ง ระนาบดังกล่าวเรียกว่าระนาบ Helmholtz ซึ่งระนาบเฮลล์มโฮลตจะอยู่ถัดจากชั้น Stern และระนาบ Helmholtz เรียกว่า ระนาบเฉือน (Plane of shear) ศักย์ไฟฟ้าที่ระนาบเฉือนเรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าซีต้า (Zeta potential) ซึ่งในทางปฏิบัติจะสมมติให้ศักย์ไฟฟ้าซีต้าเท่ากับศักย์ไฟฟ้า Stern

นอกจากนี้ van Olphen ได้กล่าวว่าผิวของอนุภาคดินไม่ใช่มีที่เดียว แต่ยังมีที่ขอบของอนุภาคดิน ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะเกิดอิเล็กทริกคอลลด์แบบเฮลล์ที่ขอบของอนุภาคดิน อิเล็กทริกคอลลด์แบบเฮลล์ที่ขอบของอนุภาคเกิดจากการดูดซับไอออนที่ใช้วัดศักย์ไฟฟ้า (ไอออนที่ใช้สำหรับ

วัดศักย์ไฟฟ้า (Potential determining ions) ได้แก่ ไฮโดรเจนไอออน (H^+) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) บนขอบของอนุภาคดินที่เกิดจากการแตกหักของพันธะในชั้นซิลิกาและชั้นกิบไซต์ อิเล็กโทรคอลลด์ดับเบิลเลเยอร์ที่เกิดขึ้นที่ขอบของอนุภาคดินสามารถแบ่งออกได้สองชนิดคือ อิเล็กโทรคอลลด์ดับเบิลเลเยอร์ประจุบวก เกิดขึ้นเมื่ออนุภาคดินอยู่ในสารแขวนลอยที่มีสภาพเป็นกรด และอิเล็กโทรคอลลด์ดับเบิลเลเยอร์ประจุลบ เกิดขึ้นเมื่ออนุภาคดินอยู่ในสารแขวนลอยที่มีสภาพเป็นเบส



รูปที่ 2.31 แบบจำลองไฟฟ้าสถิตดับเบิลเลเยอร์ของ Stern [34]

2.7 จลศาสตร์ไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้าซีต้า (Electrokinetic or Zeta potential) [32 และ 33]

จลศาสตร์ไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้าซีต้า คือ ศักย์ไฟฟ้าในอิเล็กโทรคอลลด์ดับเบิลเลเยอร์ที่ระนาบเฉือน ปรากฏการณ์จลศาสตร์ไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษาระบบของสารแขวนลอยอย่างมากที่สุดคือ อิเล็กโตรโฟเรซิส (Electrophoresis) ซึ่งอิเล็กโตรโฟเรซิสเกิดจากการป้อนศักย์ไฟฟ้าให้กับอนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ ในกรณีของอนุภาคของดินที่กระจายตัวอยู่ในน้ำ เมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าเข้าไปจะทำให้ประจุในอิเล็กโทรคอลลด์ดับเบิลเลเยอร์เคลื่อนที่เข้าหาขั้วแคโทดที่มีประจุเป็นบวก ส่วนแคตไอออนจะเคลื่อนที่สู่ขั้วแอโนดที่เป็นประจุลบ การวัดจลศาสตร์ไฟฟ้าจะวัด ณ ตำแหน่งระหว่างพื้นที่ผิวของอนุภาคดิน และอิเล็กโทรคอลลด์ดับเบิลเลเยอร์ชั้นนอก ซึ่งเรียกว่าระนาบเฉือน ดังนั้น ศักย์ไฟฟ้าซีต้าของอนุภาคดิน คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ระนาบเฉือนนั่นเอง การหาค่าศักย์ไฟฟ้าซีต้าวัดจากความเร็วของอนุภาค (v) ในสนามไฟฟ้า (E) จะแสดงในสมการของ Smoluchowski ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของอนุภาคและสนามไฟฟ้า ดังแสดงในสมการที่ 2.10

$$\nu = \frac{E \varepsilon_r \varepsilon_0 \zeta}{\eta_l} \quad (2.10)$$

และการเคลื่อนที่ของอิเล็กโตรโฟรีติก μ_e ดังแสดงในสมการที่ 2.11

$$\mu_e = \frac{\nu}{E} = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 \zeta}{\eta_l} \quad (2.11)$$

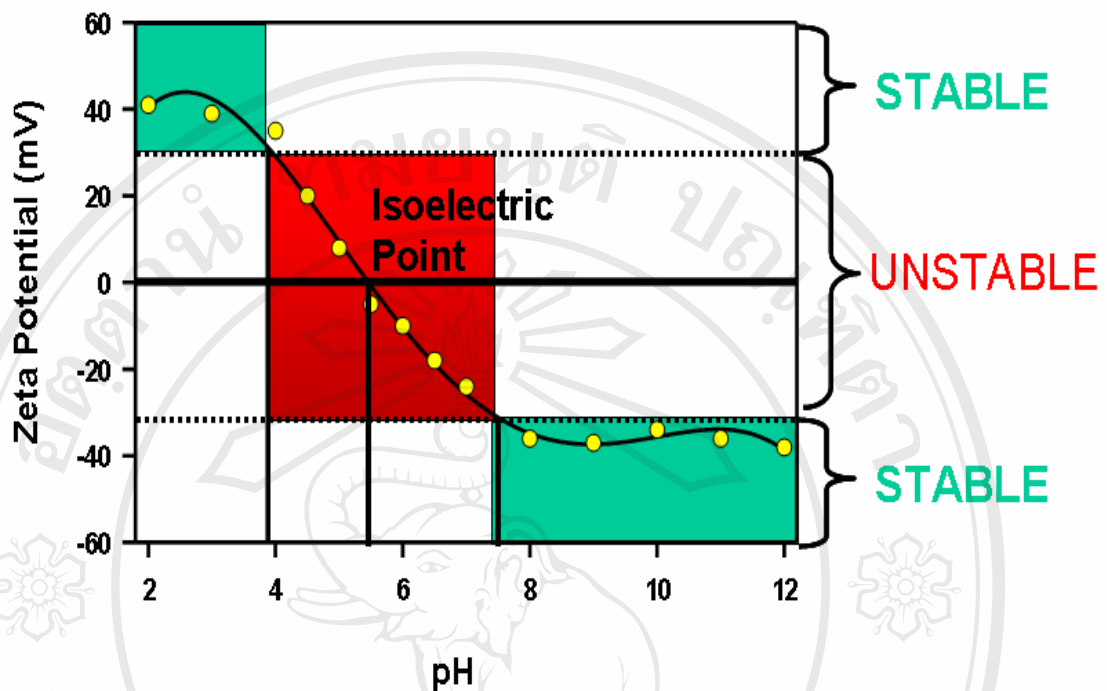
เมื่อ ε_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในสารตัวกลาง (Dielectric constant of the medium)
 ε_0 คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสุญญากาศ (Dielectric constant of the free space)
 ζ คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าซีต้า (Zeta potential)
 η_l คือ ค่าความหนืดของน้ำ (Liquid viscosity)

นอกจากนี้ยังมีสมการของ Henry ที่ใช้หาค่าศักย์ไฟฟ้าซีต้าด้วยการวัดจากความเร็วของอนุภาคในสนามไฟฟ้า ดังแสดงในสมการที่ 2.12

$$\mu_e = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 \zeta}{1.5 \eta_l} f(ka) \quad (2.12)$$

เมื่อ $f(ka)$ คือ Henry function

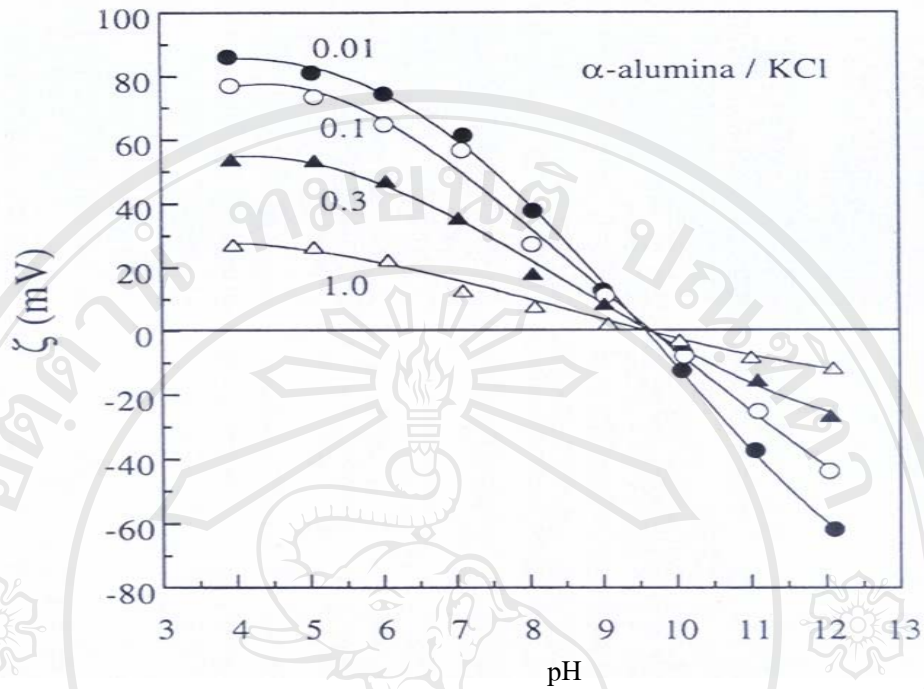
ค่าศักย์ไฟฟ้าซีต้าที่วัดได้ของอนุภาคดินจะบอกถึงความเสถียรหรือความไม่เสถียรของน้ำดิน ถ้าค่าศักย์ไฟฟ้าซีต้ามีค่าเป็นบวกหรือลบ แสดงว่าน้ำดินมีความเสถียร เกิดการกระจายตัวได้ดี แต่ค่าศักย์ไฟฟ้าซีต้ามีค่าเป็นศูนย์ แสดงว่าน้ำดินมีความไม่เสถียร เกิดการรวมกันของอนุภาคเกิดขึ้น ซึ่งจะตรงกับจุดที่มีประจุเป็นศูนย์ (Point of zero charge) หรือจุดไอโซอิเล็กทริก (Isoelectric point) นอกจากนี้ค่าศักย์ไฟฟ้าซีต่ายังสามารถบอกถึงประจุที่ผิวของอนุภาคดินได้ จะเห็นได้ว่า ค่าพีเอชในช่วง 5.5-12 น้ำดินจะมีประจุเป็นลบ ส่วนค่าพีเอชในช่วง 2-5.5 น้ำดินจะมีประจุเป็นบวก ดังแสดงในรูปที่ 2.32



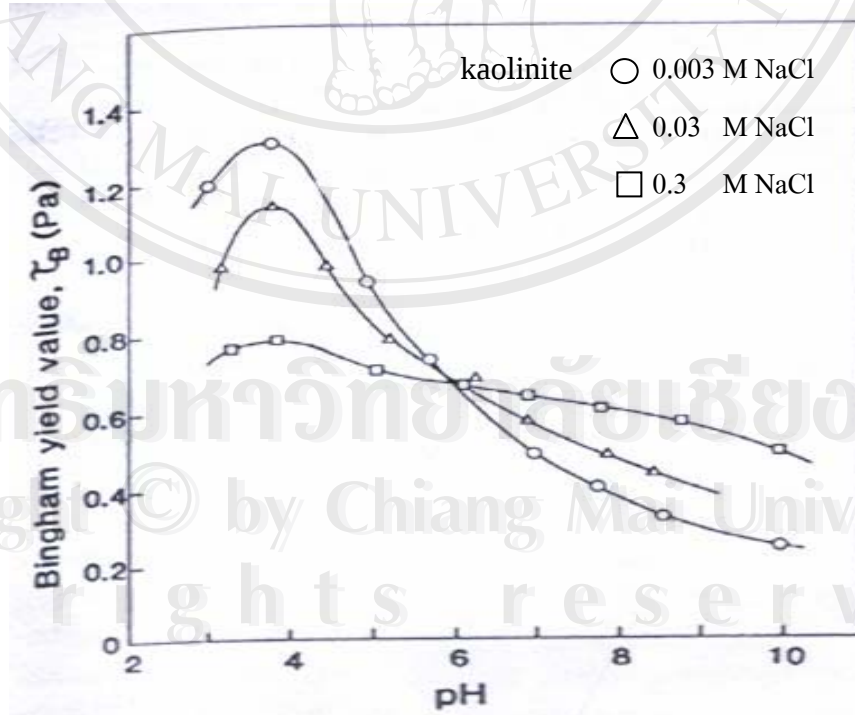
รูปที่ 2.32 ค่าศักย์ไฟฟ้าซีต้าที่แสดงถึงความเสถียรหรือความไม่เสถียรของน้ำดิน และประจุที่ผิวของอนุภาคดิน [32]

การหาจุดไอโซอิเล็กทริกจะหาได้จากเครื่องวัดศักย์ไฟฟ้าซีต้าโดยทำการพลอตกราฟระหว่างพีเอชกับค่าศักย์ไฟฟ้าซีต้า ถ้ากราฟตัดตรงกับจุดที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์แสดงว่าจุดนั้นเป็นจุดไอโซอิเล็กทริก นอกจากนี้การหาจุดไอโซอิเล็กทริกยังสามารถหาได้จากการพลอตกราฟระหว่างพีเอชกับค่าศักย์ไฟฟ้าซีต้าที่เปรียบเทียบกับความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ แล้วหาจุดตัดร่วม ซึ่งจุดตัดร่วมคือ จุดไอโซอิเล็กทริก ดังแสดงในรูปที่ 2.33 [35]

นอกจากนี้การหาจุดไอโซอิเล็กทริกนอกจากจะหาจากเครื่องวัดศักย์ไฟฟ้าซีต้า ยังสามารถหาจุดไอโซอิเล็กทริกได้จากจุดตัดร่วมของกราฟที่พลอตระหว่างค่าพีเอชกับค่าความเค้นของ Bingham ที่มีความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.34 โดยค่าความเค้นของ Bingham จะหาได้จากการวัดค่าความหนืดด้วยเครื่องความหนืด [36]



รูปที่ 2.33 การหาจุดไอโซอิเล็กทริกที่พลอตกราฟระหว่างพีเอชกับค่าศักย์ไฟฟ้าซีต้าที่เปรียบเทียบกับความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ [35]



รูปที่ 2.34 การหาจุดไอโซอิเล็กทริกที่พลอตกราฟระหว่างพีเอชกับค่าความเค้นของ Bingham ที่เปรียบเทียบกับความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ [36]

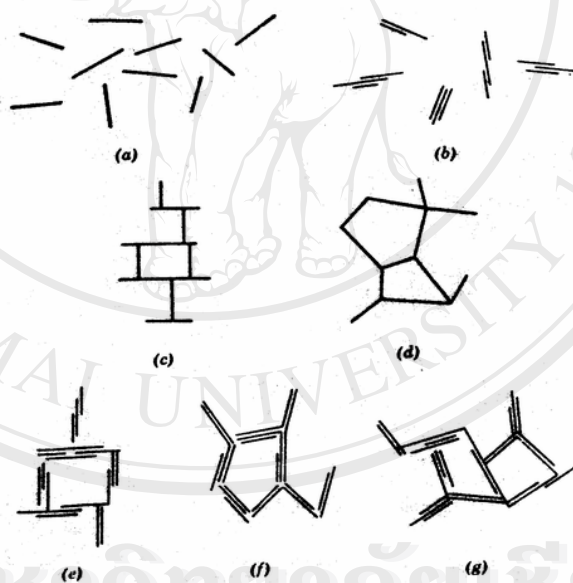
2.8 การรวมตัวและการกระจายตัวของอนุภาคดินในสารแขวนลอย [29]

2.8.1 การรวมตัวของอนุภาคดินในสารแขวนลอย

ในสารแขวนลอยของอนุภาคดินที่มีลักษณะเป็นแผ่นหกเหลี่ยม อนุภาคดินมีโอกาที่จะเกิดการรวมตัวกันของอนุภาคด้วยแรงทางประจุไฟฟ้า ซึ่งการรวมตัวกันของอนุภาคดินจะมี 3 ประเภท ดังแสดงในรูปที่ 2.35 b-g ดังนี้

1. การรวมตัวกันของอนุภาคแบบ Edge-to-Face
2. การรวมตัวกันของอนุภาคแบบ Edge-to-Edge
3. การรวมตัวกันของอนุภาคแบบ Face-to-Face

การรวมตัวกันของอนุภาคแบบ Face-to-Face จะก่อให้เกิดอนุภาคมีลักษณะเป็นแผ่นหนาและมีขนาดใหญ่ ส่วนการรวมตัวกันของอนุภาคดินแบบ Edge-to-Face และ Edge-to-Edge จะนำไปสู่การเกิดโครงสร้างสามมิติ หรือเรียกว่า House of card



รูปที่ 2.35 การกระจายตัว (a) และการรวมกันของอนุภาคดิน (b-g) [29]

การรวมตัวกันของอนุภาคดินทั้งสามแบบดังกล่าวจะเกิดขึ้นในสถานะของน้ำดินที่แตกต่างกันดังนี้คือ

1. ถ้าอนุภาคดินเกิดการรวมตัวกันแบบ Edge-to-Face จะเกิดขึ้นในสถานะน้ำดินที่มีปริมาณสารอิเล็กโทรไลต์และพีเอชต่ำ เนื่องจากประจุบวกที่ขอบของอนุภาคดินจะดึงดูดกับประจุลบที่ผิวของอนุภาคดิน

2. ถ้าอนุภาคดินเกิดการรวมตัวกันแบบ Edge-to-Edge จะเกิดขึ้นในสภาวะน้ำดินที่มีพีเอชตรงกับจุดไอโซอิเล็กทริก ซึ่งการรวมตัวกันของอนุภาคดินแบบ Edge-to-Edge จะเกิดขึ้นเนื่องจากบริเวณขอบของอนุภาคดินจะอยู่ในสภาวะสมดุลหรือไม่มีประจุ หรือความหนาอิเล็กทริกคอลด์ดับเบิลเลเยอร์ที่ขอบของอนุภาคดินมีน้อย จึงทำให้อนุภาคดินเกิดการรวมกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ได้

3. ถ้าอนุภาคดินเกิดการรวมตัวกันแบบ Face-to-Face จะเกิดขึ้นเมื่อสภาวะน้ำดินมีความแรงของไอออน (Ionic strength) และพีเอชสูง เนื่องจากอิเล็กทริกคอลด์ดับเบิลเลเยอร์ที่ผิวของอนุภาคดินถูกกดอัด จึงทำให้เกิดการรวมตัวกันของอนุภาคดินด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่าง Face กับ Face

2.8.2 การกระจายตัวของอนุภาคดินในสารแขวนลอย

การกระจายตัวของอนุภาคดินในน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.35a จะขึ้นกับสภาวะน้ำดินที่มีการปรับพีเอชให้เป็นเบส และมีการเติมสารช่วยกระจายตัว

1. การกระจายตัวของอนุภาคดินที่เกิดจากการปรับพีเอช

อนุภาคดินที่แขวนลอยอยู่ในน้ำจะกระจายตัวเมื่อสภาวะน้ำดินมีสภาพเป็นเบส หรือเมื่อค่าพีเอชมากกว่าจุดไอโซอิเล็กทริก แต่ค่าพีเอชไม่ควรมีค่าสูงมากเกินไปเพราะจะทำให้เกิดการรวมกันระหว่างอนุภาคดินได้ เนื่องจากอิเล็กทริกคอลด์ดับเบิลเลเยอร์จะถูกกดอัด เมื่ออนุภาคเข้าใกล้กันจะเกิดการรวมตัวกันระหว่างอนุภาคด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ได้

กลไกการกระจายตัวของอนุภาคดินจะเกิดเมื่อสภาวะน้ำดินเป็นเบส สาเหตุเกิดจากที่ขอบของอนุภาคดินจะถูกเปลี่ยนให้เป็นประจุลบ หรือเป็นการลดความแรงของประจุบวกที่ขอบของอนุภาคดิน เมื่ออนุภาคดินเข้าใกล้กัน จะเกิดการผลักกัน ทำให้น้ำดินเกิดการกระจายตัว

2. การกระจายตัวของอนุภาคดินที่เกิดจากการเติมสารช่วยกระจายตัว

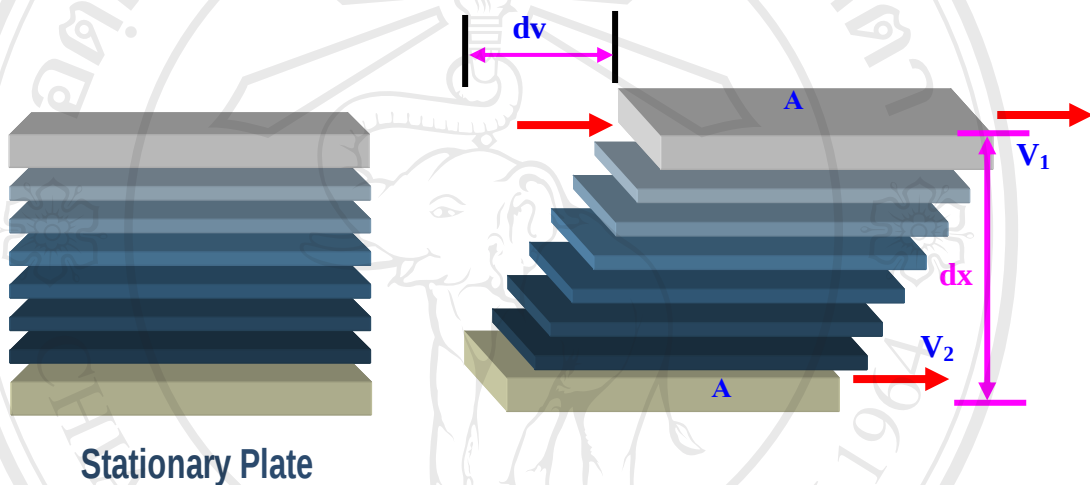
อนุภาคดินที่แขวนลอยอยู่ในน้ำจะกระจายตัวเมื่อน้ำดินมีการเติมสารช่วยกระจายตัว ซึ่งสารช่วยกระจายตัวมีหลายชนิด ได้แก่ โซเดียมซิลิเกต โซเดียมคาร์บอเนต โซเดียมเฮกซะเมตาฟอสเฟต และสารช่วยกระจายตัวจำพวกพอลิเมอร์ เป็นต้น สารพอลิเมอร์ที่ทำหน้าเป็นสารช่วยกระจายตัวจะต้องมีจำนวนมอนอเมอร์ประมาณ 50 มอนอเมอร์

เมื่อเติมสารช่วยกระจายตัวลงไปในน้ำดิน ซึ่งจะทำให้การรวมตัวของอนุภาคดินลดลง เช่น เมื่อเติมโซเดียมซิลิเกตลงในน้ำดินค่าความหนืดจะลดลง เนื่องจากหมู่ซิลิเกต (SiO_3^{2-}) ที่แตกตัวออกจากโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) จะไปเกาะที่ขอบของอนุภาคดินจึงทำให้น้ำดินมีประจุลบเพิ่มขึ้น และมีโอกาสผลักกันระหว่างอนุภาคได้สูง ค่าความหนืดของน้ำดินจึงลดลง

2.9 พฤติกรรมการไหลของของไหล

2.9.1 ทฤษฎีการไหลของของไหล [32, 33, 34 และ 37]

การไหลเป็นพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของของไหลเนื่องจากมีแรงมากระทำ เมื่อมีแรงมากระทำกับของไหล ของไหลด้านล่างจะมีแรงต้านจากพื้นไม่ใหของไหลเกิดการเคลื่อนที่ โดยแรงต้านที่เกิดขึ้นจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อชั้นของเหลวอยู่สูงห่างจากพื้น ดังนั้นความเร็วในแต่ละชั้นจะไม่เท่ากัน ซึ่งชั้นบนสุดจะมีความเร็วสูงสุด และเคลื่อนที่ได้มากกว่าชั้นที่ต่ำลงมา ดังแสดงในรูปที่ 2.36



รูปที่ 2.36 ลักษณะการไหลของของไหลเมื่อมีแรงมากระทำ [32]

สำหรับการกวนน้ำดินจะแสดงพฤติกรรมการไหลเหมือนกับการไหลของของไหล คือความเร็วของน้ำดินด้านบนจะมีความเร็วมากกว่าด้านล่าง โดยการวัดการไหลของของไหลมักจะแสดงออกเป็นค่าความหนืด

ค่าความหนืด คือ ผลที่ได้จากการวัดแรงเสียดทานภายในของของไหล โดยแรงเสียดทานจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อชั้นของของไหลมีการเคลื่อนที่สัมพันธ์กัน แรงเสียดทานยังมีค่ามากเท่าใดก็ยิ่งต้องใช้แรงในการเคลื่อนที่มากเท่านั้น แรงที่กล่าวถึงนี้เรียกว่า ความเค้นเฉือน (Shear stress) โดยปกติแล้วการเฉือน (Shearing) จะเกิดขึ้นเสมอเมื่อวัตถุมีการเคลื่อนที่ ดังนั้นของไหลที่มีความหนืดสูงจึงต้องการแรงมากกว่าของไหลที่มีความหนืดต่ำ

Sir Isaac Newton ได้อธิบายในเรื่องความหนืดโดยอาศัยแบบจำลองดังรูปที่ 2.35 ซึ่ง Newton ได้กล่าวว่า เมื่อระนาบของของไหลสองชั้นที่ขนานกันและมีพื้นที่เท่ากันคือ A ถูกแยกออกจากกันเป็นระยะทาง dx เคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกันด้วยความเร็วที่ต่างกันคือ V_1 และ V_2 นิวตันได้สมมติ

ว่าแรง (F) ที่ต้องการใช้ในการรักษาความแตกต่างของความเร็ว (dv) จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างของความเร็วตลอดของไหลหรือเกรเดียนต์ความเร็ว ดังแสดงในสมการที่ 2.13

$$\frac{F}{A} = \eta \frac{dv}{dx} \quad (2.13)$$

โดย η คือ ค่าความหนืด

ค่าเกรเดียนต์ความเร็ว (dv/dx) เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าอัตราเฉือน (Shear rate) เขียนแทนด้วย γ มีหน่วยเป็น วินาที⁻¹ และเทอม F/A คือ แรงต่อหน่วยพื้นที่ ที่ต้องการในการทำให้เกิดการเฉือน เรียกว่าความเค้นเฉือน เขียนแทนด้วย τ มีหน่วยเป็น ไดน์ต่อตารางเซนติเมตร หรือ นิวตันต่อตารางเมตรในระบบ SI ดังแสดงในสมการที่ 2.14-2.15

$$\tau = \eta \gamma \quad (2.14)$$

$$\eta = \frac{\tau}{\gamma} \quad (2.15)$$

ปกติหน่วยความหนืด คือ พอยส์ หรือเซนติพอยส์ แต่บางครั้งอาจพบในรูปของหน่วย พาสคัล-นาที หรือ มิลลิพาสคัล-วินาที ซึ่งเป็นหน่วยในระบบ SI

$$1 \text{ mPa}\cdot\text{S} = 1 \text{ cP}$$

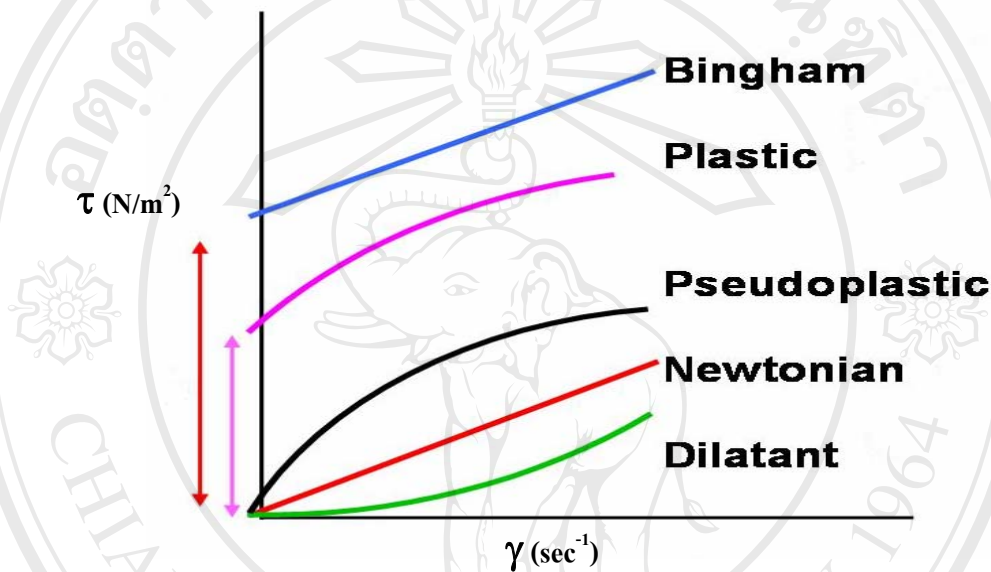
Newton ได้ตั้งสมมติฐานไว้ว่าวัสดุทุกชนิด ณ อุณหภูมิหนึ่งๆ จะมีค่าความหนืดที่ไม่ขึ้นกับอัตราเฉือน หรืออีกนัยหนึ่งคือถ้าเพิ่มแรงขึ้นเป็นสองเท่าก็จะทำให้ของไหลไหลเร็วขึ้นเป็นสองเท่าด้วย แต่ความเป็นจริงแล้ววัสดุที่มีลักษณะดังกล่าวมีอยู่เพียงบางชนิดเท่านั้น

2.9.2 พฤติกรรมการไหลของของไหล [32, 33, 34 และ 37]

พฤติกรรมการไหลของของไหลสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

1. ของไหลแบบนิวโทเนียน (Newtonian fluids)

ของไหลแบบนิวโทเนียน คือ ของเหลวที่มีพฤติกรรมการไหลเป็นไปตามกฎของ Newton ซึ่งจากรูปที่ 2.37 จะเห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือนและความเค้นเฉือนเป็นไปในลักษณะเส้นตรง แสดงให้เห็นว่าความหนืดของของไหลนั้นคงที่ตลอด แม้ว่าความเค้นเฉือนจะเปลี่ยนไปก็ตาม ซึ่งหมายความว่าถ้าวัดความหนืดของสารนี้ ณ อุณหภูมิหนึ่งๆ ค่าความหนืดจะคงที่เสมอไม่ว่าจะใช้เครื่องวัดความหนืดรุ่นไหน เจ็มเบอร์โด หรือใช้ความเร็วในการหมุนเข้มนำไปวัดก็ตาม



รูปที่ 2.37 พฤติกรรมการไหลของของไหลแบบนิวโทเนียนและแบบนอนนิวโทเนียน [32,34]

2. ของไหลแบบนอนนิวโทเนียน (Non-Newtonian fluids)

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือนและความเค้นเฉือนสำหรับของไหลประเภทนี้จะไม่เป็นค่าคงที่ คือ ถ้าความเค้นเฉือนเปลี่ยน ค่าอัตราเฉือนจะไม่เปลี่ยนในลักษณะที่เป็นสัดส่วนเดียวกัน ดังนั้นค่าความหนืดจึงเปลี่ยนเมื่อความเค้นเฉือนเปลี่ยนไป

การวัดค่าความหนืดด้วยเครื่องคนละรุ่น หรือใช้ขนาดเข้มน ความเร็วต่างกัน จึงส่งผลให้ค่าที่วัดได้มีความแตกต่างกันออกไป ดังนั้นการวัดเพื่อให้ได้ค่าที่แน่นอนจึงต้องอาศัยการควบคุมภาวะตัวแปรต่างๆ อย่างระมัดระวัง โดยค่าที่วัดได้นี้จะเรียกว่าค่าความหนืดปรากฏ (Apparent viscosity)

ของไหลแบบนอนนิวโทเนียนสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ ประเภทที่หนึ่งได้แก่การไหลของของเหลวที่เป็นอิสระกับเวลา (Flow of time-independent fluids) และประเภทที่สองได้แก่การไหลของของเหลวที่ขึ้นกับเวลา (Flow of time-dependent fluids)

2.1 การไหลของของเหลวที่เป็นอิสระกับเวลา [32, 33, 34 และ 37]

พฤติกรรมพลาสติกบิงแฮม (Bingham plastic behavior)

พฤติกรรมพลาสติกของบิงแฮม เป็นของไหลที่ต้องการแรงเริ่มต้นค่าหนึ่งเพื่อให้ของเหลวนั้นไหลได้ และเมื่อให้แรงกระทำเพิ่มขึ้นลักษณะการไหลจะเป็นแบบนิวโทเนียน พฤติกรรมการไหลแบบพลาสติกที่บิงแฮมได้กล่าวไว้จะเป็นพฤติกรรมการไหลในอุดมคติ ดังแสดงในสมการที่ 2.16 และแสดงในรูปที่ 2.37

$$\tau = \tau_B + \eta_{pl} \dot{\gamma} \quad (2.16)$$

เมื่อ η_{pl} คือ ค่าความหนืดพลาสติก ซึ่งหาได้จากความชันของกราฟ

τ_B คือ ความเค้นเฉือนของบิงแฮม ซึ่งหาได้จากจุดตัดแกน Y (Shear stress) ของกราฟ

นอกจากนี้พฤติกรรมการไหลแบบพลาสติกของบิงแฮมในสารแขวนลอยในตามธรรมชาติจะไม่เหมือนพฤติกรรมการไหลแบบพลาสติกของบิงแฮมในอุดมคติ เช่น ในสารแขวนลอยของดินที่มีปริมาณอนุภาคสูง พฤติกรรมการไหลแบ่งออกเป็นสองช่วงคือ ช่วงที่หนึ่งเป็นพฤติกรรมการไหลแบบนอนนิวโทเนียน ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายกับพฤติกรรมการไหลแบบเสมือนพลาสติก ส่วนในช่วงที่สองเป็นพฤติกรรมการไหลแบบนิวโทเนียน ดังแสดงในรูปที่ 2.37 และบ่อยครั้งที่พบว่าลักษณะการไหลตัวจะเป็นแบบเสมือนพลาสติกหรือเชียร์ทินนิง

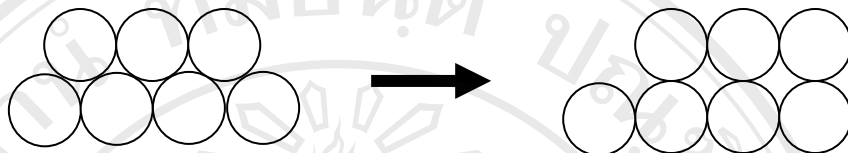
พฤติกรรมเสมือนพลาสติก (Pseudoplastic behavior)

สารแขวนลอยของดินที่เจือจางจะมีพฤติกรรมการไหลแบบเสมือนพลาสติก บางครั้งเรียกพฤติกรรมการไหลแบบนี้ว่า เชียร์ทินนิง (Shear thinning) ซึ่งหมายถึงพฤติกรรมการไหลที่มีค่าความหนืดลดลงเมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้น หรือค่าความหนืดจะลดลงเมื่อความเค้นเฉือนเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.37

พฤติกรรมไดลาแทนต์ (Dilatant behavior)

พฤติกรรมไดลาแทนต์ เป็นพฤติกรรมการไหลตัวของของไหลที่มีค่าความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราเฉือน พฤติกรรมไดลาแทนต์อาจเรียกว่า เชียร์ทิกเคนนิง (Shear thickening) ดังแสดงในรูปที่ 2.37 ซึ่งมักจะปรากฏในของเหลวที่มีส่วนผสมของอนุภาคของแข็งอยู่ในปริมาณสูงๆ เช่น น้ำดินขุ่น ของผสมระหว่างทรายกับน้ำ ทั้งนี้เนื่องจากในสภาพดังกล่าวอนุภาคจะมีการจัดเรียงตัวแบบ

ชิดกันมากที่สุด การทำให้เกิดความเค้นเฉือนในแนวระดับนั้นเท่ากับการทำให้อนุภาคแถบเคลื่อนตัวไปอยู่เหนืออนุภาคที่เรียงอยู่แถวล่าง ดังแสดงในรูปที่ 2.38 ซึ่งการเคลื่อนที่เช่นนี้จะทำให้วัสดุมีความหนืดสูงมาก เนื่องจากขณะที่อนุภาคเคลื่อนตัวนั้นจะเกิดการชนกันกับอนุภาคอื่น และเกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางทั้งแนวตั้งฉากและแนวระดับ



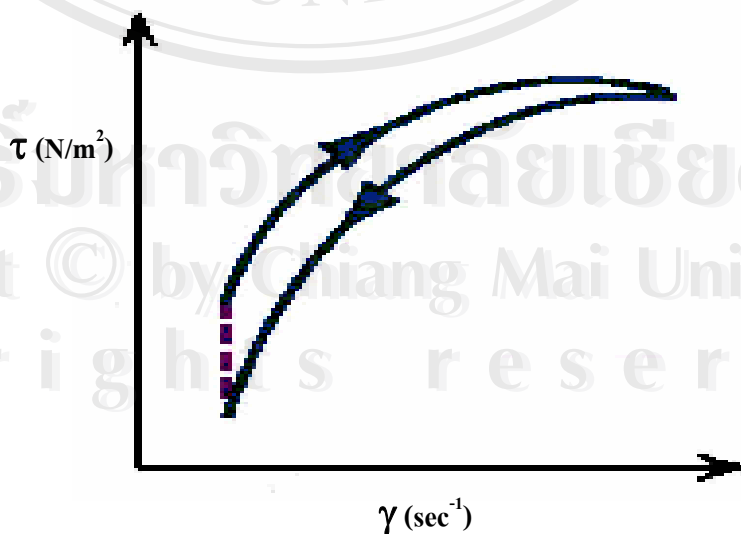
รูปที่ 2.38 พฤติกรรมไดลาแทนต์ [37]

2.2 การไหลของของไหลที่ขึ้นกับเวลา [32, 33, 34 และ 37]

ทิกโซโทรปี (Thixotropy)

ทิกโซโทรปี หมายถึง พฤติกรรมของน้ำดินที่มีแนวโน้มที่จะมีความหนืดเพิ่มขึ้น เมื่อตั้งทิ้งไว้เป็นเวลานานๆ ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าในน้ำดินเกิดโครงสร้างขึ้นมาภายในน้ำดิน และโครงสร้างนี้จะถูกทำลายโดยวิธีการกวน

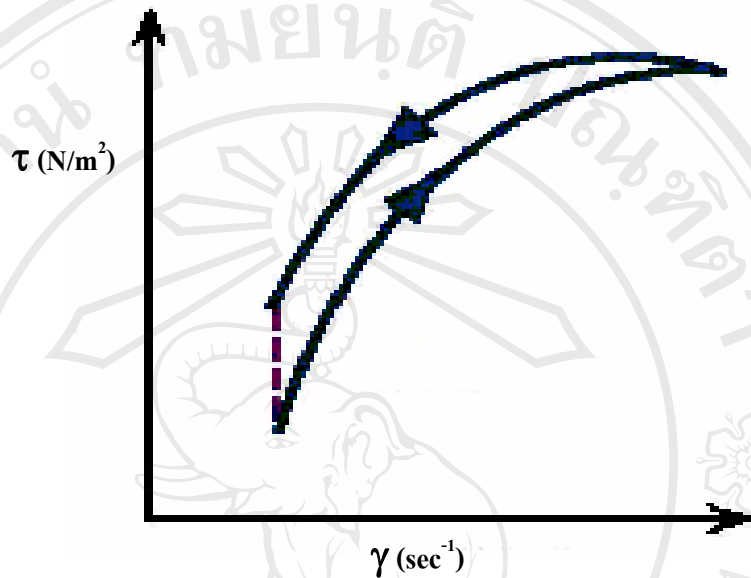
การวัดค่าทิกโซโทรปีจะทำการวัดจากระบบของการเพิ่มและลดอัตราเฉือน ถ้าในขณะลดอัตราเฉือน ค่าความหนืดและความเค้นเฉือนจะลดลง จึงทำให้เกิดเป็นวงขึ้นมา ซึ่งวงดังกล่าวจะเรียกว่า Hysteresis loop ดังแสดงในรูปที่ 2.39 Hysteresis loop จะบ่งบอกถึงปริมาณของค่าทิกโซโทรปี ถ้าพื้นที่ของ Hysteresis loop มากแสดงว่าค่าทิกโซโทรปีจะมาก แต่ถ้าพื้นที่ของ Hysteresis loop น้อยค่าทิกโซโทรปีจะน้อยด้วย



รูปที่ 2.39 พฤติกรรมการไหลของของไหลแบบนอนนิวโทเนียนชนิดทิกโซโทรปี [32]

รีโอเพกซี (Rheopexy)

รีโอเพกซี จะเป็นระบบที่ตรงกันข้ามกับระบบทิกโซโทรปี คือ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ค่าความหนืดและความเค้นเฉือนจะเพิ่มขึ้นภายใต้แรงเฉือน ดังแสดงในรูปที่ 2.40

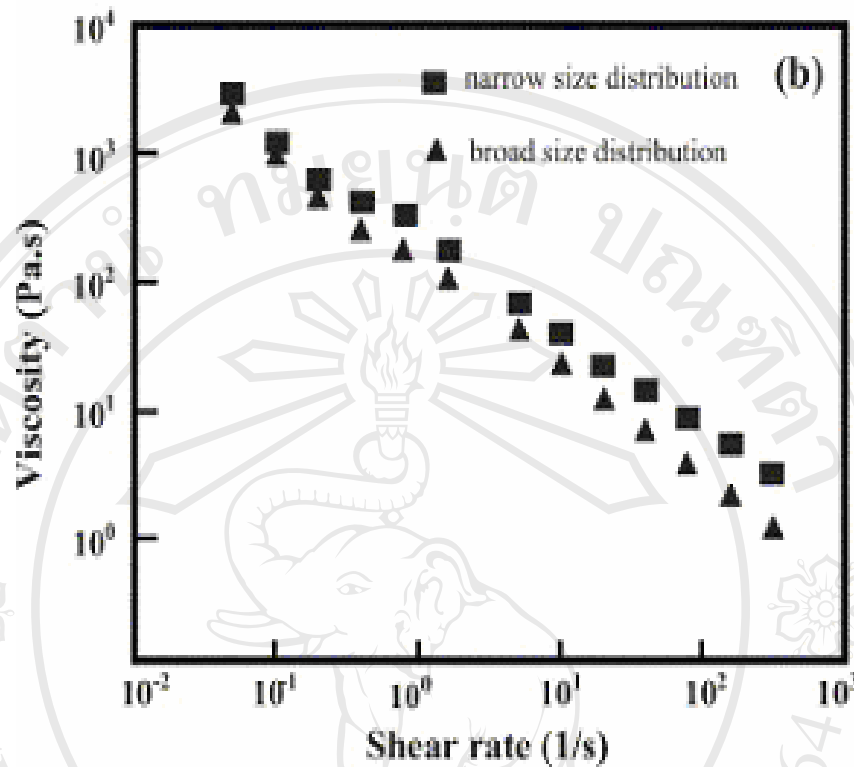


รูปที่ 2.40 พฤติกรรมการไหลของของไหลแบบนอนนิวโทเนียนชนิดรีโอเพกซี [32]

2.10 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหนืด

1. ขนาดอนุภาค (Particle size) [38]

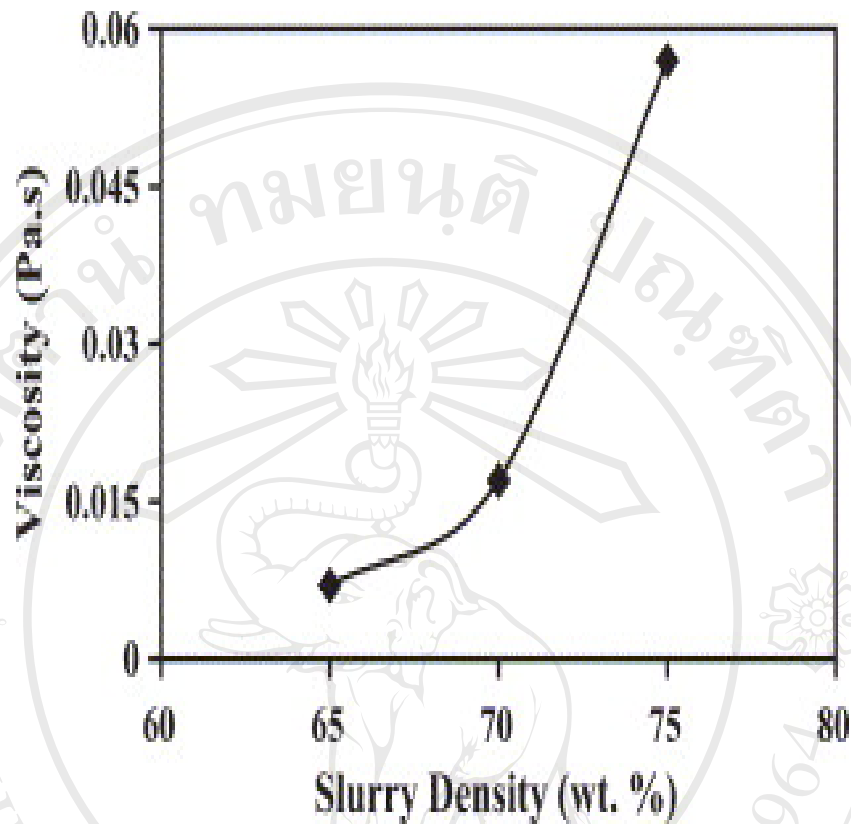
เมื่อขนาดอนุภาคของดินมีขนาดเล็ก ค่าความหนืดของน้ำดินที่วัดได้จะมีค่าสูง แต่ถ้าขนาดอนุภาคของดินมีขนาดใหญ่ ค่าความหนืดของน้ำดินที่วัดได้จะมีค่าต่ำ สามารถอธิบายได้ว่าอนุภาคขนาดเล็กจะมีระยะห่างอนุภาคน้อยกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ จะทำให้อนุภาคเกิดการดึงดูดกัน โดยจะมีผลเมื่อระยะห่างระหว่างอนุภาคอยู่ในช่วง 20-40 Å เมื่อขนาดอนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้ระยะห่างระหว่างอนุภาคมาก จึงทำให้อนุภาคเกิดการผลักกัน โดยจะมีผลเมื่อระยะห่างระหว่างอนุภาคอยู่ในช่วง 40-200 Å และส่งผลให้ค่าความหนืดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.41



รูปที่ 2.41 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือนกับความหนืด โดยเปรียบเทียบกับขนาดอนุภาคเล็กและใหญ่ [38]

2. ปริมาณของของแข็งในสารแขวนลอย (Solid content) [38]

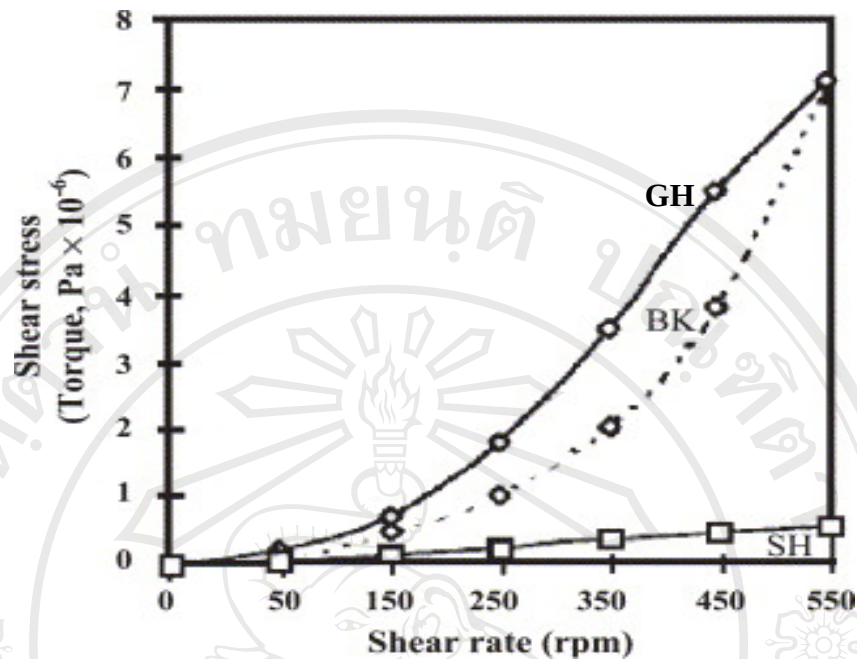
ถ้าปริมาณของของแข็งในสารแขวนลอยมากจะทำให้ค่าความหนืดมีค่าสูง แต่ถ้าปริมาณของของแข็งในสารแขวนลอยน้อยจะทำให้ค่าความหนืดมีค่าต่ำ สาเหตุเกิดจากการดึงดูดกันระหว่างอนุภาค เมื่อปริมาณของอนุภาคคือน้ำมีความเข้มข้นสูง การดึงดูดจะเกิดขึ้นได้ดีกว่าอนุภาคคือน้ำที่มีความเข้มข้นต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากน้ำคือน้ำที่มีปริมาณความเข้มข้นสูงน้ำจะแทรกเข้าไปในช่องว่างระหว่างอนุภาคได้น้อยทำให้อนุภาคอยู่ใกล้กันมาก จึงมีโอกาสดึงดูดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ ค่าความหนืดจึงเพิ่มขึ้น ส่วนน้ำคือน้ำที่มีปริมาณความเข้มข้นต่ำน้ำจะแทรกเข้าไปในช่องว่างระหว่างอนุภาคได้มาก อนุภาคคือน้ำจึงเกิดการกระจายตัวดี ค่าความหนืดจึงลดลง ดังแสดงในรูปที่



รูปที่ 2.42 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของของแข็งในสารแขวนลอย กับความหนืด [38]

3. รูปร่างของอนุภาคดิน

Yuan และ Murray [39] ได้ทำการศึกษารูปร่างผลึกของดินเคโอลินที่มีลักษณะเป็นท่อ (Tube) เป็นแผ่นหกเหลี่ยม และเป็นทรงกลม ที่มีผลต่อค่าความหนืด จากการทดลองจะพบว่าดินเคโอลินที่มีลักษณะเป็นทรงกลมจะมีค่าความหนืดน้อยกว่าดินเคโอลินที่มีลักษณะเป็นแผ่นหกเหลี่ยมและเป็นท่อ ตามลำดับ สามารถอธิบายได้ว่าดินที่มีลักษณะเป็นทรงกลมจะมีประจุบวกที่ผิวของอนุภาคน้อย จึงทำให้การรวมตัวกันระหว่างอนุภาคนั้นลดลง และเกิดการผลักกันของอนุภาคดินที่มีศักย์ไฟฟ้าที่เป็นลบสูง ค่าความหนืดที่วัดได้จึงมีค่าน้อยที่สุด ส่วนดินเคโอลินที่มีลักษณะเป็นท่อและเป็นแผ่นหกเหลี่ยมจะมีประจุบวกที่ขอบและประจุลบที่ผิว จึงมีโอกาที่จะเกิดการรวมตัวกันระหว่างอนุภาค และจะมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ จึงทำให้มีค่าความหนืดมากกว่าดินเคโอลินที่มีลักษณะเป็นทรงกลม ดังแสดงในรูปที่ 2.43



GH คือ รูปร่างผลึกของดินเคโอลินที่มีลักษณะเป็นท่อ

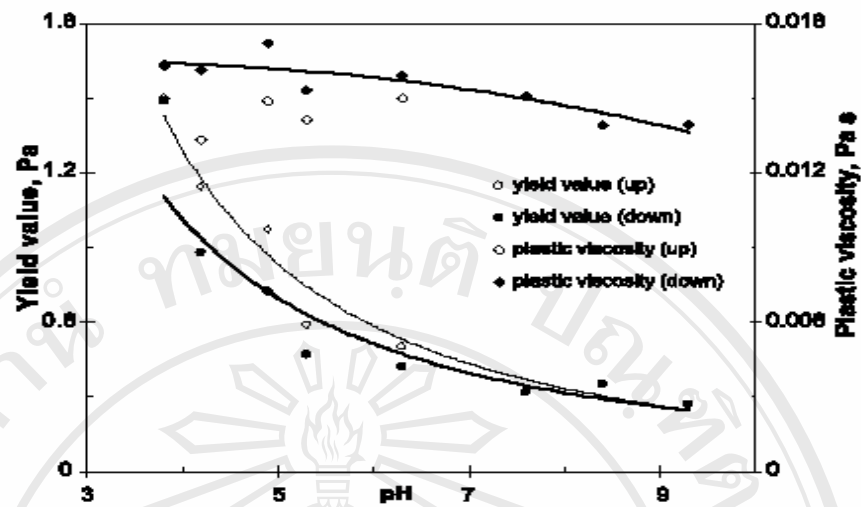
BK คือ รูปร่างผลึกของดินเคโอลินที่มีลักษณะเป็นแผ่นหกเหลี่ยม

SH คือ รูปร่างผลึกของดินเคโอลินที่มีลักษณะเป็นทรงกลม

รูปที่ 2.43 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือนกับความเค้นเฉือน โดยเปรียบเทียบกับรูปร่างของอนุภาค [39]

4. ความเป็นกรด-เบส [40]

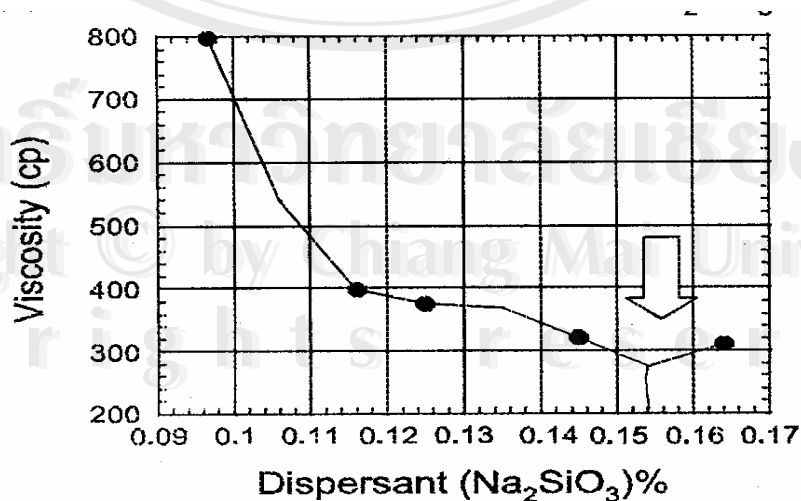
ในสภาพน้ำดินที่มีความเป็นกรดจะมีค่าความหนืดสูง ส่วนน้ำดินที่มีความเป็นเบสจะมีค่าความหนืดต่ำ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาอนุภาคดินในสถานะของน้ำดินที่มีความเป็นกรด (พีเอชต่ำ) จะมีการเพิ่มประจุบวกในน้ำดิน โดยประจุบวกนี้จะทำให้บริเวณขอบของอนุภาคดินมีความเป็นบวกมากขึ้น และเมื่ออนุภาคเข้ามาใกล้กันจึงเกิดการดึงดูดกันขึ้น ในลักษณะที่ขอบของอนุภาคหนึ่ง (บวก) ไปเกาะกับผิวหน้าของอีกอนุภาคหนึ่ง (ลบ) เรียกการดึงดูดลักษณะนี้ว่า Edge-to-Face ทำให้น้ำดินเกิดการรวมตัวกัน ค่าความหนืดที่วัดได้จึงเพิ่มขึ้น เมื่ออนุภาคของดินอยู่ในสถานะของน้ำดินที่มีความเป็นเบสมากขึ้น (พีเอชสูง) จะเป็นการเพิ่มประจุลบให้แก่ น้ำดิน ประจุลบนี้จะไปลดความแรงที่ขอบของอนุภาคดินที่เป็นประจุบวก และเมื่ออนุภาคดินเข้าใกล้กัน จะเกิดการผลักกัน ทำให้น้ำดินมีการกระจายตัวดี ส่งผลให้ค่าความหนืดลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.44



รูปที่ 2.44 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับค่าความหนืด และ Yield value ของมอนท์โมริลโลไนท์ [40]

5. ปริมาณสารช่วยกระจายตัว [41]

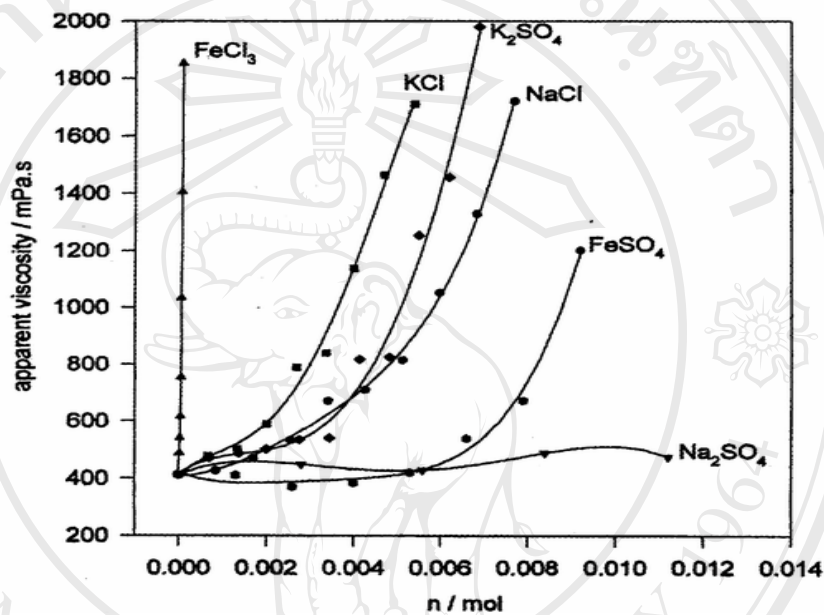
เมื่อเติมสารช่วยกระจายตัวลงไปใต้น้ำดินเพิ่มขึ้น ค่าความหนืดจะลดลงเรื่อยๆ จนถึงจุดที่มีค่าความหนืดต่ำสุด ซึ่งจุดนี้น้ำดินจะเกิดการกระจายตัวดีที่สุด สาเหตุเกิดจากไอออนลบที่แตกตัวจากสารช่วยกระจายตัวจะไปเกาะที่ขอบของอนุภาคดิน เมื่ออนุภาคดินเข้าใกล้กันจะเกิดการผลักกันระหว่างอนุภาค ค่าความหนืดจึงลดลง แต่เมื่อเติมสารช่วยกระจายตัวลงในน้ำดินเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ค่าความหนืดก็จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากอิเล็กทริกคอลด์บีลเลเยอร์จะถูกกดอัด เมื่ออนุภาคเข้าใกล้กันจะเกิดการรวมตัวกันระหว่างอนุภาคด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ ค่าความหนืดจึงเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.45



รูปที่ 2.45 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารช่วยกระจายตัวกับค่าความหนืดดินขาวเคโอลิไนท์ [41]

6. เวเลนซีและปริมาณความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ [42]

เมื่อน้ำดินที่มีเวเลนซีและปริมาณความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์สูง ค่าความหนืดจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากอิเล็กทริกคอลลด์บีบเกลียวจะถูกกดอัด เมื่ออนุภาคเข้าใกล้กัน จะเกิดการรวมตัวกันระหว่างอนุภาคด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ จึงส่งผลให้ค่าความหนืดเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.46

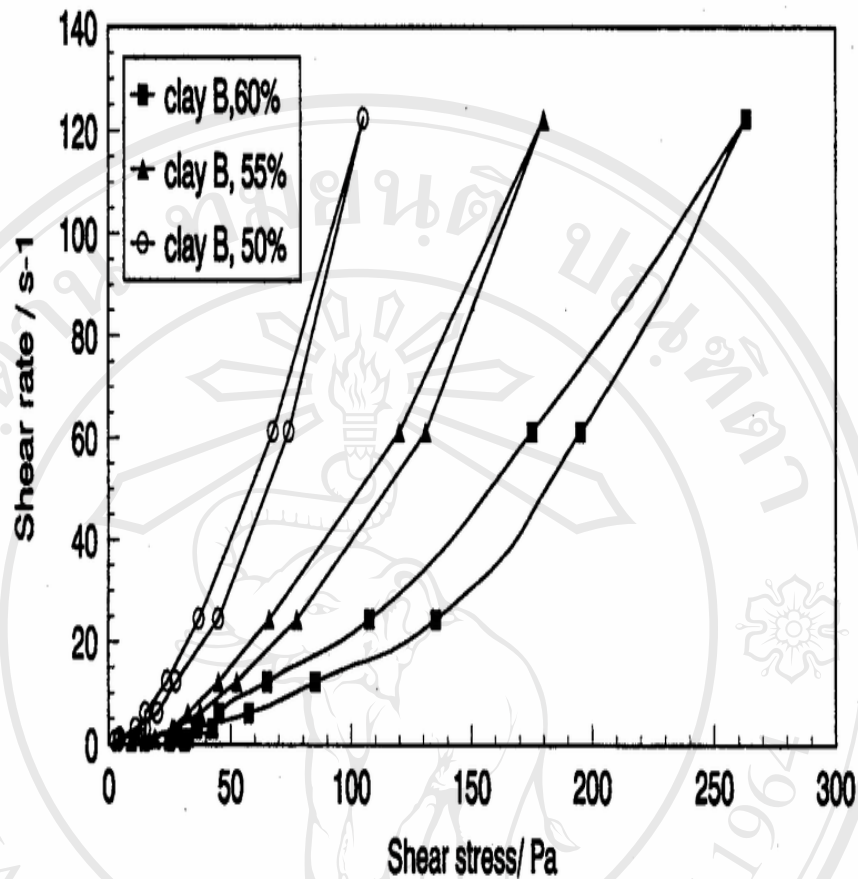


รูปที่ 2.46 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์กับค่าความหนืด [42]

2.11 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าทิกโซโทรปี

1. ปริมาณของของแข็งในสารแขวนลอย (Solid content) [43]

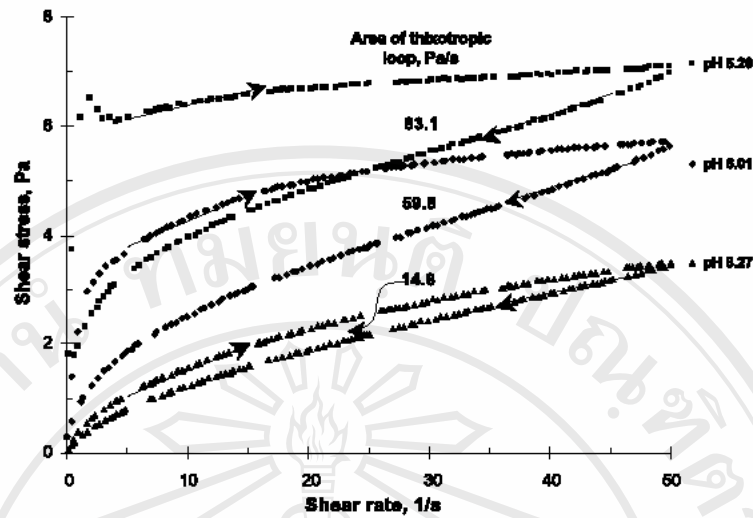
ถ้าปริมาณของของแข็งในสารแขวนลอยมากจะทำให้ค่าทิกโซโทรปีมีค่าสูง แต่ถ้าปริมาณของของแข็งในสารแขวนลอยน้อยจะทำให้ค่าทิกโซโทรปีมีค่าต่ำ สาเหตุเกิดจากการดึงดูดกันระหว่างอนุภาค เมื่อปริมาณของอนุภาคดินในน้ำมีความเข้มข้นสูง การดึงดูดจะเกิดขึ้นได้ดีกว่าอนุภาคดินในน้ำที่มีความเข้มข้นต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากน้ำดินที่มีปริมาณความเข้มข้นสูงน้ำจะแทรกเข้าไปในช่องว่างระหว่างอนุภาคได้น้อยทำให้อนุภาคอยู่ใกล้กันมาก จึงมีโอกาสดึงดูดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ ค่าทิกโซโทรปีจึงเพิ่มขึ้น ส่วนน้ำดินที่มีปริมาณความเข้มข้นต่ำน้ำจะแทรกเข้าไปในช่องว่างระหว่างอนุภาคได้มาก อนุภาคดินจึงเกิดการกระจายตัวดี ค่าทิกโซโทรปีจึงลดลง แสดงในรูปที่ 2.47



รูปที่ 2.47 ค่าทิกโซโทรปีที่เปรียบเทียบกับปริมาณของของแข็งในสารแขวนลอย [43]

2. ความเป็นกรด-เบส [40]

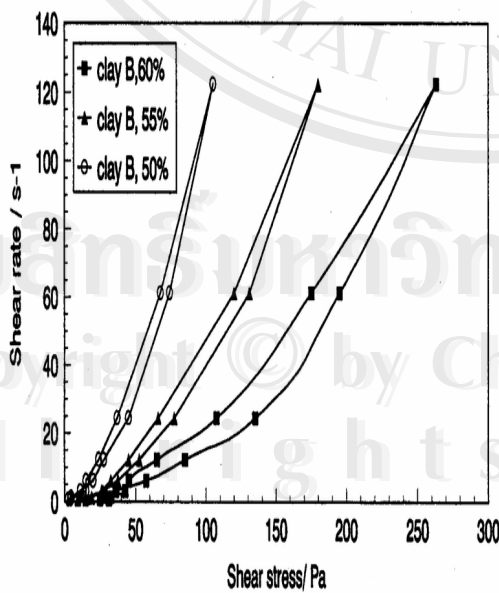
ในสภาพน้ำดินที่มีความเป็นกรดจะมีค่าทิกโซโทรปีสูง ส่วนน้ำดินที่มีความเป็นเบสจะมีค่าทิกโซโทรปีต่ำ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาสถานะของน้ำดินที่มีความเป็นกรด (พีเอชต่ำ) จะมีการเพิ่มประจุบวกในน้ำดิน โดยประจุบวกนี้จะทำให้บริเวณขอบของอนุภาคดินมีความเป็นบวกมากขึ้น และเมื่ออนุภาคเข้ามาใกล้กันจึงเกิดการดึงดูดกันแบบ Edge-to-Face ทำให้น้ำดินเกิดการรวมตัวกัน ค่าทิกโซโทรปีที่วัดได้จึงเพิ่มขึ้น เมื่อสถานะของน้ำดินที่มีความเป็นเบสมากขึ้น (พีเอชสูง) จะเป็นการเพิ่มประจุลบให้แก่ น้ำดิน ประจุลบนี้จะไปลดความแรงที่ขอบของอนุภาคดินที่เป็นประจุบวก และเมื่ออนุภาคดินเข้าใกล้กัน จะเกิดการผลักกัน ทำให้น้ำดินมีการกระจายตัวดี ส่งผลให้ค่าทิกโซโทรปีลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.48



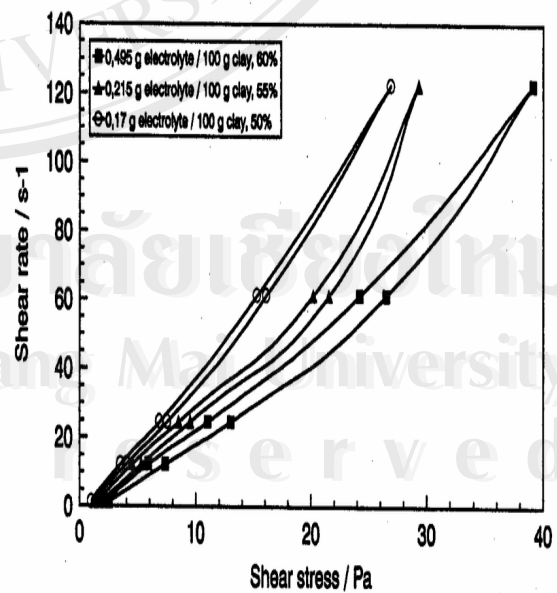
รูปที่ 2.48 ค่าทิกโซโทรปีที่เปรียบเทียบกับพีเอช [40]

3. ปริมาณสารช่วยกระจายตัว [43]

เมื่อเติมสารช่วยกระจายตัวลงไปในน้ำดิน ค่าทิกโซโทรปีจะลดลง เนื่องจากประจุบวกที่ขอบของอนุภาคดินจะถูกเปลี่ยนให้เป็นประจุลบเพิ่มขึ้น โดยที่ไอออนลบจะไปเกาะที่ขอบของอนุภาคดิน เมื่ออนุภาคดินเข้าใกล้กันจะเกิดการผลักกันระหว่างอนุภาค ค่าทิกโซโทรปีจึงลดลง ยกตัวอย่างเช่น ในรูปที่ 2.49a น้ำดินจะไม่มีการเติมสารช่วยกระจายตัวจะมีปริมาณทิกโซโทรปีมากกว่าน้ำดินที่มีการเติมสารช่วยกระจายตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.49b



a

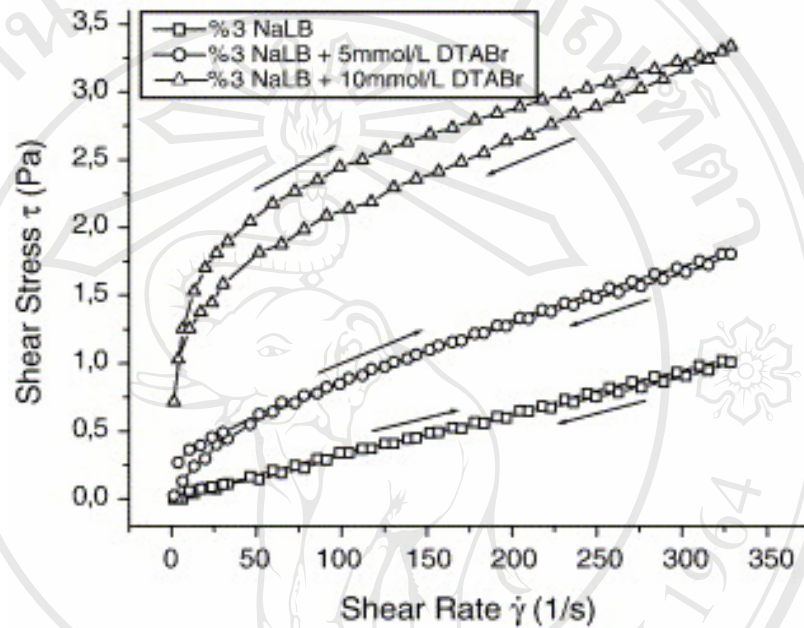


b

รูปที่ 2.49 ค่าทิกโซโทรปีที่เปรียบเทียบกับปริมาณสารช่วยกระจายตัว [43]

4. ปริมาณความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ [44]

เมื่อน้ำดินมีปริมาณความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์สูง ค่าทิกโซโทรปีจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากอิเล็กทริกคอลลิดเบิลเลเยอร์จะถูกกดอัด เมื่อนุภาคเข้าใกล้กัน จะเกิดการรวมตัวกันระหว่างอนุภาคด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ ค่าทิกโซโทรปีจึงเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.50



รูปที่ 2.50 ค่าทิกโซโทรปีที่เปรียบเทียบกับปริมาณความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ [44]

2.12 ผลิตภัณฑ์พอร์ซเลน (Porcelain) [5]

ผลิตภัณฑ์พอร์ซเลน เป็นเนื้อดินสีขาวโปร่งแสงเผาในอุณหภูมิสูง 1,250-1,400 องศาเซลเซียส เนื้อดินขาวเคลือบ ฟลัดสปาร์ และควอตซ์ ในอัตราส่วน 50:25:25 ตามลำดับ นอกจากนี้ อาจมีการเติมดินดำ เพื่อเพิ่มความเหนียวในการขึ้นรูป เนื้อดินพอร์ซเลนมีความแข็งแกร่งสูงกว่าเนื้อดินเอิร์ทเทินแวร์และสโตนแวร์

เนื้อดินพอร์ซเลนแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามอุณหภูมิการเผา คือ

1. พอร์ซเลนอุณหภูมิต่ำ (Soft porcelain)

แนวความคิดในการผลิตพอร์ซเลนในยุคแรกๆ ที่ใช้แก้วบดละเอียดผสมกับดินขาว ได้มีการพัฒนาต่อมาจนกระทั่งกลายเป็นฟริตพอร์ซเลนที่เผาสุกตัวที่อุณหภูมิต่ำลงกว่าพอร์ซเลนของจีน และได้มีการนำวัตถุดิบอื่นมาผสมในเนื้อดินอีกหลายชนิด เช่น ถ้ำกระดูก (Bone ash) และ ฟลัดสปาร์ เนื้อดินที่มีสีขาวโปร่งแสงเผาในอุณหภูมิระหว่าง 1,200-1,280 องศาเซลเซียส ถูกจัดให้

เป็นเนื้อดินพอร์ซเลนเผาในอุณหภูมิต่ำ ได้แก่ เนื้อดินโบนไชน่า เนื้อดินพาเรียน และเนื้อดินไฮเต็ลไชน่า เป็นต้น

2. พอร์ซเลนอุณหภูมิสูง (Hard porcelain)

พอร์ซเลนอุณหภูมิสูงเป็นผลิตภัณฑ์เนื้อสีขาวโปร่งแสงเผาในอุณหภูมิสูงระหว่าง 1,300-1,460 องศาเซลเซียส ได้แก่ พอร์ซเลนของยุโรปและจีน สูตรพื้นฐานของพอร์ซเลนเผาไฟสูง ปกติใช้วัตถุดิบเพียง 3 ชนิด คือดินขาว 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ควอตซ์ 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเฟลด์สปาร์ 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในเนื้อดินพอร์ซเลนไม่นิยมใช้ดินดำเพื่อเพิ่มความหนา เพราะจะทำให้ลายความขาวและโปร่งแสงของเนื้อดิน ทำให้ผลิตภัณฑ์ระหว่างการผึ่งแห้งมีความแข็งแรงน้อย การเพิ่มตัวหลอมละลายในเนื้อดินมีส่วนช่วยให้โปร่งแสงดีขึ้น เนื้อดินพอร์ซเลนเผาในอุณหภูมิสูงนิยมใช้ทำผลิตภัณฑ์หลายประเภทคือ ถ้วยชาม อุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการเคมี และผลิตภัณฑ์ประเภทงานศิลปะพวกตุ๊กตาตั้งโชว์

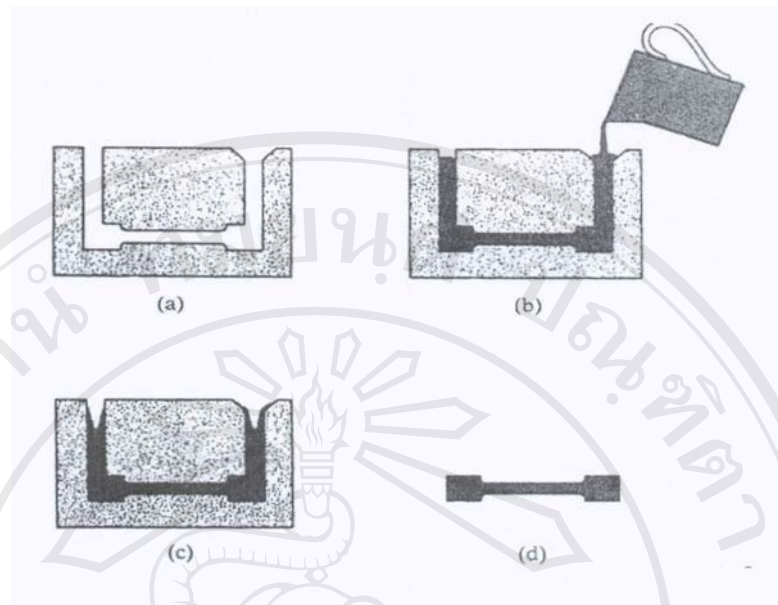
2.13 การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์โดยวิธีการหล่อแบบ [45]

การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิก มีวิธีแตกต่างหลายวิธี ขึ้นกับชนิดและรูปร่างของผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงคุณภาพและคุณสมบัติต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ที่จะทำการผลิต การขึ้นรูปวิธีหนึ่งที่ใช้ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างซับซ้อนที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมเซรามิก คือ การหล่อแบบ

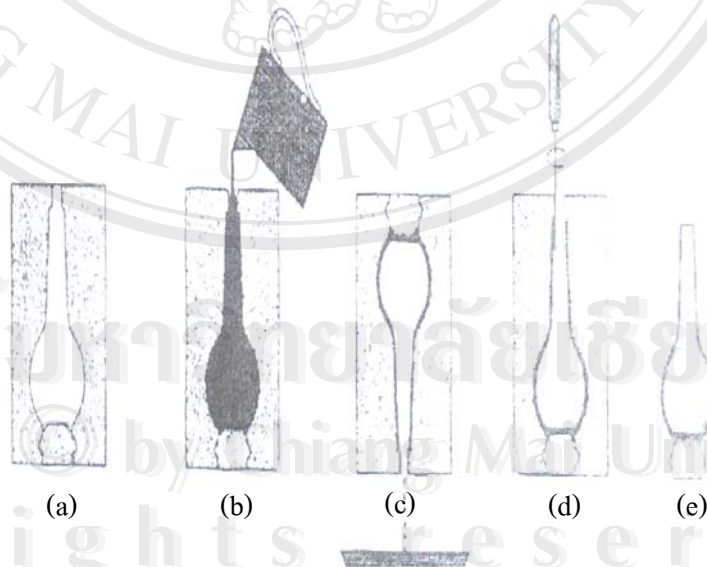
การหล่อแบบ คือ การนำเอาส่วนผสมของวัตถุดิบที่มีความเหนียว เช่น ดิน และวัตถุดิบที่ไม่มีความเหนียว เช่น ควอตซ์ และเฟลด์สปาร์ และสารเคมีที่ทำให้เกิดการกระจายตัวในอัตราส่วนที่ทำให้เกิดคุณสมบัติที่เหมาะสม แล้วทำการเทน้ำดินที่ได้ลงในแบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์ที่มีรูปร่างที่ต้องการ ความหนาของผลิตภัณฑ์จะค่อยๆ ก่อตัวขึ้น เมื่อแบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์ที่ใช้เริ่มดูดน้ำเข้าสู่เนื้อแบบพิมพ์ด้วยแรงที่เกิดจากสุญญากาศในแบบ เมื่อความหนาของผลิตภัณฑ์ก่อตัวขึ้นได้ตามที่ต้องการแล้วจะทำการเทน้ำดินออกจากแบบพิมพ์ หลังจากนั้นปล่อยให้ผลิตภัณฑ์ที่ก่อตัวขึ้นในแบบพิมพ์แห้งและแกะออก อบให้แห้งสนิทแล้วจึงนำไปเผาเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป

2.13.1 กระบวนการหล่อแบบ มี 2 วิธี ดังนี้

1. การหล่อแบบโดยให้น้ำดินแข็งตัวอยู่ในแบบพิมพ์เลย เรียกว่า Solid casting ซึ่งเหมาะกับการหล่อแบบผลิตภัณฑ์ที่มีความหนา ดังแสดงในรูปที่ 2.51
2. การหล่อแบบโดยมีการเทน้ำดินที่เหลืทิ้ง เรียกว่า Drain casting ซึ่งเหมาะกับการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องการผนังบาง มีรูปร่างซับซ้อน และต้องการความหนาอย่างสม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 2.52



รูปที่ 2.51 การหล่อแบบชนิด Solid casting, (a) แบบที่ประกอบแล้ว (b) เทน้ำดินลงแบบ (c) ปล่อน้ำดินไว้ในแบบพิมพ์ (d) ผลิตภัณฑ์ที่ตกแต่งเรียบร้อยแล้ว [45]



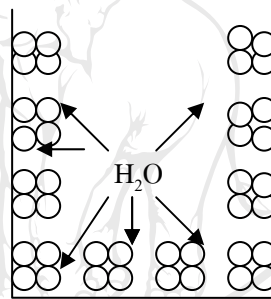
รูปที่ 2.52 การหล่อแบบชนิด Drain casting, (a) แบบที่ประกอบแล้ว (b) เทน้ำดินลงแบบ (c) เทน้ำดินที่เหลือออกจากแบบพิมพ์ (d) ตัดแต่งปากผลิตภัณฑ์ (e) ผลิตภัณฑ์หลังถอดแบบ [45]

2.13.2 คุณสมบัติน้ำดินที่ใช้ในการหล่อแบบ

น้ำดินที่ใช้ในการหล่อแบบคือ ส่วนผสมที่กระจายตัวและแขวนลอยอยู่ในน้ำอย่างสม่ำเสมอ โดยมีสัดส่วนของเนื้อผสมต่อน้ำ ความหนืด การไหลตัวที่เหมาะสม คุณสมบัติน้ำดินที่ดีที่ใช้ในการหล่อแบบมีดังนี้

1. มีการกระจายตัวที่ดี สามารถเทลงในแบบพิมพ์ได้ง่าย โดยมีปริมาณของของแข็งในสารแขวนลอยสูง
2. ไม่มีการแยกชั้นระหว่างของเหลวกับของแข็งที่มีขนาดอนุภาคใหญ่
3. มีอัตราในการหล่อแบบที่เร็ว แต่ไม่ควรจะเร็วเกินไป ซึ่งแบ่งออกได้ 2 ลักษณะดังนี้

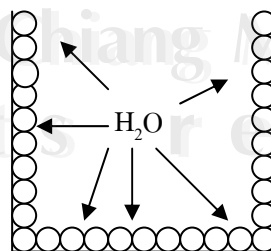
3.1 น้ำดินที่มีลักษณะการรวมตัวกัน ซึ่งจะทำให้การหล่อแบบเกิดขึ้นได้เร็ว ดังแสดงในรูปที่ 2.53



น้ำดินจะผ่านเข้าไปในรูพรุนของแบบพิมพ์อย่างรวดเร็ว

รูปที่ 2.53 การหล่อแบบของน้ำดินที่มีลักษณะการรวมตัวกันของอนุภาค

3.2 น้ำดินที่มีลักษณะการกระจายตัวที่ดี ซึ่งจะทำให้การหล่อแบบเกิดขึ้นได้ช้ากว่าน้ำดินที่มีลักษณะการรวมตัวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.54



น้ำดินจะผ่านเข้าไปในรูพรุนของแบบพิมพ์ได้ช้ากว่า แต่จะมีความหนาแน่นมากกว่า

รูปที่ 2.54 การหล่อแบบของน้ำดินที่มีลักษณะการกระจายตัวที่ดีของอนุภาค

4. น้ำดินจะต้องไม่มีฟองอากาศ
5. เทน้ำดินออกจากแบบได้ง่าย
6. ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะต้องมีความหนาแน่นมากและมีความแข็งแรงสูง

2.13.3 ขั้นตอนการหล่อแบบ

ขั้นตอนการหล่อแบบสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

1. เทน้ำดินลงในแบบพิมพ์
2. น้ำในน้ำดินจะถูกแบบพิมพ์ดูดด้วยแรงที่เกิดจากรูพรุนในแบบ
3. เกิดการสะสมเป็นชั้นของดินขึ้น ซึ่งความหนาจะขึ้นอยู่กับเวลา
4. เทน้ำดินออกจากแบบพิมพ์ ถ้าการหล่อแบบเป็นแบบการเทน้ำดินที่เหลือทิ้ง และปล่อยให้
น้ำดินแข็งตัวอยู่ในแบบพิมพ์ ถ้าการหล่อแบบเป็นแบบปล่อยน้ำดินให้แข็งตัวอยู่ในแบบพิมพ์เลย
5. ปล่อยผลิตภัณฑ์ให้แห้ง
6. ทำการแกะผลิตภัณฑ์ออกจากแบบพิมพ์
7. นำผลิตภัณฑ์ไปอบ
8. ทำการเผาที่อุณหภูมิที่ต้องการ

2.13.4 ทฤษฎีในการหล่อแบบ

น้ำดินที่เทลงในแบบพิมพ์ประกอบด้วยน้ำประมาณ 25% น้ำในน้ำดินจะถูกแบบพิมพ์พลาสเตอร์ดูดด้วยแรงที่เกิดจากรูพรุนในแบบพิมพ์ น้ำดินบริเวณผิวแบบจะขึ้นขึ้นเรื่อยๆ จนในที่สุดก็จะเหลือแต่เนื้อดินที่สะสมที่ผิวแบบกลายเป็นผนังของผลิตภัณฑ์ ผนังผลิตภัณฑ์ (Cast) จะหนามากขึ้นตามเวลาที่ผ่านไป ดังแสดงในสมการที่ 2.16 และแบบพิมพ์ (Mold) ก็จะขึ้นมากขึ้นเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.55

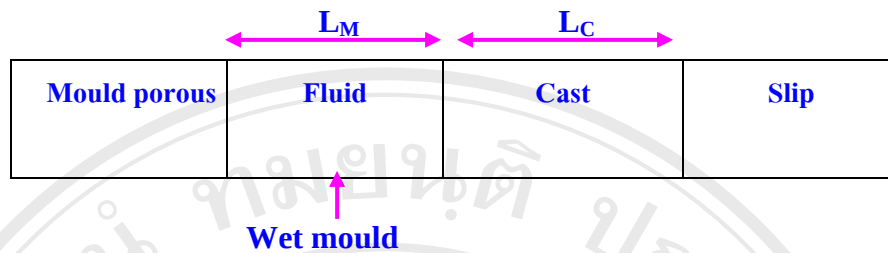
$$L_C^2 = C \cdot \Delta P \cdot t \quad (2.16)$$

เมื่อ L_C คือ ความหนาของผลิตภัณฑ์ (The cast thickness)

C คือ ค่าคงที่ของการหล่อแบบ (Casting constant)

ΔP คือ ความดันที่ทำให้เกิดการขับเคลื่อน (Driving pressure)

t คือ เวลา (Time)



L_M คือ ความหนาของแบบพิมพ์ (The mould thickness)

L_C คือ ความหนาของผลิตภัณฑ์ (The cast thickness)

รูปที่ 2.55 ลักษณะการเกิดชั้นต่างๆ ขณะทำการหล่อแบบ

อัตราเร็วในการหล่อแบบหรืออัตราการเพิ่มความหนาของผนังผลิตภัณฑ์ เริ่มลดลงตามเวลาผ่านไปด้วยเหตุผลสองประการ

1. น้ำจะซึมผ่านเข้าแบบพิมพ์ได้ยากขึ้น เพราะว่าผนังของผลิตภัณฑ์ด้านเอาไว้
2. แบบพิมพ์ชื้นมากขึ้น อัตราการดูดซึมน้ำก็ย่อมจะลดลง

นอกจากนี้ ความละเอียดของเนื้อดินที่ใช้ทำน้ำดินยังมีส่วนช่วยเร่งอัตราเร็วในการหล่อแบบ คือ เนื้อดินที่ใช้ทำน้ำดินยิ่งหยาบอัตราการหล่อแบบจะเร็วขึ้น

น้ำดินสำหรับการหล่อแบบประกอบด้วย ดินและวัสดุอื่นๆ ซึ่งกระจายลอยตัวในน้ำ น้ำในน้ำดินควรจะมีเปอร์เซ็นต์ต่ำเท่าที่จะเป็นไปได้ แต่น้ำดินต้องมีการไหลตัวดี การที่จะทำให้น้ำดินมีคุณสมบัติเช่นนี้ จะต้องนำสารเคมีซึ่งมีคุณสมบัติช่วยทำให้กลุ่มดินมีการกระจายและลอยตัวได้ดีใส่ลงไปช่วย น้ำดินที่ใช้ในการหล่อแบบชนิดมีการเหนียวดินที่เหลือนั้นควรมีความถ่วงจำเพาะระหว่าง 1.65 ถึง 1.80 หรือมีความหนืดระหว่าง 1 ถึง 5 พอยส์ ส่วนน้ำดินที่ใช้ในการหล่อแบบชนิดให้น้ำดินแข็งอยู่ในแบบพิมพ์เลยควรมีความถ่วงจำเพาะระหว่าง 1.75 ถึง 1.95 หรือมีความหนืดระหว่าง 5 ถึง 50 พอยส์

อัตราเร็วในการหล่อแบบเป็นเรื่องสำคัญอันหนึ่งที่จะต้องพิจารณา อัตราเร็วในการหล่อแบบจะช้าหรือเร็วขึ้นกับส่วนผสมของน้ำดิน ความชื้นและอายุการใช้งานของแบบพิมพ์ เราต้องการหล่อแบบได้เร็ว เพื่อที่จะได้นำเอาแบบพิมพ์กลับมาใช้ใหม่ แต่การเทแบบเร็วก็จะเกิดปัญหาการควบคุมความหนาของผนังผลิตภัณฑ์ได้ยาก

การเหนียวดินที่เหลือนั้นในแบบพิมพ์ทั้งก็เป็นสิ่งสำคัญที่จะละเลยไม่ได้ คือ เมื่อเหนียวดินที่เหลือนั้นผิวด้านในของผลิตภัณฑ์จะต้องเรียบ ผลิตภัณฑ์ในขณะทำการถอดแบบจะต้องมีความแข็งแรง

พอที่จะไม่เกิดการบิดจนเสียรูปร่าง ความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์นี้ขึ้นอยู่กับการใช้ดิน สารที่ช่วยในการกระจายและลอยตัวของเนื้อดินผสมและการควบคุมอนุโมลซัลเฟต ผลิตภัณฑ์ขณะที่อยู่ในแบบพิมพ์จะต้องมีการหดตัวมากพอที่จะหลุดออกจากแบบได้ แต่ก็ไม่ควรจะมีการหดตัวมากเกินไป การหลุดออกจากแบบของผลิตภัณฑ์บางครั้งก็มีปัญหาโดยเฉพาะแบบที่มีแกน เพราะว่าผลิตภัณฑ์จะหดตัวแกนเอาไว้ ปัญหานี้แก้โดยการโรยฝุ่นพวกแป้งผัดหน้าหรือผงอื่น ๆ การใช้สารที่ช่วยในการกระจายและลอยตัวมากไป ก็จะทำให้ผลิตภัณฑ์ติดแน่นและขณะเดียวกันก็ทำลายผิวแบบพิมพ์ด้วย การตกแต่งผลิตภัณฑ์ให้เรียบร้อยควรแต่งในขณะที่ผลิตภัณฑ์ยังอยู่ในแบบพิมพ์ ในขณะที่ยังหมาด ๆ อยู่ ถ้าแต่งนอกแบบพิมพ์อาจทำให้เสียรูปร่างได้ และถ้าแต่งในขณะที่ผลิตภัณฑ์แห้งไป ผลิตภัณฑ์มักเปราะจะแตกและอยู่ได้ง่าย

2.14 สารสำคัญของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Michael และ Bolger (1963) [46] ศึกษาการทำปฏิกิริยาของอนุภาคดินขาวเคโอลินที่กระจายตัวในน้ำ ซึ่งในการทดลองได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของการรวมตัวกันของอนุภาคดินขาวเคโอลินในน้ำ ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชและการเติมโซเดียมเฮกซะเมตตาฟอสเฟต จากการทดลองพบว่าถ้าค่าพีเอชมีค่าต่ำ ค่าความหนืดที่วัดได้จะมีค่าสูง เนื่องจากบริเวณขอบของอนุภาคดินขาวเคโอลินมีความเป็นบวกมากขึ้น และเมื่ออนุภาคเข้ามาใกล้กันจึงเกิดการดึงดูดกันขึ้นในลักษณะแบบ Edge-to-Face ทำให้สารแขวนลอยของดินขาวเคโอลินเกิดการรวมตัวกัน ค่าความหนืดที่วัดได้จึงเพิ่มขึ้น ถ้าค่าพีเอชมีค่าสูง ค่าความหนืดที่วัดได้จะมีค่าต่ำ สาเหตุเกิดจากเมื่อพีเอชสูงขึ้นจะเป็นการเพิ่มประจุลบให้แก่พื้นดิน ประจุลบนี้จะไปลดความแรงที่ขอบของอนุภาคดินที่เป็นประจุบวก และเมื่ออนุภาคดินเข้าใกล้กัน จะเกิดการผลักกัน ทำให้น้ำดินมีการกระจายตัวดี ส่งผลให้ค่าความหนืดลดลง นอกจากนี้เมื่อทำการเติมโซเดียมเฮกซะเมตตาฟอสเฟตลงไปในสารแขวนลอยของดินขาวเคโอลินจะทำให้ค่าความหนืดลดลง เนื่องจากพอลิฟอสเฟตไอออนจะถูกดูดซับบนขอบของอนุภาคดินขาวเคโอลิน จึงทำให้บริเวณขอบของอนุภาคดินมีประจุลบเพิ่มขึ้น การรวมตัวกันของอนุภาคดินลดลง และจะทำให้เกิดการกระจายตัวได้ดี

Heath และ Tadros (1983) [47] ศึกษาพฤติกรรมการไหลของซิลิกาที่กระจายตัวในน้ำ จากการทดลองพบว่า เมื่อปริมาณอนุภาคซิลิกาเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความหนืดและทิกโซโทรปี เพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากเมื่ออนุภาคซิลิกาเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำที่เข้าไปแทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาคมีน้อย จึงทำให้อนุภาคอยู่ใกล้ชิดกันมากขึ้น จึงมีโอกาสเกิดการรวมตัวกันระหว่างอนุภาคด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ ส่วนผลการทดลองของพีเอชที่มีผลต่อค่าความหนืดของซิลิกา จึงพบว่าค่าความหนืดจะลดลงจากพีเอช 2 ถึง 3 และค่าความหนืดจะเพิ่มขึ้นจากพีเอช 3 ถึง 7 นอกจากนี้ค่า Yield stress จะ

เพิ่มขึ้น เมื่อพีเอชมากกว่า 5 และค่า Yield stress จะมีค่าสูงสุดอยู่ที่พีเอช 7 หลังจากพีเอช 7 ค่า Yield stress จะลดลง ซึ่งผลการทดลองสามารถอธิบายในรูปแบบการรวมตัวกันของอนุภาคของซิลิกา

Diz และ Rand (1989) [48] ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของจุดไอโซอิเล็กทริกของดินขาวเคโอลิไนท์ ซึ่งในการทดลองจะวัดการไหลตัวของดินขาวเคโอลิไนท์เปรียบเทียบกับพีเอชและความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ ซึ่งการไหลตัวของดินขาวเคโอลิไนท์จะอธิบายในแบบจำลองที่ซับซ้อนแตกต่างกัน และจุดไอโซอิเล็กทริกที่ขอบของอนุภาคดินขาวเคโอลิไนท์ จะหาได้จากจุดตัดร่วมของกราฟที่พลอตระหว่าง Yield stress กับพีเอช จากการทดลองพบว่า ดินขาวเคโอลิไนท์ที่ไม่ได้ล้าง 3 ครั้ง และล้าง 16 ครั้ง ด้วยโซเดียมคลอไรด์ 1 โมลาร์ จะมีค่าจุดไอโซอิเล็กทริกเท่ากับ 5.6 6.8 และ 8.8 ตามลำดับ สาเหตุของการเปลี่ยนแปลงจุดไอโซอิเล็กทริกของดินขาวเคโอลิไนท์ที่ทำการล้าง เพราะว่าอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินามีค่าต่ำ

Chang และคณะ (1993) [49] ศึกษาอิทธิพลของพีเอชและความแรงของไอออน (Ionic strength) ที่มีผลต่อการไหลและความเสถียรของน้ำดิน จากการทดลองชี้ให้เห็นว่าอิทธิพลของพีเอชจะเป็นตัวควบคุมการรวมตัวของอนุภาคดิน ซึ่งการรวมตัวของอนุภาคดินเกิดจากการเปลี่ยนแปลงประจุที่ผิวของอนุภาค จากการทดลองพบว่าที่พีเอช 7 ถึง 10 ค่าความหนืดจะลดลง เนื่องจากที่ขอบของอนุภาคดินจะถูกเปลี่ยนให้เป็นประจุลบเพิ่มขึ้น จึงทำให้การรวมตัวของอนุภาคดินลดลงและเกิดการกระจายตัว แต่ถ้าพีเอชมากกว่า 11 จะทำให้ค่าความหนืดเพิ่มขึ้น สาเหตุเกิดจากอิเล็กทริกคอลด์ดับเบิลเลเยอร์จะถูกกดอัด จึงทำให้เกิดการรวมตัวกันของอนุภาคด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ ส่วนพีเอชที่มีค่า 7 ถึง 0 ค่าความหนืดจะลดลง เนื่องจากความแรงของไอออนเพิ่มขึ้น จึงทำให้ความแรงของไอออนมีผลต่ออิเล็กทริกคอลด์ดับเบิลเลเยอร์ที่ผิวของอนุภาคดิน จึงทำให้การรวมตัวกันของอนุภาคดินแบบ Edge-to-face ลดลง และค่าความหนืดจะลดลงด้วย

Staneva และคณะ (1995) [50] ศึกษาการไหลและการหล่อแบบของส่วนผสมพอร์ซเลน จากการศึกษพบว่า Yield stress ความหนืด และทิกโซโทรปีจะลดลง เมื่อปริมาณของของแข็งในสารแขวนลอยลดลง และปริมาณโซเดียมซิลิเกตเพิ่มขึ้น สาเหตุเกิดจากปริมาณการรวมตัวกันของอนุภาคลดลง เนื่องจากค่าศักย์ไฟฟ้าซัด้าเพิ่มขึ้น จึงทำให้อนุภาคมีโอกาสเกิดการผลักกัน ดังนั้นค่าความหนืดจึงลดลง จากผลการทดลองการหล่อแบบ พบว่าอัตราเร็วในการหล่อแบบจะลดลง เมื่อปริมาณของของแข็งในสารแขวนลอยลดลง และปริมาณโซเดียมซิลิเกตเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคดินเกิดการกระจายตัวดี จึงส่งผลให้การหล่อแบบลดลง

Theng และ Wells (1995) [36] ศึกษาสมบัติการไหลของดินฮาล์ลอยโซท์ ซึ่งดินฮาล์ลอยโซท์ที่ใช้ในการศึกษานี้มีรูปร่างผลึกแตกต่างกัน 3 ชนิด ชนิดแรกมีลักษณะเป็นท่อยาวและหนา (Thick long tubules) ชนิดที่สองมีลักษณะเป็นแผ่นบางและสั้น (short thin laths) ชนิดที่สามมีลักษณะเป็น

ทรงกลม (Spherules) จากการทดลองพบว่าเมื่อปริมาณของของแข็งในสารแขวนลอยเพิ่มขึ้นค่าความหนืดจะสูง สาเหตุเกิดจากปริมาณน้ำที่เข้าไปแทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาคมีน้อย จึงทำให้อนุภาคอยู่ใกล้ชิดกันมากขึ้น จึงมีโอกาสดเกิดการรวมตัวกันระหว่างอนุภาคด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความหนืดของดินฮาล์ลอยไชท์ทั้งสามชนิด พบว่าดินฮาล์ลอยไชท์ที่มีลักษณะเป็นแผ่นบางและสั้น จะมีค่าความหนืดมากกว่าดินฮาล์ลอยไชท์ที่มีลักษณะเป็นท่อยาวและหนา และดินฮาล์ลอยไชท์ที่มีลักษณะเป็นทรงกลม ตามลำดับ สาเหตุเกิดจากอนุภาคดินมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ส่วนการทดลองที่ทำการเปรียบเทียบค่าความหนืดของดินฮาล์ลอยไชท์กับพีเอช พบว่าเมื่อพีเอชลดลงค่าความหนืดและทิกโซโทรปีของดินทั้ง 3 ชนิดจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคดินเกิดการรวมตัวกันแบบ Edge-to-face นอกจากนี้เขายังทำการทดลองหาจุดไอโซอิเล็กทริกของดินฮาล์ลอยไชท์ที่มีลักษณะเป็นท่อยาวและหนา และดินฮาล์ลอยไชท์ที่มีลักษณะเป็นแผ่นบางและสั้น ซึ่งการหาจุดไอโซอิเล็กทริกหาได้จากจุดตัดร่วมของกราฟที่พลอต ระหว่าง Yield stress กับพีเอช จากการทดลองพบว่าจุดไอโซอิเล็กทริกของดินฮาล์ลอยไชท์ที่มีลักษณะเป็นท่อยาวและหนา และดินฮาล์ลอยไชท์ที่มีลักษณะเป็นแผ่นบางและสั้นมีเท่ากับ 6.0 และ 7.1 ตามลำดับ

Yuan และ Murray (1997) [39] ได้ทำการศึกษารูปร่างผลึกของดินฮาล์ลอยไชท์ที่มีลักษณะเป็นท่อและเป็นทรงกลม และดินขาวเคโอลินที่มีลักษณะเป็นแผ่นหกเหลี่ยม ที่มีผลต่อค่าความหนืดจากการทดลองจะพบว่าดินฮาล์ลอยไชท์ที่มีลักษณะเป็นทรงกลมจะมีค่าความหนืดน้อยกว่าดินขาวเคโอลินที่มีลักษณะเป็นแผ่นหกเหลี่ยมและดินฮาล์ลอยไชท์ที่มีลักษณะเป็นท่อ ตามลำดับ สามารถอธิบายได้ว่าดินฮาล์ลอยไชท์ที่มีลักษณะเป็นทรงกลมจะมีประจุบวกที่ผิวของอนุภาคน้อย จึงทำให้การรวมตัวกันระหว่างอนุภาคดินลดลง และเกิดการผลักกันของอนุภาคดินที่มีศักย์ไฟฟ้าที่เป็นลบสูง ค่าความหนืดที่วัดได้จึงมีค่าน้อยที่สุด ส่วนดินฮาล์ลอยไชท์ที่มีลักษณะเป็นท่อและดินขาวเคโอลินที่มีลักษณะเป็นแผ่นหกเหลี่ยมจะมีประจุบวกที่ขอบและประจุลบที่ผิว จึงมีโอกาสดเกิดการรวมตัวกันระหว่างอนุภาค และจะมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ จึงทำให้มีค่าความหนืดมากกว่าดินฮาล์ลอยไชท์ที่มีลักษณะเป็นทรงกลม นอกจากนี้เขายังได้ทำการทดลองเกี่ยวกับการนำดินฮาล์ลอยไชท์ที่มีลักษณะเป็นท่อผสมกับดินขาวเคโอลินที่มีลักษณะเป็นแผ่นหกเหลี่ยม และดินฮาล์ลอยไชท์ที่มีลักษณะเป็นทรงกลมผสมกับดินขาวเคโอลินที่มีลักษณะเป็นแผ่นหกเหลี่ยม ซึ่งจากการทดลองพบว่าดินฮาล์ลอยไชท์ที่มีลักษณะเป็นท่อผสมกับดินขาวเคโอลินที่มีลักษณะเป็นแผ่นหกเหลี่ยม จะมีค่าความหนืดมากกว่าดินฮาล์ลอยไชท์ที่มีลักษณะเป็นทรงกลมผสมกับดินขาวเคโอลินที่มีลักษณะเป็นแผ่นหกเหลี่ยม สาเหตุเกิดจากดินฮาล์ลอยไชท์ที่มีลักษณะเป็นท่อผสมกับดินขาวเคโอลินที่มีลักษณะเป็นแผ่นหกเหลี่ยมจะมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบมากกว่าดินฮาล์ลอยไชท์ที่มีลักษณะเป็นทรงกลมผสมกับดินขาวเคโอลินที่มีลักษณะเป็นแผ่นหกเหลี่ยม

Yildiz และคณะ (1998) [43] ศึกษาการปรับสภาพน้ำดินหล่อแบบโดยใช้โซเดียมซิลิเกต ซึ่งดินที่ใช้ในการศึกษาคือดินขาวเคโอลินไนท์ ซึ่งมี 2 แหล่ง คือ Sindirgi และ Kure จากการทดลองพบว่าค่าความหนืดและทิกโซโทรปีของดินทั้ง 2 แหล่งจะลดลง เมื่อมีปริมาณของของแข็งในสารแขวนลอยลดลง เนื่องจากน้ำจะเข้าไปแทรกในช่องว่างระหว่างอนุภาคมากจึงทำให้เกิดการกระจายตัวได้ดี นอกจากนี้ เมื่อปริมาณโซเดียมซิลิเกตเพิ่มขึ้น ความหนืดและทิกโซโทรปีของดินทั้ง 2 แหล่งจะลดลงเช่นกัน สาเหตุเกิดจากที่ขอบของอนุภาคจะถูกเปลี่ยนให้เป็นประจุลบเพิ่มขึ้น จึงทำให้อนุภาคมีโอกาสดึงดูดกัน ดังนั้นค่าความหนืดจึงลดลง จากผลการหล่อแบบพบว่าอัตราเร็วในการหล่อแบบจะลดลง เมื่อค่าทิกโซโทรปี ค่าความหนืด ปริมาณของของแข็งในสารแขวนลอยลดลง เนื่องจากอนุภาคดินเกิดการกระจายตัวดี จึงทำให้อัตราเร็วการหล่อแบบลดลง

เมื่อเปรียบเทียบค่าความหนืด ทิกโซโทรปี และอัตราเร็วในการหล่อแบบของดินทั้ง 2 แหล่ง จะพบว่าดินจาก Sindirgi จะมีค่าความหนืด ทิกโซโทรปี และอัตราเร็วในการหล่อแบบมากกว่าดินจาก Kure เนื่องจากดินจาก Sindirgi มีปริมาณดินขาวเคโอลินไนท์ มากกว่าดินจาก Kure

2.15 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

ศึกษาวิทยากระแสน้ำของดินขาวเคโอลิน ควอตซ์ เฟลด์สปาร์ และเนื้อดินผสมพอร์ซเลน

2.16 ขอบเขตของงานวิจัย

1. พฤติกรรมวิทยากระแสน้ำจะวัดออกมาในรูปของความหนืด และทิกโซโทรปี
2. วัดค่าความหนืดและทิกโซโทรปีเปรียบเทียบกับ ปริมาณของของแข็งในสารแขวนลอยพีเอช โซเดียมซิลิเกต และความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลต์
3. ดินขาวที่ใช้ในการเตรียมน้ำดินเพื่อทำการศึกษา ได้แก่ ดินขาวเคโอลินลำปาง ดินขาวเคโอลินนราธิวาส และดินขาวเคโอลินระนอง

2.17 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษาเชิงทฤษฎี และเชิงประยุกต์

1. ทราบปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความหนืดและทิกโซโทรปีของดินขาวเคโอลิน ควอตซ์ และเฟลด์สปาร์ และเนื้อดินผสมพอร์ซเลน
2. เป็นแนวทางในการปรับสภาพที่เหมาะสมของน้ำดินที่ใช้ในการหล่อแบบในอุตสาหกรรมเซรามิกโดยเฉพาะอุตสาหกรรมเซรามิกที่ผลิตพอร์ซเลน