

บทที่ 2

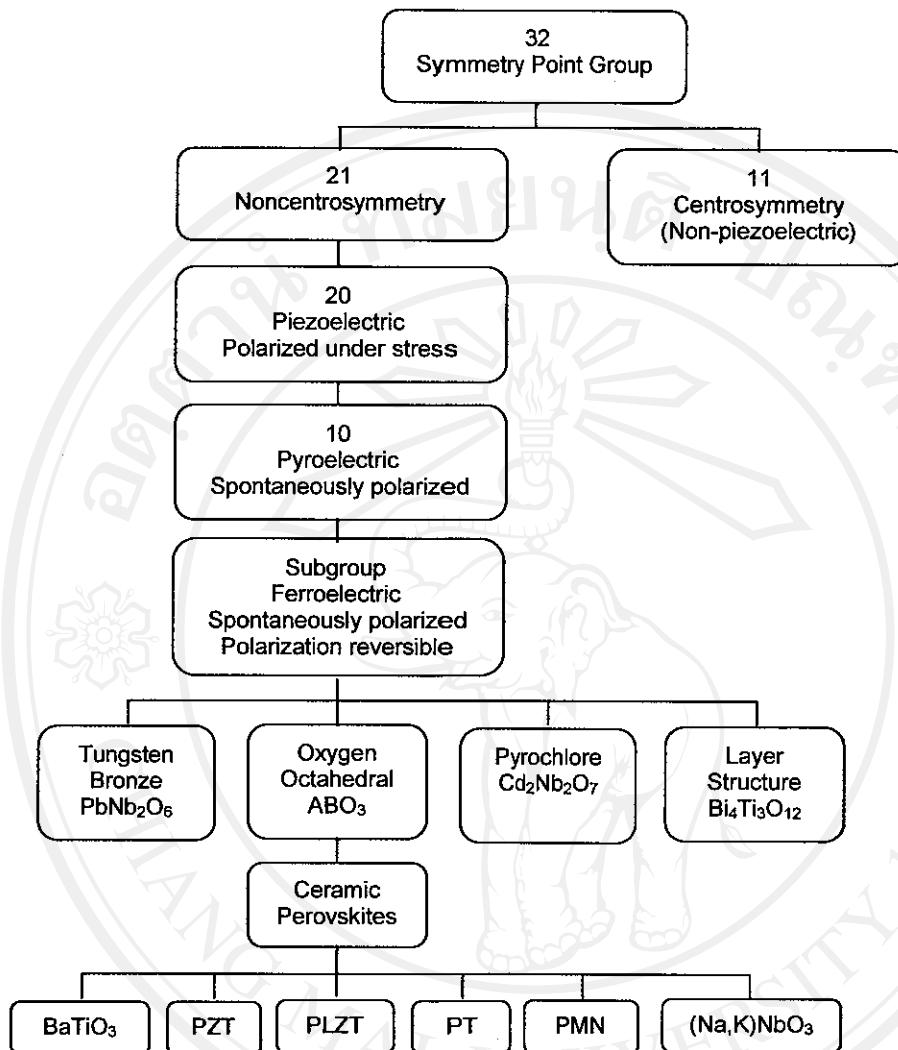
ทฤษฎี

2.1 ปฏิกิริยาไฟฟ้าสถิต (Piezoelectricity)

ค.ศ.1880-1882 Pierre and Jacques Curie [1] ได้ทำการทดลองครั้งแรกเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาไฟฟ้าสถิต (Piezoelectricity) กับโครงสร้างทางผลึกวิทยาซึ่งการทดลองกระทำโดยการวัดประจุบนผิวของสารตัวอย่าง (สมัยนั้นคือ quartz และ Rochelle salt) ซึ่งประจุดังกล่าวแปรผันกับแรงเค้น ซึ่งเครื่องมือที่วัดมีแต่เพียงแผ่นดินบุกบางๆ, กาว, เส้นลวด และแม่เหล็ก เมื่อพิจารณากระบวนการทางวิทยาศาสตร์ในปัจจุบัน สมบัติดังกล่าวภายหลังถูกขนานนามว่า สมบัติไฟฟ้าสถิต

ปฏิกิริยาไฟฟ้าสถิตเป็นปฏิกิริยาที่สามารถเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชัน (polarization) ทางไฟฟ้าเมื่อได้รับความเครียดทางกล ในทำนองกลับกันเมื่อสารได้รับสนามไฟฟ้าก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดและปริมาตรได้ซึ่งสารที่จะแสดงสมบัติไฟฟ้าสถิต (Piezoelectric) ได้นั้นจะมีลักษณะของโครงสร้างผลึกเป็นแบบหน่วยเซลล์ (unit cell) ไม่สมมาตรกับจุดศูนย์กลาง (noncentrosymmetric class) เมื่อพิจารณาสมมาตรของผลึกแล้วสามารถแบ่งออกได้เป็น 32 กลุ่ม [1] ใน 32 กลุ่มจะถูกแบ่งออกเป็น 2 พวก คือ 11 กลุ่มที่มีหน่วยเซลล์สมมาตรกับจุดศูนย์กลาง และ อีก 21 กลุ่มที่มีหน่วยเซลล์ไม่สมมาตรกับจุดศูนย์กลาง และใน 21 กลุ่มนี้มีเพียง 20 กลุ่มเท่านั้นที่แสดงสมบัติไฟฟ้าสถิต และอีกหนึ่งกลุ่มไม่แสดงสมบัติไฟฟ้าสถิต เนื่องจากเมื่อสารอยู่ในความเครียดแล้ว สารจะมีสมมาตรกับจุดศูนย์กลาง (ส่งผลให้โพลาไรเซชันรวมหักล้างกันหมด) ส่งผลให้ไม่แสดงสมบัติไฟฟ้าสถิต และใน 20 กลุ่มนี้จะมีเพียง 10 กลุ่มเท่านั้นที่มีขั้วในตัวเอง (spontaneous polarization, P_s) คือ เกิดโพลาไรเซชันได้ด้วยตัวของสารเองโดยไม่ต้องมีการให้สนามไฟฟ้าเข้าไปดังรูป 2.1

Copyright© by Chiang Mai University =
All rights reserved

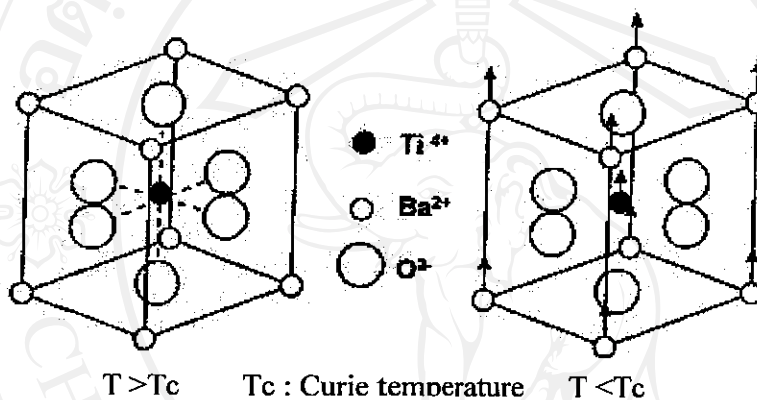


รูป 2.1 การจำแนกสารโดยใช้สมมาตรของผลึก[1]

วัสดุเซรามิกบางชนิดมีโครงสร้างแบบไอออนิก และเป็นพวกหน่วยเซลล์ไม่สมมาตรกับจุดศูนย์กลางภายในหน่วยเซลล์ เซรามิกประเภทนี้จะมีผลของไดโพลไฟฟ้า(electric dipole) เกิดขึ้นเล็กน้อย เช่น แบเรียมไทเทเนต (barium Titanate, BaTiO_3)[3] ณ ที่อุณหภูมิสูงกว่า 130°C แบเรียมไทเทเนตมีโครงสร้างผลึกแบบ เพอรอฟสไกต์ (perovskite structure) ที่มีสมมาตรเป็นเพอรอฟสไกต์แบบลูกบาศก์(cubic perovskite)แต่เมื่อลดอุณหภูมิต่ำกว่า 130°C จะทำให้ Ti^{4+} ซึ่งเป็นไอออนที่อยู่ตรงกลาง และ O^{2-} ซึ่งเป็นไอออนที่อยู่ด้านหน้าทั้ง 8 ด้าน เกิดการเหลื่อมกันใน

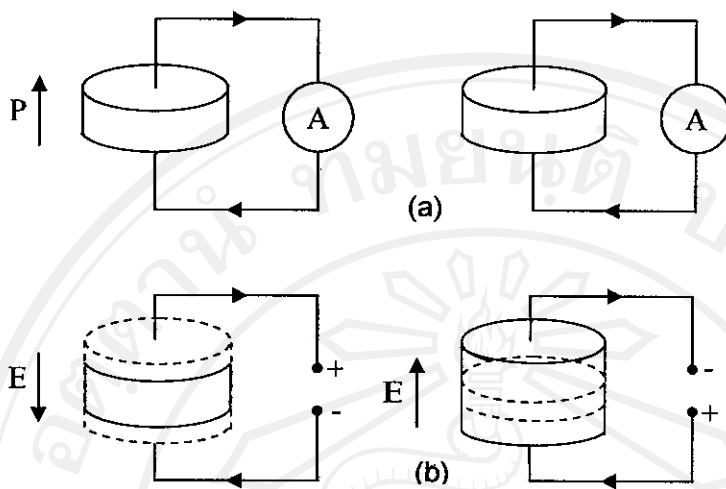
ทิศทางตรงกันข้ามเล็กน้อยส่งผลให้เกิดไดโพลไฟฟ้าขึ้นและยังทำให้โครงสร้างของแบเรียมไทเทเนตเป็นเพอรอฟสไกต์แบบเตตระโกนอล (tetragonal perovskite) ดังรูปที่ 2.2

ซึ่ง ณ อุณหภูมิ 130°C นี้เรียกว่าอุณหภูมิคูรี (curie temperature, T_C) ซึ่งก็คือ อุณหภูมิที่สารพาราอิเล็กทริก(paraelectric) เปลี่ยนเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก (ferroelectric) เนื่องจากโครงสร้างภายในของสารเปลี่ยนแปลงนั่นเองหากพิจารณาอุณหภูมิที่สารเกิดการเปลี่ยนเฟสนี้สารแต่ละตัวจะมีอุณหภูมิคูรีต่างกันออกไปขึ้นกับชนิดของสารนั่นเอง



รูป 2.2 หน่วยเซลล์ของแบเรียมไทเทเนต ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า อุณหภูมิคูรี[3]

เมื่อพิจารณาแบเรียมไทเทเนตที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิคูรี เมื่ออยู่ในสภาวะที่มีสนามไฟฟ้าไดโพล (dipole) ภายในแบเรียมไทเทเนตจะถูกสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้เรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันส่งผลทำให้เมื่อรวมไดโพลโมเมนต์ (dipole moment) ของแบเรียมไทเทเนตก็จะเท่ากับผลรวมของไดโพลโมเมนต์ ของแต่ละ หน่วยเซลล์ ที่ประกอบขึ้นเป็น แบเรียมไทเทเนต ปรากฏการณ์เช่นนี้เองที่ทำให้แบเรียมไทเทเนตแสดงไดโพล โมเมนต์ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่มีความหนาแน่นของประจุสูง ส่งผลให้แสดงสมบัติของพิโซอิเล็กทริกออกมา หากพิจารณา ดังรูป 2.3



รูป 2.3 ปรากฏการณ์ของวัสดุพิโซอิเล็กทริก ;(a) การเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ที่เกิดขึ้น เมื่อวัสดุถูกแรงอัด, (b) การเปลี่ยนแปลงขนาดเมื่อวัสดุถูกใส่ความต่างศักย์เข้าไป[4]

จะเห็นได้ว่าด้านทั้งสองด้านของวัสดุมีขั้วที่แตกต่างกันด้านหนึ่งแสดงขั้วบวก อีกด้านหนึ่งแสดงขั้วลบ เมื่อออกแรงกดอัดวัสดุจะเกิดการลดระยะห่างระหว่างไดโพล ส่งผลทำให้ผลรวมของไดโพลโมเมนต์ ของวัสดุทั้งหมดลดลง ซึ่งเป็นผลทำให้ความหนาแน่นของประจุเปลี่ยนแปลงและความต่างศักย์ที่ปลายทั้งสองด้านเกิดการเปลี่ยนแปลง ในทางตรงกันข้ามถ้ามีการให้สนามไฟฟ้าแก่วัสดุจะเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาด ซึ่งผลของปรากฏการณ์ พิโซอิเล็กทริก เป็นผลทางไฟฟ้าเชิงกล (Electromechanical) ของวัสดุ นั่นคือ สามารถเปลี่ยนแรงทางกลไปเป็นไฟฟ้า และสามารถเปลี่ยนสนามไฟฟ้าที่ได้รับไปเป็นแรงทางกลได้ [4]

หากพิจารณา กลุ่มสารที่แสดงสมบัติพิโซอิเล็กทริกจะมีสารในกลุ่ม พิโซอิเล็กทริกบางตัวที่แสดงสภาพขั้วหรือเกิดไดโพล โมเมนต์ได้ด้วยตัวเองแม้ไม่ได้รับสนามไฟฟ้า เรียกกลุ่มสารพวกนี้ว่า “สปอนเทเนียสโพลารไรเซชัน” (spontaneous polarization)[3] ซึ่งก็คือค่าของ ไดโพล โมเมนต์ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ถึงแม้ว่า ผลึก 20 กลุ่มที่หน่วยเซลล์ไม่สมมาตรกับจุดศูนย์กลางจะแสดงสมบัติพิโซอิเล็กทริก แต่ก็ไม่จำเป็นว่าทุกตัวจะต้องมีสภาพขั้วไฟฟ้าในตัวเอง จะมีเพียง 10 กลุ่มใน 21 กลุ่มเท่านั้น ที่แสดงสมบัติการมีสภาพขั้วไฟฟ้าในตัวเอง และถ้าสภาพมีขั้วไฟฟ้ามีการ

เปลี่ยนแปลง กับอุณหภูมิ จะเรียกว่า “ปรากฏการณ์ ไพโรอิเล็กทริก” (pyroelectric effect) ซึ่งถูกค้นพบครั้งแรกโดย Teophrast ซึ่ง มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิดังสมการ

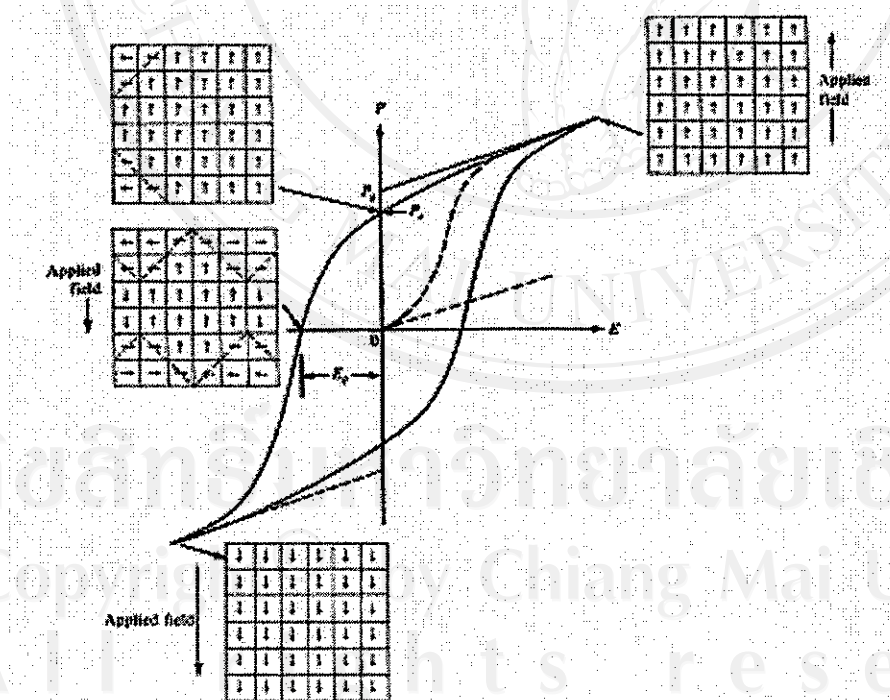
$$\Delta P_s = \pi \Delta T \quad (2.1)$$

ΔP_s = การเปลี่ยนแปลง spontaneous polarization

π = pyroelectric coefficient

ΔT = การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

ซึ่งถ้าสารไพโรอิเล็กทริกที่นอกจากจะมีสภาพขั้วไฟฟ้าที่ขึ้นกับอุณหภูมิแล้วยังสามารถเกิดการกลับขั้วไฟฟ้าไปมา หรือเกิดการสวิตช์ (switching) ได้โดยการให้สนามไฟฟ้าภายนอกเข้าไปนั้น จะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ”ปรากฏการณ์เฟอร์โรอิเล็กทริก” (Ferroelectricity) ซึ่งจะสังเกตได้จากเฟอร์โรอิเล็กทริกฮิสเทอรีซิส (Ferroelectric hysteresis) ดังรูป 2.4



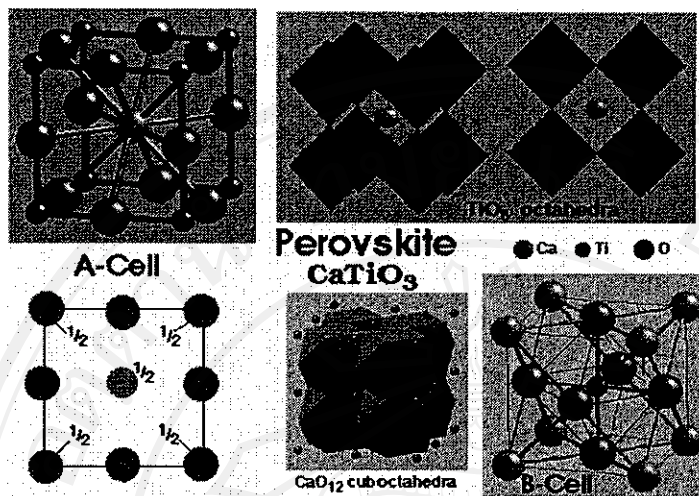
รูป 2.4 ความสัมพันธ์ P-E ของสาร เฟอร์โรอิเล็กทริก [5]

ลักษณะของ Curve แสดงความสัมพันธ์โพลาไรเซชันกับสนามไฟฟ้ากับ (P-E) เช่นนี้ แสดงปรากฏการณ์ เฟร์โรอิเล็กทริก ซึ่งมีรูปร่างคล้ายกับ Curve ของความเข้มสนามแม่เหล็กกับ ฟลักซ์แม่เหล็ก (H-B) ในวัสดุแม่เหล็ก

พิจารณา รูป 2.4 เมื่อให้สนามไฟฟ้าภายนอกเข้าไป สนามไฟฟ้าจะไปเหนี่ยวนำให้ ไดโพล เกิดการจัดเรียงตัวตามสนามไฟฟ้าที่กระทำ ส่งผลให้ค่าโพลาไรเซชัน(polarization)เพิ่มขึ้นจนเข้าใกล้จุดอิ่มตัว ซึ่งเรียกว่าโพลาไรเซชันอิ่มตัว(saturation polarization , P_s) และ เมื่อลดสนามไฟฟ้าที่ให้ ค่าโพลาไรเซชันไม่ได้ลดตาม จากกราฟตอนแรกจะเห็นได้ว่าเมื่อลดสนามไฟฟ้าให้เป็น ศูนย์แล้วโดเมน(domain)ในวัสดุบางตัวจะจัดเรียงตัวใหม่ส่งผลให้ค่าโพลาไรเซชันลดลงเล็กน้อย เรียกว่า โพลาไรเซชันคงเหลือ (remnant polarization, P_r) และเมื่อกลับทิศทางในการให้ สนามไฟฟ้า ผลึกจะถูกดีโพลาไรซ์(depolarized) ด้วยสนามไฟฟ้าที่กลับขั้วจนค่าโพลาไรเซชันลดลง เป็นศูนย์ ค่าสนามไฟฟ้าภายนอกที่ให้เพื่อลดค่าโพลาไรเซชันให้เป็นศูนย์นี้ เรียกว่า สนามไฟฟ้า หักล้าง (Coercive Field strength, E_c)[3]

2.2 โครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ (Perovskite Structure) [2, 3, 6]

เพอโรฟสไกต์เป็นชื่อของสาร แคลเซียมไทเทเนต (CaTiO_3) ซึ่งมีสูตรเป็น ABO_3 แต่สาร ที่แสดงสมบัติ เฟร์โรอิเล็กทริก ส่วนใหญ่มีสูตรโครงสร้างเหมือนกับสารเพอโรฟสไกต์ ดังนั้นจึง เรียกสารพวกนี้ว่า เพอโรฟสไกต์ ซึ่งจริงๆแล้วสารเพอโรฟสไกต์เองก็ไม่ได้แสดงสมบัติเฟร์โรอิเล็กทริก หากพิจารณาโครงสร้างแบบ เพอโรฟสไกต์จะเป็นการจัดเรียงตัวของ อะตอม A และ อะตอม B แบบคอมเพลกออกไซด์ (complexoxide) ซึ่งลักษณะเป็นการร่วมกันระหว่าง แคตไอออน (cation) และ แอนไอออน (anion) สร้าง โครงสร้างแบบโคลสแพก (close pack structure) แบบ ลูกบาศก์โคลสแพก (cubic close pack structure) โดยที่ ตำแหน่ง B อยู่ตรงกลาง และ ตำแหน่ง A จะเป็นอะตอมที่อยู่ตำแหน่ง ออกตะฮีดรอล(Octahedral site) ของ B ส่วน O_3 อยู่ที่มุมทั้ง 8 ดังรูป 2.5



รูป 2.5 ลักษณะโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์

ซึ่งอาจแบ่งโครงสร้างของเพอโรฟสไกต์ออกเป็น 2 แบบ

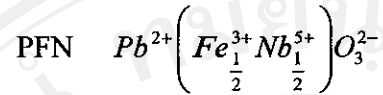
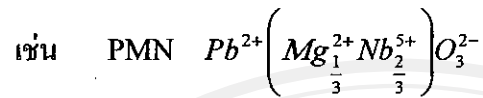
- เพอโรฟสไกต์อุดมคติ (Ideal perovskite , ABO₃)
- คอมเพลกเพอโรฟสไกต์ (Complex perovskite , A'A''B'B''O₃)

เพอโรฟสไกต์อุดมคติ เป็นโครงสร้างของเพอโรฟสไกต์ ณ ตำแหน่ง A และ B เป็นอะตอมของธาตุชนิดหนึ่งชนิดใด เลยไม่ได้แบ่งตำแหน่งนี้ให้ธาตุอื่นอยู่ ซึ่งเมื่อพิจารณา คอมเพลกเพอโรฟสไกต์ อาจแบ่งย่อยออกได้อีก 2 แบบ

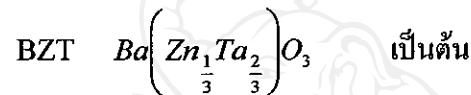
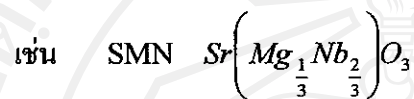
- คอมเพลกเพอโรฟสไกต์ที่มีเลดเป็นฐาน (Lead-Based complex perovskite)
- คอมเพลกเพอโรฟสไกต์ที่ไม่มีเลดเป็นฐาน (Free Lead based complex perovskite)

เมื่อพิจารณา คอมเพลกเพอโรฟสไกต์ที่มีเลดเป็นฐาน ณ ตำแหน่ง A เป็นตำแหน่งของเลด (Lead, Pb) และตำแหน่ง B จะเป็นการอยู่ร่วมกันระหว่างธาตุอื่น อย่างน้อย 2 ธาตุ

ในทำนองเดียวกันสำหรับ คอมเพลกเพอโรฟสไกต์ที่ไม่มีเลดเป็นฐาน ตำแหน่ง A ไม่ได้มีเลด (Lead) อยู่ ณ ตำแหน่งนี้แล้ว แต่ทั้งตำแหน่ง A และ B จะเป็นการอยู่ร่วมกันของอะตอมธาตุอื่นทั้งสองตำแหน่ง ยกตัวอย่างสำหรับ คอมเพลกเพอโรฟสไกต์ที่มี เลดเป็นฐาน



และ คอมเพลกเพอโรฟสไกต์ที่ไม่มีเลดเป็นฐาน

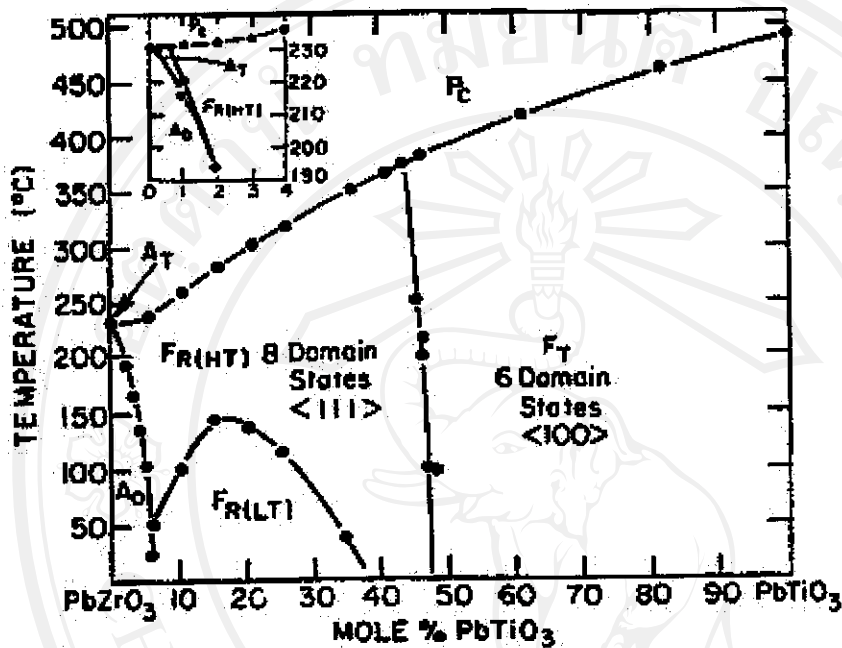


2.3 เลดเซอร์โคเนตไทเทเนต (Lead Zirconate Titanate, PZT)[3,4]

เซรามิกเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต เป็นสารพีโซอิเล็กทริกที่นิยมนำมาใช้อย่างแพร่หลายในวงการอุตสาหกรรม เนื่องจากแสดงสมบัติพีโซอิเล็กทริกได้ดี มีค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบไฟฟ้าเชิงกล (electromechanical coupling coefficient, K_t) และ อุณหภูมิคูรีที่สูง ส่งผลให้สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ดี ที่สำคัญสามารถเตรียมได้ง่าย และหลากหลายองค์ประกอบ อุณหภูมิที่ใช้ก็ไม่สูงมาก เลดเซอร์โคเนตไทเทเนต เป็นสารละลายของแข็งที่เกิดจากเลดเซอร์โคเนต (Lead Zirconate, $PbZrO_3$) ซึ่งมีสมบัติเป็นแอนติเฟอร์โรอิเล็กทริก (antiferroelectric) และมีโครงสร้างเป็นออร์โธรอมบิก (orthorhombic) กับ เลดไทเทเนต (Lead Titanate, $PbTiO_3$) ซึ่งแสดงสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริก และมีโครงสร้างเพอโรฟสไกต์แบบเตตระโกนอล (tetragonal perovskite) ซึ่งเมื่อรวมกันเป็น PZT แล้วจะมีโครงสร้างเป็นแบบ เพอโรฟสไกต์ ซึ่งไอออนของ Ti^{4+} และ Zr^{4+} อยู่ ณ ตำแหน่ง B และ ไอออนของ Pb^{2+} อยู่ ณ ตำแหน่ง A ของหน่วยเซลล์

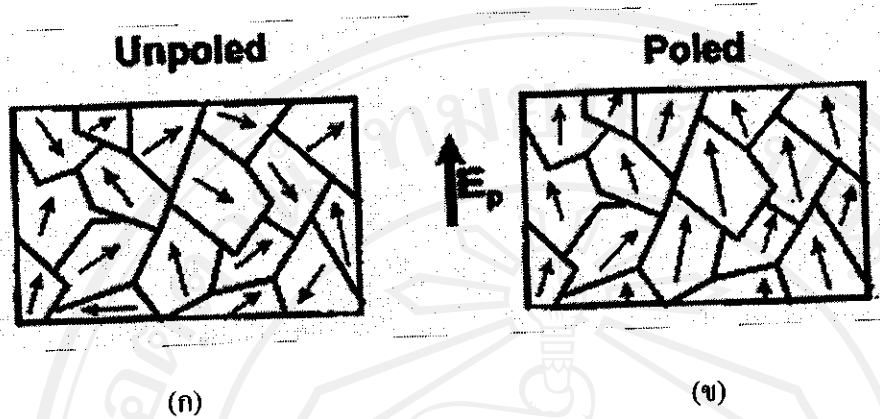
ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรี เซรามิก PZT จะมีโครงสร้างเป็น เพอโรฟสไกต์แบบคิวบิก (cubic perovskite structure) ซึ่งมีสมบัติเป็นพาราอิเล็กทริกและเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิคูรี โครงสร้างจะเปลี่ยนเป็นเตตระโกนอล หรือรอมโบฮีดรอล ซึ่งมีสมบัติเป็นเฟอร์โรอิเล็กทริก เมื่อพิจารณาเฟสที่เป็นรอมโบฮีดรอลจะมีสภาพการมีขั้วในตัวเองในทิศทาง $\langle 111 \rangle$ โดยสมบัติทางคานไดอิเล็กทริกและพีโซอิเล็กทริกของ PZT จะมีสมบัติที่โดดเด่นมาก ณ บริเวณที่เรียกว่า มอร์โฟ

โทรปีคเฟส บาวเดรี (morphotropic phase boundary , MPB) โดยมีอัตราส่วนระหว่าง Zr:Ti เท่ากับ 52:48 ดังรูป 2.6



รูป 2.6 เฟสไดอะแกรมของระบบ PbZrO_3 - PbTiO_3 [3]

เนื่องจากบริเวณนี้มีเฟสพสกันระหว่างเตตระโกนอล กับรอมโบอีดรอล ณ อุณหภูมิห้อง ซึ่งบริเวณ MPB นี้จะเกิดการโพล (poling) ดังรูป 2.7 ได้ง่าย เนื่องจากการมีสภาพขั้วในตัวเอง ในแต่ละเกรนสามารถเกิดการโพล่าไรซ์ได้มากถึง 14 ทิศทาง คือ ในเฟสที่เป็นรอมโบอีดรอล 8 ทิศทาง คือ $[111]$, $[\bar{1}11]$, $[1\bar{1}1]$, $[11\bar{1}]$, $[1\bar{1}\bar{1}]$, $[\bar{1}1\bar{1}]$, $[\bar{1}\bar{1}1]$ และ $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ และเฟสที่เป็นเตตระโกนอลอีก 6 ทิศทาง คือ $[100]$, $[\bar{1}00]$, $[010]$, $[0\bar{1}0]$, $[001]$ และ $[00\bar{1}]$



รูป 2.7 การโพลในเซรามิก PZT [3]

(ก) แสดงทิศทางโพลาริเซชันก่อนโพล

(ข) แสดงทิศทางโพลาริเซชันหลังโพล

สมบัติของสารพีโซอิเล็กทริกเซรามิก สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยการเติม สารเจือ ซึ่ง สารเจือ ที่เติม คือ ไอออนที่มีอิเล็กตรอนวงนอกสุดแตกต่างกันกับ ไอออนของแลตทิซ (lattice) พีโซอิเล็กทริก PZT เซรามิก ซึ่งส่วนผสม ณ ตำแหน่ง MPB สามารถเจือไอออนเพื่อประกอบตัว เป็น “ hard ” และ “ soft ” PZT ได้ สำหรับ Hard PZT เป็นการเติมไอออนตัวรับ (acceptor ions) เช่น K^+ , Na^+ สำหรับตำแหน่ง A และ Fe^{3+} , Al^{3+} , Mn^{3+} สำหรับตำแหน่ง B สำหรับสมบัติ ของ Hard PZT นั้นจะแสดงค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (permittivity, ϵ_r) ค่าการสูญเสียทางความร้อน (electrical loss, $\tan\delta$) และยังให้ค่าสัมประสิทธิ์พีโซอิเล็กทริก (piezoelectric coefficient, d_{33}) ที่ต่ำ อีกทั้งยังสามารถทำการโพลได้ยากอีกด้วย ในทำนองกลับกันสำหรับ Soft PZT เป็นการเจือ ไอออนตัวให้ (donor ions) เช่น La^{3+} สำหรับตำแหน่ง A และ Nb^{5+} , Sb^{5+} สำหรับตำแหน่ง B ส่งผลให้สมบัติต่างๆของสารเปลี่ยนแปลงไปนั่นคือ มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ที่สูงรวมไปถึงค่าการ สูญเสียทางความร้อน และ สัมประสิทธิ์พีโซอิเล็กทริกที่สูงอีกด้วย นอกจากนี้ ยังสามารถโพลได้ง่าย อีกด้วย

2.4 ปูนซีเมนต์ (Cement)[7]

จากหลักฐานยืนยันว่าปูนซีเมนต์ถูกนำมาใช้งานตั้งแต่ สมัยอียิปต์, กรีก และโรมัน คำว่า ซีเมนต์ มาจากภาษาละติน มีความหมายทั่วไป คือ วัตถุที่แข็งเมื่อผสมกับน้ำ ซีเมนต์ถูกใช้อย่างแพร่หลายในฐานะเป็นวัสดุก่อสร้าง เนื่องจากคุณสมบัติที่สำคัญ คือ เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดความสามารถเปลี่ยนแปลงทางเคมี ก่อให้เกิดความสามารถยึดส่วนต่าง ๆ หรืออนุภาคที่เป็นของแข็งให้รวมตัวกัน

เมื่ออาณาจักรโรมันเสื่อมลง การใช้ปูนซีเมนต์ก็สิ้นสุดลงด้วย และความก้าวหน้าที่สำคัญเกิดขึ้นอีกครั้ง ในปี ค.ศ. 1824 โดย Josept Aspdin ชาวอังกฤษ ได้คิดค้นซีเมนต์ จนประสบความสำเร็จ โดยซีเมนต์นี้เมื่อแข็งตัวจะมีสีเหลืองปนเทา เหมือนกับหินที่ใช้ก่อสร้าง บริเวณเมืองพอร์ตแลนด์ ในประเทศอังกฤษ จึงเรียกวัตถุนี้ว่า ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ รวมทั้งได้จดลิขสิทธิ์เป็นครั้งแรก

ปลายศตวรรษที่ 19 ปริมาณปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ที่ผลิตได้อย่างมากในประเทศอังกฤษ ได้ ถูกส่งออกไปจำหน่ายยังประเทศต่างๆ ทั่วโลก รวมทั้งได้มีการเปิดโรงงานผลิต ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ นอกประเทศอังกฤษขึ้น เช่น ประเทศฝรั่งเศส ในปี ค.ศ. 1855 ประเทศสหรัฐอเมริกา ในปี ค.ศ. 1871 ประเทศเยอรมัน ในปี ค.ศ. 1855 และประเทศออสเตรเลียในปี ค.ศ. 1882 ส่วนในประเทศไทยได้มีการเริ่มผลิตปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ครั้งแรกในปี ค.ศ. 1913

2.4.1 ประเภทของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ [7]

ตามมาตรฐานทั่วไป ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์สามารถแบ่งออกเป็น 5 ประเภทดังนี้

ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่มีผลผลิตใช้มากที่สุด เหมาะสำหรับผลิตมอร์ต้าทั่วไป ที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าธรรมดา ได้แก่ ปูนพอร์ตแลนด์ ดราซัง ดราเพชร ดราพญานากเขียว เป็นต้น

ประเภทที่ 2 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland Cement) เหมาะสำหรับใช้งานมอร์ต้าที่เกิดความร้อนและทนซัลเฟตได้ปานกลาง ซึ่งในปัจจุบันไม่มีการผลิตใช้ในประเทศไทย

ประเภทที่ 3 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทให้กำลังอัดเร็ว (High Early Strength Portland Cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ให้กำลังอัดสูงในระยะแรกเพราะมีความ

ละเอียดมาก กว่า ปูนปอร์ตแลนด์ธรรมดา เหมาะสำหรับการทำคอนกรีตที่ต้องการจะใช้งานเร็วหรือถอดไม้แบบในเวลาอันสั้น ได้แก่ ปูนปอร์ตแลนด์ ตราเอราวัณ ตราสามเพชร ตราพญานาคสีแดง เป็นต้น ข้อควรระวังคือไม่ควรใช้ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ในงานโครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่เพราะความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะเกิดสูงมากในช่วงต้นอันอาจก่อให้เกิดโครงสร้างนั้นแตกร้าวได้

ประเภทที่ 4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement) ได้ถูกพัฒนาขึ้นใช้ครั้งแรกในประเทศอเมริกา เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนต่ำ เหมาะสำหรับงานคอนกรีตมวล (Mass Concrete) เช่น การสร้างเขื่อน เนื่องจากทำให้อุณหภูมิของคอนกรีตขณะก่อตัวต่ำกว่าปูนซีเมนต์ชนิดอื่นซึ่งเป็นการลดปัญหาความเสี่ยงจากการแตกร้าวเนื่องจากความร้อน (Thermal Cracking) ในประเทศไทยไม่มีการผลิตปูนประเภทนี้ ปัจจุบันปูนประเภทนี้ถูกทดแทนโดยการใช้ปูนปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมกับ Pulverized Fuel Ash (PFA) และ Ground Granular Blast Furnace Slag (GGBS)

ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทนี้ทนซัลเฟตได้สูง (Sulphate Resistance Portland Cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้มี C_3A ต่ำ เพื่อป้องกันไม่ให้ซัลเฟตจากภายนอกมาทำลายเนื้อคอนกรีต เหมาะสำหรับโครงสร้างที่มีการกระทำของซัลเฟต ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ให้กำลังอัดช้าและให้ความร้อนต่ำกว่าปูนซีเมนต์ชนิดที่หนึ่ง ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตราช้างฟ้าและตราปลาฉลามเป็นต้น

2.4.2 ส่วนผสมที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [7]

- Calcareous Material ได้แก่ หินปูน (Limestone) และดินสอพอง (Chalk)
- Argillaceous Materials ได้แก่ ซิลิกา อลูมินา ซึ่งอยู่ในรูปของดินดำหรือดินเหนียว (Clay) และ ดินดาน (Shale)
- Iron Oxide Materials ได้แก่ แร่เหล็ก (Iron Ore) หรือคิลาแลง (Laterite)

เมื่อวัตถุดิบต่าง ๆ ถูกเผาในหม้อเผา ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเป็นขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1) น้ำจะระเหยออกจากส่วนผสมทั้งหมด

ขั้นตอนที่ 2) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จะถูกขับออกจากหินปูนและดินสอพอง เหลือไว้เพียง CaO

ขั้นตอนที่ 3) เกิดการหลอมตัวของออกไซด์ ระหว่าง CaO จากหินปูนและดินสอพอง ซิลิกา อลูมินา และเหล็กออกไซด์จากดินดำหรือดินเหนียว และดินดาน

ขั้นตอนที่ 4) เกิดการรวมตัวทางเคมีของออกไซด์ต่างๆ และตามด้วยขบวนการตกผลึกเมื่อทำให้เย็น ตัวลง

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ได้จะประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่ คือ

- ออกไซด์หลักได้แก่แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) อะลูมิเนียม ออกไซด์ (Al₂O₃) และ เฟอริกออกไซด์ (Fe₂O₃) ซึ่งรวมกันประมาณ 90% ของน้ำหนักซีเมนต์

- ออกไซด์รอง ได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) โซเดียมออกไซด์ (Na₂O) และไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) ฟอสฟอรัสออกไซด์ (P₂O₅) และยิปซัม

ปริมาณออกไซด์ต่างๆที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดังตาราง 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าออกไซด์ต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [7]

ออกไซด์	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
ออกไซด์หลัก	
CaO	60-67
SiO ₂	1-25
Al ₂ O ₃	3-8
Fe ₂ O ₃	0.5-6.0
ออกไซด์รอง	
MgO	0.1-5.5
Na ₂ O+K ₂ O	0.5-0.3
TiO ₂	0.1-0.4
P ₂ O ₅	0.1-0.2
SO ₃	1-3

ออกไซด์หลักจะรวมตัวในระหว่างการเกิดปูนเม็ด (Clinker) เกิดเป็นสารประกอบที่สำคัญ 4 อย่าง ดังแสดงในตาราง ที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [7]

ชื่อสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate)	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate)	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium Aluminate)	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (Tetracalcium Aluminoferrite)	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

ซึ่งสารประกอบหลักจะประกอบไปด้วย

ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) : C_3S เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึก 6 เหลี่ยม มีสีเทาเข้ม คุณสมบัติของ C_3S เหมือนกับคุณสมบัติของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ เมื่อผสมกับน้ำจะแข็งตัวภายใน 2-3 ชั่วโมง และจะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงสัปดาห์แรก การเกิดปฏิกิริยากับน้ำและก่อ ให้เกิดความร้อน 500 จูล ต่อกรัม กำลังอัดของ C_3S ถูกกระทบโดยยิปซัม ปริมาณ C_3S ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะมีประมาณ 35-55 เปอร์เซ็นต์

ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) : C_2S เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างกลม โดย C_2S มีอยู่หลายรูปแบบ มีเพียง C_2S เท่านั้นที่อยู่ตัว ณ อุณหภูมิทั่วไป C_2S มีคุณสมบัติยืดยาว เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยปล่อยความร้อน 250 จูลต่อกรัม เมื่อแข็งตัวจะพัฒนากำลังอัดอย่างช้า ๆ แต่ในระยะยาวจะได้กำลังอัดใกล้เคียงกับ C_3S ปริมาณ C_2S ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีประมาณ 15-35 เปอร์เซ็นต์

ไตรคัลเซียมอลูมิเนต (C_3A) : C_3A เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม สีเทาอ่อน C_3A จะทำปฏิกิริยากับน้ำทันที ก่อให้เกิด Flash Set และเกิดความร้อนจำนวนมาก ประมาณ 850 จูลต่อกรัม การป้องกัน Flash Set ทำได้โดยการเติมยิปซัมลงระหว่างการบดซีเมนต์ กำลังอัดของ C_3A จะพัฒนาขึ้นภายใน 1-2 วัน แต่กำลังอัดค่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_3A อยู่ในปริมาณ 7-15 เปอร์เซ็นต์

เตตราคัลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C_4AF) : C_4AF ทำปฏิกิริยากับน้ำรวดเร็วมาก และก่อตัวภายในไม่กี่นาที ความร้อนที่เกิดประมาณ 420 จูลต่อกรัม กำลังอัดของ C_4AF ค่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_4AF อยู่ในปริมาณ 5-10 เปอร์เซ็นต์

2.4.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) [7]

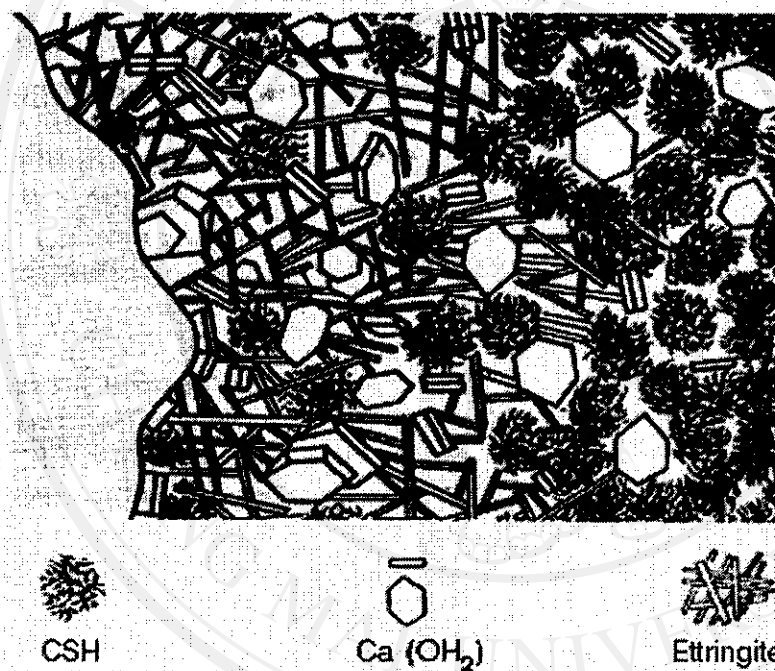
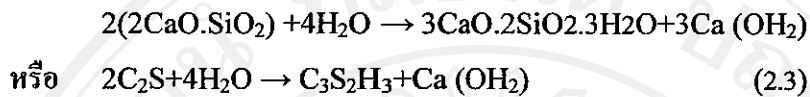
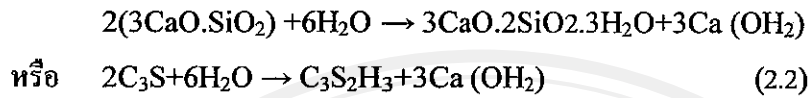
การก่อตัวและแข็งตัวของซีเมนต์เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันขององค์ประกอบของซีเมนต์ โดย ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นใน 2 ลักษณะ คือ

- อาศัยสารละลาย ซีเมนต์จะละลายในน้ำก่อให้เกิดไอออนในสารละลาย และไอออนนี้จะผสมกันทำให้เกิดสารประกอบใหม่ขึ้น

- การเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง ปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยตรง ที่ผิวของของแข็งโดยไม่จำเป็นต้องใช้สารละลาย ปฏิกิริยาประเภทนี้เรียกว่า “Solid State Reaction”

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ จะเกิดขึ้นทั้ง 2 ลักษณะ โดยในช่วงแรกจะอาศัยสารละลาย และ ในช่วงต่อไปจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง ซึ่งซีเมนต์ ประกอบด้วยสารประกอบหลายชนิด เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้อาจเกิดปฏิกิริยาต่อไป ทำให้มันแตกต่างจากผลิตภัณฑ์ที่ได้ในครั้งแรก ดังนั้น จึงจะแยกพิจารณาปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักของซีเมนต์แต่ละประเภท

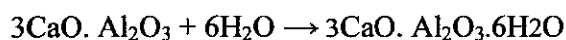
- ปฏิกิริยาไฮเดรชันของคัลเซียมซิลิเกต (C_3S, C_2S) : คัลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับน้ำ ก่อให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide, $Ca(OH)_2$) และคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, CSH) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานดังรูป 2.8 และสมการการเกิดปฏิกิริยามีดังนี้



รูป 2.8 แผนภาพแสดงปฏิกิริยาของคัลเซียมซิลิเกต[7]

จากปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้ จะเกิดเจล (Gel) ซึ่งเมื่อแข็งตัวจะมีลักษณะที่สำคัญอยู่ 2 ประการ คือ โครงสร้างจะไม่สม่ำเสมอ และมีรูพรุน ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของ CSH นั้นจะขึ้นอยู่กับ อายุ อุณหภูมิ และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ซีเมนต์เฟสต์มี คุณสมบัติเป็นด่างอย่างมาก คือมี พี-เอช ประมาณ 12.5 ซึ่งช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริม ได้เป็นอย่างดี

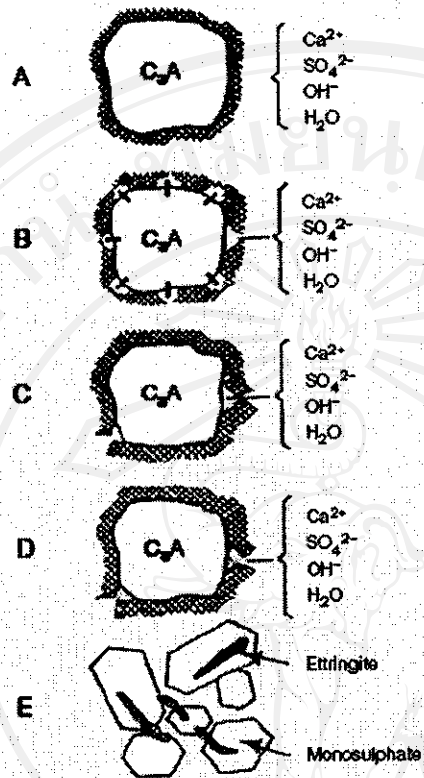
-ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรคัลเซียมอัลูมิเนต (C_3A) : ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A จะเกิดทันทีทันใดและก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เฟสต์ดังสมการ



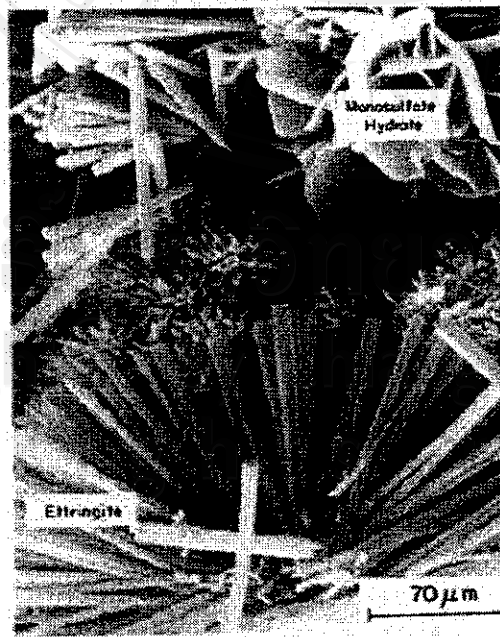
เพื่อหน่วงไม่ให้เกิดปฏิกิริยานี้อย่างรวดเร็ว จึงใส่ยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) เข้าไปในระหว่าง
ขบวนการบดซีเมนต์ ยิปซัมจะทำปฏิกิริยากับ C_3A ก่อให้เกิดชั้นของ เอทานินต์ (Ettringite) บนผิว
ของอนุภาค C_3A ดังสมการ



ชั้นของเอทานินต์ก่อให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของ C_3A และทำให้การก่อตัวในช่วงแรก
นี้จะขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3S และ C_2S เป็นส่วนใหญ่ แต่ชั้นของเอทานินต์ไม่ได้หยุด
การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A กล่าวคือ เมื่อเกิดเอทานินต์จะก่อให้เกิดแรงดันที่มาจากการเพิ่ม
ปริมาตรของของแข็ง ซึ่งแรงดันนี้จะทำให้ชั้นของเอทานินต์แตกออก และเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน
ของ C_3A เมื่อเกิดการแตกตัว จะเกิดเอทานินต์ใหม่เข้าไปแทนที่ เป็นการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันอีก
ครั้งหนึ่ง ขั้นตอนจะเป็นอย่างนี้ไปจนกระทั่ง ซัลเฟตไอออน (Sulphate ions) มีปริมาณไม่เพียงพอ
ที่จะก่อให้เกิดเอทานินต์ ซึ่งปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A จะเกิดโดยเปลี่ยนเอทานินต์ไปเป็นโม
โนซัลเฟต (monosulphate) ดังรูป 2.9 และ 2.10

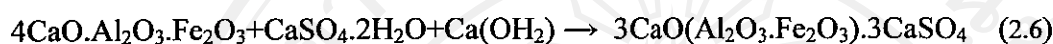


รูป 2.9 ขบวนการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A [7]



รูป 2.10 ภาพขยายโมโนซัลเฟตและเอทรีนไนด์[7]

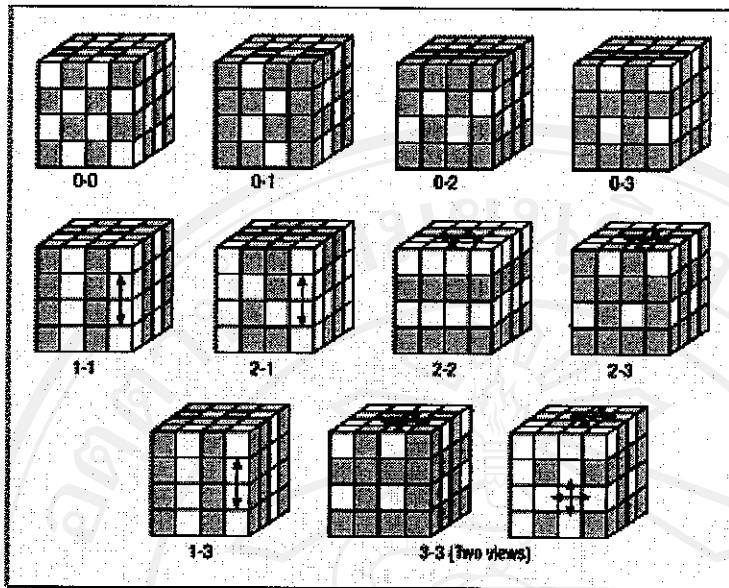
-ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตระคัลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C_4AF) : ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_4AF นี้จะเกิดในช่วงต้นโดย C_4AF จะทำปฏิกิริยากับยิปซัมและคัลเซียมไฮดรอกไซด์ก่อให้เกิดอนุภาคที่มีรูปร่างเหมือนเข็มของ ซัลเฟอร์อัลูมิเนต(Sulphoaluminate) และ ซัลเฟอร์เฟอร์ไรท์ (Sulphoferrite) ดังสมการ



2.5 วัสดุผสม (Composite Material)[2,3,23]

2.5.1 วัสดุผสมหรือ หรือวัสดุประกอบ

คือ วัสดุที่เกิดขึ้นโดยการผสมกัน หรือประกอบกันของวัสดุตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ให้ยึดติดกันเป็นอันหนึ่งอันเดียวกัน มิใช่เป็นการละลายวัสดุชนิดหนึ่งในอีกชนิดหนึ่ง โดยการยึดติดกันนี้ยังคงสามารถแบ่งแยกวัสดุแต่ละชนิดที่เป็นองค์ประกอบได้ด้วยตา, กล้องแสง หรือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน วัสดุผสมจึงเป็นวัสดุหลายเฟส (multiphase material) ซึ่งจะมีสมบัติที่เป็นองค์ประกอบรวมของวัสดุผสม และอาจมีสมบัติที่แตกต่างกันออกไปจากสมบัติของวัสดุแต่ละชนิดที่เป็นองค์ประกอบรวมของวัสดุผสมนั้น โดยทั่วไปแล้ววัสดุผสมจะมีสมบัติในการใช้ประโยชน์ได้เหมาะสมดีกว่าวัสดุชนิดเดียว วัสดุที่เป็นองค์ประกอบของวัสดุผสมนั้น สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ เมทริกซ์เฟส (matrix phase) และ ดิสเพิร์สเฟส (dispersed phase) ซึ่งเมทริกซ์เฟสจะเป็นเฟสที่ทำหน้าที่เชื่อมประสาน และยึดเกาะดิสเพิร์สเฟส ให้รวมเป็นอันเดียวกัน ส่วนดิสเพิร์สเฟส เป็นองค์ประกอบที่เหลือของวัสดุผสมที่กระจายตัวในลักษณะต่างๆ ในเมทริกซ์เฟส วัสดุผสมนั้นสามารถแบ่งตามลักษณะของชนิด, ขนาด, รูปร่าง และลักษณะโครงสร้างการจัดเรียงตัวของดิสเพิร์สเฟส หากพิจารณาการจัดเรียงตัวของแต่ละเฟสที่มีการจัดเรียงตัวติดกันใน 3 มิติ สำหรับวัสดุผสม 2 เฟสนั้นสามารถจัดเรียงตัวติดกันได้ 10 แบบ คือ 0-0, 1-0, 2-0, 3-0, 1-1, 2-1, 3-1, 2-2, 2-3, 3-3 ดังรูป 2.11



รูป 2.11 แสดงลักษณะความเป็นไปได้ของการจัดเรียงตัวของแต่ละเฟส 10 แบบของวัสดุผสมระหว่าง 2 เฟส[2]

2.5.2 วัสดุผสมแบบ 0-3 [2,13]

วัสดุผสมแบบ 0-3 ประกอบด้วยเมทริกซ์เฟสที่เชื่อมติดกันใน 3 ทิศทาง และมีอนุภาคดิสเพิร์สเฟส กระจายตัวอยู่ภายใน ข้อดีของวัสดุผสมแบบนี้ คือสามารถขึ้นรูปได้หลายรูปแบบ เช่น เป็นแผ่นบางๆ (thin sheet) เป็นแท่ง (extruded bar) เส้นใย (fibre) หรือ ทำเป็นรูปร่างต่างๆ ขึ้นกับแม่พิมพ์ซึ่งสามารถผลิตได้ในปริมาณที่มาก (mass production) แม้ว่าวัสดุผสมแบบ 0-3 จะผลิตได้ง่าย แต่ก็เป็นการยาก ที่จะทำให้เกิดการกระจายตัวของดิสเพิร์สเฟสที่เป็นเซรามิกอย่างสม่ำเสมอในเมทริกซ์เฟสที่เป็นปูนซีเมนต์ และนอกจากนี้การปรากฏช่องว่างภายในเนื้อวัสดุผสม จะไปลดค่าสนามไฟฟ้าในการทำจั่ว ดังนั้นค่าความต้านทานการพังทลายไดอิเล็กทริก (dielectric breakdown strength) จะลดลงไปด้วย

ปัญหาที่สำคัญอีกอย่างของวัสดุผสมแบบ 0-3 ที่มีต่อสมบัติพิโซอิเล็กทริก คือ การทำจั่วได้ยาก ในวัสดุผสมแบบ 0-3 สนามไฟฟ้าที่กระทำต่อเฟสที่เป็นดิสเพิร์สเฟสในวัสดุผสมพิโซอิเล็กทริกจะถูกควบคุมด้วยค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ซึ่งการให้กระแสไฟฟ้าแก่วัสดุผสมนั้น กระแสไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ผ่านบริเวณที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำ ดังนั้นกระแสที่เข้าไปกระทำกับเฟสที่เป็นเซรามิกจึงลดลง เมื่อสนามไฟฟ้าที่กระทำต่อเซรามิกต่ำจึงไม่เพียงพอต่อการทำให้เกิดจั่วซึ่งในกรณีของวัสดุ

ผสมที่มีพอลิเมอร์เป็นเมทริกซ์เฟสได้มีการแก้ปัญหาโดยการเติมเฟสที่เป็นตัวนำเข้าไปช่วยในการโพลได้ง่ายขึ้น

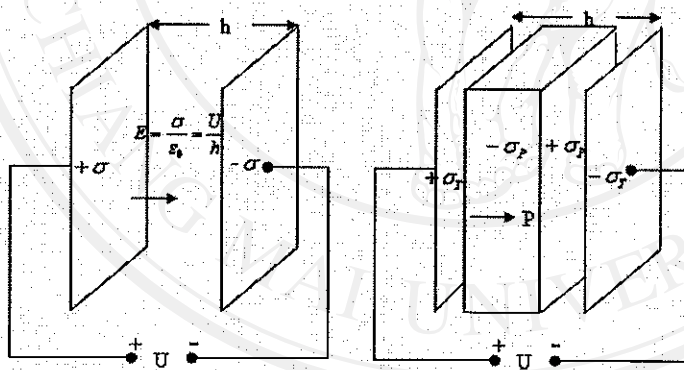
2.6 สมบัติทางไฟฟ้า (Electrical Properties)

2.6.1 สมบัติไดอิเล็กทริก [4, 22, 23]

สารที่มีสมบัติไดอิเล็กทริก คือ สารที่มีสมบัติเป็นฉนวนที่สามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้ ดังนั้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจึงเป็นค่าที่บอกความสามารถในการเก็บประจุของสารไดอิเล็กทริกนั้นๆ หรือ บอกให้ทราบว่า ค่าความจุของตัวเก็บประจุที่ใช้สารไดอิเล็กทริกนั้นๆจะเพิ่มขึ้นเป็นกี่เท่าตัวของตัวเก็บประจุสูญญากาศ

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก[4]

พิจารณาผลจากการใส่วัสดุไดอิเล็กทริกเข้าไปในช่องว่างระหว่างแผ่นคู่ขนานดังรูป 2.12



รูป 2.12 ลักษณะตัวเก็บประจุแผ่นคู่ขนาน[4]

จาก Gauss's theorem สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นคู่ขนานที่เป็นสูญญากาศ คือ

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (2.7)$$

และเมื่อให้ความต่างศักย์ขนาดเดียวกันแก่แผ่นคู่ขนานที่มีสาร ไดอิเล็กทริกคั่นอยู่ สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเป็น

$$E = \frac{\sigma_T - \sigma_P}{\epsilon_0} \quad (2.8)$$

$$\sigma_T = \bar{E}\epsilon_0 + \sigma_p \quad (2.9)$$

โดยที่ σ_p = polarization charge density

σ_T = total charge density or dielectric displacement (D)

ดังนั้น
$$\bar{D} = \bar{E}\epsilon_0 + \sigma_p \quad (2.10)$$

ถ้าระหว่างแผ่นคู่ขนานเป็นสุญญากาศค่าความจุที่ได้ คือ

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{A}{h} \quad (2.11)$$

และถ้าระหว่างแผ่นคู่ขนานเป็นสารไดอิเล็กทริกค่าความจุจะเพิ่มขึ้นเนื่องจาก ค่าสภาพยอมของไดอิเล็กทริกเป็น

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{h} \quad (2.12)$$

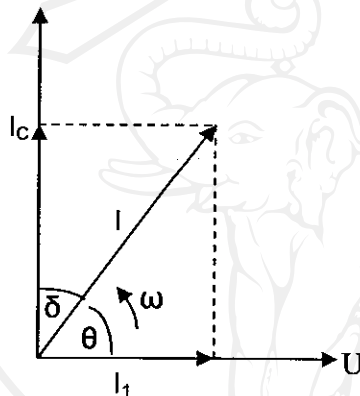
โดยที่	θ	คือ	ประจุรวม (total charge/coulomb)
	A	คือ	พื้นที่หน้าตัดของแผ่นโลหะตัวนำ
	U	คือ	ศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่วัสดุไดอิเล็กทริก
	C	คือ	ค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุมีหน่วยเป็นฟารัด (F)
	ϵ_0	คือ	ค่าสภาพยอมของสุญญากาศ มีค่า 8.854×10^{-12} (F/m)
	ϵ_r	คือ	ค่าความสามารถในการกักเก็บประจุของสารเมื่อเทียบกับอากาศ (relative permittivity or dielectric constant)
	h	คือ	ความหนา

การสูญเสียในสารไดอิเล็กทริก[24,25]

เมื่อวัสดุไดอิเล็กทริกอยู่ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ พฤติกรรมของวัสดุจะต่างออกไปจากเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งเมื่อพิจารณาสนามไฟฟ้ากระแสสลับ สนามไฟฟ้าจะสลับตามรูปแบบของคลื่นไซน์ ($E = E_0 \sin \omega t$) ดังนั้น เมื่อให้สนามไฟฟ้ากระแสสลับ แก้ววัสดุไดอิเล็กทริก ไดโพลภายในวัสดุไดอิเล็กทริกจะเกิดการเปลี่ยนแปลงกลับไปกลับมา ตามความถี่ของสนามไฟฟ้า

กระแสกลับที่ให้ ซึ่ง ณ ความถี่สูง ไดโพลจะกลับตัวไม่ทันกับสนามไฟฟ้าที่ให้ ส่งผลให้เกิดรีแลกเซชัน (relaxation) ขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่า สนามไฟฟ้าเป็นพลังงานแบบหนึ่งซึ่งเมื่อให้สนามไฟฟ้าแก่วัสดุไดอิเล็กทริก ไดโพลในวัสดุไดอิเล็กทริกจะใช้พลังงาน ที่ให้ในการกลับตัวไป-มา แต่เมื่อที่ความถี่สูงๆ ไดโพลจะกลับตัวตามความถี่ไม่ทัน เมื่อกลับไม่ทันไดโพลจึงไม่กลับตัว และเมื่อไม่กลับตัวแต่ยังรับพลังงานจากสนามไฟฟ้าอยู่พลังงานที่สาร ได้รับจะค่อยๆสะสมเกิดเป็นความร้อนขึ้นเป็นการสูญเสียในวัสดุไดอิเล็กทริก

ตามทฤษฎีจะไม่เกิดการสูญเสียเกิดขึ้นแต่ในความเป็นจริงกระแสมีได้นำศักย์ไฟฟ้าอยู่ที่ 90° ซ ส่งผลทำให้เกิดการสูญเสียเกิดขึ้น



รูป 2.13 การนิยาม Loss Tangent ที่เกิดขึ้นในวัสดุไดอิเล็กทริก [4]

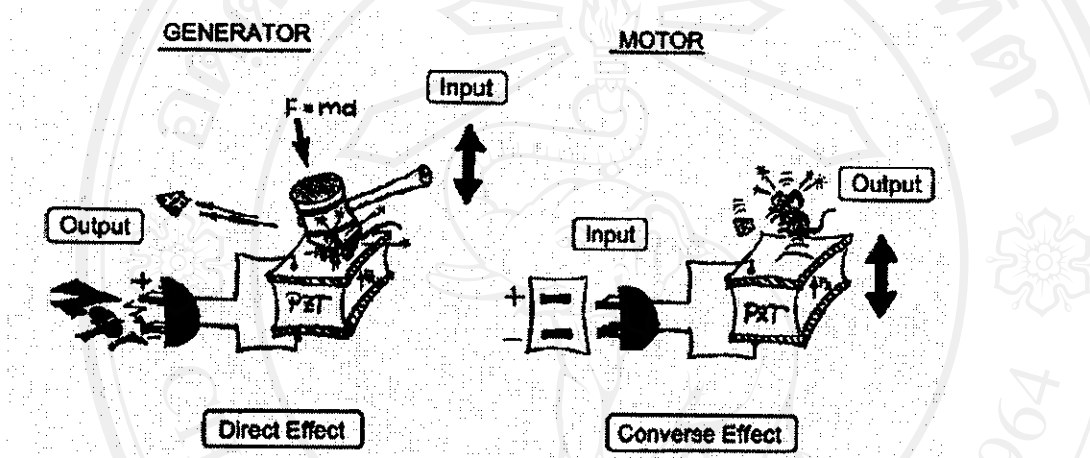
พิจารณากระแสที่ทำให้เกิดการสูญเสีย I_1 ดังรูป 2.13 [24]

โดยมีค่า $\tan \delta = \text{dissipation factor หรือ loss tangent}$

2.6.2 สมบัติพิโซอิเล็กทริก[1, 2,4]

สมบัติพิโซอิเล็กทริกเป็นสมบัติเฉพาะของสาร นั่นคือ สารสามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าที่ได้รับไปเป็นพลังงานกล ในทางกลับกันยังสามารถเปลี่ยนพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้อีกด้วย ดังนั้นจึงสามารถแบ่งปรากฏการณ์ทางพิโซอิเล็กทริก ออกเป็น 2 ประเภท คือ

- ปรากฏการณ์แบบ direct
- ปรากฏการณ์แบบ converse



รูป 2.14 แสดงปรากฏการณ์ 2 แบบ คือ Direct effect และ Converse effect
ในสารพิโซอิเล็กทริก[1]

พิจารณาปรากฏการณ์พิโซอิเล็กทริกแบบไคเรค (direct) คือ เมื่อสารได้รับความเค้นจากภายนอกสารจะสร้างประจุไฟฟ้าขึ้นที่ผิวของสารเรียก “ผลโดยตรง” (Direct effect) ในทำนองกลับกันเมื่อสารได้รับสนามไฟฟ้าสารจะเปลี่ยนสนามไฟฟ้าที่ได้เป็นการยืดหดตัวเรียก “ผลย้อนกลับ” (Converse effect) สามารถอธิบายปรากฏการณ์ทั้งสองด้วยสมการดังนี้ [1]

$$P_i = d_{ij}T_j \quad i = 1, 2, 3 \quad j = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (2.13)$$

โดยที่ P_i = โพลาริเซชันทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น (Electrical polarization)
 T_j = ความเค้นที่ใส่ให้แก่สารพิโซอิเล็กทริก (applied mechanical)
 d_{ij} = สัมประสิทธิ์พิโซอิเล็กทริก (piezoelectric change coefficient) ในทิศทาง i

สำหรับกรณีพิโซอิเล็กทริกแบบ converse สามารถพิจารณาได้จากสมการ[23,24]

$$S_j = d_{ij}E_i \quad \begin{matrix} i=1, 2, 3 \\ j=1, 2, 3, 4, 5, 6 \end{matrix} \quad (2.14)$$

โดยที่ S_j = ความเครียดที่เกิดขึ้น (mechanical strain) ในทิศทาง j
 E_i = สนามไฟฟ้าที่ให้กับสารพิโซอิเล็กทริก (electric field) ในทิศทาง i

สัมประสิทธิ์พิโซอิเล็กทริก (Piezoelectric coefficient, d_{ij} ; CN^{-1})

หรือเรียกว่า “Piezoelectric charge constant” เป็นค่าปริมาณของประจุไฟฟ้าที่สร้างขึ้นบนผิวของวัสดุพิโซอิเล็กทริกซึ่งตัววัสดุพิโซอิเล็กทริกจะสร้างขึ้นเมื่อได้รับความเค้นเชิงกลต่อหนึ่งหน่วยนิวตันทั้ง Direct Effect และ Converse Effect

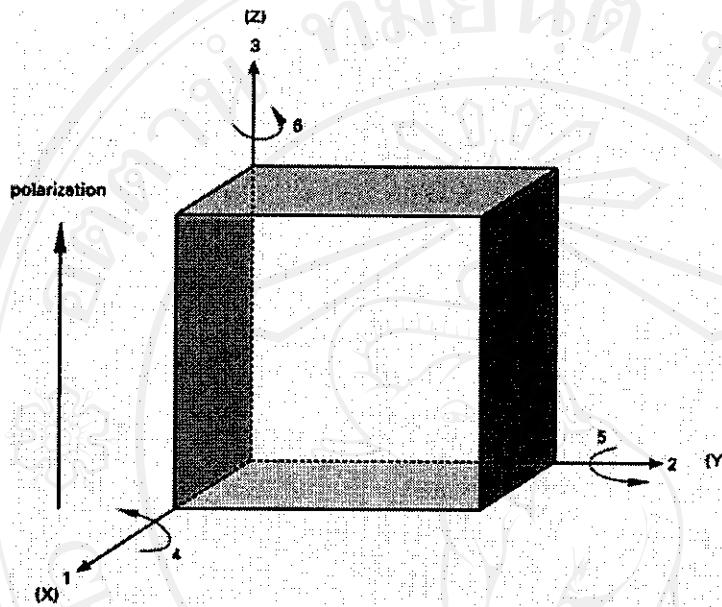
โดย i คือ ทิศทางของโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นในวัสดุเมื่อไม่มีการให้สนามไฟฟ้า ($E=0$)
 j คือ ทิศทางของความเค้นเชิงกลที่ให้ หรือแสดงถึงทิศทางของความเครียดเชิงกลที่สารยึดหด

เช่น d_{33} คือ โพลาริเซชันที่เกิดขึ้นในทิศทาง 3 (แกน z) เมื่อสารได้รับความเค้นเชิงกลในทิศทาง 3 (แกน z)
 d_{31} คือ โพลาริเซชันที่เกิดขึ้นในทิศทาง 3 (แกน z) เมื่อสารได้รับความเค้นเชิงกลในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางที่สารเกิดโพลาริเซชัน (1, 2) (แกน x หรือ แกน y)

ความสัมพันธ์ของสมบัติพิโซอิเล็กทริก[4]

เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าแก่สารพิโซอิเล็กทริกเซรามิกจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเกิดขึ้น (converse effect) หรือ เมื่อให้แรงทางกลจะมีประจุไฟฟ้าเกิดขึ้นบนผิวของวัสดุ (direct effect)

ถ้าขั้ว (electrode) ไม่มีการลัดวงจร (short-circuit) ศักย์ไฟฟ้าที่ได้ก็就会有ความสัมพันธ์กับประจุที่เกิดขึ้น และการอธิบายปรากฏการณ์พิโซอิเล็กทริกนั้น สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติยืดหยุ่นของวัสดุซึ่งมีการกำหนดทิศทางต่างๆ ดังรูป 2.15



รูป 2.15 การกำหนดทิศทางและระนาบสำหรับพิโซอิเล็กทริกเซรามิก[4]

โดย	ทิศทาง 1	เป็นแรงตามแนวแกน	X
	ทิศทาง 2	เป็นแรงตามแนวแกน	Y
	ทิศทาง 3	เป็นแรงตามแนวแกน	Z
	ทิศทาง 4	เป็นแรงตามแนวแกน	X
	ทิศทาง 5	เป็นแรงตามแนวแกน	Y
	ทิศทาง 6	เป็นแรงตามแนวแกน	Z

สัมประสิทธิ์ความต่างศักย์ (Voltage Coefficient, g_{ij} ; VmN^{-1})

เรียกว่า “piezoelectric voltage constant” เป็นค่าปริมาณของความต่างศักย์ที่สารพิโซอิเล็กทริกสร้างขึ้นเมื่อได้รับความเค้นเชิงกลทั้งในกรณี Direct Effect และ Converse Effect

- i คือ ทิศทางของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนผิวของวัสดุหรือบอกทิศทางของ dielectric displacement ที่ให้กับวัสดุ

j คือ ทิศทางของความเค้นเชิงกลที่ให้ หรือ แสดงถึงความเครียดเชิงกลที่เกิดขึ้น

ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการ [23,24]

$$E_i = g_{ij} T_j \quad \begin{matrix} i=1, 2, 3 \\ j=1, 2, 3, 4, 5, 6 \end{matrix} \quad (2.15)$$

E_i = สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น (electric field) ที่เกิดขึ้นในทิศทาง i

T_j = ความเค้นที่ใส่ให้กับสารพีโซอิเล็กทริก (apply mechanical stress) ในทิศทาง j

g_{ij} = สัมประสิทธิ์แรงดันพีโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Voltage coefficient) ในทิศทาง ij มีหน่วยเป็น Vm/N

นอกจากนี้ยังแสดงความสัมพันธ์กับค่า piezoelectric charge coefficient (d_{ij}) และสัมประสิทธิ์แรงดันพีโซอิเล็กทริกดังสมการ[23,24]

$$g_{ij} = \frac{d_{ij}}{\epsilon_r \epsilon_0} \quad (2.16)$$

ϵ_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant)

ϵ_0 คือ ค่าสภาพยอม (permittivity) ของสุญญากาศมีค่า 8.854×10^{-12} F/m

สัมประสิทธิ์คู่ควบไฟฟ้าเชิงกล (Electromechanical Coupling Factor, k_{ij} หรือ K_{eff})

ในสารพีโซอิเล็กทริก กรณี direct effect เป็นค่าที่บอกถึง ประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงานกล (mechanical stress) ไปเป็นพลังงานไฟฟ้า (electrical energy) ส่วนในกรณี converse effect เป็นค่าที่บอกถึง ประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกล ดังสมการ 2.22 และ 2.23

$$k^2 = \frac{\text{output mechanical energy}}{\text{input electrical energy}} \quad (2.17)$$

หรือ

$$k^2 = \frac{\text{output electrical energy}}{\text{input mechanical energy}} \quad (2.18)$$

ในสารพีโซอิเล็กทริกที่ไม่เป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกจะมีค่า $k < 0.1$ เช่น ควอตซ์ (quartz) ส่วนในเซรามิกที่เป็นเฟอร์โรอิเล็กทริกจะมีค่าสูงเช่น PZT มีค่า k อยู่ระหว่าง 0.5-0.7 และ Rochell salt มีค่า k สูงถึง 0.9 ($T_c = 24^\circ\text{C}$) โดยปกติแล้วค่า k จะมีค่าน้อยกว่า 1 เสมอ เนื่องจากการเปลี่ยนรูปพลังงานไม่สมบูรณ์ และค่า k ที่วัดได้นั้นมิได้นับประสิทธิภาพที่แท้จริงของสารพีโซอิเล็กทริกเนื่องจากพลังงานบางส่วนถูกเปลี่ยนไปเป็นความร้อนและบางส่วนตัวสารพีโซอิเล็กทริกจะเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในตัวสารเองเพื่อลดพลังงานที่ได้รับมา

2.7 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

2.7.1 กำลังอัด (compressive strength)[7]

คุณสมบัติของมอร์ต้าในขณะที่ยังอยู่ในสภาพของเหลวจะมีความสำคัญเพียงขณะก่อสร้างเท่านั้น ในขณะที่คุณสมบัติของมอร์ต้าที่แข็งตัวแล้ว จะมีความสำคัญไปตลอดอายุการใช้งานของโครงสร้างมอร์ต้านั้น อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติ คุณสมบัติของมอร์ต้าทั้ง 2 ลักษณะ จะมีผลต่อกันและกัน การที่จะให้ได้คุณสมบัติของมอร์ต้าที่แข็งตัวดีแล้ว จะต้องมาจากการเลือกสัดส่วนผสมเพื่อให้มอร์ต้าที่อยู่ในสภาพเหลวมีความเหมาะสมอย่างมากในการใช้งาน

คุณสมบัติของมอร์ต้าที่แข็งตัวแล้ว ได้แก่ กำลัง, ความทนทาน, และ การเปลี่ยนแปลงปริมาตร ซึ่งต่อไปนี้จะกล่าวถึงกำลังอัดของมอร์ต้า ซึ่งเป็นเพียงส่วนหนึ่งของคุณสมบัติด้านกำลัง

2.7.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกำลัง [7]

-คุณสมบัติของวัสดุผสม ปูนซีเมนต์เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลที่สำคัญมากเพราะว่าปูนซีเมนต์แต่ละประเภทจะก่อให้เกิดกำลังอัดที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ นอกจากนี้แม้ว่าจะเป็นปูนซีเมนต์ประเภทเดียวกันแต่มีความละเอียดแตกต่างกันแล้ว อัตราการเพิ่มกำลังของมอร์ต้าก็จะแตกต่างกันด้วยถ้าปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดมากก็จะให้กำลังสูง โดยเฉพาะหลังจากที่แข็งตัวไปแล้วไม่นาน

-มวลรวม มวลรวมมีผลต่อกำลังมอร์ต้าเล็กน้อย เพราะมวลรวมที่ใช้กันอยู่ทั่วไปมักมีความแข็งแรงมากกว่าซีเมนต์เพสต์ อย่างไรก็ตาม มวลรวมหยาบที่เป็นหินย่อยซึ่งมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมหรือผิวหยาบ จะทำให้กำลังอัดของมอร์ต้า ดีกว่าพวกกรวดที่มีผิวเกลี้ยง ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมก็มีผลต่อกำลังอัดของมอร์ต้าเช่นกัน เพราะ มอร์ต้าที่ใช้มวลรวมขนาดใหญ่จะต้องการปริมาณน้ำน้อยกว่ามวลรวมขนาดเล็กสำหรับมอร์ต้าที่มีความสามารถเท่าเทียมกัน ดังนั้นมอร์ต้าที่ใช้มวลรวมขนาดใหญ่ จึงมักให้กำลังดีกว่า ส่วนขนาดละเอียดของมวลรวมจะมีผลต่อกำลังมอร์ต้าในแง่ที่ว่ามอร์ต้าที่ใช้มวลรวมที่มีส่วนขนาดละเอียดไม่เหมาะสม คือ มีส่วนละเอียดมากเกินไปนั้นจะต้องการปริมาณน้ำมากกว่ามวลรวมที่มีส่วนละเอียดดี เพื่อให้มอร์ต้ามีความสามารถเท่าเทียมกัน อีกทั้งยังก่อให้เกิดฟองอากาศแทรกอยู่ในเนื้อมอร์ต้าเป็นจำนวนมาก ส่งผลทำให้กำลังอัดมอร์ต้ามีค่าต่ำลงได้

-น้ำ น้ำมีผลต่อกำลังอัดของมอร์ต้าตามความใสและปริมาณสารเคมีหรือเกลือแร่ที่ผสมอยู่ในน้ำที่มีเกลือคลอไรด์ผสมอยู่จะทำให้อัตราการเพิ่มกำลังของมอร์ต้าในระยะต้นสูง น้ำขุ่นและน้ำที่มีสารแขวนลอยผสมอยู่จะทำให้กำลังของมอร์ต้าต่ำลงซึ่งอาจจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณและชนิดของสารแขวนลอยนั้น

2.7.3 การทำมอร์ต้า

การชั่งตวงส่วนผสม

การชั่งตวงส่วนผสมหากใช้การตวงโดยปริมาตรจะมีโอกาสผิดพลาดมากกว่า การชั่งส่วนผสมโดยน้ำหนักซึ่งหากอัตราส่วนผสมมอร์ต้าผิดไปจะทำให้คุณสมบัติมอร์ต้าเปลี่ยนแปลงได้ นอกจากนี้ อัตราส่วนผสม จะมีอิทธิพลต่อกำลังอัดมอร์ต้าโดยตรงโดยเฉพาะอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

การผสมมอร์ต้า

การผสมมอร์ต้าจะต้องผสมวัสดุทำมอร์ต้าให้เป็นเนื้อเดียวกันมากที่สุดเพื่อให้มีน้ำมีโอกาสทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ได้อย่างทั่วถึงและเพื่อให้ซีเมนต์เพสต์กระจายแทรกตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างมวลรวมได้อย่างเต็มที่ ดังนั้นการผสมมอร์ต้าหากกระทำอย่างไม่ทั่วถึง จะมีผลทำให้กำลังของมอร์ต้ามีค่าไม่คงที่ได้

การเทมอร์ต้าเข้าแบบหล่อและการอัดแน่น

จะมีอิทธิพลต่อกำลังอัดของมอร์ต้าเพราะหากมอร์ต้าเกิดการแยกตัวในขณะที่ลำเลียง หรือเท จะมีผลทำให้กำลังของมอร์ต้ามีค่าไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้การทำให้มอร์ต้าแน่นตัว หากทำได้ไม่เต็มที่ก็จะทำให้เกิดรูโพรงขึ้นในเนื้อมอร์ต้าส่งผลทำให้กำลังของมอร์ต้าลดลงได้ หรือ

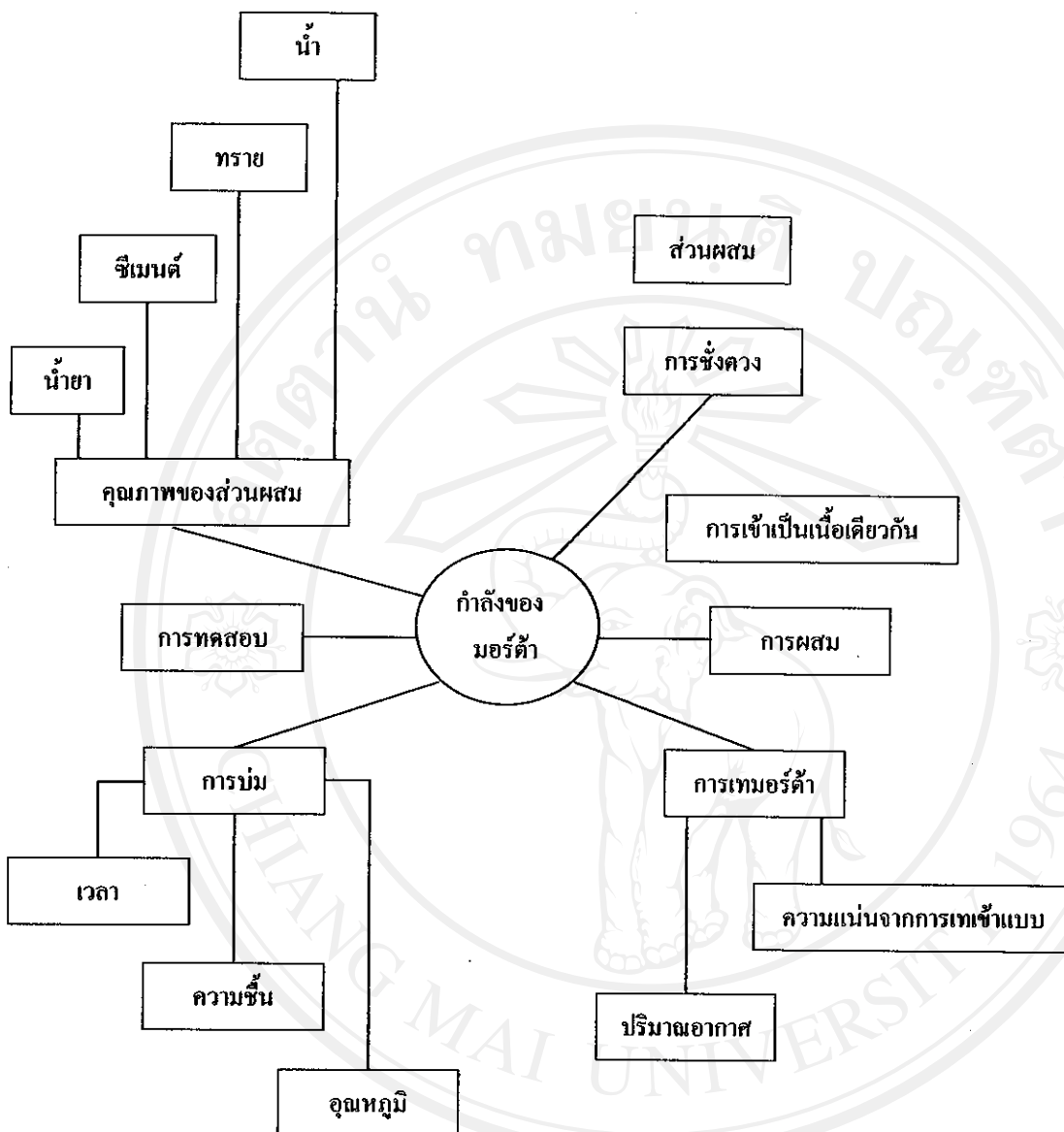
หากใช้วิธีทำให้มอร์ดำแน่นตัวไม่เหมาะสมก็สามารถทำให้เกิดการแยกตัวขึ้นในเนื้อมอร์ดำได้ทำให้กำลังมอร์ดำมีค่าไม่สม่ำเสมอ

2.7.4 การบ่มมอร์ดำ

ความชื้น จะมีอิทธิพลต่อกำลังของมอร์ดำ เพราะปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจากการรวมตัวกันระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำจะค่อยเป็นค่อยไป นับตั้งแต่ปูนซีเมนต์เริ่มผสมกับน้ำเป็นซีเมนต์เพสต์และซีเมนต์เพสต์จะมีกำลังเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ถ้ามีความชื้นอยู่ตลอดเวลา ถ้าซีเมนต์เพสต์ในมอร์ดำไม่มีความชื้นอยู่มอร์ดำก็จะไม่มีการเพิ่มกำลังอีกต่อไป ในทางปฏิบัติเรามักจะบ่มมอร์ดำจนถึงอายุ 28 วัน ดังนั้นเมื่อมอร์ดำเริ่มแข็งตัวจึงทำการบ่มด้วยความชื้นทันที

อุณหภูมิ ถ้าหากอุณหภูมิสูงในการบ่มก็จะทำให้อัตราการเพิ่มกำลังของมอร์ดำถูกเร่งให้เร็วขึ้นทำให้มอร์ดำมีกำลังสูงกว่ามอร์ดำที่ได้รับการบ่มในอุณหภูมิที่ต่ำกว่า

เวลาที่ใช้ในการบ่ม ถ้าหากสามารถบ่มมอร์ดำให้ชื้นอยู่ตลอดเวลาได้ยิ่งนานเท่าใดก็จะได้กำลังอัดของมอร์ดำเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังอัดแสดงดังรูป 2.16



รูป 2.16 สรุปปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกำลังของมอร์ต้า[7]

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดก้อนตัวอย่างทรงลูกบาศก์และทรงกระบอก

ก้อนตัวอย่างมาตรฐานที่ทำเพื่อทดสอบกำลังอัดที่ใช้กันอยู่อย่างแพร่หลายมี 2 รูปทรงคือ

-รูปทรงกระบอก เป็นการทดสอบตามมาตรฐานอเมริกา ขนาดที่ใช้ คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง คือ 15 ซม. สูง 30 ซม.

-รูปทรงลูกบาศก์เป็นการทดสอบตามมาตรฐานอังกฤษ ขนาดที่ใช้คือ 15 x 15 x 15 ซม.

กำลังอัดของ 2 รูปทรงนี้จะแตกต่างกันถึงแม้จะใช้ส่วนผสมของมอร์ต้าเดียวกันโดยกำลังอัดตัวอย่างรูปทรงกระบอกจะมีค่าน้อยกว่ากำลังอัดของตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ทั้งนี้เนื่องจากองค์ประกอบ

-แรงเสียดทานระหว่างผิวของก้อนตัวอย่างกับแผ่นรองกดก่อให้เกิด Confining Stress ซึ่งจะมีผลทำให้ค่ากำลังอัดของรูปทรงลูกบาศก์ที่ได้สูงกว่าความเป็นจริง

-องค์ประกอบเรื่องความชื้น รวด กล่าวคือเนื่องจากรูปทรงกระบอกมีความสูงมากกว่าด้านกว้างทำให้ผลด้าน Confining Stress ลดลงอย่างมาก

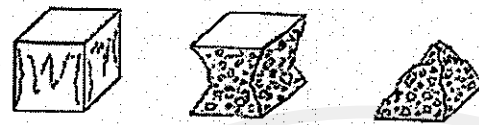
2.7.5 สาเหตุที่ค่ากำลังอัดไม่เป็นไปตามข้อกำหนด

การที่ค่ากำลังอัดของมอร์ต้าได้ต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนดนี้ อาจมีสาเหตุมาจากหลายประการอันได้แก่

- ใช้สัดส่วนผสมที่ไม่เหมาะสม
- ควบคุมปริมาณน้ำไม่ดีพอ
- ควบคุมปริมาณฟองอากาศไม่ดีพอ
- การผสมไม่ดีพอ
- มีสารอินทรีย์ต่างๆมากเกินไปเกินข้อกำหนด
- ใช้หินทรายที่สกปรก
- ใช้น้ำยาผสมมอร์ต้าที่ไม่มีประสิทธิภาพ
- ไม่ได้ปรับความชื้นในมวลรวม
- การอัดแน่นไม่ถูกต้อง
- การบ่มไม่เพียงพอ
- การลำเลียงและการทดสอบไม่ถูกต้อง
- อุณหภูมิผันแปรไป

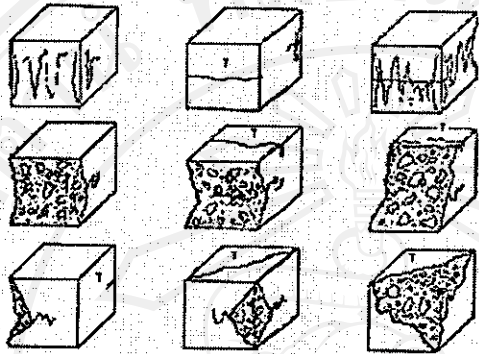
2.7.6 ลักษณะการแตกของก้อนตัวอย่างมอร์ต้า

ลักษณะการชำรุดแตกหักของก้อนตัวอย่างมอร์ต้าที่รับแรงอัดมักแตกออกเป็นรูปกรวยคู่ (Shear Failure) ในกรณีก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอก ส่วน ลักษณะของการแตกของก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ที่จะแตกเป็นรูป พีรามิด ดังรูป 2.17



Explosive failure

(a)



T = Tensile Crack

(b)

รูป 2.17(a) ลักษณะของการแตกของก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ที่ถูกต้อง

(b) ลักษณะของการแตกของก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ที่ไม่ถูกต้อง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright© by Chiang Mai University

All rights reserved