

บทที่ 2

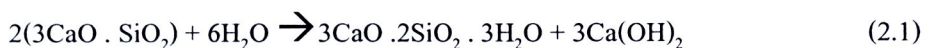
ทฤษฎี

2.1 ส่วนประกอบทางเคมีของซีเมนต์

2.1.1 สารประกอบเคมีหลักและปฏิกิริยาไฮเดรชันในซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา

(1) ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S)

C_3S มีอยู่มากที่สุดในปูนซีเมนต์ประมาณร้อยละ 45 ถึง 55 มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมสี่เท่าแก่ที่อุณหภูมิในเตาเผา 1250 องศาเซลเซียส C_3S สามารถสลายตัวได้ ซึ่งการสลายตัวนี้ค่อนข้างช้าและเมื่ออุณหภูมิลดต่ำกว่า 700 องศาเซลเซียส C_3S จะมีเสถียรภาพและจะไม่เปลี่ยนแปลงสภาพเมื่อผสม C_3S กับน้ำจะเกิดการก่อตัวและแข็งตัวและให้กำลังค่อนข้างดีโดยเฉพาะในช่วง 7 วันแรก ดังแสดงในรูป 2.1 ปฏิกิริยาระหว่าง C_3S กับน้ำทำให้เกิดความร้อนปานกลางประมาณ 500 จูล/กรัม ความร้อนที่คายออกมาเรียกว่าความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Heat of Hydration) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกตแสดงในสมการ



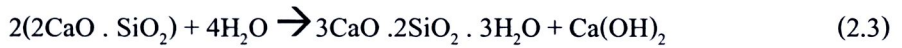
หรือ



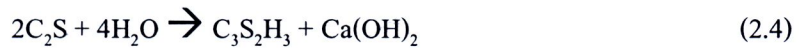
(2) ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S)

C_2S มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 15 ถึง 35 C_2S บริสุทธิ์มีอยู่ 4 รูปแบบคือ $\alpha-C_2S$ ซึ่งเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส และเมื่อเย็นตัวลงจะแปลงสภาพเป็น $\alpha'-C_2S$ ซึ่งเปลี่ยนเป็น βC_2S ที่อุณหภูมิต่ำลงและแปลงสภาพเป็น C_2S ที่อุณหภูมิปกติ แต่เนื่องจากในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ C_2S อยู่ในสภาพที่ไม่บริสุทธิ์ สารแปลกปลอมอื่นและอัตราการลดลงของอุณหภูมิทำให้การแปลงสภาพจาก βC_2S เป็น C_2S ไม่เกิดขึ้น ดังนั้น βC_2S จะมีเสถียรภาพที่อุณหภูมิปกติ C_2S มีลักษณะเป็นเม็ดกลมและแสดงลักษณะทวินนิง (Twinning) เมื่อผสมกับน้ำสามารถทำปฏิกิริยา

เกิดความร้อนขึ้น ความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_2S ก่อนข้างต่ำ มีค่าประมาณ 250 จูล/กรัม และการพัฒนากำลังของ C_2S ก่อนข้างช้าและช้ากว่า C_3S มาก คือ เริ่มให้กำลังหลังจาก 4 สัปดาห์ขึ้นไป ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกตแสดงในสมการ

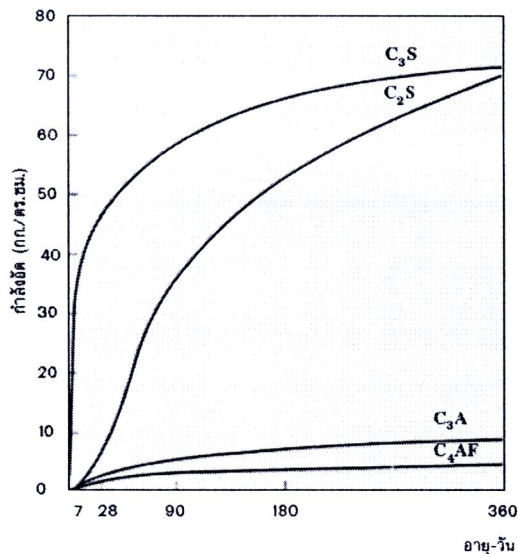


หรือ

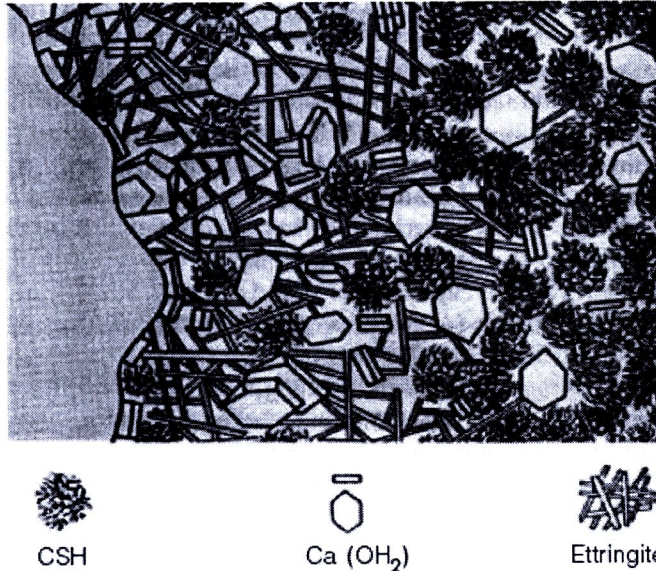


จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกตและไดแคลเซียมซิลิเกตนี้ จะเกิดเจลซึ่งเมื่อแข็งตัวจะมีลักษณะที่สำคัญ 2 ประการ คือ โครงสร้างไม่สม่ำเสมอและมีรูพรุน องค์ประกอบทางเคมีของ CSH นี้ ขึ้นอยู่กับ อายุ อุณหภูมิ และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ในที่นี้จะใช้ตัวย่อ CSH แทน แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate) ที่เกิดขึ้นไม่ว่าจะมีองค์ประกอบและโครงสร้างเป็นอย่างไร

$Ca(OH)_2$ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติเป็นด่างอย่างมาก คือมี P.H. ประมาณ 12.5 ซึ่งช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้อย่างดีมาก



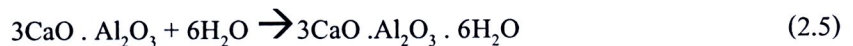
รูป 2.1 การพัฒนากำลังของสารประกอบหลัก (CPAC, 2549)



รูป 2.2 แผนภาพแสดงปฏิกิริยาของแคลเซียมซิลิเกต (CPAC, 2549)

(3) ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A)

C_3A มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 7 ถึง 15 ลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมมีสีเทาอ่อน ปฏิกิริยากับน้ำมีความรุนแรงมากและทำให้เพสต์ก่อตัวทันที ความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมีค่าสูงมาก คือ กว่า 880 จูล/กรัม การพัฒนากำลังของ C_3A จะเร็วมากคือสามารถพัฒนาได้ภายในวันเดียวแต่กำลังประลัยที่ได้มีค่าค่อนข้างต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับ C_3S หรือ C_2S ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนตแสดงในสมการ



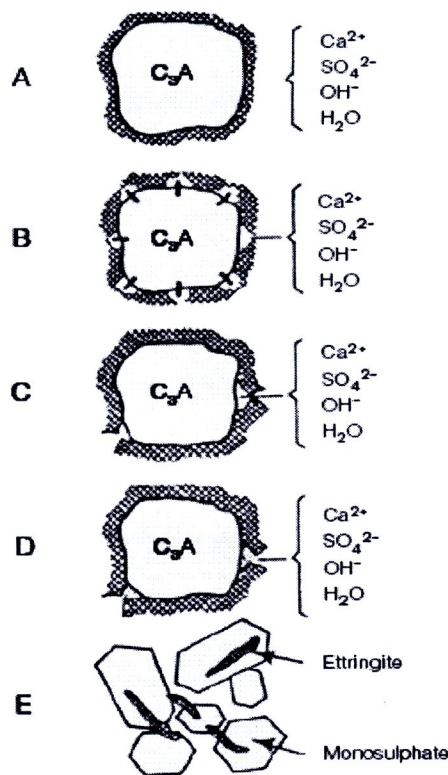
หรือ



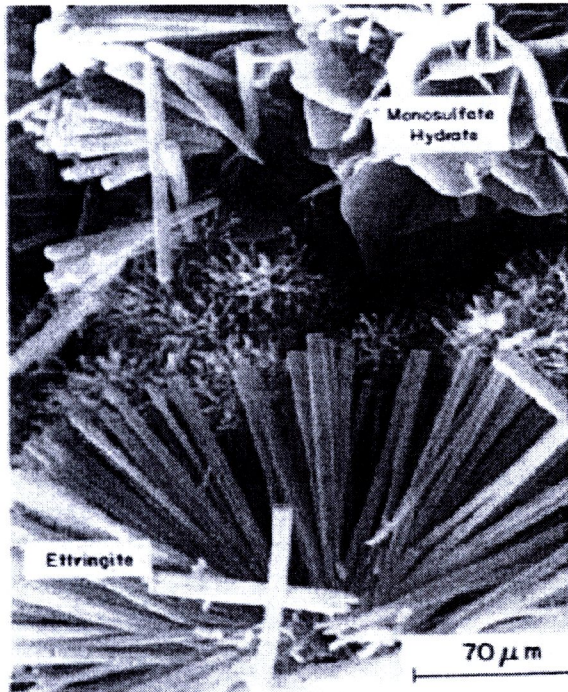
เพื่อหน่วงไม่ให้เกิดปฏิกิริยานี้อย่างรวดเร็ว จึงใส่ยิปซัม ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) เข้าไปในระหว่างขบวนการบดซีเมนต์ ยิปซัมจะทำปฏิกิริยากับ C_3A ก่อให้เกิดชั้นของเอททริงไกต์บนผิวของอนุภาค C_3A ดังสมการ



ชั้นของเอททริงไคต์ก่อให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของ C_3A และทำให้การก่อตัวในช่วงแรกนี้ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3S และ C_2S เป็นส่วนใหญ่ แต่ชั้นของเอททริงไคต์ไม่ได้หยุดการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A กล่าวคือ เมื่อเกิดเอททริงไคต์จะเกิดแรงดันที่มาจากการเพิ่มปริมาตรของของแข็ง แรงดันนี้จะทำให้ชั้นของเอททริงไคต์แตกออก และเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A แต่เมื่อเกิดการแตกตัว จะเกิดเอททริงไคต์ใหม่เข้าไปแทนที่เป็นการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันอีกครั้งหนึ่ง ขั้นตอนจะเป็นอย่างไร ไปจนกระทั่งซัลเฟตไอออนมีปริมาณไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิดเอททริงไคต์ จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A โดยเปลี่ยนเอททริงไคต์ไปเป็น โมโนซัลเฟตดังแสดงในรูป 2.3 และ 2.4



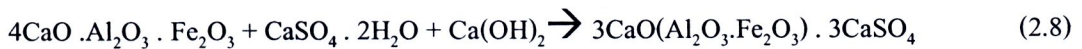
รูป 2.3 ขบวนการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A (CPAC, 2549)



รูป 2.4 ภาพขยายโมโนซัลเฟต และเอททริงไคต์ (CPAC, 2549)

(4) เตตระแคลเซียมอลูมิเนียมเฟอไรต์ (C_4AF)

C_4AF มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 5 ถึง 10 และอยู่ในสภาพของสารละลายแข็ง (Solid Solution) เมื่อผสมกับน้ำจะทำปฏิกิริยาและทำให้เพสต์ก่อตัวอย่างรวดเร็ว ความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมีค่าปานกลางประมาณ 420 จูล/กรัม โดย C_4AF พัฒนากำลังได้เร็วมาก เช่นเดียวกับ C_3A แต่กำลังประลัยที่ได้มีค่าค่อนข้างต่ำและต่ำกว่า C_3A เล็กน้อยปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตระแคลเซียมอลูมิเนียมเฟอไรต์แสดงในสมการ



2.1.2 โครงสร้างจุลภาคของผลิตภัณฑ์ไฮเดรชัน

(1) แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH)

CSH มีปริมาณมากที่สุดในส่วนประกอบของซีเมนต์เพสต์ ดังนั้นจึงมีความสำคัญต่อคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์มากที่สุด CSH เริ่มเกิดขึ้นมากเมื่อพ้นระยะคอร์แมนต์และเข้าสู่การทำ

ปฏิกิริยาอีกครั้งหนึ่ง โดยจะเกิดขึ้นของ CSH ขยายออกจากเม็ดปูนเข้าสู่ช่องว่างและเกิดภายใต้ผิวเดิมของเม็ดปูนและขยายเข้าสู่ภายในเม็ดปูน เมื่อเกิดปริมาณมากและเชื่อมโยงถึงกันก็จะสามารถรับกำลังได้ CSH มีอยู่ประมาณร้อยละ 50 ถึง 70 โดยปริมาตรและอยู่ในรูปของอนุภาคเล็กๆ มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตรทุกมิติ จากการใช้เครื่องถ่ายภาพขยายด้วยอิเล็กตรอน พบว่า CSH มีลักษณะเป็นผลึกที่หยาบมาก อัตราส่วนของแคลเซียมต่อซิลิกาใน CSH ไม่คงที่ขึ้นอยู่กับอายุ อุณหภูมิและปริมาณน้ำที่ใช้ทำปฏิกิริยา

(2) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH)

ซีเมนต์เพสต์ประกอบด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) ปริมาณร้อยละ 20 ถึง 25 โดยปริมาตรเป็นผลึกที่มีรูปร่างหลายแบบ มีทั้งผลึกเล็กที่มีขนาดด้านเท่า ผลึกใหญ่ที่มีลักษณะเป็นแผ่นผลึกบางยาว และผลึกที่มีรูปร่างระหว่างผลึกที่กล่าวมาทั้งหมด ถ้าสารละลายมีความเข้มข้นพอ CH จะตกผลึกซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างรวดเร็วอีกครั้งหนึ่ง และหลังจากนี้จะเพิ่มจำนวนและขยายตัวเข้าสู่โพรงคาปิลารี CH ขยายเข้าสู่ที่ว่างเท่านั้นและจะหยุดเมื่อไม่มีช่องว่างเหลืออยู่ CH เป็นสารประกอบที่ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความคงทนลดลงเนื่องจากเป็นสารที่ละลายได้และถูกชะล้างออกมาได้ง่าย นอกจากนี้การให้กำลังของ CH ยังค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังที่ได้จาก CSH

(3) แคลเซียมซัลโฟลูมิเนต

แคลเซียมซัลโฟลูมิเนตและแคลเซียมโมโนซัลโฟลูมิเนตมีอยู่ประมาณร้อยละ 10 ถึง 15 โดยที่แคลเซียมซัลโฟลูมิเนตหรือเอททริงไคต์เกิดขึ้นตั้งแต่เริ่มผสมปูนซีเมนต์กับน้ำ มีลักษณะเป็นเข็มยาวเกิดขึ้นรอบเม็ดปูนและขยายตัวเข้าไปในช่องว่าง เมื่อไม่มีช่องว่างเอททริงไคต์จะพยายามดันส่วนที่ล้อมรอบอยู่ออก ถ้าเกิดเอททริงไคต์ตอนที่ซีเมนต์เพสต์ยังเหลวอยู่จะไม่ใช่ปัญหา แต่ถ้าเกิดเมื่อซีเมนต์เพสต์แข็งตัวแล้วจะทำให้เกิดแรงดันและทำให้ซีเมนต์เพสต์ขยายตัวและแตกร้าวได้ เมื่ออิออนของซัลเฟตหมดเอททริงไคต์จะทำปฏิกิริยาและเปลี่ยนเป็นแคลเซียมโมโนซัลโฟลูมิเนตที่มีลักษณะเป็นแผ่น

(4) เม็ดปูนซีเมนต์ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา

โดยทั่วไปแล้วเม็ดปูนซีเมนต์จะมีขนาดตั้งแต่ 1 ถึง 50 ไมโครเมตร และมีส่วนน้อยที่มีขนาดใหญ่กว่า 50 ไมโครเมตรขึ้นไป เม็ดปูนซีเมนต์ขนาดเล็กสามารถทำปฏิกิริยาได้ดีและทำปฏิกิริยา

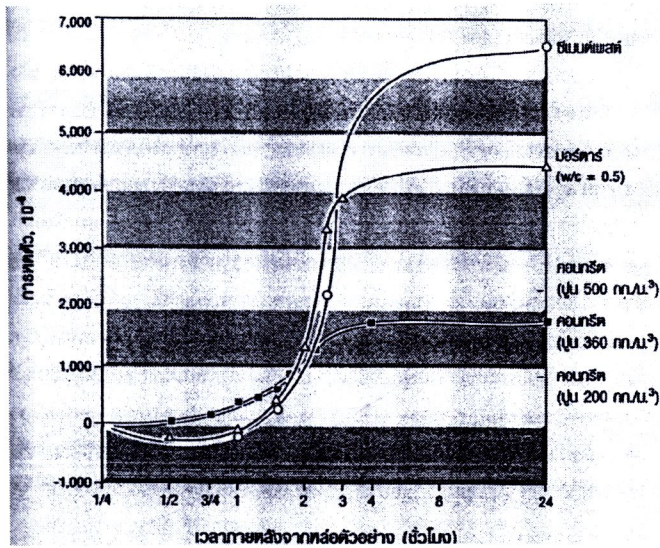
ได้ทั้งหมด ขณะที่เม็ดปูนขนาดใหญ่ต้องใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา ถึงแม้ว่าปฏิกิริยาจะยังคงมีต่อไป และผลผลิตไฮเดรชันที่เกิดขึ้นจะขยายเข้าสู่ช่องว่างที่เหลืออยู่ แต่เนื่องจากช่องว่างระหว่างอนุภาคมีจำกัด ดังนั้นเม็ดปูนที่ทำปฏิกิริยาไม่หมดก็ยังคงมีอยู่ในซีเมนต์เพสต์

2.2 การหดตัวของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

คอนกรีตนับตั้งแต่เริ่มผสมเสร็จใหม่ๆ ซึ่งอยู่ในสภาพเหลวจนกระทั่งสิ้นสุดอายุการใช้งาน จะมีการใช้น้ำในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันและมีการเคลื่อนที่เข้าหรือออกของน้ำได้ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางปริมาตรของคอนกรีต การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของคอนกรีตสามารถจำแนกได้

2.2.1 การหดตัวพลาสติก

การหดตัวพลาสติก (Plastic Shrinkage) คือ การหดตัวจากการสูญเสียน้ำในขณะที่คอนกรีตยังไม่แข็งตัวหรือยังอยู่ในสภาพพลาสติก การทำปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำทำให้ปริมาตรของคอนกรีตลดลงและเกิดการหดตัว เนื่องจากปฏิกิริยาของซีเมนต์ส่วนใหญ่เกิดขึ้นหลังการก่อตัวดังนั้นการหดตัวในช่วงนี้จึงเกิดค่อนข้างสูง แต่ภายหลังจากการที่ซีเมนต์เพสต์เริ่มแข็งตัวแล้ว การหดตัวจะเกิดได้ยากขึ้นเพราะซีเมนต์เพสต์เริ่มมีกำลังสูงขึ้น นอกจากนี้คอนกรีตยังสูญเสียน้ำโดยการระเหยที่ผิวหน้า และการดูดน้ำออกจากคอนกรีตหรือการที่พื้นดินที่แห้งข้างใต้คอนกรีตดูดน้ำออกจากคอนกรีต จึงทำให้คอนกรีตเกิดการหดตัวมากขึ้น การหดตัวพลาสติกของซีเมนต์เพสต์มีค่ามากกว่ามอร์ตาร์และคอนกรีตดังแสดงในรูป 2.5 และการหดตัวของคอนกรีตจะมากขึ้นเมื่อมีปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมสูงขึ้น



รูป 2.5 การหดตัวพลาสติกของซีเมนต์พิเศษมอร์ตาร์ และคอนกรีต
(ปริณูญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2549)

2.2.2 การหดตัวด้วยตัวเอง

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์จะยังคงมีต่อไปภายหลังจากการก่อตัว ในกรณีที่ไม่มี ความชื้นหรือไม่มีน้ำเข้าออก อาจทำให้ซีเมนต์เพสต์เกิดการหดตัว การหดตัวในลักษณะนี้เกิดขึ้น เนื่องจากการนำน้ำที่อยู่ในโพรงคาปิลารีมาใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันและเรียกการหดตัวชนิดนี้ว่า การหดตัวด้วยตัวเอง (Autogenous Shrinkage)

2.2.3 การหดตัวแห้ง

การหดตัวแห้ง (Drying Shrinkage) เกิดจากการที่น้ำในคอนกรีตระเหยออกมาทำให้ คอนกรีตเกิดหดตัว การหดตัวแห้งในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วเป็นการหดตัวที่สำคัญยิ่งกว่าการหดตัวที่ กล่าวมาแล้วข้างต้น หากการออกแบบและการก่อสร้างไม่ดีพอ จะทำให้เกิดรอยแตกร้าวและการบิดตัวของคอนกรีตได้ ซึ่งส่วนมากเกิดขึ้นเนื่องจากการยัดรี้งของโครงสร้างกลไกการแตกร้าวของการหดตัว แห้งมีดังนี้

(1) การสูญเสียน้ำของคอนกรีต (Capillary Water Loss)

การสูญเสียน้ำของคอนกรีตเป็นสาเหตุทำให้คอนกรีตเกิดการหดตัว โดยกลไกการหด

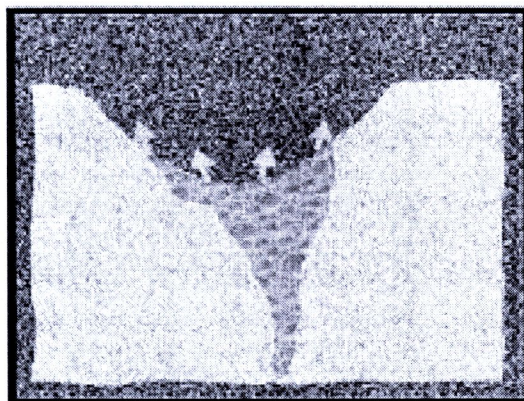
ตัวของคอนกรีตนั้นเกิดจากน้ำที่เต็มเต็มอยู่ภายในช่องว่างของคอนกรีต (Capillary Pore) เกิดการระเหยออก เนื่องจากสถานะแวดล้อมที่รุนแรง ได้แก่ อุณหภูมิที่สูง หรือความชื้นสัมพัทธ์ที่ต่ำทำให้เกิดปรากฏการณ์แรงตึงผิวในช่องว่างคาปิลลารีเกิดขึ้น (Capillary Surface Tension) จึงทำให้คอนกรีตที่อยู่โดยรอบช่องว่าง Capillary นั้นเกิดการอัดตัวเข้ามาเนื่องจากการรักษาสมดุลของแรง เป็นสาเหตุทำให้คอนกรีตเกิดการหดตัวนั่นเอง ดังแสดงในรูป 2.6 และ 2.7

(2) การเกิดการยึดรั้ง (Restraint)

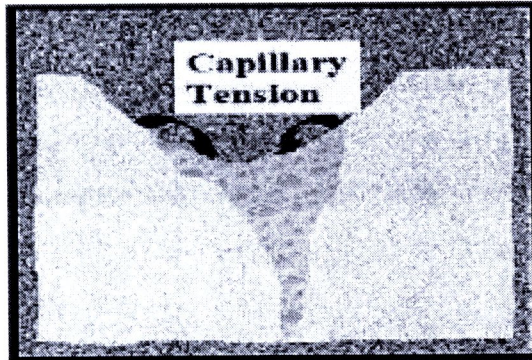
โดยปกติแล้วการเกิดการหดตัวของคอนกรีตเพียงอย่างเดียวนั้นไม่สามารถทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวได้ ถ้าคอนกรีตเกิดการหดตัวแบบอิสระจะไม่มีเกิดการแรงดึงภายในเกิดขึ้น จึงไม่มีการแตกร้าวจากการหดตัว แต่ในการใช้งานในชีวิตจริง เป็นไปไม่ได้ที่คอนกรีตจะไม่มีเกิดการยึดรั้งเกิดขึ้นซึ่งการยึดรั้งของโครงสร้างคอนกรีตแบ่งเป็น 2 ประเภทหลักๆ ได้แก่

ก) การยึดรั้งภายใน (Internal Restraint)

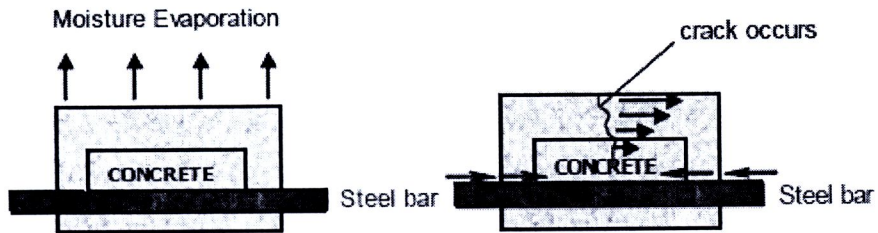
การยึดรั้งภายในเกิดจากการหดตัวภายในที่ไม่เท่ากันของคอนกรีต การออกแบบเหล็กเสริมที่มีปริมาณมากเกินไปและไม่เหมาะสม ก็เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวเนื่องจากการยึดรั้งภายในอีกด้วย ดังแสดงในรูป 2.8



รูป 2.6 การระเหยของน้ำในช่องว่าง Capillary (ศักรินทร์ เหลืองกำจร, 2007)



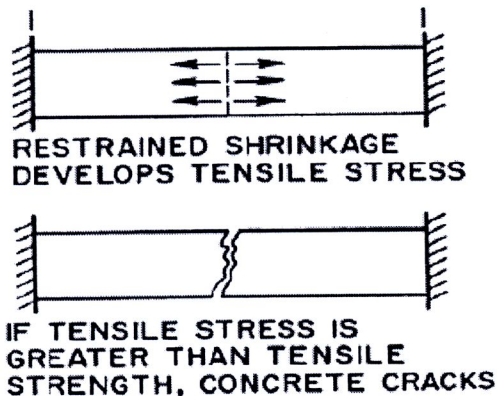
รูป 2.7 แรงดึง Capillary ทำให้คอนกรีตหดตัว (ศักรินทร์ เหลืองกำจร, 2007)



รูป 2.8 กลไกการเกิดการแตกร้าวจากการยัดรีงภายใน (ศักรินทร์ เหลืองกำจร, 2007)

ข) การยัดรีงภายนอก (External Restraint)

การยัดรีงภายนอกเกิดจากการหดตัวของโครงสร้างของคอนกรีต แล้วมีการยัดหรือค้ำไว้ด้วยโครงสร้างคอนกรีตอื่นหรือโครงสร้างประเภทอื่น ซึ่งการยัดรีงภายนอกนี้ก็เป็นอีกสาเหตุที่ทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวเนื่องมาจากการหดตัวแบบแข็งเช่นกัน

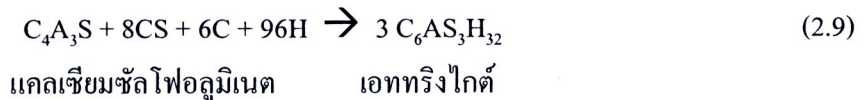


รูป 2.9 กลไกการเกิดการแตกร้าวจากการยัดรีงภายนอก (ศักรินทร์ เหลืองกำจร, 2007)

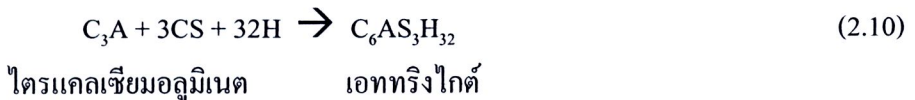
ดังนั้นการเกิดการแตกร้าวเนื่องมาจากการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต จึงเกิดจากคอนกรีตหดตัวเนื่องมาจากการสูญเสียน้ำประกอบกับมีการยึตรังเกิดขึ้น จากกลไกดังกล่าวจะทำให้คอนกรีตเกิดหน่วยแรงดึงภายใน เมื่อหน่วยแรงดึงภายในมากกว่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีต จะส่งผลให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวเกิดขึ้น และจะทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหายในภายหลัง

2.3 ซีเมนต์ที่สามารถขยายตัวได้ (Expansive Cement)

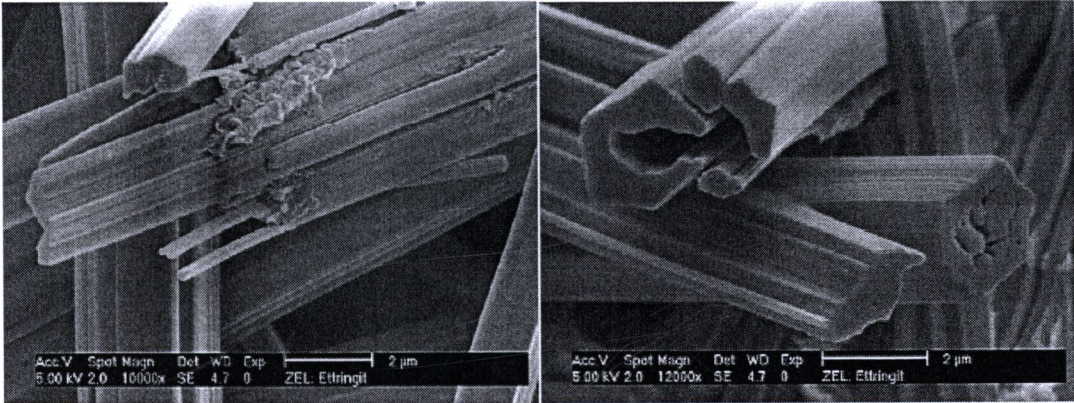
ปูนซีเมนต์ที่ขยายตัวได้จะประกอบด้วยส่วนประกอบของสารเพิ่มการขยายตัวร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา สารเพิ่มความเสถียรซึ่งใช้ละลาย และสารผสมเพิ่มประเภท F โดยที่สารเพิ่มการขยายตัวจะมีส่วนประกอบของ แคลเซียมซัลโฟลูมิเนต (C_4A_3S) เป็นสารประกอบหลัก เมื่อนำสารเพิ่มการขยายตัวมาผสมกับปูนซีเมนต์และน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันก่อนให้เกิดสารประกอบเอททริงไคต์ ($C_6AS_3H_{32}$) ซึ่งเป็นสารที่ทำให้ซีเมนต์เกิดการขยายตัว ปฏิกิริยาเคมีดังกล่าวแสดงในสมการ



โดยปกติแล้ว เมื่อนำเอาปูนซีเมนต์ธรรมดามาผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยที่สารประกอบ ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) ในปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับน้ำก่อนให้เกิดสารประกอบเอททริงไคต์ ดังแสดงในสมการ



จะเห็นว่าสารประกอบ เอททริงไคต์ จะเกิดขึ้นทั้งจากส่วนประกอบของสารเพิ่มการขยายตัวและปูนซีเมนต์ธรรมดา แต่ในปูนซีเมนต์ธรรมดาจะมีปริมาณของ C_3A อยู่เพียง 10% จึงทำให้ เอททริงไคต์ ที่เกิดขึ้นในส่วนนี้มีปริมาณน้อย แต่ปริมาณเอททริงไคต์ส่วนที่เพิ่มขึ้นจากสารเพิ่มการขยายตัวจะสามารถนำมาชดเชยกับคุณสมบัติของซีเมนต์ธรรมดาที่เกิดการหดตัวเมื่ออยู่ในสภาพแข็ง

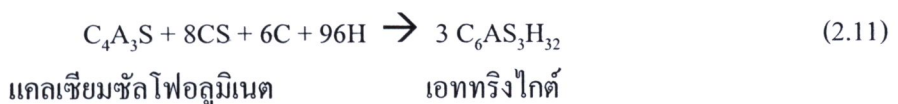


รูป 2.10 แสดงถึงรูปร่างผลึกของเอททริงไคต์ที่มีลักษณะคล้ายเข็มและมีหน้าตัดเป็นรูปหกเหลี่ยม

(Jochen Stark และ Katrin Bollmann, 1995)

2.4 ทฤษฎีการขยายตัวของซีเมนต์

การขยายของเพสต์ถูกเชื่อมโยงกับการก่อตัวของแคลเซียมซัลโฟลูมิเนตไฮเดรต นั่นก็คือ เอททริงไคต์ มีหลายทฤษฎีพยายามอธิบายถึงการก่อตัวทางกลของเอททริงไคต์ ทฤษฎีการขยายตัวสามารถแบ่งได้เป็น 2 กรณี ได้แก่ ทฤษฎีการเจริญเติบโตของผลึก (Crystal Growth Theory) และทฤษฎีการบวมตัว (Swelling Theory) ปฏิริยาไฮเดรชันก่อให้เกิดเอททริงไคต์จากปฏิริยา Stoichiometric ซึ่งแสดงในสมการ (2.11)



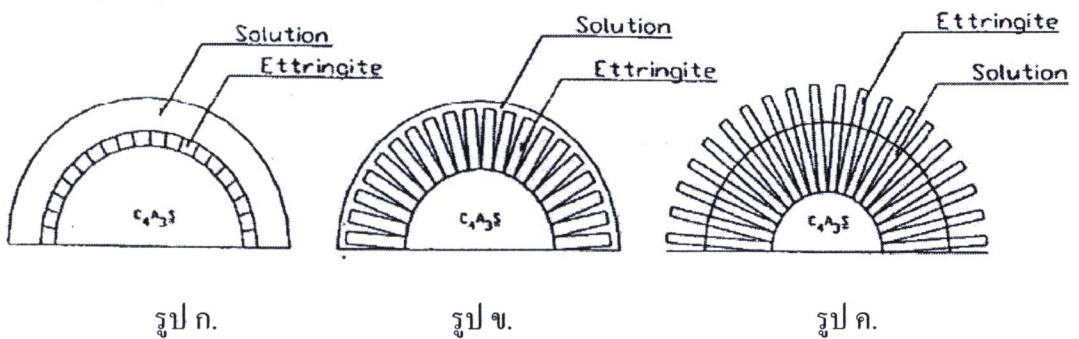
2.4.1 ทฤษฎีการเจริญเติบโตของผลึก (Crystal Growth Theory)

การขยายตัวมีสาเหตุมาจากการเจริญเติบโตของผลึกเอททริงไคต์ ซึ่งก่อตัวบนพื้นผิวของอนุภาคการขยายตัวหรือในสารละลาย ดังนั้นแรงขยายตัว มีสาเหตุมาจากแรงดันของผลึก ทันทีที่ปฏิริยาเริ่มขึ้นพื้นผิวของอนุภาคการขยายตัว ($\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$) จะถูกคลุมด้วยเอททริงไคต์อย่างรวดเร็ว ปฏิริยานี้ถูกเรียกว่า “ปฏิริยา Topochemically” ที่เพิ่มเติมจากปฏิริยาไฮเดรชันเอททริงไคต์จะเพิ่มขึ้นความหนาของอนุภาค การขยายตัวจึงมีสาเหตุมาจากความหนาของชั้นที่มากกว่าชั้นของสารละลายที่อยู่โดยรอบ มันจะผลักอนุภาคอื่นๆ ให้แยกออกจากกัน ดังนั้นสาเหตุทั้งหมดนี้จึงเกิดการขยายตัว การขยายตัวจะยังคงดำเนินต่อไปจนกว่าอนุภาคการขยายตัวหรือซัลเฟตถูกทำให้ละลายลด

น้อยลง แบบจำลองการขยายตัวจะแบ่งซีเมนต์การขยายตัวได้ 3 ระบบ ได้แก่ สารละลาย เมทริกซ์ และ อนุภาคขยายตัว

- สารละลาย : รวมน้ำ สารละลายซัลเฟต หินปูนและสารเจือปนอื่นๆ
- เมทริกซ์: รวมอนุภาคแคลเซียมซิลิเกตที่ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำ C_3S และ C_2S
- อนุภาคขยายตัว : ประกอบด้วยอนุภาคซีเมนต์ที่เป็นทรงกลม แต่ละอนุภาคถูก

ล้อมรอบด้วยอนุภาคสม่ำเสมอโดยชั้นบางๆ ของสารละลายที่มีความหนาเหมือนกัน สำหรับแต่ละอนุภาคแต่แตกต่างกันในแต่ละขนาด



รูป 2.11 แสดงถึงการขยายตัวของเอททริงไคต์ (วิศวะ จักร ไพศาล, 2544)

อนุภาคทรงกลม C_4A_3S สมมติให้มีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากัน ปฏิกริยาระหว่างอนุภาค C_4A_3S และสารละลายที่ผลิตเอททริงไคต์ อนุภาคทรงกลม C_4A_3S ปกคลุมอย่างสม่ำเสมอด้วยผลึกเอททริงไคต์ ความยาวของผลึกจะเพิ่มขึ้นแต่จำนวนของเอททริงไคต์และความหนายังคงเท่าเดิมกระบวนการนี้จะดำเนินต่อไปจนกว่าจะมีสารตั้งต้นในปริมาณ Stoichiometric เริ่มต้นการขยายตัวเมื่อความยาวของผลึกมีขนาดใหญ่กว่าความหนาของชั้นสารละลายและผลึกเริ่มออกแรงดันด้านบริเวณรอบๆ เมทริกซ์

โดยมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของ Richards และ Helmuth (1977) ซึ่งได้ใช้ทฤษฎีนี้ในการศึกษากลไกของการขยายตัวในซีเมนต์ขยายตัวได้ ในงานวิจัยของพวกเขา เขาถือว่าการขยายตัวของอนุภาค C_3A และ C_4A_3S เป็นทรงกลมและล้อมรอบด้วยสารละลายที่มีความหนาสม่ำเสมอ ประกอบด้วยซัลเฟตที่ละลาย แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และน้ำ พวกเขาสันนิษฐานว่าทันทีที่เริ่มเกิดปฏิกิริยา พื้นผิวของอนุภาคที่ขยายตัว C_4A_3S และ C_3A จะถูกล้อมรอบอย่างรวดเร็วโดยผลิตภัณฑ์ที่เคลือบอย่าง

หนาแน่น นั่นก็คือ เอททริงไคต์ นอกจากนี้จะเกิดอย่าง Topochemical เพิ่มความหนาของชั้น เมื่อความหนาของชั้นสารละลายเกินบริเวณ โดยรอบแล้วมันจะผลักดันอนุภาคอื่นๆ ส่งผลให้เกิดการขยายตัวทั้งหมด นี่คือนิวเคลียสการเจริญเติบโตของผลึก การขยายตัวจะดำเนินต่อไปจนกว่าทั้งอนุภาคขยายตัวหรือซัลเฟตที่ละลายแล้วจะหมดลง

Ogawa และ Roy (1982) ได้ศึกษาในระดับจุลภาคของปฏิกิริยาไฮเดรชัน C_4A_3S พบว่าที่สภาวะแรกๆ ของไฮเดรชัน การเกิดเอททริงไคต์มีอนุภาคเล็กมาก ไม่สม่ำเสมอรอบ C_4A_3S ต่อมาอนุภาคนี้ถูกเปลี่ยนเป็นผลึกรูปร่างคล้ายเข็มวางตัวเป็นแฉกๆ รอบอนุภาค C_4A_3S ล้อมรอบรูพรุนระหว่างพวกมัน การขยายตัวเริ่มขึ้นเมื่อบริเวณปฏิกิริยาตัดผ่านกันและความดันได้เบ่งต่อๆกัน การสังเกตนี้แตกต่างจากแบบจำลองทางกลไกระดับจุลภาค ที่ถือว่าชั้นเอททริงไคต์มีความหนาแน่นและปราศจากรูพรุน นี่คือน่าจะเป็นเหตุผลว่าทำไมแบบจำลองได้คำนวณว่าค่าความเครียดจากการขยายตัวมีค่าน้อยเปรียบเทียบกับการวัดจากการทดสอบ

Schwietz et al. (1966) ได้รายงานว่าผลึกเอททริงไคต์ก่อตัวบนผิวของอนุภาค C_3A โดยที่ปราศจาก C_3A ที่ถูกทำให้ละลายล่วงหน้าแล้วได้ พวกเขาพบว่าผลึกเหล่านี้ก่อตัวในวินาทีแรกบนผิวของอนุภาค C_3A เนื่องจากปริมาตรของการเกิดเอททริงไคต์มีค่ามากกว่าส่วนของ C_3A ที่ใช้ไป ชั้นของเอททริงไคต์จะไม่คงอยู่บนผิวของอนุภาค C_3A ในท้ายที่สุดมันจะดันออกมา นี่คือนิวเคลียสที่เกี่ยวข้องกับการตกผลึกในการก่อตัวของเอททริงไคต์

Bentur และ Ish-Shalom (1974) ได้ใช้ทฤษฎีการเจริญเติบโตของผลึกในการศึกษากลไกการขยายตัวของอนุภาค C_4A_3S บริสุทธิ์ เช่นเดียวกับ Richards and Helmuth พวกเขาสันนิษฐานว่าการก่อตัวของเอททริงไคต์บนผิวของอนุภาค C_4A_3S ซึ่งมีรูปร่างเป็นทรงกลม ไม่เหมือนกับแบบจำลองกลไกระดับจุลภาค อนุภาคเหล่านี้ถูกพิจารณาให้มีขนาดเท่ากัน นอกจากนี้พวกเขายังถือว่าชั้นเอททริงไคต์มีผลึกที่สานเป็นตาข่ายละเอียดล้อมรอบรูพรุนระหว่างพวกมัน เหมือนการสังเกตของ Ogawa และ Roy

2.4.2 ทฤษฎีการบวมตัว (Swelling Theory)

การขยายตัวได้มาจากการบวมของเอททริงไคต์ การขยายตัวของเอททริงไคต์เกิดจากการผ่านสารละลายทางกล เป็นเหตุให้ผลึกของเอททริงไคต์เป็นเจลและคอลลอยด์อนุภาคเอททริงไคต์ต้องมีพื้นที่ผิวสัมผัสเฉพาะที่ใหญ่และมีโมเลกุลของน้ำ สามารถดูดซับเข้าไปในพื้นที่ผิวอนุภาคได้ การดูดซับน้ำจะก่อให้เกิดความดันของการบวมมาก นำไปสู่การขยายตัวทั้งหมดของระบบโดยปราศจาก

การเปลี่ยนแปลงใดๆ ในผลึกที่ที่แย่งพาดกันไปมาของเอททริงไคต์ เอททริงไคต์ที่เป็นอนุภาคละเอียด จะขยายได้มากกว่าเอททริงไคต์ที่เป็นเนื้อหยาบ เพราะมีพื้นที่ผิวสัมผัสเฉพาะใหญ่กว่าและสามารถดูดซับน้ำได้มากกว่าบนพื้นฐานของข้อมูลการทดสอบ Mehta (1973) ได้เสนอสมมติฐานกลไกของการขยายตัวที่เกิดจากการก่อตัวของผลึกเอททริงไคต์ อันดับแรกเขาเสนอว่ารูปแบบของการเกิดเอททริงไคต์เป็นไปตามกลไกตลอดสารละลาย อันดับที่สองในการมีอยู่ของ Ca(OH)_2 ที่อิ่มตัว อัตราของปฏิกิริยาไฮเดรชันของอลูมินेटลดลงอย่างมากทำให้เกิดผลึกเอททริงไคต์ที่มีลักษณะเหมือนเจลและมีขนาดคอลลอยด์

เนื่องจากอนุภาคคอลลอยด์มีพื้นที่ผิวจำเพาะที่ใหญ่ โมเลกุลน้ำจะถูกดูดซับบนผิวของอนุภาคเอททริงไคต์ ก่อให้เกิดแรงดันบวมตัวที่แข็งแรงนำไปสู่การขยายตัวโดยรวมของระบบปราศจากการเปลี่ยนแปลงในโครงผลึกของเอททริงไคต์

ในกรณีที่ไม่มีหินปูน Mehta (1973) ได้เพิ่มเฟสอลูมินेटที่จะทำให้มีน้ำเป็นส่วนประกอบได้อย่างรวดเร็ว การก่อตัวของผลึกเอททริงไคต์จะมีขนาดใหญ่ แผ่นยวบาง ผลึกนี้จะไม่ก่อให้เกิดการขยายตัวเพราะมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อย การดูดซับน้อยกว่าจำนวนของโมเลกุลน้ำบนผิวของพวกมัน

Mehta และ Wang (1982) ดำเนินการทดสอบอื่นๆตามแนวทางนี้ พวกเขาสังเกตว่าการผสมที่ประกอบด้วยผลึกเอททริงไคต์ที่ละเอียดขยายอย่างมีนัยสำคัญมากกว่าผสมกับผลึกเอททริงไคต์ที่หยาบ ลักษณะนี้เป็นคุณสมบัติที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะขนาดใหญ่ของผลึกเอททริงไคต์ละเอียด ดูดซับน้ำได้มาก

ในการศึกษาปฏิกิริยาไฮเดรชันของระบบ $\text{C}_4\text{A}_3\text{S} - \text{CSH}_2$ ของระบบที่มีและไม่มีหินปูน Mehta (1982) ได้ตรวจสอบการพัฒนาในโครงสร้างจุลภาคและได้สรุปออกมาโดย Okushima et al. (1968) เกี่ยวกับขนาดของผลึกเอททริงไคต์ กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดแสดงให้เห็นถึงการมีอยู่ของหินปูน ผลึกเอททริงไคต์มีความยาวประมาณ 1 ไมครอนและกว้าง $\frac{1}{4}$ ไมครอน ถ้าไม่มีหินปูนพวกมันจะใหญ่ โดยยาวประมาณ 6-8 ไมครอนและกว้าง $\frac{1}{2}$ ไมครอน Mehta ได้รับผลคล้ายๆกันเมื่อ CA ถูกนำมาใช้แทน $\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$

ในการศึกษาอื่นๆ Mehta และ Hu (1978) ได้สังเกตว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำที่ดูดซับสอดคล้องกับปริมาตรที่เพิ่มขึ้นของการขยายตัว ดังนั้นจึงให้การสนับสนุนกับสมมติฐานของเขา

ในงานวิจัยของ Chen และ Mehta (1982) ทำการหาโดยใช้มุมน้อย วิธี X-ray Scattering (SAXS) ที่พื้นที่ผิวของเอททริงไคต์ $153 \text{ m}^2/\text{g}$ Okushima et al (1968) ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ ทำการหาค่าน้อยมากโดยการดูดซับ N_2 $20 \text{ m}^2/\text{g}$ ค่าเหล่านี้ โดยเฉพาะค่าส่วนหลัง มีค่าน้อยกว่าเจล C-S-H ซึ่งมีประมาณ $300 \text{ m}^2/\text{g}$ เนื่องจากผลึกเอททริงไคต์มีเนื้อหยาบกว่าการตกผลึกเจล C-S-H

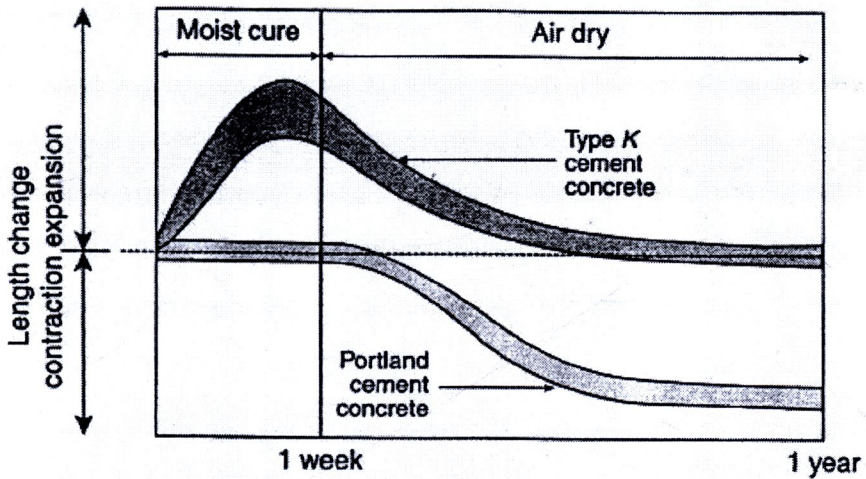
เช่นเดียวกับกลไกของ Power (1965) ของการหดตัว มันมีความเป็นไปได้ที่วุ้นน้ำดูดซับบนพื้นผิวของเอททริงไคต์สามารถวางที่พื้นผิวในแรงดึง และในรูปร่างทรงสี่เหลี่ยมเป็นแรงอัด นี่ก็คือผลในการหดตัว กลไกการพองตัวอาจทำให้แรงแวนเดอวาล์วลดลงของแรงดึงดูระหว่างผลึกเอททริงไคต์ นี่น่าจะเป็นผลของการขยายตัวสุทธิทั้งหมด การชดเชยสำหรับการหดตัวมีสาเหตุจากแรงดึงผิวของผลึกเอททริงไคต์

2.5 คอนกรีตชดเชยการหดตัว (Shrinkage-Compensating Concrete)

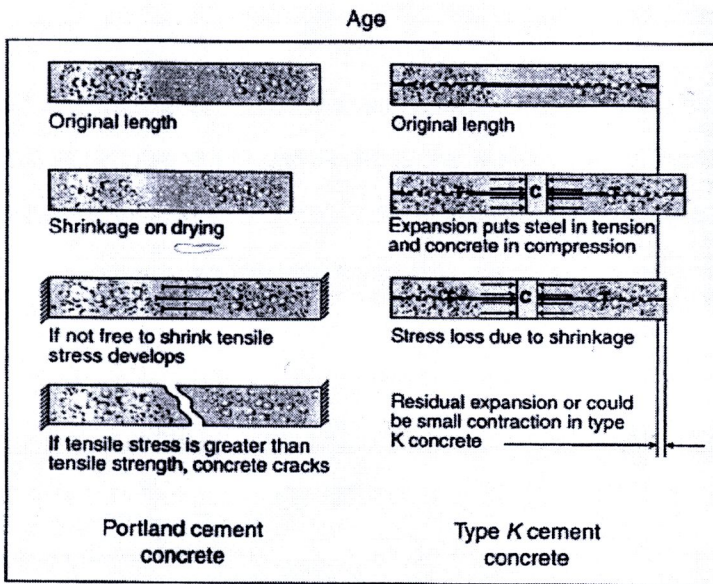
2.5.1 นิยามและแนวคิด

ACI Committee 223 ให้คำนิยาม shrinkage-compensating concrete คือปูนซีเมนต์ที่มีการขยายตัวเมื่อเหล็กเสริมมีการยึดรั้งอย่างเหมาะสม อัตราการขยายจะเท่ากับหรือมากกว่าการหดตัวแห้งเล็กน้อย จะมีการเหนี่ยวนำให้เกิดความเค้นจากการหดตัวในคอนกรีตช่วงการขยายตัวและการหดตัวแห้งจะลดความเค้นเหล่านี้ลง

การบรรยายถึงแนวคิดในรูป 2.12 และ รูป 2.13 ได้เปรียบเทียบคุณสมบัติของซีเมนต์พอร์ตแลนด์กับปูนซีเมนต์คอนกรีตชนิดขยายตัว ประเภท K ระหว่างการบ่มความชื้นและช่วงการทำให้แห้ง คอนกรีตชดเชยการหดตัวนำมาใช้เพื่อลดและจัดการแตกร้าวจากการหดตัวแห้งในคอนกรีตเสริมเหล็ก ปูนซีเมนต์ ประเภท K ผสมน้ำจะมีการรวมตัวของเอททริงไคต์เป็นจำนวนมาก เมื่อคอนกรีตก่อตัวและมีความแข็งแรงพอ มันจะยึดกับเหล็กเสริมและจะเริ่มขยายตัวถ้ามีปริมาณการบ่มน้ำเพียงพอ ตั้งแต่ที่คอนกรีตเริ่มยึดกับเหล็ก การขยายตัวภายใต้การยึดรั้งจะส่งผลให้เหล็กเสริมมีแรงดึงลดลง ในขณะที่คอนกรีตจะมีการอัดแรงมากขึ้น เมื่อชิ้นส่วนต่างๆเริ่มแห้งในช่วงการบ่มความชื้นในตอนสุดท้ายนั้นจะมีการหดตัวคล้ายกับซีเมนต์พอร์ตแลนด์อย่างไรก็ตามการหดตัวจะเริ่มปล่อยแรงอัดก่อน จะเกิดความเค้นดึงในคอนกรีต เนื่องจากการหดตัวแห้งจะลดลง



รูป 2.12 เปรียบเทียบความยาวที่เปลี่ยนแปลงระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ กับ ซีเมนต์ประเภท K (Mehta Monteiro, 3rd edition)



รูป 2.13 แสดงถึงซีเมนต์ประเภท K ต่อต้านการแตกร้าวอันเนื่องมาจากการหดตัวแบบแห้ง (Mehta Monteiro, 3rd edition)

2.5.2 ลักษณะสำคัญ

การหดตัวแห้งเป็นคุณสมบัติหลักของแกลเซียมซิลิเกตไฮเดรตซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีปฏิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์ ดังนั้นวัสดุคอนกรีตขนาดเล็กและขนาดกลาง

อาจเกิดการแตกร้าวจากการหดตัวแห้งภายใน 2-3 เดือน รอยแตกร้าวในคอนกรีตนั้นเราอาจจะมองไม่เห็น และอาจจะเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำสามารถซึมเข้าไปในคอนกรีต ทำให้โครงสร้างไม่ค่อยมีความคงทนเท่าที่ควร แต่มีบางกรณีที่มีการแทรกซึมของน้ำช่วยรักษาโครงสร้างของคอนกรีต

การออกแบบและการก่อสร้างในปัจจุบัน คอนกรีตมักจะเกิดการแตกร้าว ทางแก้ไข อาจทำได้จากการเลือกสรรวัสดุและส่วนผสมคอนกรีตที่ได้สัดส่วน ซึ่งจะเกิดการหดตัวน้อยลง, จัดเตรียมข้อต่อที่แผ่นปูพื้นอย่างเพียงพอ หรือจะเป็นเหล็กเสริมที่ใช้กับคอนกรีต

2.5.3 วัสดุและส่วนประกอบ

จาก ACI Committee 223 กล่าวว่า การใช้วัสดุและกระบวนการที่เหมือนกันเพื่อใช้ในการสร้างซีเมนต์ปอร์ตแลนด์คุณภาพสูง จำเป็นต้องใช้คอนกรีตชดเชยการหดตัว ยิ่งกว่านี้ต้องมีการบ่มความชื้นต่อเนื่องอีกอย่างน้อย 7 วันหลังจากการวางระดับเพื่อขยายตัว และการออกแบบโครงสร้างต้องคำนึงถึงการขยายตัวเพื่อจะชดเชยจากการหดตัวแห้งอีกด้วย

ACI Committee 223, Recommended Practice for the Use of Shrinkage-Compensating Cements, การขยายตัวในคอนกรีตอาจเกิดได้จากการตัดแปลงการใช้งานของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ปูนซีเมนต์ ประเภท K ซึ่งประกอบด้วย C_4A_3S ซึ่งเป็นส่วนผสมหลักของการก่อตัวของเอททริงไคต์จาก reactive aluminate) หรือจากการเพิ่มปูนซีเมนต์ขยายตัวชนิดอื่นเข้าไปใน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

การทำส่วนผสมให้เข้ากันของคอนกรีตชดเชยการหดตัวนั้นต้องมีการใส่ฟองอากาศเหมือนกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อทำละลายน้ำแข็งและจัดการจับตัวกันของเกล็ด ถ้ามี แคลเซียมคลอไรด์, เถ้าลอย, วัสดุปอชโซลานและสารลดน้ำมากเกินไป จะลดการขยายตัวอันเกิดจากความไม่สมดุลระหว่างอัตราการรวมตัวของเอททริงไคต์และอัตราความแข็งแรงในคอนกรีต

เนื่องจากการรวมตัวของเอททริงไคต์ต้องใช้น้ำเป็นปริมาณมาก และประมาณ 10% ถูกนำมาใช้กับปูนซีเมนต์คอนกรีตชนิดขยายตัว ประเภท K แต่ไม่มีผลกระทบใดๆที่เกิดความเสียหาย นอกจากนี้จากรายงานของ ACI 223 และจากรายงานอื่นๆ ได้กล่าวถึงอัตราส่วนผสม, การออกแบบและวิธีการก่อสร้างที่มีประโยชน์มากเกี่ยวกับโครงสร้างคอนกรีตชดเชยการหดตัว

2.5.4 คุณลักษณะ

1. ลักษณะที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติ เนื่องจากเอททริงไคต์มีคุณสมบัติซึมซับน้ำได้ดี ทำให้ส่วนผสมของคอนกรีตแน่นและยึดเกาะกันสูง เมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ อัตราการใช้ส่วนผสมกับปูนซีเมนต์ค่อนข้างสูงกว่า โดยอัตราการยุบตัวจะอยู่ที่ 100-150 ม.ม. สำหรับโครงสร้างองค์อาคาร เช่น แผ่นปูพื้น, คาน, กำแพงเสริมเหล็ก และเสา เพราะมันจะเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

2. การสูญเสียค่าการยุบตัวอันเนื่องมาจากความร้อน (คอนกรีตมีอุณหภูมิอยู่ที่ 32 °C หรือสูงกว่า) และสภาพอากาศแห้ง เป็นปัญหาสำหรับคอนกรีตชดเชยการหดตัวมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จำนวนการก่อตัวของเอททริงไคต์และอัตราการรวมตัวของมันอาจก่อให้เกิดการยุบตัวที่รุนแรงและก่อตัวอย่างรวดเร็ว

3. การหดตัวแบบพลาสติก เนื่องจากไม่มีน้ำปูนบนผิว การแข็งตัวอย่างรวดเร็ว การก่อตัวของคอนกรีตภายใต้อุณหภูมิสูง อากาศแห้งและลมแรง อาจเกิดปัญหาการแตกร้าวจากการหดตัวแบบพลาสติกในคอนกรีตชดเชยการหดตัว เมื่อคอนกรีตสัมผัสกับพื้นผิวที่สามารถดูดซึมได้ อย่างเช่น ดินแห้ง หรือคอนกรีตเก่า บริเวณฐานควรจะทำให้ชุ่มน้ำไว้ในตอนเย็นก่อนการวางระดับ อีกประการหนึ่งคือควรหลีกเลี่ยงการวางระดับล่าช้าที่ไซต์งานเมื่อมีการใช้คอนกรีตผสมเสร็จ สำหรับแผ่นปูพื้น การฉีดน้ำหรือคลุมผิวหน้าด้วยผ้าเปียกหลังจากการวางระดับเป็นการช่วยป้องกันการสูญเสียความชื้นได้

4. ความแข็งแรงการพัฒนากำลังอัด กำลังดึง และกำลังคัดในคอนกรีตชดเชยการหดตัว จะได้รับอิทธิพลอย่างเดียวกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดย Polivka และ Wilson เป็นผู้ค้นพบอัตราส่วนการให้น้ำกับปูนซีเมนต์ (ในอัตรา 0.4-0.65) กำลังอัดของปูนซีเมนต์คอนกรีต ประเภท K จะสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ส่วนในกรณีของคอนกรีตชดเชยการหดตัว แม่แบบคอนกรีตเนื้อแน่นการเปลี่ยน โชนผิวหน้าที่แข็งแรงกว่าระหว่างซีเมนต์เปียกและหินบดอย่างหยาบ เป็นปัจจัยที่ทำให้แข็งแรงกว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซึ่งมีอัตราการใช้เท่ากับปูนซีเมนต์เท่าๆกัน

5. การเปลี่ยนแปลงปริมาตร ลักษณะการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตชดเชยการหดตัวเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อัตราและปริมาณการหดตัวมาจากปัจจัยเดียวกัน เช่น ขนาดและชนิดของหินบดละเอียด และปริมาณน้ำ อย่างไรก็ตาม ในกรณีของคอนกรีตชดเชยการหดตัว ผลจากอัตราส่วนของน้ำกับปูนซีเมนต์ช่วงการขยายตัวระหว่างการเริ่มบ่มด้วยไอน้ำค่อนข้างสำคัญ Polivka และ Wilson แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนน้ำกับปูนซีเมนต์ที่ 0.5 หรือน้อยกว่า ปริมาณการขยายตัวในช่วงแรกจะมีการขยายตัวตกร้าง แม้จะมีการหดตัวแห้งไปแล้ว 2 เดือน โดยส่วนมากปริมาณการหดตัวจะลดลงไปพร้อมกับอัตราส่วนของน้ำกับปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น (0.76)

6. ความทนทานสาเหตุการขยายตัวเหนียวรั้งของคอนกรีต การขาดน้ำปูน หรือรอยแตกเล็กๆ น้อยๆ จากการหดตัวแบบแห้ง คอนกรีตชดเชยการหดตัวจะให้เนื้อที่แน่นกว่า และของเหลวจะซึมผ่านไม่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนน้ำกับปูนซีเมนต์ที่เท่ากันที่ 0.4 ถึง 0.6 จากการทดลองในห้องปฏิบัติการและภาคสนามแสดงให้เห็นว่าปูนซีเมนต์คอนกรีต ประเภท K จะมีความทนทานต่อการกัดกร่อนและการทำลายด้วยสารเคมีสูงกว่า จากการทดสอบจะเห็นว่าเมื่อปูนซีเมนต์ชนิดขยายตัว ประเภท K ที่ทำขึ้นด้วยปูนเม็ดซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตาม ASTM ประเภทที่ 2 หรือ 5 คอนกรีตจะทนทานต่อการกัดกร่อนของซัลเฟตเท่ากับคอนกรีตที่ทำมาจาก ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ทนทานต่อการกัดกร่อนของซัลเฟต

การออกแบบ การวางระดับ และการบ่มอย่างเหมาะสมของส่วนผสมของคอนกรีตชดเชยการหดตัว จะทนทานต่อจุดเยือกแข็งและการทำละลาย เหมือนคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่นำมาเปรียบเทียบ โดยทั่วไปการใส่ฟองอากาศลงไปจะช่วยสร้างปริมาตรของอากาศและพื้นที่ว่างในคอนกรีตชดเชยการหดตัว เมื่ออยู่ในสภาวะเดียวกันกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

2.6 เถ้าลอย

เถ้าลอยเป็นสารปอซโซลานสังเคราะห์ เมื่อนำมาผสมในคอนกรีตจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของคอนกรีตด้านต่าง ๆ ดังนี้ เถ้าลอยมีคุณสมบัติดังนี้

2.6.1 คุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของเถ้าลอย

เถ้าลอยได้จากการเผาถ่านหินในโรงงานไฟฟ้า มีสีเทา เทาดำ หรือสีน้ำตาล รูปร่างค่อนข้างกลมบางครั้งอาจพบลักษณะเป็นรูพรุน มีน้ำหนักเบาลอยน้ำได้ ซึ่งแตกต่างจากซีเมนต์ที่มีลักษณะเป็นแท่งหรือเหลี่ยม เมื่อนำเถ้าลอยที่มีรูปร่างกลมทดแทนซีเมนต์ในส่วนผสมของคอนกรีตแล้วจะเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของคอนกรีตทำให้เนื้อคอนกรีตแน่นทึบ แต่ถ้ามีรูปร่างไม่แน่นอนหรือมีรูพรุนอาจมีผลต่อปริมาณน้ำที่ใช้มีผลให้กำลังอัดของส่วนผสมต่ำลงได้

ขนาดหรือพื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าลอยจะบ่งบอกถึงความสามารถในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก เนื่องจากเถ้าลอยที่มีอนุภาคหยาบจะมีพื้นที่ผิวน้อยทำปฏิกิริยาได้ช้ากว่าอนุภาคที่ละเอียดกว่า ระยะเวลาการก่อตัว พบว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีระยะเวลาการก่อตัวนานกว่า เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในปูนซีเมนต์จะเร็วกว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิกในส่วนของเถ้าลอยที่ผสมอยู่นอกจากนี้คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยที่มีผลต่อคอนกรีตยังมีอีกหลายประการ เช่น การหดตัว การคายน้ำ ความต้องการน้ำ ความอยู่ตัว การกำหนดความสม่ำเสมอ Multiple factor การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) และความชื้นเหลือปกติ

การทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของเถ้าลอยเพื่อนำไปใช้งาน ต้องอาศัยข้อกำหนดทางกายภาพของเถ้าลอย กำหนดโดย ASTM C 618-97 ดังตาราง 2.1

2.6.2 คุณสมบัติพื้นฐานทางด้านเคมีของเถ้าลอย

เถ้าลอยเมื่ออยู่ในสภาพแห้งและป่นเป็นฝุ่น จะไม่มีคุณสมบัติเชื่อมเกาะระหว่างอนุภาค แต่เมื่อสัมผัสเข้ากับน้ำภายใต้อุณหภูมิปกติจะสามารถทำปฏิกิริยาเคมี กับสารแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) และเกิดเป็นสารใหม่ที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน (Cementitious)

ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยประกอบด้วย แร่ธาตุต่างๆ ที่สำคัญได้แก่ ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) เป็นต้นปริมาณแร่ธาตุต่างๆ สามารถแยกได้ตามข้อกำหนดทางเคมีตามมาตรฐาน ASTM C 618 ตามตาราง 2.2

2.6.3 ปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอย

การใส่เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนทำให้ปริมาณ C_3S , C_2S , C_3A และ C_4AF ในคอนกรีตลดลง การทำปฏิกิริยาของซีเมนต์จะช้าลงการคายความร้อนจากปฏิกิริยาจะลดตัวออกไป ทั้งนี้เถ้าลอยเป็นอนุภาคเล็กและมีทรงกลมทำให้สามารถกระจายตัวได้ดีในเฟสตัน อนุภาคที่เล็กสามารถเป็นตัวแทรกเข้าไปในช่องว่างทำให้เฟสตันแน่นขึ้น และยังทำให้เกิดแหล่งสำหรับการตกผลึกของผลผลิตไฮเดรชันเพิ่มขึ้น

เถ้าลอยประกอบไปด้วย SiO_2 และ Al_2O_3 เป็นหลักและถ้าเป็นเถ้าลอยชนิด C ก็จะมี CaO มากด้วย ปฏิกิริยาหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยและน้ำจึงเกิดระหว่าง SiO_2 และ Al_2O_3 กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และน้ำ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาปอซโซลาน โดยเกิดขึ้นก่อนข้างช้า เป็นดังสมการ



2.6.4 ผลที่มีต่อคอนกรีตสด

(1) ความต้องการน้ำ

ความต้องการน้ำของส่วนผสมจะเปลี่ยนไปเมื่อใส่สารปอซโซลาน การวัดความต้องการน้ำของส่วนผสมจะวัดที่ความสามารถทำงานได้ที่เท่ากัน การวัดความสามารถทำงานได้ของมอร์ตาร์จะใช้การวัดค่าการไหลแผ่นตามมาตรฐาน ASTM C109 ค่าการไหลแผ่นของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยจะขึ้นอยู่กับปริมาณและความละเอียดของเถ้าลอย การเพิ่มปริมาณเถ้าลอยทำให้ส่วนผสมลื่นไหลได้ดีขึ้นทำให้ต้องการน้ำลดลง เถ้าลอยที่ละเอียดมีความเป็นเม็ดกลมสูงและมีผิวเรียบทำให้ต้องการน้ำลดลงได้อีก การใช้เถ้าลอยที่ละเอียดมากจะลดน้ำได้ไม่มากนัก เนื่องจากพื้นที่ผิวที่สูงทำให้ต้องการน้ำมาเคลือบผิวมากขึ้น ในทางกลับกันเถ้าลอยที่หยาบมากจะมีผิวไม่เรียบเป็นรูพรุนทำให้สามารถดูดน้ำได้มากและต้องการน้ำมากขึ้น ในการใช้สารผสมเพิ่มเถ้าลอยหยาบจะดูดสารผสมเพิ่มด้วย ทำให้ต้องใช้สารผสมเพิ่มมากกว่าปกติและสิ้นเปลือง

(2) ระยะเวลาก่อตัว

โดยทั่วไประยะเวลาการก่อตัวของเฟสตันผสมเถ้าลอยจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากการแทนที่ด้วยเถ้าลอยทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลดลง ระยะเวลาการก่อตัวของเฟสตันผสมเถ้าลอยแม้

เกาะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณของเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น เถ้าลอยที่ละเอียดมีแนวโน้มทำให้การก่อตัวเร็วขึ้น และในทางกลับกันเถ้าลอยที่หยาบมีแนวโน้มทำให้การก่อตัวช้าลง เถ้าลอยที่มีปริมาณ SO_3 สูงจะมีเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นได้ โดยเวลาการก่อตัวเริ่มต้นเพิ่มขึ้นไม่มากนัก แต่เวลาการก่อตัวสุดท้ายเพิ่มขึ้นค่อนข้างมาก การวัดเวลาการก่อตัวนิยมใช้การวัดการจมของเข็มไวแอกต ตามมาตรฐาน ASTM C191

ตาราง 2.1 ข้อกำหนดทางกายภาพตามมาตรฐาน ASTM C 618-97 (ASTM C 618-97, 1997)

ข้อกำหนดทางกายภาพ	ประเภทของเถ้าลอย	
	ชั้นคุณภาพ F	ชั้นคุณภาพ C
ส่วนที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 หลังการร่อนแบบเปียก มากที่สุด ร้อยละ	34	34
ดัชนีกำลัง (Strength activity index) : โดยผสมกับปอร์ตแลนด์		
7 วันมากที่สุดร้อยละ (เมื่อเทียบกับตัวควบคุม)	75	75
28 วันมากที่สุดร้อยละ (เมื่อเทียบกับตัวควบคุม)	75	75
ความต้องการน้ำ (Water requirement) : มากที่สุดร้อยละ (เมื่อเทียบกับตัวควบคุม)	105	105
ความอยู่ตัว (Soundness) : การขยายตัวหรือหดตัวโดยวิธีออโตคลีฟ (Autoclave) มากที่สุดร้อยละ	0.8	0.8
การกำหนดความสม่ำเสมอ (Uniformity requirement) : - ความหนาแน่น (Density) มากที่สุดร้อยละ (จากค่าเฉลี่ย) - ส่วนที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 มากที่สุดร้อยละ (จากค่าเฉลี่ย)	5 5	5 5
Multiple factor : ผลคูณระหว่างการสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ (%LOI) กับร้อยละของปริมาณที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 325	255	-
การหดตัวแบบแห้ง (Drying shrinkage) : ของแท่งมอร์ตาร์ที่ 28 วัน Max% ที่แตกต่างจากตัวควบคุม	0.03	0.03

ตาราง 2.2 ข้อกำหนดทางด้านเคมีตามมาตรฐาน ASTM C618-93 (ASTM C 618-93, 1993)

คุณสมบัติ	ประเภทของเถ้าลอย	
	ชั้นคุณภาพ F	ชั้นคุณภาพ C
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ มากที่สุดร้อยละ	70.0	50.0
SO ₃ มากที่สุดร้อยละ	5.0	5.0
ปริมาณความชื้น มากที่สุดร้อยละ	3.0	3.0
การสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ มากที่สุดร้อยละ	6.0	6.0
Na ₂ O มากที่สุดร้อยละ	1.5	1.5

(3) การเพิ่มความสามารถในการทำงานได้

เถ้าลอยนอกจากสามารถลดปริมาณน้ำแล้ว ในการใช้งานยังเพิ่มความสามารถในการทำงานของมอร์ตาร์และคอนกรีตได้โดยคงปริมาณน้ำไว้ เถ้าลอยมีคุณสมบัติช่วยให้มอร์ตาร์และคอนกรีตลื่นไหลได้ดีขึ้น ปรินญา จินดาประเสริฐ กล่าวไว้ว่า “ค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ทำจากปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะร้อยละ 0, 20 และ 40 ที่ W/B 0.45 มีค่าเท่ากับร้อยละ 125, 135 และ 145 และเมื่อใช้เถ้าลอยละเอียดขึ้น จะมีค่าเป็นร้อยละ 125, 155 และ 175 ตามลำดับ”

2.6.5 ผลที่มีต่อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

(1) กำลังรับแรง

กำลังรับแรงของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่อายุต้นจะลดลงตามปริมาณของเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาในช่วงต้นเกิดจากปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ เมื่ออายุมากขึ้นปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดมากขึ้น และกำลังรับแรงของคอนกรีตผสมเถ้าลอยจะดีขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอย สำหรับส่วนผสมที่มีเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่ไม่มากเกินไป กำลังรับแรงของคอนกรีตผสมเถ้าลอยสามารถพัฒนาได้ดีและสูงกว่าคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอย โดยปกติเวลาที่ใช้ในการพัฒนาจะนานประมาณ 1-6 เดือน

(2) การหดตัวแห้ง

การหดตัวแห้ง (Drying Shrinkage) ของปูนซีเมนต์ใช้การวัดการหดตัวของมอร์ตาร์ ตามมาตรฐาน ASTM C596 การหดตัวแห้งของมอร์ตาร์ลดลงเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าลอยแม่เมาะ เนื่องจากสามารถลดปริมาณน้ำของส่วนผสมและการเพิ่มเถ้าลอยเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ ทั้งนี้ยังขึ้นอยู่กับคุณภาพและความละเอียดของเถ้าลอยด้วย โดย รศ.ดร. ปริญา จินดา ประเสริฐ กล่าวว่า “เถ้าลอยละเอียดสามารถลดน้ำได้มาก แต่ถ้าละเอียดมากความต้องการน้ำจะกลับเพิ่มขึ้น เถ้าลอยหยาบถึงแม้ว่าไม่สามารถลดน้ำของมอร์ตาร์ลดลงได้ แต่ถ้าการเพิ่มเถ้าลอยทำให้ปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นมากจะทำให้การหดตัวแห้งสูงขึ้นได้ เถ้าลอยแม่เมาะรุ่นเก่าที่มี SO_3 สูงทำให้การหดตัวแห้งเพิ่มขึ้น”

2.7 สารเคมีผสมเพิ่ม

สารเคมีผสมเพิ่ม (Chemical Admixture) เป็นสารที่เพิ่มในขั้นตอนของการผสมคอนกรีต ซึ่งแบ่งเป็น สารลดน้ำและควบคุมการก่อตัว (Water Reducer and Set Controlling Admixture) สารกักกระจายฟองอากาศ (Air Entraining Agent) และสารผสมเพิ่มเพื่องานเฉพาะโดยในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึง สารลดน้ำพิเศษที่ถูกนำมาใช้เป็นสารผสมเพิ่มในคอนกรีต เพื่อลดปริมาณน้ำที่ต้องการของส่วนผสมคอนกรีต การลดลงของความต้องการน้ำอาจจะแสดงออกมาในรูปของการลดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ลดลง จะทำให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้น และลดความซึมผ่านได้ โดยปกติกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่สูงขึ้นจากการใช้สารลดน้ำนั้นจะมากกว่าผลของอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ลดลง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการปรับปรุงประสิทธิภาพของปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์

2.7.1 สารลดน้ำพิเศษ

เมื่อผสมเถ้าลอยในคอนกรีต เถ้าลอยจะกระจายและแทรกตัวในเนื้อคอนกรีตทำให้การกระจายตัวของปูนซีเมนต์ดีขึ้นด้วย การลดน้ำและคุณสมบัติของเพสต์ที่สม่ำเสมอและแน่นขึ้นทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติโดยรวมดีขึ้น การเพิ่มการลดน้ำและการกระจายตัวของปูนซีเมนต์สามารถทำได้ด้วยการใช้สารลดน้ำพิเศษ สารลดน้ำพิเศษหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “ซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์” มีคุณสมบัติในการลดแรงระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์ในคอนกรีตสดทำให้คอนกรีตไหลได้ดีขึ้น วัสดุที่ใช้ทำเป็นสารลดน้ำพิเศษสามารถแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

- (1) ซัลโฟเนตเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์คอนเดนเซต (Sulfonated Melamine Formaldehyde Condensates)
- (2) ซัลโฟเนตแนพทาลีนฟอร์มัลดีไฮด์คอนเดนเซต (Sulfonated Naphthalene Formaldehyde Condensates)
- (3) โมดิฟายด์ลิกโนซัลโฟเนต (Modified Lignosulfonates)
- (4) สารลดน้ำพิเศษอื่น เช่น กรดซัลโฟนิคเอสเทอร์และคาร์โบไฮเดรตเอสเทอร์ (Sulfonic Acid Esters and Carbohydrate Esters) เป็นต้น

สารลดน้ำพิเศษ 2 กลุ่มแรกเป็นกลุ่มที่ใช้กันค่อนข้างมากซึ่งเรียกว่า ซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์กลุ่มเมลามีนและกลุ่มแนพทาลีน สารลดน้ำพิเศษเป็นโพลีเมอร์ของสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ซึ่งได้จากการสังเคราะห์ตามกระบวนการโพลีเมอร์ไรเซชันทำให้ได้โมเลกุลที่ยาวและมีมวลสูง เมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์และแนพทาลีนฟอร์มัลดีไฮด์มีโมเลกุลของสารลิกโนซัลโฟเนตเป็นองค์ประกอบ กลไกของการลดน้ำในส่วนผสมของคอนกรีตได้จำนวนมากมีความคล้ายกับกรณีของการใช้สารลดน้ำธรรมดา แต่ไม่มีผลกระทบต่อความตึงผิวของน้ำมากนัก ดังนั้นจึงเกิดฟองอากาศในส่วนผสมค่อนข้างน้อยทำให้สามารถใช้สารลดน้ำพิเศษในปริมาณที่สูงได้

2.7.1.1 ผลที่มีต่อคอนกรีตสด

ก) การลดปริมาณน้ำ

สารลดน้ำตามมาตรฐาน ASTM C 494 ประเภท A สามารถลดปริมาณน้ำได้อย่างน้อยร้อยละ 5 หรือในบางกรณีถึงร้อยละ 12 ส่วนสารลดน้ำพิเศษจะต้องลดปริมาณน้ำได้อย่างน้อยร้อยละ 12 แต่อาจลดได้มากถึงร้อยละ 30 ความต้องการสารลดน้ำพิเศษซึ่งคิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก (มวล) ของปูนซีเมนต์จะลดลงเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีตเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพของสารผสมเพิ่มเหล่านี้ขึ้นอยู่กับ C_3A , C_3S และปริมาณของค่าในปูนซีเมนต์ คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภท 2 และ 5 จะมีความต้องการสารลดน้ำพิเศษน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภท 1 และ 3 ในบางกรณีพบว่าปริมาณ SO_3 ในปูนซีเมนต์ยิ่งมากจะทำให้ประสิทธิภาพของสารลดน้ำพิเศษดีขึ้น



ข) ความสามารถที่ได้

สำหรับคอนกรีตที่เหมือนกันแต่แตกต่างกันตรงการใช้และไม่ใช้สารลดน้ำ เป็นการยากที่จะเปรียบเทียบความสามารถที่ได้ของคอนกรีตทั้งสองอย่างนี้เนื่องจากไม่มีมาตรฐานในการทดสอบที่จะแยกความแตกต่างได้ อย่างไรก็ตามคอนกรีตที่มีสารลดน้ำมีแนวโน้มที่จะเกิดการแยกตัวน้อยลง และจากการสังเกตยังสามารถพบได้อีกว่า เมื่อเขย่าคอนกรีต คอนกรีตที่มีสารลดน้ำจะสามารถไหลได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดา โดยปกติสัดส่วนการผสมของคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้สารลดน้ำพิเศษจะมีปริมาณปูนซีเมนต์สูงที่จะทำให้คอนกรีตมีส่วนละเอียดที่เพียงพอ การใช้สารลดน้ำพิเศษสามารถเปลี่ยนสัดส่วนผสมของคอนกรีตได้โดยการลดปริมาณน้ำและทดแทนปริมาณน้ำที่ลดไปได้ด้วยการเพิ่มมวลรวมหยาบและละเอียดในปริมาณที่เท่าๆกัน หากส่วนผสมที่ได้มีความเหนียวก็ควรเพิ่มปริมาณมวลรวมหยาบและลดมวลรวมละเอียดลง ซึ่งจะทำให้ส่วนผสมง่ายต่อการเทและตกแต่งผิว

2.7.1.2 ผลที่มีต่อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

ก) กำลัง

การลดปริมาณน้ำจะช่วยเพิ่มกำลังของคอนกรีต แต่สำหรับการใช้สารลดน้ำ นอกจากจะสามารถเพิ่มกำลังของคอนกรีตโดยการลดปริมาณน้ำในคอนกรีตแล้ว ยังสามารถเพิ่มกำลังเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์และโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตด้วย กำลังในระยะหลังอาจเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 20 หรือมากกว่าสำหรับปริมาณปูนซีเมนต์ที่เท่ากัน ดังนั้นจึงสามารถลดปริมาณปูนซีเมนต์โดยที่กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตอายุ 28 วันไม่ลดลง หากมีการใช้สารลดน้ำพิเศษในการลดปริมาณน้ำอาจจะได้กำลังที่ 28 วันเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 25 หรือมากกว่า กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้สารลดน้ำก็มีค่าสูงขึ้นแต่ไม่มากเช่นกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

ข) การหดตัวและการคืบ

การหดตัวในระยะยาวอาจลดลงขึ้นอยู่กับระดับของปริมาณน้ำที่ลดลง ส่วนการคืบจะลดลงเป็นสัดส่วนกับการเพิ่มขึ้นของกำลังของคอนกรีต ผลกระทบต่อการหดตัวและการคืบจากการใช้สารผสมเพิ่มอาจแตกต่างกันเมื่อใช้ปูนซีเมนต์ที่มีองค์ประกอบต่างกัน

2.8 การประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมและพลังงานของซีเมนต์ชนิดเซกการหดตัว

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์คือวัสดุผสมหลักของคอนกรีตที่ถูกใช้ในงานก่อสร้าง ในปัจจุบันมีการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นจำนวนมากโดยทั่วโลกนั้นมีกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 1.4 พันล้านตันต่อปี (Keith Quillin, 2006) ปัญหาของปูนชนิดนี้ก็คือ ในกระบวนการผลิตมีคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นมากมาย เพราะว่าการเพิ่มอุณหภูมิภายในเตาเผาซีเมนต์ให้สูงถึง 1,450 องศาเซลเซียส เพื่อเผาแคลเซียมคาร์บอเนต (จากหินขาวหรือหินปูน) นั้นต้องใช้พลังงานเป็นจำนวนมากและในกระบวนการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแคลเซียมคาร์บอเนตนั้นก็ทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์อีกด้วยทุกๆ 1 ตันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ออกมาจากเตาเผานั้นก็จะมีคาร์บอนไดออกไซด์ถูกปลดปล่อยสู่บรรยากาศในปริมาณประมาณ 1 ตัน เท่ากันด้วยอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาสู่บรรยากาศอยู่ในสัดส่วนประมาณร้อยละ 7 ของคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดทั่วโลกที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ ตัวเลขนี้จะเพิ่มขึ้นเป็น 10 เปอร์เซ็นต์ ในประเทศที่มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว เช่น ประเทศจีน ในขณะนี้ประเทศจีนมีกำลังการผลิตปูนซีเมนต์มากเป็นจำนวน 1 ใน 3 ของจำนวนปูนซีเมนต์ทั้งหมดที่ทั้งโลกผลิตได้

การศึกษาในปัจจุบันได้ถือปฏิบัติตาม BRE แสดงถึงการลดจำนวนการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการผลิตซีเมนต์นั้นสามารถเกิดขึ้นได้โดยใช้ซีเมนต์ที่มีคาร์บอนในปริมาณที่ต่ำ โดยใช้แคลเซียมซัลโฟลูมิเนตเป็นตัวหลัก ปัจจุบันการประเมินการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์พบว่า มากกว่า 300 ล้านตันต่อปี ถ้าใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่แทนที่ด้วยแคลเซียมซัลโฟลูมิเนต ซึ่งถือว่าช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลงได้มาก (Keith Quillin, 2006) นอกจากนี้จากงานวิจัยของ (Amina ALAOUI et al, 2007) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการใช้แคลเซียมซัลโฟลูมิเนตเป็นวัสดุในคอนกรีต ได้กล่าวว่า คอนกรีตโดยทั่วไปที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างอย่างกว้างขวางบนโลก มีโดยประมาณ 1.7×10^9 ตัน/ปี (Gartner, 2004) แต่การผลิตคอนกรีต 1 ตันนั้นทำให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถึง 0.08 ตัน ส่วนประเทศฝรั่งเศสการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีถึง 2.6% เนื่องจากโรงงานผลิตซีเมนต์ และในประเทศอื่นๆ โรงงานผลิตซีเมนต์จะปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถึง 5% (Gartner, 2004)

ปัจจุบันนี้การผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 1 ตันจะปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถึง 815 กิโลกรัม และใช้พลังงาน 4.2 GJ ในอเมริกาเหนือ ในปี 1994 การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เนื่องจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมาจากวัตถุดิบ (ประมาณ 52%) และจากเชื้อเพลิง (ประมาณ 48%) (Gartner, 2004) เพื่อที่จะลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และพัฒนากระบวนการผลิตให้ดี

จีน จะเชื่อมโยงถึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยจากกระบวนการผลิต โดยการเปลี่ยนแปลงวัตถุดิบที่ใช้ในการสร้างปูนเม็คนั้น คือวิธีหนึ่งของการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นจึงทำปูนเม็ดชัลโฟลูมิเนต (Alaoui et al, 2006) ซึ่งปูนเม็ดชัลโฟลูมิเนตนี้ คือ เป็นไปตาม Gartner ที่ได้กล่าวไว้ว่าปูนเม็ดชนิดนี้สามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลงได้ ดังนั้นจึงเป็นทางเลือกหนึ่งของการนำไปใช้ในปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์

โดยทั่วไปปูนเม็ดพอร์ตแลนด์ทำจากส่วนผสมของหินปูน 80% (จากแคลเซียมคาร์บอเนต) และซิลิกา 20% จากดินเหนียว) ส่วนผสมนี้ถูกใส่เข้าไปในเตาเผาที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมินี้มีความเป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาของปูนเม็ด ได้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ออกมา กระบวนการผลิตส่งผลทำให้สภาพแวดล้อมไม่ดี เนื่องจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากวัตถุดิบ (ส่วนใหญ่มาจากหินปูน) โดยปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประกอบด้วย C_2S 20%, C_3S 60%, C_3A 10% และ C_4AF 10% ซึ่งการผลิตปูนเม็ด 1 ตันจะปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 535 กิโลกรัม (Feraille et al, 2007) ส่วนปูนเม็ดชัลโฟลูมิเนตทำจากส่วนผสมของหินปูน bauxite และแคลเซียมซัลเฟต การทำปูนเม็ดของส่วนผสมนี้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าปูนเม็ดพอร์ตแลนด์ ประมาณ 1250-1300 องศาเซลเซียส ส่วนประกอบมีดังต่อไปนี้ yeelimite 60-70%, C_2S 10-20%, C_4AF 0-14% และ แคลเซียมอลูมิเนต 0-7% จากการพิจารณาร้อยละของส่วนประกอบต่างๆ ของเม็ดชัลโฟลูมิเนตนั้น จะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 305 กิโลกรัมสำหรับการผลิตปูนเม็ดชัลโฟลูมิเนต 1 ตัน (Feraille et al, 2007) เหตุผลที่กระบวนการผลิตของปูนเม็ดชัลโฟลูมิเนตปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาได้ต่ำกว่ากระบวนการผลิตของปูนเม็ดพอร์ตแลนด์นั้น เนื่องมาจากอุณหภูมิในการผลิตปูนเม็ดชัลโฟลูมิเนตต่ำกว่าการผลิตปูนเม็ดพอร์ตแลนด์ ทำให้เกิดมูลค่าการทำเม็ตน้อยกว่า