

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์ฝุ่นหินปูน รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 บทนำทั่วไป

คอนกรีตเป็นวัสดุที่มีความสำคัญอีกชนิดหนึ่งสำหรับงานด้านวิศวกรรมโยธา ในอดีตที่ผ่านมา วิศวกรโยธาและผู้ที่เกี่ยวข้องกับการใช้คอนกรีตได้คำนึงถึงกำลังรับแรงอัดประลัยที่ 28 วันของคอนกรีตเป็นหลักในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก รวมถึงมาตรฐานในการดำเนินการก่อสร้างงานคอนกรีตเสริมเหล็กต่างๆ แต่ปัจจุบันสถานะแวดล้อมของโลกได้เปลี่ยนแปลงไปมาก ทำให้คอนกรีตต้องเผชิญกับสิ่งแวดล้อมต่างๆ ที่มีโอกาสทำให้อายุการใช้งานของคอนกรีตลดลง ดังนั้นการนำคอนกรีตไปใช้โดยคำนึงถึงคุณสมบัติด้านกำลังประลัยอย่างเพียงเดียวนั้นไม่เพียงพอ จึงจำเป็นต้องอย่างยิ่งที่วิศวกรโยธาและผู้ที่เกี่ยวข้องกับการใช้คอนกรีตจำเป็นต้องคำนึงถึงอายุการใช้งานของคอนกรีตด้วย นั่นหมายถึงคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตที่ต้องเผชิญกับสถานะแวดล้อมต่างๆ กัน

สถานะแวดล้อมที่มีสารซัลเฟตซึ่งอยู่ในรูปสารละลายซัลเฟต (SO_4^{2-}) โดยเฉพาะโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของคอนกรีต เนื่องจากสารละลายซัลเฟตสามารถซึมผ่านสู่ภายในเนื้อคอนกรีตเข้าทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์ ก่อให้เกิดการผุกร่อนพองตัว และแตกร้าว ส่งผลให้โครงสร้างคอนกรีตไม่สามารถใช้งานตามที่ออกแบบไว้ ตัวอย่างของโครงสร้างที่มีโอกาสเสื่อมสภาพจากการทำลายโดยซัลเฟต เช่น โครงสร้างใต้ดิน โครงสร้างที่สัมผัสกับน้ำทะเล หรือโครงสร้างที่สัมผัสกับน้ำเสีย โดยทั่วไปในสารละลายซัลเฟตที่พบในสิ่งแวดล้อมนั้นสามารถแบ่งประเภทได้ตามปริมาณซัลเฟตที่มีอยู่ในสภาพแวดล้อมดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สถานะของซัลเฟต [8]

สภาพแวดล้อมซัลเฟต	ซัลเฟตในดินที่ละลายน้ำ (SO_4^{2-} , ร้อยละ)	ซัลเฟตในน้ำ (ppm)
เบาบาง	0.00 – 0.10	0 – 150
ปานกลาง	0.10 – 0.20	150 – 1,500
รุนแรง	0.20 – 2.00	150 – 10,000
รุนแรงมาก	มากกว่า 2.00	มากกว่า 10,000

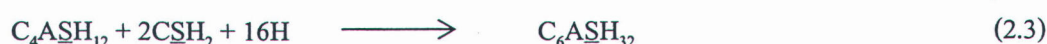
2.1.2 การกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายซัลเฟต

สำหรับกลไกการทำลายของซัลเฟตต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Mechanisms of Sulfate Attack on Portland cement) นั้น เนื่องจากเกลือซัลเฟต (SO_4^{2-}) ที่อยู่ในรูปของสารละลาย สามารถทำอันตรายต่อซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตได้ ตัวอย่างของเกลือซัลเฟต ที่พบมากในธรรมชาติและอันตรายต่อคอนกรีต เช่น โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) และแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) เป็นต้น เกลือซัลเฟตจะมีอยู่มากในน้ำทะเล น้ำกร่อย ในบริเวณริมทะเลหรือในดินทั่วไป ในน้ำเสีย จากบ้านเรือนหรือตามน้ำพุร้อน ธรรมชาติ เป็นต้น

ในการศึกษาเรื่องการทำลายโดยซัลเฟตสามารถทำได้โดยนำตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ มอร์ตาร์หรือคอนกรีต ไปแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟตหรือแคลเซียมซัลเฟต แต่เนื่องจากแคลเซียมซัลเฟตมีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อย ดังนั้นจึงใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตในการศึกษาครั้งนี้

ก) กลไกการทำลายของโดยโซเดียมซัลเฟต (Mechanisms of Sodium Sulfate Attacks) [7]

กลไกการทำลายของโซเดียมซัลเฟตแสดงดังสมการที่ 2.1 ถึง 2.4 เริ่มต้นเมื่อโซเดียมซัลเฟตทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide, CH) ซึ่งเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาจากไฮเดรชัน ดังแสดงในสมการที่ 1 เนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) มีความเป็นด่างสูงมาก ($\text{pH}=13.5$) จึงเป็นการรักษาสภาพทั้งแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และ Ettringite ($\text{C}_6\text{ASH}_{32}$) ไม่ทำให้ปฏิกิริยากลายเป็นผลอื่น โดยที่สารยิปซัม (CSH_2) ที่ได้จากสมการที่ 1 จะทำปฏิกิริยากับผลผลิตไฮเดรชันบางตัว เช่น แคลเซียมอลูมินไฮเดรต (C_4AH_{13}) โมโนซัลเฟต ($\text{C}_4\text{ASH}_{12}$) และไตรแคลเซียมอลูมินไฮเดรต (C_3A) ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ได้ Secondary Ettringite ดังแสดงในสมการที่ 2.2 ถึง 2.4 โดยธรรมชาติแล้ว Ettringite จะมีความหนาแน่นต่ำกว่าผลผลิตปฏิกิริยาไฮเดรชันชนิดอื่นมาก จึงทำให้เกิดการขยายตัว ดังนั้นการทำลายโซเดียมซัลเฟต จึงเป็นการขยายตัวและแตกร้าวของคอนกรีต



โดยที่ $\text{C} = \text{CaO}$, $\text{N} = \text{Na}_2\text{O}$, $\text{M} = \text{MgO}$, $\text{S} = \text{SiO}_2$, $\text{S} = \text{SO}_3$ และ $\text{H} = \text{H}_2\text{O}$

ข) กลไกการทำลายของแมกนีเซียมซัลเฟต (Mechanisms of Magnesium Sulfate Attacks) [7]

กลไกการทำลายของแมกนีเซียมซัลเฟตซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.5 ถึง 2.7 จะแตกต่างจากกรณีของโซเดียมซัลเฟต กล่าวคือแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (MH) หรือ Brucite มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยมาก และค่า pH ของสารละลาย MH ที่อิ่มตัวมีค่าประมาณ 10.5 ซึ่งมีความเป็นด่างที่ไม่สูง ดังนั้นจึงทำให้

ทั้ง C-S-H และ Ettringite ไม่เสถียรภาพ นอกจากนี้ C-S-H จะถูกทำลายโดยแมกนีเซียมซัลเฟตดังแสดงในสมการที่ 2.6 จากสมการที่ 2.5 และ 2.6 ทั้ง CSH_2 และ MH จะสะสมมากขึ้นโดย CSH_2 จะถูกสะสมในช่องว่าง (Pores) ของคอนกรีต ส่วน MH จะทำปฏิกิริยากับซัลฟิด (S₂H) ดังแสดงในสมการที่ 2.7 ได้แมกนีเซียมซัลเฟตไฮดรอกไซด์ (M-S-H) ซึ่งไม่มีความสามารถในการประสานเลยดังนั้นการทำลายโดยแมกนีเซียมซัลเฟตจึงเป็นการเปลี่ยน C-S-H เป็น M-S-H การทำลายดังกล่าวทำให้เกิดการอ่อนตัวและเสื่อมสภาพของซีเมนต์ที่แข็งตัวและจะเกิดการสะสม CSH_2 โดยไม่เกิดการขยายตัวมากดังกรณีการทำลายของโซเดียมซัลเฟต



ค) ปัจจัยที่มีผลต่อการทำลายของซัลเฟต

- 1) สิ่งแวดล้อมที่มีซัลเฟตตลอดจนความเข้มข้นของซัลเฟต
- 2) ความชื้นน้ำของคอนกรีต คอนกรีตที่มีความชื้นน้ำสูงจะทำให้ซัลเฟตเข้าไปได้ยาก ลดการทำลายชั้นรุนแรง

3) ปริมาณ C_3A และ C_4AF ในปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A และ C_4AF น้อยมีแนวโน้มต้านทานการทำลายของซัลเฟตได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A และ C_4AF สูง และปูนซีเมนต์ที่มีอัตราส่วน C_2A และ C_3S ต่ำก็มีความสามารถต้านทานซัลเฟตได้ดีขึ้น

4) ปริมาณ Ca(OH)_2 ในคอนกรีต ถ้าลดปริมาณของ Ca(OH)_2 ในคอนกรีตก็ช่วยลดความรุนแรงลงได้ด้วย วิธีการลด Ca(OH)_2 ในคอนกรีตอาจทำได้โดยใช้สารวัสดุปอชโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน

จ) วิธีการป้องกันการทำลายโดยซัลเฟต

- 1) ใช้ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A และอัตราส่วน C_2A และ C_3S ต่ำ นั่นคือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5
- 2) การใช้วัสดุปอชโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนซึ่งช่วยลดปริมาณบางส่วนของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) รวมทั้งลด C_3A และยังช่วยเพิ่มความชื้นน้ำให้กับคอนกรีตได้ด้วย
- 3) ลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ให้ต่ำเพื่อให้คอนกรีตมีความชื้นน้ำสูงขึ้น
- 4) ออกแบบให้คอนกรีตมีปริมาณซีเมนต์เฟสที่ไม่มากเกินไป

2.1.3 ฝุ่นหินปูน

ฝุ่นหินปูน (Limestone Powder) เป็นผลพลอยได้จากการย่อยหิน เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์ และอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ โดยปกติแล้วฝุ่นหินปูนจำนวนมากเหล่านี้มักจะถูกกองเก็บไว้ในบริเวณแหล่งหินย่อย ๆ นั้น โดยอนุภาคของผงหินปูนมีขนาดเล็กอยู่ในช่วงระหว่าง 100 ถึง 1 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่สามารถก่อให้เกิดปัญหาการฟุ้งกระจายสู่สิ่งแวดล้อม และยังส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจของผู้ที่อยู่อาศัยในบริเวณใกล้เคียงแหล่งย่อยหินเหล่านั้น สำหรับฝุ่นหินปูนในประเทศไทยมีเหมืองที่ทำการผลิตอยู่ 2 แหล่งใหญ่ด้วยกัน คือเหมืองหินปูนโดโลมิติกจังหวัดสระบุรี และฝุ่นหินปูนจากเหมืองหินปูนชนิดโดโลไมท์ จังหวัดกาญจนบุรี

หินปูนชนิดโดโลมิติก (Dolomitic) และโดโลไมท์ (Dolomite) จัดอยู่ในจำพวกหินคาร์บอเนต (Carbonate Rock) โดยหินคาร์บอเนตที่มีองค์ประกอบของแร่โดโลไมท์อยู่ในปริมาณร้อยละ 10 ถึง 50 จะจัดเป็นหินปูนประเภทโดโลมิติก ในขณะที่มีปริมาณของแร่โดโลไมท์มากกว่าร้อยละ 50 จะจัดเป็นหินปูนประเภทโดโลไมท์

2.1.4 เถ้าลอย

เถ้าลอย (Fly ash) เป็นผลพลอยได้ (By product) จากการเผาถ่านหินเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า ถ่านหินที่บดละเอียดจะถูกเผาเพื่อเอาพลังงานความร้อนมาใช้ เถ้าถ่านหินที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่จะตกลงกันเตา จึงเรียกกันว่าเถ้าก้นเตา (bottom ash) ส่วนเถ้าถ่านหินขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร จนถึงประมาณ 200 ไมโครเมตร จะลอยไปกับอากาศร้อนจึงเรียกว่าเถ้าลอย (Fly ash) เถ้าลอยจะถูกดักจับโดยที่ดักจับไฟฟ้าสถิต (electrostatic precipitator) เพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศร้อนและเป็นมลภาวะต่อพื้นที่รอบบริเวณโรงไฟฟ้า

เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน ใช้ผสมปูนซีเมนต์ทำคอนกรีตได้ โดยตามมาตรฐาน ASTM C 618-80 ได้ให้คำนิยามของเถ้าลอยไว้ว่า เถ้าลอย คือวัสดุเม็ดละเอียดที่เหลือจากการเผาไหม้ของถ่านหิน โดยส่วนมากจะได้มาจากการผลิตไฟฟ้าด้วยถ่านหิน ถ่านหินที่ใช้ในการเผาเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้ามีอยู่ด้วยกัน 4 ชนิด เช่น แอนทราไซต์ (Anthracite) บิทูมินัส (Bituminous) ซับบิทูมินัส (Sub bituminous) และลิกไนต์ (Lignite) โดยถ่านหินคุณภาพดีที่สุดได้แก่ แอนทราไซต์ สามารถให้ความร้อนสูงสุด และมีปริมาณความร้อนต่ำ ตามด้วยบิทูมินัส ซับบิทูมินัสและลิกไนต์ตามลำดับ โดยลิกไนต์ให้ความร้อนต่ำและมีความชื้นสูง นอกจากถ่านหินทั้ง 4 ชนิดแล้ว ยังมีพีท (Peat) ซึ่งเป็นถ่านหินคุณภาพต่ำสุด ให้ความร้อนต่ำสุด และมีความชื้นสูงสุด จึงไม่นิยมใช้ในการเผาเป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้า โดยเมื่อเผาถ่านหินลิกไนต์แล้วจะเหลือเถ้าถ่านหินประมาณร้อยละ 25 ของปริมาณถ่านหินที่เผา โดยสามารถแบ่งเถ้าถ่านหินลิกไนต์ได้ดังนี้

1) เถ้าลอย (Fly Ash, Pulverized Fuel Ash, Dry Ash)

เถ้าลอยเป็นเถ้าที่ถูกแยกออกจากลมร้อนที่พัดออกไปสู่ปล่องควัน และถูกดักจับไว้ได้ในเครื่องดักจับ (Electrostatic Precipitator) โดยจะมีประมาณร้อยละ 82 ของปริมาณเถ้าทั้งหมด

2) เถ้าหนัก (Bottom Ash, Wet Ash)

เถ้าหนักเป็นเถ้าที่เกิดจากการปะทะกันของอนุภาคเถ้าในบริเวณสันดาป (Combustion Zone) โดยในบริเวณนี้อุณหภูมิจะสูงพอที่จะหลอมเถ้าที่เป็นเม็ดหรือก้อนตกลงสู่ก้นเตา โดยมีประมาณร้อยละ 18 ของเถ้าทั้งหมด

3) จีเถ้า (Slag)

จีเถ้าเป็นเถ้าที่ปะทะกับผนังเตาและหลอมติดกันรวมกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ เมื่อรวมตัวกันจนมีน้ำหนักมากจะตกลงสู่ก้นเตา ซึ่งจีเถ้ามีปริมาณน้อยมาก

2.1.4.1) ชนิดของเถ้าลอย

มาตรฐาน ASTM C618 แบ่งเถ้าลอยออกเป็น 2 ชนิด คือ

ก) ชนิด F (Class F) เถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ และบิทูมินัส มีปริมาณผลรวมของซิลิกา (silica, SiO_2) อลูมินา (alumina, Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (ferric oxide, Fe_2O_3) มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 ดังแสดงในตารางที่ 2.2 วิธีการเก็บตัวอย่างและทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C311 โดยทั่วไปเถ้าลอยชนิด F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (calcium oxide, CaO) ต่ำ

ข) ชนิด C (Class C) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ และซับบิทูมินัส เป็นส่วนใหญ่ มีปริมาณของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ตั้งแต่ร้อยละ 50 ถึงร้อยละ 70 และปริมาณ CaO สูง โดยมีคุณสมบัติตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 ดังในตารางที่ 2.2 เถ้าลอยชนิดนี้เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่าเถ้าลอยแคลเซียมสูง สำหรับ Al_2O_3 มาจากแร่ดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มี Al_2O_3 ต่ำทำให้เถ้าลอยชนิด C นอกจากมี SiO_2 ต่ำแล้วยังมี Al_2O_3 ต่ำด้วย

นอกจากจะแบ่งแยกชนิดของเถ้าถ่านออกเป็น 2 ชนิดดังกล่าวมา ยังสามารถพิจารณาจากความแตกต่างของส่วนประกอบและคุณสมบัติในด้านความเป็นซีเมนต์ (Cementitious) และความเป็นปอซโซลาน (Pozzolan) ได้ด้วย เนื่องจากเถ้าลอย Class C โดยทั่วไปจะมีคุณสมบัติการเป็นซีเมนต์เพิ่มขึ้นจากคุณสมบัติปอซโซลาน เพราะเถ้าถ่านหิน Class C มักจะมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูงกว่าร้อยละ 10 ส่วน Class F มีแคลเซียมออกไซด์ต่ำกว่าร้อยละ 10 ดังนั้นการนำเถ้าถ่านหินมาใช้ในการคอนกรีตธรรมดาทั่วไป ACI 226 (1987) ได้แนะนำว่า ควรใช้เถ้าถ่านหิน Class F ในปริมาณร้อยละ 15 ถึง 25 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และสามารถเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 15 ถึง 35 ได้ในกรณีที่ใช้เถ้าถ่านหิน Class C เนื่องจากพบว่า เถ้า

ถ่านหิน Class C จะมีลักษณะความเป็นซีเมนต์มากกว่า เพราะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ สูงกว่าถ่านหิน Class F

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด	
	F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อลูมินาออกไซด์ และไอออนออกไซด์ ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) อย่างต่ำ, ร้อยละ	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) อย่างสูง, ร้อยละ	5.0	5.0
ปริมาณความชื้นสูงสุด, ร้อยละ	3.0	3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) อย่างสูง, ร้อยละ	6.0	6.0
ปริมาณอัลคาไลสูงสุดเมื่อเทียบเท่า Na_2O , ร้อยละ	1.5	1.5

2.1.4.2 คุณสมบัติทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหิน แต่โดยทั่วไป องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจะคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือประกอบด้วย SiO_2 , Fe_2O_3 และ CaO เป็นองค์ประกอบหลัก และมี MgO , Na_2O , K_2O , SO_3 เป็นองค์ประกอบรอง ดังแสดงในตารางที่ 2.3 นอกจากนี้ยังประกอบด้วยความชื้น (H_2O) และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition, LOI) เถ้าลอยมี SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ CaO เป็นองค์ประกอบหลัก เนื่องจากรวมกันแล้วมีปริมาณถึงร้อยละ 80–90 ดังนั้นจึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของถ่านหิน มาตรฐาน ASTM C618 กำหนดผลรวมของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ของเถ้าลอยไว้อย่างต่ำร้อยละ 50 ถึงจะอยู่ในเกณฑ์ที่นำไปใช้งานได้

2.1.4.3 คุณสมบัติทางกายภาพ

ก) ลักษณะของอนุภาคและรูปร่างของเถ้าลอยแตกต่างกันไปตามชนิดของถ่านหินที่เผา อนุภาคที่ใช้ในการเผา สภาพในการเผา และวิธีการเก็บเถ้าลอย โดยรูปร่างของเถ้าลอยจะเป็นส่วนประกอบของแก้ว (Glassy) มีลักษณะกลมหรือกลวง โดยที่ทรงกลมกลวงจะเรียกว่า Cenospheres ส่วนทรงกลมที่ประกอบด้วยทรงกลมเล็กหลายอันรวมกันจะเรียกว่า Peripheries

ข) ค่าความละเอียด โดยทั่วไปเถ้าลอยจะมีขนาดตั้งแต่ 1 ไมโครเมตร ถึง 1 มิลลิเมตร ค่าความละเอียดของเถ้าลอยจะวัดได้จากปริมาณผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐาน (Sieve Analysis) โดยทั่วไปปริมาณของเถ้าลอยที่ค้างบนตะแกรงขนาด 80 ไมโครเมตร มีปริมาณร้อยละ 6 ถึงร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ปริมาณเถ้าลอยที่ค้างบนตะแกรงขนาด 50 ไมโครเมตร มีปริมาณร้อยละ 16 ถึงร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก และค้างบน

ตะแกรงขนาด 45 ไมโครเมตร มีปริมาณร้อยละ 3 ถึงร้อยละ 14 โดยน้ำหนัก ค่าความละเอียดจะมีผลอย่างมากต่อคุณภาพของคอนกรีต นั่นคือเถ้าลอยที่มีความละเอียดมากจะทำให้คอนกรีตมีความสามารถต้านทานแรงอัดสูงขึ้น

ค) ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ เถ้าลอยที่ได้จากการเก็บโดยเครื่องมือดักจับ (Electrostatic Precipitators) จะมีความละเอียดอยู่ในช่วง 4,000 ถึง 7,000 ซม²/กรัม แต่เครื่องมือดักจับสมัยใหม่สามารถดักจับเถ้าลอยที่มีความละเอียดได้ถึง 12,000 ซม²/กรัม โดยทั่วไปค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสามารถหาได้จากเครื่องมือทดสอบหาความซึมอากาศเบลน (Blaine Air Permeability Apparatus) โดยความละเอียดของเถ้าลอยจากวิธีนี้อยู่ในช่วง 2,500 ถึง 5,500 ซม²/กรัม เมื่อเทียบค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าลอยกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะพบว่า มีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อเถ้าลอยมีความละเอียดมากจะมีพื้นที่ผิวมาก ส่งผลให้สามารถทำปฏิกิริยาต่าง ๆ ได้เร็วกว่าเถ้าลอยที่มีความละเอียดน้อยกว่า

ง) ความถ่วงจำเพาะ เถ้าลอยปกติแล้วจะค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วง 2.2 ถึง 2.8 แต่อนุภาคที่มีลักษณะกลมและกลวง (Cenospheres) จะมีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่า 1.0 จึงสามารถลอยน้ำได้ เถ้าลอยที่มีปริมาณเหล็กสูงจะมีค่าความถ่วงจำเพาะแนวโน้มที่สูง แต่ถ้ามีปริมาณคาร์บอนสูงค่าความถ่วงจำเพาะจะมีแนวโน้มลดลง

จ) ความคงตัวเป็นความสามารถของซีเมนต์เฟสค์ มอร์ตาร์ และคอนกรีต ที่สามารถต้านทานความเค้นภายใน ที่เกิดขึ้นระหว่างการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยไม่เกิดการแตกร้าว หรืออาจจะกล่าวได้ว่าเมื่อส่วนผสมของปูนซีเมนต์แข็งตัวแล้วจะไม่เกิดการขยายตัวของเนื้อคอนกรีต ส่งผลให้ปริมาตรเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก

ฉ) สีของเถ้าลอย สีของเถ้าลอยจะขึ้นอยู่กับปริมาณของ Fe₂O₃ และปริมาณคาร์บอน โดยเถ้าลอยมีปริมาณคาร์บอนสูงจะมีสีดำและเทา ส่วนเถ้าลอยที่มีปริมาณ Fe₂O₃ สูงจะมีสีน้ำตาล

อย่างไรก็ตามเถ้าลอยในประเทศไทยสามารถพบได้ทั้ง Class C และ Class F ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มา และลักษณะการเผาถ่านหิน อย่างไรก็ตามก็มีความเสี่ยงเพียงพอนำไปใช้ในงานคอนกรีต เถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ ในประเทศไทย มีองค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 2.3 ส่วนตารางที่ 2.4 แสดงถึงองค์ประกอบทางเคมีจากแหล่งต่างๆ

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะระหว่างปี พ.ศ. 2528 – 2544
(ชัย จตุรพิทักษ์กุล และคณะ, 2542)

ปี พ.ศ.	องค์ประกอบทางเคมี, %								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	LOI
2528	12.0	5.9	17.3	39.5	4.6	2.0	0.8	11.5	6.3
2533	37.8	20.5	14.2	17.4	3.3	0.9	2.1	3.9	0.8
2535	40.3	24.0	15.0	11.2	2.8	1.0	2.6	3.1	0.5
2540	41.5	28.1	12.3	10.0	1.2	0.6	3.3	2.0	0.8
2544	39.9	18.2	13.6	17.2	2.4	1.3	2.7	1.5	0.1

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ (สหภาพ หอมวุฒิจิวงค์ และคณะ, 2547)

ตัวอย่างเถ้าลอย	องค์ประกอบทางเคมี								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	LOI
แม่เมาะ	41.16	22.30	11.51	15.27	2.70	1.43	2.93	1.66	0.20
ระยอง	45.24	28.25	2.43	11.80	0.74	3.63	0.66	0.47	2.96
กาญจนบุรี	39.56	20.99	9.37	10.62	1.47	3.34	3.08	0.30	7.10
ราชบุรี	32.96	13.81	6.69	24.42	1.44	10.56	2.38	0.61	7.05
ปราจีนบุรี	42.03	18.97	4.44	4.91	1.01	19.68	0.28	0.72	3.65

2.1.4.4 ปฏิกิริยาปอซโซลาน

เถ้าลอยทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) เกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต กล่าวคือเมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แคลเซียมไฮดรอกไซด์นี้เองที่ทำปฏิกิริยากับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) ในเถ้าลอย เกิดเป็นสารประกอบที่เรียกว่า แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ตามลำดับ ซึ่งสารประกอบที่ได้ทั้งสองนี้มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) ปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอยสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 2.8 และสมการที่ 2.9



2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เป็นการศึกษางานวิจัยที่ผ่านซึ่งศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเถ้าลอยและผงหินปูนมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ เพื่อความต้านทานสารละลายซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน

ปิตินันต์ กร้ามาตร และสมนึก ตั้งเดิมสิริกุล [9] ได้ศึกษาการต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน และมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอย โดยใช้เถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) แตกต่างกันสองระดับคือร้อยละ 8.28 และร้อยละ 17.28 จากการศึกษาพบว่า การขยายตัวเมื่อแช่ทั้งในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต รวมทั้งการลดลงของกำลังรับแรงอัดและการสูญเสียน้ำหนักเมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 8.28 ให้ค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่การลดลงของกำลังรับแรงอัดและการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจะให้ค่าสูงกว่า ในทางกลับกันมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 17.28 ส่งผลให้การลดลงของกำลังรับแรงอัดและการสูญเสียน้ำหนักแย่งลงกว่าเดิม แต่จะช่วยให้ค่าการขยายตัวในสารละลายซัลเฟตทั้งสองชนิดลดลง การลดลงของกำลังรับแรงอัดและการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 17.28 จะลดลงตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น การใช้เถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 17.28 แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนส่งผลให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน แต่การลดลงจะไม่มีผลกระทบเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่มี CaO ร้อยละ 8.28 นอกจากนี้ยังพบว่าในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ค่าการขยายตัว ค่าการลดลงของกำลังรับแรงอัด และค่าการสูญเสียน้ำหนักจะเป็นสัดส่วนกัน อย่างไรก็ตามในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีเพียงค่าการลดลงของกำลังรับแรงอัดและค่าการสูญเสียน้ำหนักที่เป็นสัดส่วนกัน แต่การขยายตัวจะมีแนวโน้มตรงกันข้ามกับค่าการลดลงของกำลังรับแรงอัดและค่าการสูญเสียน้ำหนัก

ปิตินันต์ กร้ามาตร และสมนึก ตั้งเดิมสิริกุล [1] ได้ศึกษาการต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์ที่ทำมาจากปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 และปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนและเถ้าลอยบางส่วน โดยการวัดการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนัก ตัวอย่างถูกแช่ในสารละลายซัลเฟต จากการศึกษาพบว่าทั้งในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตการขยายตัวของมอร์ตาร์แทนที่ฝุ่นหินปูนและเถ้าลอยในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 มีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน และน้อยกว่าหรือใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน ส่วนการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่อายุ 68 สัปดาห์ ทุกส่วนผสมยังไม่มี การสูญเสียน้ำหนัก ในขณะที่การแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต การแทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้งในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 5 การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1

และ 5 ล้วน แต่ในกรณีมอร์ตาร์แทนที่ด้วยฝุ่นหินปูนทั้งในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 5 พบว่าการสูญเสีย น้ำหนักมีค่าใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 5 ล้วน

Al-Amoudi O.S.B. [10] ได้ศึกษาพบว่า ปูนซีเมนต์ที่ผสมด้วยร้อยละ 20 ของเถ้าลอย หรือร้อยละ 10 ของซิลิกาฟูม หรือร้อยละ 70 ของตะกอนเตาถลุงเหล็ก จะมีความต้านทานโซเดียมซัลเฟตได้ดีมาก แต่จะต้านทานซัลเฟตได้แย่งเมื่อเป็นกรณีของแมกนีเซียมซัลเฟต

Al- Moudi O.S.B. et al. [7] ได้ศึกษาการขยายตัวและการสูญเสียกำลังอัดของมอร์ตาร์แฉะในสารละลายโซเดียมและแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 โดยนำปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอย ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ผสมซิลิกาฟูม และปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ผสมตะกอนเตาถลุงเหล็ก พบว่า การสูญเสียกำลังอัดในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต มีค่ามากกว่าในสารละลายโซเดียมซัลเฟต เมื่อเปรียบเทียบค่าการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ปรากฏว่ามีค่ามากกว่าการขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ดังนั้นจึงให้ความสำคัญต่อการสูญเสียกำลังอัดในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ผสมซิลิกาฟูมให้ผลดีที่สุดที่สุดในสารละลายโซเดียมซัลเฟต แต่ไม่แนะนำให้ใช้ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

S.U. Al-Dulaijan [11] ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายซัลเฟต โดยปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 นอกจากนี้ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอย และปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ผสมซิลิกาฟูม จากการศึกษาพบว่า การใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าลอย และปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ผสมซิลิกาฟูม ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีความสามารถใกล้เคียงกัน สามารถใช้ทดแทนกันได้ทั้งในสภาพแวดล้อมซัลเฟต



สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ	
ห้องสมุดงานวิจัย	
วันที่.....	12 ต.ค. 2555
เลขทะเบียน.....	245564
เลขเรียกหนังสือ.....	