บทที่ 2

คอนกรีตผสมขี้เถ้าลอย

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1 ขี้เถ้าลอย

2.1.1 ส่วนประกอบทางเคมี

ส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญของขี้เถ้าลอยได้แก่ SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, CaO, CaO, MgO, Na_2O, K_2O, SO_3, และ C ส่วนประกอบทางเคมีเหล่านี้จะมีความแตกต่างกันในเชิงปริมาณตามแหล่งที่มาของขี้เถ้าลอยนั้นๆ ซึ่งในทางปฏิบัติถือว่าเป็นปัญหาต่อการนำขี้เถ้าลอยไปใช้เพราะยากต่อการควบคุมคุณภาพและคุณสมบัติต่างๆ

เนื่องจากขี้เถ้าลอยเป็นวัสดุที่ได้จากการเผาถ่านหิน และถ่านหินที่ใช้กันในแถบยุโรป อเมริกา และญี่ปุ่น เป็นถ่านหินชนิดดีให้ความร้อนสูง จึงแตกต่างจากถ่านหินในประเทศไทยซึ่งเป็นถ่านหินลิกไนต์ให้พลังงานความร้อนต่ำ นอกจากนี้ส่วนประกอบทางเคมีของขี้เถ้าลอยที่ได้ยังแตกต่างออกไปดังแสดงในตาราง 2.1 ซึ่งแสดงองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญเปรียบเทียบกันระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ขี้เถ้าลอยในต่างประเทศและขี้เถ้าลอยแม่เมาะ ความแตกต่างที่เห็นได้ชัดคือปริมาณ CaO ในขี้เถ้าลอยส่วนใหญ่จะมีประมาณ 3-6% แต่ในขี้เถ้าลอยแม่เมาะมีถึง 28-40% ซึ่งอาจถือได้ว่าเป็นปริมาณสารเคมีหลักในขี้เถ้าลอยแม่เมาะคล้ายๆ กับปริมาณสารเคมีหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ส่วนปริมาณ $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ รวมกันในขี้เถ้าลอยต่างประเทศจะมีปริมาณสูงถึง 66-92% ในขณะที่ขี้เถ้าลอยแม่เมาะมีปริมาณเพียง 38-51% เท่านั้น

2.1.2 ประเภทของขี้เถ้าลอย

ตามมาตรฐาน ASTM C 618 ได้แบ่งประเภทของขี้เถ้าลอยตามปริมาณของ $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ ไว้ดังนี้

1. ขี้เถ้าลอย class C จะมีส่วนประกอบของ $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ อยู่ปริมาณไม่ต่ำกว่า 50%

2. ขี้เถ้าลอย class F จะมีส่วนประกอบของ $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ อยู่ปริมาณไม่ต่ำกว่า 70%

นอกจากนี้ความแตกต่างระหว่างขี้เถ้าลอยทั้งสองชนิด คือขี้เถ้าลอย class F ได้จากการเผาถ่านหินประเภทแอนทราไซต์ หรือบิทูมินัส ซึ่งถ่านหินทั้งสองชนิดนี้เป็นถ่านหินที่ใช้กันมากในแถบยุโรป อเมริกาและญี่ปุ่น เป็นถ่านหินเกรดดี คือให้พลังงานความร้อนมาก เพราะมีปริมาณคาร์บอนสูง มีความแข็งและเป็นถ่านหินที่เกิดมาก่อนถ่านหินประเภทอื่น ส่วนขี้เถ้าลอย class C ได้จากการเผาถ่านหินประเภทซับบิทูมินัส หรือลิกไนต์เป็นถ่านหินเกรดต่ำมีปริมาณคาร์บอนน้อย

อนึ่งขี้เถ้าลอย class F จะมีปริมาณคาร์บอนหลงเหลืออยู่มาก และอาจมีปริมาณสารอินทรีย์อยู่ด้วย ในขณะที่ขี้เถ้าลอย class C จะมีปริมาณสารทั้งสองเหลืออยู่น้อยกว่า แต่จะมี CaO ในปริมาณเกินกว่า 10% จึงจัดอยู่ในประเภทสารปอซโซลาน และสารเชื่อมประสานทั้งนี้เพราะขี้เถ้าลอยที่มีปริมาณ CaO สูงจะทำปฏิกิริยาทางเคมีกับซิลิกาและอลูมินาในขี้เถ้าลอยนั้นเองได้ ส่วนขี้เถ้าลอย class F เป็นสารปอซโซลานแต่เพียงอย่างเดียว Metha (3) จึงได้แบ่งขี้เถ้าลอยออกเป็น 2 ชนิดตามปริมาณคัลเซียมในขี้เถ้าลอยคือ

1. ประเภทแรกจะมีปริมาณ CaO น้อยกว่า 5% มักจะเป็นขี้เถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินประเภทแอนทราไซต์ และบิทูมินัส

2. ประเภทสองจะมีปริมาณ CaO ประมาณ 15-35% มักจะเป็นขี้เถ้าลอยที่ได้จากการเผ่าถ่านหินประเภท ซับบิทูมินัส และลิกไนต์

2.1.3 ปฏิกิริยาทางเคมี

ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำทำให้เกิดการก่อตัว และแข็งตัวซึ่งเรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ปฏิกิริยาจะขึ้นกับสารประกอบในปูนซีเมนต์ สารประกอบเหล่านี้จะทำปฏิกิริยาและมีอิทธิพลต่อกันและกัน ผลิตผลของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นมีชื่อรวมๆ ว่าซีเมนต์เจล (cement gel) ประกอบด้วยคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต(CSH) ประมาณร้อยละ 50-90 โดยปริมาตร คัลเซียมไฮดรอกไซด์(CH)ประมาณร้อยละ 20-25 คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์จะขึ้นอยู่กับคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต เพราะมีปริมาณสูงสุดโดยที่เป็นอนุภาคเล็กๆ มีลักษณะเป็นผลึกที่หยาบมาก และมีการเกิด

ปฏิกิริยาดังนี้

$$2(3CaO.SiO_2) + 6H_2O \longrightarrow 3CaO.SiO_2.3H_2O + Ca(OH)_2$$

หรือ $$2(2CaO.SiO_2) + 4H_2O \longrightarrow 3CaO.SiO_2.3H_2O + Ca(OH)_2$$

ขี้เถ้าลอยเป็นสารปอซโซลานอย่างหนึ่งตาม ASTM C 595 ซึ่งในความหมายของสารปอซโซลานนั้นหมายถึง วัสดุซึ่งตัวของมันเองไม่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน แต่สามารถทำปฏิกิริยากับคัลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ และก่อตัวเป็นสารเชื่อมประสาน ดังนั้นถ้าใส่วัสดุปอซโซลานในส่วนผสมคอนกรีตก็จะทำปฏิกิริยากับคัลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ที่เหลือจากปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้สารประกอบคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และคัลเซี่ยมอลูมิเนตไฮเดรตเหมือนกับปฏิกิริยาของ C_3S และ C_2S แต่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะช้ากว่า ซึ่งอาจเขียนเป็นสมการเคมีได้ดังนี้

$$3Ca(OH)_2 + 2SiO_2 \longrightarrow 2CaO.2SiO_2.3H_2O$$

หรือ $$3Ca(OH)_2 + 2Al_2O_3 \longrightarrow 3CaO.2Al_2O_3.3H_2O$$

2.2 การผสมขี้เถ้าลอยในคอนกรีต

การผสมขี้เถ้าลอยในคอนกรีตอาจแยกเป็น 3 วิธีหลักตามเอกสารอ้างอิงที่ 5 คือ แยกได้ดังนี้

2.2.1 การแทนที่ (replacement method) โดยการใช้ขี้เถ้าลอยผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ที่ลดลงอาจกระทำได้โดยปริมาตรหรือโดยน้ำหนัก แต่การแทนที่โดยน้ำหนักจะเป็นที่นิยมมากกว่าเพราะง่ายและสะดวกกว่า การใช้ขี้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์โดยน้ำหนักจะได้คอนกรีตที่มีกำลังสูงกว่าการแทนที่โดยปริมาตร และเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ได้จากซีเมนต์ล้วนๆ จะพบว่ากำลังของคอนกรีตที่ใช้ขี้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์บางส่วนทั้งโดยปริมาตรและโดยน้ำหนักจะให้กำลังต่ำกว่าคอนกรีตที่ได้จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน

2.2.2 การผสมเพิ่ม (addition method) โดยการใช้ขี้เถ้าลอยผสมเพิ่มในซีเมนต์ วิธีการนี้มักจะนิยมใช้เพื่อการปรับปรุงคุณสมบัติความสามารถทำงานได้ ลดการเยิ้มของคอนกรีต คอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยโดยวิธีนี้มักจะให้กำลังสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา ทั้งนี้เพราะขี้เถ้าลอยเป็นส่วนเพิ่มจากซีเมนต์จะเป็นส่วนเพิ่มกำลังได้จากพฤติกรรมของสารปอซโซลาน

2.2.3 การแทนที่และผสมเพิ่มรวมกัน (replacement-addition method) โดยยึดหลักเพื่อปรับปรุงกำลังของคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยให้ดีขึ้นกว่าการใช้ขี้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว และยังต้องการจะประหยัดการใช้ปริมาณซีเมนต์เพื่อลดราคาการผลิตคอนกรีตให้ถูกลง จึงใช้ขี้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่มากกว่าปูนซีเมนต์ที่ลดลง เพื่อเร่งการเพิ่มกำลังของคอนกรีตโดยปฏิกิริยาปอซโซลานเนื่องจากโดยทั่วไปจะถือกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วันเป็นเกณฑ์

2.3 อิทธิพลของขี้เถ้าลอยที่มีต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสด

2.3.1 ลักษณะของคอนกรีตสด

2.3.1.1 บทบาทของส่วนผสมในคอนกรีตสด

ส่วนประกอบของคอนกรีตได้แก่ ส่วนผสมของซีเมนต์ น้ำ และมวลรวม วัสดุมวลรวมจะต้องเป็นวัสดุที่เฉื่อยจะมีประมาณ 75% ของปริมาตรคอนกรีตซึ่งจะช่วยลดปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสมลงได้มาก ทำให้การคืบและการหดตัวเมื่อแข็งตัวเกิดขึ้นน้อย ส่วนผสมระหว่างซีเมนต์และน้ำรวมเรียกว่า ซีเมนต์เพสต์ ในคอนกรีตสดซีเมนต์จะมีบทบาท 2 ประการ คือ ประการแรกซีเมนต์เพสต์จะแทรกตัวอยู่ระหว่างช่องว่างของมวลรวมและเป็นตัวแยกมวลรวมออกจากกัน แต่ยังคงให้มวลรวมแพร่กระจายอยู่ในเนื้อเพสต์ ประการที่สองซีเมนต์เพสต์จะทำหน้าที่เป็นวัสดุหล่อลื่นระหว่างมวลรวมทำให้คอนกรีตสดอยู่ในสภาวะพลาสติกได้ คุณสมบัติของคอนกรีตสดจะขึ้นอยู่กับสมบัติและปริมาณของเพสต์ การลดปริมาณเพสต์จะลดการแพร่กระจายของมวลรวม เพิ่มแรงเสียดทานระหว่างมวลรวมทำให้คอนกรีตที่ได้มีความหนืดสูง แต่ถ้าเพิ่มปริมาณเพสต์จะได้คอนกรีตที่เนื้อนุ่ม และเมื่อลดปริมาณเพสต์ลงต่ำกว่าปริมาณที่ป้องกันการแยกตัวของมวลรวมได้ก็จะได้คอนกรีตสดที่กระด้างและเกิดการแยกตัวได้ง่าย นอกเหนือจากปริมาณเพสต์ที่เหมาะสมสภาวะพลาสติกของคอนกรีตสดยังขึ้นกับส่วนประกอบในเพสต์ ถ้าปริมาณน้ำน้อยจะมีความหนืดสูง เพสต์ลักษณะนี้จะสามารถแพร่กระจายมวลรวมได้ แต่ไม่สามารถทำให้เกาะรวมตัวกันอยู่ได้จึงทำให้การหล่อลื่นมีน้อย คอนกรีตแบบนี้กระด้าง ความหนืดสูงแต่ถ้าปริมาณน้ำมากขึ้นจะทำให้เพสต์อ่อนนุ่มขึ้น แต่ถ้าปริมาณน้ำมากจนเกินไปจะทำให้เพสต์ไม่สามารถแพร่กระจายมวลรวมและทำให้เกาะรวมตัวกันอยู่ได้ ทำให้เกิดการแยกตัวและการเยิ้มมีความสามารถทำงานได้ต่ำ

2.3.1.2 แรงกระทำระหว่างอนุภาคในซีเมนต์เพสต์

ซีเมนต์เพสต์อยู่ในสภาวะพลาสติกเพราะอนุภาคซีเมนต์และฟองอากาศแพร่กระจายในน้ำเกิดแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคที่ทำให้อยู่ร่วมกันโดยมิให้อนุภาคสัมผัสกัน แรงกระทำร่วมกันระหว่างอนุภาคนี้จะมีทั้งแรงดูดและแรงผลัก แรงดูดที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงระหว่างโมเลกุลที่เรียกว่า แวน เดอ วาล์ว แรงผลักจะเกิดจากแรงผลักกระแสไฟฟ้าของอิออนชนิดเดียวกัน และการดูดซึมโมเลกุลของน้ำเคลือบรอบอนุภาคซีเมนต์ ผลเนื่องจากแรงระหว่างอนุภาคก็มีทิศทางตรงกันข้ามจะทำให้เกิดพลังงานศักย์สะสมต่ำสุด แรงระหว่างอนุภาคนี้ทำให้เพสต์ในสภาวะเหลวมีกำลังรับแรงเฉือยสามารถทำให้เกิดการไหลต่อเนื่อง ถ้าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์มากกว่า 0.3 ซึ่งเป็นเพสต์ที่ใช้ในคอนกรีต เพสต์จะถูกทำให้หุ่มโดยการเติมน้ำ หรือสารที่ช่วยเพิ่มแรงผลักระหว่างอนุภาค เป็นผลให้สภาวะพลาสติกเสียไป เปลี่ยนเพสต์จากสภาวะพลาสติกไปสู่สภาวะที่เป็นของไหล แม้ว่าแรงระหว่างอนุภาคจะเกิดขึ้นในสภาวะที่เป็นของไหล ความเข้มข้นของอนุภาคจะต่ำจนกระทั่งระยะห่างระหว่างอนุภาคเพิ่มขึ้นจนแรงระหว่างอนุภาคอ่อนลง

2.3.1.3 กลไกการเปลี่ยนความข้นเหลวของซีเมนต์เพสต์

สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์จะมีผลอย่างมากต่อซีเมนต์เพสต์ สภาวะพลาสติกของเพสต์จะขึ้นกับผลรวมของแรงกระทำระหว่าอนุภาคและผลของการหล่อลื่นของน้ำระหว่างอนุภาค เมื่อปริมาณน้ำมีเพียงพอที่จะหล่อลื่นแต่ยังไม่เพียงพอที่จะบรรจุในช่องว่าง การยึดเหนี่ยวในเพสต์จึงขึ้นกับแรงคะบิลารี่ของน้ำซึ่งเกิดจากแรงตึงผิวเช่นเดียวกับการพองตัวของทราย (bulking) เมื่อปริมาณน้ำเพิ่มมากขึ้นการยึดเกาะจะเพิ่มมากขึ้น และลดลงอย่างรวดเร็ว เพราะแรงคะบิลารีลดลงอย่างรวดเร็ว ช่องว่างก็จะมีขนาดเล็กลง ในที่สุดก็จะถึงจุดที่แรงคะบิลารีหมดไปเพราะน้ำจะกั้นช่องว่างโดยการเกิดฟองอากาศ และบรรจุเต็มในช่องว่างนั้น Power(7) เรียกปริมาณน้ำที่จุดนี้ว่า ปริมาณน้ำพื้นฐาน (basis water content) และเรียกความข้นเหลวที่จุดนี้ว่า ความข้นเหลวพื้นฐาน (basis consistency) ซึ่งเป็นจุดที่ปริมาณน้ำมากที่สุดในส่วนผสมที่ทำให้ปริมาณช่องว่างในเพสต์ต่ำสุด การยึดเกาะในเพสต์ที่ความข้นเหลวพื้นฐานนี้เป็นผลเนื่องมาจากแรงดึงดูดระหว่างอนุภาค ความข้นเหลวพื้นฐานนี้จะมีค่าการยุบตัวประมาณ 1-3 นิ้ว การเพิ่มปริมาณน้ำมากกว่าปริมาณน้ำพื้นฐานจะทำให้ความข้นเหลวของเพสต์มากขึ้นอย่างรวดเร็ว เพราะจะทำให้อนุภาคซีเมนต์แพร่กระจายมากซึ่งจะลดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาค

2.3.2 <u>ความสามารถทำงานได้</u>

2.3.2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถทำงานได้

สิ่งที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสดขึ้นอยู่กับส่วนผสมได้แก่ ปริมาณน้ำ อัตราส่วนผสม คุณสมบัติของมวลรวม ชนิดของปูนซีเมนต์ และสารผสมเพิ่ม นอกจากนี้คุณสมบัติของคอนกรีตสดยังขึ้นกับเวลาและอิทธิพลจากสิ่งแวดล้อมอื่น ได้แก่ความชื้นและอุณหภูมิ

1. ปริมาณน้ำในส่วนผสม น้ำมีอิทธิพลต่อความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตสดโดยตรง การเพิ่มปริมาณน้ำทำให้คอนกรีตมีสภาพเหลว การเทและอัดแน่นได้ง่าย แต่กลับทำให้กำลังรับแรงลดลง เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์สูงขึ้น นอกจากนี้คอนกรีตสดที่เหลวยังเกิดการแยกตัวได้ง่าย ในทางกลับกันการมีน้ำผสมอยู่น้อยไปจะทำให้คอนกรีตสดมีลักษณะแห้ง การผสมและการอัดแน่นทำได้ยากขึ้น

2. ลักษณะรูปร่างและลักษณะผิวของมวลรวมจะมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสด อนุภาคที่กลมจะทำให้คอนกรีตมีความสามารถทำงานได้ดีกว่ามวลรวมที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมเป็นมุมเพราะมวลรวมที่ขัดกันระหว่างอนุภาค มวลรวมที่กลมยังมีพื้นที่ผิวต่ำทำให้ต้องการปริมาณซีเมนต์เพสต์มาเคลือบและหล่อลื่นน้อย ขนาดและการกระจายอนุภาคของมวลรวมก็มีอิทธิพลต่อความสามารถทำงานได้ของคอนกรีต มวลรวมที่มีอนุภาคขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวมากทำให้ต้องการน้ำและซีเมนต์เพสต์มากขึ้น

3. ปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ที่มีความไวต่อปฏิกิริยาจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เร็วและจะลดความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตลง ปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดมากจะต้องการน้ำมากกว่าปูนซีเมนต์ชนิดอื่น เพราะมีพื้นที่ผิวมาก และทำให้ปฏิกิริยาทางเคมีได้เร็วขึ้น

4. เวลาและอุณหภูมิ ความสามารถทำงานได้ลดลงเมื่ออุณหภูมิสูง คอนกรีตที่ผสมเสร็จแล้วทิ้งไว้จะทำให้ความสามารถทำงานได้ลดลงเนื่องจากการไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ การสูญเสียน้ำจากการระเหยและการดูดน้ำของมวลรวม การผสมน้ำเพิ่มจะทำให้ความสามารถทำงานได้ดีขึ้นอีกถ้าคอนกรีตยังไม่ก่อตัว แต่การเพิ่มน้ำมากจะทำให้กำลังรับแรงลดลง

5. สารผสมเพิ่ม การเพิ่มความสามารถทำงานได้ของคอนกรีต

สามารถทำได้โดยใช้สารผสมเพิ่มหน่วงการก่อตัว สารจำพวกสารกระจายกักฟองอากาศและสารลดน้ำก็ช่วยทำให้ความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตดีขึ้น เพราะสามารถเพิ่มความไหลลื่นให้สูงขึ้น ผงสารผสมเพิ่มเช่นขี้เถ้าลอยก็ช่วยให้ความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตดีขึ้น ลดการเยิ้มและการแยกตัวของคอนกรีต

2.3.2.2 ผลของขี้เถ้าลอยต่อความสามารถทำงานได้

การเติมขี้เถ้าลอยในส่วนผสมคอนกรีตจะมีผลต่อความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตสดอย่างไรนั้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัย ดังต่อไปนี้คือ

1. วิธีการผสม การใช้ขี้เถ้าลอยผสมในคอนกรีตมีวิธีหลัก 3 วิธี ดังกล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.2 ซึ่งในแต่ละวิธีนั้นขี้เถ้าลอยจะมีผลต่อความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตสดแตกต่างกันออกไปดังนี้

- การใช้ขี้เถ้าลอยผสมคอนกรีตในลักษณะการแทนที่ปูนซีเมนต์นั้น เนื่องจากขี้เถ้าลอยมีลักษณะเป็นผงละเอียดมีความต้องการน้ำประมาณใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ การเติมขี้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์โดยปริมาตรมักจะไม่ปรากฏผลในด้านการปรับปรุงความสามารถทำงานได้ แต่ด้วยขี้เถ้าลอยมีความถ่วงจำเพาะประมาณ 2 ใน 3 ของซีเมนต์ การแทนที่ซีเมนต์โดยน้ำหนักจะทำให้ปริมาณเพสต์เพิ่มขึ้นเป็นการเพิ่มสารหล่อลื่นรอบๆอนุภาคของมวลรวม (8, 9, 15)

- การใช้ขี้เถ้าลอยผสมคอนกรีตในลักษณะผสมเพิ่มในซีเมนต์นั้น อาจจะกระทำได้ใน 2 ลักษณะคือใช้แทนที่ทราย หรือใช้แทนที่ทั้งหินและทราย การใช้ขี้เถ้าลอยเป็นมวลรวมละเอียดในการผสมคอนกรีต พบว่าจะได้คอนกรีตที่มีลักษณะหยาบกระด้าง และเกิดการจมตัวของหิน เนื่องจากขี้เถ้าลอยมีขนาดละเอียดมาก อย่างไรก็ตามการใช้ทรายธรรมชาติแทนบางส่วนจะทำให้ความสามารถทำงานได้ดีขึ้น(29) ส่วนการใช้ขี้เถ้าลอยแทนที่ทั้งทรายและหินนั้น ก็จะทำให้ความสามารถทำงานได้ลดลงทั้งนี้เนื่องจากเป็นการเพิ่มอนุภาคเล็กๆเข้าไปในส่วนผสมทำให้แรงหนืด (viscous drag) เพิ่มขึ้น (11, 12)

- การใช้ขี้เถ้าลอยผสมคอนกรีตในลักษณะการแทนที่และผสมเพิ่มรวมกันโดยการใช้ขี้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ในปริมาณที่มากกว่าซีเมนต์ที่ลดลงแล้ว ความสามารถทำ

งานได้ของคอนกรีตสดจะถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น แม้ว่าขี้เถ้าลอยนั้นจะมีขนาดอนุภาคใหญ่ก็ตาม และโดยเฉพาะอย่างยิ่งมวลรวมที่ขาดส่วนละเอียด ขี้เถ้าลอยจะมีส่วนช่วยในการปรับปรุงการกระจายขนาดคละของมวลรวมละเอียดให้ดีขึ้น พบว่าการใช้ขี้เถ้าลอยปริมาณ 30% โดยน้ำหนักของซีเมนต์แทนที่ซีเมนต์ที่ลดลง 20% โดยน้ำหนักจะทำให้ความต้องการน้ำของคอนกรีตลดลง 7.2% ที่การยุบตัว 2.5 นิ้ว(10, 26)

2. คุณภาพของขี้เถ้าลอย ได้แก่ ประเภทของขี้เถ้าลอย ขนาดและรูปร่างอนุภาคของขี้เถ้าลอย

การที่ขี้เถ้าลอยแตกต่างจากสารปอซโซลานชนิดอื่นๆ ซึ่งมักจะทำให้ความต้องการน้ำของคอนกรีตสดเพิ่มมากขึ้น การแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วยขี้เถ้าลอยจะทำให้ความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตสดดีขึ้น เนื่องจากความต้องการน้ำของมอร์ต้าลดลง(13, 14) แต่ขี้เถ้าลอยบางชนิดทำให้ความต้องการน้ำในมอร์ต้าเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะกรณีที่ขี้เถ้าลอยมีปริมาณคาร์บอนสูง(21, 22) เพราะโพรงคาร์บอนมีขนาดใหญ่ ในทำนองเดียวกันขี้เถ้าลอยที่มีคัลเซียมสูง ปริมาณ C_3A จะเกิดขึ้นมากจึงมีแนวโน้มที่จะเพิ่มความต้องการน้ำเนื่องจากปฏิกิริยาการเกิดคัลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตหรือซัลโฟอลูมิเนตไฮเดรต จะทำให้สูญเสียความข้นเหลวอย่างรวดเร็ว ขนาดและรูปร่างของขี้เถ้าลอยก็เช่นกันจะมีผลต่อความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตที่ผสมขี้เถ้าลอย เพราะลักษณะที่เป็นเม็ดๆ ของมวลรวมหยาบก็ดี มวลรวมละเอียดก็ดี และของซีเมนต์เองก็ดี จะมีผลให้เกิดปริมาตรช่องว่างและความต้องการน้ำในเนื้อคอนกรีต การเติมอนุภาคที่มีเม็ดละเอียดโดยเฉพาะ 1-20 ไมโครเมตร จะมีผลอย่างมากในการลดปริมาณช่องว่างในเนื้อคอนกรีต ทำให้ความต้องการน้ำของคอนกรีตลดน้อยลง นอกจากนี้ผิวและรูปร่างของอนุภาคขี้เถ้าลอยที่มีลักษณะเรียบและเป็นทรงกลมจะมีส่วนช่วยเสริมการปรับปรุงความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตสด แม้ว่าในการตรวจดูด้วยกล้องจุลทรรศน์พบว่าขี้เถ้าลอยจะมีอนุภาคที่เป็นเหลี่ยม หรือเป็นรูกลวงก็ตามแต่มีปริมาณน้อย และผิวเรียบซึ่งเกือบจะไม่มีผลในการลดความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตสด (19,20) แต่ Smith(15) ให้ผลสรุปในทางตรงกันข้าม คือความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตสดไม่ได้ขึ้นอยู่กับรูปร่างที่เป็นทรงกลมของอนุภาคขี้เถ้าลอยซึ่งได้ทำการทดสอบโดยใช้ผงสารผสมเพิ่มอย่างอื่นแต่ก็ให้ผลไม่แตกต่างจากการใช้ขี้เถ้าลอย

3. วิธีการทดสอบความสามารถทำงานได้ การวัดความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตมีอยู่หลายวิธี ได้แก่ การทดสอบค่ายุบตัว การทดสอบการไหล การทดสอบการอัดแน่น การทดสอบการจมของลูกบอลล์เคลลี่ การทดสอบปรีโมลดิง และการทดสอบ

วีบี วิธีการเหล่านี้วัดคุณสมบัติหลายๆด้านของความสามารถทำงานได้ของคอนกรีต ดังนั้นผลของการเติมขี้เถ้าลอยในคอนกรีตที่มีต่อความสามารถทำงานได้จึงขึ้นอยู่กับวิธีการทดสอบเหล่านี้ด้วย การใช้ขี้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์โดยน้ำหนักจะพบว่าจะทำให้ความต้องการน้ำในคอนกรีตลดลง 5.6-6.0% ทุกๆการใช้ขี้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ 10% โดยน้ำหนัก ถ้าทดสอบโดยการทดสอบการอัดแน่นและการทดสอบวีบีจะพบว่าความต้องการน้ำในคอนกรีตลดลง 3.5% (28)

4. สัดส่วนผสมของคอนกรีต ได้แก่ปริมาณซีเมนต์ น้ำ มวลรวม และปริมาณขี้เถ้าลอยที่เติมในส่วนผสม ซึ่งจะมีผลต่อความสามารถทำงานได้ของคอนกรีต พบว่าขี้เถ้าลอยสามารถช่วยปรับปรุงความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตสดได้ดีโดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนผสมที่มีปริมาณซีเมนต์ต่ำ(9, 14) อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ก็เช่นกันพบว่า ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.4 ใช้ขี้เถ้าลอยแทนที่ 10% โดยน้ำหนักจะทำให้ความต้องการน้ำในคอนกรีตลดลง 5.0-5.5% เพื่อรักษาหน่วยแรงคลากให้คงที่ แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เป็น 0.6 จะทำให้ความต้องการน้ำในคอนกรีตลดลง 3.5-4.5% (28) นอกจากนี้ปริมาณขี้เถ้าลอยที่เติมในส่วนผสมก็มีผลต่อความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตสด การใช้ขี้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ 25-30% โดยน้ำหนัก จะสามารถลดความต้องการน้ำในคอนกรีตสดลงโดยเฉลี่ย 7% โดยรักษาค่ายุบตัวให้คงที่ (16, 17) การใช้ขี้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ 50% โดยน้ำหนักจะสามารถลดน้ำได้ถึง 25% โดยค่ายุบตัวคงที่(10)

2.3.2.3 การแยกตัว

คอนกรีตสดนับตั้งแต่เริ่มผสมจนกระทั่งถึงการแต่งผิว พบว่าในระหว่างการขนย้าย การเท การทำให้แน่น จะมีแรงกระทำต่อคอนกรีตสดทุกขั้นตอน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องรักษาเนื้อคอนกรีตสดให้มีความคงตัวสม่ำเสมอยู่ตลอดเวลา มิฉะนั้นแล้วอาจทำให้เกิดโพรงได้ง่าย มีความแน่นลดลง จะมีข้อเสียอื่นๆตามมาเช่น ทำให้กำลังของคอนกรีตลดลง ความทึบน้ำน้อยลง และอาจทำให้เหล็กเกิดสนิมได้ง่าย โดยทั่วไปแล้วผลอันที่เกิดจากการแยกตัวนั้นอาจเกิดได้ใน 2 ลักษณะคือ

1. การแยกตัวภายใน (internal segregation) เกิดจากการแยกชั้นของมวลรวมในระหว่างการทำให้แน่น

2. การแยกตัวภายนอก (external segregation) เกิดจากแรงภายนอกก่อนการทำให้แน่น เช่น การเทจากที่สูงจะทำให้มวลรวมขนาดใหญ่สะสมอยู่ทางด้านล่างของแบบ เป็นต้น

การแยกตัวภายในเกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่นระหว่างมวลรวมหยาบและมอร์ต้า การแยกตัวภายนอกมักจะเกิดจากการเกาะตัวไม่เพียงพอ เนื่องจากปริมาณน้ำมากเกินไป เรียกอีกอย่างหนึ่งได้ว่า การแยกตัวแบบเปียก (wet segregation) และถ้าหากมีน้ำน้อยเกินไปก็จะทำให้เกิดการแยกตัวเช่นกัน เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การแยกตัวแบบแห้ง (dry segregation) การแยกตัวจะเป็นอันตรายอย่างยิ่งต่อคุณสมบัติของคอนกรีต การป้องกันการแยกตัวจะทำได้ง่ายกว่าและปลอดภัยกว่าการซ่อมแซมคอนกรีตเนื่องจากการแยกตัว จะเห็นได้ว่าการแยกตัวจะเกิดจากสัดส่วนผสมของคอนกรีตและแรงภายนอกเข้ามากระทำต่อคอนกรีตสด เมื่อสัดส่วนผสมของคอนกรีตสดเข้ามาเกี่ยวข้อง ดังนั้นปัจจัยที่มีผลต่อการแยกตัวจะได้แก่

1. การเพิ่มขนาดโตสุดของมวลรวมมากกว่า 1 นิ้ว
2. การเพิ่มปริมาณของวัสดุมวลรวมที่มีขนาดโตสุด
3. วัสดุมวลรวมหยาบที่มีความถ่วงจำเพาะสูงเมื่อเทียบกับวัสดุมวลรวมละเอียด
4. การลดปริมาณส่วนละเอียดในทราย
5. การลดปริมาณซีเมนต์
6. รูปร่างของมวลรวม ลักษณะผิวที่ไม่เรียบแบน
7. ส่วนผสมที่มีปริมาณน้ำมากหรือน้อยจนเกินไป

ผลของความถ่วงจำเพาะและปริมาณน้ำจะมีอิทธิพลอย่างมากต่อการเกิดการแยกตัวภายในระหว่างการทำให้คอนกรีตแน่น การดักจับฟองอากาศในคอนกรีตสดจะช่วยให้การแยกตัวเกิดขึ้นน้อยลง เพราะฟองอากาศจะช่วยให้ซีเมนต์เพสต์เหนียว มีการเกาะตัวที่ดีขึ้น ด้วยเหตุผลเดียวกันนี้การเติมผงสารที่มีคุณสมบัติปอซโซลาน หรือผงสารละเอียดก็สามารถช่วยลดการแยกตัวของคอนกรีตได้

2.3.3 ปริมาณฟองอากาศในคอนกรีตสด

2.3.3.1 รูปแบบของฟองอากาศ

อากาศในคอนกรีตจะแทรกอยู่ในซีเมนต์เพสต์ในลักษณะของฟองอากาศแทรกอยู่ในโพรงช่องว่างระหว่างอนุภาคซีเมนต์และมวลรวม อากาศในคอนกรีตจะมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสด ลักษณะของฟองอากาศในคอนกรีตอาจจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

1. การกักกันฟองอากาศ (entraped air) เป็นผลเนื่องมาจากการอัดแน่นที่ไม่สมบูรณ์กักกันฟองอากาศที่มีอยู่ตามอนุภาคมวลรวมให้รวมตัวเป็นสัดส่วน

2. การกระจายฟองอากาศ (entrained air) เป็นผลเนื่องมาจากการเติมสารกระจายฟองอากาศทำให้เกิดฟองอากาศจากปฏิกิริยาเคมีหรือผลจากประจุไฟฟ้า ส่วนมากจะทำให้ฟองอากาศเล็กๆขยายตัวให้โตขึ้นเพื่อการไหลลื่นที่ดีขึ้น

2.3.3.2 ผลของฟองอากาศ

การมีปริมาณฟองอากาศในคอนกรีตสดจะทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตสด และคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วเปลี่ยนไป ฟองอากาศจะทำให้ปริมาตรของเพสต์เพิ่มขึ้นมีความเหนียวและเพิ่มความสามารถทำงานได้ให้ดีขึ้น โอกาสที่จะเกิดการแยกตัวมีน้อย แนวโน้มที่จะเกิดการเยิ้มลดลง กำลังของคอนกรีตจะลดลง แต่ความคงทนจะถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น ปริมาณฟองอากาศในซีเมนต์เพสต์จะขึ้นกับ ลักษณะและปริมาณของสารกระจายฟองอากาศที่ใช้เติมในส่วนผสม คุณสมบัติของซีเมนต์ สัดส่วนผสมของเพสต์ ความข้นเหลวของคอนกรีต วิธีการและเวลาในการผสม วิธีการทำงานและการเทคอนกรีต อย่างไรก็ดีคอนกรีตสดและคอนกรีตแห้งจะมีคุณสมบัติแตกต่างตามปริมาณฟองอากาศด้วยเช่นกัน โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตจะมีปริมาณฟองอากาศอยู่ราว 3-4%(7) ในคอนกรีตที่ไม่มีสารกระจายฟองอากาศเมื่อปริมาณน้ำในส่วนผสมมากขึ้น ค่ายุบตัวจะมากขึ้น แต่ปริมาณฟองอากาศจะลดลง แต่ในคอนกรีตที่เติมสารกระจายฟองอากาศจะให้ผลในทางตรงกันข้าม คือเมื่อค่าการยุบตัวมากขึ้น ปริมาณน้ำในส่วนผสมจะมากขึ้น และปริมาณฟองอากาศจะมากขึ้นด้วย

2.3.3.3 ผลของขี้เถ้าลอยต่อปริมาณฟองอากาศ

ขี้เถ้าลอยจะมีผลต่อปริมาณฟองอากาศใน 2 ลักษณะ (29) คือ เพิ่มปริมาตรช่องว่างในเนื้อมอร์ต้าจากความพรุนในตัวขี้เถ้าลอยเอง หรือลดปริมาณฟองอากาศเนื่องจากปริมาณคาร์บอนที่หลงเหลืออยู่ในขี้เถ้าลอยซึ่งคาร์บอนนี้จะเป็นตัวดูดซึมสารเพิ่มปริมาณฟองอากาศ

ในคอนกรีตที่ไม่ใส่สารกระจายฟองอากาศ ผลของขี้เถ้าลอยที่มีต่อปริมาณฟองอากาศในมอร์ต้าจะทำให้ปริมาณฟองอากาศในมอร์ต้าลดลง (30) โดยเฉพาะขี้เถ้าลอยที่มีปริมาณคาร์บอนสูง ส่วนในคอนกรีตที่มีสารกระจายฟองอากาศ การใช้ขี้เถ้าลอยผสมในคอนกรีตจะทำ

014316

ให้ความต้องการสารกระจายฟองอากาศเพิ่มขึ้น เพื่อให้ได้ปริมาณฟองอากาศตามต้องการ (27, 31, 32) คาร์บอนในขี้เถ้าลอยจะดูดซับสารกระจายฟองอากาศประมาณ 1.2-2.0 เท่าของปริมาณที่ใช้ตามปกติ ซึ่งปริมาณความต้องการสารกระจายฟองอากาศของคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยจะมีความสัมพันธ์กับการสูญเสียน้ำหนักจากการเผาขี้เถ้าลอย พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาณของคาร์บอน ประเภทและส่วนประกอบทางเคมีของขี้เถ้าลอย (19, 26, 34) นอกจากนี้ Minnick (33) ได้ตั้งข้อสังเกตว่าปริมาณการดูดซับของคาร์บอนในขี้เถ้าลอยที่ผสมกับสารกระจายฟองอากาศสามารถที่ทำนายได้ และปริมาณสารกระจายฟองอากาศที่ถูกดูดซับโดยคาร์บอนในขี้เถ้าลอยไม่มีผลต่อคอนกรีต และหลังจากที่ปริมาณการดูดซับของคาร์บอนอิ่มตัวแล้ว ปริมาณฟองอากาศควรจะเกิดขึ้นในระดับปกติ

โดยทั่วไปแล้วการผสมขี้เถ้าลอยในคอนกรีตจะช่วยปรับปรุงความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตสดให้ดีขึ้น แต่ในกรณีที่มีสารกระจายกักฟองอากาศในคอนกรีตกลับพบว่าคอนกรีตที่ผสมขี้เถ้าลอยและไม่ได้ผสมขี้เถ้าลอยจะมีระดับความสามารถทำงานได้ใกล้เคียงกัน (5)

2.3.4 การก่อตัว

2.3.4.1 อิทธิพลของขี้เถ้าลอยต่อการก่อตัว

ผลของขี้เถ้าลอยที่มีต่อการก่อตัวยังสรุปแน่นอนไม่ได้ และจากงานวิจัยที่ผ่านมาผลที่ได้ค่อนข้างจะสับสนและขัดแย้งกัน บางฉบับได้สรุปว่าขี้เถ้าลอยจะเป็นตัวหน่วงการก่อตัว (1, 13, 19, 38, 39, 40) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- ปูนซีเมนต์ปอร์แลนด์ผสมขี้เถ้าลอยจะใช้เวลาในการก่อตัวช้ากว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน แต่ทว่าระยะเวลาในการก่อตัวยังอยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ (13)
- ขี้เถ้าลอยจะมีผลต่อการหน่วง ทำให้ระยะเวลาก่อตัวของคอนกรีตเพิ่มขึ้น 1-2 ชั่วโมง (19)
- ขี้เถ้าลอยจะทำให้การก่อตัวระยะต้นและระยะปลายล่าช้าออกไป และผลอันนี้จะลดลงเมื่อความละเอียดของซีเมนต์เพิ่มขึ้น ความละเอียดของขี้เถ้าลอยไม่มีผลต่อระยะเวลาก่อตัว (38)
- ขี้เถ้าลอยจะเป็นตัวหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_3A และ C_4AF (39)
- ขี้เถ้าลอยแม่เมาะจะมีผลต่อการหน่วงการก่อตัวระยะปลายมากกว่าระยะต้น (1)

แต่ Samarin et al (5) สรุปว่า การใช้ขี้เถ้าลอยผสมในคอนกรีตไม่ว่าจะวิธีใดก็ตาม ผลที่มีต่อระยะเวลาต่อตัวโดยตรงก็คือ ปริมาณน้ำและอุณหภูมิของคอนกรีตสด ตัวขี้เถ้าลอยโดยตรงดูเหมือนว่าจะไม่มีผลโดยตรงต่อการก่อตัวของคอนกรีต จากการทดสอบที่ BMI Research การแทนที่ซีเมนต์ด้วยขี้เถ้าลอยคุณภาพดีถึง 80% ยังมีผลต่อการเพิ่มระยะเวลาก่อตัวเพียงเล็กน้อย ซึ่งไม่สามารถอธิบายได้โดยการลดความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ในขณะที่ Lame และ Best (3) พบว่าขี้เถ้าลอยที่มีปริมาณคาร์บอนสูงจะทำให้ความต้องการปริมาณน้ำของคอนกรีตสูงขึ้น ดังนั้นทำให้เวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นด้วย การใช้ขี้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 60% โดยน้ำหนัก ขี้เถ้าลอยมีปริมาณคาร์บอน 12% ทำให้เวลาก่อตัวช่วงปลายเพิ่มขึ้น 2 เท่า มากกว่าที่ ASTM C150 ได้กำหนดไว้

การการศึกษาในประเทศออสเตรเลีย (5) พบว่าอนุภาคของขี้เถ้าลอยจะเป็นตัวแกนกลางในการเกิดสารประกอบ เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ซึ่งเท่ากับว่าขี้เถ้าลอยจะเป็นตัวเร่งการก่อตัวของซีเมนต์ Ogawa et al (41) พบว่าขี้เถ้าลอยจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชั่นช่วงต้นและ C_3S ของซีเมนต์ ส่วน Covey (3) พบว่าขี้เถ้าลอยประเภทมีคัลเซี่ยมสูงจะช่วยเร่งการก่อตัวให้เร็วขึ้น แต่ Diamond และ Lopez Flores กลับพบว่าขี้เถ้าลอยทั้งประเภทมีคัลเซียมสูง และคัลเซียมต่ำทุกตัวอย่างจะมีผลในการหน่วงระยะเวลาก่อตัวทั้งสิ้น (3) และจากการสังเกตและทดลองการก่อสร้างโรงไฟฟ้าในประเทศออสเตรเลียได้ยืนยันว่าคุณสมบัติของซีเมนต์และปริมาณซีเมนต์จะมีผลอย่างยิ่งต่อระยะเวลาก่อตัว การใช้ขี้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ 0-35% โดยน้ำหนักจะมีผลอยู่ระหว่างการเร่งและการหน่วงการก่อตัว ซึ่งจะขึ้นกับประเภทของปูนซีเมนต์และสัดส่วนผสม (5)

2.3.4.2 การสูญเสียค่ายุบตัว

คอนกรีตเหลวจะค่อยๆ สูญเสียความสามารถทำงานได้ ตามระยะเวลาที่ผ่านไป ซึ่งบางส่วนเป็นผลที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_3S และ C_3A ซึ่งเกิดขึ้นอย่างช้าๆในระหว่างระยะเวลาพักตัว (dormant period) และบางส่วนเกิดจากการสูญเสียน้ำจากการระเหยและการดูดซับ และเนื่องจากแรงกระทำระหว่างอนุภาคที่เปลี่ยนไป เพราะการเกิดผลิตผลไฮเดรชั่น การสูญเสียค่ายุบตัวจะประมาณเป็นความสัมพันธ์ในรูปโดยตรงกับระยะเวลา การสูญเสียค่ายุบตัวจะมากในช่วงระยะเวลา 1/2-1 ชั่วโมงภายหลังการผสม (35)

เนื่องจากค่ายุบตัวของคอนกรีตในระหว่างการเทจะมีความสำคัญ

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

มาก ดังนั้นการสูญเสียค่ายุบตัวของคอนกรีตจะต้องถูกนำมาพิจารณด้วยเวลาเลือกสัดส่วนผสม ผลของอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้ค่าการสูญเสียการยุบตัวเพิ่มมากขึ้น สารเร่งการก่อตัวก็จะทำให้การสูญเสียค่ายุบตัวเพิ่มมากขึ้น ทำให้ระยะเวลาก่อตัวลดลง การเร่งการสูญเสียค่ายุบตัวอาจจะเกิดขึ้นเมื่อใช้สารลดน้ำ หรือสารหน่วงการก่อตัว แม้ว่าระยะเวลาก่อตัวจะไม่เปลี่ยนแปลงหรือเพิ่มขึ้นก็ตาม อัตราการสูญเสียค่ายุบตัวจะมีน้อยลง สำหรับส่วนผสมที่มีปริมาณซีเมนต์ต่ำและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูง นอกจากนี้การสูญเสียค่ายุบตัวยังขึ้นกับค่าการยุบตัวเริ่มแรก ถ้าค่ายุบตัวเริ่มแรกสูง ค่าการสูญเสียค่ายุบตัวก็จะมากด้วย (35, 42)

2.4 อิทธิพลของขี้เถ้าลอยต่อกำลังอัด

การใช้คอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยในระยะเริ่มแรกจะใช้วิธีการเติมขี้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์เพื่อการประหยัดซีเมนต์ทำให้ราคาคอนกรีตต่อหน่วยลดลง แต่การใช้ขี้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์โดยปริมาตรจะทำให้ได้คอนกรีตที่มีกำลังอัดต่ำกว่าการใช้ขี้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์โดยน้ำหนัก ดังนั้นการใช้ขี้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์โดยน้ำหนักจึงเป็นที่นิยมมากกว่า อีกทั้งง่ายและสะดวกในทางปฏิบัติ คอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยที่ได้จะให้กำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาในระยะเริ่มแรก ทั้งนี้ขึ้นกับปริมาณการใช้ขี้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์และคุณภาพของขี้เถ้าลอย พบว่าปริมาณขี้เถ้าลอยสูงสุดที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ควรอยู่ระหว่าง 25-30% โดยน้ำหนัก (14, 20, 22, 23, 25, 44, 45, 46) และถ้าขี้เถ้าลอยมีคุณภาพดีอาจใช้แทนที่ซีเมนต์ได้ถึง 30-40% โดยน้ำหนัก (30) และ ถ้าทำการอบด้วยไอน้ำจะสามารถใช้ขี้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์สูงถึง 45% โดยน้ำหนัก (47) การที่คอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยมีกำลังอัดในช่วงอายุเริ่มแรกต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาเนื่องจากที่อายุเริ่มแรกนี้ปฏิกิริยาปอซโซลานยังไม่เกิดขึ้น หรือเกิดขึ้นน้อยไม่เพียงพอที่จะชดเชยกำลังที่ลดลงเนื่องจากส่วนผสมมีปริมาณซีเมนต์ลดน้อยลง แต่เมื่ออายุมากขึ้นการเพิ่มของกำลังอัดมีค่ามากขึ้นและอาจสูงกว่าคอนกรีตที่ได้จากปูนซีเมนต์ล้วน การทดสอบพบว่าการใช้ขี้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ 25% โดยน้ำหนัก ที่อายุ 91 วันคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยมีกำลังอัดเท่ากับ 98% ของคอนกรีตธรรมดา (44) และพบว่าคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยให้กำลังสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา หลังจากเวลาผ่านไป 1 ปีและอาจสูงกว่าถึง 20% (48)

สำหรับการศึกษาการใช้ขี้เถ้าลอยแม่เมาะในการผสมคอนกรีตพบว่าปริมาณขี้เถ้าลอยสูงสุดที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ควรอยู่ระหว่าง 35-40% โดยน้ำหนัก (49, 50) ปริมาณขี้เถ้าลอยที่ใช้แทนที่ซีเมนต์ 42% โดยน้ำหนัก คอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยมีกำลังอัด 74.1% ของคอนกรีตธรรมดา (50) และเมื่อใช้ขี้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ 35% โดยน้ำหนักจะให้กำลังอัด 83.1% ของ

คอนกรีตธรรมดา (50)

ในงานโครงสร้างส่วนใหญ่มักจะกำหนดความต้องการกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วันเป็นส่วนใหญ่ การใช้ขี้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ดังกล่าวมาแล้วจะให้กำลังอัดที่อายุ 28 วันต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา ข้อบกพร่องอันนี้ได้ถูกปรับปรุงโดยการใช้ขี้เถ้าลอยเติมแทนที่ซีเมนต์ในปริมาณที่มากกว่าซีเมนต์ที่ลดลง (51) ด้วยหลักการที่ว่านี้ Smith จึงได้เสนอค่าเทียบเท่าซีเมนต์ของขี้เถ้าลอย (cementing efficiency, k) ค่า k ที่เสนอมีค่า 0.25 หมายความว่าขี้เถ้าลอยหนัก F กิโลกรัมจะมีค่าเท่ากับซีเมนต์หนัก 0.25F กิโลกรัม (53, 54) การคาดคะเนกำลังอัดของคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยนั้นจะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ [W/(C+F)] เป็นพื้นฐาน วิธีการใช้ค่าเทียบเท่าซีเมนต์ของ Smith ได้รับความสนใจมากจึงเป็นวิธีพื้นฐาน และถูกพัฒนาแก้ไขต่อๆมาโดยนักวิจัยหลายท่าน (55-58) เพื่อให้ได้กำลังอัดของคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยใกล้เคียงกับคอนกรีตธรรมดามากขึ้น Munday et al (58) ได้ให้ข้อสังเกตว่าค่า k จะไม่คงที่แต่จะเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ สภาวะการบ่ม ระดับของกำลังคอนกรีต อีกทั้งความแตกต่างในความต้องการน้ำระหว่างซีเมนต์ และขี้เถ้าลอยและแหล่งของขี้เถ้าลอย การปรับปริมาณมวลคละในส่วนผสมเพื่อให้ได้ความสามารถทำงานได้ตามต้องการ แม้ว่าจะประสบผลสำเร็จในห้องทดลองโดยให้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์คงที่จะให้กำลังของคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยที่ไม่แปรเปลี่ยนจากคอนกรีตธรรมดามากนัก แต่กว่าในทางปฏิบัติแล้วปริมาณน้ำในส่วนผสมจะถูกปรับแก้เพื่อให้ได้ความสามารถทำงานได้ตามต้องการ ทำให้เกิดความแปรปรวนของค่ากำลังของคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยมีมากขึ้น

สำหรับขี้เถ้าลอยแม่เมาะ ประจิต จิรัปปภา (49) ได้ทำการทดสอบคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยแม่เมาะ โดยการผสมขี้เถ้าลอยเข้ากับส่วนผสมคอนกรีตในอัตราส่วนขี้เถ้าลอยต่อซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 ปริมาณซีเมนต์เป็น 250, 300, 350 และ 400 กก./ม.^{3} อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ 0.5, 0.75, 1.00 และ 1.25 พบว่าปริมาณขี้เถ้าลอยที่เติมจะต้องมากกว่าปริมาณซีเมนต์ที่ลดลง เพื่อรักษาระดับกำลังอัดให้คงเดิม และได้สร้างกราฟแสดงค่าเทียบเท่าซีเมนต์ของขี้เถ้าลอยแม่เมาะได้ โดยขึ้นกับตัวแปรต่างๆซึ่งจะหาปริมาณขี้เถ้าลอยที่ต้องใช้เติมในส่วนผสมเพื่อให้ได้กำลังอัดของคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยเท่ากับคอนกรีตธรรมดาที่อายุตามต้องการ ส่วน Ashino (50) ได้สร้างกราฟ 3 มิติสำหรับการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยโดยถือกำลังอัดที่อายุ 28 วันเป็นเกณฑ์

นอกเหนือจากการใช้ขี้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่มากกว่าซีเมนต์ที่ลดลงเพื่อให้

ได้กำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตธรรมดาเมื่ออายุ 28 วัน ดังกล่าวมาแล้วนั้น อีกวิธีการหนึ่งที่ใช้คือการใช้ขี้เถ้าลอยผสมเพิ่มเป็นมวลรวม วิธีนี้จะทำให้คอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาที่อายุ 28 วัน และกำลังอัดของคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยโดยวิธีผสมเพิ่มนี้จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามเปอร์เซ็นต์ขี้เถ้าลอย พบว่าที่อายุ 28 วัน คอนกรีตผสมขี้เถ้าลอยโดยวิธีนี้จะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้น 13% จากคอนกรีตธรรมดาต่อการใช้ขี้เถ้าลอยแทนที่มวลรวม 100 กก./ม.^{3} (12)