บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เถ้าลอยลิกไนต์ (Lignite fly ash)

เถ้าลอยลิกไนต์หรือเถ้าถ่านหิน เกิดจากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ถ่านหินเมื่อถูกบดให้ละเอียดจะถูกลำเลียงด้วยสายพานมายังเตาเผา คาร์บอนในถ่านหินจะถูกเผาไหม้เปลี่ยนแปลงสภาพของแร่ธาตุในรูปของออกไซด์ของโลหะหลายชนิด

ส่วนประกอบหลักๆ ทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์ คือ ซิลิกา อลูมินา และเหล็ก หากมีขนาดเล็กเพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับด่างที่อุณหภูมิปกติได้สารประกอบตัวใหม่เกิดขึ้น และมีสมบัติคล้ายกับปูนซีเมนต์ กล่าวคือยึดเกาะกันได้ดี และมีความแข็งแรง ปฏิกิริยานี้เรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน และสารที่สามารถทำปฏิกิริยานี้เรียกว่าสารปอซโซลาน ที่รู้จักกันทั่วๆ ไป เช่น เถ้าลอยลิกไนต์ เถ้าแกลบ เถ้าถ่านไม้ เถ้าถ่านจากภูเขาไฟ เถ้าของสารอินทรีย์เกือบทุกชนิด และดินบางชนิด เป็นต้น อย่างไรก็ตาม สิ่งสำคัญอย่างมากสำหรับสารปอซโซลาน คือ จะต้องมีความละเอียดสูง เพราะถ้ามีความละเอียดต่ำจะทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานไม่เกิดขึ้น หรือเกิดขึ้นในปริมาณที่น้อยมาก

2.1.1 ประเภทของเถ้าลอยลิกไนต์

เถ้าลอยลิกไนต์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชั้นคุณภาพตามมาตรฐาน ASTM C618-94a (1995) ได้แก่ ชั้นคุณภาพ F และชั้นคุณภาพ C โดยใช้องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์ที่ได้หลังจากการเผา ซึ่งจะแสดงรายละเอียดการแบ่งชั้นคุณภาพของเถ้าลอยลิกไนต์

1. เถ้าลอยลิกไนต์ชั้นคุณภาพ F เป็นเถ้าลอยลิกไนต์ที่มีผลรวมของซิลิกา เฟอร์ริกออกไซด์ และอลูมินา มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก

2. เถ้าลอยลิกไนต์ชั้นคุณภาพ C เป็นเถ้าลอยลิกไนต์ที่มีผลรวมของซิลิกา อลูมินา และเฟอร์ริกออกไซด์ อยู่ระหว่างร้อยละ 50 ถึง 70 โดยน้ำหนัก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 การแบ่งชั้นคุณภาพของเถ้าลอยลิกไนต์ ตามมาตรฐาน ASTM C618-96 (1996)

สมบัติ	ประเภทของเถ้าลอยลิกไนต์	
	ชั้นคุณภาพ F	ชั้นคุณภาพ C
$SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ ร้อยละ	70.0	50.0
SO_3 มากที่สุดร้อยละ	5.0	5.0
ปริมาณความชื้น มากที่สุดร้อยละ	3.0	3.0
การสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ มากที่สุดร้อยละ	6.0	6.0
ดัชนีกำลัง น้อยที่สุดร้อยละ	75.0	75.0

2.1.2 สมบัติของเถ้าลอยลิกไนต์

เถ้าลอยลิกไนต์มีสมบัติเป็นสารปอซโซลานสังเคราะห์ประเภทหนึ่ง โดยมีส่วนประกอบหลักเป็นอันยรูปของซิลิกา และอลูมินา เมื่ออยู่ในสภาพแห้งหรือป่นเป็นฝุ่นจะไม่มีสมบัติเชื่อมเกาะระหว่างอนุภาค แต่เมื่อสัมผัสกับน้ำภายใต้อุณหภูมิปกติแล้วสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับสารประกอบ ($Ca(OH)_2$) และเกิดเป็นสารประกอบใหม่ที่มีสมบัติเชื่อมประสาน โดยที่สมบัติดังกล่าวขึ้นอยู่กับประเภทของถ่านหิน อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา และช่วงเวลาการเผา ดังนั้นคุณภาพ และความสม่ำเสมอของเถ้าลอยลิกไนต์จึงขึ้นอยู่กับแหล่งที่เผาถ่านหินด้วย

2.1.2.1 สมบัติพื้นฐานทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์

1. ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์

จากการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์จากแม่เมาะที่ผ่านมาโดยใช้เครื่องเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรมิเตอร์ พบว่า เถ้าลอยลิกไนต์จะประกอบไปด้วยองค์ประกอบออกไซด์ของแร่ธาตุต่างๆ ได้แก่ ออกไซด์ของซิลิกอน (SiO_2) ออกไซด์ของอลูมิเนียม (Al_2O_3) ออกไซด์ของเหล็ก (Fe_2O_3) ออกไซด์ของแคลเซียม (CaO) เป็นหลัก และมีองค์ประกอบรอง ได้แก่ ออกไซด์ของแมกนีเซียม (MgO) ออกไซด์ของโซเดียม (Na_2O) ออกไซด์ของโปตัสเซียม (K_2O) และออกไซด์ของซัลเฟอร์ (SO_3) นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยความชื้น การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition, LOI) (ปริญญา , 2547)

ส่วนประกอบทางเคมีเหล่านี้จะมีค่าต่างกันในเชิงปริมาณตามแหล่งหรือชนิดของถ่านหินที่มาของเถ้าลอยลิกไนต์ ลักษณะกระบวนการเผา อุณหภูมิที่ใช้เผา ดังนั้นสามารถแยกประเภทของเถ้าลอยลิกไนต์ตามมาตรฐาน ASTM C 618 ซึ่ง ได้แก่ Class F และ Class C โดยอาศัยส่วนประกอบทางเคมีเป็นหลักสำคัญ

2. ปฏิกิริยาทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในคอนกรีตที่มีเถ้าลอยลิกไนต์เป็นส่วนผสมจะมีปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์ และน้ำได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3CaO.2SiO_2.3H_2O$) แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ($3CaO.2Al_2O_3.3H_2O$) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) หลังจากนั้นซิลิกา และอลูมินาในเถ้าลอยจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์ และน้ำเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้เป็นสารไดแคลเซียมซิลิเกต ($2CaO.SiO_2$) และไตรแคลเซียมซิลิเกต ($CaO.SiO_2$) ซึ่งเป็นผลิตผลเช่นเดียวกับที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน แต่ปฏิกิริยาไฮเดรชันในคอนกรีตที่มีเถ้าลอยลิกไนต์เป็นส่วนผสมจะเกิดขึ้นช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์

ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำหรือปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration of portland cement)

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

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

$$2[3CaO.Al_2O_3] + 6H_2O \longrightarrow 3CaO.2Al_2O_3.3H_2O + 3Ca(OH)_2$$

ปฏิกิริยาระหว่าง $(Ca(OH)_2$ กับเถ้าลอยลิกไนต์ (Pozzolanic reaction)

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

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

ดังได้กล่าวแล้วว่า ปฏิกิริยาปอซโซลานมีองค์ประกอบสำคัญอยู่ 2 ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่งต้องมีสารซิลิกาหรืออลูมินาอยู่ ซึ่งสารส่วนนี้จะมีสมบัติทางด้านปูนซีเมนต์อยู่น้อยมากหรือแทบไม่มีเลย และมีความละเอียดสูงซึ่งตรงตามคุณลักษณะของเถ้าลอยลิกไนต์ หรือเถ้าถ่านหินพอดี ส่วนที่สอง คือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ซึ่งเกิดเมื่อปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำ โดยจะทำปฏิกิริยากับ ซิลิกา อลูมินาในเถ้าลอยลิกไนต์ ปฏิกิริยาปอซโซลานนี้จะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ซึ่งพบว่าปฏิกิริยาปอซโซลานที่ทดสอบอุณหภูมิที่ 20 องศาเซลเซียส จะเกิดปฏิกิริยาในปูนซีเมนต์เพสต์ได้เมื่ออายุระหว่าง 7 ถึง 14 วัน และสามารถทำปฏิกิริยาไปเรื่อยๆ จนถึงอายุมากกว่า 3 ปีครึ่ง

อย่างไรก็ตาม กลไกในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะซับซ้อนกว่าที่นำสารปอซโซลานทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยตรง และจากการทดลอง พบว่า เถ้าลอยลิกไนต์จะ

หน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนตซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในช่วงแรก แต่จะหน่วงแค่ไหนขึ้นอยู่กับปริมาณซัลเฟต ปริมาณอัลคาไลน์ และปริมาณแคลเซียมในเถ้าลอยลิกไนต์

2.1.2.2 สมบัติพื้นฐานทางกายภาพของเถ้าลอยลิกไนต์

สมบัติทางกายภาพโดยทั่วๆ ไป ของเถ้าลอยลิกไนต์จะแสดงพฤติกรรมของคอนกรีตที่มีเถ้าลอยลิกไนต์เป็นส่วนผสม (Fly ash concrete) แต่สมบัติของเถ้าลอยลิกไนต์อาจเปลี่ยนแปลงในกระบวนการเผาไหม้ เช่น มีการเผาน้ำมันเตาร่วมกับการเผาถ่านหิน มีการเติมวัสดุบางประเภทเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ และการกัดกร่อน ดังนั้นการทดสอบสมบัติต่างๆ ของเถ้าลอยลิกไนต์เพื่อนำไปใช้งานอาศัยข้อกำหนดทางกายภาพตามมาตรฐาน ASTM ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดทางกายภาพมาตรฐาน ASTM C618-96(1996)

ข้อกำหนดด้านกายภาพ	ชนิดของเถ้าลอยลิกไนต์	
	F	C
ความละเอียด : ส่วนที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 หลังการร่อนแบบเปียก มากสุดร้อยละ	34	34
หาดัชนีกำลัง : โดยผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์		
7 วัน น้อยสุดร้อยละ เมื่อเทียบกับตัวควบคุม	75	75
28 วัน น้อยสุดร้อยละ เมื่อเทียบกับตัวควบคุม	75	75
ความต้องการน้ำ : มากสุดร้อยละ เมื่อเทียบกับตัวควบคุม	105	105
ความอยู่ตัว : การขยายตัวหรือหดตัวโดยวิธี Autoclave มากสุดร้อยละ	0.8	0.8
การกำหนดความสม่ำเสมอ (Uniformity requirement)		
- ความหนาแน่น ต่างจากค่าเฉลี่ยมากสุด ร้อยละ	5	5
- ส่วนที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ต่างจากค่าเฉลี่ยมากสุด ร้อยละ	5	5
Multiple Factor (ผลคูณระหว่าง LOI เป็นร้อยละกับปริมาณที่ค้างตะแกรงเบอร์ 325 เป็นร้อยละ)	255	-
Drying Shrinkage ของแท่งมอร์ตาที่ 28 วัน แตกต่างจากตัวควบคุมมากสุดร้อยละ	0.03	0.03

2.2 เถ้าลอยเส้นใยปาล์ม

2.2.1 กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม

โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มในประเทศไทยมีกระบวนการผลิตต่างกัน 3 แบบ ประกอบด้วย กระบวนการสกัดน้ำมันแบบมาตรฐาน กระบวนการสกัดน้ำมันแบบทอดผลปาล์ม และ กระบวนการสกัดน้ำมันแบบผสม โดยที่แบบมาตรฐานจะมีการใช้น้ำ ส่วนแบบทอดผลปาล์ม และแบบผสมนั้นจะไม่มีการใช้น้ำ ซึ่งกระบวนการสกัดที่สามารถรองรับวัตถุดิบได้ในปริมาณมาก และให้ผลผลิตในรูปน้ำมันปาล์มดิบที่มีคุณภาพ คือ กระบวนการสกัดน้ำมันแบบมาตรฐาน หรือแบบใช้น้ำซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสมกับโรงงานขนาดใหญ่ที่ใช้เงินลงทุนค่อนข้างสูง

ขั้นตอนของกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มแบบมาตรฐานหรือแบบใช้น้ำ

1.การอบ-นึ่งผลปาล์ม

หลังจากที่ผลปาล์มสดได้ผ่านเครื่องชั่งน้ำหนักส่งขึ้นลานเทปาล์มแล้ว ปาล์มสดจะถูกบรรจุลงในกระบะบรรจุปาล์ม และทำการเคลื่อนกระบะจากลานเทเข้าหม้ออบนึ่งโดยใช้รางการอบจะอบด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิระหว่าง 120-130 องศาเซลเซียส ความดัน 40-60 ปอนด์ต่อตารางนิ้วเป็นเวลาประมาณ 45-60 นาที การอบผลปาล์มจะช่วยยับยั้งการเกิดกรดไขมันอิสระในผลปาล์มซึ่งทำให้น้ำมันปาล์มที่สกัดออกมามีคุณภาพต่ำ นอกจากนี้ไอน้ำยังทำให้ผลปาล์มอ่อนนุ่มสะดวกต่อการย่อย และการหีบ ทั้งยังทำให้ขั้วหลุดออกจากทะลายได้ง่าย

2. การนวดแยกทะลายจากผลปาล์ม

ผลปาล์มที่อบหรือนึ่งสุกแล้วจะถูกส่งเข้าเครื่องนวดแยกทะลายจากผลปาล์ม เพื่อนำเฉพาะผลปาล์มมาใช้สกัดน้ำมัน

3. การกวนผลปาล์ม

ในขั้นตอนนี้ผลปาล์มจะถูกส่งเข้าหม้อกวนระหว่างการกวนจะมีการเพิ่มความร้อนด้วยไอน้ำในหม้อกวน เพื่อช่วยให้ส่วนที่เป็นน้ำมันหรือเนื้อเยื่อของผลปาล์มแยกออกจากส่วนที่เป็นเมล็ดในทำให้ง่ายต่อการหีบหรือบีบน้ำมันออกในขั้นตอนต่อไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4. การหีบหรือบีบน้ำมันจากผลปาล์ม

หลังจากผ่านการกวนจากหม้อกวนแล้ว ผลปาล์มจะถูกป้อนเข้าเครื่องบีบน้ำมันปาล์ม ซึ่งขั้นตอนนี้น้ำมันปาล์มจะถูกแยกออกจากส่วนที่เป็นเมล็ดในที่ยังไม่ได้กะเทาะเปลือก และส่วนที่เป็นเส้นใย น้ำมันปาล์มจะถูกส่งผ่านเข้าตะแกรงกรองน้ำมันเพื่อกรองเส้นใย และสิ่งเจือปนออกก่อนที่นำไปผ่านกรรมวิธีกรองแยก สำหรับเส้นใยจะถูกแยกออกจากเมล็ดในปาล์มที่ยังไม่ได้กะเทาะเปลือก และจะถูกส่งไปเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำ เมล็ดในที่ยังไม่ได้กะเทาะเปลือกจะผ่านขั้นตอนการอบ กะเทาะ และแยกเมล็ดในจากกะลาต่อไป

5. การกรองแยกน้ำมัน และสิ่งเจือปนออกจากน้ำมันปาล์ม

น้ำมันปาล์มที่ผ่านตะแกรงกรองน้ำมันจะถูกส่งขึ้นถังกรองแยก โดยการเพิ่มอุณหภูมิทำให้น้ำมันร้อนจนน้ำมันลอยตัวอยู่ชั้นบนเหนือน้ำแล้วใช้กรองดักเก็บน้ำมันส่วนบน น้ำมันที่ดักเก็บผ่านกรวยนี้จะผ่านเข้าเครื่องกลั่นน้ำมันให้บริสุทธิ์เพื่อลดปริมาณความชื้น และสิ่งเจือปนเหลือเพียงประมาณร้อยละ 0.5 หลังจากนั้นน้ำมันปาล์มจะถูกส่งผ่านอุปกรณ์เพื่อขจัดความชื้นโดยการใช้สุญญากาศดูดความชื้น และสิ่งเจือปนให้เหลือประมาณร้อยละ 0.1 น้ำมันปาล์มที่ผ่านขั้นตอนนี้แล้วเป็นน้ำมันปาล์มดิบที่มีคุณภาพได้มาตรฐาน และถูกส่งเข้าถังเก็บเพื่อรอส่งออกจำหน่ายต่อไป

สำหรับน้ำตะกอน (sludge) หรือส่วนที่มีน้ำมันปาล์มผสมอยู่กับน้ำในผิวชั้นรองลงมาจะถูกส่งเข้าอุปกรณ์แยกน้ำมันจากน้ำตะกอนโดยใช้อุปกรณ์ Sludge Separator หรือ Sludge Centrifuge เพื่อให้ได้น้ำมันส่วนนี้ผ่านเข้ากรรมวิธีกรองแยกหมุน หมุนเวียนกลับไปอีกครั้งหนึ่ง

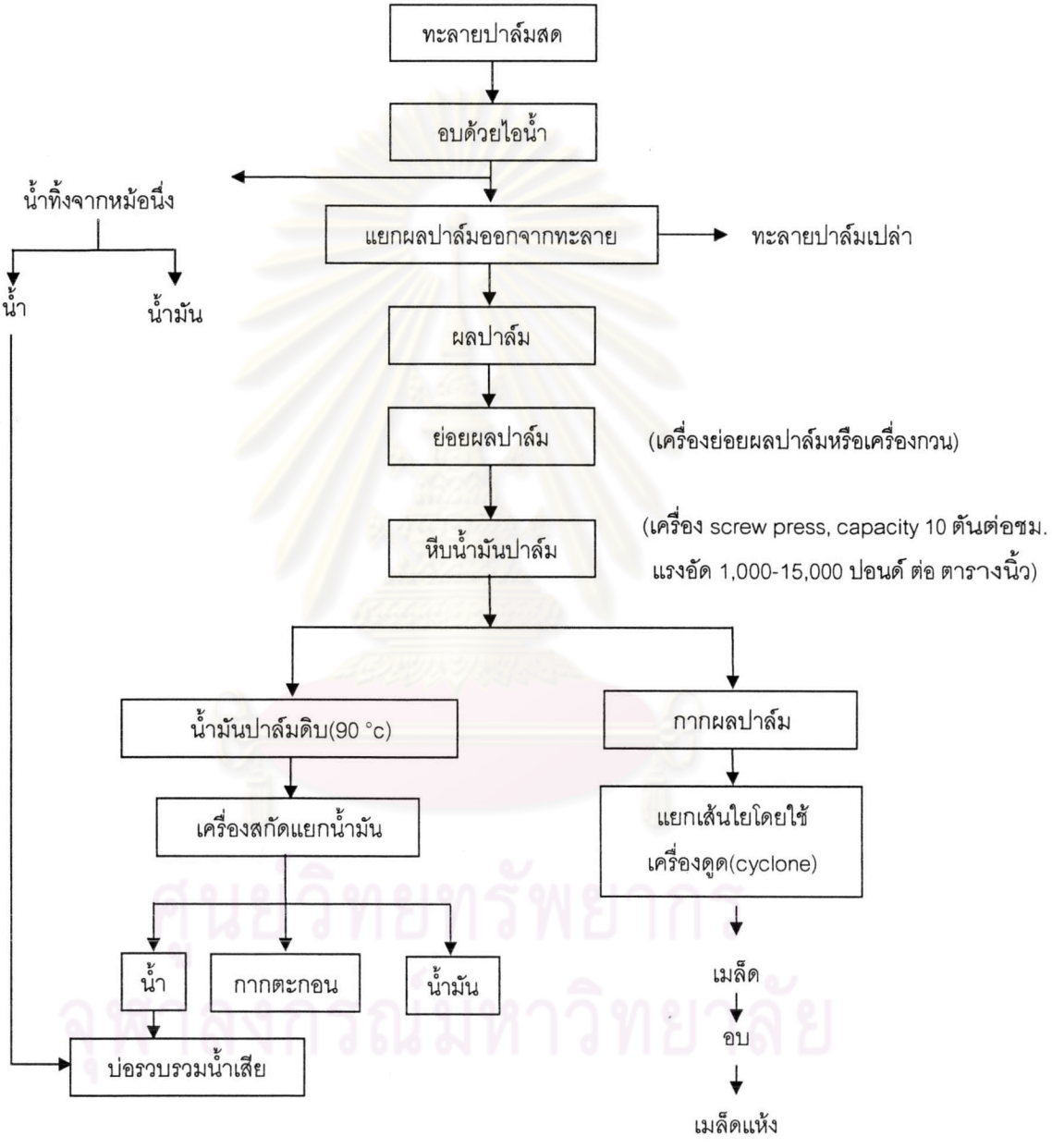
6. การอบ กะเทาะแยกเมล็ดในจากกะลา

กากซึ่งเป็นส่วนผสมของเส้นใย และเมล็ดในจากการหีบน้ำมันจากผลปาล์ม หลังจากเส้นใยถูกแยกออกจากเมล็ดปาล์มที่ยังไม่กะเทาะเปลือก ส่งป้อนเข้าเตาหม้อไอน้ำแล้ว เมล็ดในปาล์มที่ยังไม่ได้กะเทาะเปลือกนี้จะถูกส่งเข้าไซโลอบเมล็ดในเพื่ออบให้เปลือกหรือกะลาแห้ง และกรอบเพื่อให้การกะเทาะด้วยเครื่องกะเทาะเมล็ดในง่ายขึ้น ส่วนผสมของเมล็ดใน และเปลือกหรือกะลาที่ได้จะใช้วิธีแยกออกจากกันโดยผ่านเครื่องไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone Separator) กะลาปาล์มจะถูกแยกไปเป็นเชื้อเพลิงเสริมสำหรับหม้อไอน้ำ ส่วนเมล็ดในที่กะเทาะเปลือกแล้วจะถูกส่งไปยังถังอบให้แห้ง ก่อนจะบรรจุกระสอบส่งจำหน่ายต่อไป

7. การบีบน้ำมันเมล็ดในปาล์มดิบ

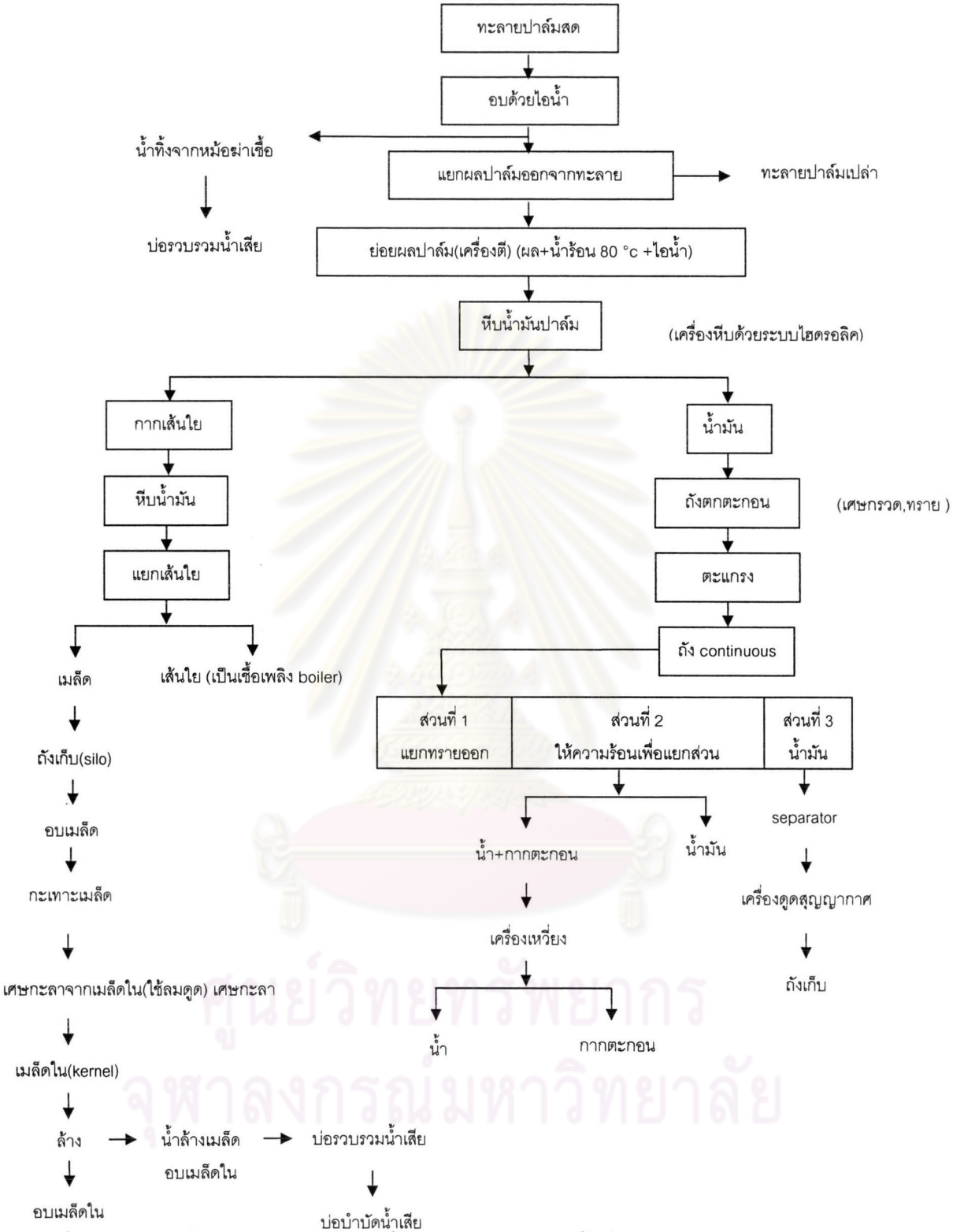
หลังจากได้เมล็ดใน (Kernel) ที่อบแห้งแล้ว จะนำไปตีให้แตกด้วยเครื่องตีเมล็ดในแล้วบดด้วยเครื่องบดเมล็ดใน ก่อนนำเข้าเครื่องบีบเมล็ดใน กากของเมล็ดในที่ได้จากเครื่องบีบนี้นำไป

บรรจุกระสอบส่งขายเป็นอาหารสัตว์ ส่วนน้ำมันที่ได้จากเมล็ดในจะถูกนำไปกรองเพื่อทำความสะอาดด้วยเครื่องกรองน้ำมันเมล็ดใน ก่อนนำน้ำมันที่ได้เข้าถังเก็บเพื่อรอจำหน่ายซึ่งเรียกว่าน้ำมันเมล็ดในปาล์มดิบ



รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบแบบใช้น้ำที่ใช้เครื่อง decanter

ที่มา : กฤษณ์ , 2545



รูปที่ 2.2 กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบแบบใช้น้ำที่ใช้เครื่อง separator

ที่มา : กฤษณ์, 2545

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2.2 วัสดุเศษเหลือที่เกิดขึ้นจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม และการนำไปใช้ประโยชน์

ในปี 2547 เนื้อที่ให้ผลปาล์มน้ำมัน 1.869 ล้านไร่ เพิ่มขึ้นจากปีที่แล้วร้อยละ 3.86 หรือเพิ่มขึ้น 69,358 ไร่ ผลผลิตปาล์มน้ำมัน ตั้งแต่ 1 มกราคม - 31 ธันวาคม 2547 ประมาณ 5.28 ล้านตัน เพิ่มขึ้นจากปีที่แล้ว 371,987 ตัน หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ7.59 เนื่องจาก ในช่วง 2-3 ปีที่ผ่านมา รัฐบาลส่งเสริมให้ขยายพื้นที่ปลูก และสนับสนุนให้ปลูกปาล์มน้ำมันพันธุ์ดี

ตารางที่ 2.3 ปริมาณวัสดุเศษเหลือของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

ปริมาณวัสดุเศษเหลือโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม (กก./ตันทลายปาล์มสด)	
- ทะลายปาล์มเปล่า	230
- เส้นใย	145
- กะลา	60
- กากตะกอน (เมื่อใช้เครื่องdecanter)	<30
- หากใช้กระบวนการสกัดแบบมาตรฐานที่ใช้เครื่อง Separator จะได้ปริมาณน้ำเสียทั้งหมด	892
- หากใช้กระบวนการสกัดแบบมาตรฐานที่ใช้เครื่อง Decanter จะได้ ปริมาณน้ำเสียทั้งหมด	315

ที่มา : สำนักงานเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน, 2540

สำหรับเถ้าลอยที่เกิดจากการเผาไหม้ของเส้นใย และกะลาปาล์มเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อไอน้ำในการผลิตไอน้ำมาใช้ในกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มนั้น จะเกิดขึ้นในปริมาณประมาณร้อยละ 5 ของปริมาณวัตถุดิบที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง (Tay และ Show,1996)

การใช้ประโยชน์จากวัสดุเศษเหลือปาล์มน้ำมันที่เป็นแข็ง

1. ทะลายปาล์มเปล่า (Empty fruit bunch)

ทะลายปาล์มเปล่าจัดเป็นวัสดุเศษเหลือที่มีปริมาณมากที่สุด (ประมาณร้อยละ 20 ของน้ำหนักทะลายปาล์มสด) ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ ได้แก่

- ใช้เป็นวัสดุคลุมดินในสวนปาล์ม เพื่อลดการระเหยของน้ำ และรักษาความชุ่มชื้นในดิน และเป็นการเพิ่มแร่ธาตุให้แก่พืช
- การนำเถ้าจากทะลายปาล์มเปล่าซึ่งผ่านการแยกในเตาเผาไปใช้เป็นปุ๋ย

- ใช้ในการเพาะเห็ด
- ใช้เป็นวัตถุดิบในการทำวัสดุไส้ใน ของที่นั่ง ที่นอน

2. เส้นใยปาล์ม (Palm Fiber)

เส้นใยปาล์มเป็นส่วนนอกของผลปาล์มความยาวโดยทั่วไปประมาณ 6.5-7.5 มิลลิเมตร สามารถนำมาใช้ประโยชน์ คือ

- ใช้เส้นใยปาล์มเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อไอน้ำ

3. กะลา (Shell)

กะลาเป็นวัสดุที่เหลือจากการกะเทาะเมล็ดในปาล์ม เพื่อให้เหลือเฉพาะส่วนของเมล็ดในสำหรับการนำไปสกัดน้ำมันจากเมล็ดในปาล์ม ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ ได้แก่

- ใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงควบคู่กับการใช้เส้นใยปาล์ม
- ใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)
- ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์ และผลิตถ่านก้อน

4. กากตะกอน (Decanter Cake)

เป็นวัสดุเหลือจากโรงงานที่ใช้เครื่อง decanter ในการแยกน้ำมันปาล์ม ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ ได้แก่

- ใช้เป็นปุ๋ยให้กับต้นปาล์ม เพราะมีองค์ประกอบของธาตุอาหารที่สำคัญ
- ใช้กากตะกอนผสมกับขี้เลื่อยไม้ยางพารา เป็นวัตถุดิบในการเพาะเห็ด
- นำไปเป็นส่วนผสมของอาหารสัตว์

2.2.3 ปริมาณเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม

เส้นใยปาล์มที่เกิดขึ้นจะถูกลำเลียงโดยสายพานส่งไปยังเตาเผาของหม้อไอน้ำ เพื่อเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อไอน้ำในการผลิตไอน้ำมาใช้ในกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม โดยจะเผาที่อุณหภูมิประมาณ 450 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการเผาขึ้นอยู่กับปริมาณทะลายปาล์มสดที่โรงงานรับมาสกัดน้ำมัน โดยทั่วไปจะใช้เวลาในการเผาประมาณ 8 ชั่วโมงขึ้นไป ภายหลังจากการเผาจะมีเถ้าลอยเกิดขึ้นประมาณร้อยละ 5 โดยมีลักษณะเป็นเม็ดละเอียดคล้ายฝุ่นมีสีเทาดำ เถ้าลอยที่เกิดขึ้นนี้จะถูกดักไว้โดยเครื่องแยกด้วยแรงหนีศูนย์กลาง ซึ่งใช้แยกอนุภาคขนาด 8-500 ไมโครเมตร จากนั้นจะรวบรวมไว้ในบริเวณโรงงาน เพื่อรอการนำไปฝังกลบเมื่อมีปริมาณมาก

2.3 **คอนกรีตมวลเบา** (Aerated lightweight concrete)

คอนกรีตมวลเบา หมายถึง คอนกรีตที่มีมวลเบากว่าคอนกรีตทั่วไปที่มีขนาดเดียวกัน โดยมีฟองอากาศเล็กๆ แทรกกระจายในเนื้อคอนกรีตอย่างสม่ำเสมอ ทำให้แข็งด้วยการอบไอน้ำ และไม่เสริมเหล็ก เหมาะสำหรับใช้ก่อผนังด้วยวิธีก่อบาง

คอนกรีตมวลเบาแบ่งได้เป็น 3 ประเภทดังนี้ (Short และ Kinniburgh, 1968)

1. ผลิตโดยการนำเอามวลรวมละเอียดออกจากส่วนผสม จนกระทั่งเกิดช่องว่างภายใน และยังคงใช้มวลรวมหยาบน้ำหนักปกติอยู่เหมือนเดิมเรียกว่า คอนกรีตไร้มวลรวมละเอียด (no fine aggregate concrete)

2. ผลิตโดยการใช้มวลรวมน้ำหนักเบาแทนที่มวลรวมเดิม เรียกว่า คอนกรีตมวลรวมเบา (Lightweight aggregate concrete)

3. ผลิตโดยการทำให้เกิดช่องว่างภายในคอนกรีตหรือมอร์ตา ช่องว่างเหล่านี้จะเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากโดยการกระจายตัวของอากาศ เรียกว่า คอนกรีตพรุน (aerated concrete)

2.3.1 **การผลิตคอนกรีตมวลเบา**

กรรมวิธีในการผลิตคอนกรีตมวลเบา มีได้หลายวิธีตามแต่แนวทางการวิจัยจะดำเนินการ แต่อาจจำแนกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

1. การใช้วัสดุเบาผสมในคอนกรีตแทนหิน

โดยการสังเคราะห์หินเทียมที่มีน้ำหนักเบาขึ้นมา ซึ่งโดยมากมักจะใช้วิธีเผาดินเหนียวหรือหินดินดานหรือหินชนวนด้วยความร้อนสูง ทำให้ดินหรือหินเกิดการพองตัวมีฟองอากาศอยู่ในตัวหินจำนวนมากทำให้หินสังเคราะห์ที่ได้มีน้ำหนักเบา

คอนกรีตเบาที่ได้จากวิธีผสมวัสดุเบานี้จะทำให้ได้คอนกรีตที่มีน้ำหนักเบาลงประมาณร้อยละ 50 ได้คอนกรีตที่มีความหนาแน่นระหว่าง 1,000 -1,600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

2. การเพิ่มฟองอากาศในเนื้อคอนกรีต

วิธีการทำให้เกิดโฟมขึ้นมาก่อน (ด้วยการผสมสารทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี) แล้วนำโฟมนี้ไปผสมกับคอนกรีตทันที เมื่อคอนกรีตแข็งตัวก็จะได้คอนกรีตที่มีฟองอากาศจำนวนมาก ทำให้มี

น้ำหนักเบา คอนกรีตเบาที่ได้มีคุณภาพดีสม่ำเสมอ และมีน้ำหนักเบาเพียงประมาณร้อยละ 20-40 ของคอนกรีตปกติ

2.3.2 ส่วนผสม และปฏิกิริยาเคมี

ส่วนผสมหลักในการผลิตคอนกรีตเบา โดยวิธีการเพิ่มฟองอากาศในเนื้อคอนกรีต ได้แก่

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
2. ทราย (ในที่นี้ใช้เถ้าลอย และเถ้าลอยเส้นใยปาล์มแทน)
2. ปูนขาว
3. ยิบซัม
4. สารทำให้เกิดฟอง เช่น ผงอลูมิเนียม หรือ ผงสังกะสี
5. สารกักกระจายฟองอากาศ
6. น้ำ

2.3.2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (วินิต , 2544)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุก่อสร้างที่สำคัญในการก่อสร้างปัจจุบัน เพราะเมื่อนำปูนซีเมนต์ไปผสมกับทราย และน้ำจะได้เป็นมอร์ตา (Mortar) ซึ่งนำไปใช้เป็นปูนก่อสำหรับงานก่ออิฐหรือหิน หรือปูนฉาบสำหรับงานปูนฉาบ เป็นต้น หากนำไปผสมกับหิน กรวด ทราย และน้ำด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมจะได้เป็นคอนกรีตซึ่งเมื่อแข็งตัวแล้วจะแข็ง และทนทานคล้ายหิน ตัวอย่างสิ่งก่อสร้างคอนกรีต ได้แก่ ฐานราก ตอม่อ เขื่อน กำแพงกันดิน พื้น และถนน ซึ่งเมื่อเสริมด้วยเหล็กเส้นจะเป็นคอนกรีตเสริมเหล็กสำหรับใช้ทำพื้น หลังคา สะพาน อาคาร อุโมงค์ และอื่นๆ

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) สำหรับใช้ในการทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์ใดๆ ที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าธรรมดา และใช้สำหรับการก่อสร้างปกติทั่วไป ที่ไม่อยู่ในภาวะอากาศที่รุนแรงหรือในที่มีอันตรายจากซัลเฟตเป็นพิเศษหรือความร้อนที่เกิดจากการรวมตัวกับน้ำ ที่ไม่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงขั้นอันตรายที่คอนกรีตจะแตกร้าวเสียหาย ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตราช้าง ตราพญานาคสีเขียว และตราเพชรเม็ดเดียว

สมบัติพื้นฐานทางเคมีและปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

1. สมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

เมื่อเผาวัตถุดิบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซึ่ง ได้แก่ สารออกไซด์ของธาตุแคลเซียม ซิลิกอน อลูมิเนียม และเหล็ก ตามสัดส่วนดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สัดส่วนออกไซด์ของธาตุต่างๆ ในปูนเม็ดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ออกไซด์ของธาตุต่างๆ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ปูนขาว (CaO)	60-65
ซิลิกา (SiO_2)	20-24
อะลูมินา (Al_2O_3)	4-8
เหล็ก (Fe_2O_3)	2-5

ที่มา : วินิต , 2544

ตารางที่ 2.5 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ชื่อของสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียมซิลิเกต	$3CaO.SiO_2$	C_3S
ไดแคลเซียมซิลิเกต	$2\ CaO.SiO_2$	C_2S
ไตรแคลเซียมอลูมิเนต	$3\ CaO.Al_2O_3$	C_3A
เทตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์	$4\ CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	C_4AF
ไดแคลเซียมซิลิเกต	$2\ CaO.SiO_2$	C_2S

ที่มา : วินิต , 2544

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อิทธิพลของสารประกอบต่อสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ตารางที่ 2.6 สมบัติขององค์ประกอบที่สำคัญในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

สมบัติด้านต่าง ๆ	พฤติกรรมของสารประกอบแต่ละตัว			
	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
อัตราการทำปฏิกิริยา	ปานกลาง	ช้า	รวดเร็ว	ช้า
ความร้อนของปฏิกิริยา	ปานกลาง	น้อย	มาก	น้อย
การพัฒนากำลังรับแรง :				
ระยะแรก (Early)	เร็ว	ช้า	เร็ว	ช้า
ระยะหลัง (Ultimate)	สูง	สูง	ต่ำ	ต่ำ
ความทนทานต่อการกัดกร่อน	ปานกลาง	สูง	น้อย	-

ที่มา : วินิต, 2544

2. ปฏิกิริยาเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

การก่อตัว และการแข็งตัวของปูนซีเมนต์นั้นเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันขององค์ประกอบที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ โดยปฏิกิริยาเกิดขึ้นใน 2 ลักษณะ คือ

1. อาศัยสารละลายปูนซีเมนต์ในน้ำก่อให้เกิดไอออนในสารละลาย และไอออนเหล่านี้จะผสมกันทำให้เกิดสารประกอบใหม่ขึ้น

2. การเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็งปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยตรงที่ผิวของแข็ง โดยไม่จำเป็นต้องใช้สารละลาย

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์จะเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะ โดยในช่วงแรกจะอาศัยสารละลาย และช่วงต่อไปจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง

ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำ (Hydration of Portland cement) มีดังนี้

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

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

$$2[3CaO.Al_2O_3] + 6H_2O \longrightarrow 3CaO.2Al_2O_3.3H_2O + Ca(OH)_2$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3.2.2 ทราย (พิภพ, 2544)

ทรายเป็นวัสดุที่สำคัญชนิดหนึ่ง ซึ่งจะใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีตประเภทมวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) เพื่อเพิ่มความแข็งแรง และเป็นตัวแทรกของคอนกรีต นอกจากนี้ยังเป็นส่วนผสมสำคัญของมอร์ตาที่นำมาใช้ในการก่อ และฉาบด้วย ทรายเป็นหินแข็งซึ่งแตกแยกออกมาจากหินก้อนใหญ่

2.3.2.3 น้ำ

หน้าที่หลักของน้ำในการผสมคอนกรีตมีดังนี้ คือ

1. ทำให้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และวัสดุผสมมีความลื่น ส่วนผสมของคอนกรีตมีความข้นเหลวพอดี สะดวกต่อการเท และการเขย่าให้เข้าแบบตามต้องการ

2. ทำให้วัสดุผสมอันได้แก่ หินย่อย หรือกรวด หรือทรายที่แห้งให้เปียกเพื่อให้ปูนซีเมนต์เกาะยึดโดยรอบ และสามารถแข็งตัวได้ อันจะเป็นทำให้วัสดุผสมเหล่านี้ยึดติดแน่นเข้าด้วยกัน

3. ทำปฏิกิริยาเคมีกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำให้สมบัติจับตัวเกาะแน่นกับวัสดุผสม

2.3.2.4 ปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องสำหรับคอนกรีตมวลเบา

Short (1968) กล่าวว่า การผลิตคอนกรีตพรุนสามารถผลิตได้โดยการทำให้มีอากาศหรือก๊าซอื่นๆ เกิดขึ้นในของเหลวข้น (slurry) ที่ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และทรายจนกระทั่งเมื่อส่วนผสมเริ่มก่อตัวจะเกิดโครงสร้างที่มีรูพรุนโดยตลอดสม่ำเสมอ ซึ่งมีวิธีการต่างๆ ในการทำช่องว่างของอากาศดังนี้

1. การผลิตโดยการเกิดก๊าซจากปฏิกิริยาเคมี

2. การผลิตโดยการเกิดฟองอากาศจากภายนอก เช่น การฉีดสารประกอบโฟมสำเร็จรูป (preformed foam) ลงไปในเนื้อของมอร์ตา

การผลิตโดยการทำให้เกิดก๊าซจากปฏิกิริยาเคมี โดยมีหลักการผสมดังนี้ คือ ใช้ผงโลหะ Alkaline เช่น ผงอลูมิเนียม หรือผงสังกะสี โดยทั่วไปจะใช้ผงอลูมิเนียมผสมลงในมอร์ตาไม่มีการใช้มวลรวมหยาบ เพราะว่ามีขนาดใหญ่ ทำให้ฟองอากาศไม่สามารถกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอ (Valore1954) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นก่อนการผสมเป็นอันดับแรก คือ ปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดจากเมื่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกับน้ำแล้ว ก็จะเกิดเป็นสารประกอบไฮเดรต (hydrate compound) โดยองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ คือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) จะแตกตัวออกเป็น 2 ส่วน ตามสมการเคมี ดังนี้

$$2(3CaO.SiO_2) + 6H_2O \text{ ----------> } 3Ca.2SiO_2.3H_2O + 3Ca(OH)_2$$

ไตรแคลเซียมซิลิเกต แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต แคลเซียมไฮดรอกไซด์

$$2(2CaO.SiO_2) + 4H_2O \text{ ----------> } 3CaO.2SiO_2.3H_2O + Ca(OH)_2$$

ไดแคลเซียมซิลิเกต แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต แคลเซียมไฮดรอกไซด์

แคลเซียมไฮดรอกไซด์อิสระที่เกิดขึ้นนี้สามารถทำปฏิกิริยาต่อไปได้อีกถ้ามีธาตุที่เหมาะสมมาร่วมทำปฏิกิริยา จากความรู้ที่กล่าวมา ถ้ามีการเติมผงอลูมิเนียมลงไปในส่วนผสมจะทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนขึ้นแทรกตัวอยู่ในเนื้อของส่วนผสม เมื่อส่วนผสมแข็งตัวแล้วจะทำให้มีน้ำหนักเบาขึ้นได้ ซึ่งการเกิดก๊าซไฮโดรเจนสามารถเกิดขึ้นได้ตามสมการดังนี้

$$2Al + 3Ca(OH)_2 + 6H_2O \text{ ----------> } 3Ca.Al_2O_3.H_2O + 3H_2$$

ผงอลูมิเนียม แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ไตรแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ไฮโดรเจน

ในกระบวนการนี้สามารถใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาตามสมการ (Caldwell 1934)

$$2Al + 2\,NaOH + 2H_2O \text{ ----------> } 2NaAlO_2 + 3H_2$$

จากสมการดังกล่าว ผงอลูมิเนียม 1 กิโลกรัม จะให้ก๊าซไฮโดรเจน ปริมาตร 1.19 ลูกบาศก์เมตร

2.3.2.5 สารปอซโซลาน

สารปอซโซลาน หมายถึง วัสดุซึ่งตัวเองไม่มีสมบัติเชื่อมประสาน แต่สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์อิสระแล้วก่อตัวเป็นสารเชื่อมประสานได้ ดังนั้นเมื่อใส่วัสดุปอซโซลานลงไปออกไซด์ของซิลิกอนหรือซิลิกา (SiO_2) และออกไซด์ของอลูมิเนียม (Al_2O_3) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่มีอยู่มากในเถ้าลอยจะทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ตามสมการเคมีดังนี้

$$3Ca(OH)_2 + 2SiO_2 \text{ ----------> } 3CaO.2SiO_2.3H_2O$$

แคลเซียมไฮดรอกไซด์ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H)

$3Ca(OH)_2 + 2Al_2O_3 \text{ ----------> } 3CaO.2Al_2O_3.3H_2O$

แคลเซียมไฮดรอกไซด์ แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H)

โดยจะได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต เป็นสารประกอบที่ให้กำลังเพิ่มขึ้น

2.4 การเร่งปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอย

การเร่งปฏิกิริยาของเถ้าลอยสามารถทำได้โดยวิธีทางกายภาพ (physical activation) ทางเคมี (chemical activation) และโดยการใช้ความร้อน

1. ทางกายภาพ

การทำปฏิกิริยาของเถ้าลอยจะเพิ่มมากขึ้น และเร็วขึ้น เมื่อพื้นที่ผิวของเถ้าลอยสูงขึ้น ซึ่งสามารถทำได้โดยการบดเถ้าลอยให้ละเอียด และการคัดขนาดเอาส่วนที่ละเอียดไปใช้งาน

2. ทางเคมี

วิธีทางเคมีสามารถทำได้ 2 วิธี คือ การปรับปรุงผิวเถ้าลอย (surface treatment) และการใช้สารเคมีผสม

2.1 การปรับปรุงผิว วิธีนี้ใช้กรดหรือด่างกัดผิวของเถ้าลอยทำให้ผิวเถ้าลอยอยู่ในสภาพที่พร้อมทำปฏิกิริยา วิธีนี้ไม่เป็นที่นิยมเท่าใดนัก เพราะต้องปรับปรุงผิวของเถ้าลอยก่อนการผสมจริง และเร่งปฏิกิริยาได้ไม่มากนัก

2.2 การผสมสารเคมี วิธีนี้เป็นที่นิยมมากเนื่องจากทำได้ง่าย และมีประสิทธิภาพสูง แบ่งสารเคมีที่ใช้ได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มซัลเฟต ได้แก่ $CaSO_4$ Na_2SO_4 และ K_2SO_4 ส่วนกลุ่มอัลคาไล ได้แก่ NaOH และ $Ca(OH_2)$ การใช้สารซัลเฟตทำให้เกิดเอททริงไกต์ขนาดของโพรงและความพรุนลดลงเป็นผลทำให้กำลังรับแรงอัดในระยะต้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเพิ่มขึ้น การใส่อัลคาไลโดยเฉพาะ $Ca(OH_2)$ ทำให้เถ้าลอยทำปฏิกิริยาได้มากขึ้น และกำลังรับแรงเพิ่มขึ้นได้จากการที่สารละลายมีความเป็นด่างสูงขึ้น นอกจากนี้ยังมีการใช้สารอื่นๆ เช่น $CaCl_2$ และสารไตรเอธธาโนลามีน (triethanolamine)

3. การใช้ความร้อน

การให้ความร้อนคอนกรีตผสมเถ้าลอยทำให้เถ้าลอยสามารถทำปฏิกิริยาได้มากขึ้น และจะทำให้กำลังรับแรงของคอนกรีตสูงขึ้น นอกจากนี้การใช้ความร้อนร่วมกับสารเคมี $Ca(OH_2)$ และ $CaSO_4$ สามารถเร่งปฏิกิริยาได้ดี

2.5 การศึกษาและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาเรื่องคอนกรีตเบาได้เริ่มดำเนินการมากว่า 40 ปี โดยในระยะแรกจะเป็นการศึกษาคอนกรีตเบาประเภท Light Weight Aggregate จากนั้นจึงได้มีการปรับปรุง และพัฒนาเรื่อยมา เช่น การหล่อเป็นก้อนสี่เหลี่ยม (Block) กำแพง หลังคา พื้น และประยุกต์ใช้ในงานคอนกรีตอัดแรง ส่วนคอนกรีตเบาประเภท Foam Concrete หรือ Aerated Concrete นั้นได้มีการปรับปรุง และพัฒนาควบคู่กันมา

Benjamin (1960)

ได้ผลิต Foam Concrete โดยใช้สารเคมีเพื่อทำให้เกิดฟองก่อนแล้วจึงผสมกับคอนกรีต

พบว่า ได้คอนกรีตที่มีความหนาแน่น 0.79-0.95 ตันต่อลูกบาศก์เมตร มีกำลังรับแรงอัด 31.6-52.7 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยมีการหดตัวที่อายุ 180 วัน เท่ากับร้อยละ 0.2-0.6 มีสมบัติที่เด่น คือ เป็นฉนวนกันความร้อน

Mirza และAl-Noury (1986)

ศึกษาคอนกรีตพรุนที่ผลิตโดยใช้ทรายจากแหล่งต่างๆ ของประเทศซาอุดิอาระเบีย นำไปผสมในแบบขนาด 4 นิ้ว โดยใช้ทรายที่มีค่าโมดูลัสความละเอียด 1.85 และ 3.20 ใช้ผงอลูมิเนียมร้อยละ 0.6 โดยน้ำหนักของวัสดุแห้งทั้งหมด แล้วนำไปบ่มไอน้ำความดันสูง

พบว่า ได้คอนกรีตมีความหนาแน่น 910 และ 1,310 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จากงานวิจัยนี้จะเห็นได้ว่าสามารถใช้ทรายที่มีความละเอียดสูงได้

Atzeni และคณะ (1991)

ศึกษาตัวอย่างของคอนกรีตพรุน โดยที่ฟองอากาศภายในเกิดจากไฮโดรเจนที่มาจากการเติมผงอลูมิเนียม 0.2 กรัม และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 กรัมต่อตัวประสาน 100 กรัม (ตัวประสาน คือ ผงเถ้าลอยผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์)

พบว่า คอนกรีตพรุนมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เมื่อใช้เถ้าลอย (ชั้น F) ผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และสามารถใช้เถ้าลอยแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนที่สูงถึงร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

การศึกษาครั้งนี้ได้ สัดส่วนที่ดี 2 สัดส่วน คือ

สัดส่วนที่ 1 คือ ใช้เถ้าลอยร้อยละ 40 แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ อัตราส่วนน้ำต่อตัวประสาน 0.40 บ่มไอน้ำที่ความดันบรรยากาศ ได้คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัด 63 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ความหนาแน่น 1,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

สัดส่วนที่ 2 คือ ใช้เถ้าลอยร้อยละ 60 แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ บ่มไอน้ำความดันสูงที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียสได้คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัด 74 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ความหนาแน่น 1,300 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ผลการทดลองของ Atzeni และคณะที่กล่าวมาข้างต้นแสดงให้เห็นถึงการใช้ประโยชน์จากเถ้าลอยในการทำคอนกรีตน้ำหนักเบาซึ่งมีการอธิบายไว้ว่าเถ้าลอย คือ เถ้าส่วนละเอียดที่สุดของการเผาไหม้ถ่านหินมีขนาดเล็กมากละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วๆไป มักมีรูปร่างลักษณะเป็นเม็ดค่อนข้างกลมมีสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน ได้มีหน่วยงานหลายๆ แห่งทำการศึกษาค้นคว้าและกำหนดสมบัติของเถ้าลอยเพื่อใช้ในงานคอนกรีต เช่น ASTM และACI เป็นต้น (Dhir,1986)

Okafor และคณะ (1996)

ศึกษากำลัง และส่วนผสมที่ดีที่สุดของมอร์ตาที่ผสมเส้นใยปาล์มน้ำมัน

ทำการหล่อก้อนมอร์ตา ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่างๆ กัน และมีการผสมเส้นใยปาล์มน้ำมันในสัดส่วนร้อยละ 0.5-4 โดยปริมาตร ทดสอบกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึง กำลังรับแรงดัดเพื่อศึกษาผลของส่วนผสมต่อสมบัติดังกล่าว

พบว่า ก้อนมอร์ตามีกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงลดลงเมื่อผสมเส้นใยปาล์มน้ำมัน แต่กำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 33

ส่วนผสมที่ดีที่สุด คือ อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทราย เท่ากับ 1:2 อัตราน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.6 ใช้เส้นใยปาล์มน้ำมันร้อยละ 2 โดยปริมาตร

Abdul Awal และ Warid Hussin (1997)

ศึกษาประสิทธิภาพของเถ้าปาล์มน้ำมันในการลดการขยายตัวของมอร์ตาอันเนื่องมาจาก Alkali-silica Reaction

ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุปอซโซลาน และช่วยลดการขยายตัวของมอร์ตา โดยใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์แลนด์ประเภทที่ 1 ที่อัตราร้อยละ 0 10 30 และ 50 โดยน้ำหนัก และมีการใช้หิน tuff เป็น reactive aggregate

พบว่า เถ้าปาล์มน้ำมัน มีประสิทธิภาพในการลดการขยายตัวของมอร์ตาเนื่องจาก Alkali silica Reaction

Elinwa และMahmood (2001)

ศึกษาการใช้เถ้าจากขี้เลื่อยเป็นวัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์

โดยใช้เถ้าจากขี้เลื่อยเป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาที่อัตราร้อยละ 0-30 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.6 ทำการศึกษาเวลาในการแข็งตัว ความสามารถเทได้ กำลังรับแรงอัด

พบว่า เถ้าจากขี้เลื่อยให้ความสามารถเทได้ กำลังรับแรงอัดที่ดี เมื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ไม่เกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

Mannan และGanapathy (2004)

ศึกษาคอนกรีตจากของเสียกะลาปาล์มน้ำมัน

พบว่า คอนกรีตที่ใช้กะลาปาล์มน้ำมันเป็นมวลรวมหยาบมีความหนาแน่น 1,850 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีกำลังรับแรงอัดอยู่ระหว่าง 20-24 นิวตัน ต่อ ตารางมิลลิเมตร ที่อายุ 28 วัน

ธานันทร์ หาญเจริญกิจ (2522)

ศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้กรวดดินเผาจากกรุงเทพฯ

นำดินเหนียวจากบริเวณหนองงูเห่า บางเขน และบางมด มาอัดเป็นเม็ด แล้วนำไปเผาเพื่อทำเป็นกรวดดินเทียม นำไปผสมกับทราย และปูนซีเมนต์ (ใช้เป็นวัสดุแทนกรวดหรือหิน)

พบว่า กรวดดินเผาหนองงูเห่า เมื่อผสมเป็นคอนกรีตทำให้ได้กำลังรับแรงอัด 283 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ความหนาแน่น 1,845 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

กรวดดินเผาบางเขน เมื่อผสมเป็นคอนกรีตทำให้ได้กำลังรับแรงอัด 348 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ความหนาแน่น 2,056-2,079 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

กรวดดินเผาบางมด เมื่อผสมเป็นคอนกรีตทำให้ได้กำลังรับแรงอัด 160-175 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ความหนาแน่น 1,783-1,922 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ปรีดา และคณะ (2532)

ศึกษาวิธีการผลิตคอนกรีตพรุนด้วยการเติมฟองอากาศ

ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ผสมกับทรายละเอียดในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.4 0.5 และ 0.6 โดยน้ำหนัก ผสมกับสาร Super plasticizer (Darex super 20) ในอัตราส่วน 0.25 0.35 0.50 และ 0.60 ต่อปูนซีเมนต์ 100 กิโลกรัม ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน แล้วผสมฟองอากาศซึ่งเกิดจากการอัดอากาศเข้าไปในสารเคมีที่ทำให้เกิดฟอง คือ Sodium Lauryl Ether Sulphate ($NaC_{12}H_{25}SO_4$) ผสมน้ำในอัตราส่วนร้อยละ 4 โดยปริมาตรของน้ำ จากนั้นหล่อตัวอย่างคอนกรีตพรุนรูปทรงกระบอกมาตรฐาน

พบว่า กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพรุนมีค่าเพิ่มขึ้น ในช่วงอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.4-0.5 เมื่อเพิ่มปริมาณสาร Super plasticizer แต่ที่อัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.6 การเพิ่มปริมาณสาร Super plasticizer จะทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลง อัตราส่วนของคอนกรีตพรุนที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้งานคอนกรีตนั้นควรใช้มีอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ 0.5 ปริมาณฟองอากาศ 150 ลิตรต่อปูนซีเมนต์ 100 กิโลกรัม และปริมาณสาร Darex Super 20 เท่ากับ 0.6 ลิตรต่อปูนซีเมนต์ 100 กิโลกรัม ซึ่งจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดประมาณ 39 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และค่าความหนาแน่นประมาณ 1.0 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยมีค่าใช้จ่ายประมาณ 846 บาท ต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

อุดม หงษ์ประธานพร (2532)

ศึกษาการพัฒนากำลังของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผสมเถ้าลอย และเถ้าแกลบ

โดยนำเถ้าลอย และเถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณ 10 15 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก

พบว่า การพัฒนากำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม อัตราการใช้เถ้าลอย และเถ้าแกลบแทนที่ที่เหมาะสม คือ ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จะให้การพัฒนากำลังในช่วงแรก ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ล้วน แต่ในช่วงหลังจะให้กำลังที่สูงกว่า

เถ้าลอยให้การพัฒนากำลังดีกว่าเถ้าแกลบ

ปารเมศ กำแหงฤทธิรงค์ (2536)

ศึกษาสมบัติของคอนกรีตน้ำหนักเบา

พบว่า การใช้ทรายละเอียดได้ส่วนผสมที่มีน้ำหนักเบากว่าส่วนผสมที่ใช้ทรายหยาบ แต่กำลังรับแรงอัดจะน้อยกว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตชนิดนี้ขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วนปริมาตรอากาศต่อปูนซีเมนต์ สัดส่วนที่เหมาะสม คือ อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายหยาบ 1:2 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.45 และอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายละเอียด 1:3 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.75

บุรฉัตร ฉัตรวีระและคณะ (2537)

ศึกษาการประยุกต์ใช้เถ้าจากกะลามะพร้าว ซังข้าวโพด และเปลือกถั่วลิสงเป็นวัสดุปอซโซลาน

พบว่า เถ้าจากกะลามะพร้าว และซังข้าวโพดไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ เป็นวัสดุผสมปูนซีเมนต์ได้ ส่วนเถ้าเปลือกถั่วลิสงสามารถใช้ได้โดยจัดเป็นวัสดุปอซโซลานชนิด N

มอร์ตาผสมเปลือกถั่วลิสงให้กำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาธรรมดา

ฉัตรชาย จิตรสายธาร และคณะ (2539)

ศึกษาคอนกรีตเบาโดยวิธีลดสัดส่วนมวลรวมละเอียด

พบว่า คอนกรีตที่ใช้หินบะซอลท์เป็นมวลรวมที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.35-0.40 และใช้หินขนาดโตสุดเท่ากับ ¾ และ ½ นิ้ว จะให้กำลังสูงถึง 160 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยมีความหนาแน่นไม่เกิน 2,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และคอนกรีตที่ใช้หินทรายเป็นมวลรวมใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.35-0.40 และขนาดของหินโตสุดเท่ากับ ¾ และ ½ นิ้ว จะให้กำลังรับแรงอัดประมาณ 60-80 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยมีความหนาแน่นไม่เกิน 2,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

จักพล กลั่นมั่นคง และคณะ(2543)

ศึกษาศักยภาพของเถ้าปาล์มน้ำมันเพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน

ใช้ตัวอย่างเถ้าปาล์มน้ำมัน 3 ตัวอย่าง เถ้าปาล์มน้ำมันที่ไม่บด เถ้าปาล์มน้ำมันที่บดจนละเอียดมีขนาดอนุภาคค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 28.4 โดยน้ำหนัก และเถ้าปาล์มน้ำมันที่บดละเอียดจนมีขนาดอนุภาคค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 6.2 โดยน้ำหนัก ซึ่งทำการร่อนเถ้าปาล์มน้ำมันผ่านตะแกรงเบอร์ 325 โดยวิธีร่อนผ่านน้ำ ตามมาตรฐาน ASTM C430 และทดสอบสมบัติทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี และกำลังรับแรงอัดของมอร์ตา โดยเปรียบเทียบกับเถ้าปาล์มน้ำมันที่ไม่ได้บด

พบว่า เถ้าปาล์มน้ำมันที่บดละเอียดมีศักยภาพที่จะพัฒนาเป็นวัสดุปอซโซลานได้ ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันที่ไม่ได้บดนั้นไม่มีศักยภาพพอ โดยพิจารณาจากกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน ที่ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก เป็นปริมาณการแทนที่ที่เหมาะสมที่สุด โดยค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่บดละเอียดมากกว่าจะมีค่าสูงกว่า

กฤษณ์ จารุทะวัย (2545)

ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม และเถ้าลอยชานอ้อยใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในการผสมมอร์ตา ตลอดจนมีการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในน้ำชะของเถ้าลอยทั้งสองชนิด

พบว่า เถ้าลอยเส้นใยปาล์ม และเถ้าลอยชานอ้อย ไม่สามารถจัดเป็นวัสดุปอซโซลานตามข้อกำหนดใน ASTM C618 เมื่อนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาลดลง ความต้องการน้ำ และระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาธรรมดา ค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน ของมอร์ตาผสมเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม และมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อยมีค่าต่ำกว่ามอร์ตาธรรมดาทุกปริมาณการแทนที่

เถ้าลอยเส้นใยปาล์มสามารถนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ อัตราการแทนที่ที่เหมาะสม คือ ร้อยละ10 โดยน้ำหนัก

ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักจากน้ำชะของเถ้าลอยเส้นใยปาล์ม เถ้าลอยชานอ้อยมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดในประกาศของกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540) เมื่อพิจารณาผลของกำลังรับแรงอัด เถ้าลอยเส้นใยปาล์มหรือเถ้าลอยชานอ้อยมีแนวโน้มที่จะสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ เช่น การนำเถ้าลอยเส้นใยปาล์มมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในงานที่ไม่ต้องการกำลังรับแรงอัดมาก ทำคอนกรีตบล็อคหรืออาจใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการทำก้อนแข็ง และการปรับเสถียร

สุรพันธ์ สุคันธปรีย์ (2545)

ศึกษา อิฐคอนกรีตที่มีเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสม

นำเถ้าปาล์มน้ำมัน และเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่บด และไม่ได้บดมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่อัตราส่วนร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ทำการหล่อก้อนตัวอย่างมอร์ตา เพื่อศึกษากำลังรับแรงอัดตลอดจนมีการใช้เถ้าปาล์มน้ำมัน และเถ้าแกลบ-เปลือกไม้เป็นส่วนผสมผลิตอิฐคอนกรีต

พบว่า กำลังรับแรงอัดของอิฐคอนกรีตขึ้นอยู่กับร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือ ยิ่งแทนที่มากกำลังรับแรงอัดยิ่งต่ำ นอกจากนี้ยังขึ้นกับความละเอียดของเถ้าด้วย คือ ยิ่งมีความละเอียดมากยิ่งทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตสูงขึ้นตามไปด้วย

วีรชาติ ตั้งจิรภัทร (2546)

ศึกษากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน และการขยายตัวของแท่งมอร์ตาที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน และเถ้าแกลบ-เปลือกไม้

นำเถ้าปาล์มน้ำมันที่บด และไม่ได้บดโดยนำส่วนที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 มาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ของวัสดุประสานเพื่อหล่อมอร์ตา จากนั้นแยกก้อนตัวอย่างมอร์ตาออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 นำไปบ่มโดยใช้น้ำประปา ส่วนที่ 2 นำไปแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

นอกจากนี้ยังทดสอบการขยายตัวของมอร์ตาที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมัน และเถ้าแกลบ-เปลือกไม้มาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่อัตราส่วนต่างๆ กัน หล่อตัวอย่างขนาด 2.5×2.5×28.5 เซนติเมตร นำไปแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

พบว่า มอร์ตาผสมเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบด เมื่อบ่มในน้ำประปามีกำลังรับแรงอัดต่ำกว่ามอร์ตาธรรมดา และทุกอายุการทดสอบ

สำหรับการขยายตัวของมอร์ตาที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ นั้นที่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และมอร์ตาที่ใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักมีค่าการขยายตัวต่ำสุด และมีแนวโน้มขยายตัวเพิ่มขึ้นเมื่อการแทนที่สูงขึ้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีตที่ผ่านมา

งานวิจัย	ผลที่ได้	ผู้วิจัย
ปี ค.ศ.1960 ได้ผลิต Foam Concrete โดยใช้สารเคมี เพื่อทำให้เกิดฟองก่อน แล้วจึงผสมกับคอนกรีต	- กำลังรับแรงอัด 31.6-52.7 กก.ต่อ ตร.ซม. - ความหนาแน่น 0.79-0.95 ตันต่อ ลบ.ม.	Benjamin
ปี ค.ศ.1986 ใช้ผงอลูมิเนียมร้อยละ 0.6 โดย น้ำหนัก	- ความหนาแน่น 910 และ 1,310 กก.ต่อ ลบ.ม.	Mirza และ Al-Noury
ปี ค.ศ.1991 ใช้ผงอลูมิเนียม 0.2 กรัม และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 กรัม ต่อตัวประสาน 100 กรัม สัดส่วนที่ 1 ใช้เถ้าลอยร้อยละ 40 แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อัตราส่วนน้ำต่อตัวประสาน 0.40 บ่มไอน้ำที่ความดันบรรยากาศ สัดส่วนที่ 2 คือ ใช้เถ้าลอยร้อยละ 60 แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ บ่มไอน้ำความดันสูง	- กำลังรับแรงอัด 63 กก.ต่อ ตร.ซม. - ความหนาแน่น 1,000 กก.ต่อ ลบ.ม. - กำลังรับแรงอัด 74กก.ต่อ ตร.ซม. - ความหนาแน่น 1,300 กก.ต่อ ลบ.ม.	Atzeni และคณะ
ปี ค.ศ. 1996 หล่อก้อนมอร์ตา โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อน้ำต่างๆ กัน และมีการผสมเส้นใยปาล์มน้ำมันในสัดส่วนร้อยละ 0.5-4 โดยปริมาตร	- มอร์ตามีกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงลดลง เมื่อผสมเส้นใยปาล์มน้ำมัน แต่กำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 33 - ส่วนผสมที่ดีที่สุด คือ อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทราย เท่ากับ 1: 2 อัตราน้ำต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.6 ใช้เส้นในปาล์มน้ำมันร้อยละ 2 โดยปริมาตร	Okafor และคณะ
ปี ค.ศ. 1997 ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุปอซโซลาน แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์แลนด์ธรรมดาที่อัตราร้อยละ 0 10 30 และ 50 โดยน้ำหนัก ในการลดการขยายตัวของมอร์ตา ซึ่งใช้หิน tuff เป็นreactive aggregate	- เถ้าปาล์มน้ำมันมีประสิทธิภาพในการลดการขยายตัวของมอร์ตา อันเนื่องมาจาก Alkali-silica Reaction	Abdul Awal และ Warid Hussin
ปี ค.ศ. 2001 ใช้เถ้าจากขี้เลื่อยเป็นวัสดุปอซโซลาน แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาที่อัตราร้อยละ 0-30 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.6 ทำการศึกษาเวลาในการแข็งตัว ความสามารถเทได้ กำลังรับแรงอัด	- เถ้าจากขี้เลื่อยให้ความสามารถเทได้ และกำลังรับแรงอัดที่ดี เมื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ไม่เกิน ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก	Elinwa และ Mahmood
ปี ค.ศ. 2004 ศึกษาคอนกรีตจากของเสียกะลาปาล์มน้ำมัน	- พบว่าคอนกรีตที่ใช้กะลาปาล์มน้ำมันเป็นมวลรวมหยาบมีความหนาแน่น 1,850 กิโลกรัม ต่อลูกบาศก์เมตร มีกำลังรับแรงอัดอยู่ระหว่าง 20-24 นิวตัน ต่อ ตารางมิลลิเมตร ที่อายุ 28 วัน จัดเป็นคอนกรีตน้ำหนักเบา	Mannan และ Ganapathy

ตารางที่ 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีตที่ผ่านมา (ต่อ)

งานวิจัย	ผลที่ได้	ผู้วิจัย
ปี พ.ศ. 2522 นำดินเหนียวจากบริเวณหนองงูเห่า บางเขน และบางมด มาอัดเป็นเม็ด แล้วนำไปเผาเพื่อทำเป็นกรวดดิน นำไปผสมกับทราย และปูนซีเมนต์ (ใช้เป็นวัสดุแทนกรวดหรือหิน)	- กรวดดินเผาหนองงูเห่า เมื่อผสมเป็นคอนกรีตมีกำลังรับแรงอัด 283 กก.ต่อตร.ซม. ความหนาแน่น 1,845 กก.ต่อลบ.ม. - กรวดดินเผาบางเขน ได้คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัด 348 กก. ต่อ ตร.ซม. ความหนาแน่น 2,056-2,079 กก. ต่อ ลบ.ซม. - กรวดดินเผาบางมด ได้คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัด 160-175 กก.ต่อ ตร.ซม. ความหนาแน่น 1,783-1,922 กก. ต่อ ลบ.ม.	**ธานันทร์ หาญเจริญกิจ**
ปี พ.ศ. 2532 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ผสมกับทรายละเอียด ในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก W/C เท่ากับ 0.4 0.5 และ 0.6 ผสมกับสาร Super plasticizer ในอัตราส่วน 0.25 0.35 0.50 และ 0.60 ต่อปูนซีเมนต์ 100 กิโลกรัม เติมสารเคมีที่ทำให้เกิดฟอง คือ Sodium Lauryl Ether Sulphate ($NaC_{12}H_{25}SO_4$) ผสมน้ำในอัตราส่วนร้อยละ 4 โดยปริมาตรของน้ำ	- กำลังรับแรงอัด 39 กก.ต่อ ตร.ซม. - ค่าความหนาแน่น 1.0 ก. ต่อลบ.ซม.	**ปรีดา และคณะ**
ปี พ.ศ. 2532 เถ้าลอย และเถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณ 10 15 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก	- การพัฒนากำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม - อัตราการใช้เถ้าลอยและเถ้าแกลบแทนที่ที่เหมาะสม คือ ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จะให้การพัฒนากำลังในช่วงแรก ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ล้วน แต่ในช่วงหลังจะให้กำลังที่สูงกว่า - เถ้าลอยให้การพัฒนากำลังดีกว่าเถ้าแกลบ	**อุดม หงษ์ประธานพร**
ปี พ.ศ. 2536 สมบัติของคอนกรีตน้ำหนักเบา อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายหยาบ 1:2 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.45 และอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายละเอียด 1:3 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.75	- การใช้ทรายละเอียดได้ส่วนผสมที่มีน้ำหนักเบากว่าส่วนผสมที่ใช้ทรายหยาบ แต่กำลังรับแรงอัดจะน้อยกว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตชนิดนี้ขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วนปริมาตรอากาศต่อปูนซีเมนต์	**ปารเมศ กำแหงฤทธิรงค์**
ปี พ.ศ. 2537 ศึกษาการประยุกต์ใช้เถ้าจากกะลามะพร้าว ซังข้าวโพด และเปลือกถั่วลิสงเป็นวัสดุปอซโซลาน	- พบว่าเถ้าจากกะลามะพร้าว และซังข้าวโพดไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ เป็นวัสดุผสมปูนซีเมนต์ได้ ส่วนเถ้าเปลือกถั่วลิสง ใช้ได้โดยจัดเป็นวัสดุปอซโซลานชนิด N - มอร์ตาผสมเปลือกถั่วลิสงให้กำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาธรรมดา	**บุรฉัตร ฉัตรวีระและคณะ**

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีตที่ผ่านมา (ต่อ)

งานวิจัย	ผลที่ได้	ผู้วิจัย
ปี พ.ศ. 2539 คอนกรีตที่ใช้หินบะซอลท์เป็นมวลรวมที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.35-0.40 และขนาดโตสุดเท่ากับ ¾ และ ½ นิ้ว	- กำลังรับแรงอัด 160 กก. ต่อตร.ซม. ความหนาแน่นไม่เกิน 2,000 กก. ต่อลบ.ม. - คอนกรีตที่ใช้หินทรายเป็นมวลรวม ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.35-0.40 และขนาดโตสุดเท่ากับ ¾ และ ½ นิ้ว จะให้กำลังรับแรงอัดประมาณ 60-80 กก.ต่อ ตร.ซม. ความหนาแน่นไม่เกิน 2,000 กก. ต่อลบ.ม.	**ฉัตรชาย จิตรสายธาร และคณะ**
ปี พ.ศ. 2543 ศึกษาศักยภาพของเถ้าปาล์มน้ำมันเพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน ใช้ตัวอย่างเถ้าปาล์มน้ำมัน 3 ตัวอย่าง เถ้าปาล์มน้ำมันที่ไม่บด เถ้าปาล์มน้ำมันที่บดจนละเอียดมีขนาดอนุภาคค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และทดสอบสมบัติทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี และกำลังรับแรงอัดของมอร์ตา โดยเปรียบเทียบกับเถ้าปาล์มน้ำมันที่ไม่ได้บด	- พบว่า เถ้าปาล์มน้ำมันที่บดละเอียดมีศักยภาพที่จะพัฒนาเป็นวัสดุปอซโซลานได้ ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันที่ไม่ได้บดนั้นไม่มีศักยภาพ - ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก เป็นปริมาณการแทนที่ที่เหมาะสมที่สุด โดยค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่บดละเอียดมากกว่าจะมีค่าสูงกว่าที่ไม่ได้บด	**จักพล กลั่นมั่นคง และคณะ**
ปี พ.ศ. 2545	เถ้าลอยเส้นใยปาล์มสามารถนำมาใช้แทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอร์ตแลนด์ได้ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก	**กฤษณ์ จารุทะวัย**
ปี พ.ศ. 2545 นำเถ้าปาล์มน้ำมัน และเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ ที่บดและไม่ได้ บดมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1ที่อัตราส่วนร้อยละ 10 20 และ 30 สำหรับหล่อก้อนตัวอย่างมอร์ตา เพื่อศึกษากำลังรับแรงอัด	- กำลังรับแรงอัดของอิฐคอนกรีตขึ้นอยู่ กับร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือ ยิ่งแทนที่มากกำลังรับแรงอัดยิ่งต่ำ นอกจากนี้ยังขึ้นกับความละเอียดของเถ้าด้วย คือ ยิ่งมีความละเอียดมากยิ่งทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตสูงขึ้นตามไปด้วย	**สุรพันธ์ สุคันธปรีย์**
ปี พ.ศ. 2546 เถ้าปาล์มน้ำมันที่บด และไม่ได้บด นำส่วนที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เปรียบเทียบกับเถ้าปาล์มที่ละเอียดน้อยกว่ามาแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่วนที่ 1 นำไปบ่มโดยใช้น้ำประปา ส่วนที่ 2 นำไปแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ใช้เถ้าปาล์มน้ำมัน และเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ มาแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ที่อัตราส่วนต่างๆ หล่อตัวอย่างขนาด 2.5×2.5×28.5 เซนติเมตร แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก	- มอร์ตาผสมเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบด เมื่อบ่มในน้ำประปามีกำลังรับแรงอัดต่ำกว่ามอร์ตาธรรมดาทุกอายุการทดสอบ - มอร์ตาที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และมอร์ตาที่ใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าการขยายตัวต่ำสุด และมีแนวโน้มขยายตัวเพิ่มขึ้นเมื่อการแทนที่สูงขึ้น	**วีรชาติ ตั้งจิรภัทร**

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพอจะสรุปอัตราส่วนผสมได้ดังนี้

ตารางที่ 2.8 ตารางสรุปอัตราส่วนผสมที่ใช้ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีตที่ผ่านมา

อัตราส่วนผสม			
ปูนซีเมนต์ : ทราย	อัตราการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละโดยน้ำหนัก	ผงอลูมิเนียมร้อยละโดยน้ำหนักปูนซีเมนต์	อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ w/c
1:1 1:2 1:3	10 20 30 40 50 60	0.2-0.6	0.35-0.8

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย