บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเผาชานอ้อยและการจัดการเถ้าลอยชานอ้อยที่เกิดขึ้น

ชานอ้อยที่เกิดจากการบีบสกัดเอาน้ำอ้อยออกมา จะถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำในโรงงานน้ำตาลประมาณร้อยละ 30 โดยจะเผาที่อุณหภูมิประมาณ 1,000 องศาเซลเซียส ภายหลังจากการเผาจะเกิดเถ้าลอยขึ้นประมาณร้อยละ 5 ถึงร้อยละ 10 เถ้าลอยที่เกิดขึ้นนี้จะถูกดักไว้โดยเครื่องสัมผัสแบบเปียก (Wet Collectors) ซึ่งใช้แยกอนุภาคขนาด 0.1-20 ไมโครเมตร ก้อนเถ้าที่เปียกนี้จะถูกลำเลียงโดยสายพานส่งขึ้นรถบรรทุกเพื่อนำไปทิ้งในบ่อเก็บที่เตรียมไว้ ดังแสดงในรูปที่ 2.1

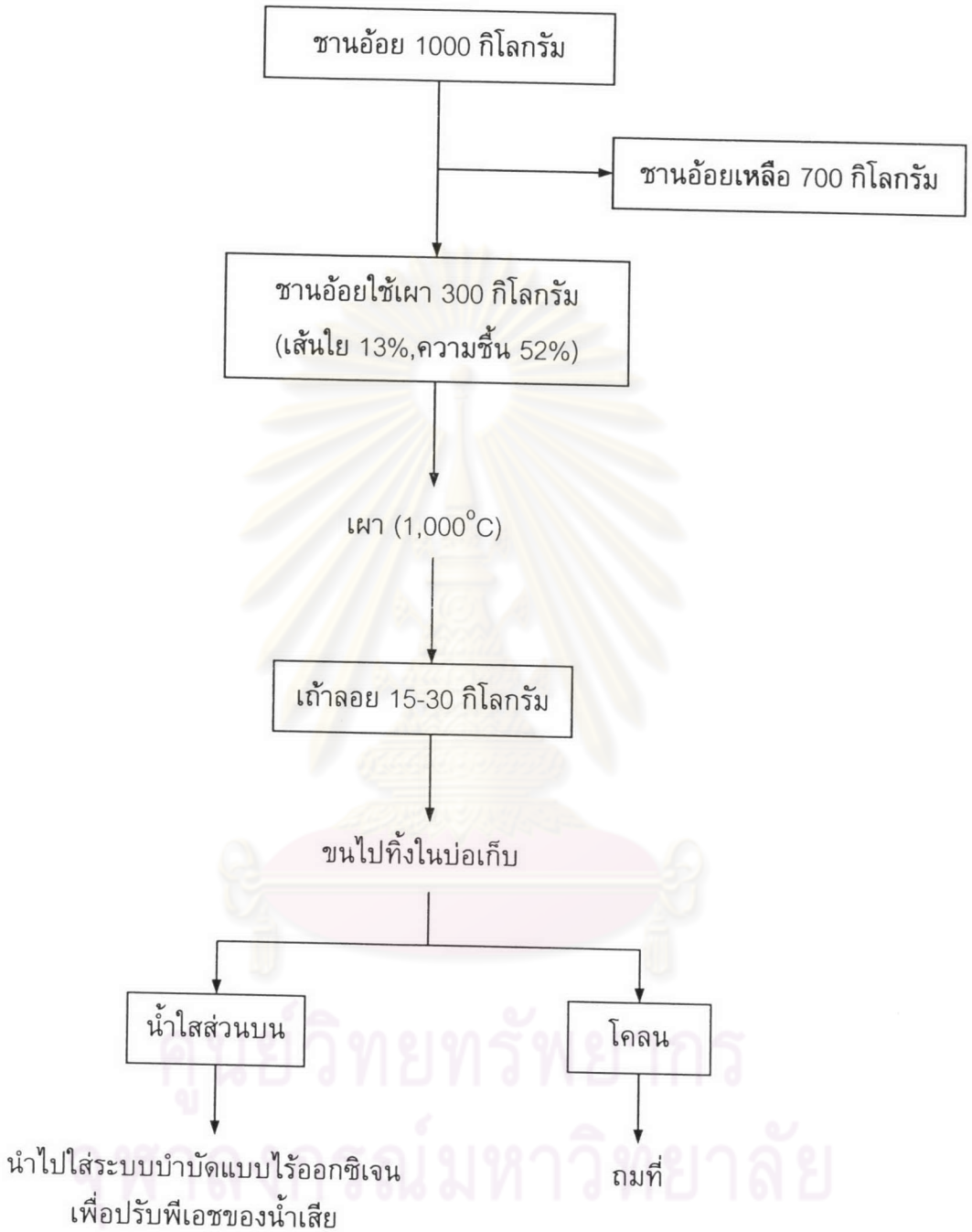
2.2 เถ้าลอย (Fly Ash)

เถ้าลอย (Fly Ash) คือ เถ้าส่วนละเอียดที่สุดจากการเผาไหม้ มีขนาดเล็กมาก และอาจจะละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วๆไป ลักษณะเฉพาะและคุณสมบัติของเถ้าลอยแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับสภาวะการเผาและชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ เถ้าลอยบางชนิดมีคุณสมบัติคล้ายกับเถ้าภูเขาไฟ ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ (Natural Pozzolan) จึงมีการสนับสนุนและพัฒนาการใช้เถ้าลอยร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในงานคอนกรีต

หน่วยงานวิจัยหลายแห่งได้กล่าวถึง คุณสมบัติและข้อกำหนดสำหรับการนำเถ้าลอยไปใช้ เช่น ในสหรัฐอเมริกามี American Concrete Institute (ACI) และ American Society for Testing and Materials (ASTM) เป็นต้น นอกจากที่สหรัฐอเมริกาแล้ว ที่อังกฤษ แคนาดา เยอรมัน เนเธอร์แลนด์ ญี่ปุ่นและอีกหลายประเทศในโลก ล้วนมีมาตรฐานของตนเองในการกำหนดชนิดและคุณสมบัติของเถ้าลอย

2.2.1 ส่วนประกอบทางเคมี

ส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญของเถ้าลอย ได้แก่ SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, CaO, MgO, Na_2O, K_2O, SO_3 และ C ส่วนประกอบทางเคมีเหล่านี้จะมีความแตกต่างกันในเชิงปริมาณตามแหล่งที่มาของเถ้าลอยนั้นๆ ซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญต่อการนำเถ้าลอยไปใช้ เพราะยากต่อการควบคุมคุณภาพและคุณสมบัติต่างๆ



รูปที่ 2.1 การเผาชานอ้อยและการจัดการเถ้าลอยที่เกิดจากการเผา (สถาบันวิจัยพลังงาน, 2541)

2.2.2 คุณสมบัติทางกายภาพ

คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยที่สำคัญต่อคุณภาพคอนกรีต คือ ขนาดอนุภาคของเถ้าลอย ซึ่งขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่นำมาเผาไหม้และลักษณะการเผาไหม้ โดยทั่วไปเถ้าลอยมีขนาดตั้งแต่เล็กกว่า 0.001 จนถึง 0.15 มิลลิเมตร

2.2.3 ประเภทของเถ้าลอย

ตามมาตรฐาน ASTM C 618 – 96 แบ่งประเภทของวัสดุผสมในคอนกรีตเป็น 3 ชั้นคุณภาพ ได้แก่ ชั้นคุณภาพ N, F และ C โดยกำหนดองค์ประกอบทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การแบ่งชั้นคุณภาพของวัสดุผสมในคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 618 - 96

คุณสมบัติ		ประเภทของวัสดุผสม		
		N	F	C
$SiO_2 + Al_2O3 + Fe_2O_3$	%น้อยที่สุด	70.0	70.0	50.0
SO_3	%มากที่สุด	4.0	5.0	5.0
ปริมาณความชื้น	%มากที่สุด	3.0	3.0	3.0
การสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้	%มากที่สุด	10.0	6.0	6.0
Pozzolanic Index	%น้อยที่สุด	75.0	75.0	75.0

ชั้นคุณภาพ N คือ วัตถุดิบหรือวัสดุปอซโซลานธรรมชาติที่เป็นผง เช่น ดินบางชนิด หินชนวน หินหรือเถ้าภูเขาไฟ เป็นต้น ซึ่งหินและดินต้องผ่านกระบวนการแปรสภาพให้มีขนาดเล็กลง เพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการใช้งาน

ชั้นคุณภาพ F คือ เถ้าลอยที่เกิดจากการเผาไหม้ของถ่านหินแอนทราไซต์หรือบิทูมินัส ซึ่งเถ้าลอยชั้นคุณภาพ F มีคุณสมบัติปอซโซลาน (Pozzolanic)

ชั้นคุณภาพ C คือ เถ้าลอยที่เกิดจากการเผาไหม้ของถ่านหินลิกไนต์หรือซับบิทูมินัส เถ้าลอยชั้นคุณภาพ C นอกจากจะมีคุณสมบัติปอซโซลาน (Pozzolanic) แล้ว ยังมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน (Cementitious) อีกด้วยและอาจจะมี CaO อยู่มากกว่าร้อยละ 10

2.3 คอนกรีต

คอนกรีตเป็นวัสดุที่มนุษย์สร้างขึ้นเพื่อการใช้งานด้านโครงสร้างเป็นวัสดุที่สามารถสร้างให้มีรูปร่างและลักษณะตามต้องการและเหมาะกับงาน ซึ่งเป็นข้อที่ได้เปรียบอีกประการหนึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่นๆ เช่น ไม้ อิฐ หรือ เหล็ก คอนกรีตเกิดจากการผสมซีเมนต์ น้ำ ซึ่งทำปฏิกิริยากันเกิดเป็นวัสดุประสาน รวมเรียกว่า ซีเมนต์เพสท์ กับ ทราย หินหรือกรวด ที่เป็นวัสดุผสมหรือมวลรวม ส่วนผสมทั้งหมดจะแข็งตัวภายใน 24 ชั่วโมง และจะสามารถทนแรงอัดได้ดีขึ้นเรื่อยๆ ตามอายุ ตราบที่มีน้ำอยู่ในโครงสร้างเพื่อทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่น

คอนกรีตโดยทั่วไปจะมีปริมาตรของซีเมนต์เพสต์อยู่ประมาณร้อยละ 25 ถึงร้อยละ 40 ซึ่งแยกออกเป็นปริมาตรของซีเมนต์ประมาณร้อยละ 7 ถึงร้อยละ 15 ในน้ำประมาณร้อยละ 14 ถึงร้อยละ 21 และฟองอากาศที่แทรกอยู่ในช่องว่างประมาณร้อยละ 0.5 ถึงร้อยละ 3 ที่เหลือเป็นปริมาตรของวัสดุผสม (วินิต ช่อวิเชียร, 2539) สมบัติของซีเมนต์เพสต์ขึ้นอยู่กับคุณภาพของซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่เกิดขึ้นระหว่างน้ำและซีเมนต์ ซีเมนต์เพสต์จะทำหน้าที่เสริมในช่องว่างระหว่างวัสดุผสม หล่อลื่นคอนกรีตสดในขณะทำงาน ให้กำลังแก่คอนกรีตเมื่อคอนกรีตแข็งตัว และป้องกันการซึมผ่านของน้ำ ในขณะที่วัสดุผสมจะมีหน้าที่เป็นตัวแทรกประสานอยู่ในซีเมนต์เพสต์เนื่องจากมีราคาถูก และช่วยให้คอนกรีตมีความคงทน

2.3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เป็นวัสดุก่อสร้างที่สำคัญที่สุดในการก่อสร้างทางวิศวกรรมในปัจจุบัน เพราะเมื่อนำไปผสมรวมกับทรายและน้ำจะได้เป็นมอร์ตา (Mortar) ซึ่งนำไปใช้เป็นปูนก่อสำหรับงานก่ออิฐหรือหิน หรือปูนฉาบ สำหรับงานฉาบปูน เป็นต้น หากนำไปผสมรวมกับหิน กรวด ทรายและน้ำด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมจะได้เป็นคอนกรีต ซึ่งเมื่อแข็งตัวแล้วจะแข็งและทนทานคล้ายหิน (วินิต ช่อวิเชียร, 2539) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดปูนเม็ด (Clinker) จนละเอียด ซึ่งปูนเม็ดนี้เป็นผลผลิตที่เกิดจากการเผาวัตถุดิบที่ผสมรวมกันด้วยอุณหภูมิสูงประมาณ 1,400 – 1,600 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี เกิดการรวมตัวของออกไซด์ของธาตุต่างๆ และจับกันเป็นเม็ดเล็กๆ ซึ่งก็คือปูนเม็ด

วัตถุดิบ

วัตถุดิบที่สำคัญที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์แบ่งได้ 2 ประเภท คือ ประเภทที่ให้ธาตุแคลเซียมเป็นส่วนใหญ่ ได้แก่ หินปูน ดินสอพอง ดินปูนขาว กับประเภทที่ให้ออกไซด์ของธาตุ ซิลิกา และอลูมิน่าเป็นส่วนใหญ่ ได้แก่ ดินดาน ดินเหนียว หินชนวน

องค์ประกอบทางเคมี

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ได้หลังจากการเผาวัตถุดิบจะประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2539)

ออกไซด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ออกไซด์หลัก	
CaO	60 – 67
SiO_2	17 – 25
Al_2O_3	3 – 8
Fe_2O_3	0.5 – 6.0
ออกไซด์รอง	
MgO	0.1 – 5.5
Na_2O+K_2O	0.5 – 1.3
TiO_2	0.1 – 0.4
P_2O_5	0.1 – 0.2
SO_3	1 – 3

ออกไซด์หลักจะรวมตัวกันในระหว่างการเกิดปูนเม็ด เกิดเป็นสารประกอบที่สำคัญ 4 อย่าง ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.3 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2539)

ชื่อสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ไตรแคลเซียม ซิลิเกต (Tricalcium Silicate)	$3CaO.SiO_2$	C_3S	33-55
ไดแคลเซียม ซิลิเกต (Dicalcium Sillcate)	$2CaO.SiO_2$	C_2S	15-35
ไตรแคลเซียม อลูมิเนต (Tricalcium Aluminate)	$3CaO.Al_2O_3$	C_3A	7-15
เตตราแคลเซียม อลูมิโนเฟอร์ไรท์ (Tetracalcium Aluminoferrite)	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	C_4AF	5-10

อิทธิพลของสารประกอบต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

สารประกอบที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีผลกระทบต่อคุณสมบัติต่างๆ ของปูนซีเมนต์เมื่อนำไปผสมกับน้ำเพื่อทำเป็นมอร์ตาหรือคอนกรีต คุณสมบัติของสารประกอบที่สำคัญในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของสารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2539)

คุณสมบัติ	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
1. อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน	เร็ว (ชั่วโมง)	ช้า (วัน)	ทันทีทันใด	เร็วมาก (นาที)
2. การพัฒนากำลังอัด	เร็ว (วัน)	ช้า (สัปดาห์)	เร็วมาก (วันเดียว)	เร็วมาก (วันเดียว)
3. กำลังอัดประลัย	สูง	ค่อนข้างสูง	ต่ำ	ต่ำ
4. ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน	ปานกลาง (500 J/g)	น้อย (250 J/g)	สูงมาก (850 J/g)	ปานกลาง (420 J/g)
5. คุณสมบัติอื่นๆ	คุณสมบัติเหมือนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	-	ไม่คงตัวในน้ำและถูกซัลเฟตทำลายได้ง่าย	ทำให้ปูนซีเมนต์มีสีเทา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีสารประกอบไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) รวมกันประมาณร้อยละ 70 ถึงร้อยละ 80 ของปริมาณทั้งหมด ซึ่งสารประกอบทั้งสองชนิดนี้เป็นตัวควบคุมความแข็งแรงของมอร์ตาหรือคอนกรีต ดังนั้นในการศึกษาโดย X–Ray Diffraction Spectrometry จะสนใจที่จะศึกษาสารประกอบทั้งสองชนิดนี้ รวมทั้งสารเชื่อมประสาน แคลเซียม ซิลิเกตไฮเดรท (Calcium Silicate Hydrate; C-S-H) ซึ่งเป็นสารที่เกิดหลังจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกับน้ำ เป็นสารที่ก่อให้เกิดการเชื่อมประสานและทำให้ปูนซีเมนต์เกิดการก่อตัว แข็งตัวและยึดเกาะกับวัสดุผสม

2.3.2 **วัสดุผสม** (Aggregates)

วัสดุผสม หรือบางครั้งเรียกว่า มวลรวม เป็นวัสดุเฉื่อยที่สำคัญสำหรับการผลิตคอนกรีต โดยจะแทรกประสานกระจายตัวอยู่ทั่วซีเมนต์เพสต์ มีปริมาตรเป็นร้อยละ 70 ถึงร้อยละ 80 ของส่วนผสมทั้งหมด วัสดุผสมโดยทั่วไปได้แก่ หินย่อย กรวด และทรายหยาบ ซึ่งเมื่อผสมกับซีเมนต์แล้วทำให้คอนกรีตมีความคงทน ความแข็งแรง (Durability) เพราะวัสดุผสมโดยทั่วไปในธรรมชาติสามารถรับกำลังอัดได้ดีกว่าคอนกรีต ปริมาตรของคอนกรีตไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก (Volume stability) และที่สำคัญยังช่วยให้คอนกรีตมีราคาที่ถูกลง กำลังและสมบัติทางกายภาพของวัสดุผสมหลายอย่างมีผลต่อสมบัติของคอนกรีตทั้งในสภาพเหลวและแข็งตัวแล้ว ดังนั้นการเลือกวัสดุผสมที่เหมาะสมไม่เพียงเป็นการประหยัด ยังเท่ากับเป็นการช่วยให้คอนกรีตมีคุณภาพดีขึ้นด้วย วัสดุผสมที่ใช้ในงานคอนกรีตสามารถจำแนกออกเป็น 2 ประเภทตามขนาด คือ

1. **วัสดุผสมละเอียด** (Fine aggregates) เป็นวัสดุที่ส่วนใหญ่สามารถลอดผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4 (4.76 มิลลิเมตร) ได้ แต่ต้องไม่เล็กจนเป็นฝุ่น (0.07 มิลลิเมตร) หรือผ่านตะแกรงเบอร์ 200 วัสดุผสมละเอียดที่นิยมใช้คือ ทรายธรรมชาติ และควรเป็นทรายน้ำจืดที่สะอาด มีเหลี่ยมคม และขนาดของเม็ดสม่ำเสมอ

2. **วัสดุผสมหยาบ** (Coarse aggregates) คือ วัสดุส่วนใหญ่ที่ค้างบนตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์4 อาจจะมีบางส่วนที่ละเอียดปนอยู่บ้าง แต่ต้องไม่เกินปริมาณที่มาตรฐานกำหนด วัสดุผสมหยาบได้แก่ หินย่อย หรือ กรวด หินที่เหมาะในการทำคอนกรีตต้องมีเหลี่ยมมุม แข็ง ผิวขรุขระ ยึดหดตัวต่ำ และทนทานต่อการสึกหรอได้ดี และมีสัดส่วนคละที่เหมาะสม ขนาดของหินโดยทั่วไปที่ใช้กันจะอยู่ในช่วง 4.76 - 76.20 มิลลิเมตร (3/16 - 3 นิ้ว) โดยสามารถแบ่งออกเป็นหินย่อยเบอร์ 1 ซึ่งมีขนาด 4.76 - 19.05 มิลลิเมตร (3/16 - 3/4 นิ้ว) หินย่อยเบอร์ 2 มีขนาด 19.05 - 38.10 มิลลิเมตร (3/4 - 1½ นิ้ว) และหินย่อยเบอร์ 3 ที่มีขนาดตั้งแต่ 38.10 - 76.20 มิลลิเมตร

(1½ - 3 นิ้ว) วัสดุผสมต้องมีรูพรุนพอที่จะสามารถดูดซับน้ำและเป็นที่สำหรับการขยายตัวของน้ำ เพื่อป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีต

3. **ส่วนคละของวัสดุผสม** (Gradation) ส่วนคละมีผลอย่างมากต่อความสามารถทำงานได้ และปริมาณซีเมนต์ แต่ละก้อนหรืออนุภาคของวัสดุผสมจะต้องถูกห่อหุ้มด้วยซีเมนต์เพสต์ ไม่ว่าวัสดุผสมนั้นจะมีขนาดเล็กหรือใหญ่ นอกจากนี้วัสดุผสมหยาบและละเอียดจะต้องมีสัดส่วนที่เหมาะสมเมื่อนำมาผสมรวมกัน เพื่อให้วัสดุผสมขนาดเล็กสามารถแทรกตัวอยู่ระหว่างช่องว่างของวัสดุผสมที่ใหญ่กว่าให้มากที่สุด ซึ่งมีผลทำให้ประหยัดซีเมนต์เพสต์ที่จะยึดวัสดุผสมเข้าไว้ด้วยกันและอุดช่องว่างระหว่างวัสดุผสม ประณต กุลประสูตร (2541) กล่าวว่า ส่วนคละของวัสดุผสมมีผลต่อเนื้อและคุณภาพคอนกรีต ปกติอัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุผสมละเอียดต่อวัสดุผสมหยาบกำหนดโดยให้ปริมาตรของวัสดุผสมละเอียดมากกว่าปริมาตรช่องว่างในวัสดุผสมหยาบ ประมาณร้อยละ 5 โดยที่ช่องว่างระหว่างวัสดุหยาบอาจมีมากถึงร้อยละ 45 ของปริมาตรวัสดุหยาบแห้ง ดังนั้นในทางปฏิบัติ จึงมักจะมีการกำหนดปริมาตรของวัสดุผสมละเอียดเท่ากับประมาณครึ่งหนึ่งของปริมาตรของวัสดุผสมหยาบที่แห้ง แต่เพื่อให้ส่วนผสมของคอนกรีตง่ายต่อการเท จึงได้มีการกำหนดอัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุผสมละเอียดต่อวัสดุผสมหยาบไว้ โดยอยู่ระหว่าง 1 : 1½ ถึง 1 : 2½ อัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุผสมละเอียดต่อวัสดุผสมหยาบ

2.3.3 น้ำ

น้ำสำหรับผสมคอนกรีตมีหน้าที่หลักคือ ทำปฏิกิริยากับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อให้เกิดการจับตัวแน่นกับวัสดุผสมทำให้เกิดการเกาะตัวเป็นก้อนวัสดุที่แข็ง ช่วยเคลือบผิววัสดุผสมให้เปียกเพื่อการยึดจับกับซีเมนต์เพสต์ได้ดี และยังช่วยทำให้ส่วนผสมมีความลื่น มีความข้นเหลวพอดี สามารถทำงานได้อย่างสะดวกและหล่อเข้าแบบได้ตามต้องการ ดังนั้นคุณภาพและปริมาณน้ำจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต น้ำที่นำมาผสมในคอนกรีตจะต้องเป็นน้ำสะอาด ไม่มีน้ำมัน กรด ด่าง สารอินทรีย์ และต้องมีความขุ่นไม่เกิน 2,000 ส่วนในล้านส่วน ที่จะส่งผลต่อคุณภาพของคอนกรีตที่ผลิตได้ เช่น ระยะเวลาในการแข็งตัว ค่ากำลังรับแรงอัด หรือทำให้คอนกรีตมีสีผิวที่ไม่สม่ำเสมอ

คอนกรีตที่มีคุณภาพดี ไม่เพียงจะขึ้นอยู่กับความถูกต้องของอัตราส่วนผสมแต่เพียงอย่างเดียวเท่านั้น แต่ปริมาณของน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตที่ถูกกำหนดเป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ (Water cement ratio) ก็จัดเป็นอีกองค์ประกอบหนึ่งที่มีความสำคัญเช่นกัน กล่าวไว้ว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์น้อย จะแข็งแรงกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์มาก แต่อย่างไรก็ตามส่วนผสมของคอนกรีตก็ควรจะมีความเข้มข้นเหลวพอดี เพื่อให้

สะดวกต่อการเทคอนกรีตลงแบบ ความต้องการน้ำจำนวนเพียงให้สามารถลื่นไหลเข้าแบบหล่อได้ แต่การใส่น้ำปริมาณมากเกินไปอาจทำให้คอนกรีตมีสภาพเหลว ซึ่งอาจมีความสะดวกการเทแต่ค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้จะมีค่าต่ำลง จากตารางที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าค่ากำลังรับแรงอัดเป็นสัดส่วนผกผันกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

ตารางที่ 2.5 ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่างๆ (ประณต กุลประสูตร, 2541)

อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์	ค่ากำลังรับแรงอัดคอนกรีตที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)	
	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
0.35	500	420
0.40	450	380
0.45	410	340
0.50	350	280
0.55	320	250
0.60	280	210
0.65	250	190
0.70	210	170

น้ำสำหรับการบ่มเป็นน้ำที่คอนกรีตต้องการในขณะที่แข็งตัวแล้ว ต้องเป็นน้ำสะอาด เพื่อป้องกันผลกระทบต่อกำลังของคอนกรีต สีผิวคอนกรีตที่ไม่พึงประสงค์ และรอยเปื้อนที่ผิวอันเกิดจากการใช้น้ำสกปรกบ่มคอนกรีต ส่วนน้ำสำหรับการใช้ล้างวัสดุนั้นไม่จำเป็นต้องสะอาดเหมือนกับน้ำสำหรับส่วนผสมและบ่ม แต่ก็ควรเป็นน้ำที่สะอาดพอควร ไม่มีฝุ่น เกลือ หรือสารอินทรีย์ ปนอยู่ เพราะอาจเคลือบผิววัสดุผสมและทำให้คอนกรีตที่ได้กำลังอัดลดลงหรือแข็งตัวช้า

2.4 ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น

2.4.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ทำให้เกิดการก่อตัวและแข็งตัว โดยมีสารตั้งต้นคือ แคลเซียมซิลิเกต (Calcium Silicate) ซึ่งเป็นสารประกอบในปูนซีเมนต์และน้ำ (H_2O) เมื่อทำปฏิกิริยาแล้วจะได้สารผลิตภัณฑ์ที่เรียกรวมๆ ว่า ซีเมนต์เจล (Cement Gel)

ประกอบด้วยแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (Calcium Silicate Hydrate ; C-S-H) ซึ่งมีปริมาณมากที่สุดประมาณร้อยละ 60 โดยปริมาตร และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide ; $Ca(OH)_2$) อีกประมาณร้อยละ 20 ถึงร้อยละ 25 คุณสมบัติของซีเมนต์เพสท์จะขึ้นอยู่กับแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรทเพราะมีปริมาณสูงสุด ซึ่งมีลักษณะเป็นอนุภาคเล็กๆ มีผลึกหยาบ ปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถเขียนในรูป สมการเคมี ได้ดังนี้

$$2(3CaO.SiO_2) + 6H_2O \longrightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O + 3Ca(OH)_2$$
$$2(2CaO.SiO_2) + 4H_2O \longrightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O + Ca(OH)_2$$

ปฏิกิริยานี้จะดำเนินต่อเนื่องโดยที่แคลเซียมออกไซด์ (CaO) จะแยกตัวออกจากแคลเซียมซิลิเกต ($CaO.SiO_2$) เข้าทำปฏิกิริยากับน้ำ (H_2O) ได้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ปฏิกิริยาจะสิ้นสุดเมื่อเข้าสู่สมดุล หรือสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตถูกทำปฏิกิริยาไปจนหมด

แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (C-S-H) ที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวเชื่อมประสานทำให้ ปูนซีเมนต์เกิดการก่อตัว แข็งตัวและยึดเกาะกับวัสดุผสม ส่วนแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) เป็นสารที่สามารถทำปฏิกิริยาต่อไปได้อีก หากมีสารประกอบที่เหมาะสมมาร่วมทำปฏิกิริยา

2.4.2 ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction)

เป็นปฏิกิริยาขั้นที่ 2 โดยมีสารตั้งต้นคือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน เข้าทำปฏิกิริยากับซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) จากเถ้าลอยซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลาน โดยมีปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังนี้

$$3Ca(OH)_2 + 2SiO_2 \longrightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O$$
$$3Ca(OH)_2 + 2Al_2O_3 \longrightarrow 3CaO.2Al_2O_3.3H_2O$$

แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรท (C-A-H) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์เดียวกับผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน มีผลต่อการเพิ่มกำลังให้แก่คอนกรีต แต่เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาขั้นที่ 2 และอัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้นช้า จึงทำให้คอนกรีตซึ่งใช้เถ้าลอยบางชนิด (Class F) แทนที่ซีเมนต์บางส่วนมีสารประกอบคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรทจากปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยกว่าปกติ จึงมีผลให้กำลังรับแรงอัดในช่วงแรกต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา และเมื่อปฏิกิริยาเกิดขึ้นช้ากว่าจึงทำให้เกิดการลดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันด้วย แต่ในกรณีเถ้าลอยบางชนิด (Class C) ซึ่งมีคุณสมบัติทั้งในลักษณะเชื่อมประสาน (Cementitious) และปอซโซลาน (Pozzlanic) การพัฒนากำลังในช่วงต้นอาจไม่แตกต่างมากนัก (เมธี เวชารัตนา, 2535)

2.5 คอนกรีตบล็อก

คอนกรีตบล็อก เป็นวัสดุก่อสร้างชนิดหนึ่งที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน โดยใช้ก่อเป็นผนังกั้นหรือกำแพงทั้งภายในและภายนอกของอาคาร หรือก่อเป็นพื้นทางเท้า ถนน เป็นต้น ด้วยสมบัติในการทนไฟและระบายความร้อนได้ดี น้ำหนักเบา แข็งแรงทนทาน ขนาดและคุณภาพได้ตามมาตรฐาน ทำให้คอนกรีตบล็อกเป็นวัสดุที่มีประโยชน์อย่างมากต่องานก่อสร้าง คอนกรีตบล็อกที่ดีต้องมีสมบัติได้มาตรฐานที่กำหนดโดยสมาคมทดสอบวัสดุแห่งสหรัฐอเมริกา(The American Society for Testing and Materials, ASTM) หรือตามมาตรฐาน มอก. ของประเทศไทยที่กำหนดโดยกระทรวงอุตสาหกรรม

คอนกรีตบล็อก หมายถึง แท่งคอนกรีตที่ทำจากซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ น้ำ และวัสดุผสม ที่เหมาะสมชนิดต่างๆ เช่น ทราย กรวด หินย่อย และบางครั้งอาจมีสารอื่นที่เหมาะสมปนอยู่ด้วย อัดเข้าแบบมาตรฐานเป็นบล็อกต่างๆ คอนกรีตบล็อกสามารถแบ่งออกกว้างๆ ตามประโยชน์ในการใช้สอยเป็น คอนกรีตบล็อกสำหรับก่อผนัง และคอนกรีตบล็อกสำหรับปูพื้น

2.5.1 คอนกรีตบล็อกสำหรับก่อผนัง

คอนกรีตบล็อกก่อผนังสามารถจำแนกออกเป็น 2 แบบ ได้แก่

1. **คอนกรีตบล็อกก่อผนังแบบกลวง** (Hollow concrete block) ซึ่งเป็นคอนกรีตบล็อกที่มีลักษณะกลวง แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ ชนิดที่สามารถรับน้ำหนักได้ (Load bearing block) ใช้สำหรับผนังที่ออกแบบให้รับน้ำหนักบรรทุก และน้ำหนักของคอนกรีตบล็อกเอง และชนิดที่ไม่สามารถรับน้ำหนักได้ (Non-load bearing block) โดยไม่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกใดๆ ได้นอกจากน้ำหนักของคอนกรีตบล็อกเอง

2. **คอนกรีตบล็อกก่อผนังแบบตัน** (Solid concrete block) เป็นคอนกรีตบล็อกที่ผลิตเฉพาะชนิดสามารถรับน้ำหนักได้เท่านั้น

2.5.2 คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น (Interlocking concrete paving block)

คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นมีลักษณะเป็นก้อนคอนกรีตตัน ที่สามารถนำมาวางเรียงประสานกันได้อย่างต่อเนื่อง มีสีตามธรรมชาติหรืออาจมีผงสีเจือปนอยู่ทั้งบล็อกหรือเฉพาะที่ชั้นผิวหน้าและมีรูปร่างแบบใดก็ได้ เหมาะสำหรับใช้ปูพื้นเช่น ถนน ทางเท้า ลานจอดรถ และลานกองเก็บวัสดุ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการออกแบบโครงสร้างชั้นพื้นและชั้นรองพื้นให้สอดคล้องกับสภาพการใช้งาน

ชนิดและขนาดคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นใช้เป็นเกณฑ์ในการแบ่งประเภท โดยพิจารณาถึงลักษณะ รูปร่างของคอนกรีตบล็อกซึ่งขึ้นอยู่กับผู้ผลิต ดังนี้

ก. คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นซีแพค 6 เซนติเมตร สำหรับปูทางเท้าและจอดรถถนนภายในอาคาร

ข. คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นซีแพค 10 เซนติเมตร สำหรับใช้งานที่ต้องรับน้ำหนักสูง อาทิ ลานจอดรถในโรงงาน พื้นโกดังสินค้า ถนนสาธารณะ

ค. ขอบคันหินซีแพค สำหรับก่อทำขอบคันทางเดินหรือขอบของถนนที่ปูด้วยบล็อกชนิดนี้ให้มีความเรียบร้อยสวยงาม

ง. คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นรูปตัว "ไอ" เพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการปูซ้อนเพื่อทำพื้นถนน

รายละเอียดของบล็อกแต่ละชนิดให้ดูจากรูปที่ 2.2 ประกอบ

ข้อพิจารณาในการเลือกใช้

ก. ปูง่ายสะดวกรวดเร็ว เสร็จแล้วใช้งานได้ทันที คอนกรีตบล็อกปูถนน ออกแบบมาให้สามารถล็อกกันได้ในตัว

ข. สะดวกและง่ายในการซ่อมบำรุง และด้วยเหตุที่มีรูปลักษณะเป็นก้อนที่ต่อเนื่องกัน คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นจึงไม่มีการแตกหักเป็นรอยร้าวเหมือนพื้นคอนกรีตทั่วไป แต่ในกรณีที่จำเป็นต้องเปลี่ยนหรือซ่อมก็สามารถถอดเปลี่ยนได้เฉพาะก้อน

2.5.3 เกณฑ์มาตรฐานคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น

ก. มิติและเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน ตามมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรมให้เป็นไปตามตารางที่ 2.6 แต่มาตรฐาน ASTM C936-82 ได้กำหนดมิติอย่างกว้างๆ โดยคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นแต่ละก้อนต้องมีความกว้าง และความยาวไม่เกิน 140 และ 240 มิลลิเมตร ตามลำดับ ความหนาต้องไม่มากกว่า 140 มิลลิเมตร เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความกว้างและความยาวกำหนดโดย ASTM C936-82 มีค่า $\pm$ 1.6 มิลลิเมตร ขณะที่ความคลาดเคลื่อนของความหนามีค่าเท่ากัน คือ $\pm$ 3.2 มิลลิเมตร โดยใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C140-96

ตารางที่ 2.6 มิติและเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2531)

มิติ	เกณฑ์ที่กำหนด (มิลลิเมตร)	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อน (มิลลิเมตร)
ความกว้างและความยาว	ไม่เกิน 295	$\pm$ 2
ความหนา	60	$\pm$ 2
	80	$\pm$ 2
	100	$\pm$ 3
	120	$\pm$ 3
ความหนาของชั้นผิวหน้า (เฉพาะชั้นผิวหน้าที่ทำเป็นสี)	ต่ำสุด 3	

ข. คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นต้องมีเนื้อแน่น ไม่ร้าวและสีของชั้นผิวหน้าต้องสม่ำเสมอ การทดสอบทำโดยการตรวจพินิจ

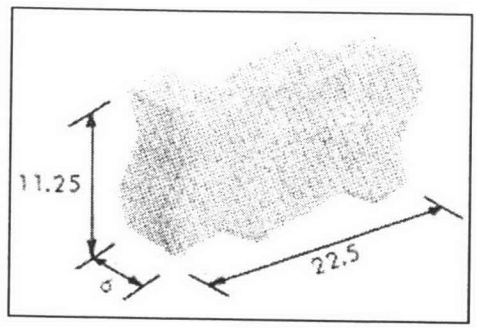
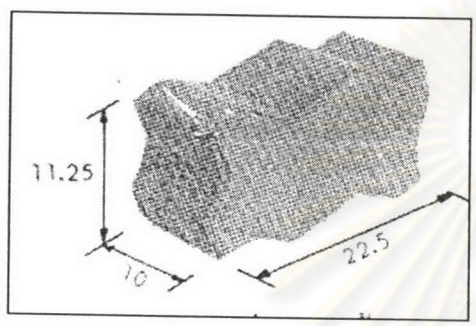
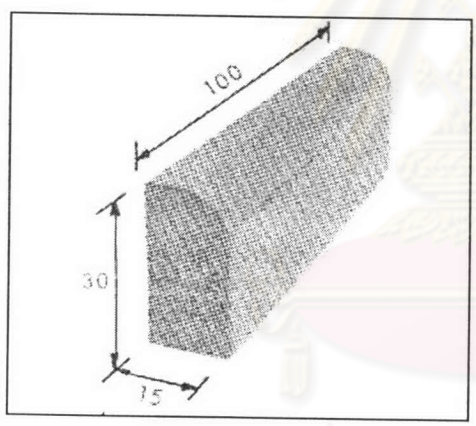
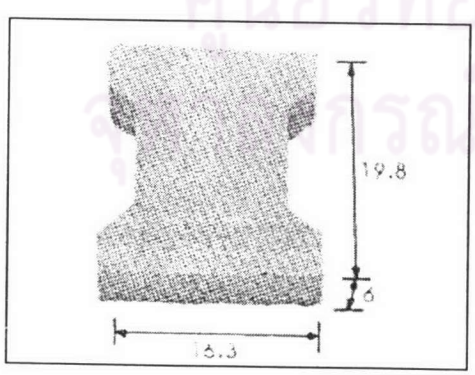
ค. ความได้ฉาก

- คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นที่มีเกณฑ์กำหนดของความหนาไม่เกิน 80 มิลลิเมตร จะมีค่าความเบี่ยงเบนของความได้ฉากได้ไม่เกิน 2 มิลลิเมตร

- คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นที่มีเกณฑ์กำหนดของความหนาเกิน 80 มิลลิเมตร จะมีค่าความเบี่ยงเบนของความได้ฉากได้ไม่เกิน 3 มิลลิเมตร

ง. ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นแต่ละก้อน ต้องไม่น้อยกว่า 35 เมกะปาสคาล และค่าเฉลี่ยต้องไม่น้อยกว่า40 เมกะปาสคาล ขณะที่ ASTM C936-82 กำหนดให้แต่ละก้อนของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นต้องมีค่ากำลังรับแรงอัดไม่น้อยกว่า 50 เมกะปาสคาล โดยให้ค่าเฉลี่ยมากกว่า 55 เมกะปาสคาล ทดสอบตามวิธีมาตรฐาน ASTM C140-96

จ. ASTM C936 กำหนดให้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และวัสดุปอซโซลานที่ใช้ ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐาน ASTM C150-95a และ C618-96 ตามลำดับ วัสดุผสมต้องได้มาตรฐานตามข้อกำหนด ASTM C33-93 ยกเว้นสัดส่วนคละที่ไม่จำเป็นต้องเป็นไปตามมาตรฐานกำหนด โดยสามารถใช้ได้ทั้งวัสดุผสมธรรมดา หรือวัสดุผสมน้ำหนักเบา (Light weight aggregate) การดูดซึมน้ำเฉลี่ยของคอนกรีตบล็อกต้องไม่มากกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ โดยในแต่ละก้อนต้องมีค่าไม่มากกว่า 7 เปอร์เซ็นต์ ทดสอบตามวิธีในมาตรฐาน ASTM C140-96

	**บล็อกปูถนนซีแพค 6 ซม.** สำหรับงานปูทางเท้า จอดรถถนนภายใน บ้าน 1 ตารางเมตรใช้ 40 ก้อน ความยาว 22.5 ซม. ความกว้าง 11.25 ซม. หนา 6 ซม.
	**บล็อกปูถนนซีแพค 10 ซม.** สำหรับใช้งานที่ต้องรับน้ำหนักสูง เช่น ลานจอดรถในโรงงาน โกดังสินค้า ถนนสาธารณะ 1 ตารางเมตรใช้ 40 ก้อน ความยาว 22.5 ซม. ความกว้าง 11.25 ซม. หนา 10 ซม.
	**ขอบคันหินซีแพค** เพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการสร้างถนน ซีแพคได้ผลิตขอบคันหินสำเร็จรูป ขนาดกว้าง 15 ซม. สูง 30 ซม. ยาว 1 เมตร เพื่อใช้ทำขอบถนนทั่วๆไป เหมาะสมมากสำหรับใช้ควบคู่ไปกับบล็อกปูถนนซีแพค สามารถทำการติดตั้งได้ง่ายเพียงแต่วางเรียงต่อกันเท่านั้น
	**บล็อกปูถนนรูปตัว "ไอ"** เป็นบล็อกปูถนนซีแพคแบบใหม่ มีลักษณะรูปตัวไอ 1 ตารางเมตรใช้ 35 ก้อน ความกว้าง 16.3 ซม. ความยาว 19.8 ซม. หนา 6 ซม. น้ำหนัก 3.8 กิโลกรัม

รูปที่ 2.2 ลักษณะและขนาดของบล็อกประสานปูพื้นแต่ละชนิด (พิภพ สุนทรสมัย, 2530)

มาตรฐานของกระทรวงอุตสาหกรรมกำหนดให้ คอนกรีตบล็อกที่นำมาทดสอบ ต้องมีอายุไม่น้อยกว่า 7 วัน

ชวลิต นิตยะ (2524) กล่าวว่า วิธีการในการสร้างคอนกรีตบล็อกที่ดี หลักใหญ่คือ ทำให้รับกำลังได้ดีที่สุดในขณะที่มีความหนาแน่นน้อยที่สุด และให้ใช้ซีเมนต์น้อยที่สุดเท่าที่จำเป็นเพื่อเป็นการลดค่าวัสดุ และการหดตัวจะได้ลดน้อยลงด้วย

2.6 การวิเคราะห์การถดถอยและสหสัมพันธ์ (Regression and Correlation Analysis)

เป็นเทคนิคทางสถิติ ที่ใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ ระหว่างตัวแปร โดยข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา มีระดับการวัดแบบ อันตรภาคสเกล(interval scale) และ อัตราส่วนสเกล(ratio scale)

ข้อมูลที่ใช้ศึกษา ประกอบด้วยตัวแปรสองประเภท

- **ตัวแปรอิสระ** (Independent variable(s)) เป็นตัวแปรที่กำหนดค่าได้แน่นอน หรือสามารถวัดค่าได้โดยไม่มีความคลาดเคลื่อน
- **ตัวแปรตาม** (Dependent variable) เป็นตัวแปรที่เกิดขึ้นโดยสุ่ม

การวิเคราะห์สมการถดถอยสามารถแบ่งออกตามตัวแปรได้เป็น

การวิเคราะห์การถดถอยอย่างง่าย (Simple regression analysis) เป็นการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรอิสระเพียงตัวเดียวที่มีต่อตัวแปรตาม

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงซ้อน (Multiple regression analysis) เป็นการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรอิสระตั้งแต่สองตัวขึ้นไปที่มีต่อตัวแปรตาม

การวิเคราะห์สมการถดถอยสามารถแบ่งออกตามลักษณะข้อมูลได้เป็น

การถดถอยเชิงเส้นตรง(Linear regression) ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรตามมีลักษณะเชิงเส้นตรง

การถดถอยเชิงเส้นโค้ง(Nonlinear regression) ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรตามมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นตรง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.6.1 **สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ** (Coefficient of Determination : r^2)

สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ หมายถึงสัดส่วนที่ตัวแปร X สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร Y ได้ ดังนั้นถ้า r^2 มีค่ามากแสดงว่า Y และ X มีความสัมพันธ์กันมาก หรือ X สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปล Y ได้มาก โดยที่

$$R^2 = r^2 = \frac{\text{ความแปรปรวนของ Y ที่เกิดจาก X}}{\text{ความแปรปรวนของ Y ทั้งหมด}}$$

$$R^2 = r^2 = \frac{SSR}{SST} = \frac{bSS_{XY}}{SS_{YY}}$$

แต่เนื่องจาก $SST = SSR + SSE$

$$R^2 = r^2 = 1 - \frac{SSE}{SST}$$

ดังนั้น $0 \leq r^2 \leq 1$ เนื่องจาก $SST > SSR$

2.7 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย

กฤษณ์ จารุทะวัย (2545) ได้การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเถ้าลอยเส้นใยปาล์มจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อยจากโรงงานน้ำตาล มาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในการผสมมอร์ตา สรุปได้ว่า เถ้าลอยทั้งสองชนิดนี้ไม่สามารถจัดเป็นวัสดุปอซโซลานตามข้อกำหนดใน ASTM C618 และเมื่อนำมาใช้ แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ พบว่า กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาลดลง ส่วนความต้องการน้ำและระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาธรรมดา ซึ่งในงานวิจัยนี้ เถ้าลอยเส้นใยปาล์มสามารถนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการผสมมอร์ตาได้ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยใช้สัดส่วนระหว่างวัสดุประสานต่อทรายเท่ากับ 1 ต่อ 2.75 และปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.485 ต่อ 1 ซึ่งให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน ประมาณร้อยละ 85 เมื่อเทียบกับมอร์ตาธรรมดา ส่วนมอร์ตาผสมเถ้าลอยชานอ้อยให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน ประมาณร้อยละ 50 เมื่อเทียบกับมอร์ตาธรรมดา ส่วนผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในน้ำชะของเถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อย พบว่ามีค่าต่ำกว่าเกณฑ์กำหนดในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)

ภาณุพงษ์ สถิตวัฒนาพร (2546) ได้การศึกษาถึงความสามารถและประสิทธิภาพเถ้าลอยชานอ้อยจากโรงงานน้ำตาล กำจัดตะกั่วแล้วนำเถ้าลอยชานอ้อยที่ใช้กำจัดตะกั่วแล้วมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในการผสมมอร์ตา โดยในส่วนของการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียทำการทดลองแบบแบตช์ ซึ่งการทดลองได้ศึกษาถึงผลของคุณสมบัติน้ำเสียเริ่มต้น ความเข้มข้น

ตะกั่วและพีเอชของน้ำเสียที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว ผลการทดลองพบว่า เมื่อพีเอชของน้ำเสียเพิ่มสูงขึ้น ก็จะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงขึ้นด้วย โดยเถ้าลอยชานอ้อยสามารถกำจัดตะกั่วได้ประสิทธิภาพสูงในช่วงพีเอช 4 ถึง 6 โดยประสิทธิภาพสูงสุดคิดเป็น 259 มิลลิกรัมต่อกรัมเถ้าลอยชานอ้อยที่ความเข้มข้นตะกั่วในน้ำเสียเริ่มต้นเป็น 80 มิลลิกรัมต่อลิตรและพีเอชเริ่มต้นเป็น 5 ส่วนผลการศึกษาไอโซเทอมโดยใช้เถ้าลอยชานอ้อยพบว่าความสามารถในการกำจัดตะกั่วมีความสัมพันธ์กับไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช โดยกลไกการกำจัดตะกั่วเกิดจากการเกิดพันธะทางเคมีระหว่างไอออนของตะกั่วกับซิลิก้าที่มีอยู่ในเถ้าลอยชานอ้อย จึงสรุปได้ว่าการดูดติดผิวของตะกั่วจะมีแบบเกิดพันธะกับตัวดูดซับหรือการดูดติดผิวทางเคมี

จากนั้นศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเถ้าลอยชานอ้อยที่ใช้กำจัดตะกั่วแล้ว มาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในการผสมมอร์ตา ซึ่งได้ทำการศึกษาถึงสมบัติทางกายภาพและส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยชานอ้อย นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบลักษณะของน้ำชะจากเถ้าลอยทั้งสองชนิด ตามข้อกำหนดในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) เพื่อยืนยันความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม ในการนำเถ้าลอยชานอ้อยมาใช้ประโยชน์ผลการทดสอบสมบัติของเถ้าลอยชานอ้อย สรุปได้ว่า เถ้าลอยชนิดนี้ไม่สามารถจัดเป็นวัสดุปอซโซลานตามข้อกำหนดใน ASTM C618 และเมื่อนำมาใช้ แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ พบว่า กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาลดลง ซึ่งในงานวิจัยนี้ เถ้าลอยชานอ้อยสามารถนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการผสมมอร์ตาได้ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยใช้สัดส่วนระหว่างวัสดุประสานต่อทราย เท่ากับ 1 ต่อ 2.75 และปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.5 ต่อ 1 ซึ่งให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน ประมาณร้อยละ 67.10 เมื่อเทียบกับมอร์ตาธรรมดา ส่วนผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในน้ำชะของเถ้าลอยชานอ้อย พบว่า มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์กำหนดในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)

พชรพงศ์ ชื่นศิริ และ แสวงสิน เกตุโตประการ (2540) ศึกษาการนำกากตะกอนของสีน้ำทาบ้านมาเป็นส่วนผสมการทำคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น ผลการทดลองพบว่า สามารถผสมเศษสีแห้งเร็วและกากตะกอนจากระบบบำบัดสีแห้งเร็วในคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น2ได้เปอร์เซ็นต์ โดยสามารถรับแรงกดได้สูงสุด 131.7 กก./ซม.^{2} อัตราการชะละลายออกมาของโลหะหนักในน้ำไม่เกินค่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนด (ยกเว้นเหล็กที่มีอัตราการละลายสูงสุด 0.9-1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ให้ไม่เกิน 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร) น้ำหนักของคอนกรีตบล็อกที่ผลิตได้เบากว่าผลิตภัณฑ์ตามท้องตลาด 1.136 เท่า ส่วนราคาของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้นั้นมีราคาถูกกว่าผลิตภัณฑ์ทั่วไปตามท้องตลาดประมาณร้อยละ50 แต่ราคา

ยังไม่ได้รวมราคาต้นทุน จากการทำเศษสีแห้งเร็วและกากตะกอนจากระบบบำบัดสีแห้งเร็วแบบเปียกให้แห้ง และบดให้ละเอียด

ไลทิพย์ อภิธรรมวิริยะ (2542) ศึกษาอัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสม และระยะเวลาบ่มในการทำวัสดุปูพื้นประเภทคอนกรีตบล็อก พบว่าค่าที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดคือ ใช้อัตราส่วนซิลิกา-อลูมินาที่ใช้แล้วต่อปูนซีเมนต์ที่ 0.25 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.5 และระยะเวลาบ่มที่ 28 วันจะทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่อพิจารณาตามเกณฑ์มาตรฐาน

ธีระชัย วัฒนสกุลเอก (2546)การศึกษาถึงความสามารถและประสิทธิภาพของเถ้าลอยชานอ้อยจากโรงงานน้ำตาล เพื่อใช้กำจัดโครเมียมจากนั้นนำเถ้าลอยชานอ้อยที่ดูดซับโครเมียมแล้วมาทำเป็นก้อนแข็งโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในการผสมมอร์ตา โดยในส่วนของการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เป็นการทดลองแบบแบตช์ โดยหาสภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดโครเมียมที่ความเข้มข้นและพีเอชต่างๆ แต่ละความเข้มข้นจะทำการปรับค่าพีเอชให้เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 1 ถึง 6

ผลการทดลองพบว่า เมื่อพีเอชของน้ำเสียโครเมียมสังเคราะห์ลดลงความสามารถและประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียมจะเพิ่มขึ้น และที่พีเอช 1 เป็นพีเอชที่กำจัดโครเมียมได้ดีที่สุด สภาวะที่เหมาะสมต่อการกำจัดโครเมียมคือที่ความเข้มข้นโครเมียมสูงกว่า 20 มิลลิกรัมต่อลิตรขึ้นไป ที่พีเอชเท่ากับ 1 ใช้เวลาสัมผัสเท่ากับ 30 นาที ซึ่งความสามารถในการดูดซับโครเมียมจะมีค่าใกล้เคียงกันทุกความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียมที่มากกว่า 20 มิลลิกรัมต่อลิตรขึ้นไป จะได้ความสามารถในการดูดซับโครเมียมประมาณ 0.60 มิลลิกรัมโครเมียมต่อกรัมเถ้าลอยชานอ้อย แต่ในด้านประสิทธิภาพการกำจัดจะลดลงเมื่อใช้ความเข้มข้นโครเมียม ส่วนผลการศึกษาไอโซเทอมโดยใช้เถ้าลอยชานอ้อยพบว่าความสามารถในการกำจัดโครเมียมมีความสัมพันธ์กับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์

สำหรับการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเถ้าลอยชานอ้อยที่ใช้กำจัดโครเมียมแล้วมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในการผสมมอร์ตา ซึ่งสรุปผลการศึกษาถึงสมบัติทางกายภาพและส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยชานอ้อยได้ว่า เถ้าลอยชานอ้อยไม่สามารถจัดเป็นวัสดุปอซโซลานตามข้อกำหนดใน ASTM C618 และเมื่อนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์พบว่า กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาลดลง ซึ่งในงานวิจัยนี้ เถ้าลอยชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับโครเมียมสามารถนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการผสมมอร์ตาได้ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยใช้สัดส่วนระหว่างวัสดุประสานต่อทราย เท่ากับ 1 ต่อ 2.75 และอัตราส่วนน้ำต่อ

ซีเมนต์ เท่ากับ 0.5 ซึ่งให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดที่อายุการบ่ม 28 วัน คิดเป็นร้อยละ 79.67 เมื่อเทียบกับมอร์ตาธรรมดา

Frias และ Sanchez (1997) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง (Microstructure) ของมอร์ตาผสมเถ้าลอย และปรากฏการณ์ที่ส่งผลต่ออนุภาคและขนาดช่องว่างในโครงสร้าง จากการศึกษาพบว่า ความละเอียดของเถ้าลอยเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการกระทบกันของอนุภาคนานขึ้นเถ้าลอยบางอนุภาคอาจเกิดการแตกหักระหว่างกระบวนการกระทบ ทำให้อนุภาคหลังกระทบเสียลักษณะทรงกลม และยังพบว่า ความพรุนทั้งหมดจะเพิ่มขึ้นหลังจากอายุประมาณ 28 วัน และเพิ่มขึ้นตามอายุ กำลังของมอร์ตาลดลงแบบเส้นตรงเมื่อความพรุนรวมมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อส่วนผสมของเถ้าลอยเพิ่มขึ้นกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาจะลดลงในระยะต้น

Maltais และ Marchand (1997) ศึกษาอุณหภูมิของการบ่มต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันและการพัฒนากำลังของมอร์ตาผสมเถ้าลอย ClassF ที่มีขนาดเล็กกว่าและใหญ่กว่า 45 μm ใช้ปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก บ่มที่อุณหภูมิ 20^{o}C และ40^{o}C ผลการศึกษาพบว่า ขนาดเถ้าลอยจะมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่อายุช่วงแรกเพิ่มขึ้น สำหรับการเพิ่มอุณหภูมิการบ่มมีผลต่อการลดกำลังอัดในระยะยาวของมอร์ตาควบคุม แต่ไม่มีผลเชิงลบต่อกำลังอัดของมอร์ตาที่ผสมเถ้าลอยในระยะยาวในช่วงต้นโครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (C-S-H) ของทั้งมอร์ตาที่ผสมเถ้าลอยและมอร์ตาธรรมดาไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งตัวอย่างที่อายุน้อยกว่า 28 วัน อิทธิพลของเถ้าลอยต่อปฏิกิริยาไฮเดรชัน ไม่ปรากฏชัดทุกอุณหภูมิการบ่มของเถ้าลอยทั้งสองชนิด แต่จะปรากฏชัดเจนขึ้นหลังจากอายุ 28 วันไปแล้ว นอกจากนั้นแล้วเถ้าลอยที่ขนาดละเอียดกว่ามีผลต่อการเพิ่มความแน่นของโครงสร้างภายใน เนื่องจากปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (C-S-H) และ เอททริงไกต์ (Ettringite; $3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.31H_2O$) ที่เพิ่มขึ้น

Nontananandh (1990) ได้สรุปว่า ปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอยสามารถสังเกตได้จากการลดลงของ $Ca(OH)_2$ โดยใช้ X-Ray Diffraction เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดจาก $Ca(OH)_2$ และเป็นปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดสารประกอบคือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (C-S-H), เอททริงไกต์ (Ettringite; $3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.31H_2O$), แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรท (C-A-H) และแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้เป็นสาเหตุของการพัฒนากำลังในคอนกรีต

Rusch (1960) กล่าวว่า ปริมาณน้ำที่ต้องการเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นขึ้นอย่างสมบูรณ์นั้นมีค่าประมาณร้อยละ 25 ของซีเมนต์ แต่ในทางปฏิบัติจำเป็นต้องเติมน้ำมากขึ้นกว่าสัดส่วนดังกล่าว เพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำในซีเมนต์เพสต์ระหว่างการ

เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น และจะช่วยเพิ่มความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตสด ดังนั้นโดยทั่วไปแล้วอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ใช้สำหรับการผสมคอนกรีตจะอยู่มีค่าในช่วง 0.4 ถึง 0.6

Weiping และ Brown (1997) ได้ศึกษาความร้อนจากปฏิกิริยาของเถ้าลอยกับ $Ca(OH)_2$ และ $CaSO_4.2H_2O$ โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะแปรตามปริมาณการเติม $Ca(OH)_2$ หรือ $CaSO_4.2H_2O$ สารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรท, ไตรแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรท และเอททริงไกต์ ซึ่งเป็นสารผลิตภัณฑ์หลักเช่นเดียวกันกับที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ และเมื่อใช้เถ้าลอยที่มีปริมาณปูนขาวต่ำ (low-lime ash) ปฏิกิริยาปอซโซลานจะยังไม่เกิดในช่วงแรก แต่หากใช้เถ้าลอยที่มีปริมาณปูนขาวสูง (high-lime ash) จะเกิดปฏิกิริยาเร็วกว่าปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นมีผลในการเพิ่มสารเชื่อมประสานโดยตรง จากการศึกษาพบว่าระดับอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญในการเกิดปฏิกิริยา โดยที่ระดับอุณหภูมิปกติ (25°C) ปฏิกิริยาจะเกิดอย่างช้าๆ แต่เมื่อระดับอุณหภูมิสูงขึ้นปฏิกิริยาจะเกิดได้เร็วและเกิดขึ้นมากที่สุดในช่วง 24 ชั่วโมงแรก โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 60°C

สรุปข้อมูลจากเอกสารที่นำมาใช้ในงานวิจัย

จากการศึกษาเอกสารที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยพบว่า ถ้าเราต้องการนำเถ้าลอยชานอ้อยมาดูดซับตะกั่วและโครเมียมได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ต้องใช้ควบคุมให้อยู่ในสภาวะ ดังตารางที่ 2.7 ซึ่งผลการทดลองนี้มาจากภาณุพงษ์ สถิตวัฒนาพร (2546) และ ธีระชัย วัฒนสกุลเอก (2545) และเมื่อนำเถ้าลอยชานอ้อยมาทำการแทนที่ซีเมนต์บางส่วน โดยทำการหล่อเป็นคอนกรีต เราจะใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ใช้สำหรับการผสมคอนกรีต ในช่วง 0.4 ถึง 0.6 (Rusch, 1960) ใช้อัตราทรายต่อหินให้มีค่าอยู่ในช่วง 0.55 - 0.7 (ประณต กุลประสูตร, 2541) จึงจะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้ออกมาอยู่ในช่วงค่าที่สูงสำหรับตัวเลือกนั้นๆ

ตารางที่ 2.7 แสดงสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการนำเถ้าลอยชานอ้อยดูดซับตะกั่วและโครเมียม

โลหะหนัก	ปริมาณเถ้าลอย (กรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	pH	เวลา (นาที)
ตะกั่ว	10	20	6	30
โครเมียม	20	25	1	30