

บทที่ 2

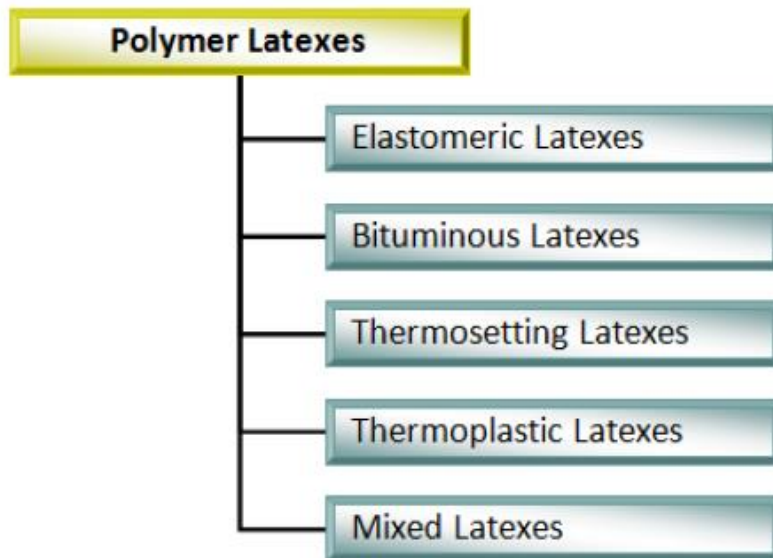
การตรวจเอกสาร (Literature Review)

2.1 การใช้น้ำยางผสมในงานคอนกรีตและมอร์ต้า

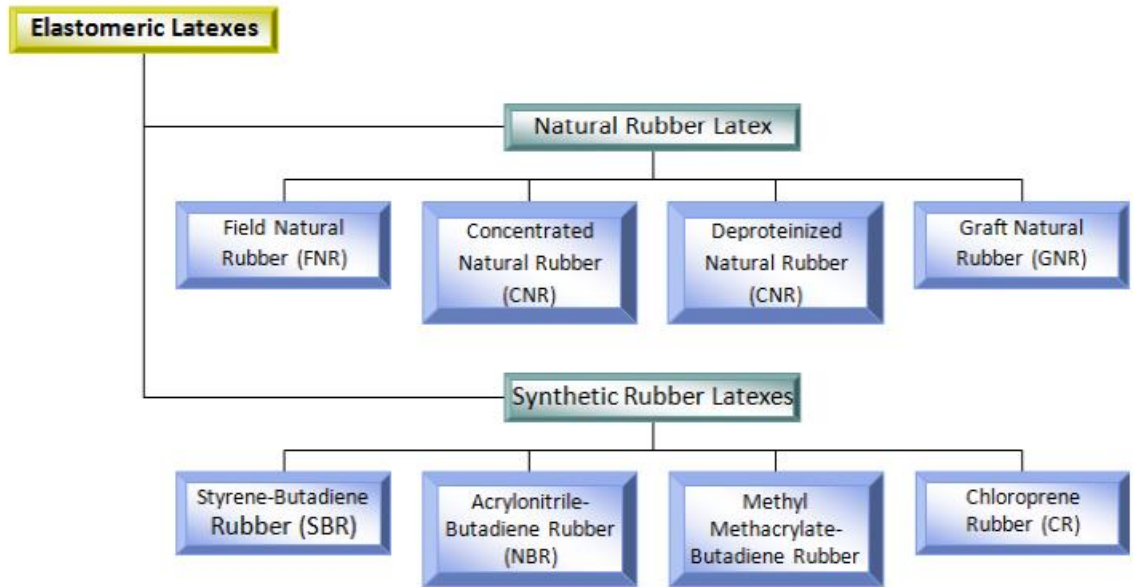
Polymer latex มีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการก่อสร้างมากขึ้นในปัจจุบันปัจจุบันได้มีประยุกต์ใช้น้ำยางผสมคอนกรีตกันมากขึ้น น้ำยางที่ใช้อยู่ในรูปการสังเคราะห์ (Synthetic Rubber Latex, SRL) น้ำยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่มีการเปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนกรีตธรรมดา กับคอนกรีตผสมน้ำยาง ซึ่งมีข้อดีกว่าคอนกรีตธรรมดาหลายประเด็น (Neville, A.M.; Brooks, J.J.-1990)

- ความสามารถในการรับแรงดึงและแรงอัดสูงขึ้น
- น้ำซึมผ่านได้ยากขึ้น
- มีความทนทานต่อการกัดกร่อน โดยสารเคมีได้ดี
- สามารถยึดเกาะกับคอนกรีตเดิมที่แข็งตัวแล้วได้ดี จึงเหมาะกับงานซ่อมแซม
- น้ำยางที่ใช้ผสมจะไม่เป็นพิษต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม
- น้ำยางอยู่ในสภาพ Emulsion จึงง่ายต่อการเติมสารผสมเพิ่มอื่นๆ เพื่อปรับปรุงคุณภาพ

น้ำยางที่สามารถนำมาใช้ในการผสมคอนกรีต แบ่งได้เป็น 5 ประเภทดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูป 2.1 น้ำยางที่นำมาประยุกต์ใช้ในงานคอนกรีตและมอร์ต้า (Walters, D. Gerry-1987) จากน้ำยางทั้ง 5 ประเภท ดังแสดงในรูปที่ 2.1 มีเพียงประเภทเดียวที่ผลิตขึ้นเพื่อการค้า สำหรับผสมคอนกรีตและมอร์ต้า คือ Elastomeric Latex ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูป 2.2 Elastomeric latexes สำหรับผสมในคอนกรีตและมอร์ต้า(Ohama Y-1995)

2.2 นํ้ายางพรีวัลคาไนซ์

นํ้ายางพรีวัลคาไนซ์ (Prevulcanized latex) คือ นํ้ายางที่วัลคาไนซ์ในสภาวะของเหลวและขึ้นรูปเป็นยางวัลคาไนซ์ได้โดยไม่ต้องให้ความร้อนอีก นํ้ายางพรีวัลคาไนซ์ยังคงสถานะเป็นของไหลและมีลักษณะทั่วไปเหมือนเดิม การวัลคาไนซ์จะเกิดขึ้นภายในอนุภาค การพรีวัลคาไนซ์จะให้ความร้อนแก่นํ้ายางคอมพาวด์ที่เหนือจุดเดือดของนํ้า ในตู้ความดันแต่ต่อมาเนื่องจากการใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไวสูงเป็นพิเศษ จึงทำให้การทำนํ้ายางพรีวัลคาไนซ์สามารถทำได้ภายใต้ความดันบรรยากาศที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส ซึ่งวิธีนี้ได้รับการพัฒนาต่อมาและสามารถจะทำพรีวัลคาไนซ์ได้โดยใช้อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ใช้เวลาเพียง 1 ชั่วโมง

ตารางที่ 2.1 สูตรผสมเคมีของน้ำยางชั้นพรีวัลคาไนซ์ในระบบกำมะถัน

สูตรผสมเคมี	ปริมาณ (phr)*
น้ำยางชั้นชนิดแอมโมเนียสูง (HA)	167
สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (ความเข้มข้นร้อยละ 10)	2.5
สารละลายโพแทสเซียมลอเรต (ความเข้มข้นร้อยละ 20)	1.3
ดิสเพนชันของกำมะถัน (ความเข้มข้นร้อยละ 50)	2.0
ดิสเพนชันของซิงก์ไดเอทิลไดไทโอคาร์บามेट (ความเข้มข้นร้อยละ 10)	0.8
ดิสเพนชันของซิงก์ออกไซด์ (ความเข้มข้นร้อยละ 50)	0.4

*parts per hundred of rubber

ขั้นตอนในการผลิตน้ำยางพรีวัลคาไนซ์

1. เดิมสารรักษาสภาพน้ำยางลงในน้ำยางชั้นและถ่ายน้ำยางไปยังถังเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีการกวนตลอดเวลา
2. ให้ความร้อนกับน้ำยางในถังที่อุณหภูมิ 32-38 องศาเซลเซียสแล้วเติมดิสเพนชันของซิงก์ออกไซด์ กำมะถัน และสารตัวเร่งปฏิกิริยาลงในน้ำยาง
3. ให้ความร้อนกับน้ำยางคอมพาวด์ที่อุณหภูมิ 70 – 80 องศาเซลเซียสกวนน้ำยางคอมพาวด์ตลอดเวลา และรักษาอุณหภูมิของน้ำยางคอมพาวด์ให้อยู่ในช่วง 70 – 80 องศาเซลเซียส (เวลาและอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับระบบการวัลคาไนซ์ที่ใช้และระดับการเชื่อมโยงของพันธะที่ต้องการ)
4. ลดอุณหภูมิของน้ำยางคอมพาวด์ลงมาที่ 30 องศาเซลเซียส โดยการหล่อเย็นและนำน้ำยางคอมพาวด์ ออกจากถัง เก็บไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
5. นำน้ำยางไปปั่นหมุนเหวี่ยงเพื่อแยกเอาส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ออก เดิมสารด้านออกซิเดชั่นลงไปนำน้ำยางที่ได้ไปทดสอบและบรรจุต่อไป สูตรผสมน้ำยางชั้นพรีวัลคาไนซ์ในระบบกำมะถันเป็นไปตามตารางที่ 2.1 ปัจจุบันสูตรเคมีตามตารางที่ 2.1 เป็นที่นิยมใช้ในการผลิตน้ำยางพรีวัลคาไนซ์มากที่สุด

น้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสี (Radiation-vulcanized;RVNRL)

ในการวัลคาไนซ์ด้วยรังสีขั้นแรกผสมน้ำยางเข้ากับสารเซนซิไทเซอร์(sensitizer)เช่น n-butylacrylate(n-BA)และรักษาสภาพน้ำยางไว้ก่อนที่จะมีการฉายรังสี(รังสีที่นิยมใช้ได้แก่รังสีแกมมา)ข้อดีของน้ำยางRVNRLเมื่อเทียบกับน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ในระบบก้ำมะถันคือ

1. เกิดการแพ้โปรตีนลดลง
2. ไม่มีสารไนโตรซามีน(N-nitrosamines)
3. สามารถย่อยสลายได้ดีในสภาวะแวดล้อม
4. มีความเป็นพิษต่อเซลล์ต่ำ(cytotoxicity)
5. ไม่มีการปนเปื้อนของซิงก์ออกไซด์
6. ลดปริมาณการปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศและลดปริมาณการเกิดเถ้าจากการเผาไหม้ลง
7. โปร่งแสงและมีความนิ่ม
8. ประหยัดพื้นที่และลดพลังงานในการผลิตของโรงงานผู้ผลิตผลิตภัณฑ์จากน้ำยางจากข้อได้เปรียบเหล่านี้ทำให้น้ำยางRVNRLสามารถใช้ในการผลิตถุงมือยางที่ใช้งานพิเศษ(special-purposegloves)ในภาคอุตสาหกรรมนิวเคลียร์และสุขภาพเช่นจุกนมยางของเด็กทารกและจุกนมยางดูดเล่นที่ต้องระวังเป็นพิเศษในเรื่องของปริมาณสารไนโตรซามีน

น้ำยางขั้นพรีวัลคาไนซ์เป็นน้ำยางธรรมชาติที่ผลิตมาเพื่อตอบสนองต่อความต้องการ(tailor-cutform)ของผู้ผลิตสินค้าจากน้ำยางธรรมชาติโดยเฉพาะในกรณีที่ใช้ในปริมาณน้อยการใช้งานทำได้อย่างสะดวกเพียงแค่นำน้ำยางคอมพาวด์ไปขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มและทำให้แห้ง

การวัลคาไนซ์ผลิตภัณฑ์จากน้ำยาง

ผลิตภัณฑ์จากน้ำยางจะไม่สามารถนำมาใช้งานได้จนกว่าจะผ่านการวัลคาไนซ์เสียก่อน ทั้งนี้เพื่อกำจัดความเหนียวติด (tackiness)ของยางและปรับปรุงสมบัติต่างๆ เช่น ความแข็งแรง ความต้านทานต่อการสึกกร่อน ความยืดหยุ่นของผลิตภัณฑ์ เป็นต้นการวัลคาไนซ์เป็นกระบวนการเชื่อมโมเลกุลยางแต่ละโมเลกุลผ่านพันธะโควาเลนต์ให้เกิดเป็นโครงสร้างตาข่ายความเร็วในการเชื่อมโยงพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างการวัลคาไนซ์เรียกว่าอัตราการวัลคาไนซ์(cure rate)และแผ่นฟิล์มน้ำยางที่ได้คือแผ่นฟิล์มน้ำยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์แล้วในการวัลคาไนซ์ยางจะทำปฏิกิริยากับก้ำมะถันทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความยืดหยุ่นทนทานและไม่เหนียวติดการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิห้องจะดำเนินไปอย่างช้าๆซึ่งอาจต้องใช้เวลาหลายวันในการทำให้การวัลคาไนซ์เกิดได้อย่างสมบูรณ์

ดังนั้นเพื่อลดเวลาในการวัลคาไนซ์ลงเราสามารถทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ให้สูงขึ้นสำหรับอุณหภูมิปกติที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ผลิตภัณฑ์จากน้ำยางจะอยู่ที่ประมาณ 100 องศาเซลเซียสซึ่งที่อุณหภูมินี้อัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างยางกับกำมะถันจะเป็นไปอย่างช้าๆ ผลิตภัณฑ์ที่ใช้กำมะถันเพียงอย่างเดียวเป็นสารวัลคาไนซ์จะให้สมบัติที่ไม่ดีทั้งในแง่ความแข็งแรงและลักษณะภายนอกดังนั้นจึงต้องมีการเติมสารเคมีที่เรียกว่าสารตัวเร่งปฏิกิริยา (accelerator) และสารกระตุ้นปฏิกิริยา (activator) เพื่อช่วยแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เหล่านี้

การบ่ม¹ (Maturation) ของน้ำยางคอมพาวด์

น้ำยางคอมพาวด์ประกอบด้วยน้ำยางสารสตาบิไลเซอร์สารวัลคาไนซ์และสารต้านออกซิเดชัน (antioxidant) ซึ่งน้ำยางคอมพาวด์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงระหว่างการเก็บได้ 2 ลักษณะคือ

1. เสถียรภาพของคอลลอยด์ดีขึ้นหลังการบ่ม (ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงสมบัติของคอลลอยด์ระหว่างการเก็บ)
2. เกิดการวัลคาไนซ์บางส่วนซึ่งวัดได้จากระดับการเชื่อมโยงของโมเลกุลน้ำยางคอมพาวด์ระหว่างการเก็บการเปลี่ยนแปลงทั้ง 2 ลักษณะนี้เกิดขึ้นพร้อมกันดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมการเกิดวัลคาไนซ์ในน้ำยางคอมพาวด์ที่อยู่ระหว่างการใช้งานและส่วนที่ยังคงเหลืออยู่ในถังเก็บน้ำยางก่อนที่จะใช้น้ำยางคอมพาวด์หมดด้วยการกำหนดอุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บ

ระบบการวัลคาไนซ์

ในระบบการวัลคาไนซ์ประกอบด้วยกำมะถันสารกระตุ้นปฏิกิริยา (โดยทั่วไปนิยมใช้ซิงก์ออกไซด์) และสารตัวเร่งปฏิกิริยา (นิยมใช้ ZDC) ซึ่งปริมาณของสารต่างๆ เหล่านี้ที่ใช้จะขึ้นกับสมบัติของผลิตภัณฑ์จากน้ำยางปริมาณของสารเคมีส่วนใหญ่ที่ใช้จะเป็นดังนี้

• กำมะถัน	1-2 phr (เทียบกับน้ำหนักเนื้อยางแห้ง; DRC)
• สารตัวเร่งปฏิกิริยา (ZDC)	0.7-1.5 phr
• สารกระตุ้นปฏิกิริยา (ซิงก์ออกไซด์)	0.1-1.0 phr

¹ การบ่ม (maturation) หมายถึงการปล่อยหรือตั้งทิ้งน้ำยางที่ผสมสารเคมีต่างๆ ได้แก่ สารสตาบิไลเซอร์ สารต้านออกซิเดชัน สารตัวเร่งปฏิกิริยา สารกระตุ้นปฏิกิริยา และสารวัลคาไนซ์ไว้ที่อุณหภูมิห้องหรือที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้เกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุลน้ำยางคอมพาวด์อย่างช้าๆ จนถึงระดับการวัลคาไนซ์ที่ต้องการ

ผลิตภัณฑ์จากน้ำยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบนี้จะมีสมบัติทางกายภาพเป็นที่น่าพอใจอย่างไรก็ตามระบบนี้ไม่เหมาะกับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสมบัติความทนต่อความร้อนเนื่องจากสมบัติแรงดึงจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อผลิตภัณฑ์ถูกเก็บไว้ในสภาพที่มีอุณหภูมิสูงสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสมบัติความทนต่อความร้อนจึงควรใช้ระบบที่มีปริมาณกำมะถันต่ำและปริมาณสารตัวเร่งปฏิกิริยาสูงตัวอย่างที่นิยมใช้ได้แก่

•กำมะถัน	0–0.5 phr
•สารตัวเร่งปฏิกิริยา (TMTD)	2.5–3.5 phr
•สารกระตุ้นปฏิกิริยา (ซิงก์ออกไซด์)	0.5–1.0 phr

ถึงแม้ว่าการใช้สูตรผสมเคมีตามที่ได้กล่าวมานี้จะให้สมบัติความทนต่อความร้อนที่ดีแต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความแข็งเกร็ง (stiffness) ต่ำซึ่งสามารถจะปรับปรุงได้โดยใช้สารไทโอยูเรียประมาณ 1-1.5phrระยะเวลาของการวัลคาไนซ์ขึ้นกับอุณหภูมิถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเวลาที่ใช้ในการวัลคาไนซ์จะลดลงอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นโดยทั่วไประยะเวลาในการวัลคาไนซ์จะลดลงครึ่งหนึ่งเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทุกๆ 10 องศาเซลเซียสเช่นถ้าเวลาที่ใช้การวัลคาไนซ์เท่ากับ 30 นาทีที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 110 องศาเซลเซียสระยะเวลาที่ใช้ในการวัลคาไนซ์จะลดลงเหลือเพียง 15 นาที

วิธีการวัลคาไนซ์

ผลิตภัณฑ์จากน้ำยางสามารถวัลคาไนซ์ได้ 2 วิธีด้วยกันคือ

1. วัลคาไนซ์ก่อนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์
2. วัลคาไนซ์หลังการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์

วิธีแรกเป็นการวัลคาไนซ์น้ำยางในสถานะของไหล (fluidstate) ซึ่งจะให้แผ่นฟิล์มที่มีความยืดหยุ่น (elasticfilm) เมื่อแห้งกระบวนการนี้เป็นที่รู้จักกันดีในชื่อ “การพรีวัลคาไนซ์ (pre-vulcanization) ซึ่งนิยมใช้ในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการขนาดที่มีความแม่นยำสูงและให้สมบัติสุดท้ายและความมันเงาที่ดีกว่าอย่างไรก็ตามความแข็งเกร็งและความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ที่วัลคาไนซ์ด้วยวิธีแรกจะด้อยกว่าผลิตภัณฑ์ที่วัลคาไนซ์ด้วยวิธีที่สองในการพรีวัลคาไนซ์กำมะถันซิงก์ออกไซด์และสารตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกเติมลงไปเพื่อให้กระจายตัว (dispersion) อยู่ในน้ำยางให้ความร้อนกับน้ำยางโดยค่อยเพิ่มอุณหภูมิขึ้นอย่างช้าๆและคงอุณหภูมิไว้ที่ 70-80 องศาเซลเซียส จนกระทั่งได้อัตราการวัลคาไนซ์ตามต้องการผลิตภัณฑ์จากน้ำยางส่วนใหญ่จะวัลคาไนซ์ด้วยวิธีที่สองซึ่งสามารถทำได้ 3 แบบคือ

1. การวัลคาไนซ์ด้วยอากาศร้อน (hot air cure)
2. การวัลคาไนซ์ด้วยน้ำร้อน (hot water cure)
3. การวัลคาไนซ์ด้วยไอน้ำ (steam cure)

การวัลคาไนซ์ด้วยอากาศร้อนนั้นนิยมใช้กับผลิตภัณฑ์ที่มีความบางมากเช่นบอลลูนุ่มมีือ เป็นต้นซึ่งต้องการความแม่นยำที่ดีกว่าสำหรับยางรัดของและถุงนิ้วมือนิยมวัลคาไนซ์ด้วยน้ำร้อน

การวัลคาไนซ์ด้วยอากาศร้อน (Hot air cure)

สภาวะที่จะเกิดการวัลคาไนซ์ได้อย่างเหมาะสม (เวลาและอุณหภูมิ) สามารถหาได้จาก การทดลองโดยทั่วไปอุณหภูมิที่ใช้ในการวัลคาไนซ์จะอยู่ในช่วง 110-120 องศาเซลเซียสแต่สามารถจะใช้อุณหภูมิสูงกว่านี้ได้ถ้าต้องการให้เกิดการวัลคาไนซ์ได้เร็วขึ้นผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาจะใช้เวลาในการวัลคาไนซ์นานกว่าที่อุณหภูมิต่ำอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัลคาไนซ์คือตู้อบ (oven) ซึ่งสามารถใช้ในการทำแห้งที่อุณหภูมิสูงได้ด้วยการวัลคาไนซ์โดยใช้ตู้อบนี้อาจจะทำแบบแบทช์ (batch) หรือแบบต่อเนื่อง (continuous) ก็ได้ถ้าจะให้ดีก็ควรมีตู้อบ 2 ตู้ที่ใช้งานที่อุณหภูมิต่างกัน โดยตู้แรก สำหรับการอบแห้งใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ (55-65 องศาเซลเซียส) และตู้ที่สองสำหรับการวัลคาไนซ์ใช้งานที่อุณหภูมิสูง (110-120 องศาเซลเซียส) โดยพลังงานความร้อนที่ใช้ในตู้อบอาจจะได้จากไฟฟ้า ก๊าซหรือไอน้ำและถ้าตู้อบมีฉนวนที่ดีก็จะช่วยลดการสูญเสียความร้อนได้แต่วัสดุที่ทำเป็นฉนวนไม่ควรก่อให้เกิดฝุ่นละอองและไม่ควรใช้ใยหินหรือเส้นใยอื่นๆซึ่งอนุภาคของสารเหล่านี้ อาจก่อให้เกิดปัญหาในการเกาะติดบนผลิตภัณฑ์ได้นอกจากนั้นยังไม่ควรวางตู้อบไว้ใกล้กับถังน้ำยา คอมพาวด์ด้วยข้อดีของการวัลคาไนซ์ด้วยอากาศร้อนคือง่ายอุปกรณ์ที่ใช้มีราคาถูกและสามารถปรับเป็นการผลิตแบบต่อเนื่องได้ง่ายกระบวนการผลิตสะอาดและปราศจากอันตรายจากสนิมและการกัดกร่อนของน้ำที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ส่วนข้อเสียของการวัลคาไนซ์แบบนี้คือการเกิดออกซิเดชันที่ผิวของผลิตภัณฑ์ในบางครั้งจะเกิดฟองอากาศขึ้นบนผลิตภัณฑ์ระหว่างการวัลคาไนซ์ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการอบที่ไม่แห้งสนิทมีก๊าซเกิดขึ้นหรือการเกิดรูพรุนที่ผิวหรือใช้อุณหภูมิที่สูงมากเกินไป การวัลคาไนซ์หลังจากการอบแห้งสามารถช่วยหลีกเลี่ยงสิ่งเหล่านี้ได้ข้อเสียอื่น ๆคือใช้เวลานานเมื่อเทียบกับการวัลคาไนซ์ด้วยน้ำร้อน

การวัลคาไนซ์ด้วยน้ำร้อน (Hot water cure)

ผลิตภัณฑ์ยางที่อยู่บนแม่พิมพ์ (former) ถูกจุ่มลงในน้ำร้อน (80-85 องศาเซลเซียส) หรือน้ำเดือดกระบวนการผลิตมีทั้งแบบแบทช์และแบบต่อเนื่องในการผลิตแบบแบทช์อาจทำในถังหนึ่งใบหรือมากกว่าก็ได้ในขณะที่การผลิตแบบต่อเนื่องจะใช้ถังแบบที่มีขนาดยาวที่ประกอบด้วยอุปกรณ์ที่เหมาะสมเช่นอะลูมิเนียมเหล็กกล้ากัลวาไนซ์ (galvanized steel) ซึ่งถังนี้อาจจะให้ความร้อนด้วยก๊าซไฟฟ้าหรือไอน้ำเนื่องจากยางสัมผัสกับตัวกลางที่ให้ความร้อนอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นจึงใช้เวลาในการวัลคาไนซ์สั้นปัญหาการเกิดการออกซิเดชันที่ผิวจะไม่เกิดขึ้นตรงเท่าที่ไม่มีอากาศเข้ามาการเปลี่ยนน้ำอย่างต่อเนื่องทำให้วัสดุที่ละลายน้ำได้ถูกชะออกไปและเกิดการวัลคาไนซ์ขึ้นได้พร้อมๆกันข้อเสียของการวัลคาไนซ์ด้วยน้ำร้อนคือต้องมีกระบวนการที่เพิ่มขึ้นคือการทำให้ผลิตภัณฑ์แห้งที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียสซึ่งถ้าหากใช้อุณหภูมิสูงกว่านี้อาจเกิดปัญหาจากไอน้ำและการระเหยที่มากเกินไปได้

การวัลคาไนซ์ด้วยไอน้ำ (Steam cure)

ผลิตภัณฑ์จากน้ำยางบางชนิดสามารถวัลคาไนซ์ได้ด้วยไอน้ำซึ่งสามารถทำได้โดยการใช้หม้อนิ่งอัดไอน้ำ (autoclave) ที่มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกอัดด้วยความดันโดยทั่วไปจะวางอยู่ในแนวนอนใช้ไอน้ำที่อุณหภูมิสูงเป็นตัวกลางทำให้เกิดความดันผลิตภัณฑ์จะถูกบรรจุไว้บนรางบรรทุกที่สามารถเลื่อนเข้าไปสู่หม้อนิ่งอัดไอน้ำได้โดยทั่วไปจะใช้ 2 รางต่อหม้อนิ่งอัดไอน้ำหนึ่งใบการวัลคาไนซ์ด้วยไอน้ำมีข้อดีคือจะไม่เกิดการออกซิเดชันของความชื้นที่เหลืออยู่ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดรูพรุนกระบวนการนี้เหมาะสำหรับการผลิตแบบแบทช์เท่านั้นไม่เหมาะกับการผลิตแบบต่อเนื่อง

น้ำยางข้น (Concentrated latex)

คือ น้ำยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการเพิ่มความเข้มข้น โดยน้ำยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการเพิ่มความเข้มข้นแล้วจะมีปริมาณเนื้อยางประมาณร้อยละ 55-65 ซึ่งสูงกว่าน้ำยางสดที่มีปริมาณเนื้อยางประมาณร้อยละ 25-30 ทำให้สามารถทำการขนส่งได้ง่ายขึ้นเป็นอย่างมาก

น้ำยางชั้นพรีวัลคาไนซ์ (Pre- vulcanized)

คือ น้ำยางที่วัลคาไนซ์ในสถานะของเหลวและขึ้นรูปเป็นยางวัลคาไนซ์ได้โดยไม่ต้องให้ความร้อนอีก การพรีวัลคาไนซ์ (pre-vulcanization) เป็นกระบวนการที่นำน้ำยางวัลคาไนซ์มาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่งในกรณีนี้คำว่าน้ำยางพรีวัลคาไนซ์และน้ำยางวัลคาไนซ์สามารถจะนำมาใช้แทนกันได้ น้ำยางพรีวัลคาไนซ์ยังคงสถานะเป็นของไหลและมีลักษณะทั่วไปเหมือนเดิมการวัลคาไนซ์จะเกิดขึ้นภายในอนุภาคน้ำยางแต่ละอนุภาค โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะของการกระจายตัวของอนุภาคน้ำยาง

การวัลคาไนซ์ผลิตภัณฑ์จากน้ำยาง

ผลิตภัณฑ์จากน้ำยางจะไม่สามารถนำมาใช้งานได้จนกว่าจะผ่านการวัลคาไนซ์เสียก่อน ทั้งนี้เพื่อกำจัดความเหนียวติด (tackiness) ของยางและปรับปรุงสมบัติต่างๆ เช่น ความแข็งแรง ความต้านทานต่อการสึกกร่อน ความยืดหยุ่นของผลิตภัณฑ์ เป็นต้น การวัลคาไนซ์เป็นกระบวนการเชื่อมโมเลกุลยางแต่ละโมเลกุลผ่านพันธะโควาเลนต์ให้เกิดเป็นโครงสร้างตาข่ายความเร็วในการเชื่อมโยงพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างการวัลคาไนซ์เรียกว่าอัตราการวัลคาไนซ์ (cure rate) และแผ่นฟิล์มน้ำยางที่ได้คือแผ่นฟิล์มน้ำยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์แล้วในการวัลคาไนซ์ยางจะทำปฏิกิริยากับกำมะถันทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความยืดหยุ่นทนทานและไม่เหนียวติดการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิห้องจะดำเนินไปอย่างช้าๆซึ่งอาจต้องใช้เวลาหลายวันในการทำให้การวัลคาไนซ์เกิดได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นเพื่อลดเวลาในการวัลคาไนซ์เราสามารถทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ให้สูงขึ้นสำหรับอุณหภูมิปกติที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ผลิตภัณฑ์จากน้ำยางจะอยู่ที่ประมาณ 100 องศาเซลเซียสซึ่งที่อุณหภูมินี้อัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างยางกับกำมะถันจะเป็นไปอย่างช้าๆผลิตภัณฑ์ที่ใช้กำมะถันเพียงอย่างเดียวเป็นสารวัลคาไนซ์จะให้สมบัติที่ไม่ดีทั้งในแง่ความแข็งแรงและลักษณะภายนอกดังนั้นจึงต้องมีการเติมสารเคมีที่เรียกว่าสารตัวเร่งปฏิกิริยา (accelerator) และสารกระตุ้นปฏิกิริยา (activator) เพื่อช่วยแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ

ข้อแตกต่างระหว่าง น้ำยางชั้น และ น้ำยางชั้นพรีวัลคาไนซ์

คือ น้ำยางชั้นจะเติมสารแอมโมเนีย แต่ น้ำยางพรีวัลคาไนซ์จะใช้น้ำยางชั้นแอมโมเนียสูงผสมกับสารวัลคาไนซ์ต่างชนิดกันจะให้น้ำยางพรีวัลคาไนซ์ที่มีสมบัติแตกต่างกันการใช้สารให้กำมะถันประเภทไทูเรม (thiuram-typesulfur donor) จะให้ค่าความทนต่อแรงดึงสูงและสมบัติหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่ต่ำกว่าน้ำยางชั้น และ น้ำยางพรีวัลคาไนซ์ที่มีโมดูลัสค่อนข้างต่ำการใช้

เพอร์ออกไซด์ไฮโดรเพอร์ออกไซด์จะให้ค่าความทนต่อแรงดึงและการยึดตัวมอดูลสูงสำหรับน้ำ ยางพรีวัลคาไนซ์ที่มีค่าโมดูลต่ำซึ่งจะทำให้ น้ำยางพรีวัลคาไนซ์ที่ได้เหมาะกับการนำไปผลิต ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสีอ่อนและโปร่งใส ซึ่งทำให้ น้ำยางพรีวัลคาไนซ์มีความคงทนในแง่ของ แรงดึงสูงกว่าน้ำยางข้น

2.3 คุณสมบัติของ Latex, Latex Modified Mortar และ Latex Modified Concrete (Neville, A.M.; Brooks, J.J.-1990) (Ohama, Y-1987)

Polymer Portland Cement Concrete (PPCC) หรือ Polymer Modified Concrete (PMC) เกิด จากการผสมคอนกรีตสดกับ Polymer ที่อยู่รูปของเหลวหรือ Monomer ที่สามารถเกิดปฏิกิริยา Polymerization ที่หน่วยงานก่อสร้างได้ โดยทั่วไปแล้ว Polymer ที่ใช้กับ PPCC หรือ PMC มีอยู่หลาย ชนิด ซึ่งจะได้กล่าวถึงในภายหลัง แต่ในปัจจุบันนี้ Polymer ที่นิยมใช้กับ PPCC หรือ PMC มากคือ Polymer Latex ตัว Polymer Latex ที่ใช้จะอยู่ในสภาพที่เป็น Emulsion คือมีอนุภาคของ Polymer แขนงลอยอยู่ในน้ำหรือของเหลว Polymer Latex เมื่อนำมาใช้เป็นส่วนผสมของ PPCC หรือ PMC มักจะทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กกระจายอยู่ภายในเนื้อคอนกรีต ซึ่งจะทำให้กำลังอัดของ คอนกรีตลดลง จึงมักจะมีการเติมพวก Antifoaming หรือ สารขจัดฟองอากาศลงใน PPCC หรือ PMC เพื่อลดปริมาณฟองอากาศในเนื้อคอนกรีตให้เหลือน้อยที่สุด คุณสมบัติของ PPCC หรือ PMC จะดีมาก เมื่อทำการบ่มขึ้นเป็นเวลาอย่างน้อย 3-7 วัน แล้วทำการบ่มแห้งต่อไป การบ่มขึ้นในระยะ 3-7 วันแรกจะทำให้ปฏิกิริยา Hydration ระหว่างน้ำกับซีเมนต์ยังคงดำเนินต่อไปได้ ส่วนสาเหตุที่ต้องมีการบ่มแห้งต่อเพื่อจะให้น้ำที่เหลืออยู่ภายในเนื้อคอนกรีตเกิดการระเหยออกไปโดยเร็ว เพื่อจะทำให้ อนุภาคของ Polymer ที่อยู่ในส่วนผสมคอนกรีตมี โอกาสมาเกาะรวมตัวกัน (Coalesce) ก่อตัวเป็นชั้น Film ที่ต่อเนื่องแทรกกระจายปนอยู่ในเนื้อคอนกรีต ซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อต่อไปข้อดีของ PPCC หรือ PMC เมื่อเทียบกับคอนกรีตธรรมดาทั่วไปคือ คอนกรีตประเภทนี้จะมี ความทนทาน (Durable) สูงและมีการเกาะยึดกันดี การต้านทานแรงกระแทกดีขึ้นแต่มีข้อเสียคือ Creep จะมากกว่า ปกติ สำหรับคอนกรีตที่มี Polymer Latex เป็นส่วนผสมมีชื่อเรียกเฉพาะว่า Latex Modified Concrete หรือ LMC ส่วน Mortar (ส่วนผสมของซีเมนต์ ทราย และน้ำ) ที่มี Polymer Latex เป็น ส่วนผสมมีชื่อเรียกเฉพาะว่า Latex Modified Mortar หรือ LMM สำหรับ Polymer Latex ที่ใช้กัน อย่างแพร่หลายในปัจจุบันได้แก่ Thermoplastic และ Elastomeric Polymer (ในงานวิจัยครั้งนี้ต่อไป จะเรียก Polymer Latex ว่า Latex)

คุณสมบัติของ LMC และ LMM คือ

1. ความสามารถในการรับแรงดึงและกำลังอัดสูงขึ้น
2. อัตราการซึมผ่านของน้ำ (Permeability) ลดน้อยลง
3. ความทนทานมากขึ้นสามารถต้านทานต่อการกัดกร่อนโดยสารเคมีได้ดี
4. ตัว LMC หรือ LMM มีคุณสมบัติเป็น Bonding Medium สามารถยึดเกาะติดกับคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว (Hardened Concrete) ได้ดี จึงเหมาะที่จะใช้ในงานซ่อมแซม เช่น ใช้ในงาน Thin Bond Patching โดยการเท LMC หรือ LMM ความหนาไม่เกิน 1-2 นิ้ว ลงบน Slab หรือ Pavement เพื่อซ่อมแซมหรือเพิ่มความสามารถในการรับ Load
5. Latex ที่ใช้เป็นส่วนผสมของ LMC หรือ LMM ไม่เป็นพิษ (Nontoxicity) ต่อมนุษย์ไม่ติดไฟ (Nonflammability) รวมทั้งขั้นตอนการผสมหรือเตรียม LMC และ LMM ก็ทำได้ง่าย
6. เนื่องจาก Latex ที่ใช้เป็นส่วนผสมของ LMC หรือ LMM อยู่ในสภาพที่เป็นของเหลวหรือ Emulsion จึงทำให้เป็นการง่ายต่อการเติมสารเคมีเพื่อปรับคุณสมบัติบางอย่างให้ดีขึ้น เช่น สาร Antifoaming หรือสารเร่งการก่อตัวของคอนกรีต
7. ราคาของ Latex ไม่สูงมากนัก

2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติด้านกำลังของคอนกรีตและมอร์ต้าผสมน้ำยาง (Neville, A.M.; Brooks, J.J.-1990) (Ohama, Y-1987)

ปริมาณและคุณภาพของซีเมนต์ หิน ทราย รวมทั้งอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) นอกจากจะเป็นองค์ประกอบ (Factor) ที่กำหนดคุณสมบัติด้านกำลัง (Strength) ของ Mortar และ Concrete แล้วองค์ประกอบเหล่านี้ยังเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติด้านกำลังของ LMM และ LMC เช่นเดียวกัน เนื่องจาก Latex เหลวมีน้ำเป็นส่วนประกอบอยู่ในปริมาณที่มาก ดังนั้นในการผสมหรือทำ Mixed Proportion จะต้องคำนึงถึงปริมาณน้ำในส่วนนี้ด้วย เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง LMM หรือ LMC หรือ Mortar หรือ Concrete ธรรมดาที่มีส่วนผสมของน้ำและ w/c เท่ากัน LMM และ LMC จะมีความสามารถในการเท (Workability) ดีกว่า เพราะ Latex ทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กกักกระจายอยู่ในส่วนผสม ฟองอากาศเหล่านี้ทำหน้าที่เสมือนมวลรวมละเอียดขนาดเล็กยึดหยุ่นได้จึงช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างของแข็งภายในเนื้อ LMM และ LMC เหลว นอกจากนี้การที่อนุภาคของ Polymer ใน Latex มีรูปร่างเป็นทรงกลม (Sphere) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 0.05-0.2 Micron กระจายอยู่ในส่วนผสมทำให้เกิดผลที่เรียกว่า Ball Bearing Action ช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างของแข็งในส่วนผสมด้วย องค์ประกอบที่สำคัญอีก 2 ประการ ที่เป็นตัวกำหนดคุณสมบัติด้านกำลังของ LMM และ LMC คือ

1. อัตราส่วนเนื้อของแข็ง (Solid) ทั้งหมดใน Latex ต่อซีเมนต์ โดยน้ำหนักหรือ Polymer Cement Ratio (P/C) ใน Mixed Proportion โดยทั่วไป LMM หรือ LMC ที่มี P/C สูงจะทำให้กำลังเช่น Tensile Strength, Flexural Strength เป็นต้น สูงกว่า LMM หรือ LMC ที่ค่า P/C ต่ำ แต่ปริมาณ Latex ใน Mixed Proportion ถูกจำกัดด้วยเหตุผลที่เคยกล่าวมาแล้วในข้างต้น นอกจากนี้ LMM หรือ LMC ที่มีค่า P/C ยิ่งสูงจะทำให้เวลาก่อตัวหรือ Set ด้วนานกว่า Mortar หรือ Concrete ธรรมดา
2. วิธีการบ่ม (Curing Method) Latex ในส่วนผสมของ LMM หรือ LMC ต้องการบ่มแห้งหรือบ่มในอากาศเพื่อจะให้น้ำที่อยู่ภายในเนื้อ Concrete หรือ Mortar เกิดการระเหยออกไปโดยเร็ว จึงจะทำให้อนุภาค Polymer ใน Latex มีโอกาสมาเกาะรวมตัวกัน (Coalesce) ก่อตัวเป็นชั้นฟิล์ม (Film) ที่ต่อเนื่องแทรกกระจายป็นอยู่ในเนื้อ Mortar หรือ Concrete ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อกลไกการทำงานของ Latex ใน LMC และ LMM ส่วน Cement ใน LMM หรือ LMC ต้องการการบ่มชื้นเพื่อให้ปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำ (Hydration) ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์ ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปเพื่อที่จะให้ได้ LMM และ LMC มีคุณภาพดีจึงต้องใช้วิธีบ่มผสมกัน โดยทำการบ่มชื้นประมาณ 3-7 วันแรก หลังจากนั้นจึงบ่มแห้งต่อไป

2.5 การประยุกต์ใช้วัสดุปอซโซลานผสมในคอนกรีตและมอร์ต้าวัสดุปอซโซลาน

ตามมาตรฐาน ASTM C618 (2001) (American Society for Testing and Materials, 2001) ปอซโซลานเป็นวัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมีจำพวกซิลิกา หรือซิลิกาและอลูมินาเป็นหลัก โดยทั่วไปวัสดุปอซโซลานจะไม่มีสมบัติในการยึดประสานแต่ถ้าวัสดุปอซโซลานมีความละเอียดและมีน้ำหรือความชื้นที่เพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติทำให้ได้สารประกอบในการยึดประสาน วัสดุปอซโซลานเมื่อใช้ผสมคอนกรีตจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แม้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลานจะคล้ายกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาช้ากว่าดังนั้นจึงสามารถใช้วัสดุปอซโซลานเพื่อลดความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชันได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานคอนกรีตขนาดใหญ่หรือคอนกรีตหนาหรือใช้ผสมในมอร์ต้าวัสดุปอซโซลานที่มีอยู่ใน เมืองไทยมีปริมาณค่อนข้างมากและสามารถนำมาใช้งานได้เช่นเถ้าแกลบและเถ้าขานอ้อย เป็นต้น

เถ้าแกลบ

เถ้าแกลบได้จากการเผาแกลบการเผาแกลบที่อุณหภูมิในช่วง 600 – 800 องศาเซลเซียสจะทำให้ซิลิกาอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึกซึ่งมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานถ้าเผาแกลบอุณหภูมิที่ต่ำเกินไปจะทำให้มีสารอินทรีย์เหลืออยู่จะไม่เหมาะกับการนำมาผสมกับปูนซีเมนต์และถ้าเผาที่อุณหภูมิสูงเกินไปซิลิกาที่ได้จะเป็นผลึกซึ่งจะเฉื่อยต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานและไม่เหมาะกับการนำมาผสมคอนกรีตเช่นกันจากการศึกษาของงานวิจัยพบว่า เถ้าแกลบมีผลต่อคุณสมบัติของมอร์ต้าและคอนกรีตได้แก่เถ้าแกลบที่ได้จากการเผาเมื่อนำมาทำการแทนที่ในปูนซีเมนต์ไม่เกินร้อยละ 35 จะทำให้กำลังรับแรงที่ 28 วัน ใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ล้วน (พีรวัฒน์ ปลาเงิน- 2555) และยังพบว่ามอร์ต้าและคอนกรีตผสมเถ้าแกลบให้กำลังรับแรงอัดและแรงดึงเพิ่มขึ้นจนถึงร้อยละ 20 (บุรฉัตร นัทรวิระและวัชรกร วงศ์คำจันทร์-2545) ในขณะที่ผลต่อความทนทานพบว่ามอร์ต้าและคอนกรีตผสมเถ้าแกลบทนทานต่อสภาพที่เป็นกรดและสารละลายซัลเฟตได้ดี (Metha,P.K.,-1977) เนื่องจากเถ้าแกลบมีองค์ประกอบของ SiO_2 ประมาณ 81% ขณะที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีองค์ประกอบของ SiO_2 ประมาณ 21%

สมบัติทางเคมีของเถ้าแกลบ

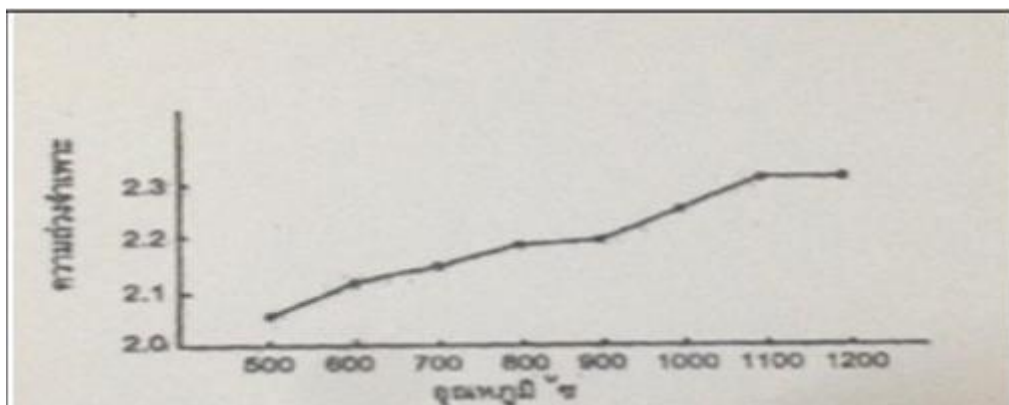
องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบแสดงแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งพบว่าเถ้าแกลบมี SiO_2 สูงมากถึงประมาณร้อยละ 90 (พีรวัฒน์ ปลาเงิน-2555,บุรฉัตร นัทรวิระ และ ทวีศักดิ์ คงทรัพย์-2545) ทำนองเดียวกัน (บุรฉัตร นัทรวิระและวัชรกร วงศ์คำจันทร์-2545) พบว่าเถ้าแกลบที่เผาในประเทศไทยมี SiO_2 อยู่ร้อยละ 92.28, 95.36, และ 91.84 ตามลำดับ ส่วนที่เหลือเป็นออกไซด์ของโซเดียม โปรแตสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม เหล็กฟอสฟอรัส และ ซัลเฟอร์ และค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (loss on ignition หรือ LOI) ซึ่งตามปกติมี LOI อยู่ประมาณร้อยละ 2-5 อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแกลบมีผลต่อค่า LOI เพราะการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์จะทำให้เถ้าแกลบมี LOI สูงขึ้น LOI ที่อยู่ในเถ้าแกลบส่วนใหญ่จะเป็นธาตุถ่านคุดน้ำสูง และถ้ามีจำนวนมากจะทำให้กำลังของคอนกรีตลดลงได้

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ

สารประกอบ	เถ้าแกลบ	เถ้าแกลบเทาขาว	เถ้าแกลบดำโรงสี
SiO ₂	86.9-97.3	88.33	89.95
K ₂ O	0.6-2.5	2.76	1.49
Na ₂ O	0-1.5	0.15	0.07
CaO	0.2-1.5	0.52	0.50
MgO	0.12-1.96	0.28	0.23
Fe ₂ O ₃	0-0.6	3.37	1.89
P ₂ O ₅	0.2-2.9	NA	NA
SO ₃	0.1-1.1	0.12	0.02
Cl	0-0.4	NA	NA
Al ₂ O ₃	NA	0.48	0.54

ความถ่วงจำเพาะ

ความถ่วงจำเพาะของเถ้าแกลบขึ้นอยู่กับวิธีการเผา เถ้าแกลบที่เผาใหม่ไม่สมบูรณ์จะมีสิ่งที่ไม่เผาไหม้ไม่หมดและคาร์บอนปนอยู่มากและจะมีความถ่วงจำเพาะต่ำ ความถ่วงจำเพาะเถ้าแกลบที่เผาไหม้ค่อนข้างสมบูรณ์มีค่าระหว่าง 1.9-2.3 และยังขึ้นกับอุณหภูมิในการเผาดังแสดงในรูปที่ 2.3 เถ้าแกลบเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสมีความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.06 และความถ่วงจำเพาะจะเพิ่มเป็น 2.20 และ 2.30 ที่อุณหภูมิการเผา 800 และ 1,000 องศาเซลเซียส ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของความถ่วงจำเพาะเนื่องมาจากปริมาณคาร์บอนลดน้อยลง



รูปที่ 2.3 ความถ่วงจำเพาะเถ้าแกลบกับอุณหภูมิในการเผา

กำลังรับแรง

กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบที่อายุต้องขึ้นอยู่กับความละเอียดของเถ้าแกลบ ถ้าที่ความละเอียดสูงจะทำให้กำลังรับแรงอัดสูงเนื่องจากความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา ส่วนเถ้าแกลบซึ่งได้จากการเผาแกลบโดยตรงจะทำให้คอนกรีตที่มีกำลังอัดต่ำเพราะมีขนาดใหญ่และดูดน้ำมาก เถ้าแกลบเป็นวัสดุปอซโซลานดังนั้นจึงต้องใช้ค่าที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์มาทำปฏิกิริยา จึงทำให้กำลังในช่วงอายุต้นต่ำ แต่เมื่ออายุมากขึ้นกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบสามารถมีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าแกลบ โดยเฉพาะกรณีที่เถ้าแกลบมีความละเอียดสูง เช่นการใช้เถ้าแกลบบดละเอียดซึ่งมีอนุภาคข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 1 แทนที่ปูนซีเมนต์เพื่อทำคอนกรีตคุณภาพสูงโดยมีสารลดน้ำพิเศษเพื่อปรับความสารถในการเทพบว่าช่วงต้นอายุต้น (3-7 วัน) คอนกรีตผสมเถ้าแกลบบดละเอียดมีกำลังต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมแต่เมื่ออายุ 28 และ 56 วันพบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าแกลบบดละเอียดร้อยละ 30 มีกำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีตควบคุม แต่การแทนที่เถ้าแกลบบดละเอียดในปริมาณที่สูงกว่านี้จะทำให้กำลังอัดต่ำทั้งอายุต้นและอายุปลายการใช้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่เหมาะสมจะส่งผลดีต่อกำลังอัด ดังตารางที่ 2.3 ซึ่งแสดงถึงกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าแกลบที่มีความละเอียดสูงและเถ้าถ่านหิน ส่วนผสมที่ใช้เถ้าแกลบแทนปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 ถึง 40 โดยน้ำหนักให้กำลังอัดค่อนข้างสูง แต่การใช้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์มากเกินไปทำให้กำลังอัดของคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าแกลบ นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้เถ้าแกลบร่วมกับเถ้าถ่านหินทำให้ส่วนผสมมีความชื้นไหลและกำลังดีขึ้น ดังตารางที่ 2.3 เนื่องจากการเกี่ยวกัน ระหว่างเถ้าแกลบและเถ้าถ่านหินนอกจากการผสมแทนที่ปูนซีเมนต์แล้ว ยังสามารถผสมเถ้าแกลบกับปูนขาวซึ่งมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานเช่นกัน แต่กำลังรับจะต่ำเนื่องจากกำลังรับแรงพื้นฐานของปูนขาวต่ำ และถ้าเถ้าแกลบมีการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ กำลังรับแรงจะลดลงตามปริมาณของ LOI ที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบที่ w/c ต่างกัน

ส่วนผสม ปูนซีเมนต์ : เถ้าถ่านหิน : เถ้า แกลบ	W/C	กำลังอัด(Ksc)			
		3วัน	7วัน	28วัน	90วัน
100 : 0 : 0	0.245	550.8	612	826.2	831.3
80 : 10 : 10	0.245	596.7	622.2	754.8	765
60 : 20 : 20	0.260	479.4	663	775.2	790.5
40 : 30 : 30	0.350	300.9	510	642.6	708.8

Horsakulthai et al. [Horsakulthai V, Phiuvanna S, Keanbud W-2010] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการทนทานต่อการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต ผสมเถ้าขานอ้อย-แกลบ-ไม้บดละเอียดโดยวิธีเร่งด้วยกระแสไฟฟ้าจากการทดสอบกำลังอัดได้ทำตาม ASTM C39 ที่อายุ 7, 28, 91 และ 180 วัน ซึ่งผลการใช้เถ้าขานอ้อย-แกลบ-ไม้แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 จะมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาที่ทุกอายุการบ่มการบ่มที่อายุ 7 วันการใช้เถ้าขานอ้อย-แกลบ-ไม้แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 จะมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมเพียงเล็กน้อยสำหรับการใช้เถ้าขานอ้อย-แกลบ-ไม้แทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 40 และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60 กำลังอัดจะสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุการบ่ม 91-180 วันเถ้าขานอ้อยแกลบไม้เป็นวัสดุปอชโซลานที่ดีสามารถนำไปใช้ได้ อย่างมีประสิทธิภาพเพิ่มความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ช่วยลดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมและช่วยลดปัญหาการใช้พื้นที่ในการฝังกลบเถ้าขานอ้อยแกลบไม้

ชินวัตร [ชินวัตรแสงสว่าง-2541] ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของซีเถ้าแกลบผสมซีเมนต์ในการทดสอบนี้จะนำซีเถ้าแกลบมาผสมกับปูนซีเมนต์ตามปริมาณร้อยละ 0, 3, 6, 9, และ 12 ของงน้ำหนักซีเถ้าแกลบที่เตรียมไว้จากนั้นทำการทดสอบ CBR Test ตามมาตรฐานของ ASTM D 1883-67 จากการทดสอบปูนซีเมนต์ที่ผสมลงไปจะมีอิทธิพลต่อค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดค่าความชื้นที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุดและค่า CBR ของซีเถ้าแกลบผสมซีเมนต์เพราะว่าปูนซีเมนต์เมื่อผสมกับน้ำจะทำให้เกิดปฏิกิริยา Hydration ในปฏิกิริยา Hydration จะได้ผลผลิตอย่างหนึ่งคือแคลเซียมไฮดรอกไซด์อิสระซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์อิสระนี้จะทำปฏิกิริยากับสารประกอบซิลิกาในวัสดุปอชโซลานหรือซีเถ้าแกลบเรียกปฏิกิริยานี้ว่าปฏิกิริยาปอชโซลานซึ่งจะทำให้ซีเถ้าแกลบเปลี่ยนรูปเป็นสารซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติในการยึดประสานผลของการเปลี่ยนรูปเป็นสารซีเมนต์จะมากหรือน้อย

ขึ้นอยู่กับปริมาณปูนซีเมนต์ที่ผสมลงไป ดังนั้นอิทธิพลที่สำคัญที่เพิ่มความแข็งแรงให้แก่ซีเมนต์ก็คือปูนซีเมนต์

กิติคุณ และชัยวัฒน์ (กิติคุณเกษตรกรรมและชัยวัฒน์ โคนาคม-2542) ได้ทำการศึกษาผลกระทบด้านกำลังอัดของมอร์ต้าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยและเถ้าแกลบในสารละลายซัลเฟตที่ pH7 และ pH3 พบว่ากำลังอัดของมอร์ต้าชนิดเดียวกันบ่มในความเข้มข้น pH3 จะมียกกำลังน้อยกว่าในความเข้มข้น pH7 จากสภาพที่เป็นกรดและสารละลายซัลเฟตจะมีผลกระทบกับกำลังของมอร์ต้าซึ่งมอร์ต้าที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าแกลบจะมีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้นเนื่องจากเถ้าแกลบมีความละเอียดค่อนข้างสูงทำให้ต้องการน้ำเคลือบผิวมาก ดังนั้นการใช้เถ้าลอยและเถ้าแกลบเข้าช่วยนั้นต้องใช้ในปริมาณที่เหมาะสมจึงจะสามารถพัฒนากำลังให้กับก้อนมอร์ต้าได้

Metha (Metha-1997) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ที่ผสมวัสดุปอซโซลานซึ่งวัสดุปอซโซลาน (เถ้าแกลบ) พบว่า เถ้าแกลบมีปริมาณซิลิกาสูงมากสามารถผสมกับปูนขาว หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซึ่งทำให้ ปูนซีเมนต์มีความทนทานสามารถรับน้ำหนักได้มากขึ้น แต่ไม่เพียงพอต่อการรับน้ำหนักบรรทุก แต่สามารถใช้กับงานก่ออิฐ หรือ งานฉาบปูน ได้ส่วนปูนซีเมนต์ที่ผสมกับเถ้าแกลบในปริมาณสูงถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุผสม มีกำลังรับแรงอัดที่อายุ 3 วัน และ 7 วัน สูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาและมีความต้านทานกรดได้ดี ซึ่งถือเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ

Bedard และ Bergeron (Bedard และ Bergeron-1990) ได้ศึกษาผลกระทบของคาร์บอนेटต่อคอนกรีตที่บ่มด้วยความร้อน ซึ่งตัวอย่างปูนซีเมนต์ CSA Type 30 และ ปูนซีเมนต์ผสมหินปูนจาก 2 แหล่ง ได้ถูกนำมาผสมคอนกรีต ปริมาณของหินปูนได้ถูกเลือกเพื่อให้เหมาะสมต่อคุณสมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์ชนิดแรกมีส่วนผสมของ C_3A ร้อยละ 10.4 และถูกทดสอบในกรณีที่เดิมและไม่เติมหินปูนชนิด A ปริมาณร้อยละ 4.1 ปูนซีเมนต์ชนิดที่สองมีส่วนผสมของ C_3A ร้อยละ 11.6 และถูกทดสอบในกรณีที่เดิมและไม่เติมหินปูนชนิด B ปริมาณร้อยละ 2.3 การกระจายตัวของขนาดคละปูนซีเมนต์ในแต่ละกรณีใกล้เคียงกัน โดยผลกำลังคอนกรีตมีค่าใกล้เคียงกันทุกกรณี ผลกำลังของปูนซีเมนต์ที่อายุ 1 วัน ทั้งที่มีหินปูนและไม่หินปูนไม่มีความแตกต่างกัน

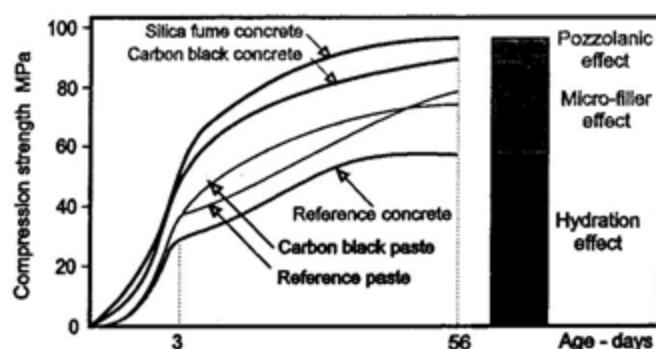
Sprung และ Siebel (Sprung และ Siebel-1991) พบว่าวัสดุเนื้อละเอียดสามารถใช้เพื่ออุดช่องว่างขนาดเล็กและสามารถเพิ่มกำลังอัดโดยการปรับปรุงการอัดตัวของส่วนผสมขนาดเล็ก ซึ่งการใช้ผงหินปูนจากการใช้วัสดุปอซโซลาน การใช้หินปูนไม่ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้นเมื่อบ่มนานขึ้น เมื่อหินปูนถูกเติมในปริมาณมากกว่าร้อยละ 15 ถึง ร้อยละ 25 กำลังอัดจะต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

J.D. Mathews (J.D.Mathews-1994) ศึกษาพบว่าการใช้ผงหินปูนร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์จะไม่ก่อให้เกิดผลเสียต่อคุณสมบัติของคอนกรีต ซึ่งคอนกรีตที่บ่มในอากาศจะมีกำลังรับแรงอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่บ่มในน้ำ และ คอนกรีตที่บ่มในน้ำปูนใสจะมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่บ่มในน้ำประปาเนื่องจากคอนกรีตที่บ่มในน้ำปูนใสมีการสูญเสียแคลเซียมออกไซด์ (CaO) น้อยกว่าในน้ำประปา

Rubio (Rubio-1996) ได้ทำการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการผลิตวัสดุเชื่อมประสานจากปูนขาวกับเถ้าแกลบ และ ปอช โซลานชนิดอื่นๆ เช่น เถ้าลอยและดินเหนียวคาโอลินไนท์ (Kaolinite) ผลการทดสอบพบว่าเมื่อเพิ่มวัสดุเชื่อมประสานลงไปปูนซีเมนต์ที่ทำจากปูนขาวกับเถ้าแกลบทำให้ก่อตัวช้าลงแต่ยังอยู่ในมาตรฐาน ASTM และ กำลังรับแรงอัดน้อยลงเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ที่ทำจากปูนขาว และแกลบ นอกจากนี้ผลการทดสอบยังพบว่า สามารถต้านทานต่อสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดได้ดี สามารถนำไปใช้งานก่อสร้างที่ต้องการความต้านทานต่อกรด เช่น งานพื้นที่โรงงานในอุตสาหกรรมอาหาร

Vuk et al. (Vuk et al.-2001) ได้ทำการทดลองศึกษาผลกระทบของการใช้หินปูนปริมาณร้อยละ 5 พบว่ากำลังอัดช่วงต้นของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้นเมื่อมีส่วนผสมของหินปูน อย่างไรก็ตามกำลังอัดช่วงปลายจะคงที่หรือลดลงขึ้นอยู่กับความละเอียดและคุณสมบัติด้านเคมีของเม็ดปูน

G.C.Isalia และ A.L.G. Gastaldini (G.C.Isalia และ A.L.G. Gastaldini-2003) ศึกษาผลการปฏิกิริยาที่มีผลต่อการรับกำลังแรงอัดของคอนกรีตโดยใช้วัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ คือ เถ้าลอย เถ้าแกลบ และผงหินปูนซึ่งจะศึกษาผลกระทบต่อกำลังของคอนกรีตโดยดูความสำคัญจากปฏิกิริยาต่างๆ ได้แก่ ปฏิกิริยาไฮเดรชันปฏิกิริยาปอชโซลานิก และ ลักษณะคุณสมบัติการเป็นวัสดุเติมเต็ม (filler)



รูป 2.4 ผลผลิตจากปฏิกิริยาต่างๆของซีเมนต์พิเศษ

จากรูปที่ 2.4 เป็นผลของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ปฏิกิริยาปอซโซลานิก และวัสดุ เติมเต็ม พบว่าคอนกรีตเต็มแก้วมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาน้อยและเมื่อเติม ซิลิกาฟุ่มซึ่งมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยามากกว่า เพิ่มเข้าจะทำให้เกิดการเสริมแรงกันระหว่างวัสดุปอซโซลานิกเรียกผลลัพธ์ที่ได้ นี้ว่า Synergic effect ผลจากการวิจัย สรุปได้ว่า เมื่อต้องการให้คอนกรีตมีความแข็งแรงที่ต้องการ คอนกรีตจะต้องมีแคลเซียมไฮดรอกไซด์และน้ำที่เหลืออยู่อย่างเหมาะสม ซึ่งลักษณะทางกายภาพของวัสดุผง (ความละเอียด) เช่นถ้าเติมเต็มแก้วลงไปแต่ไม่ละเอียดจะส่งผลต่อปฏิกิริยาปอซโซลานิกให้ทำปฏิกิริยาไม่ทั่วถึงซึ่งความละเอียด เป็นต้นเหตุปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตมากที่สุด

Gemma Rodriguez de Sensale (Gemma Rodriguez de Sensale -2006) ศึกษากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตผสมเต็มแก้ว โดยใช้เต็มแก้วจากประเทศอูรุกวัยซึ่งเป็นเต็มแก้วที่ได้จากโรงสีข้าว พบว่า เมื่อปริมาณเต็มแก้วเพิ่มขึ้น กำลังรับแรงดึงของคอนกรีตผสมเต็มแก้วจะมีค่าลดลงและกำลังรับแรงดึงจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปริมาณปูนซีเมนต์มีค่าต่ำลงที่อัตราแทนที่ส่วนผสมเดียวกัน

2.6 การบำรุงรักษาคลองส่งน้ำชลประทาน(กอบเกียรติ ผ่องบุตติ-2542)

คลองส่งน้ำของระบบชลประทานทุกแห่ง สร้างขึ้นเพื่อรับน้ำไปแจกจ่ายให้แก่แปลงเพาะปลูกได้ทั่วถึง ระบบคลองส่งน้ำของโครงการชลประทานแต่ละแห่งประกอบด้วย คลองส่งน้ำสายใหญ่ คลองซอย คลองแยกซอย และคลองระบายน้ำ คลองแต่ละสายมีความยาวและอยู่ห่างไกลกันมากทำให้ยากต่อการบำรุงรักษาให้อยู่ในสภาพที่ดีทั่วถึงกันตลอดทั้งบริเวณเขตโครงการได้

ขั้นตอนในการปฏิบัติงานด้านการบำรุงรักษา ดังนี้

1. ดำเนินการตรวจสอบความเสียหายของระบบชลประทานในเขตรับผิดชอบ
2. รวบรวมข้อมูลการตรวจสอบเพื่อจัดส่งให้ฝ่ายวิศวกรรม
3. ประสานงานกับชุดเครื่องจักรกล ในการปฏิบัติงานในเขตรับผิดชอบแต่ละวันเพื่อให้การปฏิบัติงานเป็นไปตามแผนงาน
4. จัดเจ้าหน้าที่และอุปกรณ์เพื่อปฏิบัติงานบำรุงรักษาตามแผนการปฏิบัติงานที่กำหนด
5. ตรวจสอบและรวบรวมรายงานผลการปฏิบัติงานในสนามเพื่อเสนอหัวหน้าโครงการ
6. ตรวจสอบผลงานที่ปฏิบัติได้จริงกับแผนปฏิบัติงานที่กำหนดเพื่อพิจารณาดำเนินการให้ เป็นไปตามแผนจัดทำงบประมาณการบำรุงรักษา



รูปที่ 2.5 งานบำรุงรักษาและขุดลอกคลองส่งน้ำ

งานบำรุงรักษาปกติและการซ่อมแซม

การบำรุงรักษาปกติและการซ่อมแซม เนื่องจากการใช้งานซึ่งต้องการเครื่องจักร วัสดุ และแรงงานมาสนับสนุน ดังนั้นจึงต้องเตรียมประมาณการเพื่อของบประมาณงานที่ต้องดำเนินการ ได้แก่ การสำรวจปริมาณงานการเตรียมประมาณราคา และเมื่อได้ดำเนินการบำรุงรักษาแล้วต้องจัดทำรายงานและประเมินผลงานด้วย กิจกรรมในการบำรุงรักษาปกติและการซ่อมแซม ประกอบด้วย

- งานขุดลอกตะกอนดินในคลองส่งน้ำ
- งานซ่อมแซมคอนกรีตคาคคลอง
- งานบำรุงรักษาหัวงานและคลองส่งน้ำ
- งานกำจัดวัชพืช
- งานซ่อมแซมอาคารชลประทาน
- งานซ่อมแซมคันคลองส่งน้ำ
- งานขุดลอกคลองระบายน้ำ

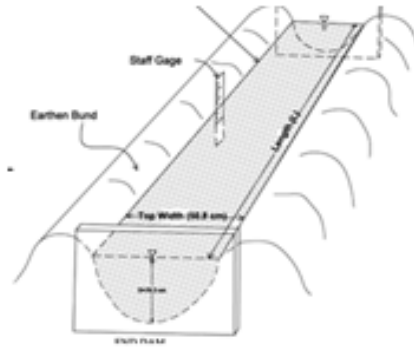


รูปที่ 2.6 งานขุดลอกตะกอนดินคลองส่งน้ำ และคลองที่มีวัชพืชและการแตกร้าตามผนังคลอง

2.7 การจัดการสูญเสียน้ำในคลองชลประทาน

2.7.1 การจัดการสูญเสียน้ำโดยวิธีระบบบ่อเก็บกักน้ำ (Ponding Method) (กอบเกียรติ ผ่องพุดิ-2542)

การทดสอบโดยวิธีระบบบ่อเก็บกักน้ำ (Ponding Method) จุดประสงค์เพื่อเรียนรู้ถึงประสิทธิภาพของวิธีการคาดหรือวัสดุที่นำมาคาด เพื่อหาอัตราการสูญเสียน้ำที่เกิดขึ้นในคลองส่งน้ำ การก่อสร้างบ่อเก็บกักซึ่งคั่นน้ำถูกสร้างขึ้นมาได้อย่างไรก็ขึ้นอยู่กับขนาดของคลองและวัสดุที่มีอยู่ เชื่อกันน้ำอาจจะสร้างมาจากผ้าใบหรือพลาสติกที่วางบนพื้น โดยมีขอนไม้วางทับข้างบน และมีเศษวัสดุวางตามมุมขอบของหน้าตัดนั้น โดยทั่วไป เชื่อกันน้ำเหล่านี้จะถูกจำกัดในคลองขนาดเล็กที่มีความลึกของน้ำน้อยกว่าเมตร ผ้าใบขนาดใหญ่ที่มีน้ำหนักมากที่สามารถกั้นน้ำได้โดยทั่วไปแล้วมักจะมียอรั่วรั่วเล็กน้อย หรืออาจจะนำวัสดุที่เป็นพลาสติกที่มีน้ำหนักมากมาใช้ได้เช่นกัน การทดสอบบ่อเก็บกักน้ำสามารถทำได้โดยใช้อุปกรณ์ เช่น ไม้วัดระดับน้ำ และเครื่องบันทึกระดับน้ำ เพื่อหาระดับความสูงของผิวน้ำ การเติมน้ำลงในบ่อเก็บกักน้ำที่ใช้ทดลองอาจจะทำได้โดยการปล่อยน้ำลงมาตามแรงโน้มถ่วงของโลกหรือโดยการสูบน้ำซึ่งวิธีการที่ใช้จะขึ้นกับสถานที่ตั้งและขนาดของคลอง การอ่านค่าระดับ การวัดอัตราการรั่วไหลของผิวน้ำจะเริ่มขึ้นหลังจากที่มีการเติมน้ำลงไป ในบ่อเก็บกักน้ำเรียบร้อยแล้ว โดยการติดตั้งเครื่องมือวัดระดับน้ำ และเครื่องบันทึกระดับน้ำจะเริ่มทำงาน ข้อมูลที่ควรบันทึก เวลาในการอ่านแต่ละครั้งควรจะอยู่ในช่วงเวลา 5 นาที การคำนวณการสูญเสีย ข้อมูลการสูญเสียน้ำเนื่องจากการซึมผ่านจะสามารถคำนวณได้ โดยคอมพิวเตอร์หรือด้วยมือก็ได้และขึ้นอยู่กับความกว้างของผิวน้ำ และเส้นรอบรูปเปียกที่ทราบของบ่อเก็บกักน้ำเพื่อวัดระดับน้ำในคลองนั้น



รูปที่ 2.7 การวัดการสูญเสียน้ำโดยวิธี Ponding Method

2.7.2 การวัดการสูญเสียน้ำโดยวิธี Inflow - Outflow (กอบเกียรติ ผ่องพุดิ, 2542)

การวัดการสูญเสียน้ำแบบ Inflow - Outflow คือ การตรวจวัดปริมาณน้ำที่จุดต้นทางกับที่จุดปลายทาง โดยการใช้เครื่องวัดกระแสไฟฟ้า (Current Meter) ซึ่งแสดงอัตราการส่วนการสูญเสียน้ำขณะส่งน้ำที่เกิดจากการรั่วซึมของน้ำในคลองส่งน้ำ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{อัตราการส่วนสูญเสียน้ำ} = \frac{\text{อัตราการไหลที่จุดต้นทาง} - \text{อัตราการไหลที่จุดปลายทาง}}{\text{ระยะทางระหว่างจุดต้นทางกับปลายทาง}}$$

อัตราการรั่วซึมจะมีหน่วยเป็นอัตราความสูญเสียของการส่งน้ำต่อหน่วยระยะทางซึ่งกรณีดังกล่าวนี้สามารถตรวจวัดเป็นอัตราความสูญเสียของการน้ำต่อระยะทาง 1000 เมตรได้ดังนี้ คือ

อัตราการสูญเสียน้ำขณะส่งน้ำต่อระยะทาง 1000 เมตร

$$\text{อัตราการส่วนสูญเสียน้ำ} = \frac{\text{อัตราการไหลที่จุดต้นทาง} - \text{อัตราการไหลที่จุดปลายทาง}}{\text{ระยะทาง(เมตร)ระหว่างจุดต้นทางกับปลายทาง}} \times 1000$$