# บทที่ 2
# งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การทำวิจัยในครั้งนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงของผนังอิฐก่อโบราณแบบ Full-scale ใน 2 กรณี อันได้แก่ พฤติกรรมการรับแรงของผนังอิฐก่อโบราณแบบผนังเปล่า และแบบเสริมวัสดุ Glass Fiber Reinforce Polymer (GFRP) โดยให้แรงกระทำทางด้านบน แล้วเปรียบเทียบพฤติกรรมของผนังทั้ง 2 กรณีเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการบูรณะโบราณสถานต่อไปในอนาคต

การวิจัยนี้อิฐโบราณที่นำมาทดสอบ เป็นอิฐใหม่สำหรับการก่อสร้างและบูรณะโบราณสถาน ที่มีการผลิตในปัจจุบันที่ ตำบลลุมพลี จังหวัดพระนครศรีอยุธยา โดยได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับแนวความคิด ทฤษฎี วรรณกรรมหรือผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

## 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อานนท์ (2550) การเสริมโครงสร้างภายนอกด้วยการติดหรือรัดด้วยวัสดุเสริมกำลัง เช่น แผ่นไฟเบอร์พลาสติกเสริมกำลัง วิธีนี้ไม่ทำให้น้ำหนักเดิมเพิ่มขึ้นและไม่ต้องยุ่งยากซับซ้อน ไม่ทำให้รูปร่างของโครงสร้างเปลี่ยนไปจากเดิมและเพิ่มความยืดหยุ่นของโครงสร้างได้ด้วย วัสดุไฟเบอร์ใยแก้วเสริมกำลังประกอบด้วย ไฟเบอร์ซึ่งแทรกอยู่ในโพลิเมอร์เมทริกซ์จะแสดงคุณสมบัติหลายอย่าง ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการเสริมกำลังให้กับวัสดุโครงสร้างได้เป็นอย่างดี วัสดุไฟเบอร์พลาสติกเสริมกำลังจะสามารถรับแรงดึงได้สูงในทิศทางการเรียงตัวของไฟเบอร์ อย่างไรก็ตาม วัสดุไฟเบอร์พลาสติกเสริมกำลังจะไม่แสดงจุดคราก แต่จะแสดงคุณสมบัติยืดหยุ่นจนกระทั่งฉีกขาด การตอบสนองของวัสดุไฟเบอร์พลาสติกเสริมกำลังต่อแรงดึงในแนวแกนจะเป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นกับความเครียดในแนวแกน ส่วนการตอบสนองของวัสดุไฟเบอร์พลาสติกเสริมกำลังต่อแรงอัดในแนวแกนจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของปริมาตรของไฟเบอร์ การวิบัติของวัสดุไฟเบอร์พลาสติกเสริมกำลังภายใต้แรงอัดจะเกิดขึ้นเมื่อไฟเบอร์ถูกทำให้เคลื่อนที่ไปทางด้านข้างซึ่งปรากฏการณ์นี้ถูกเรียกว่า การโก่งของไฟเบอร์ การตอบสนองของวัสดุไฟเบอร์พลาสติกเสริมกำลังต่อแรงที่ตั้งฉากกับแรงดึงนั้นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของไฟเบอร์และเมทริกซ์ แรงกระทำระหว่างไฟเบอร์และเมทริกซ์และกำลังของพันธะระหว่างไฟเบอร์และเมทริกซ์ โดยทั่วไปแล้วความสามารถในการต้านทานแรงที่ตั้งฉากกับแรงดึงนั้นจะมีค่าน้อย ส่วนความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนของวัสดุไฟเบอร์พลาสติกเสริมกำลังนั้นไม่สามารถวัดได้โดยตรง โดยส่วนมาก

แล้วการวิบัติด้วยแรงเฉือนของวัสดุไฟเบอร์พลาสติกเสริมกำลังจะเกิดขึ้นเมื่อวัสดุเมทริกซ์เกิดการเคลื่อนที่ขนานกับไฟเบอร์

สุพจน์ และคณะ(2550) การแก้ปัญหาการชำรุดของโครงสร้างกระทำได้โดยการนำแผ่นเส้นใยคาร์บอน ซึ่งเป็นวัสดุที่สามารถต้านทานแรงดึงได้สูง มาช่วยเสริมในลักษณะแผ่นหรือแถบและฉาบทับด้วยอีพอกซี่ เพื่อช่วยรับแรงดึงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างที่ชำรุด การเสริมแถบเส้นใยคาร์บอน (CFEC) บนโครงสร้างมักจะใช้เป็นแถบผืนใหญ่ปูใต้ท้องพื้นหรือห่อหุ้มท้องคาน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการเสริมเหล็กในโครงสร้างคอนกรีต เหล็กหน้าตัดเล็กให้ค่าแรงยึดเหนี่ยวและการกระจายแรงได้ดีกว่าการใช้เหล็กหน้าตัดใหญ่ที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน การเสริมเส้นใยคาร์บอนแบบแผ่นจะสูญเสียเส้นใยคาร์บอนส่วนหนึ่ง จากการซ้อนทับกันตรงบริเวณจุดไขว้กันของแถบเส้นใย ดังนั้นถ้าหากนำเส้นใยคาร์บอนมาถักทอในลักษณะของตาข่าย (CMEC) จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้เส้นใยคาร์บอนได้มากกว่า การเสริมแผ่นคาร์บอนแบบแถบ โดยเฉพาะการเสริมตาข่ายเส้นใยคาร์บอนในแผ่นพื้นจะมีประสิทธิภาพในการรับแรง มากกว่าการเสริมตาข่ายเส้นใยคาร์บอนแบบปะใต้ท้องพื้นและยังมีราคาถูกกว่า โดยระยะความกว้างช่องตาข่ายไม่มีผลสำหรับการเสริมตาข่ายแบบปะใต้ท้องพื้น แต่ระยะช่องตาข่ายที่ถี่จะช่วยให้การรับแรงของการเสริมตาข่ายเส้นใยแบบเสริมในพื้นดีกว่าช่องตาข่ายที่ห่าง

ประวีณ (2550) พฤติกรรมรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดาภายใต้แรงดัดสลับทิศ (Reversed Cyclic Loading) จะพบว่ากำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตลดลง เมื่อมีการโก่งตัวเพิ่มขึ้น เนื่องจากคอนกรีตเกิดการแตกร้าวและหลุดกะเทาะออก การนำเส้นใยสั้นขนาดเล็กมาใช้ผสมในคอนกรีต เรียกว่า FRC (Fiber Reinforced Concrete) เพื่อช่วยปรับปรุงพฤติกรรมภายใต้แรงดึงของคอนกรีต และลดปริมาณการใช้เหล็กเสริมสำหรับควบคุมการหดตัวและการขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิของคอนกรีต โดยทั่วไปเส้นใยที่ใช้อาจทำด้วยเหล็กกล้าหรือโพลิเมอร์ และจะใช้ในปริมาณระหว่าง 0.05-0.5 %โดยปริมาตรของคอนกรีต ซึ่งการใช้งานในลักษณะนี้ ไม่ช่วยให้กำลังรับแรงดึงของคอนกรีตเพิ่มขึ้น แต่จะช่วยควบคุมไม่ให้รอยร้าวขยายตัวกว้างขึ้น วัสดุพิเศษของ FRC ที่เรียกว่า HPFRCC (High Performance Fiber Reinforced Cement Composites) โดยหลังจากที่หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในวัสดุมีค่าถึงกำลังรับแรงดึงของมอร์ต้าร์ มอร์ต้าร์ก็จะเกิดการแตกร้าว แรงดึงที่เกิดขึ้นจะถูกส่งผ่านไปยังเส้นใยที่เสริมอยู่ เมื่อแรงดึงเพิ่มขึ้นรอยร้าวที่เกิดขึ้นตอนแรกจะยังไม่ขยายตัวออก แต่จะเกิดรอยร้าวใหม่เพิ่มขึ้นมากมาย (Multiple Cracking) พร้อมกับกำลังรับแรงดึงที่เพิ่มขึ้น ซึ่งพฤติกรรมช่วงนี้คล้ายกับพฤติกรรมการแข็งตัวเพิ่ม (Strain Hardening) ของเหล็ก จึงเรียกช่วงนี้ว่า PseudoStrain-Hardening กำลังรับแรงดึงจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงจุดๆหนึ่งที่การยืด เนื่องจากแรงดึงจะไปรวมตัวอยู่ที่รอยร้าวหนึ่ง (Localization) และ

จะนำไปสู่การวิบัติของตัวอย่าง พฤติกรรมของวัสดุ HPFRCC สามารถรับแรงดึงได้เกินกว่ากำลังรับแรงดึงของมอร์ต้าร์ และสามารถคงกำลังรับแรงดึงไว้ที่ความเครียดสูงกว่าความเครียดที่จุดแตกร้าวมาก นั่นคือ HPFRCC มีความเหนียว(Ductility) สูงกว่าคอนกรีต มอร์ต้าร์ หรือ FRC มาก จากพฤติกรรมการรับแรงดึงของ HPFRCC ทำให้สามารถนำHPFRCC มาใช้ในการรับแรงดึงในชิ้นส่วนโครงสร้างได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งในโครงสร้างที่ต้องรับแรงสลับทิศ เช่น แรงที่เกิดจากแผ่นดินไหว เนื่องจากโครงสร้างชนิดนี้ต้องสามารถเปลี่ยนรูปร่างได้มากโดยไม่เกิดการวิบัติ

นิพนธ์ (2550) โพลีเมอร์เสริมใยคาร์บอน (Carbon Fiber Reinforced Polymer: CFRP) เป็นวัสดุที่มีกำลังดึงสูงมาก ไม่เกิดสนิม น้ำหนักเบา ทำให้มีการนำมาใช้เสริมกำลังโครงสร้างแพร่หลายมากขึ้น เช่นสะพาน อาคาร พื้นที่จอดรถ อย่างไรก็ตาม วัสดุนี้มีข้อจำกัดหลายอย่าง เช่น มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นตรง (linear elastic) จนวิบัติ ทำให้มีความเหนียวน้อย และมีราคาสูงกว่าเหล็กมากเมื่อเทียบตามน้ำหนักวัสดุ แต่ถ้าเทียบราคาต่อกำลังแล้วจะต่างกันน้อยลง นอกจากนั้น มีค่าการขยายตัวเนื่องจากความร้อนไม่เท่ากับคอนกรีต และเมื่อมีอุณหภูมิสูง อาจเสื่อมสภาพเร็วกว่าปกติหรืออาจวิบัติได้ โพลีเมอร์เสริมเส้นใย (Fiber-reinforced polymers, FRP) ได้กลายมาเป็นตัวเลือกในการใช้แทนเหล็กเส้นที่เสริมในคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา เนื่องจากวัสดุ FRP ซึ่งอาจเสริมด้วยเส้นใยชนิดต่าง ๆ เช่น คาร์บอน อารามิด (aramid) และแก้ว ไม่นำกระแสแม่เหล็กและไม่ผุกร่อนเป็นสนิม จึงขจัดปัญหาเรื่องการเหนี่ยวนำกระแสแม่เหล็กไฟฟ้าและการเป็นสนิม และกำลังดึงที่สูงของมันทำให้เหมาะสำหรับรับแรงดึง อย่างไรก็ดี พฤติกรรมทางกลของการเสริมแรงด้วย FRP ต่างจากการพฤติกรรมของเหล็กเสริมธรรมดา วัสดุ FRP มีพฤติกรรมแบบ anisotropic คือกำลังของมันขึ้นอยู่กับทิศทางกำลังดึงที่สูงของมันอยู่ในทิศทางของเส้นใยเท่านั้น จึงมีผลต่อกำลังเฉือนและแรงแบบเดือย (dowel action) ของแท่ง FRP และต่อการยึดเหนี่ยว (bond) ของแท่ง FRP ต่อคอนกรีต นอกจากนั้น การออกแบบต้องคำนึงถึงการที่แท่ง FRP ไม่คราก (yield) แต่ยืดหยุ่นจนขาดอย่างฉับพลันโดยไม่มีการเตือนล่วงหน้าด้วย

หัตถชัย และคณะ (2547) พฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกในแนวแกนของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยการหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์ จะทำให้โครงสร้างเหนียวขึ้นและความสามารถในการรับแรงจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณ และทิศทางของคาร์บอนไฟเบอร์ที่ใช้ ในกรณีของเสาที่รับแรงในแนวแกนเพียงอย่างเดียว การหุ้มไฟเบอร์เป็นช่วงในแนวดิ่งจะไม่มีผลต่อกำลังมากเท่าการหุ้มในแนวราบ เนื่องจากการหุ้มรอบในแนวราบจะโอบรัดคอนกรีต และทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นจากการถูกโอบรัด (Confinement) เสาจะมีค่ากำลังรับแรงอัดตามแนวแกนเพิ่มขึ้นประมาณ 14% ของกำลังเดิม ในขณะที่การหุ้มเสาทั้งต้นจะให้กำลังที่เพิ่มขึ้นประมาณ 22-60% ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดหน้าตัดเสา หน้าตัดเสาที่มีขนาดใหญ่จะได้รับผลของการโอบ

รัดน้อยกว่าหน้าตัดขนาดเล็ก เนื่องจากเสาขนาดเล็กเมื่อมีการลบมุมเพื่อติดตั้งคาร์บอนไฟเบอร์แล้ว จะมีลักษณะเข้าใกล้เสากลมมากกว่าเสาที่มีขนาดใหญ่จึงทำให้ประสิทธิภาพในการโอบรัดคอนกรีตมีมากกว่า

สิทธิชัย (2544) พลาสติกเสริมเส้นใย โดยเฉพาะพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน ถูกนำมาใช้ในการเสริมกำลังและซ่อมแซมคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างแพร่หลาย เนื่องจากความสะดวกและรวดเร็วในการดำเนินการ ไม่ทำให้รูปร่างของโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไปมากนัก และมีความคงทนสูง การจัดวางและติดตั้งแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยเข้ากับองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก จะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกับการจัดวางเหล็กเสริมให้กับองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก นอกจากนั้นแล้ว การเสริมกำลังและซ่อมแซมดังกล่าวจะสามารถเพิ่มกำลังให้กับโครงสร้างเป็นอย่างมาก แต่การวิบัติขององค์อาคารที่ถูกเสริมกำลังและซ่อมแซมดังกล่าว จะต้องถูกกำหนดให้มีรูปแบบที่ค่อยเป็นค่อยไปและไม่รุนแรง (gradual and non-catastrophic failure) และจะต้องไม่เกินกำลังที่ยอมให้อย่างปลอดภัยของโครงสร้างเดิม เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นกับชีวิตและทรัพย์สิน

Mirmiran และคณะ (1997) เสนอว่า แผ่นไฟเบอร์คาร์บอนเสริมกำลังสามารถเพิ่มกำลังอัดและความแข็งแรงให้กับเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก และเสาคอนกรีตเสริมเหล็กมีคุณสมบัติการยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นด้วยเมื่อเสาถูกรัดด้วยแผ่นไฟเบอร์

## 2.2 ความหมายของวัสดุก่อ

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (2553) ได้นิยามความหมายของคำไว้ในมาตรฐานสำหรับอาคารวัสดุก่อไว้ดังนี้

ก้อนวัสดุก่อตัน หมายถึง ก้อนวัสดุก่อซึ่งมีเนื้อที่หน้าตัดในทุกระนาบ ซึ่งขนานกับผิวหน้าที่รับน้ำหนักตั้งแต่ร้อยละ 75 ของเนื้อที่หน้าตัดรวม ซึ่งวัดในระนาบเดียวกันขึ้นไป

มอร์ต้าร์ หมายถึง ส่วนผสมเหลว ๆ ของวัสดุที่เป็นตัวประสานมวลรวมและน้ำ

เกร้าท์ หมายถึง ส่วนผสมของวัสดุที่เป็นเชื้อประสานและมวลรวมซึ่งจัดส่วนปฏิภาคให้มีความข้นเหลวพอดีที่จะเทหรือสูบได้ โดยวัสดุที่เป็นส่วนผสมไม่เกิดการแยกแยะ

งานวัสดุ หมายถึง งานก่อสร้างที่ประกอบด้วยก้อนวัสดุก่อ ซึ่งวางเรียงกันในมอร์ต้าร์หรือเกร้าท์

## 2.3 ขนาดและคุณลักษณะของอิฐก่อ

2.2.1 ขนาดของอิฐก่อ

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2517) ได้กำหนดประเภท ขนาดของอิฐก่อสร้างสามัญ โดยแบ่งประเภทของอิฐก่อสร้างสามัญไว้ 2 ประเภท ดังนี้

ประเภทที่ 1 อิฐขนาดเล็ก (อิฐมอญ) หมายถึง อิฐที่มีลักษณะเป็นก้อนสี่เหลี่ยมตัน ผิวไม่สู้เรียบ ทำด้วยมือหรือเครื่องจักร เหมาะสำหรับใช้ก่อผนังหรือกำแพงที่ฉาบปูน

ประเภทที่ 2 อิฐขนาดใหญ่ หมายถึง อิฐที่มีลักษณะเป็นก้อนสี่เหลี่ยมตัน ใหญ่กว่าอิฐมอญ ผิวหน้าเรียบ มีร่องสำหรับยึดปูนก่อทำด้วยเครื่องจักร เหมาะสำหรับก่อผนังหรือกำแพง

ขนาดและความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้สำหรับอิฐประเภทที่ 1 และประเภทที่ 2 ความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้เป็นไปตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ขนาดความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้และขีดจำกัดในการทดสอบ หน่วยเป็นมิลลิเมตร [4]

| ประเภทที่ | ขนาด | | | ขีดจำกัดในการทดสอบอิฐจำนวน 20 แผ่น | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ยาว | กว้าง | หนา | ยาว | กว้าง | หนา |
| 1 | 140 ± 5 | 65 ± 3 | 40 ± 2 | 2,700 ถึง 2,900 | 1,240 ถึง 1,360 | 760 ถึง 840 |
| | 160 ± 5 | 65 ± 3 | 40 ± 2 | 3,100 ถึง 3,300 | 1,240 ถึง 1,360 | 760 ถึง 840 |
| | 190 ± 5 | 90 ± 3 | 40 ± 2 | 3,700 ถึง 3,900 | 1,740 ถึง 1,860 | 760 ถึง 840 |
| 2 | 190 ± 5 | 90 ± 3 | 65 ± 2 | 3,700 ถึง 3,900 | 1,740 ถึง 1,860 | 1,260 ถึง 1,340 |
| | 190 ± 5 | 90 ± 3 | 65 ± 2 | 3,700 ถึง 3,900 | 1,740 ถึง 1,860 | 1,740 ถึง 1,860 |

2.2.2 คุณลักษณะที่ต้องการ

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2517) ได้กำหนดคุณลักษณะที่ต้องการของอิฐไว้ดังนี้

1) ผลิตภัณฑ์ที่สำเร็จรูปต้องมีขนาดตามตารางที่ 2.1 โดยมีลักษณะและคุณสมบัติอื่น ๆ ดังต่อไปนี้

- เผาสุกและมีสีสม่ำเสมอตลอดทั้งแผ่น
- มีความแข็งแรงทนทานตามที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2
- มุมทุกมุมควรเป็นมุมฉาก
- รูปร่างและขนาดสม่ำเสมอกัน
- เนื้อแน่นและไม่มีรอยแตกร้าว

2) คุณสมบัติทางกายภาพ

- แรงอัด (Compressive Strength) ตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2.2
- การดูดซึมน้ำ (Water Absorption) ตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แรงอัดและการดูดซึมน้ำของอิฐตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม [4]

| ประเภทที่ | ยาว × กว้าง × หนา<br>cm | แรงอัดต่ำสุด<br>$kg/cm^2$ | การดูดซึมน้ำสูงสุด<br>ร้อยละของน้ำหนัก<br>อิฐ |
|---|---|---|---|
| 1 | 14.0 × 6.5 × 4.0 | 35.7 | 25 |
| | 16.0 × 6.5 × 4.0 | 35.7 | 25 |
| | 19.0 × 9.0 × 4.0 | 35.7 | 25 |
| 2 | 19.0 × 9.0 × 6.5 | 152.8 | 15 |
| | 19.0 × 9.0 × 9.0 | 152.8 | 15 |

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยได้กำหนดคุณภาพของวัสดุไว้ดังนี้

1) หากมิได้ระบุเป็นอย่างอื่น วัสดุที่ใช้ในงานวัสดุก่อคอนกรีตจะต้องมีคุณสมบัติตรงตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของกระทรวงอุตสาหกรรม หรือมาตรฐานสากล

2) มอร์ต้าร์ และ เกร้าท์

- หากมิได้มีการระบุเป็นอย่างอื่น มอร์ต้าร์ และ เกร้าท์ จะต้องมีคุณสมบัติตรงตามมาตรฐานสากลที่เหมาะสม

- ห้ามใช้แคลเซียมคลอไรด์ หรือสารผสมเพิ่มซึ่งมีแคลเซียมคลอไรด์กับมอร์ต้าร์หรือ เกร้าท์ ซึ่งมีเหล็กเสริม เหล็กปลอก หรือเหล็กยึดอื่น ๆ ฝังอยู่

ในกรณีที่มิได้มีการหากำลังอัดของวัสดุก่อคอนกรีตโดยวิธีทดสอบล่วงหน้า และก้อนวัสดุก่อ มอร์ต้าร์ตลอดจนฝีมือการทำงานตรงตามเกณฑ์กำหนดในมาตรฐานแล้ว อาจคิดค่าหน่วยแรงอัดที่ยอมให้โดยเฉลี่ยค่ากำลังอัดของวัสดุก่อทั้งหมดจากค่าตามตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 กำลังอัดของวัสดุก่อคิดเนื้อที่รวมสำหรับวัสดุก่อชนิดก้อนตัน [4]

| กำลังอัดของก้อน ($kg/cm^2$) | กำลังอัดของวัสดุก่อทั้งหมด $f'_m$ ($kg/cm^2$) |
|---|---|
| 70 ถึง 105 | 63 ถึง 80 |
| 106 ถึง 175 | 81 ถึง 110 |
| 176 ถึง 280 | 111 ถึง 140 |
| 281 ถึง 420 | 141 ถึง 170 |
| เกิน 420 | เกิน 170 |

หน่วยแรงที่ยอมให้ในงานวัสดุก่อคอนกรีตไม่เสริมเหล็ก

ค่าหน่วยแรงอัดที่ยอมให้ในงานวัสดุก่อคอนกรีตไม่เสริมเหล็กจะต้องไม่เกินค่าต่อไปนี้

$$\text{หน่วยแรงตามแกน} \qquad 0.20\, f'_m \tag{2.1}$$

$$\text{หน่วยแรงดัด} \qquad 0.30\, f'_m \tag{2.2}$$

หากไม่มีผลทดสอบมาแสดงจนเป็นที่พอใจแล้วค่าหน่วยแรงเฉือนและแรงดึงอันเกิดจากการดัดสำหรับงานวัสดุก่อคอนกรีตไม่เสริมเหล็กจะต้องไม่เกินค่าที่กำหนดให้ตามตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 หน่วยแรงเฉือนและหน่วยแรงดึงที่เกิดจากการตัดสำหรับงานวัสดุก่อคอนกรีตไม่เสริมเหล็ก [4]

| หน่วยแรงที่ยอมให้ | งานก่อสร้างด้วยวัสดุก่อ | | | |
|---|---|---|---|---|
| | ชนิดก้อนกลวง | | ชนิดก้อนตัน หรือ เกร้าท์ | |
| | มอร์ต้าร์ กำลังสูง (ฉ) | มอร์ต้าร์ ธรรมดา (ช) | มอร์ต้าร์ กำลังสูง (ฉ) | มอร์ต้าร์ ธรรมดา (ช) |
| หน่วยแรงเฉือน, $kg/cm^2$ หน่วยแรงดึงในการดัด (ข) | 2.4 (ง) | 1.6 (ง) | 2.4 (ง) | 1.6 |
| ตั้งฉากกับรอยต่อทางราบ (ข) | 1.6 (ง) | 1.1 (ง) | 2.7 | 1.9 |
| ขนานกับรอยต่อทางราบ (ค) | 3.2 (ง) | 2.2 (ง) | 5.5 | 3.8 |

(ก) ในกรณีที่ไม่มีการควบคุมงานทางวิศวกรรมหรือสถาปัตยกรรมให้เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดให้ลดค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ต่าง ๆ ลงครึ่งหนึ่ง

(ข) ทิศทางของหน่วยแรงตั้งฉากกับชั้นรอยต่อราบ ตั้งดิ่งในงานวัสดุก่อธรรมดา

(ค) ทิศทางของหน่วยแรงขนานกับรอยต่อทางราบซึ่งจะอยู่ในแนวราบในงานวัสดุก่อสร้างธรรมดาในกรณีที่ก่อวัสดุก่อแบบเรียงตามขวางจะยอมให้เกิดหน่วยแรงดึงในแนวราบในวัสดุก่อไม่ได้

(ง) เนื้อที่สุทธิของชั้นมอร์ต้าร์

(ฉ) ในการคำนวณความต้านทานแรงดัด จะต้องถือว่าโมดูลัสหน้าตัดของผนังกลวงมีค่าเท่ากับผลรวมของโมดูลัสหน้าตัดของผนังแต่ละแผง

(ช) กำลังอัดสูงสุดที่อายุ 28 วัน ต้องไม่ต่ำกว่า 140 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร

(ซ) กำลังอัดสูงสุดที่อายุ 28 วัน ต้องไม่ต่ำกว่า 50 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร

## 2.4 ส่วนผสมและวิธีทำอิฐก่อ

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2517) ได้อธิบายส่วนผสมของอิฐและวิธีทำอิฐ ตามประเภทของอิฐไว้ดังนี้

ประเภทที่ 1 อิฐขนาดเล็ก (อิฐมอญ) วัสดุที่ใช้ในการทำได้แก่ ดินเหนียว หรือดินโคลน และวัสดุอื่น ๆ เช่น แกลบ ทราย ขี้เลื่อย อย่างใดอย่างหนึ่ง หรือหลาย ๆ อย่างรวมกันแล้วแต่ความเหมาะสม ถ้าเป็นการทำด้วยมือจะใช้ดินเหนียวผสมกบทรายหรือแกลบหรือใช้ดินโคลนผสมกับแกลบย่ำผสมน้ำอัดลงในแบบพิมพ์ไม้ ซึ่งวางอยู่บนลานดินที่เรียบ โดยโรยเถ้าแกลบบนลานดินและภายในแบบพิมพ์ เพื่อกันไม่ให้ดินผสมติดแบบพิมพ์ ปาดให้เรียบ ยกแบบพิมพ์ไม้ออกผึ่งไว้กลางลานดินให้แห้งแล้วจึงนำเข้าเตาเผา หากเป็นการทำด้วยเครื่องจักรจะใช้ดินเหนี่ยวผสมกับทรายหรือแกลบนำเข้าเครื่อง พ่นน้ำ นวด อัด รีด ออกมาเป็นแท่งยาว ตัดด้วยลวดเป็นแผ่นอิฐ ผึ่งให้แห้งแล้วจึงนำเข้าเตาเผา

ประเภทที่ 2 อิฐขนาดใหญ่ วัสดุที่ใช้ในการทำได้แก่ ดินเหนียว และวัสดุอื่น ๆ เช่น ทราย โดยใช้ดินเหนียวผสมกับทราย ย่ำผสมน้ำ อัดลงแบบไม้ ปาดให้เรียบแล้วยกแบบไม้ออก หรือนำเข้าเครื่อง นวด อัด รีดออกมาเป็นแท่งยาว ตัดด้วยลวดเป็นก้อนขนาดใหญ่กว่าแผ่นอิฐเล็กน้อย ผึ่งก้อนดินที่เตรียมไว้นี้ให้มีความชื้นพอสมควร นำเข้าเครื่องอัดให้แน่นเป็นก้อนอิฐตามขนาดที่ต้องการ ผึ่งให้แห้งแล้วจึงนำเข้าเตาเผา

สิทธิชัย แสงอาทิตย์ (2542) ได้อธิบายถึงกรรมวิธีการผลิตอิฐที่ทำด้วยมือไว้ดังนี้

2.4.1 การเลือกดิน

เป็นดินที่ไม่มีเม็ดทรายเจือปนมากเกินไปและไม่เป็นดินเหนียวมากเกินไปถ้าดินมีทรายมากจะทำให้อิฐนั้นร่อนและร่วน และถ้าดินเป็นดินเหนียวมากเกินไป เมื่อนำไปตากแดดจะเกิดการแตกร้าวค่อนข้างสูง

2.4.2 การขุดและการย่ำดิน

ขุดดินและแยกเอาเศษไม้หรือสารอินทรีย์ที่เจือปนอยู่ออกให้หมด จากนั้นทำการผสม

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

แกลบประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรของดินและย่ำดินให้ละเอียดและให้เข้ากันดี ถ้าดินมีลักษณะแห้งจนเกินไปก็ให้เติมน้ำได้ตามสมควร พอที่จะทำการย่ำดินและเทลงในแบบได้สะดวก

การผสมแกลบจะช่วยให้เนื้อดินมีความโปร่งมากขึ้น หลังจากที่แกลบถูกความร้อนเผาไหม้ไปจากเนื้ออิฐแล้ว จะทำให้อิฐมีน้ำหนักเบาและเป็นฉนวนกันความร้อนได้ดีขึ้น นอกจากนั้นแล้วยังป้องกันไม่ให้อิฐแตกในเวลาตากแดด และป้องกันไม่ให้ติดแม่พิมพ์อีกด้วย

2.4.3 การพิมพ์แบบ

แบบที่ใช้หล่อดินให้เป็นแผ่นอิฐจะเป็นแบบที่ทำด้วยไม้ 4 ด้าน โดยจะมีเฉพาะด้านข้าง (ไม่มีส่วนบนและส่วนล่าง) ไม้ที่ทำแบบเป็นไม้ที่ทนทานต่อน้ำและความชื้น ผิวด้านในใสเรียบขนาดของแบบจะใหญ่กว่าขนาดของอิฐที่ต้องการประมาณ 5-10 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากดินที่ตากแห้งแล้วจะมีขนาดที่เล็กลง ในขั้นตอนนี้ เริ่มต้นทำการจุ่มแบบลงในน้ำ แล้ววางแบบลงบนพื้นราบ จากนั้นนำดินเหนียวที่ผสมได้ที่แล้วเทลงในแบบและทำการอัดดินโดยใช้ไม้ตบดินให้แน่นโดยทั่ว สุดท้ายปาดดินส่ .นเกินออกให้เรียบเสมอไม้แบบและยกแบบออกจากก้อนดิน

2.4.4 การตากแดด

เมื่อถอดแบบออกแล้ว นำก้อนดินไปตากแดดให้แห้งสนิท ซึ่งระยะเวลาที่ใช้ในการตากแดดจะขึ้นอยู่กับฤดูกาล ถ้าทำในฤดูแล้งอาจใช้เวลาประมาณ 3-5 วัน ในฤดูอื่นๆ อาจจะต้องใช้เวลาประมาณ 7-8 วัน ในขั้นตอนนี้ต้องระวังอย่าให้ก้อนดินถูกฝน

2.4.5 การถากแต่งก้อนดิน

เมื่อก้อนดินแห้งสนิท ด้านข้างก้อนดินจะไม่เรียบ ต้องใช้มีดถากแต่งก้อนดินเพื่อให้ได้ก้อนอิฐที่เรียบสม่ำเสมอกัน ก่อนจะนำเข้าเตาเผาอิฐ

2.4.6 การเผาอิฐ

เมื่อตกแต่งก้อนดินแล้ว นำก้อนดินมาวางเป็นแถว แถวหนึ่งกว้างเท่ากับก้อนดินที่จะทำการเผา โดยเว้นระยะระหว่างแถวให้เท่าๆ กัน เพื่อที่จะใส่แกลบลงในช่องว่างระหว่างแถวได้โดยง่าย โดยทั่วไปแล้ว กองดินจะมีความกว้างประมาณ 4 เมตร ยาวประมาณ 6 ถึง 7 เมตร และสูงประมาณ 1.6 เมตร เมื่อกองเสร็จเรียบร้อยแล้ว นำก้อนอิฐที่เผาสุกแล้วมาล้อมกองดินทั้ง 4 ด้าน เพื่อกันความร้อนไม่ให้กระจายออกไปจากกองดินในขณะเผา จากนั้นเทแกลบลงไปให้เต็มทุกช่องว่างระหว่างแถว จากนั้นจุดไฟให้แกลบไหม้ เมื่อแกลบไหม้และยุบลงให้คอยเติมแกลบให้ได้ระดับอยู่

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 17 ส.ค. 2555
เลขทะเบียน 243296

เสมอ เผาอิฐเป็นเวลานานประมาณ 15 วัน แล้วรอจนอิฐเย็นตัวลง แล้วทำการลำเลียงอิฐไปเข้าโกดังเก็บไว้เพื่อรอการจำหน่ายต่อไป

## 2.5 คุณสมบัติของมอร์ต้าร์

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (2553) ได้กำหนดคุณสมบัติของมอร์ต้าร์สำหรับอาคารวัสดุก่อไว้ดังนี้

2.5.1 การวัดปริมาณวัสดุต้องกระทำด้วยความระมัดระวัง เพื่อให้ได้อัตราส่วนผสมตามที่กำหนดอยู่ตลอดเวลา ซึ่งอัตราส่วนผสมให้เป็นไปตามมาตรฐานสากลที่กำหนด

2.5.2 มอร์ต้าร์ผสมจะต้องคลุกวัสดุผสมต่าง ๆ เข้าด้วยกันในเครื่องผสมที่ใช้เครื่องจักรกลเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 3 นาที ความข้นเหลวของส่วนผสมจะต้องข้นที่สุดเท่าที่จะใช้งานได้ดี

2.5.3 ห้ามนำมอร์ต้าร์ซึ่งทิ้งไว้จากการผสมครั้งแรกเริ่มก่อตัว หรือไม่ได้ใช้ภายใน 2.5 ชั่วโมง มาใช้เป็นอันขาด สำหรับมอร์ต้าร์ซึ่งกระด้างเนื่องจากน้ำระเหยออกไป ให้ทำการผสมต่อเพื่อรักษาให้อยู่ในสภาพเทได้ แต่ทั้งนี้ต้องอยู่ภายในระยะเวลา 2.5 ชั่วโมงดังกล่าว

สำหรับชั้นและรอยต่อมอร์ต้าร์ที่ใช้ในก้อนวัสดุตันให้เรียบโดยยาด้วยมอร์ต้าร์เต็มหน้าทั้งรอยต่อทางหัวและทางราบ รอยต่อทางราบและทางตั้งต้องหนาไม่น้อยกว่า 9 มิลลิเมตรนอกจากจะระบุเป็นอย่างอื่น รอยต่อทางตั้งจะต้องอัดให้แน่น สำหรับรอยต่อที่ผิวด้านนอกให้ปาดให้เรียบหลังจากอัดมอร์ต้าร์ให้แน่นด้วยเครื่องมือรูปรีหรือกลม รอยต่อที่ผิวด้านในจะปาดมอร์ต้าร์ให้เรียบหรือกำหนดให้เป็นอย่างอื่นก็ได้ รอยต่อของวัสดุก่อที่ไม่ฉาบปูนได้ระดับดินจะต้องใช้เกรียงอัดมอร์ต้าร์ให้แน่น

Hendry และคณะ (1986) ได้แนะนำมอร์ต้าร์สำหรับวัสดุก่อว่าควรประกอบด้วยส่วนผสมของ ซีเมนต์ : ปูนขาว : ทราย ผสมเข้าด้วยกันตามมาตรฐาน BS 5628 สำหรับอิฐที่มีกำลังรับแรงค่อนข้างต่ำ ควรใช้มอร์ต้าร์ที่อ่อน โดยมีส่วนผสม 1 : 2 : 9 โดยปริมาตรการกำหนดปริมาณน้ำที่ใช้ผสม ควรใช้ในปริมาณที่พอเหมาะ โดยให้ความแข็งแรงของมอร์ต้าร์เพียงพอตามต้องการและเหมาะสมกับการดูดซึมน้ำของอิฐจะทำให้มีประสิทธิภาพของการยึดเหนียวระหว่างมอร์ต้าร์กับอิฐต่ำลง นอกจากนี้ปริมาตรน้ำยังมีผลกระทบต่อกำลังของมอร์ต้าร์ ซึ่งจะส่งผลไปยังความสามารถในการรับแรงอัดของวัสดุก่อด้วย

## 2.6 รอยต่อของผนังอิฐก่อ

โดยทั่วไปแล้ว รอยต่อที่ใช้ในผนังอิฐก่อสามารถแบ่งได้เป็น 6 แบบ คือ

2.6.1 รอยต่อแบบ Flush joint

เป็นการยาแนวให้เสมอหน้าอิฐโดยใช้เกรียงปาดเศษปูนที่เกินออกจากผิวหน้ากำแพง

2.6.2 รอยต่อแบบ Weather joint

เป็นการเซาะร่องปูนที่เกิดจากเกรียงกดลงไปตรงส่วนบนสุดของรอยต่อซึ่งจะช่วยระบายน้ำได้อย่างรวดเร็ว

2.6.3 รอยต่อแบบ Concave tooled joint

เป็นการเซาะร่องปูนก่อแบบเว้าโค้งจากการใช้อุปกรณ์ที่มีขอบโค้งมน

2.6.4 รอยต่อแบบ Struck joint

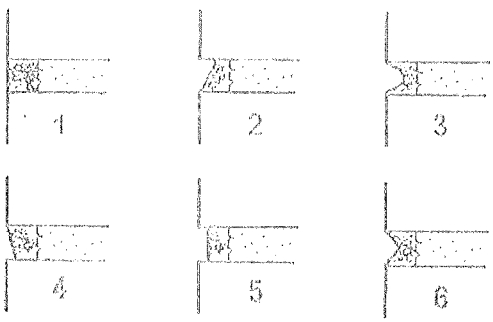
เป็นการเซาะร่องปูนก่อที่เกิดจากเกรียงกดลงไปตรงส่วนล่างสุดของรอยต่อซึ่งทำให้เกิดผิวลาดขึ้นที่มีทิศทางตรงกันข้าม

2.6.5 รอยต่อแบบ Raked joint

เป็นการเซาะร่องปูนที่เกิดจากการใช้อุปกรณ์ที่มีความเรียบเสมอกันโดยการเซาะลงไปในขณะที่ปูนยังไม่แข็งตัว

2.6.6 รอยต่อแบบ “V” tooled joint

เป็นการเซาะร่องปูนก่อแบบให้มีมุมลึกลงไปเป็นรูปตัววีจากการใช้อุปกรณ์ที่มีขอบสันเป็นรูปตัววี




รูปที่ 2.1 รอยต่อของผนังอิฐก่อ [9]

## 2.7 รูปแบบการเรียงอิฐ

2.7.1 รูปแบบการเรียงสามารถเรียงได้ 4 แบบ คือ

1) Running bond

เป็นรูปแบบการก่ออิฐที่นิยมมากที่สุดมีลักษณะการก่อแบบสับหว่างกันในแต่ละชั้นของการก่อ การก่อในลักษณะนี้ความสามารถในการรับแรงจะดีมาก

2) Stack bond

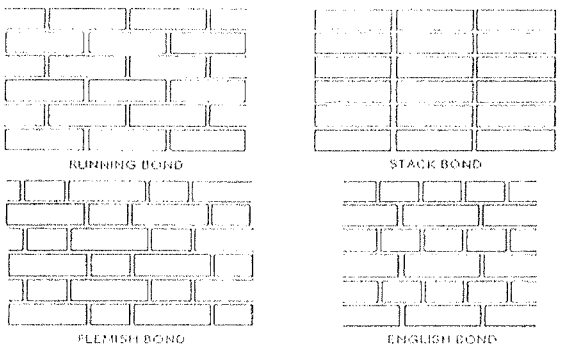
เป็นการก่ออิฐในลักษณะแนวเดียวกันหมดทั้งผนัง การก่อลักษณะนี้ไม่เป็นที่นิยม เนื่องจากรอยต่อของปูนก่ออยู่ในแนวเดียวกันทำให้ความสามารถในการรับแรงน้อย การวิบัติจะเกิดบริเวณแนวรอยต่อ

3) Flemish bond

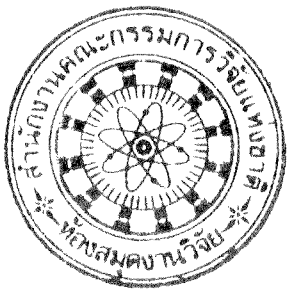
วิธีนี้เป็นอีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ เป็นการก่อในลักษณะการวางอิฐในแต่ละชั้นจะวางสลับกันระหว่างด้านยาวกับด้านกว้างของก้อนอิฐแต่จะก่อแบบสับหว่างในชั้นต่อไปเหมือนกับวิธีที่หนึ่ง

4) English bond

ลักษณะของชั้นแรกจะก่อในแนวเดียวกันหมดคือก่อตามแนวความยาวแต่ในชั้นที่สองจะเป็นการก่อตามความกว้าง




รูปที่ 2.2 รูปแบบการเรียงอิฐ [9]



## 2.8 ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของวัสดุก่อ

Curtin และคณะ (1995) กล่าวว่า กำลังรับแรงอัดโดยรวมของวัสดุก่อขึ้นอยู่กับปัจจัย 3 ประการ ประกอบด้วย

2.8.1 ความแข็งแรงของวัสดุได้แก่ ก้อนวัสดุก่อและมอร์ต้าร์ และรวมถึงการควบคุมคุณภาพในการผลิต การก่อสร้าง

2.8.2 พื้นที่หน้าตัดของวัสดุก่อ

2.8.3 ความสูงและความหนาหรืออัตราส่วนความชะลูดของวัสดุก่อที่กำลังรับแรงอัดของก้อนวัสดุที่เท่ากันกำลังแรงอัดโดยรวมของวัสดุก่อจะขึ้นอยู่กับกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์โดยหลังรับแรงอัดของวัสดุก่อจะมีค่าใกล้เคียงกับกำลังของมอร์ต้าร์

ปัจจัยอีกประการหนึ่งที่มีผลกระทบต่อกำลังของวัสดุก่อก็คือ ความหนาของรอยต่อ โดยที่ความหนาของรอยต่อที่ประสานด้วยมอร์ต้าร์ที่หนาขึ้น จะทำให้กำลังของวัสดุก่อมีค่าลดลง

## 2.9 อิฐที่ใช้ในการก่อสร้างและบูรณะโบราณสถาน

ชาติชาย (2539) ได้ศึกษาตัวอย่างอิฐจากโบราณสถานต่างๆ ในเกาะเมืองพระนครศรีอยุธยา พบว่าอิฐส่วนใหญ่ในสมัยอยุธยา มีลักษณะทางกายภาพ ทางเคมี และชนิดทางจุลสัณฐานที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าวิธีการทำอิฐและชนิดดิน ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้มีความคล้ายคลึงกัน และมีความต่อเนื่องถ่ายทอดกันมาตลอดสมัยอยุธยา อย่างไรก็ตามมีตัวอย่างอิฐบางตัวอย่างเมื่อพิจารณาทางด้านโบราณคดีและสถาปัตยกรรมของโบราณสถานแล้ว น่าสงสัยว่าอาจจะเป็นอิฐคนละสมัยหรือเป็นอิฐที่นำมาเสริมเติมภายหลัง แต่ก็สามารถตรวจสอบได้อย่างชัดเจนโดยวิธีการวิเคราะห์ปริมาณธาตุ อีกประการหนึ่งคือ ผลการศึกษาองค์ประกอบของอิฐในปัจจุบันที่ยังมีการผลิตอยู่ที่บ้านลุมพลี บริเวณริมคลองสระบัว ซึ่งอยู่ด้านเหนือของเกาะเมืองอยุธยามีลักษณะคล้ายคลึงกับอิฐส่วนใหญ่ในสมัยอยุธยา แสดงให้เห็นถึงเทคโนโลยีการผลิตอิฐที่สืบทอด นอกจากนั้นผลการวิเคราะห์อิฐโดยวิธี Thin Section พบว่าอิฐส่วนใหญ่ประกอบด้วยแร่ไมก้า ซึ่งพบว่าเป็นแร่ที่ปะปนในดินชุดท่าม่วง และราชบุรีซึ่งเป็นดินเหนียวที่แพระกระจายอยู่บริเวณสองฝั่งลำน้ำตอนบน

ของเกาะเมืองอยุธยาเท่านั้น แสดงให้เห็นชัดเจนว่าแหล่งผลิตอิฐแหล่งใหญ่ที่สุดในสมัยอยุธยาน่าจะเป็นบริเวณริมคลองสระบัว

สุดชาย (2543) ได้ดำเนินการทดสอบหาความสมารถในการรับแรงของอิฐสมัยต่างๆ ที่ใช้ก่อสร้างโบราณสถานภายในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา เพื่อหาแนวโน้มความเปลี่ยนแปลงกำลังแรงอัดของอิฐโบราณที่มีการผลิตในปัจจุบัน บริเวณริมคลองสระบัว ตำบลลุมพลี อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา เปรียบเทียบกับตัวอย่างอิฐโบราณที่หลุดร่วงจากโบราณสถานที่สามารถประมาณอายุการก่อสร้างได้ ตามตารางที่ 2.5 และ 2.6

ตารางที่ 2.5 ข้อมูลเบื้องต้นของตัวอย่างอิฐโบราณ [2]

| แหล่งตัวอย่าง | อายุโดยประมาณ (ปี) | ขนาด (ซม.) | | | น้ำหนัก (กรัม) | หมายเหตุ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | กว้าง | ยาว | หนา | | |
| 1.อิฐบ้านลุมพลี | 1 | 5.45 | 5.57 | 3.89 | 153 | ผลิตในปัจจุบัน |
| | | 5.42 | 5.47 | 4.13 | 180 | |
| | | 5.47 | 5.29 | 3.65 | 142 | |
| 2.อิฐภูเขาทอง | 50 | 5.34 | 5.15 | 5.65 | 224 | บูรณะในสมัยจอมพล ป. พิบูลสงคราม |
| | | 5.17 | 5.68 | 5.31 | 215 | |
| | | 5.23 | 5.62 | 5.79 | 226 | |

ตารางที่ 2.5 ข้อมูลเบื้องต้นของตัวอย่างอิฐโบราณ [2] (ต่อ)

| แหล่งตัวอย่าง | อายุโดยประมาณ (ปี) | ขนาด (ซม.) | | | น้ำหนัก (กรัม) | หมายเหตุ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | กว้าง | ยาว | หนา | | |
| 3.อิฐวัดขุนแสน | 130 | 5.11 | 5.15 | 3.86 | 139 | บูรณะในสมัย |
| | | 5.39 | 5.65 | 4.43 | 215 | พระบาทสมเด็จ |
| | | 5.29 | 5.50 | 4.58 | 185 | พระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว |
| 4.อิฐวัดหน้าพระเมรุ | 145 | 5.09 | 5.18 | 3.86 | 139 | สร้างในสมัย |
| | | 5.33 | 5.33 | 5.24 | 207 | พระบาทสมเด็จ |
| | | 5.11 | 5.18 | 5.24 | 197 | พระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว |
| 5.อิฐวัดพระราม | 240 | 4.79 | 4.51 | 4.88 | 121 | บูรณะในสมัย |
| | | 7.89 | 4.95 | 5.18 | 189 | พระบาทสมเด็จ |
| | | 4.29 | 4.34 | 4.76 | 143 | พระเจ้าอยู่หัวบรมโกศ |
| 6.อิฐวัดกุฎีดาว | 285 | 5.57 | 5.41 | 4.17 | 176 | เจดีย์ประธานสร้างในสมัย |
| | | 5.23 | 5.39 | 4.13 | 176 | สมเด็จพระเจ้าอยู่หัว |
| | | 5.45 | 5.52 | 4.04 | 177 | ท้ายสระ |
| 7.อิฐวัดสมณโกฏิ | 310 | 5.31 | 4.84 | 4.62 | 177 | สร้างในสมัย |
| | | 5.18 | 5.43 | 4.24 | 172 | สมเด็จ |
| | | 4.82 | 4.90 | 4.44 | 160 | พระนารายณ์มหาราช |
| 8.อิฐวัดวรเชษฐาราม | 385 | 4.38 | 5.95 | 4.28 | 166 | สร้างในสมัย |
| | | 5.45 | 5.49 | 5.57 | 237 | สมเด็จพระเอกาทศรถ |
| | | 4.50 | 5.72 | 5.31 | 161 | |
| 9.อิฐป้อมเพชร | 430 | 5.12 | 5.08 | 4.46 | 162 | สร้างในสมัย |
| | | 5.24 | 5.31 | 4.48 | 164 | สมเด็จ |
| | | 5.15 | 5.39 | 4.10 | 143 | พระมหาจักรพรรดิ์ |

ตารางที่ 2.6 สรุปค่าเฉลี่ยคุณสมบัติของอิฐโบราณจากการทดสอบ [2]

| แหล่งตัวอย่าง | หน่วยน้ำหนัก (ก./ซม.$^3$) | กำลังอัดประลัย (กก./ซม.$^2$) | โมดูลัสความยืดหยุ่น (กก./ซม.$^2$) | หมายเหตุ |
|---|---|---|---|---|
| 1. อิฐบ้านลุมพลี | 1.373 | 40.12 | 31,033 | |
| 2. อิฐภูเขาทอง | 1.383 | 41.61 | 41,200 | |
| 3. อิฐวัดขุนแสน | 1.403 | 57.19 | 26,633 | |
| 4. อิฐวัดหน้าพระเมรุ | 1.359 | 39.54 | 42,400 | |
| 5. อิฐวัดพระราม | 1.463 | 37.58 | 32,400 | |
| 6. อิฐวัดกุฎีดาว | 1.457 | 44.01 | 32,450 | |
| 7. อิฐวัดสมณโกฏิ | 1.475 | 50.12 | 37,033 | |
| 8. อิฐวัดวรเชษฐาราม | 1.387 | 49.97 | 32,650 | |
| 9. อิฐป้อมเพชร | 1.322 | 39.60 | 29,876 | |
| 10. อิฐพระปฐมเจดีย์ | 1.690 | 59.50 | 75,104 | วรศักดิ์ และคณะ (2539) |
| 11. อิฐภูเขาทอง (ยุคแรก) | 1.584 | 67.50 | 25,482 | สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย, 2540 |

ตารางที่ 2.7 คุณสมบัติของอิฐโบราณแยกตามกลุ่มอายุ [2]

| กลุ่ม | ช่วงอายุ (ปี) | กำลังอัดประลัย (กก./ซม.$^2$) | โมดูลัสความยืดหยุ่น (กก./ซม.$^2$) |
|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 40.12 | 31,033 |
| 2 | 50 – 200 | 46.11 | 36,744 |
| 3 | 200 – 350 | 43.90 | 33,961 |
| 4 | 350 - 410 | 44.79 | 31,263 |

## 2.10 มอร์ต้าร์ที่ใช้ในการก่อสร้างและบูรณะโบราณสถาน

สมชาติ (2540) ปูนที่มีคุณสมบัติเหมาะสมที่สุดสำหรับโบราณสถานก็คือ ปูนแบบโบราณ ซึ่งหมักจากปูนขาวนั่นเอง เพราะมีความแข็งแรงพอประมาณ มีความพรุน และความยืดหยุ่นค่อนข้างสูงพอเหมาะสำหรับกำแพงอิฐโบราณสถาน ซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน แตกต่างจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีความแข็งและทึบตันสูง มีการหดตัวมากและขาดความยืดหยุ่น การเตรียมปูนหมักแบบโบราณ มีขั้นตอนและรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.10.1 การเตรียมปูนขาวเพื่อใช้ทำปูนหมัก เริ่มจากการเผาหินปูนด้วยความร้อนสูง เพื่อไล่คาร์บอนไดออกไซด์ หินปูนจะแตกออกเป็นก้อนสีขาวใหญ่บ้างเล็กบ้างเรียกว่า ปูนดิบ ซึ่งจะนำไปดำเนินการเป็นมอร์ต้าร์ต่อไป

2.10.2 การหมักปูนดิบ ที่ทำให้ปูนดิบดูดน้ำ แล้วกลายสภาพเป็นปูนเหนียว ถ้าปูนดิบที่ได้มาจากโรงงานมีขนาดก้อนใหญ่เกินไป ให้เคาะออกเป็นก้อนเล็กๆ ก่อนหมัก เพื่อลดความรุนแรงจากปฏิกิริยาของก้อนปูนขาวในน้ำ นำปูนดิบไปแช่ในบ่อหมักปูน ใส่น้ำในบ่อหมักให้สูงกว่าปูนประมาณ 2.5 เซนติเมตรเป็นอย่างน้อย เมื่อใส่ปูนดิบลงในน้ำแล้วจะเกิดปฏิกิริยาปูนแตกตัวอย่างรุนแรง น้ำและปูนร้อนจัดจนอุณหภูมิขึ้นสูงถึงจุดเดือด ให้กวนปูนอยู่เรื่อยๆ จนกว่าปฏิกิริยาหยุด และน้ำในบ่อหมักแห้งจะได้ปูนขาวเหนียว นำปูนขาวเหนียวขึ้นจากบ่อหมัก ล้างน้ำร่อนผ่านตะแกรงขนาดตา 5 มิลลิเมตร เพื่อกรองเอาสิ่งปนเปื้อนหรือก้อนปูนที่ไม่ทำปฏิกิริยาหรือก้อนปูนขนาดใหญ่ออกไป เก็บปูนขาวเหนียวนี้ไว้ใต้น้ำ ให้น้ำอยู่สูงจากผิวปูนไม่น้อยกว่า 2.5 เซนติเมตรเป็นอย่างน้อย และหมักทิ้งไว้ประมาณ 14 วัน แต่ถ้าจะให้มีความเหนียวมากขึ้นต้องหมักไว้ 60 วัน

ขึ้นไป ปูนหมักนี้สามารถหมักเก็บไว้เป็นปี ปูนหมักที่มีอายุการหมักนานๆ จะแข็งตัว แต่ก็สามารถนำมาใช้งานได้เมื่อผสมน้ำแล้วตำให้ได้ที่

2.10.3 การผสมปูนกับทราย เมื่อหมักปูนจนได้ระยะเวลาตามกำหนดแล้วให้นำปูนหมักมาผสมกับทรายและปูนซิเมนต์ขาวโดยปริมาตรดังนี้

| | | |
|---|---|---|
| ปูนซีเมนต์ขาว | 1 | ส่วน |
| ปูนหมักร่อนแล้ว | 2 | ส่วน |
| ทรายหยาบ | 9 | ส่วน |

ผสมน้ำพอให้ปูนทรายเข้ากันดี จึงในไปใช้ก่ออิฐ

## 2.11 การเสื่อมสภาพของมอร์ต้าร์

อนพัช (2547) ทำการศึกษาการเพิ่มคุณสมบัติของมอร์ต้าร์ด้านการรับแรงดึงและด้านความเหนียวหรือลดการแตกร้าวโดยใช้เส้นใยเป็นตัวประสานระหว่างวัสดุผสมในมอร์ต้าร์เพื่อให้เกิดการยึดเหนี่ยวอย่างทั่วถึงในเนื้อมอร์ต้าร์ เป็นการพัฒนาการเสื่อมสภาพของมอร์ต้าร์ที่ใช้เป็นวัสดุก่อซึ่งมอร์ต้าร์จะเริ่มเสื่อมสภาพในช่วงปีแรกๆของการก่อสร้าง ปัจจัยการเสื่อมสภาพของมอร์ต้าร์เกิดขึ้นจากสาเหตุหลายประการเช่น การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ การเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศ เป็นต้น

Bernard (1995) สรุปถึงการเสื่อมสภาพของวัสดุก่อสร้างว่าเกิดขึ้นจากสาเหตุหลายประการ ภูมิอากาศเป็นหนึ่งในสาเหตุพื้นฐานของการเสื่อมสภาพ การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ การขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิ ความเค้นที่เกิดขึ้นในวัสดุอาคารเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

1) ขนาดของความเปลี่ยนแปลงทางมิติ

2) ความยืดหยุ่นของวัสดุ (elasticity of material)

3) ความสามารถของวัสดุที่จะแผ่ (creep) หรือไหลภายใต้น้ำหนัก

4) ค่าความต้านทานการเคลื่อนที่ของวัสดุโดยการเชื่อมต่อกับองค์ประกอบอื่น ๆ ของโครงสร้าง

Ashursi (1989) ได้สรุปวงจรของการเสื่อมสภาพของมอร์ต้าร์ว่า มอร์ต้าร์ที่ใช้ประสานวัสดุก่อที่ไม่มีการฉาบผิวปิดรอยต่อจะเริ่มเสื่อมสภาพในช่วงปีแรก ๆ ของการก่อสร้าง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของภูมิอากาศ และจะเสื่อมสภาพมากขึ้นจากการกัดเซาะของน้ำฝนและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ หากมีการซ่อมวัสดุประสานอย่างไม่ถูกวิธีจะทำให้เกิดการแตกร้าวบริเวณรอยต่อเนื่องจากการหดตัวที่แตกต่างของมอร์ต้าร์ที่ประสานเข้าไปใหม่

## 2.12 วัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย (Fiber-Reinforced Polymer Composite หรือ FRP Composite)

วัสดุคอมโพสิต (composite material) เป็นวัสดุที่ประกอบกันมากกว่า 2 ชนิดขึ้นไปสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (macroscopic) วัสดุที่ถูกนำมาประกอบเข้าด้วยกันนั้นจะต้องมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน และคุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตที่ได้จะต้องมีคุณสมบัติที่แตกต่างจากวัสดุที่ถูกนำมาประกอบเข้าด้วยกัน โดยทั่วไปแล้วคุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิตที่ได้จะเป็นคุณสมบัติที่โดดเด่นของวัสดุที่ถูกนำมาประกอบ ถ้าเปรียบเทียบวัสดุคอมโพสิตประเภทพลาสติกเสริมเส้นใย (fiber-reinforced plastic หรือ FRP) กับคอนกรีตเสริมเหล็ก จะพบว่าเส้นใยทำหน้าที่เปรียบเสมือนเหล็กเสริมและพลาสติกทำหน้าที่เปรียบเสมือนคอนกรีต

ในปัจจุบันพลาสติกเสริมเส้นใย (fiber-reinforced plastic หรือ FRP) โดยเฉพาะแบบอีพ็อกซี (epoxy) เสริมเส้นใยคาร์บอน (carbon fiber) หรือเส้นใยเคฟลาร์ (kevlar fiber) หรือเส้นใยแก้ว (glass fiber)ได้ถูกนำมาใช้งานวิศวกรรมโยธาในหลายด้าน เช่น ใช้แทนเหล็กเสริมและเคเบิลใช้ในการเสริมกำลัง (strengthening) และซ่อมแซม (repair) โครงสร้างหรือองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก และใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้างองค์อาคารและโครงสร้างต่างๆ โดยตรงโดยเฉพาะในงานที่ต้องการวัสดุที่มีอัตราส่วนของกำลังต่อน้ำหนักสูง มีน้ำหนักเบา และมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนจากสภาวะแวดล้อมและสารเคมีได้ดี

## 2.13 ชนิดของเส้นใย (Fiber Reinforcement Type)

วัสดุเส้นใย fiber reinforcement ที่นิยมใช้ในงานเสริมกำลังโดยทั่วไปคือมีอยู่ด้วยกัน 3 ชนิด คือ carbon fiber, aramid fiber และglass fiber ซึ่งมีคุณสมบัติทางกล และทางเคมีที่แตกต่างกัน ดังนี้

2.13.1 เส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber)

เส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) ได้จากกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมีในอุณหภูมิสูง โดยทำให้เกิดการเรียงตัวของโมเลกุลคาร์บอนเป็นเส้นยาว และมีความแข็งแรงสูง มีความสามารถรับแรงดึงได้สูงถึง 10-15 เท่าของเหล็กกล้าที่มีขนาดเท่ากัน แต่จะมีความเปราะแตกหักได้ง่ายและไม่สามารถดัดงอที่มุม 90 องศาได้ เนื่องจากจะหักและไม่สามารถถ่ายแรงได้ เหมาะสมกับการเสริมกำลังโครงสร้างที่มีการบรรทุกน้ำหนักต่อเนื่องยาวนาน, โครงสร้างที่รับ cyclic load เช่นสะพาน, งานที่ต้องควบคุม deflection หรืองานที่ต้องการคุณภาพสูง เป็นต้น ซึ่งเส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) ที่ใช้กันจะมี 2 แบบคือ

1) ชนิด High Tensile Strength จะใช้ใช้เสริมในงานคอนกรีตเสริมเหล็ก

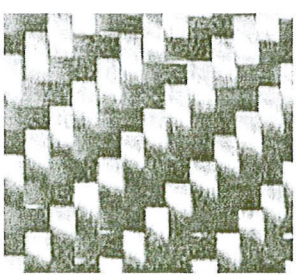
2) ชนิด High Modulus จะใช้เสริมในงานโครงสร้างเหล็ก

2.13.2 Aramid fiber หรือเส้นใยเคฟลาร์ (kevlar fiber)

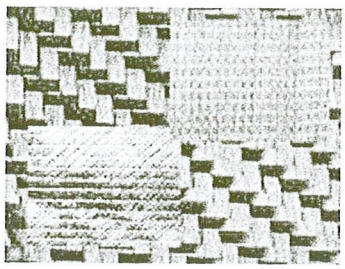
มักใช้งานที่ต้องการทั้งกำลังและความยืดหยุ่น ซึ่ง Aramid fiber จะสามารถทนแรงกระแทกได้ดี และสามารถงอ 90 องศาได้โดยไม่แตกหัก

2.13.3 เส้นใยแก้ว (Glass fiber)

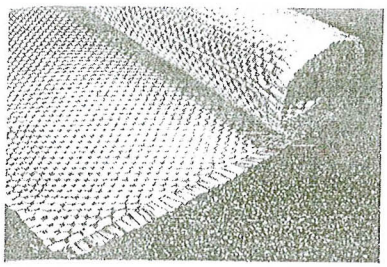
เส้นใยแก้ว (Glass fiber) จะเหมาะสมกับการใช้งานแบบระยะสั้น-กลาง หรือไม่มีการใส่น้ำหนักต่อเนื่องยาวนาน (sustained load) เนื่องจากจะเกิดปัญหาจาก creep หากจะใช้ glass fiber ในงานระยะยาวควรควบคุมให้เกิด stress ไม่เกิด 20% ของ Ultimate tensile strength แต่เส้นใยแก้ว (Glass fiber) จะมีความเปราะแตกหักได้ง่ายและไม่สามารถดัดงอที่มุม 90 องศาได้ เนื่องจากจะหักและไม่สามารถถ่ายแรงได้



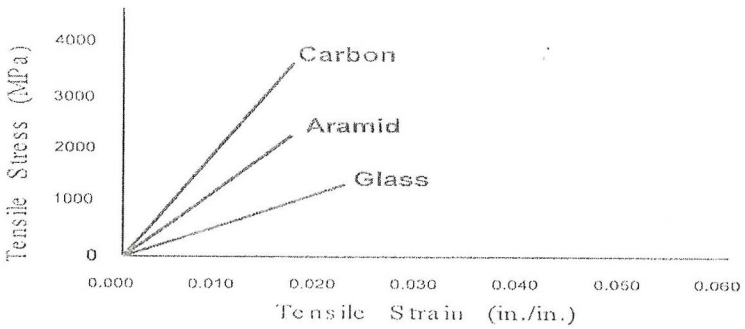
รูปที่ 2.3 ลักษณะเส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber) [6]



รูปที่ 2.4 เส้นใยเคฟลาร์ (kevlar fiber) [6]



รูปที่ 2.5 เส้นใยแก้ว (glass fiber) [6]

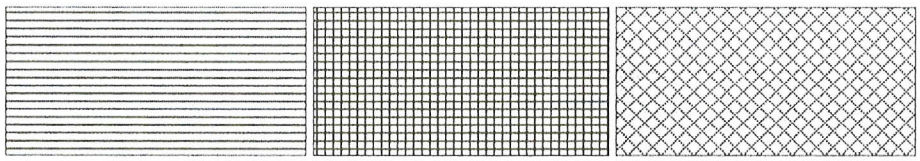



รูปที่ 2.6 Stress-Strain เส้นใย Fiber Reinforcement [10]

## 2.14 ลักษณะหรือรูปแบบทั่วไปของเส้นใย (Fiber Reinforcement Form)

รูปแบบของ FRP ที่นิยมใช้งานอยู่ 3 ประเภท คือ แบบแผ่นเส้นใย (Fiber Sheet) แบบแผ่นแข็ง (Laminate, Plate) และแบบเส้น (Rod ,Bar)

Fiber Sheet จะมีรูปแบบการทอที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปงานเสริมกำลังคอนกรีตจะใช้รูปแบบจัดเรียงทิศทางเดียว (Unidirectional) เพื่อความสะดวกและประสิทธิภาพในการกำหนดทิศทางการรับแรง แต่ในบางกรณีอาจใช้รูปแบบการจัดเรียงแบบ 2 ทิศทาง (Bidirectional) เพื่อการกระจายแรง หรือเพื่อการรับแรงเฉือน ตามความเหมาะสม



รูปที่ 2.7 ลักษณะการเรียงตัวของเส้นใยแบบ Unidirectional ($0^{\circ}$), Bidirectional ($0^{\circ}+90^{\circ}$), Bidirectional ($45^{\circ}$) [6]

## 2.15 เรซิน (Resin)

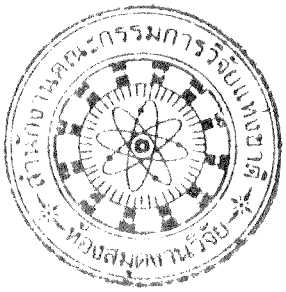
2.15.1 หน้าที่หลักของเรซิน

เรซิน (Resin) มีหน้าที่หลัก 3 ประการคือ ทำหน้าที่ยึดประสานเส้นใย (fiber) เข้าด้วยกัน, ถ่ายแรงระหว่างเส้นใย และป้องกันความเสียหายของเส้นใยจากสภาวะแวดล้อม โดยที่เรซินนั้นมีด้วยกัน 2 ประเภท คือ Thermoplastics เป็นเรซินที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ส่วนใหญ่จะใช้ในงานอุตสาหกรรม และเรซินประเภท Thermosets เป็นเรซินที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ได้อีก เรซินประเภทนี้จะใช้ในงานเสริมกำลัง

2.15.2 ชนิดของเรซิน (Resin Types)

1) Unsaturated Polyesters

- Vinyl Esters (VE)
- Orthophthalic Polyesters
- Isophthalic Polyesters (Iso Polyesters)



2) Epoxies

3) Polyurethanes

4) Phenolics

โดยทั่วไป Polyurethanes กับ Vinyl Esters (VE) จะเป็นวัสดุหลักที่ใช้ยึดเกาะใน Grass Fiber และ Polyurethanes กับ Epoxies จะเป็นวัสดุหลักที่ใช้ยึดเกาะใน Carbon Fiber และ Aramid Fiber ซึ่งเรซินชนิด Polyesters ไม่เหมาะสมกับ Carbon Fiber และ Aramid Fiber

## 2.16 การติดตั้ง Fiber-Reinforced Polymer (FRP)

ผิวของเส้นใย fiber จะมีกระบวนการ surface treatment ได้หลายวิธี ประสิทธิภาพในการยึดเกาะ และการเสริมกำลังจะขึ้นอยู่กับการยึดเหนี่ยว และการถ่ายหน่วยแรงระหว่างผิวชิ้นงาน และแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใย ซึ่งตัวแปรดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับวิธีการประกอบแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยเข้ากับผิวชิ้นงาน ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 วิธี ดังนี้

2.16.1 adhesive bonding แผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยที่ถูกผลิตและบ่มมาจากโรงงานถูกยึดเข้ากับผิวชิ้นงานโดยใช้กาวภายใต้ความดัน

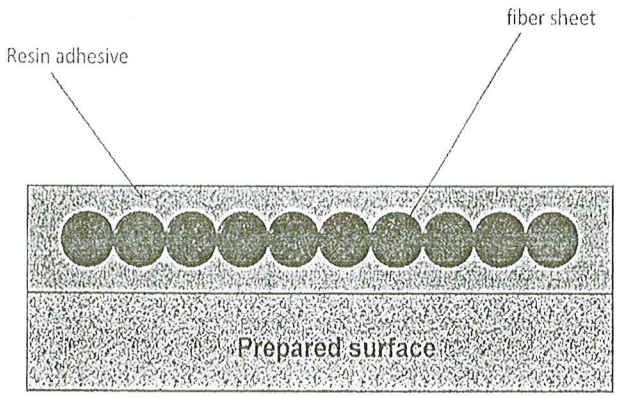
2.16.2 wet lay-up ทาเรซินบนผิวชิ้นงานจากนั้นวางพลาสติกเสริมเส้นใยที่อยู่ในรูปของ fabric และใช้ลูกกลิ้งกลิ้งไปบน fabric เพื่อรีดให้กาวส่วนเกินไหลออกมาเพื่อก่อให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวที่สมบูรณ์

2.16.3 resin infusion จัดวาง fabric ลงบนพื้นที่ที่ต้องการเสริมกำลังจากนั้นทำการห่อพื้นที่ดังกล่าวด้วย vacuum bag และอัดเรซินให้ซึมเข้าไปใน fabric และให้ความดันแก่ vacuum bag เพื่อกดอัด fabric ให้สัมผัสกับผิวคอนกรีตอย่างแนบแน่นซึ่งวิธีการนี้จะทำให้เรซินซึมแทรกเข้าไปในรอยแตกของชิ้นงานด้วย

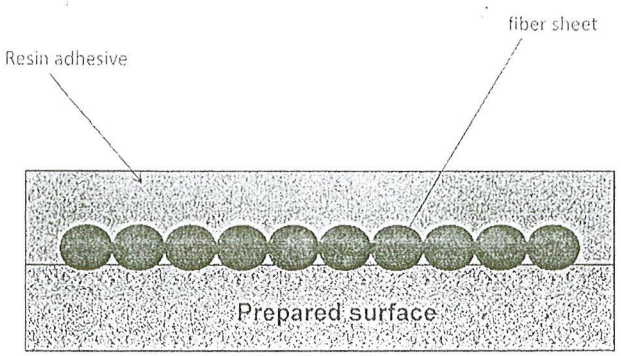
ประสิทธิภาพของการเสริมกำลังในลักษณะนี้ จะขึ้นอยู่กับการใช้ชนิดของกาวที่เหมาะสม ซึ่งควรมีค่าความแกร่งและสัมประสิทธ์การขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับชิ้นงานและพลาสติกเสริมเส้นใยให้มากที่สุด

ในสามวิธีการติดตั้งแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยเข้ากับผิวชิ้นงานข้างต้น วิธีที่ใช้มากที่สุด เหมาะสมกับการก่อสร้างหน้างานที่สุด และถูกที่สุดคือ วิธี wet lay-up อย่างไรก็ตามเรซินที่ใช้ควร

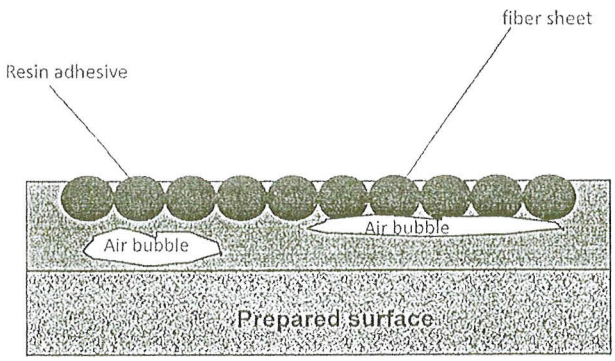
มีปริมาณที่เหมาะสมเพราะถ้ามากเกินไปจะทำให้ fabric ย่นได้ ซึ่งจะเป็นสาเหตุทำให้ประสิทธิภาพของการเสริมกำลังลดลงอย่างมาก นอกจากนั้นแล้ววิธีการนี้ อาจจะมีฟองอากาศเกิดขึ้นในเนื้อกาวได้เป็นจำนวนมากหากไม่มีการรีดกาวด้วยลูกกลิ้งที่ดี ซึ่งจะเป็นสาเหตุทำให้กาวเสื่อมสภาพได้ในเวลาอันสั้น วิธี resin infusion ในสนามเป็นวิธีการที่ค่อนข้างใหม่ที่ทำให้กาวยึดติดกับผิวคอนกรีตและfabric ได้เป็นอย่างดี




รูปที่ 2.8 การติดตั้ง Fiber-Reinforced Polymer (FRP) อย่างมีประสิทธิภาพ




รูปที่ 2.9 การติดตั้งโดยเส้นใย (Fiber Reinforcement) อยู่ด้านล่าง เป็นสาเหตุให้ประสิทธิภาพการเสริมกำลังลดลง [13]




รูปที่ 2.10 ฟองอากาศในเรซิน เป็นสาเหตุให้ประสิทธิภาพการเสริมกำลังลดลง [13:11]

## 2.17 การออกแบบและข้อกำหนดรายละเอียด FRP

2.17.1 การกำหนดทิศทางของแรง

แรงใน fiber จะเป็นแรงดึง แนวแรงควรจะเป็นเส้นตรงในระนาบให้มากที่สุดในการออกแบบควรมีการกระจายแรงไปตาม fiber filament ที่ขนานกันอย่างสม่ำเสมอ การเปลี่ยนทิศทางของแรงอย่างกะทันหันอาจทำให้เกิดความบกพร่องและเสียหายได้

2.17.2 การใช้ code และการกำหนด parameter ในการออกแบบ

Design Manual ต่างๆ ที่มีในปัจจุบันจะมีลักษณะเป็น Guide line เท่านั้น เนื่องจากวัสดุและวิธีการเสริมกำลัง มีความหลากหลาย และไม่มีมาตรฐานเป็นอันเดียวกัน นอกจากนี้เงื่อนไขในการทำงาน (Working Conditions) มีความแตกต่างกันมากมายในแต่ละสถานการณ์ ดังนั้นผู้ออกแบบจึงต้องพิจารณาในการเลือกใช้ parameter ต่างๆให้เหมาะสมกับวัสดุกระบวนการและสถานการณ์แต่ละกรณี และควรทำการทดสอบสมมติฐานที่ใช้ในการออกแบบทุกครั้ง

## 2.18 ข้อควรระวังในการออกแบบติดตั้ง Fiber-Reinforced Polymer (FRP)

1) จำนวนชั้น Layer ควรมีจำนวนชั้นที่น้อยที่สุดเพื่อหลีกเลี่ยงจากการเกิด Debonding โดยปกติไม่ควรเกิน 3 - 4 ชั้นเมื่อเสริมกำลังด้วย fiber sheet และ 1 ชั้นสำหรับแบบแผ่น laminate

2) ควรมีการกระจายแรงอย่างสม่ำเสมอและต่อเนื่อง โดยที่ stress ที่เกิดขึ้นจากการรับแรงในแนวขนานกับผิวสัมผัสควรอยู่ในระดับที่ต่ำเท่าที่จะเป็นได้

3) ระยะ Development length จากตำแหน่งที่ต้องการเสริมกำลัง และการต่อทาบของแต่ละ Layer ต้องเพียงพอต่อการถ่ายเท และกระจายแรง ทั้งใน Flexural Strengthening และ Shear Strengthening

4) ควรพิจารณา Strain และ Deflection เพื่อป้องกันการ Debonding ทั้งนี้ Concrete society committee, UK แนะนำว่าโดยทั่วไป Strainใน composites ไม่ควรเกิน 0.8% เมื่อรับน้ำหนักแบบ Uniformly distribute และ 0.6% เมื่อมี Shear และ Bending moment ในระดับสูง เช่นเมื่อรับน้ำหนัก Concentrate load และมี Hogging region ใกล้กับ support

5) ทิศทางของการเสริมกำลัง Unidirectional FRP จะสามารถรับแรงได้ดีเฉพาะในทิศทางการจัดเรียงเส้นใยเท่านั้น ส่วนในทิศทางตั้งฉากจะอ่อนแอกว่ามากหรือใช้ไม่ได้เลย

2.18.6 Bidirectional Fiber Sheet จะควบคุมแนวทิศทางแรงและคุณภาพการทำงานได้ยากกว่าการใช้ Unidirectional 2 ชั้นในทิศทางตั้งฉากกัน

7) โดยทั่วไป fiber จะรับแรงเป็นแนวเส้นตรง ในการออกแบบไม่ควรเปลี่ยนทิศทางของ fiber เช่น การหักมุมหรือดัดโค้งงอ หากจำเป็นก็ควรมีรัศมีความโค้งที่เพียงพอ หรือใช้การแยกส่วนแล้วต่อทาบกับ fiber ในทิศทางใหม่ที่ต้องการ

8) ไม่ควรติดตั้ง FRP ผ่านมุมงอด้านใน (Inner Corner) เนื่องจากจะเป็นจุดเริ่มของการ Debonding

9) การผสม Part A และ Part B ของ adhesive มักไม่ได้ใช้การชั่งตวงที่ถูกต้อง หรือใช้การประมาณส่วนผสมเอาเอง (บางผู้ผลิตจะระบุอัตราส่วนผสมแบบอัตราส่วนน้ำหนัก ในขณะที่บางผู้ผลิตจะระบุแบบอัตราส่วนปริมาตร) การผสม Part B (Hardener) น้อยเกินไปจะทำให้ปฏิกิริยาเคมีไม่สมบูรณ์ ในขณะที่ถ้า Part B มากเกินไปจะทำให้เรซินแข็งตัวรวดเร็วและเกิดความร้อนสูงในขณะทำปฏิกิริยา ซึ่งอาจเปราะแตกได้

10)การใช้ Adhesive ที่มากเกินพอดี อาจทำให้แนวเส้นใย Fiber เกิดการเคลื่อนตัวและหย่อนในขณะที่ถ้าใช้ Adhesive ไม่เพียงพอ ก็จะทำให้เกิด Unsaturated Area ซึ่งจะทำให้การถ่ายเทแรงไม่สมบูรณ์ หรือเป็นจุดเริ่ม Debonding

11)วิธีการติดตั้งที่ไม่ถูกต้องหรือขาดความชำนาญ อาจทำให้เกิดโพรงช่องว่าง (Void) หรือเส้นใย fiber เกิดการหย่อนงอ ซึ่งอาจเป็นอันตรายโดยเฉพาะในบริเวณที่มี Stress สูง

12)การลบมุมที่ไม่เรียบร้อย หรือมีรัศมีความโค้งที่ไม่เพียงพอ จะทำให้บริเวณมุมมี stress สูง และ fiber อาจหักในขณะติดตั้ง หรือฉีกขาดในขณะรับแรง