ชุดผนังค.ส.ล.สำเร็จรูปชนิดถอดประกอบได้

REFABRICABLE PRECAST WALL ASSEMBLY

สาธิต คำเงิน
SATHIT KUMNGERN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2550
KMITL-2007-EN-M-093-142

ชุดผนังค.ส.ล.สำเร็จรูปชนิดถอดประกอบได้

REFABRICABLE PRECAST WALL ASSEMBLY

สาธิต คำเงิน

SATHIT KUMNGERN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2550

KMITL-2007-EN-M-093-142

REFABRICABLE PRECAST WALL ASSEMBLY

SATHIT KUMNGERN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

MASTER OF ENGINEERING IN CIVIL ENGINEERING

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2007

KMITL-2007-EN-M-093-142

COPYRIGHT 2007

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ชุดผนัง ค.ส.ล.สำเร็จรูปชนิดถอดประกอบได้
นักศึกษา	นาย สาธิต คำเงิน
รหัสนักศึกษา	48061501
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
พ.ศ.	2550
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. ศรีกริช หิรัญมาศ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผศ.ดร. คมสัน มาลีสี

บทคัดย่อ

การใช้พลังงานทั่วโลกกำลังเพิ่มขึ้นอย่างหนักหน่วง ขณะเดียวกันที่แหล่งสำรองพลังงานฟอสซิลได้รับการคาดการณ์ว่าอาจจะหมดไปภายในไม่กี่ทศวรรษนี้ บัดนี้เราได้อยู่ในยุคของวิกฤติการณ์พลังงานแล้ว เพื่อเป็นการผสานกำลังกับวงการวิศวกรรมอื่นๆ วิศวกรโยธาก็จะต้องร่วมสมทบบทบาทนี้ด้วยกัน"ชุดผนังค.ส.ล.สำเร็จรูปชนิดถอดประกอบได้" ที่คิดทำขึ้นใหม่นี้ก็ร่วมอยู่ในการประดิษฐ์คิดค้นทั้งหลายเช่นกัน

เมื่อผนังไม่ต้องรับน้ำหนักองค์อาคารส่วนเหนือขึ้นไปแล้วเราก็ไม่ควรต้องรวมส่วนผนังเข้าในขั้นตอนก่อสร้างที่เร่งรีบ เพราะไม่จำเป็นที่จะต้องเร่งทำมันให้เสร็จด้วย เครื่องจักร กลหนัก โดยหลังจากโครงสร้างเสาคานแล้วเสร็จ เมื่อใดที่มีกำลังแรงงานเหลือเกินจากงานที่ทำได้อื่นใดก็จะสับเปลี่ยนมาที่งานชุดผนังค.ส.ล.สำเร็จรูปชนิดถอดประกอบได้นี้ซึ่งที่ช่วงความสูงผนัง3ม.สามารถรับแรงกระทำแบบกระจายสม่ำเสมอได้ 175 กก.ต่อ ตร.ม.ที่ค่าโก่งตัว L/360 และผ่านการทดสอบการซึมผ่านของน้ำฝนทั้งแบบใช้และไม่ใช้วัสดุอุดกันซึม ผนังแต่ละแผ่นมีน้ำหนักน้อยกว่า 30 กก. มีน้ำหนักประมาณ 30 กก.ติดตั้งแบบแห้งไม่เปียกเลอะจากปูนก่อปูนฉาบ สะอาดและมีของเสียน้อย ทั้งเพียงต้องการเครื่องมือเล็กๆ ไม่กี่ชิ้น นอกจากนี้หลังประกอบติดตั้งผนังชุดเสร็จไปแล้วยังสามารถคืนพื้นที่ใช้สอยกลับมาโดยรื้อแยกชิ้นส่วนซึ่งจะคงมีเพียงปลั๊กปิดสมอเล็กๆเรียบๆเหลืออยู่เท่านั้นราวกับไม่เคยมีผนังอยู่เลย และที่สำคัญสามารถประกอบผนังเดิมทั้งหมดกลับคืนได้อีกด้วย

Thesis Title	Refabricable Precast Wall Assembly
Student	Mr. Sathit Kumngern
Student ID.	48061501
Degree	Master Degree in Civil Engineering
Program	Structural Engineering
Year	2007
Thesis Adviser	Assoc. Prof. Dr. Srikrid Hiranmas
Thesis Co-adviser	Asst. Prof. Dr. komsan Maleesee

ABSTRACT

The global consumption of energy is steadily increasing while the reservoirs of fossil fuels are predicted to be vanished in a couple of decades. Inevitably we are now already in the energy shortage crises. Accompanying to the several engineering fields, the construction engineers must also contribute their roles too. The newly invented "Refabricable Precast Wall Assembly" may share with the innovations.

Consider to a common building construction, when the wall is not designed to bearing the overhead loading, we would rather not include the walls in the fast construction sequence because there is no necessity to carrying them out rapidly by heavy equipment. After columns and beams are finished there is no more preceding sequence. Anytime when labours are exceeding the current works or idle, they may be shifted to precast wall assembly which is 30 kgs/pc.weight, able to withstand 175kgs/sq.m.wind load at L/360 deflection in 3 m. height of erected wall , dry and no dirt of wet mortar, clean and a little waste, ease and only a few small tools are needed. And after finish assembling this Refabricable Precast Wall Assembly, we can resume the floor space by detaching this wall which only the small tidy anchor closing plugs are left asif the wall had never existed. And can be refabricated again.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ศรีกริช หิรัญมาศ และ ดร.คมสัน มาลีสี ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ร่วมกับ บมจ.ปูนซีเมนต์นครหลวงผู้ให้การสนับสนุนทุนวิจัย และขอขอบคุณ คุณจำเริญ วิโรจนาภา หัวหน้างานที่ให้ยืมเวลางานและจักรกลอุปกรณ์

ขอขอบคุณน้อง ๆ หลาน ๆ ในห้องปฏิบัติการทุกคน

สุดท้ายต้องขอขอบคุณ พี่ๆและบุตรชายทั้งสองของข้าพเจ้าที่กระตือรือร้นช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจที่ดี

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....IV

สารบัญตาราง.....VII

สารบัญรูป.....VIII

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 ความสำคัญของปัญหา.....1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....3

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....4

1.4 การนำเสนอหลักการใหม่.....5

1.5 การเปรียบเทียบกับหลักการที่มีอยู่เดิม.....5

1.6 ขอบเขตของงานวิจัย.....5

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....7

2.1 วัสดุ.....7

2.1.1 วัสดุของคอนกรีต.....8

2.1.2 ความแข็งแรงของคอนกรีต.....9

2.1.3 ความสามารถเทได้.....10

2.1.4 การวัดค่ายุบตัว.....10

2.1.5 ความทนทาน.....10

2.2 คุณสมบัติทางกลของคอนกรีต.....11

2.2.1 กำลังรับแรงอัดและโมดูลัสยืดหยุ่น.....11

2.2.2 กำลังรับแรงดึง.....11

2.2.3 กำลังรับแรงสองแกน.....12

2.2.4 การคืบ.....12

2.2.5 การหดตัว.....13

2.2.6 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ.....15

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.3 เหล็กเสริม.....15
2.3.1 ชนิดของเหล็กเสริม.....16
2.3.2 คุณสมบัติของเหล็กเสริม.....17
2.3.3 การวางเหล็กเสริม.....17
2.4 วิธีออกแบบและข้อกำหนดด้านกำลัง.....17
2.4.1 วิธีออกแบบ.....17
2.4.2 ข้อกำหนดด้านกำลัง.....21
2.4.3 ข้อกำหนดด้านการใช้งาน.....23
2.4.5 หลักการทั่วไปของการออกแบบโดยวิธีกำลัง.....25
2.4.6 สมมุติฐานในการออกแบบ.....25

บทที่ 3 แนวทางการวิจัยและการออกแบบ.....28
3.1 แนวทางการวิจัย.....28
3.2 การค้นคว้าผลงานวิจัย.....30
3.3 การออกแบบ.....33

บทที่ 4 การทดสอบ.....37
4.1 การทดสอบความต้านทานแรงลม.....37
4.2 ระบบทดสอบความต้านทานแรงลม.....38
4.3 ผลการทดสอบความต้านทานแรงลม.....39
4.4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบความต้านทานแรงลม.....40
4.5 สรุปผลการทดสอบความต้านทานแรงลม.....42
4.6 การทดสอบความต้านทานการซึมผ่านของน้ำฝน.....42
4.7 ระบบทดสอบความต้านทานการซึมผ่านของน้ำฝน.....44
4.8 สรุปผลการทดสอบความต้านทานการซึมผ่านของน้ำฝน.....48

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 อุปกรณ์ช่วยในการผลิต,ขนส่งและติดตั้ง.....49

5.1 การขนส่งและติดตั้ง.....49

5.2 การขนย้ายระหว่างการผลิต.....49

บทที่ 6 การพัฒนาสู่ผลิตภัณฑ์ศิลปหัตถกรรม.....52

6.1 เป้าหมายในการพัฒนาสู่ศิลปหัตถกรรม.....52

6.2 การพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ศิลปหัตถกรรม.....52

บทที่ 7 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....56

บรรณานุกรม.....58

ภาคผนวก.....59

ประวัติผู้เขียน.....64

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

1.1 ชนิดของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์.....8
2.1 น้ำหนักบรรทุกกับตัวคูณเพิ่มที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัย.....24

สารบัญรูป

ภาพที่ หน้า

3.1 ภาพเปรียบเทียบอุปกรณ์สร้างฟองอากาศผลิตจากเยอรมันนีกับที่ผู้ทำวิจัยประดิษฐ์ขึ้น.....29
3.2 แสดงระบบผลิตซีแอลซีดอนกรีต.....29
3.3 กราฟเปรียบเทียบค่าดูดซึมน้ำสัมพัทธ์.....30
3.4 กราฟเปรียบเทียบค่าการหดตัว.....30
3.5 กราฟเปรียบเทียบค่าการทนไฟ.....31
3.6 กราฟค่ากำลังอัดประลัยของผู้ผลิตในต่างประเทศ.....31
3.7 ภาพด้านหน้าและหลังของแผ่นผนังค.ส.ล.สำเร็จรูปชนิดถอดประกอบได้.....32
3.8 กราฟเปรียบเทียบข้อมูลจากห้องทดลองกับสมการ.....34
3.9 ภาพชุดประกับต่อแผ่นผนัง.....35
3.10 การวิเคราะห์ชุดต่อผนังโดยโปรแกรมไฟไนต์อิลิเมนต์.....35
3.11 การทดสอบการรับกำลังของชุดต่อผนัง.....36
3.12 แผนภูมิองค์ประกอบควบคุมกำลังของแผ่นผนังค.ส.ล.....36
4.1 มิติของชุดผนังตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ.....37
4.2 ระบบการทำงานของอุปกรณ์ทดสอบชุดผนัง.....38
4.3 การทดสอบกำลังต้านทานแรงลมของชุดผนัง.....39
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงลมกับค่าการโก่งตัวสูงสุด.....39
4.5 การประเมินกำลังต้านทานแรงลมของชุดผนังที่ช่วงพาดสี่เมตร.....41
4.6 ภาพการเลื่อนออกของชุดประกับต่อผนังหลังการทดสอบ.....41
4.7 ภาพพื้นที่รอยต่อของผนังที่จะทำการทดสอบการต้านทานการซึมผ่านของน้ำฝน.....43
4.8 ระบบทดสอบความต้านทานการซึมผ่านของน้ำฝน.....44
4.9 แสดงการทดสอบความต้านทานการซึมผ่านของน้ำฝน.....45
4.10 แสดงการทดสอบความต้านทานการซึมผ่านของน้ำฝนแบบไม่ใช้หมันอุดรอยต่อ.....46
4.11 แสดงการทดสอบความต้านทานการซึมผ่านของน้ำฝนแบบใช้หมันอุดรอยต่อ.....47
4.12 แสดงการเจาะผนังเพื่อเก็บตัวอย่างหาค่าการดูดซึมน้ำในระบบการทดสอบนี้.....47

สารบัญรูป(ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

5.1 ภาพชุดอุปกรณ์จับยกแผ่นผนังรูปตัวซี.....50
5.2 ภาพแสดงสลักเกลียวยึดอุปกรณ์จับยกรูปตัวซีกับแผ่นผนังสำเร็จรูป.....50
5.3 ภาพนักเรียนชายชั้นประถมสองคนช่วยกันยกแผ่นผนังสำเร็จรูป.....51
6.1 แสดงการลงเส้นขอบอีพอกซี่หลังการทารองพื้นและวาดเส้นร่างแล้ว.....54
6.2 ภาพชื่อ “School” บนแผ่นผนังสำเร็จรูปที่พร้อมใช้งาน.....55

บทที่ 1
บทนำ

เป็นที่ทราบดีอยู่ว่าผนังเป็นองค์อาคารที่ทำหน้าที่หลายๆอย่างในขณะเดียวกันตามวัตถุประสงค์ที่ได้รับการออกแบบ เช่น แบ่งสัดส่วนพื้นที่ใช้งานของอาคาร, รับน้ำหนักองค์อาคารส่วนเหนือขึ้นไป, กันลม, กันฝน, กันน้ำ, กั้นเสียง, กันแดด, กันไฟ, เป็นฉนวนกั้นอุณหภูมิ, ปิดบังสายตา, ปกป้องคุ้มภัย, กันกระสุน, เป็นเครื่องตกแต่งอาคารให้ได้อารมณ์ความรู้สึกต่างๆ ดังกล่าวมา ผนังจึงเป็นส่วนประกอบสำคัญของอาคาร อาคารที่ปราศจากผนังจะเป็นเพียงโครงสร้างกำบังแดดฝนเท่านั้นไม่สามารถอยู่อาศัยอย่างปกติสุขได้ หากออกแบบผนังให้รับน้ำหนักองค์อาคารส่วนเหนือขึ้นไปได้ ก็จะสามารถใช้ผนังเป็นโครงสร้างอาคารได้โดยตัวผนังเอง และหากสามารถออกแบบและสร้างผนังแบบสำเร็จรูปได้ก็จะทำให้การก่อสร้างทำได้รวดเร็ว เรียบร้อย ไม่มีของเสียมาก และลดการขนส่งซ้ำซ้อน มีคุณภาพดีสม่ำเสมอเนื่องมีการควบคุมคุณภาพอย่างถูกต้องในโรงงานผลิตที่มีการจัดการเป็นระบบต่อเนื่อง หากออกแบบให้สามารถทำการติดตั้งได้ง่ายโดยใช้คนเพียงคนสองคนก็ยิ่งทำให้เกิดความสะดวกในการติดตั้งใช้งานมาก และยิ่งสามารถออกแบบให้ถอดประกอบได้ใหม่ด้วยก็เป็นมูลค่าเพิ่มขึ้นหลายเท่าตัวทีเดียว

1.1 ความสำคัญของปัญหา

<u>ในส่วนเศรษฐกิจมหภาค</u>

ปัจจุบันประเทศไทยนำเข้าเหล็กและสินแร่เกี่ยวเนื่องเป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมต่างๆในแต่ละปีเป็นจำนวนมาก ส่วนหนึ่งนำมาทำเป็นโครงเคร่าเหล็กชุบสังกะสีแบบกรุด้วยยิบซั่มบอรด์ ซึ่งเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ใช้สอยของอาคารเศษซากจากการรื้อถอนก็จะขายได้ถูกๆเพียงเศษสังกะสีเท่านั้น

นอกจากนั้นในส่วนของการนำเข้าไม้เนื้อแข็งที่นำมาใช้ในระบบโครงเคร่าผนังไม้ดั้งเดิมสำหรับชาวบ้านรายได้น้อยซึ่งเป็นคนส่วนใหญ่ของประเทศ หรือใช้กับพื้นที่เช่าหรืออาคารสำหรับใช้งานระยะสั้นถึงปานกลางที่เห็นได้ทั่วไปก็มีราคาแพงขึ้นตลอดเวลาไม่ว่าจากข้อจำกัดในพื้นที่ปลูกป่าและการเจริญเติบโตของต้นไม้ที่ไม่ทันความต้องการและค่าขนส่งจากต่างประเทศ ก็ทำให้เกิดการสูญเสียเงินตราต่างประเทศปีละมากๆทีเดียว ทั้งๆที่โดยข้อเท็จจริงนั้นหากเราเปรียบเทียบกันโดยปริมาตรต่อปริมาตรระหว่างคอนกรีตกับไม้เนื้อแข็งปรับไสแล้วจะเห็นโดยเด่นชัดว่าไม้เนื้อแข็งธรรมดาๆมีราคาต่อปริมาตรสูงกว่าโดยไม่ต้องกล่าวถึงไม้ชั้นดีอย่างประดู่หรือไม้สัก

ในส่วนของเนื้อไม้เองที่เป็นเซลลูโลสนั้นไม่ทนทานต่อสภาวะอากาศและยังเป็นอาหารโอชะของแมลงที่แพร่พันธ์อย่างรวดเร็วหลายชนิดอีกด้วยซึ่งเคมีภัณฑ์สำหรับรักษาสภาพเนื้อไม้และป้องกันการกัดกินทำลายโดยแมลงต่างๆนั้นส่วนใหญ่เป็นการนำเข้าทั้งผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปและวัตถุดิบเคมีภัณฑ์พื้นฐานทั้งสิ้น ซึ่งก็ยังต้องฉีดพ่นกันเป็นประจำ ตลอดการใช้งานอีกด้วย

เราต่างก็ทราบกันดีอยู่ว่าผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปนั้นช่วยลดการขนส่งในกระบวนการก่อสร้างได้มากโดยเฉพาะกรณีที่มีการจัดจ้างแรงงานหลายกลุ่มหรือจัดซื้อวัสดุจากหลายแหล่งยิ่งต้องทำให้เกิดการขนส่งซ้ำซ้อนยิ่งขึ้น ซึ่งปัจจัยหลักของการขนส่งก็คือน้ำมันเชื้อเพลิงซึ่งเราทุกคนต่างได้รับรู้ภาระผลกระทบที่เป็นอยู่และมีแนวโน้มทวีความรุนแรงมากขึ้นเรื่อยๆอย่างไม่มีสิ่งใดจะฉุดรั้งไว้ได้

<u>ในส่วนเศรษฐกิจจุลภาค</u>

ส่วนประกอบของระบบผนัง ค.ส.ล.สำเร็จรูปแบบถอดประกอบได้นี้จะได้รับการออกแบบให้แต่ละชิ้นส่วนมีน้ำหนักไม่มากให้ยกได้ด้วยคนคนเดียวหรือทำงานโดยสะดวกโดยคนสองคน ซึ่งจากเทคนิคในการผลิตชิ้นงานในพิกัดน้ำหนักระดับนี้สามารถผลิตเป็นผลิตภัณฑ์คุณภาพสูงได้ขนาดที่แน่นอนเที่ยงตรง เนื้องานที่มีคุณภาพสม่ำเสมอและเทคนิคด้านผิวงานชั้นสูงที่ต้องทำในโรงงานที่มีการบริหารจัดการเป็นระบบที่มีการผลิตต่อเนื่องคราวละมากๆ หรือสามารถถ่ายทอดเทคนิคที่จำเป็นให้กับชาวบ้านและชุมชนในงานผลิตระดับผิวงานแบบศิลปะหัตถกรรมครัวเรือนและชุมชนก็สามารถพัฒนาฝีมือแรงงานให้เกิดการขับเคลื่อนเศรษฐกิจระดับรากฐานให้เข้มแข็งได้และยังสามารถกระตุ้นให้เกิดการสร้างผลิตภัณฑ์คุณภาพสูงขึ้นในชุมชนด้วยเนื่องจากมีตัวอย่างชิ้นงานคุณภาพสูงจากโรงงานเป็นมาตรฐานเปรียบเทียบ และเนื่องจากแผ่นผนังมีเนื้อหลักเป็นคอนกรีตเบาน้ำหนักเพียงสิบกว่ากิโลกรัมแต่มีความคงทนมากๆ หากมีแนวทางศิลปะหัตถกรรมให้สอดคล้องต้องใจตามรสนิยมนักท่องเที่ยวชาวต่างชาติแล้วก็จะนำผลประโยชน์สู่ท้องถิ่นตลอดจนถึงประเทศชาติได้ในที่สุดอย่างแน่นอน

<u>ในด้านที่ส่งผลต่อสภาพแวดล้อม</u>

ดังที่ทราบดีอยู่แล้วกับการที่สามารถพัฒนาผลิตภัณฑ์ทดแทนไม้ขึ้นมาได้ก็เท่ากับช่วยลดการตัดไม้ทำลายป่า เพื่อช่วยกันรักษาสมดุลย์ทางธรรมชาติให้ดีที่สุด

นอกจากนั้นผลิตภัณฑ์เคมีต่างๆอีกมากมายที่ใช้สำหรับไม้ก็สร้างมลพิษในดิน, น้ำ และอากาศมากขึ้นทุกๆวัน ซึ่งมลพิษจากขบวนการผลิตทั้งหมดก็ย่อมต้องแพร่กระจายไปไม่มากก็น้อยตลอดเส้นทางจากทะเลท่าเรือไปยังโกดังสินค้า โรงงานผลิต จนกระทั่งจุดใช้งานในบ้านในอาคาร ซึ่งเราทุกคนก็น่าจะเคยใช้ผลิตภัณฑ์เคมีประเภทนี้กันมาแล้วทุกคนและคงจำความรู้สึกกังวลที่จะเก็บบรรจุภัณฑ์เคมีที่ยังมีเนื้อเคมีเหลืออยู่ไว้อย่างไรกรณีที่ในบ้านมีเด็กเล็กอยู่ หรือเมื่อต้องทิ้งทั้ง

กากของเสียตกค้างที่เหลืออยู่บรรจุภัณฑ์ก็เป็นภาระที่ลำบากแก่หน่วยงานต่างๆที่มีหน้าที่เกี่ยวข้องจะสามารถจัดการกำจัดทำลายได้โดยสมบูรณ์

ในด้านที่เป็นนวัตกรรมใหม่

ผนังค.ส.ล.สำเร็จรูปแบบถอดประกอบได้จะมีขนาดประมาณไว้ของแผ่นผนังสำเร็จรูปโดยทั่วไปจะมีขนาดเท่าๆกับขนาดของกรอบหน้าต่างที่จำหน่ายแพร่หลายอยู่แล้วในท้องตลาดเพื่อให้เกิดความกลมกลืนเมื่อประกอบกันเป็นผนังของอาคาร ระบบผนังค.ส.ล.สำเร็จรูปแบบถอดประกอบใหม่ได้นี้ยังสามารถใช้เป็นผนังภายนอกอาคารสามารถกันน้ำและฝนได้แบบติดตั้งในโครงสร้างเสาและคานดั้งเดิมทั่วไป ยิ่งกว่านั้นเมื่อได้รับการออกแบบพัฒนาอย่างถูกต้องแล้วก็จะสามารถรับน้ำหนักโครงสร้างเหนือขึ้นไปได้ด้วย เช่นโครงสร้างหลังคา, ระบบกันเสียง หรือความร้อนได้ด้วย ซึ่งเป็น การพัฒนาทั้งในแง่เทคนิคการก่อสร้าง สร้างสรรค์ผลิตภัณฑ์ใหม่ซึ่งยังไม่มีจำหน่ายในตลาดเพราะทราบกันดีว่าระบบผนังในลักษณะนี้จะต้องมีขนาดได้มาตรฐานและออกแบบเครื่องใช้อุปกรณ์ให้ง่ายต่อการติดตั้งเพราะจะต้องมีจุดบังคับฉากทั้งสามแกนมิติ

ในด้านที่สามารถแตกสายผลิตภัณฑ์ใหม่

ระบบผนังค.ส.ล.สำเร็จรูปแบบถอดประกอบใหม่ได้นี้จะมีจุดเปลี่ยนของรูปแบบการใช้งานอยู่ที่แผ่นผนังสำเร็จรูปซึ่งสามารถสร้างขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์หลายหลากมากมายตั้งแต่แบ่งสัดส่วนพื้นที่ใช้งานของอาคาร, ปิดบังสายตา, กันแดด, กันลม, กันฝนตามปกติทั่วไปแล้ว ยังสามารถออกแบบให้เหมาะกับวัตถุประสงค์เฉพาะเช่น กันน้ำ, กั้นเสียง, กันไฟ, เป็นฉนวนกั้นอุณหภูมิ,รับน้ำหนักองค์อาคารส่วนเหนือขึ้นไป, ปกป้องคุ้มภัย, กันกระสุน, เป็นเครื่องตกแต่งอาคารให้ได้อารมณ์ความรู้สึกต่างๆ ได้อีกมากมาย และช่วยสร้างแนวทางของศิลปหัตถกรรมครัวเรือนชุมชนที่เป็นรากฐานของประเทศได้เป็นอย่างดี

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อวิจัยทดสอบระบบผนังค.ส.ล.สำเร็จรูปให้ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่ที่สามารถทดแทนโครงคร่าวชุบสังกะสี,ไม้และผนังก่ออิฐฉาบปูนที่ประกอบด้วย แผ่นผนังค.ส.ล., อุปกรณ์จับยึดระบบผนัง
2. เพื่อวิจัยทดสอบระบบผนังค.ส.ล.สำเร็จรูปดังกล่าวที่สามารถถอดออกและประกอบใหม่ได้ซึ่งแต่ละชิ้นส่วนจะมีน้ำหนักเบาสามารถทำงานติดตั้งได้โดยใช้คนไม่เกินสองคน
3. เพื่อวิจัยทดสอบส่วนผสมคอนกรีตที่มีคุณภาพทั้งแข็งแรงและรูปลักษณ์เหมาะสมกับระบบผนังค.ส.ล.สำเร็จรูปชนิดถอดประกอบใหม่ได้นี้

4. เพื่อวิจัยทดสอบชิ้นส่วนเสริมกำลังคอนกรีตที่ใช้หล่อฝังที่จุดเชื่อมต่อในชิ้นงานเพื่อให้รอยต่อสำหรับการยึดเหนี่ยวระบบผนังค.ส.ล.สำเร็จรูปชนิดถอดประกอบใหม่ได้

5. เพื่อวิจัยทดสอบระบบผนังค.ส.ล.สำเร็จรูปชนิดถอดประกอบใหม่ได้ที่สามารถผลิตได้ทั้งในขบวนการผลิตขนาดใหญ่และเล็ก

6. เพื่อวิจัยทดสอบผนังค.ส.ล.สำเร็จรูปชนิดถอดประกอบใหม่ได้ที่สามารถผลิตแตกสายผลิตภัณฑ์เป็นผนังกันเสียง, เป็นผนังแบบอื่นๆหากได้รับการสนับสนุนเพิ่มอีก, พัฒนาเป็นศิลปหัตถกรรมครัวเรือนชุมชนได้ต่อไป

7. เพื่อวิจัยทดสอบอุปกรณ์ช่วยในการขนส่งและติดตั้งระบบผนังค.ส.ล.สำเร็จรูปชนิดถอดประกอบใหม่ได้ที่สามารถทำงานได้สะดวกปลอดภัยและให้ภาพลักษณ์ของผลิตภัณฑ์และผลการทำงานที่ดูมีฝีมือดีและใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ของการออกแบบ

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

นอกจากประโยชน์ที่จะได้รับในส่วนเศรษฐกิจมหภาค,ในส่วนเศรษฐกิจจุลภาค,ในด้านที่เป็นผลดีต่อสภาพแวดล้อม,ในส่วนที่เป็นนวัตกรรมใหม่ที่สามารถแตกสายผลิตภัณฑ์ไปได้อีกดังที่กล่าวไปแล้วยังได้รับประโยชน์ในส่วนอื่นๆของตัวงานวิจัยอีกคือ

เพื่อวิจัยระบบผนังค.ส.ล.สำเร็จรูปให้ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่ที่สามารถทดแทนผนังก่ออิฐดั้งเดิมและไม้ที่ประกอบด้วย แผ่นผนังค.ส.ล., อุปกรณ์จับยึดระบบผนัง

เพื่อวิจัยระบบผนังค.ส.ล.สำเร็จรูปดังกล่าวที่สามารถถอดออกและประกอบได้ซึ่งแต่ละชิ้นส่วนจะมีน้ำหนักเบาสามารถทำงานติดตั้งได้โดยใช้คนหนึ่งหรือสองคน

เพื่อวิจัยส่วนผสมคอนกรีตที่มีคุณภาพทั้งแข็งแรงและรูปลักษณ์เหมาะสมกับระบบผนังค.ส.ล.สำเร็จรูปชนิดถอดประกอบได้นี้

เพื่อวิจัยชิ้นส่วนเสริมกำลังคอนกรีตที่ใช้หล่อฝังที่จุดเชื่อมต่อในชิ้นงานเพื่อให้รอยต่อสำหรับการยึดเหนี่ยวระบบผนังค.ส.ล.สำเร็จรูปชนิดถอดประกอบได้

เพื่อวิจัยระบบผนังค.ส.ล.สำเร็จรูปชนิดถอดประกอบได้ที่สามารถผลิตได้ทั้งในขบวนการผลิตขนาดใหญ่และเล็ก

เพื่อวิจัยผนังค.ส.ล.สำเร็จรูปชนิดถอดประกอบใหม่ได้ที่สามารถผลิตแตกสายผลิตภัณฑ์เป็นผนังกันเสียง, เป็นผนังแบบอื่นๆหากได้รับการสนับสนุนเพิ่มอีก, พัฒนาเป็นศิลปหัตถกรรมครัวเรือนชุมชนได้ต่อไป

เพื่อวิจัยอุปกรณ์ช่วยในการขนส่งและติดตั้งระบบผนังค.ส.ล.สำเร็จรูปชนิดถอดประกอบใหม่ได้ที่สามารถทำงานได้สะดวกปลอดภัยและให้ภาพลักษณ์ของผลิตภัณฑ์และผลการทำงานที่ดูมีฝีมือดีและใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ของการออกแบบ

1.4 การนำเสนอหลักการใหม่

1. ชุดผนังสำเร็จรูปนี้สามารถถอดออกแล้วประกอบกลับเข้าไปใหม่ได้

2. แต่ละชิ้นส่วนมีน้ำหนักเบาจึงทำงานได้เพียงลำพังคนสองคน

3.ใช้เครื่องมือเล็กไม่กี่ชิ้นในการประกอบโดยไม่ใช้เครื่องจักรกลหนักจึงช่วยประหยัดพลังงาน

4.สามารถประยุกต์ใช้ศิลปะหลากหลายรูปแบบได้กับพื้นผิวของผนังทำให้เป็นประโยชน์กับงานผลิตทั้งแบบลงทุนสูงและแบบหัตถกรรมครัวเรือน

5. ใช้เป็นผนังภายนอกเพราะมีระบบกันน้ำและระบบอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวปลอดสนิม

6. การประกอบระบบผนังไม่ใช้มอร์ตาร์ในการยึดประสานจึงทำได้ง่ายไม่เลอะเทอะและไม่ต้องเชื่อมด้วยไฟฟ้าทำให้ประหยัดพลังงาน

7. หากเกิดความเสียหายใดๆขึ้นภายหลังสามารถถอดเปลี่ยนโดยสะดวก

8. เนื่องจากระบบยึดเหนี่ยวมีลักษณะเสมือนข้อหมุนและมีแนวบัวกันน้ำจึงสามารถปรับตัวรับการสั่นไหวของอาคารและการทรุดตัวของโครงสร้างได้ดี

1.5 การเปรียบเทียบกับหลักการที่มีอยู่เดิม

1. ชุดผนังสำเร็จรูปที่ใช้อยู่ในปัจจุบันไม่สามารถถอดออกแล้วประกอบกลับเข้าไปใหม่ได้โดยชิ้นส่วนเดิม

2. ชุดผนังสำเร็จรูปที่ใช้อยู่ในปัจจุบันแต่ละชิ้นส่วนมีน้ำหนักมากต้องใช้ปั้นจั่นหรือเครน

3. การซ่อมหรือถอดเปลี่ยนชุดผนังสำเร็จรูปที่ใช้อยู่ในปัจจุบันทำได้ยาก

1.6 ขอบเขตของงานวิจัย

1 วิจัยทดสอบระบบผนังค.ส.ล.สำเร็จรูปให้ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่ที่สามารถทดแทนโครงคร่าวชุบสังกะสี,ไม้และผนังก่ออิฐฉาบปูนที่ประกอบด้วย แผ่นผนังค.ส.ล., อุปกรณ์จับยึดระบบผนัง

2 วิจัยทดสอบระบบผนังค.ส.ล.สำเร็จรูปดังกล่าวที่สามารถถอดออกและประกอบใหม่ได้ซึ่งแต่ละชิ้นส่วนจะมีน้ำหนักเบาสามารถทำงานติดตั้งได้โดยใช้คนหนึ่งหรือสองคน

3 วิจัยทดสอบส่วนผสมคอนกรีตที่มีคุณภาพทั้งแข็งแรงและรูปลักษณ์เหมาะสมกับระบบผนังค.ส.ล.สำเร็จรูปชนิดถอดประกอบใหม่ได้นี้

4 วิจัยทดสอบชิ้นส่วนเสริมกำลังคอนกรีตที่ใช้หล่อฝังที่จุดเชื่อมต่อในชิ้นงานเพื่อให้รอยต่อสำหรับการยึดเหนี่ยวระบบผนังค.ส.ล.สำเร็จรูปชนิดถอดประกอบใหม่ได้

5 วิจัยทดสอบระบบผนังค.ส.ล.สำเร็จรูปชนิดถอดประกอบใหม่ได้ที่สามารถผลิตได้ทั้งในขบวนการผลิตขนาดใหญ่และเล็ก

6 วิจัยทดสอบผนังค.ส.ล.สำเร็จรูปชนิดถอดประกอบใหม่ได้ที่สามารถผลิตแตกสายผลิตภัณฑ์เป็นผนังกันเสียง, เป็นผนังแบบอื่นๆหากได้รับการสนับสนุนเพิ่มอีก, พัฒนาเป็นศิลปหัตถกรรมครัวเรือนชุมชนได้ต่อไป

7 วิจัยทดสอบอุปกรณ์ช่วยในการขนส่งและติดตั้งระบบผนังค.ส.ล.สำเร็จรูปชนิดถอดประกอบใหม่ได้ที่สามารถทำงานได้สะดวกปลอดภัยและให้ภาพลักษณ์ของผลิตภัณฑ์และผลการทำงานที่ดูมีฝีมือดีและใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ของการออกแบบ

8 วิจัยทดสอบความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของน้ำฝนผ่านรอยต่อของชุดผนังค.ส.ล.สำเร็จรูปชนิดถอดประกอบได้นี้

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุ

คอนกรีตเป็นวัสดุที่เกิดจากการผสมของซีเมนต์ น้ำ มวลรวมละเอียด และมวลรวมหยาบ นอกเหนือไปจากนี้ยังมีการใส่*สารผสมเพิ่ม* (admixture) เพื่อควบคุมปฏิกิริยาหรือเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของคอนกรีตในทันทีที่ส่วนประกอบของคอนกรีตถูกผสมเข้าด้วยกันซีเมนต์และน้ำจะรวมตัวเป็นซีเมนต์เจล ทำหน้าที่เป็นตัวประสานให้มวลรวมทั้งหลายจับตัวกัน กลายเป็นวัสดุแข็งคล้ายหิน ปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์และน้ำเป็นปฏิกิริยาที่คลายความร้อนออกมา เราเรียกปฏิกิริยานี้ว่า *ไฮเดรชั่น* (Hydration)ในสภาวะเริ่มต้นของปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ปริมาณของซีเมนต์เจลจะมีไม่มากนัก คอนกรีตอยู่ในสภาวะพลาสติกและไหลได้ง่าย ในช่วงนี้เมื่อเทคอนกรีตลงในแบบคอนกรีตจะไหลไปตามช่องว่างระหว่างเหล็กเสริม ซึ่งอาจจะช่วยด้วยการจี้เขย่าเพื่อลดรูพรุนในเนื้อคอนกรีต การปรับแต่งผิวหน้าก็ทำได้ง่าย เมื่อปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเกิดต่อเนื่องปริมาณของซีเมนต์เจลจะเพิ่มขึ้นเรื่อย จนถึงจุดที่คอนกรีตแข็งตัว สูญเสียความง่ายในการเท และมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น อัตราการสร้างซีเมนต์เจลขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ปฏิกิริยาจะเกิดอย่างรวดเร็ว ที่อุณหภูมิสูงคอนกรีตจะแข็งตัวโดยใช้เวลาเพียงสิบถึงสิบห้านาทีเท่านั้น ที่อุณหภูมิต่ำปฏิกิริยาอาจจะใช้เวลาถึง 10 - 12 ชั่วโมง เพื่อทำให้คอนกรีตแข็งตัว เมื่อเราทุบคอนกรีตให้แตกออกจากกัน จะเห็นได้ว่าคอนกรีตประกอบด้วยวัสดุหยาบหลายขนาดล้อมรอบด้วยซีเมนต์และทราย คอนกรีตที่แน่นเป็นเนื้อเดียวกันปราศจากรูพรุน รอยแตกร้าว และข้อบกพร่องอื่น ๆ เป็นสิ่งที่พึงประสงค์ คอนกรีตควรจะมีคุณสมบัติแข็งแรงสม่ำเสมอ น้ำซึมผ่านไม่ได้ และมีผิวที่ดูสวยงาม แต่ในทางปฏิบัติแล้ว เป็นการยากมากที่จะผลิตคอนกรีตที่สมบูรณ์แบบ แม้จะควบคุมการผลิตอย่างดีเพียงใดก็ตาม รูพรุนในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วเกิดจากฟองอากาศที่ฝังตัวอยู่ในคอนกรีตสดระหว่างการผสม และเกิดจากการแยกตัวของมวลรวมหยาบจากซีเมนต์เจลเมื่อเทคอนกรีตสดลงในแบบ ปริมาณน้ำที่ผสมในคอนกรีตเพื่อให้เทได้ง่ายจะมีมากกว่าปริมาณที่ต้องการเพื่อทำปฏิกิริยากับซีเมนต์ถึงสองเท่า น้ำส่วนเกินจะลอยตัวขึ้นสู่ผิวของคอนกรีตเมื่อมีการจี้เขย่าการลอยตัวของน้ำขึ้นสู่ผิวนี้เรียกว่า*การเยิ้ม*

สิ่งบกพร่องที่ผิวซึ่งมีลักษณะเป็นหลุมเป็นบ่อหรือเหมือนกับรังผึ้ง เกิดขึ้นเนื่องจากปริมาณของซีเมนต์เจลไม่เพียงพอหรืออาจจะเกิดจากการจี้เขย่าที่ไม่เพียงพอเมื่อเทคอนกรีตลงในแบบ เมื่อใช้เอกซ์เรย์หรือกล้องขยายเข้าช่วย จะเห็นรอยร้าวเล็ก ๆ ภายในเนื้อคอนกรีตซึ่งเกิดจากการสูญเสียกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์เจลกับมวลรวม การสูญเสียกำลังยึดเหนี่ยวมีผลมาจากการแห้งและการหดตัว รอยร้าวภายในเหล่านี้เป็นตัวอธิบายว่าทำไมคอนกรีตจึงรับแรงอัดได้สูงแต่รับแรงดึงได้ต่ำมาก ภายใต้แรงอัดรอยร้าวจะถูกบีบเข้าหากัน จนเนื้อคอนกรีตบนแต่ละด้านของรอยร้าวถูกบีบเข้ามาชิดกัน ทำให้มีเนื้อที่ในการรับแรงอัดเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้าม เมื่ออยู่ภายใต้แรงดึง หน่วย

แรงดึงที่ปลายของรอยร้าวจะสูงกว่าหน่วยแรงดึงเฉลี่ย ทำให้รอยร้าวขยายตัว ส่งผลให้เนื้อที่ในการรับแรงดึงลดลงอย่างรวดเร็ว นอกเหนือไปจากสิ่งบกพร่องเล็กน้อยเหล่านี้ที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ องค์อาคารคอนกรีตที่มีการยึดรั้ง จะเกิดการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวและการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเนื่องจากสภาวะแวดล้อม ถึงแม้ว่ารอยแตกร้าวเหล่านี้จะเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ แต่การเสริมเหล็กซึ่งเรียกว่า *เหล็กเสริมต้านการยืดหด* (Temperature and Shrinkage Steel) จะช่วยควบคุมขนาดและตำแหน่งของการแตกร้าว ป้องกันไม่ให้การใช้งานและรูปแบบของโครงสร้างสูญเสียไป

2.1.1 วัสดุของคอนกรีต

คอนกรีตส่วนใหญ่ทำด้วยปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ซึ่งเรียกอีกชื่อว่า *ไฮดรอลิกซีเมนต์* (Hydraulic Cement)อันเป็นชื่อเรียกตามคุณสมบัติของมัน เพราะซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับน้ำและสามารถแข็งตัวได้ภายใต้น้ำ

ปอร์ตแลนต์ซีเมนต์โดยทั่วไปแบ่งเป็น 5 ชนิด (ตารางที่ 2.1) ทั้งห้าชนิดผลิตมาจากวัสดุพื้นฐานเดียวกันแต่คุณสมบัติแตกต่างกัน เนื่องจากกรรมวิธีที่แตกต่างกันในขั้นตอนที่วัตถุดิบบางอย่าง เช่น ดินเหนียวและหินปูน ถูกผสม เผา และบดผสมกลายเป็นผงซีเมนต์

ตารางที่ 1.1 ชนิดของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์

ชนิด	ชื่อ	การใช้งานหรือคุณลักษณะทั่วไปของซีเมนต์
I	ทั่วไป	ใช้งานทั่วไป; ใช้เมื่อไม่มีความต้องการเป็นพิเศษ
II	ปานกลาง	มีความต้านทานต่อซัลเฟตดีกว่าชนิดที่ 1 มีความร้อนปานกลาง ระหว่างการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน
III	High-early Strength	ให้กำลังได้รวดเร็ว ถอดแบบได้เร็ว ใช้เร่งงานก่อสร้าง
IV	ความร้อนต่ำ	มีความร้อนเกิดขึ้นต่ำ; ใช้ในการก่อสร้างที่มีหน้าตัดใหญ่ เช่น เขื่อน
V	ต้านทานซัลเฟต	ใช้เมื่อคอนกรีตอยู่ในบริเวณที่มีซัลเฟตสูง

มวลรวมซึ่งเป็นส่วนประกอบประมาณร้อยละ 75 ของเนื้อคอนกรีต มักจะเป็นกรวดหรือหินซึ่งมีการจัดส่วนคละของขนาดที่เหมาะสม มวลรวมที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (ช่องเปิดขนาด 6.4 มม) ถูกจัดให้เป็นมวลรวมละเอียด มวลรวมที่ใหญ่กว่านั้นจัดให้เป็นมวลรวมหยาบ เนื่องจากฝุ่นหรือสารเคมีจะทำให้การยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์เจลและมวลรวมลดลงได้

ดังนั้นคอนกรีตที่คงทนจะต้องใช้มวลรวมที่สะอาดและแข็งแกร่ง คอนกรีตไม่เสริมเหล็กซึ่งใช้มวลรวมเป็นหินและกรวด จะมีน้ำหนักโดยปกติประมาณ 2320 กก./ม.^{3} แต่เมื่อเสริมเหล็กเข้าไป โดยทั่วไปน้ำหนักจะเพิ่มเป็นประมาณ 2400 กก./ม.^{3} ถ้าผู้ออกแบบต้องการที่จะลดน้ำหนักขององค์อาคารคอนกรีตที่ไม่อยู่ภายใต้การเสียดทานสูง ก็อาจจะใช้มวลรวมน้ำหนักเบาทำจากดินดาน (Shale) และกากแร่ (Slags) แทนหินหรือกรวด คอนกรีตซึ่งมีกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 175 กก./ซม.^{2} และหนักน้อยกว่า 1840 กก./ม.^{3} จะถูกจัดเป็น *คอนกรีตน้ำหนักเบา* ถ้ามวลรวมทั้งหยาบและละเอียดเป็นมวลรวมเบา จะจัดเป็น *คอนกรีตน้ำหนักเบาที่มีมวลเบาล้วน*(All-lightweight) ถ้ามวลรวมหยาบเป็นมวลรวมเบาและมวลรวมละเอียดเป็นทราย จะจัดเป็น *คอนกรีตน้ำหนักเบาที่มีทรายเป็นส่วนผสม* (Sand-lightweight)

มาตรฐานการออกแบบ [1] กำหนดขนาดโตสุดของมวลรวมต้องไม่ใหญ่กว่า

1. 1/2 ของด้านในที่แคบที่สุดของแบบหล่อ
2. 1/3 ของความหนาของแผ่นพื้น
3. 3/4 ของระยะช่องว่างที่น้อยที่สุดระหว่างเหล็กเสริมแต่ละเส้นหรือแต่ละมัด

หากวิศวกรพิจารณาเห็นว่าคอนกรีตซึ่งใช้มวลรวมใหญ่กว่าข้อกำหนดแต่มีความสามารถเทได้และมีวิธีการทำให้คอนกรีตแน่นตัวได้โดยจะไม่เกิดรูพรุนหรือเกิดโพรงขึ้นแล้ว ก็อาจจะผ่อนผันจากข้อกำหนดนี้ได้

2.1.2 ความแข็งแรงของคอนกรีต

อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ เป็นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อความแข็งแรง และความทนทานของคอนกรีต เมื่ออัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์สูง จะได้เจลที่เจือจาง มีการหดตัวสูง และไม่แข็งแรง คอนกรีตที่ผลิตจากเจลแบบนี้จะมีกำลังต่ำและมีความต้านทานต่อสภาวะแวดล้อมต่ำ

อัตราการเพิ่มกำลังของคอนกรีตจะสูงขึ้นถ้าใช้ซีเมนต์ละเอียด รวมทั้งการให้ความร้อนด้วยการบ่มด้วยไอน้ำหรือใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น แคลเซียมคลอไรด์ ทำให้เกิดการเพิ่มของอัตราการเพิ่มกำลังในคอนกรีต ทำให้ถอดแบบได้เร็วส่งผลให้การก่อสร้างรวดเร็วขึ้น

ถ้าคอนกรีตสดถูกแช่แข็ง น้ำส่วนเกินที่อยู่ในรูพรุนในเนื้อคอนกรีตจะกลายเป็นน้ำแข็ง เกิดการขยายตัว ทำลายโครงสร้างของคอนกรีต และลดกำลังของคอนกรีตลงอย่างถาวร ในกรณีที่คอนกรีตต้องโดนน้ำเกลือ หรือต้องอยู่ภายใต้วัฏจักรของการเย็นจนแข็งและละลาย ควรจะใส่สารผสมเพิ่มฟองอากาศ ซึ่งจะเพิ่มปริมาณฟองอากาศ ในเนื้อคอนกรีต ประมาณร้อยละ 4 ถึง 8 ฟองอากาศเหล่านี้จะช่วยเพิ่มความทนทานให้คอนกรีตและยังช่วยเป็นเสมือนตัวหล่อลื่นช่วยให้ง่ายต่อการเทคอนกรีตอีกด้วย

เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีกำลังสูงสุดและมีความทนทาน มาตรฐานการออกแบบ กำหนดว่าต้องบ่มคอนกรีตในอุณหภูมิที่สูงกว่า 10° ซ. และให้มีความชื้นอยู่เสมออย่างน้อย 7 วันนับจากวันที่เทคอนกรีต และสำหรับคอนกรีตที่ให้กำลังเร็วให้ใช้เวลาอย่างน้อย 3 วันในการบ่ม ความชื้นจะช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นอย่างต่อเนื่อง เพิ่มปริมาณซีเมนต์เจล การบ่มอาจจะทำด้วยการพ่นน้ำคลุมคอนกรีตด้วยวัสดุกันน้ำหรือทิ้งแบบไว้โดยไม่ถอดและคลุมคอนกรีตส่วนที่โดนอากาศ

2.1.3 ความสามารถเทได้ (Workability)

ในการผลิตคอนกรีตที่มีคุณภาพสูง จะต้องมีปริมาณน้ำที่พอเพียงเพื่อช่วยให้คอนกรีตไหลเข้าไปในทุกส่วนของแบบ แต่ถ้าปริมาณน้ำมากเกินไป จะทำให้ได้คอนกรีตที่กำลังต่ำและมีการหดตัวสูง ในปัจจุบันมีสารผสมเพิ่มลดปริมาณน้ำ (Superplasticizer) ให้เลือกใช้อย่างแพร่หลาย ทำให้สามารถผลิตคอนกรีตที่มีความสามารถในการเทสูงโดยไม่ต้องเพิ่มปริมาณน้ำ

2.1.4 การวัดค่ายุบตัว (Slump Test)

การทดสอบค่ายุบตัวเป็นวิธีที่ใช้ทั่วไปในสนามเพื่อควบคุมความสามารถเทได้และคุณภาพของคอนกรีต ซึ่งขั้นตอนคร่าว ๆ ประกอบด้วยการเทคอนกรีตสดลงในโคนรูปทรงกรวยตัดสูง 30 ซม.วางบนพื้นราบ หลังจากที่ทำคอนกรีตให้แน่นด้วยการตำด้วยแท่งเหล็ก และปาดผิวหน้าเรียบร้อย จะค่อย ๆ ยกโคนรูปทรงกรวยขึ้น คอนกรีตสดจะยุบตัวลง ผลแตกต่างระหว่างความสูงของโคนรูปทรงกรวยกับความสูงคอนกรีตที่ยุบตัวจะเรียกว่า *ค่ายุบตัว* ค่ายุบตัวโดยทั่วไปจะอยู่ระหว่าง 5 ถึง 15ซม. คอนกรีตสดที่มีค่าการยุบตัวมากจะใช้ในการก่อสร้างซึ่งมีแบบที่แคบ และจัดเหล็กเสริมวางค่อนข้างถี่

2.1.5 ความทนทาน (Durability)

การเลือกกำลังของคอนกรีตที่จะใช้ ในเบื้องต้นนั้นจะต้องคำนึงถึง กำลังที่ต้องการและสภาวะแวดล้อมว่าจะโดนน้ำทะเล หรือเกลือที่ใช้ในการละลายน้ำที่แข็งจับตัวบนผิวคอนกรีตด้วยหรือไม่ คอนกรีตจะต้านสภาวะเหล่านี้ได้ ถ้ามีการบ่มที่ดี และจี้เขย่าอย่างทั่วถึงโครงสร้างคอนกรีตที่โดนความชื้นและอยู่ภายใต้วัฏจักรของการเย็นจนแข็งและละลาย น้ำแข็งที่จับตัวบนผิวและน้ำในรูพรุนในเนื้อคอนกรีตที่เกิดการแข็งตัว จะก่อให้เกิดแรงดันภายใน ซึ่งจะทำลายเนื้อคอนกรีตอย่างรวดเร็วสิ่งเหล่านี้สามารถป้องกันได้ ด้วยการใช้คอนกรีตกำลังสูง และใส่สารผสมเพิ่มฟองอากาศ มาตรฐานการออกแบบกำหนดว่า ต้องมีปริมาตรของฟองอากาศ ประมาณร้อยละ 6 ถึง 7.5 สำหรับคอนกรีตที่มีมวลรวมขนาดเล็กกว่า 3/8 นิ้ว และร้อยละ 3.5 ถึง 4.5 สำหรับคอนกรีตที่มีมวลรวมขนาดใหญ่กว่า 3 นิ้วเพื่อจะให้มีปริมาณซีเมนต์ที่เพียงพอ มาตรฐานการออกแบบกำหนดว่า สำหรับคอนกรีตน้ำหนักธรรมดาอัตราส่วนของ น้ำต่อซีเมนต์ โดยที่น้ำหนักจะต้องไม่เกิน 0.50 สำหรับ

โครงสร้างคอนกรีตที่ต้องสัมผัสกับน้ำ ที่มีปริมาณซัลเฟตปานกลาง มาตรฐานการออกแบบระบุว่าคอนกรีตนั้นจะต้องผลิตด้วยซีเมนต์ชนิด II ซึ่งเป็นซีเมนต์ที่ต้านทานซัลเฟตได้ ถ้าต้องสัมผัสกับน้ำที่มีปริมาณซัลเฟตสูง ประมาณ 1,500 ถึง 10,000 ppm. ควรใช้ซีเมนต์ชนิด V ซึ่งต้านทานซัลเฟตได้สูงสุด และอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์จะต้องไม่เกิน 0.45 สำหรับคอนกรีตน้ำหนักธรรมดา

2.2 คุณสมบัติทางกลของคอนกรีต

2.2.1 กำลังรับแรงอัดและโมดูลัสยืดหยุ่น

โดยทั่วไปแล้วเราสามารถที่จะหากำลังรับแรงอัด ของคอนกรีตได้จาก การกดแท่งตัวอย่างรูปทรงกระบอกที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 ซม. และยาว 30 ซม. จนวิบัติ คอนกรีตที่ทดสอบต้องมีอายุ 28 วัน และต้องบ่มใต้น้ำหรือบ่มในห้องที่มีอุณหภูมิคงที่และมีความชื้นสัมพัทธ์ 100 เปอร์เซ็นต์ การให้ความชื้นตลอดเวลาแก่คอนกรีตจะเป็นการเร่งอัตราการเพิ่มกำลังโดยตรง ซึ่งทำให้มีปฏิกิริยาไฮเดรชั่นอย่างต่อเนื่องกำลังรับแรงอัดสูงสุดซึ่งเกิดขึ้นเมื่อความเครียดมีค่าระหว่าง 0.002 ถึง 0.003 จะแทนค่าด้วย f_c' ถึงแม้ว่าความเครียดที่จุดวิบัติ จะมีค่าแปรเปลี่ยนจาก 0.003 ในคอนกรีตกำลังสูงไปจนถึง 0.005 ในคอนกรีตกำลังต่ำ มาตรฐานการออกแบบกำหนดให้ใช้ค่าความเครียดสูงสุดเป็น 0.003 สำหรับคอนกรีตทุกชนิด ถึงแม้จะพบว่ามีการใช้คอนกรีตซึ่งมีกำลังอัดตั้งแต่ 175 กก./ซม.^{2} จนถึง 1300 กก./ซม.^{2} ในการก่อสร้างทั่วไป แต่ในส่วนใหญ่แล้ว คอนกรีตที่ใช้จะมีกำลังรับแรงอัดอยู่ระหว่าง 210 กก./ซม.^{2}ถึง350 กก./ซม.^{2}เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีตไม่เป็นเชิงเส้น โมดูลัสยืดหยุ่นจึงแปรเปลี่ยนตามกำลัง สำหรับคอนกรีตทั่วไป ภายใต้หน่วยแรงที่ต่ำกว่า $2/3\,f'c$ อัตราส่วนโพซอง [2] (Poisson's Ratio: อัตราส่วนระหว่างความเครียดในแนวตั้งฉากต่อความเครียดในแนวแกน) จะมีค่าประมาณ 0.2

2.2.2 กำลังรับแรงดึง (Tensile Strength)

ผลจากห้องปฏิบัติการแสดงว่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตมีค่าแปรเปลี่ยนมาก อยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 8ถึง 15 ของกำลังรับแรงอัด ความแตกต่างอันมากมายระหว่างกำลังรับแรงดึงและกำลังรับแรงอัด เป็นผลมาจากรอยแตกร้าวเล็ก ๆ ที่มีอยู่ทั่วไปในเนื้อคอนกรีต ที่หน่วยแรงไม่มากนัก รอยแตกร้าวจะไม่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต เนื่องจากแรงอัดจะบีบรอยแตกร้าวเข้าหากันและถ่ายแรงผ่านรอยแตก ดังนั้นเนื้อคอนกรีตทั้งส่วนที่มีรอยแตกและไม่มีก็จะช่วยกันส่งถ่ายแรงอัด

ภายใต้แรงดึง การกระจายหน่วยแรงผ่านหน้าตัดจะเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากแรงดึงไม่สามารถถ่ายผ่านรอยแตก จะถ่ายผ่านเฉพาะในพื้นที่ที่ไม่มีรอยแตกในหน้าตัดเท่านั้น ทำให้พื้นที่ประสิทธิผลในการส่งผ่านแรงดึงมีน้อยกว่าพื้นที่ทั้งหมดของหน้าตัด หน่วยแรงที่เกิดขึ้นจริงจะมีค่า

สูงกว่าหน่วยแรงเฉลี่ย เมื่อหน่วยแรงดึงถ่ายผ่าน รอบรอยแตกร้าวและรูพรุนภายใน จะเกิดความเข้มของหน่วยแรง (Stress Concentration) รอบขอบของรูพรุน และที่ปลายของรอยแตกร้าว ทำให้รอยแตกร้าวขยายตัวลดพื้นที่ที่ไม่มีรอยแตก ทำให้หน่วยแรงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว นำไปสู่การวิบัติของหน้าตัด เนื่องจากขนาดและตำแหน่งของรอยแตกร้าวเหล่านี้เป็นสิ่งที่ไม่สามารถระบุแน่ชัดได้ กำลังรับแรงดึงจึงมีค่าแปรเปลี่ยนมาก

2.2.3 กำลังรับแรงสองแกน (Biaxial Strength)

บางส่วนขององค์อาคารจะอยู่ภายใต้สภาวะที่แรงกระทำในสองทิศทาง ภายใต้แรงอัดทั้งสองแกน กำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 20 ของกำลังรับแรงอัดแกนเดียว แต่ถ้าแรงในอีกแกนหนึ่งเป็นแรงดึงแล้ว กำลังรับแรงอัดจะลดลงอย่างมากมาย เมื่อเปรียบเทียบกับแรงดึงที่มากระทำ

2.2.4 การคืบ (Creep)

ผลจากห้องปฏิบัติการแสดงว่าการยืดหดตัวขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก เนื่องจากแรงตามแกน และแรงดัดนั้นจะเพิ่มขึ้นตามเวลา การยืดหดตัวทั้งหมด แบ่งออกได้เป็นสองส่วน ส่วนแรกได้แก่การยืดหดตัวเบื้องต้นที่เกิดขึ้น ทันทีหลังจากที่มีน้ำหนักมากระทำ และส่วนที่สองได้แก่ การยืดหดตัวที่เพิ่มขึ้นตามเวลา เรียกว่า *การคืบ* (Creep) ซึ่งจะเพิ่มต่อไปในระยะเวลาสองสามปีแต่อัตราการเพิ่มจะลดลงประมาณร้อยละ 75 ของการคืบจะเกิดขึ้นในปีแรก และจะเกิดต่อไปเรื่อย ๆ จนสิ้นสุดเอาประมาณสิ้นปีที่สามหรือสี่ ถ้าเอาแรงกดออก จะเกิดการยืดตัวกลับแบบอีลาสติกตามด้วยการยืดตัวกลับจากการคืบ แต่อย่างไรก็ตามจะมีการหดตัวแบบถาวรคงอยู่ ถึงแม้ว่าการคืบที่เกิดขึ้นภายใต้น้ำหนักใช้งานทั่วไปนั้นจะไม่ลดกำลังขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่จะผลต่อพฤติกรรมกรณีที่จะกล่าวถึงต่อไป แสดงผลของการคืบ ที่มีต่อพฤติกรรมและวิธีที่จะป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้น

กรณีที่ 1 – เนื่องจากการคืบขึ้นอยู่กับเวลา ดังนั้นการแอ่นตัวสุดท้ายของคานอาจจะมากกว่าการแอ่นตัวเบื้องต้นประมาณสองถึงสามเท่า ดังนั้นผู้ออกแบบจะต้องคำนึงถึงการแอ่นตัวสุดท้ายนี้ ไม่ว่าจะเป็นในคอนกรีตเสริมเหล็กหรือคอนกรีตอัดแรง จะต้องตรวจสอบว่าโครงสร้างยังคงใช้งานได้และการแอ่นตัวสุดท้ายต้องน้อยกว่าค่าที่ยอมให้

กรณีที่ 2 – ในคอนกรีตอัดแรง แรงอัดส่วนมากจะเกิดขึ้นที่ปลายทั้งสองข้างขององค์อาคารที่รับตัวยึดของลวดอัดแรง เมื่อเกิดการคืบขึ้นในองค์อาคาร จะส่งผลให้เกิดการเสื่อมลดของแรงอัด

ทำให้องค์อาคารเกิดการแตกร้าวและแอ่นตัวมากขึ้นภายใต้น้ำหนักใช้งาน ข้อเสียนี้สามารถกำจัดได้โดยการใช้ลวดแรงสูง ซึ่งถึงแม้จะมีการเสื่อมลดของแรงดึงในลวดเนื่องจากการคืบแล้วก็ยังคงรักษาแรงอัดในเนื้อคอนกรีตเหมือนเดิม

กรณีที่ 3 – เสาคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงอัดคงที่ การคืบจะทำให้หน่วยแรงเบื้องต้นในเหล็กเสริมเพิ่มขึ้นเป็นสองหรือสามเท่า เมื่อการคืบในคอนกรีตเกิดขึ้น เหล็กเสริมซึ่งยึดเหนี่ยวติดกับเนื้อคอนกรีตก็จะต้องหดตัวตามไปด้วย ทำให้แรงที่เหล็กเสริมต้องรับเพิ่มขึ้น ตามแรงที่เนื้อคอนกรีตรับลดลงเนื่องจากการคืบข้อดีของการคืบก็มีอยู่บ้าง ยกตัวอย่าง ในกรณีขององค์อาคารภายใต้แรงอัดสูงบนบางตำแหน่ง การคืบจะลดหน่วยแรงที่สูงบนตำแหน่งนั้น ถ่ายแรงไปให้ตำแหน่งใกล้เคียงที่มีหน่วยแรงต่ำช่วยรับ ดังนั้นการคืบจึงเป็นเสมือนตัวลดความเข้มของหน่วยแรงและช่วยป้องกันการวิบัติการคืบจะแปรเปลี่ยนตามหน่วยแรงในเนื้อคอนกรีต ตราบใดที่หน่วยแรงในคอนกรีตต่ำกว่าครึ่งหนึ่งของกำลังของคอนกรีต ค่าการคืบสูงสุดจะขึ้นอยู่กับชนิดของมวลรวม กำลังของคอนกรีต วิธีการบ่ม อายุของคอนกรีตเมื่อเริ่มใช้งาน อัตราส่วนผิวต่อปริมาตรขององค์อาคารและความชื้นสัมพัทธ์จะลดค่าของการคืบได้ตามขั้นตอนต่อไปนี้

1. ยืดการใช้งานของคอนกรีตไปจนกระทั่งคอนกรีตมีกำลังเพียงพอ
2. ใช้คอนกรีตกำลังสูง
3. ใช้ปริมาตรของซีเมนต์เจลให้ต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาตรของมวลรวม
4. บ่มคอนกรีตด้วยไอน้ำภายใต้ความดัน
5. เพิ่มปริมาณเหล็กเสริม
6. ใช้มวลรวมเป็นหินปูน

2.2.5 การหดตัว (Shrinkage)

เพื่อที่จะให้ได้คอนกรีตสดที่สามารถเทลงแบบได้สามารถไหลไประหว่างเหล็กเสริมตามซอกมุมทุกส่วนของไม้แบบ และปราศจากรูพรุน จะต้องใช้ปริมาณน้ำที่ผสมในคอนกรีตมากกว่าปริมาณที่ต้องการเพื่อทำปฏิกิริยากับซีเมนต์ถึงสองเท่า หลังจากคอนกรีตถูกบ่มและเริ่มแข็งตัว น้ำส่วนเกินซึ่งเหลือจากการทำปฏิกิริยากับซีเมนต์แล้วจะลอยตัวจากเนื้อคอนกรีตขึ้นสู่ผิวหน้า เมื่อน้ำเหล่านี้ระเหยไป คอนกรีตก็จะหดตัวตามไปด้วย ปริมาณการสูญเสียความชื้นแปรเปลี่ยนตามระยะถึงผิว จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วใกล้ผิวหน้า และเกิดอย่างช้าภายในเนื้อคอนกรีตเพราะระยะที่ห่างจากผิวหน้า การหดตัวต่อหน่วยความยาว ซึ่งเกิดร่วมกับการลดปริมาตรเนื่องจากการสูญเสียความชื้นนี้เรียกว่า *การหดตัว* (Shrinkage)

ปริมาณการหดตัวขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำเบื้องต้นในคอนกรีตกับความชื้นสัมพัทธ์ของสภาวะแวดล้อม ปริมาณการหดตัวกับปริมาณน้ำในส่วนผสมมีความสัมพันธ์เกือบเป็นเส้นตรงต่อกัน ถ้าความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น การหดตัวจะลดลง ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 100 เปอร์เซนต์หรือถ้าเอาไปจุ่มในน้ำ คอนกรีตจะขยายตัว เพราะคอนกรีตเจลจะก่อตัวเพิ่ม เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ค่าสูงสุดและอัตราการเกิดของการหดตัว ขึ้นอยู่กับตราส่วนของผิวหน้าต่อปริมาตร ขององค์อาคารคอนกรีต ถ้ามีผิวหน้ามาก เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาตร ความชื้นก็จะระเหยได้เร็ว สำหรับองค์อาคารคอนกรีตไม่เสริมเหล็กภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ทั่วไป (ประมาณ 70 %) การหดตัวมีค่าสูงสุดประมาณ 0.0004 ถึง 0.0007แต่ถ้ามีการเสริมเหล็กแล้ว เหล็กจะช่วยลดการหดตัวสูงสุดลงเหลือ 0.0002 ถึง 0.0003

ถึงแม้ว่าการหดตัวจะเกิดต่อเนื่องเป็นเวลาหลายปี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในองค์อาคารที่มีความหนามากประมาณร้อยละ 90 ของค่าสูงสุดจะเกิดขึ้นในปีแรก การหดตัวในคอนกรีตน้ำหนักเบาจะมีค่ามากกว่าคอนกรีตน้ำหนักธรรมดา เนื่องจากมวลรวมของคอนกรีตน้ำหนักเบาจะพองตัวในตอนแรกเนื่องจากการดูดซึมน้ำเข้าไปในตัวของมัน เมื่อคอนกรีตเริ่มแข็งตัว จะเกิดการหดตัวที่มากซึ่งเป็นผลมาจากการหดตัวของมวลรวม และซีเมนต์เจลเนื่องจากคอนกรีตใกล้ผิวหน้าจะหดตัวเร็วกว่าคอนกรีตภายใน การหดตัวจะมีมากที่ใกล้ผิวหน้ามากกว่าภายในเนื้อคอนกรีต ทำให้เกิดแรงภายในที่พยายามจะสร้างความสมดุลขึ้น โดยที่ด้านนอกจะเกิดแรงดึง และภายในจะเกิดแรงอัด ซึ่งการกระจายโดยประมาณของหน่วยแรงเหล่านี้ จะเข้าใจหน่วยแรงที่เกิดขึ้น เนื่องจากการหดตัวนี้ได้ง่ายขึ้นถ้าลองคำนึงถึงคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐาน และถ้าแยกส่วนแกนออกจากส่วนวงแหวนรอบนอกและปล่อยให้แต่ละส่วนหดตัวได้เองตามความชื้นที่มีอยู่ในตัวของมัน

แต่ในความเป็นจริงแล้ว การหดตัวที่จุดต่อจะต้องเท่ากัน ดังนั้นที่ผิวสัมผัสของแกนและส่วนในของวงแหวนจะเกิดหน่วยแรงเฉือนขึ้น ถ้าหากตัดส่วนบนของแกนและวงแหวนมาพิจารณาเพื่อให้หน้าตัดอยู่สภาวะสมดุล หน่วยแรงเฉือนจะต้องทำให้เกิดแรงอัดขึ้นในส่วนแกน และทำให้เกิดแรงดึงขึ้นในวงแหวนรอบนอก หลังจากระยะเวลาหนึ่ง เมื่อความชื้นในส่วนในระเหยไปหมด การหดตัวจะเกิดสม่ำเสมอทั่วหน้าตัด หน่วยแรงเหล่านี้ก็จะหายไปนอกเหนือไปจากการเกิดหน่วยแรงที่สมดุลในตัวมันเอง เนื่องจากการหดตัวที่ไม่สม่ำเสมอ การหดตัวยังทำให้เกิดหน่วยแรงในองค์อาคารที่มีการยึดต้านการหดตัวยกตัวอย่างเช่น คานคอนกรีตซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างอาคาร ถ้าปล่อยให้คอนกรีตในคานหดตัวได้ ความยาวของคานก็จะลดเป็น L' ซึ่งสั้นกว่าความยาวระหว่างเสา L แต่เนื่องจากคานถูกยึดติดแน่นอยู่กับเสา ทำให้เกิดแรงดึงที่จุดต่อ ต้านการหดตัว แรงดึงนี้มักจะสูงกว่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีต ดังนั้นจะเกิดรอยแตกร้าวขึ้นในคาน รอยแตกร้าวนั้นจะเริ่มจากตำแหน่งที่อ่อนแอที่สุดในคาน และจะเกิดต่อเนื่องไปทั่วความยาวของคาน

การแตกร้าวเนื่องจากแรงดึงอันเป็นผลมาจากการหดตัวจะเกิดขึ้นในแทบทุกองค์อาคารที่มีการยึดรั้งรอบ ไม่ว่าจะเป็นผนัง แผ่นพื้นบนคาน หรือแผ่นพื้นวางบนดิน จะต้องมีการควบคุมรอยแตกร้าวเพราะจะกลายเป็นช่องเปิดให้ความชื้นซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้ ทั้งยังลดกำลังรับแรง

เฉือนของหน้าตัดอีกด้วยเพื่อที่จะลดรอยแตกร้าวผู้ออกแบบควรดำเนินการดังต่อไปนี้

1. ใช้น้ำในส่วนผสมให้น้อยที่สุด

2. ใช้มวลรวมที่ปราศจากรูพรุน

3. บ่มคอนกรีตให้ดี

4. จำกัดพื้นที่หรือความยาวของบริเวณที่จะเทคอนกรีตในแต่ละครั้งถ้าซอยการเทผนัง หรือแผ่นพื้นเป็นหลายส่วน การหดตัวจะเกิดเฉพาะในส่วนที่เทแล้ว ดังนั้นการหดตัวจะน้อยกว่าการเทหลายส่วนพร้อมกัน

5. ใช้รอยต่อก่อสร้าง (Construction Joint) และรอยต่อเผื่อขยาย (Expansion Joint) เพื่อควบคุมตำแหน่งของรอยแตกร้าว ถ้าจะใช้รอยต่อก่อสร้างเพื่อลดการหดตัวในคานหรือแผ่นพื้นที่หล่อติดคาน รอยต่อจะต้องอยู่ในบริเวณที่มีแรงเฉือนต่ำ หรือบริเวณกลางช่วง เพื่อลดรอยร้าวในแผ่นพื้นหล่อบนดินควรใช้เหล็กเดือยหุ้มด้วยแผ่นยืดหยุ่นฝังในรอยต่อ

6. เพิ่มเหล็กเสริมเพื่อควบคุมความกว้างของรอยแตกร้าว เหล็กตะแกรงซึ่งเรียกว่า *เหล็กเสริมต้านการยืดหด* (Shrinkage Steel) จะช่วยลดความกว้างของรอยร้าว จนทำให้มองเห็นได้ด้วยตาเปล่าไม่ได้

2.2.6 ผลของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

คอนกรีตจะขยายตัวเมื่ออุณหภูมิเพิ่มและหดตัวเมื่ออุณหภูมิลด ถ้าองค์อาคารถูกยึดรั้งอุณหภูมิที่ลดจะทำให้เกิดหน่วยแรงดึงและอุณหภูมิที่เพิ่มจะทำให้เกิดหน่วยแรงอัดขึ้น การลดผลของอุณหภูมิจะทำได้ในลักษณะเดียวกับการลดผลของการหดตัว ผู้ออกแบบจะต้องป้องกันไม่ให้การยืดหดตัวนั้นจะส่งผลให้เกิดหน่วยแรงเกินกว่าที่องค์อาคารจะรับได้ สัมประสิทธิ์การขยายตัวของคอนกรีตจะมีค่าประมาณ 2.8×10^{-6} ซม./ซม./°ซ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าสัมประสิทธิ์ของเหล็กเสริมเพียงเล็กน้อย

2.3 เหล็กเสริม

คอนกรีตเป็นวัสดุที่เปราะ มีกำลังรับแรงดึงต่ำ จึงไม่สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างได้โดยลำพัง เพราะในองค์ประกอบของโครงสร้างทั่วไปจะต้องรับแรงเฉือนและโมเมนต์ซึ่งทำให้เกิดแรงดึงสูงบนหน้าตัด การเพิ่มเหล็กเสริมที่ยืดหยุ่น มีกำลังสูง และยึดติดอย่างแข็งแรงกับเนื้อคอนกรีต ทำให้ได้วัสดุที่เหนียวส่งถ่ายแรงดึงได้สูง และเหมาะสำหรับก่อสร้างเป็นส่วนต่าง ๆ ของอาคารมากมาย เช่น แผ่นพื้น คาน และเสา นอกเหนือไปจากนี้ เหล็กเสริมยังช่วยลดการคืบและลด

ความกว้างของรอยแตกร้าวในคอนกรีตเหล็กเสริมมีขนาดยาวเรียว สามารถดัดเป็นรูปต่างๆได้ทำให้สามารถสร้างองค์อาคารที่มีรูปแบบได้หลากหลาย

2.3.1 ชนิดของเหล็กเสริม

เหล็กเสริมทั่วไปจะอยู่ในรูปของเหล็กเส้นมีหน้าตัดเป็นวงกลม แบ่งออกเป็นสองประเภทตามลักษณะของผิวประเภทแรกเป็นเหล็กเส้นกลมมีผิวเรียบ(Round Bar) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6, 9, 12, 15, 19 และ25 มม. ชั้นคุณภาพที่มีจำหน่ายในประเทศมีเพียงอย่างเดียว คือ ชั้นคุณภาพ SR24 โดยที่ R หมายถึงRound หรือเหล็กเส้นกลมผิวเรียบ และตัวเลข 24 แสดงกำลังรับแรงดึงที่จุดครากไม่น้อยกว่า 2400 กก./ซม.^{2} ประเภทที่สองเป็นเหล็กเส้นกลมซึ่งมีบั้งหรือครีบเกลียวบนผิวเพื่อเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับเนื้อคอนกรีต เรียกว่า เหล็กข้ออ้อย (Deformed Bar) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10,12, 16, 20, 25, 28 และ 32 มม. ชั้นคุณภาพที่มีจำหน่ายในประเทศมีสามชั้นคุณภาพ คือ SD30, SD40และ SD50 โดยที่ D หมายถึง Deformed หรือเหล็กข้ออ้อย และตัวเลขข้างหลัง แสดงกำลังรับแรงดึงที่จุดคราก สำหรับขนาดของทั้งสองประเภท มีความยาวมาตรฐานที่ผลิตจากโรงงานมีสองขนาดคือ 10 และ 12 เมตร ในแบบก่อสร้าง จะใช้คำย่อ RB แทนเหล็กเส้นกลม และ DB แทนเหล็กข้ออ้อย ตามด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ยกตัวอย่างเช่น RB 6 หมายถึงเหล็กเส้นกลมขนาด 6 มม.และ DB25 หมายถึงเหล็กข้ออ้อยขนาด 25 มม.

งานก่อสร้างทั่วไปจะใช้เหล็กข้ออ้อย เพราะมีกำลังสูง และมีแรงยึดเหนี่ยวกับคอนกรีตสูงเปรียบเทียบง่าย ๆระหว่าง เหล็ก SD50 กับเหล็ก SR24 จะเห็นว่ากำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็ก SD50 เป็นสองเท่าของเหล็ก SR24 ดังนั้นภายใต้น้ำหนักกระทำเหมือนกัน และใช้การคำนวณง่าย ๆ โดยไม่คำนึงถึงข้อกำหนดต่างๆ ของมาตรฐานการออกแบบ ถ้าเลือกใช้เหล็ก SD50 จะจำเป็นต้องใช้พื้นที่หน้าตัดเพียงครึ่งเดียวของเหล็ก SR24 และราคาของเหล็ก SD50 ก็แพงกว่าเหล็ก SR24 ไม่เกิน 20% เหล็กเส้นกลมเหมาะสำหรับงานก่อสร้างขนาดไม่ใหญ่นัก เหมาะสำหรับโครงสร้างที่รับน้ำหนักไม่มาก เช่นในโครงสร้างที่วิเคราะห์แล้ว ได้หน่วยแรงใช้งานไม่เกินครึ่งหนึ่งของจุดครากของเหล็กเสริม เพราะแรงยึดหน่วงระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมประเภทนี้มีไม่มาก สำหรับการก่อสร้างทั่วไปจะนิยมใช้เหล็กเส้นกลมแค่สองขนาดคือ 6 และ 9 มม. เพราะขนาดเล็ก ดัดงอได้ง่าย มักจะใช้เป็นเหล็กปลอกของคานและเสา หรือเป็นเหล็กเสริมในแผ่นพื้นขนาดเล็กนอกเหนือไปจากเหล็กเส้นสองประเภทดังกล่าวมาแล้ว ยังมีเหล็กเสริมที่นิยมใช้เฉพาะในงานบางอย่างด้วย อีกสองประเภท คือ ลวดเหล็ก (Steel Wires) และ ลวดตะแกรงเหล็กเชื่อม (Welded Wire Fabric) ลวดเหล็กจะใช้เป็นเหล็กปลอกในเสาปลอกเกลียว ส่วนลวดตะแกรงเหล็กเชื่อมมักจะใช้ในแผ่นพื้นหล่อบนดินและถนน

2.3.2 คุณสมบัติของเหล็กเสริม

ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับหน่วยการยืดตัว ของตัวอย่างเหล็กเสริมภายใต้แรงดึง สำหรับเหล็กซึ่งมีจุดคราดต่ำกว่า 4000 กก./ซม.^{2} โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กวัดได้เป็น 2,040, 000 กก./ซม.^{2} สำหรับทุกชั้นคุณภาพ สำหรับเหล็กที่มีจุดครากสูงความสัมพันธ์ระหว่าง หน่วยแรงกับหน่วยการยืดตัวจะไม่แสดงจุดครากที่เด่นชัด ในกรณีนี้เราจะถือว่าจุดครากคือหน่วยแรงที่ตำแหน่งที่หน่วยการยืดตัวมีค่าเท่ากับ 0.0035

2.3.3 การวางเหล็กเสริม (Fabrication of Bars)

หลังจากที่ได้ศึกษาแบบก่อสร้างและรายการประกอบแบบอย่างถ่องแท้ ผู้รับเหมาจะทำการตัด และดัดเหล็กเสริมเพื่อใส่ลงในไม้แบบ ขั้นตอนจะเริ่มต้นด้วย การถอดแบบโครงสร้างแล้วจึงเขียนแบบรายละเอียด (Shop Drawing) สำหรับเหล็กเสริมทุกเส้นที่จะใส่ลงในโครงสร้างหลังจากที่วิศวกรผู้ออกแบบได้ตรวจสอบและอนุมัติรายละเอียดนี้แล้ว การตัด และการดัดก็จะเริ่มขึ้นเพื่อช่วยป้องกันไม่ให้เหล็กเสริมเคลื่อนตัวออกจากตำแหน่งที่วาง ในระหว่างการเทคอนกรีตและการจี้เขย่า คนงานจะผูกเหล็กเสริมชิ้นต่าง ๆ ให้รวมติดกันไว้ด้วยลวดผูกเหล็ก ในลักษณะเหมือนพรมในเหล็กเสริมแผ่นพื้นและในลักษณะเหมือนกรงในคานและเสา เพื่อให้ได้ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมตามต้องการจะมีการองรับเหล็กเสริม หรือกันด้านข้างด้วยตัวรองรับพลาสติก แต่ในการก่อสร้างทั่วไปในประเทศมักนิยมใช้การหล่อลูกปูนเล็กๆใช้แทน

ถ้าปล่อยให้เหล็กเสริมโดนฝนหรือน้ำค้าง จะเกิดสนิมขึ้นอย่างรวดเร็วบนผิวของเหล็กเสริม ถ้าสนิมมีไม่มากนัก ก็ไม่จำเป็นต้องเอาออก (ในความเป็นจริงแล้ว สนิมที่เกิดขึ้นเล็กน้อย จะเพิ่มความขรุขระบนผิวของเหล็ก ทำให้การยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กกับคอนกรีตดีขึ้น) แต่ถ้าสนิมเกิดมาก เป็นแผ่นแข็ง ก็จำเป็นต้องขัดออกก่อนเทคอนกรีต วิศวกรจะตรวจสอบอีกครั้งว่า เหล็กเสริมมีขนาดถูกต้องตามแบบ ระยะเรียง ระยะห่างถูกต้อง และวางในตำแหน่งที่ถูกต้อง การตรวจสอบครั้งสุดท้ายนี้เป็นสิ่งที่สำคัญมาก การวิบัติของอาคารหลายแห่งเกิดจาก การลดปริมาณเหล็กเสริมหรือการวางเหล็กเสริมไม่ถูกตำแหน่ง

2.4 วิธีออกแบบและข้อกำหนดด้านกำลัง

2.4.1 วิธีออกแบบ

วิธีออกแบบโครงสร้างคอนกรีตมีอยู่สองวิธีที่ใช้กันมาแต่ดั้งเดิม ได้แก่ วิธีหน่วยแรงใช้งาน (Working Stress Design) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมาตั้งแต่ ต้นคริสต์ศตวรรษที่ 1900 มาจนถึงต้นทศวรรษที่ 1960 แต่หลังจากการเผยแพร่มาตรฐานของ American Concrete Institute (ACI) ในปี

1963 ผู้ออกแบบก็เริ่มหันมาใช้การออกแบบโดยวิธีกำลัง (Strength Design) เพราะเป็นวิธีที่ให้ความปลอดภัยแก่โครงสร้างที่มองเห็นภาพพจน์ได้ดีกว่า

วิธีหน่วยแรงใช้งาน มีพื้นฐานอยู่บนการสมมุติค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในองค์อาคารภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน (Service Load) ซึ่งเป็นน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่คาดว่าองค์อาคารจะรับได้ วิธีนี้จะเลือกขนาดขององค์อาคารเพื่อให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นน้อยกว่าหน่วยแรงที่ยอมให้ โดยจะกำหนดหน่วยแรงที่ยอมให้ ให้เป็นอัตราส่วนของหน่วยแรงที่ วัสดุสามารถรับได้ ก่อนการวิบัติ หรือก่อนการครากผู้ใช้วิธีหน่วยแรงใช้งานจะต้องเข้าใจถึงพฤติกรรมขององค์อาคารภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน โดยใช้สมมติฐานที่ว่าหน่วยแรง และความเครียดมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น วิธีหน่วยแรงใช้งานไม่คำนึงถึงชนิดของการวิบัติขององค์อาคาร ไม่ว่าจะเป็นแบบเหนียวหรือแบบเปราะ ไม่คำนึงถึงข้อแตกต่างระหว่าง กำลังที่องค์อาคารรับได้ภายใต้น้ำบรรทุกใช้งาน และกำลังที่องค์อาคารรับได้สูงสุด ดังนั้นเราจึงไม่สามารถรู้อัตราส่วนปลอดภัยที่แท้จริงขององค์อาคาร ได้จากวิธีหน่วยแรงใช้งาน

วิธีกำลัง [3] มีพื้นฐานอยู่บนการหาน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิบัติแทนการหาหน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายใต้น้ำหนักบรรทุกผู้ออกแบบจะหาน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้โครงสร้างวิบัติโดยสมบูรณ์ และด้วยชนิดของการวิบัติที่เลือกได้ ซึ่งก็คงเป็นแบบเหนียวหรือช้า ดังนั้นวิธีนี้จะไม่ค่อยให้ความสำคัญกับหน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งานเนื่องจากการวิบัติแบบช้าในโครงสร้าง เป็นสิ่งที่เราให้ความสำคัญมากที่สุดในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก การออกแบบด้วยวิธีกำลังจึงเป็นวิธีที่เหมาะสมกว่า เราสามารถควบคุมกำลังวิบัติของทุกองค์อาคารในโครงสร้าง เราสามารถควบคุมชนิดการวิบัติของระบบโครงสร้างทั้งหมด ด้วยวิธีนี้ ถ้าเกิดมีน้ำหนักบรรทุกที่สูงกว่าที่ออกแบบไว้มากระทำ การวิบัติก็จะเกิดขึ้นเพียงบางส่วน ไม่ทำให้เกิดการวิบัติของโครงสร้างทั้งระบบ นอกจากนี้ ผลจากห้องปฏิบัติการยังยืนยันว่า การควบคุมชนิดของการวิบัติขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก สามารถกระทำได้อย่างแม่นยำและได้ผล แต่อย่างไรก็ตาม การหาขนาดของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจริง ในองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กก็ยังทำได้ไม่แม่นยำนัก เนื่องจากสาเหตุดังต่อไปนี้

1. หน่วยแรงอันเกิดจากการหดตัว (Shrinkage Stress) เนื่องจากการแข็งตัวของคอนกรีตสดทำให้เกิดหน่วยแรงที่พยายามจะสร้างความสมดุลด้วยตัวเอง

2. ภายใต้น้ำหนักบรรทุกที่มากระทำ การแตกร้าวของคอนกรีตมีรูปแบบเส้นที่ไม่แน่นอน ดังนั้นจึงไม่สามารถหาคุณสมบัติของหน้าตัดที่แต่ละตำแหน่งได้อย่างแน่นอน

3. เมื่อมีอายุมากขึ้นจะเกิดการคืบ (Creep) ขึ้นในเนื้อคอนกรีต ซึ่งการคืบทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในหน่วยแรง โดยทั่วไปจะเพิ่มหน่วยแรงในเหล็กเสริม และลดหน่วยแรงในคอนกรีต

การออกแบบโดยวิธีกำลัง จะเลือกขนาดองค์อาคารเพื่อรับ*น้ำหนักบรรทุกที่คูณด้วยตัวคูณเพิ่ม* (Factored Loads) น้ำหนักนี้ได้มาจาก การคูณน้ำหนักบรรทุกใช้งานด้วย *ตัวคูณเพิ่ม* (Load

Factors) ค่าของตัวคูณเพิ่มเป็นส่วนหนึ่งของอัตราส่วนความปลอดภัย ที่เพิ่มเข้าไปในน้ำหนักที่มากระทำ และขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำหนักน้ำหนักซึ่งมีขนาดและการกระจายที่ชัดเจน จะมีค่าของตัวคูณเพิ่มที่น้อย เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักที่มีขนาดและการกระจายที่ไม่ชัดเจนยกตัวอย่าง เช่น น้ำหนักบรรทุกคงที่ซึ่งสามารถหาได้อย่างแม่นยำจะใช้ค่าตัวคูณเพิ่มเท่ากับ 1.4 แต่น้ำหนักบรรทุกจรซึ่งส่วนมากได้มาจากการประมาณจะใช้ค่าตัวคูณเพิ่มเท่ากับ 1.7

โดยทั่วไป น้ำหนักบรรทุกที่คูณด้วยตัวคูณเพิ่มแล้ว จะถูกระบุด้วยตัวอักษร U และแรงภายในทั้งหลาย ที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกที่คูณด้วยตัวคูณ จะใช้ตัวอักษร u แสดงเป็นเครื่องหมายห้อย เช่น M_u แสดงถึงโมเมนต์ที่หน้าตัดใดๆ อันเกิดจากน้ำหนักบรรทุกที่คูณด้วยตัวคูณเพิ่มแล้ว ผู้ออกแบบจะใช้น้ำหนักบรรทุกที่คูณตัวคูณเพิ่มแล้วในการวิเคราะห์โครงสร้างโดยคำนึงถึงน้ำหนักตามแนวโน้มถ่วงและเมื่อรวมผลของแรงลมและแรงกระทำอื่นๆเป็นน้ำหนักบรรทุกที่ต้องคำนึงถึงในการวิเคราะห์โครงสร้าง อนึ่งแรงภายในที่เกิดขึ้นในแต่ละองค์อาคารเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกที่คูณด้วยตัวคูณ เรียกว่า *กำลังที่ต้องการ* (Required Strength)จะต้องเลือกขนาดขององค์อาคารให้ได้ *กำลังที่ใช้คำนวณออกแบบ* (Design Strength) ไม่น้อยกว่ากำลังที่ต้องการ (Required Strength) กำลังที่ใช้คำนวณออกแบบเป็นค่าที่ลดมาจากกำลังวิบัติหรือ*กำลังระบุ* (Nominal Strength)ของหน้าตัด กำลังระบุหาได้จากสภาวะของหน่วยแรงบนหน้าตัด ตามชนิดของการวิบัติ (อาจจะเป็นการครากของเหล็กเสริมหรือการอัดแตกของคอนกรีต) แรงภายในระบุใช้ตัวอักษร n เป็นเครื่องหมายห้อย

เพื่อที่จะรวมผลของการสูญเสียกำลังขององค์อาคาร เนื่องจากการก่อสร้างที่มีคุณภาพไม่ดีพอนั้น ขนาดขององค์อาคารที่เล็กกว่าแบบการวางเหล็กเสริมไม่ตรงตำแหน่งรูพรุนในเนื้อคอนกรีตและวัสดุที่มีกำลังน้อยกว่าที่ใช้ในการออกแบบ เราจะลดกำลังระบุลงโดยคูณด้วย*ตัวคูณลดกำลัง* (Capacity Reduction Factor Φ) ผลที่ได้จะเรียกว่า *กำลังที่ใช้คำนวณออกแบบ* (Design Strength) ซึ่งค่าเหล่านี้ขึ้นกับความเหนียวขององค์อาคาร ความแม่นยำในการหากำลังขององค์อาคาร และความสำคัญขององค์อาคารนั้นในโครงสร้างทั้งหมด ยกตัวอย่างเช่น การวิบัติด้วยแรงดัดในคานจะเกิดขึ้นแค่ในคานตัวนั้นถือเป็นการวิบัติเพียงส่วนเดียวแต่ถ้าเสาเกิดวิบัติอาจจะส่งผลให้อาคารหลายหลายชั้นวิบัติตามไปด้วยตัวคูณลดกำลังนี้จัดได้ว่าเป็นอัตราส่วนปลอดภัยตัวที่สองในการออกแบบด้วยวิธีกำลังตัวคูณเพิ่มและลดกำลังสำหรับองค์อาคารทุกตัว ถูกเลือกมาโดยกำหนดให้การวิบัติเริ่มต้นที่คานโดยเริ่มจาก การครากของเหล็กเสริม การครากของเหล็กเสริม ในคานที่ออกแบบถูกตามขั้นตอนจะทำให้คานเกิดการแอ่นตัวและแตกร้าว แต่จะไม่ทำให้โครงสร้างทั้งหมดพังทลาย สำหรับองค์อาคารอื่น ๆ ที่มีชนิดของการวิบัติเปราะมากกว่าคาน จะมีอัตราส่วนความปลอดภัยสูงกว่า

โดยสรุป สาระสำคัญของการออกแบบโดยวิธีกำลังมีดังต่อไปนี้

กำลังที่ต้องการ $\leqq$ กำลังที่ใช้คำนวณออกแบบ

หรือ กำลังที่ต้องการ $\leqq \Phi$ (กำลังระบุ)

สำหรับคานภายใต้แรงเฉือนและโมเมนต์ ที่ทุกหน้าตัด

$$Vu \leqq Vn \text{ และ } Mu \leqq Mn$$

โดยที่ Vu และ Mu เป็นแรงเฉือนและโมเมนต์ที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกที่คูณด้วยตัวคูณแล้ว เป็นกำลังที่ต้องการ ในระหว่างที่ Vn และ Mn คือกำลังระบุของหน้าตัดนั้น

ตัวย่อทั้งหลายที่ใช้แทนกำลังต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก จะสรุปได้ตามข้างล่าง

1. กำลังที่ต้องการ (Required Strength) :

Mu = กำลังรับแรงดัดที่ต้องการ (factored moment)

Pu = กำลังรับแรงตามแนวแกนที่ต้องการ (factored axial load)

Vu = กำลังรับแรงเฉือนที่ต้องการ (factored shear force)

Tu = กำลังรับแรงบิดที่ต้องการ (factored torsional moment)

2. กำลังระบุ (Nominal Strength) :

Mn = กำลังต้านทานโมเมนต์ระบุ (nominal moment strength)

Mb = กำลังต้านทานโมเมนต์ระบุที่สภาวะสมดุลของความเครียด (nominal moment strength at balanced strain conditions)

Pn = กำลังต้านทานน้ำหนักบรรทุกตามแนวแกนระบุ ที่มีการเยื้องศูนย์ (nominal axial load strength at given eccentricity)

Po = กำลังต้านทานน้ำหนักบรรทุกตามแนวแกนระบุ ที่ไม่มีการเยื้องศูนย์ (nominal axial load strength at zero eccentricity)

Pb = กำลังต้านทานน้ำหนักบรรทุกตามแนวแกนระบุ ที่สภาวะสมดุลของความเครียด (nominal axial load strength at balanced strain conditions)

Vn = กำลังต้านทานแรงเฉือนระบุ (nominal shear strength)

Vc = กำลังต้านทานแรงเฉือนระบุที่รับโดยคอนกรีต (nominal shear strength)

Vs = กำลังต้านทานแรงเฉือนระบุที่รับโดยเหล็กปลอก (nominal shear strength)

Tn = กำลังต้านทานโมเมนต์บิดระบุ (nominal torsional moment strength)

Tc = กำลังต้านทานโมเมนต์บิดระบุที่รับโดยคอนกรีต (nominal torsional moment strength)

Ts = กำลังต้านทานโมเมนต์บิดระบุที่รับโดยเหล็กเสริม (nominal torsional moment strength)

3. กำลังที่ใช้คำนวณออกแบบ (Design Strength) :

ΦMn = กำลังรับโมเมนต์ที่ใช้ออกแบบ (design moment strength)

ΦPn = กำลังรับแรงตามแนวแกนที่ใช้ออกแบบ

(design axial load strength at given eccentricity)

ΦVn = กำลังรับแรงเฉือนที่ใช้ออกแบบ (design shear strength)

ΦTn = กำลังโมเมนต์บิดที่ใช้ออกแบบ (design torsional moment strength) = $\Phi(Tc + Ts)$

2.4.2 ข้อกำหนดด้านกำลัง

ข้อกำหนดพื้นฐานของการออกแบบด้วยทฤษฎีกำลัง ได้ระบุไว้ดังนี้

กำลังที่ใช้คำนวณออกแบบ (Design Strength) $\geqq$ กำลังที่ต้องการ (Required Strength: U) หรือ Strength Reduction Factor (Φ) x Nominal Strength $\geqq$ Load Factors x Service Load

ดังนั้นจะต้องออกแบบให้ทุกองค์อาคารผ่านข้อกำหนดข้างบน ภายใต้ผลรวมของน้ำหนักบรรทุกที่วิกฤตที่สุดและต้องรับแรงทุกชนิดได้ (แรงดัด, แรงตามแกน, แรงเฉือน ฯลฯ)

$\Phi Pn \geqq Pu$, $\Phi Mn \geqq Mu$, $\Phi Vn \geqq Vu$, $\Phi Tn \geqq Tu$

ข้อกำหนดข้างบนได้ถูกกำหนดไว้เพื่อให้ค่าความปลอดภัยแก่องค์อาคารในสองทางคือ

1. ได้ลดความสามารถจริงในการรับแรงขององค์อาคาร เพื่อใช้เป็นกำลังที่ใช้ในการออกแบบ โดยคูณด้วยตัวคูณลดกำลัง (Φ) ซึ่งจะมีค่าตามชนิดของแรง แต่จะมีค่าน้อยกว่า 1 เสมอ ความสามารถในการรับแรงนี้ได้มาจากการคำนวณ โดยถือว่าหน้าตัดขององค์อาคารและวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างจริง เท่ากับค่าที่ใช้ในการคำนวณทุกอย่าง

ยกตัวอย่างสำหรับคานซึ่งมีเหล็กเสริมรับแรงดึง กำลังระบุในการรับแรงดัดของคาน $Mn = As\,fy\,(d - a/2)$

ซึ่งกำลังที่ใช้ในการคำนวณออกแบบเท่ากับ $\Phi Mn = \Phi As\,fy(d - a/2)$

2. ได้เพิ่มน้ำหนักบรรทุกที่มากระทำบนองค์อาคารโดยคูณด้วยตัวคูณเพิ่มน้ำหนักบรรทุก (Load Factor)

แรงดัดใช้งานเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ = Md

เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร = Ml

แรงดัดที่ต้องการคือ $Mu = 1.4Md + 1.7Ml$

ดังนั้น ในการออกแบบของคานตัวนี้ ข้อกำหนดทางด้านกำลังในส่วนแรงดัดคือ

$\Phi As\,fy(d - a/2) \geqq 1.4Md + 1.7Ml$

สำหรับ แรงเฉือนที่กระทำบนคาน ข้อกำหนดทางด้านกำลังในส่วนแรงเฉือนคือ

$\Phi Vn = \Phi(Vc + Vs) \geqq Vu$

เหตุที่ต้องมีตัวคูณลดและตัวคูณเพิ่มในการออกแบบโดยวิธีกำลัง สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

1. <u>ต้องมีตัวคูณลดเพราะ</u>

ก. คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้อาจจะไม่เป็นไปตามที่กำหนดในการออกแบบเพราะ

- ความไม่คงตัวในคุณสมบัติของวัสดุ ทั้งเกิดจากแรงอัดประลัยของคอนกรีต และแรงดึงครากของเหล็กเสริม

- ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ อัตราการเพิ่มน้ำหนักในเครื่องทดสอบจะมีผลต่อการทดสอบ

- ความแตกต่างระหว่างคุณสมบัติของคอนกรีตที่หล่ออยู่หน้างาน กับคุณสมบัติของลูกปูนที่ถูกเก็บไว้ในห้องปฏิบัติการเพื่อการทดสอบ

- ผลของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต อาจทำให้เกิดการแตกร้าวในเนื้อคอนกรีต ซึ่งจะมีผลต่อแรงประลัยที่รับได้ ยกตัวอย่างในเสา การหดตัวของคอนกรีตอาจส่งผลให้หน่วยแรงในเหล็กรับแรงอัดในเสา ถึงจุดครากก่อนที่ออกแบบไว้ ส่งผลให้เกิดการวิบัติโดยเฉพาะ อย่างยิ่งในเสาชะลูดที่มีเหล็กเสริมน้อย

ข. ขนาดขององค์อาคารในการก่อสร้างจริง อาจจะไม่เป็นไปตามที่กำหนดในการออกแบบโดยเฉพาะอย่างยิ่ง

- ขนาดของเหล็กเสริมอาจจะเล็กกว่า เนื่องจากความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้ในการรีด

- ขนาดขององค์อาคารอาจคลาดเคลื่อนเนื่องจากเข้าไม้แบบไม่ถูกต้อง และการจัดวางเหล็กเสริมไม่ถูกต้อง

ค. สมมติฐานในการสร้างสมการออกแบบ และการปรับให้ง่ายต่อการใช้งาน เช่นการใช้รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าแทนเส้นโค้งในการคำนวณหาแรงในคอนกรีตและการจำกัดให้ความเครียดสูงสุดของคอนกรีตเท่ากับ 0.003 ส่งผลให้ผลการคำนวณคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง

2. <u>ต้องมีตัวคูณเพิ่มเพราะ</u>

ก. น้ำหนักบรรทุกที่กระทำอาจไม่ตรงกับที่กำหนดน้ำหนักบรรทุกคงที่อาจคลาดเคลื่อนเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของ ขนาดขององค์อาคาร น้ำหนักของวัสดุ รวมถึงการเปลี่ยนแปลงแบบโครงสร้าง หรือแบบสถาปัตยกรรม น้ำหนักบรรทุกจรเปลี่ยนแปลงได้ตามเวลาที่ใช้และตามชนิดของอาคาร

ข. ความไม่แน่นอนในการคำนวณผลของน้ำหนักบรรทุกที่กระทำ เช่นสมมติฐานของสติฟเนส ความยาวช่วง ฯลฯ ซึ่งจะส่งผลให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นจริงแตกต่างไปจาก หน่วยแรงที่คำนวณได้จากการวิเคราะห์โดยวิศวกร

3. <u>ต้องมีทั้งตัวคูณลดและตัวคูณเพิ่มเพราะ</u>

ความเสียหายที่เกิดจากการวิบัติของอาคารมีผลต่อทรัพย์สินและชีวิตจำนวนมาก สิ่งที่ควรคำนึงถึงได้แก่

ก. ชนิดของการวิบัติและการเตือนก่อนวิบัติ

ข. ความเป็นไปได้ในการสูญเสียชีวิตของผู้ใช้อาคาร

ค. ผลต่อสังคมเนื่องจากการสูญเสียเวลา รายได้ และทรัพย์สิน

ง. ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมหรือสร้างใหม่

2.4.3 ข้อกำหนดด้านการใช้งาน

ถึงแม้ว่าจะออกแบบองค์อาคารให้ผ่านข้อกำหนดด้านกำลังแล้วก็ตามแต่ก็ไม่ได้หมายความว่า ภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งานที่กระทำ องค์อาคารจะใช้งานได้โดยไม่เสียหาย ดังนั้นมาตรฐานการออกแบบจึงได้ตั้งข้อกำหนดในด้านการใช้งานไว้ ข้อกำหนดดังกล่าว ได้เน้นความสำคัญของการแอ่นตัวขององค์อาคาร การเรียงเหล็กเสริม และหน่วยแรงที่ยอมให้ในอาคารคอนกรีตอัดแรงสิ่งสำคัญที่สุดภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งานก็คือ การแอ่นตัว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในองค์อาคารที่ใช้วัสดุกำลังสูงซึ่งจะส่งผลให้ได้องค์อาคารที่บางและชะลูด

กำลังที่ต้องการ

ตารางที่ 2.1 แสดงน้ำหนักบรรทุกที่กระทำบนองค์อาคาร และตัวคูณเพิ่มที่เกี่ยวข้องกับน้ำหนักบรรทุกและแรงชนิดต่าง ๆ ค่าของตัวคูณเพิ่มได้มาจากการคำนึงถึงความแม่นยำใน การกำหนดน้ำหนักบรรทุกชนิดต่าง ๆและการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักบรรทุกชนิดนั้นในช่วงเวลาการใช้งานขององค์อาคาร

ดังนั้นน้ำหนักบรรทุกคงที่ ซึ่งสามารถที่จะกำหนดได้แม่นยำและเปลี่ยนแปลงน้อย จึงมีค่าตัวคูณเพิ่มเป็น 1.4 ในระหว่างที่น้ำหนักบรรทุกจร ซึ่งกำหนดโดยการประมาณ และเปลี่ยนแปลงได้มาก จะใช้ค่าตัวคูณเพิ่มเป็น 1.7

น้ำหนักบรรทุกและแรงดันของของเหลว ที่มีความหนาแน่นคงที่และมีความลึกที่แน่นอนจะใช้ตัวคูณเพิ่มเป็น 1.4 เนื่องจากความผิดพลาดในการคำนวณหาแรงเป็นไปได้ต่ำ ในระหว่างที่แรงดันของดินและน้ำใต้ดิน จะใช้ตัวคูณเพิ่มเป็น 1.7 เพราะความไม่แน่นอนในการหาความลึกและปริมาณ

ในการคำนวณหากำลังที่ต้องการเนื่องจาก ผลรวมของน้ำหนักบรรทุกและแรงชนิดต่าง ๆ จะต้องระวังในเรื่องของทิศทางของแรงลัพธ์ที่ได้ เพราะแรงชนิดหนึ่งอาจจะมีผลต่อองค์อาคารในทิศทางตามหรือสวนกับแรงอีกชนิดหนึ่ง เช่นแรงลมและแรงเนื่องจากแผ่นดินไหวจะพยายามที่จะยกเสาขึ้นและทำให้เกิดการกลับทิศทางของแรงดัดในคาน

ดังนั้นในการคำนวณหากำลังที่ต้องการเนื่องจากผลรวมของน้ำหนักบรรทุก และแรงชนิดต่าง ๆ จะต้องมองหากรณีที่ให้ผลที่วิกฤตที่สุด ซึ่งจะสำคัญมากสำหรับองค์อาคารภายใต้น้ำหนักบรรทุก หรือแรงมากกว่าหนึ่งชนิด เช่น กำลังขององค์อาคารภายใต้แรงดัดและแรงตามแนวแกนหรือภายใต้แรงเฉือนและแรงตามแนวแกน

ตารางที่ 2.1 น้ำหนักบรรทุกกับตัวคูณเพิ่มน้ำหนัก [4]

น้ำหนักบรรทุกและแรง[1]	**กำลังที่ต้องการ**
น้ำหนักบรรทุกคงที่ (D) และน้ำหนักบรรทุกจร (L)	$U = 1.4D + 1.7L$
น้ำหนักบรรทุกคงที่, น้ำหนักบรรทุกจร และแรงลม (W)	(i) $U = 1.4D + 1.7L$ (ii) $U = 0.75(1.4D + 1.7L + 1.7W)$ (iii) $U = 0.9D + 1.3W$
น้ำหนักบรรทุกคงที่, น้ำหนักบรรทุกจร และแรงเนื่องจากแผ่นดินไหว (E)	(i) $U = 1.4D + 1.7L$ (ii) $U = 0.75(1.4D + 1.7L + 1.87E)$ (iii) $U = 0.9D + 1.43E$
น้ำหนักบรรทุกคงที่, น้ำหนักบรรทุกจร และแรงดันจากดินและน้ำใต้ดิน (H)[2]	(i) $U = 1.4D + 1.7L$ (ii) $U = 1.4D + 1.7L + 1.7H$ (iii) $U = 0.9D + 1.7H$
ในกรณีที่ D หรือ L มีผลต้านกับ H น้ำหนักบรรทุกคงที่, น้ำหนักบรรทุกจร และแรงดันของของเหลว (F)[3]	(i) $U = 1.4D + 1.7L$ (ii) $U = 1.4D + 1.7L + 1.4F$ (iii) $U = 0.9D + 1.4F$
ในกรณีที่ D หรือ L มีผลต้านกับ F แรงกระแทก (I)4 ใช้สมการข้างบนแต่แทนค่า L ด้วย $L + I$ น้ำหนักบรรทุกคงที่, น้ำหนักบรรทุกจร และผลจากการทรุดตัว, การคืบ, การหดตัวของคอนกรีต และอุณหภูมิ (T)	(i) $U = 1.4D + 1.7L$ (ii) $U = 0.75(1.4D + 1.7L + 1.7T)$ (iii) $U = 1.4(D + T)$

<u>หมายเหตุ</u>

1. D, L, W, E, H, F และ T ใช้แทนน้ำหนักบรรทุกและแรงใช้งานชนิดต่าง ๆ

2. น้ำหนักบรรทุกและแรงดันของดินและน้ำในดิน (แรงดันของน้ำใต้ดิน จะถือเป็นส่วนหนึ่งของแรงดันดิน)

3. น้ำหนักบรรทุก และแรงดันของของเหลวที่มีความหนาแน่น และมีความลึกที่แน่นอน

4. ผลของแรงกระแทกจะต้องใช้ในการออกแบบอาคารที่จอดรถ ชานชาลาสำหรับขนถ่ายสินค้า พื้น โกดัง, ปล่องลิฟต์ ฯลฯ

2.4.5 หลักการทั่วไปสำหรับการออกแบบโดยวิธีกำลัง

ในความเป็นจริงแล้ว การออกแบบโดยวิธีกำลังได้กลายเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมาตั้งแต่ยุคที่ยังไม่มีการศึกษาเรื่องขนาดและการกระจายของหน่วยแรงภายในเนื้อวัสดุ ในต้นคริสต์ศตวรรษที่ 1900ได้ใช้การทดลองในห้องปฏิบัติการ และใช้ผลการทดลองนั้น สร้างทฤษฎีการออกแบบขึ้นมา ดังนั้นทฤษฎีที่ใช้ในระยะนั้นจะเป็นผลที่ได้มาจากการทดลอง

ในขณะที่องค์อาคารเข้าสู่จุดวิบัติ ทั้งคอนกรีตและเหล็กเสริม จะมีคุณสมบัติที่ไม่เป็นไปตามเส้นตรงสัมพัทธ์จึงจำเป็นจะต้องกำหนดคุณสมบัติของวัสดุเหล่านี้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อสร้างทฤษฎีที่ใช้ระบุกำลังประลัยขององค์อาคาร สำหรับเหล็กเสริมซึ่งมีจุดคราก ที่ชัดเจนจะใช้การแทนคุณสมบัติของเหล็กเสริมได้ด้วยเส้นตรง แต่สำหรับคอนกรีตแล้ว การหาคุณสมบัติทั้งในห้องปฏิบัติการและในการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์เป็นสิ่งที่ยากมาก

การทดลองหาคุณสมบัติของคอนกรีตในอดีต ได้แสดงถึงผล ซึ่งได้ถือเป็นพื้นฐานสำหรับทฤษฎีที่ใช้ในปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลของการทดลองในปี ค.ศ. 1912 และ 1932

2.4.6 สมมุติฐานในการออกแบบ

จะหากำลังขององค์อาคารโดยทฤษฎีกำลังได้จากข้อกำหนดสองข้อ คือ แรงในหน้าตัดต้องอยู่ในสภาวะสมดุล และความเครียดในหน้าตัดจะต้องอยู่ในสภาวะสอดคล้องกัน

ข้อกำหนดแรกระบุว่า แรงอัดและแรงดึงซึ่งกระทำบนหน้าตัด ณ จุดวิบัติ จะต้องเท่ากัน และข้อกำหนดที่สองระบุว่า ความเครียดในคอนกรีตและในเหล็กเสริม จะต้องสอดคล้องกัน ณ จุดวิบัติ

สมมติฐานข้อที่ 1

"ความเครียดในเหล็กเสริมและคอนกรีตเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ ระยะจากแกนสะเทินของหน้าตัด"

หรืออีกนัยก็คือ หน้าตัดใด ๆ ที่ตั้งฉากกับแกนของแรงดัดจะยังคงสภาพเดิมอยู่หลังจากที่แรงดัดนั้นกระทำ การทดลองในห้องปฏิบัติการยืนยันสมมติฐานข้อนี้ ตลอดระยะเวลาของการทดลองตั้งแต่เริ่มใส่แรงจนกระทั่งถึงจุดวิบัติ

สมมติฐานข้อที่ 2

"ค่าความเครียดสูงสุดที่ผิวของคอนกรีตในด้านรับแรงอัดมีค่า เท่ากับ $\epsilon_u = 0.003$"

จากการทดลองหาความเครียดสูงสุดของคอนกรีตที่จุดวิบัติ ทั้งในองค์อาคารที่มี และไม่มีเหล็กเสริม การทดลองในคานและเสาได้ความเครียดสูงสุด มีค่าระหว่าง 0.003 ถึง 0.008 แต่ถ้าพิจารณาจากความสัมพันธ์ ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด แล้ว จะได้ค่าอยู่ระหว่าง 0.003 ถึง

0.004 ดังนั้น จึงเลือกใช้ค่า 0.003 มาตรฐานในบางประเทศจะให้ใช้ค่า 0.0035 แต่ผลที่ได้ในการหากำลังขององค์อาคารก็ใกล้เคียงกัน

สมมติฐานข้อที่ 3

" หน่วยแรงในเหล็กเสริม fs เมื่อต่ำกว่าจุดคราก fy จะถือว่าเท่ากับผลคูณของ Es กับความเครียดในเหล็กเสริม (es) แต่เมื่อสูงกว่าจุดครากหรือเมื่อความเครียดสูงกว่า fy/Es จะถือว่าหน่วยแรงในเหล็กเสริมสิ้นสุดความสัมพันธ์กับความเครียด และมีค่าคงที่เท่ากับ fy "

โดยที่ ϵs เป็นค่าความเครียดที่ตำแหน่งของเหล็กเสริม ในการออกแบบ จะใช้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม (Es) เท่ากับ 2 ,040, 000 กก./ซม.^{2}

สมมติฐานข้อที่ 4

" จะไม่คำนึงถึงความสามารถในการรับแรงดึงของคอนกรีต ในองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงดัด "

แรงดึงประลัยในคอนกรีตภายใต้แรงดัด หรือ โมดูลัสแตกร้าว (Modulus of Rupture) มีค่าประมาณร้อยละ 10 ถึง 15 ของแรงอัดประลัยที่คอนกรีตรับได้ สำหรับคอนกรีตน้ำหนักปกติจะใช้ค่าเท่ากับ 2 fc' สำหรับองค์อาคารที่มีเหล็กเสริมในปริมาณปานกลาง การหากำลังของหน้าตัดภายใต้แรงดัดโดยถือว่า คอนกรีตไม่สามารถรับแรงดึงได้ จะได้ผลใกล้เคียงกับการทดลองในห้องปฏิบัติการ

สมมติฐานข้อที่ 5

"จะสมมติให้ความสัมพันธ์ระหว่าง หน่วยแรงอัดและความเครียดในคอนกรีต มีลักษณะเป็น รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า สีเหลี่ยมคางหมู พาราโบล่า หรือรูปอะไรก็ได้ ตราบใดที่กำลังที่คำนวณได้ใกล้เคียงกับผลจากการทดลอง"

สมมติฐานข้อนี้ระบุว่าเมื่อเข้าใกล้หน่วยแรงสูงสุด ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดในคอนกรีต จะไม่เป็นปฏิภาคเส้นตรงต่อไป จะเห็นว่าความสัมพันธ์ขึ้นอยู่กับ ความแข็งแรงของคอนกรีต เริ่มจากหน่วยแรงเป็นศูนย์ขึ้นไป จนถึงหน่วยแรงสูงสุดซึ่งโดยทั่วไปจะเกิดที่ความเครียดประมาณ 0.0015 ถึง 0.0020 จากนั้นหน่วยแรงก็จะเริ่มตกลงมา จนถึงจุดแตกหักที่ความเครียดอยู่ระหว่าง 0.003 ถึง 0.004 สังเกตจากรูปจะเห็นว่า ความสัมพันธ์จะเริ่มเบี่ยงเบนไปจากเส้นตรง เมื่อ หน่วยแรงมีค่าประมาณ $0.5fc'$ กำลังสูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อ ความเครียดที่ผิวบนของคอนกรีตถึงจุดอัดแตก (ϵu) ที่จุดนี้ ความเครียดในเหล็กเสริม (ϵsu) อาจจะสูงกว่าหรือน้อยกว่า e $y = fy / Es$ โดยขึ้นอยู่กับปริมาณของเหล็กเสริม ถ้าเหล็กเสริมมีปริมาณน้อยเพียงพอที่จะให้เหล็กเสริมเกิดการยืดตัว ก่อนที่คอนกรีตจะอัดแตก การวิบัติแบบนี้จะเรียกว่า เป็นการวิบัติแบบ

เหนียวหรือช้า (Ductile failure condition) ถ้าปริมาณเหล็กเสริมมาก การอัดแตกของคอนกรีตจะเกิดขึ้นก่อน โดยที่หน่วยแรงในเหล็กเสริมยังน้อยกว่าจุดคราก การวิบัติแบบนี้จะเรียกว่า เป็นการวิบัติแบบเปราะหรือฉับพลัน (Brittle failure condition)

สมมติฐานข้อที่ 6

"จากสมมติฐานข้อที่ 5 จะเลือกใช้ การกระจายหน่วยแรงอัดของคอนกรีต ในรูปของสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยกำหนดให้ สี่เหลี่ยมนั้นประกอบด้วยด้านหนึ่งเป็นหน่วยแรงอัดในคอนกรีต มีค่าคงที่เท่ากับ $0.85fc'$ และอีกด้านเป็นความลึกมีค่าเท่ากับ $a = \beta 1c$ โดยที่ c เป็นระยะจากผิวนอกสุดด้านรับแรงอัดถึงแกนสะเทิน และ $\beta 1$ มีค่าเท่ากับ 0.85 สำหรับคอนกรีตที่มีกำลังไม่เกิน 280 กก./ซม.^{2} และลดลงด้วยอัตรา 0.05 ต่อกำลังที่เพิ่มขึ้นทุก 70 กก./ซม.^{2} จนกระทั่งถึงจุดที่มีค่าคงที่เท่ากับ 0.65"

บทที่ 3
แนวทางการทำวิจัยและการออกแบบ

3.1 แนวทางการวิจัย

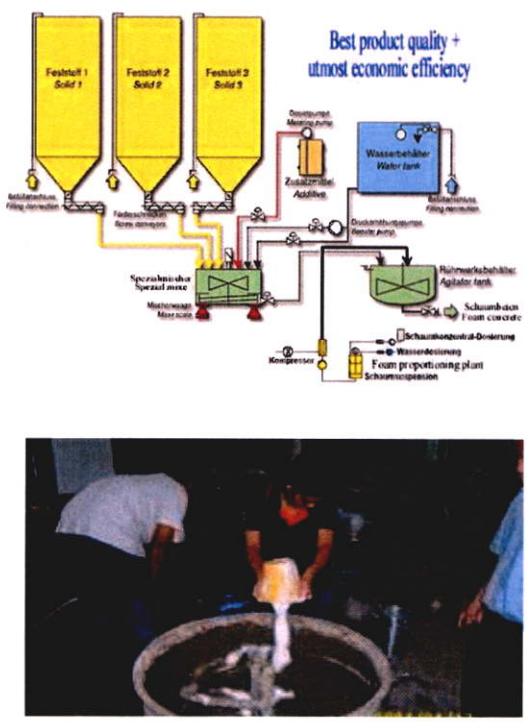
แผนงานในโครงการวิจัยแม้จะแบ่งได้หลายส่วนแต่ก็ต้องเริ่มทำไปพร้อมๆกัน เพราะต้องมีความเกี่ยว เนื่องสอดคล้องกันอย่างใกล้ชิดอย่างไรก็ตามสามารถลำดับความสัมพันธ์ในลักษณะของการจัดการข้อมูลเพื่อการวิจัยได้ดังต่อไปนี้

- ค้นคว้าข้อกฎหมายและมาตรฐานทางการออกแบบที่เกี่ยวข้องกับงานผนังสำเร็จรูป
- ค้นคว้ารวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับซีแอลซีคอนกรีต
- พัฒนาอุปกรณ์สร้างโฟมที่ใช้ทำซีแอลซีคอนกรีตให้มีคุณภาพที่ใช้งานได้ดี
- ออกแบบลักษณะการติดตั้งแผ่นผนังค.ส.ล. ที่จะต้องมีกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างกัน และทำงานติดตั้งได้โดยสะดวกโดยคนสองคน
- ออกแบบอุปกรณ์ชุดจับยึดผนังค.ส.ล. ซึ่งมีกำลังต้านทานแรงลมได้ ตามข้อกำหนดในการออกแบบ
- ออกแบบหน้าตัดแผ่นผนังค.ส.ล.สำเร็จรูป ให้มีน้ำหนักที่เบา พอที่จะทำงานได้โดยคนสองคนแต่มีกำลังเพียงพอในการต้านทานแรงลมตามข้อกำหนดในการออกแบบ
- ออกแบบรอยต่อผนัง ในจุดที่ชุดเชื่อมต่อผนังจะต้องถ่ายโอนกำลัง มาสู่แผ่นผนังค.ส.ล. สำเร็จรูปให้ทำหน้าที่ได้สัมพันธ์กันอย่างเหมาะสมแข็งแรง
- ออกแบบรอยต่อระหว่างแผ่นผนังค.ส.ล.สำเร็จรูปสำหรับป้องกันน้ำฝน
- ออกแบบแบบหล่อที่สามารถทำงานหล่อควบคุมระยะต่างๆได้แม่นยำ
- ออกแบบอุปกรณ์ช่วยในการขนย้าย
- ออกแบบตกแต่งพื้นผิวผนังในเชิงศิลปหัตถกรรม

แผนงานดังกล่าวมาในโครงการวิจัยแม้จะแบ่งได้หลายส่วน แต่ก็ต้องเริ่มทำไปพร้อมๆกัน เพราะต้องมีความเกี่ยวเนื่องสอดคล้องกันเริ่มจากการค้นคว้าทดลองเกี่ยวกับ คอนกรีตมวลเบาชนิดเซลลูล่าร์ (CLC Concrete) ทำได้โดยนำคอนกรีตสดผสมเข้ากับฟองอากาศ ทรงกลมเล็กๆจำนวนมากจะแทรกกระจายอยู่สม่ำเสมอทั่วเนื้อคอนกรีต ดังนั้นสิ่งสำคัญก็คือคุณภาพของฟองอากาศที่ต้องมีความคงสภาพดี ในรูปแสดงอุปกรณ์สร้างฟองอากาศหรือ Foam Generator แบบหนึ่ง

ภาพที่ 3.1 ภาพเปรียบเทียบอุปกรณ์สร้างฟองอากาศจากเยอรมันนีและที่ผู้ทำวิจัยประดิษฐ์ขึ้น

อากาศและสารเคมีสร้างโฟมเจือจางด้วยน้ำจะถูกฉีดผ่านหัวฉีดเข้ามายังห้องผสมด้วยขนาดละอองและความดันที่เหมาะสมจะเกิดฟองอากาศจำนวนมากแทรกตัวผ่านตะแกรงออกมา ฟองอากาศเหล่านี้จะคงสภาพอยู่จนคอนกรีตเซ็ตตัวซีแอลซีคอนกรีต(Cellular Light-weight Concrete)หรือมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าโฟมคอนกรีตมีใช้กันแพร่หลายในแถบยุโรปมาระยะหนึ่งแล้ว



ภาพที่ 3.2 แสดงระบบผลิตCLCคอนกรีตระดับอุตสาหกรรมและการผลิตขนาดเล็ก

3.2 การค้นคว้าผลงานวิจัย

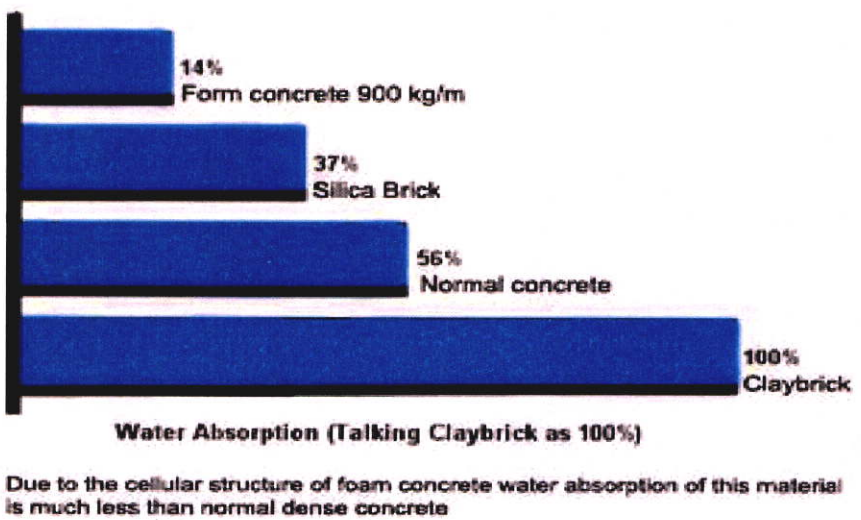
การค้นคว้าผลงานวิจัยในต่างประเทศพบว่าโฟมคอนกรีตมีจุดเด่นที่ดีหลายประการสรุปได้ดังนี้

-โฟมคอนกรีตมีค่าดูดซึมน้ำสัมพัทธ์ต่ำเพียง 14 % เทียบกับคอนกรีตธรรมดาที่มีค่าดูดซึมน้ำสัมพัทธ์ที่ 56 %

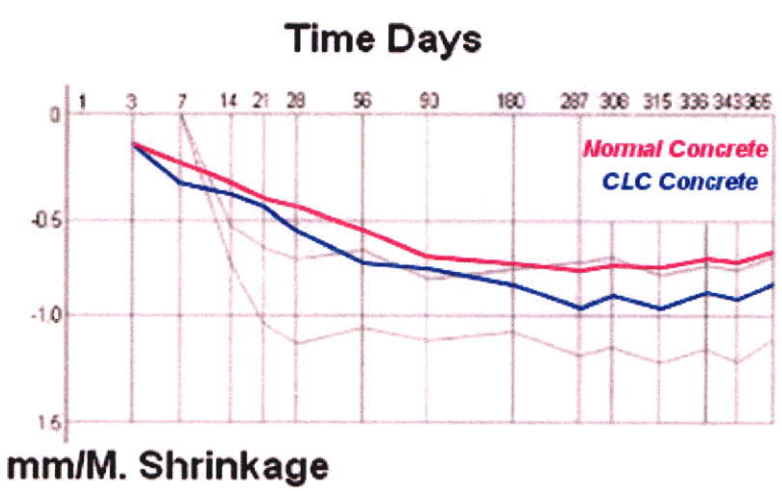
- โฟมคอนกรีตมีค่าการหดตัวที่ 28 วันที่ 0.5 mm/M. และเกือบจะคงที่หลังจากนั้น

-โฟมคอนกรีตมีค่าทนไฟสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา

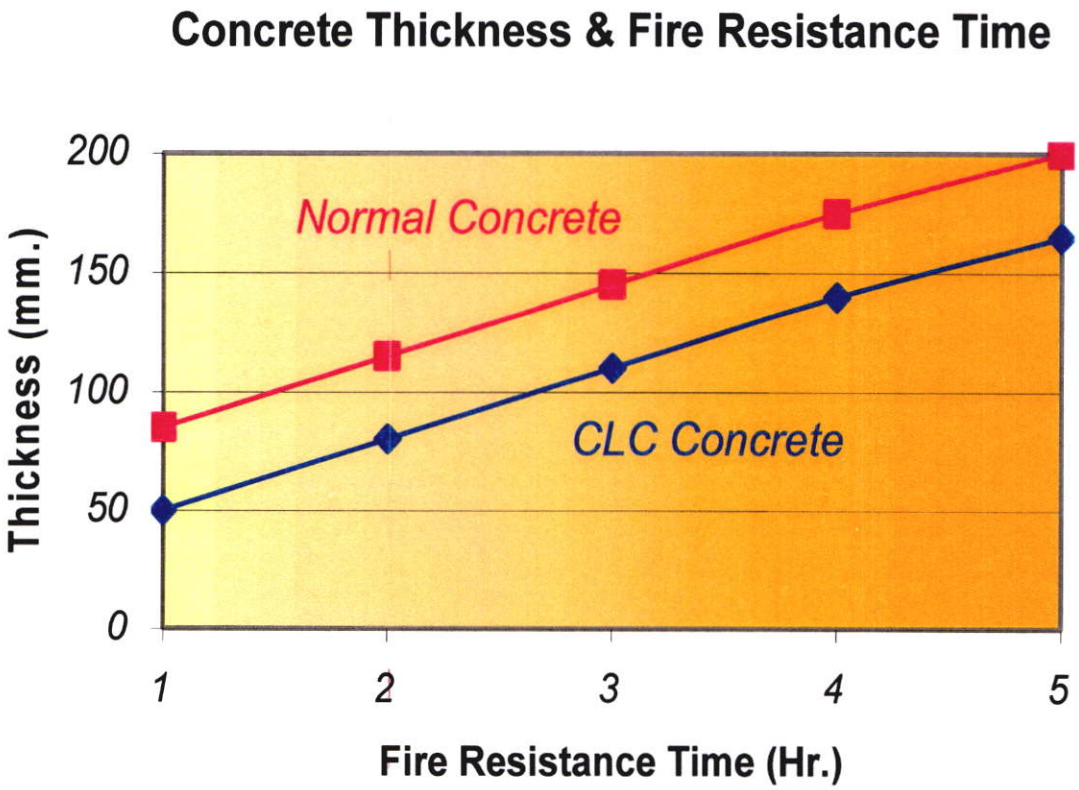
-โฟมคอนกรีตมีค่านำความร้อนแปรผันตามความหนาแน่นแห้ง



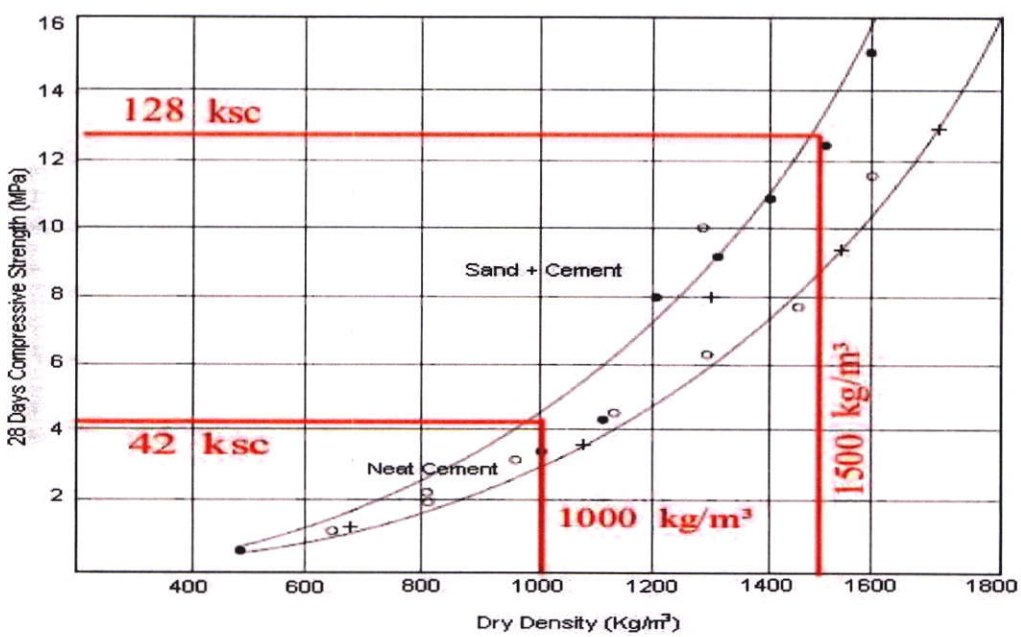
ภาพที่ 3.3 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าดูดซึมน้ำสัมพัทธ์



ภาพที่ 3.4 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าการหดตัว



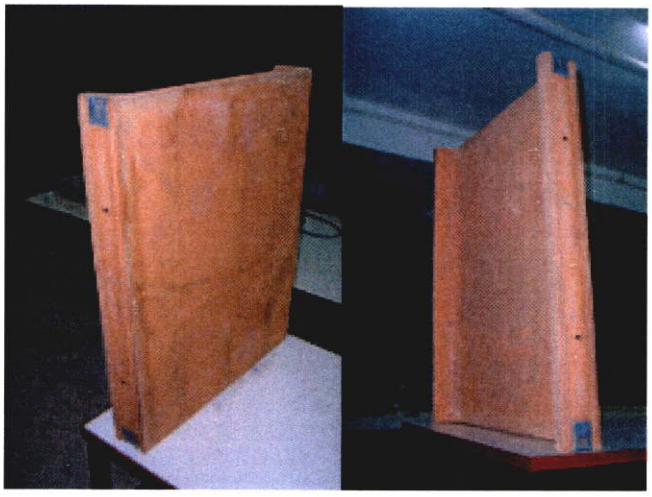
ภาพที่ 3.5 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าการทนไฟ



ภาพที่ 3.6 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่ากำลังอัดประลัย(ผู้ผลิตในต่างประเทศ)

จากภาพที่ 3.6 เมื่อนำไปเปรียบเทียบกัน พบว่าค่ากำลังอัดประลัยของโฟมคอนกรีตที่ทำได้ในห้องทดลองของผู้ผลิตเคมีภัณฑ์ในต่างประเทศ [5] มีค่าต่ำกว่าที่ผลิตได้ในห้องทดลองของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังแสดงในรูปที่ 3.8

เนื่องจากเป็นนวัตกรรมที่ใช้เป็นผนังภายนอกอาคารได้จึงจำเป็นต้องมีความแข็งแรงในการใช้งานตามหลักวิศวกรรม เนื่องจากผนังของอาคารจะต้องต้านทานแรงกระทำในทิศทางตั้งฉากกับระนาบของแผ่นผนังเช่นแรงลม รวมถึงแรงแผ่นดินไหวและแรงกระทำอื่นๆอันเกิดจากการใช้งานตามปกติ ทั้งนี้ถือว่าแรงกระทำต่างๆดังกล่าวไม่จำเป็นต้องเกิดขึ้นพร้อมๆกัน ซึ่งข้อบัญญัติกรุงเทพมหานครเรื่องการควบคุมการก่อสร้างอาคาร กำหนดให้การออกแบบโครงสร้างอาคารให้คำนึงถึงแรงลมด้วยและหากไม่มีเอกสารข้อมูลอ้างอิงให้ใช้หน่วยแรงลมทั่วไปดังนี้คือใช้หน่วยแรงลม 50 กก.ต่อตร.ม.สำหรับส่วนของอาคารสูงไม่เกิน 10 ม.ใช้หน่วยแรงลม 80 กก.ต่อตร.ม. สำหรับส่วนของอาคารสูงไม่เกิน 20 ม.ใช้หน่วยแรงลม 120 กก.ต่อตร.ม.สำหรับส่วนของอาคารสูงไม่เกิน 40 ม.ใช้หน่วยแรงลม 160 กก.ต่อตร.ม.สำหรับส่วนของอาคารสูงเกินกว่า 40 ม นอกจากนี้มาตรฐาน Uniform Building Code (UBC) ได้ระบุให้ผนังจะต้องไม่แอ่นตัวเกินกว่า L/240 สำหรับวัสดุเปราะแตกง่าย จึงได้กำหนดการทดสอบขึ้นเพื่อทดสอบความสามารถในการรับน้ำหนักกระทำด้านข้างแบบกระจายสม่ำเสมอ ผลทดสอบที่ได้จะแสดงความสามารถใช้งานได้จริงตามเกณฑ์กำหนดของหน่วยแรงลมและค่าการแอ่นตัวที่กล่าวมา นอกจากนั้นจะใช้ผลทดสอบในการคำนวณค่าความต้านทานการดัดประสม (Composite Bending Stiffness) ค่าที่ได้จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาค่าช่วงความสูงใช้งานของชุดผนังที่ขอบเขตการแอ่นตัวที่ L/240 สำหรับหน่วยแรงลม 160 กก.ต่อ ตร.ม.



ภาพที่ 3.7 ภาพทั้งสองด้านของแผ่นผนังค.ส.ล.สำเร็จรูปชนิดถอดประกอบได้

การวิจัยนี้จะแสดงผลความสามารถในการใช้งานได้ชุดผนังค.ส.ล.สำเร็จรูปชนิดถอดประกอบได้ ซึ่งเป็นนวัตกรรมที่ประสานเอาความเบาของ CLC (Cellular Light-weight Concrete) รวมกับความแข็งแรงของหน้าตัดรูปทรงตัว C ของแผ่นผนังที่เหมาะสมพอดี(Optimize)กับความแข็งแรงของชุดประกับสลักยึดผนังซึ่งออกแบบให้ซ่อนอยู่ในรอยต่ออย่างมิดชิดเรียบร้อยประกอบกันเป็นแผ่นผนังน้ำหนักประมาณ30 กก.ต่อหนึ่งแผ่น โดยจะทดสอบผนังที่ต่อเทินกันขึ้นไปสามแผ่นเป็นช่วงความสูง 3 เมตร(เท่าความสูงผนัง)เพื่อทราบผลพฤติกรรมรับแรงดัดของชุดผนังหนึ่งแถบผนัง(Strip) ซึ่งจะได้ผลเป็นแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดันกระจายสม่ำเสมอด้านข้างค่าการแอ่นตัวจากหน่วยแรงเริ่มต้นจนจุดที่ชุดผนังแอ่นตัวเกินเกณฑ์ L/240 ตาม Uniform Building Code และจะได้ผลค่าความต้านทานการดัดประสม(Composite Bending Stiffness)ค่าที่ได้จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาค่าช่วงความสูงใช้งาน เครื่องมือทดสอบจะกำหนดจุดรองรับเป็นแบบธรรมดา(Simple Support)ที่ขอบบนและล่าง และมีจุดรองรับแนวตั้งที่ฐานแบบอิสระต่อการหมุน(Free Rotation) เพื่อลดสภาพการยึดรั้งที่จุดรองรับให้มากที่สุด โดยการทดสอบนี้จะไม่ครอบคลุมระบบผนังจริงเนื่องจากแต่ละแผ่นผนังมีจุดยึดรั้งด้านข้างอยู่อีกสี่จุดต่อหนึ่งแผ่นผนังซึ่งยังไม่ได้ใช้ในการทดสอบนี้ซึ่งจะทำให้ระบบผนังแข็งแรงเพิ่มขึ้นอีกมากเมื่อประกอบเข้าเป็นระบบในโครงสร้างเสากับคานและจะไม่ครอบคลุมถึงผลกระทบปัจจัยเรื่องน้ำหนักกระทำซ้ำซึ่งมีผลต่อความสามารถในการรับกำลังของผนังเช่นกัน

3.3 การออกแบบ

การออกแบบคำนึงถึงสมดุลที่ประสานความแข็งแรงของขอบคอนกรีตมวลเบาที่จุดต่อผนังกับกำลังรับแรงดัดของชุดประกับต่อแผ่นผนังและความแข็งแรงของหน้าตัดรูปC-Channel ของแผ่นผนัง

เริ่มจากการรวบรวมข้อมูลความสัมพันธ์ ระหว่างหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบา(y, ตัน/ลบ.ม.) กับกำลังอัดประลัย(x,กก./ตร.ซม.) ที่ให้ความแข็งแรงเพียงพอกับน้ำหนักแผ่นผนังที่เหมาะสมจากลำดับข้อมูลจำนวนนับร้อยตัวอย่างจะนำมาวิเคราะห์ลำดับความถี่ข้อมูลและทำการเขียนโปรแกรม Mathcad เพื่อที่จะหาหาสมการตัวแทนกลุ่มข้อมูลที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักกับกำลังอัดประลัยของคอนกรีตมวลเบาที่เก็บตัวอย่างไว้ให้มีค่าคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุดโดยจะเขียนโปรแกรมให้ประมาณค่าสมการต่างกันสามรูปแบบคือรูปแบบสมการเส้นตรงแบบ Linear Least Square Approximation , รูปแบบสมการพาราโบล่าแบบ Quadratic Approximation , และสมการกำลังสามแบบ Qubic Approximation ซึ่งทั้งสามรูปแบบดังกล่าวจะเป็นการประมาณค่าแบบวนรอบเพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรที่มีค่าคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด

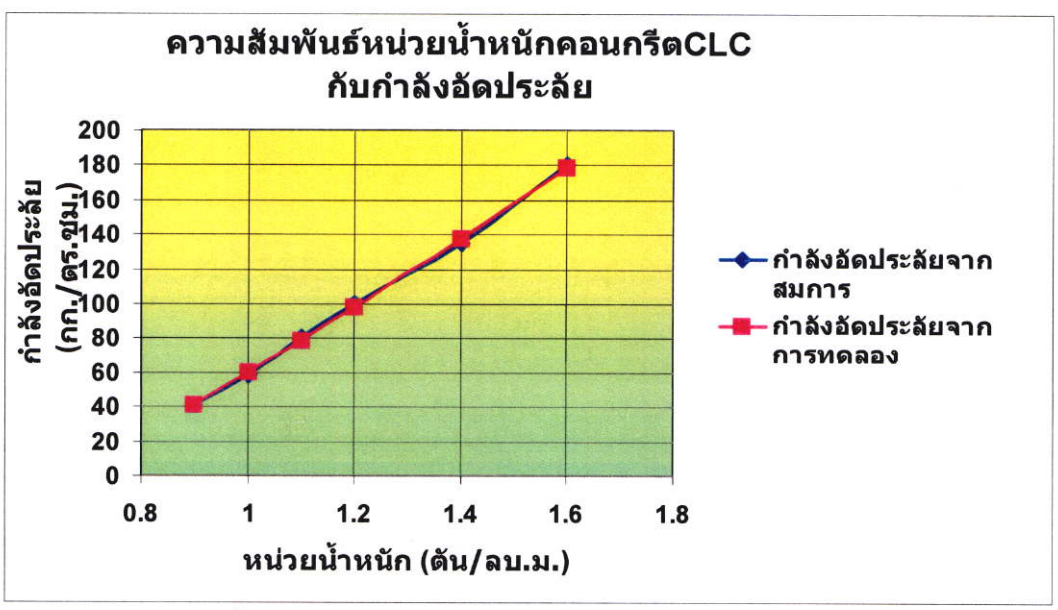
ก่อนในแต่ละรูปแบบสมการ ต่อจากนั้นนำค่าเคลื่อนของทั้งสามรูปแบบสมการมาเปรียบเทียบกันว่ารูปแบบสมการใดให้ค่าคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดโดยที่เส้นสมการที่ได้โดยวิธี Approximation นี้ไม่จำเป็นที่จะต้องได้เส้นกราฟที่ตัดผ่านจุดโคออดิเนตของข้อมูลตั้งต้นแต่จะให้เส้นสมการที่คลาดเคลื่อนจากจุดโคออดิเนตน้อยที่สุดและเส้นกราฟมีการเปลี่ยนแปลงความชันไม่มากนักก็คือกราฟได้รูปต่อเนื่อง ดังนั้นก็จะได้สมการตัวแทนกลุ่มข้อมูลที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักกับกำลังอัดประลัยของคอนกรีตมวลเบาที่เก็บตัวอย่างไว้ในที่สุด

เมื่อทำการเขียนและทดสอบโปรแกรมแล้วก็นำข้อมูลที่ได้รวบรวมไว้จากการทดลองนำมาหาค่ามัธยฐาน ณ.หน่วยน้ำหนักที่กำหนดไว้ เช่น จากข้อมูลกลุ่มตัวอย่างในพิสัย หน่วยน้ำหนัก 1.4 (±0.025) ตัน/ลบ.ม. ตัวอย่างให้ค่าอัดประลัย 127, 130, 132,135, 138, 140, 143 ก็จะได้ค่ามัธยฐานที่ (127+130+132+135+138+140+143)/7 = 135 กก./ตร.ซม. ซึ่งข้อมูลที่รวบรวมได้จะแยกเป็น 6 ชุดที่หน่วยน้ำหนัก 0.9, 1, 1.1, 1.2, 1.4, 1.6 ตัน/ลบ.ม. จะให้ค่ามัธยฐานของค่าอัดประลัยที่ 41, 58, 80, 100, 135, 180 135 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ จากลำดับข้อมูลดังกล่าวนำมาใส่ในเมตริกซ์นำเข้าข้อมูล โดยที่เมตริกซ์ x เป็นเมตริกซ์นำเข้าของหน่วยน้ำหนักของซีแอลซีคอนกรีต และ y เป็นเมตริกซ์นำเข้าของกำลังอัดประลัย โปรดดูภาคผนวก

จากค่าคลาดเคลื่อนที่ได้ไม่ต่างกันมากนักดังนั้นจะได้สมการที่เหมาะสมต่อการใช้งานดังนี้

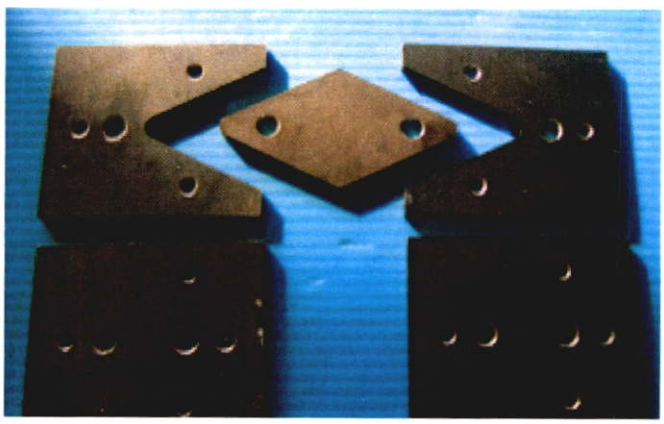
$$y = 17.6x^2 + 153.2x - 111.6 \quad (1)$$

ซึ่งสมการดังกล่าว เมื่อนำไปไปวิเคราะห์โดยระเบียบวิธี Polynomial Regression จะให้ค่า $R^2 = 0.999$ แสดงค่าความน่าเชื่อถือเข้าใกล้ 100 % ดังแสดงในภาพที่ 3.8

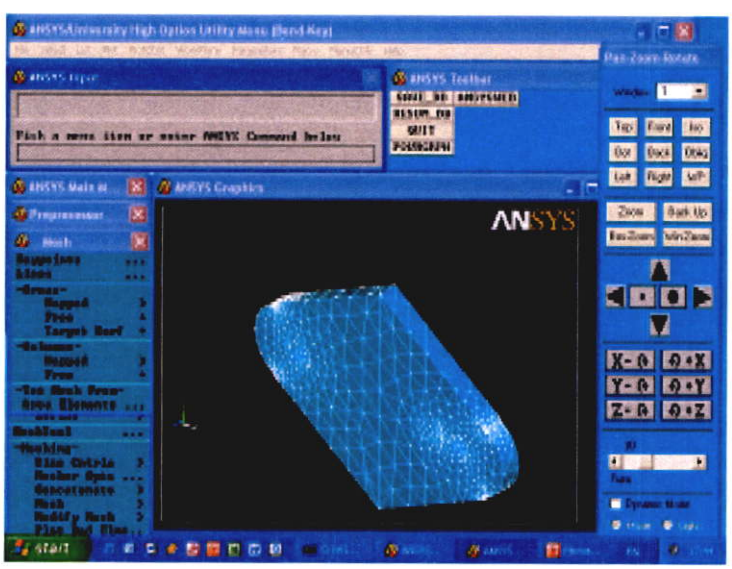


ภาพที่ 3.8 แผนภูมิเปรียบเทียบข้อมูลจากห้องทดลองกับสมการที่ 1

สมการที่1จะนำไปใช้ในโปรแกรมคำนวณExcel ที่คำนวณกำลังของหน้าตัดแผ่นผนัง,กำลังอัดที่จุดต่อ(โดยวิธีกำลัง)แล้วออกแบบชุดประกับต่อแผ่นผนัง(ภาพที่9)โดยวิธี Truss Analogy ตรวจสอบกับโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ในภาพที่ 3.10 หลังจากทำการวิเคราะห์แบบจำลองจำนวนมากจนพบชุดต่อผนังที่เหมาะสมชุดหนึ่งจึงทำการสร้างต้นแบบเพื่อทดสอบการรับแรงดัดจริงเปรียบเทียบกับค่าที่ออกแบบไว้



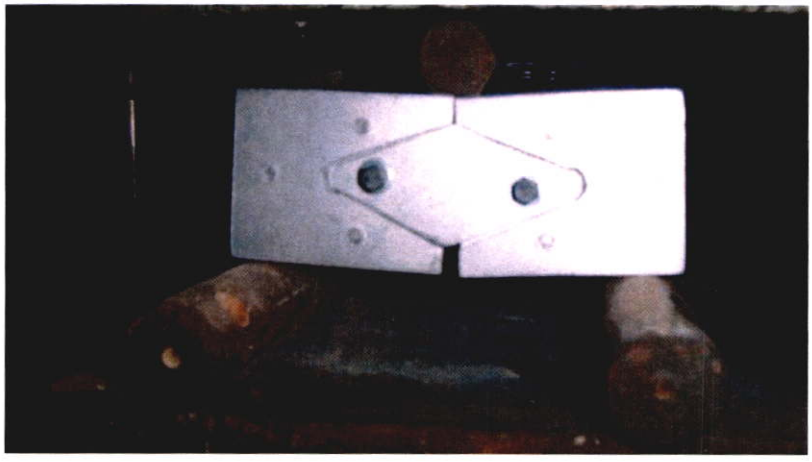
ภาพที่ 3.9 ภาพชุดประกับต่อแผ่นผนัง



ภาพที่ 3.10 ภาพการวิเคราะห์ชุดต่อผนังโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

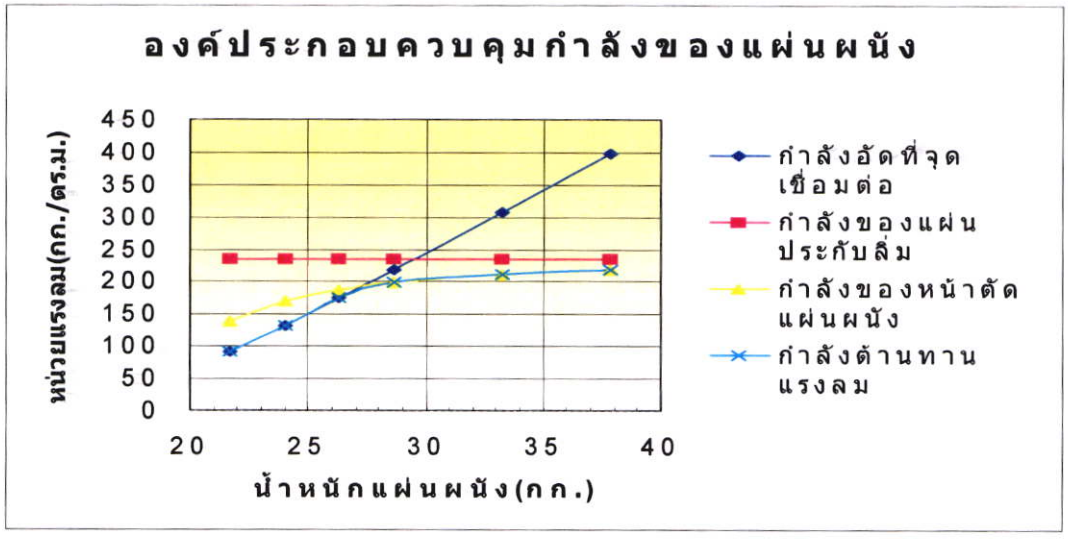
ภาพที่ 3.11 แสดงการเลื่อนออกของแผ่นประกับเนื่องจากแรงกดที่ทำการทดสอบสูงเกินกำลังอัดของ Nut และเพราะมี Clearance ที่ขอบสลักเกลียว จึงเกิดการเลื่อนออกโดยที่ชุดประกับยังไม่เสียหายสามารถถอดประกอบแล้วทดสอบใหม่ได้ ตามที่ออกแบบไว้ พบว่าค่าต้านทานโมเมนต์

ของชุดต่อณ.จุดที่เกิดการเลื่อนออกโดยไม่เสียหายนั้น สูงกว่าโมเมนต์จากแรงลมที่ต้องการ



ภาพที่ 3.11 ภาพการทดสอบการรับกำลังของชุดต่อผนัง

เพื่อคำนึงถึงสมดุลย์ที่ประสานความแข็งแรงของขอบคอนกรีตมวลเบาที่จุดต่อผนังกับกำลังรับแรงดัดของชุดประกับต่อแผ่นผนังและความแข็งแรงของหน้าตัดรูปทรงตัว C ของแผ่นผนัง เส้นความสัมพันธ์ดังกล่าวทั้งหมดจะนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบควบคุมกำลังของแผ่นผนัง ณ.ขนาดน้ำหนักต่างๆลำดับกันไปซึ่งจะได้เส้นที่สัมผัสขอบล่างสุดของเส้นความสัมพันธ์ต่างๆที่บอกถึงกำลังรับแรงกระทำด้านข้างแบบกระจายสม่ำเสมอเช่นแรงลมคือเส้นความสัมพันธ์ล่างสุดในภาพที่ 3.12 ได้ขนาดน้ำหนักแผ่นผนังที่เหมาะสมต่อการใช้งานและประหยัดที่ราวไม่เกิน 30 กก./แผ่น



ภาพที่ 3.12 แผนภูมิองค์ประกอบควบคุมกำลังของแผ่นผนัง

บทที่ 4

การทดสอบ

การทดสอบเป็นสิ่งจำเป็นมาก และเป็นหลักสำคัญ ที่จะยืนยัน พิสูจน์ว่าเราจะสามารถใช้งานชุดผนังสำเร็จรูปนี้ได้ในอาคารโดยทั่วไป หรือไม่เพียงไร นอกจากหลักในการออกแบบที่ได้อธิบายในบทที่ผ่านมาแล้ว การพิสูจน์โดยการทดสอบตามมาตรฐาน ก็ถือว่าเป็นการเพิ่มความเชื่อมั่นให้กับการออกแบบที่นำทฤษฎีต่างๆมาประยุกต์ใช้

4.1 การทดสอบการต้านทานแรงลม

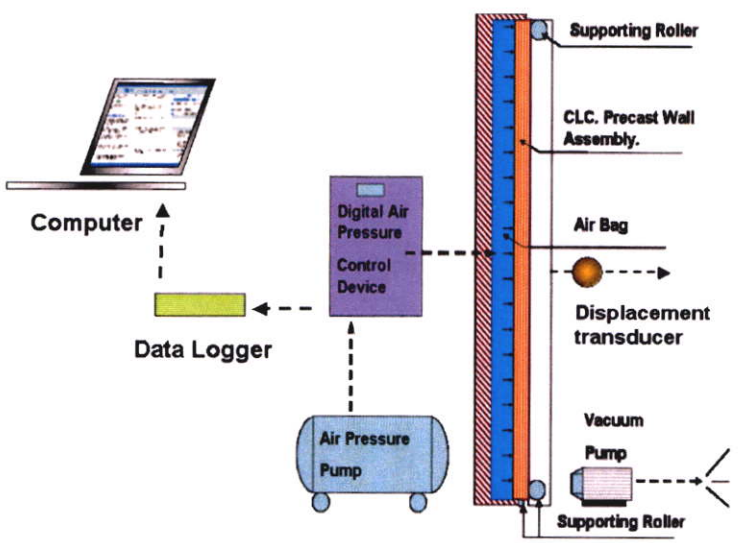
วิธีการทดสอบที่ใช้ กำหนดให้สอดคล้องตามมาตรฐาน ASTM E-72 และจะทำการทดสอบเพิ่มเติมอีก โดยหลังการทดสอบครั้งแรกจะทำการรื้อแยกชิ้นส่วนชุดผนังออกจากกันสลับตำแหน่งแผ่นผนัง แล้วทำการทดสอบการรับแรงระทำอีก รวมทั้งหมดสามครั้งจำนวนสามชุดตัวอย่างดังนี้

การจัดแผ่นผนังตัวอย่างเพื่อจำลองสภาพใช้งานจริง [6] ผนังตัวอย่างจะประกอบกันโดยตั้งขึ้นในแนวดิ่งดังรูปที่ 3.13รับแรงกระทำแบบกระจายสม่ำเสมอด้านข้างเต็มความกว้างของผนังซึ่งจะถ่ายแรงมาโดยการขยายตัวของเบาะลมซึ่งมีปั้มลมคอยเพิ่มแรงดันให้จนถึงค่าที่กำหนดไว้โดยจะมีชุดควบคุมความดันอากาศแสดงค่าความดันและตัดหรือจ่ายกระแสไฟฟ้าเพื่อปิดหรือเปิดวาล์วจ่ายลมอย่างแม่นยำ

ภาพที่ 4.1 มิติของผนังตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ(ซม.)

4.2 ระบบทดสอบความต้านทานแรงลม

การทดสอบตามมาตรฐานมีวัตถุประสงค์ให้ทำการตรวจวัดขณะที่ความดันอากาศอยู่ในภาวะสถิตย์จึงให้มีการพักการเพิ่มแรงดัน(อัตราการเพิ่ม 140 Pa/min หรือ 14 กก./ตร.ม./นาที)ที่จุดวัดค่าความโก่งตัวเป็นเวลาห้านาทีแล้วสูบอากาศออกจากระบบจนหมดแล้วหยุดห้านาทีจึงวัดค่าโก่งตัวเพื่อวัดหน่วยแรงคงค้าง(residual stress)ในชิ้นตัวอย่างต่อจากนั้นจึงเพิ่มความดันไปยังจุดสูงกว่าถัดไปเรื่อยๆ (Cyclic Loading) เนื่องจากการทดสอบนี้ต้องการทราบความสามารถใช้งานได้หลังจากมีการถอดประกอบใหม่ด้วยจึงกำหนดให้หยุดการทดสอบที่ค่าการโก่งตัวที่ L/360 หรือที่แรงดันเทียบเท่า 200 กก./ตร.ม.ตามภาพที่ 3.15 เพื่อให้ทราบกำลังที่ใช้งานได้โดยที่ชิ้นตัวอย่างยังไม่พังและสามารถถอดประกอบแล้วทดสอบการรับกำลังซ้ำอีกได้ เช่นกับการใช้งานจริงตามปกติ



ภาพที่ 4.2 ระบบทำงานของอุปกรณ์ทดสอบชุดผนัง

ระบบทดสอบที่สร้างขึ้นมีระบบควบคุมแรงดันอากาศแบบอิเลคโทรนิคส์กำลัง แสดงผลโดยจอแอลซีดีดิจิตอลโดยเมื่อถึงจุดความดันมีค่าตามที่ตั้งไว้ชุดควบคุมจะส่งสัญญานไปยังชุดรีเลย์เพื่อตัดหรือจ่ายกระแสไฟให้โซลินอยด์เปิดหรือปิดการจ่ายแรงดันอากาศโดยอัตโนมัติโดยตั้งค่าไว้ที่ -0.5 ksc สำหรับปั๊มสูญญากาศและตั้งค่าที่ 0.005 , 0.010, 0.015, 0.020 ksc ตามลำดับสำหรับปั๊มอัดอากาศ ทำให้แรงดันในถุงลมที่กระทำต่อผนังตัวอย่าง มีค่าเทียบเท่าแรงลม 50, 100, 150, 200 กก./ตร.ม.ตามที่ออกแบบ นอกจากนั้น ชุดควบคุมแรงดันอากาศนี้ยังสามารถ ส่งค่าการเปลี่ยนแปลงความดันอากาศที่วัดได้โดยส่งเป็นสัญญาณอนาล็อกขนาด 0-5 โวลท์ผ่านไปยัง Data Logger เพื่อทำการแปลงสัญญาณเป็นดิจิตอลที่คอมพิวเตอร์เข้าใจ เพื่อส่งไปประมวลผลต่อไป โดยคอมพิวเตอร์

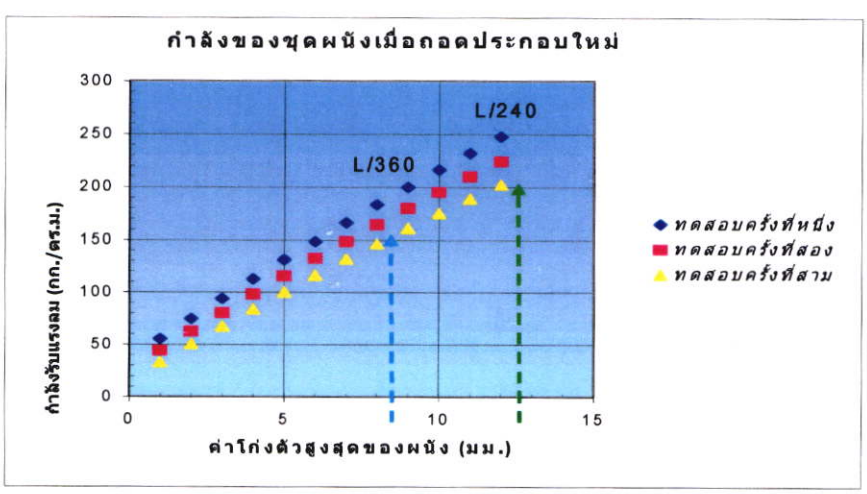
จะมีโปรแกรมที่รวบรวมค่าการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดไว้แล้วนำเข้าสู่ Matrix Spread sheet เพื่อแปลงข้อมูลที่ได้มาให้เป็นสมการตัวแทนที่จะนำไปคำนวณโดยอัตโนมัติที่ค่าตัวแปรต่างๆที่ต้องการ

ภาพที่ 4.3 ภาพการทดสอบกำลังต้านทานแรงลมของชุดผนัง

4.3 ผลการทดสอบความต้านทานแรงลม

ผลการทดสอบพบว่า ขณะเมื่อชุดผนังตัวอย่างรับแรงกระทำด้านข้าง จนเกิดการแอ่นตัวสูงสุดที่ L/240 นั้นแรงกระทำยังอยู่ในช่วง 200-250 กก./ตร.ม และจากค่าการแอ่นตัวสูงสุดที่ L/360 นั้นแรงกระทำยังอยู่ในช่วง 160-200 กก./ตร.มจากการประกอบแล้วทดสอบใหม่ทั้งสามครั้ง ได้ยืนยันความสามารถใช้งานได้ของชุดผนัง ดังแสดงในภาพที่ 4.4 เส้นแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงลมกับค่าโก่งตัวสูงสุดของผนังหลังจากปรับเรียบ โดยสมการจากวิธีเมตริกซ์ซึ่งให้ค่าPolynomial Regression 99.8 % โดยมีลักษณะเป็นเส้นตรงเป็นสัดส่วนสม่ำเสมอ (Proportional)

นอกจากนี้พบว่า ชุดผนังตัวอย่างยังแสดงค่าโก่งตัวทั้งสามจุด อยู่บนเส้นโค้งร่วม ณ จุดศูนย์กลางเดียวกันที่แรงกระทำในช่วงดังกล่าวบ่งชี้ว่าชุดผนังตัวอย่างมีความต้านทานการคัดประสมเป็นเสมือนชิ้นเดียวกันและนำค่านี้ไปประเมินกำลังของชุดผนังสี่ชิ้นได้ดังแสดงในภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์กำลังรับแรงลมกับค่าโก่งตัวของผนังโดยการถอดประกอบสามครั้ง

จากข้อมูลที่รวบรวมได้จากการทดสอบทั้งสามครั้งจะนำมาสังเคราะห์โดยหาค่ามัธยฐานที่ค่าโก่งตัวทุกหนึ่งมิลลิเมตรที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องสัมพันธ์กับค่ากำลังต้านทานแรงลม

โดยโปรแกรม Mathcad ที่เขียนขึ้นมานี้จะทำการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของสมการโดยวิธี Quadratic Approximation ซึ่งจะแสดงสมการตัวแทนที่ใช้งานได้ง่ายในรูปสมการกำลังสองดังแสดงในภาคผนวก

จากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ แบบถอดประกอบแล้วทดสอบใหม่อีกรวมสามครั้ง นำมาหาค่าเฉลี่ย ของกำลังต้านทานแรงลม ที่ค่าการโก่งตัวของชุดผนังที่สัมพันธ์กัน โดยนำข้อมูลเข้าสู่โปรแกรมทางเมตริกซ์นำเข้า ทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพาราโบล่า ซึ่งเป็นสมการตัวแทนของกำลังต้านทานแรงลมของชุดผนังสำเร็จรูปที่ช่วงพาดสามเมตร ดังสมการที่ 2

เมื่อ x แทนค่า โก่งตัวของชุดผนัง และ y แทนกำลังต้านทานแรงลม

$$y = -0.2\,x^2 + 19.036\,x + 24.991 \qquad (2)$$

4.4 การวิเคราะห์ผลความต้านทานแรงลม

ความต้านทานการดัดประสม(Composite Bending Stiffness) เป็นค่าการต้านทานแรงดัดของแถบชุดผนังทั้งระบบ สามารถคำนวณจากสมการการแอ่นตัวของคาน ที่มีการจัดฐานรองรับแบบธรรมดาที่มีน้ำหนักแผ่กระจายสม่ำเสมอดังนี้

$$EI = \frac{5wl^4}{384\Delta} \qquad (3)$$

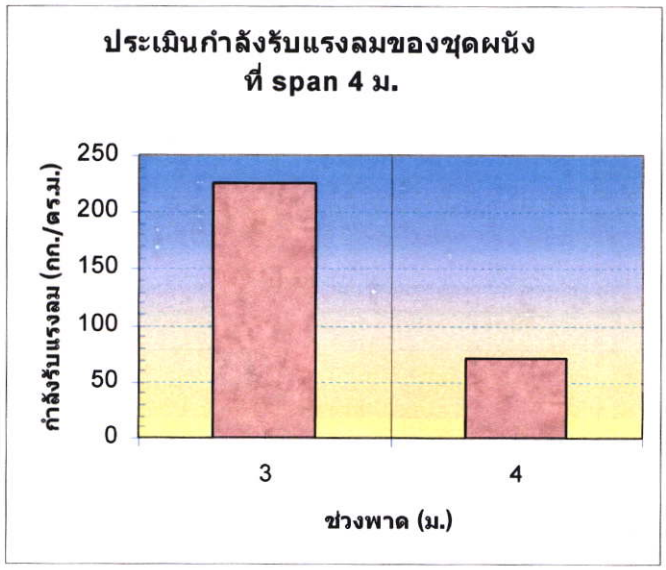
เมื่อ EI = ความต้านทานการดัดประสม,กก./ตร.ม.

w = ขนาดน้ำหนักกระทำต่อหน่วยความสูงของผนัง,กก./ม.

l = ช่วงพาดของผนัง (ระหว่างล้อรองรับ),ม.

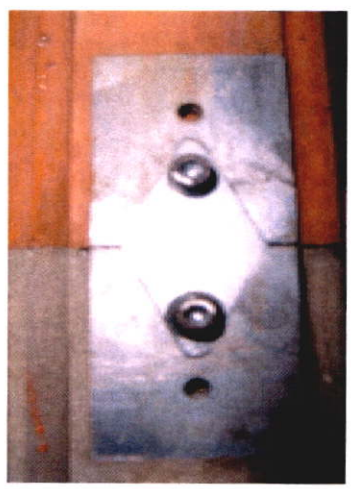
Δ = ระยะการแอ่นตัวของผนังที่จุดกึ่งกลางช่วงพาด

ค่าที่ได้จากการทดลองจะนำไปสร้างแผนภูมิความสัมพันธ์ของความต้านทานการดัดประสมซึ่งใช้ทำนายค่าการโก่งตัวที่ช่วงพาด 4 ม.ต่อไปได้ก่อนการทดสอบจริงเพื่อยืนยันความสามารถใช้งานได้ของชุดผนัง



ภาพที่ 4.5 การใช้ค่าความต้านแรงดัดประสมประเมินกำลังรับแรงลมที่ช่วงพาด 4 ม.

อนึ่งหลังการทดสอบแต่ละครั้งได้พบว่าเมื่อเพิ่มแรงดันลมให้กับชุดผนังตัวอย่างเพิ่มไปที่ 300 กก./ตร.ม. โดยเฉลี่ยจะเกิดการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของค่าโก่งตัวที่รอยต่อโดยตรวจไม่พบการปริร้าวของคอนกรีตแต่อย่างใดแต่พบว่าแผ่นประกับลิ่มแยกออกจากกันเล็กน้อยประมาณ 0.75 ม.ม. ดังภาพที่ 4.6 และพบรอยเลื่อนของแผ่นลิ่มเนื่องจากมีระยะห่างของรูร้อยรอบๆสลักเกลียวที่เป็นต้นเหตุของการปริแยกของแผ่นประกับโดยไม่ถือว่าผนังเกิดการวิบัติเพียงแค่เลื่อนปรับตัวเพื่อรับกำลังอีกระดับหนึ่ง ซึ่งเมื่อถอดแยกชุดผนังออกจากกันไม่พบการเสียรูปของรูเจาะหรือแผ่นลิ่ม ยกเว้นรอยเลื่อนดังกล่าวแล้วเมื่อประกอบสลับกันเข้าไปใหม่แล้วก็สามารถทำการทดสอบใส่แรงดันลมเข้าไปได้อีกดังอธิบายในภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.6 ภาพการเลื่อนออกจากกันของชุดต่อผนังหลังการทดสอบโดยไม่เกิดการแตกร้าว

พฤติกรรมของชุดผนังจากการสังเกตดังกล่าวได้บ่งชี้ความเหมาะสมสำหรับการใช้งานสำหรับอาคารที่ออกแบบเพื่อต้านทานแผ่นดินไหวเป็นพิเศษด้วย

4.8 สรุปผลการทดสอบความต้านทานแรงลม

จากการทดสอบซ้ำหลายครั้งชุดผนังยังแสดงพฤติกรรมในเชิงสอดคล้องกับการออกแบบขั้นต้นดังนี้

1. ชุดผนังมีน้ำหนักเบาประกอบได้สะดวกโดยคนสองคน

2. ที่ค่าโก่งตัวโดยเฉลี่ย L/240 ชุดผนังมีกำลังรับแรงกระทำด้านข้างแบบกระจายสม่ำเสมอได้โดยเฉลี่ย 230 กก./ตร.ม.

3. ที่ค่าโก่งตัวโดยเฉลี่ย L/360 ชุดผนังมีกำลังรับแรงกระทำด้านข้างแบบกระจายสม่ำเสมอได้โดยเฉลี่ย 175 กก./ตร.ม.

4. ชุดผนังมีค่าความสามารถรับแรงกระทำด้านข้างแบบกระจายสม่ำเสมอลดลงเล็กน้อยหลังทำการถอดประกอบใหม่แต่คงใช้งานได้โดยปกติ

5. พฤติกรรมของชุดผนังที่ปรับตัวที่จุดเชื่อมต่อได้ที่แรงกระทำสูงๆโดยไม่แตกร้าว ซึ่งจะเหมาะสมสำหรับการใช้งานสำหรับอาคารที่ออกแบบเพื่อต้านทานแผ่นดินไหว

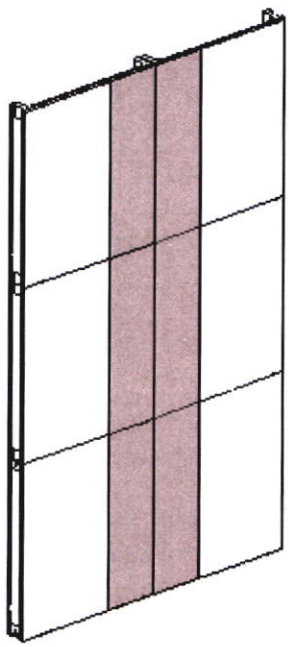
4.6 การทดสอบความต้านทานการซึมผ่านของน้ำฝน

หน้าที่หลักสำคัญของผนังที่ใช้งานกันไม่ว่าประเทศใดๆก็คือการป้องกันลมและฝนในส่วนต่อไปก็จะขอกล่าวถึงการทดสอบความต้านทานการซึมผ่านของน้ำฝน ที่มีความสำคัญมากในแถบประเทศร้อนชื้นเช่นบ้านเรา

การทดสอบความต้านทานการซึมผ่านของน้ำฝนได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กันอย่างกว้างขวางในการตรวจรับงานผนังประกอบในประเทศไทยไม่ว่าจะเป็นงานกระจก, ผนังอลูมินั่ม, โดมโปร่งแสงรวมทั้งการตรวจสอบการติดตั้ง ประตู, หน้าต่าง หรือช่องเปิดสำหรับงานผนังภายนอกอาคาร เช่น ข้อกำหนดที่ระบุในการตรวรับงานสร้างหอประชุมในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ระบุอย่างชัดเจน ในเอกสารประกวดราคาทางอินเตอร์เนต (E-Auction Document) โดยมีข้อกำหนดให้ใช้มาตรฐาน ASTM E-331 Water Penetration Resistance for Clading Wall โดยมีอุปกรณ์มาตรฐานที่สามารถสั่งซื้อได้ทางอินเตอร์เนตก็ได้แก่ Rain Maker Spray Rack แต่สำหรับงานวิจัยนี้จะวัสดุที่มีในประเทศที่มีจำหน่ายอยู่แล้ว สำหรับงานจ่ายน้ำสำหรับเกษตรกรรม โดยผู้วิจัยจะประกอบและ

ตรวจสอบให้พ่นจ่ายน้ำฝนเทียมได้ดี เทียบเท่ามาตรฐานที่กำหนดให้ดังนี้ คือ ให้พ่นกระจายน้ำในปริมาณ 5 แกลลอน ต่อ ลูกบาศก์ฟุต ต่อ ชั่วโมง โดยจะต้องไม่ปรากฏการรั่วซึมใดๆ

ในการทดสอบจะกำหนดให้สอดคล้องกับ มาตรฐาน ASTM E-331 Water Penetration Resistance for Clading Wall โดยแผ่นผนังสำเร็จรูปจำนวน 6 แผ่น จะถูกนำมาประกอบด้วยสลักเกลียวเหมือนกับลักษณะการใช้งานดังภาพที่ 4.7

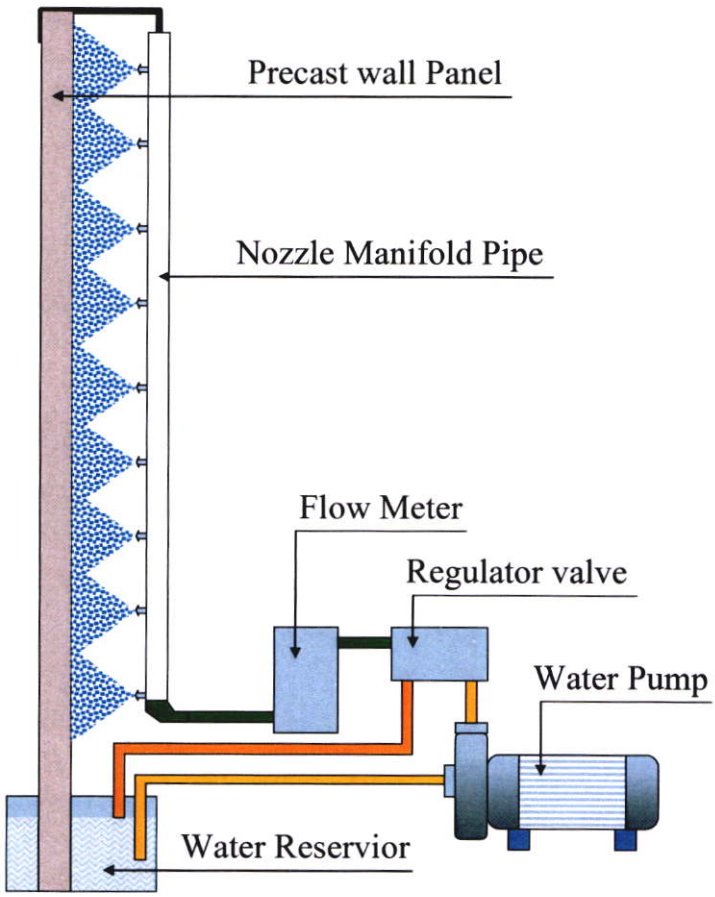


ภาพที่ 4.7 ภาพพื้นที่รอยต่อของผนังทั้ง 6 แผ่น(แถบสีเทา)ซึ่งจะถูกทดสอบการซึมผ่านของน้ำฝน

ตามข้อกำหนดมาตรฐาน ASTM E-331 Water Penetration Resistance for Clading Wall จะกำหนดให้แถบพื้นที่สีเทาที่ห่างจากรอยออกไปข้างละเท่าๆกัน มาเป็นพื้นที่ที่จะนำมาคำนวณเป็นพื้นที่รับน้ำ เนื่องจากแผ่นผนังสูงแผ่นละหนึ่งเมตรซ้อนกันสามแผ่น จึงคิดเป็น 9.8 ตารางฟุต แต่เนื่องจากตีนผนังมีส่วนที่จะต้องจมอยู่ในน้ำ จึงคำนวณเป็นพื้นที่รับน้ำเพียง 9 ตารางฟุต ดังนั้นเมื่อนำไปคูณกับปริมาณ 5 แกลลอนต่อชั่งโมง ตามข้อกำหนดนั้น ก็จะได้ปริมาณน้ำที่จะต้องฉีดพ่นใส่บริเวณแถบพื้นที่สีเทานี้ เท่ากับ 45 แกลลอน ต่อ ชั่วโมง แต่เพื่อให้มีความสะดวกในการคำนวณ และง่ายต่อการปรับวาล์วจ่ายน้ำที่ต้องทำพร้อมกับการอ่านมิเตอร์วัดปริมาณการไหลดังนี้ ผู้ทำวิจัยจึงเพิ่มปริมาณน้ำเป็น 60 แกลลอนต่อชั่วโมงหรือเท่ากับ 1 แกลลอนต่อนาที

4.7 ระบบทดสอบความต้านทานการซึมผ่านของน้ำฝน

เนื่องจากเราต้องใช้น้ำในปริมาณมากในระบบทดสอบนี้ สำหรับหมุนเวียน ฉีดพ่นละอองน้ำให้ต่อเนื่องตลอดเวลาหลายชั่วโมงเพื่อสังเกตุว่ามีการรั่วซึมอย่างไรหรือไม่ จึงต้องออกแบบให้มีอ่างน้ำวางรองอยู่ใต้ชุดผนังสำเร็จรูปที่จะทำการทดสอบ



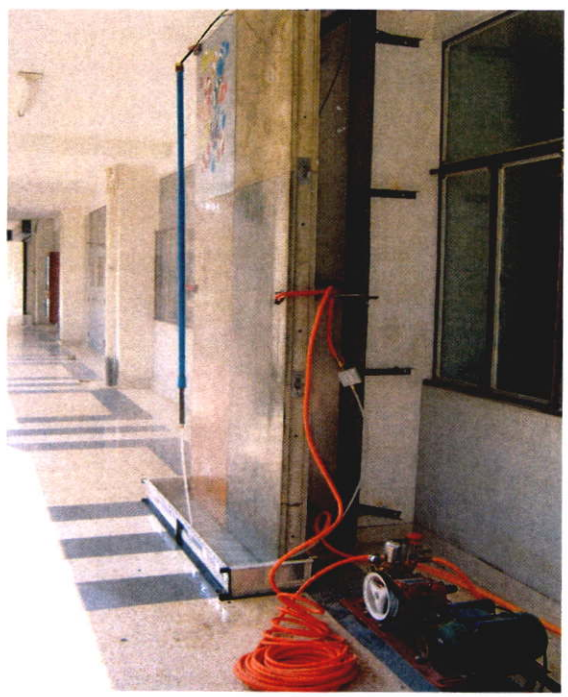
ภาพที่ 4.8 แสดงรูปด้านข้างของชุดผนังและระบบทดสอบความต้านทานการซึมผ่านของน้ำฝน

เมื่อเริ่มจ่ายกระแสไฟฟ้า มอเตอร์ไฟฟ้าจะสูบน้ำจากอ่าง ส่งจ่ายต่อไปยังวาล์วปรับแรงดัน (Regulator Valve) ที่ทำหน้าที่ควบคุม และปรับแรงดันส่วนเกิน เพื่อที่จะทำให้ปริมาณน้ำที่จ่ายผ่านมาตรวัดการไหล (Flow Meter) ให้พอดีที่จะทำการตรวจวัดอัตราการไหลให้ได้ หนึ่งแกลลอนต่อนาทีตามที่ต้องการ ส่วนน้ำที่เป็นแรงดันส่วนเกินจะถูกระบายออกโดยวาล์วปรับแรงดัน (Regulator Valve) โดยส่งไปตามท่อกลับไปยังอ่างน้ำ

กระแสน้ำในท่อที่ถูกปรับให้พอดีแล้ว จะถูกส่งมายังมาตรวัดการไหล (Flow Meter) ซึ่งเป็นชนิดเก็บยอดจ่ายน้ำรวม (Totalizer)ทำงานด้วยไฟฟ้ากระแสตรง โดยวัดความเร็วของการหมุนใบพัดของกังหันในระบบวัดการส่งจ่ายน้ำที่จะเปลี่ยน การหมุนเป็นไฟฟ้ากระแสตรง แล้วส่งไปยัง

ไมโครโปรเซสเซอร์เพื่อคำนวณและแสดงผลผ่านจอแอลซีดี โดยแสดงเป็นปริมาณน้ำที่เพิ่มสะสมขึ้นเรื่อยๆ ดังนั้นจากระบบทดสอบดังกล่าวมาจะต้องให้ค่าปริมาณน้ำสะสมต่อชั่วโมงเท่ากับหกสิบแกลลอนและเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอทุกๆชั่วโมงที่ทำการทดสอบต่อเนื่องไป

เมื่อกระแสน้ำในท่อที่ถูกปรับให้พอดีสม่ำเสมอและผ่านการวัดแล้วก็ถูกส่งผ่านมาทางท่อที่แขวนให้ความยาวของท่อ อยู่ในแนวขนานกับระนาบของชุดผนังสำเร็จรูป ที่จะทำการทดสอบโดยจัดให้ห่างจากผนังเท่ากับหกนิ้วแล้วจับยึดท่อ ไม่ให้ถีบตัวหรือส่ายออกเนื่องจากแรงปฏิกริยาจากการฉีดน้ำ หัวฉีดพ่นน้ำจะถูกติดตั้งแบบฝังเกลียวปล่อยเข้าในท่อ ทุกระยะความยาวท่อสิบนิ้วโดยสม่ำเสมอเพื่อให้ตลอดระนาบในแถบผนังที่ทำการทดสอบได้รับแรงดันจากละอองน้ำที่ถูกพ่นจากหัวฉีดเท่าๆกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.9



ภาพที่ 4.9 แสดงการทดสอบความต้านทานการซึมผ่านของน้ำฝน

กำหนดให้การทดสอบแบ่งเป็นสองรูปแบบการทดสอบตามลักษณะการใช้งานได้แก่

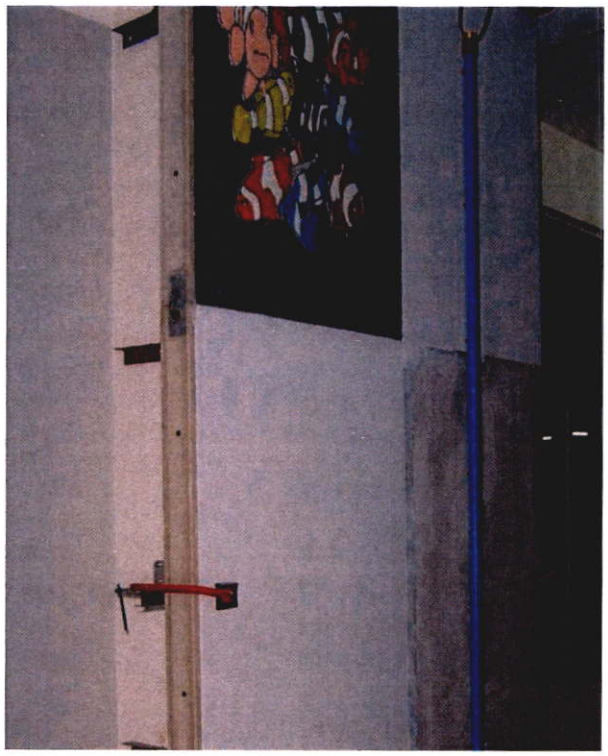
1. ทดสอบแบบผนังเปลือย

ชุดผนังจะถูกประกอบเข้าด้วยกันโดยจำลองการใช้งานเป็นผนังที่ประกอบกันเป็นอาคารที่มีกำหนดการใช้งานชั่วคราว โดยให้มีลักษณะเป็นผนังเปลือยซึ่งจะไม่ใช้หมันอุดรอยต่อใดๆเลยทั้งภายในรอยต่อที่มองไม่เห็น และผิวรอยต่อด้านหน้าของผนังที่มองเห็นได้ รวมทั้งผิวด้านหน้าของผนังสำเร็จรูปก็จะไม่ได้มีการฉาบโป้วใดๆด้วย (ยกเว้นแผ่นที่ทำเป็นศิลปหัตถกรรมไว้แล้ว) การทดสอบจะใช้น้ำในการฉีดพ่นรวม 600 แกลลอน ดังแสดงในภาพที่ 4.10

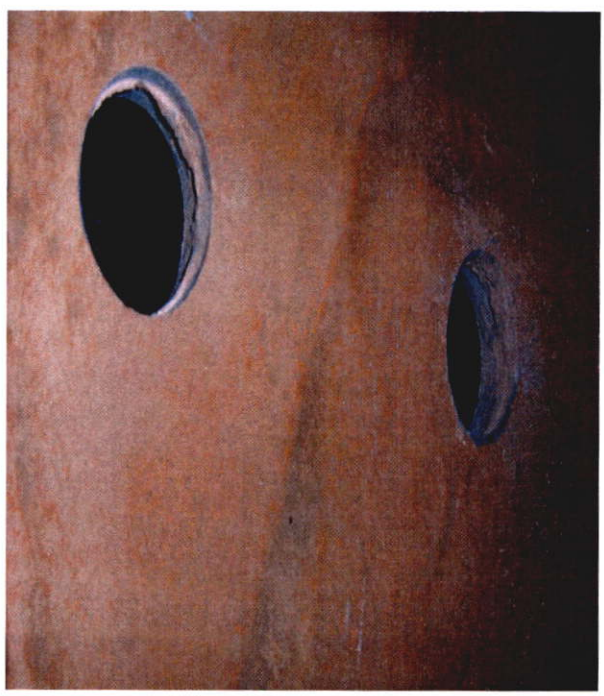
ภาพที่ 4.10 แสดงการทดสอบการต้านทานการซึมผ่านของน้ำฝนโดยไม่ใช้หมันอุดรอยต่อใดๆ

2. การทดสอบแบบอุดหมันปิดรอยต่อภายนอก

ชุดผนังจะถูกประกอบเข้าด้วยกันแบบจำลองการใช้งานเป็นผนังที่ประกอบกันเป็นอาคารที่ถูกกำหนดให้ทำสีเพื่อให้ได้ความกลมกลืน กับงานสีในส่วนอื่นๆของตัวอาคาร ซึ่งชุดผนังจะถูกนำมาประกอบเข้าด้วยกันโดยไม่ใช้หมันอุดรอยต่อใดๆเลยภายในรอยต่อที่มองไม่เห็น ส่วนรอยต่อผนังที่มองเห็นและผิวภายนอกของผนังสำเร็จรูปบางแผ่นที่มีพื้นผิวไม่เรียบร้อย หรือมีร่องรอยการแตกร้าวเล็กๆ (Hair Cracks) บ้าง ก็จะทำการโป้วภายนอกไปพร้อมทั้งทาสีทับไปด้วย เช่นเดียวกันกับการทำสีผนังถายนอกของอาคารโดยทั่วๆไป แล้วจึงทำการฉีดพ่นด้วยน้ำ เช่นเดียวกับการทดสอบในแบบแรกที่กล่าวมา ดังแสดงในภาพที่ 4.11 และหลังจากได้ทดสอบจนครบปริมาณที่กล่าวมาแล้ว จึงจะทำการเจาะ(Coring)เก็บตัวอย่างเพื่อหาค่าการดูดซึมน้ำในระบบการทดสอบนี้ (ภาพที่ 4.12)



ภาพที่ 4.11 การทดสอบการต้านทานการซึมผ่านของน้ำฝนของชุดผนังโดยใช้หมันอุดรอยต่อ



ภาพที่ 4.12 แสดงการเจาะเก็บตัวอย่างเพื่อหาค่าการดูดซึมน้ำในระบบทดสอบนี้

4.8 สรุปผลการทดสอบความต้านทานการซึมผ่านของน้ำฝน

จากทดสอบโดยต่อเนื่องเป็นเวลาสิบชั่วโมง และวัดปริมาณน้ำที่หมุนเวียนฉีดพ่นมากกว่ากว่าหกสิบแกลลอนได้ทำการบันทึกความเปลี่ยนแปลงที่สังเกตได้ดังนี้คือ

1. ผลการทดสอบแบบผนังเปลือย

-ที่รอยต่อแนวดิ่งตรงกลางชุดผนัง ตั้งแต่เริ่มฉีดพ่นละอองน้ำจนสิ้นสุดการทดสอบปรากฏว่าไม่สังเกตเห็นการรั่วซึมใดๆ

-ที่รอยร้าวเล็กๆ (Hair Cracks) ที่มีและที่เกิดการชำรุดบ้างบางแผ่น จากที่บริเวณกลางแผ่นต่อเนื่องไปยังขอบนอกของแผ่นผนัง ตั้งแต่เริ่มฉีดพ่นละอองน้ำจนเวลาผ่านไปเพียงห้านาทีหรือที่วัดปริมาณน้ำได้ห้าแกลลอนจะเริ่มปรากฏรอยซึมบางๆ และหนาขึ้นเรื่อยๆ กระทั่งเวลาผ่านไปอีกเป็นสิบห้านาที และวัดปริมาณน้ำได้สิบห้าแกลลอน ปรากฏว่าที่ใต้รอยร้าวเริ่มมีน้ำหยดเป็นน้ำตาเรื่อยแต่ก็ไม่รุนแรงขึ้นแล้ว จนกระทั่งเวลาผ่านไปจนถึงสองชั่งโมงครึ่ง วัดปริมาณน้ำที่ฉีดได้หนึ่งร้อยห้าสิบแกลลอน ปรากฏว่าหยดน้ำตา จากรอยร้าวเล็กๆที่กล่าวมาเริ่มหยดช้าลง และจนเวลาผ่านเข้าสู่ชั่วโมงที่สี่ วัดปริมาณน้ำได้สองร้อยสี่สิบแกลลอน ปรากฏว่าหยดน้ำตาจากรอยร้าวเล็กๆหยุดไปเอง และเมื่อเวลาผ่านไปใกล้ชั่วโมงที่หก วัดปริมาณน้ำได้สามร้อยหกสิบแกลลอน ปรากฏว่าเหลือเพียงรอยซึมบางๆ ที่ด้านหลังของผนังที่เกิดรอยร้าวเท่านั้น เหตผลที่รอยร้าวปิดตัวแคบลงได้นี้ ยังไม่ได้ศึกษาทดสอบมากขึ้น แต่มีความเป็นไปได้ที่เนื้อซีแอลซีคอนกรีตที่มีฟองอากาศเล็กๆจำนวนมากกระจายอย่างสม่ำเสมอมีการขยายตัวขึ้นเมื่อค่อยๆดูดซับน้ำทีละนิด แต่กระจายไปทั่วถึงกันจนปิดรอยร้าวบริเวณผิวด้านหน้าแผ่นให้เล็กลงได้นี้เองที่ทำให้น้ำซึมผ่านเข้ามาได้น้อยลงเรื่อยๆ เมื่อเวลาผ่านไปโดยอัตราการฉีดน้ำยังคงที่หนึ่งแกลลอนต่อนาทีจนทำให้การซึมผ่านไปยังด้านหลังที่มีการระเหยไปเองด้วยนั้นดูบางตาลง

-ที่รอยต่อด้านขวาง ที่ขวางกับทิศทางการตกของน้ำ ตั้งแต่เริ่มฉีดพ่นละอองน้ำจนเมื่อเวลาผ่านไปเพียงห้านาทีหรือที่วัดปริมาณน้ำได้ห้าแกลลอนจะเริ่มปรากฏรอยซึมบางๆ บริเวณรอยร้าวที่ต่อเนื่องมาจากกลางแผ่น แต่ไม่หนาขึ้น เพราะที่รอยต่อด้านขวางนี้ ได้รับการออกแบบให้ระบายน้ำออกไปด้านหน้าได้อยู่แล้ว

2. ผลการทดสอบแบบอุดหมันปิดรอยต่อภายนอก

เมื่อได้ฉาบอุดหมันปิดรอยร้าวเล็กๆต่างๆรวมทั้งอุดหมันปิดรอยต่อภายนอกที่เห็นทั้งหมดแล้วทาทับด้วยสีอะครีลิค ที่ใช้กับผนังภายที่มีจำหน่ายทั่วไปแล้ว จึงทำการทดสอบ สังเกตพบว่าไม่ปรากฏการรั่วซึมใดๆ จากเริ่มต้นจนจบการทดสอบ

3. ค่าการดูดซึมน้ำในระบบทดสอบนี้

การทดสอบ โดยจำลองสถานการณ์ ที่มีฝนตกต่อเนื่องนานๆหลายชั่วโมง แล้วย่อมจะมีปริมาณน้ำที่แผ่นผนังดูดซับไว้มากขึ้นซึ่งเท่ากับสะสมน้ำหนักเพิ่มขึ้นด้วย ปรากฏว่าโดยเฉลี่ยจะมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นเพียงตารางเมตรละไม่ถึงสองร้อยกรัมต่อตารางเมตรเท่านั้น

บทที่ 5
อุปกรณ์ช่วยในการผลิต,ขนส่งและติดตั้ง

ปกติเมื่อกล่าวถึงการเคลื่อนย้ายขนส่งผนังคอนกรีตสำเร็จรูปโดยทั่วไปเราจะนึกถึงรถเทรลเลอร์ที่มี A เฟรมสำหรับวางตั้งแผ่นผนังคอนกรีตสำเร็จรูปที่พิงเอียงเข้าหากันทั้งสองด้านของ A เฟรม แล้วใช้แถบโพลีเอสเตอร์รัดผนังเข้ากับ A เฟรมอีกทีหนึ่ง ซึ่งเมื่อใดที่จะต้องเคลื่อนย้ายก็จำเป็นจะต้องใช้เครนหรือปั้นจั่นช่วยในการทำการเคลื่อนย้ายทุกครั้ง

5.1 การขนส่งและติดตั้ง

สำหรับผนังคอนกรีตสำเร็จรูปชนิดถอดประกอบได้นี้ได้กำหนดวัตถุประสงค์ไว้ให้ทำการขนย้ายและติดตั้งได้ด้วยคนสองคน และแผ่นผนังที่ผ่านการทดสอบ ที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 ก็มีน้ำหนักไม่เกินสามสิบกิโลกรัม และบ่อยครั้งที่ผู้ทำวิจัยเองไม่มีผู้ช่วย ก็ยังสามารถยกย้ายได้ด้วยลำพังตนเอง ดังนั้นหากใช้คนทำงานสองคน จึงยังไม่ถึงกับจำเป็นจะต้องใช้เครื่องทุ่นแรงในการเคลื่อนย้ายยกเว้นเมื่อปริมาณชิ้นงานมีจำนวนมากจริงๆ

5.2 การขนย้ายระหว่างการผลิต

สำหรับการผลิตผนังคอนกรีตสำเร็จรูปชนิดถอดประกอบได้นี้ ช่วงหลังเทเข้าแบบได้อายุคอนกรีตที่สามวันโดยไม่มีการเร่งกำลังของปอร์ตแลนด์คอนกรีตโดยวิธีใดๆ ก็สามารถถอดแบบได้โดยปลอดภัย แต่เนื่องจากแบบเหล็กซึ่งใช้เทแผ่นผนังนี้วางอยู่ในแนวราบ เมื่อได้กำลังคอนกรีตเริ่มพอที่จะถอดแบบได้แล้วก็จำเป็นต้องทำการยกออกจากแบบโดยระมัดระวัง เนื่องจากจะยังมีแรงดูดเนื่องสูญญากาศของผิวแบบหล่อมาเกี่ยวข้อง

และเนื่องจากบ่อยครั้งที่ผู้ทำวิจัยเองไม่มีผู้ช่วยก็ยังจำเป็นยกย้ายได้ด้วยลำพังตนเอง จึงสร้างอุปกรณ์ช่วยสำหรับยกย้ายขณะที่ถอดแบบ และในระหว่างที่คอนกรีตมีอายุไม่ถึงเจ็ดวัน โดยมีรูปลักษณะดังนี้

- เป็นโครงสร้างเหล็ก equal angle steel 45x3mm เชื่อมประกอบกันเป็นรูปตัวซี ที่ปลายขาตัวซีเจาะรูขนาด 7 มม. 2 รู ทั้งสองขา ในการยกย้ายแผ่นผนังหนึ่งแผ่น จะต้องใช้โครงสร้างตัวซีดังกล่าวนี้จำนวนสองชิ้น
- รูด้านบนของโครงสร้างรูปตัวซี สำหรับคล้องลวดสลิง รูด้านล่างมีไว้สำหรับร้อยสลักเกลียวเข้ากับชุดประกับที่หล่อฝังอยู่แล้วในแผ่นผนัง

- ร้อยสลักเกลียว ขนาด M6 เข้ากับชุดประกับ ที่หล่อฝังอยู่แล้วในแผ่นผนัง แล้วจึงใช้ชุดสลิง 4Leg –M4 x 1M มาคล้องกับรูทั้งสี่ที่ขาของโครงสร้างรูปตัวซี
- เมื่อจะทำการยกย้ายก็ใช้ขอที่ปลายชุดสลิงแขวนกับกระโดงเหล็ก 45องศาซึ่งชุดเสริมงายกของล้อเลื่อนไฮโดรลิคยกย้ายไปได้เลย

ภาพที่ 5.1 ภาพชุดอุปกรณ์จับยกแผ่นผนังรูปตัวซี

ภาพที่ 5.2 ภาพขยายสลักเกลียวยึดชุดอุปกรณ์จับรูปตัวซีกับแผ่นผนังสำเร็จรูป

ภาพที่ 5.3 ภาพนักเรียนชายชั้นประถมสองคนช่วยกันยกแผ่นผนังสำเร็จรูป

บทที่ 6
การพัฒนาสู่ผลิตภัณฑ์ศิลปหัตถกรรม

6.1 เป้าหมายในการพัฒนาสู่ศิลปหัตถกรรม

เป้าหมายในการค้นคิดเทคนิคในการตกแต่ง เพิ่มมูลค่าของแผ่นผนังสำเร็จรูปนี้ ก็คือการที่จะสามารถถ่ายทอดเทคนิคที่จำเป็นให้กับชาวบ้านและชุมชน ในงานผลิตระดับผิวงาน ในรูปแบบศิลปะหัตถกรรมที่ใช้เทคนิคเรียบง่ายครัวเรือนและชุมชนซึ่งจะสามารถพัฒนาฝีมือแรงงานที่มีความชำนาญให้เกิดการขับเคลื่อนเศรษฐกิจระดับรากฐานให้เข้มแข็งได้และยังสามารถกระตุ้นให้เกิดการสร้างผลิตภัณฑ์คุณภาพสูงขึ้นในชุมชนด้วย เนื่องจากมีตัวอย่างชิ้นงานคุณภาพสูงจากโรงงาน เป็นมาตรฐานเปรียบเทียบ และเนื่องจากแผ่นผนังมีเนื้อวัสดุหลักเป็นคอนกรีตเบา น้ำหนักเพียงสิบกว่ากิโลกรัมแต่มีความคงทนมากหากมีแนวทางศิลปะหัตถกรรมให้สอดคล้องต้องใจให้ได้ตามรสนิยมนักท่องเที่ยวชาวต่างชาติแล้วก็จะนำผลประโยชน์สู่ท้องถิ่นตลอดจนถึงประเทศชาติได้ในที่สุดอย่างแน่นอน

6.1 การพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ศิลปหัตถกรรม

แนวทางการพัฒนาผลิตภัณฑ์ศิลปที่เหมาะสมกับงานผนังสำเร็จรูปนี้ มีความเป็นไปได้ในหลายหลากรูปแบบแต่ที่มีความเหมาะสมในช่วงระยะการวิจัยนี้แบ่งได้เป็นสองแนวทางหลัก ได้แก่

1. การสร้างลวดลายมาตรฐานลงในพื้นโมลด์ ซึ่งแยกได้หลายแบบตามชนิดของวัสดุที่ใช้เป็นพื้นโมลด์ที่เป็นแม่พิมพ์หล่อลวยลายแบบนูนต่ำสำเร็จซึ่งสามารถทำงานหล่อคอนกรีตตามปกติได้เลย โดยเมื่อหลังจากทดสอบแม่พิมพ์ จนทำงานได้สวยงามเป็นที่พอใจแล้ว แม่พิมพ์ลวดลายสามารถทำได้ ด้วยวัสดุมีขายทั่วไปเช่น

-ยางซิลิโคนซึ่งมีราคาวัสดุไม่แพงนัก แต่แม่พิมพ์จะต้องมีความหนานูนขึ้นมาจากพื้นแบบเหล็กเดิม ทำให้ระยะหุ้มของคอนกรีตกับเหล็กเสริมน้อยลงไปด้วย ดังนั้นหากใช้เทคนิคนี้ก็มีความจำเป็นต้องสร้างแบบหล่อด้านพื้นล่างใหม่ ให้มีความหนาขอบชดเชยความสูงของเนื้อยางซิลิโคนด้วยทำให้มีค่าใช้จ่ายมากขึ้นตามไปด้วย

-การกัดลวดลายลงบนพื้นโมลด์โดยตรงก็เป็นวิธีที่สามารถทำได้โดยใช้เครื่องมิลลิ่งขนาดใหญ่ซึ่งค่าจ้างงานจะแพงตามไปด้วย และหากว่าหล่อแผ่นงานออกมาแล้วไม่ได้คุณภาพที่ดีพอก็เหมือนกับเสียพื้นโมลด์ไปเลย

2. การสร้างลวดลายบนแผ่นผนังที่หล่อสำเร็จแล้วซึ่งทำได้ทั้งก่อน และหลังที่จะประกอบผนังเข้าด้วยกันโดยทำในลักษณะเดียวกันกับจิตรกรรมบนฝาผนังซึ่งมีข้อดีคือ

-กำหนดลวดลายใหม่ได้เรื่อยๆ

-ขยายขอบเขตตามจินตนาการของผู้ทำงานศิลปะได้

-ไม่มีค่าลงทุนแบบหล่อเพิ่ม

-ใช้เทคนิคฉาบปั้นแบบประติมากรรมได้

-สามารถลบทำใหม่ได้

ส่วนข้อเสียก็มีอยู่บ้างคือ การกำหนดควบคุมฝีมือของผู้ทำงานศิลปะเองเนื่องจากแต่ละคนมีความชอบความถนัด และระดับการฝึกฝนต่างกันไป แต่ก็ยังสามารถลบออกทำใหม่ได้อีกเรื่อยๆ นอกจากนั้น ยังเลือกเทคนิคที่ไม่ต้องใช้ทักษะสูงนักได้ เช่นเทคนิคยกเส้นขอบ (คล้ายงานประเภทบาติกหรือสเตนกลาส)

ดังนั้นในช่วงท้ายของงานวิจัยนี้ผู้ทำงานวิจัยจึงเลือกเทคนิคแบบที่สองนี้ เนื่องจากค่าใช้จ่ายไม่มากนักและจากที่ได้ลองเสาะหาวัสดุที่ใช้ตกแต่งงานคอนกรีตที่หาได้จากโฮมมาร์ต์ทั่วไป พบว่าในปัจจุบันมีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ใช้กับงานตกแต่งภายนอกอาคาร ให้เลือกใช้ที่ระดับคุณภาพและราคาหลายหลาก

วัสดุที่เลือกสรรไว้ได้แบ่งตามหน้าที่ได้สี่ชนิดคือ

1. รองพื้นเลือกใช้ชนิดอะครีลิคโพลิเมอร์สังเคราะห์ (Synthetic Acrylic Polyme) ซึ่งมีคุณสมบัติที่จะปิดร่องรอยผิวที่ไม่เรียบร้อยได้ดีซึ่งต้องสามารถทำงานสีทับซ้อนได้เมื่อแห้งแล้ว มีกำลังยืดหยุ่นตัว ตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงได้ ทั้งยังมีคุณสมบัติกันน้ำ และไม่ลามไฟอีกด้วย ซึ่ง ช่วยเพิ่มคุณลักษณะให้กับแผ่นผนังสำเร็จรูปอีกด้วย

2. วัสดุยกขอบสร้างลวดลายเลือกใช้อีพอกซี่ เพื่อความคงทนและต้องการแสดงขอบที่ให้ความรู้สึกว่ารูปมีมิติลอยจากพื้นหลัง และเลือกใช้อีพอกซี่ชนิดผสมสีฝุ่นได้ เพื่อเชื่อมต่อความรู้สึกกลมกลืนกับงานสี

3. สี ใช้สีอะครีลิคชนิดดี (Fine Acrylic) ที่มีคุณสมบัติที่แห้งเร็ว มีสีสันสดใสทนนานนับร้อยปี ซึ่งเป็นชนิดเดียวกับที่ใช้ในงานจิตรกรรมตกแต่งผนังและเพดานของอาคารสำคัญในประเทศยุโรป

4. สารพ่นเคลือบชั้นนอกสุดป้องกันความชื้น และรอยขีดข่วนเลือกใช้โพลียูรีเทนชนิดใสพ่นทับอีกสองชั้นเพื่อความคงทนของชิ้นงาน

ขั้นตอนการปฏิบัติงานศิลปะบนแผ่นผนัง

สำหรับเทคนิคการสร้างลวดลายบนแผ่นผนังที่เลือกทำมีความเรียบง่ายโดยจะงดเว้นการใช้ทักษะที่สูงนักแต่ควรมีความปราณีตในระดับที่ดี ข้อพึงระวังที่สำคัญคือต้องแน่ใจว่าแผ่นชิ้นงานที่จะจบลงในแต่ละขั้นตอนจะต้องแห้งสนิทดีจริง และหากจำเป็นต้องเร่งงานก็อาจจำเป็นต้องอบแห้งด้วยแสงอินฟราเรดได้เช่นกัน

ขั้นตอนการทำงานแบ่งเป็นสี่ขั้นตอนตามชนิดวัสดุที่กล่าวมาแล้วคือ

1. รองพื้นอะครีลิคโพลิเมอร์สังเคราะห์ (Synthetic Acrylic Polymer) เมื่อแน่ใจว่ารอจนแผ่นผนังสำเร็จรูปสะอาด และแห้งสนิทดีแล้ว ใช้กระดาษกาวปิดที่ขอบด้านข้างโดยรอบผนัง ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่จำเป็นต้องลงสี ต่อมาทำการทารองพื้นด้วยเกรียง หรือแปรงหรือลูกกลิ้งทาสีธรรมดาหนึ่งชั้นแล้วทิ้งไว้ประมาณ 72 ช.ม.ในร่มที่ระบายอากาศได้ดีให้แห้งจึงเริ่มขั้นตอนต่อไป

2. หลังจากร่างแบบคร่าวๆลงบนรองพื้นแล้ว ขั้นต่อไปลงลวดลายขอบด้วยอีพอกซี่ชนิดผสมสีฝุ่นได้ผสมอีพอกซี่คราวละประมาณ 50 ซีซี แล้วใส่ลงในกรวยปลายตัด (ใช้ครั้งเดียวทิ้ง) ซึ่งเลือกตัดปลายเล็กใหญ่ ตามแต่ขนาดเส้นขอบที่เลือกใช้ แล้วทิ้งไว้ 24 ช.ม. ก็จะทำงานลำดับต่อไปได้

3. ลงสีอะครีลิคชนิดดี (Fine Acrylic) ลงในกรอบลายอีพอกซี่ที่ยกขอบไว้แล้ว เนื่องจากสีอะครีลิคจะแห้งเร็วทำให้การทำสีเหลื่อมซ้อนทับทำได้สะดวก หลังจากลงสีแล้วสามวันจึงลงมือทำงานลำดับต่อไปได้

4. พ่นเคลือบด้วยโพลียูรีเทนชนิดใส เป็นฟิลม์บางๆให้ทั่ว เพียงชั้นเดียวก็พอเพียงที่จะช่วยกันความชื้นให้งานผนังในร่ม และให้ความเงางามกับเนื้อสีได้ดี เพราะเนื้อสีอะครีลิคชนิดดีมีความทนทานดีอยู่แล้วแต่หากต้องการพ่นทับจำนวนมากครั้งก็ทำได้โดยให้ปฏิบัติตามข้อแนะนำในการใช้อย่างถูกต้องด้วย

ภาพที่ 6.1 ภาพการลงเส้นขอบอีพอกซี่หลังจากลงรองพื้นและวาดเส้นร่างแล้ว

ภาพที่ 6.2 ภาพชื่อ “School” บนแผ่นผนังที่พร้อมใช้งาน

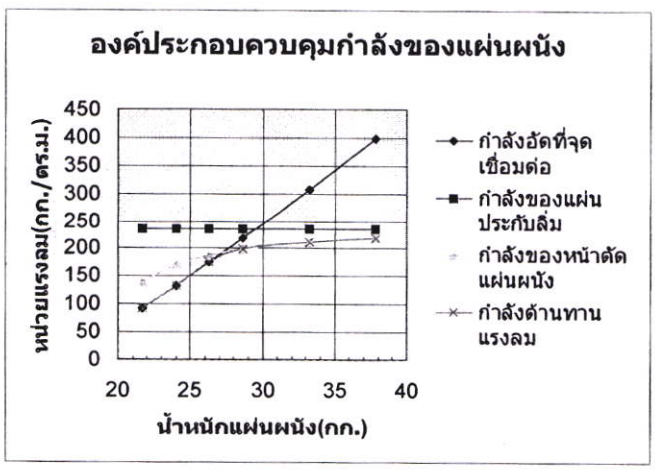
บทที่ 7
สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

สรุปผลงานวิจัย

เมื่อผนังไม่ต้องรับน้ำหนักองค์อาคารส่วนเหนือขึ้นไปแล้วเราก็ไม่ควรต้องรวมส่วนผนังเข้าในขั้นตอนก่อสร้างที่เร่งรีบเพราะไม่จำเป็นที่จะเร่งทำมันให้เสร็จไปด้วยกัน เครื่องจักร กลหนัก โดยหลังจากโครงสร้างเสาคานแล้วเสร็จลง เมื่อใดที่มีกำลังแรงงานเหลือเกินจากงานที่ทำได้อื่นใดก็จะสับเปลี่ยนมาที่งานชุดผนังค.ส.ล.สำเร็จรูปชนิดถอดประกอบได้นี้ ซึ่งผลทดสอบที่ช่วงความสูงผนัง 3 ม.สามารถรับแรงกระทำแบบกระจายสม่ำเสมอได้ 175 กก.ต่อ ตร.ม.ที่ค่าโก่งตัว L/360 และผ่านการทดสอบการซึมผ่านของน้ำฝนทั้งแบบใช้และไม่ใช้วัสดุอุดกันซึม ผนังแต่ละแผ่นมีน้ำหนักน้อยกว่า 30 กก. ติดตั้งแบบแห้งไม่เปียกเลอะจากปูนก่อปูนฉาบ สะอาดและมีของเสียน้อย ทั้งเพียงต้องการเครื่องมือเล็กๆ ไม่กี่ชิ้น นอกจากนี้หลังประกอบติดตั้งผนังชุดเสร็จไปแล้วยังสามารถคืนพื้นที่ใช้สอยกลับมาโดยรื้อแยกชิ้นส่วนซึ่งจะมีเพียงปลั๊กปิดสมอเล็กๆเรียบๆเหลืออยู่เท่านั้น ราวกับไม่เคยมีผนังอยู่เลย และที่สำคัญสามารถประกอบผนังเดิมทั้งหมดกลับคืนได้อีกด้วย

ข้อเสนอแนะ

การใช้พลังงานทั่วโลกกำลังเพิ่มขึ้นอย่างหนักหน่วง ซึ่งย่อมส่งผลต่อภาวะโลกร้อนด้วยในขณะที่แหล่งสำรองพลังงานฟอสซิล ได้รับการคาดการณ์ว่ากำลัง จะหมดไปภายในไม่กี่ทศวรรษนี้ บัดนี้ เราได้อยู่ในยุคของวิกฤติการณ์พลังงานแล้ว เพื่อเป็นการผสานกำลังกับวงการวิศวกรรมอื่น ๆ วิศวกรโยธาก็จะต้องเข้าร่วมสมทบบทบาทนี้ด้วยกัน"ชุดผนังค.ส.ล.สำเร็จรูปชนิดถอดประกอบได้" ที่คิดทำขึ้นใหม่นี้ก็ร่วมอยู่ในการประดิษฐ์คิดค้นทั้งหลายเช่นกัน



ภาพที่ 3.12(โปรดดูบทที่ 3) แผนภูมิองค์ประกอบควบคุมกำลังของแผ่นผนัง

เราทั้งหมดทุกคนล้วนต่างมี หรือเคยมีความคิดฝัน หากตอนนี้เรายุ่งเหลือเกินก็เก็บความฝันดีๆนั้นไว้ วันหนึ่งที่จิ๊กซอว์เล็ก ๆ ได้ถูกปะติดปะต่อในจังหวะที่เหมาะสมแม้ว่าจิ๊กซอว์บางชิ้นจะขาดหายไปบ้าง หรือเปรียบเสมือนทฤษฎีปลีกย่อยจะยังไม่จำเป็นต้องครบถ้วนสมบูรณ์ แต่ด้วยการคัดสรรจัดประสานองค์ประกอบหลักที่มีอิทธิพลชัดเจนต่อนวัตกรรมดังแสดงด้วยกราฟที่ 3.12 บนความพยายามด้วยการประสานความคิดปัญญาร่วมกัน ในท้ายสุดความเป็นจริง ก็จะเป็นรูปเป็นร่าง ให้ได้ทดสอบ, ชื่นชม และพัฒนามันต่อไปได้ในที่สุด ทั้งยังเป็นกระแสพลังให้กับการค้นคิดสร้างสรรค์งานนวัตกรรมอื่น ๆ อีกด้วย สุดท้ายนี้ขอทุกท่านจงโปรดร่วมช่วยกันรักษา พลังแห่งการสรรสร้างอารยธรรม (CIVILIZATION) ที่งดงามและยั่งยืนของมนุษย์เราสืบไปเทอญ

บรรณานุกรม

[1] คณะกรรมการวิชาการ สาขาวิศวกรรมโยธา (2543), มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดย วิธีกำลัง,แก้ไขปรับปรุงครั้งที่ 2 ,วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์

[2] คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา (2540), ศัพท์วิทยาการวิศวกรรมโยธา แก้ไขปรับปรุงครั้งที่ 1 , วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์

[3] ศรีกริช หิรัญมาศ, Reinforce Concrete Design I, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[4] Design of Structural Concrete , Journal of Structural Engineering. American Society for Testing and Material. (2003), Annual Book of ASTM Standards.

[5] LITE BUILD RESERCH, 2003, Ligth Weight Concrete Hand Book

[6] Davis H.E. Troxell G.E. and Hauck G.G.W. (1982), The Testing of Engineering Materials 4 th ED., Mc Graw Hill, New York.

[7] Robert E, Engle Kirk, 2003, Seismic Design of Reinfored and Precast Concrete Buildings

[8] Ghalli A. Megally A. Design for Punching Shear Strength with ACI 318-95, ACI Structural Journal, 96:4,July/August 1999,pp

[9] Collins M.P.,Mithell D,Adebar P and Vecchio F.J. (1996), A General Shear Design Method, ACI Structural Journal,93:1, pp.36-45

[10] McGregor J.G. and GHONEIM M.G., Design for Torsion, American Concrete Institute Structural Journal, March-April, 1995, pp.211-218

ภาคผนวก

รายการคำนวณประกอบแผนภาพที่ 3.12

	หน่วยน้ำหนักของซีแอลซีคอนกรีต	ตัน/ลบ.ม.	0.9	1	1.1	1.2	1.4	1.6		
	กำลังอัดประลัย(จากสมการที่ 1 หน้า 38)	ก.ก./ตร.ม.	40.5	59.2	78.2	97.6	137.4	178.6		
	$\rho_{max} = 0.75\rho_b =$		0.0225							
	$As_{max} = \rho_{max} bd =$		1.1475	cm^2	$As =$	0.566	cm^2	$As' =$	0.57	cm^2
	$a = As_{max} fy / 0.85 f'_c b =$		13.321	9.1216	6.904	5.5337	3.9308	3.0239		
(1)	$\phi Mn_{max} = 0.9Asfy(d-a/2)+0.9As'(d-d')fy =$		10806.5	13373.8	14729.4	15567.0	16546.8	17101.2		
(2)	$\phi Mn_{max} = 0.85a_{bolt}d_{bolt}fy$ (shear bolt) =		23092.8	23092.8	23092.8	23092.8	23092.8	23092.8		
	กำลังอัดที่จุดเชื่อมต่อ (แผ่นหนา 2.5 ซม.)		7093.8	10360.0	13687.8	17077.2	24040.8	31250.8		
	น้ำหนักแผ่น (หนา 2.5 ซม.)	**ก.ก.**	**20.5**	**22.8**	**25.1**	**27.4**	**31.9**	**36.5**		
	กำลังอัดที่จุดเชื่อมต่อ (แผ่นหนา 3.5 ซม.)		9931.3	14504.0	19162.9	23908.1	33657.1	43751.1		
	น้ำหนักแผ่น (หนา 3.5 ซม.)		26.1	29	31.9	34.8	40.6	46.4		
	กำลังอัดที่จุดเชื่อมต่อ (แผ่นหนา 2.5 ซม.)	**ก.ก./ตร.ม.**	**90.1**	**131.6**	**173.8**	**216.9**	**305.3**	**396.8**		
	กำลังของแผ่นประกับสิ้นจาก(2)	**ก.ก./ตร.ม.**	**293.2**	**293.2**	**293.2**	**293.2**	**293.2**	**293.2**		
	กำลังของหน้าตัดแผ่นผนังจาก(1),ขอบหนา 10 ซม.	**ก.ก./ตร.ม.**	**137.2**	**169.8**	**187.0**	**197.7**	**210.1**	**217.2**		
	น้ำหนักแผ่น (ตามขอบผนังหนา 10 ซม.)	**ก.ก.**	**20.5**	**22.8**	**25.1**	**27.4**	**31.9**	**36.5**		
	กำลังของหน้าตัดแผ่นผนังจาก(1),ขอบหนา 11 ซม.	ก.ก./ตร.ม.	154.4	191.1	210.4	222.4	236.4	244.3		
	น้ำหนักแผ่น (ตามขอบผนังหนา 11 ซม.)	ก.ก.	21.1	23.4	25.7	28.1	32.8	37.4		
	กำลังต้านทานแรงลม	**ก.ก./ตร.ม.**	**90.1**	**131.6**	**173.8**	**197.7**	**210.1**	**217.2**		

โปรแกรมคำนวณประกอบสมการที่ 1

Linear Least Squares Approximation

$$\begin{aligned}
&\text{Lin_LS}(x,y) := \\
&\quad n \leftarrow \text{length}(x) \\
&\quad sx \leftarrow \sum x \\
&\quad sy \leftarrow \sum y \\
&\quad sxx \leftarrow x \cdot x \\
&\quad sxy \leftarrow x \cdot y \\
&\quad denom \leftarrow n \cdot sxx - sx \cdot sx \\
&\quad s_0 \leftarrow \frac{n \cdot sxy - sx \cdot sy}{denom} \\
&\quad s_1 \leftarrow \frac{sxx \cdot sy - sxy \cdot sx}{denom} \\
&\quad s
\end{aligned}$$

Quadratic Approximation

$$\begin{aligned}
&\text{Quadratic}(x,y) := \\
&\quad n \leftarrow \text{length}(x) \\
&\quad sx \leftarrow \sum x \\
&\quad sy \leftarrow \sum y \\
&\quad sx2 \leftarrow \sum_{i=0}^{n-1} x_i \cdot x_i \\
&\quad sxy \leftarrow \sum_{i=0}^{n-1} x_i \cdot y_i \\
&\quad sx3 \leftarrow \sum_{i=0}^{n-1} (x_i)^3 \\
&\quad syx2 \leftarrow \sum_{i=0}^{n-1} y_i \cdot (x_i)^2 \\
&\quad sx4 \leftarrow \sum_{i=0}^{n-1} (x_i)^4 \\
&\quad A \leftarrow \begin{pmatrix} sx4 & sx3 & sx2 \\ sx3 & sx2 & sx \\ sx2 & sx & n \end{pmatrix} \\
&\quad r \leftarrow \begin{pmatrix} syx2 \\ sxy \\ sy \end{pmatrix} \\
&\quad sol \leftarrow A^{-1} \cdot r \\
&\quad sol
\end{aligned}$$

Cubic Approximation

$$\text{cubic}(x,y) := \left| \begin{array}{l} n \leftarrow \text{length}(x) \\ sx \leftarrow \sum x \\ sy \leftarrow \sum y \\ sx2 \leftarrow \sum_{i=0}^{n-1} x_i \cdot x_i \\ sxy \leftarrow \sum_{i=0}^{n-1} x_i \cdot y_i \\ sx3 \leftarrow \sum_{i=0}^{n-1} (x_i)^3 \\ syx2 \leftarrow \sum_{i=0}^{n-1} y_i \cdot (x_i)^2 \\ sx4 \leftarrow \sum_{i=0}^{n-1} (x_i)^4 \\ sx5 \leftarrow \sum_{i=0}^{n-1} (x_i)^5 \\ sx6 \leftarrow \sum_{i=0}^{n-1} (x_i)^6 \\ syx3 \leftarrow \sum_{i=0}^{n-1} y_i \cdot (x_i)^3 \\ A \leftarrow \begin{pmatrix} sx6 & sx5 & sx4 & sx3 \\ sx5 & sx4 & sx3 & sx2 \\ sx4 & sx3 & sx2 & sx \\ sx3 & sx2 & sx & n \end{pmatrix} \\ r \leftarrow \begin{pmatrix} syx3 \\ syx2 \\ sxy \\ sy \end{pmatrix} \\ sol \leftarrow A^{-1} \cdot r \\ sol \end{array} \right.$$

Data In

ORIGIN= 0

$$x := \begin{pmatrix} 0.9 \\ 1 \\ 1.1 \\ 1.2 \\ 1.4 \\ 1.6 \end{pmatrix} \qquad y := \begin{pmatrix} 41 \\ 58 \\ 80 \\ 100 \\ 135 \\ 180 \end{pmatrix}$$

Coefficie Output

$$\text{Lin_LS}(x,y) = \begin{pmatrix} 197.353 \\ -137.824 \end{pmatrix}$$

$$\text{Quadratic}(x,y) = \begin{pmatrix} 17.62 \\ 153.2 \\ -111.211 \end{pmatrix}$$

$$\text{cubic}(x,y) = \begin{pmatrix} 107.928 \\ -385.202 \\ 643.493 \\ -305.836 \end{pmatrix}$$

Functio pproximation

$$f1(z) := \text{Lin_LS}(x,y)_0 \cdot z + \text{Lin_LS}(x,y)_1$$

$$f2(z1) := \text{Quadratic}(x,y)_0 \cdot z1^2 + \text{Quadratic}(x,y)_1 \cdot z1 + \text{Quadratic}(x,y)_2$$

$$f3(z2) := \text{cubic}(x,y)_0 \cdot (z2)^3 + \text{cubic}(x,y)_1 \cdot (z2)^2 + \text{cubic}(x,y)_2 \cdot (z2) + \text{cubic}(x,y)_3$$

Error Cc iring

$$E_1 := \sum_{i=0}^{4} \left(y_i - f1\left(x_i\right)\right)^2 \qquad E_1 = 17.379$$

$$E_2 := \sum_{i=0}^{4} \left(y_i - f2\left(x_i\right)\right)^2 \qquad E_2 = 16.327$$

$$E_3 := \sum_{i=0}^{4} \left(y_i - f3\left(x_i\right)\right)^2 \qquad E_3 = 11.761$$

โปรแกรมคำนวณประกอบสมการที่ 2

Data Input Matrix

Column 1 = Deflection
Column 2 = Wind Resistance

$$data := \begin{pmatrix} 1 & 43.8 \\ 2 & 62.3 \\ 3 & 80.3 \\ 4 & 97.9 \\ 5 & 115.2 \\ 6 & 132.0 \\ 7 & 148.4 \\ 8 & 164.5 \\ 9 & 180.1 \\ 10 & 195.3 \\ 11 & 210.2 \\ 12 & 224.6 \end{pmatrix}$$

$X := data^{\langle 1 \rangle}$ $Y := data^{\langle 2 \rangle}$

$n := rows(data)$ $k := 2$ $n := 12$

$z := regress(X, Y, k)$ $coeffs := submatrix(z, 4, length(z) 1, 1, 1)$

$fit(x) := interp(z, X, Y, x)$

$coeffs^{T} = (24.991 \quad 19.036 \quad -0.2)$

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นาย สาธิต คำเงิน
วัน เดือน ปีเกิด	28 พฤศจิกายน 2504
ที่อยู่	238/55 ม.ซิตี้ปาร์ค ถ.เทพารักษ์ ก.ม. 21
	อ.บางเสาธง จ.สมุทรปราการ
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2535	วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิทยาการจัดการ
	มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช
พ.ศ. 2542	วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา
	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ประวัติการทำงาน	
พ.ศ. 2536-2539	Precast Production Planner
	MABCO Prefabricated Building Manufacturing
พ.ศ. 2542-2548	วิศวกร บจ. ดีด เอ็นจิเนียริ่ง
พ.ศ. 2549-2550	ผจก.วิศวกรรม บจ. ดีด เอ็นจิเนียริ่ง
ผลงานทางวิชาการ	
พ.ศ. 2550	บทความวิจัย “ชุดผนัง ค.ส.ล.สำเร็จรูปชนิดถอดประกอบได้”
	ณ. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12
ทุนการศึกษา	
พ.ศ. 2549	โครงการทุนวิจัย สกว.- บมจ.ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด