

## บทที่ 2

### ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 เจดีย์

##### 2.1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเจดีย์

เจดีย์ที่มีอยู่ในพระพุทธศาสนาในประเทศไทยนั้นมีต้นกำเนิดมาจากประเทศอินเดียโบราณ และมีความหลากหลายมากขึ้นเนื่องจากการปรับปรุงให้เข้ากับแนวคิดของแต่ละพื้นที่ การติดต่อเชื่อมความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใกล้เคียงยังก่อให้เกิดการถ่ายทอดอิทธิพลทางศิลปวัฒนธรรมซึ่งกันและกันด้วย โดยในแต่ละท้องถิ่นยังคงความเป็นเอกลักษณ์ประจำท้องถิ่นเอาไว้

เจดีย์ในที่นี้หมายถึงสิ่งก่อสร้างในพระพุทธศาสนาอันควรแก่การสักการบูชา มีทั้งสร้างขึ้นเพื่อบรรจุอัฐิธาตุหรือเพื่อประดิษฐานพระพุทธรูป หรือเพื่อเป็นที่ระลึก เป็นต้น วัสดุที่ใช้สร้างเจดีย์นั้นมักจะเป็น ศิลา ศิลาแลง และอิฐ และจะมีการฉาบปูนทับไว้ (สันติ, 2538)

ประเภทของเจดีย์นั้นยังแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ประเภทแรก คือเจดีย์ที่ให้ความหมายทางด้านตำแหน่งที่ตั้ง หรือการใช้งาน ได้แก่ เจดีย์ประธาน เจดีย์ราย ประเภทที่สอง คือเจดีย์ที่ให้ความหมายทางด้านรูปแบบ ซึ่งมีความนิยมมากกว่าประเภทแรก ได้แก่เจดีย์ทรงระฆัง เจดีย์ทรงปราสาท เจดีย์ทรงพระศาก เป็นต้น

องค์เจดีย์ที่พบเห็นในเชียงใหม่สามารถแบ่งได้เป็น 4 ระยะเวลาคือ

ระยะแรก ในช่วงรัชกาลของพญามังรายถึงพญาฮ่อ เป็นเจดีย์ที่ประกอบด้วยฐานบัว ลูกแก้วย่อเก็จ ตั้งอยู่บนฐานเขียงสี่เหลี่ยมจัตุรัสเดี่ยวรองรับฐานเขียงกลมสามชั้น ถัดไปเป็นมาลัยเถาที่เปลี่ยนมาจากฐานบัวลูกแก้วย่อเก็จแต่ทำเป็นฐานกลมซ้อนกันสามชั้น เหนือขึ้นไปเป็นองค์ระฆังขนาดเล็ก เช่น เจดีย์วัดพระสิงห์ เป็นต้น นอกจากนั้นยังมีเจดีย์เหลี่ยมที่สืบทอดมาจากทวารวดี คือเจดีย์เหลี่ยมที่เวียงกุมกาม อ.สารภี จ.เชียงใหม่

ระยะที่สอง ระหว่างรัชกาลพญาเกือนาถึงพระเจ้าสามฝั่งแกน ซึ่งแยกเป็น 2 แบบ คือแบบแรกได้รับอิทธิพลขององค์ระฆังและแผนผังที่ประกอบด้วยฐานทักษิณรวมทั้งเจดีย์ทิศจากเมืองนครศรีธรรมราช ได้แก่ เจดีย์วัดสวนดอก แบบที่สองเป็นอิทธิพลจากศิลปะพม่า ลักษณะเด่นคือท้องไม้ของมาลัยเถามีช่องสี่เหลี่ยมเจาะเป็นระยะๆ เช่น เจดีย์วัดอุโมงค์เชิงคอยสุเทพ

ระยะที่สาม เป็นเจดีย์มณฑปผสมทรงกลมที่เริ่มสร้างตั้งแต่รัชกาลของพระเจ้าติโลกราชถึงพระยศเกล้า ลักษณะเด่นของเจดีย์จะเป็นการผสมกันระหว่างมณฑปกับเจดีย์ทรงกลมแบบสุโขทัย โดยพิจารณาถึงชั้นมาลัยเถาและองค์ระฆังเป็นสำคัญ

ระยะที่สี่ ตั้งแต่รัชกาลพระยศเกล้าลงมาได้มีความนิยมสร้างเจดีย์ย้อนรอยตามแบบเจดีย์ระยะแรก แต่ดัดแปลงมาลัยเถาเป็นสี่เหลี่ยมรวมทั้งจำนวนชั้นที่มากขึ้น เช่น เจดีย์วัดพระธาตุคุดอยสุเทพ เป็นต้น (พิเศษ และจนิษฐา, 2510)

#### 2.1.2 รูปทรงเจดีย์ล้านนา

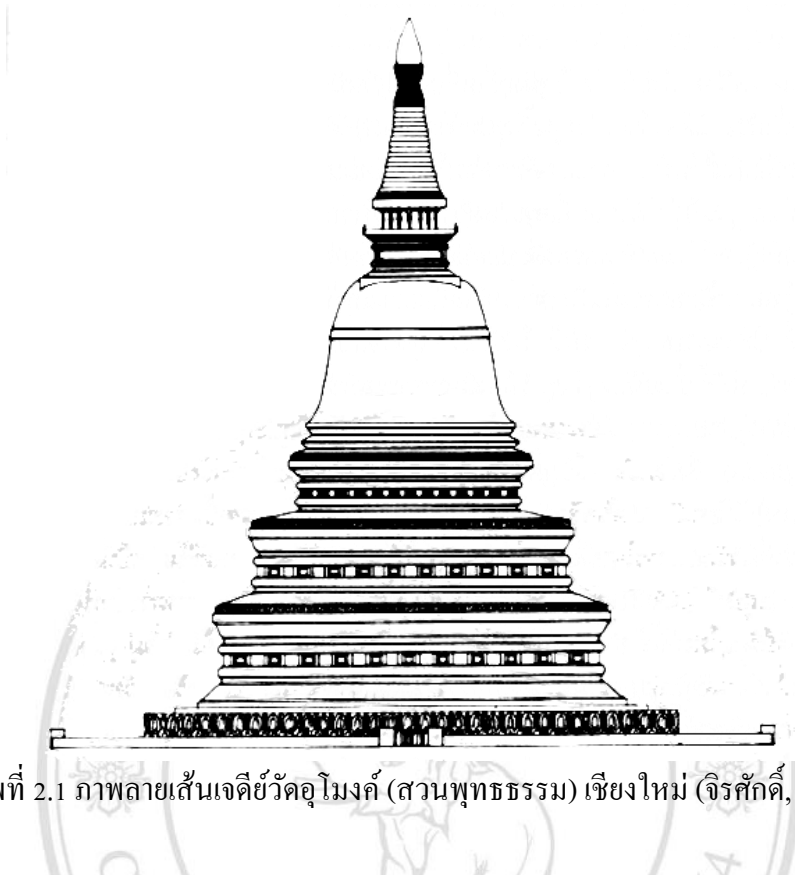
การศึกษารูปทรงเจดีย์เพื่อความเข้าใจง่ายจึงได้แบ่งรูปทรงออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ คือ เจดีย์รูปทรงระฆัง เจดีย์ทรงประสาท และเจดีย์แบบอื่นๆ ดังนี้

1) เจดีย์ทรงระฆัง หมายถึงเจดีย์ที่มีองค์ระฆังเป็นส่วนประกอบที่สำคัญ รูปแบบโดยส่วนรวมจะประกอบไปด้วย ส่วนฐานที่รองรับด้วยมาลัยเถา โดยมีองค์ระฆังเป็นส่วนสำคัญ เหนือองค์ระฆังมีบัลลังก์และส่วนยอดซึ่งประกอบไปด้วย ปล้องไฉนและปลียอด เจดีย์ทรงระฆังได้แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มคือ

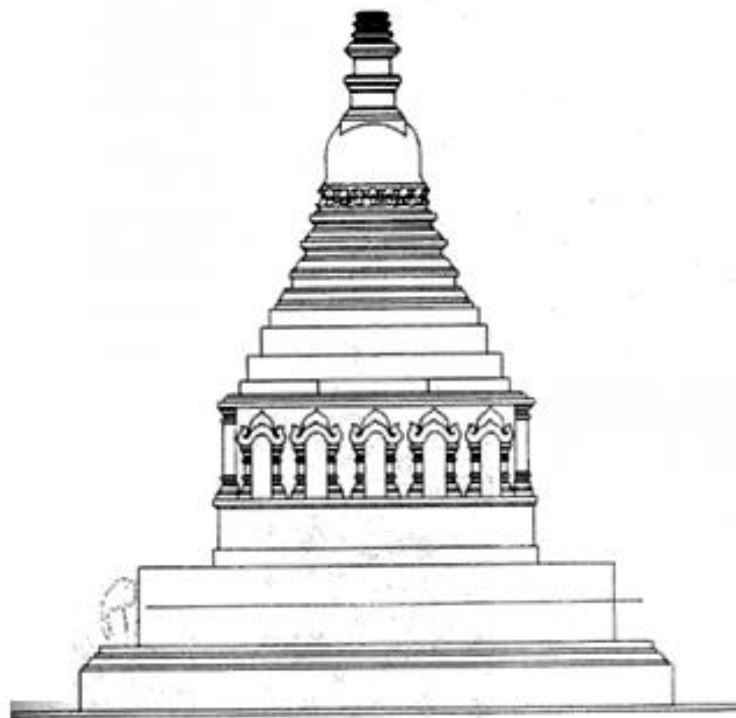
กลุ่มที่ 1 เจดีย์ทรงระฆังที่ได้รับอิทธิพลมาจากศิลปะพม่า และพัฒนาจนกลายเป็นแบบเจดีย์พื้นเมือง ได้แก่เจดีย์อุโมงค์เชิงคอยสุเทพ ดังภาพที่ 2.1

กลุ่มที่ 2 เจดีย์ทรงระฆังที่ได้รับอิทธิพลมาจากศิลปะสุโขทัย พัฒนาเป็นแบบเจดีย์พื้นเมือง ได้แก่ เจดีย์วัดป่าแดง เจดีย์วัดป่าพร้าวใน ดังภาพที่ 2.2 และ 2.3

กลุ่มที่ 3 เจดีย์ทรงระฆังที่เลียนแบบมาจากศิลปะพม่ารุ่นหลัง ราวปลายพุทธศตวรรษที่ 23 ได้แก่เจดีย์วัดป่าเป้า เชียงใหม่ ดังภาพที่ 2.4



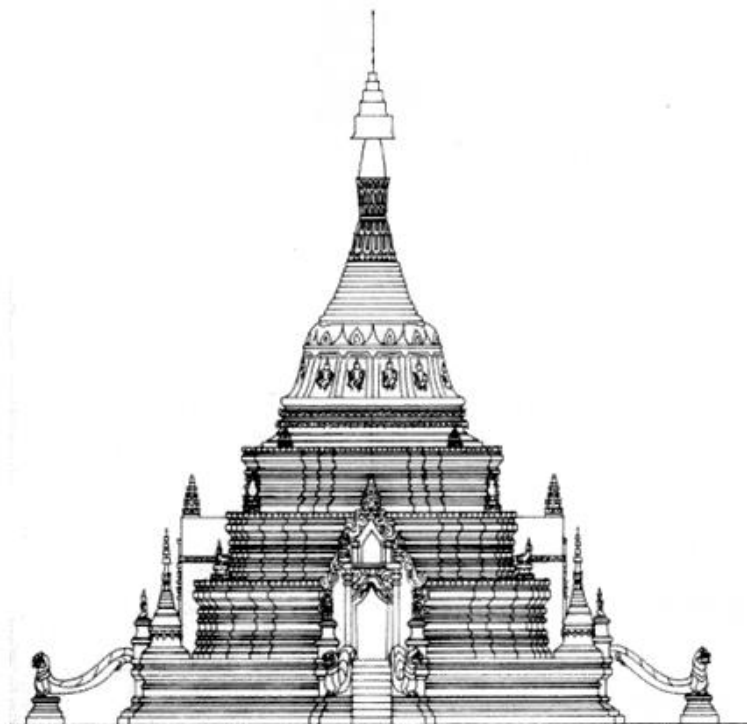
ภาพที่ 2.1 ภาพลายเส้นเจดีย์วัดคูโองค์ (สวนพุทธธรรม) เชียงใหม่ (จิรศักดิ์, 2541)



ภาพที่ 2.2 ภาพลายเส้นเจดีย์วัดป่าแดง (จิรศักดิ์, 2541)



ภาพที่ 2.3 ภาพลายเส้นเจดีย์วัดป่าพร้าวใน (จิรศักดิ์, 2541)



ภาพที่ 2.4 ภาพลายเส้นเจดีย์วัดป่าเป้า (จิรศักดิ์, 2541)

2) เจดีย์ทรงปราสาท หมายถึงเจดีย์ที่มีเรือนธาตุและยอดที่ซ้อนลดหลั่นเรียวแหลมขึ้นไปโดยไม่จำกัดว่าเป็นยอดในลักษณะใด เจดีย์ทรงปราสาทในเมืองเชียงใหม่จำแนกตามลักษณะได้ 4 กลุ่ม คือ

กลุ่มที่ 1 เจดีย์ทรงปราสาทยอดเจดีย์ ลักษณะโดยรวมเป็นเจดีย์ที่มียอดเหนือเรือนธาตุเป็นเจดีย์ทรงระฆัง เป็นทรงที่นิยมสร้างมากที่สุดในเจดีย์ทรงปราสาทด้วยกัน ได้แก่ เจดีย์อุโมงค์อารยมณฑล ดังภาพที่ 2.5 เจดีย์วัดปู่เปี้ย เจดีย์วัดโลกโมฬี เป็นต้น

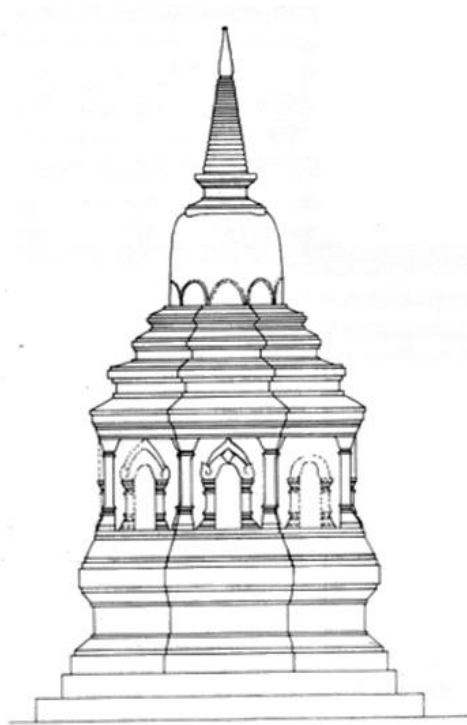
กลุ่มที่ 2 เจดีย์ทรงปราสาทแปดเหลี่ยมและเจดีย์ปล่อง เจดีย์แปดเหลี่ยมในเมืองเชียงใหม่จัดเป็นเจดีย์ทรงปราสาทประเภทหนึ่ง เนื่องจากลักษณะขององค์ประกอบที่คล้ายกันเพียงแต่มีแผนผังเป็นรูปแปดเหลี่ยม ส่วนกลุ่มที่เป็นเจดีย์ปล่องก็จัดเป็นเจดีย์ทรงปราสาทประเภทหนึ่งเช่นเดียวกัน เนื่องจากมีวิวัฒนาการที่เกี่ยวข้องกับเจดีย์ทรงปราสาทแปดเหลี่ยมดังภาพที่ 2.6

กลุ่มที่ 3 เจดีย์ทรงปราสาทสี่เหลี่ยม ในเมืองเชียงใหม่พบเพียงองค์เดียว คือเจดีย์เหลี่ยม เมืองกุมกาม ดังภาพที่ 2.7

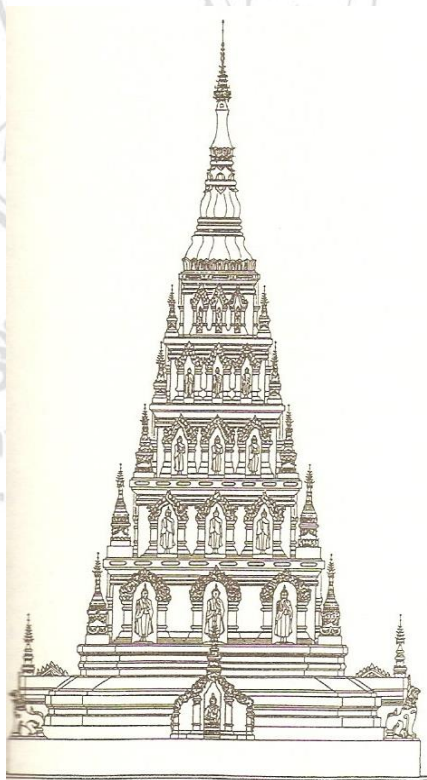
กลุ่มที่ 4 เจดีย์ทรงมณฑป มณฑปในความหมายของช่างไทย หมายถึงอาคารที่มีฐานรูปสี่เหลี่ยมมีส่วนยอดเรียวแหลมอย่างทรงปราสาท รวมทั้งยังมีพื้นที่ใช้สอยภายในและเป็นที่ประดิษฐานสิ่งทีเคารพบูชา ดังภาพที่ 2.8



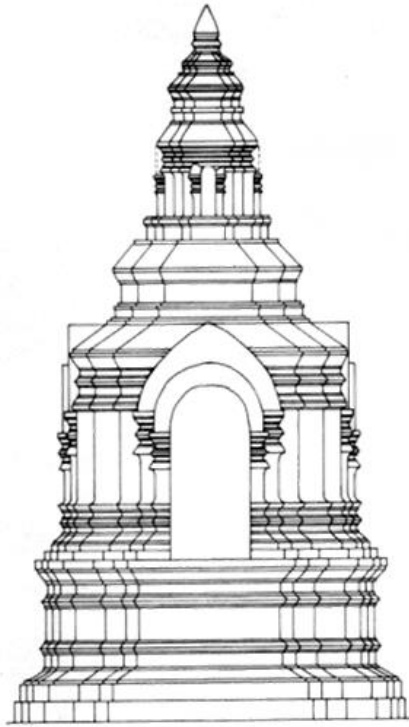
ภาพที่ 2.5 ภาพลายเส้นเจดีย์วัดอุโมงค์อารยมณฑล (จิรัชศักดิ์, 2541)



ภาพที่ 2.6 ภาพลายเส้นเจดีย์แปดเหลี่ยม วัดสะดือเมือง (ร้าง) (จิรศักดิ์, 2541)



ภาพที่ 2.7 ภาพลายเส้นเจดีย์เหลี่ยม เมืองกุมภกาม (จิรศักดิ์, 2541)

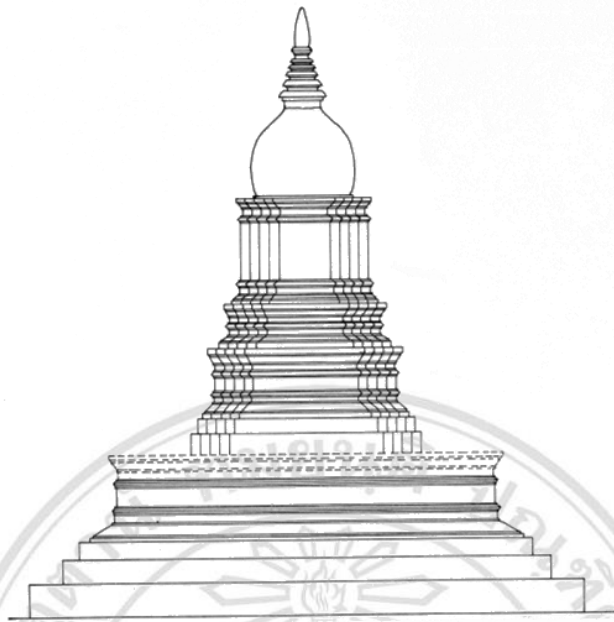


ภาพที่ 2.8 ภาพลายเส้นเจดีย์ทรงมณฑปประดิษฐานพระแก่นจันทน์ วัดเจ็ดยอด เชียงใหม่  
(จิรศักดิ์, 2541)

3) เจดีย์ทรงอื่นๆ นอกจากรูปทรงเจดีย์ที่ได้กล่าวมานั้น ยังมีอีก 2 แบบ ที่ได้รับอิทธิพลมาจากศิลปะใกล้เคียง คือ เจดีย์ทรงพุ่มข้าวบิณฑ์ และเจดีย์เพิ่มมุม (ย่อมุม) เจดีย์กลุ่มนี้จะพบน้อยมากในเมืองเชียงใหม่

แบบที่ 1 เจดีย์ทรงพุ่มข้าวบิณฑ์ ลักษณะโดยทั่วไปประกอบด้วยฐานเชิงในผังสี่เหลี่ยมซ้อนลดหลั่นกันเพื่อรับฐานปัทมลูกแก้วอกไก่ ต่อด้วยฐานส่วนกลางที่เป็นฐานแฉ่นฟ้าซ้อนกัน 2 ชั้นรับแท่งสี่เหลี่ยมสูง ส่วนยอดเป็นทรงดอกบัวต่อยอดด้วยปล้องไฉนและปลี ได้แก่เจดีย์วัดธาตุกลาง ดังภาพที่ 2.9

แบบที่ 2 เจดีย์เพิ่มมุม (ย่อมุม) เกิดจากเจดีย์ที่มีเรือนธาตุเป็นห้องสี่เหลี่ยม เมื่อขยายพื้นที่ของด้านทั้งสี่ออกมา ขนาดความยาวพื้นที่ส่วนที่ขยายก็จะสั้นกว่าความยาวเดิม ทำให้เกิดเป็นมุมขนาดเล็กที่เพิ่มขึ้นด้านละเท่าๆกัน ซึ่งเจดีย์ทรงเพิ่มมุมนี้ ได้รับอิทธิพลจากศิลปะอยุธยาตอนกลาง และมีวิวัฒนาการต่อเนื่องลงมาจนถึงศิลปะรัตนโกสินทร์ ซึ่งเจดีย์รูปทรงดังกล่าวที่เห็นอยู่ในเชียงใหม่ ได้แก่เจดีย์วัดศรีโคงดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.9 ภาพลายเส้นเจดีย์วัดธาตุกลาง เชียงใหม่ (จิรศักดิ์, 2541)



ภาพที่ 2.10 ภาพลายเส้นเจดีย์วัดศรีโคง เชียงใหม่ (จิรศักดิ์, 2541)

### 2.1.3 องค์ประกอบของเจดีย์

องค์ประกอบของเจดีย์แบ่งได้ออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ด้วยกันคือ

1) ส่วนฐานหรือตอนล่างฐาน หมายถึงส่วนล่างสุดของตัวองค์เจดีย์ เป็นส่วนที่รองรับส่วนอื่นๆขององค์เจดีย์ มีชื่อแตกต่างกันออกไปตามตำแหน่งหรือลักษณะการใช้งาน ได้แก่

1.1) ฐานประทักษิณ เป็นฐานที่มีพื้นเป็นลานสำหรับเดินเวียนขวามัสการองค์เจดีย์

1.2) ฐานบัว เป็นฐานที่มีผิวคล้ายกับกลีบบัวหงาย – คว่า ภาคประดับรับรองส่วนบนและส่วนล่างของฐาน

1.3) ฐานเชิงบาตรหรือชั้นเชิงบาตร เป็นฐานที่ใช้รับรองเรือนธาตุ

1.4) ฐานเจียง เป็นฐานที่ใช้ในการหมุนส่วนต่างๆขององค์เจดีย์เพื่อได้รูปทรงที่งดงาม เป็นต้น

2) ส่วนองค์เรือนธาตุหรือตอนกลาง องค์เรือนธาตุหรือที่เรียกกันสั้นๆว่า เรือนธาตุ เป็นส่วนที่อยู่เหนือฐานขึ้นไป มีหรือไม่มีห้องคูหาก็ได้ มีไว้เพื่อประดิษฐานสิ่งศักดิ์สิทธิ์อันควรแก่การเคารพบูชา เช่นพระพุทธรูป หรือเจดีย์ขนาดเล็กที่ไว้บรรจุอัฐิ จึงมักเรียกส่วนนี้ว่าควรรธาตุ หรือธาตุควรด้วย ส่วนที่เป็นห้องคูหาจึงเป็นส่วนที่สำคัญของเจดีย์ โดยทั่วไปแล้วมักจะทำไว้ที่เจดีย์ทรงปราสาทซึ่งมีทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส แต่การที่มีเรือนธาตุแยกออกเป็นหลายแบบ หลายสมัย จึงมีทั้งที่ทำเป็นซิงตันหรือช่องเว้าด้วย หรือที่เรียกว่า จระนำ โดยมีพระพุทธรูปประดิษฐานไว้เพื่อให้ดูเหมือนราวกับว่ามีพระพุทธรูปประดิษฐานอยู่ภายในคูหา ได้แก่

2.1) องค์ระฆังหรือทรงระฆัง เป็นส่วนกลางของเจดีย์ทรงระฆัง

2.2) บัวปากระฆัง เป็นส่วนล่างของระฆังที่ผายออกเล็กน้อย มีแนวบัวอยู่ข้างใต้

2.3) มาลัยเถา มีลักษณะคล้ายพวงมาลัยวางซ้อนกันซึ่งมักจะซ้อนกัน 3 ชั้นเพื่อรองรับทรงระฆังถัดจากบัวปากระฆังลงมา เป็นต้น

3) ส่วนยอดหรือตอนบน เป็นส่วนที่อยู่ถัดจากองค์เรือนธาตุขึ้นไป จะมีลักษณะเรียวยาวปลายแหลม ได้แก่

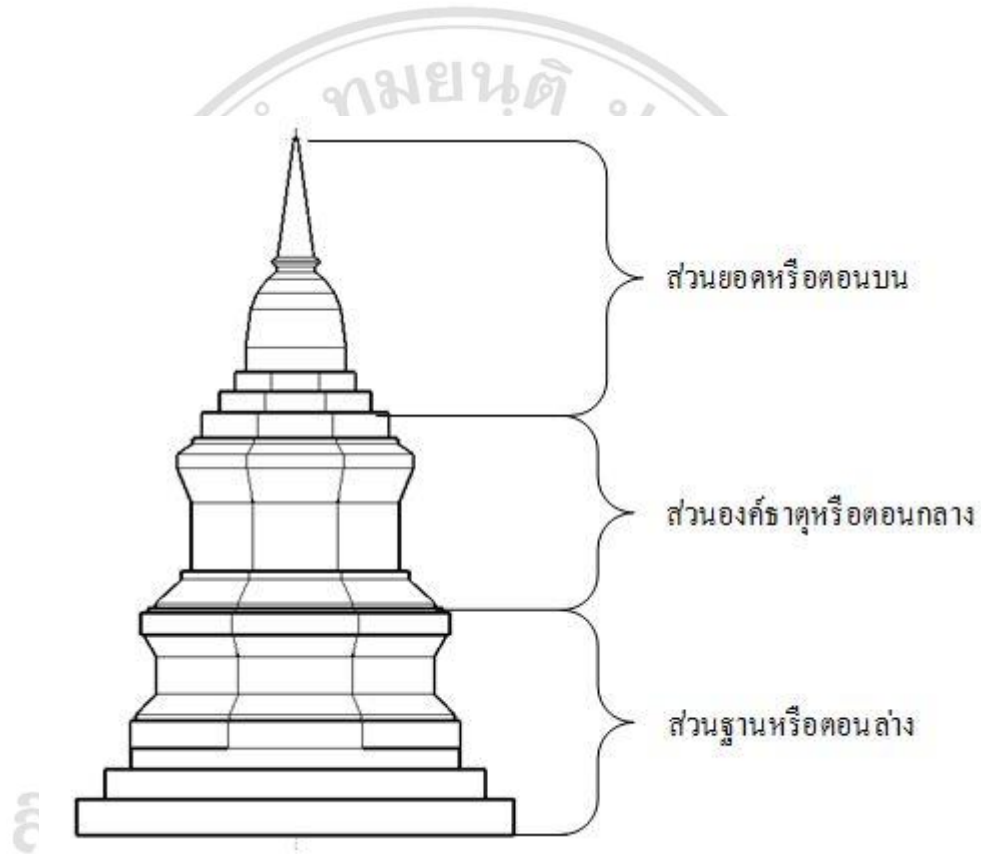
3.1) บัลลังก์ เป็นฐานทรงสี่เหลี่ยม บางครั้งมีหยักมุม ทัวไปตั้งอยู่ตรงส่วนบน  
ทรงระฆัง มีรูปแบบเป็นฐานบัวหรือฐานบัวลูกแก้วอกไก่

3.2) ปล้องไฉน มีลักษณะเป็นทรงกรวยและตั้งเป็นส่วนยอดของเจดีย์

3.3) ปลี เป็นกรวยขนาดเล็กอยู่ต่อจากปล้องไฉนขึ้นไป

3.4) ลูกแก้ว เป็นลักษณะลูกทรงกลมคล้ายกับหยดน้ำอยู่ที่ยอดสุดของเจดีย์เป็น

ต้น



ภาพที่ 2.11 องค์ประกอบเจดีย์  
Copyright © by Chiang Mai University  
All rights reserved

## 2.2 วัสดุก่อ และวัสดุเชื่อมประสาน

มนุษย์สามารถผลิตวัสดุก่อ และวัสดุเชื่อมประสาน เพื่อใช้ในงานก่อสร้างมาตั้งแต่สมัยอดีต  
ซึ่งสังเกตได้จาก โบราณสถานสถานต่างๆ ที่พบได้ในปัจจุบันเช่น วิหาร เจดีย์ หรือโบราณสถานต่างๆ  
เป็นต้น แต่ในปัจจุบันนี้การใช้วัสดุแบบโบราณมิให้เห็นกันน้อยลง โดยส่วนมากจะทำการบูรณะ  
ซ่อมแซมเพื่อให้มีรูปแบบลักษณะที่ใกล้เคียงกับของเดิมให้มากที่สุด

### 2.2.1 อธิฐ

อธิฐเป็นวัสดุก่อที่ที่มนุษย์สร้างขึ้นด้วยวัสดุจากธรรมชาติมาทำเป็นก้อนสำหรับใช้ในการก่อสร้างอาคารนับพันๆ ปี การใช้อธิฐครั้งแรกนั้นเชื่อกันว่าเริ่มต้นในสมัยอียิปต์โบราณ ซึ่งใช้ดินโคลนในแม่น้ำไนล์ มาตรฐานแล้วปั้นให้เป็นก้อนตามขนาดที่ต้องการแล้วนำไปตากแดดให้แห้ง โดยไม่ได้เผาให้สุก เนื่องจากสภาพทางภูมิศาสตร์ที่มีฝนตกน้อย จึงไม่เกิดปัญหาเรื่องการชะล้างของน้ำฝน และในช่วงเวลาเดียวกันบริเวณลุ่มแม่น้ำไทกริส ยูเฟรติส มีการทำอธิฐที่เผาให้สุกแล้วนำไปใช้งานในการก่อสร้างอาคารต่างๆ มากมาย อธิฐที่เผาให้สุกแล้วนี้สามารถทนทานต่อการชะล้างของน้ำฝน และการเปลี่ยนแปลงของสภาพดินฟ้าอากาศ

จากหลักฐานทางโบราณคดี ในดินแดนล้านนาพบว่า มีการใช้อธิฐในการก่อสร้างมาตั้งแต่ในสมัยรัฐหริภุญไชย ซึ่งเป็นรัฐที่เคยมีอำนาจในดินแดนแถบนี้มาก่อน มีการใช้อธิฐในการก่อสร้างอาคาร โดยเฉพาะ อาคารและสถาปัตยกรรมในพุทธศาสนา ซึ่งได้แก่ เจดีย์ ต่อมาในสมัยล้านนา มีการใช้อธิฐในการก่อสร้างอย่างกว้างขวาง ซึ่งส่วนใหญ่เป็นอาคารศาสนสถาน เช่น วิหาร และเจดีย์ โดยอธิฐที่ใช้ในการก่อสร้างของล้านนามีชื่อเรียกในภาษาพื้นเมืองว่า “ดินก่” ซึ่งเป็นอธิฐที่ทำด้วยมือ ซึ่งมีขนาดใหญ่มากเมื่อเทียบกับอธิฐในปัจจุบัน และขนาดของอธิฐแต่ละก้อนจะไม่เท่ากัน ซึ่งความคลาดเคลื่อนนี้เนื่องจากสาเหตุหลายประการเช่น ขนาดของแบบไม่เท่ากัน การอัดดินเข้าในแบบไม่แน่น การหดตัวของโคลนที่ใช้ทำอธิฐไม่เท่ากันเพราะ ส่วนผสมไม่สม่ำเสมอ ถึงอย่างนั้นอธิฐเหล่านี้ก็ยังสามารถใช้งานในการก่อสร้างได้เป็นอย่างดี (ชาตุมรงค์ และคณะ, 2549)

ในการผลิตอธิฐ หรือดินก่ล้านนามีขั้นตอนการผลิตดังนี้

#### 1) การเลือกดิน

ดินที่จะนำมาทำอธิฐนั้นต้องไม่มีทราย หรือดินเหนียวเจือปนมากเกินไป เพราะถ้ามีทรายมากเกินไปก็จะทำให้อธิฐนั้นล่อน ร่วน แต่ถ้ามีดินเหนียวมากเกินไปก็จะทำให้เกิดการแตกร้าวเมื่อนำดินไปตากแดด ซึ่งคุณสมบัติของส่วนผสมต่างๆ ในอธิฐมีแตกต่างกันออกไป สามารถอธิบายได้ดังนี้ (พัชรวิไล, 2547)

1.1) ดินเหนียว มีคุณสมบัติช่วยให้ดินเกาะกันเป็นก้อนในระหว่างที่อธิฐยังไม่ได้ผ่านการเผา

1.2) ทราย มีคุณสมบัติช่วยป้องกันการเกิดรอยแตกร้าว การหดตัว และการบิดตัวของอธิฐ

1.3) แร่ธาตุอื่นๆ โดยทั่วไปแล้วในดินจะมีแร่ธาตุต่างๆ มากกว่า 100 ชนิดด้วยกัน แต่มีเพียง 8 ชนิดที่พบมากบนผิวโลกคือ ออกซิเจน (O), ซิลิกอน (Si), อะลูมิเนียม (Al), เหล็ก (Fe), แคลเซียม (Ca), โซเดียม (Na), โพแทสเซียม (K) และ แมกนีเซียม (Mg) (เอิบ, 2542) ซึ่งธาตุเหล่านี้จะช่วยในการแปรสภาพของสารในดิน ในขณะที่ถูกความร้อนเผาให้สูง สำหรับพวกออกไซด์จะช่วยให้อิฐมีสีต่างๆ เมื่อเผาจนสุกแล้ว

## 2) การขุดดิน และย่ำดิน

ดินที่จะนำมาใช้ต้องผ่านการแช่น้ำทิ้งไว้ก่อน จากนั้นนำเศษพง และสิ่งปะปนอื่นๆ เช่นกรวด ทรายที่ปนอยู่ออกให้หมด แล้วนำดินมาย่ำจนเข้ากันได้ดี โดยอาจเติมขี้เถ้าลงไป ในขณะที่รดเพื่อป้องกันการติดแบบพิมพ์ไม้เมื่ออัดดินเข้าแบบ แต่ถ้าหากดินที่ทำอยู่แห้งเกินไปสามารถเติมน้ำลงไปให้พอเหมาะเพื่อความสะดวกในการทำงาน

## 3) การทำให้เป็นรูปแบบที่ต้องการ

แบบที่ใช้ในการขึ้นรูปจะมีลักษณะเป็นกรอบไม้ ด้านบน และด้านล่างโค้ง โดยไม้ที่นำมาทำเป็นแบบนี้ต้องมีคุณสมบัติที่ไม่บิดงอเวลาโดนน้ำ หรือความชื้น ด้านในใส่ผิวเรียบ และขนาดของไม้แบบจะต้องมีขนาดใหญ่กว่าอิฐที่ต้องการ 5 - 10% เนื่องจากอิฐจะหดตัวลงเมื่อแห้งแล้ว เมื่อแบบพร้อมแล้วเตรียมพื้นราบซึ่งใช้ได้ทั้งที่โล่งกลางแดดและในที่ร่ม เอาไม้แบบชุบน้ำและวางราบลง ตักโคลนที่ผสมแล้วเทลงในแบบ ใช้ไม้คบให้โคลนเข้าไปอัดแน่นในแบบให้ทั่วแล้วปาดส่วนบนให้เสมอกับขอบไม้แบบ แล้วยกไม้แบบออก นำไม้แบบชุบน้ำแล้วทำซ้ำไปเรื่อยๆ

## 4) การตากแดดให้แห้งสนิท

เมื่อถอดแบบออกแล้วต้องตากแดดให้แห้งสนิท สำหรับระยะเวลาในการตากแดดนั้นขึ้นอยู่กับฤดูกาลและสภาพของอากาศ โดยถ้าทำในฤดูร้อนอาจใช้เวลาประมาณ 3 - 5 วัน ส่วนในฤดูอื่น เฉลี่ยๆ โดยทั่วๆ ไปประมาณ 7 - 8 วัน ยกเว้นในฤดูฝน ไม่เหมาะในการทำอิฐเพราะขณะตากแดด ฝนอาจจะตกลงมาทำให้อิฐที่ตากอยู่เสียหาย

## 5) การตากแต่งอิฐให้เรียบร้อย

เมื่ออิฐที่ตากแห้งแล้ว อิฐแต่ละก้อน ส่วนใหญ่มักจะมีส่วนเกินออกมาจากด้านข้าง เนื่องจากเนื้อดินที่เกินออกมาขณะอัดเข้าแบบ จึงต้องใช้มีดตากแต่งก้อนอิฐให้เรียบร้อยและมีรูปร่างเสมอกัน ก่อนที่จะนำเข้าเตาเผา

## 6) การเผาอิฐ

เมื่อตากแห้งอิฐที่ยังไม่ได้เผาเรียบร้อยแล้ว นำอิฐมาวางกองเป็นแถว แถวหนึ่งกว้างเท่ากับความยาวของแท่งดินที่จะเผาเป็นอิฐ โดยเว้นระยะห่างระหว่างแถวไว้เท่าๆ กัน เพื่อให้ไ้กลบลงไปในช่วงแถว การเรียงขนาดทั้งกองทั้งหมดจะมีขนาดเท่าใดนั้นแล้วแต่ปริมาณของแท่งดินที่จะเผาในครั้งหนึ่งๆ โดยขนาดที่ปฏิบัติทั่วไปในปัจจุบันคือกองกว้างประมาณ 4 เมตร ยาวประมาณ 6 - 7 เมตร ความสูงของกองประมาณ 1.6 เมตร ซึ่งถ้ากองกว้างและสูงเกินไปจะทำให้การเติมแคลบขณะเผาไม่สะดวก เมื่อกองเสร็จเรียบร้อยแล้ว ที่ด้านนอกทั้ง 4 ด้านใช้อิฐที่เผาสุกแล้วกองล้อมรอบไว้เพื่อป้องกันความร้อนไม่ให้กระจายออกไป เสร็จแล้วเทแคลบลงไปในช่วงที่เว้นระยะไว้ นั้น และโรยแคลบให้ทั่วส่วนบนของกองให้หนาประมาณ 7 - 10 เซนติเมตร แล้วจุดไฟให้แคลบไหม้ แคลบจะค่อยๆ ไหม้ลามไปทั่วกอง เมื่อแคลบไหม้และยุบลงต้องคอยเติมแคลบให้ได้ระดับเสมอ ทำตามลักษณะนี้ต่อเนื่อง 15 วัน แล้วปล่อยให้ไฟดับเอง แล้วรื้อกองออกก็จะได้อิฐตามที่ต้องการ

นอกจากนี้ยังมีการเผาอิฐที่ใช้ฟืนเป็นเชื้อเพลิง โดยการเผาด้วยฟืนนั้นจะต้องเผาในเตาซึ่งมีลักษณะเป็นเตาสี่เหลี่ยมซึ่งก่อด้วยอิฐที่เผาสุกแล้วโดยมีความหนาสองชั้นของก้อนอิฐเพื่อป้องกันไม่ให้ความร้อนกระจายออกไป เตาเผานี้มีช่องสำหรับใส่ฟืนอยู่ด้านล่างซึ่งจะต้องเติมฟืนอยู่เรื่อยๆ เพื่อให้อุณหภูมิที่เผาคงที่ การเผาอิฐด้วยเตานี้จะใช้เวลาประมาณหนึ่งวันกับหนึ่งคืน เสร็จแล้วจึงหยุดไฟแล้วปล่อยให้ไฟค่อยๆ ดับและอบทิ้งไว้ในเตาให้ค่อยๆ เย็นลง ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 2 - 3 วัน ก็จะได้อิฐตามที่ต้องการ อิฐที่เผาด้วยเตานี้จะมีคุณภาพและความแข็งแรงทนทานมากกว่าการเผาด้วยแคลบ

### 2.2.2 วัสดุเชื่อมประสาน

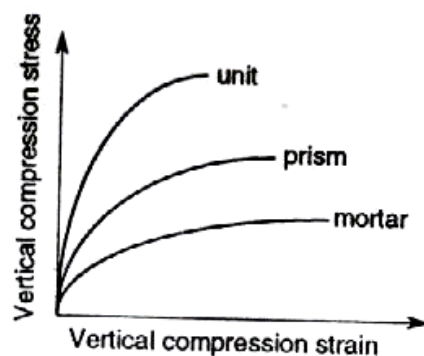
ตั้งแต่สมัยโบราณ มนุษย์รู้จักนำวัสดุต่างๆ มาใช้เพื่อการก่อสร้างอาคารที่อยู่อาศัย และเพื่อพิธีกรรมต่างๆ วัสดุหลักที่ใช้ในการก่อสร้างมี อาทิเช่น อิฐ หิน ฯลฯ วัสดุเหล่านี้ถูกใช้เป็นฐานรองรับอาคาร ใช้ก่อสร้างกำแพง ผนัง เพดาน ฯลฯ แต่ในการก่อสร้าง หากใช้วัสดุเหล่านี้เพียงวางเรียงหรือซ้อนกัน จะไม่สามารถก่อเป็นอาคารที่มีความมั่นคงได้เลย จึงจำเป็นต้องมีวัสดุที่ทำหน้าที่เชื่อมยึดหินหรืออิฐเหล่านั้นให้ติดกัน

วัสดุที่ทำหน้าที่เชื่อมประสานเหล่านี้เรียกว่า Binder ซึ่งในการทำงานจะไม่ใช้ Binder เพียงอย่างเดียว แต่จะใช้วัสดุอื่นผสมด้วย เพื่อให้ได้แรงยึดเหนี่ยวที่ดีขึ้น แข็งแรงขึ้น และมีคุณสมบัติเหมาะสม กับงานนั้นๆ ส่วนผสมนี้เรียกว่า มอร์ตาร์

เราจะเรียกมอร์ตาร์ตามชนิดของ Binder ที่ผสมอยู่ เช่นหากใช้ดินเป็น Binder ส่วนผสมนั้นก็เรียกว่า Mud Mortar หรือ Clay Mortar หรือที่เรียกว่า สอดิน ซึ่งเรายังคงพบโบราณสถาน ที่อายุมากมาย บางแห่งที่ใช้สอดินในการเชื่อมอิฐให้ติดกัน ถ้าหากมอร์ตาร์นั้น ผสมด้วย Plaster of Paris ก็เรียกว่า Gypsum Mortar (ชาญณรงค์ และคณะ, 2549)

### 2.2.3 ปริซึมอิฐก่อ

อิฐก่อเป็นวัสดุก่อสร้างที่ใช้กันมานาน ทำขึ้นจากวัสดุสองชนิดคือ อิฐ และ มอร์ตาร์ ลักษณะการใช้งานของอิฐแตกต่างจากคอนกรีตในเรื่องของความแข็งแรง คือ อิฐที่ใช้ไม่จำเป็นต้องมีความแข็งแรงมาก ในงานก่อสร้างจะใช้อิฐก่อทำเป็นผนังหรือกำแพง กำลังอัดของอิฐก่อสามารถหาได้จากการทดสอบตาม ASTM E447 ซึ่งการทดสอบจะทดสอบ โดยก่ออิฐเป็นปริซึม หรือเรียกว่าปริซึมอิฐก่อ (Masonry Prism) แล้วทดสอบการรับแรงอัดตามแนวแกนอย่างเดียว ในการก่อสร้างจริงจะมีรูปแบบการก่ออิฐที่แตกต่างกันไป แต่เพื่อความสะดวกในการทดสอบ ตามมาตรฐานโดยทั่วไปแล้ว การทดสอบ Prism กำหนดให้ใช้ Prism ที่ก่อแบบเรียงแนวเดียว (Stack Bond) และกำหนดความสูงได้ตามต้องการ (ปรกติใช้ความสูงประมาณ 1.5 – 5 เท่าของความหนาอิฐ) ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการทดสอบ ซึ่งการทดสอบกำลังที่ได้ของปริซึมจะอยู่ระหว่างกลางของกำลังของอิฐ และมอร์ตาร์ เนื่องจากวัสดุทั้งสองนี้มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่แตกต่างกันมาก เช่น กำลังรับแรงอัด เป็นต้น เมื่อประสานวัสดุสองชนิดขึ้นเป็นปริซึมอิฐก่อ กำลังอัดของปริซึมอิฐก่อจะมีค่าสูงกว่ากำลังของมอร์ตาร์ แต่จะมีค่าต่ำกว่ากำลังอัดของอิฐ



ภาพที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุก่อสร้างและปริซึมอิฐก่อ

(Drysdale et al., 1994)

## 2.3 การกักร่อนของโบราณสถาน และโบราณวัตถุ

โบราณสถานและโบราณวัตถุต่างๆ ประกอบไปด้วยวัสดุชนิดต่างๆ หลายชนิด วัสดุแต่ละชนิดมีคุณสมบัติต่างกัน และมีกรรมวิธีในการผลิตที่แตกต่างกันออกไป ในทางวิทยาศาสตร์สามารถแบ่งวัสดุที่เป็นองค์ประกอบของโบราณวัตถุออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ อินทรีย์วัตถุ และอนินทรีย์วัตถุ (ภักดิ์, 2542)

อินทรีย์วัตถุ หมายถึงวัสดุที่ได้มาจากสิ่งที่มีชีวิต ดังนั้นองค์ประกอบหลักของวัสดุประเภทนี้คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไนโตรเจน โดยอินทรีย์วัตถุแบ่งออกเป็น 3 ชนิดได้แก่ อินทรีย์วัตถุที่ได้จากพืช เช่น ฝ้าย ฝ้ายลินิน ฝ้ายป่าน เป็นต้น อินทรีย์วัตถุที่ได้จากสัตว์ เช่น ฝ้ายไหม ฝ้ายขนสัตว์ เป็นต้น และอินทรีย์วัตถุที่ได้จากการสังเคราะห์ เช่น พลาสติกชนิดต่างๆ ฟิล์มภาพยนตร์ เป็นต้น

อนินทรีย์วัตถุ หมายถึงวัสดุที่ทำมาจากสิ่งที่ไม่มีชีวิต ได้แก่ หิน ดิน โลหะ ฯลฯ เช่น เครื่องปั้นดินเผาที่ทำมาจากดินเหนียว แก้วที่ทำมาจากทราย เป็นต้น โดยอนินทรีย์วัตถุยังสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ โลหะ และอโลหะ

### 2.3.1 สาเหตุของการกักร่อน

สาเหตุที่ทำให้โบราณสถานและโบราณวัตถุเกิดการชำรุดทรุดโทรมเสื่อมสภาพสามารถแบ่งได้เป็นหลายสาเหตุและหลายกระบวนการ ซึ่งจะเกิดขึ้นพร้อมๆ กัน และมีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกัน จนบางครั้งไม่สามารถแยกออกจากกันโดยเด็ดขาด ทั้งนี้อาจมาจากสิ่งแวดล้อม จุดอ่อนในตัววัตถุเอง หรือจากการกระทำของมนุษย์และสัตว์ นอกจากนี้สภาพแวดล้อมยังเป็นสาเหตุสำคัญที่ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้หรือป้องกันยาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งโบราณสถานและโบราณวัตถุที่อยู่กลางแจ้งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด ความชื้น ความร้อน แสงสว่าง ก๊าซต่างๆ ในบรรยากาศ ฝุ่นละออง เกลือ พืช สัตว์ และจุลินทรีย์ ล้วนมีบทบาทสำคัญที่ทำให้โบราณสถานและโบราณวัตถุเกิดการเปลี่ยนแปลง (ภักดิ์, 2542) โดยองค์ประกอบที่เป็นสาเหตุทำให้โบราณสถาน และโบราณวัตถุชำรุดทรุดโทรมสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

#### 1) เกิดจากการกระทำของมนุษย์

มนุษย์เป็นสาเหตุทำให้โบราณสถานและโบราณวัตถุชำรุดทรุดโทรมโดยไม่รู้ตัว ทั้งเจตนา และไม่เจตนา เช่น การปล่อยปะละเลย ความรู้เท่าไม่ถึงการณ์ การจับต้องเคลื่อนย้ายโดยใช้วิธี และอุปกรณ์ที่ไม่เหมาะสม การสันตะเทียนของยานพาหนะ เครื่องจักร เครื่องยนต์ และอุปกรณ์ที่

ใช้ในการก่อสร้าง การระเบิด ฯลฯ ซึ่งล้วนแต่มีผลกระทบต่อโบราณสถานและโบราณวัตถุที่อยู่ใกล้เคียงทั้งสิ้น ความสั่นสะเทือนทำให้แรงยึดเหนี่ยวของวัสดุต่างๆ ลดน้อยลงหรือทำให้เกิดการเคลื่อนที่ออกจากที่เดิมทีละน้อยนานๆ เข้าจะทำให้เกิดการชำรุดแตกหักพังทลายได้

## 2) เกิดจากธรรมชาติ

สาเหตุที่เกิดจากธรรมชาติยังสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มได้แก่

2.1) ภัยพิบัติทางธรรมชาติ ได้แก่ อัคคีภัย वादภัย อุทกภัย แผ่นดินไหว ไฟป่า ฯลฯ ภัยพิบัติเหล่านี้เป็นสาเหตุที่ร้ายแรงที่สุด ถึงแม้ว่าจะเกิดขึ้นไม่บ่อยครั้ง แต่ก็สามารถทำให้โบราณสถาน และโบราณวัตถุเกิดการพังทลายลงมาได้ในชั่วพริบตา

## 2.2) สภาพแวดล้อม

โบราณสถานและโบราณวัตถุส่วนใหญ่สร้างขึ้นอยู่กลางแจ้ง ซึ่งสภาพแวดล้อมโดยรอบ ล้วนสามารถสร้างกระบวนการชำรุดเสื่อมสภาพให้แก่โบราณสถาน และโบราณวัตถุได้ทั้งสิ้น ผลกระทบจากสิ่งแวดล้อมอาจเกิดได้ทั้งทางตรงและทางอ้อม และเกิดขึ้นตลอดเวลา นับตั้งแต่เริ่มมีการก่อสร้าง ซึ่งมีอัตราการกัดกร่อนที่ไม่แน่นอนและไม่คงที่ ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศของสถานที่นั้นๆ

น้ำฝนและความชื้นมีบทบาทสำคัญและก่อให้เกิดการชำรุดเสื่อมสภาพได้รุนแรงที่สุด โดยจะเข้าทำปฏิกิริยากับวัตถุโดยตรงหรือช่วยให้ปฏิกิริยาระหว่างวัตถุกับสิ่งแวดล้อมอื่นๆ เกิดขึ้นได้ดียิ่งขึ้น โดยอาจไปละลายองค์ประกอบบางส่วนของโบราณสถานและโบราณวัตถุ หรืออาจรวมกับดิน ฝุ่นละออง ก๊าซต่างๆ ในบรรยากาศ รวมทั้งวัสดุที่เป็นองค์ประกอบของโบราณสถานและโบราณวัตถุเอง จนเกิดเป็นปฏิกิริยาแล้วก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมากมายในโบราณสถานและโบราณวัตถุ ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดที่สุดคือ การเป็นสนิมและการสึกกร่อนของโลหะชนิดต่างๆ การสึกกร่อนของหิน อิฐ ปูน ฯลฯ

อุณหภูมิยังมีส่วนต่อการเสื่อมสภาพลักษณะอื่นๆ อีก เช่น อุณหภูมิสูงช่วยให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีความชื้นเข้าร่วมด้วย ปฏิกิริยาจะยิ่งทวีความรุนแรง แสงสว่าง รังสีอัลตราไวโอเล็ต และรังสีอินฟราเรดมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงที่ทำอันตรายต่อวัตถุแทบทุกชนิด พลังจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเหล่านี้จะทำให้โมเลกุลของอินทรีย์วัตถุเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยมีขั้นตอนที่สลับซับซ้อน ผลสุดท้ายจะทำให้โมเลกุลแตกหัก อินทรีย์วัตถุเกิดสภาพ

กรอบประา ขาดความเหนียว ขาดความยืดหยุ่น สีซีดจาง การเสื่อมสภาพในลักษณะเช่นนี้ค่อนข้างรุนแรงและยากต่อการอนุรักษ์

ก๊าซหลายชนิดในบรรยากาศ ส่งผลให้เกิดการชำรุดเสื่อมสภาพของวัตถุหลายชนิด เช่น ก๊าซออกซิเจนทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีต่างๆ ทำให้โลหะเป็นสนิม ก๊าซโอโซนเป็นตัวเติมออกซิเจนที่รุนแรงสามารถทำให้พันธะระหว่างโมเลกุลของอินทรีย์วัตถุหลายชนิดแตกหักออก โดยการเปลี่ยนแปลงที่เห็นได้ชัด คือ ทำให้ผ้า กระดาษ และภาพเขียน อ่อนนุ่มฉีกขาดง่าย และมีสีซีดจาง ในบริเวณที่มีโรงงานอุตสาหกรรมหรือมีการจราจรที่คับคั่ง จะเห็นว่าในบรรยากาศบริเวณนั้นจะมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ ปะปนอยู่ด้วย ปริมาณสูงกว่าปกติ ซึ่งก๊าซเหล่านี้จะรวมตัวกับน้ำหรือไอน้ำจนเกิดสารละลายที่เป็นกรดสามารถกัดกร่อนเนื้อวัตถุทุกชนิด ส่วนก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ทำปฏิกิริยากับโลหะ และเกลือของโลหะหลายชนิดทำให้โลหะหมองคล้ำเป็นสนิม เกลือของโลหะบางชนิดใช้เป็นรงควัตถุ (วัตถุให้สี) โดยเกลือจะเกิดการเปลี่ยนสีเมื่อทำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เช่น สีขาวมาจากตะกั่วคาร์บอเนตมักเปลี่ยนเป็นสีดำ เป็นต้น

ฝุ่นละอองและอนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในบรรยากาศก็สามารถทำให้เกิดความเสื่อมสภาพได้หลายรูปแบบ ในที่มีลมแรงฝุ่นละอองที่ปลิวมากับลมอาจแข็งพอที่จะขัดสีผิวของวัตถุให้สึกกร่อนลงไปเรื่อยๆ ในบริเวณที่ลมสงบฝุ่นละอองจะสะสมพอกพูนอยู่บนวัตถุ ทำให้เกิดการสกปรกในบริเวณที่มีความชื้นสูงหรือเปียกชื้น ฝุ่นละอองเหล่านี้จะรวมตัวกับน้ำหรือไอน้ำแล้วกลายเป็นสารละลายของกรด ต่าง หรือเกลือ ซึ่งทำปฏิกิริยาเคมีกับวัตถุได้หลายรูปแบบ ฝุ่นละอองบางประเภท เช่น เขม่า และควัน จะเกิดเป็นลักษณะวัตถุเหนียวๆ ติดอยู่บนผิวของวัตถุ ทำให้ผิววัตถุสกปรก ทำความสะอาดยาก และยังเป็นแหล่งสะสมฝุ่นละอองประเภทอื่นๆ รวมทั้งสปอร์ต่างๆ ให้มาเกาะติดแน่นอยู่บนผิวของวัตถุมากขึ้นเรื่อยๆ ฝุ่นละอองบางประเภทสามารถดูดดูดความชื้นได้ดี จึงทำให้ผิวของวัตถุชื้นขึ้น และทำให้มีน้ำมีโอกาสทำปฏิกิริยากับวัตถุได้มากขึ้น

เกลือ ก็เป็นอีกหนึ่งสาเหตุที่สำคัญ โดยในสิ่งแวดล้อมจะมีเกลือปะปนอยู่มากมายหลายชนิด เช่น พื้นที่ที่อยู่ใกล้ทะเลจะมีเกลือแกงปะปนอยู่ในบรรยากาศมาก ทำนองเดียวกันในพื้นที่ที่ตั้งอยู่บนแหล่งเกลือสินเธาว์ก็จะมีเกลือแกงปะปนอยู่ในดิน ในน้ำใต้ดิน และแหล่งน้ำต่างๆ มาก ซึ่งเกลือเหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยากับโบราณสถานและโบราณวัตถุได้อย่างรวดเร็ว ปฏิกิริยาจะเกิดได้เร็วยิ่งขึ้นหากมีความชื้นร่วมด้วย เกลือส่วนใหญ่จะละลายน้ำได้ดีกลายเป็นสารละลายของเกลือ ซึ่งจะแทรกซึมเข้าไปในเนื้อของวัตถุที่มีรูพรุน เช่น หิน เครื่องปั้นดินเผา เครื่องเคลือบอิฐ ปูนปั้น ฯลฯ

แล้วสะสมอยู่ในช่องว่างเล็กๆ ภายในเนื้อวัสดุ เมื่อใดที่มีความชื้นลดลง น้ำจะระเหยออกไปตรงผิวของวัตถุ ส่วนเกลือจะตกผลึกอยู่ภายในเนื้อวัสดุนั้นๆ

พืชก็มีบทบาทไม่น้อยในการทำให้โบราณสถานชำรุดเสื่อมสภาพ มักพบพืชหลายชนิดเจริญเติบโตอยู่บนโบราณสถานที่สำคัญได้แก่ หญ้าชนิดต่างๆ ต้นไผ่ ต้นโพธิ์ ต้นไทร สาบเสือ ตีนตุ๊กแก ผักปราบ น้ำนมราชสีห์ บานไม่รู้โรย ป่าพังพวย ฯลฯ ซึ่งรากพืชเหล่านี้จะชอนไชไปในช่องว่าง รูพรุน รอยแตกรอยต่อระหว่างวัสดุ แล้วดันให้วัสดุเหล่านั้นแยกหรือแตกออกจากกัน เมื่อเวลาผ่านไป รากเหล่านี้จะขยายตัวขึ้นเรื่อยๆ และมีแรงดันเพิ่มขึ้นจนในที่สุดอาจทำให้บางส่วนของโบราณสถานแตกกะเทาะหรือพังทลายลงมา บางครั้งพบว่ารากของพืชทำให้โบราณสถานเอียงไปสร้างปัญหาในการอนุรักษ์เป็นอย่างมาก นอกจากนี้ ยังมีพืชชั้นต่ำอีกจำนวนมากอยู่บนโบราณสถานและโบราณวัตถุที่อยู่กลางแจ้งหรืออยู่ในที่ชื้นแฉะ ส่วนมากพบอยู่บนโบราณสถานโบราณวัตถุที่ติดกับดิน และส่วนที่น้ำใต้ดินซึมขึ้นไปถึง พืชเหล่านี้มีอายุไม่ยืนยาวเมื่อตายไป ซากของพืชเหล่านี้จะกลายเป็นฮิวมัสซึ่งเป็นแหล่งอาหารของพืชอื่นๆ ที่จะเจริญเติบโตต่อไป

### 3) เกิดจากจุดอ่อนในตัววัตถุเอง

โบราณสถานและโบราณวัตถุประกอบด้วยวัสดุหลายชนิด วัสดุแต่ละชนิดก็มีความสามารถในการดูดและคายความชื้นแตกต่างกันขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ และโครงสร้างของวัสดุแต่ละชนิด ระดับความชื้นจึงมีผลอย่างมากต่อการ "คงสภาพ" หรือ "เสื่อมสภาพ" ของวัตถุ เช่น อินทรียวัตถุมีความสามารถในการดูดและคายความชื้นได้ดี หากเก็บรักษาไว้ในสถานที่ที่มีความชื้นสูงเกินไป วัตถุจะดูดความชื้นจากบรรยากาศแล้วขยายตัวหรือบวมพองตัวขึ้น ในขณะที่เดียวกันระดับความชื้นที่สูงเกินไปจะทำให้วัตถุอ่อนนุ่ม ขาดความเหนียว นึกขาดหรือแตกหักง่าย และยังเป็นแหล่งอาหารหรือที่อยู่อาศัยของแมลงและจุลินทรีย์อีกด้วย ความชื้นที่แปรเปลี่ยนขึ้นๆ ลงๆ ตลอดเวลา ทำให้วัตถุหลายชนิดมีการหดตัวและขยายตัวสลับกันไปเรื่อยๆ นานๆ เข้าวัตถุจะเกิดการแตกร้าว โกงงอบิดเบี้ยว หรือกะเทาะแยกหลุดออกจากกันได้

นอกจากที่กล่าวไปข้างต้นแล้ว ยังมีอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้โบราณสถานและโบราณวัตถุเกิดการเสื่อมสภาพนั่นคือ การรับน้ำหนักของตัวโบราณสถาน และโบราณวัตถุเอง โดยวัสดุที่เป็นส่วนของโครงสร้างทั้งหมดต้องรับแรงที่กระทำเกิดขึ้นในลักษณะที่ต่างกัน เช่น แรงดึง แรงดัน แรงอัด และแรงแกว่ง เป็นต้น ซึ่งแรงเหล่านี้จะส่งผลให้วัสดุที่รับแรงดังกล่าวเกิดการเสื่อมสภาพ และเสียหายไปเมื่อเวลาผ่านไป (จิราภรณ์, 2526)

## 2.4 แผ่นดินไหว

### 2.4.1 สาเหตุการเกิดแผ่นดินไหว

แผ่นดินไหวเป็นภัยพิบัติทางธรรมชาติ เกิดจากการสั่นสะเทือนของพื้นดินเนื่องจากการปลดปล่อยพลังงาน เพื่อลดความเครียดที่สะสมไว้ออกมาและปรับสมดุลของเปลือกโลกให้คงที่ แผ่นดินไหวเกิดจากสาเหตุ 2 ประการคือ เกิดจากธรรมชาติ และเกิดจากการกระทำของมนุษย์

แผ่นดินไหวที่เกิดจากธรรมชาติ เกิดจากการเคลื่อนที่ของเปลือกโลก โดยทฤษฎีกลไกการเกิดแผ่นดินไหวที่ยอมรับกัน ในปัจจุบันมี 2 ทฤษฎีคือ ทฤษฎีว่าด้วยการขยายตัวของเปลือกโลก และทฤษฎีว่าด้วยการคืนตัวของวัตถุ โดยเมื่อเปลือกโลกเกิดการคดโค้งและ โกงตัวอย่างจับปล้นจนทำให้วัตถุขาดออกจากกันจึงปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปคลื่นแผ่นดินไหว ส่วนการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนก็สามารถทำให้เกิดแผ่นดินไหวได้เช่นกัน กล่าวคือ เมื่อรอยเลื่อนเกิดการเคลื่อนตัวถึงจุดหนึ่งวัตถุจะขาดออกจากกันและเสียรูป พร้อมทั้งปลดปล่อยพลังงานมหาศาลออกมาในรูปของคลื่นแผ่นดินไหว และหลังจากนั้นวัตถุจะคืนตัวกลับสู่รูปเดิม ส่วนแผ่นดินไหวที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์ เช่น การจรรजर การระเบิด การทำเหมือง การสร้างอ่างเก็บน้ำหรือเขื่อนใก้ล้รอยเลื่อน การทดลองระเบิดปรมาณู เป็นต้น

### 2.4.2 ลักษณะของคลื่นแผ่นดินไหว

1) คลื่นหลัก (Body Wave) เป็นคลื่นที่เดินทางอยู่ภายในโลก ได้แก่ หรือคลื่น P (Primary Wave) เป็นคลื่นแรกที่เดินทางมาถึงสถานี เป็นคลื่นตามยาว มีลักษณะเช่นเดียวกับคลื่นเสียง อนุภาคจะถูกดันกลับไป-มา ในทิศขนานกับการเคลื่อนที่ของคลื่น อนุภาคของดินเคลื่อนที่ไปตามแนวแรง สามารถเคลื่อนที่เข้าไปได้ทั้งในของแข็งและของเหลว ทำการบันทึกได้ดีที่สุดในแนวตั้ง (Vertical Component) และ คลื่น S (Secondary Wave) เป็นคลื่นที่สองที่บันทึกได้ เป็นคลื่นตามขวาง เหมือนคลื่นแสงเกิดจากการเฉือน (Shear) ซึ่งอนุภาคจะถูกดันเคลื่อนที่ออกไปด้านข้างกลับไป-มา ในทิศตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของคลื่น อนุภาคดินจะเคลื่อนที่ไปตามแนวระนาบ ทิศเหนือใต้ และ ตะวันออกตะวันตก เคลื่อนที่ได้เฉพาะในของแข็งเท่านั้น ทำให้เชื่อว่าแกนกลางของโลกเป็นของเหลว เพราะคลื่น S ไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในแกนโลกได้ บันทึกได้ดีที่สุดในแนวราบ (Horizontal Component) ความยาวช่วงคลื่นหลักอยู่ระหว่าง 0.01-50 วินาที

2) คลื่นผิวพื้น (Surface Wave) คลื่นนำทาง (Guided Wave) เป็นคลื่นที่เคลื่อนที่ตามผิวพื้นโลก แบ่งออกเป็น คลื่นเลิฟ (Love Wave) เป็นคลื่นที่เคลื่อนที่ตามขวาง สังเกตเห็นได้เฉพาะใน

แนวราบเท่านั้น อนุภาคเคลื่อนที่ไปด้านข้างกลับไป-กลับมา อนุภาคเคลื่อนที่ในแนวระนาบเหมือนการเคลื่อนที่ของงูเลื้อย และคลื่นเรย์เลห์ (Rayleigh Wave) เป็นคลื่นเคลื่อนที่ทางตรง โดยอนุภาคเคลื่อนที่เป็นวงรี อนุภาคของดินเคลื่อนที่เหมือนคลื่น P แต่ ขณะเดียวกันมีการเคลื่อนตัวแบบย้อนกลับ ความยาวช่วงคลื่นผิวพื้นประมาณ 10-350 วินาที

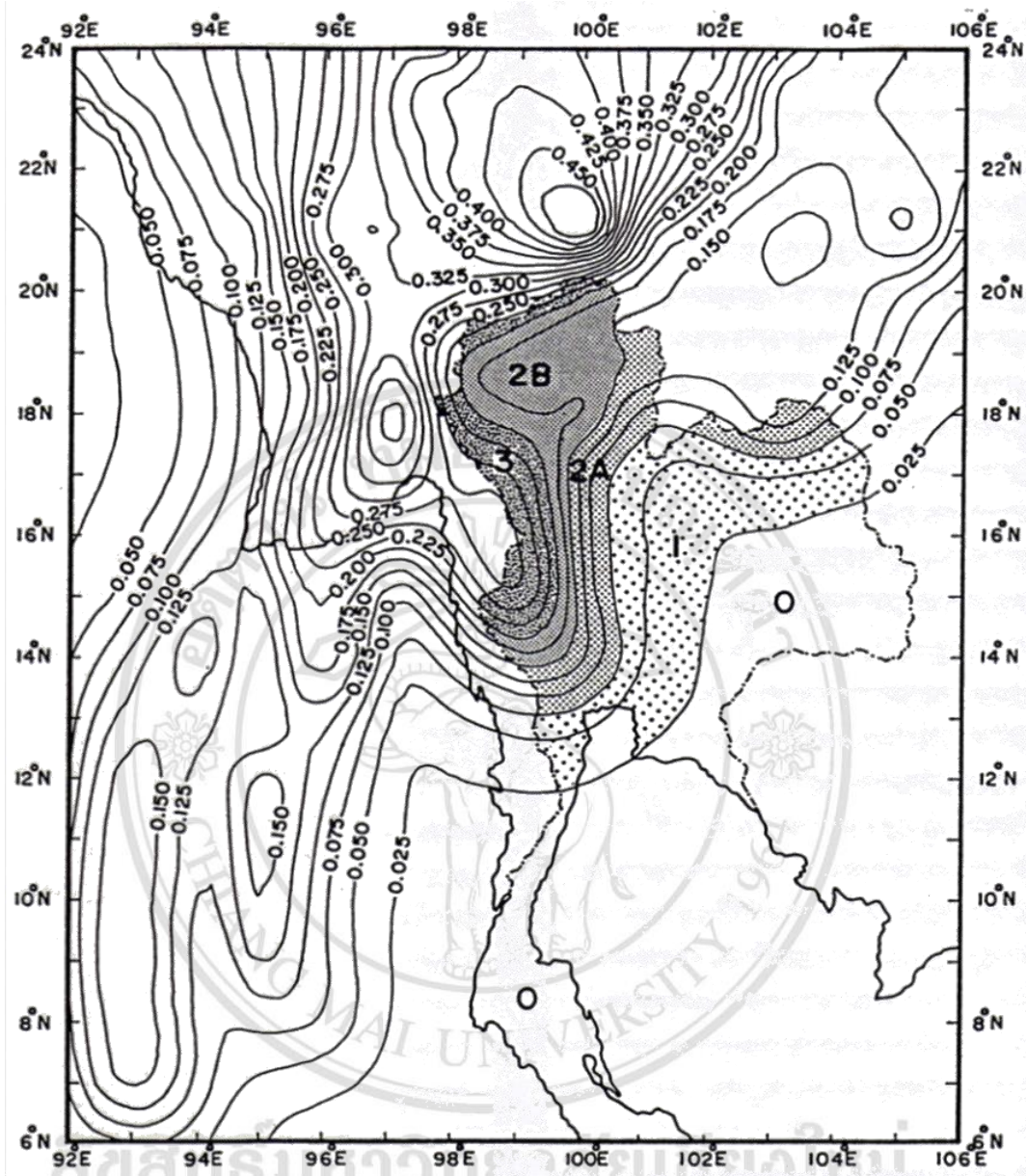
#### 2.4.3 ค่าอัตราเร่งสูงสุดของพื้นดิน

ค่าอัตราเร่งสูงสุดของพื้นดิน (Peak Ground Acceleration: PGA) เป็นค่าที่ใช้ในการออกแบบเชิงวิศวกรรมของอาคารในบริเวณที่มีความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหว หน่วยเป็นค่าอัตราเร่งเซนติเมตร/วินาทีหรือเป็นสัดส่วนของค่าอัตราเร่งหรือแรงโน้มถ่วงของโลก (% ของค่า g) หรือหน่วยเป็น gal (ประมาณ 980 gal เท่ากับ 1 g) ค่า PGA สามารถหาได้จากค่าสูงสุดของอัตราเร่งที่วัดได้จากค่าบันทึกของ Accelerogram เป็นค่าอัตราเร่งของพื้นดินเทียบกับเวลา

#### 2.4.4 ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหว

ปัจจุบันมีการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราเร่งสูงสุดของพื้นดิน (PGA) กับขนาดของแผ่นดินไหว และระยะห่างจากศูนย์กลางแผ่นดินไหว ที่เรียกว่า Attenuation Model จำนวนมากในหลายพื้นที่ทั่วโลก สำหรับประเทศไทยได้มีการจัดทำแผนที่แบ่งเขตแผ่นดินไหวขึ้น ในที่นี้ได้แสดงแผนที่แบ่งเขตแผ่นดินไหว (เป็นหนึ่งและอาศด,2537) โดยแสดงเขตพื้นที่ที่มีความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหว โดยแบ่งเป็น โซนต่างๆ กันตามลักษณะเส้น Contour Lines ของค่าระดับ  $PGA_0/G$  แสดงดังภาพที่ 2.13 เขตแผ่นดินไหวของประเทศไทยแบ่งออกเป็น 6 เขต คือ จาก 0 ถึง 4 เมื่อ  $PGA_0$  (Peak Ground Acceleration) คืออัตราเร่งสูงสุดบนพื้นดินที่มีความน่าจะเป็นเพียง 1 ใน 10 ที่จะเกิดมีค่าสูงกว่าในคาบเวลา 50 ปี และ G คืออัตราเร่งของสนามโน้มถ่วงของโลก เท่ากับ  $9.81 \text{ m/sec}^2$  ดังนี้

- เขต 4 : รุนแรงมาก :  $0.3 < PGA_0/G$
- เขต 3 : รุนแรง :  $0.2 < PGA_0/G \leq 0.3$
- เขต 2B: ปานกลางค่อนข้างแรง :  $0.15 < PGA_0/G \leq 0.2$
- เขต 2A: ปานกลาง :  $0.075 < PGA_0/G \leq 0.15$
- เขต 1 : ไม่รุนแรง :  $0.025 < PGA_0/G \leq 0.075$
- เขต 0 : ไม่จำเป็นต้องออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว :  $PGA_0/G \leq 0.025$



ภาพที่ 2.13 แผนที่แสดง contour lines ของ  $PGA_0/G$  และเขตแผ่นดินไหวของประเทศไทยที่กำหนดตามเกณฑ์ของ UBC 1991 (เป็นหนึ่งและอาเด, 2537)

#### 2.4.5 ขนาดและความรุนแรงของแผ่นดินไหว

ขนาดของแผ่นดินไหว (Magnitude) เป็นปริมาณที่มีความสัมพันธ์กับพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาในรูปของการสั่นสะเทือน ซึ่งได้มาจากการตรวจวัดค่าความสูงของคลื่นแผ่นดินไหวที่ตรวจวัดได้ด้วยเครื่องวัดแผ่นดินไหว (Seismograph) โดยเป็นขนาด ณ จุดกำเนิดแผ่นดินไหว ขนาดที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีด้วยกันหลายประเภทดังนี้

Local Magnitude (ML) หรือขนาดแผ่นดินไหวในท้องถิ่น บ่งบอกถึงปริมาณของแผ่นดินไหวท้องถิ่นหรือแผ่นดินไหวใกล้ (ระยะทางน้อยกว่า 1,000 กิโลเมตร) คำนวณได้จากความสูงของคลื่นซึ่งตรวจด้วยเครื่องมือตรวจความสั้นสะเทือนแบบวัดการขจัด (Displacement) มีหน่วยเป็นริกเตอร์ แสดงดังตารางที่ 2.1 โดยนำค่าความสูงของคลื่น S ที่สูงสุด ซึ่งมีช่วงคลื่นอยู่ระหว่าง 0.1-1.0 วินาที มาใช้ในการคำนวณ ขนาดที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีด้วยกันหลายประเภทดังนี้

Teleseismic body-wave magnitudes (Mb) แสดงขนาดของเหตุการณ์แผ่นดินไหวทั้งใกล้และแผ่นดินไหวไกล (ระยะทางมากกว่า 1,000 กิโลเมตร) เรียกว่าขนาดของคลื่นหลัก (Body-Wave Magnitude) ในการคำนวณใช้คลื่นหลักได้แก่คลื่น P ที่มีความยาวช่วงคลื่นประมาณ 1.0-5.0 วินาที

Teleseismic surface wave magnitude (MS) แสดงขนาดของเหตุการณ์แผ่นดินไหวไกล และมีขนาดใหญ่ เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าขนาดคลื่นผิวพื้น (Surface Magnitude) ในการคำนวณใช้คลื่นผิวพื้นที่มีความยาวช่วงคลื่นประมาณ 18-22 วินาที

Moment magnitude (MW) เป็นขนาดพลังงานของแผ่นดินไหว เพื่อหาผลคูณการขจัดของรอยเลื่อน และปริมาณพื้นที่ของรอยเลื่อน ใช้สำหรับแผ่นดินไหวไกลที่มีขนาดใหญ่ สมการคำนวณขนาดของแผ่นดินไหวแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 ขนาดของแผ่นดินไหว

ขนาดแผ่นดินไหว(ริกเตอร์)	ประเภท
น้อยกว่า 3.0	แผ่นดินไหวขนาดเล็กมาก (Micro)
3.0 - 3.9	แผ่นดินไหวขนาดเล็ก (Minor)
4.0 - 4.9	แผ่นดินไหวขนาดค่อนข้างเล็ก (Light)
5.0 - 5.9	แผ่นดินไหวขนาดปานกลาง (Moderate)
6.0 - 6.9	แผ่นดินไหวขนาดค่อนข้างใหญ่ (Strong)
7.0 - 7.9	แผ่นดินไหวขนาดใหญ่ (Major)
8.0 ขึ้นไป	แผ่นดินไหวขนาดใหญ่มาก (Great)

ตารางที่ 2.2 สมการคำนวณขนาดแผ่นดินไหวชนิดต่างๆ

ขนาด	สูตรคำนวณ	คลื่นแผ่นดินไหว	ความยาวช่วงคลื่น (วินาที)	การตรวจวัด
$M_L$	$\log A - \log A_0$	S	0.1-1.0	Displacement
$M_b$	$\log A - \log T + 0.01\Delta + 5.9$	p	1.0-5.0	Velocity
$M_S$	$\log A + 1.66 \log D + 2.0$	Surface	20	Velocity
$M_w$	$(\log M_0)/1.5 - 10.7$	Surface	>200	Velocity

โดยที่ A = ความสูงของคลื่น P-Wave และค่าการเคลื่อนที่สูงสุดของพื้นดินไมโครเมตร (สำหรับขนาด  $M_b$  และ  $M_S$  ตามลำดับ)

$\Delta$  = ระยะศูนย์กลางแผ่นดินไหว, คีกรี

T = คาบเวลาของคลื่น P-Wave, วินาที

$M_0$  = โมเมนต์แผ่นดินไหว, ไดน์-ซม.

ความรุนแรงของแผ่นดินไหว (Intensity) เป็นระดับความรุนแรงที่เกิดจากแผ่นดินไหวที่ส่งผลกระทบต่อความรู้สึกของคน ต่อสิ่งของธรรมชาติต่างๆ และต่อความเสียหายของอาคารและสิ่งก่อสร้าง ความรุนแรงจะมากขึ้นแตกต่างกันในแต่ละแห่งที่ถูกรบกวน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของผู้สังเกตว่าอยู่ห่างไกลจากตำแหน่งศูนย์กลางแผ่นดินไหว (Epicenter) มากน้อยเพียงใด ประเทศไทยใช้มาตราเมอร์คัลลี ในการบ่งบอกถึงระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหว โดยแบ่งออกเป็น 12 ระดับ เรียงลำดับความรุนแรงแผ่นดินไหวจากน้อยไปมาก ดังตารางที่ 2.3 และตารางที่ 2.4 ได้แสดงการเปรียบเทียบระหว่างขนาดแผ่นดินไหว ความรุนแรง และอัตราเร่งของพื้นดิน

ตารางที่ 2.3 ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวตามมาตราเมอร์คัลลี

อันดับ	เหตุการณ์แผ่นดินไหว
I	ไม่รู้สึกรสั่นไหว ตรวจวัดได้ด้วยเครื่องมือ
II	รู้สึกบางคน โดยเฉพาะผู้อยู่ชั้นบนของอาคาร สิ่งของแกว่งไกว
III	ผู้อยู่ในอาคารรู้สึก เฉพาะอย่างยิ่งผู้อยู่ชั้นบนอาคาร แต่ผู้คนส่วนใหญ่ยังไม่รู้สึกว่ามีแผ่นดินไหว
IV	ในเวลากลางวันผู้คนในอาคารรู้สึกมาก แต่ผู้อยู่นอกอาคารรู้สึกบางคน งาน หน้าต่าง ประตู สั่น ความรู้สึกเหมือนรถบรรทุกชนอาคาร
V	เกือบทุกคนรู้สึก หลายคนตกใจตื่น วัตถุที่ไม่มั่นคงล้มคว่ำ เสา ต้นไม้ แกว่งไกว
VI	ทุกคนรู้สึก เครื่องเรือนเคลื่อน ปล่องไฟแตก เกิดความเสียหายเล็กน้อยกับอาคาร
VII	ทุกคนตกใจวิ่งออกนอกอาคาร อาคารที่ออกแบบดีไม่เสียหาย เสียหายเล็กน้อยถึงปานกลาง กับอาคารสิ่งก่อสร้างธรรมดา เสียหายมากกับอาคารที่ออกแบบไม่ดี ผู้ขับรถรู้สึกได้
VIII	เสียหายเล็กน้อยกับอาคารที่ออกแบบไว้ดี เสียหายมากในอาคารธรรมดา บางส่วนของอาคารพังทลาย เสียหายอย่างมากในอาคารที่ออกแบบไม่ดี ผนังอาคารหลุดออกนอกอาคาร ปล่องไฟพัง ดินและทรายพุ่งขึ้นมา
IX	เสียหายมากในอาคารที่ออกแบบไว้ดี โครงสิ่งก่อสร้างบิดเบนจากแนวตั้ง เสียหายอย่างมากกับอาคารและบางส่วนพังทลาย ตัวอาคารเคลื่อนจากฐานราก พื้นดินแตก ท่อใต้ดินแตกหัก
X	อาคารไม้ที่สร้างไว้อย่างดี เสียหาย โครงสร้างอาคารพังทลาย รางรถไฟบิด พื้นดินแตก แผ่นดินถล่มหลายแห่ง ทรายและโคลนพุ่งจากพื้นดิน
XI	สิ่งก่อสร้างเหลืออยู่น้อย สะพานถูกทำลาย พื้นดินมีรอยแยกกว้าง ท่อใต้ดินเสียหายหมด รางรถไฟบิดงอมาก
XII	เสียหายทั้งหมด เห็นคลื่นบนพื้นดิน เส้นแนวระดับสายตาบิดเบน วัตถุสิ่งของกระเด็นในอากาศ



6) ความยาวนานของแผ่นดินไหว เมื่อเกิดแผ่นดินไหวที่มีความสั้นสะเทือนกินเวลาหลายวินาที ความเสียหายจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหวประกอบด้วยคลื่นความสั้นสะเทือนหลายความยาวช่วงคลื่นหรือหลายความถี่ ในกรณีที่แผ่นดินไหวมีความสั้นสะเทือนยาวนาน ความถี่ที่ตรงกับค่าความถี่ธรรมชาติของอาคารสิ่งก่อสร้างจะช่วยเสริมให้เกิดความเสียหายรุนแรงต่อโครงสร้างได้

7) ตำแหน่งของศูนย์กลางแผ่นดินไหว ตำแหน่งของศูนย์กลางแผ่นดินไหว เช่นอยู่ในบริเวณรกร้าง ในป่าเขา ในทะเล มหาสมุทร ไกลจากชุมชนมาก ความสั้นสะเทือนที่เกิดย่อมมีอันตรายน้อยกว่า แผ่นดินไหวที่มีจุดศูนย์กลางใกล้ชุมชน

8) สภาพทางธรณีวิทยา บริเวณที่มีการดูดซับพลังงานจากความสั้นสะเทือนได้มาก จะได้รับความเสียหายน้อย เช่น ในบริเวณที่เป็นหินแข็ง ต่างกับในบริเวณที่เป็นชั้นดินอ่อน ที่ทำให้เกิดการขยายการสั้นสะเทือนของพื้นดินได้มากกว่าเดิมหลายเท่า ก่อให้เกิดความเสียหายที่รุนแรงมากขึ้น

#### 2.4.7 การเกิดแผ่นดินไหวในภาคเหนือ

กรมทรัพยากรธรณีได้ทำการสำรวจข้อมูลรอยเลื่อนมีพลังพบว่า ในประเทศไทยมีกลุ่มรอยเลื่อน 13 กลุ่ม ที่พาดผ่านพื้นที่จำนวน 22 จังหวัดดังภาพที่ 2.14 นอกจากนี้ยังมีการจัดทำแผนที่บริเวณที่มีความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหว โดยวิเคราะห์จากแนวรอยเลื่อนมีพลัง ลักษณะทางธรณีวิทยา ความถี่ และขนาดแผ่นดินไหวที่เกิดในประเทศไทยและประเทศข้างเคียง แสดงดังภาพที่ 2.15 จากข้อมูลการศึกษาที่เกี่ยวกับแผ่นดินไหวภายในประเทศแสดงให้เห็นว่า พื้นที่บริเวณภาคเหนือและภาคตะวันตกของประเทศไทย มีโอกาสเกิดแผ่นดินไหวขนาดปานกลางถึงขนาดใหญ่ เนื่องจากในพื้นที่ดังกล่าวมีรอยเลื่อนที่มีพลัง (Active Fault) ที่สามารถทำให้เกิดแผ่นดินไหวขนาดปานกลางถึงใหญ่ได้ ซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งปลูกสร้างต่างๆ และเกิดความสูญเสียต่อชีวิตและทรัพย์สิน ซึ่งเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นบริเวณภาคเหนือที่มีขนาดตั้งแต่ 5 ริกเตอร์ขึ้นไป ได้แสดงดังตารางที่

2.5

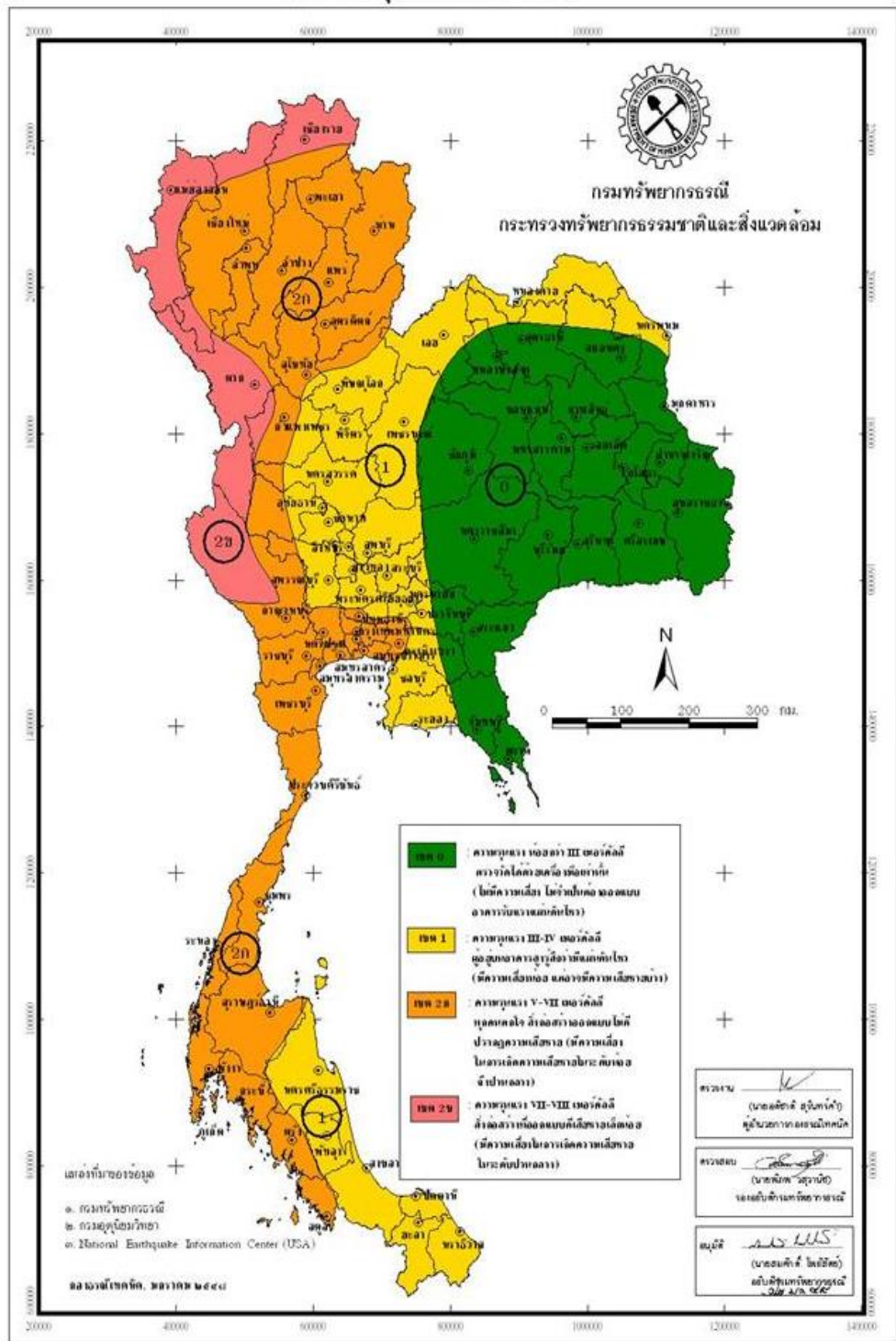
ตารางที่ 2.5 เหตุการณ์แผ่นดินไหวในอดีตที่มีขนาดตั้งแต่ 5 ริกเตอร์ขึ้นไปในภาคเหนือ

วัน เดือน ปี	สถานที่ที่รู้สึกสั่นไหว และที่ได้รับความเสียหาย	ขนาด (ริกเตอร์)
13 พ.ค. 2478	จ.น่าน	6.5
17 ก.พ. 2518	อ.ท่าสองยาง จ.ตาก	5.6
สิงหาคม 2532	ยอดฉัตรเจดีย์วัดพระธาตุคอกยสุเทพหัก	-
11 ก.ย. 2537	อ.พาน จ.เชียงราย	5.1
12 ก.ค. 2538	ลูกแก้วบนยอดฉัตรเจดีย์วัดพระธาตุคอกยสุเทพตกลงมา	-
9 ธ.ค. 2538	อ.ร้องกวาง จ.แพร่	5.1
21 ธ.ค. 2538	อ.พร้าว จ.เชียงใหม่	5.2
22 ธ.ค. 2539	พรมแดนไทย-ลาว-พม่า	5.5
20 ม.ค. 2543	ประเทศลาว	5.9
30 ธ.ค. 2547	ประเทศพม่า	5.4,5.6
13 ธ.ค. 2549	อ.แม่ริม จ.เชียงใหม่	5.1
15 พ.ค. 2550	ประเทศลาว	5.1
16 พ.ค. 2550	ประเทศลาว, ยอดเจดีย์จอมกิตติ อ.เชียงแสนหัก	5.3

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
Copyright © by Chiang Mai University  
All rights reserved



ภาพที่ 2.14 แผนที่รอยเลื่อนมีพลังในประเทศไทย



ภาพที่ 2.15 แผนที่บริเวณเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวของประเทศไทย ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 2 พ.ศ. 2548

เชียงใหม่ถือว่าเป็นจังหวัดหนึ่ง ที่อยู่ในพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวขนาดปานกลางถึงขนาดใหญ่ได้ในอนาคต นอกจากสิ่งปลูกสร้างประเภทอาคารและเขื่อนที่จะได้รับความเสียหายแล้ว ยังมีโบราณสถานอันเก่าแก่เป็นจำนวนมาก ที่อาจได้รับความเสียหายจากการเกิดแผ่นดินไหวได้ ซึ่งเคยเกิดความเสียหายมาแล้วเป็นจำนวนมากในอดีต โดยเฉพาะเจดีย์ เหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ส่งผลกระทบต่อเจดีย์ ทั้งที่บันทึกไว้ในประวัติศาสตร์ และเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ได้บันทึกไว้โดยเครื่องมือตรวจวัดจนถึงปัจจุบัน พบว่าแผ่นดินไหวส่งผลให้เกิดความเสียหายแก่เจดีย์เป็นจำนวนมาก ดังนี้

พ.ศ. 1077 ขอดเจดีย์หัก 4 แห่ง

พ.ศ. 2088 ขอดเจดีย์หลวง จ. เชียงใหม่ หักจากความสูง 86 เมตร เหลือประมาณ 60 เมตร

พ.ศ. 2103 เจดีย์หลวงสูง 17 วา กว้าง 10 วา ได้รับความเสียหาย

พ.ศ. 2111 พระเจดีย์เมืองร่างกุ้ง ประเทศพม่า ทะลายลงมาถึงชั้นกลาง

พ.ศ. 2172 ฉัตรยอดพระเจดีย์ร่างกุ้งหัก

พ.ศ. 2217 ขอดเจดีย์หัก ฟังหลายแห่ง ที่เชียงใหม่

พ.ศ. 2258 แผ่นดินไหวหนัก พระเจดีย์วิหารหักพังหลาย 4 ตำบล

พ.ศ. 2300 เกิดแผ่นดินไหว ฉัตรยอดพระเจดีย์มูตางในเมืองหงสาวดีหักลงมา

พ.ศ. 2344 แก้วอันในยอดพระธาตุเจ้าภูเพียงแช่แห้งกระเด็นตกลงมา ขอดพระธาตุเจ้าสุเทพเชียงใหม่ ขอดพระธาตุเจ้าลำพูน ขอดพระธาตุเจ้าลำปางนครและขอดพระธาตุเจ้าน้อยแะ เมืองแพร่ และพระวิหารหลวงเมืองพะเยาที่พระเจ้าตนหลวงอยู่นั้นก็กระเด็นตกลงเช่นเดียวกัน

พ.ศ. 2363 ขอดมหาธาตุเจ้าภูเวียงแช่แห้งหัก

พ.ศ. 2532 ขอดฉัตรเจดีย์วัดพระธาตุคอกยสุเทพหัก

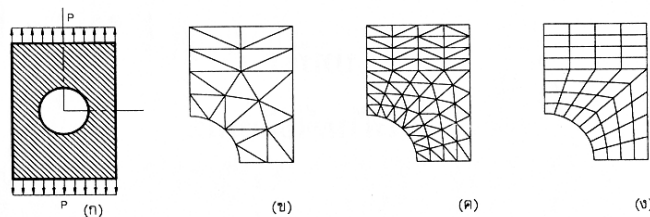
พ.ศ. 2538 ลูกแก้วบนยอดฉัตรเจดีย์วัดพระธาตุคอกยสุเทพตกลงมา

พ.ศ. 2550 ขอดฉัตรของพระธาตุจอมกิตติหัก และเกิดรอยร้าวในตัวพระธาตุ

## 2.5 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

### 2.5.1 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) เป็นวิธีเชิงตัวเลขวิธีหนึ่งที่ใช้ในการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ และเป็นที่ยอมรับใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรมอย่างกว้างขวาง สามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้านกลศาสตร์ของแข็ง เช่น การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และความเค้นของชิ้นส่วนของโครงสร้างที่ซับซ้อนได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ยังสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้านพลศาสตร์ เช่น การสั่นสะเทือนของโครงสร้างได้ด้วย ในการแก้ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบจำลองชิ้นส่วนของปัญหาจะถูกแบ่งออกเป็นชิ้นย่อยๆ อย่างต่อเนื่องกัน ตามรูปร่างลักษณะที่แท้จริงของปัญหาคงภาพที่ 2.16 เรียกชิ้นย่อยเหล่านี้ว่า ไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลที่ได้รับจะเป็นผลเฉลยที่จุดต่อหรือโหนดของแต่ละเอลิเมนต์ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะวิเคราะห์ปัญหาโดยจะวิเคราะห์ค่าที่แต่ละเอลิเมนต์ แล้วนำมารวมเข้าด้วยกันเป็นผลเฉลยของระบบ



(ก) แผ่นโลหะมีโหลด P กระทำ (ข) อิลิเมนต์สามเหลี่ยมหายาบ

(ค) อิลิเมนต์สามเหลี่ยมละเอียด (ง) อิลิเมนต์สี่เหลี่ยมโค้ง

ภาพที่ 2.16 การแบ่งชิ้นส่วนออกเป็นอิลิเมนต์ย่อย (เดช, 2538)

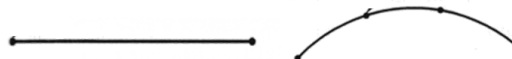
ทฤษฎีไฟไนต์เอลิเมนต์ มีพื้นฐานมาจากวิธีเรลซ์-ริทซ์ (Rayleigh-Ritz Method) ที่ใช้หลักของงานสมมุติ (Principal of Virtual Work) หรือหลักของพลังงานศักย์ต่ำสุด (Principal of Minimum Potential Energy) ต่อมาได้มีการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการแก้ปัญหาสามมิติ ในช่วงเริ่มต้นวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะใช้ในการแก้ปัญหาในกรณีที่มีความเครียดและการกระจัดน้อยๆ และวัสดุอยู่ในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้น และแรงกระทำเป็นแบบสถิต จากนั้นได้นำไปใช้วิเคราะห์ปัญหาที่การกระจัดมีค่ามากและวัสดุอยู่ในช่วงไม่ยืดหยุ่นเชิงเส้น และใช้ในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนและการ

ตอบสนองของระบบโครงสร้างด้วย การประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ขยายตัวกว้างขึ้น มีแนวคิดในการนำวิธีเวทเรซิดิว (Weighted-Residual Method) เช่น วิธีของกาลเลอร์กิน (Galerkin's Method) มาใช้หาสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงสร้าง ปัจจุบันการวิเคราะห์ปัญหาด้านวิศวกรรมศาสตร์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ถูกใช้อย่างแพร่หลาย

### 2.5.2 ความรู้พื้นฐานสำหรับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

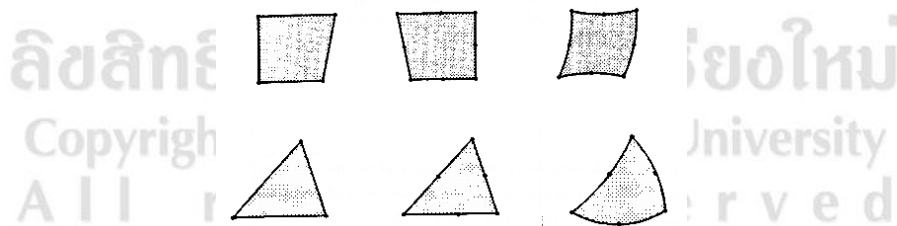
1) ชนิดของเอลิเมนต์ ในการวิเคราะห์ ต้องทำการแบ่งโครงสร้างออกเป็นส่วนเล็กๆ เรียกว่าเอลิเมนต์ (Element) ชนิดของเอลิเมนต์แบ่งออกได้ 3 ประเภทดังนี้

1.1) เอลิเมนต์มิติเดียว เป็นเอลิเมนต์ที่นิยมใช้กับการวิเคราะห์ปัญหามิติเดียวดังภาพที่ 2.17 เช่น ชิ้นส่วนที่มีแรงกระทำในแนวแกน ชิ้นส่วนที่รับแรงบิด การโค้งงอของคาน เป็นต้น



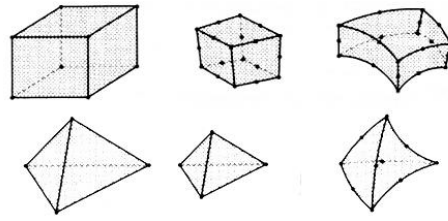
ภาพที่ 2.17 เอลิเมนต์มิติเดียว (เดช, 2538)

1.2) เอลิเมนต์สองมิติ โดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมหรือสี่เหลี่ยม ประกอบด้วยด้านที่เป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้งดังภาพที่ 2.18 เอลิเมนต์สองมิตินิยมใช้กับการวิเคราะห์ความเค้น-ความเครียดระนาบ



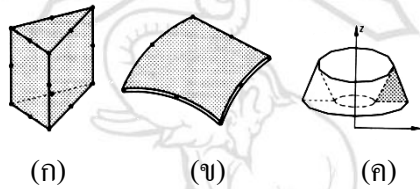
ภาพที่ 2.18 เอลิเมนต์สองมิติ (เดช, 2538)

1.3) เอลิเมนต์สามมิติ ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาสามมิติต่างๆ ลักษณะของเอลิเมนต์เป็นสี่เหลี่ยมปริซึมและรูปกรวยสามเหลี่ยมดังภาพที่ 2.19



ภาพที่ 2.19 อีลิเมนต์สามมิติ (เดซ, 2538)

นอกจากอีลิเมนต์สามมิติตามที่กล่าวมาแล้วยังมีอีลิเมนต์อีกกลุ่มหนึ่งดังภาพที่ 2.20 (ก) ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาในลักษณะรูปทรงกระบอก ส่วนภาพที่ 2.20 (ข) วิเคราะห์ปัญหาในลักษณะแผ่นโค้ง (Shell) และภาพที่ 2.20 (ค) เป็นอีลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาการรวมสมมาตร ซึ่งอาจเป็นอีลิเมนต์ชนิดสามเหลี่ยมหรือสี่เหลี่ยมหมุนรอบแกนสมมาตร ( $360^\circ$ )



ภาพที่ 2.20 อีลิเมนต์รูปทรงต่างๆ (เดซ, 2538)

2) รูปแบบของแรง แรงที่มากกระทำต่อชิ้นส่วนสามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบคือ แรงกระทำเป็นจุด (Point Load) แรงต่อพื้นที่ (Force Per Unit Area) คือแรงที่กระทำต่อพื้นผิวของวัตถุ และแรงต่อปริมาตร (Force Per Volume) คือแรงอันเนื่องมาจากหน่วยน้ำหนักของวัตถุ

3) ความเค้น (Stress) เมื่อวัตถุมีแรงใดๆ มากระทำจะเกิดความเค้น ความเครียด และการกระจัดขึ้น พิจารณาจากความเค้นรวมที่เกิดขึ้น หรือเรียกว่าความเค้นที่ใช้ในการทำนายความเสียหาย (Von Mises Stress) ซึ่งวัสดุแต่ละประเภทจะมีลักษณะการเสียหายแตกต่างกันออกไป ในการวิเคราะห์หาความเค้นของวัสดุค่าความเค้นรวมที่ได้ ต้องมีค่าไม่เกินความเค้นคราก ( $\sigma_y$ ) ของวัตถุ หากวัตถุหรือโครงสร้างใดมีค่าความเค้นรวมเกินค่าที่ยอมรับให้ โครงสร้างดังกล่าวอาจเกิดการวิบัติ ควรได้รับการซ่อมแซมเสริมกำลัง เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการวิบัติขึ้น

### 2.5.3 ขั้นตอนของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

#### 1) การเลือกชนิดของเอลิเมนต์

การเลือกชนิดของเอลิเมนต์จะต้องคำนึงถึงลักษณะของโครงสร้าง การกระทำของน้ำหนักบรรทุก และผลเฉลยที่ต้องการ เอลิเมนต์ที่เลือกใช้อาจเป็น เอลิเมนต์ชนิดมิติเดียว สองมิติ สามมิติ หรือเอลิเมนต์ชนิดแกนสมมาตร (Axisymmetric Element) เอลิเมนต์ต่างชนิดกันก็จะมีลักษณะการกระจายของตัวไม่รู้ค่าบนเอลิเมนต์ที่ต่างกัน จึงมีผลโดยตรงต่อผลเฉลยที่คำนวณได้ ดังนั้นในการเลือกใช้อิเลเมนต์จึงมีความสำคัญต่อการวิเคราะห์

#### 2) การแบ่งโครงสร้างออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย

การแบ่งโครงสร้างออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ต้องคำนึงถึงรูปร่างลักษณะของโครงสร้างจริงเพื่อให้ได้แบบจำลองที่ใกล้เคียงโครงสร้างจริงมากที่สุด และเรียกแบบจำลองนี้ว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Model) การแบ่งเอลิเมนต์ย่อยในบริเวณที่มีลักษณะต่างกัน เช่น บริเวณที่มีส่วนเว้า ส่วนโค้ง ช่องว่าง หรือบริเวณที่โครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างฉับพลัน ควรแบ่งเอลิเมนต์ในบริเวณนั้นให้มีขนาดเล็กกว่าบริเวณอื่น เพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้อง

#### 3) การเลือกฟังก์ชันการกระจัด

การเลือกฟังก์ชันการกระจัด ควรให้สอดคล้องกับจำนวนจุดต่อของเอลิเมนต์ หรือสอดคล้องกับระดับความเสรีของเอลิเมนต์ พอลิโนเมียลฟังก์ชันเป็นฟังก์ชันที่นิยมใช้โดยทั่วไป ซึ่งอาจเป็นฟังก์ชันพอลิโนเมียลกำลังหนึ่ง กำลังสอง หรือกำลังสาม โดยการกระจัดที่จุดต่อจะแสดงในเทอมของพิกัดของระนาบ เช่น ปัญหาสองมิติจะมีการกระจัดสองทิศทางแสดงในระนาบ X-Y

#### 4) การกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด/การกระจัด และความเค้น/ความเครียด

ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการกระจัด และความเค้นกับความเครียดเป็นสิ่งสำคัญในการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของแต่ละเอลิเมนต์ โดยผลเฉลยของการกระจัด ความเค้น และความเครียดโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกลของวัสดุ และความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการกระจัด และความเค้นกับความเครียดที่ใช้ในการคำนวณว่ามีความถูกต้องเพียงใด

## 5) การหาสตีฟเนสเมตริกซ์และสมการของอิลิเมนต์

วิธีการหาสตีฟเนสเมตริกซ์ของอิลิเมนต์ และสมการของแรงแต่ละอิลิเมนต์ สามารถทำได้หลายวิธีดังนี้

5.1) วิธีสมดุลโดยตรง (Direct Equilibrium Method) สามารถหาสตีฟเนสเมตริกซ์ และสมการของแรงในทอมการกระจัดที่จุดต่อของอิลิเมนต์ โดยใช้เงื่อนไขการสมดุลของแรงในอิลิเมนต์ วิธีนี้ส่วนมากจะใช้หาสตีฟเนส เมตริกซ์ของอิลิเมนต์มิติเดียว

5.2) วิธีงานหรือพลังงาน (Work or Energy Method) วิธีนี้จะอาศัยหลักการของงานหรือพลังงานในการหาสตีฟเนสเมตริกซ์ของอิลิเมนต์และหาสมการของอิลิเมนต์ทั้งสองและสามารถทำได้โดยอาศัย วิธีของงานสมมติ (Principal of Virtual Work) ซึ่งสามารถหาสตีฟเนสเมตริกซ์ของอิลิเมนต์ของวัสดุทุกชนิด ส่วนพลังงานศักย์ต่ำสุด (Principal of Minimum Potential Energy) และทฤษฎีคาสติเกลียโน (Castigliano's Theorem) จะใช้หาสตีฟเนสเมตริกซ์ของวัสดุยืดหยุ่นเชิงเส้นเท่านั้น

5.3) วิธีเวทเรซิดิว (Method of Weighted Residuals) การหาสมการของ อิลิเมนต์ด้วยวิธีเวทเรซิดิวที่นิยมใช้กันคือ วิธีของกาลเออร์คิน (Galerkin's Method) ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับวิธีพลังงาน

จากการหาสตีฟเนสและสมการของแรงแต่ละอิลิเมนต์ดังที่กล่าวมา จะได้สมการสมดุลของแรงในทอมของสตีฟเนสเมตริกซ์ และการกระจัดที่จุดต่อของอิลิเมนต์ ดังสมการที่ 2.1

$$\{f\} = [k]\{q\} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $\{f\}$  คือเมตริกซ์ของแรงที่กระทำที่จุดต่อ

$[k]$  คือสตีฟเนสของอิลิเมนต์

$\{q\}$  คือการกระจัดที่จุดต่อซึ่งยังไม่ทราบค่า

การหาสมการรวมของระบบทำได้โดยการรวมสมการของแต่ละอิลิเมนต์เข้าด้วยกันด้วยวิธีซ้อนทับ (Superposition Method) หรือเรียกว่าวิธีสตีฟเนสโดยตรง (Direct Stiffness Method) โดยอาศัยหลักการสมดุลของแรงที่จุดต่อของอิลิเมนต์ และการต่อเนื่องของโครงสร้าง จากนั้นกำหนดเงื่อนไขขอบ (Boundary Condition) ซึ่งสมการรวมของระบบแสดงดังสมการที่ 2.2 และเมื่อกำหนด

เงื่อนไขขอบแล้วจะสามารถหาค่าการกระจัดได้ด้วยการแก้สมการทางพีชคณิตและสามารถหาความถี่ธรรมชาติที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างได้

$$\{F\} = [K]\{Q\} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $\{F\}$  คือเมตริกซ์รวมของแรงที่กระทำที่จุดต่อ

$[K]$  คือสติฟเนสเมตริกซ์รวมของระบบ

$\{Q\}$  คือเมตริกซ์รวมการกระจัดของระบบ

#### 2.5.4 ความรู้พื้นฐานทางพลศาสตร์ของโครงสร้าง (Dynamic of Structure)

##### 1) ความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency, $f_n$ )

ความถี่ธรรมชาติของการสั่นไหว คือจำนวนรอบของการเคลื่อนที่ของโครงสร้างในระยะเวลา 1 วินาที มีหน่วยเป็น เฮิรตซ์ ( $H_z$ , รอบต่อวินาที) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับคาบการสั่นไหวธรรมชาติ ( $T_n$ ) ดังสมการที่ 2.3 โดยที่คาบการสั่นไหวธรรมชาติ คือระยะเวลาการแกว่งตัวของโครงสร้างตามธรรมชาติครบ 1 รอบ มีหน่วยเป็นวินาที

$$f_n = \frac{1}{T_n} \quad (2.3)$$

คาบการสั่นไหวและความถี่ธรรมชาติมีความสัมพันธ์กับค่าความถี่ธรรมชาติเชิงมุมของการสั่นไหว (Circular Natural Frequency,  $\omega_n$ ) แสดงดังสมการที่ 2.4 และ 2.5

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} \quad (2.4)$$

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} \quad (2.5)$$

ค่าของความถี่ธรรมชาติ,  $f_n$  คาบการสั่นไหวธรรมชาติ,  $T_n$  และความถี่ธรรมชาติเชิงมุม  $\omega_n$  ล้วนขึ้นอยู่กับมวล ( $m$ ) และสติฟเนส ( $k$ ) ของโครงสร้างนั้นๆ ดังสมการที่ 2.6

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.6)$$

## 2) สมการการเคลื่อนที่ (Equation of Motion)

ในภาวะปกติตามธรรมชาติแล้วอาคารจะมีการสั่นไหวอยู่ตลอดเวลา แม้ว่าจะไม่มีแรงใดๆมากระทำกับโครงสร้างเรียกว่า การสั่นไหวอิสระ (Free Vibration) โดยการสั่นไหวอิสระของระบบถูกควบคุมด้วยสมการการเคลื่อนที่ สมการที่ 2.7

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = 0 \quad (2.7)$$

เมื่อ  $m$  คือเมตริกซ์รวมของมวลรวม

$\ddot{u}, \dot{u}, u$  คือเมตริกซ์รวมของความเร่ง ความเร็ว และการเคลื่อนที่ตามลำดับ

$c$  คือเมตริกซ์รวมของความหน่วง

$k$  คือสตีเฟนสมเมตริกซ์รวมของระบบ

หากโครงสร้างถูกกระทำด้วยแรงแผ่นดินไหว ลักษณะการตอบสนองของโครงสร้างจะประกอบไปด้วย การเสียดรูป และเกิดแรงภายในของโครงสร้าง ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะการสั่นไหวของพื้นดิน ที่มีความเร่งเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ( $\ddot{u}_g(t)$ ) สมการการเคลื่อนที่ของระบบภายใต้แรงแผ่นดินไหวแสดงดังสมการที่ 2.8

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t) \quad (2.8)$$

เมื่อ  $m\ddot{u}$  คือแรงที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของมวล ( $f_1$ )

$c\dot{u}$  คือแรงที่เกิดจากความหน่วงในโครงสร้าง ( $f_2$ )

$ku$  คือแรงที่เกิดจากสตีเฟนของโครงสร้าง ( $f_3$ )

$p(t)$  คือแรงแผ่นดินไหวที่มากกระทำ เท่ากับ  $-m\ddot{u}_g(t)$

การวิเคราะห์และออกแบบเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหว แบ่งออกเป็น 3 วิธีคือ วิธีแรงสถิตเทียบเท่า (Equivalent Static Force Method), Response Spectrum Analysis และ Time History Analysis ในงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ด้วยวิธี Time History Analysis เนื่องจากวิธีนี้เหมาะกับการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงตามข้อมูลความเร่งของพื้นดิน สมการ

การเคลื่อนที่ใช้วิธีการหาผลตอบสนองได้ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขของ Newmark Beta Method มีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณความเร่ง ณ เวลาเริ่มต้น  $t = 0$  สมการที่ 2.9

$$\ddot{u}_0 = \frac{p_0 - c\dot{u}_0 - ku_0}{m} \quad (2.9)$$

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดช่วงเวลา  $\Delta t$  เช่น 0.02 วินาที

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณหาค่า  $\hat{k}$  สมการที่ 2.10

$$\hat{k} = k + \frac{\gamma}{\beta\Delta t}c + \frac{1}{\beta(\Delta t)^2}m \quad (2.10)$$

เมื่อ  $\gamma = \frac{1}{2}, \beta = \frac{1}{4}$  สำหรับ Average Acceleration Method

$\gamma = \frac{1}{2}, \beta = \frac{1}{6}$  สำหรับ Linear Acceleration Method

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณหาค่าคงที่  $a$  และ  $b$  สมการที่ 2.11 และ 2.12

$$a = \frac{1}{\beta\Delta t}m + \frac{\gamma}{\beta}c \quad (2.11)$$

$$b = \frac{1}{2\beta}m + \Delta t \left( \frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) c \quad (2.12)$$

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณหาค่าต่างๆ ตามสมการที่ 2.13 ถึง 2.17

$$\Delta \hat{p}_i = \Delta p_i + a\dot{u}_i + b\ddot{u}_i \quad (2.13)$$

$$\Delta u_i = \frac{\Delta \hat{p}_i}{\hat{k}} \quad (2.14)$$

$$\Delta \ddot{u}_i = \frac{\gamma}{\beta\Delta t} \Delta u_i - \frac{\gamma}{\beta} \dot{u}_i + \Delta t \left( 1 - \frac{\gamma}{2\beta} \right) \ddot{u}_i \quad (2.15)$$

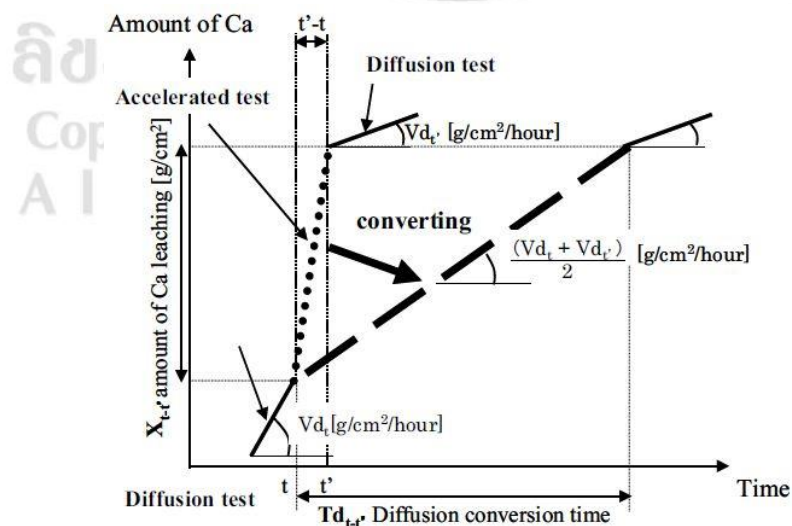
$$\Delta \ddot{u}_i = \frac{1}{\beta(\Delta t)^2} \Delta u_i - \frac{1}{\beta \Delta t} \dot{u}_i - \frac{1}{2\beta} \ddot{u}_i \quad (2.16)$$

$$u_{i+1} = u_i + \Delta u_i, \dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + \Delta \dot{u}_i, \ddot{u}_{i+1} = \ddot{u}_i + \Delta \ddot{u}_i \quad (2.17)$$

ขั้นตอนที่ 6 กลับไปคำนวณหาค่าต่างๆ ในเวลาถัดไป  $i+1$  ตามสมการที่ 2.10 ถึง 2.17 แล้วจะได้ค่าการตอบสนองของโครงสร้าง

## 2.6 การเทียบการกระจายตัวของเวลาทดสอบ

ในการทดสอบการทำนายระยะเวลาเพื่อการซ่อมแซมของโครงสร้างที่ทำมาจากอิฐก่อ ปัจจุบันยังไม่มีมาตรฐานการทดสอบจึงต้องมีการประยุกต์วิธีการทดสอบอื่น โดยงานวิจัยที่สอดคล้องเป็นการศึกษาเรื่องการทำนายการเสื่อมสภาพของคอนกรีตเนื่องจากการกัดเซาะของแคลเซียมที่มากกว่า 100 ปี (H.Minagawa, 2002) ซึ่งได้ทำการทดสอบการเสื่อมสภาพของคอนกรีตเนื่องจากการกัดเซาะของแคลเซียมโดยวิธีการทดสอบแบบธรรมชาติ สลับกับการเร่งปฏิกิริยา ซึ่งการทดสอบแบบเร่งปฏิกิริยาสามารถเทียบเวลาช่วงที่เร่งปฏิกิริยาให้เป็นเวลาตามความเป็นจริงได้ วิธีการเทียบเวลาจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ช่วง ดังนี้ ช่วงแรกเป็นช่วงเวลาตามความเป็นจริง ซึ่งกระบวนการเกิดปฏิกิริยาจะเป็นไปตามความเป็นจริงของธรรมชาติ ช่วงที่สองเป็นช่วงเร่งปฏิกิริยา โดยอาศัยปัจจัยต่างๆ ที่สามารถเร่งปฏิกิริยาได้และต้องไม่เปลี่ยนแปลงไปของปฏิกิริยา และช่วงที่สามเป็นช่วงระยะเวลาตามความเป็นจริงอีกครั้งหนึ่งดังภาพที่ 2.21 โดยการแปลงค่าของเวลาการแพร่ผ่าน (Diffusion Conversion Time) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.18



ภาพที่ 2.21 แนวคิดสำหรับแปลงค่าของเวลาการแพร่ผ่าน (H.Minagawa, 2002)

$$\text{Diffusion Conversion Time, } T_{d \cdot r-t} = \frac{X_r - X_t}{(Vd_r + Vd_t)} \quad (2.18)$$

2

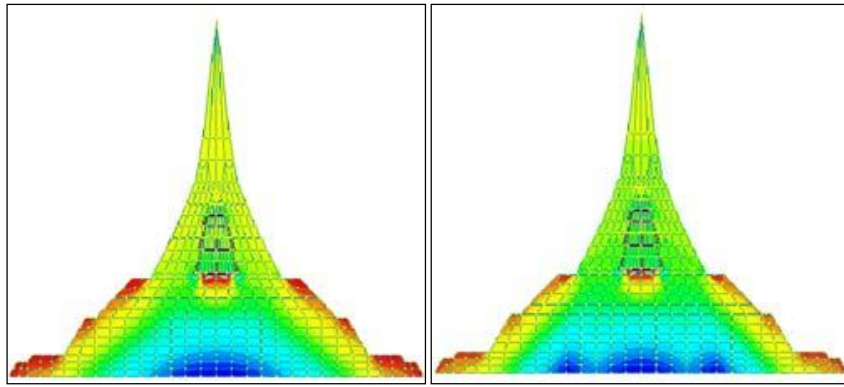
เมื่อ  $X_r - X_t$  คือปริมาณการกักก่อนแบบเร่งปฏิกิริยาของกราฟช่วงที่ 2

$Vd_r$  คือความชันของกราฟช่วงที่ 1

$Vd_t$  คือความชันของกราฟช่วงที่ 3

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

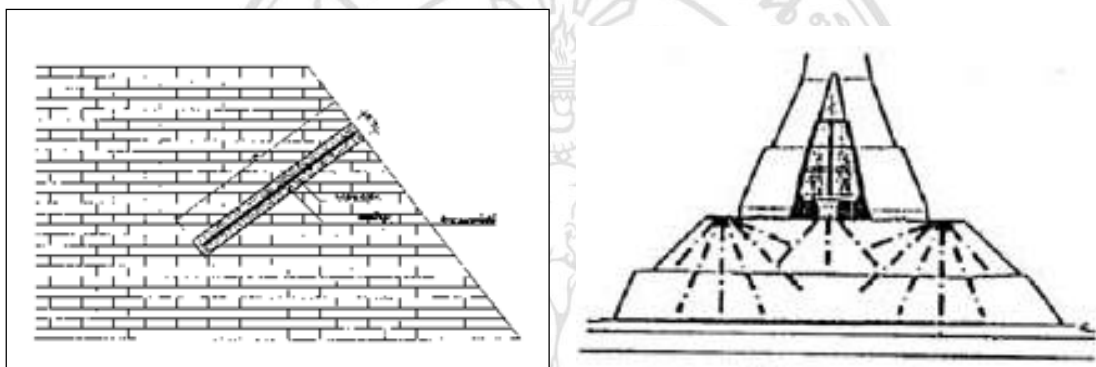
วรศักดิ์ และคณะ (2540) ได้ทำการวิเคราะห์โครงสร้างองค์เจดีย์ภูเขาทอง จังหวัดพระนครศรีอยุธยา โดยสร้างแบบจำลองสามมิติ และได้ทำการเจาะหลุมและเก็บวัสดุขององค์เจดีย์ ซึ่งเป็นวิธีการเช่นเดียวกันกับที่ใช้สำรวจชั้นหิน ตัวอย่างอิฐที่เก็บมีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 61 มม. นอกจากนั้นจากการสำรวจยังพบการเอียงขององค์เจดีย์ที่เกิดจากการทรุดตัวของอิฐที่ฐาน เนื่องจากเป็นโพรงและมีช่องว่างอยู่ภายใน จึงได้วิเคราะห์เพื่อเพิ่มเสถียรภาพแก่องค์เจดีย์ โดยใช้วิธีไฟในต้อลิเมนต์ จากการวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้น พบว่าแรงกดมีค่าสูงสุดบริเวณศูนย์กลาง และลดลงเมื่อห่างออกจากศูนย์กลาง เมื่อเจดีย์เกิดการเสียศูนย์เพียงเล็กน้อยก็มีผลต่อเสถียรภาพได้ จึงทำการออกแบบเพื่อเพิ่มเสถียรภาพของฐานรากเจดีย์ด้วยการกระจายแรงกดออกจากศูนย์กลางให้มากที่สุด ด้วยวิธีการฉีดน้ำปูนเข้มข้นเข้าไปในส่วนฐานของเจดีย์ โดยบังคับให้บริเวณฉีดน้ำปูนเป็นรูปทรงกลาคว่า แล้ววิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้นหลังการเพิ่มเสถียรภาพ พบว่าแรงกดถูกกระจายออก ดังภาพที่ 2.22 ฐานใต้เจดีย์ช่วยกันรับแรงกดเป็นบริเวณกว้างขึ้นเจดีย์มีเสถียรภาพมากขึ้น และค่าหน่วยแรงอัดอันเกิดจากการรับน้ำหนักของตัวองค์เจดีย์เองมีค่าต่ำกว่าค่ากำลังประลัยของวัสดุก่อ นอกจากนี้ยังทำการสร้างกำแพงคอนกรีตรอบเจดีย์และเหล็กตรอบเจดีย์ เพื่อป้องกันการเบ่งตัวขององค์เจดีย์เมื่อมีแรงกด และเสริมความแข็งแรงให้กับองค์เจดีย์โดยการเจาะเย็บทั้งแนวเอียงและแนวตั้ง ดังภาพที่ 2.23 เพื่อให้ผิวภายนอกขององค์เจดีย์ยึดเหนี่ยวเสมือนกับเป็นเนื้อเดียวกัน



(ก) ก่อนบูรณะ

(ข) หลังบูรณะ

ภาพที่ 2.22 การกระจายแรงกดใน โครงสร้างของเจดีย์ภูเขาทอง (วรศักดิ์และคณะ, 2540)

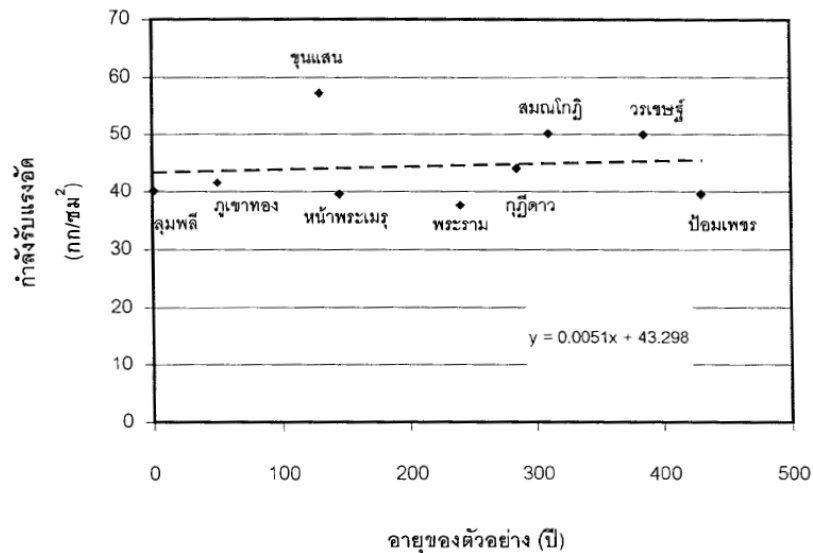


ภาพที่ 2.23 การเจาะยึด (Rock Bolts) (วรศักดิ์และคณะ, 2540)

วรศักดิ์ (2540) ได้ศึกษาถึงผลกระทบของการสันสะเทือนจากการจราจรที่มีต่อ โครงสร้างของ องค์พระปฐมเจดีย์ เนื่องจากการตัดถนนจากถนนเพชรเกษมเข้าสู่บริเวณวัดพระปฐมเจดีย์ซึ่งอาจ ส่งผลกระทบต่อความมั่นคงของ โครงสร้างองค์พระปฐมเจดีย์ โดยวิเคราะห์ห้องพระปฐมเจดีย์ จาก การนำเอาชิ้นส่วนก้อนอิฐและปูนประสานมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ และตรวจวัดขนาดความ สันสะเทือนบริเวณฐานขององค์พระปฐมเจดีย์ แล้วนำมาวิเคราะห์ เพื่อดูการตอบสนองต่อการ สันสะเทือนขององค์พระปฐมเจดีย์ เนื่องจากองค์พระปฐมเจดีย์มีลักษณะสมมาตรจึงสร้างแบบจำลอง เพียงครึ่งเดียว และประเภทอิเลเมนต์ที่ใช้ประกอบด้วย Solid Element แบบ 8 โหนดต่ออิเลเมนต์ (Linear Hexahedron) แบบ 6 โหนดต่ออิเลเมนต์ (Linear wedge) และแบบ 4 โหนดต่ออิเลเมนต์ (Linear Tetrahedron) โดยแต่ละ โหนดมีการเคลื่อนที่ 3 ทิศทางตามแนวแกน x, y และ z (หรือ 3 Degree of Freedom) จากการศึกษาด้านวัสดุพบว่าคุณสมบัติที่สำคัญ คือ กำลังอัดประลัยของก้อนอิฐ และปูนประสานมีค่าประมาณ 60 และ 25 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ แล้วนำมาใช้คำนวณหา กำลังอัด ประลัยของวัสดุก่อโดยรวมของก้อนอิฐและปูนประสาน (ตามข้อกำหนด BS CODE 5628, 1978) จะ

ได้ค่ากำลังอัดประลัยเท่ากับ 28.21 กก./ตร.ซม. โมดูลัสยืดหยุ่นได้ค่าเท่ากับ 28,210 กก./ตร.ซม. คุณสมบัติ Poisson's Ratio เท่ากับ 0.216 และน้ำหนักจำเพาะได้ค่าเท่ากับ 1,760 กก./ตร.ซม. ในส่วนของการวิเคราะห์ไฟไนท์อีลิเมนต์ทางพลศาสตร์ การสันสะเทือนที่เกิดจากการจราจรบริเวณใกล้เคียงกับองค์พระปฐมเจดีย์ ไม่มีผลที่เป็นนัยสำคัญต่อความมั่นคงขององค์พระปฐมเจดีย์ แต่แรงดึงที่เกิดขึ้นจากการโยกตัวของปล้องโฉนเนื่องจาก การสันสะเทือนอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้จุดอ่อนบริเวณปล้องโฉนเกิดการแตกร้าวและสามารถขยายตัวไปยังบริเวณใกล้เคียงจนทำให้อายุขององค์พระปฐมเจดีย์สั้นลงเรื่อยๆ

สุดชาย (2543) ได้ทำการศึกษาถึงความสามารถในการรับแรงของอิฐโบราณและอิฐที่ใช้ในการบูรณะโบราณสถาน เป็นตัวอย่างทดสอบจำนวน 9 แห่ง ได้แก่อิฐโบราณที่เก็บตัวอย่างมาจากแหล่งโบราณสถานในเขตจังหวัดพระนครศรีอยุธยา 8 แห่ง และอิฐที่มีการผลิตในปัจจุบันที่บ้านลุมพลี จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 1 แห่ง แล้วนำผลการทดสอบไปวิเคราะห์โครงสร้างเจดีย์ประธานโบราณสถานวัดกุฎีดาวเป็นกรณีศึกษา จากการทดสอบอิฐตัวอย่างพบว่ากำลังรับแรงอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของอิฐตัวอย่างขนาดประมาณ  $5 \times 5 \times 5$  เซนติเมตร ทั้ง 9 แห่ง มีค่าใกล้เคียงกัน เฉลี่ย 43 - 46 กก./ตร.ซม. ซึ่งไม่ขึ้นกับเวลาดังภาพที่ 2.24 นอกจากนั้น จากการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของอิฐที่มีอายุตั้งแต่ 1 ถึง 430 ปี พบว่าอิฐที่อยู่ในมีคุณสมบัติค่อนข้างคงที่ แต่อิฐที่อยู่นอกแสดงให้เห็นถึงลักษณะของการเสื่อมสภาพ ในส่วนของการวิเคราะห์โครงสร้างเจดีย์ประธานของวัดกุฎีดาว เพื่อศึกษาถึงการกระจายหน่วยแรงเนื่องจากน้ำหนักขององค์เจดีย์ในกรณีที่ไม่มีการต่อเติมองค์ระฆังและปล้องโฉนพบว่า หน่วยแรงที่เกิดขึ้นกับองค์เจดีย์ทั้งหน่วยแรงในแนวตั้งและหน่วยแรงในแนวราบเป็นหน่วยแรงอัด โดยมีหน่วยแรงอัดสูงสุดบริเวณฐาน และหน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นมีค่าไม่เกินกำลังรับแรงอัดของอิฐ จากนั้นได้ทำการต่อเติมโครงสร้างส่วนบนขององค์เจดีย์ตามรูปแบบสันนิษฐานแล้ววิเคราะห์พบว่า หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในแนวตั้งเป็นหน่วยแรงอัด มีค่าสูงสุดบริเวณฐาน และไม่เกินกำลังรับแรงอัดของอิฐ แต่จะเกิดหน่วยแรงดึงในแนวราบบริเวณส่วนบนที่ต่อเติมและบริเวณฐาน ซึ่งหน่วยแรงดึงที่เกิดมีขนาดไม่มากนัก แต่อาจทำให้องค์เจดีย์เริ่มแตกร้าว โดยเฉพาะบริเวณตำแหน่งรอยต่อระหว่างอิฐกับปูนก่อ



ภาพที่ 2.24 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุและกำลังรับแรงอัดของอิฐจากแหล่งต่างๆ ในเขตจังหวัดพระนครศรีอยุธยา (สุดชาย, 2543)

อดิษฐ์ (2544) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทางจลนศาสตร์ และคุณสมบัติวัสดุของโครงสร้างโบราณสถาน โดยศึกษาองค์เจดีย์วัดกุฎีดาว อุทยานประวัติศาสตร์กรุงศรีอยุธยา แล้วทำการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้การบูรณะองค์เจดีย์ จากการศึกษาพบว่าการทดสอบของอิฐได้ค่าต่างๆ ดังนี้

โมดูลัสยืดหยุ่น	=	30,800	กก./ชม. <sup>2</sup>
กำลังรับแรงอัด	=	40	กก./ชม. <sup>2</sup>
อัตราส่วนปัวซอง	=	0.21	
โมดูลัสของแรงเฉือน	=	12,727.27	กก./ชม. <sup>2</sup>

ณัฐยา (2550) ได้ศึกษาถึงพฤติกรรมภายใต้แรงสถิต ของโบราณสถานอิฐก่อ องค์เจดีย์วัดชัยมงคล จังหวัดพระนครศรีอยุธยา โดยทำการสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ภายใต้สมมุติฐานว่าโครงสร้างอยู่ในสภาพสมบูรณ์และมีความต่อเนื่องกันระหว่างก้อนอิฐและปูนทราย จากการวิเคราะห์โครงสร้างเจดีย์ภายใต้น้ำหนักตัวเองพบว่า หน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นสูงสุดในแนวตั้ง เท่ากับ 3.5 กก/ชม<sup>2</sup> ที่บริเวณกึ่งกลางฐานองค์เจดีย์ ซึ่งมีค่าไม่เกินค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐก่อ (40 กก/ชม<sup>2</sup>) และเกิดหน่วยแรงดึงสูงสุดในแนวราบบริเวณฐานรอบองค์เจดีย์เท่ากับ 0.32 กก/ชม<sup>2</sup>

สราวุธ และสัญชัย (2550) ได้ทำการเก็บข้อมูลเชิงวิศวกรรมของเจดีย์ในเขตเมืองเก่าเชียงใหม่ โดยเก็บข้อมูลทางกายภาพของเจดีย์ ได้แก่ ขนาดความกว้างฐาน ความสูง ประวัติความเป็นมา ลักษณะรูปพรรณสัณฐาน ลักษณะโครงสร้าง และวัสดุก่อ พื้นที่ทำการสำรวจคือบริเวณในคูเมือง

เชียงใหม่ ได้ข้อมูลทั้งสิ้น 34 วัด และได้สร้างแบบจำลอง 3 มิติขึ้น ทำให้ทราบถึงขนาดและสัดส่วนของเจดีย์ จากการสำรวจพบว่า เจดีย์ส่วนมากมีลักษณะทางกายภาพที่คล้ายกัน แต่ต่างกันที่ขนาดและรายละเอียดที่ใช้ประดับองค์เจดีย์ ส่วนขนาดความกว้างฐานมีค่าอยู่ระหว่าง 8-20 เมตร ความสูงอยู่ระหว่าง 11-35 เมตร และจากการเปรียบเทียบขนาดของเจดีย์ พบว่าเจดีย์ในยุคแรกๆ จะมีขนาดใหญ่กว่าเจดีย์ในยุคหลัง

Kaushik et al. (2007) ได้ศึกษาพฤติกรรมความเค้น - ความเครียดในการรับแรงอัดแกนเดียว และคุณสมบัติอื่นๆ ของอิฐ มอร์ตาร์ และอิฐก่อ โดยทำการเตรียมตัวอย่างอิฐที่ได้มาจากโรงงาน 4 แห่ง มอร์ตาร์ที่ทำจากส่วนผสมที่ต่างกัน 3 รูปแบบ และปริซึมอิฐก่อจากนั้นทำการทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างเพื่อดูพฤติกรรมความเค้น - ความเครียด แล้วทำการวิเคราะห์หาสมการการประมาณค่ากำลังของปริซึมอิฐก่อด้วยวิธีวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น จากผลการศึกษาพบว่ากราฟความเค้น - ความเครียดที่ได้มาจากการทดสอบอิฐ มอร์ตาร์ และปริซึมอิฐก่อมีความสอดคล้องกัน ในส่วนของ การวิเคราะห์หาสมการแสดงดังสมการที่ 2.19 ซึ่งวิเคราะห์หาค่าประมาณกำลังของปริซึมอิฐก่อโดยใช้สมการดังกล่าวสามารถใช้ประมาณได้ดีสำหรับปริซึมที่ทำจากอิฐที่มีความแข็งแรงน้อยถึงปานกลาง

$$f'_m = 0.63 f_b^{0.49} f_j^{0.32} \quad (2.19)$$

โดยที่  $f'_m$  = ผลการทดสอบกำลังอัดของปริซึม  
 $f_b$  = ผลการทดสอบกำลังอัดของอิฐ  
 $f_j$  = ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์

กนกวรรณ (2553) ได้ศึกษาถึงพฤติกรรมขององค์เจดีย์ในเมืองเชียงใหม่ในการรับแรงสถิตและแรงแผ่นดินไหว ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ โดยเลือกตัวแทนองค์เจดีย์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ รวม 3 องค์เจดีย์ ได้แก่ องค์เจดีย์วัดคูมอ้งค์เชิงคอยสุเทพ องค์เจดีย์วัดโลกโมฬี และองค์เจดีย์วัดหัวข่วง และสมมุติให้แรงแผ่นดินไหวมีค่าอัตราเร่งสูงสุดของพื้นดินเท่ากับ 0.28 ของแรงโน้มถ่วงของโลก (g) กระทำในแนวนอน จากนั้นวิเคราะห์แบบจำลองภายใต้น้ำหนักตัวเองและแรงแผ่นดินไหว ภายใต้สมมุติฐานที่ว่า โครงสร้างอยู่ในสภาพสมบูรณ์ และฐานรากไม่มีการเคลื่อนไหว ซึ่งจากการวิเคราะห์แรงสถิตพบว่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นส่วนมากเป็นหน่วยแรงอัด เกิดบริเวณผิวนอกตอนกลางเจดีย์ และส่วนที่เป็นคอคอดของเจดีย์ โดยค่าสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าไม่เกินค่ากำลังอัดประลัยของอิฐก่อ จึงถือได้ว่าโครงสร้างยังอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัย ส่วนหน่วยแรงดึงเกิดเพียงเล็กน้อยที่ผิวนอกของเจดีย์ ในการวิเคราะห์การรับแรงแผ่นดินไหวพบว่า องค์เจดีย์ทั้ง 3 รูปทรง จะเกิดความเสียหายที่ส่วนยอดก่อนบริเวณอื่นๆ เนื่องจาก โครงสร้างเกิดการสั่นไหวมากที่สุด และหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นมีค่าเกินหน่วย

แรงที่ยอมให้ของวัสดุ สำหรับองค์เจดีย์วัดโลกโมฬีและองค์เจดีย์วัดหัวขวงเกิดแรงอัดมากที่ส่วนตอนกลางของเจดีย์ ซึ่งบริเวณดังกล่าวมีแนวโน้มที่สามารถเกิดความเสียหายเนื่องจากแรงอัด ส่วนองค์เจดีย์วัดอุโมงค์เกิดที่แทนบัลลังก์ บริเวณที่รองรับปล้อง โฉนและปลียอด ดังนั้นส่วนที่องค์เจดีย์มีความอ่อนแอมากที่สุดคือบริเวณส่วนยอดขององค์เจดีย์ และในบริเวณที่มีการเปลี่ยนขนาดของหน้าตัดอย่างทันที

บัญชา (2553) ได้ศึกษาการทำนายการเสื่อมสภาพในระยะแรกๆของโครงสร้างโบราณสถาน ที่สร้างด้วยอิฐดินเผาด้วยวิธีการทดสอบแบบเร่งกรดกำมะถัน โดยศึกษาการเสื่อมสภาพ และสร้างสมการที่ใช้ในการคาดคะเนการกัดกร่อนของโครงสร้างโบราณสถานที่ถูกทำลายด้วยกรดกำมะถัน ความเข้มข้นร้อยละ 3 จากการพิจารณาค่ากำลังอัด และอัตราการกัดกร่อนจากการสูญเสียน้ำหนักของวัสดุอิฐ มอร์ตาร์ และปริซึมในระยะเวลา 24 สัปดาห์ ซึ่งการทดสอบจะแบ่งเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ การเสื่อมสภาพแบบธรรมชาติ การเสื่อมสภาพแบบเร่งปฏิกิริยา และการเสื่อมสภาพแบบธรรมชาติสลับกับการเสื่อมสภาพแบบเร่งปฏิกิริยา จากการศึกษาพบว่า การทดสอบกำลังรับแรงอัดตามการเสื่อมสภาพแบบธรรมชาติของวัสดุมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น ค่ากำลังอัดของปริซึมที่ทดสอบได้มีค่าอยู่ระหว่างกลางของอิฐกับมอร์ตาร์ การทดสอบกำลังอัดตามการเสื่อมสภาพแบบเร่งปฏิกิริยาพบว่าในช่วงแรกวัสดุจะสามารถรับกำลังอัดได้เพิ่มขึ้นแต่ในระยะยาวมีแนวโน้มของกำลังอัดที่ลดลงเรื่อยๆ ซึ่งสมการทั้งหมดที่ได้จากการทดสอบสามารถใช้ในการพยากรณ์หรือทำนายการเสื่อมสภาพของวัสดุในระยะแรกได้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
Copyright © by Chiang Mai University  
All rights reserved