



กรณีศึกษาค่ากำลังอัดของคอนกรีต ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก  
และขนาดหน้าตัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก สำหรับอาคารชุดในเขตกรุงเทพมหานคร  
Case Study of the Compressive Strength, Concrete Covering  
and Sizes of Reinforced Concrete Columns for Condominium in Bangkok

เทอดศักดิ์ สายสุทธิ

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ 19/1 ถนนเพชรเกษม แขวงหนองค้างพลู เขตหนองแขม กทม. 10160

E-mail: Terdsaka@sau.ac.th, Terdsaka@hotmail.com

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาค่ากำลังอัดของคอนกรีต, ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กและขนาดหน้าตัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กสำหรับอาคารชุดหรือคอนโดมิเนียมในเขตกรุงเทพมหานคร ซึ่งมีการควบคุมคุณภาพงานก่อสร้างเป็นอย่างดี โดยใช้เครื่องมือทดสอบแบบไม่ทำลายประเภท PUNDIT เพื่อหาค่ากำลังอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ใช้เครื่องมือ Micro Covermeter เพื่อหาค่าระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กและใช้เครื่องมือ Accutap2 เพื่อหาค่าความสูงและขนาดหน้าตัดของเสาทั้งสี่ด้านของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า จากการวิจัยพบว่า “ค่ากำลังอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กในแต่ละต้นเสาที่อ่อนล่างสุดมีค่ามากกว่าเสาที่อ่อนกลางร้อยละ 9.80 และเสาที่อ่อนบนสุดมีค่าต่ำกว่าเสาที่อ่อนกลางร้อยละ 1.93 และค่ากำลังอัดคอนกรีตของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กในงานก่อสร้างจริงโดยเฉลี่ยมีค่าสูงกว่าในแบบก่อสร้างร้อยละ 11.73 สำหรับระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กในงานก่อสร้างจริงตลอดความสูงของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กมีค่าโดยเฉลี่ยต่ำกว่าค่าที่กำหนดไว้ในแบบก่อสร้างร้อยละ 1 และขนาดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กทั้งสี่ด้านในงานก่อสร้างจริงตลอดความสูงของเสามีค่าโดยเฉลี่ยขนาดใหญ่กว่าค่าที่ใช้ในการออกแบบร้อยละ 2.32 ตามลำดับ”

**คำสำคัญ:** การทดสอบแบบไม่ทำลายประเภท PUNDIT, กำลังอัดของคอนกรีต, ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก, ขนาดหน้าตัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก และอาคารชุดหรือคอนโดมิเนียม.

### Abstract

This research studies the compressive strength of concrete, concrete covering and size of reinforced concrete columns and condominium in Bangkok. The construction quality control is very good. Using PUNDIT non-destructive testing tools to determine the compressive strength of reinforced concrete columns. Use the Micro Covermeter tool to find the concrete covering of the columns and use the Accutap2 tool to find the height and cross-sectional dimensions of the four columns of rectangular reinforced concrete columns. According to studies, it has been found that "The strength of reinforced concrete columns in the post lower end was greater than the column pieces of the percentage of 9.80 and column pieces on the lower column pieces central percent

to 1.93 and the compressive strength of concrete columns reinforced concrete in construction, the average was higher than the 11.73 percent for building construction concrete covering virtually the entire height of the reinforced concrete columns were very average, for concrete covering in steel construction virtually the entire height of the reinforced concrete columns are averaged under a predetermined value in construction by 1 percent and the size of the reinforced concrete columns on four sides in the actual construction throughout the height of the columns precious, the average larger than those used in the design 2.32 percent, respectively."

**Keywords:** PUNDIT Non-Destructive Testing, Compressive Strength, Concrete Covering, Sizes of Reinforced Concrete Column and Condominium.

## 1. บทนำ

1.1. ที่มาและความสำคัญของปัญหา ในปัจจุบันได้มีการก่อสร้างอาคารสูงหรือตึกสูงในเขตกรุงเทพมหานคร และปริมณฑลมากขึ้น โดยจะทำเป็นอาคารสำนักงาน อาคารที่จอดรถยนต์ อาคารพาณิชย์และอาคารอยู่อาศัยรวม หรืออาคารชุดหรือคอนโดมิเนียม เป็นต้น ซึ่งอาคารสูงเหล่านั้นส่วนมากนั้นมักจะใช้โครงสร้างอาคารเป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete Structure) เนื่องจากมีราคาถูกกว่าอาคารที่ใช้โครงสร้างเหล็กรูปพรรณ (Steel Structure) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการควบคุมคุณภาพของคอนกรีตให้เป็นไปตามที่ออกแบบไว้ ในทางปฏิบัติ การเทคอนกรีตในแต่ละครั้งคราวละหลายๆ นั้น จะต้องมีการเก็บแท่งคอนกรีตตัวอย่าง (Sampling) ไว้เสมอ ซึ่งอาจจะทำเป็นรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์หรือรูปทรงกระบอก (Cube or Cylinder) ก็ได้โดยขึ้นอยู่กับมาตรฐานที่ใช้อ้างอิง เมื่อคอนกรีตตัวอย่างได้อายุครบตามกำหนดแล้ว เช่น อายุครบ 28 วัน เป็นต้น จึงทำการทดสอบแบบทำลาย (Destructive Test) เพื่อหาค่าการรับกำลังอัดประลัยของคอนกรีต (Ultimate Strength of Concrete) ซึ่งจะใช้เป็นตัวแทนคอนกรีตโครงสร้างในงานก่อสร้างชิ้นนั้นๆ ทำให้ค่าใช้จ่ายสูงขึ้นและเสียเวลาค่อนข้างมาก ดังนั้นการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Test; NDT) จึงมีบทบาทเข้ามาเกี่ยวข้องมากขึ้น เช่น วิธีการนับจำนวนครั้งของการสะท้อน (Rebound Hammer Method; RHM or Schmidt Hammer Method; SHM) วิธีการใช้คลื่นอัลตราโซนิกหรือคลื่นความถี่สูงแบบเรโซแนนซ์ (Ultrasonic Resonance Method; URM) วิธีการใช้ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกแบบชีพจรหรือแบบพัลส์หรือแบบสั้นเป็นจังหวะ (Ultrasonic Pulse Velocity Method; UPV หรือ UPVM) เป็นต้น โดยเฉพาะวิธี UPV นี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมาก เพราะสามารถประเมินค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตค่อนข้างแม่นยำและเป็นที่ยอมรับโดยทั่วไป

### 1.2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย มีดังนี้คือ

1.2.1. เพื่อหาค่าความสัมพันธ์ของค่าการรับกำลังอัดประลัยของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กและขนาดหน้าตัดตามความสูงของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก สำหรับอาคารชุดในเขตกรุงเทพมหานคร

1.2.2. เพื่อหาค่าความเบี่ยงเบนของระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กและขนาดหน้าตัดของเสาที่มีผลต่อค่าการรับกำลังอัดประลัยของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก สำหรับอาคารชุดในเขตกรุงเทพมหานคร

1.2.3. เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและการทำงานในภาคสนามของวิศวกรรุ่นใหม่ต่อไป

### 1.3. ขอบเขตของการวิจัย มีดังนี้คือ

1.3.1. ทำการศึกษาจากอาคารชุดหรือคอนโดมิเนียม ที่มีความสูงมากกว่า 20 ชั้น จำนวน 1 หลังในเขตกรุงเทพมหานคร ซึ่งมีจำนวนเสาคอนกรีตเสริมเหล็กรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าไม่น้อยกว่า 110 ต้น

1.3.2. หาค่ารับกำลังอัดประลัยของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยใช้วิธีการทดสอบแบบไม่ทำลายประเภทเครื่องมือ PUNDIT (Non-Destructive Testing Method; NDT; PUNDIT) และวิธี Direct Method เท่านั้น

1.3.3. หาค่าระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของเสาแต่ละต้นทั้งสี่ด้าน (ตามที่กำหนดไว้ในแบบแปลน) ตามความสูงของเสาในแต่ละชั้นสำหรับอาคารชุดในเขตกรุงเทพมหานครและใช้เครื่องมือ Micro Covermeter เท่านั้น

1.3.4. หาค่าขนาดหน้าตัดของเสาแต่ละต้นทั้งสี่ด้าน (ตามที่กำหนดไว้ในแบบแปลน) ตามความสูงของเสาในแต่ละชั้น สำหรับอาคารชุดในเขตกรุงเทพมหานคร

1.3.5. เสาที่จะทำการทดสอบ (ตามที่กำหนดไว้ในแบบแปลน) จะต้องเป็นเสาคอนกรีตเสริมเหล็กรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ยังไม่ฉาบปูนเท่านั้น

1.3.6. หาค่าขนาดหน้าตัดและความสูงของเสาแต่ละต้นตามความสูงของเสาในแต่ละชั้นนั้นให้ใช้เครื่องมือวัดแบบ AccuTape 2 โดยมีความละเอียด  $\pm 1\%$  และตลับเมตรที่ได้มาตรฐานเท่านั้นโดยมีความละเอียดมากถึง 1 มม.

### 1.4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ มีดังนี้คือ

1.4.1. ทำให้ทราบค่าการประเมินกำลังอัดประลัยของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธี NDT ประเภท PUNDIT สำหรับอาคารชุดในเขตกรุงเทพมหานคร

1.4.2. ทำให้ทราบค่าระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กและขนาดหน้าตัดตามความสูงของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กสำหรับอาคารชุดในเขตกรุงเทพมหานคร

1.4.3. ทำให้ทราบค่าความเปียงเบนและความสัมพันธ์ของค่าการรับกำลังอัดประลัยของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กและขนาดหน้าตัดตามความสูงของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก สำหรับอาคารชุดในเขตกรุงเทพมหานคร

1.4.4. ทำให้ทราบคุณภาพของการทำงานคอนกรีตเสริมเหล็กในภาคสนามของผู้รับเหมาก่อสร้างและผู้ควบคุมงานก่อสร้างรวมทั้งบริษัทที่ปรึกษาสำหรับอาคารชุดในเขตกรุงเทพมหานคร

1.4.5. ทำให้ได้ข้อมูลพื้นฐานเพื่อใช้ในการคัดเลือกผู้รับเหมาก่อสร้าง ผู้ควบคุมงานก่อสร้างและรวมทั้งบริษัทที่ปรึกษาก่อสร้างด้วย

## 2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1. ทฤษฎี ตามมาตรฐาน ACI 228.2R-98 ซึ่งรายงานโดยคณะกรรมการ ACI 228 (ACI Committee 228) ได้สรุปวิธีการตรวจสอบของการทดสอบแบบไม่ทำลายสำหรับการประเมินของคอนกรีตในโครงสร้าง (Non-Destructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures) แบ่งออกเป็น 8 วิธีการคือ (1) วิธีการตรวจสอบด้วยภาพภายนอก (Visual Inspection) (2) วิธีการใช้คลื่นความเค้นสำหรับโครงสร้าง (Stress-Wave Methods For Structures; SWMFS) (3) วิธีการใช้คลื่นความเค้นสำหรับฐานรากลึก (Stress-Wave Methods for

Deep Foundations) (4) วิธีการใช้นิวเคลียร์ (Nuclear Methods) (5) วิธีการใช้ไฟฟ้าและแม่เหล็ก (Magnetic And Electrical Methods) (6) วิธีการทะลุทะลวง (Penetrability Methods) (7) วิธีการใช้กล้องอินฟราเรด (Infrared Thermography) และ (8) วิธีการใช้เรดาร์ (Radar) โดยเฉพาะวิธีที่ 2 ซึ่งเป็นวิธีการใช้คลื่นความเค้นสำหรับโครงสร้าง (SWMFS) ที่สามารถแบ่งย่อยออกเป็น 4 วิธีการย่อยคือ (1) วิธีการส่งผ่านของคลื่นอัลตราโซนิกหรือคลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonic Through Transmission Method) (2) วิธีการสะท้อนของคลื่นอัลตราโซนิกหรือคลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonic-Echo Method; UEM) (3) วิธีการอัดและสะท้อนคลื่นเสียง (Impact-Echo Method) และ (4) การวิเคราะห์สเปกตรัมของคลื่นพื้นผิว (Spectral Analysis of Surface Waves; SASW) และวิธีการย่อยที่ 2 วิธีการสะท้อนของคลื่นอัลตราโซนิกหรือวิธีการสะท้อนของคลื่นเสียงความถี่สูงหรือ UEM เป็นวิธีการหนึ่งซึ่งมีข้อดีคือ (1) สามารถหาความลึกของจุดที่เสียหายหรือจุดที่บกพร่องได้ทันที (2) โดยตัวแปลงส่งสัญญาณและตัวแปลงรับสัญญาณอาจจะ (ก) เป็นชุดเดียวกัน เรียกว่า วิธีการสะท้อนของคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic Pulse-Echo Method; UPEM.) และ (ข) เป็นคนละชุดกัน เรียกว่า วิธีตั้งเสียงและจับคลื่นอัลตราโซนิก; Ultrasonic Pitch-Catch Method; UPCM) แต่มีข้อจำกัดอยู่เหมือนกัน (1) ความหนาขององค์อาคารคอนกรีตที่ใช้งานมีข้อจำกัดพอสมควร (2) ในเชิงพาณิชย์เครื่องมือและอุปกรณ์ยังคงมีราคาแพง แต่อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ได้รับการพัฒนาและนิยมใช้สำหรับการทดสอบโลหะ (Metals Testing) และเป็นที่รู้จักกันเป็นวิธีคลื่นสะท้อน (Pulse-Echo Method) ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1960<sup>[5]</sup> เป็นต้นมา จำนวนการทดลองวิธีการสะท้อนของคลื่นอัลตราโซนิกในคอนกรีตยังคงมีค่อนข้างน้อย ซึ่งต่อมาได้รับการพัฒนาใช้กับงานคอนกรีตมากขึ้น (Bradfield and Gatfield 1964; Howkins, 1968) การประยุกต์ใช้งานที่ประสบความสำเร็จ ได้แก่ การวัดความหนาและการตรวจสอบความบกพร่องของงานแผ่นพื้นบาง (Thin Slabs) งานทางเท้า (Pavements) และงานผนัง (Walls) (Mailer, 1972; Alexander and Thornton, 1989) ดังนั้นการวิจัยในครั้งนี้จึงได้ใช้วิธีการสะท้อนของคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic Pulse-Echo Method; UPEM.) หรือวิธีการใช้ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกแบบซีพจรหรือแบบสั้นเป็นจังหวะหรือแบบพัลส์ (UPVM) ดังกล่าวมาแล้ว

เครื่องมือ PUNDIT เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบหาค่ากำลังอัดของคอนกรีตโดยวิธีการใช้ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกสั้นเป็นจังหวะโดยใช้ความถี่ของคลื่นระหว่าง 20 kHz. ถึง 1 MHz. ด้วยตัวแปลงส่งสัญญาณ (Transmitting Transducer) ซึ่งวางอยู่บนผิวด้านหน้าที่เรียบและตัวแปลงรับสัญญาณ (Receiving Transducer) วางอยู่ตรงข้ามบนด้านหน้าที่เรียบอีกด้านหนึ่ง คลื่นนี้จะถูกส่งไปโดยตรง (Direct) ผ่านความหนาของคอนกรีตตัวอย่าง (Concrete Sample) สิ่งที่ได้ก็คือ เวลา (Time) ที่คลื่นอัลตราโซนิกเดินทางผ่านความหนาของคอนกรีตตัวอย่าง เครื่องมือและอุปกรณ์ดังกล่าวที่ทำการทดสอบต้องได้ตามมาตรฐาน ASTM C 597 ในการทดสอบนั้นตัวแปลงส่งสัญญาณและตัวแปลงรับสัญญาณจะต้องวางให้สนิทกับผิวหน้าของคอนกรีตให้มากที่สุด ซึ่งอาจทำได้โดยการใช้เจล (Gel) หรือจาระบี (Grease) ที่ไม่มีผลกระทบต่อ การส่งและรับสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิก<sup>[5]</sup> ตัวแปลงสัญญาณเสียงสะท้อนในงานทั่วไปจะใช้คลื่นอัลตราโซนิกที่ความถี่ ~50 kHz เท่านั้น ส่วนกรณีที่เป็นงานคอนกรีตหนา (Mass Concrete) จะใช้คลื่นความถี่ ~20 kHz และบางครั้งอาจจะใช้ความถี่มากกว่า 100 kHz สำหรับองค์อาคารที่บางกว่า (Thinner Members) เช่น แผ่นพื้นบางหรือผนังบาง (Plate and Shell or Thin Wall) เพราะจะสามารถวัดระยะเวลาที่คลื่นเดินทางได้แม่นยำ (Accurate) มากกว่า แต่ในปัจจุบันที่นิยมใช้มากที่สุดก็คือ ที่คลื่นความถี่ 50

kHz ซึ่งจะมีความเหมาะสมกับการใช้ในงานคอนกรีตมากที่สุด คำว่า “PUNDIT” ย่อมาจาก Portable Ultrasonic Nondestructive Digital Indicating Tester

## 2.2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ในประเทศไทยนั้น<sup>[4]</sup> ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับคลื่นอัลตราโซนิกดังนี้คือ

2.2.1 ในปี 2525 โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (KMUTT) ได้ศึกษาเรื่อง “การประเมินค่ากำลังอัดของคอนกรีตโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก” ซึ่งพบว่า ค่ากำลังอัดของคอนกรีตขึ้นอยู่กับความเร็วคลื่นเสียงที่ผ่านเนื้อคอนกรีต แสดงในรูปสมการ 2 สมการดังนี้ ประเภทที่ 1 การวัดความเร็วคลื่นเสียงของคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ที่อายุ 1-7, 14, 28 และ 56 วัน จะได้สมการ  $y = 0.7461e^{0.00122x}$  และประเภทที่ 2 การวัดความเร็วคลื่นเสียงของคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ที่อายุมากกว่า 56 วัน จะได้สมการ  $y = 0.6094e^{0.00128x}$  เมื่อค่า y เป็นค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (กก/ซม<sup>2</sup>) และ x เป็นความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิก (เมตร/วินาที)

2.2.2 ในปี 2537 โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (KMUTNB) ได้ศึกษาเรื่อง “ค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการรับกำลังของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กสำหรับอาคารสูงประเภทสำนักงานในเขตกรุงเทพมหานคร” ซึ่งเป็นงานวิจัยที่มีการประยุกต์คลื่นอัลตราโซนิกไปใช้กับงานโครงสร้างจริงในภาคสนามโดยใช้วิธีการทดสอบแบบไม่ทำลายประเภท PUNDIT จำนวน 5 หลัง จำนวนเสา 632 ต้น จำนวนข้อมูลมากกว่า 28,000 ข้อมูล ซึ่งพบว่า กำลังอัดโดยเฉลี่ยของคอนกรีตที่ส่วนบนของเสาจะมีค่าต่ำกว่าส่วนล่างประมาณร้อยละ 5 แต่ค่าที่ได้ยังสูงกว่าค่าที่ออกแบบไว้ ส่วนความคลาดเคลื่อนของระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กยื่นตลอดความสูงของเสาเป็นไปในทางบวกทุกด้านโดยเฉลี่ยร้อยละ 19 ของระยะที่ออกแบบไว้และความคลาดเคลื่อนของขนาดเสาตลอดความสูงของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กนี้เป็นไปในทางบวกเช่นเดียวกันทุกด้านเท่ากับร้อยละ 1

ในต่างประเทศได้การศึกษาและทำการวิจัยเกี่ยวกับความเร็วของคลื่นเสียงในคอนกรีตเป็นครั้งแรกที่ประเทศสหรัฐอเมริกา<sup>[5]</sup> เมื่อปี ค.ศ. 1940 โดยได้ทำการศึกษาและวิจัยพบว่า “ความเร็วของคลื่นเสียงขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของการยืดหยุ่นของคอนกรีต ไม่ได้ขึ้นอยู่กับรูปทรงหรือรูปร่างของคอนกรีต” ต่อมาในปี ค.ศ. 1943 ที่ประเทศฝรั่งเศสได้มีการพัฒนาเครื่องมือที่ใช้วัดความเร็วคลื่นเสียงประเภท Repetitive Mechanical Pulse และอีก 2 ปีต่อมา ค.ศ. 1945 นักประดิษฐ์ชาวแคนาดาและชาวอังกฤษได้พัฒนาเครื่องมือประเภท Electro Acoustic Transducer แทนเครื่องมือชนิดเดิม ซึ่งสามารถควบคุมชนิดของคลื่นและความถี่ของคลื่นเสียงได้ดีกว่า นับตั้งแต่นั้นมาจึงได้มีการพัฒนากันอย่างต่อเนื่องจนสามารถควบคุมคลื่นเสียงอุตราโซนิกให้มีความถี่อยู่ระหว่าง 50 ถึง 150 ครั้งต่อวินาทีได้ อีกทั้งยังสามารถสร้างและวัดค่าออกมาเป็นตัวเลข (Digital) ได้โดยใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ ทำให้เครื่องมือมีขนาดกะทัดรัด น้ำหนักเบาและคุณภาพดี เหมาะกับการนำมาใช้ในงานภาคสนามได้เป็นอย่างดี แต่อย่างไรก็ตามเครื่องมือชนิดนี้ก็ยังมียุคใหม่ เครื่องมือหลายรูปแบบที่มีการพัฒนาในเวลาต่อมา เช่น Sonic-Ultrasonic Techniques, Sonic Vibration, Eddy Sonic Vibration, Acoustic Emission, Pulse-Echo Ultrasonic, Transmission Ultrasonic, Resonance Ultrasonic, Surface - Wave Ultrasonic, Critical Angle Ultrasonic และ Ultrasonic Pulse Velocity ซึ่งนิยมใช้มากในปัจจุบัน

### 2.3. คำจำกัดความบางประการที่ควรทราบ

2.3.1. อาคารสูง หมายถึง อาคารที่บุคคลอาจเข้าอยู่หรือเข้าใช้สอยได้ที่มีความสูงตั้งแต่ 23 เมตรขึ้นไป การวัดความสูงของอาคารให้วัดจากระดับพื้นดินที่ก่อสร้างถึงพื้นดาดฟ้า สำหรับอาคารทรงจั่วหรือปั้นหยาให้วัดจากระดับพื้นดินที่ก่อสร้างถึงยอดผนังของชั้นสูงสุด<sup>[1]</sup>

2.3.2. อาคารชุดหรือคอนโดมิเนียม (Condominium) หมายถึง ที่อยู่อาศัยที่เจ้าของห้องชุดจะต้องแบ่งปันกรรมสิทธิ์หรือความเป็นเจ้าของร่วมกับเจ้าของห้องชุดอื่นๆ ในพื้นที่ส่วนกลาง เช่น ทางเดิน บริเวณห้องโถงบันได ลิฟต์ โรงจอดรถ สระว่ายน้ำ สนามเด็กเล่น เป็นต้น ซึ่งเจ้าของห้องทุกคนจะเป็นเจ้าของร่วมกันตามกฎหมาย<sup>[3]</sup> หรืออาคารอยู่อาศัยรวม หมายถึง อาคารหรือส่วนใดส่วนหนึ่งของอาคารที่ใช้เป็นที่อยู่อาศัยสำหรับหลายครอบครัว โดยแบ่งออกเป็นหน่วยแยกจากกันสำหรับแต่ละครอบครัว<sup>[1]</sup>

2.3.3. กำลังของคอนกรีต (Strength of Concrete) หมายถึง กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (Ultimate Strength of Concrete) โดยมีหน่วยเป็นน้ำหนักต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ เช่น  $N/mm^2$ ,  $kg/cm^2$  หรือ  $กค/ซม^2$  เป็นต้น

2.3.4. ระยะเวลาคอนกรีตหุ้มเหล็กแกนเสา (Concrete Covering of Main Steel) หมายถึง ระยะเวลาความหนาของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมหลัก (Main Steel) ไม่ใช่หุ้มเหล็กปลอกตั้งนั้นตามหลักการจะมีค่ามากกว่า 25 มม. เสมอ มีหน่วยเป็น มม. หรือ mm. เป็นต้น

2.3.5. ขนาดของเสา (Sizes of Columns) หมายถึง ขนาดหรือระยะความกว้างหรือความหนาของเสา คอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวัดจากด้านหนึ่งไปอีกด้านหนึ่งในทางตรงข้ามในแนวราบหรือแนวระดับ (Horizontal or Level) มีหน่วยเป็น มม. หรือ mm. เป็นต้น

2.3.6. ความสูงของเสา หมายถึง ขนาดหรือระยะความยาวของเสา คอนกรีตเสริมเหล็กในแนวตั้ง (Vertical) มีหน่วยเป็น มม. หรือ mm. เป็นต้น

### 3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ ได้แก่ (1) ศึกษาวิธีการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์และการตรวจสอบความแม่นยำของเครื่องมือแต่ละชนิดที่ใช้ในการวิจัย เช่น การใช้เครื่องมือ PUNDIT, เครื่องมือ Micro Covermeter, เครื่องมือวัดแบบ AccuTape 2 และโปรแกรมทางสถิติ SPSS/PC<sup>+</sup> เป็นต้น (2) ศึกษางานวิจัยทั้งต่างประเทศและในประเทศไทย พร้อมทั้งปรึกษาผู้เชี่ยวชาญทางด้านวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย (3) เลือกอาคารชุดหรืออาคารคอนโดมิเนียมใหม่ที่กำลังก่อสร้างที่มีความสูงมากกว่า 20 ชั้น จำนวน 1 แห่งย่านถนนพระราม 3 เลียบแม่น้ำเจ้าพระยาในเขตกรุงเทพมหานคร โดยเลือกอาคารที่มีบริษัทที่ปรึกษา (Consultant) เป็นหลัก โดยปกติเจ้าของอาคารจะไม่อนุญาตให้ถ่ายรูปของอาคารที่ทำการวิจัยลงในรายงานใดๆ เพราะอาจจะทำให้เกิดผลเสียหายทางธุรกิจและเศรษฐกิจ ซึ่งผู้วิจัยจะต้องรับทราบและปฏิบัติโดยเคร่งครัด (4) ศึกษาแบบแปลนชั้นต่างๆ รูปด้านหน้า รูปด้านหลัง รูปด้านข้างซ้าย รูปด้านข้างขวา รูปตัดตามขวาง รูปตัดตามยาวและขนาดของอาคารอย่างละเอียด โดยกำหนดสัญลักษณ์และเครื่องหมายให้ถูกต้อง อาคารนี้มีเสา คอนกรีตเสริมเหล็กเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยเลือกเฉพาะต้นที่ยังไม่ฉาบปูนเท่านั้น (5) การกำหนดจำนวนชั้นและจำนวนเสาในแต่ละชั้น เช่น 5C1 หมายถึง เสา คอนกรีตเสริมเหล็กชั้นที่ 5 ต้นที่ 1, 20C6 หมายถึง เสาชั้นที่ 20 ต้นที่ 6 เป็นต้น (6) การกำหนดทิศทาง

ของการวางหัวสัมผัสรับและส่งคลื่น (Transducer) ของเครื่องมือ PUNDIT Testing ให้ใช้วิธี Direct Method (7) การกำหนดด้านแต่ละด้านของเสาที่ทำการทดสอบ เช่น ด้าน A อยู่ตรงข้ามด้าน C และด้าน B อยู่ตรงข้ามด้าน D และ (8) ตรวจจับเสียงการสั่นไหวของเสาในแต่ละต้น แต่ละชั้นและแต่ละหน้าตัดตามความสูงของเสาอาคารในแต่ละชั้น ซึ่งทำให้ทราบค่าต่างๆ ในแบบการก่อสร้าง เพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่วัดในงานจริง

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ได้แก่ (1) เครื่องมือ PUNDIT ซึ่งประกอบไปด้วย ตัวเครื่อง PUNDIT หัวสัมผัสส่งคลื่นและหัวสัมผัสรับคลื่นขนาด 54 kHz. จำนวน 2 ก้อน สายไฟนำคลื่นจำนวน 2 สาย แท่งเหล็กมาตรฐานรูปทรงกระบอก (Reference Bar for Checking Zero) สายไฟหลักและคู่มือการใช้งาน รวมทั้งจาระบีหรือเจล 9000 (Conductivity Gel Echo-trace 9000) (2) เครื่องมือ Micro Covermeter เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม (Concrete Covering) ซึ่งประกอบไปด้วยตัวเครื่องมือ Micro Covermeter พร้อมถ่านอัลคาไลน์ 4 ก้อน หัวสัมผัสตรวจสอบ (Search Head) บล็อกเว้นระยะ (Spacer Block) สายไฟฟ้าที่ต่อเข้าเครื่องและคู่มือการใช้งาน (3) เครื่องมือวัดแบบ AccuTape 2 เป็นเครื่องมือวัดระยะทางทั้งแนวตั้งและแนวราบด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ช่วงระยะ 0.61 ถึง 13.00 เมตร ภายใต้อุณหภูมิ 4–38°C โดยมีค่าความละเอียด  $\pm 1\%$  โดยมีแหล่งพลังงานเป็นแบตเตอรี่ลิเทียมซึ่งมีอายุมากกว่า 10 ปี และ (4) โปรแกรมทางสถิติ SPSS/PC<sup>+</sup> (Statistical Package for the Social Science for Windows) เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลและการจัดการข้อมูลต่างๆ ทางสถิติ โดยแสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลออกมาในรูปแบบของตารางหรือแผนภูมิชนิดต่างๆ ได้ทั้ง 2 มิติ และ 3 มิติ จึงเหมาะสำหรับผู้ที่ต้องการประมวลผลข้อมูลที่ต้องการแม่นยำและรวดเร็ว

3.3 อาคารชุดที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ มีข้อมูลเบื้องต้นดังนี้ (1) อาคารชุดหรือคอนโดมิเนียมที่มิงงานโครงสร้างเสร็จมากกว่าร้อยละ 80 - 90 จำนวน 1 หลังในเขตกรุงเทพมหานคร ย่านถนนพระราม 3 เลียบแม่น้ำเจ้าพระยา โดยลักษณะของอาคารคอนโดมิเนียมนี้ เป็นรูปทรงเหลี่ยมความสูงประมาณ 30 ชั้น โดยเลือกตัวแทนของเสาในแต่ละชั้นๆ ละ 3-5 ต้นตามแบบแปลนของโครงสร้างจำนวน 20 ชั้นรวมทั้งหมด 110 ต้น (โดยการสุ่มตัวอย่างเลือกเสาต้นที่น่าสนใจในแต่ละชั้นและแต่ละโซนตามความเหมาะสม เช่น เลือกเสาบริเวณตรงกลาง ซึ่งสามารถวัดขนาดและค่าต่างๆ ได้เป็นหลัก เสาริมอาคารบางครั้งก็ไม่เลือกเนื่องจากจะต้องคำนึงถึงความปลอดภัยต่อตัวเอง บุคคลอื่นที่ร่วมงาน รวมทั้งอุปกรณ์และเครื่องมือด้วย) (2) การหาค่าการรับกำลังอัดของคอนกรีตในเสา (เสาท่อนบนสุด เสาท่อนกลาง เสาท่อนล่างสุด เสาท่อนระหว่างกลางบนและเสาท่อนระหว่างกลางล่าง) ต้นละ 5 ข้อมูลจำนวน 110 ต้น ตามความสูงของเสารวมทั้งสิ้น 550 ข้อมูล (3) การหาค่าระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กโดยใช้เครื่องมือ Micro Covermeter ทั้ง 4 ด้านจำนวน 110 ต้นๆ ละ 5 ข้อมูล ตามความสูงของเสารวมทั้งสิ้น 2,200 ข้อมูล และ (4) การวัดค่าขนาดของเสา คอนกรีตเสริมทั้ง 4 ด้านจำนวน 110 ต้นๆ ละ 5 ข้อมูล ตามความสูงของเสารวมทั้งสิ้น 2,200 ข้อมูล

## 4. ผลการวิจัยและการวิจารณ์

### 4.1 ผลการวิจัย สามารถสรุปได้ดังนี้

4.1.1. กำลังอัดคอนกรีตของเสา ค่าการรับกำลังอัดคอนกรีตโดยเฉลี่ยของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กในแต่ละต้นมีค่าสูงกว่าค่ากำลังอัดคอนกรีตที่ใช้ในการออกแบบจำนวน 110 ค่า คิดเป็นร้อยละ 98.21 และต่ำกว่าจำนวน 2 ค่า คิดเป็นร้อยละ 1.79 สำหรับค่าเฉลี่ยกำลังอัดคอนกรีตของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กในแต่ละต้นสูงกว่าค่าเฉลี่ยในเสา

ก่อนกลางจำนวน 67 ค่า คิดเป็นร้อยละ 59.82 และต่ำกว่าจำนวน 43 ค่า คิดเป็นร้อยละ 38.39 อนึ่งค่ากำลังอัดคอนกรีตโดยเฉลี่ยในแต่ละท่อนจะสูงกว่าค่าเฉลี่ยกำลังอัดคอนกรีตของเสาท่อนกลางจำนวน 338 ค่า คิดเป็นร้อยละ 60.36 [เมื่อให้  $f_c'$  เป็นค่ากำลังอัดคอนกรีต ( $N/mm^2$ );  $xf_c'$  เป็นค่าเฉลี่ยกำลังอัดคอนกรีต ( $N/mm^2$ ); Std.Dev. เป็นค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน; Avr.Std.Dev. เป็นค่าเฉลี่ยความเบี่ยงเบนมาตรฐาน] ค่าเฉลี่ยกำลังอัดคอนกรีตและค่าเฉลี่ยความเบี่ยงเบนมาตรฐานของกำลังอัดคอนกรีตของเสาในแต่ละท่อนของทุกๆ ชั้นที่ทำการทดสอบ ได้แก่

เสาท่อนบน (Top; T)	ค่า $xf_c'$ = 30.69 $N/mm^2$ ; ค่า Std. Dev. = 2.50
เสาท่อนระหว่างกลางและบน (Middle & Top; M&T)	ค่า $xf_c'$ = 31.38 $N/mm^2$ ; ค่า Std. Dev. = 2.49
เสาท่อนกลาง (Middle; M)	ค่า $xf_c'$ = 31.22 $N/mm^2$ ; ค่า Std. Dev. = 2.46
เสาท่อนระหว่างกลางและล่าง (Middle & Bottom; M&B)	ค่า $xf_c'$ = 31.97 $N/mm^2$ ; ค่า Std. Dev. = 2.57
เสาท่อนล่าง (Bottom; B)	ค่า $xf_c'$ = 34.17 $N/mm^2$ ; ค่า Std. Dev. = 3.01

กล่าวโดยสรุป (1) ค่ากำลังอัดคอนกรีตของเสาท่อนบนมีค่าต่ำสุด 30.69  $N/mm^2$  หรือ 301.07 ksc. ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่ากำลังอัดคอนกรีตที่ใช้ในการออกแบบ (280 ksc.) หรือ ค่าเฉลี่ยกำลังอัดของคอนกรีตเสาทั้งต้นมีค่าสูงกว่าค่าที่ทำการออกแบบไว้ร้อยละ =  $[(31.89 \times 9.81 \times 100) / 280] - 100 = 11.73$  หรือกำลังอัดของคอนกรีตของเสาท่อนล่างสุดมีค่า;  $f_{c_B} = 1.098f_{c_M}$ ,  $f_{c_{B\&M}} = 1.024f_{c_M}$ ,  $f_{c_M} = 1.000f_{c_M}$ ,  $f_{c_{M\&T}} = 1.005f_{c_M}$  และ  $f_{c_T} = 0.981f_{c_M}$  เมื่อค่า  $f_{c_B}$ ,  $f_{c_{M\&T}}$ ,  $f_{c_M}$ ,  $f_{c_{M\&B}}$ ,  $f_{c_T}$  คือกำลังอัดของคอนกรีตของเสาท่อนล่างสุด, ท่อนระหว่างกลางและล่าง, ท่อนกลาง, ท่อนระหว่างกลางและบน, ท่อนบนสุดตามลำดับและ (2) กำลังอัดคอนกรีตของเสาท่อนล่างสุดในงานก่อสร้างจริงมีค่ามากกว่าค่าที่ใช้ในการออกแบบร้อยละ 11.70

4.1.2. ระยะเวลาคอนกรีตหุ้มเหล็กของเสา (1) ระยะเวลาคอนกรีตหุ้มเหล็กของเสาท่อนล่างสุดมีค่า;  $C_B = 0.964C_M$ ,  $C_{B\&M} = 0.995C_M$ ,  $C_M = 1.000C_M$ ,  $C_{M\&T} = 0.995C_M$  และ  $C_T = 0.996C_M$  เมื่อค่า  $C_B$ ,  $C_{B\&M}$ ,  $C_M$ ,  $C_{M\&T}$ ,  $C_T$  คือระยะเวลาคอนกรีตหุ้มเหล็กของเสาท่อนล่างสุด, ท่อนระหว่างกลางและล่าง, ท่อนกลาง, ท่อนระหว่างกลางและบน, ท่อนบนสุด และ (2) ระยะเวลาคอนกรีตหุ้มเหล็กของเสาทั้งสี่ด้านในงานก่อสร้างจริงมีขนาดเล็กกว่าค่าที่ใช้ในการออกแบบร้อยละ 1

4.1.3. ขนาดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก (1) ขนาดของเสาทั้งสี่ด้านโดยเฉลี่ยท่อนล่างสุดมีค่า;  $S_B = 1.260S_M$ ,  $S_{M\&B} = 1.106S_M$ ,  $S_M = 1.000S_M$ ,  $S_{M\&T} = 0.925S_M$  และ  $S_T = 0.825S_M$  เมื่อค่า  $S_B$ ,  $S_{B\&M}$ ,  $S_M$ ,  $S_{M\&T}$ ,  $S_T$  คือขนาดของเสาทั้งสี่ด้านของเสาท่อนล่างสุด, ท่อนระหว่างกลางและล่าง, ท่อนกลาง, ท่อนระหว่างกลางและบน, ท่อนบนสุด และ (2) ขนาดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กทั้งสี่ด้านในงานก่อสร้างจริงมีขนาดใหญ่กว่าค่าที่ใช้ในการออกแบบร้อยละ 2.32

## 5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล จากการวิจัยพบว่า (1) ค่าเฉลี่ยกำลังอัดคอนกรีตของเสาท่อนล่างสุด;  $f_{c_B} = 1.098f_{c_M}$  และเสาท่อนบนสุด;  $f_{c_T} = 0.981f_{c_M}$  เมื่อ  $f_{c_M}$  คือค่าเฉลี่ยกำลังอัดคอนกรีตของเสาท่อนกลางและค่ากำลังอัดของเสาท่อนล่างสุดมีค่ามากกว่าเสาท่อนกลางร้อยละ 9.80 และค่ากำลังอัดของเสาท่อนบนสุดมีค่าต่ำกว่าเสาท่อนกลางร้อยละ 1.93 ตามลำดับ หรือค่ากำลังอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กในงานจริงโดยเฉลี่ยมีค่าสูงกว่าในแบบก่อสร้างร้อยละ



11.73 (2) ในภาพรวมค่าระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กโดยเฉลี่ยมีค่าต่ำกว่าค่าที่ออกแบบไว้เท่ากับร้อยละ 1 และ (3) ขนาดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กทั้งสี่ด้านในงานก่อสร้างจริงมีขนาดใหญ่กว่าค่าที่ใช้ในการออกแบบร้อยละ 2.32

5.2 ข้อเสนอแนะ มีดังนี้คือ (1) ผิวของคอนกรีตเสา จะต้องเรียบสม่ำเสมอไม่ขรุขระและควรใช้เจลหรือจาระบีทำให้ทั่วถึงทั้งตัวส่งและตัวรับคลื่นและเมื่อทำการทดสอบเสร็จแล้วจะต้องเช็ดคราบเจลหรือจาระบีออกให้หมดโดยเคร่งครัด (2) ควรใช้ผู้ทดสอบชุดเดียวกันทั้งโครงการและเลือกคนที่มีความรู้ในเรื่องงานก่อสร้างด้วยจะความผิดพลาดเนื่องจาก Human Error น้อยกว่าหลายชุด (3) อุณหภูมิและความชื้นของคอนกรีตจะมีผลกระทบต่อความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกหรือคลื่นเสียงความถี่สูง เช่น ควรให้อยู่ในช่วง 0-40°C และ (4) คุณภาพของงานก่อสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในงานภาคสนามขึ้นอยู่กับฝีมือของแรงงานและช่างฝีมือต่างๆ ของผู้รับเหมาก่อสร้าง ซึ่งแต่ละบริษัทก็จะแตกต่างกันไป รวมทั้งความเอาใจใส่ของวิศวกรผู้ควบคุมงานก่อสร้างของบริษัทที่ปรึกษาด้วย

5.3 การพัฒนาในงานวิจัยต่อไปในอนาคต ให้พิจารณาดังนี้คือ (1) ควรทำการศึกษาค่ากำลังอัดของคอนกรีต, ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กและขนาดหน้าตัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กสำหรับอาคารชุดในเขต จังหวัดหรือภูมิภาคอื่นๆ ในประเทศไทย (2) ควรทำการศึกษาค่ากำลังอัดของคอนกรีต, ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กและขนาดหน้าตัดของเสา คอนกรีตเสริมเหล็กสำหรับอาคารที่จอดรถยนต์และอาคารพาณิชย์ในเขตจังหวัดหรือภูมิภาคอื่นๆ ในประเทศไทย และ (3) ควรทำการศึกษาค่ากำลังอัดของคอนกรีต, ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กและขนาดหน้าตัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กสำหรับอาคารที่พักอาศัยในเขตจังหวัดหรือภูมิภาคอื่นๆ ในประเทศไทย

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์สืบศักดิ์ พรหมบุญ อาจารย์สำนวนและคุณนันทิชา สายสุทธิ ที่ช่วยอ่านต้นฉบับ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ของบริษัท อินเตอร์-คอนซัลท์ จำกัดและคณาจารย์ทุกๆ ท่านที่ช่วยให้งานวิจัยนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ท้ายที่สุดนี้ขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ให้ข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อบทความนี้

## 7. บรรณานุกรมและเอกสารอ้างอิง

- [1] กฎกระทรวงฉบับที่ 55, 2543, “ข้อบัญญัติกรุงเทพมหานคร เรื่องควบคุมอาคาร พ.ศ. 2544,” [ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 117 ตอนที่ 75 ก วันที่ 7 สิงหาคม 2543].
- [2] กฎกระทรวง ฉบับที่ 61, 2550, [ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 124 ตอนที่ 17 ก, วันที่ 26 มีนาคม 2550]. หน้า 29-31.
- [3] ชัชวาล เศรษฐบุตร, 2543, “คอนกรีตเทคโนโลยี,” พิมพ์ครั้งที่ 8, กรุงเทพมหานคร.
- [4] เทอดศักดิ์ สายสุทธิ, 2537, “การศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการรับกำลังของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กสำหรับอาคารสูงประเภทสำนักงานในกรุงเทพมหานคร,” มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 256 น.
- [5] ACI 228.2R-98, 1998, “Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures,” Reported by ACI Committee 228.
- [6] Lawson, K.A. Danso, H.C. Odoi, C.A. Adjei, F.K. and Quashie, 2011, "Non-Destructive Evaluation of Concrete using Ultrasonic Pulse Velocity," ISSN: 2040-7467, Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 3 (6) : 499-504.