# บทที่ 6 สรุปผลการศึกษา

## 6.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร

การดำเนินการในส่วนแรกคือการศึกษาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารโดยการตรวจวัดและพัฒนาสมการประมาณค่าคาบธรรมชาติสำหรับการปรับปรุงมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างต้านทานแผ่นดินไหวของประเทศไทย โดยมีผลการดำเนินงานและข้อสรุปจากการวิจัยดังนี้

6.1.1 การดำเนินการศึกษาได้ทำการตรวจวัดอาคารในจังหวัดเชียงใหม่รวม 51 หลัง เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับกลุ่มอาคารที่ตั้งอยู่บนชั้นดินแข็ง และอาคารในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลเพิ่มเติมจำนวน 20 หลัง และรวมกับผลการศึกษาในโครงการวิจัยก่อนหน้าไปแล้วจำนวน 50 หลัง รวมเป็น 70 หลัง เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับกลุ่มอาคารที่ตั้งอยู่บนชั้นดินอ่อน รวมจำนวนอาคาร 121 หลัง

6.1.2 ผลการศึกษาค่าคาบธรรมชาติของอาคารที่ได้ในงานวิจัยนี้แสดงอยู่ในรูปความสัมพันธ์กับความสูงของอาคาร จากการวิเคราะห์ Regression ของข้อมูลค่าคาบธรรมชาติในแต่ละทิศทางของการเสียรูปใน 2 แกนหลักที่ตั้งฉากกับแกนของอาคาร (Transverse and Longitudinal Direction) ได้เป็นสูตรการประมาณค่าคาบธรรมชาติพื้นฐาน ซึ่งเป็นค่าคาบธรรมชาติเฉลี่ย ($T_R$) ที่ให้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลต่ำที่สุด (Best-Fit) นอกจากนั้นการนำไปประยุกต์ใช้กับมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหว อาจพิจารณาค่าคาบธรรมชาติที่มีค่าต่ำกว่าค่าเฉลี่ยของข้อมูล เป็นการประมาณค่าคาบธรรมชาติขอบเขตล่าง ($T_L$) เพื่อให้การออกแบบมีความปลอดภัยสูงขึ้น (Conservative) และสำหรับข้อกำหนดในมาตรฐานการออกแบบที่กำหนดค่าขอบเขตบน ($T_U$) ไว้สำหรับค่าคาบที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีอื่น

โดยรายละเอียดสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าคาบธรรมชาติ $T$ หน่วยเป็นวินาที กับความสูงของอาคาร $H$ (เมตร) ของแต่ละกลุ่มอาคารที่ศึกษา แสดงได้ดังนี้

อาคารในจังหวัดเชียงใหม่

$T_U = 0.0343H^{0.8578}$ สำหรับสูตรประมาณค่าคาบธรรมชาติขอบเขตบน

$T_R = 0.0292H^{0.8578}$ สำหรับสูตรประมาณค่าคาบธรรมชาติการสั่นพื้นฐาน

$T_L = 0.0248H^{0.8578}$ สำหรับสูตรประมาณค่าคาบธรรมชาติขอบเขตล่าง

อาคารในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล

$T_U = 0.0210H^{1.0248}$ สำหรับสูตรประมาณค่าคาบธรรมชาติขอบเขตบน

$T_R = 0.0169H^{1.0248}$ สำหรับสูตรประมาณค่าคาบธรรมชาติการสั่นพื้นฐาน

$T_L = 0.0136H^{1.0248}$ สำหรับสูตรประมาณค่าคาบธรรมชาติขอบเขตล่าง

กรณีพิจารณาข้อมูลทั้งสองกลุ่มอาคาร

$T_U = 0.0230H^{0.9941}$ สำหรับสูตรประมาณค่าคาบธรรมชาติขอบเขตบน

$T_R = 0.0189H^{0.9941}$ สำหรับสูตรประมาณค่าคาบธรรมชาติการสั่นพื้นฐาน

$T_L = 0.0155H^{0.9941}$ สำหรับสูตรประมาณค่าคาบธรรมชาติขอบเขตล่าง

6.1.3 ผลการพิจารณาข้อมูลทั้งสองกลุ่มอาคารพบว่ามีความแตกต่างกันไม่มาก จึงเสนอใช้สมการในการประมาณค่าคาบธรรมชาติเดียวกันสำหรับทั้งสองกลุ่มอาคารเพื่อเป็นแนวทางที่สะดวกในการปฏิบัติ และได้ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคาบธรรมชาติ $T$ หน่วยเป็นวินาทีกับความสูงของอาคาร $H$ (เมตร) ในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้นคือ

$T_U = 0.0225H$ สำหรับสูตรประมาณค่าคาบธรรมชาติขอบเขตบน

$T_R = 0.0185H$ สำหรับสูตรประมาณค่าคาบธรรมชาติการสั่นพื้นฐาน

$T_L = 0.0152H$ สำหรับสูตรประมาณค่าคาบธรรมชาติขอบเขตล่าง

6.1.4 เมื่อใช้สูตรประมาณค่าคาบธรรมชาติขอบเขตล่าง และพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าคาบธรรมชาติของอาคารที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากการตอบสนองภายใต้แผ่นดินไหว สามารถสรุปเสนอสมการสำหรับการประมาณค่าคาบธรรมชาติที่เหมาะสมสำหรับออกแบบอาคารเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหวในประเทศไทยคือ $T = 0.02H$

6.1.5 ผลการพิจารณาสมการแบบขอบเขตล่างและขอบเขตบนเพื่อกำหนดขอบเขตของค่าคาบที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีอื่นนอกเหนือจากการใช้สมการการประมาณ เสนอให้ หากใช้การคำนวณเพื่อการหาค่าคาบธรรมชาติโดยหลักการของพลศาสตร์โครงสร้าง ค่าคาบธรรมชาติที่ได้ไม่ควรมีค่ามากกว่า 1.5 เท่าของค่าที่ได้จากสูตรการประมาณ

6.1.6 ข้อมูลจากการวิเคราะห์แสดงคุณลักษณะที่ใกล้เคียงกับสภาพอาคารจริงในประเทศไทย แต่มีความแตกต่างจากสมการการประมาณในกฎกระทรวงแผ่นดินไหว พศ 2550 ที่มีต้นแบบจากสมการประมาณค่าที่พัฒนาสำหรับอาคารของประเทศสหรัฐอเมริกา ทั้งใน รูปแบบของสมการและค่าที่คำนวณได้

6.1.7 จากการศึกษารูปร่างการสั่นไหวของอาคาร พบว่าอาคารมีการเคลื่อนตัวที่ฐานที่เทียบกับการเคลื่อนตัวที่ชั้นบนสุดของอาคาร โดยมีค่ามากสำหรับอาคารเตี้ย อาคารที่มีคาบธรรมชาติต่ำหรืออาคารที่มีค่าอัตราส่วนสติฟเนสของอาคารต่อสติฟเนสของฐานรากและชั้นดินสูง โดยกลุ่มอาคารในจังหวัดเชียงใหม่พบว่าการเคลื่อนตัวที่ฐานเกิดน้อยกว่ากลุ่มอาคารในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลอย่างชัดเจน

## 6.2 ผลการศึกษาคุณลักษณะบริเวณที่ตั้งของชั้นดิน

การดำเนินการในส่วนที่สองคือการศึกษาคุณลักษณะบริเวณที่ตั้งของชั้นดิน โดยประกอบด้วยการตรวจวัด Microtremor แบบ 1 จุด (Single–Point Microtremor Observation) และการตรวจวัด Microtremor แบบหลายจุดพร้อมกัน (Array Microtremor Observation) เพื่อศึกษาคุณสมบัติของชั้นดินด้านการขยายขนาดคลื่นแผ่นดินไหว คือ คาบอิทธิพลหลัก และ ความเร็วคลื่นเฉือน โดยมีผลการดำเนินงานและข้อสรุปจากการวิจัยดังนี้

6.2.1 การตรวจวัด Microtremor แบบ 1 จุด ดำเนินการศึกษารวมทั้งหมด 100 ตำแหน่งในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ และ การตรวจวัด Microtremor แบบหลายจุดพร้อมกัน ดำเนินการศึกษา 30 บริเวณในจังหวัดเชียงใหม่ จำนวน 25 บริเวณในจังหวัดเชียงราย จำนวน 16 บริเวณในจังหวัดกาญจนบุรี และ จำนวน 4 บริเวณในกรุงเทพมหานคร

6.2.2 ผลการศึกษาค่าคาบอิทธิพลหลักจากการตรวจวัด Microtremor แบบ 1 จุดในจังหวัดเชียงใหม่ และการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยเทคนิค H/V spectrum ratio พบว่าข้อมูล 48 ตำแหน่ง (จากทั้งหมด 100 ตำแหน่ง) ไม่สามารถหาค่าค่าคาบอิทธิพลหลักได้ สำหรับพื้นที่อื่น พบว่ามีค่าคาบอิทธิพลหลักอยู่ในช่วง 0.4 ถึง 0.8 วินาที เป็นส่วนมาก โดยในแต่ละบริเวณมีลักษณะที่แตกต่างกันดังนี้ บริเวณ อ.เมือง มีค่าคาบอิทธิพลหลักแตกต่างกันอย่างมาก คือ บริเวณคูเมืองมีค่าคาบอิทธิพลหลักอยู่ในช่วง 0.60 – 0.80 วินาที และพื้นที่บางส่วนสูงกว่า 0.80 วินาที บริเวณรอบนอก อ.เมือง รัศมี ประมาณ 15 กม. มีค่าคาบอิทธิพลหลัก อยู่ในช่วง 0.40 – 0.60 วินาที ส่วนบริเวณทิศเหนือของพื้นที่ศึกษา คือ อ.แม่ริม และ อ.สันทราย มีค่าคาบอิทธิพลหลักต่ำกว่า 0.40 วินาที ซึ่งแสดงถึงลักษณะทางสภาพธรณีวิทยาของชั้นดินที่มีความแตกต่างในแต่ละพื้นที่

6.2.3 ผลการศึกษาความเร็วคลื่นเฉือนจากการตรวจวัด Microtremor แบบหลายจุดพร้อมกัน และการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยเทคนิค 2-site Spatial Autocorrelation (2s-SPAC) ในส่วนแรกเป็นการพัฒนาและตรวจสอบความถูกต้องกับงานวิจัยก่อนหน้า ซึ่งพบว่าวิธีที่พัฒนาให้ผลของค่าความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกของชั้นดินสอดคล้องกับผลการสำรวจโดยการเจาะหลุมทดสอบและการตรวจวัดแบบ Array Microtremor ของงานวิจัยอื่นอย่างดี และจำแนกชั้นดินได้เป็นประเภทเดียวกัน ข้อดีต่อการประยุกต์ใช้ศึกษาคือ สามารถปฏิบัติได้โดยสะดวก เนื่องจากไม่ต้องทำการเจาะหลุมสำรวจและใช้อุปกรณ์และบุคลากรน้อยกว่าวิธีอื่นทำให้ประหยัดทั้งค่าใช้จ่ายและเวลาในการตรวจวัด นอกจากนั้น ค่าที่วิเคราะห์ได้ให้ผลถึงระดับความลึกเกินจากช่วงที่หลุมเจาะโดยทั่วไปมาก (ระดับ 80-100 เมตร ในงานวิจัยนี้)

6.2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคาบอิทธิพลหลักและความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยที่ระดับความลึก 30 เมตร ของบริเวณที่ศึกษาแสดงเป็นแนวโน้มว่า บริเวณที่มีคาบอิทธิพลหลักต่ำจะมีความเร็วคลื่นเฉือนสูง แสดงถึงเป็นบริเวณชั้นดินแข็ง ในทางกลับกัน บริเวณที่เป็นดินอ่อนมีค่าคาบอิทธิพลหลักสูงและความเร็วคลื่นเฉือนต่ำ

6.2.5 ผลการวิเคราะห์ความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยที่ระดับความลึก 30 เมตร เมื่อนำมาใช้จำแนกชั้นดินตามข้อกำหนดของ NEHRP (2003) ได้ผลซึ่งแสดงถึงลักษณะของชั้นดินที่บริเวณที่ศึกษา โดยบริเวณที่ศึกษาในจังหวัดเชียงใหม่ เชียงราย และกาญจนบุรี พื้นที่ราบในเขตอำเภอเมืองส่วนใหญ่จำแนกเป็น ชั้นดินประเภท D (ดินแข็ง) บางส่วนจำแนกเป็นชั้นดินประเภท C (ดินแข็งมาก กึ่งหิน) สำหรับบริเวณใกล้เชิงเขา และไม่พบ ชั้นดินประเภท E (ดินอ่อน) ส่วนผลการศึกษาในกรุงเทพมหานครและปริมณฑลพบว่าทุกบริเวณจำแนกเป็น ชั้นดินประเภท E (ดินอ่อน)

## 6.3 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยต่อไป

โครงการวิจัยนี้ได้ศึกษาพัฒนาด้านคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารและชั้นดินที่มีผลต่อระดับแรงและการตอบสนองของอาคารต่อแรงแผ่นดินไหว ข้อมูลที่ได้ส่วนหนึ่งได้นำไปใช้ในการปรับปรุงมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างด้านทานแผ่นดินไหวให้มีความถูกต้องและสอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงในประเทศไทยแล้ว อย่างไรก็ตาม ขอบเขตของงานวิจัยที่สำคัญต่อการพัฒนาในด้านนี้ยังคงเหลืออยู่อีกในหลายประเด็น โดยมีประเด็นหลัก ดังนี้

6.3.1 การศึกษาด้านคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร เนื่องจากการศึกษาที่ดำเนินการมามุ่งเน้นเพื่อพัฒนาสูตรการประมาณค่าสำหรับอาคารและกำหนดในมาตรฐานการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหว ซึ่งใช้กับอาคารที่มีรูปทรง และคุณสมบัติการตอบสนองต่อแรงแผ่นดินไหว อย่างสม่ำเสมอตลอดความสูง จึงได้ดำเนินการศึกษากับอาคารที่เป็นตัวแทนอาคารทั่วไปจำนวนมาก โดยยังไม่ได้คำนึงถึงผลกระทบเนื่องจากรูปทรงหรือลักษณะความไม่สม่ำเสมอดังกล่าว อย่างไรก็ตามผลจากรูปทรงและความไม่สม่ำเสมอของอาคารมีผลอย่างยิ่งต่อพฤติกรรมการตอบสนองต่อแรงแผ่นดินไหว ซึ่งสามารถศึกษาได้ด้วยเทคนิคการตรวจวัดที่ใช้ดำเนินการศึกษาในงานนี้ แต่ยังไม่มีงานวิจัยใดที่อธิบายพฤติกรรมของอาคารได้เหมาะสมกับกลุ่มอาคารที่ใช้งานหลักในประเทศไทย เช่น อาคารพาณิชย์ อาคารที่มักมีช่องเปิดด้านล่าง เป็นต้น ดังนั้น จึงควรมีการศึกษาพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ของอาคารที่เป็นผลจากรูปทรงและลักษณะความไม่สม่ำเสมอของอาคาร เพื่อความเข้าใจและปรับปรุงวิธีการวิเคราะห์ให้เหมาะสมกับพฤติกรรมจริงได้อย่างเหมาะสม

6.3.2 การศึกษาคุณลักษณะบริเวณที่ตั้งของชั้นดิน งานวิจัยนี้ได้พัฒนาเทคนิคที่สามารถดำเนินการศึกษาได้อย่างรวดเร็ว และได้พยายามขยายขอบเขตพื้นที่ศึกษาให้ครอบคลุมพื้นที่สำคัญด้านความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวของประเทศ อย่างไรก็ตาม ยังมีพื้นที่ที่ยังไม่ได้ศึกษาอีกจำนวนมาก จึงควรมีการขยายพื้นที่ศึกษาให้มากขึ้น โดยดำเนินการตามลำดับความสำคัญ ทั้งในเขตเมืองและพื้นที่ที่จะพัฒนาในอนาคต นอกจากนั้นแล้ว ผลการศึกษาที่ได้ สามารถนำไปวิเคราะห์เพิ่มเติมเพื่อประเมินกำลังขยายคลื่นแผ่นดินไหวของแต่ละพื้นที่ย่อย และจัดทำเป็น แผนที่เขตความรุนแรงของแผ่นดินไหวอย่างละเอียด ที่มีความสำคัญอย่างยิ่งโดยเฉพาะเมืองใหญ่ เช่น กรุงเทพมหานครและปริมณฑล จังหวัดเชียงใหม่ และพื้นที่อีกหลายส่วนของประเทศ