# บทที่ 5
# สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

## 5.1 สรุปผลการวิจัย

โครงสร้างใดๆ ก็ตามที่มีการเชื่อมต่อเข้ากับโครงสร้างต่างชนิดกัน มักมีปัญหาที่เกิดขึ้นเกิดจากการทรุดตัวที่แตกต่างกันระหว่างโครงสร้างทำให้โครงสร้างเสียหาย ถ้าไม่มีการพิจารณาในการออกแบบไว้ก่อน โครงสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินที่อยู่ในพื้นที่กรุงเทพฯ และปริมณฑลมีการเชื่อมต่อระหว่างโครงสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินกับบ่อพักที่ตั้งอยู่บนฐานรากที่ต่างชนิดกัน ความเสียหายส่วนมากมักเกิดจากการทรุดตัวที่ไม่เท่ากันของโครงสร้าง

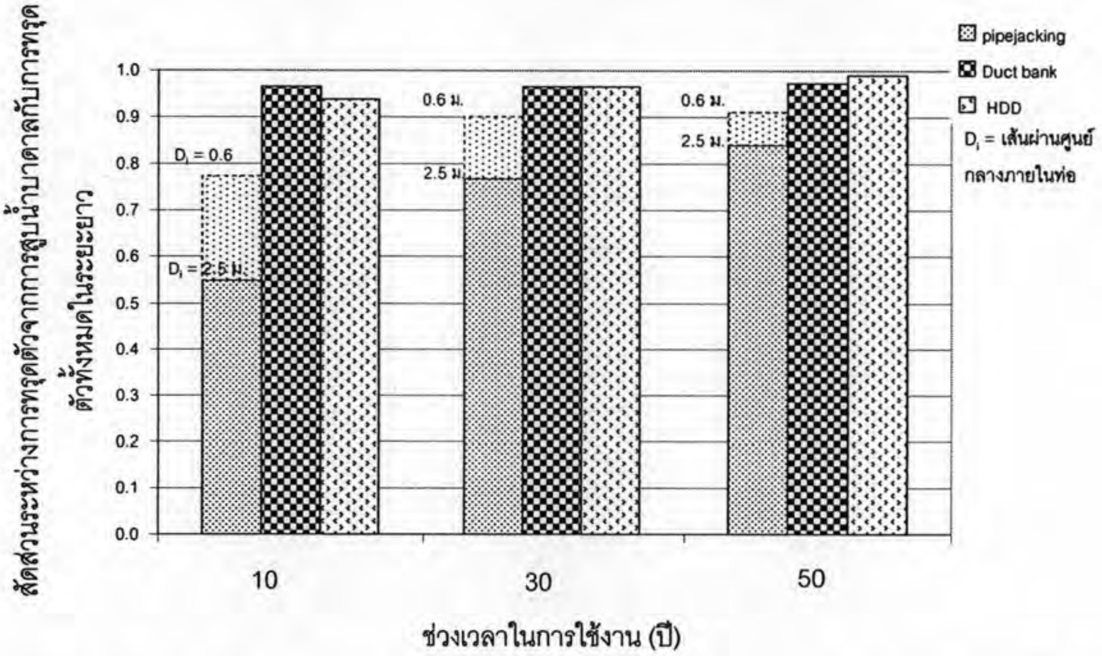
ค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งของโครงสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินในพื้นที่กรุงเทพฯ และปริมณฑลนั้น ประกอบไปด้วยการเคลื่อนตัวที่เกิดจากน้ำหนักของโครงสร้างเอง การเคลื่อนตัวที่เกิดจากการสูบน้ำบาดาล และการเคลื่อนตัวที่เกิดจากการรบกวนดินเมื่อทำการก่อสร้าง ซึ่งค่าการเคลื่อนตัวที่ได้สามารถนำไปประมาณการทรุดตัวที่จะเกิดขึ้นทั้งหมดของแต่ละโครงสร้างได้ จากผลการวิเคราะห์พบว่าค่าการทรุดตัวที่เกิดจากการสูบน้ำบาดาลสูงกว่าการทรุดตัวที่เกิดจากสาเหตุอื่นๆ

การเปรียบเทียบระหว่างค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งจากการสูบน้ำบาดาลกับค่าการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นทั้งหมดของแต่ละวิธีการก่อสร้างตามช่วงเวลาการใช้งานที่ 10, 30 และ 50 ปี ในพื้นที่กรุงเทพฯ และปริมณฑลได้เสนอในรูปที่ 5.1 โดยค่าเฉลี่ยการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งจากการสูบน้ำบาดาลในช่วงเวลาการใช้งาน 10-50 ปีของโครงสร้าง Pipe jacking ขนาด 2.5 เมตร มีค่าประมาณ 55-84 เปอร์เซ็นต์และขนาด 0.6 เมตรมีค่าประมาณ 94-99 เปอร์เซ็นต์ สำหรับโครงสร้าง Duct bank มีค่าประมาณ 96-97 เปอร์เซ็นต์ และโครงสร้าง HDD มีค่าประมาณ 94-99 เปอร์เซ็นต์

ในการคำนวณการทรุดตัวที่แตกต่างกันระหว่างโครงสร้างสมมุติให้บ่อพักไม่มีการเคลื่อนตัวเนื่องจากน้ำหนักของบ่อพักเพราะน้ำหนักสุทธิระหว่างดินที่ขุดออกและตัวบ่อพักใกล้เคียงกันและระดับอ้างอิงการทรุดตัวของโครงสร้างใกล้เคียงกับพื้นของบ่อพักจึงไม่นำการทรุดตัวที่เกิดจากการสูบน้ำบาดาลมารวมด้วยเพราะตัวท่อใต้ดินและบ่อพักมีความลึกใกล้เคียงกันทำให้การทรุดตัวเนื่องจากการสูบน้ำใต้ดินมีค่าใกล้เคียงกัน นั่นหมายถึงการทรุดตัวที่แตกต่างกันของแต่ละ

โครงสร้าง ประกอบด้วยค่าการทรุดตัวแบบทันทีทันใดและการอัดตัวคายน้ำที่ได้จาก FEM ส่วนการทรุดตัวในระยะยาวจะได้จากวิธีของ Terzaghi

ค่าการเคลื่อนตัวที่แตกต่างกันของโครงสร้างได้ถูกสรุป และนำเสนอในรูปแบบของกราฟการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งที่ต่างกันที่เวลาใช้งาน 10 ปี 30 ปี และ 50 ปี ของโครงสร้าง Pipe jacking, Duct bank และ HDD ใน 10 พื้นที่ที่มีการจัดแบ่งตามลักษณะชั้นดินดังได้นำเสนอในบทที่ 4 และภาคผนวก ค ซึ่งกราฟที่ได้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบจุดเชื่อมต่อระหว่างโครงสร้างให้รองรับการเคลื่อนตัวที่ไม่เท่ากันเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับโครงสร้าง ได้




รูปที่ 5.1 สัดส่วนค่าเฉลี่ยการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งจากการสูบน้ำบาดาลกับค่าเฉลี่ยการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งทั้งหมดในแต่ละวิธีการก่อสร้างตามช่วงเวลาใช้งานในพื้นที่กรุงเทพฯ และปริมณฑล

## 5.2 อภิปรายผลการวิจัย

จากรูปที่ 5.1 เห็นได้ว่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งที่เกิดจากน้ำหนักของโครงสร้าง และจากการรบกวนดินมีค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งน้อยกว่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งที่เกิดจากการสูบน้ำบาดาล โดยเฉพาะการก่อสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินด้วยวิธี Duct bank และ HDD เนื่องจากผลจากการใช้เข็มพืดและน้ำหนักของโครงสร้างที่มีขนาดเล็กและเบา จากผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวในแนวดิ่งที่เกิดจากการสูบน้ำบาดาลเป็นสาเหตุหลักของการทรุดตัวของโครงสร้างท่อร้อย

สายไฟฟ้าใต้ดินที่อยู่ในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล และจากรูปที่ 5.1 โครงสร้าง Duct bank และ HDD มีค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งของแต่ละชนิดของแต่ละโครงสร้างมีค่าใกล้เคียงกันมากจึงเฉลี่ยค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งของทุกชนิดในแต่ละโครงสร้างเป็นค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งจากการสูบน้ำบาดาลในพื้นที่กรุงเทพฯ และปริมณฑล

การนำเสนอผลการวิเคราะห์การทรุดตัวได้จัดทำในรูปแบบกราฟการเคลื่อนตัวที่ต่างกันของท่อใต้ดินและบ่อพัก ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการออกแบบจุดต่อเชื่อม (Connection joint) รองรับปริมาณการทรุดตัวที่ไม่เท่ากันของโครงสร้างทั้งสองได้ การทรุดตัวที่ต่างกันระหว่างท่อ Pipe jacking และบ่อพัก ณ เวลา 10 ปี 30 ปี และ 50 ปี ดังแสดงในรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการก่อสร้างที่ความลึกเดียวกันท่อที่มีขนาดใหญ่จะมีค่าความแตกต่างการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งมากกว่าท่อที่มีขนาดเล็กเนื่องจากท่อที่มีขนาดใหญ่หน่วยน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นกระทำลงไปในชั้นดินมากกว่าท่อขนาดเล็กจึงมีเกิดการทรุดตัวที่มาก และค่าแตกต่างการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งลดลงตามความลึกเนื่องจากลักษณะของชั้นดินจะมีความแข็งแรงเปลี่ยนแปลงตามความลึกโดยที่ความลึกมากๆ จะมีค่าความแข็งแรงสูงจึงส่งผลให้การเคลื่อนตัวในแนวดิ่งน้อย ค่าการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งจะขึ้นอยู่กับสภาพของชั้นดินโดยพื้นที่ที่มีสภาพชั้นดินที่มีความแข็งแรงต่ำจะเกิดการทรุดตัวที่มาก

ค่าความแตกต่างการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งระหว่างท่อ HDD และบ่อพักนำเสนอตามพื้นที่และระยะเวลาใช้งาน ดังแสดงในตารางที่ 4.4 โดยชนิดของท่อมีอยู่ 3 ชนิดคือ PN 8, PN 10 และ PN 12.5 โดยทั้งสามชนิดมีเส้นผ่านศูนย์กลางเดียวคือ 16 ซม. โดยพบว่าค่าความแตกต่างการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับท่อ Pipe jacking เนื่องจากท่อ HDD มีขนาดเล็กและเบา

ส่วนค่าความแตกต่างของการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งของ Duct bank พิจารณากับการก่อสร้าง 6 ลักษณะและความลึกในการก่อสร้างที่แตกต่างกัน 3 ความลึกซึ่งแต่ละความลึกมีเทคนิคการก่อสร้างที่แตกต่างกันกล่าวคือหากไม่มีการใช้กำแพงกันดินความลึกที่ทำการก่อสร้างไม่เกิน 1.5 เมตร ส่วนความลึกที่ 3 และ 5 เมตรจำเป็นต้องใช้กำแพงกันดิน ตารางที่ 4.5 แสดงค่าความแตกต่างการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งในกรณีการก่อสร้าง Duct bank ที่ความลึก 1.5 เมตร โดยเริ่มจากขนาดความกว้างน้อยไปหาความกว้างมาก การเคลื่อนตัวในแนวดิ่งของการก่อสร้างบางลักษณะมีการลอยตัวขึ้นของดินเพราะน้ำหนักของโครงสร้าง Duct bank มีค่าน้อยกว่าดินเดิม

ส่วนการก่อสร้างที่ความลึก 3 และ 5 เมตร โดยมีเข็มพืดเป็นกำแพงกันดิน ค่าความแตกต่างของการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งดังแสดงในรูปที่ 4.3 ที่ความลึก 5 เมตรจะมีค่าความแตกต่าง

ของการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งที่มากกว่า 3 เมตรเนื่องเทคนิคการก่อสร้างจะมีทรายถมกลับทำให้ที่ความลึก 5 เมตรน้ำหนักของโครงสร้างจะมากกว่าที่ความลึก 3 เมตรเมื่อ Duct bank มีลักษณะเดียวกัน

## 5.3 อุปสรรค/ปัญหา ข้อจำกัดที่นำเอาผลการวิเคราะห์ไปใช้

ในการวิเคราะห์ด้วย ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้แก้ปัญหาโดยใช้โปรแกรม Plaxis ยังมีข้อจำกัดบางอย่างเช่น การหาเวลาสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำไม่ได้ และการประยุกต์ใช้ค่าการเคลื่อนตัวที่ได้จากการคำนวณด้วยมือโดยใช้ทฤษฎีต่างๆ นั้นเป็นการแก้ปัญหาอย่างหนึ่งที่จะสามารถทำได้แต่เนื่องข้อสมมุติฐานที่ไม่ตรงตามสภาพจริงในธรรมชาติ เช่นดินเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenous) ดินเคลื่อนที่ได้ 3 มิติ เป็นต้นต่างกันทำให้ค่าการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งที่ได้อาจไม่ถูกต้อง

ค่าพารามิเตอร์บางตัวที่ใช้ในการวิเคราะห์ไม่สามารถหาได้ครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดที่พิจารณาเช่น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของดิน (k) และค่า $c_v$ เป็นต้น

การนำผลการวิจัยที่ได้ไปใช้กับการออกแบบควรที่จะเลือกและพิจารณาคุณสมบัติของชั้นดินและเทคนิคการก่อสร้างตามการก่อสร้างจริงและจะเป็นการดีที่สุดหากทำการวิเคราะห์เป็นกรณีๆ ไป

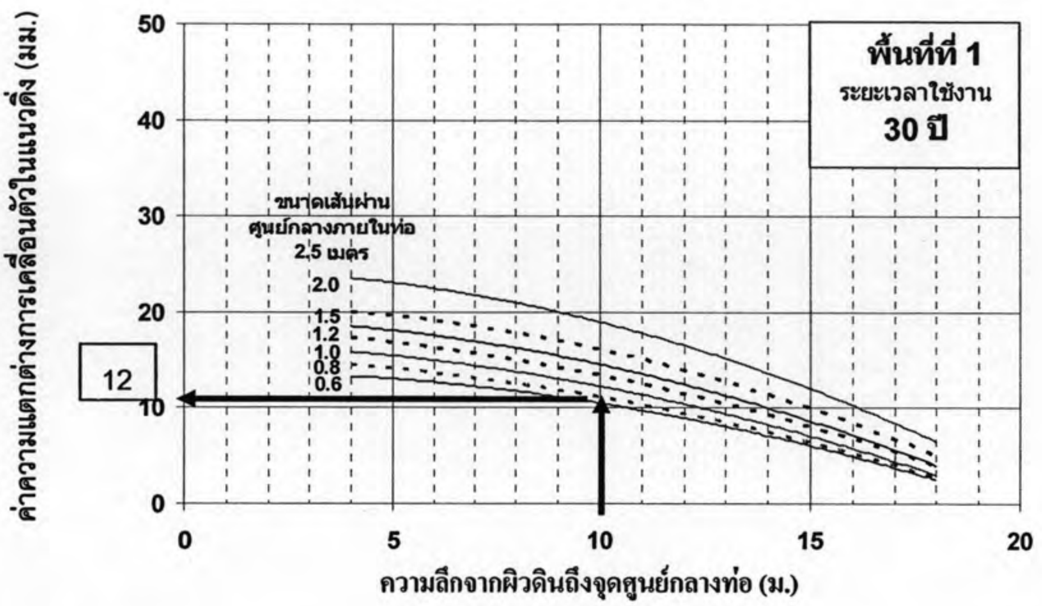
## 5.4 ตัวอย่างการใช้ผลการวิเคราะห์ในการออกแบบ

ตัวอย่างการออกแบบจุดต่อเชื่อมเพื่อรองรับการทรุดตัวที่ไม่เท่ากัน

<u>ปัญหาที่ 1</u>

ท่อใต้ดินที่ก่อสร้างด้วยวิธี Pipe jacking ขนาด 1.0 เมตรที่ความลึก 10 เมตรจากผิวดินถึงจุดศูนย์กลางท่อในเขตปทุมวัน (พื้นที่ที่ 1) สำหรับอายุการใช้งาน 30 ปี

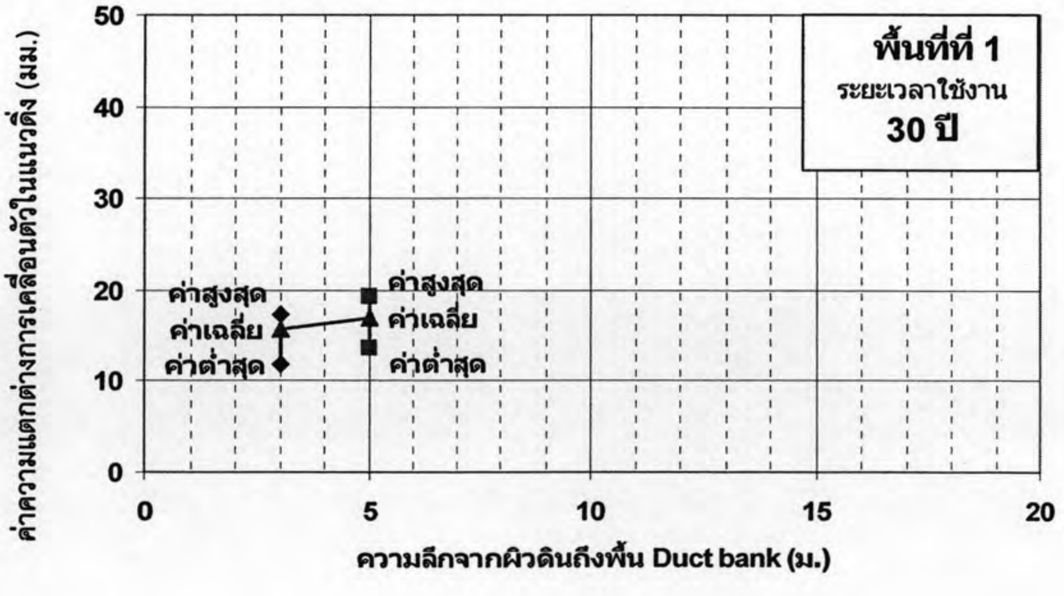
จากรูปที่ 4.1 ปริมาณการทรุดตัวที่ไม่เท่ากันระหว่างท่อและบ่อพักมีค่าประมาณ 12 มม. ที่อายุการใช้งาน 30 ปี ดังนั้นจุดต่อเชื่อมต้องสามารถรองรับปริมาณการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งที่ไม่เท่ากันประมาณ 12 มม. ได้




ปัญหาที่ 2

ท่อใต้ดินที่ก่อสร้างด้วยวิธี Open cut ความลึก 5 เมตรจากพื้น Duct bank ในเขตปทุมวัน (พื้นที่ที่ 1) สำหรับอายุการใช้งาน 30 ปี

จากรูปที่ 4.2 ปริมาณการทรุดที่ไม่เท่ากันระหว่างท่อและบ่อพักมีค่าประมาณ 14 ถึง 19 มม. ที่อายุการใช้งาน 30 ปี ดังนั้นจุดต่อเชื่อมต้องสามารถรองรับปริมาณการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งที่ไม่เท่ากันประมาณ 14 มม. ได้เป็นอย่างน้อย



<u>ปัญหาที่ 3</u>

ท่อใต้ดินที่ก่อสร้างด้วยวิธี HDD ขนาด 0.16 เมตรที่ความลึก 10 เมตรจากผิวดินถึงจุดศูนย์กลางท่อในเขตปทุมวัน (พื้นที่ที่ 1) สำหรับอายุการใช้งาน 30 ปี

| พื้นที่ที่ | ระยะเวลาใช้งาน | ค่าความแตกต่างการเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง (มม.) | |
|---|---|---|---|
| | | ความลึกถึงจุดศูนย์กลางท่อ 2-8 เมตร | ความลึกถึงจุดศูนย์กลางท่อ 10 เมตร |
| | 10 | 5 | |
| 1 | 30 | 6 | |
| | 50 | 6 | |

จากกราฟที่ 4.4 ปริมาณการทรุดตัวที่ไม่เท่ากันระหว่างท่อและบ่อพักมีค่าประมาณ 6 มม. ที่อายุการใช้งาน 30 ปี ดังนั้นจุดต่อเชื่อมต้องสามารถรองรับปริมาณการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งที่ไม่เท่ากันประมาณ 6 มม. ได้

## 5.5 ข้อเสนอแนะต่องานวิจัยในอนาคต

ควรมีการตรวจวัดข้อมูลการทรุดตัวของโครงสร้างท่อที่เกิดขึ้นจริงเพื่อเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ด้วย FEM และปรับเทียบค่าตัวแปรต่างๆ เพื่อให้ผลการวิเคราะห์ด้วย FEM เป็นค่าที่ถูกต้องน่าเชื่อถือมากขึ้น เมื่อมีการเกิดการทรุดตัวที่แตกต่างกันของโครงสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินควรมีการหาวิธีการในการช่วยลดหรือป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นด้วย ในการก่อสร้างจริงการเชื่อมต่อกันระหว่างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินกับบ่อพักมีการอุดช่องว่างด้วยมอร์ต้าร์ซึ่งการวิจัยในอนาคตควรมีการพิจารณาถึงลักษณะของจุดต่อเชื่อมนี้มีผลอย่างไรกับการทรุดตัวในแนวดิ่งของโครงสร้าง