หอสมุดกลาง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ ๖

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

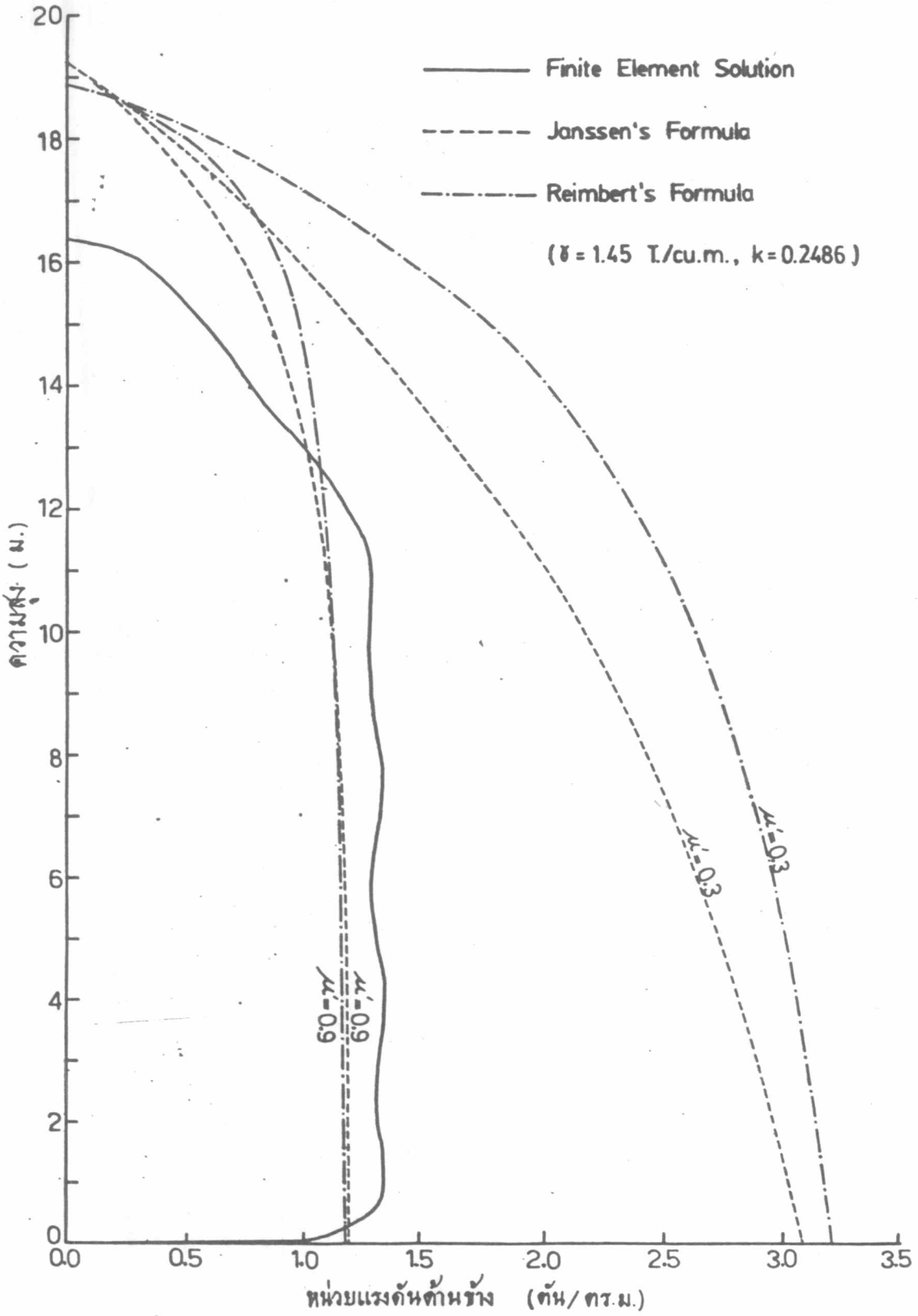
๖.๑ สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทดลองหาคุณสมบัติกลศาสตร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา ผลจากการทดลองได้แสดงให้เห็นว่าปูนซีเมนต์เป็นวัสดุอิลัสติคแบบไร้เชิงเส้น ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของปูนซีเมนต์มีการเปลี่ยนแปลงจากอิทธิพลของความหนาแน่นของปูนซีเมนต์ซึ่งเขียนแทนด้วยสมการ $E = 2.478 \cdot \exp [- 8.582 (1 - \gamma_c / \gamma_0)]$, เมื่อ E คือโมดูลัสยืดหยุ่นของปูนซีเมนต์มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร, γ_c คือความหนาแน่นของปูนซีเมนต์ที่เปลี่ยนแปลง และ γ_0 คือความหนาแน่นเริ่มต้นของปูนซีเมนต์มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ ๑.๓๗ ตันต่อลูกบาศก์เมตร (จากผลการทดลอง) ค่าอัตราส่วนยืดหดของปูนซีเมนต์จากการวิเคราะห์ได้ค่าประมาณ ๐.๒๕ สัมประสิทธิ์ของความฝืดระหว่างปูนซีเมนต์และแผ่นเหล็กจากผลการทดลองมีค่าไม่คงที่ ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงฝืดและหน่วยแรงบรรทุกตั้งฉากกับผิวสัมผัส จากการทดลองเขียนแทนด้วยสมการ $\tau = 0.3035(\sigma)^{0.5685}$ เมื่อ τ คือหน่วยแรงฝืดระหว่างปูนซีเมนต์และแผ่นเหล็กมีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และ σ คือหน่วยแรงบรรทุกตั้งฉากกับผิวสัมผัสมีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร แต่เมื่อหน่วยแรงบรรทุกตั้งฉากกับผิวสัมผัสมีค่าน้อยกว่า ๐.๐๗๘ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เราได้สมมุติให้สัมประสิทธิ์ของความฝืดมีค่าคงที่เท่ากับ ๐.๙ (ส่วนเริ่มต้นของกราฟรูปที่ ๔.๙) ส่วนมุมลาดชันของปูนซีเมนต์จากการทดลองมีค่าประมาณ ๓๗ องศา

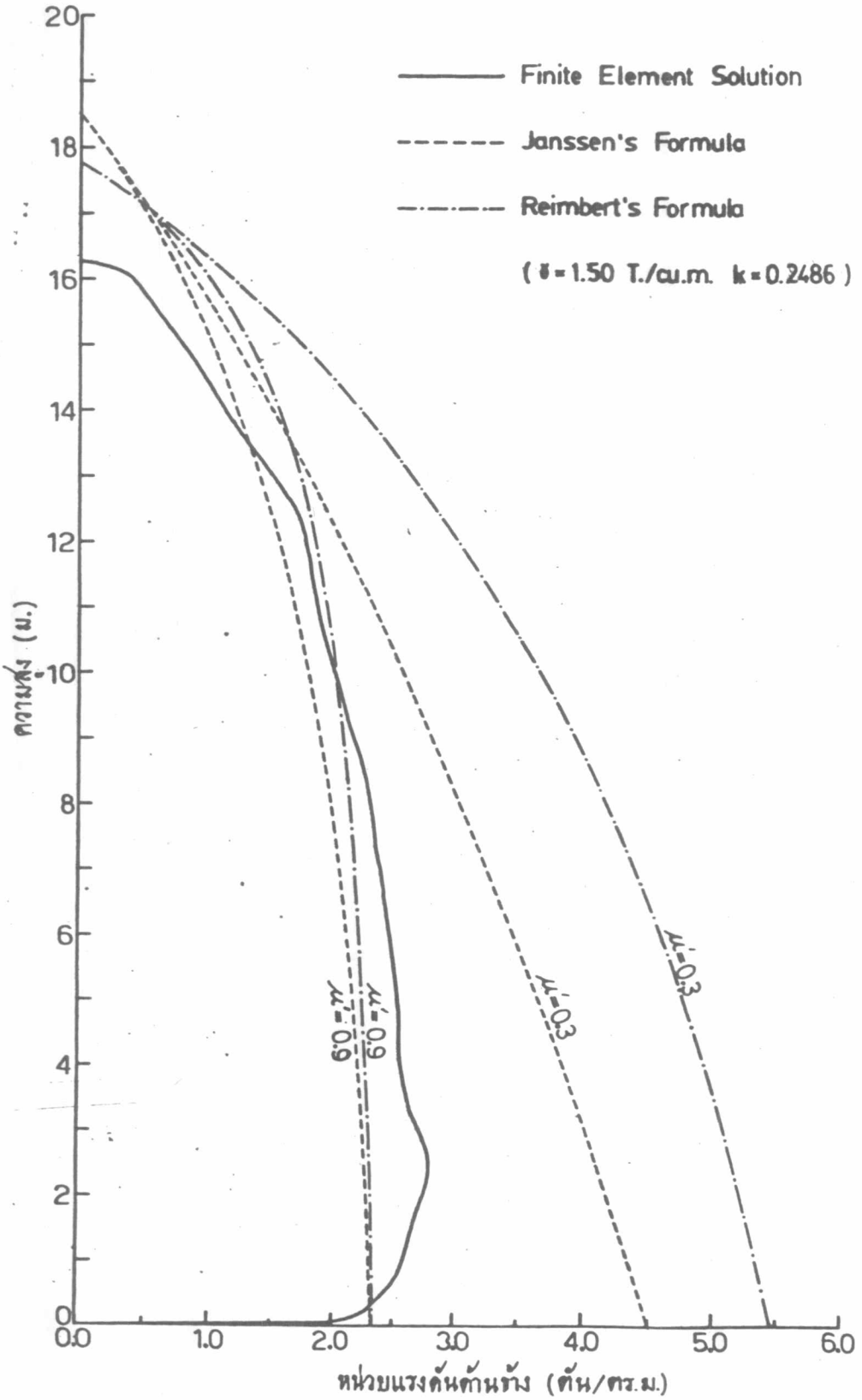
การวิเคราะห์พฤติกรรมระหว่างมวลบรรจุปูนซีเมนต์และไซโลที่ใช้บรรจุโดยวิธีไฟไนท์เอลเม้นท์ ได้ใช้ไซโลทรงกระบอกกลมทำด้วยเหล็กมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๓,๖ และ ๑๒ เมตร ตามลำดับและสูง ๒๐ เมตร เนื่องจากปูนซีเมนต์เป็นวัสดุชนิดไร้เชิงเส้นจึงทำการวิเคราะห์แบบลำดับขั้น และยังแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นขั้นตอนตามการบรรจุปูนซีเมนต์เป็นชั้น ๆ ซึ่งสมมุติให้มีการบรรจุปูนซีเมนต์จำนวน ๒๐ ชั้น (ยกเว้นไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๓ เมตรมีการบรรจุปูนซีเมนต์เพียง ๑๙ ชั้น) มวลของปูนซีเมนต์ในแต่ละชั้นจำลองได้เป็นเอลเม้นท์วงแหวนชนิด

Isoparametric Quadrilateral Ring Elements ผนังไซโลซึ่งทำด้วยเหล็กจำลองให้เป็นวัสดุอิลัสติคและมีสภาพเสมือนกับที่รองรับยืดหยุ่น ส่วนความฝืดระหว่างปูนซีเมนต์และผนังไซโลก็ใช้ผลที่ได้ตามการทดลอง ผลของการวิเคราะห์แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมระหว่างปูนซีเมนต์และไซโลตามลำดับขั้นของการบรรจุได้เป็นอย่างดี การทรุดตัวของปูนซีเมนต์, การกระจายหน่วยแรงดันด้านข้างของปูนซีเมนต์ที่กระทำต่อผนังไซโล, การกระจายหน่วยแรงดันแนวดิ่งของปูนซีเมนต์ที่กระทำต่อพื้นไซโล และการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของปูนซีเมนต์ในไซโลแต่ละขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางให้ผลที่สอดคล้องกัน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของไซโลและความฝืดระหว่างปูนซีเมนต์และผนังไซโลมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมระหว่างปูนซีเมนต์และไซโลที่ใช้บรรจุ เมื่อความฝืดระหว่างปูนซีเมนต์และผนังไซโลเพิ่มขึ้นก็จะทำให้หน่วยแรงดันด้านข้างลดลง การลื่นไถลของปูนซีเมนต์ทำให้หน่วยแรงดันด้านข้างและหน่วยแรงดันแนวดิ่งเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว หน่วยแรงดันแนวดิ่งที่ศูนย์กลางของไซโลมากกว่าที่บริเวณใกล้กับผนังไซโล เนื่องจากความฝืดระหว่างปูนซีเมนต์และผนังไซโลทำให้ปูนซีเมนต์บริเวณนั้นมีการทรุดตัวน้อยกว่าบริเวณศูนย์กลาง จึงเป็นผลให้หน่วยแรงดันแนวดิ่งลดลง การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของปูนซีเมนต์ซึ่งแสดงด้วยคอนทัวร์ระดับความหนาแน่น แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นของมวลปูนซีเมนต์โดยทั่วไปเพิ่มขึ้น นอกจากมวลปูนซีเมนต์ที่บริเวณมุมระหว่างพื้นและผนังไซโลจะมีความหนาแน่นน้อยกว่าบริเวณศูนย์กลาง เนื่องจากผลของความฝืดและสภาพเงื่อนไขของพื้นผิว

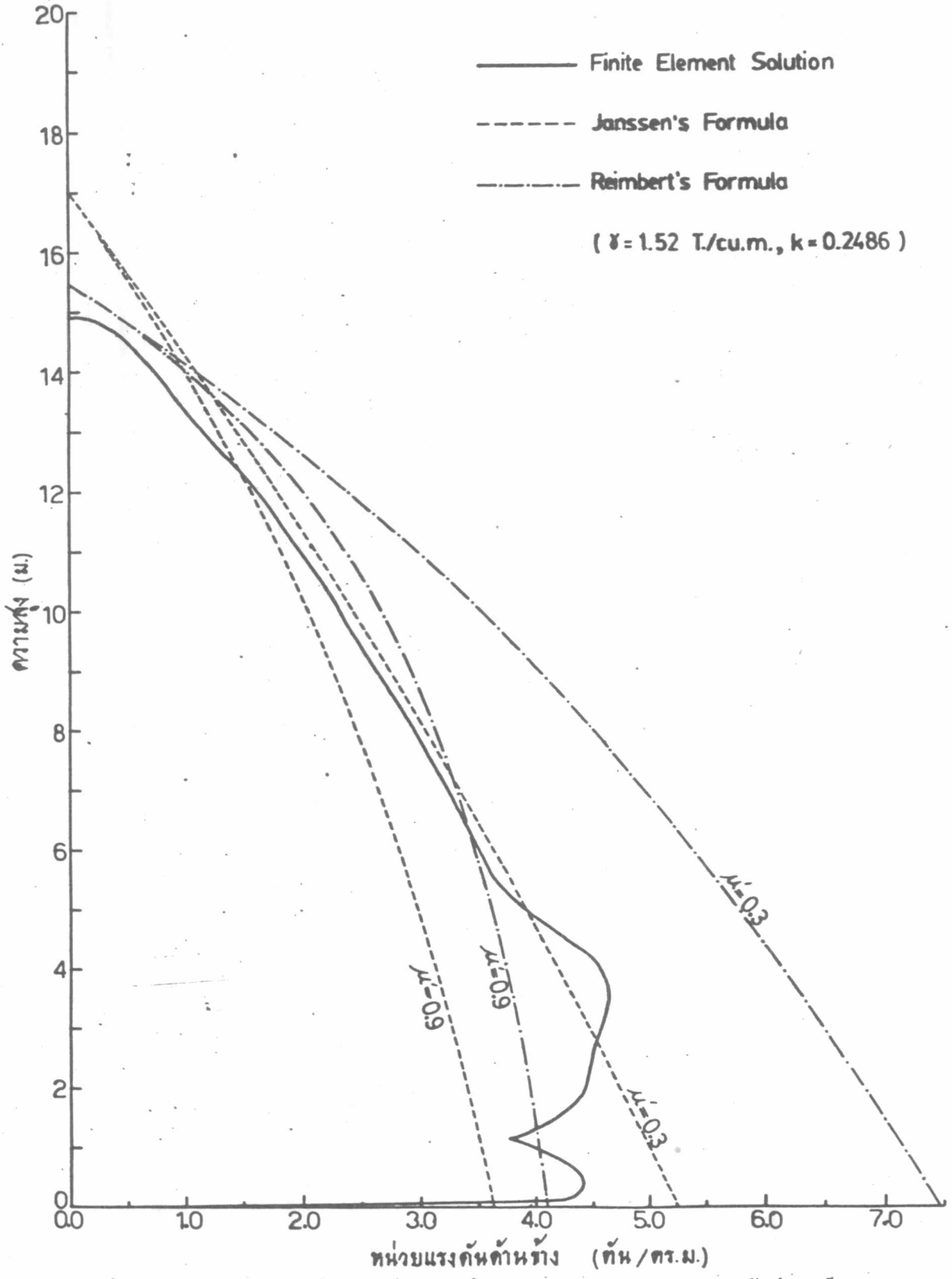
รูปที่ ๖.๑, ๖.๒ และ ๖.๓ แสดงการกระจายหน่วยแรงดันด้านข้างของปูนซีเมนต์ที่กระทำต่อผนังไซโลซึ่งได้จากวิธีไฟไนท์เอลเม้นท์เปรียบเทียบกับการใช้สูตรสำเร็จของ Janssen และ Reimbert จากสมการที่ (๒.๔) และ (๒.๘) ตามลำดับ ACI Committee 313[9] ได้แนะนำให้ใช้สูตรสำเร็จทั้งสองนี้สำหรับการหาหน่วยแรงดันด้านข้างของมวลบรรจุที่กระทำต่อผนังไซโลและเป็นสูตรที่นิยมใช้กันมาก ในการเปรียบเทียบนี้ได้ใช้ความหนาแน่นเฉลี่ยของปูนซีเมนต์ที่ได้จากวิธีไฟไนท์เอลเม้นท์คือ ๑.๔๔, ๑.๕๐ และ ๑.๕๒ ตันต่อลูกบาศก์เมตร สำหรับไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๓, ๖ และ ๑๒ เมตรตามลำดับ อัตราส่วนหน่วยแรงดันด้านข้างต่อหน่วยแรงดันแนวดิ่ง (k) ได้จากสูตร $k = (1 - \sin \phi)/(1 + \sin \phi)$ โดยสมมุติให้มุมของความฝืดภายในของปูนซีเมนต์ (Angle of Internal Friction of Cement, ϕ) เท่ากับมุมลาดชันของปูนซีเมนต์



รูปที่ ๖.๑ การเปรียบเทียบการกระจายหน่วยแรงดันด้านข้างของไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๓ เมตร โดยวิธีไฟไนท์เอลเม้นท์และการใช้สูตรสำเร็จ



รูปที่ ๖.๒ การเปรียบเทียบการกระจายหน่วยแรงดันด้านข้างของไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๖ เมตร โดยวิธีไฟไนท์เอลเม้นท์และการใช้สูตรสำเร็จ



รูปที่ ๖.๓ การเปรียบเทียบการกระจายหน่วยแรงดันด้านข้างของไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๑๒ เมตร โดยวิธีไฟไนท์เอลเม้นท์และการใช้สูตรสำเร็จ

ซึ่งจะได้ค่า k = 0.2486 ส่วนสัมประสิทธิ์ของความฝืดระหว่างปูนซีเมนต์และผนังไซโล (μ) ซึ่งทำด้วยเหล็ก ACI Committee 313[9] ได้กำหนดให้เท่ากับ ๐.๓ (ค่าประมาณ) และในรูปเดียวกันนี้ก็ได้แสดงหน่วยแรงดันด้านข้างโดยสูตรของ Janssen และ Reimbert เมื่อใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของความฝืดเท่ากับ ๐.๙ ซึ่งใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์เอลเม้นท์ (สำหรับช่วงที่หน่วยแรงดันด้านข้างมีค่าน้อยกว่า ๐.๗๘ ตันต่อตารางเมตร) การใช้สูตรของ Janssen และ Reimbert สำหรับไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๓ และ ๖ เมตร เมื่อ $\mu' = 0.3$ จะให้หน่วยแรงดันด้านข้างมากกว่าวิธีของไฟไนท์เอลเม้นท์ เมื่อใช้ $\mu' = 0.9$ จะให้หน่วยแรงดันน้อยกว่าวิธีของไฟไนท์เอลเม้นท์ แต่ลักษณะของการกระจายหน่วยแรงดันด้านข้างมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน สำหรับไซโลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๑๒ เมตร เมื่อ $\mu' = 0.3$ สูตรของ Reimbert ให้หน่วยแรงดันด้านข้างมากกว่าวิธีไฟไนท์เอลเม้นท์, ในขณะที่สูตรของ Janssen ให้หน่วยแรงดันด้านข้างที่ใกล้เคียงกับวิธีไฟไนท์เอลเม้นท์ และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างสูตรสำเร็จทั้งสองจะเห็นได้ว่าสูตรของ Janssen จะให้หน่วยแรงดันด้านข้างน้อยกว่าสูตรของ Reimbert สำหรับค่า μ' ที่เท่ากัน เมื่อเพิ่มค่า μ' จาก ๐.๓ ไปเป็น ๐.๙ ทำให้หน่วยแรงดันด้านข้างลดน้อยลง ทั้งนี้การลดลงของหน่วยแรงดันด้านข้างจะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของไซโลด้วย

จากการเปรียบเทียบการกระจายหน่วยแรงดันด้านข้างซึ่งได้จากวิธีไฟไนท์เอลเม้นท์และสูตรสำเร็จทั้งสองนั้นได้แสดงให้เห็นว่า การวิเคราะห์หาหน่วยแรงดันด้านข้างของมวลบรรจุเพื่อใช้ในการออกแบบก่อสร้างไซโลจะต้องคำนึงถึงข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติของมวลบรรจุ และวิธีการที่จะใช้ในการวิเคราะห์ ACI Committee 313[9] ได้เสนอข้อมูลของมวลบรรจุไว้หลายชนิด และได้กล่าวเสริมว่าควรจะใช้ข้อมูลซึ่งได้มาจากการทดลอง ส่วนการวิเคราะห์โดยใช้สูตรสำเร็จทั้งสองนั้นยังมีข้อบกพร่องคือไม่ได้พิจารณาถึงความหนาแน่นของมวลบรรจุซึ่งเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากการทรุดตัวของมวลบรรจุ, การลื่นไถลของมวลบรรจุ และสภาพเงื่อนไขของพื้นผิวของมวลบรรจุ ดังนั้นการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์เอลเม้นท์จะให้ผลที่ดีกว่าเพราะเป็นวิธีการที่สามารถจำลองระบบโครงสร้างอันซับซ้อนได้ดีที่สุด งานวิจัยของ Bishara, Mahmound and Chandrangsu[5] เกี่ยวกับพฤติกรรมของผลิตผลทางเกษตรที่บรรจุในไซโลโดยการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์เอลเม้นท์ได้ผลที่ใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยของ Wood[4] ซึ่งทำการสำรวจจากไซโลที่ใช้งานจริง ๆ

นั่นคือการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์เอลเม้นท์จะให้ผลเป็นที่เชื่อถือได้

นอกจากนี้ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ไม่ได้พิจารณาถึง Dynamic Effect ซึ่งวิศวกรผู้ออกแบบควรจะคำนึงถึง เพราะเป็นผลทำให้เกิดการทรุดตัวและหน่วยแรงดันเพิ่มขึ้นอีก

๖.๒ ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยต่อไป

สำหรับงานวิจัยขั้นต่อไปควรจะศึกษาถึงกรณีของการลำเลียงมวลบรรจุออกจากไซโล หรือทำการสำรวจหาข้อมูลจากไซโลที่ใช้บรรจุปูนซีเมนต์ในการใช้งานจริง เปรียบเทียบกับการวิเคราะห์