บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 การทดลองความสามารถในการเก็บความร้อน

ในการทดลองความสามารถในการเก็บความร้อนของถังน้ำ ได้ใช้วิธีต้มน้ำร้อนจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการแล้วจึงเทใส่ในถัง อุปกรณ์และวัสดุที่ใช้ในการต้มน้ำมี เตาถ่าน 2 ใบ ปีบ 4 ใบ และถ่านหุงต้ม การทดลองได้ใช้สถานที่ของห้องทดลองปฏิบัติการคอนกรีต ซึ่งเป็นสถานที่มีสภาวะอับลม เหมาะแก่การทดลอง การวัดอุณหภูมิ ได้ใช้เทอร์โมมิเตอร์ซึ่งอ่านได้สูงสุด 200 องศา เซลเซียส จำนวน 4 อัน โดยใช้ติดตรงกึ่งกลางของผนังถังด้านนอกในตำแหน่งตรงกันข้ามกันสองอัน ติดฝาถังบนด้านนอกหนึ่งอันและจุ่มอยู่ในน้ำร้อนภายในถังหนึ่งอัน นอกจากนี้ยังมีเทอร์โมมิเตอร์สำหรับวัดอุณหภูมิห้องอีกหนึ่งอัน ตัวถังทดลองตั้งอยู่บนอิฐบล็อคที่วางห่างกันพอสมควร เพื่อไม่ให้ก้นถังสัมผัสกับพื้น การทดลองแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

4.1.1 ถังเปล่าไม่หุ้มฉนวนยกเว้นท่อน้ำเข้าออกซึ่งเป็นโลหะนำความร้อนได้ดีเพื่อว่าจะได้ไม่มีผลการสูญเสียความร้อนที่ท่อเข้ามาเกี่ยวข้องกับการสูญเสียความร้อนที่ผ่านตัวถัง การวัดอุณหภูมิเริ่มวัดตั้งแต่เวลา 13.15 น. จนถึง 17.00 น. ติดต่อกันทุก ๆ ครึ่งชั่วโมง แล้วทำการวัดอีกทีในเวลา 9.00 น. ของวันรุ่งขึ้น ผลการทดลองและผลจากการคำนวนตามทฤษฎีได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1, 4.5 และรูปที่ 4.1 ปรากฏว่าได้ผลที่ใกล้เคียงกัน

4.1.2 ถังหุ้มฉนวนด้วยโฟมโพลีสไตรีน หนา 1 นิ้ว และสังกะสี จากผลการทดลองในข้อ 4.1.1 ปรากฏว่าน้ำภายในถังมีอุณหภูมิครั้งสุดท้ายในตอนเช้าต่ำกว่าอุณหภูมิ 40 องศา เซลเซียส จากการจำกัดความของ Narinder[30] ว่าน้ำร้อนคือน้ำที่มีอุณหภูมิตั้งแต่ 40 องศา เซลเซียสขึ้นไป จึงจำเป็นต้องปรับปรุงความสามารถในการเก็บความร้อน โดยใช้โฟมโพลีสไตรีน หนา 1 นิ้ว หุ้มเป็นฉนวนพร้อมกับหุ้มด้วยสังกะสีทับอีกชั้นหนึ่ง เพื่อป้องกันการเสียหายที่จะเกิดแก่

ฉนวน การทดลองวัดอุณหภูมิได้ทำการทดลองล่องครั้งเพื่อการตรวจสอบ ครั้งแรกเริ่มวัดอุณหภูมิตั้งแต่เวลา 12.00 น. จนถึง 17.00 น. ติดต่อกันทุก ๆ ครึ่งชั่วโมง แล้วทำการวัดอีกครั้งในเวลา 9.00 น. ของวันรุ่งขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ส่วนการทดลองครั้งที่สองเริ่มวัดอุณหภูมิตั้งแต่เวลา 12.00 น. จนถึง 22.00 น. ติดต่อกันทุก ๆ ชั่วโมง แล้วทำการวัดอีกครั้งในเวลา 6.00 น. ถึง 9.00 น. ติดต่อกันทุก ๆ ชั่วโมงของวันรุ่งขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งการทดลองทั้งสองครั้งให้ผลใกล้เคียงกันมาก ตารางที่ 4.6 แสดงผลจากการคำนวณตามทฤษฎี และรูปที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองกับทฤษฎี

4.1.3 ถังหุ้มด้วยสังกะสีโดยมีอากาศเป็นตัวกลาง จากการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศกับโฟมโพลีสไตรีนจะเห็นว่ามีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองอีกครั้งหนึ่งโดยได้เอาฉนวนโฟมโพลีสไตรีนออกทำให้เหลือช่องอากาศตรงกลางระหว่างสังกะสีกับผนังถังห่างกัน 1 นิ้ว แต่ด้านบนยังคงใช้ฉนวนตามเดิม การวัดอุณหภูมิเริ่มวัดตั้งแต่ 12.00 น. จนถึง 17.00 น. ติดต่อกันทุก ๆ ชั่วโมง แล้วทำการวัดอีกครั้งในเวลา 9.00 น. ของวันรุ่งขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.4 ผลจากการคำนวณตามทฤษฎีแสดงไว้ในตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับทฤษฎีแสดงไว้ในรูปที่ 4.3 ปรากฏว่าให้ผลที่ใกล้เคียงกัน

จากผลการทดลองพบว่าถังเมื่อไม่หุ้มฉนวน อุณหภูมิของน้ำร้อนภายในถังเริ่มต้น 67 องศาเซลเซียส ลดลง 43.3% เหลืออุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส ในเวลา 20 ชั่วโมง อุณหภูมิของน้ำที่เหลือนี้ต่ำกว่า 40 องศาเซลเซียส ซึ่งไม่ถือว่าเป็นน้ำร้อนตามนิยามของ Narinder[30] เมื่อหุ้มถังด้วยโฟมโพลีสไตรีนหนา 1 นิ้ว อุณหภูมิของน้ำร้อนภายในถังลดลงจากอุณหภูมิเริ่มต้น 70 องศาเซลเซียส เหลือ 55 องศาเซลเซียส หรือลดลง 21.4% ในเวลา 24 ชั่วโมง และเมื่อใช้ช่องว่างอากาศ 1 นิ้ว เป็นฉนวน อุณหภูมิของน้ำร้อนภายในถังลดลง 26.7% จากอุณหภูมิเริ่มต้น 70.9 องศาเซลเซียส เหลือ 52 องศาเซลเซียส ในเวลา 24 ชั่วโมง แสดงว่าการหุ้มฉนวนช่วยป้องกันการสูญเสียความร้อนของน้ำร้อนได้ดี อุณหภูมิของน้ำร้อนภายในถังสูงมากกว่า 50 องศาเซลเซียส ซึ่งมีความร้อนเพียงพอสำหรับการใช้ในวันต่อไป

4.2 การทดลองศึกษาพฤติกรรมของถังในการรับความดันภายใน

เพื่อทำการศึกษาความเค้นที่เกิดรอยแตกร้าว เริ่มแรกสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของลวดตาข่ายที่เสริม ว่าเป็นไปตามทฤษฎีที่คาดคะเนไว้หรือไม่

4.2.1 การทดลองและการเตรียมเครื่องมือ

ก. เครื่องอัดอากาศ SANCO กำลังอัดสูงสุด 400 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

ข. เกจวัดความดัน อ่านละเอียด 1 ปอนด์ต่อตารางนิ้วและสูงสุด 60 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

ค. เครื่องอ่านความเครียดสถิต (Static Strain Indicator) Type SM-60D และเครื่อง Switching and Balancing Box Model SS-R ใช้อ่านความเครียดที่ได้จากเกจวัดความเครียดแบบไฟฟ้า อ่านได้ละเอียด 10×10^{-6} ซม./ซม.

ง. เกจวัดความเครียดแบบไฟฟ้า (Electrical Strain Gage) ชนิด KFC-10-C1-11 ความยาวเกจ 10 มม. ต่อแบบ Half Bridge พร้อม Dummy ตำแหน่งเกจที่ติดถังมีดังนี้

1) ถัง T4-P ติดผิวด้านนอกในแนวตรงกันข้ามกันในระยะ $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ และ $\frac{3}{4}$ ของความสูงภายในถัง การติดจะติดทั้งในแนวนอนและแนวตั้งรวมทั้งสิ้น 12 ตัว

2) ถัง T2-P ติดผิวด้านนอกในแนวระยะกึ่งกลางถังสามจุดเว้นช่วงเท่า ๆ กันรอบถัง การติดจะติดในแนวนอนทั้งสามตัว เหตุผลที่ติดเกจวัดความเครียดน้อยกว่าถังอีกใบเพราะว่า ต้องการศึกษาความเครียดในแนวรอบวงที่ระยะกึ่งกลางของถังเท่านั้น

จ. ใช้ปูนขาวละลายน้ำข้น ๆ ทารอบ ๆ ตัวถังให้ทั่ว เพื่อง่ายแก่การสังเกตรอยซึมของน้ำและรอยแตกร้าวของถัง จากนั้นเติมน้ำเข้าใส่ถังจนถึงระดับท่อน้ำที่ใช้ต่อสายยางเข้ากับเครื่องอัดอากาศ เมื่อเครื่องมือทุกอย่างเรียบร้อยแล้วก็เริ่มการทดลอง โดยค่อย ๆ ปล่อยความดันจากเครื่องอัดอากาศเข้าถัง

4.2.2 ผลการทดลอง

ในแต่ละขั้นของการเพิ่มความดันภายในถัง จะตรวจสอบและสังเกตรอยแตกร้าวเริ่มแรกทุกครั้ง (ดูรูปที่ 4.5 - 4.6) ผลการทดลองมีดังนี้

ก. ถัง T4-P ในการเพิ่มความดันเข้าถัง ได้เพิ่มทีละ 2 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เมื่อความดันภายในถังเป็น 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้วก็เริ่มมีรอยซึมของน้ำเล็ก ๆ ที่ผิวหน้า 1 ของถัง (เมื่อแบ่งผิวนอกของถังออกเป็น 4 ส่วนเท่า ๆ กัน ผิวหน้า 1 เป็นผิวที่มีท่อความดันเข้าอยู่ตรงกลาง) เมื่อความดันภายในถังเป็น 16 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว มีน้ำซึมปุดออกมาเป็นฟองอากาศติดต่อกันเป็นทางยาวประมาณ 5 ซม. ในแนวดิ่งที่ผิวหน้า 1 ห่างเยื้องมาทางล่างของท่อความดันเข้าประมาณ 15 ซม. แต่รอยแตกร้าวยังมองด้วยตาเปล่าไม่เห็นรอยซึมของน้ำได้ขยายใหญ่ขึ้นจนกระทั่งถึงความดันภายในถัง 24.5 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ลักษณะถังก็ยังเหมือนเดิม ระหว่างที่กำลังอ่านเกจวัดความเครียดอยู่นั้น ความดันภายในถังได้ลดลงต่ำกว่า 24 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เมื่อเพิ่มความดันเข้าไปในถังอีกจนเป็น 24 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ถังก็เกิดรอยแตกร้าวยาวประมาณ 40 ซม. ในแนวดิ่งอย่างเห็นได้ชัดเจนที่หน้า 1 แล้วก็มีน้ำพุ่งไหลออกมาตามรอยร้าวทำให้รอยซึมของน้ำเกือบเต็มผิวหน้า 1 ตอนนี้ความดันภายในถังที่อ่านจากเกจวัดความดันจะลดต่ำลง และเกจวัดความเครียดแบบไฟฟ้าบางตัวได้เสียไปเพราะถูกน้ำ จากนั้นได้เพิ่มความดันเข้าไปในถังอีกจนเกิดรอยแตกร้าวในแนวดิ่งเพิ่มขึ้นอีก 3 รอย ห่างกันประมาณ 10 ซม. แต่ละรอยยาวประมาณ 40 ซม. เท่ากันในหน้า 1 และ 2 พร้อมกับน้ำในถังได้ไหลพุ่งออกจากถังอย่างแรง การทดลองจึงสิ้นสุดลง เป็นที่น่าสังเกตว่าหน้า 3 ไม่มีรอยน้ำซึมใด ๆ เลย และหน้า 4 มีรอยน้ำซึมขนาดเล็ก ๆ เพียงแห่งเดียวเท่านั้น ส่วนรอยแตกร้าวในแนวนอนรอบ ๆ ตัวถังนั้นไม่มีปรากฏเมื่อมองด้วยตาเปล่า

ข. ถัง T2-P การเพิ่มความดันภายในถังได้เพิ่มขึ้นทีละ 1 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เมื่อความดันภายในถังเป็น 6 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ก็เริ่มมีรอยซึมของน้ำเล็ก ๆ ที่หน้า 1, 2 และ 3 เมื่อความดันภายในถังเป็น 9 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ก็มีน้ำซึมปุดออกมาเป็นฟองอากาศติดต่อกันเป็นทางยาวประมาณ 7 ซม. ในแนวดิ่งที่ผิวหน้า 1 ห่างเยื้องมาทางล่างของท่อความดันเข้าประมาณ

10 ซม. รอยแตกร้าวเป็นแบบ Hair Line Crack จนกระทั่งเมื่อความดันภายในถังเป็น 14 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ก็เกิดรอยแตกร้าวเพิ่มขึ้นอีกอย่างเห็นได้ชัดเจนในแนวดิ่งยาวประมาณ 30 ซม. พร้อมกับน้ำไหลพุ่งออกที่หน้า 1, 2 และ 4 เมื่อเพิ่มความดันภายในถังขึ้นอีกเป็น 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ก็เกิดรอยแตกร้าวในแนวดิ่งเพิ่มขึ้นอีก 5 รอย ห่างกันจากรอยเดิมประมาณ 10 ซม. ที่หน้า 1, 2 และ 4 แต่ละรอยยาวประมาณ 20-40 ซม. พร้อมกับน้ำไหลพุ่งออกอย่างแรงและพร้อมกันนี้ก็เกิดรอยแตกร้าวพร้อมกับน้ำไหลพุ่งออกในแนวนอนยาวประมาณ 50 ซม. ตรงระยะประมาณกึ่งกลางถังที่หน้า 1 และ 2 ทำให้การทดลองสิ้นสุดลง

4.2.3 การเปรียบเทียบผลการทดลองอัดความดันกับทฤษฎีและสูตรสำเร็จ

ในการเปรียบเทียบความสามารถรับความดันภายในของถัง ได้แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเค้นแตกร้าวเริ่มแรกของถังต่อหน่วยแรงดึงประลัยของมอร์ต้าร์กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของลวดตาข่ายในแนวแรง พร้อมกันนี้ได้นำข้อมูลของ Guerra, Naaman และ Shah[19] มาร่วมเปรียบเทียบด้วยดังรูปที่ 4.9

จากการทดลองถัง T2-P และ T4-P พบว่า ค่าความเค้นตอนแตกร้าวเริ่มแรกของถังมีค่าต่ำกว่าค่าที่คาดคะเนไว้โดย Broutman ฯ [17] และ Nathan ฯ [18] 79% และ 53% และต่ำกว่า Naaman[6] 80% และ 63% ตามลำดับ

จากการทดลองของ Guerra, Naaman และ Shah[19] ซึ่งได้ทำการทดลองอัดความดันถังเก็บน้ำเฟอร์โรซีเมนต์ โดยมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของลวดตาข่ายเสริมในทิศทางของแรงกระทำเป็น 1.21 1.69 2.55 3.63 และ 5.24 นิ้ว^2/นิ้ว^3 ตามลำดับ ซึ่งสองค่าแรกเสริมลวดตาข่ายต่ำกว่าที่ Naaman[12] แนะนำไว้ 39.5% และ 15.5% พบว่าค่าความเค้นตอนแตกร้าวเริ่มแรกของถังใกล้เคียงกับค่าที่คาดคะเนโดย Broutman ฯ [17] และ Nathan ฯ [18] แต่ต่ำกว่า Naaman[6] 29.5% และ 35.8% ตามลำดับ เมื่อเสริมลวดตาข่ายมากขึ้นพบว่า ค่าความเค้นตอนแตกร้าวเริ่มแรกของถังสูงกว่าค่าที่คาดคะเนโดย Broutman ฯ [17] 18.2% 22.1% และ 57.3% ตามลำดับ และสูงกว่า Nathan ฯ [18] 23.7% 27.2% และ 64%

ตามลำดับ แต่ต่ำกว่า Naaman[6] 49.6% 77% และ 78.3% ตามลำดับ

จากการพิจารณาค่าที่คาดคะเนโดย Broutman ฯ[17] และ Nathan ฯ[18] พบว่าให้ค่าที่ใกล้เคียงกันมาก แต่ของ Naaman[6] ให้ค่าที่สูงกว่ามาก ดังนั้นในการออกแบบจึงให้ค่าที่แตกต่างกันออกไปและเนื่องจากข้อมูลทางการทดลองถังเก็บน้ำเฟอร์โร-ซีเมนต์อัดด้วยความดันมีน้อยมาก จึงไม่สามารถจะวิจารณ์ได้ว่าสูตรหรือทฤษฎีใดสามารถให้ค่าใกล้เคียงกับการทดลองมากที่สุด ในรูปที่ 4.9 ค่า $\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{mu}}$ จากสูตร LAW OF MIXTURE มีค่าลดลง เมื่อค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของลวดตาข่ายมากกว่า 3.5 นิ้ว^2/นิ้ว^3 โดยประมาณ เป็นเพราะว่าค่า $\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{mu}}$ เป็นปฏิภาคกับค่า V_{fL} หรือ $\frac{dS}{4}_{RL}$ และค่า d ซึ่งเป็นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นลวดที่ใช้ในการทดลองของ Guerra ฯ[19] มีค่าต่าง ๆ กัน จึงทำให้ค่า $\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{mu}}$ กับค่า S_{RL} ไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้น ซึ่งหากขนาดของเส้นลวดเป็นค่าคงที่แล้ว ความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองนี้ก็จะเป็นเส้นตรง และถ้าหากค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของลวดตาข่ายต่ำกว่า 1.0 นิ้ว^2/นิ้ว^3 โดยประมาณแล้ว ค่าความเค้นตอนแตกร้าวเริ่มแรกของถังเก็บน้ำจะมีค่าเข้าใกล้ค่ากำลังของซีเมนต์มอร์ต้าร์รับแรงดึงประลัย แต่จากการทดลองในงานวิจัยพบว่าให้ค่าต่ำกว่ากำลังของซีเมนต์มอร์ต้าร์รับแรงดึงประลัย เป็นเพราะว่าการฉาบอัดถังไม่แน่นสมบูรณ์เท่ากับการหล่อลูกปูนตัวอย่างสำหรับทดลองหากำลังของซีเมนต์มอร์ต้าร์ แต่ก็แข็งแรงเพียงพอสำหรับการใช้เป็นถังเก็บน้ำเหมือนถังที่สร้างจากแหล่งอื่น ๆ ในตารางที่ 2.2 โดยได้ใส่น้ำทิ้งไว้ภายในถังเป็นเวลา 4 เดือน แล้วสังเกตไม่พบรอยซึมของน้ำ รูปที่ 4.7 และ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันภายในถังกับความเครียดของผนังถังในแนวรอบถัง พบว่าเส้นกราฟไม่ได้แสดงจุดคลากของผนังถัง เพราะว่าเมื่อถังเริ่มเกิดรอยแตกร้าวขึ้นน้ำภายในถังก็จะรั่วออกมาตามรอยแตกร้าว ทำให้เส้นกราฟเบนกลับทันทีและการทดลองต้องยุติลง เพราะความดันภายในถังลดลงอย่างมาก ส่วนความเครียดของผนังถังที่ตำแหน่งตรงกันข้ามได้ให้ค่าที่ต่างกัน เป็นการแสดงว่าการฉาบอัดปูนเข้ากับผนังถังไม่แน่นเท่ากันสม่ำเสมอ ทำให้จุดที่อัดปูนไม่แน่นเกิดความเครียดมากกว่าจุดที่อัดปูนแน่นกว่า