

การวิเคราะห์ความเข้มของความเค้นในถังความดัน มีรูเจาะแบบวงกลมที่ได้รับการเสริม โดยวิธีการไฟไนท์เอลิเมนต์

นายวิรัตน์ ประคิษฐ์เวียงคำ* และ ดร. วิรัตน์ จอมขวา**

บทคัดย่อ

ถังความดันที่ใช้ในงานในวงการอุตสาหกรรม เช่น ถังบรรจุแก๊สและสารเคมีต่าง ๆ จะต้องมีรูเจาะวงรี หรือวงกลม หรือลักษณะอื่น ๆ เพื่อใช้สำหรับการเข้าตรวจสอบทำความสะอาดภายในถัง หรือเพื่อต่อท่อต่าง ๆ ซึ่งบริเวณรูเจาะนี้จะเป็นจุดที่มีความเข้มของความเค้นสูงกว่าบริเวณอื่น ๆ จึงมีความจำเป็นต้องเสริมความหนาของบริเวณรูเพื่อเพิ่มความปลอดภัย โรงงานที่ผลิตถังความดันมักจะประสบปัญหาในการเสริมความหนาของบริเวณรู เพราะหากเสริมน้อยไป ก็ทำให้เกิดความเสียหายแก่ถัง และเป็นอันตรายในการใช้งาน แต่ถ้าหากเสริมมากไปก็จะเป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย จึงได้มีการพยายามในการค้นคว้าวิจัย เพื่อหาค่าความเค้นรอบรูเจาะถังที่ได้รับการเสริม ในประเทศไทยการศึกษาค่าความเข้มของความเค้น ด้วยวิธีการทดลองยังไม่สามารถกระทำได้อย่างกว้างขวาง เนื่องจากขาดแคลนอุปกรณ์ และแหล่งเงินทุนสนับสนุนการวิจัย แต่ในปัจจุบันคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล และโปรแกรมวิเคราะห์ทางไฟไนท์เอลิเมนต์พัฒนาไปกว่าเดิมมาก ดังนั้นการวิเคราะห์ความเข้มของความเค้นโดยใช้คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลจึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัย และศึกษาหาค่าความเข้มของความเค้นของรูเจาะถังความดันทรงกระบอก ที่มีแผ่นเสริมกลมรอบรูแบบสมดุขย ขนาดต่าง ๆ กัน ภาระที่กระทำกับถังมีเฉพาะภาระแรงดันภายในถัง ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าแผ่นเสริมแบบสมดุขยสามารถลดค่าความเข้มของความเค้นลงได้ จากก่อนมีแผ่นเสริมค่าความเข้มของความเค้นเป็น 2.57 เมื่อเสริมตามมาตรฐาน ASME คือที่สัดส่วนของเส้นผ่าศูนย์กลางแผ่นเสริม (D) ต่อเส้นผ่าศูนย์กลางรูเจาะ (d) และสัดส่วนของความหนาแผ่นเสริม (h) ต่อความหนาถัง (t) เท่ากับ 2 ค่าความเข้มของความเค้นลดลงเป็น 1.73 ซึ่งลดลง 32.68% ที่รูเจาะขนาด 6 นิ้ว และลดลง 27.75% ที่รูเจาะขนาด 3 นิ้ว ผลที่ได้จากการวิจัยนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับเปรียบเทียบกับกรวิจัยปัญหาในลักษณะเดียวกัน ด้วยวิธีการอื่น และสามารถนำไปประกอบการพิจารณาในปัญหาทางานที่เกิดขึ้นจริง

* รองผู้จัดการโรงงาน และผู้จัดการผลิตถังแรงดันบริษัท โซคอนเอ็นจิเนียริง จำกัด

** อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

บทนำ

ถึงความดันที่ใช้ในวงการอุตสาหกรรม เช่นถังบรรจุแก๊สและสารเคมีต่าง ๆ มักจะมีการเจาะรู วงรี วงกลม หรือลักษณะอื่น ๆ เพื่อใช้สำหรับการเข้าตรวจสอบ ทำความสะอาดภายในถัง หรือ เพื่อต่อท่อต่าง ๆ ซึ่งบริเวณรูเจาะนี้จะเป็นจุดที่มีค่าความเข้มของความเค้นสูงกว่าบริเวณอื่น ๆ จึงต้องมีการเสริมความหนารอบบริเวณรูเจาะเพื่อเพิ่มความปลอดภัย โรงงานที่ผลิตถังความดันมักจะประสบปัญหาในการเสริมความหนารอบบริเวณรู เพราะถ้าหากเสริมน้อยไปก็จะทำให้เกิดความเสียหายแก่ถังได้ แต่ถ้าหากเสริมมากเกินไปก็จะเป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย จึงมีความพยายามที่จะทำการค้นคว้าวิจัย เพื่อหาค่าความเค้นรอบรูเจาะถึงที่ได้รับการเสริม เมื่อมีขนาดของรูและขนาดของการเสริมต่าง ๆ กัน ไบซอนและมอริแกน [1] ได้ทำการวิจัยโดยการทดลองใช้เกจวัดความเครียด หาค่าความเค้นที่ขอบรูเจาะที่ได้รับการเสริม ซึ่งจะทำได้ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจริง แต่วิธีการใช้เกจวัดความเครียดนั้นต้องใช้วัสดุจริงในการทดลอง ทำให้สิ้นเปลืองเวลา และค่าใช้จ่ายมาก

วิธีไฟไนท์เอเลเมนต์เป็นวิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical method) วิธีหนึ่งใช้ในการประมาณค่าคำตอบของปัญหา โดยอาศัยเครื่องคอมพิวเตอร์ช่วยในการประมวลผล ซึ่งวิธีไฟไนท์เอเลเมนต์นี้สามารถใช้วิเคราะห์ชิ้นส่วนที่มีรูปร่างสลับซับซ้อนได้ โดยทำการจำลองแบบและใช้ข้อมูลต่าง ๆ จากโครงสร้างที่จะนำมาวิเคราะห์ การศึกษานี้เป็นการศึกษาผลของการเสริมความหนาแบบวงแหวนรอบบริเวณรูเจาะวงกลมของถังความดันทรงกระบอก เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มของความเค้นตรงบริเวณขอบรูเจาะ สำหรับวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์จะใช้โปรแกรมทางไฟไนท์เอเลเมนต์ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์นั้นสามารถใช้เป็นแนวทางในการออกแบบแผ่นเสริมสำหรับถังแรงดันได้

สมมุติฐานของการวิจัย

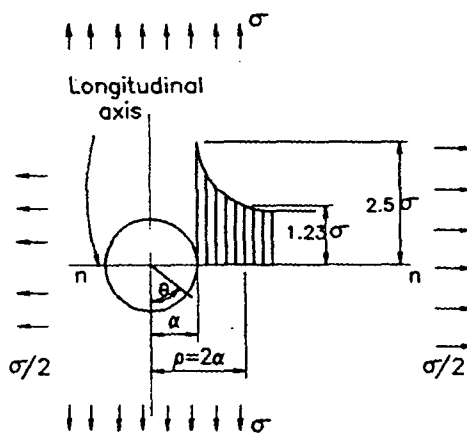
1. วัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์มีคุณสมบัติไอโซโทรปิก (Isotropic) และโฮโมจีเนียส (Homogenous)
2. แบบจำลองที่ใช้วิจัยไม่มีผลของความเค้นตกค้าง และไม่คำนึงถึงผลของความเครียดอันเนื่องมาจากความร้อน
3. แผ่นเสริมรอบรูเจาะเป็นเนื้อเดียวกันกับผนังถัง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

Durelli และ Murray [3] ได้วิเคราะห์การกระจายตัวของความเค้นรอบรูเจาะแบบวงรีในแผ่นราบไว้โดยในกรณีที่มีความเค้นสองแนวแกนเป็น σ_L และ σ_C และมีอัตราส่วนของแกนยาวต่อแกนสั้นของรูวงรีเป็น a/b จากจุดปลายแกนสั้น ($x=0$) ถึงจุดปลายแกนยาว ($x=a$) ดังนี้

$$\sigma_r = \sigma_L \left[\frac{2(n+1)k + (n-1)(k^2 - 1) - (n-1)(k+1)^2 (2(x/a)^2 - 1)}{(k^2 + 1) - (k^2 - 1)(2(x/a)^2 - 1)} \right]$$

กรณีการเจาะเป็นรูวงกลม $a/b = k = 1$ สำหรับภาชนะทรงกระบอกรับความดันภายใน $\sigma_L/\sigma_C = n = 2$ และเมื่อขนาดของรูน้อยเมื่อเทียบกับขนาดของถังความดัน (รัศมีมีความโค้งของระนาบรูมีค่ามาก) สามารถใช้สมการของ Durelli และ Murray ได้ ดังนั้นเมื่อแทนค่าลงในสมการจะได้ว่าความเค้นสูงสุดเกิดขึ้นที่จุด n , $x=0$ (ดูรูปที่ 3) จะมีค่าเท่ากับ $2.5\sigma_L$ และที่จุด m , $x=a$ จะมีค่าเท่ากับ $0.5\sigma_L$



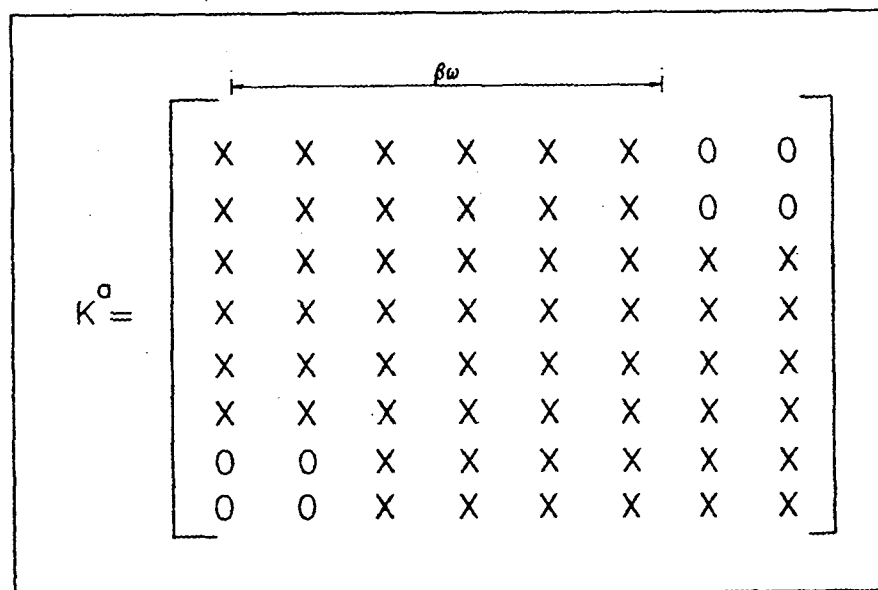
รูปที่ 1 แสดงตำแหน่งจุด m และ n ที่ขอบบริเวณรูเจาะวงกลมบนถังทรงกระบอก

การดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยหาค่าความเข้มของความเค้นรอบรูเจาะของถังความดันทรงกระบอก ทำโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปทางไฟไนท์เอเลเมนต์และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลจากการทดลองโดยวิธีเคจวัดความเครียดของไบซอนและมอริแกน [1]

คุณลักษณะของแบบจำลองถังความดันทรงกระบอก และค่าประกอบการคำนวณมีดังนี้

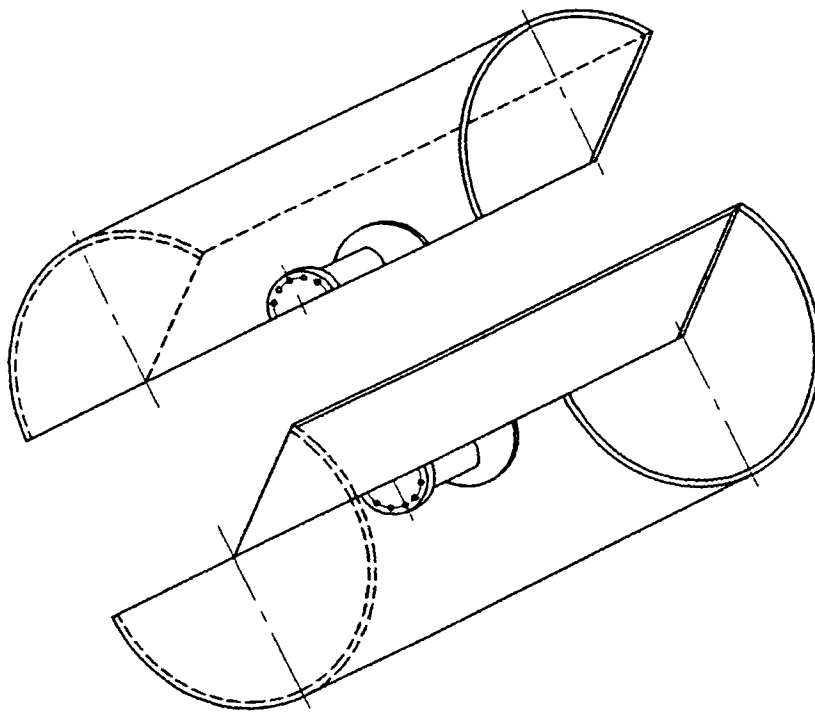
ความดันภายใน	150	ปอนด์/ตารางนิ้ว
ความหนาฝาปิดแบบฝาเรียบด้านบนและด้านล่าง	1.25	นิ้ว
โมดูลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุ	3.0×10^7	ปอนด์/ตารางนิ้ว
อัตราส่วนปัวซองของวัสดุ	0.3	



รูปที่ 2 แสดงแบบจำลองถังความดันทรงกระบอกและภาระแรงดัน

การวิเคราะห์แบบจำลองถึงความดันทรงกระบอกที่มีรูเจาะ

นำแบบจำลองถึงความดันทรงกระบอกที่มีรูเจาะ และมีการเสริมความหนาขอบ ๆ บริเวณรูเจาะ แบบจำลองในการวิเคราะห์นี้มี 2 ขนาด คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 48 นิ้ว ยาว 60 นิ้ว ความหนา (t) 0.625 นิ้ว และเส้นผ่านศูนย์กลาง 96 นิ้ว ยาว 120 นิ้ว ความหนา (t) 0.62 นิ้ว ส่วนขนาดของรูเจาะนั้นมี 2 ขนาด คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (d) 3 นิ้ว และ 6 นิ้ว การเสริมความหนาขอบรูเจาะมีหลายขนาด โดยขนาดของการเสริมจะระบุเป็นอัตราส่วนระหว่างความหนาของแผ่นเสริม (h) ต่อความหนาของผนังถึง (t) โดยให้เท่ากับ 1, 1.5, 2, 3, 4 และอัตราส่วนระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นเสริม(D)ต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูเจาะ (d) เท่ากับ 1, 1.25, 1.5, 2, 2.5 โดยที่ตามมาตรฐาน ASME- นั้นได้กำหนดให้การออกแบบแผ่นเสริมให้มีอัตราส่วน h/t เท่ากับ 2 ซึ่งอัตราส่วนนี้เป็นอัตราส่วนที่พื้นที่หน้าตัดของแผ่นเสริมต่อพื้นที่หน้าตัดของรูเจาะเท่ากับ 1 การแบ่งเอเลเมนต์นั้นจะหนาแน่นขึ้นบริเวณรอบรูเจาะ ดังแบบจำลองแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงแบบจำลองถึงความดันทรงกระบอกที่เจาะรูและมีการเสริมรอบรู

ผลการวิจัย

จากผลการวิเคราะห์ค่าการกระจายของความเค้นรอบรูเจาะแบบวงกลม ที่ได้รับการเสริมในถึงความดันโดยวิธีการไฟไนท์เอลิเมนต์ ได้ผลการวิเคราะห์ในแต่ละขั้นตอนดังต่อไปนี้

ถึงความดันทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 48 นิ้ว.

ตารางที่ 1 แสดงผลของค่าความเข้มของความเค้นแบบรูเจาะวงกลมขนาด 3 นิ้ว และตารางที่ 2 เป็นการแสดงผลของความเข้มของความเค้นแบบรูเจาะขนาด 6 นิ้ว

รูปที่ 4 ถึงรูปที่ 9 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าความเข้มของความเค้นกับผลจากวิธีเกจวัดความเครียดของไบซอน [1]

ถึงความดันทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 96 นิ้ว.

ตารางที่ 3 แสดงผลของค่าความเข้มของความเค้นแบบรูเจาะวงกลมขนาด 3 นิ้ว และตารางที่ 4 เป็นการแสดงผลของความเข้มของความเค้นแบบรูเจาะขนาด 6 นิ้ว

รูปที่ 10 ถึงรูปที่ 15 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าความเข้มของความเค้นกับผลจากวิธีเกจวัดความเครียดของไบซอน [1]

สรุปผลการวิเคราะห์

จากการวิเคราะห์ค่าความเข้มของความเค้นรอบรูเจาะกลม ในถึงความดันทรงกระบอกที่ได้รับการเสริม โดยวิธีการไฟไนท์เอลิเมนต์ สามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้ดังนี้

1. จากการวิเคราะห์แบบจำลองถึงความดันทรงกระบอก ผลที่ได้เป็นไปตามหลักการของวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ โดยเมื่อกำหนดจำนวนเอลิเมนต์ให้ละเอียดขึ้น ก็จะได้ผลลู่เข้าหาค่าตอบ (Convergence) และมีค่าความคลาดเคลื่อนลดลง แบบจำลองที่แบ่งจำนวนเอลิเมนต์ออกเป็น 192 เอลิเมนต์ นับว่ามีความเหมาะสมสามารถใช้เป็นแบบจำลองในการวิเคราะห์ขั้นต่อไปได้ เนื่องจากให้ค่าที่ใกล้เคียงกับคำตอบมากมีความคลาดเคลื่อนเพียง -0.59% และมีจำนวนเอลิเมนต์ไม่มากเกินไป ทำให้ประหยัดเวลาในการคำนวณ แบบจำลองถึงความดันทรงกระบอกนี้สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ความเค้น ในถึงความดันทรงกระบอกขนาดใด ๆ

2. จากการวิเคราะห์แบบจำลองถึงความดันทรงกระบอกที่มีรูเจาะกลมและต่อท่อขนาดต่าง ๆ ตำแหน่งของความเข้มของความเค้นสูงสุดจะเกิดที่ขอบรูด้านล่างตามแกนยาวของถัง ซึ่งเป็นไปตามหลักทฤษฎีที่ว่าความเค้นสูงสุดจะเกิดที่ขอบรูตามแกนยาวของถังในกรณีที่ ความเค้นตามแนวเส้นรอบวง(σ_c) มีค่าเป็น 2 เท่าของความเค้นตามแนวยาว (σ_L)

3. ค่าความเข้มของความเค้นของรูเจาะดังที่ยังไม่ได้มีการเสริมรอบรูตามทฤษฎีของความเค้นและวิธีเกจวัดความเครียดมีค่าเท่ากัน คือ 2.5 ส่วนจากการวิเคราะห์แบบจำลองจะได้ค่าความเข้มขอ

ความเค้นโดยเฉลี่ยเท่ากับ 2.325 ซึ่งเป็นความคลาดเคลื่อนเท่ากับ -7.00% ทั้งนี้มีผลมากจากความโค้งของดั่ง และขนาดของรูเจาะที่ต่างกัน

4. เปอร์เซ็นต์การลดลงของค่า K ในการเสริมแผ่นเสริมด้วยอัตราส่วนที่เท่า ๆ กันรูขนาดที่ใหญ่กว่าจะมีเปอร์เซ็นต์การลดลงของความเค้นได้มากกว่ารูขนาดเล็ก เปรียบเทียบได้จากรูเจาะขนาด 3 นิ้ว และ 6 นิ้ว ก่อนเสริมรูเจาะขนาด 3 นิ้ว จะมีค่า K สูงกว่ารูขนาด 6 นิ้ว แต่เมื่อเสริมรอบรูเจาะค่าความเค้นของรูเจาะ 6 นิ้ว จะลดลงได้มากกว่า

5. ค่าความเข้มของความเค้นของรูเจาะดั่งที่ได้รับการเสริมรอบรูด้วยสัดส่วนความโต และความหนาของแผ่นเสริมขนาดต่าง ๆ นั้น ผลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองใกล้เคียงกับผลที่ได้จากวิธีแกว้ดความเครียด ส่วนสัดส่วนการเสริมตามมาตรฐาน ASME ที่ D/d และ h/t เท่ากับ 2 นั้น ให้ผลค่า K อยู่ระหว่าง 1.58-1.73 ซึ่งตามมาตรฐาน ASME ถือว่ามีความปลอดภัยในการใช้งานได้เพียงพอ

จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นแบบจำลองที่ถูกต้องและเหมาะสม สามารถนำไปใช้เป็นแบบจำลองในการออกแบบเสริมรอบรูเจาะของดั่งความดันทรงกระบอกได้

ตารางที่ 1 แสดงค่าความเข้มของความเค้นรอบรูเจาะ(K) ที่มีการเสริมขนาดต่าง ๆ กัน ของถังขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 48 นิ้ว รูเจาะขนาด 3 นิ้ว

		$\frac{h}{t} = 1$	$\frac{h}{t} = 1.5$	$\frac{h}{t} = 2$	$\frac{h}{t} = 3$	$\frac{h}{t} = 4$
รูเจาะที่	D/d	K				
1	1.00	2.27	2.27	2.27	2.27	2.27
2	1.25	2.27	2.17	2.07	1.91	1.81
3	1.50	2.27	2.01	1.81	1.55	1.37
4	1.75	2.27	1.95	1.71	1.40	1.19
5	2.00	2.27	1.90	1.64	1.32	1.11
6	2.25	2.27	1.87	1.60	1.26	1.05
7	2.50	2.27	1.85	1.56	1.22	1.01

ตารางที่ 2 แสดงค่าความเข้มของความเค้นสูงสุดรอบรูเจาะที่มีการเสริมขนาดต่าง ๆ กัน ของถังขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 48 นิ้ว รูเจาะขนาด 6 นิ้ว

		$\frac{h}{t} = 1$	$\frac{h}{t} = 1.5$	$\frac{h}{t} = 2$	$\frac{h}{t} = 3$	$\frac{h}{t} = 4$
รูเจาะที่	D/d	K				
1	1.00	2.57	2.57	2.57	2.57	2.57
2	1.25	2.57	2.35	2.13	1.85	1.68
3	1.50	2.57	2.20	1.92	1.64	1.35
4	1.75	2.57	2.12	1.81	1.44	1.22
5	2.00	2.57	2.06	1.73	1.36	1.14
6	2.25	2.57	2.00	1.66	1.29	1.07
7	2.50	2.57	1.95	1.59	1.23	1.01

ตารางที่ 3 แสดงค่าความเข้มของความเค้นสูงสุดรอบรูเจาะที่มีการเสริมขนาดต่าง ๆ กัน ของถังขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 96 นิ้ว รูเจาะขนาด 3 นิ้ว

		$\frac{h}{t} = 1$	$\frac{h}{t} = 1.5$	$\frac{h}{t} = 2$	$\frac{h}{t} = 3$	$\frac{h}{t} = 4$
รูเจาะที่	D/d	K				
1	1.00	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14
2	1.25	2.14	2.05	1.97	1.84	1.74
3	1.50	2.14	1.92	1.73	1.50	1.34
4	1.75	2.14	1.86	1.65	1.37	1.18
5	2.00	2.14	1.82	1.58	1.28	1.08
6	2.25	2.14	1.80	1.55	1.24	1.03
7	2.50	2.14	1.77	1.52	1.20	1.01

ตารางที่ 4 แสดงค่าความเข้มของความเค้นสูงสุดรอบรูเจาะที่มีการเสริมขนาดต่าง ๆ กัน ของถังขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 96 นิ้ว รูเจาะขนาด 6 นิ้ว

		$\frac{h}{t} = 1$	$\frac{h}{t} = 1.5$	$\frac{h}{t} = 2$	$\frac{h}{t} = 3$	$\frac{h}{t} = 4$
รูเจาะที่	D/d	K				
1	1.00	2.32	2.32	2.32	2.32	2.32
2	1.25	2.32	2.13	1.95	1.71	1.57
3	1.50	2.32	2.00	1.76	1.45	1.26
4	1.75	2.32	1.95	1.68	1.33	1.15
5	2.00	2.32	1.90	1.63	1.29	1.08
6	2.25	2.32	1.88	1.59	1.25	1.05
7	2.50	2.32	1.84	1.55	1.23	1.03

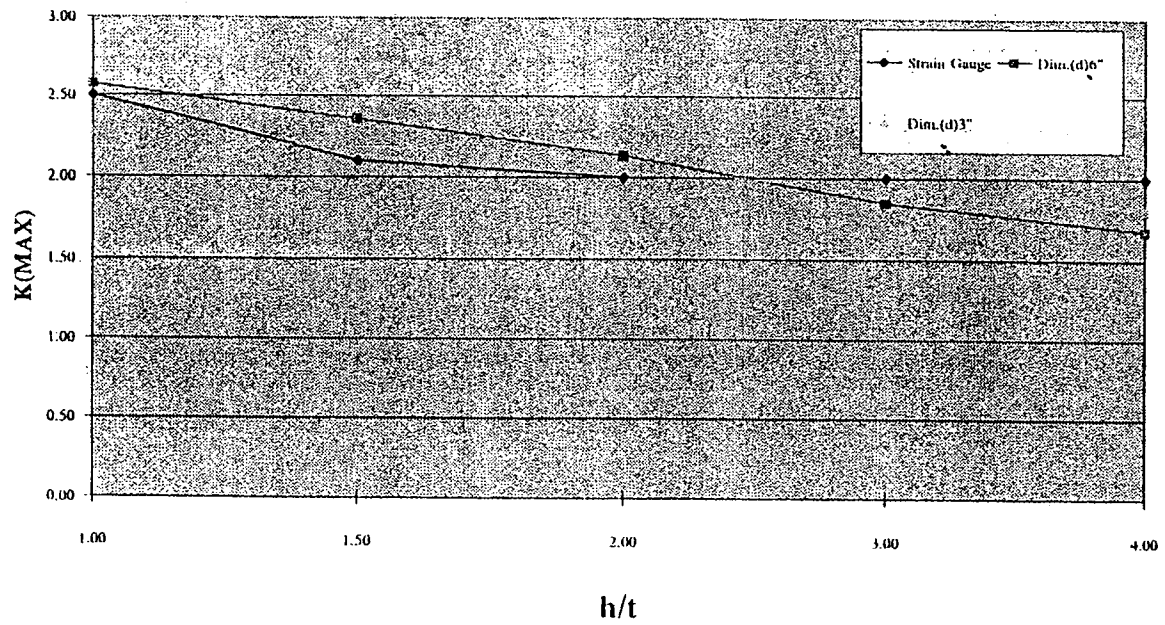
ตารางที่ 5 แสดงเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าความเข้มของความเค้นของถังขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 48 นิ้ว

D/d	d	การลดค่าของ K (h/t = 1.5)	การลดค่าของ K (h/t = 2)	การลดค่าของ K (h/t = 3)	การลดค่าของ K (h/t = 4)
1.25	6	8.56%	17.12%	28.02%	34.63%
1.25	3	4.41%	8.81%	15.86%	20.26%
1.50	6	14.40%	25.29%	36.19%	47.47%
1.50	3	11.45%	20.26%	31.72%	39.65%
1.75	6	17.51%	29.57%	43.97%	52.53%
1.75	3	14.10%	24.67%	38.33%	47.58%
2.00	6	19.84%	32.68%	47.08%	55.64%
2.00	3	16.30%	27.75%	41.85%	51.10%
2.25	6	22.18%	35.41%	49.81%	58.37%
2.25	3	17.62%	29.52%	44.49%	53.74%
2.50	6	24.12%	38.13%	52.14%	60.70%
2.50	3	18.50%	31.28%	46.26%	55.51%

ตารางที่ 6 แสดงเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าความเข้มของคลื่นของถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 96 นิ้ว

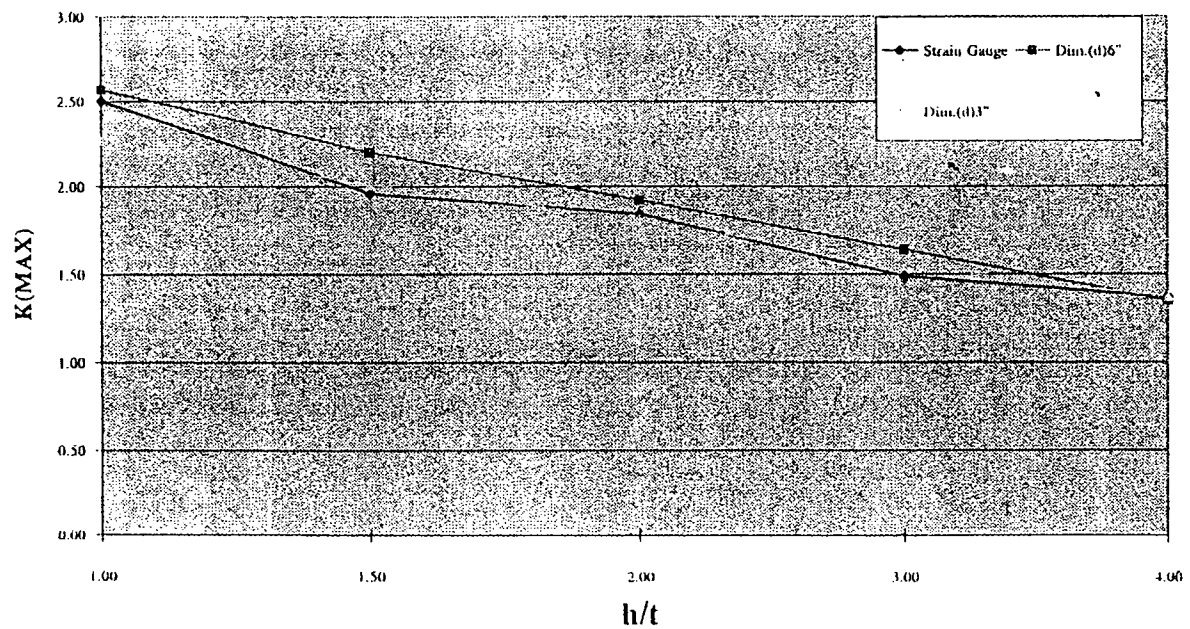
D/d	d	การลดค่าของ K (h/t = 1.5)	การลดค่าของ K (h/t = 2)	การลดค่าของ K (h/t = 3)	การลดค่าของ K (h/t = 4)
1.25	6	8.19%	15.95%	26.29%	32.33%
1.25	3	4.21%	7.94%	14.02%	18.69%
1.50	6	13.79%	24.14%	37.50%	45.69%
1.50	3	10.28%	19.16%	29.91%	37.38%
1.75	6	15.95%	27.59%	42.67%	52.53%
1.75	3	13.08%	22.09%	35.98%	44.86%
2.00	6	18.10%	29.74%	44.40%	53.45%
2.00	3	14.95%	26.17%	40.19%	49.53%
2.25	6	18.97%	31.47%	46.12%	54.74%
2.25	3	15.89%	27.57%	42.06%	51.87%
2.50	6	20.69%	33.19%	46.98%	55.60%
2.50	3	17.29%	28.97%	43.93%	52.80%

Stress Concentration Value.(K)

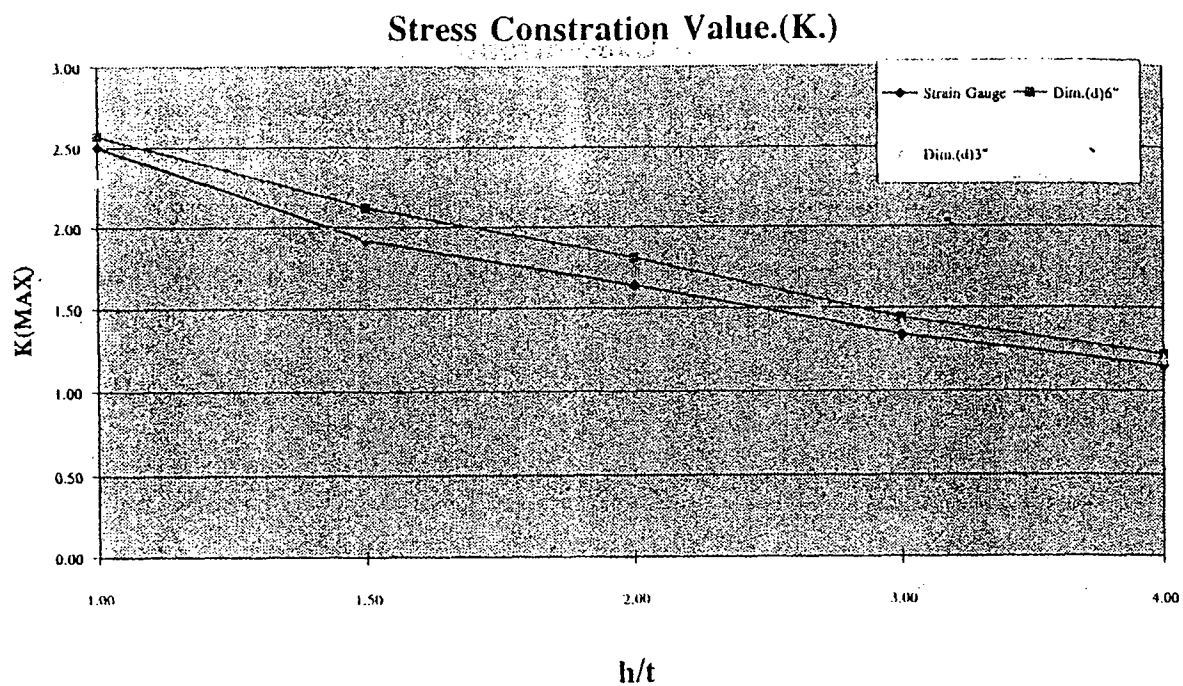


รูปที่ 4. ความเข้มของความเค้นสูงสุดที่รอบรูเจาะของถังขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 48 นิ้วกับค่าจากวิธีเกจวัดความเค้น เมื่อ $D/d = 1.25$

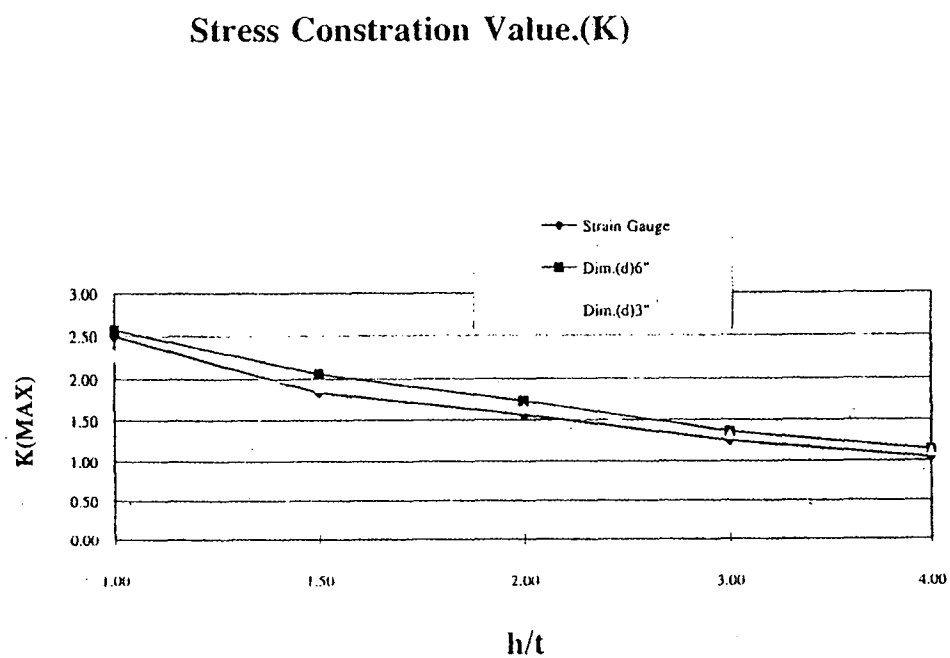
Stress Constration Value.(K)



รูปที่ 5 ความเข้มของความเค้นสูงสุดที่รอบรูเจาะของถังขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 48 นิ้วกับค่าจากวิธีเกจวัดความเค้น เมื่อ $D/d = 1.5$

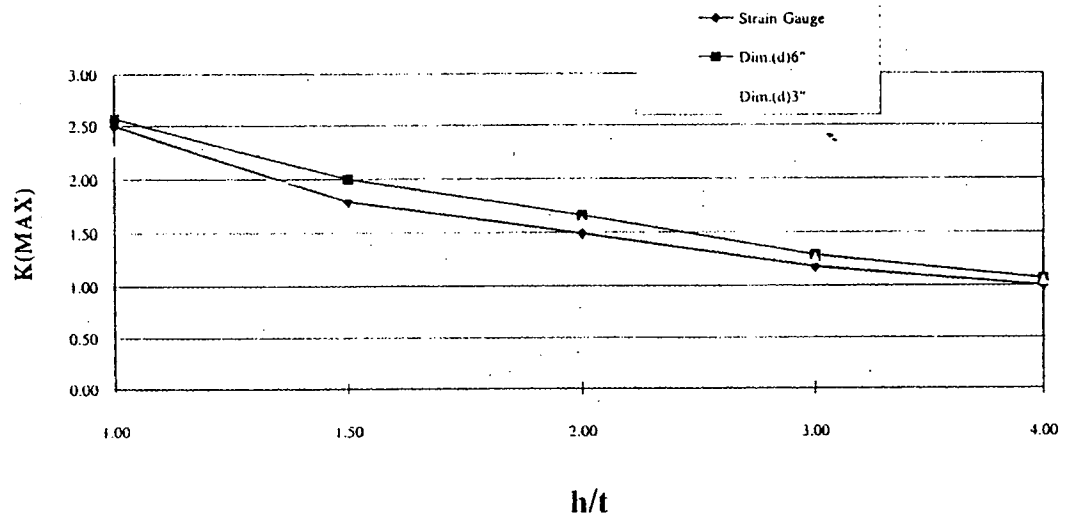


รูปที่ 6 ความเข้มของความเค้นสูงสุดที่รอบรูเจาะของถังขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 48 นิ้วกับค่าจากวิธีเกจวัดความเครียด เมื่อ $D/d = 1.75$



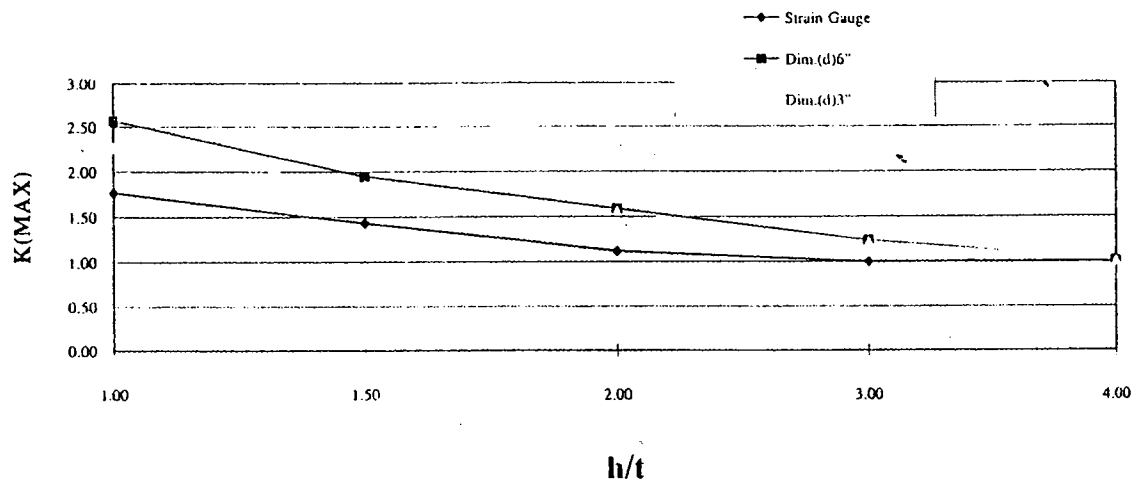
รูปที่ 7 ความเข้มของความเค้นสูงสุดที่รอบรูเจาะของถังขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 48 นิ้วกับค่าจากวิธีเกจวัดความเครียด เมื่อ $D/d = 2.00$

Stress Constration Value.(K)

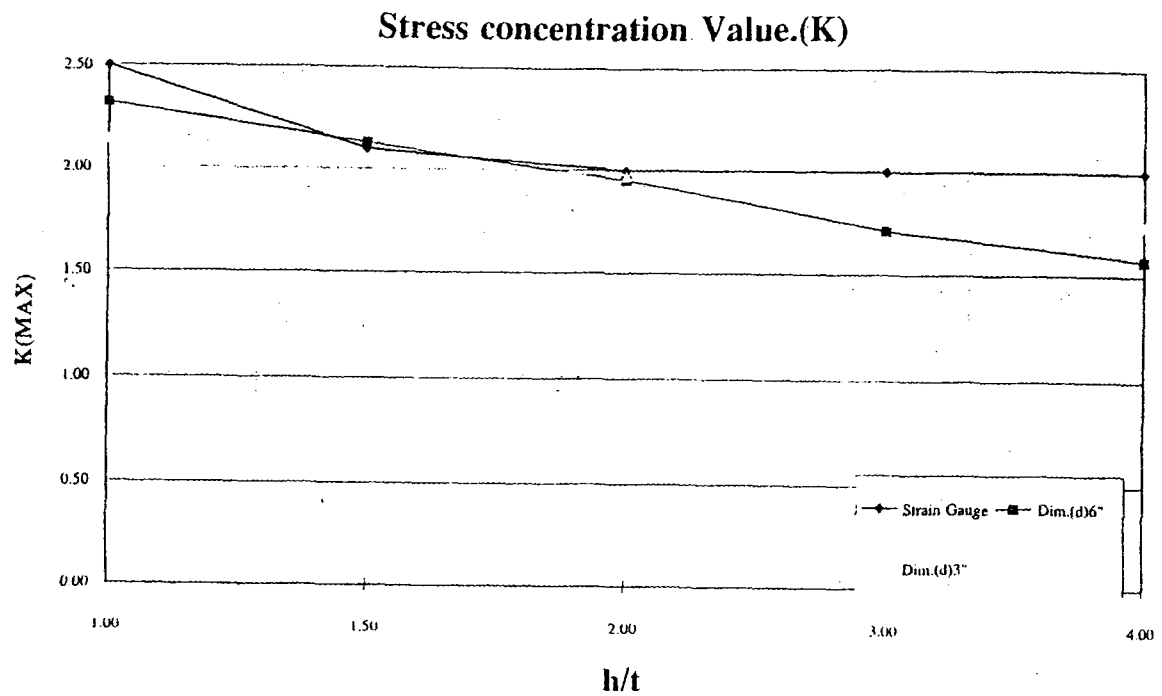


รูปที่ 8 ความเข้มของความเค้นสูงสุดที่รอบรูเจาะของถังขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 48 นิ้วกับค่าจากวิธีเกจวัดความเครียด เมื่อ $v/d = 2.25$

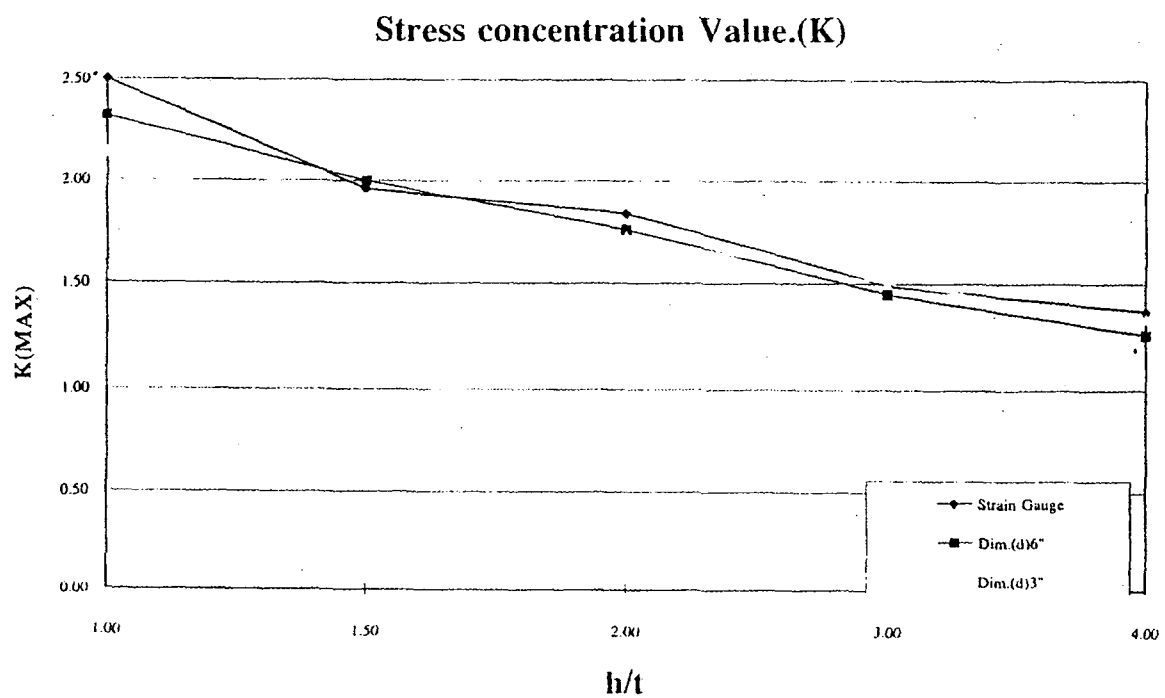
tress Constration Value.(K)



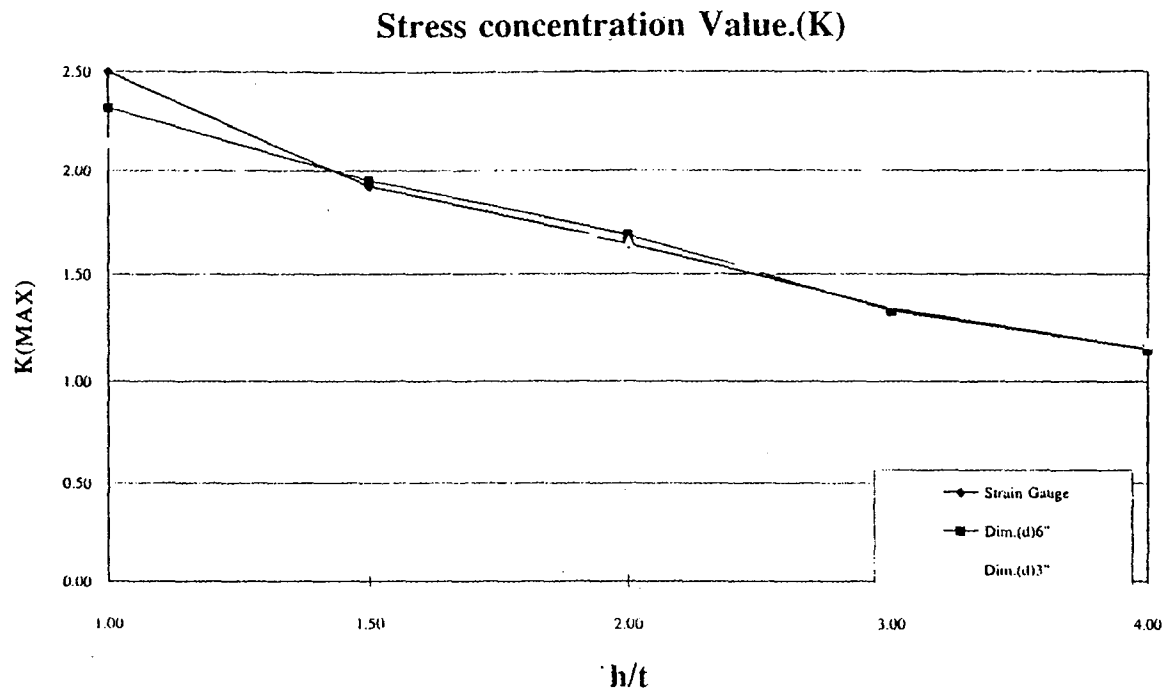
รูปที่ 9 ความเข้มของความเค้นสูงสุดที่รอบรูเจาะของถังขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 48 นิ้วกับค่าจากวิธีเกจวัดความเครียด เมื่อ $v/d = 2.5$



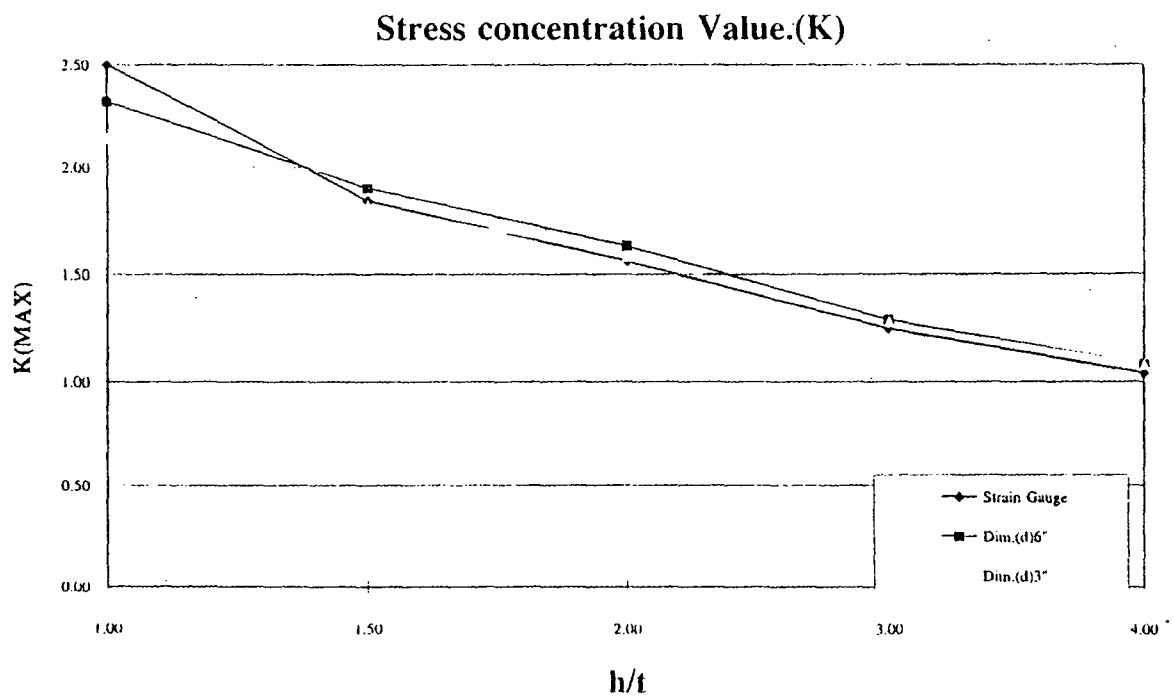
รูปที่ 10. ความเข้มของความเค้นสูงสุดที่รอบรูเจาะของถังขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 96 นิ้วกับค่าจากวิธีแกว้ดความเครียด เมื่อ $D/d = 1.25$



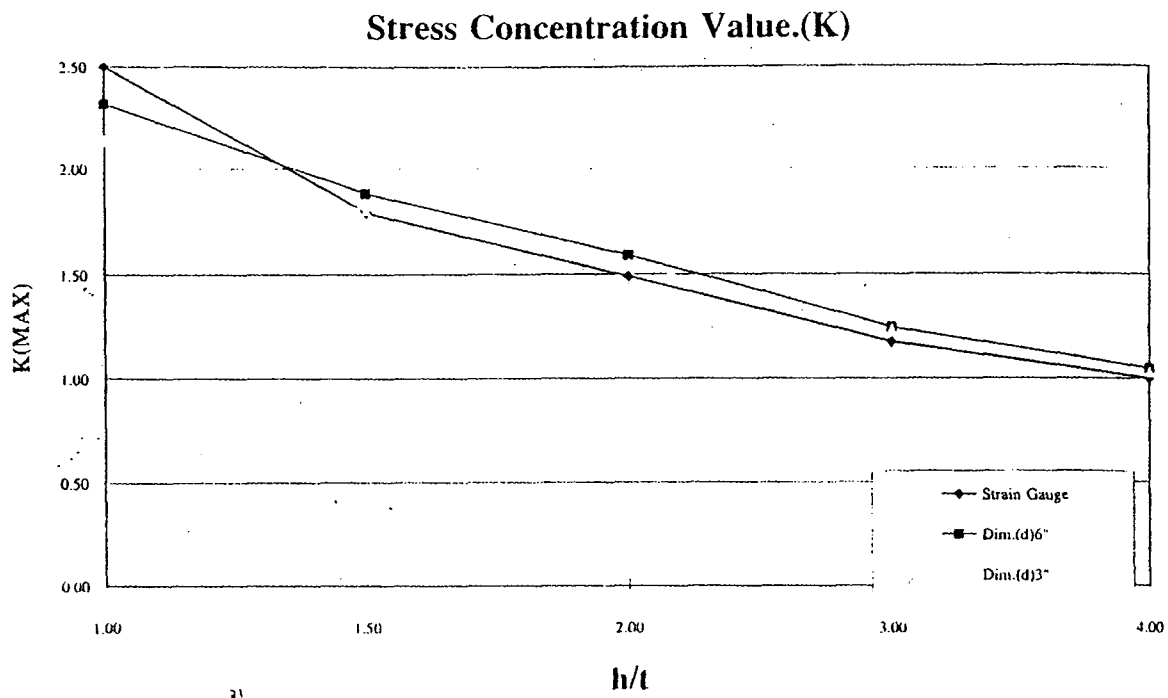
รูปที่ 11. ความเข้มของความเค้นสูงสุดที่รอบรูเจาะของถังขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 96 นิ้วกับค่าจากวิธีแกว้ดความเครียด เมื่อ $D/d = 1.5$



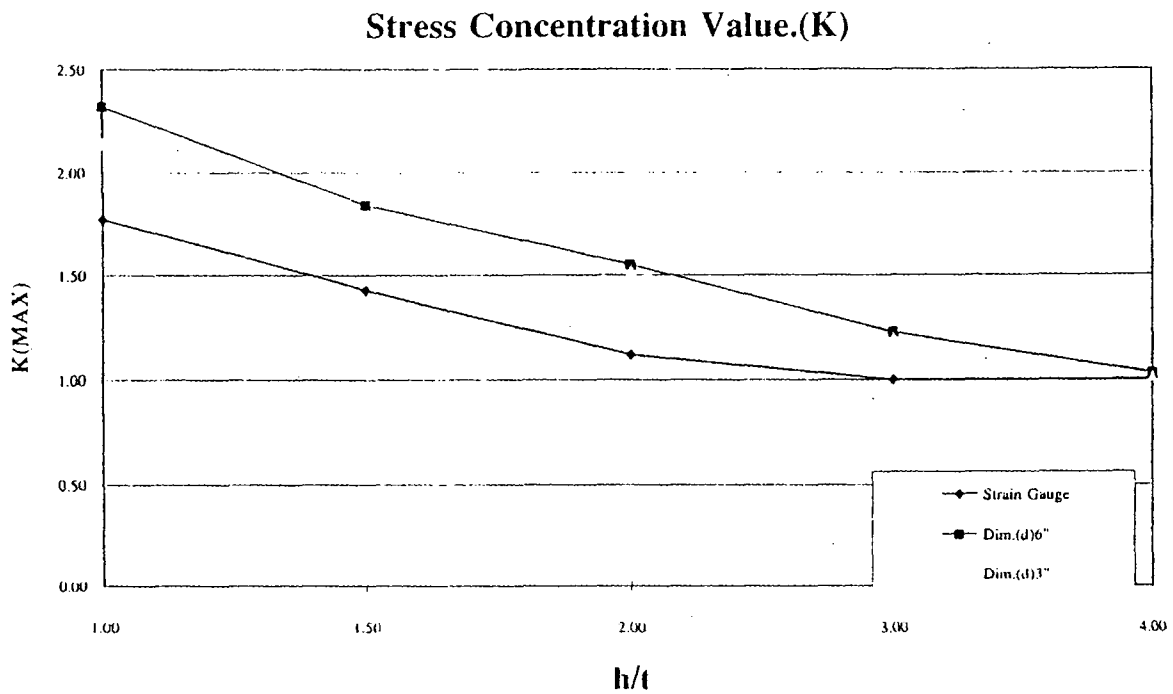
รูปที่ 12 ความเข้มของความเค้นสูงสุดที่รอบรูเจาะของถังขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 96 นิ้วกับค่าจากวิธีแกว้ดความเครียด เมื่อ $h/d = 1.75$



รูปที่ 13 ความเข้มของความเค้นสูงสุดที่รอบรูเจาะของถังขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 96 นิ้วกับค่าจากวิธีแกว้ดความเครียด เมื่อ $h/d = 2.00$



รูปที่ 14 ความเข้มของความเค้นสูงสุดที่รอบรูเจาะของถังขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 96 นิ้วกับค่าจากวิธีแก้จวดความเค้นเมื่อ $\frac{D}{d} = 2.25$



รูปที่ 15 ความเข้มของความเค้นสูงสุดที่รอบรูเจาะของถังขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 96 นิ้วกับค่าจากวิธีแก้จวดความเค้นเมื่อ $\frac{D}{d} = 2.5$

เอกสารอ้างอิง

1. Peterson, R.E. Stress Concentration Factors New York : John Wiley & Sons , 1974.
2. ASME Boiler and pressure Vessel Committes Subcommittee on Pressure Vessel. Section VIII Rules for Construction of Pressure Vessels Division 1 1992 Edition New York, 1992
3. Durelli, A.J. and Murray, W.M. Stress Distribution Around an Elliptical Discontinuity in Any Two-dimensional Uniform and Axial System of Combined Stress Proceeding of Society for Experimental Stress Analysis, Volume 1, No. 1, pp 19-31, 1943
4. John F. Harvey. Pressure Component Construction New York : Litton Education Publishing, 1980
5. Frank, Stasa L. Applied Finite Element Analysis for Engineers. Japan : CBS College Publishing, 1986.
6. ประเสริฐ พงศ์จิตรธรรม. การวิเคราะห์เทคนิคการเจาะรูเพื่อลดค่าตัวประกอบความเค้นหนาแน่นโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
7. Daryl L. Logan. A First Course in The Finite Element Method Boston : PWS Publishers, 1986.