

การเปรียบเทียบค่าภาระการ โกงงอของแผ่นบาง โดยวิธีทดลอง



นาย ชวนันท์ สุภาคักดิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-17-6016-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

๕๒๒๐๓๑๗๕

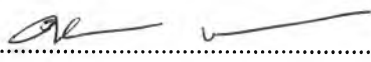
COMPARISON OF BUCKLING LOADS OF THIN PLATES BY EXPERIMENT
METHOD

Mr. Chavanan Supasak

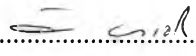
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2005
ISBN 974-17-6016-7

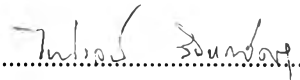
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเปรียบเทียบค่าภาระการ โกงงอของแผ่นบางโดยวิธีทดลอง
โดย นาย ชวนันท์ สุภาศักดิ์
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพโรจน์ สิงहनัดกิจ

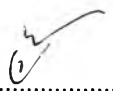
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

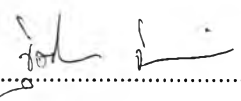

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ยงเจริญ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพโรจน์ สิงहनัดกิจ)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จिरพงษ์ กสิวิทย์อำนาจ)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิติมา จินตนาวัน)

ชวรัตน์ สุภาศักดิ์ : การเปรียบเทียบค่าภาระการโก่งงอของแผ่นบางโดยวิธีทดลอง.

(COMPARISON OF BUCKLING LOADS OF THIN PLATE BY

EXPERIMENT METHOD) อ.ที่ปรึกษา : ผศ. ดร.ไพโรจน์ สิงหนัดกิจ , 162 หน้า.

ISBN 974-17-6016-7.

วิทยานิพนธ์นี้หาขนาดภาระการโก่งงอของโครงสร้างแผ่นอะลูมิเนียมบางโดยวิธีทดลองและนำไปเปรียบเทียบกับผลเฉลยทางทฤษฎี การทดลองการโก่งงอทำบนชุดทดลองซึ่งสร้างและออกแบบให้สามารถให้แรงกดกับแผ่นทดสอบที่มีเงื่อนไขขอบเขตแบบง่าย ค่าภาระการโก่งงอบนชิ้นทดสอบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า 6 ขนาดหาโดยการเขียนกราฟความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากการทดลอง 4 แบบคือ 1) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างภาระในแนวระนาบกับระยะเคลื่อนที่นอกระนาบ 2) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างภาระในแนวระนาบกับระยะขยุตัวในแนวแรง 3) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างภาระในแนวระนาบกับผลต่างของความเครียดที่ผิวหน้าและ 4) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของระยะเคลื่อนที่นอกระนาบต่อภาระในแนวระนาบกับระยะเคลื่อนที่นอกระนาบ ค่าภาระการโก่งงอจากการทดลองแต่ละวิธีนำมาเปรียบเทียบกับค่าภาระการโก่งงอจากทฤษฎีแบบเชิงเส้นเพื่อหาค่าความแม่นยำ ค่าภาระการโก่งงอจากการทดลองทั้ง 4 วิธีมีค่าต่างจากค่าทางทฤษฎีโดยมีเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ $-2.8 \pm 16.3 \%$ $13.4 \pm 13.1 \%$ $-3.2 \pm 17.7 \%$ และ $69.7 \pm 25.7 \%$ ตามลำดับ ฉะนั้นจากการศึกษานี้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างภาระในแนวระนาบกับระยะเคลื่อนที่นอกระนาบเป็นวิธีที่แม่นยำที่สุดสำหรับการหาค่าภาระการโก่งงอจากการทดลอง กราฟจากผลต่างความเครียดบนผิวหน้าให้ค่าที่แม่นยำเท่าเทียมกัน อย่างไรก็ตามวิธีนี้ต้องอาศัยข้อมูลซึ่งมีความยุ่งยากกว่าในการวัดกล่าวคือ ต้องใช้สเตรนเกจในการวัด ส่วนอีก 2 วิธีมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่สูงกว่าจึงไม่แนะนำในการใช้หาค่าภาระการโก่งงอกับชุดทดลองและลักษณะของชิ้นงานที่ใช้ในการศึกษานี้

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....

ปีการศึกษา.....2548.....

ลายมือชื่อนิสิต.....ชวรัตน์ สุภาศักดิ์.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....ไพโรจน์ สิงหนัดกิจ.....

4570276021 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORD : BUCKLING / PLATE / EXPERIMENT

CHAVANAN SUPASAK : COMPARISON OF BUCKLING

LOADS OF THIN PLATE BY EXPERIMENT METHOD : THESIS

ADVISOR : ASST.PROF. PAIROD SINGHATANADGID, Ph.D.

162 pp. ISBN 974-17-6016-7

In this thesis, buckling loads of aluminum thin plates was experimentally determined and compared with the closed form solutions. Buckling experiment was performed on a custom-designed buckling-test setup which is able to apply a compressive load and constrain the specimen with simple support boundary condition. Buckling loads of rectangular specimens with six different dimension were identified from four plots of experimental parameters which are 1) a plot of in-plane loads and out-of-plane displacement, 2) a plot of in-plane loads and end-shortening, 3) a plot of in-plane loads and difference of surface strains, and 4) a plot of ratio of out-of-plane displacement to in-plane load and out-of-plane displacement. The experimental buckling loads from each technique were compared to buckling loads from linear theory to determine the accuracy of each plot. The experimental buckling loads from four methods are diverged from the closed form solutions with the average percent discrepancy and standard deviation of $-2.8 \pm 16.3\%$, $13.4 \pm 13.1\%$, $-3.2 \pm 17.7\%$ and $69.7 \pm 25.7\%$, respectively. Therefore, from this study, a plot of in-plane loads vs. out-of-plane displacement is the most accurate method for using to identify the buckling load in the experiment. The plot of difference in surface strain gives equal accuracy, however this technique required more complicate data acquisition, i.e. a strain gage is required. The other two experiment methods give higher percent of discrepancy and are not recommended to employ with the test setup and specimen configurations used in this study.

Department.....Mechanical Engineering
 Field of study...Mechanical Engineering
 Academic year.....2005.....

Student's signature.....*Chavanan Supasak*.....
 Advisor's signature.....*Pairod Singhatanadgid*.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับการช่วยเหลือดีจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไพโรจน์ สิงหนัดกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาหาทุนเพื่อสนับสนุนงานวิจัยนี้และยังถ่ายทอดความรู้ รวมทั้งประสบการณ์ คำแนะนำสั่งสอนด้วยความเมตตาในเรื่องการทำงานการศึกษาเล่าเรียนและการดำเนินชีวิต ดังนั้นผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา ยงเจริญ ประธานกรรมการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนวยและผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จูติมา จินตนาวัน กรรมการ ที่ได้ให้คำแนะนำในการดำเนินงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณสุบิน ชันติและเจ้าหน้าที่ฝ่ายช่างเทคนิคประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในการปรับปรุงโครงสร้างของเครื่องทดสอบ รวมทั้งให้คำแนะนำในเรื่องการผลิตชิ้นทดสอบ การใช้เครื่องจักรและความปลอดภัยในการทำงาน

ประโยชน์และคุณความดีอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูตาบูชาแด่บิดามารดา ครูอาจารย์ ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	๗
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	3
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	3
1.4 เนื้อหาโดยรวมของวิทยานิพนธ์.....	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	4
บทที่ 2 ปริทัศน์วรรณกรรม.....	5
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับปัญหาการโค้งงอ.....	5
บทที่ 3 การโค้งงอของโครงสร้างแผ่นบางรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	16
3.1 ทฤษฎีพื้นฐานสำหรับ โครงสร้างแผ่นบาง.....	16
3.1.1 นิยามและสมมติฐาน.....	16
3.1.2 สมการครอบคลุมสำหรับปัญหาการ โค้งงอของ โครงสร้างแผ่น บาง.....	19
3.2 การหาค่าภาระการ โค้งงอของ โครงสร้างแผ่นบางรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	22
3.3 การหาโหมดการ โค้งงอของ โครงสร้างแผ่นบาง.....	25
3.4 การหาค่าภาระการ โค้งงอโดยวิธีทดลอง.....	26
3.4.1 วิธีระยะเคลื่อนที่นอกกระนาบ.....	26
3.4.2 วิธี end-shortening.....	27
3.4.3 วิธีผลต่างความเครียด.....	28
3.4.4 วิธี Southwell plot.....	29

	หน้า
3.4.5 การวัดโหมดการ โกงงอ.....	31
บทที่ 4 การทดลองการ โกงงอ.....	34
4.1 ชุดทดลองการ โกงงอ.....	34
4.1.1 Test frame.....	34
4.1.2 Grating.....	38
4.1.3 แผ่นทดสอบ.....	38
4.2 ขั้นตอนการทดลอง.....	39
4.2.1 การเตรียมการทดลอง.....	39
4.2.2 ขั้นตอนการเก็บค่าพารามิเตอร์.....	43
บทที่ 5 ผลการทดลอง.....	46
5.1 ค่าภาระการ โกงงอทางทฤษฎี.....	46
5.2 ผลการทดลอง.....	47
บทที่ 6 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง.....	58
6.1 การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	58
6.1.1 การหาค่าภาระการ โกงงอโดยวิธีระยะเคลื่อนที่นอกกระนาบ.....	58
6.1.2 การหาค่าภาระการ โกงงอโดยวิธี end-shortening.....	58
6.1.3 การหาค่าภาระการ โกงงอโดยวิธีผลต่างความเครียด.....	60
6.1.4 การหาค่าภาระการ โกงงอโดยวิธี Southwell plot.....	60
6.1.5 การเปรียบเทียบการหาค่าภาระการ โกงงอ.....	63
6.2 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	78
รายการอ้างอิง.....	82
ภาคผนวก.....	84
ภาคผนวก ก กราฟสำหรับหาค่าภาระการ โกงงอของแผ่นทดสอบ.....	85
ภาคผนวก ข ค่าพารามิเตอร์สำหรับเขียนกราฟพฤติกรรมการ โกงงอ.....	134
ภาคผนวก ค กราฟแสดงคุณสมบัติทางกลของแผ่นทดสอบ.....	159
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	162

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 5.1 ค่าภาระการ โกงงอและโหมคการ โกงงอของแผ่นทดสอบขนาดต่าง ๆ.....	47
ตารางที่ 5.2 ค่าภาระการ โกงงอของแผ่นทดสอบยาว 480 มม กว้าง 240 มม.....	49
ตารางที่ 5.3 ค่าภาระการ โกงงอของแผ่นทดสอบยาว 360 มม กว้าง 240 มม.....	50
ตารางที่ 5.4 ค่าภาระการ โกงงอของแผ่นทดสอบยาว 240 มม กว้าง 240 มม.....	52
ตารางที่ 5.5 ค่าภาระการ โกงงอของแผ่นทดสอบยาว 360 มม กว้าง 180 มม.....	53
ตารางที่ 5.6 ค่าภาระการ โกงงอของแผ่นทดสอบยาว 270 มม กว้าง 180 มม.....	55
ตารางที่ 5.7 ค่าภาระการ โกงงอของแผ่นทดสอบยาว 180 มม กว้าง 180 มม.....	56
ตารางที่ 6.1 ขอบเขตของค่าภาระการ โกงงอจากการวัดของแผ่นทดสอบขนาด 480 x 240 มม ²	64
ตารางที่ 6.2 ขอบเขตของค่าภาระการ โกงงอจากการวัดของแผ่นทดสอบขนาด 360 x 240 มม ²	65
ตารางที่ 6.3 ขอบเขตของค่าภาระการ โกงงอจากการวัดของแผ่นทดสอบขนาด 240 x 240 มม ²	65
ตารางที่ 6.4 ขอบเขตของค่าภาระการ โกงงอจากการวัดของแผ่นทดสอบขนาด 360 x 180 มม ²	66
ตารางที่ 6.5 ขอบเขตของค่าภาระการ โกงงอจากการวัดของแผ่นทดสอบขนาด 270 x 180 มม ²	66
ตารางที่ 6.6 ขอบเขตของค่าภาระการ โกงงอจากการวัดของแผ่นทดสอบขนาด 180 x 180 มม ²	67
ตารางที่ 6.7 ความแตกต่างของค่าภาระการ โกงงอระหว่างการทดลองครั้งที่ 1 กับครั้งที่ 2 บนแผ่นทดสอบขนาด 480 x 240 มม ²	68
ตารางที่ 6.8 ความแตกต่างของค่าภาระการ โกงงอระหว่างการทดลองครั้งที่ 1 กับครั้งที่ 2 บนแผ่นทดสอบขนาด 360 x 240 มม ²	69
ตารางที่ 6.9 ความแตกต่างของค่าภาระการ โกงงอระหว่างการทดลองครั้งที่ 1 กับครั้งที่ 2 บนแผ่นทดสอบขนาด 240 x 240 มม ²	70
ตารางที่ 6.10 ความแตกต่างของค่าภาระการ โกงงอระหว่างการทดลองครั้งที่ 1 กับครั้งที่ 2 บนแผ่นทดสอบขนาด 360 x 180 มม ²	71

	หน้า
ตารางที่ 6.11 ความแตกต่างของค่าภาระการโค้งงอระหว่างการทดลองครั้งที่ 1 กับครั้งที่ 2 บนแผ่นทดสอบขนาด 270 x 180 มม ²	72
ตารางที่ 6.12 ความแตกต่างของค่าภาระการโค้งงอระหว่างการทดลองครั้งที่ 1 กับครั้งที่ 2 บนแผ่นทดสอบขนาด 180 x 180 มม ²	73
ตารางที่ 6.13 เปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยระหว่างค่าภาระการโค้งงอของแผ่นทดสอบ ขนาดต่าง ๆ กับค่าภาระการโค้งงอทางทฤษฎี.....	74
ตารางที่ 6.14 เปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยระหว่างค่าภาระการโค้งงอของแผ่นทดสอบ ซึ่งเกิดการโค้งงอแบบโหมคต่าง ๆ กับค่าภาระการโค้งงอทางทฤษฎี.....	77

สารบัญภาพ

		หน้า
รูปที่ 1.1	ภาระการโค้งงอทางทฤษฎีและจากการทดลอง.....	2
รูปที่ 2.1	ลักษณะช่วงก่อนและหลังเกิดการโค้งงอ.....	6
รูปที่ 2.2	ความเค้นคปริเวณผิวหน้าของแผ่นทดสอบ.....	7
รูปที่ 2.3	ส่วนประกอบทั้งสองของโครงสร้างแผ่นหนา.....	11
รูปที่ 2.4	โครงสร้างเสากลางหน้าตัดแบบ Box และ Universal.....	12
รูปที่ 2.5	พารามิเตอร์ในการเขียนกราฟพฤติกรรมการโค้งงอ.....	15
รูปที่ 3.1	ระบบพิกัดฉากของโครงสร้างแผ่นบาง.....	17
รูปที่ 3.2	องค์ประกอบของแรงและโมเมนต์ที่กระทำกับ differential element.....	20
รูปที่ 3.3	ชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ารับแรงคดในทิศทางเดียว.....	22
รูปที่ 3.4	การแปรผันของสัมประสิทธิ์การโค้งงอ k ต่ออัตราส่วน R	24
รูปที่ 3.5	การเคลื่อนที่นอกกระนาบของแผ่นบางในโหมดที่ 1 ($m = 1$ และ $n = 1$ ซึ่ง $a/b = 1$).....	25
รูปที่ 3.6	การเคลื่อนที่นอกกระนาบของแผ่นบางในโหมดที่ 2 ($m = 2$ และ $n = 1$ ซึ่ง $a/b = 2$).....	25
รูปที่ 3.7	พฤติกรรมการโค้งงอของโครงสร้างแผ่นบาง.....	27
รูปที่ 3.8	การหาค่าภาระการโค้งงอโดยวิธีระยะเคลื่อนที่นอกกระนาบ.....	27
รูปที่ 3.9	การหาค่าภาระการโค้งงอโดยวิธี end-shortening.....	28
รูปที่ 3.10	การหาค่าภาระการโค้งงอโดยวิธีผลต่างความเค้น.....	28
รูปที่ 3.11	การหาค่าภาระการโค้งงอโดยวิธี Southwell plot.....	30
รูปที่ 3.12	แสงขนานตกกระทบทำมุมกับ grating.....	31
รูปที่ 3.13	การเชื่อมลึกระหว่างแถบสี่และเงา.....	32
รูปที่ 3.14	รูปแบบการโค้งงอในโหมดที่ 1 วัดโดยวิธี Moiré Method [4].....	32
รูปที่ 3.15	รูปแบบการโค้งงอในโหมดที่ 2 วัดโดยวิธี Moiré Method [4].....	33
รูปที่ 4.1	ส่วนประกอบหลักของชุดทดลองการโค้งงอ.....	35
รูปที่ 4.2	เพลากลมเซาะร่องสำหรับครอบขอบบนและล่างของชิ้นงาน.....	36
รูปที่ 4.3	ร่องรูปครึ่งวงกลมบริเวณแทนกคและฐานรอง.....	36
รูปที่ 4.4	การจับยึดที่ด้านข้างของชิ้นงานด้วยขอมมีด.....	36

	หน้า
รูปที่ 4.5	ลักษณะการค้ำยันของสกรูเพื่อให้ขอบมีดจับยึดแผ่นทดสอบ..... 37
รูปที่ 4.6	ตัวอย่าง grating ที่ใช้ในการทดลอง..... 38
รูปที่ 4.7	การเตรียมแผ่นทดสอบก่อนการทดลอง..... 40
รูปที่ 4.8	การติดตั้งชุดจับยึดกับเสาทั้ง 4 ด้านของ test frame..... 41
รูปที่ 4.9	การติดตั้งขอบมีดกับชุดจับยึด..... 41
รูปที่ 4.10	การครอบพลาสติกบนแผ่นทดสอบ..... 42
รูปที่ 4.11	การเคลื่อนที่ของขอบมีดบนชุดจับยึด..... 42
รูปที่ 4.12	การวัดความเครียดและระยะเคลื่อนที่นอกระนาบ..... 43
รูปที่ 4.13	การวัดระยะยุบตัวในแนวแรง..... 43
รูปที่ 5.1	กราฟแสดงค่าภาระการโก่งงอของแผ่นทดสอบขนาด 480 มม x 240 มม โดยวิธีต่าง ๆ..... 49
รูปที่ 5.2	กราฟแสดงค่าภาระการโก่งงอของแผ่นทดสอบขนาด 360 มม x 240 มม โดยวิธีต่าง ๆ..... 51
รูปที่ 5.3	กราฟแสดงค่าภาระการโก่งงอของแผ่นทดสอบขนาด 240 มม x 240 มม โดยวิธีต่าง ๆ..... 52
รูปที่ 5.4	กราฟแสดงค่าภาระการโก่งงอของแผ่นทดสอบขนาด 360 มม x 180 มม โดยวิธีต่าง ๆ..... 54
รูปที่ 5.5	กราฟแสดงค่าภาระการโก่งงอของแผ่นทดสอบขนาด 270 มม x 180 มม โดยวิธีต่าง ๆ..... 55
รูปที่ 5.6	กราฟแสดงค่าภาระการโก่งงอของแผ่นทดสอบขนาด 180 มม x 180 มม โดยวิธีต่าง ๆ..... 57
รูปที่ 6.1	พฤติกรรมที่ใกล้เคียงเส้นตรงของวิธี end-shortening..... 59
รูปที่ 6.2	ความเครียดบนแผ่นทดสอบซึ่งไม่สามารถหาค่าภาระการโก่งงอได้..... 61
รูปที่ 6.3	ความเครียดบนแผ่นทดสอบซึ่งสามารถหาค่าภาระการโก่งงอได้..... 61
รูปที่ 6.4	พฤติกรรมของแผ่นทดสอบจากวิธี Southwell plot ในการทดลองครั้งที่ 1.... 62
รูปที่ 6.5	พฤติกรรมของแผ่นทดสอบจากวิธี Southwell plot ในการทดลองครั้งที่ 2.... 63
รูปที่ 6.6	ฮิสโทแกรมของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนโดยวิธีระยะเคลื่อนที่นอกระนาบ 75
รูปที่ 6.7	ฮิสโทแกรมของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนโดยวิธี end- shortening..... 75
รูปที่ 6.8	ฮิสโทแกรมของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนโดยวิธีผลต่างความเครียด..... 76

รูปที่ 6.9	ฮิสโทแกรมของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนโดยวิธี Southwell plot.....	หน้า 76
------------	---	---------

คำอธิบายสัญลักษณ์

ε_1	คือ	ความเครียดตั้งฉากบริเวณที่เกิดการเคลื่อนที่นอกกระนาบสูงสุดทิศทาง + z
ε_2	คือ	ความเครียดตั้งฉากบริเวณที่เกิดการเคลื่อนที่นอกกระนาบสูงสุดทิศทาง - z
ε_A	คือ	ความเครียดตั้งฉากเฉลี่ยบริเวณที่เกิดการเคลื่อนที่นอกกระนาบแผ่น
ε_x	คือ	ความเครียดตั้งฉากในทิศทาง x
ε_y	คือ	ความเครียดตั้งฉากในทิศทาง y
ε_z	คือ	ความเครียดตั้งฉากในทิศทาง z
γ_{xy}	คือ	ความเครียดเฉือนบนระนาบ x-y
γ_{xz}	คือ	ความเครียดเฉือนบนระนาบ x-z
γ_{yz}	คือ	ความเครียดเฉือนบนระนาบ y-z
σ_x	คือ	ความเค้นในแนวแกน x
σ_y	คือ	ความเค้นในแนวแกน y
σ_z	คือ	ความเค้นในแนวแกน z
τ_{xz}	คือ	ความเค้นเฉือนบนระนาบ x-z
τ_{yz}	คือ	ความเค้นเฉือนบนระนาบ y-z
N_x	คือ	แรงลัพธ์ที่เกิดจากความเค้นตั้งฉากในแนวแกน x
N_y	คือ	แรงลัพธ์ที่เกิดจากความเค้นตั้งฉากในแนวแกน y
N_{xy}	คือ	แรงลัพธ์ที่เกิดจากความเค้นเฉือนบนระนาบ x-y
M_x	คือ	โมเมนต์ลัพธ์ที่เกิดจากความเค้นตั้งฉากในแนวแกน x
M_y	คือ	โมเมนต์ลัพธ์ที่เกิดจากความเค้นตั้งฉากในแนวแกน y
M_{xy}	คือ	โมเมนต์ลัพธ์ที่เกิดจากความเค้นเฉือนบนระนาบ x-y
Q_x	คือ	แรงลัพธ์ที่เกิดจากความเค้นเฉือนบนระนาบ x-z
Q_y	คือ	แรงลัพธ์ที่เกิดจากความเค้นเฉือนบนระนาบ y-z
E	คือ	ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น
ν	คือ	ค่าอัตราส่วนปัวร์ซอง
δ	คือ	ระยะขยุบตัวในแนวแรง
u	คือ	ระยะเคลื่อนที่ในแนวแกน x
v	คือ	ระยะเคลื่อนที่ในแนวแกน y
w	คือ	ระยะเคลื่อนที่นอกกระนาบ x-y

$F(x, y)$	คือ	ฟังก์ชันใดๆที่ค่าของฟังก์ชันนั้นขึ้นอยู่กับค่าตัวแปร x และ y
a	คือ	ความยาวของโครงสร้างแผ่นบางในทิศทาง x
b	คือ	ความยาวของโครงสร้างแผ่นบางในทิศทาง y
h	คือ	ความหนาของโครงสร้างแผ่นบาง
N_{cr}	คือ	ค่าภาระการ โกงงอ (N/m)
P	คือ	ค่าภาระที่กระทำกับแผ่นทดสอบ (N)
P_E	คือ	Euler load
P_{cr}	คือ	ค่าภาระการ โกงงอหรือค่าภาระวิกฤต (N)
α	คือ	มุมของแสงขนานที่ตกกระทบแผ่น grating (degree)