การระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ : การคำนวณหา ค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลในช่องเปิดที่ซับซ้อน (การไหลแบบราบเรียบ)

นาย ณัฐวุฒิ วลัยกนก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-1500-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

NATURAL VENTILATION : CALCULATION OF DISCHARGE COEFFICIENT IN COMPLEX OPENING (LAMINAR FLOW)

Mr. Nuttavut Walaikanok

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2001
ISBN 974-03-1500-3

นายณัฐวุฒิ วลัยกนก : การระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ : การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลในช่องเปิดที่ซับซ้อน (การไหลแบบราบเรียบ) (NATURAL VENTILATION : CALCULATION OF DISCHARGE COEFFICIENT IN COMPLEX OPENING (LAMINAR FLOW)) อ.ที่ปรึกษา : อ. ดร.เชิดพันธ์ วิทูราภรณ์ , 183 หน้า. ISBN 974-03-1500-3.

ในปัจจุบัน ประเทศไทยมีความตื่นตัวในด้านการใช้พลังงาน ให้มีประสิทธิภาพเป็นอย่างมาก โดยมีการคิดค้นวิธีการต่างๆเพื่อช่วยในการประหยัดพลังงาน การระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ นับว่าเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการประหยัดพลังงาน อย่างไรก็ตาม วิธีการคำนวณหาอัตราการระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติให้ถูกต้องและแม่นยำ จำเป็นต้องอาศัยข้อมูลที่ชัดเจนของค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล ซึ่งแตกต่างกันไปตามลักษณะของช่องเปิดที่ใช้ ดังนั้น การวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาถึงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล และสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล สำหรับช่องเปิดรูปแบบต่างๆ

ในการทดลองได้ศึกษาถึงผลกระทบของการไหลของอากาศ ต่อค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล เมื่ออากาศไหลผ่านช่องเปิดที่มีรูปแบบต่างๆ ซึ่งทำมุม 30 , 45 , 60 และ 90 องศา ในท่อลมรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยสภาวะเริ่มต้นของอากาศมีลักษณะเป็นการไหลแบบราบเรียบ และเป็นการไหลที่มีการพัฒนาเต็มที่ (Fully Developed Flow) พบว่า การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล เทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับช่องเปิดรูปแบบต่างๆ มี 2 ลักษณะ คือ ลักษณะการกระจายตัวรูประฆังคว่ำ กล่าวคือ ค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล จะมีค่าสูงสุดเมื่อช่องเปิดทำมุมกับทิศทางการไหลของอากาศเท่ากับ 90 องศา และลักษณะการกระจายตัวรูปตัว M คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล จะมีค่าสูงสุดเมื่อมุมที่กระทำกับทิศทางการไหลของอากาศเท่ากับ 45 องศา กับ 135 องศา โดยที่ลักษณะการกระจายตัวรูปตัว M จะมีแนวโน้มที่ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลสูงกว่าลักษณะการกระจายตัวรูประฆังคว่ำ และพบว่าจำนวนช่องเปิดภายในจะแปรผกผันกับค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล

ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ได้กำหนดค่าตัวประกอบรูปร่าง (Shape Factor) ขึ้นเพื่อใช้ในการบ่งบอกถึงความแตกต่างของช่องเปิดที่มีลักษณะต่างๆกัน ในเชิงคณิตศาสตร์ ซึ่งค่าตัวประกอบรูปร่างนี้ มีความสัมพันธ์กับลักษณะของการแบ่งช่องเปิดภายใน และจำนวนช่องเปิดภายใน ซึ่งพบว่า ค่าตัวประกอบรูปร่างจะแปรผกผันกับค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล นอกจากนี้เมื่อนำผลกระทบของมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ , จำนวนช่องเปิดภายใน และค่าตัวประกอบรูปร่างมาใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อที่จะใช้คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล สมการที่ได้มีความถูกต้อง และแม่นยำ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (r^2) เท่ากับ 0.9878 สำหรับช่องเปิดที่วางตัวในแนวตั้ง และเท่ากับ 0.9828 สำหรับช่องเปิดที่วางตัวในแนวนอน และรูปสมมาตร

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนิสิต ....
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ....
ปีการศึกษา 2544

4270324121 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING
KEY WORD : DISCHARGE COEFFICIENT / VENTILATION THROUGH OPENING

NUTTAVUT WALAIKANOK : NATURAL VENTILATION : CALCULATION OF DISCHARGE COEFFICIENT IN COMPLEX OPENING (LAMINAR FLOW). THESIS ADVISOR : DR. CHIRDPUN VITUORAPORN , 183 pp. ISBN 974-03-1500-3.

At present the efficiency on the use of energy in Thailand gains more and more attention. Several methods for energy saving have been developed. Natural ventilation is also another approach for energy saving. However the method for calculating the ventilation rate based on this approach is heavily relied on the accurate data for discharge coefficient. This coefficient is vary according to the type of the opening used. Therefore in this research the study on the discharge coefficient and deriving the mathematic equation for calculating the discharge coefficient is performed for different configurations of the opening.

A set of experiment was performed to study the effect of discharge coefficient when airflow through complex openings at 30, 45, 60, and 90 degrees with respect to the freestream. The experiment was done in the square air duct with the initial condition of the air is set to be laminar and fully developed flow. It is found that the distribution of the discharge coefficient with respect to the angle between the opening and the direction of airflow in various openings has two main characteristics : overturn-bell shaped distribution, and M shaped distribution. For the overturn-bell shaped distribution, the discharge coefficient has a maximum value when the angle between the opening and the direction of airflow is 90 degrees. For the M shaped distribution, the discharge coefficient has a maximum value when the angle between the opening and the direction of airflow is 45 and135 degrees. The average value of discharge coefficient in the M shaped distribution tends to be higher than the average value of discharge coefficient in the overturn-bell shaped distribution. Moreover, the study also points out that the number of the internal hole for complex openings is inversely proportional to the discharge coefficient.

In developing the mathematical model , the so-called shape factor parameter is used to specify the various configurations of the opening. This shape factor is found to be related to the layout of the inside opening and the number of the internal holes. As well as it is inversely proportional to the discharge coefficient. The effect of the angle between the opening and the free stream, the number of the internal hole and the shape factor on the discharge coefficient is then used to developed the mathematical model for calculating the discharge coefficient. The model developed is highly accurate with the coefficient of determination (r^2), equals to 0.9878 for vertical openings and 0.9828 for horizontal and symmetry openings.

Department Mechanical Engineering Student's Signature ....

Field of study Mechanical Engineering Advisor's Signature …………………………...

Academic year 2001

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยดี โดยได้รับความช่วยเหลือ และความอนุเคราะห์จากหลายฝ่ายด้วยกัน ข้าพเจ้าขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.เชิดพันธ์ วิทูราภรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาสละเวลาอันมีค่าช่วยเหลือให้คำแนะนำปรึกษา และแนะนำแนวทางในการวิจัย แนวทางแก้ปัญหา และข้อคิดเห็นต่างๆที่นำมาซึ่งความสมบูรณ์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ อีกทั้งตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จเป็นรูปเล่มที่สมบูรณ์ รวมถึง รองศาสตราจารย์ ดร.มานิจ ทองประเสริฐ ประธานกรรมการ อาจารย์ ดร.ตุลย์ มณีวัฒนา และ อาจารย์ ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์ กรรมการ

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ยงเจริญ ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์วัดความดัน และชุดทดลอง รวมถึง อาจารย์ ตะวัน ปภาพจน์ ที่ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ และการวิเคราะห์ในเชิงสถิติ

นอกจากนี้ ข้าพเจ้าขอขอบคุณ ครอบครัวเลิศเจริญยงศ์ ที่ให้ความเกื้อหนุน และช่วยเหลือในการสร้างชุดทดลอง และขอขอบคุณเพื่อนๆ น้องๆ ทุกคนที่คอยช่วยเหลือและสนับสนุนการทำงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้ากราบขอบพระคุณบิดา-มารดา ซึ่งอบรมสั่งสอน และให้กำลังใจตลอดเวลา จนสำเร็จการศึกษา

ผู้จัดทำงานวิจัย

นายณัฐวุฒิ วลัยกนก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .... จ

กิตติกรรมประกาศ .... ฉ

สารบัญ .... ช

สารบัญตาราง .... ญ

สารบัญภาพ .... ฎ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์ 1

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ 3

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ 3

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ 3

บทที่ 2 บทความที่ผ่านมา 4

บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 6

3.1 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ 7

3.2 การไหลของอากาศผ่านสิ่งกีดขวางภายในท่อ 10

3.3 สมการทางทฤษฎีสำหรับการไหลผ่านสิ่งกีดขวาง 11

บทที่ 4 การทดลอง 16

4.1 ลักษณะทั่วไปของชุดทดลอง 16

4.1.1 ชุดอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นใหม่ 16

4.1.1.1 ส่วนทางเข้าของชุดทดลอง 16

4.1.1.2 ส่วนที่ใช้ทดลอง 18

4.1.1.3 ส่วนทางออก 19

4.1.2 ส่วนที่เป็นชุดอุปกรณ์ทดลองเดิม 20

4.1.2.1 ชุดอุปกรณ์วัดความเร็ว 20

4.1.2.2 ชุดพัดลมดูดอากาศ 21

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2 หน้าต่างจำลอง 22
4.3 การวัดความดันสถิต 23
4.3.1 วัดความดันตกคร่อมของส่วนทดลอง 23
4.3.1.1 ติดตั้ง Pressure Tap ที่ส่วนทางเข้าของชุดทดลอง 23
4.3.1.2 ติดตั้ง Pressure Tap ที่ส่วนทางออกของชุดทดลอง 23
4.3.2 วัดความดันตกคร่อมของชุดอุปกรณ์วัดความเร็ว 23
4.4 เครื่องมืออ่านค่าความดัน 24
4.4.1 Incliened Manometer 24
4.4.2 Microtector 24

บทที่ 5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง 26
5.1 พิจารณาช่องเปิดที่ทำการทดลองทั้งหมด.......... 27
5.2 พิจารณาช่องเปิดที่มีรูปแบบภายนอกของช่องเปิด มีลักษณะเดียวกัน แต่จำนวนช่องเปิดภายในต่างกัน 29
5.3 พิจารณาช่องเปิดที่มีลักษณะภายนอกเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งมีลักษณะการแบ่งช่องเปิดภายในเหมือนกัน และมีจำนวนช่องเปิดภายในเท่ากันแต่ลักษณะการจัดวางตัวของช่องเปิดมีลักษณะที่แตกต่างกัน 31
5.4 พิจารณาช่องเปิด ที่มีลักษณะการแบ่งช่องเปิดภายในเหมือนกัน และมีจำนวนช่องเปิดภายในเท่ากัน แต่ลักษณะภายนอกของช่องเปิด มีลักษณะที่แตกต่างกัน 32
5.5 พิจารณาช่องเปิดที่มีรูปแบบภายนอกของช่องเปิดมีลักษณะเดียวกัน และจำนวนช่องเปิดภายในเท่ากันแต่ลักษณะการแบ่งช่องเปิดภายในแตกต่างกัน 33

บทที่ 6 สมการและการทดสอบ 36
6.1 รูปแบบของสมการ 36
6.2 ผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลจากสมการ 37
6.3 การทดสอบสมการ 38

บทที่ 7 สรุปผลการวิจัย 39

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รายการอ้างอิง 42

ภาคผนวก 44

ภาคผนวก ก. แสดงผลในรูปของตาราง 45

ภาคผนวก ข. แสดงผลในรูปของกราฟ 67

ภาคผนวก ค. แสดงตัวอย่างการคำนวณ 165

ภาคผนวก ง. สถิติเพื่อช่วยในการตัดสินใจ 176

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 183

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

ตารางที่ 4 - 1	แสดงขนาดและรูปแบบของช่องเปิดที่ใช้ในการทดลอง	22
ตารางที่ ก - 1	แสดงลักษณะของช่องเปิดและการแบ่งช่องเปิดภายใน ของช่องเปิดที่ใช้ในการทดลอง	46
ตารางที่ ก - 2	แสดงค่าความดันตกคร่อมที่วัดได้จากการทดลอง และค่าที่คำนวณได้สำหรับช่องเปิดรูปแบบต่างๆ	49
ตารางที่ ก - 3	แสดงค่า Shape Factor ที่คำนวณได้ สำหรับช่องเปิดรูปแบบต่างๆ	59
ตารางที่ ก - 4	แสดงค่าตัวแปรต่างๆ , ค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล และค่าความคลาดเคลื่อนที่คำนวณได้จากสมการ	61
ตารางที่ ก - 5	แสดงผลการทดสอบสมการ	66
ตารางที่ ง - 1	แสดงความหมายของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์	176
ตารางที่ ง - 2	แสดงการคำนวณความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณค่า	180

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
รูปที่ 3 - 1	แสดงการระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ	8
รูปที่ 3 - 2	แสดงลักษณะการไหลของอากาศผ่านสิ่งกีดขวาง	10
รูปที่ 3 - 3	แสดงลักษณะท่อ	11
รูปที่ 4 - 1	แสดงภาพรวมของชุดอุปกรณ์ทดลองทั้งหมด ประกอบด้วย ส่วนที่สร้างขึ้นใหม่ และส่วนที่เป็นชุดทดลองเดิม	17
รูปที่ 4 - 2	แสดงชุดจัดเรียงการไหลของอากาศ ที่ส่วนทางเข้าของชุดทดลอง	17
รูปที่ 4 - 3	แสดงส่วนทางเข้าของชุดทดลองที่ต่อกับส่วนที่ใช้ทดลอง	17
รูปที่ 4 - 4	แสดงแบบจำลองหน้าต่างที่ใช้ทดสอบ	19
รูปที่ 4 - 5	แสดงชุดทดลองที่ใช้เปลี่ยนทิศทางการไหลของอากาศ	19
รูปที่ 4 - 6	แสดงชุดอุปกรณ์วัดความเร็ว	21
รูปที่ 4 - 7	แสดงชุดพัดลมดูดอากาศ	21
รูปที่ 4 - 8	แสดง Incliened Manometer ที่ใช้ในการทดลอง	24
รูปที่ 4 - 9	แสดง Microtector ที่ใช้ในการทดลอง	25
รูปที่ ข - 1	กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล ที่ได้จากการทดลองเทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นวงกลม โดยมีช่องเปิดภายใน 2 ช่อง	68
รูปที่ ข - 2	กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล ที่ได้จากการทดลองเทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นวงกลม โดยมีช่องเปิดภายใน 4 ช่อง	69
รูปที่ ข - 3	กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล ที่ได้จากการทดลองเทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นวงกลม โดยมีช่องเปิดภายใน 8 ช่อง	70
รูปที่ ข - 4	กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล ที่ได้จากการทดลองเทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีช่องเปิดภายใน 2 ช่อง และมีเส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวดิ่ง	71

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

รูปที่ ข - 5 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล ที่ได้จากการทดลอง เทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับ ช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีช่องเปิดภายใน 2 ช่อง และมีเส้นแบ่งภายในเป็นเส้นทแยงมุม 72

รูปที่ ข - 6 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล ที่ได้จากการทดลอง เทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับ ช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีช่องเปิดภายใน 4 ช่อง 73

รูปที่ ข - 7 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล ที่ได้จากการทดลอง เทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับ ช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีช่องเปิดภายใน 4 ช่อง และเส้นแบ่งภายในเป็นเส้นทแยงมุม 74

รูปที่ ข - 8 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล ที่ได้จากการทดลอง เทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับ ช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีช่องเปิดภายใน 8 ช่อง 75

รูปที่ ข - 9 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล ที่ได้จากการทดลอง เทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับ ช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 2 ช่อง วางตัวในแนวตั้ง และมีเส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวระดับ 76

รูปที่ ข - 10 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล ที่ได้จากการทดลอง เทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับ ช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 2 ช่อง วางตัวในแนวนอน และมีเส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวดิ่ง 77

รูปที่ ข - 11 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล ที่ได้จากการทดลอง เทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับ ช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 2 ช่อง วางตัวในแนวตั้ง และมีเส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวดิ่ง 78

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

รูปที่ ข - 12 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล ที่ได้จากการทดลองเทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 2 ช่อง วางตัวในแนวนอน และมีเส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวระดับ 79
รูปที่ ข - 13 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล ที่ได้จากการทดลองเทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 2 ช่อง วางตัวในแนวตั้ง และมีเส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวทแยง 80
รูปที่ ข - 14 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล ที่ได้จากการทดลองเทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 2 ช่อง วางตัวในแนวนอน และมีเส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวทแยง 81
รูปที่ ข - 15 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล ที่ได้จากการทดลองเทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 4 ช่อง วางตัวในแนวตั้ง และมีเส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวระดับ 82
รูปที่ ข - 16 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล ที่ได้จากการทดลองเทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 4 ช่อง วางตัวในแนวนอน และมีเส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวดิ่ง 83
รูปที่ ข - 17 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล ที่ได้จากการทดลองเทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 4 ช่อง วางตัวในแนวตั้ง และมีเส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวดิ่ง 84
รูปที่ ข - 18 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล ที่ได้จากการทดลองเทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 4 ช่อง วางตัวในแนวนอน และมีเส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวระดับ 85

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

รูปที่ ข - 19 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล ที่ได้จากการทดลองเทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 4 ช่องวางตัวในแนวตั้ง โดยเส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวระดับและแนวดิ่ง 86

รูปที่ ข - 20 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล ที่ได้จากการทดลองเทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 4 ช่องวางตัวในแนวนอน โดยเส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวระดับและแนวดิ่ง 87

รูปที่ ข - 21 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล ที่ได้จากการทดลองเทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 4 ช่องวางตัวในแนวตั้ง และมีเส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวทแยง 88

รูปที่ ข - 22 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล ที่ได้จากการทดลองเทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 4 ช่องวางตัวในแนวนอน และมีเส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวทแยง 89

รูปที่ ข - 23 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล ที่ได้จากการทดลองเทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 7 ช่องวางตัวในแนวตั้ง โดยเส้นแบ่งภายในไม่เป็นเส้นแนวระดับและแนวดิ่ง 90

รูปที่ ข - 24 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล ที่ได้จากการทดลองเทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 7 ช่องวางตัวในแนวนอน โดยเส้นแบ่งภายในไม่เป็นเส้นแนวระดับและแนวดิ่ง .. 91

รูปที่ ข - 25 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล ที่ได้จากการทดลองเทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 8 ช่องวางตัวในแนวตั้ง โดยเส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวระดับและแนวดิ่ง 92

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

รูปที่ ข - 26 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล ที่ได้จากการทดลอง เทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับ ช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 8 ช่อง วางตัวในแนวนอน โดยเส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวระดับและแนวดิ่ง 93

รูปที่ ข - 27 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล ที่ได้จากการทดลอง เทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับ ช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 8 ช่อง วางตัวในแนวตั้ง โดยเส้นแบ่งภายในไม่เป็นเส้นแนวระดับและแนวดิ่ง 94

รูปที่ ข - 28 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล ที่ได้จากการทดลอง เทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับ ช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 8 ช่อง วางตัวในแนวนอน โดยเส้นแบ่งภายในไม่เป็นเส้นแนวระดับและแนวดิ่ง . 95

รูปที่ ข - 29 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล ที่ได้จากการทดลอง เทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับ ช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 16 ช่อง วางตัวในแนวตั้ง โดยเส้นแบ่งภายในไม่เป็นเส้นแนวระดับและแนวดิ่ง 96

รูปที่ ข - 30 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล ที่ได้จากการทดลอง เทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับ ช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 16 ช่อง วางตัวในแนวนอน โดยเส้นแบ่งภายในไม่เป็นเส้นแนวระดับและแนวดิ่ง . 97

รูปที่ ข - 31 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล ที่ได้จากการทดลอง เทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับ ช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 22 ช่อง วางตัวในแนวตั้ง โดยเส้นแบ่งภายในไม่เป็นเส้นแนวระดับและแนวดิ่ง 98

รูปที่ ข - 32 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล ที่ได้จากการทดลอง เทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับ ช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 22 ช่อง วางตัวในแนวนอน โดยเส้นแบ่งภายในไม่เป็นเส้นแนวระดับและแนวดิ่ง . 99

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

รูปที่ ข - 33 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นวงกลม โดยมีช่องเปิดภายใน 2 , 4 และ 8 ช่อง 100

รูปที่ ข - 34 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีช่องเปิดภายใน 2 , 4 และ 8 ช่อง 101

รูปที่ ข - 35 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 2 , 4 และ 8 ช่อง วางตัวในแนวตั้ง และมีเส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวระดับ สำหรับช่องเปิด 2 ช่องและ 4 ช่อง 102

รูปที่ ข - 36 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 2 , 4 และ 8 ช่อง วางตัวในแนวตั้ง และมีเส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวดิ่ง สำหรับช่องเปิด 2 ช่องและ 4 ช่อง 103

รูปที่ ข - 37 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 2 , 4 และ 8 ช่องวางตัวในแนวนอนและมีเส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวระดับ สำหรับช่องเปิด 2 ช่องและ 4 ช่อง 104

รูปที่ ข - 38 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 2 , 4 และ 8 ช่องวางตัวในแนวนอนและมีเส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวดิ่ง สำหรับช่องเปิด 2 ช่องและ 4 ช่อง 105

รูปที่ ข - 39 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 2 , 4 , 7 , 8 , 16 และ 22 ช่องวางตัวในแนวตั้ง และมีเส้นแบ่งภายในไม่เป็นเส้นแนวระดับ 106

รูปที่ ข - 40 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 2 , 4 , 7 , 8 , 16 และ 22 ช่องวางตัวในแนวนอน และมีเส้นแบ่งภายในไม่เป็นเส้นแนวระดับ 107

รูปที่ ข - 41 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ช่องเปิดภายในมีจำนวน 2 ช่องโดยแบ่งช่องเปิดภายในด้วยเส้นที่แบ่งครึ่งด้านยาว 108

รูปที่ ข - 42 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ช่องเปิดภายในมีจำนวน 2 ช่องโดยแบ่งช่องเปิดภายในด้วยเส้นที่แบ่งครึ่งด้านกว้าง 109

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

รูปที่ ข - 43 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ช่องเปิดภายในมีจำนวน 2 ช่องโดยแบ่งช่องเปิดภายในด้วยเส้นทแยงมุม 110

รูปที่ ข - 44 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ช่องเปิดภายในมีจำนวน 4 ช่องโดยแบ่งช่องเปิดภายในด้วยเส้นที่แบ่งครึ่งด้านยาว 111

รูปที่ ข - 45 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ช่องเปิดภายในมีจำนวน 4 ช่องโดยแบ่งช่องเปิดภายในด้วยเส้นที่แบ่งครึ่งด้านกว้าง 112

รูปที่ ข - 46 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ช่องเปิดภายในมีจำนวน 4 ช่องโดยแบ่งช่องเปิดภายในด้วยเส้นที่แบ่งครึ่งด้านยาว และด้านกว้าง 113

รูปที่ ข - 47 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ช่องเปิดภายในมีจำนวน 4 ช่องโดยแบ่งช่องเปิดภายในด้วยเส้นทแยงมุม 114

รูปที่ ข - 48 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ช่องเปิดภายในมีจำนวน 7 ช่อง โดยเส้นแบ่งภายไม่ในเป็นเส้นแนวระดับและแนวดิ่ง 115

รูปที่ ข - 49 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ช่องเปิดภายในมีจำนวน 8 ช่องเปิด โดยเส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวระดับและแนวดิ่ง 116

รูปที่ ข - 50 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ช่องเปิดภายในมีจำนวน 8 ช่องเปิด โดยเส้นแบ่งภายไม่ในเป็นเส้นแนวระดับและแนวดิ่ง 117

รูปที่ ข - 51 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ช่องเปิดภายในมีจำนวน 16 ช่องเปิดโดยเส้นแบ่งภายไม่ในเป็นเส้นแนวระดับและแนวดิ่ง 118

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

รูปที่ ข - 52 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยม ผืนผ้า ช่องเปิดภายในมีจำนวน 22 ช่องเปิดโดยเส้นแบ่งภายไม่ในเป็น เส้นแนวระดับและแนวดิ่ง 119

รูปที่ ข - 53 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นวงกลม และสี่เหลี่ยมจัตุรัส ช่องเปิดภายในจำนวน 2 ช่อง โดยสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีการแบ่งช่องเปิดภายในด้วยเส้นในแนวดิ่ง 120

รูปที่ ข - 54 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นวงกลม และสี่เหลี่ยมจัตุรัส ช่องเปิดภายในจำนวน 2 ช่อง โดยสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีการแบ่งช่องเปิดภายในด้วยเส้นในแนวทแยงมุม 121

รูปที่ ข - 55 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นวงกลม และสี่เหลี่ยมจัตุรัส ช่องเปิดภายในจำนวน 4 ช่อง โดยสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีการแบ่งช่องเปิดภายในด้วยเส้นในแนวระดับ และแนวดิ่ง 122

รูปที่ ข - 56 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นวงกลม และสี่เหลี่ยมจัตุรัส ช่องเปิดภายในจำนวน 4 ช่อง โดยสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีการแบ่งช่องเปิดภายในด้วยเส้นในแนวทแยงมุม 123

รูปที่ ข - 57 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นวงกลม และสี่เหลี่ยมจัตุรัส ช่องเปิดภายในจำนวน 8 ช่อง 124

รูปที่ ข - 58 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยม จัตุรัส ซึ่งมีช่องเปิดภายในจำนวน 2 ช่อง 125

รูปที่ ข - 59 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยม จัตุรัส ซึ่งมีช่องเปิดภายในจำนวน 4 ช่อง 126

รูปที่ ข - 60 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยม ผืนผ้า ที่วางตัวในแนวตั้ง ซึ่งมีช่องเปิดภายในจำนวน 2 ช่อง 127

รูปที่ ข - 61 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยม ผืนผ้า ที่วางตัวในแนวนอน ซึ่งมีช่องเปิดภายในจำนวน 2 ช่อง 128

รูปที่ ข - 62 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยม ผืนผ้า ที่วางตัวในแนวตั้ง ซึ่งมีช่องเปิดภายในจำนวน 4 ช่อง 129

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

รูปที่ ข - 63 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่วางตัวในแนวนอน ซึ่งมีช่องเปิดภายในจำนวน 4 ช่อง 130
รูปที่ ข - 64 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่วางตัวในแนวตั้ง ซึ่งมีช่องเปิดภายในจำนวน 8 ช่อง 131
รูปที่ ข - 65 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่วางตัวในแนวนอน ซึ่งมีช่องเปิดภายในจำนวน 8 ช่อง 132
รูปที่ ข - 66 กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นวงกลมโดยมีช่องเปิดภายใน 2 ช่อง 133
รูปที่ ข - 67 กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นวงกลมโดยมีช่องเปิดภายใน 4 ช่อง 134
รูปที่ ข - 68 กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นวงกลมโดยมีช่องเปิดภายใน 8 ช่อง 135
รูปที่ ข - 69 กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีช่องเปิดภายใน 2 ช่อง และมีการแบ่งช่องเปิดภายในด้วยเส้นในแนวดิ่ง 136
รูปที่ ข - 70 กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีช่องเปิดภายใน 4 ช่อง และมีการแบ่งช่องเปิดภายในด้วยเส้นในแนวระดับและแนวดิ่ง 137
รูปที่ ข - 71 กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีช่องเปิดภายใน 4 ช่อง และมีการแบ่งช่องเปิดภายในด้วยเส้นในแนวทแยงมุม 138
รูปที่ ข - 72 กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 2 ช่อง วางตัวในแนวตั้ง ภายในแบ่งด้วยเส้นในแนวระดับ 139
รูปที่ ข - 73 กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 2 ช่อง วางตัวในแนวนอน ภายในแบ่งด้วยเส้นในแนวดิ่ง 140

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

รูปที่ ข - 74 กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 2 ช่อง วางตัวในแนวตั้ง ภายในแบ่งด้วยเส้นในแนวดิ่ง 141
รูปที่ ข - 75 กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 2 ช่อง วางตัวในแนวตั้ง ภายในแบ่งด้วยเส้นในแนวทแยงมุม 142
รูปที่ ข - 76 กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 2 ช่อง วางตัวในแนวนอน ภายในแบ่งด้วยเส้นในแนวทแยงมุม 143
รูปที่ ข - 77 กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 4 ช่อง วางตัวในแนวตั้ง ภายในแบ่งด้วยเส้นในแนวระดับ 144
รูปที่ ข - 78 กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 4 ช่อง วางตัวในแนวนอน ภายในแบ่งด้วยเส้นในแนวดิ่ง 145
รูปที่ ข - 79 กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 4 ช่อง วางตัวในแนวตั้ง ภายในแบ่งด้วยเส้นในแนวระดับ และแนวดิ่ง 146
รูปที่ ข - 80 กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 4 ช่อง วางตัวในแนวนอน ภายในแบ่งด้วยเส้นในแนวระดับ และแนวดิ่ง 147
รูปที่ ข - 81 กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 4 ช่อง วางตัวในแนวตั้ง ภายในแบ่งด้วยเส้นในแนวดิ่ง 148
รูปที่ ข - 82 กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 4 ช่อง วางตัวในแนวตั้ง โดยที่เส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวทแยงมุม 149

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

รูปที่ ข - 83 กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 4 ช่อง วางตัวในแนวนอน โดยที่เส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวทแยงมุม 150
รูปที่ ข - 84 กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 7 ช่อง วางตัวในแนวนอน โดยที่เส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวทแยง 151
รูปที่ ข - 85 กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 8 ช่อง วางตัวในแนวตั้ง ภายในแบ่งด้วยเส้นในแนวระดับ และแนวดิ่ง 152
รูปที่ ข - 86 กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 8 ช่อง วางตัวในแนวนอน ภายในแบ่งด้วยเส้นในแนวระดับ และแนวดิ่ง 153
รูปที่ ข - 87 กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 8 ช่อง วางตัวในแนวตั้ง โดยที่เส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวทแยง 154
รูปที่ ข - 88 กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 8 ช่อง วางตัวในแนวนอน โดยที่เส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวทแยง 155
รูปที่ ข - 89 กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยมีช่องเปิดภายใน 16 ช่อง วางตัวในแนวนอนโดยที่เส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวทแยง 156
รูปที่ ข - 90 กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 22 ช่อง วางตัวในแนวตั้ง โดยที่เส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวทแยง 157
รูปที่ ข - 91 กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยมีช่องเปิดภายใน 22 ช่อง วางตัวในแนวนอนโดยที่เส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวทแยง 158

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

รูปที่ ข - 92 กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีช่องเปิดภายใน 2 ช่อง และมีการแบ่งช่องเปิดภายในด้วยเส้นในแนวทแยงมุม 159

รูปที่ ข - 93 กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีช่องเปิดภายใน 8 ช่อง และมีการแบ่งช่องเปิดภายในด้วยเส้นในแนวทแยงมุม 160

รูปที่ ข - 94 กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 2 ช่อง วางตัวในแนวนอน ภายในแบ่งด้วยเส้นในแนวระดับ 161

รูปที่ ข - 95 กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 4 ช่อง วางตัวในแนวนอน ภายในแบ่งด้วยเส้นในแนวระดับ 162

รูปที่ ข - 96 กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 7 ช่อง วางตัวในแนวตั้ง โดยที่เส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวทแยง 163

รูปที่ ข - 97 กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 16 ช่อง วางตัวในแนวตั้ง โดยที่เส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวทแยง 164

รูปที่ ง - 1 แสดงแนวความคิดสหสัมพันธ์ 177

รูปที่ ง - 2 แสดงกราฟที่ได้จากค่า r น้อยกว่า 1.00 177

รูปที่ ง - 3 แสดงสมการถดถอยและกราฟที่มีค่า r เท่ากับ 1.00 178

รูปที่ ง - 4 แสดงกราฟที่ได้จากข้อมูลด้านซ้าย 179

รูปที่ ง - 5 แสดงโค้งปกติ กับค่า SD 181

รูปที่ ง - 6 (ก) แสดงค่า $\overline{Y}$ จะทำให้เกิดค่า $\overline{X}(\overline{X},\overline{Y})$ และ X1(X1, $\overline{Y}$) 182

รูปที่ ง - 6 (ข) แสดงค่า X1 จะทำให้เกิดค่า Y’(X1,Y’) และ Y1(X1,Y1) 182

รูปที่ ง - 7 แสดงค่าความคลาดเคลื่อน 182

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

กระบวนการลดความร้อนโดยวิธีการธรรมชาติ เป็นกระบวนการที่ถูกนำมาใช้เพิ่มเติม เพื่อสร้างสภาวะความน่าสบายให้กับมนุษย์ กระบวนการนี้เป็นการมุ่งเน้นไปที่การขจัดปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นให้ออกไปจากอาคาร โดยใช้ตัวแปรจากธรรมชาติในด้านต่างๆ ที่มีความเหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศและการใช้สอย ความสนใจในการใช้วิธีการธรรมชาติเพื่อลดความร้อน เริ่มเป็นที่สนใจแพร่หลายต่อสาธารณะและหมู่ที่เกี่ยวข้อง ตั้งแต่ช่วงทศวรรษ 1970 เป็นต้นมา ซึ่งเป็นผลมาจากปัญหาด้านการขาดแคลนพลังงานเชื้อเพลิง โดยเฉพาะน้ำมันดิบที่ส่งผลกระทบไปทั่วโลก ทำให้ค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงาน เช่น ค่าไฟฟ้า แก๊สหุงต้ม ฯลฯ ที่มีความจำเป็นในการดำรงชีวิตของมนุษย์เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ สิ่งที่เกิดขึ้นจากการบริโภคพลังงานเชื้อเพลิงอย่างไร้การควบคุมเหล่านี้ ยังก่อให้เกิดปัญหาร้ายแรงต่อสภาวะแวดล้อม และธรรมชาติของโลกมนุษย์ ไม่ว่าจะเป็นภาวะการณ์โลกร้อนระอุ (Global Warming) หรือการสลายตัวของโอโซนในชั้นบรรยากาศ เมื่อปัญหาเหล่านี้เริ่มรุนแรงขึ้น จึงก่อให้เกิดความสนใจในแนวทางการใช้ธรรมชาติเป็นเครื่องมือในการแก้ไขปัญหา แนวทางนี้ถูกพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากนักวิทยาศาสตร์ และนักวิจัยต่างๆมากมาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสหรัฐอเมริกา ซึ่งได้รับผลกระทบโดยตรงจากปัญหาที่เกิดขึ้นนี้ แต่ในจุดเริ่มต้นของการวิจัย จะเป็นการศึกษาเพื่อให้เกิดการใช้ความร้อนจากธรรมชาติ คือ แสงอาทิตย์ เพื่อใช้ทำความอบอุ่นให้กับอาคารในฤดูหนาว (Passive-Heating) จนกระทั่งเกิดการขยายตัวและอพยพของประชากรในรัฐทางใต้ และตะวันตกเฉียงใต้ของประเทศ ซึ่งมีลักษณะภูมิอากาศแบบประเทศในเขตร้อน และก่อให้เกิดปัญหาในการใช้พลังงานในลักษณะเดียวกัน จึงเป็นจุดเริ่มต้นของการวิจัย เพื่อค้นหาแนวทางการใช้ธรรมชาติเป็นเครื่องมือในการทำความเย็นให้กับอาคาร (Passive-Cooling) จากจุดนี้ การวิจัยได้ขยายผลเพิ่มขึ้นอย่างกว้างขวาง จนถูกใช้เป็นแนวทางในการเลือกใช้ เพื่อประกอบการออกแบบอาคารอย่างเหมาะสมกับลักษณะภูมิอากาศ และมีประสิทธิภาพต่อไป

กระบวนการลดความร้อน หรือทำความเย็นจากธรรมชาติ มีหลายแนวทางในการเลือกใช้เพื่อประกอบการออกแบบอาคาร ให้เหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศ และสภาพของธรรมชาติแวดล้อม โดยปัจจัยในการจำแนกแนวทางที่ใช้เป็นเครื่องมือประกอบการออกแบบ จะ

พิจารณาจากลักษณะของสภาพธรรมชาติ ที่ถูกใช้เป็นหลักในการใช้งาน ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 5 แนวทาง ดังนี้

1. กระบวนการทำความเย็นโดยการระบายอากาศ
2. กระบวนการทำความเย็นโดยการแผ่รังสี
3. กระบวนการทำความเย็นโดยการระเหย
4. กระบวนการทำความเย็นโดยใช้ดินเป็นตัวดูดซับความร้อน
5. กระบวนการทำความเย็นโดยการลดความชื้น

เมื่อได้พิจารณาในส่วนรายละเอียดของปัจจัยจากธรรมชาติ ที่มีความแตกต่างกันไปในแต่ละแนวทาง ในการลดความร้อนที่เกิดขึ้น ความเหมาะสมในการใช้งาน และความสามารถในการประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการออกแบบอาคารในประเทศไทยที่สามารถเป็นไปได้ จะเห็นได้ว่าแนวทางที่ 1 คือ กระบวนการทำความเย็นโดยการระบายอากาศ โดยวิธีธรรมชาตินั้น เป็นแนวทางที่นิยม และใช้กันอย่างแพร่หลาย ตั้งแต่อดีตจวบจนปัจจุบัน

อย่างไรก็ตาม การสร้างบ้านเรือน หรืออาคารต่างๆนั้น เราจะเห็นได้ว่า ผู้อยู่อาศัยหรือเจ้าของอาคารต่างๆ ได้ให้ความสำคัญกับสถาปนิกในการออกแบบ ควบคุม และตกแต่งให้เกิดความสวยงามตามความต้องการ โดยไม่ได้ให้ความสำคัญ หรือคำนึงถึงประโยชน์ที่จะได้รับจากการใช้งาน ทำให้ประสิทธิภาพการใช้งานของอาคารไม่ดีเท่าที่ควร ซึ่งจะทำให้เราได้อาคารที่ไม่สัมพันธ์กับสภาพแวดล้อมของบริเวณที่ตั้งของอาคาร เช่น ทิศทางลม , ทิศทางของแสง เป็นต้น ทำให้ก่อให้เกิดปัญหาตามมา และในการแก้ไขนั้น เราอาจจะต้องจัดหา และซื้ออุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ เข้ามาชดเชยผลเสียที่เกิดขึ้น ซึ่งจะเป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย อีกทั้งยังเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานในระยะยาวอีกด้วย ด้วยเหตุนี้ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการร่วมมือกันระหว่างสถาปนิก และวิศวกรในการออกแบบอาคาร ซึ่งจะทำให้ได้อาคารที่มีความสวยงาม และมีประสิทธิภาพในการใช้งานอย่างเต็มที่

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะศึกษา และทดลองเกี่ยวกับการระบายอากาศในอาคารโดยวิธีทางธรรมชาติ ซึ่งจะพิจารณาถึงการไหลของอากาศเมื่อผ่านหน้าต่าง ซึ่งถือว่าเป็นช่องเปิดในอาคาร ในลักษณะ และมีรูปแบบต่างๆกัน โดยมีวัตถุประสงค์ คือ เพื่อให้งานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลให้กับสถาปนิก ในการออกแบบหน้าต่างของอาคารต่างๆ เพื่อให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมมากที่สุด ซึ่งจะส่งผลให้การระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติมีประสิทธิภาพมากขึ้น อันจะเป็นการช่วยลดค่าใช้จ่ายในการปรับอากาศภายในอาคาร และช่วยประหยัดพลังงานอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. เพื่อศึกษา และวิเคราะห์ถึงตัวแปร ที่มีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลของอากาศ เมื่ออากาศไหลผ่านช่องเปิดที่ซับซ้อนรูปแบบต่างๆ
2. เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการกำหนดช่องเปิด ที่ให้อัตราการไหลของอากาศ เป็นไปตามที่ต้องการ ภายใต้เงื่อนไขของสภาพแวดล้อมได้
3. หาค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลของช่องเปิดที่ซับซ้อนรูปแบบต่างๆ รวมทั้งหาสมการที่เหมาะสมในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลอีกด้วย

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลรายละเอียดของช่องเปิดแบบต่างๆ และ ศึกษาการไหลของอากาศผ่านช่องเปิด
2. จัดสร้างชุดทดลองเพื่อทดสอบการไหล เพื่อให้สอดคล้องกับสมมติฐานมากที่สุด
3. ทำการทดลองเพื่อศึกษาการไหลของอากาศผ่านช่องเปิดต่างๆ โดยเปลี่ยนค่าตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้อง เพื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลในกรณีต่างๆ
4. หาสมการ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลที่เหมาะสม
5. จัดทำรายงานเพื่อนำเสนอข้อมูล และสรุปผลที่ทำการศึกษา เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับใช้ในการออกแบบต่อไป

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สร้างฐานข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลสำหรับช่องเปิดรูปแบบต่างๆ และการวางตัวของช่องเปิดที่ตำแหน่งต่างๆ
2. ค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลที่ได้ สามารถนำไปเป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจในการกำหนดรูปแบบช่องเปิดอาคารเพื่อให้ได้การระบายอากาศตามที่ต้องการ
3. เป็นข้อมูลเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณเกี่ยวกับการรักษาระดับความดันภายในอาคาร
4. สามารถนำเอาแนวทางเดียวกันนี้ ไปใช้กับช่องเปิดรูปแบบอื่นๆ เพื่อใช้หาค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลตามรูปแบบช่องเปิดที่ต้องการได้
5. สามารถนำเอาสมการที่วิเคราะห์ ไปใช้คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลของช่องเปิดที่มีรูปแบบที่คล้ายคลึงกันได้

บทที่ 2

บทความที่ผ่านมา

จากการศึกษาเอกสาร และผลงานวิจัยต่างๆที่ผ่านมา ซึ่งเกี่ยวข้อง หรือเกี่ยวพันกับวิทยานิพนธ์นี้ สามารถได้ข้อสรุป ดังนี้

อ. ดร.เชิดพันธ์ วิทูราภรณ์ (1999) ศึกษาถึงการระบายอากาศในอาคารโดยวิธีธรรมชาติ โดยนำเสนอกลไกการระบายอากาศที่เกิดขึ้น ทั้งจากกรณีของผลจากกระแสลม (Wind Effect) และผลจากแรงลอยตัว (Stack Effect) ตลอดจนตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้อง ที่มีผลกระทบต่อการระบายอากาศ และนำเสนอสมการที่เกี่ยวข้องกับกลไก รวมทั้งนำเสนอวิธีการหาอัตราการระบายอากาศที่เกิดขึ้นจากกลไกทั้งสองด้วย

Harris J. Sobin (1981) ศึกษาถึงตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการไหลของอากาศผ่านหน้าต่าง ทำการทดลองโดยการเปลี่ยนแปลงทิศทางของลม , เปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนพื้นที่หน้าต่าง (Area Ratio) , เปลี่ยนแปลงรูปแบบของหน้าต่างที่ทางเข้า และตำแหน่งของหน้าต่าง โดยพิจารณาจากการเคลื่อนที่ของอากาศภายในอาคาร

N. Hay , D. Lampard และ A. Khaldi (1994) ศึกษาถึงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล (Discharge Coefficient) ของการไหลของอากาศผ่านรูพื้นเอียงที่ทำมุม 30° กับทิศทางการไหลของอากาศ ซึ่งมีค่าอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter Ratio) เท่ากับ 6 ทดลองโดยการลบความคมของรู ที่ทางเข้าและทางออก ในสภาวะการไหลต่างกัน ซึ่งในการลบความคมนั้น มีค่ารัศมีความโค้งอยู่ในช่วง 0-1 มิลลิเมตร และมีค่า Mach Number อยู่ระหว่าง 0-0.5 พบว่า การลบความคมที่ปากทางเข้านั้น สามารถเพิ่มค่าอัตราการไหลได้ถึง 15% แต่การลบความคมที่ปากทางออกนั้น ไม่มีผลกระทบกับการไหลใดๆเลย ส่วนการเปลี่ยนแปลงลักษณะการไหล (เปลี่ยนค่า Mach Number) นั้น ทำให้ค่าความดันตกคร่อมเปลี่ยนแปลงไป และนำข้อมูลต่างๆไปประดิษฐ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถทำนายค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล

Gerald L. Morrison , David R. Panak และ Roberd E. Jr Deotte (1992) ศึกษาถึงการที่อากาศที่ทางเข้ามีการกระจายความเร็ว (Velocity Profile) โดยเฉลี่ย โดยที่ความเร็วที่ผนังท่อมากกว่าความเร็วที่กลางท่อ จะทำให้เกิดค่าความดันตกคร่อม มากกว่าอากาศที่มีการกระจายความเร็วแบบเต็มที่แล้ว (Fully Developed Flow) ดังนั้นค่าความดันตกคร่อมจะมีความสัมพันธ์กับค่าการกระจายความเร็วตามแนวรัศมีของท่อ ซึ่งใช้ Create X Inc.'s FLUENT

Numerical Analysis Program ในการวิเคราะห์ พบว่า เราสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลที่เปลี่ยนแปลงไป โดยใช้ค่าการกระจายความเร็ว ที่ทางเข้าได้

J. C. Kayser และ R. L. Shambaugh (1991) ศึกษาพฤติกรรมการไหลของก๊าซเบา ที่สามารถอัดตัวได้ผ่าน Orifice และ Nozzle ที่มีขนาดเล็กประมาณ 0.9-1.9 มิลลิเมตร ซึ่งทดลองโดยการเปลี่ยนรูปแบบ คือ ใช้ Sharp-edge Orifice (Knife-edge) และ Straight-bore Orifice และทำการเปลี่ยนอุณหภูมิที่ทางเข้าระหว่าง 295-700 K.

G. L. Morrison , K. R. Hall , M. L. Macek , L. M. Ihfe , R. E. Deotte Jr และ J. E. Hauglie (1994) ศึกษาถึงผลกระทบของการกระจายความเร็ว (Velocity Profile) ที่ทางเข้าต่อประสิทธิภาพของ Orifice โดยที่การไหลไม่มีการหมุนวน ทดลองกับ Orifice ที่มีค่า Beta Ratio (อัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดของ Orifice กับพื้นที่หน้าตัดของท่อ) เท่ากับ 0.43 , 0.50 , 0.60 , 0.70 , และ 0.75 ซึ่งมีค่า Renold Number , Re เท่ากับ 54,700 และท่อยาว 50.4 ซม. พบว่า การเพิ่มการไหลของอากาศในท่อ จะเป็นการลดค่าความดันตกคร่อมของ Orific ซึ่งจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลมีค่าสูงขึ้น และหากว่าเราลดการไหลของอากาศลง ก็จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลมีค่าลดลงด้วย ทั้งนี้จะเกิดความคลาดเคลื่อนมากขึ้น หากว่าค่า Beta Ratio มีค่าสูงขึ้น

J. P. Chastain และ D. G. Colliver (1987) ศึกษาการไหลของอากาศผ่านช่องเปิดที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม และวงกลม โดยการทดลองเพื่อสร้างสมการทำนายหาค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การระบายอากาศโดยวิธีการธรรมชาติ เป็นกระบวนการลดความร้อนที่ปราศจากเครื่องมือกลที่นิยมใช้กันแพร่หลายทั่วโลก กระบวนการนี้มีพื้นฐานมาจากการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน ซึ่งเมื่อมีการเคลื่อนที่ของอากาศ ก็จะพัดพาความร้อนให้เคลื่อนที่ตามไปด้วย ก่อให้เกิดการลดลงของอุณหภูมิในบริเวณนั้น นอกจากนี้ เมื่อมีการเคลื่อนที่ของอากาศผ่านผิวหนังของมนุษย์ ก็จะก่อให้เกิดการระเหยของเหงื่อที่บริเวณรูขุมขน และส่งผลเกี่ยวกับความรู้สึกร้อน-หนาวของประสาทสัมผัสที่ผิวหนัง สำหรับการแบ่งประเภทของการระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติมีสาเหตุจากการเคลื่อนที่ของอากาศจากภายนอกสู่ภายในอาคาร หรือจากภายในสู่ภายนอกอาคาร จะมีอยู่ 2 ลักษณะ คือ

1. ***แบบควบคุมได้*** คือ การระบายอากาศ (Ventilation) ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ
   - การเคลื่อนที่ของอากาศโดยแรงกระทำของตัวเอง (กระแสลม) หรือความแตกต่างของความดัน
   - การเคลื่อนที่ของอากาศโดยความแตกต่างของอุณหภูมิ
2. ***แบบควบคุมไม่ได้*** ซึ่งก็คือ การซึมเข้า หรือออกของอากาศในอาคาร ผ่านโครงสร้าง หรือรอยต่อที่อยู่รอบๆอาคาร โดยเราจะเรียกว่า การแทรกซึมของอากาศ (Infiltration)

สำหรับการระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติในแบบควบคุมได้ ตามหัวข้อที่ 1 นั้นก่อให้เกิดประโยชน์ต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภายในอาคารใน 3 ลักษณะ คือ

➢ เพื่อรักษาคุณภาพของอากาศภายในอาคาร ให้อยู่ในระดับที่เพียงพอต่อความต้องการพื้นฐาน ในการใช้ชีวิตของมนุษย์ด้วยการถ่ายเทอากาศบริสุทธิ์จากภายนอกอาคารเข้าแทนที่อากาศเสีย เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่เกิดจากกิจกรรมต่างๆในการดำรงชีวิตของมนุษย์ตั้งแต่การหายใจจนกระทั่งเครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ ในการใช้งานในชีวิตประจำวัน ความสำคัญของประเด็นแรกนี้จะอยู่ที่การป้องกันการเกิดโรคภัยไข้เจ็บที่จะเกิดขึ้นจากสภาพที่เรียกว่า มลภาวะจากอากาศภายใน (Indoor Air Pollution) ภายในอาคาร รวมทั้งความต้องการอากาศบริสุทธิ์ในการดำรงชีวิตของมนุษย์ จึงเรียกการระบายอากาศในลักษณะนี้ว่า การระบายอากาศเพื่อสุขภาพ (Health Ventilation)

- เพื่อเสริมสร้างสภาวะความน่าสบายในการดำรงชีวิตของมนุษย์ ในลักษณะของการถ่ายเทความร้อนในรูปแบบของการพาความร้อน ซึ่งการเคลื่อนที่ของอากาศที่พัดผ่านตัวมนุษย์ จะช่วยเพิ่มอัตราการสูญเสียความร้อน (Heat Loss) ที่เกิดขึ้นภายในร่างกายของมนุษย์ได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ การพัดพาความร้อนดังกล่าวจะช่วยทำให้ฟิล์มอากาศ (Air Film) ที่อยู่ที่ผิวหนังมนุษย์ถูกพัดพาไป ทำให้เกิดความรู้สึกเย็นสบาย ไม่เกิดความอับชื้นอันเนื่องมาจากเหงื่อไคลบนผิวหนังอีกด้วย ซึ่งลักษณะการระบายอากาศนี้ จะถูกเรียกว่า การระบายอากาศเพื่อสภาวะความสบาย (Thermal Comfort Ventilation)

- เพื่อรักษาสภาพความเย็น และระบายความร้อนของโครงสร้างอาคาร โดยที่เมื่อสภาพอุณหภูมิภายในอาคารสูงกว่าภายนอก การพัดพาของอากาศจะสามารถป้องกันการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ภายในอาคาร ที่จะมีผลต่อผู้ใช้อาคาร ไม่ว่าจะเป็นการแผ่รังสีความร้อน หรือ การนำความร้อนที่เกิดจากการเก็บกักความร้อนในตัวมวลสารของวัสดุประกอบอาคาร โดยมีความมุ่งหมายหลักอยู่ที่ การลดอุณหภูมิเฉลี่ยที่เกิดจากการแผ่รังสี (Mean Radiant Temperature-MRT) ซึ่งเกิดจากการแผ่รังสีของสภาพพื้นผิวของวัสดุประกอบอาคารในส่วนต่างๆ เช่น หลังคา , พื้น และผนังที่ส่งผลต่อสภาพของอุณหภูมิภายในอาคาร โดยการระบายอากาศในลักษณะนี้ เรียกว่า การระบายอากาศสำหรับโครงสร้าง (Structural Ventilation)

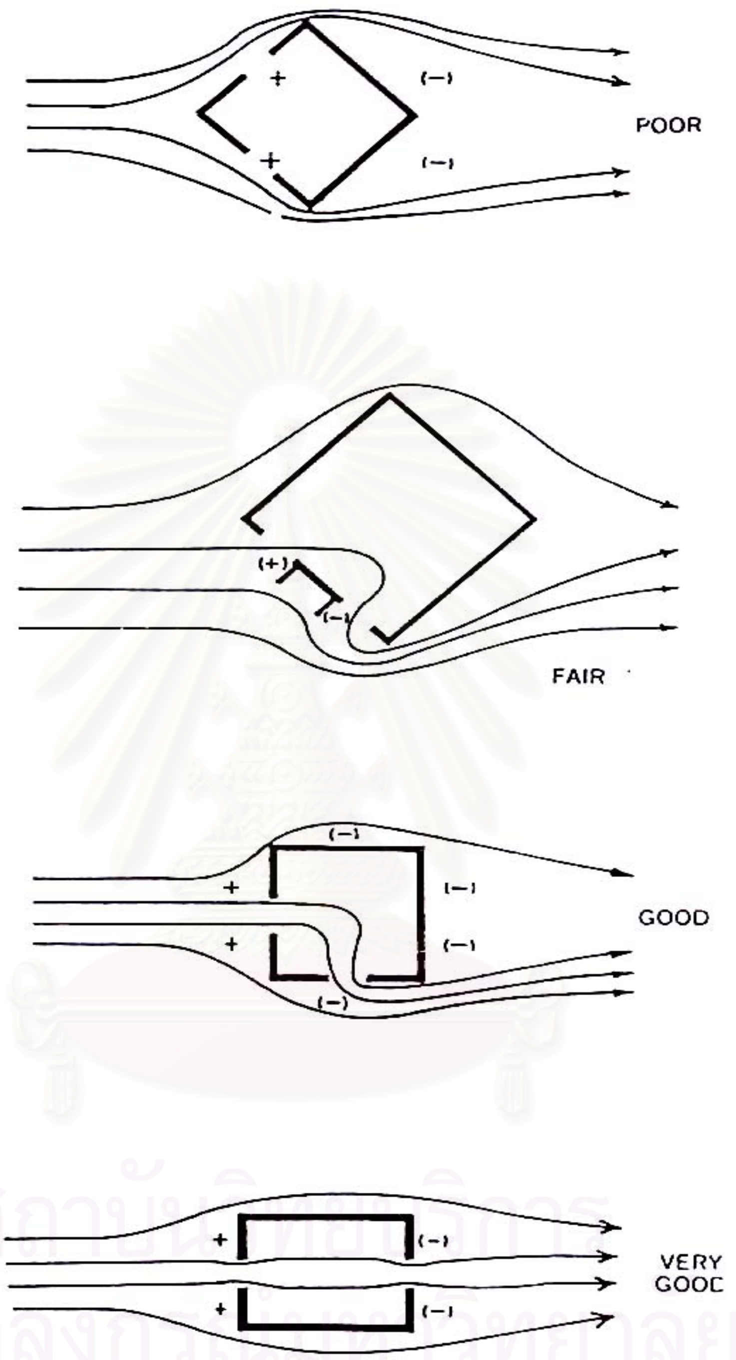
3.1 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการระบายอากาศโดยวิธีการธรรมชาติ

ในการศึกษาถึงการระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ ในความเป็นจริงแล้วก็คือกระบวนการที่ใช้ธรรมชาติเป็นเครื่องมือในการถ่ายเทความร้อน จากจุดที่ไม่ต้องการออกไปนั่นเอง ซึ่งในที่นี้ ธรรมชาติก็คืออากาศ หรือกระแสลมที่จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนในลักษณะของการพาความร้อนออกไปจากตัวอาคาร โดยที่ปริมาณของความร้อนที่ถูกถ่ายเทออกไปนั้น จะเป็นผลมาจากความสัมพันธ์ที่เกี่ยวเนื่องกัน ระหว่างค่าความจุความร้อนของอากาศ , อัตราการเคลื่อนที่ของอากาศ และความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิภายนอกกับภายในอาคาร แสดงในรูปที่ 3 - 1 ซึ่งสามารถอธิบายความสัมพันธ์ดังกล่าวในรูปของสมการได้ดังนี้

$$\dot{Q} = \frac{H}{\rho C_P (T_i - T_o)}$$

หรือปรับสมการใหม่ จะได้

$$H = \dot{Q} \times \rho C_P (T_i - T_o)$$



รูปที่ 3 - 1 : แสดงการระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ

ซึ่ง H = ปริมาณความร้อนที่ถูกถ่ายเทออกไป , มีหน่วยเป็นวัตต์

$\dot{Q}$ = อัตราการเคลื่อนที่ของอากาศ , มีหน่วยเป็น เมตร ^{3} / วินาที

C_P = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ (Specific Heat) , มีหน่วยเป็น จูล / กิโลกรัม ^{O}C (มีค่าประมาณ 1000)

ρ = ค่าความหนาแน่นของอากาศ ,มีหน่วยเป็น กิโลกรัม. / เมตร ^{3} (มีค่าประมาณ 1.2)

$T_i - T_o$ = ค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิภายใน – อุณหภูมิภายนอกอาคาร , มีหน่วยเป็น ^{O}C

และเมื่อแทนค่าด้วยค่าคงที่ในส่วนของ C_P และ ρ จะได้รูปแบบของความสัมพันธ์ ดังนี้

$$H = 1200\dot{Q}(T_i - T_o)$$

จากสมการ จะเห็นได้ว่า ปริมาณความร้อนที่ถูกถ่ายเทออกไปจากตัวอาคารจะขึ้นอยู่กับอิทธิพลของ อัตราการเคลื่อนที่ของอากาศ ($\dot{Q}$) และค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ (ΔT) เป็นสำคัญ โดยจะพบว่าในส่วนของอัตราการเคลื่อนที่ของอากาศ จะมีอิทธิพลต่อการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด เนื่องจากในส่วนของความแตกต่างของอุณหภูมิภายในและภายนอกอาคารนั้น (ΔT) สำหรับในประเทศไทยตามความเป็นจริง ค่าแตกต่างดังกล่าวไม่ควรเกิน 10 ^{O}C และเป็นปัจจัยที่ขึ้นกับเปลี่ยนแปลงของสภาพธรรมชาติแวดล้อมเป็นส่วนมาก ดังนั้น ในส่วนของอัตราการเคลื่อนที่ของอากาศ จึงเป็นส่วนที่สามารถกำหนดได้ด้วยการออกแบบอาคาร และรายละเอียดของการออกแบบช่องเปิดในลักษณะต่างๆ ที่ส่งเสริมให้เกิดอัตราการเคลื่อนที่ของอากาศเพิ่มขึ้น ซึ่งจะก่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน เมื่อพิจารณาต่อไปถึงปัจจัยในการกระตุ้นอัตราการเคลื่อนที่ของอากาศโดย Liddament (1988) ที่พบความแตกต่างระหว่างความเร็วลมในฤดูหนาวและฤดูร้อน รวมทั้งทิศทางของการพัดพาของลมธรรมชาติ ที่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาลเช่นเดียวกัน และความสัมพันธ์ของความเร็วลม กับทิศทางของกระแสลมที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของอากาศ ขนาดของช่องเปิดจะสามารถแสดงได้จากสมการของความสัมพันธ์ ดังนี้

$$\dot{Q} = C_D \times A \times V$$

ซึ่ง $\dot{Q}$ = อัตราการเคลื่อนที่ของอากาศ , มีหน่วยเป็น เมตร ^{3} / วินาที

A = ขนาดพื้นที่ของช่องลมเข้า , มีหน่วยเป็น เมตร ^{2}

V = ความเร็วลม , มีหน่วยเป็น เมตร / วินาที

C_D = ค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลของอากาศ

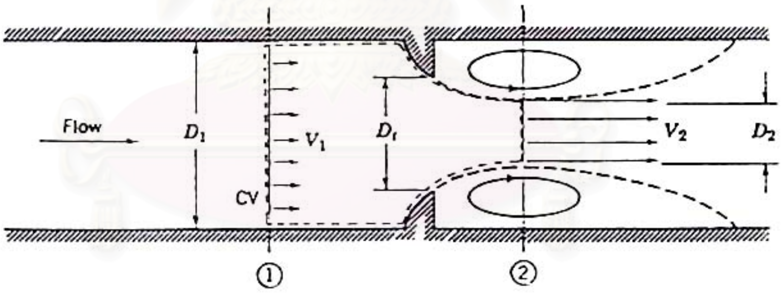
จากความสัมพันธ์นี้ เมื่อนำไปแทนค่าอัตราการเคลื่อนที่ของอากาศ ($\dot{Q}$) ในสมการแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณการถ่ายเทความร้อน จะได้

$$H = 1200 \times C_D \times A \times V\left(T_i - T_o\right)$$

จากสมการนี้จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล (C_D) เป็นตัวแปรสำคัญในการคำนวณหาค่าอัตราการเคลื่อนที่ของอากาศผ่านช่องเปิดของอาคาร ซึ่งส่งผลกระทบถึงค่าปริมาณการถ่ายเทความร้อนของอาคาร ดังนั้น ในการวิจัยจะมุ่งศึกษาถึงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล (C_D) กับค่าอัตราการเคลื่อนที่ของอากาศ ($\dot{Q}$) รวมทั้งศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล (C_D) ด้วย ซึ่งในการวิจัยนี้ จะพิจารณาการไหลของอากาศผ่านช่องเปิดอาคาร ให้มีลักษณะเดียวกันกับการไหลผ่านสิ่งกีดขวางภายในท่อ

3.2 การไหลของอากาศผ่านสิ่งกีดขวางภายในท่อ

โดยทั่วๆไป การไหลของอากาศภายในท่อผ่านสิ่งกีดขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออากาศมีการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) นั้น จะเป็นการทำให้อากาศมีความเร็วสูงขึ้น ซึ่งอากาศที่ไหลผ่านนั้นจะมีลักษณะการไหลเป็นดังรูปที่ 3 - 2



รูปที่ 3 - 2 : แสดงลักษณะการไหลของอากาศผ่านสิ่งกีดขวาง

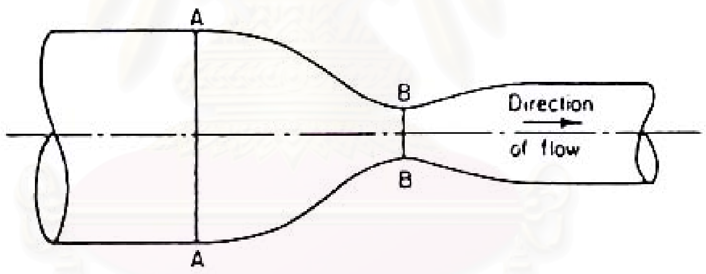
อากาศที่ไหลผ่านนั้น จะเกิดการแยกตัวขึ้นที่บริเวณคอของสิ่งกีดขวาง ทำให้เกิดบริเวณที่มีการไหลวนขึ้น ดังแสดงเป็นเส้นเต็ม และทางด้านหลังของสิ่งกีดขวางนั้น อากาศส่วนมากยังคงไหลต่อไป และถูกเร่งความเร็วขึ้นจากคอของสิ่งกีดขวาง ไปจนถึงส่วนที่การไหลมีขนาดเล็กที่สุด (Vena Contracta) ดังตำแหน่งที่ 2 ในรูปที่ 3 - 2 จากนั้น อากาศจะลดความเร็วลงจนกระทั่งอากาศไหลจนเต็มท่ออีกครั้ง ส่วนที่การไหลมีขนาดเล็กที่สุดนั้น แน่นอนว่าพื้นที่การไหลต้องน้อยที่สุด และเส้นแสดงการไหล (Stream line) เป็นเส้นตรง และความดันสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดนั้นด้วย

3.3 สมการทางทฤษฎีสำหรับการไหลผ่านสิ่งกีดขวาง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการไหลนั้น บางทีอาจมีความสัมพันธ์ กับค่าความดันที่เปลี่ยนแปลงไป ระหว่างตำแหน่ง AA ถึงตำแหน่ง BB ดังรูปที่ 3 - 3 โดยการใช้สมการ Continuity และสมการ Bernoulli ดังนั้นเราจะสามารถหาค่าอัตราการไหลของอากาศจากตัวแปรต่างๆได้

สมมติฐาน :
(1) เป็นการไหลแบบคงที่ (Steady Flow)
(2) เป็นการไหลตลอดเส้นแสดงการไหล (Stream line)
(3) เป็นการไหลที่ไม่มีแรงเสียดทาน
(4) ความเร็วสม่ำเสมอตลอดหน้าตัดตำแหน่ง AA และ BB
(5) ความดันสม่ำเสมอตลอดหน้าตัดตำแหน่ง AA และ BB
(6) ความสูงของตำแหน่ง AA และ BB เท่ากัน ($Z_{AA} = Z_{BB}$)

สมมติให้ท่อและสิ่งกีดขวางมีรูปร่าง และขนาด ดังรูปที่ 3 - 3 ดังนั้น พื้นที่หน้าตัดที่ตำแหน่ง BB นั้นมีขนาดเล็กกว่าที่ตำแหน่ง AA และสมมติว่าทิศทางการไหลของอากาศที่ตำแหน่ง AA และ BB ขนานกับแกนของท่อ



รูปที่ 3 - 3 : แสดงลักษณะท่อ

โดยที่
P_1 , P_2 = ความดันสัมบูรณ์ที่ตำแหน่ง AA และ BB ตามลำดับ
V_1 ,V_2 = ความเร็วเฉลี่ยที่ตำแหน่ง AA และ BB ตามลำดับ
ρ_1 , ρ_2 = ความหนาแน่นของอากาศที่ตำแหน่ง AA และ BB ตามลำดับ
A_1 , A_2 = พื้นที่หน้าตัดที่ตำแหน่ง AA และ BB ตามลำดับ

ความแตกต่างระหว่างค่าความดัน P_1 และ P_2 จะขึ้นกับค่าอัตราส่วนระหว่างค่า A_1 และ A_2 อย่างไรก็ตาม อัตราส่วนของค่า P_2/P_1 มีค่าใกล้เคียง 1

เราเริ่มต้นจากสมการทั่วๆไปคือ สมการ Bernoulli

$$\frac{V^2}{2} + \int \frac{dP}{\rho} = \text{constant}$$

นำไปใช้กับอากาศที่ตำแหน่ง AA และ BB เราจะได้

$$\frac{V_2^2 - V_1^2}{2} = \int_{P_2}^{P_1} \frac{dP}{\rho} \qquad (1)$$

- ***กรณีที่ 1:** P_2/P_1 **มีค่าใกล้เคียง 1*** ในกรณีนี้ ค่า ρ_2 อาจกำหนดให้เท่ากับค่า ρ_1 ซึ่งก็คือ เป็นการไหลของอากาศที่ไม่สามารถอัดตัวได้ ดังนั้น สมการที่ (1) จะกลายเป็น

$$\frac{V_2^2 - V_1^2}{2} = \frac{P_1 - P_2}{\rho} \qquad (2)$$

และค่าอัตราการไหลโดยมวลของอากาศไหล ต่อหนึ่งหน่วยเวลาผ่านตำแหน่ง AA จะเท่ากับที่ ตำแหน่ง BB

$$\rho A_1 V_1 = \rho A_2 V_2$$

หรือ

$$V_1 = \frac{A_2 V_2}{A_1} \qquad (3)$$

แทนค่าสมการที่ (3) ลงในสมการที่ (2) จะได้

$$V_2^2 = \frac{2(P_1 - P_2)}{\rho\left[1 - \left(A_2^2 / A_1^2\right)\right]} \qquad (3a)$$

และค่าอัตราการไหลโดยมวลของอากาศต่อวินาทีในทางทฤษฎี อยู่ในรูป

$$\dot{m}_t = \rho A_2 V_2 = A_2 \sqrt{\frac{2\rho(P_1 - P_2)}{\left[1 - \left(A_2^2 / A_1^2\right)\right]}} \qquad (4)$$

หรือกำหนดให้ ค่าอัตราส่วนพื้นที่ $A = A_2 / A_1$ เราจะได้

$$\dot{m}_t = A_2 \sqrt{\frac{2\rho(P_1 - P_2)}{1 - A^2}} \qquad (5)$$

ดังนั้น เราจะได้สมการแสดงอัตราการไหลโดยมวลของอากาศ ที่ไม่สามารถอัดตัวได้ไหลผ่านสิ่งกีดขวาง และได้สมการแสดงค่าอัตราการไหลโดยปริมาตร ดังนี้

$$\dot{Q}_t = A_2 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{1 - A^2}}$$

❑ ***กรณีที่** 2 : P_2/P_1 **มีค่าน้อยกว่า** 1* ในกรณีนี้ ค่า ρ_2 ไม่สามารถกำหนดให้เท่ากับค่า ρ_1 ได้ ซึ่งโดยที่ค่าความหนาแน่นจะเปลี่ยนไปตามค่าความดัน ซึ่งเป็นธรรมชาติของอากาศโดยทั่วๆไป ในทางปฏิบัติ การไหลภายในท่อโดยมากแล้วจะเป็นการขยายตัวอย่างรวดเร็ว (P_2 น้อยกว่า P_1) ซึ่งเราจะใช้สมการ Bernoulli ที่ตำแหน่ง AA และ BB เพื่อที่จะอธิบาย ดังเช่นในกรณีที่ 1 ที่ผ่านมา เราจะได้

$$\frac{V_2^2 - V_1^2}{2} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{P_1}{\rho_1} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right] \qquad (6)$$

ใช้สมการ Continuity ของการไหล แสดงว่ามวลของอากาศที่ไหลผ่านตำแหน่ง AA และ BB ในหนึ่งหน่วยเวลานั้นเท่ากัน ดังแสดง

$$\rho A_1 V_1 = \rho A_2 V_2$$

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{1/\gamma}$$

$$V_1 = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{1/\gamma} \frac{A_2}{A_1} V_2$$

แทนค่า V_1 ในสมการที่ (6) เราจะได้

$$V_2 = \sqrt{\left\{ \frac{2 \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{P_1}{\rho_1} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right]}{1 - \frac{A_2^2}{A_1^2} \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{2/\gamma}} \right\}} \qquad (7)$$

จากนั้น กำหนดให้ $A = A_2 / A_1$ จะได้ค่า อัตราการไหลโดยมวลของอากาศไหลต่อวินาที ดังนี้

$$\dot{m}_t = A_2 \rho_2 V_2 = A_2 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{1/\gamma} \rho_1 V_2$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$= A_2 \sqrt{\left\{ \frac{2 \dfrac{\gamma}{\gamma - 1} \rho_1 P_2^{2/\gamma} P_1^{(\gamma-2)/\gamma} \left[1 - \left(\dfrac{P_2}{P_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right]}{1 - A^2 \left(\dfrac{P_2}{P_1} \right)^{2/\gamma}} \right\}}$$

$$\dot{m}_t = A_2 \sqrt{\left\{ \frac{2 P_1 \rho_1 \dfrac{\gamma}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\dfrac{P_2}{P_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right] \left(\dfrac{P_2}{P_1} \right)^{2/\gamma}}{1 - A^2 \left(\dfrac{P_2}{P_1} \right)^{2/\gamma}} \right\}} \quad (8)$$

ซึ่งสมการนี้ สามารถจัดรูปให้สะดวกต่อการใช้งาน และสะดวกในการวัด คือ วัดค่าความดันตกคร่อม $P_1 - P_2$ ระหว่างสิ่งกีดขวาง

กำหนดให้ ค่าอัตราการขยายตัว $\phi = P_2 / P_1$ ซึ่งปรากฏในสมการที่ (8) แล้วแทนค่า P_1 กลับไปได้ดังสมการ

$$P_1 = \frac{P_1}{(P_1 - P_2)} \times (P_1 - P_2) = (P_1 - P_2) \times \frac{1}{1 - \phi}$$

ดังนั้นสมการที่ (8) จะเปลี่ยนรูปเป็น

$$\dot{m}_t = A_2 \sqrt{\frac{2 \rho_1 (P_1 - P_2)}{1 - A^2}}$$

$$= \sqrt{\left[\frac{(1 - A^2) \dfrac{\gamma}{\gamma - 1} \dfrac{1}{1 - \phi} \left(1 - \phi^{(\gamma-1)/\gamma}\right) \phi^{2/\gamma}}{1 - A^2 \phi^{2/\gamma}} \right]} \quad (9)$$

จะเห็นได้ว่า ค่าความดันที่เปลี่ยนแปลงไป จะขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วนพื้นที่ของสิ่งกีดขวางกับพื้นที่ของท่อ โดยที่ถ้าหากว่าค่าอัตราส่วนนี้ลดลง จะส่งผลให้ การวัดค่าความดันที่เปลี่ยนไปสูงขึ้น ในทางปฏิบัติเพื่อให้อัตราส่วนนี้มีค่าน้อยลง เรามักกำหนดให้ พื้นที่ของสิ่งกีดขวางมีค่าน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับขนาดของท่อ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในการประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติจริงๆแล้ว ค่าอัตราการไหลในทางปฏิบัติ ($\dot{Q}_a$) มักจะมีค่าน้อยกว่าค่าอัตราการไหลในทางทฤษฎี ($\dot{Q}_t$) และเราจะเรียกค่าอัตราส่วนของอัตราการไหลในทางปฏิบัติ ต่ออัตราการไหลในทางทฤษฎี ($\dot{Q}_a/\dot{Q}_t$) ว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล (Discharge Coefficient ,C_D) ซึ่งค่านี้ เป็นตัวแปรที่ใช้ในการบอกประสิทธิภาพในการไหล ว่าสามารถให้อัตราการไหลผ่านเท่าไร

ในทั่วๆไป ช่องเปิดของอาคาร หรือหน้าต่างนั้น มีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับพื้นที่ผนังของอาคารทั้งหมด ซึ่งเมื่อมีลมพัดอากาศผ่านช่องเปิดเหล่านั้น โดยที่ลมนั้นมีความเร็วไม่มากจนเกินไป อาจเทียบได้กับการที่อากาศซึ่งมีการไหลแบบราบเรียบ ไหลผ่านสิ่งกีดขวางภายในท่อ เราจึงสามารถวิเคราะห์การไหลของอากาศให้เป็นแบบการไหลที่อัดตัวไม่ได้ ซึ่งการทดลองในวิทยานิพนธ์นี้ เราจะใช้สมมติฐานนี้เป็นสมมติฐานอ้างอิง ดังนั้น สมการที่ใช้ ได้แก่

$$\dot{Q}_t = A_2\sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{1 - A^2}}$$

$$C_D = \frac{\dot{Q}_a}{\dot{Q}_t}$$

ซึ่งจากสมการทั้งสองนี้ สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลของอากาศที่ไหลผ่านสิ่งกีดขวางภายในท่อได้ โดยที่อากาศมีการไหลแบบราบเรียบ

บทที่ 4

การทดลอง

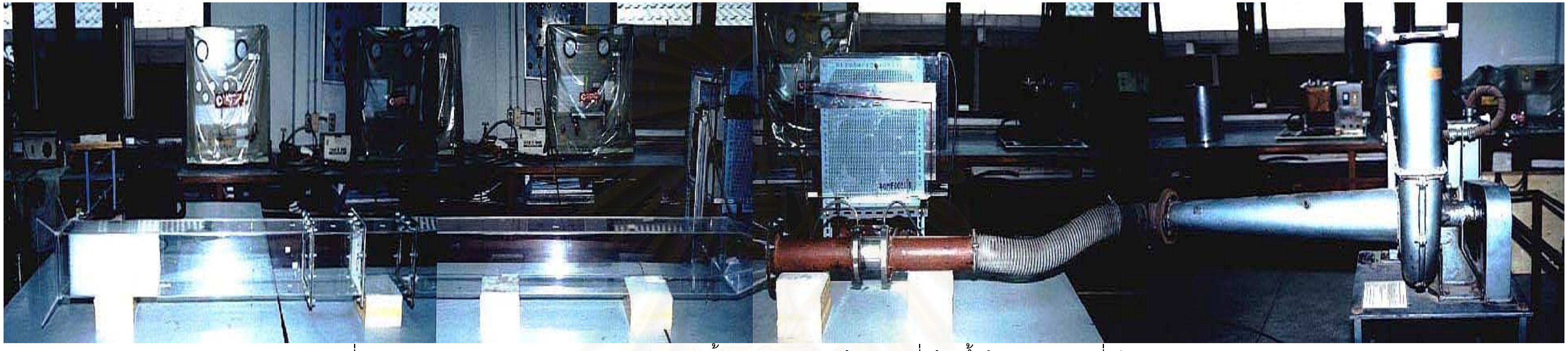
4.1 ลักษณะทั่วไปของชุดทดลอง

ในการศึกษาวิจัยนี้ ได้ทำการจัดสร้างชุดจำลองขึ้น เพื่อทำการทดลอง โดยชุดจำลองที่ใช้ในการวิจัยนี้ ประกอบด้วยส่วนที่สร้างขึ้นใหม่ และส่วนที่เป็นชุดอุปกรณ์ทดลองเดิม ซึ่งส่วนที่สร้างขึ้นมาใหม่นี้ มีลักษณะเป็นท่อพลาสติกยาว หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีขนาดพื้นที่หน้าตัด 15 x 15 เซนติเมตร ซึ่งจะเทียบเท่ากับวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 17 เซนติเมตร โดยสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนทางเข้าของชุดทดลอง , ส่วนที่ใช้ทดลอง (เปลี่ยนมุม) และส่วนทางออกที่ต่อกับชุดอุปกรณ์เดิม (ชุดอุปกรณ์วัดความเร็ว และ ชุดพัดลมดูดอากาศ) ซึ่งทั้ง 3 ส่วนนี้ ประกอบกันเป็นชุดทดลอง โดยใช้น็อตยึดแต่ละส่วนให้ติดกันบริเวณหน้าแปลน ซึ่งจะมีปะเก็นยางติดอยู่ที่บริเวณหน้าแปลนนี้ เพื่อช่วยป้องกันไม่ให้อากาศที่ไหลอยู่ภายในชุดทดลองรั่วไหลออกมาภายนอก ซึ่งเมื่อนำส่วนที่สร้างขึ้นใหม่ มาประกอบกับส่วนที่เป็นชุดอุปกรณ์ทดลองเดิม ทำให้ชุดทดลองนี้ มีขนาดความยาวทั้งสิ้นโดยประมาณ 5 เมตร 25 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4 - 1

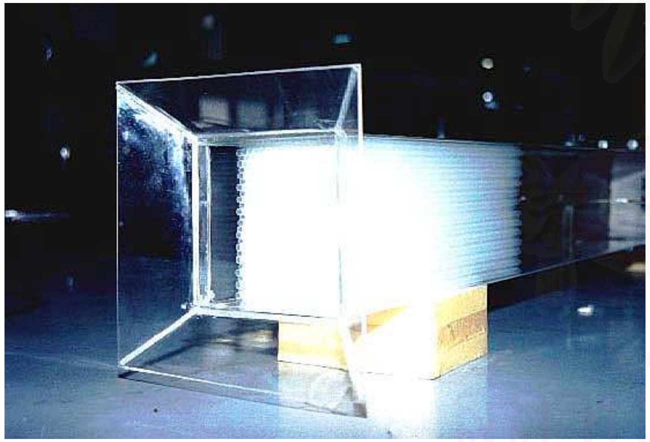
4.1.1 ชุดอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นใหม่

4.1.1.1 ส่วนทางเข้าของชุดทดลอง

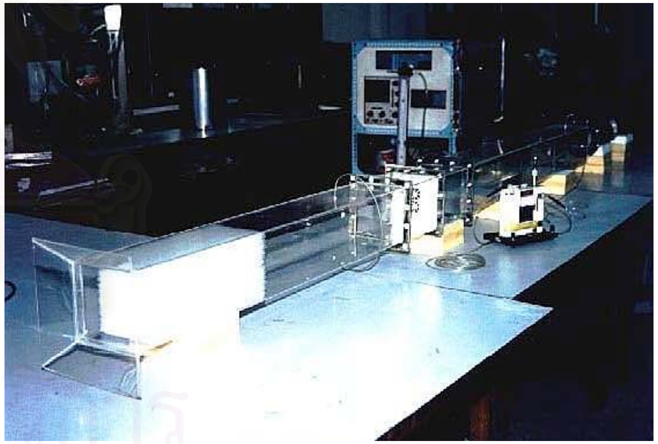
ในส่วนทางเข้าของชุดทดลองนี้ เป็นส่วนที่อยู่ด้านหน้าที่สุดของชุดทดลอง เป็นส่วนที่อากาศจะไหลผ่านเป็นส่วนแรกก่อนที่จะเข้าสู่ในส่วนที่ใช้ทดลองต่อไป โดยส่วนนี้มีลักษณะเป็นท่อพลาสติกหนา 3 มิลลิเมตร ยาวประมาณ 105 เซนติเมตร หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีขนาดพื้นที่หน้าตัด 15 x 15 เซนติเมตร และที่บริเวณปากทางเข้าของส่วนนี้ ได้ออกแบบและทำการสร้างให้ปากทางเข้าขยายกว้างขึ้น เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการดูดอากาศเข้าชุดทดลองมากขึ้น ซึ่งในส่วนนี้ยังได้มีจัดทำ ชุดจัดเรียงการไหลของอากาศ (Flow Straightener) ไว้ที่บริเวณทางเข้า ดังแสดงในรูปที่ 4 - 2 โดยชุดจัดเรียงการไหลของอากาศนี้ จะทำหน้าที่ในการจัดเรียงการไหลของอากาศให้เป็นระเบียบมากขึ้น และมีความเร็วสม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัดของการไหล เพื่อให้อากาศมีลักษณะการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) ก่อนที่จะนำไปใช้ในส่วนทดสอบต่อไป



รูปที่ 4 - 1 : แสดงภาพรวมของชุดอุปกรณ์ทดลองทั้งหมด ประกอบด้วยส่วนที่สร้างขึ้นใหม่ และส่วนที่เป็นชุดทดลองเดิม



รูปที่ 4 - 2 : แสดงชุดจัดเรียงการไหลของอากาศ ที่ส่วนทางเข้าของชุดทดลอง



รูปที่ 4 - 3 : แสดงส่วนทางเข้าของชุดทดลองที่ต่อกับส่วนที่ใช้ทดลอง

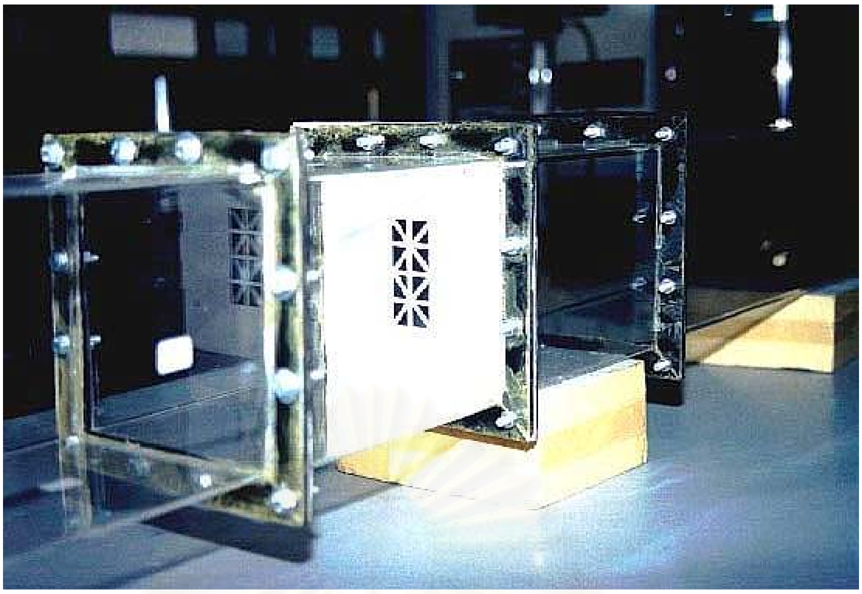
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชุดจัดเรียงการไหลของอากาศ ที่ออกแบบและสร้างขึ้นนี้ มีลักษณะเป็นรังผึ้ง (Honeycomb) สร้างขึ้นจากหลอดกาแฟ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.6 เซนติเมตร มีความยาวประมาณ 33 เซนติเมตร ประกอบกันให้มีพื้นที่หน้าตัดการไหล ขนาด 15 x 15 เซนติเมตร ซึ่งได้ออกแบบให้ชุดจัดเรียงการไหลมีความยาวประมาณ 2 เท่า ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ โดยการออกแบบขนาด และความยาวของชุดจัดเรียงการไหลของอากาศนี้ ได้อ้างอิงจาก Reid F. Stearns et al. (1951)

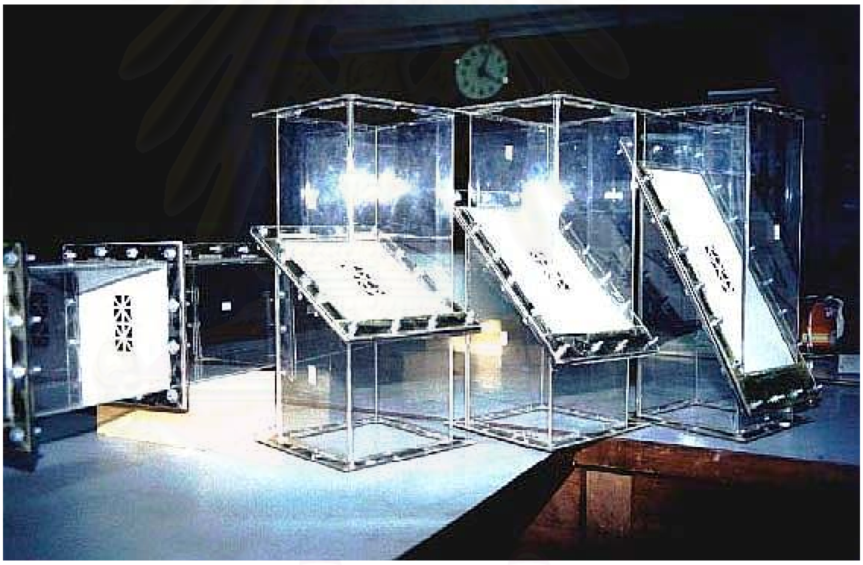
ภายหลังจากที่อากาศถูกดูดโดยพัดลมดูดอากาศ เข้าสู่ส่วนทางเข้าของชุดทดลอง และไหลผ่านชุดจัดเรียงการไหลของอากาศ นอกจากจะทำให้มีความเป็นระเบียบแล้ว ยังทำให้ความเร็วของอากาศภายในหน้าตัดมีความสม่ำเสมอตลอดทั่วทั้งหน้าตัด และมีลักษณะการไหลแบบราบเรียบ ซึ่งอากาศที่ไหลผ่านชุดจัดเรียงการไหลของอากาศนี้แล้ว จะต้องไหลผ่านท่อที่มีลักษณะเป็นท่อตรง ยาว เพื่อให้อากาศที่ออกจากส่วนทางเข้าของชุดทดลองนี้ มีลักษณะเป็นการไหลที่มีการพัฒนาเต็มที่ (Fully Developed Flow) ก่อนที่จะเข้าสู่ส่วนที่ใช้ทดลองต่อไป

4.1.1.2 ส่วนที่ใช้ทดลอง

ในส่วนที่ใช้ทดลองนี้ เป็นส่วนที่อยู่ถัดจากส่วนทางเข้าของชุดทดลอง เป็นส่วนที่ใช้ในการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล โดยส่วนนี้มีลักษณะเป็นท่อพลาสติกหนา 3 มิลลิเมตร ยาวประมาณ 40 เซนติเมตร หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีขนาดพื้นที่หน้าตัด 15 x 15 เซนติเมตร สามารถทำการถอดประกอบทางด้านข้างของชุดทดลองได้ โดยส่วนนี้เราได้ทำการเปลี่ยนแปลงชุดทดลองในส่วนที่ใช้ทดลอง เพื่อใช้ในการเปลี่ยนทิศทางของช่องเปิดที่กระทำต่อทิศทางการไหลของอากาศ โดยประกอบด้วย 4 ชุด เพื่อทดลองทิศทางการไหล 4 ทิศทาง คือ การไหลโดยที่อากาศไหลผ่านแบบ ทำมุม 30° , ทำมุม 45° , ทำมุม 60° และมุม 90° (ไหลตั้งฉาก)กับแบบจำลองหน้าต่าง มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4 - 4 และ รูปที่ 4 - 5 จากนั้นอากาศจะไหลเข้าสู่ส่วนทางออกที่ต่อกับอุปกรณ์เดิมต่อไป ซึ่งชุดทดสอบแบบจำลองหน้าต่างนี้ จะอยู่ห่างจากทางออกของชุดจัดเรียงการไหลของอากาศประมาณ 5 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ โดยการออกแบบนี้ได้อ้างอิงจาก Reid F. Stearns et al. (1951)



รูปที่ 4 - 4 : แสดงแบบจำลองหน้าต่างที่ใช้ทดสอบ



รูปที่ 4 - 5 : แสดงชุดทดลองที่ใช้เปลี่ยนทิศทางการไหลของอากาศ

4.1.1.3 ส่วนทางออก

ในส่วนทางออกที่ต่อกับชุดอุปกรณ์เดิมนี้ เป็นส่วนทางออกซึ่งต่อมาจากจากส่วนที่ใช้ในการทดลอง โดยส่วนนี้มีลักษณะเป็นท่อพลาสติกหนา 3 มิลลิเมตร ยาวประมาณ 140 เซนติเมตร หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีขนาดพื้นที่หน้าตัด 15 x 15 เซนติเมตร และในบริเวณส่วนปลายของส่วนนี้ จะมีลักษณะเป็นกรวยเพื่อใช้ลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลง เพื่อให้สามารถต่อเข้ากับชุดอุปกรณ์ทดลองเดิมได้อย่างเหมาะสม

4.1.2 ส่วนที่เป็นชุดอุปกรณ์ทดลองเดิม

4.1.2.1 ชุดอุปกรณ์วัดความเร็ว

ชุดอุปกรณ์วัดความเร็วนี้ เป็นส่วนที่ต่อมาจากส่วนทางออก มีชื่อเรียกว่า Laminar Flow Element ดังแสดงในรูปที่ 4 - 6 เป็นเครื่องมือวัดอัตราการไหลของอากาศในช่วงการไหลแบบลามินา หรือการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) ซึ่งโดยทั่วๆไป จะมีค่าเรโนลด์นัมเบอร์ (Reynold Number , Re) น้อยกว่า 1000 โดยเครื่องมือจะประกอบด้วยท่อเล็กๆ วางขนานกัน โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.9 มิลลิเมตร วางขนานกันเป็นจำนวน 1,780 ท่อน แต่ละท่อนยาว 40 มิลลิเมตร เพื่อเปลี่ยนให้การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) ก่อนเข้าเครื่องวัด ให้กลายเป็นการไหลแบบราบเรียบภายในท่อเล็กๆของเครื่องมือวัด โดยอัตราการไหลของชุดอุปกรณ์วัดความเร็วนี้ หาได้จาก

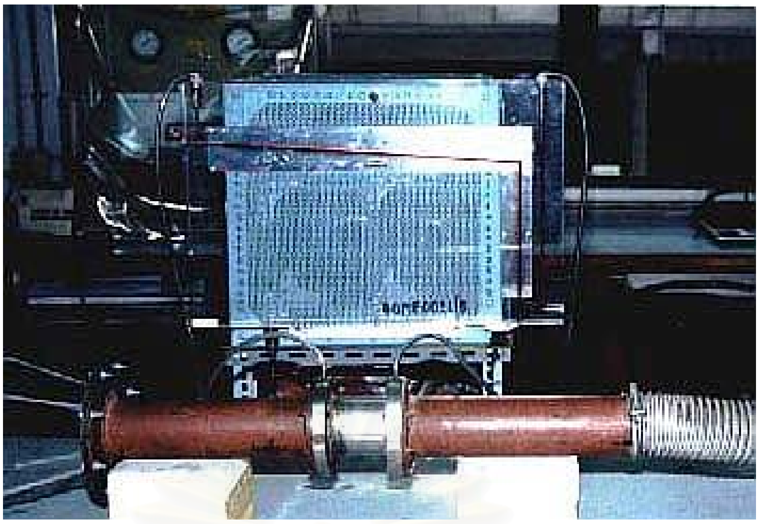
$$Q = \left[\frac{\pi D^4 n}{128\,\mu L}\right]\Delta P = C_1 \Delta P$$

$$\Delta P = \gamma H$$

เมื่อ	D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ , เมตร
	L	=	ความยาวท่อ , เมตร
	μ	=	ความหนืดของอากาศ = 18.6 x 10^{-6} NS/m^2 ที่ 25^{O} C
	Q	=	อัตราการไหลของอากาศ , เมตร^3/วินาที
	ΔP	=	ค่าความดันตกคร่อม , Pa
	C_1	=	ค่าคงที่
	n	=	จำนวนท่อ
	γ	=	ค่าคงที่ โดยมีค่า = 8,103.06 N / m^3
	H	=	ค่าความสูงที่อ่านได้จากมาโนมิเตอร์ , เมตร

และชุดอุปกรณ์วัดความเร็วนี้ ยังประกอบด้วยมาโนมิเตอร์แบบเอียง (Inclined Manometer) เพื่อใช้ในการวัดความดันตกคร่อมของชุดอุปกรณ์นี้ด้วย

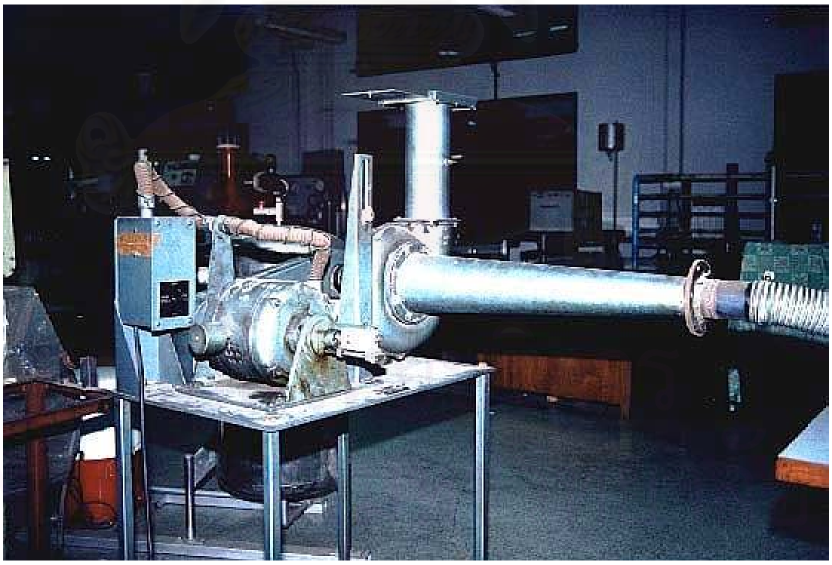
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4 - 6 : แสดงชุดอุปกรณ์วัดความเร็ว

4.1.2.2 ชุดพัดลมดูดอากาศ

ชุดพัดลมดูดอากาศนี้ ประกอบด้วย ข้อต่อที่ยืดหยุ่นได้ ต่อจากชุดอุปกรณ์วัดความเร็ว เพื่อต่อกับเข้ากับพัดลมดูดอากาศ ซึ่งถือว่าชุดพัดลมดูดอากาศนี้ เป็นส่วนสุดท้ายของชุดอุปกรณ์ทดลองทั้งหมด ดังรูป 4 - 7



รูปที่ 4 - 7 : แสดงชุดพัดลมดูดอากาศ

4.2 หน้าต่างจำลอง

ในการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลของช่องเปิดนั้น เราจำเป็นที่จะต้องออกแบบ และสร้างแบบจำลองช่องเปิดขึ้น เพื่อที่จะใช้ทดสอบ ซึ่งแบบจำลองช่องเปิดที่สร้างขึ้นในการทดลองนี้ ทำมาจาก กระดาษชานอ้อย ชนิดแข็ง หนา 1 มิลลิเมตร ซึ่งมีความแข็งพอสมควร เมื่อประกอบเข้าสู่ชุดทดลอง มีความสามารถทนต่อความแรงของอากาศ ไม่โค้งงอ ซึ่งจะสามารถประกอบเข้ากับชุดทดลองที่บริเวณหน้าแปลน

และในการวิจัยนี้เราได้ออกแบบ และสร้างแบบจำลองช่องเปิดทั้งสิ้น 32 รูปแบบ โดยรูปแบบที่โครงสร้างภายนอกเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้านั้น สามารถแบ่งย่อยออกได้อีก 2 รูปแบบ คือ วางตัวในแนวตั้งแนวนอน และและวางตัวในแนวนอนแนวตั้ง โดยขนาดและรูปแบบของช่องเปิดที่ใช้ทดลองนี้ แสดงดังตารางที่ 4 - 1 และตารางที่ ก - 1 ซึ่งแสดงอยู่ในภาคผนวก ก.

ตารางที่ 4 - 1 : แสดงขนาดและรูปแบบของช่องเปิดที่ใช้ในการทดลอง

รูปแบบภายนอกของช่องเปิด	ขนาดและรายละเอียด
1. ลักษณะภายนอกเป็นรูปวงกลม	มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.4 เซนติเมตร การแบ่งช่องเปิดภายในแบ่งโดยใช้การแบ่งครึ่งมุมตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง
2. ลักษณะภายนอกเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส	มีขนาด 4.6 x 4.6 เซนติเมตร การแบ่งช่องเปิดภายในแบ่งโดยใช้การแบ่งครึ่งด้าน และการแบ่งครึ่งมุม
3. ลักษณะภายนอกเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า	มีขนาดกว้าง x ยาว คือ 3.1 x 7 เซนติเมตร การแบ่งช่องเปิดภายในแบ่งโดยใช้การแบ่งครึ่งด้านตามความกว้างและยาว

โดยในการทดลอง เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล ของช่องเปิดที่ซับซ้อนนี้ เราได้ทำการทดลองโดย

1. เปลี่ยนรูปแบบของช่องเปิด
2. เปลี่ยนมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ซึ่งช่องเปิดที่ใช้ทดลองในแต่ละรูปแบบนั้น จะมีพื้นที่เท่ากันทั้งหมดทุกรูปแบบ และช่องเปิดจะอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของหน้าตัด

4.3 การวัดความดันสถิต

4.3.1 วัดความดันตกคร่อมของส่วนทดลอง

การวัดความดันสถิตที่ตกคร่อมของชุดทดสอบนี้ กระทำโดยการติดตั้ง Pressure Tap ซึ่งสร้างขึ้นจากทองเหลือง โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูที่ใช้วัดความดันสถิต 1.5 มิลลิเมตร ต่อเข้ากับรูที่เจาะไว้ที่ผนังด้านข้างของท่อ โดยจะติดตั้ง Pressure Tap ไว้ 2 บริเวณ คือ

4.3.1.1 **ติดตั้ง Pressure Tap ที่ส่วนทางเข้าของชุดทดลอง** คือ บริเวณก่อนที่อากาศจะไหลเข้าสู่ส่วนที่ใช้ทดลอง โดยเราจะติด Pressure Tap ไว้ที่ตำแหน่งก่อนที่จะถึงชุดทดสอบแบบจำลองหน้าต่าง ประมาณ 2.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ

4.3.1.2 **ติดตั้ง Pressure Tap ที่ส่วนทางออกของชุดทดลอง** คือ บริเวณหลังจากอากาศผ่านส่วนที่ใช้ทดลองแล้ว โดยเราจะติด Pressure Tap ไว้ที่ตำแหน่งหลังชุดทดสอบแบบจำลองหน้าต่าง ประมาณ 8 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ

โดยทั้ง 2 บริเวณที่ติดตั้ง Pressure Tap นี้ จะติดตั้ง Pressure Tap ไว้ทุกด้านของท่อ เพื่อที่จะใช้ตรวจสอบว่า ความดันที่บริเวณที่ติดตั้ง Pressure Tap นั้น มีความดันเท่ากันทั้งหน้าตัดหรือไม่ คือ อากาศที่ไหลก่อนเข้าถึงส่วนที่ใช้ทดลอง มีลักษณะเป็นการไหลที่มีการพัฒนาเต็มที่ (Fully Developed Flow) หรือไม่ และจะต่อสายความดันจาก Pressure Tap เข้ากับเครื่องมืออ่านค่าความดัน Microtector ค่าความดันสถิตที่วัดดังกล่าวนี้ จะใช้เป็นตัวแทนของค่าความดันสถิตเฉลี่ยที่เกิดขึ้นภายในหน้าตัด โดยการกำหนดตำแหน่งที่ใช้ติดตั้ง Pressure Tap นี้ ได้อ้างอิงจาก Reid F. Stearns et al. (1951)

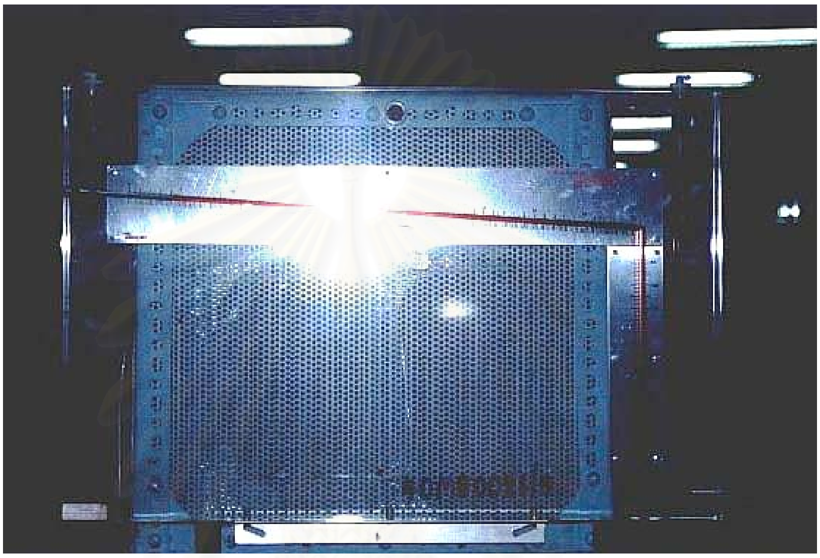
4.3.2 วัดความดันตกคร่อมของชุดอุปกรณ์วัดความเร็ว

การวัดความดันสถิตที่ตกคร่อมชุดอุปกรณ์วัดความเร็วนี้ สามารถวัดได้จากมาโนมิเตอร์แบบเอียง ซึ่งติดตั้งไว้ด้วยกันกับชุดอุปกรณ์วัดความเร็ว โดยโดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูที่ใช้วัดความดันสถิต 3.5 มิลลิเมตร ซึ่งจะทำการวัดความดันตกคร่อมที่บริเวณก่อนเข้าและหลังจากอากาศผ่านชุดอุปกรณ์วัดความเร็ว

4.4 เครื่องมืออ่านค่าความดัน

4.4.1 Incliened Manometer

Model	:	Dwyer Instrument Inc.
Pressure Range	:	0 - 240 mm. of water
Resolution	:	0.2 mm. of water



รูปที่ 4 - 8 : แสดง Inclined Manometer ที่ใช้ในการทดลอง

4.4.2 Microtector

Model	:	Dwyer Instrument Inc.
Pressure Range	:	0- 2” w.c. Differential Pressure
Accurate and Repeatable	:	±0.00025 inches water column

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4 - 9 : แสดง Microtector ที่ใช้ในการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

การวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลของช่องเปิดรูปแบบต่างๆ ได้วัดค่าและนำเสนอผลการทดลองในรูปแบบตารางและกราฟ ดังแสดงในตารางที่ ก - 2 และรูปที่ ข - 1 ถึง ข - 32 ซึ่งแสดงอยู่ในภาคผนวก ก. และภาคผนวก ข. จากผลการทดลองที่ได้ เราสามารถแบ่งกลุ่มเพื่อทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยแยกพิจารณาออกเป็น 5 กลุ่ม ดังนี้ คือ

1. ***พิจารณาช่องเปิดที่ทำการทดลองทั้งหมด*** โดยนำผลการทดลองทั้งหมด จากช่องเปิดที่มีลักษณะภายนอกที่ต่างกัน และมีการแบ่งช่องเปิดภายในที่ต่างกัน มาทำการวิเคราะห์ เพื่อพิจารณาว่ามุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ จะส่งผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลของอากาศมาก - น้อยแค่ไหน และอย่างไร

2. ***พิจารณาช่องเปิด ที่มีรูปแบบภายนอกของช่องเปิดมีลักษณะเดียวกัน แต่จำนวนช่องเปิดภายในต่างกัน*** โดยนำผลการทดลองของช่องเปิดที่มีลักษณะภายนอกที่เหมือนกันคือ วงกลม , สี่เหลี่ยมจัตุรัส , สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่วางตัวในแนวนอน และ สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่วางตัวในแนวตั้ง มาทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบกัน ทั้งนี้ ช่องเปิดเหล่านี้จะมีความแตกต่างกันที่จำนวนช่องเปิดภายใน โดยจะทำการพิจารณาว่าจำนวนช่องเปิดภายในจะส่งผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลของอากาศมาก - น้อยแค่ไหน และอย่างไร

3. ***พิจารณาช่องเปิดที่มีลักษณะภายนอกเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งมีลักษณะการแบ่งช่องเปิดภายในเหมือนกัน และมีจำนวนช่องเปิดภายในเท่ากัน แต่ลักษณะการจัดวางตัวของช่องเปิดมีลักษณะที่แตกต่างกัน*** โดยนำผลการทดลองของช่องเปิดที่มีลักษณะภายนอกเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่วางตัวในแนวนอน และสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่วางตัวในแนวตั้ง ซึ่งมีลักษณะการแบ่งช่องเปิดภายในเหมือนกัน และมีจำนวนช่องเปิดภายในเท่ากัน มาทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบกัน เพื่อพิจารณาว่า ลักษณะการวางตัวของช่องเปิด ที่มีลักษณะภายนอกเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า จะส่งผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลของอากาศมาก - น้อยแค่ไหน และอย่างไร

4. ***พิจารณาช่องเปิดที่มีลักษณะการแบ่งช่องเปิดภายในเหมือนกัน และมีจำนวนช่องเปิดภายในเท่ากัน แต่ลักษณะภายนอกของช่องเปิดมีลักษณะที่แตกต่างกัน*** โดยนำผลการทดลองของช่องเปิดที่มีลักษณะภายนอกเป็นรูปวงกลม และรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ซึ่งมีลักษณะการแบ่งช่องเปิดภายในเหมือนกัน และมีจำนวนช่องเปิดภายในเท่ากัน มาทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบ

เทียบกัน เพื่อพิจารณาว่ารูปแบบภายนอก จะส่งผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลของอากาศมาก - น้อยแค่ไหน และอย่างไร

*5. **พิจารณาช่องเปิด ที่มีรูปแบบภายนอกของช่องเปิดมีลักษณะเดียวกัน และจำนวนช่องเปิดภายในเท่ากัน แต่ลักษณะการแบ่งช่องเปิดภายในแตกต่างกัน*** โดยจะนำผลการทดลองของช่องเปิดที่มีลักษณะภายนอกที่เหมือนกันคือ วงกลม , สี่เหลี่ยมจัตุรัส , สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่วางตัวในแนวนอน และ สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่วางตัวในแนวตั้ง และมีจำนวนช่องเปิดภายในที่เท่ากัน มาทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบกัน โดยช่องเปิดเหล่านี้ จะความแตกต่างกันที่ลักษณะการแบ่งช่องเปิดภายใน เพื่อทำการวิเคราะห์ ว่าลักษณะการแบ่งช่องเปิดภายใน จะส่งผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลของอากาศมาก - น้อยแค่ไหน และอย่างไร

5.1 พิจารณาช่องเปิดที่ทำการทดลองทั้งหมด

พิจารณารูปที่ ข - 1 ถึง ข - 32 ในภาคผนวก ข. เมื่อทำการทดลองโดยเปลี่ยนแปลงมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับช่องเปิดทุกรูปแบบ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลของอากาศ เปลี่ยนแปลงไปตามมุมที่เปลี่ยนไป ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า สำหรับช่องเปิดใดๆก็ตาม มุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ จะส่งผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลของอากาศ

จากผลการทดลองที่ได้ เราสามารถแบ่งแนวโน้มของลักษณะการกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล ที่เปลี่ยนแปลงเนื่องมาจากการเปลี่ยนมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ ออกได้เป็น 2 ลักษณะ ดังนี้ คือ

1. **ลักษณะการกระจายตัวรูประฆังคว่ำ** : พิจารณารูปที่ ข - 1 ถึงรูปที่ ข - 8 , รูปที่ ข - 10 , รูปที่ ข - 12 , รูปที่ ข - 14 , รูปที่ ข - 16 , รูปที่ ข - 18 , รูปที่ ข - 20 , รูปที่ ข - 22 , รูปที่ ข - 24 , รูปที่ ข - 26 , รูปที่ ข - 28 , รูปที่ ข – 30 และรูปที่ ข - 32 ในภาคผนวก ข. ซึ่งได้แก่ช่องเปิดที่มีรูปแบบภายนอกเป็นรูปวงกลม , สี่เหลี่ยมจัตุรัส และสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่วางตัวในแนวนอน จากรูปแสดงถึงการกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลของช่องเปิดทั้งสิ้น 20 รูปแบบ เทียบกับมุมที่กระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ พบว่า ลักษณะการกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล เทียบกับมุมที่กระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ ของช่องเปิดทั้ง 20 รูปแบบนี้มีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน โดยค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล จะมีค่าสูงสุดเมื่อมุมที่กระทำกับทิศทางการไหลของอากาศเท่ากับ 90 องศา นั่นก็คือ สภาวะที่อากาศไหลตั้งฉากกับช่องเปิด จะมีประสิทธิภาพในการระบายอากาศได้ดีที่สุด จากนั้นค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลจะมีค่าลด

ลงตามมุมที่กระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ โดยจะลดลงตามลำดับคือ มุม 60 องศา กับ 120 องศา , มุม 45 องศา กับ 135 องศา และ มุม 30 องศา กับ 150 องศา ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า หากว่ามุมที่กระทำกับทิศทางการไหลของอากาศยิ่งเบี่ยงเบนออกจากทิศทางที่อากาศไหลตั้งฉากกับช่องเปิดมากขึ้น ส่งผลให้พื้นที่ในการรับลมน้อยลง จะทำให้ประสิทธิภาพของการระบายอากาศยิ่งลดน้อยลง ดังนั้น สรุปได้ว่า สำหรับช่องเปิดที่มีรูปแบบภายนอกเป็นรูปวงกลม , สี่เหลี่ยมจัตุรัส และสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่วางตัวในแนวนอน ยิ่งพื้นที่ที่รับลมมาก ประสิทธิภาพในการระบายอากาศจะยิ่งมากขึ้น

2. **ลักษณะการกระจายตัวรูปตัว** M : พิจารณารูปที่ ข - 9 , รูปที่ ข - 11 , รูปที่ ข - 13 , รูปที่ ข - 15 , รูปที่ ข - 17 , รูปที่ ข - 19 ,รูปที่ ข - 21 , รูปที่ ข - 23 ,รูปที่ ข - 25 , รูปที่ ข - 27 ,รูปที่ ข - 29 และ รูปที่ ข - 31 ในภาคผนวก ข. ซึ่งได้แก่ช่องเปิดที่มีรูปแบบภายนอกเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่วางตัวในแนวตั้ง จากรูปแสดงถึงการกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลของช่องเปิดทั้งสิ้น 12 รูปแบบ เทียบกับมุมที่กระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ พบว่า ลักษณะการกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล เทียบกับมุมที่กระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ ของช่องเปิดทั้ง 12 รูปแบบนี้ มีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน โดยค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล จะมีค่าสูงสุดเมื่อมุมที่กระทำกับทิศทางการไหลของอากาศเท่ากับ 45 องศา กับ 135 องศา จากนั้น ค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลจะมีค่าลดลง ตามมุมที่กระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ โดยจะลดลงตามลำดับคือ มุม 60 องศา กับ 120 องศา , มุม 90 องศา และ มุม 30 องศา กับ 150 องศา ตามลำดับ นั่นก็คือ สภาวะที่อากาศไหลทำมุม 45 องศา กับ 135 องศา กับช่องเปิดจะมีประสิทธิภาพในการระบายอากาศได้ดีที่สุด แสดงให้เห็นว่า หากว่ามุมที่กระทำกับทิศทางการไหลของอากาศยิ่งเบี่ยงเบนออกจากทิศทางที่อากาศไหลทำมุม 45 องศา กับ 135 องศา กับช่องเปิดมากขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพของการระบายอากาศยิ่งลดน้อยลง และที่มุม 30 องศา กับมุม 150 องศา จะมีประสิทธิภาพในการระบายอากาศต่ำที่สุด ซึ่งเป็นมุมที่มีพื้นที่ ในการรับลมน้อยสุด ดังนั้น สรุปได้ว่า ช่องเปิดที่มีรูปแบบภายนอกเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่วางตัวในแนวตั้ง จะมีประสิทธิภาพในการระบายอากาศที่ดีที่สุด เมื่อมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศคือ 45 องศา กับ 135 องศา และประสิทธิภาพในการระบายอากาศจะลดลงตามมุมที่เบี่ยงเบนไป

การที่มุม 30 องศากับ 120 องศา และมุม 45 องศากับ 135 องศา มีค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลที่สูงที่สุด ทั้งๆที่มีพื้นที่ในการรับลมน้อยกว่าที่มุม 90 องศา เข้าใจว่ามีผลของการกระจายตัวของความเร็วที่ตำแหน่งต่างๆ ในแนวตั้งของแต่ละหน้าตัด เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย กล่าวคือ เมื่อช่องเปิดถูกวางตัวอยู่ในแนวตั้ง ขนาดของพื้นที่ที่รับลมนั้น ย่อมน้อยกว่าช่องเปิด

ที่วางตัวในแนวนอน สำหรับช่องเปิดที่มีขนาดเท่ากัน ดังนั้น การที่อากาศจะสามารถไหลผ่านช่องเปิดได้ดีมาก หรือน้อยแค่ไหน น่าจะเป็นผลมาจาก ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านตำแหน่งต่างๆของช่องเปิด หรืออาจกล่าวได้ว่า ในกรณีนี้ อิทธิพลของความเร็วของอากาศ อาจจะมีมากกว่าอิทธิพลของพื้นที่รับลม อย่างไรก็ตาม การศึกษาเพื่อที่จะวิเคราะห์อย่างลึกซึ้งถึงอิทธิพลของทั้งความเร็ว และพื้นที่ที่มีผลกระทบต่ออัตราการไหลของอากาศที่ผ่านช่องเปิด จำเป็นต้องอาศัยความรู้ทางด้านกลศาสตร์ขั้นสูงต่อไป

5.2 พิจารณาช่องเปิดที่มีรูปแบบภายนอกของช่องเปิดมีลักษณะเดียวกัน แต่จำนวนช่องเปิดภายในต่างกัน

ในการพิจารณา เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบของค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล เมื่อทำการทดลองโดยเปลี่ยนแปลงจำนวนช่องเปิดภายใน สำหรับช่องเปิดที่มีรูปแบบภายนอกลักษณะเดียวกันนั้น เราได้ทำการแบ่งกลุ่มของช่องเปิดเพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณา และวิเคราะห์ผลการทดลอง ออกได้เป็น 8 กลุ่ม ดังนี้ คือ

1. ช่องเปิดที่มีลักษณะภายนอกเป็นรูปวงกลม โดยช่องเปิดภายในแบ่งเป็น 2, 4 และ 8 ช่อง ดังแสดงในรูปที่ ข - 33

2. ช่องเปิดที่มีลักษณะภายนอกเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยช่องเปิดภายในแบ่งเป็น 2 , 4 และ 8 ช่อง ดังแสดงในรูปที่ ข - 34

3. ช่องเปิดที่มีลักษณะภายนอกเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า วางตัวในแนวตั้ง โดยช่องเปิดภายในแบ่งเป็น 2 , 4 และ 8 ช่อง โดยที่ช่องเปิดที่มีจำนวนช่องเปิดภายใน 4 ช่อง มี 2 รูปแบบ ซึ่งมีลักษณะการแบ่งช่องเปิดภายในต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ ข - 35

4. ช่องเปิดที่มีลักษณะภายนอกเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า วางตัวในแนวตั้ง โดยช่องเปิดภายในแบ่งเป็น 2 , 4 และ 8 ช่อง โดยที่ช่องเปิดที่มีจำนวนช่องเปิดภายใน 4 ช่อง มี 2 รูปแบบ ซึ่งมีลักษณะการแบ่งช่องเปิดภายในต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ ข - 36

5. ช่องเปิดที่มีลักษณะภายนอกเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า วางตัวในแนวนอน โดยช่องเปิดภายในแบ่งเป็น 2 , 4 และ 8 ช่อง โดยที่ช่องเปิดที่มีจำนวนช่องเปิดภายใน 4 ช่อง มี 2 รูปแบบ ซึ่งมีลักษณะการแบ่งช่องเปิดภายในต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ ข - 37

6. ช่องเปิดที่มีลักษณะภายนอกเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า วางตัวในแนวนอน โดยช่องเปิดภายในแบ่งเป็น 2 , 4 และ 8 ช่อง โดยที่ช่องเปิดที่มีจำนวนช่องเปิดภายใน 4 ช่อง มี 2 รูปแบบ ซึ่งมีลักษณะการแบ่งช่องเปิดภายในต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ ข - 38

7. ช่องเปิดที่มีลักษณะภายนอกเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า วางตัวในแนวตั้ง โดยช่องเปิดภายในแบ่งเป็น 2 , 4 , 7 , 8 , 16 และ 22 ช่อง โดยที่เส้นแบ่งช่องเปิดภายในไม่เป็นเส้นแนวระดับและแนวดิ่ง ดังแสดงในรูปที่ ข - 39

8. ช่องเปิดที่มีลักษณะภายนอกเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า วางตัวในแนวนอน โดยช่องเปิดภายในแบ่งเป็น 2 , 4 , 7 , 8 , 16 และ 22 ช่อง โดยที่เส้นแบ่งช่องเปิดภายในไม่เป็นเส้นแนวระดับและแนวดิ่ง ดังแสดงในรูปที่ ข - 40

หมายเหตุ : การแบ่งกลุ่มที่ 3 กับกลุ่มที่ 4 และแบ่งกลุ่มที่ 5 กับกลุ่มที่ 6 มีลักษณะการแบ่งช่องเปิดภายในที่ไม่เหมือนกัน

พิจารณารูปที่ ข - 33 ถึง ข - 40 ซึ่งเป็นกราฟ แสดงการเปรียบเทียบผลกระทบของค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล เมื่อทำการทดลองโดยเปลี่ยนแปลงจำนวนช่องเปิดภายในสำหรับช่องเปิดที่มีรูปแบบภายนอกที่มีลักษณะเดียวกัน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลของอากาศเปลี่ยนแปลงไปตามจำนวนช่องเปิดภายในที่เปลี่ยนไป ในทุกๆรูปแบบ ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า จำนวนช่องเปิดภายในของช่องเปิดรูปแบบต่างๆ จะส่งผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลของอากาศ

นอกจากนี้ พบว่าในทุกๆมุมที่กระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ ช่องเปิดที่มีการแบ่งช่องเปิดภายในเป็น 2 ช่องเปิด มีค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลสูงที่สุด และเมื่อทำการแบ่งช่องเปิดภายในเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล มีแนวโน้มที่ลดต่ำลง ในทุกๆรูปแบบภายนอกของช่องเปิด นั่นคือ ประสิทธิภาพในการระบายอากาศมีแนวโน้มที่ลดต่ำลง ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า การที่ช่องเปิดมีลักษณะภายนอกที่เหมือนกัน ยิ่งจำนวนช่องเปิดภายในมากขึ้นประสิทธิภาพในการระบายอากาศจะยิ่งน้อยลง

ในส่วนของผลต่างของค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลที่ต่างกันนี้ ไม่มีแนวโน้มที่มีลักษณะตายตัว รวมทั้งจากผลการทดลองที่ได้ อาจกล่าวได้ว่า ค่าผลต่างดังกล่าวยังขึ้นอยู่กับลักษณะการแบ่งช่องเปิดภายในอีกด้วย กล่าวคือ ช่องเปิดที่มีลักษณะภายนอกที่เหมือน และมีจำนวนช่องเปิดภายในที่เหมือนกัน แต่มีลักษณะการแบ่งช่องเปิดภายในที่แตกต่างกัน จะมีค่า

สัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลที่แตกต่างกัน ซึ่งเราจะกล่าวถึงการวิเคราะห์ในส่วนนี้ ในหัวข้อต่ออื่นๆ ต่อไป

5.3 พิจารณาช่องเปิด ที่มีลักษณะภายนอกเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งมีลักษณะการแบ่งช่องเปิดภายในเหมือนกัน และมีจำนวนช่องเปิดภายในเท่ากัน แต่ลักษณะการจัดวางตัวของช่องเปิดมีลักษณะที่แตกต่างกัน

พิจารณารูปที่ ข - 41 ถึง ข - 52 ซึ่งเป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบผลกระทบของค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล เมื่อทำการทดลองโดยเปลี่ยนลักษณะการวางตัวของช่องเปิดสำหรับช่องเปิดที่มีรูปแบบภายนอกที่มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยพิจารณาสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่วางตัวในแนวนอน เปรียบเทียบกับสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่วางตัวในแนวตั้ง ซึ่งลักษณะการแบ่งช่องเปิดภายในเหมือนกัน และจำนวนช่องเปิดภายในเท่ากัน พบว่าการกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลของอากาศเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะการวางตัวของช่องเปิดที่เปลี่ยนไป ในทุกๆ รูปแบบ ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า การวางตัวของช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า จะส่งผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลของอากาศ

พิจารณารูปที่ ข - 41 ถึง ข - 43 ซึ่งเป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบของช่องเปิดที่มีการแบ่งช่องเปิดภายในจำนวน 2 ช่อง พบว่า ช่องเปิดที่วางตัวในแนวนอน มีลักษณะของการกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลที่สูงกว่า ช่องเปิดที่วางตัวในแนวตั้ง

พิจารณารูปที่ ข - 44 ถึง ข - 52 ซึ่งเป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบของช่องเปิดที่มีการแบ่งช่องเปิดภายในจำนวนมากกว่า 2 ช่อง พบว่า ช่องเปิดที่วางตัวในแนวนอน มีลักษณะของการกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลที่ต่ำกว่า ช่องเปิดที่วางตัวในแนวตั้ง

จากการพิจารณาของทั้ง 2 กรณีนี้ แสดงให้เห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล ขึ้นอยู่กับอิทธิพลของตัวแปร 2 ตัว คือ รูปแบบลักษณะการวางตัวของช่องเปิด และ จำนวนช่องเปิดภายในที่เพิ่มขึ้น ดังจะเห็นได้ว่า เมื่อช่องเปิดภายในมีจำนวน 2 ช่อง ช่องเปิดที่วางตัวในแนวนอน มีลักษณะของการกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลที่สูงกว่า ช่องเปิดที่วางตัวในแนวตั้ง แต่เมื่อเพิ่มจำนวนช่องเปิดภายในให้เพิ่มขึ้น จะทำให้ผลของการวางตัวเปลี่ยนไป คือ ช่องเปิดที่วางตัวในแนวนอน มีลักษณะของการกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลที่ต่ำกว่า ช่องเปิดที่วางตัวในแนวตั้ง ทั้งนี้ เนื่องมาจากการที่ผลของจำนวนช่องเปิดที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ ขนาดของการกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลเปลี่ยนไป ดังนั้น เราสามารถสรุปได้ว่า ผลของจำนวนช่องเปิดภายใน จะส่งผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล มากกว่า ผลของการวางตัวของช่องเปิด สำหรับช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

นอกจากนี้ การที่จำนวนช่องเปิดภายในเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลของช่องเปิดที่วางตัวในแนวตั้ง มีค่าสูงกว่าช่องเปิดที่วางตัวในแนวนอนนี้ ทำให้เราพบว่าช่องเปิดที่วางตัวในแนวตั้ง สามารถให้ค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลที่สูงที่สุด เมื่อมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศถึง 2 มุม คือ ที่มุม 45 องศา และมุม 135 องศา ซึ่งดีกว่าช่องเปิดที่วางตัวในแนวนอนที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลสูงที่สุดเพียงมุมเดียว คือที่มุม 90 องศา ซึ่งการกระจายตัวในลักษณะนี้ (ให้ค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลสูงที่สุด 2 มุม) ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลในทุกๆมุม สูงขึ้นตามไปด้วย

ดังนั้น เราสามารถบ่งบอกถึง แนวทางในการออกแบบช่องเปิดเพื่อใช้ในอาคารเพื่อให้ได้การระบายอากาศที่ดี ซึ่งอาคารโดยทั่วๆไปแล้ว ช่องเปิดที่ใช้จะมีความซับซ้อน ซึ่งมีจำนวนช่องเปิดภายในที่มากกว่า 2 ช่อง รวมทั้งทิศทางลมที่กระทำต่อช่องเปิดภายในอาคารโดยทั่วไปแล้ว มีทิศทางที่ไม่แน่นอน ดังนั้น หากต้องการให้ช่องเปิดภายในอาคาร มีลักษณะภายนอกเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า และสามารถให้อัตราการระบายอากาศที่ดีเราควรออกแบบให้ช่องเปิด มีลักษณะการวางตัวในแนวตั้ง เพราะสามารถให้การระบายอากาศที่ดีได้ ในทุกๆมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ

5.4 พิจารณาช่องเปิด ที่มีลักษณะการแบ่งช่องเปิดภายในเหมือนกัน และมีจำนวนช่องเปิดภายในเท่ากัน แต่ลักษณะภายนอกของช่องเปิดมีลักษณะที่แตกต่างกัน

พิจารณารูปที่ ข - 53 ถึง ข - 57 ซึ่งเป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบผลกระทบของค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล เมื่อทำการทดลองโดยเปลี่ยนลักษณะรูปแบบลักษณะภายนอกของช่องเปิด สำหรับช่องเปิดที่มีรูปแบบภายนอกที่มีลักษณะเป็นรูปวงกลม เปรียบเทียบกับสี่เหลี่ยมจัตุรัส ซึ่งมีลักษณะการแบ่งช่องเปิดภายในเหมือนกัน และมีจำนวนช่องเปิดภายในเท่ากันพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลของอากาศ เปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะภายนอกของช่องเปิดที่เปลี่ยนไป ในทุกๆรูปแบบ ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า ลักษณะรูปแบบภายนอกของช่องเปิดที่เปลี่ยนแปลงไป จะส่งผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลของอากาศ

นอกจากนี้ พบว่า 4 ใน 5 ของการทดลองโดยการเปลี่ยนรูปแบบภายนอกของช่องเปิดนี้ ช่องเปิดที่มีลักษณะภายนอกเป็นรูปวงกลม จะมีการกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล สูงกว่าช่องเปิดที่มีลักษณะภายนอกเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส เมื่อมีลักษณะการแบ่งช่องเปิดภายในเหมือนกัน ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า ช่องเปิดที่มีลักษณะภายนอกเป็นรูปวงกลม จะสามารถให้ประสิทธิภาพในการระบายอากาศที่ดีกว่า ช่องเปิดที่มีลักษณะภายนอกเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสสำหรับช่องเปิดที่มีการแบ่งช่องเปิดภายในที่เหมือนกัน และมีจำนวนช่องเปิดภายในเท่ากัน

5.5 พิจารณาช่องเปิด ที่มีรูปแบบภายนอกของช่องเปิดมีลักษณะเดียวกัน และจำนวนช่องเปิดภายในเท่ากัน แต่ลักษณะการแบ่งช่องเปิดภายในแตกต่างกัน

❑ **กำหนดค่าตัวประกอบรูปร่าง** (Shape Factor)

เนื่องจากในการวิเคราะห์ในหัวข้อนี้ การที่ช่องเปิดมีลักษณะรูปแบบภายนอกที่เหมือนกัน และจำนวนช่องเปิดภายในเท่ากัน แต่แตกต่างกันที่ลักษณะของการแบ่งช่องเปิดภายใน ซึ่งการที่ลักษณะของการแบ่งช่องเปิดภายในที่แตกต่างกันนี้ คือการใช้เส้นแบ่งช่องเปิดที่วางตัวแตกต่างกัน คือเส้นในแนวดิ่ง , เส้นในแนวระดับ และ เส้นที่ไม่ใช่เส้นในแนวดิ่งและแนวระดับ (เส้นในแนวทแยง) ซึ่งจากการใช้เส้นแบ่งที่แตกต่างกันนี้ แบ่งช่องเปิดภายใน ทำให้รูปแบบของช่องเปิดมีลักษณะที่ต่างกัน ซึ่งสามารถมองเห็นได้ด้วยตา แต่ในการวิเคราะห์ในส่วนนี้ จำเป็นที่จะต้องสามารถบ่งบอกถึงความแตกต่างของช่องเปิด ที่มีรูปแบบที่ต่างกันนี้ ออกมาในเชิงคณิตศาสตร์ ดังนั้น เราจึงได้ทำการกำหนดตัวแปรขึ้นมาตัวหนึ่ง เรียกว่า ค่าตัวประกอบรูปร่าง (Shape Factor , SF) ซึ่งตัวแปรตัวนี้ มีไว้เพื่อบ่งบอกถึงความแตกต่างของช่องเปิดที่มีลักษณะต่างๆกัน ในเชิงคณิตศาสตร์ โดย

$$SF = \frac{\text{Actual Perimeter of the Cross Section}}{\text{Perimeter of the Equivalent Circle}}$$

หรือ

$$SF = \frac{\text{àÊé¹ÃÍºÃÙ»¢Í§ªèÍ§à»Ô´}}{\text{àÊé¹ÃÍºÃÙ»¢Í§Ç§¡ÅÁ·Õèà·èÒ¡Ñº¾×é¹·Õè¢Í§ªèÍ§à»Ô´}}$$

ซึ่งช่องเปิดหนึ่งๆ จะมีค่าตัวประกอบรูปร่างที่ไม่ซ้ำกัน แต่ในการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลในการวิจัยนี้ เราได้ทดลองกับช่องเปิดที่มีรูปแบบที่ซับซ้อน คือ ช่องเปิดมีการแบ่งภายในออกเป็นช่องเปิดย่อยๆอีก ดังนั้น ค่าตัวประกอบรูปร่างของช่องเปิดที่มีรูปแบบที่ซับซ้อนนี้หาได้จาก

$$SF = \frac{SF_1 + SF_2 + SF_3 + ... + SF_{n-1} + SF_n}{n}$$

โดยที่ SF = ค่าตัวประกอบรูปร่างเฉลี่ยของช่องเปิดที่มีรูปแบบที่ซับซ้อน

n = จำนวนช่องเปิดที่อยู่ภายใน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากนิยามของค่าตัวประกอบรูปร่างที่เรากำหนดขึ้นนี้ จะสามารถคำนวณหาค่าตัวประกอบรูปร่าง สำหรับช่องเปิดที่ใช้ทดลองที่มีรูปแบบต่างๆได้ โดยมีค่าตัวประกอบรูปร่างๆที่คำนวณได้ แสดงในตารางที่ ก - 3 ในภาคผนวก ก.และตัวอย่างการคำนวณค่าตัวประกอบรูปร่างของช่องเปิดนี้ ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ค.

พิจารณาช่องเปิดที่มีรูปแบบภายนอกมีลักษณะเป็นวงกลม โดยแบ่งช่องเปิดภายในออกเป็น 2 ช่องเปิด ซึ่งเส้นที่ใช้ในการแบ่งเป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลม พบว่า ไม่ว่าเราจะทำการแบ่งช่องเปิดวงกลม โดยใช้เส้นในแนวดิ่ง , เส้นในแนวระดับ หรือเส้นในแนวทแยงที่ทำมุมใดๆก็ตาม วงกลมที่ถูกแบ่งด้วยเส้นต่างๆเหล่านี้ มีค่าตัวประกอบรูปร่างเฉลี่ยเท่ากันทุกรูปแบบ ซึ่งหมายความว่า วงกลมต่างๆเหล่านี้ แตกต่างกันทางกายภาพ แต่ไม่ได้มีความแตกต่างกันในเชิงคณิตศาสตร์ ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า ในการแบ่งช่องเปิดภายใน สำหรับช่องเปิดที่มีรูปแบบภายนอกที่เหมือนกัน ไม่ว่าจะทำการแบ่งช่องเปิดภายในโดยใช้เส้นแบ่งที่ทำมุมใดๆก็ตาม เมื่อแบ่งแล้วทำให้เกิดจำนวนช่องเปิดภายในที่เท่ากัน และไม่ได้ทำให้ค่าตัวประกอบรูปร่างเฉลี่ยของช่องเปิดนั้นเปลี่ยนแปลงไป ค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลของอากาศ เมื่อไหลผ่านช่องเปิดที่มีการแบ่งโดยใช้เส้นแบ่งที่ต่างกันนี้ จะมีค่าที่เท่ากัน

ดังนั้น สามารถกล่าวได้ว่า ค่าตัวประกอบรูปร่างเป็นตัวแปรที่สามารถเชื่อมความสัมพันธ์ระหว่าง ความแตกต่างทางคณิตศาสตร์ และความแตกต่างทางกายภาพ ให้มีความสอดคล้องกันได้ โดยสามารถใช้ในการบ่งบอกถึงผลของความแตกต่างทางกายภาพ สำหรับช่องเปิดใดๆ ให้อยู่ในรูปของความแตกต่างของตัวเลขทางคณิตศาสตร์ได้ ด้วยเหตุนี้ การพิจารณาช่องเปิดที่มีรูปแบบภายนอกของช่องเปิด มีลักษณะเดียวกัน และจำนวนช่องเปิดภายในเท่ากัน แต่ลักษณะการแบ่งช่องเปิดภายในแตกต่างกัน นั่นคือ การพิจารณาช่องเปิดที่มีรูปแบบภายนอกของช่องเปิดมีลักษณะเดียวกัน และจำนวนช่องเปิดภายในเท่ากัน แต่มีค่าตัวประกอบรูปร่างแตกต่างกันนั่นเอง

พิจารณารูปที่ ข - 58 ถึง ข - 65 ซึ่งเป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบผลกระทบของค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล เมื่อทำการทดลองโดยมีค่าตัวประกอบรูปร่างแตกต่างกัน สำหรับช่องเปิดที่มีรูปแบบภายนอกเหมือนกัน และจำนวนช่องเปิดภายในเท่ากัน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลของอากาศ เปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะของการแบ่งช่องเปิดภายในที่เปลี่ยนไปในทุกๆรูปแบบ ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า ค่าของตัวประกอบรูปร่างที่เปลี่ยนแปลงไป นั่นคือ การที่ช่องเปิดมีลักษณะของการแบ่งช่องเปิดภายในที่แตกต่างกัน จะส่งผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลของอากาศ

นอกจากนี้ พบว่าในทุกๆมุมที่กระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ ช่องเปิดที่มีค่าตัวประกอบรูปร่างต่ำกว่า จะมีค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลที่สูงกว่า ช่องเปิดที่มีค่าตัวประกอบรูปร่างที่สูง ในทุกๆรูปแบบภายนอกของช่องเปิด นั่นคือ ประสิทธิภาพในการระบายอากาศจะมีแนวโน้มที่สูงขึ้น ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า การที่ช่องเปิดมีลักษณะภายนอกที่เหมือนกัน และจำนวนช่องเปิดภายในเท่ากัน ช่องเปิดที่มีค่าตัวประกอบรูปร่างที่ต่ำ จะให้ประสิทธิภาพในการระบายอากาศที่สูง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

สมการและการทดสอบ

6.1 รูปแบบของสมการ

จากผลการวิเคราะห์ผลการทดลองในบทที่ 5 ทำให้ทราบว่า มีตัวแปรใดบ้างที่ส่งผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล ซึ่งได้แก่

1. ลักษณะรูปแบบภายนอกของช่องเปิด

2. ลักษณะการแบ่งช่องเปิดภายใน หรือหมายถึงความแตกต่างของค่าตัวประกอบรูปร่าง

3. จำนวนช่องเปิดภายใน

4. มุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ

ดังนั้น เราจึงนำตัวแปร และพิจารณาผลที่ตัวแปรต่างๆเหล่านี้ กระทำต่อค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล มาใช้ในการสร้างสมการ เพื่อใช้สำหรับการหาค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล สำหรับช่องเปิดที่มีรูปแบบต่างๆ โดยกรรมวิธีสมการถดถอย (Regression) โดยสมการที่สร้างขึ้นนี้ จะอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ของตัวแปร 3 ตัว คือ ค่าตัวประกอบรูปร่าง , จำนวนช่องเปิดภายใน และมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ ส่วนผลของลักษณะรูปแบบภายนอกของช่องเปิดนั้น จะส่งผลให้ลักษณะการกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล เทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศเปลี่ยนแปลงไป ด้วยเหตุนี้ เราจึงสร้างสมการเพื่อใช้คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล โดยจะแบ่งแยกตามลักษณะการกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล ซึ่งจะสามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

- ***สมการสำหรับลักษณะการกระจายตัวรูปประฆังคว่ำ*** ได้แก่ ช่องเปิดที่มีลักษณะภายนอกเป็นรูปวงกลม , สี่เหลี่ยมจัตุรัส และสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่วางตัวในแนวนอน จะมีรูปแบบของสมการดังนี้ คือ

$$CD = e^{-0.031\left(SF^{1.2}N^{0.8}\right)} Sin\left(-0.862A^4 + 3.3327A^3 - 4.5897A^2 + 2.7261A\right)$$

- ***สมการสำหรับลักษณะการกระจายตัวรูปตัว M*** ได้แก่ ช่องเปิดที่มีลักษณะภายนอกเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่วางตัวในแนวตั้ง จะมีรูปแบบของสมการดังนี้ คือ

$$CD = e^{-0.0215\left(SF^{1.2}N^{0.9}\right)} Sin\left(0.5797\,A^3 - 1.9063\,A^2 + 1.9426\,A\right)$$

โดยที่ CD = ค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลที่คำนวณได้

A = มุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ มีหน่วยเป็น เรเดียน โดยจะต้องมีค่าอยู่ในช่วง 0 - π/2 เรเดียน (0 - 90 องศา)

N = จำนวนช่องเปิดภายใน

SF = ค่าตัวประกอบรูปร่างเฉลี่ยของช่องเปิดที่มีรูปแบบที่ซับซ้อน

แม้ว่าสมการที่ได้ จะสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล ได้ในช่วงระหว่างมุม 0 - 90 องศา แต่เนื่องจากช่องเปิดมีความสมมาตรต่อมุมที่กระทำ ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่า สมการที่ได้นี้สามารถนำไปใช้คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลได้ตั้งแต่มุม 0 - 180 องศา โดยที่มุม 120 , 135 และ 150 องศา เราจะใช้มุม 60 , 45 และ 30 องศา มาใช้ในคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลแทน ตามลำดับ

6.2 ผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลจากสมการ

ผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลจากสมการ สำหรับช่องเปิดรูปแบบต่างๆ และ ค่าความคลาดเคลื่อนต่างๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ ก - 4 และความแม่นยำของการคำนวณจากสมการ แสดงในรูปที่ ข - 66 ถึงรูปที่ ข - 91 ซึ่งแสดงไว้ในภาคผนวก ก. และ ภาคผนวก ข. และจากผลการคำนวณที่ได้นี้ เราได้นำค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลที่คำนวณได้ มาประมวลผลทางสถิติ เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลที่ได้จากการทดลอง เพื่อใช้ในการบ่งบอกถึงความแม่นยำของสมการ โดยค่าที่คำนวณนี้ เราจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

รูประฆังคว่ำ : เป็นกลุ่มที่นำค่าของช่องเปิด ที่มีลักษณะภายนอกเป็นรูปวงกลม , สี่เหลี่ยมจัตุรัส และสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่วางตัวในแนวนอนมาคำนวณ

รูปตัว M : เป็นกลุ่มที่นำค่าของช่องเปิด ที่มีลักษณะภายนอกเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่วางตัวในแนวตั้งมาคำนวณ

ได้ผลการคำนวณทางสถิติดังนี้คือ

Standard Error of Estimation :	SD รูประฆังคว่ำ	=	0.0105
	SD รูปตัว M	=	0.0080
Coefficient of Correlation :	r รูประฆังคว่ำ	=	0.9914
	r รูปตัว M	=	0.9939
Coefficient of Determination :	r^2 รูประฆังคว่ำ	=	0.9828
	r^2 รูปตัว M	=	0.9878
Average Percent Error :	รูประฆังคว่ำ	=	1.7528 %
	รูปตัว M	=	1.3563 %

6.3 การทดสอบสมการ

ในการทดสอบสมการที่ได้ข้างต้นนี้ เราได้นำช่องเปิดที่ทดลอง ซึ่งไม่ได้นำค่าที่ได้จากผลการทำลองเข้ามาพิจารณาเพื่อใช้ในการหาสมการ มาใช้ในการทดสอบ เพื่อทดสอบความแม่นยำของสมการ ได้ผลดังในตารางที่ ก - 5 และรูปที่ ข - 92 ถึง รูปที่ ข - 97 ซึ่งแสดงไว้ในภาคผนวก ก. และภาคผนวก ข.

จากตาราง และรูป พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลที่คำนวณได้ สำหรับช่องเปิดที่นำมาทดสอบนี้ มีความคลาดเคลื่อนที่สูงกว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลที่คำนวณได้ สำหรับช่องเปิดที่นำมาใช้ในการหาสมการ แต่ค่าความคลาดเคลื่อนของการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล สำหรับช่องเปิดที่นำมาทดสอบนี้ ก็ยังอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ และให้ผลการคำนวณที่แม่นยำ

Average of Percent Error :	รูประฆังคว่ำ	=	4.5854 %
	รูปตัว M	=	3.3183 %

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 7

สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาและทำการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลของอากาศ โดยพิจารณาช่องเปิดที่มีลักษณะรูปแบบภายนอกแบบต่างๆ ซึ่งมีลักษณะการแบ่งช่องเปิดภายในที่แตกต่างกัน และมีการเปลี่ยนจำนวนช่องเปิดภายใน รวมทั้งทำการปรับเปลี่ยนมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ โดยช่องเปิดที่ใช้ในการทดลองมีทั้งสิ้น 32 รูปแบบ แบ่งเป็นช่องเปิดที่มีลักษณะรูปแบบภายนอกของช่องเปิด 4 รูปแบบด้วยกัน คือ วงกลม จำนวน 3 รูปแบบ , สี่เหลี่ยมจัตุรัส จำนวน 5 รูปแบบ , สี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีการจัดวางตัวในแนวตั้ง จำนวน 12 รูปแบบและสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีการจัดวางตัวในแนวนอน จำนวน 12 รูปแบบ และช่องเปิดที่มีการแบ่งช่องเปิดภายในรูปแบบต่างๆกัน ส่งผลให้จำนวนช่องเปิดภายในมีความแตกต่างกันทั้งสิ้น 6 ลักษณะ คือ มีจำนวนช่องเปิดภายใน 2 ช่อง จำนวน 9 รูปแบบ , 4 ช่อง จำนวน 11 รูปแบบ , 7 ช่อง จำนวน 2 รูปแบบ , 8 ช่อง จำนวน 6 รูปแบบ , 16 ช่อง จำนวน 2 รูปแบบ และ 22 ช่อง จำนวน 2 รูปแบบ อีกทั้งช่องเปิดที่มีการเปลี่ยนมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ มีทั้งสิ้น 4 มุม คือ 30 , 45 , 60 และ 90 องศา

จากข้อมูลของค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลของอากาศ ที่ได้จากการทดลองนี้ สามารถวิเคราะห์ และสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ตัวแปรสำคัญที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อ ค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลของอากาศ คือ มุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ , จำนวนช่องเปิดภายใน , ลักษณะการจัดวางตัวของช่องเปิด (สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะภายนอกที่ไม่สมมาตรทุดด้าน เช่น รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า) , ลักษณะรูปแบบภายนอกของช่องเปิด และ ลักษณะการแบ่งช่องเปิดภายใน ซึ่งตัวแปรเหล่านี้ จะเป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพของการไหลของอากาศ เมื่ออากาศไหลผ่านช่องเปิดที่มีรูปแบบที่ซับซ้อน

2. การเปลี่ยนแปลงมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ ส่งผลให้เกิดลักษณะการกระจายตัว ของค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลของอากาศ ที่แตกต่างกัน 2 ลักษณะด้วยกัน คือ

    - ลักษณะการกระจายตัวรูประฆังคว่ำ ได้แก่ ช่องเปิดที่มีรูปแบบภายนอกเป็นรูปวงกลม , สี่เหลี่ยมจัตุรัส และสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่วางตัวในแนวนอน ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์

ของอัตราการไหลของอากาศ จะมีค่าสูงสุดเมื่อช่องเปิดทำมุมกับทิศทางการไหลของอากาศเท่ากับ 90 องศา นั่นคือ ยิ่งช่องเปิดมีพื้นที่ที่รับลมมาก ประสิทธิภาพในการระบายอากาศ จะยิ่งมากขึ้น

- ลักษณะการกระจายตัวรูปตัว M ได้แก่ ช่องเปิดที่มีรูปแบบภายนอกเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่วางตัวในแนวตั้ง ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลของอากาศจะมีค่าสูงสุดเมื่อช่องเปิดทำมุมกับทิศทางการไหลของอากาศเท่ากับ 45 องศา และมุม 135 องศา นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลของอากาศ ที่มุมต่างๆ ของช่องเปิดที่วางตัวในแนวตั้ง มีค่าสูงกว่าในกรณีของช่องเปิดที่วางตัวในแนวนอน

3. ข้อสรุปในข้อ 2 สามารถสรุปเพิ่มเติมได้ว่า ควรออกแบบช่องเปิดสำหรับใช้ในอาคาร ให้ช่องเปิดมีลักษณะรูปแบบภายนอกเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่วางตัวในแนวตั้ง มากกว่าช่องเปิดที่มีลักษณะภายนอกเป็นรูปวงกลม , สี่เหลี่ยมจัตุรัส และสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่วางตัวในแนวนอน เพราะสามารถให้การระบายอากาศที่ดีได้ ในทุกๆมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ

4. สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะภายนอกเหมือนกัน และมีการวางตัวที่เหมือนกัน จำนวนช่องเปิดภายในจะแปรผกผันกับ ประสิทธิภาพในการระบายอากาศ นั่นคือ ยิ่งจำนวนช่องเปิดภายในมากขึ้น ประสิทธิภาพในการระบายอากาศจะยิ่งลดลง

5. สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะการแบ่งช่องเปิดภายในที่เหมือนกัน และมีจำนวนช่องเปิดภายในเท่ากัน ช่องเปิดที่มีลักษณะภายนอกเป็นรูปวงกลม จะสามารถให้ประสิทธิภาพในการระบายอากาศที่ดีกว่า ช่องเปิดที่มีลักษณะภายนอกเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส

นอกจากนี้ ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการกำหนดนิยามของตัวแปรขึ้นมาตัวหนึ่ง คือ ค่าตัวประกอบรูปร่าง (Shape Factor , SF) ซึ่งเป็นตัวแปรที่สามารถเชื่อมความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์กับทางกายภาพ ให้มีความสอดคล้องกันได้ โดยสามารถใช้ในการบ่งบอกถึงความแตกต่างของรูปแบบภายใน สำหรับช่องเปิดใดๆ ให้อยู่ในรูปของความแตกต่างของตัวเลขทางคณิตศาสตร์ได้ โดยที่ช่องเปิดหนึ่งๆ จะมีค่าตัวประกอบรูปร่างที่ไม่ซ้ำกัน

6. ค่าตัวประกอบรูปร่าง สามารถนำมาใช้ เพื่อบ่งบอกลักษณะภายใน สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะรูปแบบภายนอกที่เหมือนกัน และมีจำนวนช่องเปิดภายในเท่ากัน แต่มีลักษณะ

การแบ่งช่องเปิดภายในที่แตกต่างกัน ในเชิงคณิตศาสตร์ และช่องเปิดที่มีค่าตัวประกอบรูปร่างที่ต่ำ จะให้ประสิทธิภาพในการระบายอากาศที่สูงกว่า

นอกจากนี้ ยังนำข้อมูลของค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลที่ได้ มาใช้ในการสร้างสมการ สำหรับคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลของอากาศ สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะใดๆ และวางตัวทำมุมใดๆ กับทิศทางการไหลของอากาศอีกด้วย สมการที่ได้นี้ ขึ้นอยู่กับตัวแปร 3 ตัว คือ ค่าตัวประกอบรูปร่าง , จำนวนช่องเปิดภายใน และมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ โดยแบ่งแยกตามลักษณะรูปแบบภายนอกของช่องเปิด รวมถึงลักษณะการวางตัวของช่องเปิด และแบ่งตามลักษณะการกระได้สมการทั้งสิ้น 2 สมการ ซึ่งสมการที่ได้นี้สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล สำหรับช่องเปิดที่ใช้ในการทดลองได้อย่างถูกต้อง และแม่นยำ ซึ่งสามารถนำสมการนี้ไปใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลสำหรับช่องเปิดที่มีลัษณะคล้ายคลึงกับช่องเปิดที่ใช้ในการทดลองได้อีกด้วย

ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการทดลอง เมื่ออากาศมีการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมของค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลว่าเหมือนหรือแตกต่างกัน หรือไม่ และอย่างไรกับการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) ในงานวิจัยนี้

2. ควรทำการทดลอง โดยการเพิ่มมุมที่ช่องเปิด กระทำกับทิศทางการไหลของอากาศให้ละเอียดกว่านี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วง 0 - 30 องศา ซึ่งกราฟน่าจะมีความชันค่อนข้างมาก เพื่อทำให้สามารถเห็นแนวโน้มของ ลักษณะการกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลที่ละเอียด และชัดเจนกว่านี้ และจะส่งผลกระทบต่อสมการที่ได้สร้างขึ้นทั้ง 2 สมการ กล่าวคือแม้ว่าสมการที่ได้ จะสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลได้ตั้งแต่ ช่วงมุม 0 - 90 องศา แต่เนื่องจากเหตุผลดังกล่าวนี้เองทำให้ สมการที่ได้มีความเชื่อมั่นในการคำนวณอยู่ในช่วง 30 - 90 องศา

3. ควรทำการทดลอง โดยการเปลี่ยนแปลงรูปแบบลักษณะภายนอก , ลักษณะการแบ่งช่องเปิดภายใน , จำนวนช่องเปิดภายใน และลักษณะการวางตัวของช่องเปิด ให้มีรูปแบบที่หลากหลาย และแตกต่างกันกับในงานวิจัยนี้ เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ และสร้างสมการที่ถูกต้อง และสามารถครอบคลุมช่องเปิดที่มากขึ้น

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

เชิดพันธ์ วิทูราภรณ์ . การระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติในอาคาร . งานประชุมใหญ่ทางวิชาการประจำปี 2542 . วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย .

ธวัชชัย งามสันติวงศ์ . SPSS for Windows หลักการและวิธีใช้คอมพิวเตอร์ในงานสถิติเพื่อการวิจัย . 4th Edition . กรุงเทพมหานคร . โรงพิมพ์ 21 เซ็นจูรี่ . 2543 .

ภาษาอังกฤษ

Reid F. Stearns , Russell R. Johnson , Robert M. Jackson and Charles A. Larson . Flow Measurement with Orifice Meter . Princeton , New Jersey . D. Van Nostrand Company , Inc. 1951 .

British Standards Institution . Methods for the Measurement of Fluid Flow in Pipes . London . British Standard House . Part 1 . 1964 .

British Standards Institution . Methods for the Measurement of Fluid Flow in Pipes . London . British Standard House . Part 3 . 1965 .

A. Linford . Flow Measurement & Meters . London . E & F.N. Spon .Second Edition . 1961 .

M. Santamouris and D. Asimakopoulos . Passive Cooling of Buildings . London . James & James (Science Publishers) . 1996 .

J. P. Chastain and D. G. Colliver . Computation of Discharge Coefficient for Laminar Flow in Rectangular and Circular Openings . ASHRAE Transaction . Vol. 93 Part 2 . 1987 . p. 2259-2283 .

N. Hay , D. Lampard and A. Khaldi . Coefficient of Discharge of 30^{O} degree Inclined Film Cooling Holes with Rounded Entries or Exits . American Society of Mechanical Engineers (Paper) . 1994 . p. 1-7 .

G. L. Morrison , K. R. Hall , M. L. Macek , L. M. Ihfe , R. E. Deotte Jr and J. E. Hauglie . Upstream Velocity Profile Effects on Orifice Flow meters . Flow Measurement and Instrumentation . Vol. 5 . No. 2 . April 1994 . p. 87-92 .

J. C. Kayser and R. L. Shambaugh . Discharge Coefficient for Compressible Flow Through Small-Diameter Orifice and Convergent Nozzle . Chemical Engineering Science . Vol. 46 . No. 7 . 1991 . p. 1697-1711 .

Gerald L. Morrison , David R. Panak and Roberd E. Jr Deotte . Numerical Study of the Effects of Upstream Flow Condition upon Orifice Flow Meter Performance . Pipeline Technology Proceedings of the International Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symposium . Vol. 5 . Part A. . p. 47-52 .

Robert W. Fox and Alan T. Mcdonald . Introduction to Fluid Mechanic . New York . John Wiley . Fourth Edition . 1994 .

E. Ower and R. C. Pankhurst . The Measurement of Air Flow . Oxford . Pergamon Press . Fifth Edition . 1977 .

American Society of Heating , Refrigerating and Air Conditioning Engineerings . 1993 ASHRAE Handbook Fundamentals. . Chapter 14 . Atlanta Georgia . 1993 .

Gail Schiller Brager and Richard de Dear . A Standard for Natural Ventilation . ASHRAE Journal . Vol. 42 . No. 10 . October 2000 . p. 21-28 .

Harris J. Sobin . Window Design for Passive Ventilative Cooling : An Experimental Model-Scale Study . Passive Cooling . 1981 . p. 191-195 .

Karl T. Andersen . Theoretical Considerations on Natural Ventilation by Thermal Buoyancy . ASHRAE Transaction . Vol. 101 Part 2 . 1995 . p. 1103-1117 .

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

แสดงผลในรูปของตาราง

ประกอบด้วย

ตารางที่ ก - 1 : แสดงลักษณะของช่องเปิดและการแบ่งช่องเปิดภายใน ของช่องเปิดที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ ก - 2 : แสดงค่าความดันตกคร่อมที่วัดได้จากการทดลอง และค่าที่คำนวณได้สำหรับช่องเปิดรูปแบบต่างๆ

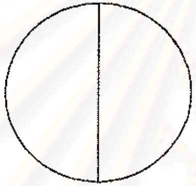
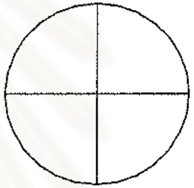
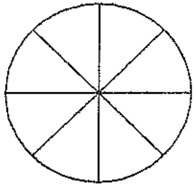
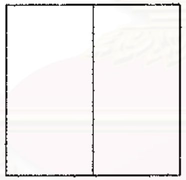
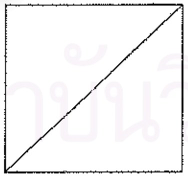
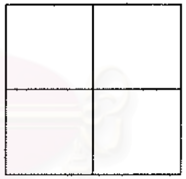
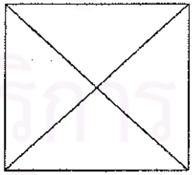
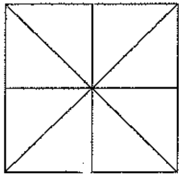
ตารางที่ ก - 3 : แสดงค่าตัวประกอบรูปร่างที่คำนวณได้ สำหรับช่องเปิดรูปแบบต่างๆ

ตารางที่ ก - 4 : แสดงค่าตัวแปรต่างๆ , ค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล และค่าความคลาดเคลื่อนที่คำนวณได้จากสมการ

ตารางที่ ก - 5 : แสดงผลการทดสอบสมการ

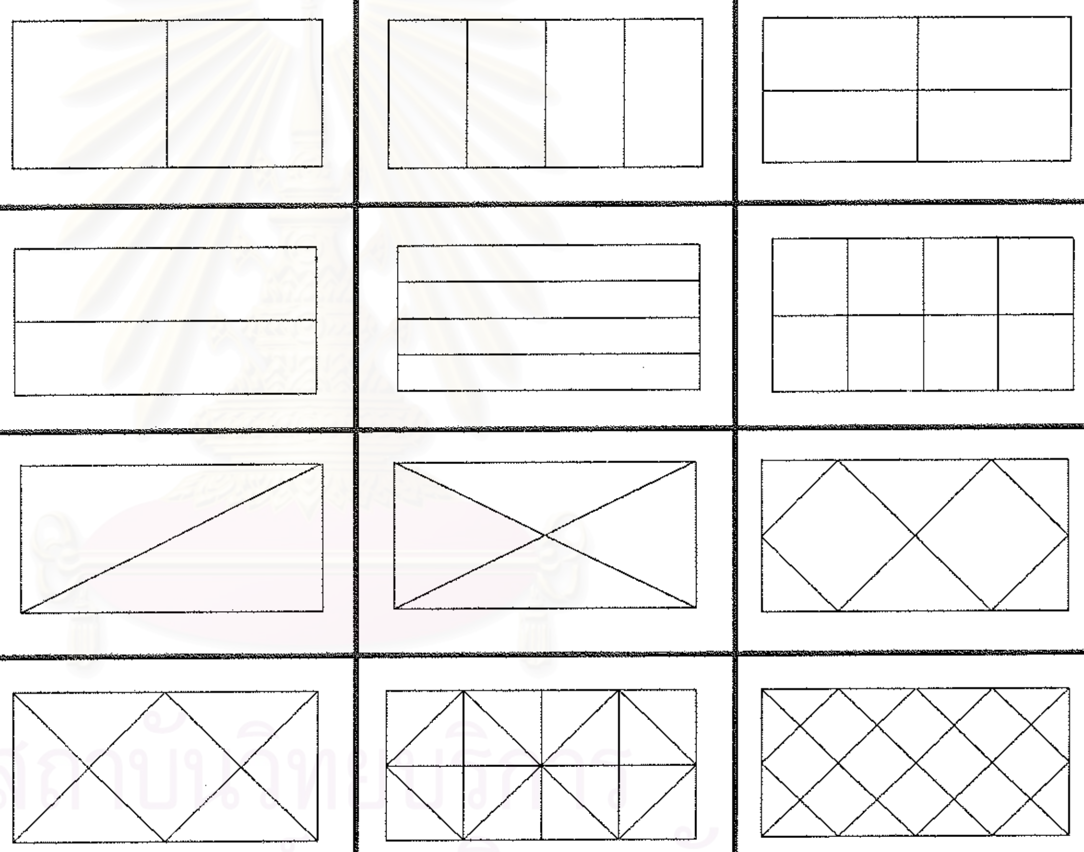
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก - 1 : แสดงลักษณะของช่องเปิดและการแบ่งช่องเปิดภายใน ของช่องเปิดที่ใช้ในการทดลอง

ลักษณะช่องเปิด	รูปแบบหน้าต่าง		
ช่องเปิดที่มีลักษณะภายนอกเป็นรูปวงกลม			
ช่องเปิดที่มีลักษณะภายนอกเป็นสี่เหลี่ยมรูปจัตุรัส	 	 	

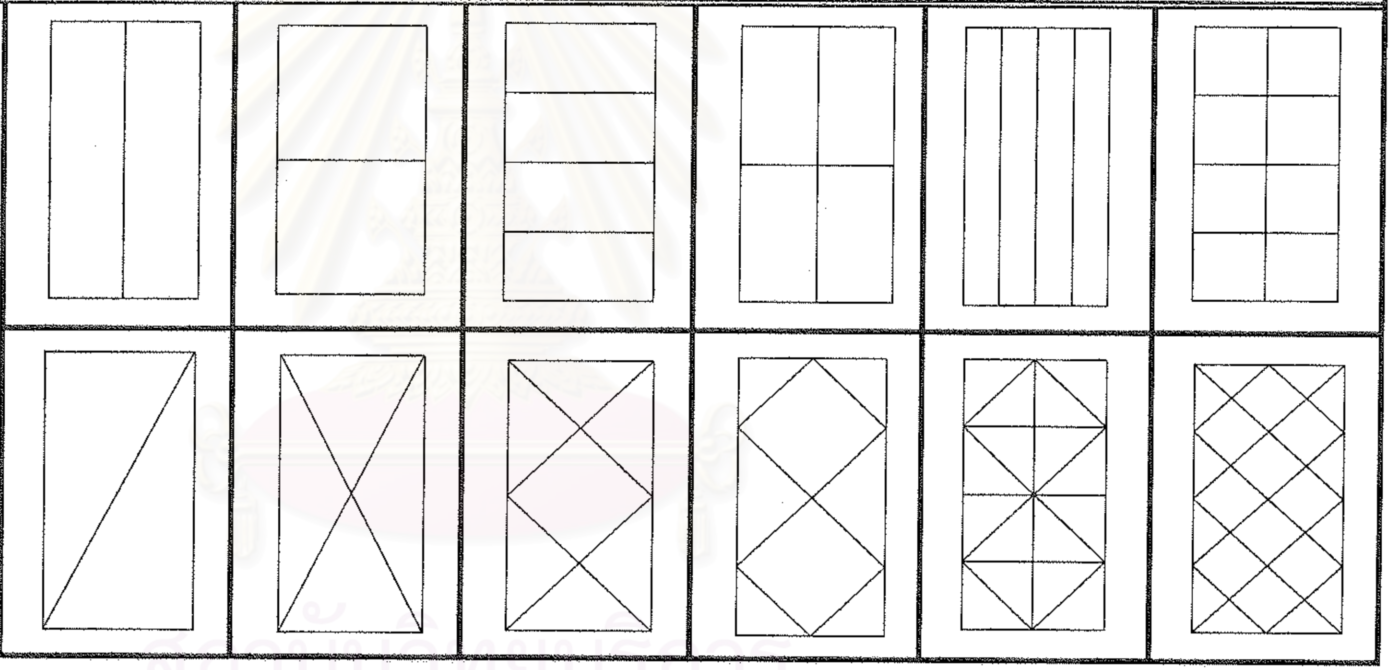
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก - 1 : แสดงลักษณะของช่องเปิดและการแบ่งช่องเปิดภายใน ของช่องเปิดที่ใช้ในการทดลอง (ต่อ)

ลักษณะช่องเปิด	รูปแบบหน้าต่าง
ช่องเปิดที่มีลักษณะภายนอก เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่จัดวางตัวในแนวนอน	

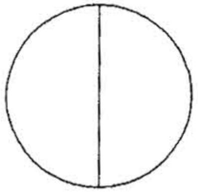
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก - 1 : แสดงลักษณะของช่องเปิดและการแบ่งช่องเปิดภายใน ของช่องเปิดที่ใช้ในการทดลอง (ต่อ)

ลักษณะช่องเปิด	รูปแบบหน้าต่าง
ช่องเปิดที่มีลักษณะภายนอก รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่วางตัวในแนวตั้ง	

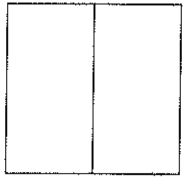
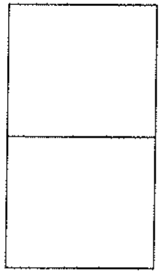
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก - 2 : แสดงค่าความดันตกคร่อมที่วัดได้จากการทดลอง และค่าที่คำนวณได้ สำหรับช่องเปิดรูปแบบต่างๆ

Complex Opening	Angle (Degree)	Read from Microtector Start pt. (mm. H_2O)	Stop pt. (mm. H_2O)	Different (mm. H_2O)	Head (mm. H_2O)	Read from Manometer Head (mm. H_2O)	Q_a (m^3/s)	Q_t (m^3/s)	CD
	90	0.23	7.92	7.69	15.38	105	0.0185	0.0343	0.5393
	30	0.24	8.99	8.75	17.50	106	0.0187	0.0366	0.5104
	45	0.23	8.35	8.12	16.24	106	0.0187	0.0352	0.5299
	60	2.57	10.41	7.84	15.68	105	0.0185	0.0346	0.5342
	90	0.48	7.70	7.22	14.44	108	0.0190	0.0332	0.5725
	30	0.47	8.46	7.99	15.98	106	0.0187	0.0349	0.5342
	45	0.45	8.25	7.80	15.60	106	0.0187	0.0345	0.5406
	60	2.58	10.05	7.47	14.94	107	0.0188	0.0338	0.5576
	90	0.68	8.73	8.05	16.10	106	0.0187	0.0351	0.5322
	30	0.42	8.68	8.26	16.52	105	0.0185	0.0355	0.5204
	45	0.19	7.91	7.72	15.44	106	0.0187	0.0344	0.5434
	60	2.58	10.26	7.68	15.36	105	0.0185	0.0343	0.5397

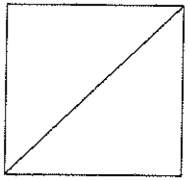
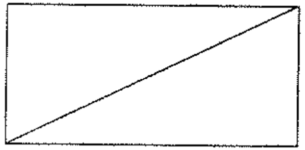
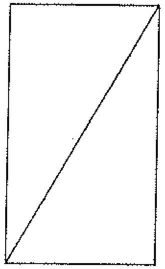
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก - 2 : แสดงค่าความดันตกคร่อมที่วัดได้จากการทดลอง และค่าที่คำนวณได้ สำหรับช่องเปิดรูปแบบต่างๆ (ต่อ)

Complex Opening	Angle (Degree)	Read from Microtector				Read from Manometer	Q_a (m^3/s)	Q_t (m^3/s)	CD
		Start pt. (mm. H_2O)	Stop pt. (mm. H_2O)	Different (mm. H_2O)	Head (mm. H_2O)	Head (mm. H_2O)			
	90	0.34	8.21	7.87	15.74	106	0.0187	0.0347	0.5382
	30	0.35	8.96	8.61	17.22	105	0.0185	0.0363	0.5097
	45	0.35	8.56	8.21	16.42	105	0.0185	0.0354	0.5220
	60	2.58	10.60	8.02	16.04	105	0.0185	0.0350	0.5281
	90	0.50	7.77	7.27	14.54	105	0.0185	0.0333	0.5547
	30	0.16	7.87	7.71	15.42	104	0.0183	0.0343	0.5335
	45	0.62	8.29	7.67	15.34	105	0.0185	0.0342	0.5400
	60	2.58	9.95	7.37	14.74	105	0.0185	0.0336	0.5509
	90	0.45	8.25	7.80	15.60	106	0.0187	0.0345	0.5406
	30	0.39	8.50	8.11	16.22	105	0.0185	0.0352	0.5252
	45	0.39	7.79	7.40	14.80	106	0.0187	0.0336	0.5550
	60	2.57	10.10	7.53	15.06	106	0.0187	0.0339	0.5502

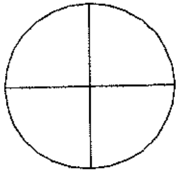
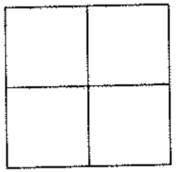
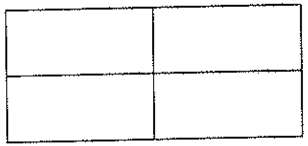
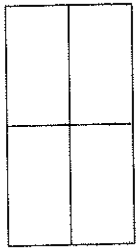
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก - 2 : แสดงค่าความดันตกคร่อมที่วัดได้จากการทดลอง และค่าที่คำนวณได้ สำหรับช่องเปิดรูปแบบต่างๆ (ต่อ)

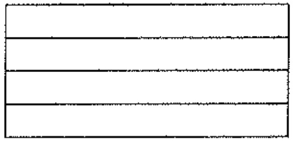
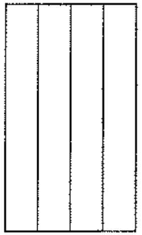
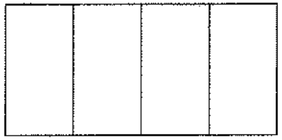
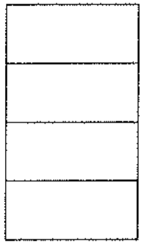
Complex Opening	Angle (Degree)	Read from Microtector Start pt. (mm. H_2O)	Stop pt. (mm. H_2O)	Different (mm. H_2O)	Head (mm. H_2O)	Read from Manometer Head (mm. H_2O)	Q_a (m^3/s)	Q_t (m^3/s)	CD
	90	0.44	8.67	8.23	16.46	105	0.0185	0.0355	0.5213
	30	0.45	9.96	9.51	19.02	105	0.0185	0.0381	0.4850
	45	0.47	9.80	9.33	18.66	106	0.0187	0.0378	0.4943
	60	2.58	11.18	8.60	17.20	106	0.0187	0.0363	0.5149
	90	0.68	8.35	7.67	15.34	106	0.0187	0.0342	0.5452
	30	0.68	8.79	8.11	16.22	106	0.0187	0.0352	0.5302
	45	0.69	8.64	7.95	15.90	106	0.0187	0.0349	0.5355
	60	2.58	10.37	7.79	15.58	106	0.0187	0.0345	0.5410
	90	0.33	8.63	8.30	16.60	106	0.0187	0.0356	0.5241
	30	0.34	8.78	8.44	16.88	105	0.0185	0.0359	0.5148
	45	0.34	8.05	7.71	15.42	105	0.0185	0.0343	0.5386
	60	2.58	10.67	8.09	16.18	105	0.0185	0.0352	0.5258

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก - 2 : แสดงค่าความดันตกคร่อมที่วัดได้จากการทดลอง และค่าที่คำนวณได้ สำหรับช่องเปิดรูปแบบต่างๆ (ต่อ)

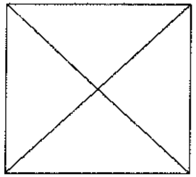
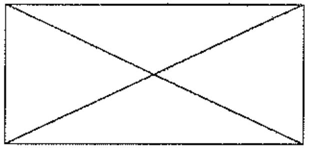
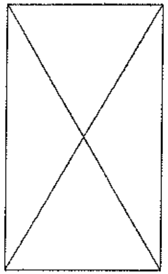
Complex Opening	Angle	Read from Microtector				Read from Manometer	Q_a	Q_t	CD
	(Degree)	Start pt. (mm. H_2O)	Stop pt. (mm. H_2O)	Different (mm. H_2O)	Head (mm. H_2O)	Head (mm. H_2O)	(m^3/s)	(m^3/s)	
	90	0.28	8.52	8.24	16.48	105	0.0185	0.0355	0.5210
	30	0.31	9.63	9.32	18.64	104	0.0183	0.0377	0.4852
	45	0.50	9.33	8.83	17.66	104	0.0183	0.0367	0.4985
	60	2.58	11.15	8.57	17.14	105	0.0185	0.0362	0.5109
	90	0.77	8.55	7.78	15.56	105	0.0185	0.0345	0.5362
	30	0.69	9.34	8.65	17.30	105	0.0185	0.0364	0.5085
	45	0.69	8.91	8.22	16.44	105	0.0185	0.0354	0.5217
	60	2.58	10.62	8.04	16.08	105	0.0185	0.0351	0.5275
	90	0.44	8.76	8.32	16.64	104	0.0183	0.0357	0.5136
	30	0.44	10.28	9.84	19.68	104	0.0183	0.0388	0.4723
	45	0.44	9.62	9.18	18.36	104	0.0183	0.0375	0.4889
	60	2.58	11.54	8.96	17.92	104	0.0183	0.0370	0.4949
	90	0.26	9.05	8.79	17.58	105	0.0185	0.0367	0.5045
	30	0.28	9.97	9.69	19.38	106	0.0187	0.0385	0.4850
	45	0.27	8.03	7.76	15.52	106	0.0187	0.0344	0.5420
	60	2.58	10.97	8.39	16.78	106	0.0187	0.0358	0.5213

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Complex Opening	Angle (Degree)	Read from Microtector Start pt. (mm. H_2O)	Stop pt. (mm. H_2O)	Different (mm. H_2O)	Head (mm. H_2O)	Read from Manometer Head (mm. H_2O)	Q_a (m^3/s)	Q_t (m^3/s)	CD
	90	0.41	7.64	7.23	14.46	94	0.0166	0.0332	0.4980
	30	0.41	8.20	7.79	15.58	92	0.0162	0.0345	0.4695
	45	0.42	7.98	7.56	15.12	93	0.0164	0.0340	0.4818
	60	2.59	10.15	7.56	15.12	94	0.0166	0.0340	0.4870
	90	0.76	8.75	7.99	15.98	96	0.0169	0.0349	0.4838
	30	0.77	9.53	8.76	17.52	97	0.0171	0.0366	0.4668
	45	0.77	8.00	7.23	14.46	98	0.0173	0.0332	0.5192
	60	2.59	10.50	7.91	15.82	98	0.0173	0.0348	0.4963
	90	0.18	8.87	8.69	17.38	106	0.0187	0.0364	0.5122
	30	0.19	9.97	9.78	19.56	107	0.0188	0.0387	0.4874
	45	0.18	9.57	9.39	18.78	107	0.0188	0.0379	0.4974
	60	2.58	11.56	8.98	17.96	107	0.0188	0.0371	0.5086
	90	0.52	8.91	8.39	16.78	105	0.0185	0.0358	0.5164
	30	0.53	9.20	8.67	17.34	105	0.0185	0.0364	0.5079
	45	0.53	7.92	7.39	14.78	105	0.0185	0.0336	0.5502
	60	2.58	10.46	7.88	15.76	105	0.0185	0.0347	0.5328

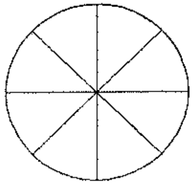
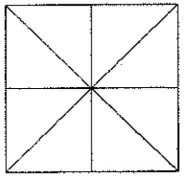
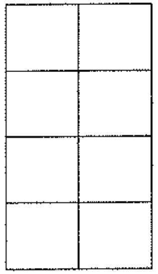
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก - 2 : แสดงค่าความดันตกคร่อมที่วัดได้จากการทดลอง และค่าที่คำนวณได้ สำหรับช่องเปิดรูปแบบต่างๆ (ต่อ)

Complex Opening	Angle (Degree)	Read from Microtector				Read from Manometer	Q_a (m^3/s)	Q_t (m^3/s)	CD
		Start pt. (mm. H_2O)	Stop pt. (mm. H_2O)	Different (mm. H_2O)	Head (mm. H_2O)	Head (mm. H_2O)			
	90	0.25	7.35	7.10	14.20	94	0.0166	0.0329	0.5025
	30	0.25	7.86	7.61	15.22	92	0.0162	0.0341	0.4750
	45	0.25	7.85	7.60	15.20	93	0.0164	0.0341	0.4805
	60	2.58	9.94	7.36	14.72	94	0.0166	0.0335	0.4935
	90	0.57	7.81	7.24	14.48	96	0.0169	0.0333	0.5082
	30	0.57	9.24	8.67	17.34	97	0.0171	0.0364	0.4692
	45	0.57	8.98	8.41	16.82	98	0.0173	0.0359	0.4814
	60	2.59	10.62	8.03	16.06	98	0.0173	0.0350	0.4926
	90	0.61	8.20	7.59	15.18	96	0.0169	0.0341	0.4963
	30	0.62	8.96	8.34	16.68	96	0.0169	0.0357	0.4735
	45	0.62	7.23	6.61	13.22	96	0.0169	0.0318	0.5319
	60	2.59	9.70	7.11	14.22	96	0.0169	0.0330	0.5128

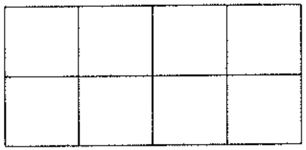
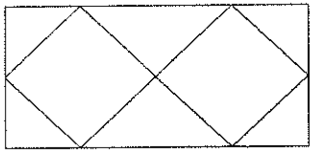
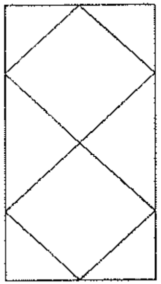
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก - 2 : แสดงค่าความดันตกคร่อมที่วัดได้จากการทดลอง และค่าที่คำนวณได้ สำหรับช่องเปิดรูปแบบต่างๆ (ต่อ)

Complex Opening	Angle (Degree)	Read from Microtector: Start pt. (mm. H_2O)	Stop pt. (mm. H_2O)	Different (mm. H_2O)	Head (mm. H_2O)	Read from Manometer: Head (mm. H_2O)	Q_a (m^3/s)	Q_t (m^3/s)	CD
	90	0.23	10.52	10.29	20.58	105	0.0185	0.0397	0.4662
	30	0.24	12.04	11.80	23.60	107	0.0188	0.0425	0.4437
	45	0.24	11.36	11.12	22.24	106	0.0187	0.0412	0.4528
	60	2.58	13.14	10.56	21.12	105	0.0185	0.0402	0.4603
	90	0.36	12.09	11.73	23.46	104	0.0183	0.0423	0.4325
	30	0.36	13.57	13.21	26.42	105	0.0185	0.0449	0.4115
	45	0.37	12.95	12.58	25.16	105	0.0185	0.0439	0.4217
	60	2.58	14.75	12.17	24.34	105	0.0185	0.0431	0.4287
	90	0.73	10.06	9.33	18.66	103	0.0181	0.0378	0.4803
	30	0.72	10.55	9.83	19.66	102	0.0180	0.0388	0.4634
	45	0.30	8.89	8.59	17.18	104	0.0183	0.0362	0.5054
	60	2.58	11.65	9.07	18.14	103	0.0181	0.0372	0.4872

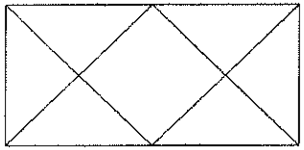
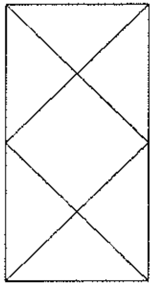
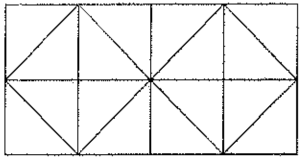
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก - 2 : แสดงค่าความดันตกคร่อมที่วัดได้จากการทดลอง และค่าที่คำนวณได้ สำหรับช่องเปิดรูปแบบต่างๆ (ต่อ)

Complex Opening	Angle (Degree)	Read from Microtector				Read from Manometer	Q_a (m^3/s)	Q_t (m^3/s)	CD
		Start pt. (mm. H_2O)	Stop pt. (mm. H_2O)	Different (mm. H_2O)	Head (mm. H_2O)	Head (mm. H_2O)			
	90	0.33	9.22	8.89	17.78	104	0.0183	0.0369	0.4968
	30	0.33	9.93	9.60	19.20	102	0.0180	0.0383	0.4689
	45	0.73	10.06	9.33	18.66	103	0.0181	0.0378	0.4803
	60	2.59	11.49	8.90	17.80	103	0.0181	0.0369	0.4918
	90	0.53	10.47	9.94	19.88	100	0.0176	0.0390	0.4518
	30	0.54	10.91	10.37	20.74	99	0.0174	0.0398	0.4379
	45	0.53	10.75	10.22	20.44	100	0.0176	0.0395	0.4456
	60	2.58	12.60	10.02	20.04	100	0.0176	0.0391	0.4500
	90	0.33	10.39	10.06	20.12	100	0.0176	0.0392	0.4491
	30	0.32	10.62	10.30	20.60	101	0.0178	0.0397	0.4483
	45	0.31	9.79	9.48	18.96	103	0.0181	0.0381	0.4765
	60	2.58	12.40	9.82	19.64	101	0.0178	0.0387	0.4591

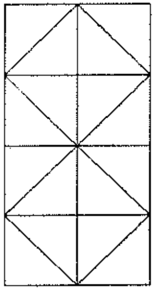
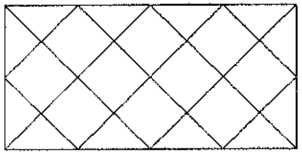
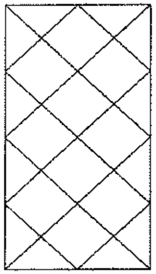
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก - 2 : แสดงค่าความดันตกคร่อมที่วัดได้จากการทดลอง และค่าที่คำนวณได้ สำหรับช่องเปิดรูปแบบต่างๆ (ต่อ)

Complex Opening	Angle (Degree)	Read from Microtector				Read from Manometer	Q_a (m^3/s)	Q_t (m^3/s)	CD
		Start pt. (mm. H_2O)	Stop pt. (mm. H_2O)	Different (mm. H_2O)	Head (mm. H_2O)	Head (mm. H_2O)			
	90	0.51	10.20	9.69	19.38	102	0.0180	0.0385	0.4667
	30	0.39	11.06	10.67	21.34	101	0.0178	0.0404	0.4404
	45	0.42	10.40	9.98	19.96	100	0.0176	0.0391	0.4509
	60	2.58	12.30	9.72	19.44	101	0.0178	0.0385	0.4615
	90	0.28	10.09	9.81	19.62	101	0.0178	0.0387	0.4593
	30	0.33	11.12	10.79	21.58	99	0.0174	0.0406	0.4293
	45	0.51	10.20	9.69	19.38	102	0.0180	0.0385	0.4667
	60	2.58	12.24	9.66	19.32	101	0.0178	0.0384	0.4629
	90	0.25	13.28	13.03	26.06	96	0.0169	0.0446	0.3788
	30	0.25	13.44	13.19	26.38	96	0.0169	0.0449	0.3765
	45	0.24	13.42	13.18	26.36	96	0.0169	0.0449	0.3767
	60	2.58	15.68	13.10	26.20	96	0.0169	0.0448	0.3778

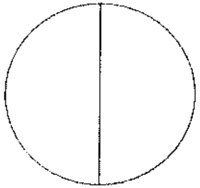
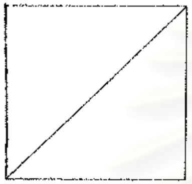
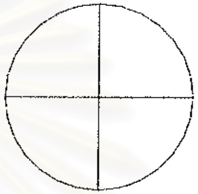
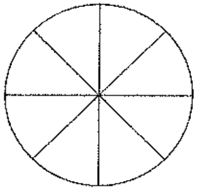
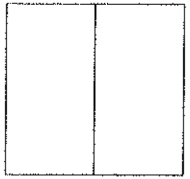
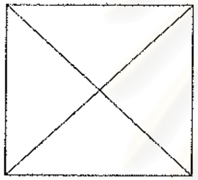
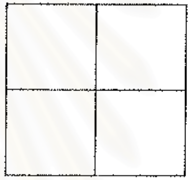
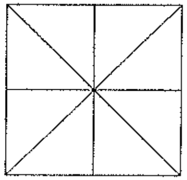
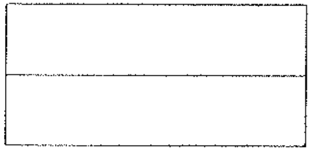
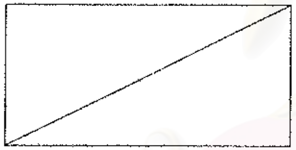
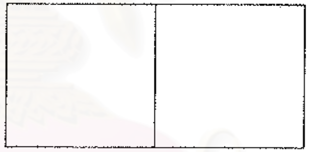
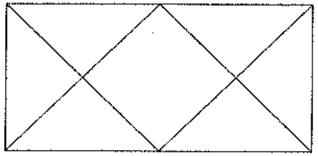
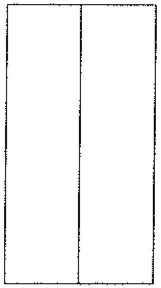
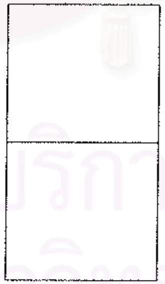
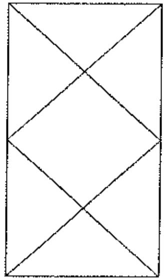
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก - 2 : แสดงค่าความดันตกคร่อมที่วัดได้จากการทดลอง และค่าที่คำนวณได้ สำหรับช่องเปิดรูปแบบต่างๆ (ต่อ)

Complex Opening	Angle (Degree)	Read from Microtector				Read from Manometer	Q_a	Q_t	CD
		Start pt. (mm. H_2O)	Stop pt. (mm. H_2O)	Different (mm. H_2O)	Head (mm. H_2O)	Head (mm. H_2O)	(m^3/s)	(m^3/s)	
	90	0.25	13.44	13.19	26.38	96	0.0169	0.0449	0.3765
	30	0.25	13.08	12.83	25.66	97	0.0171	0.0443	0.3857
	45	0.25	12.03	11.78	23.56	98	0.0173	0.0424	0.4067
	60	2.58	14.73	12.15	24.30	98	0.0173	0.0431	0.4005
	90	0.44	14.09	13.65	27.30	94	0.0166	0.0457	0.3624
	30	0.35	15.14	14.79	29.58	92	0.0162	0.0476	0.3408
	45	0.47	14.37	13.90	27.80	93	0.0164	0.0461	0.3553
	60	2.59	16.42	13.83	27.66	94	0.0166	0.0460	0.3600
	90	0.35	14.03	13.68	27.36	92	0.0162	0.0457	0.3543
	30	0.19	14.98	14.79	29.58	90	0.0159	0.0476	0.3333
	45	0.18	13.68	13.50	27.00	93	0.0164	0.0454	0.3605
	60	2.59	16.00	13.41	26.82	92	0.0162	0.0453	0.3579

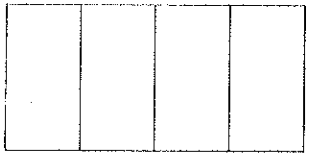
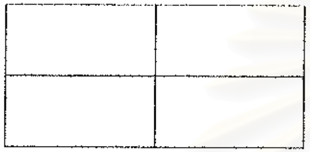
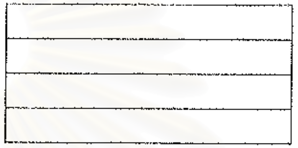
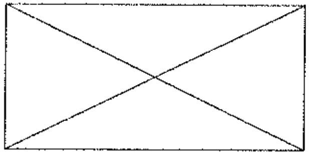
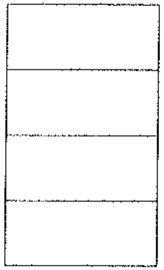
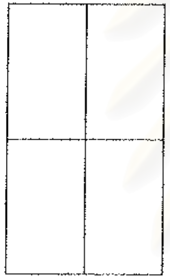
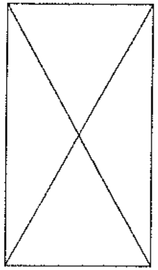
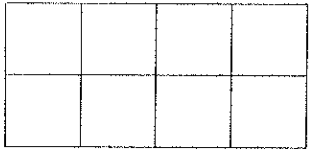
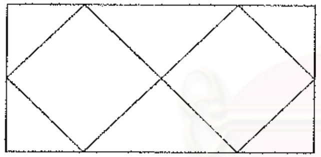
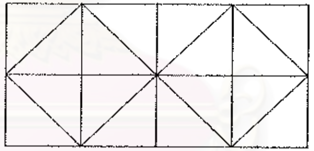
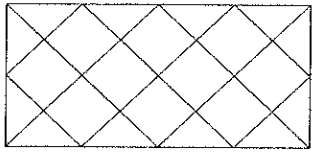
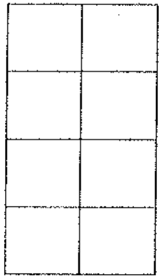
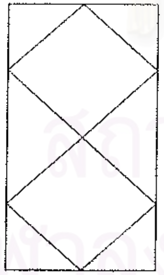
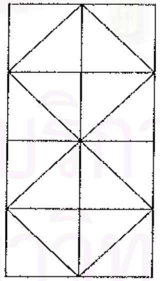
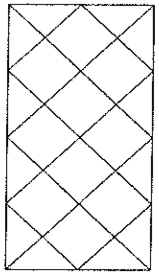
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก - 3 : แสดงค่าตัวประกอบรูปร่างที่คำนวณได้ สำหรับช่องเปิดรูปแบบต่างๆ

รูปแบบหน้าต่าง	SF	รูปแบบหน้าต่าง	SF	รูปแบบหน้าต่าง	SF	รูปแบบหน้าต่าง	SF
	1.1573		1.362		1.1366		1.2538
	1.1968		1.362		1.1284		1.3621
	1.464		1.5206		1.1305		1.347
	1.464		1.5206		1.1305		1.347

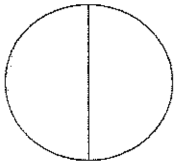
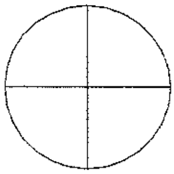
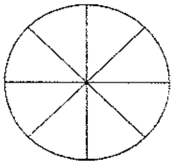
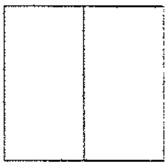
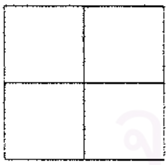
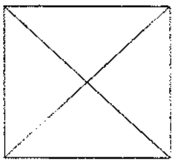
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก - 3 : แสดงค่าตัวประกอบรูปร่างที่คำนวณได้ สำหรับช่องเปิดรูปแบบต่างๆ (ต่อ)

รูปแบบหน้าต่าง	SF	รูปแบบหน้าต่าง	SF	รูปแบบหน้าต่าง	SF	รูปแบบหน้าต่าง	SF
	1.1748		1.2232		1.8833		1.5389
	1.1748		1.2232		1.8833		1.5389
	1.1304		1.32		1.3686		1.2712
	1.1304		1.32		1.3686		1.2712

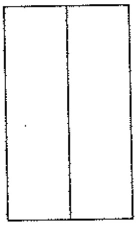
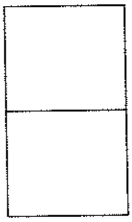
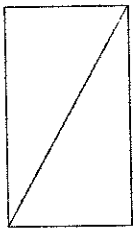
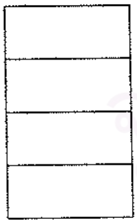
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก - 4 : แสดงค่าตัวแปรต่างๆ และค่าความคลาดเคลื่อนที่คำนวณได้จากสมการ

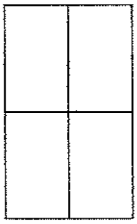
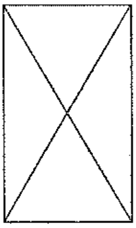
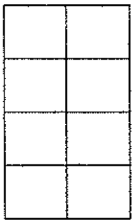
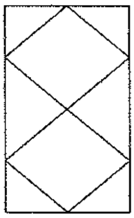
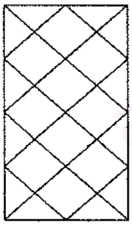
Complex Opening	Number of Windows	Shape Factor	Angle (Degree)	CD from Equation	CD from Test	% Error
	2	1.1573	0	0.0000	0.0000	0.0000
	2	1.1573	30	0.5160	0.5104	1.0981
	2	1.1573	45	0.5268	0.5299	-0.5893
	2	1.1573	60	0.5389	0.5342	0.8716
	2	1.1573	90	0.5497	0.5393	1.9351
	4	1.1366	0	0.0000	0.0000	0.0000
	4	1.1366	30	0.4932	0.4853	1.6213
	4	1.1366	45	0.5035	0.4985	0.9958
	4	1.1366	60	0.5150	0.5109	0.8042
	4	1.1366	90	0.5254	0.5210	0.8458
	8	1.2538	0	0.0000	0.0000	0.0000
	8	1.2538	30	0.4440	0.4437	0.0645
	8	1.2538	45	0.4533	0.4528	0.1006
	8	1.2538	60	0.4636	0.4603	0.7275
	8	1.2538	90	0.4730	0.4663	1.4389
	2	1.1968	0	0.0000	0.0000	0.0000
	2	1.1968	30	0.5146	0.5097	0.9697
	2	1.1968	45	0.5254	0.5220	0.6488
	2	1.1968	60	0.5374	0.5281	1.7674
	2	1.1968	90	0.5483	0.5382	1.8738
	4	1.1284	0	0.0000	0.0000	0.0000
	4	1.1284	30	0.4936	0.5085	-2.9232
	4	1.1284	45	0.5039	0.5217	-3.4039
	4	1.1284	60	0.5155	0.5275	-2.2755
	4	1.1284	90	0.5259	0.5362	-1.9200
	4	1.3620	0	0.0000	0.0000	0.0000
	4	1.3620	30	0.4802	0.4750	1.0935
	4	1.3620	45	0.4903	0.4805	2.0273
	4	1.3620	60	0.5015	0.4935	1.6221
	4	1.3620	90	0.5116	0.5025	1.8171

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก - 4 : แสดงค่าตัวแปรต่างๆ และค่าความคลาดเคลื่อนที่คำนวณได้จากสมการ (ต่อ)

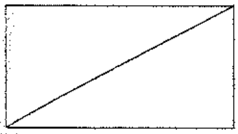
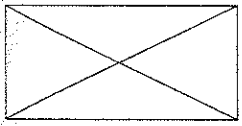
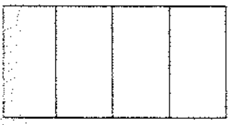
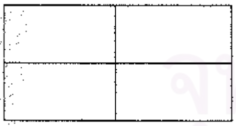
Complex Opening	Number of Windows	Shape Factor	Angle (Degree)	CD from Equation	CD from Test	% Error
	2	1.4640	0	0.0000	0.0000	0.0000
	2	1.4640	30	0.5126	0.5204	-1.5020
	2	1.4640	45	0.5535	0.5434	1.8514
	2	1.4640	60	0.5373	0.5397	-0.4440
	2	1.4640	90	0.5258	0.5322	-1.2059
	2	1.1305	0	0.0000	0.0000	0.0000
	2	1.1305	30	0.5213	0.5252	-0.7381
	2	1.1305	45	0.5629	0.5550	1.4229
	2	1.1305	60	0.5465	0.5502	-0.6788
	2	1.1305	90	0.5347	0.5406	-1.0827
	2	1.5206	0	0.0000	0.0000	0.0000
	2	1.5206	30	0.5111	0.5148	-0.7240
	2	1.5206	45	0.5518	0.5386	2.4561
	2	1.5206	60	0.5357	0.5258	1.8867
	2	1.5206	90	0.5242	0.5241	0.0253
	4	1.8833	0	0.0000	0.0000	0.0000
	4	1.8833	30	0.4654	0.4668	-0.3071
	4	1.8833	45	0.5025	0.5192	-3.2208
	4	1.8833	60	0.4878	0.4963	-1.7108
	4	1.8833	90	0.4773	0.4838	-1.3333
	4	1.1748	0	0.0000	0.0000	0.0000
	4	1.1748	30	0.4987	0.5080	-1.8293
	4	1.1748	45	0.5385	0.5502	-2.1307
	4	1.1748	60	0.5228	0.5328	-1.8847
	4	1.1748	90	0.5115	0.5164	-0.9395

ตาราง ก - 4 : แสดงค่าตัวแปรต่างๆ และค่าความคลาดเคลื่อนที่คำนวณได้จากสมการ (ต่อ)

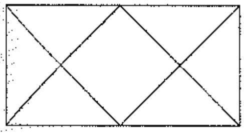
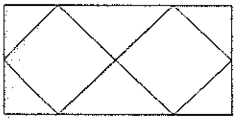
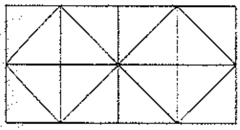
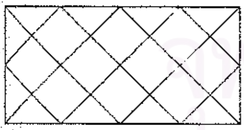
Complex Opening	Number of Windows	Shape Factor	Angle (Degree)	CD from Equation	CD from Test	% Error
	4	1.2232	0	0.0000	0.0000	0.0000
	4	1.2232	30	0.4965	0.4850	2.3636
	4	1.2232	45	0.5361	0.5420	-1.0969
	4	1.2232	60	0.5204	0.5213	-0.1714
	4	1.2232	90	0.5092	0.5045	0.9409
	4	1.5389	0	0.0000	0.0000	0.0000
	4	1.5389	30	0.4817	0.4735	1.7262
	4	1.5389	45	0.5201	0.5319	-2.2213
	4	1.5389	60	0.5049	0.5128	-1.5400
	4	1.5389	90	0.4941	0.4963	-0.4481
	8	1.1304	0	0.0000	0.0000	0.0000
	8	1.1304	30	0.4645	0.4634	0.2421
	8	1.1304	45	0.5016	0.5054	-0.7587
	8	1.1304	60	0.4869	0.4872	-0.0566
	8	1.1304	90	0.4765	0.4803	-0.7947
	8	1.3200	0	0.0000	0.0000	0.0000
	8	1.3200	30	0.4494	0.4483	0.2450
	8	1.3200	45	0.4852	0.4765	1.8334
	8	1.3200	60	0.4711	0.4591	2.6076
	8	1.3200	90	0.4610	0.4491	2.6431
	22	1.2712	0	0.0000	0.0000	0.0000
	22	1.2712	30	0.3437	0.3334	3.0877
	22	1.2712	45	0.3711	0.3605	2.9410
	22	1.2712	60	0.3603	0.3579	0.6620
	22	1.2712	90	0.3525	0.3543	-0.4956

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

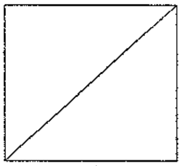
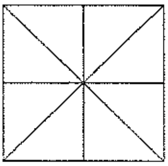
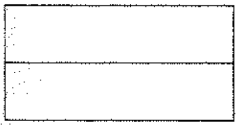
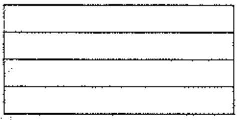
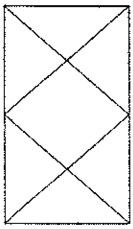
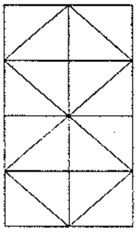
ตาราง ก - 4 : แสดงค่าตัวแปรต่างๆ และค่าความคลาดเคลื่อนที่คำนวณได้จากสมการ (ต่อ)

Complex Opening	Number of Windows	Shape Factor	Angle (Degree)	CD from Equation	CD from Test	% Error
	2	1.1305	0	0.0000	0.0000	0.0000
	2	1.1305	30	0.5169	0.5342	-3.2337
	2	1.1305	45	0.5277	0.5406	-2.3830
	2	1.1305	60	0.5398	0.5576	-3.1890
	2	1.1305	90	0.5507	0.5725	-3.8049
	2	1.5206	0	0.0000	0.0000	0.0000
	2	1.5206	30	0.5033	0.5302	-5.0724
	2	1.5206	45	0.5138	0.5355	-4.0512
	2	1.5206	60	0.5256	0.5410	-2.8489
	2	1.5206	90	0.5362	0.5452	-1.6509
	4	1.5389	0	0.0000	0.0000	0.0000
	4	1.5389	30	0.4700	0.4692	0.1670
	4	1.5389	45	0.4798	0.4814	-0.3144
	4	1.5389	60	0.4908	0.4926	-0.3564
	4	1.5389	90	0.5008	0.5082	-1.4651
	4	1.1748	0	0.0000	0.0000	0.0000
	4	1.1748	30	0.4910	0.4874	0.7357
	4	1.1748	45	0.5012	0.4974	0.7713
	4	1.1748	60	0.5127	0.5086	0.8120
	4	1.1748	90	0.5231	0.5122	2.1246
	4	1.2232	0	0.0000	0.0000	0.0000
	4	1.2232	30	0.4882	0.4723	3.3697
	4	1.2232	45	0.4984	0.4889	1.9447
	4	1.2232	60	0.5098	0.4949	3.0180
	4	1.2232	90	0.5201	0.5136	1.2714

ตาราง ก - 4 : แสดงค่าตัวแปรต่างๆ และค่าความคลาดเคลื่อนที่คำนวณได้จากสมการ (ต่อ)

Complex Opening	Number of Windows	Shape Factor	Angle (Degree)	CD from Equation	CD from Test	% Error
	7	1.3470	0	0.0000	0.0000	0.0000
	7	1.3470	30	0.4460	0.4404	1.2604
	7	1.3470	45	0.4553	0.4509	0.9672
	7	1.3470	60	0.4657	0.4615	0.9101
	7	1.3470	90	0.4751	0.4667	1.8005
	8	1.1304	0	0.0000	0.0000	0.0000
	8	1.1304	30	0.4553	0.4689	-2.9072
	8	1.1304	45	0.4648	0.4803	-3.2327
	8	1.1304	60	0.4754	0.4872	-2.4158
	8	1.1304	90	0.4850	0.4968	-2.3693
	8	1.3200	0	0.0000	0.0000	0.0000
	8	1.3200	30	0.4380	0.4379	0.0132
	8	1.3200	45	0.4471	0.4456	0.3370
	8	1.3200	60	0.4574	0.4500	1.6341
	8	1.3200	90	0.4666	0.4518	3.2731
	16	1.3686	0	0.0000	0.0000	0.0000
	16	1.3686	30	0.3633	0.3765	-3.4995
	16	1.3686	45	0.3709	0.3767	-1.5371
	16	1.3686	60	0.3794	0.3778	0.4274
	16	1.3686	90	0.3871	0.3788	2.1846
	22	1.2712	0	0.0000	0.0000	0.0000
	22	1.2712	30	0.3371	0.3408	-1.0984
	22	1.2712	45	0.3441	0.3553	-3.1541
	22	1.2712	60	0.3520	0.3600	-2.2268
	22	1.2712	90	0.3591	0.3624	-0.9133

ตาราง ก - 5 : แสดงผลการทดสอบสมการ

Complex Opening	Number of Windows	Shape Factor	Angle (Degree)	CD from Equation	CD from Test	% Error
	2	1.3620	0	0.0000	0.0000	0.0000
	2	1.3620	30	0.5089	0.4850	4.9273
	2	1.3620	45	0.5195	0.4943	5.0984
	2	1.3620	60	0.5314	0.5149	3.2098
	2	1.3620	90	0.5422	0.5213	4.0010
	8	1.3621	0	0.0000	0.0000	0.0000
	8	1.3621	30	0.4341	0.4115	5.5008
	8	1.3621	45	0.4432	0.4217	5.0983
	8	1.3621	60	0.4534	0.4287	5.7527
	8	1.3621	90	0.4625	0.4325	6.9400
	2	1.4640	0	0.0000	0.0000	0.0000
	2	1.4640	30	0.5053	0.5335	-5.2857
	2	1.4640	45	0.5159	0.5400	-4.4722
	2	1.4640	60	0.5277	0.5509	-4.2152
	2	1.4640	90	0.5383	0.5547	-2.9506
	4	1.8833	0	0.0000	0.0000	0.0000
	4	1.8833	30	0.4501	0.4695	-4.1277
	4	1.8833	45	0.4595	0.4818	-4.6186
	4	1.8833	60	0.4701	0.4870	-3.4750
	4	1.8833	90	0.4796	0.4980	-3.6938
	7	1.3470	0	0.0000	0.0000	0.0000
	7	1.3470	30	0.4575	0.4293	6.5642
	7	1.3470	45	0.4940	0.4667	5.8415
	7	1.3470	60	0.4795	0.4629	3.5953
	7	1.3470	90	0.4693	0.4593	2.1685
	16	1.3686	0	0.0000	0.0000	0.0000
	16	1.3686	30	0.3735	0.3857	-3.1604
	16	1.3686	45	0.4033	0.4067	-0.8369
	16	1.3686	60	0.3915	0.4005	-2.2414
	16	1.3686	90	0.3831	0.3915	-2.1385

ภาคผนวก ข.

แสดงผลในรูปของกราฟ

ประกอบด้วย

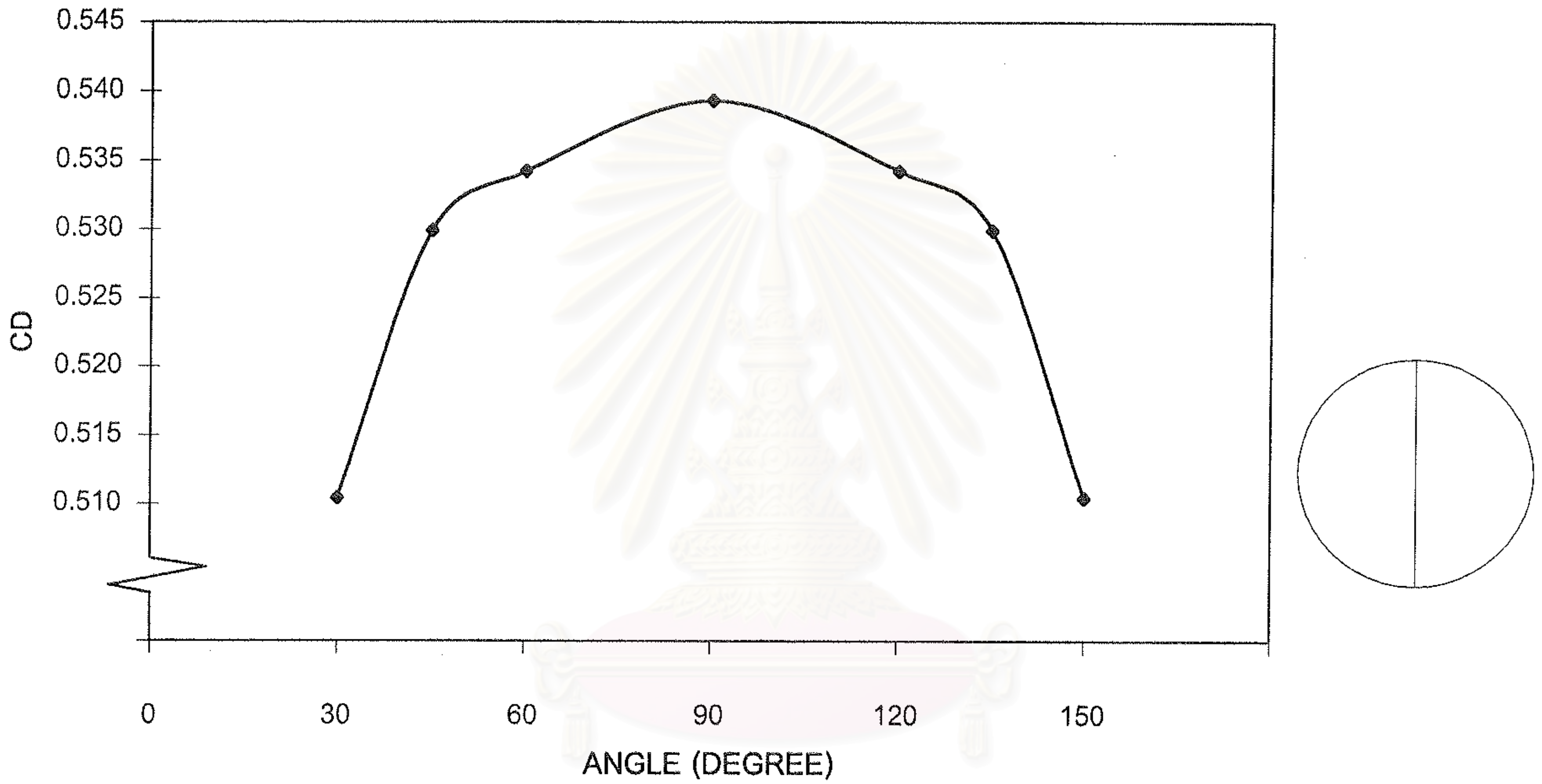
รูปที่ ข - 1 ถึง ข - 32 : กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล ที่ได้จากการทดลอง เทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับช่องเปิด สำหรับการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 5.1

รูปที่ ข - 33 ถึง ข - 40 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลกระทบของค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล เมื่อทำการทดลองโดยเปลี่ยนแปลงจำนวนช่องเปิดภายใน สำหรับช่องเปิดที่มีรูปแบบภายนอกที่มีลักษณะเดียวกัน สำหรับการวิเคราะห์ในหัวข้อ 5.2

รูปที่ ข - 41 ถึง ข - 52 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลกระทบของค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล เมื่อทำการทดลองโดยเปลี่ยนลักษณะการวางตัวของช่องเปิด สำหรับช่องเปิดที่มีรูปแบบภายนอกที่มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยพิจารณาสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่วางตัวในแนวนอน เปรียบเทียบกับสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่วางตัวในแนวตั้ง ซึ่งลักษณะการแบ่งช่องเปิดภายในเหมือนกัน และจำนวนช่องเปิดภายในเท่ากัน สำหรับการวิเคราะห์ในหัวข้อ 5.3

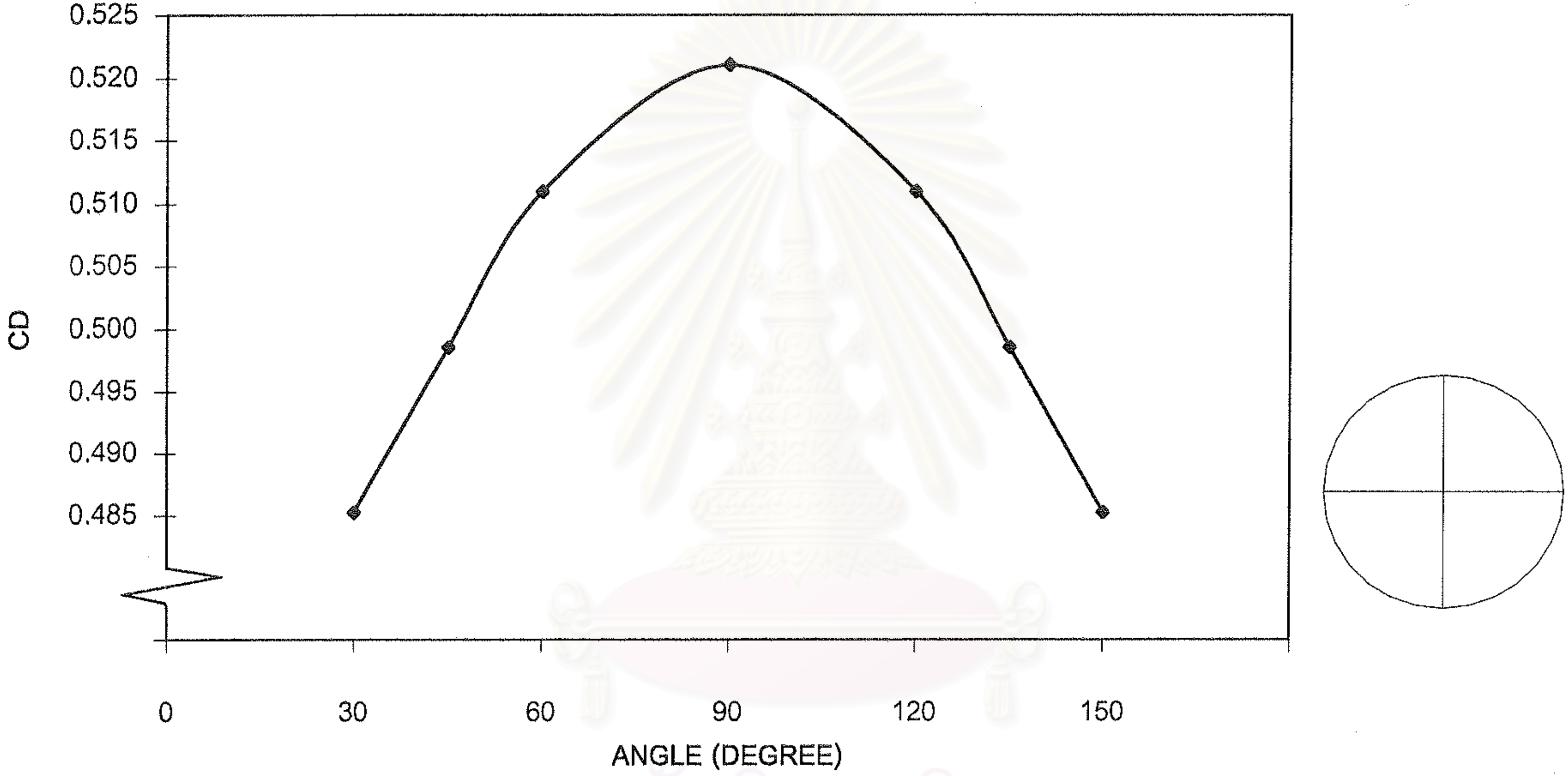
รูปที่ ข - 53 ถึง ข - 57 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลกระทบของค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล เมื่อทำการทดลองโดยเปลี่ยนลักษณะรูปแบบลักษณะภายนอกของช่องเปิด สำหรับช่องเปิดที่มีรูปแบบภายนอกที่มีลักษณะเป็นรูปวงกลม เปรียบเทียบกับสี่เหลี่ยมจัตุรัสตั้ง ซึ่งมีลักษณะการแบ่งช่องเปิดภายในเหมือนกัน และมีจำนวนช่องเปิดภายในเท่ากัน สำหรับการวิเคราะห์ในหัวข้อ 5.4

รูปที่ ข - 58 ถึง ข - 65 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลกระทบของค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหล เมื่อทำการทดลองโดยมีค่าตัวประกอบรูปร่างแตกต่างกัน สำหรับช่องเปิดที่มีรูปแบบภายนอกเหมือนกัน และจำนวนช่องเปิดภายในเท่ากัน สำหรับการวิเคราะห์ในหัวข้อ 5.5



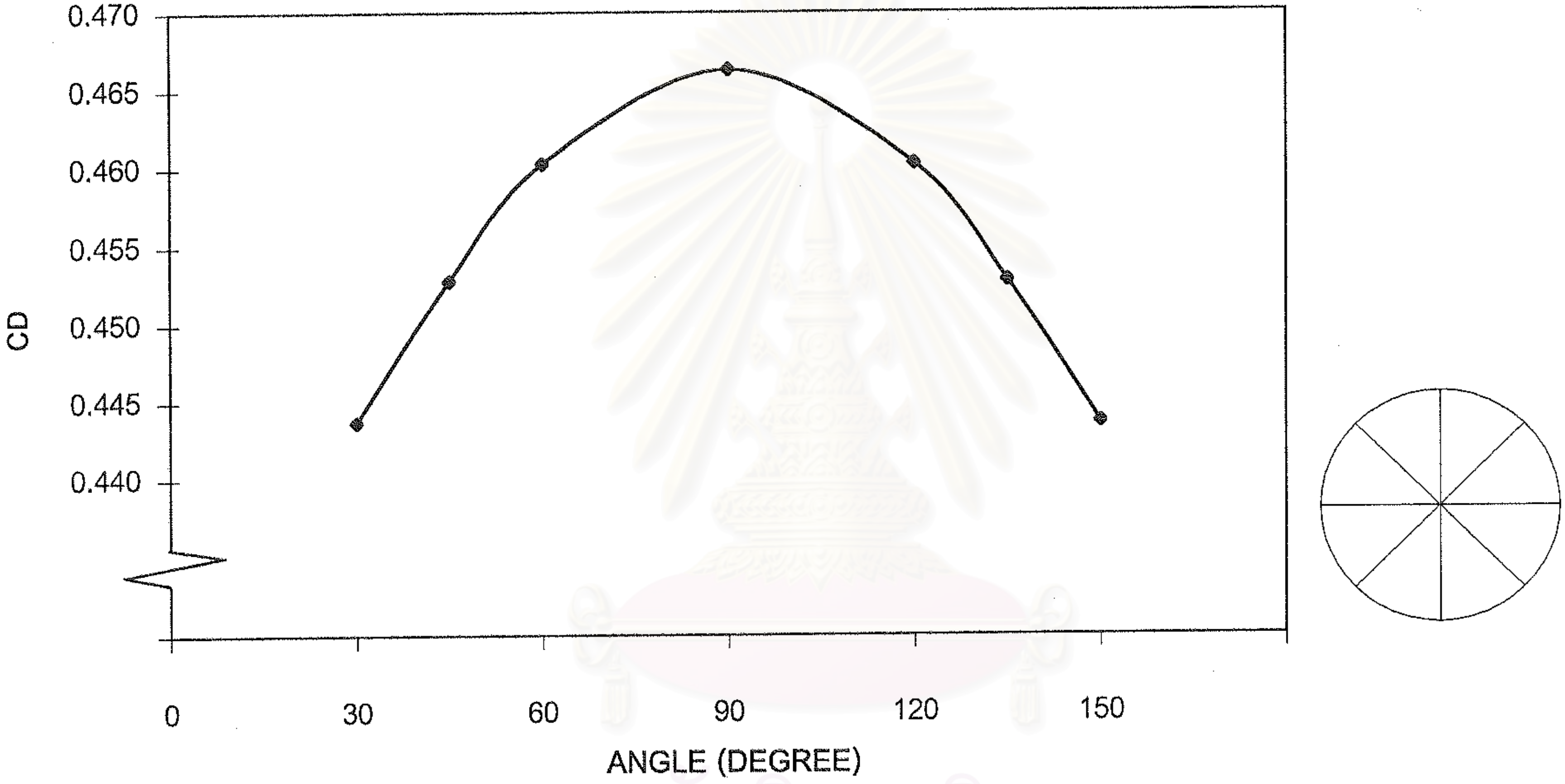
รูปที่ ข - 1 : กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลที่ได้จากการทดลอง เทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นวงกลม โดยมีช่องเปิดภายใน 2 ช่อง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



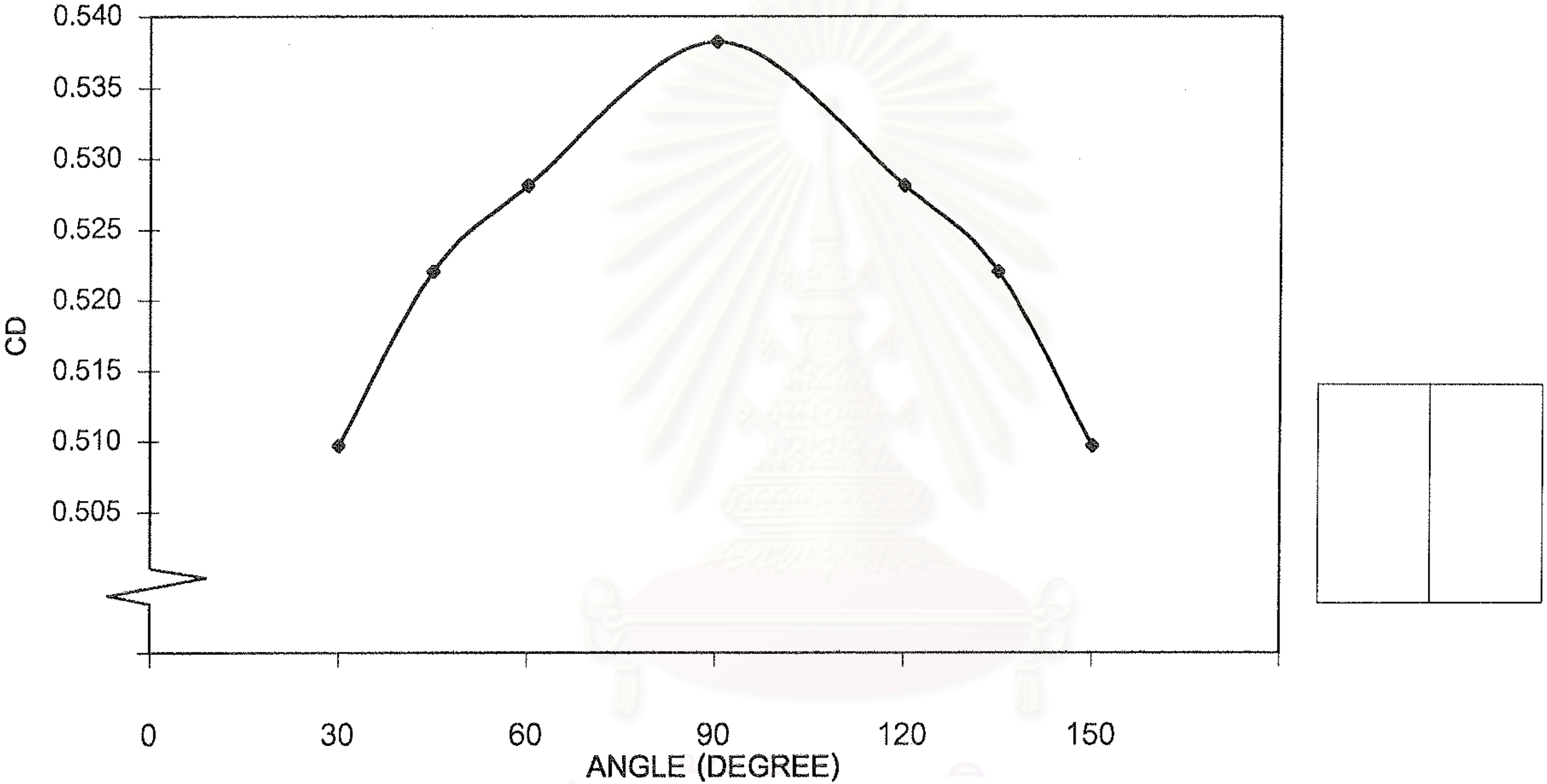
รูปที่ ข - 2 : กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลที่ได้จากการทดลอง เทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นวงกลม โดยมีช่องเปิดภายใน 4 ช่อง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



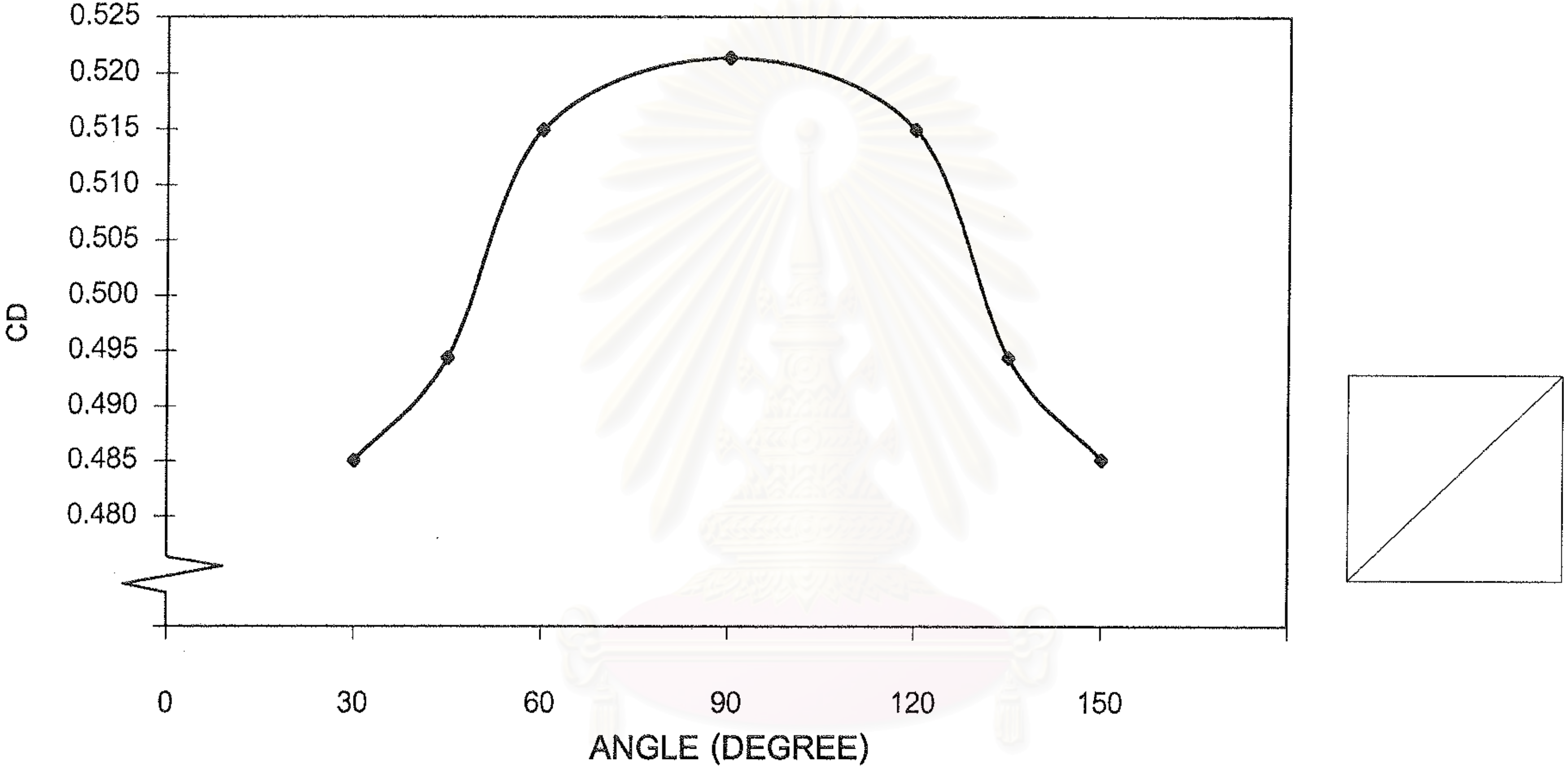
รูปที่ ข - 3 : กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลที่ได้จากการทดลอง เทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นวงกลม โดยมีช่องเปิดภายใน 8 ช่อง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



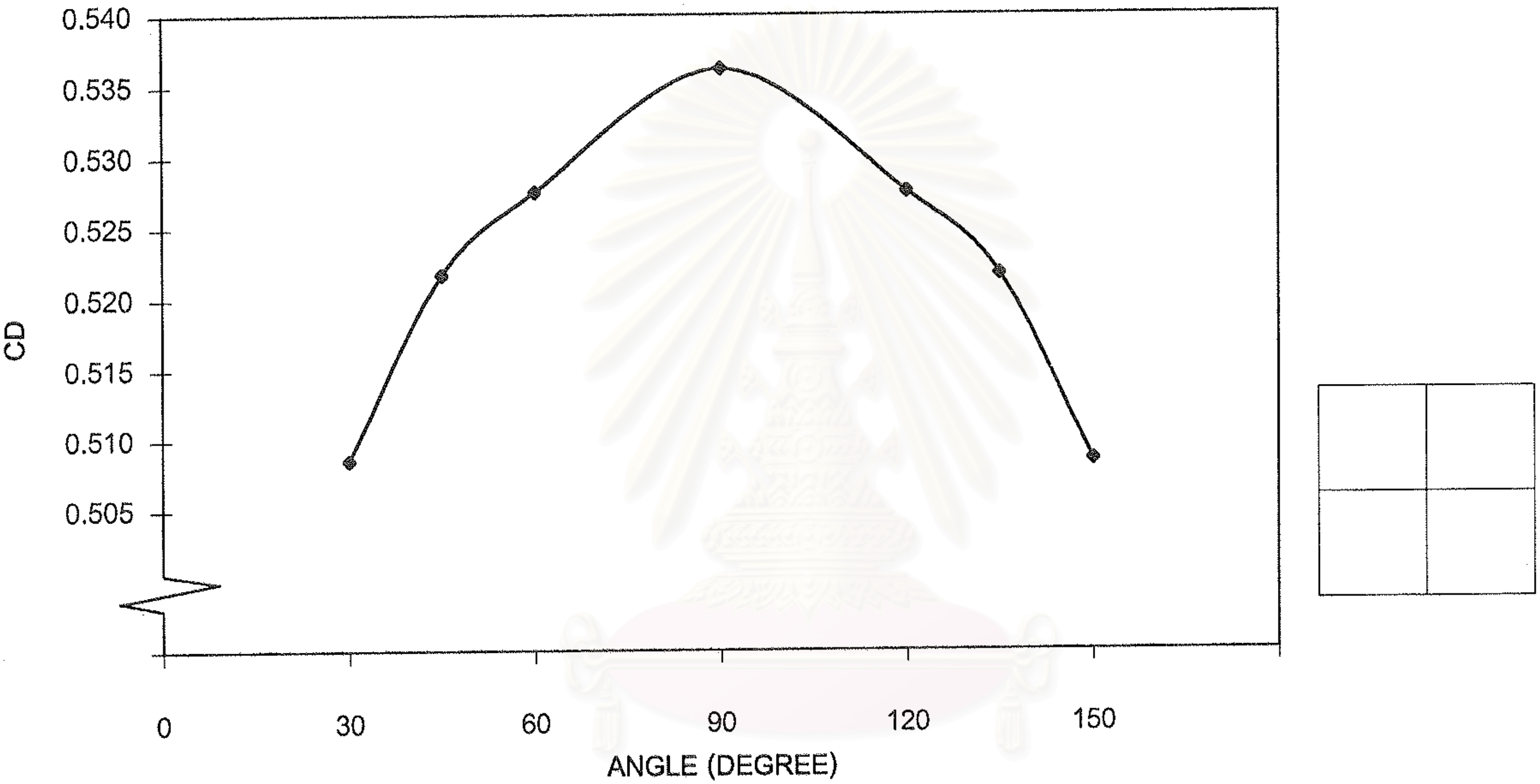
รูปที่ ข - 4 : กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลที่ได้จากการทดลอง เทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีช่องเปิดภายใน 2 ช่อง และมีเส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวดิ่ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



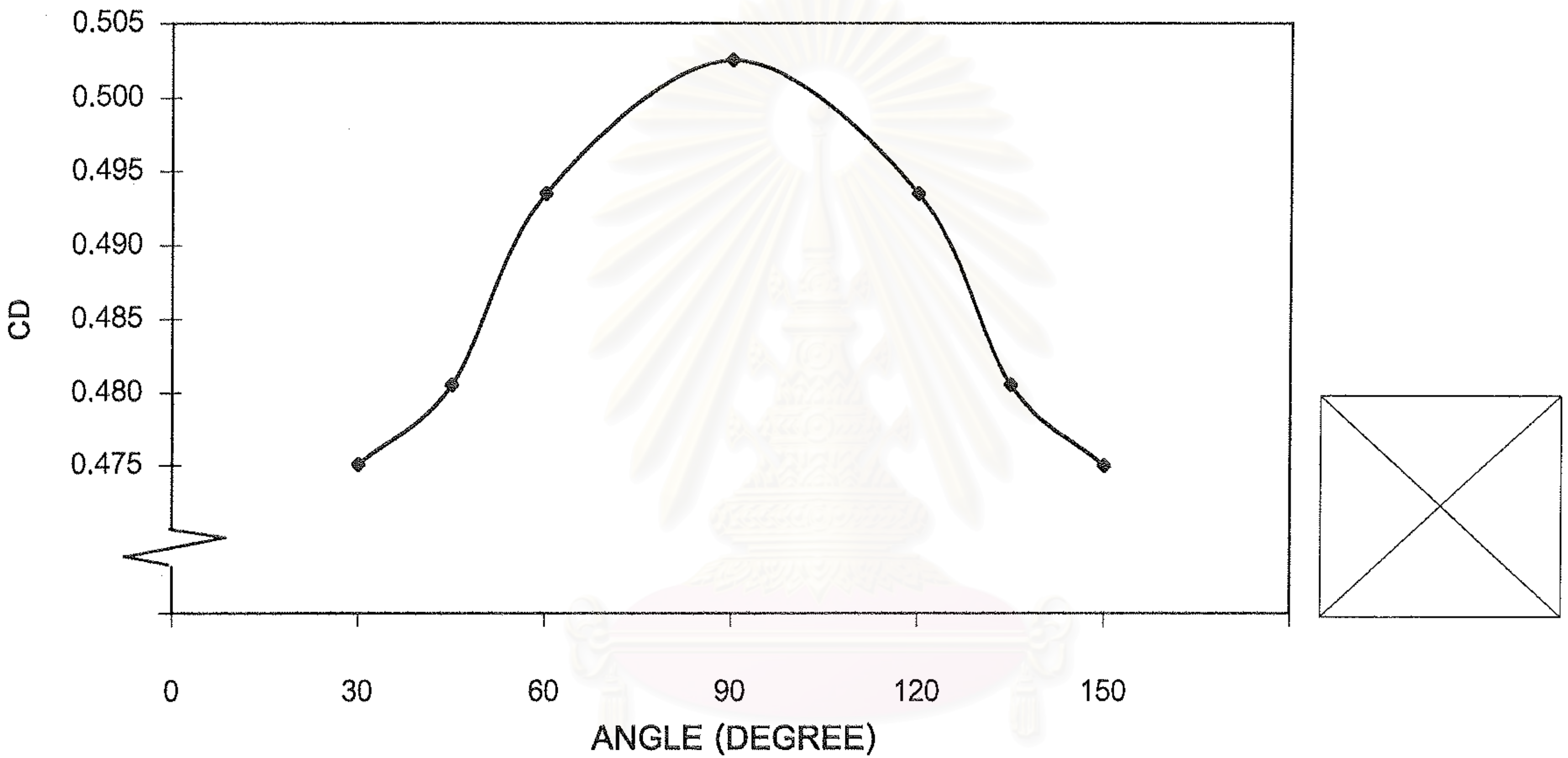
รูปที่ ข - 5 : กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลที่ได้จากการทดลอง เทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีช่องเปิดภายใน 2 ช่อง และเส้นแบ่งภายในเป็นเส้นทแยงมุม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



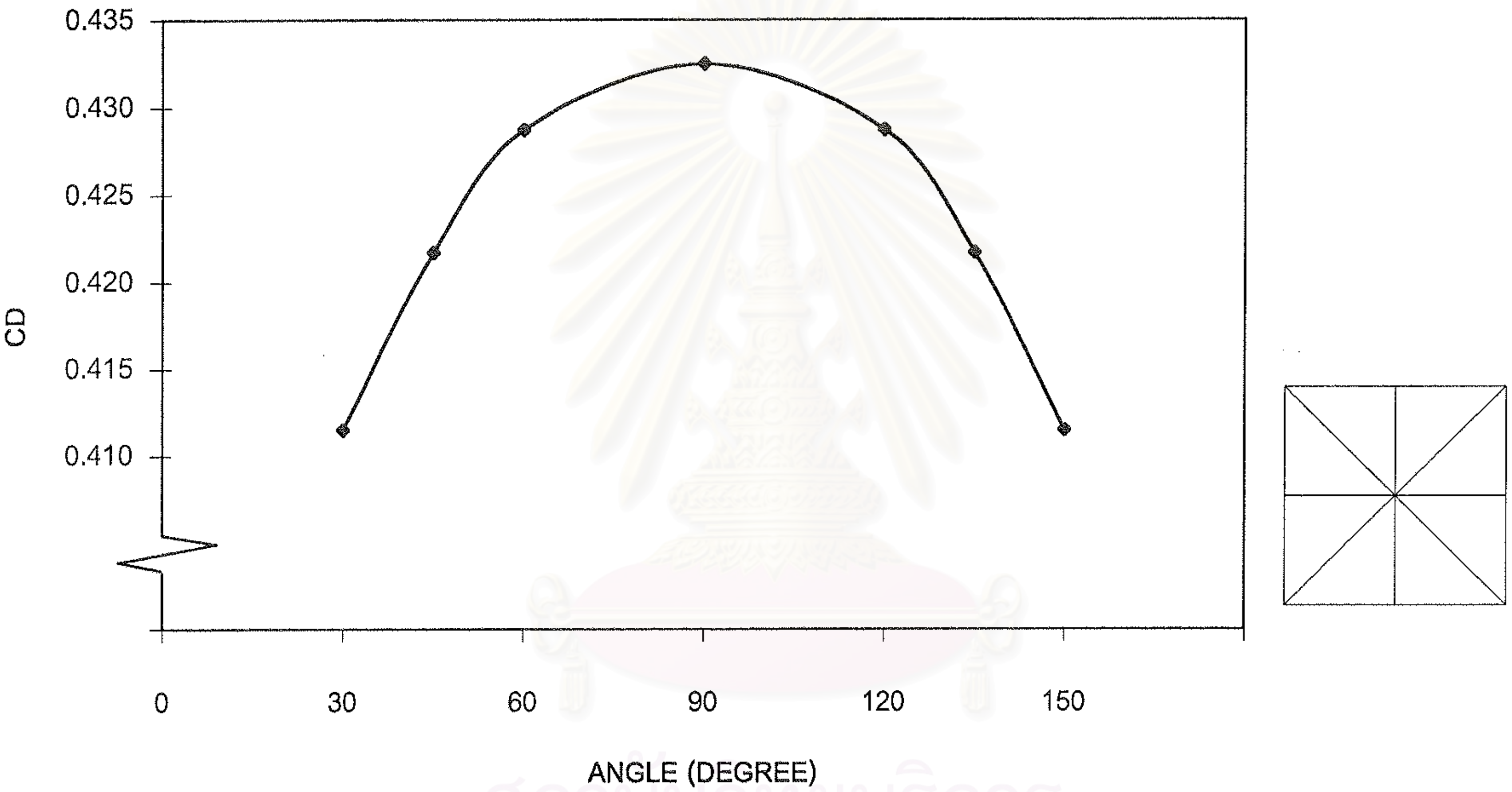
รูปที่ ข - 6 : กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลที่ได้จากการทดลอง เทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีช่องเปิดภายใน 4 ช่อง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



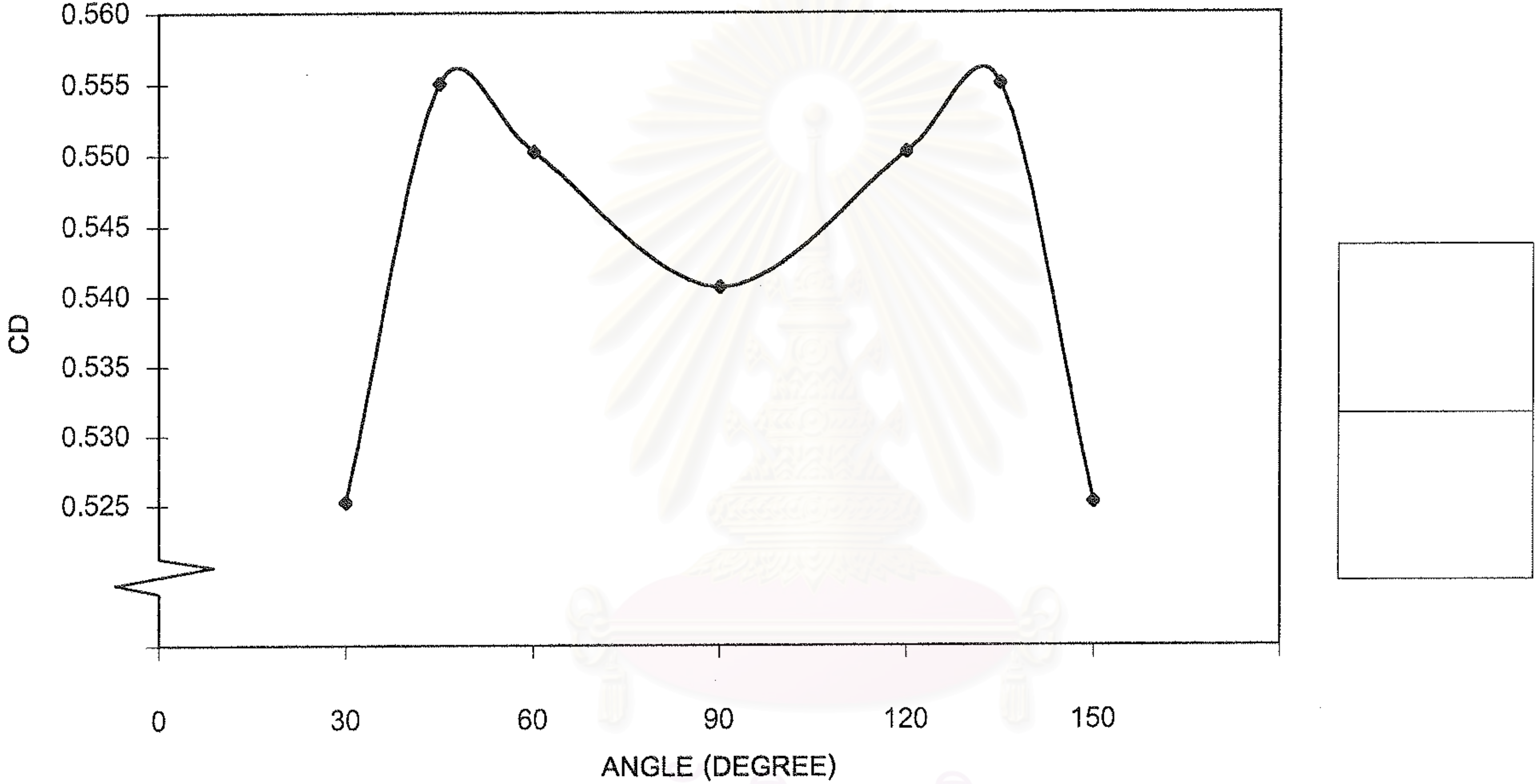
รูปที่ ข - 7 : กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลที่ได้จากการทดลอง เทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีช่องเปิดภายใน 4 ช่อง และเส้นแบ่งภายในเป็นเส้นทแยงมุม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



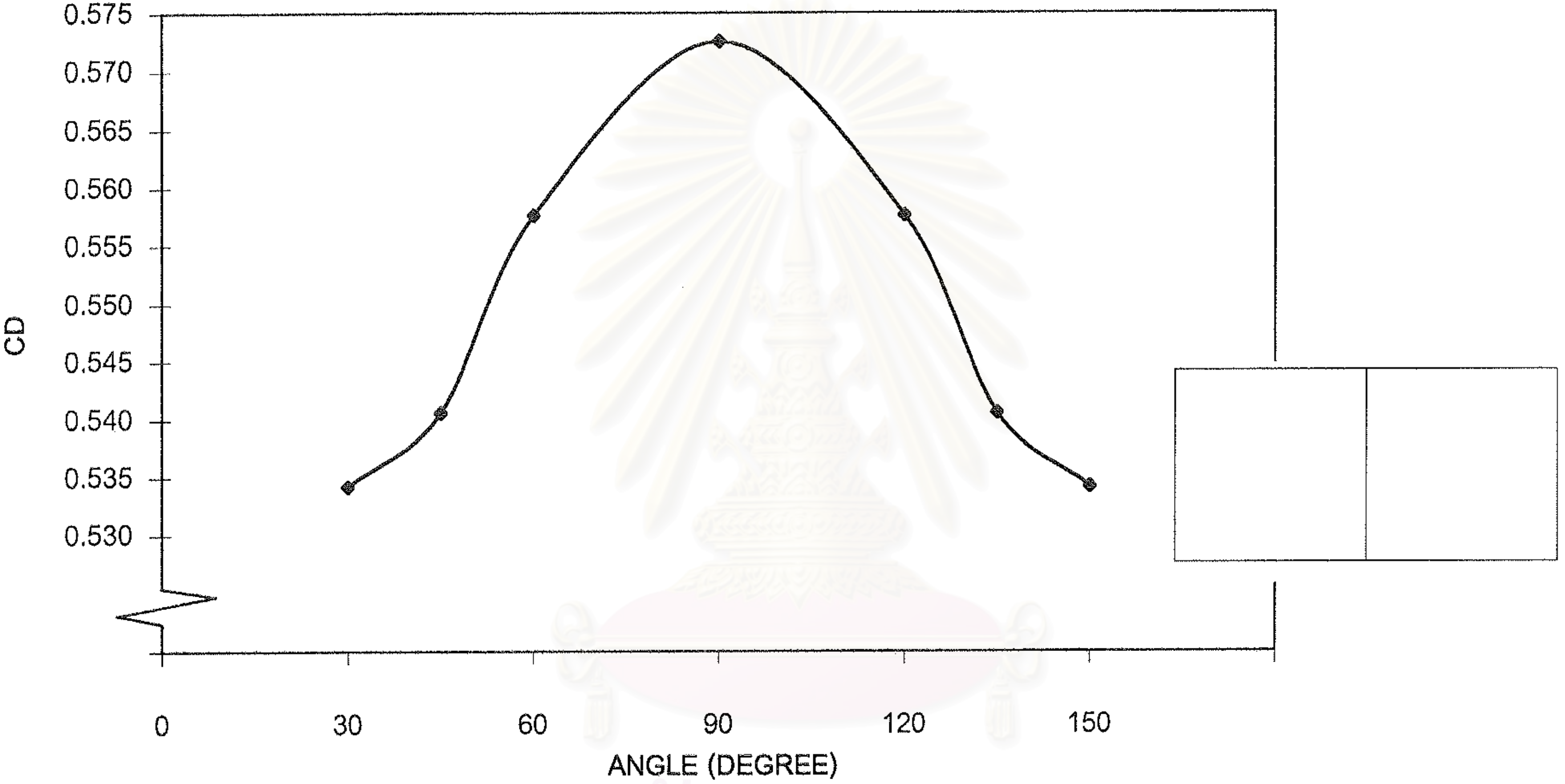
รูปที่ ข - 8 : กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลที่ได้จากการทดลอง เทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีช่องเปิดภายใน 8 ช่อง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

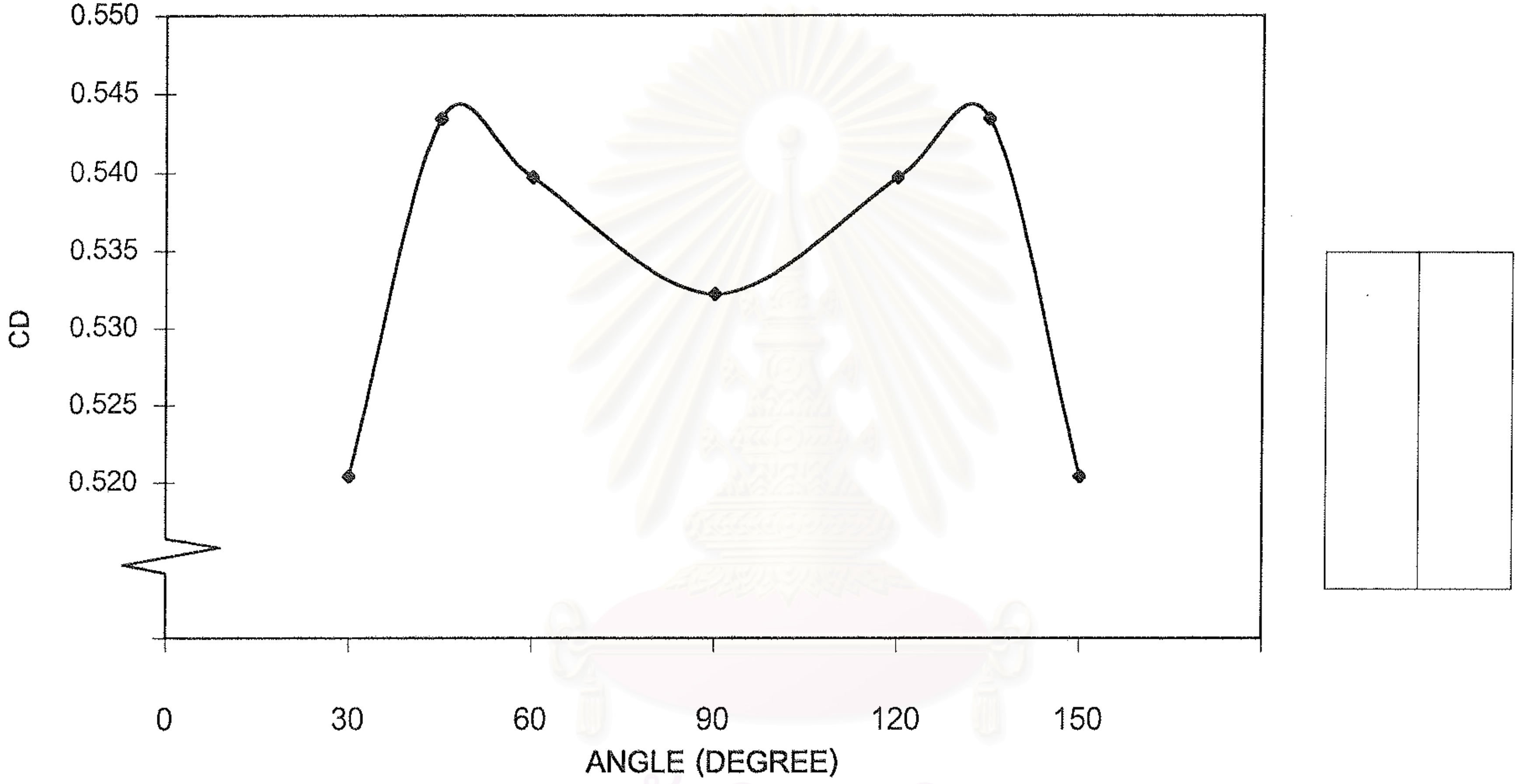


รูปที่ ข - 9 : กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลที่ได้จากการทดลอง เทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 2 ช่อง วางตัวในแนวตั้ง และมีเส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวระดับ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

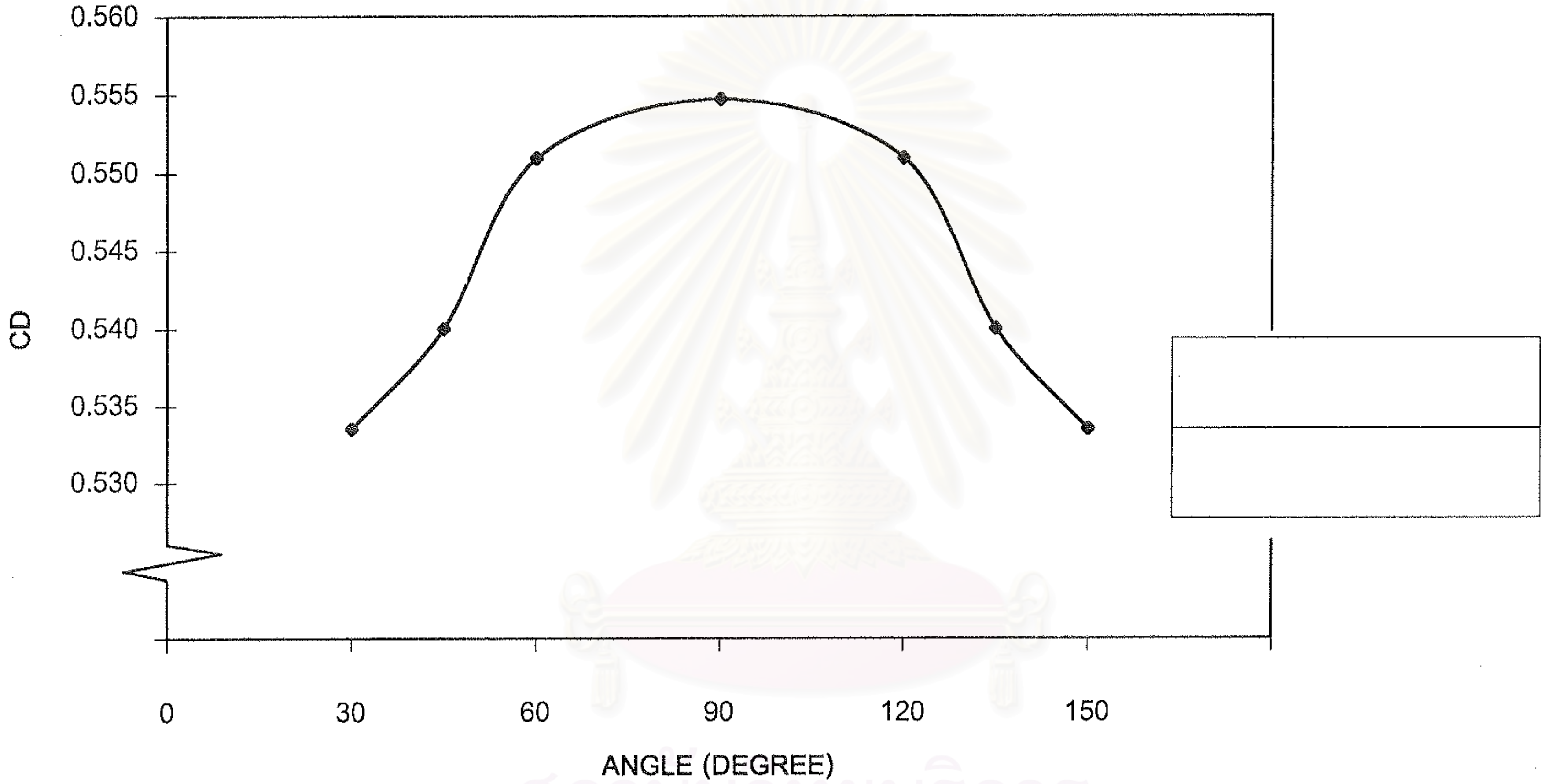


รูปที่ ข - 10 : กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลที่ได้จากการทดลอง เทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 2 ช่อง วางตัวในแนวนอน และมีเส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวดิ่ง



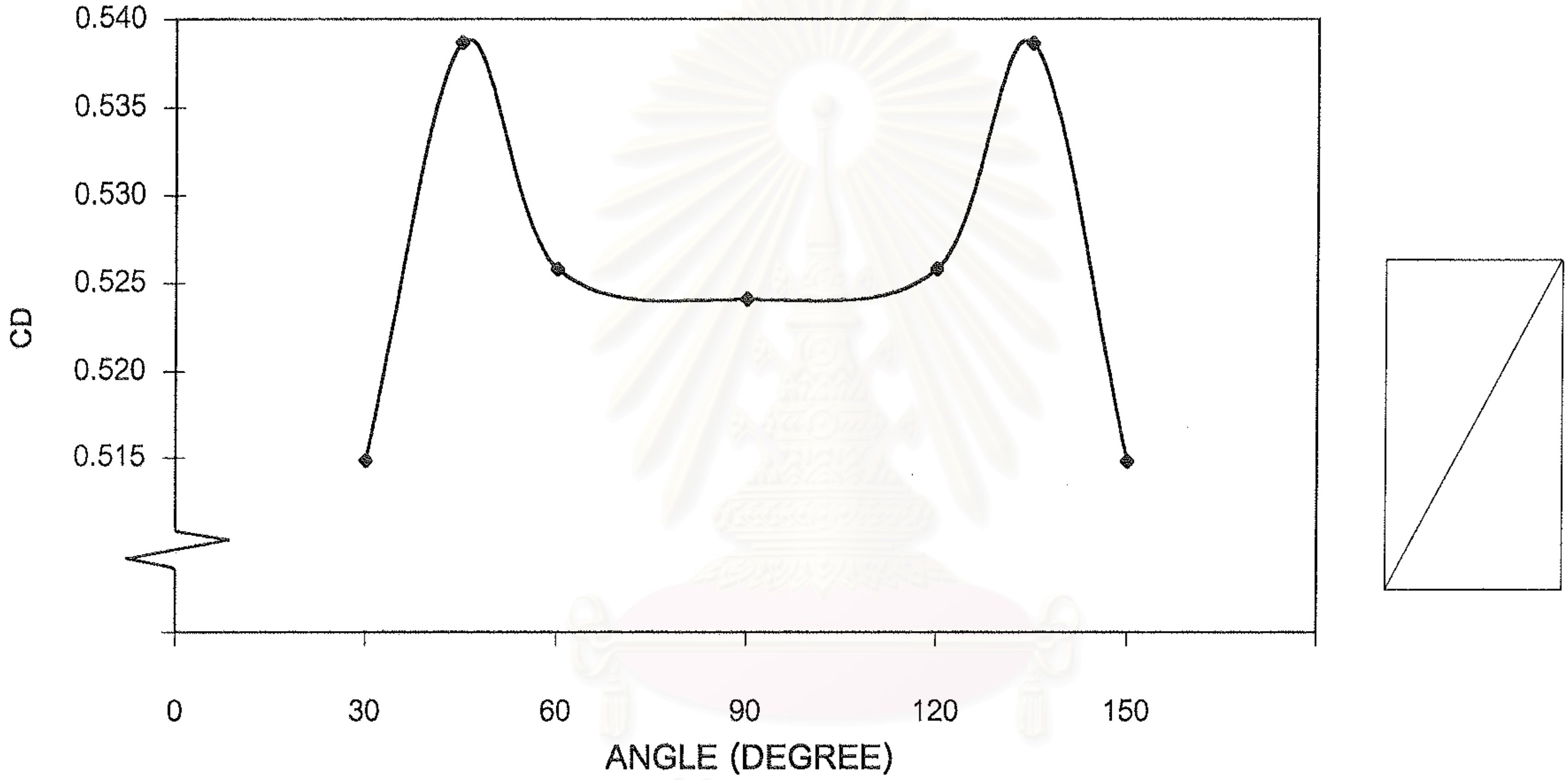
รูปที่ ข - 11 : กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลที่ได้จากการทดลอง เทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ
สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 2 ช่อง วางตัวในแนวตั้ง และมีเส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวดิ่ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



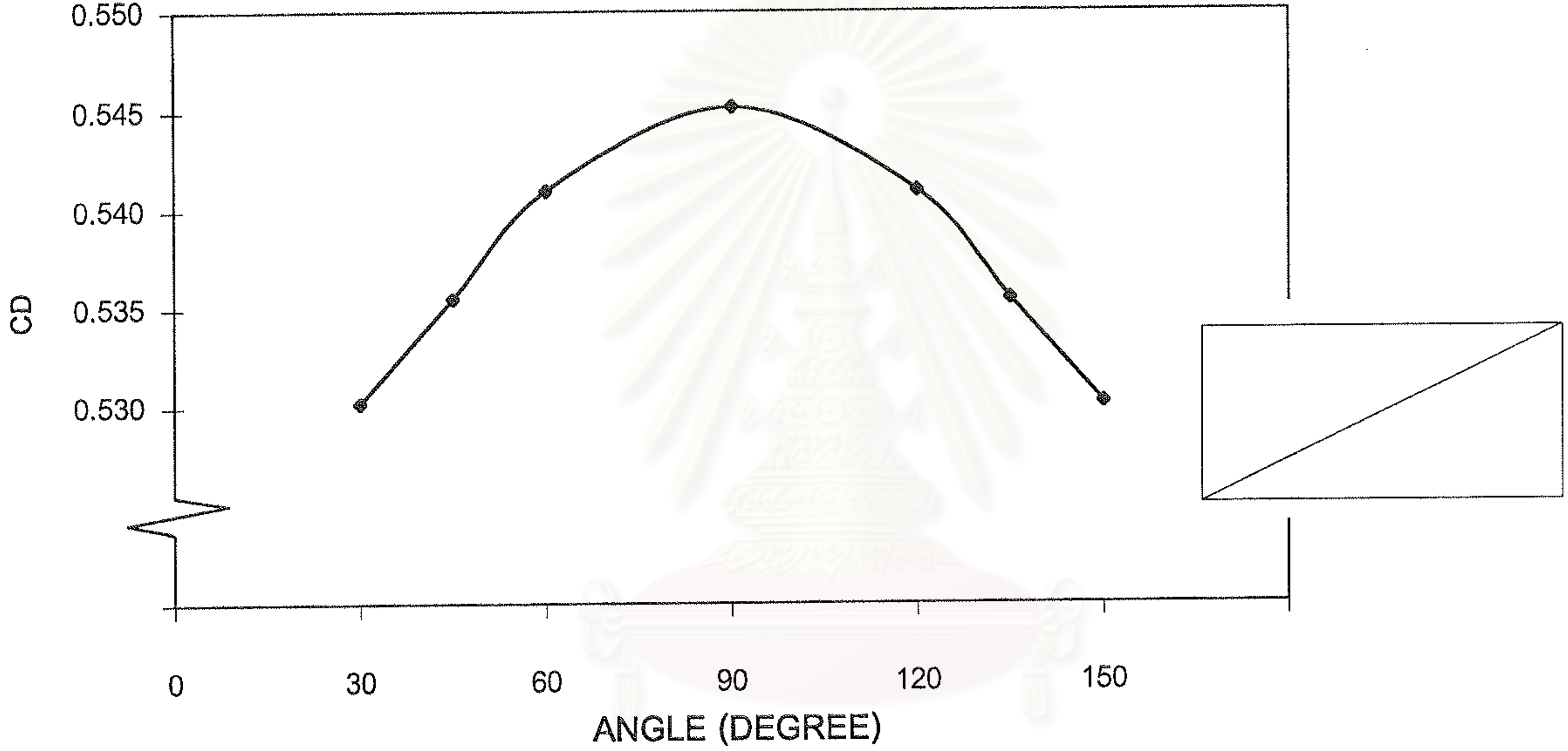
รูปที่ ข - 12 : กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลที่ได้จากการทดลอง เทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ
สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 2 ช่อง วางตัวในแนวนอน และมีเส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวระดับ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



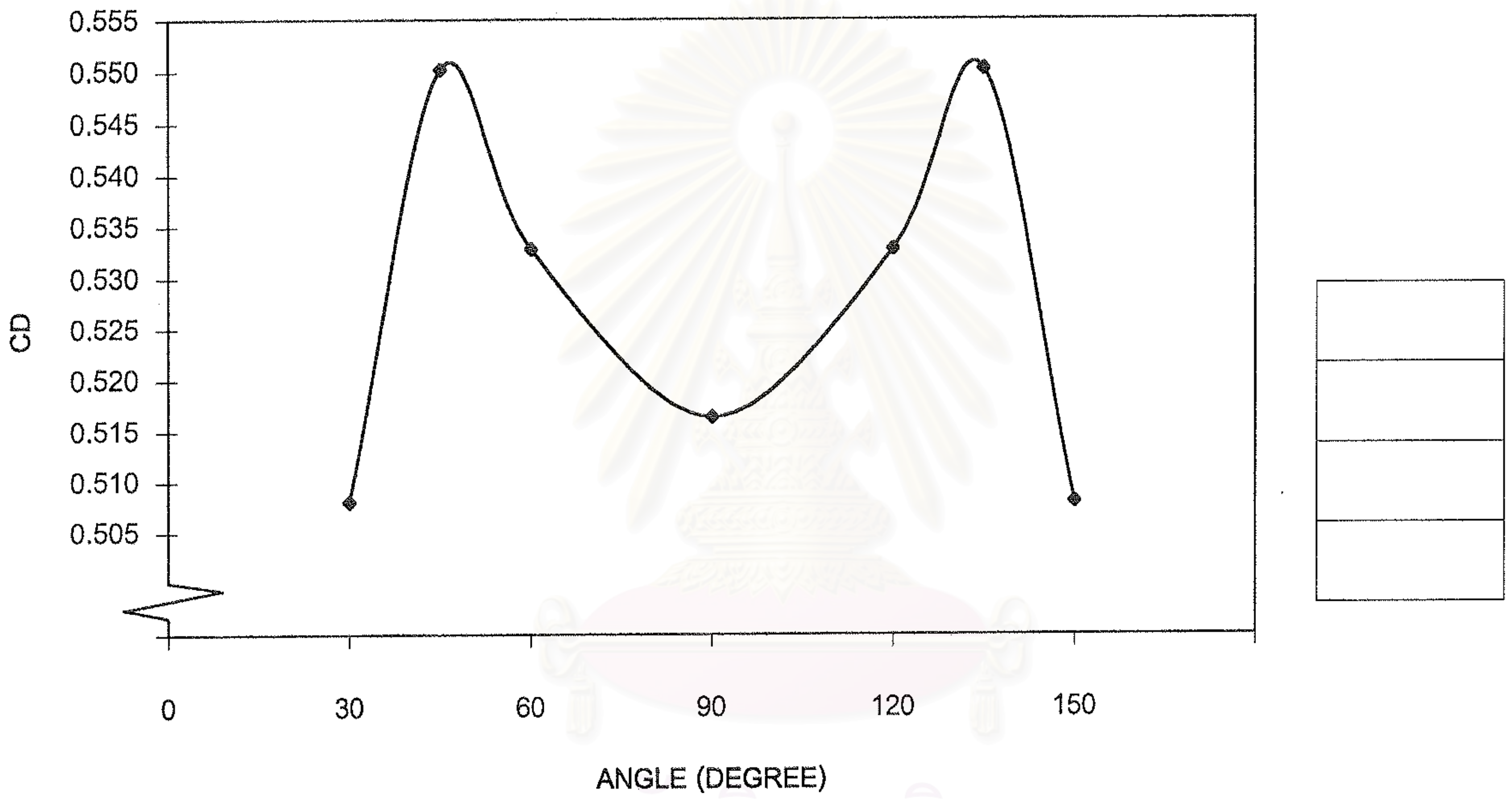
รูปที่ ข - 13 : กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลที่ได้จากการทดลอง เทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 2 ช่อง วางตัวในแนวตั้ง และมีเส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวทแยง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



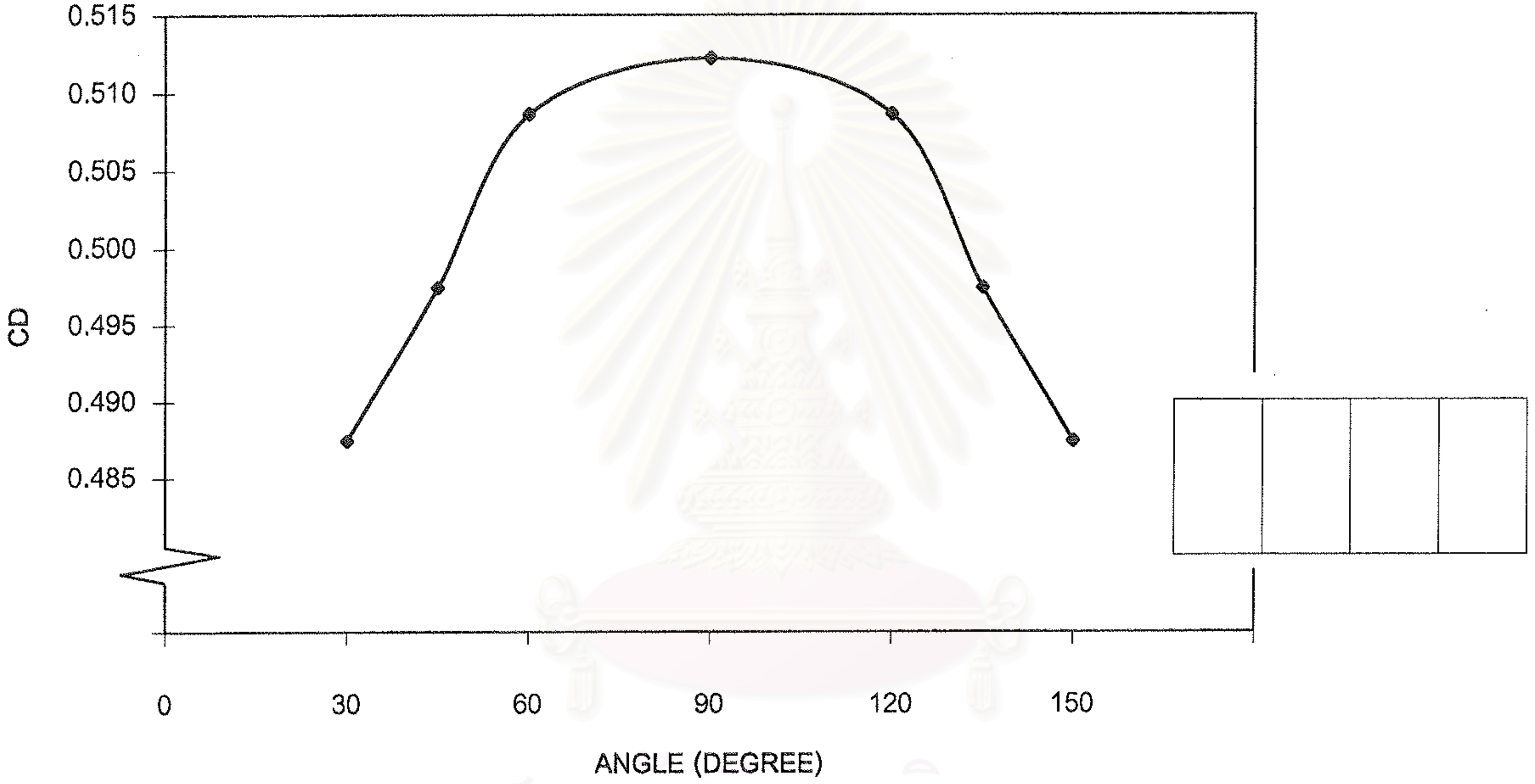
รูปที่ ข - 14 : กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลที่ได้จากการทดลอง เทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 2 ช่อง วางตัวในแนวนอน และมีเส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวทแยง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



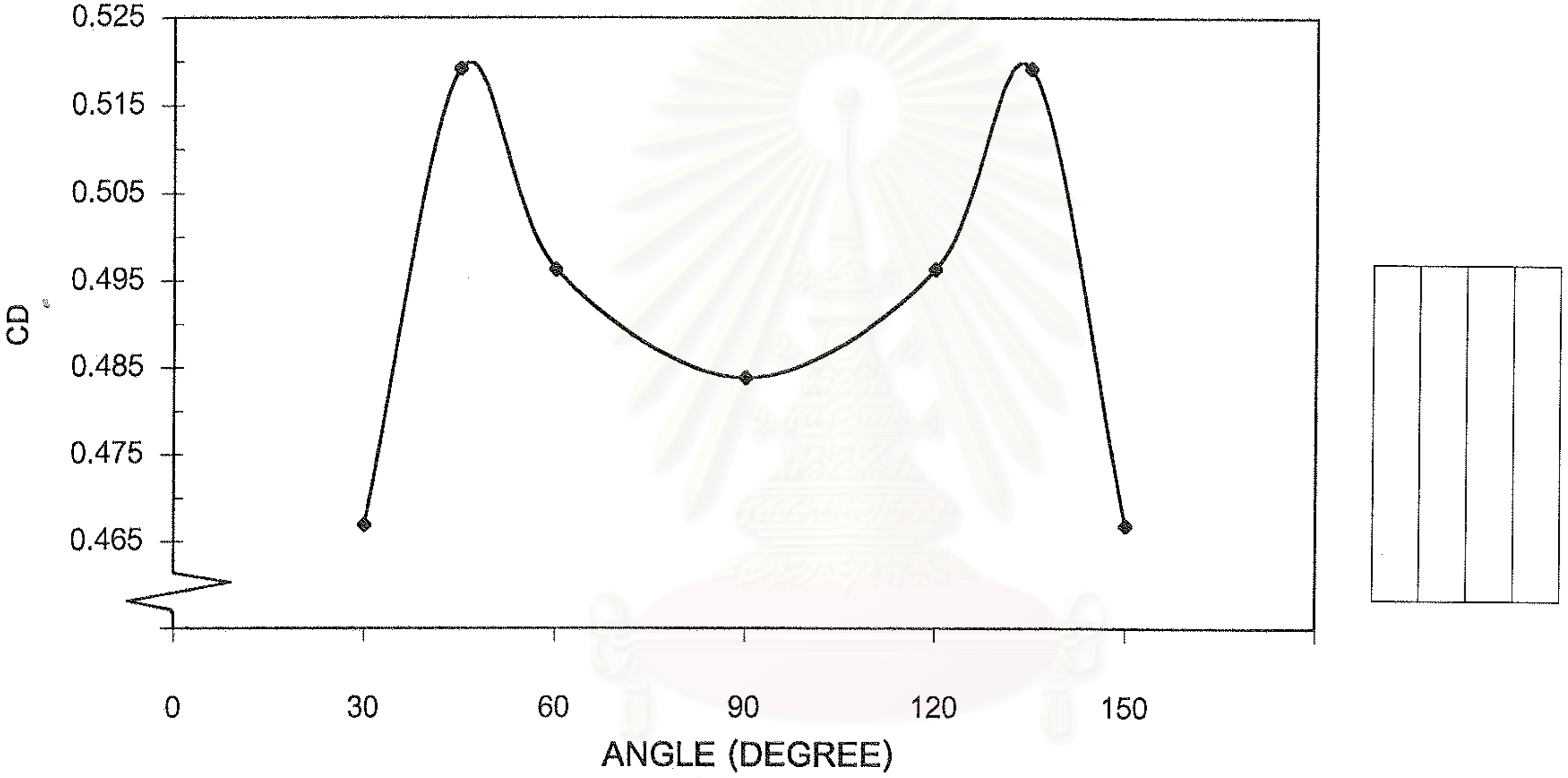
รูปที่ ข - 15 : กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลที่ได้จากการทดลอง เทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 4 ช่อง วางตัวในแนวตั้ง และมีเส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวระดับ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



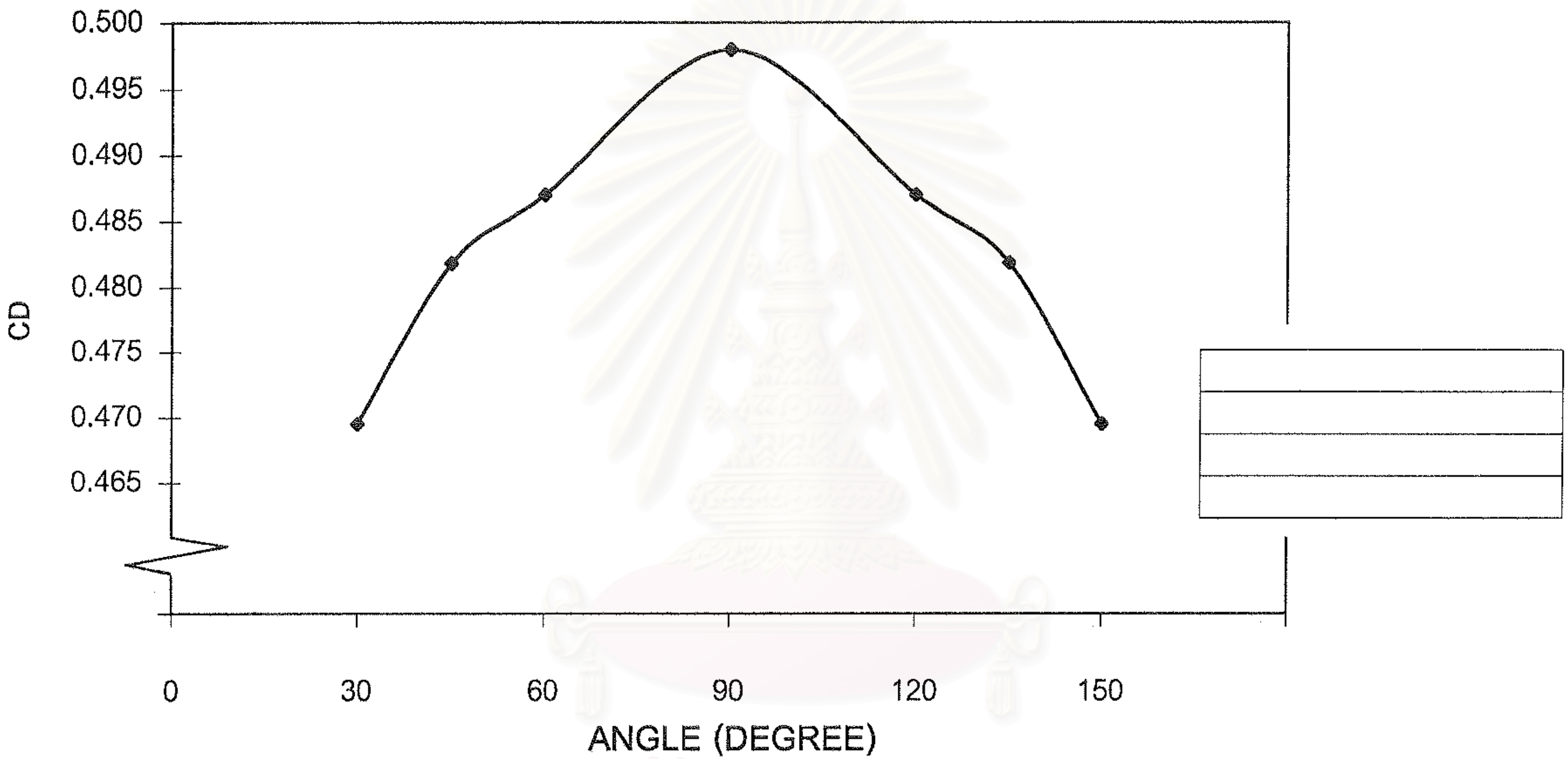
รูปที่ ข - 16 : กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลที่ได้จากการทดลอง เทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 4 ช่อง วางตัวในแนวนอน และมีเส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวดิ่ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



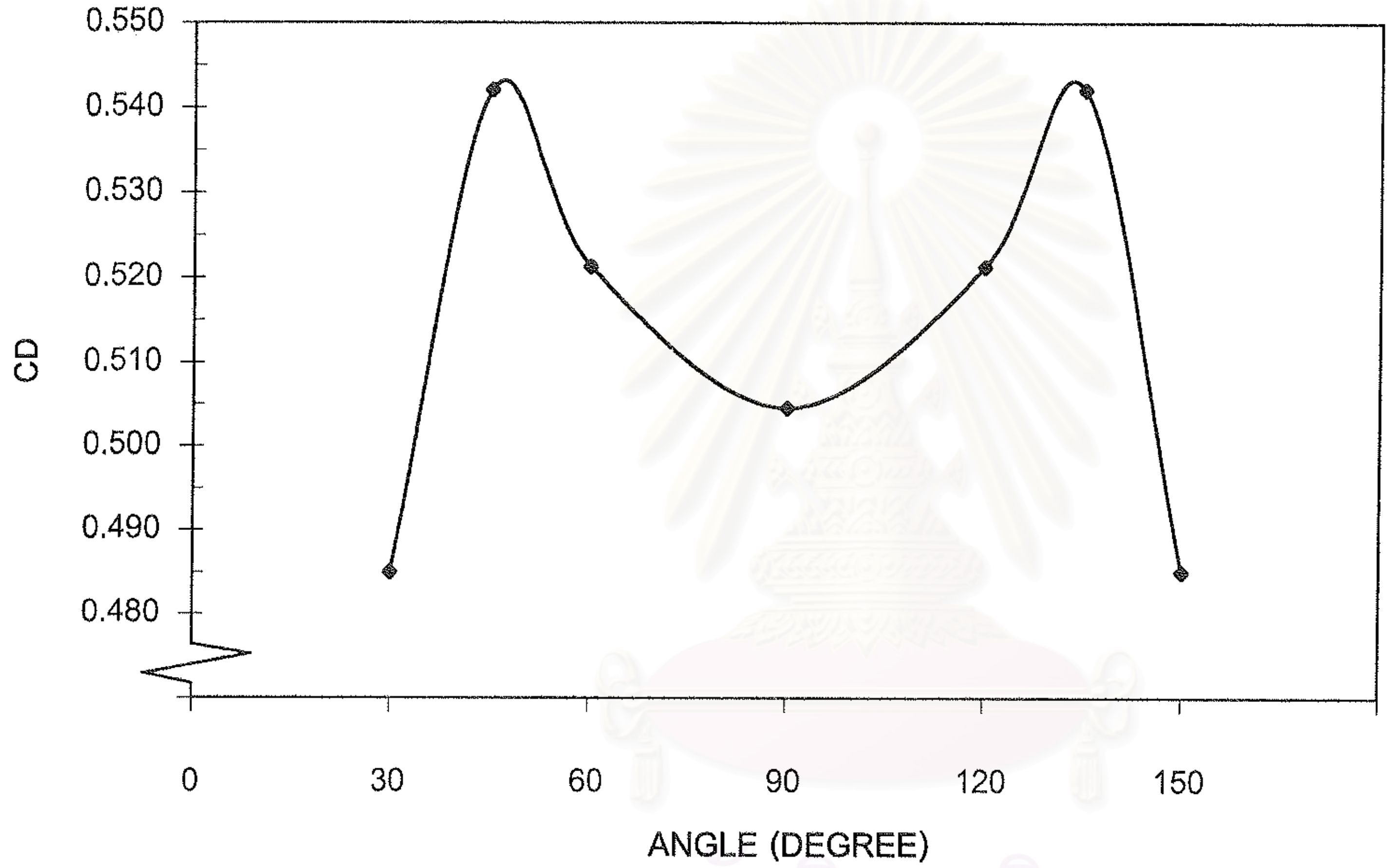
รูปที่ ข - 17 : กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลที่ได้จากการทดลอง เทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 4 ช่อง วางตัวในแนวตั้ง และมีเส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวดิ่ง

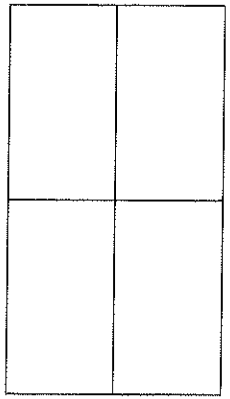
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข - 18 : กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลที่ได้จากการทดลอง เทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 4 ช่อง วางตัวในแนวนอน และมีเส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวระดับ

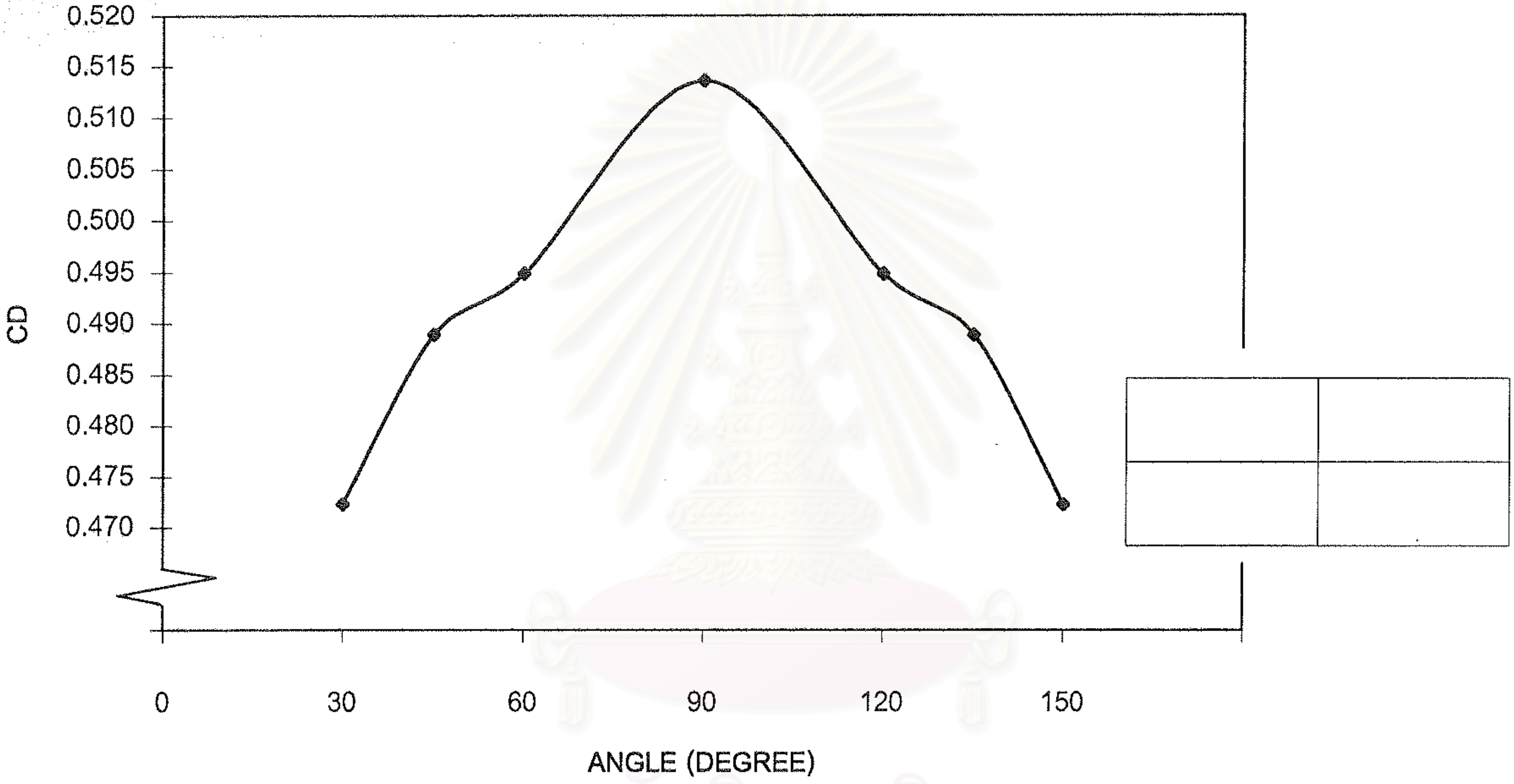
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ ข - 19 : กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลที่ได้จากการทดลอง เทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ
สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 4 ช่อง วางตัวในแนวตั้ง โดยเส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวระดับและแนวดิ่ง

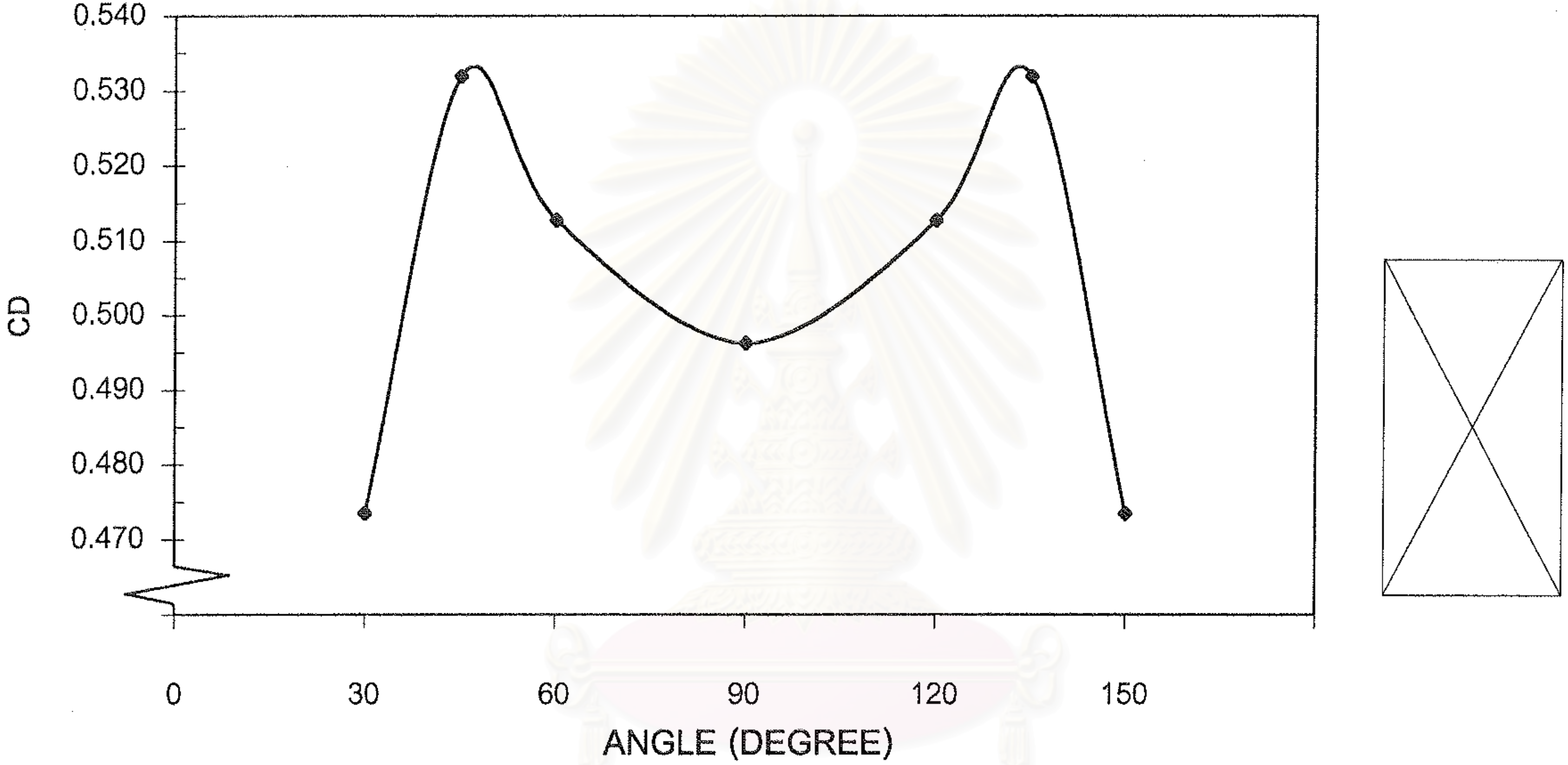
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข - 20 : กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลที่ได้จากการทดลอง เทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ

สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 4 ช่อง วางตัวในแนวนอน โดยเส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวระดับและแนวดิ่ง

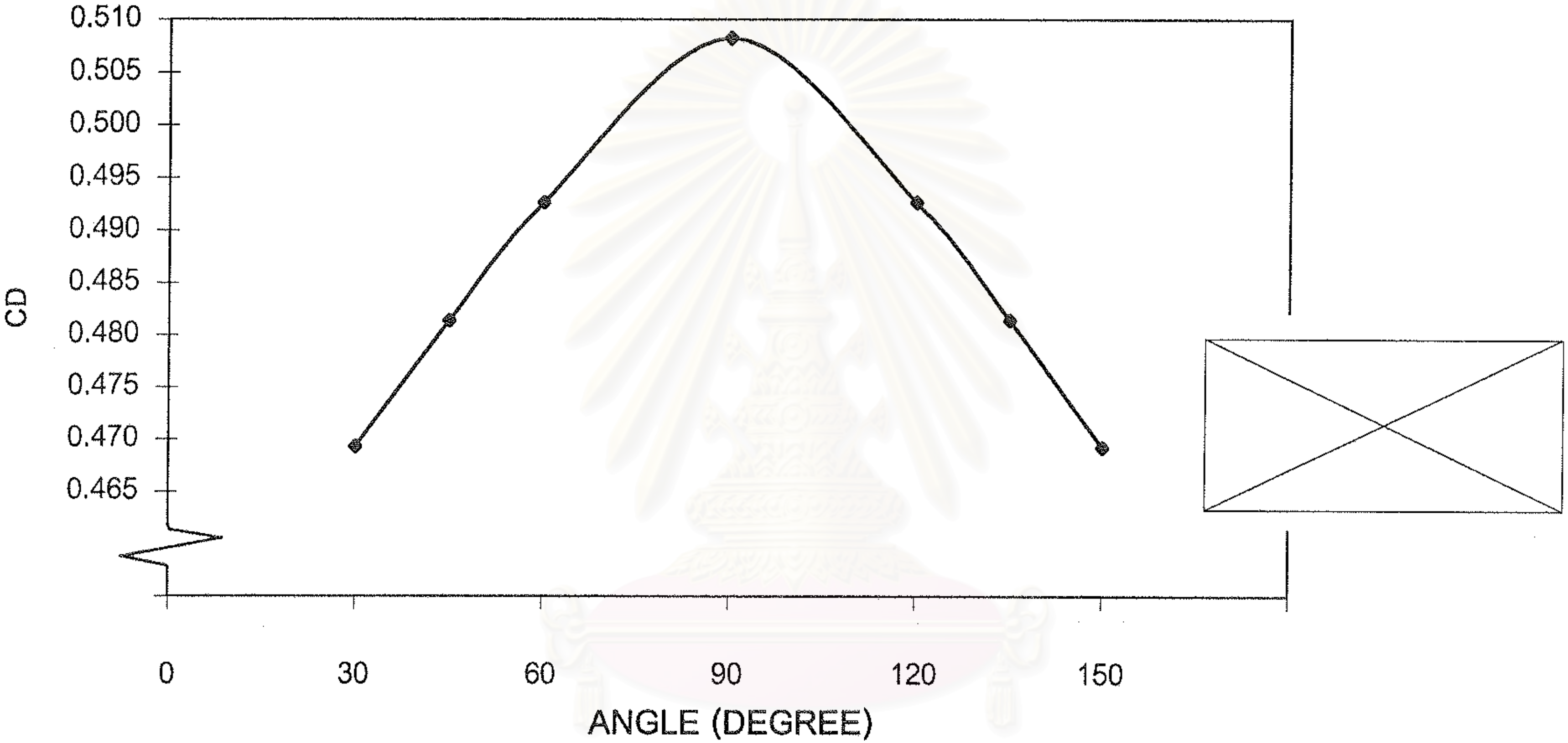
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข - 21 : กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลที่ได้จากการทดลอง เทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ

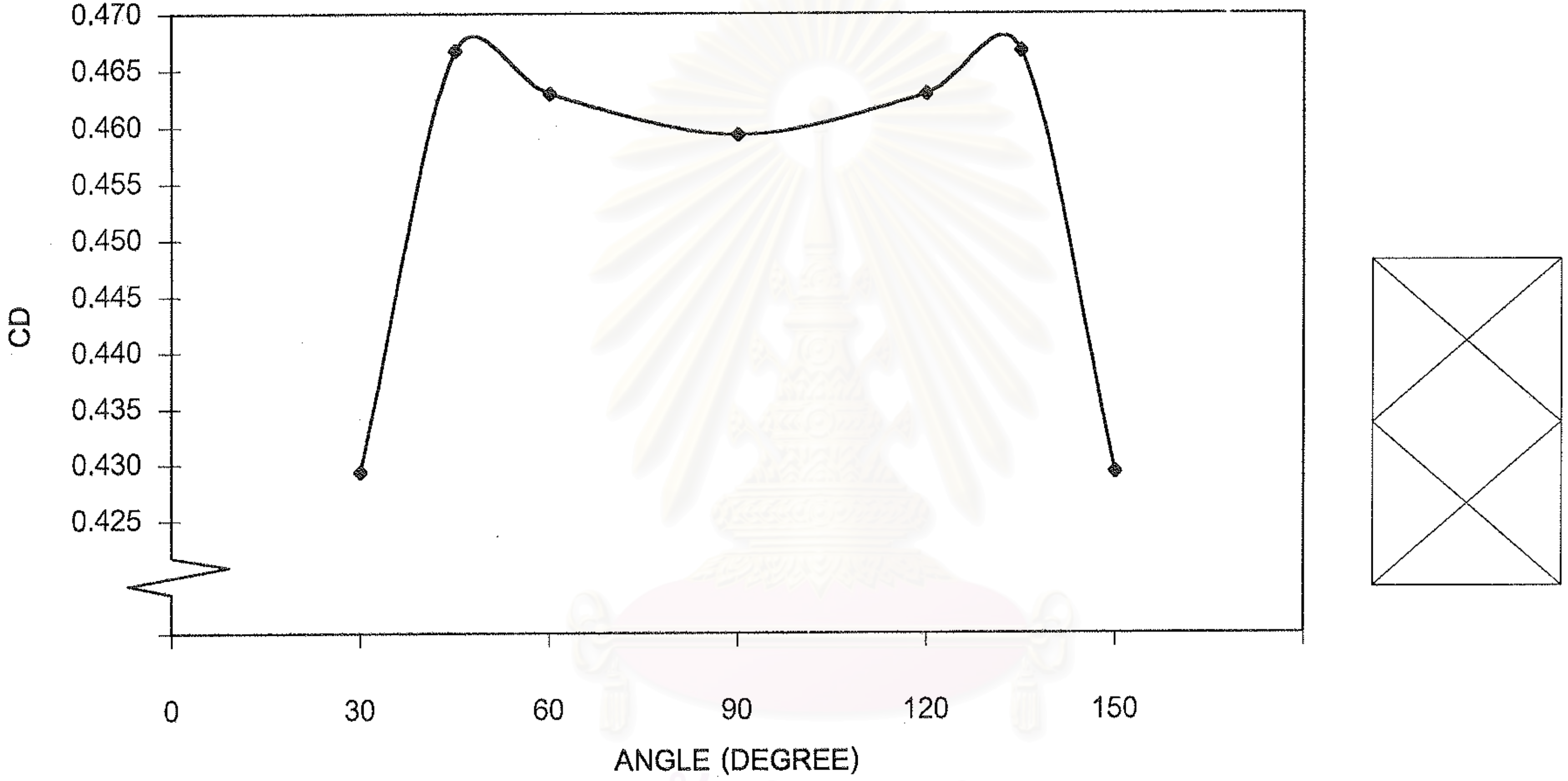
สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 4 ช่อง วางตัวในแนวตั้ง และมีเส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวทแยง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



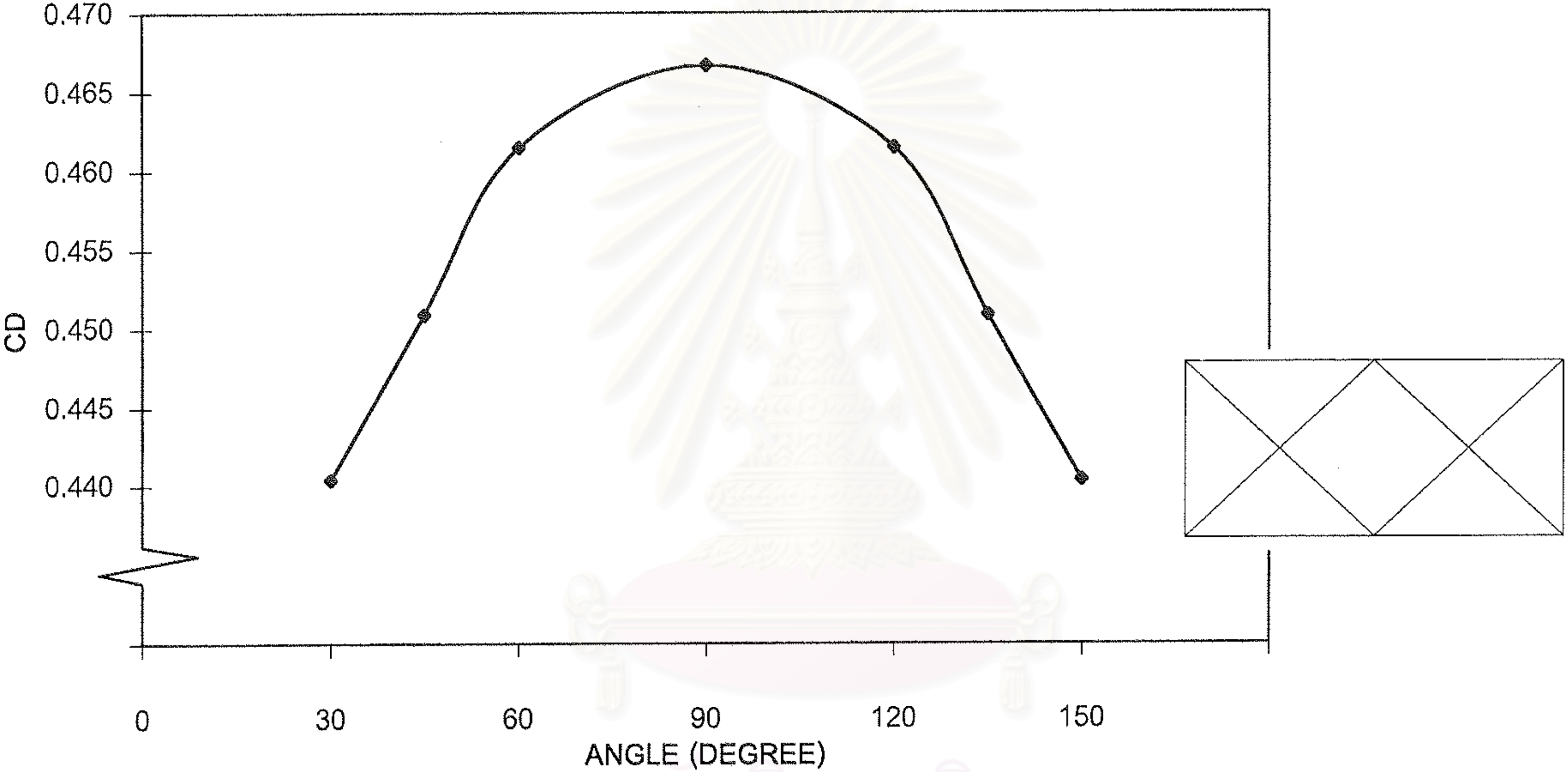
รูปที่ ข - 22 : กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลที่ได้จากการทดลอง เทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 4 ช่อง วางตัวในแนวนอน และมีเส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวทแยง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

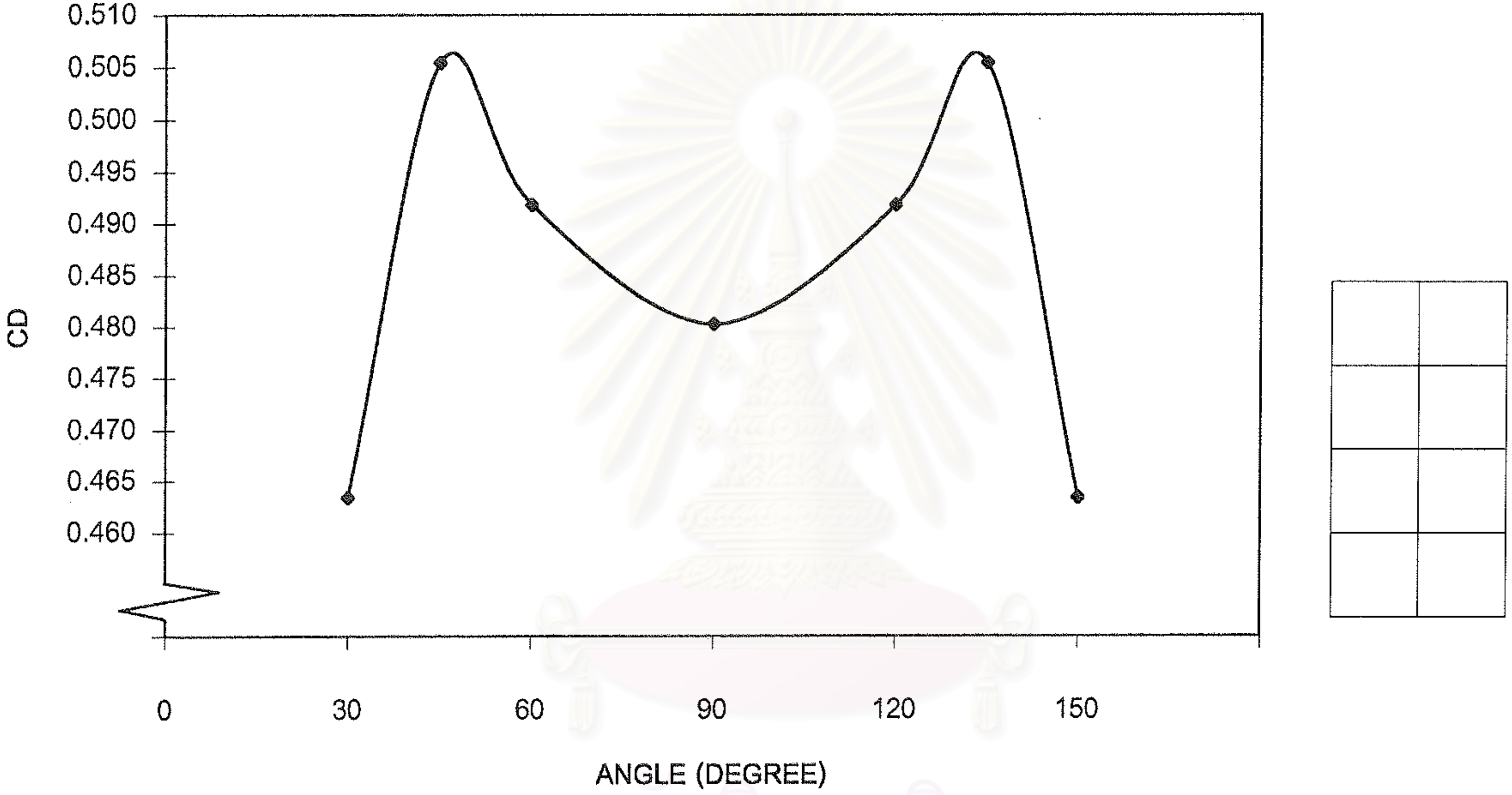


รูปที่ ข - 23 : กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลที่ได้จากการทดลอง เทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 7 ช่อง วางตัวในแนวตั้ง โดยเส้นแบ่งภายในไม่เป็นเส้นแนวระดับและแนวดิ่ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

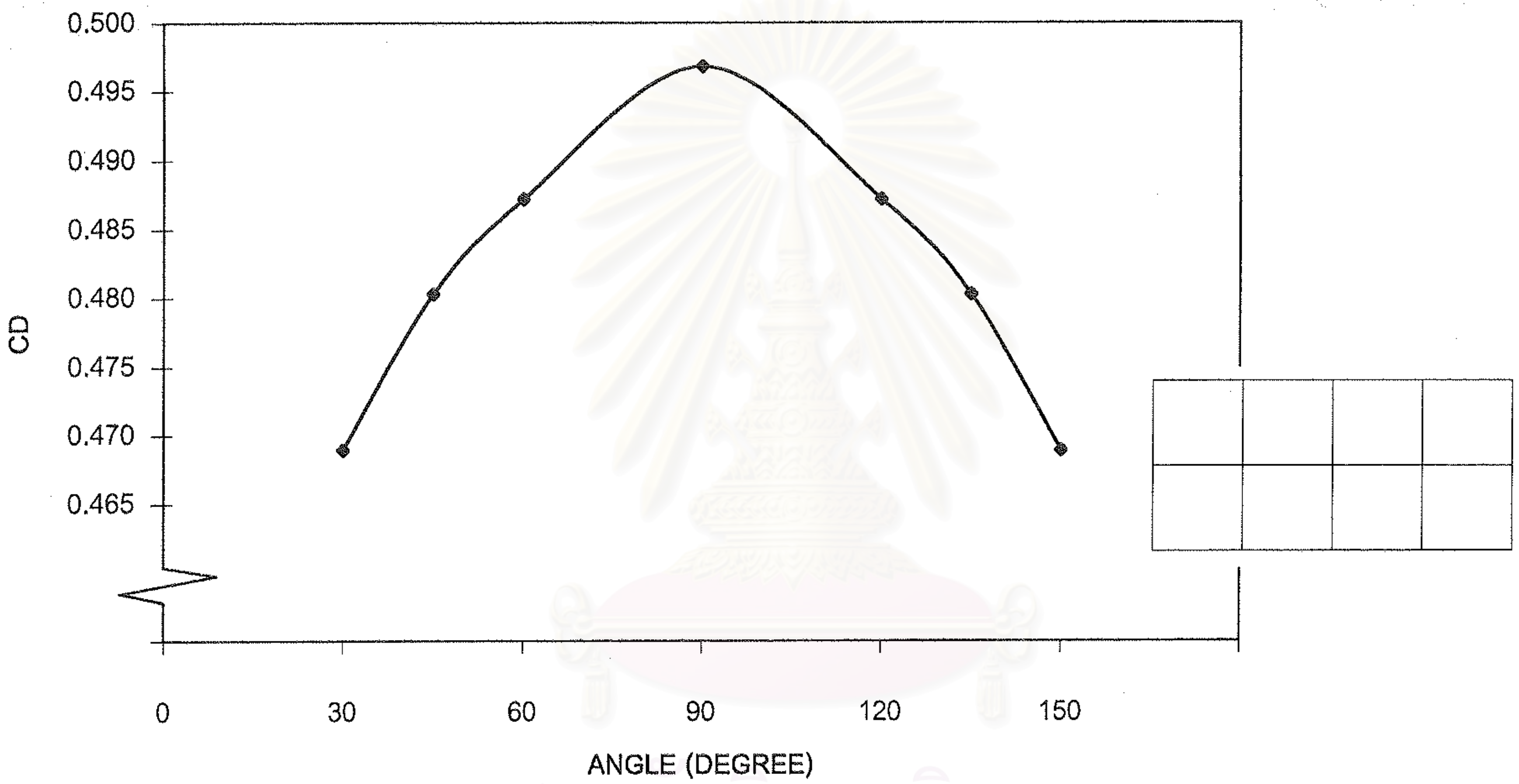


รูปที่ ข - 24 : กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลที่ได้จากการทดลอง เทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 7 ช่อง วางตัวในแนวนอน โดยเส้นแบ่งภายในไม่เป็นเส้นแนวระดับและแนวดิ่ง

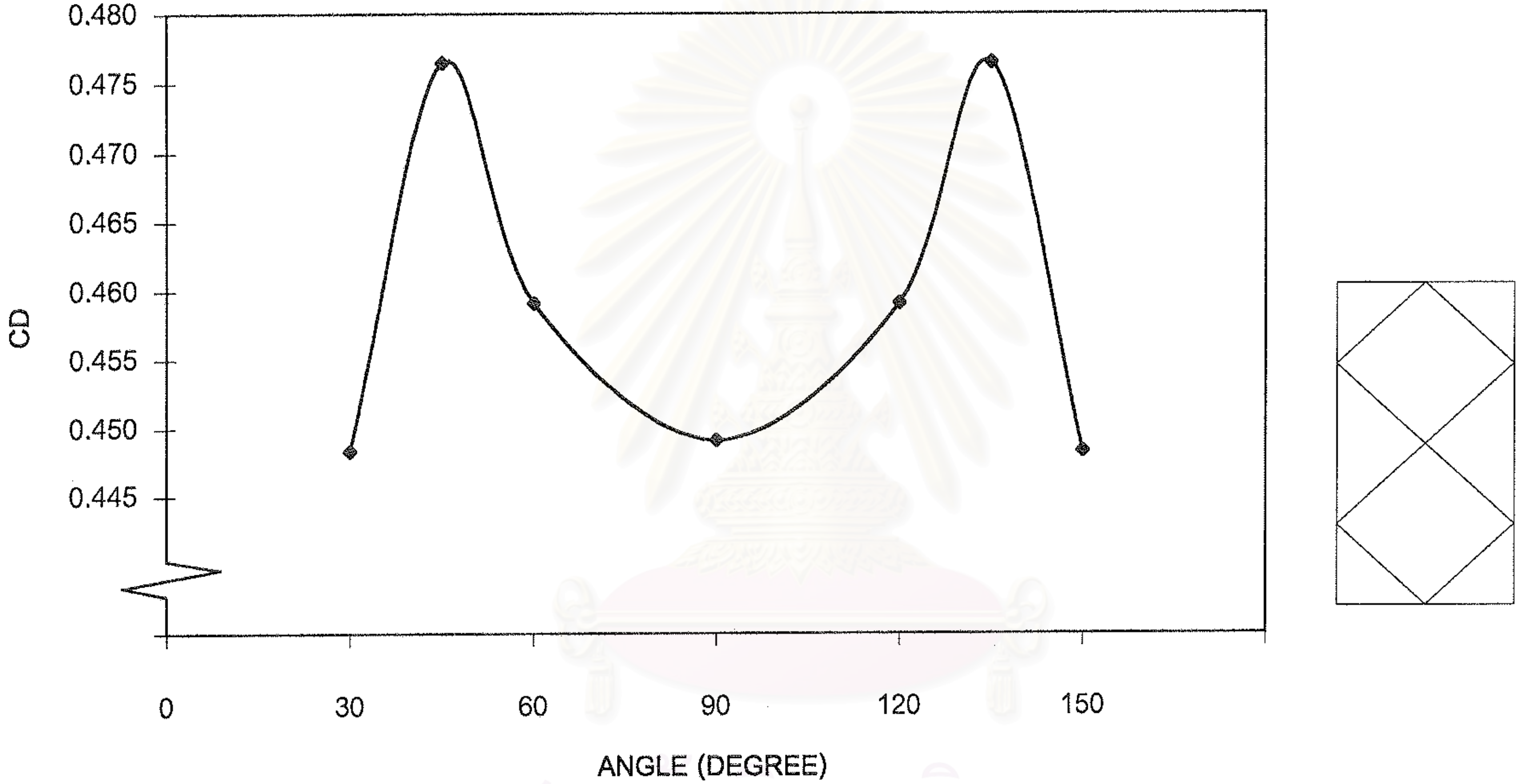


รูปที่ ข - 25 : กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลที่ได้จากการทดลอง เทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ
สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 8 ช่อง วางตัวในแนวตั้ง โดยเส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวระดับและแนวดิ่ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

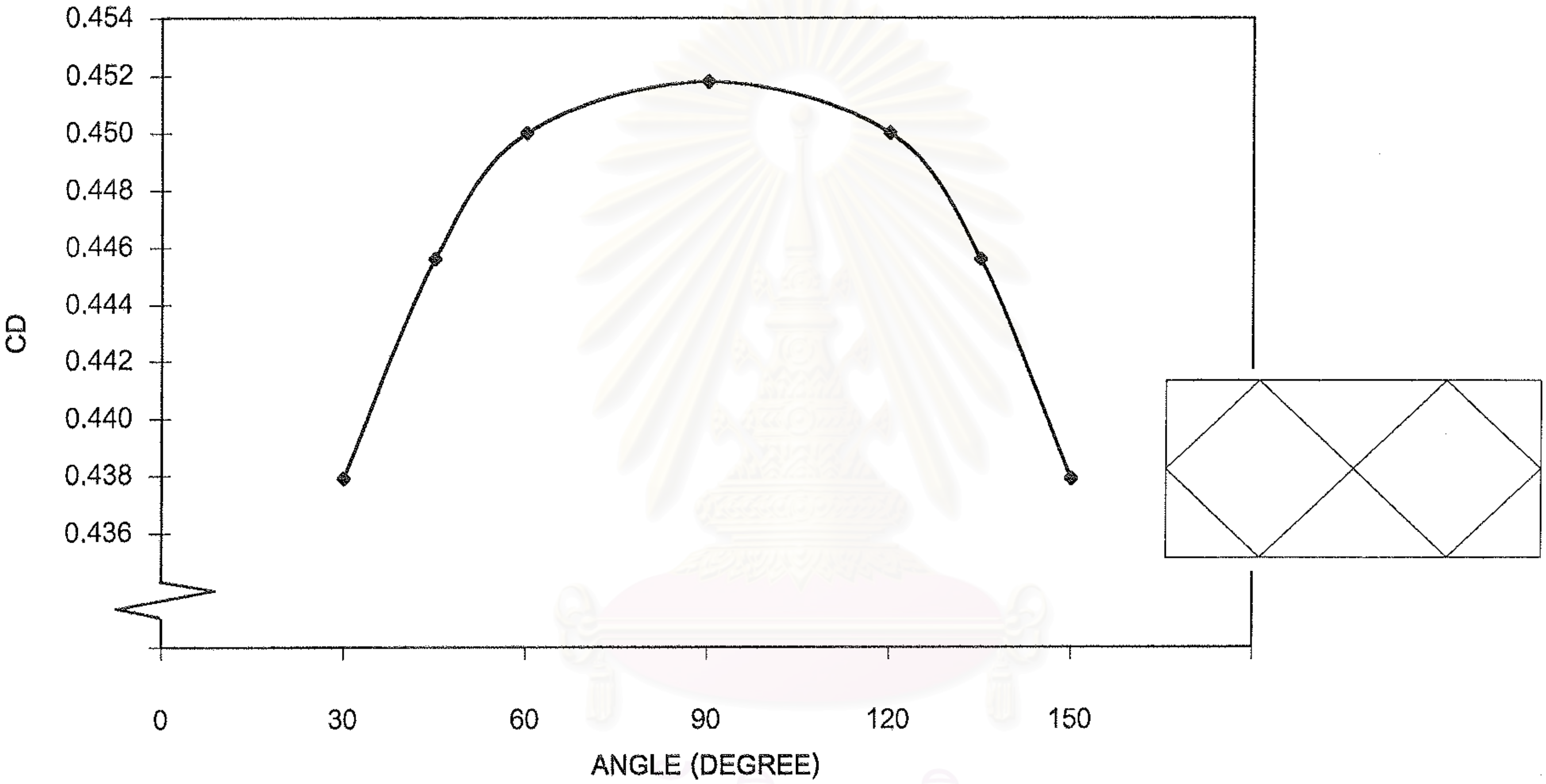


รูปที่ ข - 26 : กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลที่ได้จากการทดลอง เทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 8 ช่อง วางตัวในแนวนอน โดยเส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวระดับและแนวดิ่ง



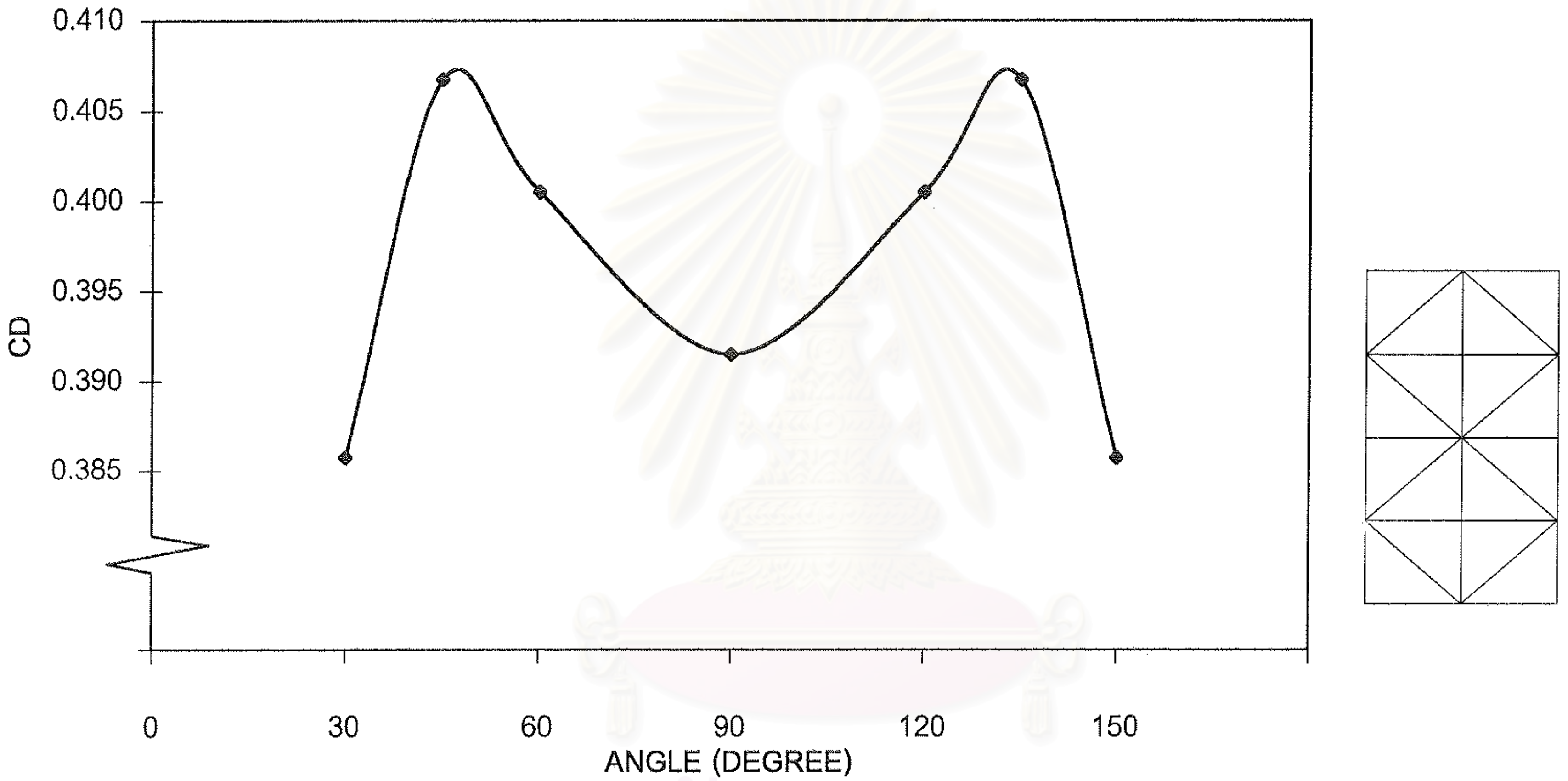
รูปที่ ข - 27 : กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลที่ได้จากการทดลอง เทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 8 ช่อง วางตัวในแนวตั้ง โดยเส้นแบ่งภายในไม่เป็นเส้นแนวระดับและแนวดิ่ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

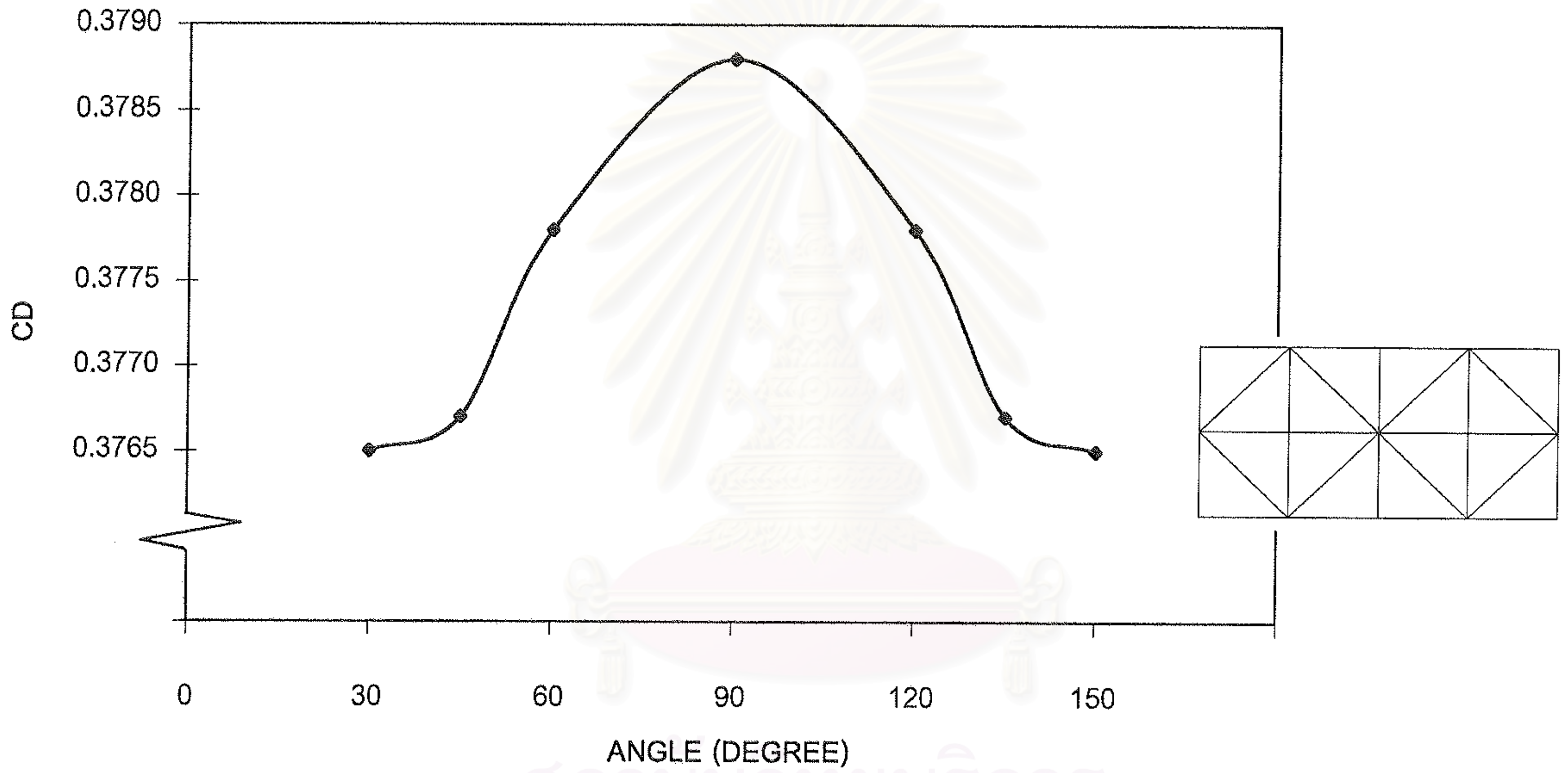


รูปที่ ข - 28 : กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลที่ได้จากการทดลอง เทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 8 ช่อง วางตัวในแนวนอน โดยเส้นแบ่งภายในไม่เป็นเส้นแนวระดับและแนวดิ่ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข - 29 : กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลที่ได้จากการทดลอง เทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 16 ช่อง วางตัวในแนวตั้ง โดยเส้นแบ่งภายในไม่เป็นเส้นแนวระดับและแนวดิ่ง

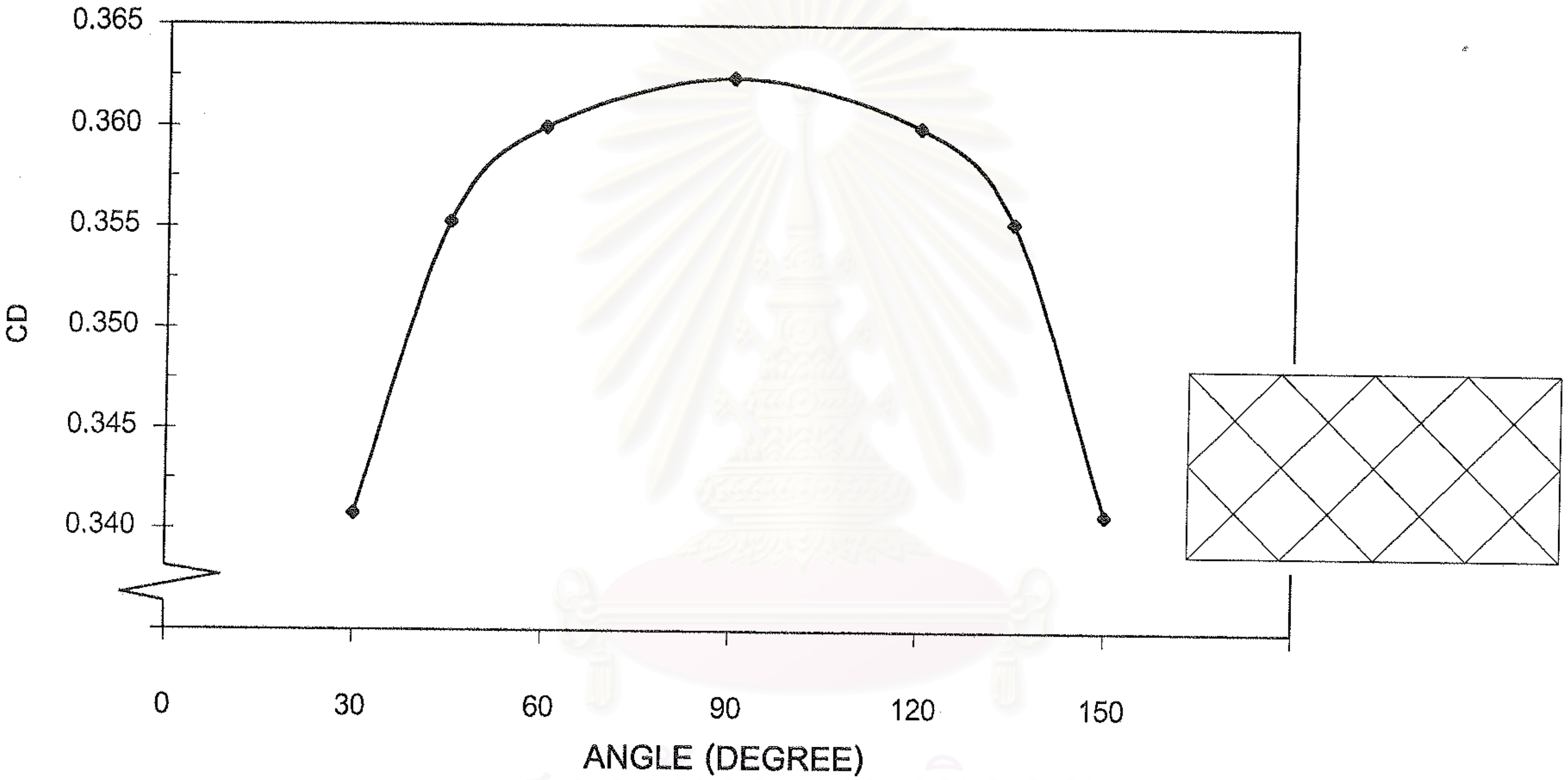


รูปที่ ข - 30 : กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลที่ได้จากการทดลอง เทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ
สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 16 ช่อง วางตัวในแนวนอน โดยเส้นแบ่งภายในไม่เป็นเส้นแนวระดับและแนวดิ่ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

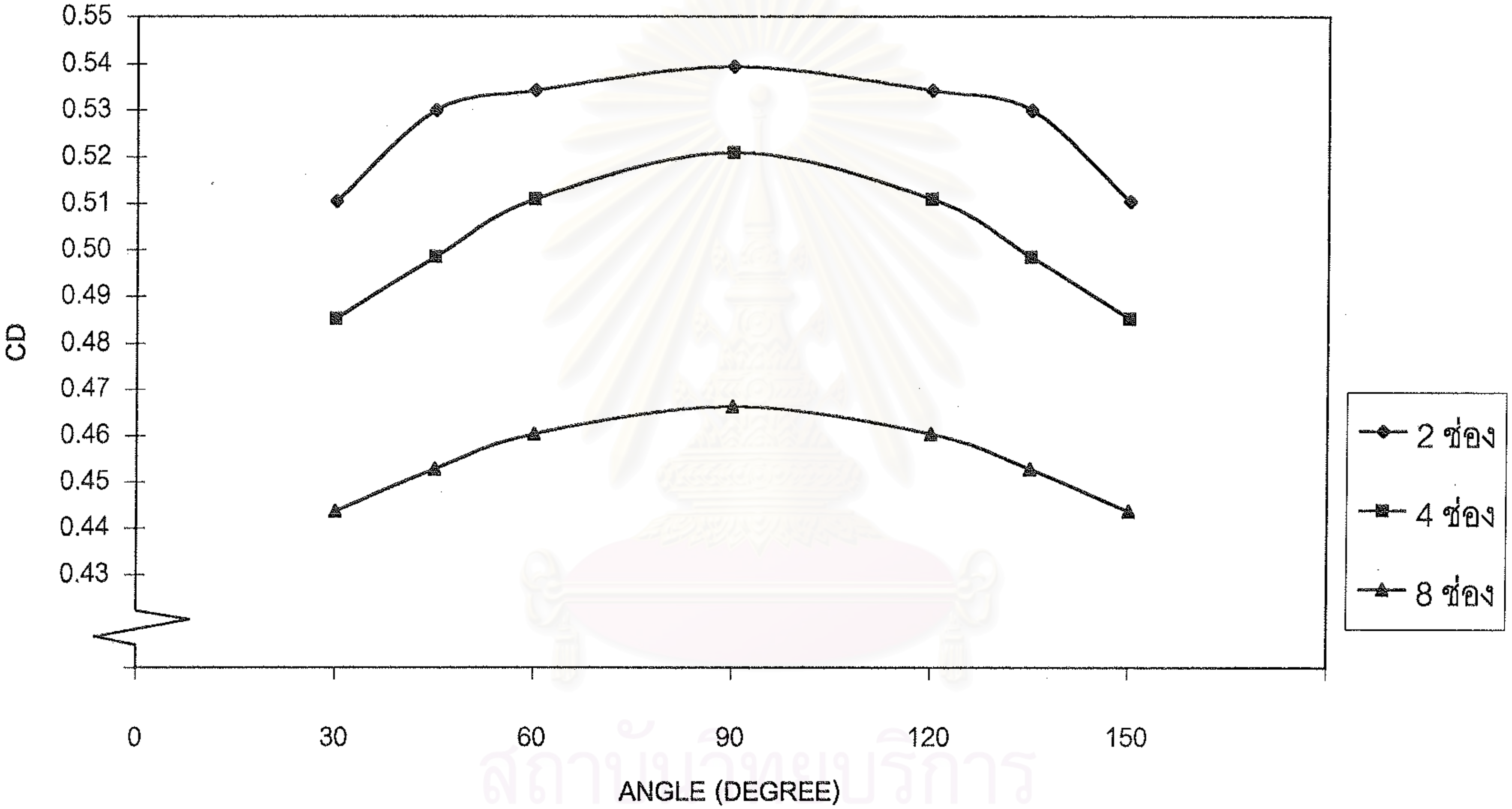
รูปที่ ข - 31 : กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลที่ได้จากการทดลอง เทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 22 ช่อง วางตัวในแนวตั้ง โดยเส้นแบ่งภายในไม่เป็นเส้นแนวระดับและแนวดิ่ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

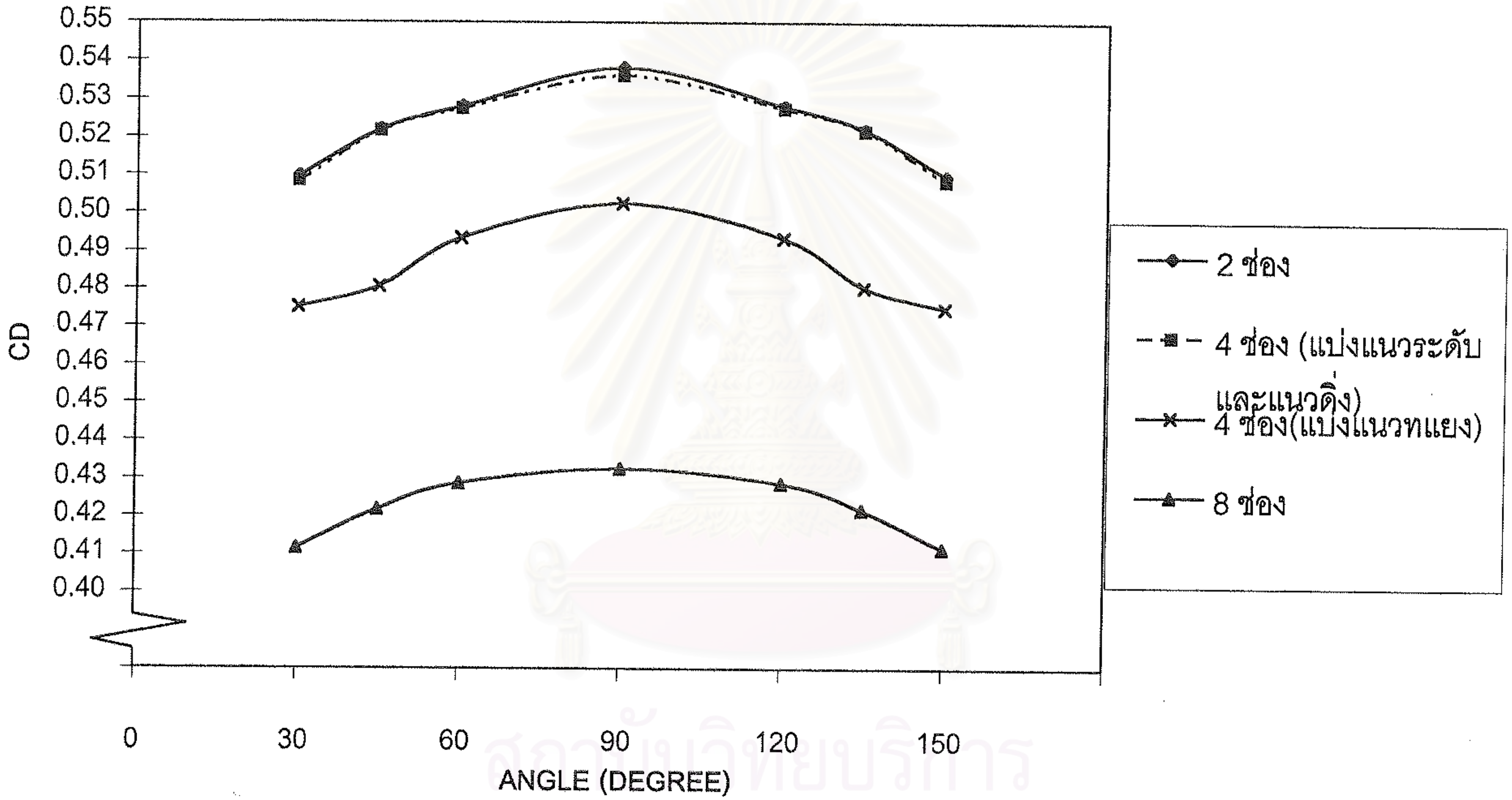


รูปที่ ข - 32 : กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลที่ได้จากการทดลอง เทียบกับมุมที่ช่องเปิดกระทำกับทิศทางการไหลของอากาศ สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 22 ช่อง วางตัวในแนวนอน โดยเส้นแบ่งภายในไม่เป็นเส้นแนวระดับและแนวดิ่ง

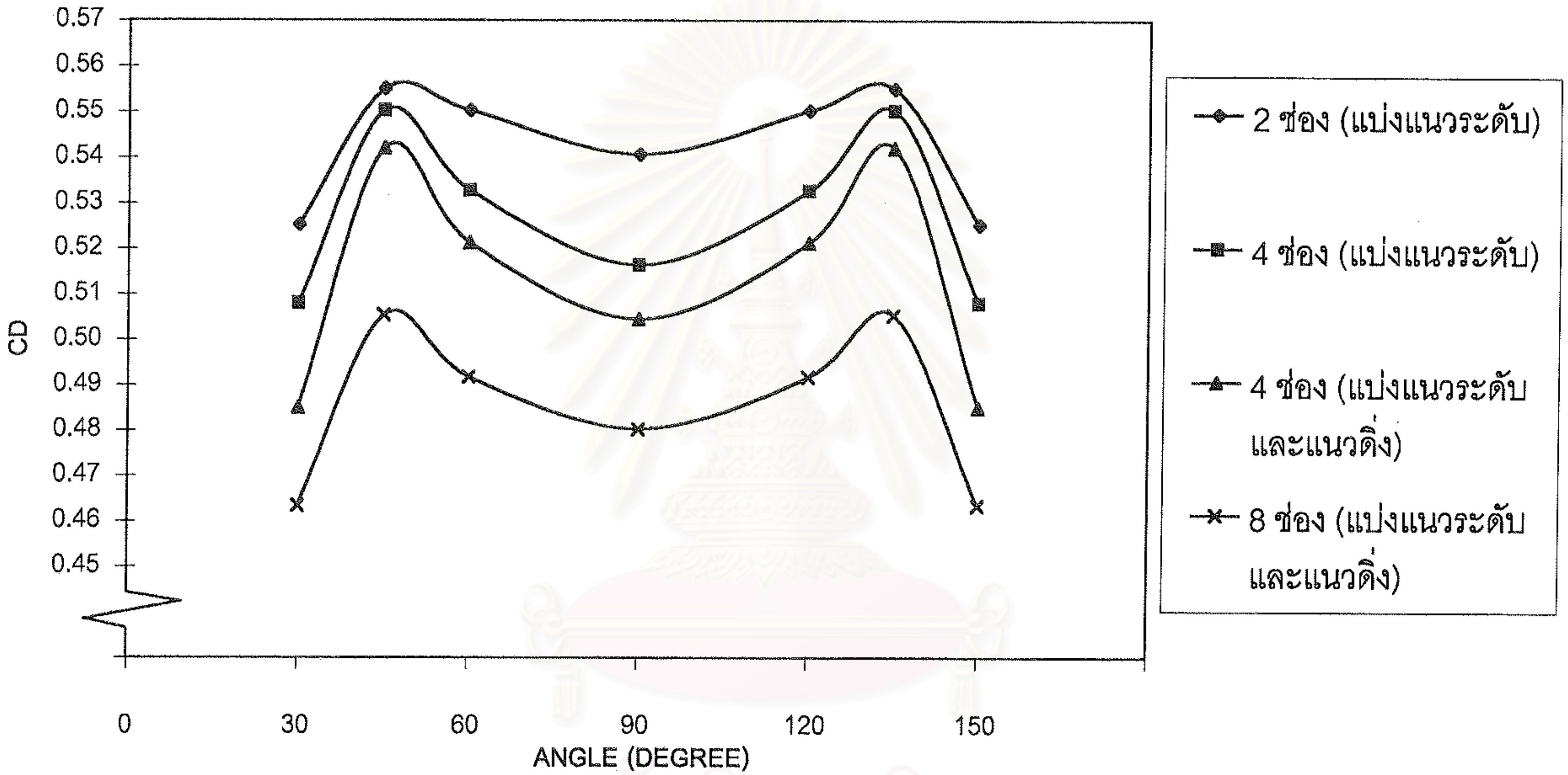
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



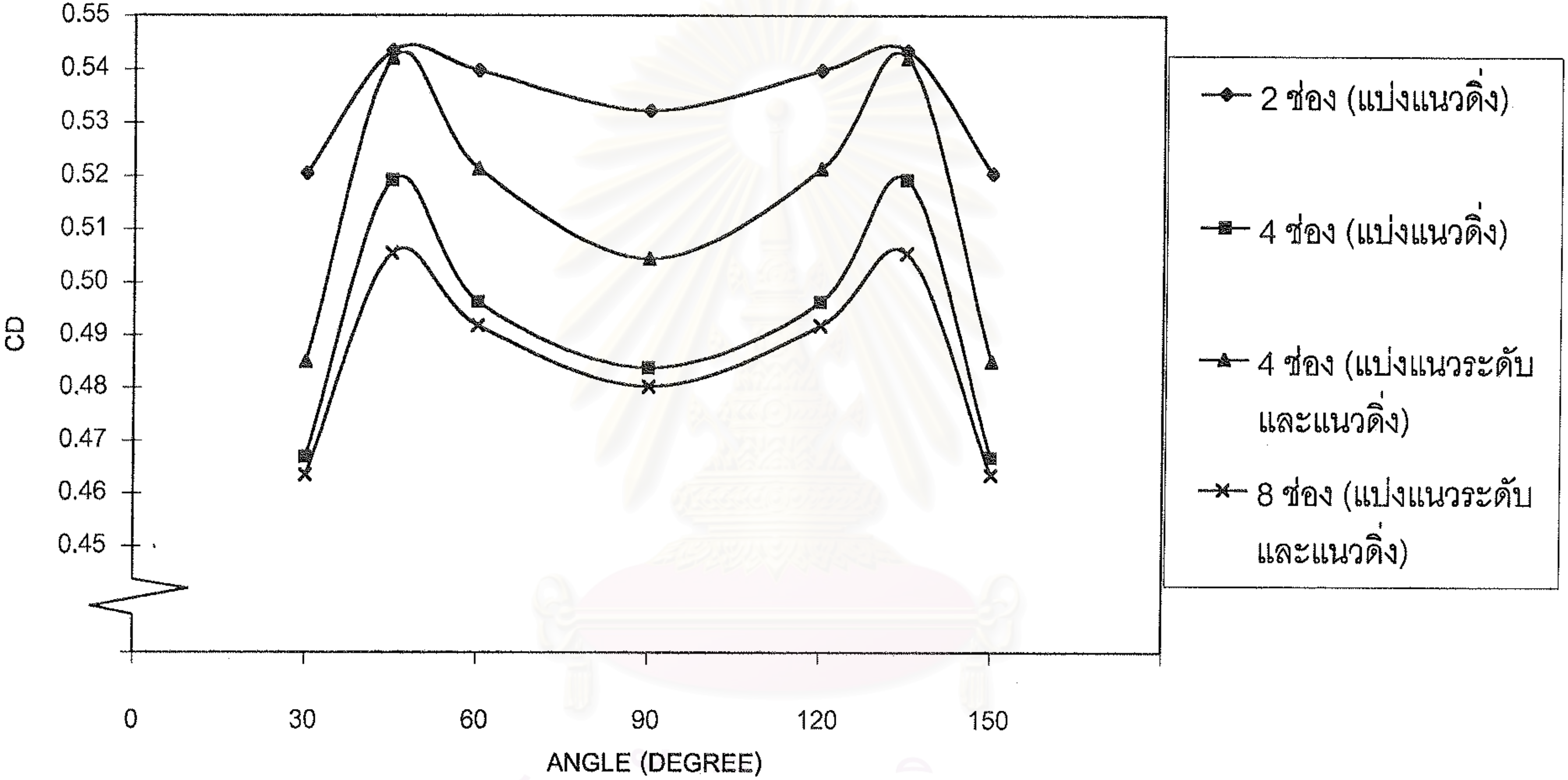
รูปที่ ข - 33 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นวงกลม โดยมีช่องเปิดภายใน 2 , 4 และ 8 ช่อง



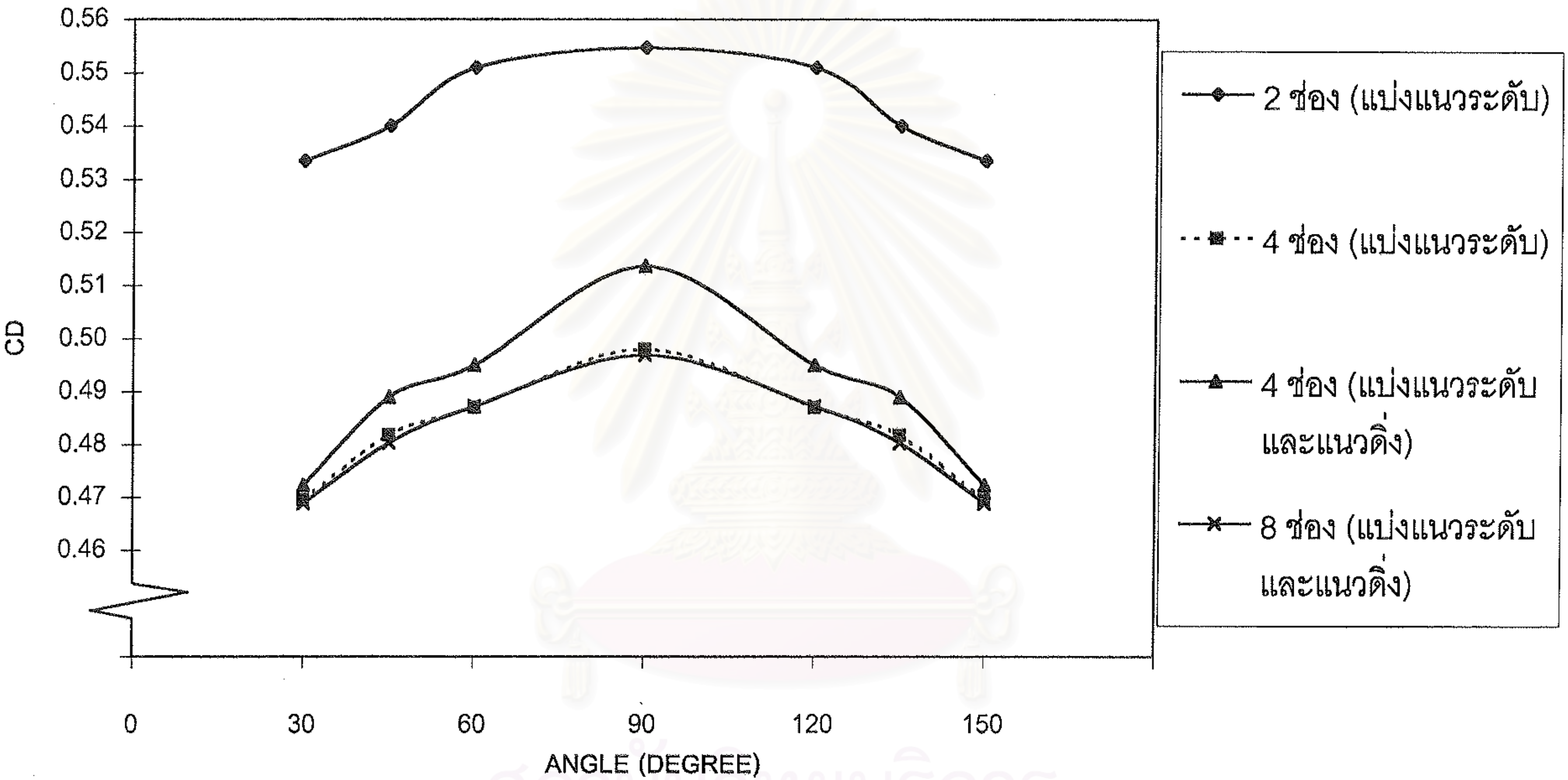
รูปที่ ข - 34 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีช่องเปิดภายใน 2 , 4 และ 8 ช่อง



รูปที่ ข - 35 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า วางตัวในแนวตั้ง โดยมีช่องเปิดภายใน 2 , 4 และ 8 ช่อง และมีเส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวระดับ สำหรับช่องเปิด 2 ช่องและ 4 ช่อง

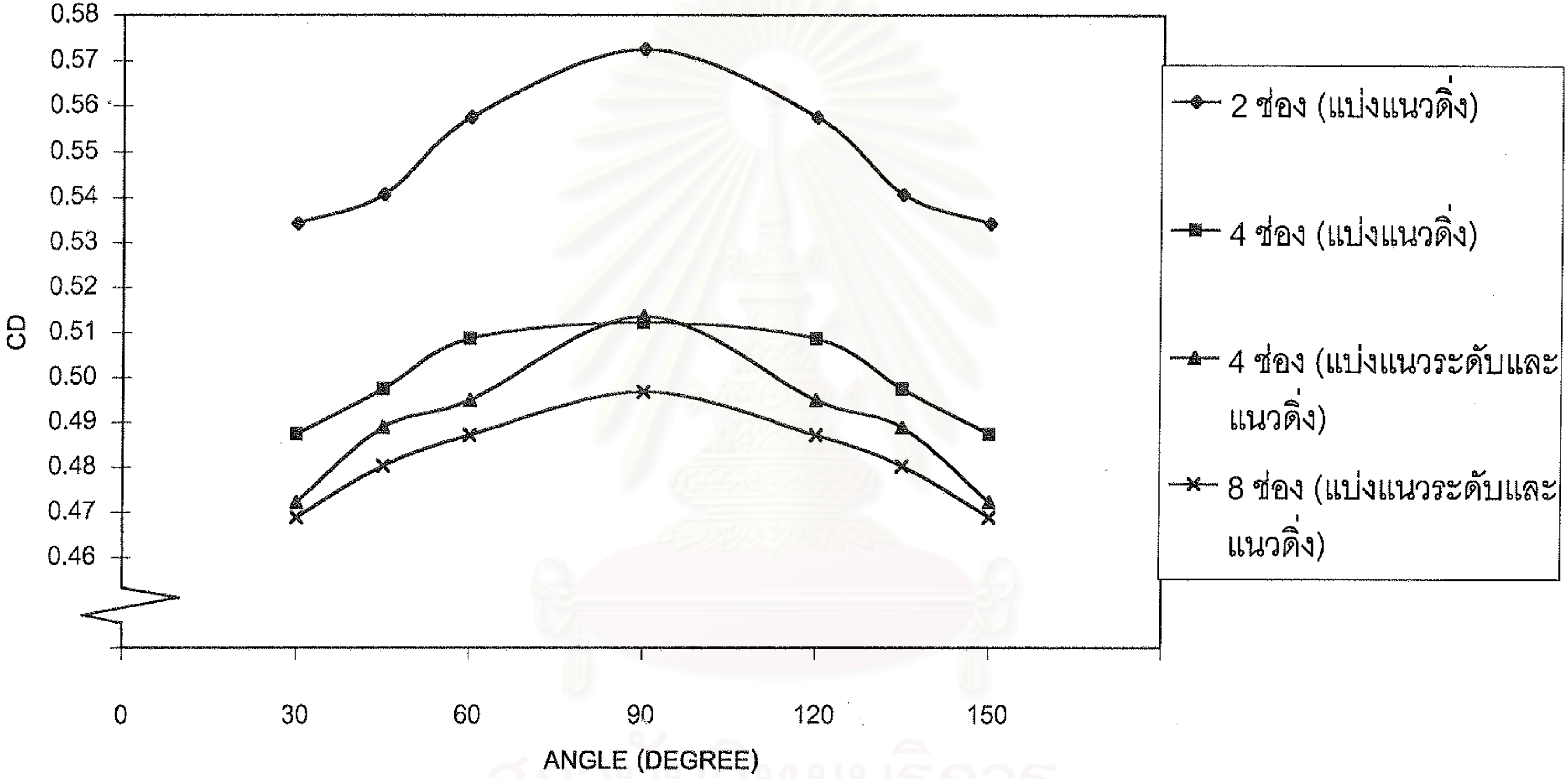


รูปที่ ข - 36 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า วางตัวในแนวตั้ง โดยมีช่องเปิดภายใน 2 , 4 และ 8 ช่อง และมีเส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวดิ่ง สำหรับช่องเปิด 2 ช่องและ 4 ช่อง

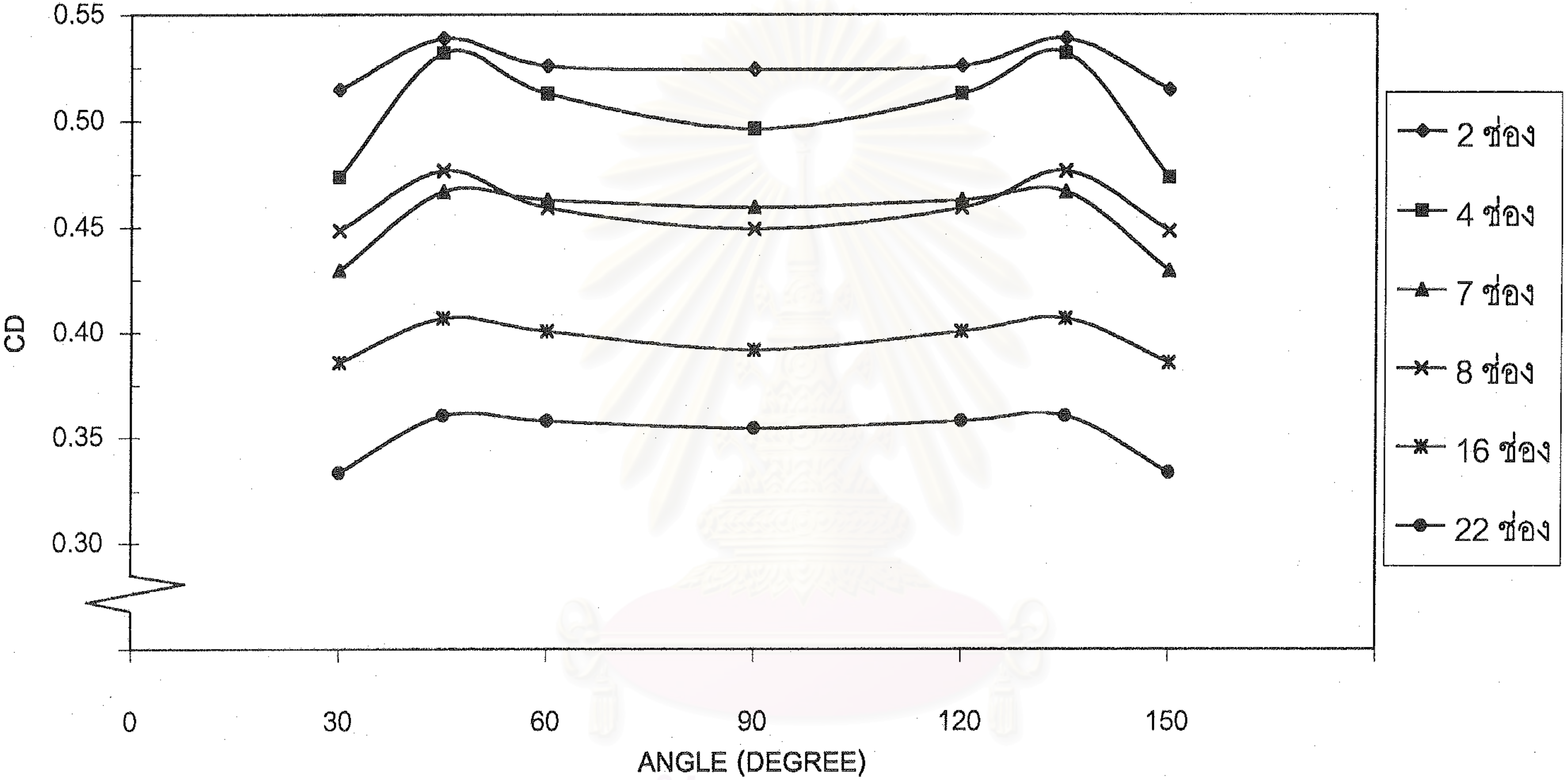


รูปที่ ข - 37 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า วางตัวในแนวนอน โดยมีช่องเปิดภายใน 2 , 4 และ 8 ช่อง และมีเส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวระดับ สำหรับช่องเปิด 2 ช่องและ 4 ช่อง

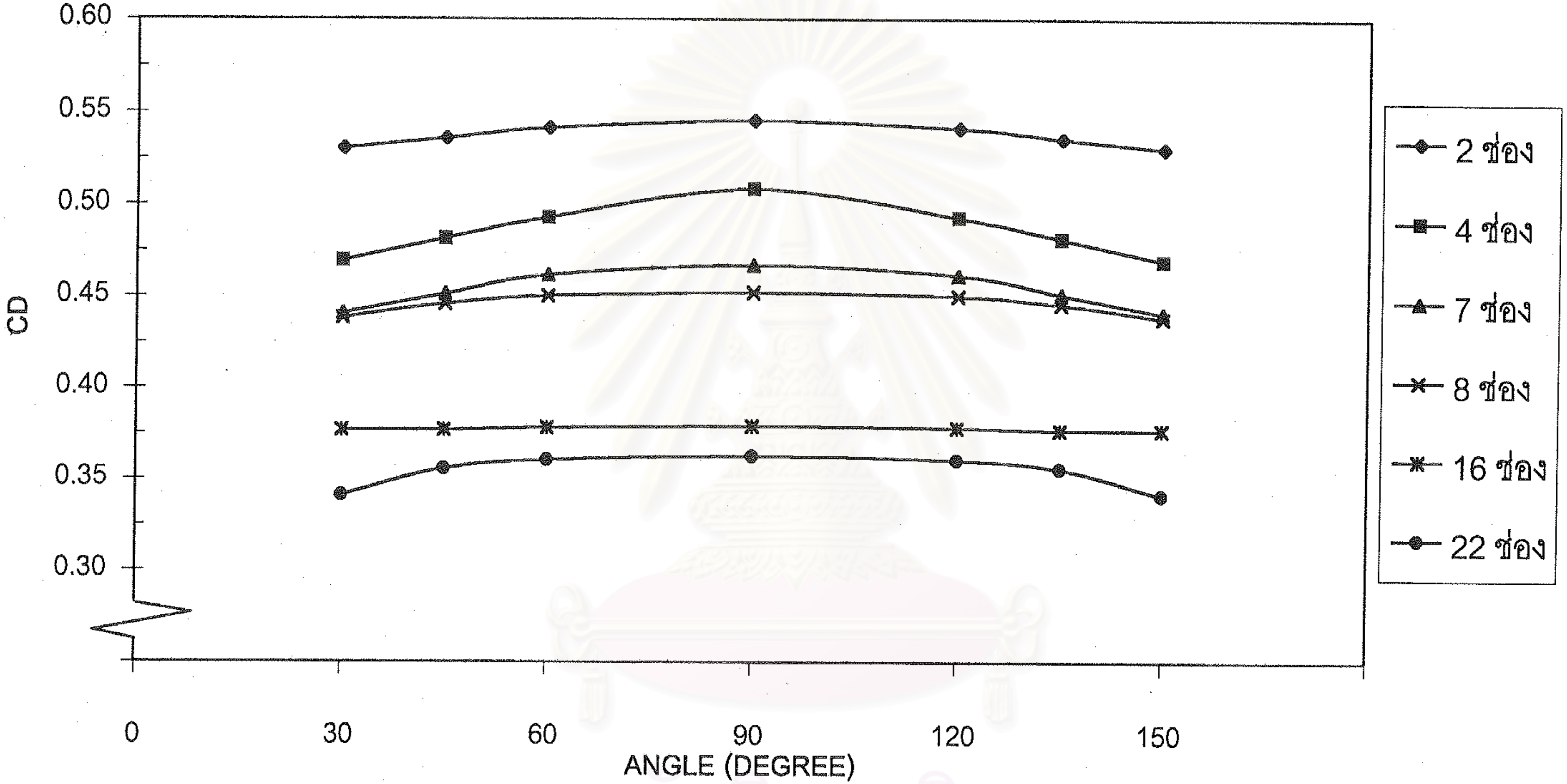
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข - 38 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า วางตัวในแนวนอน โดยมีช่องเปิดภายใน 2 , 4 และ 8 ช่อง และมีเส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวดิ่ง สำหรับช่องเปิด 2 ช่องและ 4 ช่อง

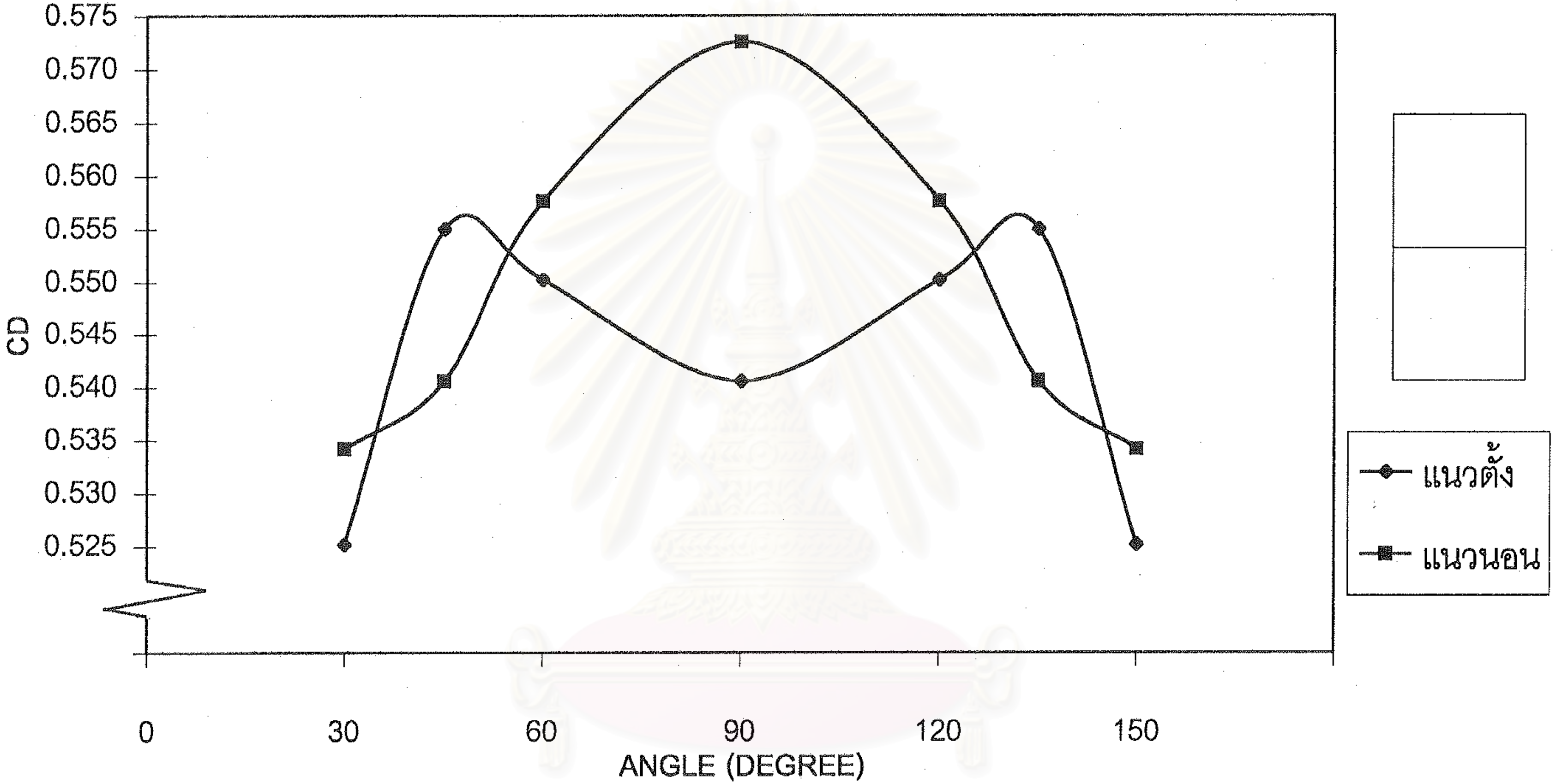


รูปที่ ข - 39 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 2,4,7,8,16 และ 22 ช่อง วางตัวในแนวตั้ง โดยเส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวระดับและแนวดิ่ง



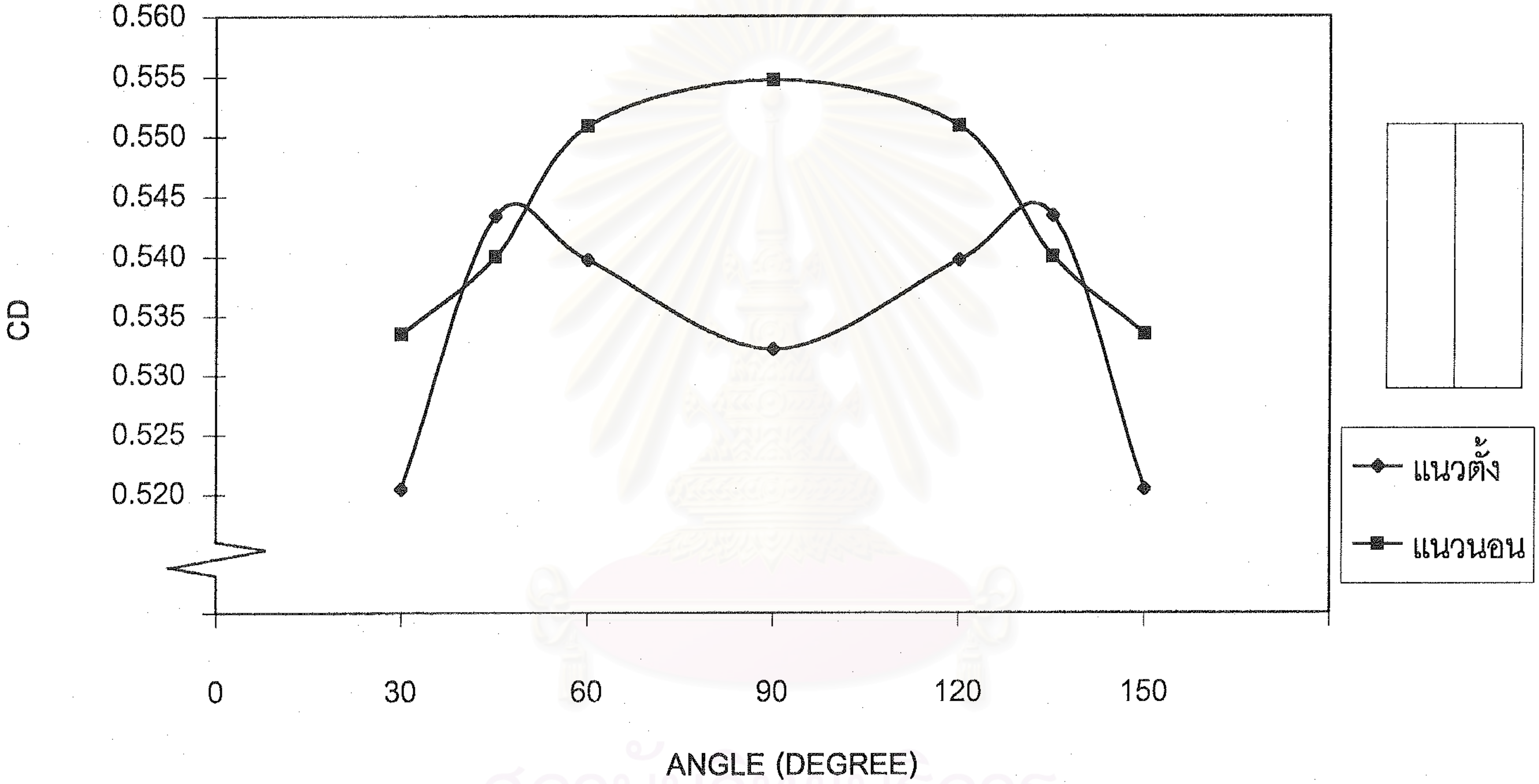
รูปที่ ข - 40 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 2,4,7,8,16 และ 22 ช่อง วางตัวในแนวนอน โดยเส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวระดับและแนวดิ่ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



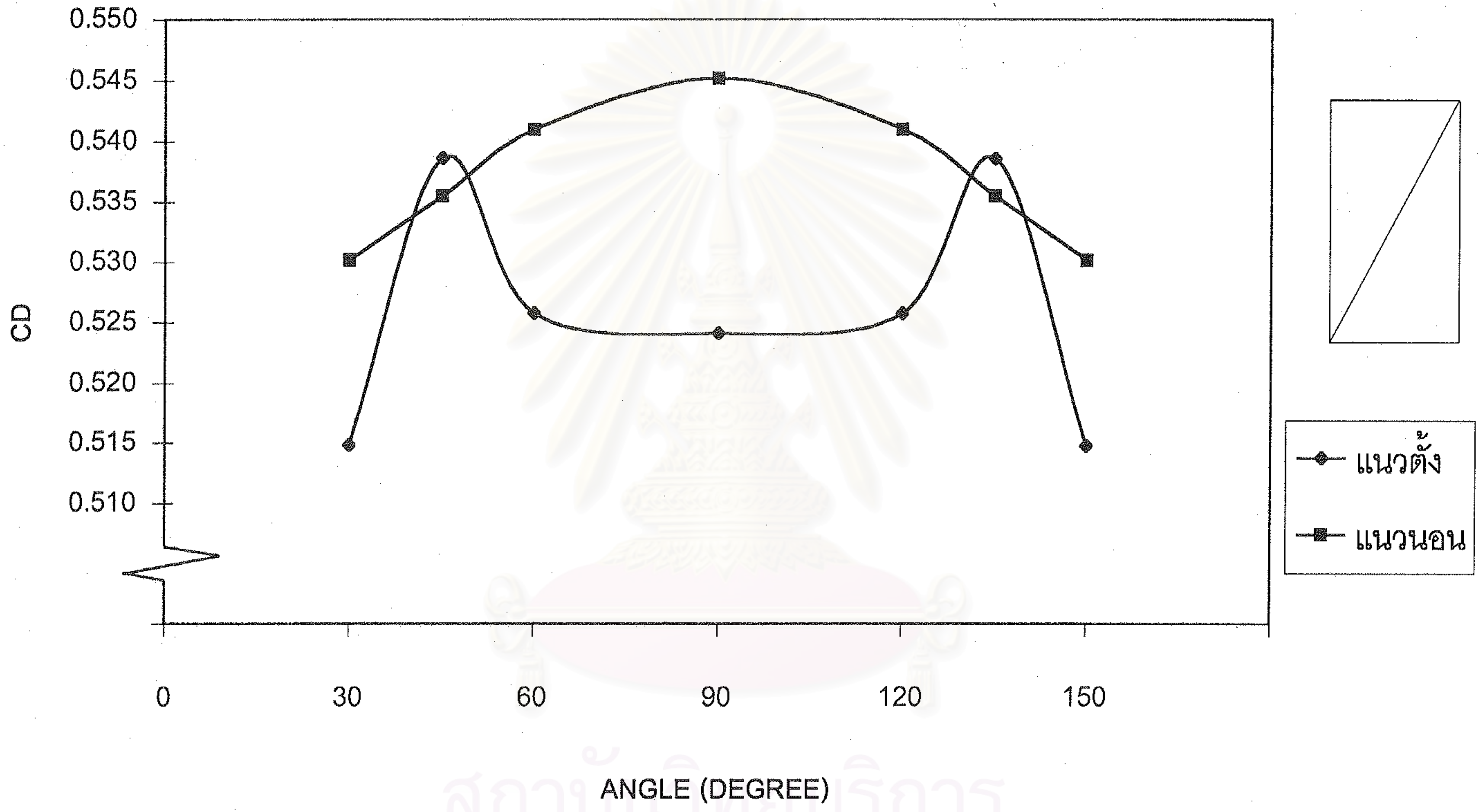
รูปที่ ข - 41 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ช่องเปิดภายในมีจำนวน 2 ช่อง โดยแบ่งช่องเปิดภายในด้วยเส้นที่แบ่งครึ่งด้านยาว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



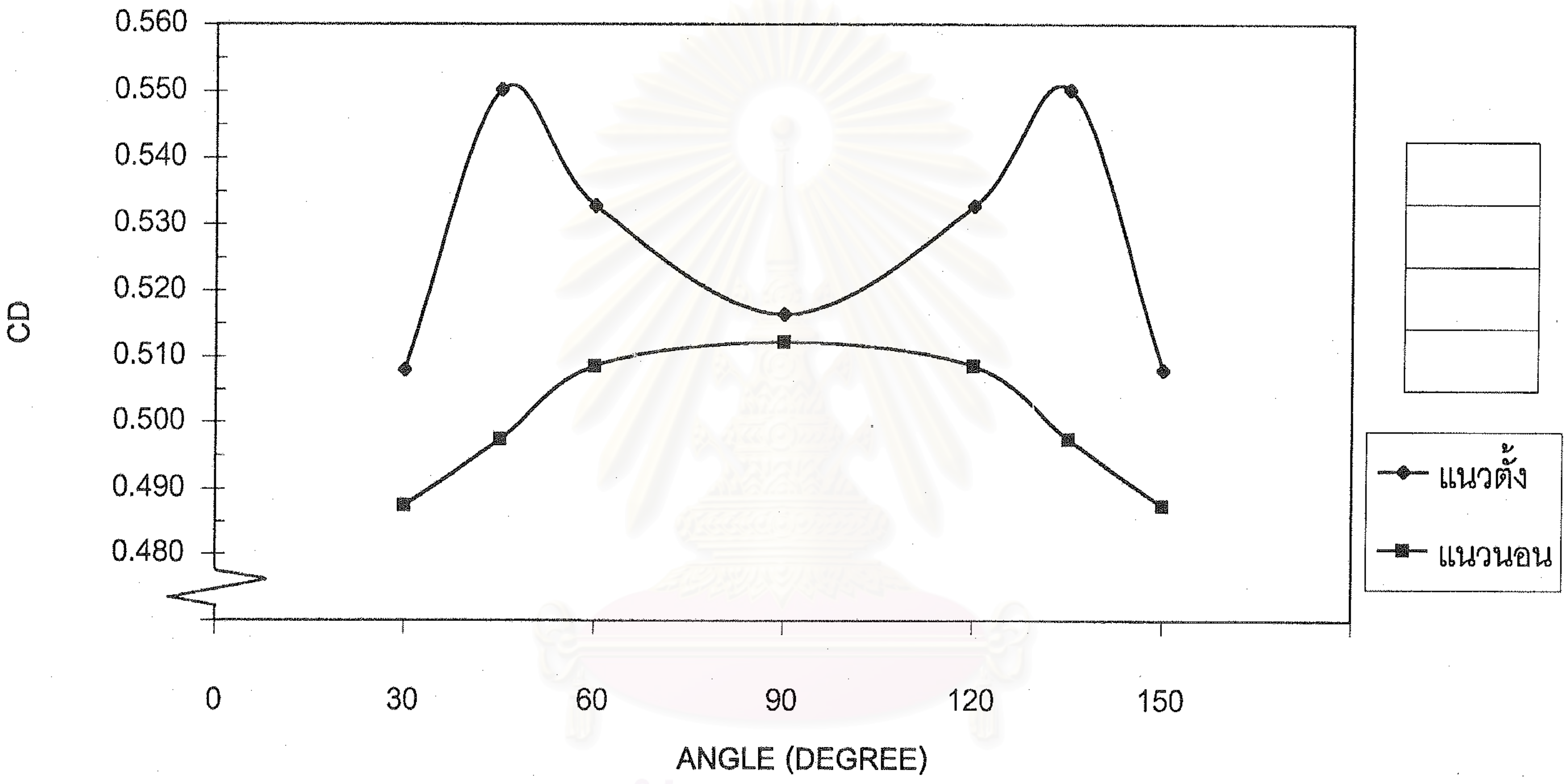
รูปที่ ข - 42 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ช่องเปิดภายในมีจำนวน 2 ช่อง โดยแบ่งช่องเปิดภายในด้วยเส้นที่แบ่งครึ่งด้านกว้าง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

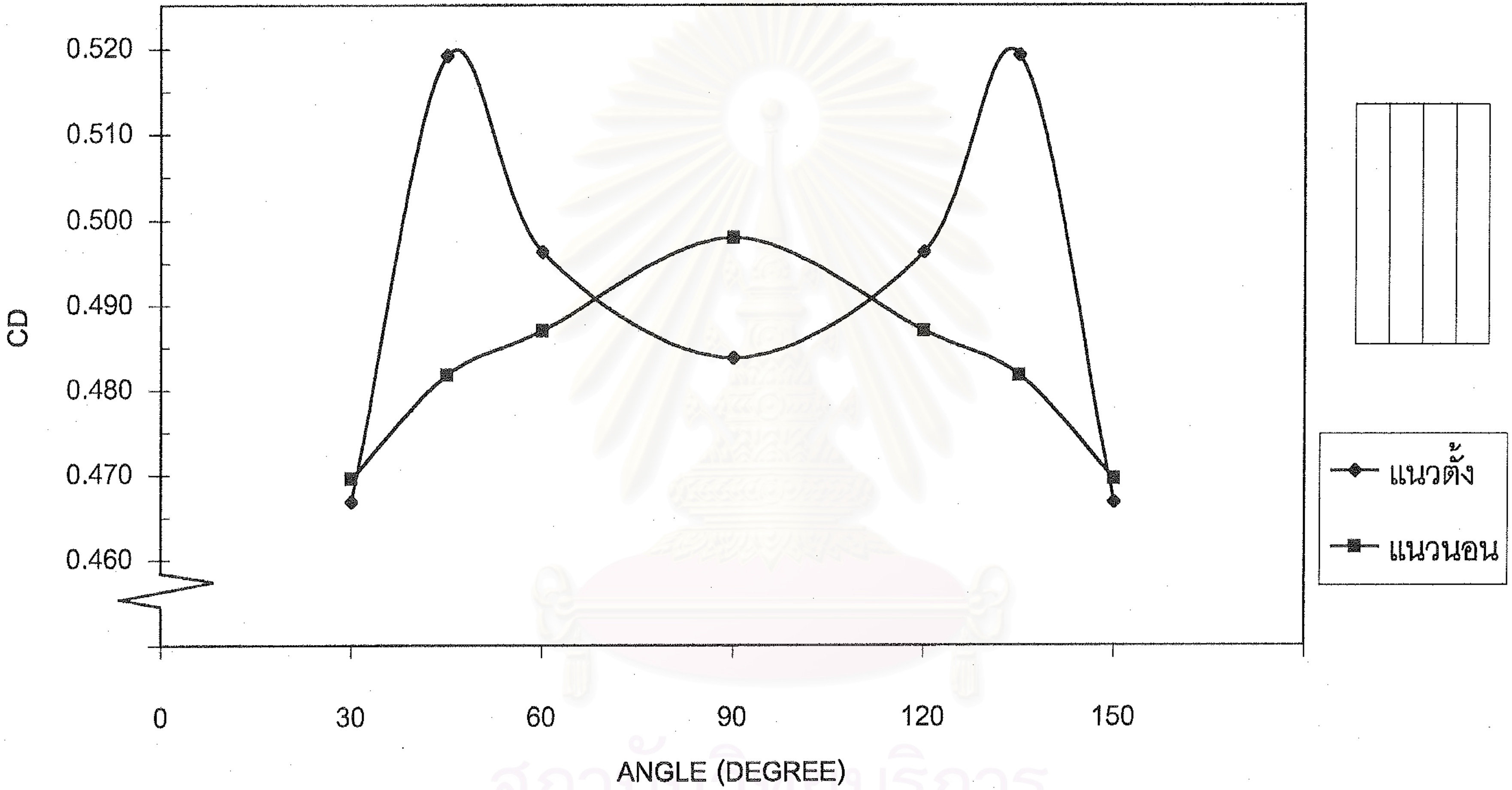


รูปที่ ข - 43 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ช่องเปิดภายในมีจำนวน 2 ช่อง โดยแบ่งช่องเปิดภายในด้วยเส้นทแยงมุม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

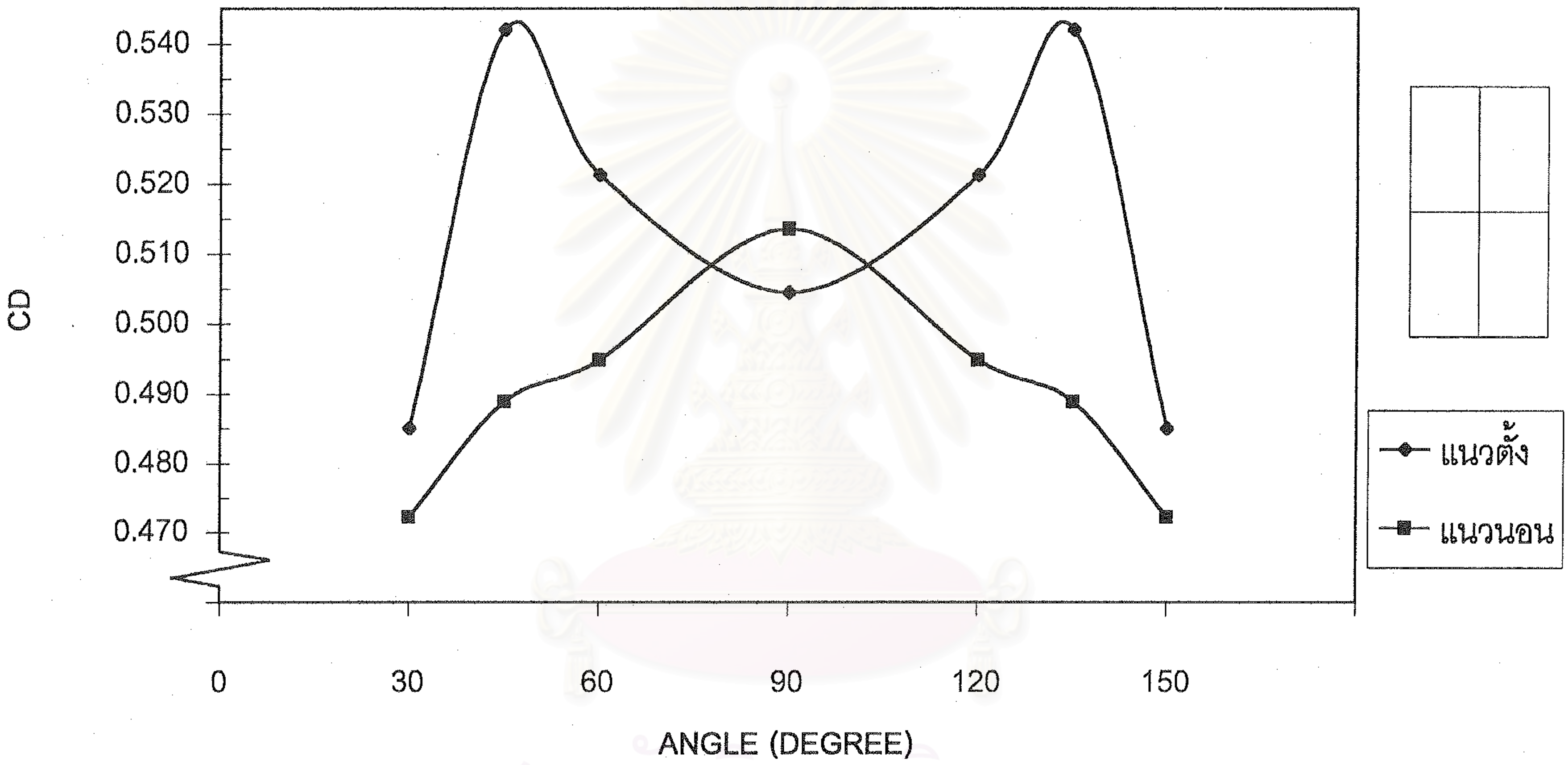


รูปที่ ข - 44 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ช่องเปิดภายในมีจำนวน 4 ช่อง โดยแบ่งช่องเปิดภายในด้วยเส้นที่แบ่งครึ่งด้านยาว



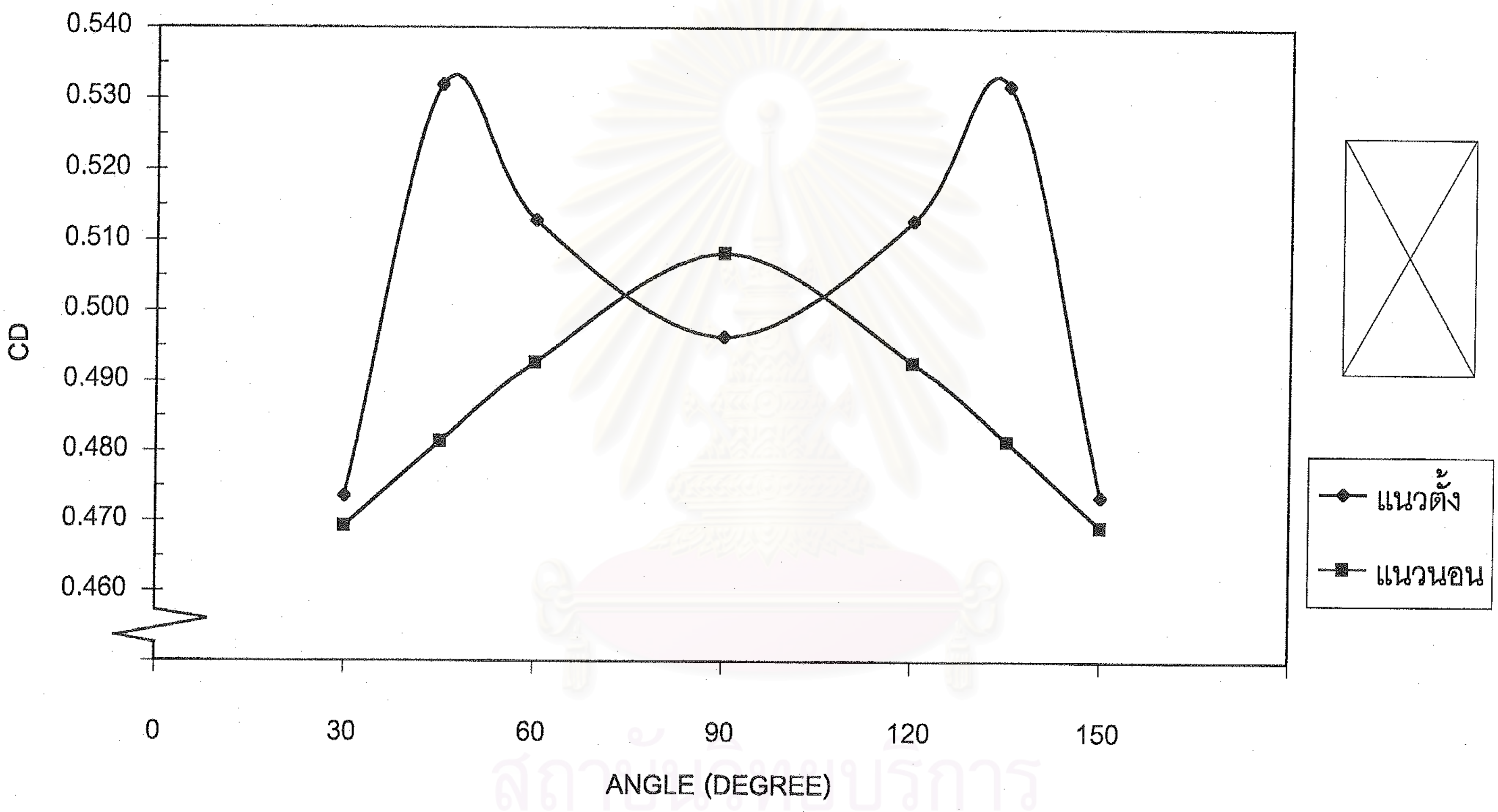
รูปที่ ข - 45 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ช่องเปิดภายในมีจำนวน 4 ช่อง โดยแบ่งช่องเปิดภายในด้วยเส้นที่แบ่งครึ่งด้านกว้าง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



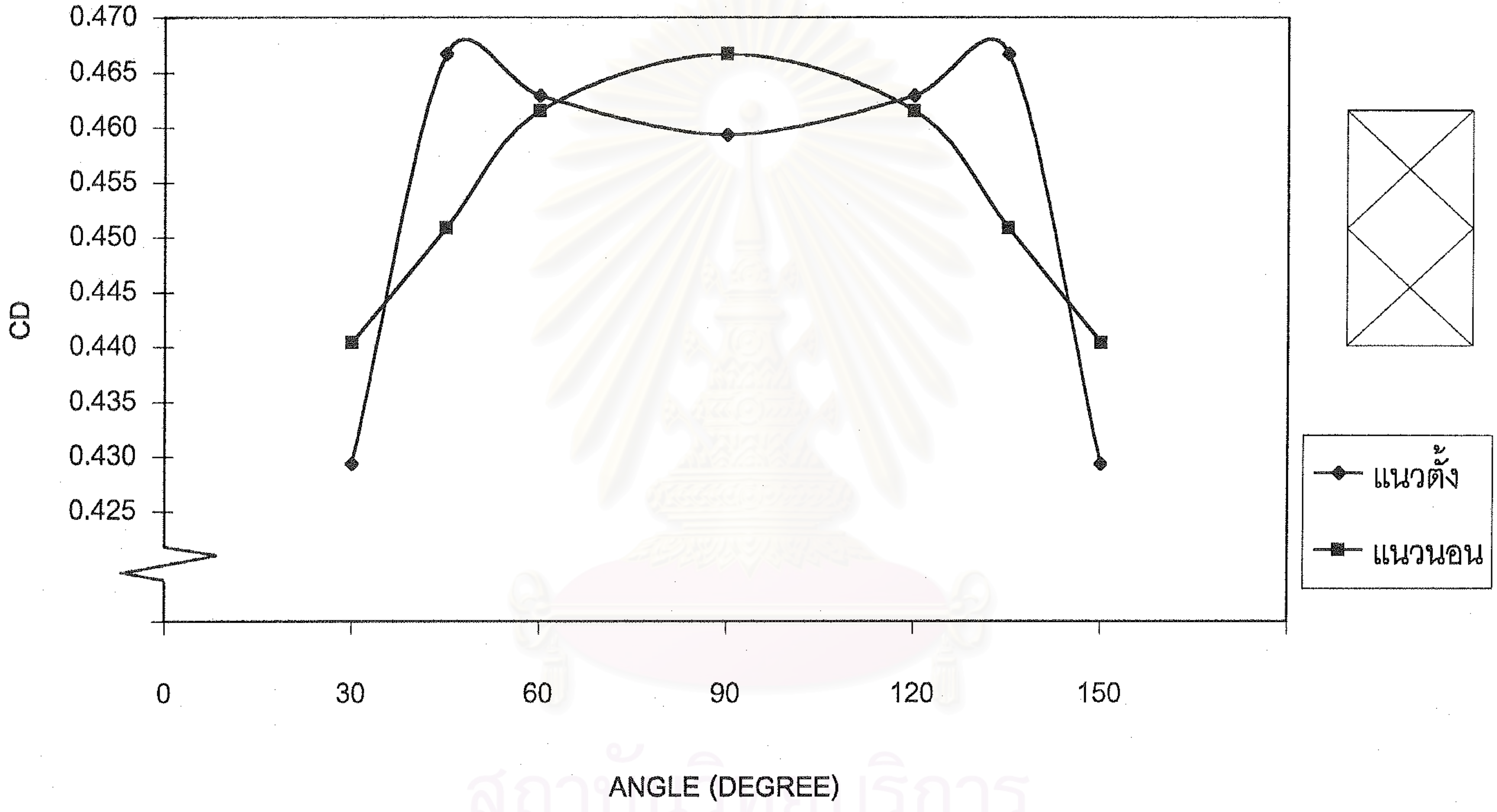
รูปที่ ข - 46 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ช่องเปิดภายในมีจำนวน 4 ช่อง โดยแบ่งช่องเปิดภายในด้วยเส้นที่แบ่งครึ่งด้านยาวและด้านกว้าง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

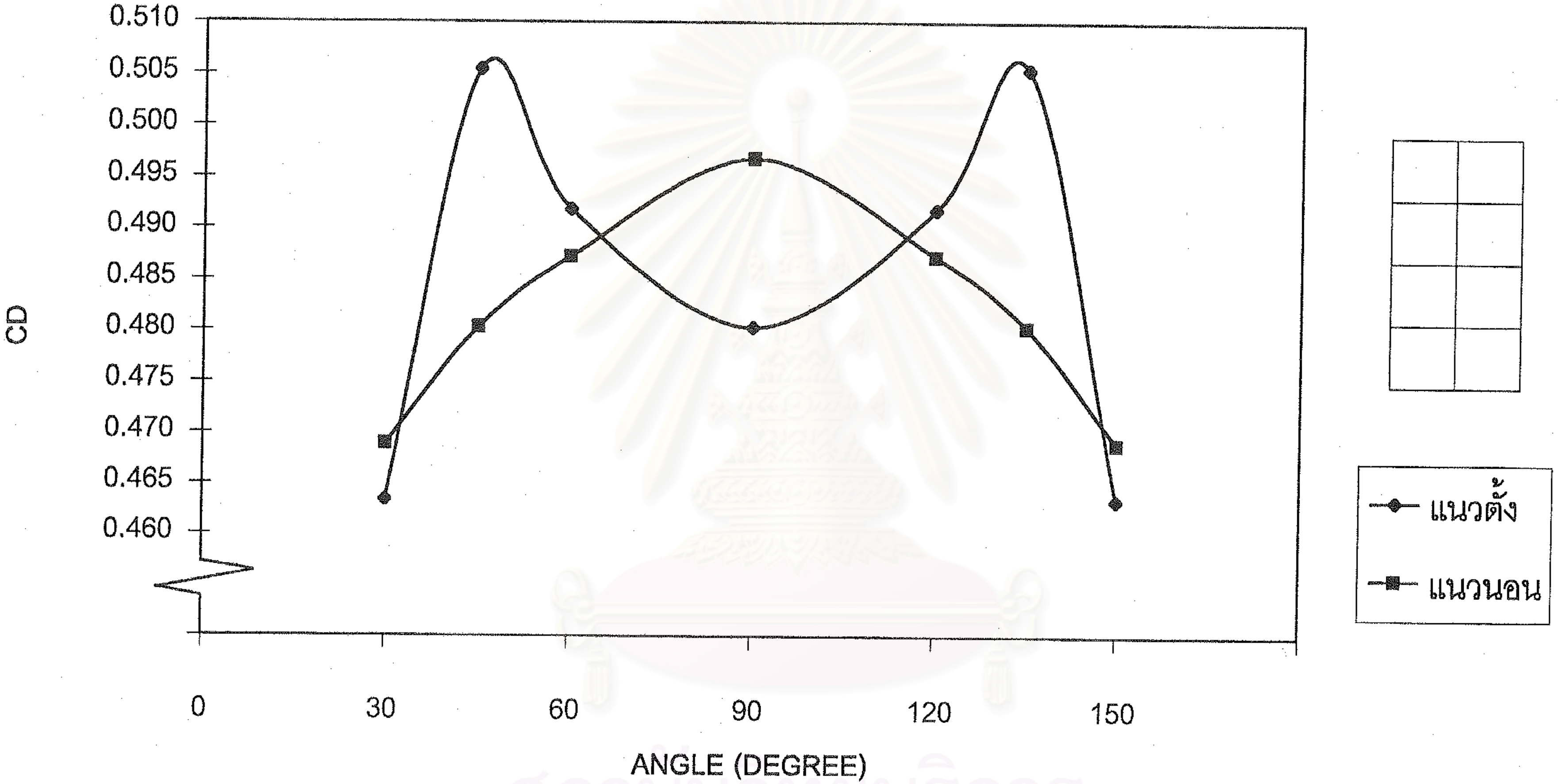


รูปที่ ข - 47 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ช่องเปิดภายในมีจำนวน 4 ช่อง โดยแบ่งช่องเปิดภายในด้วยเส้นทแยงมุม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

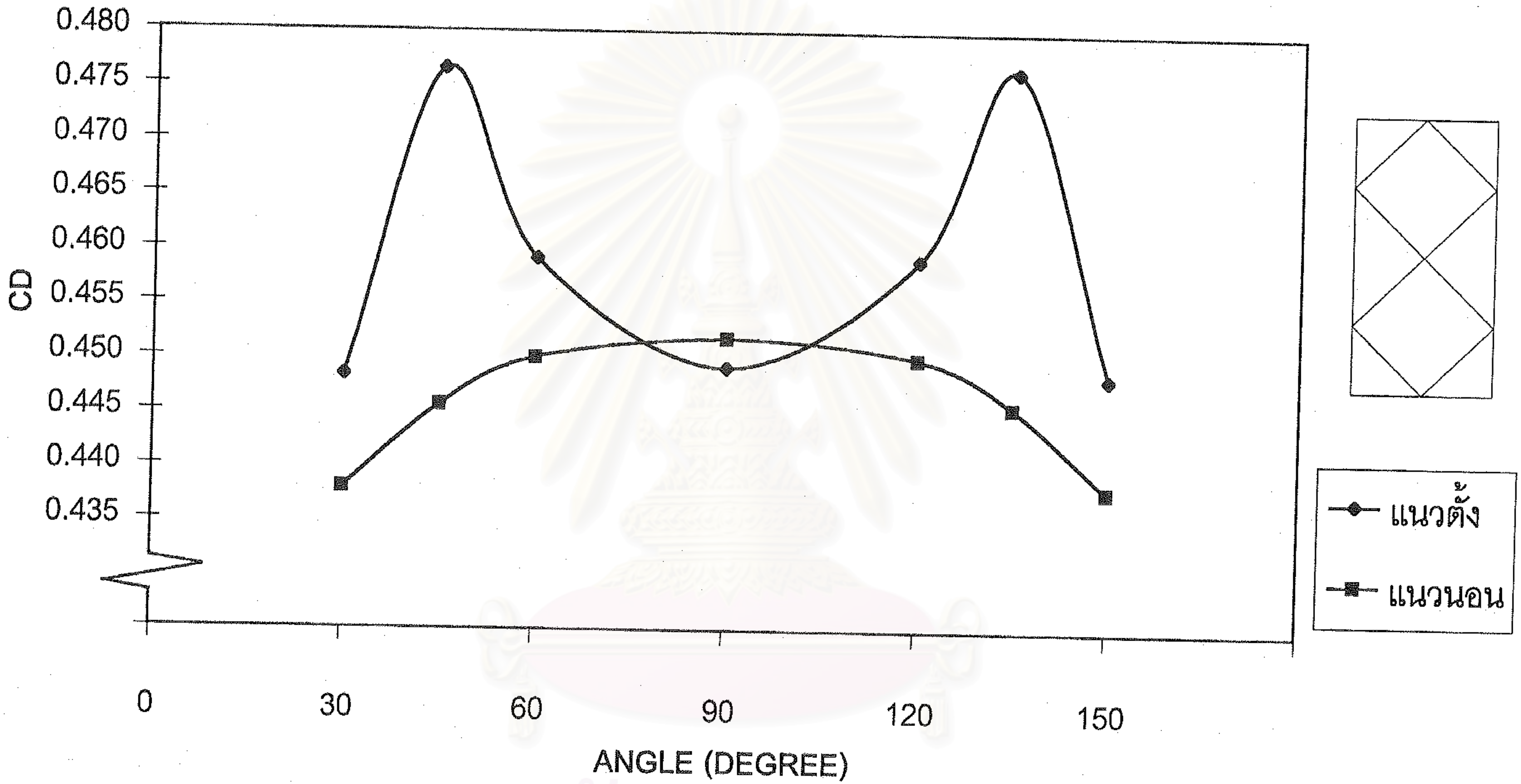


รูปที่ ข - 48 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ช่องเปิดภายในมีจำนวน 7 ช่อง โดยเส้นแบ่งภายในไม่เป็นเส้นแนวระดับและแนวดิ่ง



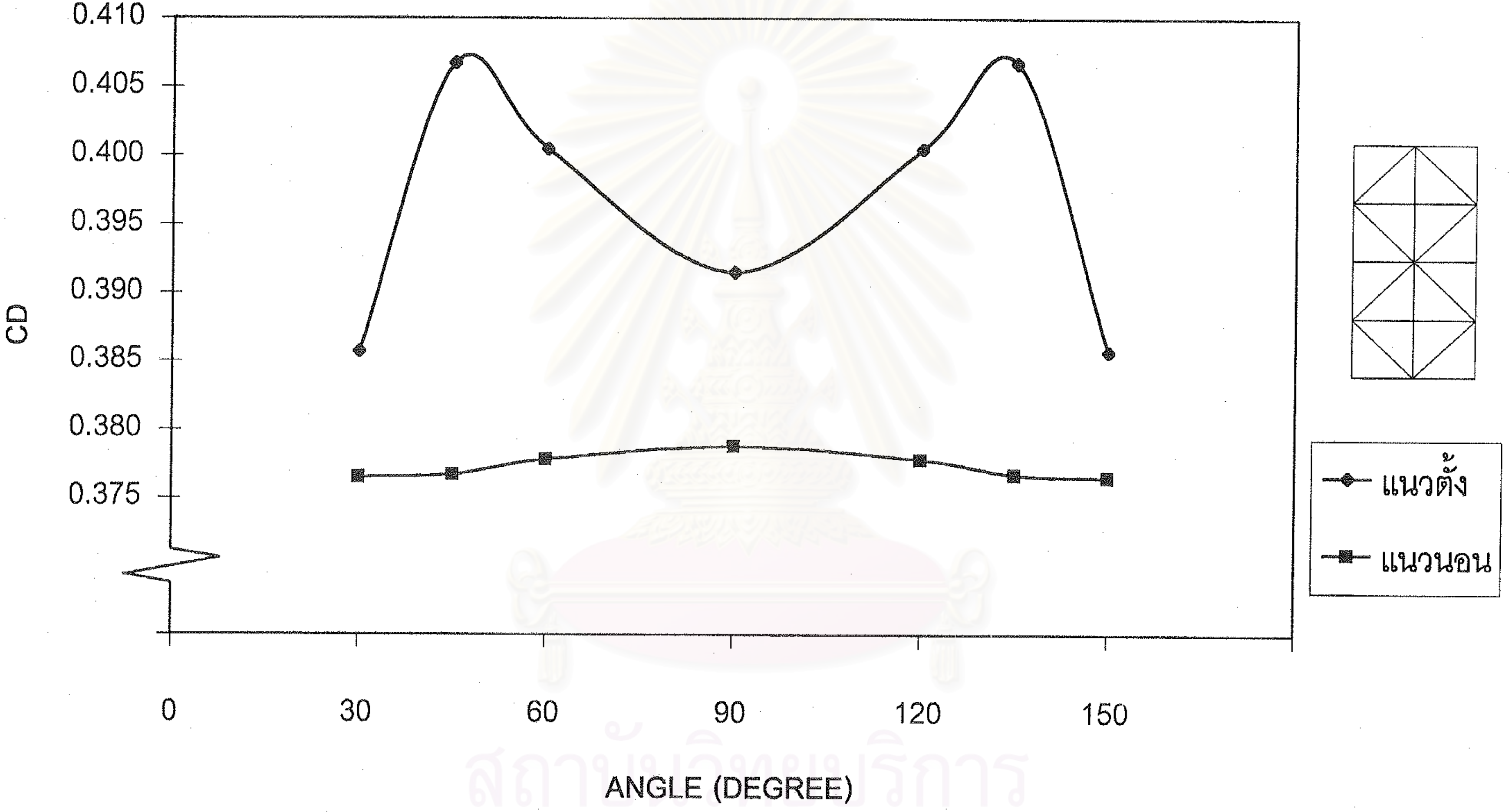
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ข - 49 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ช่องเปิดภายในมีจำนวน 8 ช่อง โดยเส้นแบ่งภายในเป็น

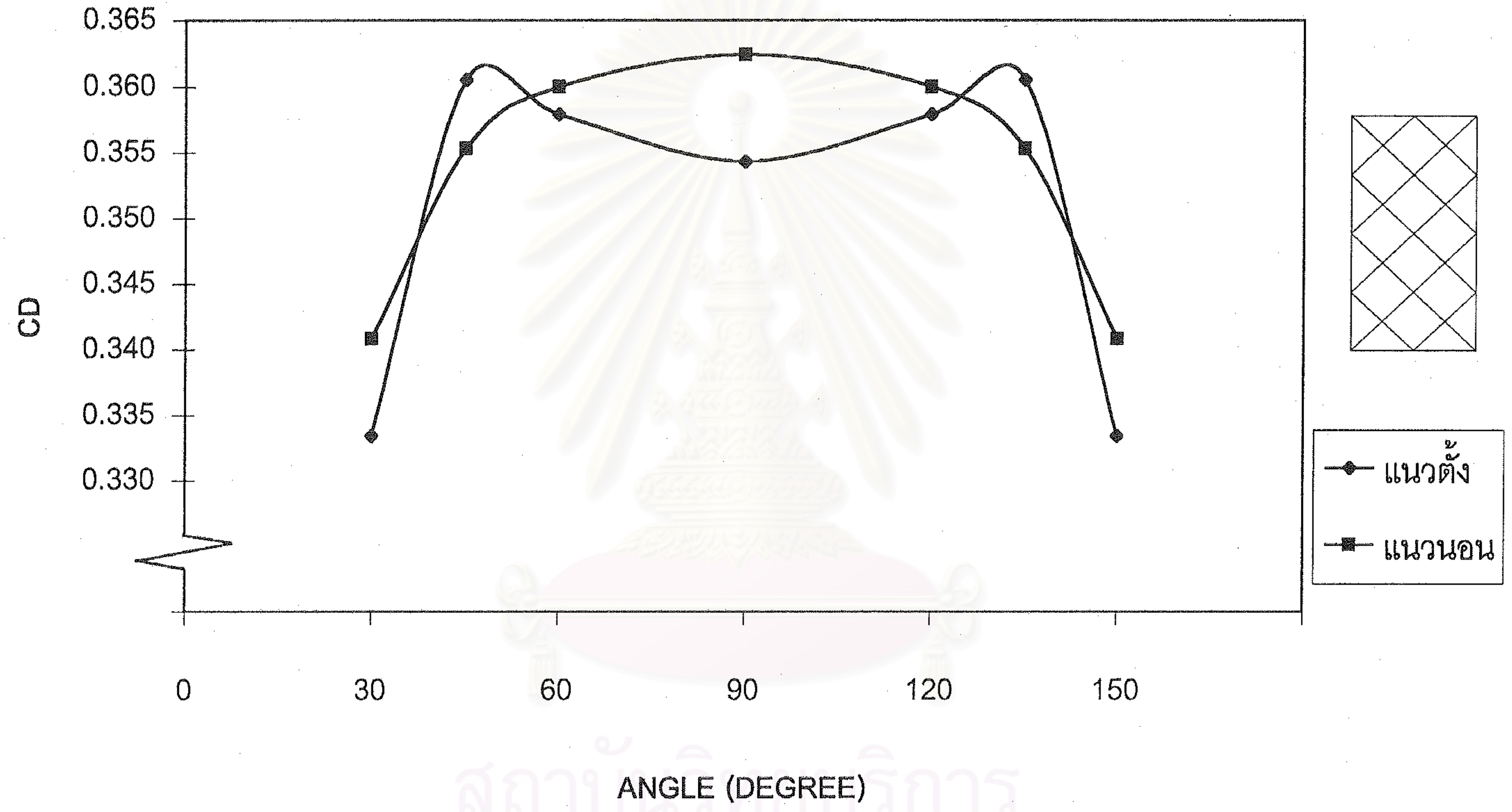


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ข - 50 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ช่องเปิดภายในมีจำนวน 8 ช่อง โดยเส้นแบ่งภายในไม่เป็นเส้นแนวระดับและแนวดิ่ง

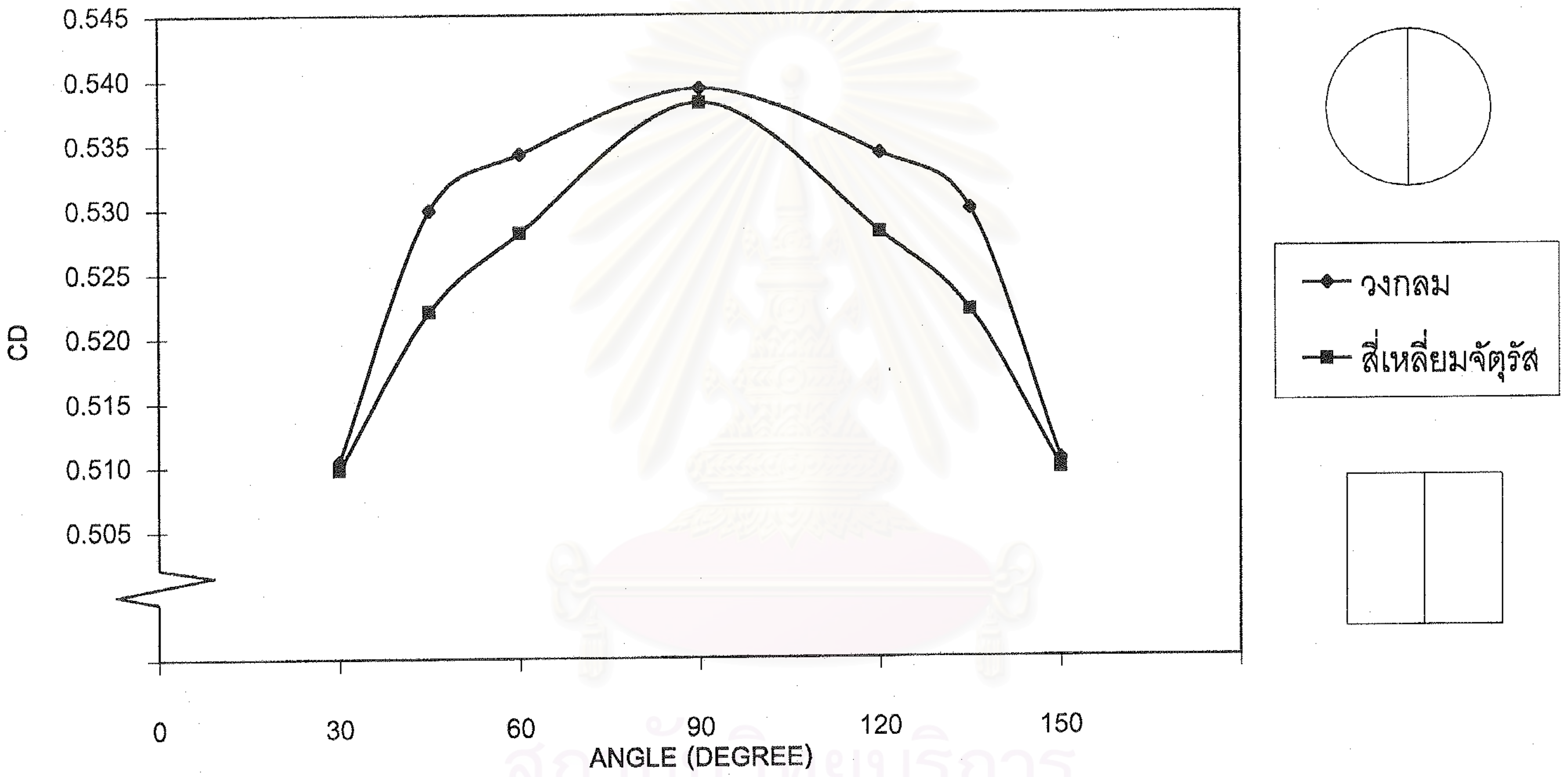


รูปที่ ข - 51 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ช่องเปิดภายในมีจำนวน 16 ช่อง โดยเส้นแบ่งภายในไม่เป็นเส้นแนวระดับและแนวดิ่ง



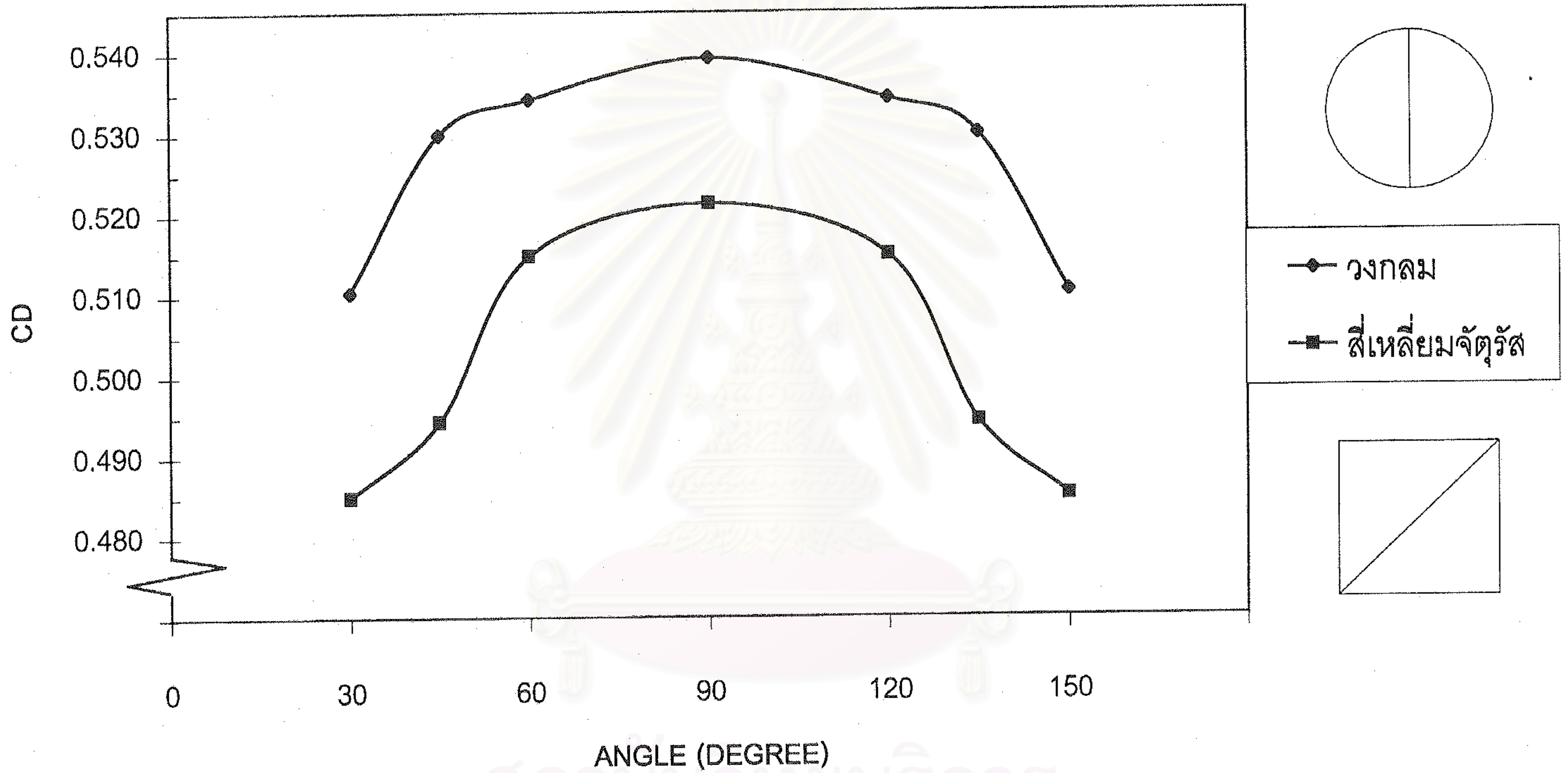
รูปที่ ข - 52 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ช่องเปิดภายในมีจำนวน 22 ช่อง โดยเส้นแบ่งภายในไม่เป็นเส้นแนวระดับและแนวดิ่ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

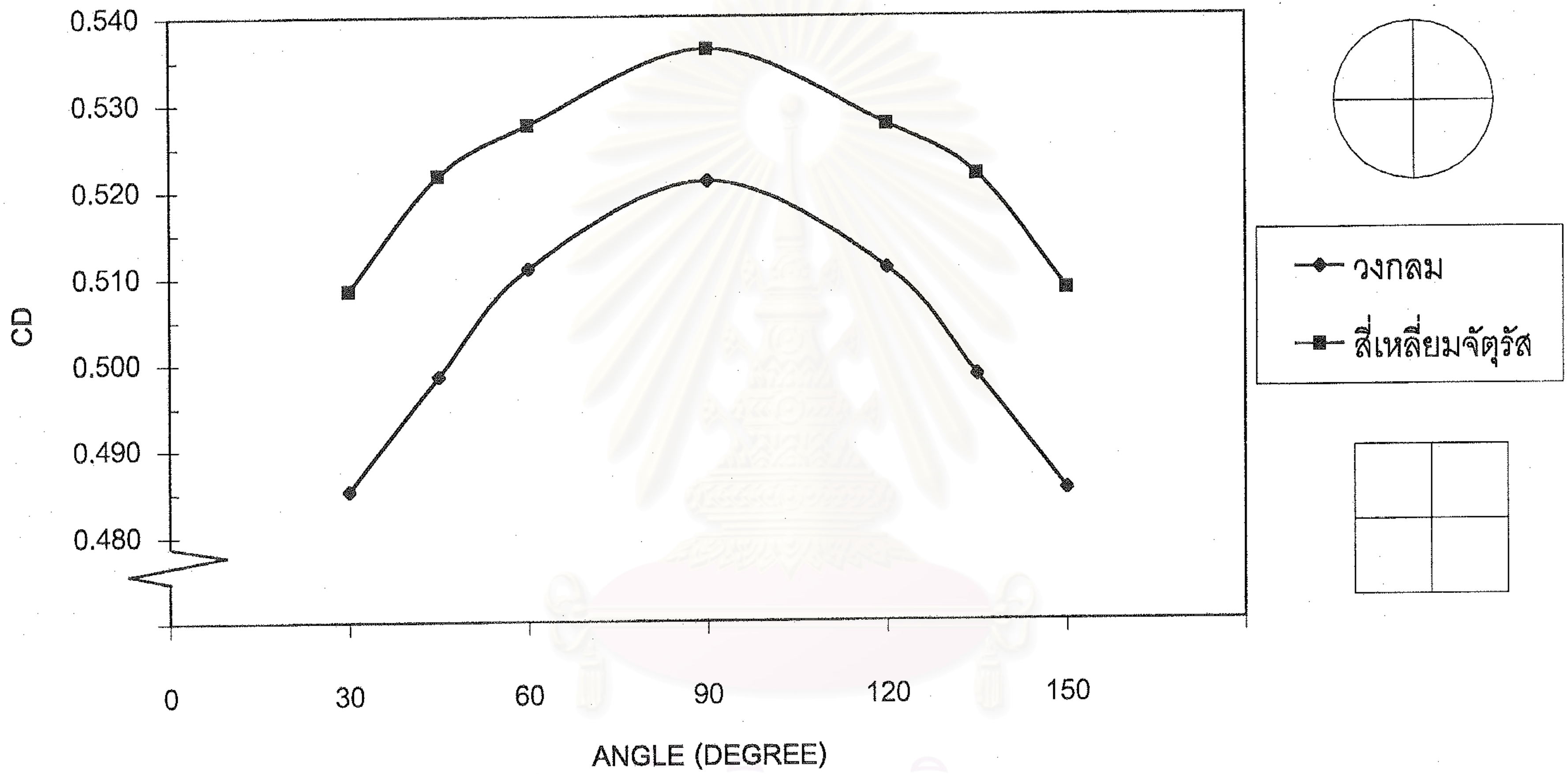


รูปที่ ข - 53 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นวงกลม และสี่เหลี่ยมจัตุรัส ช่องเปิดภายในมีจำนวน 2 ช่อง โดยที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสมีการแบ่งช่องเปิดภายในด้วยเส้นในแนวดิ่ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

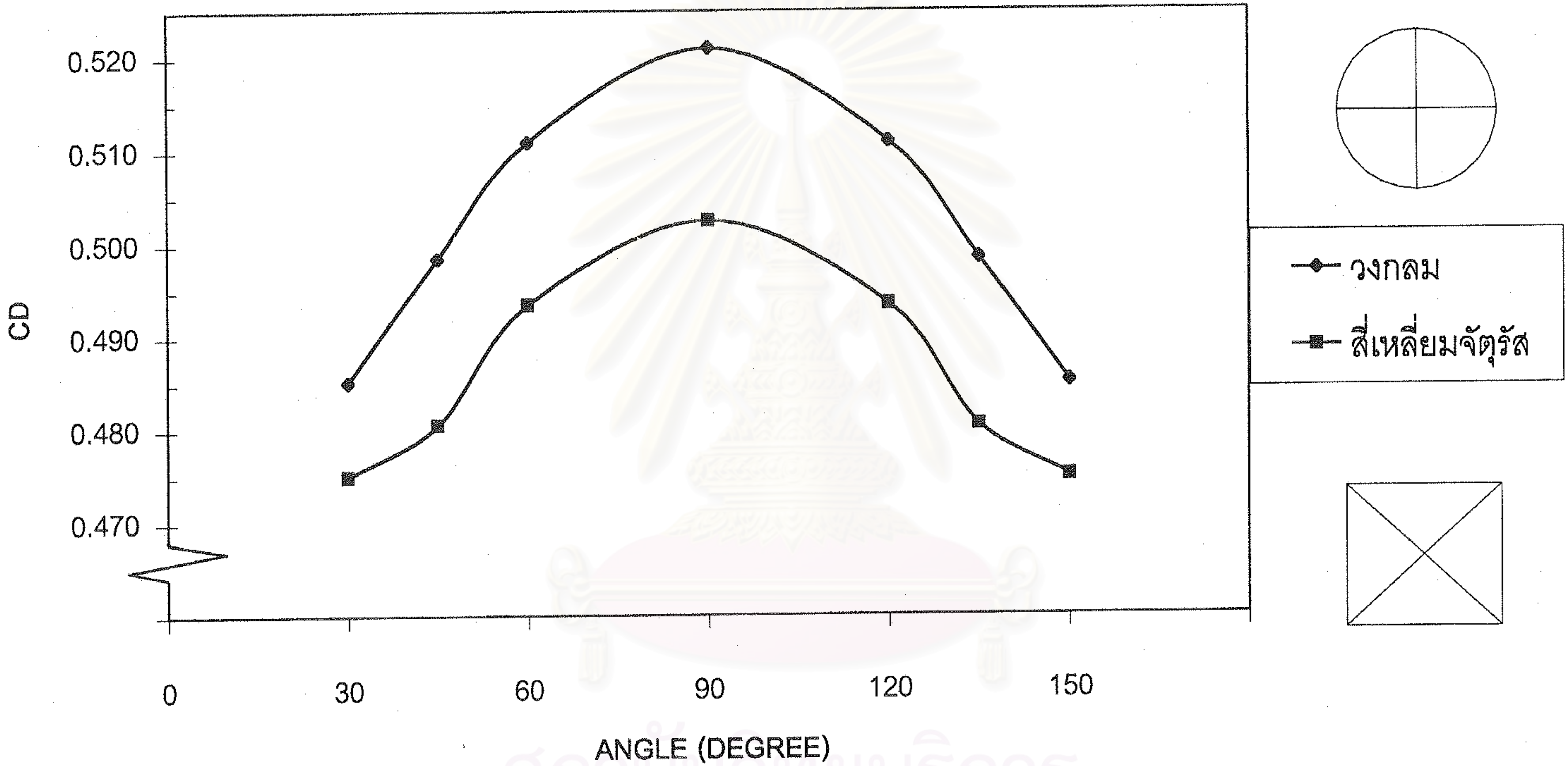


รูปที่ ข - 54 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นวงกลม และสี่เหลี่ยมจัตุรัส ช่องเปิดภายในมีจำนวน 2 ช่อง โดยที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสมีการแบ่งช่องเปิดภายในด้วยเส้นในแนวทแยงมุม



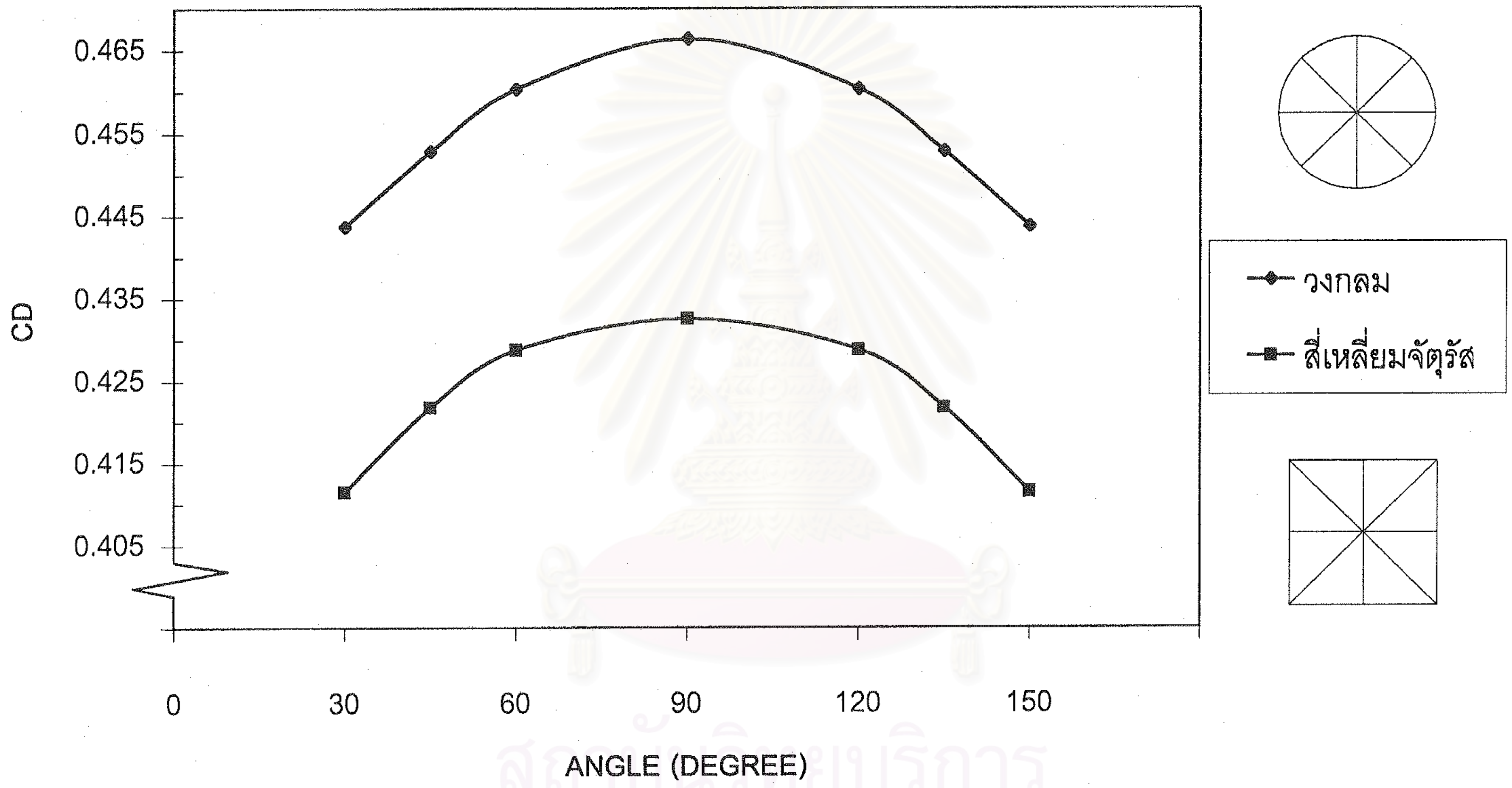
รูปที่ ข - 55 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นวงกลม และสี่เหลี่ยมจัตุรัส ช่องเปิดภายในมีจำนวน 4 ช่อง โดยที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสมีการแบ่งช่องเปิดภายในด้วยเส้นในแนวระดับ และแนวดิ่ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



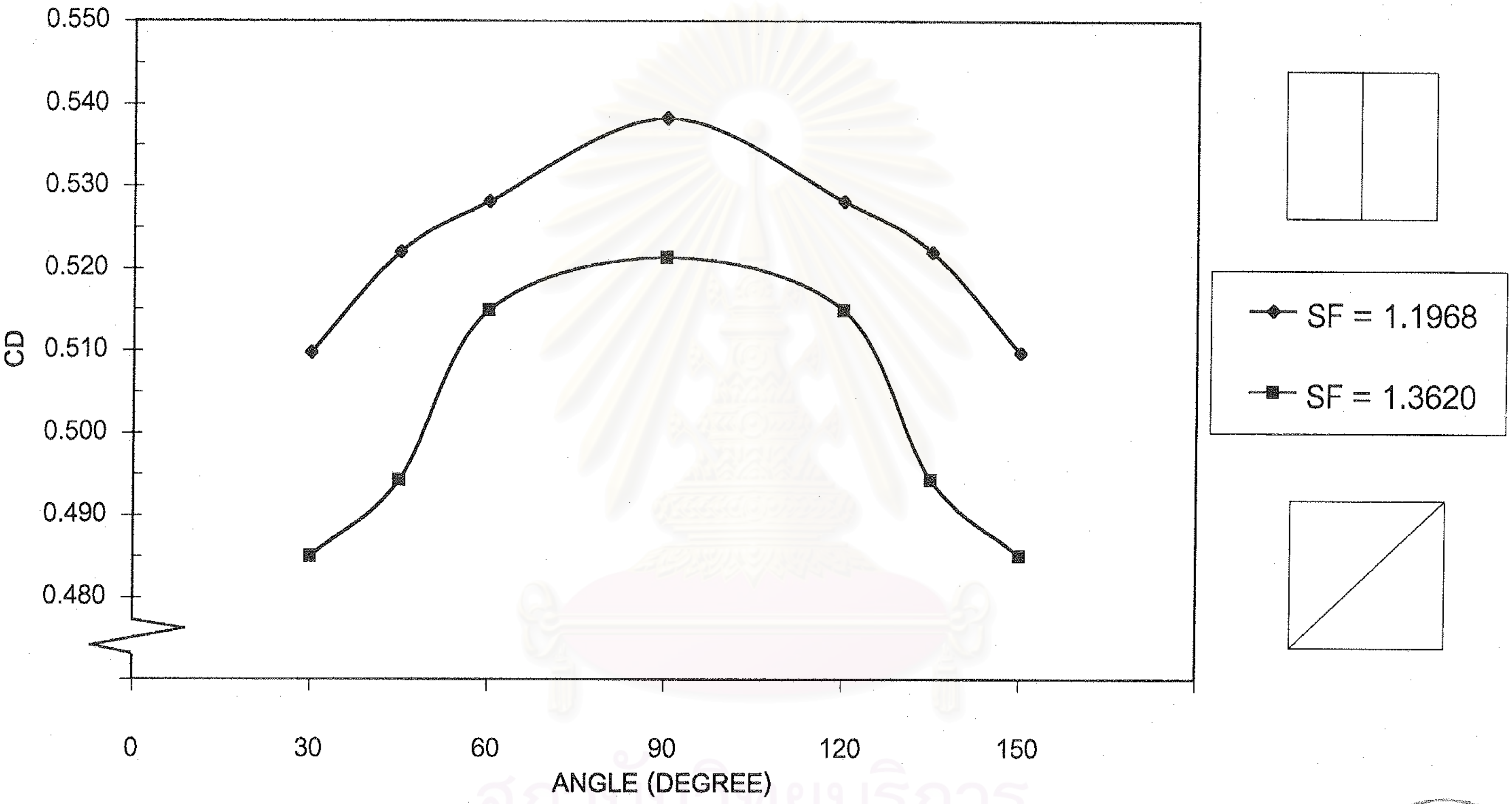
รูปที่ ข - 56 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นวงกลม และสี่เหลี่ยมจัตุรัส ช่องเปิดภายในมีจำนวน 4 ช่อง โดยที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสมีการแบ่งช่องเปิดภายในด้วยเส้นในแนวทแยงมุม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



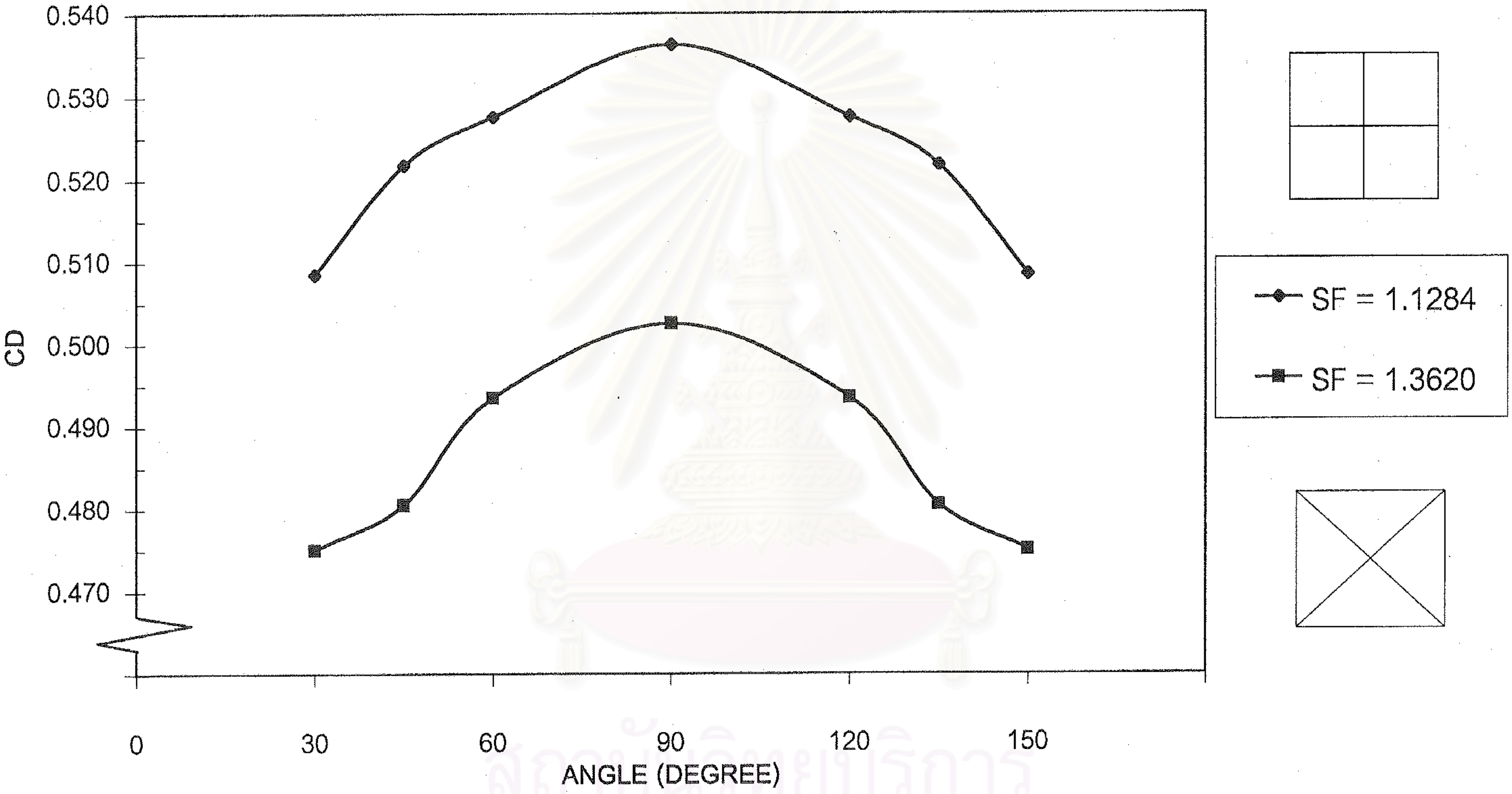
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ข - 57 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นวงกลม และสี่เหลี่ยมจัตุรัส ช่องเปิดภายในมีจำนวน 8 ช่อง



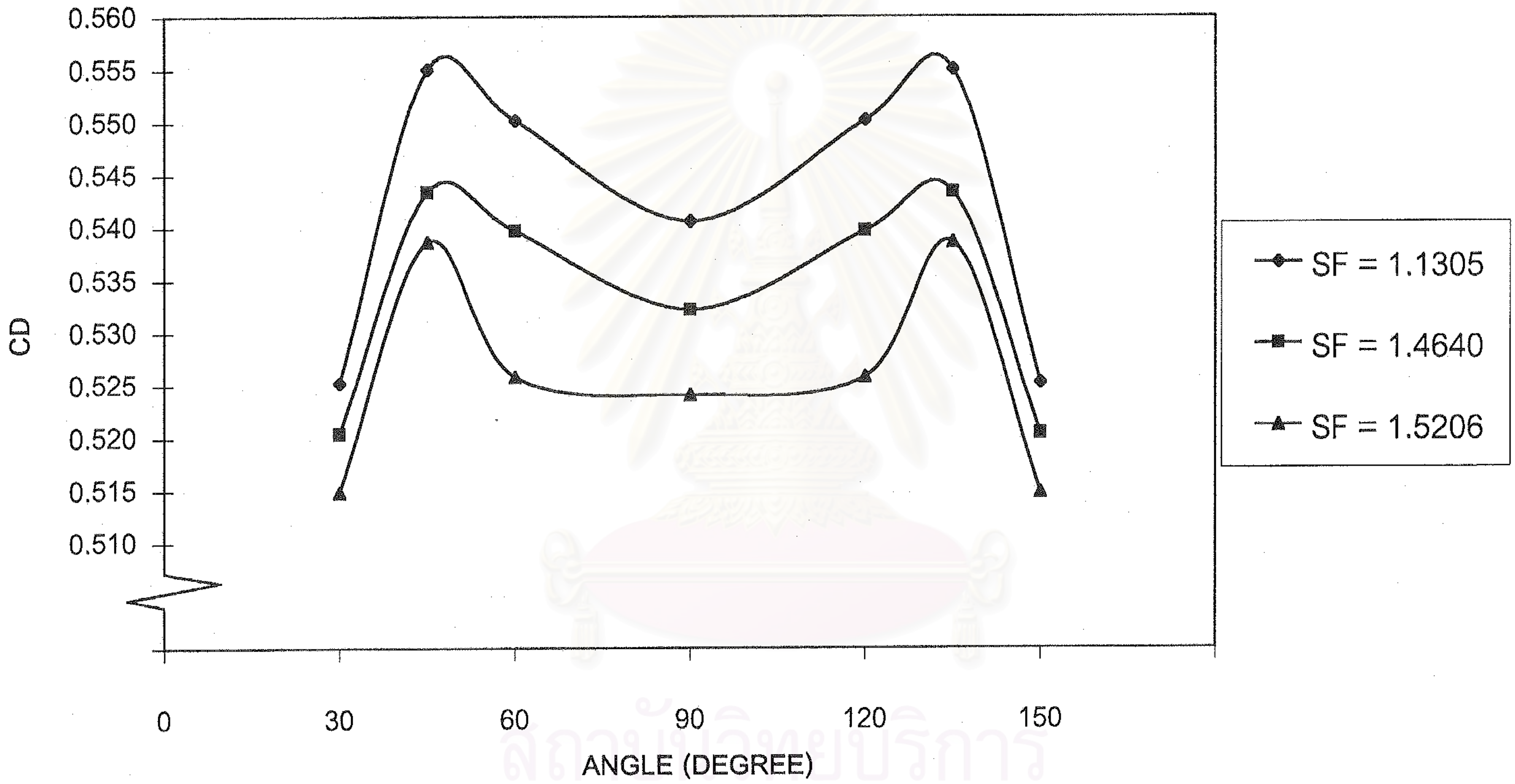
รูปที่ ข - 58 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยแบ่งช่องเปิดภายใน 2 ช่อง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

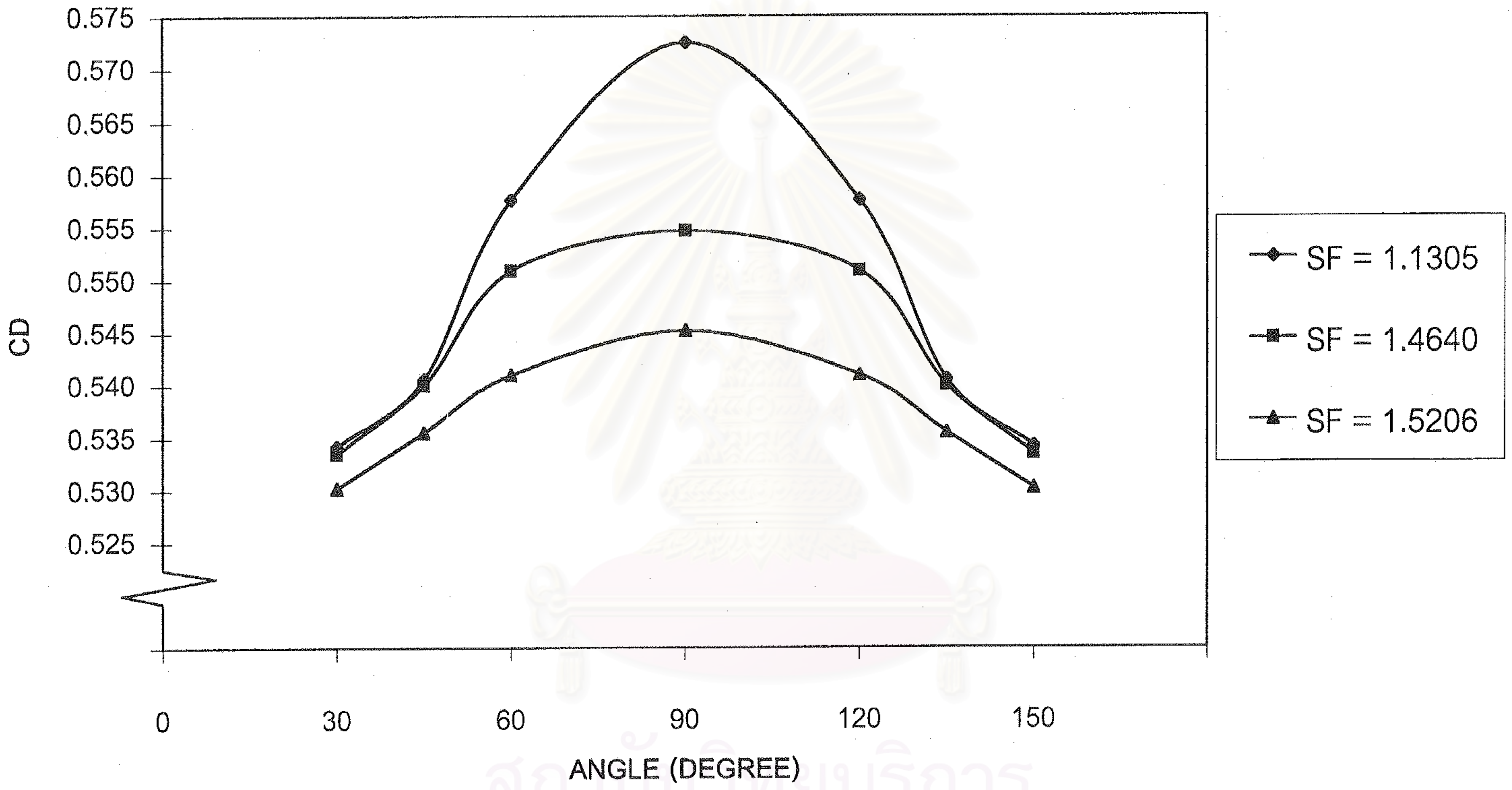


รูปที่ ข - 59 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยแบ่งช่องเปิดภายใน 4 ช่อง

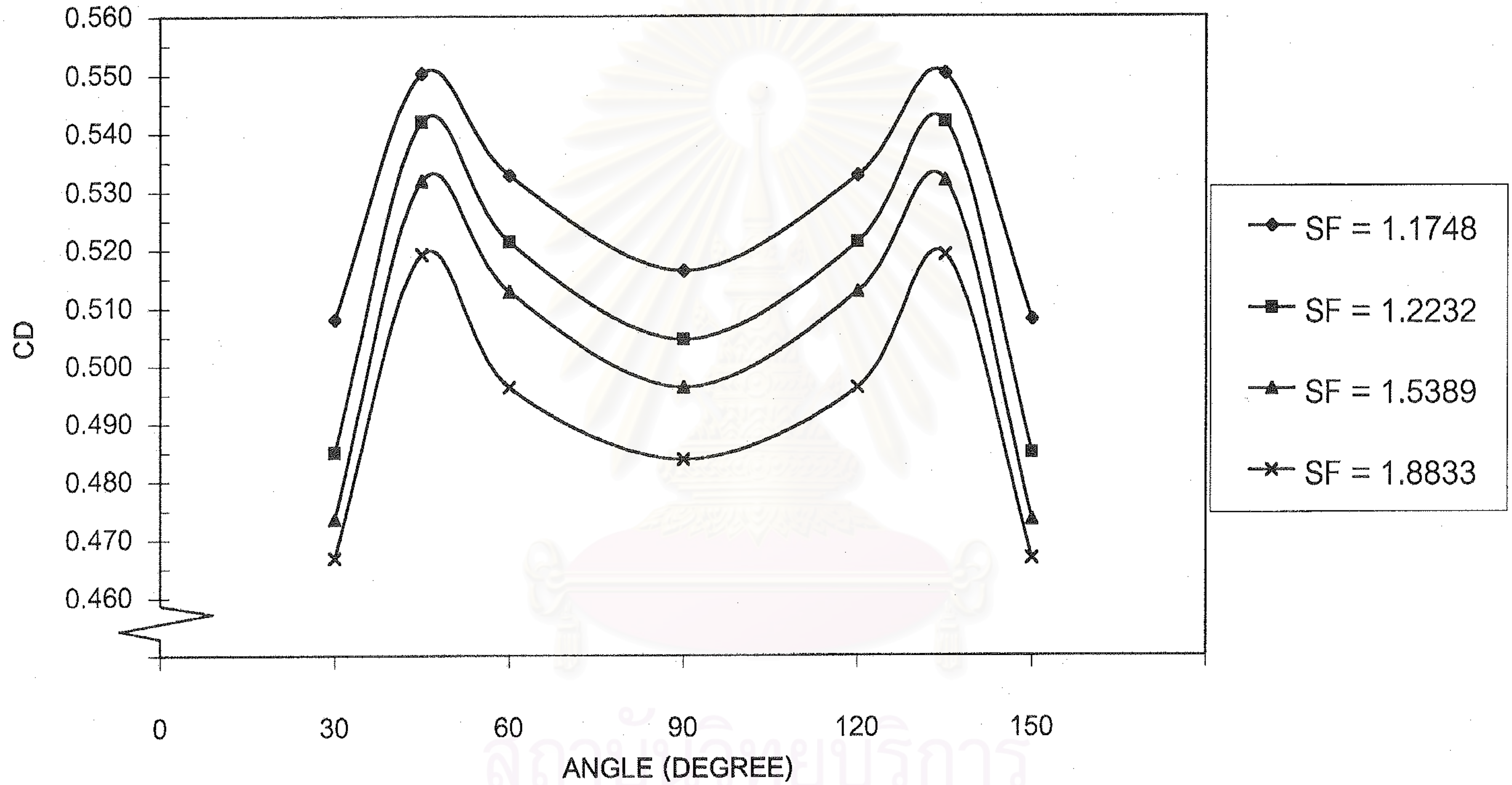
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข - 60 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่วางตัวในแนวตั้ง โดยแบ่งช่องเปิดภายใน 2 ช่อง

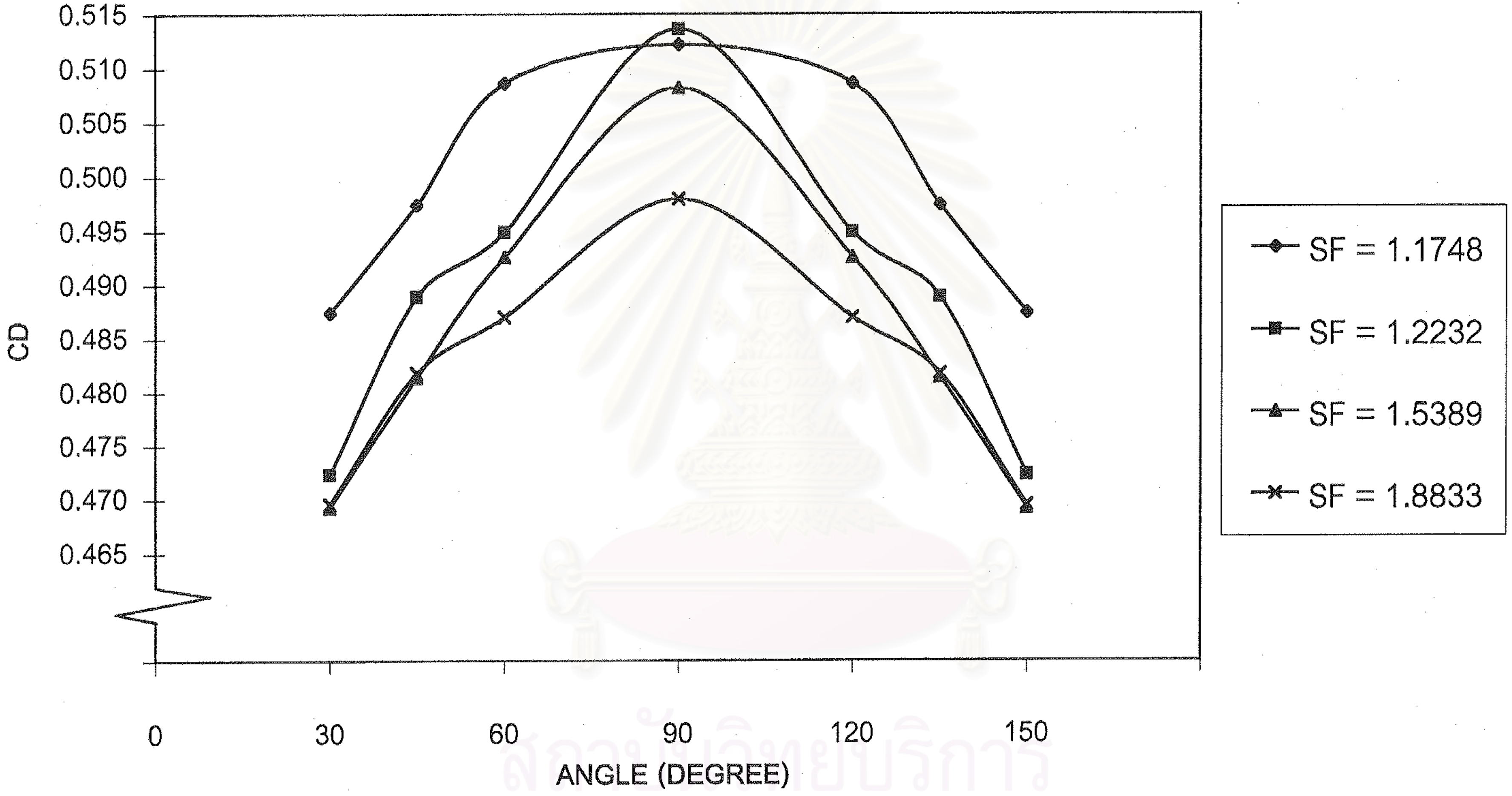


รูปที่ ข - 61 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่วางตัวในแนวนอน โดยแบ่งช่องเปิดภายใน 2 ช่อง



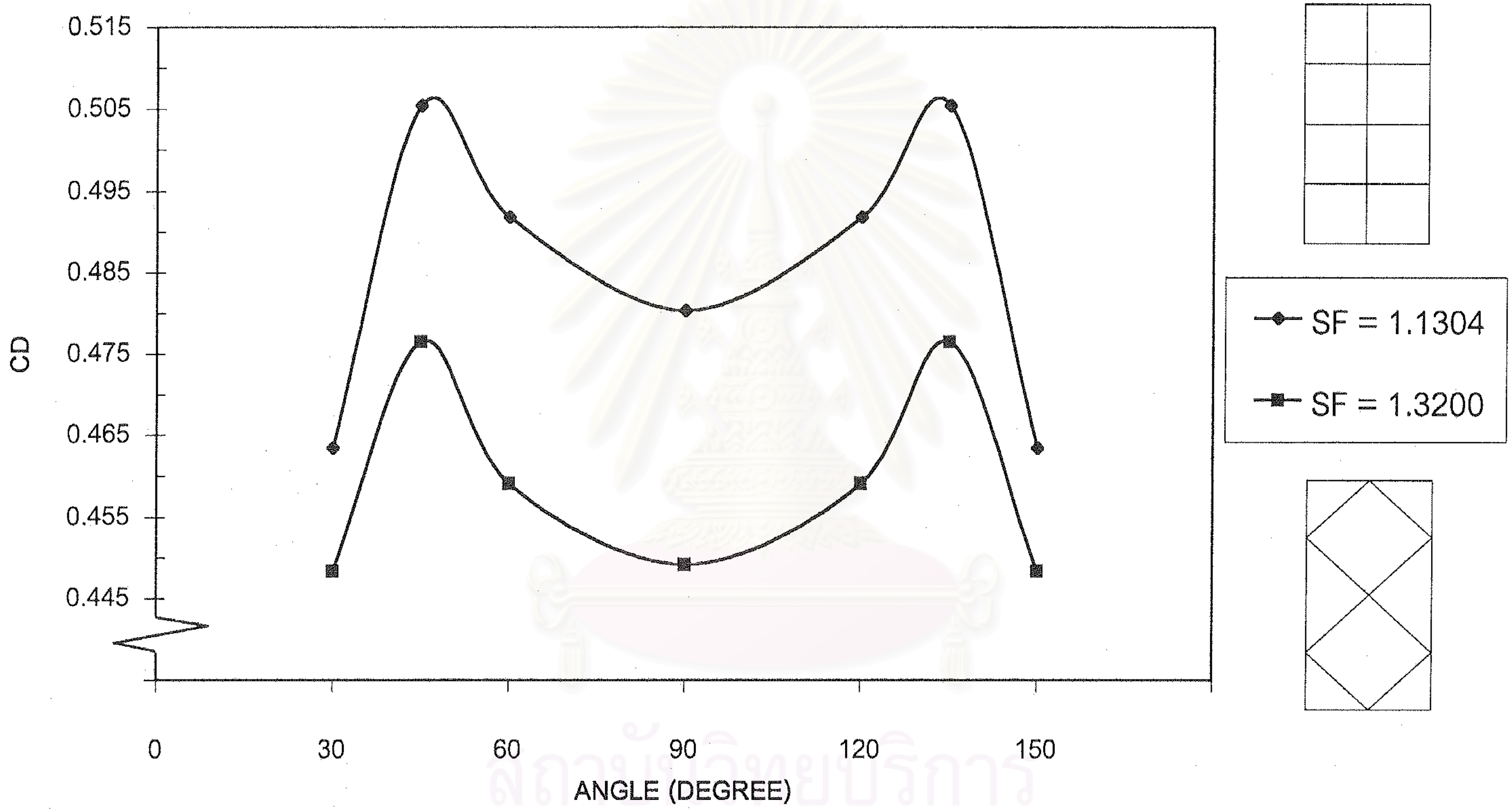
รูปที่ ข - 62 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่วางตัวในแนวตั้ง โดยแบ่งช่องเปิดภายใน 4 ช่อง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

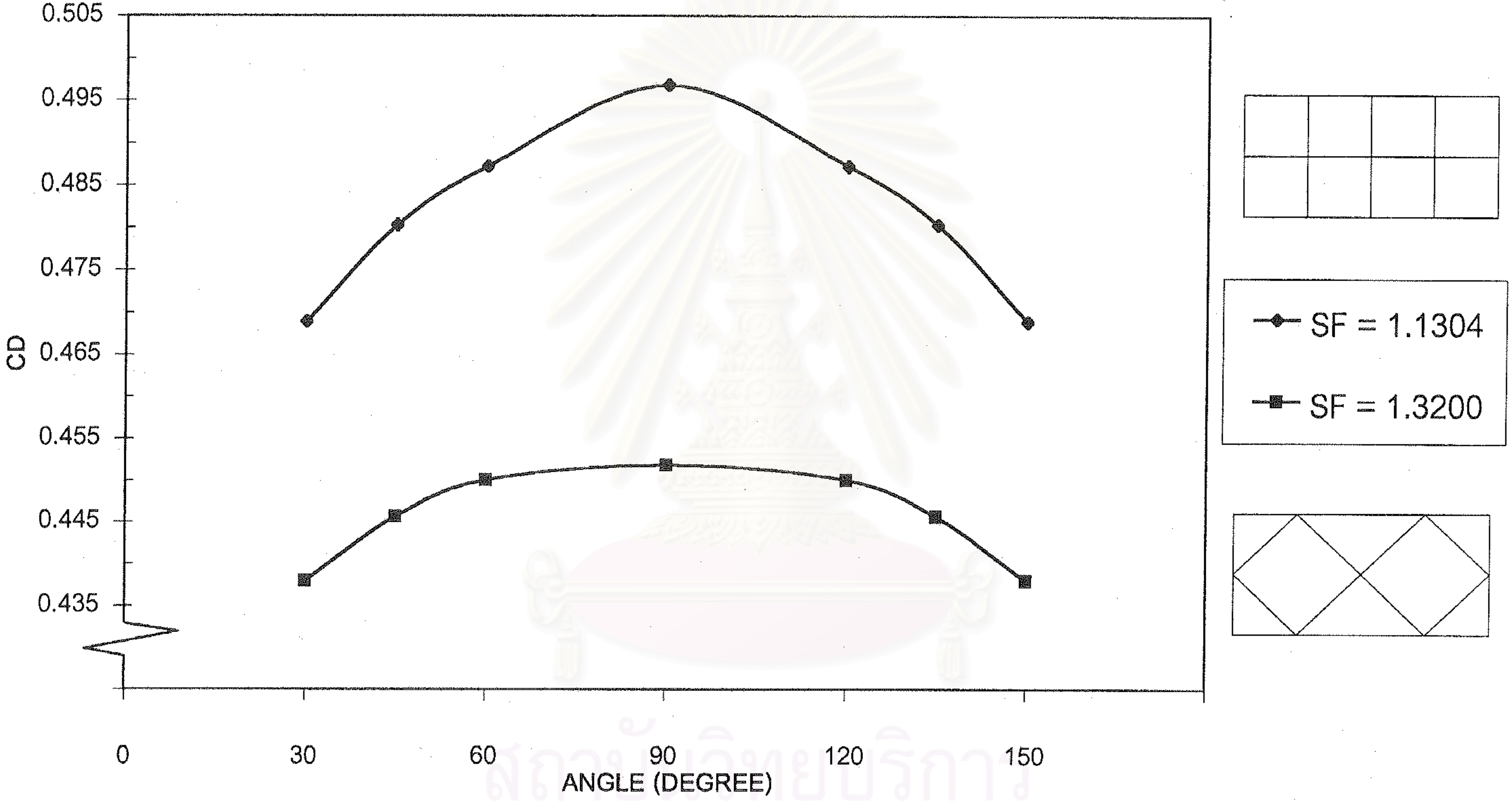


รูปที่ ข - 63 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่วางตัวในแนวนอน โดยแบ่งช่องเปิดภายใน 4 ช่อง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

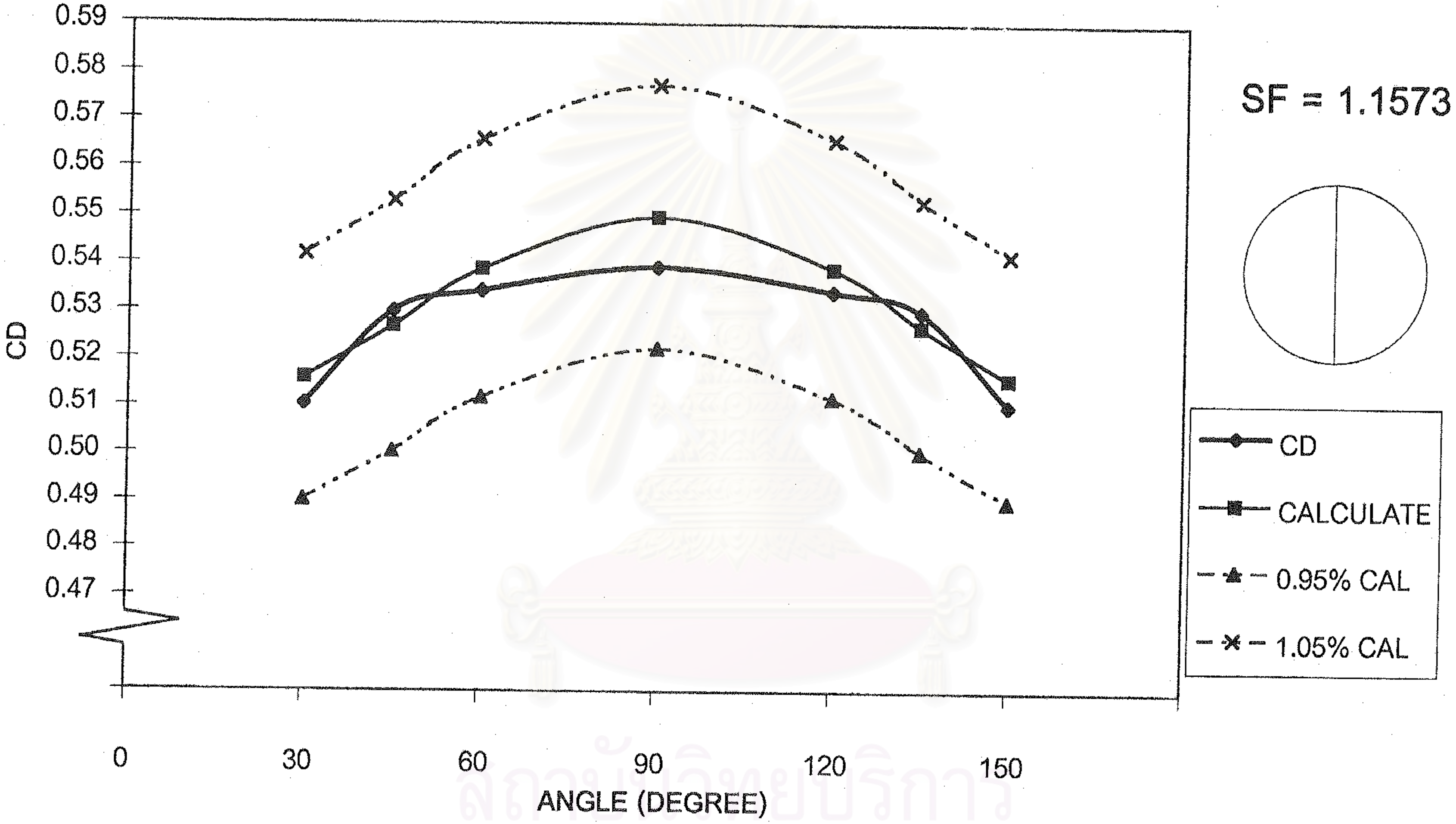


รูปที่ ข - 64 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่วางตัวในแนวตั้ง โดยแบ่งช่องเปิดภายใน 8 ช่อง



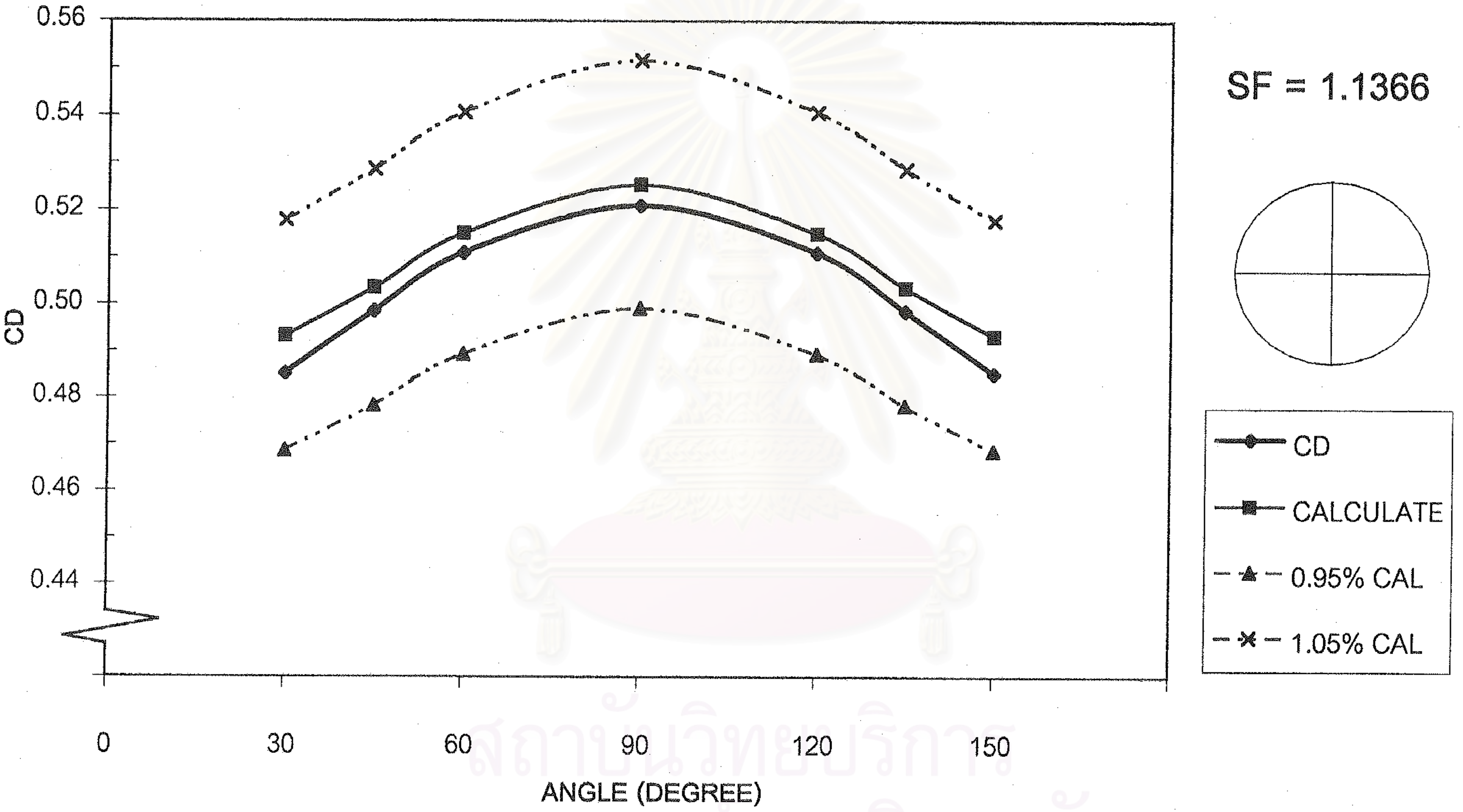
รูปที่ ข - 65 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบสำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่วางตัวในแนวนอน โดยแบ่งช่องเปิดภายใน 8 ช่อง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



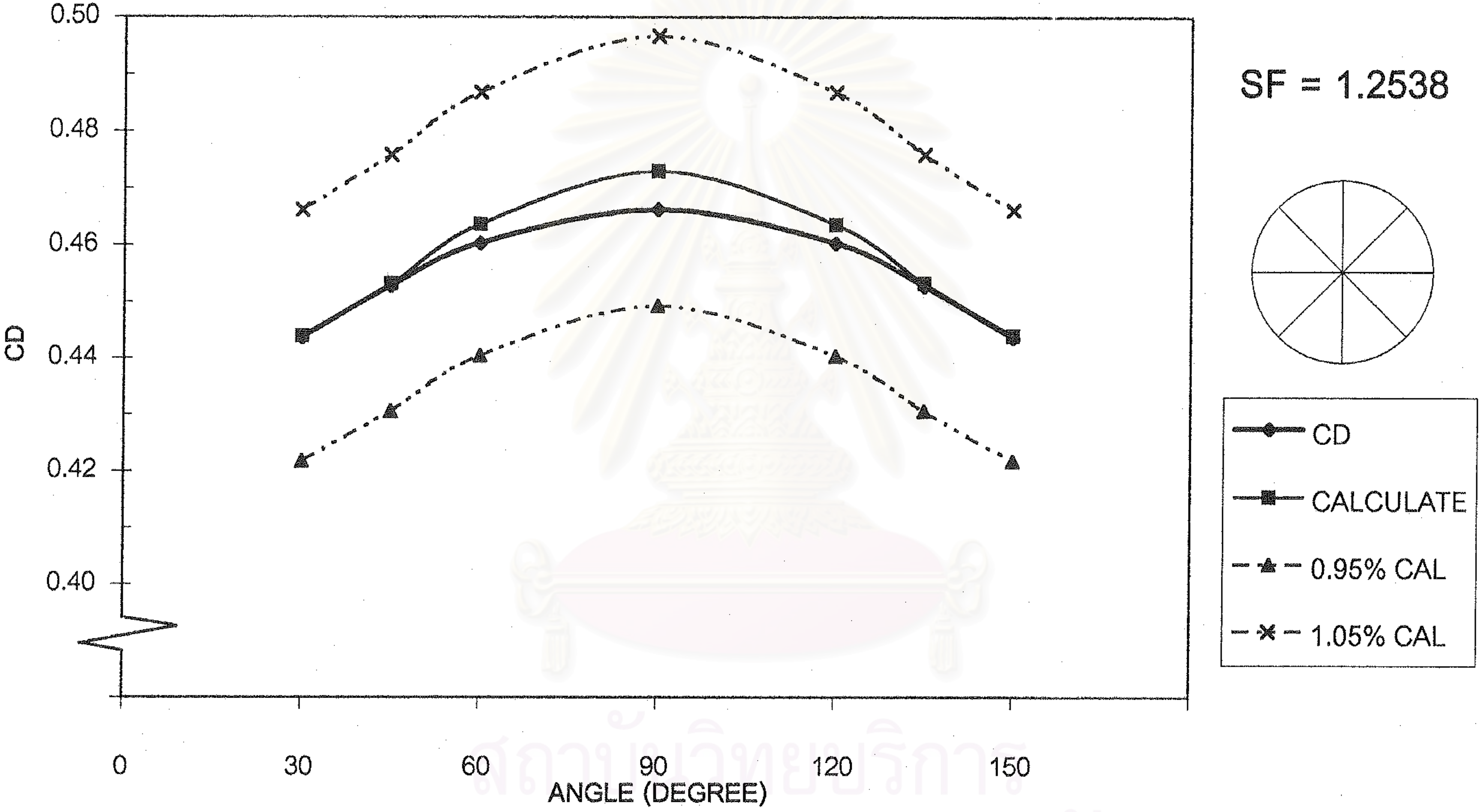
รูปที่ ข - 66 : กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นวงกลม โดยมีช่องเปิดภายใน 2 ช่อง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



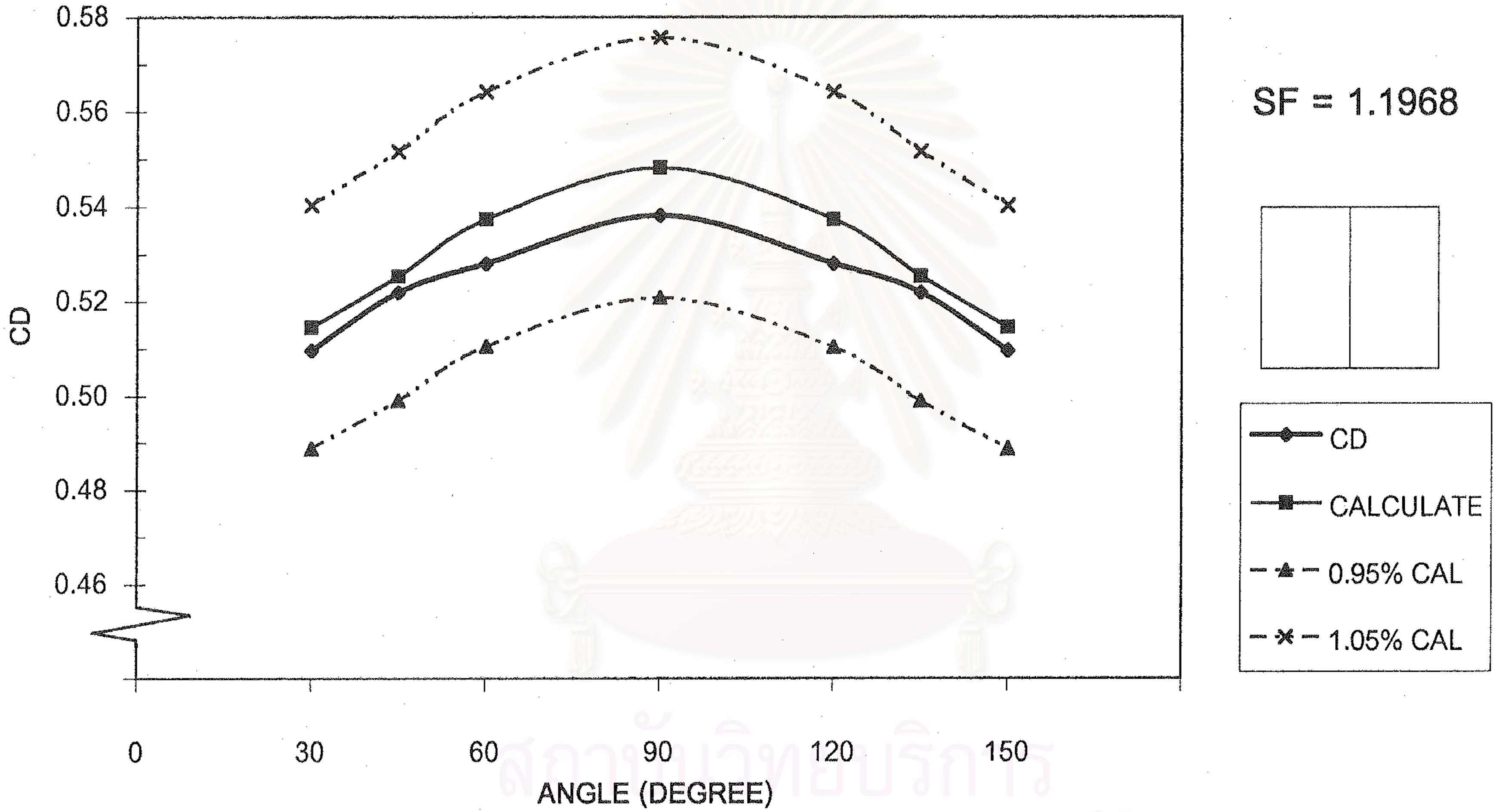
รูปที่ ข - 67 : กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นวงกลม โดยมีช่องเปิดภายใน 4 ช่อง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



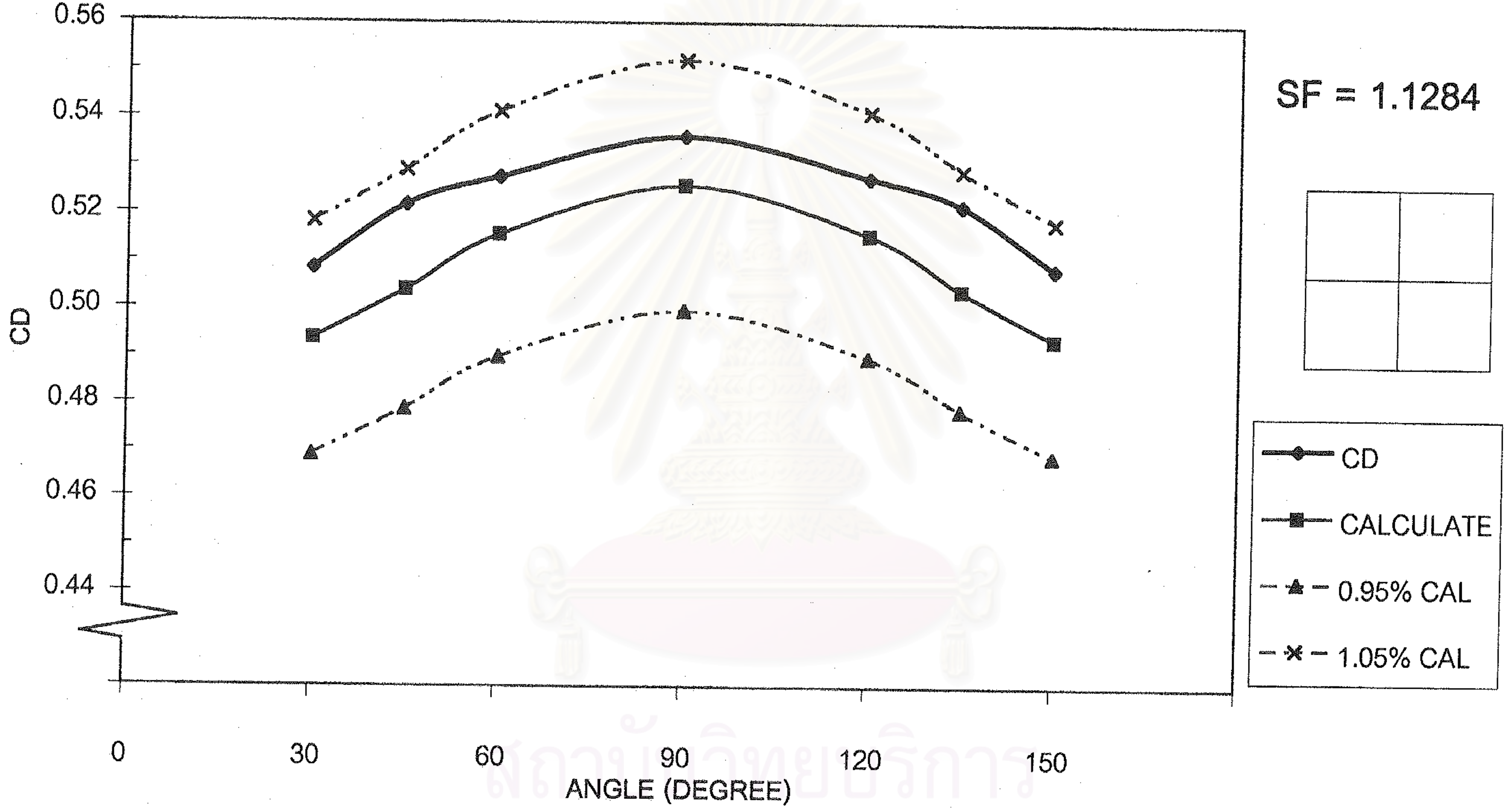
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ข - 68 : กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นวงกลม โดยมีช่องเปิดภายใน 8 ช่อง

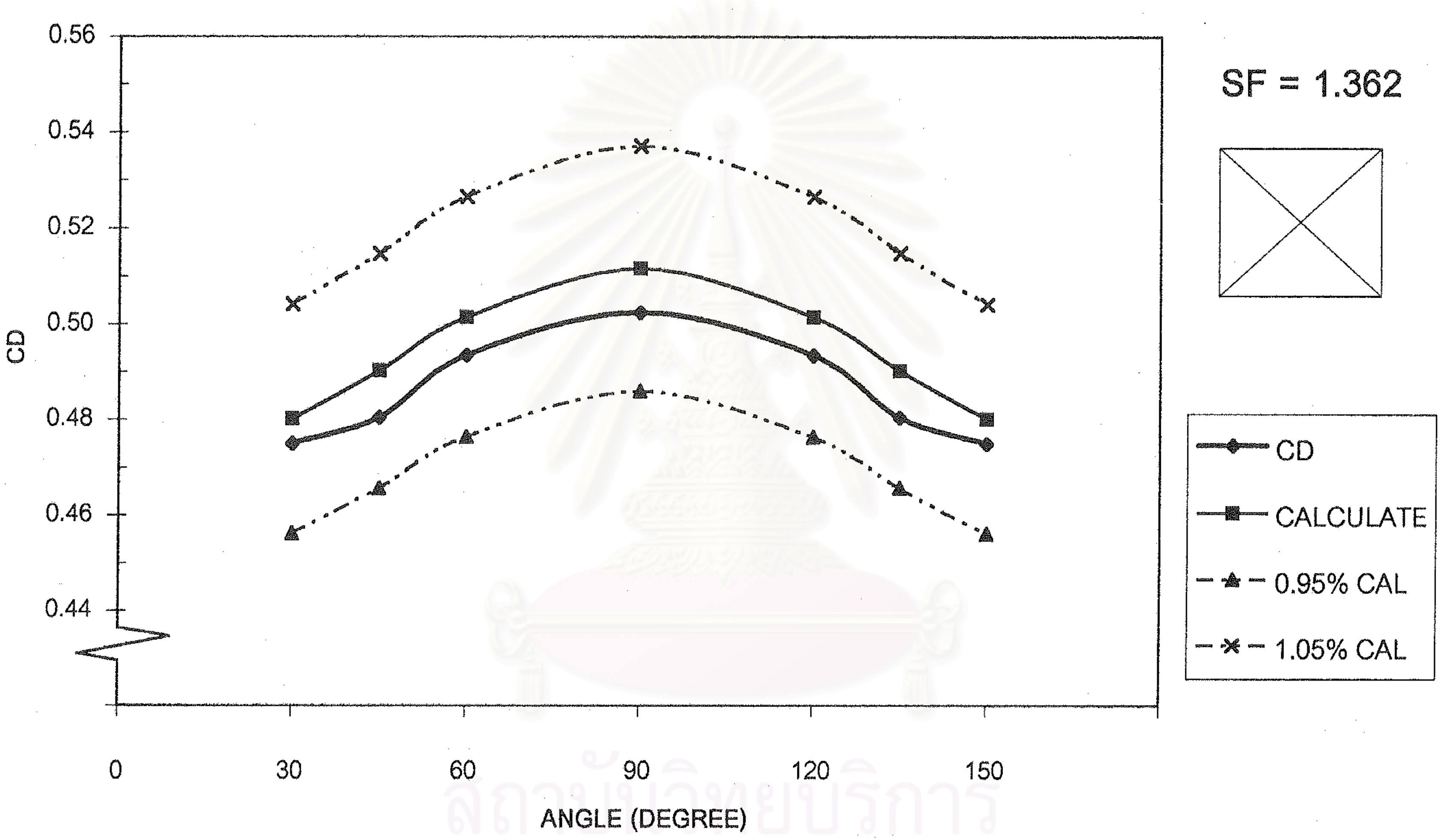


รูปที่ ข - 69 : กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีช่องเปิดภายใน 2 ช่อง และมีการแบ่งช่องเปิดภายในด้วยเส้นในแนวดิ่ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

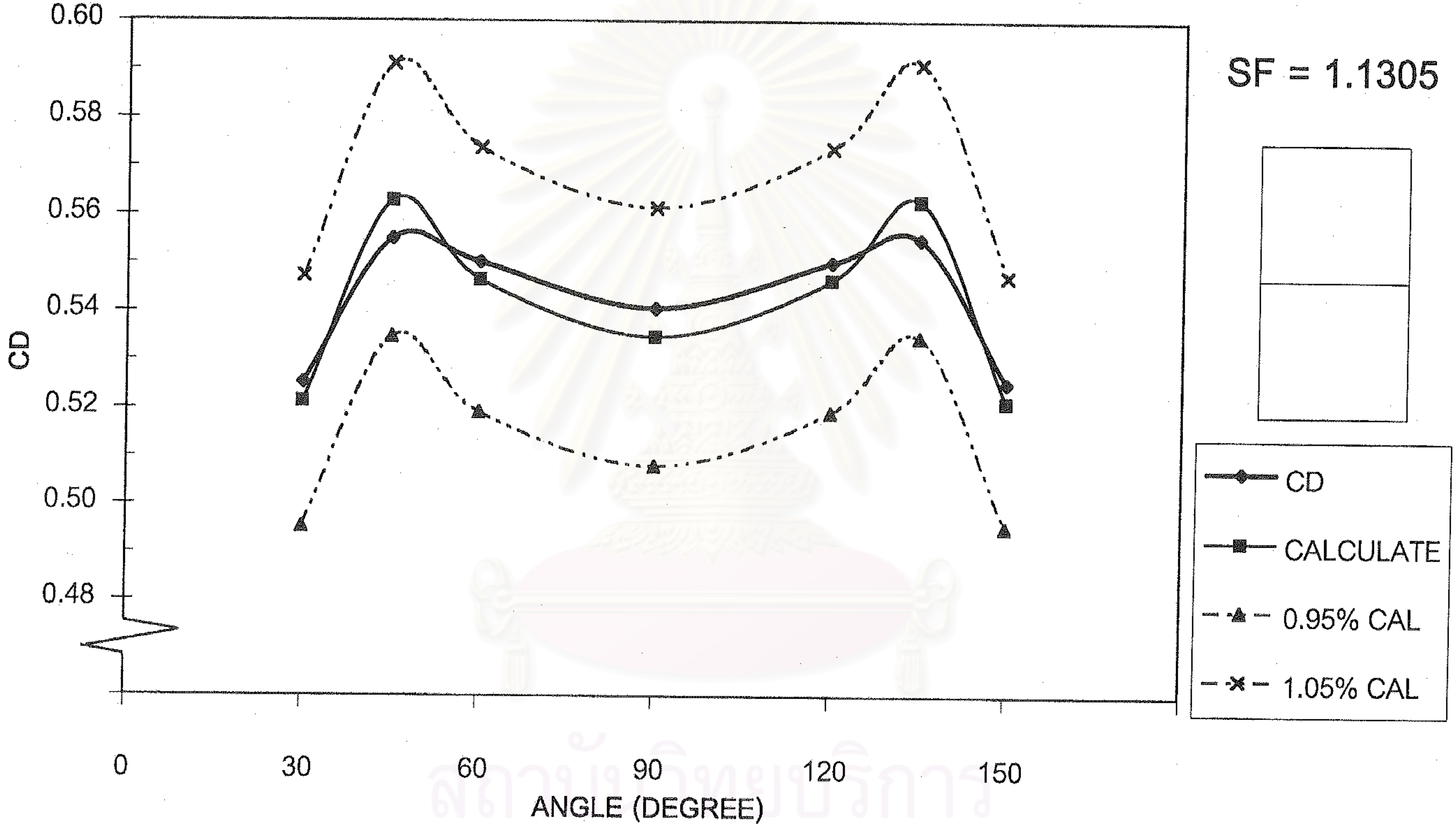


รูปที่ ข - 70 : กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีช่องเปิดภายใน 4 ช่อง และมีการแบ่งช่องเปิดภายในด้วยเส้นในแนวระดับและแนวดิ่ง



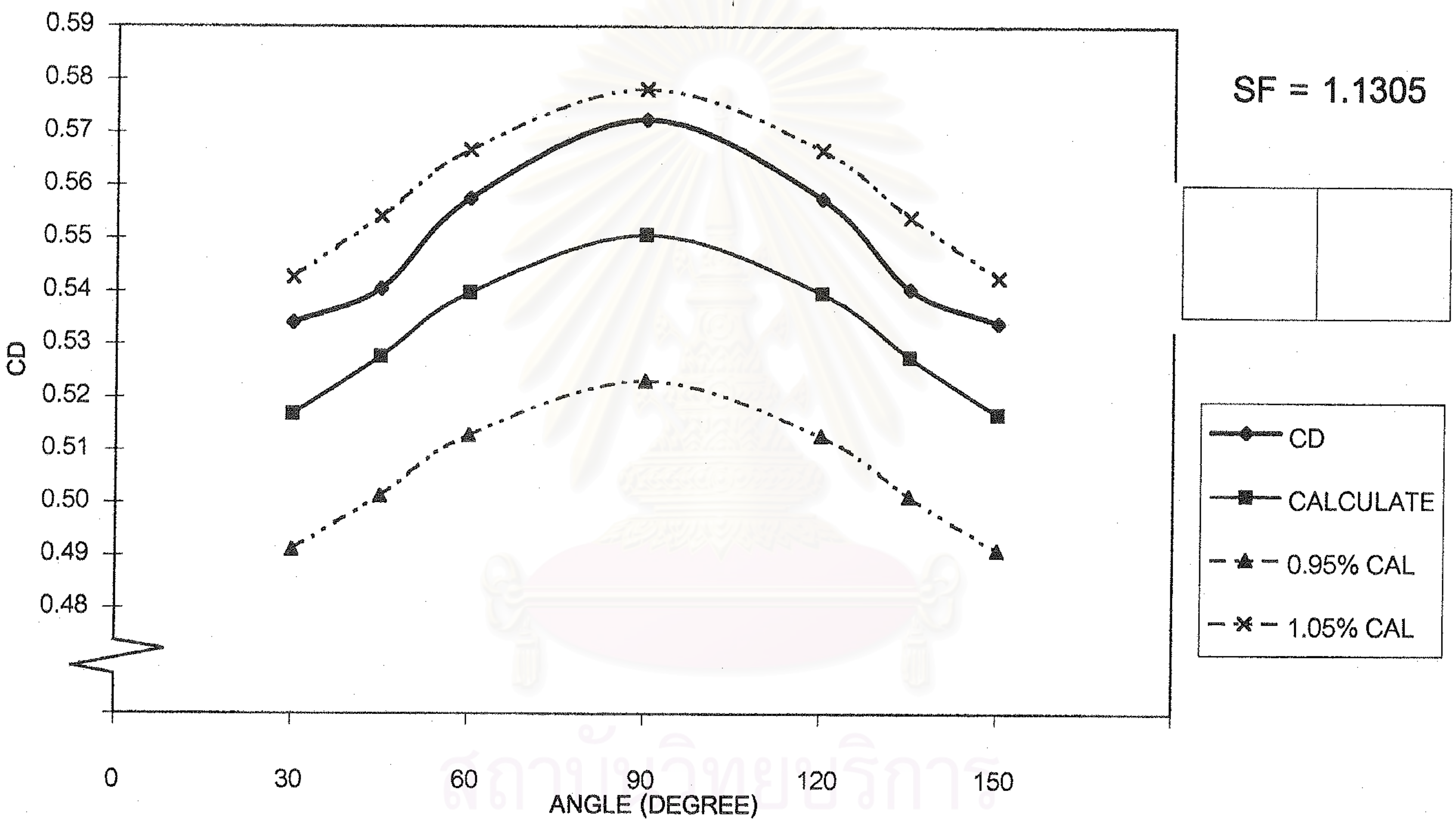
รูปที่ ข - 71 : กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีช่องเปิดภายใน 4 ช่อง และมีการแบ่งช่องเปิดภายในด้วยเส้นในแนวทแยงมุม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



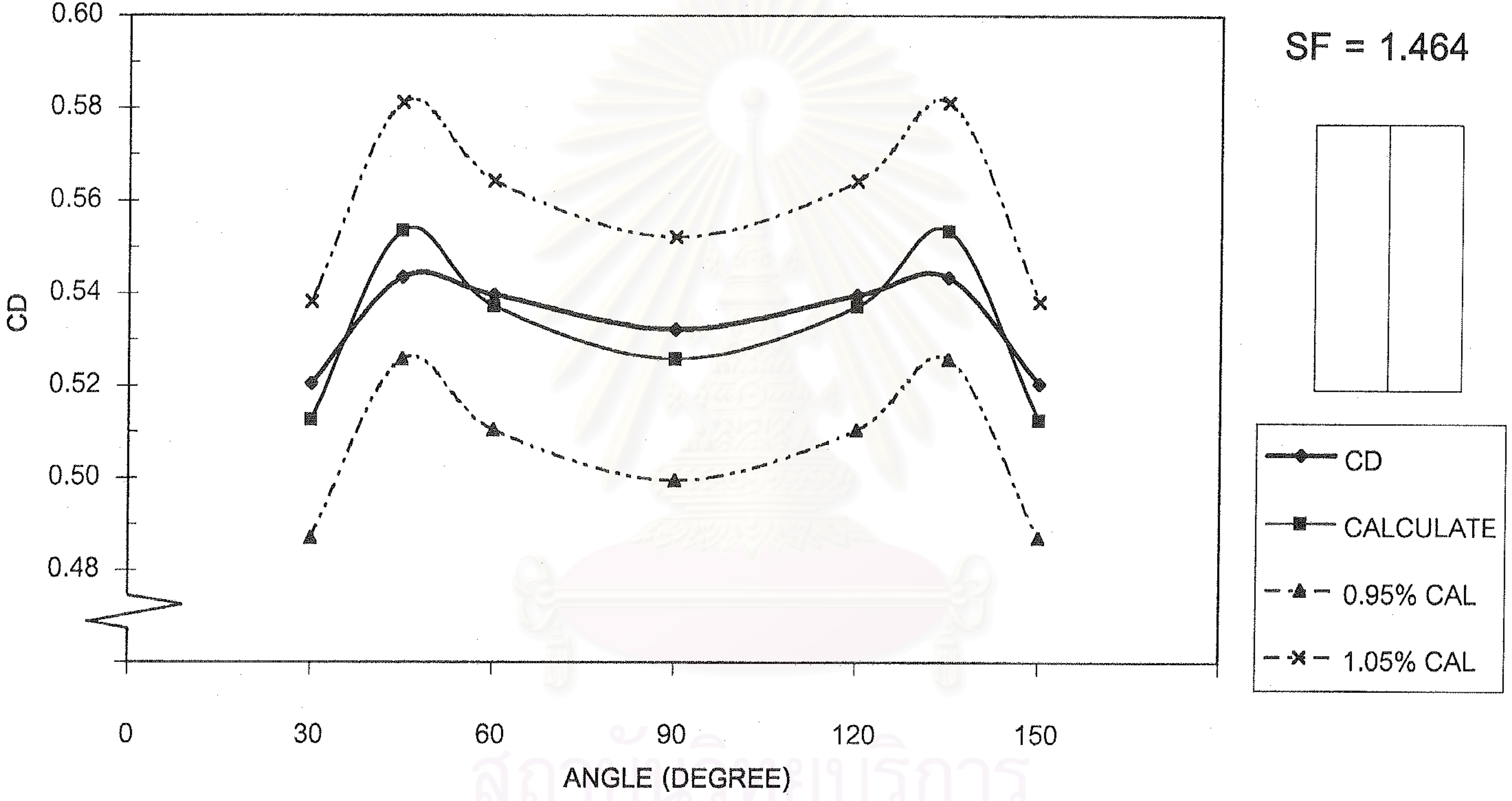
รูปที่ ข - 72 : กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 2 ช่อง วางตัวในแนวตั้ง ภายในแบ่งด้วยเส้นในแนวระดับ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

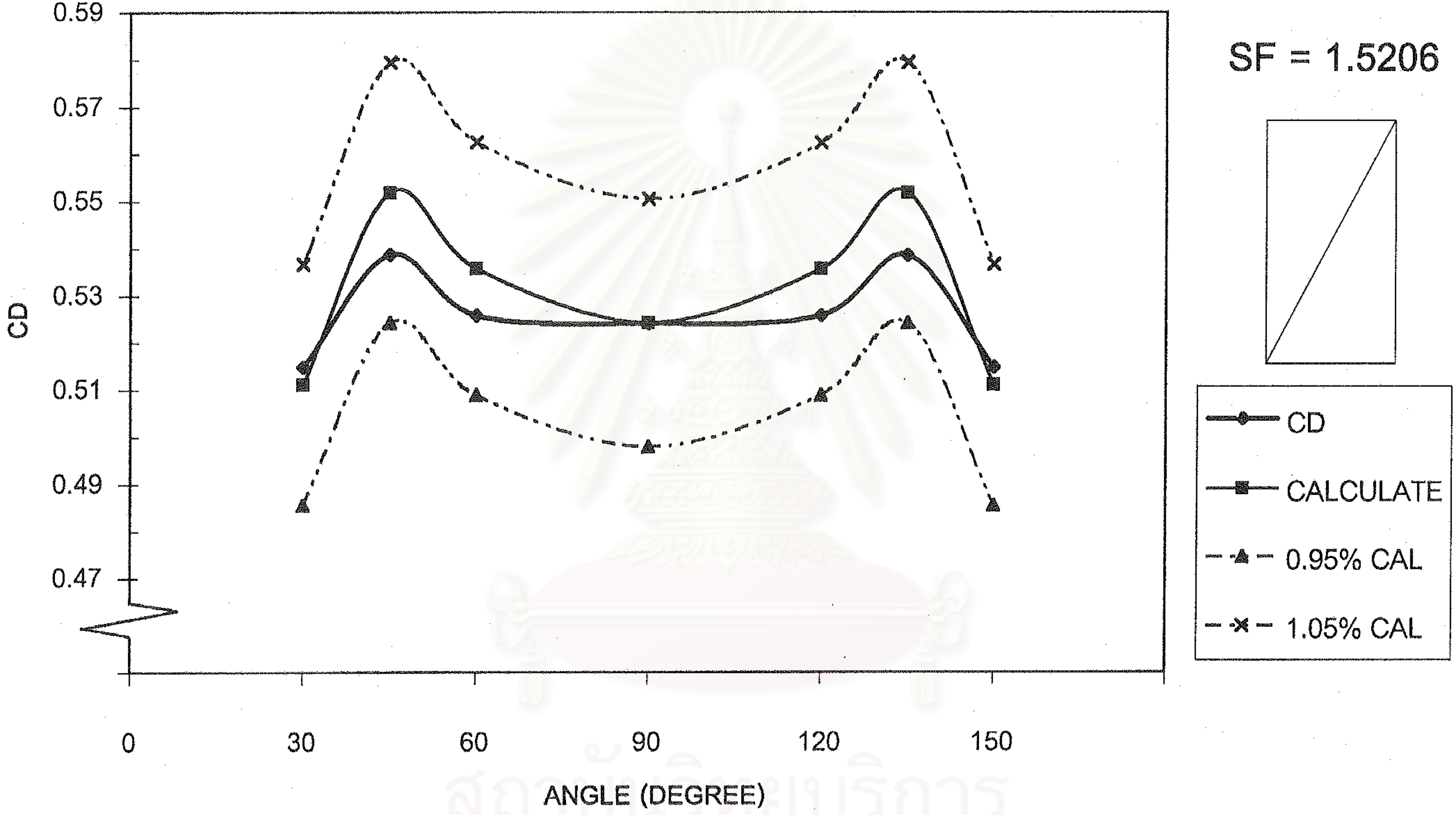


รูปที่ ข - 73 : กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 2 ช่อง วางตัวในแนวนอน ภายในแบ่งด้วยเส้นในแนวดิ่ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

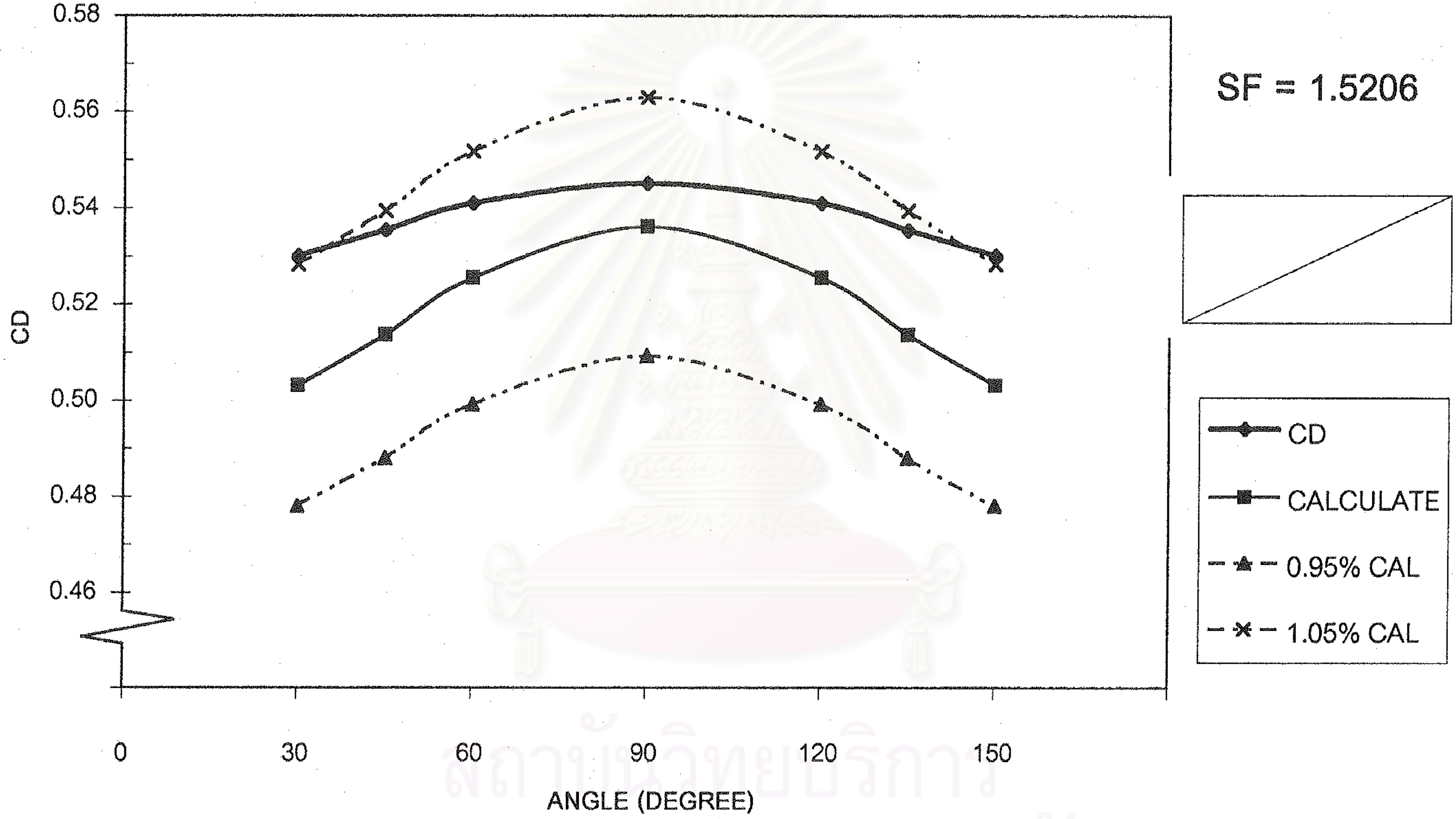


รูปที่ ข - 74 : กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 2 ช่อง วางตัวในแนวตั้ง ภายในแบ่งด้วยเส้นในแนวดิ่ง



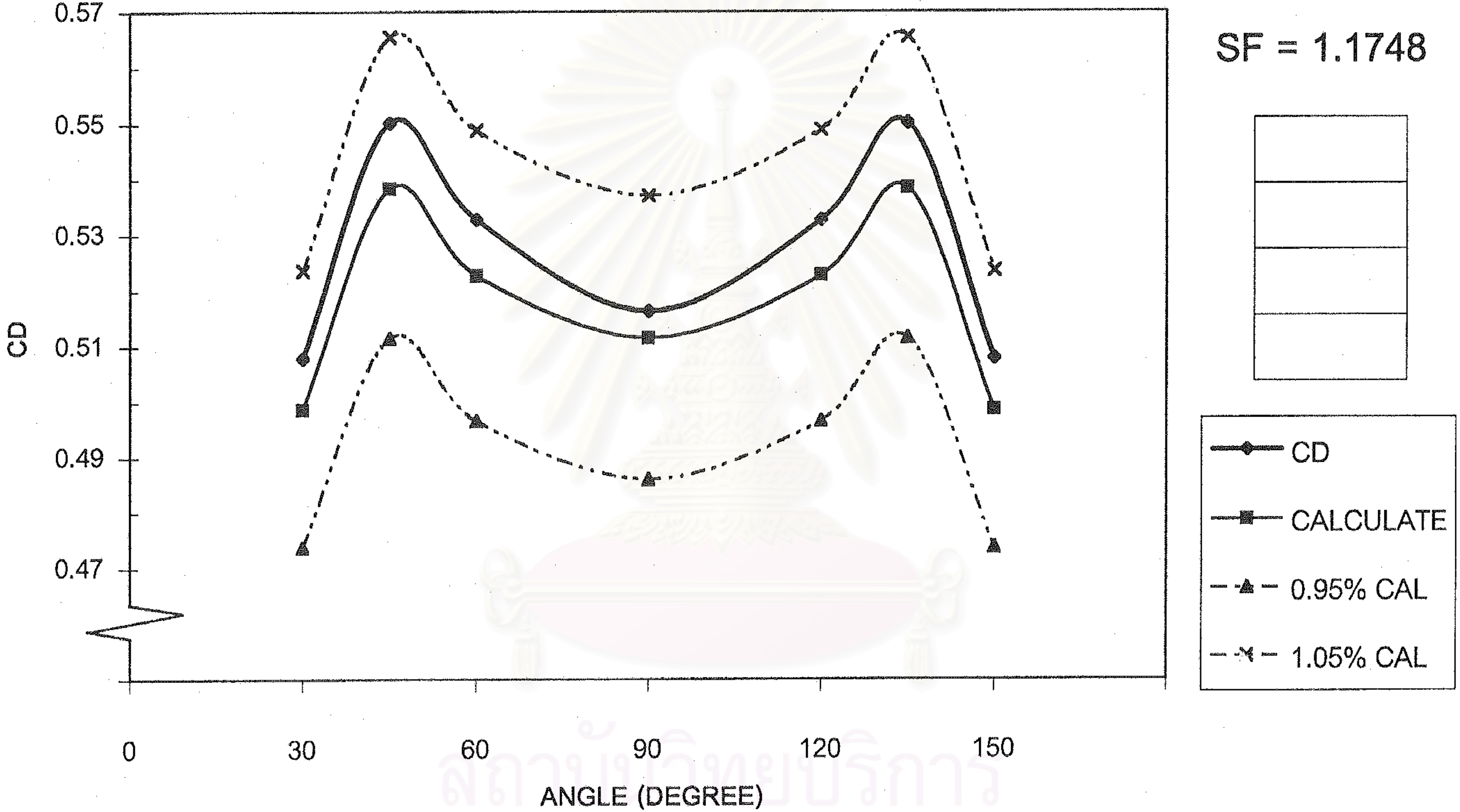
รูปที่ ข - 75 : กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 2 ช่อง วางตัวในแนวตั้ง ภายในแบ่งด้วยเส้นในแนวทแยงมุม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



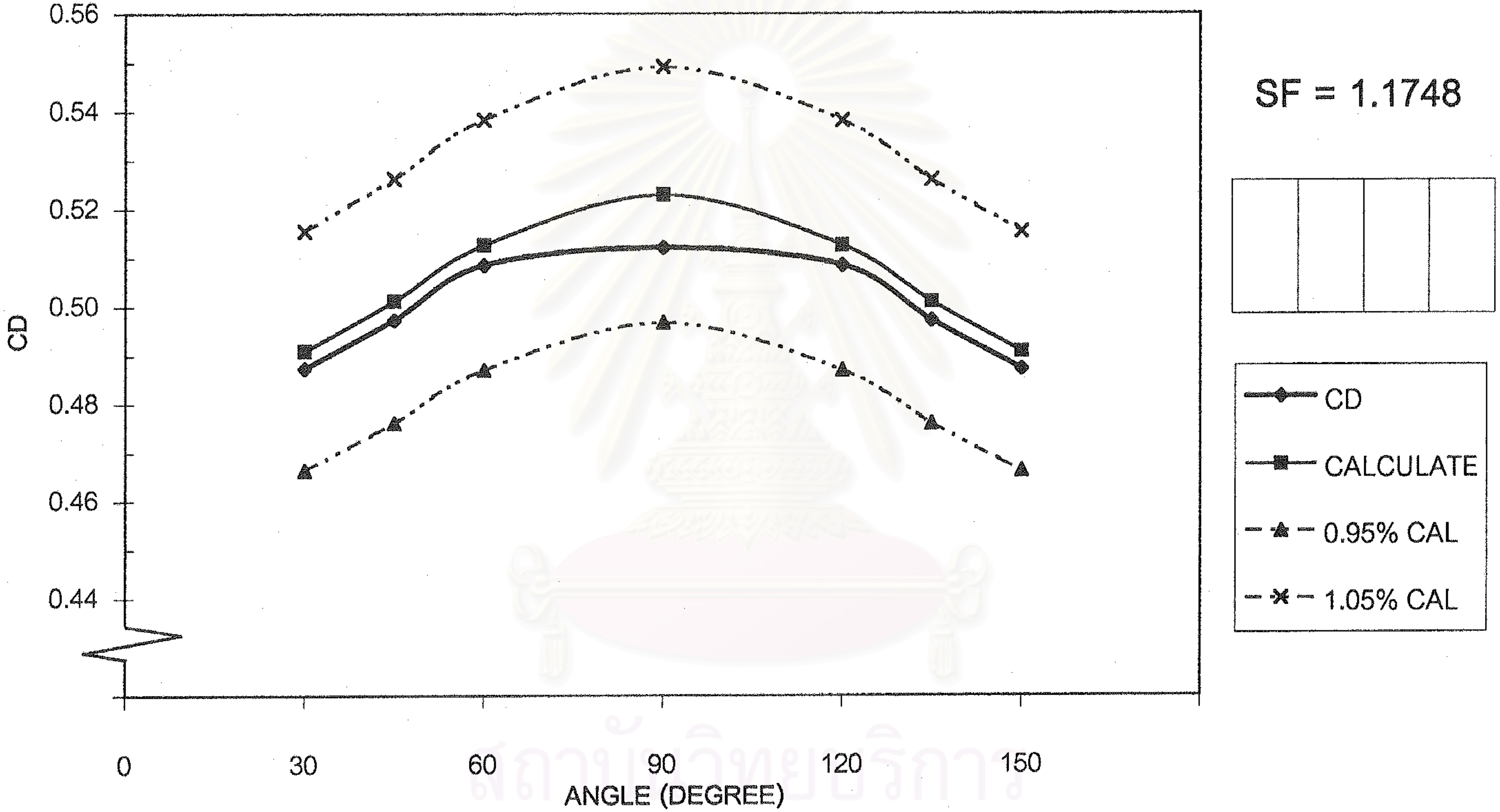
รูปที่ ข - 76 : กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 2 ช่อง วางตัวในแนวนอน ภายในแบ่งด้วยเส้นในแนวทแยงมุม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



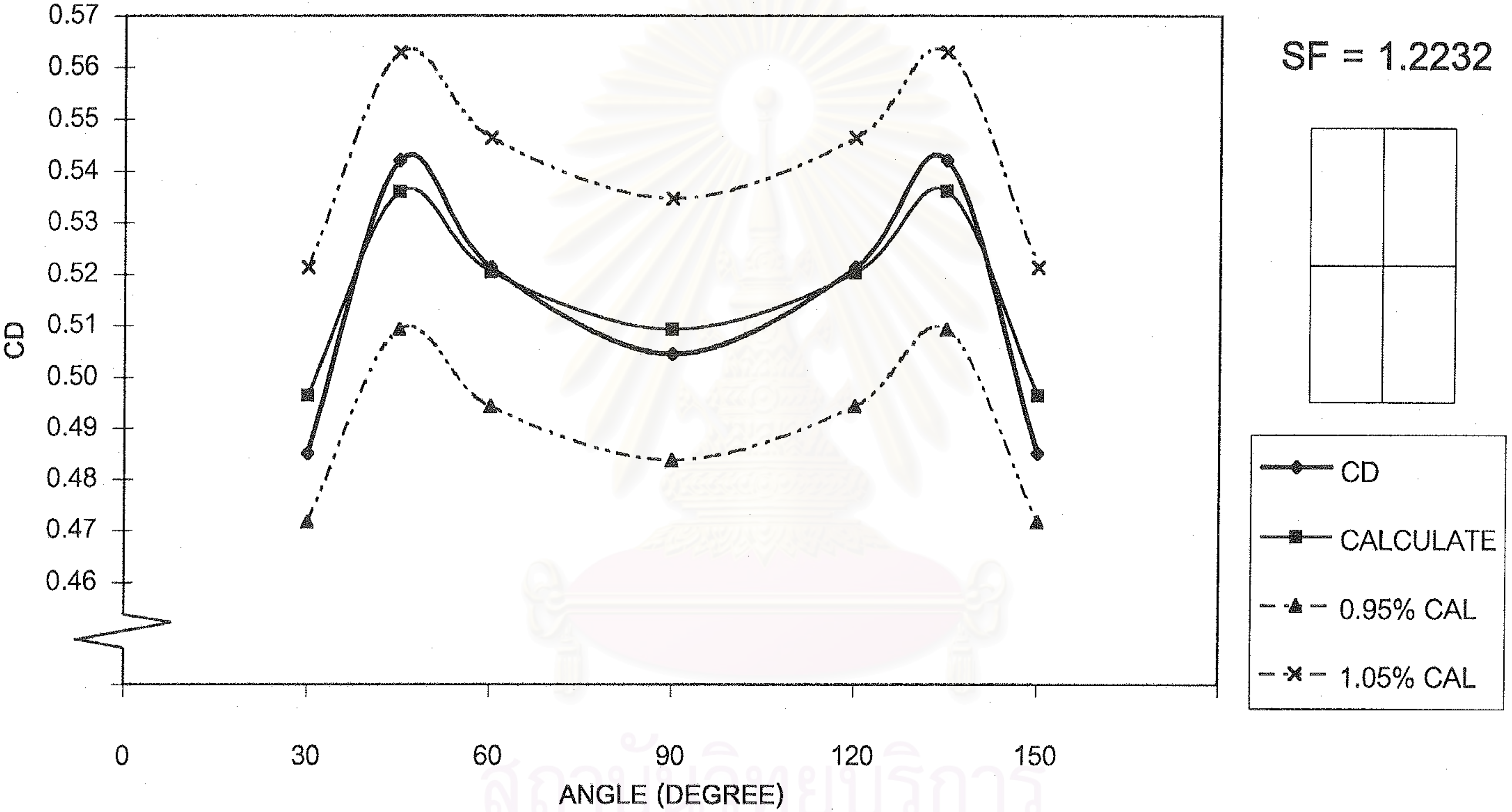
รูปที่ ข - 77 : กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 4 ช่อง วางตัวในแนวตั้ง ภายในแบ่งด้วยเส้นในแนวระดับ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



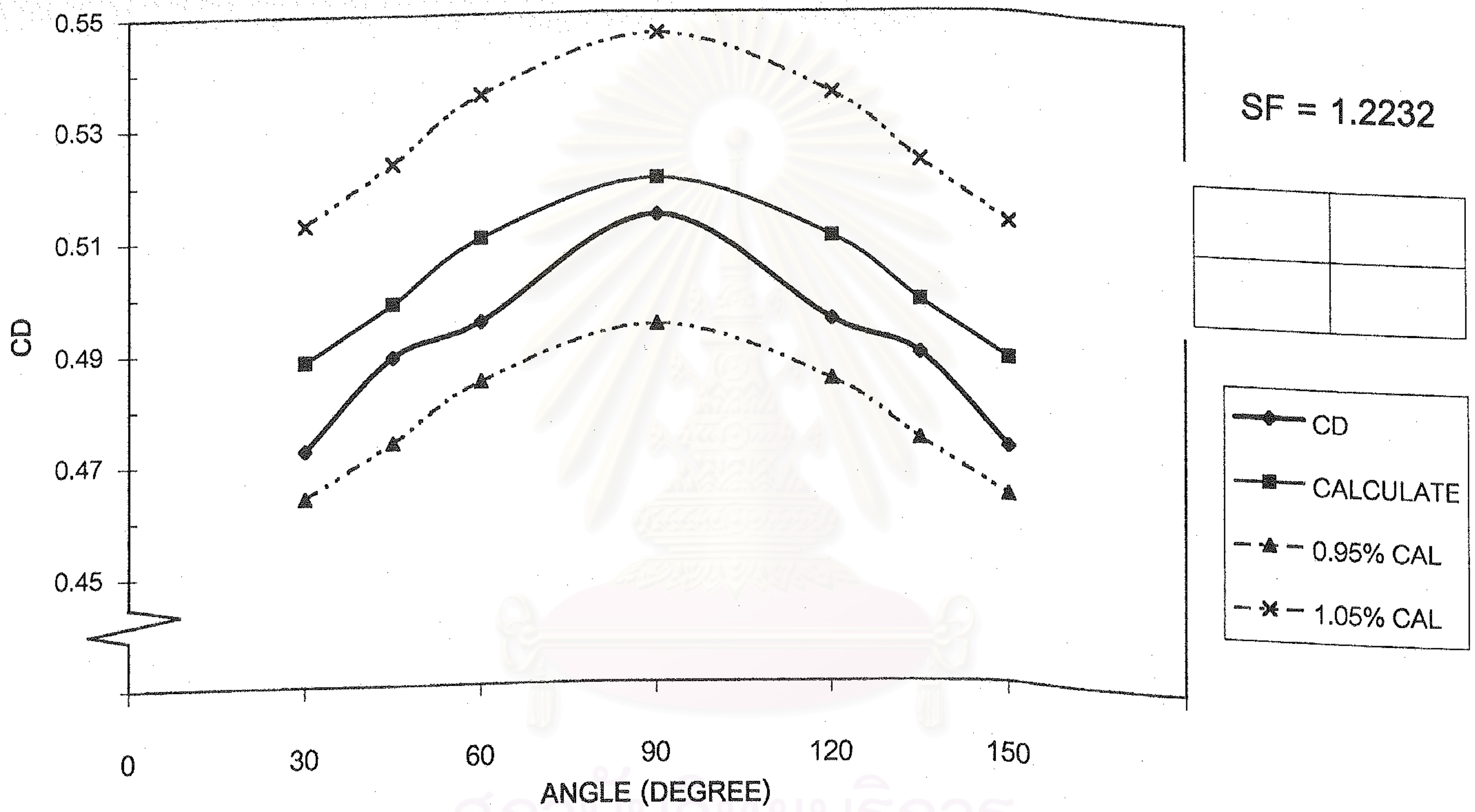
รูปที่ ข - 78 : กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 4 ช่อง วางตัวในแนวนอน ภายในแบ่งด้วยเส้นในแนวดิ่ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



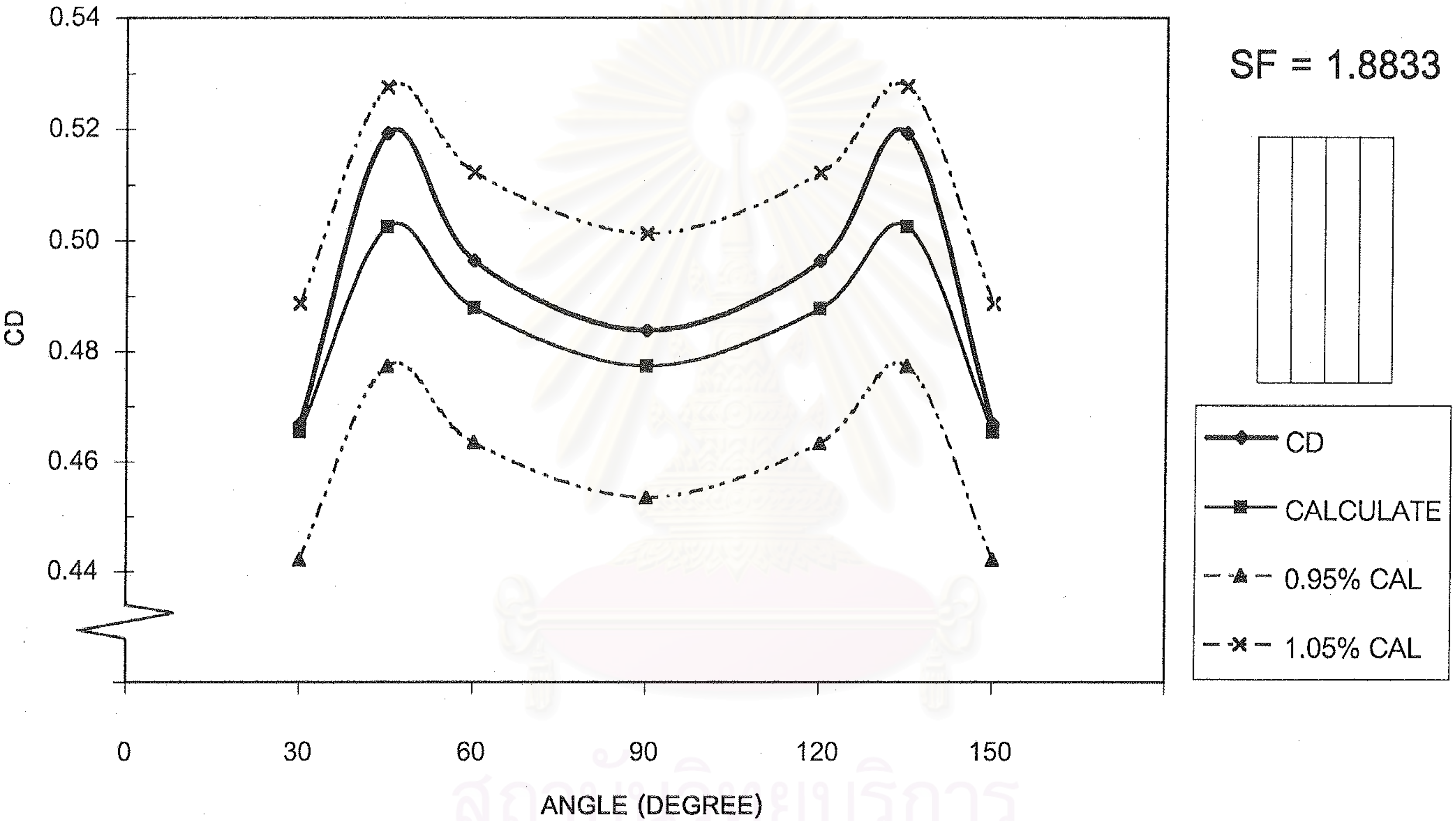
รูปที่ ข - 79 : กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 4 ช่อง วางตัวในแนวตั้ง ภายในแบ่งด้วยเส้นในแนวระดับ และแนวดิ่ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

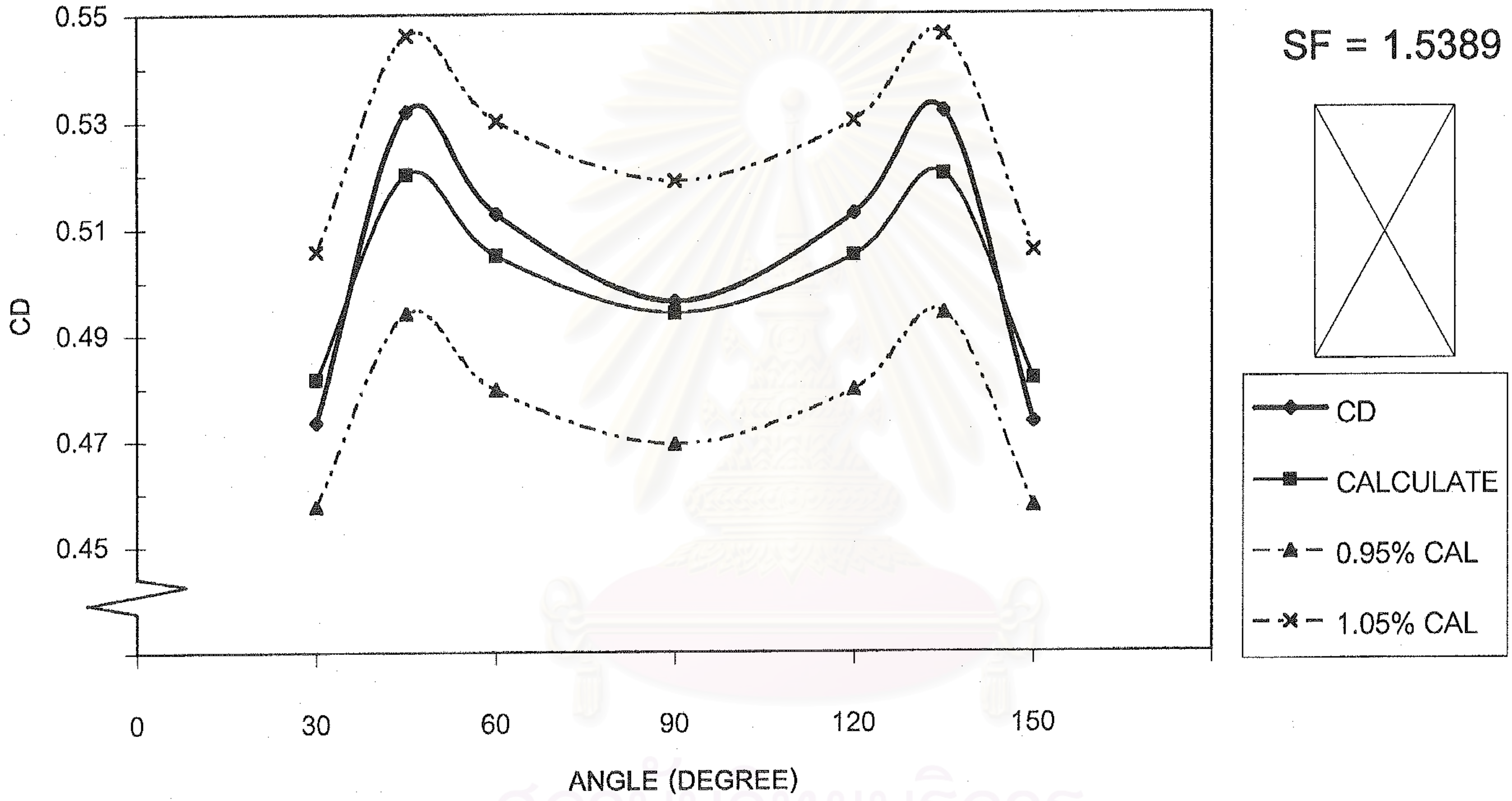


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

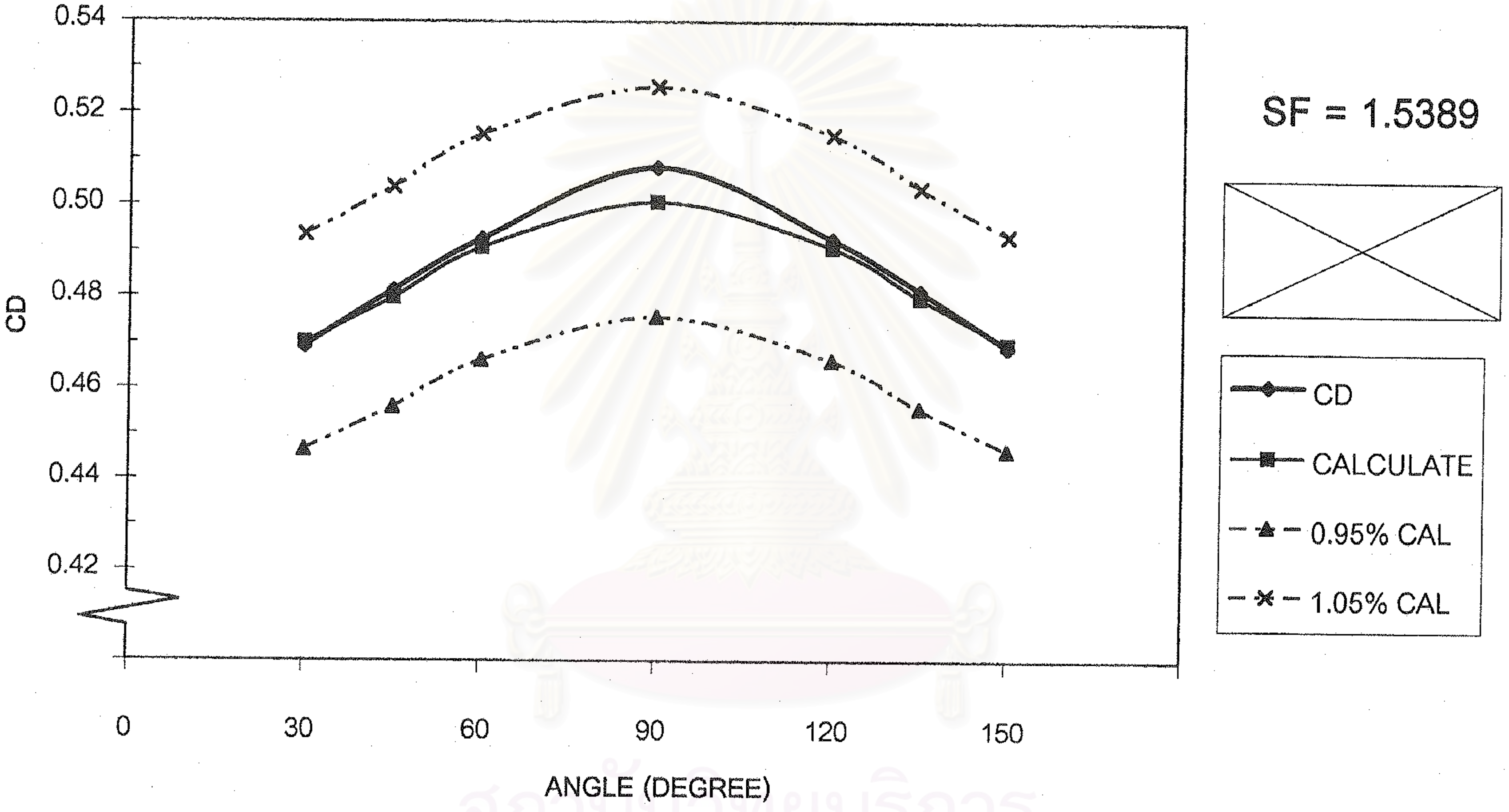
รูปที่ ข - 80 : กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 4 ช่อง วางตัวในแนวนอน ภายในแบ่งด้วยเส้นในแนวระดับ และแนวดิ่ง



รูปที่ ข - 81 : กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิด ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 4 ช่อง วางตัวในแนวตั้ง ภายในแบ่งด้วยเส้นในแนวดิ่ง

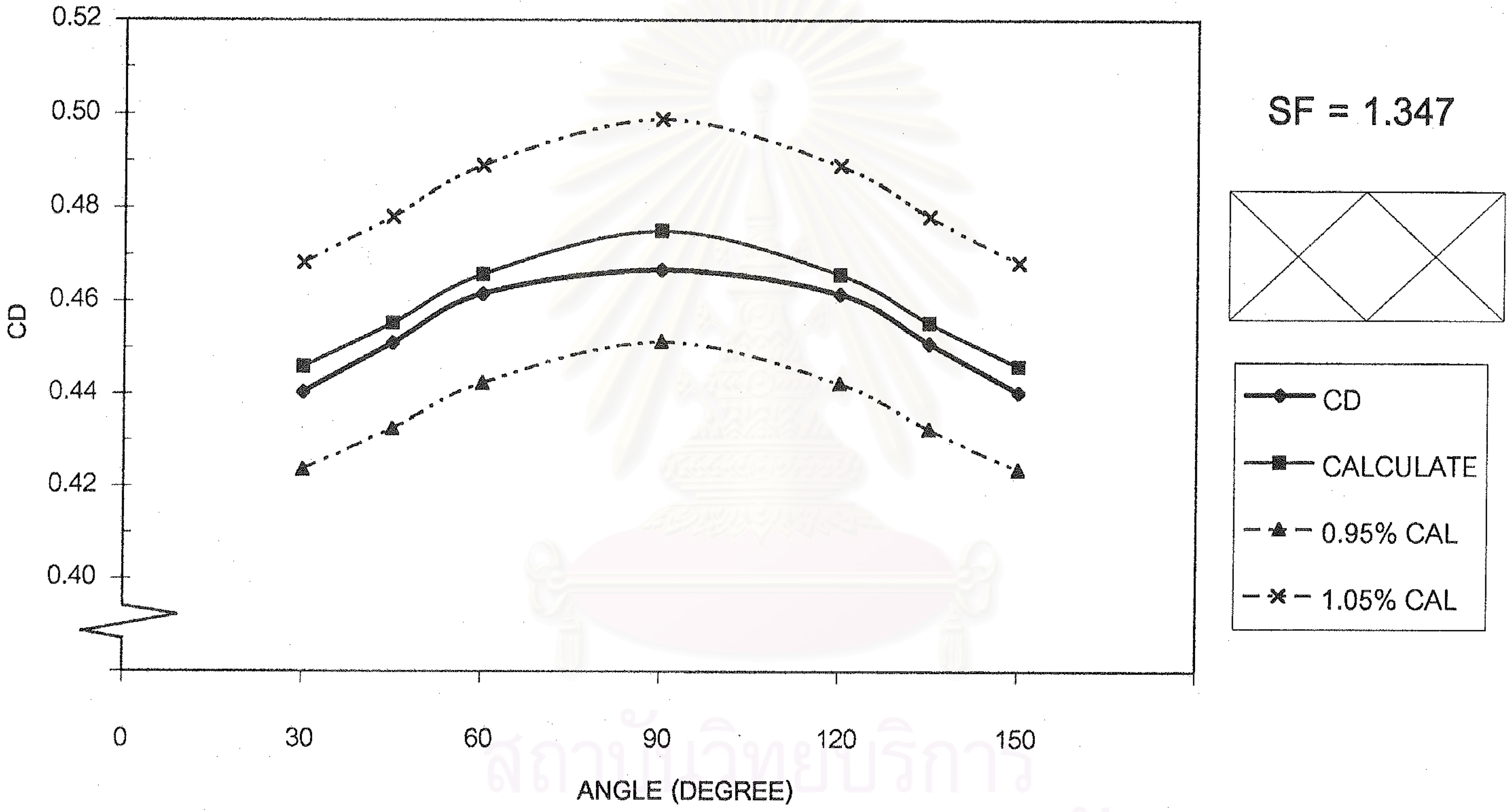


รูปที่ ข - 82 : กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 4 ช่อง วางตัวในแนวตั้ง ภายในแบ่งด้วยเส้นในแนวทแยงมุม



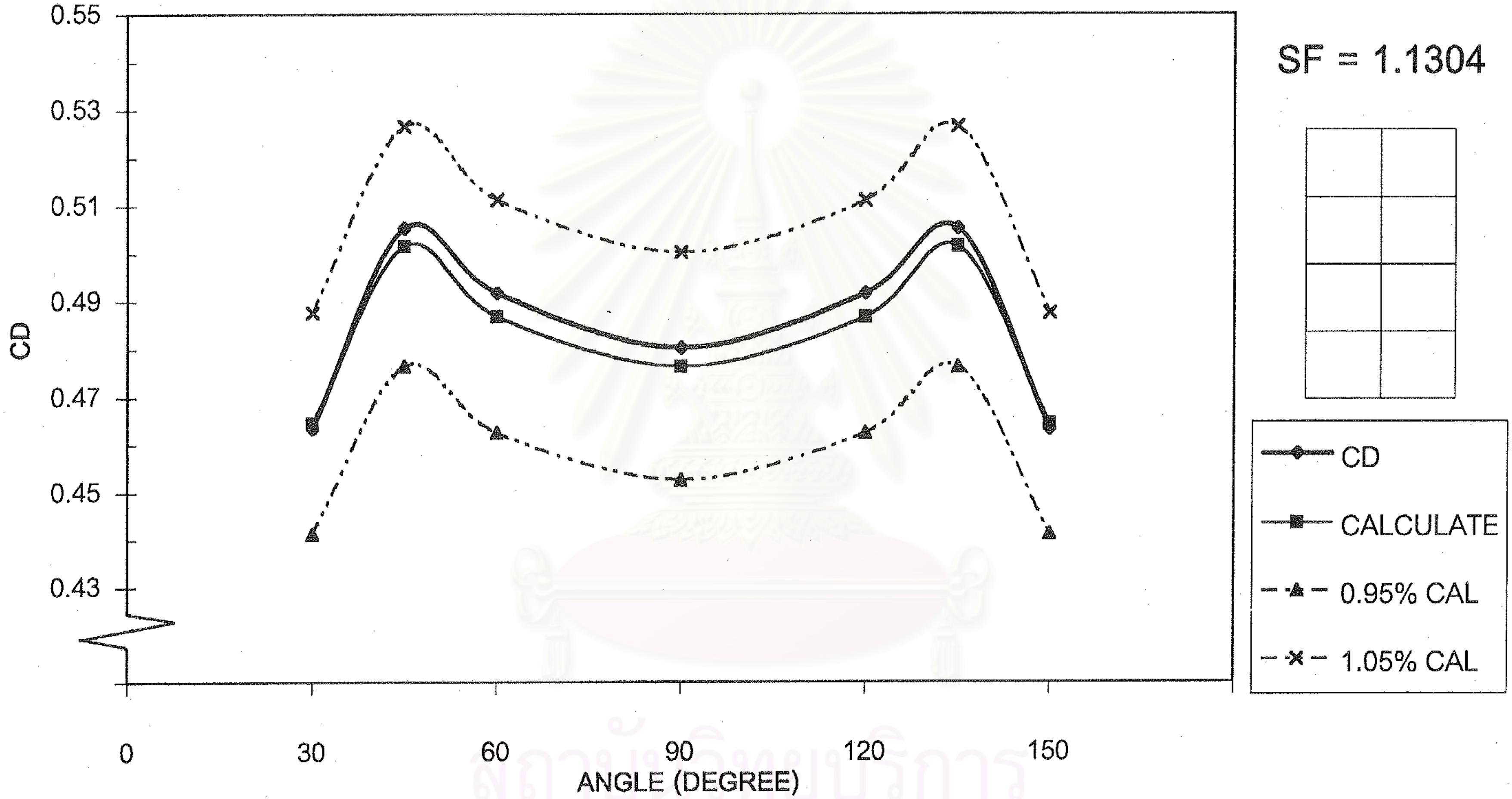
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ข - 83 : กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิดรูปเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 4 ช่อง วางตัวในแนวนอน ภายในแปงด้วยเส้นในแนวทแยงมุม

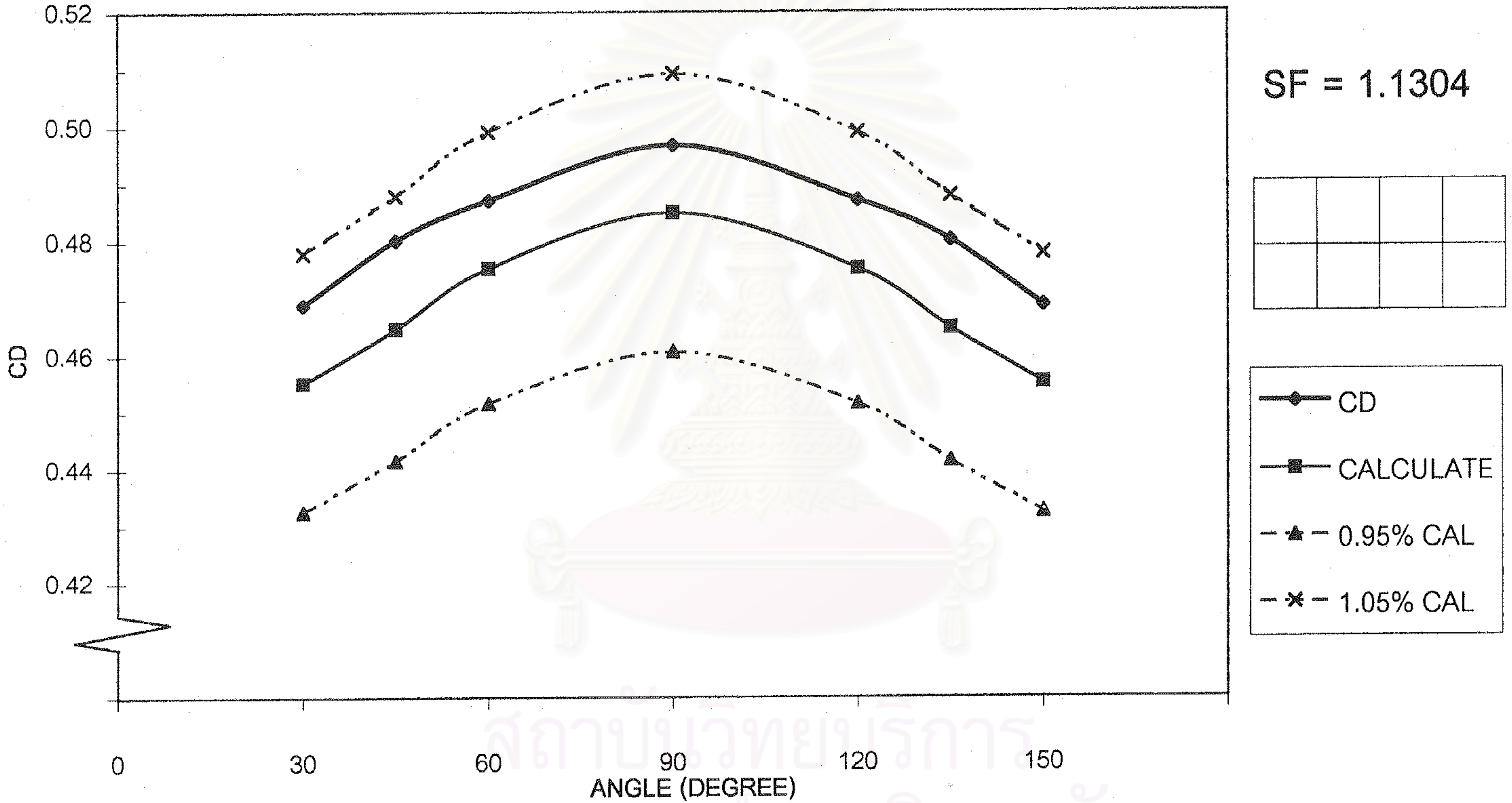


รูปที่ ข - 84 : กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 7 ช่อง วางตัวในแนวนอน โดยที่เส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวทแยง

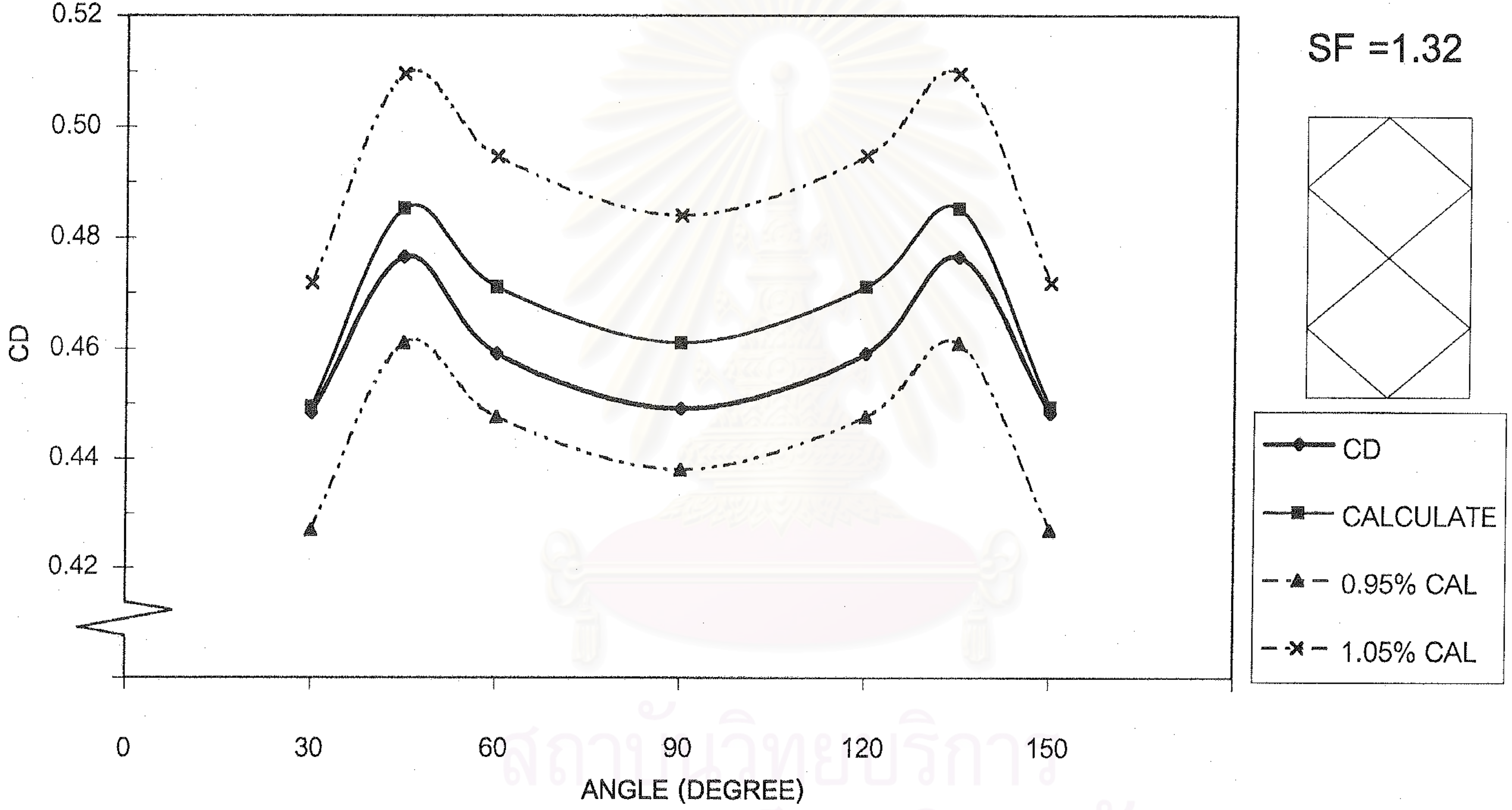
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข - 85 : กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 8 ช่อง วางตัวในแนวตั้ง ภายในแบ่งด้วยเส้นในแนวระดับ และแนวดิ่ง

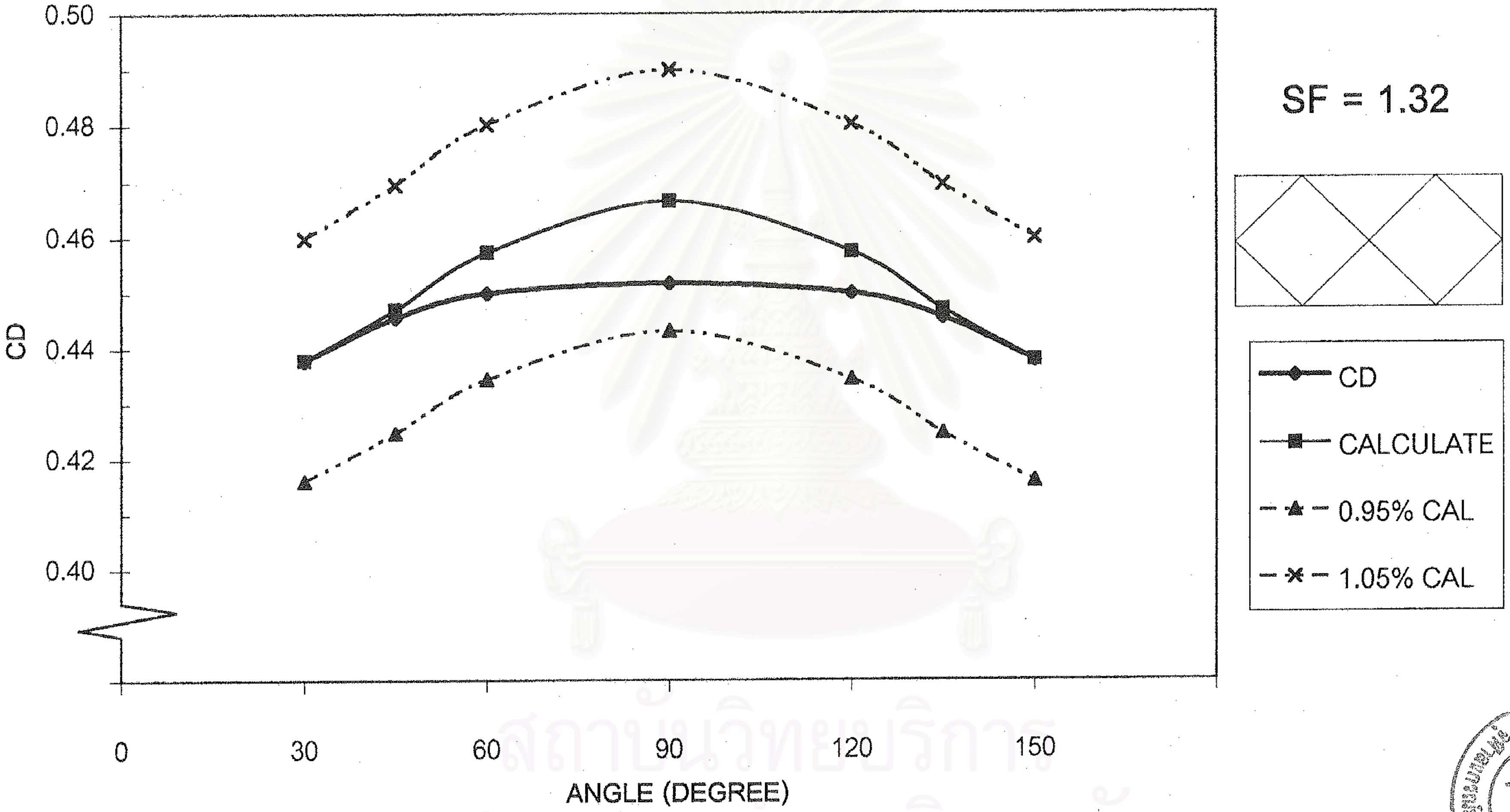


รูปที่ ข - 86 : กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 8 ช่อง วางตัวในแนวนอน ภายในแบ่งด้วยเส้นในแนวระดับ และแนวดิ่ง



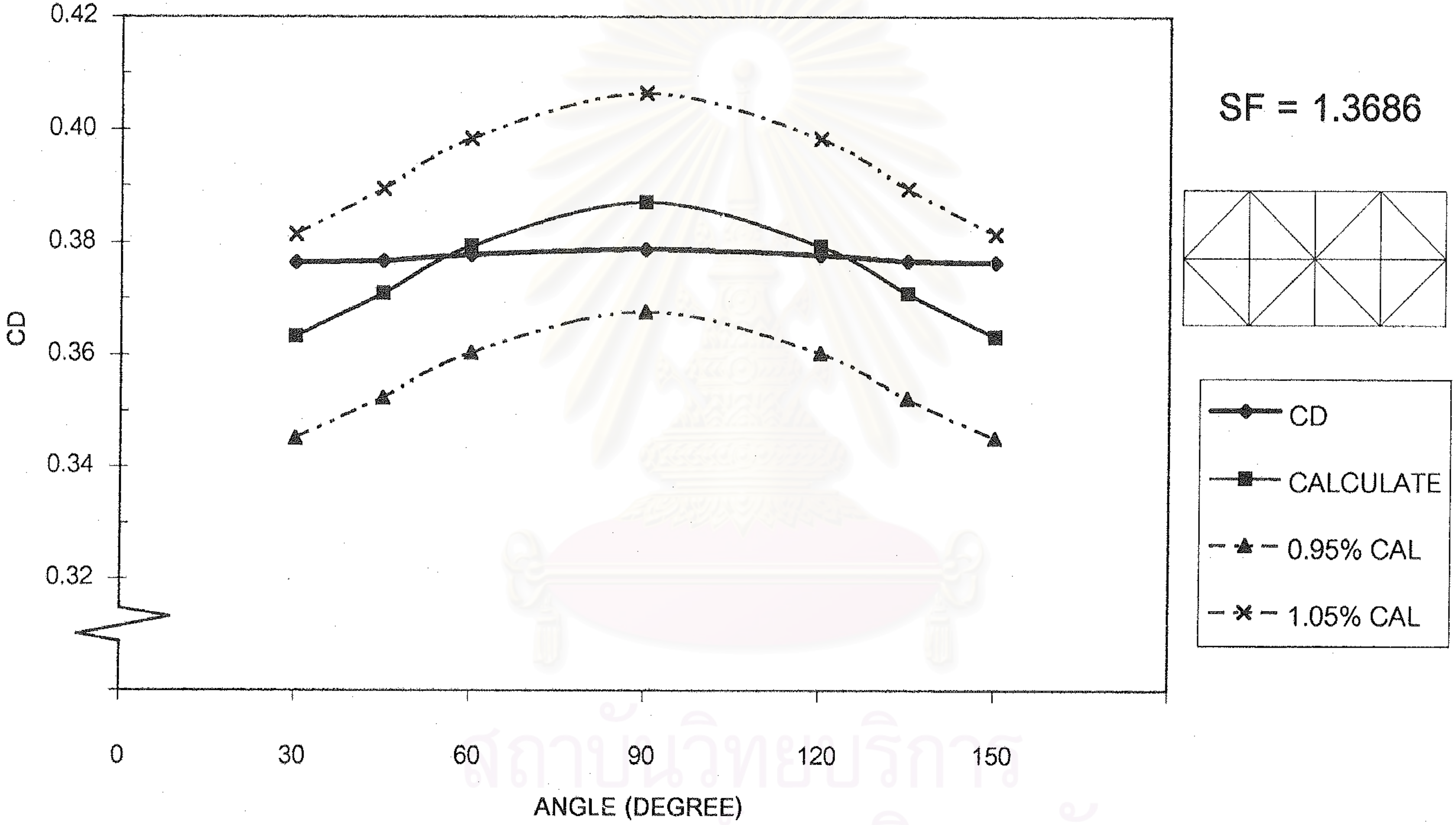
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ข - 87 : กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 8 ช่อง วางตัวในแนวตั้ง โดยที่เส้นแบ่งภายในเป็นเส้นในแนวทแยง



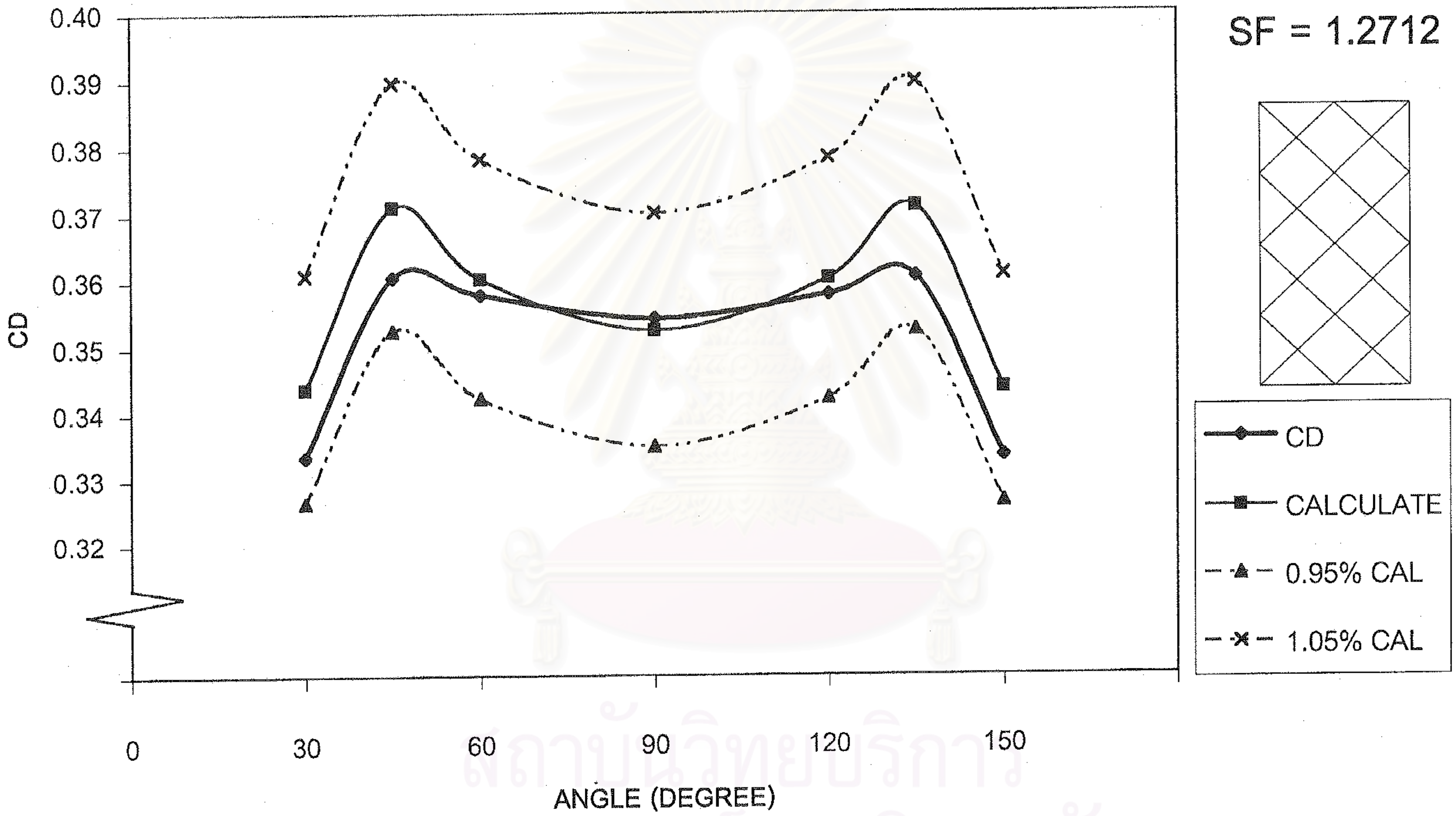
รูปที่ ข - 88 : กราฟแสดงการทดสอบสมการสำหรับช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 8 ช่องวางตัวในแนวนอนโดยที่เส้นแบ่งภายในเป็นเส้นในแนวทแยง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

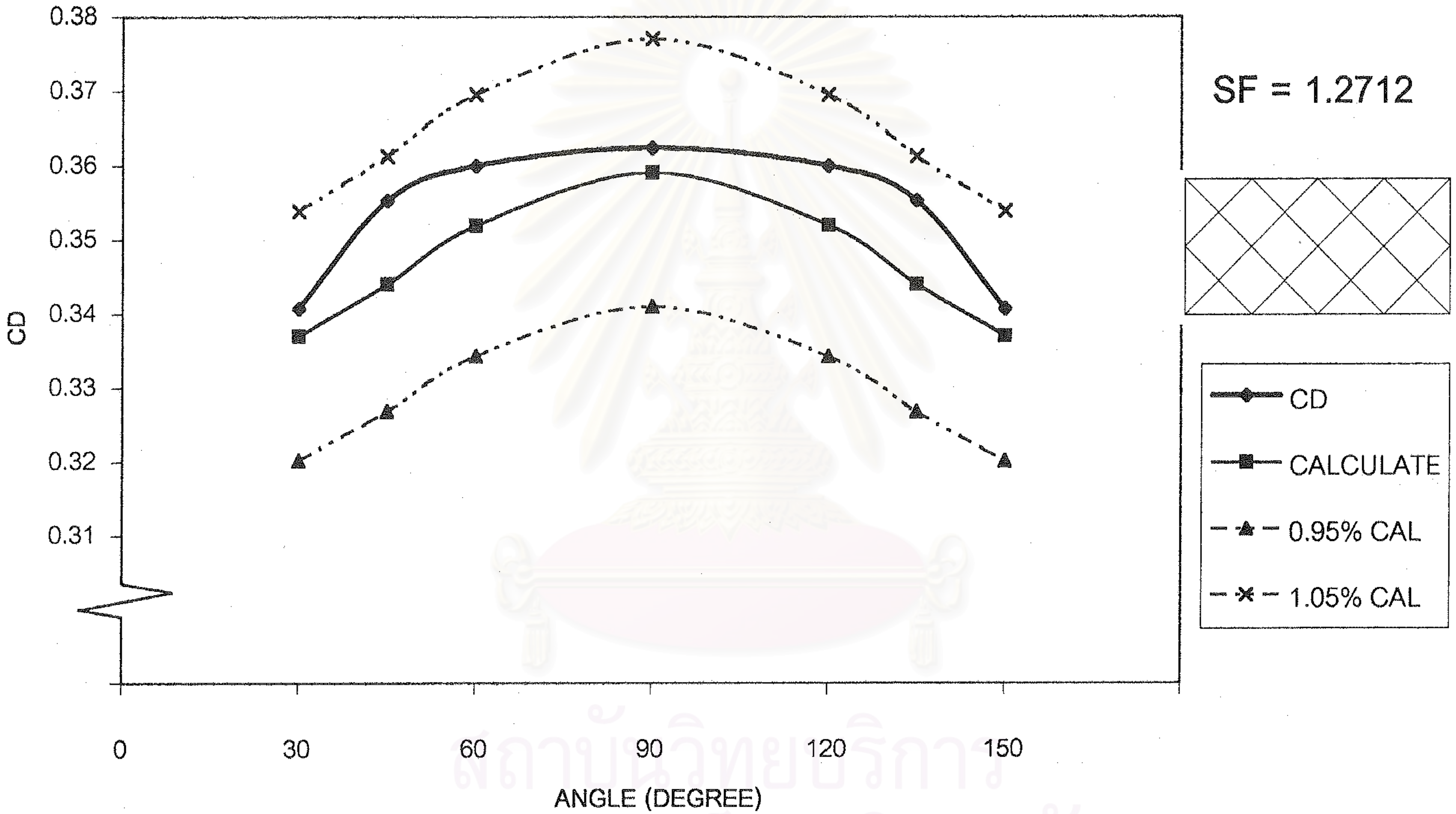


รูปที่ ข - 89 : กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 16 ช่อง วางตัวในแนวนอน โดยที่เส้นแบ่งภายในเป็นเส้นในแนวทแยง

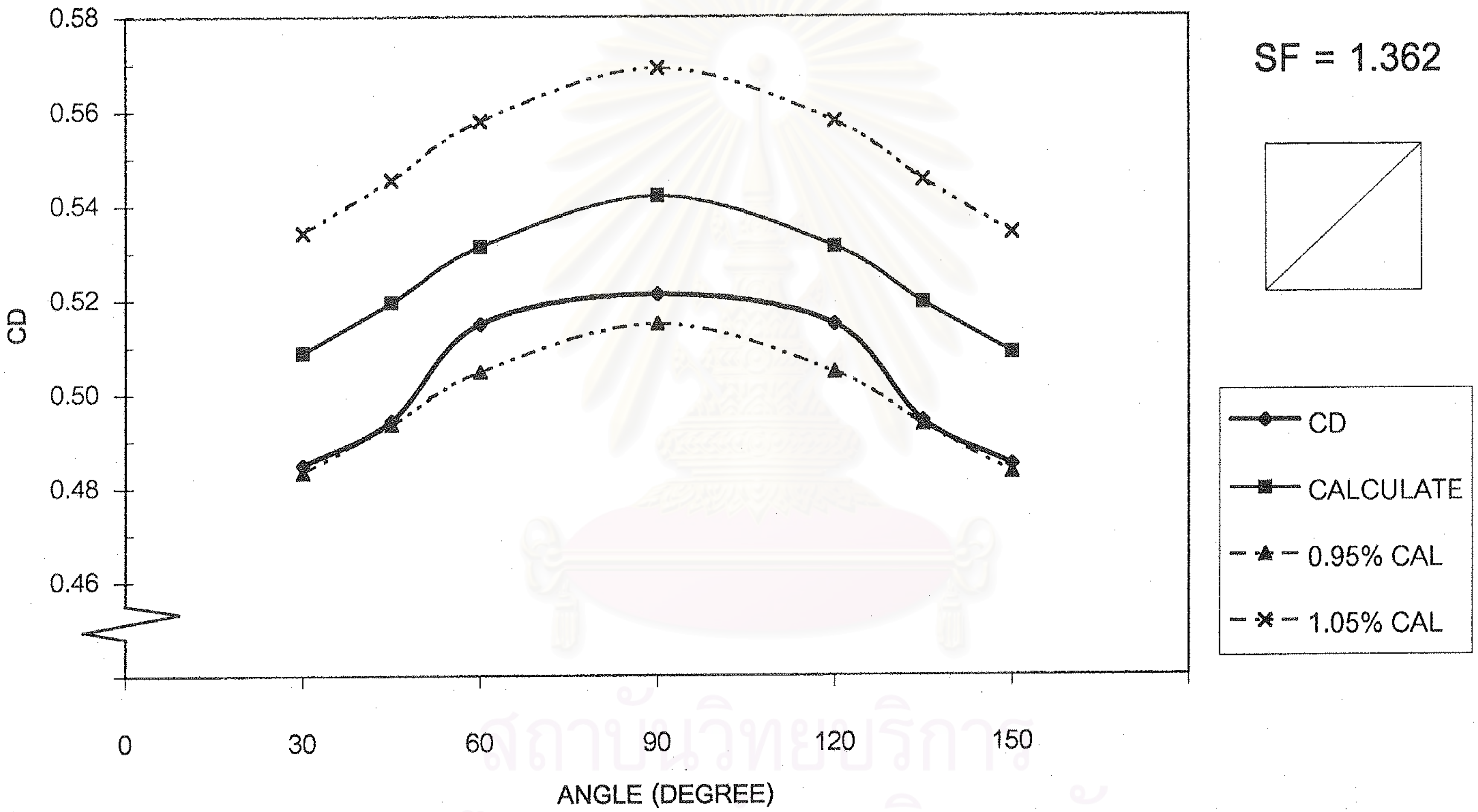
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข - 90 : กราฟแสดงการทดสอบสมการสำหรับช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 22 ช่องวางตัวในแนวตั้งโดยที่เส้นแบ่งภายในเป็นเส้นในแนวทแยง

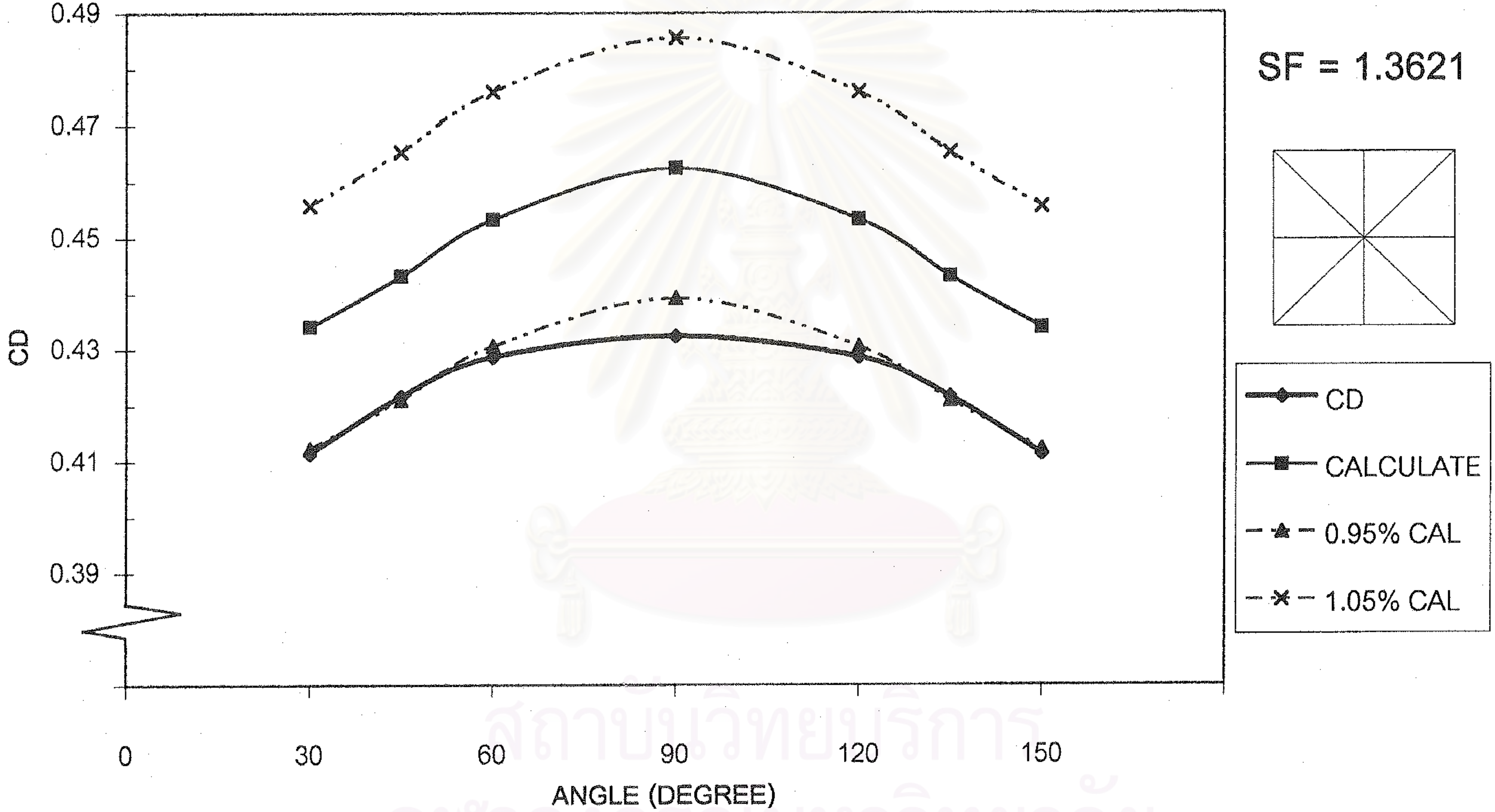


รูปที่ ข - 91 : กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 22 ช่อง วางตัวในแนวนอน โดยที่เส้นแบ่งภายในเป็นเส้นในแนวทแยง



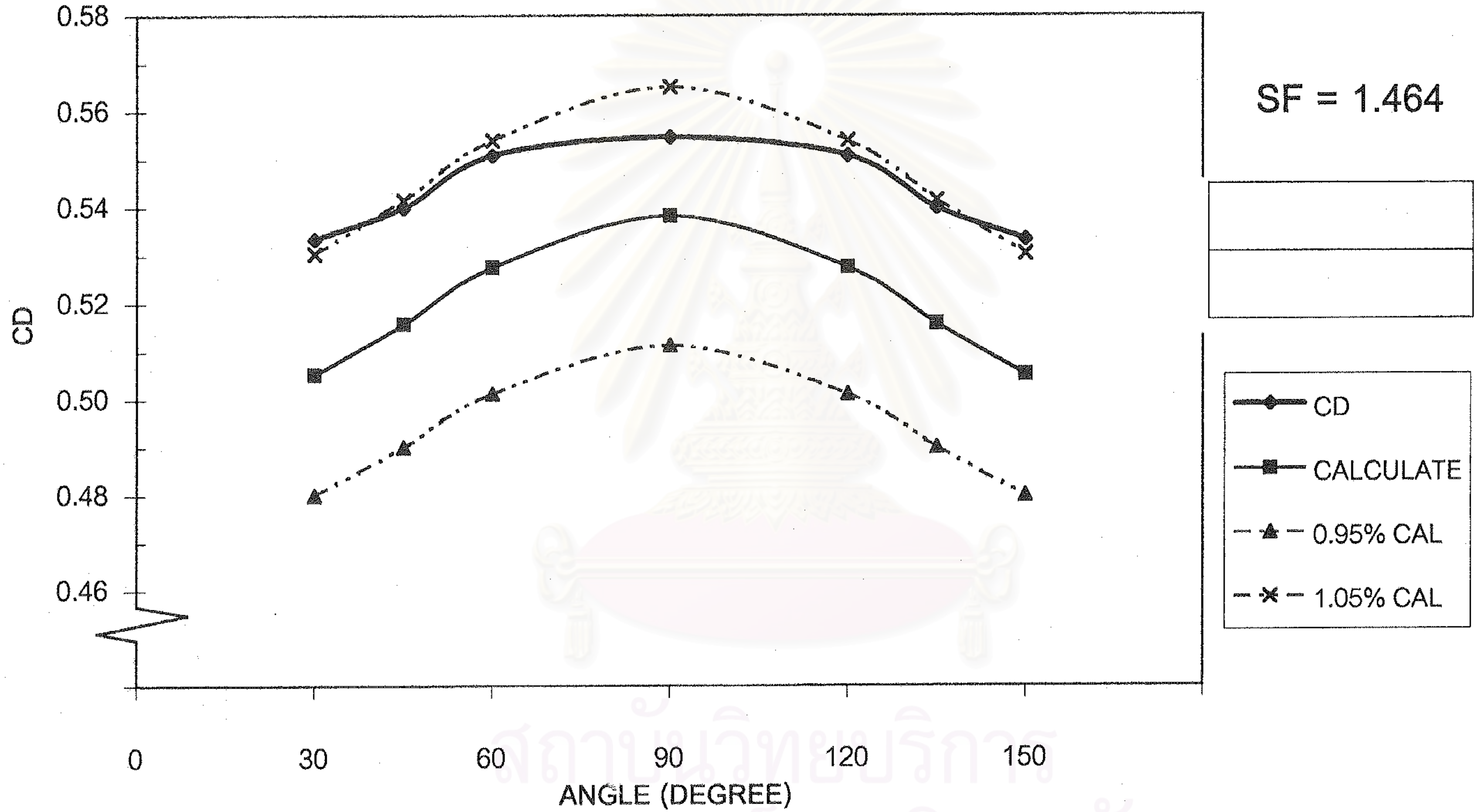
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ข - 92 : กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีช่องเปิดภายใน 2 ช่อง และมีการแบ่งช่องเปิดภายในด้วยเส้นในแนวทแยงมุม



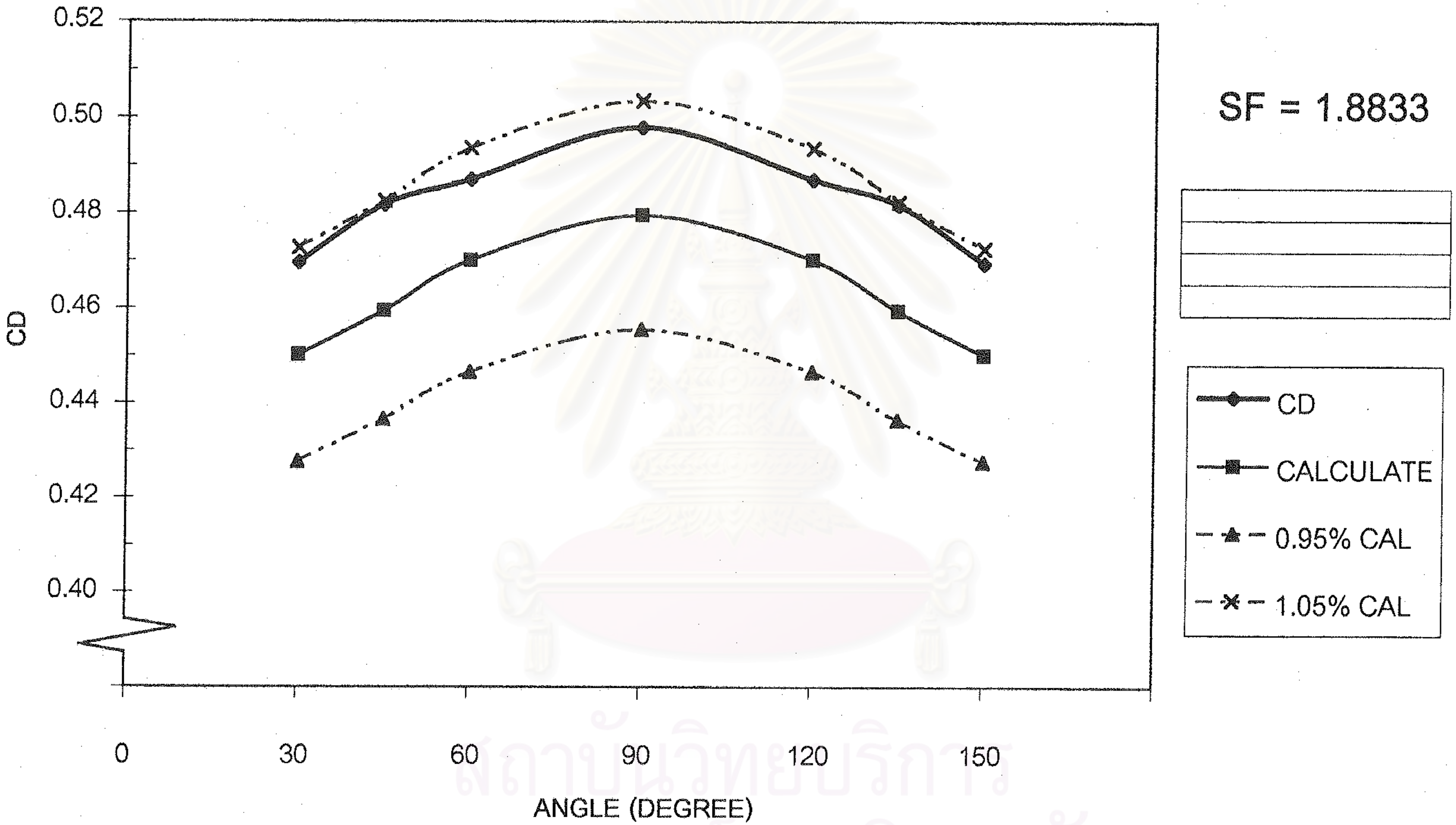
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ข - 93 : กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีช่องเปิดภายใน 8 ช่อง



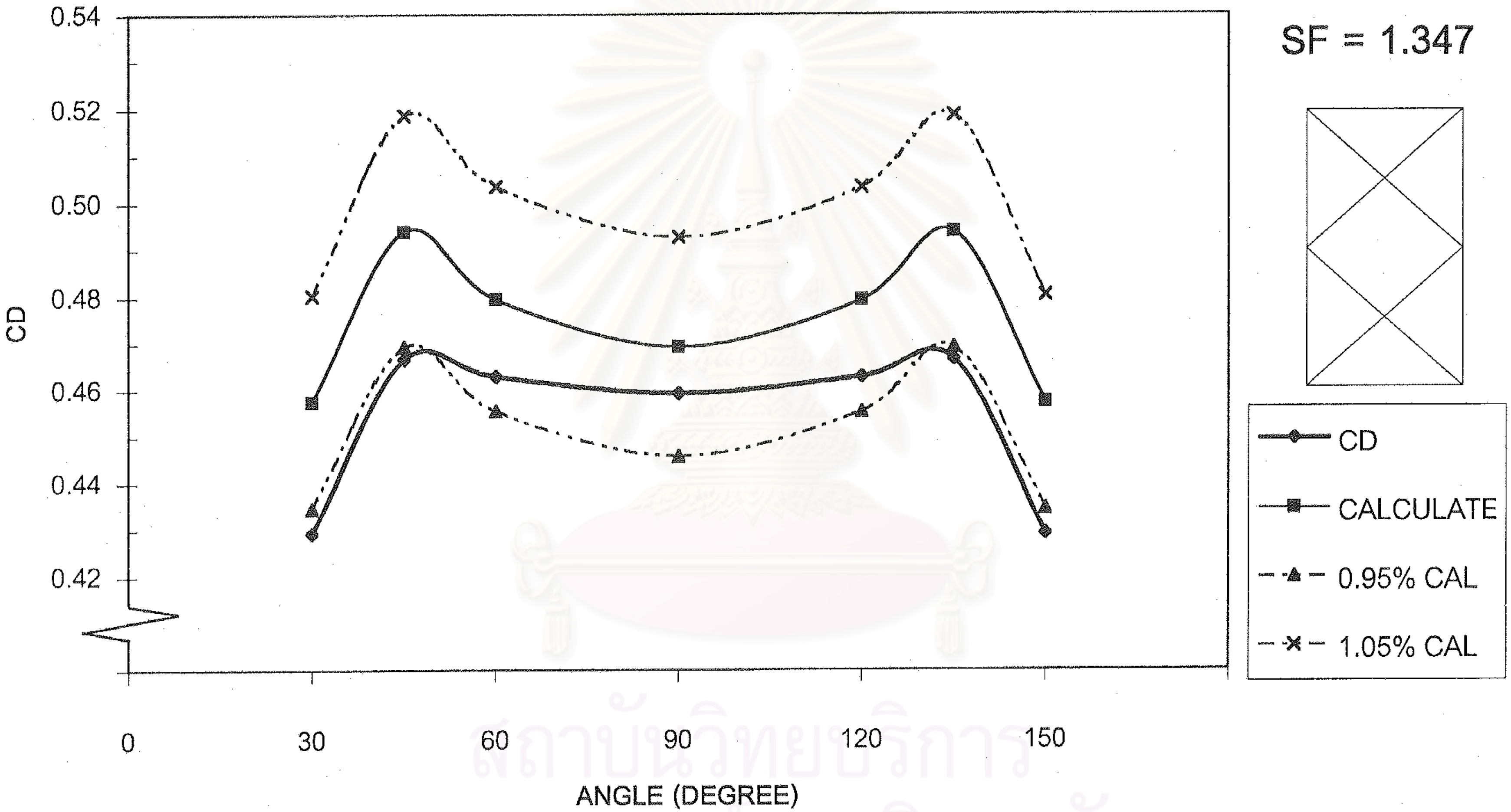
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ข - 94 : กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 2 ช่อง วางตัวในแนวนอน ภายในแบ่งด้วยเส้นในแนวระดับ



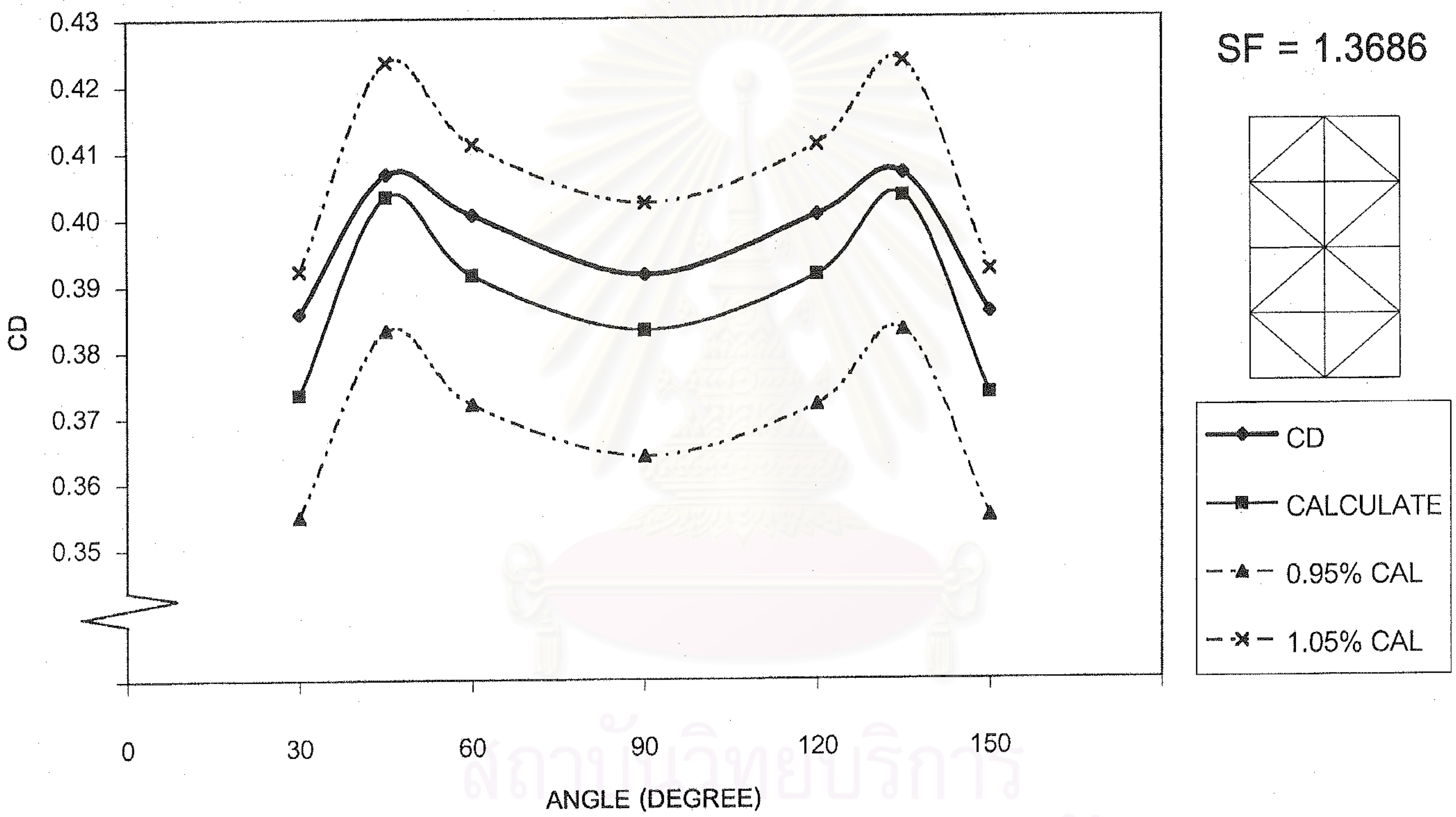
รูปที่ ข - 95 : กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิดรูปเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 4 ช่อง วางตัวในแนวนอน ภายในแบ่งด้วยเส้นในแนวระดับ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ข - 96 : กราฟแสดงการทดสอบสมการ สำหรับช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 7 ช่อง วางตัวในแนวตั้ง โดยที่เส้นแบ่งภายในเป็นเส้นแนวทแยง



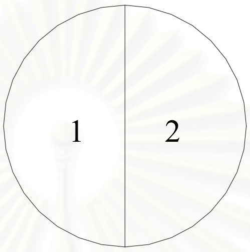
รูปที่ ข - 97 : กราฟแสดงการทดสอบสมการสำหรับช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีช่องเปิดภายใน 16 ช่องวางตัวในแนวตั้งโดยที่เส้นแบ่งภายในเป็นเส้นในแนวทแยง

ภาคผนวก ค.

แสดงตัวอย่างการคำนวณ

ค - 1 ตัวอย่างการคำนวณค่าตัวประกอบรูปร่าง (Shape Factor)

- **ช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นวงกลม ที่มีช่องเปิดภายใน 2 ช่องเปิด**



วงกลม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.4 เซนติเมตร แบ่งออกเป็น 2 ช่องเปิดภายใน ดังรูป

ดังนั้น พื้นที่ของช่องเปิดรูปวงกลม $= \dfrac{\pi {D_1}^2}{4}$ เซนติเมตร^2

$= \dfrac{\pi (5.4)^2}{4}$ เซนติเมตร^2

$= 22.9$ เซนติเมตร^2

ดังนั้น พื้นที่ของช่องเปิดภายในวงกลมรูปที่ 1 $= \dfrac{22.9}{2}$ เซนติเมตร^2

$= 11.45$ เซนติเมตร^2

ขนาดเส้นรอบรูปของช่องเปิดภายในวงกลมรูปที่ 1 $= \dfrac{\pi D_1}{2} + D_1$ เซนติเมตร

$= \dfrac{\pi 5.4}{2} + 5.4$ เซนติเมตร

$= 13.8823$ เซนติเมตร

และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมที่เทียบเท่ากับช่องเปิดรูปที่ 1 หาได้จาก

$\dfrac{\pi {D_{eq}}^2}{4} = 11.45$ เซนติเมตร^2

$D_{eq} = \sqrt{\dfrac{11.45 \times 4}{\pi}}$ เซนติเมตร

$D_{eq} = 3.8182$ เซนติเมตร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขนาดเส้นรอบรูปของวงกลมที่เทียบเท่ากับช่องเปิดรูปที่ 1 = πD_{eq} เซนติเมตร

= π x 3.8182 เซนติเมตร

= 11.9952 เซนติเมตร

ดังนั้น ค่าตัวประกอบรูปร่างของช่องเปิดภายในวงกลมรูปที่ 1 หาได้จาก

$$\text{Shape Factor}_1 = \frac{\text{àÊé¹ÃÍºÃÙ»¢Í§ªèÍ§à»Ô´ÀÒÂã¹Ç§¡ÅÁÃÙ»·Õè}}{\text{àÊé¹ÃÍºÃÙ»¢Í§Ç§¡ÅÁ·Õèà·ÕÂºà·èÒ¡ÑºªèÍ§à»Ô´ÃÙ»·Õ}}$$

$$\text{Shape Factor}_1 = \frac{13.8823}{11.9952}$$

$$\text{Shape Factor}_1 = 1.1573$$

และเนื่องจากว่า ช่องเปิดภายในวงกลมรูปที่ 2 มีขนาดพื้นที่ และเส้นรอบรูปเท่ากับช่องเปิดภายในวงกลมรูปที่ 1 ดังนั้น ค่าตัวประกอบรูปร่างของช่องเปิดภายในวงกลมรูปที่ 2 จะมีค่าเท่ากับ ค่าตัวประกอบรูปร่างของช่องเปิดภายในวงกลมรูปที่ 1 นั่นคือ

$$\text{Shape Factor}_1 = \text{Shape Factor}_2$$

ดังนั้น ค่าตัวประกอบรูปร่างเฉลี่ยของช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นวงกลม ที่มีช่องเปิดภายใน 2 ช่องเปิด คือ

$$\text{Shape Factor} = \frac{\text{Shape Factor}_1 + \text{Shape Factor}_2}{2}$$

$$= \frac{1.1573 + 1.1573}{2}$$

$$= 1.1573$$

- **ช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่มีช่องเปิดภายใน 4 ช่องเปิด**

1	2
3	4

สี่เหลี่ยมจัตุรัส มีขนาด 4.6x4.6 เซนติเมตร^2 แบ่งออกเป็น 4 ช่องเปิดภายใน ดังรูป

ดังนั้น พื้นที่ของช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส = 4.6 x 4.6 เซนติเมตร^2

= 21.16 เซนติเมตร^2

ดังนั้น พื้นที่ของช่องเปิดภายในสี่เหลี่ยมจัตุรัสรูปที่ 1 = $\frac{21.16}{4}$ เซนติเมตร^2

= 5.29 เซนติเมตร^2

ขนาดเส้นรอบรูปของช่องเปิดภายในสี่เหลี่ยมจัตุรัสรูปที่ 1 = 4 x 2.3 เซนติเมตร

= 9.2 เซนติเมตร

และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมที่เทียบเท่ากับช่องเปิดรูปที่ 1 หาได้จาก

$$\frac{\pi D_{eq}^{\ 2}}{4} = 5.29 \quad \text{เซนติเมตร}^2$$

$$D_{eq} = \sqrt{\frac{5.29 \times 4}{\pi}} \quad \text{เซนติเมตร}$$

$$D_{eq} = 2.60 \quad \text{เซนติเมตร}$$

ขนาดเส้นรอบรูปของวงกลมที่เทียบเท่ากับช่องเปิดรูปที่ 1 = πD_{eq} เซนติเมตร

= π x 2.60 เซนติเมตร

= 8.1681 เซนติเมตร

ดังนั้น ค่าตัวประกอบรูปร่างของช่องเปิดภายในสี่เหลี่ยมจัตุรัสรูปที่ 1 หาได้จาก

Shape Factor$_1$ = àÊé¹ÃÍºÃÙ»¢Í§ªèÍ§à»Ô´ÀÒÂã¹ÊÕèàËÅÕèÂÁ¨ÑµØÃÑÊÃÙ»·Õè 1 / àÊé¹ÃÍºÃÙ»¢Í§Ç§¡ÅÁ·Õèà·Õºà·èÒ¡ÑºªèÍ§à»Ô´ÃÙ»·Õè 1

Shape Factor$_1$ = $\frac{9.2}{8.1681}$

Shape Factor$_1$ = 1.1284

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

และเนื่องจากว่า ช่องเปิดภายในสี่เหลี่ยมจัตุรัสรูปที่ 2 , รูปที่ 3 และรูปที่ 4 มีขนาดพื้นที่ และเส้นรอบรูปเท่ากับช่องเปิดภายในสี่เหลี่ยมจัตุรัสรูปที่ 1 ดังนั้น ค่าตัวประกอบรูปร่างของช่องเปิดภายในสี่เหลี่ยมจัตุรัสรูปที่ 2 , รูปที่ 3 และรูปที่ 4 จะมีค่าเท่ากับ ค่าตัวประกอบรูปร่างของช่องเปิดภายในสี่เหลี่ยมจัตุรัสรูปที่ 1 นั่นคือ

$$\text{Shape Factor}_1 = \text{Shape Factor}_2 = \text{Shape Factor}_2 = \text{Shape Factor}_2$$

ดังนั้น ค่าตัวประกอบรูปร่างเฉลี่ยของช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่มีช่องเปิดภายใน 4 ช่องเปิด คือ

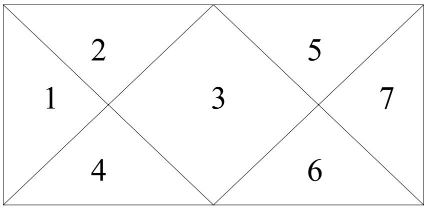
$$\text{Shape Factor} = \frac{SF_1 + SF_2 + SF_3 + SF_4}{4}$$

$$= \frac{1.1284 + 1.1284 + 1.1284 + 1.1284}{4}$$

$$= 1.1284$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

❑ **ช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีช่องเปิดภายใน 7 ช่องเปิด**



สี่เหลี่ยมผืนผ้า มีขนาด 7.0 x 3.1 เซนติเมตร^2 แบ่งออกเป็น 7 ช่องเปิดภายใน ดังรูป

ดังนั้น พื้นที่ของช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส	=	7.0 x 3.1	เซนติเมตร^2
	=	21.7	เซนติเมตร^2

พิจารณาช่องเปิดภายในรูปสามเหลี่ยมรูปที่ 1

พื้นที่ของช่องเปิดภายในสามเหลี่ยมรูปที่ 1	=	0.5 x ฐาน x สูง	เซนติเมตร^2
	=	0.5 x 3.1 x 1.75	เซนติเมตร^2
	=	2.7125	เซนติเมตร^2
ขนาดเส้นรอบรูปของช่องเปิดภายในสามเหลี่ยมรูปที่ 1	=	3.1 + 2(2.35)	เซนติเมตร
	=	7.8	เซนติเมตร

และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมที่เทียบเท่ากับช่องเปิดรูปที่ 1 หาได้จาก

$$\frac{\pi D_{eq}^{\ 2}}{4} = 2.7125 \text{ เซนติเมตร}^2$$

$$D_{eq} = \sqrt{\frac{2.7125 \times 4}{\pi}} \text{ เซนติเมตร}$$

$$D_{eq} = 1.8584 \text{ เซนติเมตร}$$

ขนาดเส้นรอบรูปของวงกลมที่เทียบเท่ากับช่องเปิดรูปที่ 1	=	πD_{eq}	เซนติเมตร
	=	π x 1.8584	เซนติเมตร
	=	5.8383	เซนติเมตร

ดังนั้น ค่าตัวประกอบรูปร่างของช่องเปิดภายในสามเหลี่ยมรูปที่ 1 หาได้จาก

Shape Factor$_1$ = àÊé¹ÃÍºÃÙ»¢Í§ªèÍ§à»Ô´ÀÒÂã¹ÊÒÁàËÅÕèÂÁÃÙ»·Õè 1 / àÊé¹ÃÍºÃÙ»¢Í§Ç§¡ÅÁ·Õèà·ÕÂºà·èÒ¡Ñºªèͧà»Ô´ÃÙ»·Õè 1

$$\text{Shape Factor}_1 = \frac{7.8}{5.8383}$$

$$\text{Shape Factor}_1 = 1.336$$

และเนื่องจากว่า ช่องเปิดภายในสามเหลี่ยมรูปที่ 7 มีขนาดพื้นที่ และเส้นรอบรูปเท่ากับช่องเปิดภายในสามเหลี่ยมรูปที่ 1 ดังนั้น ค่าตัวประกอบรูปร่างของช่องเปิดภายในสามเหลี่ยมรูปที่ 7 จะมีค่าเท่ากับ ค่าตัวประกอบรูปร่างของช่องเปิดภายในสามเหลี่ยมรูปที่ 1 นั่นคือ

$$\text{Shape Factor}_1 = \text{Shape Factor}_7 = 1.336$$

พิจารณาช่องเปิดภายในรูปสามเหลี่ยมรูปที่ 2

พื้นที่ของช่องเปิดภายในสามเหลี่ยมรูปที่ 2	=	0.5 x ฐาน x สูง	เซนติเมตร^2
	=	0.5 x 3.5 x 1.55	เซนติเมตร^2
	=	2.7125	เซนติเมตร^2
ขนาดเส้นรอบรูปของช่องเปิดภายในสามเหลี่ยมรูปที่ 2	=	3.5 + 2(2.35)	เซนติเมตร
	=	8.2	เซนติเมตร

และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมที่เทียบเท่ากับช่องเปิดรูปที่ 2 หาได้จาก

$$\frac{\pi D_{eq}^{\;2}}{4} = 2.7125 \quad \text{เซนติเมตร}^2$$

$$D_{eq} = \sqrt{\frac{2.7125 \times 4}{\pi}} \quad \text{เซนติเมตร}$$

$$D_{eq} = 1.8584 \quad \text{เซนติเมตร}$$

ขนาดเส้นรอบรูปของวงกลมที่เทียบเท่ากับช่องเปิดรูปที่ 2	=	πD_{eq}	เซนติเมตร
	=	π x 1.8584	เซนติเมตร
	=	5.8383	เซนติเมตร

ดังนั้น ค่าตัวประกอบรูปร่างของช่องเปิดภายในสามเหลี่ยมรูปที่ 2 หาได้จาก

$$\text{Shape Factor}_1 = \frac{\text{àÊé¹ÃÍºÃÙ»¢Í§ª‹Í§à»Ô´ÀÒÂã¹ÊÒÁàËÅÕèÂÁÃÙ»·Õè 2}}{\text{àÊé¹ÃÍºÃÙ»¢Í§Ç§¡ÅÁ·Õèà·ÕÂºà·èÒ¡Ñºª‹Í§à»Ô´ÃÙ»·Õè 2}}$$

$$\text{Shape Factor}_1 = \frac{8.2}{5.8383}$$

$$\text{Shape Factor}_1 = 1.4046$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

และเนื่องจากว่า ช่องเปิดภายในสามเหลี่ยมรูปที่ 4 , รูปที่ 5 และรูปที่ 6 มีขนาดพื้นที่ และเส้นรอบรูปเท่ากับช่องเปิดภายในสามเหลี่ยมรูปที่ 2 ดังนั้น ค่าตัวประกอบรูปร่างของช่องเปิดภายในสามเหลี่ยมรูปที่ 4 , รูปที่ 5 และรูปที่ 6 จะมีค่าเท่ากับ ค่าตัวประกอบรูปร่างของช่องเปิดภายในสามเหลี่ยมรูปที่ 2 นั่นคือ

$$\text{Shape Factor}_4 = \text{Shape Factor}_5 = \text{Shape Factor}_6 = \text{Shape Factor}_2 = 1.4046$$

พิจารณาช่องเปิดภายในรูปสี่เหลี่ยม รูปที่ 3

พื้นที่ของช่องเปิดภายในสี่เหลี่ยมรูปที่ 3 มีขนาดพื้นที่ เป็น 2 เท่าของพื้นที่ของช่องเปิดภายในสามเหลี่ยมรูปที่ 1 = 2 x 2.7125 เซนติเมตร^2

= 5.425 เซนติเมตร^2

ขนาดเส้นรอบรูปของช่องเปิดภายในสี่เหลี่ยมรูปที่ 3 = 4(2.35) เซนติเมตร

= 9.4 เซนติเมตร

และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมที่เทียบเท่ากับช่องเปิดรูปที่ 3 หาได้จาก

$$\frac{\pi D_{eq}^{\ 2}}{4} = 5.425 \text{ เซนติเมตร}^2$$

$$D_{eq} = \sqrt{\frac{5.425 \times 4}{\pi}} \text{ เซนติเมตร}$$

$$D_{eq} = 2.6282 \text{ เซนติเมตร}$$

ขนาดเส้นรอบรูปของวงกลมที่เทียบเท่ากับช่องเปิดรูปที่ 3 = πD_{eq} เซนติเมตร

= π x 2.6282 เซนติเมตร

= 8.2567 เซนติเมตร

ดังนั้น ค่าตัวประกอบรูปร่างของช่องเปิดภายในสี่เหลี่ยมรูปที่ 3 หาได้จาก

$$\text{Shape Factor}_1 = \frac{\text{เส้นรอบรูปของช่องเปิดภายในสี่เหลี่ยมรูปที่ 3}}{\text{เส้นรอบรูปของวงกลมที่เทียบเท่ากับช่องเปิดรูปที่ 3}}$$

$$\text{Shape Factor}_1 = \frac{9.4}{8.2567}$$

$$\text{Shape Factor}_1 = 1.1385$$

ดังนั้น ค่าตัวประกอบรูปร่างเฉลี่ยของช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีช่องเปิดภายใน 7 ช่องเปิด คือ

$$\text{Shape Factor} = \frac{SF_1 + SF_2 + SF_3 + SF_4 + SF_5 + SF_6 + SF_7}{7}$$

$$= \frac{1.336 + 1.4046 + 1.1385 + 1.4046 + 1.4046 + 1.4046 + 1.336}{7}$$

$$= 1.347$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค - 2 ตัวอย่างการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลจากการทดลอง โดยนำค่าจากช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นวงกลม ที่มีช่องเปิดภายใน 2 ช่องเปิด

จากตารางแสดงผลการทดลอง ดังตารางที่ ก - 2 พิจารณาค่าที่อ่านได้จาก Microtector ซึ่งใช้วัดความดันตกคร่อมของส่วนทดลอง

จุดเริ่มต้นการอ่านค่า อยู่ที่	=	0.23	มิลลิเมตรน้ำ
จุดสิ้นสุดการอ่านค่า อยู่ที่	=	7.92	มิลลิเมตรน้ำ
ผลต่างของค่าที่อ่านได้	=	7.92 – 0.23	มิลลิเมตรน้ำ
	=	7.69	มิลลิเมตรน้ำ

แต่เนื่องจากค่าความสูงจริงที่ได้จาก Microtector มีค่าเท่ากับ 2 เท่าของผลต่างของค่าที่อ่านได้

ค่าความสูงที่อ่านได้จริง	=	2 x 7.69	มิลลิเมตรน้ำ
	=	15.38	มิลลิเมตรน้ำ

และจากสมการ $\Delta P = \gamma H$

โดยที่ ΔP = ค่าความดันตกคร่อม , Pa

γ = ค่าคงที่ โดยมีค่า = 8,103.06 N / m^3

H = ค่าความสูงที่อ่านได้จากมาโนมิเตอร์ , เมตร

ดังนั้น จะได้ ค่าความดันตกคร่อมชุดทดลอง

$$\Delta P = 8{,}103.06 \times 15.38 \quad E\text{-}3 \quad N/m^3$$

$$= 124.625 \quad N/m^3$$

จากสมการที่ใช้ในการหาค่าอัตราการไหลในทางทฤษฎี คือ

$$\dot{Q}_t = A_2\sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{1 - A^2}}$$

โดยที่ $\dot{Q}_t$ = ค่าอัตราการไหลโดยปริมาตรในทางทฤษฎี

A_2 = พื้นที่ของช่องเปิด = 216.09 E -5

A = อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัด = 0.1

แทนค่าได้ $\dot{Q}_t$ = $216.09\text{E-}5\sqrt{\dfrac{2\times 124.625}{1-0.1^2}}$ m^3/s

= 0.03429 m^3/s

จากตารางแสดงผลการทดลอง ดังตารางที่ ข.1 พิจารณาค่าที่อ่านได้จากIncliened Manometer ซึ่งใช้วัดความดันตกคร่อมของชุดอุปกรณ์วัดความเร็ว

ค่าความสูงที่อ่านได้จากมาโนมิเตอร์ = 105 มิลลิเมตรน้ำ

และจากสมการ $\Delta P = \gamma H$

โดยที่ ΔP = ค่าความดันตกคร่อม , Pa

γ = ค่าคงที่ โดยมีค่า = 8,103.06 N/m^3

H = ค่าความสูงที่อ่านได้จากมาโนมิเตอร์ , เมตร

ดังนั้น จะได้ ค่าความดันตกคร่อมชุดอุปกรณ์วัดความเร็ว

ΔP = 8,103.06 x 105E -3 N/m^3

= 850.8213 N/m^3

เราสามารถหาค่าอัตราการไหลในทางปฏิบัติ ได้จากชุดอุปกรณ์วัดความเร็วนี้ โดยมีสมการที่ใช้ในการคำนวณ คือ

$$Q_a = \left[\frac{\pi D^4 n}{128\,\mu L}\right]\Delta P$$

โดยที่ Q_a = อัตราการไหลของอากาศ , เมตร^3/วินาที

D = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ , เมตร

L = ความยาวท่อ , เมตร

μ = ความหนืดของอากาศ = 18.6 x 10^{-6} NS/m^2 ที่ 25^O เซลเซียส

n = จำนวนท่อ

แทนค่า ได้ Q_a = $\left[\dfrac{\pi(0.78\text{E-}3)^4\times 1780}{128\times 18.6\text{E-}6\times 40\text{E-}3}\right]\times 850.8213$ m^3/s

= 0.01849 m^3/s

จากค่าอัตราการไหลในทางปฏิบัติ และค่าอัตราการไหลในทางทฤษฎี ที่เราได้จากการทดลองนี้ จะสามารถนำมาใช้หาค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลของช่องเปิดที่มีลักษณะเป็นวงกลม ที่มีช่องเปิดภายใน 2 ช่องเปิด ได้โดยใช้สมการ คือ

$$C_D = \frac{\dot{Q}_a}{\dot{Q}_t}$$

$$= \frac{0.01849}{0.03429}$$

$$= 0.53934$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง.

สถิติเพื่อช่วยในการตัดสินใจ

ง - 1 สหสัมพันธ์ (Correlation)

ถ้าพิจารณาข้อมูลที่เกิดขึ้นรอบๆตัว จะพบเห็นเสมอๆว่า ข้อมูลเหล่านั้นมักมีความสัมพันธ์กัน เช่น คนที่ได้คะแนนสูงในวิชาฟิสิกส์มักสอบได้คะแนนสูงในวิชาคณิตศาสตร์ด้วย คนที่รับประทานอาหารมาก ก็มักจะมีน้ำหนักมาก ลักษณะของข้อมูลที่เกิดขึ้นดังกล่าว เรียกว่ามีความสัมพันธ์กัน และถ้าตัวแปรตัวหนึ่งมีลักษณะข้อมูลเป็น อันตรภาค (Interval Scale) หรืออัตราส่วน (Ratio Scale) อีกตัวหนึ่งเป็นนามบัญญัติ (Nominal Scale) หรืออันตรภาค หรืออัตราส่วนแล้ว สามารถคำนวณหาสหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson Product Moment Correlation) สำหรับค่าที่บ่งบอกถึงความสัมพันธ์ เรียกว่า สัมประสิทธิ์ของสหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) ซึ่งอยู่ระหว่าง +1 ถึง -1

เมื่อกล่าวถึงความสัมพันธ์ในที่นี้ จะหมายถึง ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ของสหสัมพันธ์ จะบ่งบอกถึงลักษณะของข้อมูล เมื่อนำมาพล็อตจะรู้ว่าอยู่ในแนวเส้นตรงเพียงใด ถ้าสัมประสิทธิ์ของสหสัมพันธ์มีค่า +1 หรือ -1 แสดงว่า ทุกค่า เมื่อนำมาพล็อต จะอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน

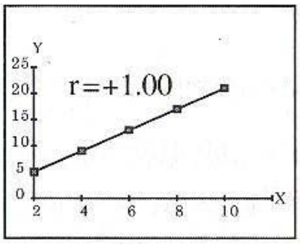
จากรูปที่ ง - 1 ก. และ ข. จะเห็นได้ว่า เมื่อเชื่อมต่อจุดก็จะเกิดเป็นเส้นตรงลักษณะดังกล่าว เมื่อคำนวณค่าเพียร์สัน , r จะมีค่าเท่ากับ +1 ในทำนองเดียวกัน ถ้าคำนวณค่าเพียร์สัน , r แล้วได้น้อยกว่า 1 ก็จะมีลักษณะดังรูปที่ ง - 2

โดยความหมายของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สามารถแสดงดังตารางที่ ง - 1

ตารางที่ ง - 1 : แสดงความหมายของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์	มีความสัมพันธ์
0.0 - 0.20	ไม่มี
0.20 - 0.40	ต่ำ
0.40 - 0.60	กลาง
0.60 - 0.80	ค่อนข้างสูง
0.80 - 1.00	สูง

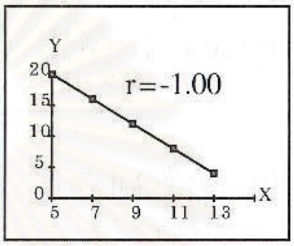
X↑	→ Y↑
2	5
4	9
6	13
8	17
10	21



ก

(X↓ → Y↓)

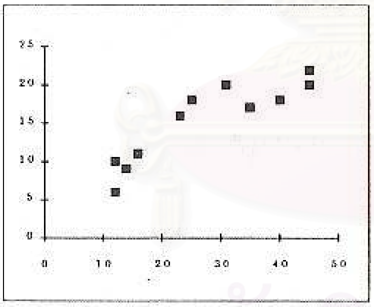
X↑	→ Y↓
5	20
7	16
9	12
11	8
13	4



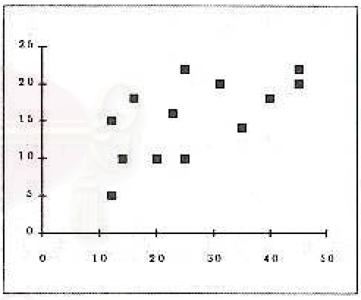
ข

(X↓ → Y↑)

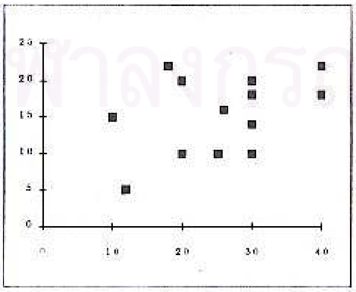
รูปที่ ง - 1 : แสดงแนวความคิดสหสัมพันธ์



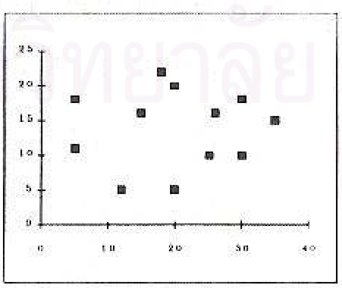
r = 0.90



r = 0.63



r = 0.40



r = 0.00

รูปที่ ง - 2 : แสดงกราฟที่ได้จากค่า r น้อยกว่า 1.00

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ง - 2 สมการถดถอย (Regression)

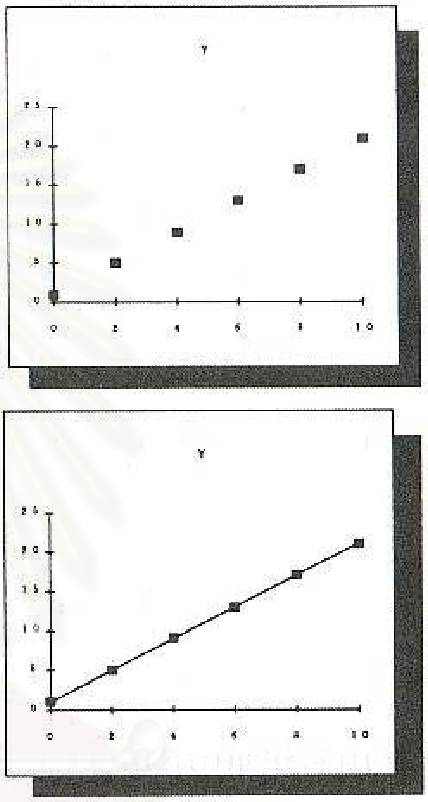
เมื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของสหสัมพันธ์ พบว่า มีค่าเท่ากับ +1 หรือ -1 แล้ว แสดงว่า เมื่อนำค่าตัวแปรดังกล่าวมาพล็อตกราฟ จะได้จุดซึ่งตกอยู่ในแนวเส้นตรง และเมื่อเชื่อมจุดต่างๆแล้วก็จะได้กราฟเส้นตรง

X	Y
0	1
2	5
4	9
6	13
8	17
10	21

$$Y = 2X+1$$

(ก)

(ข)



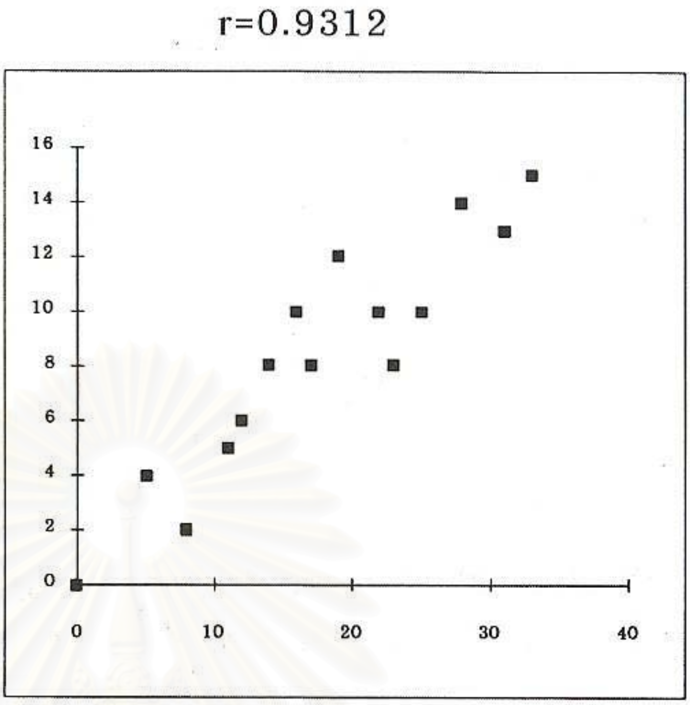
รูปที่ ง - 3 : แสดงสมการถดถอยและกราฟที่มีค่า r เท่ากับ 1.00

จากรูปที่ ง - 3 จะเห็นได้ว่า ถ้านำข้อมูลมาพล็อต ก็จะได้เพียงจุดที่ปรากฏบนกราฟเท่านั้น (ก) เมื่อกำหนดค่า Y มาให้ ก็ไม่สามารถหาค่า X ได้ ในทางตรงกันข้าม ถ้าเชื่อมจุดต่างๆเข้าด้วยกัน ก็จะเกิดกราฟเส้นตรง (ข) ถ้ามีกราฟเส้นตรงแล้ว เมื่อกำหนดค่าค่าหนึ่งมาให้ ก็จะสามารถคำนวณหาค่าอีกค่าหนึ่งได้ โดยอาศัยกราฟเส้นตรงดังกล่าว

ในความเป็นจริง การวิจัยที่กระทำกันอยู่ เมื่อนำข้อมูลมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของสหสัมพันธ์แล้ว จะพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของสหสัมพันธ์มีค่าไม่เท่ากับ +1 หรือ –1 เมื่อนำข้อมูลมาพล็อตเป็นกราฟก็จะได้จุดที่กระจายออกจากแนวเส้นตรง ดังรูปที่ ง - 4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

X	Y
33	15
31	13
28	14
25	10
23	8
22	10
19	12
17	8
16	10
14	8
12	6
11	5
8	2
5	4
0	0



รูปที่ ง - 4 : แสดงกราฟที่ได้จากข้อมูลด้านซ้าย

เมื่อเป็นเช่นนี้ การกำหนดเส้นตรงที่ผ่านจุดต่างๆ ก็สามารถทำได้หลายเส้นด้วยกัน สำหรับเส้นตรงที่กำหนดแล้วสอดคล้องกับค่าต่างๆมากที่สุด จะเรียกว่า สมการถดถอยที่ดีที่สุด เพราะสามารถแทนค่าใดๆ แล้วให้ผลที่ใกล้เคียงกับค่าที่เป็นจริงมากที่สุด

ง - 3 **ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณค่า** (Standard Error of Estimate)

จะเห็นได้ว่า เมื่อตัวแปร X และ Y มีค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์เท่ากับ +1 หรือ -1 แล้ว การแทนค่า X ใดๆ จะได้ค่า Y' ที่เกิดจากการทำนายตรงกับค่า Y นั่นก็คือ ผลรวมของ Y-Y' = 0 (หรือ $\sum$(Y-Y') = 0) แต่เมื่อใดก็ตามที่ความสัมพันธ์ระหว่าง X และ Y มีค่าน้อยกว่า 1 การทำนายย่อมเกิดความคลาดเคลื่อน เนื่องมาจากค่าทุกค่าไม่ได้อยู่ในแนวเส้นตรง

ดังนั้น จึงมีการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานจากสูตร

$$S_{yx} = \sqrt{\frac{\sum(Y - Y')^2}{N-2}}$$

เมื่อ S_{yx} คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

N คือ จำนวนข้อมูล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$S_{yx} = \sqrt{\frac{35.27}{15-2}} = \sqrt{2.71} = 1.647$$

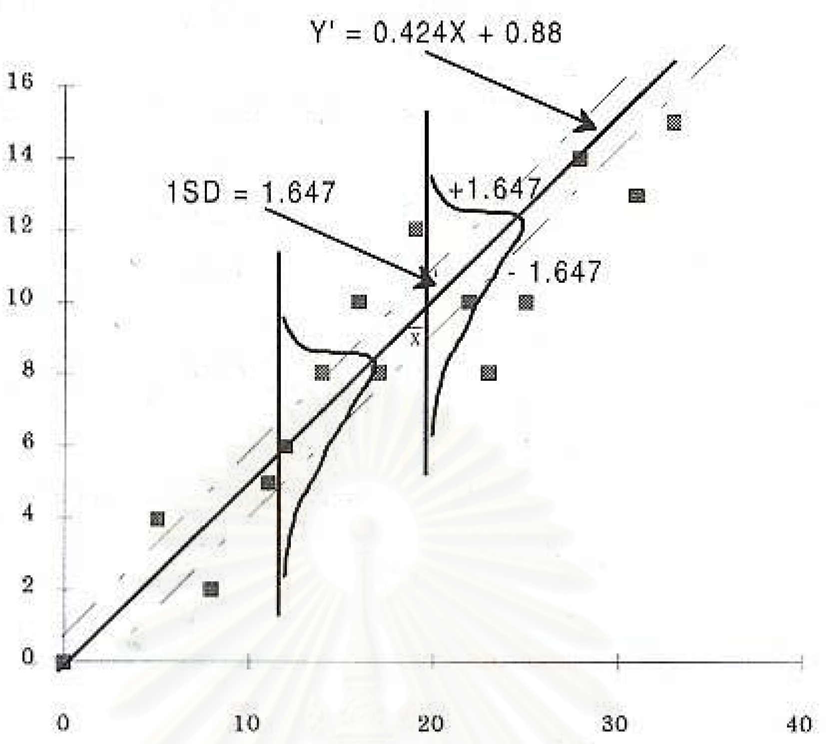
ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานก็คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการทำนายที่เกิดจากการเบี่ยงเบนระหว่างค่า Y' และ Y ในสมการถดถอยนั่นเอง

สำหรับสมการ Y' = 0.424X + 0.88 สามารถกล่าวได้ว่า ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน ของการประมาณค่า ก็คือ ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานซึ่งมีค่า 1 SD ในที่นี้เท่ากับ 1.647

ตารางที่ ง - 2 : แสดงการคำนวณคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณค่า

	X	Y	Y'	Y-Y'	$(Y-Y')^2$	
	33	15	14.87	0.13	0.02	
	31	13	14.02	-1.02	1.05	
	28	14	12.75	1.25	1.56	
	25	10	11.48	-1.48	2.19	
	23	8	10.63	-2.63	6.93	X และ Y คือ
	22	10	10.21	-0.21	0.04	ข้อมูลที่เก็บจากการวิจัย
	19	12	8.94	3.06	9.39	
	17	8	8.09	-0.09	0.01	
	16	10	7.66	2.34	5.46	Y' คือ ค่าที่ได้จากสมการ
	14	8	6.82	1.18	1.40	Y' = 0.424X + 0.88
	12	6	5.97	0.03	0.00	
	11	5	5.54	-0.54	0.30	
	8	2	4.27	-2.27	5.16	
	5	4	3.00	1.00	1.00	
	0	0	0.88	-0.88	0.77	
ค่าเฉลี่ย	17.6	8.33	8.34			
ผลรวม				-0.13	35.27	

จากตารางที่ ง - 2 อาจกล่าวได้ว่า ถ้า X มีค่าเท่ากับ 33 แล้ว Y' จะมีค่าเท่ากับ 17.87±1.647 หรืออยู่ระหว่าง 13.223 ถึง 17.517 ซึ่งตัวเลขดังกล่าวจะมีโอกาสเป็นจริง 68.26 % ทำนองเดียวกัน ถ้าต้องการให้การทำนายมีความถูกต้อง 95.44 % ก็จำเป็นจะต้องเพิ่มความกว้างของ SD เป็น 2 เท่า นั่นก็คือ 17.87±2(1.647) และถ้าต้องการให้การทำนายมีความแม่นยำ 99.74 % ก็จะต้องเพิ่มค่า SD เป็น 3 เท่า หรือ 17.87±3(1.647)



รูปที่ ง - 5 : แสดงโค้งปกติ กับค่า SD

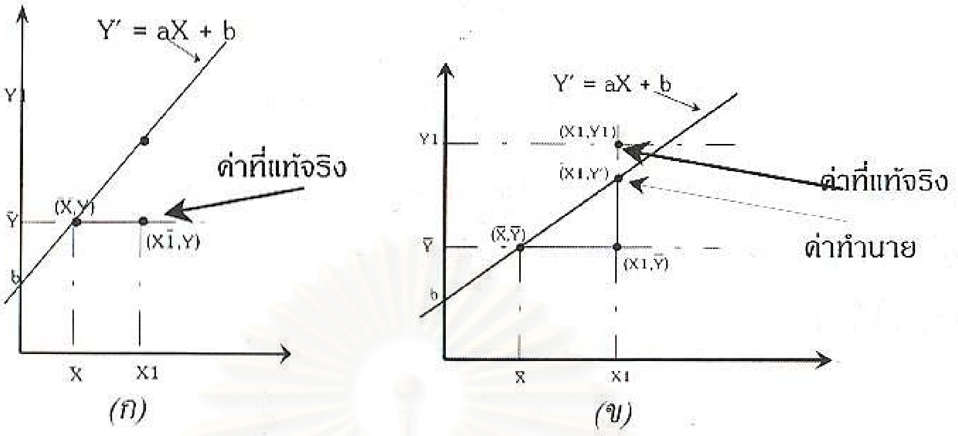
ง - 4 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination)

เมื่อสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าเท่ากับ +1 หรือ -1 แล้ว การทำนายค่า Y และ X ก็จะไม่เกิดความคลาดเคลื่อนแต่เมื่อค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวน้อยกว่า 1 ก็ย่อมจะเกิดความคลาดเคลื่อนเพิ่มมากขึ้นเป็นเงาตามตัว ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากการพยากรณ์ค่าหนึ่งซึ่งสามารถคำนวณได้อีก 2 ค่าใดๆ ดังเช่นในที่นี้ จะกำหนดให้ $\overline{Y}$ คือ ค่าๆหนึ่งที่ต้องการพยากรณ์ จะเห็นได้ว่า ถ้าใช้สมการเส้นตรงใดๆ ก็จะคำนวณได้ค่า $\overline{X}$ และ X1 ค่า $\overline{X}$ คือค่าจากการคำนวณในสมการเส้นตรง ส่วน X1 คือค่าที่แท้จริง ดังรูปที่ ง - 6 (ข) ในขณะเดียวกัน ค่า X1 ที่เป็นค่าจริง เมื่อแทนค่าลงในสมการเส้นตรงก็จะทำให้เกิดค่า Y’ และ Y1 ค่า Y’ จะเกิดจากการทำนาย ส่วนค่า Y1 จะเป็นค่าตัวเลขที่แท้จริง ดังในรูปที่ ง - 7 ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า ค่าความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นจาก 3 แหล่ง คือ

ค่าความคลาดเคลื่อนทั้งหมดของการประมาณค่า (Total Error of Estimation)ได้จาก Y1-$\overline{Y}$

ค่าความคลาดเคลื่อนของการประมาณค่าที่ไม่สามารถอธิบายได้ด้วยสมการถดถอย (Error of Estimation Unexplained by Regression) ได้จาก Y1-Y’ และ

ค่าความคลาดเคลื่อนทั้งหมดของการประมาณค่าที่สามารถอธิบายได้ด้วยสมการถดถอย (Error of Estimation Explained by Regression) ได้จาก $Y'-\overline{Y}$



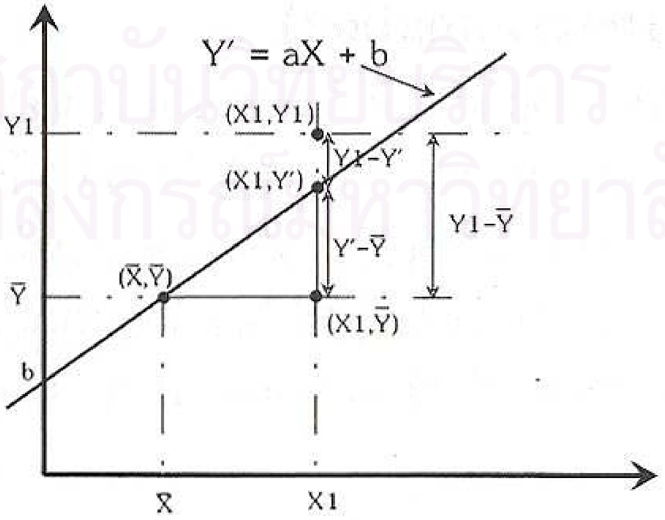
รูปที่ ง - 6 (ก) ค่า $\overline{Y}$ จะทำให้เกิดค่า $\overline{X}$ ($\overline{X}$, $\overline{Y}$) และ X1(X1, $\overline{Y}$)

(ข) ค่า X1 จะทำให้เกิดค่า Y′(X1,Y′) และ Y1(X1,Y1)

ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจเกิดจากผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อนที่สามารถอธิบายได้ หารด้วยผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อนทั้งหมด หรือสามารถเขียนเป็นสูตรได้ดังนี้

$$r^2 = \frac{\sum\left(Y'-\overline{Y}\right)^2}{\sum\left(Y1-\overline{Y}\right)^2}$$

ซึ่งถ้าพิจารณาให้ดีจะเห็นได้ว่า สัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ ก็คือ สัดส่วนของความแปรปรวน ที่สามารถอธิบายได้หารด้วย ความแปรปรวนทั้งหมด ต้องมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1



รูปที่ ง - 7 : แสดงค่าความคลาดเคลื่อน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ นายณัฐวุฒิ วลัยกนก

เกิดวันที่ 9 พฤษจิกายน พ.ศ. 2521

ประวิติการศึกษา

- สำเร็จการศึกษาจากโรงเรียนเทพศิรินทร์
- สำเร็จการศึกษาในระดับ ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2541
- เข้าศึกษาต่อในระดับ ปริญญาวิศวกรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2542

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย