ปัจจัยกายภาพหิ้งสะท้อนแสงที่มีผลต่อการนำแสงธรรมชาติเข้ามาใช้ในอาคาร

นายชัยวัฒน์ มุตติศานต์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาสถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาสถาปัตยกรรม ภาควิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์
คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-14-2086-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

i22651780

THE IMPACTS OF LIGHTSHELF' S PHYSICAL FACTORS ON DAYLIGHTING IN BUILDINGS

Mr. Chaiwat Muttisan

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Architecture in Architecture

Department of Architecture

Faculty of Architecture

Chulalongkorn University

Academic Year 2005

ISBN 974-14-2086-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ปัจจัยกายภาพหิ้งสะท้อนแสงที่มีผลต่อการนำแสงธรรมชาติเข้ามาใช้ในอาคาร
โดย	นายชัยวัฒน์ มุตติศานต์
สาขาวิชา	สถาปัตยกรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ธนิต จินดาวณิค
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พรรณชลัท สุริโยธิน

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ เลอสม สถาปิตานนท์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ชลธี อิ่มอุดม)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ธนิต จินดาวณิค)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พรรณชลัท สุริโยธิน)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร. วรภัทร์ อิงคโรจน์ฤทธิ์)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร. อัจฉราวรรณ จุฑารัตน์)

ชัยวัฒน์ มุตติศานต์ : ปัจจัยกายภาพหิ้งสะท้อนแสงที่มีผลต่อการนำแสงธรรมชาติเข้ามาใช้ในอาคาร (THE IMPACTS OF LIGHTSHELF' S PHYSICAL FACTORS ON DAYLIGHTING IN BUILDINGS) อ. ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ธนิต จินดาวณิค, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พรรณชลัท สุริโยธิน,198 หน้า. ISBN 974-14-2086-2.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลอง เพื่อศึกษาหาปัจจัยกายภาพของหิ้งสะท้อนแสงที่มีผลต่อการนำแสงธรรมชาติเข้ามาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ผ่านช่องเปิดทิศเหนือ และทิศใต้ ขอบเขตการศึกษาได้ทำการศึกษาเฉพาะอาคารประเภทสำนักงาน ที่ตั้งในเขตละติจูดที่14 องศาเหนือ และมีช่วงเวลาการใช้งานอยู่ระหว่าง 8:00 – 16:00 น. รวมเป็นระยะเวลาใช้งาน 8 ชั่วโมงต่อวัน หิ้งสะท้อนแสงทั่วไปถูกนำมาศึกษา และกำหนดตัวแปร โดยการทดลองจะอาศัยหุ่นจำลอง และห้องจำลองท้องฟ้า (skydome) วัดค่าความสว่างโดยประเมินจากค่า Daylight Factor (DF) ที่ไม่ต่ำกว่าเกณฑ์ 2.0 % ผลการทดลองถูกนำมาสรุปรูปแบบตัวแปรที่มีประสิทธิภาพที่ให้ระยะการส่องสว่างด้วยแสงธรรมชาติที่ความลึกมากที่สุดของช่องเปิดทิศเหนือ และทิศใต้ จากนั้นได้มาทำการออกแบบต้นแบบหิ้งสะท้อนแสง และนำมาคำนวณเปรียบเทียบกับข้อมูลปริมาณแสงกระจายจากท้องฟ้าเฉลี่ยเป็นรายชั่วโมงของทุกเดือน เพื่อหาความส่องสว่างจากแสงธรรมชาติ ในชั่วโมงที่ไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานไฟฟ้า และประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงาน โดยจะเปรียบเทียบพื้นที่ใช้งานที่เปิดใช้พลังงานไฟฟ้า 8 ชม.ต่อวัน กับพื้นที่ใช้งานที่ติดตั้งตัวแทนหิ้งสะท้อนแสง และพื้นที่ใช้งานที่ติดตั้งต้นแบบหิ้งสะท้อนแสง

จากการประเมินผลการประหยัดพลังงานของต้นแบบหิ้งสะท้อนแสงช่องเปิดทิศเหนือ พบว่าสามารถลดการเปิดใช้ไฟฟ้าแสงสว่างเป็นระยะเวลา 601 ชั่วโมงต่อปี หรือ 29.1 % ของจำนวนชั่วโมงใช้งานตลอดทั้งปี เพิ่มขึ้นจากตัวแทนหิ้งสะท้อนแสง 54.5 % หรือ 212 ชั่วโมง และมีประสิทธิภาพช่วยเพิ่มพื้นที่ส่องสว่างด้วยแสงธรรมชาติ 0.38 เมตร ลดค่าไฟฟ้าลงได้ 13.63 % และต้นแบบหิ้งสะท้อนแสงของช่องเปิดทิศใต้สามารถลดการเปิดใช้ไฟฟ้าแสงสว่างเป็นระยะเวลา 44 ชั่วโมงต่อปี หรือ 2.1 % ของจำนวนชั่วโมงใช้งานตลอดทั้งปี มีประสิทธิภาพช่วยเพิ่ม พื้นที่ส่องสว่างด้วยแสงธรรมชาติ 0.58 เมตร ลดค่าไฟฟ้าลงได้ 25.54 % แต่เมื่อเทียบกับพื้นที่เท่ากัน ที่เปิดใช้ไฟฟ้าแสงประดิษฐ์ตลอดทั้งวัน จากช่องเปิดทิศเหนือลดค่าไฟฟ้าลงได้ 84.42 % และช่องเปิดทิศใต้ลดค่าไฟฟ้าลงได้ 70.10 % และการออกแบบผสานต้นแบบหิ้งสะท้อนแสงช่องเปิดทิศเหนือ และทิศใต้ให้ได้ระยะความกว้างของอาคารที่สามารถใช้แสงธรรมชาติได้มากที่สุด คือระยะความกว้าง 14.00 เมตร หากเกินกว่านั้นต้องเพิ่มค่าความสว่างภายในจากแสงประดิษฐ์ หรือผสานการนำแสงธรรมชาติจากด้านบน

ข้อสรุปที่ได้จากการศึกษาจะเป็นประโยชน์ในการออกแบบหิ้งสะท้อนแสง ซึ่งไม่เจาะจงเฉพาะแต่อาคารสำนักงาน สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย เพื่อเป็นแนวทางในนำแสงธรรมชาติมาใช้ในอาคารให้มีประสิทธิภาพ และประหยัดพลังงาน

ภาควิชา	สถาปัตยกรรมศาสตร์	ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา	สถาปัตยกรรม	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา	2548	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4774117825: MAJOR ARCHITECTURE

KEY WORD: LIGHTSHELF / PHYSICAL FACTORS / DAYLIGHTING / BUILDING

CHAIWAT MUTTISAN: THE IMPACTS OF LIGHTSHELF'S PHYSICAL FACTORS ON DAYLIGHTING IN BUILDINGS. THESIS ADVISOR: ASSITANT PROFESOR THANIT CHINDAVANIC, THESIS COADVISOR: ASSITANT PROFESOR PHANCHALATH SURIYOTHIN, 198 pp. ISBN 974-14-2086-2

This thesis is an experimental research whose main objective is to study the physical factors of the lightshelf which affect the maximum use of daylighting through the north and the south fenestrations. This research investigates only offices lying on a latitude of 14 degrees north between 8 a.m. and 4 p.m. The total working hours are 8 hours a day. The general lightshelf is studied and variables are defined. A model and a skydome are used in the experiment. The value of illuminance is assessed based on Daylight Factor (DF) which is not lower than the standard (2.0%). The findings are used to determine which variables cause daylighting to pass through the north and the south fenestrations staying the longest and covering the longest distance. After that the prototype of the new lightshelf is designed to compare the hourly mean values of diffuse illuminance. These values indicate only when daylighting can be used to replace electric light and the efficiency of energy saved by comparing the functional area where electric light is left on 8 hours a day with the functional area with the prototype of the new lightshelf.

It is found that with the prototype installed in the north fenestration, the duration of electricity use can be reduced by 601 hours a year (29.1%). In addition, the prototype can reduce the duration of electricity use by 54.5% or 212 hours more than the general lightshelf. It can increase the illuminated area through daylighting by 0. 38 meter. The electricity bill can be reduced by 13.63%. However, with the prototype installed in the south fenestration, the duration of electricity use can be reduced by 44 hours a year (2.1%). The illuminated area by daylighting can be increased by 0.58 meter by daylighting and an electricity bill can be reduced by 25.54%. When compared with the electric light being left on all day, through the north fenestration, the prototype can reduce the electricity bill by 84.42% and by 70.10% through the south fenestration. Additionally, 14 meters is the width of the building that daylighting can be of the maximum use to by means of the prototype. If the width of the building is more than 14 meters, electric light or toplighting has to be used as a supplement to existing light.

The prototype lightshelf is not designed specifically for offices. It can be applied to other types of building so that daylighting can be used efficiently resulting in saving energy.

Department	Architecture	Student's signature.....
Field of study	Architecture	Advisor's signature.....
Academic year	2005	Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้โดยดี ด้วยความกรุณา ความอนุเคราะห์ และความช่วยเหลือจากหลายฝ่าย ดังรายนามต่อไปนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ธนิต จินดาวณิค อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำแนวทางในการศึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พรรณชลัท สุริโยธิน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือ ด้านข้อมูล และให้ความอนุเคราะห์ เครื่องมือที่ และวัสดุที่ใช้ในการทดลอง รวมไปถึงกรรมการและผู้ตรวจวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ทุกท่านที่ให้คำแนะนำในการวิจัยตลอดมา ขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยพลังงานจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้สนับสนุนให้ทุนในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอบคุณเพื่อน ๆ ร่วมรุ่นทุกท่านที่ได้ทำงานร่วมกันมาตลอดหลักสูตร ขอบคุณพี่เด่น เป้ล และ เปียก ที่ได้ช่วยให้คำแนะนำที่ดีตั้งแต่ก่อนเข้าเรียนจนเรียนจบ ขอบคุณน้องโมจิที่เป็นลูกมือตลอดการทำวิทยานิพนธ์ และคุณมด วราภรณ์ กาญจนริโรจน์ ช่วยอนุเคราะห์กระจกที่ใช้ในการทดลอง

ท้ายที่สุดขอกราบขอบพระคุณท่านรองผู้ว่าการการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค นายสมศักดิ์ ศิริสาคร คุณแม่ชวนพิศ คุณพ่อชูชาติ พี่เอ พี่อ้อ มุตติศานต์ น้าพาชื่น มนุษยนนท์และครอบครัวที่คอยเป็นกำลังใจให้ตลอดเวลาจนจบปริญญาโท

สารบัญ

		หน้า
	บทคัดย่อภาษาไทย	ง
	บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
	กิตติกรรมประกาศ	ฉ
	สารบัญ	ช
	สารบัญตาราง	ฌ
	สารบัญรูปภาพ	ฑ
	สารบัญแผนภูมิ	ด
บทที่ 1	บทนำ	1
	1.1 ความเป็นมา และ ความสำคัญของปัญหา	1
	1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
	1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
	1.4 ระเบียบวิธีการวิจัย	3
	1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2	ทฤษฎีและแนวความคิดที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	6
	2.1 นิยามของแสง	6
	2.2 พฤติกรรมของแสง	7
	2.3 ทฤษฎีเกี่ยวกับความสว่าง	9
	2.4 คุณสมบัติอื่น ๆ ของแสง	12
	2.5 แสงธรรมชาติ	14
	2.6 สภาพท้องฟ้า	16
	2.7 การแผ่รังสีของแสงอาทิตย์	19
	2.8 ทฤษฎีการให้ความสว่างแก่อาคารโดยอาศัยแสงธรรมชาติ	20
	2.9 ทฤษฎีเกี่ยวกับการให้แสงธรรมชาติ	23
	2.10 หิ้งสะท้อนแสง	28
	2.11 การผสานระหว่างแสงธรรมชาติกับแสงไฟฟ้า	30
	2.12 กรณีศึกษาการใช้หิ้งสะท้อนแสงในอาคารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	34
บทที่ 3	วิธีดำเนินงานวิจัย	43
	3.1 ตัวแปรกายภาพของหิ้งสะท้อนแสงที่มีผลต่อการใช้แสงธรรมชาติ	45
	3.2 ตัวแปรที่มีอิทธิพลช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของหิ้งสะท้อนแสง	50
	3.3 วิธีการวิจัย	54
	3.4 หุ่นจำลองที่ใช้ในการทดลอง	56
	3.5 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	59

หน้า

3.6 ห้องจำลองท้องฟ้า..... 61

บทที่ 4 ผลการทดลอง..... 62

4.1 ผลการทดลองตัวแปรกายภาพของหิ้งสะท้อนแสงที่มีผลต่อการใช้แสงธรรมชาติ..... 62

4.2 ผลการทดลองตัวแปรที่มีอิทธิพลช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของหิ้งสะท้อนแสง..... 77

4.3 สรุปตัวแปรหิ้งสะท้อนแสงของช่องเปิดทิศเหนือ – ทิศใต้..... 89

4.4 แนวทางการนำเสนอต้นแบบหิ้งสะท้อนแสงช่องเปิดทิศเหนือ – ทิศใต้..... 90

4.5 ผลการทดลองสรุปต้นแบบหิ้งสะท้อนแสงช่องเปิดทิศเหนือ – ทิศใต้..... 91

บทที่ 5 พิจารณาค่าความส่องสว่างภายใน..... 94

5.1 การหาค่าความส่องสว่างภายในโดยอาศัยค่า Daylight Factor..... 94

5.2 การหาปริมาณความต้องการเพิ่มค่าความสว่างภายในอาคาร..... 95

5.3 ประเมินค่าความส่องสว่าง และเพิ่มค่าความสว่างภายใน..... 98

บทที่ 6 บทสรุป และข้อเสนอแนะ..... 134

6.1 บทสรุป..... 134

6.2 การประยุกต์ใช้งาน..... 138

6.3 ข้อเสนอแนะ..... 140

รายการอ้างอิง..... 141

ภาคผนวก..... 143

ก แหล่งที่มาของสมการ..... 144

ข ตารางแสดงตำแหน่งของดวงอาทิตย์ มุมที่เกี่ยวข้อง ณ วันที่ 21 ของทุกเดือน ณ เวลาต่าง ๆ สำหรับเส้นรุ้งที่ 14 องศาเหนือ..... 145

ค ตารางแสดงข้อมูลค่า DF ที่วัดผลได้จากค่าความสว่าง ณ ระนาบของหุ่นจำลองภายในห้องจำลองท้องฟ้า (skydome) ซึ่งทำการจำลองสภาพท้องฟ้าเมฆเต็มฟ้า (overcast sky)..... 146

ง ตารางแสดงค่าการสะท้อนแสงของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง ภายในห้องจำลองท้องฟ้า... 164

จ ข้อมูลแสดงคุณสมบัติกระจกที่ใช้ในงานวิจัย..... 166

ฉ ข้อมูลแสดงการตรวจสอบค่าของการทดลอง (Calibration) เปรียบเทียบเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย..... 167

ช แสดงการพิจารณาค่า Daylight Factor (DF) กับข้อมูลปริมาณแสงกระจายในท้องฟ้า ปี พ.ศ. 2541..... 168

ซ แสดงค่าความส่องสว่าง และพลังงานไฟฟ้าแสงสว่างภายในที่ต้องการ ของตัวแทนหิ้งสะท้อนแสงช่องเปิดทิศเหนือ และทิศใต้..... 174

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 198

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	แสดงข้อมูลปริมาณแสงกระจายจากท้องฟ้า ปี ค.ศ. 2001 เฉลี่ยเป็นรายชั่วโมงของทุกเดือน	15
2.2	แสดงค่าประมาณ Daylight Factor สำหรับพื้นที่ใช้งานต่าง ๆ	21
2.3	ตารางเปรียบเทียบมาตรฐานการส่องสว่างระหว่าง CIE และ IES (USA) ตามประเภทการใช้งาน	22
2.4	ตารางเปรียบเทียบมาตรฐานการส่องแสงระหว่าง CIE และ IES (USA) และมาตรฐานการกำหนดค่า Daylight Factor ตามประเภทการใช้งาน (บางส่วน)	23
2.5	สรุปตัวแปรหิ้งสะท้อนแสงของอาคาร Asmac in Bussigny ที่สามารถวิเคราะห์ผลได้	35
2.6	สรุปตัวแปรหิ้งสะท้อนแสงของอาคาร Institute of Virology in Mittelhausern ที่สามารถวิเคราะห์ได้	36
2.7	สรุปตัวแปรหิ้งสะท้อนแสงของ Nike European Headquarters ที่สามารถวิเคราะห์ผลได้	37
2.8	สรุปตัวแปรหิ้งสะท้อนแสงของ United Gulf Bank ที่สามารถวิเคราะห์ผลได้	38
2.9	สรุปตัวแปรหิ้งสะท้อนแสงของ Automative Industry Office/Narehouse ที่สามารถวิเคราะห์ผลได้	39
2.10	สรุปตัวแปรหิ้งสะท้อนแสงของ Johnson Center ที่สามารถวิเคราะห์ผลได้	40
2.11	สรุปตัวแปรหิ้งสะท้อนแสงของ University of Victoria – Engineering Lab wing ที่สามารถวิเคราะห์ผลได้	41
2.12	สรุปตัวแปรหิ้งสะท้อนแสงของ Majoros, The University of Queensland ที่สามารถวิเคราะห์ผลได้	42
3.1	แสดงการพิจารณาค่า Daylight Factor (DF) ขั้นต่ำที่อยู่ในเวลาการใช้งาน	55
3.2	กำหนดรายละเอียดของห้องมาตรฐานที่ใช้เป็นกรณีศึกษา	56
3.3	แสดงรายละเอียดของวัสดุที่ใช้ทำหุ่นจำลอง	58
4.1	การกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการทดลองรูปแบบของหิ้งสะท้อนแสง	62
4.2	เปรียบเทียบค่า DF กับรูปแบบของหิ้งสะท้อนแสงช่องเปิดทิศเหนือ	62
4.3	เปรียบเทียบค่า DF กับรูปแบบของหิ้งสะท้อนแสงช่องเปิดทิศใต้	63
4.4	สรุปผลการทดลองรูปแบบหิ้งสะท้อนแสง	64
4.5	การกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการทดลองระยะความลึกหิ้งสะท้อนแสง	65
4.6	เปรียบเทียบค่า DF กับระยะความลึกของหิ้งสะท้อนแสงช่องเปิดทิศเหนือ	65
4.7	เปรียบเทียบค่า DF กับรูปแบบระยะความลึกของหิ้งสะท้อนแสงช่องเปิดทิศใต้	66
4.8	สรุปผลการทดลองรูปแบบระยะความลึกของหิ้งสะท้อนแสง	67

ตารางที่		หน้า
4.9	การกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการทดลองรูปแบบการสะท้อนแสงของวัสดุที่ใช้ทำหิ้งสะท้อนแสงอุปกรณ์บังแดด.....	68
4.10	เปรียบเทียบค่า DF กับรูปแบบการสะท้อนของวัสดุช่องเปิดทิศเหนือ.....	68
4.11	เปรียบเทียบค่า DF กับรูปแบบการสะท้อนของวัสดุช่องเปิดทิศใต้.....	69
4.12	สรุปผลการทดลองรูปแบบการสะท้อนของวัสดุที่ใช้ทำหิ้งสะท้อนแสงและอุปกรณ์บังแดด.....	70
4.13	การกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการทดลองรูปแบบของระดับความสูงที่ใช้ในการติดตั้งหิ้งสะท้อนแสง.....	71
4.14	เปรียบเทียบค่า DF กับระดับความสูงในการติดตั้งของหิ้งสะท้อนแสงช่องเปิดทิศเหนือ.....	71
4.15	เปรียบเทียบค่า DF กับรูปแบบระดับความสูงในการติดตั้งของหิ้งสะท้อนแสงช่องเปิดทิศใต้.....	72
4.16	สรุปผลการทดลองรูปแบบระดับความสูงในการติดตั้งหิ้งสะท้อนแสง.....	73
4.17	การกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการทดลองรูปแบบมุมองศาที่ใช้ในการติดตั้งหิ้งสะท้อนแสง.....	74
4.18	เปรียบเทียบค่า DF กับรูปแบบมุมองศาในการติดตั้งของหิ้งสะท้อนแสงช่องเปิดทิศเหนือ.....	74
4.19	เปรียบเทียบค่า DF กับรูปแบบมุมองศาในการติดตั้งของหิ้งสะท้อนแสงช่องเปิดทิศใต้.....	75
4.20	สรุปผลการทดลองรูปแบบมุมองศาในการติดตั้งของหิ้งสะท้อนแสง.....	76
4.21	การกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการทดลองรูปแบบของขอบหน้าต่าง.....	77
4.22	เปรียบเทียบค่า DF กับรูปแบบของขอบหน้าต่างช่องเปิดทิศเหนือ.....	77
4.23	เปรียบเทียบค่า DF กับรูปแบบของขอบหน้าต่างช่องเปิดทิศใต้.....	78
4.24	ตารางสรุปผลการทดลองรูปแบบของขอบหน้าต่าง.....	79
4.25	การกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการทดลองรูปแบบมุมองศาของขอบหน้าต่าง.....	80
4.26	เปรียบเทียบค่า DF กับรูปแบบมุมองศาของขอบหน้าต่างช่องเปิดทิศเหนือ.....	80
4.27	เปรียบเทียบค่า DF กับรูปแบบมุมองศาของขอบหน้าต่างช่องเปิดทิศใต้.....	81
4.28	ตารางสรุปผลการทดลองรูปแบบมุมองศาของขอบหน้าต่าง.....	82
4.29	การกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการทดลองรูปแบบของอุปกรณ์บังแดดแนวนอน.....	83
4.30	เปรียบเทียบค่า DF กับรูปแบบของอุปกรณ์บังแดดแนวนอนช่องเปิดทิศเหนือ.....	83
4.31	เปรียบเทียบค่า DF กับรูปแบบของอุปกรณ์บังแดดแนวนอนช่องเปิดทิศใต้.....	84
4.32	ตารางสรุปผลการทดลองรูปแบบของอุปกรณ์บังแดดแนวนอน.....	85
4.33	การกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการทดลองรูปแบบของกระจกช่องเปิด.....	86

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
4.34	เปรียบเทียบค่า DF กับรูปแบบกระจกช่องเปิด ทิศเหนือ.....	86
4.35	เปรียบเทียบค่า DF กับกระจกช่องเปิดทิศใต้.....	87
4.36	ตารางสรุปผลการทดลองรูปแบบของช่องเปิดกระจก.....	88
4.37	ตารางสรุปผลการทดลองตัวแปรกายภาพ และตัวแปรช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของหิ้งสะท้อนแสง.....	89
4.38	การกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการทดลองสรุปแนวทางเลือกหิ้งสะท้อนแสง.....	91
4.39	เปรียบเทียบค่า DF กับแนวทางเลือกหิ้งสะท้อนแสงช่องเปิดทิศเหนือ.....	91
4.40	เปรียบเทียบค่า DF กับแนวทางเลือกหิ้งสะท้อนแสงช่องเปิดทิศใต้.....	92
4.41	สรุปผลการทดลองรูปแบบของแนวทางเลือกหิ้งสะท้อนแสงช่องเปิดทิศเหนือ – ทิศใต้.....	93
5.1	แสดงการหาค่าความสว่างภายใน (E_i) ของแนวทางเลือกหิ้งสะท้อนแสงช่องเปิดทิศเหนือ.....	94
5.2	แสดงการหาค่าความสว่างที่ต้องการเพิ่มเฉลี่ยในพื้นที่ใช้งาน ของแนวทางเลือกหิ้งสะท้อนแสงช่องเปิดทิศเหนือ.....	96
5.3	แสดงค่าความส่องสว่าง และพลังงานไฟฟ้าแสงสว่างภายในที่ต้องการ ของแนวทางเลือกหิ้งสะท้อนแสงช่องเปิดทิศเหนือ เดือนมกราคม ช่วงเวลา 8:00 – 16:00 น.....	99
5.4	แสดงค่าความส่องสว่าง และพลังงานไฟฟ้าแสงสว่างภายในที่ต้องการ ของแนวทางเลือกหิ้งสะท้อนแสงช่องเปิดทิศเหนือ เดือนภุมภาพันธ์ ช่วงเวลา 8:00 – 16:00 น.....	100
5.5	แสดงค่าความส่องสว่าง และพลังงานไฟฟ้าแสงสว่างภายในที่ต้องการ ของแนวทางเลือกหิ้งสะท้อนแสงช่องเปิดทิศเหนือ เดือน มีนาคม ช่วงเวลา 8:00 – 16:00 น.....	101
5.6	แสดงค่าความส่องสว่าง และพลังงานไฟฟ้าแสงสว่างภายในที่ต้องการ ของแนวทางเลือกหิ้งสะท้อนแสงช่องเปิดทิศเหนือ เดือน เมษายน ช่วงเวลา 8:00 – 16:00 น.....	102
5.7	แสดงค่าความส่องสว่าง และพลังงานไฟฟ้าแสงสว่างภายในที่ต้องการ ของแนวทางเลือกหิ้งสะท้อนแสงช่องเปิดทิศเหนือ เดือน พฤษภาคม ช่วงเวลา 8:00 – 16:00 น.....	103
5.8	แสดงค่าความส่องสว่าง และพลังงานไฟฟ้าแสงสว่างภายในที่ต้องการ ของแนวทางเลือกหิ้งสะท้อนแสงช่องเปิดทิศเหนือ เดือน มิถุนายน ช่วงเวลา 8:00 – 16:00 น.....	104
5.9	แสดงค่าความส่องสว่าง และพลังงานไฟฟ้าแสงสว่างภายในที่ต้องการ ของแนวทางเลือกหิ้งสะท้อนแสงช่องเปิดทิศเหนือ เดือนกรกฎาคม ช่วงเวลา 8:00 – 16:00 น.....	105
5.10	แสดงค่าความส่องสว่าง และพลังงานไฟฟ้าแสงสว่างภายในที่ต้องการ ของแนวทางเลือกหิ้งสะท้อนแสงช่องเปิดทิศเหนือ เดือนสิงหาคม ช่วงเวลา 8:00 – 16:00 น.....	106
5.11	แสดงค่าความส่องสว่าง และพลังงานไฟฟ้าแสงสว่างภายในที่ต้องการ ของแนวทางเลือกหิ้งสะท้อนแสงช่องเปิดทิศเหนือ เดือนกันยายนช่วงเวลา 8:00 – 16:00 น.....	107

ตารางที่ หน้า

5.12 แสดงค่าความส่องสว่าง และพลังงานไฟฟ้าแสงสว่างภายในที่ต้องการ ของแนวทางเลือก หิ้งสะท้อนแสงช่องเปิดทิศเหนือ เดือนตุลาคม ช่วงเวลา 8:00 – 16:00 น..... 108

5.13 แสดงค่าความส่องสว่าง และพลังงานไฟฟ้าแสงสว่างภายในที่ต้องการ ของแนวทางเลือก หิ้งสะท้อนแสงช่องเปิดทิศเหนือ เดือนพฤศจิกายน ช่วงเวลา 8:00 – 16:00 น..... 109

5.14 แสดงค่าความส่องสว่าง และพลังงานไฟฟ้าแสงสว่างภายในที่ต้องการ ของแนวทางเลือก หิ้งสะท้อนแสงช่องเปิดทิศเหนือ เดือนธันวาคม ช่วงเวลา 8:00 – 16:00 น..... 110

5.15 แสดงค่าความส่องสว่าง และพลังงานไฟฟ้าแสงสว่างภายในที่ต้องการ ของแนวทางเลือก หิ้งสะท้อนแสงช่องเปิดทิศใต้ เดือนมกราคม ช่วงเวลา 8:00 – 16:00 น..... 111

5.16 แสดงค่าความส่องสว่าง และพลังงานไฟฟ้าแสงสว่างภายในที่ต้องการ ของแนวทางเลือก หิ้งสะท้อนแสงช่องเปิดทิศใต้ เดือนกุมภาพันธ์ ช่วงเวลา 8:00 – 16:00 น..... 112

5.17 แสดงค่าความส่องสว่าง และพลังงานไฟฟ้าแสงสว่างภายในที่ต้องการ ของแนวทางเลือก หิ้งสะท้อนแสงช่องเปิดทิศใต้ เดือนมีนาคม ช่วงเวลา 8:00 – 16:00 น..... 113

5.18 แสดงค่าความส่องสว่าง และพลังงานไฟฟ้าแสงสว่างภายในที่ต้องการ ของแนวทางเลือก หิ้งสะท้อนแสงช่องเปิดทิศใต้ เดือนเมษายน ช่วงเวลา 8:00 – 16:00 น..... 114

5.19 แสดงค่าความส่องสว่าง และพลังงานไฟฟ้าแสงสว่างภายในที่ต้องการ ของแนวทางเลือก หิ้งสะท้อนแสงช่องเปิดทิศใต้ เดือนพฤษภาคม ช่วงเวลา 8:00 – 16:00 น..... 115

5.20 แสดงค่าความส่องสว่าง และพลังงานไฟฟ้าแสงสว่างภายในที่ต้องการ ของแนวทางเลือก หิ้งสะท้อนแสงช่องเปิดทิศใต้ เดือนมิถุนายน ช่วงเวลา 8:00 – 16:00 น..... 116

5.21 แสดงค่าความส่องสว่าง และพลังงานไฟฟ้าแสงสว่างภายในที่ต้องการ ของแนวทางเลือก หิ้งสะท้อนแสงช่องเปิดทิศใต้ เดือนกรกฎาคม ช่วงเวลา 8:00 – 16:00 น..... 117

5.22 แสดงค่าความส่องสว่าง และพลังงานไฟฟ้าแสงสว่างภายในที่ต้องการ ของแนวทางเลือก หิ้งสะท้อนแสงช่องเปิดทิศใต้ เดือนสิงหาคม ช่วงเวลา 8:00 – 16:00 น..... 118

5.23 แสดงค่าความส่องสว่าง และพลังงานไฟฟ้าแสงสว่างภายในที่ต้องการ ของแนวทางเลือก หิ้งสะท้อนแสงช่องเปิดทิศใต้ เดือนกันยายน ช่วงเวลา 8:00 – 16:00 น..... 119

5.24 แสดงค่าความส่องสว่าง และพลังงานไฟฟ้าแสงสว่างภายในที่ต้องการ ของแนวทางเลือก หิ้งสะท้อนแสงช่องเปิดทิศใต้ เดือนตุลาคม ช่วงเวลา 8:00 – 16:00 น..... 120

5.25 แสดงค่าความส่องสว่าง และพลังงานไฟฟ้าแสงสว่างภายในที่ต้องการ ของแนวทางเลือก หิ้งสะท้อนแสงช่องเปิดทิศใต้ เดือนพฤศจิกายน ช่วงเวลา 8:00 – 16:00 น..... 121

5.26 แสดงค่าความส่องสว่าง และพลังงานไฟฟ้าแสงสว่างภายในที่ต้องการ ของแนวทางเลือก หิ้งสะท้อนแสงช่องเปิดทิศใต้ เดือนธันวาคม ช่วงเวลา 8:00 – 16:00 น..... 122

5.27 แสดงค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ตลอดทั้งปี จากต้นแบบหิ้งสะท้อนแสงของช่องเปิดทิศเหนือ... 123

5.28 แสดงค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ตลอดทั้งปี จากต้นแบบหิ้งสะท้อนแสงของช่องเปิดทิศใต้..... 124

ตารางที่		หน้า
5.29	แสดงค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ตลอดทั้งปี จากตัวแทนหิ้งสะท้อนแสงของช่องเปิดทิศเหนือ....	127
5.30	แสดงค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ตลอดทั้งปี จากตัวแทนหิ้งสะท้อนแสงของช่องเปิดทิศใต้.....	128
5.31	แสดงการเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ตลอดทั้งปี จากช่องเปิดทิศเหนือ.....	129
5.32	แสดงการเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ตลอดทั้งปี จากช่องเปิดทิศใต้.....	129
5.33	แสดงการเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ลดได้จากชม.ที่ไม่ใช้พลังงานไฟฟ้า จากช่องเปิดทิศเหนือ.....	132
6.1	ตารางสรุปผลการทดลองตัวแปรกายภาพ และตัวแปรช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของหิ้งสะท้อนแสง.....	134
6.2	แสดงการผสานค่า DF ของช่องเปิดทิศเหนือ - ทิศใต้ ในระยะความกว้าง 14.00 เมตร.....	138
6.3	แสดงการผสานค่า DF ของช่องเปิดทิศเหนือ - ทิศใต้ ในระยะความกว้าง 15.00 เมตร.....	139