ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
247595

ประสิทธิภาพแนวตะห้อนแสงเหนือธรรมชาติทำงานภายในอาคาร

นายไกรฤทธิ์ ลุกษ์เกษม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาสถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาสถาปัตยกรรม ภาควิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์
คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

b00252884

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
247595

ประสิทธิภาพแผงสะท้อนแสงเหนือระนาบทำงานภายในอาคาร

นายไกรฤทธิ์ ฤกษ์เกษม

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาสถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาสถาปัตยกรรม ภาควิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์
คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5174184525

THE EFFICIENCY OF INTERIOR DAYLIGHTING PANELS

Mr. Krairit Rerkasem

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Architecture Program in Architecture

Department of Architecture

Faculty of Architecture

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ประสิทธิภาพแผงสะท้อนแสงเหนือระนาบทำงานภายในอาคาร
โดย	นายไกรฤทธิ์ ฤกษ์เกษม
สาขาวิชา	สถาปัตยกรรม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ธนิต จินดาวณิค

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต จุลาสัย)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ฐานิศวร์ เจริญพงศ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ธนิต จินดาวณิค)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. พรรณชลัท สุริโยธิน)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตรจารย์ ดร.ปรีชญา มหัทธนทวี)

ไกรฤทธิ์ ฤกษ์เกษม : ประสิทธิภาพแผงสะท้อนแสงเหนือระนาบทำงานภายในอาคาร.
(THE EFFICIENCY OF INTERIOR DAYLIGHTING PANELS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก :
รองศาสตราจารย์ ธนิต จินดาวณิค, 229 หน้า.

247595

การนำแสงธรรมชาติเข้ามาใช้ในอาคารเป็นแนวคิดที่ช่วยลดการใช้พลังงานในสถาปัตยกรรม ระบบหิ้งสะท้อนแสง(light shelves)จึงถูกพัฒนาเพื่อช่วยประหยัดไฟฟ้าระบบส่องสว่างในอาคาร แต่เนื่องจากแสงธรรมชาติมีข้อจำกัดด้านความสม่ำเสมอจึงมีผลให้ส่วนระนาบทำงานยังคงต้องการแสงสว่างที่เพียงพอเพิ่มเติม วิทยานิพนธ์นี้จึงมีเป้าหมายเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนาแนวคิดในระบบหิ้งสะท้อนแสงด้วยการนำแผงสะท้อนแสงเหนือระนาบทำงานภายในอาคาร (interior daylighting panels) มาใช้เสริมกับหิ้งสะท้อนแสงที่ช่องเปิดแบบเดิม ด้วยหลักการให้แสงธรรมชาติจากช่องเปิดด้านข้าง ตกลงบนระนาบทำงานเพิ่มขึ้น และเสริมประสิทธิภาพของหิ้งสะท้อนแสงในการเพิ่มค่าความส่องสว่างภายในอาคารให้ถึงเกณฑ์ที่เพียงพอต่อการใช้งาน เพื่อลดการใช้แสงไฟประดิษฐ์ลงจากการใช้แสงธรรมชาติทดแทน

การศึกษากำหนดขอบเขตเป็นอาคารสำนักงาน ที่ตั้งในเขตละติจูด 14 องศาเหนือ และมีช่วงเวลาใช้งาน 8.00 -16.00 น. ทำการศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของ interior daylighting panelsทั้งตัวแปรกายภาพด้านรูปแบบ วัสดุ ระดับติดตั้งและตัวแปรแวดล้อมที่ช่วยส่งเสริมประสิทธิภาพด้านรูปทรงของหิ้งสะท้อนแสง ประเมินผลโดยใช้หุ่นจำลองในการวัดค่า daylight factor ที่เพิ่มขึ้นและระยะที่ความส่องสว่างผ่านเกณฑ์ 2 %DF จากช่องเปิดทิศเหนือ-ใต้ ภายใต้สภาพท้องฟ้าลักษณะ clear sky และ overcast sky แล้วนำผลมาคำนวณเปรียบเทียบกับข้อมูลปริมาณแสงกระจายจากท้องฟ้าเฉลี่ยรายชั่วโมงของทุกเดือน เพื่อหาความส่องสว่างจากแสงธรรมชาติที่ได้และแสงประดิษฐ์ที่ต้องการเพิ่มมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดการใช้พลังงานจากไฟประดิษฐ์ในแต่ละกรณี

จากการศึกษา พบว่า interior daylighting panels ที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดทางด้านกายภาพ คือ ลักษณะโค้งระนาบนอนที่ พิจารณาใช้พื้นผิวที่มีการสะท้อนแสงลักษณะ spread reflect และติดตั้งที่ระดับประมาณ 2.75 เมตร จะมีประสิทธิภาพในการเพิ่มระยะจากช่องเปิดที่มีค่าความส่องสว่างเพียงพอต่อการใช้งาน จากกรณีปกติ(base case)ที่ใช้ lightshelves เรียบที่ช่องเปิดอย่างเดียว 1.70 เมตร หรือ 42.50% ในทิศเหนือ และ เพิ่มขึ้น1.75 เมตร หรือ 53.85% ในทิศใต้ ประหยัดพลังงานเพิ่มขึ้น 34.42 %ต่อปีในทิศเหนือและ 12.40 % ต่อปีในทิศใต้ นอกจากนี้ยังพบอีกว่าหากมีการใช้ interior daylighting panels ร่วมกับหิ้งสะท้อนแสงรูปทรงโค้ง จะสามารถเพิ่มระยะที่แสงสว่างเพียงพอได้อีก 10.53% ในทิศเหนือ และ 16.00% ในทิศใต้ อีกทั้งสามารถประหยัดพลังงานเพิ่มขึ้นได้อีก 17.68 %ต่อปีในทิศเหนือ และ14.13 % ต่อปีในทิศใต้อีกด้วย โดยข้อสรุปที่ได้จากการศึกษานั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอาคารลักษณะใกล้เคียงกันที่มีการใช้ประโยชน์จากแสงธรรมชาติผ่านช่องเปิดด้านข้างได้ต่อไป

ภาควิชา สถาปัตยกรรมศาสตร์ ลายมือชื่อนิสิต ไกรฤทธิ์

สาขาวิชา สถาปัตยกรรม ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ปีการศึกษา 2553

247595

5174184525 : MAJOR ARCHITECTURE

KEYWORDS : INTERIOR DAYLIGHTING PANELS / EXTERNAL LIGHTSHELVES

KRAIRIT RERKASEM : THE EFFICIENCY OF INTERIOR DAYLIGHTING PANELS.

THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF. THANIT CHINDAWANIG, 229 pp.

Making use of natural light in buildings is a design concept for reducing energy consumption in architecture. An exterior light shelf system has been developed for energy-saving lighting systems in buildings. Because daylight is constrained by inconsistency, available light in the work place needs to be maximized. This thesis aimed to study the feasibility of lighting maximization concepts developed in light shelving systems by the use of interior daylighting panels in buildings. The principle of daylighting is to make use of natural light as it strikes a plane in a workspace. And effectiveness of the light shelves to increase the reflection of light within a building may be an effective way to reduce the use of artificial into the use of alternative daylighting

The office building which was the object of this study is located at 14 degrees latitude north. The study observations took place from 8:00 to 16:00. The study examined variables related to the performance of interior daylighting panels including physical aspects of panel design, material, installation and environmental variables that may enhance the performance of exterior light shelves. To evaluate their effectiveness, a model was used to measure the relative daylight factor and the distance from the light source as it passed through the shelves 2% DF north - south during both clear and overcast conditions. The results were used to calculate the average hourly and monthly amounts of light available from the sky. These data were used to compare the effectiveness of daylighting to artificial lighting and thus measure the performance of natural lighting in reducing energy consumption from artificial light in each case.

The study found that using interior daylighting panels is the most effective way to maximize natural light utilization. The curve of horizontal plane is using a surface that is spread reflect and the optimal panel height is approximately 2.75 meters. Their use can be effective in increasing the distance from the plane of the light source from a base value (using only exterior light shelves without interior daylighting panel) of 1.70 meters or 42.50% in the north. This increased to 1.75 m or 53.85% in the case of a south light source which resulted in an increase in efficiency of energy 34.42% per year in the north and 12.40% per year in the south. In addition, it was found that by using interior daylighting panels and exterior light shelves with a curved shape that can be extended lighting more 10.53% in the north and 16.00% in the south. Also, there will be an increase in energy savings of 17.68% per year in the north and 14.13% per year in the south with this type of shelf. The conclusions from this study can be applied in building construction for maximum utilization of natural lighting.

Department Architecture Student's Signature

Field of Study Architecture Advisor's Signature

Academic Year 2010

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความกรุณาและอนุเคราะห์ในการสนับสนุนงานวิจัยจากหลายฝ่ายดังรายนามต่อไปนี้

สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้สนับสนุนทุนในการทำวิทยานิพนธ์ เครื่องมือในงานวิจัยและลงบทความเผยแพร่ผลงานในวารสารวิจัยพลังงาน

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้อนุเคราะห์อุปกรณ์และเครื่องมือในงานวิจัย

รองศาสตราจารย์ธนิต จินดาวณิค อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้ข้อมูล แนะนำแนวทาง วิธีการและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์นี้

รองศาสตราจารย์ ดร. พรรณชลัท สุริโยธิน กรรมการตรวจวิทยานิพนธ์และให้คำปรึกษา แนะนำช่วยเหลือด้านข้อมูลในการทำวิทยานิพนธ์

รองศาสตราจารย์ ดร. ฐานิศวร์ เจริญพงศ์ ประธานกรรมการตรวจวิทยานิพนธ์ ที่สละเวลามาช่วยในการตรวจวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำในการปรับปรุงแก้ไข

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปรีชญา มหัทธนทวี กรรมการตรวจวิทยานิพนธ์ภายนอก จากคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากรที่สละเวลามาช่วยในการตรวจวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำในการปรับปรุงแก้ไข

ท้ายที่สุดขอขอบคุณครอบครัวฤกษ์เกษม ที่ให้ความสำคัญกับการศึกษาตลอดมารวมถึงผู้ซึ่งมีส่วนช่วยเหลือในวิทยานิพนธ์แต่ยังไม่ได้เอ่ยนามมา ณ โอกาสนี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ญ

สารบัญรูปภาพ..... ฐ

สารบัญแผนภูมิ..... ด

บทที่1 บทนำ..... 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... 2

1.3 ขอบเขตของการวิจัย..... 2

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น..... 3

1.5 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย..... 3

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 4

1.7 วิธีดำเนินการวิจัยและระเบียบวิธีวิจัย..... 4

บทที่2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 6

2.1 แนวคิดและทฤษฎี..... 6

2.1.1 แสงสว่างและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า..... 6

2.1.2 พฤติกรรมของแสง..... 6

2.1.3 ทฤษฎีเกี่ยวกับการส่องสว่าง..... 9

2.1.4 คุณสมบัติอื่นๆ ของแสง..... 11

2.1.5 แสงธรรมชาติ..... 12

2.1.6 สภาพท้องฟ้า..... 14

2.1.7 ทิศทางการโคจรของดวงอาทิตย์..... 16

2.1.8 การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์..... 18

2.1.9 การพิจารณาระดับความสว่างภายในอาคารจากแสงธรรมชาติ..... 19

2.1.10 มาตรฐานระดับการส่องสว่าง..... 23

2.1.11 ทฤษฎีเกี่ยวกับการนำแสงธรรมชาติเข้ามาในอาคาร..... 25

2.1.12 หิ้งสะท้อนแสง..... 28

2.1.13 การผสานระหว่างแสงธรรมชาติกับแสงประดิษฐ์..... 31

2.1.14 การจัดวางแสงประดิษฐ์ที่สัมพันธ์กับการใช้งาน..... 34
2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 35
บทที่3 วิธีดำเนินการวิจัย..... 41
3.1 ตัวแปรในการศึกษา..... 41
3.1.1 ตัวแปรกายภาพของ Interior daylighting panels..... 42
3.1.2 ตัวแปรแวดล้อมที่ช่วยส่งเสริมประสิทธิภาพ Interior daylighting panels..... 46
3.1.3 การศึกษาเกี่ยวกับการศึกษาการนำไปประยุกต์ใช้งาน..... 48
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย..... 49
3.3 วิธีการวิจัย..... 50
3.4 หุ่นจำลองที่ใช้ในการทดลอง..... 53
บทที่4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล..... 57
4.1 ผลการวิเคราะห์..... 57
4.1.1 ผลการทดลองตัวแปรกายภาพของ interior daylighting panels..... 57
- ผลการทดลองประสิทธิภาพด้านรูปแบบของ interior daylighting panels..... 59
- ผลการทดลองประสิทธิภาพด้านพื้นผิววัสดุของ interior daylighting panels... 88
- ผลการทดลองประสิทธิภาพด้านระดับติดตั้ง interior daylighting panels..... 117
4.1.2 ผลการทดลองตัวแปรแวดล้อมที่ช่วยส่งเสริมประสิทธิภาพ Interior daylighting panels..... 147
- ผลการทดลองประสิทธิภาพด้านรูปทรงของหิ้งสะท้อนแสงที่ช่องเปิดอาคาร.... 151
บทที่5 ผลการพิจารณาค่าความส่องสว่างภายในและการบริโภคพลังงาน..... 156
5.1 การหาค่าความส่องสว่างภายในโดยอาศัยค่า daylight factor..... 156
5.2 การหาปริมาณความส่องสว่างภายในอาคารที่ต้องการเพิ่ม..... 157
5.3 ผลการเปรียบเทียบการบริโภคพลังงานไฟฟ้ารายปีของการศึกษาในแต่ละกรณี..... 177
5.4 ผลการเปรียบเทียบค่าไฟฟ้ารายปีของการศึกษาในแต่ละกรณี..... 180
5.5 ผลการเปรียบเทียบค่า heat gain ที่เกิดขึ้นจากการใช้แสงประดิษฐ์ รายปีของการศึกษาในแต่ละกรณี..... 183
บทที่6 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ..... 183
6.1 สรุปและอภิปรายผลการวิจัย..... 186
6.1.1 สรุปผลการวิจัยในด้านประสิทธิภาพการเพิ่มระยะจากช่องเปิดที่มีค่า daylight factor มากกว่าเกณฑ์มาตรฐาน..... 186
6.1.2 สรุปผลการวิจัยในด้านประสิทธิภาพการเพิ่มความส่องสว่างบนระนาบทำงานที่มีผลต่อการประหยัดพลังงานในอาคาร..... 189
6.2 การนำไปประยุกต์ใช้งาน..... 191
6.3 ข้อเสนอแนะ..... 193

6.3.1 ข้อจำกัดในการวิจัย 193
6.3.2 แนวทางในการวิจัยในอนาคต 194
รายการอ้างอิง 195
ภาคผนวก 197
ภาคผนวก ก. แหล่งที่มาของสมการ 198
ภาคผนวก ข. ตารางแสดงตำแหน่งของดวงอาทิตย์และมุมที่เกี่ยวข้อง วันที่ 21 ของทุกเดือน ณ เวลาต่างๆ สำหรับเส้นรุ้งที่ 14 องศาเหนือ 200
ภาคผนวก ค. แสดงข้อมูลค่า daylight factor ที่วัดผลได้จากค่าความส่องสว่าง ณ ระนาบทำงานของหุ่นจำลอง 201
ภาคผนวก ง. ค่าการสะท้อนแสงวัสดุที่ใช้ในการทดลอง 219
ภาคผนวก จ. แสดงคุณสมบัติของกระจกที่ใช้ในการวิจัย 221
ภาคผนวก ฉ. การตรวจสอบการอ่านค่าของอุปกรณ์ทดลอง (calibration) ที่ใช้ในงานวิจัย 222
ภาคผนวก ช. แสดงการพิจารณาค่า daylight factor กับข้อมูลปริมาณแสงในท้องฟ้า ปี พ.ศ. 2541 224
ภาคผนวก ซ. ตารางและแผนภูมิประกอบการหาค่า coefficient of utilization (CU) 227
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 229

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	แสดงการใช้พลังงานประเภทต่างๆแยกตามประเภทอาคารของ USAID.....	1
2.1	แสดงค่าการสะท้อนแสงของวัสดุที่แนะนำสำหรับพื้นที่ใช้งานของสำนักงาน.....	8
2.2	แสดงข้อมูลปริมาณแสงกระจายจากท้องฟ้า เฉลี่ยเป็นรายชั่วโมงของทุกเดือน.....	13
2.3	Evalution of indoor daylight situation by daylight factor.....	22
2.4	แสดงค่า Daylight factor ที่เหมาะกับการใช้งานประเภทต่างๆ.....	22
2.5	เปรียบเทียบมาตรฐานการส่องสว่างระหว่าง CIE และ IES (USA) ตามประเภทการใช้งาน.	23
2.6	เปรียบเทียบมาตรฐานการส่องสว่าง CIE และ IESNA และมาตรฐานการกำหนดค่า daylight factor ตามประเภทพื้นที่ใช้งาน.....	24
2.7	แสดงอัตราส่วนความแตกต่างของปริมาณความสว่างที่แนะนำ.....	24
2.8	สรุปผลการศึกษาตัวแปรจากการศึกษาประสิทธิภาพหิ้งสะท้อนแสงของ ชัยวัฒน์ มุติศานต์	35
2.9	แสดงการสรุปตัวแปรหิ้งสะท้อนแสงอาคาร Johnson center.....	36
2.10	แสดงการสรุปตัวแปรหิ้งสะท้อนแสงอาคาร Automotive industry office.....	37
2.11	แสดงการสรุปตัวแปรหิ้งสะท้อนแสงอาคาร United Gulf bank.....	38
2.12	แสดงการสรุปตัวแปรหิ้งสะท้อนแสงอาคาร Hong Kong Shanghai bank.....	39
2.13	แสดงการสรุปตัวแปรหิ้งสะท้อนแสงอาคาร KfW Ostarkade bank.....	40
3.1	แสดงการสรุปตัวแปรด้านวัสดุและระดับของdaylighting panels รูปแบบเรียบระนาบนอน	43
3.2	แสดงการนำแสงธรรมชาติเข้ามาในอาคารของ daylighting panels เรียบระนาบนอน.....	43
3.3	แสดงการสรุปตัวแปรด้านวัสดุและระดับของdaylighting panels รูปแบบเรียบระนาบเอียง	44
3.4	แสดงการนำแสงธรรมชาติเข้ามาในอาคารของ daylighting panels เรียบระนาบเอียง.....	44
3.5	แสดงการสรุปตัวแปรด้านวัสดุและระดับของ daylighting panels รูปแบบโค้งระนาบนอน.	45
3.6	แสดงการนำแสงธรรมชาติเข้ามาในอาคารของ daylighting panels โค้งระนาบนอน.....	45
3.7	แสดงการสรุปตัวแปรและสมมุติฐานของการทดลอง.....	51
3.8	แสดงการสรุปรายละเอียดของหุ่นจำลองที่ใช้ในการศึกษา.....	53
3.9	แสดงค่าและรูปแบบการสะท้อนแสงของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	54
4.1	ค่า daylight factor ของการใช้ light shelves แบบเรียบตรงเพียงอย่างเดียว(Base case).	57
4.2	แสดงการกำหนดตัวแปรกายภาพที่ใช้ในการทดลองด้านรูปแบบของ daylighting panels	59
4.3	ค่า %DF ของการใช้ interior daylighting panel วัสดุ specular reflect. ระดับ 2.50 เมตร	60
4.4	ค่า % DF ของการใช้ interior daylighting panel วัสดุ specular reflect.ระดับ 2.75 เมตร	63
4.5	ค่า % DF ของการใช้ interior daylighting panel วัสดุ specular reflect.ระดับ 3.00 เมตร	66
4.6	ค่า % DF ของการใช้ interior daylighting panel วัสดุ spread reflect. ระดับ 2.50 เมตร	69
4.7	ค่า % DF ของการใช้ interior daylighting panel วัสดุ spread reflect. ระดับ 2.75 เมตร	72

4.8	ค่า % DF ของการใช้ interior daylighting panel วัสดุ spread reflect. ระดับ 3.00 เมตร	75
4.9	ค่า % DF ของการใช้ interior daylighting panel วัสดุ diffuse reflect. ระดับ 2.50 เมตร	78
4.10	ค่า % DF ของการใช้ interior daylighting panel วัสดุ diffuse reflect. ระดับ 2.75 เมตร	81
4.11	ค่า % DF ของการใช้ interior daylighting panel วัสดุ diffuse reflect. ระดับ 3.00 เมตร	84
4.12	สรุปผลตัวแปรกายภาพด้านรูปแบบที่มีผลต่อประสิทธิภาพของ daylighting panel.....	87
4.13	แสดงการกำหนดตัวแปรกายภาพที่ใช้ในการทดลองด้านผิววัสดุของ daylighting panel....	88
4.14	ค่า%DF ของการใช้ interior daylighting panel รูปแบบเรียบระนาบนอน ระดับ2.50 เมตร	89
4.15	ค่า%DF ของการใช้ interior daylighting panel รูปแบบเรียบระนาบนอน ระดับ2.75 เมตร	92
4.16	ค่า%DF ของการใช้ interior daylighting panel รูปแบบเรียบระนาบนอน ระดับ3.00 เมตร	95
4.17	ค่า%DF ของการใช้ interior daylighting panel รูปแบบเรียบระนาบเอียงระดับ 2.50 เมตร	98
4.18	ค่า%DF ของการใช้ interior daylighting panel รูปแบบเรียบระนาบเอียงระดับ 2.75 เมตร	101
4.19	ค่า%DF ของการใช้ interior daylighting panel รูปแบบเรียบระนาบเอียงระดับ 3.00 เมตร	102
4.20	ค่า%DF ของการใช้ interior daylighting panel รูปแบบโค้งระนาบนอน ระดับ 2.50 เมตร	107
4.21	ค่า%DF ของการใช้ interior daylighting panel รูปแบบโค้งระนาบนอน ระดับ 2.75 เมตร	110
4.22	ค่า%DF ของการใช้ interior daylighting panel รูปแบบโค้งระนาบนอน ระดับ 3.00 เมตร	113
4.23	สรุปผลตัวแปรกายภาพด้านพื้นผิววัสดุที่มีผลต่อประสิทธิภาพของ daylighting panels....	116
4.24	แสดงการกำหนดตัวแปรกายภาพในการทดลองด้านระดับติดตั้งของ daylighting panels..	117
4.25	ค่า%DF ของการใช้ daylighting panels รูปแบบเรียบระนาบนอน วัสดุ specular reflect.	118
4.26	ค่า%DF ของการใช้ daylighting panels รูปแบบเรียบระนาบนอน วัสดุspread reflect....	121
4.27	ค่า%DF ของการใช้ daylighting panels รูปแบบเรียบระนาบนอน วัสดุ diffuse reflect....	124
4.28	ค่า%DF ของการใช้ daylighting panels รูปแบบเรียบระนาบเอียง วัสดุspecular reflect.	127
4.29	ค่า%DF ของการใช้ daylighting panels รูปแบบเรียบระนาบเอียง วัสดุ spread reflect...	130
4.30	ค่า%DF ของการใช้ daylighting panels รูปแบบเรียบระนาบเอียง วัสดุdiffuse reflect.....	133
4.31	ค่า%DF ของการใช้ daylighting panels รูปแบบโค้งระนาบนอน วัสดุ specular reflect...	136
4.32	ค่า%DF ของการใช้ daylighting panels รูปแบบโค้งระนาบนอน วัสดุspread reflect.....	139
4.33	ค่า%DF ของการใช้ daylighting panels รูปแบบโค้งระนาบนอน วัสดุ diffuse reflect.....	142
4.34	สรุปผลตัวแปรกายภาพด้านระดับติดตั้งที่มีผลต่อประสิทธิภาพของ daylighting panels..	145
4.35	สรุปผลการศึกษาตัวแปรกายภาพ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของinterior daylighting panels	147
4.36	แสดงการกำหนดตัวแวดล้อมที่ช่วยส่งเสริมประสิทธิภาพของ daylighting panels.....	147
4.37	ค่า daylight factor ของการใช้ light shelves ลักษณะต่างๆ.....	148
4.38	ค่า%DF ของการใช้ interior daylighting panels โค้งร่วมกับ light shelves ลักษณะต่างๆ.	151
4.39	สรุปผลการศึกษาตัวแปรแวดล้อมที่มีผลต่อประสิทธิภาพของ daylighting panels.....	154
5.1	แสดงการหาค่าความส่องสว่างภายใน ของการใช้ interior daylighting panel โค้งระนาบนอน ร่วมกับ light shelves โค้ง ของช่องเปิดทิศเหนือ ใต้สภาพท้องฟ้า overcast sky.....	157

5.2	แสดงการหาค่าความส่องสว่างที่ต้องการเพิ่ม ของพื้นที่ที่มีการใช้ interior daylighting panels โค้งระนาบนอน ร่วมกับ light shelves โค้ง ของช่องเปิดทิศเหนือใต้สภาพท้องฟ้า overcast sky.....	158
5.3 - 5.14	แสดงค่าความส่องสว่างและพลังงานไฟฟ้าแสงสว่างที่ต้องการเพิ่มในการใช้ interior daylighting panels โค้งระนาบนอน ร่วมกับ lightshelves โค้งของช่องเปิดทิศเหนือ- ใต้ เดือนมกราคม –เดือนธันวาคม ช่วงเวลา 8.00 -16.00 น.....	162
5.15	ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ตลอดทั้งปีจากการใช้ daylighting panels ที่มีประสิทธิภาพที่สุด.....	175
5.16	เปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ตลอดทั้งปี จากการใช้ daylighting panels กรณีต่างๆ.....	176
6.1	สรุปผลการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพของ interior daylighting panels.....	186
6.2	สรุปผลการวิจัยในด้านประสิทธิภาพการประหยัดพลังงาน.....	189
ข.	ตำแหน่งของดวงอาทิตย์และมุมที่เกี่ยวข้อง วันที่ 21 ของทุกเดือน ณ เวลาต่างๆสำหรับเส้นรุ้งที่ 14 องศาเหนือ.....	200
ค.1 - ค.2	แสดงข้อมูลผลการทดลองและค่า daylight factor ที่วัดผลได้จากค่าความส่องสว่าง ณ ระนาบทำงานของหุ่นจำลองของการศึกษากรณีใช้ light shelves แบบเรียบตรงที่ช่องเปิดเพียงอย่างเดียว (base case).....	201
ค.3 -ค.20	แสดงข้อมูลผลการทดลองและค่า daylight factor ที่วัดผลได้จากค่าความส่องสว่าง ณ ระนาบทำงานของหุ่นจำลองของการศึกษาตัวแปรกายภาพของ interior daylighting panels ที่ระดับ 2.50 m.....	202
ค21-ค.38	แสดงข้อมูลผลการทดลองและค่า daylight factor ที่วัดผลได้จากค่าความส่องสว่าง ณ ระนาบทำงานของหุ่นจำลองของการศึกษาตัวแปรกายภาพของ interior daylighting panels ที่ระดับ 2.75 m.....	207
ค39-ค.64	แสดงข้อมูลผลการทดลองและค่า daylight factor ที่วัดผลได้จากค่าความส่องสว่าง ณ ระนาบทำงานของหุ่นจำลองของการศึกษาตัวแปรกายภาพของ interior daylighting panels ที่ระดับ 3.00 m.....	212
ง.1 - ง.6	แสดงค่าการสะท้อนแสงของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	219
จ.1	แสดงค่า transmittance ที่แตกต่างกันของวัสดุกระจก.....	221
จ.2	ข้อมูลคุณสมบัติกระจก 6 มม. ของบริษัท กระจกไทย-อาซาฮี จำกัด(มหาชน).....	221
ฉ.1	แสดงการตรวจสอบการอ่านค่าของอุปกรณ์ทดลอง (Calibration) ที่ใช้ในงานวิจัย.....	222
ช.1	ค่า Hourly mean values of global illuminance (klux) by calendar month (local time)	224
ช.2	ค่า Hourly mean values of diffuse illuminance (klux) by calendar month(local time)	225
ช.3	พิจารณาค่า Daylight factor ที่ DF = 2.0 % ของ hourly mean values of diffuse illuminance (lux).....	226
ซ.1 - ซ.5	ตารางประกอบการหาค่า coefficient of utilization (CU).....	227

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1.1	แสดงแผนภาพแนวคิดการใช้ interior daylighting panels บนระนาบทำงาน.....	1
2.1	แสดงความถี่ และความยาวคลื่นพลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และ visible light.....	6
2.2	แสดงการดูดกลืนของแสงเมื่อตกกระทบตัวกลาง.....	6
2.3	แสดงการสะท้อนแสงเสมือนกระจกเงา (specular reflection).....	7
2.4	แสดงการสะท้อนแบบกระจาย (diffuse reflection).....	7
2.5	แสดงลักษณะผสมกันระหว่าง การสะท้อนแบบเสมือนกระจกเงา (specular reflection) และการสะท้อนแสงแบบกระจาย (diffuse reflection).....	8
2.6	แสงตกกระทบตัวกลางเกิดการหักเหแล้วทะลุผ่าน.....	8
2.7	แสงตกกระทบตัวกลางแล้วทะลุผ่านแบบกระจาย.....	8
2.8	แสดงการหักเหของแสงเมื่อผ่านตัวกลาง.....	9
2.9	แสดงการหักเหหรือสะท้อนแสงผ่านตัวกลางสองชนิด.....	9
2.10	แสดงลักษณะของปริมาณแสง luminous flux.....	10
2.11	แสดงการกระจายของฟลักซ์จะลดลงโดยแปรผกผันกับระยะทางยกกำลัง สอง.....	10
2.12	แสดงการเกิดแสงจ้าในมุมต่างๆ.....	11
2.13	แสดง Sun position : couse of the earth with respect to the sun.....	12
2.14	แสดงองค์ประกอบของแสงธรรมชาติ.....	13
2.15	แสดงสภาพท้องฟ้าแบบ clear sky.....	14
2.16	แสดงสภาพท้องฟ้าแบบ partly cloudy sky.....	15
2.17	แสดงสภาพท้องฟ้าแบบ overcast sky.....	16
2.18	Insolation levels for direct light and diffuse light	16
2.19	แสดงคำแหน่งของดวงอาทิตย์ และวันเวลาที่สมดุลย์(equinox).....	17
2.20	แสดงการพิจารณาความส่องสว่างตามวิธี lumen method.....	20
2.21	แสดงองค์ประกอบของการพิจารณาความสว่างแบบ daylight factor.....	21
2.22	แสดงการคำนวณแสงสว่างด้วยวิธี daylight factor.....	21
2.23	การวัดปริมาณความสว่างภายใต้ sky dome or artificial sky.....	22
2.24	เปรียบเทียบค่าความส่องสว่างภายใน จากหน้าต่างแบบต่างๆ.....	26
2.25	การผสานหน้าต่างช่วงกลางและช่วงบน(spilt window design)เพื่อเพิ่มค่าความส่องสว่างภายใน.....	26
2.26	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของช่องแสงกับระยะของความส่องสว่างที่ได้รับ.....	27
2.27	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความส่องสว่างที่ลดลงเมื่อระยะห่างจากช่องเปิดเพิ่มขึ้น.....	27
2.28	แสดงการออกแบบช่องแสงด้านเดียว / 2ด้าน ในการนำแสงธรรมชาติเข้ามาในอาคาร.....	27

2.29	แสดงการติดตั้งช่องแสงไว้ใกล้กับผนังภายในอาคารเพื่อการสะท้อนแสง	28
2.30	แสดงสัดส่วนของแสงสะท้อนจากขอบหน้าต่างกับแสงสะท้อนจากสภาพแวดล้อมภายนอก	28
2.31	แสดงการใช้ขอบหน้าต่างลักษณะต่างๆเพื่อเสริมการสะท้อนแสงธรรมชาติเข้าในอาคาร	28
2.32	แสดงการเปรียบเทียบค่าความส่องสว่างภายในระหว่างอาคารที่มีการใช้ช่องเปิดปกติกับใช้หิ้งสะท้อนแสงที่ช่องเปิด	28
2.33	แสดงรูปแบบของหิ้งสะท้อนแสง	29
2.34	แสดงรูปแบบของหิ้งสะท้อนแสง	29
2.35	แสดงปัจจัยที่มีอิทธิภาพกับการออกแบบหิ้งสะท้อนแสง	30
2.36	แสดงการปรับมุมเอียงขึ้นของหิ้งสะท้อนแสง	30
2.37	แสดงรูปตัดหิ้งสะท้อนแสงที่สามารถปรับแผ่นฟิล์มสะท้อนแสงได้ตามฤดูกาล	30
2.38	แสดงการใช้ Interior daylighting panels ในอาคารสำนักงาน	30
2.39	แสดงลักษณะของรูปทรงที่มีผลกับรูปแบบการสะท้อนแสง	31
2.40	แสดงการ Integration daylighting and artificial light	31
2.41	แสดงการ เปรียบเทียบตำแหน่งของการวางไฟประดิษฐ์ที่สัมพันธ์กับการใช้งาน	34
2.42	สรุปผลการศึกษาปัจจัยกายภาพหิ้งสะท้อนแสงของนายชัยวัฒน์ มุติศานต์	35
2.43	แสดงการนำแสงธรรมชาติเข้ามาในอาคาร Johnson center	36
2.44	แสดงการนำแสงธรรมชาติเข้ามาในอาคาร Automotive industry office / Warehouse	37
2.45	แสดงการนำแสงธรรมชาติผ่านด้านข้างอาคารด้วย light shelves และ controlled windows ในอาคาร United gulf Bank	38
2.46	แสดงการใช้ interior curved lightshelves ในอาคาร United gulf bank	38
2.47	แสดงการใช้ specular reflectors (another way of thinking about light shelves) บน atrium อาคาร Hong Kong Shanghai bank	39
2.48	แสดงการ Integration daylighting and artificial light โดย interior daylighting panels (ซึ่งพัฒนาจาก light shelves) ในอาคาร KfW Ostarkade bank building Ostarkade , Frankfurt	40
3.1	แสดง light shelves ภายนอกรูปทรงเรียบตรง พร้อมแนวคิดการนำแสงเข้ามาในอาคาร	46
3.2	แสดง light shelves รูปทรงปรับมุม 30 องศา พร้อมแนวคิดการนำแสงเข้ามาในอาคาร	47
3.3	แสดง light shelves ภายนอกรูปทรงโค้ง พร้อมแนวคิดการนำแสงเข้ามาในอาคาร	47
3.4	แสดงอุปกรณ์ / เครื่องมือในการทดลอง	50
3.5	แสดงลักษณะของหุ่นจำลองที่ใช้ในการศึกษา	50
3.6	แสดงวิธีการเก็บข้อมูลค่าความส่องสว่างด้วยอุปกรณ์วัดแสง illuminance meter	52
3.7	แสดงขั้นตอนในการทำหุ่นจำลอง	53
3.8	แสดงการเลือกใช้ค่าการสะท้อนแสงวัสดุ พื้น , ผนัง และฝ้าเพดานที่เหมาะสม	54

3.9	แสดงมุม profile angle ที่ใช้ในการกำหนดระยะยื่นของ shading อาคารทิศเหนือ – ใต้ โดยใช้มุม 60 องศาสำหรับ shading ทิศเหนือ และ 45 องศาสำหรับ shading ทิศใต้.....	55
3.10	แสดงผังพื้นของหุ่นจำลอง ประกอบกับการจัดวางผังดวงโคมและพื้นที่ใช้งาน.....	56
3.11	แสดงรูปด้านหน้า (façade) ของหุ่นจำลองที่ใช้ในการศึกษา.....	56
4.1	แสดงการนำแสงเข้ามาในอาคารในกรณีปกติ (base case).....	57
4.2	แสดง typical section ของช่องเปิดอาคารที่มีการใช้ daylighting panels รูปแบบต่างๆ....	59
4.3	ประสิทธิภาพด้านรูปแบบของ daylighting panels วัสดุ specular reflect.ที่ระดับ 2.50 m	60
4.4	ประสิทธิภาพด้านรูปแบบของ daylighting panels วัสดุ specular reflect.ที่ระดับ 2.75 m	63
4.5	ประสิทธิภาพด้านรูปแบบของ daylighting panels วัสดุ specular reflect.ที่ระดับ 3.00 m	66
4.6	ประสิทธิภาพด้านรูปแบบของ daylighting panels วัสดุ spread reflect.ที่ระดับ 2.50 m...	69
4.7	ประสิทธิภาพด้านรูปแบบของ daylighting panels วัสดุ spread reflect.ที่ระดับ 2.75 m	72
4.8	ประสิทธิภาพด้านรูปแบบของ daylighting panels วัสดุ spread reflect.ที่ระดับ 3.00 m	75
4.9	ประสิทธิภาพด้านรูปแบบของ daylighting panels วัสดุ diffuse reflect.ที่ระดับ 2.50 m	78
4.10	ประสิทธิภาพด้านรูปแบบของ daylighting panels วัสดุ diffuse reflect.ที่ระดับ 2.75 m..	81
4.11	ประสิทธิภาพด้านรูปแบบของ daylighting panels วัสดุ diffuse reflect.ที่ระดับ 3.00m...	84
4.12	ประสิทธิภาพด้านผิววัสดุของ daylighting panels รูปแบบเรียบระนาบนอน ระดับ 2.50 m	89
4.13	ประสิทธิภาพด้านผิววัสดุของ daylighting panels รูปแบบเรียบระนาบนอน ระดับ 2.75 m	90
4.14	ประสิทธิภาพด้านผิววัสดุของ daylighting panels รูปแบบเรียบระนาบนอน ระดับ 3.00 m	95
4.15	ประสิทธิภาพด้านผิววัสดุของ daylighting panels รูปแบบเรียบระนาบเอียงระดับ 2.50 m	98
4.16	ประสิทธิภาพด้านผิววัสดุของ daylighting panels รูปแบบเรียบระนาบเอียงระดับ 2.75 m	101
4.17	ประสิทธิภาพด้านผิววัสดุของ daylighting panels รูปแบบเรียบระนาบเอีย ระดับ 3.00 m	104
4.18	ประสิทธิภาพด้านผิววัสดุของ daylighting panels รูปแบบโค้งระนาบนอน ระดับ 2.50 m.	107
4.19	ประสิทธิภาพด้านผิววัสดุของ daylighting panels รูปแบบโค้งระนาบนอน ระดับ 2.75 m	110
4.20	ประสิทธิภาพด้านผิววัสดุของ daylighting panels รูปแบบโค้งระนาบนอน ระดับ 3.00 m.	113
4.21	ประสิทธิภาพด้านระดับของ daylighting panels รูปแบบเรียบระนาบนอน วัสดุ specular	118
4.22	ประสิทธิภาพด้านระดับของ daylighting panels รูปแบบเรียบระนาบนอน วัสดุ spread ..	121
4.23	ประสิทธิภาพด้านระดับของ daylighting panels รูปแบบเรียบระนาบนอน วัสดุ diffuse ...	124
4.24	ประสิทธิภาพด้านระดับของ daylighting panels รูปแบบเรียบระนาบเอียง วัสดุ specular	127
4.25	ประสิทธิภาพด้านระดับของ daylighting panels รูปแบบเรียบระนาบเอียง วัสดุ spread...	130
4.26	ประสิทธิภาพด้านระดับของ daylighting panels รูปแบบเรียบระนาบเอียง วัสดุ diffuse	133
4.27	ประสิทธิภาพด้านระดับของ daylighting panels รูปแบบโค้งระนาบนอน วัสดุ specular ..	136
4.28	ประสิทธิภาพด้านระดับของ daylighting panels รูปแบบโค้งระนาบนอน วัสดุ spread	139
4.29	ประสิทธิภาพด้านระดับของ daylighting panels รูปแบบโค้งระนาบนอน วัสดุ diffuse	142
4.30	typical section ของช่องเปิดอาคารที่ใช้ daylighting panels ร่วมกับ lightshelves ต่างๆ	147

4.31	ประสิทธิภาพของการใช้ lightshelves ภายนอกลักษณะต่างๆเพียงอย่างเดียว.....	148
4.32	ประสิทธิภาพของการใช้ daylighting panels โค้งร่วมกับ lightshelves ลักษณะต่างๆ.....	151
5.1	แสดงตำแหน่งที่วัดค่าความส่องสว่างภายใน typical section ของหุ่นจำลอง.....	156
5.2	แสดงวิธีการกำหนด zonal cavity.....	159
6.1	แสดงสรุปผลตัวแปรกายภาพของ interior daylighting panels ที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด.	188
6.2	แสดงการสรุปผลตัวแวดล้อมที่ช่วยส่งเสริมประสิทธิภาพ ของ interior daylighting panels ที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด.....	189
6.3	แสดงรูปแบบช่องเปิดทิศเหนือ-ใต้ที่มีการใช้ light shelvesแบบเรียบตรงที่ช่องเปิดเพียงอย่างเดียว.....	192
6.4	แสดงรูปแบบช่องเปิดทิศเหนือ-ใต้ที่มีการใช้ interior daylighting panels โค้งระนาบนอนร่วมกับ light shelves ที่ช่องเปิดแบบเรียบตรง.....	192
6.5	แสดงรูปแบบช่องเปิดทิศเหนือ-ใต้ที่มีการใช้ interior daylighting panels โค้งระนาบนอนร่วมกับ light shelves ที่ช่องเปิดแบบโค้ง.....	193
ง.1	แสดงลักษณะวัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	219
ฉ.1	แสดงการตรวจสอบการอ่านค่าของอุปกรณ์ทดลอง (Calibration) ที่ใช้ในงานวิจัย.....	223
ช.1	Iso-contour plot of diffuse illuminance(klux) Local time.....	224
ช.2	Iso-contour plot of diffuse illuminance (klux) Local time.....	225
ช.3	Hourly mean values of diffuse illuminance (lux) by calendar month (local time) ที่ DF=2%.....	226

สารบัญแผนภูมิ

แผนภูมิที่		หน้า
1.1	แสดงอัตราการใช้พลังงาน (Annual energy consumption for typical office building)	1
1.2	แสดงขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.3	แสดงระเบียบวิธีวิจัย.....	5
3.1	แสดงการแจกแจงตัวแปรที่ทำการศึกษา.....	41
3.2	แสดงลำดับของการศึกษาทดลอง.....	49
4.1- 4.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่า%DF กับระยะจากช่องเปิดที่ใช้ light shelves แบบเรียบที่ช่องเปิดอย่างเดียว(base case)ในทิศเหนือ-ใต้ ภายใต้สภาพท้องฟ้า clear และ overcast sky	58
4.3	ประสิทธิภาพการใช้ light shelves แบบเรียบตรงที่ช่องเปิดเพียงอย่างเดียว (base case)	58
4.4-4.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่า%DF กับระยะจากช่องเปิดที่ใช้ lighting panel วัสดุ specular รูปแบบต่างๆที่ระดับ 2.50 mในทิศเหนือ-ใต้ภายใต้สภาพท้องฟ้า clear และ overcast sky	61
4.6	ประสิทธิภาพ daylighting panels วัสดุ specular reflect. รูปแบบต่างๆที่ระดับ 2.50 m...	62
4.7-4.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่า%DF กับระยะจากช่องเปิดที่ใช้ lighting panel วัสดุ specular รูปแบบต่างๆที่ระดับ 2.75 mในทิศเหนือ-ใต้ภายใต้สภาพท้องฟ้า clear และ overcast sky	64
4.9	ประสิทธิภาพ daylighting panels วัสดุ specular reflect. รูปแบบต่างๆที่ระดับ 2.75 m...	65
4.10-4.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่า%DF กับระยะจากช่องเปิดที่ใช้ lighting panel วัสดุ specular รูปแบบต่างๆที่ระดับ 3.00 mในทิศเหนือ-ใต้ภายใต้สภาพท้องฟ้า clear และ overcast sky	67
4.12	ประสิทธิภาพ daylighting panels วัสดุ specular reflect. รูปแบบต่างๆที่ระดับ 3.00 m...	68
4.13-4.14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่า %DF กับระยะจากช่องเปิดที่ใช้ lighting panel วัสดุ spread รูปแบบต่างๆที่ระดับ 2.50 mในทิศเหนือ-ใต้ภายใต้สภาพท้องฟ้า clear และ overcast sky	70
4.15	ประสิทธิภาพ daylighting panels วัสดุ spread reflect. รูปแบบต่างๆที่ระดับ 2.50 m...	71
4.16-4.17	กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่า %DF กับระยะจากช่องเปิดที่ใช้ lighting panel วัสดุ spread รูปแบบต่างๆที่ระดับ 2.75 mในทิศเหนือ-ใต้ภายใต้สภาพท้องฟ้า clear และ overcast sky	73
4.18	ประสิทธิภาพ daylighting panels วัสดุ spread reflect. รูปแบบต่างๆที่ระดับ 2.75 m...	74
4.19-4.20	กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่า %DF กับระยะจากช่องเปิดที่ใช้ lighting panel วัสดุ spread รูปแบบต่างๆที่ระดับ 3.00 mในทิศเหนือ-ใต้ภายใต้สภาพท้องฟ้า clear และ overcast sky	76
4.21	ประสิทธิภาพ daylighting panels วัสดุ spread reflect. รูปแบบต่างๆที่ระดับ 3.00 m.....	77
4.22-4.23	กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่า %DF กับระยะจากช่องเปิดที่ใช้ lighting panel วัสดุ diffuse รูปแบบต่างๆที่ระดับ 2.50 mในทิศเหนือ-ใต้ภายใต้สภาพท้องฟ้า clear และ overcast sky	79
4.24	ประสิทธิภาพ daylighting panels วัสดุ diffuse reflect. รูปแบบต่างๆที่ระดับ 2.50 m...	80
4.25-4.26	กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่า %DF กับระยะจากช่องเปิดที่ใช้ lighting panel วัสดุ diffuse รูปแบบต่างๆที่ระดับ 2.75 mในทิศเหนือ-ใต้ภายใต้สภาพท้องฟ้า clear และ overcast sky	82

4.27	ประสิทธิภาพ daylighting panels วัสดุ diffuse reflect. รูปแบบต่างๆที่ระดับ 2.75 m...	83
4.28-4.29	กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่า %DF กับระยะจากช่องเปิดที่ใช้ lighting panel วัสดุ diffuse รูปแบบต่างๆที่ระดับ 3.00 mในทิศเหนือ-ใต้ภายใต้สภาพท้องฟ้า clear และ overcast sky	85
4.30	ประสิทธิภาพ daylighting panels วัสดุ diffuse reflect. รูปแบบต่างๆที่ระดับ 3.00 m...	86
4.31-4.32	กราฟแสดงความสัมพันธ์ %DF กับระยะจากช่องเปิดที่ใช้ lighting panel เรียบระนาบนอน วัสดุต่างๆ ระดับ 2.50 mในทิศเหนือ-ใต้ภายใต้สภาพท้องฟ้า clear และ overcast sky.....	90
4.33	ประสิทธิภาพ daylighting panels รูปแบบเรียบระนาบนอน วัสดุต่างๆที่ระดับ 2.50 m...	91
4..34-	กราฟแสดงความสัมพันธ์ %DF กับระยะจากช่องเปิดที่ใช้ lighting panel เรียบระนาบนอน	93
4.35	วัสดุต่างๆ ระดับ 2.75 mในทิศเหนือ-ใต้ภายใต้สภาพท้องฟ้า clear และ overcast sky.....	
4.36	ประสิทธิภาพ daylighting panels รูปแบบเรียบระนาบนอน วัสดุต่างๆที่ระดับ 2.75 m.....	94
4.37-4.38	กราฟแสดงความสัมพันธ์ %DF กับระยะจากช่องเปิดที่ใช้ lighting panel เรียบระนาบนอน วัสดุต่างๆ ระดับ 3.00 mในทิศเหนือ-ใต้ภายใต้สภาพท้องฟ้า clear และ overcast sky.....	96
4.39	ประสิทธิภาพ daylighting panels รูปแบบเรียบระนาบนอน วัสดุต่างๆที่ระดับ 3.00 m.....	97
4.40-4.41	กราฟแสดงความสัมพันธ์ %DF กับระยะจากช่องเปิดที่ใช้ lighting panelเรียบระนาบเอียง วัสดุต่างๆระดับ 2.50 mในทิศเหนือ-ใต้ภายใต้สภาพท้องฟ้า clear และ overcast sky.....	99
4.42	ประสิทธิภาพ daylighting panels รูปแบบเรียบระนาบเอียง วัสดุต่างๆที่ระดับ 2.50 m.....	100
4.43-4.44	กราฟแสดงความสัมพันธ์ %DFกับระยะจากช่องเปิดที่ใช้ lighting panel เรียบระนาบเอียง วัสดุต่างๆ ระดับ 2.75 mในทิศเหนือ-ใต้ภายใต้สภาพท้องฟ้า clear และ overcast sky.....	102
4.45	ประสิทธิภาพ daylighting panels รูปแบบเรียบระนาบเอียง วัสดุต่างๆที่ระดับ 2.75m.....	103
4.46-4.47	กราฟแสดงความสัมพันธ์ %DFกับระยะจากช่องเปิดที่ใช้ lighting panel เรียบระนาบเอียง วัสดุต่างๆ ระดับ 3.00 mในทิศเหนือ-ใต้ภายใต้สภาพท้องฟ้า clear และ overcast sky.....	105
4.48	ประสิทธิภาพdaylighting panels รูปแบบเรียบระนาบเอียง วัสดุต่างๆที่ระดับ 3.00 m.....	106
4.49-4.50	กราฟแสดงความสัมพันธ์ %DFกับระยะจากช่องเปิดที่ใช้ lighting panel โค้งระนาบนอน วัสดุต่างๆ ระดับ 2.50 mในทิศเหนือ-ใต้ภายใต้สภาพท้องฟ้า clear และ overcast sky.....	108
4.51	ประสิทธิภาพ daylighting panels รูปแบบโค้งระนาบนอน วัสดุต่างๆที่ระดับ 2.50 m.....	109
4.52-4.53	กราฟแสดงความสัมพันธ์ %DFกับระยะจากช่องเปิดที่ใช้ lighting panel โค้งระนาบนอน วัสดุต่างๆ ระดับ 2.75 mในทิศเหนือ-ใต้ภายใต้สภาพท้องฟ้า clear และ overcast sky.....	111
4.54	ประสิทธิภาพ daylighting panels รูปแบบโค้งระนาบนอน วัสดุต่างๆที่ระดับ 2.75 m.....	112
4.55-4.56	กราฟแสดงความสัมพันธ์ %DF กับระยะจากช่องเปิดที่ใช้ lighting panel โค้งระนาบนอน วัสดุต่างๆ ระดับ 3.00 mในทิศเหนือ-ใต้ภายใต้สภาพท้องฟ้า clear และ overcast sky.....	114
4.57	ประสิทธิภาพ daylighting panels รูปแบบโค้งระนาบนอน วัสดุต่างๆที่ระดับ 3.00 m.....	115
4.58-4.59	กราฟแสดงความสัมพันธ์ %DF กับระยะจากช่องเปิดที่ใช้ lighting panel เรียบระนาบนอน วัสดุspecular ที่ระดับต่างๆในทิศเหนือ-ใต้ภายใต้สภาพท้องฟ้า clear และ overcast sky	119
4.60	ประสิทธิภาพ daylighting panels รูปแบบเรียบระนาบนอน วัสดุ specular ที่ระดับต่างๆ	120

4.61-4.62	กราฟแสดงความสัมพันธ์ %DF กับระยะจากช่องเปิดที่ใช้ lighting panel เรียบระนาบนอน วัสดุspread ที่ระดับต่างๆในทิศเหนือ-ใต้ภายใต้สภาพท้องฟ้า clear และ overcast sky....	122
4.63	ประสิทธิภาพ daylighting panels รูปแบบเรียบระนาบนอน วัสดุ spread ที่ระดับต่างๆ....	123
4.64-4.65	กราฟแสดงความสัมพันธ์ %DF กับระยะจากช่องเปิดที่ใช้ lighting panel เรียบระนาบนอน วัสดุdiffuse ที่ระดับต่างๆในทิศเหนือ-ใต้ภายใต้สภาพท้องฟ้า clear และ overcast sky.....	125
4.66	ประสิทธิภาพ daylighting panels รูปแบบเรียบระนาบนอน วัสดุ diffuse ที่ระดับต่างๆ.....	126
4.67-4.68	กราฟแสดงความสัมพันธ์ %DFกับระยะจากช่องเปิดที่ใช้ lighting panel เรียบระนาบเอียง วัสดุspecular ที่ระดับต่างๆในทิศเหนือ-ใต้ภายใต้สภาพท้องฟ้า clear และ overcast sky	128
4.69	ประสิทธิภาพ daylighting panels รูปแบบเรียบระนาบเอียง วัสดุ specular ที่ระดับต่างๆ	129
4.70-4.71	กราฟแสดงความสัมพันธ์ %DFกับระยะจากช่องเปิดที่ใช้ lighting panel เรียบระนาบเอียง วัสดุspread ที่ระดับต่างๆในทิศเหนือ-ใต้ภายใต้สภาพท้องฟ้า clear และ overcast sky....	131
4.72	ประสิทธิภาพ daylighting panels รูปแบบเรียบระนาบเอียง วัสดุ spread ที่ระดับต่างๆ....	132
4.73-4.74	กราฟแสดงความสัมพันธ์ %DFกับระยะจากช่องเปิดที่ใช้ lighting panel เรียบระนาบเอียง วัสดุ diffuse ที่ระดับต่างๆในทิศเหนือ-ใต้ภายใต้สภาพท้องฟ้า clear และ overcast sky....	134
4.75	ประสิทธิภาพ daylighting panels รูปแบบเรียบระนาบเอียง วัสดุ diffuse ที่ระดับต่างๆ.....	135
4.76-4.77	กราฟแสดงความสัมพันธ์ %DFกับระยะจากช่องเปิดที่ใช้ lighting panel โค้งระนาบนอน วัสดุ specular ที่ระดับต่างๆในทิศเหนือ-ใต้ภายใต้สภาพท้องฟ้า clear และ overcast sky	137
4.78	ประสิทธิภาพ daylighting panels รูปแบบโค้งระนาบนอน วัสดุ specular ที่ระดับต่างๆ....	138
4.79-4.80	กราฟแสดงความสัมพันธ์ %DF กับระยะจากช่องเปิดที่ใช้ lighting panel โค้งระนาบนอน วัสดุ spread ที่ระดับต่างๆในทิศเหนือ-ใต้ภายใต้สภาพท้องฟ้า clear และ overcast sky...	140
4.81	ประสิทธิภาพ daylighting panels รูปแบบโค้งระนาบนอน วัสดุ spread ที่ระดับต่างๆ...	141
4.82-4.83	แสดงความสัมพันธ์ %DF กับระยะจากช่องเปิดที่ใช้ lighting panel โค้งระนาบนอนวัสดุ diffuse ที่ระดับต่างๆในทิศเหนือ-ใต้ภายใต้สภาพท้องฟ้า clear และ overcast sky.....	143
4.84	ประสิทธิภาพ daylighting panels รูปแบบโค้งระนาบนอน วัสดุ diffuse ที่ระดับต่างๆ.....	144
4.85-4.86	กราฟแสดงความสัมพันธ์ %DFกับระยะจากช่องเปิดที่ใช้ lightshelves ลักษณะต่างๆเพียงอย่างเดียว ในทิศเหนือ-ใต้ภายใต้สภาพท้องฟ้า clear และ overcast sky.....	149
4.87	ประสิทธิภาพการนำแสงเข้ามาในอาคารด้วย light shelves ลักษณะต่างๆเพียงอย่างเดียว	150
4.88-4.89	กราฟแสดงความสัมพันธ์ %DF กับระยะจากช่องเปิดที่ใช้ daylighting panel โค้ง ร่วมกับ lightshelves ลักษณะต่างๆในทิศเหนือ-ใต้ภายใต้สภาพท้องฟ้า clear และ overcast sky.	152
4.90	ประสิทธิภาพของการใช้ daylighting panels โค้ง ร่วมกับ light shelves ลักษณะต่างๆ...	153
5.1	แสดงการแบ่งพื้นที่เพื่อแสดงตำแหน่งที่ต้องการค่าความส่องสว่างภายในเพิ่ม.....	157
5.2	เปรียบเทียบการบริโภคพลังงานไฟฟ้า(kW-hr/year) ตลอดปีของการศึกษาในแต่ละกรณี...	177
5.3	แสดงการเปรียบเทียบการบริโภคพลังงานตลอดปีที่ลดลง ของกรณีต่างๆ เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้ประโยชน์จากแสงธรรมชาติ(มีการเปิดใช้พลังงานไฟฟ้า 8 ชั่วโมง/วัน).....	178

5.4	แสดงการเปรียบเทียบการบริโภคพลังงานตลอดปีที่ลดลง ของกรณีต่างๆ เมื่อเทียบกับกรณีที่ใช้ light shelves เรียบตรงที่ช่องเปิดเพียงอย่างเดียว (base case).....	179
5.5	แสดงการเปรียบเทียบการบริโภคพลังงานตลอดปีที่ลดลง ของกรณีต่างๆ เมื่อเทียบกับกรณีที่ใช้ daylighting panels โค้ง ร่วมกับ light shelves แบบเรียบตรง.....	179
5.6	แสดงผลการเปรียบเทียบค่าไฟฟ้าตลอดปี(บาท)ของการศึกษาในแต่ละกรณี.....	180
5.7	แสดงการเปรียบเทียบค่าไฟฟ้าตลอดปีที่ลดลง ของกรณีต่างๆ เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้ประโยชน์จากแสงธรรมชาติ(มีการเปิดใช้พลังงานไฟฟ้า 8 ชั่วโมง/วัน).....	181
5.8	แสดงการเปรียบเทียบค่าไฟฟ้าตลอดปีที่ลดลง ของกรณีต่างๆ เมื่อเทียบกับกรณีที่ใช้ light shelves เรียบตรงที่ช่องเปิดเพียงอย่างเดียว (base case).....	182
5.9	แสดงการเปรียบเทียบค่าไฟฟ้าตลอดปีที่ลดลง ของกรณีต่างๆ เมื่อเทียบกับกรณีที่ใช้ daylighting panels โค้ง ร่วมกับ light shelves แบบเรียบตรง.....	182
5.10	แสดงการเปรียบเทียบค่า heat gain ที่เกิดขึ้นจากการใช้แสงประดิษฐ์ ตลอดปีของการศึกษาในแต่ละกรณี.....	183
5.11	แสดงการเปรียบเทียบค่า heat gain จากแสงประดิษฐ์ที่ลดลงต่อปี ของกรณีต่างๆ เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้ประโยชน์จากแสงธรรมชาติ(มีการเปิดใช้พลังงานไฟฟ้า 8 ชั่วโมง/วัน)	184
5.12	แสดงการเปรียบเทียบค่า heat gain จากแสงประดิษฐ์ที่ลดลงต่อปี ของกรณีต่างๆ เมื่อเทียบกับกรณีที่ใช้ light shelves เรียบตรงที่ช่องเปิดเพียงอย่างเดียว (base case).....	185
5.13	แสดงการเปรียบเทียบค่า heat gain จากแสงประดิษฐ์ที่ลดลงต่อปี ของกรณีต่างๆ เมื่อเทียบกับกรณีที่ใช้ daylighting panels โค้งร่วมกับ light shelves แบบเรียบตรง.....	185
6.1	แสดงสรุปประสิทธิภาพด้านระยะในการนำแสงธรรมชาติเข้ามาในอาคารด้วยกรณีต่างๆ....	187
6.2	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า %DF กับระยะจากช่องเปิดในการประยุกต์ใช้ช่องเปิดเหนือ-ใต้ร่วมกันของกรณีใช้ light shelves ที่ช่องเปิดเพียงอย่างเดียว (base case).....	192
6.3	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %DF กับระยะจากช่องเปิดในการประยุกต์ใช้ช่องเปิดเหนือ-ใต้ร่วมกันของกรณีใช้ daylighting panels โค้งร่วมกับ light shelves ที่ช่องเปิดแบบเรียบตรง	192
6.4	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %DF กับระยะจากช่องเปิดในการประยุกต์ใช้ช่องเปิดเหนือ-ใต้ร่วมกันของกรณีใช้ daylighting panels โค้งร่วมกับ light shelves ที่ช่องเปิดแบบโค้ง	193
ฉ.1	กราฟแสดงการตรวจสอบการอ่านค่าของอุปกรณ์ทดลองที่ใช้ในงานวิจัย (calibration).....	223
ช.1	Cumulative frequency distribution of global illuminance values of each month and of a year (working hour 8.00-17.00 น.).....	224
ช.2	Cumulative frequency distribution of diffuse illuminance values of each month and of a year (working hour 8.00-17.00 น.).....	225
ช.5	Luminaire dirt depreciation factors (LDD) for six luminaire categories (I to VI).....	228