

การวิเคราะห์ค่าความสว่างและความส่องสว่างบนพื้นถนนภายในอุโมงค์



นางสาว ปริญญา ตันสกุล

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-4308-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

THE ANALYSIS OF PAVEMENT ILLUMINANCE AND LUMINANCE IN TUNNEL



Miss.Parinya Tunsakul

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-4308-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ค่าความสว่างและความส่องสว่างบนพื้นถนนภายใน อุโมงค์
โดย	นางสาว ปริญา ตันสกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ไชยะ แซ่มช้อย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัญศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ไชยะ แซ่มช้อย)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

สภามหาวิทยาลัย
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปริญญา ดันสกุล : การวิเคราะห์ค่าความสว่างและความส่องสว่างบนพื้นถนน
 ภายในอุโมงค์. (THE ANALYSIS OF PAVEMENT ILLUMINANCE AND
 LUMINANCE IN TUNNEL) อ.ที่ปรึกษา : อาจารย์ไชยะ แซ่มชัย,
 จำนวนหน้า 177 หน้า. ISBN 974-17-4308-4

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์หาค่าความสว่าง (Illuminance) และ
 ความส่องสว่าง (Luminance) บนพื้นถนนภายในอุโมงค์รถยนต์โดยใช้วิธีจุดต่อจุดที่คำนึงถึงผล
 ของแสงสะท้อนจากผนังและเพดานของอุโมงค์ โดยได้พัฒนาโปรแกรมขึ้นมาเพื่อช่วยในการหาค่า
 ความสว่าง ความส่องสว่างบนพื้นถนน ค่าความสม่ำเสมอของความสว่าง ความสม่ำเสมอรวม
 และความสม่ำเสมอตามแนวยาวของช่องวิ่งของค่าความส่องสว่าง นอกจากนี้ยังสามารถใช้งาน
 เพื่อช่วยในการออกแบบระบบแสงสว่างภายในอุโมงค์เพื่อให้เข้ากับสภาพแวดล้อมรอบอุโมงค์
 โดยมีความส่องสว่างที่เหมาะสมอีกด้วย

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา _____ วิศวกรรมไฟฟ้า _____ ลายมือชื่อนิสิต _____
 สาขาวิชา _____ วิศวกรรมไฟฟ้า _____ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____
 ปีการศึกษา _____ 2546 _____ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม _____

##4470401021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORD: ILLUMINANCE , LUMINANCE , TUNNEL LIGHTING

PARINYA TUNSAKUL: THE ANALYSIS OF PAVEMENT ILLUMINANCE AND
LUMINANCE IN TUNNEL.

THESIS ADVISOR: CHAIYA CHAMCHOY.

177 PP. ISBN 974-17-4308-4

This thesis mainly concerns about the analysis of illuminance and luminance on the pavement in a tunnel using point by point method , taking into account the effect of wall and ceiling reflection. A software has been developed to calculate illuminance , luminance on the pavement in a tunnel , uniformity of illuminance , overall uniformity and longitudinal uniformity of luminance. Moreover this software can be utilized to design tunnel lighting to match to outside tunnel surrounding, which can provide appropriate lighting luminance.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department _____ Electrical Engineering _____ Student's _____

Field of study _____ Electrical Engineering _____ Advisor's _____

Academic year _____ 2003 _____ Co-advisor's _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงไปได้ด้วยดี เนื่องจากผู้ทำวิทยานิพนธ์ได้รับความกรุณาอย่างดียิ่งจากอาจารย์ไชยะ แซ่มซ้อย ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาแนะนำแนวทางปฏิบัติให้ความคิดเห็นและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ตลอดจนชี้ให้เห็นถึงข้อบกพร่องและแนวทางแก้ไขต่าง ๆ นับตั้งแต่เริ่มต้นในการทำวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ ขอขอบพระคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านซึ่งได้ช่วยให้คำแนะนำประกอบด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์ (ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์) และ รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ (กรรมการสอบวิทยานิพนธ์)

ทำยนี้ผู้ทำวิทยานิพนธ์ขอกราบขอบพระคุณบิดา - มารดา ที่ให้การสนับสนุนและส่งเสริมการศึกษาแก่ข้าพเจ้าด้วยดีตลอดมา

ปริญญา ตันสกุล

29 มีนาคม 2547

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 กล่าวนำปัญหา	1
1.2 ความสำคัญของปัญหา	1
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.5 การดำเนินการวิจัย.....	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.7 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์	3
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบแสงสว่างบนพื้นถนนภายในอุโมงค์.....	5
2.1 นิยามที่เกี่ยวข้อง	5
2.1.1 ความเข้มส่องสว่าง (Luminous Intensity).....	5
2.1.2 ความสว่าง (Illuminance).....	5
2.1.3 ความส่องสว่าง (Luminance)	5
2.1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มส่องสว่าง (I) และความสว่าง (E)	6
2.1.5 ความส่องสว่างเฉลี่ยบนถนน (Average Luminance , Lav).....	7
2.1.6 ความสม่ำเสมอรวม (Overall Uniformity , U ₀)	7
2.1.7 ความสม่ำเสมอตามแนวยาว (Longitudinal Uniformity , U ₁)	7
2.2 รายละเอียดพื้นที่.....	8
2.2.1 ตำแหน่งจุดสังเกต	8
2.2.2 พื้นที่ที่ใช้ในการคำนวณ	8

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.3 ค่าแบ่งประเภทของผิวถนน	9
2.3.1 ระดับความขรุขระของถนน (Q_0)	9
2.3.2 ระดับการสะท้อนแสงแบบ Specular (Specularity Factor , S_1)	10
2.4 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับอุโมงค์	12
2.5 มาตรฐานในการออกแบบระบบแสงสว่างภายในอุโมงค์.....	14
2.5.1 ความส่องสว่างใน Threshold Zone.....	16
2.5.2 ความส่องสว่างในช่วง Interior Zone.....	18
2.5.3 ความส่องสว่างในตอนกลางคืน	19
2.6 ค่าความสม่ำเสมอ.....	20
2.7 ดวงโคมที่ใช้ในระบบแสงสว่างภายในอุโมงค์.....	20
2.8 ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบระบบแสงสว่างภายในอุโมงค์.....	21
3. การคำนวณความสว่างและความส่องสว่างบนพื้นถนนภายในอุโมงค์.....	24
3.1 การคำนวณในส่วนของ Direct Component.....	25
3.1.1 ดวงโคมที่ติดตั้งไว้บนเพดานของอุโมงค์ (ดวงโคมไม่มีมุมเอียง).....	26
3.1.2 ดวงโคมที่ติดตั้งไว้บนผนังของอุโมงค์ (ดวงโคมไม่มีมุมเอียง).....	28
3.1.3 ดวงโคมที่ติดตั้งไว้บนเพดานเอียงของอุโมงค์ หรือดวงโคมที่มีมุมเอียง	31
3.2 การคำนวณในส่วนของ Indirect Component	35
3.3 การคำนวณความสว่างบนพื้นที่ย่อยจากดวงโคม	38
3.3.1 ดวงโคมที่ติดตั้งไว้บนเพดานของอุโมงค์ (ดวงโคมไม่มีมุมเอียง).....	38
3.3.2 ดวงโคมที่ติดตั้งไว้บนผนังของอุโมงค์ (ดวงโคมไม่มีมุมเอียง).....	40
3.3.3 ดวงโคมที่ติดตั้งไว้บนเพดานเอียงของอุโมงค์ หรือดวงโคมที่มีมุมเอียง	43
3.4 การคำนวณความสว่างบนพื้นที่ย่อยจากพื้นที่ย่อย	46
4. การพัฒนาโปรแกรม	48
4.1 โครงสร้างโปรแกรม	48

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5. โปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าความสว่างและความส่องสว่างบนพื้นถนน ภายในอุโมงค์.....	71
6. การประเมินคุณภาพการส่องสว่าง.....	98
6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนครั้งที่ทำการแบ่งพื้นที่กับเวลาที่ใช้ในการ คำนวณ	98
6.2 ตัวอย่างการให้แสงสว่างอุโมงค์ที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม	102
6.3 ตัวอย่างการให้แสงสว่างอุโมงค์ที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปโค้ง	110
6.4 ตัวอย่างการออกแบบระบบแสงสว่างบนพื้นถนนภายในอุโมงค์ กรณีที่ 1	118
6.5 ตัวอย่างการออกแบบระบบแสงสว่างบนพื้นถนนภายในอุโมงค์ กรณีที่ 2	121
7. สรุปและข้อเสนอแนะ	125
7.1 สรุปผลการดำเนินงาน	125
7.2 ข้อเสนอแนะ	126
รายการอ้างอิง	127
ภาคผนวก ก. ตัวอย่างข้อมูลความเข้มส่องสว่างของดวงโคม	129
ภาคผนวก ข. ROADSURFACE STANDARD	145
ภาคผนวก ค. ผลการวิเคราะห์ค่าความสว่างและความส่องสว่างทางเครื่องพิมพ์	159
ประวัติผู้เขียน	177

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การแบ่งประเภทของพื้นผิวถนนแบบ R – Classification.....	10
2.2 การแบ่งประเภทของพื้นผิวถนนแบบ N – Classification.....	10
2.3 การแบ่งประเภท (Class) ของผิวถนน.....	11
2.4 การแบ่งประเภทของพื้นผิวถนนแบบ C – Classification.....	11
2.5 การแบ่งประเภทของพื้นผิวถนนแบบ W – Classification	12
2.6 ค่า Safe-Stopping-Sight Distance ที่ความเร็วต่าง ๆ	13
2.7 ความส่องสว่างที่แนะนำในช่วง Threshold Zone	18
2.8 ความส่องสว่างที่แนะนำในช่วง Interior Zone.....	19
2.9 รายละเอียดของดวงโคมทั้ง 3 ชนิด.....	21
6.1 รูปแบบการติดตั้งดวงโคมในอุโมงค์ที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม	99
6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของพื้นที่และเวลาที่ใช้ในการคำนวณ	99
6.3 ความสว่างบนพื้นถนนจาก Total Component (ลักซ์).....	103
6.4 ความสว่างบนพื้นถนนจาก Direct Component (ลักซ์).....	104
6.5 ความส่องสว่างบนพื้นถนนจาก Total Component ($cd./m^2$).....	105
6.6 ความส่องสว่างบนพื้นถนนจาก Direct Component ($cd./m^2$).....	106
6.7 ความสว่างบนพื้นถนน	107
6.8 ความส่องสว่างบนพื้นถนน.....	107
6.9 รูปแบบการติดตั้งดวงโคมในอุโมงค์ที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปโค้ง.....	111
6.10 ความสว่างบนพื้นถนนจาก Total Component (ลักซ์).....	111
6.11 ความสว่างบนพื้นถนนจาก Direct Component (ลักซ์).....	112
6.12 ความส่องสว่างบนพื้นถนนจาก Total Component ($cd./m^2$).....	113
6.13 ความส่องสว่างบนพื้นถนนจาก Direct Component ($cd./m^2$).....	114
6.14 ความสว่างบนพื้นถนน.....	115
6.15 ความส่องสว่างบนพื้นถนน.....	115
6.16 การติดตั้งดวงโคมภายในอุโมงค์	119
6.17 ความสว่างจาก Total Component ของช่วง Threshold Zone และ Interior Zone	120

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
6.18 ความส่องสว่างจาก Total Component ของช่วง Threshold Zone และ Interior Zone	120
6.19 การติดตั้งดวงโคมภายในอุโมงค์	123
6.20 ความสว่างจาก Total Component ของช่วง Threshold Zone และ Interior Zone	123
6.21 ความสว่างจาก Total Component ของช่วง Threshold Zone และ Interior Zone	123
ก.1 ข้อมูลความเข้มส่องสว่างของดวงโคม C8712.IES.....	129
ก.2 ข้อมูลความเข้มส่องสว่างของดวงโคม C9102.IES.....	133
ก.3 ข้อมูลความเข้มส่องสว่างของดวงโคม C9631.IES.....	137
ข.1 ROADSURFACE STANDARD C1.....	145
ข.2 ROADSURFACE STANDARD C2.....	146
ข.3 ROADSURFACE STANDARD R1.....	147
ข.4 ROADSURFACE STANDARD R2.....	148
ข.5 ROADSURFACE STANDARD R3.....	149
ข.6 ROADSURFACE STANDARD R4.....	150
ข.7 ROADSURFACE STANDARD N1.....	151
ข.8 ROADSURFACE STANDARD N2.....	152
ข.9 ROADSURFACE STANDARD N3.....	153
ข.10 ROADSURFACE STANDARD N4.....	154
ข.11 ROADSURFACE STANDARD W1.....	155
ข.12 ROADSURFACE STANDARD W2.....	156
ข.13 ROADSURFACE STANDARD W3.....	157
ข.14 ROADSURFACE STANDARD W4.....	158

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1	ลักษณะการใช้ Cosine Law 6
2.2	จุดที่ต้องคำนวณภายในพื้นที่ 8
2.3	การกำหนดค่ามุมในแนวมอง 9
2.4	การแบ่งอุโมงค์เพื่อใช้ในการออกแบบระบบแสงสว่างภายในอุโมงค์ 13
2.5	การลดลงของค่าความส่องสว่างในช่วง Threshold Zone , Transition Zone และ Interior Zone 15
2.6	ฉากหลังแบบที่ 1..... 16
2.7	ฉากหลังแบบที่ 2..... 16
2.8	ฉากหลังแบบที่ 3..... 16
2.9	ฉากหลังแบบที่ 4..... 16
2.10	ฉากหลังแบบที่ 5..... 17
2.11	ฉากหลังแบบที่ 6..... 17
2.12	ฉากหลังแบบที่ 7..... 17
2.13	ฉากหลังแบบที่ 8..... 17
2.14	ลักษณะของความส่องสว่างในแต่ละช่วงของอุโมงค์ 19
2.15	การกำหนดแนวของมุม $\gamma = 0$ องศา..... 21
3.1	ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของการให้แสงสว่างบนพื้นถนนจากดวงโคม ที่ติดบนเพดาน 26
3.2	ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของการให้แสงสว่างบนพื้นถนนจากดวงโคม ที่ติดบนผนัง 28
3.3	ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของการให้แสงสว่างบนพื้นถนนจากดวงโคม ที่ติดบนเพดานเอียงหรือดวงโคมที่มีมุมเอียง..... 31
3.4	ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของการให้แสงสว่างบนพื้นถนนจากดวงโคม ที่ติดบนเพดานเอียงหรือดวงโคมที่มีมุมเอียง..... 34
3.5	ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของการให้แสงสว่างบนพื้นถนนจากส่วนของ Indirect Component..... 35

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6 ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของการให้แสงสว่างบนพื้นที่ย่อยจากดวงโคม ที่ติดบนเพดาน.....	38
3.7 ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของการให้แสงสว่างบนพื้นที่ย่อยจากดวงโคม ที่ติดบนผนัง	40
3.8 ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของการให้แสงสว่างบนพื้นที่ย่อยจากดวงโคม ที่ติดบนเพดานเอียงหรือดวงโคมที่มีมุมเอียง.....	43
3.9 ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของการให้แสงสว่างบนพื้นที่ย่อยจากพื้นที่ย่อย ..	46
4.1 ไดอะแกรมแสดงรายละเอียดในส่วนหลักของโปรแกรม	49
4.2 ไดอะแกรมแสดงการคำนวณเพื่อแบ่งพื้นที่ย่อยของอุโมงค์ ที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม	56
4.3 ไดอะแกรมแสดงการคำนวณเพื่อแบ่งพื้นที่ย่อยของอุโมงค์ ที่มีหน้าตัดเป็นรูปโค้ง	59
4.4 ไดอะแกรมการคำนวณเพื่อหาความสว่างและความส่องสว่าง บนพื้นถนนจากดวงโคม.....	65
4.5 ไดอะแกรมการคำนวณเพื่อหาความสว่างบนพื้นที่ย่อยจากดวงโคม	67
4.6 ไดอะแกรมการคำนวณเพื่อหาความสว่างและความส่องสว่าง บนพื้นถนนจากพื้นที่ย่อย.....	68
4.7 ไดอะแกรมการคำนวณเพื่อหาความสว่างบนพื้นที่ย่อยจากพื้นที่ย่อย	70
5.1 ไอคอนของโปรแกรม	72
5.2 หน้าต่างหลักของโปรแกรม.....	73
5.3 หน้าต่างเมื่อเลือกรายการ File.....	73
5.4 หน้าต่างย่อยในส่วนของการใส่ข้อมูลความเข้มส่องสว่างของดวงโคม	74
5.5 หน้าต่างย่อยในส่วนของการใส่ข้อมูลความเข้มส่องสว่างของดวงโคม	75
5.6 หน้าต่างแสดงการบันทึกข้อมูล	76
5.7 หน้าต่างแสดงการเปิดข้อมูล	76
5.8 หน้าต่างย่อยในส่วนของการเปิดข้อมูลความเข้มส่องสว่างของดวงโคม	77
5.9 หน้าต่างเมื่อเลือกรายการ Create New Project	78

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.10 หน้าต่างสำหรับป้อนข้อมูลของอุโมงค์ที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม.....	78
5.11 หน้าต่างสำหรับป้อนข้อมูลของอุโมงค์ที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปโค้ง.....	79
5.12 ตัวอย่างการใส่ข้อมูลของอุโมงค์	79
5.13 หน้าต่างสำหรับเลือกปัจจัยของอุโมงค์ที่มีผลกับ ความส่องสว่างภายในอุโมงค์.....	80
5.14 หน้าต่างแสดงฉากหลัง	81
5.15 หน้าต่างแสดงการออกแบบระบบแสงสว่างภายในอุโมงค์	82
5.16 หน้าต่างการเลือกดวงโคมที่ใช้ในการออกแบบระบบแสงสว่างภายในอุโมงค์....	82
5.17 หน้าต่างแสดงการเลือกดวงโคม	83
5.18 หน้าต่างแสดงรายละเอียดการกำหนดตำแหน่งของดวงโคม	83
5.19 หน้าต่างแสดงลักษณะการกระจายแสงของดวงโคมที่ได้เลือกใช้.....	85
5.20 หน้าต่างแสดงภาพลักษณะการติดตั้งบนเพดานของดวงโคมชุดที่ 1	85
5.21 หน้าต่างแสดงภาพลักษณะการติดตั้งบนผนังด้านซ้ายของดวงโคมชุดที่ 2	86
5.22 หน้าต่างแสดงภาพลักษณะการติดตั้งบนผนังด้านขวาของดวงโคมชุดที่ 3.....	86
5.23 หน้าต่างแสดงกราฟที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าความสว่างและความส่องสว่าง	87
5.24 หน้าต่างแสดงกราฟที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าความสว่างและความส่องสว่าง	88
5.25 หน้าต่างแสดงกราฟที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าความสว่างและความส่องสว่าง	89
5.26 หน้าต่างแสดงรายละเอียดในส่วนของ Result.....	89
5.27 หน้าต่างแสดงรายละเอียดของผลสรุปที่ได้จากการคำนวณ.....	90
5.28 หน้าต่างแสดงตารางค่าความสว่างของ Total Component.....	90
5.29 หน้าต่างแสดงตารางค่าความสว่างของ Direct Component.....	91
5.30 หน้าต่างแสดงตารางค่าความส่องสว่างของ Total Component.....	91
5.31 หน้าต่างแสดงตารางค่าความส่องสว่างของ Direct Component.....	92
5.32 หน้าต่างแสดงเส้นทางเดินของความสว่างเท่า	92
5.33 หน้าต่างแสดงเส้นทางเดินของความส่องสว่างเท่า.....	93
5.34 หน้าต่างแสดง Shade ของความสว่าง	93
5.35 หน้าต่างแสดง Shade ของความส่องสว่าง	94

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.36 หน้าต่างแสดงภาพแรงเงาของความสว่าง	94
5.37 หน้าต่างแสดงภาพแรงเงาของความส่องสว่าง	95
5.38 หน้าต่างสำหรับป้อนข้อมูลของอุโมงค์ที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม.....	95
5.39 หน้าต่างแสดงกราฟที่ใช้ในการออกแบบระบบแสงสว่างภายในอุโมงค์	96
5.40 หน้าต่างแสดงรายละเอียดของโปรแกรม.....	97
6.1 รูปแบบการติดตั้งดวงโคมในอุโมงค์มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม.....	99
6.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างและจำนวนครั้งในการสะท้อนแสง ระหว่างพื้นที่ย่อยที่ได้ทำการแบ่งในครั้งที่ 1	100
6.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างและจำนวนครั้งในการสะท้อนแสง ระหว่างพื้นที่ย่อยที่ได้ทำการแบ่งในครั้งที่ 2	100
6.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างและจำนวนครั้งในการสะท้อนแสง ระหว่างพื้นที่ย่อยที่ได้ทำการแบ่งในครั้งที่ 3	100
6.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างและจำนวนครั้งในการสะท้อนแสง ระหว่างพื้นที่ย่อยที่ได้ทำการแบ่งในครั้งที่ 4	101
6.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างและจำนวนครั้งในการสะท้อนแสง ระหว่างพื้นที่ย่อยที่ได้ทำการแบ่งในครั้งที่ 5	101
6.7 ลักษณะการกระจายแสงของดวงโคมรหัส C8712.IES ในระนาบ C ที่ 0,90,180 องศา	102
6.8 ภาพลายเส้นของความสว่าง	107
6.9 ภาพลายเส้นของความส่องสว่าง	107
6.10 ภาพ Shade ของความสว่าง	108
6.11 ภาพ Shade ของความส่องสว่าง	108
6.12 ภาพแรงเงาของความสว่าง	108
6.13 ภาพแรงเงาของความส่องสว่าง	108
6.14 กราฟที่ใช้ในการออกแบบระบบแสงสว่างภายในอุโมงค์ ที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม	109
6.15 ขนาดของอุโมงค์ที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปโค้ง.....	110

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.16 รูปแบบการติดตั้งดวงโคมในอุโมงค์ที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปโค้ง	111
6.17 ภาพลายเส้นของความสว่าง.....	116
6.18 ภาพลายเส้นของความส่องสว่าง	116
6.19 ภาพ Shade ของความสว่าง	116
6.20 ภาพ Shade ของความส่องสว่าง	116
6.21 ภาพแรงเงาของความสว่าง	117
6.22 ภาพแรงเงาของความส่องสว่าง	117
6.23 กราฟที่ใช้ในการออกแบบระบบแสงสว่างภายในอุโมงค์ ที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปโค้ง	117
6.24 ลักษณะการกระจายแสงของดวงโคมรหัส C9102.IES ในระนาบ C ที่ 0,90,180 องศา.....	119
6.25 การติดตั้งดวงโคมภายในอุโมงค์	119
6.26 กราฟที่ใช้ในการออกแบบระบบแสงสว่างภายในอุโมงค์.....	120
6.27 ลักษณะการกระจายแสงของดวงโคมรหัส C9631.IES ในระนาบ C ที่ 0,90,180 องศา	122
6.28 การติดตั้งดวงโคมภายในอุโมงค์	122
6.29 กราฟที่ใช้ในการออกแบบระบบแสงสว่างภายในอุโมงค์.....	124
ค.1 หัวข้อที่จะแสดงใน Tunnel Lighting Design Report.....	160
ค.2 แสดงข้อมูลเบื้องต้นของอุโมงค์ทางเครื่องบิน	161
ค.3 ผลสรุปที่ได้จากการคำนวณค่าความสว่างและความส่องสว่างบน พื้นถนนภายในอุโมงค์ทางเครื่องบิน	162
ค.4 ตารางค่าความสว่างของ Total Component ทางเครื่องบิน.....	163
ค.5 ตารางค่าความสว่างของ Total Component (ต่อ) ทางเครื่องบิน	164
ค.6 ตารางค่าความสว่างของ Direct Component ทางเครื่องบิน	165
ค.7 ตารางค่าความสว่างของ Direct Component (ต่อ) ทางเครื่องบิน	166
ค.8 ตารางค่าความส่องสว่างของ Total Component ทางเครื่องบิน.....	167

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ค.9 ตารางค่าความส่องสว่างของ Total Component (ต่อ) ทางเครื่องพิมพ์.....	168
ค.10 ตารางค่าความส่องสว่างของ Direct Component ทางเครื่องพิมพ์.....	169
ค.11 ตารางค่าความส่องสว่างของ Direct Component (ต่อ) ทางเครื่องพิมพ์.....	170
ค.12 ภาพลายเส้นของความสว่างทางเครื่องพิมพ์.....	171
ค.13 ภาพลายเส้นของความส่องสว่างทางเครื่องพิมพ์.....	172
ค.14 ภาพ Shade ของความสว่างทางเครื่องพิมพ์.....	173
ค.15 ภาพ Shade ของความส่องสว่างทางเครื่องพิมพ์.....	174
ค.16 ภาพแรเงาของความสว่างทางเครื่องพิมพ์.....	175
ค.17 ภาพแรเงาของความส่องสว่างทางเครื่องพิมพ์.....	176

บทที่ 1

บทนำ

1.1 กล่าวนำปัญหา

อุโมงค์รถยนต์เป็นโครงสร้างของถนนซึ่งถูกจำกัดแสงจากแสงอาทิตย์ในตอนกลางวัน ทำให้ถนนภายในอุโมงค์มีแสงน้อยกว่าปกติส่งผลให้การมองเห็นของผู้ขับขี่ลดลง จุดประสงค์ของระบบแสงสว่างบนถนนภายในอุโมงค์คือ ทำให้ผู้ขับขี่มีความมั่นใจและรู้สึกปลอดภัยในการขับขี่ ยานพาหนะบนถนนภายในอุโมงค์ทั้งตอนกลางวันและตอนกลางคืน ความแตกต่างหลัก ๆ ระหว่างระบบแสงสว่างบนถนนภายในอุโมงค์และระบบแสงสว่างบนถนนธรรมดา คือความต้องการแสงสว่างในตอนกลางวัน เนื่องจากในตอนกลางวันนั้น บนถนนธรรมดาจะได้รับแสงสว่างจากดวงอาทิตย์อยู่แล้ว ซึ่งเป็นแสงสว่างที่เพียงพอต่อการมองเห็นของผู้ขับขี่ จึงไม่จำเป็นต้องมีแสงสว่างจากแหล่งกำเนิดแสงอื่น ๆ มาช่วยให้แสงสว่าง แต่ภายในอุโมงค์จะถูกจำกัดแสงจากแสงอาทิตย์ในตอนกลางวัน ทำให้ถนนภายในอุโมงค์มีแสงสว่างที่ไม่เพียงพอต่อการมองเห็นของผู้ขับขี่อาจทำให้เกิดอุบัติเหตุได้ง่ายกว่าบนถนนธรรมดา จึงจำเป็นต้องมีแสงสว่างจากแหล่งกำเนิดแสงอื่น ๆ มาช่วยให้แสงสว่าง

1.2 ความสำคัญของปัญหา

จากที่กล่าวมาแล้วว่าอุโมงค์รถยนต์เป็นโครงสร้างของถนน ซึ่งถูกจำกัดแสงจากแสงอาทิตย์ในตอนกลางวัน ทำให้ถนนภายในอุโมงค์มีแสงน้อยกว่าปกติส่งผลให้การมองเห็นของผู้ขับขี่ลดลง ดังนั้นระบบไฟฟ้าแสงสว่างบนถนนภายในอุโมงค์จึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องคำนึงถึง โดยระบบแสงสว่างบนถนนภายในอุโมงค์ควรจะทำให้ผู้ขับขี่มองเห็นระยะข้างหน้าที่แน่นอน สามารถทำการหยุดรถภายในระยะทางนั้นได้เพราะอาจเกิดอันตรายที่ไม่คาดคิด และทำให้ผู้ขับขี่สามารถขับขี่ยานพาหนะได้ด้วยความเร็วที่กำหนด รวมทั้งทำให้มีคุณภาพของระบบแสงสว่างบนถนนภายในอุโมงค์ไม่น้อยกว่าบนถนนธรรมดา (Open Road) เพราะคุณภาพของระบบแสงสว่างบนถนนที่ดีจะไม่ทำให้สายตาเมื่อยล้าเร็ว เพิ่มความสะดวกปลอดภัยบนท้องถนน เพิ่มความคล่องตัวของการจราจร

โดยค่าความสว่าง (Illuminance,E) และความส่องสว่าง (Luminance,L) เป็นปริมาณที่มีผลต่อการมองเห็นของผู้ใช้ ซึ่งการพิจารณาดังกล่าวจะต้องใช้เวลาในการคำนวณมาก

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอวิธีการวิเคราะห์ค่าความสว่างและความส่องสว่างบนพื้นถนนภายในอุโมงค์ โดยพัฒนาโปรแกรมเพื่อช่วยในการหาค่าปริมาณดังกล่าว ซึ่งจะทำได้มีความถูกต้องแม่นยำ และรวดเร็ว รวมทั้งสามารถแสดงผลการคำนวณในรูปแบบกราฟฟิก (graphic) เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาความสม่ำเสมอของแสงบนผิวถนนที่ออกแบบได้ รวมทั้งสามารถหาค่าความส่องสว่างที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการออกแบบระบบแสงสว่างภายในอุโมงค์นั้น

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาวิธีการวิเคราะห์ค่าความสว่างและความส่องสว่างบนพื้นถนนภายในอุโมงค์
2. ออกแบบและพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถวิเคราะห์ค่าความสว่างและความส่องสว่างบนพื้นถนนภายในอุโมงค์
3. ออกแบบและพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการแสดงผลค่าความสว่างและความส่องสว่างบนพื้นถนนภายในอุโมงค์
4. ออกแบบและพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ค่าความส่องสว่างที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการออกแบบระบบแสงสว่างภายในอุโมงค์

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

ทำการคำนวณหาค่าความสว่างและความส่องสว่างบนพื้นถนนภายในอุโมงค์โดยสามารถคำนวณได้ตลอดความยาวของอุโมงค์ โดยจะทำการคำนวณเฉพาะอุโมงค์ที่เป็นอุโมงค์ตรงตลอดความยาว และสามารถคำนวณได้ทั้งรูปร่างของอุโมงค์ที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมและพื้นที่หน้าตัดเป็นลักษณะโค้ง

1.5 การดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาหลักการและกระบวนการในการหาค่าความสว่าง และความส่องสว่างบนพื้นถนนภายในอุโมงค์รถยนต์ตามมาตรฐาน IESNA
2. ศึกษาข้อมูลที่เป็นเพื่อช่วยในการออกแบบระบบแสงสว่างบนพื้นถนนภายในอุโมงค์รถยนต์

3. ศึกษาวิธีการเขียนโปรแกรม เพื่อช่วยในการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์
4. ออกแบบโครงสร้างของโปรแกรมคอมพิวเตอร์
5. พัฒนาโปรแกรมในส่วนของกรคำนวณและการประมวลผล
6. ทดสอบผลการคำนวณ
7. พัฒนาโปรแกรมในส่วนของกรแสดงผล
8. พัฒนาโปรแกรมในส่วนการวิเคราะห์ค่าความส่องสว่างที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการออกแบบระบบแสงสว่างภายในอุโมงค์
9. ปรับปรุงโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมา
10. สรุปผลการวิจัยพร้อมข้อเสนอแนะและจัดทำรายงาน

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ศึกษาวิธีการหาค่าความสว่างและความส่องสว่างบนพื้นถนนภายในอุโมงค์
2. ได้ศึกษาทำความเข้าใจถึงผลของการสะท้อนแสงของผนังภายในอุโมงค์ที่มีผลต่อค่าความสว่างและความส่องสว่างของระบบแสงสว่างบนถนนภายในอุโมงค์
3. ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความส่องสว่างภายในอุโมงค์
4. ได้ศึกษาการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์อย่างละเอียดและสามารถนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นมาใช้งานได้
5. เป็นการนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ในการคำนวณ เพื่อหาค่าความสว่างและความส่องสว่างบนพื้นถนนภายในอุโมงค์
6. สามารถคาดคะเนได้ล่วงหน้าว่าเมื่อติดตั้งตามที่ออกแบบแล้ว จะได้คุณภาพของการส่องสว่างเป็นอย่างไร

1.7 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์แต่ละบทมีดังนี้

- บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบแสงสว่างบนพื้นถนนภายในอุโมงค์
- บทที่ 3 กล่าวถึงการคำนวณความสว่างและความส่องสว่างบนพื้นถนนภายในอุโมงค์
- บทที่ 4 กล่าวถึงการพัฒนาโปรแกรม
- บทที่ 5 กล่าวถึงการใช้โปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้วิเคราะห์ค่าความสว่างและความส่องสว่างบนพื้นถนนภายในอุโมงค์

บทที่ 6 กล่าวถึงการวิเคราะห์ค่าความสว่างและความส่องสว่างบนพื้นถนนภายใน
อุโมงค์

บทที่ 7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบแสงสว่างบนพื้นถนนภายในอุโมงค์

2.1 นิยามที่เกี่ยวข้อง [8,9]

2.1.1 ความเข้มส่องสว่าง (Luminous Intensity)

ความเข้มส่องสว่าง คือความหนาแน่นของฟลักซ์ส่องสว่างในทิศทางหนึ่ง (ปริมาณแสงต่อมุมตัน) มีสัญลักษณ์เป็น I มีหน่วยเป็น candela (cd) แสดงได้ดังสมการ

$$I = \frac{d\phi}{d\Omega} \quad (2.1)$$

2.1.2 ความสว่าง (Illuminance)

ความสว่าง คือ ความหนาแน่นของฟลักซ์ส่องสว่างที่ตกกระทบลงบนพื้นที่ใด ๆ มีค่าเท่ากับปริมาณฟลักซ์ส่องสว่างที่ตกกระทบลงบนพื้นที่หารด้วยขนาดของพื้นที่นั้น มีสัญลักษณ์เป็น E มีหน่วยเป็น lux แสดงได้ดังสมการ

$$E = \frac{d\phi}{dA} \quad (2.2)$$

2.1.3 ความส่องสว่าง (Luminance)

ความส่องสว่าง คือ อัตราส่วนของความเข้มส่องสว่างในทิศทางที่กำหนดที่เกิดจากพื้นที่ย่อยที่ล้อมรอบจุดนั้นต่อพื้นที่ของพื้นผิวย่อยที่ฉายลงบนระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางที่กำหนด มีสัญลักษณ์เป็น L มีหน่วยเป็น cd/m^2 แสดงได้ดังสมการ

$$L = \frac{I}{A_{\perp}} \quad (2.3)$$

โดย A_{\perp} คือ พื้นที่ที่ตั้งฉากกับแนวแสงตกกระทบ

2.1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มส่องสว่าง (I) และความสว่าง (E)

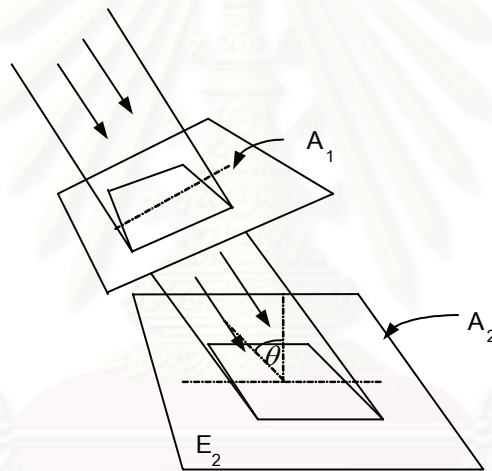
กฎกำลังสองผกผัน (Inverse Square Law)

ค่าความสว่างของจุดบนพื้นที่ที่ตั้งฉากกับแสงตกกระทบบมีค่าเท่ากับความเข้มส่องสว่างในทิศทางที่ไปยังจุดนั้นหารด้วยกำลังสองของระยะทางระหว่างจุดนั้นกับแหล่งกำเนิดแสง ดังสมการ

$$E = \frac{I}{D^2} \quad (2.4)$$

กฎโคไซน์ (Cosine Law)

กฎโคไซน์กล่าวว่า ความสว่างบนพื้นผิวใด ๆ จะแปรโดยตรงกับค่าโคไซน์ของมุมของแสงตกกระทบบ โดยมุมของแสงตกกระทบบ (θ) คือมุมระหว่างเส้นตั้งฉากกับพื้นผิวและทิศทางของแสงตกกระทบบ



รูปที่ 2.1 ลักษณะการใช้ Cosine Law

จากรูปที่ 2.1 ให้ฟลักซ์ส่องสว่างที่ตกกระทบบพื้นผิว A_1 อย่างตั้งฉากมีค่า ϕ จะได้ความสว่างบนพื้นผิว A_1 เท่ากับ E_1

$$E_1 = \frac{\phi}{A_1}$$

ให้ A_2 เป็นพื้นผิวที่แสงตกกระทบบทำมุม (θ) จากรูปที่ 2.1 จะเห็นว่าฟลักซ์ส่องสว่าง ϕ จะตกลงบนพื้นผิว A_2 ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าพื้นผิว A_1 ได้ความสว่าง E_2

$$E_2 = \frac{\phi}{A_2}$$

แต่ $A_2 = \frac{A_1}{\cos \theta}$ ดังนั้น

$$E_2 = \frac{\phi \cos \theta}{A_1}$$

$$E_2 = E_1 \cos \theta \quad (2.5)$$

เราสามารถรวมกฎกำลังสองผกผันและกฎโคไซน์เข้าด้วยกันได้ ดังนี้
เนื่องจาก E_1 เกิดจากฟลักซ์ส่องสว่างที่ตกกระทบพื้นผิวอย่างตั้งฉาก จากสมการที่ (2.4) จะได้

$$E_1 = \frac{I}{D^2}$$

แทนค่าลงในสมการที่ (2.5) จะได้

$$E = \frac{I}{D^2} \cos \theta \quad (2.6)$$

2.1.5 ความส่องสว่างเฉลี่ยบนถนน (Average Luminance ,Lav)

ความส่องสว่างเฉลี่ยบนถนนคือค่าเฉลี่ยของความส่องสว่างของถนนในบริเวณที่พิจารณา

$$L_{av} = \frac{L_{sum}}{N} \quad (2.7)$$

โดย L_{sum} คือ ผลรวมของความส่องสว่างทุกจุดในช่วงที่กำลังพิจารณา

N คือ จำนวนจุดที่พิจารณา

2.1.6 ความสม่ำเสมอรวม (Overall Uniformity , U_0)

$$U_0 = \frac{L_{min}}{L_{av}} \quad (2.8)$$

โดย L_{min} คือ ค่าความส่องสว่างต่ำสุด

L_{av} คือ ค่าความส่องสว่างเฉลี่ย

ถ้าค่าความสม่ำเสมอรวมต่ำ การสังเกตเห็นวัตถุบนผิวถนนจะเป็นไปได้ยาก

2.1.7 ความสม่ำเสมอตามแนวยาว (Longitudinal Uniformity , U_1)

$$U_1 = \frac{L_{min}}{L_{max}} \quad (2.9)$$

โดย L_{min} คือ ค่าความส่องสว่างต่ำสุดของช่องวิ่ง

L_{max} คือ ค่าความส่องสว่างสูงสุดของช่องวิ่ง

ค่า U_1 จะทำให้ผู้ขับขี่รถยนต์มีความสบายตาในขณะที่ขับขึ้นไปตามถนน ถ้าค่า U_1 มีค่าต่ำ ค่าความส่องสว่างของถนนจะน้อยและมากสลับกันไป คล้ายกับเราขับรถผ่านทางม้าลาย ซึ่งจะทำให้ตาลายและอาจเกิดอุบัติเหตุตามมา

2.2 รายละเอียดพื้นที่

2.2.1 ตำแหน่งจุดสังเกต

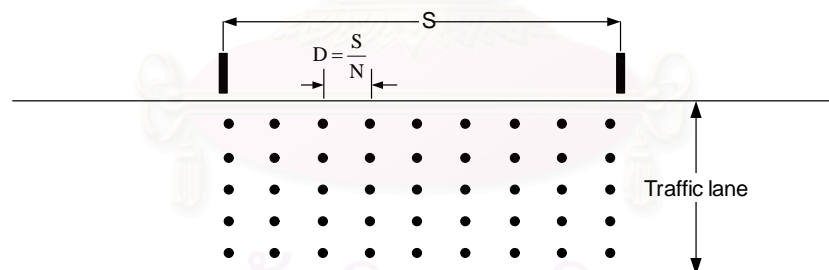
- แนวตามยาวถนนจะอยู่ห่างจากจุดแรกที่จะคำนวณ 60 m. และสูงจากพื้นดิน 1.5 m.
- แนวตามขวางถนน

ถ้าคำนวณ L_{av} และ U_0 จะคิดที่จุดห่างจากขอบซ้ายของถนน เท่ากับ $\frac{1}{4}$ ของ

ความกว้างของถนน

ถ้าคำนวณ U_1 จะคิดที่จุดกึ่งกลางของแต่ละช่องวิ่ง

2.2.2 พื้นที่ที่ใช้ในการคำนวณ



รูปที่ 2.2 จุดที่ต้องคำนวณภายในพื้นที่

โดยที่

S = ช่วงความยาวถนนที่ต้องการคำนวณ

D = ระยะห่างระหว่างจุดที่ต้องการคำนวณ

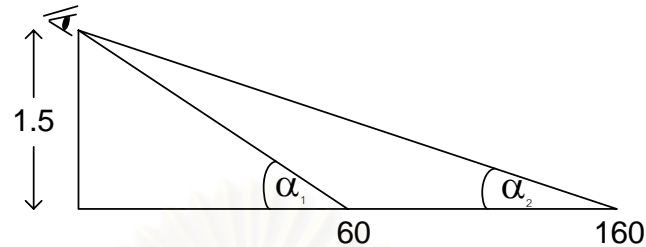
N = จำนวนจุดที่ต้องการคำนวณ

ถ้า

$S \leq 50$ m. ; $N = 10$

$S > 50$ m. ; $D \leq 5$ m.

โดย S มีค่าไม่เกิน 100 เมตร เนื่องจากตำแหน่งจุดสังเกตอยู่สูงจากพื้นถนน 1.5 เมตร ถ้าจุดแรกตามแนวยาวที่จะคำนวณอยู่ที่ 60 เมตร โดยมีจุดสังเกตอยู่ที่ 0 เมตร เนื่องจากระยะ S ไม่เกิน 100 เมตร ดังนั้นจุดสุดท้ายตามแนวยาวที่จะคำนวณอยู่ที่ 160 เมตร จากจุดสังเกต



รูปที่ 2.3 การกำหนดค่ามุมในแนวมอง

จากรูปที่ 2.3 พบว่า

$$\tan \alpha_2 = \frac{1.5}{160}$$

$$\alpha_2 = \tan^{-1}\left(\frac{1.5}{160}\right) = 0.53^\circ$$

$$\tan \alpha_1 = \frac{1.5}{60}$$

$$\alpha_1 = \tan^{-1}\left(\frac{1.5}{60}\right) = 1.43^\circ$$

ตามมาตรฐาน C.I.E. กำหนดให้มุม α อยู่ระหว่าง $0.5^\circ - 1.5^\circ$ ดังนั้นระยะของช่วงถนนที่ใช้ในการคำนวณจึงไม่เกิน 100 เมตร

ส่วนตามขวางถนนจะคำนวณ 5 จุด ต่อ 1 ช่องวิ่ง (lane) โดยจุดแรกอยู่ห่างจากขอบถนนเท่ากับ $\frac{1}{10}$ เท่าของความกว้างช่องวิ่ง และแต่ละจุดห่างกัน $\frac{2}{10}$ เท่าของความกว้างช่องวิ่ง

2.3 ค่าแบ่งประเภทของผิวถนน[9]

2.3.1 ระดับความขรุขระของถนน (Q_0)

$$Q_0 = \frac{\int_0^{\omega_0} q d\omega}{\omega_0} \quad (2.10)$$

โดยที่ q = สัมประสิทธิ์ความส่องสว่าง

ω_0 = มุมตันในทิศทางที่แสงตกกระทบตำแหน่งที่พิจารณานบนพื้นถนน

เมื่อ Q_0 มีค่ามากแสดงว่าพื้นผิวถนนมีความสามารถในการสะท้อนแสงมาก

2.3.2 ระดับของการสะท้อนแสงแบบ Specular (Specularity Factor ,S1)

$$S1 = \frac{r(0,2)}{r(0,0)} \quad (2.11)$$

โดยที่ $r(0,2)$ = Reduced Luminance Coefficient ที่ $\beta = 0$ และ $\tan \gamma = 2$

$r(0,0)$ = Reduced Luminance Coefficient ที่ $\beta = 0$ และ $\tan \gamma = 0$

ตารางที่ 2.1 การแบ่งประเภทของพื้นผิวถนน แบบ R-Classification

ประเภท	S1	S1 มาตรฐาน	Q ₀ ปกติ
R1	$S1 < 0.42$	0.25	0.10
R2	$0.42 \leq S1 < 0.85$	0.58	0.07
R3	$0.85 \leq S1 < 1.35$	1.11	0.07
R4	$1.35 \leq S1$	1.55	0.08

- ถนน R1 คือ ถนนคอนกรีตที่การสะท้อนแสงของผิวถนนจะเป็นแบบ Diffuse และ $Q_0 = 0.10$
- ถนน R2 คือ ถนนลาดยางที่ผิวถนนมีลักษณะหยาบ การสะท้อนแสงของผิวถนนเป็นแบบ Diffuse และ $Q_0 = 0.07$
- ถนน R3 คือ ถนนลาดยางที่ผิวถนนค่อนข้างเรียบ การสะท้อนแสงของผิวถนนเป็นแบบ Specular เล็กน้อย $Q_0 = 0.07$
- ถนน R4 คือ ถนนลาดยางที่ผิวถนนเรียบหรือขัดมัน การสะท้อนแสงของผิวถนนเป็นแบบ Specular และ $Q_0 = 0.08$

ตารางที่ 2.2 การแบ่งประเภทของพื้นผิวถนน แบบ N-Classification

ประเภท	S1	S1 มาตรฐาน	Q ₀ ปกติ
N1	$S1 < 0.28$	0.18	0.10
N2	$0.28 \leq S1 < 0.6$	0.41	0.07
N3	$0.60 \leq S1 < 1.30$	0.88	0.07
N4	$1.30 \leq S1$	1.61	0.08

จะพบว่าทั้ง R – Classification และ N – Classification จะแบ่งออกเป็น 4 class ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การแบ่งประเภท (class) ของผิวถนน

Class	Material
1.	<ul style="list-style-type: none"> -Asphaltic type road surface containing either at least 15 percent artificial brightener or at least 30 percent very bright anorthosites. -Surface dressing containing chippings that cover over 80 percent of the road surface , where the chippings mainly consist of either artificial brightener or are 100 percent very bright anorthosites. -Concrete road surfaces.
2.	<ul style="list-style-type: none"> - Surface dressing having a harsh texture and containing normal aggregates. - Asphaltic surfaces containing 10 to 15 percent artificial brighteners. - Coarse and harsh asphaltic concrete,rich in gravel (>60%) of sizes up to or greater than 10 mm. - New condition mastic asphalt.
3.	<ul style="list-style-type: none"> - Asphaltic concrete (cold asphalt , mastic asphalt) having gravel size up to 10 mm , but of a harsh texture (similar to sand paper) - Polished ,coarse textured ,surface dressing.
4.	<ul style="list-style-type: none"> - Mastic asphalt after some months of use. - Road surfaces having a rather smooth or polished texture.

ตารางที่ 2.4 การแบ่งประเภทของพื้นผิวถนน แบบ C-Classification

ประเภท	S1	S1 มาตรฐาน	Q ₀ ปกติ
C1	$S1 < 0.4$	0.24	0.10
C2	$S1 \geq 0.85$	0.97	0.07

- ถนน C1 คือ ถนนคอนกรีตที่การสะท้อนแสงของผิวถนนจะเป็นแบบ Diffuse และ $Q_0 = 0.10$
- ถนน C2 คือ ถนนลาดยางที่การสะท้อนแสงของผิวถนนเป็นแบบ Specular และ $Q_0 = 0.07$

ตารางที่ 2.5 การแบ่งประเภทของพื้นผิวถนน แบบ W-Classification

ประเภท	S1	Q_0 ปกติ
W1	$S'1 < 9.6$	0.11
W2	$9.6 \leq S'1 < 26.5$	0.15
W3	$26.5 \leq S'1 < 73$	0.20
W4	$73 \leq S'1$	0.25

โดยที่ ถ้า $S1 > 1$

$$\log\left(\frac{S'1}{0.147}\right) = \frac{\log\left(\frac{S1}{0.147}\right)}{1 - \frac{Q_0}{0.687}}$$

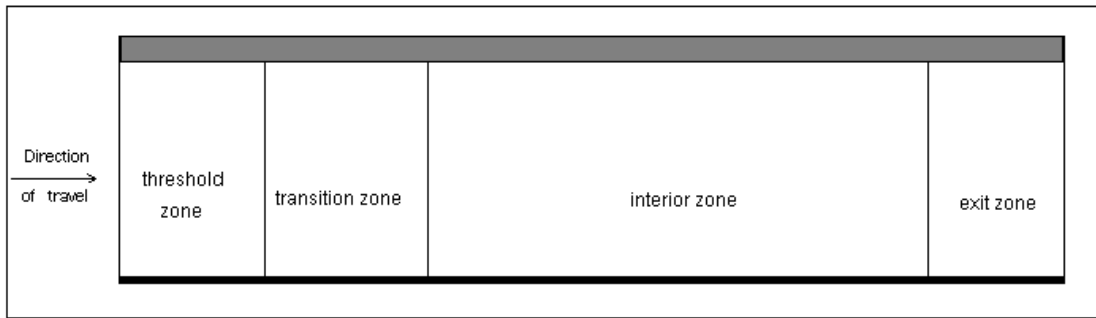
ถ้า $S1 \leq 1$

$$S'1 = S1$$

โดยรายละเอียดของผิวถนนในแต่ละประเภท แสดงในภาคผนวก ข

2.4 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับอุโมงค์ [1]

การออกแบบระบบแสงสว่างภายในอุโมงค์ในตอนกลางวันจะไม่สามารถออกแบบให้มีระดับแสงสว่างเท่ากับแสงสว่างภายนอกอุโมงค์ได้ตลอดช่วงความยาวของอุโมงค์จึงต้องแบ่งอุโมงค์ตามแนวยาวของอุโมงค์เป็นช่วง ๆ เพื่อใช้ในการออกแบบระบบแสงสว่างภายในอุโมงค์ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การแบ่งอุโมงค์เพื่อใช้ในการออกแบบระบบแสงสว่างภายในอุโมงค์

ในวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาเฉพาะอุโมงค์ยาว (Long Tunnel) คือ อุโมงค์ที่มีความยาวทั้งหมดของอุโมงค์มากกว่าค่าระยะที่เห็นและหยุดได้อย่างปลอดภัยที่ความเร็วใด ๆ (Safe-Stopping-Sight Distance ,SSSD) ตามตารางที่ 2.6 และเป็นอุโมงค์ตรงตลอดความยาวของอุโมงค์

ตารางที่ 2.6 ค่า Safe-Stopping-Sight Distance ที่ความเร็วต่าง ๆ

AASHTO STOPPING SIGHT DISTANCE (Wet Pavement)	
Traffic Speed (estimated km/h)	Estimate Safe Stopping Sight Distance (SSSD)
Kilometers per Hour	Meters
50	60
60	90
80	140
90	160
100	190
110	220

AASHTO คือ American of State Highway and Transportation officials

ช่วงต่าง ๆ ของอุโมงค์ที่แบ่งไว้จะมีความสำคัญที่แตกต่างกัน ดังต่อไปนี้

- Threshold Zone เป็นช่วงแรกของอุโมงค์ โดยช่วงนี้จะมีความยาวเท่ากับ SSSD เพื่อที่จะทำให้ผู้ขับขี่มีความปลอดภัยที่ความเร็วที่กำหนด โดยปกติตาของผู้ขับขี่ที่เข้ามาในบริเวณทางเข้าอุโมงค์จะต้องปรับสายตาจากระดับแสงสว่างที่มีระดับสูงในตอนกลางวัน โดยช่วงนี้จะเป็นช่วงแรกที่จะช่วยในการปรับสายตาจากระดับแสงสว่างที่มีระดับสูงในตอนกลางวัน ซึ่งถ้าระดับแสงสว่างภายในอุโมงค์มีค่าต่ำกว่าระดับแสงสว่างภายนอกอุโมงค์มาก ๆ จะทำให้ผู้ขับขี่ไม่สามารถมองเห็นรายละเอียด

ละเอียดของสิ่งกีดขวางภายในอุโมงค์ได้ทำให้เกิดอุบัติเหตุได้ง่าย โดยระดับแสงสว่างในส่วนท้ายของช่วงนี้จะเป็นระดับแสงสว่างในช่วงต้นของ Transition Zone

- Transition Zone เป็นช่วงของอุโมงค์ที่ต่อมาจากช่วง Threshold Zone ซึ่งระดับแสงสว่างในช่วงนี้จะค่อย ๆ ลดลงเรื่อย ๆ เนื่องจากในช่วงนี้ตาของผู้ขับขี่จะเริ่มปรับตัวให้เข้ากับระดับแสงสว่างภายในอุโมงค์ได้ โดยช่วงนี้จะมีความยาวเท่ากับ SSSD โดยระดับแสงสว่างในส่วนท้ายของช่วงนี้จะเป็นระดับแสงสว่างในช่วงต้นของ Interior Zone

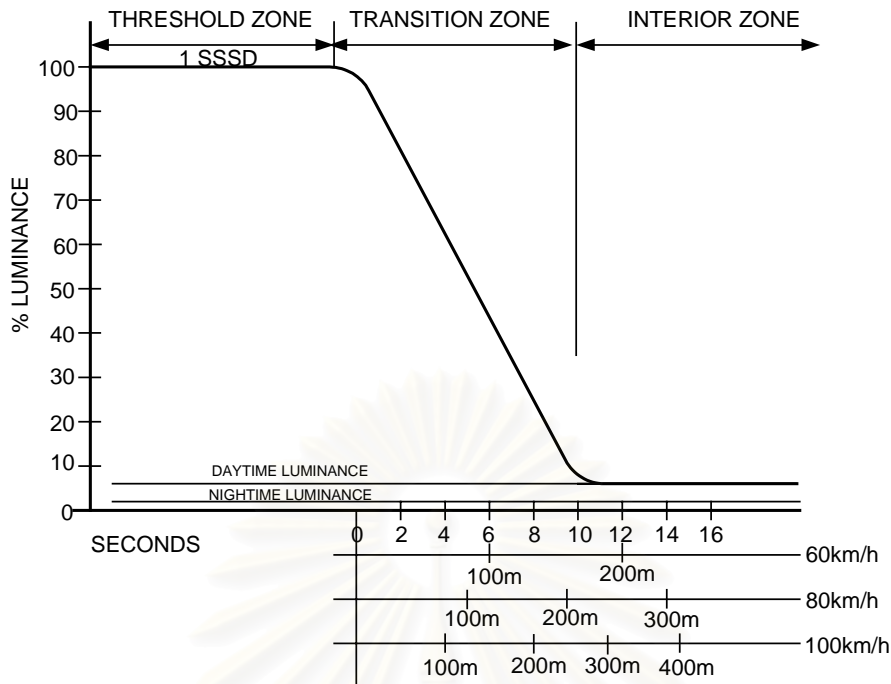
- Interior Zone เป็นช่วงของอุโมงค์ที่ต่อมาจากช่วง Transition Zone ระดับแสงสว่างในช่วงนี้จะคงที่ตลอดความยาวช่วง เนื่องจากในช่วงนี้ตาของผู้ขับขี่สามารถปรับสายตาได้อย่างสมบูรณ์แล้ว โดยระดับแสงสว่างในส่วนท้ายของช่วงนี้จะเป็นระดับแสงสว่างในช่วงต้นของ Exit Zone

- Exit Zone เป็นช่วงสุดท้ายของอุโมงค์ที่ต่อมาจากช่วง Interior Zone ถึงแม้ระดับแสงสว่างในช่วงนี้จะไม่ไ้เป็นระดับแสงสว่างที่มีผลต่อการมองเห็นและความปลอดภัยของผู้ขับขี่เท่ากับช่วง Threshold Zone, Transition Zone และ Interior Zone เนื่องจากสิ่งกีดขวางในช่วงนี้ผู้ขับขี่จะมองเห็นได้อย่างชัดเจนอันเนื่องจากรีระดับแสงสว่างจากภายนอกอุโมงค์เป็นฉากหลังให้วัตถุ แต่ก็ต้องมีระบบแสงสว่างในช่วงนี้ไว้เพื่อในกรณีฉุกเฉินที่จำเป็นต้องเปลี่ยนด้านทางออกของอุโมงค์ให้เป็นทางเข้าอุโมงค์และทำให้ผู้ขับขี่สามารถมองเห็นรถคันหลังจากกระจกมองหลังได้

2.5 มาตรฐานในการออกแบบระบบแสงสว่างภายในอุโมงค์[1]

การออกแบบระบบแสงสว่างภายในอุโมงค์จะเป็นไปตามมาตรฐาน IESNA โดยในการออกแบบระบบแสงสว่างภายในอุโมงค์นั้นความส่องสว่างในช่วง Threshold Zone , Transition Zone และ Interior Zone เป็นช่วงที่มีผลต่อการมองเห็นและความปลอดภัยของผู้ขับขี่เป็นอย่างมาก ซึ่งลักษณะของความส่องสว่างในช่วงเหล่านี้ต้องมีลักษณะใกล้เคียงตามกราฟในรูปที่ 2.5

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.5 การลดลงของค่าความส่องสว่างในช่วง Threshold Zone, Transition Zone และ Interior Zone

ความส่องสว่างที่ออกแบบยอมให้มีความคลาดเคลื่อนจากค่าความส่องสว่างฐานนั้นคือ ค่าความส่องสว่างที่ 100% ของ Threshold zone ในรูปที่ 2.5 อยู่ที่ $\pm 20\%$

โดยในแกน X จะเป็นระยะทางจากทางเข้าอุโมงค์จนถึงระยะทางภายในเวลา 16 วินาที นับตั้งแต่เริ่มเข้ามาอยู่ในช่วง Transition Zone ที่ผู้ขับขี่สามารถเดินทางได้ โดยระยะทางเหล่านี้ขึ้นอยู่กับความเร็วในการขับขี่

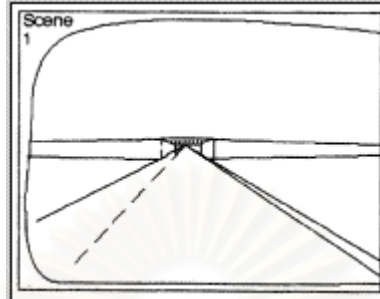
ส่วนในแกน Y จะเป็นค่าความส่องสว่างที่ทำให้ผู้ขับขี่เห็นสิ่งกีดขวางภายในอุโมงค์ได้อย่างชัดเจน ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อค่าความส่องสว่างนี้คือ

- ความส่องสว่างรอบ ๆ ทางเข้าอุโมงค์
- ลักษณะทางภูมิศาสตร์
- ลักษณะภูมิอากาศ
- แนวของอุโมงค์
- ความเร็วของผู้ขับขี่
- ปริมาณของรถ
- วัสดุที่ใช้ภายในโครงสร้างของอุโมงค์
- ทิศทางการเดินทาง

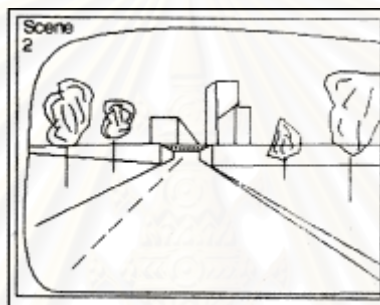
2.5.1 ความส่องสว่างใน Threshold Zone

ค่าความส่องสว่างใน Threshold Zone หาได้ดังต่อไปนี้

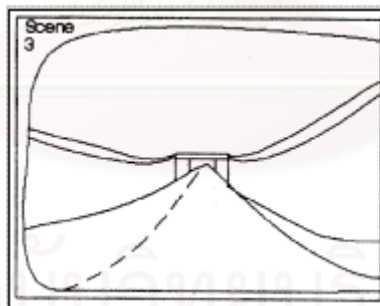
- กำหนดลักษณะฉากหลังของอุโมงค์ตามรูปที่ 2.6-2.13 โดยให้ใกล้เคียงกับลักษณะฉากหลังของอุโมงค์ที่ต้องการออกแบบระบบแสงสว่าง



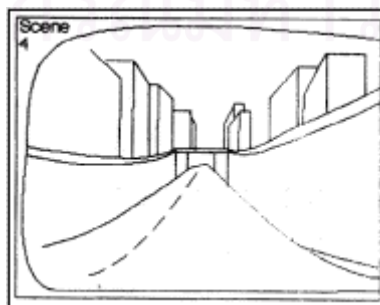
รูปที่ 2.6 ฉากหลังแบบที่ 1



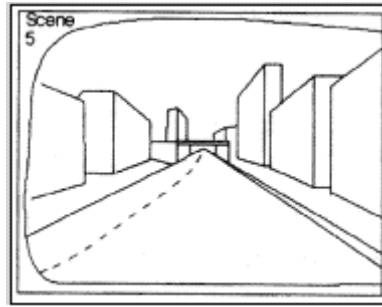
รูปที่ 2.7 ฉากหลังแบบที่ 2



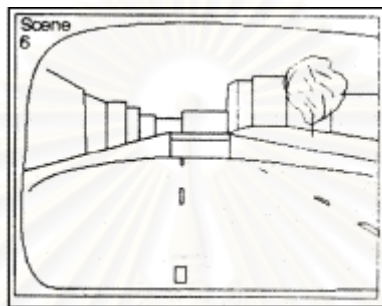
รูปที่ 2.8 ฉากหลังแบบที่ 3



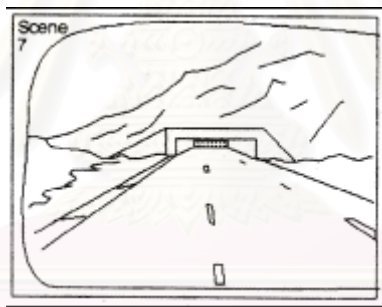
รูปที่ 2.9 ฉากหลังแบบที่ 4



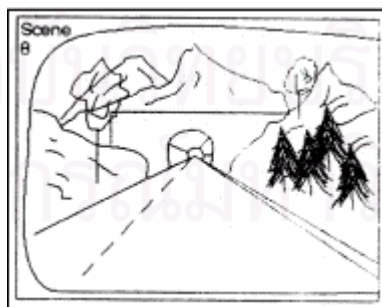
รูปที่ 2.10 ฉากหลังแบบที่ 5



รูปที่ 2.11 ฉากหลังแบบที่ 6



รูปที่ 2.12 ฉากหลังแบบที่ 7



รูปที่ 2.13 ฉากหลังแบบที่ 8

- กำหนดความเร็วของผู้ขับขี่และทิศทางการเดินทาง แล้วอ่านค่าความส่องสว่างในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ความส่องสว่างที่แนะนำในช่วง Threshold Zone

Recommended Daytime Maintained Average Pavement Luminance Levels in the Threshold Zone of Vehicular Tunnel				
Approach Characteristics	Traffic Speed	Driver Direction		
	km/h	North	East-West	South
		cd/m ²		
<u>Open Road</u> Scene 1,2,3	100	250	310	370
	80	220	260	320
	60	180	220	270
<u>Urban Road</u> Scene 4,5,6	100	320	280	310
	80	280	240	270
	60	230	200	220
<u>Mountain Tunnel</u> Scene 7,8	100	230	200	200
	80	200	170	170
	60	170	140	140

โดยค่าความส่องสว่างที่ได้เป็นค่าความส่องสว่างที่ 100% ของช่วง Threshold Zone ตามกราฟรูปที่ 2.5

2.5.2 ความส่องสว่างในช่วง Interior Zone

ค่าความส่องสว่างในช่วง Interior Zone สามารถทราบได้จากตารางที่ 2.8

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.8 ความส่องสว่างที่แนะนำในช่วง Interior Zone

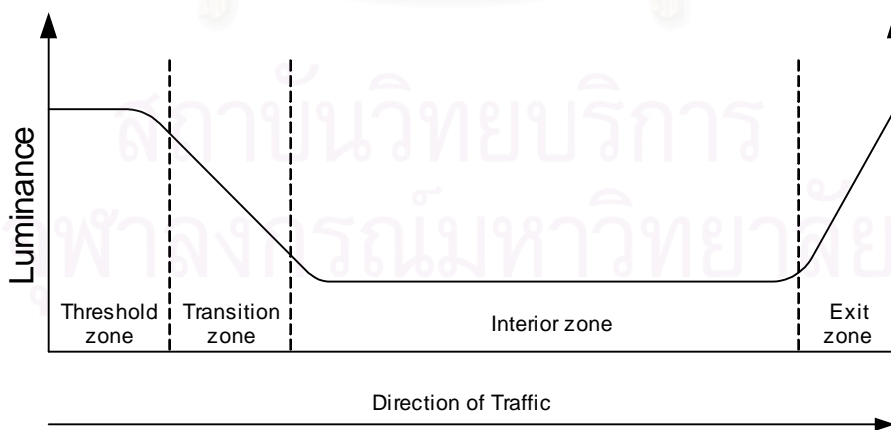
Interior zone average road surface luminance in cd/m ²			
Traffic Speed	Traffic Flow		
	Low ≤ 2,400AADT	Medium > 2,400AADT < 24,000AADT	Heavy ≥ 24,000AADT
100 km/h	6	8	10
80 km/h	4	6	8
60 km/h	3	4	6

AADT คือ จำนวนยานพาหนะรายวันเฉลี่ยต่อปีที่ผ่านมาอุโมงค์ภายใน 24 ชั่วโมง (Average Annual Daily Traffic)

2.5.3 ความส่องสว่างในตอนกลางคืน

ค่าความส่องสว่างในตอนกลางคืน เนื่องจากตาของผู้ขับขี่ไม่จำเป็นต้องปรับสายตามากเหมือนตอนกลางวัน ค่าความส่องสว่างต่ำสุดที่แนะนำโดยรวมคือ 2.5 cd/m²

โดยลักษณะของความส่องสว่างโดยรวมในแต่ละช่วงของอุโมงค์แสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ลักษณะของความส่องสว่างในแต่ละช่วงของอุโมงค์

2.6 ค่าความสม่ำเสมอ (Uniformity Ratio)

ค่าความสม่ำเสมอของความส่องสว่างบนพื้นถนนภายในอุโมงค์เป็นสิ่งจำเป็นที่ใช้ยืนยันความเพียงพอของความส่องสว่างที่ช่วยในการปรับสายตา โดยดวงโคมแต่ละดวงทำให้เกิดความส่องสว่างที่รูปแบบไม่เหมือนกันขึ้นอยู่กับรูปแบบการกระจายแสงและระยะห่างจากจุดที่คำนวณกับดวงโคม ในมาตรฐาน IESNA[1] กำหนดให้

$$U_0 \geq 0.5$$

$$U_1 \geq 0.29$$

ซึ่งค่าเหล่านี้ได้มาจากความเห็นที่ตรงกันของผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบระบบแสงสว่างภายในอุโมงค์

2.7 ดวงโคมที่ใช้ในระบบแสงสว่างภายในอุโมงค์

ในระบบแสงสว่างภายในอุโมงค์สามารถจำแนกชนิดดวงโคมได้ 3 ประเภท

1. Symmetrical – Transverse lighting เป็นดวงโคมที่มีการกระจายความเข้มส่องสว่างสมมาตรในแนวขวางอุโมงค์ ข้อดีของดวงโคมชนิดนี้คือ ให้การมองเห็นที่ดี ทำให้เกิดแสงจ้า (glare) น้อยที่สุด และง่ายต่อการสับเปลี่ยนดวงโคม ส่วนข้อเสียคือระยะห่างระหว่างดวงโคมน้อย ทำให้ต้องติดตั้งดวงโคมหลายดวง

2. Symmetrical – Longitudinal lighting เป็นดวงโคมที่มีการกระจายความเข้มส่องสว่างสมมาตรตามแนวยาวของอุโมงค์ ข้อดีของดวงโคมชนิดนี้คือ มีประสิทธิภาพสูงและสามารถติดตั้งดวงโคมให้ระยะห่างระหว่างดวงโคมมาก ๆ ได้นั่นคือทำให้ไม่ต้องใช้ดวงโคมมาก ส่วนข้อเสียคือ อาจเกิดเงาได้ และระดับแสงสว่างไม่สม่ำเสมอ

3. Asymmetrical – Counterbeam lighting เป็นดวงโคมที่มีการกระจายความเข้มส่องสว่างแบบไม่สมมาตรโดยการกระจายแสงส่วนใหญ่มีทิศทางที่ตรงข้ามกับทิศทางทางการเดินรถ ข้อดีของดวงโคมชนิดนี้คือ มีประสิทธิภาพสูง และมีความแตกต่างของความส่องสว่าง (Contrast) สูง ส่วนข้อเสียคือ อาจเกิดเงาได้ และระดับแสงสว่างไม่สม่ำเสมอ

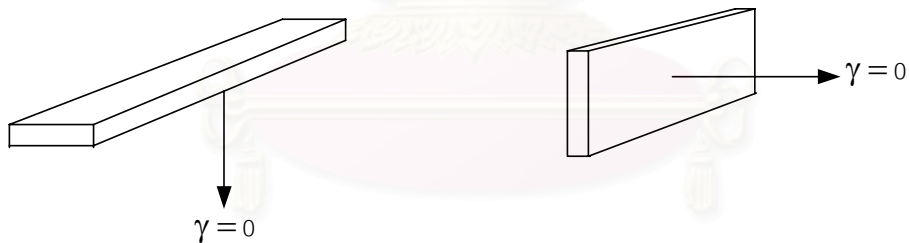
โดยรายละเอียดของดวงโคมชนิดต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 รายละเอียดของดวงโคมทั้ง 3 ชนิด

Typical light distribution of the lamp		Max Sp/m.h. ratio	Prefered Lamp type	Efficiency Cd/W ($q_0=0.1$)
Symmetrical-transversal		1.5	TLD	2.0
			SOX-E	4.0
		2.0	SON-T	2.5
Symmetrical-axial		3.5	SOX-E	4.5
		4	SON-T	3.5-4
Asymmetrical-counterbeam		2-2.5	SON-T	4.5

ตัวอย่างของดวงโคมที่ใช้ในระบบแสงสว่างภายในอุโมงค์แสดงในภาคผนวก ก

ในวิทยานิพนธ์นี้ จะกำหนดให้แนวของมุม $\gamma = 0$ องศา แสดงดังรูปที่ 2.15



ก. ดวงโคมติดเพดาน

ข. ดวงโคมติดผนัง

รูปที่ 2.15 การกำหนดแนวของมุม $\gamma = 0$ องศา

ส่วนแนวของระนาบ C ที่ 0 องศา จะขึ้นอยู่กับผู้ผลิตดวงโคมว่าจะกำหนดให้แนวใดเป็นของระนาบ C ที่ 0 องศา

2.8 ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบระบบแสงสว่างภายในอุโมงค์

ในการคำนวณเพื่อที่จะหาความสว่างและความส่องสว่างบนพื้นถนนภายในอุโมงค์นั้นมีความยุ่งยากและซับซ้อนในการคำนวณเนื่องจากต้องคำนึงถึงการสะท้อนแสงของพื้นผิวของผนัง

และเพดานของอุโมงค์ ในการคำนวณจึงมีปัจจัยหลายอย่างรวมทั้งความสัมพันธ์ที่ต้องนำมาพิจารณาในการคำนวณ ดังนี้

- พื้นผิวของผนังและเพดานของอุโมงค์จะต้องทำการแบ่งออกเป็นพื้นที่เล็ก ๆ (Discretization) พื้นที่ที่แบ่งได้มาจะมีความส่องสว่างที่เกิดขึ้นโดยตรงจากดวงโคม ความส่องสว่างนี้ขึ้นกับลักษณะการกระจายความเข้มส่องสว่างของดวงโคม, ความสัมพันธ์เชิงตำแหน่งของดวงโคมและของพื้นผิวย่อยของอุโมงค์, ลักษณะการสะท้อนแสงของพื้นที่ที่แบ่ง และจุดของผู้สังเกต
- ความส่องสว่างบนพื้นถนนจะต้องคำนวณจากแสงที่ส่องโดยตรงจากดวงโคม (Direct component) การสะท้อนจากพื้นที่ย่อยของอุโมงค์ (Indirect component) ด้วย
- รูปร่างของอุโมงค์โดยพื้นที่หน้าตัดอาจจะเป็นรูปสี่เหลี่ยม หรืออาจจะเป็นรูปร่างหลาย ๆ แบบรวมเข้าด้วยกัน
- ความส่องสว่างบนพื้นผิวใด ๆ จะเพิ่มขึ้นจากการสะท้อนครั้งแรก เนื่องจากได้รับการสะท้อนครั้งที่ 2 และการสะท้อนที่จะตามมาของพื้นผิวอื่น ๆ ซึ่งเป็นพื้นที่ที่ได้รับแสงด้วย นั่นคือการสะท้อนแสงหลายหนของแสงสว่างระหว่าง discrete zone ทั้งหมด ภายในอุโมงค์ตามรูปแบบของผนังและเพดาน
- ความแน่นอนของการคำนวณจะขึ้นอยู่กับขนาดของพื้นที่ที่ทำการแบ่ง ถ้าทำการแบ่งพื้นที่เล็ก ๆ จำนวนมาก จะทำให้ความแน่นอนของการคำนวณเพิ่มขึ้น แต่จะทำให้ยิ่งใช้เวลามากขึ้นด้วย

การคำนวณค่าความสว่างและความส่องสว่างบนพื้นถนน ณ จุดที่กำหนดจะมีขั้นตอนการคำนวณดังต่อไปนี้

1. คำนวณค่าความสว่างและความส่องสว่างจาก Direct component จากดวงโคมดวงแรก โดยใช้กฎกำลังสองผกผันและกฎโคไซน์
2. คำนวณค่าจาก Direct component จากดวงโคมดวงอื่น ๆ จนครบทุกดวงที่มีผลและรวมค่าที่ได้จาก Direct component เป็น Total direct component
3. แบ่งพื้นผิวของผนังและเพดานให้เป็นพื้นที่ย่อย โดยจะทำการแบ่งพื้นที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือใกล้เคียงรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสเนื่องจากการแบ่งพื้นที่ให้เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสจะทำให้มีความละเอียดและความสม่ำเสมอของพื้นที่ ซึ่งพื้นที่เหล่านี้จะเป็นตัวสะท้อนแสงที่มาจากดวงโคมแต่ละดวงไปยังจุดที่กำหนดบนพื้นถนน ทำการระบุขนาดของพื้นที่ย่อย และตำแหน่งจุดศูนย์กลางของพื้นที่ย่อยแต่ละพื้นที่
4. คำนวณความสว่างในระนาบของพื้นที่ย่อยแรกที่จุดศูนย์กลางของพื้นที่โดยคิดผลจากโคมแต่ละดวงรวมกันทำซ้ำกับพื้นที่ย่อยแต่ละชั้นจนครบ

5. อาศัยข้อมูลลักษณะการสะท้อนแสงของพื้นผิวคูโงมค์ทำการคำนวณหาความเข้มส่องสว่างที่ออกจากพื้นที่ย่อยไปยังจุดที่กำหนด โดยเปรียบเสมือนว่าพื้นที่ย่อยเป็นดวงโคม
6. คำนวณค่าความสว่างและความส่องสว่างบนพื้นถนน ณ จุดที่กำหนดที่เกิดจากแสงสะท้อนจากพื้นที่ย่อยแต่ละชั้น ทำจนครบทุกชั้นและรวมผลลัพธ์เป็น Total Indirect component
7. ทำซ้ำในข้อ 5,6 เพื่อหา Total Indirect component บนจุดอื่น ๆ บนพื้นถนน ซึ่งเป็นคำนวณสำหรับการสะท้อนครั้งแรก
8. คำนวณความสว่างบนระนาบพื้นที่ย่อยแรกที่จุดศูนย์กลางของพื้นที่ย่อย โดยคิดผลจากแสงสะท้อนจากพื้นที่ย่อยที่เหลือแต่ละพื้นที่ย่อย (โดยเปรียบเสมือนว่าพื้นที่ย่อยที่เหลือเป็นดวงโคมที่สะท้อนแสงไปยังพื้นที่ย่อยแรก) ทำกับพื้นที่ย่อยที่เหลือจนครบทุกชั้น
9. อาศัยข้อมูลลักษณะการสะท้อนแสงของพื้นผิวคูโงมค์ทำการคำนวณหาความเข้มส่องสว่างที่ออกจากพื้นที่ย่อยไปยังจุดที่กำหนด โดยเปรียบเสมือนว่าพื้นที่ย่อยเป็นดวงโคม
10. คำนวณค่าความสว่างและความส่องสว่างบนพื้นถนน ณ จุดที่กำหนดที่เกิดจากแสงสะท้อนจากการสะท้อนของพื้นที่ย่อย
11. ทำซ้ำในข้อ 9,10 เพื่อหา Total Indirect component บนจุดอื่น ๆ บนพื้นถนน ซึ่งเป็นการคำนวณสำหรับการสะท้อนระหว่างพื้นที่ย่อยแต่ละชั้น
12. ทำซ้ำข้อ 8,9,10,11 จนกระทั่งความสว่างเฉลี่ยระหว่างการสะท้อนครั้งปัจจุบันกับครั้งก่อนหน้าบนพื้นที่ที่ทำการคำนวณมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก [ตามเงื่อนไขที่กำหนด]
13. ทำการแบ่งพื้นที่ย่อยให้มีความละเอียดมากขึ้น
14. ทำซ้ำข้อ 4-13 จนกระทั่งความสว่างเฉลี่ยระหว่างการแบ่งพื้นที่ครั้งปัจจุบันกับครั้งก่อนหน้าบนพื้นที่ที่ทำการคำนวณมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก [ตามเงื่อนไขที่กำหนด]

บทที่ 3

การคำนวณความสว่างและความส่องสว่างบนพื้นถนนภายในอุโมงค์

การคำนวณความสว่างและความส่องสว่างที่จุดบนพื้นถนนภายในอุโมงค์ที่กล่าวถึงในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ วิธีจุดต่อจุด (Point By Point) โดยค่าความสว่างและความส่องสว่างที่เกิดขึ้นบนพื้นถนนภายในอุโมงค์เป็นผลเนื่องจากแสงที่ส่องโดยตรงจากดวงโคม (Direct component) และส่วนที่เกิดจากการสะท้อนของพื้นที่ย่อยที่ได้ทำแบ่งพื้นผิวของผนังและเพดาน (Indirect Component) ซึ่งพื้นที่เหล่านี้จะเป็นตัวสะท้อนแสงที่มาจากดวงโคมแต่ละดวงไปยังจุดที่กำหนดบนพื้นถนน

โดยในการคำนวณความสว่างและความส่องสว่างกำหนดให้

L = ตำแหน่งของดวงโคม

- L_x = ตำแหน่งของดวงโคมในแนวแกน X
- L_y = ตำแหน่งของดวงโคมในแนวแกน Y
- L_z = ตำแหน่งของดวงโคมในแนวแกน Z

P = ตำแหน่งของจุดที่กำลังพิจารณา

- P_x = ตำแหน่งของจุดที่กำลังพิจารณาในแนวแกน X
- P_y = ตำแหน่งของจุดที่กำลังพิจารณาในแนวแกน Y
- P_z = ตำแหน่งของจุดที่กำลังพิจารณาในแนวแกน Z = 0

Ob = ตำแหน่งของจุดผู้สังเกต

- Ob_x = ตำแหน่งของจุดผู้สังเกตในแนวแกน X
- Ob_y = ตำแหน่งของจุดผู้สังเกตในแนวแกน Y
- Ob_z = ตำแหน่งอ้างอิงของจุดผู้สังเกตในแนวแกน Z = 0

Z = ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางของพื้นที่ย่อย

- Z_x = ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางของพื้นที่ย่อยในแนวแกน X
- Z_y = ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางของพื้นที่ย่อยในแนวแกน Y
- Z_z = ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางของพื้นที่ย่อยในแนวแกน Z

R = พิกัดบนแนวเวกเตอร์ของระนาบ C เท่ากับ 0 องศา

R_g = พิกัดบนแนวเวกเตอร์ของมุม γ เท่ากับ 0 องศา

N_p = พิกัดบนแนวเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับพื้นผิวถนน

- $N_{px} = P_x$
- $N_{py} = P_y$
- $N_{pz} = 1$

N_z = พิกัดบนแนวเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับพื้นที่ย่อย

L_p = ความส่องสว่างบนจุดที่กำลังพิจารณา (Luminance – $cd./m^2$)

E_p = ความสว่างบนจุดที่กำลังพิจารณา (Illuminance – Lux)

L_z = ความส่องสว่างบนพื้นที่ย่อยที่กำลังพิจารณา (Luminance – $cd./m^2$)

E_z = ความสว่างบนพื้นที่ย่อยที่กำลังพิจารณา (Illuminance – Lux)

γ = มุมของแนวแสงเมื่อเทียบกับมุม γ เท่ากับ 0 องศา

C = ระนาบของแนวแสงเมื่อเทียบกับแนวระนาบ C เท่ากับ 0 องศา

β = มุมระหว่างระนาบแสงตกกระทบบ (ด้านที่แสงสะท้อนออก) กับระนาบสังเกต

β' = มุมระหว่างระนาบแสงตกกระทบบ (ด้านที่แสงตกกระทบบ) กับระนาบสังเกต

α = มุมสังเกตของผู้ขับยานพาหนะเหนือพื้นถนน

γ_R = มุมระหว่างเส้นตั้งฉากของพื้นผิวกับทิศทางของแสงตกกระทบบ

$I(C, \gamma)$ = ความเข้มส่องสว่างบนระนาบ C ที่มุม γ

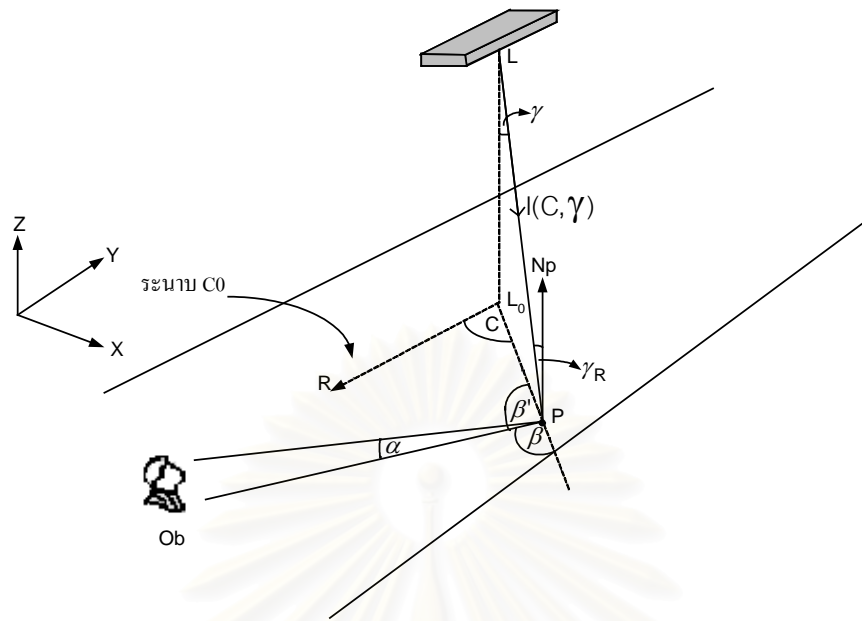
$\alpha(\beta, \gamma_R)$ = สัมประสิทธิ์ความส่องสว่างของผิวถนน (Luminance Coefficient)

$r(\beta, \gamma_R)$ = สัมประสิทธิ์ความส่องสว่างแบบลดรูปของผิวถนน (Reduced Luminance Coefficient)

3.1 การคำนวณในส่วนของ Direct Component

การหาค่าความส่องสว่างและความส่องสว่างที่จุดบนพื้นถนนภายในคู่มือโดยแสงที่ส่องมาจากดวงโคมโดยตรง ในการคำนวณความส่องสว่างและความส่องสว่างในส่วนของ Direct component จะทำการแยกพิจารณาตามลักษณะการติดตั้งของดวงโคม ดังต่อไปนี้

3.1.1 ดวงโคมที่ติดตั้งไว้บนเพดานของอุโมงค์ (ดวงโคมไม่มีมุมเอียง)



รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของการให้แสงสว่างบนพื้นถนนจากดวงโคมที่ติดบนเพดาน

ความสว่างที่จุด P บนพื้นถนนในอุโมงค์ ดังรูปที่ 3.1

$$E_p = \frac{I(C, \gamma) \cos \gamma_R}{D^2} \quad (3.1)$$

โดยที่ $D = \frac{H}{\cos \gamma_R}$

แทนค่า D ในสมการที่ (3.1) ได้

$$E_p = \frac{I(C, \gamma) \cos^3 \gamma_R}{H^2} \quad (3.2)$$

เมื่อ D = ระยะทางระหว่างจุด P กับดวงโคม

H = ความสูงของดวงโคมเหนือจุด P

ความส่องสว่างที่จุด P บนพื้นถนนภายในอุโมงค์ ดังรูปที่ 3.1

$$L = q \cdot E \quad (3.3)$$

แทนค่า E ในสมการที่ (3.2) ในสมการที่ (3.3) ได้

$$L = q(\beta, \gamma_R) \cdot \frac{I(C, \gamma) \cos^3 \gamma_R}{H^2}$$

$$L = r(\beta, \gamma_R) \cdot \frac{I(C, \gamma)}{H^2} \quad (3.4)$$

ในการคำนวณหาค่า C และมุม γ กำหนดให้

ตำแหน่งของจุด L_0 ในรูปที่ 3.1

$$\text{ให้ } L_0x = Lx$$

$$L_0y = Ly$$

$$L_0z = 0$$

กำหนดตำแหน่งของ R ในรูปที่ 3.1

- ถ้าแนวระนาบ C ที่ 0 องศาอยู่ในแนวแกน $+X$

$$\text{ให้ } Rx = Lx+1$$

$$Ry = Ly$$

$$Rz = 0$$

- ถ้าแนวระนาบ C ที่ 0 องศาอยู่ในแนวแกน $-X$

$$\text{ให้ } Rx = Lx-1$$

$$Ry = Ly$$

$$Rz = 0$$

- ถ้าแนวระนาบ C ที่ 0 องศาอยู่ในแนวแกน $+Y$

$$\text{ให้ } Rx = Lx$$

$$Ry = Ly+1$$

$$Rz = 0$$

- ถ้าแนวระนาบ C ที่ 0 องศาอยู่ในแนวแกน $-Y$

$$\text{ให้ } Rx = Lx$$

$$Ry = Ly-1$$

$$Rz = 0$$

จากรูปที่ 3.1 จะพบว่า

$$P\vec{L}_0 \cdot R\vec{L}_0 = |P\vec{L}_0| |R\vec{L}_0| \cdot \cos C$$

$$\cos C = \frac{P\vec{L}_0 \cdot R\vec{L}_0}{|P\vec{L}_0| |R\vec{L}_0|}$$

$$C = \cos^{-1} \left(\frac{P\vec{L}_0 \cdot R\vec{L}_0}{|P\vec{L}_0| |R\vec{L}_0|} \right)$$

(3.5)

$$L_0\vec{L} \cdot P\vec{L} = |L_0\vec{L}| |P\vec{L}| \cdot \cos \gamma$$

$$\cos \gamma = \frac{L_0 \vec{L} \cdot P \vec{L}}{|L_0 \vec{L}| |P \vec{L}|}$$

$$\gamma = \cos^{-1} \left(\frac{L_0 \vec{L} \cdot P \vec{L}}{|L_0 \vec{L}| |P \vec{L}|} \right) \quad (3.6)$$

$$\gamma_R = \gamma \quad (3.7)$$

$$L_0 \vec{P} \cdot Ob \vec{P} = |L_0 \vec{P}| |Ob \vec{P}| \cdot \cos \beta'$$

$$\cos \beta' = \frac{L_0 \vec{P} \cdot Ob \vec{P}}{|L_0 \vec{P}| |Ob \vec{P}|}$$

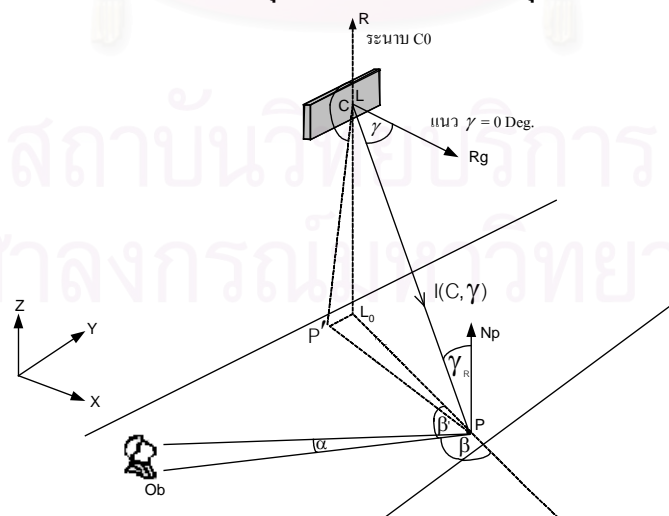
$$\beta' = \cos^{-1} \left(\frac{L_0 \vec{P} \cdot Ob \vec{P}}{|L_0 \vec{P}| |Ob \vec{P}|} \right)$$

$$\beta = 180 - \beta' \quad (3.8)$$

จากค่า C ในสมการที่ (3.5) และมุม γ ในสมการที่ (3.6) นำไปคำนวณหาค่า Luminous Intensity จากตาราง Luminous Intensity ของดวงโคม แล้วนำไปหาค่าความส่องสว่างจากดวงโคมที่ติดบนเพดานอุโมงค์ที่จุด P ตามสมการที่ (3.2)

มุม γ_R ในสมการที่ (3.7) และมุม β ในสมการที่ (3.8) นำไปคำนวณหาค่า Reduced Luminance Coefficient จากตารางของผิวดนที่กำหนด แล้วนำไปหาค่าความส่องสว่างจากดวงโคมที่ติดบนเพดานอุโมงค์ที่จุด P ตามสมการที่ (3.4)

3.1.2 ดวงโคมที่ติดตั้งไว้บนผนังของอุโมงค์ (ดวงโคมไม่มีมุมเอียง)



รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของการให้แสงสว่างบนพื้นถนนจากดวงโคมที่ติดบนผนัง

โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณความสว่างและความส่องสว่างบนจุด P จะเป็นไปตามสมการที่ (3.2) และ (3.4)

ในการคำนวณหาค่า C และมุม γ กำหนดให้

กำหนดตำแหน่งของจุด R ในรูปที่ 3.2

- ถ้าแนวระนาบ C ที่ 0 องศาอยู่ในแนวแกน +Y

$$\text{ให้ } R_x = L_x$$

$$R_y = L_y + 1$$

$$R_z = L_z$$

- ถ้าแนวระนาบ C ที่ 0 องศาอยู่ในแนวแกน -Y

$$\text{ให้ } R_x = L_x$$

$$R_y = L_y - 1$$

$$R_z = L_z$$

- ถ้าแนวระนาบ C ที่ 0 องศาอยู่ในแนวแกน +Z

$$\text{ให้ } R_x = L_x$$

$$R_y = L_y$$

$$R_z = L_z + 1$$

- ถ้าแนวระนาบ C ที่ 0 องศาอยู่ในแนวแกน -Z

$$\text{ให้ } R_x = L_x$$

$$R_y = L_y$$

$$R_z = L_z - 1$$

- ตำแหน่งของจุด L_0 ในรูปที่ 3.2

$$\text{ให้ } L_{0x} = L_x$$

$$L_{0y} = L_y$$

$$L_{0z} = 0$$

กำหนดตำแหน่งของจุด R_g ในรูปที่ 3.2

- ถ้าดวงโคมติดตั้งอยู่บนผนังด้านซ้าย

$$\text{ให้ } R_{gx} = L_x + 1$$

$$R_{gy} = L_y$$

$$R_{gz} = L_z$$

- ถ้าดวงโคมติดตั้งอยู่บนผนังด้านขวา

$$\text{ให้ } R_{gx} = L_x - 1$$

$$Rgy = Ly$$

$$Rgz = Lz$$

กำหนดตำแหน่งของจุด P' ในรูปที่ 3.2

$$\text{ให้ } P'x = Lx$$

$$P'y = Py$$

$$P'z = 0$$

กำหนดตำแหน่งของจุด Np ในรูปที่ 3.2

$$\text{ให้ } Npx = Px$$

$$Npy = Py$$

$$Npz = 1$$

จากรูปที่ 3.2 จะพบว่า

$$R\vec{L} \cdot P'\vec{L} = |R\vec{L}| |P'\vec{L}| \cdot \cos C$$

$$\cos C = \frac{R\vec{L} \cdot P'\vec{L}}{|R\vec{L}| |P'\vec{L}|}$$

$$C = \cos^{-1} \left(\frac{R\vec{L} \cdot P'\vec{L}}{|R\vec{L}| |P'\vec{L}|} \right) \quad (3.9)$$

$$Rg\vec{L} \cdot P\vec{L} = |Rg\vec{L}| |P\vec{L}| \cdot \cos \gamma$$

$$\cos \gamma = \frac{Rg\vec{L} \cdot P\vec{L}}{|Rg\vec{L}| |P\vec{L}|}$$

$$\gamma = \cos^{-1} \left(\frac{Rg\vec{L} \cdot P\vec{L}}{|Rg\vec{L}| |P\vec{L}|} \right) \quad (3.10)$$

$$Np\vec{P} \cdot L\vec{P} = |Np\vec{P}| |L\vec{P}| \cdot \cos \gamma_R$$

$$\cos \gamma_R = \frac{Np\vec{P} \cdot L\vec{P}}{|Np\vec{P}| |L\vec{P}|}$$

$$\gamma_R = \cos^{-1} \left(\frac{Np\vec{P} \cdot L\vec{P}}{|Np\vec{P}| |L\vec{P}|} \right) \quad (3.11)$$

$$L_0\vec{P} \cdot Ob\vec{P} = |L_0\vec{P}| |Ob\vec{P}| \cdot \cos \beta'$$

$$\cos \beta' = \frac{L_0 \vec{P} \cdot Ob \vec{P}}{|L_0 \vec{P}| |Ob \vec{P}|}$$

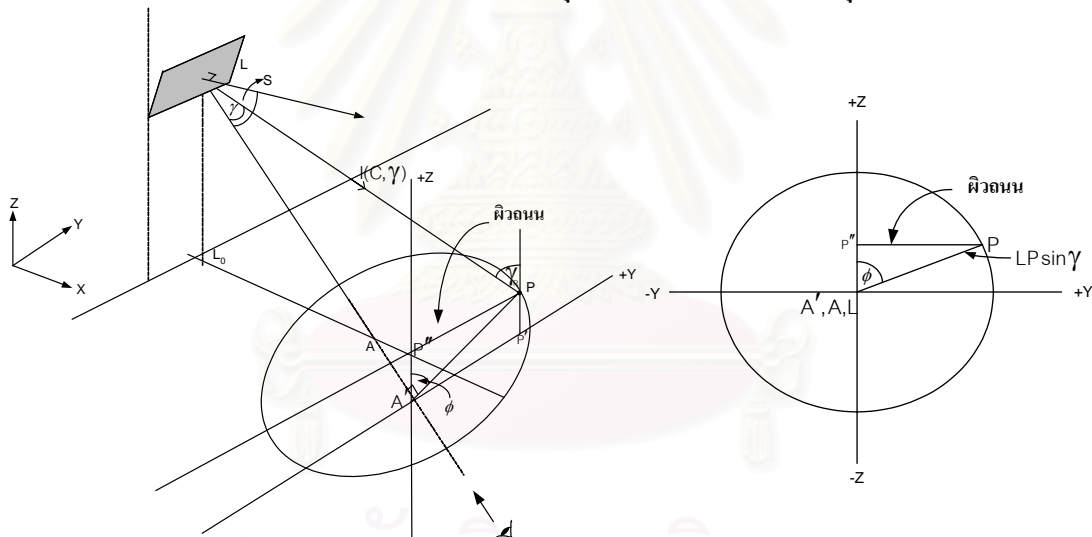
$$\beta' = \cos^{-1} \left(\frac{L_0 \vec{P} \cdot Ob \vec{P}}{|L_0 \vec{P}| |Ob \vec{P}|} \right)$$

$$\beta = 180 - \beta' \quad (3.12)$$

จากค่า C ในสมการที่ (3.9) และมุม γ ในสมการที่ (3.10) นำไปคำนวณหาค่า Luminous Intensity จากตาราง Luminous Intensity ของดวงโคม แล้วนำไปหาค่าความสว่างตามสมการที่ (3.2)

มุม γ_r ในสมการที่ (3.11) และ มุม β ในสมการที่ (3.12) นำไปคำนวณหาค่า Reduced Luminance Coefficient จากตารางของพิกอนที่กำหนด แล้วนำไปหาค่าความส่องสว่างจากดวงโคมที่ติดบนผนังอุโมงค์ที่จุด P ตามสมการที่ (3.4)

3.1.3 ดวงโคมที่ติดตั้งไว้บนเพดานเอียงของอุโมงค์หรือดวงโคมที่มีมุมเอียง



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของการให้แสงสว่างบนพื้นถนนจากดวงโคมที่ติดบนเพดานเอียงหรือดวงโคมที่มีมุมเอียง

โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณความสว่างและความส่องสว่างบนจุด P จะเป็นไปตามสมการที่ (3.2) และ (3.4)

โดย

$$Ax = \text{ตำแหน่งของจุดเล็งในแนวแกน X}$$

$$Ay = \text{ตำแหน่งของจุดเล็งในแนวแกน Y}$$

$$Az = \text{ตำแหน่งของจุดเล็งในแนวแกน Z} = 0$$

ถ้าดวงโคมติดตั้งอยู่บนเพดานเอียงด้านซ้าย

$$\begin{aligned} \text{ให้ } A_x &= L_x + \frac{L_z}{\tan S} \\ A_y &= L_y \\ A_z &= 0 \end{aligned}$$

ถ้าดวงโคมติดตั้งอยู่บนเพดานเอียงด้านขวา

$$\begin{aligned} \text{ให้ } A_x &= L_x - \frac{L_z}{\tan S} \\ A_y &= L_y \\ A_z &= 0 \end{aligned}$$

จากรูปที่ 3.3 จะพบว่า

$$\begin{aligned} \vec{A} \cdot \vec{P} &= |\vec{A}| |\vec{P}| \cdot \cos \gamma \\ \cos \gamma &= \frac{\vec{A} \cdot \vec{P}}{|\vec{A}| |\vec{P}|} \\ \gamma &= \cos^{-1} \left(\frac{\vec{A} \cdot \vec{P}}{|\vec{A}| |\vec{P}|} \right) \end{aligned} \quad (3.13)$$

สำหรับการคำนวณมุม C นั้นต้องลากเส้นต่อจากเส้น LA จนกระทั่งตั้งฉากกับเส้นตรงที่ลากจากจุด P ที่จุด A' แล้วสร้างเป็นกรวยโดยให้จุด A' เป็นจุดศูนย์กลางดังรูปที่ 3.3

$$\phi = \sin^{-1} \left(\frac{PP''}{LP \sin \gamma} \right)$$

โดยที่ $PP'' = P_y - A_y$

ในกรณีที่ดวงโคมมีการกระจายความเข้มส่องสว่างในลักษณะสมมาตรในแนวระนาบ C0-180 จะแบ่งการพิจารณาดังนี้

- $P_x > A_x$ และ $P_y > A_y$

- แนวระนาบ C ที่ 0 องศา อยู่ในแนวแกน +Z

$$C = \phi$$

- แนวระนาบ C ที่ 0 องศา อยู่ในแนวแกน -Z

$$C = 180 - \phi$$

- แนวระนาบ C ที่ 0 องศา อยู่ในแนวแกน +Y

$$C = 90 - \phi$$

- แนวระนาบ C ที่ 0 องศา อยู่ในแนวแกน -Y

$$C = 90 + \phi$$

- $P_x > A_x$ และ $P_y \leq A_y$

- แนวระนาบ C ที่ 0 องศา อยู่ในแนวแกน +Z

$$C = \phi$$

- แนวระนาบ C ที่ 0 องศา อยู่ในแนวแกน -Z

$$C = 180 - \phi$$

- แนวระนาบ C ที่ 0 องศา อยู่ในแนวแกน +Y

$$C = 90 + \phi$$

- แนวระนาบ C ที่ 0 องศา อยู่ในแนวแกน -Y

$$C = 90 - \phi$$

- $P_x \leq A_x$ และ $P_y < A_y$

- แนวระนาบ C ที่ 0 องศา อยู่ในแนวแกน +Z

$$C = 180 - \phi$$

- แนวระนาบ C ที่ 0 องศา อยู่ในแนวแกน -Z

$$C = \phi$$

- แนวระนาบ C ที่ 0 องศา อยู่ในแนวแกน +Y

$$C = 90 + \phi$$

- แนวระนาบ C ที่ 0 องศา อยู่ในแนวแกน -Y

$$C = 90 - \phi$$

- $P_x \leq A_x$ และ $P_y \geq A_y$

- แนวระนาบ C ที่ 0 องศา อยู่ในแนวแกน +Z

$$C = 180 - \phi$$

- แนวระนาบ C ที่ 0 องศา อยู่ในแนวแกน -Z

$$C = \phi$$

- แนวระนาบ C ที่ 0 องศา อยู่ในแนวแกน +Y

$$C = 90 - \phi$$

- แนวระนาบ C ที่ 0 องศา อยู่ในแนวแกน -Y

$$C = 90 + \phi$$

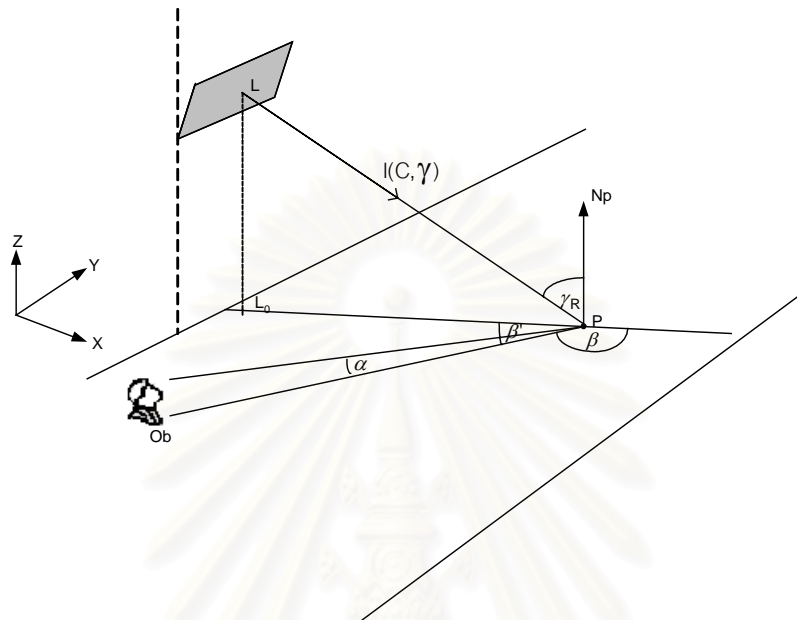
(3.14)

จากรูปที่ 3.4 จะพบว่า

$$N_p \vec{P} \cdot L \vec{P} = |N_p \vec{P}| |L \vec{P}| \cdot \cos \gamma_R$$

$$\cos \gamma_R = \frac{N_p \vec{P} \cdot L \vec{P}}{|N_p \vec{P}| |L \vec{P}|}$$

$$\gamma_R = \cos^{-1} \left(\frac{N_p \vec{P} \cdot L \vec{P}}{|N_p \vec{P}| |L \vec{P}|} \right) \quad (3.15)$$



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของการให้แสงสว่างบนพื้นถนนจากดวงโคม
ที่ติดบนเพดานเอียงหรือดวงโคมที่มีมุมเอียง

- ตำแหน่งของจุด L_0 ในรูปที่ 3.4

ให้

$$\begin{aligned} L_0 x &= Lx \\ L_0 y &= Ly \\ L_0 z &= 0 \end{aligned}$$

$$L_0 \vec{P} \cdot Ob \vec{P} = |L_0 \vec{P}| |Ob \vec{P}| \cdot \cos \beta'$$

$$\cos \beta' = \frac{L_0 \vec{P} \cdot Ob \vec{P}}{|L_0 \vec{P}| |Ob \vec{P}|}$$

$$\beta' = \cos^{-1} \left(\frac{L_0 \vec{P} \cdot Ob \vec{P}}{|L_0 \vec{P}| |Ob \vec{P}|} \right)$$

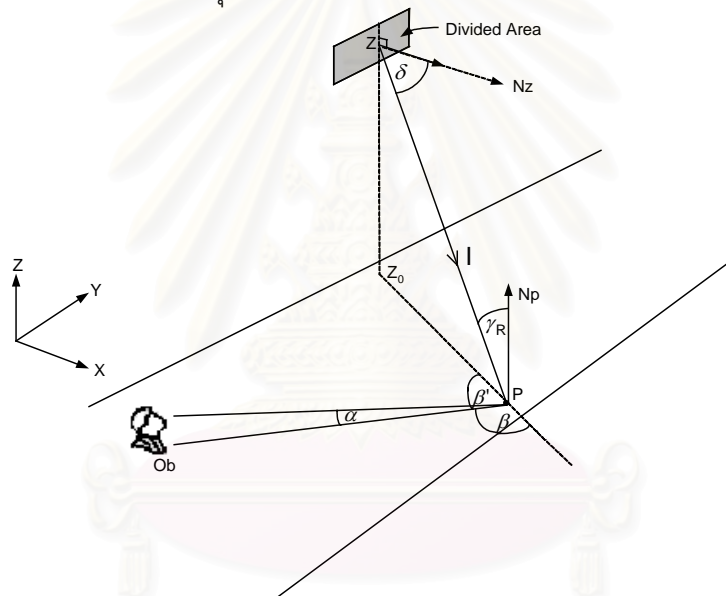
$$\beta = 180 - \beta' \quad (3.16)$$

มุม γ ในสมการที่ (3.13) และค่า C ในสมการที่ (3.14) นำไปคำนวณหาค่า Luminous Intensity จากตาราง Luminous Intensity ของดวงโคม แล้วนำไปหาค่าความส่องสว่างจากดวงโคมที่ติดบนเพดานเฉียงของอุโมงค์หรือดวงโคมที่มีมุมเอียงที่จุด P บนพื้นถนนตามสมการที่ (3.2)

มุม γ_R ในสมการที่ (3.15) และ มุม β ในสมการที่ (3.16) นำไปคำนวณหาค่า Reduced Luminance Coefficient จากตารางของผิวถนนที่กำหนด แล้วนำไปหาค่าความส่องสว่างจากดวงโคมที่ติดบนผนังเฉียงของอุโมงค์หรือดวงโคมที่มีมุมเอียงที่จุด P ตามสมการที่ (3.4)

3.2 การคำนวณในส่วนของ Indirect Component

เป็นการหาค่าความส่องสว่างและความส่องสว่างที่จุดบนพื้นถนนภายในอุโมงค์จากพื้นที่ย่อยที่ได้แบ่งพื้นผิวของผนังและเพดานอุโมงค์



รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของการให้แสงสว่างบนพื้นถนนจาก ส่วนของ Indirect Component

ความส่องสว่างที่จุด P บนพื้นถนนในอุโมงค์ ดังรูปที่ 3.5

$$E_p = \frac{I \cos \gamma_R}{D^2} \tag{3.17}$$

โดยที่ $D = \frac{H}{\cos \gamma_R}$

แทนค่า D ในสมการที่ (3.17) ได้

$$E_p = \frac{I \cos^3 \gamma_R}{H^2} \tag{3.18}$$

- เมื่อ I = ความเข้มส่องสว่าง (Luminous Intensity) จากพื้นที่ย่อย Z ที่ส่องไปจุด P
 D = ระยะทางระหว่างจุด P กับพื้นที่ย่อย
 H = ความสูงของพื้นที่ย่อยเหนือจุด P

ความส่องสว่างที่จุด P บนพื้นถนนภายในอุโมงค์ ดังรูปที่ 3.5

$$L_p = q \cdot E \quad (3.19)$$

แทนค่า E ในสมการที่ (3.18) ในสมการที่ (3.19) ได้

$$L_p = q(\beta, \gamma_R) \cdot \frac{I \cos^3 \gamma_R}{H^2}$$

$$L_p = r(\beta, \gamma_R) \cdot \frac{I}{H^2} \quad (3.20)$$

โดยสามารถหาค่า I ได้ดังนี้

$$L_z = \frac{f(r) \cdot E_z}{\pi} \quad (3.21)$$

โดยที่ $f(r)$ = Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF)

เนื่องจากในวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาเฉพาะพื้นผิวที่มีการแพร่กระจาย (Diffusing) อย่างสมบูรณ์ เพราะฉะนั้นค่าความส่องสว่างบนพื้นที่ย่อยจะได้

$$L_z = \frac{\rho \cdot E_z}{\pi} \quad (3.22)$$

โดย ρ = ค่าการสะท้อนแสง (diffuse reflectance factor)

$$I' = L_z \cdot A$$

$$I = I' \cdot \cos \delta$$

$$I = L_z \cdot A \cdot \cos \delta \quad (3.23)$$

โดย I' = ความเข้มส่องสว่างที่ตั้งฉากกับพื้นที่ย่อย (cd.)

δ = มุมระหว่างแนวตั้งฉากของพื้นที่ย่อยกับแนวของความเข้มส่องสว่างที่ส่องไปยังจุด P

A = พื้นที่ของพื้นที่ย่อยที่กำลังพิจารณา

นำค่า I จากสมการที่ (3.23) แทนค่าลงในสมการที่ (3.18) และสมการที่ (3.20) จะได้

$$E_p = \frac{L_z \cdot A \cdot \cos \delta \cos^3 \gamma_R}{H^2} \quad (3.24)$$

$$L_p = r(\beta, \gamma_R) \cdot \frac{L_z \cdot A \cdot \cos \delta}{H^2} \quad (3.25)$$

ตำแหน่งของ N_z ในรูปที่ 3.5 จะสามารถหาได้ในขั้นตอนการแบ่งพื้นที่ผนังและเพดานอุโมงค์ให้เป็นพื้นที่ย่อย

จากรูปที่ 3.5 จะพบว่า

กำหนดให้ตำแหน่งของจุด Z_0 ในรูปที่ 3.5

$$\begin{aligned} \text{ให้ } Z_0x &= Zx \\ Z_0y &= Zy \\ Z_0z &= 0 \end{aligned}$$

กำหนดให้ตำแหน่งของจุด Np ในรูปที่ 3.5

$$\begin{aligned} \text{ให้ } Npx &= Px \\ Npy &= Py \\ Npz &= 1 \end{aligned}$$

จากรูปที่ 3.5 จะพบว่า

$$\begin{aligned} P\vec{Z} \cdot Nz\vec{Z} &= |P\vec{Z}| |Nz\vec{Z}| \cdot \cos \delta \\ \cos \delta &= \frac{P\vec{Z} \cdot Nz\vec{Z}}{|P\vec{Z}| |Nz\vec{Z}|} \\ \delta &= \cos^{-1} \left(\frac{P\vec{Z} \cdot Nz\vec{Z}}{|P\vec{Z}| |Nz\vec{Z}|} \right) \end{aligned} \quad (3.26)$$

$$\begin{aligned} Np\vec{P} \cdot Z\vec{P} &= |Np\vec{P}| |Z\vec{P}| \cdot \cos \gamma_R \\ \cos \gamma_R &= \frac{Np\vec{P} \cdot Z\vec{P}}{|Np\vec{P}| |Z\vec{P}|} \\ \gamma_R &= \cos^{-1} \left(\frac{Np\vec{P} \cdot Z\vec{P}}{|Np\vec{P}| |Z\vec{P}|} \right) \end{aligned} \quad (3.27)$$

$$\begin{aligned} Z_0\vec{P} \cdot Ob\vec{P} &= |Z_0\vec{P}| |Ob\vec{P}| \cdot \cos \beta' \\ \cos \beta' &= \frac{Z_0\vec{P} \cdot Ob\vec{P}}{|Z_0\vec{P}| |Ob\vec{P}|} \\ \beta' &= \cos^{-1} \left(\frac{Z_0\vec{P} \cdot Ob\vec{P}}{|Z_0\vec{P}| |Ob\vec{P}|} \right) \\ \beta &= 180 - \beta' \end{aligned} \quad (3.28)$$

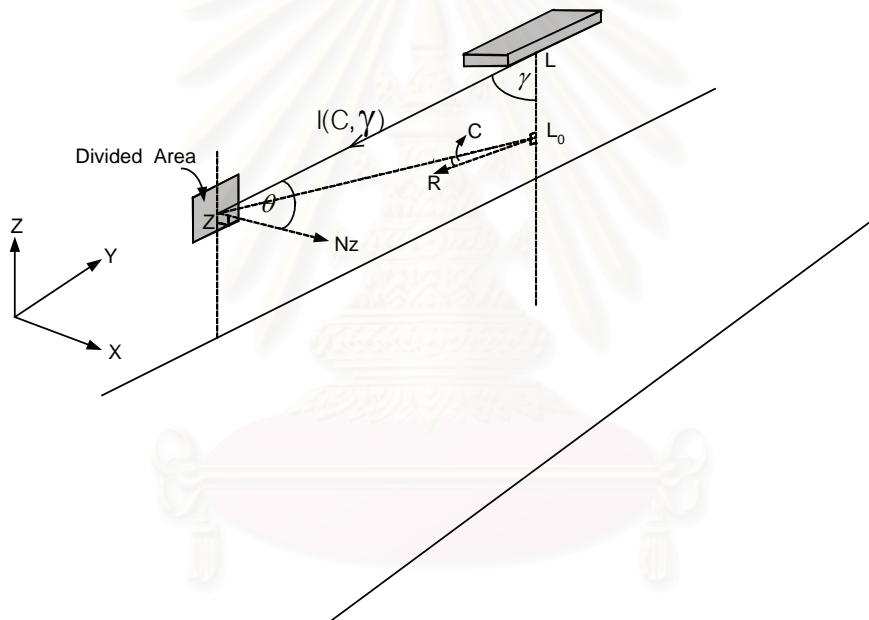
จากค่า δ ในสมการที่ (3.26) และมุม γ_R ในสมการที่ (3.27) นำไปหาค่าความสว่างจากพื้นที่ย่อยตามสมการที่ (3.24)

มุม γ_r ในสมการที่ (3.27) และมุม β ในสมการที่ (3.28) นำไปคำนวณหาค่า Reduced Luminance Coefficient จากตารางของนิพจน์ที่กำหนด แล้วนำไปหาค่าความส่องสว่างจากพื้นที่ย่อยที่จุด P ตามสมการที่ (3.25)

3.3 การคำนวณความสว่างบนพื้นที่ย่อยจากดวงโคม

เป็นการหาค่าความสว่างบนพื้นที่ย่อยซึ่งพื้นที่เหล่านี้เป็นตัวสะท้อนแสงที่มาจากดวงโคม แต่ละดวงไปยังจุดที่กำหนดบนพื้นถนน ในการคำนวณความสว่างบนพื้นที่ย่อยจะทำการแยกพิจารณาตามลักษณะการติดตั้งของดวงโคม ดังต่อไปนี้

3.3.1 ดวงโคมที่ติดตั้งไว้บนเพดานของอุโมงค์ (ดวงโคมไม่มีมุมเอียง)



รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของการให้แสงสว่างบนพื้นที่ย่อยจากดวงโคมที่ติดบนเพดาน

จากรูปที่ 3.6

ให้ θ = มุมระหว่างเส้นตั้งฉากของพื้นที่ย่อยกับทิศทางของแสงตกกระทบพื้นที่ย่อย ความสว่างบนพื้นที่ย่อย ดังรูปที่ 3.6

$$E_z = \frac{I(C, \gamma) \cos \theta}{D^2} \quad (3.29)$$

เมื่อ D = ระยะทางระหว่างจุดศูนย์กลางของพื้นที่ย่อยกับดวงโคม

ในการคำนวณหาค่า C และมุม γ ในรูปที่ 3.6

กำหนดตำแหน่งของจุด L_0

$$\begin{aligned} \text{ให้ } L_0x &= Lx \\ L_0y &= Ly \\ L_0z &= Zz \end{aligned}$$

กำหนดตำแหน่งของจุด R

- ถ้าแนวระนาบ C ที่ 0 องศาอยู่ในแนวแกน +X

$$\begin{aligned} \text{ให้ } Rx &= Lx+1 \\ Ry &= Ly \\ Rz &= Zz \end{aligned}$$

- ถ้าแนวระนาบ C ที่ 0 องศาอยู่ในแนวแกน -X

$$\begin{aligned} \text{ให้ } Rx &= Lx-1 \\ Ry &= Ly \\ Rz &= Zz \end{aligned}$$

- ถ้าแนวระนาบ C ที่ 0 องศาอยู่ในแนวแกน +Y

$$\begin{aligned} \text{ให้ } Rx &= Lx \\ Ry &= Ly+1 \\ Rz &= Zz \end{aligned}$$

- ถ้าแนวระนาบ C ที่ 0 องศาอยู่ในแนวแกน -Y

$$\begin{aligned} \text{ให้ } Rx &= Lx \\ Ry &= Ly-1 \\ Rz &= Zz \end{aligned}$$

ตำแหน่งของ Nz ในรูปที่ 3.6 จะสามารถหาได้ในขั้นตอนการแบ่งพื้นที่อุโมงค์ให้เป็นพื้นที่ย่อย จากรูปที่ 3.6 จะพบว่า

$$\begin{aligned} Z\vec{L}_0 \cdot R\vec{L}_0 &= |Z\vec{L}_0| |R\vec{L}_0| \cdot \cos C \\ \cos C &= \frac{Z\vec{L}_0 \cdot R\vec{L}_0}{|Z\vec{L}_0| |R\vec{L}_0|} \end{aligned}$$

$$C = \cos^{-1} \left(\frac{Z\vec{L}_0 \cdot R\vec{L}_0}{|Z\vec{L}_0| |R\vec{L}_0|} \right) \quad (3.30)$$

$$L_0\vec{L} \cdot Z\vec{L} = |L_0\vec{L}| |Z\vec{L}| \cdot \cos \gamma$$

$$\cos \gamma = \frac{L_0 \vec{L} \cdot Z \vec{L}}{|L_0 \vec{L}| |Z \vec{L}|}$$

$$\gamma = \cos^{-1} \left(\frac{L_0 \vec{L} \cdot Z \vec{L}}{|L_0 \vec{L}| |Z \vec{L}|} \right) \quad (3.31)$$

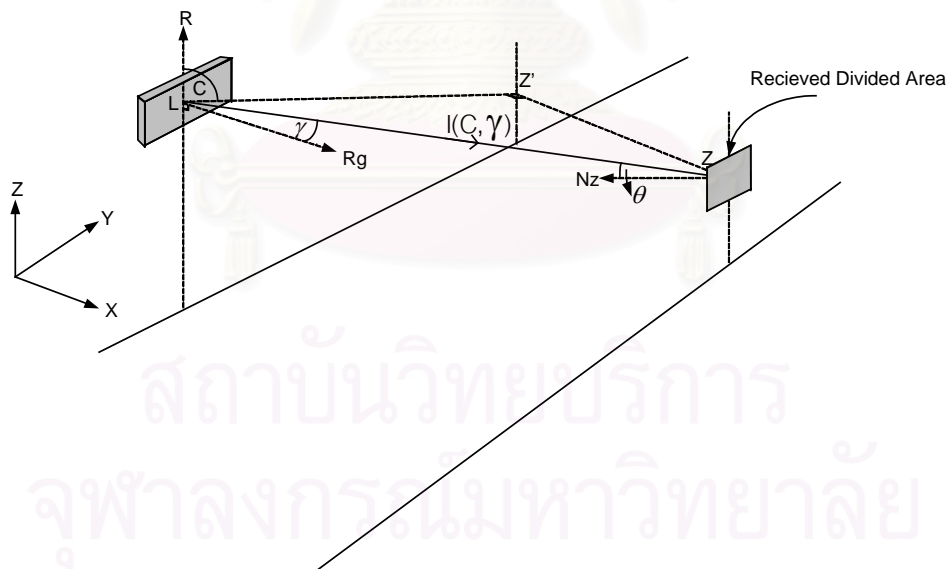
$$Nz \vec{Z} \cdot L \vec{Z} = |Nz \vec{Z}| |L \vec{Z}| \cdot \cos \theta$$

$$\cos \theta = \frac{Nz \vec{Z} \cdot L \vec{Z}}{|Nz \vec{Z}| |L \vec{Z}|}$$

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{Nz \vec{Z} \cdot L \vec{Z}}{|Nz \vec{Z}| |L \vec{Z}|} \right) \quad (3.32)$$

จากค่า C ในสมการที่ (3.30) และมุม γ ในสมการที่ (3.31) นำไปคำนวณหาค่า Luminous Intensity จากตาราง Luminous Intensity ของดวงโคม แล้วนำไปหาค่าความสว่าง จากดวงโคมที่ติดบนเพดานอุโมงค์บนพื้นที่ย่อย ตามสมการที่ (3.29)

3.3.2 ดวงโคมที่ติดตั้งไว้บนผนังของอุโมงค์ (ดวงโคมไม่มีมุมเอียง)



รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของการให้แสงสว่างบนพื้นที่ย่อยจากดวงโคม
ที่ติดบนผนัง

กำหนดตำแหน่งของจุด Rg ในรูปที่ 3.7

- ถ้าดวงโคมติดตั้งอยู่บนผนังด้านซ้าย

$$\text{ให้ } Rgx = Lx+1$$

$$Rgy = Ly$$

$$Rgz = Lz$$

- ถ้าดวงโคมติดตั้งอยู่บนผนังด้านขวา

$$\text{ให้ } Rgx = Lx-1$$

$$Rgy = Ly$$

$$Rgz = Lz$$

ตำแหน่งของจุด R ในรูปที่ 3.7

- ถ้าแนวระนาบ C ที่ 0 องศาอยู่ในแนวแกน +Y

$$\text{ให้ } Rx = Lx$$

$$Ry = Ly+1$$

$$Rz = Lz$$

- ถ้าแนวระนาบ C ที่ 0 องศาอยู่ในแนวแกน -Y

$$\text{ให้ } Rx = Lx$$

$$Ry = Ly-1$$

$$Rz = Lz$$

- ถ้าแนวระนาบ C ที่ 0 องศาอยู่ในแนวแกน +Z

$$\text{ให้ } Rx = Lx$$

$$Ry = Ly$$

$$Rz = Lz+1$$

- ถ้าแนวระนาบ C ที่ 0 องศาอยู่ในแนวแกน -Z

$$\text{ให้ } Rx = Lx$$

$$Ry = Ly$$

$$Rz = Lz-1$$

กำหนดตำแหน่งของจุด Z' ในรูปที่ 3.7

$$\text{ให้ } Z'_x = Lx$$

$$Z'_y = Zy$$

$$Z'_z = Zz$$

ตำแหน่งของ Nz ในรูปที่ 3.7 จะสามารถหาได้ในขั้นตอนการแบ่งพื้นที่คูมิงค์ให้เป็นพื้นที่ย่อย จากรูปที่ 3.7 จะพบว่า

$$\begin{aligned} R\vec{L} \cdot Z'\vec{L} &= |R\vec{L}| |Z'\vec{L}| \cdot \cos C \\ \cos C &= \frac{R\vec{L} \cdot Z'\vec{L}}{|R\vec{L}| |Z'\vec{L}|} \\ C &= \cos^{-1} \left(\frac{R\vec{L} \cdot Z'\vec{L}}{|R\vec{L}| |Z'\vec{L}|} \right) \end{aligned} \quad (3.33)$$

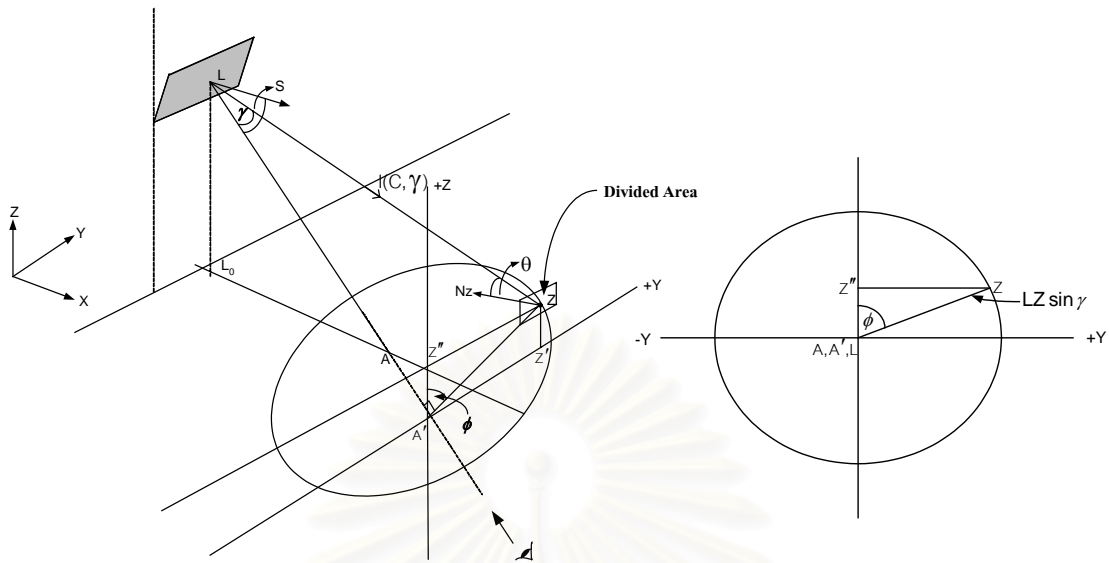
$$\begin{aligned} Rg\vec{L} \cdot Z\vec{L} &= |Rg\vec{L}| |Z\vec{L}| \cdot \cos \gamma \\ \cos \gamma &= \frac{Rg\vec{L} \cdot Z\vec{L}}{|Rg\vec{L}| |Z\vec{L}|} \\ \gamma &= \cos^{-1} \left(\frac{Rg\vec{L} \cdot Z\vec{L}}{|Rg\vec{L}| |Z\vec{L}|} \right) \end{aligned} \quad (3.34)$$

$$\begin{aligned} Nz\vec{Z} \cdot L\vec{Z} &= |Nz\vec{Z}| |L\vec{Z}| \cdot \cos \theta \\ \cos \theta &= \frac{Nz\vec{Z} \cdot L\vec{Z}}{|Nz\vec{Z}| |L\vec{Z}|} \\ \theta &= \cos^{-1} \left(\frac{Nz\vec{Z} \cdot L\vec{Z}}{|Nz\vec{Z}| |L\vec{Z}|} \right) \end{aligned} \quad (3.35)$$

จากค่า C ในสมการที่ (3.33) และมุม γ ในสมการที่ (3.34) นำไปคำนวณหาค่า Luminous Intensity จากตาราง I ของดวงโคม แล้วนำไปหาค่าความสว่างตามสมการที่ (3.29)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3.3 ดวงโคมที่ติดตั้งไว้บนเพดานเอียงของอุโมงค์หรือดวงโคมที่มีมุมเอียง



รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของการให้แสงสว่างบนพื้นที่ย่อยจากดวงโคมที่ติดตั้งบนผนังเอียงหรือดวงโคมที่มีมุมเอียง

- ถ้าดวงโคมติดตั้งอยู่บนผนังด้านซ้าย

$$\text{ให้ } Ax = Lx + \frac{(Lz - Zz)}{\tan S}$$

$$Ay = Ly$$

$$Az = Zz$$

- ถ้าดวงโคมติดตั้งอยู่บนผนังด้านขวา

$$\text{ให้ } Ax = Lx - \frac{(Lz - Zz)}{\tan S}$$

$$Ay = Ly$$

$$Az = Zz$$

กำหนดให้ $S =$ มุมเอียงของดวงโคมหรือมุมเอียงของเพดาน

จากรูปที่ 3.8 จะพบว่า

$$\vec{A} \cdot \vec{Z} = |\vec{A}| |\vec{Z}| \cdot \cos \gamma$$

$$\cos \gamma = \frac{\vec{A} \cdot \vec{Z}}{|\vec{A}| |\vec{Z}|}$$

$$\gamma = \cos^{-1} \left(\frac{\vec{A} \cdot \vec{Z}}{|\vec{A}| |\vec{Z}|} \right) \quad (3.36)$$

จากรูปที่ 3.8 จะพบว่า

$$\begin{aligned}
 Nz\vec{Z} \cdot L\vec{Z} &= |Nz\vec{Z}| |L\vec{Z}| \cdot \cos \theta \\
 \cos \theta &= \frac{Nz\vec{Z} \cdot L\vec{Z}}{|Nz\vec{Z}| |L\vec{Z}|} \\
 \theta &= \cos^{-1} \left(\frac{Nz\vec{Z} \cdot L\vec{Z}}{|Nz\vec{Z}| |L\vec{Z}|} \right) \quad (3.37)
 \end{aligned}$$

สำหรับการคำนวณมุม C นั้นต้องลากเส้นต่อจากเส้น LA จนกระทั่งตั้งฉากกับเส้นตรงที่ลากจากจุด Z ที่จุด A' แล้วสร้างเป็นกรวยโดยให้จุด A' เป็นจุดศูนย์กลางดังรูปที่ 3.8

$$\phi = \sin^{-1} \left(\frac{ZZ''}{LZ \sin \gamma} \right)$$

โดยที่ $ZZ'' = Z_y - A_y$

ในกรณีที่ดวงโคมมีการกระจายความเข้มส่องสว่างในลักษณะสมมาตรในแนวระนาบ CO-180 จะแบ่งการพิจารณาดังต่อไปนี้

- $Z_x > A_x$ และ $Z_y > A_y$

- แนวระนาบ C ที่ 0 องศา อยู่ในแนวแกน $+Z$

$$C = \phi$$

- แนวระนาบ C ที่ 0 องศา อยู่ในแนวแกน $-Z$

$$C = 180 - \phi$$

- แนวระนาบ C ที่ 0 องศา อยู่ในแนวแกน $+Y$

$$C = 90 - \phi$$

- แนวระนาบ C ที่ 0 องศา อยู่ในแนวแกน $-Y$

$$C = 90 + \phi$$

- $Z_x > A_x$ และ $Z_y \leq A_y$

- แนวระนาบ C ที่ 0 องศา อยู่ในแนวแกน $+Z$

$$C = \phi$$

- แนวระนาบ C ที่ 0 องศา อยู่ในแนวแกน $-Z$

$$C = 180 - \phi$$

- แนวระนาบ C ที่ 0 องศา อยู่ในแนวแกน $+Y$

$$C = 90 + \phi$$

- แนวระนาบ C ที่ 0 องศา อยู่ในแนวแกน $-Y$

$$C = 90 - \phi$$

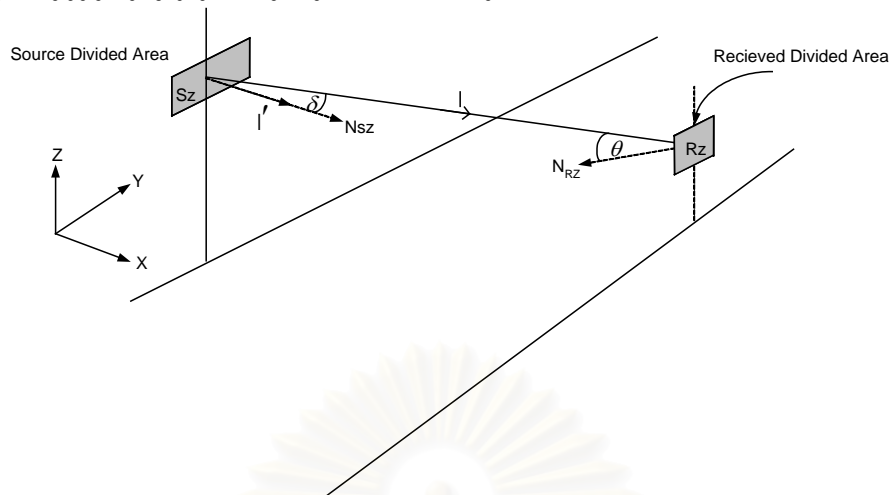
- $Zx \leq Ax$ และ $Zy < Ay$
 - แนวระนาบ C ที่ 0 องศา อยู่ในแนวแกน $+Z$
 $C = 180 - \phi$
 - แนวระนาบ C ที่ 0 องศา อยู่ในแนวแกน $-Z$
 $C = \phi$
 - แนวระนาบ C ที่ 0 องศา อยู่ในแนวแกน $+Y$
 $C = 90 + \phi$
 - แนวระนาบ C ที่ 0 องศา อยู่ในแนวแกน $-Y$
 $C = 90 - \phi$

- $Zx \leq Ax$ และ $Zy \geq Ay$
 - แนวระนาบ C ที่ 0 องศา อยู่ในแนวแกน $+Z$
 $C = 180 - \phi$
 - แนวระนาบ C ที่ 0 องศา อยู่ในแนวแกน $-Z$
 $C = \phi$
 - แนวระนาบ C ที่ 0 องศา อยู่ในแนวแกน $+Y$
 $C = 90 - \phi$
 - แนวระนาบ C ที่ 0 องศา อยู่ในแนวแกน $-Y$
 $C = 90 + \phi$ (3.38)

มุม γ ในสมการที่ (3.36) และจากค่า C ในสมการที่ (3.38) นำไปคำนวณหาค่า Luminous Intensity จากตาราง Luminous Intensity ของดวงโคม แล้วนำไปหาค่าความสว่างจากดวงโคมที่ติดบนผนังเฉียงของอุโมงค์หรือดวงโคมที่มีมุมเฉียงที่จุด Z ตามสมการที่ (3.29)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4 การคำนวณความสว่างบนพื้นที่ย่อยจากพื้นที่ย่อย



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของการให้แสงสว่างบนพื้นที่ย่อยจากพื้นที่ย่อย

ความสว่างที่จุด Rz บนพื้นที่ย่อยในอุโมงค์ ดังรูปที่ 3.9

$$E_{RZ} = \frac{I \cos \theta}{D^2} \quad (3.39)$$

เมื่อ I = ความเข้มส่องสว่าง (Luminous Intensity) จากพื้นที่ย่อยไปยังพื้นที่ย่อย

D = ระยะทางระหว่างพื้นที่ย่อยที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงกับพื้นที่ย่อยที่ต้องการหาค่าความสว่าง

โดยสามารถหาค่า I ได้ดังนี้

$$L_{sz} = \frac{f(r) \cdot E_{sz}}{\pi} \quad (3.40)$$

โดยที่ L_{sz} = ความส่องสว่างบนพื้นที่ย่อยที่เป็นแหล่งกำเนิดแสง

E_{sz} = ความสว่างบนพื้นที่ย่อยที่เป็นแหล่งกำเนิดแสง

$f(r)$ = Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF)

เนื่องจากในวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาเฉพาะพื้นผิวที่มีการแพร่กระจาย (Diffusing) อย่างสมบูรณ์ เพราะฉะนั้นค่าความส่องสว่างบนพื้นที่ย่อยจะได้

$$L_{sz} = \frac{\rho \cdot E_{sz}}{\pi} \quad (3.41)$$

โดย ρ = ค่าการสะท้อนแสง (diffuse reflectance factor)

$$I' = L_{sz} \cdot A$$

$$I = I' \cdot \cos \delta$$

$$I = L_{sz} \cdot A \cdot \cos \delta \quad (3.42)$$

โดย I' = ความเข้มส่องสว่างที่ตั้งฉากกับพื้นที่ย่อยที่เป็นแหล่งกำเนิดแสง (cd.)
 δ = มุมระหว่างแนวตั้งฉากของพื้นที่ย่อยที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงกับแนวของ
 ความเข้มส่องสว่างที่ส่งไปยังพื้นที่ย่อยที่ต้องการหาค่าความสว่าง
 A = พื้นที่ของพื้นที่ย่อยที่เป็นแหล่งกำเนิดแสง

นำค่า I จากสมการที่ (3.42) แทนค่าลงในสมการที่ (3.39) จะได้

$$E_{RZ} = \frac{L_{SZ} \cdot A \cdot \cos \delta \cos \theta}{D^2} \quad (3.43)$$

ตำแหน่งของ N_{RZ} และ N_{SZ} ในรูปที่ 3.9 จะสามารถหาได้ในขั้นตอนการแบ่งพื้นที่ผืนผนังและเพดาน
 อูโมงค์ให้เป็นพื้นที่ย่อย

จากรูปที่ 3.9 จะพบว่า

$$\begin{aligned} N_{SZ} \cdot RZS\vec{z} &= |N_{SZ} S\vec{z}| |RZS\vec{z}| \cdot \cos \delta \\ \cos \delta &= \frac{N_{SZ} \cdot RZS\vec{z}}{|N_{SZ} S\vec{z}| |RZS\vec{z}|} \\ \delta &= \cos^{-1} \left(\frac{N_{SZ} \cdot RZS\vec{z}}{|N_{SZ} S\vec{z}| |RZS\vec{z}|} \right) \end{aligned} \quad (3.44)$$

$$\begin{aligned} N_{RZ} \cdot SzR\vec{z} &= |N_{RZ} R\vec{z}| |SzR\vec{z}| \cdot \cos \theta \\ \cos \theta &= \frac{N_{RZ} \cdot SzR\vec{z}}{|N_{RZ} R\vec{z}| |SzR\vec{z}|} \\ \theta &= \cos^{-1} \left(\frac{N_{RZ} \cdot SzR\vec{z}}{|N_{RZ} R\vec{z}| |SzR\vec{z}|} \right) \end{aligned} \quad (3.45)$$

จากค่า δ ในสมการที่ (3.44) และมุม θ ในสมการที่ (3.45) นำไปหาค่าความสว่างจาก
 พื้นที่ย่อยตามสมการที่ (3.43)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

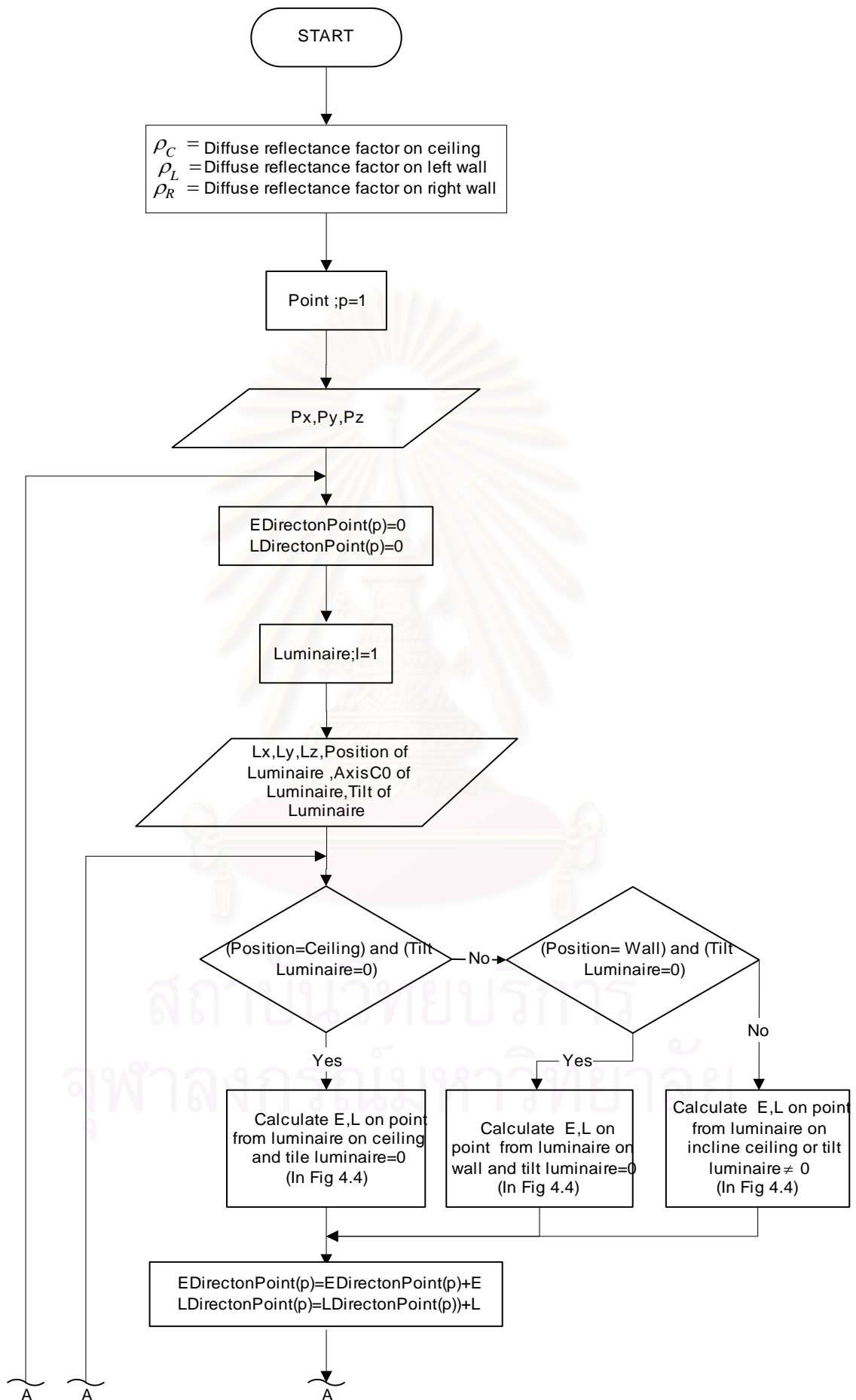
การพัฒนาโปรแกรม

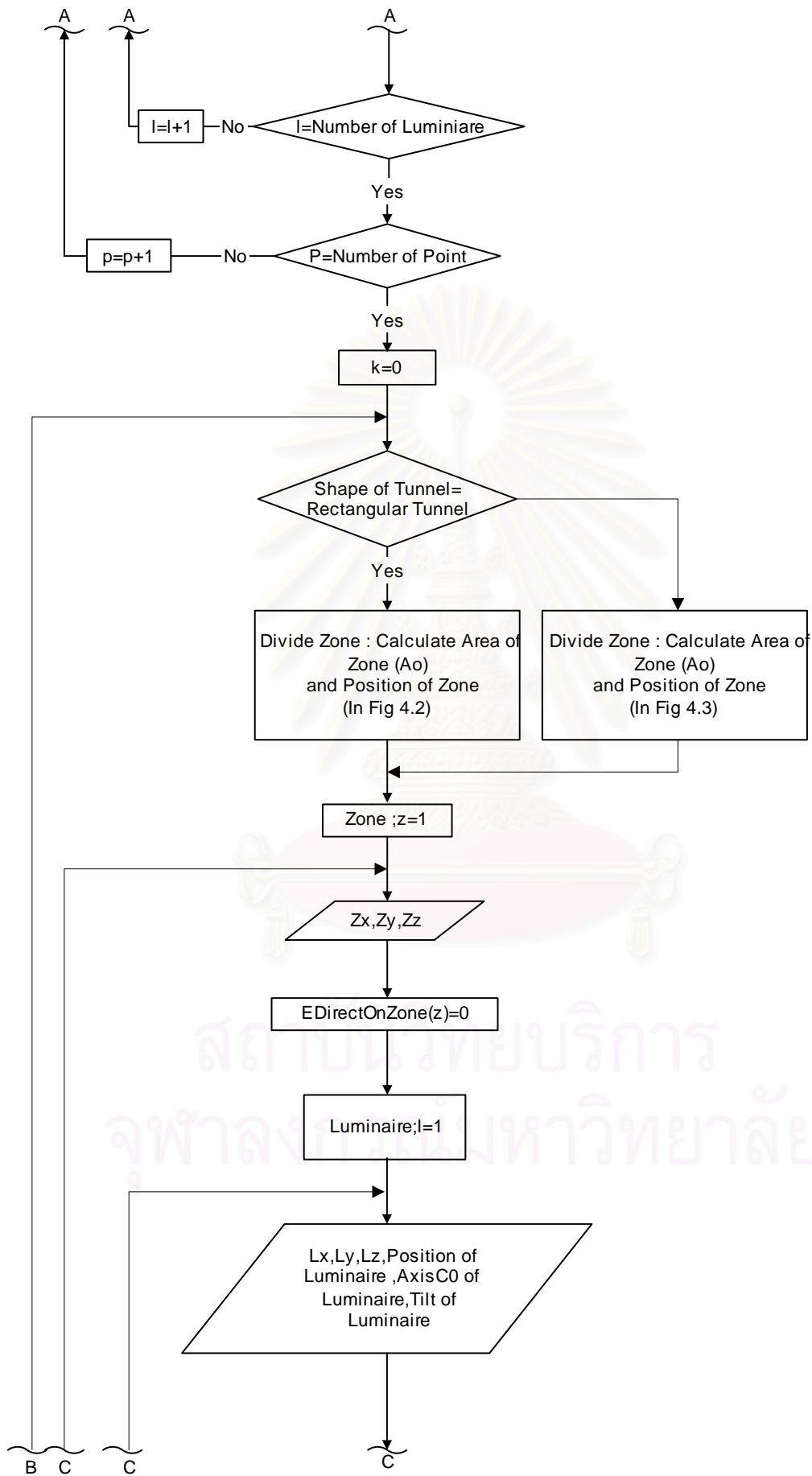
4.1 โครงสร้างโปรแกรม

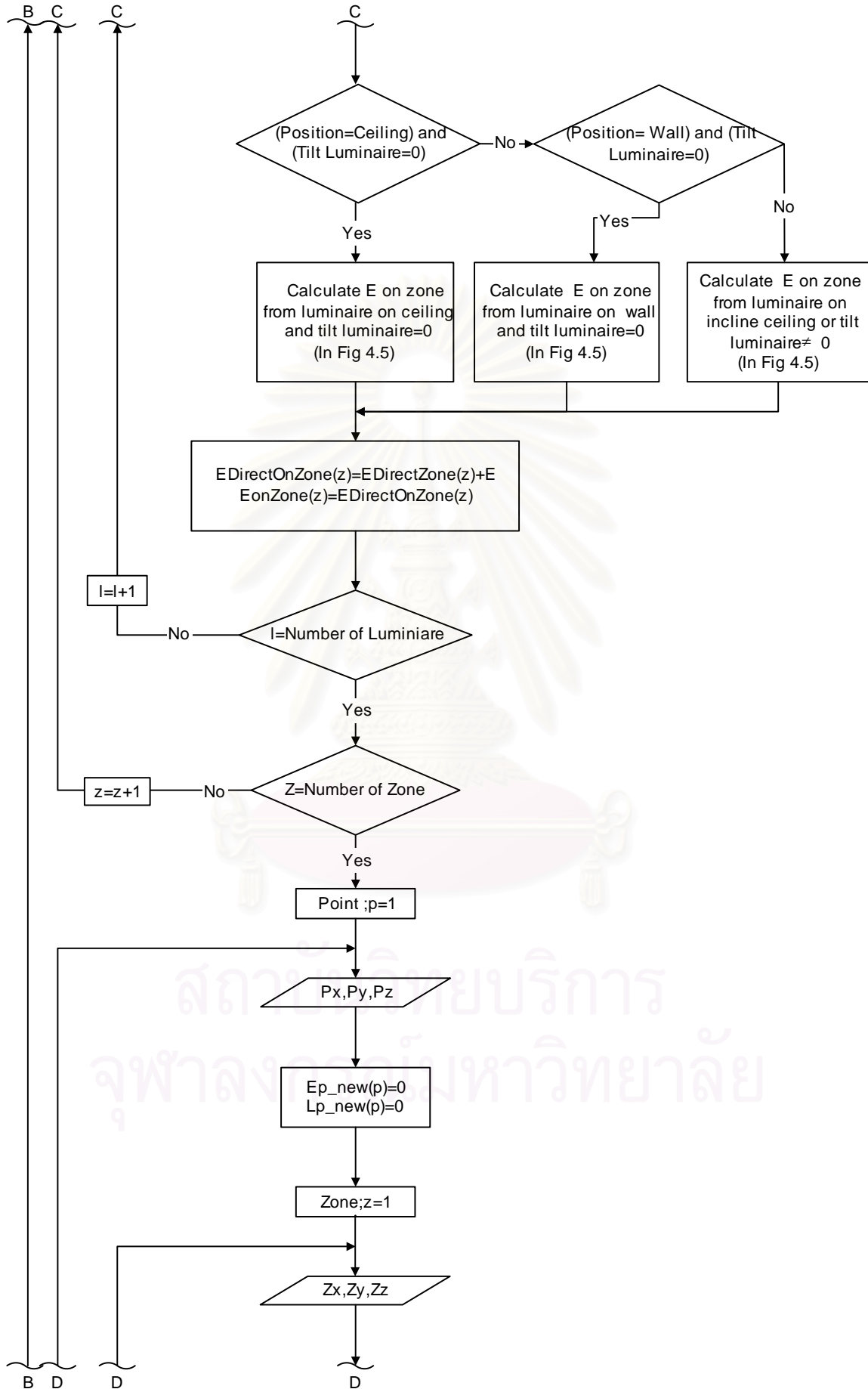
การคำนวณระบบแสงสว่างบนพื้นถนนภายในอุโมงค์ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้วิธี Point-by-Point ซึ่งเป็นการคำนวณซ้ำไปซ้ำมา และต้องคำนวณในส่วนของการสะท้อนจากพื้นที่ย่อยของอุโมงค์ด้วย ซึ่งทำให้เกิดความยุ่งยากและซับซ้อนในการคำนวณ รวมทั้งในการคำนวณต้องมีการอ่านข้อมูลจากตาราง ซึ่งบางครั้งกว่าจะได้ข้อมูลที่ต้องการจะต้องมีการ Interpolate หลายครั้ง เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ต้องการ ดังนั้นการนำคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ในการคำนวณจึงช่วยประหยัดเวลาและมีความถูกต้องแม่นยำสูงกว่าการคำนวณด้วยมือ ซึ่งโปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้นมาได้ใช้ เดลไฟล์ (Delphi) เวอร์ชัน 5 เป็นเครื่องมือในการพัฒนาโปรแกรม ซึ่งเดลไฟล์เป็นเครื่องมือในการพัฒนาแอปพลิเคชัน ที่นอกจากจะใช้งานง่ายและสามารถเห็นผลลัพธ์ที่จะได้ตั้งแต่ในขณะที่กำลังสร้างแล้ว แอปพลิเคชันที่ได้ยังมีประสิทธิภาพที่สูงด้วย

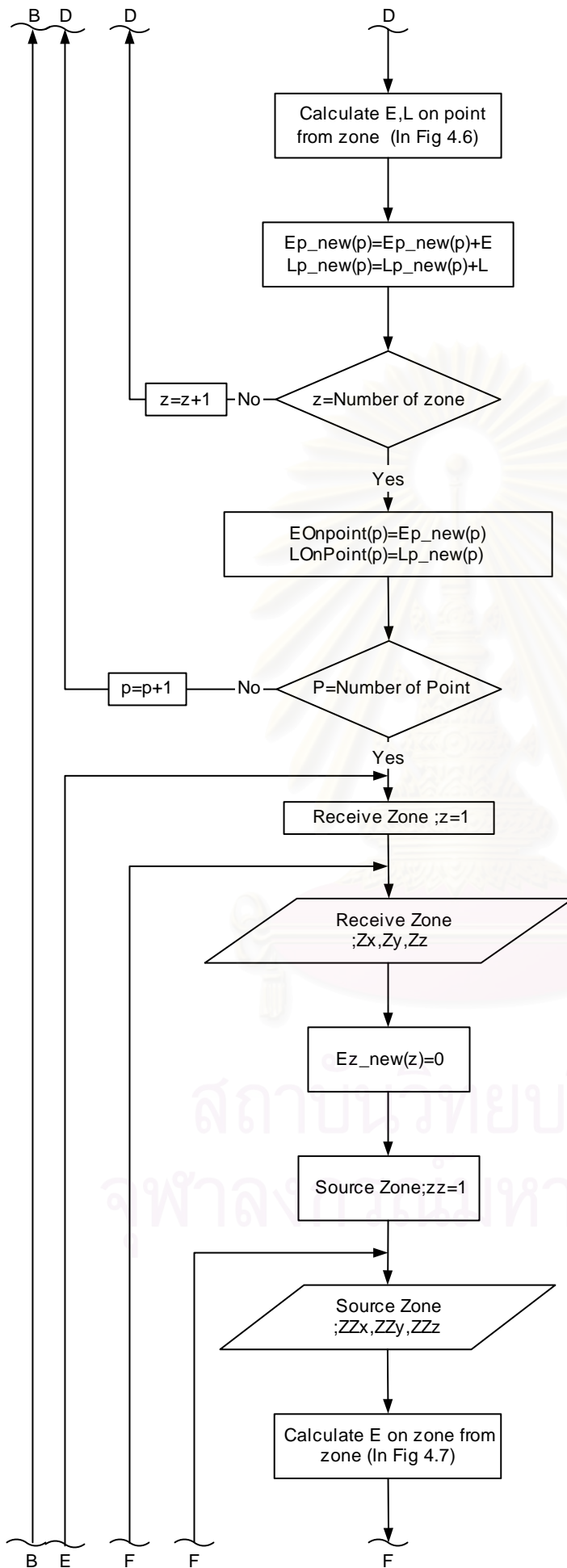
ในการพัฒนาโปรแกรมได้แบ่งรายละเอียดของโปรแกรมออกเป็น 3 ส่วนหลัก ๆ คือ

1. ส่วนหลักของโปรแกรม ซึ่งได้แสดงรายละเอียดการคำนวณดังรูปที่ 4.1

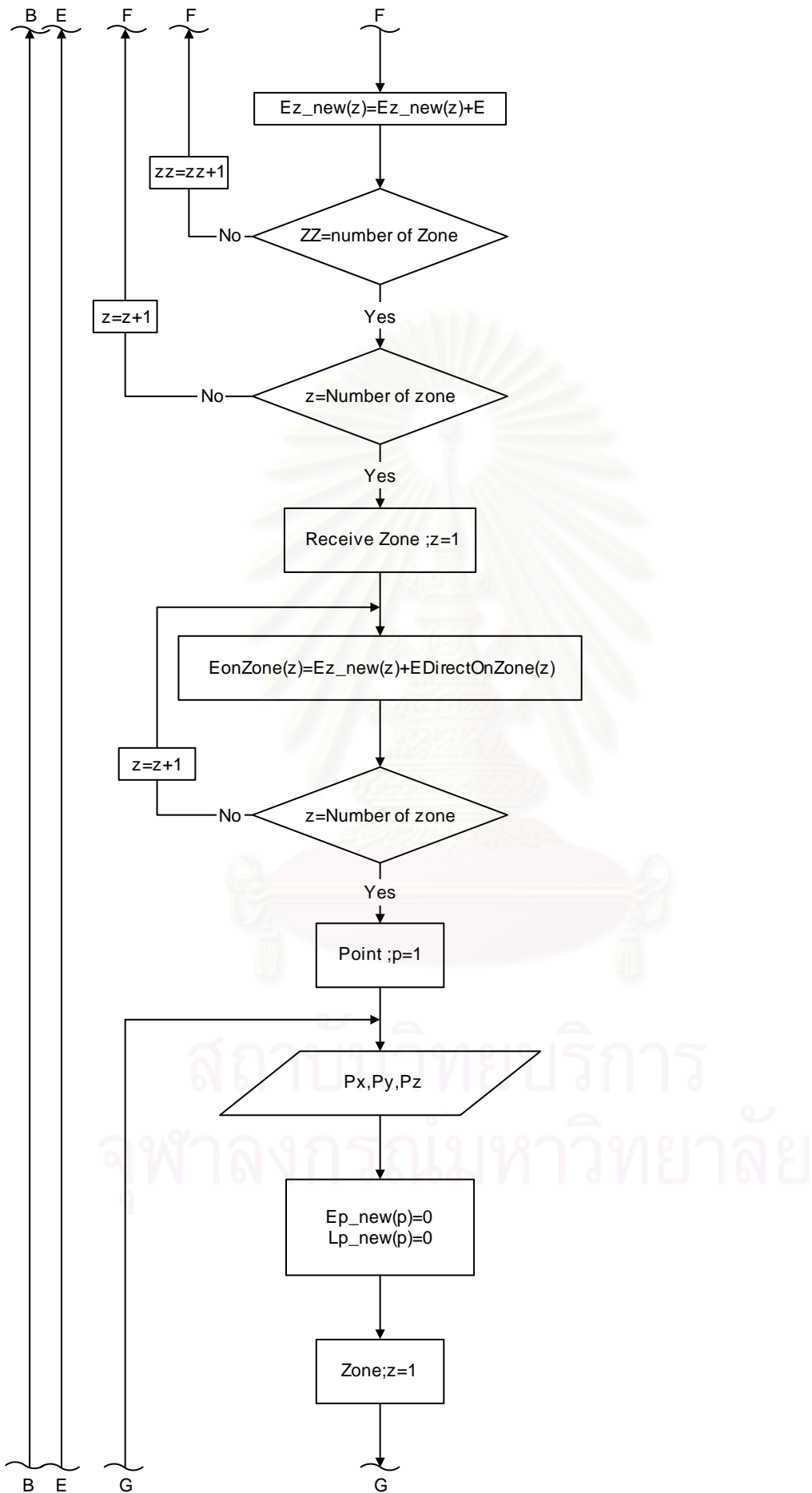


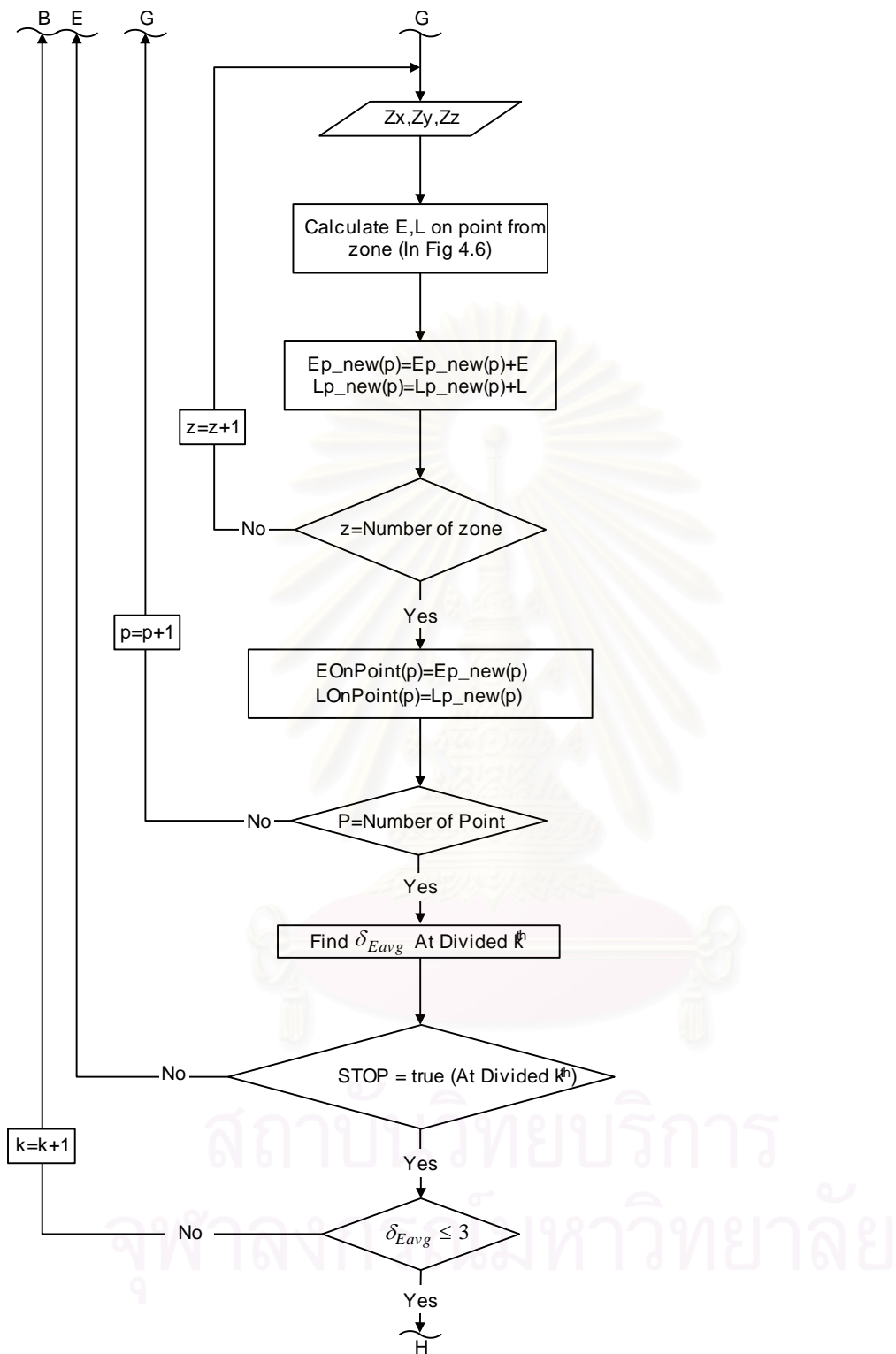


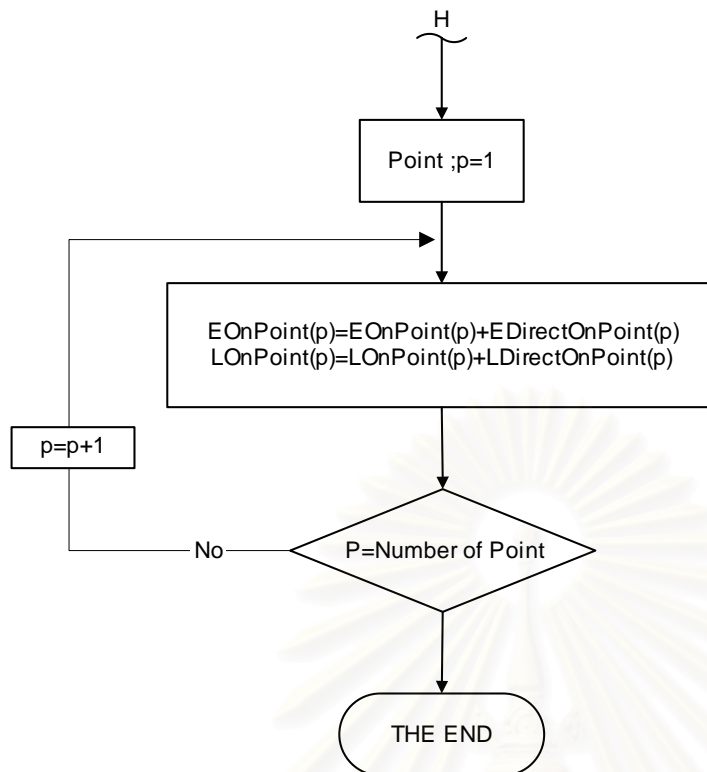




สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



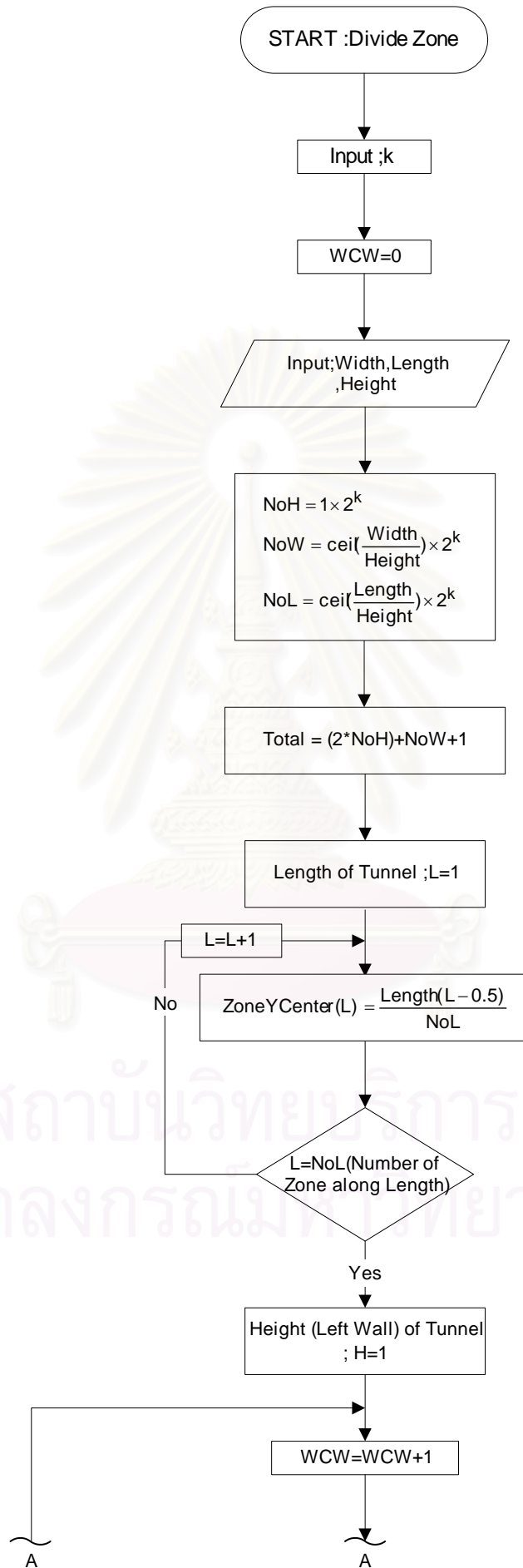


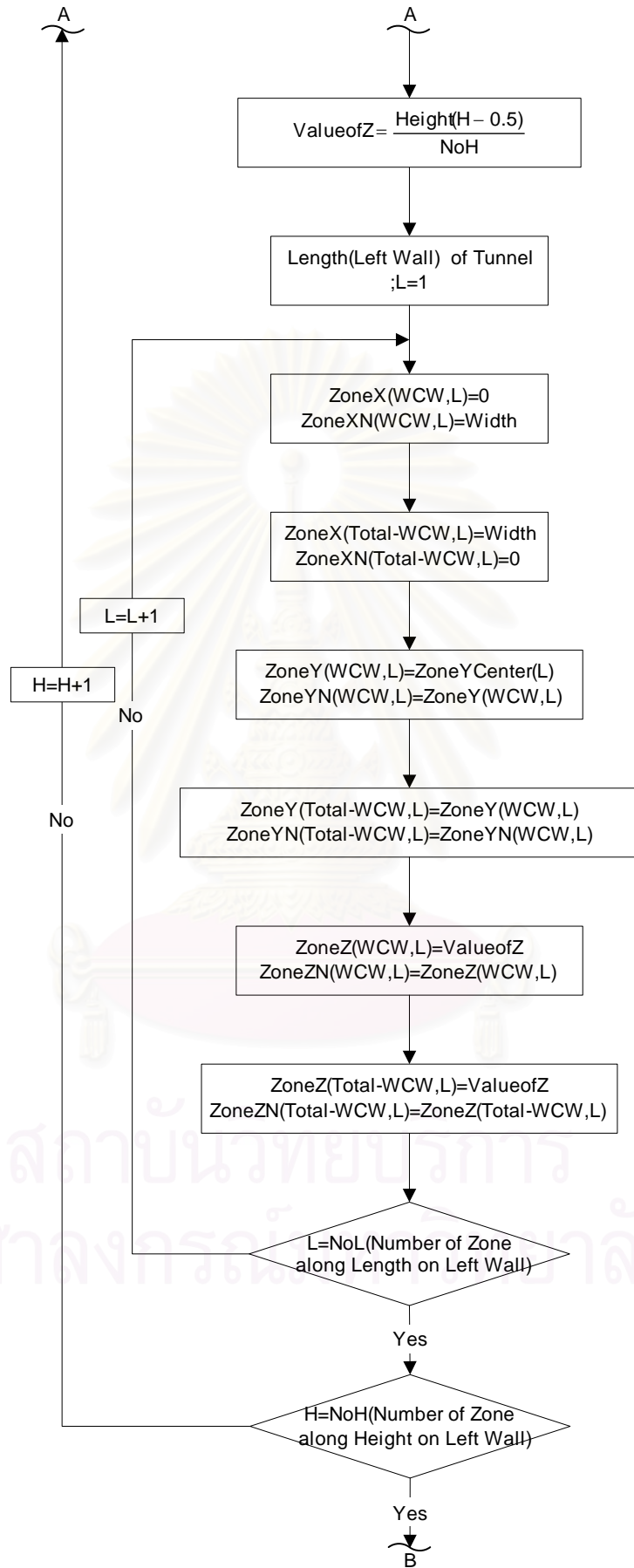


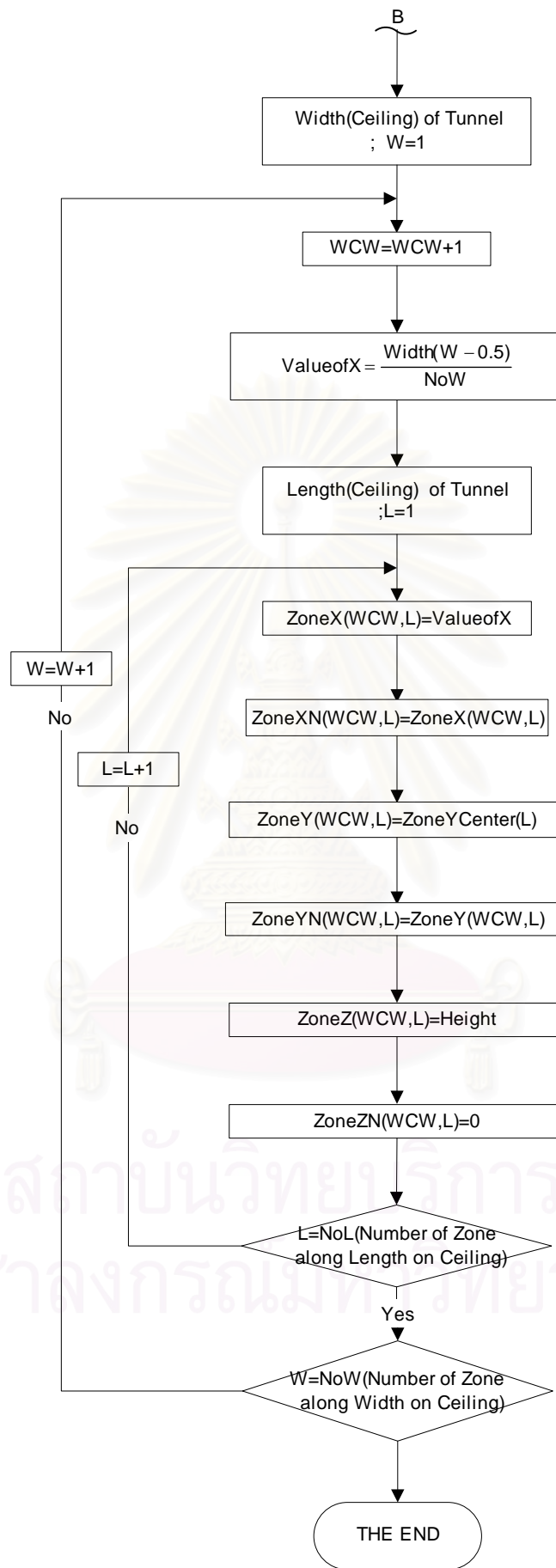
รูปที่ 4.1 ไตอะแกรมแสดงรายละเอียดในส่วนหลักของโปรแกรม

2. ส่วนของการคำนวณเพื่อที่จะทำการแบ่งพื้นที่ผนังและเพดานของอุโมงค์ โดยแบ่งการพิจารณาเป็น
- การแบ่งพื้นที่ผนังและเพดานของอุโมงค์ที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 4.2
 - การแบ่งพื้นที่ผนังและเพดานของอุโมงค์ที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปโค้ง ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 4.3

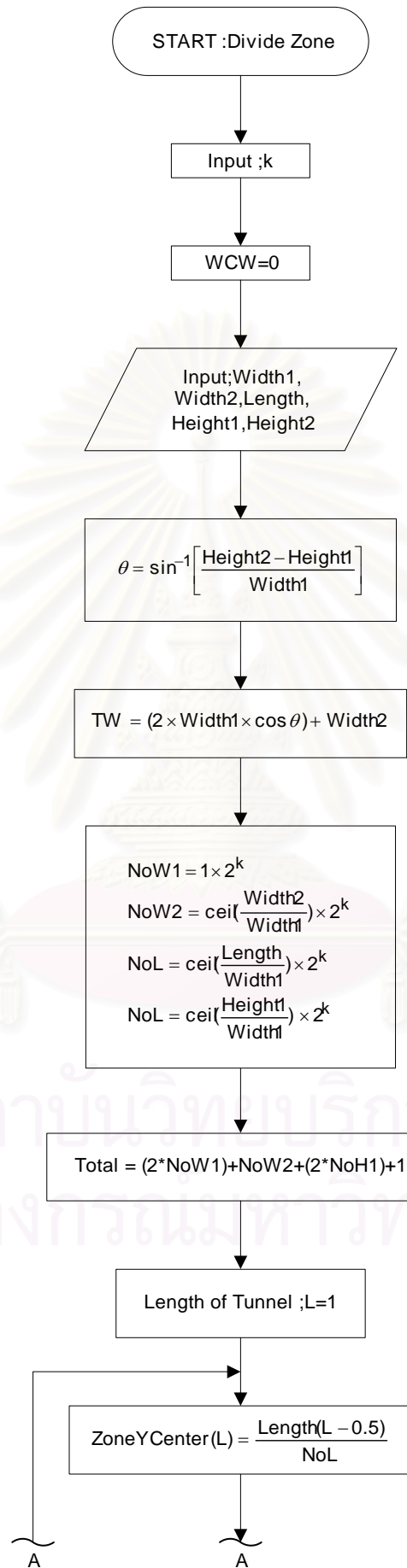
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

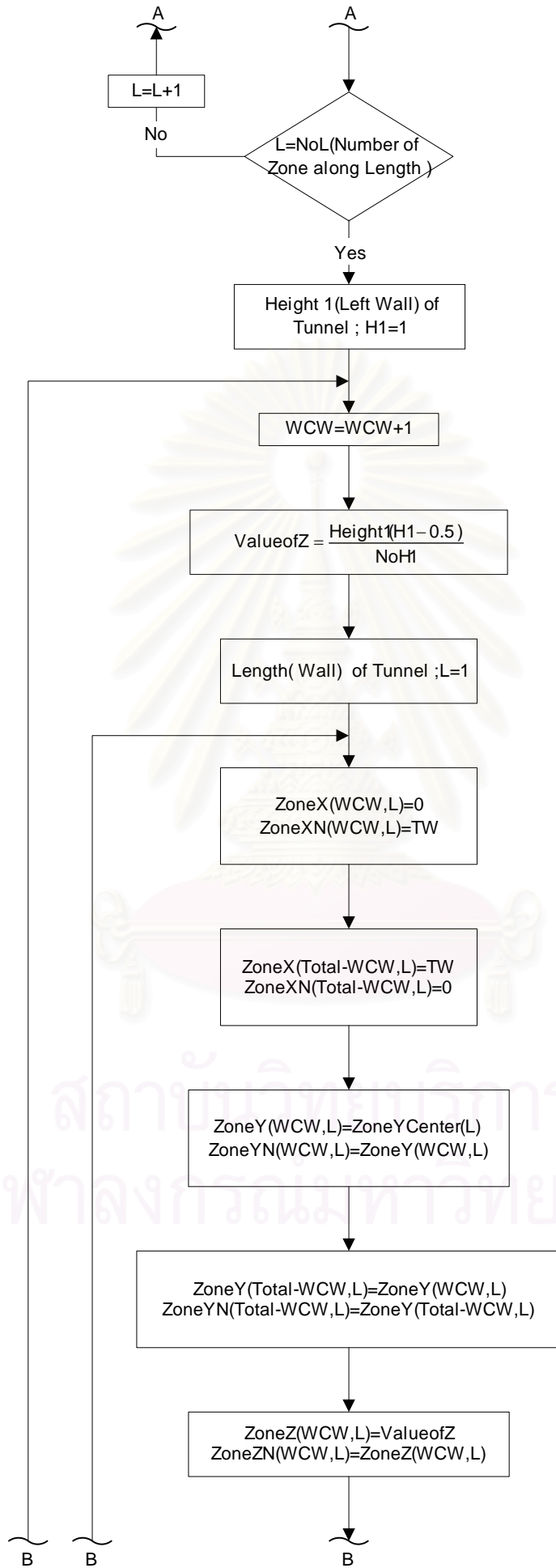


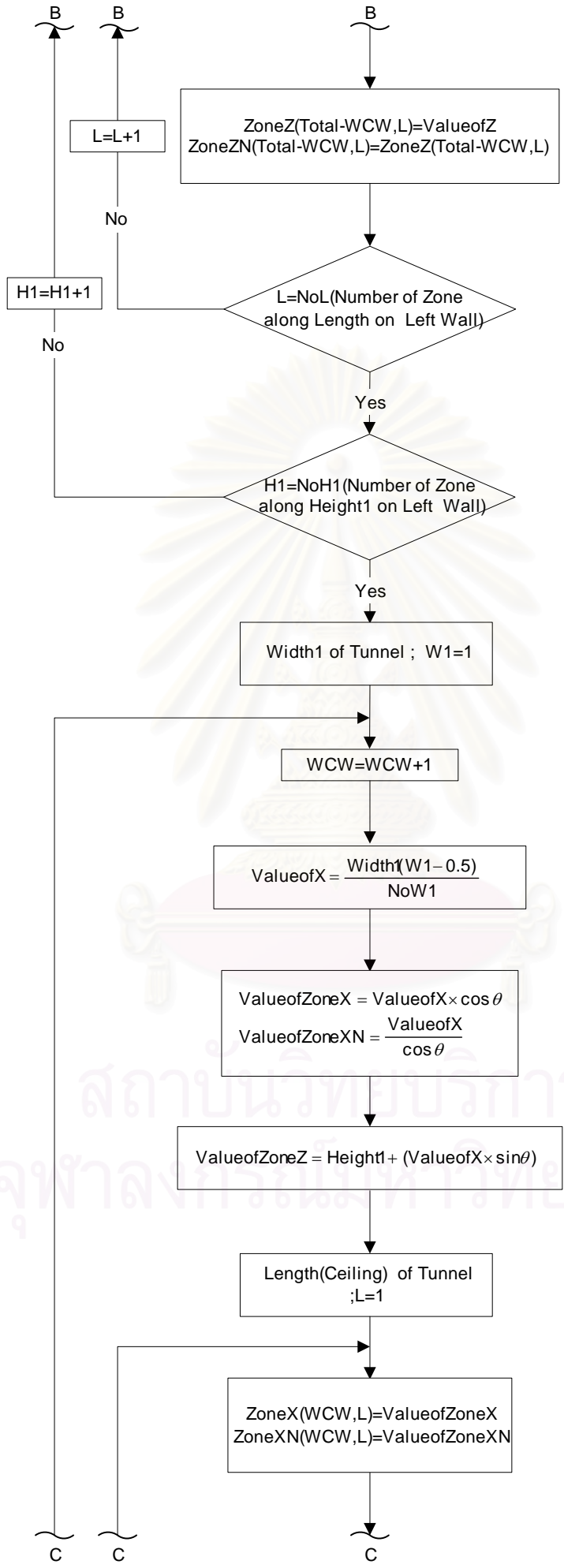


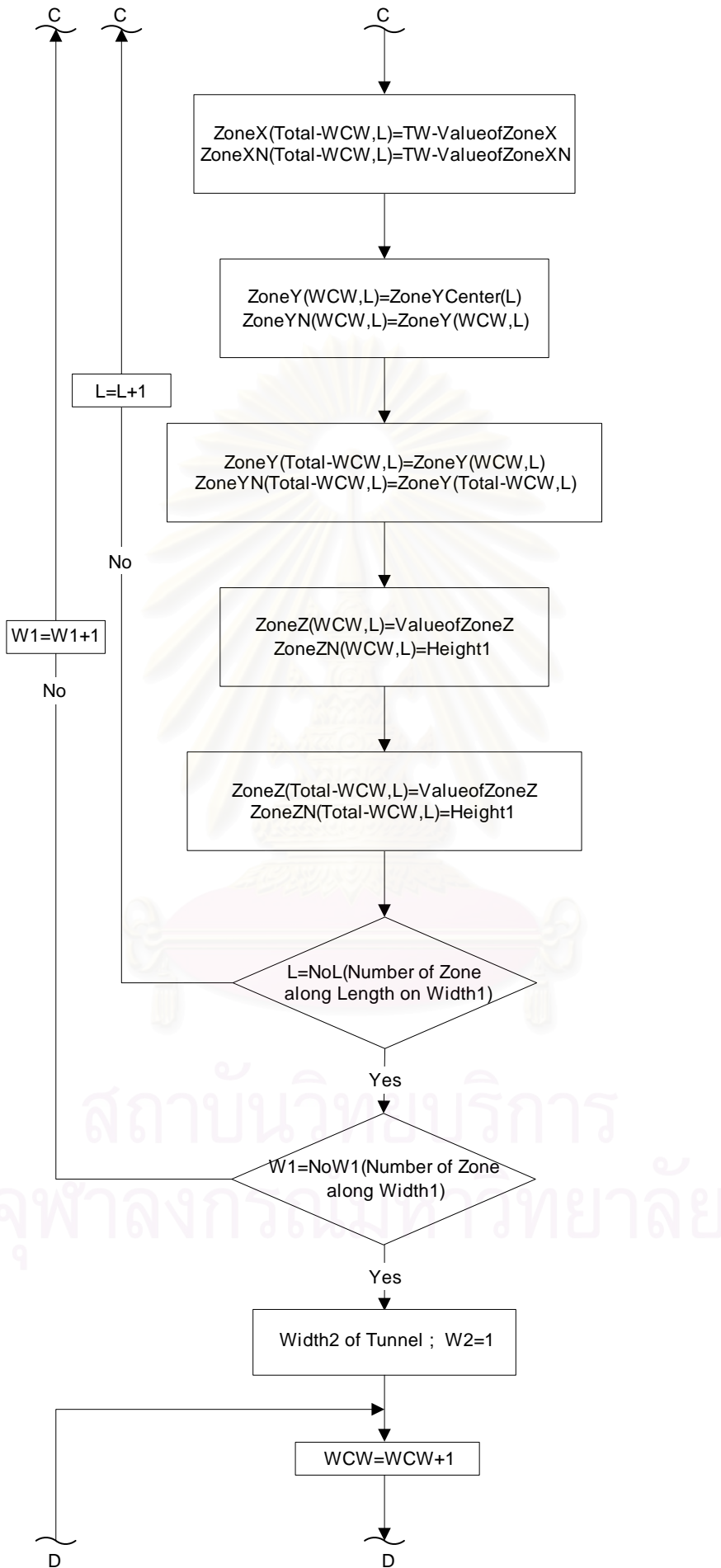


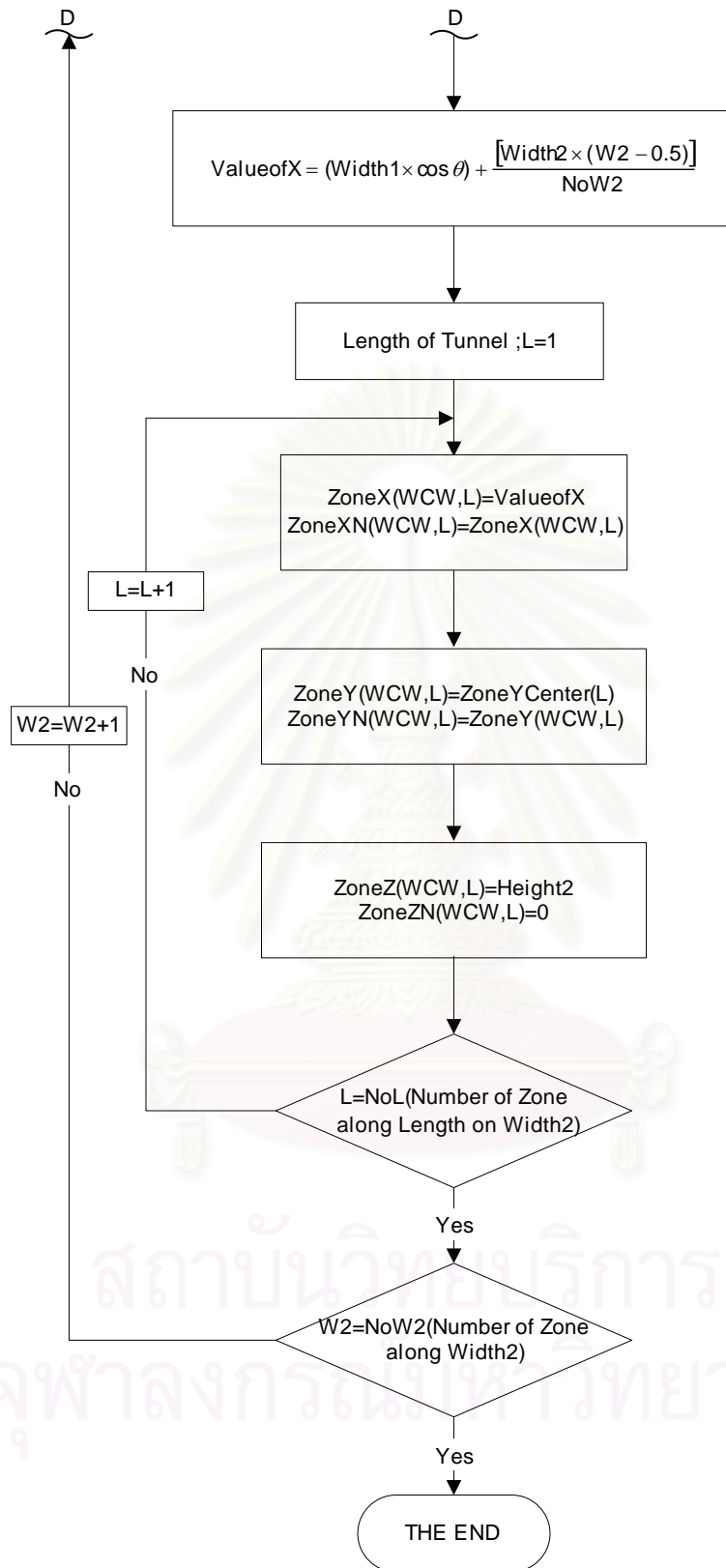
รูปที่ 4.2 ไดอะแกรมแสดงการคำนวณเพื่อแบ่งพื้นที่ย่อยของอุโมงค์ที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม







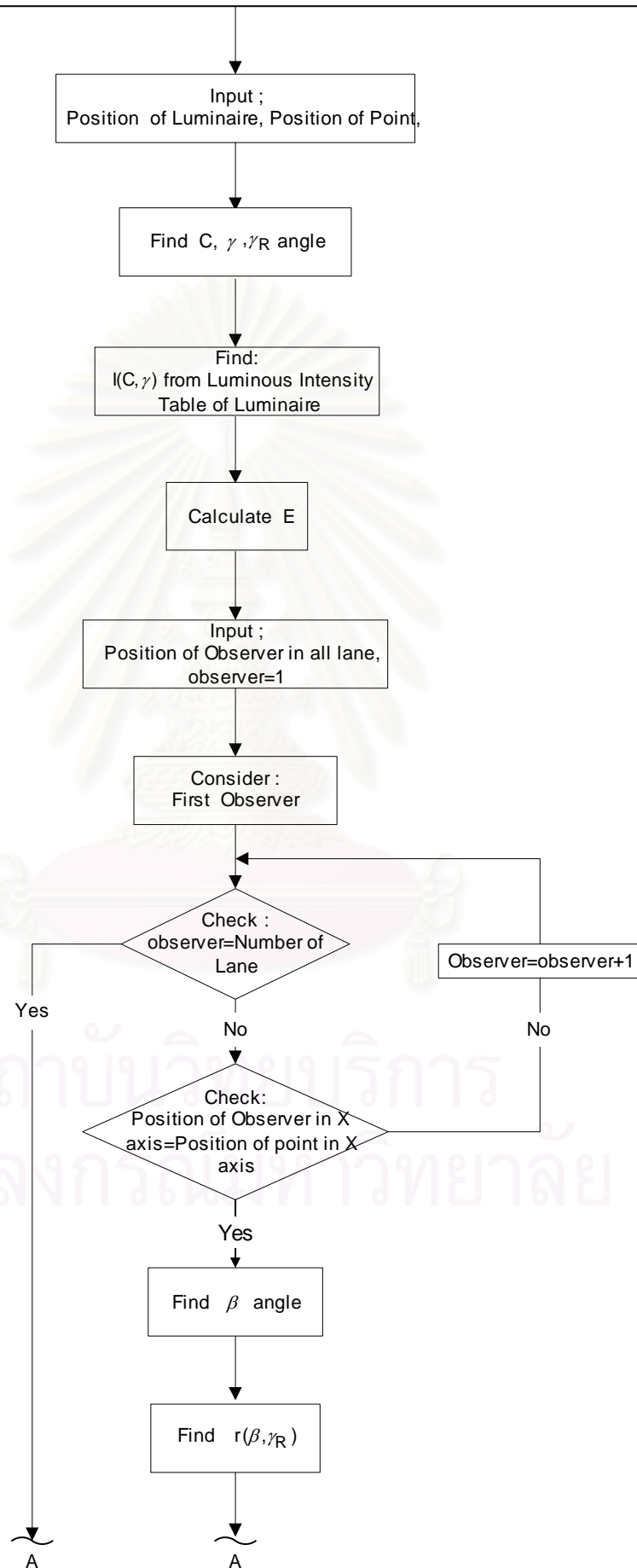


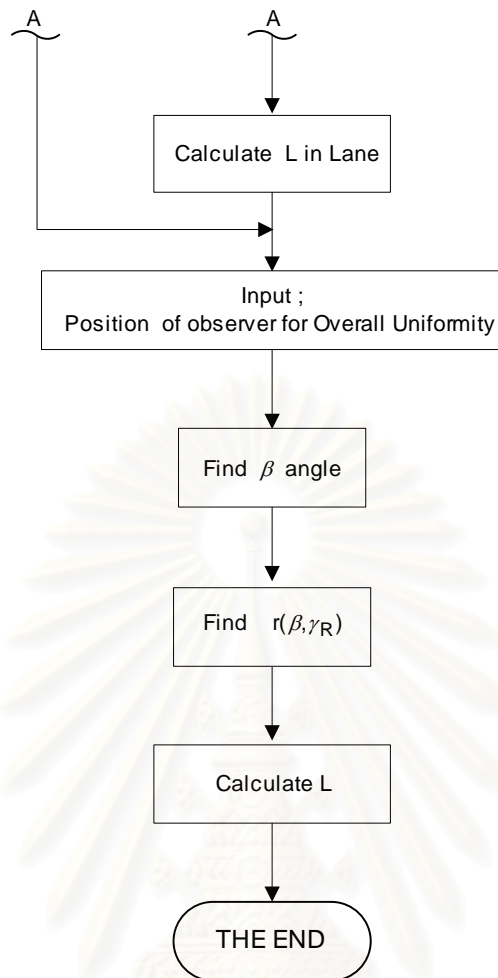


รูปที่ 4.3 ไดอะแกรมการคำนวณเพื่อแบ่งพื้นที่ย่อยของอุโมงค์ที่มีหน้าตัดเป็นรูปโค้ง

3. ส่วนของการคำนวณเพื่อหาความสว่างและความส่องสว่าง โดยแบ่งการพิจารณาเป็น
- การคำนวณเพื่อหาค่าความสว่างและความส่องสว่างบนพื้นถนนภายในอุโมงค์จากดวงโคม โดยแสดงรายละเอียดการคำนวณดังรูปที่ 4.4 โดยรูปที่ 4.4 จะแสดงไดอะแกรมโดยภาพรวมของการหาค่าความสว่างและความส่องสว่างบนพื้นถนนภายในอุโมงค์จากดวงโคม ซึ่งรายละเอียดในการคำนวณจะต้องพิจารณาแยกตามลักษณะการติดตั้งของดวงโคม สามารถดูรายละเอียดในบทที่ 3 – การคำนวณความสว่างและความส่องสว่างบนพื้นถนนภายในอุโมงค์ ในหัวข้อที่ 3.1 - การคำนวณในส่วนของ Direct Component
 - การคำนวณเพื่อหาค่าความสว่างบนพื้นที่ย่อยจากดวงโคม โดยแสดงรายละเอียดการคำนวณดังรูปที่ 4.5 โดยรูปที่ 4.5 จะแสดงไดอะแกรมโดยภาพรวมของการหาค่าความสว่างบนพื้นที่ย่อยจากดวงโคม ซึ่งรายละเอียดในการคำนวณจะต้องพิจารณาแยกตามลักษณะการติดตั้งของดวงโคมสามารถดูรายละเอียดในบทที่ 3 – การคำนวณความสว่างและความส่องสว่างบนพื้นถนนภายในอุโมงค์ ในหัวข้อที่ 3.3 – การคำนวณความสว่างบนพื้นที่ย่อยจากดวงโคม
 - การคำนวณเพื่อหาค่าความสว่างบนพื้นถนนจากพื้นที่ย่อย โดยแสดงรายละเอียดการคำนวณดังรูปที่ 4.6 โดยรูปที่ 4.6 จะแสดงไดอะแกรมโดยภาพรวมของการหาค่าความสว่างบนพื้นถนนจากพื้นที่ย่อย ซึ่งรายละเอียดในการคำนวณสามารถดูรายละเอียดได้ในบทที่ 3 – การคำนวณความสว่างและความส่องสว่างบนพื้นถนนภายในอุโมงค์ ในหัวข้อที่ 3.2 – การคำนวณในส่วนของ Indirect Component
 - การคำนวณเพื่อหาค่าความสว่างบนพื้นที่ย่อยจากพื้นที่ย่อย โดยแสดงรายละเอียดการคำนวณดังรูปที่ 4.7 โดยรูปที่ 4.7 จะแสดงไดอะแกรมโดยภาพรวมของการหาค่าความสว่างบนพื้นที่ย่อยจากพื้นที่ย่อย ซึ่งรายละเอียดในการคำนวณสามารถดูรายละเอียดได้ในบทที่ 3 – การคำนวณความสว่างและความส่องสว่างบนพื้นถนนภายในอุโมงค์ ในหัวข้อที่ 3.4 – การคำนวณความสว่างบนพื้นที่ย่อยจากพื้นที่ย่อย

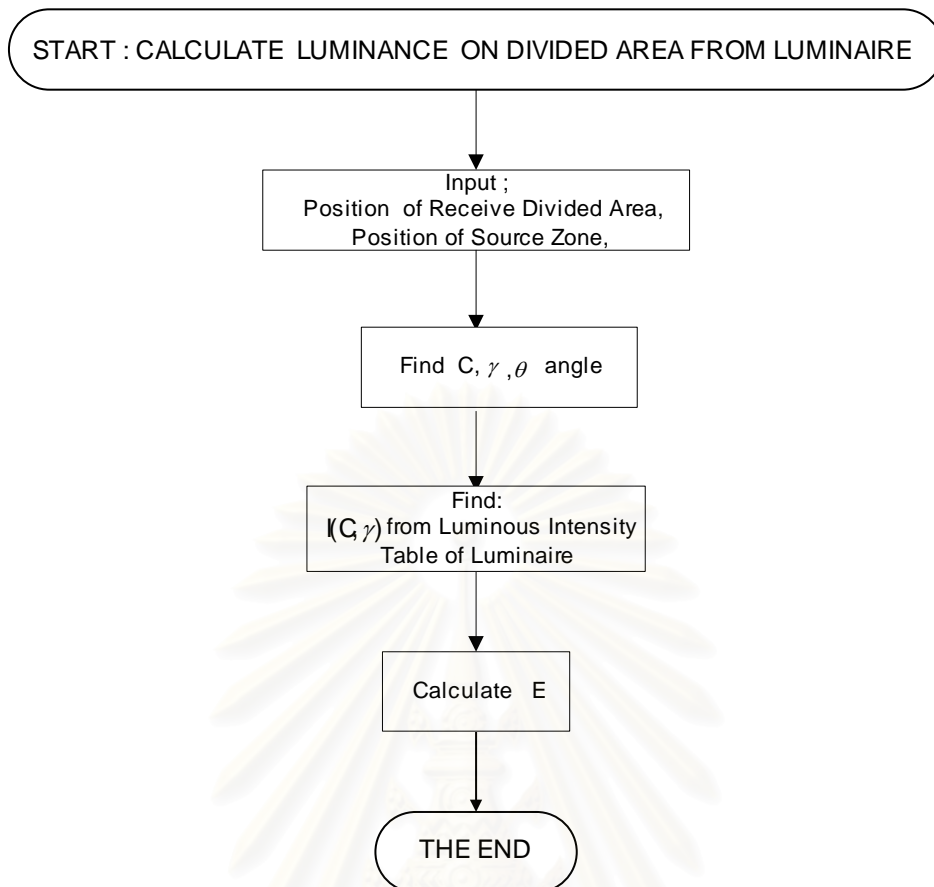
START : CALCULATE LUMINANCE AND ILLUMINANCE ON POINT FROM LUMINAIRE





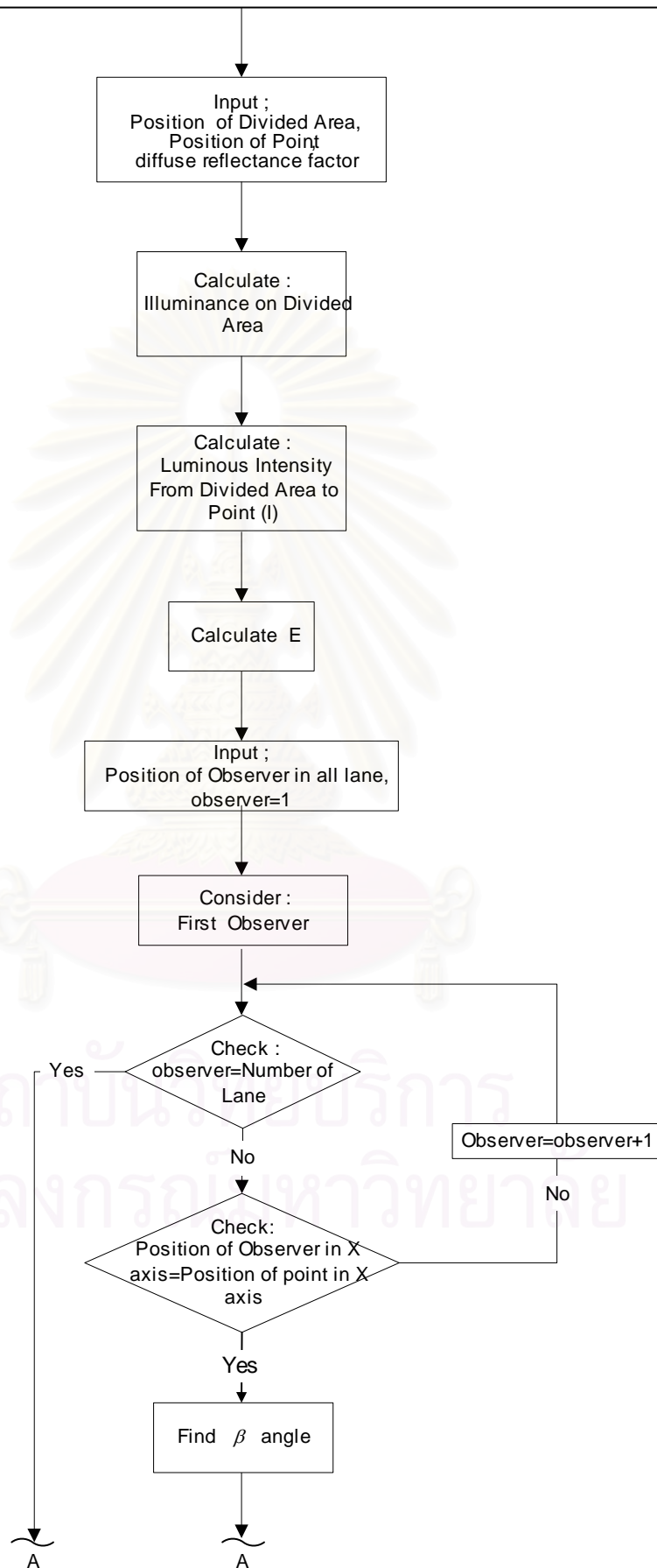
รูปที่ 4.4 ไดอะแกรมการคำนวณเพื่อหาความสว่างและความส่องสว่างบนพื้นถนนจากดวงโคม

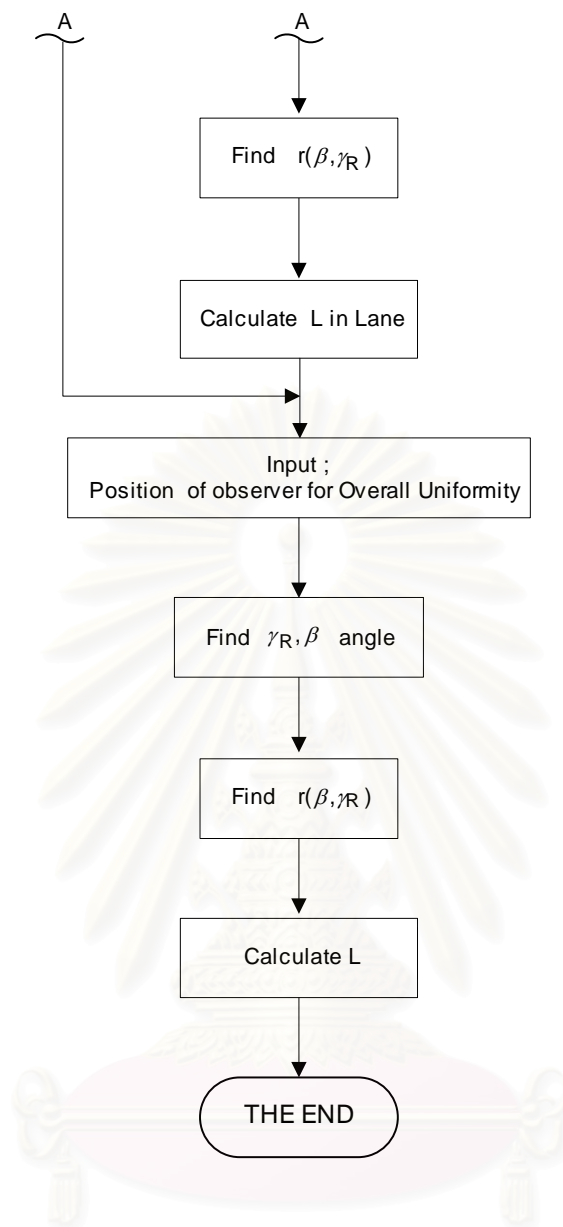
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.5 ไดอะแกรมการคำนวณเพื่อหาความสว่างบนพื้นที่ย่อยจากดวงโคม

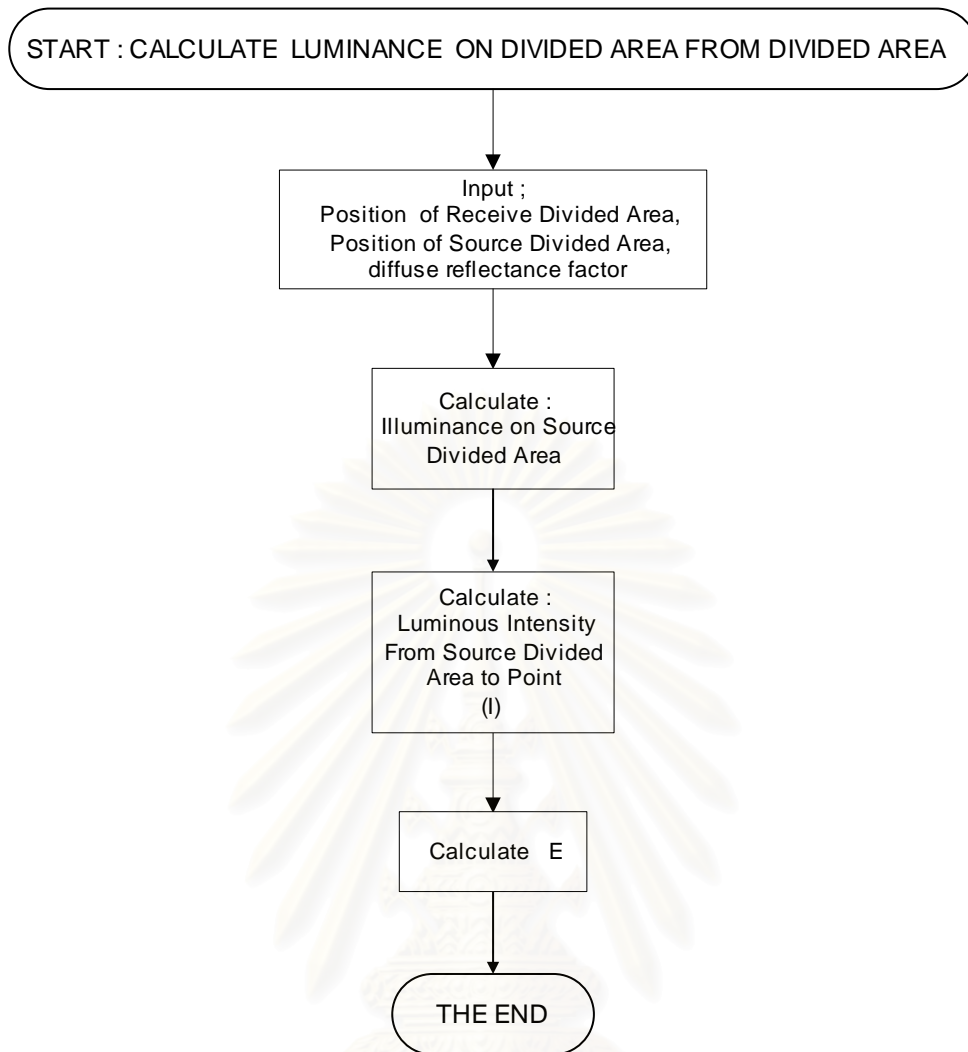
START : CALCULATE LUMINANCE AND ILLUMINANCE ON POINT FROM DIVIDED AREA





รูปที่ 4.6 ไดอะแกรมการคำนวณเพื่อหาความสว่างและความส่องสว่างบนพื้นถนนจากพื้นที่ย่อย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.7 ไดอะแกรมการคำนวณเพื่อหาความสว่างบนพื้นที่ย่อยจากพื้นที่ย่อย

บทที่ 5

โปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าความสว่างและความส่องสว่าง บนพื้นถนนภายในอุโมงค์

ในการพัฒนาโปรแกรมเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ค่าความสว่างและความส่องสว่างจะแบ่งโครงสร้างของโปรแกรกดังต่อไปนี้

1. การป้อนข้อมูล (Input Data)

เป็นส่วนรับข้อมูลเข้ามาเพื่อให้โปรแกรมนำข้อมูลเหล่านั้นมาทำการคำนวณ โดยข้อมูลที่ต้องการคือ

- ค่าความเข้มส่องสว่างของดวงโคมที่จะติดตั้งภายในอุโมงค์ โดยสามารถป้อนข้อมูลเข้าไปเองหรือทำการดึงข้อมูลจาก IES Standard File Format ซึ่งบริษัทผู้ผลิตดวงโคมจะมีไว้ให้อยู่แล้ว
- ค่าสัมประสิทธิ์ความส่องสว่างแบบลดรูป ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของผิวถนน โดยโปรแกรมจะมีข้อมูลของถนนแบบ C1,C2,N1,N2,N3,N4,R1,R2,R3,R4,W1,W2,W3 และ W4 ไว้ให้แล้ว
- ลักษณะและขนาดของอุโมงค์ รวมทั้งค่าการสะท้อนแสง (ρ) ของผนังและเพดานของอุโมงค์
- ปัจจัยที่มีผลต่อความส่องสว่างภายในอุโมงค์ ซึ่งจะมีประโยชน์ต่อการออกแบบระบบแสงสว่างภายในอุโมงค์
- ลักษณะการติดตั้งของดวงโคมภายในอุโมงค์ ซึ่งจะมีผลต่อความสว่างและความส่องสว่างบนพื้นถนนภายในอุโมงค์

2. การคำนวณ (Calculation)

เป็นส่วนที่ทำการประมวลผลเพื่อที่จะหาความสว่างและความส่องสว่างบนพื้นถนนภายในอุโมงค์ตามข้อมูลที่โปรแกรมได้รับ

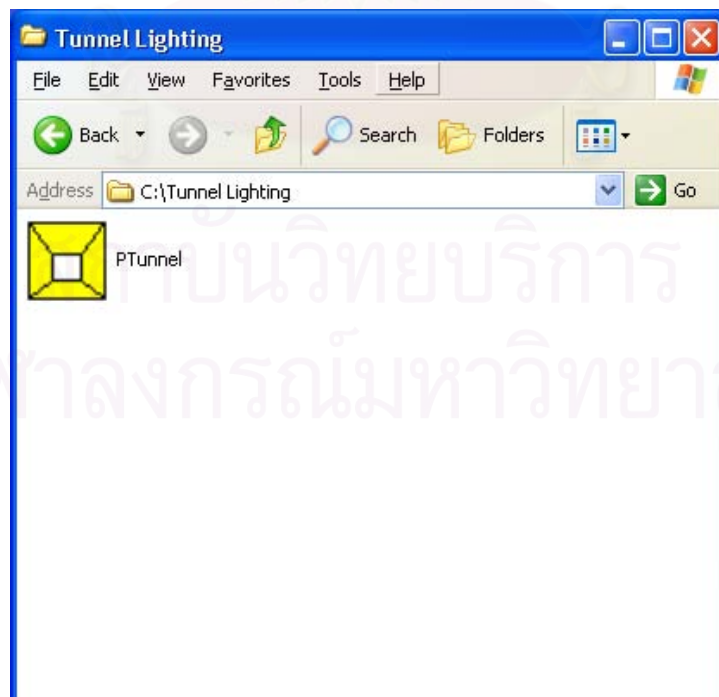
3. การแสดงผล (Display)

เป็นส่วนที่แสดงผลการคำนวณ โดยรูปแบบที่โปรแกรมจะแสดงผลคือ

- ส่วนที่สรุปค่าความสว่าง ความส่องสว่าง ความสม่ำเสมอตามแนวยาว (U_1) รวมทั้งความสม่ำเสมอรวม (U_0) ทั้งในส่วนของ Direct Component และ Total Component
- ตารางแสดงค่าความสว่างและความส่องสว่างตลอดช่วงที่กำลังพิจารณา ทั้งในส่วนของ Direct Component และ Total Component

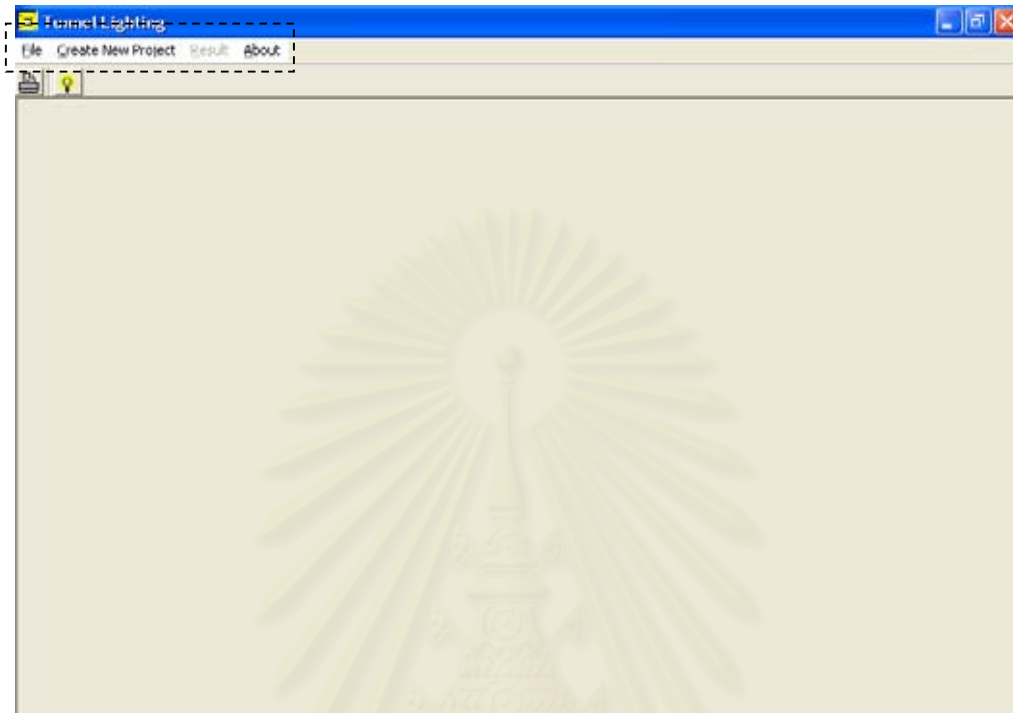
- เส้นโค้งความสว่างเท่า (Iso – Lux Diagram) และเส้นโค้งความส่องสว่างเท่า (Iso – Luminance Diagram) เฉพาะในส่วน Total Component โดยจะแสดงเส้นทางเดินที่ 10% , 20%,30%,40%,50%,60%,70%,80% และ 90% ของค่าความสว่างสูงสุดและค่าความส่องสว่างสูงสุด เพื่อให้เห็นการกระจายความสว่างและความส่องสว่างได้อย่างชัดเจน
- Illuminance Color Shade Diagram และ Luminance Color Shade Diagram เฉพาะในส่วน Total Component โดยจะแสดงเส้นทางเดินที่ 0-10% , 10-20% , 20-30% , 30-40% , 40-50% , 50-60% , 60-70% , 70-80% , 80-90% และ 90-100% ของค่าความสว่างสูงสุดและค่าความส่องสว่างสูงสุด เพื่อให้เห็นการกระจายความสว่างและความส่องสว่างได้อย่างชัดเจน
- ภาพแรเงาของความสว่าง (Illuminance Rendering) และ ภาพแรเงาของความส่องสว่าง (Luminance Rendering) เฉพาะในส่วน Total Component เพื่อให้เห็นการกระจายความสว่างและความส่องสว่างได้อย่างชัดเจน
- กราฟที่ใช้ในการออกแบบระบบแสงสว่างภายในอุโมงค์ โดยจะเป็นกราฟที่ช่วยในการวิเคราะห์ค่าความส่องสว่างจากดวงโคมที่ได้ทำการติดตั้งว่าเหมาะสมกับอุโมงค์หรือไม่
- พิมพ์รายงานทางเครื่องพิมพ์

การใช้งานโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์ค่าความสว่างและความส่องสว่างบนพื้นถนนภายในอุโมงค์ ทำได้โดยจากรูปที่ 5.1 ใช้เมาส์ (Mouse) เลื่อนตัวชี้ (Pointer) ไปที่ไอคอน PTunnel แล้วกดคลิกซ้อน (Double-Click) ก็จะเข้าสู่โปรแกรม Tunnel Lighting ได้ทันที



รูปที่ 5.1 ไอคอนของโปรแกรม

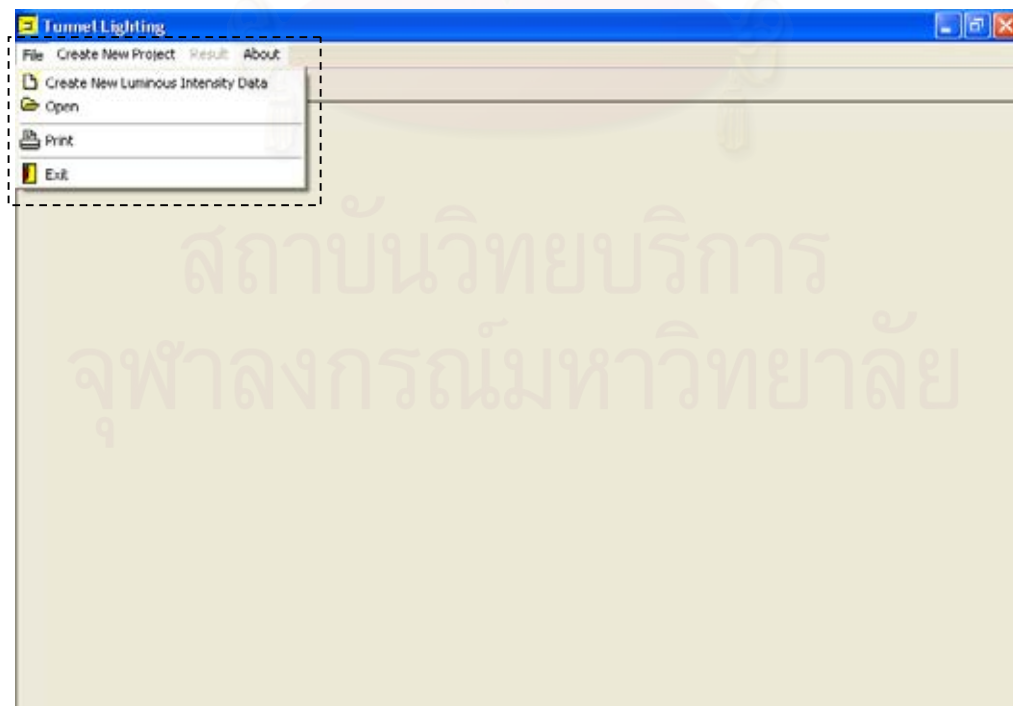
เมื่อเข้าโปรแกรม Tunnel Lighting จะปรากฏภาพหน้าต่างหลักของโปรแกรม ดังรูปที่ 5.2 โดยด้านบนของโปรแกรมจะมีเมนูบาร์ ซึ่งจะมีเมนูหลักคือ File ,Create New Project , Result , About ในแต่ละรายการจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.2 หน้าต่างหลักของโปรแกรม

1. การใช้งานรายการ File บนเมนูบาร์ดังรูปที่ 5.2

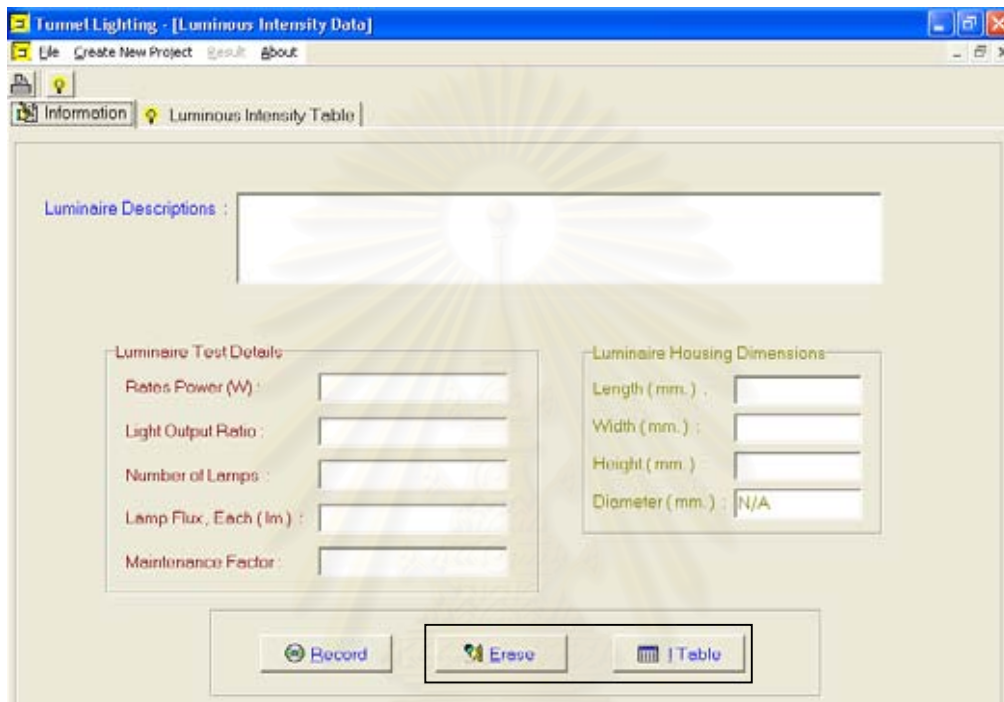
เมื่อเลือก File จะปรากฏดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 หน้าต่างเมื่อเลือกรายการ File

จากรูปที่ 5.3 จะปรากฏเมนูย่อยคือ Create New Luminous Intensity Data , Open, Print และ Exit ในแต่ละรายการจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

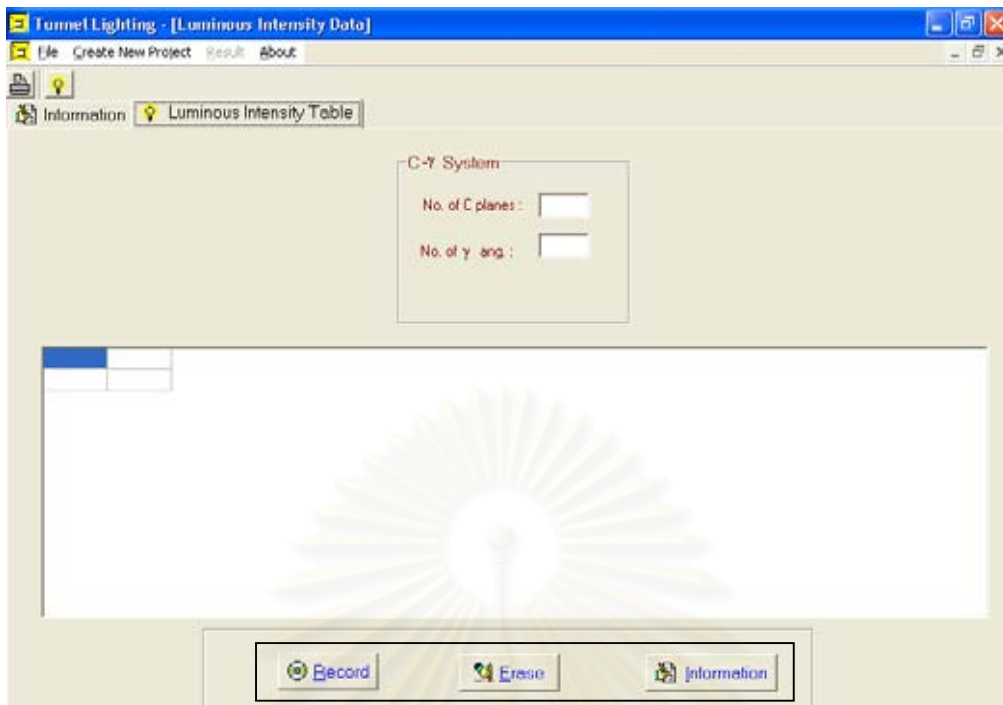
1.1 Create New Luminous Intensity Data เป็นรายการที่ให้ผู้ใช้งานป้อนข้อมูลความเข้มส่องสว่างของดวงโคมเข้าไป โดยเมื่อคลิกเมนูย่อย Create New Luminous Intensity Data จะปรากฏดังรูปที่ 5.4







รูปที่ 5.4 หน้าต่างย่อยในส่วนของการใส่ข้อมูลความเข้มส่องสว่างของดวงโคม

จากรูปที่ 5.4 ให้ผู้ใช้ใส่ข้อมูลต่าง ๆ เมื่อทำการใส่ข้อมูลต่าง ๆ ครบแล้ว ถ้ากดปุ่ม  Erase จะทำให้ข้อมูลในส่วนของ Information โดนลบไป เมื่อผู้ใช้เลือก  ได้ดังรูปที่ 5.5

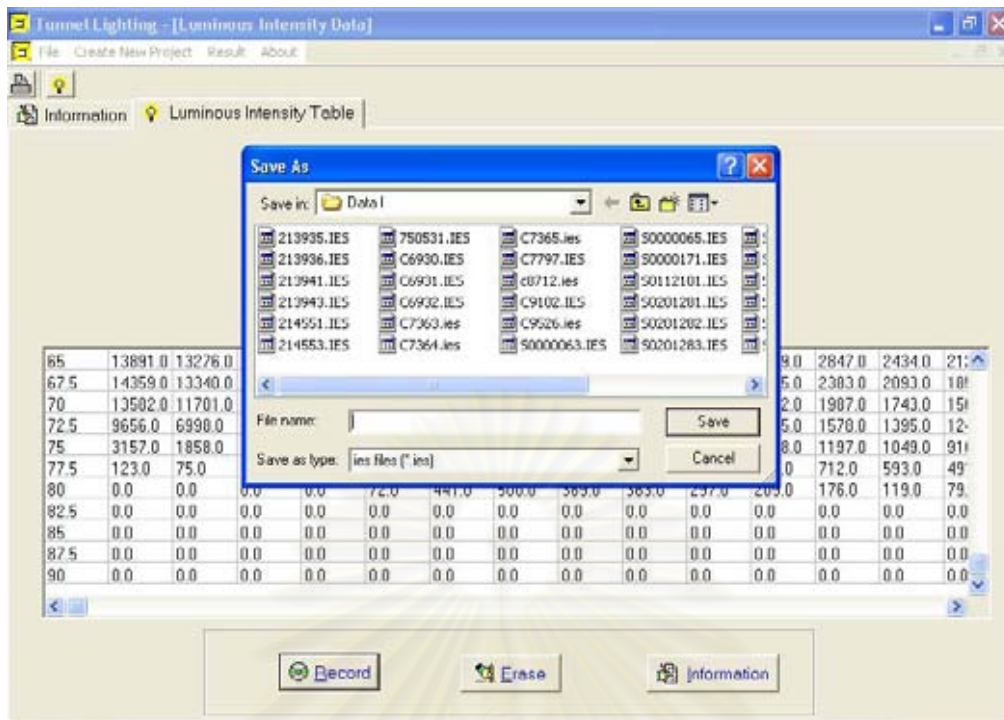
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.5 หน้าต่างย่อยในส่วนของการใส่ข้อมูลความเข้มส่องสว่างของดวงโคม

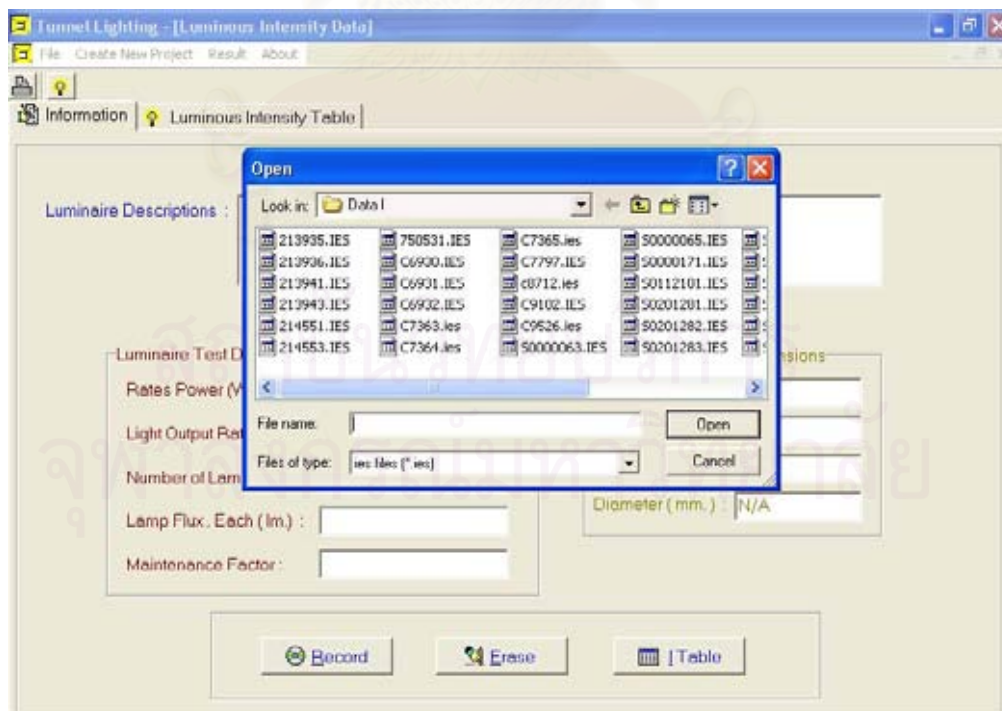
- ผู้ใช้อยังสามารถไปยังหน้าต่างดังรูปที่ 5.5 ได้โดยกดปุ่ม  Table ในรูปที่ 5.4 และผู้ใช้อสามารถกลับไปยังหน้าต่างดังรูปที่ 5.4 ได้โดยกดปุ่ม  Information ในรูปที่ 5.5
- เมื่อทำการใส่ข้อมูลต่าง ๆ ครบแล้ว ถ้ากดปุ่ม  Erase ในรูปที่ 5.5 จะทำให้ข้อมูลในส่วนของความเข้มส่องสว่างโดนลบไป
- เมื่อใส่ข้อมูลเสร็จแล้ว ให้กดปุ่ม  Record เพื่อทำการบันทึกข้อมูล ดังรูปที่ 5.6

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



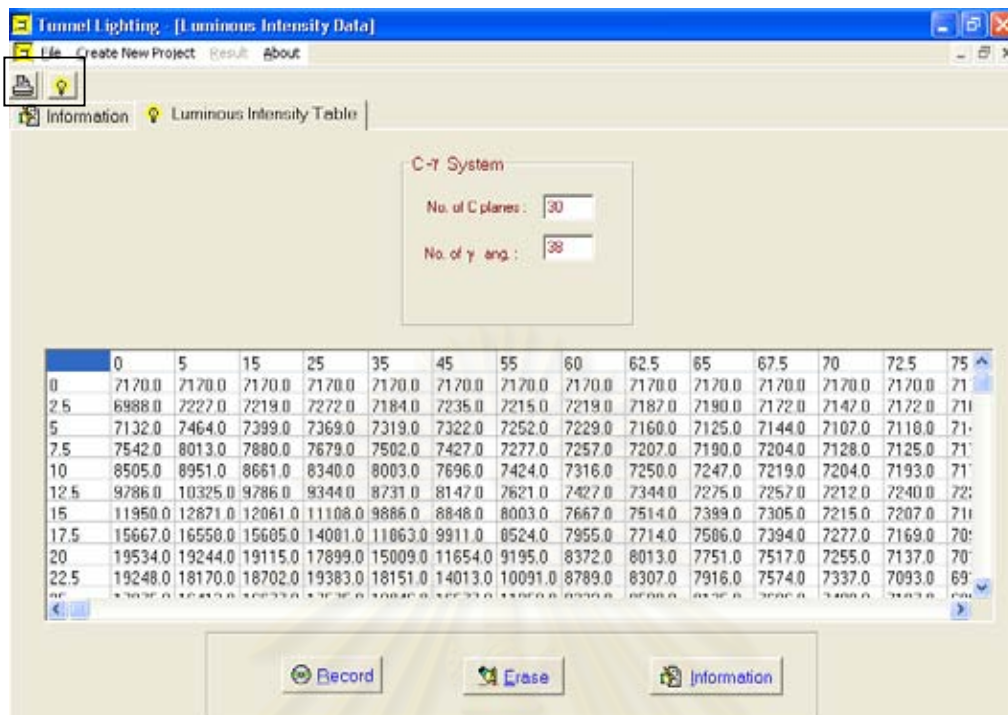
รูปที่ 5.6 หน้าต่างแสดงการบันทึกข้อมูล

- 1.2 Open เป็นรายการที่ให้ผู้ใช้งานข้อมูลความเข้มส่องสว่างของดวงโคม โดยเมื่อคลิกเมนูย่อย Open ในรูปที่ 5.3 จะปรากฏดังรูปที่ 5.7




รูปที่ 5.7 หน้าต่างแสดงการเปิดข้อมูล

เลือกข้อมูลที่ต้องการเปิด จะได้ดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 หน้าต่างย่อยในส่วนของการเปิดข้อมูลความเข้มส่องสว่างของดวงโคม

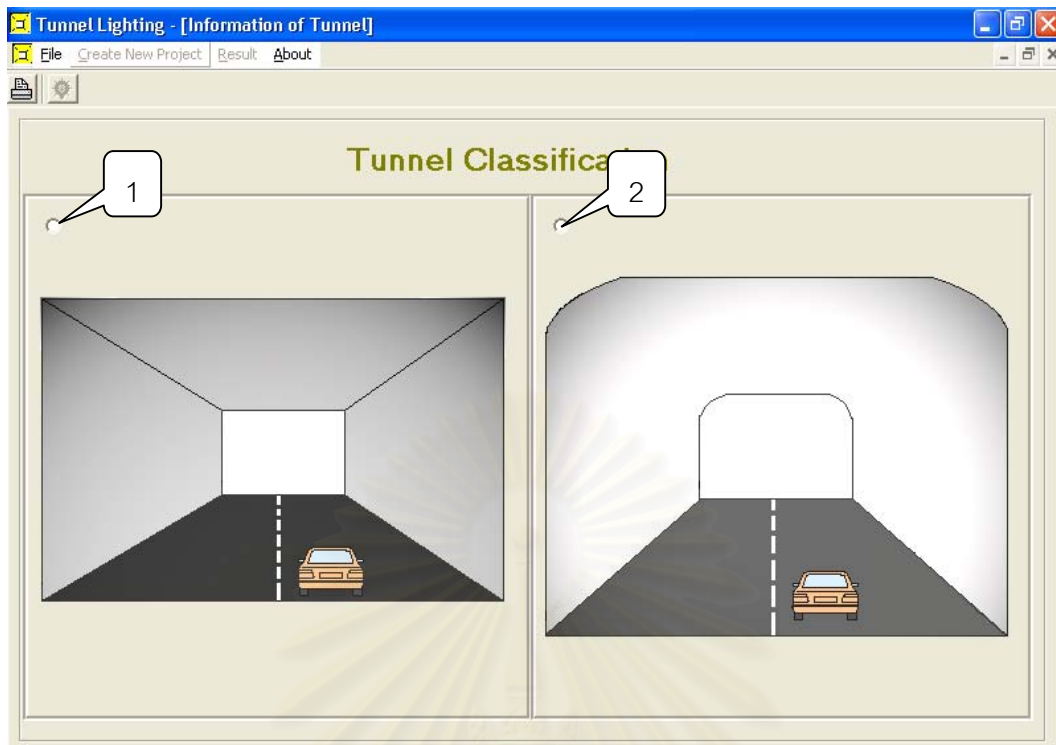
1.3 Print เป็นรายการที่ให้ผู้ใช้งานสามารถพิมพ์ผลการวิเคราะห์ค่าความสว่างและความส่องสว่างทางเครื่องพิมพ์ได้ หรืออาจจะกดปุ่มลัด  ในรูปที่ 5.8 โดยตัวอย่างการพิมพ์จะปรากฏในภาคผนวก ค

1.4 Exit เป็นรายการสำหรับการออกจากโปรแกรม

2. การใช้รายการ Create New Project บนเมนูบาร์ดังรูปที่ 5.2

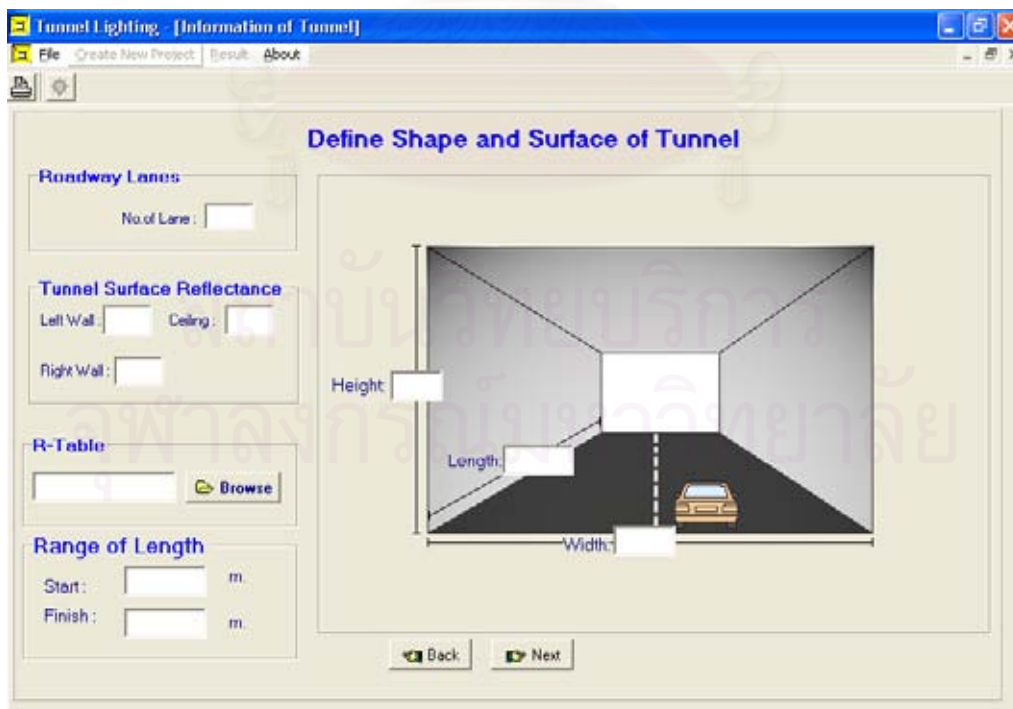
เมื่อเลือก Create New Project หรือเลือกปุ่มลัด  ในรูปที่ 5.8 จะปรากฏดังรูปที่ 5.9

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



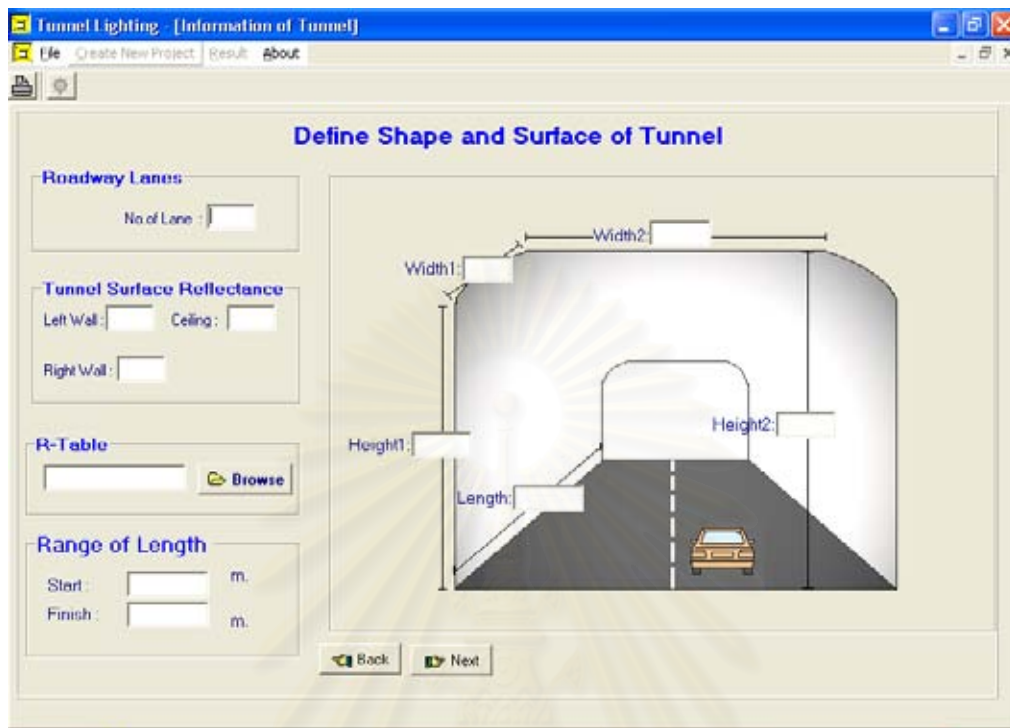
รูปที่ 5.9 หน้าต่างเมื่อเลือกรายการ Create New Project

ถ้าอุโมงค์มีลักษณะพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมให้ผู้เลือกใช้ ๓ ตำแหน่งหมายเลข 1 ในรูปที่ 5.9 จะปรากฏดังรูปที่ 5.10

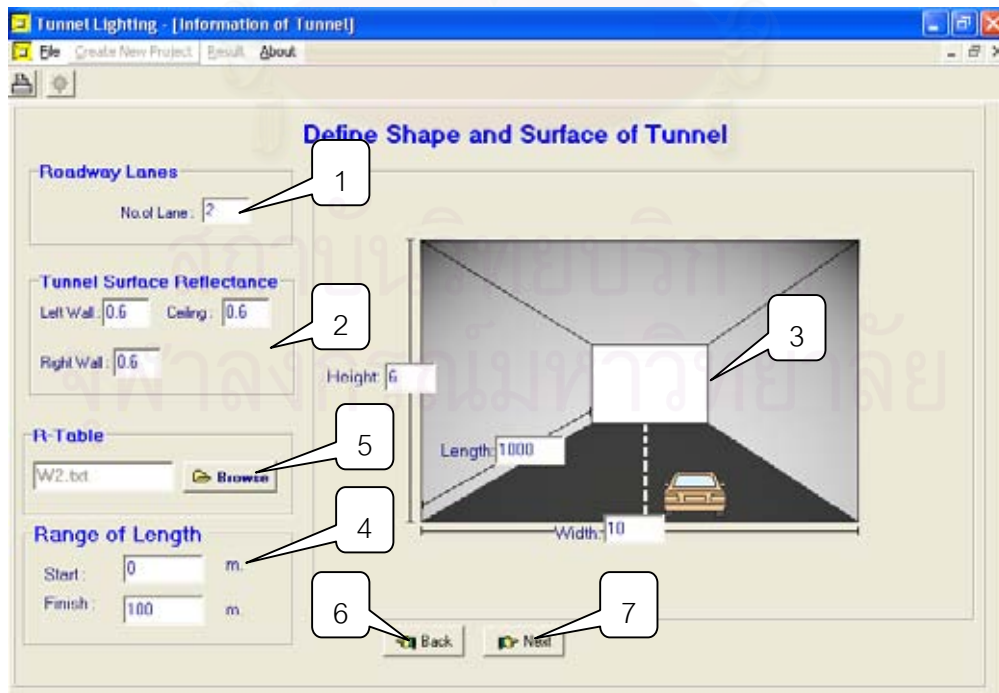


รูปที่ 5.10 หน้าต่างสำหรับป้อนข้อมูลของอุโมงค์ที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม

แต่ถ้าอุโมงค์มีลักษณะพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปโค้งให้ผู้ใช้เลือก ณ ตำแหน่งหมายเลข 2 ในรูปที่ 5.9 จะปรากฏดังรูปที่ 5.11



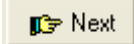


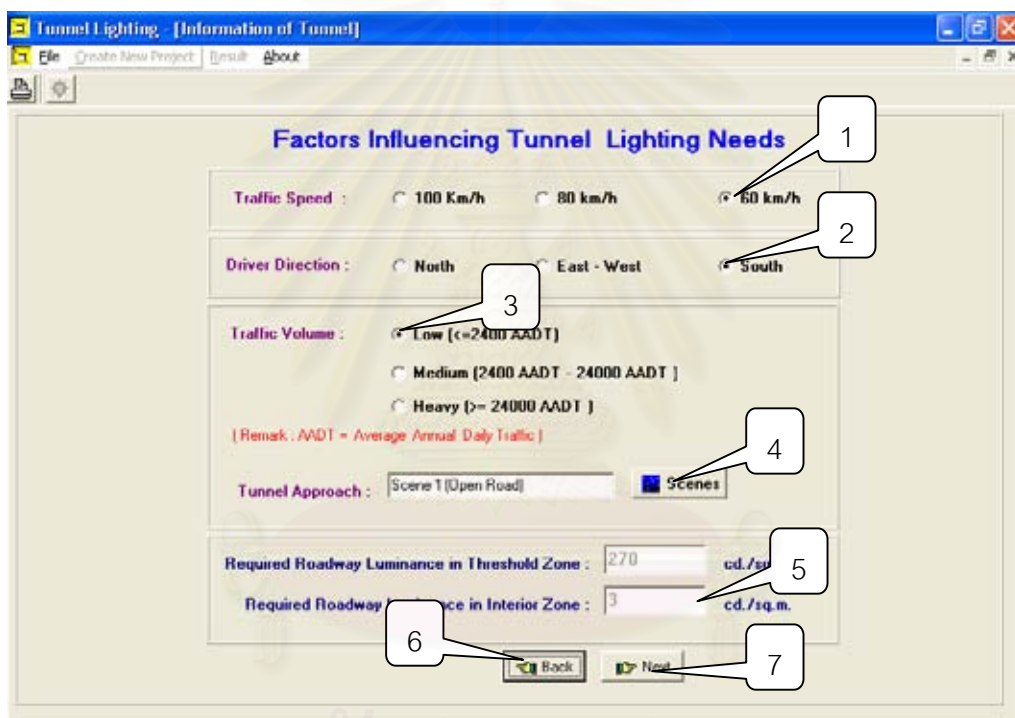
รูปที่ 5.11 หน้าต่างสำหรับป้อนข้อมูลของอุโมงค์ที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปโค้ง
ในการอธิบายขั้นตอนในการใช้โปรแกรมดังกล่าว จะกำหนดให้อุโมงค์มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 5.12



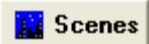
รูปที่ 5.12 ตัวอย่างการใส่ข้อมูลของอุโมงค์

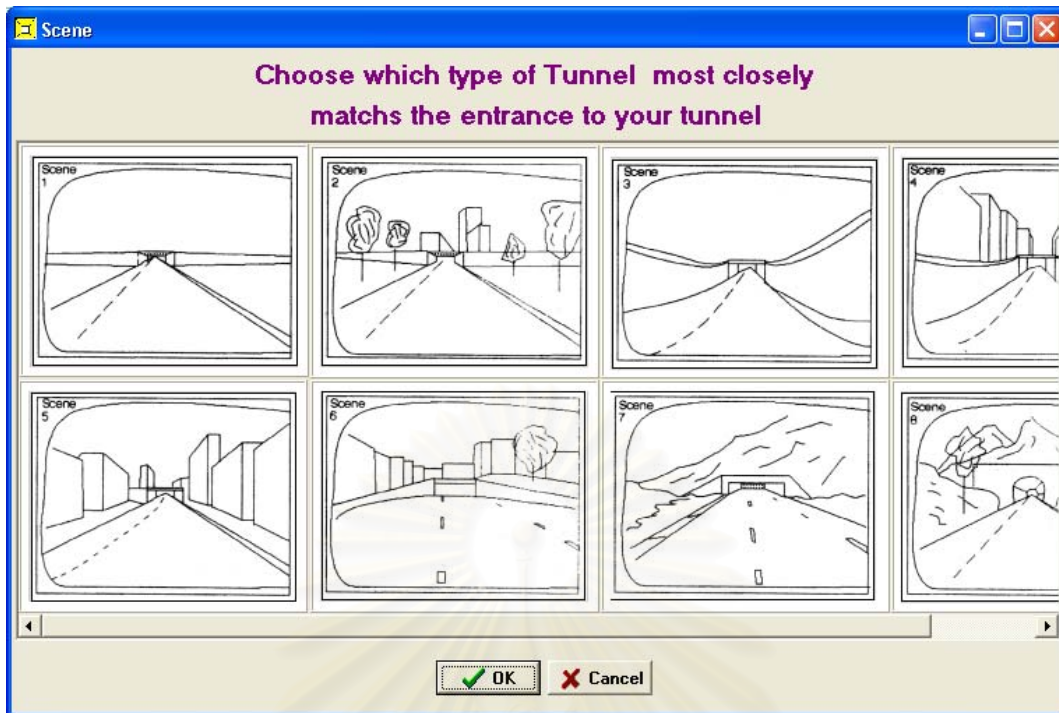
จากรูปที่ 5.12

1. ใส่จำนวนช่องทางเดินรถ (Lane)
2. ใส่ค่าการสะท้อนแสงของพื้นผิวผนังด้านซ้าย ผนังด้านขวา และเพดาน
3. ใส่ค่าขนาดของอุโมงค์
4. ใส่ค่าช่วงความยาวที่ต้องการวิเคราะห์ค่าความสว่างและความส่องสว่าง (ไม่เกิน 100 เมตร)
5. เลือกปุ่ม  เพื่อเลือกประเภทของผิวดน
6. เลือกปุ่ม  ถ้าต้องการกลับไปหน้าต่างในรูปที่ 5.9
7. เลือกปุ่ม  จะปรากฏดังรูปที่ 5.13




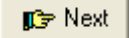
รูปที่ 5.13 หน้าต่างสำหรับเลือกปัจจัยของอุโมงค์ที่มีผลกับความส่องสว่างภายในอุโมงค์
จากรูปที่ 5.13

1. เลือกค่าความเร็วสูงสุดของยานพาหนะที่เดินทางภายในอุโมงค์
2. เลือกทิศทางการเดินรถ
3. เลือกปริมาณของยานพาหนะที่ผ่านอุโมงค์ภายใน 24 ชั่วโมงเฉลี่ยต่อปี
4. เลือกฉากหลังของอุโมงค์โดยเลือกปุ่ม  จะปรากฏดังรูปที่ 5.14




รูปที่ 5.14 หน้าต่างแสดงฉากหลัง

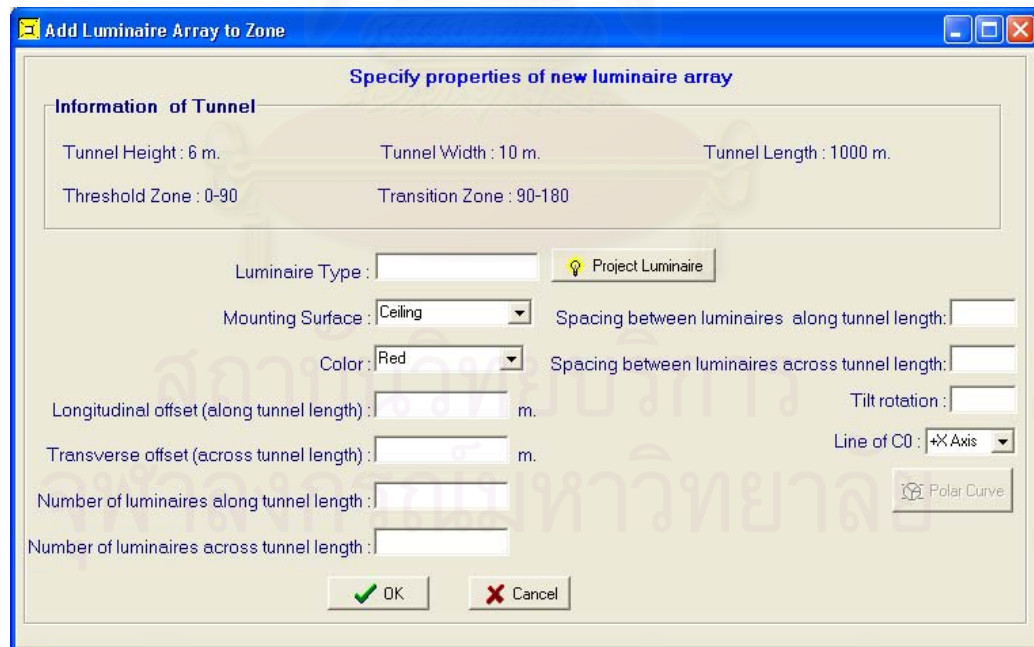
คลิกเลือกฉากหลังแล้วเลือกปุ่ม  ในรูปที่ 5.14


5. โปรแกรมจะคำนวณค่าความส่องสว่างใน Threshold zone และ Interior zone ที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมของอุโมงค์ตามที่ผู้ใช้ป้อนข้อมูลเข้าไป
6. เลือกปุ่ม  ถ้าต้องการกลับไปหน้าต่างในรูปที่ 5.10 หรือรูปที่ 5.11 ขึ้นอยู่กับลักษณะของอุโมงค์
7. เลือกปุ่ม  จะปรากฏดังรูปที่ 5.15

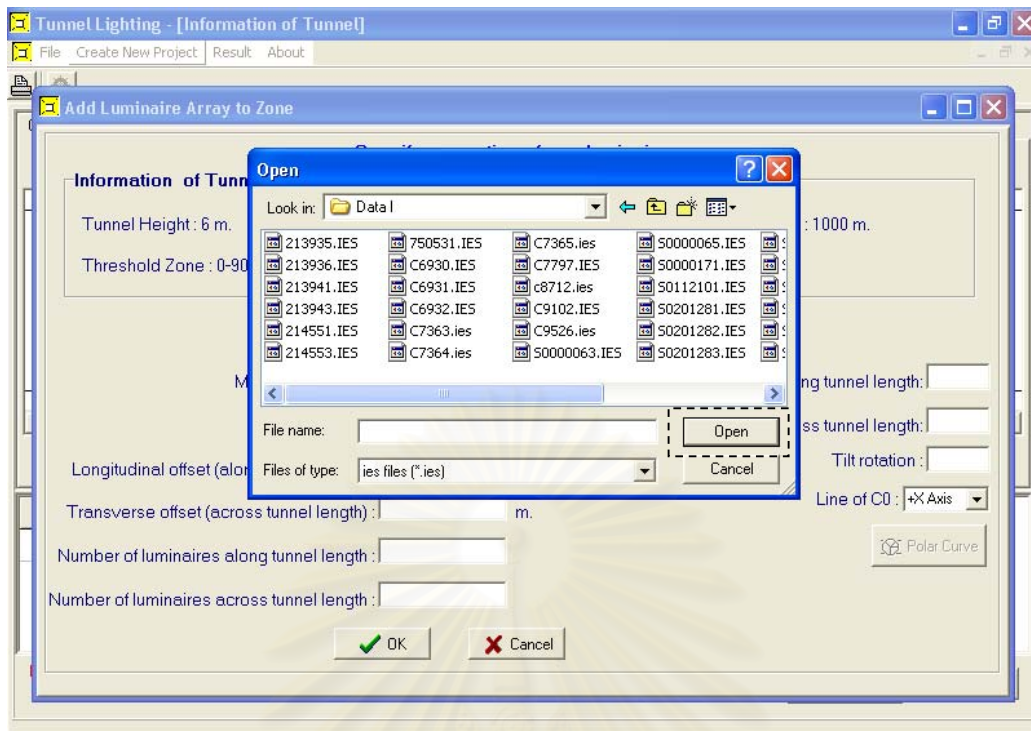
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.15 หน้าต่างแสดงการออกแบบระบบแสงสว่างภายในอุโมงค์
 เลือกปุ่ม  ในรูปที่ 5.15 เป็นการเลือกดวงโคมที่จะนำมาติดตั้งภายในอุโมงค์จะ
 ปรากฏดังรูปที่ 5.16

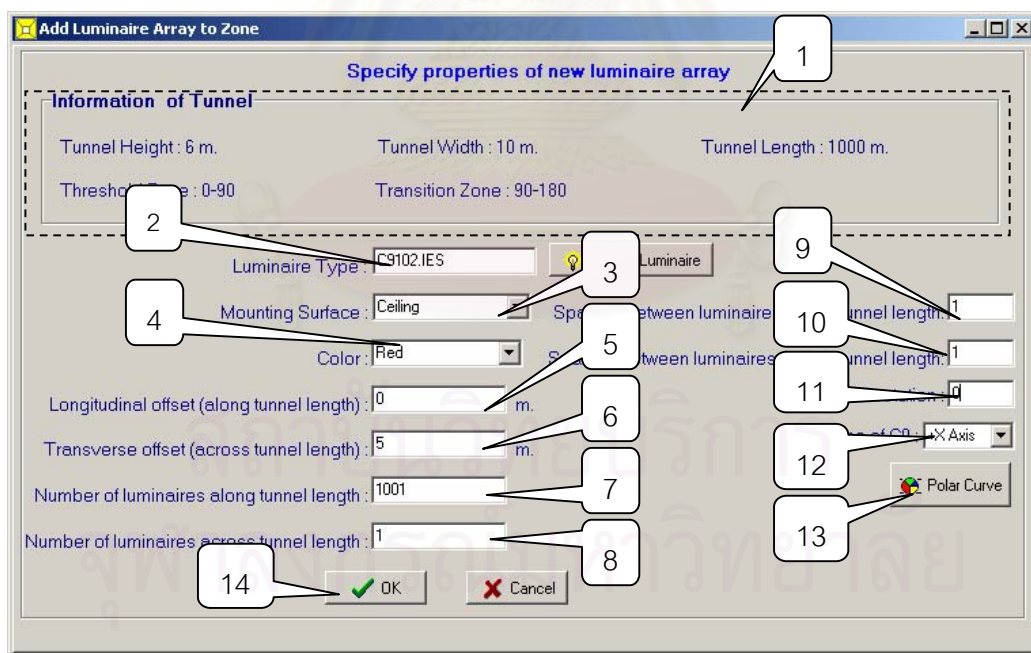


รูปที่ 5.16 หน้าต่างการเลือกดวงโคมที่ใช้ในการออกแบบระบบแสงสว่างภายในอุโมงค์
 เลือกปุ่ม  เพื่อเลือกดวงโคม เมื่อคลิกปุ่มนี้จะได้ดังรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.17 หน้าต่างแสดงการเลือกดวงโคม

เมื่อเลือกดวงโคมแล้วคลิกปุ่ม **Open** ในรูปที่ 5.17 จะปรากฏดังรูปที่ 5.18

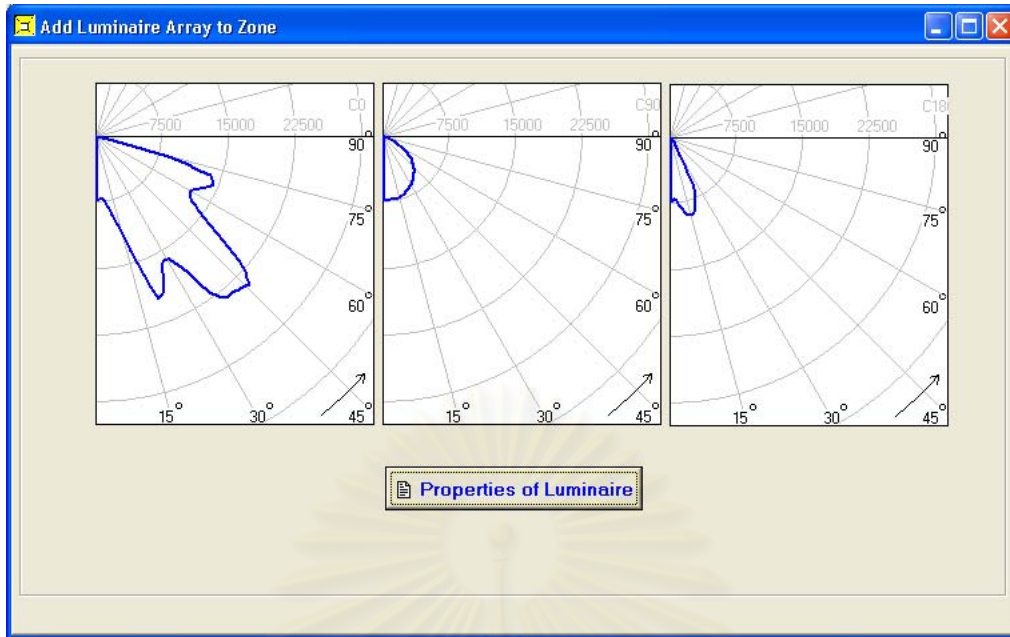


รูปที่ 5.18 หน้าต่างแสดงรายละเอียดการกำหนดตำแหน่งของดวงโคม

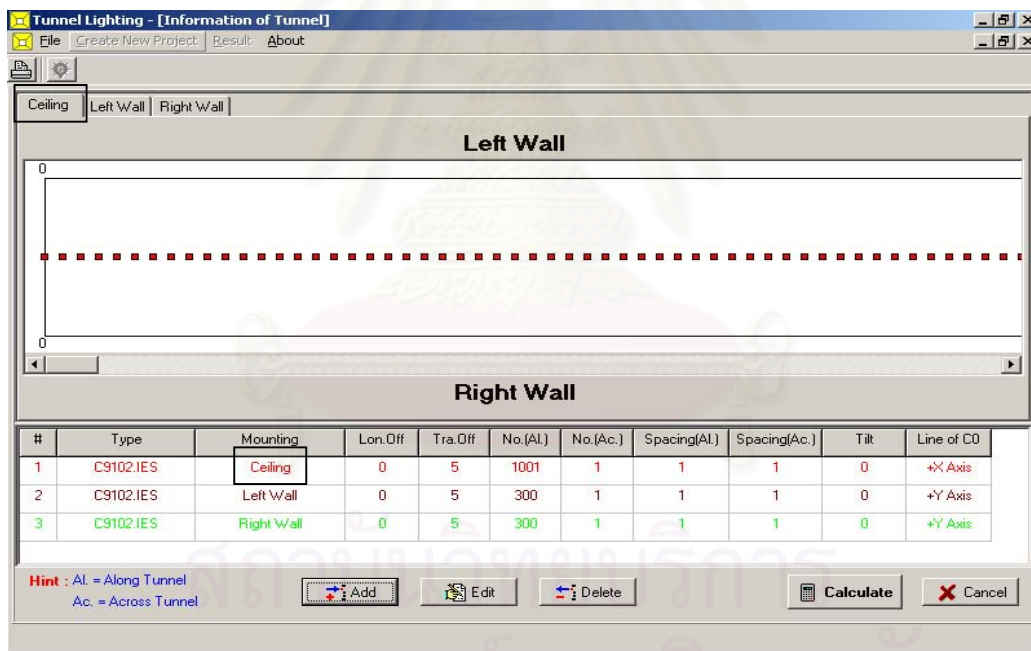
จากรูปที่ 5.18

1. แสดงรายละเอียดของอุโมงค์โดยจะบอกเกี่ยวกับขนาดของอุโมงค์ แสดงช่วงความยาวของ Threshold Zone แสดงช่วงความยาวของ Transition Zone

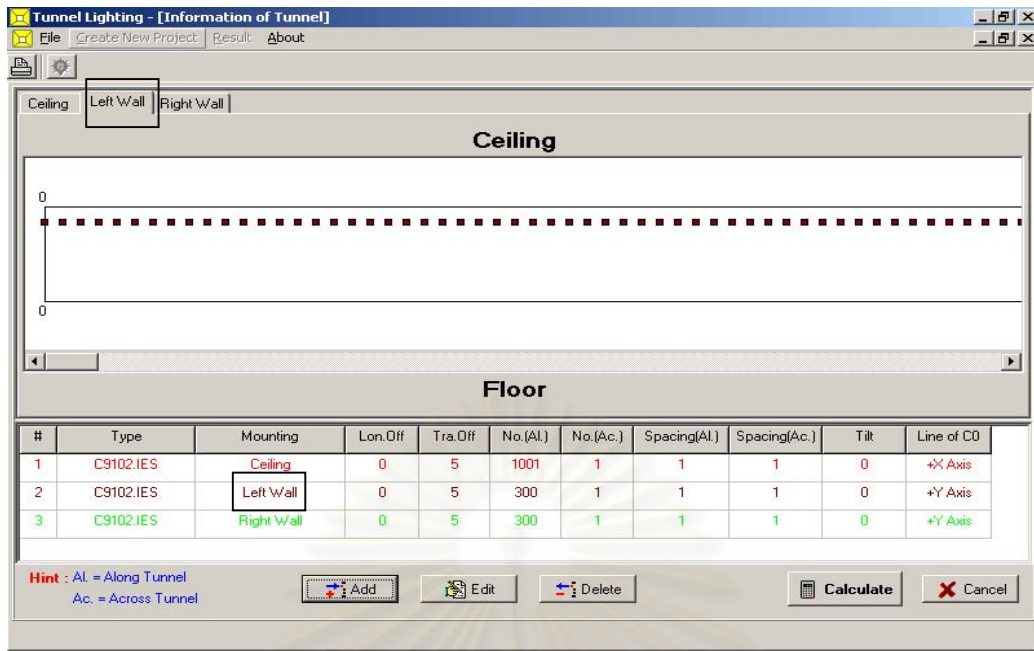
2. แสดงชื่อของแฟ้มข้อมูลดวงโคม
3. เลือกตำแหน่งของการติดตั้งอุโมงค์ โดยสามารถติดตั้งได้บนเพดาน (Ceiling) ผนังด้านซ้าย (Left Wall) ผนังด้านขวา (Right Wall) เพดานเอียงด้านซ้าย (Incline Left Ceiling) เพดานเอียงด้านขวา (Incline Right Ceiling) ในกรณีที่อุโมงค์ที่กำลังพิจารณาเป็นอุโมงค์ที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจะไม่สามารถเลือกตำแหน่งการติดตั้งดวงโคมที่เพดานเอียงด้านซ้ายหรือเพดานเอียงด้านขวาได้ โดยสามารถคลิกที่ ในส่วนของ Mounting Surface
4. เลือกสีที่ต้องการให้โปรแกรมแสดงภาพกราฟฟิก เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณตำแหน่งการติดตั้งดวงโคมในกรณีที่ติดตั้งดวงโคมหลายชุด โดยสามารถคลิกที่ปุ่ม ในส่วนของ Color ก็ จะปรากฏสีให้เลือก
5. ระยะเริ่มต้นที่ต้องการติดตั้งดวงโคมชุดนี้ในแนวแกน Y
6. ระยะเริ่มต้นที่ต้องการติดตั้งดวงโคมชุดนี้ในแนวแกน X สำหรับการติดตั้งบนเพดาน และในแนวแกน Z สำหรับการติดตั้งในกรณีอื่น ๆ
7. จำนวนดวงโคมที่ต้องการติดตั้งในแนวแกน Y
8. จำนวนดวงโคมที่ต้องการติดตั้งในแนวแกน X สำหรับการติดตั้งบนเพดาน และในแนวแกน Z สำหรับการติดตั้งในกรณีอื่น
9. ระยะระหว่างดวงโคมในแนวแกน Y
10. ระยะระหว่างดวงโคมในแนวแกน X สำหรับการติดตั้งบนเพดาน และในแนวแกน Z สำหรับการติดตั้งในกรณีอื่น
11. มุมเอียงของดวงโคม
12. เลือกทิศทางของแนวระนาบ C ที่ 0 องศา โดยทิศทางสามารถอยู่ในแนวแกน +X , -X,+Y, -Y,+Z และ -Z โดยสามารถคลิกที่ปุ่ม
13. โปรแกรมจะแสดงลักษณะการกระจายตัวของดวงโคมที่ได้เลือกในแนวระนาบ C ที่ 0,90,180 องศา ดังรูปที่ 5.19 เมื่อเลือกปุ่ม Properties of Luminaire ในรูปที่ 5.19 ก็จะสามารถย้อนกลับมารูปที่ 5.18
14. เลือกปุ่ม OK เมื่อเสร็จสิ้นการเลือกตำแหน่งของดวงโคม
ถ้าต้องการกำหนดตำแหน่งของดวงโคมในชุดอื่น ๆ ก็สามารถทำตามขั้นตอนที่ 1-14 ในรูปที่ 5.18 ได้ โดยภาพลักษณะการติดตั้งดวงโคมขึ้นอยู่กับตำแหน่งการติดตั้งดวงโคม นั่นคือ ถ้าชุดที่ 1 ติดตั้งไว้บนเพดาน ภาพลักษณะการติดตั้งจะปรากฏในส่วนที่เป็นเพดานดังรูปที่ 5.20



รูปที่ 5.19 หน้าต่างแสดงลักษณะการกระจายแสงของดวงโคมที่เลือกใช้

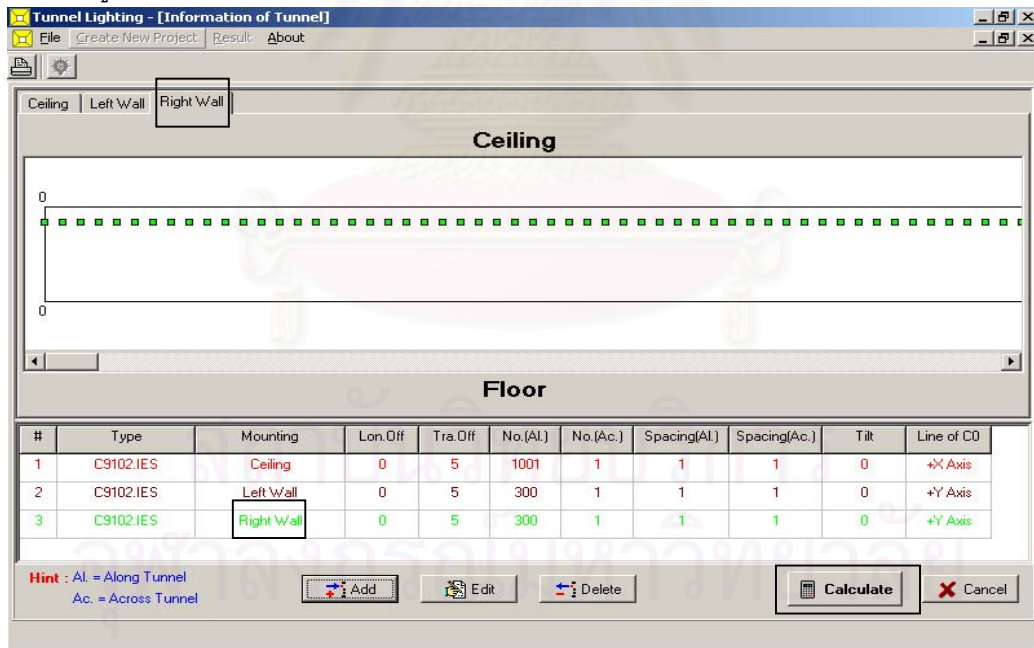


รูปที่ 5.20 หน้าต่างแสดงภาพลักษณะการติดตั้งบนเพดานของดวงโคมชุดที่ 1 ชุดที่ 2 ติดตั้งไว้บนผนังด้านซ้าย ภาพลักษณะการติดตั้งจะปรากฏในส่วนที่เป็นผนังด้านซ้ายดังรูปที่ 5.21




รูปที่ 5.21 หน้าต่างแสดงภาพลักษณะการติดตั้งบนผนังด้านซ้ายของดวงโคมชุดที่ 2

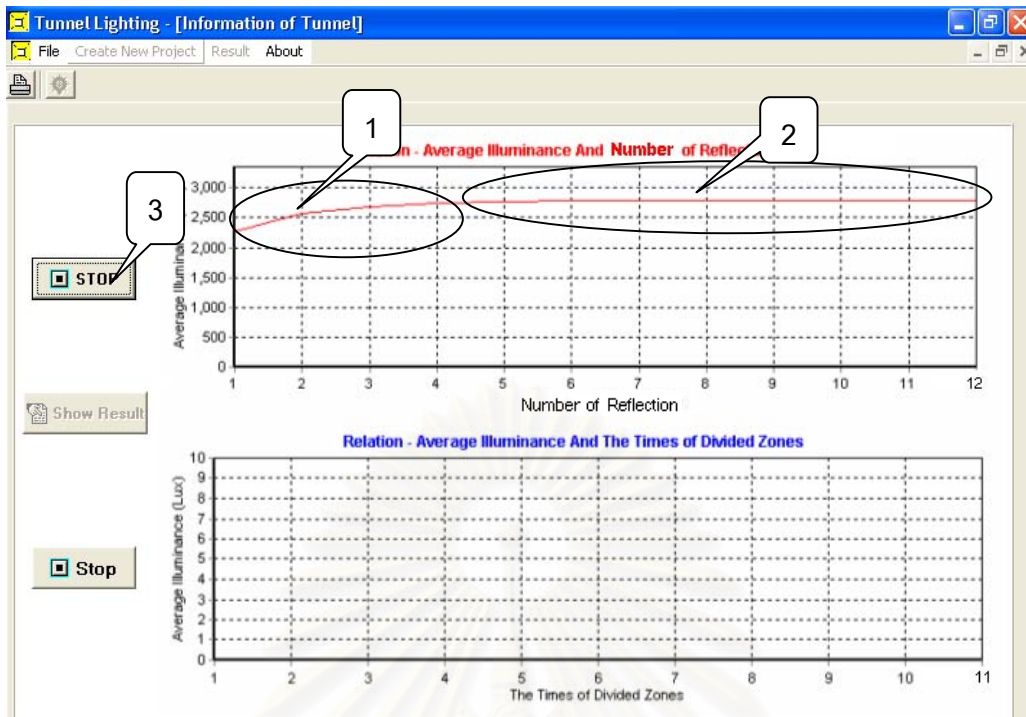
ชุดที่ 3 ติดตั้งไว้บนผนังด้านขวา ภาพลักษณะการติดตั้งจะปรากฏในส่วนที่เป็นผนังด้านซ้ายดังรูปที่ 5.22



รูปที่ 5.22 หน้าต่างแสดงภาพลักษณะการติดตั้งบนผนังด้านขวาของดวงโคมชุดที่ 3

ในกรณี que ติดตั้งบนเพดานเพียงก็จะเป็นไปในลักษณะเดียวกัน

เลือกปุ่ม  Calculate ในรูปที่ 5.22 จะปรากฏดังรูปที่ 5.23



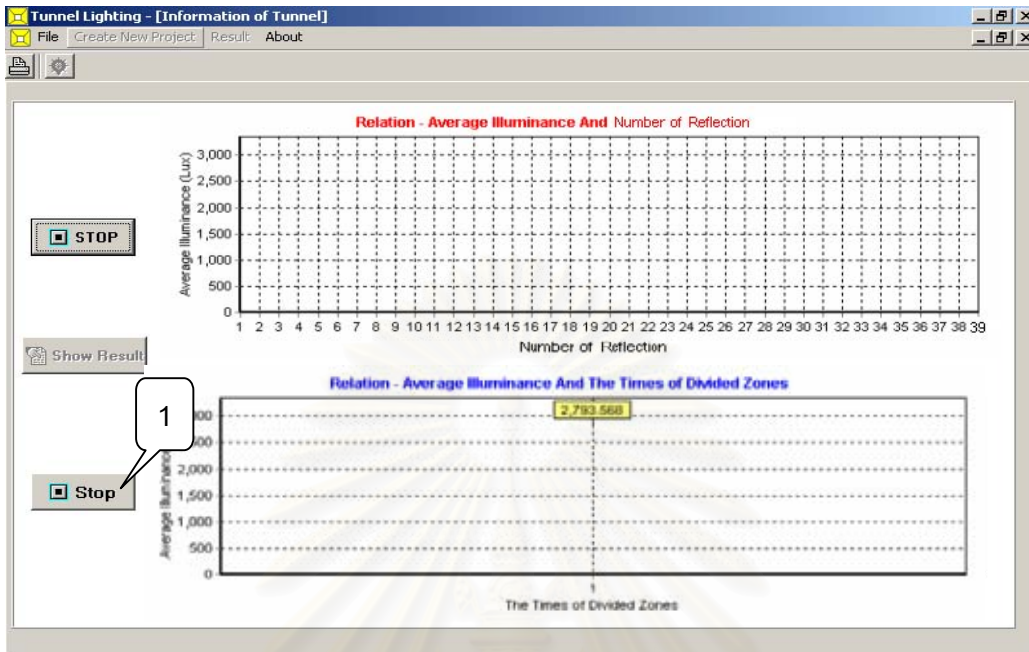
รูปที่ 5.23 หน้าต่างแสดงกราฟที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าความสว่างและความส่องสว่าง โดยกราฟด้านบนจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสว่างเฉลี่ยในช่วงที่ต้องการจะวิเคราะห์ค่าความสว่างและความส่องสว่างกับจำนวนครั้งในการสะท้อนระหว่างพื้นที่ย่อยที่ได้ทำการแบ่ง โดยจะอธิบายลักษณะของกราฟเป็น 2 ช่วง คือ

ช่วงของกราฟในหมายเลข 1 ในรูปที่ 5.23 กราฟจะมีความชันนั้นแสดงว่า ความสว่างที่เกิดจากการสะท้อนระหว่างพื้นที่ย่อยในแต่ละครั้งยังคงเพิ่มขึ้น ดังนั้นความสว่างและความส่องสว่างที่คำนวณได้ในช่วงนี้จึงไม่ใช่ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าความสว่างและความส่องสว่างที่เกิดขึ้นจริง


ช่วงของกราฟในหมายเลข 2 ในรูปที่ 5.23 กราฟจะมีลักษณะคงที่ นั้นแสดงว่า ความสว่างที่เกิดจากการสะท้อนระหว่างพื้นที่ย่อยในแต่ละครั้งเพิ่มขึ้นน้อยมาก ดังนั้นความสว่างและความส่องสว่างที่ช่วงนี้จึงเป็นค่าที่ค่อนข้างใกล้เคียงกับค่าความสว่างและความส่องสว่างที่เกิดขึ้นจริง



เมื่อผู้ใช้พิจารณาค่าความสว่างจากรูปกราฟและมีความพอใจต่อช่วงความแตกต่างของความสว่างของการสะท้อนแต่ละครั้ง ผู้ใช้สามารถเลือกปุ่ม ในหมายเลข 3 ในรูปที่ 5.23 โปรแกรมจะทำการวาดกราฟในรูปล่างซึ่งเป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสว่างเฉลี่ยในช่วงที่ต้องการจะวิเคราะห์ค่าความสว่างและความส่องสว่างกับจำนวนครั้งที่ทำการแบ่งพื้นที่ โดยยิ่งจำนวนครั้งในการแบ่งพื้นที่มากก็จะได้ความละเอียดของพื้นที่มากขึ้น นั่นคือทำให้ผลการคำนวณมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น แต่ก็ต้องเสียเวลามากเช่นกัน พร้อม

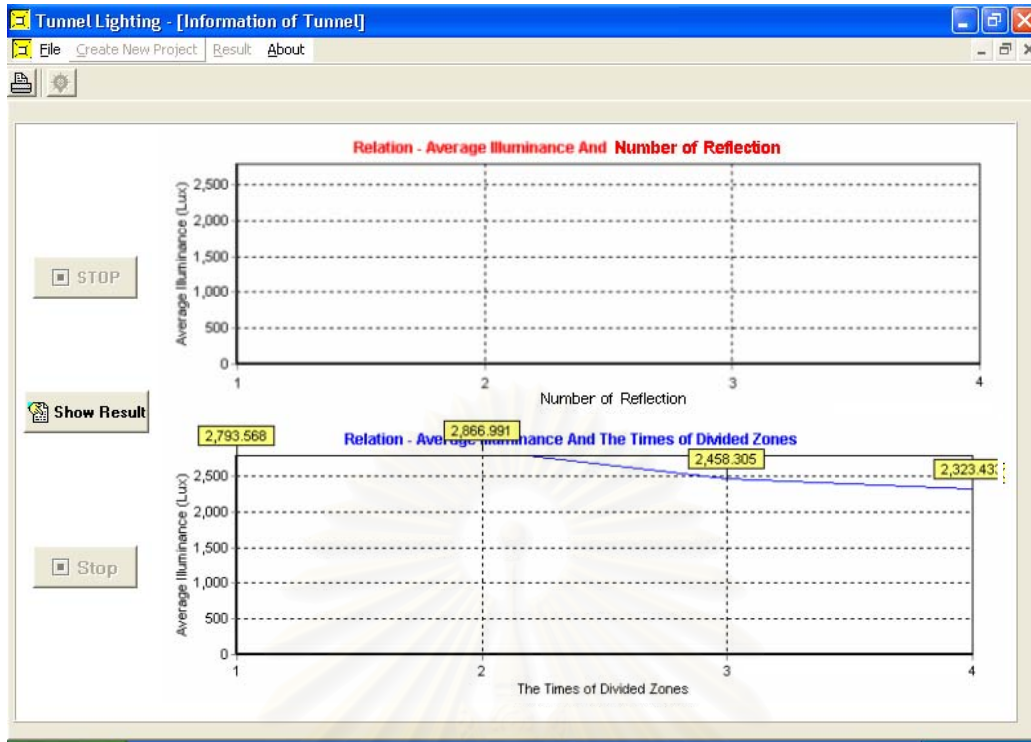
ดังนั้นโปรแกรมจะทำการล้างกราฟด้านบนเพื่อที่จะทำการวาดกราฟในการแบ่งพื้นที่ครั้งใหม่ ดังรูปที่ 5.24



รูปที่ 5.24 หน้าต่างแสดงกราฟที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าความสว่างและความส่องสว่าง

เมื่อผู้ใช้พิจารณาค่าความสว่างจากรูปกราฟและมีความพอใจต่อช่วงความแตกต่างของความส่องสว่างในการแบ่งพื้นที่แต่ละครั้ง ผู้ใช้สามารถเลือกปุ่ม  ในหมายเลข 1 ในรูปที่ 5.24

เมื่อผู้ใช้เลือกปุ่ม  ในหมายเลข 1 ในรูปที่ 5.24 จะทำให้ปุ่ม  ในรูปที่ 5.25 ทำงานได้ เมื่อเลือกปุ่มนี้จะเป็นการแสดงผลการคำนวณดังที่ได้กล่าวมาแล้วในส่วนของการแสดงผล

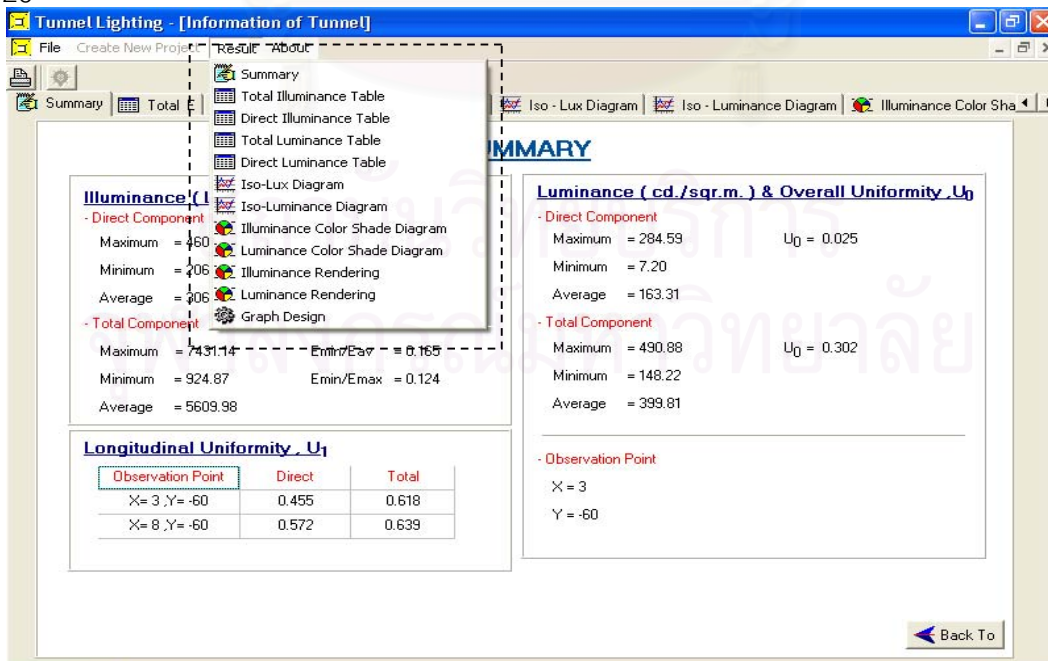


รูปที่ 5.25 หน้าต่างแสดงกราฟที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าความสว่างและความส่องสว่าง

3. การใช้รายการ Result บนเมนูบาร์ดังรูปที่ 5.2

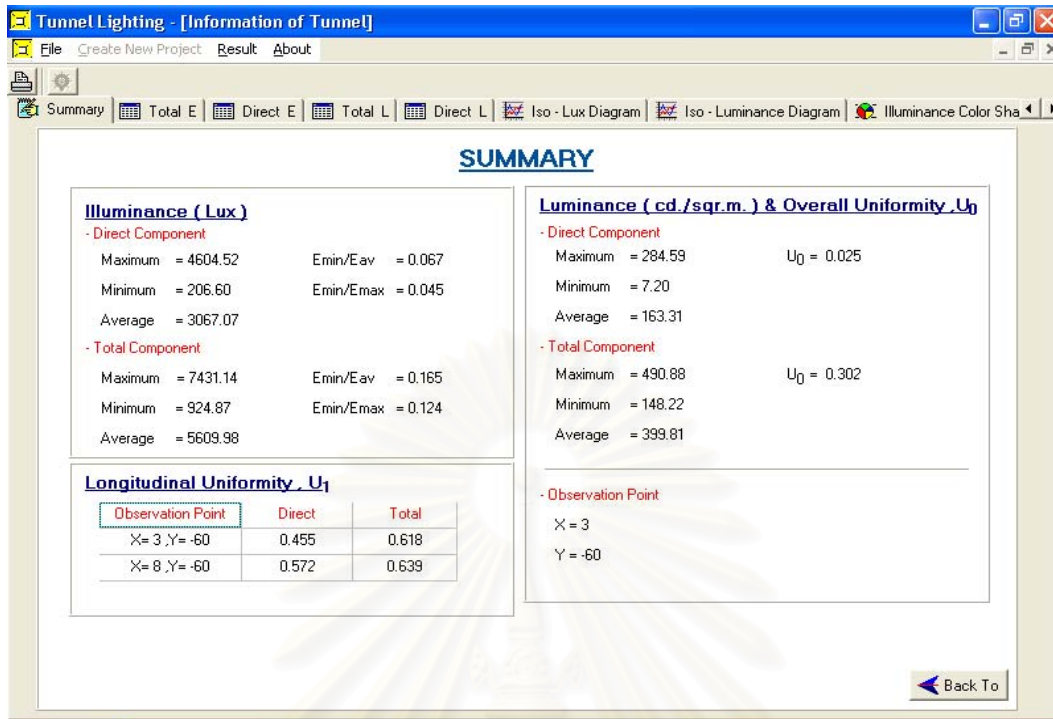
รายการ Result เป็นรายการที่ใช้ในการเลือกดูรูปแบบที่จะใช้ในการช่วยวิเคราะห์ค่าความสว่างและความส่องสว่างในช่วงที่ต้องการวิเคราะห์ เมื่อเลือก Result จะปรากฏดังรูปที่

5.26

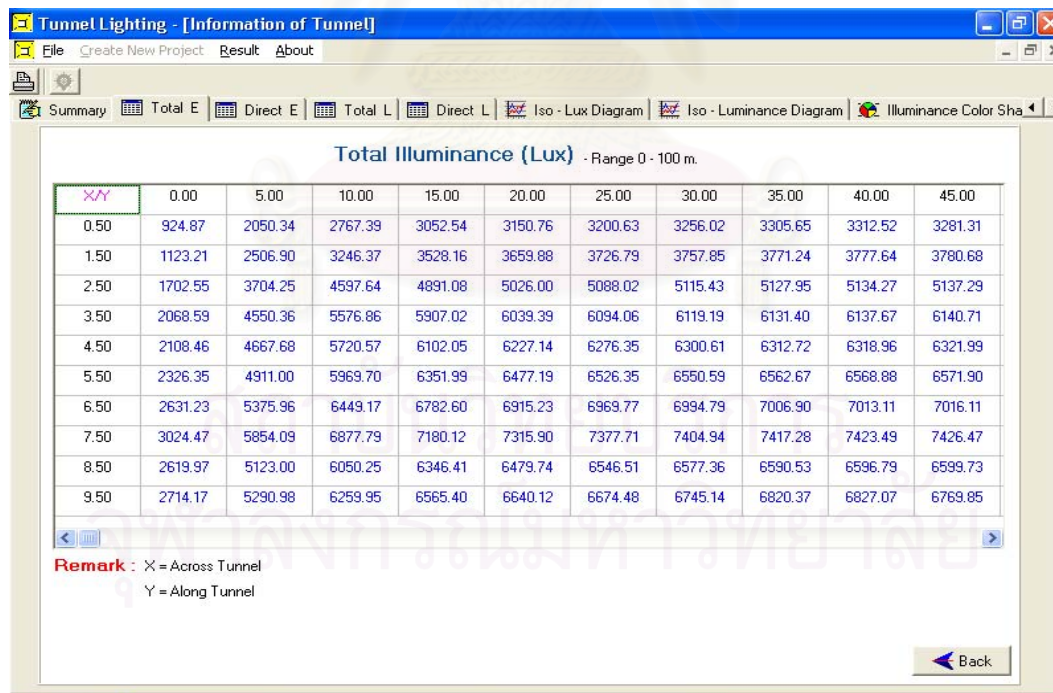


รูปที่ 5.26 หน้าต่างแสดงรายละเอียดในส่วนของ Result

โดยคลิกเลือกหัวข้อที่ต้องการพิจารณา ดังนี้



รูปที่ 5.27 หน้าต่างแสดงรายละเอียดของผลสรุปที่ได้จากการคำนวณ



รูปที่ 5.28 หน้าต่างแสดงตารางค่าความสว่างของ Total Component

Tunnel Lighting - [Information of Tunnel]

File Create New Project Result About

Summary Total E Direct E Total L Direct L Iso - Lux Diagram Iso - Luminance Diagram Illuminance Color Sha

Direct Illuminance (Lux) - Range 0 - 100 m.

X/Y	0.00	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00	30.00	35.00	40.00	45.00
0.50	206.60	438.87	655.65	729.93	764.45	784.66	793.74	796.37	796.92	796.98
1.50	343.63	844.05	1115.12	1190.90	1229.68	1248.88	1254.97	1256.10	1256.23	1256.24
2.50	883.97	2002.13	2422.39	2508.10	2549.84	2564.76	2567.61	2567.92	2567.95	2567.95
3.50	1227.00	2826.39	3376.40	3498.38	3537.62	3545.75	3546.65	3546.72	3546.72	3546.72
4.50	1249.81	2918.82	3492.08	3665.48	3697.70	3700.75	3701.02	3701.05	3701.05	3701.05
5.50	1450.01	3119.40	3695.02	3869.58	3902.23	3905.41	3905.72	3905.75	3905.75	3905.75
6.50	1735.29	3518.44	4104.98	4231.30	4271.79	4280.27	4281.27	4281.36	4281.37	4281.37
7.50	2111.38	3910.87	4445.07	4541.47	4585.64	4601.16	4604.14	4604.48	4604.51	4604.52
8.50	1700.84	3080.67	3517.19	3609.75	3652.23	3672.36	3678.63	3679.80	3679.93	3679.95
9.50	1804.81	3085.25	3495.80	3592.80	3632.08	3653.54	3662.90	3665.58	3666.13	3666.20

Remark : X = Across Tunnel
Y = Along Tunnel

Back

รูปที่ 5.29 หน้าต่างแสดงตารางค่าความสว่างของ Direct Component

Tunnel Lighting - [Information of Tunnel]

File Create New Project Result About

Summary Total E Direct E Total L Direct L Iso - Lux Diagram Iso - Luminance Diagram Illuminance Color Sha

Total Luminance (cd./sq.m.) - Range 0 - 100 m.

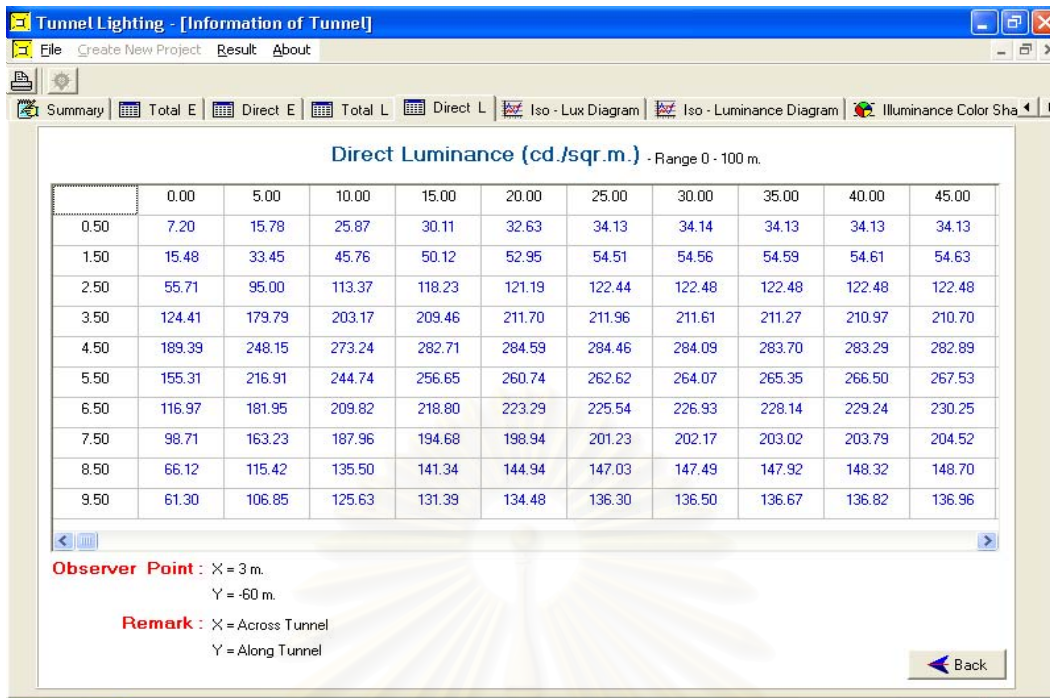
X/Y	0.00	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00	30.00	35.00	40.00	45.00
0.50	148.22	201.55	236.83	251.87	258.65	263.90	266.65	268.90	268.91	267.79
1.50	195.09	249.48	281.46	295.00	302.51	306.59	307.68	307.95	308.10	308.48
2.50	222.29	295.61	332.96	346.81	354.06	357.51	358.68	359.14	359.37	359.52
3.50	268.49	357.66	400.34	415.82	422.50	425.06	425.99	426.29	426.37	426.36
4.50	327.17	419.62	463.75	482.06	488.12	490.10	490.83	490.88	490.69	490.45
5.50	307.22	402.48	448.67	468.71	476.31	479.67	481.67	482.93	483.86	484.66
6.50	294.08	394.28	440.46	457.30	464.95	468.39	470.03	470.89	471.42	471.81
7.50	291.43	395.57	440.06	455.60	463.87	468.01	469.69	470.62	471.18	471.62
8.50	254.82	353.49	395.45	411.39	420.39	425.27	426.62	427.32	427.82	428.92
9.50	219.48	337.98	388.90	402.23	409.77	414.65	418.33	421.84	420.35	419.09

Observer Point : X = 3 m.
Y = -60 m.

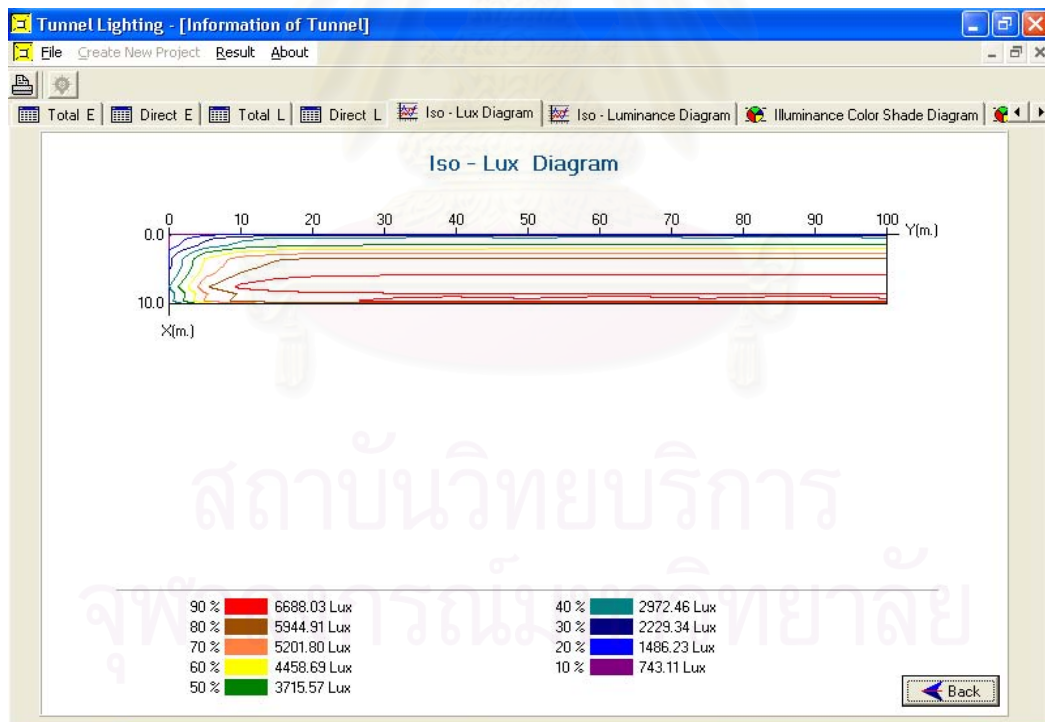
Remark : X = Across Tunnel
Y = Along Tunnel

Back

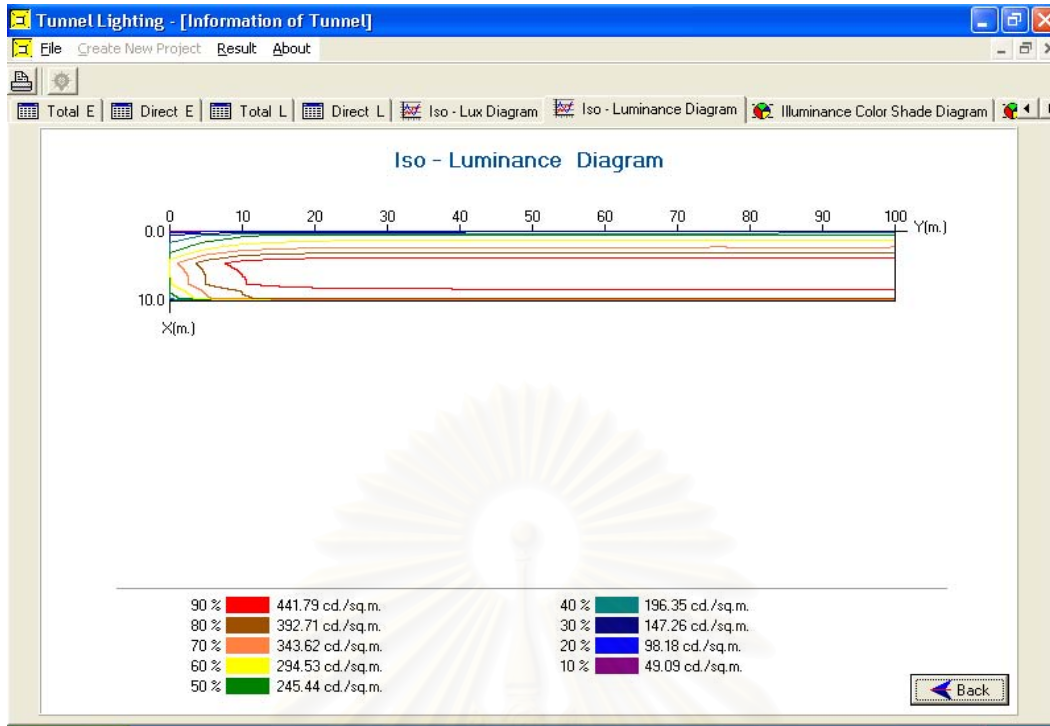
รูปที่ 5.30 หน้าต่างแสดงตารางค่าความส่องสว่างของ Total Component



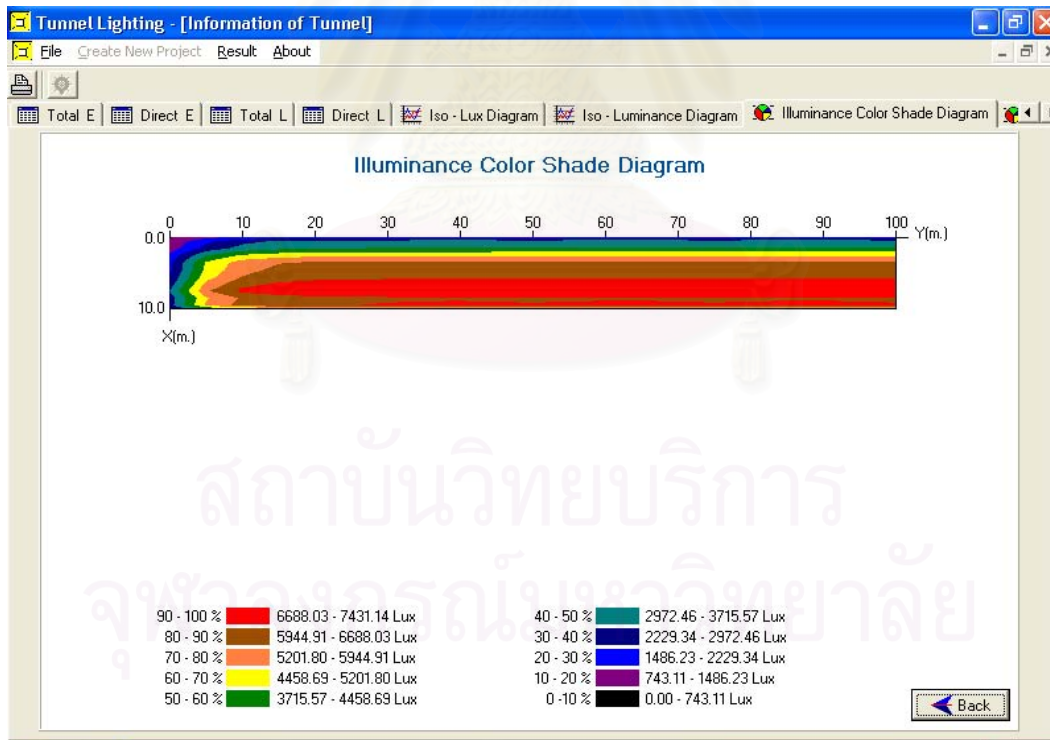
รูปที่ 5.31 หน้าต่างแสดงตารางค่าความส่องสว่างของ Direct Component



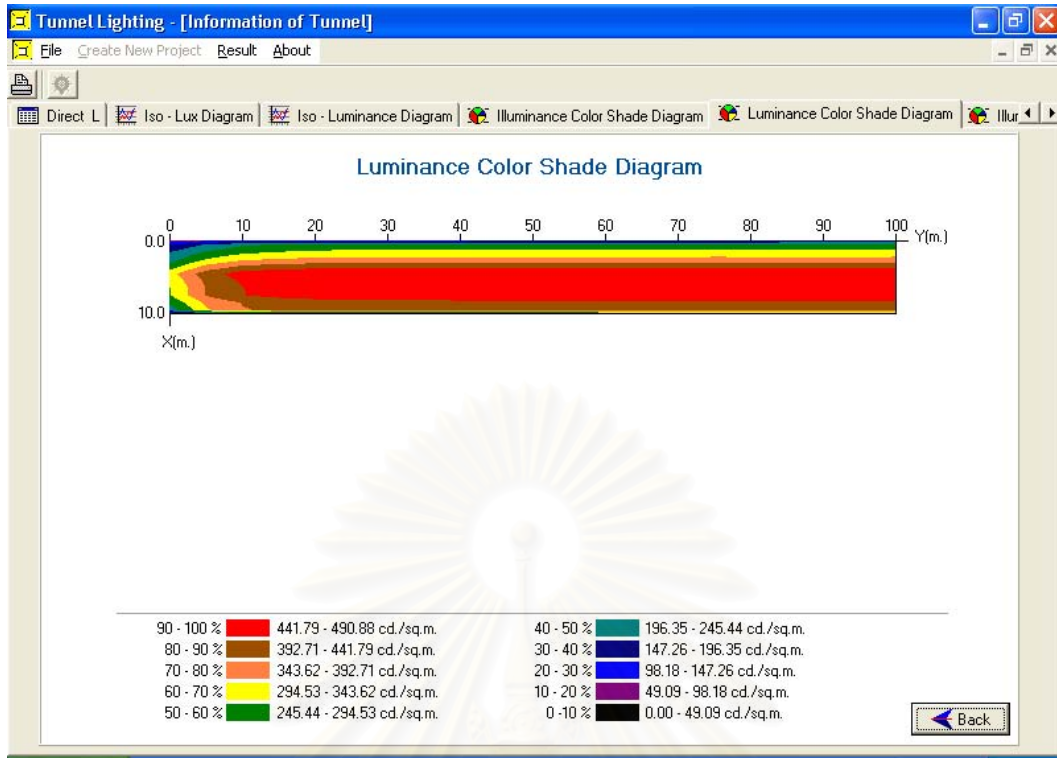
รูปที่ 5.32 หน้าต่างแสดงเส้นทางเดินของความสว่างเท่า



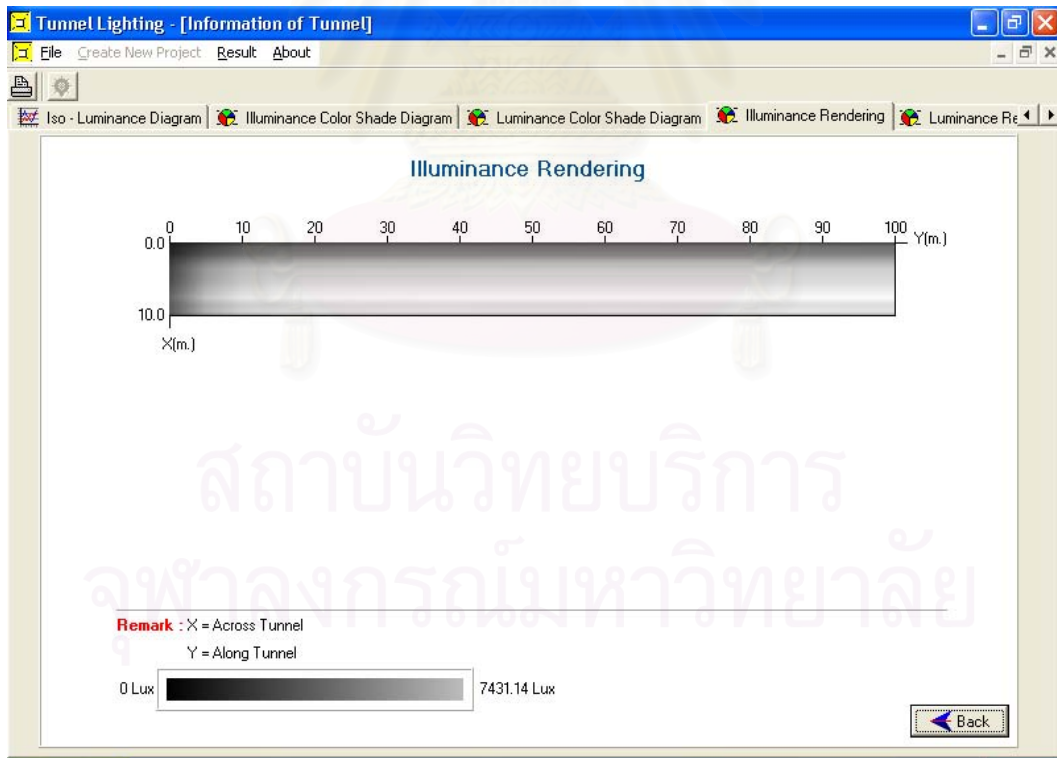
รูปที่ 5.33 หน้าต่างแสดงเส้นทางเดินของความส่องสว่างเท่า



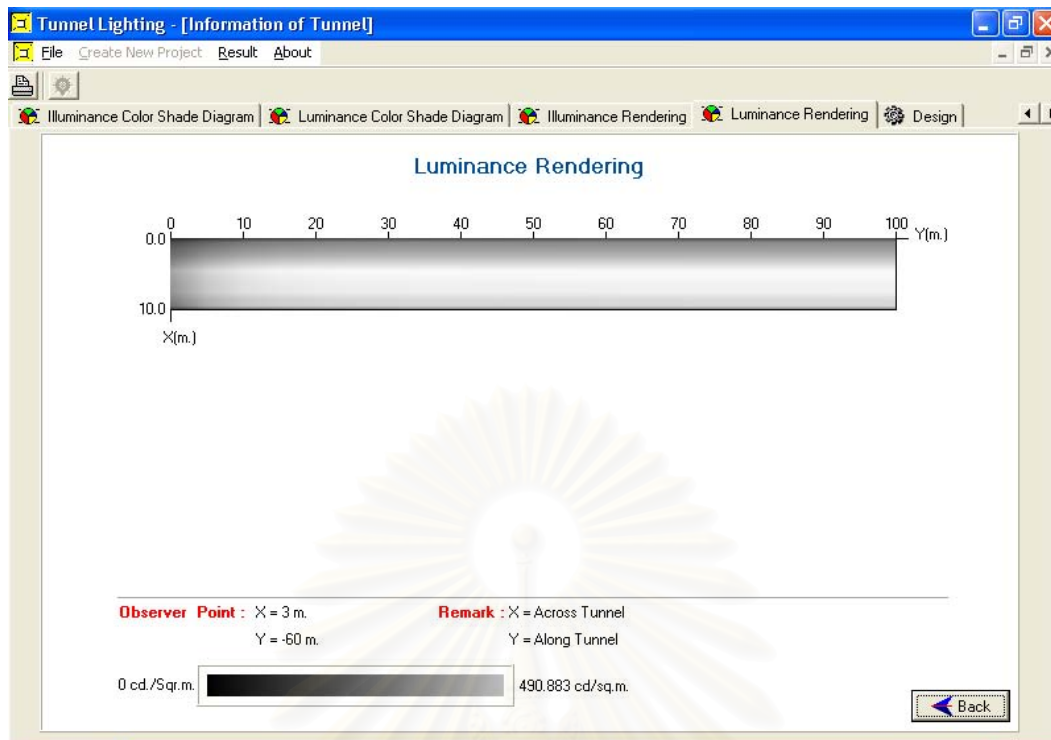
รูปที่ 5.34 หน้าต่างแสดง Shade ของความสว่าง




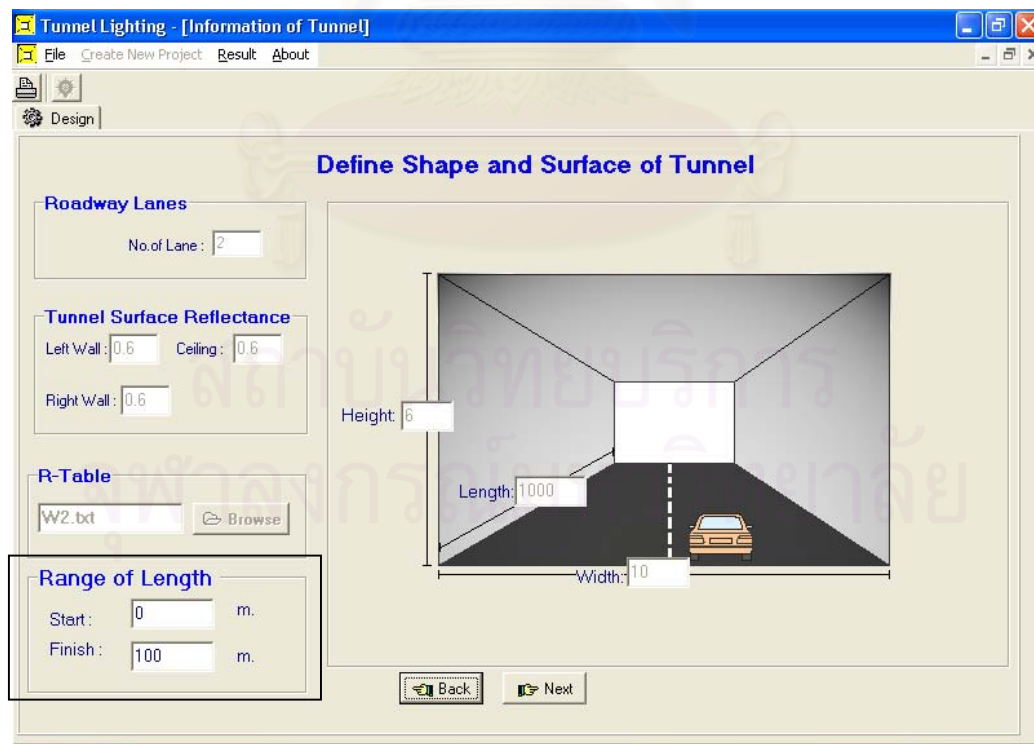
รูปที่ 5.35 หน้าต่างแสดง Shade ของความส่องสว่าง



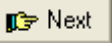
รูปที่ 5.36 หน้าต่างแสดงภาพเงาของความสว่าง

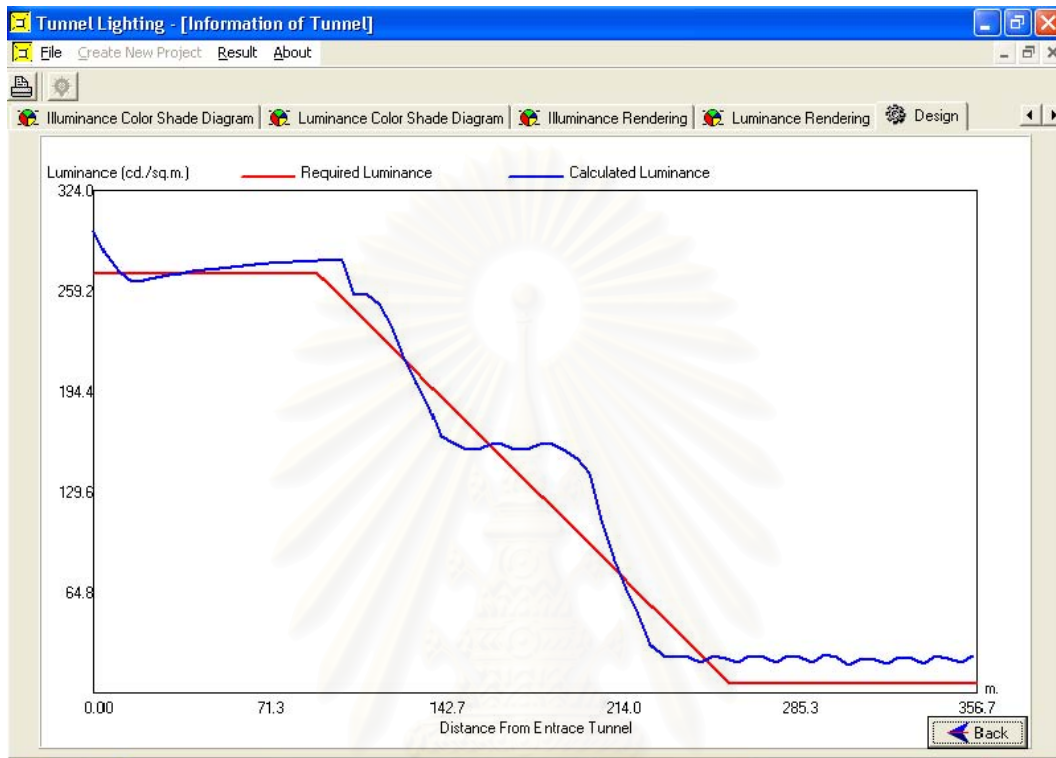


รูปที่ 5.37 หน้าต่างแสดงภาพเรนเงาของความส่องสว่าง
ในกรณีที่ต้องการพิจารณาความส่องสว่างและความส่องสว่างในช่วงอื่น ๆ ผู้ใช้สามารถเลือก
ปุ่ม  จะปรากฏดังรูปที่ 5.38



รูปที่ 5.38 หน้าต่างสำหรับป้อนข้อมูลของอุโมงค์ที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม

ผู้ใช้ไม่สามารถแก้ไขข้อมูลได้ยกเว้นช่วงของความยาวที่ต้องการคำนวณ ดังรูปที่ 5.38 เมื่อผู้ใช้เลือกปุ่ม  ก็จะย้อนกลับขั้นตอนเดิม แต่ผู้ใช้จะไม่สามารถแก้ไขข้อมูลใดๆ ได้ ในการออกแบบระบบแสงสว่างนั้นผู้ใช้ต้องทำการย้อนกลับมาเปลี่ยนช่วงของอุโมงค์ที่ทำการคำนวณ ดังที่ได้อธิบายมาแล้ว จะได้ผลดังรูปที่ 5.39

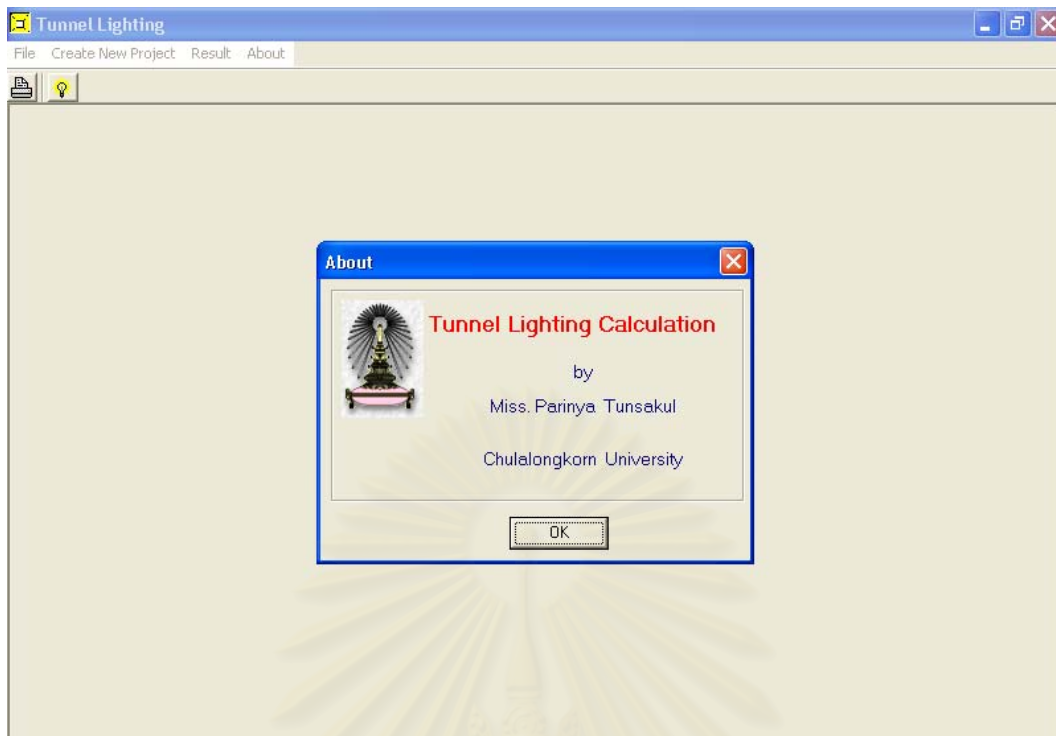


รูปที่ 5.39 หน้าต่างแสดงกราฟที่ใช้ในการออกแบบระบบแสงสว่างภายในอุโมงค์ จากรูปที่ 5.39 ผู้ใช้ต้องใส่ช่วงที่ต้องการคำนวณ 4 ช่วงคือ 0-100 , 100-200 , 200-300 , 300-400 เมตร ตามลำดับ

4. การใช้รายการ About บนเมนูบาร์ดังรูปที่ 5.2

เมื่อคลิกเลือก About บนเมนูบาร์ดังรูปที่ 5.2 จะปรากฏดังรูปที่ 5.40

สงวนลิขสิทธิ์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.40 หน้าต่างแสดงรายละเอียดของโปรแกรม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

การประเมินคุณภาพการส่องสว่าง

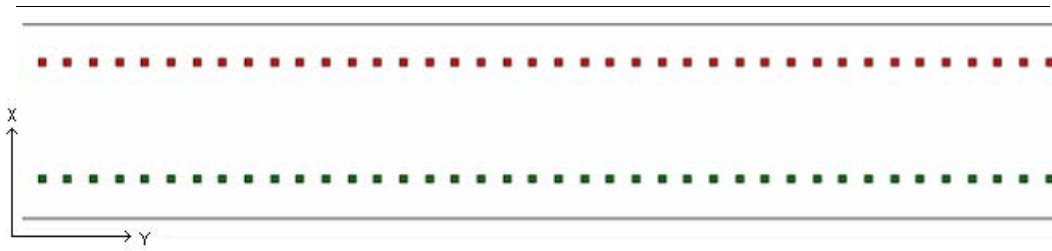
ในบทนี้จะนำเสนอตัวอย่างการประเมินระดับคุณภาพของการให้แสงสว่าง โดยวิธีจุดต่อจุด วิเคราะห์ระดับความสว่าง ความส่องสว่าง และค่าความสม่ำเสมอบนพื้นถนนภายในอุโมงค์ของอุโมงค์ที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมและอุโมงค์ที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปโค้ง ซึ่งการแสดงผลสามารถแสดงได้ทั้งรูปแบบของตารางข้อมูล ภาพแรเงา ภาพลายเส้นของความสว่างและความส่องสว่าง ทำให้ผู้ชมมองเห็นภาพได้ชัดเจนยิ่งขึ้น เนื่องจากการแสดงผลเป็นรูปภาพจะสามารถสื่อสารให้เข้าใจได้ง่าย

6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนครั้งที่ทำการแบ่งพื้นที่กับเวลาที่ใช้ในการคำนวณ

จากที่กล่าวมาแล้วว่า ความแม่นยำของการคำนวณจะขึ้นอยู่กับขนาดของพื้นที่ที่ทำการแบ่ง ถ้าทำการแบ่งเป็นพื้นที่เล็ก ๆ จำนวนมาก จะทำให้ความแม่นยำของการคำนวณเพิ่มขึ้น แต่จะทำให้ยังใช้เวลามากขึ้นด้วย ซึ่งโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมาจะแสดงให้เห็นค่าความสว่างเฉลี่ยในช่วงที่ต้องการพิจารณาในการแบ่งพื้นที่แต่ละครั้งในรูปแบบของกราฟเพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างของความสว่างในการแบ่งพื้นที่แต่ละครั้ง

ในการทดสอบได้ทำการใช้คอมพิวเตอร์ PC ที่ใช้หน่วยประมวลผล(CPU) Intel Pentium4 ความเร็ว 2.4 GHz หน่วยความจำหลัก (RAM) ขนาด 256 MB ฮาร์ดดิสก์(HardDisk) มีขนาดความจุ 40GB ใช้ระบบปฏิบัติการ WindowXP Professional Version 2002

พื้นที่ทดสอบเป็นอุโมงค์ที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมโดยมีขนาดกว้าง 15 เมตร 3 เลนสูง 10 เมตร ยาว 1000 เมตร (เป็นขนาดสมมุติ) โดยให้ค่าการสะท้อนแสงของผนังข้าง ผนังขวา และเพดาน มีค่า 0.6 ติดตั้งดวงโคมบนเพดาน ลักษณะการติดตั้งดังรูปที่ 6.1 และตารางที่ 6.1 ตลอดความยาวอุโมงค์ โดยใช้ดวงโคมรหัส C8712.IES ต้องการวิเคราะห์ค่าความสว่างและความส่องสว่างในช่วง 500-600 เมตร



รูปที่ 6.1 รูปแบบการติดตั้งดวงโคมในอุโมงค์ที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม

ตารางที่ 6.1 รูปแบบการติดตั้งดวงโคมในอุโมงค์ที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม

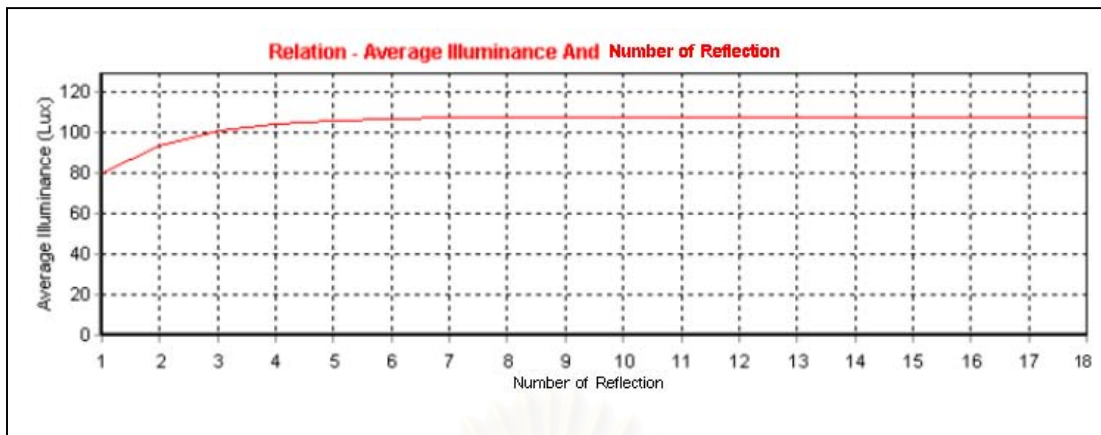
#	Type	Mounting	Lon.Off	Tra.Off	No.(Al.)	No.(Ac.)	Spacing (Al.)	Spacing (Ac.)	Tilt	Line of C0
1	C8712.ies	Ceiling	0	3	500	1	2	1	0	+X
2	C8712.ies	Ceiling	0	12	500	1	2	1	0	-X

จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของพื้นที่ย่อยและเวลาที่ใช้ในการคำนวณดังตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของพื้นที่ย่อยและเวลาที่ใช้ในการคำนวณ

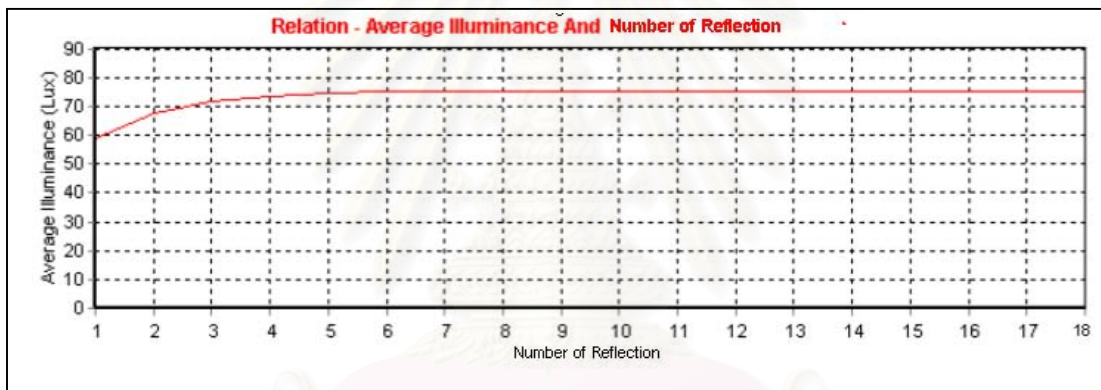
ครั้งที่ทำการแบ่ง	จำนวนพื้นที่บนผนังด้านซ้าย-ด้านขวา	จำนวนพื้นที่บนเพดาน	ความสูงของพื้นที่ย่อยบนผนังด้านซ้าย-ด้านขวา (เมตร)	ความยาวของพื้นที่ย่อยบนผนังด้านซ้าย-ด้านขวา (เมตร)	ความกว้างของพื้นที่ย่อยบนเพดาน (เมตร)	ความยาวของพื้นที่ย่อยบนเพดาน (เมตร)	Eav (Lux)	เวลาที่ใช้ทั้งหมดโดยประมาณ
1	100	200	10	10	7.5	10	107.454	น้อยกว่า 1 วินาที
2	400	800	5	5	3.75	5	75.328	6 วินาที
3	1600	3,200	2.5	2.5	1.875	2.5	66.342	31.6 วินาที
4	6,400	12,800	1.25	1.25	0.9375	1.25	64.369	3 นาที 53 วินาที
5	25,600	51,200	0.625	0.625	0.469	0.625	64.187	46 นาที 32 วินาที

โดยในการแบ่งพื้นที่ย่อยครั้งที่ 1 ความแตกต่างของความสว่างจากการสะท้อนแสงที่เพิ่มขึ้นแต่ละครั้ง ระหว่างพื้นที่ย่อยที่ได้ทำการแบ่งในครั้งที่ 1 เป็นดังกราฟรูปที่ 6.2

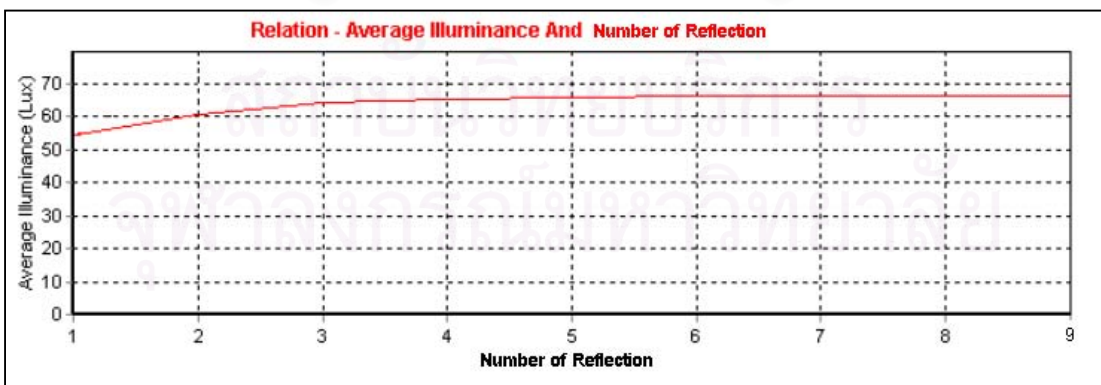


รูปที่ 6.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างและจำนวนครั้งในการสะท้อนแสงระหว่างพื้นที่ย่อยที่ได้ทำการแบ่งในครั้งที่ 1

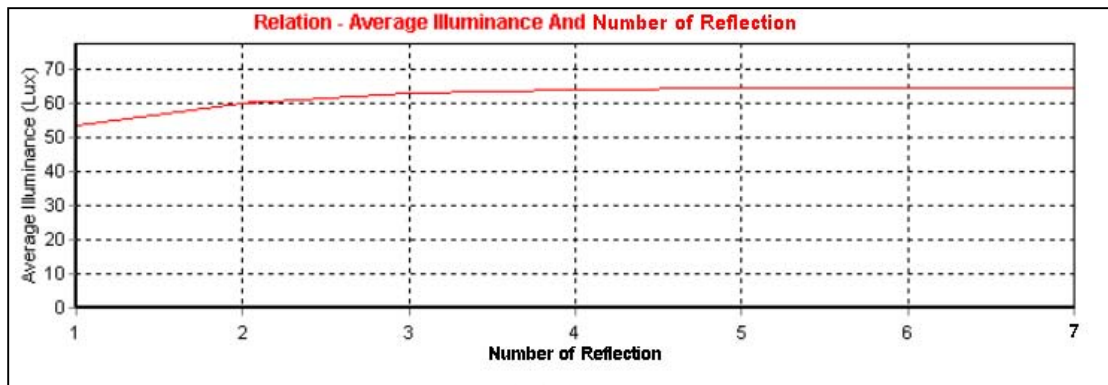
ความแตกต่างของความสว่างจากการสะท้อนแสงที่เพิ่มขึ้นแต่ละครั้ง ระหว่างพื้นที่ย่อยที่ได้ทำการแบ่งในครั้งที่ 2 ถึงครั้งที่ 5 เป็นดังกราฟรูปที่ 6.3 ถึงกราฟรูปที่ 6.6 ตามลำดับ



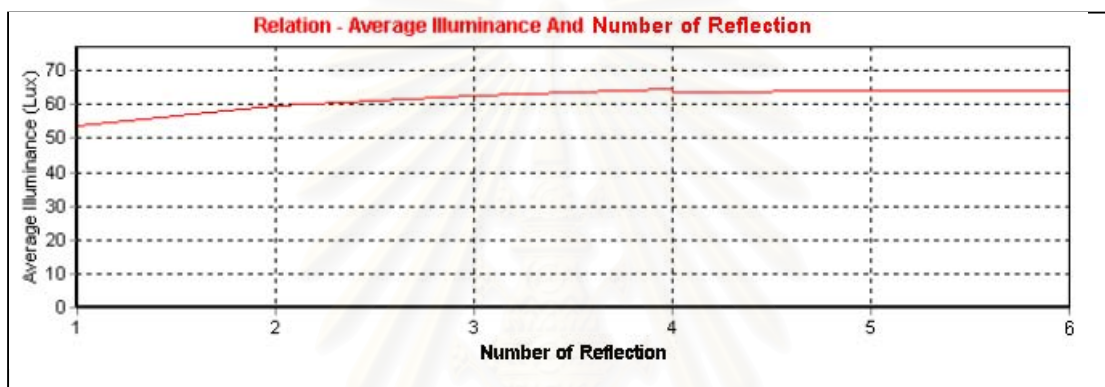
รูปที่ 6.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างและจำนวนครั้งในการสะท้อนแสงระหว่างพื้นที่ย่อยที่ได้ทำการแบ่งในครั้งที่ 2



รูปที่ 6.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างและจำนวนครั้งในการสะท้อนแสงระหว่างพื้นที่ย่อยที่ได้ทำการแบ่งในครั้งที่ 3



รูปที่ 6.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างและจำนวนครั้งในการสะท้อนแสงระหว่างพื้นที่ย่อยที่ได้ทำการแบ่งในครั้งที่ 4

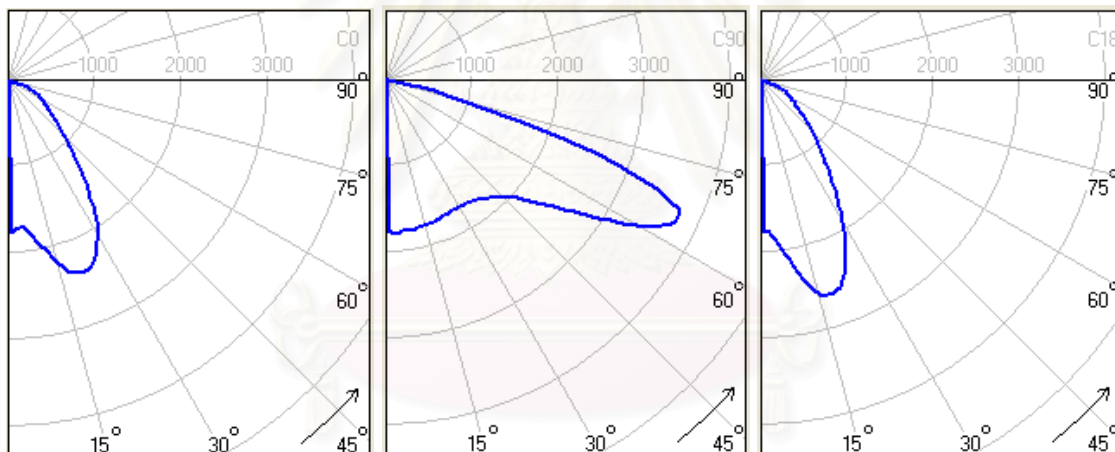


รูปที่ 6.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างและจำนวนครั้งในการสะท้อนแสงระหว่างพื้นที่ย่อยที่ได้ทำการแบ่งในครั้งที่ 5

จากตารางที่ 6.2 พบว่าในการแบ่งพื้นที่ครั้งที่ 4 จะได้ค่าความสว่างเฉลี่ย 64.369 Lux ใช้เวลาในการคำนวณทั้งหมด 3 นาที 53 วินาที โดยคิดผลจากแสงสะท้อนจำนวน 7 ครั้ง (รูปที่ 6.5) การแบ่งพื้นที่ครั้งที่ 5 จะได้ค่าความสว่างเฉลี่ย 64.187 Lux ใช้เวลาในการคำนวณทั้งหมด 46 นาที 32 วินาที โดยคิดผลจากแสงสะท้อนจำนวน 6 ครั้ง (รูปที่ 6.6) พบว่าการแบ่งพื้นที่ย่อยในครั้งที่ 4 และครั้งที่ 5 ให้ค่าความสว่างเฉลี่ยในช่วงที่ต้องการวิเคราะห์ใกล้เคียงกัน แต่เวลาที่ใช้ในการคำนวณจะแตกต่างกันมาก เนื่องจากจำนวนพื้นที่ย่อยที่ใช้ในการวิเคราะห์ต่างกันมาก เพราะฉะนั้น การวิเคราะห์ค่าความสว่างและความส่องสว่างบนพื้นถนนภายในอุโมงค์ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะวิเคราะห์ค่าดังกล่าวโดยจะแบ่งพื้นที่ที่ใช้ในการคำนวณ 4 ครั้งเพื่อความรวดเร็วในการคำนวณ

6.2 ตัวอย่างการให้แสงสว่างอุโมงค์ที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม

พื้นที่ทดสอบเป็นอุโมงค์ที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมโดยมีขนาดกว้าง 15 เมตร 3 เลน สูง 6 เมตร ยาว 1000 เมตร โดยให้ค่าการสะท้อนแสงของผนังข้าง ผนังขวา และเพดาน มีค่า 0.6 ติดตั้งดวงโคมบนเพดาน ลักษณะการติดตั้งดังรูปที่ 6.1 ตลอดความยาวอุโมงค์ โดยใช้ดวงโคม รหัส C8712.IES โดยลักษณะการกระจายแสงของดวงโคมในแนวระนาบ C ที่ 0 , 90 ,180 องศา ดังรูปที่ 6.7 (ข้อมูลความเข้มส่องสว่างของดวงโคมแสดงไว้ในภาคผนวก ก , ตาราง C8712.IES) ถนนเป็นแบบ R3 (ข้อมูลการสะท้อนแสงของพื้นถนนแสดงไว้ในภาคผนวก ข, ตาราง R3) จำกัดความเร็วของรถยนต์ที่ 60 กิโลเมตร/ชั่วโมง ทิศทางการเดินรถไปทางทิศใต้ มีปริมาณการจราจรน้อยกว่าหรือเท่ากับ 2,400 AADT ฉากหลังของอุโมงค์เป็นฉากหลังแบบที่ 1 ต้องการวิเคราะห์ค่าความสว่างและความส่องสว่างในช่วง 0-90 เมตรแรกจากปากอุโมงค์ ซึ่งเป็นช่วง Threshold Zone จะได้ความส่องสว่างที่แนะนำของช่วง Threshold Zone เท่ากับ 270 cd./m² และความส่องสว่างที่แนะนำของช่วง Interior Zone เท่ากับ 3 cd./m²



รูปที่ 6.7 ลักษณะการกระจายแสงของดวงโคมรหัส C8712.IES

ในแนวระนาบ C ที่ 0 , 90 ,180 องศา

จะได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 6.3-6.8 และดังรูปที่ 6.8-6.14

ตารางที่ 6.3 ความสว่างบนพื้นถนนจาก Total Component (ลักซ์)

X/Y	0.0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	45.0
0.5	163.30	344.27	337.21	397.59	359.16	417.16	346.70	417.91	361.28	403.72
1.5	185.77	376.27	362.84	446.98	386.87	453.40	388.27	454.14	389.05	453.85
2.5	173.57	335.79	330.56	406.62	356.82	413.16	358.75	413.92	359.10	414.09
3.5	215.90	317.85	363.49	388.65	391.15	395.50	393.14	396.27	393.50	396.45
4.5	236.84	348.56	393.85	422.39	422.07	429.47	424.11	430.25	424.46	430.44
5.5	237.83	344.83	396.50	420.57	424.42	427.77	426.53	428.57	426.88	428.75
6.5	214.82	306.96	361.74	382.35	389.19	389.57	391.31	390.36	391.66	390.54
7.5	202.05	285.49	342.70	360.04	369.90	367.48	372.00	368.27	372.36	368.45
8.5	214.82	306.96	361.74	382.35	389.19	389.57	391.31	390.36	391.66	390.54
9.5	237.83	344.83	396.50	420.57	424.42	427.77	426.53	428.57	426.88	428.75
10.5	236.84	348.56	393.85	422.39	422.07	429.47	424.11	430.25	424.46	430.44
11.5	215.90	317.85	363.49	388.65	391.15	395.50	393.14	396.27	393.50	396.45
12.5	173.57	335.79	330.56	406.62	356.82	413.16	358.75	413.92	359.10	414.09
13.5	185.77	376.27	362.84	446.98	386.87	453.40	388.27	454.14	389.05	453.85
14.5	163.30	344.27	337.21	397.59	359.16	417.16	346.70	417.91	361.28	403.72

ตารางที่ 6.3 ความสว่างบนพื้นถนนจาก Total Component (ต่อ) (ลักซ์)

X/Y	50.0	55.0	60.0	65.0	70.0	75.0	80.0	85.0	90.0
0.5	361.39	418.18	347.18	418.21	361.46	403.83	361.47	418.24	347.21
1.5	389.16	454.40	388.78	454.44	389.23	453.96	389.24	454.46	388.81
2.5	359.21	414.18	359.26	414.21	359.27	414.20	359.28	414.23	359.29
3.5	396.61	396.52	393.65	396.55	393.67	396.56	393.68	396.57	393.68
4.5	424.57	430.50	424.61	430.53	424.63	430.54	424.64	430.55	424.64
5.5	426.99	428.82	427.03	428.84	427.05	428.86	427.06	428.86	427.06
6.5	391.77	390.61	391.81	390.64	391.83	390.65	391.84	390.66	391.84
7.5	372.46	368.52	372.51	368.55	372.52	368.56	372.53	368.56	372.54
8.5	391.77	390.61	391.81	390.64	391.83	390.65	391.84	390.66	391.84
9.5	426.99	428.82	427.03	428.84	427.05	428.86	427.06	428.86	427.06
10.5	424.57	430.50	424.61	430.53	424.63	430.54	424.64	430.55	424.64
11.5	393.61	396.52	393.65	396.55	393.67	396.56	393.68	396.57	396.68
12.5	359.21	414.18	359.26	414.21	359.27	414.20	359.28	414.23	359.29
13.5	389.16	454.40	388.78	454.44	389.23	453.96	389.24	454.46	388.81
14.5	361.39	418.18	347.18	418.21	361.46	403.83	361.47	418.24	347.21

ตารางที่ 6.4 ความสว่างบนพื้นถนนจาก Direct Component (ลักซ์)

X/Y	0.0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	45.0
0.5	144.35	286.26	269.65	340.46	286.76	344.11	287.61	344.36	287.69	344.39
1.5	166.44	331.75	310.38	392.10	330.40	396.35	331.37	396.63	331.46	396.66
2.5	157.19	300.69	288.59	362.05	311.14	366.93	312.24	367.25	312.34	367.28
3.5	201.52	288.61	327.93	350.57	351.96	355.76	353.13	356.09	353.23	356.13
4.5	223.84	323.17	362.50	388.53	387.10	393.95	388.31	394.30	388.42	394.34
5.5	225.73	321.85	367.80	389.37	392.10	394.91	393.38	395.26	393.49	395.30
6.5	203.22	285.31	334.51	352.61	358.33	358.17	359.63	358.52	359.73	358.56
7.5	190.62	264.26	315.94	330.77	339.51	336.55	340.79	336.89	340.89	336.93
8.5	203.22	285.31	334.51	352.61	358.33	358.17	359.63	358.52	359.73	358.56
9.5	225.73	321.85	367.80	389.37	392.10	394.91	393.38	395.26	393.49	395.30
10.5	223.84	323.17	362.50	388.53	387.10	393.95	388.31	394.30	388.42	394.34
11.5	201.52	288.61	327.93	350.57	351.96	355.76	353.13	356.09	353.23	356.13
12.5	157.19	300.69	288.59	362.05	311.14	366.93	312.24	364.25	312.34	367.28
13.5	166.44	331.75	310.38	392.10	330.40	396.35	331.37	396.63	331.46	396.66
14.5	144.35	286.26	269.65	340.46	286.76	344.11	287.61	344.36	287.69	344.39

ตารางที่ 6.4 ความสว่างบนพื้นถนนจาก Direct Component (ต่อ) (ลักซ์)

X/Y	50.0	55.0	60.0	65.0	70.0	75.0	80.0	85.0	90.0
0.5	287.70	344.39	287.70	344.39	287.70	344.39	287.70	344.39	287.70
1.5	331.47	396.67	331.48	396.67	331.48	396.67	331.48	396.67	331.48
2.5	312.35	367.29	312.36	367.29	312.36	367.29	312.36	367.29	312.36
3.5	353.25	356.14	353.25	356.14	353.25	356.14	353.25	356.14	353.25
4.5	388.43	394.34	388.43	394.34	388.43	394.34	388.43	394.34	388.43
5.5	393.50	395.31	393.51	395.31	393.51	395.31	393.51	395.31	393.51
6.5	359.75	358.56	359.75	358.57	359.75	358.57	359.75	358.57	359.75
7.5	340.91	336.94	340.91	336.94	340.91	336.94	340.91	336.94	340.91
8.5	359.75	358.56	359.75	358.57	359.75	358.57	359.75	358.57	359.75
9.5	393.50	395.31	393.51	395.31	393.51	395.31	393.51	395.31	393.51
10.5	388.43	394.34	388.43	394.34	388.43	394.34	388.43	394.34	388.43
11.5	353.25	356.14	353.25	356.14	353.25	356.14	353.25	356.14	353.25
12.5	312.35	367.29	312.36	367.29	312.36	367.29	312.36	367.29	312.36
13.5	331.47	396.67	331.48	396.67	331.48	396.67	331.48	396.67	331.48
14.5	287.70	344.39	287.70	344.39	287.70	344.39	287.70	344.39	287.70

ตารางที่ 6.5 ความส่องสว่างบนพื้นถนนจาก Total Component (cd./m^2)

X/Y	0.0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	45.0
0.5	12.68	18.06	18.32	20.54	19.45	21.19	19.41	21.34	19.75	21.18
1.5	17.63	23.33	23.42	26.29	24.72	26.76	25.01	26.93	25.13	27.08
2.5	22.87	27.69	27.87	30.53	29.22	30.95	29.43	31.10	29.49	31.17
3.5	25.04	27.99	29.55	30.64	30.80	31.01	30.88	31.04	30.90	31.01
4.5	20.49	23.73	25.39	26.61	26.76	27.05	26.94	27.14	27.00	27.19
5.5	16.04	19.20	21.10	22.20	22.48	22.67	22.67	22.78	22.75	22.85
6.5	12.99	15.74	17.75	18.68	19.06	19.11	19.23	19.20	19.27	19.24
7.5	12.66	15.12	17.09	17.91	18.27	18.24	18.35	18.24	18.32	18.22
8.5	15.85	18.35	20.13	20.88	21.10	20.99	21.01	20.84	20.85	20.71
9.5	21.98	24.67	26.23	26.92	26.94	26.80	26.61	26.44	26.25	26.12
10.5	25.57	28.75	30.39	31.45	31.54	31.67	31.47	31.48	31.27	31.27
11.5	22.10	25.45	27.40	28.85	29.35	29.83	29.99	30.33	30.42	30.66
12.5	16.15	21.39	21.99	25.01	24.04	26.04	24.79	26.66	25.27	27.13
13.5	13.52	19.38	19.65	22.63	21.15	23.33	21.65	23.68	21.96	24.02
14.5	10.39	15.99	16.36	18.68	17.67	19.45	17.75	19.72	18.19	19.68

ตารางที่ 6.5 ความส่องสว่างบนพื้นถนนจาก Total Component (ต่อ) (cd./m^2)

X/Y	50.0	55.0	60.0	65.0	70.0	75.0	80.0	85.0	90.0
0.5	19.85	21.48	19.67	21.57	19.96	21.37	20.02	21.66	19.82
1.5	25.23	27.17	25.35	27.24	25.41	27.34	25.47	27.39	25.56
2.5	29.58	31.20	29.63	31.27	29.64	31.31	29.70	31.32	29.73
3.5	30.90	31.03	30.87	31.02	30.89	30.99	30.88	31.01	30.85
4.5	27.04	27.23	27.08	27.26	27.10	27.29	27.13	27.31	27.15
5.5	22.81	22.90	22.86	22.94	22.91	22.97	22.94	23.01	22.97
6.5	19.30	19.27	19.33	19.30	19.35	19.32	19.37	19.34	19.39
7.5	18.30	18.20	18.29	18.19	18.27	18.18	18.26	18.17	18.25
8.5	20.72	20.59	20.61	20.50	20.53	20.42	20.46	20.36	20.40
9.5	25.96	25.85	25.72	25.64	25.51	25.46	25.34	25.31	25.19
10.5	31.05	31.05	30.83	30.85	30.63	30.66	30.44	30.48	30.27
11.5	30.71	30.91	30.87	31.06	31.01	31.13	31.09	21.23	31.13
12.5	25.71	27.47	26.05	27.82	26.31	28.10	26.61	28.32	26.87
13.5	22.24	24.26	22.53	24.50	22.72	24.75	22.94	24.92	23.16
14.5	18.38	20.05	18.32	20.21	18.67	20.10	18.79	20.45	18.67

ตารางที่ 6.6 ความส่องสว่างบนพื้นถนนจาก Direct Component (cd./m^2)

X/Y	0.0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	45.0
0.5	10.91	15.04	14.92	17.28	15.91	17.64	16.11	17.79	16.23	17.89
1.5	16.21	20.98	20.77	23.51	21.93	23.94	22.16	24.11	22.30	24.24
2.5	21.74	25.87	25.82	28.36	27.01	28.75	27.19	28.86	27.27	28.92
3.5	24.15	26.58	27.92	28.95	29.04	29.23	29.11	29.24	29.10	29.23
4.5	19.70	22.53	23.99	25.12	25.23	25.50	25.38	25.58	25.43	25.62
5.5	15.27	18.05	19.75	20.76	20.99	21.17	21.16	21.26	21.23	21.32
6.5	12.23	14.61	16.42	17.27	17.60	17.63	17.74	17.70	17.77	17.74
7.5	11.90	14.02	15.77	16.50	16.82	16.77	16.87	16.76	16.84	16.73
8.5	15.08	17.22	18.79	19.45	19.63	19.51	19.51	19.34	19.35	19.20
9.5	21.16	23.48	24.83	25.43	25.41	25.26	25.06	24.89	24.70	24.57
10.5	24.68	27.47	28.91	29.89	29.95	30.06	29.86	29.86	29.65	29.66
11.5	21.01	23.87	25.62	27.00	27.47	27.94	28.11	28.44	28.53	28.80
12.5	14.77	19.33	19.70	22.62	21.62	23.64	22.36	24.25	22.89	24.73
13.5	11.74	16.70	16.62	19.53	18.07	20.23	18.55	20.63	18.91	20.96
14.5	8.41	12.60	12.58	15.01	13.70	15.50	14.04	15.77	14.27	15.99

ตารางที่ 6.6 ความส่องสว่างบนพื้นถนนจาก Direct Component (ต่อ) (cd./m^2)

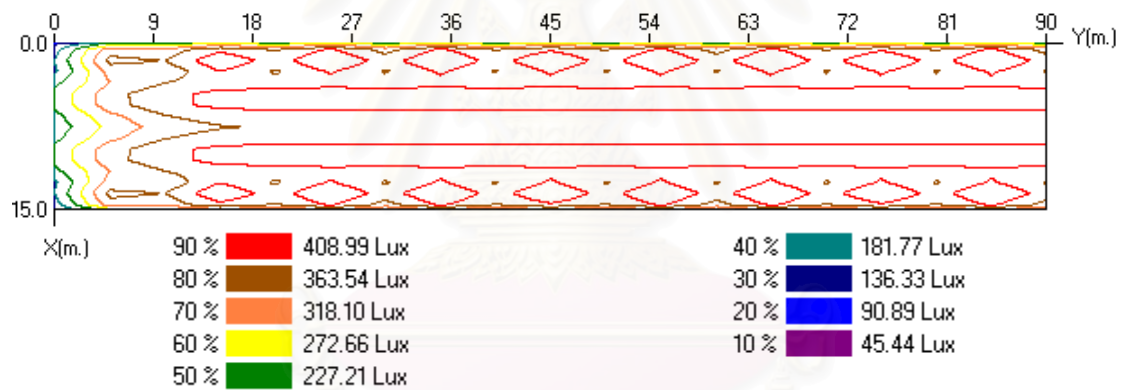
X/Y	50.0	55.0	60.0	65.0	70.0	75.0	80.0	85.0	90.0
0.5	16.32	17.98	16.40	18.06	16.47	18.12	16.53	18.18	16.58
1.5	22.42	24.34	22.51	24.43	22.59	24.51	22.66	24.57	22.73
2.5	27.33	28.98	27.38	29.02	27.42	29.06	27.45	29.10	27.49
3.5	29.10	29.23	29.09	29.22	29.09	29.22	29.08	29.21	29.08
4.5	25.47	25.66	25.50	25.69	25.53	25.72	25.56	25.74	25.58
5.5	21.29	21.37	21.34	21.41	21.38	21.45	21.41	21.48	21.44
6.5	17.80	17.77	17.83	17.80	17.85	17.82	17.87	17.84	17.89
7.5	16.82	16.71	16.80	16.70	16.78	16.69	16.77	16.68	16.76
8.5	19.22	19.09	19.11	19.00	19.03	18.92	18.96	18.86	18.90
9.5	24.41	24.30	24.17	24.09	23.97	23.91	23.79	23.76	23.65
10.5	29.43	29.43	29.22	29.24	29.02	29.05	28.84	28.88	28.67
11.5	28.84	29.04	29.03	29.19	29.15	29.30	29.24	29.37	29.30
12.5	23.32	25.12	23.68	25.45	23.99	25.75	24.27	26.01	24.52
13.5	19.22	21.25	19.49	21.51	19.74	21.74	19.97	21.96	20.17
14.5	14.49	16.18	14.67	16.35	14.83	16.50	14.98	16.64	15.11

ตารางที่ 6.7 ความสว่างบนพื้นถนน

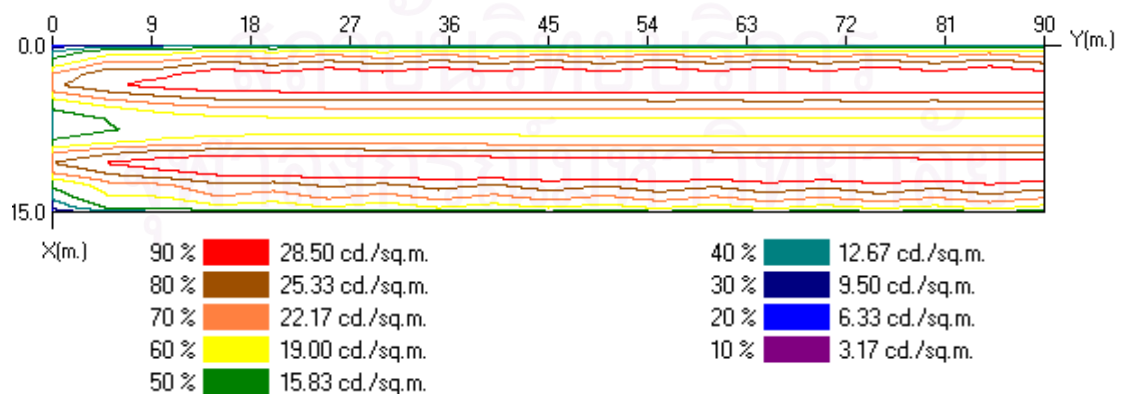
กรณี	Emin (Lux)	Emax(Lux)	Eav(Lux)	Emin/Eav	Emin/Emax
Total	163.30	454.43	385.88	0.424	0.360
Direct	144.35	396.67	344.41	0.419	0.364

ตารางที่ 6.8 ความส่องสว่างบนพื้นถนน

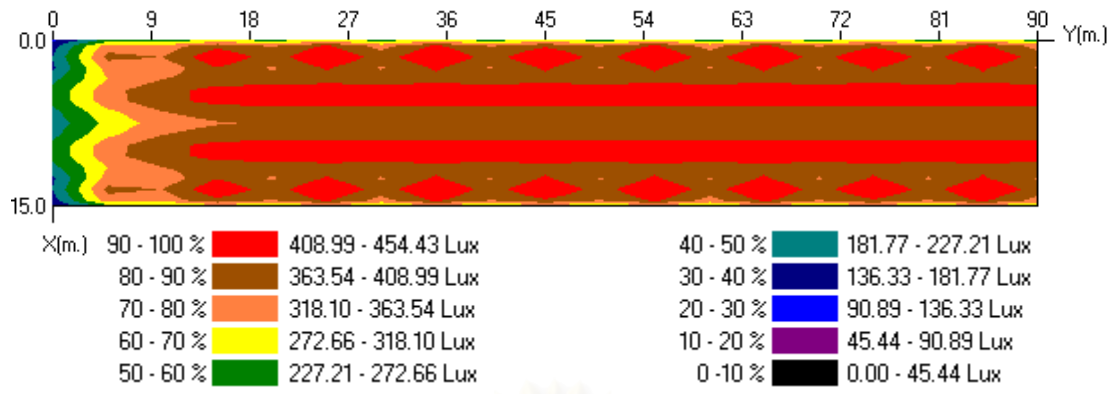
กรณี	Lmin (cd/m ²)	Lmax (cd/m ²)	Lav (cd/m ²)	U ₀	U ₁₁	U ₁₂	U ₁₃
Total	10.39	31.67	24.16	0.328	0.754	0.675	0.754
Direct	8.41	30.06	22.11	0.280	0.774	0.690	0.774



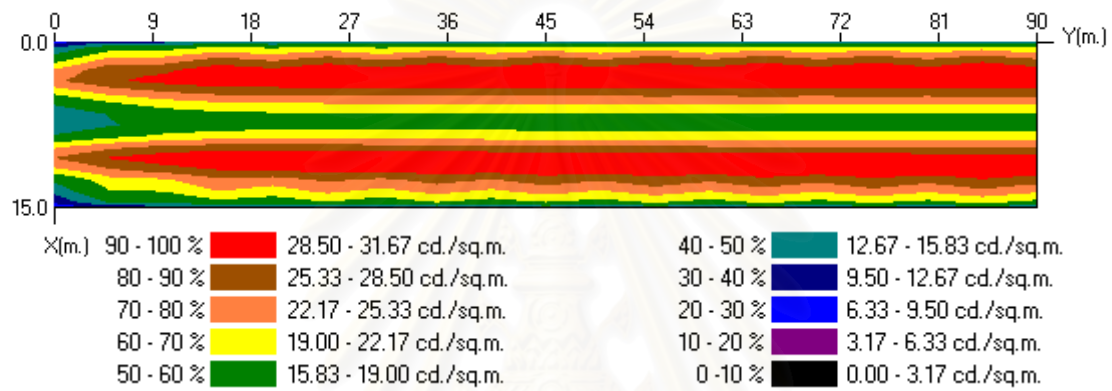
รูปที่ 6.8 ภาพลายเส้นของความสว่าง



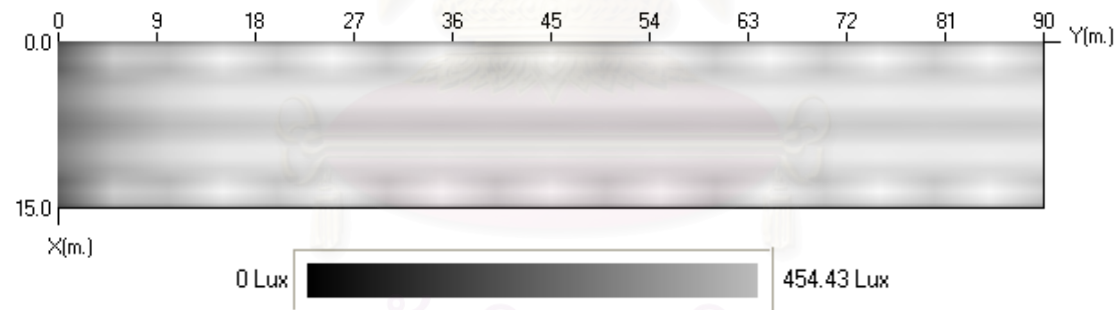
รูปที่ 6.9 ภาพลายเส้นของความส่องสว่าง



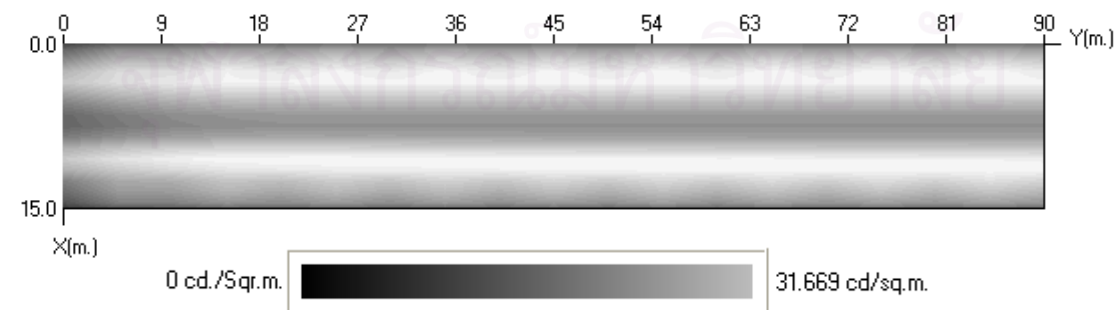
รูปที่ 6.10 ภาพ Shade ของความสว่าง



รูปที่ 6.11 ภาพ Shade ของความส่องสว่าง

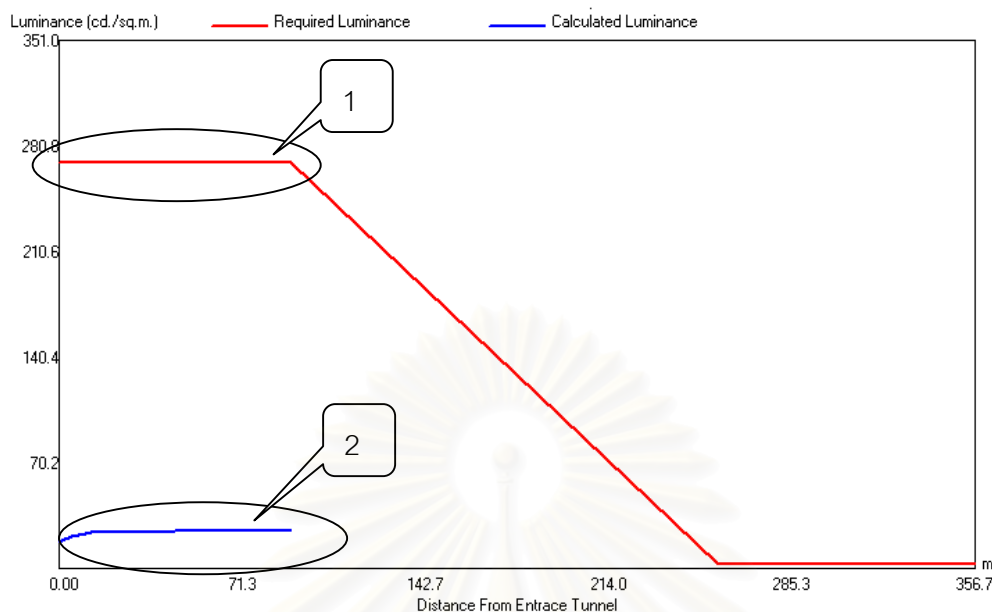


รูปที่ 6.12 ภาพแรเงาของความสว่าง



รูปที่ 6.13 ภาพแรเงาของความส่องสว่าง

ลักษณะของความส่องสว่างในช่วง 0-90 เมตร จะเป็นไปดังกราฟในรูปที่ 6.14



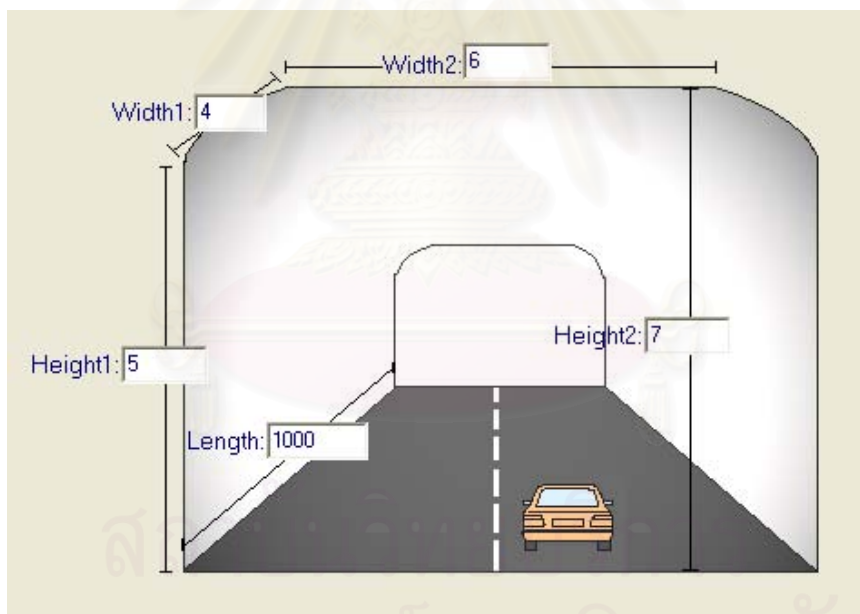
รูปที่ 6.14 กราฟที่ใช้ในการออกแบบระบบแสงสว่างภายในอุโมงค์ที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม

การวิเคราะห์ผล

- ก. จากผลการคำนวณได้ความสม่ำเสมอรวมของความส่องสว่างในส่วน Total Component U_0 0.328 ซึ่งมาตรฐาน IESNA กำหนดไว้ว่า U_0 ต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 0.5 จึงไม่ผ่านเงื่อนไขการให้แสงสว่าง
- ข. จากผลการคำนวณได้ความสม่ำเสมอของความส่องสว่างในแต่ละเลนในส่วน Total Component U_1 0.754 0.675 และ 0.754 ตามลำดับ ซึ่งมาตรฐาน IESNA กำหนดไว้ว่า U_1 ต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 0.29 ซึ่งผ่านเงื่อนไขการให้แสงสว่าง
- ค. พบว่าความส่องสว่างที่ได้จากการออกแบบตามกราฟรูปที่ 6.14 หมายเลข 2 มีค่าต่ำกว่าความส่องสว่างที่แนะนำตามกราฟรูปที่ 6.14 หมายเลข 1 มากจึงไม่ผ่านการออกแบบต้องติดตั้งดวงโคมเพิ่ม (ออกแบบใหม่)

6.3 ตัวอย่างการให้แสงสว่างอุโมงค์ที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปโค้ง

พื้นที่ทดสอบเป็นอุโมงค์ที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปโค้งโดยลักษณะของอุโมงค์เป็นดังรูปที่ 6.15 มี 3 เลน โดยให้ค่าการสะท้อนแสงของผนังซ้าย ผนังขวา และเพดาน มีค่า 0.6 ติดตั้งดวงโคมบนเพดาน ลักษณะการติดตั้งดังรูปที่ 6.16 และตารางที่ 6.9 โดยใช้ดวงโคมรหัส C8712.IES มีลักษณะการกระจายแสงของดวงโคมในแนวระนาบ C ที่ 0,90,180 องศา ดังรูปที่ 6.7 (ข้อมูลความเข้มส่องสว่างของดวงโคมแสดงไว้ในภาคผนวก ก ตาราง C8712.IES) ถนนเป็นแบบ R3 (ข้อมูลการสะท้อนแสงของพื้นถนนแสดงไว้ในภาคผนวก ข, ตาราง R3) จำกัดความเร็วของรถยนต์ที่ 60 กิโลเมตร/ชั่วโมง ทิศทางการเดินทางไปทางทิศใต้ มีปริมาณการจราจรน้อยกว่าหรือเท่ากับ 2,400 AADT ฉากหลังของอุโมงค์เป็นฉากหลังแบบที่ 1 ต้องการวิเคราะห์ค่าความสว่างและค่าความส่องสว่างในช่วง 0-90 เมตรแรกจากปากอุโมงค์ซึ่งเป็นช่วง Threshold Zone จะได้ความส่องสว่างที่แนะนำของช่วง Threshold Zone เท่ากับ 270 cd./m^2 และความส่องสว่างที่แนะนำของช่วง Interior Zone เท่ากับ 3 cd./m^2



รูปที่ 6.15 ขนาดของอุโมงค์ที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปโค้ง



รูปที่ 6.16 รูปแบบการติดตั้งดวงโคมในอุโมงค์ที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปโค้ง

ตารางที่ 6.9 รูปแบบการติดตั้งดวงโคมในอุโมงค์ที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปโค้ง

#	Type	Mounting	Lon.Off	Tra.Off	No.(Al.)	No.(Ac.)	Spacing (Al.)	Spacing (Ac.)	Tilt	Line of CO
1	C8712.ies	Ceiling	0	1	500	1	2	1	0	+X
2	C8712.ies	Ceiling	0	5	500	1	2	1	0	-X

จะได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 6.10-6.15 และดังรูปที่ 6.17-6.23

ตารางที่ 6.10 ความสว่างบนพื้นถนนจาก Total Component (ลักซ์)

X/Y	0.0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	45.0
0.43	151.43	280.51	305.67	359.16	343.02	373.34	348.27	375.73	349.20	375.77
1.29	183.64	333.93	354.66	420.20	393.52	433.90	398.13	435.92	399.12	436.47
2.15	214.79	386.82	403.76	481.93	445.90	496.69	450.73	498.72	451.71	499.27
3.02	236.19	411.49	433.14	512.79	479.27	528.93	484.35	531.00	485.34	531.54
3.88	250.72	416.86	448.31	522.35	498.11	539.87	503.40	541.97	504.40	542.52
4.74	307.33	442.43	512.57	551.67	565.40	570.11	570.86	572.26	571.86	572.80
5.60	337.12	488.44	558.32	602.46	613.20	621.42	618.73	623.57	619.73	624.11
6.46	354.11	516.04	583.74	632.02	639.55	651.31	645.16	653.48	646.15	654.00
7.33	337.12	488.44	558.32	602.46	613.20	621.42	618.73	623.57	619.76	624.11
8.19	307.33	442.43	512.57	551.67	565.40	570.11	570.86	572.26	571.86	572.80
9.05	250.72	416.87	448.31	522.36	498.11	539.87	503.40	541.97	504.40	542.52
9.91	236.19	411.49	433.14	512.80	479.27	528.93	484.35	531.00	485.34	531.54
10.77	214.79	386.83	403.76	481.93	445.90	496.69	450.73	498.72	451.71	499.27
11.64	183.64	333.93	354.67	420.20	393.52	433.91	398.13	435.92	399.13	436.47
12.50	151.43	280.52	305.67	359.16	343.02	373.34	348.27	375.73	349.20	375.77

ตารางที่ 6.10 ความสว่างบนพื้นถนนจาก Total Component (ต่อ) (ลักซ์)

X/Y	50.0	55.0	60.0	65.0	70.0	75.0	80.0	85.0	90.0
0.43	348.75	375.03	348.03	374.49	347.84	374.68	348.36	375.42	349.05
1.29	399.46	436.68	399.58	436.74	399.60	436.72	399.53	436.59	399.31
2.15	452.04	499.47	452.16	499.53	452.18	499.51	452.11	499.38	451.90
3.02	485.66	531.73	485.78	531.80	485.80	531.78	485.73	531.62	485.52
3.88	504.72	542.71	504.84	542.78	504.86	542.75	504.79	542.63	504.58
4.74	572.18	573.00	572.30	573.06	572.32	573.04	572.25	572.91	572.04
5.60	620.05	624.30	620.16	624.36	620.18	624.34	620.11	624.22	619.91
6.46	646.47	654.19	646.58	654.26	646.60	654.23	646.53	654.11	646.33
7.33	620.05	624.30	620.16	624.36	620.18	624.34	620.11	624.22	619.91
8.19	572.18	573.00	572.30	573.06	572.32	573.04	572.25	572.91	572.04
9.05	504.72	542.71	504.84	542.78	504.86	542.75	504.79	542.63	504.58
9.91	485.66	531.73	485.78	531.80	485.80	531.78	485.73	531.65	485.52
10.77	452.04	499.47	452.16	499.53	452.18	499.51	452.11	499.38	451.90
11.64	399.46	436.68	399.58	436.74	399.60	436.72	399.53	436.59	399.31
12.50	348.75	375.03	348.03	374.49	347.84	374.68	348.36	375.42	349.05

ตารางที่ 6.11 ความสว่างบนพื้นถนนจาก Direct Component (ลักซ์)

X/Y	0.0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	45.0
0.43	118.33	199.51	206.87	250.80	230.38	258.41	232.31	259.07	232.54	259.16
1.29	154.19	266.54	271.96	330.10	300.15	338.95	302.36	339.68	302.60	339.76
2.15	188.32	329.50	332.68	404.27	365.19	414.47	367.71	415.25	367.96	415.34
3.02	212.02	361.51	370.47	443.98	407.52	455.71	410.34	456.54	410.61	456.63
3.88	228.20	371.99	391.44	459.58	432.46	472.75	435.51	473.64	435.80	473.75
4.74	285.91	400.84	459.44	492.77	503.65	506.90	506.87	507.84	507.17	507.95
5.60	316.32	448.69	507.28	545.71	553.60	560.37	556.91	561.32	557.21	561.42
6.46	333.50	476.88	533.36	575.95	580.64	590.95	584.03	591.91	584.33	592.01
7.33	316.32	448.69	507.28	545.71	553.60	560.37	556.91	561.32	557.21	561.42
8.19	285.91	400.84	459.44	492.77	503.65	506.90	506.87	507.84	507.17	507.95
9.05	228.20	371.99	391.44	459.58	432.46	472.75	435.51	473.64	435.80	473.75
9.91	212.02	361.51	370.47	443.98	407.52	455.71	410.34	456.54	410.61	456.63
10.77	188.32	329.50	332.68	404.27	365.19	414.47	367.71	415.25	367.96	415.34
11.64	154.19	266.54	271.96	330.10	300.15	338.95	302.36	339.68	302.60	339.76
12.50	118.33	199.51	206.87	250.80	230.38	258.41	232.31	259.07	232.54	259.15

ตารางที่ 6.11 ความสว่างบนพื้นถนนจาก Direct Component (ต่อ) (ลักซ์)

X/Y	50.0	55.0	60.0	65.0	70.0	75.0	80.0	85.0	90.0
0.43	232.57	259.16	232.58	259.16	232.58	259.16	232.58	259.16	232.56
1.29	302.63	339.77	302.64	339.77	302.64	339.77	302.63	339.77	302.62
2.15	368.00	415.35	368.00	415.35	368.00	415.35	368.00	415.35	367.98
3.02	410.65	456.65	410.65	456.65	410.65	456.65	410.65	456.64	410.63
3.88	435.84	473.76	435.85	473.77	435.85	473.77	435.85	473.76	435.83
4.74	507.22	507.97	507.22	507.97	507.22	507.97	507.22	507.96	507.20
5.60	557.25	564.44	557.26	561.44	557.26	561.44	557.26	561.43	557.24
6.46	584.37	592.02	584.37	592.03	584.37	592.03	584.37	592.02	584.35
7.33	557.25	561.44	557.26	561.44	557.26	561.44	557.26	561.43	557.24
8.19	507.22	507.97	507.22	507.97	507.22	507.97	507.22	507.96	507.20
9.05	435.84	473.76	435.85	473.77	435.85	473.77	435.85	473.76	435.83
9.91	410.65	456.65	410.65	456.65	410.65	456.65	410.65	456.64	410.63
10.77	368.00	415.35	368.00	415.35	368.00	415.35	368.00	415.35	367.98
11.64	302.63	339.77	302.64	339.77	302.64	339.77	302.63	339.77	302.62
12.50	232.57	259.16	232.58	259.16	232.58	259.16	232.58	259.16	232.56

ตารางที่ 6.12 ความส่องสว่างบนพื้นถนนจาก Total Component (cd./m²)

X/Y	0.0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	45.0
0.43	10.11	14.42	15.62	17.60	17.34	18.33	17.66	18.50	17.75	18.56
1.29	13.08	17.73	18.69	20.98	20.42	21.69	20.71	21.86	20.80	21.92
2.15	17.24	22.42	23.24	25.94	25.09	26.70	25.40	26.87	25.49	26.94
3.02	22.46	27.64	28.54	31.27	30.51	32.06	30.78	32.18	30.84	32.21
3.88	27.50	32.34	33.46	36.04	35.52	36.83	35.76	36.91	35.77	36.90
4.74	30.70	34.70	36.96	38.62	39.21	39.51	39.50	39.63	39.54	39.64
5.60	31.29	35.69	37.92	39.76	40.26	40.71	40.58	40.86	40.65	40.90
6.46	32.50	37.18	39.25	41.19	41.54	42.06	41.77	42.13	41.76	42.11
7.33	31.56	36.12	38.42	40.34	40.87	41.35	41.24	41.52	41.32	41.57
8.19	27.34	31.67	34.24	36.18	37.01	37.54	37.69	38.00	38.01	38.23
9.05	21.38	26.63	28.15	31.01	30.81	32.34	31.53	32.87	31.97	33.24
9.91	17.29	22.72	23.89	26.84	26.30	28.04	26.96	28.51	27.34	28.83
10.77	14.12	19.47	20.45	23.26	22.54	24.23	23.04	24.57	23.29	24.79
11.64	11.31	16.09	17.14	19.50	18.99	20.33	19.38	20.59	19.56	20.73
12.50	9.00	13.47	14.77	16.83	16.63	17.65	17.03	17.91	17.17	17.98

ตารางที่ 6.12 ความส่องสว่างบนพื้นถนนจาก Total Component (ต่อ) (cd./m^2)

XY	50.0	55.0	60.0	65.0	70.0	75.0	80.0	85.0	90.0
0.43	17.79	18.57	17.73	18.48	17.67	18.49	17.73	18.56	17.78
1.29	20.86	21.97	20.89	21.99	20.92	22.01	20.93	22.01	20.91
2.15	25.55	26.98	25.58	27.01	25.61	27.02	25.61	27.01	25.58
3.02	30.86	32.23	30.87	32.23	30.87	32.22	30.85	32.19	30.79
3.88	35.75	36.88	35.73	36.85	35.70	36.81	35.65	36.76	35.56
4.74	39.54	39.64	39.52	39.62	39.50	39.59	39.46	39.54	39.38
5.60	40.69	40.92	40.70	40.93	40.71	40.93	40.69	40.90	40.63
6.46	41.74	42.08	41.71	42.04	41.67	41.99	41.62	41.93	41.52
7.33	41.35	41.58	41.34	41.58	41.33	41.55	41.29	41.49	41.20
8.19	38.19	38.37	38.32	38.49	38.42	38.57	38.49	38.62	38.50
9.05	32.31	33.55	32.60	33.81	32.82	34.01	33.00	34.16	33.11
9.91	27.64	29.10	27.88	29.32	28.08	29.51	28.24	29.64	28.35
10.77	23.48	24.96	23.64	25.11	23.78	25.23	23.89	25.32	23.95
11.64	19.69	20.84	19.80	20.94	19.88	21.02	19.95	21.07	19.99
12.50	17.24	18.02	17.23	17.97	17.18	17.99	17.26	18.11	17.36

ตารางที่ 6.13 ความส่องสว่างบนพื้นถนนจาก Direct Component (cd./m^2)

XY	0.0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	45.0
0.43	7.51	9.92	10.34	11.90	11.47	12.37	11.65	12.48	11.72	12.53
1.29	10.96	14.23	14.61	16.62	15.94	17.17	16.16	17.29	16.24	17.35
2.15	15.44	19.51	19.81	22.27	21.31	22.87	21.53	22.99	21.60	23.04
3.02	20.85	25.10	25.53	28.03	27.17	28.66	27.36	28.74	27.39	28.76
3.88	25.99	30.03	30.71	33.07	32.44	33.70	32.60	33.73	32.59	33.71
4.74	29.26	32.53	34.36	35.80	36.29	36.54	36.49	36.61	36.51	36.61
5.60	29.87	33.59	35.41	37.03	37.43	37.82	37.66	37.92	37.71	37.95
6.46	31.09	35.10	36.75	38.48	38.72	39.19	38.87	39.22	38.84	39.18
7.33	30.13	34.00	35.88	37.60	38.02	38.45	38.31	38.58	38.37	38.61
8.19	25.83	29.45	31.59	33.32	34.05	34.53	34.66	34.95	34.96	35.17
9.05	19.74	24.19	25.28	27.94	27.64	29.13	28.29	29.62	28.72	29.99
9.91	15.42	19.92	20.64	23.39	22.76	24.46	23.36	24.91	23.74	25.24
10.77	11.93	16.16	16.65	19.24	18.44	20.10	18.89	20.43	19.16	20.67
11.64	8.77	12.12	12.60	14.70	14.09	15.40	14.44	15.65	14.64	15.82
12.50	6.24	8.69	9.16	10.76	10.3	11.30	10.64	11.48	10.78	11.59

ตารางที่ 6.13 ความส่องสว่างบนพื้นถนนจาก Direct Component (ต่อ) (cd/m^2)

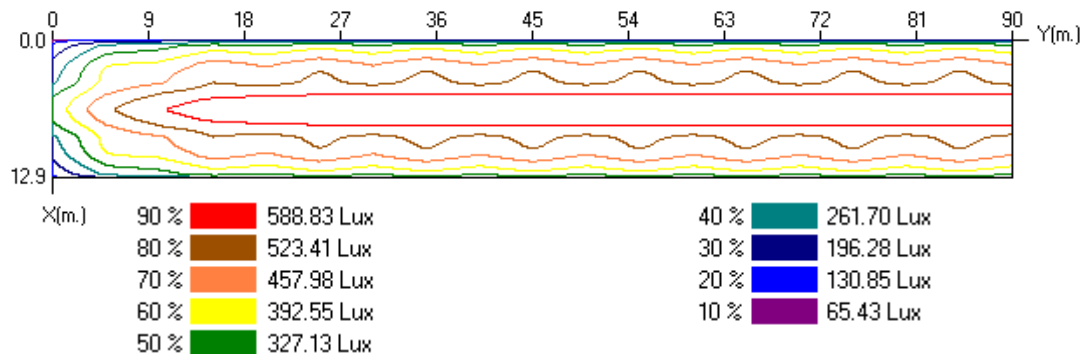
X/Y	50.0	55.0	60.0	65.0	70.0	75.0	80.0	85.0	90.0
0.43	11.76	12.57	11.80	12.61	11.84	12.64	11.86	12.66	11.88
1.29	16.29	17.40	16.33	17.44	16.37	17.47	16.40	17.50	16.42
2.15	21.65	23.08	21.69	23.12	21.72	23.15	21.75	23.17	21.75
3.02	27.40	28.77	27.41	28.78	27.42	28.78	27.42	28.78	27.40
3.88	32.56	33.69	32.54	33.66	32.52	33.64	32.49	33.61	32.44
4.74	36.50	36.60	36.49	36.60	36.48	36.58	36.46	36.56	36.42
5.60	37.74	37.98	37.76	37.99	37.78	38.00	37.78	38.00	37.76
6.46	38.81	39.15	38.78	39.12	38.75	39.09	38.73	39.08	38.67
7.33	38.39	38.62	38.39	38.63	38.38	38.61	38.37	38.58	38.32
8.19	35.13	35.32	35.26	35.43	35.37	35.53	35.46	35.61	35.52
9.05	29.06	30.30	29.35	30.57	29.59	30.79	29.79	30.97	29.94
9.91	24.05	25.51	24.30	25.76	24.52	25.96	24.71	26.13	24.86
10.77	19.37	20.86	19.55	21.04	19.71	21.18	19.86	21.32	19.97
11.64	14.80	15.97	14.94	16.09	15.06	16.21	15.16	16.31	15.25
12.50	10.88	11.69	10.97	11.78	11.05	11.86	11.11	11.92	11.17

ตารางที่ 6.14 ความสว่างบนพื้นถนน

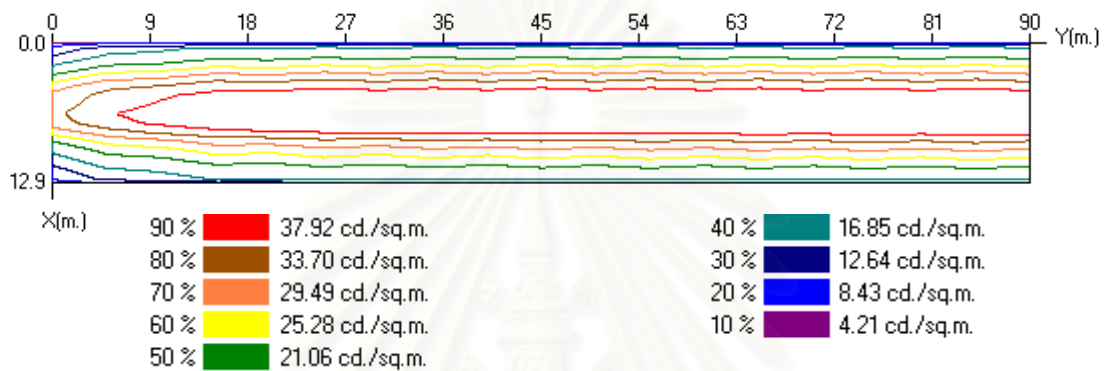
กรณี	Emin (Lux)	Emax(Lux)	Eav(Lux)	Emin/Eav	Emin/Emax
Total	151.43	654.26	483.41	0.313	0.231
Direct	118.33	592.03	409.10	0.289	0.200

ตารางที่ 6.15 ความส่องสว่างบนพื้นถนน

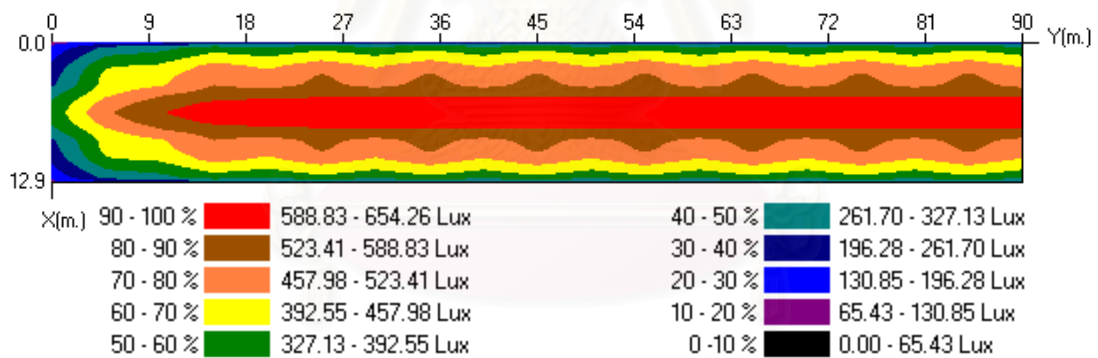
กรณี	Lmin (cd/m^2)	Lmax (cd/m^2)	Lav (cd/m^2)	U_0	U_{11}	U_{12}	U_{13}
Total	9.00	42.13	29.57	0.214	0.659	0.764	0.659
Direct	6.24	39.22	25.91	0.159	0.692	0.785	0.692



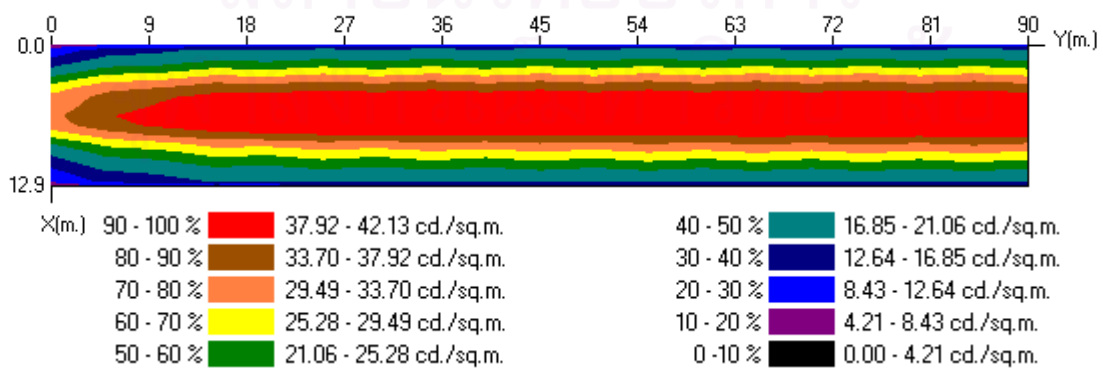
รูปที่ 6.17 ภาพลายเส้นของความสว่าง



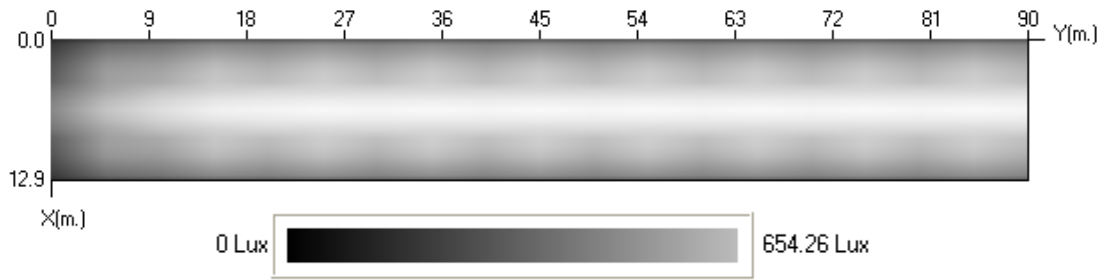
รูปที่ 6.18 ภาพลายเส้นของความส่องสว่าง



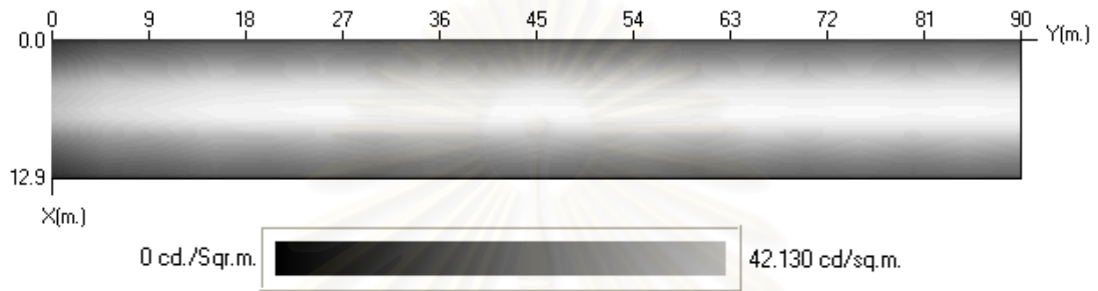
รูปที่ 6.19 ภาพ Shade ของความสว่าง



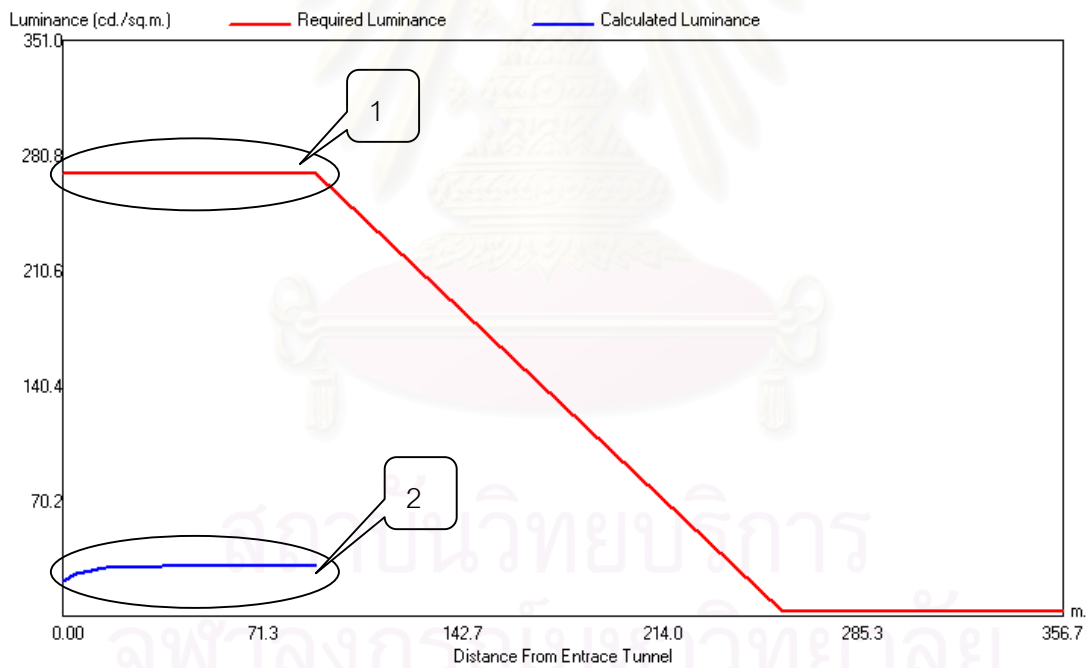
รูปที่ 6.20 ภาพ Shade ของความส่องสว่าง



รูปที่ 6.21 ภาพแรงเงาของความสว่าง



รูปที่ 6.22 ภาพแรงเงาของความส่องสว่าง



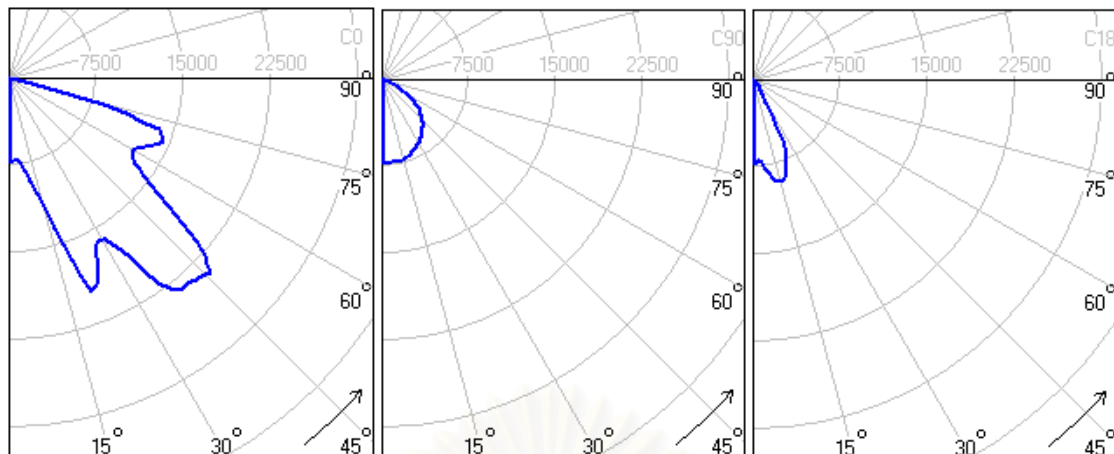
รูปที่ 6.23 กราฟที่ใช้ในการออกแบบระบบแสงสว่างภายในอุโมงค์ที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปโค้ง

การวิเคราะห์ผล

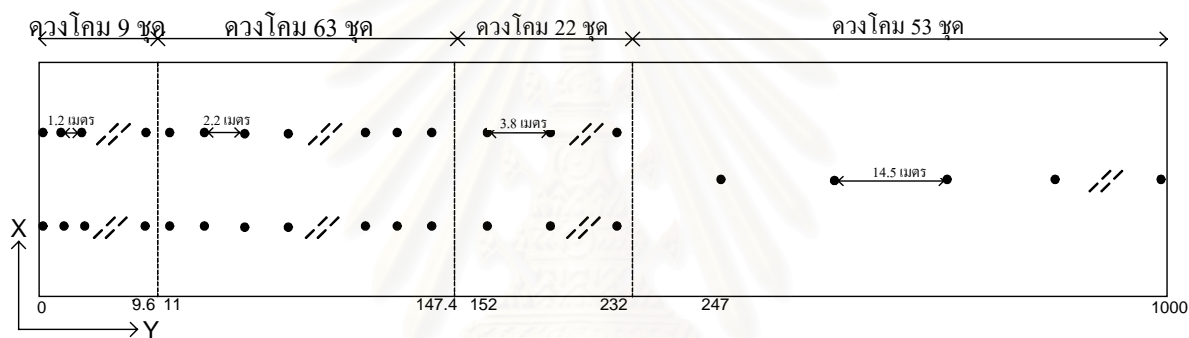
- ก. จากผลการคำนวณได้ความสม่ำเสมอรวมของความส่องสว่างในส่วน Total Component U_0 0.214 ซึ่งมาตรฐาน IESNA กำหนดไว้ว่า U_0 ต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 0.5 จึงไม่ผ่านเงื่อนไขการให้แสงสว่าง
- ข. จากผลการคำนวณได้ความสม่ำเสมอของความสม่ำเสมอในแต่ละเลนในส่วน Total Component U_1 0.659 0.764 และ 0.659 ตามลำดับ ซึ่งมาตรฐาน IESNA กำหนดไว้ว่า U_1 ต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 0.29 ซึ่งผ่านเงื่อนไขการให้แสงสว่าง
- ค. พบว่าความส่องสว่างที่ได้จากการออกแบบตามกราฟรูปที่ 6.23 หมายเลข 2 มีค่าต่ำกว่าความส่องสว่างที่แนะนำตามกราฟรูปที่ 6.23 หมายเลข 1 มากจึงไม่ผ่านการออกแบบต้องติดตั้งดวงโคมเพิ่ม (ออกแบบใหม่)

6.4 ตัวอย่างการออกแบบระบบแสงสว่างบนพื้นถนนภายในอุโมงค์ กรณีที่ 1

พื้นที่ทดสอบเป็นอุโมงค์ที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมโดยมีขนาดกว้าง 12 เมตร สูง 6 เมตร ยาว 1000 เมตร มี 3 เลน โดยให้ค่าการสะท้อนแสงของผนังซ้าย ผนังขวา และเพดานมีค่า 0.6 ติดตั้งดวงโคมบนเพดาน ลักษณะการติดตั้งดังรูปที่ 6.25 และตารางที่ 6.16 โดยใช้ดวงโคมรหัส C9102.IES โดยลักษณะการกระจายแสงของดวงโคมในระนาบ C ที่ 0 ,90 ,180 องศา ดังรูปที่ 6.24 (ข้อมูลความเข้มส่องสว่างของดวงโคมแสดงไว้ในภาคผนวก ก , ตาราง C9102.IES) ถนนเป็นแบบ R2 (ข้อมูลการสะท้อนแสงของพื้นถนนแสดงไว้ในภาคผนวก ข, ตาราง R2) จำกัดความเร็วของรถยนต์ที่ 60 กิโลเมตร/ชั่วโมง ทิศทางการเดินรถไปทางทิศเหนือ มีปริมาณการจราจรอยู่ในช่วง 2,400-24,000 AADT ฉากหลังของอุโมงค์เป็นฉากหลังแบบที่ 7 จะได้ความส่องสว่างที่แนะนำของช่วง Threshold Zone เท่ากับ 170 cd./m^2 และความส่องสว่างที่แนะนำของช่วง Interior Zone เท่ากับ 4 cd./m^2



รูปที่ 6.24 ลักษณะการกระจายแสงของดวงโคมรหัส C9102.IES
ในแนวระนาบที่ 0 ,90 ,180 องศา



รูปที่ 6.25 การติดตั้งดวงโคมภายในอุโมงค์

ตารางที่ 6.16 การติดตั้งดวงโคมภายในอุโมงค์

#	Type	Mounting	Lon.Off	Tra.Off	No.(Al.)	No.(Ac.)	Spacing (Al.)	Spacing (Ac.)	Tilt	Line Of C0
1	C9102.IES	Ceiling	0	3	9	2	1.2	6	0	-Y
2	C9102.IES	Ceiling	11	3	63	2	2.2	6	0	-Y
3	C9102.IES	Ceiling	152	3	22	2	3.8	6	0	-Y
4	C9102.IES	Ceiling	247	6	53	1	14.5	1	0	-Y

โดยจะพิจารณาค่าความสว่าง ความส่องสว่าง และค่าความสม่ำเสมอของช่วง Threshold Zone (ช่วง 0-90 เมตร จากปากอุโมงค์) และ Interior Zone (พิจารณาช่วง 400 - 500 เมตร จาก

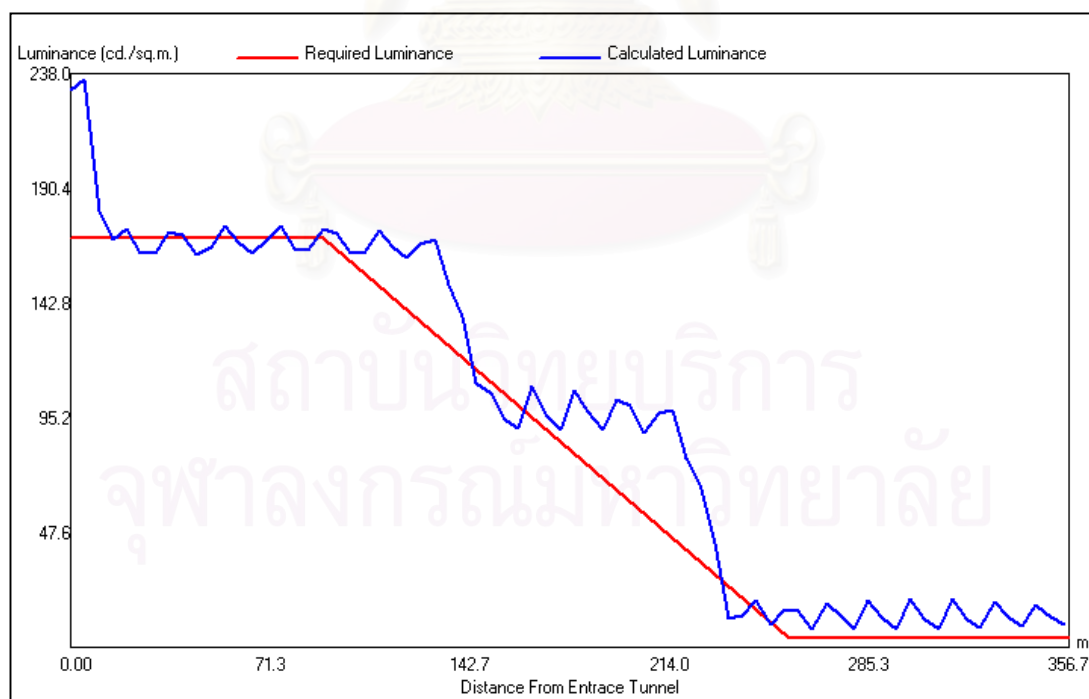
ปากอุโมงค์) ดังตารางที่ 6.17 - 6.18 โดยกราฟที่ใช้ในการออกแบบระบบแสงสว่างภายในอุโมงค์ ดังรูปที่ 6.26

ตารางที่ 6.17 ความสว่างจาก Total Component ของช่วง Threshold Zone และ Interior Zone

ช่วงของ อุโมงค์(เมตร)	Emin (Lux)	E _{max} (Lux)	E _{av} (Lux)	Emin/E _{av}	Emin/E _{max}
0-90	1467.45	3312.86	2047.63	0.717	0.443
400-500	32.85	343.78	146.31	0.224	0.096

ตารางที่ 6.18 ความส่องสว่างจาก Total Component ของช่วง
Threshold Zone และ Interior Zone

ช่วงของ อุโมงค์ (เมตร)	Lmin (cd/m ²)	Lmax (cd/m ²)	L _{av} (cd/m ²)	U ₀	U ₁₁	U ₁₂	U ₁₃
0-90	111.27	270.38	175.93	0.412	0.685	0.686	0.685
400-500	4.02	36.79	13.04	0.109	0.419	0.298	0.419



รูปที่ 6.26 กราฟที่ใช้ในการออกแบบระบบแสงสว่างภายในอุโมงค์

การวิเคราะห์ผล

ตามมาตรฐาน IESNA กำหนดไว้ว่า U_0 ต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 0.5 จากการคำนวณได้ ความสม่ำเสมอในส่วน Total Component (U_0) ในช่วง 0 -90 เมตร เท่ากับ 0.412 ซึ่งไม่ผ่านมาตรฐาน IESNA เนื่องจากลักษณะการติดตั้งดวงโคมในช่วงนี้มี 2 ลักษณะ นั่นคือ ในช่วง 0 - 9.6 เมตร ติดตั้งดวงโคมห่างกัน 1.2 เมตร และในช่วง 11 - 90 เมตร ติดตั้งดวงโคมห่างกัน 2.2 เมตร ดังรูปที่ 6.25 และตารางที่ 6.16 จึงทำให้จุดที่มีความส่องสว่างสูงสุดมีค่ามากกว่าจุดที่มีความส่องสว่างต่ำสุดมาก ส่งผลให้ค่า U_0 มีค่าน้อย

ในช่วง 400-500 เมตร มีค่า U_0 เท่ากับ 0.109 ซึ่งไม่ผ่านมาตรฐาน IESNA และค่า U_0 มีค่าน้อยมาก อาจเนื่องมาจากระยะห่างของดวงโคมแต่ละดวงห่างกันมากนั่นคือห่างกัน 14.5 เมตร ดังรูปที่ 6.25 และตารางที่ 6.16

ตามมาตรฐาน IESNA กำหนดไว้ว่า U_1 ต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 0.29 จากผลการคำนวณได้ความสม่ำเสมอในส่วน Total Component U_{11} ในช่วง 0 - 90 เมตร เท่ากับ 0.685 U_{12} เท่ากับ 0.686 และ U_{13} เท่ากับ 0.685 ซึ่งผ่านมาตรฐาน

ในช่วง 400 - 500 เมตร มีค่า U_{11} เท่ากับ 0.419 U_{12} เท่ากับ 0.298 และ U_{13} เท่ากับ 0.419 ซึ่งผ่านมาตรฐาน IESNA

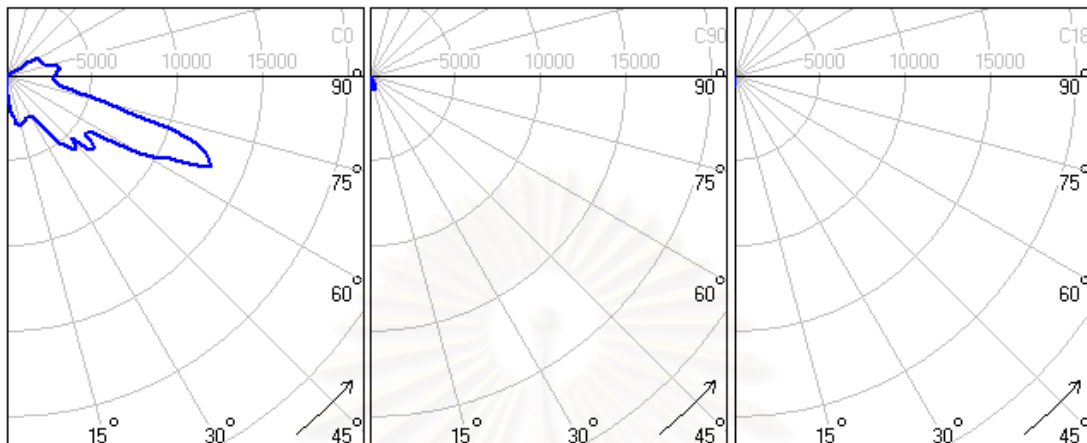
เมื่อพิจารณากราฟที่ใช้ในการออกแบบระบบแสงสว่าง ดังรูปที่ 6.26 จะพบว่ากราฟที่แสดงระดับความส่องสว่างที่ทำการออกแบบมีค่าใกล้เคียงกับกราฟที่แสดงระดับความส่องสว่างที่ต้องการ แต่เนื่องจากค่า U_0 ในช่วงความยาวที่ 0-90 , 400-500 เมตร ไม่ผ่านตามมาตรฐาน IESNA จึงต้องทำการออกแบบระบบแสงสว่างภายในอุโมงค์นี้ใหม่ โดยการเปลี่ยนดวงโคมชนิดใหม่ หรืออาจจะติดตั้งในลักษณะอื่น

6.5 ตัวอย่างการออกแบบระบบแสงสว่างบนพื้นถนนภายในอุโมงค์ กรณีที่ 2

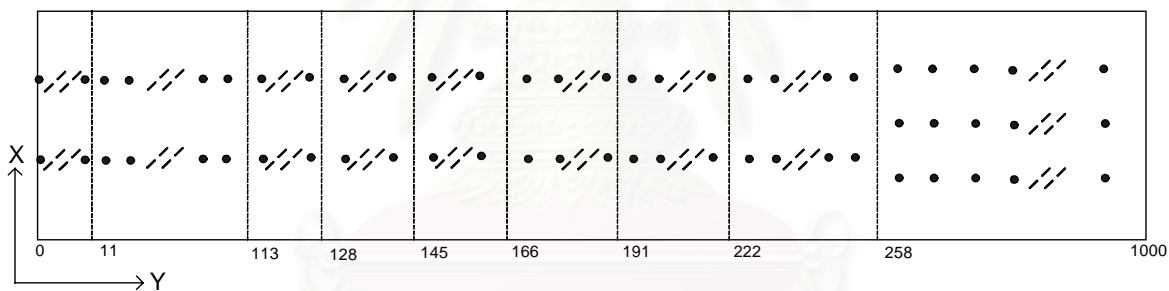
จากหัวข้อ 6.4 - ตัวอย่างการออกแบบระบบแสงสว่างบนพื้นถนนภายในอุโมงค์ กรณีที่ 1 พบว่าค่า U_0 ในช่วงความยาวที่ 0-90 และ 400-500 เมตร ไม่ผ่านตามมาตรฐาน IESNA จึงต้องทำการออกแบบระบบแสงสว่างภายในอุโมงค์นี้ใหม่

พื้นที่ทดสอบเป็นอุโมงค์ที่มีลักษณะเช่นเดียวกับหัวข้อ 6.4 - ตัวอย่างการออกแบบระบบแสงสว่างบนพื้นถนนภายในอุโมงค์ กรณีที่ 1 รวมทั้งปัจจัยที่มีผลต่อค่าความส่องสว่างในอุโมงค์ด้วย โดยลักษณะการติดตั้งดังรูปที่ 6.28 และตารางที่ 6.19 โดยใช้ดวงโคมรหัส C8712.IES ,

C9102.IES และ C9631.IES โดยลักษณะการกระจายแสงของดวงโคมในระนาบ C ที่ 0, 90, 180 องศา ดังรูปที่ 6.7, 6.24, 6.27 ตามลำดับ (ข้อมูลความเข้มส่องสว่างของดวงโคมแสดงไว้ในภาคผนวก ก , ตาราง C8712 ,C9102.IES และ C9631.IES)



รูปที่ 6.27 ลักษณะการกระจายแสงของดวงโคมรหัส C9631.IES
ในแนวระนาบที่ 0,90,180 องศา



รูปที่ 6.28 การติดตั้งดวงโคมภายในอุโมงค์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 6.19 การติดตั้งดวงโคมภายในอุโมงค์

#	Type	Mounting	Lon.Off	Tra.Off	No.(Al.)	No.(Ac.)	Spacing (Al.)	Spacing (Ac.)	Tilt	Line Of C0
1	C9102.IES	Ceiling	0	3	7	2	1.5	6	0	-Y
2	C9102.IES	Ceiling	11	3	51	2	2.0	6	0	-Y
3	C9102.IES	Ceiling	113	3	6	2	2.3	6	0	-Y
4	C9102.IES	Ceiling	128	3	6	2	2.8	6	0	-Y
5	C9102.IES	Ceiling	145	3	6	2	3.3	6	0	-Y
6	C9102.IES	Ceiling	166	3	6	2	4.0	6	0	-Y
7	C9102.IES	Ceiling	191	3	6	2	5.0	6	0	-Y
8	C9631.IES	Ceiling	222	3	6	2	6.0	6	0	-Y
9	C8712.IES	Ceiling	258	3	124	3	6.0	3	0	-Y

โดยจะพิจารณาค่าความสว่าง ความส่องสว่าง และค่าความสม่ำเสมอของช่วง Threshold Zone (ช่วง 0 – 90 เมตร จากปากอุโมงค์) และ Interior Zone (พิจารณาระยะ 400 – 500 เมตร จากปากอุโมงค์) ดังตารางที่ 6.20 – 6.21 โดยกราฟที่ใช้ในการออกแบบระบบแสงสว่างภายในอุโมงค์ ดังรูปที่ 6.29

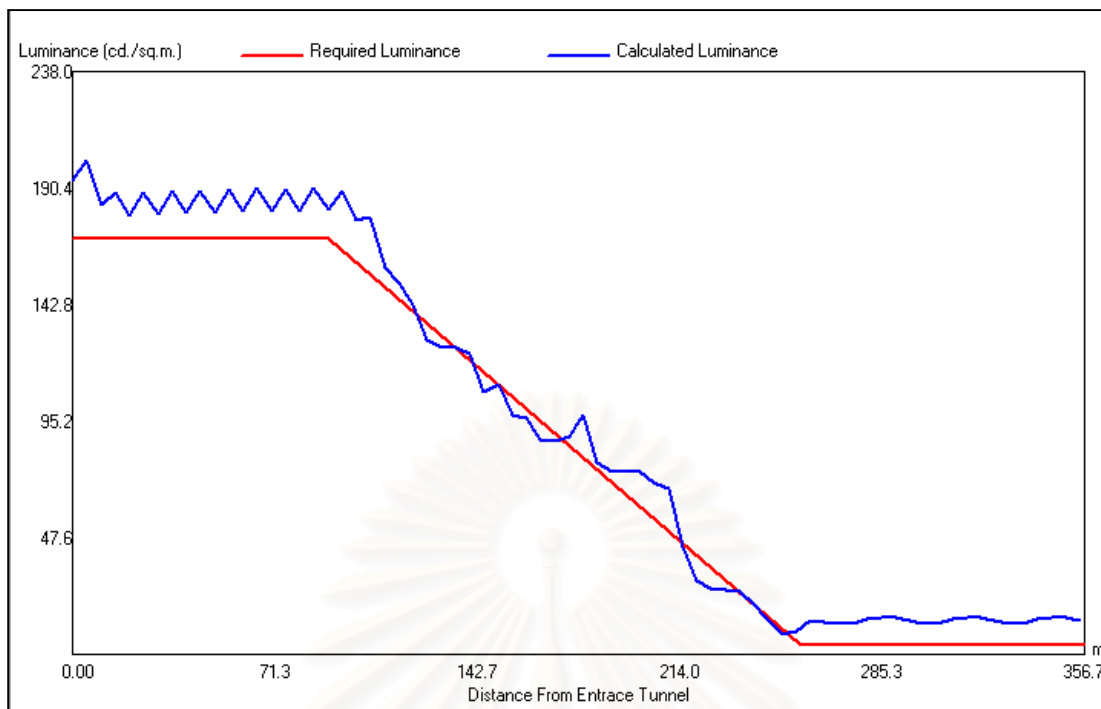
ตารางที่ 6.20 ความสว่างจาก Total Component ของช่วง Threshold Zone และ Interior Zone

ช่วงของ อุโมงค์(เมตร)	Emin (Lux)	E _{max} (Lux)	E _{av} (Lux)	Emin/E _{av}	Emin/E _{max}
0-90	1621.20	2684.81	2148.79	0.754	0.604
400-500	172.68	262.55	221.14	0.781	0.658

ตารางที่ 6.21 ความส่องสว่างจาก Total Component ของช่วง

Threshold Zone และ Interior Zone

ช่วงของ อุโมงค์ (เมตร)	Lmin (cd/m ²)	Lmax (cd/m ²)	L _{av} (cd/m ²)	U ₀	U ₁₁	U ₁₂	U ₁₃
0-90	122.54	233.90	186.28	0.524	0.882	0.889	0.882
400-500	11.25	16.67	14.01	0.675	0.809	0.826	0.809



รูปที่ 6.29 กราฟที่ใช้ในการออกแบบระบบแสงสว่างภายในอุโมงค์

การวิเคราะห์ผล

ตามมาตรฐาน IESNA กำหนดไว้ว่า U_0 ต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 0.5 จากการคำนวณได้ความสม่ำเสมอในส่วน Total Component (U_0) ในช่วง 0 - 90 เมตร เท่ากับ 0.524 ซึ่งผ่านมาตรฐาน IESNA

ในช่วง 400-500 เมตร มีค่า U_0 เท่ากับ 0.675 ซึ่งผ่านมาตรฐาน IESNA

ตามมาตรฐาน IESNA กำหนดไว้ว่า U_1 ต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 0.29 จากผลการคำนวณได้ความสม่ำเสมอในส่วน Total Component U_{11} ในช่วง 0 - 90 เมตร เท่ากับ 0.882 U_{12} เท่ากับ 0.889 U_{13} เท่ากับ 0.882 ซึ่งผ่านมาตรฐาน IESNA

ในช่วง 400 - 500 เมตร มีค่า U_{11} เท่ากับ 0.809 U_{12} เท่ากับ 0.826 U_{13} เท่ากับ 0.809 ซึ่งผ่านมาตรฐาน IESNA

เมื่อพิจารณากราฟที่ใช้ในการออกแบบระบบแสงสว่าง ดังรูปที่ 6.29 จะพบว่ากราฟที่แสดงระดับความส่องสว่างที่ทำการออกแบบมีค่าใกล้เคียงกับกราฟที่แสดงระดับความส่องสว่างที่ต้องการ

บทที่ 7

สรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการดำเนินงาน

วิทยานิพนธ์นี้ได้เสนอวิธีการวิเคราะห์ค่าความสว่างและความส่องสว่างบนพื้นถนนภายในอุโมงค์ ซึ่งความสว่างและความส่องสว่างบนพื้นถนนภายในอุโมงค์เป็นผลเนื่องจากแสงที่ส่องโดยตรงจากดวงโคม (Direct component) และส่วนที่เกิดจากการสะท้อนของพื้นผิวย่อย ๆ ที่เกิดจากการแบ่งพื้นผิวของผนังและเพดาน (Indirect Component) ความส่องสว่างที่เหมาะสมสำหรับอุโมงค์นั้นไม่ได้เท่ากันในทุกอุโมงค์ แต่ขึ้นอยู่กับลักษณะสภาพแวดล้อมของอุโมงค์ ความเร็วของยานพาหนะในอุโมงค์ รวมทั้งแนวของอุโมงค์ ซึ่งสิ่งเหล่านี้ล้วนเป็นปัจจัยที่สำคัญสำหรับความส่องสว่างภายในอุโมงค์ วิธีที่ใช้ในการคำนวณค่าความสว่างและความส่องสว่างในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้วิธีจุดต่อจุดซึ่งเป็นวิธีที่ใช้หาค่าความสว่างและความส่องสว่าง ณ จุดที่กำหนดบนพื้นถนน ซึ่งวิธีจุดต่อจุดเป็นวิธีที่ต้องใช้เวลาในการคำนวณนาน และมีความผิดพลาดได้ง่าย จึงจำเป็นต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์มาช่วยในการวิเคราะห์ จึงทำให้ผลการคำนวณมีความแม่นยำมากขึ้น และยังใช้เวลาในการคำนวณไม่นาน ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้ภาษาเดลไฟล์ 5 มาเป็นเครื่องมือในการพัฒนาโปรแกรม ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ง่ายและมีประสิทธิภาพที่สูงด้วย

โปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้นสามารถคำนวณค่าความสว่างและความส่องสว่างบนพื้นถนนภายในอุโมงค์ รวมทั้งสามารถหาค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุดของความสว่างและความส่องสว่างทั้งในส่วนของ Direct Component และ Total Component โปรแกรมนี้สามารถจะคำนวณในส่วนของอุโมงค์ที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมและอุโมงค์ที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปโค้ง โดยการแสดงผลของโปรแกรมจะแสดงในรูปแบบตารางข้อมูลความสว่างและความส่องสว่างทั้งในส่วนของ Direct Component และ Total Component ภาพแรเงา ภาพลายเส้น ภาพระบายสี (Shade) ของความสว่างและความส่องสว่าง เนื่องจากการแสดงผลเป็นรูปภาพจึงสามารถสื่อสารให้เข้าใจได้ง่ายและถูกต้องกว่า อีกทั้งโปรแกรมยังมีส่วนของการคำนวณเพื่อที่จะช่วยในการออกแบบระบบแสงสว่างภายในอุโมงค์เพื่อให้เข้ากับสภาพแวดล้อมรอบ ๆ อุโมงค์โดยมีความส่องสว่างที่เหมาะสมอีกด้วย

7.2 ข้อเสนอแนะ

การพัฒนาโปรแกรมในวิทยานิพนธ์นี้เป็นเพียงการเริ่มต้นการพัฒนาโปรแกรมเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความสว่างและความส่องสว่างบนพื้นถนนภายในอุโมงค์ สามารถคำนวณได้เฉพาะอุโมงค์ตรงและอุโมงค์ที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมและมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปโค้งเท่านั้น แต่ลักษณะการใช้งานจริงไม่ได้มีเฉพาะอุโมงค์ตรงเท่านั้น และลักษณะของพื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์ก็อาจจะมีรูปร่างอื่น ๆ ได้ รวมทั้งพื้นผิวของเพดานและผนังก็อาจจะมีลักษณะการสะท้อนแสงที่ไม่เป็นแบบกระจายแสงสมบูรณ์ (Perfectly Diffuse) ก็ได้จึงควรจะมีการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นต่อไป



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] ANSI/IESNA RP –22-96 , “American National Standard Practice for Tunnel Lighting”,
Illuminating Engineering Society of North America , 1996
- [2] I. Lewin and R. Heinisch , “Luminance Calculations for Tunnel Lighting Systems” ,
Journal of the Illuminating Society Winter 1988,p74-79.
- [3] Ir. W.J.M.van Bommel. Prof.J.B.de Boer, “Road Lighting”, PHILIPS TECHNICAL
LIBRARY KLUWER TECHNISCHE BOEKEN B.V.-DEVENTER-ANTWERPEN ,
1980
- [4] CIE 88-1990, “Guide for the lighting of road tunnels and underpasses”,International
Commission On Illumination,1990
- [5] BS 5489:Part 7:1992, “Code of practice for the lighting of tunnels and underpasses”,
British Standard ,1992
- [6] JIS Z9116 1990,“Lighting of Tunnels for Motorized Traffic”,Japanese Standards
Association,1990
- [7] Lumec-Schreder . Available from : [http://www.lumecscreder.com/en/Products/cgi-
bin/productSeries.asp?section=tunnel](http://www.lumecscreder.com/en/Products/cgi-bin/productSeries.asp?section=tunnel)
- [8] ไชยะ แซ่มซ้อย , “พื้นฐานวิศวกรรมการส่องสว่าง เล่มที่ 1” , บริษัท เอ็มแอนด์อี จำกัด ,
กรุงเทพ ฯ , 2544
- [9] ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์ , “Lighting System Design” , กลุ่มบริษัท แสงมิตร กรุ๊ป , กรุงเทพ ฯ ,
2544
- [10] สุวิษญาน์ อินนัตตา, “การประเมินคุณภาพไฟถนน” , วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขา
วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2543

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ตาราง ก.1 ข้อมูลความเข้มส่องสว่างดวงโคม C8712.IES

มุม γ (องศา)	ระนาบ C														
	0	5	15	25	35	45	55	60	62.5	65	67.5	70	72.5	75	77.5
0	1752	1752	1752	1752	1752	1752	1752	1752	1752	1752	1752	1752	1752	1752	1752
2.5	1705	1722	1729	1737	1729	1732	1736	1746	1754	1743	1750	1757	1753	1753	1749
5	1708	1771	1768	1775	1778	1765	1760	1759	1749	1746	1754	1741	1754	1755	1749
7.5	1806	1871	1869	1860	1828	1809	1790	1779	1769	1748	1759	1759	1746	1763	1769
10	1934	2021	2030	1986	1939	1896	1814	1784	1770	1774	1763	1758	1744	1742	1739
12.5	2067	2171	2173	2129	2051	1978	1860	1818	1795	1789	1763	1751	1742	1733	1736
15	2232	2314	2335	2284	2179	2054	1916	1863	1820	1815	1786	1754	1748	1737	1722
17.5	2352	2404	2421	2382	2283	2126	1949	1875	1844	1815	1796	1779	1758	1720	1729
20	2379	2427	2449	2447	2321	2151	1991	1907	1848	1828	1788	1751	1741	1723	1695
22.5	2357	2380	2410	2434	2314	2159	1979	1903	1855	1810	1805	1748	1744	1707	1709
25	2276	2277	2334	2350	2266	2150	1986	1902	1885	1834	1801	1768	1735	1709	1693
27.5	2150	2092	2177	2240	2193	2125	2006	1944	1885	1861	1822	1788	1743	1735	1694
30	2008	1918	1993	2092	2094	2063	2003	1949	1920	1872	1828	1807	1784	1736	1696
32.5	1784	1673	1771	1886	1955	1999	2013	1972	1938	1900	1876	1833	1806	1768	1741
35	1565	1467	1548	1701	1828	1950	2010	1982	1983	1954	1922	1893	1841	1806	1770
37.5	1368	1246	1367	1514	1683	1858	2020	2027	2013	2005	1989	1944	1917	1867	1824
40	1157	1094	1184	1355	1537	1770	1987	2048	2048	2053	2034	2017	1983	1921	1891

มุม γ (องศา)	ระนาบ C														
	80	82.5	85	87.5	90	95	105	115	125	135	145	155	165	175	180
0	1752	1752	1752	1752	1752	1752	1752	1752	1752	1752	1752	1752	1752	1752	1752
2.5	1768	1752	1766	1764	1784	1774	1782	1770	1790	1790	1790	1791	1796	1785	1769
5	1749	1763	1765	1769	1753	1787	1787	1814	1844	1876	1883	1888	1893	1893	1907
7.5	1739	1759	1763	1762	1770	1792	1810	1854	1904	1962	2010	2026	2030	2062	2070
10	1752	1741	1759	1753	1752	1764	1824	1906	1977	2087	2162	2197	2229	2259	2276
12.5	1738	1729	1739	1727	1734	1757	1823	1934	2067	2196	2312	2373	2420	2453	2468
15	1728	1727	1733	1737	1734	1755	1843	1971	2131	2300	2432	2530	2562	2576	2591
17.5	1701	1700	1708	1722	1734	1744	1857	2013	2209	2382	2515	2592	2625	2638	2606
20	1706	1687	1689	1700	1707	1740	1854	2062	2261	2443	2536	2594	2619	2610	2562
22.5	1693	1684	1685	1694	1705	1737	1871	2085	2296	2420	2486	2538	2518	2509	2419
25	1679	1692	1678	1677	1696	1726	1903	2131	2303	2365	2371	2416	2394	2345	2249
27.5	1676	1674	1668	1678	1692	1755	1939	2159	2291	2284	2244	2220	2181	2133	2033
30	1680	1666	1666	1667	1699	1752	1986	2196	2269	2193	2083	2013	1976	1926	1809
32.5	1707	1689	1680	1698	1705	1772	2025	2236	2214	2067	1900	1799	1737	1686	1568
35	1731	1722	1713	1705	1725	1811	2106	2284	2184	1956	1743	1587	1505	1478	1358
37.5	1777	1756	1741	1747	1763	1873	2182	2304	2123	1835	1560	1387	1283	1278	1169
40	1845	1796	1801	1804	1807	1936	2287	2327	2040	1695	1384	1211	1127	1108	1029
42.5	1929	1859	1857	1858	1880	2014	2397	2336	1958	1577	1227	1067	968	968	913

ตาราง ก.2 ข้อมูลความเข้มส่องสว่างดวงโคม C9102.IES

มุม γ (องศา)	ระนาบ C														
	0	5	15	25	35	45	55	60	62.5	65	67.5	70	72.5	75	77.5
0	7170	7170	7170	7170	7170	7170	7170	7170	7170	7170	7170	7170	7170	7170	7170
2.5	6988	7227	7219	7272	7184	7235	7215	7219	7187	7190	7172	7147	7172	7165	7147
5	7132	7464	7399	7369	7319	7322	7252	7229	7160	7125	7144	7170	7118	7140	7162
7.5	7542	8013	7880	7679	7502	7427	7277	7257	7207	7190	7204	7128	7125	7171	7147
10	8505	8951	8661	8340	8003	7696	7424	7316	7250	7247	7219	7204	7193	7172	7150
12.5	9786	10325	9786	9344	8731	8147	7621	7427	7344	7275	7257	7212	7240	7229	7165
15	11950	12871	12061	11108	9886	8848	8003	7667	7514	7399	7305	7215	7207	7169	7150
17.5	15667	16558	15685	14081	11863	9911	8524	7955	7714	7586	7394	7277	7169	7097	7082
20	19534	19244	19115	17899	15009	11654	9195	8372	8013	7751	7517	7255	7137	7010	6984
22.5	19248	18170	18702	19383	18151	14013	10091	8789	8307	7916	7574	7337	7093	6931	6931
25	17075	16413	16677	17575	18946	16577	11258	9332	8599	8135	7696	7409	7107	6883	6770
27.5	15891	15807	15792	15904	16824	17471	12600	10008	9055	8394	7898	7456	7176	6855	6655
30	16047	16274	15779	15415	15333	16029	13460	10706	9527	8703	8053	7539	7169	6830	6576
32.5	17926	18615	17446	16045	14844	14215	13452	11292	10116	9105	8344	7748	7247	6830	6514
35	21742	21742	20678	18054	15141	13298	12560	11522	10529	9556	8631	7891	7359	6838	6459
37.5	23433	22907	22633	21271	16681	12928	11894	11397	10756	9968	9051	8175	7456	6869	6434
40	23224	22820	22501	22446	19090	13071	11425	11173	10900	10357	9475	8552	7654	6931	6392

มุม γ (องศา)	ระนาบ C														
	80	82.5	85	87.5	90	95	105	115	125	135	145	155	165	175	180
0	7170	7170	7170	7170	7170	7170	7170	7170	7170	7170	7170	7170	7170	7170	7170
2.5	7162	7157	7191	7197	7184	7212	7160	7187	7212	7207	7201	7207	7090	7107	6882
5	7172	7122	7147	7160	7157	7207	7147	7132	7168	7200	7269	7284	7262	7229	7118
7.5	7150	7179	7140	7197	7179	7154	7137	7171	7287	7430	7543	7624	7701	7740	7795
10	7154	7151	7153	7201	7144	7172	7097	7293	7449	7768	8103	8287	8452	8463	8564
12.5	7115	7118	7154	7144	7140	7132	7085	7344	7754	8322	8728	8958	9045	9077	9023
15	7118	7107	7104	7125	7087	7110	7088	7131	8185	8915	9232	9332	9192	9175	9008
17.5	7073	7028	6992	7028	6992	6995	7045	7545	8491	9238	9365	9214	8980	8901	8693
20	6988	6939	6873	6898	6880	6835	6941	7553	8628	9153	9138	8854	8571	8477	8145
22.5	6850	6798	6733	6716	6668	6679	6795	7452	8412	8728	8715	8300	7869	7639	7118
25	6713	6646	6554	6554	6504	6489	6686	7333	8000	8195	8035	7331	6582	6284	5680
27.5	6561	6461	6402	6381	6356	6352	6643	7190	7369	7481	6975	5803	4292	3581	2467
30	6434	6330	6274	6241	6230	6205	6629	7060	6858	6629	5526	3224	2146	1837	1705
32.5	6280	6183	6128	6072	6068	6057	6621	6758	6420	5526	3009	1777	1633	1540	1425
35	6172	5970	5885	5857	5806	5845	6515	6518	5915	3659	1491	1531	1379	1273	1207
37.5	6072	5834	5713	5633	5571	5658	6431	6327	5339	1671	1124	1247	1169	1097	1027
40	5950	5651	5464	5408	5361	5483	6321	6075	4074	1002	895	1004	1014	945	898
42.5	5828	5468	5259	5162	5130	5252	6112	5666	2235	884	705	848	864	824	742
45	5723	5299	5019	4918	4843	5005	5776	5077	1186	776	558	658	708	640	583

ตาราง ก.3 ข้อมูลความเข้มส่องสว่างดวงโคม C9631.IES

มุม γ (องศา)	ระนาบ C														
	0	5	15	25	35	45	55	60	62.5	65	67.5	70	72.5	75	77.5
0	597	597	597	597	597	597	597	597	597	597	597	597	597	597	597
2.5	1493	1517	1490	1552	1425	1228	1091	996	921	926	879	801	767	774	718
5	2155	2151	2117	2134	2070	1923	1798	1645	1555	1513	1408	1235	1119	1067	935
7.5	2331	2345	2304	2302	2246	2209	2110	2018	1961	1926	1855	1711	1583	1457	1259
10	2808	2796	2785	2822	2577	2335	2256	2189	2161	2145	2101	2025	1957	1848	1658
12.5	2973	2938	2924	2934	3004	2794	2321	2283	2254	2233	2208	2169	2131	2075	1957
15	2959	2919	2942	2955	3009	3174	2796	2397	2307	2271	2239	2195	2179	2148	2096
17.5	2831	2820	2808	2850	2938	3141	3265	2857	2465	2339	2274	2219	2191	2168	2141
20	2822	2808	2810	2836	2839	3019	3337	3217	2933	2581	2356	2237	2186	2172	2110
22.5	2727	2699	2701	2775	2843	2881	3208	3106	2900	2680	2468	2285	2202	2148	2120
25	2672	2656	2652	2653	2765	2836	2887	2827	2734	2614	2522	2397	2246	2186	2131
27.5	2699	2676	2676	2662	2659	2779	2670	2641	2599	2578	2532	2465	2376	2250	2165
30	2769	2748	2744	2709	2662	2642	2628	2533	2512	2522	2533	2505	2465	2362	2169
32.5	2987	2987	2870	2836	2684	2595	2610	2510	2441	2430	2479	2529	2546	2451	2145
35	4185	4234	3619	3134	2754	2563	2526	2489	2413	2380	2416	2503	2533	2434	2042
37.5	5064	5052	4983	4558	2965	2557	2437	2401	2403	2362	2355	2434	2491	2325	1902
40	5612	5624	5161	5242	3603	2567	2427	2332	2338	2380	2370	2388	2377	2103	1698

มุม γ (องศา)	ระนาบ C														
	0	5	15	25	35	45	55	60	62.5	65	67.5	70	72.5	75	77.5
42.5	5966	5901	6286	5754	4376	2595	2417	2332	2332	2380	2420	2366	2162	1763	1394
45	5173	5304	5539	6338	4503	2614	2269	2314	2363	2397	2406	2304	1950	1446	1125
47.5	6525	6579	6603	5998	4216	2798	2066	2176	2275	2342	2335	2162	1694	1160	872
50	6606	6537	6733	6733	4199	2860	2124	1940	1976	2046	2075	1902	1401	900	703
52.5	5612	5683	6315	5941	4359	3007	2401	1953	1800	1704	1626	1474	1087	675	577
55	5986	6222	5889	4936	4354	3089	2618	2066	1862	1623	1373	1077	784	515	474
57.5	7764	8064	7734	5454	4269	3241	2673	2144	1974	1704	1316	938	618	406	396
60	9666	9786	9530	8313	4435	3439	2515	2219	2042	1777	1303	883	562	365	337
62.5	10914	11119	10928	10164	5331	3657	2430	2200	1992	1711	1214	815	488	342	318
65	13047	13242	12972	11644	5566	4091	2417	2056	1817	1518	1098	686	369	294	297
67.5	12578	12563	13818	13505	5874	4435	2479	1835	1578	1285	879	529	304	259	273
70	11310	11132	11902	12496	6241	5211	2919	1814	1426	1056	678	375	245	228	256
72.5	7689	7379	8613	9625	5638	5944	3661	2161	1316	869	573	315	245	213	192
75	4704	4574	5031	5243	4326	5437	3869	2175	1128	760	543	325	240	202	164
77.5	3660	3525	3589	3279	2813	3780	2969	1531	952	732	522	365	276	188	127
80	3054	2972	2980	2625	2297	2477	189	1125	843	703	481	365	277	157	103
82.5	2870	2864	2806	2444	2267	1936	1347	890	717	597	403	314	208	131	62
85	2755	2768	2772	2413	2274	1791	1211	784	642	481	311	245	164	100	32
87.5	2699	2751	2694	2328	2195	1722	1140	709	566	368	219	177	110	55	22
90	2761	2751	2692	2226	2155	1775	1126	679	550	297	177	141	82	37	11

มุม γ (องศา)	ระนาบ C														
	0	5	15	25	35	45	55	60	62.5	65	67.5	70	72.5	75	77.5
142.5	69	62	75	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
145	55	20	39	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
147.5	27	0	18	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
152.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
155	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
157.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
160	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
162.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
165	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
167.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
170	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
172.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
175	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
177.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
180	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

มุม γ (องศา)	ระนาบ C														
	80	82.5	85	87.5	90	95	105	115	125	135	145	155	165	175	180
142.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
145	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
147.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
152.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
155	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
157.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
160	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
162.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
165	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
167.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
170	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
172.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
175	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
177.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
180	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ค

ผลการวิเคราะห์ค่าความสว่างและความส่องสว่างทางเครื่องพิมพ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

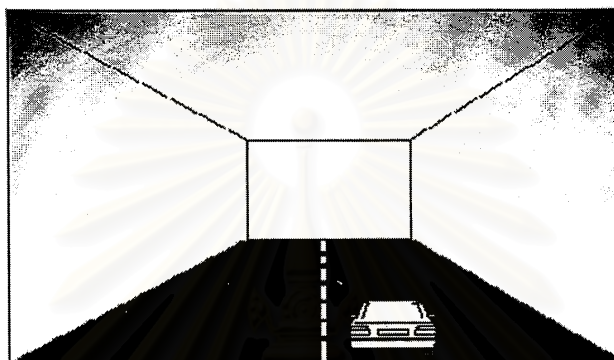
Tunnel Lighting Design Report

	Page
Results For :	
1. Information of Tunnel	2
2. Summary	3
3. Total Illuminance Table	4
4. Direct Illuminance Table	6
5. Total Luminance Table	8
6. Direct Luminance Table	10
7. Iso-Lux Diagram	12
8. Iso-Luminance Diagram	13
9. Illuminance Color Shade Diagram	14
10. Luminance Color Shade Diagram	15
11. Illuminance Rendering	16
12. Luminance Rendering	17

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Tunnel Lighting Design Report

Information of Tunnel



Width : 15 m.

Length : 1000 m.

Height : 6 m.

Ceiling Reflectance : 0.60

Right Wall Reflectance : 0.60

Left Wall Reflectance : 0.60

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Tunnel Lighting Design Report

SUMMARY

Illuminance (Lux)

- Direct Component

Maximum	= 396.67	Emin/Eav	= 0.419
Minimum	= 144.35	Emin/Emax	= 0.364
Average	= 344.41		

- Total Component

Maximum	= 452.80	Emin/Eav	= 0.430
Minimum	= 166.40	Emin/Emax	= 0.367
Average	= 386.83		

Luminance (cd./sqr.m.) & Overall Uniformity , U₀

- Direct Component

Maximum	= 30.06	U ₀	= 0.280
Minimum	= 8.41		
Average	= 22.11		

- Total Component

Maximum	= 31.84	U ₀	= 0.327
Minimum	= 10.42		
Average	= 24.20		

Observation Point

X = 4 m. , Y = -60 m.

Longitudinal Uniformity , U₁

Observation Point	Direct	Total
X = 3 , Y = -60	0.774	0.755
X = 8 , Y = -60	0.690	0.674
X = 13 , Y = -60	0.774	0.755

Tunnel Lighting Design Report

Total Illuminance (Lux)

Y (m.)

X (m.)	0.00	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00	30.00	35.00	40.00	45.00
0.50	166.40	343.16	336.32	407.63	358.31	416.42	356.93	417.17	360.45	414.04
1.50	185.48	374.98	361.34	445.84	385.25	451.76	387.09	452.50	387.41	452.67
2.50	173.90	336.28	331.12	407.19	357.38	413.72	359.31	414.48	359.66	414.66
3.50	216.41	318.71	364.47	389.67	392.17	396.52	394.16	397.29	394.52	397.48
4.50	237.40	349.50	394.95	423.52	423.22	430.62	425.26	431.41	425.62	431.59
5.50	238.40	345.78	397.62	421.73	425.60	428.95	427.71	429.75	428.07	429.94
6.50	215.38	307.90	362.85	383.51	390.36	390.75	392.49	391.54	392.85	391.73
7.50	202.62	286.42	343.80	361.19	371.07	368.66	373.18	369.45	373.54	369.63
8.50	215.38	307.90	362.85	383.51	390.36	390.75	392.49	391.54	392.85	391.73
9.50	238.40	345.78	397.62	421.73	425.60	428.95	427.71	429.75	428.07	429.94
10.50	237.40	349.50	394.95	423.52	423.22	430.62	425.26	431.41	425.62	431.59
11.50	216.41	318.71	364.47	389.67	392.17	396.52	394.16	397.29	394.52	397.48
12.50	173.90	336.29	331.12	407.19	357.38	413.72	359.31	414.48	359.66	414.66
13.50	185.48	374.98	361.34	445.84	385.25	451.76	387.09	452.50	387.41	452.67
14.50	166.40	343.16	336.32	407.63	358.31	416.42	356.94	417.17	360.45	414.04

Remark : X =Across Tunnel

Y= Along Tunnel

Tunnel Lighting Design Report

Total Illuminance (Lux) - Continued

X (m.)	Y (m.)								
	50.00	55.00	60.00	65.00	70.00	75.00	80.00	85.00	90.00
0.50	360.57	417.44	357.45	417.47	360.64	414.16	360.65	417.49	357.49
1.50	387.52	452.75	387.59	452.78	387.58	452.78	387.59	452.80	387.62
2.50	359.77	414.73	359.82	414.76	359.83	414.77	359.84	414.78	359.85
3.50	394.63	397.55	394.67	397.57	394.69	397.58	394.70	397.59	394.71
4.50	425.72	431.66	425.77	431.69	425.78	431.70	425.79	431.71	425.80
5.50	428.17	430.00	428.22	430.03	428.24	430.04	428.24	430.05	428.25
6.50	392.95	391.79	392.99	391.82	393.01	391.83	393.02	391.84	393.02
7.50	373.64	369.70	373.69	369.73	373.70	369.74	373.71	369.75	373.72
8.50	392.95	391.79	392.99	391.82	393.01	391.83	393.02	391.84	393.02
9.50	428.17	430.00	428.22	430.03	428.24	430.04	428.24	430.05	428.25
10.50	425.72	431.66	425.77	431.69	425.78	431.70	425.79	431.71	425.80
11.50	394.63	397.55	394.68	397.57	394.69	397.59	394.70	397.59	394.71
12.50	359.77	414.73	359.82	414.76	359.83	414.77	359.84	414.78	359.85
13.50	387.52	452.75	387.59	452.78	387.58	452.78	387.59	452.80	387.62
14.50	360.57	417.44	357.45	417.47	360.64	414.16	360.65	417.49	357.49

Remark : X =Across Tunnel
Y= Along Tunnel

Tunnel Lighting Design Report

Direct Illuminance (Lux)

Y (m.)

X (m.)	0.00	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00	30.00	35.00	40.00	45.00
0.50	144.35	286.26	269.65	340.46	286.76	344.11	287.61	344.36	287.69	344.39
1.50	166.44	331.75	310.38	392.10	330.40	396.35	331.37	396.63	331.46	396.66
2.50	157.19	300.69	288.59	362.05	311.14	366.93	312.24	367.25	312.34	367.28
3.50	201.52	288.61	327.93	350.57	351.96	355.76	353.13	356.09	353.23	356.13
4.50	223.84	323.17	362.50	388.53	387.10	393.95	388.31	394.30	388.42	394.34
5.50	225.73	321.85	367.80	389.37	392.10	394.91	393.38	395.26	393.49	395.30
6.50	203.22	285.31	334.51	352.61	358.33	358.17	359.63	358.52	359.73	358.56
7.50	190.62	264.26	315.94	330.77	339.51	336.55	340.79	336.89	340.89	336.93
8.50	203.22	285.31	334.51	352.61	358.33	358.17	359.63	358.52	359.73	358.56
9.50	225.73	321.85	367.80	389.37	392.10	394.91	393.38	395.26	393.49	395.30
10.50	223.84	323.17	362.50	388.53	387.10	393.95	388.31	394.30	388.42	394.34
11.50	201.52	288.61	327.93	350.57	351.96	355.76	353.13	356.09	353.23	356.13
12.50	157.19	300.69	288.59	362.05	311.14	366.93	312.24	367.25	312.34	367.28
13.50	166.44	331.75	310.38	392.10	330.40	396.35	331.37	396.63	331.46	396.66
14.50	144.35	286.26	269.65	340.46	286.76	344.11	287.61	344.36	287.69	344.39

Remark : X =Across Tunnel

Y= Along Tunnel

Tunnel Lighting Design Report

Direct Illuminance (Lux) - Continued

X (m.)	Y (m.)								
	50.00	55.00	60.00	65.00	70.00	75.00	80.00	85.00	90.00
0.50	287.70	344.39	287.70	344.39	287.70	344.39	287.70	344.39	287.70
1.50	331.47	396.67	331.48	396.67	331.48	396.67	331.48	396.67	331.48
2.50	312.35	367.29	312.36	367.29	312.36	367.29	312.36	367.29	312.36
3.50	353.25	356.14	353.25	356.14	353.25	356.14	353.25	356.14	353.25
4.50	388.43	394.34	388.43	394.34	388.43	394.34	388.43	394.34	388.43
5.50	393.50	395.31	393.51	395.31	393.51	395.31	393.51	395.31	393.51
6.50	359.75	358.56	359.75	358.57	359.75	358.57	359.75	358.57	359.75
7.50	340.91	336.94	340.91	336.94	340.91	336.94	340.91	336.94	340.91
8.50	359.75	358.56	359.75	358.57	359.75	358.57	359.75	358.57	359.75
9.50	393.50	395.31	393.51	395.31	393.51	395.31	393.51	395.31	393.51
10.50	388.43	394.34	388.43	394.34	388.43	394.34	388.43	394.34	388.43
11.50	353.25	356.14	353.25	356.14	353.25	356.14	353.25	356.14	353.25
12.50	312.35	367.29	312.36	367.29	312.36	367.29	312.36	367.29	312.36
13.50	331.47	396.67	331.48	396.67	331.48	396.67	331.48	396.67	331.48
14.50	287.70	344.39	287.70	344.39	287.70	344.39	287.70	344.39	287.70

Remark : X =Across Tunnel

Y= Along Tunnel

Tunnel Lighting Design Report

Total Luminance (cd./sqr.m.)

Y (m.)

X (m.)	0.00	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00	30.00	35.00	40.00	45.00
0.50	12.64	18.09	18.32	20.81	19.52	21.22	19.70	21.43	19.80	21.47
1.50	17.59	23.21	23.26	26.14	24.56	26.58	24.86	26.77	24.95	26.93
2.50	22.84	27.60	27.80	30.43	29.12	30.88	29.33	31.00	29.41	31.07
3.50	25.13	28.09	29.66	30.78	30.92	31.13	31.02	31.16	31.02	31.15
4.50	20.56	23.85	25.53	26.76	26.91	27.20	27.09	27.30	27.15	27.35
5.50	16.08	19.26	21.17	22.28	22.55	22.75	22.75	22.86	22.83	22.92
6.50	13.00	15.76	17.78	18.71	19.09	19.14	19.26	19.23	19.30	19.27
7.50	12.68	15.16	17.12	17.95	18.31	18.28	18.38	18.28	18.36	18.25
8.50	15.89	18.40	20.17	20.93	21.15	21.04	21.06	20.89	20.90	20.75
9.50	22.03	24.74	26.30	26.99	27.01	26.87	26.68	26.51	26.33	26.19
10.50	25.67	28.91	30.57	31.63	31.72	31.84	31.65	31.66	31.44	31.45
11.50	22.17	25.54	27.52	28.98	29.47	29.95	30.13	30.45	30.54	30.80
12.50	16.14	21.33	21.92	24.91	23.93	25.97	24.68	26.56	25.19	27.02
13.50	13.46	19.32	19.53	22.54	21.08	23.23	21.56	23.60	21.86	23.92
14.50	10.42	16.04	16.43	18.97	17.75	19.47	18.01	19.79	18.17	19.86

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Remark : X =Across Tunnel
Y= Along Tunnel

Observation Point :X = 4 m.
Y = -60 m.

Tunnel Lighting Design Report

Total Luminance (cd./sqr.m.) - Continued

X (m.)	Y (m.)								
	50.00	55.00	60.00	65.00	70.00	75.00	80.00	85.00	90.00
0.50	19.94	21.54	19.97	21.67	20.02	21.68	20.12	21.72	20.13
1.50	25.07	26.98	25.20	27.08	25.23	27.18	25.30	27.20	25.40
2.50	29.47	31.12	29.52	31.17	29.56	31.21	29.60	31.24	29.63
3.50	31.02	31.15	31.01	31.14	31.01	31.14	31.00	31.13	31.00
4.50	27.20	27.39	27.23	27.42	27.26	27.45	27.29	27.47	27.31
5.50	22.89	22.97	22.94	23.02	22.98	23.05	23.02	23.08	23.05
6.50	19.33	19.30	19.36	19.33	19.39	19.36	19.41	19.38	19.42
7.50	18.34	18.24	18.32	18.22	18.31	18.21	18.29	18.20	18.28
8.50	20.77	20.64	20.66	20.55	20.58	20.47	20.51	20.40	20.45
9.50	26.03	25.93	25.79	25.71	25.59	25.53	25.42	25.38	25.27
10.50	31.22	31.22	31.00	31.02	30.79	30.83	30.61	30.65	30.43
11.50	30.83	31.03	31.02	31.18	31.13	31.28	31.21	31.35	31.28
12.50	25.60	27.40	25.95	27.71	26.24	28.00	26.51	28.25	26.76
13.50	22.14	24.15	22.41	24.39	22.60	24.63	22.81	24.78	23.03
14.50	18.41	20.02	18.47	20.21	18.63	20.26	18.79	20.40	18.84



Remark : X =Across Tunnel
 Y= Along Tunnel

Observation Point : X = 4 m.
 Y = -60 m.

Tunnel Lighting Design Report

Direct Luminance (cd./sqr.m.)

		Y (m.)									
X (m.)	0.00	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00	30.00	35.00	40.00	45.00	
0.50	10.91	15.04	14.92	17.28	15.91	17.64	16.11	17.79	16.23	17.89	
1.50	16.21	20.98	20.77	23.51	21.93	23.94	22.16	24.11	22.30	24.24	
2.50	21.74	25.87	25.82	28.36	27.01	28.75	27.19	28.86	27.27	28.92	
3.50	24.15	26.58	27.92	28.95	29.04	29.23	29.11	29.24	29.10	29.23	
4.50	19.70	22.53	23.99	25.12	25.23	25.50	25.38	25.58	25.43	25.62	
5.50	15.27	18.05	19.75	20.76	20.99	21.17	21.16	21.26	21.23	21.32	
6.50	12.23	14.61	16.42	17.27	17.60	17.63	17.74	17.70	17.77	17.74	
7.50	11.90	14.02	15.77	16.50	16.82	16.77	16.87	16.76	16.84	16.73	
8.50	15.08	17.22	18.79	19.45	19.63	19.51	19.51	19.34	19.35	19.20	
9.50	21.16	23.48	24.83	25.43	25.41	25.26	25.06	24.89	24.70	24.57	
10.50	24.68	27.47	28.91	29.89	29.95	30.06	29.86	29.86	29.65	29.66	
11.50	21.01	23.87	25.62	27.00	27.47	27.94	28.11	28.44	28.53	28.80	
12.50	14.77	19.33	19.70	22.62	21.62	23.64	22.36	24.25	22.89	24.73	
13.50	11.74	16.70	16.62	19.53	18.07	20.23	18.55	20.63	18.91	20.96	
14.50	8.41	12.60	12.58	15.01	13.70	15.50	14.04	15.77	14.27	15.99	

Remark : X =Across Tunnel
Y= Along Tunnel

Observation Point : X = 4 m.
Y = -60 m.

Tunnel Lighting Design Report

Direct Luminance (cd./sqr.m.) - Continued

X (m.)	Y (m.)								
	50.00	55.00	60.00	65.00	70.00	75.00	80.00	85.00	90.00
0.50	16.32	17.98	16.40	18.06	16.47	18.12	16.53	18.18	16.58
1.50	22.42	24.34	22.51	24.43	22.59	24.51	22.66	24.57	22.73
2.50	27.33	28.98	27.38	29.02	27.42	29.06	27.45	29.10	27.49
3.50	29.10	29.23	29.09	29.22	29.09	29.22	29.08	29.21	29.08
4.50	25.47	25.66	25.50	25.69	25.53	25.72	25.56	25.74	25.58
5.50	21.29	21.37	21.34	21.41	21.38	21.45	21.41	21.48	21.44
6.50	17.80	17.77	17.83	17.80	17.85	17.82	17.87	17.84	17.89
7.50	16.82	16.71	16.80	16.70	16.78	16.69	16.77	16.68	16.76
8.50	19.22	19.09	19.11	19.00	19.03	18.92	18.96	18.86	18.90
9.50	24.41	24.30	24.17	24.09	23.97	23.91	23.79	23.76	23.65
10.50	29.43	29.43	29.22	29.24	29.02	29.05	28.84	28.88	28.67
11.50	28.84	29.04	29.03	29.19	29.15	29.30	29.24	29.37	29.30
12.50	23.32	25.12	23.68	25.45	23.99	25.75	24.27	26.01	24.52
13.50	19.22	21.25	19.49	21.51	19.74	21.74	19.97	21.96	20.17
14.50	14.49	16.18	14.67	16.35	14.83	16.50	14.98	16.64	15.11

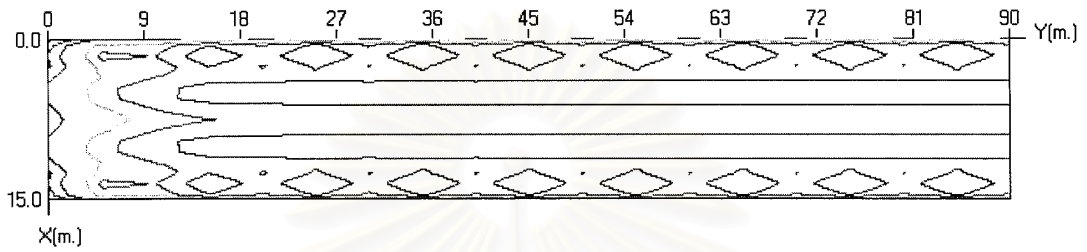
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Remark : X =Across Tunnel
Y= Along Tunnel

Observation Point :X = 4 m.
Y = -60 m.

Tunnel Lighting Design Report

Iso - Lux Diagram

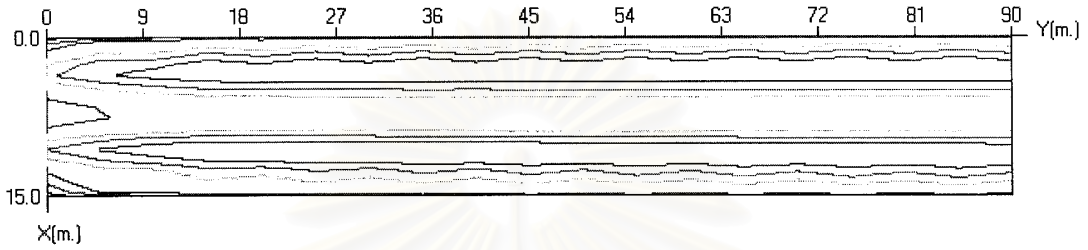


90 %	407.52 Lux	40 %	181.12 Lux
80 %	362.24 Lux	30 %	135.84 Lux
70 %	316.96 Lux	20 %	90.56 Lux
60 %	271.68 Lux	10 %	45.28 Lux
50 %	226.40 Lux		

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Tunnel Lighting Design Report

Iso - Luminance Diagram



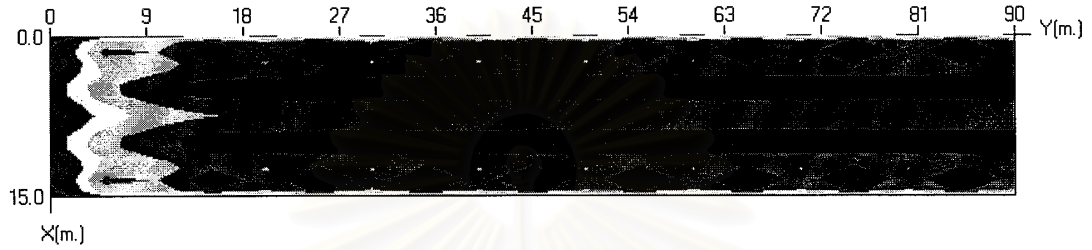
90 %	28.66 cd./sq.m.	40 %	12.74 cd./sq.m.
80 %	25.48 cd./sq.m.	30 %	9.55 cd./sq.m.
70 %	22.29 cd./sq.m.	20 %	6.37 cd./sq.m.
60 %	19.11 cd./sq.m.	10 %	3.18 cd./sq.m.
50 %	15.92 cd./sq.m.		

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ค.13 ภาพลายเส้นของความส่องสว่างทางเครื่องพิมพ์

Tunnel Lighting Design Report

Illuminance Color Shade Diagram

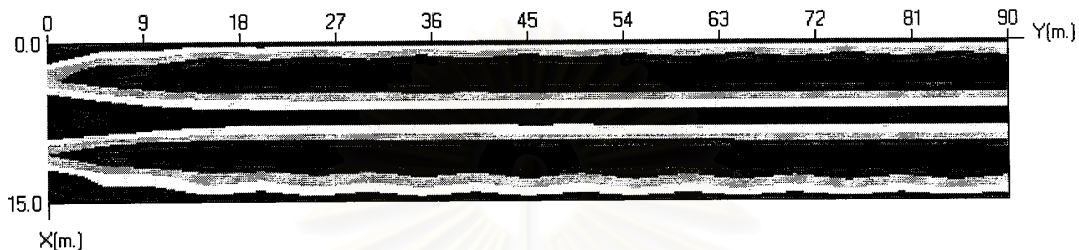


90 - 100 %	407.52 - 452.80 Lux	40 - 50 %	181.12 - 226.40 Lux
80 - 90 %	362.24 - 362.24 Lux	30 - 40 %	135.84 - 181.12 Lux
70 - 80 %	316.96 - 362.24 Lux	20 - 30 %	90.56 - 135.84 Lux
60 - 70 %	271.68 - 316.96 Lux	10 - 20 %	45.28 - 90.56 Lux
50 - 60 %	226.40 - 271.68 Lux	0 - 10 %	0.00 - 45.28 Lux

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Tunnel Lighting Design Report

Luminance Color Shade Diagram



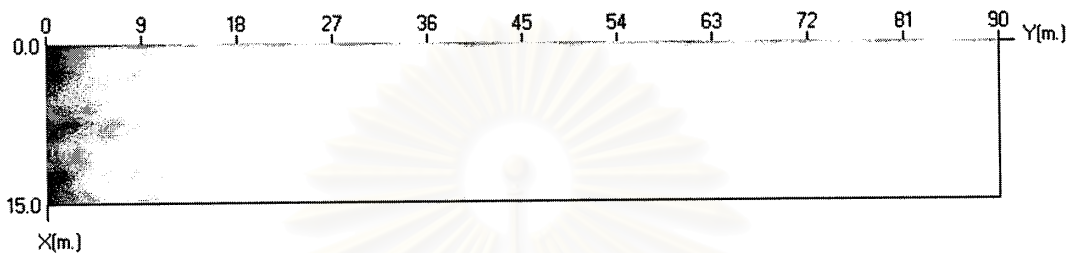
90 - 100 %	28.66 - 31.84 cd./sq.m.	40 - 50 %	12.74 - 15.92 cd./sq.m.
80 - 90 %	25.48 - 28.66 cd./sq.m.	30 - 40 %	9.55 - 12.74 cd./sq.m.
70 - 80 %	22.29 - 25.48 cd./sq.m.	20 - 30 %	6.37 - 9.55 cd./sq.m.
60 - 70 %	19.11 - 22.29 cd./sq.m.	10 - 20 %	3.18 - 6.37 cd./sq.m.
50 - 60 %	15.92 - 19.11 cd./sq.m.	0 - 10 %	0.00 - 3.18 cd./sq.m.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ค.15 ภาพ Shade ของความส่องสว่างทางเครื่องพิมพ์

Tunnel Lighting Design Report

Illuminance Rendering



Remark : X =Across Tunnel
Y= Along Tunnel

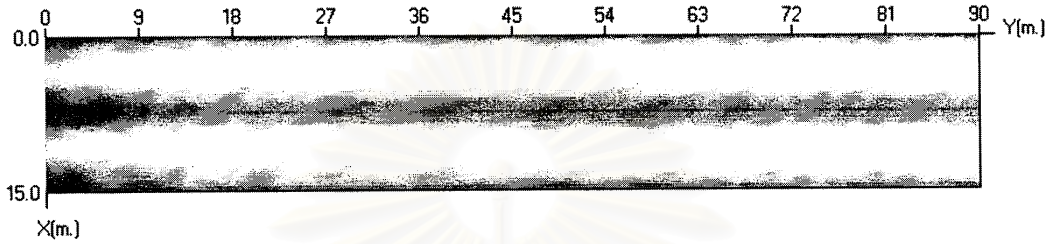
0 Lux 452.80 Lux

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ค.16 ภาพแรเงาของความสว่างทางเครื่องพิมพ์

Tunnel Lighting Design Report

Luminance Rendering



Observation Point : X = 4 m.
Y = -60 m.

Remark : X =Across Tunnel
Y= Along Tunnel

0 cd./sq.m.  31.84 cd./sq.m.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ค.17 ภาพแรเงาของความส่องสว่างทางเครื่องพิมพ์

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวปริญญา ตันสกุล เกิดวันที่ 1 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2522 ที่ อำเภอสีชล จังหวัด นครศรีธรรมราช สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จาก สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2543 จากนั้นได้เข้า ศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย