บทที่ 4

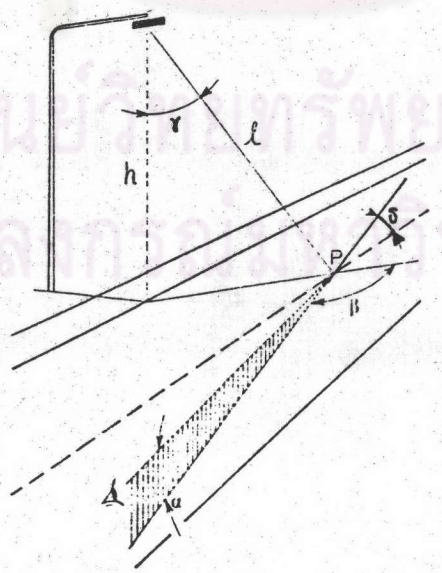
ผิวถนน

4.1 การหาค่าสัมประสิทธิ์ความส่องสว่างของผิวถนน

ในปัจจุบันนี้การกำหนดและอธิบาย เกี่ยวกับคุณสมบัติของการสะท้อนแสงของผิวถนนที่เข้าใจดีที่สุดคือ วิธีกำหนดและอธิบายด้วยค่าสัมประสิทธิ์ของการส่องสว่าง (luminance coefficient) ซึ่งก็คืออัตราส่วนระหว่างค่าความส่องสว่างของผิวถนนต่อค่าความสว่างบนผิวถนนที่พิจารณา เขียน เป็นสมการได้ว่า

$$q = \frac{L}{E}$$

ค่าสัมประสิทธิ์การส่องสว่าง (q) ขึ้นกับวัสดุที่ใช้ทำผิวถนน ตำแหน่งที่แสงตกลงบนผิวถนน และตำแหน่งของผู้มองไปยังผิวถนนจุดที่พิจารณา ซึ่งตำแหน่งต่าง ๆ นี้ กำหนดได้ด้วยมุม 4 มุม ดังรูป 4.1



รูปที่ 4.1 การติดตั้งโคมไฟถนนและการมองความส่องสว่างของผิวถนน เมื่อ α คือมุมของแนวที่มองกับแนวระดับ

β คือ มุมของระนาบแสงตกกับระนาบที่มอง

γ คือ มุมของแนวแสงตกกับแนวดิ่ง

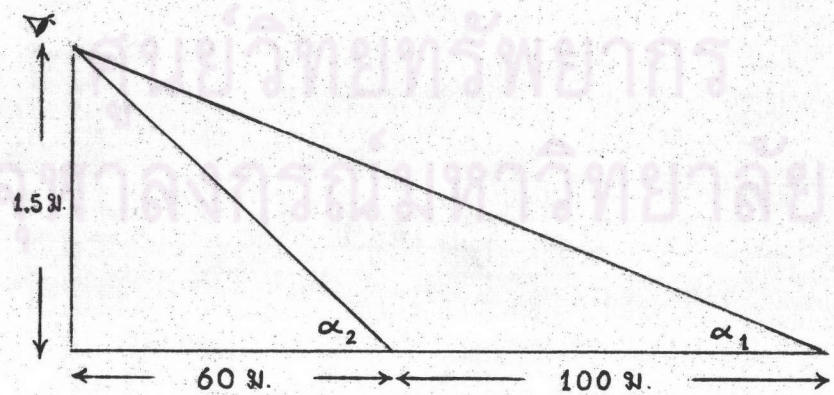
δ คือ มุมของระนาบที่มองกับแนวแกนถนน

แต่โดยทั่วไปแล้วในทางปฏิบัติ ถนนมักจะกว้างไม่เกิน 25 เมตร และระยะจากผู้มองถึงจุดที่พิจารณายาวกว่า 60 เมตร ทำให้มุม δ ไม่เกิน 20 องศา ซึ่งเมื่อคิดค่ามุม δ ด้วยแล้วมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการส่องสว่างเปลี่ยนแปลงน้อยมาก จึงตัดค่ามุม δ ทิ้งได้ ส่วนมุม α นั้น เมื่อระยะจากผู้มองถึงจุดที่พิจารณาอยู่ระหว่าง 60 เมตร ถึง 160 เมตร และผู้มองอยู่สูงจากพื้น 1.5 เมตร ดังรูป 4.2 จะได้มุม α อยู่ระหว่าง 0.53 ถึง 1.43 องศา โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ของการส่องสว่างมีผลเปลี่ยนแปลงน้อยมากในช่วงของมุม α ดังกล่าว มาตรฐาน ซี ไอ อี จึงกำหนดให้ค่ามุม α มีค่าคงที่เป็นค่าเฉลี่ยระหว่างมุม 0.53 ถึง 1.43 องศา คือ เท่ากับ 1 องศา ดังนี้

$$\alpha_1 = \tan^{-1}\frac{1.5}{160} = 0.53^\circ$$

$$\alpha_2 = \tan^{-1}\frac{1.5}{60} = 1.43^\circ$$

$$\alpha = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} = \frac{0.53 + 1.43}{2} \simeq 1^\circ$$



รูปที่ 4.2 การกำหนดค่ามุมของแนวที่มองกับแนวระดับ (α) ของ ซี ไอ อี

ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ของการส่องสว่างจึงขึ้นอยู่กับมุม เพียง 2 มุม คือ β และ γ ซึ่ง เขียนได้ว่า

$$q = q(\beta, \gamma)$$

ในการคำนวณค่าความส่องสว่างของผิวถนน เนื่องจากโคมไฟเพียงโคม เดียว จะได้

$$L = q \cdot E$$

$$= q \cdot \frac{I \cdot \cos\gamma}{l^2} \qquad \left(E = \frac{I \cdot \cos\gamma}{l^2}\right)$$

$$= q \cdot \frac{I \cdot \cos^3\gamma}{h^2} \qquad \left(l = \frac{h}{\cos\gamma}\right)$$

$$= r \cdot \frac{I}{h^2} \qquad (r = q \cdot \cos^3\gamma)$$

ซึ่งจะเห็นว่าในการคำนวณค่าความส่องสว่างของผิวถนน ถ้าใช้ค่า r(reduced luminance coefficient) แทนค่า q จะสะดวกในการคำนวณกว่ามาก

r = คือ reduced luminance coefficient ขึ้นกับมุม β และ γ มีหน่วยเป็น $Cd/m^2/lx$

I คือ ความ เข้มแห่งการส่องสว่าง

h คือ ความสูงของโคมไฟ

ดังนั้น เมื่อรู้ค่า r ที่มุม β และ γ ต่าง ๆ ก็อาจหาค่าความส่องสว่างของผิวถนนได้ ในทำนอง เดียวกันถ้ามีโคมไฟหลาย ๆ โคม ความส่องสว่างที่มอง เห็นก็คือผลรวมของค่าความส่องสว่างของโคมไฟแต่ละโคมนั่น เอง

ในการหาค่า r ที่มุม β และ γ ต่าง ๆ นั้น สามารถทำการวัดในห้องปฏิบัติการได้ ซึ่งจะได้คุณสมบัติการสะท้อนแสงของวัสดุที่ใช้ทำผิวถนนแต่ละชนิดโดยที่ค่ามุม γ ในตาราง r แทนที่จะ เป็นค่ามุมก็กำหนด เป็นค่าของ tangent ของมุม γ ทั้งนี้ เพื่อความสะดวกในการคำนวณ โดยใช้คอมพิว เตอร์

สำหรับค่าตัวแปรที่เป็นตัวกำหนดชนิดของตาราง r หรือชนิดของวัสดุที่ทำผิวถนนนั้นมีตัวแปร 3 ตัว คือ

Q_o เป็น ค่าสัมประสิทธิ์ของความส่องสว่างเฉลี่ย (average luminance coefficient)

S_1 เป็น ค่าความมันผิวตัวที่ 1 (specular factor 1)

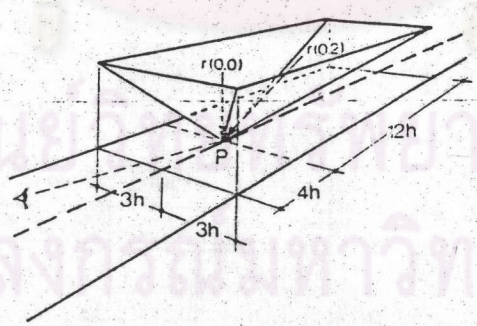
S_2 เป็น ค่าความมันผิวตัวที่ 2 (specular factor 2)

โดยที่ $Q_o = \frac{1}{\Omega_o} \int_o^{\Omega_o} q \, d\Omega$

$S_1 = \frac{r(0,2)}{r(0,0)}$

$S_2 = \frac{Q_o}{r(0,0)}$

เมื่อ Ω_o เป็นมุมเชิงของแข็งที่วัด ณ. จุดภายในพื้นผิวถนนช่วงที่พิจาณาซึ่งครอบคลุมถึงทิศทางของแสงที่ตกลงบนจุดนั้นทุกโคมไฟที่นำมาคิด ถ้าโคมไฟสูง h ค่ามุมเชิงของแข็งจะอยู่ภายในช่วงที่กำหนดดังรูป 4.3



รูปที่ 4.3 การกำหนดค่ามุมเชิงของแข็ง (Ω_o) ของโคมไฟที่ส่องแสงลงบนผิวถนนช่วงที่พิจารณาความส่องสว่างของผิวถนน

ระยะตามขวางถนนมีช่วงกว้าง ± 3h คือมุมที่แสงตกทางด้านข้างอยู่ระหว่างมุม ± 71.5°

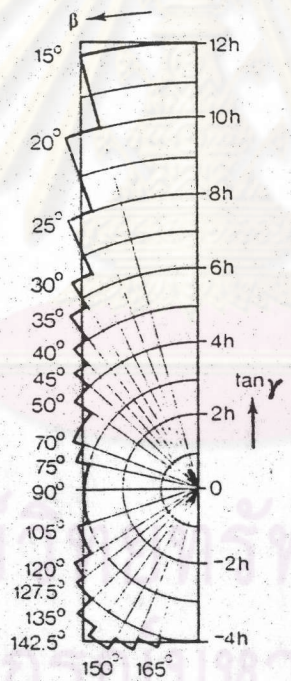
ระยะตามแนวถนนมีช่วงตามถนนจาก -4h ถึง +12h คือมุมที่แสงตกอยู่ระหว่างมุม -75.9 ถึง 85.2°

r(0,2) เป็นค่า reduced luminance coefficient ที่มุม $\beta = 0$ และ $\tan \gamma = 2$

r(0,0) เป็นค่า reduced luminance coefficient ที่มุม $\beta = 0$ และ $\tan \gamma = 0$

4.2 การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความส่องสว่างเฉลี่ย

การหาค่าความส่องสว่างเฉลี่ย ก็คือการหาค่าเฉลี่ยของ q ที่มุมต่าง ๆ ภายในมุมเชิงของแข็ง Ω_o นั่นเอง แต่สำหรับที่เป็นค่า r อาจหาค่า Q_o ได้โดยการ integrate ค่า $r(\beta, \tan \gamma).\tan \gamma$ รอบบริเวณที่พิจารณาในเทอมของ $\tan \gamma$ และ β ดังรูป 4.4



รูปที่ 4.4 การหาค่า Q_o โดยการ integrate รอบพื้นที่ของผิวถนนช่วงที่พิจารณาความส่องสว่างในเทอมของ $\tan \gamma$ และ β

ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$Q_o = \frac{1}{\Omega_o}\int_0^{\Omega_o} q \, d\Omega = \frac{1}{\Omega_o}\int_0^{\Omega_o}\int r(\beta, \tan\gamma).\tan\gamma.d(\tan\gamma).d\beta$$

หรืออาจหาค่า Q_o โดยวิธี numberical integration ได้ดังนี้

คูณตาราง r ด้วยตาราง weighting factor และค่า tan γ ค่าต่อค่าของตารางแล้วรวมผลที่ได้ทั้งหมดหารด้วย 9.936×10^7 จะได้เท่ากับค่า Q_o ตามต้องการ ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$Q_o = \left\{ \Sigma \left[r(\beta, \tan \gamma) . \text{weighting factor} . \tan \gamma \right] \right\} / 9.936 \times 10^7$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

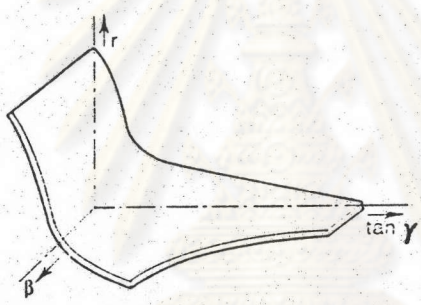
ตาราง 4.1 ตาราง Weighting factor

BETA → TANGAMMA	0	2	5	10	15	20	25	30	35	40	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
.00	8	8	32	22	40	20	40	30	40	25	45	120	60	120	60	120	60	120	60	60
.25	32	32	128	88	160	80	160	80	160	100	180	480	240	480	240	480	240	480	240	240
.50	16	16	64	44	80	40	80	40	80	50	90	240	120	240	120	240	120	240	120	120
.75	32	32	128	88	160	80	160	80	160	100	180	480	240	480	240	480	240	480	240	240
1.00	16	16	64	44	80	40	80	40	80	50	90	240	120	240	120	240	120	240	120	120
1.25	32	32	128	88	160	80	160	80	160	100	180	480	240	480	240	480	240	480	240	240
1.50	16	16	64	44	80	40	80	40	80	50	90	240	120	240	120	240	120	240	120	120
1.75	32	32	128	88	160	80	160	80	160	100	180	480	240	480	240	480	240	480	240	240
2.00	24	24	96	66	120	60	120	60	120	75	135	360	180	360	180	360	180	360	180	180
2.50	64	64	256	176	320	160	320	160	320	200	360	960	480	960	480	960	480	960	480	480
3.00	32	32	128	88	160	80	160	80	160	100	120	510	222	240	180	480	240	480	240	240
3.50	64	64	256	176	320	160	320	160	320	200	120	270	33	0	−30	690	480	960	480	480
4.00	32	32	128	88	160	80	160	80	160	100	60	0	0	0	75	−30	255	510	222	120
4.50	64	64	256	176	320	160	320	160	320	155	75	0	0	0	0	0	135	372	33	0
5.00	32	32	128	88	160	80	160	105	125	5	−15	0	0	0	0	0	0	33	0	0
5.50	64	64	256	176	320	160	320	170	90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.00	32	32	128	88	160	80	160	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.50	64	64	256	176	320	160	275	35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7.00	32	32	128	88	160	105	80	−25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7.50	64	64	256	176	320	170	90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8.00	32	32	128	88	160	85	45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8.50	64	64	256	176	320	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9.00	32	32	128	88	160	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9.50	64	64	256	176	320	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10.00	32	32	128	88	115	−5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10.50	64	64	256	176	230	−10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11.00	32	32	128	113	80	−25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11.50	64	64	256	186	90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12.00	16	16	64	69	45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

4.3 ความมันผิวถนน

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การส่องสว่างของผิวถนนในสภาพแห้งในเทอมของ r ที่ค่า β และ tan γ ต่าง ๆ นั้น ค่า Q_o เป็นตัวกำหนดถึงค่าความส่องสว่างเฉลี่ยของผิวถนนค่า S_1 และ S_2 เป็นตัวกำหนดถึงความมันของผิวถนน ซึ่งถ้าค่า S_1 และ S_2 ยิ่งมากแสดงว่าผิวถนนยิ่งมีความมันมาก หรืออาจจะอธิบายค่าทั้ง 3 นี้โดยใช้กราฟก็ได้

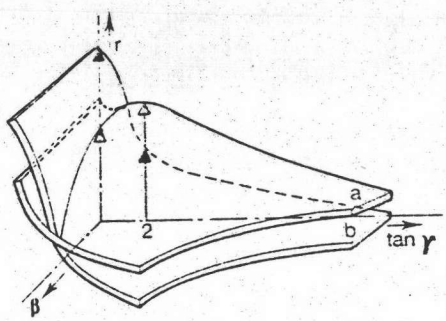
เมื่อให้ r เป็นแกนตั้ง และค่า tan γ, β เป็นแกนนอน ถ้า plot ค่า r ต่าง ๆ จากตารางลงในกราฟ จะได้เป็นพื้นที่อันหนึ่ง ดังรูป 4.5



รูปที่ 4.5 แสดงค่า r ในลักษณะกราฟ 3 มิติ ที่ค่า tan γ และ β ต่าง ๆ

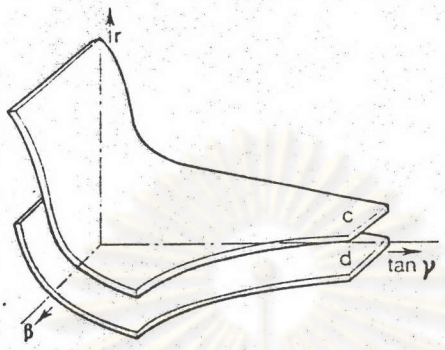
ค่า Q_o คือ ปริมาตรภายใต้รูป ส่วน S_1 คืออัตราส่วนความสูงของค่า r ที่ $\beta = 0$, tan $\gamma = 2$ และ r ที่ $\beta = 0$, tan $\gamma = 0$ นั่นเอง

รูปที่ 4.6 แสดงผิวถนนในสภาพแห้ง 2 ชนิดที่มีค่าความมันต่างกันคือผิวถนน (a) มีความมันมากกว่าผิวถนน (b)



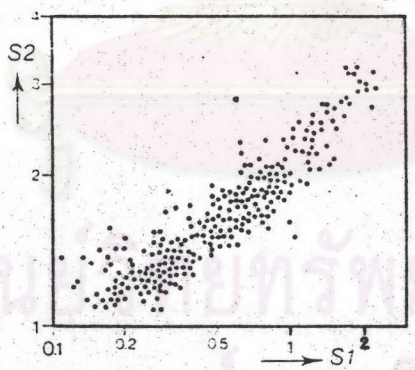
รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะค่า r ของผิวถนน แห้งเมื่อ (a) เป็นผิวถนนที่มีความมันสูง (b) เป็นผิวถนนที่มีการสะท้อนแสงสม่ำเสมอ

รูป 4.7 แสดงผิวถนนในสภาพแห้ง 2 ชนิดที่มีค่าความมัน เท่ากันแต่ผิวถนน (c) มีความส่องสว่างมากกว่าผิวถนน (d) ซึ่งก็คือผิวถนน (c) มีค่า Q_o มากกว่าผิวถนน (d) นั่น เอง



รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะค่า r ของผิวถนนแห้ง 2 ชนิดที่มีความมัน เท่ากันแต่ (c) มีความส่องสว่างมากกว่า (d)

สำหรับค่า S_1 และ S_2 นั้นจะมีความสัมพันธ์โดยตรงซึ่งกันและกัน โดยไม่อาจแยกการพิจารณาแต่ละค่าได้ รูป 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง S_1 และ S_2



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า S_1 และ S_2

4.4 การจัดประเภทของผิวถนนในสภาพแห้ง

การจัดประเภทของผิวถนนในสภาพแห้งโดยพิจารณาจากคุณสมบัติในการสะท้อนแสงของผิวถนนนั้น ๆ ได้ใช้ประโยชน์ในการคำนวณค่าความส่องสว่างของผิวถนนอย่างมาก เพราะถนนต่าง ๆ แม้จะใช้วัสดุทำผิวถนนที่เหมือนกัน แต่คุณสมบัติของการสะท้อนแสงก็อาจจะแตกต่างกันบ้างเล็กน้อย ยิ่งกว่านั้นคุณสมบัติในการสะท้อนแสงของผิวถนนยิ่งจะแตกต่างกันมากขึ้นตาม เวลาและสภาพ

การใช้งาน ดังนั้นในกรณีที่ไม่รู้ค่าจริงของคุณสมบัติในการสะท้อนแสงของผิวถนน แต่รู้ประเภทของวัสดุที่ใช้ทำผิวถนน เราก็ยังสามารถคำนวณออกแบบไฟถนนโดยคิดค่าความส่องสว่างของผิวถนนได้ประมาณใกล้เคียงกับความเป็นจริงมาก

ซี ไอ อี ได้จัดประเภทของผิวถนนในสภาพแห้งเป็นมาตรฐานไว้ 4 ประเภท คือ R_1, R_2, R_3 และ R_4 ดังตาราง 4.2 ซึ่งในต่างประเทศได้ใช้เป็นมาตรฐานในการคำนวณออกแบบไฟถนนอย่างได้ผลถูกต้องแล้ว ยิ่งกว่านั้นในการทำผิวถนนให้สว่างขึ้นและลดความมันลงกว่าผิวถนนประเภท R_1 ถึง R_4 ก็ได้มีการทำขึ้นใช้งานโดยเฉพาะในกลุ่มประเทศทางภาคพื้นยุโรป ดังนั้น ซี ไอ อี จึงจัดเป็นผิวถนนมาตรฐานอีก 4 ประเภทคือ N_1, N_2, N_3 และ N_4 ดังตาราง 4.2

อย่างไรก็ตามดังที่กล่าวข้างต้นแล้วว่า ผิวถนนแต่ละประเภทก็มีช่วงของความแตกต่างในการสะท้อนแสงอยู่บ้าง กล่าวอีกนัยหนึ่งคือมีช่วงของค่า Q_o ต่างกันบ้าง ดังนั้นมาตรฐาน ซี ไอ อี จึงกำหนดตาราง r (r-table) ของประเภทถนน R_1 ถึง R_4 และ N_1 ถึง N_4 จากสภาพของค่า Q_o ที่ใช้งานเป็นส่วนมาก ดังภาคผนวกที่ 1 ถึง 8 แต่ถ้าหากรู้ค่า Q_o ของผิวถนนที่ใช้งานจริง เราก็สามารถปรับค่า r ในตารางให้เป็นค่าตามความเป็นจริงได้ โดยคูณค่า r ทุกค่าในตาราง r มาตรฐานด้วย correction factor เมื่อ

$$\text{Correction factor} = \frac{Q_o \text{ ค่าจริง}}{Q_o \text{ ตามมาตรฐานในตาราง}}$$

<u>หมายเหตุ</u> 1. ในการคำนวณค่าความส่องสว่าง ให้ใช้ค่า r ของตาราง R และ N ที่เป็นเลขจำนวนเต็มเท่านั้น สำหรับเลขหลังจุดทศนิยมใช้สำหรับหาค่า Q_o หรือค่าอื่น ๆ ที่ต้องการความละเอียดมากยิ่งขึ้น

2. ค่า r ทุกค่าในตาราง R และ N ต้องหารด้วย 10^4

ตารางที่ 4.2 การจัดประเภทของผิวถนนในสภาพแห้งของ ซี ไอ อี

R1 N1	- Asphaltic road surfaces with at least 15% of artificial brightener (Grenette^{R}, Luxovite^{R}, Synopal^{R} or similar) or with at least 30% of very bright anorthosites (Arclyte, Labradorite or similar). - Surface dressings with chippings where over 80% of the road surface is covered and where the chippings exist for a great deal of artificial brighteners or for 100% of very bright anorthosites. - Concrete road surface.
R2 N2	- Surface dressings with harsh texture and with normal aggregates. - Asphaltic surfaces with 10% to 15% of artificial brighteners in the mixture. - Coarse and harsh asphaltic concrete rich in gravel (760%) and with gravel sizes up to or greater than 10 mm. - Mastic asphalt (Gussasphalt) after dressing in new condition.
R3 N3	- Asphaltic concrete (cold asphalt, mastic asphalt) with gravel sizes up to 10 mm but with harsh texture (sand paper). - Surface dressings with coarse texture but polished.
R4 N4	- Mastic asphalt (Gussasphalt) after some months of use. - Road surfaces with rather smooth or polished texture.

สำหรับค่า r ของตาราง R_1 (พื้นผิวคอนกรีต) และ R_4 (พื้นผิวแอสฟัลท์ที่ผ่านการใช้งานแล้ว 2-3 เดือน) ซึ่งใช้ในการคำนวณค่าความส่องสว่างของงานวิจัยนี้ ได้เขียนเป็นกราฟเปรียบเทียบค่า r ที่มุม $\beta = 0^\circ$ และ 45° เมื่อ tan γ เปลี่ยนไปดังกราฟ 4.1 และ 4.2

จากกราฟ 4.1 เมื่อ $\beta = 0^\circ$ แสดงว่าแสงจากโคมไฟส่องลงสู่ผิวถนนในทิศทางเข้าสู่ตาคนมอง จะได้ว่า

$$S_1 \text{ ของตาราง } R_1 = \frac{r(0,2)}{r(0,0)} = \frac{162}{655} = 0.25$$

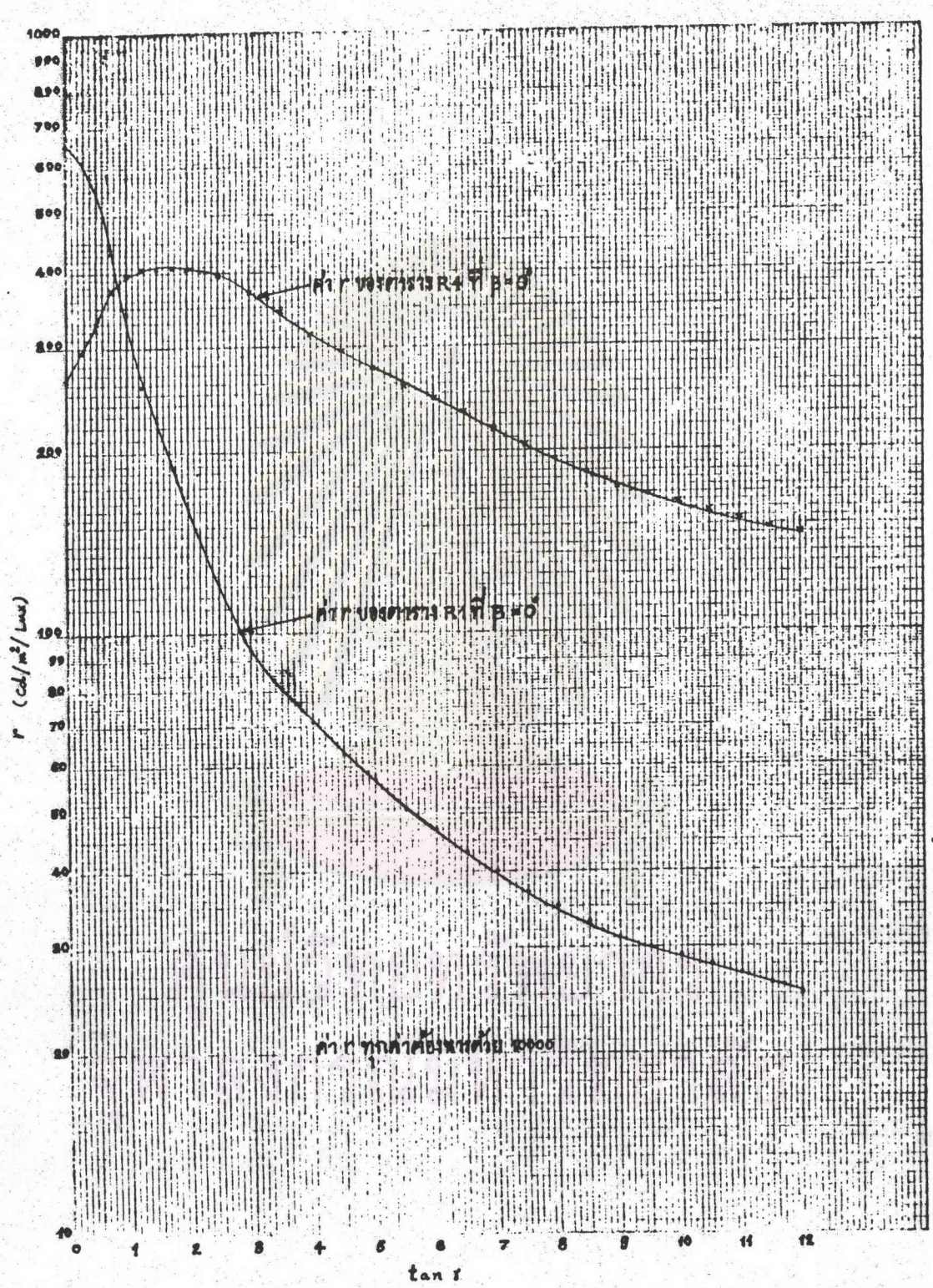
$$S_1 \text{ ของตาราง } R_4 = \frac{r(0,2)}{r(0,0)} = \frac{409}{264} = 1.55$$

ซึ่งแสดงว่าผิวถนนของตาราง R_4 มีความมันมากกว่าผิวถนนของตาราง R_1 และค่า r ตาราง R_1 เฉลี่ยแล้วจะต่ำกว่าตาราง R_4 ในกราฟ 4.1 แต่ในกราฟ 4.2 ค่า r ของตาราง R_1 เฉลี่ยแล้วจะสูงกว่าตาราง R_4 ถึงอย่างไรก็ตามเมื่อเฉลี่ยค่า r รอบมุม β และ tan γ ทุก ๆ ค่าแล้ว ซึ่งก็คือค่าสัมประสิทธิ์ความส่องสว่างเฉลี่ย (Q_o) นั่นเอง จะได้ว่า

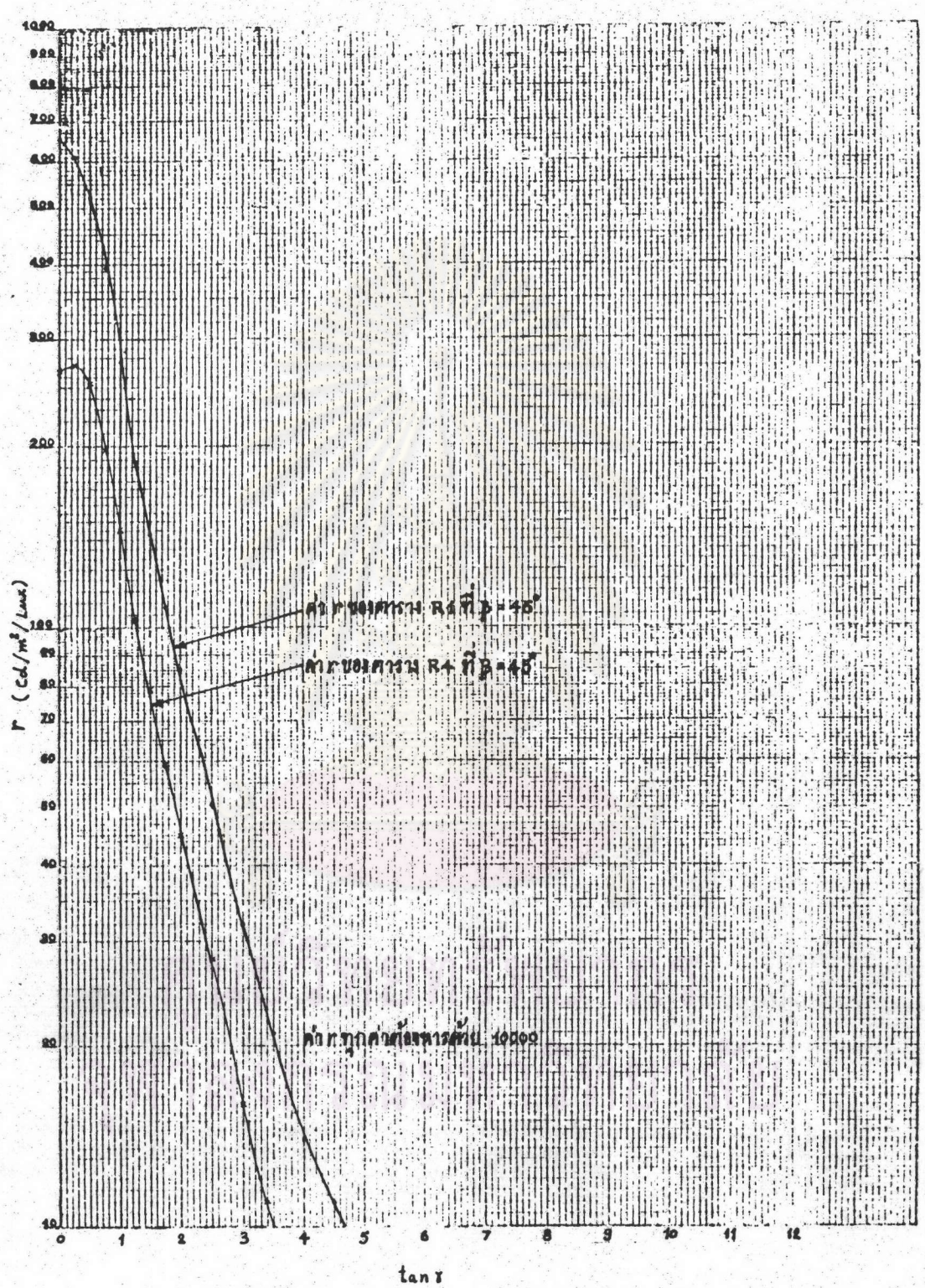
$$Q_o \text{ ของตาราง } R_1 = 0.10$$

$$\text{และ } Q_o \text{ ของตาราง } R_4 = 0.08$$

สรุปว่าผิวถนนคอนกรีต (ตาราง R_1) ในสภาพแห้งมีความมันน้อยกว่าผิวถนนแอสฟัลท์ที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว 2-3 เดือน (ตาราง R_4) แต่ผิวถนนคอนกรีตมีคุณสมบัติในการสะท้อนแสงเข้าสู่ตาผู้สังเกต ณ. จุดสังเกตที่กำหนดจากบริเวณผิวถนนที่พิจารณา (ค่าสัมประสิทธิ์ความส่องสว่างเฉลี่ย) เฉลี่ยแล้วสูงกว่าผิวถนนแอสฟัลท์



กราฟ 4.1 เปรียบเทียบค่า r ของตาราง R_1 และ R_4 ที่ $\beta = 0^\circ$ และ tan γ ต่าง ๆ



กราฟ 4.2 เปรียบเทียบค่า r ของตาราง R_1 และ R_4 ที่ β = 45° และ tan γ ต่าง ๆ