

## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

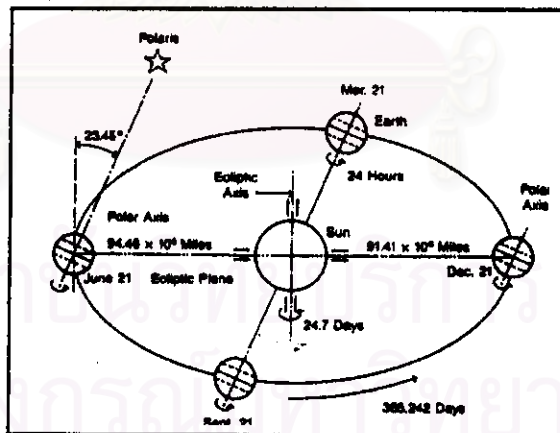
### 2.1 ความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในบทนี้กล่าวถึงรายละเอียดและความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการคำนวณค่ารังสีจากดวงอาทิตย์ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นหัวข้อย่อยดังนี้

- 2.1.1 การคำนวณพิภคของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้า
- 2.1.2 การทำนายค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์โดยใช้ข้อมูลทางสถิติ
- 2.1.3 การคำนวณค่ารังสีจากดวงอาทิตย์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

#### 2.1.1 การคำนวณพิภคของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้า

การที่โลกโคจรรอบดวงอาทิตย์เป็นรูปวงรี จะทำให้ปริมาณแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบชั้นบรรยากาศของโลกที่ถูกเรียกว่า ค่า Extraterrestrial solar radiation ( $I_0$ ) มีค่าเปลี่ยนแปลงตลอดปี โดยที่ค่า Extraterrestrial solar radiation จะมีค่าสูงสุดเท่ากับ  $1418 \text{ W/m}^2$  เมื่อระยะห่างระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์มีค่าน้อยที่สุดในวันที่ 3 มกราคม และมีค่าต่ำสุดเท่ากับ  $1325 \text{ W/m}^2$  เมื่อระยะห่างระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์มีค่ามากที่สุดในวันที่ 4 กรกฎาคม ดังรูปที่ 2.1 ค่า Extraterrestrial solar radiation โดยประมาณของแต่ละวันสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1 ส่วนค่า Extraterrestrial solar radiation ที่เป็นตัวแทนของแต่ละเดือนจะถูกแสดงดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์

ที่มา : ASHRAE HANDBOOK, 1995 HVAC Applications : pp. 30.1

ค่าเฉลี่ยของรังสี Extraterrestrial solar radiation ที่ตกกระทบชั้นบรรยากาศของโลกตลอดปี ถูกเรียกว่า ค่า Solar constant ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $434.0 \text{ Btu/hr-ft}^2$  แต่เนื่องจากโลกโคจรรอบดวงอาทิตย์เป็นวงรี จึงทำให้ค่ารังสี Extraterrestrial solar radiation มีค่าเบี่ยงเบนไปจากค่า Solar constant ประมาณ  $\pm 3.3 \%$  (ASHRAE, 1995) ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$I_0 = \left[ 1 + 0.033 \cdot \cos\left(\frac{360^\circ \cdot N}{365.25}\right) \right] \cdot 1373 \quad (2.1)$$

- เมื่อ  $I_0$  คือ Extraterrestrial solar radiation,  $W/m^2$   
 $N$  คือ ลำดับที่ของวันในหนึ่งปี เช่น 1 = 1 January หรือ 152 = 1 June เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 (ก) ค่า Extraterrestrial solar radiation และค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้อง (SI Unit)

	$I_0$ $W/m^2$	Equation of Time, min.	Declination, Degrees	A $W/m^2$	B	C
Jan	1416	-11.2	-20.0	1230	0.142	0.058
Feb	1401	-13.9	-10.8	1215	0.144	0.060
Mar	1381	-7.5	0.0	1186	0.156	0.071
Apr	1356	1.1	11.6	1136	0.180	0.097
May	1336	3.3	20.0	1104	0.196	0.121
June	1326	-1.4	23.45	1088	0.205	0.134
July	1326	-6.2	20.6	1085	0.207	0.136
Aug	1338	-2.4	12.3	1107	0.201	0.122
Sep	1359	7.5	0.0	1151	0.177	0.092
Oct	1380	15.4	-10.5	1192	0.160	0.073
Nov	1405	13.8	-19.8	1221	0.149	0.083
Dec	1417	1.6	-23.45	1233	0.142	0.057

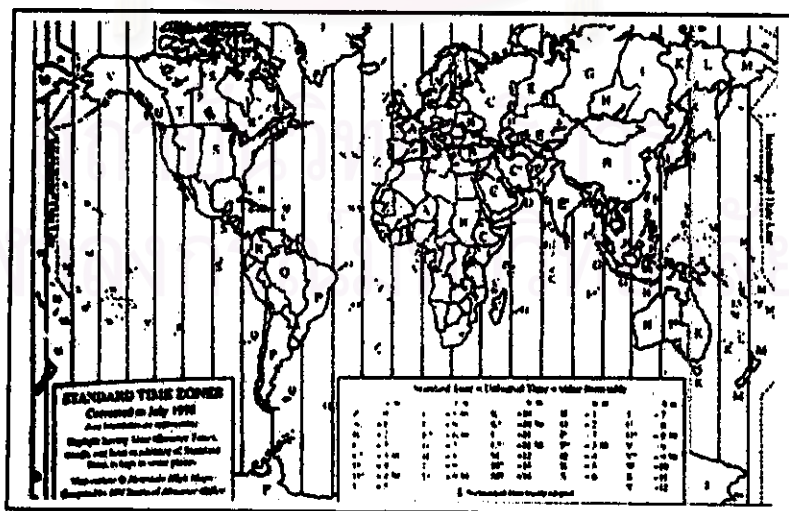
หมายเหตุ ค่าในตารางเป็นค่าของวันที่ 21 ของแต่ละเดือน ได้มาจากรฐานข้อมูลของปี พ.ศ.2507

ตารางที่ 2.1 (ข) ค่า Extraterrestrial solar radiation และค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้อง (English Unit)

	$I_0$ BTU/hr ft <sup>2</sup>	Equation of Time, min.	Declination, Degrees	A W/m <sup>2</sup>	B	C
Jan	448.8	-11.2	-20.0	390	0.142	0.058
Feb	444.2	-13.9	-10.8	385	0.144	0.060
Mar	437.7	-7.5	0.0	376	0.156	0.071
Apr	429.9	1.1	11.6	360	0.180	0.097
May	423.6	3.3	20.0	350	0.196	0.121
June	420.2	-1.4	23.45	345	0.205	0.134
July	420.3	-6.2	20.6	344	0.207	0.136
Aug	424.4	-2.4	12.3	351	0.201	0.122
Sep	430.7	7.5	0.0	365	0.177	0.092
Oct	437.3	15.4	-10.5	376	0.160	0.073
Nov	445.3	13.8	-19.8	387	0.149	0.063
Dec	449.1	1.6	-23.45	391	0.142	0.057

**หมายเหตุ** ค่าในตารางเป็นค่าของวันที่ 21 ของแต่ละเดือน ได้มาจากรายงานข้อมูลของปี พ.ศ.2507

ผลของวงโคจรรูปวงรีดังกล่าวส่งผลให้ค่าเวลาสุริยะ (Apparent solar time) มีค่าแตกต่างจากเวลามาตรฐานท้องถิ่น (Local standard time) เท่ากับ ค่าสมการของเวลา (Equation of time, ET) สำหรับสถานที่ที่ไม่ได้ตั้งอยู่บนเส้นเวลามาตรฐานท้องถิ่นจะต้องมีการปรับแก้เพิ่มเติมด้วยผลต่างของเวลา เนื่องจากใช้ตัวปรับแก้ของเวลาท้องถิ่น (เส้นลองจิจูด) จะมีทั้งหมด 24 เส้น แต่ละเส้นจะอยู่ห่างกันประมาณ 15 องศา โดยที่ทำการกำหนดเส้นเวลามาตรฐานของท้องถิ่นของแต่ละพื้นที่จะใช้สภาพภูมิประเทศและนโยบายทางการเมืองเข้าประกอบการพิจารณาด้วย ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การแบ่งเส้นเวลามาตรฐานท้องถิ่น

ที่มา : ASHRAE HANDBOOK, 1997.

ค่าเวลาดวงอาทิตย์ที่ตำแหน่งใด ๆ บนผิวโลกสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.2 โดยนำค่าเวลามาตรฐานท้องถิ่น (LST) ที่พาดผ่านบริเวณนั้น มาปรับแก้ด้วยค่าสมการของเวลา และค่าลองจิจูดของตำแหน่งนั้น ตามสมการที่ 2.1 ดังนี้

$$AST = ET + 4 * (LSM - LON) + LST \quad (2.2)$$

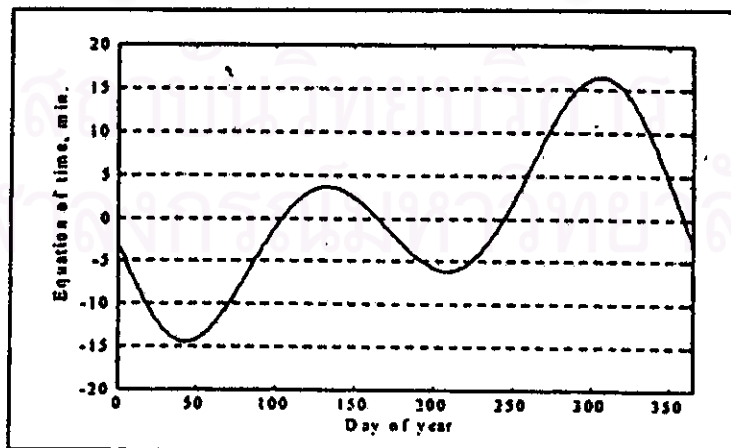
เมื่อ	AST	คือ	Apparent solar time, minute
	ET	คือ	Equation of time, minute
	LSM	คือ	Local standard time meridian, degree (105° E) THAI
	LON	คือ	Local longitude, degree (13.4° N) BANGKOK
	LST	คือ	Local standard time, minute
4	คือ		เวลาที่ดวงอาทิตย์ใช้ในการเคลื่อนผ่านเส้นลองจิจูดทุก 1 องศา

ค่า Equation of time สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.3 ส่วนกราฟของค่าสมการของเวลาจะถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.3 และตัวแทนของค่าสมการของเวลาของแต่ละเดือนจะถูกแสดงดัง ตารางที่ 2.1

$$ET = 60 \left\{ \left( 0.696 * 10^{-4} + 0.00706 * \cos(W) - 0.0533 * \cos(2 * W) - 0.00157 * \cos(3 * W) \right. \right. \\ \left. \left. - 0.122 * \sin(W) - 0.156 * \sin(2 * W) - 0.00556 \sin(3 * W) \right) \right\} \quad (2.3)$$

และ 
$$W = \frac{2 * \pi * N}{365}$$

เมื่อ  $N$  คือ ลำดับของวันในหนึ่งปี เช่น 1 = 1 January หรือ 152 = 1 June เป็นต้น



รูปที่ 2.3 ค่า Equation of time บนเส้นเวลามาตรฐานท้องถิ่น

ที่มา : ASHRAE, 1997.

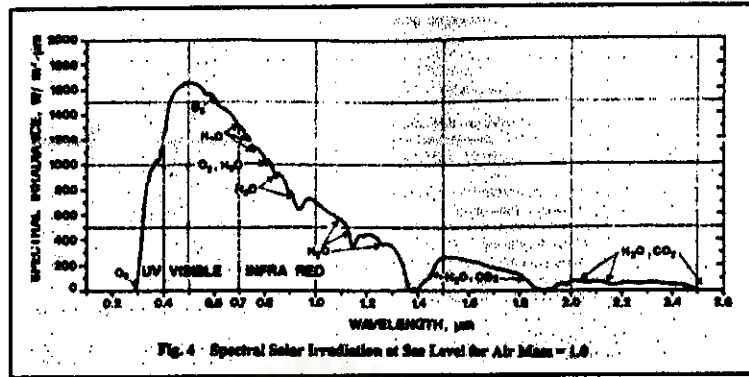
การที่โลกหมุนรอบตัวเองโดยที่ระนาบของเส้นศูนย์สูตรของโลก (Earth's equatorial plane) นั้นจะวางทำมุม  $23.45^\circ$  กับระนาบการหมุนของโลกรอบดวงอาทิตย์ (Orbital plane) ตลอดเวลา ทำให้มุมเอียงระหว่างระนาบของเส้นศูนย์สูตรกับเส้นระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ (Earth-sun line) ที่เรียกว่า ค่า Declination หรือค่า Solar declination ( $\delta$ ) มีค่าเปลี่ยนแปลงตลอดทั้งปี ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง  $\pm 23.45^\circ$  การเปลี่ยนแปลงของค่า Declination เป็นสาเหตุทำให้เกิดฤดูกาลและช่วงเวลากลางวันและกลางคืนที่ยาวไม่เท่ากัน ตัวแทนของค่า Declination ในแต่ละเดือนจะถูกแสดงไว้ใน ตารางที่ 2.1 และรูปแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า Declination จะถูกแสดงไว้ดังรูปที่ 2.1 ส่วนค่า Declination สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.4 ดังนี้

$$\delta = -0.00527 - 0.4001 \cdot \cos(W) - 0.003996 \cdot \cos(2 \cdot W) - 0.00424 \cdot \cos(3 \cdot W) + 0.0672 \cdot \sin(W) \quad (2.4)$$

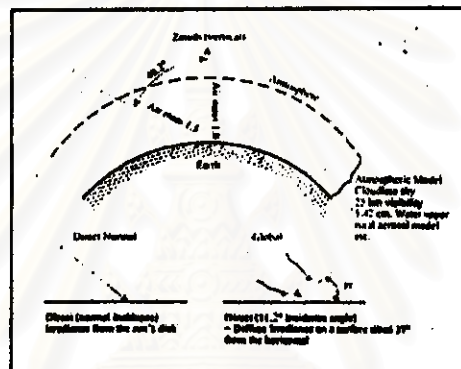
ขณะที่รังสี Extraterrestrial solar radiation ซึ่งเป็นรังสีตรงชนิดหนึ่งเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศของโลก สสารต่าง ๆ ที่อยู่ในชั้นบรรยากาศ เช่น ฝุ่น โมเลกุลของก๊าซชนิดต่าง ๆ โอโซน ioni น้ำ หยดน้ำ และก้อนเมฆ เป็นต้น จะทำหน้าที่ดูดซับ สะท้อนและทำให้เกิดการกระเจิงแสง (Scattering) ซึ่งส่งผลให้ปริมาณพลังงานของรังสี Extraterrestrial solar radiation ในบรรยากาศมีค่าลดลง ที่ถูกเรียกว่า รังสี Terrestrial solar radiation ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วน คือ รังสีตรงตั้งฉากจากดวงอาทิตย์ (Direct normal radiation,  $E_{DN}$ ) และรังสีเกิดจากการกระเจิงแสงที่ถูกเรียกว่ารังสีกระจายจากดวงอาทิตย์ (Diffuse radiation,  $E_D$ ) เป็นต้น ซึ่งสัดส่วนของการลดลงของรังสี Extraterrestrial solar radiation ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ (Wave length) จะแปรผันตามชนิดของสสารในชั้นบรรยากาศและระยะทางที่รังสีเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศ ดังรูปที่ 2.2 ส่วนระยะทางไร้มิติที่ใช้ระยะทางที่รังสีดวงอาทิตย์เดินทางผ่านชั้นบรรยากาศถูกเรียกว่า ค่ามวลอากาศ (Air mass,  $m$ ) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของระยะทางที่รังสีจากดวงอาทิตย์เดินทางจริง ทหารด้วยระยะทางที่รังสีเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศในทิศทางที่ตั้งฉากกับผิวทะเล ที่เวลาที่ยาวสุริยะจะให้ค่ามวลอากาศเท่ากับ 1 ( $m = 1$ ) ส่วนช่วงเวลาที่ตั้งฉากกับผิวทะเล ปริมาณรังสีจากดวงอาทิตย์ที่มาถึงผิวโลกจะมีค่าน้อยลงเนื่องจากรังสีต้องเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศที่มีความหนาเพิ่มขึ้น ทำให้ค่ามวลอากาศมีค่ามากกว่า 1.0 ค่ามวลอากาศสามารถคำนวณได้โดยใช้ค่ามุม Zenith ( $z$ ) ซึ่งเป็นมุมระหว่างรังสีตรงตั้งฉากจากดวงอาทิตย์กับแนวตั้งฉากของแนวระดับน้ำทะเล ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ตามสมการของ Kasten และ Young [1] ดังสมการที่ 2.5 ส่วนค่ามุม Zenith เมื่อมวลอากาศมีค่าเท่ากับ 1.0 กับ 1.5 และรูปแสดงองค์ประกอบของรังสีรวมที่จากดวงอาทิตย์ที่มุม  $37^\circ$  กับแนวระดับ จะถูกแสดงดังรูปที่ 2.3

$$m = \frac{1}{\cos(z) + 0.50572 \cdot (96.07995 - z)} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $z$  คือ Zenith angle, degree



รูปที่ 2.4 ปริมาณรังสี Extraterrestrial solar radiation และ รังสี Terrestrial solar radiation ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ เมื่อมวลอากาศมีค่าเท่ากับ 1.5  
ที่มา : ASHRAE HANDBOOK, 1995 HVAC Application, pp 30.4



รูปที่ 2.5 มุม Zenith เมื่อมวลอากาศมีค่าเท่ากับ 1.0 และ 1.5

ที่มา : ASHRAE HANDBOOK, 1995 HVAC Application.

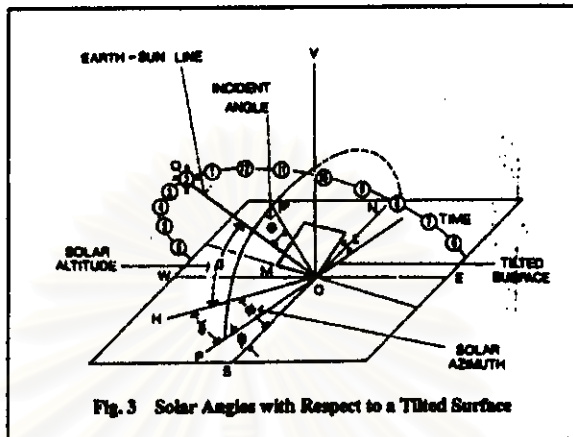
การระบุตำแหน่งดวงอาทิตย์บนท้องฟ้าสามารถกำหนดได้ด้วยมุม 2 มุม คือ มุม Solar altitude ( $\beta$ ) และมุม Solar azimuth ( $\theta$ ) ซึ่งเป็นตัวแทนของมุมในแนวตั้งฉากและมุมในแนวระดับระหว่างพื้นผิวในแนวระดับบนผิวโลกกับรังสีตรงจากดวงอาทิตย์ตามลำดับ ดังถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.4 โดยที่มุม Solar azimuth เป็นมุมระหว่างเส้นฉายของรังสีตรงจากดวงอาทิตย์บนแนวระดับกับทิศใต้ (มุม HOS) ค่าของมุมทั้งสองนี้จะขึ้นกับค่าเวลาดวงอาทิตย์ (Apparent solar time, AST) ค่า Declination ( $\delta$ ) ค่าละติจูด (Local latitude,  $L$ ) และค่า Hour angle ( $H$ ) ที่เป็นเวลาที่นับจากเวลาเที่ยงสุริยะ (Solar noon) ซึ่งคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$H = 2.05 * (720 - AST) \quad (2.5)$$

$$\sin(\beta) = \cos(L) * \cos(\delta) * \cos(H) + \sin(L) * \sin(\delta) \quad (2.6)$$

$$\cos(\theta) = \frac{(\sin(\beta) * \sin(L) - \sin(\delta))}{\cos(\beta) * \cos(L)} \quad (2.7)$$

เมื่อ	$H$	คือ	Hour angle, degree
	$\beta$	คือ	Solar altitude, radian
	$\phi$	คือ	Solar azimuth, radian
	$L$	คือ	Latitude, degree



รูปที่ 2.6 มุมของรังสีตรงจากดวงอาทิตย์ที่ทำกับพื้นผิวที่วางทำมุมใด ๆ กับแนวระดับ  
ที่มา : ASHRAE HANDBOOK, 1995 HVAC Application, pp 30.3

การระบุตำแหน่งของดวงอาทิตย์ด้วยมุม Solar altitude และมุม Solar azimuth อาจเพียงพอสำหรับการคำนวณค่ารังสีจากดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวที่วางตั้งฉากกับรังสีตรงตั้งฉากจากดวงอาทิตย์ (Direct normal radiation,  $E_{DN}$ ) เท่านั้น แต่สำหรับการคำนวณค่ารังสีตรงตั้งฉากจากดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวที่วางทำมุมใด ๆ กับแนวระดับ (ที่ถูกเรียกว่า รังสีตรงจากดวงอาทิตย์ (Direct normal radiation,  $E_{DN}$ ) ตามรูปที่ 2.6 จำเป็นต้องนำทิศทางของการวางตัวของพื้นผิวเทียบกับแกนโลก (Surface orientation) ซึ่งได้แก่มุม Surface azimuth ( $\psi$ ) ที่เป็นทิศทางของการวางตัวของผนังเทียบกับทิศใต้ (มุม SOP) จากตารางที่ 2.2 และ มุมเอียงของผนังจากแนวระดับ (Tilt angle of surface,  $\Sigma$ ) มาพิจารณาประกอบเพื่อใช้ในการคำนวณค่ามุมตกกระทบ (Incident angle,  $\theta$ ) ตามสมการที่ 2.8

$$\cos(\theta) = \cos(\beta) * \cos(\gamma) * \sin(\Sigma) + \sin(\beta) * \cos(\Sigma) \tag{2.8}$$

และ

$$\gamma = \phi - \psi \tag{2.9}$$

เมื่อ  $\gamma$  คือ Surface-solar azimuth

ซึ่งค่ารังสีรวมของดวงอาทิตย์จะสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$E_t = E_{DN} * \cos\theta_v + E_D + E_r \tag{2.10}$$

## ตารางที่ 2.2 แสดงทิศทางการวางตัวของผนังเทียบกับทิศใต้

Orientation	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Surface azimuth	180°	-135°	-90°	-45°	0°	45°	90°	135°

สมการที่ 2.8 และ 2.10 มีข้อสังเกตว่า ในกรณีที่มีมุม Surface-solar azimuth มีค่าในช่วงตั้งแต่ 90° ถึง 270° ผนังได้รับรังสีเพียง 2 ประเภท คือ รังสีกระจายจากดวงอาทิตย์ (Diffuse radiation,  $E_d$ ) และ รังสีกระจายจากสิ่งแวดล้อม (Diffuse ground reflected radiation,  $E_g$ ) ซึ่งเป็นรังสีจากจากดวงอาทิตย์ส่วนที่กระทบกับสิ่งแวดล้อมแล้วสะท้อนเข้าสู่ผนังนั้น ๆ โดยที่ผนังด้านนั้นจะไม่ได้รับรังสีตรงจากดวงอาทิตย์โดยตรง แต่ในกรณีที่มีมุม Surface-solar azimuth มีค่าตั้งแต่ 0° ถึง 90° กับ 270° ถึง 360° พบว่าผนังด้านนั้นจะได้รับรังสีจากดวงอาทิตย์ครบทั้ง 3 ประเภท

รังสีรวมจากดวงอาทิตย์ (Total short-wave radiation หรือ Global radiation,  $E_t$ ) ที่ตกกระทบพื้นผิวที่อยู่ในชั้นบรรยากาศของโลกจะประกอบด้วยรังสีพื้นฐานทั้งหมด 3 ประเภท คือ รังสีตรงตั้งฉากจากดวงอาทิตย์ (Direct normal radiation) รังสีกระจายจากดวงอาทิตย์ (Diffuse radiation) และ รังสีกระจายจากสิ่งแวดล้อม (Diffuse ground reflected radiation) ซึ่งความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างค่ารังสีรวมกับรังสีทั้ง 3 ประเภท สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.10 ส่วนที่มาของค่ารังสีพื้นฐานอาจได้มาจากการตรวจวัด การทำนายโดยใช้ข้อมูลทางสถิติ หรือ การคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เป็นต้น

### 2.1.2 การทำนายค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์โดยใช้ข้อมูลทางสถิติ

วิธีนี้เป็นการทำนายค่ารังสีจากดวงอาทิตย์โดยอาศัยความสัมพันธ์ทางสถิติระหว่างค่ารังสีจากดวงอาทิตย์กับตัวแปรที่มีผลกระทบต่อค่ารังสีจากดวงอาทิตย์ เช่น ช่วงเวลาการส่องสว่างของดวงอาทิตย์ (Sunshine duration) เป็นต้น วิธีการนี้นิยมใช้ในการทำนายค่ารังสีจากดวงอาทิตย์บริเวณสถานีตรวจอากาศขนาดเล็กที่ไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดรังสีจากดวงอาทิตย์โดยตรง แต่ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดตัวแปรที่มีผลกระทบต่อค่ารังสีจากดวงอาทิตย์แทน โดยค่าสัมประสิทธิ์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ารังสีจากดวงอาทิตย์กับตัวแปรที่มีผลกระทบอาจได้มาจากวิธีทางสถิติของข้อมูลรังสีจากดวงอาทิตย์ที่ถูกตรวจวัดที่สถานีตรวจอากาศขนาดใหญ่กว่าที่ตั้งอยู่ใกล้เคียงแทนได้ ความแม่นยำของผลเฉลยที่ได้รับจะแปรผกผันกับระยะห่างระหว่างพื้นที่นั้นกับสถานีตรวจอากาศขนาดใหญ่ที่ใช้ในการหาความสัมพันธ์ และแปรผันตรงกับจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการหาความสัมพันธ์ เป็นต้น ตัวอย่างของตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับค่ารังสีจากดวงอาทิตย์ เช่น ค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์ในหนึ่งวัน (Daily global radiation,  $Q$ ) กับช่วงเวลาการส่องสว่าง (Sun shine duration,  $S$ ) เป็นต้น

วิธีการทางสถิติที่นิยมใช้ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์ในหนึ่งวันกับช่วงเวลาการส่องสว่าง คือ การวิเคราะห์แบบถดถอยเชิงเส้น (Linear regression analysis) โดยกำหนดให้ช่วงเวลาการส่องสว่างเป็นตัวแปรต้น และให้ปริมาณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์ในหนึ่งวันเป็นตัวแปรตาม สมการที่ใช้ในการทำนายอาจมีอยู่หลายรูปแบบด้วยกัน แต่สมการแบบหนึ่งที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายจะเป็นสมการพหุนามดีกรีหนึ่งในรูปของตัวแปรไร้มิติดังนี้

$$\frac{Q}{Q_0} = a + b * \frac{S}{S_0} \quad (2.11)$$



เมื่อ	$Q$	คือ	ปริมาณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์ในหนึ่งวัน
	$Q_0$	คือ	ปริมาณรังสี Extraterrestrial solar radiation ในหนึ่งวัน
	$S$	คือ	ช่วงเวลาการส่องสว่างของดวงอาทิตย์จริงในแต่ละวัน
	$S_0$	คือ	ช่วงเวลาการส่องสว่างของดวงอาทิตย์ทางทฤษฎีของแต่ละวัน
	$a, b$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามดีกรีหนึ่ง

เนื่องจากสมการที่ 2.11 อยู่ในรูปแบบของสมการเชิงเส้นซึ่งอาจไม่สามารถใช้เป็นตัวแทนที่ดีของข้อมูลที่มีแนวโน้มหรือความชันของข้อมูลแตกต่างกันมากได้ ดังนั้น ก่อนการหาค่าสัมประสิทธิ์แสดงความสัมพันธ์ของชุดข้อมูล ซึ่งได้แก่ ค่าคงที่  $a$  และ ค่าสัมประสิทธิ์ถดถอย  $b$  จำเป็นต้องผ่านขั้นตอนการจัดกลุ่มของข้อมูลที่มีแนวโน้มแบบเดียวกันให้อยู่ด้วยกันก่อน ตัวอย่างเช่น การจัดกลุ่มของข้อมูลโดยยึดฤดูกาลเป็นหลัก เป็นต้น วิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์ของสมการที่ 2.11 จะใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดเป็นหลัก โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์สามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$a = \frac{\sum y * \sum x^2 - \sum x * \sum x * y}{N * \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (2.12)$$

และ

$$b = \frac{N * \sum x * y^2 - \sum x * \sum y}{N * \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (2.13)$$

เมื่อ	$x$	คือ	$S/S_0$
	$y$	คือ	$Q/Q_0$
	$N$	คือ	จำนวนข้อมูลทั้งหมด

### 2.1.3 การคำนวณค่ารังสีจากดวงอาทิตย์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ถึงแม้ว่าข้อมูลรังสีจากดวงอาทิตย์ที่ได้จากการตรวจวัดและการทำนายค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์โดยใช้ข้อมูลทางสถิติ จะให้ผลเฉลยที่มีความน่าเชื่อถือได้ เนื่องจากผลเฉลยจากวิธีแรกได้มาจากการตรวจวัดจริง และผลเฉลยจากวิธีที่สองได้มากจากการเก็บรวบรวมข้อมูลทางสถิติ แต่ทั้งสองวิธีแรกจำเป็นต้องใช้ค่ารังสีจากดวงอาทิตย์ประเภทต่าง ๆ ที่ตรวจวัดที่สถานีตรวจอากาศมาพิจารณาประกอบเสมอ แต่ในบางกรณีการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการประมาณค่ารังสีจากดวงอาทิตย์ก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่ง ซึ่งนิยมใช้กับกรณีที่สถานีตรวจอากาศหลักจัดเก็บเฉพาะค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์เท่านั้น หรือใช้กับกรณีที่บางพื้นที่ที่ไม่มีการจัดเก็บข้อมูลรังสีจากดวงอาทิตย์ทุกประเภท เป็นต้น

ค่ารังสีจากดวงอาทิตย์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อยู่ภายใต้สมมติฐานที่ว่าเวลาที่คำนวณนั้นท้องฟ้าโปร่ง (Clear atmosphere) ซึ่งทำให้ค่ารังสีตรงตั้งฉากและค่ารังสีตรงจากดวงอาทิตย์จะมีค่าสูง ส่วนค่ารังสีกระจายจากดวงอาทิตย์บนท้องฟ้า และทิศทางการวางตัวของพื้นผิวเทียบกับแกนโลก ตามสมการดังต่อไปนี้

ค่ารังสีตรงตั้งฉากจากดวงอาทิตย์ของวันที่ท้องฟ้าโปร่ง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.14 แต่สำหรับวันที่ท้องฟ้าโปร่งมาก (Very clear atmosphere) ค่ารังสีตรงตั้งฉากอาจมีค่าสูงกว่าค่าที่คำนวณได้อีก 15% (ASHRAE,1995)

$$E_{DN} = \frac{A}{\exp\left(\frac{B}{\sin(\beta)}\right)} \quad (2.14)$$

โดยที่

$$A = 368.44 + 24.52 * \cos(W) - 1.14 * \cos(2 * W) - 1.09 * \cos(3 * W) + 0.58 * \sin(W) - 0.18 * \sin(2 * W) + 0.28 * \sin(3 * W) \quad (2.15)$$

$$B = 0.1717 - 0.0344 * \cos(W) + 0.0032 * \cos(2 * W) + 0.0024 * \cos(3 * W) - 0.0043 * \sin(W) - 0.0008 * \sin(3 * W) \quad (2.16)$$

และ

$$W = \frac{2 * \pi * N}{365} \quad (2.17)$$

เมื่อ	A	คือ	Apparent solar constant
	B	คือ	Atmospheric extinction coefficient
	N	คือ	ลำดับของวันในหนึ่งปี

ค่ารังสีตรงจากดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นผิวที่วางทำมุมกับแนวระดับสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$E_D = E_{DN} * \cos(\theta) \quad \text{เมื่อ} \quad \cos(\theta) > 0 \quad (2.18)$$

$$E_D = 0 \quad \text{ในกรณีอื่น ๆ}$$

ค่ารังสีกระจายจากดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวที่วางทำมุมกับแนวระดับ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$E_D = C * Y * E_{DN} \quad \text{เมื่อ} \quad \Sigma = 90^\circ \quad (2.19)$$

$$E_D = C * E_{DN} \left( \frac{1 + \cos(\Sigma)}{2} \right) \quad \text{ในกรณีอื่น ๆ}$$

โดยที่

$$C = 0.0905 - 0.041 * \cos(W) + 0.0073 * \cos(2 * W) + 0.0015 * \cos(3 * W) - 0.0034 * \sin(W) + 0.0004 * \sin(2 * W) - 0.0006 * \sin(3 * W) \quad (2.20)$$

และ

$$Y = 0.55 + 0.437 * \cos(\theta) + 0.313 * \cos^2(\theta) \quad \text{เมื่อ } \cos(\theta) > -0.2 \quad (2.21)$$

$$Y = 0.45 \quad \text{ในกรณีอื่น ๆ}$$

เมื่อ	$\Sigma$	คือ	Tilt angle, degree
	C	คือ	Sky diffuse factor จากตารางที่ 2.1
	Y	คือ	อัตราส่วนของรังสีกระจายจากดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวที่วางตั้งฉากกับแนวระดับต่อพื้นผิวในแนวระดับ

ค่ารังสีกระจายจากสิ่งแวดล้อมที่ตกกระทบพื้นผิวที่วางทำมุมกับแนวระดับ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$E_r = E_{DN} * (C + \sin(\beta) * P_g * \frac{(1 - \cos(\Sigma))}{2}) \quad (2.22)$$

เมื่อ	$P_g$	คือ	สัมประสิทธิ์การสะท้อนของสิ่งแวดล้อม
-------	-------	-----	-------------------------------------

## 2.2 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการคำนวณสมการถดถอย

การวิเคราะห์การถดถอยเป็นวิธีการทางสถิติอีกวิธีหนึ่งที่จะศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ประเภท โดยสามารถนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์นั้นไปใช้ในการพยากรณ์ค่าตัวแปรตัวหนึ่ง เมื่อค่าตัวแปรอีกตัวหนึ่งเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะกำหนดให้ตัวแปรที่มีการเปลี่ยนแปลงไปมีค่ากระทบต่อค่าของตัวแปรอีกตัวหนึ่งว่า ตัวแปรอิสระ Independent Variable : X) ส่วนตัวแปรที่มีการเปลี่ยนแปลงตามค่าของตัวแปรอิสระนั้นจะเรียกว่า ตัวแปรตาม (Dependent Variable : Y) (N.R. DRAPER, H. SMITH, 1996)

การวิเคราะห์การถดถอยเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร โดยมุ่งเน้นพยากรณ์ตัวแปรตาม ซึ่งต้องอาศัยการประมาณค่าความสัมพันธ์ระหว่างทั้งสองตัวแปร โดยจะเรียกความสัมพันธ์นี้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) ในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยนั้นจะทำได้หลังจากที่ได้สร้างรูปแบบความสัมพันธ์ (Model) ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตามแล้ว ซึ่งรูปแบบความสัมพันธ์อาจจะมีลักษณะเป็นเส้นแบบตรง แบบเส้นโค้ง ฯลฯ ได้ (ศิริชัย พงษ์วิชัย, 2537)

หรือสามารถบรรยายการวิเคราะห์การถดถอยได้อีกรูปแบบหนึ่ง คือ การวิเคราะห์ที่ใช้ในการพิจารณาถึงรูปแบบที่เป็นไปได้ของความสัมพันธ์ของตัวแปร และมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ประโยชน์ในการทำนาย Predict หรือคาดประมาณ Estimate ค่า ๆ หนึ่งซึ่งสัมพันธ์กับค่าที่กำหนดให้อีกค่าหนึ่ง นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษชื่อ Sir Francis Galton เป็นคนแรกที่ได้ศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร ซึ่งนำไปสู่การค้นคิดเรื่องการวิเคราะห์ความถดถอย โดยเขาได้กล่าวถึงแนวโน้มของลักษณะพันธุกรรมที่บุตรหลานสืบต่อจากบิดามารดา ในรายงานการวิจัยเกี่ยวกับพันธุกรรมของเขา เมื่อปี ค.ศ. 1899 (N.R. DRAPER, H. SMITH, 1996)

ส่วนการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (Correlation Analysis) จะเกี่ยวข้องกับการวัดขนาดความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร การคำนวณค่าสหสัมพันธ์จากข้อมูลชุดใดชุดหนึ่ง คือ การคำนวณค่าตัวแปรที่ได้จากข้อมูลชุดนั้นมีความสัมพันธ์กันมากน้อยเพียงใด แนวความคิดและศัพท์ต่าง ๆ ในการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ก็มาจาก Galton เช่นกัน (N.R. DRAPER, H. SMITH, 1996)

เมื่อได้รูปแบบความสัมพันธ์แล้ว จะใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์สร้างสมการเพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย เช่น ถ้าได้รูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองประเภทเป็นแบบเส้นตรง ก็จะสามารถสร้างสมการเชิงเส้นตรงที่เรียกว่า สมการถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Equations) (ศิริชัย พงษ์วิชัย, 2537)

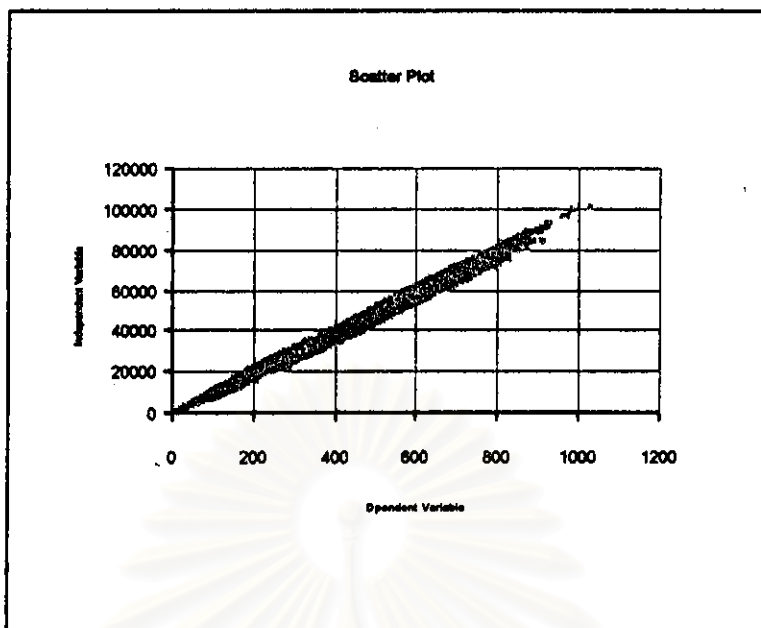
แต่ถ้าได้รูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองเป็นเชิงเส้นโค้ง ก็จะสามารถสร้างสมการเชิงเส้นโค้งได้ (Curvilinear Regression Equations) ซึ่งมีอยู่หลายชนิด เช่น

- รูปแบบความสัมพันธ์พาราโบลา (Parabola or Quadratic Form)
- รูปแบบความสัมพันธ์โพลิโนเมียล (Polynomial Form)
- รูปแบบความสัมพันธ์เอกซ์โปเนนเชียล (Exponential Form)

### 2.2.1 สมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression Equation)

การวิเคราะห์การถดถอยอย่างง่ายนี้ เป็นการวิเคราะห์การถดถอยเพื่อที่จะอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามด้วยตัวแปรอิสระเพียงตัวเดียว และความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตามมีรูปร่างเส้นโดยตรง กำหนดให้ X เป็นตัวแปรอิสระ และ Y เป็นตัวแปรตาม (N.R. DRAPER, H. SMITH, 1996)

		รูปแบบสมการ คือ	$Y = \beta_0 + \beta_1 X + E$
		สมการประมาณค่า Y	$= \beta_0 + \beta_1 X$
โดยที่	Y	=	ค่าของตัวแปรตาม
	X	=	ค่าของตัวแปรอิสระ
	$\beta_1$	=	ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระ X และยังเป็นค่าที่ใช้แสดงความชันของสมการถดถอยนี้ด้วย
	$\beta_0$	=	ค่าคงที่ สำหรับสมการถดถอยในรูปของตัวอย่าง b จะเป็นจุดตัด (Intercept) ของสมการถดถอยเชิงเส้น
	E	=	ค่าความแตกต่างหรือค่าความคลาดเคลื่อน (Error or Residual) ที่เกิดจากผลต่างของค่าสังเกต $Y_i$ กับค่าประมาณ $\hat{Y}_i$



แผนภูมิที่ 2.1 แสดงโมเดลถดถอยเชิงเส้น

$Y_i - \hat{Y}_i$  = ความคลาดเคลื่อนของการประมาณค่าที่ไม่สามารถที่จะอธิบายได้ด้วยสมการถดถอย (Error of Estimation Unexplained by Regression)

$\hat{Y}_i - Y_i$  = ความคลาดเคลื่อนของการประมาณค่าที่สามารถที่จะอธิบายได้ด้วยสมการถดถอย (Error of Estimation Explained by Regression)

$Y_i - Y_i$  = ความคลาดเคลื่อนทั้งหมดของการประมาณค่า (Total Error of Estimation)

ความคลาดเคลื่อนทั้งหลายสามารถที่จะนำมาเขียนในรูปของความแปรปรวนได้ดังนี้

Total variation	=	Unexplained variation + Explained Variation
$\sum (y_i - \bar{y})^2$	=	$\sum (y_i - \hat{y}_i)^2 + \sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2$
หรือ SST	=	SSE + SSR

การประมาณค่าตัวแปรตาม  $Y$  โดยตัวแปรอิสระ  $X$  นั้น จะใช้วิธีการที่เรียกกันว่า วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุด ซึ่งเป็นวิธีการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์  $a$  และค่าคงที่  $b$  โดยพยายามทำให้ผลต่างของค่าตัวแปรตามที่ได้จากการสังเกตและประมาณค่า คือ  $e$  หรือ  $Y_i - \hat{Y}_i$  เมื่อนำมายกกำลังสองแล้วมีค่าน้อยที่สุดโดยสมการเส้นตรงจะมีคุณสมบัติดังนี้

1. ค่า  $X$   $Y$  จะต้องอยู่บนเส้นสมการถดถอยนี้ด้วย
2.  $\sum (Y_i - \hat{Y}_i) = 0$
3.  $\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2$  มีค่าน้อยที่สุด

นอกจากสมการถดถอยจะมีคุณสมบัติดังกล่าวแล้ว ยังมีข้อสมมติเกี่ยวกับการแจกแจงความน่าจะเป็นของความคลาดเคลื่อนนี้ ซึ่งมีข้อสมมติเบื้องต้น ดังนี้

1. การแจกแจงของ  $e$  เป็นแบบปกติ (Normality) โดยมีค่าเฉลี่ยเป็น 0 คือ  $E(e) = 0$
2. ความแปรปรวนของ  $e$  มีค่าคงที่และเท่ากับค่าความแปรปรวนหรือที่เรียกว่าเป็นเอกภาพ (Homoskedasticity)
3. ความคลาดเคลื่อนของแต่ละค่าสังเกตเป็นอิสระต่อกัน นั่นคือ  $e_i$  และ  $e_j$  ของข้อมูลที่  $i$  และ  $j$  เป็นอิสระต่อกัน

## 2.2.2 การวิเคราะห์ข้อมูล

ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ออกมาจากสมการจะมีค่าต่าง ๆ ที่เข้ามาเกี่ยวข้องกับการคำนวณสมการถดถอย ซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องทราบเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลที่ได้ออกมาอย่างถูกต้อง ซึ่งค่าที่เกี่ยวข้องมีดังนี้ คือ

1.  $n$  = จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง
2. **STD** = ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณค่า  $Y$  โดยตัวแปร  $X$  (Standard Error of Estimation  $Y$  on  $X$ )  
 ค่า STD นี้ จะแสดงการกระจายของข้อมูลในความหมายดังนี้  
 ค่า STD น้อย แสดงว่าค่า  $Y$  จะอยู่ใกล้กับเส้นถดถอยมาก ดังนั้นสมการที่ใช้ประมาณค่านี้มีความน่าเชื่อถือมาก  
 ค่า STD มาก แสดงว่าค่า  $Y$  จะอยู่ห่างกับเส้นถดถอยมาก ดังนั้นสมการที่ใช้ประมาณค่านี้มีความน่าเชื่อถือน้อย  
 ค่า STD มีค่า 0 แสดงว่าค่า  $Y$  จะอยู่บนเส้นถดถอยมาก ดังนั้นสมการที่ใช้ประมาณค่านี้มีความน่าเชื่อถือมากที่สุด
3.  **$R^2$**  ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination) เป็นค่าที่ใช้ในการอธิบายความเปลี่ยนแปลงของค่า  $Y$  ที่เกิดขึ้นจากค่า  $X$  กล่าวคือ เป็นการบอกร้อยละของการเปลี่ยนแปลงของค่า  $Y$  ที่เกิดจากอิทธิพลของค่า  $X$  ถ้าค่า  $R^2$  มีค่าสูงมากก็แสดงว่า สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรตาม  $Y$  จากตัวแปรอิสระ  $X$  ที่อยู่ในสมการถดถอยนั้นได้เป็นอย่างดี และตัวแปรทั้งสองนี้มีความสัมพันธ์กันค่อนข้างสูง สมการถดถอยที่ใช้ประมาณค่าย่อมมีความน่าเชื่อถือได้สูง แต่ถ้าค่า  $R^2$  แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตาม  $Y$  ไม่สามารถอธิบายได้ด้วยค่า  $X$  ที่มีอยู่ในสมการถดถอยและตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กันน้อยมาก เช่น  
 ถ้า  $R^2 = 0.03$  หมายความว่า สมการถดถอยสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร  $Y$  ได้ 30% และมีปัจจัยอื่น ๆ อีก 70% มีผล ค่า  $R^2$  สามารถที่จะบอกความแตกต่างระหว่างเส้นสมการถดถอยได้ กล่าวคือ  
 ถ้าค่า  $R^2 = 1$  ค่า  $Y$  จะอยู่บนเส้นสมการถดถอยทุกจุด โดยมีค่า  $e = 0$  นั่นคือ สมการถดถอยที่ใช้อยู่มีแนวโน้มเป็นเส้นตรง 100%

ถ้าค่า  $R^2$  มากหรือเข้าใกล้ 1 ค่า  $Y$  จะอยู่ใกล้เส้นสมการถดถอยมาก นั่นคือจะมีค่าความคลาดเคลื่อนค่า  $e$  คือสมการถดถอยที่ใช้อยู่ มีแนวโน้มใกล้เป็นเส้นตรงมาก

ถ้าค่า  $R^2$  น้อยหรือเข้าใกล้ 0 ค่า  $Y$  จะอยู่ไกลเส้นสมการถดถอยมาก นั่นคือจะมีค่าความคลาดเคลื่อนค่า  $e$  มาก คือสมการถดถอยที่ใช้อยู่มีแนวโน้มไม่ใช่เป็นเส้นตรงมากถ้าค่า  $R^2$  เท่ากับ 0 ค่า  $Y$  จะกระจายไปจนไม่สามารถที่จะหาแนวโน้มที่แน่นอนได้ ความคลาดเคลื่อนจะมี 100% ซึ่งไม่ควรใช้สมการถดถอยนี้ในการประมาณค่า

4. Adjust R Square เนื่องจากจำนวนตัวอย่างที่เราศึกษามีน้อย อาจส่งผลให้ค่า  $R^2$  มีความคลาดเคลื่อนได้ คือ สูงเกินความเป็นจริง จึงต้องมีการนำค่า  $R^2$  มาปรับปรุงใหม่โดยเรียกค่าที่ปรับปรุงนี้ว่า

Adjust R Square

5. ค่าสถิติ F-Test เป็นค่าที่ได้จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน หรือ Analysis Variance หรือ ANOVA ซึ่งได้จากสมการแปรปรวน คือ

$$\Sigma (Y - \bar{Y})^2 = \Sigma (Y - \hat{Y})^2 + \Sigma (\hat{Y} - \bar{Y})^2$$

โดยสามารถที่จะนำมาสร้างเป็นตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อคำนวณค่าสถิติ F ดังนี้

แหล่งของความผันแปร Source of Variation	ชั้นความเป็นอิสระ df	ผลบวกกำลังสอง Sum of Square : SS	ค่าเฉลี่ยกำลังสอง Mean Square : MS
จากการถดถอย (Due to regression)	1	SSR $\Sigma (y - \hat{y})^2$	MSR $\Sigma (y - \hat{y})^2$
จากแหล่งอื่นที่อธิบายไม่ได้ (error or residual)	n-2	SSE $(y - \hat{y})^2$	MSE $[\Sigma (y - \hat{y})^2] / (N-2)$
รวม (Total)	n-1	SST $(y - \bar{y})^2$	MST $[\Sigma (y - \bar{y})^2] / (N-1)$

ตารางที่ 2.3 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อวิเคราะห์ค่า F

โดยที่  $F = \text{SSR}/\text{SSE}/(n-2) = \text{MSR}/\text{MSE}$

นำค่า F ที่คำนวณได้เปรียบเทียบกับค่า F จากตารางที่ระดับนัยสำคัญที่อัลฟา df = (n-2)

6. ค่าสถิติ T-Test คำนวณได้จากสมการ คือ

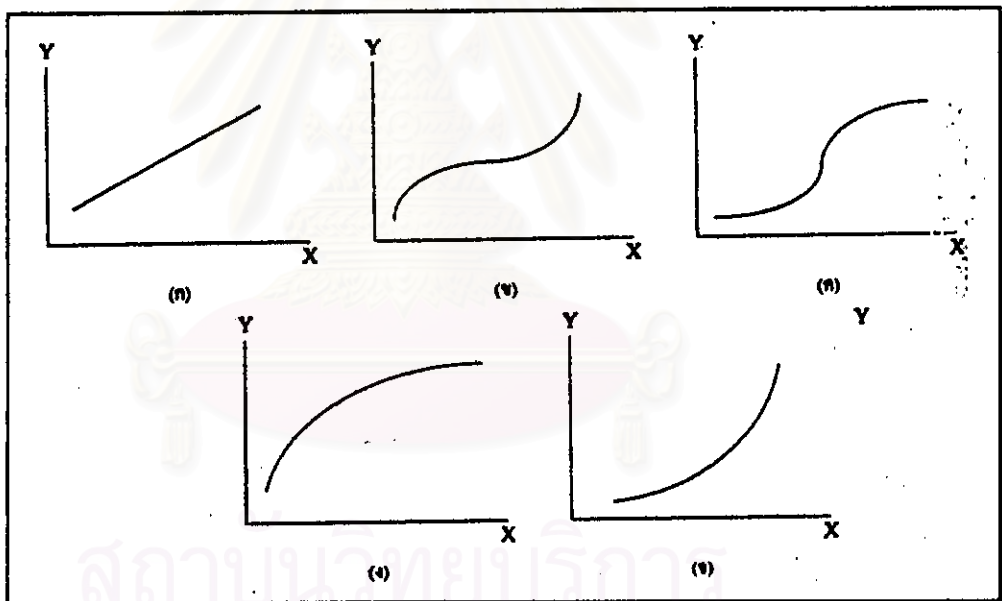
$$t = \frac{a - 0}{S(a)}$$

นำค่า t ที่คำนวณได้เปรียบเทียบกับค่า t จากตารางที่ระดับนัยสำคัญที่อัลฟา df = (n-2)

ทั้งนี้ ไม่ว่าจะเป็นค่า  $F$  หรือค่า  $t$  จะสรุปผลทำนองเดียวกัน คือ จะปฏิเสธสมมติฐานว่าง  $H_0$  เมื่อค่าที่คำนวณได้มากกว่าค่าที่เปิดจากตารางที่ระดับนัยสำคัญ อัลฟา นั่นคือ  $a$  ไม่เท่ากับ 0 หรือแสดงว่าตัวแปรอิสระ  $X$  ไม่มีผลต่อตัวแปรตาม  $Y$  หรือจะพิจารณาจากค่า  $P$  ถ้าค่า  $P$  น้อยกว่าหรือเท่ากับค่าอัลฟาก็จะปฏิเสธสมมติฐานว่างเช่นเดียวกัน

### 2.2.3 การวิเคราะห์สมการพหุคูณ (Multiple Regression Analysis)

การวิเคราะห์การถดถอยเพื่อการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามและตัวแปรอิสระนั้น จุดประสงค์ก็เพื่อที่จะอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามด้วยตัวแปรอิสระ และนำไปสู่การพยากรณ์หรือการประมาณค่าตัวแปรตามนั้น ๆ อาจที่จะต้องใช้ตัวแปรอิสระมากกว่า 1 ตัว ซึ่งจะช่วยให้การพยากรณ์มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น เพราะในความเป็นจริงนั้นการศึกษาเรื่องต่าง ๆ ในทางเศรษฐศาสตร์ ทางวิทยาศาสตร์ หรือธุรกิจมักมีตัวแปรที่เข้ามาเกี่ยวข้องมากกว่า 1 ตัวแปรเสมอ การใช้เพียงตัวแปรเดียวมาอธิบายการเปลี่ยนแปลงตามนั้นอาจจะไม่พอเพียง เช่น การพยากรณ์ราคาสินค้าที่จะขึ้นอยู่กับการได้ประชาชาติ ต้นทุนราคา ฯลฯ ลักษณะการวิเคราะห์ที่ใช้ตัวแปรอิสระมากกว่า 1 ตัวนั้น เราเรียกว่า การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณนั่นเอง



รูปภาพที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์เชิงกิจกรรมรูปแบบต่าง ๆ ระหว่างตัวแปร  $X$  และ  $Y$

ที่มา : R. G. Hopkinson, 1966.

#### 1. สมการถดถอยพหุคูณเชิงเส้นตรง Multiple Linear Regression Equations

การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณในรูปสมการเชิงเส้นตรง เป็นการวิเคราะห์การถดถอยเพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามด้วยตัวแปรอิสระตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป โดยถือว่ารูปแบบความสัมพันธ์อยู่ในรูปของเส้นตรง ซึ่งมีรูปแบบของสมการถดถอยดังต่อไปนี้



$$\text{สมการในรูปแบบของตัวอย่าง} = Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \varepsilon$$

$$\text{สมการประมาณค่า} = Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3$$

- โดยที่  $k$  = จำนวนตัวแปรอิสระที่ใช้ในสมการถดถอย
- $Y$  = ค่าตัวแปรตามสำหรับประมาณค่าหรือทำนาย
- $X_i$  = ค่าของตัวแปรอิสระตัวที่  $i$  จะใช้แทนตัวแปรอิสระตัวที่  $i$  ที่ได้จากตัวอย่าง
- $\beta$  = ค่าคงที่ของสมการถดถอย
- $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  = ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระตัวที่ 1 ซึ่งค่านี้จะแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า  $X$  หน่วยที่ 1 ต่อค่า  $Y$  ดังนี้ คือ ถ้าค่า  $X$  ตัวที่ 1 เปลี่ยนไป 1 หน่วย จะทำให้ค่า  $Y$  เปลี่ยนแปลงไป  $a_1$  หน่วย โดยคำนึงถึงว่า ตัวแปรอิสระตัวอื่น ๆ นอกเหนือจากตัวที่ 1 มีค่าคงที่ ดังนั้นค่านี้อาจจะเรียกได้ว่า Partial Regression Coefficient
- $\varepsilon$  = ค่าความแตกต่างหรือความคลาดเคลื่อนของการประมาณค่า  $Y$  โดยค่า  $Y$  จะใช้สัญลักษณ์  $\varepsilon$  สำหรับความคลาดเคลื่อนของสมการ ในรูปตัวอย่างการประมาณค่าตัวแปร ตาม  $Y$  โดยตัวแปรอิสระ  $X$  ยังคงใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด เพื่อนำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์
- STD** = ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณค่า  $Y$  โดยตัวแปร  $X$  (Standard Error of Estimation  $Y$  on  $X$ ) ค่า **STD** นี้ จะแสดงการกระจายของข้อมูลในความหมายดังนี้
- ค่า **STD** น้อย แสดงว่าค่า  $Y$  จะอยู่ใกล้กับเส้นถดถอยมาก ดังนั้นสมการที่ประมาณค่านี้มีความเหมาะสมมาก
- ค่า **STD** มาก แสดงว่าค่า  $Y$  จะอยู่ไกลกับเส้นถดถอยมาก ดังนั้นสมการที่ใช้ประมาณค่านี้ไม่มีความเหมาะสมมาก
- ค่า **STD** มีค่า 0 แสดงว่าค่า  $Y$  จะอยู่บนเส้นถดถอยมาก ดังนั้นสมการที่ใช้ประมาณค่านี้มีความเหมาะสมดีมาก
- R<sup>2</sup>** = ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination) เป็นค่าที่ใช้ในการอธิบายความเปลี่ยนแปลงของค่า  $Y$  ที่เกิดจากค่า  $X$  กล่าวคือ เป็นการบอกร้อยละของการเปลี่ยนแปลงของค่า  $Y$  ที่เกิดจากอิทธิพลของค่า  $X$  ถ้าค่า **R<sup>2</sup>** มีค่าสูงมากก็แสดงว่า สามารถอธิบายการถดถอยนั้นได้เป็นอย่างดี และตัวแปรทั้งสองนี้มีความสัมพันธ์กันค่อนข้างสูง สมการถดถอยที่ใช้ประมาณย่อมมีความน่าเชื่อถือได้สูง แต่ถ้าค่า **R<sup>2</sup>** ต่ำ แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตาม  $Y$  ไม่สามารถอธิบายได้ด้วยค่า  $X$  ที่มีอยู่ในสมการถดถอยและตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กันน้อยมาก เช่น
- ถ้า **R<sup>2</sup> = 0.30** หมายความว่า สมการถดถอยสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร  $Y$  ได้ 30% และปัจจัยอื่นๆอีก 70% มีผล ค่า **R<sup>2</sup>** สามารถที่จะบอกความแตกต่างระหว่างเส้นสมการถดถอยได้ กล่าวคือ

- ถ้าค่า  $R^2 = 1$  ค่า  $Y$  จะอยู่บนเส้นสมการถดถอยทุกจุด โดยมีค่า  $e = 0$  นั่นคือ สมการถดถอยที่ใช้อยู่มีแนวโน้มเป็นเส้นตรง 100%
- ถ้าค่า  $R^2$  มากหรือเข้าใกล้ 1 ค่า  $Y$  จะอยู่ใกล้เส้นสมการถดถอยมาก นั่นคือจะมีค่าความคลาดเคลื่อนค่า  $e$  คือสมการถดถอยที่ใช้อยู่ มีแนวโน้มใกล้เป็นเส้นตรงมาก
- ถ้าค่า  $R^2$  น้อยหรือเข้าใกล้ 0 ค่า  $Y$  จะอยู่ไกลเส้นสมการถดถอยมาก นั่นคือจะมีค่าความคลาดเคลื่อนค่า  $e$  มาก คือสมการถดถอยที่ใช้อยู่มีแนวโน้มไม่ใช่เป็นเส้นตรงมาก
- ถ้าค่า  $R^2$  เท่ากับ 0 ค่า  $Y$  จะกระจายไปจนไม่สามารถที่จะหาแนวโน้มที่แน่นอนได้ ความคลาดเคลื่อนจะมี 100% ซึ่งไม่ควรใช้สมการถดถอยนี้ในการประมาณค่า

**Adjust R Square** เนื่องจากจำนวนตัวอย่างที่ศึกษามีน้อย อาจส่งผลให้ค่า  $R^2$  มีความคลาดเคลื่อนได้ คือ สูงเกินความเป็นจริง จึงต้องมีการนำค่า  $R^2$  มาปรับปรุงใหม่โดยเรียกค่าที่ปรับปรุงนี้ว่า Adjust R Square

**ค่าสถิติ F-Test** เป็นค่าที่ได้จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน หรือ Analysis Variance หรือ ANOVA ซึ่งได้จากสมการแปรปรวน คือ

$$\sum (Y - \bar{Y})^2 = \sum (Y - \hat{Y})^2 + \sum (\hat{Y} - \bar{Y})^2$$

หรือ SST = SSE + SSR

โดยสามารถที่จะนำมาสร้างเป็นตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อคำนวณค่าสถิติ F ดังนี้ คือ

แหล่งของความแปรปรวน Source of Variation	ขั้นความเป็นอิสระ df	ผลบวกกำลังสอง Sum of Square	ค่าเฉลี่ยกำลังสอง Mean Square
จากการถดถอย (Due to regression)	k	SSR $\sum (y - \hat{y})^2$	MSR $\sum (y - \hat{y})^2 / k$
จากแหล่งที่อธิบายไม่ได้ (error or residual)	n-(k+1)	SSE $\sum (y - y)^2$	MSE $\sum (y - y)^2 / (n-k-1)$
รวม (Total)	n-1	SST $\sum (y - \bar{y})^2$	MST $\sum (y - \bar{y})^2 / (n-1)$

ตารางที่ 2.4 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อคำนวณค่า F

โดยที่  $F = \frac{SSR/k}{SSE/(n-k-1)}$

นำค่า F ที่คำนวณได้เปรียบเทียบกับค่า F จากตารางที่ระดับนัยสำคัญที่อัลฟา  
df = (n-k-1)

ค่าสถิติ T-Test คำนวณได้จากสมการคือ

$$t = \frac{a_i - 0}{S(a_i)}$$

ค่า t ที่คำนวณได้เปรียบเทียบกับค่า t จากตารางที่ระดับนัยสำคัญที่อัลฟา

$$df = (n-k-1)$$

ทั้งนี้ไม่ว่าจะเป็นค่า F หรือค่า t จะสรุปผลทำนองเดียวกัน คือ ปฏิเสธสมมติฐานว่าง  $H_0$  เมื่อค่าที่คำนวณได้มากกว่าค่าที่เปิดจากตารางที่ระดับนัยสำคัญ อัลฟา นั่นคือ  $a$  ไม่เท่ากับ 0 หรือแสดงว่าตัวแปรอิสระ  $X$  ไม่มีผลต่อตัวแปรตาม  $Y$  หรือจะพิจารณาจากค่า  $P$  ถ้าค่า  $P$  น้อยกว่าหรือเท่ากับค่าอัลฟาก็จะปฏิเสธสมมติฐานว่างเช่นเดียวกัน นั่นคือไม่ควรที่จะนำมาใช้ในการพยากรณ์ตัวแปร  $Y$

## 2. การวิเคราะห์สมการถดถอยโดยตัวแปรหุ่น

การวิเคราะห์การถดถอยซึ่งเป็นการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามและตัวแปรอิสระนั้น โดยทั่วไปแล้วตัวแปรที่จะนำมาพิจารณาจะต้องเป็นตัวแปรที่ได้จากข้อมูล มีการวัดที่ระดับอัตราส่วน Ratio Scale หรืออย่างน้อยที่ระดับช่วง Interval Scale ซึ่งเป็นข้อมูลเชิงปริมาณ แต่ในบางครั้งตัวแปรที่ได้จากข้อมูลที่มีการวัดในระดับเรียงลำดับ Ordinal Scale หรือระดับนามบัญญัติ Nominal Scale ซึ่งเป็นข้อมูลเชิงคุณภาพ โดยเฉพาะตัวแปรอิสระนั้นมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามสูง ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการพยากรณ์ตัวแปรตามที่ดีได้ เช่น เพศ ใช้ในการพยากรณ์รายจ่ายต่อสัปดาห์ ฯลฯ ดังนั้น ถ้านำตัวแปรเหล่านี้มาใช้ในการวิเคราะห์การถดถอยเพื่อสร้างสมการการถดถอยแล้ว จะทำให้สามารถพยากรณ์ได้อย่างแม่นยำมากขึ้น แต่ข้อจำกัดอย่างหนึ่งก็คือตัวแปรเชิงคุณภาพที่จะกำหนดตัวแปรอิสระนั้นจะต้องมีค่าที่เป็นไปได้แค่ 2 ค่า เช่น เพศชายและหญิง เป็นต้น ตัวแปรเชิงคุณภาพที่มีได้แค่ 2 ค่านี้ เรียกว่า ตัวแปรหุ่น (Dummy Variable)

การวิเคราะห์การถดถอยโดยใช้ตัวแปรหุ่นนี้ กำหนดค่าหนึ่งเป็นตัวแปรนั้น มีค่าเท่ากับ 0 และอีกหนึ่งตัวแปรนั้นกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1 ตัวอย่างเช่น

กำหนดให้ฤดูร้อนมีค่าเท่ากับ 0

กำหนดให้ฤดูหนาวมีค่าเท่ากับ 1 เป็นต้น

เนื่องจากตัวแปรหุ่นเป็นตัวแปรที่มีค่าความแปรปรวนน้อยมาก อยู่ระหว่าง 0 กับ 1 ดังนั้นถ้าไม่จำเป็นหรือตัวแปรนี้มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามสูงจริง ๆ แล้ว ควรที่จะหลีกเลี่ยงการใช้ตัวแปรหุ่นนี้

สมการในรูปแบบของตัวอย่าง =  $Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2^2 + \beta_3 x_3 + \epsilon$

สมการประมาณค่า =  $Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2^2 + \beta_3 x_3$

โดยที่  $k$  = จำนวนตัวแปรอิสระที่ใช้ในสมการถดถอย  
 $Y$  = ค่าตัวแปรตามสำหรับประมาณค่าหรือทำนาย  
 $X_i$  = ค่าของตัวแปรอิสระตัวที่  $i$  จะใช้แทนตัวแปรอิสระตัวที่  $i$  ที่ได้จากตัวอย่าง

- B = ค่าคงที่ของสมการถดถอย
- $\beta$  = ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระตัวที่ 1 ซึ่งค่านี้จะแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า X หน่วยที่ 1 ต่อค่า Y ดังนี้ คือ ถ้าค่า X ตัวที่ 1 เปลี่ยนไป 1 หน่วย จะทำให้ค่า Y เปลี่ยนแปลงไป  $a_1$  หน่วย โดยคำนึงถึงว่าตัวแปรอิสระอื่น ๆ นอกเหนือจากตัวที่ 1 มีค่าคงที่ ดังนั้นค่านี้อาจจะเรียกได้ว่า Partial Regression Coefficient
- e = ค่าความแตกต่างหรือความคลาดเคลื่อนของการประมวลค่า Y โดยค่า Y จะใช้สัญลักษณ์ e สำหรับความคลาดเคลื่อนของสมการในรูปตัวอย่าง

การวิเคราะห์การถดถอยส่วนใหญ่ นั้น จะมีข้อสมมติฐานที่ว่า ตัวแปรเชิงอิสระและตัวแปรตามมีความสัมพันธ์เชิงเส้นต่อกัน แต่ถ้าไม่เป็นไปตามข้อสมมติฐาน การนำตัวแปรหุ่นมาใช้จะช่วยให้เกิดประโยชน์ เนื่องจากการแบ่งตัวแปรอิสระออกเป็นตัวแปรหุ่นหลาย ๆ ตัว เปรียบเสมือนเป็นการตัดช่วงความสัมพันธ์เชิงเส้นออกไปเป็นช่วง ๆ แต่ละช่วงที่ได้จะมีความเป็นเส้นตรงมากกว่าการวิเคราะห์ถดถอยแบบปกติ

#### 2.2.4 การคัดเลือกสมการถดถอยที่ดีที่สุด Selecting the Best Regression Equation

สมการถดถอยที่ดีที่สุด คือ สมการที่สามารถพยากรณ์ค่าตัวแปรตามได้แม่นยำที่สุด ซึ่งอาจพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณ ถ้ามีค่าน้อยแสดงว่า สมการถดถอยที่ใช้เป็นรูปแบบนั้นมีความเหมาะสมดี หรือพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R-Square ว่ามีค่ามากหรือน้อย ถ้ามีค่ามากแสดงว่าตัวแปรอิสระที่ใช้อยู่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตาม ส่วนใหญ่แล้วสมการถดถอยที่ดีจะพยายามหาตัวแปรอิสระให้ได้มากที่สุด เพื่อที่จะมาอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตาม ซึ่งโดยปกติแล้ว ถ้ามีตัวแปรอิสระมากขึ้นย่อมจะทำให้ค่า R-Square สูงขึ้นด้วย ในกรณีนี้ผู้ใช้ต้องมีความระมัดระวังในการสรุปผลจากค่า R-Square เพราะเมื่อค่า R-Square สูงขึ้น ทำให้ดูเหมือนว่าตัวแปรอิสระเหล่านั้นมีอิทธิพลต่อตัวแปรตามมาก ซึ่งน่าที่จะดีเพราะทำให้การพยากรณ์มีความแม่นยำมากขึ้น แต่บางครั้งตัวแปรอิสระที่นำมาใช้ในสมการอันเดียวกันนั้นมีความสัมพันธ์กันสูง จะส่งผลกระทบต่อตัวแปรตามให้มีค่า R-Square สูงไปด้วย เช่น เมื่อมีการใช้ตัวแปรอายุ และตัวแปรส่วนสูงไปพยากรณ์น้ำหนักนั้น ตัวแปรอายุและตัวแปรส่วนสูงอาจมีความสัมพันธ์กันสูง และทั้งสองตัวแปรจะส่งผลต่อตัวแปรน้ำหนักพร้อมกัน ทำให้ค่า R-Square ซึ่งเป็นค่าที่เกิดจากความซ้ำซ้อนของค่าความสัมพันธ์ ปัญหาเช่นนี้ นักสถิติเรียกว่าเกิด Multicollinearity

ดังนั้นก่อนจะนำตัวแปรอิสระใดมาสร้างเป็นสมการถดถอย ควรจะแก้ปัญหานี้ก่อนโดยหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระทั้งหมดก่อน ซึ่งทำได้โดยการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ Correlation Coefficient กล่าวคือ ถ้าตัวแปรอิสระคู่ใดมีความสัมพันธ์กันสูง แสดงว่าตัวแปรทั้งสองนั้นสามารถทดแทนกันได้ จึงควรตัดออกไปโดยนำมาใช้เพียงตัวเดียว ซึ่งในการเลือกตัวแปรใดนั้นพิจารณาจากตัวแปรอิสระตัวที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามสูงกว่า

การคัดเลือกตัวแปรอิสระที่เหมาะสมกับสมการถดถอย มีวิธีการที่ใช้พิจารณาอยู่ 3 วิธีคือ

### 1. วิธี FORWARD SELECTION

วิธีการคัดเลือกตัวแปรอิสระวิธี Forward Selection นี้ เป็นการคัดเลือกตัวแปรอิสระที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามสูงสุดเข้าไปไว้ในสมการเป็นอันดับแรก แล้วจึงทดสอบความมีนัยสำคัญของตัวแปรอิสระนั้นภายใต้สมมติฐาน  $H_0 = \alpha_1 = 0$  ถ้ามีนัยสำคัญหรือปฏิเสธสมมติฐานก็จะทำการเลือกตัวแปรอิสระตัวต่อไปโดยวิธีการเดียวกัน จนกระทั่งตัวแปรอิสระไม่มีนัยสำคัญ แสดงว่าสมการถดถอยที่ได้เป็นสมการที่เหมาะสมแล้ว

### 2. วิธี BACKWARD ELIMINATION

วิธีการคัดเลือกตัวแปรอิสระโดยการใช้วิธี Backward Elimination นี้ เป็นวิธีการคัดเลือกตัวแปรอิสระออกจากสมการถดถอยที่ละตัวแปร โดยสร้างรูปแบบของสมการถดถอยที่รวมเอาตัวแปรทุกอย่างที่กำหนดเอาไว้ในสมการ แล้วพิจารณาเลือกตัวแปรอิสระออกจากสมการถดถอยที่ละตัวแปรจนกระทั่งไม่มีตัวแปรใดต้องถูกคัดออกจากสมการอีก แสดงว่าสมการถดถอยที่มีตัวแปรอิสระเหลืออยู่ในสมการนั้นเป็นสมการที่เหมาะสมแล้ว การพิจารณาคัดตัวแปรอิสระออกจากสมการนั้นใช้ค่าสถิติที่เรียกว่า Partial F-Test ทดสอบสมมติฐาน  $H_0 : \alpha/\alpha_1, \alpha_2, \dots$

### 3. วิธี STEPWISE REGRESSION

วิธีการนี้เป็นการคัดเลือกตัวแปรอิสระที่ซับซ้อน โดยขั้นแรกเป็นการเลือกตัวแปรอิสระเข้าไปในสมการที่ละตัวแปร โดยพิจารณาเลือกตัวแปรอิสระที่มีค่าความสัมพันธ์สูงสุดกับตัวแปรตามเข้าไปในสมการ แล้วจึงพิจารณาตัวแปรอิสระที่มีความสัมพันธ์เชิงส่วน ความสัมพันธ์ที่กำหนดให้ตัวแปรอิสระที่เข้าไปในสมการแล้วคงที่ กับตัวแปรตามมากที่สุดเข้าไปในสมการ และพร้อมกันนั้นก็พิจารณาว่าตัวแปรอิสระที่เข้าไปในสมการก่อนหน้านั้นทุกตัวแปรยังคงจะอยู่ในสมการอีกหรือไม่ ถ้าไม่อยู่ก็คัดออกและดำเนินการคัดเลือกตัวแปรอิสระใหม่ ถ้าควรอยู่ก็ดำเนินการคัดเลือกตัวแปรอิสระใหม่ การคัดเลือกตัวแปรอิสระจะดำเนินการไปจนกระทั่งไม่มีตัวแปรอิสระใดเข้าไปหรือถูกคัดออกจากสมการได้

#### 2.2.5 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน (RESIDUAL ANALYSIS)

การวิเคราะห์การถดถอยเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามและตัวแปรอิสระ โดยการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยนั้น การพยากรณ์ที่แม่นยำเนื่องมาจากค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ผลจากการใช้สมการถดถอยมาประมาณค่า  $Y$  โดยจะเป็นการพิจารณาความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นระหว่างค่าสังเกตที่มีอยู่กับค่าประมาณที่เกิดจากการพยากรณ์ การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนจึงเป็นการวิเคราะห์ถึงการแจกแจงความน่าจะเป็นของ  $e$  โดยพิจารณาจากข้อสมมติเบื้องต้นของสมการถดถอย ดังนี้

- การแจกแจงของ  $e$  เป็นแบบปกติ (Normality) โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0
- ความแปรปรวนของ  $e$  มีค่าคงที่ หรือที่เรียกว่าเอกภาพ (Homoscedasticity)
- ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในแต่ละค่าสังเกตเป็นอิสระต่อกัน Non (Autoregression or Nonauto Correlation)

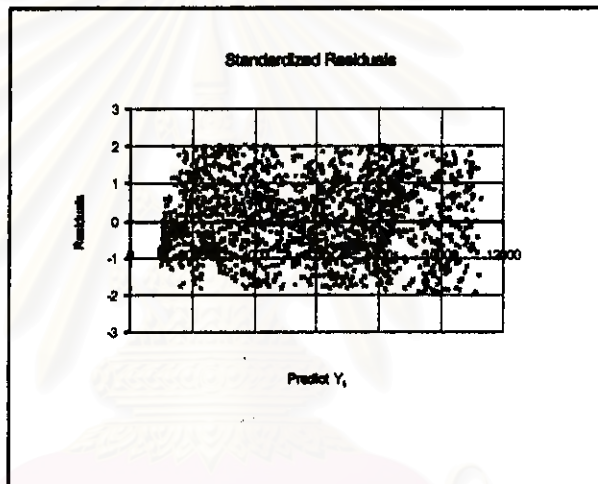
ดังนั้นการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนอาจจะกล่าวได้ว่า เป็นการตรวจสอบผลที่ได้ของสมการถดถอยว่าเป็นไปตามข้อตกลง หรือข้อสมมติที่กำหนดขึ้นหรือไม่ ถ้าสมการถดถอยที่ได้นำมาคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนแล้วไม่เป็นไปตามข้อสมมติดังกล่าวนี้แสดงว่ารูปแบบของสมการไม่เหมาะสม

□ การวิเคราะห์การแจกแจงของความคลาดเคลื่อน

จากข้อสมมติฐานข้อแรกที่ว่า การแจกแจงของความคลาดเคลื่อน จะต้องเป็นการแจกแจงแบบปกติด้วยค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และความแปรปรวน พิจารณาโดยการนำค่าความคลาดเคลื่อนทั้งหมดมาเขียนกราฟที่ได้ว่ามีลักษณะใกล้เคียงโค้งปกติหรือไม่ ซึ่งวิธีนี้เป็นการพิจารณาแบบกว้าง ๆ พอประมาณเท่านั้น อีกวิธีหนึ่งคือใช้วิธีการทางสถิติมาทดสอบสมมติฐานว่าความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติค่าเฉลี่ย 0 โดยการใช้วิธีแบบนอนพาราเมตริก เช่น ไคสแคว ฯลฯ

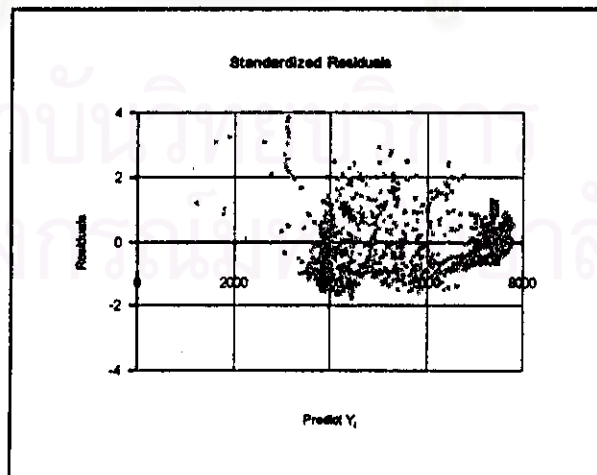
□ การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน

ต้องมีความเป็นเอกภาพหรือมีค่าคงที่ กล่าวคือ ความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนทุกค่าสังเกตจะมีค่าเท่ากันหมด ซึ่งสามารถทดสอบได้โดยเขียนกราฟ ระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนกับค่าประมาณตัวแปรตาม โดยค่าที่นำมาเขียนแผนภูมิควรนำค่าที่ถูกเปลี่ยนเป็นคะแนนมาตรฐานแล้วเพื่อตัดปัญหาเรื่องหน่วยและขอบเขตของข้อมูล



แผนภูมิที่ 2.2 แสดงความมีเอกภาพของข้อมูล

ที่มา : N.R. DRAPER, H. SMITH, 1996, pp. 90.



แผนภูมิที่ 2.3 แสดงความขาดเอกภาพข้อมูล

ที่มา : N.R. DRAPER, H. SMITH, 1996, pp. 90.

□ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของความคลาดเคลื่อน

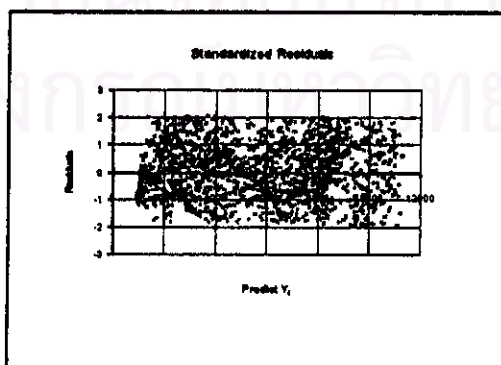
ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากแต่ละค่าสังเกตต้องเป็นอิสระต่อกันหรือเรียกว่าไม่มีความสัมพันธ์กัน แต่ถ้าความคลาดเคลื่อนมีความสัมพันธ์กันจะเรียกว่า มีความสัมพันธ์แบบ Auto Correlation ซึ่งมักจะเกิดในกรณีที่เก็บข้อมูลตามระยะเวลา หรือที่เรียกว่า Time Series การเกิด Auto Correlation นี้จะมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยขาดความแม่นยำ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยอาจจะต่ำกว่าความเป็นจริงทำให้การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับ  $\alpha$  ผิดพลาดได้ ดังนั้นถ้าข้อมูลมีการเก็บตามระยะเวลาควรจะมีการทดสอบด้วยค่าสถิติ Durbin-Watson

□ ความเชื่อมั่นของค่าสัมประสิทธิ์

หลังจากการพิจารณาในเรื่องของวิธีการใดที่เหมาะสมที่ใดในการคัดเลือกสมการทั้ง 3 วิธีนั้น ส่วนที่ต้องนำมาพิจารณาอีกประเด็นก็คือ ข้อมูลที่รวบรวมได้เมื่อนำมาแปลงเป็น Residual Plot แล้ว ข้อมูลบางตัวจะมีความแตกต่างมากกว่าข้อมูลที่กระจายโดยทั่วไป หรือมีลักษณะพิเศษในตัว อาจเรียกได้ว่าเป็นตัวแปรพิเศษ Out Liner เช่น เมื่อมีการทำการศึกษาเรื่องระดับการเรียนกับความร่ำรวย ผลที่ได้อาจมีข้อมูลบางตัวที่มีลักษณะขัดแย้งกัน เช่น ปกติการเรียนสูงจะมีรายได้มาก แต่ในกรณีนี้ข้อมูลที่ได้ระบุว่า การเรียนต่ำแต่มีรายได้สูง นั่นหมายความว่าข้อมูลชุดนั้นมีความพิเศษกว่าปกติ จึงต้องมีการพิจารณาถึงความผิดปกติอันนั้น แต่ในการวิจัยครั้งนี้เพื่อความถูกต้องสมบูรณ์จึงได้ทำการตัดชุดข้อมูลที่มีความพิเศษเหล่านั้นออก โดยการพิจารณาความเชื่อมั่นของค่าสัมประสิทธิ์ ดังนี้ (N.R. DRAPER, H. SMITH, 1996)

ระดับความเชื่อมั่น	จำนวนข้อมูล	ช่วงรอบ ๆ ค่าสัมประสิทธิ์ถดถอยที่ให้ความเชื่อมั่นระดับ
95%	5 หรือมากกว่า	+ หรือ -3.2 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
95%	15 หรือมากกว่า	+ หรือ -2.2 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
95%	30 หรือมากกว่า	+ หรือ -2.0 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
95%	5 หรือมากกว่า	+ หรือ -4.5 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
95%	15 หรือมากกว่า	+ หรือ -2.7 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
95%	30 หรือมากกว่า	+ หรือ -2.5 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ 2.5 แสดงความเชื่อมั่นของค่าสัมประสิทธิ์



แผนภูมิที่ 2.4 แสดงความมีเอกภาพของข้อมูล

ที่มา : N.R. DRAPER, H. SMITH, 1996, pp. 90.

สมมติว่าทราบค่าผิดพลาดมาตรฐาน เท่ากับ 0.098 จำนวนข้อมูลมากกว่า 15 และจากการวิเคราะห์ ได้ค่า A เท่ากับ 3.84 หากต้องการทราบว่าที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ค่าของ A ซึ่งเท่ากับ 3.84 จะอยู่ในระหว่าง  $2(0.098)$  หรือระหว่าง 3.65 และ 4.03 ตามลำดับ

#### □ ความเชื่อมั่นของค่าการพยากรณ์

หลังจากที่คำนวณค่า A และ B ได้แล้วนั้น นำมาแทนค่าตัวแปรอิสระเพื่อหาค่าตัวแปรตาม แต่จะสามารถทราบได้อย่างไรว่าค่าที่แท้จริงของค่า Y นั้นใกล้เคียงกับที่ประมาณค่าเอาไว้ ในกรณีนี้ต้องมีการหาค่าผิดพลาดมาตรฐานของการพยากรณ์ (Standard Error of Estimation) สมมติว่า ค่าผิดพลาดมาตรฐานของการพยากรณ์จากการใช้สมการเท่ากับ 14.9 และค่าที่สมมติว่าค่าผิดพลาดมาตรฐานของการพยากรณ์จากการใช้สมการเท่ากับ 14.9 และค่าที่พยากรณ์ไว้จากสมการนั้นเท่ากับ 166.6 ที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95% ค่าจริงของการพยากรณ์ควรที่จะอยู่ระหว่าง  $166.6 + 2(14.9)$  หรือระหว่าง 136.8 และ 196.4 ตามลำดับ

หากแต่มีข้อสังเกตคือ จำนวนข้อมูลที่ใช้มีอิทธิพลต่อช่วงหรือพิสัยของค่าพยากรณ์ที่ระดับความเชื่อมั่นต่าง ๆ ถ้าข้อมูลมีมาก ความกว้างของช่วงความเชื่อมั่นก็จะแคบลง สิ่งที่น่าระวังในการใช้สมการถดถอยคือ หากมีเหตุผลที่จะเชื่อว่าจะได้มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นแล้ว และการเปลี่ยนแปลงนั้นมีผลต่อสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแล้ว ควรได้มีการใช้ข้อมูลใหม่มาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์กัน)

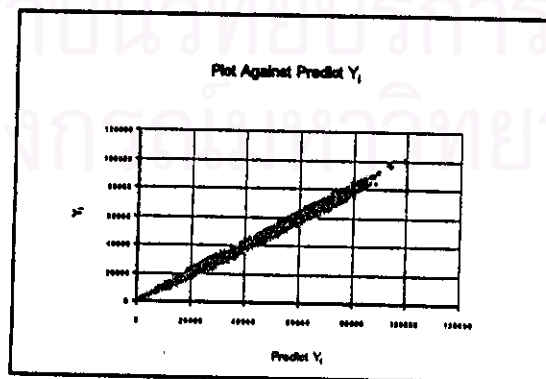
### 2.2.6 สมมติฐานในการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ

ในการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ มีสมมติฐานหลัก 4 ข้อ และข้อจำกัด 1 ข้อ หากต้องการที่จะใช้การวิเคราะห์ถดถอยอย่างถูกต้องสมบูรณ์ จะต้องระมัดระวังสิ่งเหล่านี้ (สุชาติ ประสิทธิ์รัฐสินธุ์, 2534)

#### □ ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง

สมมติฐานแรก คือ ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง (Linear Relationship) หมายความว่า ตัวแปรตามจะต้องมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับตัวแปรอิสระแต่ละตัว หากจะกล่าวในภาษาเทคนิค ก็มีความเป็นเส้นตรงในค่าสัมประสิทธิ์หรือไม่ Linearity in the Coefficients

หากพบว่าความสัมพันธ์นั้นไม่เป็นไปตามความสัมพันธ์เชิงเส้น การจะแก้ให้เห็นเป็นเส้นตรงนั้นก็ สามารถทำได้โดยการแปลงตัวแปรใหม่ที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับตัวแปรตามแล้ว Plot Against  $Y_i$  จะต้องเป็นเส้นตรงดังรูป

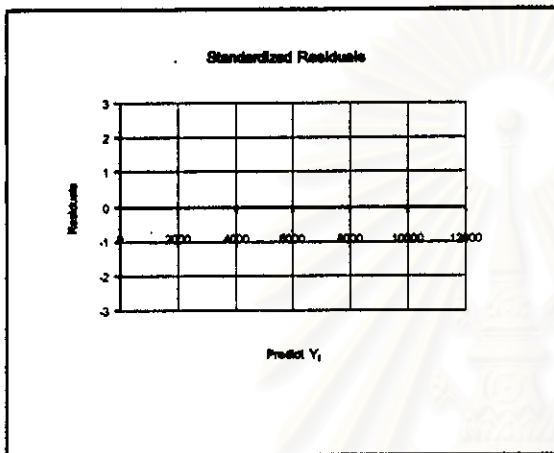


แผนภูมิที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง  
ที่มา : N.R. DRAPER, H. SMITH, 1996, pp. 90.

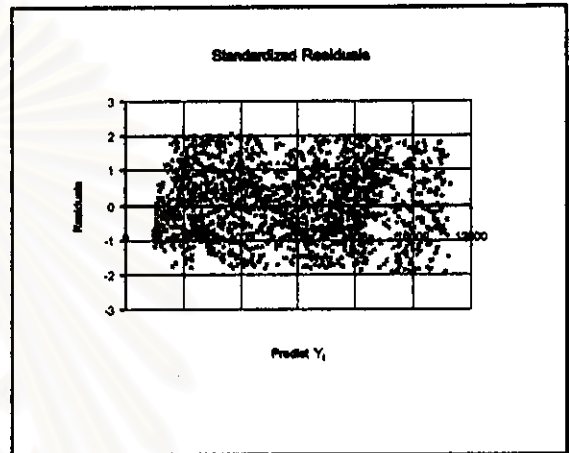


□ ความคงที่ของการผันแปรของค่าผิดพลาด

สมมติฐานข้อที่ 2 คือ ความคงที่ของการผันแปรของค่าผิดพลาดคงดอย ซึ่งเรียกว่า Homocedasticity การขาดความคงที่ของการผันแปรมีชื่อเรียกว่า Heterocedasticity สมมติฐานข้อนี้หมายความว่า การผันแปรมีค่าคงที่ตลอดช่วงของการสังเกตหรือข้อมูลทั้งหมด กล่าวคือ ค่าที่เหลือ (Residual) ของการถดถอยคงที่ตลอดทั้งตั้งแต่ต้นจนจบ ค่าที่เหลือ คือ ค่าความแตกต่างระหว่างค่าจริงและค่าการพยากรณ์ จากสมการ รูปเหล่านี้แสดงแบบแผนการคงที่ของการผันแปรดังข้างต้นที่ได้กล่าวไว้ในเรื่องของทวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน (N.R. DRAPER, H. SMITH, 1998)



(ก)



(ข)

แผนภูมิที่ 2.6 (ก,ข) แสดงแบบแผนคงที่ของการผันแปร

ถ้าค่าที่เหลือไม่คงที่ การทดสอบนัยสำคัญของสถิติก็จะไม่มีความหมาย การแก้ปัญหาสามารถทำได้โดยการเพิ่มตัวแปรหรือแปลงค่าตัวแปรบางตัวที่มีอยู่ในสมการ

□ ความเป็นเอกเทศของค่าส่วนที่เหลือ

สมมติฐานข้อที่ 3 ค่าส่วนที่เหลือจะต้องเป็นเอกเทศหรือเป็นอิสระต่อกันและกัน ซึ่งหมายความว่า ค่าที่เหลือแต่ละค่าเป็นอิสระจากค่าที่มาก่อนและมาหลัง ถ้ามีฉะนั้นจะเกิดปัญหาที่เรียกว่า ความสัมพันธ์แบบอนุกรม Serial Correlation หรือความสัมพันธ์อัตโนมัติ Autocorrelation ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่เหลือที่ติดต่อกัน วิธีการแสดงความสัมพันธ์ของส่วนที่เหลือนั้นมีหลายวิธี รวมทั้งการแสดงด้วยแผนภูมิ ศึกษาดูค่าบวกหรือค่าลบของส่วนที่เหลือและคำนวณค่าสถิติเดอร์บิน-วัตสันอยู่ระหว่าง 1.5 - 2.5 หมายความว่าไม่มีความสัมพันธ์อัตโนมัติระหว่างค่าที่เหลือ โดยทั่วไปจะดูได้จากการแสดงค่าที่เหลือบนกราฟ

เมื่อค่าที่เหลือไม่เป็นอิสระ หมายความว่า สมการขาดตัวแปรอิสระที่สำคัญ ๆ ไป หรือมีรูปแบบกิจกรรมไม่เป็นเชิงเส้นตรงในสมการถดถอย ดังนั้น แทนที่จะได้สมการที่อธิบายแบบแผนของข้อมูลที่ค่าส่วนที่เหลือเป็นค่าผิดพลาดสุ่ม ค่าส่วนที่เหลือกลับเป็นส่วนหนึ่งของแบบแผนเบื้องต้น ถ้าสามารถจับแบบแผนเบื้องต้นนี้ได้ด้วยสมการถดถอย ก็จะสมารถที่จะพยากรณ์ได้อย่างแม่นยำมากขึ้น

ในการขาดความสัมพันธ์อัตโนมัติ อาจทำได้โดยการเพิ่มตัวแปรอิสระเข้าไปอีก 1 ตัว หรือเปลี่ยนรูปแบบความสัมพันธ์ที่ใช้ เช่น จากเส้นตรงไม่เป็นเส้นตรง ถ้ายังไม่สามารถจัดได้อีกก็ให้ทำการหาผลต่างแรก เช่น ถ้าค่าของตัวแปรเป็น 6 9 7 5 และ 8 ค่าผลต่างแรกจะเป็น 3 -2 -2 3 ตามลำดับ ทำเช่นนี้กับทุกตัวแปร การหาค่าสัมประสิทธิ์ซึ่งทำได้โดยการใช้ค่าความแตกต่างนี้แทนค่าเดิมของตัวแปร (สุชาติ ประสิทธิ์รัฐสินธุ์, 2534)

#### การแจกแจงปกติของค่าที่เหลือ

สมมติฐานข้อที่ 4 คือ ค่าที่เหลือ Residual มีค่าการแจกแจงปกติ ฐูได้จากกราฟสร้างกราฟค่าที่เหลือ โดยทั่วไปค่าที่เหลือแสดงผลของตัวแปรอีกหลาย ๆ ตัวที่ไม่สำคัญนักต่อตัวแปรตาม จึงมักที่จะหักลบตัวลงไปได้ ถ้ามีตัวอย่างมากกว่า 30 ชุด ดังนั้นก็สามารถถือได้ว่าไม่มีการละเมิดสมมติฐานข้อนี้ แต่ถ้าต้องการให้ดีกว่านั้นก็ควรสร้างกราฟค่าที่เหลือแล้วดูว่าการแจกแจงเป็นรูปโค้งปกติหรือทรงระฆังคว่ำหรือไม่ ถ้ามีก็แสดงว่ามีการละเมิดการทดสอบ และค่าที่ระดับความเชื่อมั่นต่าง ๆ ที่ได้ก็ไม่ถูกต้อง (N.R. DRAPER, H. SMITH, 1996)

#### ข้อจำกัดของการประยุกต์การวิเคราะห์โดยสมการถดถอย

คือ ปัญหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ หรือ Multicollinerty ซึ่งตัวแปรอิสระ 2 ตัว หรือมีมากกว่านั้นมีความสัมพันธ์ภายในสูงมาก เกือบที่จะเป็นเมตริกซ์เดี่ยว Single Matrix ซึ่งมีผลเหมือนกันกับว่าพยายามหารเลขหนึ่งด้วยตัวเลขหนึ่งที่มีค่าเล็กมาก ๆ อีกตัวหนึ่ง นอกจากนั้นความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระด้วยกันยังมีผลต่อเสถียรภาพของค่าสัมพัทธ์อีกด้วย

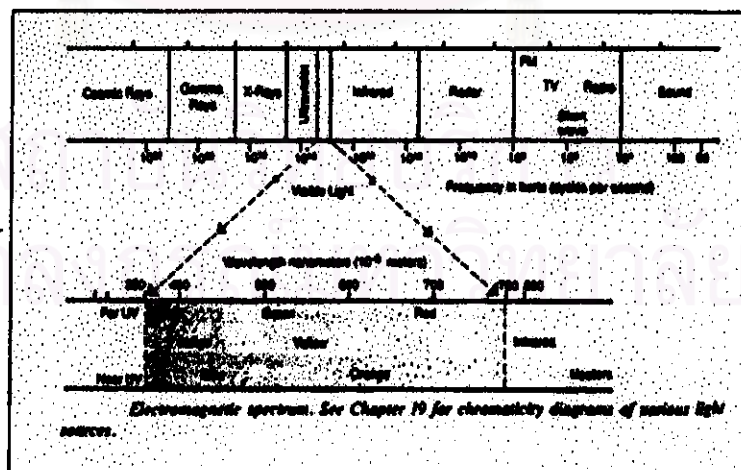
ทางแก้ไขปัญหา คือ ควรระมัดระวังในการเลือกตัวแปรอิสระ โดยพยายามหาอนุกรมข้อมูลที่มีตัวแปรอิสระที่ไม่มีความสัมพันธ์กันมาก เพื่อที่แต่ละตัวจะได้มีส่วนในการเพิ่มอำนาจการอธิบายสมการถดถอย หรือพยายามที่จะทำตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันมากให้เป็นตัวเดียวกัน (N.R. DRAPER, H. SMITH, 1996)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 2.3 ทฤษฎีเกี่ยวกับแสง

แสงเป็นพลังงานรูปแบบหนึ่งเช่นเดียวกับพลังงานชนิดอื่น ๆ เช่น พลังงานความร้อน พลังงานกล พลังงานไฟฟ้า ฯลฯ แสงเป็นพลังงานที่เคลื่อนที่ได้ การเคลื่อนที่ของแสงจะอยู่ในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งการเคลื่อนที่ในรูปของคลื่นนี้ จะมีความยาวคลื่นเฉพาะตัวที่แตกต่างกันออกไป กล่าวคือความถี่หรือความยาวคลื่นจะเป็นตัวกำหนดพลังงาน (Hopkinson, 1986) หากเราพิจารณา แสงในช่วงที่ตามองเห็น (Visible Light) ในคุณสมบัติของคลื่น แสงจะมีคุณสมบัติ ของความถี่ และความยาวคลื่นเฉพาะของตัวเอง แสงเป็นพลังงานที่มีช่วงความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง 0.38 ถึง 0.78 ไมครอน (micron) หรือ 380-760 นาโนเมตร (nanometers) โดยที่แสงในคลื่นความยาวดังกล่าวเมื่อกระทบกับเรตินาในดวงตา จะมีการกระตุ้น ของพลังงานกับประสาทตาปกติ ทำให้เกิดการเห็นภาพในดวงตา ) ประกอบไปด้วย spectrum ของสีหลายสีซึ่งเกิดจากความถี่ และความยาวคลื่นของการแผ่รังสีที่ต่างกัน ซึ่งพลังงานช่วงดังกล่าวนี้เท่านั้นที่จะช่วยให้เกิดการมองเห็นและแหล่งกำเนิดแสงธรรมชาติที่สำคัญที่สุดก็คือ ดวงอาทิตย์ เมื่อแสงจากดวงอาทิตย์ส่องผ่านอนุภาคของชั้นบรรยากาศของโลก จะเกิดการหักเหและสะท้อนก่อนที่จะส่องลงมายังผิวโลก และเมื่อกระทบกับพื้นผิวหรือวัตถุใดๆจะก่อให้เกิดลักษณะ 3 ประการคือ การดูดซึม (Absorption) การสะท้อน (Reflection) และการส่องผ่าน (Transmission) ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัตถุและพื้นผิวแต่ละชนิด

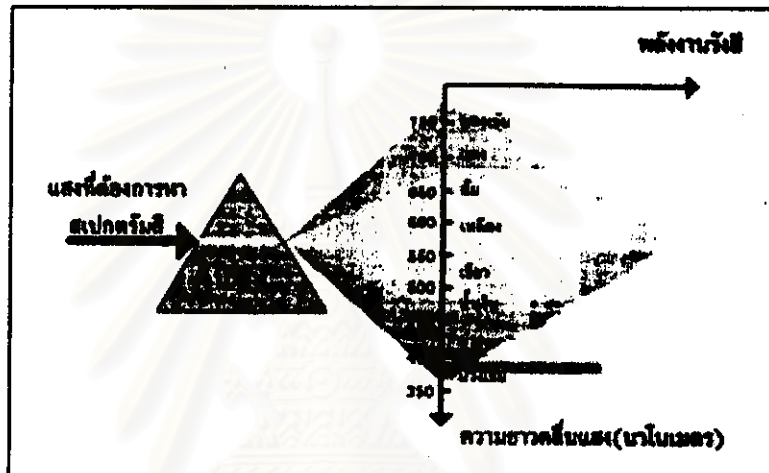
ดังนั้นหากพิจารณาในแง่แหล่งกำเนิดของแสงอาจพิจารณาได้เป็น 2 กรณี คือ แหล่งกำเนิดแสงทางตรง (Direct) และแหล่งกำเนิดแสงทางอ้อม (Indirect) แหล่งกำเนิดแสงทางตรง ได้แก่ แสงแดด หรือ Sunlight และ แสงซึ่งเกิดจากการส่องกระทบอนุภาคในชั้นบรรยากาศของโลกทำให้สะท้อน หักเห และให้แสงในลักษณะกระจายทั่วพื้นที่ หรือ Diffuse Skylight แหล่งกำเนิดแสงทางอ้อม ได้แก่ แสงที่เกิดจากการสะท้อนหรือการส่องผ่านวัตถุใดๆ และทำให้วัตถุนั้นๆเปรียบเสมือนแหล่งกำเนิดแสงอีกตัวหนึ่ง (Secondary source) ซึ่งก็อาจให้แสงในลักษณะที่แตกต่างกันขึ้นกับ คุณสมบัติในการสะท้อน หรือ การยอมให้แสงส่องผ่าน ตลอดจนลักษณะของพื้นผิวของวัตถุที่แสงตกกระทบว่าเป็นเช่นใด



รูปที่ 2.8 แสดงความถี่ และความยาวคลื่นของพลังงานต่าง ๆ

ที่มา : Mechanical and Electrical Equipment for Building ,1992,pp 122

คลื่นแสง (Visible Light) จะประกอบไปด้วยสเปกตรัม(spectrum) ของแสงที่ระดับความถี่ที่แตกต่างกัน และในแต่ละสเปกตรัมของแสงจะมีความแตกต่างกันของสี ซึ่งความเข้มแสงของแต่ละความยาวคลื่นที่แตกต่างกันออกไป จะหาได้จากการผ่านแสงในช่วงที่ต้องการทดสอบผ่านปริซึม เพื่อให้เกิดการหักเหของความยาวคลื่นต่างๆ ก็จะทราบว่าแสงที่กำลังพิจารณาอยู่นั้น ประกอบคลื่นความยาวแสงอะไรบ้าง และแต่ละความยาวคลื่นของแสงมีความเข้ม ที่แตกต่างกันอย่างไร ซึ่งแสงที่มีความยาวคลื่นน้อยจะหักเหมาก ส่วนแสงที่มีความยาวคลื่นมากจะมีการหักเหน้อย ประโยชน์ของสเปกตรัมสีของแสง จะเป็นตัวแสดงว่าแสงสีไหนมีมากกว่ากัน เช่น ถ้าแสงมีสีน้ำเงินมาก เมื่อส่องไปกระทบวัตถุที่มีสีน้ำเงินก็จะทำให้วัตถุสีน้ำเงินนั้นไม่เด่น แต่ถ้าวัตถุนั้นมีสีแดง และแสงที่ตกกระทบวัตถุเป็นสีแดงเข้ม วัตถุสีแดงก็จะเด่นขึ้นมาทันที เนื่องจากสีแดงมีความเข้มของแสงมาก ดังนั้นถ้าต้องการให้แสงที่ส่องถูกวัตถุทุกสีเด่นก็ต้องมีสเปกตรัม ของสีที่มีความเข้มมาก แสงอาทิตย์มีสเปกตรัมของสีทุกสีเข้มหมด เมื่อนำไปส่องวัตถุใดวัตถุหนึ่งก็จะเด่นหมด



รูปที่ 2.9 แสดงสเปกตรัมของคลื่นแสงในช่วงที่ตามองเห็น เกิดการหักเหไม่เท่ากัน ของความยาวคลื่นแสงที่แตกต่างกัน

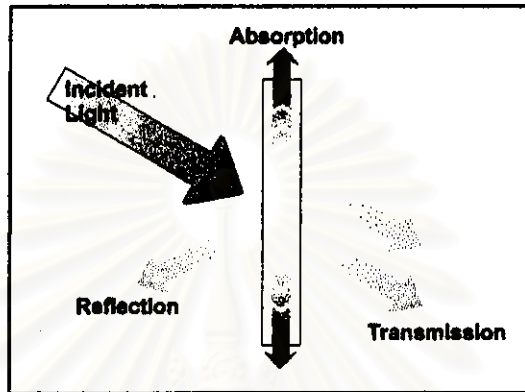
ที่มา : IES handbook , 1981,Ref. Volume, pp 1-7

แสงนอกจากจะมีช่วงของสเปกตรัมที่แตกต่างกันแล้ว แสงยังมีคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และมีการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาตลอดเวลา (Electromagnetic Radiation) เมื่อความยาวคลื่นที่แผ่ออกมามีความแตกต่างกัน ก็จะทำให้เห็นแสงสีที่แตกต่างกัน ที่สามารถมองเห็นได้ด้วยสายตามนุษย์ คาไมเซลล์ โคนสามแบบ ที่สามารถตอบสนองกับสีแดง เขียว และน้ำเงิน และความสัมพันธ์ของสีทั้งสามจะทำให้มองเห็นแสงสีต่างๆ ได้ การผสมของแสงสีต่างๆ จะมีความสำคัญมาก เพราะจะทำให้ทราบว่า การให้แสงสว่างที่เหมาะสมสำหรับสถานที่หรือวัตถุต่างๆ ที่มีสีต่างกัน ควรให้แสงสีแบบใด สีของแสงที่เกิดจากการผสมของสีทั้งสามคือ แดง เขียว น้ำเงินในอัตราส่วนที่เท่ากันจะได้แสงสีขาว ดังนั้นเมื่อเราทราบว่าแสงสีขาวเกิดจากการผสมกันของสีต่างๆ เมื่อนำไปส่องวัตถุสีอันเดียวกัน จึงให้ผลออกมาไม่เหมือนกัน แสงสีขาว ที่เกิดจากการผสมสี ระหว่างสีน้ำเงิน และเหลือง เมื่อนำไปส่องวัตถุ ที่มีสีเหลืองวัตถุนั้นก็เด่นขึ้นมา แต่ถ้านำไปส่องวัตถุสีแดง วัตถุนั้นก็จะไม่เด่น

แสงเมื่อผ่านแผ่นกรองแสง ซึ่งเป็นวัตถุโปร่งแสง หรือโปร่งแสงที่มีสี แผ่นกรองแสงจะยอมให้แสงที่มีสีเดียวกันกับแผ่นกรองแสง หรือสีประกอบของแผ่นกรองแสงผ่านไปได้ และจะดูดกลืนแสงสีอื่นเอาไว้หรือแสงเมื่อส่องกระทบวัตถุ จะสะท้อนแสงที่เป็นสีเดียวกัน หรือสีองค์ประกอบออกมา และดูดกลืนแสงสีอื่นเอาไว้ทำให้ไม่เห็นแสงสีอื่นเมื่อมองด้วยตาปกติ

## 2.4 พฤติกรรมของแสง

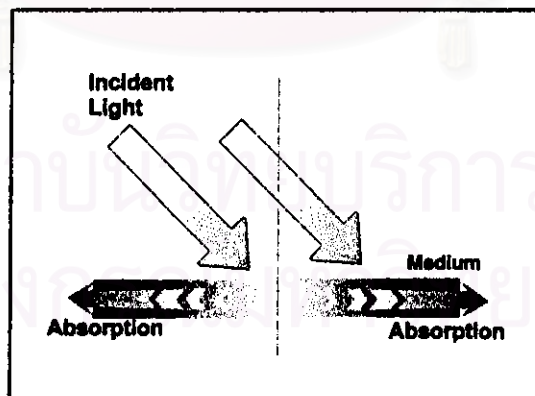
เมื่อแสงเคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิดแสง ผ่านตัวกลางต่างๆ (Medium) เช่น อากาศ น้ำ ของเหลว วัตถุโปร่งแสง วัตถุทึบแสง หรือละอองไอน้ำในชั้นบรรยากาศ ฯลฯ พฤติกรรมของแสง หรือแนวทางการเดินทางของแสงจะเปลี่ยนไป เมื่อกระทบกับตัวกลางเหล่านั้น พฤติกรรมของแสง เมื่อเดินทางผ่านตัวกลางใดๆ จะมีลักษณะที่สามารถจำแนกได้ 3 ลักษณะใหญ่ๆ คือ



รูปที่ 2.10 แสดงพฤติกรรมของแสงเมื่อกระทบกับวัตถุ

ที่มา : IES hand book , 1981,Ref. Volume, pp 2-21

2.4.1 การดูดกลืน (Absorption) เป็นปรากฏการณ์ที่แสง เมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง (Medium) จะถูกดูดกลืนหายไปในตัวกลาง ซึ่งปริมาณการถูกดูดกลืนเข้าไปในตัวกลาง จะขึ้นอยู่กับค่าการดูดกลืนแสงของตัวกลาง ที่แตกต่างกันไปในแต่ละวัสดุ โดยทั่วไปเมื่อแสงถูกดูดกลืนเข้าไปในตัวกลาง จะเกิดการเปลี่ยนรูปของพลังงาน จากในรูปของพลังงานแสง (Light) เป็นพลังงานความร้อน (Heat)

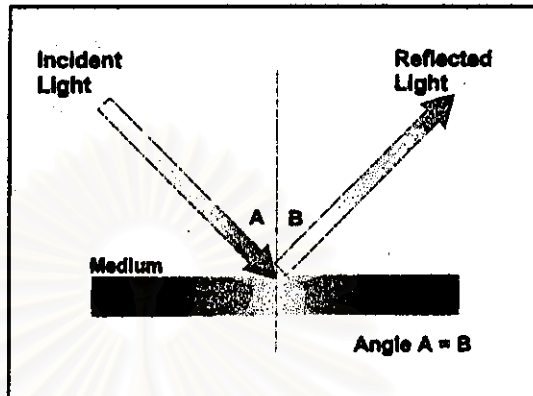


รูปที่ 2.11 แสดงการดูดกลืนของแสงเมื่อตกกระทบตัวกลาง

ที่มา : IES hand book , 1981,Ref. Volume, pp 2-21

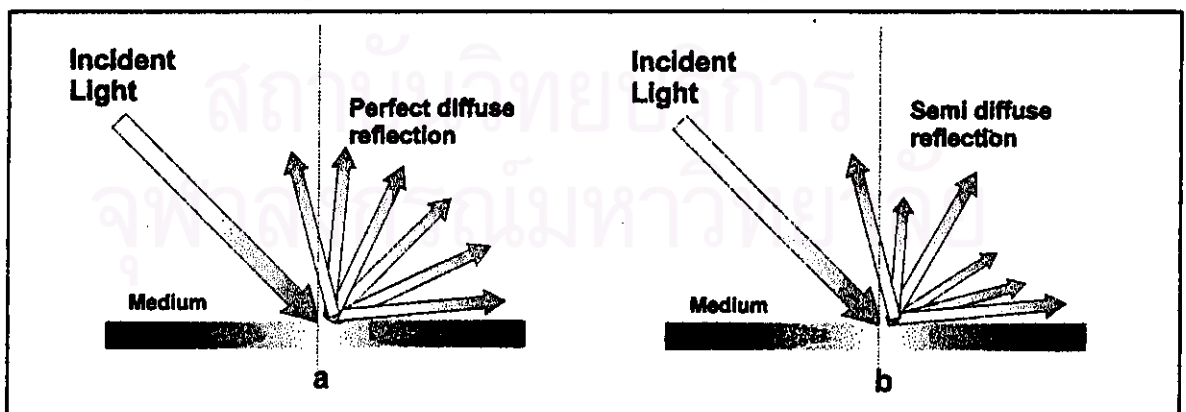
2.4.2 การสะท้อนของแสง (Reflection) เป็นพฤติกรรมที่แสงตกกระทบบนตัวกลาง แล้วเกิดการสะท้อนแสงออกมาโดยที่ความยาวคลื่น และความถี่ของคลื่นแสงไม่มีการเปลี่ยนแปลง การสะท้อนของแสงมีหลายลักษณะ และสามารถจำแนกออกได้เป็นแต่ละลักษณะดังนี้

การสะท้อนของแสงแบบกระจกเงา (Specula Reflection) เป็นลักษณะของแสงที่เกิดขึ้นเมื่อแสงตกกระทบบนตัวกลางที่เป็นวัสดุทึบแสง (Opaque material) ที่มีผิวเรียบมัน (Polish surface) อาทิ กระจกเงา หรือผิวโลหะที่ขัดมัน แสงจะมีการสะท้อน ในลักษณะของมุมตกกระทบบนของแสง (Angle of Incident) เท่ากับมุมสะท้อนของแสง (Angle of Reflection)



รูปที่ 2.12 แสดงการสะท้อนของแสงแบบ Specula Reflection  
ที่มา : IES hand book , 1981,Ref. Volume, pp 2-22

การสะท้อนของแสงแบบกระจาย (Diffuse Reflection) เป็นลักษณะที่เกิดขึ้น เมื่อแสงตกกระทบบนวัสดุหรือพื้นผิวที่ไม่เรียบ หรือผิวด้าน แสงที่สะท้อนออกมาจะกระจายไปในทุกทิศทาง มุมสะท้อนของแสงจะมีทิศทางที่ไม่แน่นอน และมุมตกกระทบบนของแสง จะไม่เท่ากับมุมสะท้อนของแสงออกมา หากผิววัสดุนั้นมีลักษณะพื้นผิวที่ไม่ราบเรียบ (Perfect Diffuse Surface) แสงสะท้อนที่สะท้อนออกมา จะเป็นแสงสะท้อนที่มีการกระจายแสง อย่างสมบูรณ์ (Perfect Diffuse Reflection) เป็นการสะท้อนแสงที่มีมุมสะท้อนเท่ากันทุกๆ มุมสะท้อน และมีค่าเฉลี่ยของแสงที่สะท้อนออกมาเท่ากัน แต่หากพื้นผิววัสดุไม่เรียบสม่ำเสมอ (Semi Diffuse Surface) แสงสะท้อนที่ได้ก็จะมีลักษณะ การสะท้อนแบบกระจัดกระจาย (Semi Diffuse Reflection)

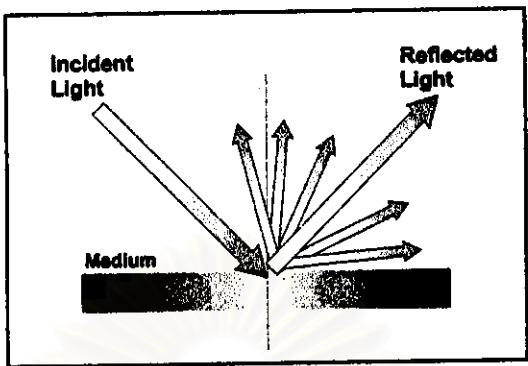


รูปที่ 2.13 แสดงการสะท้อนของแสงแบบกระจาย (Diffuse Reflection)

- (a) การสะท้อนแบบกระจกเงา Perfect diffuse reflection
- (b) การสะท้อนแบบกึ่งกระจาย Semi diffuse reflection

ที่มา : IES hand book , 1981,Ref. Volume, pp 2-27

การสะท้อนแสงแบบผสม (Combined Specular and Diffuse Reflection) เป็นลักษณะการสะท้อนแสงแบบผสม ที่เกิดจากการสะท้อนแสงแบบกระจกเงา (Specular) และแบบสะท้อนกระจาย (Diffuse Reflection) ซึ่งสภาพพื้นผิว โดยทั่วไปจะพบการสะท้อนแสงในลักษณะนี้มากที่สุด



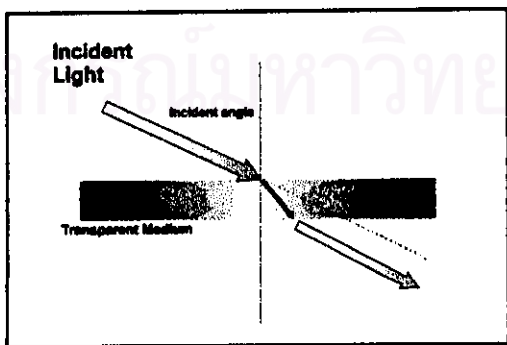
รูป 2.14 แสดงการสะท้อนของแสงแบบผสม ระหว่างการสะท้อนแบบกระจกเงา และแบบสะท้อนกระจาย  
ที่มา : IES hand book , 1981,Ref. Volume, pp 2-21

2.4.3 การส่องผ่าน (Transmission) เกิดขึ้นเมื่อกับด้านใดด้านหนึ่ง ของตัวกลาง (Medium) แล้วสามารถทะลุไปยังอีกด้านหนึ่งของตัวกลาง หากไม่พิจารณาคุณสมบัติของตัวกลาง ที่แสงส่องผ่านแล้ว จากคุณสมบัติของแสง มุมที่แสงตกกระทบตัวกลาง จะเท่ากับมุม ที่แสงสะท้อนออก และปริมาณของแสง จะคงเดิม อย่างไรก็ตามเมื่อแสงกระทบตัวกลางชนิดโปร่งแสง แสงส่วนหนึ่งจะถูกดูดกลืนเข้าไปในตัวกลาง อีกส่วนจะสะท้อนกลับ ส่วนที่เหลืออีกส่วนหนึ่งจะส่องทะลุผ่านออกมา สามารถอธิบายด้วยสมการ

$$\text{ปริมาณแสงทั้งหมด} = \text{ปริมาณแสงที่ถูกดูดซึม} + \text{ปริมาณแสงสะท้อน} + \text{ปริมาณแสงที่ส่องทะลุผ่าน}$$

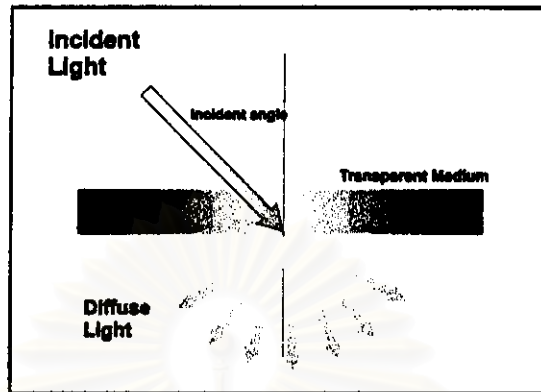
(Absorption)                      (Reflection)                      (Transmission)

เมื่อ ปริมาณแสงทั้งหมด = 1  
ชนิดของตัวกลางที่แสงส่องทะลุผ่านได้ แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ  
ตัวกลางชนิดโปร่งใส (Transparent Medium) การส่องผ่านในลักษณะนี้ จะมีการหักเห (Refracted) ของแสง เกิดขึ้น หรือมีการเปลี่ยนทิศทางของแสง (Bent) ขึ้นกับคุณสมบัติของตัวกลาง โดยสามารถมองเห็นแหล่งกำเนิดอีกด้านหนึ่งได้อย่างชัดเจน ตัวกลางประเภท นี้อาจีกระจกใส เป็นต้น



รูปที่ 2.15 แสดงแสงตกกระทบตัวกลาง เกิดการหักเหของแสงแล้วทะลุผ่าน  
ที่มา : IES hand book , 1981,Ref. Volume, pp 2-23

ตัวกลางชนิดโปร่งแสง (Translucent Method) การส่องผ่านของแสงในลักษณะนี้ จะเป็นแบบกระจาย และไม่สามารถมองเห็นแหล่งกำเนิดแสงในอีกด้านหนึ่งได้



รูปที่ 2.16 แสดงแสงทะลุผ่านตัวกลาง และทะลุผ่านแบบกระจาย  
ที่มา : IES hand book , 1981, Ref. Volume, pp 2-24

การส่องผ่านของแสงจะเกิดขึ้นเมื่อวัสดุที่แสงตกกระทบมีค่าดัชนี การหักเหของแสงมากกว่า สภาพโดยรอบของวัสดุนั้น เช่น กระจกมีค่าดัชนีการหักเห 1.520 ซึ่งมากกว่าอากาศโดยรอบที่มีค่าดัชนีการหักเหของแสง เท่ากับหนึ่ง ดังนั้นแสงจะส่องทะลุผ่านกระจกออกมาได้ แต่เมื่อแสงผ่านตัวกลางผิวเรียบจะเกิดการหักเห หรือสะท้อนกลับ การหักเหหรือสะท้อนกลับของแสงจะขึ้นอยู่กับมุมตกกระทบของแสง ถ้ามุมตกกระทบของแสงน้อย แสงก็จะผ่านจากตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่ง ถ้ามุมตกกระทบของแสง มีค่ามากเกินไป ค่าของมุมวิกฤต แสงจะไม่ผ่านตัวกลางและไม่สะท้อนกลับด้วย (ในกรณีนี้มุมตกกระทบเท่ากับมุมวิกฤต) และถ้ามุมตกกระทบมีค่ามากกว่ามุมวิกฤตแสงจะสะท้อนออกมา ความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบและมุมสะท้อนสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.24)$$

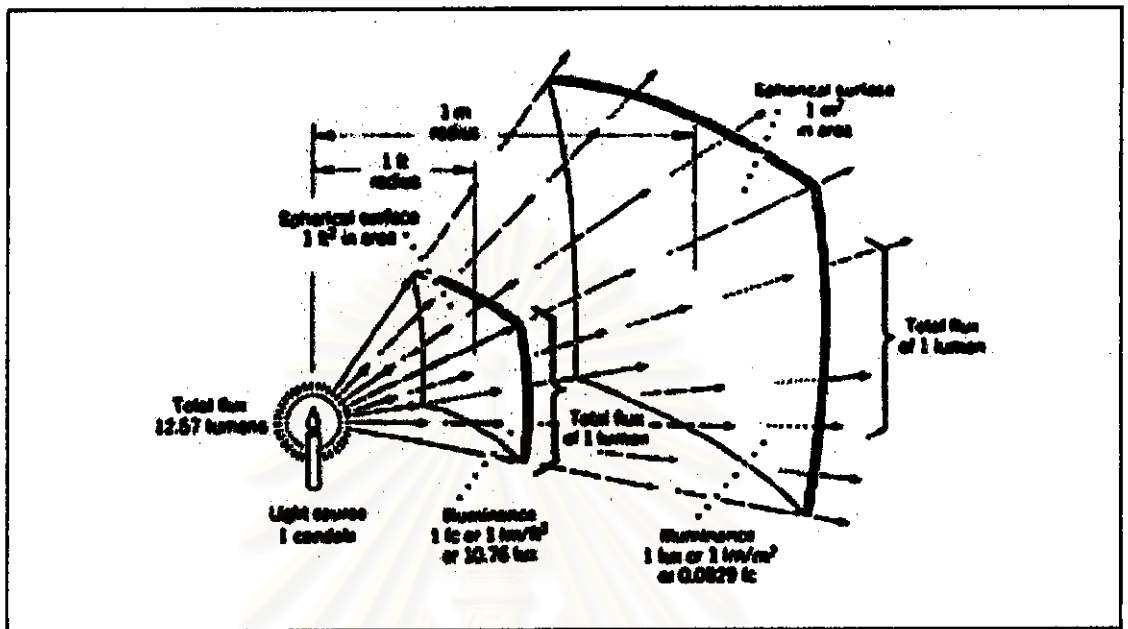
เมื่อ  $n_1, n_2$  = ดัชนีการหักเหของแสง ของวัสดุ 1 และ 2 ตามลำดับ  
 $\theta_1$  = มุมตกกระทบของแสง  
 $\theta_2$  = มุมสะท้อนของแสง

## 2.5 ทฤษฎีเกี่ยวกับการส่องสว่าง (Illuminance Theory)

แสงเมื่อส่องออกมาจากแหล่งกำเนิดแสง และตกกระทบกับวัตถุ หรือพื้นที่ใด ๆ เป็นผลให้แสงส่วนหนึ่งสะท้อนเข้าสู่ดวงตา จะทำให้เกิดการมองเห็นวัตถุนั้นที่แสงสะท้อนออกมา แต่ถ้าวัตถุนั้นไม่มีการสะท้อนของแสง ก็จะไม่สามารถมองเห็นวัตถุนั้นๆได้ ซึ่งปริมาณแสงที่ตกกระทบกับวัตถุ หรือตกกระทบพื้นที่นั้นๆ เรียกว่าการส่องสว่าง หรือความสว่าง (Illuminance) ของแสง



2.5.1 ปริมาณแสง (Luminous Flux) เป็นการบอกค่า พลังงานของแหล่งกำเนิดแสงใดๆ ในรูปของความเข้มของการส่องสว่าง หรือกำลังการส่องสว่างของแหล่งกำเนิดแสง(Power of Light Source)ในรูปของเส้นแรงปริมาณแสงที่เปล่งแสงออกมาจากแหล่งกำเนิดแสงนั้นๆ มีหน่วยเป็น ลูเมน (Lumen)



รูปที่ 2.17 แสดงปริมาณการส่องสว่าง (Luminous flux)

ที่มา : Mechanical and Electrical Equipment for Building ,1992, page 915

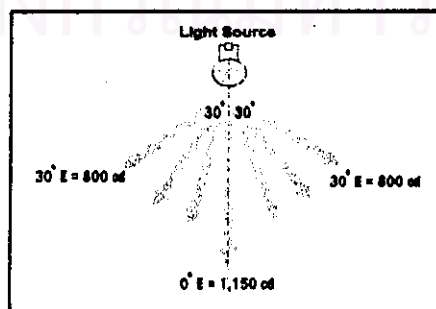
Solid angle ( $\omega$ ) เป็นการวัดพื้นที่ผิวของทรงกลม หนึ่งหน่วยที่สมมติเป็นทรงกรวย โดยมีส่วนแหลมสุดหรือโคนของกรวยที่จุดกำเนิดแสงหรือศูนย์กลางของวงกลมนั้น ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวส่วนที่พิจารณาของทรงกลมต่อรัศมีของทรงกลมนั้นๆ ยกกำลังสอง มีหน่วยเป็น สเตอเรเดียน (Steradian)

$$\text{Solid angle } (\omega) = A / R^2 \text{ steradian} \tag{2.25}$$

เมื่อ A = พื้นที่ผิวที่พิจารณาของทรงกลม

R = รัศมีของทรงกลม

แคนเดลา (Candela) ความเข้มของการส่องสว่าง 1 แคนเดลา มีค่าเท่ากับความเข้ม ของการส่องสว่างบนพื้นผิวอุทกคติ (Blackbody) ที่อุณหภูมิเยือกแข็งของแพลตินัม (Platinum) และจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามมุม ที่ทำกับแนวแกนของแหล่งกำเนิดแสง



รูปที่ 2.18 แสดงความเข้มของการส่องสว่าง เปลี่ยนแปลงไปตามมุมที่ทำกับแนวแกนของแหล่งกำเนิดแสง

2.5.2 ความส่องสว่าง (Illuminance) หมายถึง ความสว่างของปริมาณแสง 1 หน่วย ที่ตกกระทบบนพื้นที่ใดๆ มีหน่วยเป็น ลูเมนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (lumen per unit of area) หรือ ลูเมนต่อหนึ่งหน่วยตารางเมตร (หรือ ต่อ 1 ลักซ์) ซึ่งเป็นการพิจารณาแหล่งกำเนิดแสงภายในวงกลม เมื่อทรงกลมนั้นมีรัศมี 1 ฟุตหรือ 1 เมตร ปริมาณแสง 1 ลูเมน ที่พุ่งตกกระทบบนพื้นที่หนึ่งตารางฟุตของผิวทรงกลม ปริมาณความส่องสว่างที่ได้จะเท่ากับหนึ่งลูเมนต่อตารางฟุต (1 foot-candle) หรือ 1 ฟุตแคนเดิล (foot-candle) ในทำนองเดียวกัน หากทรงกลมนั้นมีขนาดรัศมีจะเท่ากับ 1 เมตร ปริมาณความส่องสว่างที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 1 ลูเมนต่อตารางเมตรหรือ 1 ลักซ์ ความส่องสว่างในหน่วยของลักซ์ (Lux) เมื่อเทียบกับในหน่วยของ ฟุตแคนเดิล (foot-candle)

$$1 \text{ Lux} = 10.76 \text{ footcandle (หรือประมาณ 10 ฟุตแคนเดิล)}$$

มาตรฐานความส่องสว่างสำหรับพื้นที่และการทำงานต่างๆกัน ตามมาตรฐาน CIE (International Commission on Illumination)

ความส่องสว่าง	ชนิดพื้นที่ใช้งาน
20 – 30 – 50	ทางเดิน และ พื้นที่ใช้งานภายนอก
50 – 100 – 150	ทางเดินภายใน และการแวะผ่านระยะเวลาสั้นๆ
100 – 150 – 200	ห้องที่ไม่ได้ใช้ทำงานแบบต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน
200 – 300 – 500	งานที่ใช้สายตาไม่มาก เช่นในโรงงาน ชิ้นงานขนาดใหญ่
300 – 500 – 750	งานที่ใช้สายตาปานกลาง เช่นงานสำนักงาน
500 – 750 – 1000	งานที่ใช้สายตามาก เช่นงานเขียนแบบ
750 – 1000 – 1500	งานที่ใช้สายตามากๆ เช่นห้องผ่าตัดของแพทย์
1000 – 1500 – 2000	งานที่ใช้สายตามากเป็นพิเศษ
มากกว่า 2000	งานที่ใช้สายตาเพื่อการทำงานมากเป็นพิเศษ

ตารางที่ 2.6 แสดงค่าความส่องสว่าง ในแต่ละพื้นที่ใช้งาน ตามมาตรฐาน CIE

ที่มา : เทคนิคการส่องสว่าง ,2535, page 1-6

มาตรฐาน CIE ได้กำหนดค่าความส่องสว่าง จากตาราง ออกเป็นสามค่า โดยค่ากลางเป็นค่าเฉลี่ย ส่วนอีกสองค่าใช้ในกรณีที่สภาพแวดล้อมมีความแตกต่างออกไป อาจจะมีค่ามากหรือน้อยกว่าขึ้นกับสภาพต่างๆดังนี้

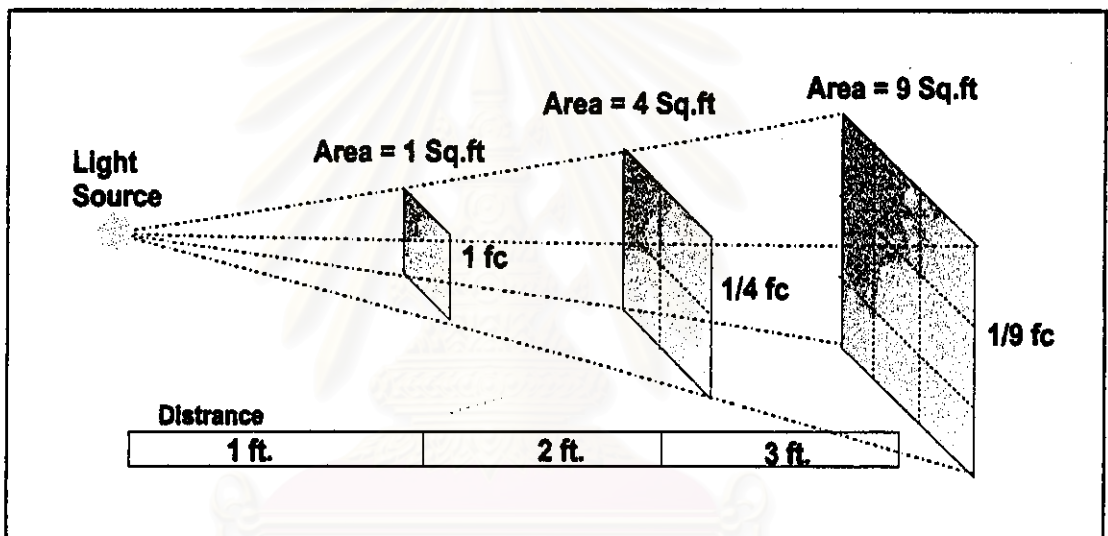
- ถ้าการสะท้อนแสงของผิวผนัง มีค่าคอนทราสต์ (Contrast) ต่ำกว่าปกติ ให้ใช้ความส่องสว่างมากขึ้น
- ถ้าเป็นงานที่ต้องการความละเอียดเพื่อให้งานมีความถูกต้องมากขึ้น อาจจะใช้ค่าความส่องสว่างที่มากขึ้น
- ถ้าการมองวัตถุใช้เวลาสั้นมาก ควรจะใช้ค่าความส่องสว่างที่สูงขึ้น
- ถ้าผู้ใช้งานเป็นผู้สูงอายุ หรือบุคคล ที่มีความผิดปกติทางสายตา ให้ใช้ความส่องสว่างมากขึ้น

2.5.3 การส่องสว่าง (Illumination) เป็นค่าการส่องสว่างของแสง บนพื้นที่ผิวใดๆ จะแปรผันโดยตรงกับความเข้มแห่งการส่องสว่างของแหล่งกำเนิดแสงและจะแปรผกผันกับระยะทางกำลังสอง ที่เกิดจากระยะทางระหว่างพื้นผิวนั้นกับแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งเรียกความสัมพันธ์นี้ว่า กฎกำลังสองผกผัน (Inverse Square Law) มีหน่วยเป็นลักซ์ (Lux) หรือ ฟุตแคนเดิล (foot-candle) มีสมการดังนี้

$$E = I/d^2$$

(2.26)

- เมื่อ E = ปริมาณการส่องสว่างบนพื้นที่ผิวที่พิจารณา มีหน่วยเป็น (Lux) หรือ ฟุตแคนเดิล (fc)  
 I = ความเข้มของการส่องสว่างของแหล่งกำเนิดแสง ในทิศทางที่พุ่งไปหาพื้นที่ผิวที่พิจารณา มีหน่วยเป็นแคนเดลา (cd)  
 d = เป็นระยะทางระหว่างพื้นที่ผิวที่พิจารณา กับแหล่งกำเนิดแสง มีหน่วยเป็น เมตร หรือฟุต



รูป 2.19 แสดงปริมาณการส่องสว่าง 1 cd ตามกฎกำลังสองผกผัน ที่ระยะทางต่างๆ จากแหล่งกำเนิดแสง  
 ที่มา : IES hand book , 1981, Ref. Volume, pp 2-17

ความเข้มของการส่องสว่าง (Luminous Intensity) คือปริมาณแสง ที่เปล่งออกจากแหล่งกำเนิดแสง ใน (Solid Angle) ใดๆ ในทิศทางหนึ่งๆ แหล่งกำเนิดแสงจะปล่อยฟลักซ์ความสว่าง (Luminous Flux) ออกมารอบทิศทาง เรียกว่า ความเข้มความส่องสว่าง (Luminous Intensity) มีหน่วยเป็นลูเมน (Lumen) ซึ่งจะแสดงถึงค่า พลังงานของแหล่งกำเนิดแสง ที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดแสงนั้นๆ หรือบางทีเรียกว่ากำลังการส่องสว่าง (Candle Power) มีหน่วยเป็น แคนเดลา (Candela) หรือลูเมนต่อสเตอเรเดียน (Lumen per steradian) ซึ่งจะใช้ในการพิจารณาแหล่งกำเนิดแสงที่มีความเล็กมาก เหมือนแหล่งกำเนิดแสงนั้นเป็นจุด (Point source)

หากพิจารณานำแหล่งกำเนิดแสงที่เป็นจุด และมีค่าความเข้มแห่งการส่องสว่างสม่ำเสมอทุกทิศทาง เท่ากับ 1 แคนเดลา มาวางไว้ที่จุดศูนย์กลางของทรงกลมรัศมี 1 หน่วย ปริมาณแสง ที่พุ่งไปตกลงบนทุกๆ หนึ่งตารางหน่วยพื้นที่บนพื้นผิวของทรงกลมนี้ จะมีค่าเท่ากับ 1 ลูเมน (lumen) และ เนื่องจากพื้นที่ผิวทั้งหมดของทรงกลมรัศมี 1 หน่วยมีค่าเท่ากับ 12.57 ตารางหน่วยพื้นที่ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าความเข้มแห่งการส่องสว่าง 1 แคนเดลา จะสามารถเปล่งปริมาณแสงของแสงออกมาได้ เท่ากับ 12.57 ลูเมน (Hopkinson, 1966)

## 2.6 คุณสมบัติอื่นๆ ของแสง

**2.6.1 ความจ้า (Brightness) หรือความสว่าง (Luminance)** เมื่อแสงส่องกระทบวัตถุใดๆ ส่วนหนึ่งจะถูกดูดกลืนอีกส่วนหนึ่งจะสะท้อนหรือส่องผ่านวัตถุเข้าสู่ตาของเราทำให้เกิดการเห็นวัตถุนั้นๆ หากแสงที่เข้าสู่ตามเรามีค่าความสว่างมาก จะเรียกว่าความจ้าของแสงสว่าง ประกอบด้วยสององค์ประกอบหลัก คือ ความสามารถในการสะท้อนหรือส่องผ่านของแสงผ่านวัตถุใดๆ ทำให้วัตถุนั้นเปรียบเสมือนแหล่งกำเนิดแสงและความสามารถในการปรับตัวของสายตา

ความจ้า จะเป็นปริมาณที่เกิดขึ้นระหว่างความเข้มของแสงที่เปล่งออกมาจากผิวของวัตถุต่อหน่วยพื้นที่ที่มีหน่วยเป็นฟุตแลมเบิร์ต (Foot-lambert) แสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$FL = F_c \times \rho \quad (2.27)$$

$$FL = F_c \times l \quad (2.28)$$

- เมื่อ
- FL = ปริมาณความจ้า มีหน่วยเป็น ฟุตแลมเบิร์ต
  - $F_c$  = ปริมาณการส่องสว่าง มีหน่วยเป็น ฟุตแคนเดิล
  - $\rho$  = ค่าการสะท้อนของแสงของวัตถุ มีหน่วยเป็นร้อยละ (%)
  - $l$  = ค่าการส่องผ่านของแสงผ่านวัตถุ มีหน่วยเป็นร้อยละ (%)

**2.6.2 ความเปรียบต่าง (Contrast)** คือค่าความส่องสว่างของวัตถุ หรือเหตุการณ์ที่ต้องการมอง เมื่อเทียบกับความสว่างของสภาพรอบข้าง ยิ่งมีความเปรียบต่างมาก การมองเห็นวัตถุนั้นก็จะง่ายขึ้นในขณะที่ความต้องการปริมาณแสงและเวลาในการรับภาพจะน้อยลง เช่น วัตถุสีขาวบนพื้นสีดำจะมองเห็นได้ง่ายกว่า วัตถุสีดำบนพื้นสีดำหรือสีเข้ม ซึ่งมีความเปรียบต่างน้อย อย่างไรก็ตามหากเหตุการณ์ที่เราพิจารณามีค่าความเปรียบต่างมากเกินไป เมื่อเทียบกับสภาพรอบข้าง ก็จะทำให้สายตาดำเนินการปรับตัวมากเกินไป และอาจเป็นผลร้ายกับสาย ตาได้ ซึ่งลักษณะการที่สายตาต้องปรับตัวอย่างรวดเร็ว เราจะเรียกความสว่างในลักษณะนี้ว่า แสงจ้า (Glare)

ความเปรียบต่างสามารถกำหนด เป็นอัตราส่วนของความแตกต่างระหว่างความสว่างของวัตถุ และของสภาพรอบข้างของวัตถุนั้นๆ เมื่อพิจารณาจากจุดสังเกต ได้ดังนี้

$$C = (L_2 - L_1) / L_1 \quad (2.29)$$

- เมื่อ
- C = ความเปรียบต่าง (Contrast)
  - $L_1$  = ค่าความสว่าง (Luminance) ของสภาพแวดล้อม
  - $L_2$  = ค่าความสว่างของวัตถุ

ค่าความเปรียบต่างยิ่งมาก การมองเห็นวัตถุนั้นก็จะง่ายขึ้น แต่หากค่าความเปรียบต่าง มีค่ามากเกินไป ก็จะเกิดเป็นแสงจ้า (Glare)



รูปที่ 2.20 แสดงความเปรียบต่าง (contrast) ความส่องสว่างของวัตถุเมื่อเทียบกับสภาพข้างเคียง ในการมองเห็นวัตถุ

ที่มา : เทคนิคการส่องสว่าง ,2535, page 1-11

## 2.7 ทฤษฎีเกี่ยวกับแสงธรรมชาติ

2.7.1 แหล่งกำเนิดแสงและการนำไปใช้งาน วันและฤดูกาลที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลานั้นจะมีความเกี่ยวข้องกับทิศทางและตำแหน่งต่างๆ ของดวงอาทิตย์ ซึ่งจะทำให้เกิดรูปแบบที่แน่นอนของทิศทางและปริมาณของแสงธรรมชาติที่เกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ และคงที่ แต่อย่างไรก็ตามนอกจากรูปแบบที่แน่นอนแล้ว ยังมีลักษณะของรูปแบบที่ไม่แน่นอน ของแสงธรรมชาติ ที่ไม่ได้เกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ และคงที่ด้วย ซึ่งจะเกิดจากสภาพภูมิอากาศ อุณหภูมิ และมลภาวะปริมาณ ของแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นโลก มากกว่าร้อยละ 40 จะเป็นคลื่นแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น (ความยาวคลื่นแสงที่ตามองไม่เห็น ได้แก่ แสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ต(Ultraviolet) ที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่าและอินฟราเรด(infrared) ที่มีความยาวคลื่นที่ยาวกว่า คลื่นแสง) เมื่อแสงธรรมชาติตกกระทบพื้นผิวต่างๆ ก็จะถูกดูดซับและแปรเปลี่ยนเป็น พลังงาน ความร้อนในทันที ซึ่งจะมากหรือน้อยตามความยาวและความถี่ของคลื่นแสงและสภาพบรรยากาศของโลกที่แสงส่องผ่าน เนื่องจากแสงจะเกิดการกระจายตัวและแปรเปลี่ยนเมื่อกระทบกับบรรยากาศในชั้นต่างๆ โดย Commission International de l'Eclairage (CIE) ได้มีการแบ่งลักษณะของแสงธรรมชาติ ออกเป็นประเภทต่างๆตามแหล่งกำเนิดแสง ได้ 3 ลักษณะ ดังนี้

### แสงธรรมชาติจากดวงอาทิตย์

การหมุนของโลก ความแกนโลกที่เอียงตามมุมต่างๆ นั้น จะมีความสำคัญต่อการเกิดของแสงธรรมชาติจากดวงอาทิตย์ เป็นอย่างมาก เนื่องจากจะทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของดวงอาทิตย์ ในตำแหน่งต่างๆ บนท้องฟ้า และเมื่อเทียบกับพื้นโลก เราจะสามารถอ้างอิงตำแหน่งของท้องฟ้าจากพื้นโลกจาก

1. มุมอะซิมูท (Solar Altitude),  $\alpha$ , เป็นมุมในแนวตั้ง ที่จะบอกมุมเงยของดวงอาทิตย์ เมื่อเทียบกับระดับพื้นราบ
2. มุมอะซิมูท (Solar Azimuth),  $\alpha$ , เป็นมุมในแนวนอน ที่จะบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์ เมื่อวัดจากแกนในแนวทิศใต้ เป็นทิศเริ่มต้น ที่ 0 องศา เรื่อยไปจนถึงทิศเหนือที่ 180 องศา และ -180 องศา

### แสงธรรมชาติจากท้องฟ้า

การส่องผ่านของแสงอาทิตย์ ผ่านบรรยากาศในชั้นต่างๆ จะเกิดการกระจายตัว ของแสงไปทั่วท้องฟ้า เมื่อกระทบกับฝุ่น ละอองไอน้ำ และสารแขวนลอยต่างๆ ในแต่ละชั้นบรรยากาศ การกระจายตัวของแสงในท้องฟ้า จะพิจารณาจากปริมาณของเมฆในท้องฟ้า ทำให้เกิดเป็นลักษณะต่างๆ ของท้องฟ้าได้ ดังนี้

1. ท้องฟ้าโปร่ง (Clear sky)
2. ท้องฟ้ามีเมฆปกคลุมบางส่วน (Partly and Cloudy sky)
3. ท้องฟ้ามีเมฆปกคลุมทึบ (Overcast sky)

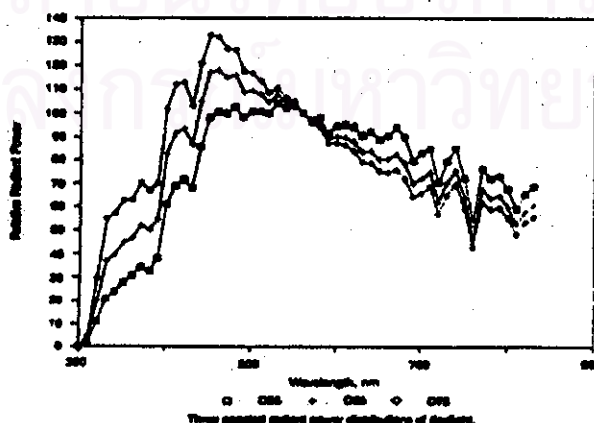
ซึ่งท้องฟ้าโปร่ง (Clear Sky) และท้องฟ้ามีเมฆปกคลุมบางส่วน (Partly and Cloudy Sky) จะมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแสงสว่างในท้องฟ้าอย่างรวดเร็ว

### แสงธรรมชาติจากพื้นดิน

การสะท้อนของแสงจากพื้นดินนับว่ามีความสำคัญ สำหรับการออกแบบอาคารด้วยแสงธรรมชาติ แสงที่เกิดจากการสะท้อนจากพื้นดินเข้าสู่ช่องเปิดของอาคารนั้น จะมีค่าเฉลี่ยประมาณร้อยละ 10-15 ของปริมาณแสงทั้งหมด ที่ผ่านช่องเปิดของอาคาร ซึ่งปริมาณแสงสะท้อนจากพื้นดิน เข้าสู่ช่องเปิดอาคาร จะมากหรือน้อยตามลักษณะของพื้นผิวที่สะท้อนแสง หากพื้นผิวเป็นทึบ หรือทราย หรือพื้นผิวที่มีสีชาหรือสีอ่อน ปริมาณของแสงที่ผ่านช่องเปิดเข้าสู่อาคารก็จะมากขึ้นกว่าค่าเฉลี่ยปกติ หากปริมาณแสงธรรมชาติที่ผ่านช่องเปิดเข้าสู่อาคาร มีมากเกินไปความจำเป็นต่อการใช้งานก็อาจจะควบคุมปริมาณแสงธรรมชาติ ที่ผ่านเข้าสู่อาคารด้วยอุปกรณ์บังแดดชนิดต่างๆ ตามความจำเป็น

**2.7.2 การนำแสงธรรมชาติไปใช้งาน** การคำนวณหาปริมาณแสงธรรมชาติ จากแหล่งกำเนิดแสงต่างๆนั้น จะมีความยุ่งยากในการคำนวณมากกว่าการคำนวณแสง ที่เกิดจากแสงจากการประดิษฐ์ การกำหนดปริมาณแสงธรรมชาติที่ตกกระทบช่องเปิด (Window and Skylight) จะต้องคำนึงถึงช่วงเวลาต่างๆ ของท้องฟ้า และ ดวงอาทิตย์ ในการคำนวณด้วย ซึ่งจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง ดวงอาทิตย์ และ แสงที่ผ่านช่องเปิดเข้าสู่ภายในอาคาร

ส่วนของการใช้งานแสงธรรมชาตินั้นจะกล่าวถึงปริมาณของแสงธรรมชาติ จากดวงอาทิตย์ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของ วัน เวลา และสภาพท้องฟ้า ในขณะนั้นๆ ซึ่งการศึกษาทางด้านแสงธรรมชาติ ได้มีการศึกษาและเก็บข้อมูลอย่างจริงจังมากกว่า 60 ปีแล้ว และข้อมูลที่ได้จากการศึกษา ก็สามารถนำมาพยากรณ์ และสร้างเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ต่างๆ เพื่ออธิบายถึงความสว่างจากแสงธรรมชาติได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 2.21 แสดงสเปกตรัมที่มาจากของรังสีดวงอาทิตย์ ที่มีความยาวคลื่นต่างกันสามลักษณะ

ที่มา : Daylighting , Daylight Sources and Availability

การนำแสงธรรมชาติไปใช้งาน จะต้องศึกษาถึงข้อมูลและองค์ประกอบต่างๆ ที่อธิบายในข้างต้น ซึ่งในการคำนวณนั้น จะไม่สามารถอธิบายลักษณะของปริมาณแสง และความเข้มของแสง ได้อย่างแม่นยำ แต่ค่าที่ได้จะเป็นค่ากลาง เนื่องจากเกณฑ์ในการคำนวณจะให้ผลของการคำนวณอย่างคร่าวๆ ซึ่งในความเป็นจริง ค่าความส่องสว่างที่วัดจริงในช่วงเวลานั้นๆ จะแตกต่างจากค่าที่คำนวณ ตามข้อกำหนดต่างๆ ของการนำแสงธรรมชาติไปใช้งาน อย่างไรก็ตามค่าที่เกิดขึ้นจริงในช่วงเวลาขณะนั้น จะมีค่าเฉลี่ยมากกว่าสองเท่า หรือน้อยกว่าครึ่งของค่าเฉลี่ยที่ใช้ในการออกแบบ

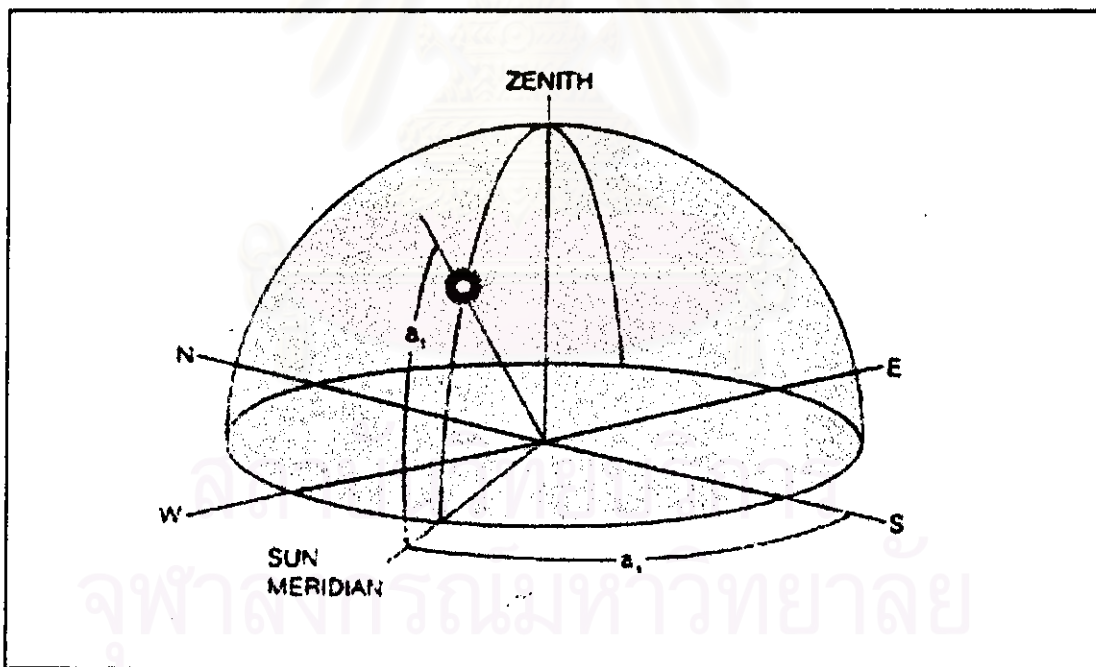
## 2.8 ทฤษฎีเกี่ยวกับดวงอาทิตย์

การคำนวณแสงธรรมชาติเพื่อนำไปใช้งานในแต่ละบริเวณนั้น จะเริ่มต้นจากการทิศทางตำแหน่งของดวงอาทิตย์ และองค์ประกอบอื่นๆ ดังนี้

- ที่ตั้งตามตำแหน่งเส้นรุ้งและเส้นแวง (Latitude and Longitude of the site)
- วันตามปีปฏิทิน (Day of the year , Julian date)
- เวลาท้องถิ่น (Local time)

โดยที่ เวลาท้องถิ่น (Local time) จะแปรเปลี่ยนมาจากเวลาที่แท้จริงของดวงอาทิตย์ (Solar time)

และมุมต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณ จะเป็นมุมเรเดียน (Radian) ที่อธิบายถึงตำแหน่งและทิศทางของดวงอาทิตย์



รูปที่ 2.22 แสดงตำแหน่งของดวงอาทิตย์ จากมุม อีลติจูด ( $a_1$ , altitude) และมุมอะซิมุท ( $a_2$ , azimuth)

ที่มา : Daylighting , Daylight Sources and Availability

2.8.1 ตำแหน่งของที่ตั้ง ตำแหน่ง และที่ตั้ง ของบริเวณที่จะศึกษานั้น จะถูกกำหนดขึ้นจาก เส้นรุ้ง (Longitude , l) และ เส้นแวง (Latitude , L) ที่มีอยู่ และ ตำแหน่งของเส้นรุ้งและเส้นแวงของจังหวัดที่สำคัญ ในประเทศจะแสดงได้ดังตารางด้านล่าง

โดยที่ เส้นแวง หรือ เส้นละติจูด (Latitude) จะกำหนดให้ด้านเหนือของทรงกลม (Hemisphere) จะเป็นบวก และด้านใต้ของทรงกลม (Hemisphere) จะเป็นลบ  
เส้นรุ้ง หรือเส้นลองจิจูด (Longitude) จะกำหนดให้ด้านตะวันตกของเส้นแบ่งเวลาเมอริเดียน (Meridian , Greenwich, U.K.) เป็นลบ และ ด้านตะวันออกของเส้นแบ่งเวลา (Latitude) เป็นบวก

เมือง / จังหวัด	ละติจูด (Latitude) องศา-ฟิลิปดา	ลองจิจูด (Longitude) องศา-ฟิลิปดา
<b>ภาคกลาง</b>		
กรุงเทพมหานคร	13° 44'	100° 30'
สุพรรณบุรี	14° 30'	100° 10'
นครสวรรค์	15° 48'	100° 10'
กาญจนบุรี	14° 01'	99° 32'
<b>ภาคเหนือ</b>		
เชียงใหม่	19° 55'	99° 50'
เชียงใหม่	18° 47'	98° 59'
เพชรบูรณ์	16° 25'	101° 08'
พิษณุโลก	16° 55'	100° 16'
<b>ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ</b>		
ขอนแก่น	16° 20'	102° 51'
อุบลราชธานี	15° 15'	104° 53'
สุรินทร์	14° 52'	103° 29'
นครราชสีมา	14° 58'	102° 07'
<b>ภาคตะวันออก</b>		
ชลบุรี	13° 22'	100° 59'
จันทบุรี	12° 37'	102° 27'
<b>ภาคใต้</b>		
ชุมพร	10° 27'	99° 15'
นครศรีธรรมราช	08° 25'	99° 58'
สงขลา	07° 11'	100° 37'
ภูเก็ต	07° 58'	98° 24'

ตารางที่ 2.7 แสดงที่ตั้งของจังหวัดต่าง ๆ ที่สำคัญ ในประเทศไทย

ในแต่ละภูมิภาค ตามแนวละติจูด และลองจิจูด

ที่มา : เอกสารฝ่ายวิจัยการก่อสร้าง (Building Research Department) , หน้า 47 - 48



2.8.2 การบอกเวลา ในปัจจุบันนี้การบอกเวลาจะแบ่งออกเป็น 24 ชั่วโมง ซึ่งเป็นการบอกเวลาแบบปกติตามแต่ละท้องถิ่น แต่การบอกเวลาตามดวงอาทิตย์ (Solar time) จะสามารถคำนวณได้จากเวลามาตรฐาน โดยเริ่มจากการกำหนดจากเส้นแวง (Longitude) ของเส้นแบ่งเวลาในช่วงต่างๆ และจากสมการของเส้นบอกเวลา (Equation of Time) โดยเวลาเทียบเท่า (Equation of time) จะมีความแตกต่างจากเวลาดวงอาทิตย์ (Solar Time) และเวลานาฬิกา (Clock Time) เนื่องจาก

- ตำแหน่งการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ (Elliptical orbit of the earth)
- ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ตามแนวแกนที่พิจารณา (Solar declination of the axis)

การบอกเวลาแบบ Equation of time จะอธิบายเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ ดังนี้

$$ET = 0.170 \sin (4\pi (J - 80) / 373) - 0.129 \sin (2\pi (J - 8) / 355) \quad (2.30)$$

เมื่อ ET = เวลาเทียบเท่า (Equation of time) ในหน่วยของเวลาแบบทศนิยม (เช่นเวลา 13.30 น. จะเป็น 13.5)

J = วันที่ ที่เริ่มนับจากวันแรกของเดือนของปี (Julian date) โดยไม่สนใจเดือนต่างๆ ซึ่งจะเริ่มตั้งแต่วันที่ 1 จนถึงวันที่ 365 ของปี

ตารางแสดงเวลามาตรฐานตามเส้นแบ่งเวลาเมอร์ริเดียน (Time Zone Standard Meridians)

Time Zone	Standard Meridian	
	Degrees	Radians
Atlantic	60	1.05
Eastern	75	1.31
Central	90	1.57
Mountain	105	1.83
Pacific	120	2.09
Yukon	135	2.36
Alaskan-Hawaiian	150	2.62
Bering	165	2.88

ตารางที่ 2.8 แสดงที่ตั้งของเส้นแบ่งเวลาที่สำคัญของโลก

ที่มา : Daylighting , Daylight Sources and Availability

ค่าที่ได้จากสมการข้างต้น จะเป็นค่าที่น้อยที่สุดของสมการกำลังสอง (Prof. Lamm, 1970) ซึ่งจะไม่มีความแม่นยำนักในการนำมาใช้ในการคำนวณที่เกี่ยวข้องกับแสงธรรมชาติ โดยเฉพาะในช่วงเวลาที่เกิดขึ้นจริงในขณะนั้นในแต่ละบริเวณจะอ้างถึง เส้นรุ้ง ที่พาดผ่าน เพื่อนำมาคำนวณเวลาของเวลาดวงอาทิตย์ (solar time) ความสัมพันธ์ระหว่างเวลามาตรฐาน (Standard time) และเวลาแสงอาทิตย์ (daylight time) จะสามารถกำหนดได้ดังนี้ คือ

$$t_s = t_s - 1 \quad (2.31)$$

เมื่อ  $t_s$  = เวลามาตรฐาน หน่วยทศนิยมของชั่วโมง (Standard time in decimal hours)  
 $t_d$  = เวลาแสงอาทิตย์ หน่วยทศนิยมของชั่วโมง (Daylight time in decimal hours)  
 เวลาดวงอาทิตย์ (Solar time) จะสามารถคำนวณได้จาก เวลามาตรฐาน (standard time) ได้ดังนี้

$$t = t_s + ET + (12 (SM - L)) / \pi \quad (2.32)$$

เมื่อ  $t$  = เวลาดวงอาทิตย์ หน่วยทศนิยมของชั่วโมง (Solar time in decimal hours)  
 $t_s$  = เวลามาตรฐาน หน่วยทศนิยมของชั่วโมง (Standard time in decimal hours)  
 ET = เวลาที่ใช้ในการคำนวณ หน่วยทศนิยมของชั่วโมง (Time in decimal hours)  
 SM = ระยะจากเส้นแบ่งเวลามาตรฐานอเมริกัน (standard meridian) หน่วยเรเดียน (rad)  
 L = ตำแหน่งตามเส้นแวง หน่วยเรเดียน (site longitude in rad)

### 2.8.3 ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ (Solar Position)

ตำแหน่งและทิศทางต่างๆ ของดวงอาทิตย์จะถูกกำหนดโดยมุมอัลติจูด และมุมอะซิมุทของดวงอาทิตย์ (Solar altitude and Solar azimuth) ซึ่งจากลักษณะของมุมทั้งสองอิงกับ เส้นแวง ณ บริเวณนั้น , เวลาดวงอาทิตย์ (Solar time) และแนวการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ (Solar declination) โดยแนวการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ (Solar declination) จะประมาณได้จากสมการ ข้างล่างนี้

$$\delta = 0.4093 \sin (2\pi (J - 81) / 368) \quad (2.33)$$

เมื่อ  $\delta$  = มุมคล้อยต่ำของดวงอาทิตย์ หน่วยเรเดียน (Solar declination in rad)  
 J = วันที่ ที่เริ่มนับจากวันแรกของเดือนของปี (Julian date) โดยไม่สนใจเดือนต่างๆ ซึ่งจะเริ่มตั้งแต่  
 วันที่ 1 จนถึงวันที่ 365 ของปี

สมการของมุมละติจูด อธิบายได้ดังนี้ คือ

$$a_s = \arcsin ( \sin l \sin \delta - \cos l \cos \delta \cos (\pi V / 12) ) \quad (2.34)$$

เมื่อ  $a_s$  = มุมอัลติจูดของดวงอาทิตย์ หน่วยเรเดียน (Solar altitude in rad)  
 l = ตำแหน่งละติจูด หน่วยเรเดียน (Site latitude in rad)  
 $\delta$  = มุมคล้อยต่ำของดวงอาทิตย์ (Solar declination in rad)  
 t = เวลาดวงอาทิตย์ หน่วยทศนิยมของชั่วโมง (Solar time in decimal hours)

มุมของ solar altitude จะมีค่าของมุมอยู่ในช่วงระหว่าง 0 ถึง  $\pi/2$  ถ้าทิศทางของดวงอาทิตย์อยู่ต่ำกว่าแนวระดับหรือเกินกว่า  $\pi/2$  จะให้ค่าเป็นลบ สมการของมุมอัลซิมุทดวงอาทิตย์ (Solar Azimuth) อธิบายได้ดังนี้ คือ

$$a_s = \arctan \left( \frac{-[\cos \delta \sin (\pi t / 12)]}{-[\cos l \sin + \sin l \cos \delta \cos (\pi t / 12)]} \right) \quad (2.35)$$

- เมื่อ  $a_s$  = ระดับมุมอัสซิมูทดวงอาทิตย์ หน่วยเรเดียน (Solar azimuth in radian)  
 $l$  = ตำแหน่งของมุมละติจูด หน่วยเรเดียน (Site latitude in radian)  
 $\delta$  = มุมคล้อยค่าของดวงอาทิตย์ (Solar declination in rad)  
 $t$  = เวลาดวงอาทิตย์ หน่วยทศนิยมของชั่วโมง (Solar time in decimal hours)

มุมอะซิมูท (Azimuth) จะเริ่มจากศูนย์องศา ในแนวของทิศใต้ และหมุนตามเข็มนาฬิกา เรื่อยไปจนถึงทิศเหนือ เป็นระยะทาง  $\pi$  และให้ทิศทางดังกล่าวเป็นบวก สำหรับทิศทางตรงข้าม เมื่อเริ่มจากศูนย์องศาในแนวทิศใต้หมุนทวนเข็มนาฬิกาขึ้นไปทางเหนือผ่านทิศตะวันออกเป็นระยะทาง  $\pi$  จะให้ทิศทางดังกล่าวเป็นลบ ในการคำนวณแสงธรรมชาติด้วยวิธีการต่าง ๆ นั้น จะต้องมีการคำนวณถึงแสงธรรมชาติบนพื้นผิวแนวตั้งเสมอ เช่น หน้าต่าง หรือผนังอาคาร ดังนั้นมุมอะซิมูท ที่เกิดขึ้นจะเป็นมุมในแนวนอน ระหว่างมุมที่อ้างอิง (ศูนย์องศาทางทิศใต้) กับมุมที่เกิดขึ้นจริงของผนังที่ตั้งฉากนั้นๆ

มุมอะซิมูท ของดวงอาทิตย์ เมื่อตกกระทบกับผนัง หรือช่องเปิดที่ไม่ได้อยู่ในแนวทิศใต้ จะพิจารณา มุม อะซิมูท ได้จากสมการดังนี้

$$a_2 = a_s - a_1 \quad (2.36)$$

- เมื่อ  $a_2$  = ระดับมุมอัสซิมูทของดวงอาทิตย์ หน่วยเรเดียน (Solar-elevation azimuth in rad)  
 $a_s$  = มุมอัสซิมูท หน่วยเรเดียน (Solar azimuth in rad)  
 $a_1$  = ความสูงมุมอัสซิมูท หน่วยเรเดียน (Elevation azimuth in rad)

มุมตกกระทบของแสงอาทิตย์ จะเป็นมุมที่เกิดขึ้น ระหว่าง แนวระนาบปกติ กับมุมตกกระทบ ของดวงอาทิตย์ คำนวณได้จากสูตร ดังนี้

$$a_i = \arccos (\cos a_1 / \cos a_2) \quad (2.37)$$

- เมื่อ  $a_i$  = ค่ามุมอาร์คโครัส ,  $\arccos(\cos a_1 / \cos a_2)$   
 $a_i$  = มุมตกกระทบ หน่วยเรเดียน (Incident angle in rad)  
 $a_1$  = มุมอัสซิมูทดวงอาทิตย์ (Solar altitude in rad)  
 $a_2$  = ระดับของมุมอัสซิมูทดวงอาทิตย์ หน่วยเรเดียน (Solar-Elevation azimuth in rad)

มุม Profile angle เป็นมุมที่เกิดขึ้นจริงของมุมอะซิมูท ในแนวตั้ง และพิจารณาได้จากสองสมการ ดังนี้

$$a_p = \arctan (\sin a_1 / \cos a_2) \quad (2.38)$$

$$a_p = \arctan (\tan a_1 / \cos a_2) \quad (2.39)$$

- เมื่อ  $a_p$  = มุมโพรไฟล์ หน่วยเรเดียน (Profile angle in rad)  
 $a_s$  = มุมตกกระทบ หน่วยเรเดียน (Solar altitude in rad)  
 $a_i$  = มุมอับติจุดดวงอาทิตย์ (Incident angle in rad)  
 $a_z$  = ระดับของมุมอับติจุดดวงอาทิตย์ หน่วยเรเดียน (Solar-Elevation azimuth in rad)

## 2.9 การแผ่รังสีของแสงจากดวงอาทิตย์

สำหรับจุดมุ่งหมายโดยทั่วไปในการคำนวณแสงธรรมชาติ จะพิจารณาให้ดวงอาทิตย์ เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ให้ความสว่างคงที่ ณ ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ตามวงโคจรของโลก ค่าความส่องสว่างคงที่ของดวงอาทิตย์ หมายถึงผลรวมของค่าความส่องสว่าง โดยปกติที่ตกกระทบลงบนพื้นผิวหนึ่งๆ บนโลกตามระยะทางระหว่างโลกและดวงอาทิตย์

$$E_{sc} = K_m \int_{380}^{770} G_\lambda V_\lambda d\lambda \quad (2.40)$$

- เมื่อ  $E_{sc}$  = ค่าคงที่ความส่องสว่างของดวงอาทิตย์ หน่วยเป็นกิโลลักซ์ (klx)  
 $K_m$  = spectral luminous ของ  $K_m$  รังสีจากดวงอาทิตย์ หน่วยเป็นลูเมนต่อวัตต์ (lm/W)  
 $G_\lambda$  = แกบความยาวคลื่น ของรังสีแสงอาทิตย์ หน่วยเป็นวัตต์ (W)  
 $V_\lambda$  = ประสิทธิภาพผลความสว่างในแต่ละช่วงความยาวคลื่น (Photopic Vision Spectral Luminous Efficiency at Wavelength)  
 $\lambda$  = ความยาวคลื่น หน่วยเป็น นาโนเมตร (สำหรับความยาวคลื่นแสงที่ 380-770 นาโนเมตร)

ค่าคงที่ต่างๆ ของปริมาณแสงสว่างและรังสีดวงอาทิตย์ ตามสมการข้างต้น

ค่าความส่องสว่างของดวงอาทิตย์ (Solar Illumination Constant)	: 128 klx
ค่ารังสีดวงอาทิตย์ (Solar Irradiation Constant)	: 1350 W/m <sup>2</sup> (126 W/ft <sup>2</sup> )
ประสิทธิภาพผลความสว่างดวงอาทิตย์ (Solar Luminous Efficacy)	: 94.2 lm/W

การพิจารณาปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ ที่ตกกระทบลงสู่พื้นผิวโลก จะพิจารณาจากหลักเกณฑ์ ดังนี้

- ระยะทางที่แตกต่างระหว่างดวงอาทิตย์ และพื้นผิวโลก ที่เกิดจากวงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์
- ผลกระทบของแสงธรรมชาติ จากการส่องผ่านบรรยากาศของโลกในชั้นต่างๆ

ค่าความส่องสว่างของ แสงอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก (Extraterrestrial solar illuminance) จะมีความสัมพันธ์กับวงโคจร ของโลกรอบดวงอาทิตย์ ดังนี้

$$E_{xt} = E_{sc} ( 1 + 0.034 \cos ( 2\pi ( J - 2 ) / 365 ) ) \quad (2.41)$$

- เมื่อ  $E_x$  = ค่าความส่องสว่างของแสงอาทิตย์นอกบรรยากาศของโลก หน่วยเป็น กิโลลักซ์ (klx)  
 $E_{\infty}$  = ค่าคงที่ของแสงจากดวงอาทิตย์ หน่วยเป็นกิโลลักซ์ (klx)  
 $J$  = วันตามวงโคจรของโลก (Julian date)

เมื่อปริมาณแสงสว่างจากดวงอาทิตย์ ส่องผ่านบรรยากาศของโลกในชั้นต่างๆ จะมีผลทำให้ปริมาณแสงจากดวงอาทิตย์ มีค่าความสว่างน้อยลง ซึ่งความสว่างของดวงอาทิตย์ ณ ระดับน้ำทะเล ( $E_{dn}$ ) จะมีความสัมพันธ์กับความสว่างของแสงอาทิตย์ในระบบสุริยะ ดังนี้

$$E_{dn} = E_x e^{-cm} \quad (2.42)$$

- เมื่อ  $E_{dn}$  = ค่าความส่องสว่างของแสงจากดวงอาทิตย์ ที่ระดับน้ำทะเล หน่วยเป็น klx  
 $E_x$  = ค่าความส่องสว่างของแสงธรรมชาติในระบบสุริยะ หน่วยเป็น klx  
 $C$  = สัมประสิทธิ์ของท้องฟ้าในแต่ละประเภท  
 $m$  = ค่ามวลอากาศ (Optical air mass , Dimensionless)

ค่าคงที่ปริมาณแสงอาทิตย์ เพื่อใช้ในการคำนวณ

ลักษณะของท้องฟ้า	c	A (klx)	B (klx)	C
Clear sky	0.21	0.8	15.5	0.5
Partly Cloudy sky	0.80	0.3	45.0	1.0
Cloudy	*	0.3	21.0	1.0
No direct sun ; $E_{dn} = 0$				

ตารางที่ 2.9 แสดงค่าคงที่ของปริมาณแสงอาทิตย์

ค่าของ optical air mass ที่ใช้ในการคำนวณ เท่ากับ

$$m = 1 / \sin a_s \quad (2.43)$$

- เมื่อ  $m$  = ค่ามวลอากาศ (Optical air mass , Dimensionless)  
 $a_s$  = มุมยลติจุดดวงอาทิตย์ (Solar altitude in rad)

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความสว่างแสงอาทิตย์ ที่ระดับน้ำทะเล และความสว่างของแสงอาทิตย์ในแนวราบ (direct horizontal solar illuminance) จะมีความสัมพันธ์ ตามสมการดังนี้

$$E_{dh} = E_{dn} \sin a_1 \quad (2.44)$$

- เมื่อ  $E_{dh}$  = ค่าความสว่างของแสงอาทิตย์ในแนวราบ (Direct horizontal solar illumination) หน่วยกิโวลต์  
 $E_{dn}$  = ค่าความสว่างของแสงอาทิตย์ที่ระดับน้ำทะเล (Direct normal solar illuminance) หน่วยกิโวลต์  
 $a_1$  = มุมอับติจุด ของดวงอาทิตย์ หน่วยเป็นเรเดียน (rad)

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความสว่างแสงอาทิตย์ ที่ระดับน้ำทะเล และความสว่างของแสงอาทิตย์ ในแนวตั้ง (Direct vertical solar illumination) จะมีความสัมพันธ์ ตามสมการดังนี้

$$E_{dv} = E_{dn} \cos a_1 \quad (2.45)$$

- เมื่อ  $E_{dv}$  = ค่าความสว่างของแสงอาทิตย์ในแนวตั้ง (Direct vertical solar illuminance) หน่วยกิโวลต์  
 $E_{dn}$  = ค่าความสว่างของแสงอาทิตย์ที่ระดับน้ำทะเล (direct normal solar illuminance) หน่วยกิโวลต์  
 $a_1$  = มุมตกกระทบของแสงจากดวงอาทิตย์ หน่วยเป็นเรเดียน (rad)

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 2.10 การแผ่รังสีของแสงจากท้องฟ้า

วิธีการจำแนกประเภทของท้องฟ้า จะจำแนกออกตามวิธีการ ได้สองวิธีการคือ

1. การจำแนกท้องฟ้าด้วยวิธีอัตราส่วนของท้องฟ้า (The sky ratio method) เป็นการแบ่งประเภทของท้องฟ้า ด้วยอัตราส่วนระหว่าง ปริมาณรังสีตกกระทบของท้องฟ้าบนพื้นราบ (Horizontal sky irradiance) ต่อปริมาณรังสีตกกระทบบนพื้นราบทั้งหมด (Global Horizontal Irradiance) ดังนั้นหากสัดส่วนของการจำแนกท้องฟ้าเท่ากับ 1.0 แสดงว่า มุมอัลติจูดของดวงอาทิตย์จะเท่ากับศูนย์ แต่การแบ่งประเภทของท้องฟ้า ด้วยวิธีการนี้ จะมีความคลาดเคลื่อน ถ้ามุมอัลติจูดของดวงอาทิตย์ มีค่าต่ำมากๆ

การจำแนกประเภทของท้องฟ้าด้วยวิธี sky ratio method จะแบ่งประเภทของท้องฟ้าออกตามอัตราส่วนต่างๆได้ 3 ลักษณะคือ (Illuminating Engineering Society of North America, NY.)

ท้องฟ้าโปร่ง (Clear) : Sky ratio  $\leq$  0.3

ท้องฟ้ามีเมฆปกคลุมบางส่วน (Partly Cloudy) :  $0.3 <$  sky ratio  $<$  0.8

ท้องฟ้ามีเมฆปกคลุมทึบ (Cloudy) : Sky ratio  $\geq$  0.8

2. การจำแนกท้องฟ้าด้วยองค์ประกอบที่ปกคลุมท้องฟ้า (The sky cover method) เป็นวิธีการจำแนกประเภทของท้องฟ้า โดยการประมาณปริมาณก้อนเมฆ ที่ปกคลุมท้องฟ้า มีมาตราส่วนในการวัดตั้งแต่ 0 ถึง 10 (0 หมายถึง ท้องฟ้าปราศจากเมฆปกคลุม , 10 หมายถึง ท้องฟ้ามีปริมาณเมฆปกคลุมมาก) และจำแนกลักษณะของท้องฟ้าออกเป็นลักษณะตามปริมาณของก้อนเมฆ ได้ดังนี้

ท้องฟ้าโปร่ง (Clear) : 0 - 3

ท้องฟ้ามีเมฆปกคลุมบางส่วน (Partly Cloudy) : 4 - 7

ท้องฟ้ามีเมฆปกคลุมทึบ (Cloudy) : 8 - 10

ค่าความสว่างในแนวราบของท้องฟ้า และ มุมอัลติจูดของดวงอาทิตย์ จะแสดงความสัมพันธ์ ที่มีความเกี่ยวเนื่องกัน ในรูปแบบของสมการ ได้ดังนี้

$$E_{\text{hor}} = A + B \sin^c a_s \quad (2.46)$$

เมื่อ  $E_{\text{hor}}$  = ค่าความส่องสว่างในแนวราบของท้องฟ้า ที่ปราศตาสีถึงปกคลุม หน่วยเป็นกิโวลต์ (ktx)

$A$  = ค่าความส่องสว่างของดวงอาทิตย์ ขณะดวงอาทิตย์ขึ้น และดวงอาทิตย์ตก หน่วยกิโวลต์ (ktx)

$B$  = ค่าสัมประสิทธิ์ความส่องสว่างของดวงอาทิตย์ ตามมุมละติจูด หน่วยเป็นกิโวลต์ (ktx)

$C$  = ค่าเอกซ์โปเนนท์เชิงลบ ความส่องสว่างของดวงอาทิตย์ ตามมุมละติจูด หน่วยเป็นกิโวลต์ (ktx)

$a_s$  = มุมอัลติจูด ของดวงอาทิตย์ หน่วยเป็นเรเดียน (rad)

โดยรูปแบบของสมการในข้างต้นจะใช้ได้กับลักษณะของท้องฟ้าทั้งสามประเภท แต่จะมีความแตกต่างกันบ้าง ตามตัวแปรคงที่บางตัวที่จะเปลี่ยนแปลง ตามลักษณะของท้องฟ้า ซึ่งจะช่วยให้สมการ และค่าความส่องสว่าง ที่ได้มีความแตกต่างกัน ซึ่งจะมีข้อพิจารณา ดังนี้

- ค่าความส่องสว่างของแสงจะมีความกระจายมากหรือน้อย ตามค่าความส่องสว่างที่มุมเซนิท (Zenith Illuminance) ของห้องฟ้า
- ค่าความส่องสว่างของห้องฟ้าที่มุมเซนิท

วิธีการ ที่ใช้ในการคำนวณ ค่าความสว่างที่เซนิท จากความสว่างของห้องฟ้าในแนวราบ จะขึ้นกับค่าความสว่างของห้องฟ้าห้องฟ้าที่มุมเซนิท ตามสมการ

$$L_z = E_{zh} ZL$$

(2.47)

- เมื่อ  $L_z$  = ค่าความสว่างที่เซนิท หน่วยเป็นกิโลแคนเดลาต่อตารางเมตร ( $\text{kcd} / \text{m}^2$ )  
 $E_{zh}$  = ค่าความสว่างในแนวราบ ที่ปราศจากสิ่งกีดขวาง จากสมการ  $E_{zh} = A + B \sin^c \alpha$   
 $ZL$  = ค่าความสว่างที่เซนิท (Zenith illuminance factor) ในตำแหน่งที่ละติจูดเดียวกับ  $E_{zh}$  หน่วยเป็นกิโลแคนเดลาต่อตารางเมตร ( $\text{kcd} / \text{m}^2$ )

ค่าความสว่างของห้องฟ้าที่เซนิทที่เกิดขึ้น จะขึ้นกับลักษณะของชั้นบรรยากาศ และ แสดงรายละเอียดต่างๆของค่าความสว่างที่เซนิท ได้จากตารางต่อไปนี้

Solar Altitude (Degree)	Clear sky ZL	Partly Cloudy sky ZL
90	1.034	0.637
85	0.825	0.567
80	0.664	0.501
75	0.541	0.457
70	0.445	0.413
65	0.371	0.375
60	0.314	0.343
55	0.269	0.315
50	0.234	0.292
45	0.206	0.272
40	0.185	0.255
35	0.169	0.241
30	0.156	0.230
25	0.148	0.221
20	0.142	0.214
15	0.139	0.209
10	0.139	0.205
5	0.140	0.202
0	0.144	0.201

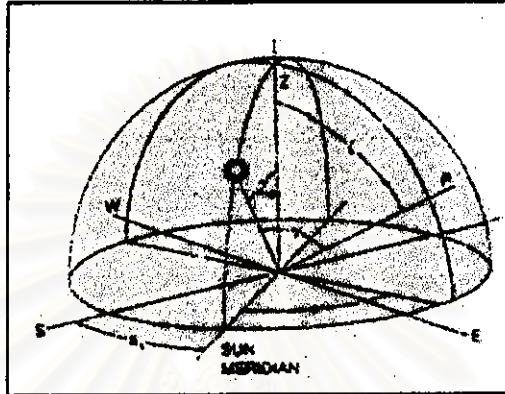
ตารางที่ 2.10 แสดงค่าคงที่ของความส่องสว่างของห้องฟ้าที่เซนิท (Sky zenith illuminance) สำหรับห้องฟ้าในลักษณะ Overcast sky , ZL = 0.409 ในแต่ละมุมอัลติจูดของดวงอาทิตย์  
ที่มา : Daylighting , Daylight Sources and Availability



ความสัมพันธ์ของมุมต่างๆ ที่ใช้ในการกำหนดค่าความสว่างของท้องฟ้าจะแสดงได้ดังรูปด้านล่างนี้ ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ตามมุมอะซิมุทของดวงอาทิตย์จะมีความสัมพันธ์กับมุมเซนิท ที่ศูนย์องศาและมุมเซนิท ที่ศูนย์องศาจะหาได้จากสูตร

$$Z_0 = \pi/2 - \alpha \quad (2.48)$$

ตำแหน่งที่จุด P จากรูป จะแสดงตำแหน่งของท้องฟ้า ที่ต้องการคำนวณความสว่าง ซึ่งจะประกอบด้วย มุม  $\zeta$  ของเซนิท (หน่วยเป็น rad) และ มุม  $\alpha$  เป็นมุมอะซิมุทจากดวงอาทิตย์



รูปที่ 2.23 แสดงค่าของมุมต่างๆ มีใช้ในสมการ  
ที่มา : Daylighting , Daylight Sources and Availability

ค่าความสว่างของท้องฟ้าโปร่ง (Clear sky) ของท้องฟ้ามาตรฐาน (CIE)

$$L_{\zeta, \alpha} = \frac{L_z (0.91 + 10e^{-0.5\gamma} + 0.45\cos^2\gamma) (1 - e^{-0.32\cos\zeta})}{(0.91 + 10e^{-0.5Z_0} + 0.45\cos^2Z_0) (1 - e^{-0.32})} \quad (2.49)$$

เมื่อ  $L_{\zeta, \alpha}$  = ความสว่างของท้องฟ้า ที่ตำแหน่ง P ของท้องฟ้าครึ่งวงกลมที่เกิดจาก คอर्डิเนต (coordination) ระหว่าง  $\zeta$  และ  $\alpha$  หน่วยเป็นกิโลแคนเดลาต่อตารางเมตร ( $\text{kcd/m}^2$ )

$L_z$  = ความสว่างของท้องฟ้าที่เซนิท หน่วยกิโลแคนเดลาต่อตารางเมตร ( $\text{kcd/m}^2$ )

$\gamma$  = มุมระหว่างดวงอาทิตย์ และตำแหน่ง P บนท้องฟ้า หน่วยเป็นเรเดียน (rad)

$\zeta$  = มุมเซนิท หน่วยเป็นเรเดียน (rad)

$\alpha$  = มุมอะซิมุท จากดวงอาทิตย์ หน่วยเป็นเรเดียน (rad)

$Z_0$  = มุมเซนิทของดวงอาทิตย์ (Zenithal sun) หน่วยเป็นเรเดียน (rad)

ความสัมพันธ์ของมุม  $\gamma$  จะกำหนดขึ้นจากตำแหน่งของดวงอาทิตย์ และตำแหน่งของจุด P บนท้องฟ้า

$$\gamma = \arccos (\cos Z_0 \cos \zeta + \sin Z_0 \sin \zeta \cos \alpha) \quad (2.50)$$

สมการสำหรับท้องฟ้าแบบมีเมฆปกคลุมบางส่วน (Partly Cloudy Sky) จะมีความคล้ายคลึงกับสมการความสว่างของท้องฟ้าโปร่ง แต่จะแตกต่างกัน เฉพาะค่าคงที่บางตัว ของท้องฟ้ามีเมฆปกคลุมบางส่วน

$$L_{\zeta, \alpha} = \frac{L_z (0.526 + 5e^{-1.5\gamma}) (1 - e^{-0.80\cos\zeta})}{(0.526 + 5e^{-1.5Z_0}) + (1 - e^{-0.80})} \quad (2.51)$$

สมการสำหรับท้องฟ้ามีเมฆปกคลุมทึบ (Overcast sky)

$$L_{\zeta, \alpha} = L_z \left( \frac{0.864 e^{-0.62/\cos \zeta}}{e^{-0.62}} + \frac{0.136 (1 - e^{-0.62/\cos \zeta})}{1 - e^{-0.62}} \right) \quad (2.52)$$

จากรูปแบบของสมการของท้องฟ้ามีเมฆปกคลุมทึบ (Overcast sky) จะมีการแบ่งสมการออกเป็นสองส่วน โดยใน ส่วนแรก จะเป็นความสว่าง ที่กระจายตัวจากก้อนเมฆ และส่วนที่สองจะเป็นความสว่างของแสง ในชั้นบรรยากาศ ระหว่างชั้นล่างสุดของเมฆและพื้นดิน ซึ่งสมการดังกล่าวจากการเก็บข้อมูลทำให้สามารถสรุปรูปแบบของสมการ (Mark-Spencer) ดังกล่าวให้อยู่ในรูปแบบที่ของสมการทางคณิตศาสตร์ที่ง่ายขึ้น ได้ดังนี้

$$L_{\zeta, \alpha} = (L_z / 3) (1 + 2 \cos \zeta) \quad (2.53)$$

เมื่อ  $L_{\zeta, \alpha}$  = ค่าความสว่างของท้องฟ้า หน่วยเป็นหน่วยเป็นกิโลแคนเดลาต่อตารางเมตร ( $\text{kcd/m}^2$ )

$L_z$  = ค่าความสว่างของท้องฟ้าที่ Zenith หน่วยเป็นหน่วยเป็นกิโลแคนเดลาต่อตารางเมตร ( $\text{kcd/m}^2$ )

$\zeta$  = มุมเซนิท (Zenithal point angle) หน่วยเป็นเรเดียน (rad)

สมการความสว่างของท้องฟ้า บนพื้นระนาบ จากการดิฟเฟอเรนเชียล (Differential) องค์ประกอบของท้องฟ้า จะได้สมการต่างๆ ของท้องฟ้าในประเภทต่างๆ ได้ดังนี้

$$dE_{kh} = L_{\zeta, \alpha} \cos \zeta d\omega = L_{\zeta, \alpha} \cos \zeta \sin \zeta d\zeta d\alpha \quad (2.54)$$

เมื่อ  $E_{kh}$  = ค่าความส่องสว่างบนพื้นผิวแนวระนาบ หน่วยเป็นกิโลลักซ์ (klx)

$L_{\zeta, \alpha}$  = ความสว่างของท้องฟ้า ที่จุด P ของท้องฟ้าครึ่งวงกลม ตามพิกัดของมุม  $\zeta$  และมุม  $\alpha$  หน่วย เป็นหน่วยเป็นกิโลแคนเดลาต่อตารางเมตร ( $\text{kcd/m}^2$ )

$d\omega$  = ค่าดิฟเฟอเรนเชียล (Differential) ของมุมโซลิด (Solid angle) ในทิศทางของจุด P

$\zeta$  = มุม เซนิท หน่วยเป็นเรเดียน (rad)

$\alpha$  = มุมอะซิมูทจากดวงอาทิตย์ หน่วยเป็นเรเดียน (rad)

พิกัดของมุมต่างๆ ในสมการจะอิงจาก ท้องฟ้าในแบบครึ่งวงกลม และหาก Integrated สมการข้างต้น จะได้สมการของความสว่างของท้องฟ้าในแนวราบ

$$E_{kh} = 1/\pi \iint L_{\zeta, \alpha} \sin \zeta \cos \zeta d\zeta d\alpha \quad (2.55)$$

เมื่อ  $E_{kh}$  = ค่าความส่องสว่างบนพื้นผิวในแนวราบ หน่วยเป็นกิโลลักซ์ (klx)

$L_{\zeta, \alpha}$  = ความสว่างของท้องฟ้า ที่จุด P ของท้องฟ้าครึ่งวงกลม ตามพิกัดของมุม  $\zeta$  และมุม  $\alpha$  หน่วยเป็นหน่วยเป็นกิโลแคนเดลาต่อตารางเมตร ( $\text{kcd/m}^2$ )

$\zeta$  = มุม เซนิท หน่วยเป็นเรเดียน (rad)

$\alpha$  = มุมอะซิมูทจากดวงอาทิตย์ หน่วยเป็นเรเดียน (rad)

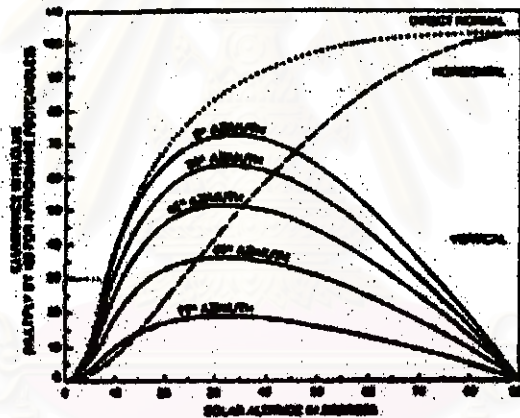
ขอบเขตของการอินทิเกรต (Integration) จะขึ้นกับตำแหน่ง และแนวเขตของท้องฟ้า ซึ่งจะเป็นขอบเขตของท้องฟ้าครึ่งวงกลม ที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง  $2\pi$  และ 0 ถึง  $\pi/2$  สมการแสดงค่าความสว่างของพื้นแนวระนาบ

$$E_{kh} = 1/\pi \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} L_{\zeta,\alpha} \sin\zeta \cos\zeta d\zeta d\alpha \tag{2.56}$$

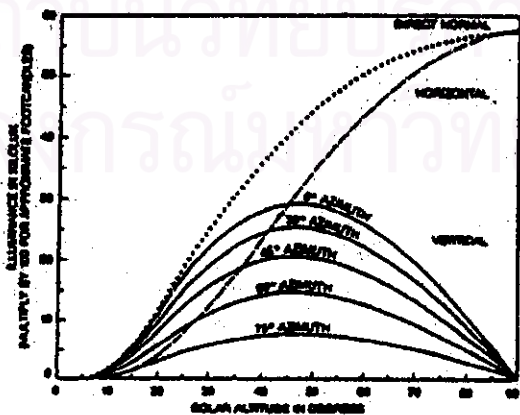
สมการแสดงค่าความสว่างของพื้นแนวระนาบตั้ง

$$E_{kv} = 1/\pi \int_{\alpha+\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{\pi/2} L_{\zeta,\alpha} \sin\zeta \cos\zeta d\zeta d\alpha \tag{2.57}$$

สมการ  $E_{kh}$  และ  $E_{kv}$  จะเป็นการคำนวณค่าความสว่างของแสงด้วยวิธีดิฟเฟอเรนซ์ (Differentials) และดิสครีต (Discrete) เพื่อหาค่าตำแหน่งของความสว่าง ณ ตำแหน่งที่ต้องการ บนระนาบพื้นราบแนวนอนและแนวตั้งที่ปราศจากสิ่งกีดขวางซึ่งค่าความสว่างของท้องฟ้าที่คำนวณได้จากสมการจะสามารถนำมาเขียนเป็นกราฟในท้องฟ้าแต่ละประเภทได้ดังนี้



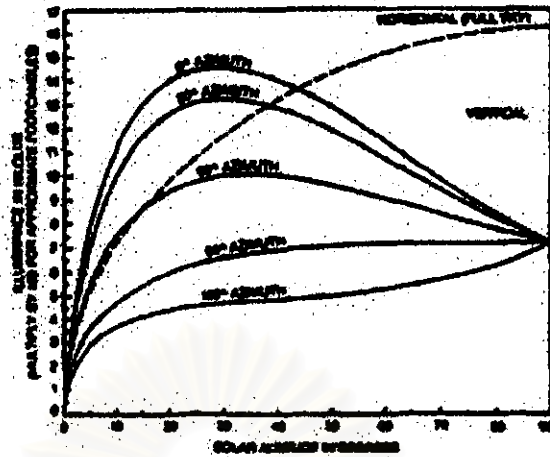
(a) ค่าความส่องสว่างของท้องฟ้า เมื่อท้องฟ้าโปร่ง (clear sky)



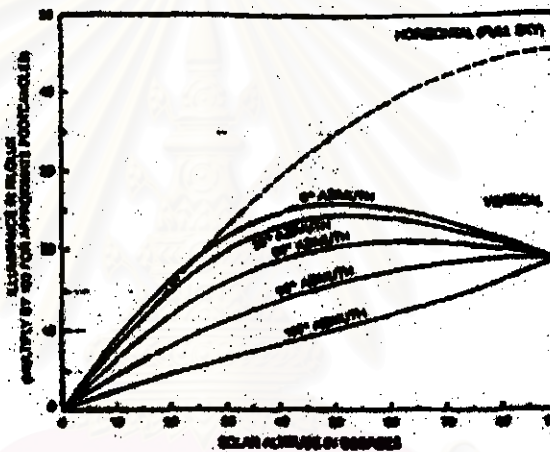
(b) ค่าความส่องสว่างของท้องฟ้า เมื่อท้องฟ้ามีเมฆปกคลุมบางส่วน (Partly Cloudy Sky)

รูป 2.24 ค่าความส่องสว่างของดวงอาทิตย์ ในแต่ละมุมอัลติจูด และ มุมอัลซิมุม ของดวงอาทิตย์

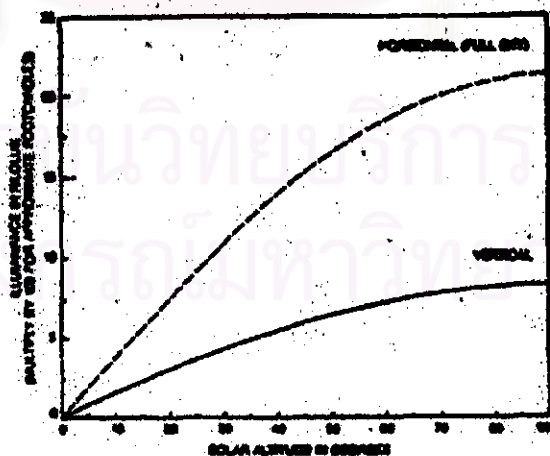
ที่มา : IES, 1984b อ้างอิงใน Heating and Cooling of Building pp. 679



(a) ค่าความส่องสว่างของดวงอาทิตย์ในระนาบตั้ง เมื่อท้องฟ้าโปร่ง (clear sky)



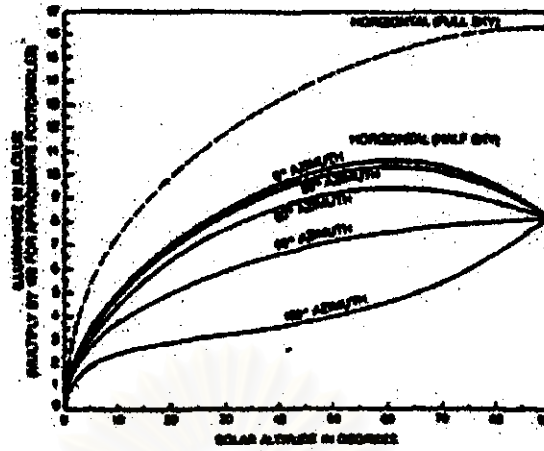
(b) ค่าความส่องสว่างของดวงอาทิตย์ในระนาบตั้งเมื่อท้องฟ้ามีเมฆปกคลุมบางส่วน (Partly Cloudy Sky)



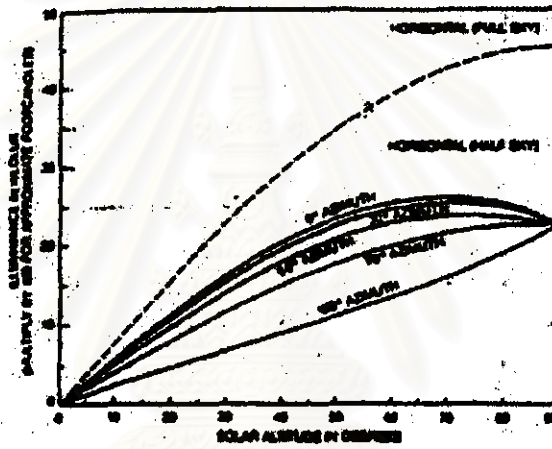
(c) ค่าความส่องสว่างของดวงอาทิตย์ในระนาบตั้ง เมื่อท้องฟ้ามีเมฆปกคลุมทั้งหมด (Overcast sky)

รูป 2.25 ค่าความส่องสว่างของดวงอาทิตย์ในแนวระนาบตั้ง ตามมุมอัลติจูด และมุมอัลซิมุทของดวงอาทิตย์

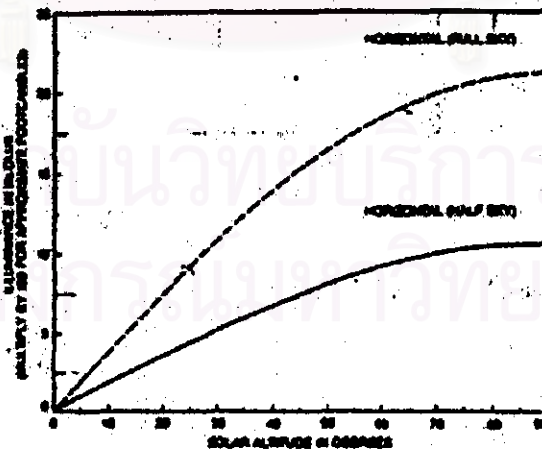
ที่มา : IES, 1984b อ้างอิงใน Heating and Cooling of Building pp. 680



(a) ค่าความส่องสว่างของดวงอาทิตย์ในระนาบนอน เมื่อท้องฟ้าโปร่ง (clear sky)



(b) ค่าความส่องสว่างของดวงอาทิตย์ในระนาบตั้งเมื่อท้องฟ้าเป็นเมฆปกคลุมบางส่วน (Partly Cloudy Sky)



(c) ค่าความส่องสว่างของดวงอาทิตย์ในระนาบนอน เมื่อท้องฟ้าเป็นเมฆปกคลุมทั้งหมด (Overcast sky)

รูป 2.26 ค่าความส่องสว่างของดวงอาทิตย์ในแนวระนาบนอน ในแต่ละมุมอัลติจูด และมุมอัลซิมูท ของดวงอาทิตย์

ที่มา : IES, 1984b อ้างอิงใน Heating and Cooling of Building page. 681

## 2.11 สภาพท้องฟ้า (Sky Condition)

เมื่อพิจารณาการแบ่งประเภทของท้องฟ้า โดยทั่วไปจะพิจารณาจากปริมาณของเมฆในท้องฟ้า ซึ่งมีดัชนีของปริมาณเมฆในท้องฟ้าตั้งแต่ 0 ถึง 10

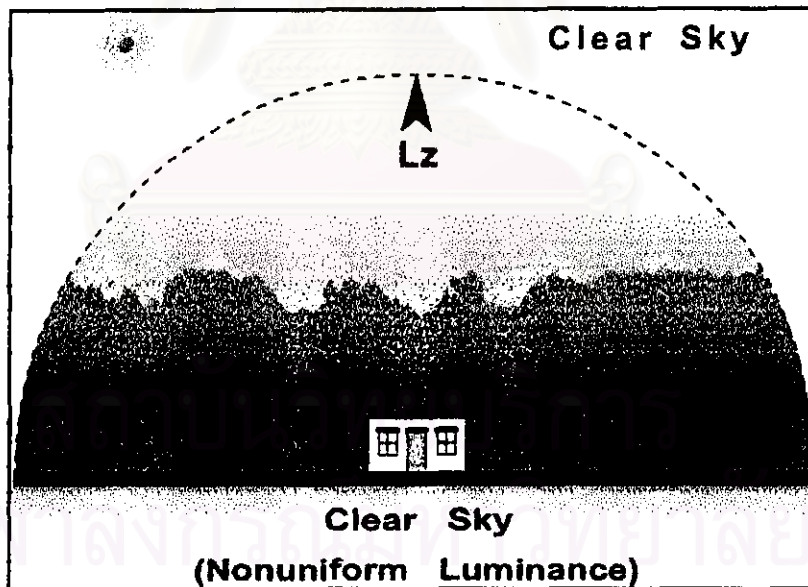
การแบ่งประเภทของท้องฟ้า จะมีวิธีการที่ใช้ในการแบ่งประเภทของท้องฟ้าหลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้คือการแบ่งประเภทของท้องฟ้าจากปริมาณของเมฆในท้องฟ้า

2.11.1 สภาพท้องฟ้าโปร่ง ไม่มีเมฆคลุม (Clear Sky)

2.11.2 สภาพท้องฟ้าที่มีเมฆปกคลุมบางส่วน (Partly Cloudy Sky)

2.11.3 สภาพท้องฟ้าที่ปกคลุมด้วยเมฆ จนไม่สามารถมองเห็นแหล่งกำเนิดแสงได้ (Overcast Sky)

2.11.1 สภาพท้องฟ้าโปร่งปราศจากเมฆปกคลุม (Clear Sky) ความสว่างของท้องฟ้า จะประกอบไปด้วยองค์ประกอบหลัก 2 ส่วนคือ ความสว่างจากแสงอาทิตย์ตรง (Direct sun) และความสว่างของแสงจากการกระจายแสง (Diffuse Illuminance) ของท้องฟ้า โดยองค์ประกอบทั้งสองนี้ จะแปรผันตามตำแหน่งมุมอัตรจุดของดวงอาทิตย์ (Solar Altitude) เป็นหลัก (Prof. Kittler, 1981) ความสว่างของท้องฟ้า จะมีความสว่างในปริมาณที่แตกต่างกัน (Non Uniform Brightness) ซึ่งที่ระดับสูงสุดของท้องฟ้าจะมีค่าความสว่างน้อยกว่าที่ระนาบล่างของท้องฟ้า โดยความสว่างจะเพิ่มมากขึ้น เป็น 3 เท่าที่ระดับระนาบล่างสุดของท้องฟ้า และ ท้องฟ้าประเภทนี้จะมีความสว่างสูงสุด ณ ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ และ มีความส่องสว่างต่ำสุด ที่ตำแหน่งตรงข้าม กับดวงอาทิตย์ (Prof. Hopkinson and Prof. Moon , 1968)



รูปที่ 2.27 แสดงรูปแสดงท้องฟ้าแบบ Clear Sky

ที่มา : Mechanical and Electrical Equipment for Building , pp. 974

จากการที่ความสว่างของท้องฟ้าโปร่ง มีความแปรผัน ตามตำแหน่งมุมอัตรจุดของดวงอาทิตย์เหนือแนวระนาบ ดังนั้นสมการที่ใช้ในการคำนวณจะหาได้จาก

$$LA = LZ (1 + 2 \sin A) / 3$$

(2.58)

เมื่อ LA = ความสว่างของท้องฟ้า ที่ตำแหน่งมุม A องศาเหนือแนวระนาบของดวงอาทิตย์  
 LZ = ความสว่างของท้องฟ้าที่ตำแหน่งสูงสุด  
 ความสว่างที่ตำแหน่งมุม A = 0 องศา จะมีค่าเท่ากับ = LZ / 3

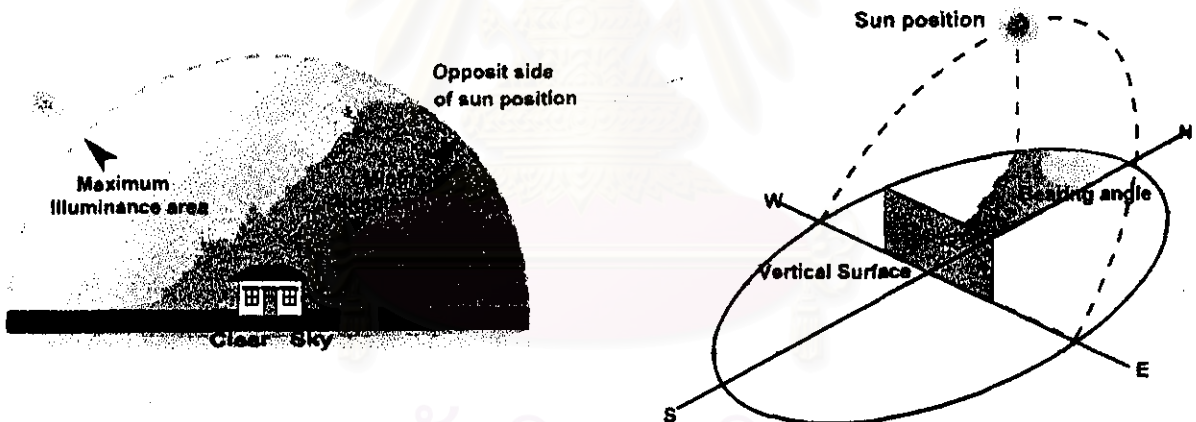
จากองค์ประกอบของท้องฟ้า ที่ประกอบด้วยแสงตรงจากดวงอาทิตย์ (Direct Sun Illuminance) และแสงอาทิตย์กระจาย (Diffuse Sun Illuminance) ซึ่งสมการจะมีลักษณะดังนี้  
 กรณี ความสว่างของท้องฟ้าจากแสงตรงของดวงอาทิตย์

$$E_h = 300 + 21,000 \sin A \text{ (lux)} \quad (2.59)$$

กรณี ความสว่างของท้องฟ้าจากแสงกระจายของท้องฟ้า

$$E_h = 1345 + 14,795 \sin A \text{ (lux)} \quad (2.60)$$

หากพิจารณาแสงกระจายจากท้องฟ้า เพียงครึ่งระนาบของท้องฟ้า จะมีความสว่างอยู่ระหว่าง 3,000 ถึง 20,000 ลักซ์ (เฉลี่ยที่ 10,000 ลักซ์)



รูปที่ 2.28 แสดงท้องฟ้าโปร่ง และมุมเบaring (Bearing Angle)

ที่มา : Mechanical and Electrical Equipment for Building , pp. 974

2.11.2 สภาพท้องฟ้าที่มีเมฆปกคลุมบางส่วน (Partly Cloudy Sky) การพิจารณาค่าความสว่างของท้องฟ้าในลักษณะนี้จะทำได้ยาก เนื่องจากปริมาณของเมฆในท้องฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา (Dynamic) และจากข้อมูลสถิติที่ได้มีการรวบรวมไว้ จะพบว่าท้องฟ้าที่มีเมฆปกคลุมบางส่วน (Partly cloudy sky) จะมีความส่องสว่าง ของท้องฟ้ามากกว่าท้องฟ้าแบบโปร่ง (Clear sky) ประมาณ 10 – 15 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งปริมาณแสงที่เพิ่มขึ้น เกิดจากการที่แสงจากดวงอาทิตย์ส่องกระทบก้อนเมฆ และสะท้อนไปมา ระหว่างก้อนเมฆ (Prof. Nakamura and Prof. Oki , 1983) สามารถอธิบายลักษณะของท้องฟ้าที่มีเมฆปกคลุมบางส่วน และเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$E_{sp} = 570 A$$

(2.61)

เมื่อ  $E_{sp}$  = ความสว่างภายนอกที่ระดับระนาบ ภายใต้สภาพท้องฟ้ามีเมฆปกคลุมหีบ มีหน่วยเป็นกิโลลักซ์

$A$  = มุมอัลติจูดดวงอาทิตย์ (Solar Altitude) ของดวงอาทิตย์

ถึงแม้ว่าท้องฟ้าที่มีเมฆปกคลุมบางส่วนจะให้ปริมาณของแสงมากกว่าท้องฟ้าโปร่ง แต่ในบางกรณี หากกลุ่มเมฆที่เกิดขึ้นเป็นเมฆฝน หรือ มีสีน้ำทึบ ก็อาจทำให้แสงถูกกั้น หรือถูกดูดซึมมากกว่า ที่จะสะท้อนหรือเกิดการกระจายของแสง ทำให้ค่าความสว่าง ของท้องฟ้ามีค่าลดลง และจากการศึกษา โดยอาศัยดัชนีเมฆ หรือ Cloudy Ratio (The Gillete prediction model, 1985) มาพิจารณาหาความสัมพันธ์ของการส่องสว่างของท้องฟ้า ที่เกิดจากแสงตรงจากดวงอาทิตย์ และแสงกระจายจากท้องฟ้า จะมีความสัมพันธ์กันของความสว่างเฉลี่ยของระดับระนาบนอนที่ปราศจากสิ่งกีดขวางดังนี้

$$E_{H} = 0.35 E_s + 0.89 E_c$$

(2.62)

เมื่อ  $E_H$  = ความส่องสว่างภายนอกที่ระดับแนวระนาบภายใต้ท้องฟ้าแบบเมฆปกคลุมบางส่วน (มีหน่วยลักซ์)

$E_s$  = ความส่องสว่างที่เกิดจากแสงตรงของดวงอาทิตย์

$E_c$  = ความส่องสว่างที่ได้จากการกระจายของแสงจากดวงอาทิตย์

**2.11.3 สภาพท้องฟ้าที่ปกคลุมด้วยเมฆ จนไม่สามารถมองเห็นแสงจากดวงอาทิตย์ (Overcast Sky หรือ CIE Sky)** ท้องฟ้าในลักษณะนี้จะเป็นท้องฟ้า ในแถบสแกนดิเนเวีย (Scandinavia) และตอนเหนือของมหาสมุทรแปซิฟิก เช่นประเทศอังกฤษ ความสว่างของท้องฟ้ามีเมฆปกคลุมบางส่วน จะมีปริมาณความสว่างที่แตกต่างกันมาก (Non-uniform Brightness Distribution) โดยความสว่าง จะเพิ่มมากขึ้นตามระดับความสูงที่เพิ่มขึ้นของท้องฟ้า เมื่อพิจารณาจากระดับพื้น (Horizon-Brightness) ความสว่างจะเพิ่มมากขึ้นจนถึงระดับสูงสุดของท้องฟ้า ที่ระดับเซนิท (Zenith-Brightness) ที่ส่องกระทบพื้นผิวในแนวระนาบ ซึ่งจะมีค่ามากกว่า ความสว่างที่ระนาบพื้นประมาณ 3 เท่า ค่าความสว่างของท้องฟ้า ที่เกิดขึ้นที่จุดใดๆ จะพิจารณาเฉพาะจากการแปรเปลี่ยนของมุมอัลติจูดของดวงอาทิตย์ แต่ไม่พิจารณาจากมุมอิมิมุของดวงอาทิตย์ โดยอธิบายเป็นสมการได้ดังนี้

$$L_A = L_Z (1 + 2 \sin A) / 3$$

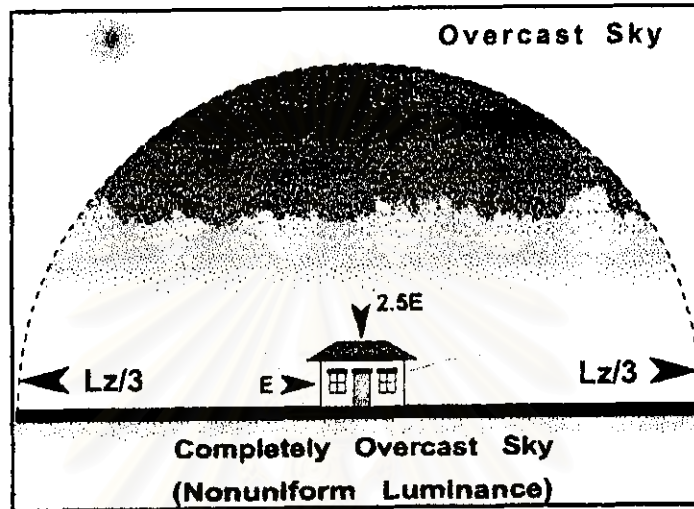
(2.63)

เมื่อ  $L_A$  = ความสว่างของท้องฟ้าที่ตำแหน่งมุม  $A$  องศา เหนือระดับในแนวระนาบ (Horizon) ในทุกทิศทาง

$L_Z$  = ความสว่างของท้องฟ้า ที่ระดับสูงสุด ที่ระดับเซนิท (Zenith)



ดังนั้นความสว่าง ณ ตำแหน่งในแนวระนาบ หรือที่มุม  $A = 0$  องศา จะมีความสว่าง มากกว่าเพียงหนึ่งในสามของความสว่างที่ระดับสูงสุด  $L_A = L_z / 3$



รูปที่ 2.29 แสดงท้องฟ้าแบบ Overcast Sky

ที่มา : Mechanical and Electrical Equipment for Building ,1992, pp. 974

อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าความสว่างของท้องฟ้ามีเมฆปกคลุมทึบ จะแปรเปลี่ยนไปตามมุมอัตรคติของดวงอาทิตย์ แต่ก็ยังมีท้องฟ้ามีเมฆปกคลุมทึบ ในอีกลักษณะหนึ่ง ที่มีความสว่างของท้องฟ้า ที่เท่ากันทั่วทั้งท้องฟ้าและทุกระดับความสูง (Uniform-Brightness) ซึ่งจะมีความใกล้เคียงกับ ท้องฟ้าแบบความสว่างคงที่ (Uniform sky) (เป็นท้องฟ้าในอุดมคติ ที่จะมีความสว่างของท้องฟ้าเท่ากันทุกจุด) โดยความสว่างของท้องฟ้าที่ระดับเซนิต (Zenith) ที่ส่องกระทบพื้นผิวในแนวระนาบจะมีค่าเท่ากับความสว่าง ในแนวระนาบ (Horizon-Brightness) ที่ส่องกระทบพื้นผิวในแนวตั้ง (Prof. Krochman, 1993) จะอธิบายเป็นสมการได้ดังนี้

$$E_H = 300 + 21,000 \sin A \text{ (lux)}$$

(2.64)

เมื่อ  $E_H$  = ความส่องสว่างภายนอกที่ระดับแนวระนาบภายใต้ท้องฟ้ามีเมฆปกคลุมบางส่วน (มีหน่วยลักซ์)  
 $A$  = มุมอัตรคติดวงอาทิตย์

## 2.12 แสงธรรมชาติ ในภูมิอากาศเขตร้อน

การกำหนดระดับปริมาณความส่องสว่างในสภาพอากาศแบบปกติ (Temperature Climates) จะอาศัยความเข้มข้นของท้องฟ้าในลักษณะ ที่มีเมฆปกคลุมทึบ (Overcast sky) หรือ ท้องฟ้าที่มีความสว่างคงที่ (CIE. Standard Overcast Sky) ซึ่งท้องฟ้า ในลักษณะดังกล่าวนี้ การกระจายแสงที่มีความสม่ำเสมอทั่วทั้งท้องฟ้า แต่สำหรับในภูมิประเทศที่มีสภาพอากาศแบบร้อนชื้น ตำแหน่งของดวงอาทิตย์จะอยู่ในแนวเหนือศีรษะ หรือตั้งฉากกับพื้นโลก ในระหว่างวันมากกว่าภูมิอากาศในเขตร้อน การกำหนดปริมาณความสว่าง จึงต้องมีการแบ่งลักษณะของท้องฟ้า ในแต่ละฤดูกาล ให้ชัดเจน เช่น ในฤดูแล้ง ที่อากาศร้อน หรือ ฤดูมรสุม ที่มีเมฆปกคลุมทั่วท้องฟ้า ทำให้การใช้เทคนิคต่างๆ ในการประยุกต์ใช้แสงธรรมชาติจะต้องมีความรอบคอบมากเป็นพิเศษ เนื่องจากสภาพท้องฟ้าจะมีความแปรปรวน ไม่คงที่ของปริมาณแสงสว่าง และยากแก่การคาดเดา เช่นในบางกรณี ฤดูที่มีอากาศร้อนและมีแสงแดดจัด แสงธรรมชาติที่ได้รับ บางทีก็อาจจะไม่เพียงพอ ต่อการใช้งานภายในอาคาร ซึ่งเกิดจากลักษณะของท้องฟ้าเอง หรือในบางกรณี ที่แสงธรรมชาติอาจจะมีมากเกินไปกว่าความจำเป็นต่อการใช้งาน ก็เป็นไปได้เช่นกัน นอกจากนี้ การประยุกต์ใช้แสงธรรมชาติในภูมิประเทศเขตร้อน หากไม่มีความระวัง ก็อาจจะเป็นการส่งเสริมให้มีการเพิ่มความร้อนให้แก่สิ่งแวดล้อมด้วย ดังนั้นการใช้งาน จะต้องหลีกเลี่ยง การใช้แสงตรงจากดวงอาทิตย์ และเน้นแสงสว่างที่ได้จากการสะท้อนแสงจากดวงอาทิตย์ เป็นสำคัญ ซึ่งช่องเปิดก็ไม่ควรจะทำขนาดใหญ่มากกว่าความจำเป็น อย่างไรก็ตาม การประยุกต์ใช้แสงธรรมชาติในภูมิอากาศเขตร้อน จะต้องมีการใช้เทคนิคที่เพิ่มมากขึ้น ในการคาดการณ์ปริมาณความส่องสว่างแสงธรรมชาติ จากความร้อนที่เกิดจากรังสีดวงอาทิตย์ ซึ่งเป็นปัญหาของภูมิอากาศ ในเขตร้อนนี้ ในขณะนี้ จะต้องรักษาระดับของความสว่างภายในอาคารให้คงที่เสมอในระดับที่เพียงพอต่อการใช้งาน

แสงธรรมชาติที่พอเพียงต่อการใช้งาน ในเขตร้อน จะแยกออกได้เป็นสองลักษณะ ตามภูมิอากาศ คือ อากาศร้อนแห้ง และ อากาศร้อนชื้น สำหรับในประเทศไทยจะจัดอยู่ในเขตกภูมิอากาศแบบร้อนชื้น และจากการศึกษา จะพบว่าประเทศต่างๆ ที่มีลักษณะภูมิอากาศแบบร้อนชื้นนี้ จะอยู่ในเขตที่มี การพัดผ่านของลมมรสุม ด้วยเช่นกัน ในสภาพภูมิอากาศแบบร้อนแห้ง เช่น ทะเลทราย สภาพภูมิอากาศจะถูกกำหนดโดย แสงแดดที่มีความต่อเนื่อง ในกรณีที่มีสภาพท้องฟ้าโปร่ง (Deep blue sky) จะมีความส่องสว่างต่ำ เมื่อตำแหน่งของดวงอาทิตย์อยู่ระหว่างระนาบนอน จนกระทั่งมุมเงยมีค่าประมาณ 30 องศา นอกเหนือจากนี้จะมีปริมาณความสว่างอยู่ในระดับสูง เมื่อพิจารณาจากปริมาณแสงสว่าง ในระหว่างวัน ซึ่งปริมาณแสงสว่างดังกล่าว ที่ไม่คงที่จะเป็นปัญหาต่อปริมาณระดับความส่องสว่างที่พอเพียงภายในอาคาร (แต่อาจจะแก้ไขได้ โดยการเลือกใช้สีอ่อน หรือสีขาว แก่อาคาร เพื่อช่วยเพิ่มการสะท้อนแสงภายนอก) สำหรับเทคนิคในการประยุกต์ใช้แสงธรรมชาติ ในภูมิอากาศเขตร้อนแห้ง จะพิจารณาจากความต้องการ การส่องสว่างที่พอเพียงในระดับทำงาน และ การหลีกเลี่ยงแสงแดดตรงที่จะก่อให้เกิดแสงจ้า และความร้อนที่ไม่ต้องการ จากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ ดังนั้นอาคารในภูมิอากาศเขตร้อน ควรจะออกแบบให้อาคาร มีระดับวงกบล่างของช่องเปิด อยู่สูงกว่าระดับสายตา หรือ ให้มีการจัดวางทิศทางอาคารให้อยู่ได้ร่มเงา หรือควบคุมความสว่างของการสะท้อนแสงภายนอกอาคารด้วยสี หรือต้นไม้

สำหรับ สภาพภูมิอากาศเขตร้อนชื้น ปริมาณแสงธรรมชาติ จะแปรผันตามสภาพของท้องฟ้า ที่จะมีลักษณะของท้องฟ้าแบบมีเมฆปกคลุมทึบเข้ามาเกี่ยวข้อง ถ้าในกรณีที่มีเมฆปกคลุมท้องฟ้า เพียงบางๆ ท้องฟ้าจะมีความสว่างเต็มที่ ทั้งแสงสว่าง และการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งการป้องกัน อาจจะเลือกใช้ระเบียงกันแดด ผงกันแดดในแนวตั้ง แนวนอน หรือการออกแบบให้มีการบังแดดด้วยรูปทรงของอาคาร แต่

ในกรณีที่มีเมฆปกคลุมทั่วทั้งท้องฟ้าปริมาณความสว่างอาจจะมีค่าอยู่ในระดับต่ำและไม่เพียงพอต่อการใช้งาน การออกแบบอาคารเพื่อลดผลกระทบดังกล่าว จึงควรจะเน้นการนำแสงธรรมชาติเข้ามาใช้ภายในอาคาร ให้มากที่สุด และอาศัยการเคลื่อนที่ของอากาศ และกระแสลม ที่พัดผ่าน เพื่อมาช่วยลดอุณหภูมิภายในอาคาร

ปริมาณความสว่าง อันเนื่องมาจากการสะท้อนแสงภายนอกอาคาร ในสภาพท้องฟ้าที่ปราศจากเมฆปกคลุม ในภูมิอากาศเขตร้อน จะมีปริมาณแสงสว่าง ที่ระดับเซนติเมตร หรือ โกล์เดียง ประมาณ 500 ลู-ล และเมื่อความส่องสว่าง ตกกระทบพื้นดิน ที่มีการสะท้อนของแสง ของระนาบพื้นดิน เท่ากับ 20 % ปริมาณแสงส่องสว่างทั้งหมด ที่ตกกระทบตั้งฉากกับพื้นดิน จะมีความสว่างประมาณ 10,000  $\text{lm/m}^2$  และแสงที่ส่องเข้ามาสู่อาคารจะมีค่าประมาณ 2,000 ลู-ล หรือมีค่าเป็น 4 เท่า เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับ แสงที่กำเนิดของแสง ซึ่งองค์ประกอบจากการส่องสว่าง และสะท้อนแสงภายนอกอาคารทั้งหมด ในทิศทางต่างๆ จะเป็นตัวกำหนดพลักร์ของแสงที่จะตกกระทบลงบนช่องเปิดของอาคาร

การคาดการณ์ปริมาณความส่องสว่างภายใน จากสภาพภูมิอากาศเขตร้อน หรือ ท้องฟ้าโปร่ง (Blue sky) จะมีกระบวนการคิดพื้นฐานและแนวทางในการพัฒนา ในลักษณะเดียวกับการคิด ในสภาพภูมิอากาศแบบปกติ (Temperature Climate) ที่จะแยกองค์ประกอบของท้องฟ้าออกเป็นสามส่วน คือ องค์ประกอบแสงตรงจากท้องฟ้า (The direct sky component) องค์ประกอบแสงสะท้อนภายนอกอาคาร (The externally reflected component) และ องค์ประกอบจากแสงสะท้อนภายในอาคาร (The internally reflected component) ซึ่งแต่ละองค์ประกอบสามารถจะอธิบายได้ด้วย หลักการของ วิถีเคย์ไลท์แฟกเตอร์ ที่ได้จากอัตราส่วน ระหว่างความส่องสว่างภายใน และความส่องสว่างภายนอกของท้องฟ้า ที่ปราศจากผลกระทบแสงตรงจากดวงอาทิตย์ แต่การคำนวณจะต้องคำนึงถึงองค์ประกอบของการสะท้อนแสงภายนอกมากเป็นพิเศษ เนื่องจากในภูมิอากาศเขตร้อน ในช่วงวันที่ท้องฟ้าโปร่ง จะมีปริมาณแสงตรงจากดวงอาทิตย์สูงกว่า สภาพภูมิอากาศแบบอื่น

การสะท้อนแสงของพื้นผิวภายในอาคาร ในสภาพภูมิอากาศเขตร้อน จะมีความสำคัญน้อยกว่า การสะท้อนแสงภายนอกอาคาร ของภูมิอากาศแบบปกติ เนื่องจากในภูมิอากาศแบบปกติ พลักร์ของแสงในอันดับแรก ที่ส่องจากช่องเปิดจะตกกระทบลงบนพื้น ดังนั้นพื้นอาคารในบริเวณใกล้ช่องเปิด ควรจะมีค่าการสะท้อนแสงที่สูง เท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการส่องสว่างของแสงภายในอาคาร แต่ในกรณีของสภาพภูมิอากาศเขตร้อนแห่งนี้ สัดส่วนของพลักร์ของแสงที่ตกกระทบภายในอาคาร จะได้จากการสะท้อนแสงของเพดานและผนัง เป็นสำคัญ เนื่องจากการสะท้อนของแสงภายนอกอาคารที่ผิวดิน และ พื้นผิวในด้านตรงกันข้าม อย่างไรก็ตาม หากเราออกแบบให้อาคาร มีค่าการสะท้อนแสงของเพดาน และ ผนัง ที่สูง เพื่อเพิ่มค่าความส่องสว่าง ภายใน สำหรับภูมิอากาศเขตร้อน ก็อาจจะก่อให้เกิดความไม่สบายตาจากแสงจ้า หรือทัศนวิสัยในการมองได้

การจัดวางอาคาร ในภูมิอากาศเขตร้อน ควรจะหลีกเลี่ยงการรับแสงตรงจากดวงอาทิตย์ ซึ่งจะเกิดขึ้นในช่วงเช้า หรือเย็น ของช่องเปิดในทิศตะวันออก และทิศตะวันตก ส่วนเวลากลางวัน ดวงอาทิตย์จะอยู่ในแนวเหนือศีรษะ และตั้งฉากกับพื้นโลก ปริมาณแสง จะมีอิทธิพลต่อ ช่องเปิดในทิศเหนือและทิศใต้ ทั้งแสงที่เกิดจากท้องฟ้า และแสงสะท้อนจากพื้นดิน ดังนั้นปริมาณความส่องสว่างภายในอาคาร จะแปรเปลี่ยนไปตามช่วงเวลาและทิศทางดังกล่าว ซึ่งเราสามารถที่จะแก้ไขได้ โดยการออกแบบให้ช่องเปิด มีความสอดคล้องกับทิศทางของแสงในแต่ละช่วงเวลา

## 2.13 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในที่นี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งใช้เป็นแนวทางในการทำวิจัยซึ่งแบ่งเป็นหัวข้อย่อย ดังนี้

- 2.13.1 การตรวจวัดตำแหน่งของดวงอาทิตย์
- 2.13.2 การคำนวณค่ามวลอากาศ (air mass)
- 2.13.3 การคำนวณค่ารังสีจากดวงอาทิตย์
- 2.13.4 ค่าปรับแก้ของอุปกรณ์วัดรังสีจากดวงอาทิตย์
- 2.13.5 การประมาณค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์โดยใช้วิธีทางสถิติ

### 2.13.1 การตรวจวัดทิศทางของดวงอาทิตย์ (อ้างอิงจาก Nabeel และ Rawi)

เนื่องจากการเพิ่มจำนวนขึ้นของการใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ในหลาย ๆ พื้นที่ เช่น การต้มน้ำจากแสงอาทิตย์ และการผลิตกระแสไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ เป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้จำเป็นต้องติดตั้งในทิศทางที่รับรังสีตรงตั้งฉากจากดวงอาทิตย์ในปริมาณที่มากที่สุดตลอดปี ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องมีการบันทึกตำแหน่งการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์เพื่อนำมาประกอบการพิจารณาทิศทางการติดตั้งของอุปกรณ์เหล่านี้ เนื่องจากกระบวนการระบุตำแหน่งการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์แต่เพียงอย่างเดียวอาจไม่สอดคล้องกับปรากฏการณ์จริง เนื่องจากความคลาดเคลื่อนของการสมมติ ค่า Hour angle เวลาสุริยะ (Apparent solar time) เวลามาตรฐานท้องถิ่น (Local standard time) และ ลองจิจูด (Longitude) เป็นต้น

ในปี พ.ศ.2534 Nabeel และ Rawi ได้เสนออุปกรณ์ตรวจวัดตำแหน่งการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์อย่างง่าย ๆ และราคาประหยัด ซึ่งประกอบด้วย ฐานรูปสี่เหลี่ยม (Mechanical holder) ฐานวงกลมที่หมุนได้รอบตัว (Circular base) เข็มทิศ (Compass) ระดับน้ำ (Level) และเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) เป็นต้น ลักษณะของอุปกรณ์ วิธีการใช้งานของอุปกรณ์ชุดดังกล่าว คือ ทำการตรวจวัดมุม Solar altitude และมุม Solar azimuth ที่ทำให้รังสีตรงตั้งฉากจากดวงอาทิตย์ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งไว้ที่กึ่งกลางของฐานวงกลมพอดี

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 2.13.2 การคำนวณค่ามวลอากาศ (อ้างอิงจาก Nijegorodov และ Luhanga)

จากการปรากฏการณ์การดูดซับแสงและการกระเจิงแสงของรังสีจากดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบโมเลกุลของก๊าซ ไอน้ำ และอนุภาคที่แขวนลอยอยู่บนชั้นบรรยากาศ ทำให้ปริมาณรังสีตรงตั้งฉากจากดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบผิวโลกมีค่าลดลง โดยที่ปริมาณการลดลงของรังสีจากดวงอาทิตย์จะแปรผันตรงกับระยะทางที่รังสีเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศซึ่งขึ้นกับมุม Zenith ( $\theta_z$ ) ซึ่งเป็นมุมระหว่างรังสีตรงตั้งฉากจากดวงอาทิตย์กับเส้นตั้งฉากผิวโลก ระยะทางไร้มิติที่รังสีจากดวงอาทิตย์เดินทางผ่านชั้นบรรยากาศถูกเรียกว่า ค่ามวลอากาศ (Air mass) ซึ่งก็คือ อัตราส่วนของระยะทางที่รังสีตรงตั้งฉากจากดวงอาทิตย์เดินทางผ่านชั้นบรรยากาศมาสู่ผิวโลกจริง (ที่มุม Zenith มีค่าใด ๆ) ต่อระยะทางที่รังสีตรงตั้งฉากจากดวงอาทิตย์เดินทางมาสู่ผิวน้ำทะเลในแนวตั้งฉาก (ที่มุม Zenith มีค่าเท่ากับศูนย์) ตัวอย่างของสมการที่ใช้ในการคำนวณค่ามวลอากาศ ได้แก่ สมการของ ASHRAE สมการของ Bird และ Hulstrom และ สมการของ Suehrcke และ McCormic เป็นต้น

ลักษณะของสมการคำนวณค่ามวลอากาศที่ถูกใช้อย่างแพร่หลาย ได้แก่ สมการของ Duffie และ Beckman

$$m = \frac{1}{\cos(\theta_z)} \quad (2.65)$$

ผลเฉลยจากสมการที่ 2.65 จะมีความน่าเชื่อถือได้ในกรณีที่มีมุม Zenith มีค่าอยู่ระหว่าง  $0^\circ$  ถึง  $70^\circ$  เท่านั้น แต่ในกรณีที่มีมุม Zenith มีค่าเท่ากับ  $90^\circ$  ในช่วงดวงอาทิตย์ขึ้นหรือตก สมการที่ 3.1 จะให้ค่ามวลอากาศที่มีค่าเป็นอนันต์ ดังนั้น ในกรณีที่มีมุม Zenith มีค่ามากกว่า  $70^\circ$  จึงสมควรนำค่าตัวประกอบอื่นมาร่วมพิจารณาด้วย เช่น ความโค้งของโลกตามสมการของ Robinson สมการของ Kondratyev และสมการของ Grag เป็นต้น

ในกรณีที่ผิวโลกอยู่สูงจากระดับน้ำทะเล (Altitude,  $h$ ) ค่ามวลอากาศสามารถคำนวณได้จากสมการของ Kasten ตามสมการที่ 2.66 โดยสมการดังกล่าวจะพิจารณาค่ามวลอากาศในรูปของมุม Zenith และความสูงจากระดับน้ำทะเลเข้าด้วยกัน ดังนี้

$$m = m_o * \frac{P}{P_o}$$

$$m_o = [\cos(\theta_z) + 0.15 * (93.885 - \theta_z)^{-1.253}]^{-1} \quad (2.66)$$

เมื่อ  $P$  คือ ความดันบรรยากาศที่ความสูงจากน้ำทะเลเท่ากับ  $A$   
 $P_o$  คือ ความดันบรรยากาศที่ระดับน้ำทะเล

ต่อมา Nijegorodov และ Luhanga ได้เสนอสมการคำนวณค่ามวลอากาศที่ประกอบด้วยตัวแปรหลายชนิด ได้แก่ มุม Zenith ( $\theta_z$ ) ความโค้งของผิวโลก ( $r$ ) ละติจูด ( $\phi$ ) ความสูงจากระดับน้ำทะเล ( $A$ ) และความหนาของชั้นบรรยากาศ ( $H$ ) และ ข้อมูลภูมิอากาศ (ได้แก่ ความดันบรรยากาศ ( $P$ ) อุณหภูมิกระเปาะแห้ง ( $T$ ) ค่าเฉลี่ยของมวลโมเลกุลของอากาศบนชั้นบรรยากาศ ( $\bar{M}$ ) อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ( $g$ ) และ ค่าคงที่ของก๊าซ (Universal gas constant,  $R$ ) เป็นต้น ซึ่งสามารถเขียนเป็นผลเฉลยดังสมการที่ 3.4

$$m = \left[ \frac{\sqrt{H * (H + 2 * r) + r^2 * \cos^2(\theta_z)} - r * \cos(\theta_z)}{H} \right] * e^{-\left(\frac{\bar{M} * g * A}{R * T}\right)} \quad (2.67)$$

รัศมีความโค้งของเปลือกโลกที่ละติจูดใด ๆ (Radius of the earth,  $r$ ) สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุม Zenith ( $\phi$ ) รัศมีความโค้งของเปลือกโลกที่ขั้วโลก ( $r_p$ ) ที่มีค่าประมาณ 6356.863 km และ รัศมีความโค้งของเปลือกโลกที่เส้นศูนย์สูตร ( $r_E$ ) ที่มีค่าประมาณ 6376.245 km ดังนี้

$$r = r_p * \sqrt{\frac{\tan^2(\phi) + 1}{\tan^2(\phi) + \left(\frac{r_p}{r_E}\right)^2}} \quad (2.68)$$

ค่าเฉลี่ยของมวลโมเลกุลของอากาศบนชั้นบรรยากาศ ( $\bar{M}$ ) ที่ปรากฏในสมการที่ 3.4 สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันบรรยากาศ ( $P$ ) และ ความดันบรรยากาศที่ระดับน้ำทะเล ( $P_o$ )

$$\bar{M} = \frac{\left(\frac{P - P_o}{P_o}\right) * 28.9644 + 18.0}{\left(\frac{P + P_o}{P_o}\right) + 1} \quad (2.69)$$

ดังนี้

อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (Acceleration of gravity,  $g$ ) ที่ปรากฏในสมการที่ 3.4 สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกมาตรฐาน (Standard acceleration of gravity,  $g_o$ ) รัศมีความโค้งของเปลือกโลก ( $r$ ) ความสูงจากระดับน้ำทะเล ( $h$ ) และมุม Zenith

$$g(\phi, h) = g_o(\phi) * \frac{r^2}{(r + h)^2} \quad (2.70)$$

ดังนี้

$$g_o = 9.78049 * (1 + 0.0052834 * \sin^2(\phi) - 0.0000059 * \sin^2(2 * \phi)) \quad (2.71)$$

### 2.13.3 การคำนวณค่ารังสีจากดวงอาทิตย์

วิธีการคำนวณค่ารังสีจากดวงอาทิตย์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เป็นวิธีที่นิยมใช้แพร่หลาย เนื่องจากสะดวก รวดเร็วและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายน้อย แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับใช้ในการคำนวณค่ารังสีจากดวงอาทิตย์ได้มีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่องดังนี้

#### ผลงานวิจัยของ Mchler และ Iqbal

ในปี พ.ศ. 2528 Mchler และ Iqbal ได้เสนอวิธีการปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการคำนวณค่ารังสีจากดวงอาทิตย์ตามที่ได้ระบุไว้ใน 1972 ASHRAE Handbook of Fundamental ให้มีความแม่นยำมากขึ้นโดยใช้ทฤษฎีจากงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ สมการที่ใช้ในการคำนวณค่ารังสีตรงตั้งฉากจากดวงอาทิตย์ ( $E_{DN}$ ) และค่ารังสีกระจายจากดวงอาทิตย์ ( $E_D$ ) ที่ถูกแสดงไว้ใน ASHRAE มีลักษณะดังนี้

$$E_{DN} = A * \exp(-B * AMS) \quad (2.72)$$

$$E_D = E_{DN} * C \quad (2.73)$$

เมื่อ  $A$ ,  $B$  และ  $C$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับใช้ในการคำนวณค่ารังสีจากดวงอาทิตย์ ที่ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 2.12 ของ ASHRAE ส่วนค่า  $AMS$  เป็นตัวแทนของค่ามวลอากาศ ภายใต้สมมติที่ว่า ความโค้งของโลกและค่าการหักเหของแสงผ่านชั้นบรรยากาศไม่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ และหรือ การกระเจิงของรังสีจากดวงอาทิตย์ โดยที่สมการของมวลอากาศจะเป็นดังนี้

$$AMS = \left( \frac{P}{P_0} \right) * \sec(\theta_z) \quad (2.74)$$

	Original ASHRAE coefficient			Precipitable water $w$ (mm)
	$A$ ( $W/m^2$ )	$B$	$C$	
January	1230.0	0.142	0.058	7.95
February	1215.0	0.144	0.060	8.55
March	1186.0	0.156	0.071	11.20
April	1136.0	0.180	0.097	17.78
May	1104.0	0.196	0.121	23.77
June	1088.0	0.205	0.134	27.60
July	1085.0	0.207	0.136	28.00
August	1107.0	0.201	0.122	26.20
September	1151.0	0.177	0.092	18.23
October	1192.0	0.160	0.073	12.53
November	1221.0	0.149	0.063	9.47
December	1230.0	0.142	0.057	7.95

ตารางที่ 2.11 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สำหรับคำนวณค่ารังสีจากดวงอาทิตย์ของ ASHRAE

ค่า  $A$  (Apparent solar constant) คือ ค่ารังสีตรงตั้งฉากจากดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวที่วางทำมุมตั้งฉากกับทิศทางของรังสี โดยสมมติว่าไม่มีการดูดซับหรือการกระเจิงของรังสีจากดวงอาทิตย์เนื่องจากรังสีเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศ โดยที่ค่า  $A$  นี้จะคำนวณได้โดยใช้ค่า Solar constant เป็นพื้นฐานในการคำนวณ ในปี พ.ศ.2483 Moon ได้เสนอให้ใช้ค่า Solar constant ที่มีค่าเท่ากับ  $420 \text{ Btu/hr}^2$  แต่จากการวิวัฒนาการของเครื่องมือตรวจวัดรังสีจากดวงอาทิตย์ทำให้ในปี พ.ศ. 2524 World Meteorological Organization (WMO) จึงได้เสนอให้ใช้ค่า Solar constant ที่มีค่าเท่ากับ  $433.3 \text{ Btu/hr}^2$  แทนค่าเดิม ค่า  $B$  (Atmospheric extinction coefficient) คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการลดลงของรังสีจากดวงอาทิตย์ เนื่องจากเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศเมื่อสมมติให้อัตราการลดลงอยู่ในรูปแบบของสมการเลขยกกำลัง (Exponential function) ซึ่งสมการนี้เป็นจริงเมื่อสมมติให้รังสีจากดวงอาทิตย์เป็นรังสีเอกภพ (monochromatic radiation) เท่านั้น ส่วนค่า  $C$  (Diffuse fraction factor) คือ อัตราส่วนของรังสีกระจายต่อรังสีตรงตั้งฉากจากดวงอาทิตย์

การคำนวณค่ารังสีจากดวงอาทิตย์จากแบบจำลองของ ASHRAE อยู่ภายใต้สมมติฐานของสภาพบรรยากาศเบื้องต้น (Basic atmosphere) คือ กำหนดให้จำนวนอนุภาคของฝุ่นในชั้นบรรยากาศเท่ากับ 200 อนุภาคต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความเข้มข้นของโอโซน (Ozone concentration) เท่ากับ 2.5 มิลลิเมตร และปริมาณน้ำฝน (Amount of precipitable water) มีค่าตามตารางที่ 2.12 สังเกตได้ว่าค่า  $B$  และ  $C$  จะมีการเปลี่ยนแปลงตามปริมาณของความชื้น (Humidity) บนชั้นบรรยากาศซึ่งแปรผันตามขนาดของละอองน้ำ (Particle size of the aerosol) อีกข้อหนึ่ง

นอกจากการพัฒนาการของอุปกรณ์ตรวจวัดรังสีจากดวงอาทิตย์จะมีอิทธิพลต่อการเลือกใช้ค่า Solar constant ที่มีความถูกต้องมากขึ้นแล้ว ยังรวมถึงผลงานวิจัยต่าง ๆ ที่ได้พัฒนาต่อเนื่องกันมาที่แสดงให้เห็นถึงจุดด้อยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ ASHRAE เช่น แบบจำลองไม่สามารถทำนายค่ารังสีจากดวงอาทิตย์ในบางพื้นที่ สมการไม่ครอบคลุมผลกระทบเนื่องจากการเบี่ยงเบนของสภาพแวดล้อมบนชั้นบรรยากาศ สมการไม่รวมผลกระทบเนื่องจากความขุ่นของอากาศ (Turbidity) และ สมการคำนวณค่ารังสีจากดวงอาทิตย์อยู่ภายใต้สมมติฐานว่าท้องฟ้าโปร่ง (Clear sky) ตลอดเวลา เนื่องจากการกระเจิงที่รังสีจากดวงอาทิตย์กระทบกับโมเลกุลก๊าซมีค่าค่อนข้างคงที่ การเปลี่ยนแปลงของรังสีจากดวงอาทิตย์มากที่สุด คือ การดูดซับรังสีจากดวงอาทิตย์เนื่องจากละอองน้ำในชั้นบรรยากาศ และการกระเจิงของรังสีจากดวงอาทิตย์เนื่องจากละอองอนุภาคอื่น ๆ (Aerosol) ในชั้นบรรยากาศ เป็นต้น

การปรับปรุงแบบจำลองสำหรับคำนวณค่ารังสีจากดวงอาทิตย์ของ ASHRAE ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ การปรับปรุงค่าสัมประสิทธิ์ในตารางที่ 2.12 ซึ่งถูกแสดงไว้ในตารางที่ 2.13 และ การปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งการปรับปรุงแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

**ขั้นตอนการปรับปรุงค่าสัมประสิทธิ์  $A$ ,  $B$  และ  $C$  มีทั้งหมด 2 ขั้นตอน ดังนี้**

1. ขั้นตอนแรกคือการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์  $A$ ,  $B$  และ  $C$  ที่ปรากฏในตารางที่ 2.12 ใหม่ โดยใช้ค่า Solar constant ตามคำแนะนำของ WMO ที่มีค่าเท่ากับ  $1367 \text{ W/m}^2$  แทนค่า Solar constant ค่าใหม่ที่ได้จากงานวิจัยของ Moon โดยกำหนดให้เท่ากับ  $1325 \text{ W/m}^2$



2. ขั้นตอนที่สองคือการปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ ASHRAE โดยใช้ทฤษฎีการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์จากงานวิจัยต่าง ๆ ที่ได้พัฒนาขึ้นภายหลังเข้ามาประกอบผลงานวิจัยของ Mchler และ Iqbal ที่ได้เสนอเพื่อปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ได้แก่ วิธีคำนวณทัศนวิสัย (Visiblity) ของ Linke สมการคำนวณค่าการกระเจิงแบบ Reyleigh (Reyleigh scattering) ของ Elterman สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายความหนาแน่นของละอองอนุภาค (Vertical aerosol density distribution) บนชั้นบรรยากาศที่ระดับความสูงต่าง ๆ กับความหนาแน่นของละอองอนุภาคที่ระดับพื้นดินของ McClatchey และ บทนิยามของการส่องผ่านละอองอนุภาค (Aerosol transmittance) ของ A egstrom

แบบจำลองของการคำนวณค่ารังสีตรงตั้งฉากจากดวงอาทิตย์ที่ถูกพัฒนาขึ้นใหม่เป็นแบบจำลองที่มีตัวแปรเข้ามาเกี่ยวข้องเพิ่มขึ้น ได้แก่ ค่า Extraterrestrial radiation ( $I_0$ ) ค่าการส่องผ่านละอองอนุภาค ( $\tau(A)$ ) ค่าทัศนวิสัย (VIS) และค่ามวลอากาศ (AMS) ตามสมการดังนี้

$$E_{DN} = I_0 * \tau(A) * 0.775^{(AMS^{0.5})} \quad (2.75)$$

และ

$$\tau(A) = (1 - 1.13 * VIS^{-0.57})^{(AMS^{0.85})} \quad (2.76)$$

สมการที่ 2.75 เป็นสมการในรูปทั่วไปที่สมมติให้ปริมาณความชื้นในชั้นบรรยากาศมีค่าคงที่ ซึ่งทำให้ความคลาดเคลื่อนจากการใช้งานของสมการที่ 2.75 อาจมีค่าสูงถึง 4 เปอร์เซ็นต์ ในกรณีที่ต้องการให้สมการที่ 2.75 พิจารณาปริมาณความชื้นในบรรยากาศด้วยก็สามารถทำได้โดยนำค่าปริมาณน้ำฝน (Precipitable water, w) คูณกับสมการที่ 2.75 ส่วนสมการที่ 2.76 ยังสามารถใช้งานได้เช่นเดิม

$$E_{DN} = I_0 * \tau(A) * W * 0.775^{(AMS^{0.5})} \quad (2.77)$$

และ

$$W = (1.0223 - 0.00149 * w)^{(AMS^{0.27})} \quad (2.78)$$

สมการคำนวณค่ารังสีกระจายจากดวงอาทิตย์ที่ถูกพัฒนาขึ้นใหม่จะเป็นสมการที่เกี่ยวข้องกับค่าทัศนวิสัย ซึ่งเป็นค่าที่แต่ละพื้นที่สามารถตรวจวัดได้โดยตรง ซึ่งทำให้สมการนี้เป็นสมการที่มีความคล่องตัวในการใช้งานมากขึ้น

$$E_D = E_{DN} * \left(0.1 + \frac{3.0}{VIS}\right) \quad (2.79)$$

	Turbidity	Equivalent	Revised ASHRAE coefficient		
	Coefficient	visibility	A (W/m <sup>2</sup> )	B	C
	$\beta$	VIS (km)			
January	0.0259	177	1202	0.141	0.103
February	0.0267	173	1187	0.142	0.104
March	0.0302	155	1164	0.149	0.109
April	0.0390	117	1130	0.164	0.120
May	0.0465	92	1106	0.177	0.130
June	0.0514	79	1092	0.185	0.137
July	0.0520	78	1093	0.186	0.138
August	0.0497	83	1107	0.182	0.134
September	0.0394	116	1136	0.165	0.121
October	0.0320	147	1166	0.152	0.111
November	0.0280	166	1190	0.144	0.106
December	0.0259	177	1204	0.141	0.103

ตารางที่ 2.12 ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับคำนวณค่ารังสีจากดวงอาทิตย์ที่ได้รับการปรับปรุงใหม่

แม้ว่าแบบจำลองสำหรับคำนวณค่ารังสีจากดวงอาทิตย์ของ ASHRAE เป็นวิธีการคำนวณค่ารังสีจากดวงอาทิตย์ที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายในโปรแกรมประมาณค่าพลังงานของอาคารหลายโปรแกรม เช่น โปรแกรม DOE 2.1E โปรแกรม NBSLD โปรแกรม BLAST โปรแกรม TRACE 600 และ โปรแกรม E20-II เป็นต้น เนื่องจากความเรียบง่ายของสมการ แต่ผลการเปรียบเทียบจากหลายงานวิจัยพบว่าแบบจำลองของ ASHRAE ยังไม่ครอบคลุมในหลายกรณี เช่น ผลงานวิจัยของ Mchler และ Iqbal

ผลงานวิจัยของ Sowell ที่ได้เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยรายชั่วโมงที่คำนวณจากแบบจำลองของ ASHRAE กับค่าจากการตรวจวัดที่ริเวอร์ไซด์ รัฐ California เป็นระยะเวลาหนึ่งปี พบว่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (Relative error) ระหว่างสมการของ ASHRAE และค่าจากการตรวจวัด มีค่ามากในช่วงเช้าและช่วงบ่ายซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ค่ามวลอากาศมีค่าสูง แต่ในช่วงใกล้เวลาเที่ยง สุริยะค่าคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์จะมีค่าน้อยกว่า 23 เปอร์เซ็นต์ ผลงานวิจัยของ Powell ซึ่งศึกษาการกระจายของค่ารังสีจากดวงอาทิตย์จากสถานีตรวจอากาศจำนวน 32 สถานีที่กระจายอยู่ทั่วสหรัฐอเมริกา ซึ่งเห็นว่าผลเฉลยจากแบบจำลองของ ASHRAE มีค่าใกล้เคียงกับผลเฉลยจากแบบจำลองอื่น ๆ ที่มีความซับซ้อนมากกว่า แต่จากผลงานวิจัยของ McLaren พบว่าแบบจำลองของ ASHRAE ให้ผลเฉลยที่แย่ที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองอื่น ๆ จำนวน 6 แบบ จากผลงานวิจัยของ Chatigny และ Galanis ที่ทำการเปรียบเทียบค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์และรังสีกระจายจากดวงอาทิตย์รายชั่วโมงที่ตกกระทบพื้นผิวในแนวระดับที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระหว่างแบบจำลองของ ASHRAE (13) กับแบบจำลองของ Won (Won solar radiation model) ที่สถานที่ 4 แห่งของแคนาดาตะวันออก โดยใช้ค่ารังสีจากดวงอาทิตย์จากการตรวจวัดเป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบ พบว่าแบบจำลองของ Won มีความเหมาะสมสำหรับใช้ในการทำนายค่ารังสีจากดวงอาทิตย์ของบริเวณแคนาดาตะวันออกมากกว่าแบบจำลองของ ASHRAE เนื่องจากค่า RMS monthly error ของรังสีจากดวงอาทิตย์มีค่าต่ำและค่อนข้างมีความสม่ำเสมอ (Uniform) ตลอดทั้งปี

### ผลงานวิจัยของ Exell

ชนิดของรังสีจากดวงอาทิตย์ที่มาถึงพื้นผิวโลกนั้นแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ Direct normal solar radiation และ Diffuse solar radiation ซึ่งเป็นรังสีที่เกิดจากการกระเจิงรังสีเนื่องจากรังสีจากดวงอาทิตย์กระทบกับโมเลกุลก๊าซ อนุภาคน้ำ หรือ ก้อนเมฆในชั้นบรรยากาศ โดยที่ผลรวมของค่า Direct solar radiation และค่า Diffuse solar radiation ที่ตกกระทบบนพื้นผิวในแนวระดับ จะถูกเรียกว่า Global solar radiation ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$G = E_{DN} * \cos(\theta) + E_D \quad (2.80)$$

เมื่อ  $E_{DN}$  คือ ปริมาณแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบกับพื้นผิวที่ตั้งฉากกับรังสีของดวงอาทิตย์

$\theta$  คือ มุมระหว่างรังสีตรงตั้งฉากจากดวงอาทิตย์กับเวกเตอร์ที่ชี้ออกจากพื้นผิว

$E_D$  คือ Diffuse solar radiation

ส่วนปริมาณอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณค่า  $E_{DN}$  ก็มีขั้นตอนและมีรูปแบบคล้ายกับการคำนวณค่า  $E_{DN}$  ตาม ASHRAE Handbook แต่มีรายละเอียดปลีกย่อยในการคำนวณต่างกัน โดยจะขอสู่ถึงขั้นตอนการคำนวณอย่างย่อ ๆ ดังต่อไปนี้

Zone mean time (ZMT) ของประเทศไทยอยู่ที่ Standard Meridian 105°E ซึ่งเป็นเวลานำหน้าเวลาที่ Greenwich จำนวน 7 ชั่วโมง

Local mean time (LMT) ของสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย ตั้งอยู่ที่ 100.80°E

Apparent solar time (AST) คือ เวลาที่วัดจากตำแหน่งของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้า ซึ่งจะมีค่า 12.00 น. เมื่อดวงอาทิตย์ผ่านเส้น meridian ของจุดที่ตั้งเขตพอดิ

Equation of time (ET) คือ ผลต่างของ AST กับ Local standard time (LST) โดยในที่นี้จะคิดว่าค่าของ ET ที่วันเดียวกันของแต่ละปีจะมีค่าเท่ากัน

Hour angle ( $H$ ) of the sun คือ มุมระหว่างระนาบของเส้น meridian และระนาบของดวงอาทิตย์กับแกนของโลก ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\omega = 15 * t \quad (2.81)$$

เมื่อ

$$t = (12 - AST) \quad (2.82)$$

Declination ( $\delta$ ) of the sun คือ ระยะทางเชิงมุมที่วัดจาก Celestial equator ไปทางทิศเหนือตามรูป ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ Fourier series ดังนี้

$$\begin{aligned} \delta = & A_0 + A_1 * \cos t + A_2 * \cos^2 * t + A_3 * \cos^3 * t \\ & + B_1 * \sin t + B_2 * \sin^2 * t + B_3 * \sin^3 * t \end{aligned} \quad (2.83)$$

เมื่อ

$$t = \frac{360 * (n_d - 80)}{365} \quad (2.84)$$

$n_d$  คือ จำนวนวันที่นับเริ่มจากวันที่ 1 มกราคม

$A_0$	=	0.386470			
$A_1$	=	-0.792624	$B_1$	=	23.259526
$A_2$	=	0.377853	$B_2$	=	0.131544
$A_3$	=	0.030124	$B_3$	=	-0.167013

ตารางที่ 2.13 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของสมการที่ 2.83

Latitude ( $\phi$ ) คือ มุมระหว่างทิศของ Zenith กับ ระนาบของ Celestial equator

Altitude ( $\alpha$ ) คือ มุมระหว่างดวงอาทิตย์ กับ พื้นผิวในแนวระนาบแสดงดังรูปที่ 3.2 ซึ่งคำนวณได้จาก

สมการ

$$\sin \alpha = \cos \phi * \cos \delta * \cos \omega + \sin \phi * \sin \delta \quad (2.85)$$

เนื่องจากการสะท้อนของแสงในชั้นบรรยากาศ ซึ่งจะทำให้ดวงอาทิตย์อยู่สูงกว่าค่าที่คำนวณได้จากสมการที่ 2.85 เล็กน้อย

Azimuth ( $\zeta$ ) คือ มุมระหว่างทิศใต้บนพื้นผิวในแนวระนาบ กับ เส้นฉายจากดวงอาทิตย์ลงมาบนพื้นผิวในแนวระนาบ โดยวัดทิศทางไปทางทิศตะวันตก ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\sin \zeta = \frac{\cos \delta * \sin \omega}{\cos \alpha} \quad (2.86)$$

$$\cos \zeta = \frac{(\sin \phi * \cos \delta * \cos \omega - \cos \phi * \sin \delta)}{\cos \alpha} \quad (2.87)$$

ในกรณีที่แสงอาทิตย์ตกกระทบบนพื้นผิวระนาบเอียงที่ทำมุมใด ๆ กับแนวระดับ พบว่ารังสีจากดวงอาทิตย์บนพื้นผิวจะมีค่าเท่ากับ โดยค่า สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\cos \theta = \sin \alpha * \sin \alpha' + \cos \alpha * \cos \alpha' * \cos(\zeta - \zeta') \quad (2.89)$$

เมื่อ  $\alpha'$  คือ Altitude ของเส้นที่ตั้งฉากกับพื้นผิวเอียง  
 $\zeta'$  คือ Azimuth ของเส้นที่ตั้งฉากกับพื้นผิวเอียง

โดยค่า Diffuse solar radiation บนพื้นผิวเอียง เมื่อตั้งสมมติฐานให้ท้องฟ้าโปร่ง มีค่าเท่ากับ

$$\frac{1}{2} * E_{DIF} * (1 + \sin \alpha') \quad \text{เมื่อ คือ ค่า Diffuse solar radiation บนพื้นผิวในแนวระดับ}$$

### การคำนวณค่ารังสีจากดวงอาทิตย์ในวันที่ท้องฟ้าโปร่ง

ตัวแปรที่มีผลต่อปริมาณความเข้มของแสงอาทิตย์ที่ตกสู่ผิวโลกในบทความนี้ คือ ค่า Solar altitude  $\alpha$  ระยะห่างจากโลกถึงดวงอาทิตย์ ปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศ ความขุ่นมัวของชั้นบรรยากาศ (Atmospheric turbidity) และปริมาณเมฆบนท้องฟ้า (Cloudiness)

โดยในการคำนวณค่า Global solar radiation ( $G_G$ ) และค่า Direct Solar Radiation Flux ( $E_{dir}$ ) สามารถคำนวณได้ด้วยสมการที่มีตัวแปรต้นขึ้นกับมุม zenith ( $Z$ ) ในรูปแบบดังต่อไปนี้

$$Z = 1 - \frac{\alpha}{90} \quad (2.90)$$

โดยกำหนดให้ค่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มของรังสีจากดวงอาทิตย์เนื่องจากวัฏจักรโคจรของโลก รอบดวงอาทิตย์มีค่าไม่คงที่ อยู่ในรูปของตัวคูณประกอบ  $F$  ดังสมการต่อไปนี้

$$F = 1 - 0.0335 * \sin \frac{360 * (n_d - n_0)}{365} \quad (2.91)$$

ในกรณีที่  $\alpha \geq 0$  ค่าของ  $G$  และ  $E_{DN}$  สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$G = F * \sum_{s=0}^6 a_s * Z^{2-s} \quad (2.92)$$

$$EDN = F * \sum_{s=0}^6 b_s * Z^{2-s} \quad (2.93)$$

ถ้าค่าของ  $\alpha$  มีค่านอกเหนือจากช่วงที่กำหนดจะได้  $G = 0$  และ  $E_{DN} = 0$  ส่วนค่าของสัมประสิทธิ์  $a_s$  และ  $b_s$  จะมีค่าตามตารางที่ 2.14 ดังนี้

$a_0 = 1.1049$	$b_0 = 0.9864$
$a_1 = -1.4354$	$b_1 = -0.2001$
$a_2 = -1.0720$	$b_2 = -1.1883$
$a_3 = 6.6849$	$b_3 = 3.3705$
$a_4 = -13.8990$	$b_4 = -5.7674$
$a_5 = 13.0798$	$b_5 = 3.7206$
$a_6 = -4.4631$	$b_6 = -0.9217$

ตารางที่ 2.14 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของสมการที่ 2.92 และ 2.93

ค่าที่คำนวณได้จากสมการที่ 2.92 และ 2.93 ไม่ได้รวมผลกระทบเนื่องค่าความขุ่นมัว (Turbidity) และปริมาณเมฆ (Cloudiness) ไว้ด้วย ส่วนค่า Diffuse solar radiation บนพื้นผิวในแนวระนาบสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$E_D = G - E_{DN} * \sin \alpha \quad (2.94)$$

ขั้นตอนการคำนวณดังที่ได้กล่าวมาทั้งหมด เป็นการคำนวณเพื่อหาค่าของ Global solar radiation ค่า Direct Solar Radiation และ ค่า Diffuse Solar Radiation ที่ตกกระทบบนพื้นผิวเอียงใด ๆ ในวันที่ท้องฟ้าโปร่ง โดยสมการเหล่านี้ได้คำนึงถึงผลเนื่องจาก Solar altitude และ ระยะห่างจากโลกถึงดวงอาทิตย์เท่านั้น แต่ไม่ได้พิจารณาถึงผลกระทบเนื่องจากความขุ่นมัวของชั้นบรรยากาศ (Turbidity) และปริมาณของเมฆในท้องฟ้า (Cloudiness) โดยผลกระทบที่เกิดขึ้นเนื่องจากสาเหตุทั้งสองนี้จะกล่าวถึงในภายหลังในช่วงที่อธิบายถึงการปรับแก้ค่าทางทฤษฎีให้ใกล้เคียงกับสภาพอากาศจริง

**การเปรียบเทียบค่ารังสีจากดวงอาทิตย์ในวันท้องฟ้าโปร่งที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำนวน 3 แบบจำลอง (อ้างอิงจาก Louche, Simonnot และ Iqbal )**

ในปี พ.ศ. 2531 Louche, Simonnot และ Iqbal ได้เปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จำนวน 3 แบบ ที่ใช้ในการคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์ รังสีกระจายจากดวงอาทิตย์ และ รังสีตรงตั้งฉากจากดวงอาทิตย์ของวันท้องฟ้าโปร่ง โดยนำผลเฉลยจากแบบจำลองดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับรังสีจากดวงอาทิตย์ที่ได้จากการตรวจวัดที่เมือง Carpentras ประเทศฝรั่งเศส โดยแบบจำลองที่นำมาเปรียบเทียบได้แก่ แบบแรกคือแบบจำลองของ Paltridge และ Platt และแบบที่สอง คือแบบจำลองของ Sasamori และ Hoyt และ และแบบที่สามคือแบบจำลองของ Bird และ Hulstrom และ

การเปรียบเทียบความแม่นยำจะใช้ค่า Mean bias error และ Root mean square error เป็นเกณฑ์ในการตัดสิน ผลจากการเปรียบเทียบพบว่า แบบจำลองที่สามคำนวณค่ารังสีตรงตั้งฉากจากดวงอาทิตย์ได้ใกล้เคียงกับค่าจากการตรวจวัดมากที่สุด ส่วนแบบจำลองที่สองสามารถคำนวณค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์และรังสีกระจายจากดวงอาทิตย์ได้ใกล้เคียงกับค่าจากการตรวจวัดมากกว่าแบบจำลองอีกสองแบบ

#### 2.13.4 ค่าปรับแก้ของอุปกรณ์วัดรังสีจากดวงอาทิตย์ (อ้างอิงจาก Hua )

การหาค่าปรับแก้ของชุดอุปกรณ์วัดรังสีจากดวงอาทิตย์ ได้แก่ อุปกรณ์วัดรังสีจากดวงอาทิตย์ และ อุปกรณ์เก็บข้อมูล เป็นต้น ควรกระทำเป็นประจำทุกปี หรือทุก 2 ปี ภายใต้สภาวะการใช้งานจริง เพื่อให้ค่ารังสีจากดวงอาทิตย์ที่บันทึกได้นั้นมีค่าตามมาตรฐานที่กำหนด เนื่องจากอุปกรณ์วัดรังสีจากดวงอาทิตย์มีหลายชนิดด้วยกัน เช่น Pyranometer เป็นต้น ดังนั้น ค่าปรับแก้จะขึ้นกับชนิดของอุปกรณ์วัดรังสีจากดวงอาทิตย์ด้วย ดังนี้

การหาค่าปรับแก้ของ Pyrhellometer จะต้องนำ Pyrhellometer ที่ติดตั้งที่สถานีตรวจอากาศมาเทียบกับ First class pyrhellometer ที่ใช้เป็นมาตรฐานของประเทศที่ได้รับการปรับแก้เป็นประจำทุกปี การเปรียบเทียบเพื่อหาค่าปรับแก้ควรทำการเปรียบเทียบคุณลักษณะเด่นของอุปกรณ์ เช่น ค่าความไว (Sensitivity) ผลกระทบของอุณหภูมิ (Effect of temperature) มุมของการรับรังสี (Angle of aperture) ความเป็นเชิงเส้น (Linearity) ค่าคงที่ของเวลา (Time constant) เป็นต้น รวมทั้งต้องบันทึกข้อมูลอื่นเพื่อนำมาประกอบการวิเคราะห์ต่อไป เช่น ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ ค่าความขุ่นมัว เสถียรภาพของรังสีตรงตั้งฉากจากดวงอาทิตย์

(Stability of direct radiation) เป็นต้น การเปรียบเทียบอุปกรณ์ภายใต้สภาวะการทำงานจริงควรกระทำในเวลาที่ได้รับรังสีจากดวงอาทิตย์เต็มที่ เช่น มีเมฆน้อยมากและไม่ควรมีก่อนเมฆอยู่ในรัศมี 15 องศาจากรอบดวงอาทิตย์เป็นเวลาอย่างน้อยที่สุด 15 นาที

การหาค่าปรับแก้ของ Pyranometer ภายใต้สภาวะการทำงานจริงอาจทำได้หลายวิธีด้วยกัน (WHO (38)) เช่น การเปรียบเทียบโดยใช้ Pyranometer มาตรฐาน กับ Shading disk การเปรียบเทียบโดยใช้ Pyranometer มาตรฐานเพื่อใช้ตรวจวัดรังสีตรงตั้งฉากจากดวงอาทิตย์กับ Pyranometer ที่ติดตั้ง Shading disk เพื่อใช้ตรวจวัดรังสีกระจายจากดวงอาทิตย์ และ การเปรียบเทียบโดยใช้ Pyranometer มาตรฐาน เป็นต้น

วิธีการหาค่าปรับแก้ของ Pyranometer โดยใช้ Pyrheliometer มาตรฐานเป็นอุปกรณ์เปรียบเทียบ จะเริ่มจากใช้ Pyranometer ตรวจวัดค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์ และใช้ Pyranometer ร่วมกับ Shading disk ตรวจวัดค่ารังสีกระจายจากดวงอาทิตย์ ช่วงเวลาที่ใช้ในการตรวจวัดขึ้นกับ ความสม่ำเสมอของรังสีจากดวงอาทิตย์ เวลาตอบสนอง (Response time) ของ Pyranometer และเวลาที่ทำให้อุณหภูมิและอัตราการแลกเปลี่ยนรังสีของครอบแก้ว (Glass dome) ของ Pyranometer อยู่ในสภาวะสมดุล (Equilibrium) เป็นต้น ผลต่างของค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์กับค่ารังสีกระจายจากดวงอาทิตย์ คือ ค่ารังสีตรงจากดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวในแนวระดับ ( $E_{DN} \cdot \cos(\theta)$ ) โดยที่ค่ารังสีตรงตั้งฉากจากดวงอาทิตย์ ( $E_{DN}$ ) สามารถตรวจวัดได้ด้วย Pyranometer มาตรฐาน และ ค่ามุมตกกระทบ ( $\theta$ ) อาจมาจากการตรวจวัดหรือจากการคำนวณก็ได้ ถ้าสมมติให้การตอบสนองต่อรังสีจากดวงอาทิตย์ของ Thermopile เป็นสมการเชิงเส้นก็จะสามารถคำนวณค่าตัวปรับแก้ของ Pyranometer ได้

ถึงแม้ว่าการสอบเทียบอุปกรณ์เพื่อหาค่าปรับแก้จะมีความสำคัญต่อการตรวจวัดค่ารังสีดวงอาทิตย์ที่ถูกต้องก็ตาม แต่ยังมีปัจจัยอีกหลายอย่างที่ส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของการตรวจวัดค่ารังสีจากดวงอาทิตย์ ตัวอย่างเช่น ผลงานวิจัยของ Suehrcke ที่ได้ศึกษาผลกระทบของความแม่นยำของเวลาของอุปกรณ์บันทึกข้อมูลที่มีต่อการตรวจวัดรังสีจากดวงอาทิตย์ โดยใช้กราฟ Cumulative probability distribution ของค่าดัชนีความกระจ่าง (Cleanness Index) เป็นเกณฑ์ในการวิเคราะห์ความแม่นยำ (ค่าดัชนีความกระจ่าง คือ อัตราส่วนของค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์ขณะใด ๆ ทหารด้วยค่า Extraterrestrial solar radiation) พบว่า ถึงแม้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนของเวลาการตรวจวัดจะน้อย (10 นาที) แต่ความคลาดเคลื่อนดังกล่าวจะทำให้ลักษณะของกราฟเปลี่ยนแปลงไปอย่างเห็นได้ชัดเจน

### 2.13.5 การประมาณค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์ด้วยวิธีทางสถิติ

การประมาณค่าปริมาณแสงอาทิตย์จากระยะเวลาการส่องสว่างของดวงอาทิตย์ (อ้างอิงจาก Exell )

สำหรับในหลายสถานที่ที่ไม่ได้มีการเก็บข้อมูลแสงอาทิตย์ด้วยเครื่องวัดปริมาณแสงอาทิตย์โดยตรงก็จะเก็บข้อมูลช่วงเวลาการส่องสว่างของดวงอาทิตย์ (Duration of sunshine) แทน ด้วยการใช้เครื่อง Campbell-Stokes sunshine recorder ซึ่งจะสามารถนำช่วงเวลาดังกล่าวมาแปลงกลับเป็นปริมาณแสงอาทิตย์เฉลี่ยทั้งวัน ( $H_d$ ) ได้โดยใช้สมการ Angstrom regression equation ดังต่อไปนี้

$$\frac{H_d}{H_c} = a + b * \frac{S}{S_m}$$

(2.95)

เมื่อ  $H_0$  คือ ค่าปริมาณแสงอาทิตย์ที่คำนวณได้จากการอินทิเกรตสมการที่ 2.29 ในช่วงเวลาตั้งแต่ดวงอาทิตย์ขึ้นจนถึงดวงอาทิตย์ลับขอบฟ้า (S) คือ ช่วงเวลาเฉลี่ยที่ดวงอาทิตย์ส่องแสงที่สังเกตได้จริงในช่วงเวลาหนึ่งวัน ( $S_m$ ) คือ ช่วงเวลาเฉลี่ยที่มากที่สุดที่ดวงอาทิตย์ส่องแสงในหนึ่งวันที่เครื่องบันทึกสามารถบันทึกได้ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับช่วงเวลาตั้งแต่ดวงอาทิตย์ขึ้นจนถึงเวลาลับขอบฟ้าลบด้วย 0.4 ชั่วโมง (เป็นเวลาที่ดวงอาทิตย์อยู่ต่ำและความเข้มของรังสีต่ำเกินกว่าที่จะเผากระดาษบันทึกได้) ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ a และ b เป็นค่าสัมประสิทธิ์แห่งการถดถอย ซึ่งขึ้นกับตำแหน่งและวันที่ทำการสังเกต ซึ่งในบทความนี้จะแนะนำให้ใช้ค่า  $a = 0.33$  และ  $b = 0.52$  สำหรับสถานที่ที่ตั้งอยู่ในบริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (อ้างอิงค่าสัมประสิทธิ์ a และ b จาก Exell และ RAMDAS กับ YEGNANARAYAN )

สมการที่ 2.95 เป็นสมการที่ใช้ในการประมาณค่า  $H_d$  จาก S โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง  $\pm 2 \text{ MJ/m}^2$  ต่อวัน

#### การประมาณค่าปริมาณแสงอาทิตย์จากปริมาณเมฆในท้องฟ้า

ในกรณีที่ไม่สามารถตรวจอากาศไม่ได้จัดเก็บข้อมูลปริมาณรังสีจากดวงอาทิตย์รายชั่วโมง และข้อมูลช่วงเวลาการส่องสว่างของดวงอาทิตย์ในหนึ่งวัน ก็อาจจะประมาณค่ารังสีจากอาทิตย์อย่างคร่าว ๆ ได้ด้วยการใช้ข้อมูลปริมาณเมฆในท้องฟ้า ซึ่งจากบทความนี้ได้ใช้ข้อมูลจากการวัดปริมาณเมฆในท้องฟ้า (Mean daily cleanness factor ( $\bar{K}_d$ ) ดังนี้

$$\bar{K}_d = 0.8 - 0.005 * c^2 \quad (2.96)$$

เมื่อค่า C มีค่าอยู่ในช่วง 2 ถึง 7 โดยสมการที่ 2.96 เหมาะสมในการคำนวณค่า Cleanness factor สำหรับสถานที่ที่ตั้งอยู่ในบริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ และสถานที่ที่ตั้งอยู่ในเขตศูนย์สูตร

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย