

# บทที่ 2

## ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาวิจัยงานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้องกับการควบคุมระบบติดตามดวงอาทิตย์และระบบสะท้อนแสงอาทิตย์ คณะผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการทำวิจัย โดยรวบรวมและเรียบเรียงสาระสำคัญไว้ดังต่อไปนี้

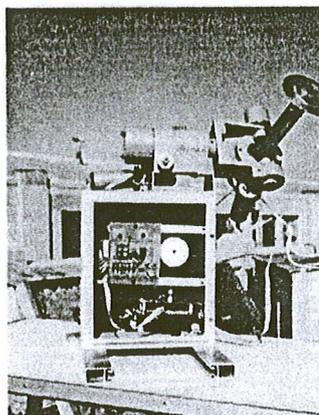
Aracil และ คณะ [1] นำเสนอระบบติดตามดวงอาทิตย์โดยใช้ตัวตรวจจับที่ถูกทำมาด้วยเทคโนโลยี MEMS ส่วนอัลกอริทึมที่ใช้ในการควบคุมนั้นได้ใช้การพิจารณาสมการอนุกรมวิธาน

ธนกร และ คณะ [2] ได้ออกแบบอุปกรณ์ติดตามดวงอาทิตย์ โดยวิธีการคำนวณหาพิกัดตำแหน่งของดวงอาทิตย์ด้วยการคำนวณจากสมการคณิตศาสตร์ ที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างผิวโลกกับพิกัดตำแหน่งของดวงอาทิตย์แทนการใช้ตัวตรวจจับแอลดีอาร์ (LDR) โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น P89V51RD2 เพื่อที่จะควบคุมการหมุนของมอเตอร์ให้หมุนตามพิกัดของดวงอาทิตย์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้หลักการควบคุมแบบป้อนกลับ

คงฤทธิ์ และ คณะ [3] ได้นำเสนอโปรแกรมจำลองติดตามดวงอาทิตย์ (Sun tracking and simulation) ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ช่วยในการคำนวณหาพิกัดตำแหน่งของดวงอาทิตย์ ณ เวลาใดๆ โดยการแสดงผลจะออกมาเป็นทั้งค่าของ มุมซันนิช (Zenith angle) มุมอซิมูทสุริยะ (Solar azimuth) มุมอัลติจูดสุริยะ (Solar altitude) มุมระหว่างแนวเส้นแวงแสงอาทิตย์ (Declination angle)

และมุมชั่วโมง (Hour angle) อีกทั้งยังสามารถแสดงการเปรียบเทียบค่าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนตัวรับ รังสีดวงอาทิตย์แบบเคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์และแบบติดตั้งอยู่กับที่

Roth และ คณะ [4] ได้สร้างระบบจักรกลไฟฟ้าในการหาตำแหน่งของดวงอาทิตย์ โดยใช้ระบบวัดตำแหน่งดวงอาทิตย์แบบออตโนมิตด้วยโฟโตไดโอดจำนวน 4 ตัว (Four - quadrant photodiode) ซึ่งติดตั้งเป็นวงกลม และวัดการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ด้วยเครื่องมือวัดพลังงานจากดวงอาทิตย์ (Pyrheliometer) ส่วนระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบจักรกลไฟฟ้าแบบออตโนมิตได้ใช้การควบคุมแบบวงปิดและมีตัวต้นกำลังเป็นดีซีมอเตอร์

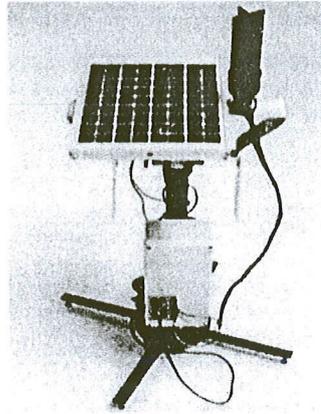


รูปที่ 2.1 โครงสร้างของระบบหาตำแหน่งดวงอาทิตย์โดยใช้เครื่องมือวัดพลังงานจากดวงอาทิตย์ [4]

Bakos [5] ได้ออกแบบระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบสองแกนที่มีโครงสร้างอย่างง่ายที่ใช้มอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อน โดยที่โครงสร้างนี้จะต้องง่ายแก่การติดตั้ง การทำงานและยังต้องการซ่อมบำรุงต่ำ ส่วนตัวตรวจวัดตำแหน่งดวงอาทิตย์นั้นได้ใช้โฟโตรีซิสเตอร์ (Photoresistor) จำนวน 2 ตัว ต่ออนุกรมกัน

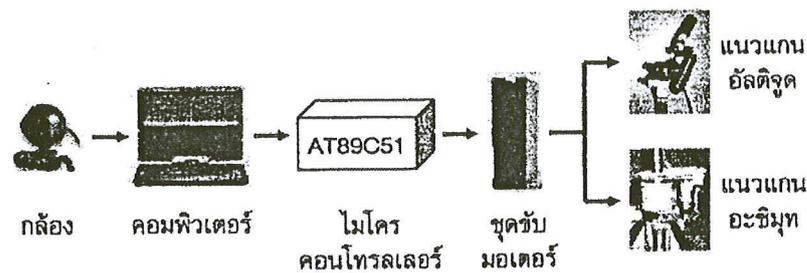
อนุชา และ คณะ [6] ได้ออกแบบเครื่องติดตามดวงอาทิตย์แบบ 2 แกน ส่วนตัวตรวจจ็ับรังสีดวงอาทิตย์ได้ใช้โฟโตทรานซิสเตอร์ โดยใช้หลักการบังเงาจากกัน ในการขับเคลื่อนนั้นได้ใช้มอเตอร์กระแสตรงเป็นตัวต้นกำลังจำนวน 2 ตัว เพื่อที่เครื่องติดตามดวงอาทิตย์นี้จะเคลื่อนที่ตามแนวแกนอัลติจูด และ อซิมูท

ธนภัทร พรหมวัฒน์ภักดี และ คณะ [7] เสนอระบบติดตามดวงอาทิตย์จากอุปกรณ์ตรวจจ็ับตำแหน่งเชิงดิจิทัลด้วยซีพีแอลดี โดยในการติดตามดวงอาทิตย์ใช้หลักการบังเงาจากกัน มีโฟโตทรานซิสเตอร์เป็นตัวตรวจจ็ับรังสีตรงของดวงอาทิตย์ การวางตำแหน่งโฟโตทรานซิสเตอร์ออกแบบให้สามารถตรวจจ็ับรังสีตรงของดวงอาทิตย์ครอบคลุมตลอดทั้ง 2 แนว ส่วนการควบคุมจะใช้การควบคุมแบบซีพีแอลดี (Complex programmable logic device)



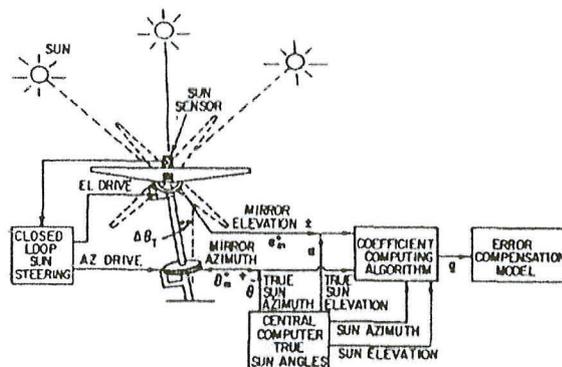
รูปที่ 2.2 ระบบติดตามดวงอาทิตย์จากอุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งเชิงดิจิทัลด้วยซีพีแอลดี [7]

ศักดิ์สิทธิ์ บัวเงิน และ คณะ [8] เสนอระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่เคลื่อนที่ได้ 2 แกน ซึ่งใช้เทคนิคการประมวลผลภาพ โดยในการติดตามดวงอาทิตย์ระบบจะใช้ภาพดวงอาทิตย์ซึ่งรับมาจากกล้องดิจิทัลเว็บแคมและใช้คอมพิวเตอร์ในการประมวลผลภาพ ส่วนการควบคุมจะใช้การควบคุมแบบไมโครคอนโทรลเลอร์ (Micro - controller)

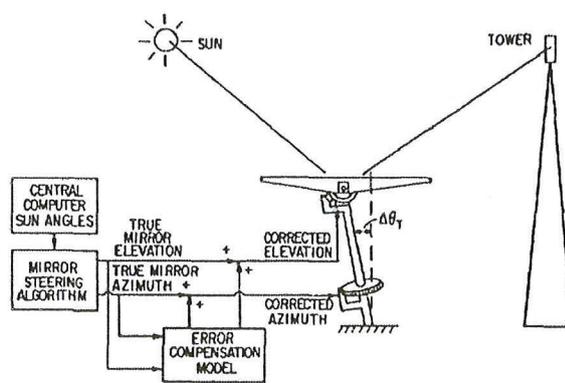


รูปที่ 2.3 โครงสร้างของระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุม [8]

Baheti และ Scott [9] นำเสนอตัวควบคุมแบบปรับตั้งได้อัตโนมัติ (Self - calibrating) เพื่อใช้ในการลดความผิดพลาดของเสาสะท้อนแสงอาทิตย์ (Heliostat) จากการติดตั้งและการขับ โดยตัวควบคุมถูกออกแบบเป็น 2 โหมด โหมดแรกเรียกว่า โหมดปรับตั้ง (Calibration mode) โหมดนี้เสาสะท้อนแสงอาทิตย์จะถูกควบคุมด้วยระบบวงรอบเปิด (Open - loop system) และแบบจำลองของค่าความผิดพลาดของเสาสะท้อนแสงอาทิตย์ จากการติดตั้งและการขับจะถูกคำนวณหาเอกลักษณ์โดยใช้ อัลกอริทึม Least - squares เพื่อหาพารามิเตอร์ของโมเดล โหมดที่สองเรียกว่า โหมดติดตาม (Track mode) โหมดนี้เสาสะท้อนแสงอาทิตย์จะถูกควบคุมด้วยระบบวงรอบเปิด (Open loop - system) โดยใช้พารามิเตอร์ของโมเดลที่ได้จากโหมดแรกมาชดเชยค่าความผิดพลาดของเสาสะท้อนแสงอาทิตย์

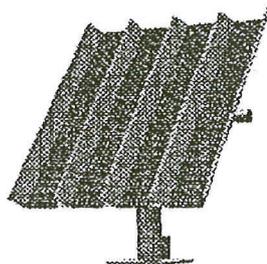


รูปที่ 2.4 โหมดปรับตั้ง [9]



รูปที่ 2.5 โหมดติดตาม [9]

Enrile และ คณะ [10] ได้ออกแบบตัวต้นแบบของเสาสะท้อนแสงอาทิตย์ (Heliostat) ที่เคลื่อนที่ได้ 2 แกนและสามารถสะท้อนแสงอาทิตย์ได้เป็นสองเท่า โดยหมุนรอบแกนเอียงได้  $0 - 240$  องศา และแกน อัลติจูด  $0 - 90$  องศา และมีความเที่ยงตรงที่  $\pm 1$  องศา ส่วนการติดตามดวงอาทิตย์นั้นใช้พื้นฐานของสมการทางดาราศาสตร์ (Astronomical equations) และควบคุมด้วยวงรอบเปิด โดยใช้ พีแอลซี (PLC) เป็นตัวควบคุม และใช้โมดูล CAN เน็ตเวิร์คของพีแอลซีเป็นตัวสื่อสารข้อมูลจากเสาสะท้อนแสงอาทิตย์หนึ่งไปยังอีกเสาสะท้อนแสงอาทิตย์หนึ่ง



รูปที่ 2.6 เสาสะท้อนแสงอาทิตย์ ที่เคลื่อนที่ได้ 2 แกน [10]

จากงานวิจัยระบบติดตามดวงอาทิตย์ [1] ถึง [3] จะเห็นว่าตัวควบคุมส่วนใหญ่สามารถควบคุมระบบติดตามดวงอาทิตย์ได้ แต่อย่างไรก็ตามระบบติดตามดวงอาทิตย์ส่วนใหญ่ไม่ได้ใช้วิธีติดตาม ดวงอาทิตย์แบบเวลาจริง (Real time) เพื่อให้เกิดความหลากหลายในระบบการควบคุม ผู้วิจัยจึงได้นำระบบภาพโดยใช้กล้องดิจิทัลอุตสาหกรรมมาใช้ในการติดตามดวงอาทิตย์

งานวิจัย [4] ถึง [7] เป็นการควบคุมระบบติดตามดวงอาทิตย์ที่ใช้วิธีติดตามดวงอาทิตย์แบบเวลาจริงและสามารถควบคุมระบบติดตามดวงอาทิตย์ได้

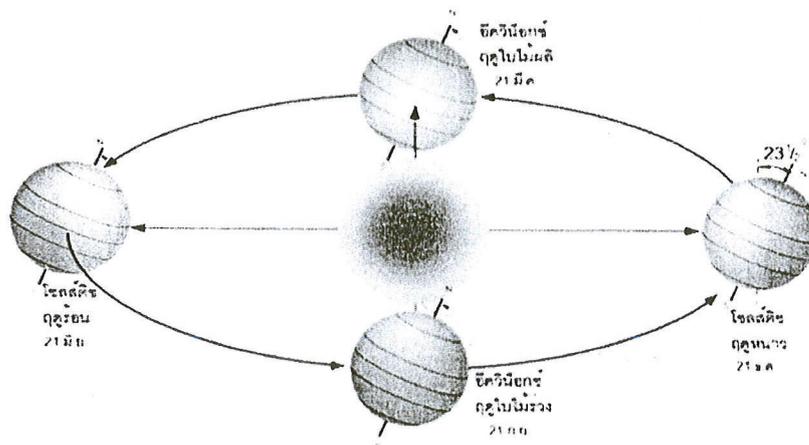
งานวิจัยที่ [8] เป็นการติดตามดวงอาทิตย์ โดยใช้ภาพจากกล้องดิจิทัลเว็บแคมในการติดตามดวงอาทิตย์ แต่เนื่องจากกล้องดิจิทัลเว็บแคมมีความละเอียดที่ต่ำและมีการส่งข้อมูลที่ช้า ดังนั้นผู้ทำ การวิจัยจึงได้เลือกใช้กล้องดิจิทัลอุตสาหกรรมซึ่งมีความละเอียดที่สูงและมีประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลที่สูง เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพที่ดีขึ้นในการใช้ข้อมูลภาพในการควบคุมระบบติดตามดวงอาทิตย์

งานวิจัย [9] ถึง [10] เป็นการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบสะท้อนแสงอาทิตย์ จะเห็นว่าตัวควบคุมดังกล่าวสามารถควบคุมระบบสะท้อนแสงอาทิตย์ได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ประยุกต์การนำค่าตำแหน่งของดวงอาทิตย์ที่ได้จากระบบติดตามดวงอาทิตย์โดยใช้เทคนิคการประมวลผลภาพมาออกแบบตัวควบคุมเพื่อควบคุมระบบสะท้อนแสงอาทิตย์

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ระบบติดตามดวงอาทิตย์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทตามวิธีติดตาม คือ ประเภทแรก ระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบไม่ได้ใช้วิธีแบบเวลาจริง เช่น การคำนวณตำแหน่งดวงอาทิตย์จากสมการคณิตศาสตร์ ซึ่งมีข้อจำกัดคือ เมื่อมุมแกนหมุนของโลกเปลี่ยนทำให้ระบบมีความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้น ประเภทที่สอง ระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบใช้วิธีแบบเวลาจริง เช่น การใช้กล้องดิจิทัลเว็บแคม ซึ่งมีข้อจำกัดคือ กล้องดิจิทัลเว็บแคมมีความละเอียดที่ต่ำและมีการส่งข้อมูลที่ช้า ทำให้ระบบมีความแม่นยำต่ำและมีการตอบสนองที่ไม่ดี ดังนั้นเพื่อลดข้อจำกัดจากงานวิจัยที่ผ่านมา งานวิจัยชิ้นนี้จึงได้ใช้ระบบติดตามดวงอาทิตย์แบบเวลาจริง โดยใช้กล้องดิจิทัลอุตสาหกรรมในการรับข้อมูลภาพ

## 2.2 ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ที่ปรากฏบนโลก

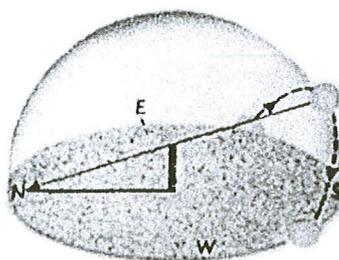
โลกโคจรรอบดวงอาทิตย์ในลักษณะที่เป็นวงรี แกนหมุนของโลกทำมุมเอียง 23.5 องศากับระนาบการโคจรรอบดวงอาทิตย์ โดยแกนของโลกจะชี้ไปตำแหน่งเดิมตลอดเวลา



รูปที่ 2.7 การโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ [11]

ณ ตำแหน่งของโลกในวันที่ 21 กันยายน โลกจะเอียงด้านข้างให้กับดวงอาทิตย์ และแกนของโลกจะอยู่ในระนาบตั้งฉากกับรัศมีจากดวงอาทิตย์พอดี ทำให้แนวของแสงอาทิตย์จะอยู่บนระนาบของเส้นศูนย์สูตร ณ วันที่ดวงอาทิตย์ขึ้นทางทิศตะวันออกและตกทางทิศตะวันตกพอดี ซีกโลกด้านเหนือและซีกโลกด้านใต้จะได้รับแสงอาทิตย์เท่ากัน และช่วงเวลากลางวันและกลางคืนเท่ากัน เท่ากับ 12 ชั่วโมง เรียกตำแหน่งนี้ว่า ศารทวิษุวัต (Autumnal equinox)

ณ ตำแหน่งของโลกในวันที่ 21 ธันวาคม โลกจะเอียงขั้วโลกใต้เข้าหาดวงอาทิตย์มากที่สุด ทำให้ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ที่ปรากฏอยู่ต่ำสุด เรียกตำแหน่งนี้ว่า วินเตอร์โซลสตีซ (Winter solstice) ช่วงนี้ประเทศทางซีกโลกใต้จะเป็นฤดูร้อน มีเวลากลางวันนานกว่ากลางคืน ส่วนประเทศทางซีกโลกเหนือจะเป็นฤดูหนาว มีเวลากลางวันสั้นกว่ากลางคืน การขึ้นและตกของดวงอาทิตย์จะค่อนข้างต่ำเล็กน้อย ดังรูปที่ 2.8



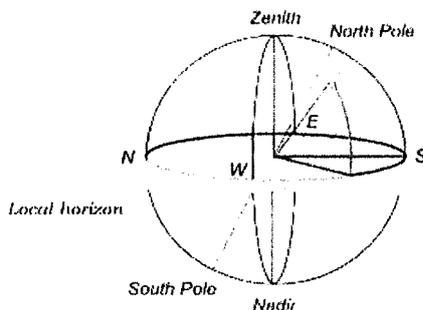
รูปที่ 2.8 การขึ้นและตกของดวงอาทิตย์ในวันที่ 21 ธันวาคม [12]

ณ ตำแหน่งของโลกในวันที่ 21 มีนาคม โลกจะเอียงด้านข้างให้กับดวงอาทิตย์ และแกนของโลกจะอยู่ในระนาบตั้งฉากกับรัศมีจากดวงอาทิตย์พอดี ทำให้แนวของแสงอาทิตย์จะอยู่บนระนาบของเส้นศูนย์สูตร ณ วันที่ดวงอาทิตย์ขึ้นทางทิศตะวันออกและตกทางทิศตะวันตกพอดี ซีกโลกด้าน



ตะวันตกเป็นลบ) ดังนั้นที่ทิศตะวันออกมุมอะซิมุซจะมีค่าเท่ากับ 90 องศา และที่ทิศตะวันตกมุมอะซิมุซจะมีค่าเท่ากับ - 90 องศา (ดังรูปที่ 2.11 เส้นสีแดง)

$\alpha$  มุมอัลติจูด (Altitude angle) หรือมุมเงย คือ ระยะทางเชิงมุมระหว่างดวงอาทิตย์กับพื้นราบ โดยมุมอัลติจูดจะมีค่าเป็น 0 องศาที่เส้นขอบฟ้า เมื่อเงยขึ้นจากเส้นขอบฟ้าให้มุมอัลติจูดมีค่าเป็นบวก (ดังรูปที่ 2.11 เส้นสีเขียว) มีค่าเท่ากับ  $90 - \theta_z$



รูปที่ 2.11 มุมอะซิมุซและมุมอัลติจูด [13]

$\delta$  มุมเดคลิเนชัน (Declination) คือ มุมระหว่างแนวลำแสงอาทิตย์ จะมีค่าเป็นบวกเมื่อวัดไปทางทิศเหนือ และมีค่าเป็นลบเมื่อวัดไปทางทิศใต้ มุมเดคลิเนชันมีค่าเปลี่ยนไปทุกวันระหว่าง 23.45 องศา ถึง - 23.45 องศา สามารถหาได้จากสมการ

$$\delta = 23.45 \sin \left[ \frac{360(283+n)}{365} \right] \quad (2.1)$$

เมื่อ  $n$  จำนวนวันในปีที่ต้องการโดยถือว่า 1 มกราคม เป็นวันที่ 1 ของปี หรือ  $n = 1$  ดังแสดงในตารางที่ 2.1

$\varphi$  ตำแหน่งเส้นรุ้งหรือละติจูด คือ มุมที่อยู่ทางทิศเหนือหรือทิศใต้ของเส้นศูนย์สูตร เมื่อวัดไปทางทิศเหนือกำหนดให้มีค่าเป็นบวก และเป็นลบเมื่อวัดไปทางทิศใต้ ละติจูดมีค่าอยู่ระหว่าง - 90 องศา ถึง 90 องศา

$\beta$  มุมเอียงของพื้นราบ

$\omega$  มุมชั่วโมง (Hour angle) คือ มุมที่แทนตำแหน่งของดวงอาทิตย์จากเมอริเดียนท้องถิ่นไปทางตะวันออกหรือตะวันตก ตอนเที่ยงถือว่า  $\omega$  เท่ากับศูนย์ และในแต่ละชั่วโมง  $\omega$  เท่ากับ 15 องศา ในตอนเช้า  $\omega$  จะมีค่าเป็นบวก ในตอนบ่าย  $\omega$  จะมีค่าเป็นลบ

$\theta_z$  มุมซีนิซ (Zenith angle) หรือมุมระหว่างลำแสงอาทิตย์กับเส้นตั้งฉากแนวราบ สามารถหาได้จากสมการ

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega \quad (2.2)$$

ตารางที่ 2.1 ตารางวันที่ของรอบปี

วันที่/เดือน	วันที่ของรอบปี (n)
1 มกราคม	1
31 มกราคม	31
1 กุมภาพันธ์	32
28 กุมภาพันธ์	59
1 มีนาคม	60
31 มีนาคม	90
1 เมษายน	91
30 เมษายน	120
1 พฤษภาคม	121
31 พฤษภาคม	151
1 มิถุนายน	152
30 มิถุนายน	181
1 กรกฎาคม	182
31 กรกฎาคม	212
1 สิงหาคม	213
31 สิงหาคม	243
1 กันยายน	244
30 กันยายน	273
1 ตุลาคม	274
31 ตุลาคม	304
1 พฤศจิกายน	305
31 พฤศจิกายน	334
1 ธันวาคม	335
31 ธันวาคม	365

$\theta$  มุมตกกระทบ (Incident angle) คือมุมระหว่างแนวลำแสงอาทิตย์บนพื้นผิวกับแนวตั้งฉากของพื้นผิว ความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบและมุมอื่นๆ สามารถคำนวณได้จาก

$$\cos \theta = \sin \delta \sin \varphi \cos \beta - \sin \delta \cos \varphi \sin \beta \cos \psi + \cos \delta \cos \varphi \cos \beta \cos \omega \quad (2.3)$$

ในกรณีที่ระนาบของแผงรับแสงอาทิตย์มีมุมเอียง  $\beta$  และวางในแนวเหนือใต้ จะได้ว่า

$$\cos \theta_z = \cos(\varphi + \cos \delta \cos \omega) + \sin(\varphi - \beta) \sin \delta \quad (2.4)$$

สำหรับเวลาที่พระอาทิตย์ขึ้น หาได้จากสมการ

$$\cos \omega_2 = -\tan \varphi \tan \delta \quad (2.5)$$

และค่าจำนวนชั่วโมงของระยะเวลาที่พระอาทิตย์ขึ้นและลงได้ดังนี้

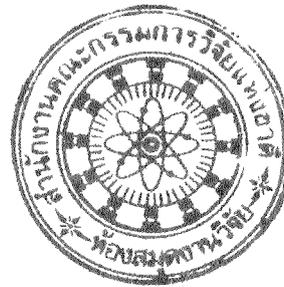
$$\frac{T_d}{15} = 2 \cos^{-1}(\tan \varphi \tan \delta) \quad (2.6)$$

จากสมการที่ 2.3 ค่าของมุมระหว่างเส้นตั้งฉากของแผงรับแสงและรังสีจากดวงอาทิตย์ เมื่อต้องการให้ค่าความเข้มแสงที่ตกกระทบบนแผงรับแสงมีค่ามากที่สุด ต้องทำให้อัตجاهตดวงอาทิตย์ ตกกระทบตั้งฉากกับแผงรับแสง หรือทำให้ค่ามุม  $\theta$  มีค่าเป็นศูนย์ มุม  $\theta$  เป็นฟังก์ชันของมุม  $\delta, \psi, \varphi$  และ  $\beta$  ดังนั้นถ้าต้องการหาค่ามุมที่เหมาะสมของแผงรับแสงที่ทำให้รังสีจากดวงอาทิตย์ตกกระทบตั้งฉาก สามารถหาได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ คือ

$$\frac{d(\cos \theta)}{d\beta} = 0 \quad (2.7)$$

นั่นคือ

$$\begin{aligned} \frac{d(\cos \theta)}{d\beta} = & -\sin \delta \sin \varphi \cos \beta \\ & -\sin \delta \cos \varphi \sin \beta \cos \omega - \cos \delta \cos \varphi \cos \omega \sin \beta \\ & + \cos \delta \sin \psi \cos \omega \cos \beta + \cos \delta \sin \psi \sin \omega \cos \beta \end{aligned}$$



เมื่อจัดรูปใหม่จะได้

$$\tan \beta_{opt} = \frac{\cos \delta (\sin \varphi \cos \psi \cos \omega + \sin \psi \sin \omega) - \sin \delta \sin \varphi}{\sin \delta \cos \varphi \cos \omega + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega} \quad (2.8)$$

เมื่อ  $\tan \beta_{opt}$  มุมที่เหมาะสมของแผงรับแสง (Optimal tilt angle)

### 2.3 เวลาท้องถิ่นและเวลาสุริยะ

เวลาท้องถิ่น (Local time) คือ เวลาจริง ณ ท้องถิ่นที่ตั้งของเมืองนั้นๆ ซึ่งมีผลต่างจากเวลานาฬิกามาตรฐานที่กำหนดไว้กับนานาประเทศ หรือเวลานาฬิกาของประเทศนั้นๆ โดยเวลาท้องถิ่นเทียบจากเวลามาตรฐานที่เมืองกรีนิชประเทศอังกฤษกับเส้นลองจิจูดมาตรฐานของพื้นที่นั้นจริง ๆ

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ	
ห้องสมุดงานวิจัย	
วันที่.....	2.1 ก.พ. 2555
เลขทะเบียน.....	244204
เลขที่.....	

เวลาสุริยะ (Solar time) คือ เวลาที่ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้า เวลาเที่ยงสุริยะ (Solar noon) หมายถึง เวลาที่ดวงอาทิตย์ข้ามเส้นเมริเดียนของตำแหน่งที่สังเกต เวลาสุริยะจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ 1. เวลาสุริยะปรากฏ นิยามว่า มุมชั่วโมง (Hour angle) ของดวงอาทิตย์ที่ปรากฏจริงบนท้องฟ้า หรือเมื่อดวงอาทิตย์อยู่ ณ ตำแหน่งเมริเดียนของท้องฟ้าพอดี เวลาสุริยะปรากฏจะมีค่า 0 ชั่วโมง อุปกรณ์ที่ใช้ ในการบอกเวลาสุริยะปรากฏ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ได้แก่ นาฬิกาแดด (Sundial) ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสุริยะและเวลาท้องถิ่น ดังสมการที่ 2.9 2. เวลาสุริยะเฉลี่ยเป็นการกำหนดค่ามุมชั่วโมงของดวงอาทิตย์เฉลี่ย เมื่อตำแหน่งของดวงอาทิตย์เฉลี่ยอยู่บนเมริเดียนพอดี ค่าเวลาสุริยะเฉลี่ยจะเป็น 0 ชั่วโมง และช่วงเวลาที่ดวงอาทิตย์เฉลี่ยอยู่บนเมริเดียน 2 ครั้งติดกัน หรือเท่ากับ 1 วันสุริยะเฉลี่ย (Mean solar day) ซึ่งวันดังกล่าวจะมีช่วงเวลาเท่ากัน

$$\text{Solar time} = \text{local time} (L_{st} - L_{loc}) + E \quad (2.9)$$

เมื่อ

$E$  คือ สมการของเวลา (Equation of time) มีหน่วยเป็นนาที สามารถหาได้จาก

$$E = 229.2(0.000075 + 0.001868 \cos B - 0.032007 \sin B - 0.014615 \cos 2B - 0.04089 \sin 2B)$$

$B$  คือ ความผิดปกติเฉลี่ยของดวงอาทิตย์ สามารถหาได้จาก

$$B = (n - 1) \times (360/365)$$

$n$  คือ วันลำดับที่ ของปี ( $1 \leq n \leq 365$ )

$L_{st}$  คือ เส้นลองจิจูดที่เวลาตามนาฬิกา เทียบจากสถานที่มาตรฐานในแต่ละประเทศ

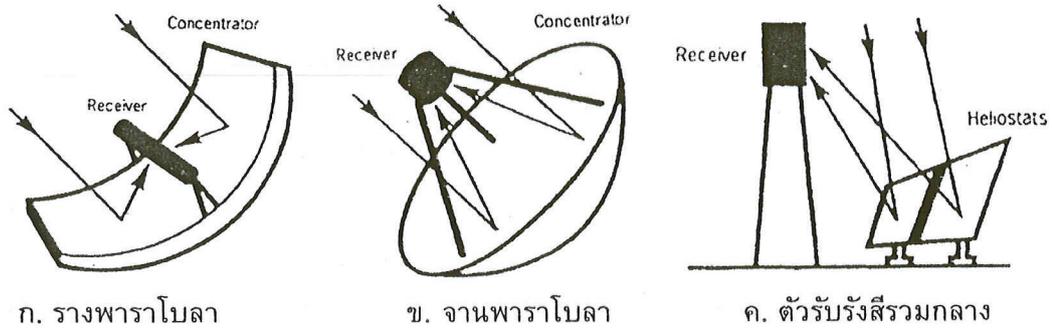
เช่น ประเทศไทย คือ 105 องศาตะวันออก

$L_{loc}$  คือ เส้นลองจิจูดของสถานที่ที่ต้องการหาค่าเวลาสุริยะ

#### 2.4 ตัวเก็บพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar energy collectors)

ตัวเก็บพลังงานแสงอาทิตย์เป็นเครื่องมือหนึ่งที่สำคัญในระบบพลังงานแสงอาทิตย์ โดยรูปแบบของการเก็บพลังงานแสงอาทิตย์ สามารถจำแนกได้ 3 รูปแบบ คือ

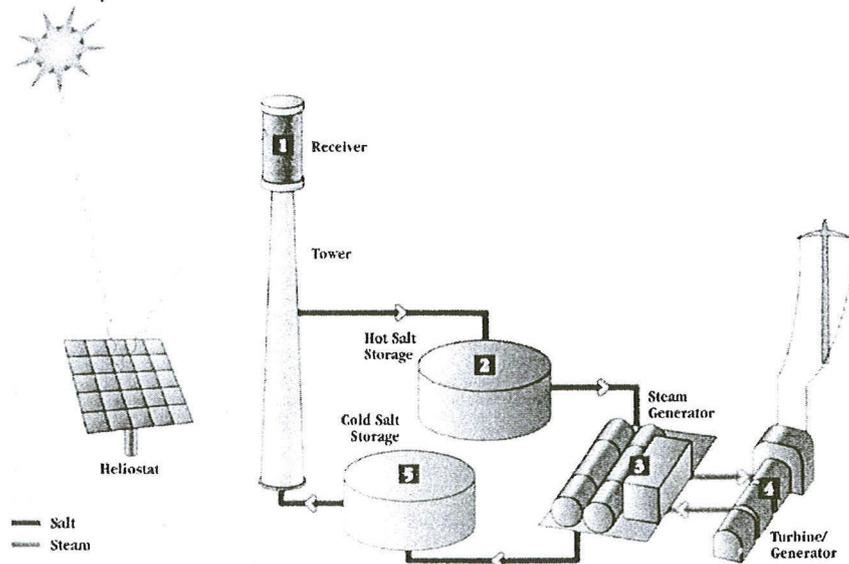
1. รางพาราโบล่า (Parabolic trough)
2. จานพาราโบล่า (Parabolic dish)
3. ตัวรับรังสีรวมกลาง (Central receiver)



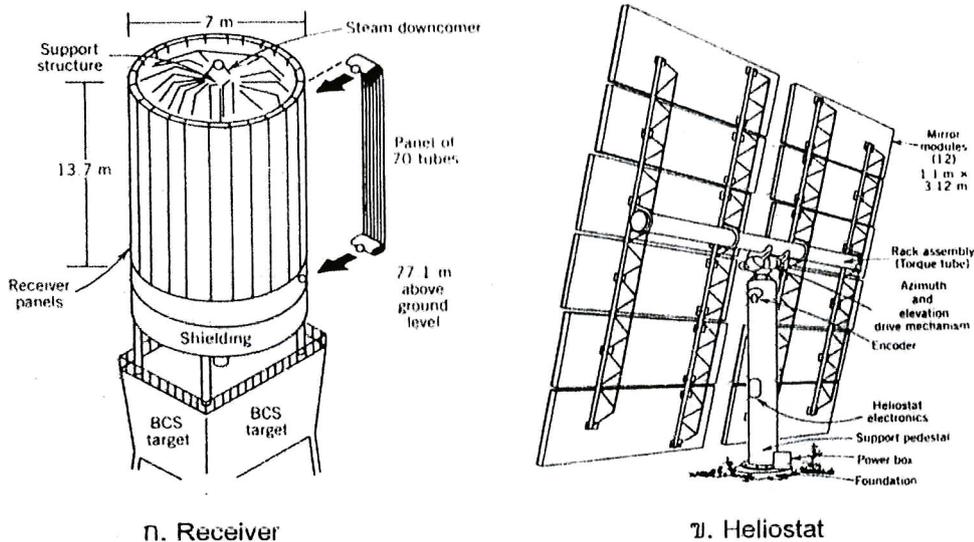
รูปที่ 2.12 รูปแบบของการเก็บพลังงานแสงอาทิตย์

**ระบบรับรังสีรวมกลาง (Central receiver system)**

หลักการของระบบรับรังสีรวมกลางจะอยู่บนพื้นฐานของการสะท้อนแสงอาทิตย์ด้วยวัสดุสะท้อนแสง อาทิเช่น กระจก ไปยังตัวรับรังสี (Receiver) หรือหม้อต้ม (Boiler) ดังรูปที่ 2.14 ก. ที่ถูกติดตั้งไว้บนยอดของหอคอย (รูปที่ 2.13) โดยที่กระจกจะถูกติดตั้งอยู่บนเสาที่สามารถหมุนรอบแกนได้ 2 แกน ที่เรียกว่า Heliostat ดังรูปที่ 2.14 ข. ซึ่งจะหมุนสะท้อนแสงอาทิตย์ไปยังตัวรับรังสีตลอดเวลา ตามปกติ 80 ถึง 95% ของพลังงานแสงอาทิตย์ที่สะท้อนมาจากกระจกจะถูกถ่ายเทไปยังของเหลวที่ไหลอยู่ภายในตัวรับรังสี ของเหลวที่รับพลังงานมาจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น โดยอุณหภูมิจะอยู่ในช่วง 540 ถึง 840 องศาเซลเซียส ของเหลวร้อนจะไหลกลับลงมายังหน่วยผลิตกระแสไฟฟ้าที่อยู่บนพื้นดิน ซึ่งสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ 1 ถึง 500 MW อุณหภูมิของเหลวหรือขนาดของความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้านั้นก็ขึ้นอยู่กับจำนวนของเสาสะท้อนแสงอาทิตย์ ความสามารถในการควบคุมมุมของการสะท้อนของเสา และความสามารถในการสะท้อนของวัสดุสะท้อนแสง



รูปที่ 2.13 ระบบรับรังสีรวมกลาง



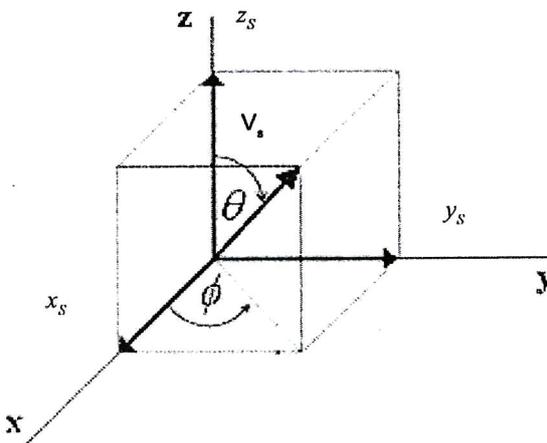
ก. Receiver

ข. Heliostat

รูปที่ 2.14 อุปกรณ์ในระบบรับรังสีรวมกลาง

2.5 การหาเวกเตอร์ตำแหน่ง

ในการควบคุมระบบสะท้อนแสงอาทิตย์ จำเป็นต้องหาเวกเตอร์ตำแหน่งดวงอาทิตย์ (Sun - position vector) โดยอาศัยการแปลงมุมในการหมุนมอเตอร์ของระบบติดตามดวงอาทิตย์ ให้เป็นเวกเตอร์ตำแหน่งดวงอาทิตย์ สามารถหาได้ดังนี้



รูปที่ 2.15 เวกเตอร์ตำแหน่งดวงอาทิตย์

$$V_s = x_s i + y_s j + z_s k \tag{2.10}$$

$$|V_s| = \sqrt{(x_s)^2 + (y_s)^2 + (z_s)^2} \tag{2.11}$$

เมื่อ

$V_S$  คือ เวกเตอร์ตำแหน่งดวงอาทิตย์

$|V_S|$  คือ ขนาดของเวกเตอร์ตำแหน่งดวงอาทิตย์

$x_S$  คือ เวกเตอร์ตำแหน่งดวงอาทิตย์ ในแกน x สามารถหาได้จาก

$$x_S = \sin \theta \cos \phi \quad (2.12)$$

$y_S$  คือ เวกเตอร์ตำแหน่งดวงอาทิตย์ ในแกน y สามารถหาได้จาก

$$y_S = \sin \theta \sin \phi \quad (2.13)$$

$z_S$  คือ เวกเตอร์ตำแหน่งดวงอาทิตย์ ในแกน z สามารถหาได้จาก

$$z_S = \cos \theta \quad (2.14)$$

$\theta$  คือ มุมซีนิซ

$\phi$  คือ มุมอิมิมุซ

จากสมการที่ (2.10) และ (2.11) สามารถหาเวกเตอร์หนึ่งหน่วย (Unit Vector) ได้ดังนี้

$$\mathbf{n}_S = \frac{V_S}{|V_S|} = n_{Sx}\mathbf{i} + n_{Sy}\mathbf{j} + n_{Sz}\mathbf{k} \quad (2.15)$$

เมื่อ

$n_{Sx}$  คือ เวกเตอร์ตั้งฉาก (Normal vector) ของดวงอาทิตย์ในแกน x สามารถหาได้จาก

$$n_{Sx} = \frac{x_S}{\sqrt{(x_S)^2 + (y_S)^2 + (z_S)^2}} \quad (2.16)$$

$n_{Sy}$  คือ เวกเตอร์ตั้งฉากของดวงอาทิตย์ในแกน y สามารถหาได้จาก

$$n_{Sy} = \frac{y_S}{\sqrt{(x_S)^2 + (y_S)^2 + (z_S)^2}} \quad (2.17)$$

$n_{Sz}$  คือ เวกเตอร์ตั้งฉากของดวงอาทิตย์ในแกน z สามารถหาได้จาก

$$n_{sz} = \frac{z_s}{\sqrt{(x_s)^2 + (y_s)^2 + (z_s)^2}} \quad (2.18)$$

เวกเตอร์ตำแหน่งของเป้าหมาย (Target position vector) คือ ตำแหน่งเป้าหมายบริเวณที่ต้องการให้แสงอาทิตย์สะท้อนไปตกบริเวณนั้น สามารถหาได้โดยการวัดโดยตรง จะได้ดังนี้

$$\mathbf{V}_T = x_T \mathbf{i} + y_T \mathbf{j} + z_T \mathbf{k} \quad (2.19)$$

$$|\mathbf{V}_T| = \sqrt{(x_T)^2 + (y_T)^2 + (z_T)^2} \quad (2.20)$$

เมื่อ

$\mathbf{V}_T$  คือ เวกเตอร์ตำแหน่งเป้าหมาย  
 $|\mathbf{V}_S|$  คือ ขนาดของเวกเตอร์เป้าหมาย  
 $x_T$  คือ เวกเตอร์ตำแหน่งเป้าหมายในแกน x  
 $y_T$  คือ เวกเตอร์ตำแหน่งเป้าหมายในแกน y  
 $z_T$  คือ เวกเตอร์ตำแหน่งเป้าหมายในแกน z

จากสมการที่ (2.19) และ (2.20) สามารถหาเวกเตอร์หนึ่งหน่วย ได้ดังนี้

$$\mathbf{n}_T = \frac{\mathbf{V}_T}{|\mathbf{V}_T|} = n_{Tx} \mathbf{i} + n_{Ty} \mathbf{j} + n_{Tz} \mathbf{k} \quad (2.21)$$

เมื่อ

$n_{Tx}$  คือ เวกเตอร์ตั้งฉากของเป้าหมายในแกน x สามารถหาได้จาก

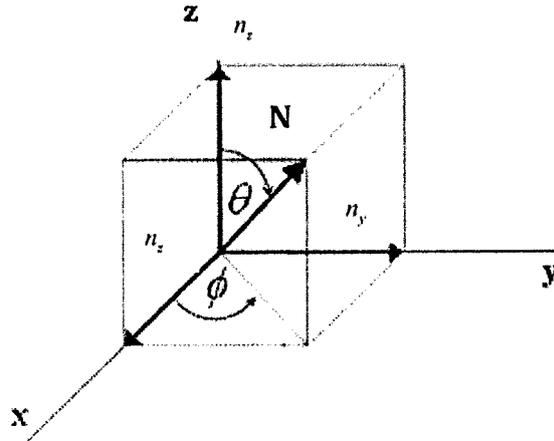
$$n_{Tx} = \frac{x_T}{\sqrt{(x_T)^2 + (y_T)^2 + (z_T)^2}} \quad (2.22)$$

$n_{Ty}$  คือ เวกเตอร์ตั้งฉากของเป้าหมายในแกน y สามารถหาได้จาก

$$n_{Ty} = \frac{y_T}{\sqrt{(x_T)^2 + (y_T)^2 + (z_T)^2}} \quad (2.23)$$

$n_{Tz}$  คือ เวกเตอร์ตั้งฉากของเป้าหมายในแกน z สามารถหาได้จาก

$$n_{Tz} = \frac{z_T}{\sqrt{(x_T)^2 + (y_T)^2 + (z_T)^2}} \quad (2.24)$$



รูปที่ 2.16 เวกเตอร์ตั้งฉากของระบบสะท้อนแสงอาทิตย์

การหามุมในการหมุนของระบบสะท้อนแสงอาทิตย์ สามารถหาได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างเวกเตอร์ตำแหน่งดวงอาทิตย์และเวกเตอร์ตำแหน่งของเป้าหมาย โดยสามารถหาเวกเตอร์ตั้งฉากของระบบสะท้อนแสงอาทิตย์ ( $\mathbf{N}$ ) ได้ดังนี้

$$\mathbf{N} = \frac{\mathbf{n}_S + \mathbf{n}_T}{|\mathbf{n}_S + \mathbf{n}_T|} = n_x \mathbf{i} + n_y \mathbf{j} + n_z \mathbf{k} \quad (2.25)$$

เมื่อ

$n_x$  คือ เวกเตอร์ตั้งฉากของระบบสะท้อนแสงอาทิตย์ในแกน x สามารถหาได้จาก

$$n_x = \frac{(n_{Sx} + n_{Tx})}{\sqrt{(n_{Sx} + n_{Tx})^2 + (n_{Sy} + n_{Ty})^2 + (n_{Sz} + n_{Tz})^2}} \quad (2.26)$$

$n_y$  คือ เวกเตอร์ตั้งฉากของระบบสะท้อนแสงอาทิตย์ในแกน y สามารถหาได้จาก

$$n_y = \frac{(n_{Sy} + n_{Ty})}{\sqrt{(n_{Sx} + n_{Tx})^2 + (n_{Sy} + n_{Ty})^2 + (n_{Sz} + n_{Tz})^2}} \quad (2.27)$$

$n_z$  คือ เวกเตอร์ตั้งฉากของระบบสะท้อนแสงอาทิตย์ในแกน z สามารถหาได้จาก

$$n_z = \frac{(n_{sz} + n_{tz})}{\sqrt{(n_{sx} + n_{tx})^2 + (n_{sy} + n_{ty})^2 + (n_{sz} + n_{tz})^2}} \quad (2.28)$$

จากรูปที่ 2.16 จะสามารถหามุมในการหมุนของระบบสะท้อนแสงอาทิตย์ได้ดังนี้

$$\theta = \cos^{-1}(n_z) \quad (2.29)$$

$$\phi = \sin^{-1} \left[ \frac{n_y}{\sqrt{(n_x)^2 + (n_y)^2}} \right] \quad (2.30)$$

เมื่อ

$\theta$  คือ มุมซันิชในการหมุนของระบบสะท้อนแสงอาทิตย์ (มุมอัลติจูดเท่ากับ  $90 - \theta$ )

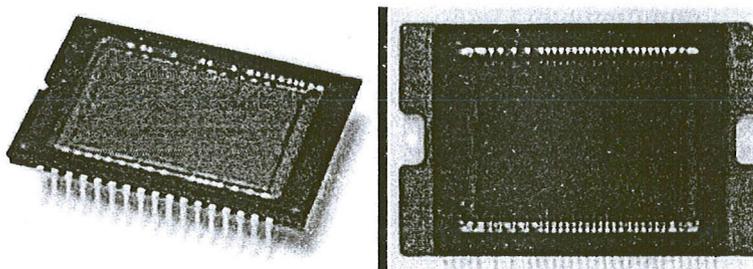
$\phi$  คือ มุมอิมิชในการหมุนของระบบสะท้อนแสงอาทิตย์

## 2.6 ทฤษฎีเกี่ยวกับกล้อง

กล้องดิจิทัล (Digital camera) คือ อุปกรณ์เก็บข้อมูลภาพผ่านเลนส์และเก็บข้อมูลที่ได้ในรูปแบบดิจิทัล การทำงานของกล้องดิจิทัล เมื่อแสงส่องกระทบวัตถุและสะท้อนมายังกล้อง เลนส์ของกล้องจะรวมแสงและส่งผ่านไปยังเซนเซอร์รับภาพ ซึ่งในตัวกล้องจะประกอบด้วยอุปกรณ์โฟโต้เซนเซอร์จำนวนนับล้านตัวโดยสามารถจะจับข้อมูลภาพที่เป็นจุดแสง ข้อมูลของแสงจะถูกอ่านทีละแถว ซึ่งสัญญาณที่ได้จะเป็นสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณที่ได้มาจากแสงหรือสัญญาณความสว่าง ซึ่งสัญญาณความสว่างนี้ก็คือแสงสีขาวนั่นเอง สัญญาณภาพนั้นเกิดจากแสงสีขาวสะท้อนกับวัตถุเกิดเป็นภาพ สัญญาณความสว่างก็คือภาพขาวดำ เนื่องจากภาพขาวดำนั้นจะประกอบจากจุดสีต่างๆ ที่มีความสว่างมากน้อยต่างกัน จุดสีดำคือจุดที่มีความสว่างน้อย จุดสีขาวคือจุดที่มีความสว่างมาก เมื่อนำจุดที่ได้กล่าวนั้นมาต่อกันแล้วก็จะได้ภาพขาวดำออกมา สำหรับภาพสีนั้นต้องเข้าใจกับหลักการผสมสีก่อน การผสมสีนั้นจะมีทั้งการผสมสีทางลบและการผสมสีทางบวก การผสมสีทางลบ จะใช้ในการสร้างภาพสีที่ต้องใช้แสงสะท้อนตกกระทบจึงจะเห็นเป็นสีที่เกิดจากแม่สีสามสีประกอบกัน คือ สีแดง สีเหลือง และสีน้ำเงิน สีทั้งสามสีนี้เมื่อผสมกันหมดจะได้สีดำและเมื่อลดความเข้มของสีลงก็จะเกิดเฉดสีมากมาย การผสมสีทางบวกนั้นไม่ต้องอาศัยแหล่งกำเนิดแสงจากภายนอก เนื่องจากสีต่างๆ นั้นจะต้องเกิดจากแสง โดยมีแม่สีหลักคือ แสงสีแดง แสงสีเขียว และแสงสีน้ำเงิน แสงทั้งสามนั้นหากผสมกันแล้วจะได้สีขาว หากแสงนี้มีค่าความสว่างต่ำสุดก็จะได้สีดำ ซึ่งเมื่อผสมกันในสัดส่วนความสว่างที่ต่างกันก็จะเกิดเฉดสีต่างๆ มากมายเช่นกัน การผสมสีและการหาค่าสีจากที่ได้กล่าวมาจากการผสมสีทางบวก เมื่อผสมกันแล้วจะได้แสงสีขาวออกมาซึ่งก็คือ

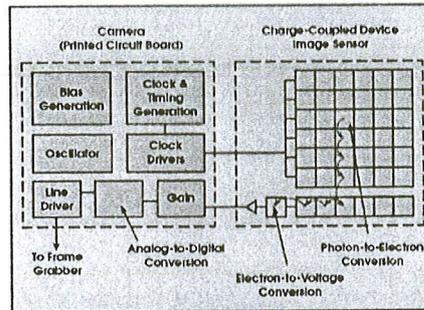
สัญญาณความสว่าง ในการใช้งานกล้องจะมีลักษณะการทำงานที่ให้ข้อมูลออกมาในหลายรูปแบบ เช่น แบบ RGB นั่นคือให้สัญญาณข้อมูลในรูปค่าความสว่างของแสงสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน แบบ YUV จะให้สัญญาณข้อมูลในรูปค่าความสว่างของแสงสีขาว ข้อมูลในรูปค่าความสว่างของสีน้ำเงิน ลบกับแสงสีขาวและข้อมูลในรูปค่าความสว่างของสีแดงลบกับแสงสีขาว แบบ YCbCr โดยจะให้สัญญาณข้อมูลในรูปค่าความสว่างของแสงสีขาว ข้อมูลในรูปค่าความสว่างของสีน้ำเงิน ข้อมูลในรูปค่าความสว่างของสีแดงเป็นต้น

อุปกรณ์รับสัญญาณภาพแบ่งออกเป็นสองประเภทหลัก คือ แบบอนาล็อก และแบบดิจิทัล ซึ่งทั้งสองชนิดนั้นมีหลักการการทำงานมาจากโฟโตเซนเซอร์เช่นเดียวกัน แต่ต่างกันตรงที่ในระบบดิจิทัลจะต้องนำสัญญาณที่ได้ซึ่งเป็นอนาล็อกไปทำการแปลงสัญญาณเป็นข้อมูลในรูปแบบดิจิทัลเสียก่อนจึงจะนำไปใช้งานได้ ซึ่งโฟโตเซนเซอร์ที่นำมาประกอบเป็นตัวกล้องนั้นจะแบ่งออกเป็นสองประเภทหลักๆ ประเภทแรกคือ CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) และประเภทที่สองคือ CCD (Charge – Couply Device)

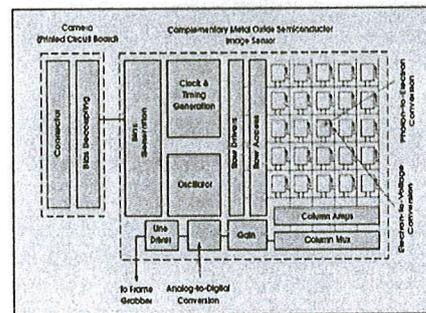


รูปที่ 2.17 CCD และ CMOS เซ็นเซอร์ [14]

CMOS และ CCD มีหลักการโดยอาศัยโฟโตไซด์ (Photosite) ให้เปลี่ยนแสงที่ตกกระทบให้กลายเป็นอิเล็กตรอนเพื่อบ่งบอกค่าของแสงสีนั้นๆ ภายในตัวเซนเซอร์ ทั้งสองชนิดนี้ประกอบไปด้วยโฟโตไซด์ขนาดเล็กๆ จำนวนมากเพื่อรับแสง ความแตกต่างระหว่าง CMOS และ CCD คือขั้นตอนของการคำนวณค่าของแสงนั้นๆ จากแต่ละโฟโตไซด์ CCD จะประจุนั้นๆ โดยตรงในแต่ละโฟโตไซด์ จากนั้นจะแปลงค่าอนาล็อกของแสงที่ตกกระทบให้เป็นค่าดิจิทัลกระบวนการทั้งหมดนี้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่วน CMOS ถึงแม้ว่าแต่ละโฟโตไซด์จะสามารถประจุนั้นๆ ได้โดยตรงเช่นเดียวกัน แต่กระบวนการในการส่งผ่านข้อมูลจะต้องอาศัยสายขนาดเล็กมากๆ เพื่อที่จะส่งข้อมูล ทำให้เกิดความล่าช้าในการส่งข้อมูลมากกว่าแบบ CCD



รูปที่ 2.18 โครงสร้างของ CCD เซนเซอร์ [14]



รูปที่ 2.19 โครงสร้างของ CCD เซนเซอร์ [14]

### 2.5.1 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของรูปที่ได้จากกล้องดิจิทัล

ก. Resolution คือ ส่วนที่เล็กที่สุดของวัตถุที่กล้องสามารถแยกได้ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นส่วนต่างๆได้ดังนี้

- Field of view (FOV) คือ บริเวณทั้งหมดที่กล้องสามารถถ่ายภาพได้
- Working distance (WD) คือ ระยะห่างระหว่างปลายสุดของเลนส์กับพื้นที่ผิวด้านบนของวัตถุ

- Sensor size คือ ขนาดของเซนเซอร์ของกล้อง
- Pixel (Pix) คือ จำนวนจุดของตัวรับแสงที่ประกอบขึ้นเป็นภาพ
- Pixel resolution คือ จำนวนที่น้อยที่สุดของพิกเซลที่กล้องต้องการในการนำมาสร้างรูป

- Focal length คือ เลนส์โฟกัส

ข. Contrast คือ ความแตกต่างของระดับความเข้มของวัตถุกับพื้นหลัง ดังนั้นรูปภาพทุกรูปควรที่จะมีค่า Contrast ที่มากพอเพื่อจะแยกวัตถุออกจากพื้นหลัง

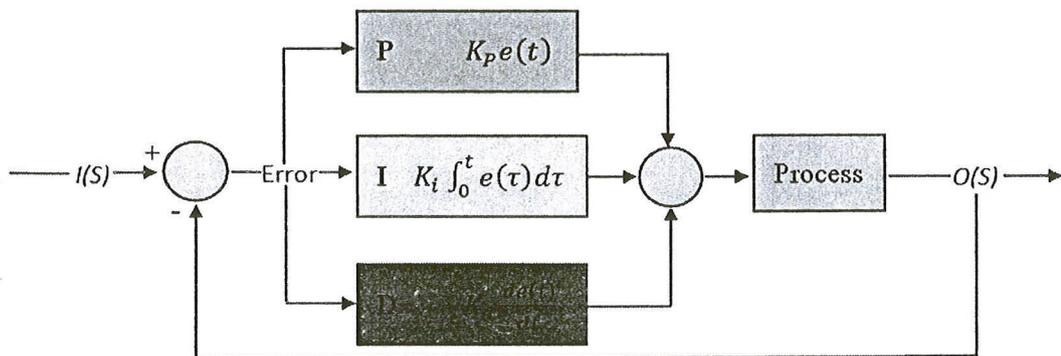
ค. Depth of field (DOF) คือ ความสามารถในการรักษาคุณภาพของรูปให้ชัดเจนเมื่อวัตถุมีการขยับออกจากจุดโฟกัสที่ดีที่สุด

ง. Perspective คือ แนวแกนของกล้องที่ไม่ได้ตั้งฉากกับวัตถุ ซึ่งจะส่งผลทำให้การเปลี่ยนแปลงกำลังขยายของวัตถุจะขึ้นอยู่กับระยะห่างจากเลนส์กับวัตถุ

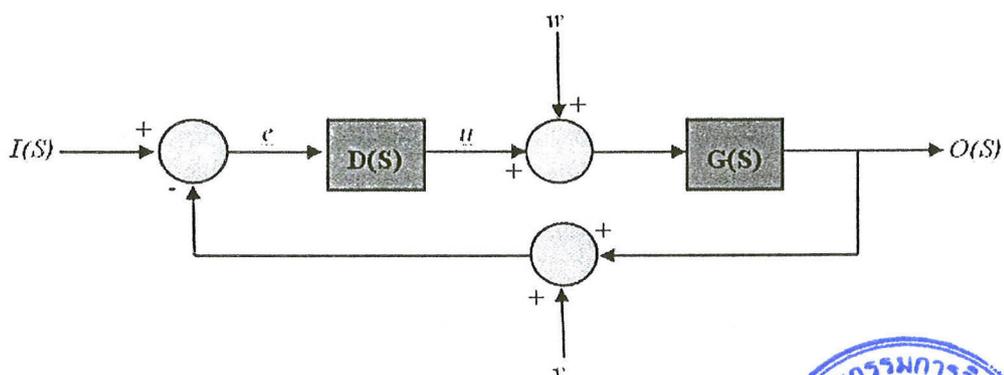
จ. Distortion เกิดจากความผิดพลาดทางเรขาคณิตของส่วนที่จับภาพของเลนส์ ซึ่งเลนส์โดยทั่วไปจะเกิดการผิดรูปแบบโค้ง (Radial distortion) ซึ่งทำให้รูปภาพที่กล้องถ่ายได้อยู่ไกลกว่าความเป็นจริง

## 2.6 ตัวควบคุมพีไอดี (PID controller)

ระบบควบคุมพีไอดี คือการควบคุมสัดส่วนป้อนกลับ เป็นระบบการควบคุมรูปแบบหนึ่ง ซึ่งใช้การควบคุมในระบบวงปิด หรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Closed – loop control system, feedback control) เพื่อลดความผิดพลาดจากสัญญาณรบกวนได้ แต่ความผิดพลาดสถานะคงตัวก็ยังไม่หมด เมื่อเพิ่มสัดส่วนป้อนกลับการตอบสนองความเร็วจะมีโอเวอร์ชูตเพิ่มขึ้น การรวมการควบคุม สัดส่วนและการควบคุมปริพันธ์เข้าด้วยกันจะสามารถกำจัดความผิดพลาดสถานะคงตัวได้ แต่การตอบสนองการเคลื่อนที่จะไม่ดี ดังนั้น จึงต้องมีการควบคุมอนุพันธ์ เพื่อให้การตอบสนองของระบบดีขึ้น เมื่อรวมทั้งสามเทอมเข้าด้วยกันจะได้รูปแบบการควบคุมแบบพีไอดี (PID controller) ดังรูปที่ 2.20 และ 2.21



รูปที่ 2.20 การควบคุมแบบพีไอดี [15]



รูปที่ 2.21 การควบคุมแบบป้อนกลับ [16]



## 1. Proportional feedback control (P)

การควบคุมสัดส่วน คือ การควบคุมสัญญาณป้อนกลับที่เป็นสัดส่วนของค่าความผิดพลาด เพื่อลดความผิดพลาดของสัญญาณขาออก สามารถหาได้จาก

$$P(t) = Ke \quad (2.31)$$

ดังนั้น จากการควบคุมแบบป้อนกลับในรูปที่ 2.18 จะได้ว่า

$$D(s) = K \quad (2.32)$$

เมื่อ

$P(t)$  คือ สัญญาณขาออก

$K$  คือ ค่าอัตราขยาย

$e$  คือ ค่าความผิดพลาด

## 2. Proportional – integral (PI) feedback control

การควบคุมปริพันธ์ (Integral) เพื่อลดหรือกำจัดความผิดพลาดสถานะคงตัว แต่จะทำให้การตอบสนองชั่วขณะแย่ง โดยการคูณด้วยอัตราขยายปริพันธ์ สามารถหาได้จาก

$$I(t) = \frac{K}{T_I} \int_{t_0}^t e \, dt \quad (2.33)$$

จากการควบคุมแบบป้อนกลับในรูปที่ 2.18 จะได้ว่า

$$\frac{U(s)}{E(s)} = D(s) = \frac{K}{T_I s} \quad (2.34)$$

เมื่อ

$I(t)$  คือ สัญญาณขาออก

$\frac{K}{T_I}$  คือ อัตราขยายปริพันธ์

$t$  คือ เวลา

$e$  คือ ความผิดพลาด

### 3. Derivative feedback control (D)

การควบคุมอนุพันธ์หรืออนุพันธ์ป้อนกลับ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาด เพื่อลดโอเวอร์ชูตและลดเวลาสู่สมดุล สามารถหาได้จากสมการ

$$D(t) = KT_D \dot{e} \quad (2.35)$$

จากการควบคุมแบบป้อนกลับในรูปที่ 2.18 จะได้ว่า

$$D(s) = KT_D s \quad (2.36)$$

เมื่อ

$D(t)$  คือ สัญญาณขาออก

$T_D$  คือ อนุพันธ์เวลา (Derivative time)

$\dot{e}$  คือ อนุพันธ์อันดับหนึ่งของความผิดพลาด

### 4. Proportional – integral – derivative control (PID)

สำหรับการควบคุม ความผิดพลาดสถานะคงตัวและความผิดพลาดชั่วขณะ (Transient error) สามารถควบคุมโดยการรวมทั้งสามเทอมเข้าด้วยกัน คือ การควบคุมสัดส่วน การควบคุมปริพันธ์ และการควบคุมอนุพันธ์ ซึ่งเรียกว่า การควบคุมแบบพีไอดี สามารถหาได้จากสมการ

$$Output = P + I(t) + D(t) = Ke + \frac{K}{T_I} \int_{t_0}^t e \, dn + KT_D \dot{e} \quad (2.37)$$

จากการควบคุมแบบป้อนกลับในรูปที่ 2.18 จะได้ว่า

$$D(s) = K \left( 1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (2.38)$$