บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 จุลชีววิทยาคืออะไร [1]

จุลชีววิทยา (Microbiology) เป็นการศึกษาเกี่ยวกับจุลินทรีย์ในเรื่องของรูปร่าง โครงสร้าง การสืบพันธ์ สรีรวิทยา รวมถึงการวิเคราะห์จำแนกของการแพร่กระจายในธรรมชาติและความสัมพันธ์ระหว่างจุลินทรีย์กับสิ่งมีชีวิตอื่นๆ รวมถึงการศึกษาการเปลี่ยนแปลงในสภาวะแวดล้อมในแบบต่างๆ ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ การศึกษาจุลินทรีย์ในด้านการนำไปใช้ประโยชน์ จะเป็นการศึกษาของจุลินทรีย์ที่มุ่งเน้นการนำไปใช้ประโยชน์ต่างๆสามารถแบ่งได้หลายสาขาดังนี้

(1) จุลชีววิทยาของดิน (Soil Microbiology) เป็นการศึกษาเกี่ยวกับจุลินทรีย์ในดิน เช่น การเปลี่ยนแปลงวัฏจักรคาร์บอน ไนโตรเจน และวัฏจักรของสารต่างๆ

(2) จุลชีววิทยาของอาหาร (Food Microbiology) ศึกษาเกี่ยวกับจุลินทรีย์ในอาหาร เช่น การควบคุมและป้องกันการเน่าเสียของอาหาร และจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของการเน่าเสียของอาหาร

(3) จุลชีววิทยาของนม (Dairy Microbiology) ศึกษาเกี่ยวกับจุลินทรีย์ในนม เช่นจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของการเน่าเสียในนมและผลิตภัณฑ์นม

(4) จุลชีววิทยาของอวกาศ (Space Microbiology) ศึกษาเกี่ยวกับจุลินทรีย์ที่พบในอวกาศและในดวงดาวต่างๆ ซึ่งอาจปะปนมากับนักบิน

(5) จุลชีววิทยาของอากาศ (Microbiology of Air) ศึกษาเกี่ยวกับจุลินทรีย์ที่อยู่ในอากาศ เช่น การแพร่กระจายของจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดโรค

(6) จุลชีววิทยาของน้ำ (Aquatic Microbiology) ศึกษาเกี่ยวกับจุลินทรีย์ในน้ำ เช่น การแพร่ระบาดที่ทำให้เกิดโรครวมถึงการควบคุมและป้องกัน จุลินทรีย์เกี่ยวกับการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุในแหล่งน้ำ การป้องกันแก้ไขปัญหาน้ำเสีย

(7) จุลชีววิทยาอุตสาหกรรม (Industrial Microbiology) ศึกษาวิธีการที่จะนำจุลินทรีย์มาใช้งานอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การผลิตยา การผลิตโปรตีน

(8) จุลชีววิทยาสาธารณะสุข (Sanitary Microbiology) ศึกษาเกี่ยวกับจุลินทรีที่เป็นเชื้อโรคในแหล่งน้ำ รวมถึงวิธีการฆ่าเชื้อโรคเพื่อทำให้น้ำบริสุทธิ์

2.2 จุลินทรีย์ (Microorganism) [1]

จุลินทรีย์นั้นมีหลายประเภทแต่สามารถจำแนกหลักๆ ได้ดังนี้

2.2.1 แบคทีเรีย (Bacteria)

แบคทีเรียจัดอยู่ในกลุ่มเซลล์ในลักษณะของโปรคาริโอตซึ่งเป็นสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียว ผนังของเซลล์ประกอบด้วยกรดอะมิโนและคาร์โบไฮเดรต นิวเคลียสของแบคทีเรียมีลักษณะสายดีเอนเอ (DNA) เป็นคู่ขดวงกลมโดยไม่มีผนังหุ้ม แบคทีเรียสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ แบคทีเรียแกรมบวก (Gram-positive bacteria) และแบคทีเรียแกรมลบ (Gram-negative bacteria) เช่น Escherichia coli (*E.coli*) จัดว่าเป็นแบคทีเรียแกรมลบรูปแท่ง (Gram negative rod) มีขนาด 1-2 μm จัดอยู่ในพวกที่สามารถเจริญเติบโตได้โดยที่ไม่มีออกซิเจนและมีออกซิเจน (Faculative anaerobic) เจริญได้ดีในสภาวะที่มีออกซิเจน พบในลำไส้ใหญ่และอุจจาระของคนและสัตว์เลือดอุ่น ส่วนใหญ่เชื้อ *E.coli* ไม่ทำให้เกิดโรคแต่ก็มีบางสายพันธ์ที่ทำให้เกิดโรค เช่นโรคท้องร่วง ทางเดินปัจสาวะอักเสบ เยื่อหุ้มสมองอักเสบ

2.2.2 ไวรัส (Viruses)

ไวรัสจัดได้ว่าเป็นจุลินทรีย์ชนิดหนึ่งที่สามารถก่อให้เกิดการติดเชื้อได้ทั้งใน มนุษย์ สัตว์ พืช ปรสิตที่อาศัยอยู่ในสิ่งมีชีวิต (Obligate intracellular parasite) มี 2 ชนิด คือ ไวรัส (Virus) และไวรอยด์ (Viroid) ซึ่งมีลักษณะแตกต่างจากพวกโพรคาริโอตและยูคาริโอต เนื่องจากโครงสร้างของไวรัสยังไม่เป็นเซลล์ ไม่มีทั้งเยื้อหุ้มเซลล์และไซโตพลาซึม มีเพียงอนุภาคที่ประกอบด้วย DNA หรือ RNA และโปรตีนเท่านั้น

2.2.3 ฟังไจ (Fungi)

ฟังไจจัดว่าอยู่ในกลุ่มเซลล์ยูคาริโอตและมีเยื้อหุ้มนิวเคลียส ผนังเซลล์เป็นสารไคตินกับเซลลูโลสพบในสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียวและเส้นใยที่เรียกว่า ไฮฟา (Hypha) ลักษณะของเส้นใยแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ เส้นใยที่มีผนังกั้นและเส้นใยที่ไม่มีผนังกั้น โดยฟังไจไม่มีคลอโรฟิลล์ได้รับสารอาหารจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยจะปล่อยเอนไซม์เพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์แล้วดูดซึมเข้าสู่ภายในเซลล์

2.2.4 สาหร่าย (Algae)

สาหร่ายจัดอยู่ในกลุ่มยูคาลิโอต ส่วนมากจะมีสารคลอโรฟิลล์ที่ใช้ในการสังเคราะห์แสง สาหร่ายบางชนิดมีประโยชน์ในด้านเศรษกิจ เช่น นำมาใช้เป็นปุ๋ยในการเกษตร ใช้ทำอาหาร ทำยาเพื่อรักษาโรค เป็นต้น

2.2.5 โปรตัวซัว (Protozoa)

โปรตัวซัวจัดได้ว่าเป็นสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียวและมีขนาดเล็ก โดยจะมีความสำคัญมากในระบบนิเวศ โปรตัวซัวอาศัยอยู่ในร่างกายของสัตว์หลายชนิดซึ่งมีทั้งเป็นประโยชน์และเป็นโทษ โปรตัวซัวมีทั้งชนิดที่สร้างอาหารได้เองและไม่สามารถสร้างอาหารได้

2.3 สภาพแวดล้อมที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

จุลินทรีย์ที่เจริญได้ดีนั้นต้องอาศัยสภาพแวดล้อมหลายประการ ได้แก่ อุณภูมิ (Temperature) รังสี (Radiation) ความชื้น (Moisture) แรงดัน (Pressure) สารอาหาร (Nutrient) คลื่นเสียง (Sonic vibration) pH ดังนั้นจึงควรนำปัจจัยเหล่านี้มาวิเคราะห์หาวิธีที่จะกำจัดจุลินทรีย์

2.4 จุลินทรีย์ในน้ำเสีย [2]

จุลินทรีย์น้ำเสียนั้นจะมีชนิดของจุลินทรีย์และปริมาณความเข้มข้นที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ น้ำเสียที่มีอินทรีย์สารมากก็จะมีจุลินทรีย์มากด้วยเช่นกัน โดยทั่วไปในน้ำเสียจะพบ ฟังไจ โปรโตซัว สาหร่าย แบคทีเรียและไวรัส จุลินทรีย์เหล่านี้ได้รับจากแหล่งที่มาต่างๆ เช่น สิ่งขับถ่ายของมนุษย์และสัตว์หรือน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสหากรรม

ในน้ำเสียทั่วไปนั้นพบจุลินทรีย์ที่เป็นต้นเหตุของโรคหลายชนิดที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำ จุลินทรีย์เหล่านี้มักก่อให้เกิดโรคทางเดินอาหาร โดยเฉพาะโรคที่เกิดจากเชื้อแบคทีเรียต่างๆ เช่น อหิวาตกโรค (Vabrio cholera) บิด (Shigella dysenteriae) ไทฟอย (Salmonella typhi) ส่วนโปรโตซัวที่พบมากได้แก่ Entamoeba histolytica ที่ทำให้เกิดโรคบิดและฟังไจที่ทำให้เกิดโรคผิวหนังต่างๆ ได้แก่ Trichophyton spp.

2.5 คุณภาพน้ำ

เนื่องจากน้ำทิ้งที่มีสารอินทรีย์อยู่มากนั้นเมื่อน้ำไหลลงสู่แหล่งน้ำต่างๆ ก็จะทำให้แหล่งน้ำมีสารอินทรีย์มากขึ้นด้วย สารอินทรีย์เหล่านี้จะถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจนจึงทำให้ออกซิเจนในน้ำน้อยลง ปริมาณออกซิเจนในน้ำจึงแปรผกผันกับอินทรียสาร ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการตรวจสอบน้ำเสียจึงใช้วิธีการหาปริมาณออกซิเจนที่ทำปฏิกิริยากับอินทรีย์สารแทนที่การหาปริมาณการหาอินทรียสารที่มีอยู่ในน้ำ สำหรับการหาปริมาณออกซิเจนนั้นสามารถทำได้ 2 วิธี

2.5.1 วิธีทางเคมี

วิธีนี้จะใช้สารเคมีเป็นตัวออกซิไดซ์ปริมาณออกซิเจนที่ได้เรียกว่า Chemical oxygen demand (COD) การหาปริมาณออกซิเจนด้วยวิธีนี้จะทำให้อินทรียสารทั้งที่ย่อยสลายได้และย่อยสลายไม่ได้จุสารเคมีทำปฏิกิริยาทั้งหมด ค่าของ COD หน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร หมายถึงมิลลิกรัมของออกซิเจนที่เข้าไปทำปฏิกิริยากับน้ำเสีย 1 ลิตร

2.5.2 วิธีทางชีววิทยา

วิธีนี้จะเป็นการใช้แบคทีเรียย่อยสลายอินทรียสาร ปริมาณออกซิเจนที่แบคทีเรียใช้เรียกว่า Biochemical oxygen demand (BOD) โดยที่ค่า BOD นั้นอธิบายได้ว่า ถ้าหากมีค่า BOD มาก แสดงว่าก็มีค่าปริมาณออกซิเจนน้ำถูกใช้ไปมาก นั่นคือ ในน้ำจะมีอินทรีย์สารมากด้วย โดยปกติแล้วแหล่งน้ำตามธรรมชาติที่ไม่เน่าเสียโดยจะมีค่า BOD อยู่ประมาณ 100-300 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.6 กระบวนการโฟโตแคตาไลซิส (Photocatalysis) [3]

กระบวนการโฟโตแคตาไลซิสเป็นกระบวนการที่ใช้ในการบำบัดสารปนเปื้อนในน้ำและในอากาศให้บริสุทธิ์ ปัจจุบันนี้ได้มีการนำกระบวนการโฟโตแคตาไลซิสมาประยุกต์ใช้ในการกำจัดสารมลพิษที่ปนเปื้อนในน้ำเสียและอากาศเสีย กระบวนการโฟโตคาตาไลซิสจะใช้แสงกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) โมเลกุลของสารตั้งต้นจะถูกดูดติดผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วเกิดปฏิกิริยาที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นโมเลกุลที่ถูกดูดซับจะเกิดการเปลี่ยนแปลงการเรียงตัวของอิเล็กตรอนและพันธะโมเลกุลจะเริ่มสลาย ในกระบวนการโฟโตแคตาไลซิสนั้นจะประกอบด้วยขั้นตอน ได้แก่ กระบวนการดูดติดผิว (Adsorption process) และกระบวนการฉายแสง (Irradiation process)

2.6.1 การเกาะหรือการดูดติดผิว (Adsorption Process)

กระบวนการดูดติดผิวนั้นเกิดขึ้นได้จากความสามารถของสารตัวกลางในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่มีอยู่ในของเหลวหรือก๊าซมาเกาะติดกับสารตัวนำนั้นๆ กระบวนการนี้สามารถเกิดได้ 2 สภาวะ เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็งหรือของเหลวกับของแข็ง โมเลกุลที่ถูกดูดจับไว้เรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนผิวของแข็งที่ถูกสารถูกดูดซับเกาะจับเรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent) กระบวนการดูดติดผิวเป็นกระบวนการทางกายภาพ ชีวภาพ และเคมี ซึ่งกระบวนการดูดติดผิวทางกายภาพนั้นเป็นผลมาจากแรงวานเดอร์วาลล์ (Van der waal's Force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic)

1. แรงทางกายภาพ (Physical Force) แบ่งออกได้เป็น 2 แรง คือ

ก. แรงวานเดอร์วาลล์ (Van der waal's Force) เป็นแรงดึงดูดระหว่างอะตอมที่อยู่อย่างอิสระ โดยอะตอมสามารถทำให้เกิดแรงดึงดูดอ่อนๆ ได้ เนื่องจากการเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบในโมเลกุลนั้นๆ ทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแต่ละบริเวณที่อยู่ภายในอะตอมหรือโมเลกุลไม่เท่ากัน จึงทำให้เกิดสภาพขั้วขึ้นและจะถูกดูดซับด้วยตัวดูดซับ การดูดซับชนิดนี้มีพลังงานในการดูดซับต่ำ ดังนั้นการคายการดูดซับ (Desorption) จะเกิดขึ้นได้ง่าย

ข. แรงไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Force) เป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว ระหว่างสารที่มีขั้วกับสารที่ไม่มีขั้ว หรือสารที่ไม่มีขั้วกับสารที่ไม่มีขั้วด้วยกัน โดยจะมีรายละเอียดดังนี้

- แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วเกิดจากการเรียงตัวของโมเลกุล (Orientation Effect) ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีประจุตรงกันข้าม

- แรงดึงดูดของโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เกิดขึ้นจากผลการกระจาย (Dispersion Effect) ซึ่งจะเห็นได้จากโมเลกุลที่ไม่มีขั้วจะสามารถเปลี่ยนเป็นไดโพลได้เมื่อมีอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ด้านใดด้านหนึ่งมาก และเมื่อโมเลกุลไม่มีขั้วเข้ามา ก็จะเกิดแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน

- แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วกับโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว ซึ่งแรงดึงดูดแบบนี้จะเป็นผลเนื่องมาจากการเหนี่ยวนำ (Induction Effect) ทำให้เกิดแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน

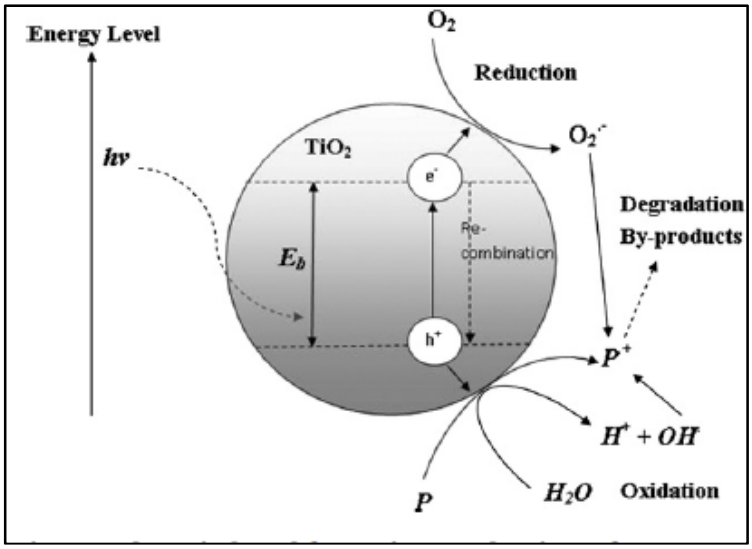
2. แรงทางเคมี (Chemical Force)

กระบวนการดูดติดผิวทางเคมีนั้นเกิดจากปฏิกิริยาของสารดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับ ซึ่งจะก่อให้เกิดสารประกอบทางเคมีขึ้น แล้วมีการเปลี่ยนแปลงอิเล็กตรอนจึงทำให้มีผลทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยว

ระหว่างไอออนของสารกับหมู่ฟังก์ชันดูดซับ กระบวนการดูดติดทางผิวนี้เป็นปฏิกิริยาที่สามารถผันกลับได้

2.6.2 กระบวนการฉายแสง (Irradiation Process)

การฉายแสงในกระบวนการโฟโตแคตาไลซิสนั้นจะมีพลังงานสูงกว่าหรือเท่ากับช่องว่างของพลังงาน (Energy band gap) บนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในด้านวาเล็นซ์ (Valence band) ถูกกระตุ้นก็จะเปลี่ยนที่อยู่ไปยังแถบการนำไฟฟ้า (Conduction band) จากนั้นอีกด้านก็จะขาดแคลนอิเล็กตรอนที่แถบวาเลนซ์ เรียกว่า โฮล (Hole) เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ h^+ ส่วนอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นแล้วไปอยู่ในแถบการนำไฟฟ้านั้น จะแทนด้วยสัญลักษณ์ e^- ดังรูปที่ 2.1 แต่อย่างไรก็ตามอิเล็กตรอนที่แถบวาเลนซ์และอิเล็กตรอนที่แถบการนำไฟฟ้า สามารถกลับมาสู่สภาวะเดิมได้ เรียกว่า รีคอมบิเนชัน (Recombination) ซึ่งถือว่าเป็นปัญหาสำคัญของกระบวนการโฟโตคาตาไลซิส



รูปที่ 2.1 กระบวนการโฟโตแคตาไลซิสบนอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา [4]

อิเล็กตรอนย้ายจากแถบของการนำไฟฟ้าไปสู่ตัวรับอิเล็กตรอน (Acceptor) ในสารละลายนั้นเรียกว่า รีดักชัน (Reduction) และอิเล็กตรอนผู้ให้ (Donor) ในสารละลายไปสู่ในแถบวาเลนซ์ เรียกว่า ออกซิเดชัน (Oxidation) ซึ่งโฮลที่เกิดขึ้นนั้นจะเป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่ดี (Strong Oxidation) แต่ถ้ามีช่องว่างของพลังงานน้อยเกินไปก็จะเกิดการรีคอมบิเนชัน โดยค่าช่องว่างของพลังงานต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ [5]

สารกึ่งตัวนำ	ค่าช่องว่างพลังงาน (eV)	ช่วงความยาวคลื่น ที่มีผลต่อแถบพลังงาน
GaAs	1.4	887
CDSe	1.7	730
CdO	2.1	590
Fe_2O_3	2.2	565
GaP	2.3	540
Cds	2.5	497
WO_3	2.8	433
TiO_2	2.8	443
ZnO	3.2	390
$BaTiO_3$	3.3	375
$SrTiO_3$	3.4	365
SnO_2	3.9	318

2.7 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide) [5]

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นสารกึ่งตัวนำที่ได้รับการพิสูจน์แล้วว่ามีความเหมาะสมกับการนำมาใช้เพื่อการบำบัดทางสิ่งแวดล้อม เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมและไม่เกิดการเปลี่ยนรูปเมื่อเกิดปฏิกิริยา ไทเทเนียมไดออกไซด์มีสูตรทางเคมี คือ TiO_2 โดยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีอยู่ในธรรมชาติมีรูปแบบของผลึก 3 แบบ

2.7.1 รูไทล์ (Rutile)

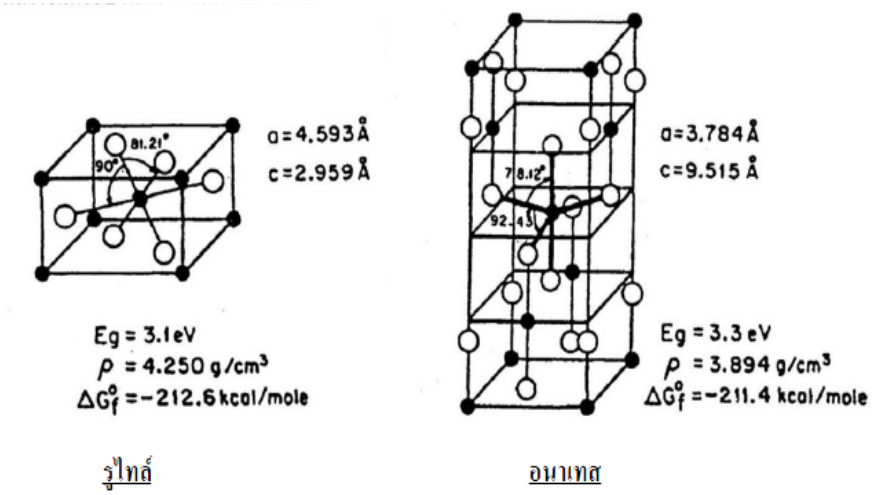
รูไทล์มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล (Tetragonal) มีเสถียรภาพสูงในอุณหภูมิสูงๆ ชนิดของไทเทเนียมไดออกไซด์ส่วนมากนั้นอยู่ในรูปของรูไทล์ ดังรูปที่ 2.2a

2.7.2 อนาเทส (Anatase)

โครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอลสามารถโน้มน้าวให้มีเสถียรภาพสูงได้ด้วยอุณหภูมิสูงๆ แต่ต่ำกว่ารูไทล์ ผลึกชนิดนี้มักนำมาใช้ในกระบวนการโฟโตคาตาไลซิส ดังรูปที่ 2.2b

2.7.3 บรูคไคต์ (Brookite)

บรูคไคต์มีโครงสร้างผลึกแบบออโธรอมบิค (Orthorhombic) จะพบในแร่เท่านั้น



รูปที่ 2.2 โครงสร้างผลึกไทเทเนียม (a) อนาเทส, (b) รูไทล์ [3]

ผลึกแบบรูไทล์และอนาเทสทั้งสองชนิดนี้สามารถพบได้ทั่วไป โดยมีสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.2 TiO_2 เป็นสารกึ่งตัวนำที่นิยมนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจาก TiO_2 นั้นมีสมบัติพิเศษในการดูดซับแสงและแลกเปลี่ยนอิเล็คตรอนได้ดี ไม่ละลายน้ำ สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้และยังมีเสถียรภาพทางเคมีสูง ส่วนสารกึ่งตัวนำอื่นๆ เช่น สังกะสีออกไซด์ และแคดเมียม (II) ซัลไฟด์ ก็มีสมบัติใกล้เคียงกับ TiO_2 แต่ไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากเป็นพิษต่อร่างกาย

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบสมบัติของ TiO_2 ระหว่างรูไทล์กับอนาเทส [5]

ลักษณะสมบัติ	รูไทล์	อนาเทส
รูปร่างผลึก	ออโธรอมบิค	ออโธรอมบิค
ค่าช่องว่างทางพลังงาน(อิเล็กตรอนโวลล์)	3.030	3.200
มาตรฐานความแข็งของโมล์(โมล์)	6.0-7.0	5.5-6.0
ความหนาแน่น (กรัมต่อตารางเซนติเมตร)	4.250	3.894
พลังงานอิสระ (กิโลแคลอรี่ต่อโมล)	-212.6	-211.4
ค่าคงตัวแลตทิซ, a (อังตรอม)	4.593	3.784
ค่าคงตัวแลตทิซ, c (อังตรอม)	2.959	9.515
จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	1.858	เปลี่ยนโครงสร้างเป็นรูไทล์ที่อุณหภูมิที่ 800

2.8 กระบวนการโฟโตแคตาไลติคของไทเทเนียมไดออกไซด์ [5]

เมื่อ TiO_2 ถูกกระตุ้นด้วยแสงที่มีพลังงานแสงเท่ากับหรือมากกว่าช่องว่างของพลังงานที่ทำให้เกิด h^+ และ e^- และเมื่อรวมตัวกับไอน้ำและอากาศก็จะทำให้เกิดปฏิกิริยาเป็นไฮดรอกซิลเรดิคอล ($OH^\bullet$) และซุปเปอร์ออกไซด์ไอออน ($O_2^\bullet$) ดังสมการที่ 2.1- 2.2

$$TiO_2(h^+) + H_2O \rightarrow TiO_2 + OH^\bullet + H^+ \quad (2.1)$$

$$TiO_2(e^-) + O_2 \rightarrow TiO_2 + O_2^\bullet \quad (2.2)$$

ซุปเปอร์ออกไซด์เรดิคัลอิออนสามารถที่จะทำปฏิกิริยาต่อไปใหม่ได้เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ดังสมการที่ 2.3-2.6

$$2O_2^{\bullet -} + H^+ \rightarrow HO_2^\bullet \quad (2.3)$$

$$HO_2^\bullet + HO_2^\bullet \rightarrow H_2O_2 + O_2 \quad (2.4)$$

$$2O_2^{\bullet -} + 2HO_2^\bullet \rightarrow H_2O_2 + 2O_2 \quad (2.5)$$

$$HO_2^\bullet + H^+ \rightarrow H_2O_2 \quad (2.6)$$

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่ดีและสามารถที่จะทำปฏิกิริยากับ e^-_{cb} เกิดเป็นเรดิคอลดังสมการที่ 2.7-2.9 เนื่องจากการเกาะติดของ H_2O_2 จะทำปฏิกิริยา จึงทำให้ไฮดรอกซิลเรดิคอล $OH^\bullet$ เข้าทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยา

$$H_2O_2 + e^-_{cb} \rightarrow OH^\bullet + OH^- \quad (2.7)$$

$$H_2O_2 + O_2^{\bullet -} \rightarrow OH^\bullet + OH^- + O_2 \quad (2.8)$$

$$H_2O_2 + hv \rightarrow 2OH^- \quad (2.9)$$

ไฮดรอกซิลเรดิคอลเป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่มีความไวในการทำปฏิกิริยาสูงและยังทำหน้าที่สลายโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ดูดติดผิวของ TiO_2 โดยจะสลายให้เป็นสารตัวกลาง (Intermediate) และกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำเมื่อเกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์

$$OH^- + R \rightarrow Intermediate \rightarrow CO_2 + H_2O \quad (2.10)$$

2.9 การคำนวณค่ารังสีอาทิตย์

2.9.1 ทิศทางของรังสีตรง [6]

ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตระหว่างระนาบของโลกที่เวลาใดๆ กับรังสีตรงหรือตำแหน่งของดวงอาทิตย์เมื่อเทียบกับระนาบ [7] สามารถอธิบายได้โดยใช้มุมต่างๆ ได้ดังนี้

ละติจูด (Latitude, ϕ) คือ มุมที่อยู่ทางทิศเหนือหรือทิศใต้ของเส้นศูนย์สูตร เมื่อวัดไปทางทิศเหนือกำหนดให้มีค่าเป็นบวกและเป็นลบเมื่อวัดไปทางทิศใต้ ละติจูดมีค่าอยู่ระหว่าง -90° ถึง 90°

มุมเอียง (Slope, β) คือ มุมระหว่างพื้นผิวของระนาบรับรังสีกับแนวระดับ มีค่าอยู่ระหว่าง 0° ถึง 180°

มุมชั่วโมง (Hour angle, ω) คือ มุมที่แทนตำแหน่งของดวงอาทิตย์จากเมอริเดียนท้องถิ่นไปทางตะวันออกหรือตะวันตก มีค่าเป็นลบในช่วงเวลาก่อนเที่ยงสุริยะและเป็นบวกหลังเที่ยงสุริยะ โดยมีค่า 15° ต่อชั่วโมง

$$\omega = \frac{t}{24} \times 360^\circ = 15t \quad (2.11)$$

เมื่อ t คือ เวลาที่วัดหลังจากเที่ยงสุริยะ (hr)

มุมเดคลิเนชัน (Declination angle, δ) คือ มุมระหว่างแนวลำแสงของรังสีอาทิตย์เมื่อเที่ยงสุริยะกับระนาบศูนย์สูตร กำหนดให้มีค่าเป็นบวกเมื่อวัดไปทางทิศเหนือ และมีค่าเป็นลบเมื่อวัดไปทางทิศใต้ มุมเดคลิเนชันมีค่าเปลี่ยนไปทุกวันโดยมีค่าระหว่าง -23.45° ถึง 23.45° สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\delta = 23.45\sin\left[360\frac{(284+n)}{365}\right] \tag{2.12}$$

เมื่อ n คือ ลำดับวันของปี

2.9.2 รังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบในแนวราบเหนือบรรยากาศ

ที่เวลาใดๆ สามารถหาค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบในแนวราบเหนือบรรยากาศตั้งแต่ดวงอาทิตย์ขึ้นไปจนถึงดวงอาทิตย์ตก [8] ได้จากสมการที่ 2.13

$$\overline{H}_0 = \frac{24\times 3600 G_{sc}}{\pi}\left(1+0.033\cos\frac{360n}{365}\right)\times\left(\cos\phi\cos\delta\sin\omega_s + \frac{\pi\omega_s}{180}\sin\phi\sin\delta\right) \tag{2.13}$$

เมื่อ

G_{sc} คือ ค่าคงตัวรังสีอาทิตย์ (1,367 W/m^2)

$\overline{H}_0$ คือ ค่าเฉลี่ยรายเดือนของค่ารายวันของรังสีอาทิตย์ในแนวระดับเหนือบรรยากาศ (MJ/m^{2}day)

ω_s คือ มุมชั่วโมงพระอาทิตย์ขึ้น (องศา) = $\cos^{-1}(\tan\phi\tan\delta)$

2.9.3 การประมาณค่ารังสีอาทิตย์ [7]

การประมาณค่ารังสีอาทิตย์ จะถูกอ้างอิงจากความสัมพันธ์เชิงเส้นของอังสตรอม ซึ่งได้เสนอเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยรายเดือนของค่ารายวันของรังสีอาทิตย์ต่อค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบเหนือบรรยากาศในแนวระดับ และค่าเฉลี่ยของชั่วโมงที่มีแดด

$$\overline{H} = \overline{H}_0\left[a + b\left(\frac{\overline{S}}{\overline{N}}\right)\right] \tag{2.14}$$

เมื่อ

a, b คือ สัมประสิทธิ์ความถดถอย

$\overline{H}$ คือ ค่าเฉลี่ยรายเดือนของค่ารายวันของรังสีรวมบนพื้นราบในแนวระดับ (MJ/m^{2}day)

$\overline{N}$ คือ ค่าเฉลี่ยรายเดือนของค่ารายวันของความยาวนานของวัน

เมื่อ $N = \frac{2}{15}\cos^{-1}(-\tan\phi\tan\delta)$

$\overline{S}$ คือ ค่าเฉลี่ยรายเดือนของค่ารายวันของชั่วโมงที่มีแดด โดยใช้ข้อมูลทางสถิติของกรุงเทพฯ (1991-1998) แสดงในตารางที่ 2.3

ดัชนีเมฆเฉลี่ยรายเดือน $(\overline{K_T})$ คือ อัตราส่วนระหว่างค่าเฉลี่ยรายเดือนของค่ารายวันของรังสีรวมบนพื้นราบในแนวระดับ $(\overline{H})$ ต่อค่าเฉลี่ยรายเดือนของค่ารายวันของรังสีอาทิตย์ในแนวระดับเหนือบรรยากาศ $(\overline{H}_0)$ และได้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนรังสีรวมรายวันต่อรังสีนอกบรรยากาศกับชั่วโมงที่มีแดดและความยาวนานของวัน โดยใช้ข้อมูลจาก 4 สถานี และได้ทำการวิเคราะห์โดยใช้ข้อมูลเฉลี่ยรายเดือนของค่ารายวันคำนวณหาค่าดัชนีเมฆเฉลี่ยรายเดือน [7] ได้จากสมการ

$$\overline{K}_T = \frac{\overline{H}}{\overline{H}_0} = a + b\left(\frac{\overline{S}}{\overline{N}}\right) \qquad (2.15)$$

ตารางที่ 2.3 ชั่วโมงมีแดดเฉลี่ยของแต่ละเดือน [7]

Month	$\overline{S}$ (hrs)	Month	$\overline{S}$ (hrs)
January	8.16	July	5.17
February	8.29	August	4.65
March	8.60	September	4.65
April	7.44	October	5.05
May	6.54	November	5.53
June	4.98	December	7.88

ตารางที่ 2.4 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรังสีรายวันต่อรังสีนอกบรรยากาศ และชั่วโมงที่มีแดดต่อความยาวนานของวัน [8]

Station	Mean of $\overline{K}_T = \frac{\overline{H}}{\overline{H}_0}$	Regression Coefficient		R^+	$RSME^{++}$
		A	b		
กรุงเทพ	0.5082	0.3149	0.3859	0.8724	0.0544
เชียงใหม่	0.5694	0.3579	0.3531	0.9049	0.0625
อุบลราชธานี	0.5534	0.2626	0.4526	0.9369	0.0695
หาดใหญ่	0.5271	0.2733	0.4344	0.8584	0.0416

R^+ คือ สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (The correlation coefficient)

$RSME^{++}$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

2.9.4 การประมาณค่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อม

อุณหภูมิอากาศแวดล้อม สามารถคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [9] ได้ดังนี้

$$T_a(t) = \frac{[(T_{\max} + T_{\min}) + (T_{\max} - T_{\min})\sin(\omega t)]}{2} \qquad (2.16)$$

เมื่อ

hr คือ เวลาในชั่วโมงที่พิจารณา

$T_a(t)$ คือ อุณหภูมิอากาศแวดล้อมในเวลา t (K)

$T_{\max}$ คือ อุณหภูมิสูงสุดของอากาศแวดล้อมของวันในเวลา t (K)

$T_{\min}$ คือ อุณหภูมิต่ำสุดของอากาศแวดล้อมของวันในเวลา t (K)

t คือ ระยะเวลาของการทดสอบในชั่วโมงที่พิจารณาก่อนแปดชั่วโมง (hr)

ω คือ $2\pi/24$

ตารางที่ 2.5 อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดและต่ำสุดของอากาศแวดล้อมในประเทศไทยในแต่ละช่วงเดือน [10]

คาบ	ช่วง	อุณหภูมิอากาศแวดล้อม (°C)	
		สูงสุด	ต่ำสุด
1	14 มกราคม – 26 กุมภาพันธ์	33.3	21.8
2	27 กุมภาพันธ์ – 12 เมษายน	35.6	23.5
3	13 เมษายน – 28 พฤษภาคม	35.5	24.9
4	29 พฤษภาคม – 15 กรกฎาคม	33.9	25.1
5	16 กรกฎาคม – 31 สิงหาคม	32.8	24.9
6	1 กันยายน – 15 ตุลาคม	32.6	24.9
7	16 ตุลาคม –29 พฤศจิกายน	31.9	23.6
8	30 พฤศจิกายน – 13 มกราคม	32.1	21.1

2.9.5 การใช้ประโยชน์ของแผงรับรังสีอาทิตย์ [6]

แผงรับรังสีในแต่ละแบบนั้นจะมีจุดประสงค์ที่แตกต่างกันออกไป นั่นก็คือการรวมรังสีอาทิตย์ในรูปของความร้อนแล้วนำไปใช้ประโยชน์ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ดังนั้นจึงได้มีการแบ่งแผงรับรังสีอาทิตย์ได้เป็น 3 ลักษณะ

1. แผงรับรังสีแบบแผ่นราบ เป็นแผงชนิดที่ไม่มีการรวมรังสี ทำอุณหภูมิได้ประมาณ 100 °C สร้างง่าย ราคาถูก ติดตั้งอยู่กับที่ได้ไม่ต้องเปลี่ยนตามดวงอาทิตย์

2. แผงรับรังสีแบบรวมรังสีอุณหภูมิปานกลาง มีอัตราส่วนของการรวมรังสีประมาณ 2-10 เท่า โดยไม่มีจุดรวมรังสีที่เที่ยงตรง และไม่ต้องติดตามดวงอาทิตย์แบบเที่ยงตรงตลอดเวลา อาจมีการปรับมุมรับรังสีตามฤดูกาล แผงรับรังสีแบบนี้ เช่น แผงรับรังสีแบบรูปประกอบพาราโบลา

3. แผงรับรังสีแบบรวมรังสีอุณหภูมิสูง ผลิตพลังงานที่มีอัตราส่วนรวมรังสีมาก และให้อุณหภูมิสูงที่เป้ารับรังสี (Receiver) ต้องการจุดรวมรังสีที่เที่ยงตรงและแน่นอน และต้องมีการติดตามดวงอาทิตย์ที่เที่ยงตรงตลอดเวลา แผงรับรังสีลักษณะนี้มีรางพาราโบลิค (Parabolic trough) และฮีลิโอสแตท (Heliostats) เป็นต้น

2.9.6 ลักษณะของการรวมรังสีสามารถแบ่งออกตามอัตราส่วนรวมรังสี 2 ชนิด คือ

1) การรวมรังสีเสมือนไม่เกิดภาพดวงอาทิตย์ที่เป้ารับรังสี (Non-imaging) คือจะได้รังสีกระจายไปทั่วเป้าดูดรังสี แต่รังสีจะไม่เข้มมากนักและมีอัตราส่วนรวมรังสีต่ำ โดยทั่วไปจะต่ำกว่า 10 เท่าลงมา

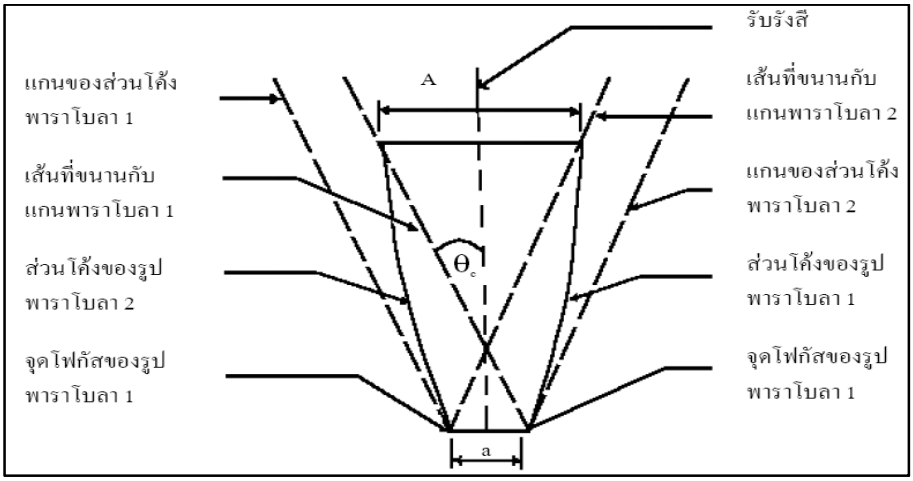
2) การรวมรังสีแบบเสมือนเกิดภาพดวงอาทิตย์ที่เป้ารับรังสี (Imaging) คือจะมีอัตราส่วนรวมรังสีที่สูงขึ้น

ข้อดีของแผงรับรังสีแบบรวมรังสี

- เพิ่มพลังงานรังสีอาทิตย์ให้เป้ารับรังสี ทำให้ได้อุณหภูมิใช้งานสูงขึ้น
- ปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงความร้อน โดยการลดพื้นที่การสูญเสียความร้อนของเป้ารับรังสีเมื่อเทียบกับพื้นที่รับรังสี (Aperture area) ทั้งหมดแล้ว การสูญเสียความร้อนนี้จะน้อยกว่าของแผงรับรังสีแบบแผ่นราบมาก
- ไม่ต้องติดตามดวงอาทิตย์อย่างเที่ยงตรงตลอดเวลา ทำให้ไม่ต้องเปลืองพลังงานเพื่อใช้ในการติดตามดวงอาทิตย์
- แผงรับรังสีแบบ CPC สามารถรับรังสีอาทิตย์ได้ทั้งรังสีตรงและรังสีกระจาย

2.9.7 รูปร่างลักษณะของแผงรับรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลา (CPC)

รูปร่างลักษณะของรูปประกอบพาราโบลาขั้นพื้นฐาน [11] เป็นรูปของส่วนโค้งพาราโบลา 2 รูป ที่นำมาประกอบกัน โดยทำให้แกนของพาราโบลา (Axis of parabola) ทั้งสองรูปทำมุม θ_c กับแกนกลางหรือแกนร่วมของแผงรับรังสี (Axis of collector) ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบของ CPC [11]

เมื่อ

A คือ หน้ากว้างของพื้นที่รับรังสี (Aperture)

a คือ เส้นรอบรูปของเป้ารับรังสี (Receiver)

θ_c คือ ครึ่งมุมรับรังสีของ CPC (Acceptance half angle)

2.9.8 สมบัติการรวมรังสีของพาราโบลา (Parabola Curve)

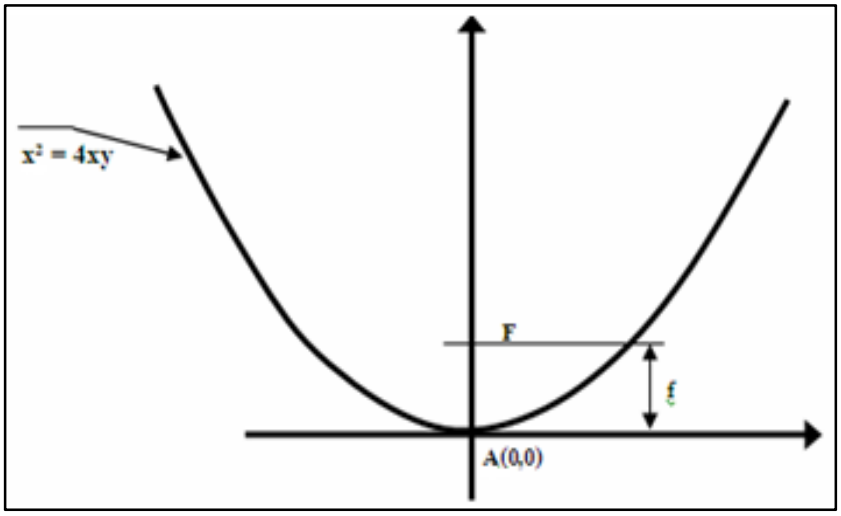
รูปกราฟพาราโบลา มีสูตรทางคณิตศาสตร์ว่า $x^2 = 4fy$ แสดงดังรูปที่ 2.4

เมื่อ

A (0, 0) คือ จุดกำเนิด (origin)

f คือ ระยะโฟกัส

F คือ จุดโฟกัส



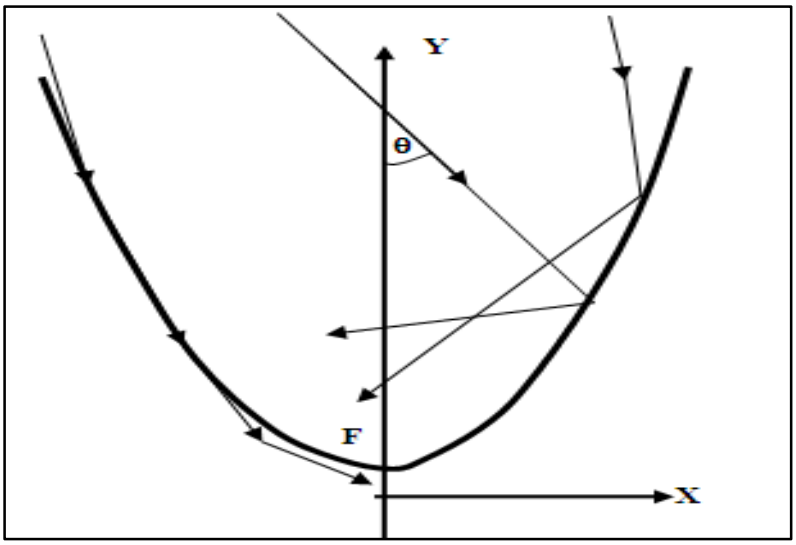
รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบของพาราโบลา [11]

2.9.9 สมบัติพิเศษในการรวมรังสีของรูปพาราโบลา

1. รังสีที่ส่องขนานกับแกนของพาราโบลาจะสะท้อนมารวมกันที่จุดๆ หนึ่ง ซึ่งเรียกว่า จุดโฟกัส

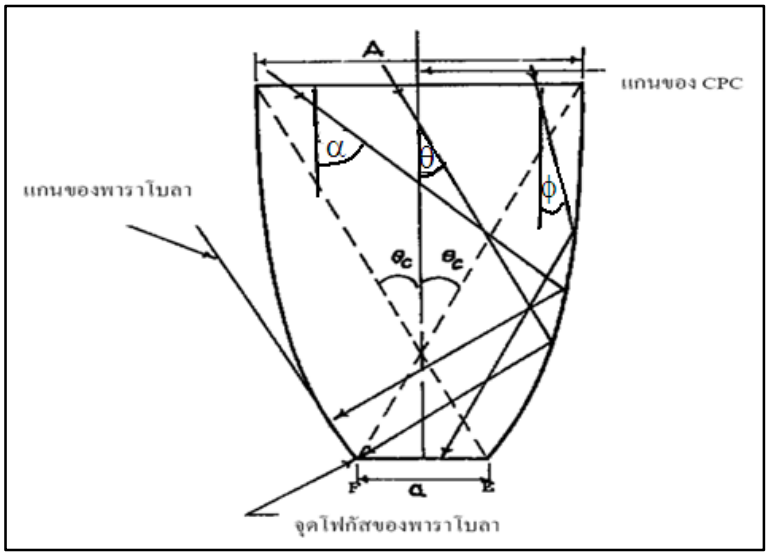
2. รังสีที่ส่องมาไม่ขนานกับแกนของพาราโบลา แต่ทำมุม θ กับแกนของพาราโบลา รังสีที่ส่องมาลักษณะนี้จะไม่สามารถสะท้อนมารวมกันที่จุดโฟกัส

3. รังสีที่ส่องมาเป็นมุมแฉลบหรือไถลไปกับส่วนโค้งของพาราโบลา (Glancing angle) รังสีอาจจะสะท้อนมากกว่าหนึ่งครั้งตามส่วนโค้งของพาราโบลาผ่านลงมาใกล้กับจุดโฟกัส



รูปที่ 2.5 การสะท้อนรังสีของรูปประกอบพาราโบลา [11]

2.9.10 การรับรังสีของแผงรับรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลา (CPC)



รูปที่ 2.6 การสะท้อนรังสีเข้าเป้าของรูปประกอบพาราโบลา [11]

จากคุณสมบัติการรวมรังสีของรูปพาราโบลาและการสร้างรูปประกอบพาราโบลาที่มีครึ่งมุมรับรังสีเป็น θ_c ทำให้รูปประกอบพาราโบลามีคุณสมบัติในการรับรังสี 3 ลักษณะ [12] คือ

1. ถ้ารังสีทำมุม θ_c กับแกนกลางของ CPC แล้ว รังสีนั้นจะถูกสะท้อนรวมเข้าจุดโฟกัสของพาราโบลารูปนั้นหรือเข้าเป้ารับรังสีของ CPC นั้น

2. ถ้ารังสีทำมุมเล็กกว่ามุมของ CPC รูปนั้นแล้วรังสีนั้นจะไม่ถูกสะท้อนเข้าจุดโฟกัสของพาราโบลารูปนั้น แต่จะตกอยู่ระหว่างจุดโฟกัสของรูปพาราโบลาทั้งสองอันที่ประกอบเป็น CPC นั้น ซึ่งระยะห่างของจุดโฟกัสทั้งสองคือ เป้ารับรังสีของ CPC

3. ถ้ารังสีทำมุม ψ ซึ่งโตกว่ามุมของ CPC รูปนั้นแล้วรังสีนั้นจะไม่ถูกสะท้อนรวมเข้าจุดโฟกัสของพาราโบลา แต่รังสีจะสะท้อนผ่านเหนือจุดโฟกัสนั้นไป ซึ่งจะไม่ตกเข้าเป้ารับรังสีของ CPC

จากลักษณะการตกกระทบของรังสีทั้ง 3 ลักษณะนี้ รูปประกอบพาราโบลาจะยอมรับรังสีเข้าเป้ารับรังสีได้ก็ต่อเมื่อรังสีนั้นทำมุมกับเส้นขนานแกนกลางของ CPC ไม่เกินครึ่งมุมรับรังสี (θ_c) ของรูปประกอบพาราโบลารูปนั้น ดังรูปที่ 2.6

2.9.11 ลักษณะทั่วไปของแผงรับรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลา (CPC)

CPC เป็นตัวเพิ่มความเข้มรังสีอาทิตย์แบบอยู่กับที่ (Fixed concentrator) มีอุณหภูมิใช้งานปานกลาง (100-300 °C) โดยมีรางสะท้อนรังสีให้มีความเข้มเพิ่มขึ้นไปประมาณ 1.1-10 เท่า โดยไม่จำเป็นต้องเคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์อย่างเที่ยงตรงตลอดเวลา ต้องการการปรับตำแหน่งเป็นบางครั้งบางคราว เช่น เดือนละครั้งหรือฤดูกาลละครั้งเท่านั้น นอกจากนี้ CPC ยังมีพื้นที่ผิวสะท้อนรังสีมากกว่าแบบเคลื่อนตามดวงอาทิตย์ (Focusing concentrator) จึงสามารถยอมให้มีการผิดพลาดของรูปแบบผิวสะท้อนรังสีได้มากขึ้น จึงไม่ต้องการความพิถีพิถันในการสร้างมากเท่าแบบเคลื่อนตามดวงอาทิตย์

CPC แบ่งตามลักษณะทางเรขาคณิตออกเป็น 2 แบบ [12] คือ แบบ 2 มิติ ซึ่งมีลักษณะเป็นรางยาวและปรับตามดวงอาทิตย์รอบแกนเดียว และแบบ 3 มิติ ซึ่งมีลักษณะเป็นกรวยต้องปรับตามดวงอาทิตย์รอบสองแกน โดยต้องปรับรอบแกนใดแกนหนึ่งทุก 15 นาที เพื่อเคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์ CPC มีอัตราส่วนการรวมรังสีตามทฤษฎี (CR) ขึ้นอยู่กับตัวกลาง (Medium) ระหว่างตัวดูดรังสี ผิวสะท้อนรังสี และมุมรับรังสี ดังนี้

$$CR_{,\text{ทฤษฎี, 2 มิติ}} = \frac{n}{Sin\theta_c} \tag{2.17}$$

$$CR_{,\text{ทฤษฎี, 3 มิติ}} = \frac{n^2}{Sin^2\theta_c} \tag{2.18}$$

เมื่อ

n คือ สัมประสิทธิ์การหักเหแสง (Index of refraction) ของตัวกลางที่อยู่ระหว่างตัวรับรังสีกับรางสะท้อนรังสี

θ_c คือ ครึ่งมุมรับรังสี (Acceptance half angle)

เนื่องจาก CPC ถูกออกแบบมาให้สามารถรับรังสีอาทิตย์ได้เป็นบริเวณกว้าง ดังนั้นสำหรับ CPC ที่มีอัตราความเข้มประมาณ 9-10 และรับรังสีอาทิตย์อย่างน้อยวันละ 7 ชั่วโมง ต้องการปรับตำแหน่งเพียงเดือนละครั้งเท่านั้น และถ้าไม่มีการปรับเลยก็ยังคงทำงานได้แต่จะรับรังสีได้น้อยกว่า 7 ชั่วโมง แกนของโลกเอียงทำมุม 23.5° กับระนาบที่โลกหมุนรอบดวงอาทิตย์ ดังนั้นจากวันที่ 21 ธันวาคม (Winter solstice) ไปถึงวันที่ 21 มิถุนายน (Summer solstice) ดวงอาทิตย์ตอนเที่ยงจะทำมุมกัน 47° ถ้าเราออกแบบตัวเพิ่มความเข้มรังสีอาทิตย์ให้มีมุมรับรังสีเป็น 20° ($CR_{ทฤษฎี}$ = 1.3054) และตั้งแกนตั้งฉากของตัวเพิ่มความเข้มรังสีอาทิตย์ตรงกับตำแหน่งของดวงอาทิตย์ตอนเที่ยงวันวิษุวัติ (ดวงอาทิตย์ตำแหน่งตรงได้ฉากกับเส้นศูนย์สูตรของโลก; Equinox) โดยวางรางในแนวตะวันออก-ตะวันตก แล้วจะไม่ต้องมีการปรับตำแหน่งเลยตลอดปี

CPC แบบ 2 มิติ สามารถแบ่งตามลักษณะของเป้ารับรังสีได้ 4 แบบ ดังนี้

แบบ 1 เป้ารับรังสีแบบแผ่นราบ (Flat type)
แบบ 2 เป้ารับรังสีแบบครีบ (Fin type)
แบบ 3 เป้ารับรังสีแบบรูปวีคว่ำ (Inverted vee type)
แบบ 4 เป้ารับรังสีแบบท่อ (Tubular type)

ความสัมพันธ์ของความสูงทั้งหมดของรางสะท้อนรังสี (H) ความยาวของระยะโฟกัส (f) กับครึ่งมุมรังสี (θ_c) และเส้นรอบรูปของเป้ารับรังสี (เฉพาะด้านที่รับรังสี) (a) ของเป้ารับรังสีทั้ง 4 แบบ แสดงไว้ในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ความสัมพันธ์ของความสูง (H) ความยาวโฟกัส (f) ครึ่งมุมรับรังสี (θ_c) และเส้นรอบรูปของเป้ารับรังสี (เฉพาะด้านที่รับรังสี, a) ของ CPC [11]

เป้ารับรังสี	ความสูงทั้งหมด (H)	ความยาวโฟกัส (f)	สมการส่วนโค้งรูปพาราโบลา
1.แบบแผ่นราบ (Flat type)	$H=\frac{a}{2}\left(\frac{1}{\tan\theta_c}+\frac{1}{\tan\theta_c\sin\theta_c}\right)$	$f=\frac{a}{2}(1+\sin\theta_c)$	$x^2=4fy$
2.แบบครีบ (Fin type)	$H=\frac{a}{2}\left(1+\frac{1}{\tan\theta_c\sin\theta_c}\right)$	$f=\frac{a}{2}$	$x^2=4fy$
3.แบบรูปวีคว่ำ (Inverted Vee type)	$H=\frac{a}{2}\left(\cos\theta_c+\frac{1}{\tan\theta_c\sin\theta_c}\right)$	$f=\frac{a}{2}$	$x^2=4fy$
4. แบบท่อ (Tubular type)	$H=\frac{a}{2}\left(\frac{1}{2}+\frac{1}{\pi\sin\theta_c}+\frac{1}{\tan\theta_c\sin\theta_c}\right)$	$f=\frac{a}{r}$	$BC=\beta\left(\frac{d}{2}\right)$ สำหรับ $\beta\le\theta_c+\frac{\pi}{2}$ $BC=\frac{\left(\frac{d}{2}\right)\left[\left(\beta+\theta_c+\frac{\pi}{2}\right)-\cos(\beta-\theta_c)\right]}{1+\sin(\beta-\theta_c)}$ สำหรับ $\theta_c+\frac{\pi}{2}\le\beta\le3\frac{\pi}{2}-\theta_c$

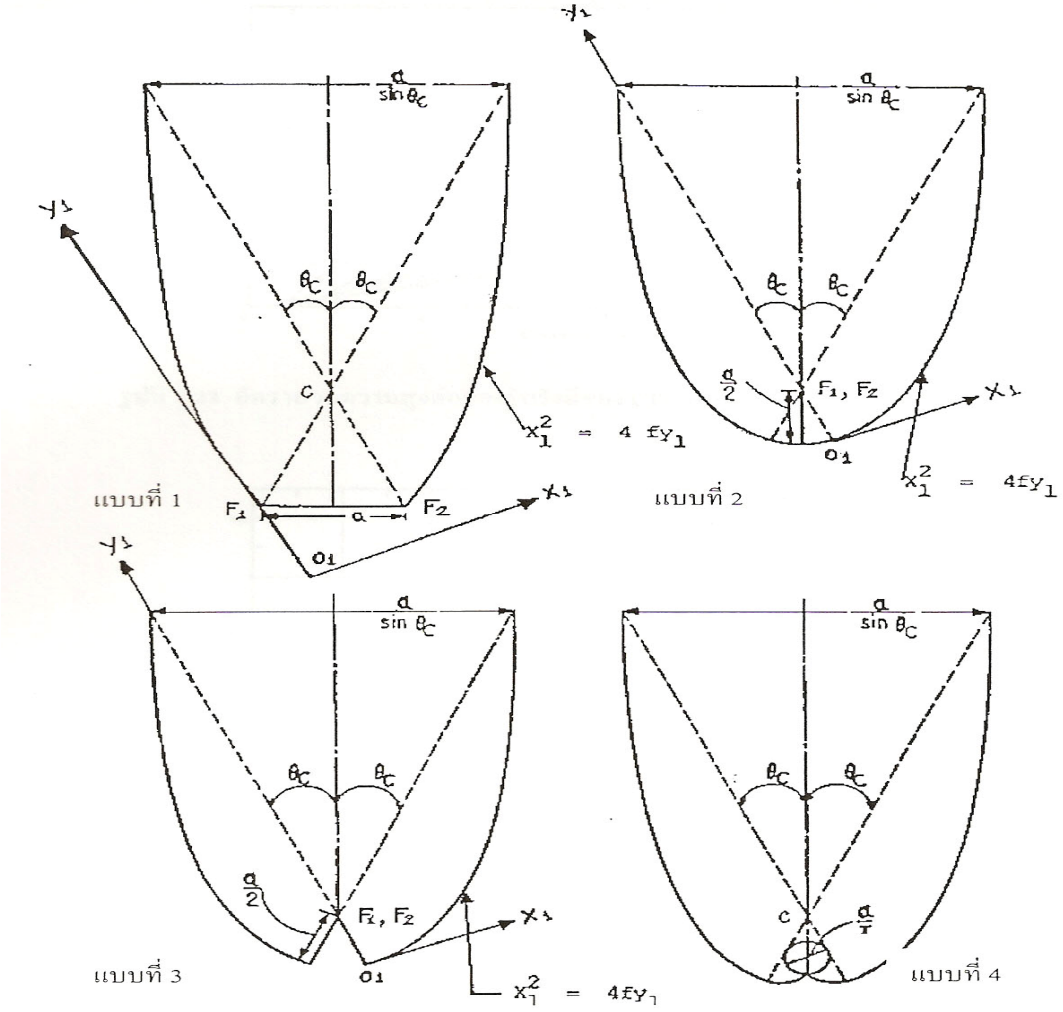
หมายเหตุ: BC คือ ส่วนโค้งรูปพาราโบลา

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (m)

r คือ รัศมีของท่อ (m)

รูปที่ 2.7 แสดงส่วนประกอบและลักษณะเป้ารับรังสีของ CPC แต่ละแบบ โดยจะเห็นว่าเป้ารับรังสีแบบที่ 2 และแบบที่ 4 นั้น เป้ารับรังสีอาทิตย์จะอยู่ภายในรางสะท้อนรังสีทั้งหมด จึงไม่ต้องมีฉนวนป้องกันการสูญเสียความร้อนด้านหลังของเป้ารับรังสีและยังสามารถรับรังสีได้รอบตัวอีกด้วย ทำให้พื้นที่ของเป้ารับรังสีมีพื้นที่น้อยลงจึงสามารถตอบสนองต่อพลังงานที่ได้รับเร็วขึ้น ในการพิจารณาได้นำ CPC มาใช้เป็นตัวรับรังสีอาทิตย์ของระบบน้ำร้อนนั้น เลือกใช้ CPC ที่มีครีบและท่อเป็นเป้ารับ

รังสีอาทิตย์ โดยให้น้ำซึ่งเป็นของไหลใช้งานไหลผ่านท่อรับรังสี เพื่อถ่ายโอนความร้อนจากตัวรับรังสีไปใช้งาน



รูปที่ 2.7 ชนิดและส่วนประกอบของ CPC แต่ละแบบ [11]

รูปแบบรางสะท้อนรังสีอาทิตย์ของเป้ารับรังสีทั้ง 4 แบบที่ได้แสดงในรูปที่ 2.7 นั้น มีพื้นผิวสะท้อนรังสีมากและลักษณะโครงสร้างสะท้อนรังสีมาก จึงทำให้สามารถตัดรางสะท้อนรังสีส่วนบนออกได้มากถึงร้อยละห้าสิบ โดยทำให้อัตราเพิ่มความเข้ม (Concentration Ratio, CR) ลดลงเพียงร้อยละสิบเท่านั้น โดยในรูปที่ 2.8 และ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนเพิ่มความเข้มกับอัตราส่วนของความสูงต่อหน้าตัดรับรังสี (Height/Aperture) และอัตราส่วนของผิวสะท้อนรังสีต่อหน้าตัดรับรังสี (Reflector/Aperture) ตามลำดับ นอกจากนี้การตัดรางสะท้อนรังสีออกบ้างยังช่วยลดความสูญเสียในการสะท้อนกลับมาและทำให้เหมาะสมในเชิงปฏิบัติมากขึ้น รางสะท้อนรังสีที่มีมุมรับรังสีต่างกัน

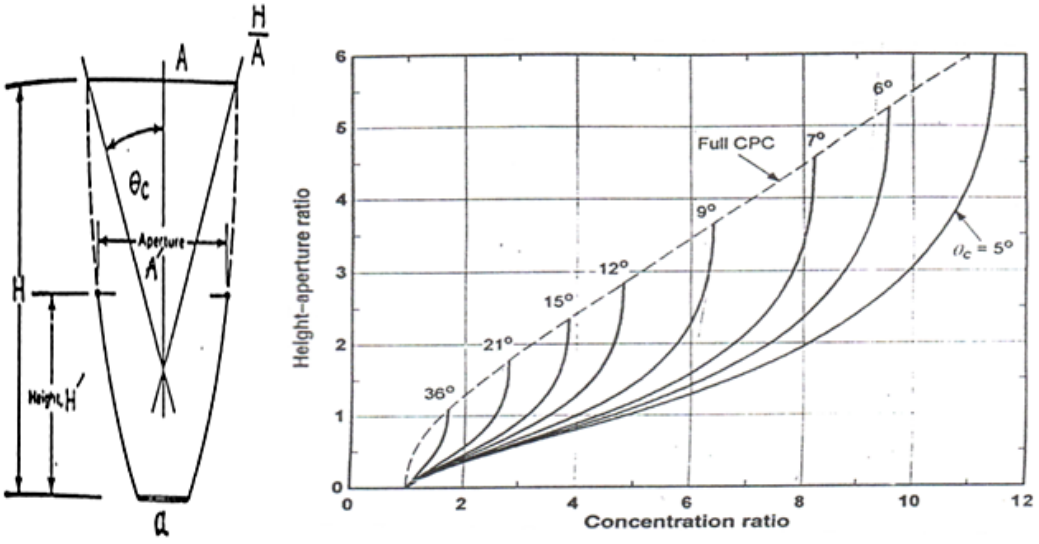
(อัตราเพิ่มความเข้มตามทฤษฎีต่างกัน) สามารถมีค่าอัตราเพิ่มความเข้มรังสีอาทิตย์ในทางปฏิบัติเท่ากันโดยการตัด (Truncation) โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$CR_{\text{ปฏิบัติ, 2 มิติ}} = \text{พื้นที่หน้าตัดแผงรับรังสี } (A_c) / \text{พื้นผิวเป้ารับรังสี } (A_r) \qquad (2.19)$$

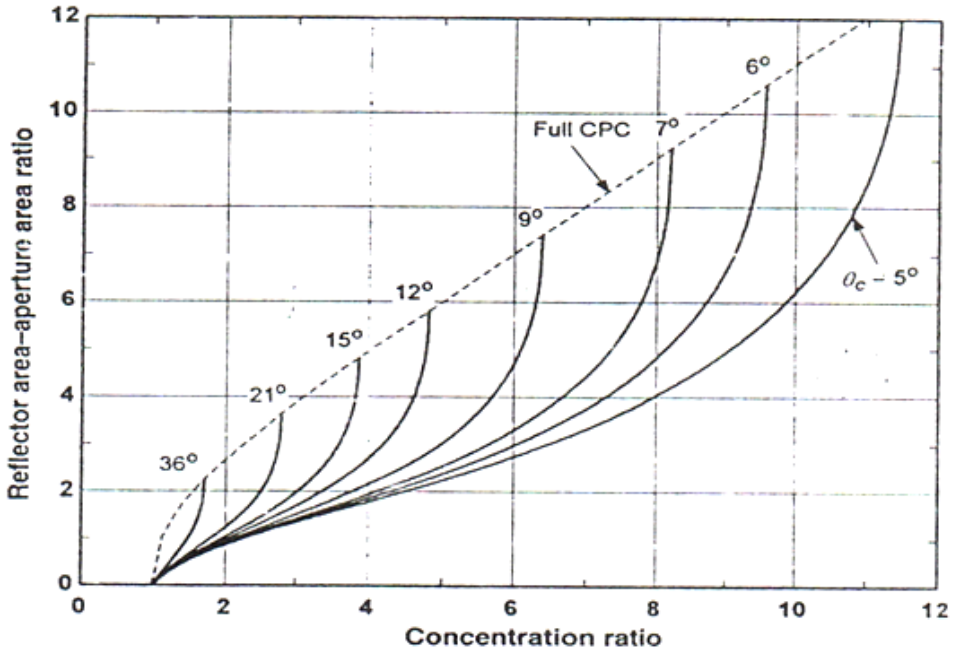
2.9.12 ข้อจำกัดของ CPC ในการรับรังสี

1. สำหรับ CPC ที่มีพื้นที่เป้าดูดรังสีเท่ากันแล้ว แบบที่มีครึ่งมุมรับรังสีน้อยกว่าจะมีความสูง (H) มากกว่าและมีพื้นที่รับรังสี (A_c) และอัตราส่วนรวมรังสีมากกว่าแบบที่มีครึ่งมุมรับรังสีที่โตกว่า แต่ถ้ามีการตัดความสูงของ CPC ลงให้มีหน้ากว้างพื้นที่รับรังสีเท่ากัน หรือให้มีอัตราส่วนรวมรังสีที่เท่ากันแล้วแบบที่มีครึ่งมุมรับรังสีที่น้อยกว่าจะมีความสูงน้อยกว่า
2. สำหรับ CPC ที่มีครึ่งมุมรับรังสีน้อยกว่าจะมีอัตราส่วนเพิ่มความเข้มที่มากกว่า แต่จะมีระยะเวลาในการรับรังสีต่อวันหรือต่อฤดูกาลได้น้อยกว่า CPC ที่มีครึ่งมุมรับรังสีที่โตกว่า ดังนั้นจึงต้องมีการปรับมุมรับรังสีบ่อยครั้งกว่า

การตัดความสูงของ CPC นั้นจะช่วยลดค่าใช้จ่ายของวัสดุและช่วยลดน้ำหนักลง



รูปที่ 2.8 อัตราส่วนความสูงต่อหน้าตัดรับรังสี (H/A) ของ CPC แบบเต็มและแบบที่ถูกตัดบางส่วน [11]



รูปที่ 2.9 อัตราส่วนของผิวสะท้อนรังสีต่อพื้นที่หน้าตัดแผงรับรังสีของ CPC แบบเต็มและแบบที่ถูกตัดบางส่วน [11]

2.9.13 ลักษณะการสร้างแผงรับรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลา (CPC)

ข้อควรคำนึงในการออกแบบสร้าง CPC [12] เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงทั้งในเชิงความร้อนและเชิงออปติกส์ ดังนี้

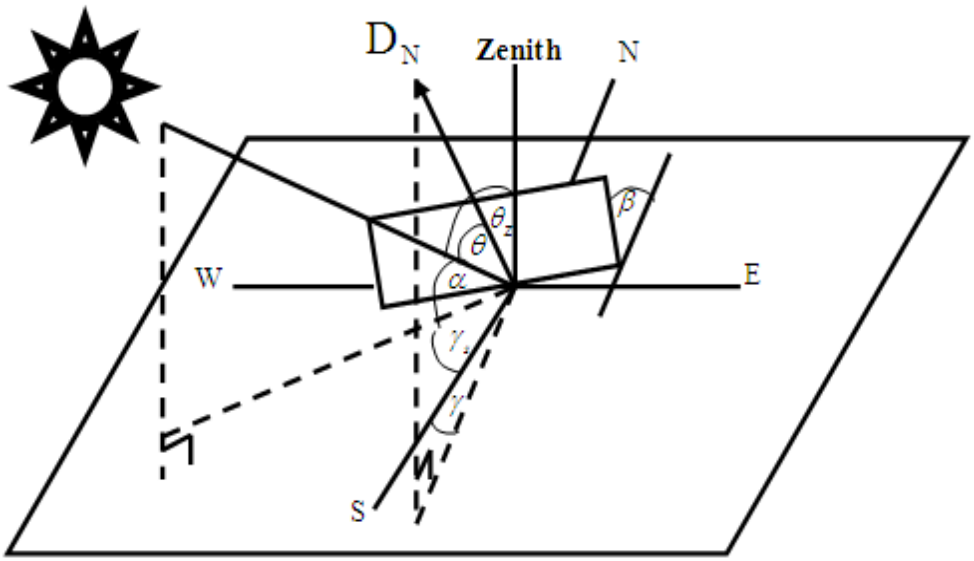
- เนื่องจาก CPC สามารถรับรังสีกระจายได้ ในการสร้าง CPC จึงควรมีกระจกปิดด้านบนพื้นที่รับรังสี (A_c) ด้วย และด้านล่างของรางสะท้อนรังสีต้องมีฉนวนหุ้ม เพื่อทำให้เป็นลักษณะแบบ Green house คือ เก็บรวบรวมความร้อนจากรังสีกระจายและให้ความร้อนส่วนนี้สูญเสียไปน้อยที่สุด โดยใช้กระจกปิดกั้นไว้ ซึ่งยังทำหน้าที่ป้องกันฝุ่นทำให้ผิวสะท้อนรังสีสะอาดด้วย

- การสร้างเพื่อจุดประสงค์ให้ได้อุณหภูมิที่สูง มีรายละเอียดเยอะในการสร้างและต้องป้องกันไม่ให้เกิดการสูญเสียความร้อน เป้ารับรังสีต้องทำด้วยวัสดุผิวเลือกรังสี (Highly selective) ประเภท Black-chrome และควรเป็นสูญญากาศด้วย ซึ่งอาจทำให้ CPC มีค่า CR ประมาณ 9.19 และให้อุณหภูมิขาออก 316 °C ที่ประสิทธิภาพ 44.3% แต่ถ้าสร้างให้สมบูรณ์จริงๆ อาจทำให้ได้อุณหภูมิถึง 600 °C

- มีข้อแนะนำว่า ควรสร้างเป้ารับรังสีให้มีพื้นที่โตกว่าที่คำนวณไว้จริงประมาณ 20% เพื่อให้มีประสิทธิภาพเชิงออปติคส์ที่ดีกว่า เพื่อป้องกันโอกาสการส่องแสงไม่โดนเป้ารับรังสี

2.9.14 ความสัมพันธ์ของรังสีตรงกับแผงรับรังสี

เนื่องจากแกนหมุนของโลกเอียงทำมุม 23.5° หรือ 23.45° กับระนาบโคจรรอบดวงอาทิตย์ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงมุมที่เกิดจากเส้นแนวต่อศูนย์กลางของโลกและดวงอาทิตย์ทำกับระนาบศูนย์ของโลก เรียกว่ามุมเดคลิเนชัน (Declination) ทิศทางของรังสีตรงกับแผงรับรังสีที่มุมเอียง [11] และมีทิศทางหันเหไปในลักษณะต่างๆ กัน ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของมุมหลายมุม



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ของมุมต่างๆ บนพื้นราบและระนาบเอียง [12]

$$\cos\theta = \sin\delta\sin\phi\cos\beta - \sin\delta\cos\phi\sin\beta\cos\gamma + \cos\delta\cos\phi\cos\beta\cos\omega + \cos\delta\sin\phi\sin\beta\cos\gamma\cos\omega + \cos\delta\sin\beta\sin\gamma\sin\omega \quad (2.20)$$

เมื่อ

β คือ มุมเอียงของแผงรับรังสี (slope), $0 \le \beta \le 180$

θ คือ มุมตกกระทบบนระนาบกับรังสี (Angle of incident)

θ_z คือ มุมซีนีธ (Zenith angle)

ϕ คือ มุมของเส้นรุ้ง (Latitude), $-90 \le \phi \le 90$

ω คือ มุมของเวลา (Hour angle)

α คือ มุมอัลติจูด (Solar–altitude)

γ คือ มุมอะซิมุธของแผงรับรังสี (Surface-azimuth)

γ_s คือ มุมอะซิมุธของดวงอาทิตย์ (Solar–azimuth)

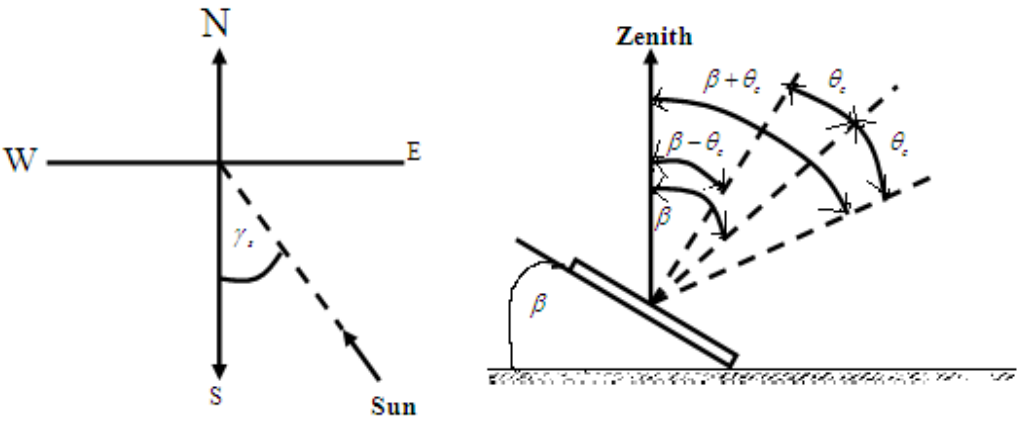
มุมที่มีความสำคัญที่ใช้กับ CPC มีดังนี้

$$\cos\theta_Z = \sin\alpha = \cos\delta\cos\phi\cos\omega + \sin\delta\sin\phi \quad (2.21)$$

$$\sin\gamma_s = \frac{\cos\delta\sin\omega}{\cos\alpha} = \frac{\cos\delta\sin\omega}{\cos\theta_Z} \quad (2.22)$$

การรับรังสีตรงของ CPC มีความสัมพันธ์กับมุมซีนิธ (θ_Z) มุมอซิมุธของดวงอาทิตย์ (γ_S) และมุมเอียงรับรังสีของ CPC (β)[11] ซึ่ง Mitchell ได้ให้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$(\beta - \theta_c) \le \tan^{-1}(\tan\theta_Z \cdot \cos\gamma_S) \le (\beta + \theta_c) \quad (2.23)$$



รูปที่ 2.11 ค่ามุม γ_S การเอียงมุมของ CPC เป็น β ที่จะสามารถให้รังสีตกทำมุม $(\beta - \theta_C)$ และ $(\beta + \theta_C)$ จากเส้นตั้งฉากกับพื้นราบ (Zenith) [11]

ถ้าให้ F เป็นฟังก์ชันที่รังสีจะเข้าสู่ CPC ในช่วง 20 (θ_C) คือ ถ้าค่าของ $\tan^{-1}(\tan\theta_Z \times \cos\gamma_S)$ เป็นไปตามสมการที่ 2.31 ให้ F = 1 แต่ถ้ามีค่านอกเหนือจากนี้ F = 0 ดังนั้นค่า Gb_{CPC} จึงมีความสัมพันธ์กับ F ด้วย

$$Gb_{CPC} = FGb_n \times \cos\theta \tag{2.24}$$

เมื่อ

Gb คือ ปริมาณรังสีตรงที่ตกตั้งฉากบนพื้นราบ (W/m^2)

Gb_n คือ ปริมาณรังสีตรง (W/m^2)

Gb_T คือ ปริมาณรังสีตรงที่ตกตั้งฉากบนพื้นเอียง (W/m^2)

ถ้าให้ R_b เป็นอัตราส่วนของปริมาณรังสีตรงบนระนาบเอียงต่อปริมาณรังสีบนพื้นราบ

$$R_b = (I_{bT} / I_b) \tag{2.25ก}$$

$$= \frac{\cos\theta}{\cos\theta_Z} \tag{2.25ข}$$

เมื่อ

I_b คือ ปริมาณรังสีตรงที่ตกตั้งฉากบนพื้นราบ(W/m^2)

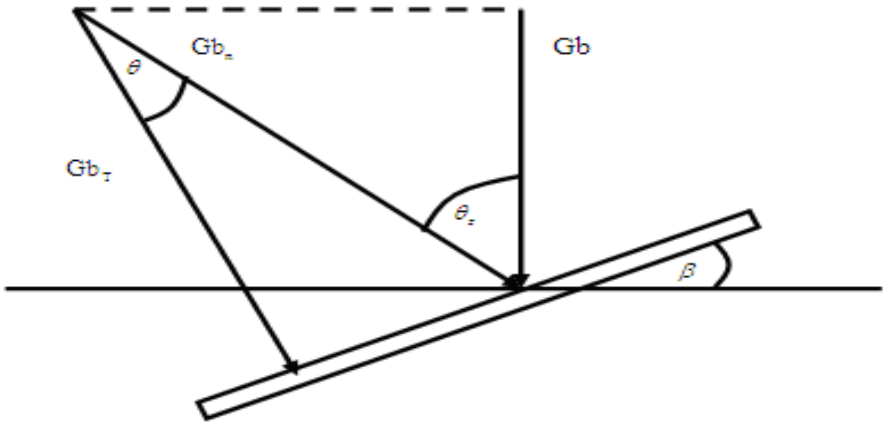
I_d คือ ปริมาณรังสีกระจายที่ตกตั้งฉากบนพื้นราบ (W/m^2)

I_{dT} คือ ปริมาณรังสีกระจายที่ตกตั้งฉากบนพื้นเอียง (W/m^2)

I_T คือ ปริมาณรังสีรวมที่ตั้งฉากบนพื้นเอียง (W/m^2)

R_b คือ อัตราส่วนของปริมาณรังสีตรงบนระนาบเอียงต่อปริมาณรังสีบนพื้นราบ

ρ คือ ค่าการสะท้อนรังสีจากพื้นดิน



รูปที่ 2.12 รังสี Gb_n ทำมุมกับเส้นตั้งฉากของพื้นราบ (θ_Z) และของพื้นเอียง (θ) ตามลำดับ [11]

การหาปริมาณรังสีรวมที่ปรับปรุงได้ดังนี้

$$I_T = [I_b \cdot R_b] + [I_d((I + \cos\beta)/2)] + [\rho(I_b + I_d)((1 - \cos\beta)/2)] \quad (2.26)$$

$$R = [(I_b \cdot R_b)/I] + [(I_d / I)((I + \cos\beta)/2)] + [((1 + \cos\beta)/2)] \quad (2.27)$$

2.9.15 การส่งผ่านตัวกลางโปร่งใส

กำหนดให้ค่าการผ่านทะลุของรังสีที่ผ่านตัวกลางโปร่งใสเมื่อมีการสะท้อนรังสีออกไปแล้วบางส่วนมีค่าเท่ากับ τ_R และค่าการผ่านทะลุรังสีเมื่อตัวกลางโปร่งใสนั้นได้ดูดรังสีไว้บางส่วนแล้วมีค่าเท่ากับ τ_a ซึ่ง Bouger ได้ให้ความสัมพันธ์ของ τ_a ไว้ดังนี้

$$\tau_a = e^{-KL/\cos\theta_r} \quad (2.28)$$

เมื่อ

K คือ Extinction coefficient (m^{-1})

L คือ ความหนาของตัวกลางโปร่งใส (m)

θ_r คือ มุมหักเหของแสง

ดังนั้นการผ่านทะลุทั้งหมด (τ) จึงเท่ากับผลคูณของค่าการผ่านทะลุเมื่อมีการสะท้อนรังสีและค่าการผ่านทะลุเมื่อมีการดึงดูดรังสีบางส่วนไว้แล้ว

$$\tau = \tau_r \times \tau_a \quad (2.29)$$

สมการนี้ใช้ได้เมื่อผลคูณ $K \cdot L$ มีค่าน้อยๆ หรือ τ มีค่าใกล้ 1

สำหรับแผงรับรังสีแบบ CPC รังสีที่ได้รับ (S) บนเป้ารับรังสี (A_r)มีผลมาจากปริมาณรังสีที่ตกลงบนพื้นที่รับรังสี (A_c)ทั้งรังสีตรงและรังสีกระจายที่มีผลต่อรังสีสะท้อนเข้าเป้าในปริมาณดังนี้

$$S = [Gb_{cpc} \times \tau_{cb}\alpha b + Gb_{cpc} \times \tau_{cd}\alpha d]\tau_{cpc} \qquad (2.30)$$

เมื่อ

$\tau_{cpc} = \rho^{nr}$

$Gb_{cpc} = Gb_n \times \cos\theta = \frac{Gb}{GR}$

nr คือ จำนวนครั้งในการสะท้อนเข้าเป้าโดยเฉลี่ย (Average number of reflections by radiation) หาได้จากรูปที่ 2.13

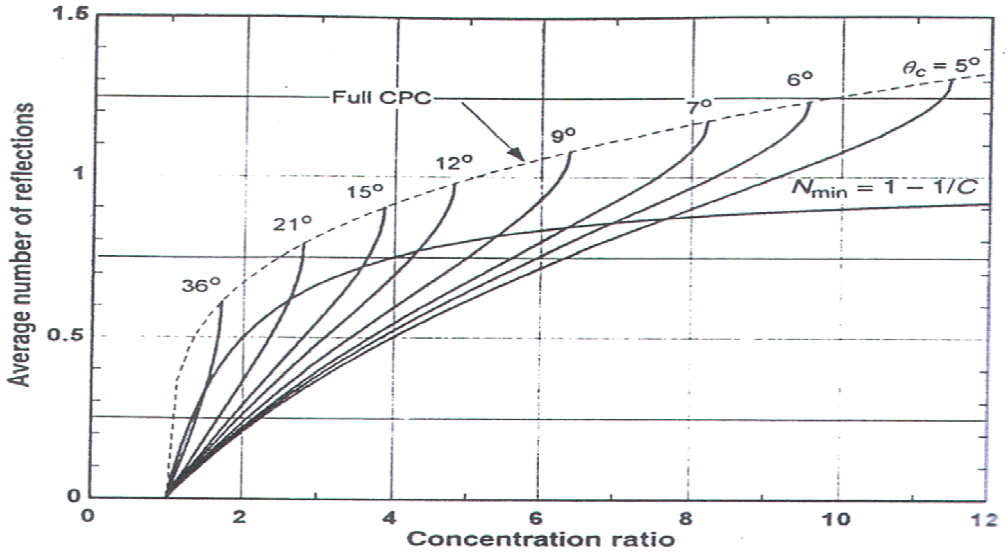
ρ คือ ค่าการสะท้อนรังสีของวัสดุทำรางสะท้อนรังสี

αb คือ ค่าการดูดรังสีตรงของวัสดุทำเป้ารับรังสี

αd คือ ค่าการดูดรังสีกระจายของวัสดุทำเป้ารับรังสี

τ_{cb} คือ ค่าการผ่านทะลุของรังสีตรงผ่านตัวกลางโปร่งใส

τ_{cd} คือ ค่าการผ่านทะลุของรังสีกระจายผ่านตัวกลางโปร่งใส



รูปที่ 2.13 จำนวนครั้งในการสะท้อนเข้าเป้าโดยเฉลี่ย กับอัตราส่วนรวมรังสี [11]

2.9.16 ความร้อนนำไปใช้ประโยชน์จากตัวรวมรังสี

ความร้อนสูญเสียจากตัวรับรังสีดวงอาทิตย์สามารถคำนวณได้ โดยใช้ข้อมูลจากการทดลองตัวรับรังสีดวงอาทิตย์ขณะเกิดสมดุลทางอุณหภูมิ (Stagnation Condition) [11] และไม่มีการนำพลังงานไปใช้ โดยใช้น้ำมันที่มีอุณหภูมิจุดเดือดสูงที่ความดันปกติของการไหลใช้งานดังสมการที่ (2.31) และ (2.32)

$$Q_u = A_c F_R \left[s - \frac{U_L}{CR}\left(T_{f_i} - T_a\right)\right] = ICR \cdot \rho\gamma\left(\tau\alpha\right)_e - U_L\left(T_s - T_a\right) \qquad (2.31)$$

จะได้ $\dfrac{U_L}{\rho\gamma(\tau\alpha)_e} = \dfrac{ICR}{(T_s - T_a)}$

$$Q_u = \dot{m}Cp\left(T_{f_o} - T_{f_i}\right) \qquad (2.32)$$

เมื่อ

A_c คือ พื้นที่รับรังสี (Aperture area) (m^2)

C_p คือ ความร้อนจำเพาะของน้ำ (kJ/kgK)

CR คือ อัตราส่วนรวมรังสี (สมการที่ 2.53)

F_R คือ ตัวประกอบการนำความร้อนมาใช้ (Heat removal factor)

I คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์รวม (kJ/m^2)

$\dot{m}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ (kg/s)

Q_u คือ พลังงานที่นำไปใช้ประโยชน์ (W)

S คือ อัตราการรับความร้อนต่อพื้นที่ของแผงรับรังสี (W/m^2) = $\tau\alpha\rho G_T$

T_a คือ อุณหภูมิของอากาศแวดล้อม (K)

T_s คือ อุณหภูมิสมดุล (K)

T_{fi} คือ อุณหภูมิของน้ำขณะไหลเข้าแผงรับรังสี (K)

T_{fO} คือ อุณหภูมิของน้ำขณะไหลออกจากแผงรับรังสี (K)

U_L คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนของตัวรับรังสีอาทิตย์ (W/m^2K)

ρ คือ สภาพสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผิวสะท้อนรังสี

$(\tau\alpha)_e$ คือ ค่าผลคูณประสิทธิผลของสภาพส่งผ่านรังสีอาทิตย์ของแผ่นพลาสติกครอบ (τ) และสภาพดูดกลืนรังสีของตัวรับรังสี (α)

γ คือ อัตราส่วนการตกกระทบเป้ารับรังสี

ในการทดลองหาประสิทธิภาพของแผงรับรังสีนี้ได้อาศัยหลักมาตรฐานการทดสอบของ ASHRAE 93-77 (ANSI. B 1981-1977) โดยมีหลักสำคัญพอสรุปได้ดังนี้

1. ทำการทดสอบตอนที่ท้องฟ้าไม่มีเมฆ
2. ต้องไม่มีรังสีสะท้อนรบกวนจากสิ่งรอบด้านข้าง ถ้ามีผิวสะท้อนรังสีต้องมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนไม่เกิน 0.2
3. ค่าความเข้มของรังสีในขณะทดสอบต้องไม่น้อยกว่า 630 W/m^2
4. ต้องควบคุมให้อุณหภูมิน้ำเข้าแผงมีค่าคงที่อย่างน้อย 15 min ก่อนเก็บข้อมูลเพื่อให้ระบบอยู่ในสภาวะสมดุล
5. อัตราการไหลของไหลต้องคงที่ตลอดการทดลองค่าที่แนะนำให้ใช้ประมาณ 0.02 kg/s ต่อพื้นที่รับรังสี 1 m^2หรือนอกจากจะออกแบบไว้ให้ไหลในอัตราอื่น
6. การทดสอบต้องใช้การไหลโดยการพาแบบบังคับ
7. ความร้อนจำเพาะและความหนาแน่นของของไหลในช่วงการทดสอบควรมีค่าต่างกันไม่เกิน 0.5%
8. ควรเอียงแผงรับรังสีให้ตั้งฉากกับรังสีอาทิตย์หรือตั้งมุมเบี่ยงเบนได้บ้างแต่ไม่เกิน 30°

มีข้อควรสังเกตเกี่ยวกับการใช้อัตราการไหลของของเหลวในขณะทดสอบ ถ้าใช้อัตราการไหลต่ำมากๆ ประสิทธิภาพของแผงที่ทดสอบก็จะต่ำมากและมีประสิทธิภาพเกือบคงที่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลจนถึงระดับหนึ่งแล้ว และยังมีข้อควรระวังในการทดสอบอีกอย่างหนึ่งคือ ถ้าทดสอบในช่วงที่รังสีอาทิตย์ที่ค่าต่ำ ประสิทธิภาพก็จะตกลงมาก ถ้าทดสอบในช่วงที่รังสีอาทิตย์มีค่ามาก ประสิทธิภาพที่ได้ก็จะสูงตามไปด้วย

2.9.17 ทฤษฎีการสมดุลพลังงานสำหรับของไหลในท่อ

เนื่องจากการไหลในท่อมีขอบเขตที่แน่นอนจึงสามารถใช้สมดุลของพลังงานหาอัตราการถ่ายโอนความร้อนโดยทั่วไปแล้วพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ของของไหลจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปด้วย แต่การเปลี่ยนแปลงของพลังงานทั้งสองจะน้อยมากจึงไม่นำมาคิดอัตราการถ่ายโอนความร้อนเป็นดังสมการ

$$\dot{Q} = \dot{m} C_P \Delta T \qquad (2.33)$$

เมื่อ

C_P คือ ความร้อนจำเพาะของของไหล (J/kg K)

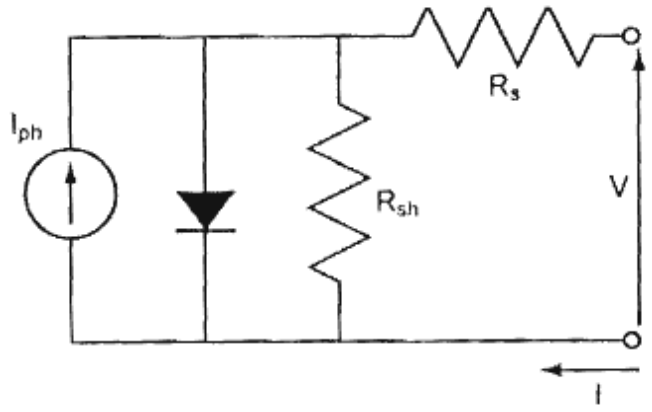
$\dot{m}$ คือ อัตราการไหล (kg/s)

$\dot{Q}$ คือ อัตราการถ่ายโอนความร้อน (J/s)

ΔT คือ ความแตกต่างอุณหภูมิของของไหลไหลระหว่างขาเข้าและขาออกจากท่อ (K)

2.10 หลักการทำงานและการใช้งานทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์ [12]

เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell) จัดได้ว่าเป็นสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เมื่อสารกึ่งตัวนำนี้ได้รับพลังงานจากรังสีอาทิตย์ เซลล์แสงอาทิตย์จะเปลี่ยนแสงเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ถือว่าเป็นพลังงานไฟฟ้าที่เกิดจากเซลล์แสงอาทิตย์ จัดได้ว่าพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่สะอาดและไม่สร้างมลภาวะใดๆ



รูปที่ 2.14 การต่อวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ [12]

วงจรสมมูลทางไฟฟ้าสามารถเขียนแทนดังรูปที่ 2.14 วงจรดังกล่าวประกอบด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่ ไดโอด ความต้านทานขนาน และความต้านทานอนุกรม เมื่อต่อภาระทางไฟฟ้าเข้ากับเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านภาระทางไฟฟ้า เมื่อมีแสงตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์แสดงดังสมการที่ 2.48

$$I = I_{ph} - I_0 [\exp[q(V+IR_S)/AKT]-1](V+IR)/R_{Sh} \quad (2.34)$$

เมื่อ

I	กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านภาระทางไฟฟ้า, A
I_{ph}	กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแสง (Photo current), A
I_0	กระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ (Reverse saturation current), A
V	แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมภาระทางไฟฟ้า,V
q	ประจุของอิเล็กตรอน, C
K	Boltzmann's constant, J/K
T	อุณหภูมิองศาสัมบูรณ์, K
A	ไดโอดแฟคเตอร์
R_S	ความต้านทานอนุกรม, Ω
R_{sh}	ความต้านทานขนาน,Ω

กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านภาระทางไฟฟ้าตามสมการ 2.48 เป็นผลรวมของกระแส 3 ส่วนคือ

1. กระแสที่เกิดขึ้นระหว่างรอยต่อพี-เอ็น เมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ (I_{ph})
2. กระแสที่ไหลผ่านไดโอด ซึ่งเป็นไปตาม Schockley diode equation (เทอมที่ 2)
3. กระแสที่ไหลผ่านความต้านทานขนาน

ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดัน ตามสมการที่ 2.48 นั้น ไม่เป็นสมการเส้นตรงและมีลักษณะเป็นอิมปลิซิตฟังก์ชัน สัมประสิทธิ์ต่างๆ ในสมการนั้นจะขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิต วัสดุที่ใช้ทำเซลล์ สภาวะการทำงาน

ในการวิเคราะห์ทางไฟฟ้าของเซลล์ จะพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันกับพารามิเตอร์ 5 ตัว โดยสามารถแบ่งเป็นพารามิเตอร์ภายในเซลล์และพารามิเตอร์นอกเซลล์ดังนี้

1. พารามิเตอร์ภายในประกอบด้วย R_{sh} R_S และ I_O
2. พารามิเตอร์ภายนอกประกอบด้วย ความเข้มรังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิเซลล์และความเข้มรังสีอาทิตย์ค่าหนึ่งๆ นอกจากพารามิเตอร์ในสมการความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันแล้วก็ยังมีพารามิเตอร์อื่นๆ ที่สำคัญ คือ
   - กระแสลัดวงจร, I_{sc}
   - แรงดันวงจรเปิด, V_{oc}

- กำลังไฟฟ้าสูงสุด P_m
- กระแสที่จุดกลังไฟฟ้าสูงสุด I_m
- แรงดันที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด V_m
- ฟิลแฟกเตอร์ F.F.
- ประสิทธิภาพที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด, ηe

2.11 อัตราการเคลื่อนย้ายก๊าซสำหรับการเติมอากาศ [13]

ส่วนใหญ่จะใช้วิธีของทฤษฎี สองฟิล์ม (Two Film Theory) โดยจะมีการถ่ายเทจากก๊าซไปสู่ของเหลว ซึ่งจะมีการถ่ายเทจากฟิล์มของก๊าซไปหาฟิล์มของของเหลว โดยมีสมการดังนี้

$$r_m = K_g A(Cs - C) \qquad (2.35)$$

เมื่อค่า

r_m = อัตราการถ่ายเทมวลสารต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (Kg/s)

K_g = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของก๊าซ (m/s)

A = พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างฟองอากาศกับน้ำ (m^2)

C_s = ความเข้มข้นอิ่มตัวในสารละลาย (mg/l)

C = ความเข้มข้นของก๊าซในสารละลาย ณ ช่วงเวลาพิจารณา (mg/l)

นำสมการ 2.49 มาจัดรูปใหม่

$$\underline{r}_m = k_g \frac{A}{S}(C_s - C) \qquad (2.36)$$

และ $\frac{dc}{ds} = k_g \frac{A}{S}(C_s - C)$

เมื่อ $\frac{dc}{ds}$ = อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของก๊าซ (mg/l.s)

V = ปริมาณของสารละลาย

การหาค่า A/V นั้นหาได้ยากมากจึงรวมค่า A/V มาเป็นค่า a แล้วพิจารณาค่า Kg เป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทก๊าซ ซึ่งจะกำหนดใหม่เป็น K_L นำมาเขียนเป็นสมการใหม่ได้เป็น

$$\frac{dc}{ds} = K_L a (C_s - C) \quad (2.37)$$

$K_L a$ = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลก๊าซ (s^{-1})

อินทริเกรตโดยใช้เงื่อนไขเริ่มต้นดังนี้

$t= 0, C= C_0$ และ $t=e, C=C_e$

ได้สมการใหม่เป็น

$$K_L a (t_e - t_0) = \ln\left(\frac{C_s - C_0}{C_s - C_e}\right) \quad (2.38)$$

2.12 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ. 2011 A.Markowska-Szczupak และคณะ [14] ได้ทำการรวบรวมข้อมูลที่มีการเผยแพร่เกี่ยวกับการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย ฟังไจ ด้วยกระบวนการโฟโตคาตาไลซิสด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยการศึกษาหลายๆ การทดลองที่ฆ่าเชื้อในน้ำและอากาศบนผิวที่ต้องการทดสอบ เช่น การฆ่าเชื้อในน้ำ และศึกษาศักยภาพของการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์สำหรับชีวิตประจำวัน

การศึกษาในงานวิจัยนี้เพื่อพัฒนาเครื่องกำจัดเชื้อแบคทีเรียโดยใช้กระบวนการโฟโตแคตาไลซิสโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับการรวมแสงรูปประกอบพาราโบล่า นอกจากจะต้องมีความเข้าใจกับทฤษฎีพื้นฐานแล้ว เพื่อให้งานวิจัยมีผลดียิ่งขึ้นจึงต้องทำการศึกษางานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้เพื่อที่จะได้ความรู้ทางวิชาการมากขึ้นและมุมมองที่แตกต่างจากทฤษฎีที่ได้ศึกษามา ซึ่งจะเป็นประโยชน์สำหรับนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ จึงทำให้งานวิจัยนี้มีคุณภาพมากยิ่งขึ้น จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมานั้นสามารถจำแนกออกได้ดังนี้

1. งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการเปรียบเทียบการกำจัดเชื้อด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์เพียงอย่างเดียวกับการเกิดกระบวนการโฟโตคาตาไลซิสกับไทเทเนียมไดออกไซด์
2. งานวิจัยที่เกี่ยวกับอัตราการไหลของน้ำที่มีผลต่อการกำจัดเชื้อ *E.coli*
3. ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีผลต่อการฆ่าเชื้อ *E.coli*
4. พื้นที่การรับแสงที่เกิดกระบวนการโฟโตคาตาไลซิสที่มีผลต่อการฆ่าเชื้อโรค

5. ความเข้มของรังสีอาทิตย์ที่มีผลต่อการกำจัดเชื้อ

2.12.1 งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการเปรียบเทียบการกำจัดเชื้อด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และการเกิดกระบวนการโฟโตคาตาไลซิสกับไทเทเนียมไดออกไซด์

ในปี ค.ศ. 2005 J. Lonnen และคณะ [15] ทำการศึกษาเปรียบเทียบการฆ่าเชื้อด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และการฆ่าเชื้อด้วยกระบวนการโฟโตคาตาไลซิส โดยการนำเชื้อ โปรโตซัว ฟังไจ แบคทีเรีย มาทำการทดสอบ โดยทั้งสองการทดลองนี้สามารถลดเชื้อลงได้ถึง 4 logs การทดลองนี้ยังพบว่าการทดลองที่มีกระบวนการโฟโตคาตาไลซิสนั้นสามารถยับยั้งเชื้อได้เร็วกว่าการยับยั้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ประมาณ 50%

ในปี ค.ศ. 2007 Cosimoma Sichel, Julian และคณะ [16] ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับผลของการกำจัดเชื้อด้วยกระบวนการโฟโตแคตาไลซิส โดยใช้เชื้อ *E.coli* ในการทดสอบกับรางรวมแสงรูปประกอบพาราโบล่า (CPC) โดยมีการออกแบบโดยการเคลือบตัวทำปฏิกิริยาที่แท่งเพื่อนำไปใส่ไว้ด้านในท่อแก้วรูปที่ 2.15 พบว่าเมื่อมีการทดสอบโดยมีปริมาตรของรีแอคเตอร์ที่ 2.27 L มีพื้นที่ของการรับแสงที่ 0.41 m^2 และมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 50 mm ทดสอบที่อัตราการไหล 2 L/min โดยทำการเปรียบเทียบของการกำจัดเชื้อด้วยกระบวนการโฟโตคาตาไลซิสกับการกำจัดเชื้อด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวรวมถึงการทดสอบการกำจัดเชื้อในที่มืด โดยผลที่ได้นั้นแสดงในรูปที่ 2.16

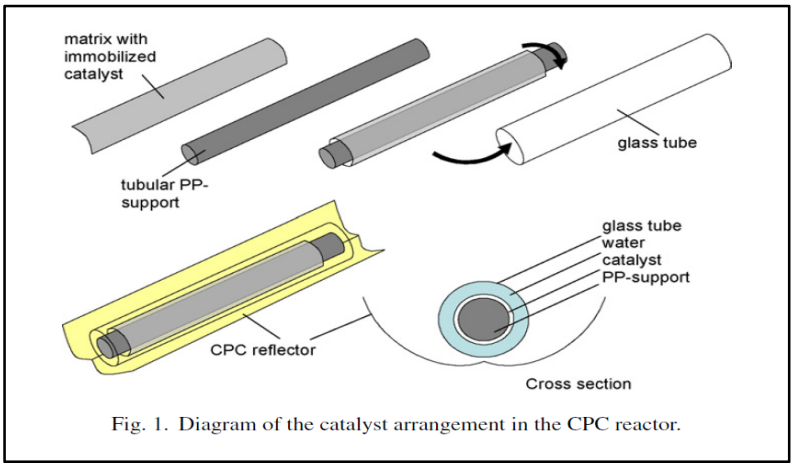
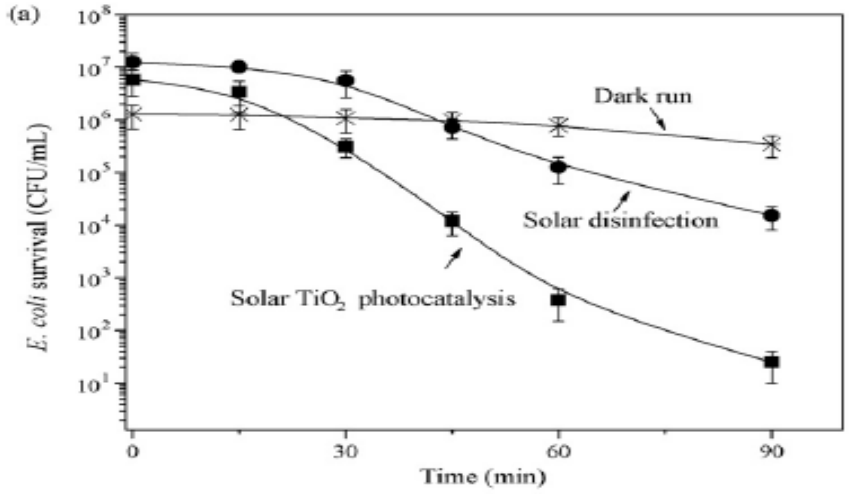


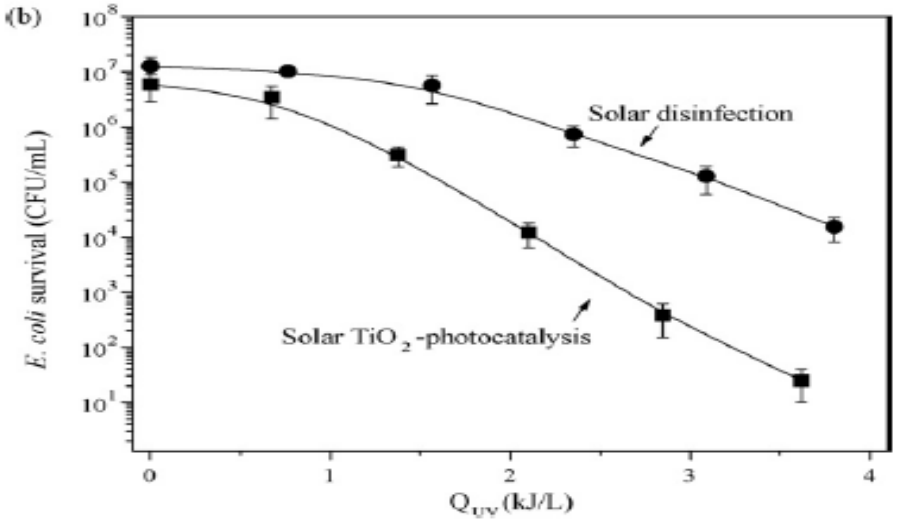
Fig. 1. Diagram of the catalyst arrangement in the CPC reactor.

รูปที่ 2.15 ไดอะแกรมของตัวเร่งโฟโตคาตาไลซิสใน CPC [16]



รูปที่ 2.16 จำนวนเชื้อที่ลดลงระหว่างการทดลอง [16]

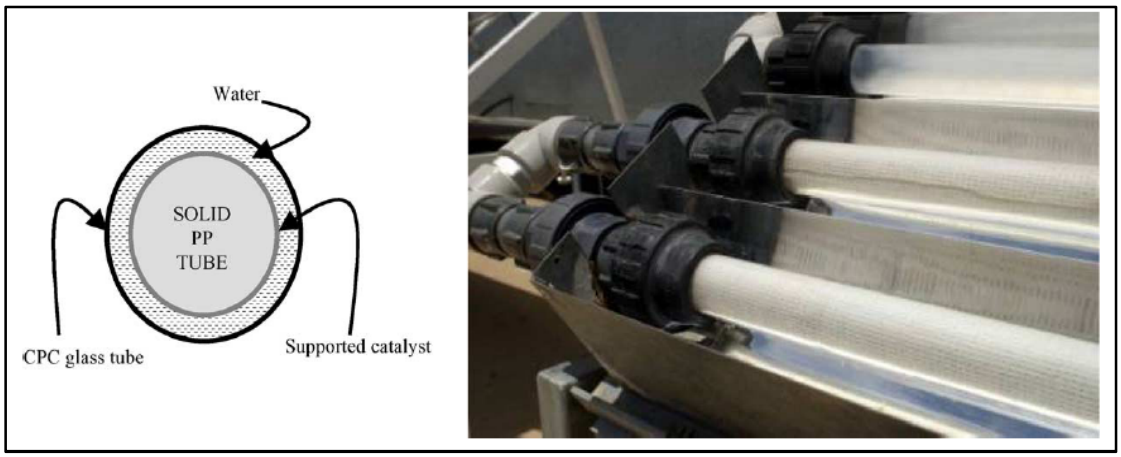
คณะนี้ยังได้ทำการทดสอบเกี่ยวกับจำนวนเชื้อที่ลดลงเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการโฟโตคาตาไลซิสกับพลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวเมื่อเทียบกับ Q_{UV} โดยผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.17 ซึ่งจะเห็นว่าการเกิดกระบวนการโฟโตแคตาไลซิสนั้นสามารถกำจัดเชื้อได้ดีกว่าการกำจัดเชื้อด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์เพียงอย่างเดียว



รูปที่ 2.17 จำนวนเชื้อที่ลดลงเมื่อเทียบกับ Q_{UV} [16]

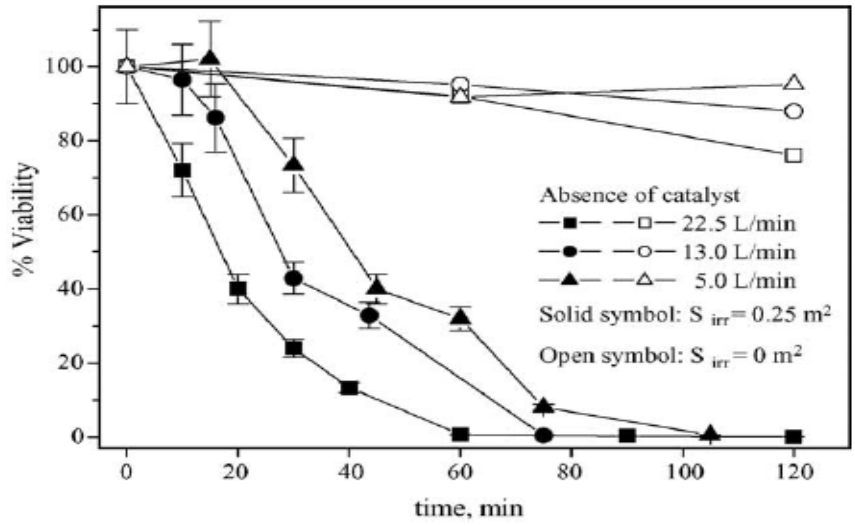
2.12.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับอัตราการไหลที่มีผลต่อการกำจัดเชื้อ *E. Coli*

ในปี ค.ศ. 2005 P. Fernandez และคณะ [17] ได้ทำการทดลองการใช้แสงในการฆ่าเชื้อโรคโดยจะใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในกระบวนการโฟโตแคตาไลซิส โดยการทดลองนั้นจะเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์กับแท่งที่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์แล้วไปสอดไว้ด้านในของท่อแก้วดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 (ซ้าย) ส่วนประกอบต่างๆของการเคลือบ TiO_2 (ขวา) ทดลองในท่อแก้วที่เคลือบ TiO_2 [20]

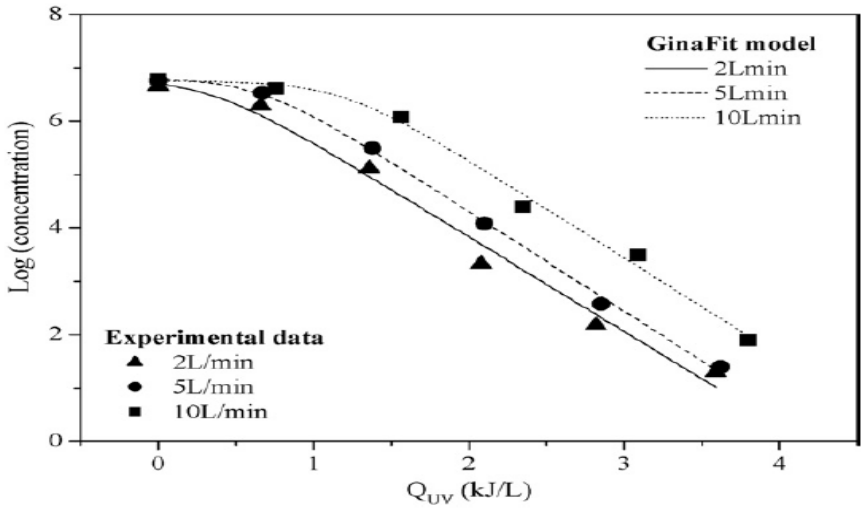
จากนั้นได้มีการทดสอบอัตราการไหลที่ระดับต่างๆ โดยได้ทดสอบ 3 ระดับอัตราการไหลโดยทดสอบตั้งแต่ 22.5, 13.0 และ 5.0 L/min โดยทดลองในพื้นที่ขนาด 0.25 m^2 โดยได้ผลการทดลองดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 การยับยั้งเชื้อ *E.coli* ที่อัตราการไหลที่แตกต่างกัน [20]

โดยจะสังเกตุเห็นจากกราฟคือผลการทดลองที่มีอัตราการไหลที่แตกต่างกันนั้นจะมีผลต่อเชื้อแบคทีเรียช่วงการทดลองที่มีการแผ่รังสีเท่านั้น และถึงแม้ว่าอัตราการไหลที่ต่ำที่สุดจะใช้เวลามากที่สุด และประสิทธิภาพการทำลายเชื้อต่ำที่สุด ซึ่งอาจเป็นคุณลักษณะที่บอกถึงจำนวนของเชื้อที่เหมาะสม เช่น การรวมแสงภายในรีแอคเตอร์ซึ่งเป็นเรื่องง่ายสำหรับการพัฒนาสำหรับระยะเวลาที่นานพอ

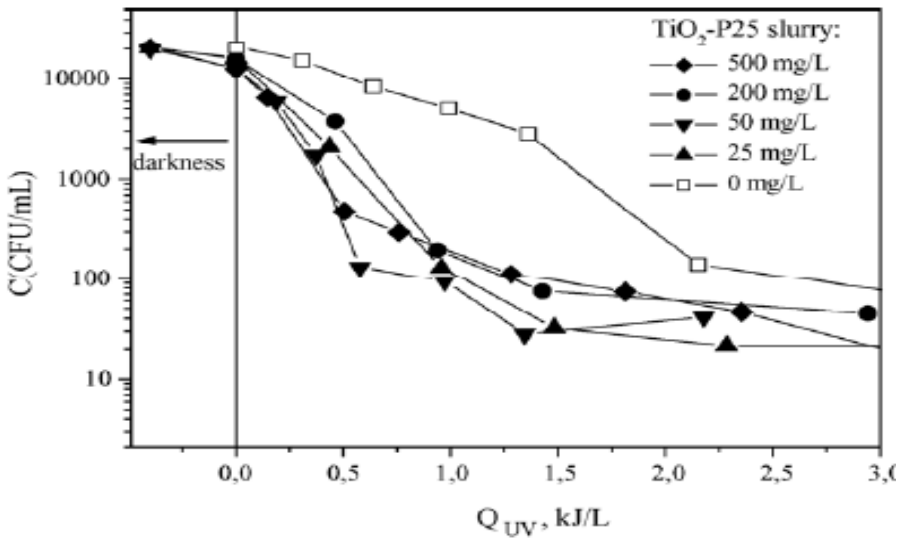
ในปี ค.ศ. 2007 Cosimoma Sichel, Julian และคณะ [16] ได้ทำการศึกษาอัตราการไหลทั้ง 3 ระดับที่ 2, 5 และ 10 L/min ภายใต้กระบวนการโฟโตแคตาไลซิสนั้นการเพิ่มขึ้นของ Q_{90} จะเพิ่มเมื่อเพิ่มอัตราการไหล โดยที่ 2 L/min ได้ 0.72 kJ/L, 5 L/min ได้ 0.98 kJ/L และ 10 L/min ได้ 1.52 kJ/L จะเห็นได้ว่ากระบวนการโฟโตแคตาไลซิสนั้นจะมีค่าน้อยเมื่อมีการเพิ่มอัตราการไหลจึงทำให้เกิดการกำจัดเชื้อได้น้อยลงดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 การทดลองกระบวนการโฟโตแคตาไลซิสทั้ง 3 อัตราการไหล [16]

2.12.3 ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีผลต่อการยับยั้งเชื้อ *E.coli*

ปี ค.ศ. 2005 P. Fernandez และคณะ [17] ได้ทำการทดลองการใช้แสงในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำโดยจะใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในกระบวนการโฟโตคาตาไลซิส โดยการผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2 Degussa P-25) ซึ่งให้ผลการกำจัดเชื้อที่ดีกว่า การทดลองนี้จึงได้ทำการทดลองกับ TiO_2 ด้วยปริมาณที่แตกต่างกันโดยการทดลองนี้มีปริมาณ 0, 25, 50, 200, 500 mg/L ด้วยอัตราการไหล 22.5 L/min มีพื้นที่ของการรับแสง 0.25 m^2 โดยผลการทดลองแสดงในรูปที่ 2.21

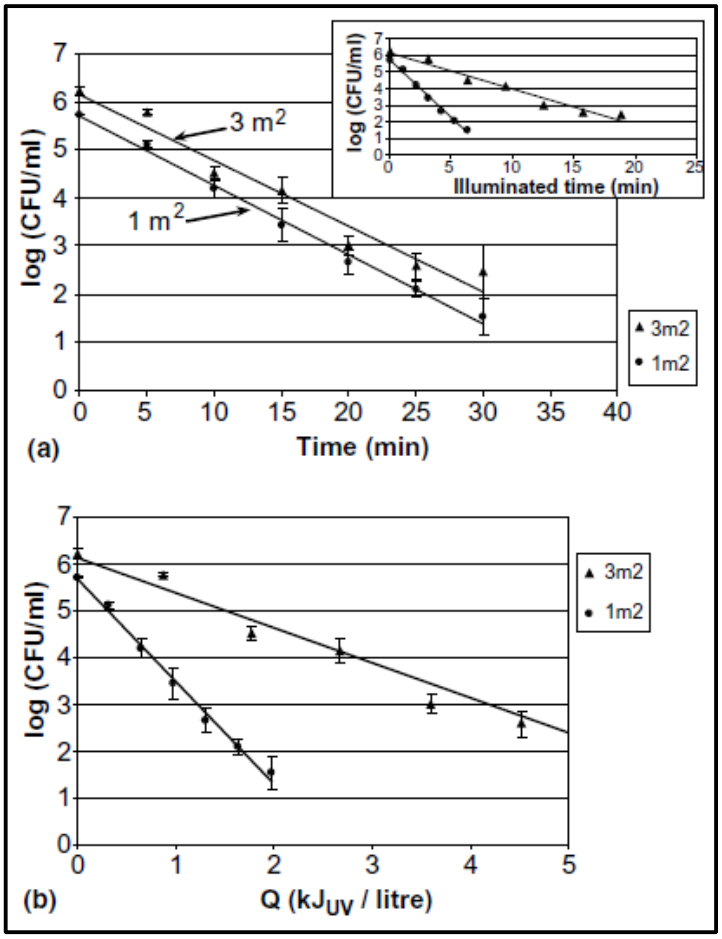


รูปที่ 2.21 การยับยั้งเชื้อแบคทีเรียกับ Q_{UV} ที่ระดับความเข้มข้นของ TiO_2 ที่แตกต่างกัน [17]

ซึ่งจะเห็นได้ว่าการผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ 50 mg/L นั้นสามารถลดเชื้อแบคทีเรียได้เร็วที่สุดซึ่งไม่ใช่จำนวนที่ผสมลงไปมากสุด ซึ่งก็พอสรุปได้ว่าถ้าใส่ TiO_2 มากเกินไปก็ไม่ได้เพิ่มประสิทธิภาพของการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย

2.12.4 พื้นที่การรับแสงที่เกิดกระบวนการโฟโตแคตาไลซิสที่มีผลต่อการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

ในปี ค.ศ. 2004 O.A. McLoughlin และคณะ [18] ได้ทำการทดลองการประยุกต์การกำจัดเชื้อแบคทีเรียในน้ำเสีย โดยจะใช้เชื้อ *E.coli* ในการทดสอบโดยการทดสอบเกี่ยวกับพื้นที่ที่รับแสงว่ามีผลต่อการกำจัดเชื้อแบคทีเรียหรือไม่ โดยการทดลองนี้มีปริมาตรน้ำที่ทำการทดลอง 35 L ปริมาตรน้ำที่รับแสง 22.4 L พื้นที่ของตัวรวมแสง 1.03 m^2 และ 22.4 m^2 และอัตราการไหลที่ 20 L/min โดยผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.22

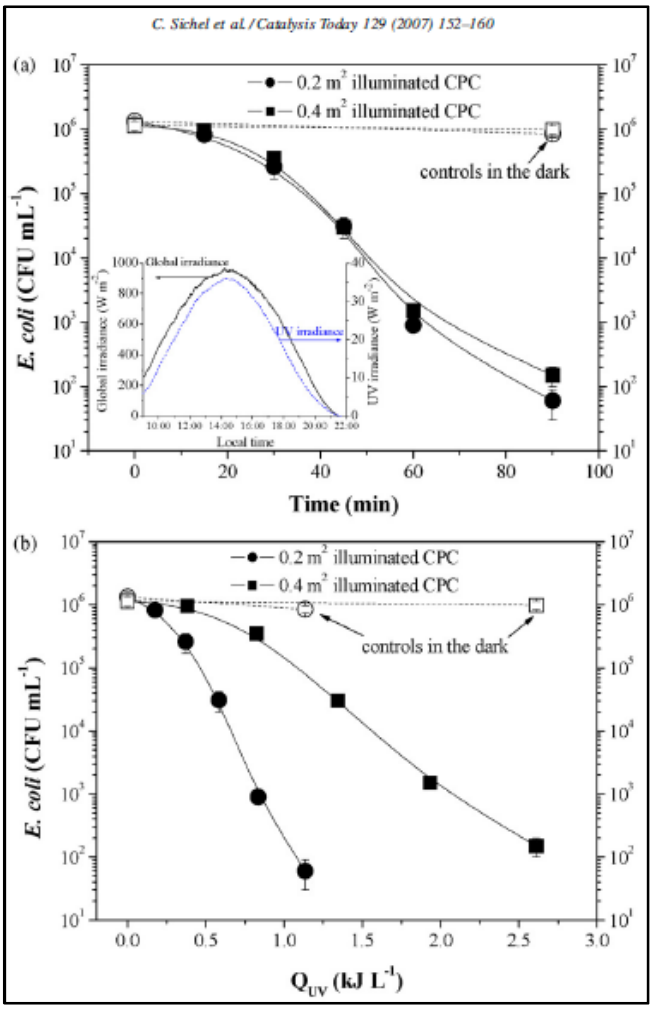


รูปที่ 2.22 (a) การยับยั้งเชื้อ *E.coli* ของพื้นที่ 1 m^2 และ 3 m^2 กับเวลา

(b) การสะสมของ Q_{UV} กับพื้นที่ 1 m^2 และ 3 m^2 [18]

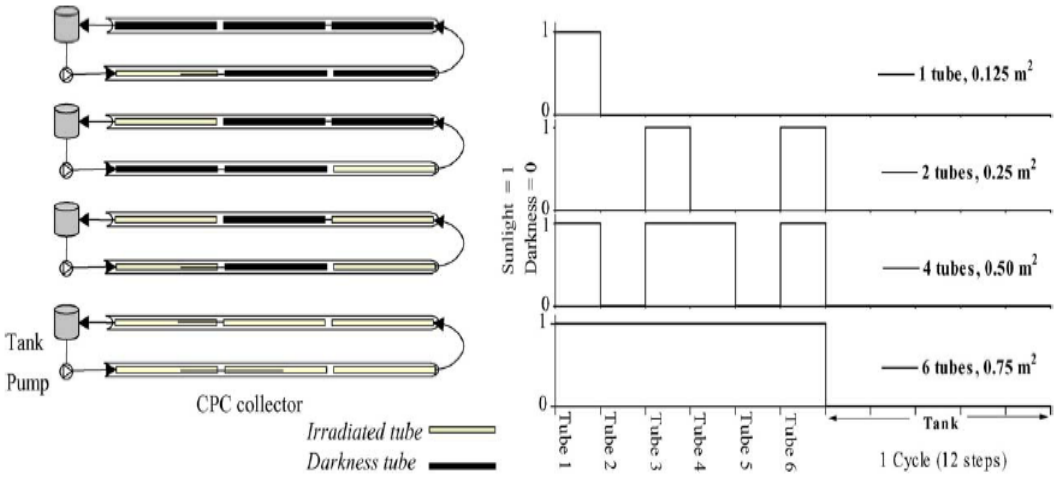
ผลที่ได้นี้ชี้ให้เห็นว่า 1.3 kJ_{UV}/L ของการแผ่รังสีในพื้นที่ 3 m^2 สามารถลดเชื้อได้ 1 log ของจำนวนเชื้อแบคทีเรียเมื่อเปรียบเทียบกับ 0.5 kJ_{UV}/L ของการแผ่รังสีในพื้นที่ 1 m^2 ซึ่งสรุปได้ว่าจำนวนพื้นที่ที่มากกว่าไม่ได้มีประสิทธิภาพมากกว่าเสมอไป

ในปี ค.ศ. 2007 C. Sichel และคณะ [19] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับพื้นที่การรับแสงโดยใช้กระบวนการโฟโตแคตาไลซิสกับพลังงานรังสีอาทิตย์ ทดสอบโดยการเคลือบ TiO_2 รอบท่อ และใช้การรวมแสงโดยตัวรวมแสงรูปประกอบพาราโบล่า (CPC) โดยทำการทดลองที่มีพื้นที่รับแสงที่แตกต่างกันโดยทดสอบที่พื้นที่ 0.2 m^2 และ 0.4 m^2 โดยแสดงการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.23 จากการทดลองพื้นที่ทั้ง 2 มีการกำจัดเชื้อแบคทีเรียได้ใกล้เคียงกันมากส่วนเมื่อนำมาเทียบกับ Q_{UV} แล้วในพื้นที่ที่เล็กกว่าสามารถยับยั้งเชื้อได้เร็วกว่าเมื่อเทียบกับพลังงานต่อหน่วยที่ได้รับ



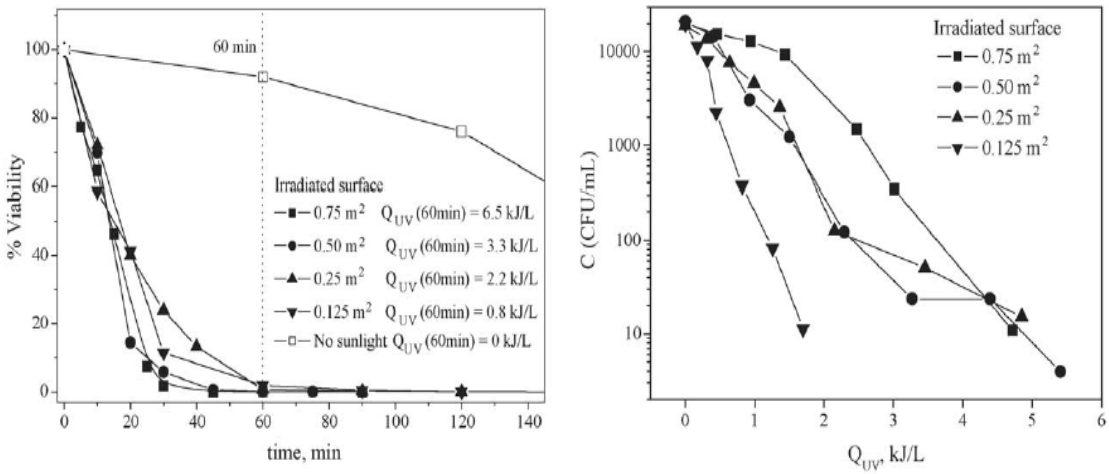
รูปที่ 2.23 (a) จำนวนเชื้อที่ลดลงเมื่อเทียบกับเวลา (b) จำนวนเชื้อที่ลดลงเมื่อเทียบกับ Q_{UV} [19]

ปี ค.ศ. 2005 P. Fernandez และคณะ [19] ได้ทำการทดลองผลของพลังงานแสงอาทิตย์ที่ส่องลง *E.coli* ที่มีการวิเคราะห์อยู่ 4 การทดลอง โดยแต่ละการทดลองจะมีพื้นที่การรับแสงที่แตกต่างกันออกไปโดยการทดลองทั้ง 4 พื้นที่การทดลองนั้นจะแสดงดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 การทดลองพื้นที่การแผ่รังสีลงบน 4 พื้นที่การทดสอบ [16]

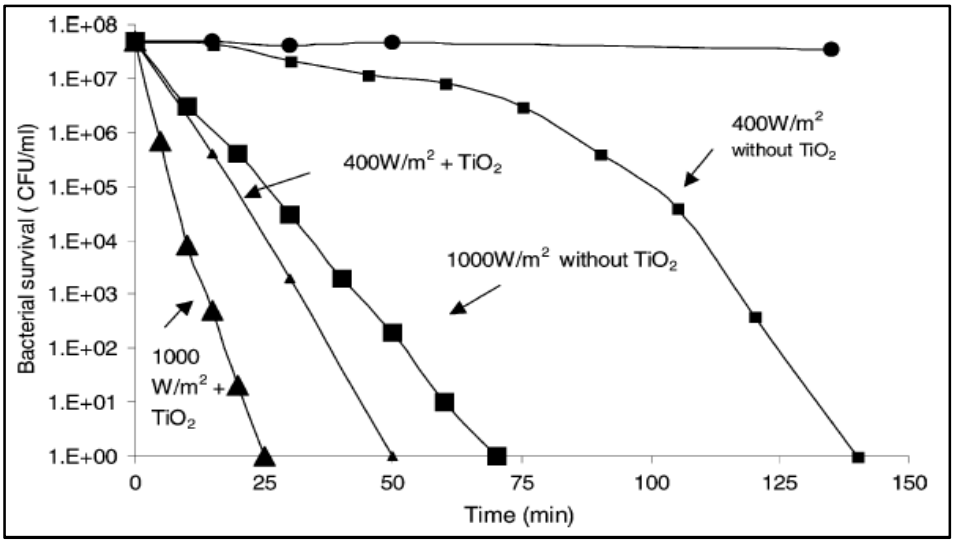
ในการทดลองมีค่าความเข้มข้นของแบคทีเรียที่ทำการทดสอบกับระยะเวลาการฉายแสงโดย $\log_{10} C$ กับ Q_{UV} และสำหรับการทดลองนี้ C คือความเข้มข้นของแบคทีเรียในหน่วยของ CFU/mL และการทดลองให้เห็นอย่างชัดเจนว่าแบคทีเรียมีผลต่อการทดลองระหว่างมีแสงและไม่มีแสง แบคทีเรียที่ถูกรับแสงในพื้นที่ที่ต่างกันซึ่งทุกๆ พื้นที่ดังกล่าวมีแนวโน้มลดลงแต่ไม่มีผลที่แตกต่างกัน ซึ่งไม่สอดคล้องกับสิ่งที่คิดคือถ้ามีการแผ่รังสีมากขึ้นจะทำให้เชื้อแบคทีเรียตายมากขึ้น ซึ่งจากผลการทดลองก็จะเห็นว่าพื้นที่ที่รับแสงมากที่สุดจะให้ประสิทธิภาพต่ำที่สุดและพื้นที่รับแสงน้อยที่สุดจะให้อัตราการกำจัดเชื้อได้มากที่สุด ผลขัดแย้งที่ได้นี้ได้ถูกพิสูจน์ให้เห็นในรูปที่ 2.25 (ขวา) และในรูปที่ 2.25 (ซ้าย) แสดงให้เห็นว่าสำหรับการรับแสงโดยใช้เวลา 60 นาที การอยู่รอดของเชื้อแบคทีเรียนั้นจะเหมือนกันทุกๆ การทดลองทั้งที่มีพื้นที่รับแสงต่างกันและพลังงานรังสีอาทิตย์ที่ต่างกัน Q_{uv}(kJ/L) ซึ่งผลที่ได้นี้สามารถจำแนกออกได้หลายเหตุผล เหตุผลแรกคือ พลังงานเพียงเล็กน้อยก็เพียงพอจะสามารถทำลายเชื้อแบคทีเรีย (*E.coli*) ลงได้ และอีกเหตุผลคือผลที่ได้นั้นเกิดจากการสะสม พลังงานรังสีอาทิตย์ในช่วงเวลาที่ทำการทดลอง



รูปที่ 2.25 เชื้อ *E.coli* ที่ลดลงหลังจากการแผ่รังสีลงบนพื้นที่ 4 ขนาดการทดสอบ [16]

2.12.5 ความเข้มของรังสีอาทิตย์ที่มีผลต่อการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย

ในปี ค.ศ. 2003 A.G. Rincon, C. Pulgarin [20] ได้ทำการทดลองการกำจัดเชื้อ *E.coli* ด้วยวิธีการต่างๆ เช่นระยะเวลาการฉายแสงต่อเนื่องและความเข้มของรังสีอาทิตย์ที่มีผลต่อการยับยั้งเชื้อ *E.coli* โดยได้ทำการทดสอบโดยการเพิ่มความเข้มของแสงตั้งแต่ 400 W/m^2 ถึง 1000 W/m^2 การทดลองนี้ได้ใช้ TiO_2 เพื่อช่วยในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียโดยผลการทดลองได้แสดงดังรูปที่ 2.26 แสดงให้เห็นว่าความเข้มของรังสีมีค่ามากขึ้นก็สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ดียิ่งขึ้นและจะมีประสิทธิภาพในการยับยั้งแบคทีเรียมากขึ้นถ้ามีการผสม TiO_2 ลงไป



รูปที่ 2.26 การกำจัดเชื้อที่ความเข้มแสงต่างๆทั้งผสม TiO_2 และไม่ผสม TiO_2 [20]