

การศึกษาประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าจากระบบการปลูกพืชใน
สภาวะที่เติมอนุภาคนาโน

STUDY OF ELECTRICAL GENERATION EFFICIENCY FROM PLANT SYSTEM
UNDER NANOPARTICLE-ADDED CONDITION



ศรัณรัตน์ ศิริ
SARANRAT SIRI

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุนาโน
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY OF ELECTRICAL GENERATION EFFICIENCY FROM PLANT
SYSTEM UNDER NANOPARTICLE-ADDED CONDITION



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING
IN NANOMATERIAL ENGINEERING
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2018

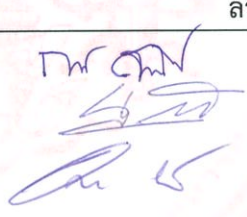
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MON GKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
โครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าจากระบบการปลูกพืช
ในสถานะที่เติมอนุภาคนาโน
Special Project Title Study of electrical generation efficiency from plant system under
nanoparticle-added condition
นักศึกษา นาย ศรัณรัตน์ ศิริ
รหัสประจำตัว 58110057
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชา นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุนาโน
ปีการศึกษา 2561
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. กนกพร สมพรไพลิน
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร. กนกพร สมพรไพลิน ผศ.ดร. นงลักษณ์ หวงกำแหง ดร. อติเรก แรงกสิกรณ	

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังอนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดารินี พรหมโยธิน)
หัวหน้าภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วันที่...20.....เดือน.....มิถุนายน.....พ.ศ. 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การศึกษาประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าจากระบบการปลูกพืชในสภาวะที่เติมอนุภาคนาโน
นักศึกษา	นายศรัณรัตน์ ศิริ
รหัสประจำตัว	58110057
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุนาโน
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.กนกพร สมพรไพลิน

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าภายใต้ระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์ ต้นพลูด่างได้ถูกนำมาใช้ระบบนี้เพื่อพลังงานไฟฟ้าชีวภาพที่สะอาดและยั่งยืน จากการทดลองศึกษาประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าในระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์ภายใต้เงื่อนไขความเงาของสารละลายธาตุอาหารพืชที่แตกต่าง และการเติมวัสดุนาโนชนิดสารกึ่งตัวนำเข้าไปในระบบ ทำการบันทึกแรงดันและกระแสจากระบบพืชที่เชื่อมขั้วไฟฟ้าของระบบเข้ากับเครื่องวัดอย่างต่อเนื่อง โดยทำการบันทึกทุกๆ 2 วันโดยใช้เวลาในการทดลองทั้งหมด 30 วัน ผลการวิจัยพบว่าการปลูกพืชภายใต้สารละลายธาตุอาหารพืชในความเข้มข้นสูง ส่งผลให้การผลิตกระแสไฟฟ้าจากระบบพืชที่ได้เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการปลูกพืชภายใต้สารละลายธาตุอาหารพืชความเข้มข้นต่ำ ทำให้การผลิตแรงดันไฟฟ้าจากระบบการปลูกพืชสูงกว่าความเข้มข้นของสารละลายธาตุอาหารพืชสูง ระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์นี้สามารถตรวจวัดค่าพลังงานไฟฟ้า ในช่วงเวลา 9:00 น. มากกว่า ในช่วงเวลา 16:00 น. อาจเป็นผลเนื่องมาจากช่วงเวลาดังกล่าวเป็นช่วงเวลาที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์แสงของต้นพลูด่าง อีกทั้งการเติมอนุภาคนาโน ZnO และ TiO₂ เข้าไปในระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์ทำให้ประสิทธิภาพการผลิตกระแสและแรงดันไฟฟ้าในทุกระบบนั้นเพิ่มขึ้นในทุกช่วงเวลา ความแตกต่างของอัตราการเพิ่ม ขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลายธาตุอาหารพืช การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยใช้ระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์ร่วมกับโซลาร์เซลล์ พบว่ามีการผลิตแรงดันไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น ในขณะที่กระแสไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับโซลาร์เซลล์เปล่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	Study of electrical generation efficiency from plant system under nanoparticle-added condition
Student	Mr. Saranrat Siri
Student ID	58110057
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Nanomaterial Engineering
Year	2018
Special Project Advisor	Associate Professor Dr. Kanokporn Sompornpailin

Abstract

This study investigated electrical generation efficiency from plant system, *Epipremnum aureum* was used to produce clean and sustainable bio-electricity under hydroponics system. A performance of the electrical generation from developing plants system was evaluated under solution differed in nutrient concentrations. Semiconductor nanoparticle, known as photo-catalyst, were added in each concentration of culture system. Potentials and currents of plant contained electrode in the system are continuously analyzed at two durations for 30 days. The result showed that plant system under high concentration of nutrient solution generated higher current than those of system containing high nutrient solution. However, plant system under low concentration of nutrient solution showed higher voltage than those of system containing low nutrient solution concentration. Plant system generated bio-electric production at 9 am higher than that at 4 pm. ZnO and TiO₂ nanoparticles in plant system have a potent to increase current and voltage at all nutrient solution concentration. Solar cells are conjugated with plant system in order to enhance bio-electricity. The result showed that the voltage production was increased, while the current production is similar to solar cell without plant system.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้ประสบความสำเร็จไปด้วยดี ด้วยความอนุเคราะห์และคำแนะนำจากอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ รศ.ดร.กนกพร สมพรไพสิน ที่ได้ช่วยเหลือ ตรวจสอบแก้ไขข้อผิดพลาดต่างๆ เพื่อปรับปรุงให้มีคุณภาพและเหมาะสมต่อการวิจัย จนทำให้โครงการพิเศษฉบับนี้เสร็จได้อย่างสมบูรณ์และขอบคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ในวิทยาลัยนาโนพระจอมเกล้าเจ้าลาดกระบัง ที่ให้ความรู้ สถานที่ในการทำวิจัยครั้งนี้ รวมทั้งเพื่อน และพี่ๆ ที่ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือตลอดเวลา

ขอบคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่ได้ให้โอกาสการศึกษาในวิทยาลัยนาโนพระจอมเกล้าลาดกระบัง และ คอยช่วยเหลือ ส่งเสริมแก่ผู้วิจัย หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้วิจัย ขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

ศรัณรัตน์ ศิริ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญภาพ.....	VI
สารบัญตาราง.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 เซลล์กัลวานิกหรือเซลล์โวลตาอิก (galvanic cell or voltaic cell).....	4
2.1.1 เซลล์ปฐมภูมิ (primary cell).....	4
2.1.2 เซลล์ทุติยภูมิ (secondary cell).....	7
2.2 ระบบไฮโดรโปนิคส์ (Hydroponic).....	8
2.3 พลังงานแสง (light energy).....	8
2.3.1 แสงที่สามารถมองเห็นได้ (visible light).....	8
2.3.2 รังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet Radiation; UV).....	9
2.4 ต้นพลูด่าง (<i>Epipremnum aureum</i>).....	12
2.5 อนุภาคนาโน (nanoparticle).....	13
2.5.1 อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO ₂).....	13
2.5.2 อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO).....	18
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	21
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	21
3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์.....	21
3.1.2 สารเคมี.....	21
3.2 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้าในระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์.....	21
3.2.1 การศึกษาการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์ในสารละลาย Hoagland.....	21

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.2 การศึกษาผลกระทบการเติมอนุภาคนาโนในระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิกส์.....	22
3.3 การออกแบบการวัดและรูปแบบระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิกส์.....	23
3.3.1 การวัดค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าในระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิกส์.....	23
3.3.2 การออกแบบเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการผลิตกระแสและแรงดันไฟฟ้าของระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิกส์ร่วมกับโซล่าเซลล์.....	24
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	25
4.1 การบันทึกและวิเคราะห์ของผลปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้าในระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิกส์.....	25
4.2 การบันทึกและวิเคราะห์ผลการศึกษาประสิทธิภาพการผลิตกระแสและแรงดันไฟฟ้าของระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิกส์ร่วมกับโซล่าเซลล์.....	35
บทที่ 5 สรุปและอภิปรายผลการวิจัย.....	36
บรรณานุกรม.....	38
ประวัติผู้เขียน.....	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 การใช้พลังงานในประเทศไทย มกราคม-กรกฎาคม 2561	1
2.1 แสดงส่วนประกอบของเซลล์กัลวานิก	4
2.2 ตัวอย่างระบบเซลล์กัลวานิกชนิดเซลล์เชื้อเพลิงของก๊าซไฮโดรเจน	6
2.3 แสดงรูปแบบบ่งประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์จูลินทรีย์ (MSC) และเซลล์เชื้อเพลิงจากพืชและ จูลินทรีย์ (P-MFC).....	7
2.4 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากช่วงของรังสีแกมมาพลังงานสูงถึงคลื่นวิทยุAMพลังงานต่ำ	9
2.5 ค่าดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ต	11
2.6 ดัชนียูวี สำหรับท้องฟ้าโปร่ง เวลา 12:00 น. พฤษภาคม 2018 โดยเฉลี่ยทั่วประเทศไทย	11
2.7 ลักษณะทางกายภาพของผลุด่างที่ใช้ในการวิจัย	13
2.8 โครงสร้างของไททาเนียมไดออกไซด์ อนาเทส รูไทล์ และ บรูคไคท์.....	14
2.9 ตำแหน่งของศักย์รีดักชันของแถบคอนดักชันและแถบเวเลนซ์ของไททาเนียมไดออกไซด์	17
2.10 โครงสร้างโมเลกุลของซิงค์ออกไซด์.....	18
2.11 ภาพอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์จากเครื่อง SEM กำลังขยาย x100K และ เครื่องTEM กำลังขยาย x100K	18
2.12 แสดงตำแหน่งของศักย์รีดักชันของแถบคอนดักชันและแถบเวเลนซ์ของซิงค์ออกไซด์.....	20
3.1 แสดงการตรวจวัดระบบไฮโดรโปนิคส์ในสารละลายเจือจาง Hoagland ที่แตกต่างกัน	23
4.7 แสดงการต่อวงจรสำหรับการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากระบบการ ปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์ร่วมกับโซลาร์เซลล์.....	24
4.1 ค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้า ณ เวลา 9:00 น. และ 16:00 น. (ในปริมาตรของ สารละลาย Hoagland's : น้ำประปา หน่วยมิลลิลิตร) ของระบบที่ไม่เติมอนุภาคนาโน.....	25
4.2 ค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้า ณ เวลา 9:00 น. และ 16:00 น. (ในปริมาตรของ สารละลาย Hoagland's : น้ำประปา หน่วยมิลลิลิตร) ของระบบที่เติมอนุภาคนาโน ZnO.....	27
4.3 ค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้า ณ เวลา 9:00 น. และ 16:00 น. (ในปริมาตรของ สารละลาย Hoagland's : น้ำประปา หน่วยมิลลิลิตร) ของระบบที่เติมอนุภาคนาโน TiO ₂	29
4.4 ภาพประกอบกระบวนการถ่ายโอนประจุจากกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสจากการกระตุ้นด้วย แสง.....	33
4.5 แสดงกระบวนการที่เกิดขึ้นทั้งหมดในระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์สำหรับการผลิต พลังงานไฟฟ้า.....	34

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 Solar Irradiance spectral categories เรียงลำดับจากช่วงความยาวคลื่นมากไปน้อย	10
2.2 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะสมบัติของโททาเนียมไดออกไซด์เฟสอานาเทส และ รูไทล์.....	15
2.3 ตำแหน่งช่องว่างพลังงานและขนาดช่องว่างพลังงาน	19
3.1 แสดงส่วนผสมสำหรับเตรียมสารละลาย Hoag's land ในน้ำ 1 ลิตร.....	22
4.1 ตารางแสดงค่าเฉลี่ยการผลิตกระแสและแรงดันไฟฟ้าของระบบที่ไม่เติมอนุภาคนาโน.....	31
4.2 แสดงค่าเฉลี่ยการผลิตกระแสและแรงดันไฟฟ้าของระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิกส์ร่วมกับโซล่าเซลล์.....	35

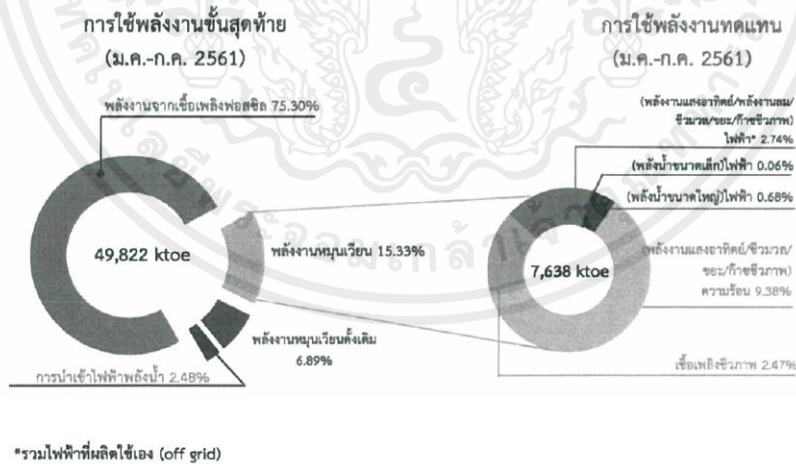


บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในการดำเนินชีวิตประจำวันของมนุษย์มีความเกี่ยวข้องกับการใช้พลังงานทั้งทางตรงและทางอ้อม ปัจจุบันมีการใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้นตามแนวโน้มการเติบโตของเศรษฐกิจ ความต้องการพลังงานของประเทศไทยร้อยละ 60 มาจากการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ และอีกร้อยละ 40 มาจากการผลิตพลังงานภายในประเทศ ปัจจุบันพลังงานที่ใช้มากที่สุดภายในประเทศยังคงเป็นน้ำมันสำเร็จรูป คิดเป็นร้อยละ 48.6 ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายทั้งหมดและรองลงมาคือ พลังงานไฟฟ้า พลังงานหมุนเวียน พลังงานถ่านหิน/ลิกไนต์ พลังงานหมุนเวียนดั้งเดิม (เช่นฟืน ถ่าน แกลบ และวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่ใช้ในบ้านอยู่อาศัย และอุตสาหกรรมในครัวเรือน) และก๊าซธรรมชาติ คิดเป็น ร้อยละ 19.6 9.4 8.7 6.9 และ 6.8 ตามลำดับ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน , 2561 [1]) การนำน้ำมันสำเร็จรูป ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติที่ผลิตมาจากซากฟอสซิลมาใช้มากเกินไปจะส่งผลกระทบต่อทำให้เกิดปัญหาภาวะโลกร้อน ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญที่ทั่วโลกให้ความสนใจและหาวิธีการแก้ไขปัญหานี้ หลายประเทศได้มีการใช้มาตรการกีดกันทางการค้า โดยปัญหาที่เกิดขึ้นนี้เป็นแรงกระตุ้นให้เกิดการพัฒนาและส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนให้มากขึ้น ซึ่งเป็นวิธีการลดปัญหาการปล่อยก๊าซเรือนกระจก



ภาพที่ 1 การใช้พลังงานในประเทศไทย มกราคม-กรกฎาคม 2561 (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2561 [1])

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในประเทศไทยมุ่งเน้นในการผลิตและพัฒนาพลังงานทดแทนเนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ผลผลิตทางการเกษตรภายในประเทศสามารถใช้เป็นวัตถุดิบผลิตพลังงาน ทั้งในรูปแบบชีวมวล ก๊าซชีวภาพ รวมไปถึงไบโอดีเซลและเอทานอล ซึ่งเป็นพลังงานทดแทนอันดับ 1 ที่ประเทศไทยมีศักยภาพสูง รวมไปถึงวัตถุดิบเหลือใช้จากอุตสาหกรรมอาหาร ยังสามารถนำมาผลิตพลังงานได้อีกด้วย นอกจากนี้พลังงานเหล่านี้พลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งมีความเข้มรังสีเฉลี่ยจากแสงอาทิตย์ทุกพื้นที่ของประเทศไทยอยู่ที่ 18.2 MJ/m²/day จะเห็นได้ว่าประเทศไทยมีศักยภาพด้านพลังงานทดแทนจากแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูง จัดอยู่ในอันดับ 4 ของภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (International Renewable Energy Agency, 2018 [17]) และมีแนวโน้มที่จะสร้างความมั่นคงด้านพลังงานจากพลังงานทดแทนในอนาคต อีกทั้งกลุ่มสมาชิกอาเซียนจัดเป็นประเทศที่มีศักยภาพด้านพลังงานทดแทนค่อนข้างสูง โดยในการประชุมรัฐมนตรีพลังงานอาเซียน ครั้งที่ 29 (ASEAN Ministers on Energy Meeting : AMEM) ในหัวข้อเรื่องศักยภาพด้านพลังงานทดแทนของอาเซียน ประเทศบรูไนดารุสซาลาม ได้มีการตั้งเป้าหมายให้พัฒนาและผลิตพลังงานทดแทนให้มากขึ้น เพื่อเพิ่มการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนเป็นร้อยละ 15 ของกำลังการผลิตไฟฟ้าที่ผลิตได้ทั้งหมดในอาเซียนภายในปี 2558 ทางกระทรวงพลังงานของประเทศไทยได้กำหนดแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 25% ใน 10 ปี (ปี2555–2564) หรือ Alternative Energy Development Plan : AEDP (2012–2021) เพื่อกำหนดกรอบและทิศทางการพัฒนาพลังงานทดแทนของประเทศ (สถาบันวิชาการป้องกันประเทศ, 2560 [8])

ในหัวข้องานวิจัยที่ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเทคโนโลยีด้านพลังงานทดแทนใหม่เพื่อเป็นทางเลือกพลังงานทดแทนที่หลากหลายมากขึ้นคือการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากกระบวนการทางชีววิทยาในระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์ (Hydroponic) ร่วมกับปฏิกิริยาแบบโฟโตคะตะไลซิส (photocatalysis) ของอนุภาคนาโนที่มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำอย่าง นาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) และนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO) อนุภาคนาโนจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันกับสารอินทรีย์ที่ออกมาจากรากพืชภายใต้แสงความยาวคลื่นในช่วงของแสงที่ตามองเห็น (visible light) และรังสีอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet radiation) ที่ตกกระทบทำให้เกิดโปรตอน (proton) และอิเล็กตรอน (electron) ซึ่งทำให้เกิดการนำไฟฟ้าขึ้นภายในระบบไฮโดรโปนิคส์

ผลงานที่ได้จากวิจัยนี้ คือองค์ความรู้เทคโนโลยีด้านพลังงานทดแทนใหม่จากระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์ร่วมกับอนุภาคนาโนเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้า โดยองค์ความรู้ที่ใช้ในงานวิจัยมาจากหลายสาขาวิชาตั้งแต่การศึกษาระบบไฟฟ้าเคมี การศึกษาพืช นาโนเทคโนโลยี รวมไปถึงด้านวิศวกรรมสาขาต่าง ๆ เป็นแนวทางด้านพลังงานทดแทนใหม่ในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาความเงิอจางของสารละลายธาตุอาหารในระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์ ต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้า
- 1.2.2 ศึกษาช่วงเวลาที่เหมาะสมในระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์ต่อการตรวจวัดค่าพลังงานไฟฟ้า
- 1.2.3 การศึกษาผลของอนุภาคนาโนชนิดสารกึ่งตัวนำร่วมกับระบบพืชแบบไฮโดรโปนิคส์ ต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้า
- 1.2.4 ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพนวัตกรรมของระบบไฮโดรโปนิคส์เพื่อนำระบบพลังงานไปประยุกต์ใช้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากต้นพืชภายใต้ระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์ ภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ ร่วมกับอนุภาคนาโน และการศึกษาแนวทางการพัฒนาระบบเพื่อการใช้พลังงานไฟฟ้า

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 เพื่อทราบถึงประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าและแรงดันจากระบบไฮโดรโปนิคส์ ในสารละลายธาตุอาหารพืช ที่ความเงิอจางแตกต่างกัน
- 1.4.2 เพื่อทราบช่วงเวลาที่เหมาะสมต่อการตรวจวัดกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าในระบบไฮโดรโปนิคส์
- 1.4.3 เพื่อทราบประสิทธิภาพการผลิตกระแสและแรงดันไฟฟ้าโดยการเติมอนุภาคนาโนชนิดสารกึ่งตัวนำร่วมกับระบบปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์

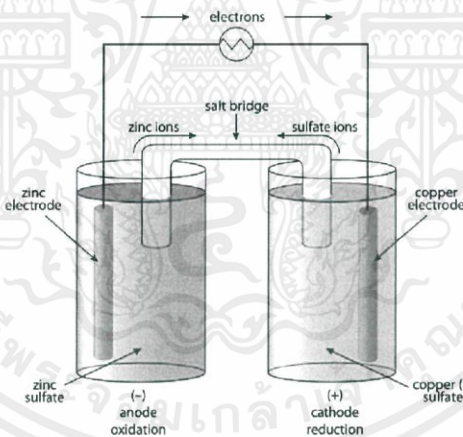
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เซลล์กัลวานิกหรือเซลล์โวลตาอิก (galvanic cell or voltaic cell)

เซลล์กัลวานิกคือเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่มีกระบวนการเปลี่ยนพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยภายในระบบเซลล์เกิดปฏิกิริยาการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากสารละลายไปยังขั้วไฟฟ้าเรียกว่าปฏิกิริยารีดอกซ์ ตัวอย่างเช่น เซลล์แอลคาไลน์ แบตเตอรี่รถยนต์ โดยทั่วไปแล้วเซลล์กัลวานิกประกอบด้วยสองครึ่งเซลล์ แต่ละครึ่งเซลล์ประกอบด้วยโลหะหรือตัวนำไฟฟ้าที่จุ่มลงในสารละลายเรียกว่า ขั้วไฟฟ้า โดยมีขั้วไฟฟ้าที่รับอิเล็กตรอนเรียกว่า ขั้วแอโนด (Anode) และขั้วไฟฟ้าที่รับประจุบวกเรียกว่า ขั้วแคโทด (Cathode) ขั้วไฟฟ้าจุ่มอยู่ในสารละลายของไอออนของโลหะ ทำหน้าที่เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยทั่วไปใช้สารละลายที่แตกต่างกัน แยกเป็น 2 ภาชนะหรือใช้เมมเบรนกั้นระหว่างสองขั้วแล้วนำมาต่อเชื่อมกัน โดยแต่ละส่วนเรียกว่าครึ่งเซลล์ (Half Cell) สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยารีดอกซ์ แสดงในภาพที่ 2.1 เซลล์กัลวานิกแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ เซลล์ปฐมภูมิ และ เซลล์ทุติยภูมิ (ณปภัช พิมพิดี, 2560 [3])



ภาพที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบของเซลล์กัลวานิกที่มา <https://www.scimath.org/lesson-chemistry/item/7181-2017-06-05-14-40-23> [3]

2.1.1 เซลล์ปฐมภูมิ (primary cell)

เซลล์ปฐมภูมิ คือเซลล์ที่ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นและดำเนินไปแล้ว ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์และเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับไม่ได้หรือนำมาอัดไฟใหม่ไม่ได้ เซลล์กัลวานิกแบบปฐมภูมิมียุทธศาสตร์การทำงานดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1.1 เซลล์เชื้อเพลิง

องค์ประกอบที่สำคัญของเซลล์เชื้อเพลิงได้แก่

- ขั้วแอโนด (anode) เป็นขั้วไฟฟ้าที่ให้ประจุลบกับเซลล์เชื้อเพลิง มีหน้าที่ส่งผ่านประจุอิเล็กตรอนหรือประจุไฟฟ้าลบออกไปทางขั้วไฟฟ้า เมื่อต่อสายไฟกับขั้วไฟฟ้า
- ขั้วแคโทด (Cathode) เป็นขั้วไฟฟ้าที่ให้ประจุบวกกับเซลล์เชื้อเพลิง มีหน้าที่ต่อเข้ากับสายไฟภายนอก ส่งผ่านประจุบวกออกไปทางขั้วไฟฟ้า
- อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ในระบบอาจทำจากวัสดุต่างชนิดกัน เช่น สารละลาย, แผ่นพลาสติก มีหน้าที่ค้ำยอุมให้ประจุบวกหรือโปรตอนเคลื่อนที่ผ่าน

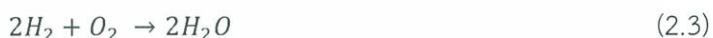
ตัวอย่างเซลล์เชื้อเพลิงเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตรอนแสดงในภาพที่ 2.2 เป็นเซลล์เชื้อเพลิงประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วคือขั้วแอโนด (ขั้วลบ) และขั้วแคโทด (ขั้วบวก) รอบสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ที่ขั้วแอโนด ให้แก๊สไฮโดรเจนเข้าไป แก๊สไฮโดรเจนแพร่ผ่านแอโนด แก๊สไฮโดรเจนถูกเร่งด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาให้ไฮโดรเจนไอออนกับอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนถูกส่งผ่านเข้าไปในสายไฟ เกิดกระแสไฟฟ้า จากนั้นเคลื่อนที่ไปยังขั้วแคโทด ดังสมการ

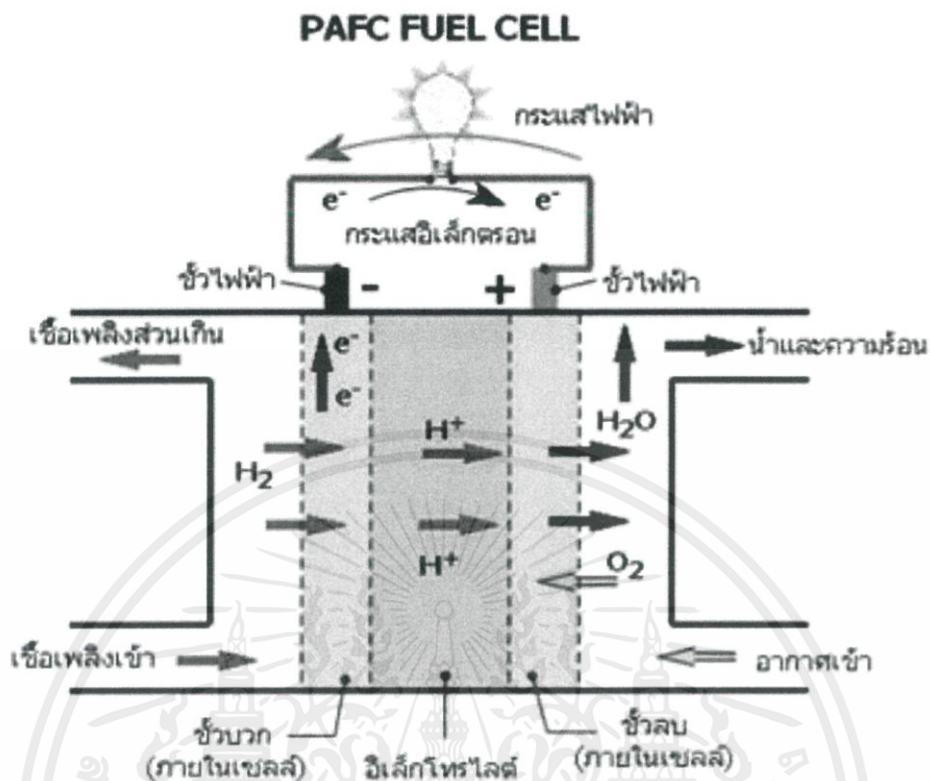


ที่ขั้วแคโทด ให้แก๊สออกซิเจนจากอากาศเข้าไปที่ขั้วแคโทด เมื่อไฮโดรเจนไอออนกับอิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่มายังขั้วแคโทดทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจนจากอากาศที่ให้เข้าไปเกิดเป็นโมเลกุลของน้ำ โดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งทำจากแพลตินัม จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้น้ำบริสุทธิ์ออกมา ดังสมการ



แรงดันไฟฟ้าที่ได้ต่อหนึ่งเซลล์มีค่าประมาณ 1 โวลต์และได้กระแสออกมาประมาณ 10 แอมแปร์ ซึ่งถ้านำมาต่ออนุกรมกัน (fuel cell stack) 12 เซลล์ ได้แรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์เหมือนกับแบตเตอรี่ ปฏิกิริยารวมของเซลล์เชื้อเพลิงเป็นการรวมตัวของไฮโดรเจนและออกซิเจนเกิดเป็นน้ำ ดังสมการ





ภาพที่ 2.2 ตัวอย่างระบบเซลล์กัลวานิกชนิดเซลล์เชื้อเพลิงของก๊าซไฮโดรเจน (ณปภัช พิมพดี, 2560 [3])

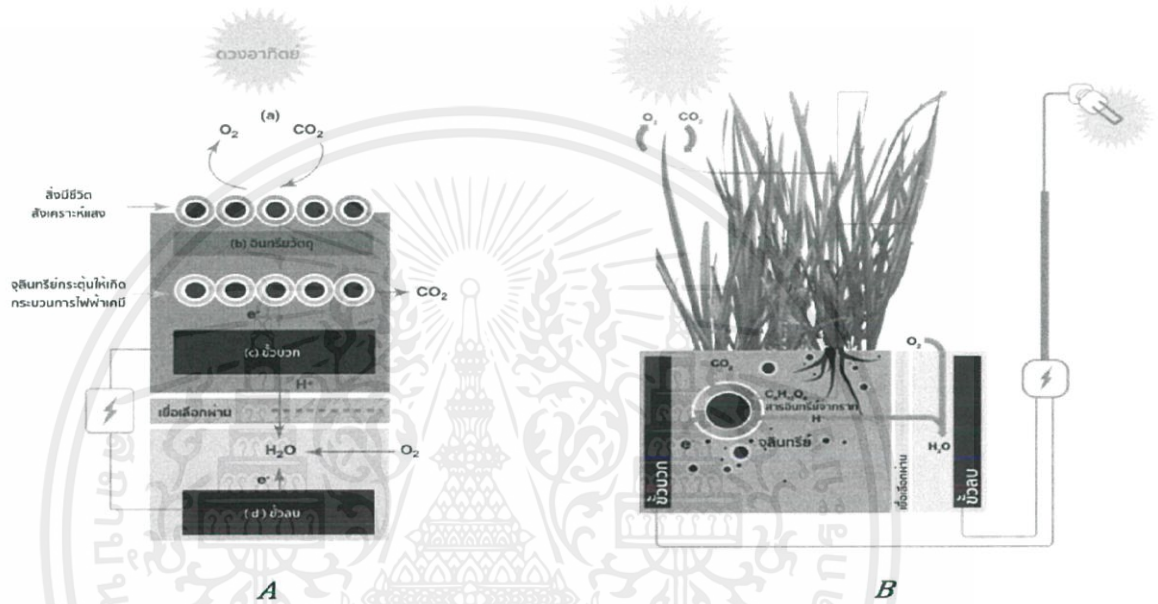
2.1.1.2 เซลล์เชื้อเพลิงจากพืชและจุลินทรีย์ (The plant-microbial fuel cell : PMFC)

เป็นเซลล์เชื้อเพลิงอีกประเภทหนึ่งจากกระบวนการทางชีวภาพระหว่างพืชและจุลินทรีย์ เรียกว่า เซลล์เชื้อเพลิงจากพืชและจุลินทรีย์ กระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้านี้จะเกิดขึ้นบริเวณรอบ ๆ รากของพืชในการผลิตไฟฟ้า เริ่มจากกระบวนการสังเคราะห์แสงที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์และคาร์บอนไดออกไซด์ทำให้พืชการผลิตสารอินทรีย์ออกมา สารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นมากกว่าร้อยละ 70% ของสารที่ผลิตได้จะสิ้นสุดลงบริเวณรากของพืช เช่น รากพืชที่ตายแล้ว , lysates , เมือก และของเหลวที่ปล่อยออกมาจากราก สารอินทรีย์เหล่านี้จะเป็นแหล่งอาหารให้แบคทีเรียเกิดการออกซิโดซ์บริเวณรอบ ๆ รากและผลิตอิเล็กตรอน (e^-) โปรตอน (H^+) และ คาร์บอนไดออกไซด์ออกมา อิเล็กตรอนที่ได้จากแบคทีเรียจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วแอโนดของ P-MFC โดยจะต่อเข้ากับโพลดภายนอก (อุปกรณ์ใช้ไฟฟ้า) และเชื่อมเข้ากับขั้วแคโทด เนื่องจากโปรตอนที่เกิดขึ้นจากแบคทีเรียเกิดขึ้นบริเวณขั้วแอโนดจึงต้องทำการแยกผ่านเยื่อเลือกผ่านให้เฉพาะโปรตอนผ่านไปยังขั้วแคโทด อีกทั้งปัจจัยอื่นที่ส่งผลให้พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ลดลง จากบริเวณขั้วแอโนดมีออกซิเจนอยู่รอบๆจะแย่งโปรตอนและอิเล็กตรอนแล้วเกิดเป็นน้ำขึ้น ตามสมการเคมีที่ 2.4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบ P-MFC มีต้นแบบมาจากเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ (Microbial Solar Cells : MSC) จากการใช้จุลินทรีย์สองชนิดคือจุลินทรีย์ที่สามารถเกิดกระบวนการสังเคราะห์แสงได้เพื่อผลิตสารอินทรีย์และจุลินทรีย์ที่ใช้สารอินทรีย์เป็นอาหารในการผลิตไฟฟ้า (Strik และคณะ, 2011 [30]; Helder และคณะ, 2012 [14]) โดยแสดงตัวอย่างเปรียบเทียบในภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 แสดงรูปแบบองค์ประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์จุลินทรีย์(MSC) (A) และเซลล์เชื้อเพลิงจากพืชและจุลินทรีย์(P-MFC) (B) โดยชนิด P-MFC สิ่งมีชีวิตที่ใช้ในการสังเคราะห์แสงคือพืช (ดัดแปลงจาก Strik และคณะ, 2011 [30])

2.1.2 เซลล์ทุติยภูมิ (secondary cell)

เซลล์ทุติยภูมิ คือ เซลล์กัลวานิกชนิดที่เมื่อปฏิกิริยาเคมีภายในเซลล์เกิดขึ้นและดำเนินไปแล้ว ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์และทำให้เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้ หรือนำมาอัดไฟใหม่ได้ ยกตัวอย่างเซลล์ทุติยภูมิได้แก่ (ณปภัช พิมพดี, 2560 [3])

2.1.2.1 เซลล์นิกเกิล - แคดเมียม (Nickel-cadmium) หรือเซลล์นิแคด

มีโลหะแคดเมียมเป็นแอโนด นิกเกิล (IV) ออกไซด์เป็นแคโทด และมีสารละลายเบสเป็นอิเล็กโทรไลต์ เซลล์นิแคดให้ศักย์ไฟฟ้าประมาณ 1.4 โวลต์ เมื่อใช้งานจนศักย์ไฟฟ้าลดต่ำลงแล้วสามารถนำมาประจุไฟได้ใหม่ ปฏิกิริยาในระหว่างการประจุไฟจะเกิดย้อนกลับกับปฏิกิริยาการจ่ายไฟ เซลล์นิแคดจึงมีข้อดีที่สามารถใช้ได้เป็นระยะเวลานาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2.2 เซลล์สะสมไฟฟ้าแบบตะกั่ว (*lead storage battery*)

ใช้เป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าในรถยนต์หรือจักรยานยนต์เรียกกันทั่วไปว่า แบตเตอรี่ ถึงแม้ว่าเซลล์สะสมไฟฟ้าแบบตะกั่วจะอัดไฟใหม่ได้ แต่ก็มีอาการเสื่อมสภาพ เพราะ $PbSO_4$ ที่เกิดขึ้นที่ขั้วทั้งสองบางส่วนหลุดร่วงอยู่ที่ก้นภาชนะ ทำให้ขั้วทั้งสองสึกกร่อน และทำให้เสื่อมสภาพในที่สุด

2.2 ระบบไฮโดรโปนิคส์ (Hydroponic)

มาจากภาษากรีก คำว่า “Hydro” แปลว่าน้ำ รวมกับ “Ponos” ที่แปลว่า งาน เมื่อรวมกันจึงหมายถึง การทำงานของน้ำ (สารละลายธาตุอาหาร) ผ่านรากพืช ปกติแล้วพืชต้องอาศัยปัจจัยต่าง ๆ มาเกี่ยวข้องเพื่อใช้ในการเจริญเติบโต เช่น แสงแดด อุณหภูมิ น้ำ และธาตุอาหารพืช การที่พืชจะนำธาตุอาหารไปใช้ประโยชน์ได้นั้นต้องคำนึงถึงความเป็นกรดและเบส (pH) ของดินหรือสารละลายธาตุอาหารที่ใช้ในการปลูกพืช การปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์ ซึ่งพืชจะได้รับธาตุอาหารในรูปแบบสารละลายที่เรียกว่า “สารละลายธาตุอาหารพืช” ซึ่งพืชสามารถนำไปใช้ได้ทันที เพราะการปรับค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity: EC) และ pH ให้เหมาะแก่การเจริญเติบโตของพืชอยู่ตลอดเวลา

ข้อดีของการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์ คือ สามารถทำการปลูกในพื้นที่ที่ไม่มีดินหรือไม่เหมาะสมต่อการปลูกพืช ใช้พื้นที่ในการปลูกน้อยและสามารถทำการผลิตได้อย่างสม่ำเสมอ สามารถควบคุมสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตได้ เช่น การควบคุมปริมาณธาตุอาหาร ค่า pH เป็นการปลูกพืชที่ใช้น้ำและธาตุอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ สะดวก แรงงานน้อยและประหยัดเวลา แต่มีต้นทุนในการทำค่อนข้างสูง เนื่องจากอุปกรณ์ราคาแพง และต้องใช้ความรู้และประสบการณ์ในการปลูก (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2558 [2])

2.3 พลังงานแสง (light energy)

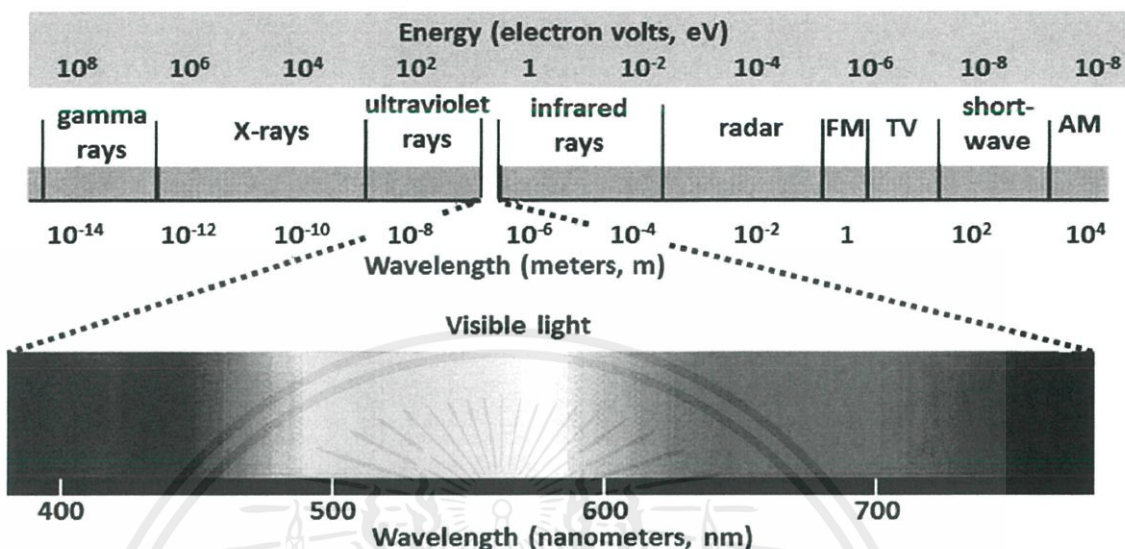
ดวงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานแสงขนาดใหญ่ที่มีความสำคัญแก่สิ่งมีชีวิตในโลกนี้ การได้รับแสงในปริมาณมากไปหรือน้อยไปย่อมส่งผลต่อสิ่งมีชีวิต รังสีจากดวงอาทิตย์ (Solar-Radiation) เป็นพลังงานในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่รังสีออกมาจากดวงอาทิตย์จะประกอบด้วยสเปกตรัมที่แตกต่างกัน แสงจากดวงอาทิตย์นี้ประกอบด้วยรังสีที่มีความยาวคลื่นต่างๆ ประกอบด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) รังสีในช่วงแสงที่สามารถมองเห็นได้ (Visible) และอินฟราเรด (Infrared) จะมีคุณสมบัติตามช่วงความยาวคลื่น มักแสดงในหน่วยนาโนเมตร (nanometer, nm = 10^{-9})

2.3.1 แสงที่สามารถมองเห็นได้ (visible light)

เป็นช่วงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ดวงตาของมนุษย์สามารถมองเห็นได้ การแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความยาวคลื่นนี้โดยทั่วไปจะเรียกว่า “แสง” หรือ “แสงที่สามารถมองเห็นได้” โดยความยาวคลื่นจะอยู่ในช่วง 380-750 นาโนเมตร มนุษย์ไม่สามารถมองเห็นสีที่มีความยาวคลื่นสูงกว่าด้วยตาได้ แสงจากดวงอาทิตย์ที่ส่องลงมายังโลกเป็นแสงขาวซึ่งภายในจะประกอบด้วยหลากหลายสีเมื่อตกกระทบลงบนวัตถุ จะดูดกลืนเฉพาะบางความยาวคลื่นและสะท้อนความยาวคลื่นที่ไม่สามารถดูดกลืนได้ออกมาทำให้สามารถมองเห็นเป็นสีต่าง ๆ ได้ด้วยตามนุษย์ ซึ่งความยาวคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากพลังงานจะต่ำในทางตรงกันข้ามหากความยาวคลื่นน้อยพลังงานสูง แสดงความสัมพันธ์ของค่าพลังงานและความยาวคลื่นในภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากช่วงของรังสีแกมมาพลังงานสูงถึงคลื่นวิทยุAMพลังงานต่ำ (Peter, 2018 [25])

ในทางชีววิทยาแสงอาทิตย์มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชจะอยู่ในช่วงของแสงยูวี (UV light) แสงที่สามารถมองเห็นได้ (visible light) และปริมาณความเข้มแสงที่พืชได้รับเพื่อใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงที่แตกต่างกันไปตามชนิดวิถัจกรการสังเคราะห์แสงของพืช และทางวัสดุศาสตร์เมื่อนาโนของวัสดุเล็กลงไปจนถึงระดับนาโนเมตรส่งผลให้คุณสมบัติของวัสดุจะเปลี่ยนแปลงไปด้วยเหตุนี้วัสดุนาโนบางชนิดจะเกิดปฏิกิริยาภายใต้แสงที่มีพลังงานสูงเรียกปรากฏการณ์โฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis) โดยเฉพาะวัสดุนาโนประเภทโลหะออกไซด์จะกล่าวในหัวข้อต่อไปในงานวิจัยนี้

2.3.2 รังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet Radiation; UV)

รังสีอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet Radiation) จัดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave) ที่มีความยาวคลื่นระหว่าง 10-400 สามารถวัดได้ในรูปกำลังงานการแผ่รังสีตกระบทยต่อหน่วยพื้นที่ (Irradiance) ที่ใช้หน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร (W/m^2) หรือในรูปพลังงานตกระบทยต่อหน่วยพื้นที่ในช่วงเวลาที่กำหนด (Radiant Exposure or dose) ใช้หน่วย จูลต่อตารางเมตร (J/m^2)

2.3.2.1 ชนิดของรังสีอัลตราไวโอเล็ต

เราสามารถจำแนกรังสีจากดวงอาทิตย์ได้เป็นชนิดต่างๆ จากความยาวคลื่นและตัวย่อตามองค์การมาตรฐานสากล หรือ International Organization for Standardization (ISO) ปี 2013 [29] แสดงความยาวคลื่นของรังสีอัลตราไวโอเล็ตชนิดต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบข้อมูล ในตารางที่ 2.1

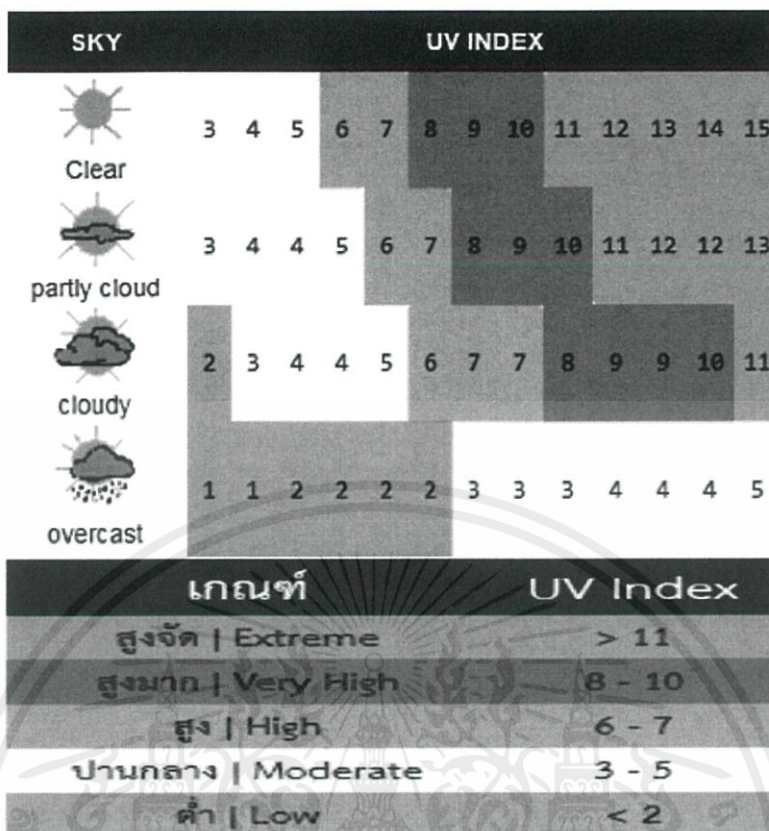
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 Solar Irradiance spectral categories เรียงลำดับจากช่วงความยาวคลื่นมากไปน้อย (ISO 21348 Definitions of Solar Irradiance Spectral Categories, 2013 [29])

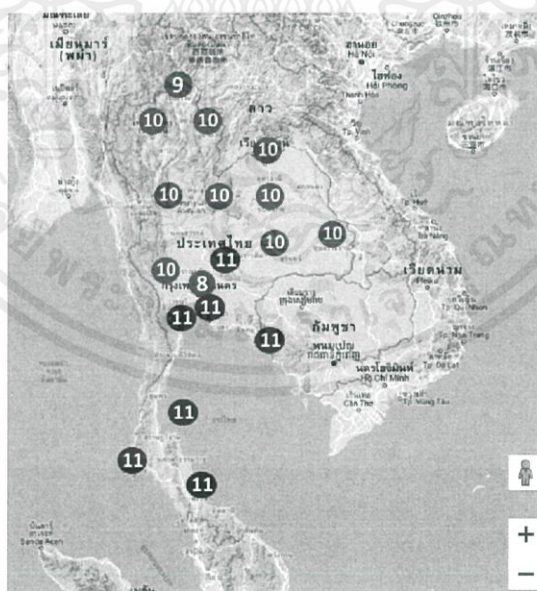
Name	Abbreviation	Wavelength range in nanometer
Before UV spectrum	Visible light	700 nm-400 nm
Ultraviolet A, long wave, or black light	UVA	400 nm-315 nm
Near Ultraviolet	NUV	400 nm-315 nm
Ultraviolet B or medium wave	UVB	315 nm-300 nm
Middle ultraviolet	MUV	300 nm-200 nm
Ultraviolet C, short wave, or germicidal	UVC	280 nm-100 nm
Far ultraviolet	FUV	200 nm-122 nm
Vacuum ultraviolet	VUV	200nm-100 nm
Low	LUV	100 nm-88 nm
Super	SUV	150 nm-10 nm
Extreme ultraviolet	EUV	121 nm-10 nm
Beyond UV range	X-rays	Below 10 nm
Soft x-ray	X-rays, XUV	1 nm- 1nm
Hard x-ray		1 nm

2.3.2.2 ผลกระทบของรังสีอัลตราไวโอเล็ตต่อมนุษย์

จากตารางของศูนย์โอโซนและรังสี กรมอุตุนิยมวิทยา [7] แสดงดัชนีรังสีในตารางที่ 2.2 แสดงให้เห็นปริมาณรังสี UV ในสภาวะอากาศที่แตกต่างกันโดยใช้ตัวเลขดัชนีเป็นตัวระบุเชิงปริมาณ ซึ่งปริมาณของรังสี UV ในประเทศไทยปี 2018 เวลากลางวันจากภาพที่ 2.5 อยู่ในระดับดัชนีที่ 11 จากภาพที่ 2.6 ซึ่งบ่งบอกว่าบางจังหวัดของประเทศมีปริมาณรังสี UV สูงสุดอยู่ในระดับก่อให้เกิดอันตราย มีผลกระทบให้ผิวหนังเกรียมแดด (sun burn) จากการได้รับแสงแดดจากดวงอาทิตย์ติดต่อกันประมาณ 20-30 นาที ในระยะยาว มีความเสี่ยงต่อดวงตา และทำลาย DNA กรณีที่ร้ายแรง มีความเสี่ยงอาจเกิดมะเร็งผิวหนัง



ภาพที่ 2.5 ค่าดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ต (ศูนย์โอโซนและรังสี กรมอุตุนิยมวิทยา, 2018 [7])



ภาพที่ 2.6 ดัชนียูวี สำหรับท้องฟ้าโปร่ง เวลา 12:00 น. พฤศจิกายน 2018 โดยเฉลี่ยทั่วประเทศไทย (ศูนย์โอโซนและรังสี กรมอุตุนิยมวิทยา, 2018 [7])

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2.3 ผลกระทบของรังสีอัลตราไวโอเล็ตต่อพืช

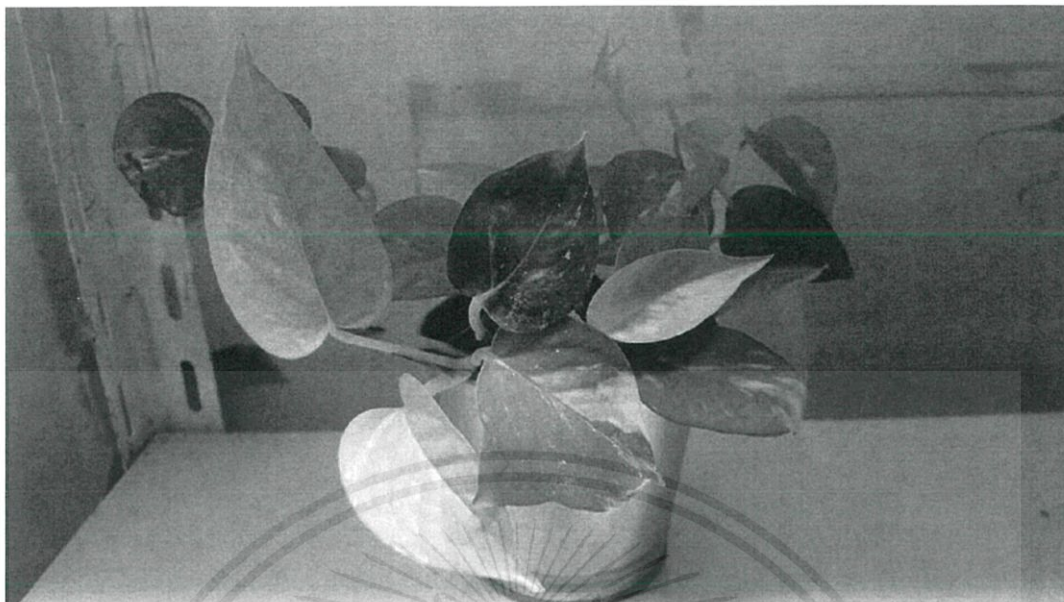
รังสีอัลตราไวโอเล็ตที่เพิ่มขึ้นมีผลกระทบทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อพืช เช่น การยับยั้งกระบวนการสังเคราะห์แสง ทำลาย DNA และเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและองค์ประกอบพืช ทำให้ลักษณะทางกายภาพ และกระบวนการเจริญเติบโตของพืชเปลี่ยนแปลงไป นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงการสังเคราะห์มวลชีวภาพ (Biomass) และผลผลิตที่ลดลง ถึงแม้ว่าพืชจะมีกลไกที่ซ่อมแซมโครงสร้างที่ถูกทำลาย และความสามารถในการปรับตัวของพืชต่อการเพิ่มระดับของ UV (ณัฐฤติ เนียมจันทร์, 2553 [4]) โดยสามารถจำแนกรังสียูวีที่อาจส่งผลกระทบต่อพืชได้ดังนี้ได้ดังนี้

- รังสี UV-A มีชื่ออื่นว่า long wave UVR หรือ Black light อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 315 – 400 nm ระดับพลังงานอยู่ที่ 3.10 – 3.94 eV พลังงานในช่วงนี้ไม่เป็นอันตรายต่อพืช พืชบางชนิดนำมาใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสง
- รังสี UV-B มีชื่ออื่นว่า Middle UVR หรือ Sunburn radiation อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 280 – 350 nm มีระดับพลังงาน 3.94- 4.43 eV การเปลี่ยนแปลงทางอ้อมที่เกิดจาก UV-B (เช่น การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของพืช) อาจสำคัญเท่าๆกันหรือมากกว่าการส่งผลในเชิงทำลายของ UV-B การเปลี่ยนแปลงนี้มีผลกระทบต่อพืชที่อยู่ในสภาวะการแข่งขันที่สมดุล สัตว์ที่กินพืช โรคพืช และวัฏจักร biogeochemical
- รังสี UV-C มีชื่ออื่นว่า Short wave UV หรือ Germicidal อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 100 – 280 nm มีระดับพลังงาน 4.43 – 12.4 eV เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต เป็นรังสีที่มีพลังงานสูง อาจส่งผลกระทบทำลายโครงสร้างพืชเซลล์พืชและทำให้เกิดการกลายพันธุ์

ในงานวิจัยนี้รังสี UV มีส่วนเกี่ยวข้องกับกระบวนการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของอนุภาคนาโน ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) และ ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อที่ 2.5

2.4 ต้นพลูด่าง (*Epipremnum aureum*)

พืชเหล่านี้มีแหล่งกำเนิดในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้และหมู่เกาะโซโลมอน นิยมนำมาปลูกเป็นแพร์หลายทั่วโลก เป็นพืชประเภทไม้อิงอาศัย เนื้อไม้อ่อน เลื้อยไปตามพื้นหรือมีรากเกาะพันกับต้นไม้ใหญ่หรือเสาหลักอื่นๆเมื่อแก่มีเนื้อไม้ กิ่งก้านสีเขียวถึงสีเขียวอ่อนอมเหลืองมักมีขีดตามยาวสีเหลืองหรือสีขาว ลักษณะใบเป็นใบเดี่ยว แทงออกบริเวณข้อ 2 ใบ อยู่ตรงข้ามกัน ใบมีลักษณะโคนใบมน โคนใบส่วนกลางเว้า ปลายใบแหลม มีรูปทรงคล้ายรูปหัวใจยาวไม่เกิน 6 นิ้ว แผ่นใบ และขอบใบเรียบ ใบมีลักษณะหนา และอวบน้ำ มีสีเขียว หรือหลายสีแกมกัน ได้แก่ สีเขียวอ่อน สีเขียวอ่อนออกทอง สีเขียวแก่ สีเหลือง และสีขาว (ธนากร รัตน์พันธ์ และคณะ, 2560 [5]) แสดงภาพตัวอย่างที่ 2.7 พลูด่างที่ใช้ในงานวิจัย



ภาพที่ 2.7 ลักษณะทางกายภาพของผลุด่างที่ใช้ในการวิจัย

2.5 อนุภาคนาโน (nanoparticle)

อนุภาคนาโนคือโครงสร้างหนึ่งของวัสดุนาโนที่อยู่ในระบบศูนย์มิติ (zero-dimensional (0D) systems) เป็นวัสดุหรือโครงสร้างที่ถูกจำกัดมิติ (dimension) กายภาพทั้งสามมิติให้จำกัดอยู่ในช่วงนาโนเมตรอาจเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติหรือมนุษย์สังเคราะห์ขึ้นในกระบวนการต่างๆสามารถแยกประเภทการสังเคราะห์ได้ 2 ประเภทคือ 1. การลดขนาดวัสดุขนาดใหญ่ให้เล็กลง (top-down) เช่น การลดขนาดของซิงค์ออกไซด์ที่เป็นวัสดุขนาดใหญ่ให้เล็กลงจนถึงระดับนาโนโดยวิธีการบด 2. การเพิ่มขนาดวัสดุขนาดเล็กให้ใหญ่ขึ้น (bottom-up) เช่น การใช้สารตั้งต้นเป็นสารละลายในกระบวนการโซลเจล (sol-gel) ผลิตอนุภาคนาโนซิลิกา เป็นต้น

เนื่องจากโครงสร้างวัสดุถูกจำกัดอยู่ในระบบมิติต่ำส่งผลให้เกิดคุณสมบัติใหม่ที่แตกต่างกันระหว่างวัสดุนาโน (nanomaterials) กับวัสดุนิตเดียวกันที่มีขนาดใหญ่ (Macromaterials) ตามองค์ประกอบ และลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมและโมเลกุลในตัววัสดุ การจำกัดมิติในวัสดุนาโนเป็นการบีบบังคับให้อิเล็กตรอนในตัววัสดุเคลื่อนที่ได้ในปริมาณที่จำกัดเท่านั้นสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ของวัสดุจึงเปลี่ยนไป และสมบัติอื่นๆจึงเปลี่ยนตามไปด้วย การนำวัสดุมาใช้งานจึงต้องทราบคุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญที่ควรมีการวิเคราะห์ลักษณะก่อนนำมาใช้ (พวงรัตน์ ขจัดวิษยานุกูล, 2557 [6])

2.5.1 อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)

2.5.1.1 ลักษณะและสมบัติของไททาเนียมไดออกไซด์

ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นวัสดุนาโนประเภทสารกึ่งตัวนำในกลุ่มโลหะออกไซด์ได้รับความนิยมน้อย่างแพร่หลายในการนำมาใช้งานเพื่อเพิ่มคุณสมบัติพิเศษให้กับผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์และงานวิจัย อีกทั้งยังสามารถนำมาใช้บำบัดและกำจัดมลพิษอยู่เป็นรูปธรรม โดยวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตไททาเนียมไดออกไซด์ ได้แก่ แร่รูไทล์ (rutile) และแร่ิลเมไนต์ (ilmenite) ทั้งสองตัวนี้เป็น

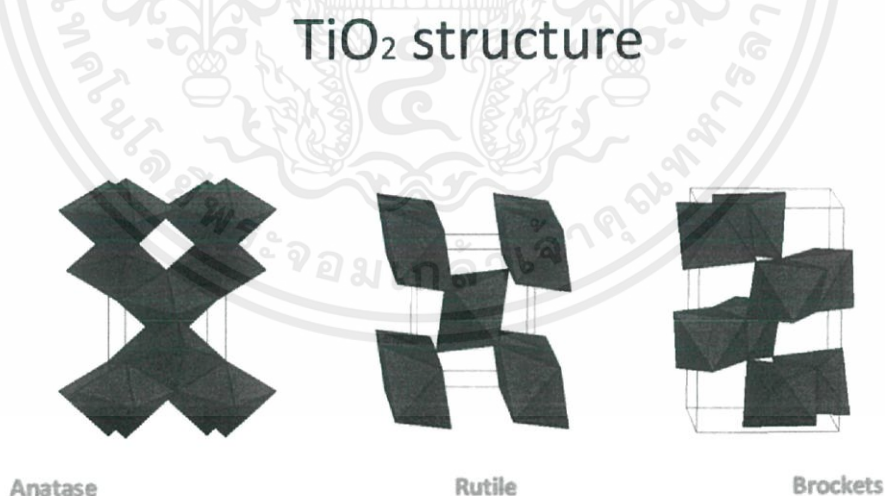
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องค์ประกอบสำคัญของเปลือกโลก พบมากในประเทศออสเตรเลีย มาเลเซีย ญี่ปุ่น แคนาดา ฟินแลนด์ แคมเบีย อินเดีย นอร์เวย์ โปรตุเกส เซเนกัล ศรีลังกา อาร์เจนตินา อียิปต์ บราซิล คองโก สเปน แอฟริกาใต้ และรัสเซีย (Sellers , 2009 [27]) ในประเทศไทยพบแร่โอลิเมนต์มากทางภาคใต้ ซึ่งเป็นแหล่งแร่ดีบุกมาก่อนภายในพื้นที่จังหวัด ได้แก่ จังหวัดกระบี่ พังงา ระนอง กระบี่ สงขลา และยะลา แร่โอลิเมนต์มีสูตรทางเคมีคือ FeTiO_2 หรือ FeTiO_4 ซึ่งอาจเรียกได้ว่าเป็น “กากแร่” หลังการแยกเอาดีบุกออกมาแล้ว แร่โอลิเมนต์มีสีดำเป็นมันวาว ผลึกมักเป็นรูปหกเหลี่ยมมีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็ก จากปกติมีโลหะอื่นผสมอยู่บ้าง เช่น แมกนีเซียม แมงกานีส และโครเมียม แร่นี้มีคุณค่าอย่างมหาศาลต่อการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศ ถ้าสามารถแยกเอาไททาเนียมไดออกไซด์ออกมาได้โดยใช้ต้นทุนต่ำ

โดยโครงสร้างของไททาเนียมไดออกไซด์แบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่

- รูไทล์ (rutile) สามารถเหนียวทำให้มีความเสถียรภาพมากได้ที่อุณหภูมิสูงๆ เป็นชนิดที่ใช้กันมากในโรงงานอุตสาหกรรมเกือบทุกโรงงาน เช่น โรงงานทาสี โรงงานทำเครื่องสำอาง โรงงานทำอาหาร ซึ่งพบในหินอัคนี
- อนาเทส (anatase) สามารถเหนียวทำให้มีความเสถียรมากได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่ารูไทล์ รูปแบบนี้นิยมใช้ในการระบวนการใช้แสงชั้นสูง
- บรูคไคท์ (brookite) เป็นผลึกที่พบในแร่เท่านั้น และมีโครงสร้างผลึกที่มีลักษณะเป็นมุมฉาก (orthorhombic)

รูปแบบโครงสร้างของไททาเนียมไดออกไซด์ รูไทล์ อนาเทส บรูคไคท์ แสดงในภาพที่ 2.8 โดยทั่วไปจะพบรูปทรงที่เกิดขึ้นง่ายของโครงสร้างแบบอนาเทส และ รูไทล์ เรียกว่าแบบรูปทรงสี่มุม (tetragonal) แสดงลักษณะและสมบัติอื่นๆ ที่แตกต่างกันของโครงสร้างทั้งสามแบบจาก ตารางที่ 2.2



ภาพที่ 2.8 โครงสร้างของไททาเนียมไดออกไซด์ อนาเทส รูไทล์ และ บรูคไคท์ (Yahya, 2013 [32])

ตารางที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะสมบัติของไททาเนียมไดออกไซด์เฟสอานาเทส และ รูไทล์
(พงวรัตน์ ขจัตวิชยานุกูล, 2557 [6])

ลักษณะสมบัติ	อานาเทส	รูไทล์
โครงสร้างผลึก	Tetragonal system	Tetragonal system
Lattice constant, a	4.78 Å ^o	4.52 Å ^o
Lattice constant, c	9.49 Å ^o	2.95 Å ^o
ค่าความถ่วงจำเพาะ	4.9 g/cm ⁴	4.2 g/cm ⁴
Refractive index	2.52	2.17
ค่าความแข็ง	5.5 – 6.0 Mohs	6.0 – 7.0 Mohs
Permittivity	41	114
จุดหลอมเหลว	เปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นรูไทล์ ที่อุณหภูมิประมาณ 800 °C	1,858 °C
พลังงานระหว่างช่องว่าง (Band gap energy)	3.2 eV	3.0 eV
พลังงานอิสระ Gibbs Gibbs Free energy	-211.4 Kcal/mol	-212.6 Kcal/mol

งานวิจัยหลายงานบ่งบอกว่าผลึกอานาเทสจะให้ประสิทธิภาพในการเกิดโฟโตคะตะไลซิสได้ดีกว่าผลึกแบบรูไทล์ ไททาเนียมไดออกไซด์ที่นิยมผลิตโดย บริษัทในเยอรมัน ชื่อบริษัท Degussa โดยมีชื่อทางการค้าว่า Titanium dioxide P25[®] ซึ่งประกอบด้วย อานาเทส 80% และรูไทล์ 20% และมีศักย์รีดักชัน (reduction potential) ของแถบพลังงานการนำและแถบพลังงานวาเลนซ์เท่ากับ -0.4 และ +2.9 โวลต์ (pH 0) โดยทั่วไปไททาเนียมไดออกไซด์ที่ผลิตจากบริษัทนี้มีขนาดในระบับ 5-100 นาโนเมตร และพื้นผิวอาจสูงถึง 400 ลบ.ม./ก. ซึ่งขึ้นกับกระบวนการสังเคราะห์ โครงสร้างผลึก และลักษณะของผลึกเป็นหลัก ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคประมาณ 20 นาโนเมตรและมีพื้นผิวเฉลี่ยประมาณ 50 ลบ.ม./ก. (พงวรัตน์ ขจัตวิชยานุกูล, 2557 [6])

2.5.1.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าของไททาเนียมไดออกไซด์

ลักษณะเคมีพื้นผิว (Surface chemistry) ของไททาเนียมไดออกไซด์เป็นลักษณะที่สำคัญในการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ เมื่อไททาเนียมไดออกไซด์อยู่ในน้ำ ประจุบนพื้นผิวของไททาเนียมไดออกไซด์จะถูกเหนี่ยวนำให้แตกต่างกันไปตามค่า pH ของน้ำนั้นๆ (Kajitvichyanukul และคณะ, 2003 [18]) ซึ่งสมบัตินี้เกิดได้ทั่วไปของโลหะออกไซด์ ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นที่รู้จักในรูปของ diprotic acid ซึ่งหมายถึงกรดที่แตกตัวได้ H⁺ สองครั้ง ซึ่งเป็นผลมาจากลักษณะการเป็น amphoteric คือส่วนประกอบในโมเลกุลที่มีทั้งประจุบวกและลบ ของกลุ่มไฮดรอกซิลบริเวณพื้นผิวของไททาเนียมไดออกไซด์หรือเรียกกันว่า กลุ่มไททานอล (titanol) แสดงในรูปของพันธะเคมีคือ ≡Ti-OH ประจุที่เกิดขึ้นเป็นได้ทั้งบวกและลบตามสมดุลของปฏิกิริยากรดเบสในสารละลาย แสดงเป็น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



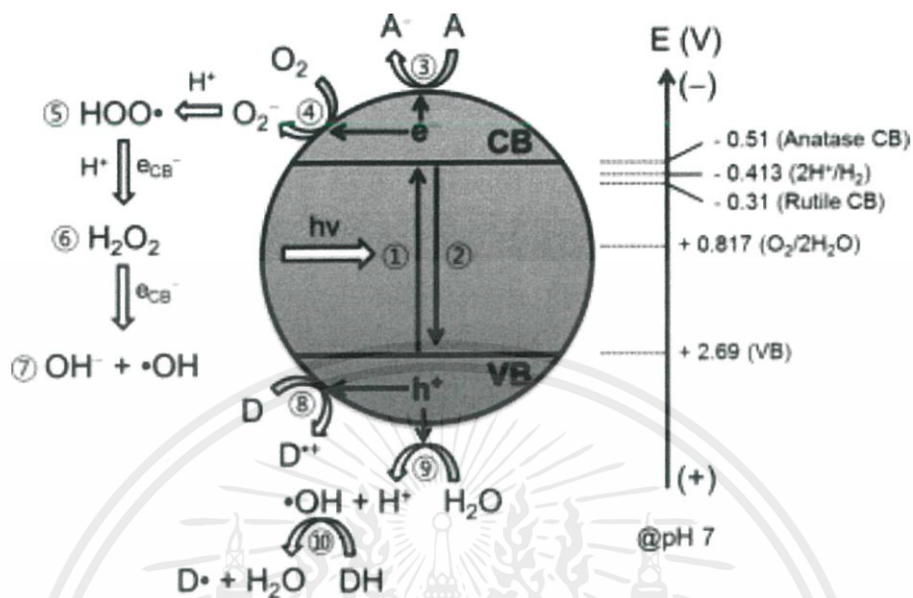
ค่าเฉลี่ยของ pK_a ได้จาก $\frac{1}{2} (pK_{a1} + pK_{a2})$ นั้นเป็นค่าที่แสดงถึงค่า pH ที่มีประจุรวมกันเป็นศูนย์หรือ point of zero charge (pH_{pzc}) จากการทดลองของ Carraway และคณะใน ปีค.ศ. 1994 [11] พบว่าการนำไททาเนียมไดออกไซด์ Degussa P25 ซึ่งได้นำมาใช้กันมากในการบำบัดมลพิษจากน้ำเสียนั้น ค่า pH_{pzc} ของไททาเนียมไดออกไซด์มีค่าเป็น 6.2 (มาจากค่า $pK_{a1} = 4.5$ $pK_{a2} = 8$) ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงพื้นที่ผิวของไททาเนียมไดออกไซด์ จะพบว่าประจุลัพท์ที่ผิวของไททาเนียมไดออกไซด์จะเป็นบวกเมื่อค่า pH ที่น้อยกว่า 6.2 และประจุลัพท์บนพื้นผิวของไททาเนียมออกไซด์จะเป็นลบเมื่อค่า pH ของน้ำมีค่ามากกว่า 6.2 ซึ่งประจุลบและประจุบวกของไททาเนียมไดออกไซด์นั้นแสดงได้ดังสมการของ Handerson-Hasselbalch (Park และคณะ, 2012 [23])

$$\frac{\equiv\text{TiO}^-}{\equiv\text{TiOH}_2^+} = 10^{(pH - pH_{pzc})} \quad (2.7)$$

ผลของประจุที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่าพีเอชของสารละลายส่งผลให้เกิดค่ากระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ในระบบ กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสซึ่งเป็นการให้และรับอิเล็กตรอนจากไททาเนียมไปยังสารละลายนั้น ปฏิกริยาทั้งหมดเกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของไททาเนียมไดออกไซด์ ถ้าสารอินทรีย์จากพีชถูกดูดกลืนบนพื้นผิวของไททาเนียมไดออกไซด์มากจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้ามากขึ้นไปด้วย โดยปฏิกริยาจะประกอบด้วยปฏิกริยาออกซิเดชันและรีดักชันจากการให้และรับอิเล็กตรอนกลไกปฏิกริยาบนพื้นผิวนี้นำไปใช้ในการบำบัดมลพิษทางน้ำ นอกจากนี้ค่าพีเอชของสารละลายที่ส่งผลต่อเคมีพื้นผิวของโลหะออกไซด์แล้ว ปัจจัยอื่นๆ ที่ส่งผลต่อเคมีพื้นผิวของโลหะออกไซด์ได้แก่ ไอออนและอิเล็กโตรไลต์ที่มีในสารละลายนั้นๆ ในการวัดค่า pH_{pzc} คือ ค่า pH ณ ประจุที่พื้นผิวเป็นศูนย์ นั้นมักมาจากการวัดค่า electrokinetic potential หรือ zeta potential จากการวัด electrophoretic mobility ของโลหะออกไซด์ซึ่งแปรผันไปกับค่าพีเอช (Stumm and Morgan, 1996 [31]) ทั้งนี้ไอออนต่างๆในน้ำจะส่งผลแตกต่างกันไป เช่น ในกรณีดูดซับโลหะหนัก Ti^+ บนพื้นผิวของไททาเนียมไดออกไซด์นั้น โดยไอออนลบของออกซาเลท (oxalate) ฟอर्मเท (formate) และ อะซิเตรท (acetate) จะทำให้ประจุลัพท์บนพื้นผิวของไททาเนียมไดออกไซด์เป็นลบมากขึ้น ทำให้เกิดความต่างศักย์ของระบบเพิ่มมากขึ้น ในขนาดที่ไอออนฟอสเฟต (phosphate anion) จะทำให้เกิดการขัดขวางประจุลบที่อยู่บนไททาเนียมไดออกไซด์ (Kajitvichyanukul และคณะ 2003 [18]) ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับชนิดของไอออนที่มีอยู่ในสารละลาย และชนิดของสารอินทรีย์ในน้ำด้วย (พวงรัตน์ ขจิตวิชยานุกูล, 2557 [6])

ในส่วนของโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของไททาเนียมไดออกไซด์ วัสดุนาโนชนิดนี้จัดเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด n-type ซึ่งมีโครงสร้างของระดับชั้นพลังงานดังภาพที่ 2.9 ตำแหน่งศักย์รีดักชัน (reduction potential) ของแถบการนำ (conduction band) เป็น -0.56 V ที่พีเอช 7 ($E_{CB} = -0.51$ V at pH 7) (Park et al., 2013 [24]) และมีตำแหน่งศักย์รีดักชันของแถบวาเลนซ์ (valence band) เป็น $+2.58$ V ที่ pH 7 ($E_{VB} = +2.69$ V at pH 7) (Park และคณะ, 2013 [24]) ตำแหน่งศักย์รีดักชันของแถบพลังงานทั้งสองนี้ มีความสำคัญมากในการถ่ายโอนอิเล็กตรอนไปสู่สารอินทรีย์หรือโลหะหนัก

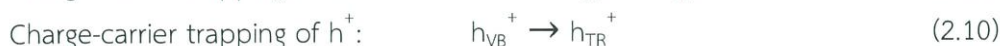
ที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของไททาเนียมไดออกไซด์ ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ส่งผลให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์และกำจัดโลหะหนักในสารละลาย



ภาพที่ 2.9 ตำแหน่งของศักย์รีดักชันของแถบคอนดักชันและแถบเวเลนซ์ของไททาเนียมไดออกไซด์ ณ pH 7 (Park และคณะ, 2013 [23])

การถ่ายเทอิเล็กตรอนของไททาเนียมไดออกไซด์จะเกิดจากปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส เริ่มจากการที่รังสีอัลตราไวโอเลตที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 490 นาโนเมตร ไปกระตุ้นอิเล็กตรอนที่แถบวาเลนซ์ของไททาเนียมไดออกไซด์ อิเล็กตรอนที่ได้รับกระตุ้นจะสามารถเคลื่อนที่ไปสู่แถบการนำ โดยเหลือช่องว่างที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ออกไปแล้วเสมือนมีประจุบวกอยู่เรียกว่า โฮลล์ (hole หรือ h^+) ในชั้นของแถบวาเลนซ์โดยอิเล็กตรอนและโฮลล์ของไททาเนียมไดออกไซด์นั้นจะเคลื่อนที่ไปสู่พื้นผิวของวัสดุ อิเล็กตรอนและโฮลล์ในส่วนนี้จะเรียกเป็น e_{TR}^- และ h_{TR}^+ หรือเรียกว่าอิเล็กตรอนและโฮลล์ที่ถูกกักขังบนพื้นผิว (Trap) ถ้าไททาเนียมไดออกไซด์อยู่ในสภาวะที่มีสารให้และรับอิเล็กตรอน หรือตัวไฟฟ้าอยู่ จะเกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนทั้งให้และรับอิเล็กตรอนนั้นจะสัมพันธ์กับศักย์รีดักชันของทั้งแถบการนำและแถบวาเลนซ์ (Hermann และคณะ 1999 [15]; Linsenbigler และคณะ 1995; Hoffmann และคณะ 1995 [16])

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวดำรงปฏิกิริยาในส่วนของกาเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลล์ (electron - hole pair) เป็นดังนี้ (Hoffmann และคณะ 1995 [16]; Hermann และคณะ 1999 [15])

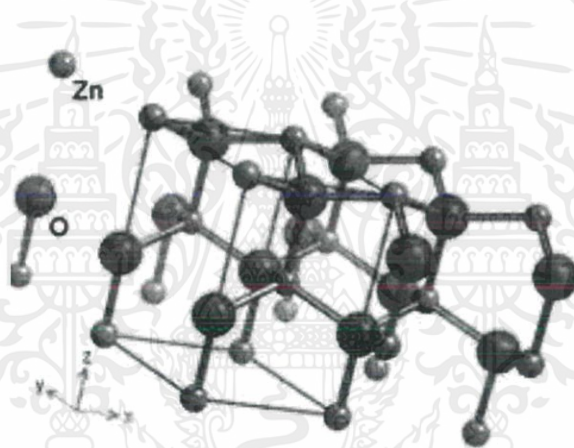


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

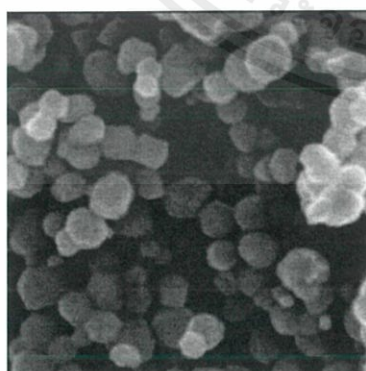
2.5.2 อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO)

2.5.2.1 ลักษณะและสมบัติของซิงค์ออกไซด์ (ZnO)

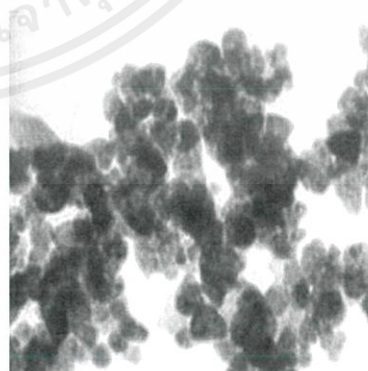
เป็นวัสดุนาโนประเภทสารกึ่งตัวนำอีกชนิดหนึ่งที่นิยมใช้ในการบำบัดและกำจัดมลพิษรองจากอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เนื่องจากลักษณะพิเศษทางอิเล็กทรอนิกส์ในการเร่งปฏิกิริยา เกิดปฏิกิริยาเคมีพื้นผิวโดยใช้แสงได้ดี มีราคาถูก โดยลักษณะทางโครงสร้างของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ และลักษณะพื้นผิวของนาโนซิงค์ออกไซด์แสดงในภาพที่ 2.10 วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์มีได้หลายโครงสร้าง โดยขึ้นอยู่กับวิธีการสังเคราะห์ที่แตกต่างทำให้เกิดโครงสร้างอื่นเพื่อการนำไปใช้งานที่หลากหลายเช่น ฟิล์มบาง แท่งนาโน ลวดนาโน และมักมีโครงสร้างผลึกที่เด่นชัด ในภาพที่ 2.11 คุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์อยู่ในประเภทสารกึ่งตัวนำแบบ n-type มีช่องว่างพลังงาน (energy gap) ระหว่างแถบพลังงานการนำ (conduction band) กับแถบพลังงานวาเลนซ์ (valence band) อยู่ที่ 3.2 eV การใช้งานของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์จึงมีความหลากหลาย เช่นกำจัดมลพิษในอากาศ น้ำ สารอินทรีย์บางชนิด จุลินทรีย์ และเชื้อโรค



ภาพที่ 2.10 โครงสร้างโมเลกุลของซิงค์ออกไซด์ (พงรัตน์ ขจิตวิษยานุกูล 2557 [6])



(ก)



(ข)

ภาพที่ 2.11 ก) ภาพอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์จากเครื่อง SEM กำลังขยาย $\times 100\text{K}$ (ข) เครื่องTEM กำลังขยาย $\times 100\text{K}$ (Liu และคณะ, 2007 [19] ; Becheri และคณะ, 2008 [9])

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าของซิงค์ออกไซด์

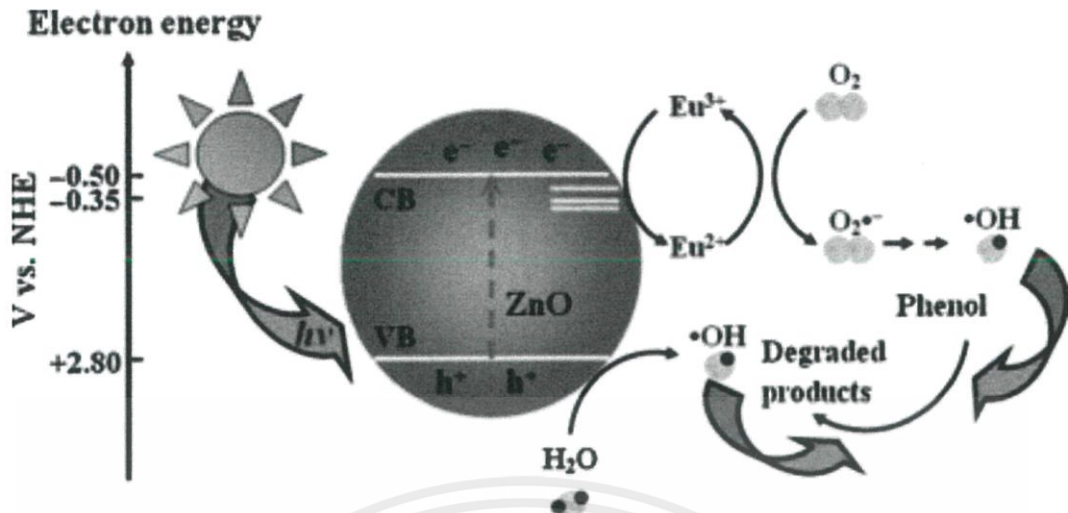
ลักษณะสมบัติเฉพาะของซิงค์ออกไซด์ที่สำคัญคือ การมีค่าดัชนีหักเหสูง (high refractive index) การทนความร้อนและอุณหภูมิได้ดี โดยซิงค์ออกไซด์มีค่าดัชนีหักเหประมาณ 1.95 – 2.10 จากการที่ซิงค์ออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำแบบ n-type ทำให้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสง โดยตำแหน่งของแถบวาเลนซ์ที่มีศักย์ไฟฟ้าในการออกซิไดซ์สารอื่นได้ดี จึงมีประสิทธิภาพอย่างมากในการย่อยสารอินทรีย์และสีต่างๆ ได้ดี (Lu et และคณะ, 2009 [20]; Mai และคณะ [21], 2008; Pare และคณะ, 2008 [22]) แสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ตำแหน่งช่องว่างพลังงานและขนาดช่องว่างพลังงาน(พวงรัตน์ ขจัดวิทยานุกูล, 2557 [6])

วัสดุนาโน	ค่าพลังงานระหว่างช่องว่าง (band gap energy, eV)	ความยาวคลื่นในช่วงของค่าพลังงานระหว่างช่องว่าง (nm)
TiO ₂ (รูไทล์)	3.0	413
TiO ₂ (อนาเทส)	3.2	388
ZnO	3.2	388

โดยงานวิจัยหลายงานแสดงถึงความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ของซิงค์ออกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้แสงวิซิเบิล (ความยาวคลื่นมากกว่า 420 นาโนเมตร) ตัวอย่างเช่น สีเมธิลกรีนจากซีตจานและถูกย่อยสลายไปเมื่อใช้แสงวิซิเบิลโดยใช้กำลังวัตต์ไม่สูงนัก (Mai et al., 2008 [21]) นอกจากนี้การเติมสารออกซิแดนซ์ ได้แก่ Na₂S₂O₈ และ H₂O₂ จะทำให้อัตราการย่อยสลายมลพิษได้ดีขึ้นทำให้เกิดพลังงานศักย์เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่การเติมสารเกลือ ได้แก่ NaCl และ Na₂CO₄ จะทำให้อัตราการย่อยสลายช้าลง (Pare et และคณะ, 2008 [22])

ในการเปรียบเทียบอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์กับไททาเนียมไดออกไซด์ โดยภายใต้แสงวิซิเบิลแล้ว ซิงค์ออกไซด์สามารถดูดกลืนสเปกตรัมของแสงอาทิตย์ได้มากกว่าไททาเนียมไดออกไซด์ ทำให้อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์สูงกว่า (Sakthivel และคณะ, 2003 [26]; Dinda and Icli, 2001 [12]) ในขนาดภายใต้แสงไฟนั้นไททาเนียมไดออกไซด์จะให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์สูงกว่าซิงค์ออกไซด์ โดยการย่อยสลายจากการใช้ซิงค์ออกไซด์นั้นการใช้แสงอาทิตย์โดยตรงจะได้ประสิทธิภาพมากกว่าการใช้หลอดไฟเป็นแหล่งให้แสงแสดงในภาพที่ 2.12 ซิงค์ออกไซด์มีข้อเสียของการกัดกร่อนจากปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส (photocorrosion) และการเสียดสภาพของวัสดุที่พีเอชมีค่าสูงและต่ำมากๆ (Domenech and Prieto, 1986 [13])



ภาพที่ 2.12 แสดงตำแหน่งของศักย์รีดักชันของแถบคอนดักชันและแถบเวเลนซ์ของซิงค์ออกไซด์ (Sin และคณะ, 2014 [28])

การศึกษาการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพืชในงานวิจัยนี้แตกต่างจากเซลล์เชื้อเพลิงแบบ P-MFC เนื่องจากการใช้อุณหภูมิที่มีขนาดเล็กมาก มีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง (Surface area to volume ratio) ทำให้สัมผัสกับแบคทีเรียได้มากขึ้น จนแพร่กระจายเข้าไปในผนังเซลล์ของแบคทีเรียได้ และ ออกฤทธิ์ทำลายเซลล์ของแบคทีเรีย อีกทั้งปฏิกิริยาทางแสง (photocatalyst) ของอนุภาคนาโนกับรังสีอัลตราไวโอเล็ต (แสงยูวี) ปฏิกิริยาเหล่านี้ส่งผลทำลายโครงสร้างเซลล์แบคทีเรียให้ไม่สามารถเจริญเติบโตและเสื่อมสลายไปในที่สุด

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์

- 3.1.1.1 เครื่องวัดมัลติมิเตอร์
- 3.1.1.2 เครื่อง MQ-500 Full Spectrum PAR Meter
- 3.1.1.3 กระถางต้นไม้สังกะสี เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 10 ซม.
- 3.1.1.4 สายวัดขั้วไฟฟ้า double-ended
- 3.1.1.5 แผ่นขั้วไฟฟ้าพอลิเมอร์ผสมคาร์บอน
- 3.1.1.6 ต้นพลูด่าง
- 3.1.1.7 หลอด Fluorescent ชนิด day light 4 หลอด
- 3.1.1.8 บีกเกอร์
- 3.1.1.9 Micropepette
- 3.1.1.10 กระบอขวดวง

3.1.2 สารเคมี

- 3.1.2.1 สารละลายสูตร Hoagland
- 3.1.2.2 อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ ความเข้มข้น 20 mg/L
- 3.1.2.3 อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ ความเข้มข้น 10 mg/L

3.2 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้าในระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์

3.2.1 การศึกษาระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์ในสารละลาย Hoagland

3.2.1.1 การศึกษาความเจือจางของสารละลาย Hoagland ในระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์ต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้า

นำสารละลาย Hoagland เจือจางในน้ำประปาจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังโดยใช้กระบอขวดวงเป็นตัววัดปริมาณเพื่อผสมเป็นอาหารเลี้ยง ทำการผสมโดยใช้อัตราส่วน 3 อัตราส่วนคือ 1. น้ำประปา 100 มิลลิลิตร ต่อ สารละลาย Hoagland 200 มิลลิลิตร (100:200) 2. น้ำประปา 150 มิลลิลิตร ต่อ สารละลาย Hoagland 150 มิลลิลิตร (150:150) และ 3. น้ำประปา 200 มิลลิลิตร ต่อ สารละลาย Hoagland 100 มิลลิลิตร (200:100) การเตรียมสารละลาย Hoagland 1 ลิตรสำหรับการเจือจางสามารถเตรียมได้จากส่วนผสมในตารางที่ 3.1 ทำการละลายในน้ำประปา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงส่วนผสมสำหรับเตรียมสารละลาย Hoag's land ในน้ำ 1 ลิตร

Hoagland Solution	mg/L
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	118.05
KNO_3	50.55
KH_2PO_4	6.81
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	24.65
Fe-EDTA (13.2% Fe)	3.00
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.95
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.20
$\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	3.00
H_2BO_3	2.50
$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	0.07

จากนั้นทำการปรับค่า pH คงที่เท่ากับ 5.5 โดยเครื่อง OHAUS®, Starter3100 แล้วนำสารละลายทั้ง 3 อัตราส่วนที่เตรียมไว้ในกระถางสังกะสีโดยมีปริมาตรสารละลายรวมในกระถางเท่ากับ 300 มิลลิลิตร หลังจากนั้นนำต้นพลูด่างที่มีขนาดลำต้นและใบเท่ากันมาปลูกลงในแต่ละกระถาง บันทึกการเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดัน ตามหัวข้อ 3.3 และเปรียบเทียบผลที่วัดได้จากทั้ง 3 อัตราส่วน เปรียบเทียบอัตราส่วนที่มีความสามารถทางไฟฟ้าที่ดีที่สุด

3.2.1.2 การศึกษาช่วงเวลาที่เหมาะสมในระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์ต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้า

ทำการวัดกระแสและแรงดันจากระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์ ที่มีอัตราส่วนของน้ำประปา ต่อ สารละลาย Hoagland คือ 100:200 150:150 และ 200:100 ทุกๆ 2 วันเป็นระยะเวลา 33 วันและวัดในช่วงเวลาแตกต่างกัน 2 ช่วงคือ 9:00 น. และ 15:00 น. เพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของการผลิตกระแสไฟฟ้าและแรงดันของระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์

3.2.1.3 การศึกษาผลกระทบการเติมอนุภาคนาโนในระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์

1.) การศึกษาผลกระทบของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์

นำสารละลายที่มีอัตราส่วนของ น้ำประปา ต่อ สารละลาย Hoagland คือ 100:200 150:150 และ 200:100 มาผสมกับอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 20 mg/L โดยใช้ micropipette หยดลงไปในการละลายทั้ง 3 อัตราส่วน และทำการวัดค่าตามหัวข้อที่ 3.3 เพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของการผลิตกระแสไฟฟ้าและแรงดันของระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

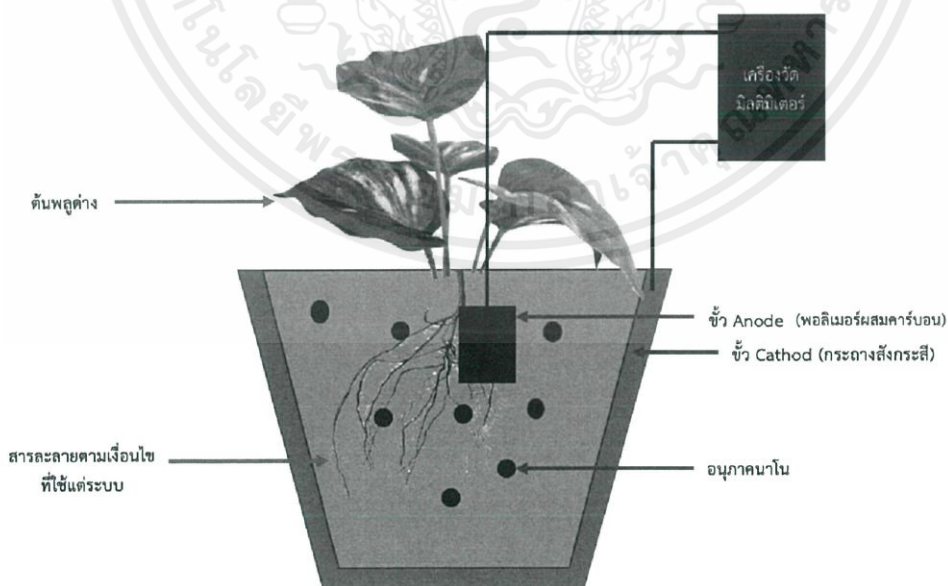
2.) การศึกษาผลกระทบของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์

นำสารละลายที่มีอัตราส่วนของ น้ำประปา ต่อ สารละลาย Hoagland คือ 100:200 150:150 และ 200:100 มาผสมกับอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 10 mg/L โดยใช้ micropipette หยดลงไปในการละลายทั้ง 3 อัตราส่วน และทำการวัดค่าตามหัวข้อที่ 3.3 เพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของการผลิตกระแสไฟฟ้าและแรงดันของระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์

3.3 การออกแบบการวัดและรูปแบบระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์

3.3.1 การวัดค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าในระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์

หลังจากนำต้นพลูด่างมาปลูกลงในกระถางแล้ว ทำการต่อสายวัดขั้วไฟฟ้า double-ended คีบที่ขอบของกระถาง (โดยใช้เป็นขั้ว cathode) และ นำสายวัดต่อเข้ากับแผ่นขั้วไฟฟ้าพอลิเมอร์ผสมคาร์บอน (โดยใช้เป็นขั้ว anode) อยู่บริเวณรากใต้ต้นพลูด่าง สามารถวัดการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้จากมัลติมิเตอร์ที่ต่อเข้ากับสายขั้วบวกและขั้วลบจากภายนอกของระบบ ภายใต้ห้องทดลองที่มีอุณหภูมิคงที่ 25 C° และความเข้มแสงที่ให้คงที่เฉลี่ยเป็น $36 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ หรือ 9 W m^{-2} (Quantum meter with separate sensor, Model MQ-200) ทำการวัดโดยมัลติมิเตอร์ (Intelligent Digital Multimeters, UT71D) ซึ่งค่าที่ทำการวัดมาจากค่าเฉลี่ยของตัวอย่างในแต่ละเงื่อนไขที่กำหนด 3 ตัวอย่างที่ซ้ำกัน แสดงรูปแบบการตรวจวัดระบบไฮโดรโปนิคส์ในสารละลายเจือจาง Hoagland ที่แตกต่างกันในภาพที่ 3.1



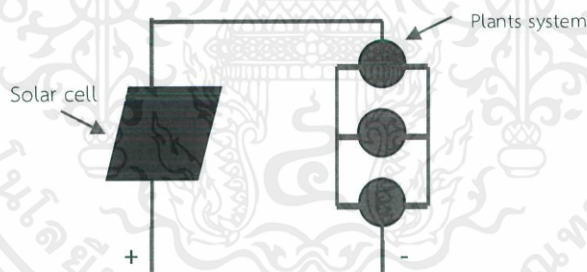
ภาพที่ 3.1 แสดงการตรวจวัดระบบไฮโดรโปนิคส์ในสารละลายเจือจาง Hoagland ที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการวัดและบันทึกค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบในช่วงเวลา 9:00 น. และ 16:00 น. จากกระบวนการสังเคราะห์แสงที่ส่งต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้าภายใต้ระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิกส์ในสารละลาย Hoagland ที่ความเงื่อนต่างต่างกัน และ ทำการเติมอนุภาคนาโน TiO_2 และ ZnO ในระบบ เป็นระยะเวลา 30 วัน ตามที่ได้กำหนดเงื่อนไขไว้ในหัวข้อ 3.1 สำหรับ การศึกษาการผลิตพลังงานไฟฟ้า

3.3.2 การออกแบบเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการผลิตกระแสและแรงดันไฟฟ้าของระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิกส์ร่วมกับโซลาร์เซลล์

เลือกเงื่อนไขความเงื่อนของสารละลาย Hoagland ที่ดีที่สุด และ ช่วงเวลาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์แสงในการทดลอง คือ อัตราส่วนของน้ำประปา 100 ต่อ Hoagland 200 และ ช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับการวัดคือ 9:00 น. โดยใช้วิธีการต่อแบบผสมจากการต่อระบบไฮโดรโปนิกส์แบบขนานเข้าด้วยกัน 3 ระบบเพื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าภายในระบบ เนื่องจากการต่อระบบแบบอนุกรมเข้าด้วยกันจะทำให้ค่าความต้านทานภายในระบบสูงมากทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้ลดลง จากนั้นทำการต่อแบบอนุกรมกับเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 6V, 0.6W แบบขนานเข้าไปแสดงดังภาพที่ 4.4 โดยกำหนดค่าคงที่ภายในห้องทดลองที่มีอุณหภูมิคงที่ $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ และความเข้มแสงที่ให้คงที่เฉลี่ยเป็น $36\ \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ หรือ $9\ \text{W m}^{-2}$ (Quantum meter with separate sensor, Model MQ-200) ทำการวัดโดยมัลติมิเตอร์ (Intelligent Digital Multimeters, UT71D) ทำการบันทึกผลการผลิตกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเป็นระยะเวลา 60 วัน



ภาพที่ 3.2 แสดงการต่อวงจรสำหรับการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิกส์ร่วมกับโซลาร์เซลล์

บทที่ 4

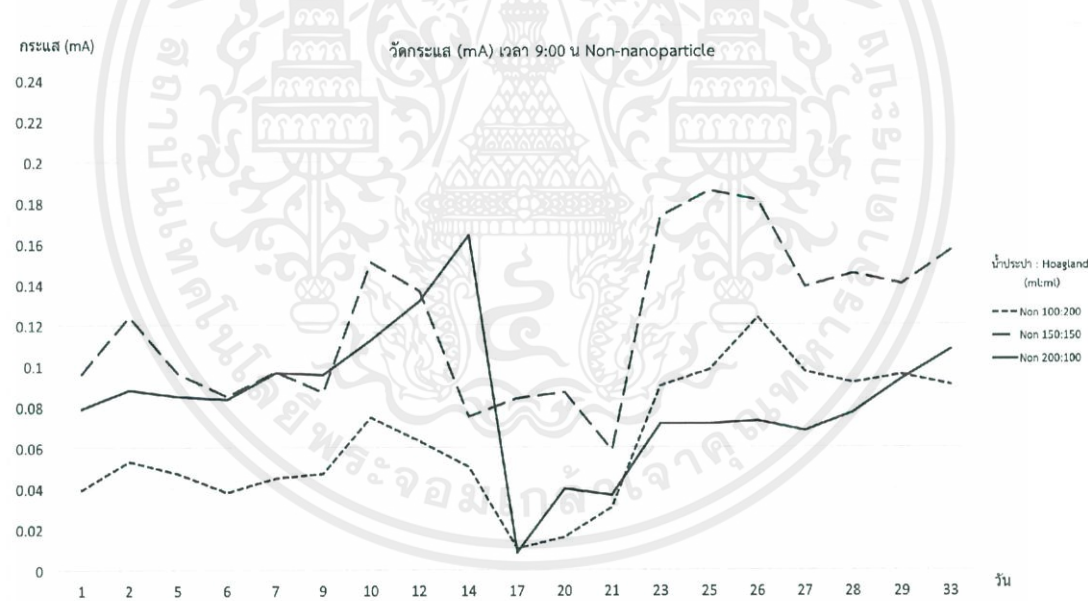
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

จากการศึกษางานวิจัยในหัวข้อเรื่อง “การศึกษาประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าจากระบบการปลูกพืชในสภาวะที่เติมอนุภาคนาโน” โดยบันทึกค่าทางไฟฟ้าที่ผลิตจากพืชได้แก่ ค่าแรงดันไฟฟ้า (หน่วย V) และค่ากระแสไฟฟ้า (หน่วย mA)

4.1 การบันทึกและวิเคราะห์ของผลปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้าในระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์

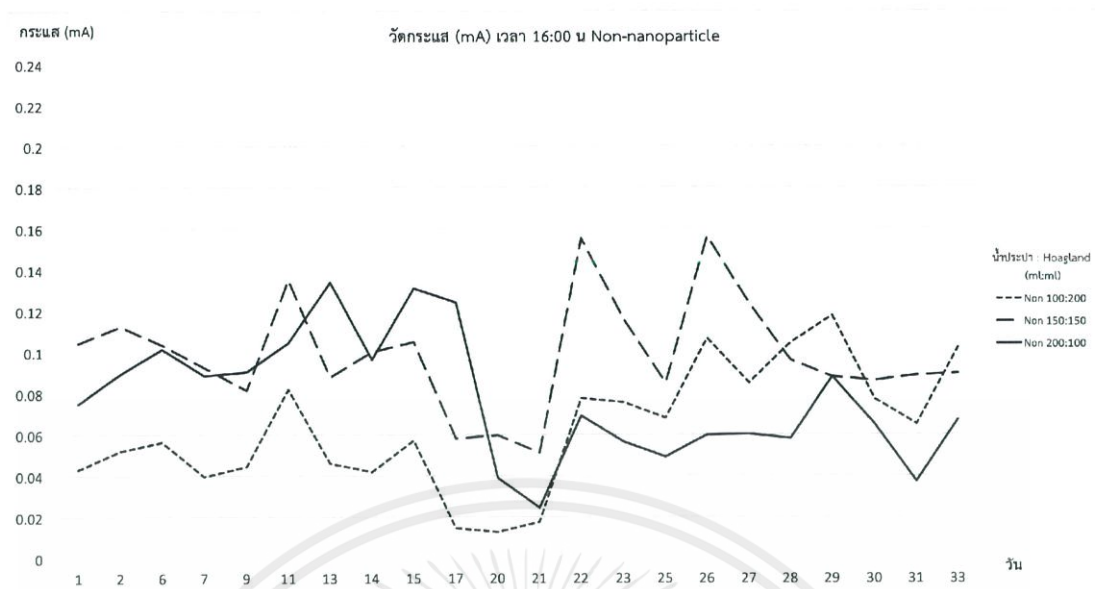
4.1.1 ระบบที่ไม่ได้เติมอนุภาคนาโน (non-nanoparticles)

ภาพที่ 4.1 ค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้า ณ เวลา 9:00 น. และ 16:00 น. (ในปริมาณของ สารละลาย Hoagland's : น้ำประปา หน่วยมิลลิลิตร) ของระบบที่ไม่เติมอนุภาคนาโน

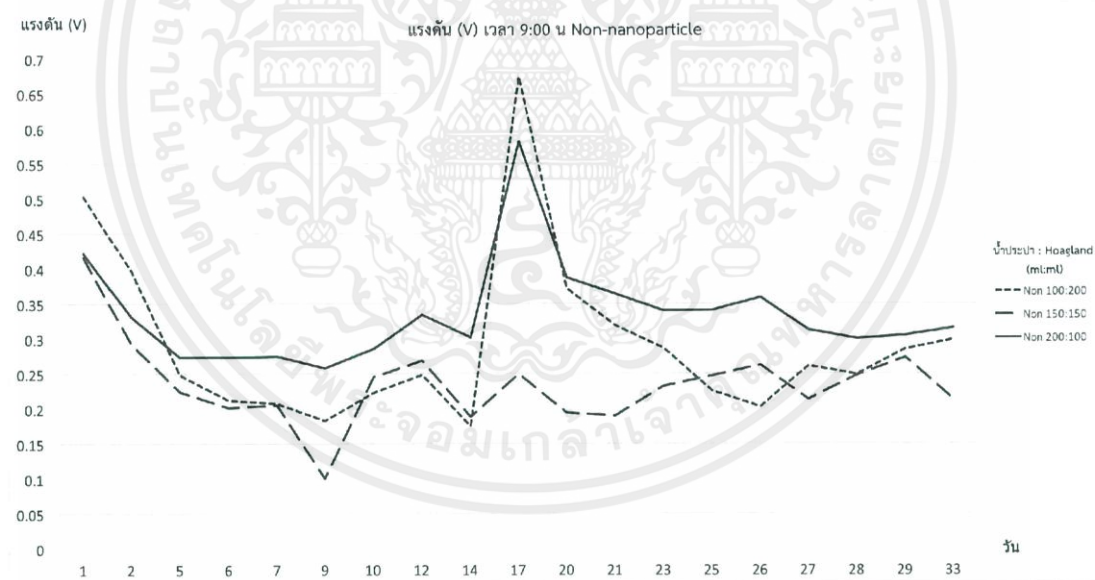


(ก) กราฟกระแส (mA) เวลา 9:00 น. ในระบบที่ไม่เติมอนุภาคนาโน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

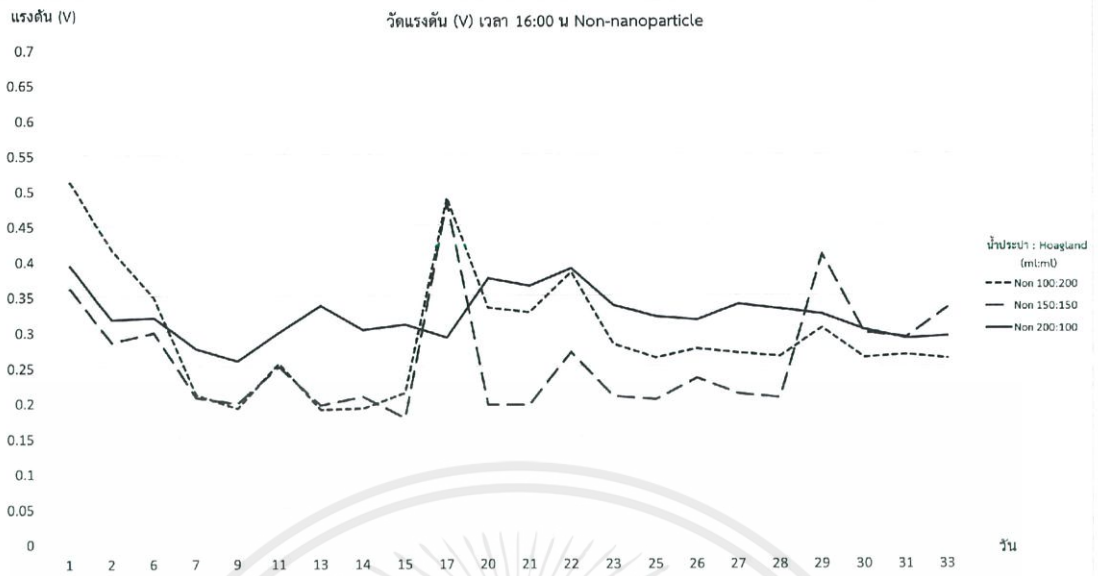


(ข) กราฟกระแส (mA) เวลา 16:00 น. ในระบบที่ไม่เติมอนุภาคนาโน



(ค) กราฟแรงดัน (V) เวลา 9:00 น. ในระบบที่ไม่เติมอนุภาคนาโน

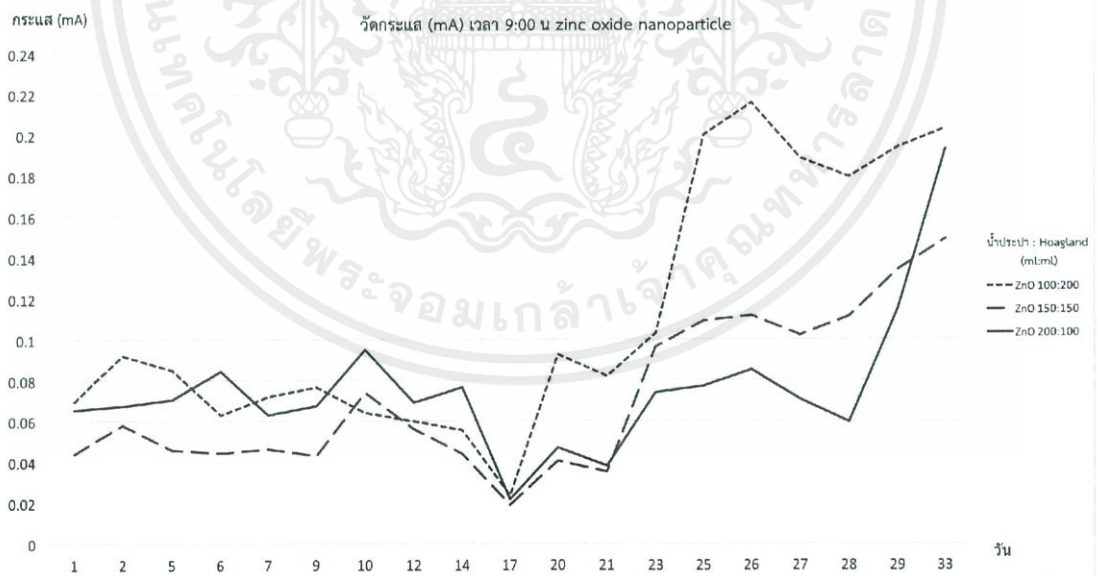
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง) กราฟแรงดัน (V) เวลา 16:00 น. ในระบบที่ไม่เติมอนุภาคนาโน

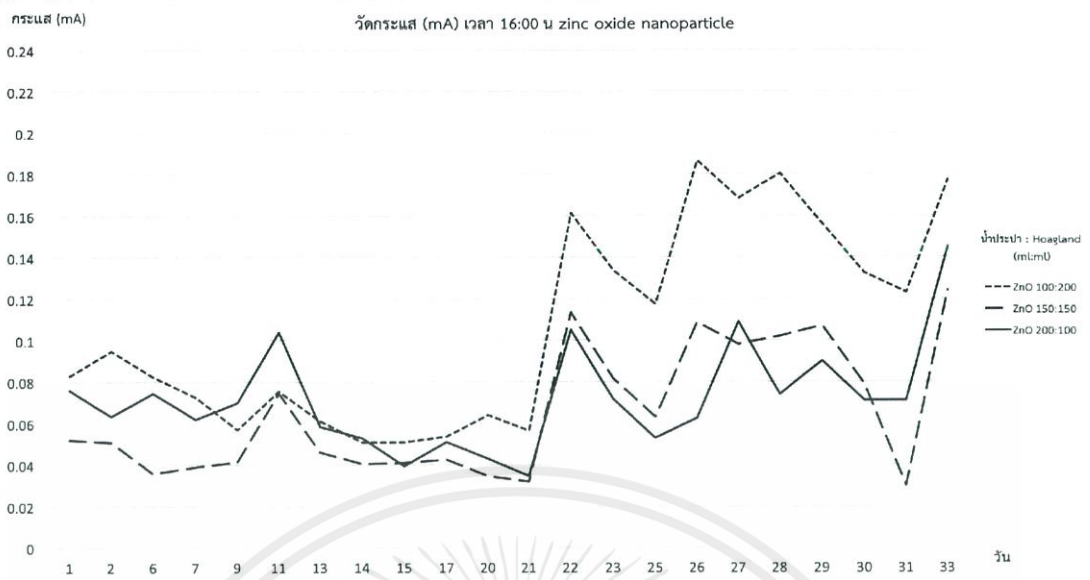
4.1.2 ระบบที่เติมอนุภาคนาโน ZnO

ภาพที่ 4.2 ค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้า ณ เวลา 9:00 น. และ 16:00 น. (ในปริมาณของ สารละลาย Hoagland's : น้ำประปา หน่วยมิลลิลิตร) ของระบบที่เติมอนุภาคนาโน ZnO

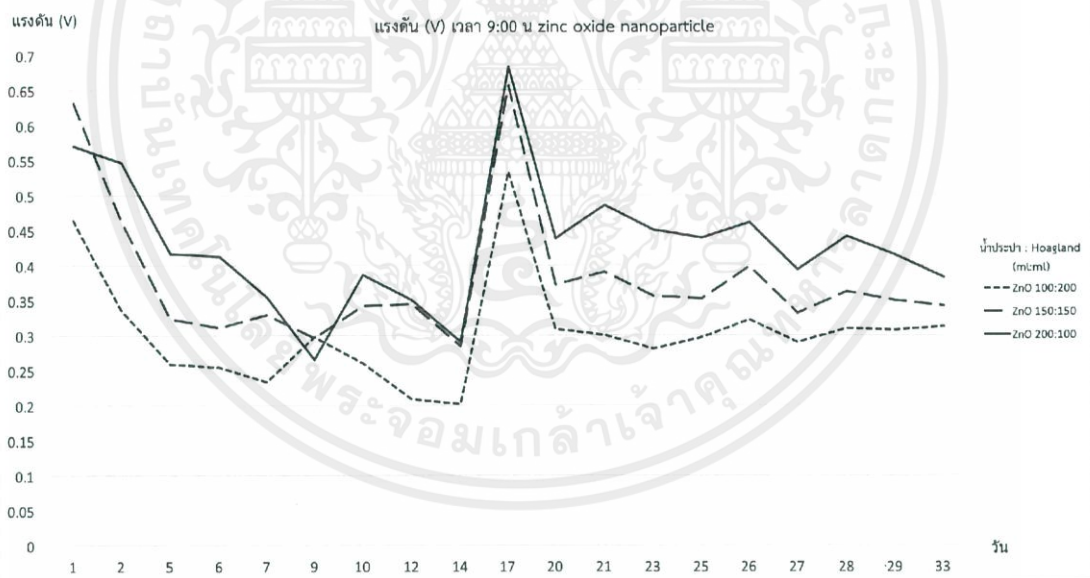


(ก) กราฟกระแส (mA) เวลา 9:00 น. ในระบบที่เติมอนุภาคนาโน ZnO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

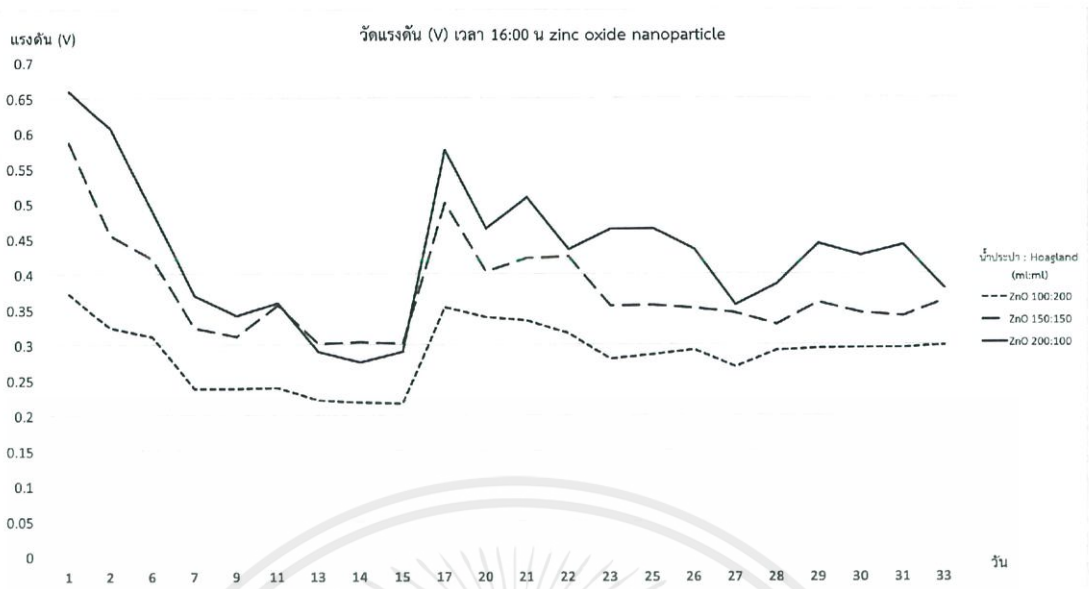


(ข) กราฟกระแส (mA) เวลา 16:00 น. ในระบบที่เติมอนุภาคนาโน ZnO



(ค) กราฟแรงดัน (V) เวลา 9:00 น. ในระบบที่เติมอนุภาคนาโน ZnO

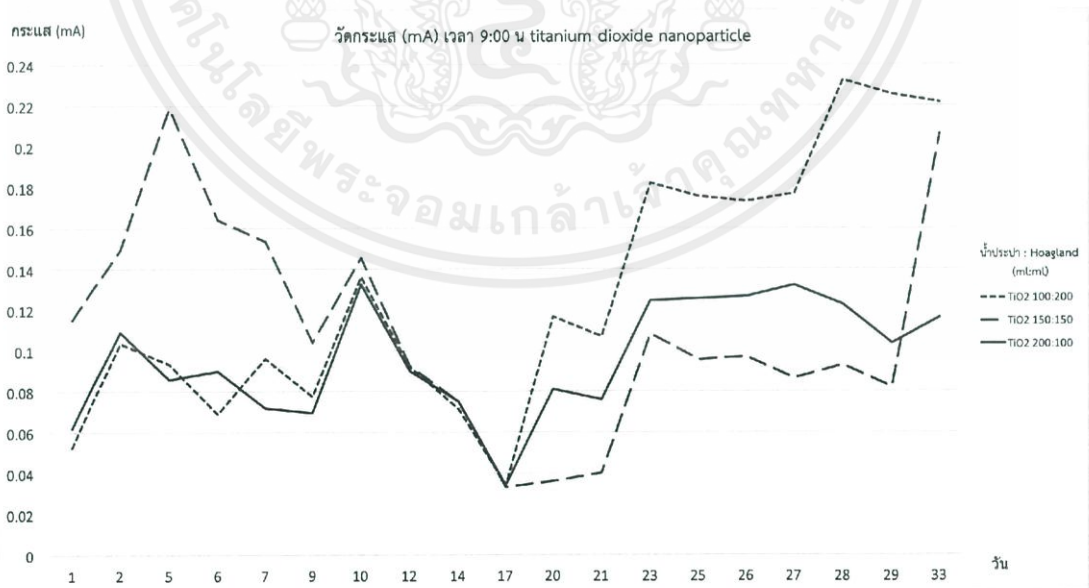
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง) กราฟแรงดัน (V) เวลา 16:00 น. ในระบบที่เติมอนุภาคนาโน ZnO

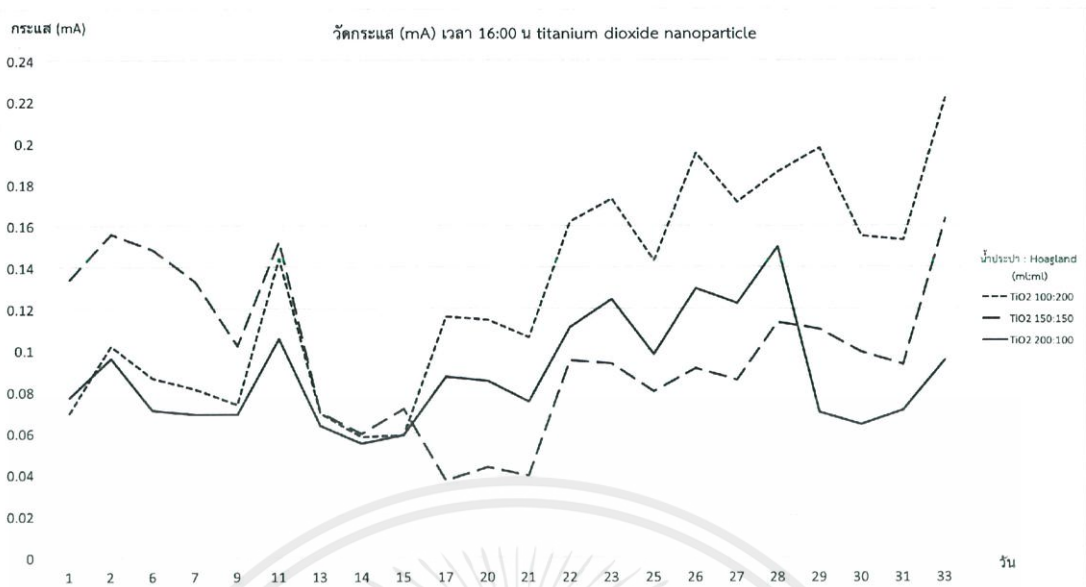
4.1.3 ระบบที่เติมอนุภาคนาโน TiO₂

ภาพที่ 4.3 ค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้า ณ เวลา 9:00 น. และ 16:00 น. (ในปริมาณของ สารละลาย Hoagland's : น้ำประปา หน่วยมิลลิลิตร) ของระบบที่เติมอนุภาคนาโน TiO₂

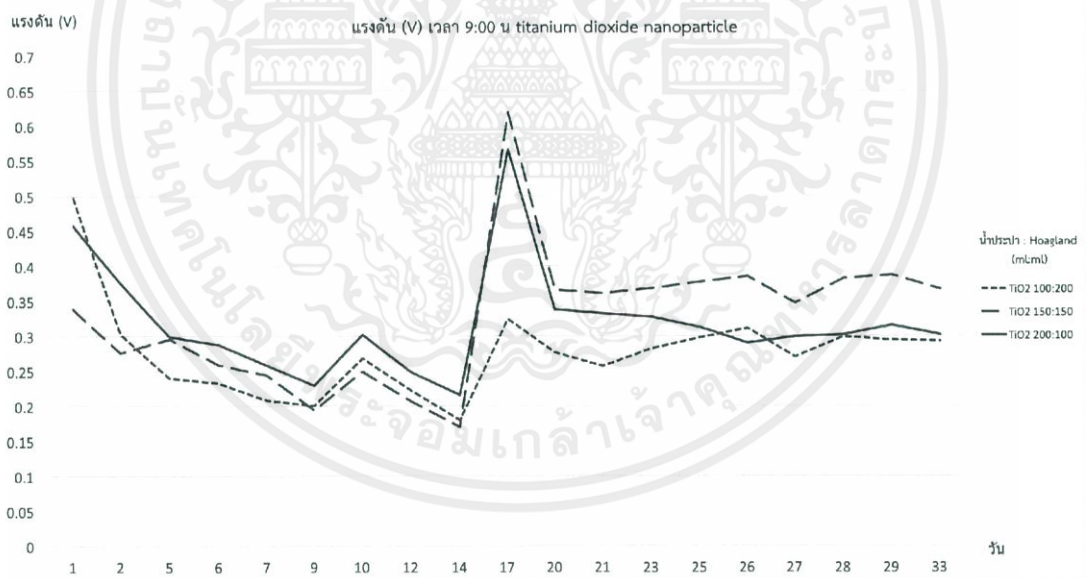


(ก) กราฟกระแส (mA) เวลา 9:00 น. ในระบบที่เติมอนุภาคนาโน TiO₂

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

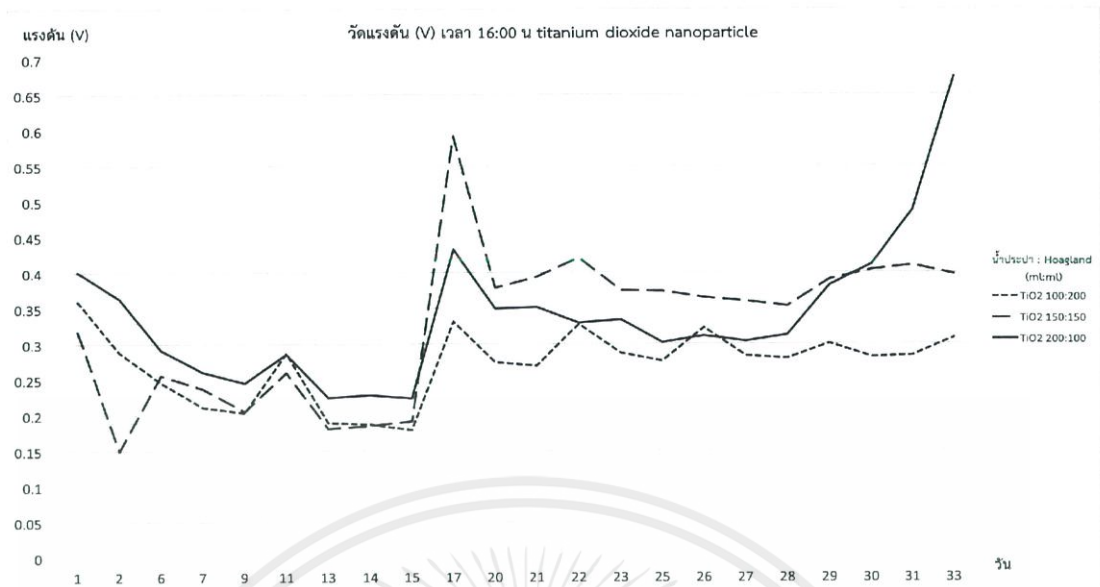


(ข) กราฟกระแส (mA) เวลา 16:00 น. ในระบบที่เติมอนุภาคนาโน TiO₂



(ค) กราฟแรงดัน (V) เวลา 9:00 น. ในระบบที่เติมอนุภาคนาโน TiO₂

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง) กราฟแรงดัน (V) เวลา 16:00 น. ในระบบที่เติมอนุภาคนาโน TiO_2

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่าเฉลี่ยการผลิตกระแสและแรงดันไฟฟ้าของระบบ

(ก) ตารางค่าเฉลี่ยการผลิตกระแสและแรงดันไฟฟ้าในระบบที่ไม่เติมอนุภาคนาโน ณ เวลา 9:00 น. และ 16:00 น.

ค่าเฉลี่ยการผลิตกระแสและแรงดันไฟฟ้า	ระบบที่ไม่เติมอนุภาคนาโน			
	9:00 น.		16:00 น.	
	อัตราส่วนความเข้มข้นน้ำประปา : Hoagland	ค่าเฉลี่ยกระแส (mA)	ค่าเฉลี่ยแรงดัน (V)	ค่าเฉลี่ยกระแส (mA)
100:200	0.0630	0.2629	0.0630	0.2454
150:150	0.0708	0.2249	0.0788	0.2297
200:100	0.0833	0.3244	0.0776	0.3216

(ข) ตารางค่าเฉลี่ยการผลิตกระแสและแรงดันไฟฟ้าในระบบที่เติมอนุภาคนาโน ZnO ณ เวลา 9:00 น. และ 16:00 น.

ค่าเฉลี่ยการผลิตกระแสและแรงดันไฟฟ้า	ระบบที่เติมอนุภาคนาโน ZnO			
	9:00 น.		16:00 น.	
	อัตราส่วนความเข้มข้นน้ำประปา : Hoagland	ค่าเฉลี่ยกระแส (mA)	ค่าเฉลี่ยแรงดัน (V)	ค่าเฉลี่ยกระแส (mA)
100:200	0.1222	0.3165	0.1063	0.2872
150:150	0.0989	0.3477	0.0853	0.3350
200:100	0.0912	0.4335	0.0819	0.4298

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (ค) ตารางค่าเฉลี่ยการผลิตกระแสและแรงดันไฟฟ้าในระบบที่เติมอนุภาคนาโน TiO_2 ณ เวลา 9:00 น. และ 16:00 น.

ค่าเฉลี่ยการผลิตกระแสและแรงดันไฟฟ้า	ระบบที่เติมอนุภาคนาโน TiO_2			
	9:00 น.		16:00 น.	
อัตราส่วนความเข้มข้นน้ำประปา : Hoagland	ค่าเฉลี่ยกระแส (mA)	ค่าเฉลี่ยแรงดัน (V)	ค่าเฉลี่ยกระแส (mA)	ค่าเฉลี่ยแรงดัน (V)
100:200	0.1340	0.3601	0.1290	0.3316
150:150	0.1245	0.3668	0.0987	0.3390
200:100	0.0986	0.4264	0.0885	0.3411

การวิเคราะห์ความแตกต่างของอัตราความเจือจางของ Hoagland's solution ต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้าในระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์

จากการศึกษาการทดลองที่ 1 ได้บันทึกผลจากภาพที่ 4.1 4.2 และ 4.3 แสดงระยะเวลาในการทดลอง 30 วันเพื่อบันทึกผลของการผลิตกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าในระบบ โดยกำหนดเงื่อนไขการผลิตพลังงานไฟฟ้าตามความแตกต่างของอัตราส่วนน้ำประปา ต่อ สารละลาย Hoagland : 100:200 , 150:150 และ 200:100 จากตารางที่ 4.1 พบว่า ทุกระบบที่มีอัตราส่วนน้ำประปา 200 ต่อ สารละลาย Hoagland 100 มีค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าสูงกว่าระบบที่มีอัตราส่วนน้ำประปา 100 ml สารละลาย Hoagland 200 ml ในทางตรงกันข้ามค่าเฉลี่ยการผลิตกระแสไฟฟ้าในระบบที่มีอัตราส่วนน้ำประปา 100 ml ต่อ Hoagland 200 ml มีค่าสูงกว่าระบบที่มีอัตราส่วนน้ำประปา 200 ml ต่อ Hoagland 100 ml เนื่องจากในอัตราส่วนของสารละลาย Hoagland ที่สูง จะมีปริมาณของไอออนอยู่มากซึ่งเป็นสารอิเล็กโทรไลต์ที่มีความแข็งแรงมากทำให้การผลิตกระแสในสารละลายเพิ่มมากขึ้นตาม ดังนั้น เมื่ออัตราส่วนของสารละลาย Hoagland ที่เพิ่มขึ้นทำให้การผลิตกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตาม

การวิเคราะห์ผลของการสังเคราะห์แสงจากการบันทึกผลในช่วงเวลา 9:00 น. และ 16:00 น. ต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้าในระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์

แสงมีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการสังเคราะห์แสงสำหรับใช้ในการเจริญเติบโตของพืชในงานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจากพืช โดยกำหนดเงื่อนไขการให้แสง 7:00 น. ถึง 18:00 น. ทำการวัดเป็นเวลา 33 วัน ในช่วงเวลา: 9:00 น. และ 16:00 น. จากตารางที่ 4.1 พบว่าการผลิตกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าสูงสุด ณ เวลา 9:00 น. ในทุกระบบ และต่ำสุด ณ เวลา 16:00 น. เนื่องจาก แสงเป็นตัวกระตุ้นเพื่อให้พืชเกิดการปล่อยสารชีวมวลบริเวณราก ช่วงระยะเวลาที่ได้รับแสงมีผลต่อกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชแต่ละชนิดที่ต่างกันเพื่อใช้ในการผลิตสารชีวมวลของพืชและการผลิตไฟฟ้าในระบบ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับพื้นฐานทางสรีรวิทยาของพืชซึ่งมีความเฉพาะเจาะจง ทำให้ช่วงเวลาที่เกิดการผลิตแรงดันและกระแสสูงสุดแตกต่างกันตามความเฉพาะของ

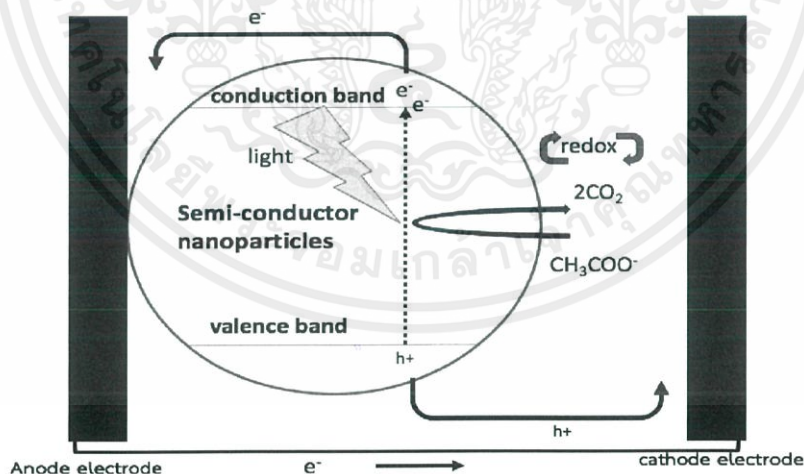
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พืช การผลิตพลังงานไฟฟ้าขึ้นอยู่กับสรีรวิทยาของพืชแต่ละชนิดสำหรับการสังเคราะห์สารประกอบอินทรีย์ การขนส่งสารประกอบไปยังราก และการปลดปล่อยสารชีวมวลออกจากราก (bombelli และ คณะ, 2013 [10])

จึงสรุปได้ว่าระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิกส์โดยใช้พื้ต่างสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าสูงสุด ณ ช่วงเวลา 9:00 น. ซึ่งมีช่วงเวลาที่ได้ระบบแสงประมาณ 2 ชั่วโมง จากการศึกษาช่วงเวลาในการสังเคราะห์แสงที่แตกต่างกัน

การวิเคราะห์ผลของการเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์และอนุภาคนาโนซิงออกไซด์ที่ส่งผลต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้าในระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิกส์

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของพลังงานกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าจากเงื่อนไขการเติมอนุภาคนาโน ZnO และ TiO₂ จากตารางที่ 4.1 พบว่าการผลิตกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของทุกระบบเพิ่มขึ้น จากการเติม TiO₂ และ ZnO ตามลำดับ เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจากการเติมอนุภาคนาโนที่มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสมีหลักการสำคัญคือ เมื่อโฟตอนจากแสงตกกระทบและถูกดูดกลืนโดยอนุภาคนาโนที่สัมผัสกับสารอินทรีย์ทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นไปยังแถบการนำ (conduction band) อย่างรวดเร็ว บริเวณ รอยต่อของอนุภาคนาโนและสารอินทรีย์ ประจุลบที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่เข้าสู่ขั้วแอโนดและประจุบวกจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วแคโทดเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์สำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าต่อไป



ภาพที่ 4.4 ภาพประกอบกระบวนการถ่ายโอนประจุจากกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสจากการกระตุ้นด้วยแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การบันทึกและวิเคราะห์ผลการศึกษาประสิทธิภาพการผลิตกระแสและแรงดันไฟฟ้าของระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิกส์ร่วมกับโซลาร์เซลล์

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าเฉลี่ยการผลิตกระแสและแรงดันไฟฟ้าของระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิกส์ร่วมกับโซลาร์เซลล์

การผลิตพลังงานไฟฟ้า	ค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้า (mA)	ค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้า (V)
Solar cell	0.797	3.215
Solar cell + พืช	0.794	3.569
Solar cell + พืช +TiO ₂	0.790	3.604
Solar cell + พืช +ZnO	0.782	3.583

การวิเคราะห์การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิกส์ในเงื่อนไขต่างๆ ร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์

จากการบันทึกผลการทดลองพบว่าการเพิ่มระบบไฮโดรโปนิกส์เข้าไปในเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้การผลิตแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากเดิมทุกระบบแสดงในตารางที่ 4.2 ระบบที่เติม TiO₂, ระบบที่เติม ZnO และระบบที่ไม่เติมอนุภาคนาโน ซึ่งมีแรงดันเพิ่มขึ้นเป็น 12.1%, 11.5% และ 11.1% ตามลำดับ ในส่วนการผลิตกระแสไฟฟ้าในระบบทั้ง 4 มีค่าที่ลดลงเล็กน้อย ซึ่งระบบที่ผลิตกระแสไฟฟ้าลดลงจากน้อยไปมากได้แก่ ระบบที่ไม่เติมอนุภาค, ระบบที่เติม TiO₂ และ ระบบที่เติม ZnO ซึ่งมีกระแสไฟฟ้าลดลงไปเท่ากับ 0.38%, 0.88% และ 1.91% ตามลำดับ แรงดันที่เพิ่มขึ้นมากที่สุดจากเงื่อนไขการเติมTiO₂ เข้าไปในระบบ เนื่องจากระบบที่เติมอนุภาคนาโนแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจากการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสทำให้ประจุในระบบเพิ่มขึ้น แต่กระแสไฟฟ้าในระบบลดลงจากกรณีเดียวกับการเติมกากมะพร้าว และ กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าลดลงเล็กน้อยแทบไม่แตกต่างจากโซลาร์เซลล์เปล่าเนื่องจากการเกิดแรงดันผสมระหว่างฝั่งแอโนดและแคโทดในระบบที่ไม่มีการแยกสารละลาย จึงสรุปได้ว่าการเติมกากมะพร้าวและอนุภาคนาโนเข้าไปในระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิกส์ทำให้แรงดันไฟฟ้าของระบบเพิ่มเพิ่มขึ้น และอาจทำให้กระแสไฟฟ้าลดลงเพียงเล็กน้อย

สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

5.1 สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้าของแต่ละเงื่อนไขที่กำหนด ผู้วิจัยได้แบ่งการสรุปออกเป็น 3 ส่วนตามการทดลองทั้ง 3 แบบ การทดลองในส่วนแรกทำการเปรียบเทียบผลการผลิตพลังงานไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขอาหารเลี้ยงจากอัตราส่วนน้ำประปา ต่อ สารละลาย Hoagland ที่แตกต่างกัน พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของสารละลาย Hoagland ในระบบ กระแสไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นและในทางกลับกันแรงดันไฟฟ้าในระบบจะลดลงเนื่องจากมีปริมาณไอออนที่มากในสารละลาย Hoagland ซึ่งมีความเป็นอิเล็กโทรไลต์ที่แข็งแรงทำให้เกิดการผลิตกระแสที่เพิ่มมากขึ้น อีกทั้งยังมีความสำคัญต่อพืชเพื่อใช้ในการเจริญเติบโตด้วย การทดลองในส่วนที่สองทำการเปรียบเทียบช่วงเวลาในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช โดยช่วงเวลาที่เกิดการผลิตกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าได้มากที่สุดคือ 9:00 น. หากคิดเป็นระยะเวลาที่พุ่มไม้ได้รับแสงคือ 3 ชั่วโมง อย่างไรก็ตามกระบวนการสังเคราะห์แสงนั้นขึ้นอยู่กับสรีรวิทยาของพืชแต่ละชนิดซึ่งใช้ในการผลิตสารชีวมวลและผลิตพลังงานไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ จึงสรุปได้ว่าปัจจัยทางสรีรวิทยาของพืชส่งผลต่อการผลิตกระแสไฟฟ้าในการทดลองนี้อยู่ 3 อย่าง คือ 1.การสังเคราะห์สารประกอบอินทรีย์ 2.การขนส่งสารประกอบไปยังราก และ 3.การปลดปล่อยสารชีวมวลออกจากราก (bombelli และ คณะ , 2013 [10]) เพื่อนำไปผลิตพลังงานไฟฟ้าในกระบวนการต่อไป ในส่วนสุดท้ายของการทดลองแรกเป็นการเติมอนุภาคนาโนเพื่อศึกษาผลของการผลิตพลังงานไฟฟ้า โดยทำการเติมอนุภาคนาโน TiO_2 และ ZnO ปริมาณ 20mg/l และ 10mg/l เข้าไปในเงื่อนไขเดิมซึ่งทำการผลิตกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทุกเงื่อนไขสารละลายโดยการผลิตพลังงานไฟฟ้า TiO_2 มีค่าสูงกว่าของ ZnO เนื่องจากอนุภาคนาโน TiO_2 ตอบสนองต่อหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ให้แสงในห้องทดลองได้ดีกว่า ZnO จึงสรุปได้ว่าการเติมอนุภาคนาโนสามารถเพิ่มกระแสและแรงดันไฟฟ้าในระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์ได้ การทดลองที่ 2 การศึกษาประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่าค่าของกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากทุกเงื่อนไขเมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์เปล่า พบว่ามีค่าลดลงเล็กน้อยแทบไม่แตกต่างกับกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์เปล่าเลย แต่ค่าของแรงดันไฟฟ้าในทุกเงื่อนไขเพิ่มขึ้นใน ระบบที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียม , ระบบที่เติมอนุภาคนาโนซิงออกไซด์ และ ระบบที่ไม่เติมอนุภาคนาโนคิดเป็น 12.1%, 11.5% และ 11.1% ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มสารอินทรีย์เข้าไปในระบบและการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสอนุภาคนาโนที่เติมเข้าไป จึงสรุปได้ว่า การใช้ระบบไฮโดรโปนิคส์ร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้น หากต้องการนำงานวิจัยชิ้นนี้ไปต่อยอดในอนาคตผู้วิจัยคิดว่า 1.ควรเพิ่มส่วนของเมมเบรนเลือกผ่านประจุ ion exchange membrane เข้าไปในระบบเพื่อป้องกันการรวมตัวของแรงดันไฟฟ้าระหว่างส่วนของแอโนดและแคโทดทำให้ค่าของกระแสและแรงดันไฟฟ้าลดลง 2.ส่วนของขั้วไฟฟ้าทั้งแอโนดและอิเล็กโทรดควรใช้ขั้วไฟฟ้าที่สามารถทนต่อการกัดกร่อนและมีประสิทธิภาพในการนำไฟฟ้าที่สูง ภายใต้

สภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสูงหรือต้องแช่ขั้วไฟฟ้าไว้ในน้ำ 3.การใช้อนุภาคนาโนร่วมกับระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิกส์นี้ ควรเคลือบอนุภาคนาโนที่มีคุณสมบัติในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสกับขั้วทางฝั่งแอโนด เพื่อให้การสัมผัสพื้นผิวของอนุภาคนาโนกับขั้วไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น และระยะทางที่อิเล็กตรอนที่ใช้ในการเคลื่อนที่สั้นลง อีกทั้งยังป้องกันการรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนและสารประกอบอื่นที่สามารถแย่งอิเล็กตรอนได้ 4. ในส่วนกระถางเลี้ยงควรใช้วัสดุที่มีความโปร่งใสเพื่อให้แสงส่องผ่านได้มากขึ้นเพื่อเพิ่มพื้นที่การได้รับแสงให้กับอนุภาคนาโนและสารชีวมวลสำหรับปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพืชจำเป็นต้องใช้ความรู้ในหลากหลายสาขาวิชา เช่น จุลชีววิทยา เคมีวิทยา วิศวกรรมศาสตร์ และ ฟิสิกส์สมัยใหม่ เพื่อพัฒนาต่อไปให้สามารถนำไปใช้ได้จริงในอนาคต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานกระทรวงพลังงาน. 2561. **สถานการณ์พลังงานของประเทศไทยเดือน มกราคม-กรกฎาคม 2561**. กรุงเทพฯ : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานกระทรวงพลังงาน
- [2] กรมส่งเสริมการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2558. **การปลูกพืชไฮโดรโปนิคส์**. กรุงเทพฯ. ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย จำกัด
- [3] ณปภัช พิมพดี. 2560. **เซลล์ไฟฟ้าเคมี**. [Online]. Available: <http://www.scimath.org/lesson-chemistry/item/7181-2017-06-05-14-40-23>
- [4] ณัฐวดี เนียมจันทร์. 2553. **ผลของซิงค์ออกไซด์อนุภาคขนาดนาโนรูปทรงต่างๆที่อยู่บนพื้นผิวผ้าด้วยเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าเพื่อสมบัติทางแสงยูวีและด้านทาแบคทีเรีย**. วิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ สาขาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์. บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยศิลปากร
- [5] ธนากร รัตนพันธุ์, มณีรัตน์ องค์กรตัน องค์กรณดี และ ศิริมา ปัญญาเมธิกุล. 2560. “การประเมินความสามารถของต้นไม้ประดับในการดักจับอนุภาคขนาดเล็กในอาคาร.” **วารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่** 24(3): 69-80
- [6] พวงรัตน์ ขจัดวัชยานุกุล. 2557. “ไททานเนียมไดออกไซด์และโลหะออกไซด์”. หน้า 124-148 ใน **นาโนเทคโนโลยีเพื่อสิ่งแวดล้อม พิชญ์โลก : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร**
- [7] ศูนย์โอโซนและรังสี กองบริการดิจิทัลอุตุนิยมิวิทยา กรมอุตุนิยมิวิทยา. 2561. **UV Index**. [Online]. Available: http://ozone.tmd.go.th/UV_index.htm
- [8] สถาบันวิชาการป้องกันประเทศ. 2560. **นโยบายพลังงานทดแทนเพื่อความมั่นคงของชาติ**. กรุงเทพฯ. วิทยาลัยป้องกันราชอาณาจักร สถาบันวิชาการป้องกันประเทศ
- [9] Becheri, A., Dürr, M., Nostro, PL., Baglioni, P. 2008. “Synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticle application to textiles as UV-absorbers.” **J Nanopart Res.** 10 : 679-689
- [10] Bombelli P, Iyer DMR, Covshoff S, McCormick AJ, Yunus K, Hibberd JM, et al. Comparison of power output by rice (*Oryza sativa*) and an associated weed (*Echinochloa glabrescens*) in vascular plant bio-photovoltaic (VP-BPV) systems. **Appl Microbiol Biotechnol** 2013;97:429–38.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] Carraway, RE., Hoffmann, AJ., Hoffman, MR. 1994. "Photocatalytic oxidation of organic- acids on quantum-sized semiconductor colloids." *Environ Sci Technol.* 28 : 786-93
- [12] Dinda, B., Icli, S. 2001. "Unusual photocatalyitivity of zinc oxide irradiated by concentrated sunlight." *J Photochem Photobiol A Chem.* 140 : 263-268
- [13] Domenech, J., Prieto, A. 1986. "Stability of ZnO particles in aqueous suspensions under UV illumination." *J Phys Chem.* (90) : 1123-6
- [14] Helder, M., Strik, D.P.B.T.B., Hamelers, H.V.M., Kuyken, R.C.P., Buisman, C.J.N. – *New plant- growth medium for increased power output of the Plant-Microbial Fuel Cell* – 2012 – *Bioresource Technology* 104 , pp. 417-423
- [15] Hermann, J.M. 1999. "Heterogeneous photocatalysis: fundamentals and applications to the removal of various types of aqueous pollutant." *Catal Today.* 53 : 115-29
- [16] Hoffmann, MR., Martin, ST., Choi, WY., Bahnemann, DW. 1995. "Environmental applications of semiconductor photocatalysis." *Chem Rev.* 95 : 69-96
- [17] International Renewable Energy Agency. 2018. **Renewable Energy Market Analysis: Southeast Asia.** Abu Dhabi United Arab Emirates. IRENA HEADQUARTERS
- [18] Kajitvichynukul, P., Chenthamarashan, CR., Rajeshwar, K., Qasim, SR. 2003. "Adsorption of thallium(I)ions on titania paricle surfaces in aqueous media." *Adsorpt Sci Technol.* 21 : 217-28
- [19] Liu, Y., Zhou, JE., Larbot, A., Persin, M. 2007. "Preparation and characterization of nano-zinc oxide." *Journal of Materials Prossing Technology.* 189 : 379-383

- [20] Lu, C., Wu, Y., Mai, F., Chung, W., Wu, C., Lin, W., Chen, C. 2009 “Degradation efficiencies and mechanisms of the ZnO-mediated photocatalytic degradation of Basic Blue 11 under visible light irradiation.” *J Mol Catal A*. 310 : 159-65
- [21] Mai, FD., Chen, CC., Chen, JL., Liu, SC. 2008. “Photodegradation of methyl green using visible irradiation in ZnO suspension. Determination of the reaction pathway and identification of intermediates by a high-performance liquid chromatography-photodiode array-electrospray ionization-mass spectrum-etry method.” *J Chromatogr A*. 1189 : 355-65
- [22] Pare, B., Jonnalagadda, SB., Tomar, H., Singh, P., Bhagwat, VW. 2008. “ZnO assisted photocatalytic degradation of acridine orange in aqueous solution using visible irradiation.” *Desalination*. 232 : 80-90
- [23] Park, H., Bak, A., Jeon, TH., Kim, S., Choi, W. 2012. “Photo-chargeable and dischargeable Ti₂O and WO₃ heterojunction electrodes.” *Appl Catal B* 115-116 : 74-80
- [24] Park, H., Park, Y., Kim, S., Choi, W. 2013. “Surface modification of Ti₂O photocatalyst for environmental applications.” *J Photochem Photobiol C*. 15 : 1-20
- [25] Peter L. 2018. What is Electromagnetic Radiation? [Online]. Available <http://ozonedepletiontheory.info/what-is-radiation.html>
- [26] Sakhivel, S., Neppolian, B., Shankar, MV., Arabindoo, B., Palanchamy, M., Murugesan, V. 2003. “Solar photocatalytic degradation of azo dye: comparison of photocatalytic efficiency of ZnO and TiO₂.” *Sol Energy Mater Sol Cells*. 77 : 65-82
- [27] Sellers, K. 2009 “Nanoscale materials, definition and properties. In: Nanotechnology and the environment.” *CRC Press*. 11-31.

- [28] Sin, JK., Lam, SM., Satoshi, I., Lee, KT., Mohamed, A.R. 2014. "Sunlight photocatalytic activity enhancement and mechanism of novel europium-doped ZnO hierarchical micro/nanospheres for degradation of phenol." *Applied Catalysis B: Environmental*. 148-149 : 258-268
- [29] International Standard. 2007. **ISO 21348 Definitions of Solar Irradiance Spectral Categories**. [Online]. Available: <http://www.iso.org>
- [30] Strik, D.P.B.T.B., Timmers, R.A., Helder, M., Steinbusch, K.J.J., Hamelers, H.V.M., Buisman, C.J.N. 2011. "Microbial solar cells: Applying photosynthetic and electrochemically active organisms." *Trends in Biotechnology* 29 (1): 41-49
- [31] Stumm, W., Morgan, JJ. 1996. "Aquatic chemistry: Chemical equilibria and rate in natural waters." *Wiley-Interscience*, New York
- [32] Yahya, K.Z. 2013. "Ti₂O Structure". **Characterization of different dopant in TiO₂ Structure by Pulsed Laser Deposition**, University of technology.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล

นายศรันรัตน์ ศิริ

วัน-เดือน-ปีเกิด

25 มีนาคม 2540

สถานที่เกิด

จังหวัดเชียงใหม่

ที่อยู่ปัจจุบัน

หอพักสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กทม.
10520

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2557 จบการศึกษาชั้นมัธยมศึกษา ที่
โรงเรียนแม่แตง จังหวัดเชียงใหม่

ปีการศึกษา 2558 เข้าศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร
บัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุภาโน วิทยาลัยนาโน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้