

การสังเคราะห์เส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์
ด้วยวิธีอิเล็กโตรสปินนิงเพื่อกำจัดสารคาร์บอนนาซิม
ตกค้างในใบกุยช่ายโดยใช้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส



นางสาวชนิดสร่า งามศักดิ์ประเสริฐ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SYNTHESIS OF TITANIUM DIOXIDE FIBERS WITH
ELECTROSPINNING FOR CARBENDAZIM RESIDUE REMOVAL
FROM CHINESE CHIVES USING PHOTOCATALYSIS

Miss Chanitsara Ngamsakpasert



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering
Department of Environmental Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2015
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสังเคราะห์เส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีอิเล็กโตรสปินนิงเพื่อกำจัดสารคาร์เบนตาซิมตกค้างในใบกุยช่ายโดยใช้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส
โดย	นางสาวชนิดสร่า งามศักดิ์ประเสริฐ
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อัจฉริยา สุริยะวงค์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภารดี ช่วยบำรุง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เขาวกิจเจริญ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อัจฉริยา สุริยะวงค์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภารดี ช่วยบำรุง)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. เขมรรัฐ โอสถาปนธ์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. สิทธีสุนทร สุปิธินะ)

ชนิดตรา งานศักดิ์ประเสริฐ : การสังเคราะห์เส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีอิเล็กโตรสปินนิงเพื่อกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างในใบกุยช่ายโดยใช้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส (SYNTHESIS OF TITANIUM DIOXIDE FIBERS WITH ELECTROSPINNING FOR CARBENDAZIM RESIDUE REMOVAL FROM CHINESE CHIVES USING PHOTOCATALYSIS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. อัจฉรียา สุริยะวงศ์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ. ดร. ภารดี ช่วยบำรุง, 145 หน้า.

การศึกษานี้ทำการลดสารตกค้างคาร์เบนดาซิมในใบกุยช่ายด้วยวิธีต่างๆที่ไม่ใช่ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสและใช้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจากเส้นใยสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ วิธีที่ไม่ใช่ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ได้แก่ การแช่น้ำประปา การแช่น้ำผสมน้ำส้มสายชู การแช่น้ำผสมน้ำยาล้างผัก St. Andrew การแช่น้ำผสมต่างทับทิม การแช่น้ำไหลล้น และการล้างน้ำไหลผ่านตะแกรง นาน 5-60 นาที ผลการศึกษาพบว่า การล้างน้ำไหลผ่านตะแกรงโดยไม่มีการขังของน้ำที่ใช้แช่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการลดสารคาร์เบนดาซิม โดยสามารถลดเหลือเพียง 0.1-1.2 มก./กก. ในเวลา 60 นาที จากปริมาณคาร์เบนดาซิมเริ่มต้น 17.3-27.2 มก./กก. คิดเป็นร้อยละ 94.8-99.3 ส่วนวิธีที่เหลือสามารถลดได้ร้อยละ 54.1-99.1 ขณะที่ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสมาจากการใช้เส้นใยที่สังเคราะห์จากสารไทเทเนียมไดออกไซด์ตั้งต้นและพอลิเมอร์ที่แตกต่างกัน คือ 1) ไทเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์ (TTiP) ผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลไพโรลิโดน (PVP) 2) ไทเทเนียมเตตระบิวทอกไซด์ (TBOT) ผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลไพโรลิโดน (PVP) และ 3) ไทเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์ (TTiP) ผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลอะซิเตท (PVAc) โดยเส้นใยที่ได้นำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 – 650 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้สัดส่วนโครงสร้างผลึกอนาเทสต่อรูไทล์ เท่ากับ 100 : 0, 80 : 20, 70 : 30, 50 : 50 และ 30 : 70 ผลการศึกษาพบว่าเส้นใยสัดส่วนโครงสร้างผลึกอนาเทสต่อรูไทล์ 70 : 30 ให้ประสิทธิภาพสูงสุด สอดคล้องกันทั้งสามชนิดเส้นใย โดยคิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดคาร์เบนดาซิมของเส้นใย TTiP + PVP คือร้อยละ 99.2 ± 0.4 ขณะที่เส้นใย TBOT + PVP มีประสิทธิภาพร้อยละ 99.6 ± 0.3 และเส้นใย TTiP + PVAc มีประสิทธิภาพร้อยละ 94.7 ± 3.0 และจากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารคาร์เบนดาซิมของเส้นใยกับการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ที่มีสัดส่วนโครงสร้างผลึกอนาเทสต่อรูไทล์ 80 : 20 พบว่าผงไทเทเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพ 93.7 ± 0.9 ดังนั้นเส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์จึงมีประสิทธิภาพมากกว่าผงไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยปริมาณเส้นใยที่เหมาะสม คือ 1 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร

ภาควิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อนิสิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
ปีการศึกษา	2558	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5570156621 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: FUNGICIDE / CARBENDAZIM / ELECTROSPINNING / PHOTOCATALYSIS

CHANITSARA NGAMSAKPASERT: SYNTHESIS OF TITANIUM DIOXIDE FIBERS WITH ELECTROSPINNING FOR CARBENDAZIM RESIDUE REMOVAL FROM CHINESE CHIVES USING PHOTOCATALYSIS. ADVISOR: ASST. PROF. ACHARIYA SURIYAWONG, Ph.D., CO-ADVISOR: ASST. PROF. PARADEE CHUAYBAMROONG, Ph.D., 145 pp.

Reduction of carbendazim in Chinese chives with non-photocatalysis and photocatalysis methods was studied. Non-photocatalysis methods were soaking in tap water, soaking in diluted vinegar, soaking in St. Andrew vegetable washing solution, soaking in potassium permanganate solution, soaking in overflowed water and running tap water through the Chinese chives in a basket without soaking for 5-60 min. The highest reduction was from the latest method with the efficiency of 94.8-99.3% (the initial carbendazim concentration was 17.3-27.2 mg/kg and the remaining carbendazim concentration at 60 min t was 0.1-1.2 mg/kg). The rest of non-photocatalysis methods could reduce 54.9-99.1%. In the case of photocatalysis method, the fibers were synthesized from different titanium precursors and polymers, namely 1) TTiP + PVP 2) TBOT + PVP and 3) TTiP + PVAc. All synthetic fibers were calcined at 500 – 650 °c to obtain anatase/rutil ratio of 100 : 0, 80 : 20 , 70 : 30 , 50 : 50 and 30 : 70. The results found that the best reduction efficiency was from the ratio of 70 : 30 from all types of fibers. The TTiP + PVP could reduce 99.2 ± 0.4 %, the TBOT + PVP could reduce 99.6 ± 0.3 % and the TTiP + PVAc could reduce 94.7 ± 0.4 %. When compared with titanium dioxide powder (Degussa P25) which has antase/rutile ratio of 80 : 20, it was found that the fibers yielded better efficiency than the powder which had 93.7 ± 0.9 %. The optimum ratio for photocatalysis was 1 gram of fibers per 1 liter of soaking wate

Department:	Environmental	Student's Signature
	Engineering	Advisor's Signature
Field of Study:	Environmental	Co-Advisor's Signature
	Engineering	

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ดำเนินงานสำเร็จลุล่วงได้ด้วย ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากบุคคล และหน่วยงานหลายฝ่าย ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อัจฉรียา สุริยะวงค์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภารดี ช่วยบำรุง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ให้คำปรึกษา แนวคิด หลักการในการดำเนินงานวิจัย แนะนำแนวทางแก้ไขปัญห และสิ่งที่บกพร่องในงานวิจัย ซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญมากในการดำเนินงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เขาวกิจเจริญ ประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. เขมรัฐ โอสถาปนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำชี้แนะ ในงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วง

ดร. สิทธิสุนทร สุโพธิณะ และศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่ให้คำปรึกษา อนุเคราะห์เครื่องมือวิเคราะห์ และสารเคมีในการวิจัยจนงานวิจัยสำเร็จลุล่วง

คณาจารย์ทุกๆ ท่านภายในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้อบรมสั่งสอนและให้ความรู้

ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ สนับสนุนทุนการใช้เครื่องโครมาโตกราฟีของเหลวสมรรถภาพสูง

ทุนวิจัยเงินงบประมาณแผ่นดินสำหรับมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปี 2558 ที่สนับสนุนเงินในการทำวิจัย

ขอบคุณครอบครัว ที่เป็นกำลังใจที่สำคัญที่สุด ขอบคุณเพื่อนๆ และพี่ๆ น้องๆ ทุกคนที่ ให้คำปรึกษา ความช่วยเหลือ ในระหว่างการทำวิจัยมาโดยตลอด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 สารกำจัดศัตรูพืช	7
2.2 การลดสารกำจัดศัตรูพืชในผลผลิตทางการเกษตร	14
2.3 ปฏิกริยาโฟโตคะตะไลซิส.....	15
2.4 การบำบัดสารมลพิษด้วยปฏิกริยาโฟโตคะตะไลซิส	22
2.5 การสังเคราะห์เส้นใยด้วยวิธีอิเล็กโตรสปินนิง.....	24
2.6 การบำบัดสารมลพิษด้วยเส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์.....	26
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	28
3.1 วัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมี	28
3.1.1 วัสดุ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	28
3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	30

3.2 วิธีดำเนินการวิจัย	31
3.2.1 การกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างในกุยช่ายด้วยวิธีการล้างแบบต่างๆ.....	34
3.2.2 การสกัดสารคาร์เบนดาซิมในกุยช่าย	36
3.2.3 กระบวนการสังเคราะห์เส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์	38
3.2.4 การศึกษาลักษณะสมบัติของเส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์	41
3.2.5 การกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างในกุยช่ายด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส	42
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	45
4.1 การลดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างในใบกุยช่ายจากวิธีการล้างต่างๆ.....	45
4.2 การศึกษาลักษณะสมบัติของเส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์	51
4.2.1 พื้นผิวของเส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์	51
4.2.2 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์	59
4.2.3 พื้นที่ผิวของเส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์และผงไทเทเนียมไดออกไซด์	66
4.2.4 สัดส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อน้ำหนักเส้นใย	68
(ค) เส้นใย TTiP + PVAc.....	69
4.3 การกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างในกุยช่ายด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส	70
4.3.1 การกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างในใบกุยช่ายของเส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์	70
4.3.2 ปริมาณเส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์ในการกำจัดสารตกค้างคาร์เบนดาซิม	85
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย ข้อเสนอแนะและความสำคัญกับงานวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	90
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	90
5.2 ข้อเสนอแนะ	92
5.3 ความสำคัญกับงานวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	92
รายการอ้างอิง	93
ภาคผนวก.....	100

ภาคผนวก ก วิธีวิเคราะห์สารคาร์เบนดาซิม	101
การวิเคราะห์คาร์เบนดาซิม.....	102
ภาคผนวก ข การคำนวณในการทดลองและสมมูลมวล.....	107
การเตรียมสารละลายมาตรฐานคาร์เบนดาซิม	108
ภาคผนวก ค ผลการทดลอง และค่าพารามิเตอร์ที่ตรวจวัดระหว่างการทดลอง	110
การลดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างในใบกุยช่ายจากวิธีการล้างต่างๆ	111
การลดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างในใบกุยช่ายด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส	117
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	145



สารบัญตาราง

ตารางที่ 2-1 ปริมาณและมูลค่าการนำเข้าสารกำจัดศัตรูพืช ปี 2551-2555	8
ตารางที่ 2-2 คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของคาร์เบนดาซิม	10
ตารางที่ 2-3 สารป้องกันกำจัดโรคพืชที่มีการนำเข้าสูงสุด 10 ลำดับในปี 2555.....	11
ตารางที่ 2-4 ปริมาณสารพิษคาร์เบนดาซิมตกค้างสูงสุดที่อนุญาตให้มีได้ (MRLs) ของประเทศไทย.....	12
ตารางที่ 2-5 ปริมาณสารพิษคาร์เบนดาซิมตกค้างสูงสุดที่อนุญาตให้มีได้ในใบกุยช่าย (MRLs) ของต่างประเทศ..	13
ตารางที่ 2-6 ผลสำรวจปริมาณสารคาร์เบนดาซิมตกค้างในผลผลิตทางการเกษตรในปี 2553-2554.....	13
ตารางที่ 2-7 สมบัติทางกายภาพและเคมีของไทเทเนียมไดออกไซด์	20
ตารางที่ 2-8 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของโครงสร้างผลึกอนาเทส รูไทล์ และบรูคไคท์.....	21
ตารางที่ 4-1 สัดส่วนโครงสร้างผลึกอนาเทสต่อรูไทล์.....	63
ตารางที่ 4-2 ขนาดผลึก (Crystallite size) ของเส้นใยเมื่อเผาที่อุณหภูมิต่างๆ.....	65
ตารางที่ 4-3 พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของเส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์	67
ตารางที่ ก-1 ร้อยละการคืนกลับสารคาร์เบนดาซิมที่สภาวะต่างๆ	105
ตารางที่ ก-2 ค่าเกณฑ์การยอมรับร้อยละการคืนกลับของสารคาร์เบนดาซิม	106
ตารางที่ ข-1 ความเข้มข้นคาร์เบนดาซิมในน้ำและในใบกุยช่าย	109
ตารางที่ ค-1 ปริมาณสารคาร์เบนดาซิมตกค้างจากการล้างกุยช่ายด้วยวิธีต่างๆ.....	111
ตารางที่ ค-2 ร้อยละการกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างจากการล้างกุยช่ายด้วยวิธีต่างๆ	113
ตารางที่ ค-3 ค่าความเป็นกรด-ด่างจากการล้างกุยช่ายด้วยวิธีต่างๆ	115
ตารางที่ ค-4 ปริมาณสารคาร์เบนดาซิมตกค้างจากการล้างกุยช่ายโดยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสด้วยเส้นใย TTiP+PVP	117
ตารางที่ ค-5 ปริมาณสารคาร์เบนดาซิมตกค้างจากการล้างกุยช่ายโดยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสด้วยเส้นใย TBOT+PVP.....	119

ตารางที่ ค-6 ปริมาณสารคาร์เบนดาซิมตกค้างจากการล้างกุ่มช่วยโดยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสด้วยเส้นใย TTiP+PVAc 121

ตารางที่ ค-7 ร้อยละการกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างจากการล้างกุ่มช่วยโดยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสด้วยเส้นใย TTiP+PVP 123

ตารางที่ ค-8 ร้อยละการกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างจากการล้างกุ่มช่วยโดยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสด้วยเส้นใย TBOT+PVP 125

ตารางที่ ค-9 ร้อยละการกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างจากการล้างกุ่มช่วยโดยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสด้วยเส้นใย TTiP+PVAc 127

ตารางที่ ค-10 ค่าความเป็นกรด-ต่างจากการล้างกุ่มช่วยด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสด้วยเส้นใย TTiP+PVP 129

ตารางที่ ค-11 ค่าความเป็นกรด-ต่างจากการล้างกุ่มช่วยด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสด้วยเส้นใย TBOT+PVP 133

ตารางที่ ค-12 ค่าความเป็นกรด-ต่างจากการล้างกุ่มช่วยด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสด้วยเส้นใย TTiP+PVAc 137

ตารางที่ ค-13 ค่าความเป็นกรด-ต่างสารละลายคาร์เบนดาซิมเมื่อฉายแสงไฟห้อง และรังสี UVA 141

ตารางที่ ค-14 ปริมาณสารคาร์เบนดาซิมตกค้างเมื่อใช้เส้นใยปริมาณ 0.5 1 2 กรัมต่อลิตร..... 142

สารบัญรูป

รูปที่ 2-1	โครงสร้างคาร์เบนดาซิม	9
รูปที่ 2-2	การประยุกต์ใช้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส	16
รูปที่ 2-3	โครงสร้างอนุภาคสารกึ่งตัวนำ	16
รูปที่ 2-4	UV spectrum	19
รูปที่ 2-5	โครงสร้างผลึกแบบต่างๆของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์	21
รูปที่ 2-6	อุปกรณ์การสังเคราะห์เส้นใยด้วยวิธีอิเล็กโตรสปินนิง	25
รูปที่ 2-7	การเกิดกรวยเทเลอร์	26
รูปที่ 3-1	ผังการศึกษาการกำจัดสารตกค้างคาร์เบนดาซิมด้วยวิธีการล้างแบบต่างๆที่ไม่ใช่ ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส	32
รูปที่ 3-2	ผังการศึกษาการกำจัดสารตกค้างคาร์เบนดาซิมด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสตะไลซิส	33
รูปที่ 3-3	การล้างแบบไหลผ่านตะแกรง	34
รูปที่ 3-4	การล้างแบบน้ำไหลล้นกะละมัง	35
รูปที่ 3-5	การชะสารคาร์เบนดาซิมออกจากตัวดูดซับด้วยการใช้ป้อนสุญญากาศ	36
รูปที่ 3-6	ขั้นตอนการสกัดและวิเคราะห์สารคาร์เบนดาซิมตกค้างในกุ่มช่วยด้วยวิธี MSPD	37
รูปที่ 3-7	ผังการติดตั้งชุดอุปกรณ์การสังเคราะห์เส้นใยด้วยวิธีอิเล็กโตรสปินนิง	38
รูปที่ 3-8	การเตรียมสารละลาย TTIP ผสมกับพอลิเมอร์ PVP	39
รูปที่ 3-9	การเตรียมสารละลาย TBOT ผสมกับพอลิเมอร์ PVP	40
รูปที่ 3-10	การเตรียมสารละลาย TTIP ผสมกับพอลิเมอร์ PVAc	40
รูปที่ 3-11	ตู้ทดลองและลักษณะการวางหลอดไฟ	43
รูปที่ 3-12	การแช่กุ่มช่วยในการกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส	43
รูปที่ 4-1	ปริมาณสารคาร์เบนดาซิมตกค้างในใบกุ่มช่วยจากการล้างวิธีต่างๆกัน	46
รูปที่ 4-2	การแตกตัวของสารคาร์เบนดาซิมในน้ำ	48

รูปที่ 4-3 ร้อยละของการลดสารคาร์เบนดาซิมด้วยวิธีการล้างแบบต่างๆ.....	49
รูปที่ 4-4 ลักษณะสัณฐานเส้นใย TTiP + PVP ที่กำลังขยาย 100000 เท่า	52
รูปที่ 4-5 ลักษณะสัณฐานเส้นใย TBOT + PVP ที่กำลังขยาย 100000 เท่า	53
รูปที่ 4-6 ลักษณะสัณฐานเส้นใย TTiP + PVAc ที่กำลังขยาย 100000 เท่า	54
รูปที่ 4-7 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใย TTiP + PVP	56
รูปที่ 4-8 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใย TBOT + PVP	57
รูปที่ 4-9 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใย TTiP + PVAc	58
รูปที่ 4-10 โครงสร้างผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ของเส้นใยไทเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์ผสมกับ พอลิเมอร์พอลิไวนิลไพโรลิโดนเมื่อเผาที่อุณหภูมิต่างๆ	60
รูปที่ 4-11 โครงสร้างผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ของเส้นใยไทเทเนียมเตตระบิวทอกไซด์ผสมกับพอลิเมอร์ พอลิไวนิลไพโรลิโดนเมื่อเผาที่อุณหภูมิต่างๆ	61
รูปที่ 4-12 โครงสร้างผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ของเส้นใยไทเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์ ผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลอะซิเตท เมื่อเผาที่อุณหภูมิต่างๆ.....	62
รูปที่ 4-13 การวิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุของเส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้ง 3 ชนิด	69
รูปที่ 4-14 ปริมาณคาร์เบนดาซิมคงเหลือในใบกุ่มช่ายเมื่อใช้เส้นใย TTiP + PVP ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส.....	71
รูปที่ 4-15 ปริมาณคาร์เบนดาซิมคงเหลือในใบกุ่มช่ายเมื่อใช้เส้นใย TBOT + PVP ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส..	72
รูปที่ 4-16 ปริมาณคาร์เบนดาซิมคงเหลือในใบกุ่มช่ายเมื่อใช้เส้นใย TTiP + PVAc ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส...	73
รูปที่ 4-17 ปริมาณคาร์เบนดาซิมคงเหลือในใบกุ่มช่ายที่เวลา 60 นาทีเมื่อใช้เส้นใย TTiP + PVP ใน ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส.....	75
รูปที่ 4-18 ปริมาณคาร์เบนดาซิมคงเหลือในใบกุ่มช่ายที่เวลา 60 นาทีเมื่อใช้เส้นใย TBOT + PVP ใน ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส.....	76
รูปที่ 4-19 ปริมาณคาร์เบนดาซิมคงเหลือในใบกุ่มช่ายที่เวลา 60 นาทีเมื่อใช้เส้นใย TTiP + PVAc ใน ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส.....	77

รูปที่ 4-20 ประสิทธิภาพการกำจัดสารคาร์เบนดาซิมของเส้นใย 3 ชนิดที่มีสัดส่วนโครงสร้างผลึก อนาเทสต่อรูไทล์ เท่ากับ 70 : 30.....	79
รูปที่ 4-21 ปริมาณสารคาร์เบนดาซิมหลงเหลือในน้ำและในใบกุยช่ายของเส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์ ..	80
รูปที่ 4-22 การกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเมื่อใช้ Degussa P25 และเส้นใยทั้ง 3 ชนิดที่สัดส่วนอนาเทสต่อรูไทล์ เท่ากับ 80 : 20 และ 70 : 30	82
รูปที่ 4-23 ปริมาณสารคาร์เบนดาซิมตกค้างคงเหลือเมื่อกำจัดด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโดย ใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ เปรียบเทียบกับเส้นใยที่สัดส่วนโครงสร้างผลึก 80 : 20 และ 70 : 30...	84
รูปที่ 4-24 ปริมาณคาร์เบนดาซิมคงเหลือเมื่อใช้เส้นใย TTIP + PVP ปริมาณ 0.5 1 และ 2 กรัมต่อลิตร ..	86
รูปที่ 4-25 ปริมาณคาร์เบนดาซิมคงเหลือเมื่อใช้เส้นใย TBOT + PVP ปริมาณ 0.5 1 และ 2 กรัมต่อลิตร..	87
รูปที่ 4-26 ปริมาณคาร์เบนดาซิมคงเหลือเมื่อใช้เส้นใย TTIP + PVAc ปริมาณ 0.5 1 และ 2 กรัมต่อลิตร..	88
รูปที่ ก-1 สารละลายคาร์เบนดาซิมมาตรฐาน 5 ไมโครกรัมต่อมิลลิเมตร	102
รูปที่ ก-2 กราฟมาตรฐานสารละลายคาร์เบนดาซิม	103
รูปที่ ก-3 ค่า Limit of Detection: LOD	104
รูปที่ ก-4 ค่า Limit of Quantitation: LOQ.....	104
รูปที่ ข-1 ความเข้มข้นคาร์เบนดาซิมในน้ำและในใบกุยช่าย	109

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเกษตรในปัจจุบันของประเทศไทยนอกจากจะเป็นการผลิตเพื่อมุ่งเน้นการบริโภคภายในประเทศแล้ว ยังเป็นการผลิตเพื่อการส่งออก โดยมีมูลค่าการส่งออกสินค้าในปี 2555 สูงถึง 1.35 ล้านล้านบาท (ศูนย์สารสนเทศการเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2556) สารกำจัดศัตรูพืชจึงเข้ามามีบทบาทสำคัญในการเพิ่มผลผลิต ดังจะเห็นได้จากปริมาณสารเคมีกำจัดศัตรูพืชที่นำเข้ามีแนวโน้มที่สูงขึ้นมากกว่าสองเท่าเมื่อเทียบกับประเทศกลุ่มที่พัฒนาแล้ว ส่งผลให้มีการตรวจพบสารกำจัดศัตรูพืชตกค้างเกินค่ามาตรฐานในผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรที่ไทยส่งออกไปต่างประเทศอยู่หลายครั้ง (แสงโสม ศิริพานิช, 2556) กระทั่งต่อความน่าเชื่อถือและสูญเสียรายได้ในการส่งออกผลิตภัณฑ์เป็นอย่างมาก นอกจากนี้สารกำจัดศัตรูพืชยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จากการตกค้างในดิน น้ำ อากาศ และ วัฏจักรของระบบนิเวศ รวมถึงเป็นพิษต่อผู้ใช้และผู้บริโภค (พาลาก สิงหเสนี, 2540)

สารกำจัดศัตรูพืชที่นิยมนำมาใช้มากชนิดหนึ่งได้แก่ คาร์เบนดาซิม ซึ่งอยู่ในกลุ่มสารป้องกันและกำจัดเชื้อราที่ก่อให้เกิดโรคพืช (fungicide) จัดเป็นสารเคมีอันตรายชนิดที่ 3 ซึ่งหมายถึงวัตถุอันตรายที่การผลิต การนำเข้า การส่งออก หรือการมีไว้ในครอบครองต้องได้รับใบอนุญาต โดย คาร์เบนดาซิมเป็นสารเคมีชนิดดูดซึม (systemic fungicide) สามารถซึมผ่านรากและเนื้อเยื่อไปยังส่วนต่างๆของพืชได้ โดยมีฤทธิ์กำจัดเชื้อโรคราจำเพาะเจาะจงและยับยั้งการสังเคราะห์ดีเอ็นเอในกระบวนการแบ่งเซลล์ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม (สุนีย์ ธีชญานนท์, 2533) เป็นอันตรายเมื่อถูกผิวหนัง มีผลทำให้เกิดการระคายเคืองต่อตา อาจเกิดผลกระทบบกัระบบทางเดินหายใจและผิวหนังอย่างถาวร รวมถึงยังเป็นสารที่ก่อให้เกิดการกลายพันธุ์ (Sigma-Aldrich, 2004) คาร์เบนดาซิมนิยมใช้เป็นสารกำจัดเชื้อราในผลผลิตเกษตรหลายชนิดเช่น องุ่น เงาะ ต้นหอม หอมใหญ่ ถั่วเหลือง กุยช่าย มะเขือเทศ จึงมีปริมาณการนำเข้าสูงเป็นอันดับสองของกลุ่มสารป้องกันและกำจัดโรคพืชในปี 2555 คือ 763,263 กิโลกรัม คิดเป็นมูลค่ากว่า 70 ล้านบาท (สำนักควบคุมพืชและวัสดุการเกษตร, 2555)

สารคาร์เบนตาซิมตกค้างในผลผลิตทางการเกษตรนั้นไม่สามารถกำจัดได้ง่ายด้วยการล้างตามปกติ ซึ่งจากการทดลองเบื้องต้นของผู้วิจัยเองที่ศึกษาการลดสารคาร์เบนตาซิมตกค้างในใบกุยช่ายโดยใช้วิธีการล้างตามคำแนะนำของกรมวิชาการเกษตรทั้งหมด 6 วิธี คือ การแช่น้ำประปา การแช่น้ำผสมน้ำส้มสายชูความเข้มข้นกรดน้ำส้มร้อยละ 5 การแช่น้ำผสมน้ำยาล้างผัก St. Andrew การแช่น้ำผสมด่างทับทิม การแช่น้ำไหลล้น และการแช่น้ำไหลผ่านตะแกรง พบว่าวิธีการล้างน้ำไหลผ่านตะแกรงโดยไม่มีการขังของน้ำให้ประสิทธิภาพในการลดสารคาร์เบนตาซิมสูงที่สุด ร้อยละ 94.8–97.5 โดยลดเหลือเพียง 0.1–1.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมในเวลา 60 นาที จากปริมาณคาร์เบนตาซิมเริ่มต้น 17.3–27.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในขณะที่วิธีที่เหลือสามารถลดสารคาร์เบนตาซิมได้เหลือ 0.7–10.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมในเวลา 60 นาที คิดเป็นร้อยละ 83.3–96.5 ซึ่งไม่ผ่านค่ามาตรฐานของกลุ่มประเทศสหภาพยุโรปที่กำหนดค่าคาร์เบนตาซิมตกค้างสูงสุดที่ยอมให้มีได้ (Maximum Residual Limits : MRLs) ของกุยช่าย ไว้ที่ 0.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จึงจำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีที่ให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่า ซึ่งหนึ่งในนั้น คือ การใช้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส (photocatalysis)

ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเกิดจากการใช้สารกึ่งตัวนำ เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์ ซิลิกอนไดออกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) เมื่อสารกึ่งตัวนำได้รับพลังงานมากพอจะทำให้อิเล็กตรอนที่แถบวาเลนซ์ (valence band) ถูกกระตุ้นให้ข้ามไปยังแถบการนำไฟฟ้า (conduction band) ทำให้เกิดช่องว่างที่แถบวาเลนซ์เรียกว่า โฮล (hole, h^+_{vb}) เมื่อทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) จากน้ำหรือความชื้นในบรรยากาศจะเกิดเป็นไฮดรอกซิลแรดิคัล ($\cdot OH$) ส่วนอิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบการนำไฟฟ้าจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (O_2) เกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์แรดิคัล (O_2^-) และ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ซึ่งเป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรงสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำได้ (Nakata และ Fujishima, 2012) ดังนั้นจึงมีการนำปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสมาใช้ในการบำบัดมลพิษรวมถึงสารกำจัดศัตรูพืชกันอย่างกว้างขวาง เช่น การศึกษาของ ภาณุมาศ นาคเจือทอง (2554) กำจัดสารพิษตกค้างคาร์เบนตาซิมในขึ้นช่าย กุยช่าย และต้นหอมด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) 0.05, 0.1, 0.5 และ 1 กรัมต่อลิตร ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 40, 80 และ 120 มิลลิโมลาร์ ด้วยการแช่ผลผลิตทางการเกษตรในน้ำที่มีปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสดังกล่าวเป็นเวลา 50 นาทีโดยวิเคราะห์คาร์เบนตาซิมตกค้างทุกๆ 10 นาที พบว่าเมื่อใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 120 มิลลิโมลาร์ร่วมกับผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.05 กรัมต่อลิตรสามารถกำจัดคาร์เบนตาซิมได้หมดภายในเวลา 30 นาที (limit of

detection 0.05 ppm) และเมื่อใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเป็น 0.1-1 กรัมต่อลิตร สามารถกำจัด สารคาร์เบนดาซิมได้หมด ภายในเวลาที่สั้นลงคือ 5-15 นาที เป็นต้น

ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) นิยมใช้อย่างแพร่หลายในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง โดยมีสัดส่วนโครงสร้างผลึกอนาเทสต่อรูไทล์ อยู่ในช่วง 70 : 30 ถึง 80 : 20 (Ohtani และคณะ, 2010) อย่างไรก็ตามข้อเสียของการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ คือ การแยกผงหลังใช้งานเป็นไปได้ยาก ก่อให้เกิดการตกค้างตามส่วนต่างๆของผลผลิตและสิ่งแวดล้อม จึงไม่สะดวกต่อการนำไปใช้งานจริง นักวิจัยจึงพยายามสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบอื่นที่สะดวกต่อการใช้งาน เช่น สังเคราะห์เส้นใยและฟิล์มบางให้มีสัดส่วนโครงสร้างผลึก และประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกับผงไทเทเนียมไดออกไซด์ เช่น งานวิจัยของ Bakardjieva และคณะ (2005) สังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์โดยใช้สารไทเทเนียมเตตระออกไซด์ซัลเฟต (titanium (IV) oxysulfate) เป็นสารตั้งต้น และเผาที่อุณหภูมิ 200-1,150 องศา พบว่าเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 825 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมงจะได้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีสัดส่วนโครงสร้างผลึกอนาเทสต่อรูไทล์ 77.4 : 22.6 ใกล้เคียงกับผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) และมีประสิทธิภาพในการกำจัด 4-ไดคลอโรพีนอลในน้ำด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสสูงที่สุดเมื่อเทียบกับสัดส่วนที่ได้จากอุณหภูมิเผาอื่นๆ

การสังเคราะห์เส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์โดยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง เป็นวิธีที่นิยมเพราะง่าย สะดวก และมีประสิทธิภาพ เทคนิคนี้ใช้หลักการสร้างสนามไฟฟ้าขึ้นระหว่างปลายหลอดบรรจุสารละลายพอลิเมอร์ กับแผ่นโลหะรองรับเส้นใย ทำให้พอลิเมอร์ถูกดึงยึดเป็นเส้นที่มีขนาดเล็กระดับนาโนได้ (Nakata และคณะ, 2012) สามารถใช้พอลิเมอร์ได้หลากหลายชนิด ยกตัวอย่าง Choi และ Hong (2012) ทำการสังเคราะห์เส้นใยจากไทเทเนียมไอโซโพรพอกไซด์ (TiP) และพอลิเมอร์พอลิไวนิลไพโรลิโดน (polyvinylpyrrolidone: PVP) ในการบำบัดยารานิทิดีน (ranitidine) ตกค้างในน้ำเทียบกับผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) พบว่าเส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์เผาที่ 600 องศาเซลเซียส มีสัดส่วนโครงสร้างผลึกอนาเทสต่อรูไทล์ 70 : 30 มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาใกล้เคียงกับผงไทเทเนียมไดออกไซด์คือ 0.008 และ 0.011 ต่อนาทีตามลำดับ อย่างไรก็ตาม จากการทบทวนเอกสารทั้งหมดพบว่ายังไม่มีมีการนำเส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์มาประยุกต์ใช้กับการกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างในผลผลิตทางการเกษตร งานวิจัยนี้จึงเสนอการสังเคราะห์เส้นใยด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ตั้งต้น และพอลิเมอร์ที่แตกต่างกัน ได้แก่ 1)ไทเทเนียมเตตระไอโซโพรพอกไซด์ (titanium (IV) isopropoxide: TTIP) ผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลไพโรลิโดน (polyvinylpyrrolidone: PVP) 2) ไทเทเนียม

เตตระบิวทอกไซด์ (titanium (IV) butoxide: TBOT) ผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลไพโรลิโดน (polyvinylpyrrolidone: PVP) และ 3) ไทเทเนียมเตตระไอโซโพรพอกไซด์ (titanium (IV) isopropoxide: TTIP) ผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลอะซิเตท (polyvinyl acetate: PVAc) โดยเส้นใยที่ได้นำไปเผาที่อุณหภูมิต่างๆกันเพื่อให้ได้สัดส่วนโครงสร้างผลึกอนาเทสต่อรูไทล์ 100 : 0, 80 : 20, 70 : 30, 50 : 50 และ 30 : 70 เปรียบเทียบกับการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ที่มีสัดส่วนโครงสร้างผลึกอนาเทสต่อรูไทล์ 80 : 20 เพื่อให้ทราบถึงสัดส่วนโครงสร้างผลึกที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในการกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้าง โดยเลือกศึกษาในกุยช่าย เนื่องจากเป็นผักที่นิยมรับประทานสดและมีการกำหนดค่าปริมาณสารพิษตกค้างสูงสุดที่ยอมให้มีได้ไว้ค่อนข้างต่ำ คือ 0.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมในสหภาพยุโรป ส่วนประเทศเกาหลีได้กำหนดที่ 1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ขณะที่ประเทศไทยกำหนดที่ 3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทำให้พบปัญหาไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานการส่งออกอยู่บ่อยครั้ง การศึกษานี้จึงมุ่งหวังที่จะช่วยยกระดับมาตรฐานสินค้าเกษตรส่งออกให้กับประเทศไทย และยังเป็นการลดอัตราเสี่ยงของผู้บริโภคจากอันตรายอันเนื่องมาจากสารพิษตกค้างในผลผลิตทางการเกษตรด้วยเช่นกัน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อสังเคราะห์เส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างในใบกุยช่ายสูงสุด

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างในใบกุยช่ายระหว่างเส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์และผงไทเทเนียมไดออกไซด์

1.2.3 เพื่อศึกษาอัตราส่วนของปริมาณเส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อน้ำ และระยะเวลาของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสที่กำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างในใบกุยช่ายได้ดีที่สุด

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ดำเนินการในห้องปฏิบัติการอาคารบรรยายรวม 3 ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม และห้องปฏิบัติการกลาง อาคารบรรยายรวม 5 คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ตามสภาวะแวดล้อมของแต่ละวันโดยไม่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้น มีการกำหนดขอบเขตของงานวิจัยดังนี้

1.3.1 ผลผลิตทางการเกษตรที่ใช้ คือ ใบกุยช่าย อายุ 50 วันขึ้นไป ทำการปลูกในแปลงขนาด กว้าง 1 เมตร ยาว 6 เมตร ฉีดพ่นด้วยสารกำจัดเชื้อราคาร์เบนดาซิม ยี่ห้อการค้าคาร์เบนดาซิม 50 ใน อัตราส่วนสารคาร์เบนดาซิม 1 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร ต่อ 1 แปลง ฉีดพ่นจำนวน 1 ครั้งก่อนเก็บเกี่ยว 3 วัน

1.3.2 รูปแบบการศึกษาใช้การแช่กุยช่ายในตู้ทดลองที่มีปฏิริยาโฟโตคะตะไลซิส แบบที่ ละเท (batch) เป็นเวลานานต่างๆกันตั้งแต่ 5 นาที ถึง 60 นาที ตู้ทดลองทำด้วยกระจกขนาด กว้าง 13.5 เซนติเมตร ยาว 20.5 เซนติเมตร สูง 15.0 เซนติเมตร

1.3.3 ปฏิริยาโฟโตคะตะไลซิสมาจากการฉายแสงอัลตราไวโอเลตชนิด A (UVA) โดยใช้ หลอดไฟแบล็คไลท์ จำนวน 8 หลอด (ช่วงความเข้มแสง 4 ± 1 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร) และใช้ เส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์จำนวน 0.5-2 กรัม เปรียบเทียบกับผงไทเทเนียมไดออกไซด์ ในปริมาณที่ เท่ากัน

1.3.4 เส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์สังเคราะห์จากสารตั้งต้นทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่

1. ไทเทเนียมเตตระไอโซโพรพอกไซด์ (titanium (IV) isopropoxide : TTiP) ผสมกับพอลิไวนิลไพร์โรลิโดน (polyvinylpyrrolidone: PVP)
2. ไทเทเนียมเตตระบิวทอกไซด์ (titanium (IV) butoxide: TBOT) ผสมกับ พอลิไวนิลไพร์โรลิโดน (polyvinylpyrrolidone: PVP)
3. ไทเทเนียมเตตระไอโซโพรพอกไซด์ (titanium (IV) isopropoxide: TTiP) ผสม กับพอลิไวนิลอะซิเตท (polyvinylacetate: PVAc)

1.3.5 สังเคราะห์สัดส่วนโครงสร้างผลึกอนาเทสต่อรูไทล์ โดยเผาเส้นใยที่อุณหภูมิต่างๆกัน ตั้งแต่ 500 – 650 องศาเซลเซียส ส่วนสัดส่วนโครงสร้างผลึกของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ใช้ตามจริงที่ปรากฏโดยไม่มีการปรับแต่งเพิ่มเติม

1.3.6 การสกัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างในกุยช่าย ใช้วิธี Matrix Solid Phase Dispersion (MSPD) ตามวิธีการของ Barker (2007) ส่วนการวิเคราะห์ปริมาณคาร์เบนดาซิมใช้เครื่องโครมาโทกราฟีของเหลว สมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography: HPLC) ใช้คอลัมน์ชนิด C18 ความ ยาว 250 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.6 มิลลิเมตร

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้องค์ความรู้ในการสังเคราะห์เส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างในผลผลิตทางการเกษตร

1.4.2 เป็นโครงการต้นแบบให้กับผู้ที่สนใจนำไปประยุกต์ใช้เพื่อกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างและสารพิษตกค้างตัวอื่นๆ ในผลผลิตทางการเกษตร

1.4.3 ช่วยพัฒนาคุณภาพผลผลิตทางการเกษตรของประเทศไทยให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานสารตกค้างที่ยอมให้มีได้ (Maximum Residue Limits : MRLs) ที่เข้มงวดของประเทศคู่ค้าเพื่อประโยชน์ในการส่งออก

1.4.4 สร้างความปลอดภัยในการบริโภคสินค้าเกษตรของผู้บริโภค



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สารกำจัดศัตรูพืช

สารกำจัดศัตรูพืช (pesticides) หมายถึง สารหรือสารผสมที่อาจเป็นสารเคมีหรือสารชีวภาพ ใช้เพื่อป้องกัน ทำลาย ไล่ ลดศัตรูพืช หรือเป็นสารที่ใช้ควบคุมการเจริญเติบโต การแพร่พันธุ์ของพืช และของสัตว์ที่เป็นศัตรูพืช โดยศัตรูพืชในที่นี้ รวมถึง แมลง สัตว์ฟันแทะ ไส้เดือนฝอย เชื้อรา วัชพืช หรือสิ่งมีชีวิตทำให้เกิดความเสียหายส่งผลกระทบต่อพืชหลักที่เพาะปลูกให้มีคุณภาพหรือปริมาณลดต่ำลง (สมนึก วงศ์ทอง, 2539) สารกำจัดศัตรูพืชสามารถแบ่งได้เป็น สารกำจัดแมลงศัตรูพืช (insecticides) สารกำจัดวัชพืช (herbicides) สารกำจัดเชื้อรา (fungicides) สารกำจัดหนูและสัตว์ฟันแทะ (rodenticides) สารกำจัดไร (acaricides) สารกำจัดหาก (molluscicides) และ สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช (plant growth regulator)

สารกำจัดเชื้อรา หมายถึง สารประกอบทางเคมีหรือสิ่งมีชีวิตทางชีวภาพที่มีความสามารถในการฆ่าเชื้อรา ยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อรา หรือสปอร์ของเชื้อราได้ (Haverkate และคณะ, 1969) ตัวอย่างเช่น สารในกลุ่มของ phosphorus acid, pencycuron, propineb เป็นต้น ส่วนใหญ่การรับสัมผัสจะทำให้เกิดการระคายเคืองผิวหนัง คัน และถ้ารับประทานเข้าไปจะมีอาการคลื่นไส้อาเจียน ท้องร่วง อ่อนเพลีย สารกำจัดเชื้อราส่วนใหญ่มีผลต่อสัตว์น้ำ เช่น ปลา และสัตว์เล็กๆ (ภาณุมาศ นาคเจือทอง, 2554) ปริมาณการนำเข้าของสารกำจัดเชื้อรา ระหว่างปี 2551 – 2555 นั้นอยู่ในลำดับที่ 3 รองจากสารกำจัดวัชพืช และ สารกำจัดแมลง (ตารางที่ 2-1) แสดงให้เห็นถึงความนิยมใช้ในกลุ่มเกษตรกรของประเทศไทย ซึ่งน่าจะหมายถึงการตกค้างในผลผลิตทางการเกษตรและในสิ่งแวดล้อม ปริมาณที่มากตามไปด้วยเช่นกัน

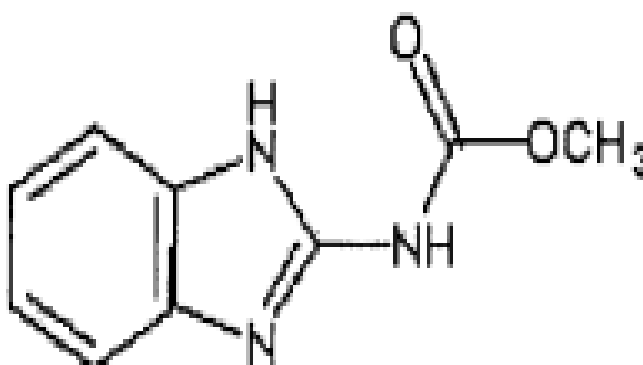
ตารางที่ 2-1 ปริมาณและมูลค่าการนำเข้าสารกำจัดศัตรูพืช ปี 2551-2555

หน่วย : ปริมาณ : ตัน							
มูลค่า : ล้านบาท							
ปี			2551	2552	2553	2554	2555
สารเคมี	สารกำจัดวัชพืช (Herbicide)	ปริมาณ	68,825	97,957	80,278	112,177	106,860
		มูลค่า	11,487	9,338	8,845	11,480	11,294
		สาระสำคัญ	44,063	53,615	51,903	67,608	60,232
	สารกำจัดแมลง (Insecticide)	ปริมาณ	25,332	24,680	23,417	34,672	16,797
		มูลค่า	4,577	3,972	4,670	5,938	3,686
		สาระสำคัญ	9,471	8,112	9,995	10,671	4,065
	สารป้องกันและ กำจัดโรคพืช (Fungicide)	ปริมาณ	11,255	10,367	9,671	12,179	6,972
		มูลค่า	2,537	2,968	3,860	3,875	3,883
		สาระสำคัญ	7,098	4,890	5,972	6,980	4,421
	อื่นๆ*	ปริมาณ	4,497	4,590	4,332	5,355	3,748
		มูลค่า	580	537	550	751	494
		สาระสำคัญ	2,238	2,151	1,999	2,360	1,438
	รวม	ปริมาณ	109,908	137,594	117,698	164,383	134,377
		มูลค่า	19,182	16,816	17,924	22,044	19,357
		สาระสำคัญ	62,870	68,769	69,868	87,619	70,156
สารชีวภาพ	สารกำจัดเชื้อรา (Fungicide)	ปริมาณ	62	145	117	156	103
		มูลค่า	12	21	32	26	21
รวมทั้งหมด		ปริมาณ	109,969	137,739	117,816	164,539	134,480
		มูลค่า	19,194	16,837	17,957	22,070	19,379
		สาระสำคัญ	62,870	68,769	69,868	87,619	70,156

* สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช สารรมควันพืช สารกำจัดหอยและหอยทาก สารกำจัดไร สารกำจัดหนู และสารกำจัดไส้เดือนฝอย

ที่มา: สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2557)

หนึ่งในสารกำจัดเชื้อราที่มีการใช้กันโดยทั่วไปอย่างแพร่หลาย คือ คาร์เบนดาซิม (carbendazim) มีชื่อทางเคมี methyl-2-benzimidazole carbamate มีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2-1 มีคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพดังตารางที่ 2-2 เป็นสารเคมีที่ใช้ป้องกันและกำจัดโรคพืชชนิดดูดซึม (systemic fungicide) โดยพืชสามารถดูดซึมผ่านทางรากและไปยังเนื้อเยื่อต่างๆ มีฤทธิ์กำจัดเชื้อโรคที่จำเพาะเจาะจง สามารถยับยั้งการสังเคราะห์ DNA ในขบวนการแบ่งเซลล์ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม (สุนีย์ วัฒนโนทัย, 2533)



รูปที่ 2-1 โครงสร้างคาร์เบนดาซิม

ที่มา: International Programme on Chemical Safety: IPCS (2004)

ตารางที่ 2-2 คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของคาร์เบนดาซิม

Property	Value
ชื่อสาร	Methyl benzimidazol-2-ylcarbamate
สูตรโมเลกุล / มวลโมเลกุล	C ₉ H ₉ N ₃ O ₂ / 191.2
สี/ลักษณะ	ผงสีขาว / ผลึกสีขาว
สี	ไม่มีสี
จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	302-307
จุดเดือด (องศาเซลเซียส)	ไม่ปรากฏ
ความดันไอ	7.5 × 10 ⁻¹⁰ มม.ปรอท ที่ 20 องศาเซลเซียส < 1 × 10 ⁻⁷ ปาสคาล (< 1 × 10 ⁻⁹ มิลลิบาร์) ที่ 20 องศาเซลเซียส 9 × 10 ⁻⁵ ปาสคาล (20 องศาเซลเซียส); 1.5 × 10 ⁻⁴ ปาสคาล (25 องศาเซลเซียส)
ความหนาแน่น/ ความถ่วงจำเพาะ	0.25-0.35 กรัมต่อลบ.ซม. ที่ 20 องศาเซลเซียส 0.27 กรัมต่อลบ.ซม. (ผง); 0.62 กรัมต่อลบ.ซม. (อัด)
ค่าคงที่การละลายของก๊าซ	1.02 × 10 ⁹ บรรยากาศ.ลบม ต่อโมล ที่ 20 องศาเซลเซียส (WHO) 3.6 × 10 ³ บรรยากาศ.ลบม ต่อโมล ที่ 24 องศาเซลเซียส 3.5 × 10 ⁸ บรรยากาศ.ลบม ต่อโมล ที่ 20 องศาเซลเซียส
การละลาย	12.9 มิลลิกรัมต่อลิตร ในน้ำ ที่ 20.0 ± 0.5 องศาเซลเซียส 28 - 36 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ค่าความเป็นกรด-เบส 4 5 - 7 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ค่าความเป็นกรด-เบส 7-8 29 มิลลิกรัมต่อลิตร ในน้ำ ที่ 24 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-เบส 28 มิลลิกรัมต่อลิตรในน้ำ ที่ 20 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-เบส 4 8 มิลลิกรัมต่อลิตรในน้ำ ที่ 20 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-เบส 7 7 มิลลิกรัมต่อลิตรในน้ำ ที่ 20 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-เบส 8 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ในเอทานอล ที่ 24 องศาเซลเซียส 359 - 480 มิลลิกรัมต่อลิตร เมทานอล ที่ 24 องศาเซลเซียส 166 - 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ในอะซิโตน ที่ 24 องศาเซลเซียส

ที่มา: Water Framework Directive-United Kingdom Technical Advisory Group (2009)

สารคาร์เบนดาซิมเป็นที่นิยมใช้ในการรักษาโรคในผลผลิตทางการเกษตรที่เกิดจากเชื้อรา ยกตัวอย่างเช่น โรคใบไหม้ โรคกาบใบแห้ง โรคราแป้ง โรคใบขีดสีน้ำตาลในข้าว โรคผลเน่าในผลไม้ เป็นต้น มีการใช้งานอย่างกว้างขวางทั้งในผัก ผลไม้ ข้าว และ ธัญพืช และสามารถรักษาโรคที่เกิดจากเชื้อราในสัตว์ (ยงยุทธ ไผ่แก้ว, 2548) ทำให้มีปริมาณการนำเข้าสูงเป็นลำดับ 3 ในกลุ่มของสารป้องกันกำจัดโรคพืช โดยมีมูลค่าการนำเข้ากว่า 70 ล้านบาท ดังตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 สารป้องกันกำจัดโรคพืชที่มีการนำเข้าสูงสุด 10 ลำดับในปี 2555

ลำดับที่	ชื่อสามัญ	ปริมาณ (กก.)	มูลค่า (บาท)	สาระสำคัญ (กก.)
1	Mancozeb	1,404,900.00	136,663,617.45	1,123,912.70
2	Propineb	732,970.00	118,553,359.12	513,079.00
3	Carbendazim	763,273.50	70,864,530.33	403,238.43
4	Captan	474,262.00	103,066,385.70	314,539.70
5	Propiconazole	353,488.00	1,001,349,972.17	309,846.08
6	Fifenoconazole	317,680.00	1,190,642,051.20	296,931.21
7	Fosetyl-aluminium	342,470.00	55,186,164.96	296,376.00
8	Copper hydroxide	374,000.00	75,394,115.92	287,980.00
9	Metalaxyl	514,614.00	79,778,317.25	128,654.50
10	Phosphonic acid	226,901.00	22,230,248.29	90,760.40

ที่มา: สำนักควบคุมพืชและวัสดุการเกษตร (2555)

คาร์เบนดาซิมเป็นสารที่คงตัวสูงสลายตัวได้ยากทั้งในสิ่งแวดล้อม ในผลผลิตทางการเกษตร และในอาหาร ทำให้เกิดการตกค้างและถ่ายทอดในวัฏจักรสิ่งแวดล้อม มีผลกระทบต่อระบบนิเวศและสุขภาพ (Readman และคณะ, 1997) ความเป็นพิษต่อคนและสิ่งมีชีวิตของสารคาร์เบนดาซิม มักนิยามรายงานอยู่ในรูปค่าแอลดี 50 (LD₅₀) ซึ่งหมายถึง ปริมาณสารที่ทำให้สัตว์ทดลองตายไปจำนวนครึ่งหนึ่ง (ร้อยละ 50) ของจำนวนทั้งหมด คาร์เบนดาซิมมีค่าแอลดี 50 ทางปาก (หนู) มากกว่า 10,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (น้ำหนักตัว) และแอลดี 50 ทางผิวหนัง (หนู) มากกว่า 2,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (น้ำหนักตัว) จัดอยู่ในกลุ่ม 3 (วัตถุอันตรายที่การผลิต การนำเข้า การส่งออก หรือการมีไว้ในครอบครองต้องได้รับใบอนุญาต) จากการจัดความเป็นพิษของสารเคมีทั้งหมด 4 กลุ่ม

ซึ่งเรียงลำดับจากความเป็นพิษสูงสุดไปยังความเป็นพิษต่ำสุดได้เป็น กลุ่ม 1A (ใช้ฉลากที่เครื่องหมาย หัวกะโหลกกับกระดูกไขว้ พร้อมข้อความระบุ “พิษร้ายแรงมาก” บนแถบสีแดง), กลุ่ม 1B (ใช้เครื่องหมายบนแถบสีแดงเช่นเดียวกัน แต่ข้อความระบุว่า พิษร้ายแรง), กลุ่ม 2 (ใช้เครื่องหมาย กากบาทพร้อมข้อความ “อันตราย” บนแถบสีเหลือง), กลุ่ม 3 (มีข้อความระบุ “ระวัง” บนแถบสีน้ำเงิน) (รุ่ง วงศ์วัฒน์, 2553)

ปริมาณสารพิษตกค้างในผลผลิตทางการเกษตรนิยมแสดงในหน่วยของ มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ของผลผลิต โดยสำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ ได้มีการกำหนดค่ามาตรฐานความเข้มข้นสูงสุดของสารคาร์เบนดาซิมตกค้างในผลผลิตทางการเกษตรชนิดต่างๆ ของประเทศไทยและต่างประเทศที่อนุญาตให้มีได้ หรือ Maximum Residue Limits : MRLs ดังแสดงในตารางที่ 2-4 และ 2-5 ตามลำดับ

ตารางที่ 2-4 ปริมาณสารพิษคาร์เบนดาซิมตกค้างสูงสุดที่อนุญาตให้มีได้ (MRLs) ของประเทศไทย

สินค้า	ปริมาณสารพิษสูงสุด (มก./กก.)	สินค้า	ปริมาณสารพิษสูงสุด (มก./กก.)
กุยช่าย	3	ใบหม่อน	0.1
ข้าวสาร	2	พริก	2
ไข่	0.05	พริกแห้ง	15
เครื่องในสัตว์ปีก	0.1	มะเขือเทศ	0.5
เครื่องในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม	0.05	มะม่วง	5
เงาะ	3	มันสัตว์ปีก	0.05
ต้นหอม	3	เมล็ดฝ้าย	0.1
ถั่วเขียว	0.5	หน่อไม้ฝรั่ง	0.2
ถั่วลิสง	0.1	หอมแดง	3
ถั่วเหลืองฝักสด	3	หอมใหญ่	3
ถั่วเหลือง	0.5	องุ่น	3
นม	0.05	อ้อย	0.1
เนื้อโค กระบือ	0.05	เนื้อสัตว์ปีก	0.05

ที่มา: สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (2557)

ตารางที่ 2-5 ปริมาณสารพิษคาร์เบนดาซิมตกค้างสูงสุดที่อนุญาตให้มีได้ในใบกุยช่าย (MRLs) ของต่างประเทศ

ประเทศ	ปริมาณสารพิษคาร์เบนดาซิม ตกค้างสูงสุดที่อนุญาตให้มีได้
	ใบกุยช่าย
กลุ่มสหภาพยุโรป	0.1 (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)*
ญี่ปุ่น	3.0 (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)**
เกาหลี	1.0 (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)***

* ที่มา: EU Pesticide database (2014)

** ที่มา: The Japan Food Chemical Research Foundation (n.d.)

*** ที่มา: The Korean Food and Drug Administration (2009)

กฎหมาย นาคเจือทอง และคณะ (2554) ได้ทำการสำรวจปริมาณสารคาร์เบนดาซิมตกค้างในผลผลิตทางการเกษตรที่ซื้อจากตลาดค้าส่งและห้างสรรพสินค้าในเขตปริมณฑลในช่วงปี 2553 - 2554 พบปริมาณสารพิษตกค้างคาร์เบนดาซิมแสดงได้ดังตารางที่ 2-6

ตารางที่ 2-6 ผลสำรวจปริมาณสารคาร์เบนดาซิมตกค้างในผลผลิตทางการเกษตรในปี 2553-2554

ผลผลิตทางการเกษตร	ปริมาณคาร์เบนดาซิมตกค้าง (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)
ต้นหอม (24 ตัวอย่าง)	7.3-13.3
ใบกุยช่าย (24 ตัวอย่าง)	6.4-13.2
ขึ้นฉ่าย (24 ตัวอย่าง)	6.9-15.6
ผักชี (1 ตัวอย่าง)	7.8
มะเขือเทศ (2 ตัวอย่าง)	6.1-6.8
แตงกวา (1 ตัวอย่าง)	0
คะน้า (1 ตัวอย่าง)	0.06

ที่มา: กฎหมาย นาคเจือทอง และคณะ (2554)

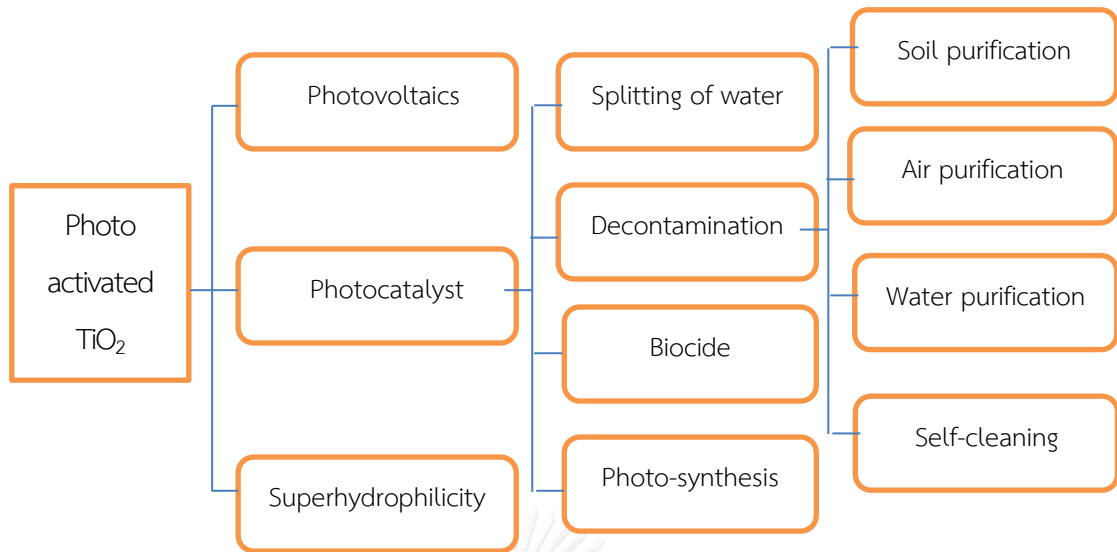
2.2 การลดสารกำจัดศัตรูพืชในผลผลิตทางการเกษตร

ในปัจจุบันผู้บริโภคมีความเสี่ยงสูงที่จะได้รับอันตรายจากการบริโภคสินค้าทางการเกษตรที่มีการตกค้างของสารกำจัดศัตรูพืช แม้ว่าปริมาณสารตกค้างที่มีในผลผลิตอาจจะไม่เกินค่ามาตรฐาน แต่การบริโภคเป็นระยะเวลาอันยาวนานติดต่อกันจะก่อให้เกิดการสะสมและส่งผลกระทบต่อสุขภาพได้เช่นกัน ดังนั้นเพื่อให้เกิดความปลอดภัยในการรับประทานผักและผลไม้ จึงมีคำแนะนำมากมายเกี่ยวกับการลดปริมาณสารตกค้างในผลผลิตทางการเกษตรเพื่อให้ปริมาณสารตกค้างลดน้อยลงก่อนนำไปรับประทานหรือก่อนนำไปประกอบอาหารด้วยวิธีที่สามารถปฏิบัติได้ง่ายและเป็นที่ยอมรับ เช่น การล้างผักโดยใช้น้ำไหลผ่าน ทำโดยการนำผลผลิตใส่ตะแกรงแล้วจึงเปิดน้ำให้ไหลผ่านประมาณ 2 นาที สามารถลดสารพิษลงได้ร้อยละ 25-63 โดยข้อเสียอยู่ที่ต้องใช้เวลาและใช้น้ำปริมาณมาก หรือการแช่ผลผลิตในน้ำที่ผสมน้ำส้มสายชู ที่ความเข้มข้นของกรดน้ำส้ม 5 อัตราส่วน 1 ส่วนต่อน้ำ 10 ส่วน เป็นระยะเวลา 10-15 นาที จะสามารถลดปริมาณสารพิษลงร้อยละ 60-84 โดยข้อเสียของวิธีนี้ คือ ทำให้ผักติดกลิ่นของน้ำส้มสายชู และ ในผักบางชนิด เช่น ผักกาดขาว ผักกาดเขียว อาจมีการดูดความเปรี้ยวจากน้ำส้มสายชูทำให้รสชาติเปลี่ยน หรือการใช้ต่างทับทิม ผสมในน้ำ 4 ลิตร ใช้เวลาแช่ประมาณ 10 นาที แล้วล้างด้วยน้ำสะอาด วิธีนี้สามารถลดสารพิษลงได้ร้อยละ 35-43 แต่ข้อจำกัด คือ การใช้ต่างทับทิมในปริมาณสูงเกินไปก่อให้เกิดอันตรายต่อระบบทางเดินอาหาร และการสูดดมไอระเหยของต่างทับทิมปริมาณมากก็ส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ รวมถึงหากเข้าตาอาจทำให้ตาบอดได้ (ฉัตรภา หัตถโกศล, 2556) นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ สมสมัย ปาลกุล และคณะ (2531) ศึกษาประสิทธิภาพของวิธีการลดปริมาณสารพิษตกค้างเม็ทธิลพาราไรออนและเม็ทธิโรมิลในพุดรา โดยใช้วิธีที่แตกต่างกัน 9 วิธีได้แก่ การล้างด้วยน้ำไหลจากก๊อกประปา การแช่น้ำ การล้างด้วยน้ำขาวข้าว การล้างด้วยน้ำส้มสายชู การล้างด้วยน้ำปูนใส การล้างด้วยน้ำเกลือ การล้างด้วยน้ำยาไลโปนวี และการปกเปลือก การศึกษาพบว่าวิธีการปกเปลือกมีประสิทธิภาพดีสุดในการลดสารเม็ทธิลพาราไรออนโดยสามารถลดได้ถึงร้อยละ 92 ส่วนวิธีอื่นๆลดได้ร้อยละ 2.7-33.3 ขณะที่การลดสารเม็ทธิโรมิล วิธีการแช่น้ำเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยลดได้ร้อยละ 60 ส่วนวิธีอื่นๆลดได้เพียง ร้อยละ 4-49 การศึกษาของ เอนก หาลี และ ธวัชชัย ศุภวิทิตพัฒนา (2555) ได้ศึกษาการลดสารเม็ทธิโรมิลในขณะด้วยการแช่น้ำผสมต่างทับทิมความเข้มข้น 0.1% เปรียบเทียบกับการแช่น้ำผสมน้ำยาล้างผัก 3 ยี่ห้อ นาน 15 นาที พบว่าการแช่น้ำต่าง

ทับทิมสามารถลดเมทโรมิลได้ร้อยละ 68.9 ขณะที่การล้างน้ำผสมน้ำยาล้างผักลดได้ร้อยละ 46.6-52.2 หรืองานวิจัยของ Satpathy และคณะ (2012) ได้ศึกษาการลดสารกำจัดศัตรูพืชกลุ่มออกาโนฟอสเฟต โดยใช้ พาราไรออน เมททิลพาราไรออนมาลาไรออน เพนิโตรไรออน ฟอมอไรออน และคลอไพริฟอสในการทดลองในผลผลิตทางการเกษตร ได้แก่ มะเขือม่วง กระเจี๊ยบเขียว มะเขือเทศ ถั่ว กระหล่ำดอก และพริกแดง ทำการทดลองโดยการแช่ผลผลิตทางการเกษตรในน้ำ น้ำผสมต่างทับทิมความเข้มข้นร้อยละ 0.001 น้ำผสมกรดน้ำส้ม (อะซิติก) ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 น้ำผสมวิตามินซี หรือ กรดแอสคอร์บิก ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 น้ำผสมกรดมาลิกความเข้มข้นร้อยละ 0.1 น้ำผสมกรดกรดออกซาลิกความเข้มข้นร้อยละ 0.1 น้ำผสมโซเดียมไบคาร์บอเนตความเข้มข้นร้อยละ 0.9 น้ำเกลือ และการต้ม โดยแช่นาน 15 นาที พบว่าการแช่น้ำให้ประสิทธิภาพในการลดสารกำจัดศัตรูพืชได้ต่ำที่สุดคือ ร้อยละ 20 ± 2 ถึง 45 ± 1 ในขณะที่การต้มให้ประสิทธิภาพสูงที่สุดโดยมีประสิทธิภาพอยู่ในช่วงร้อยละ 88.4 ± 3 ถึง 100 โดยประสิทธิภาพในการกำจัดจะแตกต่างกันไปแต่ละชนิดของสารกำจัดศัตรูพืช และในแตกต่างกันไปในแต่ละชนิดผัก ในส่วนของการลดสารตกค้างคาร์เบนดาซิมได้มีการศึกษาของ วิรัตน์ บวรศรีสุข (2548) ศึกษาการลดสารพิษตกค้างคาร์เบนดาซิมในผักกาดขาวโดยแช่น้ำที่ละลายออกซิเจนและน้ำที่ละลายโอโซน พบว่าการแช่น้ำที่ละลายด้วยออกซิเจนเป็นเวลา 35 นาทีให้ประสิทธิภาพสูงสุดที่ร้อยละ 87 แต่อย่างไรก็ตามวิธีเหล่านี้ยังไม่สามารถลดสารตกค้างในผลผลิตทางการเกษตรได้อย่างสมบูรณ์

2.3 ปฏิริยาโฟโตคะตะไลซิส

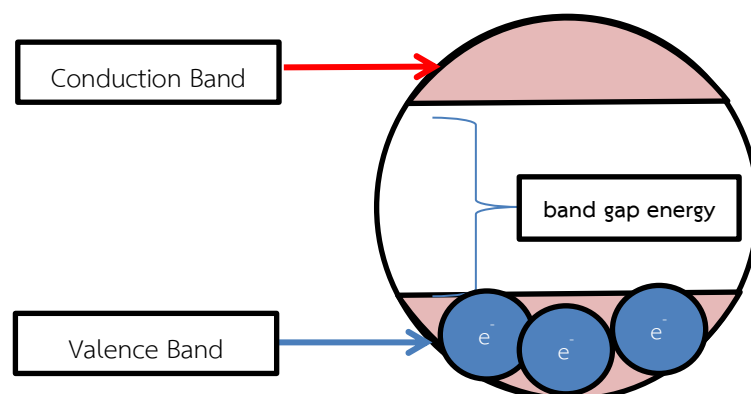
ปฏิริยาโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis) เป็นปฏิริยาที่รู้จักกันอย่างกว้างขวางถูกนำมาใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสีย สีย้อม มลพิษอากาศ และจุลินทรีย์ ดังแสดงในรูปที่ 2-2 ซึ่งการเกิดปฏิริยาจะต้องประกอบไปด้วยตัวเร่งปฏิริยาที่เป็นสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) พลังงานแสง น้ำ และ ออกซิเจน (ฉลาด บรรเทา และ ชูสิทธิ์ ศรีสุทธิกรม, 2548)



รูปที่ 2-2 การประยุกต์ใช้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

ที่มา: Lan และคณะ (2013)

สารกึ่งตัวนำ (semiconductor) มีโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยแถบวาเลนซ์ (valence band) และแถบการนำไฟฟ้า (conduction band) โดยที่แถบวาเลนซ์จะมีระดับพลังงานต่ำกว่าแถบการนำไฟฟ้า และมีช่องว่างระหว่างสองแถบพลังงานเรียกว่า band gap energy: E_g ดังแสดงในรูปที่ 2-3 สารกึ่งตัวนำส่วนใหญ่เป็นสารในกลุ่มโลหะออกไซด์ เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์ เซอร์คอนเนียมไดออกไซด์ ดีบุกออกไซด์ ทังสเตนออกไซด์ ซีเรียออกไซด์ เป็นต้น



รูปที่ 2-3 โครงสร้างอนุภาคสารกึ่งตัวนำ

ที่มา: ดัดแปลงจาก ภาณุมาศ นาคเจือทอง (2554)

ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเกิดจากการกระตุ้นสารกึ่งตัวนำที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้พลังงานแสงที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำตัวนั้นๆ เมื่อสารกึ่งตัวนำได้รับพลังงานจะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ กระโดดข้ามแถบพลังงานไปยังแถบการนำไฟฟ้า เหลือเป็นช่องว่างที่เรียกว่า โฮล (hole: h^+_{vb}) ส่วนอิเล็กตรอนที่ข้ามไปอยู่ในแถบการนำไฟฟ้า จะแทนด้วย e^-_{eb} สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.1)



ช่องว่าง h^+_{vb} มีสภาพขาดแคลนอิเล็กตรอน ดังนั้นเมื่อทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ในน้ำ จะเกิดเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ($\cdot\text{OH}$) นอกจากนี้ h^+_{vb} ยังสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำเกิด $\cdot\text{OH}$ และ โปรตอน (H^+) ดังสมการที่ (2.2) และ (2.3)



ส่วนอิเล็กตรอนที่ข้ามมาอยู่ในแถบการนำไฟฟ้า เมื่อทำปฏิกิริยารีดักชันกับออกซิเจนจะเกิดเป็นอนุมูลอิสระซูเปอร์ออกไซด์ และอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยาต่อกับ H^+ ได้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ดังสมการ (2.4) และ (2.5)



ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นสามารถเกิดปฏิกิริยากับอิเล็กตรอนที่แถบการนำไฟฟ้าได้ เนื่องจากเป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่ดีทำให้เกิด $\cdot\text{OH}$ อีกครั้งดังสมการที่ (2.6) และ (2.7)



(Ioannis และคณะ, 2001)

ทั้งนี้พลังงานที่ใช้กระตุ้นให้อิเล็กตรอนกระโดดข้ามไปยังแถบการนำไฟฟ้าได้นั้นสามารถคำนวณได้จาก

$$E = h \nu = \frac{hc}{\lambda}$$

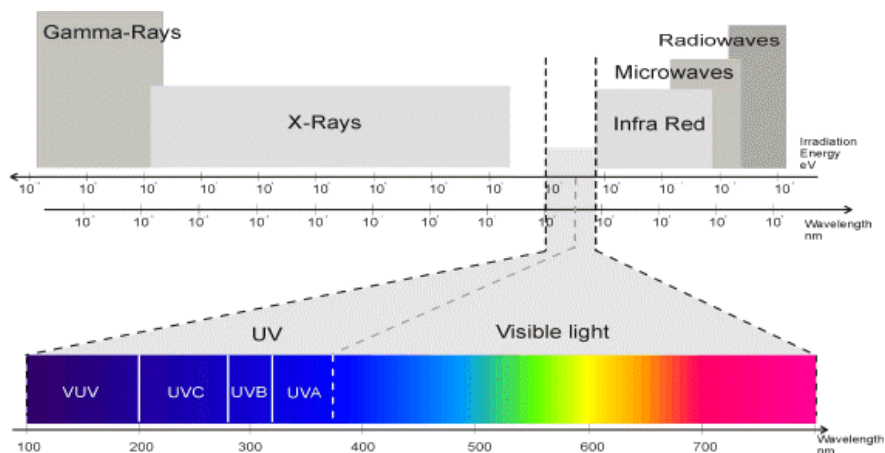
เมื่อ	E	คือ	พลังงานควอนตัม (Quantum Energy), จูล
	h	คือ	ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's Constant) = 6.625×10^{-34} , จูล-วินาที
	ν	คือ	ความถี่ของคลื่นแสง, เฮิรตซ์ หรือ รอบ ต่อ วินาที
	λ	คือ	ความยาวคลื่นแสง, นาโนเมตร
	c	คือ	ความเร็วของคลื่นแสง = 2.997×10^8 , เมตรต่อวินาที

ในกรณีที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะมีค่าพลังงานควอนตัมเท่ากับ 3.2 eV ซึ่งจะคำนวณความยาวคลื่นแสงที่ใช้ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{hc}{E} = \frac{(6.625 \times 10^{-34} \text{ J-s})(3 \times 10^8 \text{ m/s}) \times \frac{1 \text{ eV}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ J}}}{3.2 \text{ eV}} \\ &= 3.88 \times 10^{-7} \\ &= 388 \text{ nm} \end{aligned}$$

(Goswami และคณะ, 2000)

โดยช่วงพลังงานที่มีความยาวคลื่น 388 นาโนเมตร คือ พลังงานจากรังสีอัลตราไวโอเล็ตชนิด เอ รังสีอัลตราไวโอเล็ตทั้งหมดมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 100 – 400 นาโนเมตร สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงคลื่นหลัก คือ ชนิดเอ ชนิดบี และ ชนิดซี (Muszkat, 1998) ดังแสดงในรูปที่ 2-4



รูปที่ 2-4 UV spectrum

ที่มา: zontecozone (n.d.)

ในบรรดาตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งหมดนั้น ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นที่นิยมใช้กันมากที่สุด เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสมากที่สุด มีความคงตัวสูง ราคาถูก ไม่เป็นพิษ สามารถแสดงคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีได้ดังตารางที่ 2-7 โดยสามารถเรียงลำดับประสิทธิภาพของสารกึ่งตัวนำได้ดังนี้ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (อนาเทส) > ซิงค์ออกไซด์ > ทังสเตนออกไซด์ (Mo และคณะ, 2009)

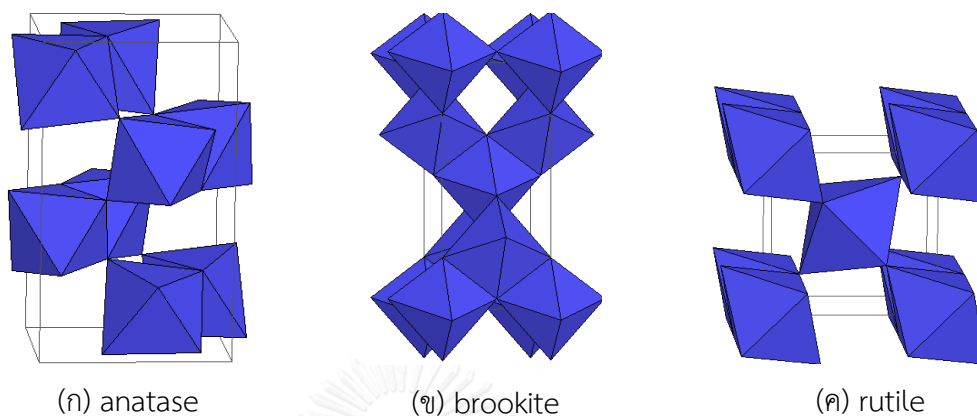
ตารางที่ 2-7 สมบัติทางกายภาพและเคมีของไทเทเนียมไดออกไซด์

คุณสมบัติ	ไทเทเนียมไดออกไซด์
มวลโมเลกุล (Molar mass)	79.8658 กรัม/โมล
สูตรเคมี (chemical formula)	TiO ₂
ลักษณะ	เป็นของแข็งสีขาว
ความหนาแน่น (Density)	3.84-4.26 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
จุดเดือด (Boiling point)	2,500 องศาเซลเซียส
จุดหลอมเหลว (Melting point)	1,850 องศาเซลเซียส
ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity)	0.7 กรัม/ลูกบาศก์เดซิเมตร
การละลายน้ำ (Solubility)	ไม่ละลายน้ำ
ดัชนีการหักเหแสง (Refractive index)	2.76 ~ 2.55
ความแข็ง (Mohs Hardness)	6-7, 5.5-6
ความจุไฟฟ้า (Capacitance ratio)	114 to 31
สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้น (The coefficient of linear expansion)	25 องศาเซลเซียส
ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity)	1.809 to 10.3
ค่าการดูดซับน้ำมัน (Oil absorption)	16 ~48, 18 ~30
ขนาดอนุภาค (Particle size)	0.2 ~ 0.3, 0.3
ความเป็นพิษ (Toxicity)	ไม่เป็นพิษ

ที่มา : Lookchem (2004)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยทั่วไปมีโครงสร้างผลึกที่สามารถพบได้แตกต่างกัน 3 รูปแบบ ดังรูปที่ 2-5 ได้แก่ อนาเทส (anatase) มีโครงสร้างผลึกแบบเทตระโกนัล (tetragonal) เป็นชนิดที่พบได้ปานกลางในธรรมชาติ และจะเปลี่ยนเป็นรูไทล์เมื่อได้รับความร้อนเกิน 915 องศาเซลเซียส รูไทล์ (rutile) มีโครงสร้างผลึกแบบเทตระโกนัล (tetragonal) โดยสามารถพบมากที่สุดในธรรมชาติ เป็นโครงสร้างที่มีความเสถียรและมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และบรูคไคท์ (brookite) มีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก (orthorhombic) เป็นชนิดที่พบน้อยในธรรมชาติ ไม่เสถียรต่อ

อุณหภูมิสูง และจะเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นแบบรูไทล์เมื่อได้รับความร้อนมากกว่า 750 องศาเซลเซียส (สยามเคมี.คอม, 2554) โดยทั้งสามโครงสร้างผลึกมีคุณสมบัติดังตารางที่ 2-8



รูปที่ 2-5 โครงสร้างผลึกแบบต่างๆของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์

ที่มา: University of Colorado (2014)

ตารางที่ 2-8 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของโครงสร้างผลึกอนาเทส รูไทล์ และบรูคไคท์

Property	Rutile TiO ₂	Anatase TiO ₂	Brookite TiO ₂
Form.Wt.	79.890	79.890	79.890
Z	2	4	8
Crystal System	tetragonal	tetragonal	orthorhombic
Point Group	4/mmm	4/mmm	mmm
Space Group	P42/mnm	I41/amd	Pbca
Unit Cell			
a (Å)	4.5845	3.7842	9.184
b (Å)			5.447
c (Å)	2.9533	9.5146	5.145
Vol	62.07	257.38	257.38
MolarVol	18.693	20.156	19.377
Density	4.2743	3.895	4.123

ที่มา: University of Colorado (2014)

โครงสร้างผลึกที่นิยมนำมาใช้ในงานด้านปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส คือ อนุภาคและรูทูล์ จากคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพที่แตกต่างกันทำให้โครงสร้างผลึกแต่ละชนิดมีประสิทธิภาพในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสที่ต่างกัน โดย Bakardjieva และคณะ (2005) ใช้สารไทเทเนียมเตตระออกไซด์ซัลเฟตเป็นสารตั้งต้นผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิสก่อนนำไปเผาที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ตั้งแต่ 200 องศาเซลเซียส ไปจนถึง 1,150 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่า การเผาที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน ทำให้ได้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีสัดส่วนโครงสร้างผลึกอนุภาคต่อรูทูล์ที่แตกต่างกันตั้งแต่ 100 : 0 - 0 : 100 จากนั้นนำไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ไปทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดสาร 4-ไดคลอโรฟีนอลในน้ำ ความเข้มข้น 0.1377 มิลลิโมลาร์ พบว่า การสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 825 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง มีสัดส่วนโครงสร้างผลึกอนุภาคต่อรูทูล์ 77.4 : 22.6 ซึ่งเป็นสัดส่วนที่ใกล้เคียงกับผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) และมีประสิทธิภาพในการกำจัด 4-ไดคลอโรฟีนอลสูงสุด หรือการศึกษาของ Ohno และคณะ (2001) ที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับสัดส่วนโครงสร้างผลึกโดยทำการผสมผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สัดส่วนผลึกอนุภาคต่อรูทูล์ 100 : 0, 75 : 25 และ 0 : 100 เปรียบเทียบประสิทธิภาพกับผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ในการกำจัดแวนทาลีน พบว่าผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ให้ประสิทธิภาพใกล้เคียงกับผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีสัดส่วนโครงสร้างผลึก 75 : 25 นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Choi และ Hong (2012) ที่สังเคราะห์เส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์จากไทเทเนียมไอโซโพรพอกไซด์ (TIP) ผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลไพโรลิโดน (polyvinylpyrrolidone: PVP) โดยเผาที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส ให้มีสัดส่วนโครงสร้างผลึกที่ใกล้เคียงกับผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดยารานิทิดีน (ranitidine) ตกค้างในน้ำ พบว่าเส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์เผาที่ 600 องศาเซลเซียส มีสัดส่วนโครงสร้างผลึกอนุภาคต่อรูทูล์เท่ากับ 70 : 30 และมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาใกล้เคียงกับผงไทเทเนียมไดออกไซด์มากที่สุดคือ 0.008 และ 0.011 ต่อนาที ตามลำดับ

2.4 การบำบัดสารมลพิษด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

เนื่องจากปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเป็นปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถสลายสารอินทรีย์ไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ จึงทำให้มีนักวิจัยศึกษาประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในการกำจัดสารพิษในรูปแบบต่างๆมากมาย อาทิเช่น Neppolian และคณะ (2000) ทดลองบำบัดน้ำเสียสีส้ม 3 ชนิด ได้แก่ รีแอกทีฟเรด, รีแอกทีฟเยลโล และ รีแอกทีฟบลู โดยใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25)

100, 200, 300, 400, 500 และ 600 มิลลิกรัมต่อน้ำสี 100 มิลลิลิตร โดยใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ (1.514×10^{-9} ไอสไตนต่อตารางเซนติเมตร-วินาที) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่า ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์ 600 มิลลิกรัมต่อน้ำสี 100 มิลลิลิตร ให้ประสิทธิภาพมากที่สุดใน การกำจัดสี รีแอกทีฟเยลโล, รีแอกทีฟเรด และ รีแอกทีฟบลู คือ ร้อยละ 94, 95 และ 88 ตามลำดับ

ในส่วนของการลดสารกำจัดศัตรูพืชโดยการใช้อนุภาคโฟโตคะตะไลซิส ภาณุมาศ นาคเจือทอง (2554) ศึกษาการกำจัดสารพิษตกค้างคาร์เบนดาซิมในผลผลิตทางการเกษตร 3 ชนิด คือ กุยช่าย ขึ้นฉ่าย และต้นหอม โดยใช้ผงไททาเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) 0.05, 0.1, 0.5 และ 1 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 40, 80 และ 120 มิลลิโมลาร์ แซ่ผลผลิตทางการเกษตรเป็นเวลา 50 นาที โดยเมื่อครบทุกๆ 10 นาที จะนำผลผลิตทางการเกษตรไปวิเคราะห์สารคาร์เบนดาซิมคงเหลือ พบว่าเมื่อใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 120 มิลลิโมลาร์ร่วมกับผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.05 กรัมต่อลิตร สามารถกำจัดคาร์เบนดาซิมได้อย่างสมบูรณ์ภายในเวลา 30 นาทีและเมื่อเพิ่มปริมาณผงไทเทเนียมไดออกไซด์เป็น 0.1-1 กรัมต่อลิตรสามารถกำจัดคาร์เบนดาซิมได้สมบูรณ์โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาล้างเหลือเพียง 5-15 นาที

ถึงแม้ว่าผงไทเทเนียมไดออกไซด์จะให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูง แต่ในแง่ของการนำไปใช้งานจริงแล้วกระทำลำบาก เนื่องจากผงไทเทเนียมไดออกไซด์มีขนาดเล็ก การคัดแยกออกจากตัวกลางหลังจากปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเสร็จสิ้นแล้วเป็นไปได้ยาก ส่งผลให้เกิดการตกค้าง จึงมีการประยุกต์ใช้ โดยการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ลงบนวัสดุต่างๆ ดังเช่น Chen และ Cao (2004) ศึกษาการกำจัดสารกำจัดศัตรูพืช Phorate โดยใช้เม็ดซิลิกาจุ่มเคลือบสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) 3 กรัมต่อลิตรและเผาที่อุณหภูมิ 550, 600, 650 และ 700 องศาเซลเซียส โดยที่แต่ละอุณหภูมิ ใช้เวลาในการเผาที่ 3, 5 และ 10 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่าเมื่อเผาเม็ดซิลิกาเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส นาน 5 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการกำจัดสารโฟเลท (Phorate) สูงที่สุดคือร้อยละ 59.8 เมื่อใช้พลังงานแสงจากดวงอาทิตย์ รวมถึงงานวิจัยของ Lhomme และคณะ (2008) ที่ศึกษาการกำจัดสารกำจัดศัตรูพืชคลอโรลอรอน (Chlortoluron) และ ไซโปรโคนาโซล (Cyproconazole) บนเป็อนในน้ำเสียทางการเกษตร โดยใช้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส โดยการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นกรองเส้นใยเซลลูโลสขนาด 0.72×0.25 เมตร ความหนา 2 มิลลิเมตร ใช้พลังงานแสงจากหลอดรังสี UVA ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร ความเข้มแสง 38 ± 0.2 วัตต์ต่อตารางเมตร พบว่าสามารถกำจัด Chlortoluron ได้ร้อยละ 78 และ กำจัดสารไซโปรโคนาโซลได้ร้อยละ

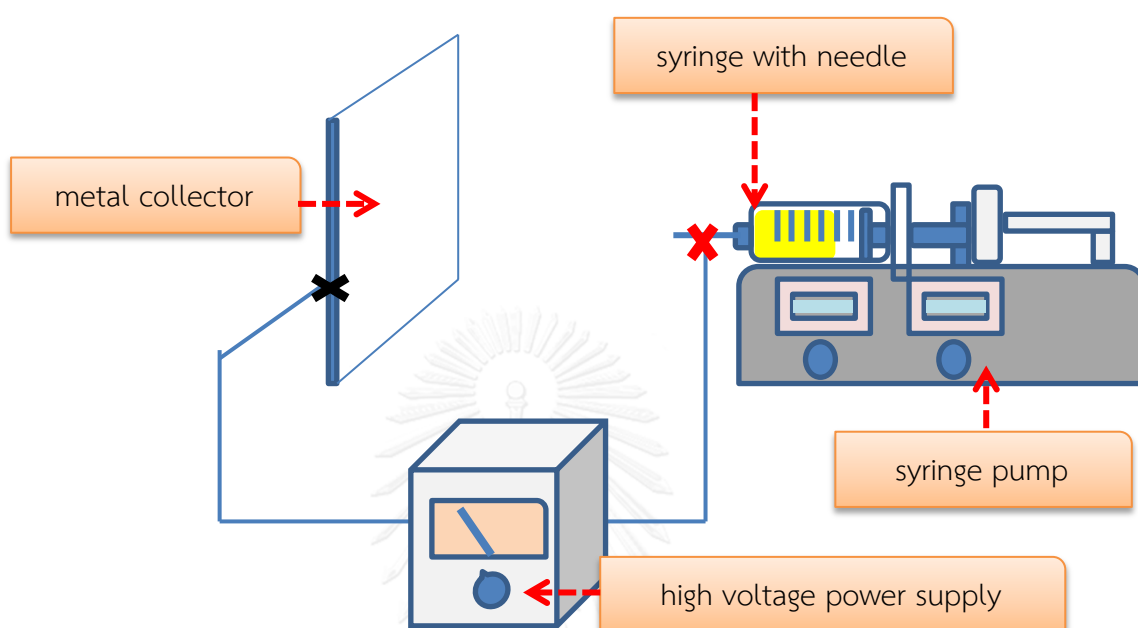
ละ 71 ในเวลา 5 ชั่วโมง รวมถึงการศึกษาของ Zhao และคณะ (2009) ที่ศึกษาการกำจัดสารกำจัดศัตรูพืชโอเมทโทเอท (omethoate) โดยใช้ซีโอไลท์ทัวเลย์เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์จากเตตระบิวทิลไททาเนท (tetrabutyl titanate) ร้อยละ 35.2 (โดยน้ำหนัก) แล้วเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ใช้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 5 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร และใช้พลังงานจากหลอดรังสีอัลตราไวโอเลตชนิดเอ ขนาด 300 วัตต์ ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร ความเข้มแสง 0.22 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร พบว่าได้ประสิทธิภาพการกำจัดโอเมทโทเอทสูงถึงร้อยละ 95

2.5 การสังเคราะห์เส้นใยด้วยวิธีอิเล็กโตรสปินนิง

เส้นใยนาโน (nanofiber) เป็นเส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กมากในระดับนาโนเมตรจึงทำให้เส้นใยมีพื้นที่ผิวต่อหน่วยปริมาตรหรือพื้นที่ผิวต่อหน่วยปริมาตรสูง มีรูพรุนขนาดเล็ก และมีค่าแรงต้านทานสูง (Shumate และคณะ, 2008) ลักษณะและคุณสมบัติดังกล่าวจึงมีการนำนาโนไฟเบอร์ไปประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆมากมาย เช่น เป็นวัสดุในการกรองสาร เป็นวัสดุวิศวกรรมเนื้อเยื่อ วัสดุควบคุมการนำส่งยาและเครื่องสำอาง สิ่งตกแต่งแผล วัสดุเสริมความแข็งแรง ตัวนำไฟฟ้าในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นส่วนประกอบของเสื้อผ้า และใช้ควบคุมการปล่อยสารกำจัดแมลงในเกษตรกรรม (ณัฐธัญ เจริญศรีวิไลวัฒน์ และปราณีต โอปณะโสภิต, 2551) ส่วนใหญ่เส้นใยที่สังเคราะห์ได้จะอยู่ในรูปของผืนเส้นใยที่ไม่ได้ทอ (non-woven nanofiber) แต่ก็มีเส้นใยอีกหลายลักษณะ เช่น นาโนไฟเบอร์ที่มีการจัดเรียงตัวของเส้นใยไปในทิศทางเดียวกัน (aligned nanofiber) หรืออยู่ในลักษณะของเส้นด้าย (yarn nanofiber) เป็นต้น ซึ่งเส้นใยแบบไม่ถักทอจะมีลักษณะเด่นคือ มีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากและมีความยืดหยุ่นสูง (Boundriot และคณะ, 2006) โดยรูปแบบต่างๆ ของเส้นใยนั้นขึ้นกับกระบวนการผลิต ซึ่งสามารถกระทำได้ 5 วิธี คือ วิธีดึงยึด (drawing) วิธีสังเคราะห์แบบเติมเพลต (template synthesis) วิธีแยกเฟส (phase separation) วิธีสังเคราะห์โดยจัดวางโมเลกุล (self-assembly) และ วิธีอิเล็กโตร-สปินนิง (electrospinning) (Huang และคณะ, 2003) โดยในที่นี้จะขอกกล่าวถึงเฉพาะวิธีสุดท้ายเท่านั้น

วิธีอิเล็กโตรสปินนิง เป็นวิธีที่นิยมนำมาใช้ในกระบวนการผลิตเส้นใยเนื่องจากไม่ซับซ้อน ใช้งานได้สะดวก มีค่าใช้จ่ายน้อย และสามารถควบคุมขนาดของเส้นใยได้ โดยมีส่วนประกอบหลักเพียง 3 ส่วนคือ แหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง (high voltage power supply) หลอดบรรจุสารละลายที่ติดเข็มโลหะ (syringe with needle) และ วัสดุรองรับที่เป็นโลหะ (metal collector) ดังแสดงในรูปที่

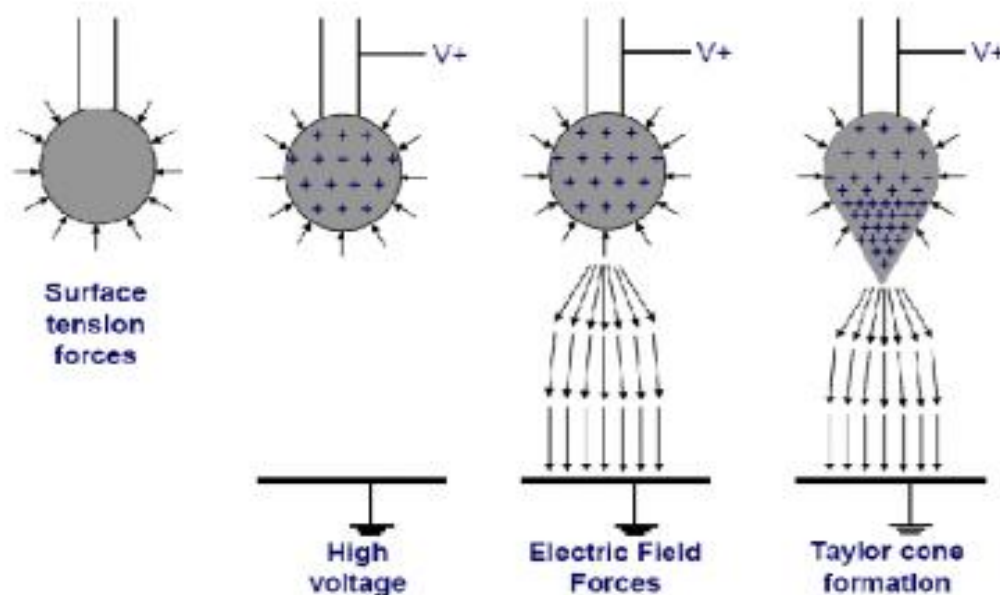
2-6 และสามารถเพิ่มอุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลของสารละลาย (syringe pump) ทำให้สามารถควบคุมขนาดและปริมาณการเกิดเส้นใยได้ต่อเนื่องมากยิ่งขึ้น (Huang และคณะ, 2003)



รูปที่ 2-6 อุปกรณ์การสังเคราะห์เส้นใยด้วยวิธีอิเล็กโตรสปินนิง

ที่มา: ดัดแปลงจาก Huang และคณะ (2003)

การสังเคราะห์เส้นใยเริ่มจากการต่อกระแสไฟฟ้าความต่างศักย์สูงขั้วบวกเข้ากับปลายเข็มโลหะ และต่อขั้วลบเข้ากับวัสดุรองรับที่เป็นโลหะเช่นกัน เมื่อเปิดกระแสไฟฟ้าที่ศักย์ไฟฟ้ามีค่าเท่ากับแรงตึงผิวของสารละลายพอลิเมอร์ เส้นใยจะพุ่งออกจากปลายเข็มไปยังวัสดุรองรับ โดยมีการเปลี่ยนรูปร่างของสารละลายจากทรงกลมเป็นลักษณะของสามเหลี่ยมคล้ายโคน เรียกว่า กรวยเทเลอร์ (Taylor cone) ดังแสดงในรูปที่ 2-7 โดยการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเป็นกรวยเทเลอร์จะขึ้นกับความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ การควบคุมอัตราการไหลของสารละลายพอลิเมอร์สามารถทำได้หลากหลาย เช่น การใช้แรงโน้มถ่วง (gravitational force) ป้อน (syringe pump) และแรงดันก๊าซ (pressure gas) เป็นต้น



รูปที่ 2-7 การเกิดกรวยเทเลอร์

ที่มา: SpinAid (2014)

2.6 การบำบัดสารมลพิษด้วยเส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์

Doh และคณะ (2007) สังเคราะห์เส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีอิเล็กโตรสปินนิงเพื่อนำไปบำบัดน้ำเสียสีย้อมผ้าเบสิคบลู 26 โดยใช้ไทเทเนียมเตตระไอโซโพรพอกไซด์ (titanium (IV) isopropoxide: TTIP) ผสมพอลิเมอร์ชนิด polyvinyl acetate โดยใช้เข็มขนาด 0.5 มิลลิเมตร กำหนดระยะห่างปลายเข็มกับวัสดุรองรับที่ 20 เซนติเมตรและให้กระแสไฟฟ้าความต่างศักย์ 0.9 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร เส้นใยที่ได้นำไปเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง แล้วจุ่มเคลือบสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีโซลเจล ความเข้มข้นร้อยละ 3.5 ก่อนนำไปบำบัดน้ำเสียสีย้อมผ้าโดยใช้พลังงานจากหลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ตชนิดเอ พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดสีร้อยละ 78.7 ในขณะที่ Choi และคณะ (2013) สังเคราะห์เส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยใช้ไทเทเนียมเตตระไอโซโพรพอกไซด์ (titanium (IV) isopropoxide: TTIP) และพอลิเมอร์พอลิเมทาคริลเลท (poly(methyl methacrylate: PMMA) นำไปบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อมเมทาคริลบลู โดยเผาเส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 450, 500 องศาเซลเซียสและไฮโดรเทอร์มอล 185 องศาเซลเซียส พบว่าเส้นใยที่เผาที่ไฮโดรเทอร์มอล 185 องศาเซลเซียสมีสัดส่วนโครงสร้างผลึกอนาเทสต่อรูไทล์ 100 : 0 ในขณะที่เส้นใยที่เผาที่ 450 องศาเซลเซียสและ 500 องศาเซลเซียสมีสัดส่วนโครงสร้างผลึกอนาเทสต่อรูไทล์ เท่ากับ 45 : 55 และ 7 : 93 ตามลำดับ

เมื่อนำมาทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดสีเมทาซีนพบว่าการเผาที่ 450 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพดีที่สุดโดยมีค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 1.55×10^{-2} รองลงมาคือการเผาที่ 500 องศาเซลเซียส มีค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 2.21×10^{-2} และไฮโดรเทอร์มอล 185 องศาเซลเซียส มีค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 7.40×10^{-3} นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Li และคณะ (2012) ที่ทำการเพิ่มประสิทธิภาพปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในการกำจัดสารกำจัดศัตรูพืชพาราไรออน โดยการสังเคราะห์เส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์จากสารตั้งต้นไทเทเนียมเตตระไอโซโพรพอกไซด์ (titanium (IV) isopropoxide: TTIP) ผสมซิลเวอร์ในเตรทที่สัดส่วนร้อยละ 2, 4 และ 8 ใช้พอลิเมอร์ชนิดพอลิไวนิลไพโรลิโดน (polyvinylpyrrolidone: PVP) มวลโมเลกุล 1,300,000 กรัมต่อโมล นำไปผลิตเส้นใยด้วยวิธีอิเล็กโตรสปินนิง โดยเผาที่ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมงและทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสารปราบศัตรูพืชพาราไรออนปนเปื้อนในน้ำความเข้มข้นเริ่มต้น 0.05 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร โดยใช้เส้นใย 4 มิลลิกรัม ต่อน้ำ 20 มิลลิลิตร โดยทำการกวน 30 นาทีก่อนฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตชนิดซี ($\lambda \geq 254$ นาโนเมตร, 6 วัตต์) ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดพาราไรออนปนเปื้อนร้อยละ 52, 67, 70, 90 และ 64 เมื่อใช้เส้นใยเงินเพียงอย่างเดียว เส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์เพียงอย่างเดียว และเส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมเงินในสัดส่วนร้อยละ 2, 4 และ 8 ตามลำดับ

จากการทบทวนเอกสารทั้งหมดดังกล่าวมานั้นพบว่ายังไม่มีการวิจัยได้นำเส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์มาประยุกต์ใช้กับการกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างในผลผลิตทางการเกษตร การศึกษานี้จึงมีแนวคิดในการสังเคราะห์เส้นใยด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ตั้งต้นและพอลิเมอร์ที่แตกต่างกัน โดยนำเส้นใยที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิต่างๆกันเพื่อให้ได้สัดส่วนโครงสร้างผลึกอนาเทสต่อรูไทล์ 100 : 0, 80 : 20, 70 : 30 และ 50 : 50 เปรียบเทียบกับการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ที่มีสัดส่วนโครงสร้างผลึกอนาเทสต่อรูไทล์ 70 : 30 เพื่อให้ทราบถึงสัดส่วนโครงสร้างผลึกที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในการกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างในใบกุยช่าย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการสังเคราะห์เส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์และหาสัดส่วนโครงสร้างผลึกอนาเทสต่อรูไทล์ที่เหมาะสมโดยใช้สารตั้งต้นไทเทเนียมไดออกไซด์และพอลิเมอร์ที่แตกต่างกัน 3 ชนิด เปรียบเทียบกับการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ในการกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างในใบกุยช่ายด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ในการศึกษามีการทดลองกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างด้วยวิธีการอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสด้วย ได้แก่ การแช่น้ำประปา การล้างน้ำไหลผ่านตะแกรง การเปิดน้ำไหลสั้น การแช่น้ำผสมน้ำส้มสายชู การแช่น้ำผสมน้ำยาล้างผัก และการแช่น้ำผสมต่างทับทิม โดยทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการของภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งมีรายละเอียดของวัสดุอุปกรณ์ สารเคมีและวิธีดำเนินการวิจัย ดังนี้

3.1 วัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมี

3.1.1 วัสดุ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- ชุดอุปกรณ์การปั่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์ป็นหนึ่ง ประกอบด้วย
 - เครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าแรงสูง (high voltage power supply) ยี่ห้อ GAMMA รุ่น ES50-20
 - เครื่องม้วนเส้นใย (drum collector)
 - เครื่องควบคุมอัตราการไหลสารอัตโนมัติ (syringe pump) ยี่ห้อ KDSscientific รุ่น KDS-101
- ชุดเครื่องมือระเหยสุญญากาศ (rotary evaporator) ประกอบด้วย
 - เครื่องหมุนระเหยสุญญากาศ ยี่ห้อ IKA รุ่น RV 10 Digital
 - อ่างน้ำปรับอุณหภูมิ ยี่ห้อ IKA รุ่น HB 10
 - บีมสุญญากาศ ยี่ห้อ Vacuubrand รุ่น MZ 2C NT
- อุปกรณ์วัดความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตเอ (radiometer) ยี่ห้อ UVP รุ่น UVX-36

4. เครื่องโครมาโตกราฟของเหลวสมรรถนะสูง (Ultra High performance liquid chromatography: UHPLC) ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น Nexera LC-30A ใช้หัวตรวจวัดชนิด PAD (Photo Diode Array Detector)
5. คอลัมน์สำหรับเครื่องโครมาโตกราฟของเหลวสมรรถนะสูง ชนิด C18 ยี่ห้อ Knauer ความยาวคอลัมน์ 250 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.6 มิลลิเมตร ขนาดอนุภาค 5 ไมโครเมตร
6. เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น BSA 224S
7. เครื่องชั่งละเอียด 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Denver รุ่น CP 3202S
8. เครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ยี่ห้อ IKA รุ่น RCT basic BS77
9. เครื่องปั่นผักผลไม้ ยี่ห้อ Waring รุ่น CAC32
10. หลอดไฟแบล็คไลท์ ยี่ห้อ Sylvania ขนาด 36 วัตต์ รุ่น blacklight 368 จำนวน 8 หลอด
11. ตู้ทดลองกระจก ขนาดกว้าง 13.5 เซนติเมตร ยาว 20.5 เซนติเมตร สูง 15.0 เซนติเมตร
12. กระดาษกรองเบอร์ 1 ยี่ห้อ Whatman
13. กระดาษกรองชนิดไนลอน 0.22 ไมครอน เส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร ยี่ห้อ MS
14. เครื่องทำสุญญากาศ (vacuum pump) รุ่น MZ 2C NT ยี่ห้อ Vacuubrand
15. ตู้อบความร้อน (hot air oven) ยี่ห้อ Labtech
16. เตาเผา ยี่ห้อ Carbolite รุ่น 301
17. อลูมิเนียมฟอยล์
18. กระจกฉีดยาแก้ว (glass syringe) ปริมาตร 20 มิลลิลิตร
19. กระจกฉีดยาพลาสติก (plastic syringe) ยี่ห้อ Nippo ปริมาตร 5 มิลลิลิตร
20. เข็มฉีดยา เบอร์ 18 และ 21 ยี่ห้อ Nippo
21. ขวดไวแอล (vial) ขนาด 2 มิลลิลิตร ยี่ห้อ Vertical
22. หลอดหยด (pasture pipette)

23. ขวดก้นกลม (round bottom flask) ยี่ห้อ Schott duran ขนาด 1,000 และ 800 มิลลิลิตร
24. เครื่องแก้วทั่วไป
25. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ยี่ห้อ Hitachi รุ่น SU8030
26. เครื่องวิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุ (Thermogravimetric Analysis: TGA) ยี่ห้อ NETZSCH รุ่น STA449C jupiter
27. เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของวัสดุ (Brunauer Emmet Teller: BET) ยี่ห้อ Autosorb 1 รุ่น 1 C
28. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer: XRD) ยี่ห้อ PANalytical รุ่น X'Pert PRO

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

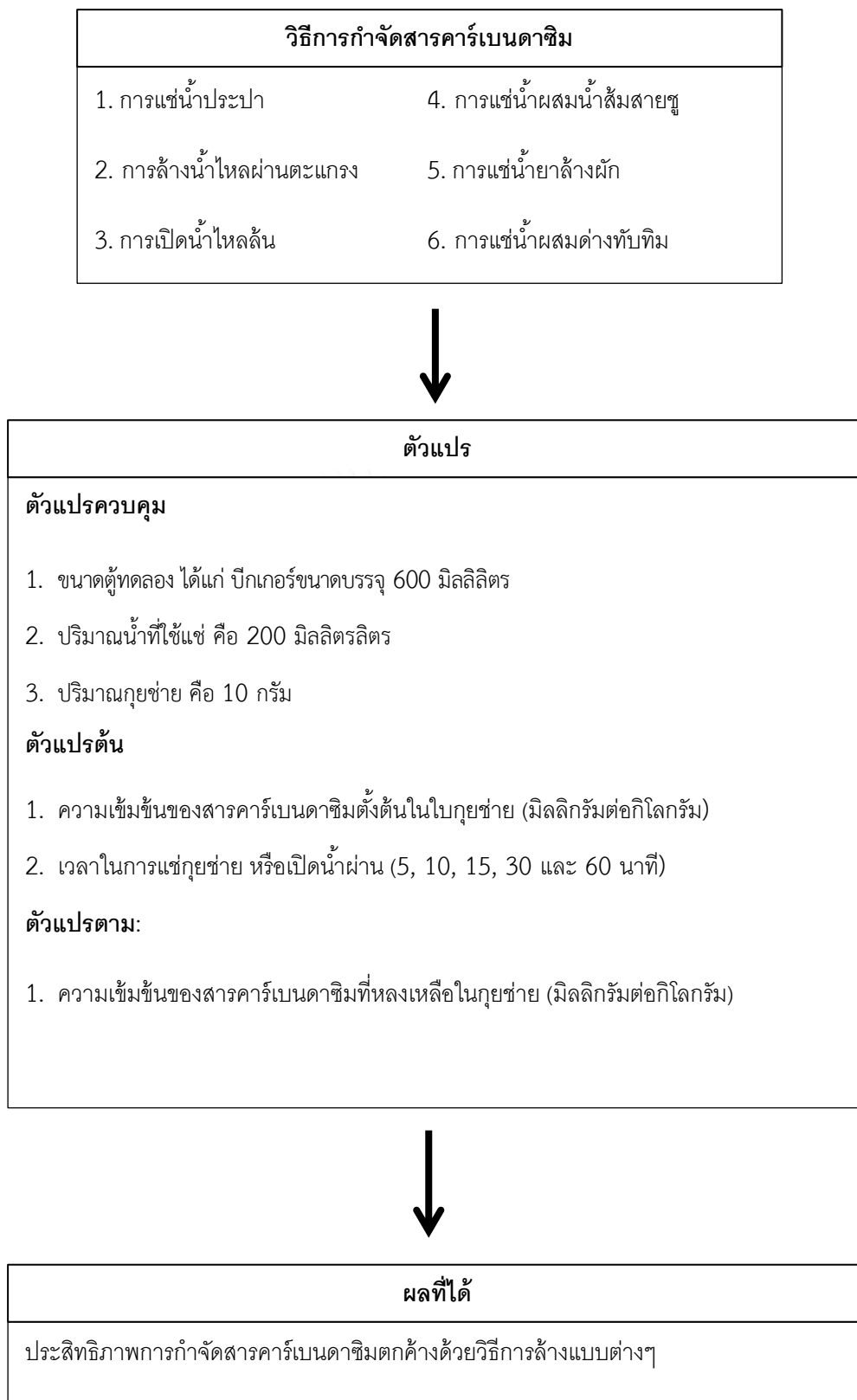
1. สารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์เส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์
 - พอลิไวนิลไพโรลิโดน (polyvinylpyrrolidone: PVP) เกรดสำหรับวิเคราะห์ (analytical grade) ยี่ห้อ Sigma-Aldrich
 - พอลิไวนิลอะซิเตท (polyvinylacetate: PVAc) เกรดสำหรับวิเคราะห์ ยี่ห้อ Sigma-Aldrich
 - ไทเทเนียม เตตระไอโซโพรพอกไซด์ (titanium (IV) isopropoxide: TTiP) เกรดสำหรับวิเคราะห์ ยี่ห้อ Fluka
 - ไทเทเนียม เตตระบิวทอกไซด์ (titanium (IV) butoxide: TBOT) เกรดสำหรับวิเคราะห์ ยี่ห้อ Fluka
 - เอทานอลแอลกอฮอล์ (ethanol) เกรดสำหรับวิเคราะห์ ยี่ห้อ RCI Labscan
 - กรดอะซิติกเข้มข้น (acetic acid glacial) เข้มข้นร้อยละ 99.7 เกรดสำหรับวิเคราะห์ ยี่ห้อ RCI Labscan

2. สารเคมีที่ใช้ในการสกัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้าง

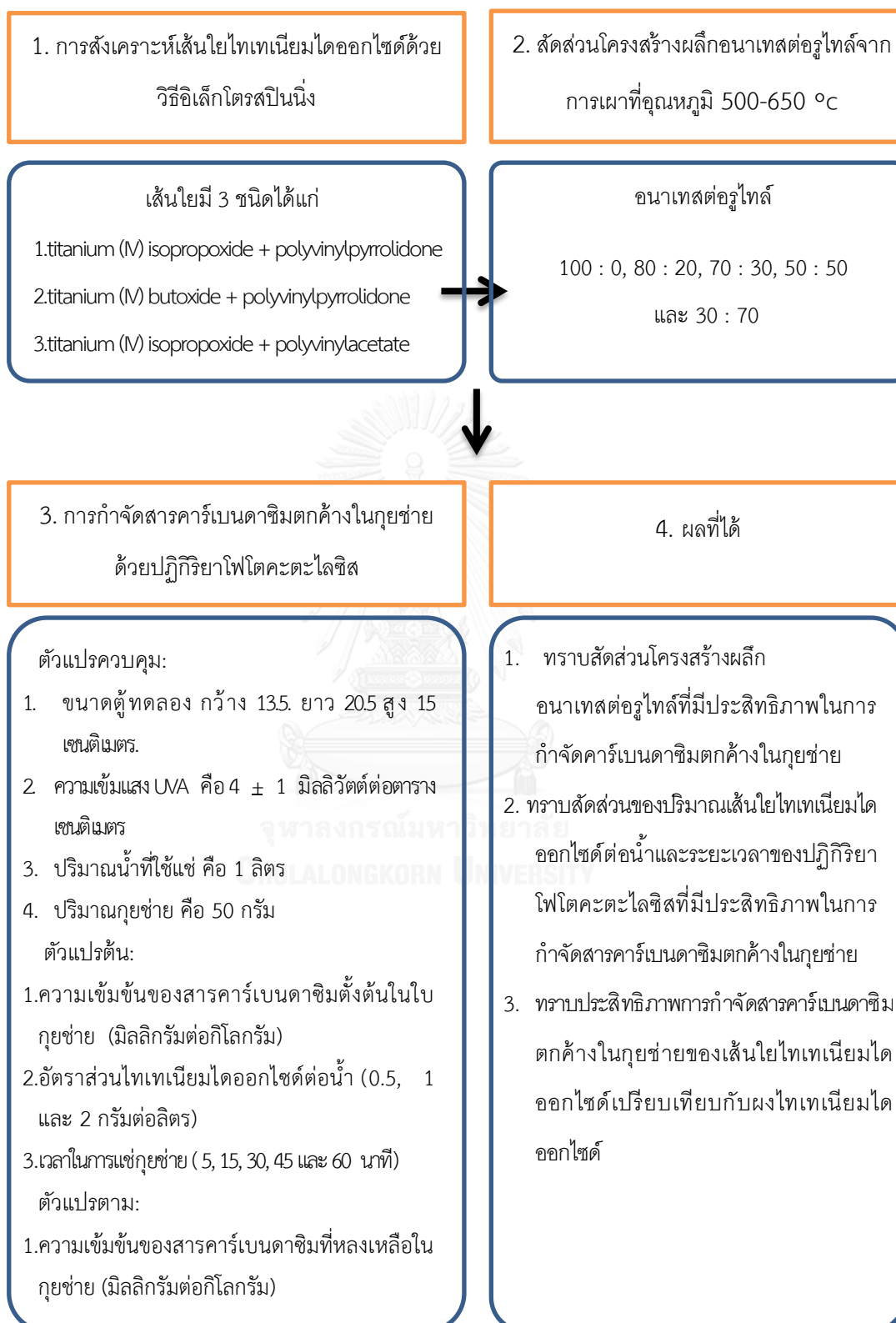
- น้ำกลั่นบริสุทธิ์ปราศจากไอออน
- สารคาร์เบนดาซิมมาตรฐานความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 (standard cabendazim) ยี่ห้อ Dr.Ehrenstorfer
- สารคาร์เบนดาซิมที่ใช้ในการฉีดพ่นกุยช่าย ยี่ห้อการค้าคาร์เบนดาซิม 50 มีส่วนประกอบ methyl benzimidazol-2-ylcarbamate ร้อยละ 50
- สารลดแรงตึงผิวสำหรับเพิ่มประสิทธิภาพในการเกาะติดของสารกำจัดศัตรูพืชบนใบกุยช่ายชนิดเข้มข้น ยี่ห้อโอตอล (ไม่มีส่วนประกอบที่สำคัญระบุไว้)
- ตัวดูดซับ diatomaceous earth (EXtrelut®) ยี่ห้อ EMD Millipore
- เมทิลแอลกอฮอล์ (methanol) เกรดสำหรับเครื่อง HPLC ยี่ห้อ RCI Labscan
- ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25)

3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยประกอบไปด้วย การกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างในกุยช่ายด้วยวิธีอื่นที่ไม่ใช่ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ซึ่งแสดงเป็นผังการศึกษาได้ดังรูปที่ 3-1 และส่วนของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสซึ่งประกอบไปด้วย การสังเคราะห์เส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์ การหาสัดส่วนโครงสร้างผลึกอนาเทสต่อรูไทล์ของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ และการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างในใบกุยช่ายด้วยเส้นใยที่สังเคราะห์ได้กับการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ซึ่งสามารถเขียนเป็นผังการศึกษาได้ดังรูปที่ 3-2



รูปที่ 3-1 ผังการศึกษาการกำจัดสารตกค้างคาร์เบนดาซิมด้วยวิธีการล้างแบบต่างๆที่ไม่ใช่
ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส



รูปที่ 3-2 ผังการศึกษาการกำจัดสารตกค้างคาร์เบนดาซิมด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

3.2.1 การกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างในกุยช่ายด้วยวิธีการล้างแบบต่างๆ

การศึกษาใช้ใบกุยช่ายอายุ 50 วันขึ้นไปฉีดพ่นสารคาร์เบนดาซิมยี่ห้อการค้าคาร์เบนดาซิม 50 ในปริมาณ 1 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตรซึ่งเป็นสัดส่วนที่ระบุไว้ข้างขวดและเติมสารลดแรงตึงผิวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเกาะติดของสารกำจัดศัตรูพืชบนใบกุยช่ายชนิดเข้มข้น ยี่ห้อการค้าโอตอล อีก 0.3 มิลลิลิตร เนื่องจากการสัมภาษณ์เกษตรกรในจังหวัดปทุมธานีพบว่าการผสมสารชนิดนี้ในการฉีดพ่นผลผลิตด้วย และเว้นระยะ 3 วัน ก่อนตัดใบกุยช่ายไปทำการทดลอง โดยในแต่ละวันมีการคละใบกุยช่ายจากแต่ละแปลง เพื่อสุ่มไปสกัดหาค่าความเข้มข้นคาร์เบนดาซิมตกค้างตั้งต้น (C_0) ตามที่พบจริงในแต่ละวัน จำนวนอย่างน้อย 3 ตัวอย่าง (ตัวอย่างละ 1 กรัม) และนำกุยช่ายส่วนที่เหลือนำไปล้างด้วยวิธีการต่างๆ ที่กรมวิชาการเกษตรแนะนำเพื่อทดสอบการกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างในใบกุยช่ายด้วยวิธีที่นอกเหนือจากปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ทั้งหมด 6 วิธี ดังนี้

1. การแช่น้ำประปา กระทำโดยนำใบกุยช่ายที่คละผสมกันแล้วแบ่งเป็นกองจำนวน 5 กองๆ ละ 10 กรัม นำไปแช่ในกระบะทดลองที่บรรจุน้ำประปา 200 มิลลิลิตร จำนวน 5 กระบะ แช่นาน 5, 10, 15, 30 และ 60 นาที ตามลำดับ เมื่อครบเวลาตามกำหนดทำการเก็บกุยช่ายขึ้นมาผึ่งบนตะแกรงให้แห้งแล้วทำการสกัดหาคาร์เบนดาซิมตกค้างด้วยวิธี Matrix Solid Phase Dispersion (MSPD) ซึ่งรายละเอียดแสดงในหัวข้อที่ 3.2.2

2. การล้างโดยใช้น้ำไหลผ่านตะแกรง ทำโดยนำใบกุยช่าย 10 กรัม ใส่ตะแกรง รวมทั้งหมด 5 ใบ จากนั้นเปิดน้ำประปาให้ไหลผ่านกุยช่าย ดังแสดงในรูปที่ 3-3 โดยไม่ให้น้ำประปาค้างหรือแช่อยู่ในตะแกรง แต่ละใบเปิดน้ำไหลผ่านนาน 5, 10, 15, 30 และ 60 นาทีตามลำดับ จากนั้นนำกุยช่ายมาผึ่งให้แห้งและมาสกัดหาคาร์เบนดาซิมตกค้างตามวิธี MSPD



รูปที่ 3-3 การล้างแบบไหลผ่านตะแกรง

3. การล้างโดยเปิดน้ำไหลสั้น ทำการทดลองโดยแช่ใบกุยช่าย 10 กรัม ในกระบะ ปริมาตรความจุ 6 ลิตร แล้วเปิดน้ำประปาไหลจนน้ำท่วมและล้นออก ดังรูปที่ 3-4 ใช้กระบะทั้งหมด 5 ใบ แต่ละใบเปิดน้ำไหลนาน 5, 10, 15, 30 และ 60 นาที เมื่อครบเวลาที่กำหนดจึงนำใบกุยช่ายมา ผึ่งให้แห้งและสกัดหาคาร์เบนดาซิมตกค้างตามวิธี MSPD



รูปที่ 3-4 การล้างแบบน้ำไหลสั้นกะละมัง

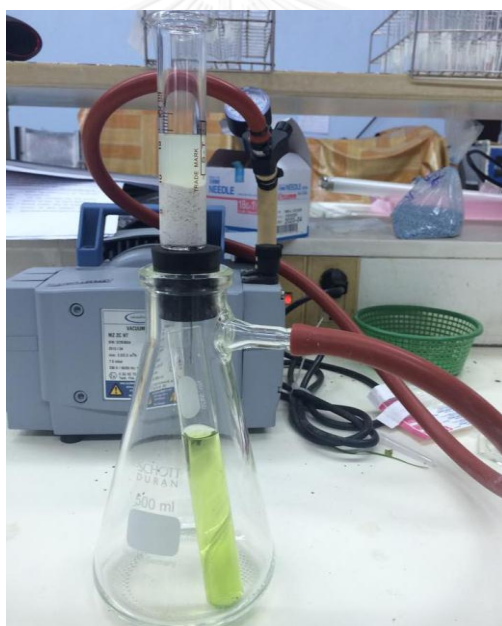
4. การแช่น้ำผสมน้ำส้มสายชูความเข้มข้นกรดน้ำส้มร้อยละ 5 ทำการทดลองโดยนำ ใบกุยช่าย 10 กรัม แช่ในกระบะที่บรรจุน้ำประปาผสมน้ำส้มสายชู ในอัตราส่วนน้ำส้มสายชู 20 มิลลิลิตร ต่อ น้ำ 200 มิลลิลิตร รวมทั้งหมด 5 กระบะ แช่นาน 5, 10, 15, 30 และ 60 นาที ตามลำดับ จากนั้นจึงนำใบกุยช่ายมาผึ่งให้แห้งและสกัดหาคาร์เบนดาซิมคงเหลือตามวิธี MSPD

5. การแช่น้ำผสมน้ำยาล้างผัก ทำการทดลองโดยนำใบกุยช่าย 10 กรัม แช่ในกระบะ ทดลองที่มีน้ำประปาผสมน้ำยาล้างผัก ยี่ห้อการค้า St. Andrew ที่มีส่วนผสมสารลดแรงตึงผิวในกลุ่ม sodium lauryl ether sulfates 4.8% (w/w) ในอัตราส่วนน้ำยาล้างผัก 0.25 มิลลิลิตร ต่อ น้ำ 200 มิลลิลิตร ทั้งหมด 5 กระบะ เป็นเวลานาน 5, 10, 15, 30 และ 60 นาที ตามลำดับ เมื่อครบเวลาจึง นำใบกุยช่ายจากแต่ละกระบะขึ้นมาผึ่งให้แห้งแล้วสกัดหาคาร์เบนดาซิมคงเหลือตามวิธี MSPD

6. การแช่น้ำผสมต่างทับทิม ทำการทดลองโดยนำใบกุยช่าย 10 กรัม แช่ในกระบะที่มีน้ำประปาผสมต่างทับทิมในอัตราส่วนต่างทับทิม 2 มิลลิกรัม ต่อ น้ำ 200 มิลลิลิตร จำนวน 5 กระบะ นาน 5, 10, 15, 30 และ 60 นาที ตามลำดับเมื่อครบเวลาจึงนำใบกุยช่ายจากแต่ละกระบะ ผึ่งให้แห้งและมาสกัดหาคาร์เบนดาซิมคงเหลือตามวิธี MSPD

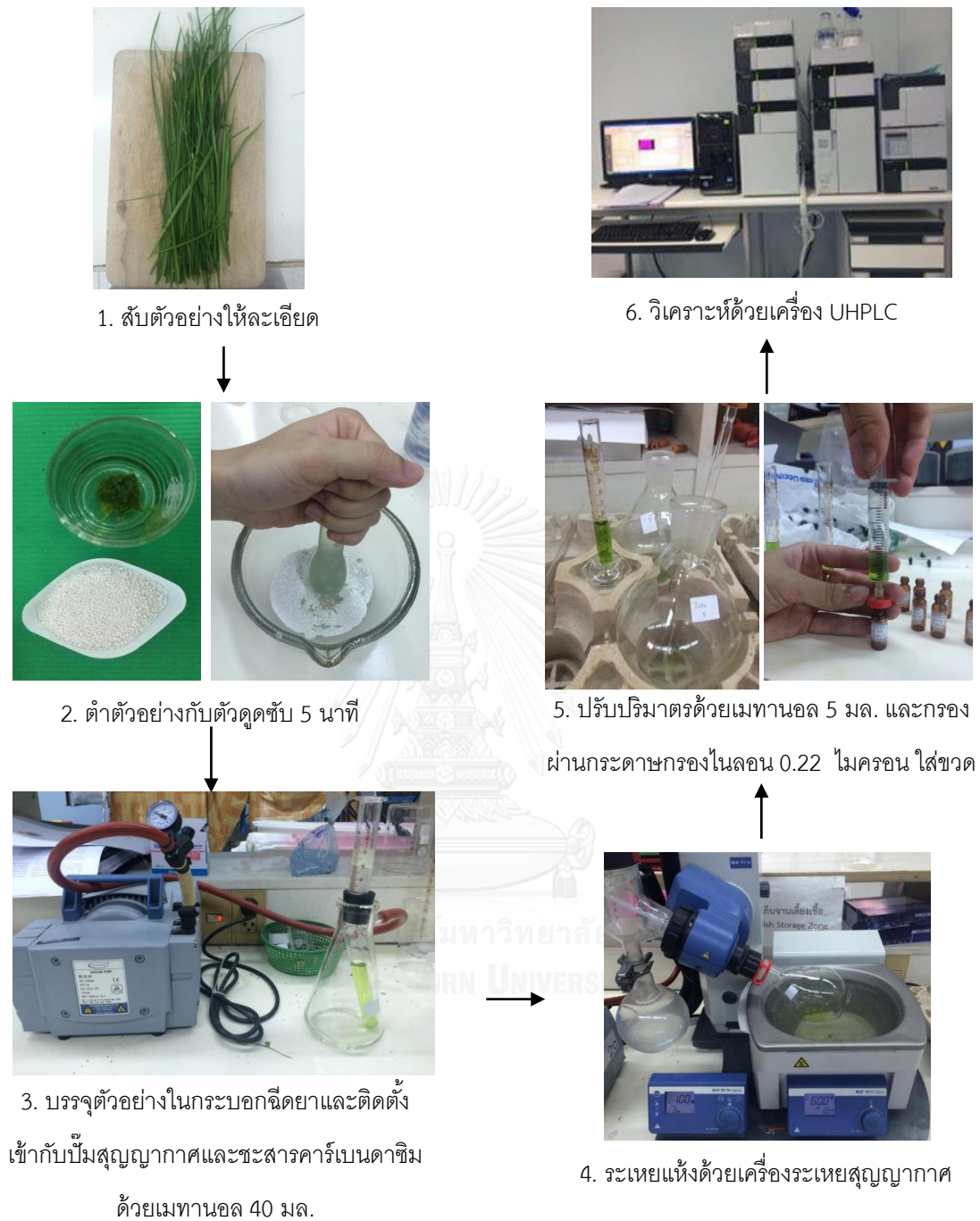
3.2.2 การสกัดสารคาร์เบนดาซิมในกุยช่าย

การสกัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างในกุยช่ายในการศึกษานี้ใช้วิธี Matrix Solid Phase Dispersion (MSPD) ซึ่งคิดค้นโดย Barker (2007) เริ่มจากนำใบกุยช่ายสับให้ละเอียด หลังจากนั้นตัดแบ่งตัวอย่างจำนวน 1 กรัม ใส่รวมกับตัวดูดซับ (diatomaceous earth) 4 กรัม ในโถรงแก้วทำให้เข้ากัน เป็นเวลา 5 นาทีเพื่อให้เกิดพันธะระหว่างคาร์เบนดาซิมกับตัวดูดซับ จากนั้นจึงนำไปบรรจุลงในกระบอกฉีดยาที่ทำจากแก้ว โดยรองใต้กระบอกฉีดยาด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 นำกระบอกฉีดยาต่อเข้ากับปั๊มสุญญากาศ (รูปที่ 3-5) แล้วเทเมทานอล 40 มิลลิลิตร ลงในกระบอกฉีดยาพร้อมทั้งเปิดปั๊ม เพื่อทำการทำการชะ (elute) สารคาร์เบนดาซิมในผักที่ถูกจับอยู่ในตัวดูดซับออกมา



รูปที่ 3-5 การชะสารคาร์เบนดาซิมออกจากตัวดูดซับด้วยการใช้ปั๊มสุญญากาศ

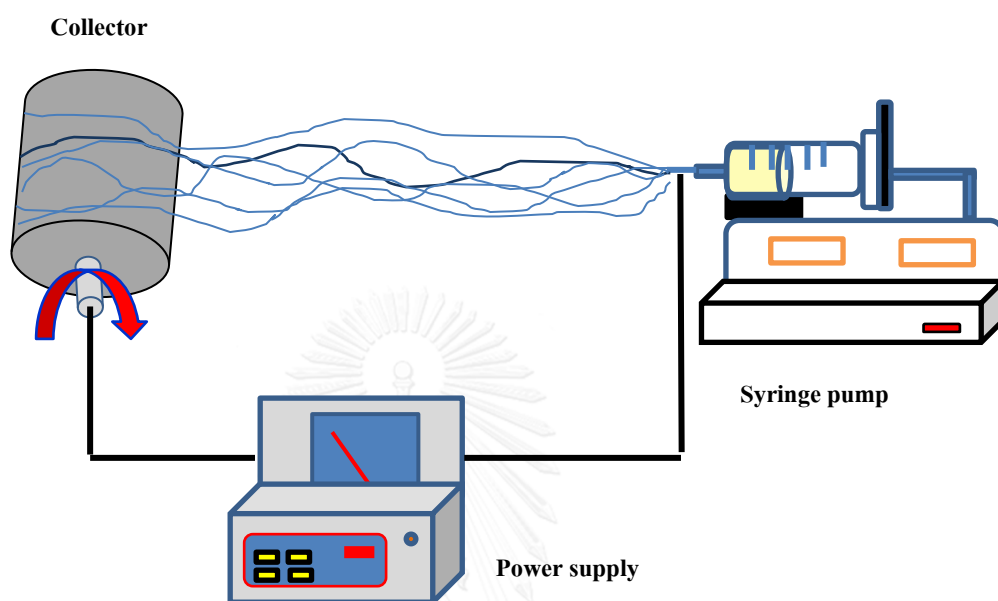
สารละลายที่ได้นำไประเหยแห้งด้วยเครื่องหมุนระเหยสุญญากาศ (rotary evaporator) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 3 นาที ใช้รอบการหมุน 100 รอบต่อนาที จนสารละลายแห้ง และทำการปรับปริมาตรสุดท้ายด้วยเมทานอล 5 มิลลิลิตร กรองสารละลายผ่านกระดาษกรองไนลอน 0.22 ไมครอน ลงในขวดตัวอย่าง (vial) สีชาและนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องโครมาโตกราฟีของเหลวสมรรถภาพสูง (UHPLC) โดยขั้นตอนการสกัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างในผลผลิตทางการเกษตรที่กล่าวมาทั้งหมดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3-6



รูปที่ 3-6 ขั้นตอนการสกัดและวิเคราะห์สารคาร์เบนดาซิมตกค้างในกุยช่ายด้วยวิธี MSPD

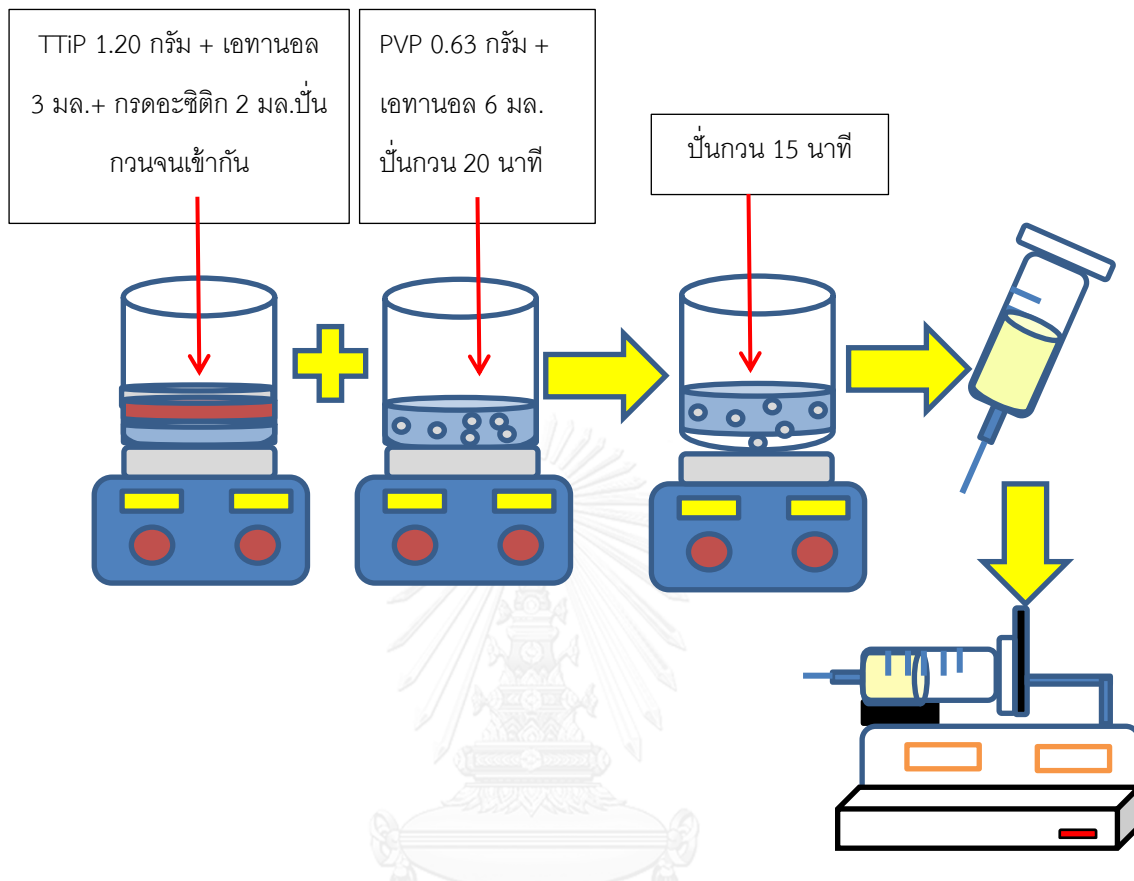
3.2.3 กระบวนการสังเคราะห์เส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์

การสังเคราะห์เส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีอิเล็กโตรสปินนิ่งมีการจัดเตรียมอุปกรณ์ในกระบวนการปั่นเส้นใย ดังรูปที่ 3-7



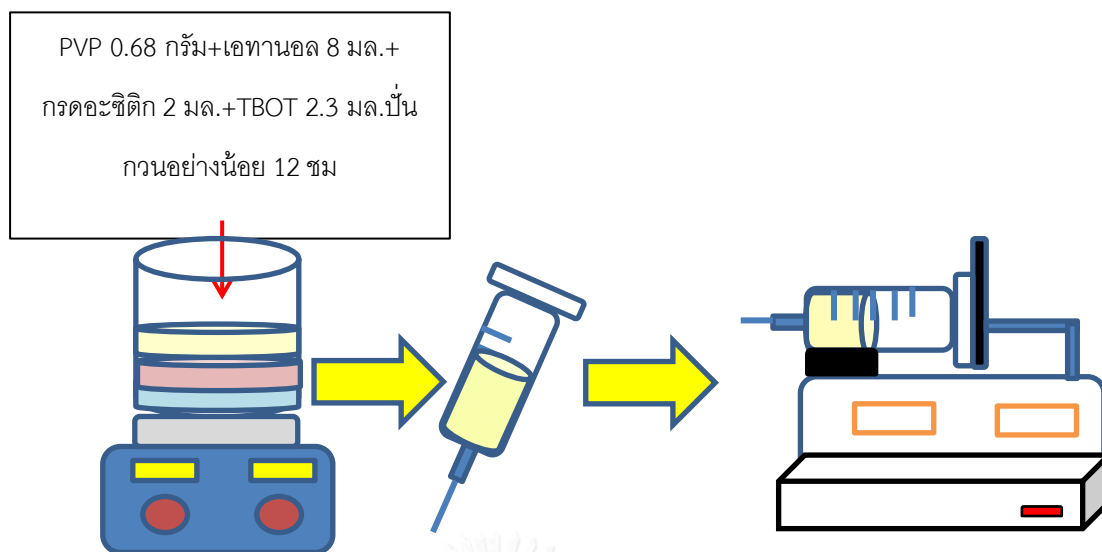
รูปที่ 3-7 ผังการติดตั้งชุดอุปกรณ์การสังเคราะห์เส้นใยด้วยวิธีอิเล็กโตรสปินนิ่ง
ที่มา: ดัดแปลงจาก Im และคณะ (2008)

ในการศึกษานี้มีการสังเคราะห์เส้นใยโดยใช้สารตั้งต้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ และพอลิเมอร์ที่แตกต่างกัน 3 ชนิด โดยชนิดที่ 1 ได้แก่ titanium (IV) isopropoxide (TTiP) + polyvinylpyrrolidone (PVP) เตรียมโดยนำ TTiP 1.20 กรัม ผสมกับเอทานอล 3 มิลลิลิตร และกรดอะซิติก 2 มิลลิลิตร กวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจนสารละลายเข้ากัน ขณะเดียวกันนำ PVP 0.63 กรัม ละลายในเอทานอล 6 มิลลิลิตร กวนบนเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้าอีกเครื่องหนึ่งเป็นเวลา 20 นาที เมื่อครบกำหนดแล้วจึงนำสารละลาย TTiP ค่อยๆเทใส่อย่างช้าๆลงในสารละลายพอลิเมอร์ และนำไปปั่นกวนต่อเป็นเวลา 15 นาที (Suphankij และคณะ, 2013) ดังแสดงในรูปที่ 3-8 จากนั้นจึงนำสารละลายที่ได้บรรจุในกระบอกฉีดยาโดยใช้เข็มสแตนเลส เบอร์ 21 ติดตั้งชุดกระบอกฉีดยาเข้ากับอุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหล ใช้ระยะห่างระหว่างปลายเข็มและวัสดุรองรับ 15 เซนติเมตร เปิดเครื่องให้กระแสไฟฟ้าขนาด 15 กิโลโวลต์



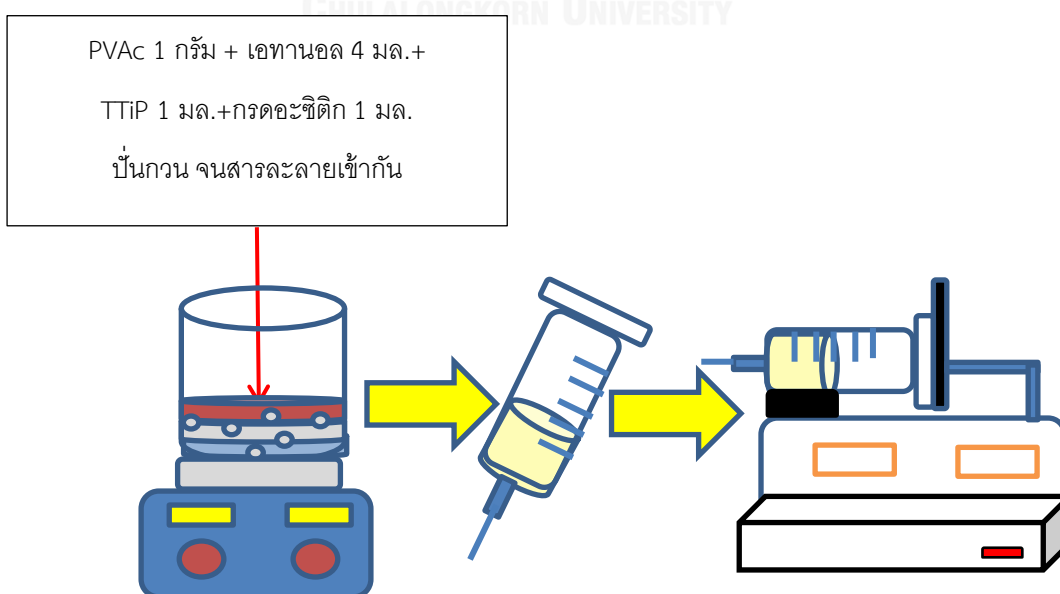
รูปที่ 3-8 การเตรียมสารละลาย TTiP ผสมกับพอลิเมอร์ PVP

สำหรับการสังเคราะห์เส้นใย titanium (IV) butoxide (TBOT) + polyvinylpyrrolidone (PVP) กระทำโดยละลาย PVP 0.68 กรัม ในเอทานอล 8 มิลลิลิตร และกรดอะซิติก 2 มิลลิลิตร จากนั้นเติม ไทเทเนียมเตตระบิวทอกไซด์ 2.3 มิลลิลิตร กวนทิ้งไว้ อย่างน้อย 12 ชั่วโมง (Liu และคณะ, 2012) โดยใช้เครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 3-9 จากนั้นจึงนำสารละลายที่ได้บรรจุในกระบอก ฉีดยาโดยใช้เข็มสแตนเลส เบอร์ 21 ติดตั้งชุดกระบอกฉีดยาเข้ากับอุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหล กำหนดระยะห่างระหว่างปลายเข็มและวัสดุรองรับไว้ที่ 15 เซนติเมตร เปิดเครื่องให้กระแสไฟฟ้า ขนาด 15 กิโลโวลต์



รูปที่ 3-9 การเตรียมสารละลาย TBOT ผสมกับพอลิเมอร์ PVP

ส่วนการสังเคราะห์เส้นใย titanium (IV) isopropoxide (TTiP) + polyvinylacetate (PVAc) กระทำโดยนำ PVAc 1 กรัม ละลายในเอทานอล 4 มิลลิลิตร และกรดอะซิติก 1 มิลลิลิตร เติม TTiP 1 มิลลิลิตร กวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจนสารละลายเข้ากัน (Doh และคณะ, 2007) ดังแสดงในรูปที่ 3-10 จากนั้นจึงนำสารละลายที่ได้บรรจุในกระบอกฉีดยาโดยใช้เข็มสแตนเลสเบอร์ 18 ติดตั้งกระบอกฉีดยาเข้ากับอุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหล ใช้ระยะห่างระหว่างปลายเข็มและวัสดุรองรับ 15 เซนติเมตร เปิดเครื่องให้กระแสไฟฟ้าขนาด 15 กิโลโวลต์



รูปที่ 3-10 การเตรียมสารละลาย TTiP ผสมกับพอลิเมอร์ PVAc

หลังจากได้เส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมพอลิเมอร์แล้ว นำเส้นใยไปเผาที่อุณหภูมิ 500 – 650 องศาเซลเซียส ใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 2 องศาเซลเซียสต่อนาที นาน 2 ชั่วโมง เพื่อสังเคราะห์อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยให้มีสัดส่วนโครงสร้างผลึกระหว่าง อนาเทสและรูไทล์ที่ต้องการ คือ 100 : 0, 80 : 20, 70 : 30 และ 50 : 50

3.2.4 การศึกษาลักษณะสมบัติของเส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์

เส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้ง 3 ชนิด มีการศึกษาลักษณะสมบัติดังนี้

1. ศึกษาลักษณะพื้นผิวและขนาดของเส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM) ร่วมกับโปรแกรม SemAfore รุ่น 5.21

2. ศึกษาโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์วิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer: XRD)

3. ศึกษาพื้นที่ผิวของเส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์และผงไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของวัสดุ (Brunauer Emmet Teller: BET)

4. ศึกษาสัดส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อน้ำหนักเส้นใยด้วยเครื่องวิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุ (Thermogravimetric Analysis: TGA)

โดยทั้งหมดนี้กระทำที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)

ในการหาค่าสัดส่วนโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์กระทำโดยใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ซึ่งได้ผลเป็นค่า Intensity ของโครงสร้างผลึกอนาเทส (ระนาบ 101) และผลึกรูไทล์ (ระนาบ 110) จากนั้นนำค่ามาแทนในสมการที่ (3.1) และ (3.2) ตามลำดับ

$$X_R = \left(1 + 0.8 \frac{I_A}{I_R} \right)^{-1} \times 100 \quad (3.1)$$

$$X_A = 100 - X_R \quad (3.2)$$

เมื่อ X_R = สัดส่วนรูไทล์

X_A = สัดส่วนอนาเทส

I_A = ความสูง (Intensity) พีคอนาเทส (ระนาบ 101)

I_R = ความสูง (Intensity) พีครูไทล์ (ระนาบ 110)

ขนาดของผลึก (Crystallite size) กระทำโดยใช้สมการของ Sherrer equation ดังสมการที่ (3.3)

$$t = \frac{k\lambda}{B \cos\theta} \quad (3.3)$$

เมื่อ t = ขนาดของผลึก Crystallite size (นาโนเมตร)

k = ค่าคงที่รูปทรงผลึก (spherical shape = 1)

B = ความกว้าง พีค (Full Width at Half Maximum)

θ = มุมแบรกก์

(Bakardjieva และคณะ, 2005)

3.2.5 การกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างในกัญช่ายด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

ในส่วนแรกเป็นการหาสัดส่วนโครงสร้างผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ อนาเทสต่อรูไทล์ที่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างในใบกัญช่ายที่ดีที่สุด กระทำโดยใช้กัญช่ายที่อายุ 50 วันขึ้นไปฉีดพ่นสารกำจัดเชื้อราคาร์เบนดาซิม ในลักษณะเดียวกันที่ระบุในหัวข้อ 3.2.1 โดยฉีดพ่นสารคาร์เบนดาซิม 1 ครั้ง 3 วันก่อนตัดใบกัญช่ายไปทำการทดลอง กัญช่ายที่ได้นำมาคละกันและแบ่งเป็นกองๆ ละ 50 กรัม ใน 3 กองแรกนำไปสกัดหาความเข้มข้นสารคาร์เบนดาซิมตกค้างตั้งต้น (C_0) ด้วยวิธี MSPD ส่วนกองที่เหลือนำไปแช่ในตู้ทดลองที่มีปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสที่ใช้เส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีสัดส่วนโครงสร้างผลึก อนาเทสต่อรูไทล์ต่างๆ คือ 100 : 0, 80 : 20, 70 : 30 , 50 : 50 และ 30 : 70 และผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) เปรียบเทียบประสิทธิภาพกับการแช่น้ำเพียงอย่างเดียวโดยไม่มีการเติมไทเทเนียมไดออกไซด์

ตู้ทดลองที่ใช้มีลักษณะเป็นตู้กระจกขนาด กว้าง 13.5 เซนติเมตร ยาว 20.5 เซนติเมตร และสูง 15 เซนติเมตร โดยในแต่ละตู้ทดลองใส่น้ำกลั่นปราศจากไอออนปริมาตร 1 ลิตรแล้วใส่เส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์จำนวน 1 กรัม ให้พลังงานจากหลอดไฟแบลคไลท์ ขนาด 36 วัตต์ จำนวน 8 หลอดซึ่งวางพาดทางด้านบนของตู้ทดลอง มีความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตชนิดเอ 4 ± 1 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (วัตต์ที่ผิวน้ำกึ่งกลางตู้ทดลองด้วยเครื่องเรดิโอมิเตอร์) ดังแสดงในรูปที่ 3-11



หมายเหตุ **X** คือ จุดวัดความเข้มแสง

รูปที่ 3-11 ตู้ทดลองและลักษณะการวางหลอดไฟ

หลังจากใส่เส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์ และผงไทเทเนียมไดออกไซด์ ลงในตู้ทดลอง และฉายแสง UVA นาน 5 นาทีเพื่อให้เกิดอนุโมลอิสระในน้ำแล้ว จึงนำกุยช่ายในแต่ละกองมาแช่ในตู้แต่ละใบ (รูปที่ 3-12) เมื่อครบกำหนดเวลา 5 นาทีจะนำกุยช่ายในตู้ใบที่ 1 ขึ้นมาแกว่งล้างในน้ำกลั่นปราศจากไอออน เพื่อให้เส้นใยหลุดออกก่อนผึ่งให้แห้งเพื่อเตรียมสกัดสารคาร์เบนดาซิมในใบกุยช่ายด้วยวิธี MSPD ต่อไป เช่นเดียวกับตู้ใบที่ 2-5 เมื่อครบกำหนดการแช่นาน 15, 30, 45 และ 60 นาทีแล้ว จึงนำกุยช่ายขึ้นมาแกว่งล้างแล้วผึ่งแห้งเพื่อเตรียมสกัดวิธีในหัวข้อ 3.2.2 ต่อไป



รูปที่ 3-12 การแช่กุยช่ายในการกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

เมื่อได้สัดส่วนโครงสร้างผลึกที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างในใบ
กุยช่ายที่ดีที่สุดของแต่ละสูตรแล้ว จึงนำเฉพาะสัดส่วนที่ดีที่สุดมาทำการทดลองเพื่อหาปริมาณเส้นใย
ไทเทเนียมต่อน้ำที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้เส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.5, 1 และ 2 กรัมต่อลิตร เพื่อ
เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างในใบกุยช่ายด้วย



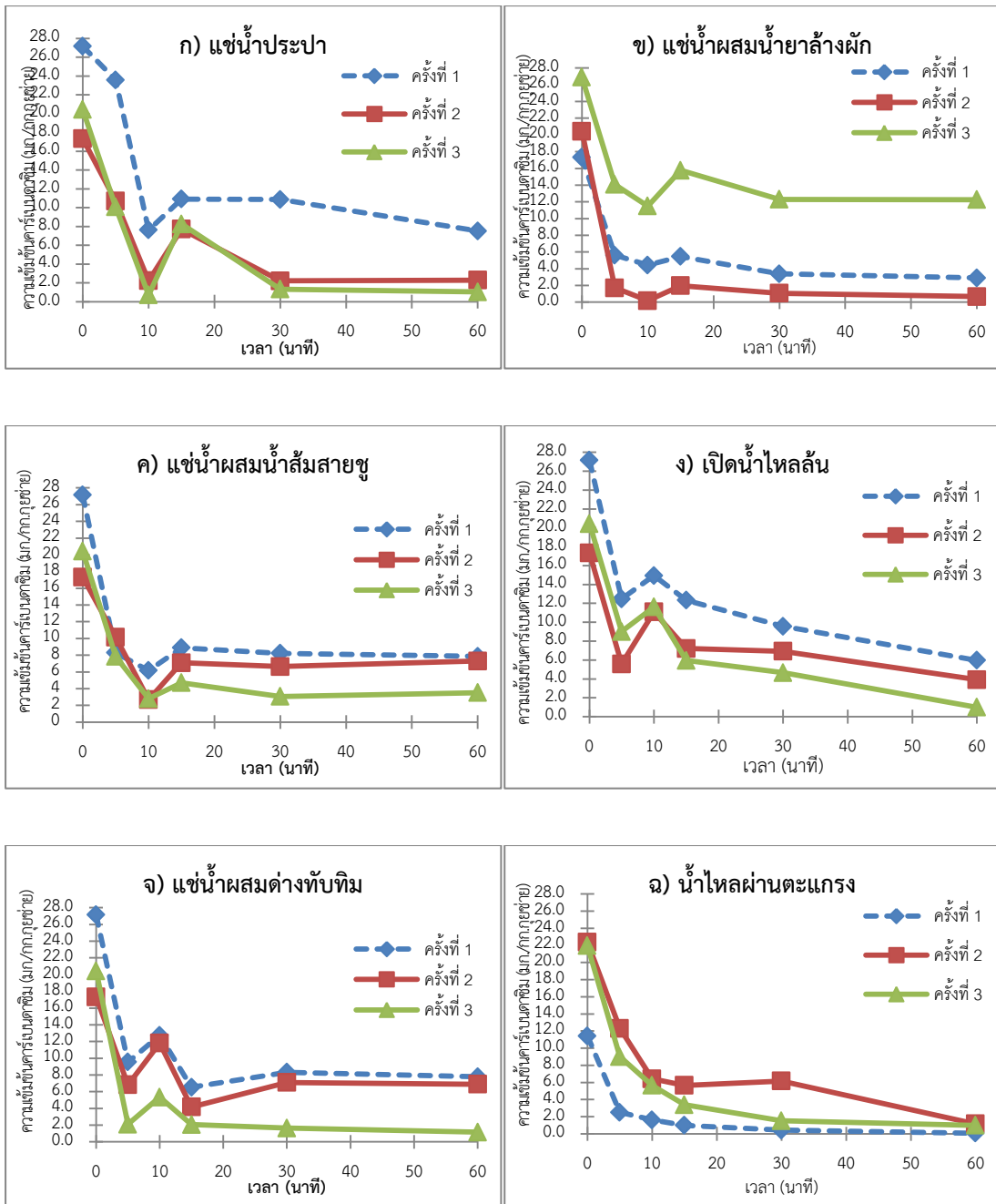
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการลดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างในใบกุยช่าย โดยเริ่มจากการใช้วิธีการล้างตามคำแนะนำของกรมวิชาการเกษตรซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ก่อนจะเป็นการใช้เส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตย์ 3 ชนิด ได้แก่ 1) ไทเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์ ผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลไพโรลิโดน 2) ไทเทเนียมเตตระบิวทอกไซด์ ผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลไพโรลิโดน และ 3) ไทเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์ ผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลอะซิเตท ที่มีสัดส่วนโครงสร้างผลึกอนาเทสต่อรูไทล์ 100 : 0, 80 : 20, 70 : 30, 50 : 50 และ 30 : 70 เปรียบเทียบกับการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ที่มีสัดส่วนโครงสร้างผลึกอนาเทสต่อรูไทล์ 80 : 20 และศึกษาปริมาณเส้นใยที่เหมาะสม โดยมีรายละเอียดผลการศึกษาดังต่อไปนี้

4.1 การลดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างในใบกุยช่ายจากวิธีการล้างต่างๆ

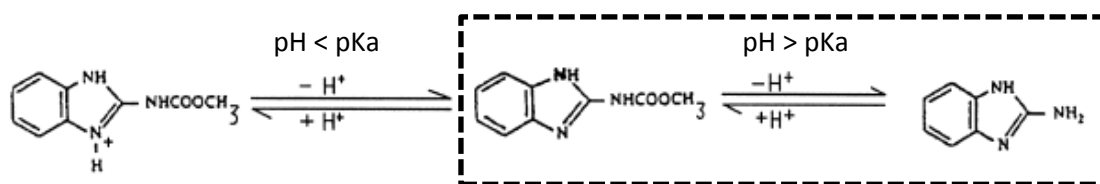
การลดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างในใบกุยช่ายด้วยวิธีการอื่นๆ ตามคำแนะนำของกรมวิชาการเกษตรที่แตกต่างกัน 6 วิธี ได้แก่ การแช่น้ำประปา การล้างโดยใช้น้ำไหลผ่านตะแกรง การล้างโดยเปิดน้ำไหลสั้น การแช่น้ำผสมน้ำส้มสายชู การแช่น้ำผสมน้ำยาล้างผัก และการแช่น้ำผสมต่างทับทิม โดยทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ สามารถแสดงผลใน ดังในรูปที่ 4-1



รูปที่ 4-1 ปริมาณสารคาร์เบนดาซิมตกค้างในใบกุยช่ายจากการล้างวิธีต่างๆกัน

จากการศึกษาพบว่าเมื่อนำใบกุยช่ายแช่ในน้ำประปา (รูป ก) ระยะเวลา 10 นาที สามารถลดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างได้ดีที่สุดโดยสามารถลดเหลือต่ำที่สุด 7.6, 2.2 และ 0.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (มก./กก.) จากปริมาณความเข้มข้นคาร์เบนดาซิมตั้งต้น 27.2, 17.3 และ 20.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ คิดเป็นร้อยละการกำจัด 71.9, 87.1 และ 96.5 จากการศึกษ 3 ครั้ง (ต่างวันและเวลา)

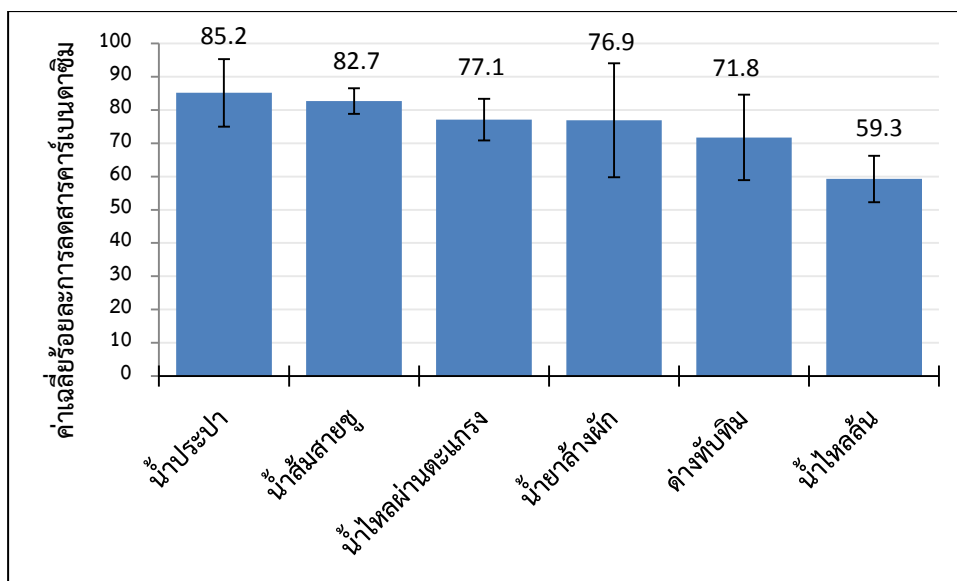
ในส่วนการแช่น้ำผสมน้ำยาล้างผัก (รูป ข) ที่เวลา 10 นาที ลดคาร์เบนดาซิมให้เหลือ 4.4, 0.2 และ 11.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จากความเข้มข้นตั้งต้น 17.3, 20.4 และ 26.9 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม คิดเป็นร้อยละ 74.4, 99.1 และ 57.3 ตามลำดับ การแช่น้ำผสมน้ำส้มสายชู (รูป ค) ที่เวลา 10 นาทีสามารถลดสารคาร์เบนดาซิมได้เหลือ 6.2, 2.7 และ 2.8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จากปริมาณคาร์เบนดาซิมตั้งต้น 27.2, 17.3 และ 20.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ คิดเป็นร้อยละ 77.3, 84.5 และ 86.3 ให้ผลสอดคล้องกันทั้งหมด แต่เมื่อแช่ใบกุยช่ายในน้ำประปา ในน้ำผสมน้ำยาล้างผัก และในน้ำผสมน้ำส้มสายชูนาน 15 นาที กลับพบว่าปริมาณคาร์เบนดาซิม ตกค้างอยู่ในใบกุยช่ายมากขึ้น ในกรณีของการเปิดน้ำไหลสั้น (รูป ง) และการแช่น้ำผสมต่างทับทิม (รูป จ) พบว่าการแช่นาน 5 นาที ให้ผลในการลดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างได้ดีกว่าการแช่นาน 10 นาที โดยการเปิดน้ำไหลสั้นสามารถลดสารคาร์เบนดาซิมเหลือเพียง 12.5, 5.6 และ 9.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จากความเข้มข้นสารคาร์เบนดาซิมตั้งต้น 27.2 17.3 และ 20.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ คิดเป็นร้อยละการกำจัด 54.1, 67.8 และ 55.9 ขณะที่การแช่น้ำผสมต่างทับทิมสามารถลดสารคาร์เบนดาซิมเหลือเพียง 9.5, 6.8 และ 2.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จากปริมาณตั้งต้น 27.2, 17.3 และ 20.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ คิดเป็นร้อยละ 64.9, 60.6 และ 89.8 แต่หากแช่นาน 10 นาที กลับพบปริมาณคาร์เบนดาซิมตกค้างในใบกุยช่ายมากขึ้นเช่นกัน โดยในส่วนของปริมาณสารคาร์เบนดาซิมที่เพิ่มขึ้นผู้วิจัยสันนิษฐานว่าเนื่องจากสารคาร์เบนดาซิมเมื่อละลายในน้ำที่ค่าความเป็นกรด-ด่างมากกว่าค่าคงที่การแตกตัว ($\text{pH} > \text{pKa} : \text{pKa carbendazim} = 4.5$) คาร์เบนดาซิมจะปล่อยโปรตอน (H^+) และเกิดเป็นสารประกอบ 2-aminobenzimidazole ดังแสดงในรูปที่ 4-2 และดูดซึมกลับเข้าสู่ใบกุยช่ายเมื่อทำการตรวจวัดด้วยเครื่อง HPLC จึงพบปริมาณสารคาร์เบนดาซิมที่เพิ่มกลับขึ้นมาในช่วง 10-15 นาที สอดคล้องกับการศึกษาของ Klinhom และคณะ (2008) พบว่าในการลดสารตกค้างเมธิโทมิลซึ่งเป็นสารกำจัดศัตรูพืชชนิดดูดซึม (ชนิดเดียวกับสารคาร์เบนดาซิม) มีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำ เมื่อทำการล้างด้วยการแช่น้ำผสมเกลือ การแช่น้ำผสมผงฟู การแช่น้ำผสมต่างทับทิม และการแช่น้ำผสมกรดน้ำส้มสายชู เป็นเวลา 15 นาที โดยผู้ศึกษาระบุว่าอาจเป็นการดูดซึมกลับของสารเข้าสู่คอกะน้ำในระหว่างการล้างเช่นกัน



รูปที่ 4-2 การแตกตัวของสารคาร์เบนดาซิมในน้ำ

ที่มา : Panades และคณะ (2000)

โปรตอนที่ปล่อยออกมาทำให้สารละลายมีความเป็นกรดค่อยๆสูงขึ้น สอดคล้องกับค่าพีเอชที่วัดได้ในการทดลอง (ภาคผนวก ค ตารางที่ ค-3) เมื่อทำการทดลองล้างแบบเปิดน้ำไหลผ่านตะแกรงโดยไม่ให้น้ำประปาค้างหรือแช่อยู่ในตะแกรง (รูป ฉ) พบว่าปริมาณสารคาร์เบนดาซิมไม่มีการเพิ่มขึ้นในใบกุยช่ายดังเช่นที่ปรากฏในการแช่น้ำชนิดต่างๆ เลย โดยระยะเวลาในการล้างยิ่งนานขึ้น ปริมาณสารคาร์เบนดาซิมยิ่งลดลงจนเหลือเพียง 0.3, 1.2 และ 0.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมเมื่อครบเวลา 60 นาทีจากปริมาณคาร์เบนดาซิมเริ่มต้น 27.2, 17.3 และ 22.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ คิดเป็นร้อยละการกำจัด 97.5, 86.8 และ 94.9 ตามลำดับ ซึ่งในบางการทดลองมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐาน MRLs ของสหภาพยุโรปที่กำหนดไว้ที่ 0.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และต่ำกว่าค่ามาตรฐานของเกาหลี และไทยซึ่งกำหนดไว้ที่ 1 และ 3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จากการศึกษาข้างต้นนำมาสรุปเป็นร้อยละของการกำจัดสารคาร์เบนดาซิมเฉลี่ยพร้อมส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ได้ดังรูปที่ 4-3 โดยการแช่น้ำประปา การแช่น้ำผสมน้ำยาล้างผัก การแช่น้ำผสมน้ำส้มสายชู และการเปิดน้ำไหลผ่านตะแกรงได้ใช้ค่าร้อยละการลดของสารคาร์เบนดาซิมเมื่อแช่นาน 10 นาที ในส่วนของการเปิดน้ำไหลล้นและการแช่น้ำผสมด่างทับทิมใช้ค่าร้อยละการลดลงของสารคาร์เบนดาซิมเมื่อแช่นาน 5 นาที



รูปที่ 4-3 ร้อยละของการลดสารคาร์เบนดาซิมด้วยวิธีการล้างแบบต่างๆ

จากรูปพบว่าสามารถเรียงลำดับการล้างที่ช่วยลดสารคาร์เบนดาซิมเรียงจากลดมากที่สุดไปหาน้อยที่สุด คือ การแช่น้ำประปา > การแช่น้ำผสมน้ำส้มสายชู > การแช่น้ำไหลผ่านตะแกรง > การแช่น้ำผสมน้ำยาล้างผัก > การแช่น้ำผสมด่างทับทิม > การแช่น้ำไหลล้น เมื่อเปรียบเทียบผลการศึกษานี้กับการศึกษาอื่นๆที่ใกล้เคียงกัน พบว่าผลการศึกษามีความสอดคล้องกันในแง่ของร้อยละการกำจัดสารพิษตกค้าง อาทิการศึกษาของ เอนก หาลี และ ธวัชชัย ศุภวิทิตพัฒนา (2555) ศึกษาการกำจัดสารเมโทรมีล ตกค้างในผักคะน้าโดยแช่ผักคะน้าในน้ำผสมด่างทับทิมความเข้มข้น 0.1% เปรียบเทียบกับการแช่ในน้ำผสมน้ำยาล้างผัก 3 ยี่ห้อ นาน 15 นาที พบว่า การแช่คะน้าในน้ำต่างทับทิมมีประสิทธิภาพในการลดสารเมโทรมีลได้ร้อยละ 68.9 ขณะที่การล้างน้ำผสมน้ำยาล้างผักลดได้ร้อยละ 46.6-52.2 ซึ่งด่างทับทิมเป็นสารออกซิไดซ์จึงช่วยสลายสารกำจัดศัตรูพืชได้ดี ขณะที่น้ำยาล้างผักมีสารลดแรงตึงผิวในกลุ่ม sodium lauryl ether sulfate จึงช่วยทำให้สิ่งสกปรกหลุดออกและแขวนลอยอยู่ในน้ำได้ หรือการศึกษาของ Satpathy และคณะ (2012) ที่ศึกษาการลดสารกำจัดศัตรูพืชในกลุ่มออกาโนฟอสเฟต ได้แก่พาราไรออน เมทิลพาราไรออน มาลาไรออน เพนิโตรไรออน ฟอมอไรออน และคลอไพริฟอส ตกค้างในมะเขือม่วง กระจับเขียว มะเขือเทศ ถั่ว กระจับดอก และพริกแดง โดยทำการแช่ตัวอย่างในน้ำ เปรียบเทียบกับน้ำผสมด่างทับทิมความเข้มข้น 0.001% และน้ำผสมกรดน้ำส้ม (อะซิติก) ความเข้มข้น 0.1% และอื่นๆนาน 15 นาที พบว่าการแช่น้ำมีประสิทธิภาพในการลดสารกำจัดศัตรูพืชได้ต่ำที่สุดคือ ร้อยละ 20 ± 2 ถึง 45 ± 1 ในขณะที่การแช่น้ำผสมกรดน้ำส้มมีประสิทธิภาพร้อยละ 40 ± 2 ถึง 91 ± 2 และการแช่น้ำผสมด่างทับทิมมี

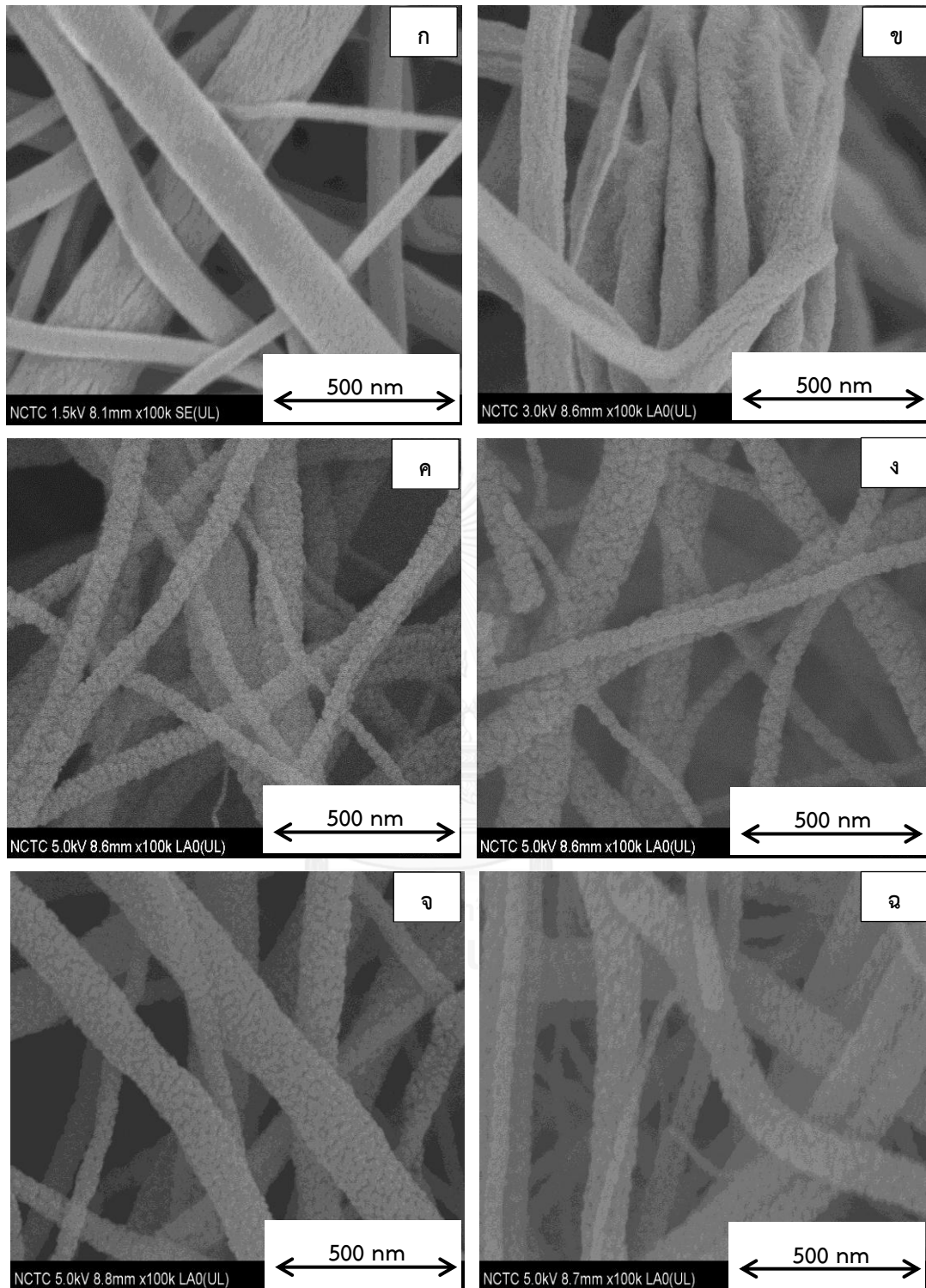
ประสิทธิภาพร้อยละ 34 ± 5 ถึง 92.6 ± 2 ซึ่งสารกำจัดศัตรูพืชแต่ละชนิดถูกกำจัดได้แตกต่างกันไป และผักแต่ละชนิดให้ผลในการลดสารกำจัดศัตรูพืชที่แตกต่างกันอีกด้วย โดยผู้ศึกษาระบุว่าน้ำผสมต่าง ทับทิมให้ผลดีที่สุดในการกำจัดสารเพนิโตรไซออน เนื่องจากต่างทับทิมเป็นสารออกซิไดส์อย่างแรงจึง มีศักยภาพสูงในปฏิกิริยารีดอกซ์กับสารกำจัดศัตรูพืชดังกล่าว ในขณะที่กรดน้ำส้มให้ประสิทธิภาพที่สูง สาเหตุมาจากมีค่า oxidation reduction potential (ORP) ที่สูงถึง 617 มิลลิโวลต์ จึงสามารถลด สารคลอไพริฟอสและมาลาไซออนได้มากใกล้เคียงกับต่างทับทิม ซึ่งจากการศึกษานี้ยังพบอีกว่า ความสามารถในการละลายน้ำของสารกำจัดศัตรูพืชไม่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพในการลดสารกำจัด ศัตรูพืช ยกตัวอย่างในกรณีของสารมาลาไซออนมีค่าการละลายน้ำ 124 มิลลิกรัมต่อลิตร ขณะที่เพนิโตรไซออนมีค่าการละลายน้ำ 34 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ร้อยละการลดลงของมาลาไซออนนั้นต่ำกว่าเพนิโตรไซออนอย่างเห็นได้ชัด เช่น ในมะเขือม่วง การแช่น้ำผสมต่างทับทิมกำจัดมาลาไซออนได้ร้อยละ 38 ± 3 ขณะที่เพนิโตรไซออนถูกกำจัดได้ร้อยละ 89 ± 6 เป็นต้น จากการศึกษาอื่นๆที่กล่าวมาข้างต้นนั้นพบว่า เมื่อใช้น้ำผสมต่างทับทิมและน้ำผสมกรดน้ำส้มให้ประสิทธิภาพในการลดสารกำจัดศัตรูพืชที่สูง ส่วน การแช่น้ำเพียงอย่างเดียวให้ประสิทธิภาพที่ค่อนข้างต่ำ ขณะที่การศึกษานี้พบว่าการแช่น้ำประปาให้ ประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกับวิธีอื่นๆแม้ว่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจะค่อนข้างมากก็ตาม (± 10.1) โดย การแช่น้ำผสมน้ำส้มสายชูให้ประสิทธิภาพที่ค่อนข้างใกล้เคียงกันโดยมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ต่ำ ที่สุด (± 3.9) ในกรณีน้ำไหลผ่านตะแกรงนั้นเนื่องจากการเปรียบเทียบในนาที่ที่ 10 การลดลงของ สารคาร์เบนดาซิมยังไม่คงที่ จึงต่ำกว่าการแช่น้ำประปาและน้ำผสมน้ำส้มสายชู แต่หากใช้ปริมาณ คงเหลือของคาร์เบนดาซิมในนาที่ที่ 60 การเปิดน้ำไหลผ่านตะแกรงจะให้ประสิทธิภาพที่สูงที่สุด

4.2 การศึกษาลักษณะสมบัติของเส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์

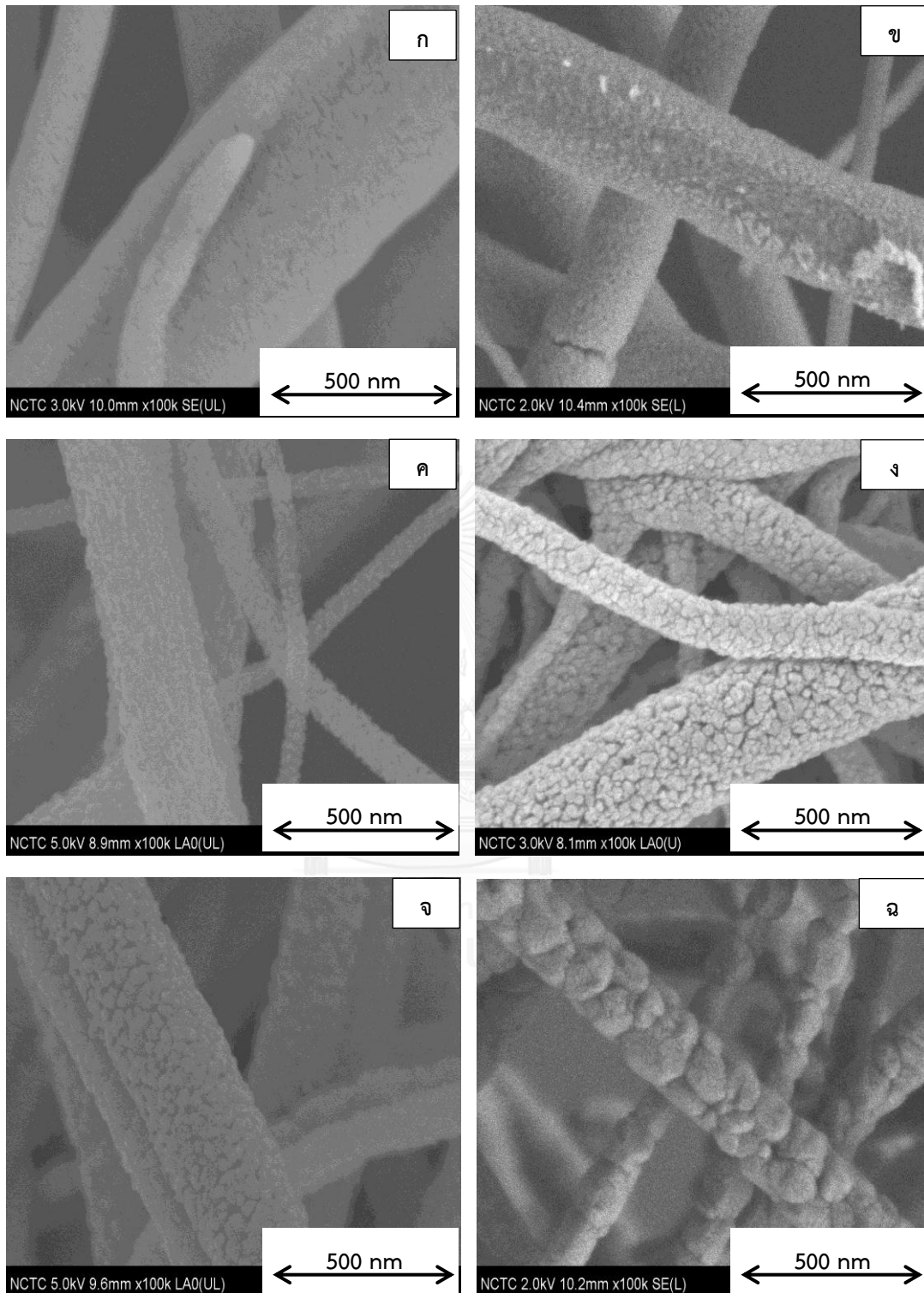
เส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต มีการศึกษาลักษณะพื้นผิวของเส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM) ศึกษาโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer: XRD) ศึกษาพื้นที่ผิวของเส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์และผงไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของวัสดุ (Brunauer Emmet Teller: BET) และศึกษาสัดส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อน้ำหนักเส้นใยด้วยเครื่องวิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุ (Thermogravimetric Analysis: TGA) มีรายละเอียดผลจากการศึกษาดังนี้

4.2.1 พื้นผิวของเส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์

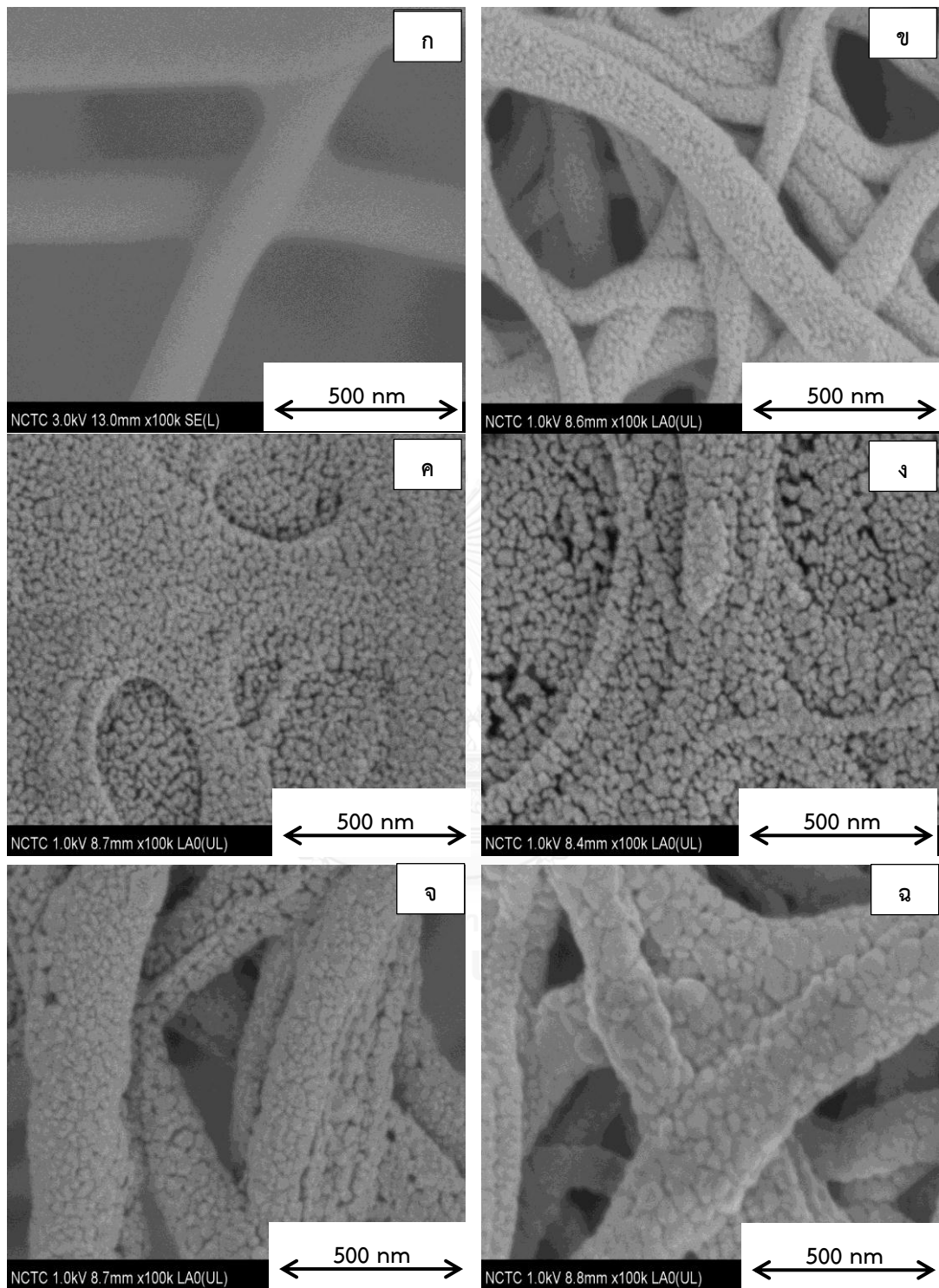
ผลการศึกษาในส่วนนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ลักษณะสัณฐานของเส้นใย และขนาดเฉลี่ยของเส้นใย โดยลักษณะสัณฐานของเส้นใยมาจากการเผาที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันตั้งแต่ 500-650 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้สัดส่วนโครงสร้างผลึกอนาเทสต่อรูไทล์ ตามที่ต้องการ ซึ่งได้ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.4 - 4.6 โดย TTiP + PVP หมายถึง เส้นใยไทเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์ผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลไพโรลิโดน TBOT+PVP หมายถึง เส้นใยไทเทเนียมเตตระบิวทอกไซด์ผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลไพโรลิโดน และ TTiP + PVAc หมายถึง เส้นใยไทเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์ผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลอะซิเตท



รูปที่ 4-4 ลักษณะสัณฐานเส้นใย TTIp + PVP ที่กำลังขยาย 100000 เท่า (ก) ก่อนเผา (ข) เผาที่ 500 องศาเซลเซียส (ค) เผาที่ 520 องศาเซลเซียส (ง) เผาที่ 535 องศาเซลเซียส (จ) เผาที่ 550 องศาเซลเซียส (ฉ) เผาที่ 650 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง



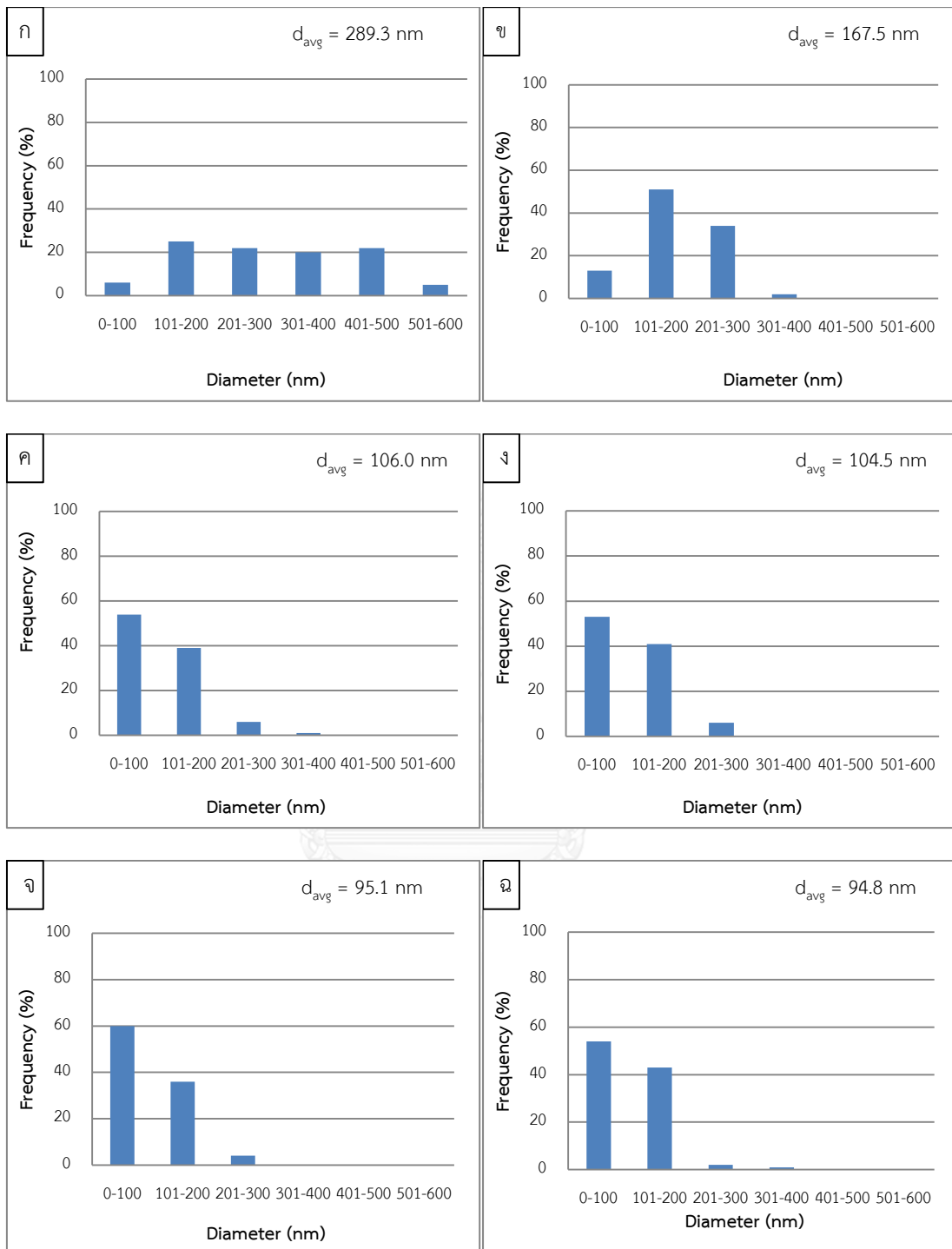
รูปที่ 4-5 ลักษณะสัณฐานเส้นใย TBOT + PVP ที่กำลังขยาย 100000 เท่า (ก) ก่อนเผา (ข) เผาที่ 500 องศาเซลเซียส (ค) เผาที่ 550 องศาเซลเซียส (ง) เผาที่ 610 องศาเซลเซียส (จ) เผาที่ 635 องศาเซลเซียส (ฉ) เผาที่ 650 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง



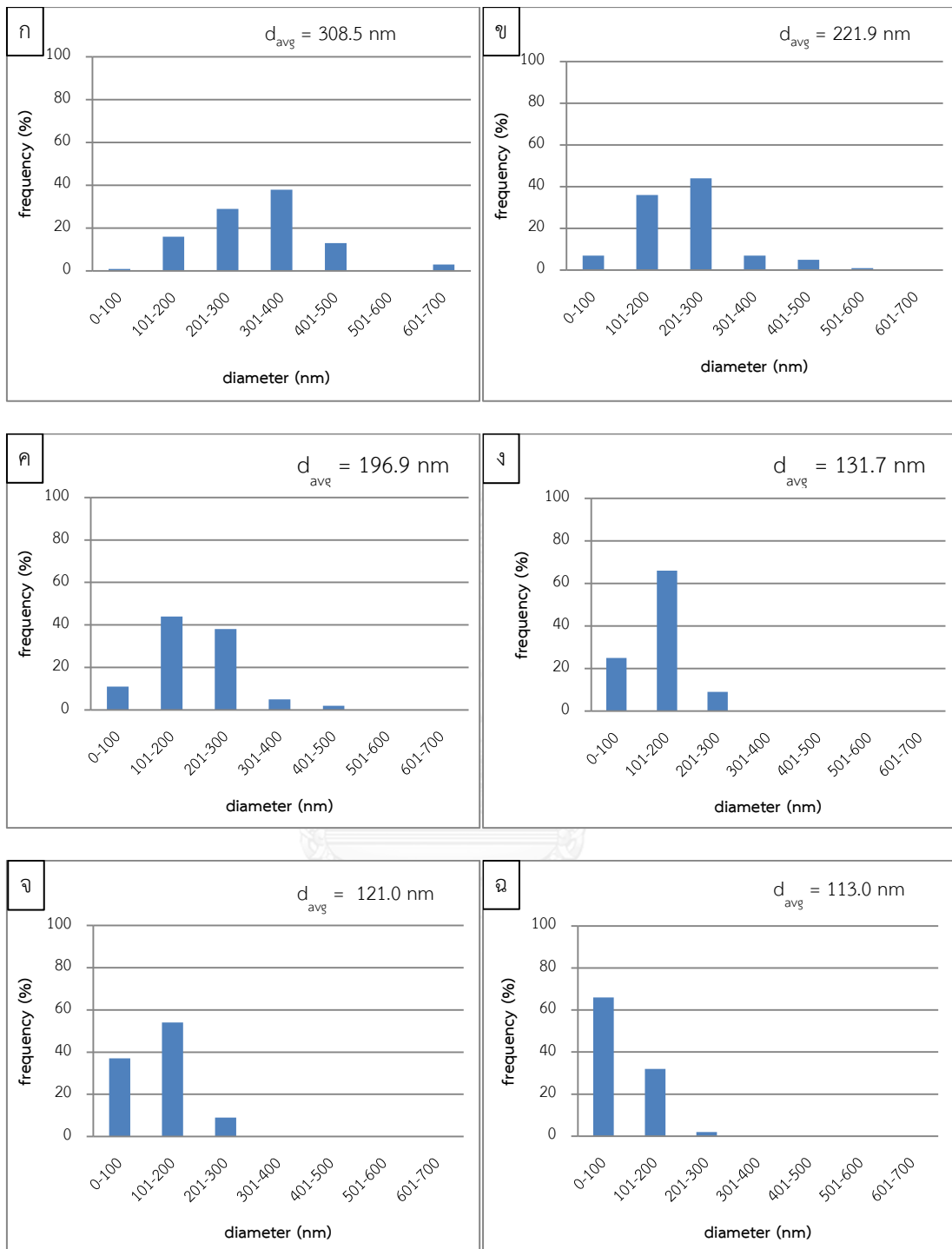
รูปที่ 4-6 ลักษณะสัณฐานเส้นใย TTiP + PVAc ที่กำลังขยาย 100000 เท่า (ก) ก่อนเผา (ข) เผาที่ 500 องศาเซลเซียส (ค) เผาที่ 550 องศาเซลเซียส (ง) เผาที่ 600 องศาเซลเซียส (จ) เผาที่ 620 องศาเซลเซียส (ฉ) เผาที่ 650 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง

จากผลการศึกษาพบว่าอุณหภูมิที่ใช้เผาส่งผลต่อลักษณะสัณฐานของเส้นใย กล่าวคือ ก่อนเผาเส้นใยที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตทั้งที่ใช้พอลิเมอร์ พอลิไวนิลไพโรลิโดน และพอลิไวนิลอะซิเตท มีลักษณะเป็นเส้นพื้นผิวที่ค่อนข้างเรียบ (รูป ก) เมื่อเผาเส้นใยที่อุณหภูมิที่สูงขึ้นพบว่าพื้นผิวของเส้นใยมีการเปลี่ยนแปลงโดยมีลักษณะที่ขรุขระมากขึ้น และเส้นใยจะแตกเป็นแท่งเล็กๆ มากขึ้น สาเหตุมาจากอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาที่สูงขึ้นทำให้พอลิเมอร์ที่ใช้ ถูกทำลาย ทำให้เส้นใยมีลักษณะที่เปราะและแตก นอกจากนี้อุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้สารไทเทเนียมตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์เส้นใยกลายเป็นอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ปรากฏลักษณะผลึกขึ้น บริเวณพื้นผิวของเส้นใยจึงสังเกตเห็นพื้นผิวเส้นใยมีลักษณะที่ขรุขระมากขึ้นสอดคล้องกับผลการตรวจวิเคราะห์ XRD ที่พบโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่อเผาที่ 500 องศาเซลเซียสเป็นต้นไป

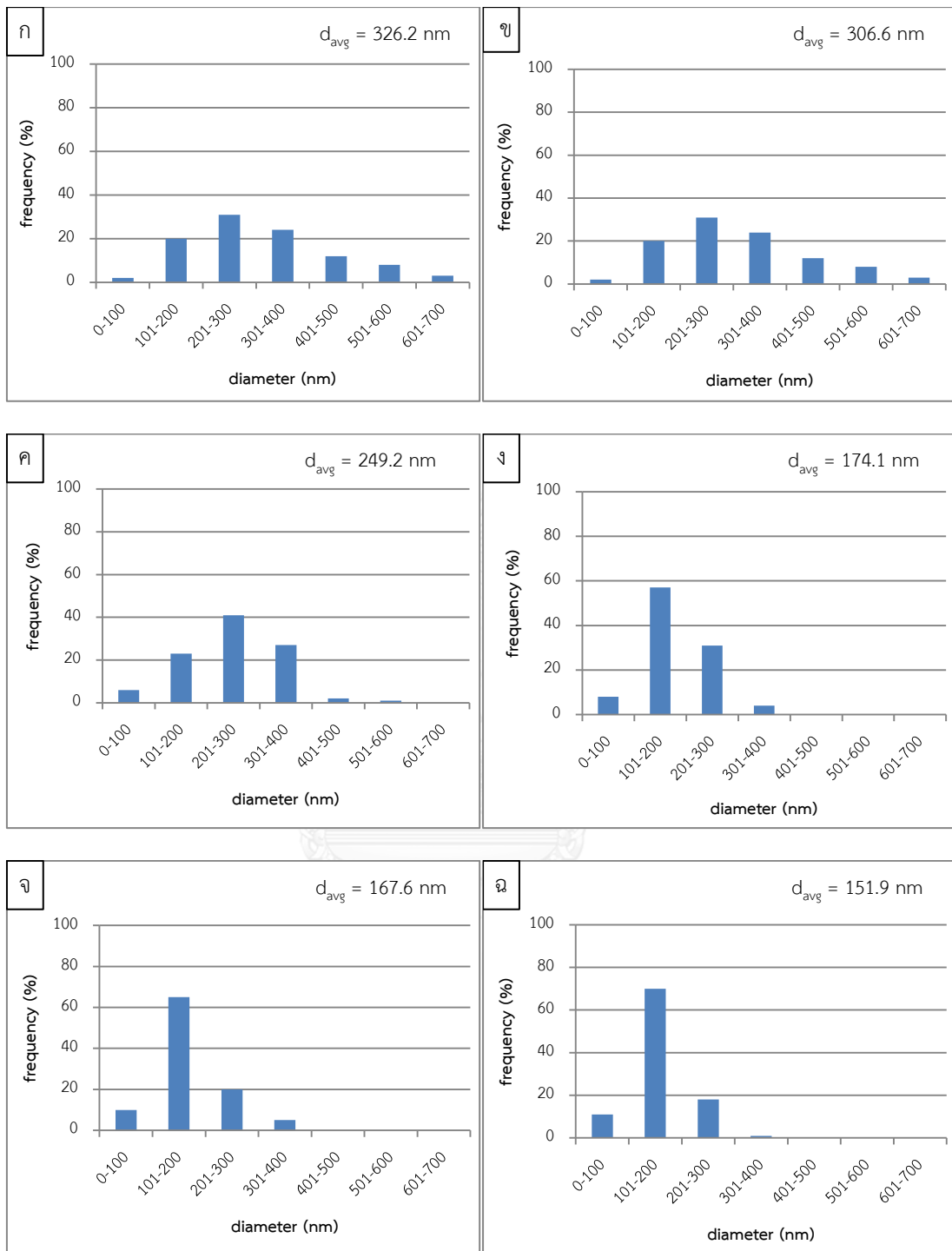
ในส่วนของการศึกษาขนาดของเส้นใยที่สังเคราะห์ทั้ง 3 สูตรนั้น สามารถนำภาพ 3 มิติที่ได้ จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) มาประมวลผลร่วมกับโปรแกรม SemAfor รุ่น 5.21 นับเป็นจำนวนเส้นใยในขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (diameter) ต่างๆ ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 4-7 – 4-9 โดย TTIP + PVP หมายถึง เส้นใยไทเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์ผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลไพโรลิโดน TBOT + PVP หมายถึง เส้นใยไทเทเนียมเตตระบิวทอกไซด์ผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลไพโรลิโดน และ TTIP + PVAc หมายถึง เส้นใยไทเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์ผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลอะซิเตท



รูปที่ 4-7 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใย TTiP + PVP (ก) ก่อนเผา (ข) เผาที่ 500 องศาเซลเซียส (ค) เผาที่ 520 องศาเซลเซียส (ง) เผาที่ 535 องศาเซลเซียส (จ) เผาที่ 550 องศาเซลเซียส (ฉ) เผาที่ 650 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง



รูปที่ 4-8 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใย TBOT + PVP (ก) ก่อนเผา (ข) เผาที่ 500 องศาเซลเซียส (ค) เผาที่ 550 องศาเซลเซียส (ง) เผาที่ 610 องศาเซลเซียส (จ) เผาที่ 635 องศาเซลเซียส (ฉ) เผาที่ 650 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง



รูปที่ 4-9 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใย TTIP + PVAc (ก) ก่อนเผา (ข) เผาที่ 500 องศาเซลเซียส (ค) เผาที่ 550 องศาเซลเซียส (ง) เผาที่ 600 องศาเซลเซียส (จ) เผาที่ 620 องศาเซลเซียส (ฉ) เผาที่ 650 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง

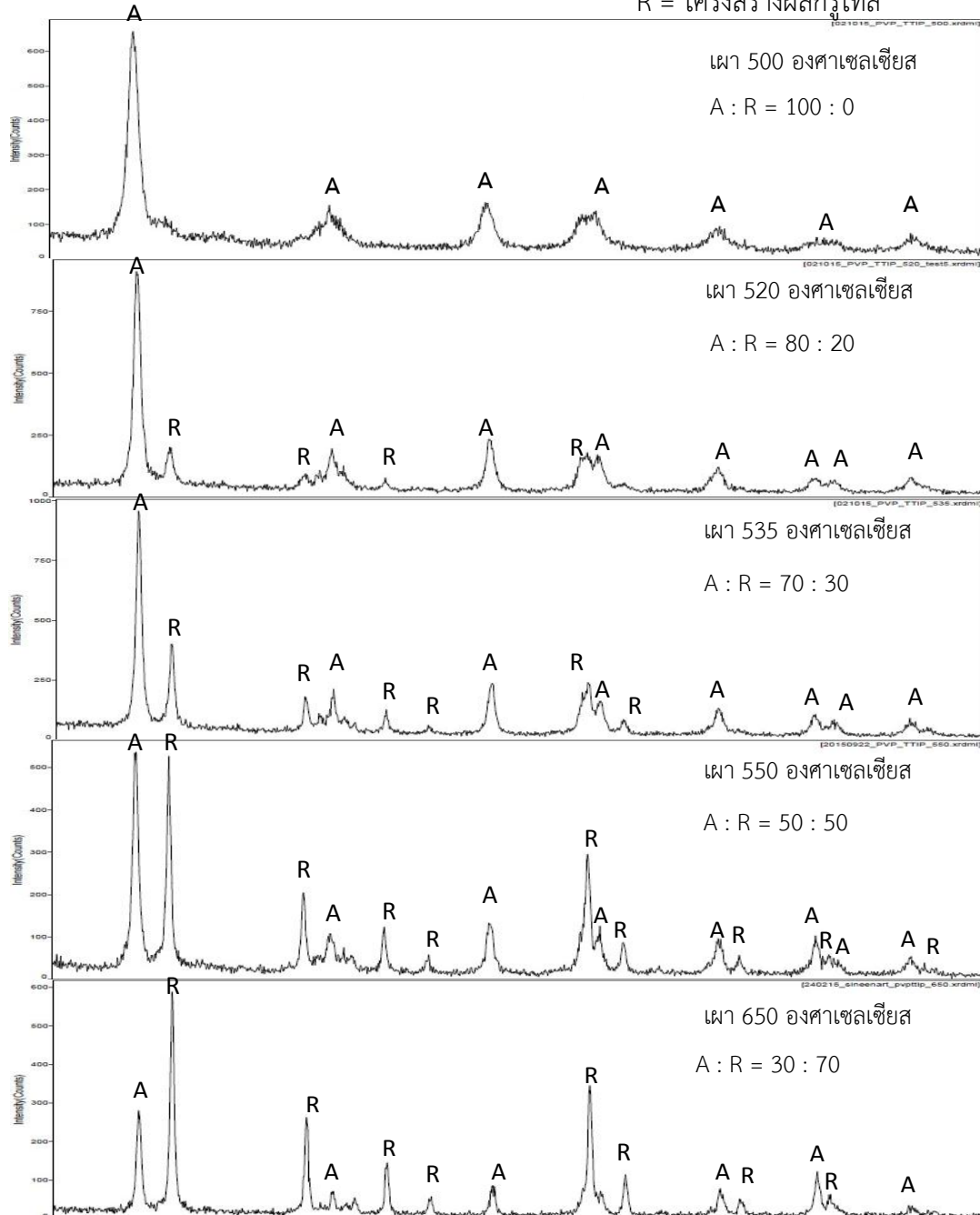
จากการศึกษาพบว่าอุณหภูมิมีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยและการกระจายตัวของขนาดเส้นใย กล่าวคือ เส้นใยที่สังเคราะห์ทั้ง 3 สูตร มีขนาดที่ลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการสังเคราะห์อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้พอลิเมอร์ที่ใช้เกิดการสลายตัวและเหลือเพียงไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยเส้นใยที่สังเคราะห์จากพอลิไวนิลไพโรลิโดนร่วมกับไทเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์มีขนาดเล็กที่สุดโดยมีขนาดเฉลี่ยก่อนเผา 289.3 นาโนเมตร และมีขนาดเฉลี่ยเล็กสุด 94.8 นาโนเมตรเมื่อเผาที่ 650 องศาเซลเซียส รองลงมาคือเส้นใยที่สังเคราะห์จากพอลิไวนิลไพโรลิโดนร่วมกับไทเทเนียมเตตระบิวทอกไซด์ ซึ่งมีขนาดก่อนเผา 308.54 นาโนเมตร และเมื่อเผา 650 องศาเซลเซียส มีขนาดเหลือเพียง 113.0 ขณะที่เส้นใยที่สังเคราะห์จากพอลิเมอร์พอลิไวนิลอะซิเตทร่วมกับไทเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์โดยมีขนาดก่อนเผา 326.2 นาโนเมตร และลดลงเหลือ 151.9 นาโนเมตร เมื่อเผา 650 องศาเซลเซียส และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการกระจายตัวของขนาดเส้นใยจะลดลง

4.2.2 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์

การศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ของเส้นใยเมื่อเผาที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันเพื่อให้ได้สัดส่วนโครงสร้างผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์อานาเทสต่อรูไทล์ ที่ต้องการศึกษา 100 : 0, 80 : 20, 70 : 30, 50 : 50 และ 30 : 70 ด้วยการใช้เครื่องเอ็กซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ โดยมีแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์มาจากรังสีทองแดง (Cu-K α) ผลการศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ สัดส่วนโครงสร้างผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ และขนาดของผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยมีผลการศึกษาแสดงได้ดังรูปที่ 4-10 – 4-12

A = โครงสร้างผลึกอนาเทส

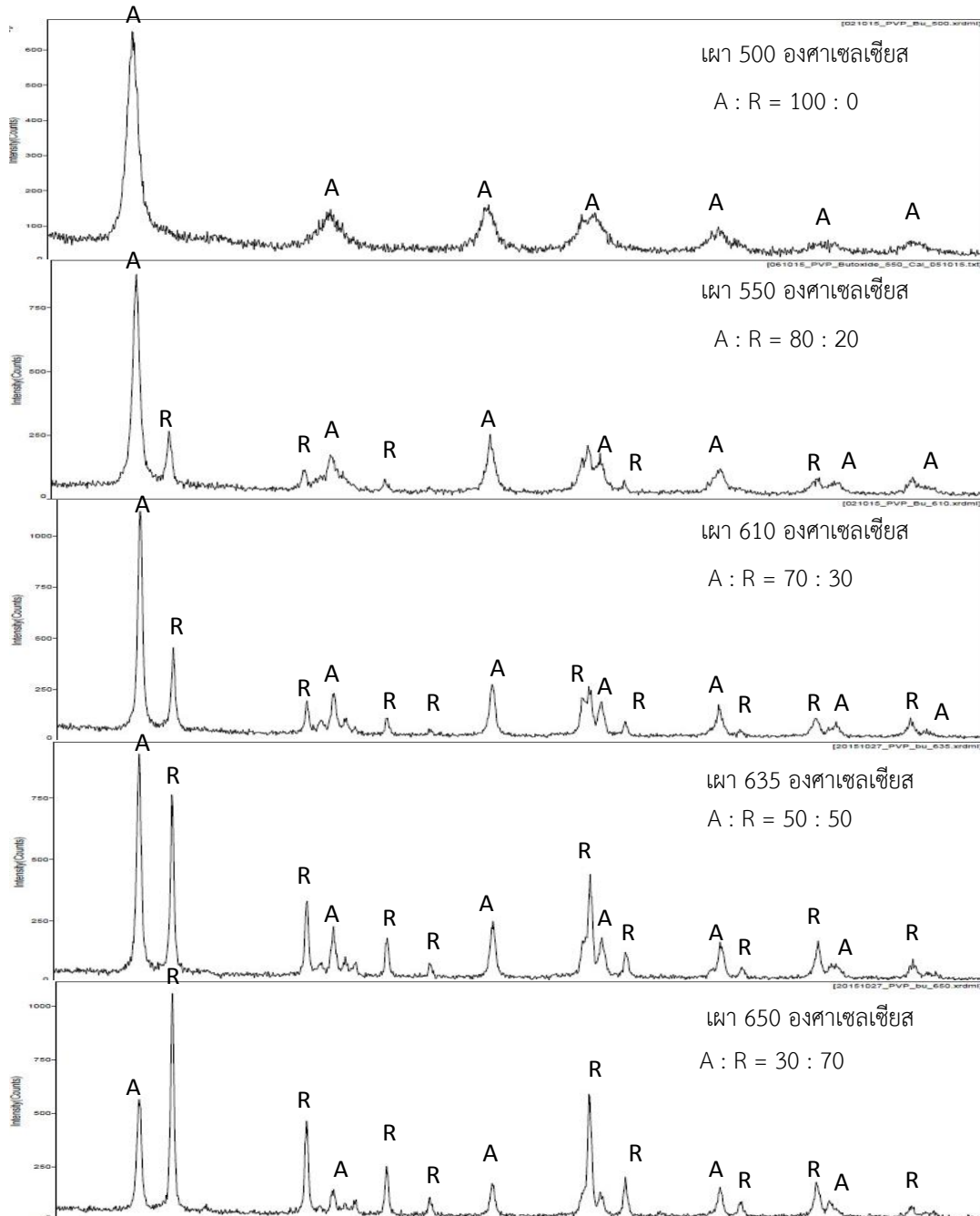
R = โครงสร้างผลึกออร์ทอโรโมน



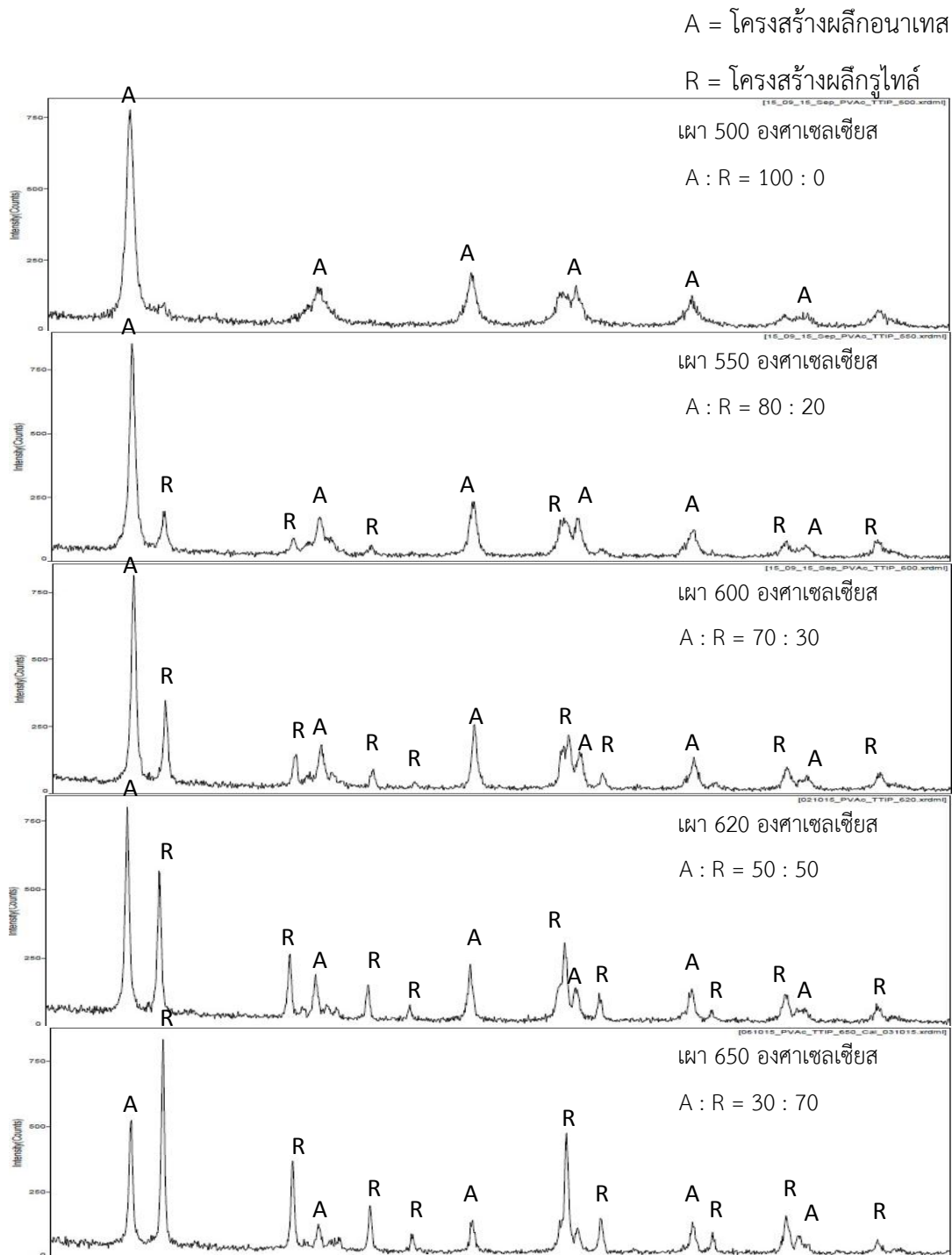
รูปที่ 4-10 โครงสร้างผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ของเส้นใยไทเทเนียมเตรอะโซโพรพอกไซด์ผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลไพโรลิโดนเมื่อเผาที่อุณหภูมิต่างๆ

A = โครงสร้างผลึกอนาเทส

R = โครงสร้างผลึกรูไทล์



รูปที่ 4-11 โครงสร้างผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ของเส้นใยไทเทเนียมเตตระบิวทอกไซด์ผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลไพโรลิโดนเมื่อเผาที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4-12 โครงสร้างผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ของเส้นใยไทเทเนียมเตตระไฮโดรฟอสเฟตผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลอะซิเตทเมื่อเผาที่อุณหภูมิต่างๆ

จากนั้นหาค่าสัดส่วนโครงสร้างผลึกอนาเทสต่อรูไทล์ โดยใช้ค่า Intensity ของโครงสร้างผลึกอนาเทส (ระนาบ 101) และผลึกรูไทล์ (ระนาบ 110) ที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์มาคำนวณ ได้ผลการศึกษาดังตารางที่ 4-1 โดย TTiP + PVP หมายถึง เส้นใยไทเทเนียมเตตระไอโซโพรพอกไซด์ผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลไพโรลิโดน TBOT + PVP หมายถึง เส้นใยไทเทเนียมเตตระบิวทอกไซด์ผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลไพโรลิโดน และ TTiP + PVAc หมายถึง เส้นใยไทเทเนียมเตตระไอโซโพรพอกไซด์ผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลอะซิเตท

ตารางที่ 4-1 สัดส่วนโครงสร้างผลึกอนาเทสต่อรูไทล์

ตัวอย่าง	อุณหภูมิเผา องศาเซลเซียส	อนาเทส : รูไทล์			
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
Degussa P25	-	78 : 22	80 : 20	83 : 17	80 : 20
TTiP + PVP	500	100 : 0	100 : 0	100 : 0	100 : 0
	520	84 : 16	84 : 16	82 : 18	83 : 17
	535	68 : 32	70 : 30	68 : 32	69 : 31
	550	46 : 54	48 : 52	48 : 52	47 : 53
	650	33 : 67	32 : 68	34 : 66	33 : 67
TBOT + PVP	500	100 : 0	100 : 0	100 : 0	100 : 0
	550	83 : 17	77 : 23	80 : 20	80 : 20
	610	68 : 32	70 : 30	70 : 30	69 : 71
	635	53 : 47	50 : 50	51 : 49	51 : 49
	650	30 : 70	32 : 68	29 : 71	30 : 70
TTiP + PVAc	500	100 : 0	100 : 0	100 : 0	100 : 0
	550	82 : 18	81 : 19	83 : 17	82 : 18
	600	71 : 29	67 : 33	69 : 31	69 : 31
	620	52 : 48	53 : 47	54 : 46	53 : 47
	650	32 : 68	32 : 68	32 : 68	32 : 68

จากผลการศึกษาดังกล่าวพบว่าอุณหภูมิมีผลต่อการเกิดอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ โดย เมื่อทำการเผาสารตั้งต้นไทเทเนียม (ไทเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์และไทเทเนียมเตตระบิวทอกไซด์) ที่ใช้ในการปั่นเส้นใยจะเกิดการเปลี่ยนรูปไปเป็นไทเทเนียมไดออกไซด์โดยที่อุณหภูมิการเผาในระยะแรกจะอยู่ในรูปโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาไปเรื่อยๆ โครงสร้างผลึกแบบอนาเทสจะเปลี่ยนเป็นโครงสร้างผลึกรูไทล์ทำให้เห็นสัดส่วนโครงสร้างผลึกรูไทล์ที่สูงขึ้นและสัดส่วนโครงสร้างผลึกอนาเทสที่ลดลง โดยจะพบผลึกโครงสร้างอนาเทสทั้งหมด (ร้อยละ 100) ในช่วงการเผาที่ 500 องศาเซลเซียส โดยยังไม่ปรากฏโครงสร้างผลึกรูไทล์ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาเป็น 520 องศาเซลเซียส ในสูตรสังเคราะห์เส้นใย TTiP + PVP และ 550 องศาเซลเซียสสูตรสังเคราะห์เส้นใย TBOT + PVP และ TTiP + PVAc จึงเริ่มพบโครงสร้างผลึกรูไทล์ โดยมีสัดส่วน อนาเทส ต่อ รูไทล์เท่ากับ 80 ต่อ 20 และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาขึ้นเรื่อยๆ พบว่าโครงสร้างผลึกอนาเทสลดลง และโครงสร้างผลึกรูไทล์เพิ่มขึ้น โดยเมื่อมีอุณหภูมิจนถึง 650 องศาเซลเซียส พบสัดส่วนโครงสร้างผลึกอนาเทส ต่อ รูไทล์ เท่ากับ 30 ต่อ 70 อุณหภูมิที่เกิดโครงสร้างผลึกสัดส่วนต่างๆ จะแตกต่างกันไปตามสารตั้งต้นไทเทเนียมแต่ละชนิด จากนั้นจึงนำไปหาขนาดของผลึก (Crystallite size) โดยใช้สมการของ Sherrer equation แสดงผลได้ดังตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 ขนาดผลึก (Crystallite size) ของเส้นใยเมื่อเผาที่อุณหภูมิต่างๆ

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ เผา (°C)	ขนาดผลึก (นาโนเมตร)							
		ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		เฉลี่ย	
		อนาเทส	รูไทล์	อนาเทส	รูไทล์	อนาเทส	รูไทล์	อนาเทส	รูไทล์
Degussa P25	-	21.8	36.3	22.3	26.1	20.4	27.7	21.5	30.0
TTiP+PVP	500	14.9	0	14.2	0	13.5	0	14.4	0.0
	520	15.8	29.2	15.8	21.6	15.8	20.4	15.8	23.7
	535	19.5	22.2	19.0	20.9	18.2	25.3	18.9	22.8
	550	19.2	26.5	19.9	24.9	20.5	26.0	19.9	25.8
	650	22.1	25.9	23.5	31.4	21.3	28.0	22.3	28.4
TBOT+PVP	500	17.4	0.0	12.1	0.0	12.1	0.0	13.9	0.0
	550	16.7	21.7	17.0	25.5	17.9	25.9	17.2	24.4
	610	22.4	26.0	22.9	28.0	20.6	27.7	22.0	27.2
	635	26.1	30.5	24.2	32.2	22.2	29.1	24.2	30.6
	650	36.0	32.7	24.4	27.7	23.9	31.6	28.1	30.6
TTiP+PVAc	500	14.9	0.0	14.8	0.0	15.6	0.0	15.1	0.0
	550	18.9	18.8	17.9	24.3	21.1	20.1	19.3	21.1
	600	22.0	20.2	22.2	26.3	26.5	27.6	23.6	24.7
	620	25.6	24.5	25.3	29.0	25.6	29.9	25.5	27.8
	650	22.5	26.0	27.3	26.3	30.0	31.2	26.6	27.8

จากการคำนวณพบว่าขนาดผลึกของเส้นใยทั้งสามชนิดแปรผันตามอุณหภูมิในการเผากล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิที่ใช้เผาเพิ่มขึ้น ขนาดผลึกของทั้งโครงสร้างอนาเทส และรูไทล์จะมีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้โครงสร้างผลึกของอนาเทสไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็กเกิดการรวมตัวกันทำให้มีขนาดผลึกที่ใหญ่ขึ้นดังจะเห็นได้ในลักษณะพื้นผิวของเส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (รูปที่ 4-4 – 4-6) และเมื่อเปรียบเทียบขนาดผลึกของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ที่สัดส่วนโครงสร้างผลึกเดียวกันกับเส้นใยจะพบว่าเส้นใยทั้งสามชนิดมีขนาดผลึกทั้งของโครงสร้างอนาเทส และรูไทล์ ที่เล็กกว่าผงไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งขนาดผลึกของผงไทเทเนียม ไดออกไซด์ที่ได้จากการศึกษานี้ใกล้เคียงกับผลการศึกษาของ Bakardjjeva และคณะ (2005) ที่พบว่าผงไทเทเนียมไดออกไซด์มีขนาดผลึกอนาเทส เท่ากับ 20.8 นาโนเมตร และขนาดผลึกรูไทล์เท่ากับ 30.5 นาโนเมตร จากนั้นจึงนำเส้นใยที่เผาที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันไปวิเคราะห์พื้นที่ผิวและ ปริมาตรรูพรุนของวัสดุเป็นลำดับถัดไป

4.2.3 พื้นที่ผิวของเส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์และผงไทเทเนียมไดออกไซด์

การศึกษาพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของวัสดุที่ทำการศึกษาโดยอาศัยการแทนที่ช่องว่างของก๊าซไนโตรเจน ได้ค่าดังแสดงในตารางที่ 4-3 โดย TTIP + PVP หมายถึง เส้นใยไทเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์ผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลไพโรลิโดน TBOT + PVP หมายถึง เส้นใยไทเทเนียมเตตระบิวทอกไซด์ผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลไพโรลิโดน และ TTIP + PVAc หมายถึง เส้นใยไทเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์ผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลอะซิเตท

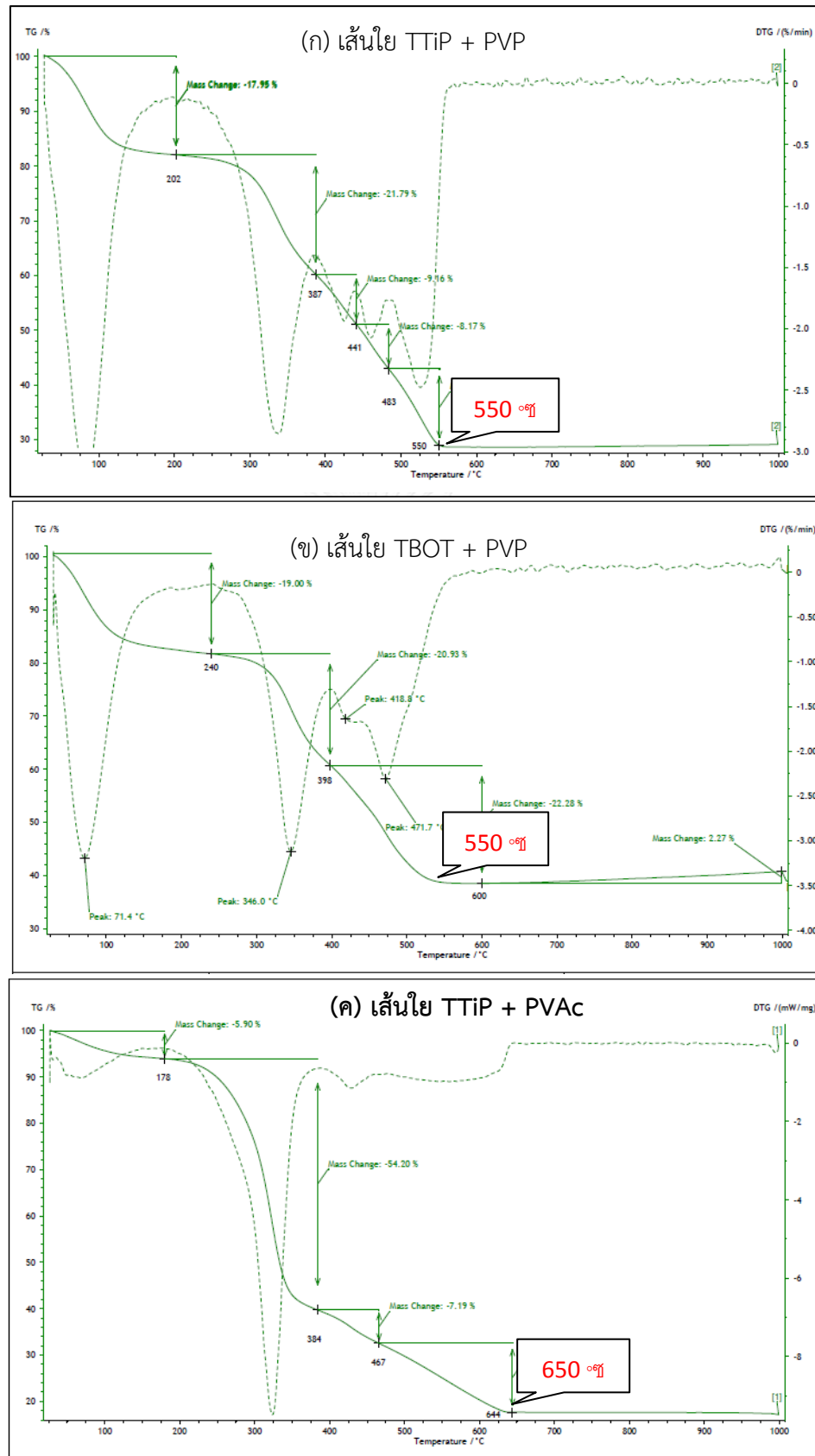
ตารางที่ 4-3 พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของเส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์

ตัวอย่าง	อุณหภูมิเผา องศาเซลเซียส	อนาเทส : รูโพล์	พื้นที่ผิววัดดู (ตารางเมตร/กรัม)	ปริมาตรรูพรุน (มิลลิลิตร/กรัม)
Degussa P25	-	80 : 20	65.68	0.026
TTiP + PVP	500	100 : 0	58.5	0.027
	520	80 : 20	50.63	0.131
	535	70 : 30	41.52	0.018
	550	50 : 50	34.77	0.015
	650	30 : 70	18.29	0.008
TBOT + PVP	500	100 : 0	8.74	0.038
	550	80 : 20	46.50	0.019
	610	70 : 30	31.58	0.095
	635	50 : 50	20.07	0.008
	650	30 : 70	25.95	0.011
TTiP + PVAc	500	100 : 0	44.19	0.019
	550	80 : 20	38.44	0.017
	600	70 : 30	25.01	0.011
	620	50 : 50	26.48	0.010
	650	30 : 70	23.33	0.011

จากผลการศึกษาพบว่าอุณหภูมิในการสังเคราะห์อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ มีผลต่อพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของวัสดุ โดยพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของเส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์จะแปรผกผันกับอุณหภูมิ กล่าวคือเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการสังเคราะห์อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของเส้นใยจะมีค่าลดลง อันเนื่องมาจากเกาะกลุ่มกันของโครงสร้างผลึกขนาดเล็ก (microstructure) ของผลึกอนาเทส และรูโหล์ทำให้ขนาดผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้น (Bakardjieva และคณะ, 2005) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองข้างต้น (ตารางที่ 4-2) ที่ผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่วิเคราะห์มีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้เผาสูงขึ้น และเมื่อนำค่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของ Degussa P25 (สัดส่วนโครงสร้างผลึก อนาเทสต่อรูโหล์ เท่ากับ 80 : 20) โดยมีค่าพื้นที่ผิวเท่ากับ 65.68 ตารางเมตรต่อกรัม และปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 0.026 มิลลิลิตรต่อกรัมเปรียบเทียบกับเส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ พบว่า Degussa P25 มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนมากกว่าเส้นใยทั้ง 3 สูตร ที่มีสัดส่วนโครงสร้างผลึกอนาเทสต่อรูโหล์เท่ากัน

4.2.4 สัดส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อน้ำหนักเส้นใย

การศึกษาสัดส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อน้ำหนักเส้นใยที่เผาที่อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้หลักการความเสถียรของวัสดุเมื่อได้รับความร้อน กระทำโดยวัดน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนไปด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวสูงในแต่ละช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลง การแตกตัวของวัสดุ (decomposition) โดยน้ำหนักที่หายไปนั้นเกิดมาจากการระเหย การย่อยสลาย หรือการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ ได้ผลการศึกษาดังรูปที่ 4-13



รูปที่ 4-13 การวิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุของเส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้ง 3 ชนิด

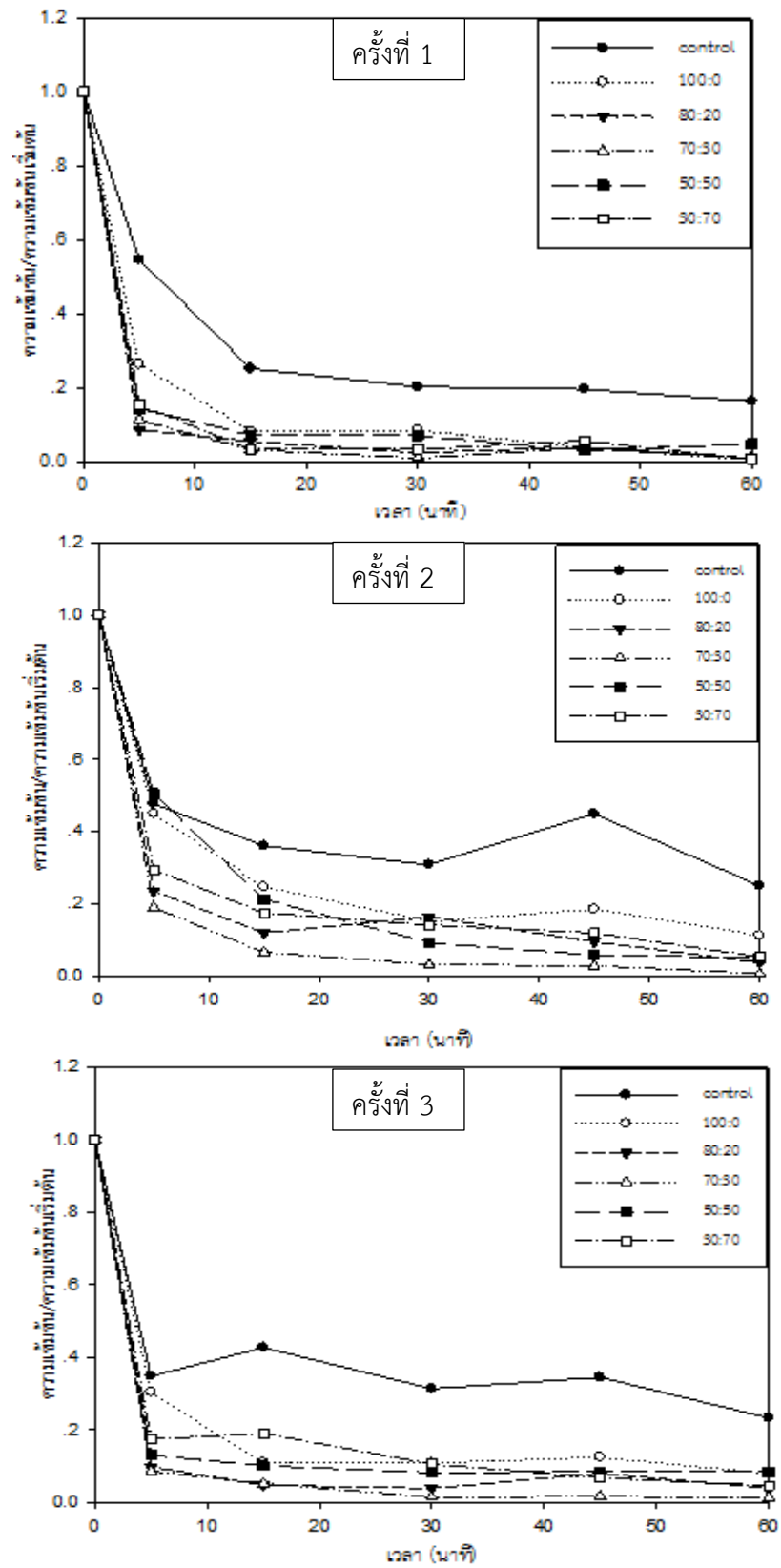
จากผลการศึกษาพบว่าเส้นใยที่ใช้พอลิเมอร์พอลิไวนิลไพโรลิโดน (PVP) จะเริ่มมีน้ำหนักคงที่ เมื่อพอลิเมอร์ที่ใช้สลายตัวจนหมดที่อุณหภูมิเผา 550 องศาเซลเซียส สอดคล้องกับการศึกษาของ Tekmen และคณะ (2008) ที่ปั่นเส้นใยโดยใช้พอลิเมอร์และสารตั้งต้นชนิดเดียวกับการศึกษานี้พบว่าพอลิเมอร์ที่ใช้เริ่มถูกทำลายที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียสและคงที่ที่ 550 องศาเซลเซียสเช่นเดียวกัน ในขณะที่เส้นใยที่ใช้พอลิไวนิลอะซิเตท (PVAc) ในการศึกษาครั้งนี้จะมีน้ำหนักคงที่ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เนื่องจากลักษณะสมบัติเฉพาะตัวของพอลิเมอร์เป็นชนิดที่สลายตัวได้ยากกว่า โดย Rimez และคณะ (2008) พบว่าพอลิเมอร์ชนิดนี้เพียงอย่างเดียวโดยไม่มีไทเทเนียมจะเริ่มสลายตัว ที่อุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียส เป็นต้นไป

4.3 การกำจัดสารคาร์เบนตาซิมตกค้างในใยช่วยด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

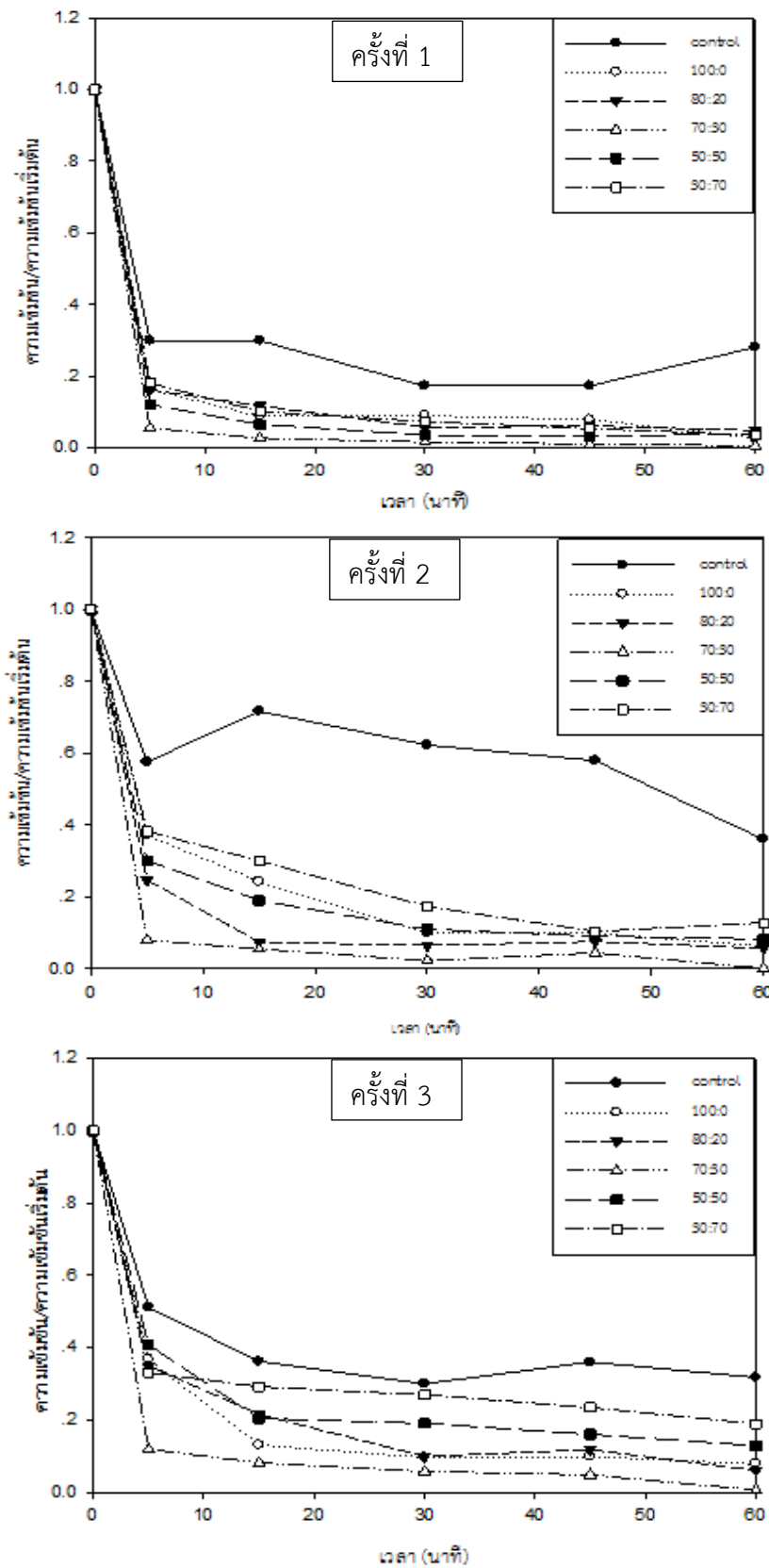
การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารคาร์เบนตาซิมตกค้างในใยช่วยโดยใช้เส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส มีการศึกษา 2 ส่วน ได้แก่การศึกษาประสิทธิภาพของเส้นใยที่สัดส่วนโครงสร้างผลึกอนาเทสต่อรูไทล์ต่างๆ กัน เปรียบเทียบกับผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) และการศึกษาปริมาณของเส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อน้ำที่ให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด รายละเอียดผลการศึกษามีดังนี้

4.3.1 การกำจัดสารคาร์เบนตาซิมตกค้างในใยช่วยของเส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์

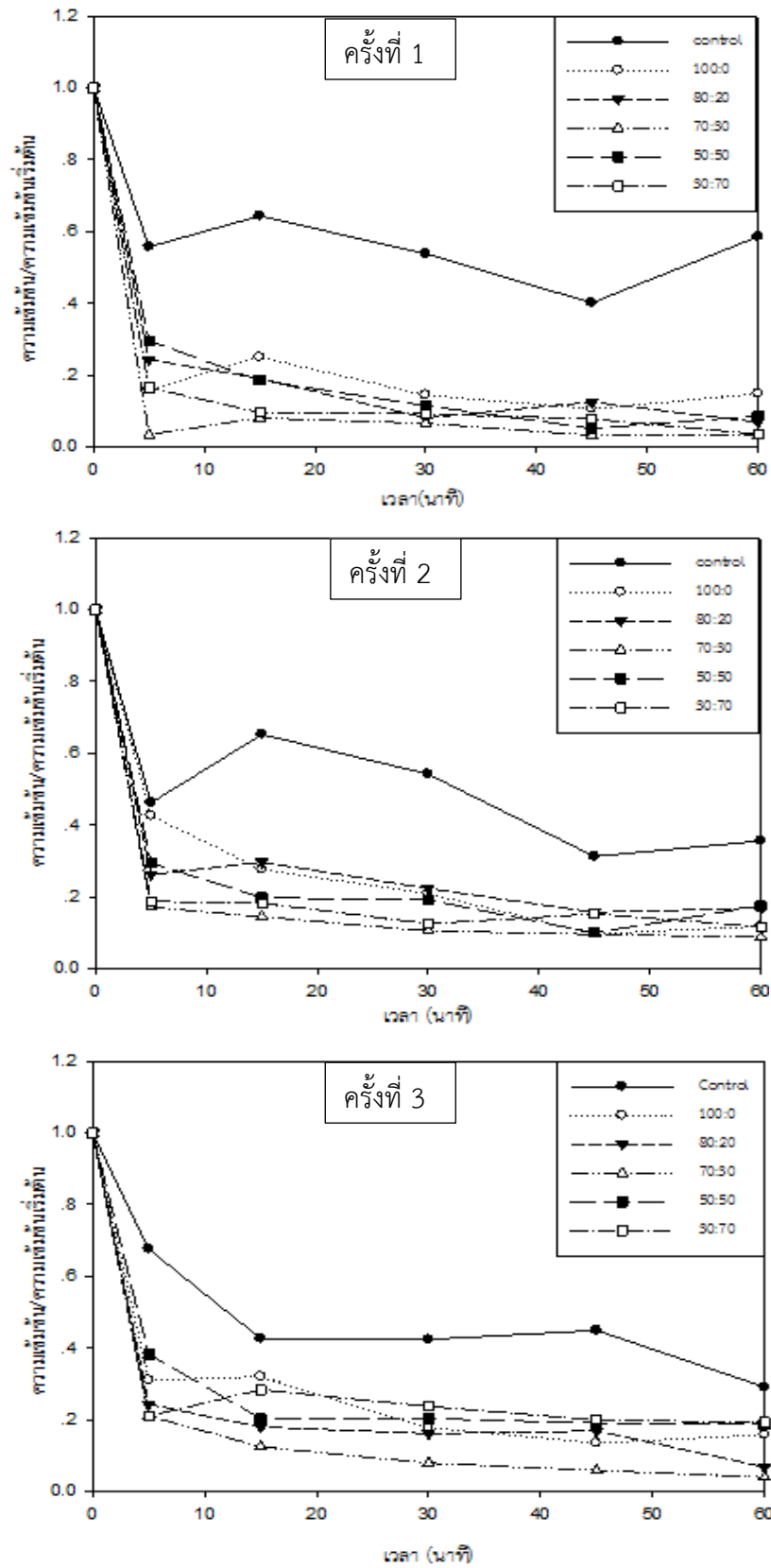
การกำจัดสารคาร์เบนตาซิมโดยใช้เส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีสัดส่วนโครงสร้างผลึกอนาเทสต่อรูไทล์ที่แตกต่างกัน (100 : 0 80 : 20 70 : 30 50 : 50 และ 30 : 70) ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ทดลองทั้งหมด 3 ชั่วโมง ผลการศึกษาสามารถแสดงในรูปกราฟเส้นโดยแกน y คือความเข้มข้นที่เวลาต่างๆ (C_t) ต่อความเข้มข้นเริ่มต้น (C_0) และแกน x คือ เวลา (นาที) ดังรูปที่ 4-14 – 4-16 โดยเส้นชุดควบคุม (control) ในรูป หมายถึงตู้ปฏิกิริยาที่ไม่มีเส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์แต่มีการฉายแสง UVA



รูปที่ 4-14 ปริมาณคาร์บอนดำที่ลดลงในใบกุ่มชายเมื่อใช้เส้นใย TTIP + PVP ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

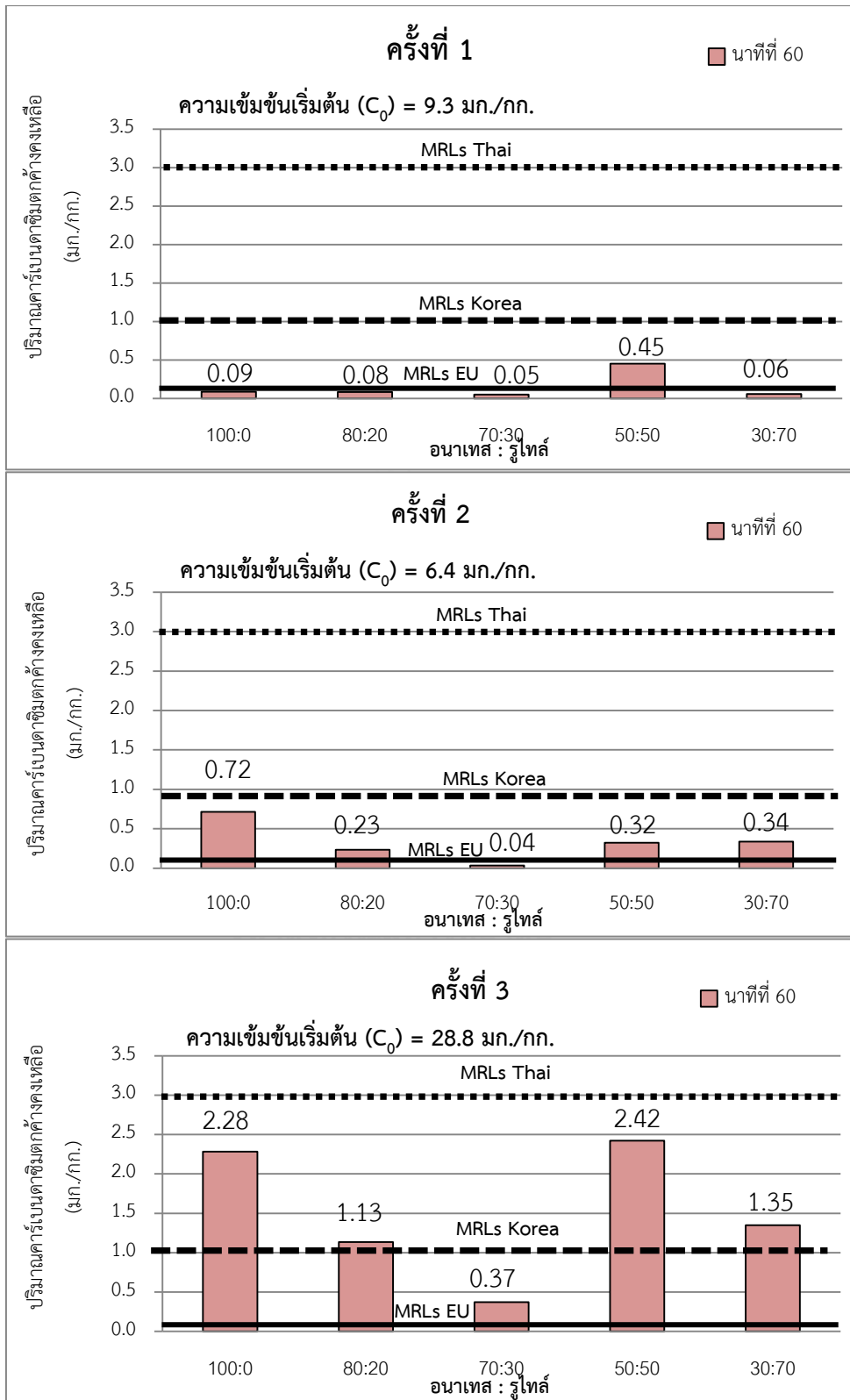


รูปที่ 4-15 ปริมาณคาร์เบนตาซิมคงเหลือในใบกัญช่ายเมื่อใช้เส้นใย TBOT + PVP ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

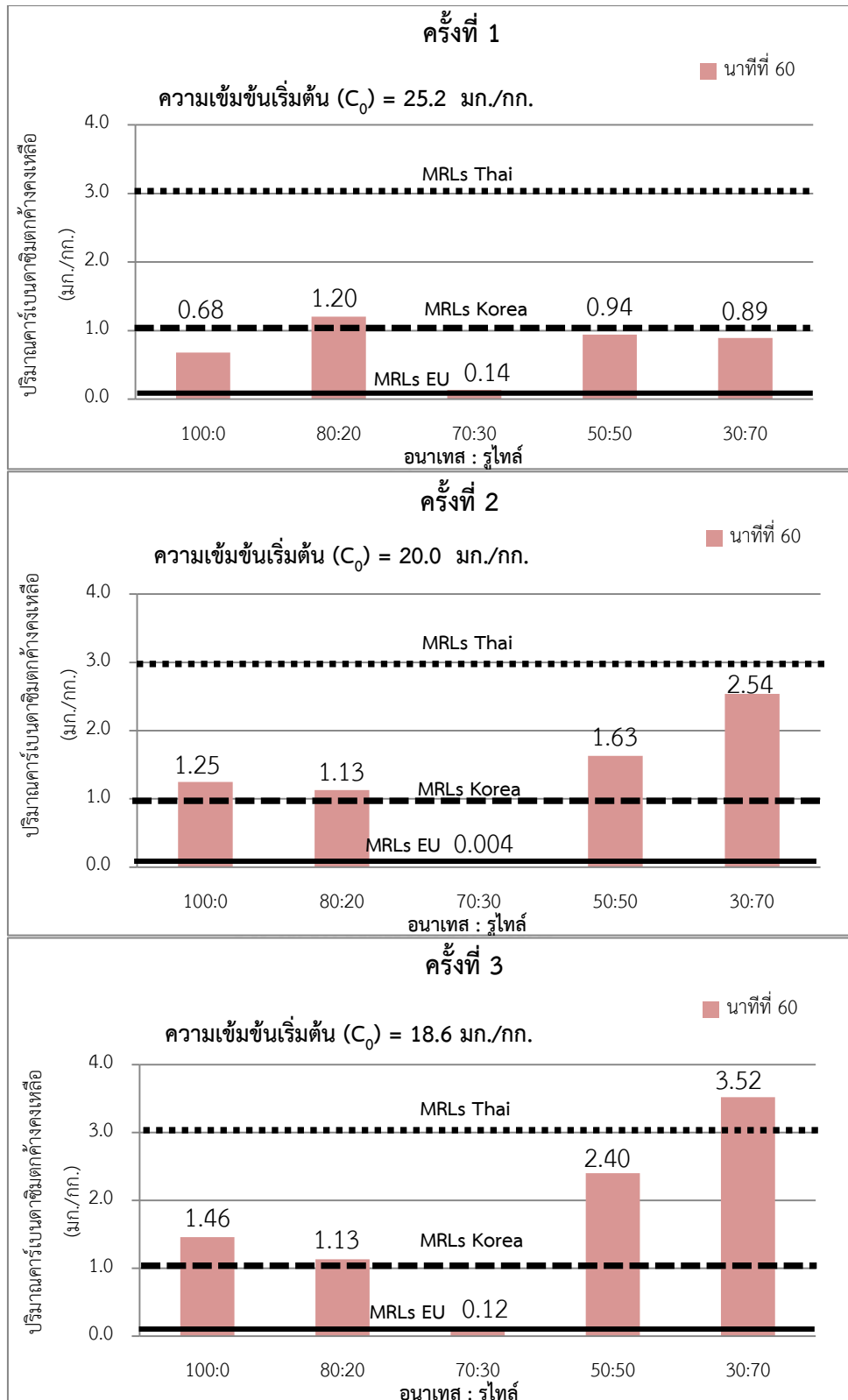


รูปที่ 4-16 ปริมาณคาร์บอนดาซิมคงเหลือในใบกวยช่ายเมื่อใช้เส้นใย TTIP + PVAc ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

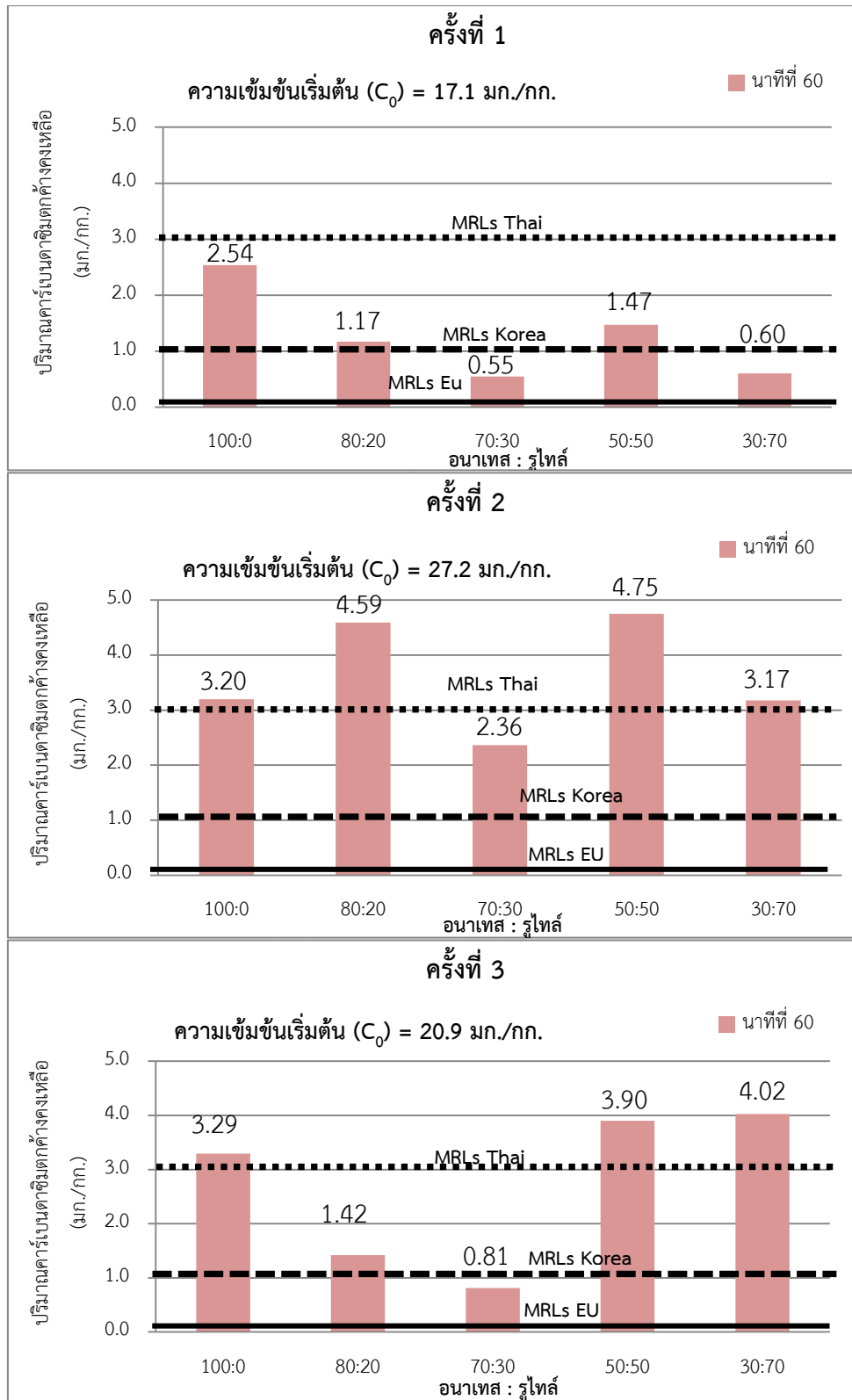
ผลการศึกษาพบว่าสัดส่วนโครงสร้างผลึกอนาเทสต่อรูไทล์ที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดคือ 70 : 30 ในทุกชนิดเส้นใย โดยการใช้เส้นใยไทเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์ผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลไพโรลิโดน สามารถลดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างคิดเป็นร้อยละการกำจัดได้ ร้อยละ 99.2 ± 0.4 ที่เวลาในการแช่ 60 นาที เช่นเดียวกันกับเส้นใยเตตระบิวทอกไซด์ผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลไพโรลิโดน ที่มีประสิทธิภาพการกำจัดคิดเป็นร้อยละ 99.6 ± 0.3 และเส้นใยไทเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์ผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลอะซิเตทโดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดร้อยละ 94.7 ± 3.0 โดยทั่วไปในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโครงสร้างผลึกอนาเทสจะให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่าโครงสร้างผลึกรูไทล์เพราะโครงสร้างผลึกอนาเทสมีช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (3.2 eV) ที่สูงกว่าโครงสร้างผลึกรูไทล์ (3.0 eV) ทำให้การเกิดรวมตัวกันใหม่ (recombination) ของคู่อิเล็กตรอนและโฮล (electron-hole pair) ในอัตราที่ต่ำกว่าโครงสร้างผลึกรูไทล์ อีกทั้งโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสสามารถสังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่าทำให้ที่พื้นผิวที่มากกว่าโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์จึงทำให้สามารถผลิตไฮดรอกซิลไอออนเรดิคัล (hydroxyl radical, OH•) ได้มาก นอกจากนี้โครงสร้างอนาเทสยังมีความสามารถในการดึงดูดติดผิวสูงกว่าโครงสร้างผลึกรูไทล์อีกด้วย (นัตตา เวชชากุล, 2555) แต่จากการศึกษาของ Li และคณะ (2011) พบว่าโครงสร้างผลึกที่ผสมกันระหว่างโครงสร้างผลึก อนาเทส และรูไทล์จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากโครงสร้างผลึกอนาเทสไปยังโครงสร้างผลึกรูไทล์ซึ่งมีระดับพลังงานที่ต่ำกว่า (0.2 eV) ที่อยู่ติดกันทำให้ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาด้วยแสงนานขึ้นจึงมีโอกาสในการสร้างอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (-OH) เพิ่มมากขึ้น ทำให้การใช้เส้นใยที่มีสัดส่วนโครงสร้างผลึกที่ผสมกันในปริมาณที่เหมาะสมมีประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสที่มากกว่าการใช้เส้นใยที่มีสัดส่วนโครงสร้างผลึกเพียงชนิดเดียว กลไกการเกิดปฏิกิริยาเกิดจากการละลายของสารคาร์เบนดาซิมลงมาสู่น้ำและเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส โดยช่วง 5-15 นาทีแรกของปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและค่อยๆ ช้าลง อีกทั้งโครงสร้างของคาร์เบนดาซิมประกอบด้วย 2 ส่วน คือ benzimidazole ring (aromatic ring) และ methyl carbamate group อนุมูลอิสระที่เข้าสลายสารคาร์เบนดาซิมเข้าทำปฏิกิริยาทั้งสองส่วนโดย methyl carbamate group จะสลายตัวได้เร็วกว่าเนื่องจากเป็นพันธะเดี่ยว ในขณะที่ aromatic ring เป็นพันธะคู่สลายตัวได้ช้ากว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจึงช้าลง ในส่วนของการทดลองชุดควบคุม (ตู้ปฏิกิริยาที่ไม่มีเส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์แต่มีการฉายแสง UVA) พบว่ามีการลดลงของปริมาณสารคาร์เบนดาซิมที่ 60 นาทีเท่ากับร้อยละ 59.0-78.5 ซึ่งเป็นผลมาจากการละลายน้ำของสารคาร์เบนดาซิมและสลายด้วยแสงโดยยังไม่มีกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส และเพื่อให้เห็นปริมาณสารคาร์เบนดาซิมคงเหลือที่ชัดเจนหลังสิ้นสุดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในแต่ละช่วงเวลา จึงนำข้อมูลในรูปที่ 4-14 – 4-16 มานำเสนอใหม่ในรูปของกราฟแท่ง 60 นาที โดยแกน x แทนสัดส่วนโครงสร้างผลึกต่างๆ และแกน y คือ ปริมาณคาร์เบนดาซิมคงเหลือในหน่วย มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งสามารถแสดงผลได้ดังรูปที่ 4-17 – 4-19



รูปที่ 4-17 ปริมาณคาร์เบนดาซิมคงเหลือในใบกัญช่ายที่เวลา 60 นาทีเมื่อใช้เส้นใย TTiP + PVP ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส



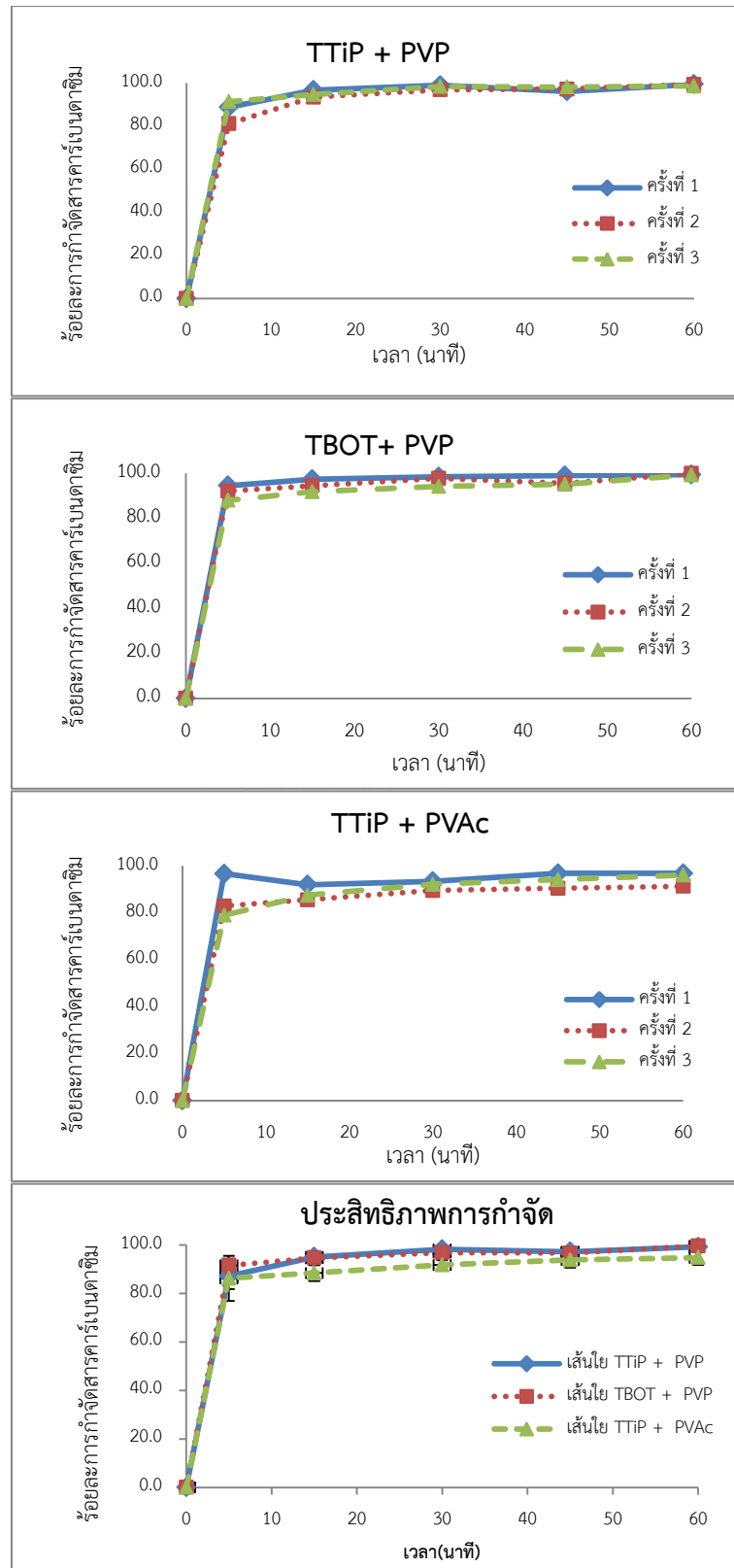
รูปที่ 4-18 ปริมาณคาร์เบนดาซิมตกค้างเฉลี่ยในใบกุยช่ายที่เวลา 60 นาทีเมื่อใช้เส้นใย TBOT + PVP ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส



รูปที่ 4-19 ปริมาณคาร์เบนดาซิมตกค้างเฉลี่ยในใบกุยช่ายที่เวลา 60 นาทีเมื่อใช้เส้นใย TTiP + PVAc ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

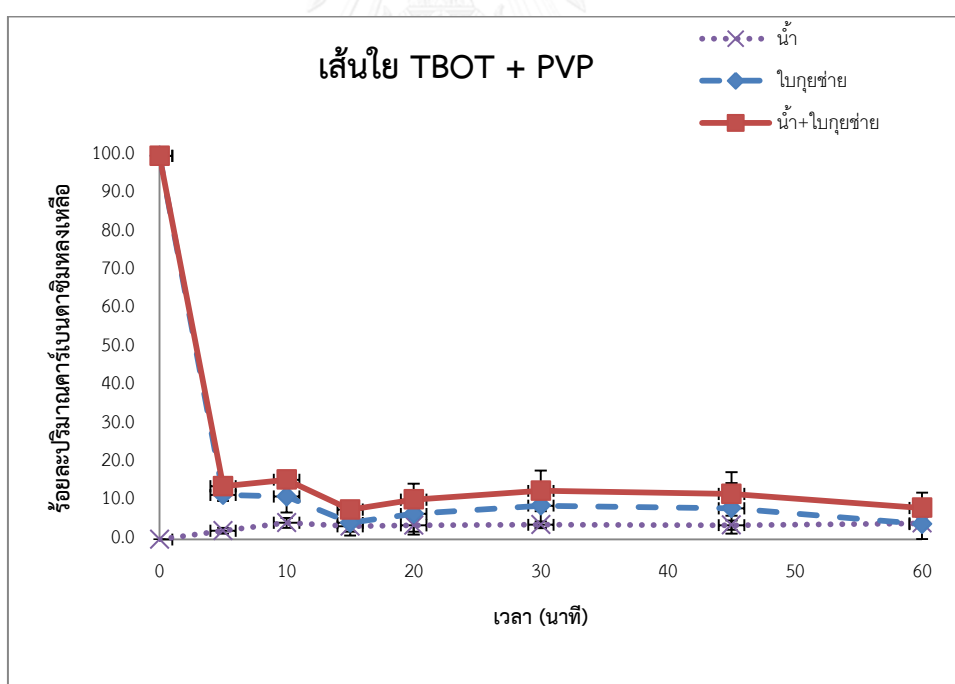
จากผลการศึกษาข้างต้นเห็นได้อย่างชัดเจนว่าสัดส่วนโครงสร้างผลึกอนาเทสต่อรูไทล์ที่สามารถกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างได้สูงสุด คือ 70 : 30 สอดคล้องกันทั้งสามชนิดเส้นใย โดยที่เวลาในการแช่ 60 นาที เส้นใยไทเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์ผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลไพโรลิโดนสามารถกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างให้เหลือเพียง 0.01 - 0.04 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จากความเข้มข้นเริ่มต้น 6.4-28.8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในส่วนของเส้นใยเตตระบิวทอกไซด์ผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลไพโรลิโดนสามารถลดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างให้เหลือเพียง 0.004-0.136 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จากความเข้มข้นคาร์เบนดาซิมตกค้างตั้งต้น 18.6-25.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และเมื่อใช้เส้นใยไทเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์ผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลอะซิเตท ความเข้มข้นคาร์เบนดาซิมตกค้างคงเหลือ 0.5-2.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จากความเข้มข้นตั้งต้น 17.1-27.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งในส่วนของเส้นใยไทเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์ผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลไพโรลิโดนและเส้นใยไทเทเนียมเตตระบิวทอกไซด์ผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลไพโรลิโดน สามารถกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างได้จนมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน MRLs ที่ทางสหภาพยุโรป เกาหลี และไทย กำหนดไว้ที่ 0.1 1 และ 3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ในขณะที่เส้นใยไทเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์ผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลอะซิเตท สามารถกำจัดได้ต่ำสุดผ่านมาตรฐานประเทศเกาหลี และไทยเท่านั้น จากผลการศึกษาพบว่าสอดคล้องกับการศึกษาของ Choi และ Hong (2012) ที่สังเคราะห์เส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์จากไทเทเนียมไฮดรอกไซด์ผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลไพโรลิโดน พบว่าเส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์เผาที่ 600 องศาเซลเซียส มีสัดส่วนโครงสร้างผลึกอนาเทสต่อรูไทล์เท่ากับ 70 : 30 และมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาดีที่สุดในแง่การกำจัดคาร์เบนดาซิมตกค้างมากที่สุดและใกล้เคียงกับผงไททาเนียมไดออกไซด์มากที่สุดในการบำบัดยารานิทินตกค้างในน้ำ

สำหรับการเปรียบเทียบเปรียบเทียบชนิดเส้นใยที่ให้ประสิทธิภาพสูงที่สุดโดยใช้สัดส่วนโครงสร้างผลึกอนาเทสต่อรูไทล์ เท่ากับ 70 : 30 ในรูปของร้อยละการกำจัดสารคาร์เบนดาซิม (แกน y) และเวลา (แกน x) จากการศึกษา 3 ครั้ง สามารถแสดงผลได้ดังรูปที่ 4-20 โดย 3 รูปบนเป็นผลของเส้นใยไทเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์ผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลไพโรลิโดน เส้นใยเตตระบิวทอกไซด์ผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลไพโรลิโดน และเส้นใยไทเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์ผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลอะซิเตท ขณะที่รูปล่างสุดเป็นการนำเสนอค่าเฉลี่ยของเส้นใยแต่ละชนิดเปรียบเทียบในรูปของร้อยละการกำจัดคาร์เบนดาซิม



รูปที่ 4-20 ประสิทธิภาพการกำจัดสารคาร์บอนดาซิมของเส้นใย 3 ชนิดที่มีสัดส่วนโครงสร้างผลึก
อนาเทสต่อรูไทล์ เท่ากับ 70 : 30

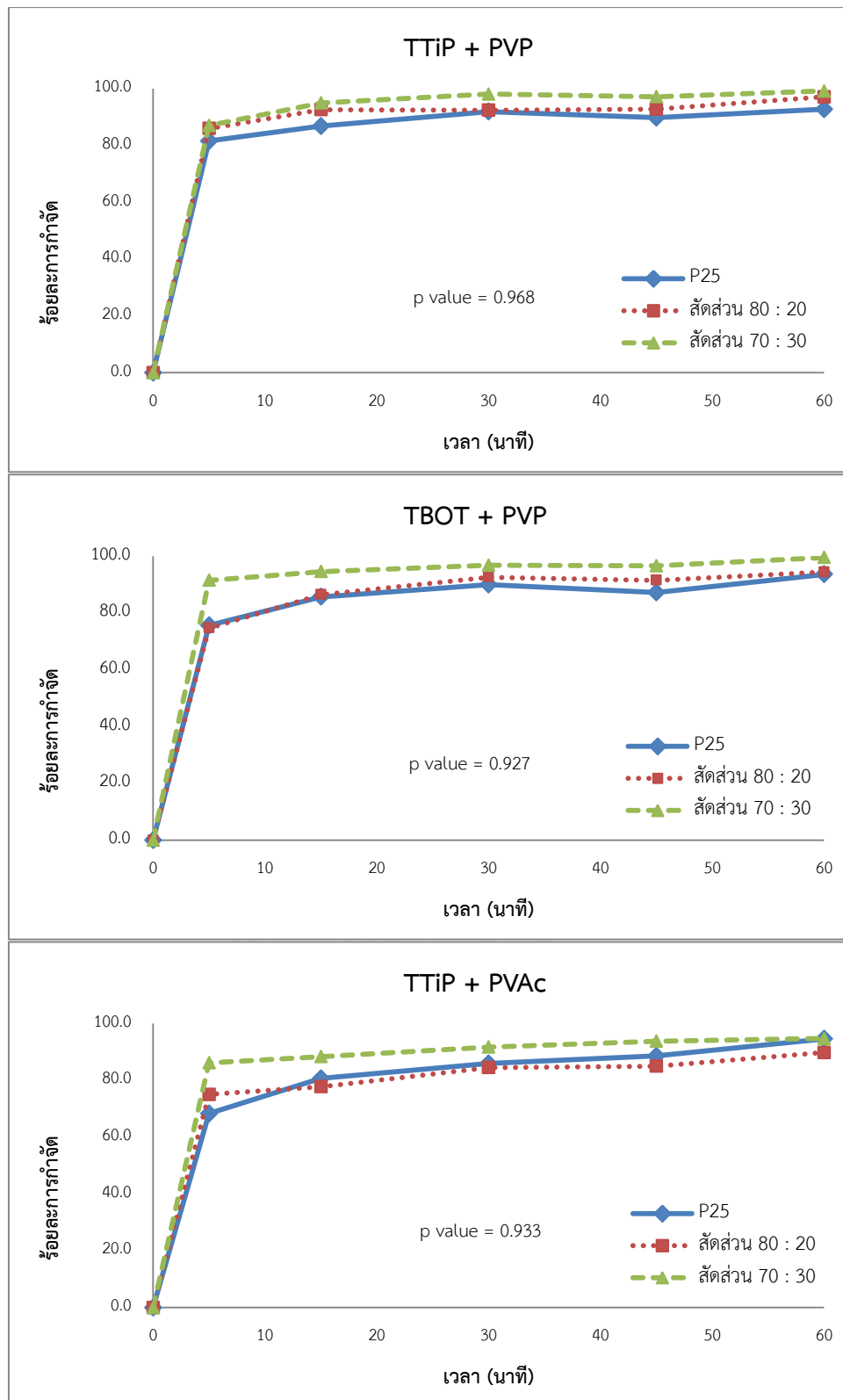
เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารคาร์เบนดาซิมโดยใช้เส้นใย 3 ชนิด (รูปล่างสุด) เส้นใยไทเทเนียมเตตระไฮดรอกซิโพรพอกไซด์ผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลไพโรลิโดน และเส้นใยเตตระบิวทอกไซด์ผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลไพโรลิโดนมีประสิทธิภาพที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน ในขณะที่เส้นใยไทเทเนียมเตตระไฮดรอกซิโพรพอกไซด์ผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลอะซิเตทให้ประสิทธิภาพในการกำจัดที่น้อยกว่าเนื่องจากพอลิเมอร์พอลิไวนิลอะซิเตทน่าจะยังคงหลงเหลืออยู่ในเส้นใย เพราะจากผลการทดสอบความเสถียรของวัสดุ (TGA) พบว่าเส้นใยที่ใช้พอลิเมอร์พอลิไวนิลอะซิเตทสลายจนหมดเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ซึ่งที่สัดส่วนโครงสร้างผลึก 70 : 30 อุณหภูมิที่ใช้เผาคือ 600 องศาเซลเซียส พอลิเมอร์จึงน่าจะยังสลายตัวไม่หมดทำให้มีสัดส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อน้ำหนักเส้นใยน้อยกว่าเส้นใยอีก 2 ชนิด นอกจากนี้ยังพบว่าเส้นใยที่ใช้พอลิเมอร์พอลิไวนิลอะซิเตทนั้นมีขนาดพื้นผิวของเส้นใยน้อยกว่าเส้นใยอีก 2 ชนิดอีกด้วย เนื่องจากปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจะเกิดขึ้นที่บริเวณพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้มีประสิทธิภาพที่น้อยกว่าเส้นใยอีก 2 ชนิด ลำดับถัดไปจึงนำเส้นใย TBOT + PVP ที่สัดส่วนโครงสร้างผลึกซึ่งให้ประสิทธิภาพสูงที่สุดไปทดสอบโดยทำการวัดความเข้มข้นที่คงเหลือในใบกุยช่ายและในน้ำที่ใช้แช่แสดงในรูปร้อยละการปริมาณคาร์เบนดาซิมที่หลงเหลือได้ดังรูปที่ 4-21



รูปที่ 4-21 ปริมาณสารคาร์เบนดาซิมหลงเหลือในน้ำและในใบกุยช่ายของเส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์

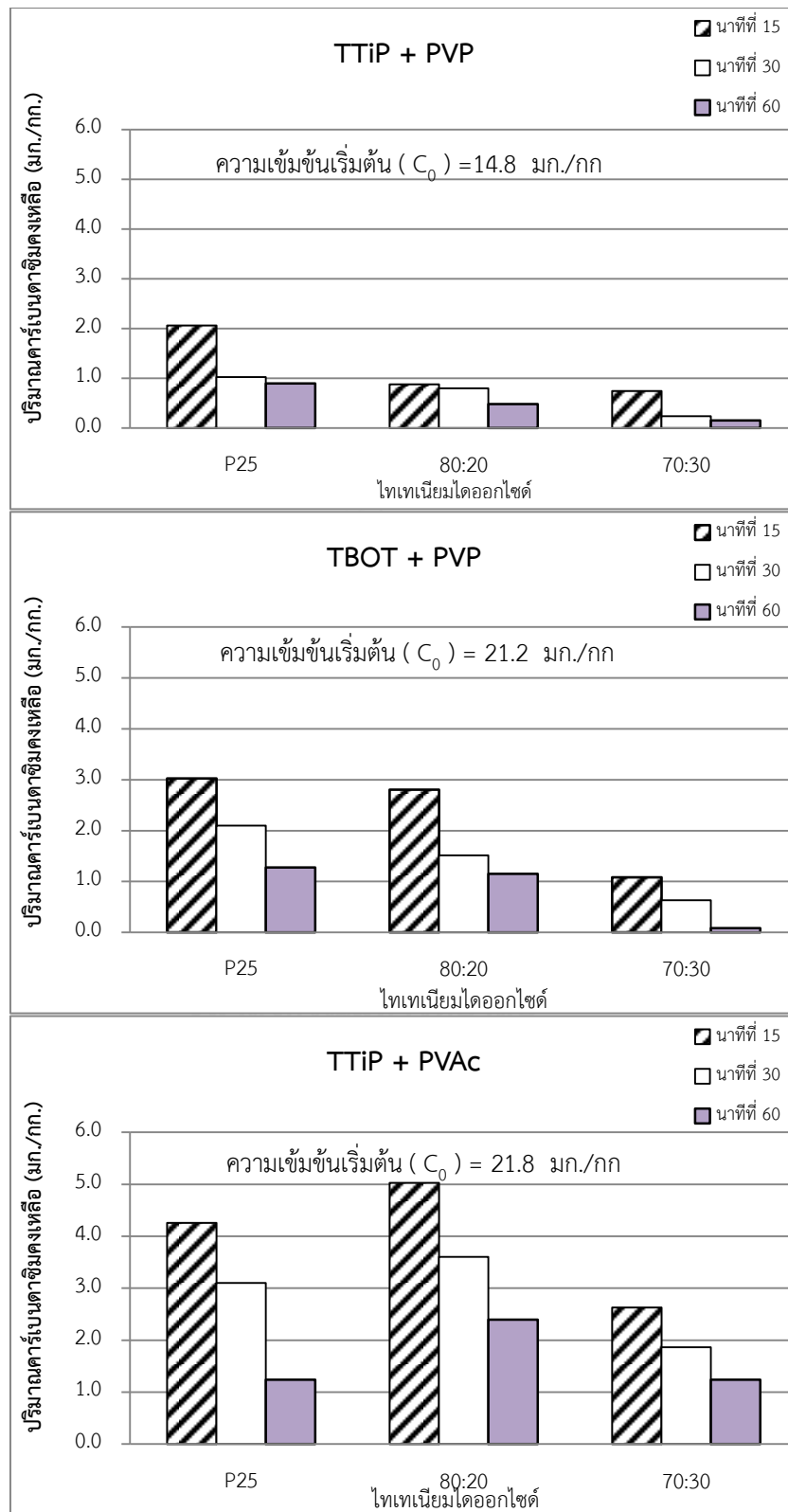
จากการศึกษาข้างต้นจะพบว่าเส้นใยมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารคาร์เบนดาซิม ทั้งในน้ำและในผักโดยสารคาร์เบนดาซิมในใบกุยช่ายจะละลายออกมาและเส้นใยไทเทเนียม ไดออกไซด์ที่สังเคราะห์สร้างอนุโมลอิสระเพื่อทำการออกซิไดส์สารคาร์เบนดาซิมที่ละลายในน้ำทำให้ เห็นการลดลงของสารคาร์เบนดาซิมในผักและหลงเหลือในน้ำเพียงเล็กน้อย

ในส่วนถัดไปเป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25 กับเส้นใยทั้งสามชนิดโดยเลือกสัดส่วนโครงสร้างผลึกที่ 70 : 30 และ 80 : 20 เนื่องจากผงไทเทเนียม ไดออกไซด์ที่นำมาทำการศึกษามีสัดส่วนโครงสร้างผลึกอยู่ในช่วงนี้ โดยใช้ปริมาณ 1 กรัมต่อลิตรเนื่องจากการศึกษาของภานุมาศ นาคเจือทอง (2554) พบว่าเมื่อใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) 1 กรัมต่อลิตร ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างในใบ กุยช่ายสูงสุด ซึ่งผลการศึกษาแสดงในรูปกราฟเส้นโดยแกน x คือ เวลา (นาที) และ แกน y คือ ประสิทธิภาพในการกำจัด(ร้อยละการกำจัด) ซึ่ง TTIIP + PVP หมายถึง เส้นใยไทเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์ผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลไพโรลิโดน TBOT + PVP หมายถึง เส้นใยไทเทเนียมเตตระบิวทอกไซด์ผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลไพโรลิโดน และ TTIIP + PVAc หมายถึง เส้นใยไทเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์ผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลอะซิเตท ได้ผลดังรูปที่ 4-22



รูปที่ 4-22 การกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเมื่อใช้ Degussa P25 และเส้นใยทั้ง 3 ชนิดที่สัดส่วนอนาเทสต่อรูไทล์ เท่ากับ 80 : 20 และ 70 : 30

ผลการศึกษาพบว่าผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ที่มีสัดส่วนโครงสร้างผลึกอนาเทสต่อรูไทล์ เท่ากับ 80 : 20 มีประสิทธิภาพการกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างใกล้เคียงกับเส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สัดส่วนโครงสร้างผลึก 80 : 20 ทั้งสามชนิดเส้นใย เนื่องจากมีสัดส่วนโครงสร้างผลึกที่ใกล้เคียงกันระหว่างผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) และเส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สัดส่วนโครงสร้างผลึก 70 : 30 พบว่าเส้นใยที่สัดส่วนโครงสร้างผลึก 70 : 30 ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดที่สูงกว่าเนื่องจากมีปริมาณสัดส่วนโครงสร้างที่เหมาะสมอีกทั้งผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) เมื่อใช้ในจำนวนเท่ากับเส้นใยจะให้น้ำมีความขุ่นมากกว่าเส้นใยเกิดการบดบังแสงที่มากกระตุ้นปฏิกิริยาจึงทำให้เส้นใยมีประสิทธิภาพที่สูงกว่า เมื่อทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 พบว่าสัดส่วนโครงสร้างผลึก 80 : 20 สัดส่วน 70 : 30 และผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ โดยเมื่อใช้เส้นใยไทเทเนียมเตตระไฮโดรโพรพอกไซด์ผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลไพโรลิโดน มีค่า p value 0.968 ในขณะที่เส้นใยเตตระไฮโดรโพรพอกไซด์ผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลไพโรลิโดน มีค่า p value 0.927 และเส้นใยไทเทเนียมเตตระไฮโดรโพรพอกไซด์ผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลอะซิเตทมีค่า p value 0.933 และเพื่อให้เห็นปริมาณสารคาร์เบนดาซิมคงเหลือเมื่อใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) เปรียบเทียบกับเส้นใยที่สัดส่วนโครงสร้างผลึก 80 : 20 และ 70 : 30 ที่ชัดเจนขึ้น จึงนำข้อมูลในรูปที่ 4-20 มานำเสนอใหม่ในรูปของกราฟแท่งแสดงปริมาณสารคาร์เบนดาซิมคงเหลือในหน่วยมิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (แกน y) และ โดยเลือกช่วงเวลา 15 30 และ 60 นาที ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4-23

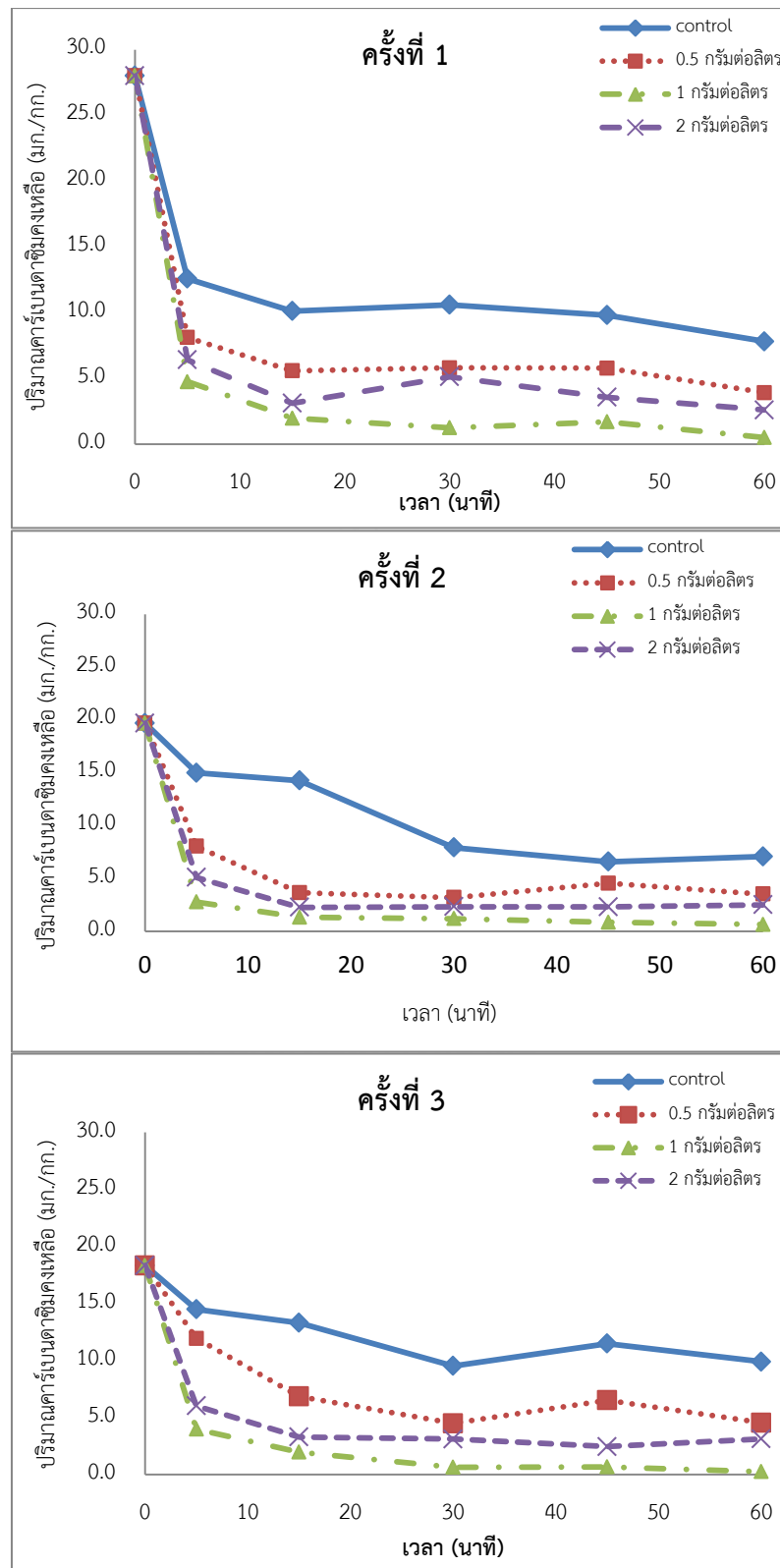


รูปที่ 4-23 ปริมาณสารคาร์บอนดาซิมตกค้างคงเหลือเมื่อกำจัดด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ เปรียบเทียบกับเส้นใยที่สัดส่วนโครงสร้างผลึก 80 : 20 และ 70 : 30

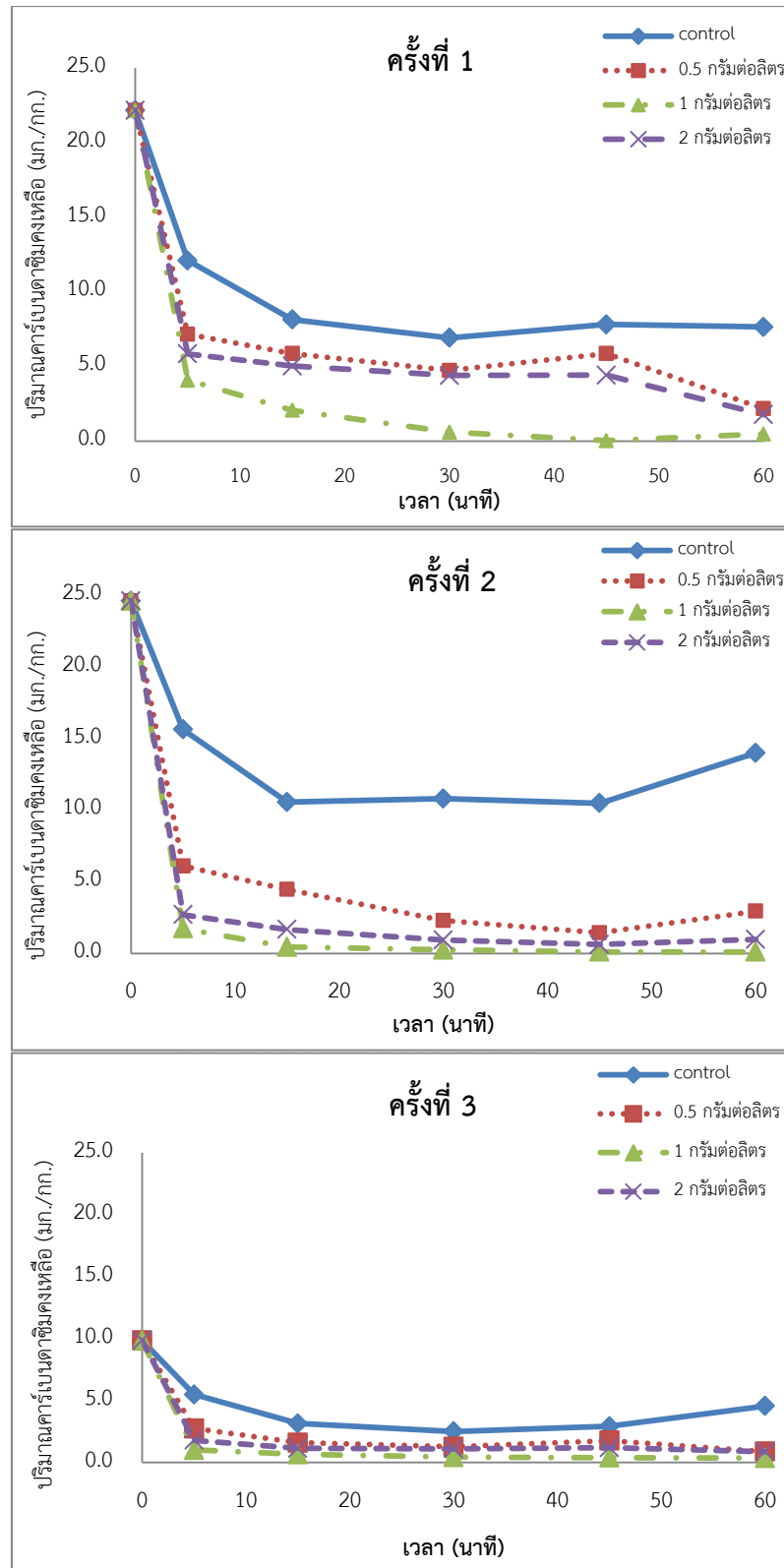
จากข้อมูลข้างต้นพบว่าผงไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ใช้ในการทดลองนี้สามารถกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างได้ใกล้เคียงกับเส้นใยที่สัดส่วนโครงสร้างผลึก 80 : 20 และสามารถลดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างได้ต่ำกว่าค่ามาตรฐาน MRLs ของประเทศเกาหลีและไทยที่กำหนดไว้ที่ 1 และ 3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม แต่ยังไม่สามารถกำจัดสารคาร์เบนดาซิมได้ต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่ทางสหภาพยุโรปกำหนดไว้ที่ 0.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในขณะที่การใช้เส้นใยสัดส่วนโครงสร้างผลึก 70 : 30 สามารถกำจัดสารคาร์เบนดาซิมได้ดีกว่าโดยเฉพาะเส้นใยเตตระบิวทอกไซด์ผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลไพโรลิโดนสามารถกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างให้เหลือเพียง 0.09 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ที่เวลา 60 นาที ซึ่งไม่เกินค่ามาตรฐานที่ทางสหภาพยุโรปกำหนดไว้

4.3.2 ปริมาณเส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์ในการกำจัดสารตกค้างคาร์เบนดาซิม

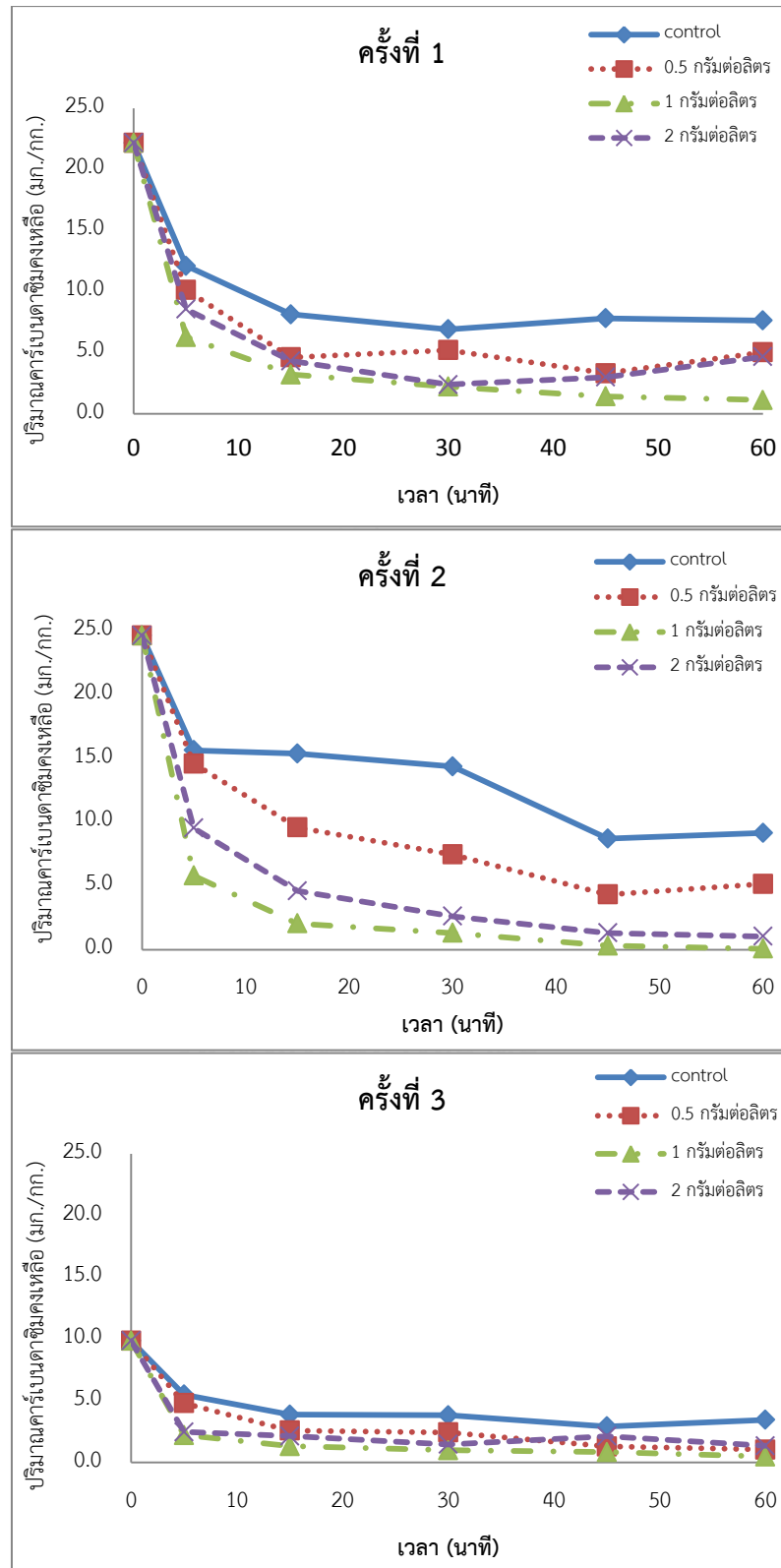
การกำจัดสารตกค้างคาร์เบนดาซิมในใบกุยช่ายโดยใช้สัดส่วนโครงสร้างผลึกที่ให้ประสิทธิภาพสูงที่สุดของแต่ละชนิดเส้นใยจากการศึกษาในส่วนก่อนหน้านี้นำมาทำการแปรผันปริมาณเส้นใยต่อน้ำ โดยใช้ปริมาณเส้นใย 0.5 1 และ 2 กรัมต่อลิตรเพื่อหาปริมาณเส้นใยที่ให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด โดยได้ผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4-24- 4-26 ซึ่งเส้นชุดควบคุม (control) หมายถึงปฏิบัติการที่ไม่มีการใส่เส้นใยแต่มีการฉายแสง UVA



รูปที่ 4-24 ปริมาณคาร์เบนตาซิมคงเหลือเมื่อใช้เส้นใย TTiP + PVP ปริมาณ 0.5 1 และ 2 กรัมต่อลิตร



รูปที่ 4-25 ปริมาณคาร์เบนตาซิมคงเหลือเมื่อใช้เส้นใย TBOT + PVP ปริมาณ 0.5 1 และ 2 กรัมต่อลิตร



รูปที่ 4-26 ปริมาณคาร์เบนดาซิมคงเหลือเมื่อใช้เส้นใย TTiP + PVAc ปริมาณ 0.5 1 และ 2 กรัมต่อลิตร

จากการศึกษาพบว่าปริมาณเส้นใยที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างในใบกุยช่ายได้ดีที่สุด คือ เส้นใยปริมาณ 1 กรัมต่อลิตร โดยรองลงมาเป็นปริมาณ 2 กรัมต่อลิตร ในขณะที่ปริมาณเส้นใย 0.5 กรัมต่อลิตร กำจัดสารคาร์เบนดาซิมได้ต่ำที่สุด สอดคล้องกันทั้งสามชนิดเส้นใย โดยปริมาณ 0.5 กรัมต่อลิตรเป็นจำนวนที่น้อยเกินไปทำให้อนุมูลอิสระที่เกิดจากฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสไม่เพียงพอในการทำปฏิกิริยากับสารคาร์เบนดาซิมตกค้างทำให้เหลือปริมาณสารคาร์เบนดาซิมตกค้างค่อนข้างสูง ในขณะที่เส้นใยปริมาณ 2 กรัมต่อลิตรมีปริมาณมากเกินไปทำให้เกิดการบดบังแสง UVA ที่จะมากระตุ้นให้เกิดอนุมูลอิสระที่ผิวของสารกึ่งตัวนำทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดไม่ดีเท่าที่ควร



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย ข้อเสนอแนะและความสำคัญกับงานวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากงานวิจัยนี้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารคาร์เบนตาซิมตกค้างในใบกุยช่ายด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้เส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากสังเคราะห์ด้วยวิธีอิเล็กโตรสปินนิงแตกต่างกันสามชนิด คือเส้นใยไทเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์ผสมกับพอลิไวนิลไพโรลิโดน เส้นใยไทเทเนียมเตตระบิวทอกไซด์ผสมกับพอลิไวนิลไพโรลิโดน และเส้นใยไทเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์ผสมกับพอลิไวนิลอะซิเตท จากนั้นเผาที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันตั้งแต่ 500 – 650 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้สัดส่วนโครงสร้างผลึกอนาเทสต่อรูไทล์ที่แตกต่างกัน (100 : 0, 80 : 20, 70 : 30, 50 : 50 และ 30 : 70) และเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสารคาร์เบนตาซิมตกค้างกับผงไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25 ด้วย

การศึกษาลดสารคาร์เบนตาซิมตกค้างในใบกุยช่ายด้วยปฏิกิริยาที่ไม่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้การล้างที่ต่างกันตามคำแนะนำของกรมวิชาการเกษตร 6 วิธี พบว่าที่เวลาในการแช่ผักนาน 60 นาที การแช่น้ำไหลผ่านตะแกรงให้ประสิทธิภาพในการลดสารคาร์เบนตาซิมตกค้างในใบกุยช่ายสูงที่สุดโดยสามารถคิดเป็นประสิทธิภาพได้ร้อยละ 96.5 สามารถลดได้ต่ำกว่าค่า MRLs ของไทยและเกาหลี ซึ่งกำหนดไว้ที่ 3 และ 1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และรองลงมาเป็นการแช่น้ำประปา การแช่น้ำไหลสั้น การแช่น้ำผสมน้ำยาล้างผัก การแช่น้ำผสมต่างทับทิม และการแช่น้ำผสมน้ำส้มสายชู ตามลำดับ

การศึกษาลักษณะสมบัติของเส้นใย พบว่าเส้นใยทั้งสามชนิดก่อนนำไปเผามีลักษณะเป็นเส้นยาวมีพื้นผิวที่ค่อนข้างเรียบ โดยเส้นใยไทเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์ผสมกับพอลิไวนิลไพโรลิโดน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 289.3 นาโนเมตร เส้นใยไทเทเนียมเตตระบิวทอกไซด์ผสมกับพอลิไวนิลไพโรลิโดนมีขนาดเท่ากับเฉลี่ย 308.5 นาโนเมตร และเส้นใยไทเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์ผสมกับพอลิไวนิลอะซิเตทมีขนาดเฉลี่ย 326.2 นาโนเมตร จากนั้นเมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน พบว่าอุณหภูมิที่ใช้เผามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะสัณฐานของเส้นใยทั้งสามชนิดโดยเส้นใยจะมีลักษณะแตกหักเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อันเนื่องมาจากพอลิเมอร์ที่ใช้ถูกทำลาย โดยพอลิเมอร์พอลิไวนิลไพโรลิโดนจะสลายตัวหมดเมื่อเผาที่ 550 องศาเซลเซียส และพอลิเมอร์พอลิไวนิลอะซิเตทจะสลายหมดที่ 650 องศาเซลเซียส นอกจากนี้แล้ว พื้นผิวของเส้นใยมีลักษณะที่ขรุขระมากขึ้นสาเหตุมาจากเกิดการเปลี่ยนรูปของสารไทเทเนียมตั้งต้นไปเป็นไทเทเนียมไดออกไซด์ทำให้แสดงลักษณะผลึกออกมาที่พื้นผิว อีกทั้งอุณหภูมิที่สูงขึ้นยังส่งผลให้เส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กลง พื้นผิวต่อ

น้ำหนักน้อยลง นอกจากนี้อุณหภูมิที่ใช้เผายังส่งผลถึงสัดส่วนโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ (อนาเทสต่อรูไทล์) โดยเมื่อเผาเส้นใยทั้งสามชนิดที่ 500 องศาเซลเซียสพบโครงสร้างผลึกอนาเทสเพียงอย่างเดียว แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ พบโครงสร้างผลึกรูไทล์เพิ่มมากขึ้น โดยขนาดผลึกของเส้นใยทั้งสามชนิดจะแปรผันตามอุณหภูมิในการเผา เมื่ออุณหภูมิที่ใช้เผาเพิ่มขึ้น ขนาดผลึกของทั้งโครงสร้างอนาเทส และ รูไทล์มีขนาดใหญ่ขึ้น และที่สัดส่วนโครงสร้างผลึกเดี่ยวขนาดผลึกของเส้นใยทั้งสามชนิดทั้งของโครงสร้างอนาเทส และรูไทล์ มีขนาดเล็กกว่าขนาดผลึกของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25)

การศึกษาการกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างโดยใช้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้เส้นใยพบว่าเส้นใยทั้งสามชนิดให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารคาร์เบนดาซิมที่ใกล้เคียงกัน โดยเส้นใยที่สัดส่วนโครงสร้างผลึกอนาเทสต่อรูไทล์ 70 : 30 ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุดสอดคล้องกันทั้งสามชนิด โดยที่เวลาในการแช่ 60 นาที เส้นใยไทเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์ผสมกับพอลิไวนิลไพโรลิโดนมีประสิทธิภาพการกำจัดคิดเป็นร้อยละ 99.2 ± 0.4 ในขณะที่เส้นใยไทเทเนียมเตตระบิวทอกไซด์ผสมกับพอลิไวนิลไพโรลิโดนมีประสิทธิภาพการกำจัดคิดเป็นร้อยละ 99.6 ± 0.3 และเส้นใยไทเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์ผสมกับพอลิไวนิลอะซิเตทมีประสิทธิภาพการกำจัดคิดเป็นร้อยละ 94.7 ± 3.0 โดยเส้นใยไทเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์ผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลไพโรลิโดน และเส้นใยเตตระบิวทอกไซด์ผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลไพโรลิโดนนั้นสามารถกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างจนมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน MRLs ที่ทางสหภาพยุโรป เกาหลี และไทย ซึ่งกำหนดไว้ที่ 0.1 1 และ 3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ในขณะที่เส้นใยไทเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์ผสมกับพอลิเมอร์พอลิไวนิลอะซิเตท สามารถกำจัดได้ต่ำสุดผ่านมาตรฐานประเทศเกาหลี และไทย หลังจากนั้นนำสัดส่วนโครงสร้างผลึก 80 : 20 และ 70 : 30 ซึ่งใกล้เคียงกับผงไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25 มาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้าง พบว่าผงไทเทเนียมไดออกไซด์ ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างใกล้เคียงกับเส้นใยที่สัดส่วนโครงสร้างผลึก 80 : 20 แต่มีประสิทธิภาพน้อยกว่าเส้นใยที่มีสัดส่วนโครงสร้างผลึก 70 : 30 ซึ่งประสิทธิภาพในการกำจัดที่แตกต่างกันอันเนื่องมาจากลักษณะสมบัติที่แตกต่างกัน

การศึกษาปริมาณเส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อน้ำที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด โดยใช้เส้นใยที่สัดส่วนโครงสร้างผลึก 70 : 30 ปริมาณ 0.5 1 และ 2 กรัมต่อลิตรมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้าง พบว่าปริมาณเส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดเรียงลำดับจากมากไปน้อย คือ 1 กรัมต่อลิตร > 2 กรัมต่อลิตร > 0.5 กรัมต่อลิตร เนื่องจากปริมาณ 0.5 กรัมต่อลิตรเป็นจำนวนที่น้อยเกินไปทำให้อนุผลอิสระที่เกิดจากปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสไม่เพียงพอในการกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้าง ในขณะที่เส้นใยปริมาณ 2 กรัมต่อลิตรมีปริมาณมาก

เกินไปทำให้เกิดการบังแสง UVA ที่เป็นพลังงานมากระตุ้นให้เกิดอนุมูลอิสระทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดไม่ดีเท่าที่ควร

จากผลการศึกษาข้างต้นทำให้เห็นว่าปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้เส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถลดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างในใบกุยช่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงสามารถนำไปพัฒนาต่อเพื่อนำไปใช้ในการลดความเสี่ยงในการบริโภคสินค้าทางการเกษตรที่อาจมีสารพิษตกค้างได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองนี้มีข้อเสนอแนะดังนี้

- ในบางการทดลองพบความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์เบนดาซิมในใบกุยช่ายที่สูงทำให้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสไม่สามารถลดค่าความเข้มข้นคาร์เบนดาซิมให้ผ่านค่ามาตรฐาน MRLs ของสหภาพยุโรปที่กำหนดไว้ก่อนข้างเข้มงวด ที่ 0.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมได้ ดังนั้นจึงควรมีการเติมสารที่ช่วยในการเกิดอนุมูลอิสระเพิ่มเติม เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
- เนื่องจากสารคาร์เบนดาซิมเป็นสารปราบศัตรูพืชที่อยู่ในกลุ่มสารดูดซึม ทำให้อาจมีการดูดกลับสารคาร์เบนดาซิมเข้าสู่เนื้อเยื่อของกุยช่ายได้อีกครั้งจึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนนี้

5.3 ความสำคัญกับงานวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

จากแนวโน้มการพบสารพิษตกค้างในผลผลิตทางการเกษตรที่สูงมากขึ้นเรื่อยๆ นั้นส่งผลกระทบต่อ การส่งออกผลผลิตไปยังประเทศคู่ค้าซึ่งมีการกำหนดค่ามาตรฐานความเข้มข้นสูงสุดที่ยอมให้มีได้หรือ MRLs ไว้อย่างเข้มงวด อีกทั้งยังกระทบต่อความเชื่อมั่นของผู้บริโภคภายในประเทศ งานวิจัยนี้ได้มีความตระหนักถึงปัญหาที่เกิดขึ้นจึงได้ทำการศึกษาเทคโนโลยีที่สามารถช่วยกำจัดสารตกค้างในผลผลิตทางการเกษตรได้อย่างมีประสิทธิภาพ ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเป็นเทคโนโลยีที่น่าสนใจในการนำมาใช้เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง ซึ่งผงไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25 เป็นสารกึ่งตัวนำที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในงานด้านสิ่งแวดล้อม แต่ยังมีข้อบกพร่องเรื่องการนำมาใช้และการเก็บออกจากสิ่งแวดล้อม ซึ่งเส้นใยที่ใช้ในการศึกษานี้ นอกจากจะมีประสิทธิภาพที่สูงกว่าแล้ว ยังไม่ก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- ฉลาด บรรเทา และ ชูสิทธิ์ ศรีสุทธิกมล. 2548. การบำบัดสีจากน้ำเสียโรงงานกระดาษด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ฉัตรภา หัตถโกศล. 2556. วิธีการล้างผักผลไม้ให้ปลอดภัย. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.manager.co.th/family/ViewNews.aspx?NewsID=956000010741> [6 มีนาคม 2557]
- ณัฐธัญ เจริญศรีวิไลวัฒน์ และ ปราณีต โอปนะโสภิต. 2551. การประยุกต์ใช้อิเล็กทรอนิกส์พอลิเมอร์นาโนไฟเบอร์. วารสารไทเทเนียม. 4 (ธันวาคม) : 1-14.
- นัตตา เวชชากุล. 2555. การกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำด้วยตัวเร่งปฏิกิริยานาโนไทเทเนียมไดออกไซด์. Energy & Enviroment. 38 (กุมภาพันธ์-มีนาคม) : 53-55.
- พาลาภ สิงหเสนี. 2540. พิษของยาฆ่าแมลงต่อผู้ใช้และสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ภาณุมาศ นาคเจือทอง, สุมิตรา ใจซื่อ, ชนิดสร่า งามศักดิ์ประเสริฐ, และ ภารดี ช่วยบำรุง. 2554. ปริมาณคาร์บอนดาซิมในผลผลิตการเกษตรและการกำจัดด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส. วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยขอนแก่น. 16 (พฤศจิกายน-มิถุนายน) : 454-467.
- ภาณุมาศ นาคเจือทอง. 2554. การกำจัดสารพิษตกค้างคาร์บอนดาซิมในผลผลิตการเกษตรด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส โอโซน และ โฟโตคะตะไลซิสร่วมกับโอโซน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- ยงยุทธ ไม้แก้ว. 2548. วิจัยปริมาณสารพิษตกค้างคาร์บอนดาซิมในพริกเพื่อกำหนดค่าปริมาณสูงสุดของสารพิษตกค้าง. กรุงเทพมหานคร : กรมวิชาการเกษตร.
- รุ่ง วงศ์วัฒน์. 2553. การจัดการสารพิษทางการเกษตร. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.ppho.go.th> [6 มีนาคม 2557]
- วิรัตน์ บวรศรีสุข. 2548. การศึกษาประสิทธิภาพของโอโซนและออกซิเจนที่ละลายในการลดสารพิษตกค้างคาร์บอนดาซิมในผักกาดขาว. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

- ศูนย์สารสนเทศการเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2556. สถิติการค้าสินค้าเกษตรไทยกับต่างประเทศปี 2555. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: www.oae.go.th/download/journal/trade56.pdf. [27 กุมภาพันธ์ 2557].
- สมนึก วงศ์ทอง. 2539. สารเคมีป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืช. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สมสมัย ปาลกุล, พงศ์ศรี ไบอดุลย์, ถวิล จอมเมือง และ พูลสุข หฤทัยธนาสันติ. 2531. การลดปริมาณสารมีพิษตกค้างใน/บนพืชม. ข่าวสารวัตถุดิบพืช. 15 (ตุลาคม-ธันวาคม) : 156-162.
- สยามเคมี.คอม. 2554. ไทเทเนียมไดออกไซด์. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.siamchemi.com/> [19 กันยายน 2558]
- สำนักควบคุมพืชและวัสดุการเกษตร. 2555. รายงานสรุปการนำเข้าวัตถุดิบรายปี 2555 [10 อันดับ]. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.doa.go.th> [5 มีนาคม 2557]
- สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ. 2557. ปริมาณสารพิษตกค้างสูงสุด (Maximum Residue Limits: MRLs). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.acfs.go.th/> [5 มีนาคม 2557]
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2557. ปริมาณและมูลค่าการนำเข้าสารกำจัดศัตรูพืช. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.oae.go.th/ewt_news.php?nid=146 [27 กุมภาพันธ์ 2557]
- สุนีย์ ธีชญโนทัย. 2533. แนะนำสารป้องกันกำจัดโรคพืชคาร์เบนดาซิม. เคหการเกษตร. 14 (มิถุนายน) : 105-108.
- แสงโสม ศิริพานิช. 2556. สถานการณ์และผลต่อสุขภาพจากการสารเคมีป้องกันกำจัดศัตรูพืชปี. รายงานการเฝ้าระวังทางระบาดวิทยาประจำสัปดาห์. 44 (พฤศจิกายน) : 1-3.
- เอนก หาลี และ ธวัชชัย ศุภวิทิตพัฒนา. 2555. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารละลายต่าง ๆ ทับทิมและน้ำยาล้างผักทางการค้า 3 ชนิดในการลดปริมาณเมทโรนิลในผักคะน้า. วารสารเกษตรพระจอมเกล้า. 30 (เมษายน) : 55-61.

ภาษาอังกฤษ

- AOAC. 2002. AOAC Guidelines for Single Laboratory Validation of Chemical Methods. อ้างถึงใน กรมวิชาการเกษตร. 2554. เอกสารวิธีทดสอบห้องปฏิบัติการ. สำนักพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร. กรมวิชาการเกษตร.
- Bakardjieva, S., Šubr, J., Štengl, V., Dianez, M.J. and Sayagues, M.J. 2005. Photoactivity of anatase–rutile TiO₂ nanocrystalline mixtures obtained by heat treatment of homogeneously precipitated anatase. Applied Catalysis B: Environmental. 58 (June) : 193-202.
- Barker, S.A. 2007. Matrix solid phase dispersion (MSPD). Journal of Biochemical and Biophysical Methods. 70 (March) : 151-162.
- Boundriot, U., Dersch, R., Greiner, A. and Wendorff, J.H. 2006. Electrospinning Approaches Toward Scaffold Engineering A Brief Overview. Artificial Organs. 30 (October) : 779-785.
- Chen, S. and Cao, G. 2004. Photocatalytic degradation of organophosphorus pesticides using floating photocatalyst TiO₂ • SiO₂ / beads by sunlight. Solar Energy. 79 (July) : 1–9.
- Choi, D.Y., Hwang, C.H., Lee, J.W., Lee, I.H., Oh, I.H. and Park, J.Y. 2013. Characterization of TiO₂ fibers by combined electrospinning method and hydrothermal reaction. Materials Letters. 106 (September) : 41– 44.
- Choi, K.J. and Hong, S.W. 2012. Preparation of TiO₂ nanofibers immobilized on quartz substrate by electrospinning for photocatalytic degradation of ranitidine. Research on Chemical Intermediates. 38 (April) : 1161–1169.
- Doh, S.J., Kim, C., Lee, S.G. and Kim, H. 2007. Development of photocatalytic TiO₂ nanofibers by electrospinning and its application to degradation of dyeutants poll. Journal of Hazardous Materials. 154 (June) : 118–127.
- EU Pesticide database. 2014. Pesticide residues and maximum residue levels (mg/kg). [Online]. Available: http://ec.europa.eu/sanco_pesticides/public/?event=substance.resultat&s=1 [6 March 2014]

- Goswami, D.Y., Kreith, F. and Kreider, J.F. 2000. Principles of Solar Engineering: Solar Photochemical Applications. Philadelphia : Taylor & Francis
- Haverkate, F., Temple, A. and Denhel, A.J. 1969. Interaction of 2,4,5-trichlorophenyl sulphonylmethyl with fungal spores. the Netherlands Journal of Plant Pathology. 75 (July) : 308-315.
- Huang, Z.M., Zhang, Y.Z., Kotaki, M. and Ramakrishna, S. 2003. A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites. Composites Science and Technology. 63 (November) : 2223–2253.
- Im, J.S., Kim, M.I. and Lee, Y.S. 2008. Preparation of PAN-based electrospun nanofiber webs containing TiO₂ for photocatalyst degradation. Materials Letters. 62 (August) : 3652–3655.
- International Programme on Chemical Safety: IPCS. 2004. Carbendazim. [Online]. Available: <http://www.inchem.org/> [6 March 2014]
- Ioannis, K.K., Vasilios, A.S. and Triantafyllos, A.A. 2001. Photocatalytic degradation of the herbicides propanil and molinate over aqueous TiO₂ suspensions: identification of intermediates and the reaction pathway. Applied Catalysis B: Environmental. 34 (November) : 227–239.
- Klinhom, P., Halee, A. and Methawiwat, S. 2008. The Effectiveness of Household Chemicals in Residue Removal of Methomyl and Carbaryl Pesticides on Chinese-Kale. Kasetsart Journal Natural Science. 42 (May) : 136-143.
- Lan, Y., Lu, Y. and Ren, Z. 2013. Mini review on photocatalysis of titanium dioxide nanoparticles and their solar applications. Nano Energy. 2 (September) : 1031-1045.
- Lhomme, L., Brosillon, S. and Wolbert, D. 2008. Photocatalytic degradation of pesticides in pure water and a commercial agricultural solution on TiO₂ coated media. Chemosphere. 70 (January) : 381-6.
- Li, H., Zhang, W., Pan, W. and Agrios, A. 2011. Enhanced Photocatalytic Activity of Electrospun TiO₂Nanofibers with Optimal Anatase/Rutile Ratio. Journal of the American Ceramic Society. 94 (July) : 3184-3187.

- Li, X., Wang, F., Qian, Q., Liu, X., Xiao, L. and Chen, Q. 2012. Ag/TiO₂ nanofibers heterostructure with enhanced photocatalytic activity for parathion. Materials Letters. 66 (January) : 370-373.
- Liu, L., Liu, Z., Bai, H. and Sun, D.D. 2012. Concurrent filtration and solar photocatalytic disinfection/degradation using high-performance Ag/TiO₂ nanofiber membrane. Water Res. 46 (March) : 1101-1112.
- Lookchem. 2004. Properties of titanium dioxide. [Online]. Available: <http://product.lookchem.com/item/24/properties-of-titanium-dioxide.html> [19 September 2015]
- Mo, J., Zhang, Y., Xu, Q., Lamson, J.J. and Zhao, R. 2009. Photocatalytic purification of volatile organic compounds in indoor air: A literature review. Atmospheric Environment. 43 (May) : 2229-2246.
- Muszkat, L. 1998. Pesticide Remediation in solid and water. New York : John Wiley & Sons.
- Nakata, K. and Fujishima, A. 2012. TiO₂ photocatalysis: Design and applications. Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews. 13 (September) : 169-189.
- Nakata, K., Ochiai, T., Murakami, T. and Fujishima, A. 2012. Photoenergy conversion with TiO₂ photocatalysis: New materials and recent applications. Electrochimica Acta. 84 (December) : 103-111.
- Neppolian, B., Choi, H.C., Sakthivel, S., Arabindoo, B. and Murugesan, V. 2000. Solar/UV induced photocatalytic degradation of three commercial textile dyes. Journal of Hazardous Materials. 89 (January) : 303-317.
- Ohno, T., Sarukawa, K., Tokieda, K. and Matsumura, M. 2001. Morphology of a TiO₂ Photocatalyst (Degussa, P-25) Consisting of Anatase and Rutile Crystalline Phases. Journal of Catalysis. 203 (October) : 82-86.
- Ohtani, B., Prieto-Mahaney, O.O., Li, D. and Abe, R. 2010. What is Degussa (Evonik) P25? Crystalline composition analysis, reconstruction from isolated pure particles and photocatalytic activity test. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. 216 (December) : 179-182.
- Panades, R., Ibarz, A. and Esplugas, S. 2000. Photodecomposition of carbendazim in aqueous solutions. Pergamon. 34 (November) : 2951-2954.

- Readman, J.W., Albanis, T.A., Barcelo, D., Galassi, S., Tronczynski, J. and Gabrielides, G.P. 1997. Fungicide contamination of Mediterranean estuarine water: results available from MED POL pilot survey. Marine Pollution Bulletin. 34 (April) : 259-263.
- Rimez, B., Rahier, H., Van Assche, G., Artoos, T., Biesemans, M. and Van Mele, B. 2008. The thermal degradation of poly(vinyl acetate) and poly(ethylene-co-vinyl acetate), Part I: Experimental study of the degradation mechanism. Polymer Degradation and Stability. 93 (September) : 800-810.
- Satpathy, G., Tyagi, Y.K. and Gupta, R.K. 2012. Removal of Organophosphorus (OP) Pesticide Residues from Vegetables Using Washing Solutions and Boiling. Journal of Agricultural Science. 4 (December) : 70-78.
- Shumate, S.R., Wu, C.Y., Wander, J., Lundgren, D., Farrah, S., Lee, J.H., Wanakule, P., Blackburn, M. and Lan, M.F. 2008. Evaluation of Physical Capture Efficiency and Disinfection Capability of an Iodinated Biocidal Filter Medium. Aerosol and Air Quality Research. 8 (September) : 1-18.
- Sigma-Aldrich. 2004. Safety data sheet. [Online]. Available: <http://www.chemtrack.org/MSDSSG/Trf/msdst/msdst10605-21-7.html>. [20 January 2014]
- SpinAid. 2014. Healing Through Electrospinning. [Online]. Available: <http://spinaid.weebly.com/electrospinning.html> [6 March 2014]
- Suphankij, S., Mekpasart, W. and Pecharapa, W. 2013. Effect of calcinations temperature on structural properties, phase transformation and photocatalytic activity electrospun TiO₂ nanofiber. Advanced Materials Research. 802 (September) : 247-251.
- Tekmen, C., Suslu, A. and Cocen, U. 2008. Titania nanofibers prepared by electrospinning. Materials Letters. 62 (March) : 4470-4472.
- The Japan Food Chemical Research Foundation. n.d. Table of MRLs for Agricultural Chemicals. [Online]. Available: http://www.m5.ws001.squarestart.ne.jp/foundation/agrdtl.php?a_inq=16900 [29 March 2014]

- The Korean Food and Drug Administration. 2009. Korea MRLs for Pesticides. [Online]. Available: <http://eng.kfda.go.kr/policy/pesticides.php> [29 March 2014]
- University of Colorado. 2014. Mineral Structure and Property Data TiO₂ Group. [Online]. Available: <http://ruby.colorado.edu/~smyth/min/tio2.html> [8 March 2014]
- Water Framework Directive-United Kingdom Technical Advisory Group. 2009. Water Framework Directive - United Kingdom Technical Advisory Group. 2009. Proposed EOS for Water Framework Directive Annex VIII substances: carbendazim (For consultation). Scotland: SNIFFER.
- Zhao, D., Wang, J., Zhang, Z. and Zhang, J. 2009. Photocatalytic degradation of omethoate using NaY zeolite-supported TiO₂. Chemical Engineering Journal.
- zontecozone. n.d. what is ultra violet light. [Online]. Available: <http://www.zontecozone.com/faqs/> [8 March 2014]



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

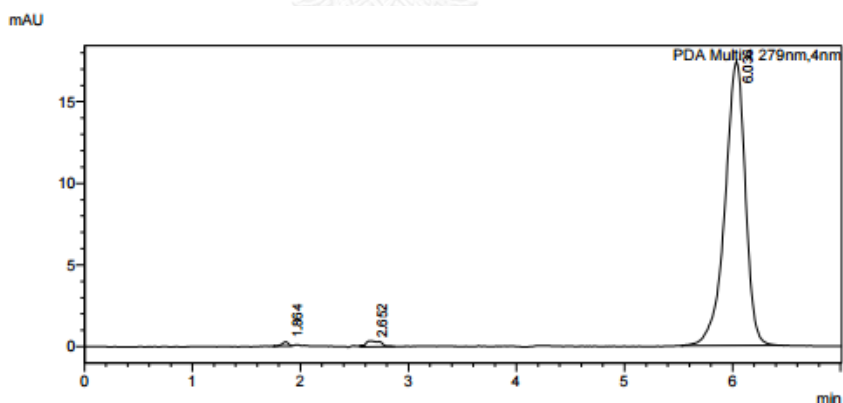


ภาคผนวก ก
วิธีวิเคราะห์สารคาร์เบนดาซิม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

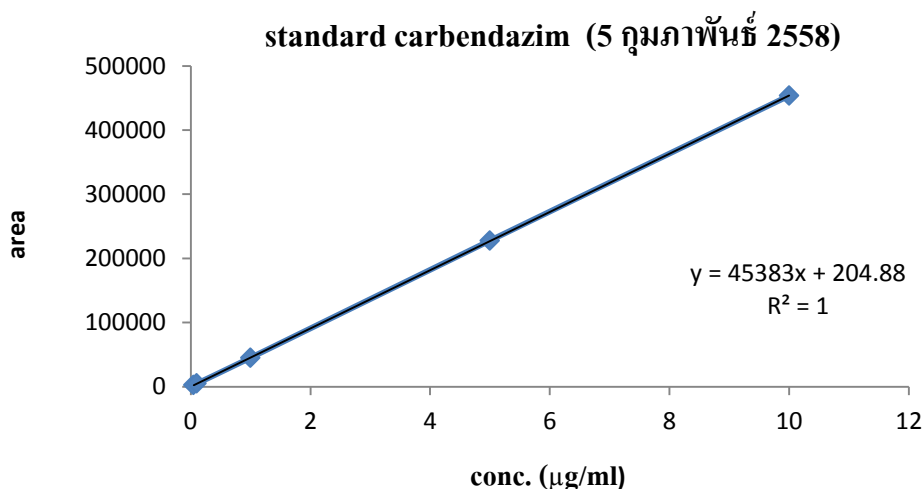
การวิเคราะห์คาร์เบนตาซิม

การวิเคราะห์คาร์เบนตาซิมด้วยเครื่องโครมาโตกราฟของเหลวสมรรถภาพสูง (UHPLC) ในการศึกษาใช้หัววัดชนิด Photo Diode Array Detector (PAD) คอลัมน์ชนิด C18 ความยาวคอลัมน์ 250 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.6 มิลลิเมตร ขนาดอนุภาค 5 ไมโครเมตร โดยฉีดตัวอย่างในปริมาตร 20 ไมโครลิตร ใช้ตัวพาสสาร (mobile phase) คือเมทานอลและน้ำอัตราส่วน 60 : 40 อัตราการนำพา 1 มิลลิลิตรต่อนาที ความยาวคลื่น 297 นาโนเมตร เครื่อง UHPLC รายงานผลในรูปของกราฟแสดงพีคของสารคาร์เบนตาซิมตามเวลาที่ถูกไล่ออกมาจากคอลัมน์ (แกน X) และ Intensity (แกน Y) โดยการเตรียมสารละลายคาร์เบนตาซิมมาตรฐานทำได้โดยเตรียมสต็อกคาร์เบนตาซิมความเข้มข้น 200 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร จากสารคาร์เบนตาซิมบริสุทธิ์ร้อยละ 99 โดยใช้เมทานอล (HPLC grade) เป็นตัวทำละลาย จากนั้นจึงนำสต็อกสารละลายมาตรฐาน 200 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตรมาเจือจางที่ความเข้มข้นต่างๆ ได้แก่ 0.04, 0.2, 1, 5, 10 และ 20 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง UHPLC ซึ่งตัวอย่างของกราฟแสดงพีคสารคาร์เบนตาซิมเมื่อใช้ความเข้มข้น 5 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ปรากฏที่เวลา 6.038 นาทีแสดงได้ดังรูปที่ ก-1



รูปที่ ก-1 สารละลายคาร์เบนตาซิมมาตรฐาน 5 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร

จากนั้นจึงสร้างกราฟมาตรฐานโดยใช้ค่าพื้นที่ใต้กราฟเป็นแกน Y และความเข้มข้นสารละลายคาร์เบนตาซิมมาตรฐานเป็นแกน X ดังแสดงในรูปที่ ก-2



รูปที่ ก-2 กราฟมาตรฐานสารละลายคาร์เบนดาซิม

ปริมาณสารคาร์เบนดาซิมตกค้างในกุยช่ายสามารถคำนวณได้จากการนำพื้นที่ใต้กราฟมาเทียบกับกราฟมาตรฐานเพื่อให้ได้เป็นความเข้มข้น (C) ในหน่วยของไมโครกรัมต่อมิลลิลิตรแล้วเปลี่ยนเป็นมิลลิกรัมคาร์เบนดาซิมต่อกิโลกรัมกุยช่ายดังนี้

$$\text{ปริมาณสารตกค้าง (}\frac{\text{มิลลิกรัม}}{\text{กิโลกรัม}}\text{)} = \frac{C \left(\frac{\text{ไมโครกรัม}}{\text{มิลลิลิตร}} \right) \times V \text{ (มิลลิลิตร)} \times \frac{1 \text{ มิลลิกรัม}}{1000 \text{ ไมโครกรัม}}}{\text{กุยช่าย } 1 \text{ กรัม} \times \frac{1 \text{ กิโลกรัม}}{1000 \text{ กรัม}}}$$

โดย C = ความเข้มข้นของสารคาร์เบนดาซิมได้จากกราฟมาตรฐาน (ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร)

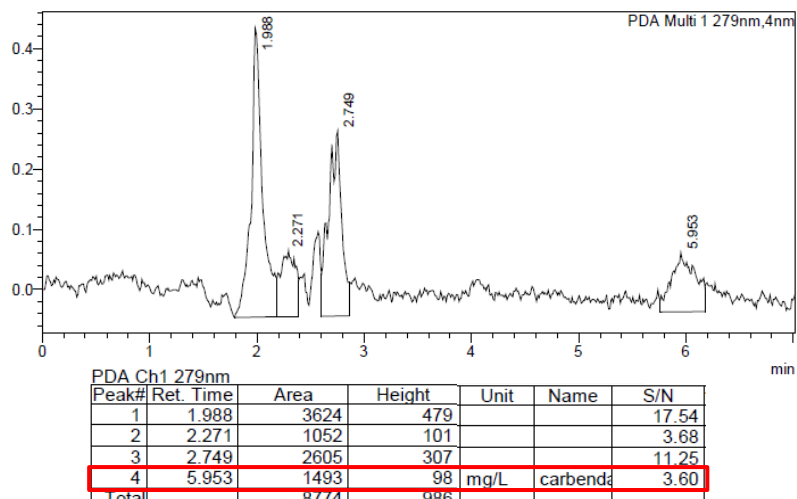
V = ปริมาตรของสารสกัดในขวดตัวอย่าง (vial) = 5 มิลลิลิตร

จากนั้นจึงคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างในกุยช่ายได้จาก

$$\text{ประสิทธิภาพการกำจัด (\%)} = \frac{\text{ความเข้มข้นเริ่มต้น (C}_0\text{)} - \text{ความเข้มข้นคงเหลือ (C}_t\text{)}}{\text{ความเข้มข้นเริ่มต้น (C}_0\text{)}} \times 100$$

ความเข้มข้นต่ำสุดที่เครื่อง UHPLC สามารถตรวจพบคาร์เบนดาซิม หรือ Limit of detection (LOD) เท่ากับความเข้มข้นที่แสดงผลเป็น 3 เท่าของสัญญาณรบกวน (Signal/Noise) ซึ่งเครื่อง UHPLC ที่

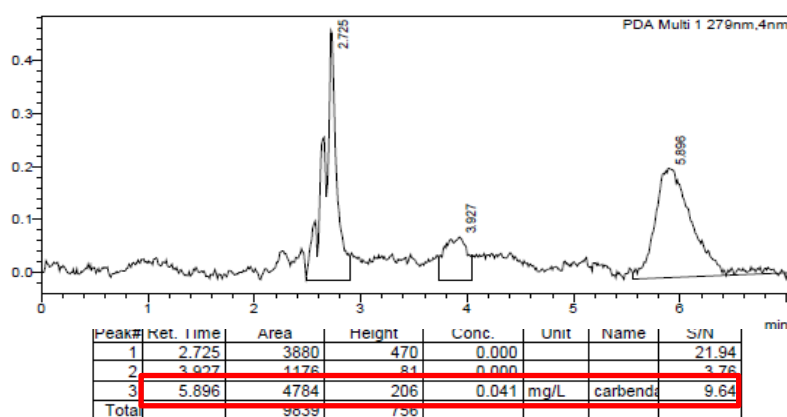
ใช้ในการศึกษานี้มีค่า LOD เท่ากับ 0.03 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร (0.03 ส่วนในล้านส่วน) โดยพีคของสารคาร์เบนดาซิมปรากฏที่เวลา 5.953 นาที แสดงดังรูปที่ ก-3



รูปที่ ก-3 ค่า Limit of Detection: LOD

การศึกษานี้ใช้ปริมาตร 2 มิลลิลิตรในการตรวจวัด (เท่ากับปริมาณสารคาร์เบนดาซิม 0.006 ไมโครกรัม) ซึ่งถ้ามีปริมาณสารคาร์เบนดาซิมมากกว่าค่าดังกล่าวเครื่อง UHPLC ที่ใช้จึงสามารถตรวจวัดได้ โดยในการทดลองตัวอย่างกุยช่าย 1 กรัม ถ้าพบปริมาณค่าเท่ากับหรือมากกว่า 0.006 มิลลิกรัมคาร์เบนดาซิมต่อกิโลกรัมกุยช่าย ข้อมูลที่รายงานถือน่าเชื่อถือ

ค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่เครื่องสามารถตรวจพบและอ่านค่าได้อย่างถูกต้อง หรือ Limit of Quantitation (LOQ) มาจากความเข้มข้นที่ให้สัญญาณเป็น 10 เท่าของสัญญาณรบกวน โดยเครื่อง UHPLC ในการศึกษานี้มีค่า LOQ สำหรับคาร์เบนดาซิม เท่ากับ 0.1 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร (0.1 ส่วนในล้านส่วน) โดยตำแหน่งพีคของสารคาร์เบนดาซิมปรากฏที่เวลาที่เวลา 5.896 แสดงดังรูปที่ ก-4



รูปที่ ก-4 ค่า Limit of Quantitation: LOQ

การหาสถานะที่เหมาะสมของวิธีสกัด Matrix Solid Phase Dispersion (MSPD)

ทำการศึกษาอัตราส่วนผักรต่อตัวดูดซับ (extrelute) และสารตัวทำละลายที่ใช้ชะสารคาร์เบนดาซิม ที่เหมาะสมที่สุดโดยรายงานผลในรูปของร้อยละการคืนกลับสารคาร์เบนดาซิมที่หยดลงไป ได้ผลการศึกษาดังตารางที่ ก-1

ตารางที่ ก-1 ร้อยละการคืนกลับสารคาร์เบนดาซิมที่สภาวะต่างๆ

ความเข้มข้น ไมโครกรัมต่อ กรัม	กวยช่าย (กรัม)	ตัวดูดซับ (กรัม)	ร้อยละการคืนกลับ (%recovery)			
			ไดคลอโร มีเทน	เมทานอล	เอทิลอะซิ เตต	ไดคลอโรมีเทน : เมทานอล (70 : 30)
3	0.5	0.5	89.2	95.4	90.8	92.2
	0.5	1	102.1	105.6	100.0	110.1
	0.5	2	74.3	81.0	87.5	86.7
	0.5	3	137.2	134.0	122.7	128.7
	1	2	83.2	114.4	91.4	112.6
	1	4	76.6	103.5	88.5	96.2
	1	6	87.3	97.9	88.1	90.5

สำหรับการตรวจสอบประสิทธิภาพของวิธีการสกัด MSPD กระทำได้โดยใช้กวยช่ายที่ไม่มีการฉีดพ่นสารคาร์เบนดาซิมจำนวน 50 กรัม นำมาปั่นละเอียด และแบ่งมา 1 กรัม หยด (spike) สารละลายมาตรฐานคาร์เบนดาซิม 0.1, 1 และ 3 ไมโครกรัมต่อกรัม (กระทำที่ความเข้มข้น) แล้วนำไปตำกับตัวดูดซับ diatomaceous earth ตามวิธีเดียวกันกับที่ใช้ในการทดลอง ความเข้มข้นละ 5 กรัม โดยคิดเป็นร้อยละการคืนกลับของสาร (%recovery) ได้จาก

$$\text{ร้อยละการคืนกลับสาร} = \frac{\text{ค่าความเข้มข้นคาร์เบนดาซิมจากตัวอย่างที่วิเคราะห์ได้} \times 100}{\text{ค่าความเข้มข้นของสารมาตรฐานคาร์เบนดาซิมที่เติม}}$$

เกณฑ์การยอมรับของร้อยละการคืนกลับสาร จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารคาร์เบนดาซิม ที่เติมลงไป ดังตารางที่ ก-2

ตารางที่ ก-2 ค่าเกณฑ์การยอมรับร้อยละการคืนกลับของสารคาร์เบนดาซิม

ความเข้มข้นของสารคาร์เบนดาซิมที่เติมใน ตัวอย่าง	ร้อยละการคืนกลับ
1000000 ส่วนในล้านส่วน (ppm)	98-102
100000 ส่วนในล้านส่วน (ppm)	98-102
10000 ส่วนในล้านส่วน (ppm)	97-103
1000 ส่วนในล้านส่วน (ppm)	95-105
100 ส่วนในล้านส่วน (ppm)	90-107
10 ส่วนในล้านส่วน (ppm)	80-110
1 ส่วนในล้านส่วน (ppm)	80-110
100 ส่วนในพันล้านส่วน (ppb)	80-110
10 ส่วนในพันล้านส่วน (ppb)	60-115
1 ส่วนในพันล้านส่วน (ppb)	40-120

ที่มา: AOAC (2002)

ในการทดลองนี้เติมสารละลายคาร์เบนดาซิมความเข้มข้น 3 ไมโครกรัมต่อกรัมคิดเป็น 3 ppm (มาจาก 3 ไมโครกรัม/10⁶ ไมโครกรัม) ดังนั้นร้อยละการคืนกลับที่ควรต้องได้จากวิธี MSPD คือ 80-110 ซึ่งจากการศึกษาของผู้วิจัยพบว่าร้อยละการคืนกลับของสารคาร์เบนดาซิมในใบกุยช่าย คือ ร้อยละ 103 อยู่ในข้อกำหนดของกรมวิชาการเกษตรดังกล่าว



ภาคผนวก ข

การคำนวณในการทดลองและสมมูลมวล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

การเตรียมสารละลายมาตรฐานคาร์เบนดาซิม

สารละลายมาตรฐานคาร์เบนดาซิมเตรียมได้จากสารคาร์เบนดาซิมความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 (standard cabendazim) โดยเริ่มจากการเตรียมสารละลายสต็อกสารละลายความเข้มข้น 200 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร

- stock standard ความเข้มข้น 200 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ปริมาณ 50 มิลลิลิตร

$$200 \frac{\text{ไมโครกรัม}}{\text{มิลลิลิตร}} = \frac{10 \text{ มิลลิกรัม}}{50 \text{ มิลลิลิตร}}$$

สารคาร์เบนดาซิมมีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99

ต้องการเนื้อสารที่มีคาร์เบนดาซิม 99 มิลลิกรัม ต้องชั่งสารคาร์เบนดาซิมมา 100 มิลลิกรัม ดังนั้น ถ้าต้องการเนื้อสารที่มีคาร์เบนดาซิม 10 มิลลิกรัม ต้องชั่งสารคาร์เบนดาซิมมา 10.10 มิลลิกรัม ละลายในเมทานอล (HPLC grade) 50 มิลลิลิตร จากนั้นนำสต็อกสารละลายมาตรฐานไปเจือจางให้ได้ความเข้มข้น 0.03 0.05 0.1 0.5 1 5 10 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร

- ตัวอย่างการคำนวณสารละลายมาตรฐานคาร์เบนดาซิม คำนวณจากสมการ

$$M_1V_1 = M_2V_2$$

เมื่อ M_1 = ความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้เตรียม

M_2 = ความเข้มข้นของสารละลายที่ต้องการ

V_1 = ปริมาตรสารละลายที่ใช้เตรียม

V_2 = ปริมาตรสารละลายที่ต้องการ

ความเข้มข้น 10 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร

$$\left(200 \frac{\text{ไมโครกรัม}}{\text{มิลลิลิตร}} \right) (V_1) = \left(10 \frac{\text{ไมโครกรัม}}{\text{มิลลิลิตร}} \right) (10 \text{ มิลลิลิตร})$$

$$V_1 = 0.5 \text{ มิลลิลิตร}$$

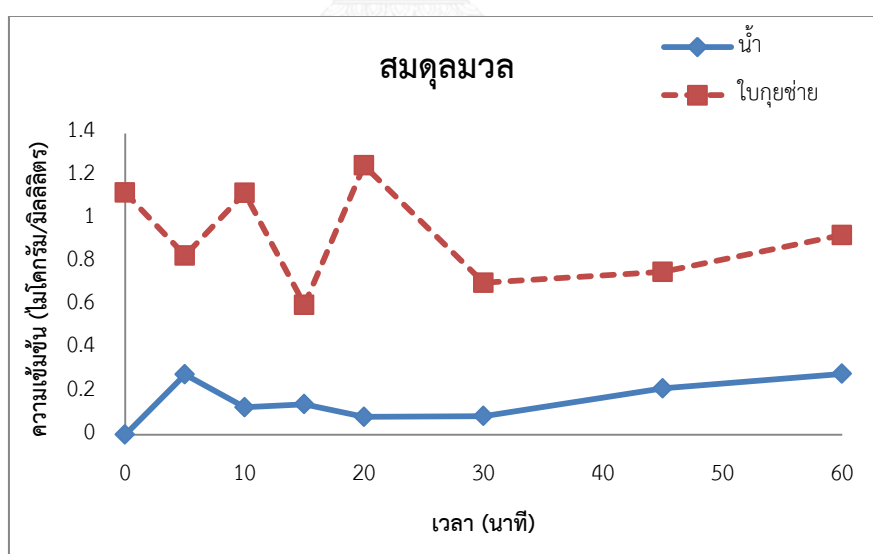
ดังนั้นต้องปิเปตสต็อกสารละลายมาตรฐานคาร์เบนดาซิมมา 0.5 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยเมทานอลจนมีปริมาตร 10 มิลลิลิตร

สมมูลมวลสารคาร์เบนดาซิม

ทำการศึกษสมมูลมวลในปฏิกิริยาโดยวัดความเข้มข้นในใบกุยช่ายและในน้ำได้ผลการศึกษาดังตารางที่ ข-1 และ รูปที่ ข-1

ตารางที่ ข-1 ความเข้มข้นคาร์เบนดาซิมในน้ำและในใบกุยช่าย

เวลา (นาทื)	ความเข้มข้นคาร์เบนดาซิม (ไมโครกรัม/มิลลิลิตร)			ร้อยละ
	ใบกุยช่าย	น้ำ	รวม	
0	1.12	0	1.12	100.00
5	0.83	0.28	1.11	98.87
10	1.12	0.13	1.25	111.20
15	0.60	0.14	0.75	66.25
20	1.25	0.08	1.33	118.63
30	0.71	0.09	0.79	70.52
45	0.76	0.22	0.97	86.44
60	0.93	0.28	1.21	107.65



รูปที่ ข-1 ความเข้มข้นคาร์เบนดาซิมในน้ำและในใบกุยช่าย



ภาคผนวก ค

ผลการทดลอง และค่าพารามิเตอร์ที่ตรวจวัดระหว่างการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การลดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างในใบกุยช่ายจากวิธีการล้างต่างๆ

จากการศึกษาการล้างใบกุยช่ายด้วยวิธีการล้างที่แตกต่างกัน 6 วิธี พบว่าแต่ละวิธีมีปริมาณคาร์เบนดาซิมหลงเหลือที่แตกต่างกันดังแสดงใน ตาราง ค-1

ตารางที่ ค-1 ปริมาณสารคาร์เบนดาซิมตกค้างจากการล้างกุยช่ายด้วยวิธีต่างๆ

วิธีล้าง	เวลา	ปริมาณคาร์เบนดาซิมหลงเหลือ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมกุยช่าย)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
แช่น้ำ	0	27.2	17.3	20.4
	5	23.6	10.7	0.4
	10	7.6	2.2	0.7
	15	10.9	7.7	8.3
	30	10.9	2.2	1.3
	60	7.5	2.3	1.0
น้ำล้นกะละมัง	0	27.2	17.3	20.4
	5	12.5	5.6	9.0
	10	14.9	11.1	11.6
	15	12.3	7.2	6.0
	30	9.6	6.9	4.7
	60	6.0	4.0	1.0
น้ำไหลผ่านตะแกรง	0	11.4	22.4	22.0
	5	2.5	12.3	9.0
	10	1.6	6.4	5.7
	15	1.0	5.7	3.4
	30	0.4	6.2	1.5
	60	0.1	1.2	1.0

ตารางที่ ค-1 ปริมาณสารคาร์เบนดาซิมตกค้างจากการล้างกุยช่ายด้วยวิธีต่างๆ (ต่อ)

วิธีล้าง	เวลา	ปริมาณคาร์เบนดาซิมคงเหลือ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมกุยช่าย)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
น้ำส้มสายชู	0	27.2	17.3	20.4
	5	8.3	10.2	7.8
	10	6.2	2.7	2.8
	15	8.9	7.1	4.7
	30	8.2	6.7	3.1
	60	7.9	7.3	3.5
น้ำผสมน้ำยาล้างผัก	0	17.3	20.4	26.9
	5	5.6	1.7	14.1
	10	4.4	0.2	11.5
	15	5.5	2.0	15.8
	30	3.4	1.1	12.3
	60	2.9	0.7	12.3
น้ำผสมต่างทับบทิม	0	27.2	17.3	20.4
	5	9.5	6.8	2.1
	10	12.7	11.8	5.3
	15	6.5	4.2	2.1
	30	8.3	7.1	1.7
	60	7.8	6.9	1.2

จากการศึกษาการล้างใบกุยช่ายด้วยวิธีการล้างที่แตกต่างกัน 6 วิธี พบว่ามีร้อยละการกำจัดสารคาร์เบนดาซิมดังแสดงใน ตาราง ค-2

ตารางที่ ค-2 ร้อยละการกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างจากการล้างกุยช่ายด้วยวิธีต่างๆ

วิธีล้าง	เวลา	ร้อยละการกำจัดสารคาร์เบนดาซิม				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
แช่น้ำ	0	0	0	0	0	0
	5	13.2	38.3	50.7	34.0	15.6
	10	71.9	87.1	96.5	85.2	10.1
	15	59.8	55.5	59.6	58.3	2.0
	30	60.0	87.2	93.5	80.2	14.5
	60	72.3	86.8	94.9	84.7	9.3
น้ำล้างกะละมัง	0	0	0	0	0	0
	5	54.1	67.8	55.9	59.3	6.1
	10	45.0	36.0	43.1	41.4	3.9
	15	54.6	58.4	70.9	61.3	6.9
	30	64.8	60.0	77.2	67.3	7.2
	60	78.0	77.4	95.1	83.5	8.2
น้ำไหลผ่านตะแกรง	0	0	0	0	0	0
	5	78.1	45.0	58.9	60.7	13.6
	10	85.8	71.3	74.2	77.1	6.3
	15	91.3	74.7	84.5	83.5	6.8
	30	96.2	72.4	93.1	87.2	10.6
	60	99.3	94.8	95.5	96.5	2.0

ตารางที่ ค-2 ร้อยละการกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างจากการล้างกุยช่ายด้วยวิธีต่างๆ(ต่อ)

วิธีล้าง	เวลา	ร้อยละการกำจัดสารคาร์เบนดาซิม				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
น้ำส้มสายชู	0	0	0	0	0	0
	5	69.4	41.4	61.6	57.5	11.8
	10	77.3	84.5	86.3	82.7	3.9
	15	67.3	59.0	77.0	67.8	7.3
	30	69.7	61.7	85.0	72.1	9.7
	60	71.0	57.8	82.7	70.5	10.2
น้ำผสมน้ำยาล้างผัก	0	0	0	0	0	0
	5	67.6	91.6	47.7	68.9	18.0
	10	74.4	99.1	57.3	76.9	17.2
	15	68.4	90.3	41.4	66.7	20.0
	30	80.5	94.8	54.3	76.5	16.8
	60	83.3	96.8	54.4	78.2	17.7
น้ำผสมต่างทับทิม	0	0	0	0	0	0
	5	64.9	60.6	89.8	71.8	12.8
	10	53.1	31.9	73.9	53.0	17.2
	15	75.9	76.0	89.9	80.6	6.6
	30	69.3	59.1	91.9	73.4	13.7
	60	71.4	60.2	94.3	75.3	14.2

จากการศึกษามีการตรวจวัดค่าเป็นกรด-ด่างตลอดการทดลองแสดงค่าได้ดังตารางที่ ค-3

ตารางที่ ค-3 ค่าความเป็นกรด-ด่างจากการล้างกุยช่ายด้วยวิธีต่างๆ

วิธีล้าง	เวลา	ค่าความเป็นกรดต่าง				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
แช่น้ำ	0	7.55	7.27	7.59	7.47	0.17
	5	7.54	7.49	7.61	7.55	0.06
	10	7.5	7.41	7.61	7.51	0.10
	15	7.47	7.36	7.50	7.44	0.07
	20	7.51	7.27	7.32	7.37	0.13
	25	7.46	7.24	7.18	7.29	0.15
	30	7.38	7.16	7.12	7.22	0.14
	35	7.28	7.13	7.04	7.15	0.12
	40	7.26	7.1	7.02	7.13	0.12
	45	7.21	7.06	6.98	7.08	0.12
	50	7.18	7.03	6.95	7.05	0.12
	55	7.07	7.01	6.91	7.00	0.08
	60	7.05	6.99	6.89	6.98	0.08
แช่น้ำผสมต่างทับทิม	0	7.49	7.28	7.56	7.44	0.15
	5	7.55	7.43	7.56	7.51	0.07
	10	7.42	7.44	7.54	7.47	0.06
	15	7.41	7.42	7.46	7.43	0.03
	20	7.40	7.38	7.40	7.39	0.01
	25	7.32	7.22	7.33	7.29	0.06
	30	7.23	7.12	7.26	7.20	0.07
	35	7.14	7.04	7.21	7.13	0.09
	40	7.12	7.01	7.15	7.09	0.07
	45	7.10	6.97	7.13	7.07	0.09
	50	7.08	6.92	7.09	7.03	0.10
	55	7.08	6.89	7.08	7.02	0.11
	60	7.04	6.85	7.06	6.98	0.12

ตารางที่ ค-3 ค่าความเป็นกรด-ด่างจากการล้างกุยช่ายด้วยวิธีต่างๆ (ต่อ)

วิธีล้าง	เวลา	ค่าความเป็นกรดต่าง				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
แช่น้ำผสมน้ำส้มสายชู	0	7.44	7.12	7.48	7.35	0.20
	5	3.13	3.09	3.11	3.11	0.02
	10	3.15	3.10	3.11	3.12	0.03
	15	3.14	3.11	3.11	3.12	0.02
	20	3.15	3.11	3.11	3.12	0.02
	25	3.15	3.12	3.11	3.13	0.02
	30	3.15	3.12	3.11	3.13	0.02
	35	3.15	3.12	3.11	3.13	0.02
	40	3.15	3.12	3.12	3.13	0.02
	45	3.15	3.12	3.12	3.13	0.02
	50	3.15	3.12	3.12	3.13	0.02
	55	3.16	3.13	3.12	3.14	0.02
	60	3.18	3.12	3.12	3.14	0.03
แช่น้ำผสมน้ำยาล้างผัก	0	7.49	7.24	7.59	7.44	0.18
	5	7.37	7.33	7.50	7.40	0.09
	10	7.40	7.31	7.53	7.41	0.11
	15	7.40	7.27	7.52	7.40	0.13
	20	7.39	7.24	7.51	7.38	0.14
	25	7.39	7.21	7.50	7.37	0.15
	30	7.39	7.14	7.48	7.34	0.18
	35	7.39	7.08	7.47	7.31	0.21
	40	7.38	7.05	7.45	7.29	0.21
	45	7.34	7.02	7.43	7.26	0.22
	50	7.34	6.97	7.41	7.24	0.24
	55	7.32	6.96	7.40	7.23	0.23
	60	7.29	6.94	7.39	7.21	0.24

การลดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างในใบกุยช่ายด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

จากการศึกษาการกำจัดสารคาร์เบนดาซิมในใบกุยช่ายด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสพบว่าแต่ชุดการทดลอง (ชุดควบคุม ชุดผงไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25 ชุดเส้นใยที่สัดส่วนโครงสร้างผลึกอนาเทสต่อรูไทล์ 100 : 0 80 : 20 70 : 30 50 : 50 และ 30 : 70) มีปริมาณคาร์เบนดาซิมหลงเหลือที่แตกต่างกันดังแสดงใน ตาราง ค-4 – ตาราง ค-6

ตารางที่ ค-4 ปริมาณสารคาร์เบนดาซิมตกค้างจากการล้างกุยช่ายโดยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสด้วยเส้นใย TTiP+PVP

วิธีล้าง	เวลา	ปริมาณคาร์เบนดาซิมหลงเหลือ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมกุยช่าย)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
ชุดควบคุม	0	9.28	6.42	28.77
	5	5.07	3.07	10.02
	10	2.34	2.32	12.29
	15	1.88	1.98	9.03
	30	1.82	2.89	9.94
	60	1.52	1.60	6.71
ชุดผงไทเทเนียมไดออกไซด์	0	9.28	6.42	28.77
	5	1.28	1.37	5.78
	10	0.75	1.03	4.40
	15	0.60	0.74	1.73
	30	0.93	0.69	2.80
	60	0.18	0.90	1.60
ชุดเส้นใย TTiP + PVP (100 : 0)	0	9.28	6.42	28.77
	5	2.44	2.89	8.75
	10	0.76	1.58	3.17
	15	0.79	0.97	3.14
	30	0.36	1.19	3.60
	60	0.09	0.72	2.28

ตารางที่ ค-4 ปริมาณสารคาร์เบนดาซิมตกค้างจากการล้างกุยช่ายโดยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสด้วยเส้นใย ด้วยเส้นใย TTiP+PVP (ต่อ)

วิธีล้าง	เวลา	ปริมาณคาร์เบนดาซิมคงเหลือ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมกุยช่าย)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
ชุดเส้นใย TTiP + PVP (80 : 20)	0	9.28	6.42	28.77
	5	0.81	1.51	2.82
	10	0.51	0.76	1.37
	15	0.23	1.05	1.13
	30	0.37	0.61	2.33
	60	0.08	0.23	1.13
ชุดเส้นใย TTiP + PVP (70 : 30)	0	9.28	6.42	28.77
	5	1.04	1.21	2.47
	10	0.30	0.42	1.51
	15	0.09	0.20	0.42
	30	0.36	0.18	0.51
	60	0.05	0.04	0.37
ชุดเส้นใย TTiP + PVP (50 : 50)	0	9.28	6.42	28.77
	5	1.34	3.25	3.76
	10	0.67	1.36	2.91
	15	0.65	0.59	2.37
	30	0.28	0.37	2.45
	60	0.45	0.32	2.42
ชุดเส้นใย TTiP + PVP (30 : 70)	0	9.28	6.42	28.77
	5	1.43	1.89	5.02
	10	0.31	1.12	5.49
	15	0.31	0.91	3.05
	30	0.52	0.76	1.96
	60	0.06	0.34	1.35

ตารางที่ ค-5 ปริมาณสารคาร์เบนดาซิมตกค้างจากการล้างกุยช่ายโดยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสด้วย
เส้นใย TBOT+PVP

วิธีล้าง	เวลา	ปริมาณคาร์เบนดาซิมคงเหลือ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม กุยช่าย)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
ชุดควบคุม	0	25.18	19.98	18.58
	5	7.51	11.50	9.52
	10	7.52	14.32	6.73
	15	4.33	12.45	5.58
	30	4.34	11.58	6.70
	60	7.05	7.19	5.90
ชุดผงไทเทเนียม ไดออกไซด์	0	25.18	19.98	18.58
	5	4.34	3.80	6.84
	10	3.38	3.00	2.69
	15	2.06	2.85	1.39
	30	3.91	2.69	1.72
	60	0.65	1.58	1.59
ชุดเส้นใย TBOT + PVP (100 : 0)	0	25.18	19.98	18.58
	5	4.08	7.42	6.85
	10	2.19	4.83	2.43
	15	2.24	1.96	1.80
	30	1.97	1.96	1.84
	60	0.68	1.25	1.46

ตารางที่ ค-5 ปริมาณสารคาร์เบนดาซิมตกค้างจากการล้างกุ่มช่วยโดยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสด้วยเส้นใย

TBOT+PVP (ต่อ)

		ปริมาณคาร์เบนดาซิมคงเหลือ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมกุ่มช่วย)		
วิธีล้าง	เวลา	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
ชุดเส้นใย TBOT + PVP (80 : 20)	0	25.18	19.98	18.58
	5	4.06	4.93	6.50
	10	2.93	1.47	4.01
	15	1.42	1.28	1.85
	30	1.52	1.50	2.19
	60	1.20	1.13	1.13
ชุดเส้นใย TBOT + PVP (70 : 30)	0	25.18	19.98	18.58
	5	1.38	1.58	2.22
	10	0.65	1.08	1.51
	15	0.38	0.44	1.08
	30	0.24	0.86	0.89
	60	0.14	0.004	0.12
ชุดเส้นใย TBOT + PVP (50 : 50)	0	25.18	19.98	18.58
	5	3.04	6.01	7.58
	10	1.63	3.78	3.80
	15	0.88	2.19	3.55
	30	0.81	1.80	2.98
	60	0.94	1.63	2.40
ชุดเส้นใย TBOT + PVP (30 : 70)	0	25.18	19.98	18.58
	5	4.53	7.63	6.16
	10	2.53	5.99	5.43
	15	1.83	3.45	5.01
	30	1.33	2.07	4.36
	60	0.89	2.54	3.52

ตารางที่ ค-6 ปริมาณสารคาร์เบนดาซิมตกค้างจากการล้างถ้วยโดยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ด้วย
เส้นใย TTiP+PVAc

		ปริมาณคาร์เบนดาซิมคงเหลือ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมถ้วย)		
วิธีล้าง	เวลา	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
ชุดควบคุม	0	17.13	27.25	20.89
	5	9.54	12.58	14.11
	10	11.02	17.77	8.89
	15	9.21	14.76	8.85
	30	6.87	8.51	9.37
	60	10.03	9.69	6.07
ชุดผงไทเทเนียม ไดออกไซด์	0	17.13	27.25	20.89
	5	3.29	11.46	7.06
	10	1.84	4.69	6.24
	15	1.02	3.14	5.15
	30	0.81	3.04	3.81
	60	0.35	1.82	1.54
ชุดเส้นใย TTiP + PVAc (100 : 0)	0	17.13	27.25	20.89
	5	2.74	11.61	6.49
	10	4.28	7.50	6.68
	15	2.46	5.69	3.70
	30	1.81	2.62	2.81
	60	2.54	3.20	3.29

ตารางที่ ค-6 ปริมาณสารคาร์เบนดาซิมตกค้างจากการล้างกุ่มช่ายโดยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ด้วย
เส้นใย TTiP+PVAc (ต่อ)

วิธีล้าง	เวลา	ปริมาณคาร์เบนดาซิมคงเหลือ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมกุ่มช่าย)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
ชุดเส้นใย TTiP + PVAc (80 : 20)	0	17.13	27.25	20.89
	5	4.17	7.13	5.07
	10	3.26	8.07	3.74
	15	1.37	6.07	3.37
	30	2.13	4.26	3.52
	60	1.17	4.59	1.42
ชุดเส้นใย TTiP + PVAc (70 : 30)	0	17.13	27.25	20.89
	5	0.57	4.65	4.39
	10	1.37	3.93	2.60
	15	1.12	2.85	1.64
	30	0.55	2.60	1.21
	60	0.55	2.36	0.81
ชุดเส้นใย TTiP + PVAc (50 : 50)	0	17.13	27.25	20.89
	5	5.07	8.00	7.98
	10	3.17	5.38	4.23
	15	1.97	5.20	4.23
	30	0.87	2.71	3.97
	60	1.47	4.75	3.90
ชุดเส้นใย TTiP + PVAc (30 : 70)	0	17.13	27.25	20.89
	5	2.82	5.09	4.37
	10	1.64	4.96	5.91
	15	1.56	3.39	4.94
	30	1.32	4.14	4.15
	60	0.60	3.17	4.02

จากการศึกษาการกำจัดสารคาร์เบนดาซิมในใบกุยช่ายด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส มีร้อยละการกำจัดสารคาร์เบนดาซิมดังแสดงใน ตาราง ค-7 – ตาราง ค-9

ตารางที่ ค-7 ร้อยละการกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกต่างจากการล้างกุยช่ายโดยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ด้วยเส้นใย TTiP+PVP

วิธีล้าง	เวลา	ร้อยละการกำจัดสารคาร์เบนดาซิม				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
ชุดควบคุม	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0
	5	45.3	52.3	65.2	54.3	10.1
	10	74.8	63.9	57.3	65.3	8.8
	15	79.7	69.2	68.6	72.5	6.2
	30	80.4	55.1	65.5	67.0	12.7
	60	83.7	75.0	76.7	78.5	4.6
ชุดผงไทเทเนียมไดออกไซด์	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0
	5	86.2	78.6	79.9	81.6	4.1
	10	92.0	83.9	84.7	86.9	4.5
	15	93.5	88.4	94.0	92.0	3.1
	30	89.9	89.2	90.3	89.8	0.6
	60	98.0	86.0	94.4	92.8	6.2
ชุดเส้นใย TTiP + PVP (100 : 0)	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0
	5	73.7	55.1	69.6	66.1	9.8
	10	91.8	75.4	89.0	85.4	8.8
	15	91.5	84.9	89.1	88.5	3.3
	30	96.1	81.5	87.5	88.4	7.3
	60	99.1	88.8	92.1	93.3	5.3

ตารางที่ ค-7 ร้อยละการกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างจากการล้างกุยช่ายโดยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสด้วยเส้นใย

TTIP+PVP (ต่อ)

วิธีล้าง	เวลา	ร้อยละการกำจัดสารคาร์เบนดาซิม				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
ชุดเส้นใย TTiP + PVP (80 : 20)	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0
	5	91.3	76.5	90.2	86.0	8.2
	10	94.5	88.2	95.2	92.6	3.9
	15	97.6	83.7	96.1	92.5	7.6
	30	96.0	90.6	91.9	92.8	2.8
	60	99.1	96.3	96.1	97.2	1.7
ชุดเส้นใย TTiP + PVP (70 : 30)	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0
	5	88.8	81.1	91.4	87.1	5.4
	10	96.8	93.5	94.7	95.0	1.7
	15	99.0	96.9	98.5	98.1	1.1
	30	96.2	97.3	98.2	97.2	1.0
	60	99.5	99.4	98.7	99.2	0.4
ชุดเส้นใย TTiP + PVP (50 : 50)	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0
	5	85.6	49.4	86.9	74.0	21.3
	10	92.8	78.8	89.9	87.2	7.4
	15	93.0	90.8	91.8	91.9	1.1
	30	97.0	94.3	91.5	94.3	2.8
	60	95.1	95.0	91.6	93.9	2.0
ชุดเส้นใย TTiP + PVP (30 : 70)	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0
	5	84.6	70.6	82.5	79.2	7.6
	10	96.7	82.6	80.9	86.7	8.7
	15	96.6	85.9	89.4	90.6	5.5
	30	94.4	88.2	93.2	91.9	3.3
	60	99.4	94.8	95.3	96.5	2.5

ตารางที่ ค-8 ร้อยละการกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างจากการล้างกุยช่ายโดยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสด้วยเส้นใย TBOT+PVP

วิธีล้าง	เวลา	ร้อยละการกำจัดสารคาร์เบนดาซิม				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
ชุดควบคุม	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	5	70.2	42.4	48.8	53.8	14.6
	10	70.1	28.3	63.8	54.1	22.5
	15	82.8	37.7	70.0	63.5	23.2
	30	82.8	42.1	63.9	62.9	20.4
	60	72.0	64.0	68.2	68.1	4.0
ชุดผงไทเทเนียมไดออกไซด์	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	5	82.7	81.0	63.2	75.6	10.8
	10	86.6	85.0	85.5	85.7	0.8
	15	91.8	85.7	92.5	90.0	3.7
	30	84.5	86.5	90.7	87.2	3.2
	60	97.4	92.1	91.4	93.6	3.3
ชุดเส้นใย TBOT + PVP (100 : 0)	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	5	83.8	62.9	63.1	69.9	12.0
	10	91.3	75.8	86.9	84.7	8.0
	15	91.1	90.2	90.3	90.5	0.5
	30	92.2	90.2	90.1	90.8	1.2
	60	97.3	93.7	92.1	94.4	2.7

ตารางที่ ค-8 ร้อยละการกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างจากการล้างกุยช่ายโดยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสด้วยเส้นใย

TBOT+PVP (ต่อ)

วิธีล้าง	เวลา	ร้อยละการกำจัดสารคาร์เบนดาซิม				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
ชุดเส้นใย TBOT + PVP (80 : 20)	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	5	83.9	75.3	65.0	74.7	9.5
	10	88.4	92.6	78.4	86.5	7.3
	15	94.4	93.6	90.1	92.7	2.3
	30	94.0	92.5	88.2	91.6	3.0
	60	95.2	94.4	93.9	94.5	0.7
ชุดเส้นใย TBOT + PVP (70 : 30)	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	5	94.5	92.1	88.0	91.5	3.3
	10	97.4	94.6	91.9	94.6	2.8
	15	98.5	97.8	94.2	96.8	2.3
	30	99.0	95.7	95.2	96.6	2.1
	60	99.5	100.0	99.4	99.6	0.3
ชุดเส้นใย TBOT + PVP (50 : 50)	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	5	87.9	69.9	59.2	72.3	14.5
	10	93.5	81.1	79.5	84.7	7.7
	15	96.5	89.0	80.9	88.8	7.8
	30	96.8	91.0	84.0	90.6	6.4
	60	96.3	91.8	87.1	91.7	4.6
ชุดเส้นใย TBOT + PVP (30 : 70)	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	5	82.0	61.8	66.8	70.2	10.5
	10	90.0	70.0	70.8	76.9	11.3
	15	92.7	82.7	73.0	82.8	9.9
	30	94.7	89.6	76.5	86.9	9.4
	60	96.5	87.3	81.0	88.3	7.8

ตารางที่ ค-9 ร้อยละการกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างจากการล้างช่ายโดยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสด้วยเส้นใย TTiP+PVAc

วิธีล้าง	เวลา	ร้อยละการกำจัดสารคาร์เบนดาซิม				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
ชุดควบคุม	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	5	44.3	53.8	32.4	43.5	10.7
	10	35.7	34.8	57.4	42.6	12.8
	15	46.2	45.8	57.6	49.9	6.7
	30	59.9	68.8	55.1	61.3	7.0
	60	41.5	64.5	70.9	59.0	15.5
ชุดผงไทเทเนียมไดออกไซด์	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	5	80.8	57.9	66.2	68.3	11.6
	10	89.3	82.8	70.1	80.7	9.8
	15	94.1	88.5	75.4	86.0	9.6
	30	95.3	88.9	81.8	88.7	6.8
	60	97.9	93.3	92.6	94.6	2.9
ชุดเส้นใย TTiP + PVAc (100 : 0)	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	5	84.0	57.4	69.0	70.1	13.3
	10	75.0	72.5	68.0	71.8	3.5
	15	85.6	79.1	82.3	82.3	3.3
	30	89.5	90.4	86.5	88.8	2.0
	60	85.2	88.3	84.2	85.9	2.1

ตารางที่ ค-9 ร้อยละการกำจัดสารคาร์เบนดาซิมตกค้างจากการล้างกุยช่ายโดยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสด้วยเส้นใย TTiP+PVAc (ต่อ)

วิธีล้าง	เวลา	ร้อยละการกำจัดสารคาร์เบนดาซิม				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
ชุดเส้นใย TTiP + PVAc (80 : 20)	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	5	75.7	73.8	75.7	75.1	1.1
	10	81.0	70.4	82.1	77.8	6.5
	15	92.0	77.7	83.9	84.5	7.2
	30	87.5	84.4	83.2	85.0	2.2
	60	93.2	83.1	93.2	89.8	5.8
ชุดเส้นใย TTiP + PVAc (70 : 30)	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	5	96.7	82.9	79.0	86.2	9.3
	10	92.0	85.6	87.6	88.4	3.3
	15	93.5	89.5	92.2	91.7	2.0
	30	96.8	90.5	94.2	93.8	3.2
	60	96.8	91.3	96.1	94.7	3.0
ชุดเส้นใย TTiP + PVAc (50 : 50)	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	5	70.4	70.6	61.8	67.6	5.0
	10	81.5	80.3	79.7	80.5	0.9
	15	88.5	80.9	79.8	83.1	4.7
	30	94.9	90.0	81.0	88.6	7.1
	60	91.4	82.6	81.3	85.1	5.5
ชุดเส้นใย TTiP + PVAc (30 : 70)	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	5	83.5	81.3	79.1	81.3	2.2
	10	90.4	81.8	71.7	81.3	9.4
	15	90.9	87.6	76.3	84.9	7.7
	30	92.3	84.8	80.1	85.7	6.2
	60	96.5	88.3	80.7	88.5	7.9

ตารางที่ ค-10 ค่าความเป็นกรด-ต่างจากการล้างช่ายด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสด้วยเส้นใย

TTiP+PVP

วิธีล้าง	เวลา	ค่าความเป็นกรดต่าง				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
ชุดควบคุม	0		7.36	6.79	7.08	0.40
	5		7.22	6.76	6.99	0.33
	10		7.16	6.82	6.99	0.24
	15		7.14	6.86	7.00	0.20
	20		7.11	6.88	7.00	0.16
	25		7.09	6.89	6.99	0.14
	30		7.09	6.89	6.99	0.14
	35		7.05	6.90	6.98	0.11
	40		7.02	6.92	6.97	0.07
	45		6.98	6.98	6.98	0.00
	50		6.97	6.99	6.98	0.01
	55		6.93	6.99	6.96	0.04
	60		6.95	6.98	6.97	0.02
ผงไทเทเนียมไดออกไซด์	0		6.34	5.11	5.73	0.87
	5		5.00	5.20	5.10	0.14
	10		5.20	5.15	5.18	0.04
	15		5.30	5.13	5.22	0.12
	20		5.42	5.06	5.24	0.25
	25		5.67	4.95	5.31	0.51
	30		5.77	5.09	5.43	0.48
	35		5.80	5.07	5.44	0.52
	40		5.89	5.06	5.48	0.59
	45		5.76	5.10	5.43	0.47
	50		5.81	5.11	5.46	0.49
	55		5.85	5.11	5.48	0.52
	60		5.89	5.13	5.51	0.54

ตารางที่ ค-10 ค่าความเป็นกรด-ต่างจากการล้างกุยช่ายด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสด้วยเส้นใย
TTiP+PVP (ต่อ)

วิธีล้าง	เวลา	ค่าความเป็นกรดต่าง				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
เส้นใย TTiP+PVP (100 : 0)	0		7.54	6.83	7.19	0.50
	5		7.41	6.42	6.92	0.70
	10		7.17	6.39	6.78	0.55
	15		7.10	6.23	6.67	0.62
	20		6.84	6.16	6.50	0.48
	25		6.71	6.05	6.38	0.47
	30		6.53	6.09	6.31	0.31
	35		6.71	6.05	6.38	0.47
	40		6.65	6.00	6.33	0.46
	45		6.64	5.94	6.29	0.49
	50		6.60	5.88	6.24	0.51
	55		6.58	5.86	6.22	0.51
	60		6.45	5.78	6.12	0.47
เส้นใย TTiP+PVP (80 : 20)	0		7.9	6.46	7.18	1.02
	5		7.6	6.13	6.87	1.04
	10		7.59	6.10	6.85	1.05
	15		7.39	6.06	6.73	0.94
	20		7.28	5.97	6.63	0.93
	25		7.13	5.93	6.53	0.85
	30		7.11	5.89	6.50	0.86
	35		6.95	5.82	6.39	0.80
	40		6.77	5.79	6.28	0.69
	45		6.48	5.82	6.15	0.47
	50		7.02	5.75	6.39	0.90
	55		7.00	5.72	6.36	0.91
	60		6.98	5.70	6.34	0.91

ตารางที่ ค-10 ค่าความเป็นกรด-ต่างจากการล้างช่ายด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสด้วยเส้นใย
TTiP+PVP (ต่อ)

วิธีล้าง	เวลา	ค่าความเป็นกรดต่าง				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
เส้นใย TTiP+PVP (70 : 30)	0		7.63	7.68	7.66	0.04
	5		7.59	7.23	7.41	0.25
	10		7.24	7.28	7.26	0.03
	15		7.04	7.23	7.14	0.13
	20		6.84	7.06	6.95	0.16
	25		7.12	6.93	7.03	0.13
	30		7.10	6.90	7.00	0.14
	35		5.99	6.86	6.43	0.62
	40		6.58	6.83	6.71	0.18
	45		6.81	6.80	6.81	0.01
	50		6.55	6.76	6.66	0.15
	55		6.51	6.67	6.59	0.11
	60		6.47	6.62	6.55	0.11
เส้นใย TTiP+PVP (50 : 50)	0		7.53	5.96	6.75	1.11
	5		6.54	5.88	6.21	0.47
	10		6.88	5.87	6.38	0.71
	15		7.09	5.90	6.50	0.84
	20		7.11	5.86	6.49	0.88
	25		6.89	5.81	6.35	0.76
	30		6.73	5.79	6.26	0.66
	35		6.43	5.77	6.10	0.47
	40		5.57	5.70	5.64	0.09
	45		5.99	5.69	5.84	0.21
	50		6.56	5.66	6.11	0.64
	55		6.52	5.63	6.08	0.63
	60		6.46	5.59	6.03	0.62

ตารางที่ ค-10 ค่าความเป็นกรด-ต่างจากการล้างด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสด้วยเส้นใย
TTiP+PVP (ต่อ)

วิธีล้าง	เวลา	ค่าความเป็นกรดต่าง				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
เส้นใย TTiP+PVP (30 : 70)	0		7.01	6.30	6.66	0.50
	5		6.33	6.95	6.64	0.44
	10		6.21	6.95	6.58	0.52
	15		5.88	6.96	6.42	0.76
	20		6.25	6.72	6.49	0.33
	25		6.5	6.46	6.48	0.03
	30		6.79	6.42	6.61	0.26
	35		6.78	6.29	6.54	0.35
	40		6.4	6.13	6.27	0.19
	45		6.36	6.11	6.24	0.18
	50		6.43	6.02	6.23	0.29
	55		6.36	5.90	6.13	0.33
	60		6.32	5.20	5.76	0.79

ตารางที่ ค-11 ค่าความเป็นกรด-ด่างจากการล้างกุยช่ายด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสด้วยเส้นใย

TBOT+PVP

วิธีล้าง	เวลา	ค่าความเป็นกรดต่าง				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
ชุดควบคุม	0	6.36	6.06	6.54	6.32	0.24
	5	6.39	5.98	6.50	6.29	0.27
	10	6.40	5.93	6.52	6.28	0.31
	15	6.42	5.86	6.50	6.26	0.35
	20	6.45	5.81	6.50	6.25	0.38
	25	6.42	5.90	6.45	6.26	0.31
	30	6.38	5.92	6.43	6.24	0.28
	35	6.36	5.87	6.21	6.15	0.25
	40	6.33	5.84	6.06	6.08	0.25
	45	6.28	5.84	5.93	6.02	0.23
	50	6.24	5.82	5.85	5.97	0.23
	55	6.11	5.81	5.81	5.91	0.17
	60	6.20	5.79	5.76	5.92	0.25
	ผงไทเทเนียมไดออกไซด์	0	4.71	4.72	4.51	4.65
5		5.05	5.13	4.51	4.90	0.34
10		4.98	5.51	4.81	5.10	0.37
15		4.56	5.46	5.59	5.20	0.56
20		4.57	5.18	5.47	5.07	0.46
25		4.52	5.10	5.49	5.04	0.49
30		4.72	5.02	5.49	5.08	0.39
35		4.79	5.00	5.47	5.09	0.35
40		4.85	4.99	5.46	5.10	0.32
45		4.97	5.20	5.45	5.21	0.24
50		5.02	5.19	5.45	5.22	0.22
55		5.10	5.19	5.43	5.24	0.17
60		5.14	5.18	5.41	5.24	0.15

ตารางที่ ค-11 ค่าความเป็นกรด-ต่างจากการล้างด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสด้วยเส้นใย
TBOT+PVP (ต่อ)

วิธีล้าง	เวลา	ค่าความเป็นกรดต่าง				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
เส้นใย TBOT+PVP (100 : 0)	0	5.59	5.86	6.31	5.92	0.36
	5	5.63	5.84	6.35	5.94	0.37
	10	5.61	5.78	6.40	5.93	0.42
	15	5.60	5.75	6.30	5.88	0.37
	20	5.59	5.65	6.26	5.83	0.37
	25	5.49	5.59	6.17	5.75	0.37
	30	5.50	5.64	6.15	5.76	0.34
	35	5.45	5.50	6.01	5.65	0.31
	40	5.41	5.48	5.95	5.61	0.29
	45	5.39	5.51	5.86	5.59	0.24
	50	5.37	5.49	5.74	5.53	0.19
	55	5.37	5.47	5.71	5.52	0.17
	60	5.38	5.47	5.70	5.52	0.17
เส้นใย TBOT+PVP (80 : 20)	0	6.87	5.88	5.90	6.22	0.57
	5	6.34	5.89	6.04	6.09	0.23
	10	6.02	5.86	6.02	5.97	0.09
	15	5.89	5.82	6.02	5.91	0.10
	20	5.77	5.85	5.98	5.87	0.11
	25	5.69	5.51	5.80	5.67	0.15
	30	5.67	5.49	5.79	5.65	0.15
	35	5.63	5.43	5.74	5.60	0.16
	40	5.59	5.43	5.68	5.57	0.13
	45	5.57	5.43	5.62	5.54	0.10
	50	5.55	5.41	5.58	5.51	0.09
	55	5.53	5.40	5.57	5.50	0.09
	60	5.53	5.39	5.54	5.49	0.08

ตารางที่ ค-11 ค่าความเป็นกรด-ด่างจากการล้างกษัยด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสด้วยเส้นใย
TBOT+PVP (ต่อ)

วิธีล้าง	เวลา	ค่าความเป็นกรดต่าง				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
เส้นใย TBOT+PVP (70 : 30)	0	6.68	5.86	5.96	6.17	0.45
	5	6.22	5.84	5.95	6.00	0.20
	10	6.21	5.78	5.92	5.97	0.22
	15	5.25	5.75	5.92	5.64	0.35
	20	5.24	5.65	5.89	5.59	0.33
	25	5.25	5.59	5.80	5.55	0.28
	30	5.25	5.64	5.78	5.56	0.27
	35	5.26	5.50	5.70	5.49	0.22
	40	5.22	5.48	5.65	5.45	0.22
	45	5.27	5.51	5.63	5.47	0.18
	50	5.20	5.49	5.61	5.43	0.21
	55	5.28	5.47	5.61	5.45	0.17
	60	5.26	5.47	5.59	5.44	0.17
เส้นใย TBOT+PVP (50 : 50)	0	5.95	6.81	6.58	6.45	0.45
	5	5.88	6.68	6.56	6.37	0.43
	10	5.75	6.55	6.26	6.19	0.41
	15	5.70	6.39	6.15	6.08	0.35
	20	5.67	6.29	6.11	6.02	0.32
	25	5.63	6.21	6.11	5.98	0.31
	30	5.63	6.13	6.09	5.95	0.28
	35	5.61	6.04	6.04	5.90	0.25
	40	5.59	6.00	6.01	5.87	0.24
	45	5.58	5.99	5.99	5.85	0.24
	50	5.57	5.96	5.96	5.83	0.23
	55	5.85	5.96	5.95	5.92	0.06
	60	5.80	5.93	5.72	5.82	0.11

ตารางที่ ค-11 ค่าความเป็นกรด-ต่างจากการล้างช่วยด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสด้วยเส้นใย
TBOT+PVP (ต่อ)

วิธีล้าง	เวลา	ค่าความเป็นกรดต่าง				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
เส้นใย TBOT+PVP (30 : 70)	0	5.95	5.87	5.43	5.75	0.28
	5	5.71	5.91	5.43	5.68	0.24
	10	5.79	5.73	5.20	5.57	0.32
	15	5.82	5.65	5.15	5.54	0.35
	20	5.67	5.61	5.34	5.54	0.18
	25	5.64	5.55	5.99	5.73	0.23
	30	5.55	5.51	5.84	5.63	0.18
	35	5.43	5.47	5.84	5.58	0.23
	40	5.41	5.47	5.83	5.57	0.23
	45	5.38	5.45	5.83	5.55	0.24
	50	5.36	5.39	5.79	5.51	0.24
	55	5.32	5.37	5.75	5.48	0.24
	60	5.27	5.34	5.74	5.45	0.25

ตารางที่ ค-12 ค่าความเป็นกรด-ต่างจากการล้างด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสด้วยเส้นใย

TTiP+PVAc

วิธีล้าง	เวลา	ค่าความเป็นกรดต่าง				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
ชุดควบคุม	0	6.63	6.59	6.44	6.55	0.10
	5	6.35	6.23	6.19	6.26	0.08
	10	6.57	6.23	6.18	6.33	0.21
	15	6.50	6.24	6.20	6.31	0.16
	20	6.74	6.21	6.22	6.39	0.30
	25	6.33	6.23	6.22	6.26	0.06
	30	6.11	6.23	6.26	6.20	0.08
	35	6.25	6.19	6.25	6.23	0.03
	40	6.2	6.15	6.25	6.20	0.05
	45	6.47	6.07	6.24	6.26	0.20
	50	6.63	6.08	6.23	6.31	0.28
	55	6.66	6.15	6.23	6.35	0.27
	60	6.69	6.15	6.15	6.33	0.31
ผงไทเทเนียมไดออกไซด์	0	5.34	3.43	4.74	4.50	0.98
	5	5	3.70	5.00	4.57	0.75
	10	5.2	4.74	5.26	5.07	0.28
	15	5.3	5.17	5.27	5.25	0.07
	20	5.42	5.13	5.26	5.27	0.15
	25	5.67	5.10	5.24	5.34	0.30
	30	5.77	5.11	5.22	5.37	0.35
	35	5.8	5.11	5.20	5.37	0.38
	40	5.89	5.10	5.20	5.40	0.43
	45	5.76	5.09	5.19	5.35	0.36
	50	5.81	5.08	5.19	5.36	0.39
	55	5.82	5.10	5.21	5.38	0.39
	60	5.81	5.10	5.21	5.37	0.38

ตารางที่ ค-12 ค่าความเป็นกรด-ต่างจากการล้างด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสด้วยเส้นใย
TTiP+PVAc (ต่อ)

วิธีล้าง	เวลา	ค่าความเป็นกรดต่าง				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
เส้นใย TTiP+PVAc (100 : 0)	0	6.74	6.42	6.00	6.74	0.37
	5	6.49	6.14	5.91	6.49	0.29
	10	6.33	6.13	5.87	6.33	0.23
	15	6.43	6.14	5.85	6.43	0.29
	20	6.33	6.06	5.83	6.33	0.25
	25	6.23	6.01	5.57	6.23	0.34
	30	6.39	5.99	5.67	6.39	0.36
	35	6.08	5.92	5.60	6.08	0.24
	40	6.18	5.91	5.53	6.18	0.33
	45	6.04	5.93	5.58	6.04	0.24
	50	6.12	5.87	5.55	6.12	0.29
	55	6.10	5.86	5.54	6.10	0.28
	60	6.10	5.83	5.58	6.10	0.26
เส้นใย TTiP+PVAc (80 : 20)	0	6.96	6.99	5.97	6.64	0.58
	5	6.69	7.01	5.71	6.47	0.68
	10	6.65	6.98	5.65	6.43	0.69
	15	6.58	6.94	5.60	6.37	0.69
	20	6.63	6.90	5.59	6.37	0.69
	25	6.63	6.88	5.53	6.35	0.72
	30	6.37	6.86	5.49	6.24	0.69
	35	6.35	6.88	5.46	6.23	0.72
	40	6.19	6.84	5.45	6.16	0.70
	45	5.99	6.84	5.41	6.08	0.72
	50	6.11	6.82	5.39	6.11	0.72
	55	6.07	6.84	5.37	6.09	0.74
	60	6.03	6.85	5.37	6.08	0.74

ตารางที่ ค-12 ค่าความเป็นกรด-ต่างจากการล้างด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสด้วยเส้นใย
TTiP+PVAc (ต่อ)

วิธีล้าง	เวลา	ค่าความเป็นกรดต่าง				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
เส้นใย TTiP+PVAc (70 : 30)	0	6.64	6.40	6.06	6.37	0.29
	5	6.58	7.21	6.15	6.65	0.53
	10	6.38	7.17	6.22	6.59	0.51
	15	6.62	7.17	6.26	6.68	0.46
	20	6.56	7.16	6.31	6.68	0.44
	25	6.52	7.13	6.37	6.67	0.40
	30	6.33	7.11	6.41	6.62	0.43
	35	6.21	7.09	6.38	6.56	0.47
	40	5.97	7.09	6.35	6.47	0.57
	45	6.14	7.09	6.30	6.51	0.51
	50	5.91	7.04	6.30	6.42	0.57
	55	5.88	7.07	6.28	6.41	0.61
	60	5.80	7.05	6.30	6.38	0.63
เส้นใย TTiP+PVAc (50 : 50)	0	6.67	6.55	6.39	6.54	0.14
	5	6.30	6.50	6.21	6.34	0.15
	10	6.25	6.46	5.86	6.19	0.30
	15	6.32	6.22	5.76	6.10	0.30
	20	6.36	6.21	5.75	6.11	0.32
	25	6.26	6.11	5.72	6.03	0.28
	30	6.15	6.07	5.67	5.96	0.26
	35	5.82	6.02	5.66	5.83	0.18
	40	5.97	6.00	5.63	5.87	0.21
	45	6.01	5.99	5.60	5.87	0.23
	50	6.25	5.90	5.59	5.91	0.33
	55	6.19	5.87	5.59	5.88	0.30
	60	6.17	5.87	5.55	5.86	0.31

ตารางที่ ค-12 ค่าความเป็นกรด-ต่างจากการล้างด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสด้วยเส้นใย
TTiP+PVAc (ต่อ)

วิธีล้าง	เวลา	ค่าความเป็นกรดต่าง				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
เส้นใย TTiP+PVAc (30 : 70)	0	6.61	6.00	6.03	6.21	0.34
	5	6.24	6.85	6.03	6.37	0.43
	10	6.17	6.10	5.97	6.08	0.10
	15	6.1	6.23	5.93	6.09	0.15
	20	6.33	6.20	5.91	6.15	0.22
	25	6.43	6.12	5.91	6.15	0.26
	30	6.35	6.06	5.83	6.08	0.26
	35	6.13	6.06	5.86	6.02	0.14
	40	6.05	6.01	5.86	5.97	0.10
	45	5.17	6.01	5.84	5.67	0.44
	50	5.24	5.96	5.82	5.67	0.38
	55	5.21	5.95	5.80	5.65	0.39
	60	5.23	5.94	5.76	5.64	0.37

ตารางที่ ค-13 ค่าความเป็นกรด-ด่างสารละลายคาร์เบนดาซิมเมื่อฉายแสงไฟห้อง และรังสี UVA

วิธีล้าง	เวลา	ค่าความเป็นกรดต่าง				
		คาร์เบนดาซิม 1 กรัมต่อลิตร	คาร์เบนดาซิม 0.01 กรัมต่อลิตร	คาร์เบนดาซิม 0.005 กรัมต่อลิตร	น้ำ กลั่น	เส้นใย TBOT+PVP 1 กรัมต่อลิตร
แสง ไฟ	0	7.14	7.59	7.11	7.07	7.27
	5	9.83	9.64	9.79	7.12	6.73
	10	9.83	9.63	9.82	7.14	6.71
	15	9.81	9.63	9.83	7.13	6.68
	20	9.80	9.62	9.82	7.12	6.66
	25	9.80	9.60	9.81	7.14	6.63
	30	9.79	9.59	9.80	7.13	6.64
	35	9.75	9.57	9.76	7.15	6.63
	40	9.73	9.56	9.76	7.15	6.63
	45	9.72	9.53	9.74	7.16	6.58
	50	9.71	9.52	9.75	7.16	6.52
	55	9.68	9.50	9.73	7.15	6.48
	60	9.61	9.47	9.72	7.11	6.45
UVA	0	9.44	9.28	9.20	7.59	7.43
	5	8.9	8.81	9.00	7.50	7.00
	10	8.84	8.71	8.88	7.48	6.14
	15	8.70	8.69	8.83	7.45	5.98
	20	8.67	8.56	8.75	7.4	5.74
	25	8.60	8.53	8.67	7.42	5.72
	30	8.46	8.51	8.63	7.39	5.64
	35	8.33	8.47	8.60	7.39	5.59
	40	8.28	8.40	8.56	7.4	5.61
	45	8.21	8.36	8.55	7.38	5.67
	50	8.14	8.31	8.51	7.43	5.89
	55	8.10	8.2	8.43	7.45	6.02
	60	7.97	8.11	8.37	7.42	6.11

จากการศึกษาการกำจัดสารคาร์เบนดาซิมในใบกุยช่ายด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสได้ทำการแปรผันจำนวนเส้นใย
ไนเทเนียมไดออกไซด์ต่อน้ำ (0.5 และ 2 กรัมต่อลิตร) มีปริมาณคาร์เบนดาซิมหลงเหลือที่แตกต่างกันดังแสดงใน ตาราง ค-14

ตารางที่ ค-14 ปริมาณสารคาร์เบนดาซิมตกค้างเมื่อใช้เส้นใยปริมาณ 0.5 1 2 กรัมต่อลิตร

		ปริมาณคาร์เบนดาซิมคงเหลือ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมกุยช่าย)		
วิธีล้าง	เวลา	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
ชุดควบคุม	0	28.02	19.69	18.34
	5	12.59	14.99	14.50
	10	10.13	14.25	13.31
	15	10.61	7.91	9.53
	30	9.81	6.58	11.49
	60	7.82	7.07	9.90
ชุดเส้นใย TTiP + PVP (0.5 กรัมต่อลิตร)	0	28.02	19.69	18.34
	5	8.12	8.03	11.96
	10	5.58	3.65	6.86
	15	5.81	3.19	4.50
	30	5.79	4.53	6.53
	60	3.92	3.51	4.56
ชุดเส้นใย TTiP + PVP (1 กรัมต่อลิตร)	0	28.02	19.69	18.34
	5	4.75	2.77	3.99
	10	1.98	1.32	1.98
	15	1.24	1.18	0.65
	30	1.70	0.85	0.69
	60	0.50	0.64	0.27
ชุดเส้นใย TTiP + PVP (2 กรัมต่อลิตร)	0	28.02	19.69	18.34
	5	6.41	5.08	6.03
	10	3.12	2.26	3.30
	15	5.12	2.33	3.13
	30	3.57	2.30	2.46
	60	2.60	2.49	3.13

ตารางที่ ค-14 ปริมาณสารคาร์เบนดาซิมตกค้างเมื่อใช้เส้นใยปริมาณ 0.5 1 2 กรัมต่อลิตร (ต่อ)

วิธีล้าง	เวลา	ปริมาณคาร์เบนดาซิมคงเหลือ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมกุยช่าย)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
ชุดควบคุม	0	22.16	24.61	9.86
	5	12.10	15.63	5.49
	10	8.14	10.56	3.16
	15	6.92	10.81	2.51
	30	7.82	10.49	2.93
	60	7.64	13.99	4.56
ชุดเส้นใย TBOT + PVP (0.5 กรัมต่อลิตร)	0	22.16	24.61	9.86
	5	7.16	6.11	2.75
	10	5.87	4.47	1.60
	15	4.74	2.31	1.27
	30	5.86	1.45	1.77
	60	2.17	2.96	0.87
ชุดเส้นใย TBOT + PVP (1 กรัมต่อลิตร)	0	22.16	24.61	9.86
	5	4.08	1.74	1.02
	10	2.06	0.46	0.66
	15	0.60	0.27	0.44
	30	0.04	0.12	0.40
	60	0.48	0.12	0.36
ชุดเส้นใย TBOT + PVP (2 กรัมต่อลิตร)	0	22.16	24.61	9.86
	5	5.85	2.71	1.79
	10	5.03	1.68	1.14
	15	4.39	0.95	1.11
	30	4.42	0.64	1.20
	60	1.77	0.99	0.87

ตามตารางที่ ค-14 ปริมาณสารคาร์เบนดาซิมตกค้างเมื่อใช้เส้นใยปริมาณ 0.5 1 2 กรัมต่อลิตร (ต่อ)

วิธีล้าง	เวลา	ปริมาณคาร์เบนดาซิมคงเหลือ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมกุยช่าย)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
ชุดควบคุม	0	22.16	24.61	9.86
	5	12.10	15.63	5.49
	10	8.14	15.36	3.88
	15	6.92	14.36	3.83
	30	7.82	8.70	2.93
	60	7.64	9.15	3.45
ชุดเส้นใย TTiP + PVAc (0.5 กรัมต่อลิตร)	0	22.16	24.61	9.86
	5	10.14	14.58	4.81
	10	4.63	9.58	2.59
	15	5.22	7.45	2.43
	30	3.33	4.32	1.31
	60	5.03	5.15	1.05
ชุดเส้นใย TTiP + PVAc (1 กรัมต่อลิตร)	0	22.16	24.61	9.86
	5	6.29	5.81	2.21
	10	3.23	2.06	1.33
	15	2.23	1.31	0.99
	30	1.43	0.31	0.84
	60	1.13	0.08	0.48
ชุดเส้นใย TTiP + PVAc (2 กรัมต่อลิตร)	0	22.16	24.61	9.86
	5	8.56	9.52	2.48
	10	4.33	4.60	2.14
	15	2.40	2.62	1.47
	30	3.00	1.31	2.13
	60	4.68	1.03	1.35

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวชนิดตรา งามศักดิ์ประเสริฐ เกิดเมื่อวันที่ 8 เดือนเมษายน พ.ศ. 2532 ที่จังหวัด ฉะเชิงเทรา สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย สายสามัญ แผนการเรียนวิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์ จากโรงเรียนเบญจมราชรังสฤษฎ์ ฉะเชิงเทรา เมื่อปีการศึกษา 2549 และสำเร็จ การศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมคณะวิทยาศาสตร์และ เทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ในปีการศึกษา 2553 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2555

การเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์

ชนิดตรา งามศักดิ์ประเสริฐ, อัจฉริยา สุริยวงศ์, สิทธิสุนทร สุโพธิณะ และ ภารดี ช่วย บำรุง. 2559. การลดสารคาร์บอนดาซิมในใบกุยช่ายและการดูดกลับจากการล้างด้วยวิธีของกรม วิชาการเกษตร. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 24 (ธันวาคม) : 629-640.