



## รายงานวิจัย

ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วยซิลเวอร์นาโนพาร์ติเคิล

โดยจอก (*Pistia stratiotes* L.): ผลของขนาดอนุภาค

The Efficiency of Phytoremediation for Silver Nanoparticles-  
Contaminated Water by *Pistia stratiotes* L.: Effect of Particle Size

นุรฮากีมา เจะและ

ฟาฏอนะฮ์ ยาโงะ

รายงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา



ใบรับรองงานวิจัย

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

ชื่อเรื่องงานวิจัย

ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วยซิลเวอร์นาโนพาร์ติเคิลโดยจอก (Pistia stratiotes L.): ผลของขนาดอนุภาค

The Efficiency of Phytoremediation for Silver Nanoparticles-Contaminated Water by Pistia stratiotes L.: Effect of Particle Size

ชื่อผู้ทำงานวิจัย

นุรฮากีมา เจะและ และ ฟาฏอนะฮ ยะโงะ

คณะกรรมการสอบโครงการวิจัย

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ..... ประธานกรรมการสอบ

(อาจารย์ ดร.สิริพร บริรักษ์วิสุทธิศักดิ์) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ขวัญกมล ขุนพิทักษ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ..... กรรมการสอบ

(อาจารย์ ดร.ภวิกา มหาสวัสดิ์) (อาจารย์ ดร.สายสิริ ไชยชนะ)

..... กรรมการสอบ

(อาจารย์หิรัญวดี สวิบุรณ์)

..... กรรมการสอบ

(อาจารย์ ดร.สิริพร บริรักษ์วิสุทธิศักดิ์)

..... กรรมการสอบ

(อาจารย์ ดร.ภวิกา มหาสวัสดิ์)

..... ประธานหลักสูตร

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ขวัญกมล ขุนพิทักษ์)

..... (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุมิตี เดชชนะ)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

27 มี.ย. 2562

เมื่อวันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

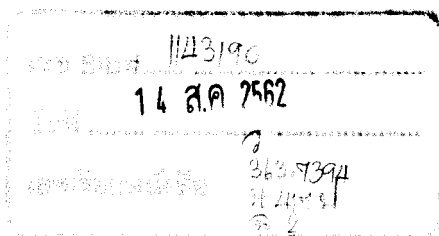
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

ชื่อเรื่อง	ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วยซิลเวอร์นาโนพาร์ติเคิล โดยจอก ( <i>Pistia stratiotes</i> L.): ผลของขนาดอนุภาค
ชื่อผู้ทำงานวิจัย	นางสาวนุรฮากีมา เจาะและ รหัสนักศึกษา 584232006 นางสาวฟาฏอนะฮ ยะโงะ รหัสนักศึกษา 584232007
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร.สิริพร บริรักษ์วิสุทธิศักดิ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ ดร.ภวิกา มหาสวัสดิ์
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต	สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
สถาบัน	มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
ปีการศึกษา	2561

### บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่จอกสามารถเจริญเติบโตในน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs และศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อน AgNPs โดยจอก ซึ่งใช้ AgNPs 2 ขนาด คือ ขนาด 7 และ 50 นาโนเมตร ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น คือ 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของ AgNPs, pH ในตัวอย่างน้ำ, วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของจอก (สังเกตสีใบ และลักษณะทั่วไป) และปริมาณคลอโรฟิลล์ในจอก หลังจกเก็บตัวอย่างน้ำและจอก ที่เวลา 0, 1, 2, 4, 6, 12, 24 และ 48 ชั่วโมง พบว่า เมื่อระยะเวลาผ่านไป ปริมาณ AgNPs ในน้ำลดลง และเมื่อความเข้มข้นของ AgNPs เพิ่มขึ้น ปริมาณคลอโรฟิลล์ในจอกมีแนวโน้มลดลง ส่งผลให้ความสามารถในการสังเคราะห์ด้วยแสงของจอกลดลง ทำให้จอกตายในที่สุด และพบว่าจอกตายหลังจากเลี้ยงใน AgNPs ที่ความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยจอกที่ได้รับ AgNPs ขนาด 7 นาโนเมตร (ตายที่ 24 ชั่วโมง) จะตายเร็วกว่าจอกที่ได้รับ AgNPs ขนาด 50 นาโนเมตร (ตายที่ 48 ชั่วโมง) จอกมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs ขนาด 7 นาโนเมตรได้ดี ที่ความเข้มข้น 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่ AgNPs ขนาด 50 นาโนเมตร จอกบำบัดได้ดี ที่ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า AgNPs มีความเป็นพิษ และส่งผลกระทบต่อเจริญเติบโตของจอก โดยขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาค ความเข้มข้น และระยะเวลาที่ได้รับ

คำสำคัญ: ซิลเวอร์นาโนพาร์ติเคิล จอก และการบำบัดด้วยพืช



<b>Study Title</b>	The Efficiency of Phytoremediation for Silver Nanoparticles-Contaminated Water by <i>Pistia stratiotes</i> L.: Effect of Particle Size	
<b>Authors</b>	Miss Nurhakeema Chelea	Satudent Code 584232006
	Miss Fatanah Yangoh	Satudent Code 584232007
<b>Advisor</b>	Dr. Siriporn Borrirukwisitsak	
<b>Co-advisor</b>	Dr. Pawika Mahasawat	
<b>Bachelor of science</b>	Environmental Science	
<b>Institution</b>	Songkhla Rajabhat University	
<b>Academic Year</b>	2018	

### Abstract

This research aims to study the conditions that supporting the growth of *Pistia stratiotes* L. in silver nanoparticles (AgNPs)-contaminated water and to study the efficiency of phytoremediation for AgNPs-contaminated water by *P. stratiotes*. Two sizes of AgNPs, including 7 and 50 nm (7 nm AgNPs and 50 nm AgNPs), were employed, and concentrations used were 0.5, 1 and 2 mg/L. The concentration of AgNPs, pH of AgNPs-contaminated water, physical properties of *P. stratiotes* (leaf colour and their general properties) and chlorophyll content were analysed. After sample collection at 0, 1, 2, 4, 6, 12, 24 and 48 h, the concentration of AgNPs decreased with an increase of incubation time. When the concentration of AgNPs increased, the chlorophyll content in *P. stratiotes* tended to decrease. This resulted in a reduction of photosynthesis ability of *P. stratiotes*, which eventually followed by a death of *P. stratiotes*. Moreover, *P. stratiotes* died after treated with AgNPs at the concentration of 2 mg/L, in which *P. stratiotes* treated with 7 nm AgNPs died (at 24 h) faster than *P. stratiotes* treated with 50 nm AgNPs (at 48 h). A phytoremediation of 7 nm AgNPs-contaminated water by *P. stratiotes* occurred satisfactorily at the AgNP concentration of 0.5 mg/L, while this was found at 1 mg/L for 50 nm AgNP-contaminated water. In summary, AgNPs were toxic and could affect the growth of *P. stratiotes*, in which this depended on particle size, concentration and incubation time.

Keywords: silver nanoparticles, *Pistia stratiotes*. L and phytoremediation

## กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ที่ทำให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความกรุณาของอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.สิริพร บริรักษ์วิสิฐศักดิ์ และ ดร.ภวิกา มหาสวัสดิ์ ที่ให้คำปรึกษาในการดำเนินการวิจัย ให้คำแนะนำเพิ่มเติม และอ่านรายงานวิจัยพร้อมแก้ไขข้อบกพร่องให้มีความถูกต้องสมบูรณ์ ทำให้งานวิจัยเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณคณาจารย์ประจำวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมที่ให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ เพื่อให้งานวิจัยนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณนายสอแหละ บางสัน เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ หลักสูตรวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมที่อำนวยความสะดวกและเครื่องมือในการทำวิจัยนี้ และขอขอบคุณนายปริญญา ทับเที่ยง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีชีวภาพ และห้องปฏิบัติการชีวภาพและชีววิทยาประยุกต์ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ที่ให้คำแนะนำและอนุเคราะห์การใช้เครื่องมือวิทยาศาสตร์แก่ผู้วิจัยเสมอมา

ขอขอบคุณบิดา มารดา พี่น้อง และเพื่อน ๆ ที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนในการทำวิจัยตลอดมาจนกระทั่งสำเร็จลุล่วงด้วยดี

นุรฮากีมา เจะและ

ฟาฏอนะฮฺ ยาโงะ

พฤษภาคม 2562

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ตัวแปร	2
1.4 นิยามศัพท์ที่ใช้ในการวิจัย	2
1.5 สมมติฐาน	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.7 ระยะเวลาที่ทำการวิจัย	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ซิลเวอร์นาโนพาร์ติเคิล	5
2.2 การใช้พืชบำบัดสารปนเปื้อน	9
2.3 ข้อมูลทั่วไปของพืชน้ำ	11
2.4 จอก	15
2.5 คลอโรฟิลล์	17
2.6 เครื่องวัดการดูดกลืนแสง	19
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20
บทที่ 3 วิธีการวิจัย	
3.1 ขอบเขตของการวิจัย	22
3.2 วัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมี	23
3.3 วิธีการวิเคราะห์	25

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลและการอภิปรายผลการวิจัย	
4.1 ผลการสังเคราะห์ AgNPs ขนาด 7 และ 50 นาโนเมตร	32
4.2 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างจอก	33
4.3 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ	43
4.4 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs ของจอก	52
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย	55
5.2 ข้อเสนอแนะ	56
บรรณานุกรม	57
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก แบบเสนอโครงการวิจัย	ผก-1
ภาคผนวก ข ภาพการทดลองและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	ผข-1
ภาคผนวก ค ข้อมูลผลการทดลอง	ผค-1
ภาคผนวก ง ประวัติผู้วิจัย	ผง-1



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
1.1	แผนการดำเนินงานโครงการ	4
2.1	การได้รับ AgNPs เข้าสู่ร่างกายและอาการที่เกิดขึ้น	8
2.2	ความเข้มข้นที่คาดการณ์ของ AgNPs ในสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกัน	9
2.3	ความแตกต่างระหว่างคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี	18
3.1	รายละเอียดของตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา	28
3.2	วิธีการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำและจอก	29
4.1	ลักษณะของจอกหลังจากดูดซึม AgNPs ขนาด 7 นาโนเมตร ที่ระยะเวลาต่าง ๆ	34
4.2	ลักษณะของจอกหลังจากดูดซึม AgNPs ขนาด 50 นาโนเมตร ที่ระยะเวลาต่าง ๆ	34
4.3	ค่า pH ของตัวอย่างน้ำในการศึกษาการสลายตัวของ AgNPs	43
4.4	ค่า pH ของตัวอย่างน้ำในการศึกษาประสิทธิภาพของจอกในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อน AgNPs	44
4.5	ความเข้มข้นของ AgNPs ในน้ำที่เวลาต่าง ๆ	46
4.6	ประสิทธิภาพของจอกในการบำบัด AgNPs	52



## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1	7
2.2	15
2.3	18
2.4	20
3.1	25
4.1	32
4.2	33
4.3	35
4.4	36
4.5	39
4.6	39
4.7	40
4.8	41
4.9	41
4.10	42
4.11	44
4.12	45
4.13	47

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.14 การสลายตัวของ AgNPs ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร	47
4.15 การสลายตัวของ AgNPs ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร	48
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ AgNPs ขนาด 7 และ 50 นาโนเมตร ในการศึกษาการสลายตัวของ AgNPs ที่เวลาต่าง ๆ	48
4.17 ความเข้มข้นของ AgNPs ในน้ำที่เวลาต่าง ๆ ในการศึกษาประสิทธิภาพของจอก ในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร	49
4.18 ความเข้มข้นของ AgNPs ในน้ำที่เวลาต่าง ๆ ในการศึกษาประสิทธิภาพของจอก ในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs 1 มิลลิกรัมต่อลิตร	50
4.19 ความเข้มข้นของ AgNPs ในน้ำที่เวลาต่าง ๆ ในการศึกษาประสิทธิภาพของจอก ในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs 2 มิลลิกรัมต่อลิตร	50
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ AgNPs ขนาด 7 และ 50 นาโนเมตร ในการศึกษาประสิทธิภาพของจอกในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs ที่เวลาต่าง ๆ	51
4.21 ประสิทธิภาพของจอกในการบำบัด AgNPs ขนาด 7 และ 50 นาโนเมตร ที่เวลาต่าง ๆ ที่ความเข้มข้น 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร	52
4.22 ประสิทธิภาพของจอกในการบำบัด AgNPs ขนาด 7 และ 50 นาโนเมตร ที่เวลาต่าง ๆ ที่ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร	53
4.23 ประสิทธิภาพของจอกในการดูดซับ AgNPs ขนาด 7 และ 50 นาโนเมตร ที่เวลาต่าง ๆ ที่ความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร	53

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

ปัจจุบันความก้าวหน้าของวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีต่าง ๆ ได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของมนุษย์และสังคมเป็นอย่างมาก นาโนเทคโนโลยีเป็นอีกหนึ่งเทคโนโลยีที่มีการพัฒนาและเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา มีการนำธาตุหลายชนิดมาผลิตให้อยู่ในรูปของนาโนพาร์ติเคิล (nanoparticles; NPs) เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ ซึ่ง NPs เป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กอยู่ในช่วง 1-100 นาโนเมตร ซึ่งมีสมบัติทางเคมีและทางกายภาพที่พิเศษแตกต่างไปจากอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ ทำให้ NPs ที่ผลิตได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย (Wang *et al.*, 2006) รวมถึงซิลเวอร์นาโนพาร์ติเคิล (silver nanoparticles; AgNPs) ซึ่งมีปริมาณการผลิตสูงถึงประมาณ 500 ตันต่อปี (Buric *et al.*, 2015) เนื่องจาก AgNPs มีสมบัติยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ดี จึงทำให้ถูกนำไปใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น เสื้อผ้า เครื่องมือแพทย์ เครื่องสำอาง อุปกรณ์ทางไฟฟ้า และเครื่องใช้ภายในบ้าน เป็นต้น อาจทำให้ AgNPs ปนเปื้อนออกมาสู่สิ่งแวดล้อม ทั้งจากการปล่อยน้ำทิ้งที่ปนเปื้อน AgNPs จากโรงงาน และอาคารบ้านเรือนลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ทำให้มี AgNPs สะสมในสิ่งแวดล้อมและส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต โดยองค์การอนามัยโลก (World Health Organization; WHO) ได้กำหนดความเข้มข้นสูงสุดของ AgNPs ในน้ำดื่มไว้ที่ 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร (EPA, 2003)

การใช้พืชบำบัดสารปนเปื้อน (phytoremediation) เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากประหยัด และมีประสิทธิภาพ จากการศึกษาของ Hanks *et al.* (2015) พบว่าจอก (*Pistia stratiotes* L.) สามารถบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs ได้ แต่ยังไม่มียางานที่ศึกษาผลของขนาดของ AgNPs ที่มีต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำของจอก รวมทั้งความสามารถของจอกในการทนทานต่อ AgNPs ที่มีขนาดอนุภาคต่างกัน ซึ่งความเป็นพิษของ AgNPs ขึ้นกับขนาดของ AgNPs โดยอนุภาคที่มีขนาดเล็กมีความเป็นพิษมากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ เนื่องจากอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวมากกว่าจึงว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่า (Liu *et al.*, 2010)

ดังนั้นงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของจอกในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs ที่มีขนาด 7 และ 50 นาโนเมตร รวมทั้งศึกษาสภาวะที่จอกสามารถเจริญเติบโตในน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs เพื่อให้ทราบถึงความสามารถของจอกในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs ที่มีขนาดต่างกัน และเป็นแนวทางในการใช้จอกบำบัด NPs ประเภทโลหะหนัก

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาสภาวะที่จอกสามารถเจริญเติบโตในน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs
- 2) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อน AgNPs โดยจอก

## 1.3 ตัวแปร

- 1) ตัวแปรอิสระ: ขนาดของ AgNPs ความเข้มข้นของ AgNPs เริ่มต้น และระยะเวลา
- 2) ตัวแปรตาม: ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs ด้วยจอก และการเจริญเติบโตของจอก
- 3) ตัวแปรควบคุม: อุณหภูมิ ปริมาณน้ำ และลักษณะทางกายภาพของจอกที่ใช้ทดลอง

## 1.4 นิยามศัพท์ที่ใช้ในการวิจัย

- 1) ประสิทธิภาพ (efficiency) หมายถึง ความสามารถของจอกในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs
- 2) จอก (*Pistia stratiotes* L.) หมายถึง พืชน้ำประเภทลอยน้ำอยู่ในวงศ์ Araceae เป็นพืชที่เหมาะสมสำหรับบำบัดน้ำ เนื่องจากมีระบบรากขนาดใหญ่ พบได้ตามแหล่งน้ำ (Hanks *et al.*, 2015)
- 3) ซิลเวอร์นาโนพาร์ติเคิล (silver nanoparticles) หมายถึง อนุภาคของซิลเวอร์ที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร (ในช่วง 1-100 นาโนเมตร) (Hood, 2004)
- 4) การบำบัดโดยใช้พืช (phytoremediation) หมายถึง การใช้พืชในการบำบัดสารมลพิษทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์ที่ปนเปื้อนในดิน น้ำ และอากาศ เพื่อลดอันตรายของสารมลพิษต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม เป็นวิธีการที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Hanks *et al.*, 2015)

## 1.5 สมมติฐาน

- 1) ความเข้มข้นของ AgNPs และระยะเวลาที่จอกได้รับ AgNPs มีผลต่อการเจริญเติบโตของจอก
- 2) จอกมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs ขนาด 7 และ 50 นาโนเมตรแตกต่างกัน

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทราบถึงความสามารถของจอกในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs ที่มีขนาดต่างกัน
- 2) สามารถนำวัชพืชน้ำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยการนำไปใช้ในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs

3) สามารถใช้เป็นแนวทางในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วยเทคโนโลยีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม แทนการบำบัดน้ำโดยใช้สารเคมี และไม่ทำลายทัศนียภาพ

### 1.7 ระยะเวลาที่ดำเนินงานวิจัย

การศึกษาลของขนาดอนุภาคที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs โดยจอก มีระยะเวลาการทำวิจัยระหว่างเดือนกรกฎาคม ปี 2560 ถึง เดือนพฤษภาคมปี 2562 ดังแสดงในตารางที่ 1.1



ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานโครงการ

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ปี 2560						ปี 2561											ปี 2562								
	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.			
1) รวบรวมข้อมูลและตรวจเอกสาร	—————																									
2) สอบโครงร่างวิจัย			▲																							
3) สังเคราะห์ AgNPs				—————																						
4) ทดลองในห้องปฏิบัติการ				—————																						
5) สอปรายงานความก้าวหน้าวิจัย									▲																	
6) วิเคราะห์ผลและสรุปผล										—————																
7) การเขียนเล่มวิจัย											—————															
8) สอบจบ																						▲				
9) แก้ไขเล่มวิจัย																								—————		

หมายเหตุ: ————— หมายถึง ระยะเวลาดำเนินการ

▲ หมายถึง ระหว่างการสอบ

■ หมายถึง อยู่ในช่วงของการฝึกประสบการณ์วิชาชีพทางวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันนาโนเทคโนโลยีมีการพัฒนาและเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว รวมทั้งกระบวนการที่นำโลหะหนักมาเตรียมให้อยู่ในรูปอนุภาคที่มีขนาดในระดับนาโนเมตร เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ หนึ่งในนาโนพาร์ติเคิล (NPs) ชนิดโลหะหนักที่นำมาใช้อย่างแพร่หลาย คือ ซิลเวอร์นาโนพาร์ติเคิล (AgNPs) เนื่องจาก AgNPs มีคุณสมบัติในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ดี เมื่อมีการใช้ AgNPs มากขึ้น ทำให้ AgNPs มีการปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมมากขึ้น ส่งผลให้เกิดความเป็นพิษต่อมนุษย์และระบบนิเวศในน้ำ องค์การอนามัยโลก (WHO) ได้กำหนดความเข้มข้นสูงสุด (maximum contaminant level; MCL) ของซิลเวอร์ในน้ำดื่มไว้ที่ 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร (EPA, 2003) นอกจากนี้ยังพบว่า ขนาดของ AgNPs มีผลต่อความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม โดยที่ AgNPs ขนาดเล็กจะมีความเป็นพิษมากกว่า AgNPs ขนาดใหญ่ (Liu *et al.*, 2010)

#### 2.1 ซิลเวอร์นาโนพาร์ติเคิล

##### 2.1.1 ลักษณะเฉพาะของ AgNPs

ซิลเวอร์นาโนพาร์ติเคิล (silver nanoparticles; AgNPs) เกิดจากการจัดเรียงตัวของธาตุซิลเวอร์ในรูปของ NPs มีขนาดอยู่ในช่วง 1-100 นาโนเมตร โดย AgNPs ไม่ละลายน้ำ (Pronk *et al.*, 2009) แต่สามารถปลดปล่อยซิลเวอร์ไอออน ( $Ag^+$ ) ได้ หลังจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (สุพิณแสงสุข, 2550) ลักษณะทางกายภาพและเคมีของ AgNPs รวมทั้ง ขนาด รูปร่าง และพื้นที่ผิวมีผลต่อคุณสมบัติทางชีวภาพของ AgNPs โดยเฉพาะอย่างยิ่งขนาดของ AgNPs ที่พบว่าส่งผลต่อกิจกรรมทางชีวภาพของ AgNPs อีกทั้งยังมีรายงานว่า ขนาดของ AgNPs ที่สามารถฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพอยู่ในช่วง 1-10 นาโนเมตร และเมื่อเปรียบเทียบความเป็นพิษต่อเซลล์แบคทีเรียพบว่า AgNPs ที่มีขนาดเล็กกว่า มีความเป็นพิษต่อเซลล์แบคทีเรียสูงกว่า AgNPs ที่มีขนาดใหญ่กว่า เนื่องจาก AgNPs ที่มีขนาดเล็กกว่า สามารถเข้าไปในเซลล์แบคทีเรียได้ง่ายกว่า และมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมากกว่า AgNPs ที่มีขนาดใหญ่กว่า ส่งผลให้มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่า และสามารถปลดปล่อย  $Ag^+$  ออกมาได้สูงกว่า ทำให้เซลล์แบคทีเรียตายในที่สุด (Pal *et al.*, 2007 ; Martinez-Castanon *et al.*, 2008)

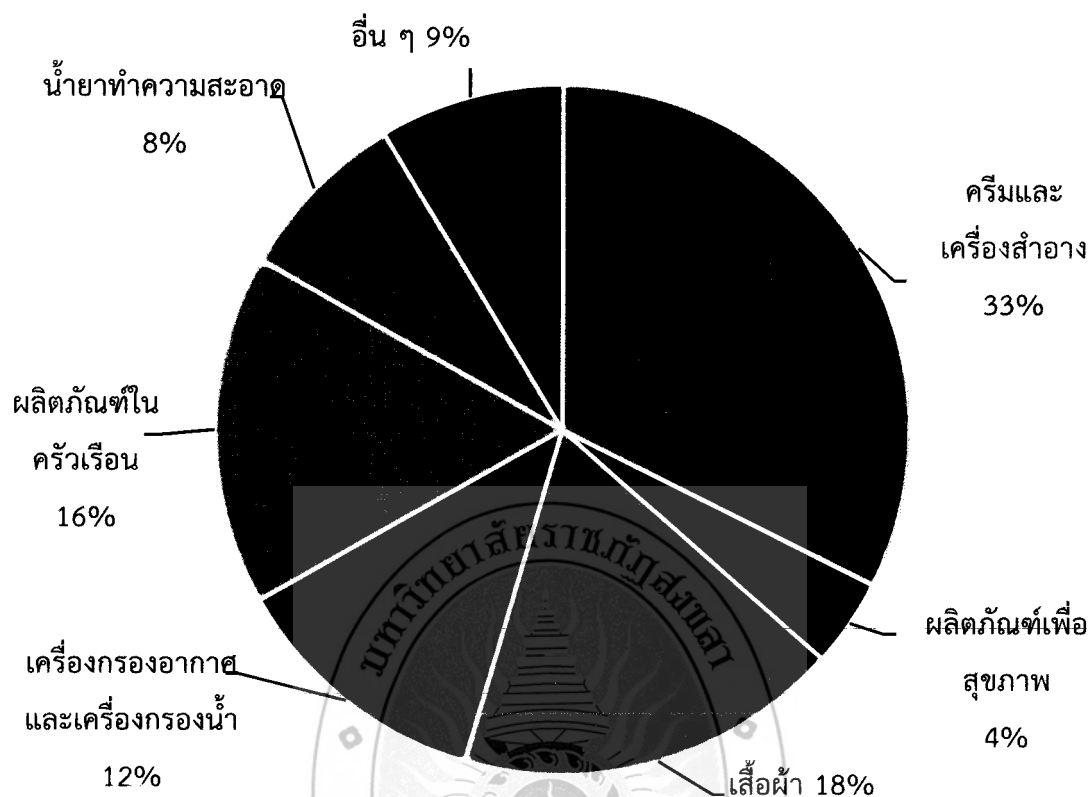
### 2.1.2 คุณสมบัติของ AgNPs

คุณสมบัติเด่นของ AgNPs คือ สามารถฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ได้ดี ซึ่ง AgNPs เป็นสารที่ออกฤทธิ์กว้าง สามารถฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ได้ทั้งจุลินทรีย์แกรมบวกและแกรมลบ (Burrel *et al.*, 1999) โดยสามารถฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของโรคได้ถึง 650 โรค ถึงแม้จะใช้ความเข้มข้นต่ำ เช่น เชื้อ *E. coli* สาเหตุของโรคท้องร่วงในเด็กเล็ก เชื้อ *Pseudomonas spp.* สาเหตุของการติดเชื้อในกระแสเลือด เชื้อ *Staphylococcus spp.* สาเหตุของโรคผิวหนังต่าง ๆ และเชื้อ *Salmonella spp.* สาเหตุของโรคไข้ไทฟอยด์ เป็นต้น (Dastjerdi and Montazer., 2010) และจากงานวิจัยของ Mahasawat *et al.* (2018) ซึ่งศึกษาอิทธิพลของขนาดของ AgNPs ที่บรรจุในเม็ดปิดอัลจินเตไฮโดรเจลต่อฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรีย รวมทั้งศึกษาความเป็นพิษต่อเซลล์และต่อระบบพันธุกรรมของเม็ดปิดอัลจินเตไฮโดรเจลที่ประกอบด้วย AgNPs โดยเริ่มจากเตรียม AgNPs ที่มีขนาดแตกต่างกัน 2 ขนาด ได้แก่ ขนาด 10 นาโนเมตร (S-AgNPs) และขนาด 50 นาโนเมตร (L-AgNPs) และนำไปพ่นหุ้มด้วยเม็ดปิดอัลจินเตไฮโดรเจล พบว่า เม็ดปิดอัลจินเตไฮโดรเจลที่ประกอบด้วย S-AgNPs มีแนวโน้มยับยั้งการเจริญเติบโตของ *E. coli* มากกว่าเม็ดปิดอัลจินเตไฮโดรเจลที่ประกอบด้วย L-AgNPs และเม็ดปิดอัลจินเตไฮโดรเจลที่ประกอบด้วย S-AgNPs มีความเป็นพิษต่อเซลล์ เล็กน้อย ในขณะที่เดียวกัน เม็ดปิดอัลจินเตไฮโดรเจลที่ประกอบด้วย L-AgNPs ไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์ อย่างไรก็ตาม เม็ดปิดอัลจินเตไฮโดรเจลที่ประกอบด้วย AgNPs เหล่านี้ โดยเฉพาะเม็ดปิดอัลจินเตไฮโดรเจลที่ประกอบด้วย S-AgNPs สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุชีวภาพต้านเชื้อแบคทีเรียและมีความเป็นพิษต่อเซลล์ต่ำ ดังนั้น จึงเป็นไปได้ที่จะนำ AgNPs ไปใช้เป็นส่วนผสมของผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น เสื้อผ้า เครื่องมือทางการแพทย์ เครื่องสำอาง อุปกรณ์ทางไฟฟ้า และเครื่องใช้ในบ้าน เป็นต้น (สุพิณ แสงสุข, 2550)

### 2.1.3 การนำมาใช้ประโยชน์

จากคุณสมบัติของ AgNPs ที่สามารถฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ได้ดี ทำให้ในปัจจุบันมีผลิตภัณฑ์ที่มี AgNPs เป็นส่วนประกอบมากมาย ทั้งในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์อุปโภคบริโภค และอุตสาหกรรมทางการแพทย์ เป็นต้น โดยผลิตภัณฑ์ที่จำหน่ายตามท้องตลาดที่ประกอบด้วย AgNPs แสดงดังภาพที่ 2.1 นอกจากนี้ AgNPs ยังได้ถูกนำไปใช้ในการรักษาโรคมะเร็ง รวมไปถึงการกำจัดเชื้อ HIV อีกด้วย (Asharani *et al.*, 2008)





ภาพที่ 2.1 ผลิตภัณฑ์ที่จำหน่ายตามท้องตลาดที่ประกอบด้วย AgNPs  
ที่มา : Fabrege *et al.* (2011)

#### 2.1.4 การได้รับเข้าสู่ร่างกาย

เนื่องจาก AgNPs ถูกใช้อย่างแพร่หลาย จึงอาจทำให้ AgNPs ปนเปื้อนเข้าสู่สิ่งแวดล้อมและเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ได้ การได้รับ AgNPs เข้าสู่ร่างกายมนุษย์นั้น อาจได้รับจากทั้งทางตรงและทางอ้อม ซึ่งการได้รับ AgNPs ทางอ้อมนั้น จะผ่านตัวกลางในสิ่งแวดล้อม เช่น น้ำ พืชผัก และดินตะกอน เป็นต้น ส่วนการได้รับ AgNPs ทางตรงนั้น มีโอกาสเกิดขึ้นจากการหายใจ ทางปาก และทางผิวหนัง ไม่ว่าจะเป็นการดื่มกินอาหาร ตลอดจนถึงการสัมผัสผลิตภัณฑ์อุปโภคบริโภคที่มี AgNPs และอาจเกิดจากการที่ผู้ปฏิบัติงานได้รับสารเคมีเข้าสู่ร่างกายระหว่างปฏิบัติงานที่มี AgNPs รายละเอียดของการได้รับ AgNPs เข้าสู่ร่างกายและอาการที่เกิดขึ้น (มหาวิทยาลัยนครสวรรค์, 2551) แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การได้รับ AgNPs เข้าสู่ร่างกายและอาการที่เกิดขึ้น

เส้นทางการได้รับ AgNPs เข้าสู่ร่างกาย	ลักษณะการได้รับ	อาการที่ได้รับสาร
1) ทางการหายใจ	เกิดจากการได้รับ AgNPs ในรูปแบบผง เกิดขึ้นขณะทำงานเป็นหลัก โดยผ่านการหายใจเข้าสู่ร่างกาย	ระคายเคืองช่องจมูก อาจมีอาการไอ มีเสมหะ ทำให้เกิดโรคหลอดลมอักเสบได้
2) ทางปาก	เกิดขึ้นเมื่อหายใจเอา AgNPs เข้าสู่ร่างกายผ่านทั้งทางจมูกและปากขณะปฏิบัติงาน	ทำให้เกิดอันตรายได้หากมีการกลืน AgNPs อาการที่เกิดขึ้น ได้แก่ การระคายเคืองในทางเดินอาหาร เกิดคลื่นไส้อาเจียน และท้องเสียได้
3) ทางผิวหนัง	เกิดเมื่อสัมผัสกับ AgNPs โดยมักอยู่ในรูปของผง AgNPs	ถ้ารับทางผิวหนัง อาจเกิดการระคายเคือง มีผื่นขึ้น เกิดอาการอักเสบทางผิวหนังได้ หากได้รับต่อเนื่องเป็นเวลานาน อาจทำให้สีผิวทั้งผิวหนังหรือตา เปลี่ยนเป็นสีเทา หรือสีน้ำเงิน ซึ่งเรียกอาการนี้ว่า ภาวะอาร์จเรีย (Argyria) (Wilkinson <i>et al.</i> , 2017)
4) ทางดวงตา	มักเกิดจากการได้รับผง AgNPs ซึ่งอาจปลิวหรือฟุ้งกระจายเข้าสู่ดวงตา	ถ้าเข้าสู่ดวงตาจะทำให้เกิดการระคายเคือง

ที่มา: มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ (2551)

### 2.1.5 ความเป็นพิษของ AgNPs

ซิลเวอร์ที่มีขนาดนาโนมีความเป็นพิษมากกว่าซิลเวอร์และมีความเป็นพิษสูงกว่าโลหะหนักอื่นที่อยู่ในรูป NPs เมื่อ AgNPs ปรากฏอยู่ในน้ำจะแตกตัวเป็นไอออนอิสระของซิลเวอร์ในรูป  $Ag^+$  ซึ่งมีความเป็นพิษสูง AgNPs เป็นสารที่สามารถดูดซึม สร้างพันธะ และทำให้เกิดสารเชิงซ้อน ตกค้างได้ง่ายในสิ่งแวดล้อม เช่น ในดินและตะกอนดิน เป็นต้น (Pronk *et al.*, 2009) โดยค่าความเข้มข้นที่คาดการณ์ (predictable environmental concentration; PEC) ของ AgNPs และซิลเวอร์ในสิ่งแวดล้อม แสดงดังตารางที่ 2.2 (Goswami *et al.*, 2017)

ตารางที่ 2.2 ความเข้มข้นที่คาดการณ์ของ AgNPs ในสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกัน

แหล่งที่พบ	ชนิด/ประเภท	PEC ( $\mu\text{g}/\text{Kg.y}$ )	อ้างอิง
1) อากาศ (air)	AgNPs	1.7-4.4 $\times$ 10 <sup>-3</sup>	Mueller and Nowack. (2008)
2) น้ำดื่ม (fresh water)	AgNPs	0.3	Mueller and Nowack. (2008)
3) ตะกอน (sediment)	Ag	0.7-2.2	Gottschalk <i>et al.</i> (2009)
4) ดิน (soil)	Ag	2.3-7.4	Gottschalk <i>et al.</i> (2009)
5) น้ำเสีย (waste water)	AgNPs	0.12–0.35	Hendren <i>et al.</i> (2013)
6) กากตะกอน (sludge)	Ag	0.38–1.5	Sun <i>et al.</i> (2014)

Bar-llan *et al.* (2009) ได้ทดสอบความเป็นพิษของ AgNPs ต่อปลาฆ่าลาย (zebrafish) พบว่า AgNPs มีผลทำให้ตา กระจก และหางของปลาฆ่าลายทำงานผิดปกติ และตัวอ่อนบางตัวมีของเหลวในหัวใจ ทำให้เกิดภาวะหัวใจล้มเหลว จากงานวิจัยของ Asharani *et al.* (2008) ศึกษาความเป็นพิษของ AgNPs ต่อตัวอ่อนของปลาฆ่าลาย พบว่า AgNPs มีความเป็นพิษต่อปลาฆ่าลาย ทำให้อัตราการตายเพิ่มขึ้น การฟักไข่ของตัวอ่อนช้าลง ระบบไหลเวียนโลหิตช้า หัวใจหยุดเต้น และตายในที่สุด นอกจากนี้ Asharani *et al.* (2007) รายงานว่า AgNPs ส่งผลทำให้เกิดความผิดปกติของโครโมโซม ทำลาย DNA และยับยั้งการแบ่งตัวของเซลล์ของปลาฆ่าลาย จากการทดลองของ Price *et al.* (2002) ได้ศึกษาการวัดปริมาณการสะสมของอนุภาคในระบบทางเดินหายใจของมนุษย์และหนู พบว่า AgNPs ที่มีขนาดเล็กกว่า 50 นาโนเมตร จะตกค้างอยู่บริเวณทางเดินหายใจส่วนบน ก่อนที่จะเข้าสู่ทางเดินหายใจส่วนใน และเข้าสู่ปอด ในขณะที่ AgNPs ที่มีขนาดต่ำกว่า 10 นาโนเมตรนั้น ไม่สามารถทำนายการตกค้างได้ชัดเจน อีกทั้ง Gao *et al.* (2016) รายงานว่า AgNPs ส่งผลทำให้การบำบัดแอมโมเนียออกจากน้ำเสียลดต่ำลง เนื่องจาก AgNPs ไปยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์

ดังนั้นเมื่อ AgNPs ปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำ จะส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศทางน้ำและมนุษย์ได้ในที่สุด จึงต้องมีการกำจัด AgNPs ออกจากแหล่งน้ำ ซึ่งการใช้พืชบำบัด (phytoremediation) เป็นวิธีบำบัดวิธีหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และมีต้นทุนต่ำ

## 2.2 การใช้พืชบำบัดสารปนเปื้อน

การบำบัดด้วยพืช (phytoremediation) เป็นคำที่มาจากกรรรวมกันของภาษากรีก คือ คำว่า phyto หมายถึง พืช (plants) และคำที่มาจากภาษาละติน คือ remedium หมายถึง การฟื้นฟูหรือการบำบัด ดังนั้น เมื่อรวมกันเป็นคำว่า phytoremediation หมายถึง กระบวนการใช้พืชในการบำบัดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ต่าง ๆ ที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม ทั้งที่อยู่ในน้ำ อากาศ ดิน และดินตะกอน และส่งผลให้เกิดภาวะมลพิษ ตัวอย่างสารปนเปื้อนต่าง ๆ เช่น ยาปราบศัตรูพืช ยาฆ่า

แมลง ตัวทำลายอินทรีย์ น้ำมันปิโตรเลียม โลหะหนัก วัตถุระเบิด และสารกัมมันตรังสี เป็นต้น กระบวนการบำบัดโดยใช้พืชเป็นทางเลือกที่อาศัยความสามารถของพืชที่สามารถทนต่อสารปนเปื้อนได้ ซึ่งพืชบางชนิดสามารถทนโลหะหนักได้ในปริมาณสูง จึงสามารถนำมาใช้บำบัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมได้ วิธีการนี้เป็นอีกวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารพิษ สามารถนำไปใช้ในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนในบริเวณกว้างได้ มีค่าใช้จ่ายน้อย เป็นเทคโนโลยีสะอาด ปลอดภัย และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มีผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมน้อย โดยทั่วไปพืชจะมีการดูดซึมสารไปสะสมไว้ในส่วนต่าง ๆ ของต้นพืช เช่น ใบ ลำต้น และราก เป็นต้น แต่มวลชีวภาพ (biomass) ที่ได้จากการใช้พืชในการบำบัดจะมีสารพิษสะสมอยู่กลายเป็นขยะอันตราย จึงต้องนำมากำจัดอย่างถูกวิธี เช่น อาจนำมาเผา หรือใช้จุลินทรีย์ย่อยสลาย เป็นต้น (ลัดดาวัลย์ ช้องบ้านช้าง, 2550 และดวงรัตน์ อินทร, 2554)

### 2.2.1 ชนิดของพืชที่ใช้บำบัดโลหะหนัก

เทคโนโลยีการบำบัดดินหรือน้ำที่ปนเปื้อนด้วยโลหะหนักโดยใช้พืช เป็นการอาศัยความสามารถของพืชที่ทนต่อโลหะหนักและสามารถสะสมโลหะหนักได้ พืชบางชนิดสามารถสะสมโลหะหนักได้ในปริมาณมาก โดยเฉพาะในลำต้นและใบ ซึ่งพืชสามารถทนต่อโลหะหนักได้หลายชนิด เช่น สังกะสี นิกเกิล และเซเลเนียม เป็นต้น ชนิดของพืชที่ใช้บำบัดโลหะหนัก (มาลีญา เครือตราชู, 2553) มีดังนี้

- 1) เอกซ์คลูเดอร์ (excluder) เป็นพืชที่มีความสามารถในการสะสมโลหะหนักได้น้อยหรือสะสมได้เฉพาะส่วนรากเท่านั้น แม้ในสารละลายจะมีโลหะหนักสูง พืชเหล่านี้จะมีกลไกหลีกเลี่ยงการดูดซึมโลหะหนัก แต่หากมีโลหะหนักเป็นปริมาณมาก อาจก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อพืช
- 2) แอควิมิวเลเตอร์ (accumulator) เป็นพืชที่มีความสามารถในการสะสมโลหะหนักได้ พืชเหล่านี้จะมีกลไกทำลายพิษในเนื้อเยื่อราก ลำต้น และใบ ซึ่งเมื่อปริมาณโลหะหนักในสารละลายสูงขึ้น พืชจะสะสมมากขึ้นจนมีความเข้มข้นคงที่ (ภาวะสมดุล)
- 3) ไฮเปอร์แอควิมิวเลเตอร์ (hyperaccumulator) เป็นพืชที่มีความสามารถสะสมโลหะหนักได้ในปริมาณสูงมาก พืชจำพวกนี้จะสามารถลำเลียงโลหะหนักจากรากไปสะสมในส่วนต้นได้มาก มักมีลักษณะของลำต้นและใบขนาดเล็ก เนื่องจากมีกลไกในการลดความเป็นพิษในเนื้อเยื่อของพืช ซึ่งพืชเหล่านี้สามารถเจริญเติบโตในดินที่มีโลหะหนักสูง (Baker, 1981)

### 2.2.2 การคัดเลือกพืชเพื่อใช้ในการบำบัด

ปัจจัยที่สำคัญประการหนึ่งในการใช้พืชบำบัดโลหะหนัก คือ การคัดเลือกพันธุ์ที่ใช้ในการดูดซึมโลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อมให้เหมาะสม เนื่องจากพืชแต่ละชนิดมีความทนทานและกลไกในการกำจัดสารปนเปื้อนที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงต้องมีการคัดเลือกชนิดพืชที่เหมาะสม ซึ่งคุณสมบัติ

ของพืชที่นำมาใช้ในการบำบัดสารมลพิษที่ปนเปื้อนสามารถสรุปได้ดังนี้ (สิริพร บริรักษ์วิฐุศักดิ์, 2549 และ วงศ์ผกา จำปา, 2551)

1) เป็นพืชที่สามารถพบเจอได้ง่าย เป็นพืชท้องถิ่นหรือเป็นพืชที่สามารถเจริญเติบโตได้ดีในสภาพแวดล้อมที่อาศัยอยู่

2) เป็นพืชที่มีความสามารถในการดูดซึมและเก็บสะสมสารที่พืชต้องการบำบัดต่าง ๆ ได้

3) เป็นพืชที่สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารมลพิษได้ค่อนข้างสูง

4) เป็นพืชที่มีลักษณะระบบรากฝอย (fibrous roots system)

5) เป็นพืชที่มีความสามารถในการส่งผ่านออกซิเจนได้ดี เนื่องจากต้องมีการนำออกซิเจนจากบรรยากาศส่งผ่านลงมาตามใบ ลำต้น และระบบรากต่าง ๆ

6) เป็นพืชที่สามารถเอาออกจากระบบหรือสิ่งแวดล้อมได้ง่าย ซึ่งทำได้โดยการเก็บเกี่ยวการนำพืชมาใช้ในการบำบัดดินและน้ำที่ปนเปื้อนโลหะหนักนั้น เป็นวิธีหนึ่งที่ได้รับคความนิยม ในปัจจุบันมีการนำพืชมาบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนโลหะหนักต่าง ๆ เช่น ซิลเวอร์ (Ag), แคดเมียม (Cd), โครเมียม (Cr), ทองแดง (Cu), ปรอท (Hg), นิกเกิล (Ni), ตะกั่ว (Pb), และสังกะสี (Zn) (Odjegba and Fasidi., 2004) เนื่องจากพืชสามารถลดปริมาณไอออนของโลหะหนักได้ดี มีค่าใช้จ่ายต่ำผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม แต่อย่างไรก็ตาม การใช้พืชบำบัดโลหะหนักจะใช้กับพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนักไม่สูงมากนักและไม่เกินความสามารถในการทนต่อโลหะหนักของพืช เพื่อให้พืชยังสามารถเจริญเติบโตได้ (วงศ์ผกา จำปา, 2551)

## 2.3 ข้อมูลทั่วไปของพืชน้ำ

พืชน้ำหรือพรรณไม้น้ำตรงกับภาษาอังกฤษว่า aquatic plant, water plant หรือ hydrophyte หมายถึง พืชจำพวกที่ขึ้นอยู่ในน้ำ โดยที่พืชชนิดนั้นอาจจะเจริญเติบโตลอยตามผิวน้ำ เติบโตอยู่ใต้ผิวน้ำ ใปล่ขึ้นเหนือน้ำหรืออยู่ตามชายน้ำ ริมตลิ่ง และยังรวมถึงพืชที่ชอบเจริญเติบโตอยู่ตามแหล่งที่มีน้ำขังแฉะ ดังนั้นจึงมีการจัดจำแนกพืชน้ำได้หลายประเภทดังนี้ (สุชาติ ศรีเพ็ญ, 2542)

### 2.3.1 การจำแนกชนิดของพืชน้ำ

1) การจำแนกตามแหล่งน้ำที่พืชขึ้นอยู่ได้

1.1) พืชที่ขึ้นอยู่ในแหล่งน้ำจืด (limnophyte) เช่น พบตามคลอง หนอง บึง อ่างเก็บน้ำ ทะเลสาบ หรือพรวน้ำจืด เป็นต้น

1.2) พืชที่ขึ้นอยู่ในแหล่งน้ำกร่อยหรือน้ำเค็ม (lialophyte) เช่น พบตามปากแม่น้ำป่าชายเลน และในทะเล เป็นต้น

## 2) การจำแนกตามหลักการจำแนกอาณาจักรพืช

2.1) พืชกลุ่มสาหร่าย (algae) ประกอบด้วย กลุ่มสาหร่ายสีเขียว กลุ่มสาหร่ายสีน้ำตาล และกลุ่มสาหร่ายสีทอง

2.2) พืชกลุ่มไบรโอไฟต์ (bryophyte) ประกอบด้วย กลุ่มมอสส์ (bryophyte) และลิเวอร์เวิร์ค (marchantiophyta)

2.3) พืชกลุ่มเฟิร์น ประกอบด้วยเฟิร์นชนิดต่าง ๆ ทั้งที่ลอยน้ำ ขึ้นตามริมน้ำหรือขึ้นใต้น้ำ

2.4) พืชมีเมล็ดจะมีเฉพาะจำพวกพืชมีดอก ซึ่งจะเป็นกลุ่มพืชที่มีความหลากหลายมากที่สุดในอาณาจักรพืช เป็นกลุ่มพืชที่มีขนาดใหญ่ ทั้งชนิดพืชใบเลี้ยงเดี่ยวและพืชใบเลี้ยงคู่

## 3) การจำแนกตามลักษณะทางนิเวศวิทยา

3.1) พืชใต้น้ำ (submerged plants) เป็นพืชน้ำประเภทที่มีการเจริญเติบโตอยู่ในน้ำทั้งหมด อาจจะมีหรือไม่มีรากยึดกับพื้นดินใต้น้ำก็ได้ บางชนิดทั้งรากและลำต้นเจริญอยู่ในพื้นดินใต้น้ำ มีลำต้นประสาน และใบเจริญอยู่ใต้น้ำ เช่น สาหร่ายหางกระรอก เป็นต้น

3.2) พืชโผล่เหนือน้ำ (emerged plants) หมายถึง พืชที่มีส่วนรากและลำต้นเจริญบนดินใต้น้ำในระยะหนึ่ง และเมื่อเจริญเต็มที่จึงมีบางส่วนโผล่พ้นเหนือน้ำ เช่น บัวชนิดต่าง ๆ และสาหร่ายญี่ปุ่น เป็นต้น

3.3) พืชลอยน้ำ (floating plants) เป็นพืชน้ำประเภทที่เจริญเติบโตที่บริเวณผิวน้ำ โดยจะลอยอยู่ที่ระดับน้ำ มีรากลอยอยู่ในน้ำ ส่วนต้น ใบ และดอกจะเจริญเติบโตบริเวณปริมาตรน้ำ บางส่วนจะลอยอยู่เหนือน้ำ และมีโครงสร้างพิเศษหรือมีเนื้อเยื่อที่ประกอบด้วยช่องอากาศขนาดใหญ่ เรียกว่า แอเรนจิม่า (aerenchyma) ถ้าอยู่ในน้ำตื้น รากอาจจะหยั่งยึดพื้นดินใต้น้ำได้ เช่น พอกแหนต่าง ๆ จอก และผักตบชวา เป็นต้น

3.4) พืชชายน้ำ (marginol plants) เป็นพืชน้ำที่เจริญอยู่ตามชายน้ำ ริมตลิ่ง ชายคลอง หนองน้ำ สระน้ำ หรือทะเลสาบ ลักษณะโดยทั่วไปมีรากและลำต้นเจริญอยู่ใต้น้ำ บางส่วนของต้น ใบ และดอกเจริญเหนือน้ำ พืชน้ำประเภทนี้จะมีลักษณะใกล้เคียงกับจำพวกพืชที่โผล่เหนือน้ำมาก

### 2.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชน้ำ

โดยทั่วไปแล้วพืชน้ำสามารถเจริญเติบโตได้ดี และสามารถแพร่กระจายไหลไปตามแหล่งน้ำได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งเกิดจากปัจจัยต่าง ๆ ที่เข้ามาเกี่ยวข้อง โดยปัจจัยที่มีความสำคัญต่อพืชน้ำมีดังนี้ (สุชาติดา ศรีเพ็ญ, 2542)

1) แสง (light) เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญกับพืชน้ำ มีส่วนเกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างลักษณะของพืชน้ำ ซึ่งแสงมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาการสังเคราะห์ด้วยแสงในการเจริญเติบโตของพืช ส่วนใหญ่พืชแต่ละชนิดมีความต้องการปริมาณแสงที่แตกต่างกัน โดยสามารถแบ่งเขตการได้รับปริมาณของแสงได้ดังนี้

- 1.1) ยูโฟติก โซน (euphotic zone) เป็นเขตที่พืชได้รับแสงสว่างมาก พืชที่อยู่ในบริเวณนี้จะได้รับแสงที่เพียงพอ และส่วนใหญ่เป็นพืชที่มีขนาดใหญ่
- 1.2) ดิสโฟติก โซน (dysphotic zone) เป็นเขตที่พืชได้รับแสงสว่างน้อยกว่า ยูโฟติกโซน พืชบริเวณนี้มีขนาดเล็ก
- 1.3) เอโฟติก โซน (aphotic zone) เป็นเขตที่มีแสงสว่างไม่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งเป็นเขตที่แสงส่องไปไม่ถึง โดยสิ่งมีชีวิตที่เจริญเติบโตได้ในบริเวณนี้ มักเป็นพืชจำพวกที่ไม่สามารถสังเคราะห์ด้วยแสงได้

2) อุณหภูมิ (temperature) เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญกับพืชน้ำเช่นกัน เนื่องจากพืชน้ำแต่ละชนิดสามารถเจริญเติบโตได้ในอุณหภูมิที่แตกต่างกัน คือ พืชน้ำบางชนิดเจริญเติบโตได้ดีในน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำ บางชนิดเจริญเติบโตได้ดีในน้ำที่มีอุณหภูมิสูง โดยทั่วไปพืชสามารถเจริญเติบโตได้ดีที่อุณหภูมิระหว่าง 25-29 องศาเซลเซียส

3) ปริมาณก๊าซ (gas content) ก๊าซที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืชน้ำ คือ ก๊าซออกซิเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากในตอนกลางคืนพืชจะใช้ก๊าซออกซิเจนในการหายใจและคายคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา ส่วนในตอนกลางวันพืชใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในการสังเคราะห์ด้วยแสง และจะคายออกซิเจนให้กับแหล่งน้ำ ซึ่งจะเป็นประโยชน์กับสัตว์น้ำต่าง ๆ โดยพืชน้ำจะเจริญเติบโตได้ดีในน้ำที่มีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ค่อนข้างสูง ประมาณ 5-15 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ถ้ามีปริมาณที่สูงกว่า 60 มิลลิกรัมต่อลิตร อาจจะเป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำ เช่น ปลาและสัตว์น้ำ เป็นต้น

4) ความกระด้างของน้ำ (hardness) พืชน้ำแต่ละชนิดชอบความกระด้างของน้ำที่แตกต่างกัน บางชนิดชอบน้ำที่มีลักษณะเป็นน้ำกระด้างเล็กน้อยหรือกระด้างปานกลาง

5) ความเป็นกรด-ด่างของน้ำ (pH) จะมีความสัมพันธ์กับความกระด้างของน้ำ น้ำควรมีค่าความเป็นกรด-ด่างที่เป็นกลาง ซึ่งถ้ามีความเป็นกรด-ด่างต่ำจะส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชน้ำ โดยทั่วไปพืชน้ำส่วนใหญ่จะเจริญเติบโตได้ดีในน้ำที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างระหว่าง 6.5 -7.4

6) ความขุ่นของน้ำ (turbidity) เป็นปัจจัยที่เป็นอุปสรรคต่อการเจริญเติบโตของพืชน้ำ เนื่องจากน้ำที่มีความขุ่นมากจะมีสารแขวนลอยในน้ำมาก ซึ่งจะปิดกั้นไม่ให้แสงสว่างส่องลงไปได้ลึก ทำให้พืชใต้น้ำได้รับแสงสว่างไม่เต็มที่ ซึ่งจะลดการเกิดปฏิกิริยาการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืชน้ำ ทำให้พืชไม่สามารถเจริญเติบโตได้และอาจจะเกิดการเน่าตายได้

7) ธาตุอาหารในน้ำ (nutrients) เป็นปัจจัยที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชน้ำทุกประเภท ไม่ว่าจะเป็นพืชลอยน้ำ พืชชายน้ำ และพืชใต้น้ำ โดยทั่วไปพืชน้ำจะเจริญเติบโตได้ดีในแหล่งน้ำที่มีแร่ธาตุอาหารหลักที่จำเป็นต่อกระบวนการเจริญเติบโตของพืช เช่น ไนโตรเจน (N) และ ฟอสฟอรัส (P) เป็นต้น

8) สภาพของพื้นดินใต้น้ำ (natural of substratum) เป็นลักษณะของพื้นดินใต้น้ำ อาจเป็นทราย หิน ดิน โคลน หรือซากเน่าเปื่อยของพืชที่ทับถมกัน ซึ่งลักษณะดังกล่าวจะมีผลต่อพืชน้ำ ไม่ว่าจะเป็นต่อชนิดหรือต่อการเจริญเติบโตของพืช

9) การเคลื่อนที่ของน้ำ (movement of water) เป็นปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะของแหล่งน้ำที่พืชน้ำอาศัยอยู่ ซึ่งการเคลื่อนที่ของน้ำเกิดจากกระแสลม ทำให้เกิดการหมุนเวียนของน้ำ ส่งผลให้เกิดการไหลของกระแสน้ำ โดยทั่วไปพืชน้ำบางชนิดอาจชอบขึ้นในแหล่งน้ำที่มีน้ำไหลเพื่อที่จะได้รับแร่ธาตุและก๊าซที่มากับกระแสน้ำ ซึ่งพืชน้ำลักษณะนี้จะมีรากยึดแน่นกับผิวดิน ใบมักบอบบาง และปลิวไปตามกระแสน้ำได้ เช่น พืชใต้น้ำ แต่พืชน้ำบางชนิดอาจชอบขึ้นในแหล่งน้ำที่มีน้ำนิ่ง เพื่อที่จะไปจะได้รับแสงได้อย่างเต็มที่ แต่พืชน้ำลักษณะนี้ มักมีใบที่เปราะบาง และฉีกขาดได้ง่าย เช่น สาหร่ายพวงชะโด (*Ceratophyllum demersum*) เป็นต้น

### 2.3.3 ประโยชน์ของพืชน้ำ

พืชน้ำมีประโยชน์มากมายหลายด้านทั้งทางตรงและทางอ้อม เช่น มีบทบาทต่อระบบนิเวศในแหล่งน้ำและมีบทบาทต่อวิถีชีวิตของมนุษย์ เป็นต้น ดังรายละเอียดต่อไปนี้ (สุชาติ ศรีเพ็ญ, 2542)

1) สร้างออกซิเจนให้กับแหล่งน้ำ เป็นการเพิ่มก๊าซออกซิเจนให้กับปลาและสัตว์น้ำอื่น ๆ โดยพืชจะนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงและปล่อยก๊าซออกซิเจนออกมา

2) เป็นแหล่งที่อยู่อาศัยของปลาและสัตว์น้ำนานาชนิด รวมทั้งเป็นแหล่งวางไข่และหลบภัยของสัตว์น้ำหลาย ๆ ชนิด

3) เป็นแหล่งอาหารของมนุษย์และสัตว์โดยตรง เช่น ข้าว ผักบุ้ง ไข่น้ำ บัว และกระเจี๊ยบ เป็นต้น

4) เป็นประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากพืชสามารถดูดซึมธาตุอาหารต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี พืชที่นิยมนำมาใช้บำบัดน้ำเสีย เช่น ผักตบชวา และธูปฤาษี เป็นต้น

5) สร้างทัศนียภาพที่สวยงามให้แก่แหล่งน้ำ เช่น แม่น้ำและทะเลสาบ เป็นต้น



### 2.3.4 โทษของพีชน้ำ

พีชน้ำมีประโยชน์มากมายหลายด้าน แต่หากมีปริมาณมากเกินไปในแหล่งน้ำ อาจทำให้เกิดผลเสียดังต่อไปนี้ (วงศ์ผกา จำปา, 2551)

- 1) เป็นปัญหาต่อการไหลของน้ำ เนื่องจากพีชไปปิดกั้นทางการไหลของน้ำ ซึ่งจะเป็นอุปสรรคต่อการคมนาคมและการระบายน้ำ ส่งผลให้แหล่งน้ำตื้นเขิน
- 2) ส่งผลให้แหล่งน้ำเน่าเสีย เนื่องจากการขยายพันธุ์อย่างรวดเร็วของพีช ซึ่งเมื่อพีชตายแบคทีเรียจะมาย่อยสลาย ทำให้ก๊าซออกซิเจนในน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งก่อให้เกิดน้ำเน่าเสีย
- 3) เป็นอุปสรรคต่อการประมง เมื่อพีชในแหล่งน้ำมีปริมาณมากเกินไป ทำให้พีชมีการดูดซึมธาตุอาหารต่าง ๆ ได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้สัตว์น้ำไม่สามารถเอาแร่ธาตุไปใช้ได้และอาจทำให้สัตว์ไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ต่อไปได้
- 4) เป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำวัยอ่อน เนื่องจากพีชน้ำบางชนิดมีหนามแหลม เช่น สาหร่ายข้าวเหนียวจะมีถุงขนาดเล็กที่โคนใบคอยจับแมลงแพลงก์ตอนและลูกปลาเป็นอาหาร

### 2.4 จอก

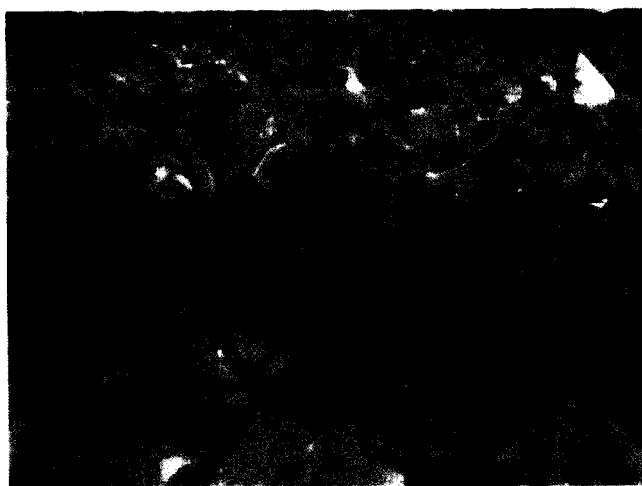
จอก (*Pistia stratiotes* L.) เป็นพีชน้ำชนิดหนึ่งที่อยู่ในวงศ์บอน เป็นพืชลอยน้ำเช่นเดียวกับผักตบชวา (ภาพที่ 2.2) จอกมีชื่อเรียกต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ (สุชาติ ศรีเพ็ญ, 2542)

ชื่อสามัญ: water lettuce, shell flower

ชื่อวิทยาศาสตร์: *Pistia stratiotes* Linn

ชื่อวงศ์: ARACEAE

ชื่ออื่น ๆ: จอก (ภาคกลาง), กากอก (ภาคเหนือ), ผักกอก (เชียงใหม่)



ภาพที่ 2.2 ลักษณะทั่วไปของจอก

### 2.4.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

จอก เป็นพืชชนิดหนึ่งที่ลอยอยู่บนผิวน้ำและเจริญเติบโตติดกันเป็นกลุ่ม โดยจัดเป็น วัชพืชน้ำขนาดเล็ก มีอายุยืนหลายปี และเป็นพืชน้ำที่ชอบแสงแดดจัด ชอบน้ำจืด สามารถพบได้ตามแหล่ง น้ำทั่วไป เช่น ลำคลอง หนองน้ำ นาข้าว และที่ม่น้ำขัง เป็นต้น พบได้ทั้งในน้ำตื้น น้ำลึก น้ำนิ่ง และน้ำไหล ในหลายฤดู สามารถขยายพันธุ์ได้ด้วยการขยายพันธุ์ด้วยไหลหรือการแยกต้นอ่อน รวมทั้ง การอาศัยเมล็ด ซึ่งจอกมีลักษณะทางพฤกษศาสตร์ดังนี้ (สุชาติ ศรีเพ็ญ, 2542)

1) ลำต้น: มีลักษณะอวบน้ำ เป็นกอลอยน้ำและมีลักษณะที่ทอดขนานไปกับผิวน้ำ ลำต้น มีความสูงประมาณ 2.5-10 เซนติเมตร ซึ่งลำต้นทำหน้าที่ขยายพันธุ์ เกิดเป็นต้นใหม่ โดยเกิดจากโคน ต้นและเกิดบนไหล

2) ราก: เป็นลักษณะระบบรากฝอย (fibrous roots system) และระบบรากแก้วเป็น จำนวนมาก รากจะเกิดได้เกือบอยู่เป็นจุกใหญ่ ๆ

3) กอต้น: ประกอบด้วยกลุ่มของใบเรียงกันเป็นวงรอบเรียงลำต้นสั้น ๆ โดยที่กอต้นจะ ลอยน้ำได้

4) ใบ: เป็นใบเดี่ยว เกิดบริเวณส่วนโคนของลำต้นเรียงเป็นชั้น ๆ ไม่มีก้านใบ รูปร่างใบ มีลักษณะที่ไม่แน่นอน เช่น เป็นรูปรี รูปไข่กลับ และรูปใบพัด เป็นต้น ซึ่งโดยส่วนใหญ่เป็นรูป สามเหลี่ยมบริเวณขอบใบเรียงกันเป็นชั้น ซึ่งปกคลุมแผ่นใบทั้งสองด้าน โดยที่ใบมีความยาวและ ความกว้างประมาณ 10-25 เซนติเมตร บริเวณฐานใบจะนุ่มคล้ายฟองน้ำ และใบมีลักษณะอ่อนนุ่ม คล้ายกับฟองน้ำช่วยให้ลอยน้ำได้

5) ดอก: เป็นช่อขนาดเล็กอยู่ตรงกลางต้น ออกดอกตามโคนชอกใบ ก้านช่อดอกสั้นมี สีเขียวอ่อน และมีแผ่นสีเขียวอ่อนขาวห่อหุ้มดอกไว้ ด้านนอกมีขนละเอียดปกคลุม มีใบรองรับช่อดอก ยาวประมาณ 1.2-1.5 เซนติเมตร ดอกด้านบนมีขนละเอียดปกคลุมช่อดอก ช่อดอกเพศผู้อยู่บนบน มีประมาณ 3-8 ดอก ส่วนช่อดอกเพศเมียอยู่ตอนล่างมีใบรองรับช่อดอก ภายในดอกมีรังไข่ ซึ่งมีไข่ อ่อนหลายใบ ดอกเพศผู้มีเกสร 4-8 อันติดต่อกัน ดอกจอกจะไม่มีการสืบดอกและกลีบเลี้ยง

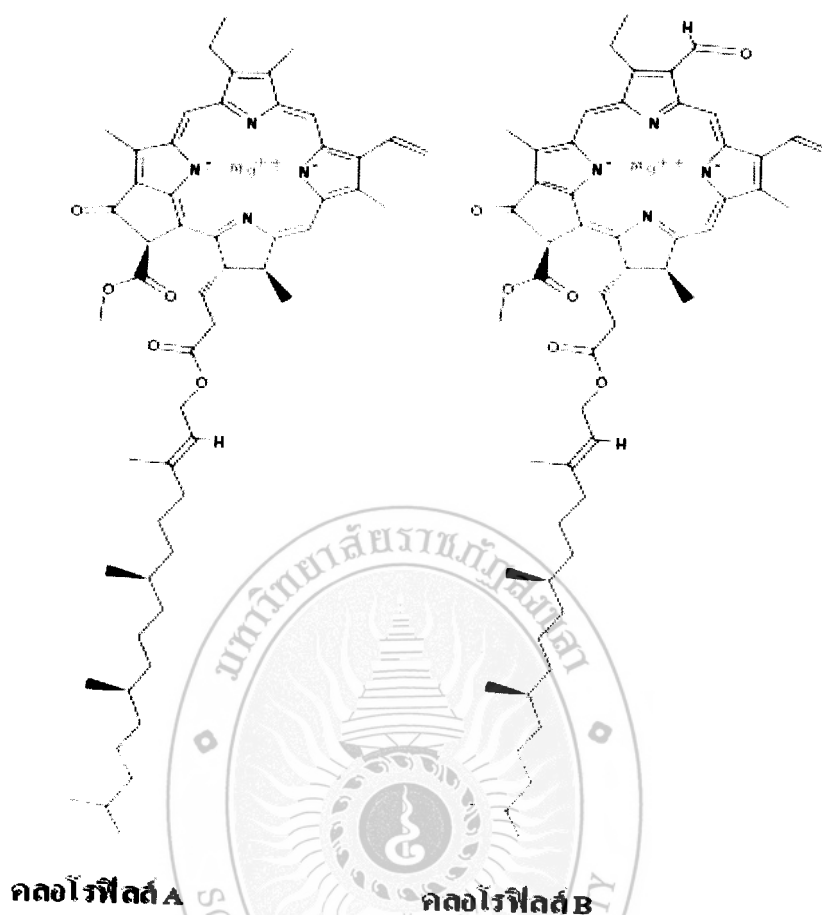
6) ผล: มีลักษณะเป็นแผ่นขาว ๆ หรือเป็นชนิดแบคแคท (baccate) ซึ่งมีกาบหรือใบ ประดับสีเขียวอ่อนติดอยู่ ภายในผลจะมีเมล็ดอยู่ประมาณ 2-3 เมล็ด มีสีน้ำตาลอ่อน ลักษณะกลม ยาวและมีรอยย่น

## 2.4.2 ประโยชน์ของจอก

จอกเป็นพืชน้ำที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายด้าน ทั้งเป็นสมุนไพร ขับปัสสาวะ รักษาโรคโกโนเรีย ทืด ขับเสมหะ และโรคผิวหนัง นำมาทำเป็นปุ๋ยหมัก ใช้ประดับตู้เลี้ยงปลา เป็นที่หลบบังให้กับปลาขนาดเล็กและลูกปลาได้ และต้นอ่อนของจอกสามารถใช้เป็นอาหารสำหรับเลี้ยงสัตว์ เช่น หมู เป็ด และปลา เป็นต้น (สุชาติ ศรีเพ็ญ, 2542)

## 2.5 คลอโรฟิลล์

คลอโรฟิลล์ (chlorophyll) เป็นรงควัตถุ (pigment) สีเขียวที่มีขนาดเล็กมาก อยู่ในคลอโรพลาสต์ (chloroplast) จะพบได้ในส่วนที่มีสีเขียวของพืชและสาหร่ายทุกชนิด รวมทั้งในแบคทีเรียบางชนิด คลอโรฟิลล์มีความสำคัญในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (photosynthesis) ของพืชเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นโมเลกุลที่ทำหน้าที่รับพลังงานจากดวงอาทิตย์มาใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงเพื่อสร้างสารอินทรีย์ คลอโรฟิลล์สามารถดูดกลืนช่วงคลื่นแสงสีฟ้าและสีแดงได้ดี แต่ดูดกลืนช่วงคลื่นแสงสีเหลืองและสีแดงได้น้อย ทำให้แสงสีเขียวสะท้อนออกมา ส่งผลให้คลอโรฟิลล์มีสีเขียว ในธรรมชาติมีคลอโรฟิลล์อยู่หลายชนิด แต่คลอโรฟิลล์หลักที่พบ คือ คลอโรฟิลล์ เอ (chlorophyll a) และคลอโรฟิลล์ บี (chlorophyll b) ซึ่งคลอโรฟิลล์แต่ละชนิดจะมีโครงสร้างโมเลกุลหลักเหมือนกัน คือ ประกอบไปด้วยวงแหวนไพโรล (pyrrole) จำนวน 4 วง แต่จะมีโมเลกุลของโซ่ข้าง (side chain) ต่างกัน คลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี จะมีโซ่ข้างที่วงแหวนไพโรล ตำแหน่งที่ 3 แตกต่างกัน (ภาพที่ 2.3) โดยคลอโรฟิลล์ เอ จะเป็นหมู่เมทิล ( $-CH_3$ ) ในขณะที่คลอโรฟิลล์ บี มีโซ่ข้างเป็นหมู่ไฮดรอกซิล ( $-OH$ ) นอกจากนี้ การที่โครงสร้างโมเลกุลของคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี แตกต่างกัน ทำให้มีการดูดกลืนแสงต่างกัน คลอโรฟิลล์ เอ จะมีสีเขียวเข้มมากกว่าคลอโรฟิลล์ บี โดยทั่วไปพืชจะมีอัตราส่วนคลอโรฟิลล์ เอ : คลอโรฟิลล์ บี ที่ 3:1 ซึ่งคลอโรฟิลล์ เอ จะเป็นโมเลกุลหลัก (principle pigment) ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ในขณะที่คลอโรฟิลล์ บี จะช่วยให้กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงเกิดได้ดีขึ้น (accessory pigment) ดังนั้น ถ้าพืชขาดคลอโรฟิลล์ เอ จะไม่สามารถเกิดกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงได้ ซึ่งความแตกต่างของคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี แสดงดังตารางที่ 2.3 (ภาคภูมิ พระประเสริฐ, 2550)



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างของคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี  
ที่มา: ภาคภูมิ พระประเสริฐ (2550)

ตารางที่ 2.3 ความแตกต่างระหว่างคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี

พารามิเตอร์	คลอโรฟิลล์ เอ	คลอโรฟิลล์ บี
1) หน้าที่ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง	รงควัตถุหลัก (principal pigment)	รงควัตถุเสริม (accessory pigment)
2) ช่วงการดูดกลืนแสงที่ดีที่สุด	430 nm (สีฟ้า) 662 nm (สีแดง)	470 nm (สีฟ้า)
3) สีที่มองเห็น	สีเขียวเข้ม	สีเขียวอ่อน
4) โครงสร้างตำแหน่งที่ 3 (Carbon C-3) ของวงแหวนไพโรล	มีหมู่เมทิล (methyl group)	มีหมู่แอลดีไฮด์ (aldehyde group)
5) สูตรเคมี	$C_{55}H_{72}MgN_4O_5$	$C_{55}H_{70}MgN_4O_6$

## ตารางที่ 2.3 ความแตกต่างระหว่างคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี (ต่อ)

พารามิเตอร์	คลอโรฟิลล์ เอ	คลอโรฟิลล์ บี
6) น้ำหนักโมเลกุล	839.51 กรัมต่อโมล	907.49 กรัมต่อโมล
7) สิ่งมีชีวิตที่พบ	พืช สาหร่าย และสาหร่ายสีเขียว แกมน้ำเงิน (cyanobacteria)	พืชและสาหร่ายสีเขียว
8) อัตราส่วนปริมาณที่พบ	¾ ส่วน	¼ ส่วน
9) การละลายในตัวทำละลาย	ละลายได้ในตัวทำตัวละลายที่ไม่มีขั้ว	ละลายได้ในตัวทำละลายที่มีขั้ว

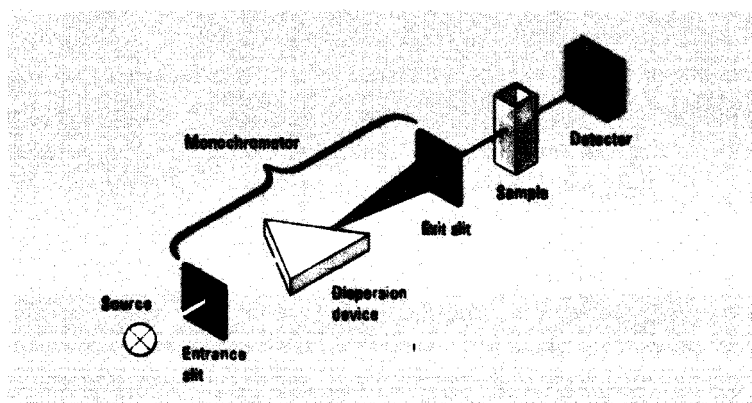
ที่มา: ภาคภูมิ พระประเสริฐ (2550)

## 2.6 เครื่องวัดการดูดกลืนแสง

การศึกษาครั้งนี้ใช้เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-Visible spectrophotometer) ในการวิเคราะห์ปริมาณ AgNPs รวมทั้งปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี ในจอก ซึ่งเครื่อง UV-Visible spectrophotometer มีหลักการทำงาน ดังนี้ (Glasswarechemical, 2014)

เครื่อง UV-Visible spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่าความเข้มแสง (intensity) ในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงสีขาวยุที่ทะลุผ่านตัวอย่างหรือถูกดูดกลืนด้วยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่าง ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อน และสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้

เมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมของสารเกิดการดูดกลืนแสง แล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า เมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่าน หรือสะท้อนออกมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ตามกฎของ Beer-Lambert ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในการระบุชนิดและปริมาณของสารต่าง ๆ ที่อยู่ในตัวอย่างได้ โดยค่าที่วัดได้จะถูกส่งเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์ที่เชื่อมกันไว้ ซึ่งส่วนประกอบของเครื่องวัดการดูดกลืนแสงแสดงดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 ส่วนประกอบของเครื่อง UV-visible spectrophotometer

ที่มา: Glasswarechemical (2014)

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Asharani *et al.* (2008) ได้ศึกษาความเป็นพิษของ AgNPs ต่อตัวอ่อนของปลาฆ่าลาย พบว่า AgNPs มีความเป็นพิษต่อปลาฆ่าลาย ทำให้อัตราการตายเพิ่มขึ้น การฟักไข่ของตัวอ่อนฆ่าลายระบบไหลเวียนโลหิตช้า หัวใจหยุดเต้นและตายในที่สุด

Giao *et al.* (2016) ได้ศึกษาผลของ AgNPs ต่อกระบวนการออกซิเดชันแอมโมเนียด้วยสลัดจ์ไนโตรฟายอิง พบว่า AgNPs ที่ความเข้มข้น 1-100 มิลลิกรัมต่อลิตร ยับยั้งปฏิกิริยาแอมโมเนียออกซิเดชันร้อยละ 90±8.6 ถึง 94.8±4.3 บ่งชี้ได้ว่า AgNPs ส่งผลทำให้การบำบัดแอมโมเนียออกจากน้ำเสียมีประสิทธิภาพลดลง เนื่องจาก AgNPs ไปยังยังการทำงานของจุลินทรีย์

วงศ์ผกา จำปา (2551) ได้ศึกษาความสามารถในการดูดซึม ทองแดง (Cu), สังกะสี (Zn) และ ตะกั่ว (Pb) ในน้ำด้วยสาหร่ายพวงชะโด พบว่า สาหร่ายพวงชะโดสามารถดูดซึมโลหะหนักทั้งสามชนิด โดยการดูดซึมจะเกิดได้ดีในช่วงเวลา 32 ชั่วโมงแรกของการทดลองและปริมาณของ ทองแดง, สังกะสี และ ตะกั่ว ที่สาหร่ายพวงชะโด สามารถดูดซึมได้สูงสุด คือ 87.09, 28.33 และ 375.27 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของสาหร่ายพวงชะโด ตามลำดับ ชนิดของโลหะหนักที่สาหร่ายพวงชะโดดูดซึมที่ได้สูงสุด คือ ตะกั่ว

Kamal *et al.* (2004) ได้ศึกษาการใช้พืชน้ำ ได้แก่ สาหร่ายญี่ปุ่น (*Myriophyllum aquaticum*), พริมโรส (*Ludwigia palustris*) และมินต์น้ำ (*Meatha aquatic*) ดูดซึมโลหะหนัก 4 ชนิด คือ สังกะสี (Zn), ทองแดง (Cu), ปรอท (Hg) และเหล็ก (Fe) พบว่า พืชน้ำมีอัตราการกำจัดโลหะหนักที่ระดับความเข้มข้น 0.48, 0.11, 0.0787-0.002 และ 7.00-0.41 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวันตามลำดับ และพบว่าพืชเหล่านี้จะดูดโลหะหนักไปสะสมไว้ที่ราก ลำต้น และใบ โดยค่าเฉลี่ยของ

ประสิทธิภาพในการดูดซึมสังกะสี, ทองแดง, โปรท และเหล็ก เท่ากับร้อยละ 33.9, 41.62, 99.8 และ 76.7 ตามลำดับ

Sushera (2004) ได้ศึกษาการดูดซึมแคดเมียม (Cd) โดยใช้สาหร่ายหางกระรอก (*Hydrilla verticillata*) พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซึมจะสูงที่ความเข้มข้นของสารละลาย แคดเมียมต่ำและ pH อยู่ระหว่าง 5-9 รวมทั้งการดูดซึมแคดเมียมเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและอิ่มตัวใน 30 นาที การดูดซึมแคดเมียมที่สภาวะสมดุลจะเป็นไปตามแบบจำลองของ Langmuir และพบว่า สังกะสี (Zn) มีผลกระทบต่อ การดูดซึมแคดเมียมของ *H. verticillata*

Hanks *et al.* (2015) ได้ใช้จอก (*Pistia stratiotes* L.) ในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs และซิลเวอร์ไอออนที่ความเข้มข้น 0.02, 0.2 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า จอกสามารถดูดซึม AgNPs และซิลเวอร์ไอออนได้ และสามารถอยู่รอดที่ความเข้มข้น 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร และพบว่าจอกมีประสิทธิภาพในการสะสมโลหะหนักสูง และมีความสามารถในการดูดซึมสารอาหารสูง นอกจากนี้ จอกเป็นพืชที่มีอัตราการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว และสามารถบำบัด AgNPs จนมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่องค์การอนามัยโลกกำหนด (0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร)

Winkelmann *et al.* (2017) ได้ศึกษาผลของ AgNPs ต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ในพืช โดยใช้สาหร่ายเดนซ่า (*Egeria densa*) โดยแช่สาหร่าย *E. densa* ในน้ำที่มี AgNPs ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน (0, 13, 25, 38, และ 51 มิลลิกรัมต่อลิตร) เป็นเวลา 2 สัปดาห์ จากนั้นจึงนำสาหร่าย *E. densa* มาสกัดคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี โดยใช้เอทานอล และวัดความเข้มข้นด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ผลการทดลองพบว่า *E. densa* ที่ได้รับ AgNPs มีการเจริญเติบโตช้าลงและปริมาณคลอโรฟิลล์ในสาหร่าย *E. densa* จะลดลงเมื่อระยะเวลาผ่านไป ส่งผลให้สีของใบเปลี่ยนไปจากเดิม จากสีเขียวกลายเป็นสีเขียวอ่อนหรือสีน้ำตาล

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า พืชสามารถนำมาบำบัดโลหะหนักได้ รวมทั้งยังพบว่าจอกสามารถนำมาบำบัด AgNPs ได้ แต่อย่างไรก็ตามยังไม่มีการศึกษาถึงผลของขนาดของ AgNPs ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดของจอก งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาผลของขนาดของ AgNPs ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของจอกในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs ซึ่งจะช่วยให้เป็นแนวทางในการนำพืชไปใช้บำบัดวัสดุอันตรายต่อไป

## บทที่ 3

### วิธีการวิจัย

การศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยได้เก็บตัวอย่างจอกและตัวอย่างน้ำ โดยตัวอย่างจอกจะถูกนำมาศึกษาการเจริญเติบโตและปริมาณคลอโรฟิลล์ ส่วนตัวอย่างน้ำจะถูกนำมาวัดความเข้มข้นของ AgNPs ด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-Visible spectrophotometer) สำหรับวิธีการวิจัยในบทนี้จะกล่าวถึงขอบเขตของการวิจัย เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมี วิธีการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูล มีรายละเอียดดังนี้

#### 3.1 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs โดยจอก ในการทดลองใช้ AgNPs 2 ขนาด ได้แก่ 7 และ 50 นาโนเมตร โดยใช้ความเข้มข้นของ AgNPs ที่ 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จาก ดร.ภวีกา มหาสวัสดิ์ โปรแกรมชีววิทยาและชีววิทยาประยุกต์ โดยมีรายละเอียดขอบเขตการวิจัยดังนี้

##### 3.1.1 กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา

กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาในงานวิจัยนี้ คือ จอก ที่มีรูปร่างขนาดและน้ำหนักใกล้เคียงกัน (ความยาวราก 6-10 เซนติเมตร ขนาดของใบ 5.5-7.5 เซนติเมตร และน้ำหนัก 3-4 กรัม)

##### 3.1.2 ระยะเวลาที่ใช้ทดลอง

เก็บตัวอย่างน้ำและจอกที่เวลา 0, 1, 2, 4, 6, 12, 24 และ 48 ชั่วโมง และควบคุมอุณหภูมิการทดลองไว้ที่อุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส

##### 3.1.3 สถานที่ทดลอง

- 1) พื้นที่เก็บตัวอย่างจอก ณ บริเวณแหล่งน้ำอาคารศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
- 2) พื้นที่ทดสอบ ณ ห้องปฏิบัติการ อาคารปฏิบัติการเทคโนโลยีชีวภาพ และห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา



## 3.2 วัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมี

### 3.2.1 วัสดุ

- 1) ขวดปรับปริมาตร (volumetric flasks)
- 2) กระจกบอทดวง (cylinders)
- 3) ปิเปต (volumetric pipettes)
- 4) หลอดหยด (droppers)
- 5) บีกเกอร์ (beakers)
- 6) แท่งแก้วคนสาร (stirring rods)
- 7) กรวยบุชเนอร์ (buchner funnel)
- 8) ขวดรูปชมพู่ (erlenmeyer flasks)
- 9) โกร่งบด (mortars and pestles)
- 10) ถังพลาสติก (plastic bucket)
- 11) แก้วพลาสติก (plastic cups)
- 12) ไม้บรรทัด (ruler)
- 13) ชุดกรองสุญญากาศ (vacuum filter set)
- 14) เทอร์โมมิเตอร์ (thermometer)
- 15) ขวดตัวอย่าง (sample bottles)
- 16) หลอดทดลอง (test tubes)
- 17) เหยือก (pitchers)
- 18) หลอดเซนติฟิว (centrifuge tubes)
- 19) เดซิเคเตอร์ (desiccator)
- 20) อะลูมิเนียมฟอยด์ (aluminum foil)
- 21) กระดาษกรอง เบอร์ 1 และเบอร์ 5 (filter papers)

### 3.2.2 อุปกรณ์

- 1) เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-visible spectrophotometer) รุ่น EVO 201 PC ยี่ห้อ Thermo Scientific
- 2) เครื่องระเหย (rotary evaporator) รุ่น Rotarac Valve Tec ยี่ห้อ heidolph
- 3) เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (balance) รุ่น ED3235-CW ยี่ห้อ Sartorius

- 4) ตู้อบ (hot air oven) รุ่น FED115 ยี่ห้อ Binder
- 5) เครื่อง pH meter รุ่น pH Portable F2-Meter ยี่ห้อ METTLER TOLEDO
- 6) เครื่องเขย่า (shaker) รุ่น G560E ยี่ห้อ Vortex-Genie
- 7) เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยเทคนิค (inductivity couple plasma-optical emission spectrometer; ICP-OES) รุ่น Optima 4300 DV ยี่ห้อ Perkin Elmer
- 8) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทรานสมิสชัน (transmission electron microscope; TEM) รุ่น JEM-2010 ยี่ห้อ JEOL
- 9) เครื่องกวนสารละลาย (magnetic stirrer) รุ่น MS-200 ยี่ห้อ MTOPs

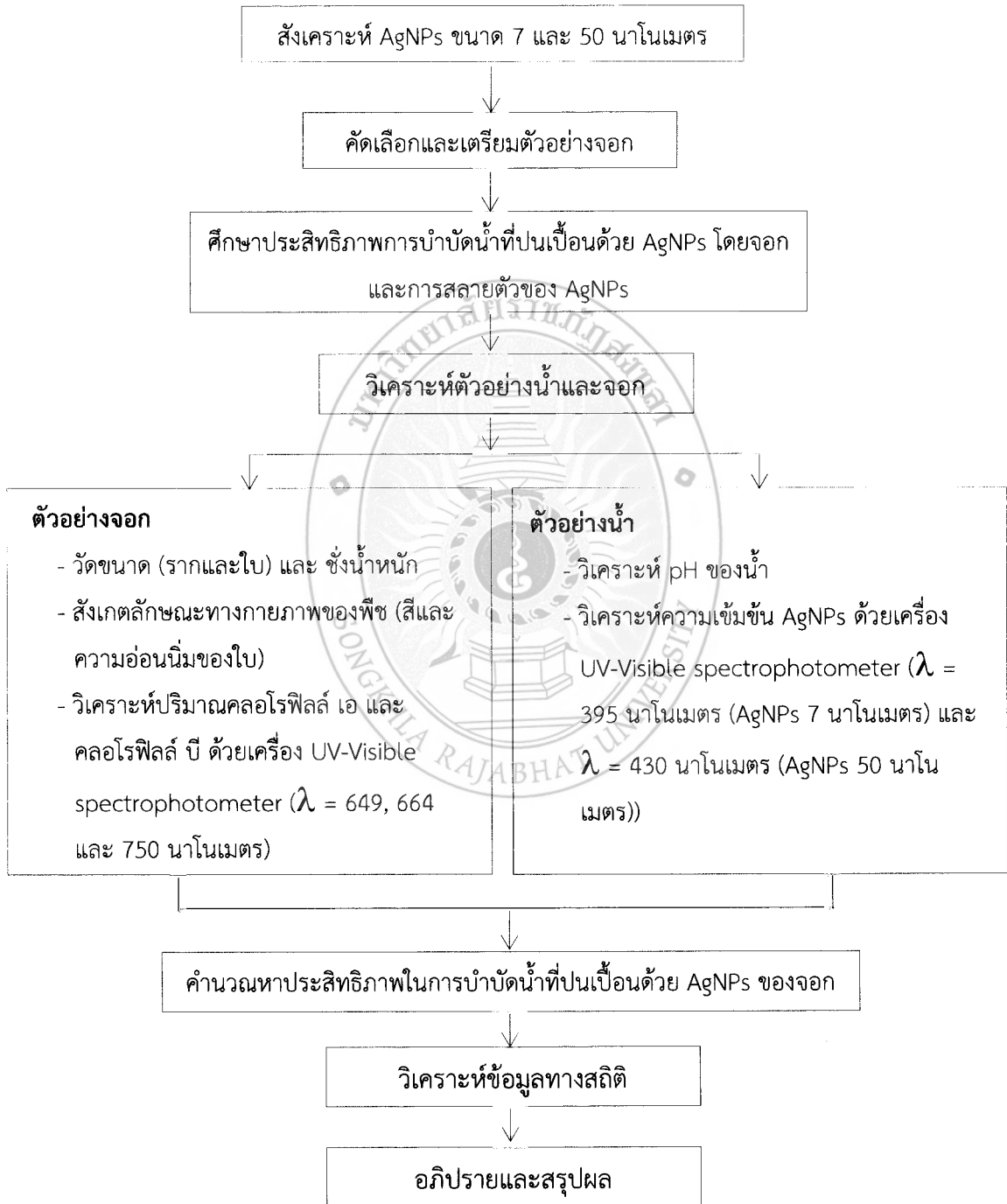
### 3.2.3 สารเคมี

- 1) ซิลเวอร์ไนเตรท (silver nitrate;  $\text{AgNO}_3$ )
- 2) โซเดียมโบโรไฮไดรด์ (sodium borohydride;  $\text{H}_4\text{BNa}$ )
- 3) โซเดียมซิเตรท (sodium citrate;  $\text{C}_6\text{H}_5\text{Na}_3\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )
- 4) กรดไนตริก (nitric Acid;  $\text{HNO}_3$ )
- 5) เอทานอล 95% (ethanol 95%)
- 6) น้ำประปา (tap water)
- 7) น้ำปราศจากไอออน (deionized water; DI)
- 8) น้ำกลั่น (distilled water)



### 3.3 วิธีการวิเคราะห์

การทดลองครั้งนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs โดยจอก ซึ่งมีกรอบแนวคิดในการดำเนินการดังแสดงในภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 กรอบแนวคิดการศึกษา

ว  
368.9204  
No. 41/1/1  
3.2

### 3.3.1 การเตรียมสารแขวนลอย AgNPs

#### 1) การเตรียมสารแขวนลอย AgNPs ขนาด 7 นาโนเมตร

1.1) การเตรียมสารแขวนลอย AgNPs ขนาด 7 นาโนเมตร ตามวิธีของ Jana *et al.* (2001) ทำโดยนำสารละลาย silver nitrate เข้มข้น 0.25 มิลลิโมลาร์ ปริมาณ 18 มิลลิลิตร และสารละลาย sodium citrate เข้มข้น 0.25 มิลลิโมลาร์ ปริมาณ 18 มิลลิลิตร ผสมในน้ำกลั่น 600 มิลลิลิตร จากนั้นคนให้เข้ากันด้วยเครื่องกวนสารละลาย (magnetic stirrer) ที่อุณหภูมิห้อง เติมสารละลาย sodium borohydride เข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ ปริมาณ 18 มิลลิลิตร แล้วกวนด้วย magnetic stirrer เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง

1.2) นำสารแขวนลอย AgNPs ที่ได้ไประเหยด้วยเครื่อง rotary evaporator ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็ว 40 รอบ/นาทีจนเหลือปริมาตร 50 มิลลิลิตร จะได้ AgNPs ขนาด 7 นาโนเมตร

1.3) วัดความเข้มข้นของ AgNPs ที่เตรียมได้ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยเทคนิค inductivity couple plasma-optical emission spectrometer (ICP-OES) และวัดขนาดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทรานสมิสชัน (transmission electron microscope; TEM) โดยส่งวิเคราะห์ที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

#### 2) การเตรียมสารแขวนลอย AgNPs ขนาด 50 นาโนเมตร

1.1) การเตรียมสารแขวนลอย AgNPs ขนาด 50 นาโนเมตร ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ได้แก่ การเตรียมสารแขวนลอย Ag seed (หัวเชื้อซิลเวอร์) และการทำให้ Ag seed มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งสารแขวนลอย Ag seed ในการศึกษาครั้งนี้ คือ AgNPs ขนาด 7 นาโนเมตร ดังนั้นการเตรียมสารแขวนลอย Ag seed จึงเตรียมตามขั้นตอนในหัวข้อ 3.3.1 ข้อ 1) สำหรับการทำให้ Ag seed มีขนาดใหญ่ขึ้น ทำได้โดยใส่สารแขวนลอย Ag Seed ปริมาตร 6 มิลลิลิตร ลงในสารละลาย silver nitrate เข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ และสารละลาย sodium citrate เข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ ในน้ำกลั่น ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันด้วย magnetic stirrer ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 10 นาที

1.2) ต้มสารแขวนลอยดังกล่าวจนเหลือสารแขวนลอย AgNPs ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วกรองสารแขวนลอย AgNPs ที่ได้ด้วยกระดาษกรองขนาด 0.22 ไมโครเมตร จะได้สารแขวนลอย AgNPs ขนาด 50 นาโนเมตร

1.3) วัดความเข้มข้นของ AgNPs ที่ได้ด้วยเครื่อง ICP-OES และวัดขนาดอนุภาค AgNPs ที่ได้ด้วยเครื่อง TEM โดยส่งวิเคราะห์ที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

### 3.3.2 การคัดเลือกและการเตรียมตัวอย่างจอก

1) เก็บตัวอย่างจอกจากแหล่งน้ำบริเวณมหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา โดยมีเกณฑ์ในการพิจารณา ดังนี้

1.1) รูปร่างและขนาดใกล้เคียงกัน โดยเลือกจอกที่มีรากยาวประมาณ 6-10 เซนติเมตร ความยาวใบประมาณ 5.5-7.5 เซนติเมตร น้ำหนักประมาณ 3-4 กรัม

1.2) ใบมีสีเขียวใกล้เคียงกัน

1.3) มีการเจริญเติบโตที่สมบูรณ์แข็งแรง

2) นำจอกมาเลี้ยงในน้ำประปาอย่างน้อย 1 วัน

3) นำจอกไปทำความสะอาดจอกด้วยน้ำประปา เพื่อกำจัดตะกอนต่าง ๆ ให้หมดประมาณ 2-3 ครั้ง แล้วล้างต่อด้วยน้ำกลั่นอีกครั้ง

4) เลี้ยงปรับสภาพจอกเป็นเวลา 2 วัน ด้วยน้ำปราศจากไอออน (deionized water; DI) ที่อุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส

5) นำจอกที่ปรับสภาพแล้วมาใช้ทดลอง โดยวัดความยาวรากและขนาดใบ และนำไปชั่งน้ำหนักของจอกก่อนการทดลอง รวมทั้งสังเกตสีของใบจอกและสภาพของจอก

### 3.3.3 การทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs โดยจอกและการสลายตัวของ AgNPs

ในการทดลองประสิทธิภาพการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs โดยจอกและการสลายตัวของ AgNPs ทำโดยใช้ AgNPs 2 ขนาด คือ 7 และ 50 นาโนเมตร และความเข้มข้นของ AgNPs ที่ใช้ทดลอง ได้แก่ 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยควบคุมอุณหภูมิห้องที่  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส

1) การศึกษาการสลายตัวของ AgNPs

ศึกษาการสลายตัวของ AgNPs ในสภาพที่ทดลองโดยไม่มีจอก เป็นชุดการทดลองที่ 1 โดยทำเช่นเดียวกับการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัด AgNPs ด้วยจอก แต่จะไม่ใส่จอกลงไป ทำโดยใช้สารแขวนลอย AgNPs ในน้ำ DI ที่ความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่สภาวะเดียวกับการทดลองหาประสิทธิภาพการบำบัดของจอก ( $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส) จากนั้นเก็บตัวอย่างน้ำที่เวลา 0, 1, 2, 4, 6, 12, 24 และ 48 ชั่วโมง ใช้น้ำ DI ที่ปราศจาก AgNPs เพื่อใช้เป็นชุดควบคุม เก็บตัวอย่างที่เวลา 0 และ 48 ชั่วโมง

## 2) การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัด AgNPs โดยจอก

ศึกษาการดูดซึม AgNPs ของจอกเป็นชุดการทดลองที่ 2 โดยนำจอกจากข้อ 3.3.2 มาเลี้ยงในน้ำ DI ที่มี AgNPs 2 ขนาด คือ 7 และ 50 นาโนเมตร ที่ความเข้มข้น 3 ระดับ คือ 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ทดลองที่อุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส จากนั้นเก็บตัวอย่างจอกและน้ำผสม AgNPs ที่เวลา 0, 1, 2, 4, 6, 12, 24 และ 48 ชั่วโมง ชุดควบคุมในการศึกษานี้ ทำโดยเลี้ยงจอกในน้ำ DI ที่ปราศจาก AgNPs ซึ่งจะเก็บตัวอย่างที่เวลา 0 ชั่วโมง (เริ่มการทดลอง) และที่เวลา 48 ชั่วโมง (สิ้นสุดการทดลอง)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้แบ่งชุดการทดลองเป็น 2 ชุดการทดลอง คือ ชุดการทดลองที่ 1 การศึกษาการสลายตัวของ AgNPs (degradation; D) ชุดการทดลองที่ 2 การศึกษาประสิทธิภาพ (efficiency; E) ดังตารางที่ 3.1 โดยใช้ น้ำ DI และจอก เป็นชุดควบคุมของการศึกษาประสิทธิภาพ (P) ส่วนการศึกษาการสลายตัวใช้น้ำ DI เป็นชุดควบคุม (B) ซึ่งการทดลองทั้ง 2 ชุด ทำการทดลองพร้อมกันภายใต้สภาวะเดียวกัน ( $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส) และเก็บตัวอย่างที่เวลาเดียวกัน คือ 0, 1, 2, 4, 6, 12, 24 และ 48 ชั่วโมง

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา

ชุดการทดลอง	รหัสตัวอย่าง	ขนาดของ AgNPs (nm)	ความเข้มข้นของ AgNPs (mg/L)	หมายเหตุ
1) การศึกษาการสลายตัวของ AgNPs	B	-	0	น้ำ DI
	DSC <sub>1</sub>	7	0.5	ไม่มีจอก
	DSC <sub>2</sub>		1	
	DSC <sub>3</sub>		2	
	DBC <sub>1</sub>	50	0.5	
	DBC <sub>2</sub>		1	
	DBC <sub>3</sub>		2	
2) การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัด AgNPs	P	-	0	
	SC <sub>1</sub>	7	0.5	มีจอก
	SC <sub>2</sub>		1	
	SC <sub>3</sub>		2	
	BC <sub>1</sub>	50	0.5	
	BC <sub>2</sub>		1	
	BC <sub>3</sub>		2	

หมายเหตุ: B และ P เป็นชุดควบคุม

- หมายถึง ไม่มีการเติม AgNPs เนื่องจากเป็นชุดควบคุม

### 3.3.4 การเก็บตัวอย่าง

#### 1) การเก็บตัวอย่างจอก

เก็บตัวอย่างจอกในแต่ละชุดการทดลองที่เวลาต่าง ๆ แล้วล้างจอกด้วยน้ำ DI จากนั้นนำมาซับด้วยกระดาษทิชชู ผึ่งลมประมาณ 10-15 นาทีให้แห้งก่อนนำมาวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของจอกและปริมาณคลอโรฟิลล์ (ลัดดาวลัย ช้องบ้านโขง, 2550)

#### 2) การเก็บตัวอย่างน้ำ

เก็บตัวอย่างน้ำในแต่ละชุดการทดลองที่เวลาต่าง ๆ ประมาณ 100 มิลลิลิตร ใส่ในขวดพอลิเอธิลีน เพื่อวัดค่า pH และความเข้มข้นของ AgNPs (กรมควบคุมมลพิษ, 2541)

### 3.3.5 การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำและจอก

เก็บตัวอย่างน้ำและจอกที่เวลาต่าง ๆ ทั้ง 2 ชุดการทดลอง แล้วจึงนำตัวอย่างน้ำและจอกมาวิเคราะห์ โดยมีรายละเอียดวิธีการวิเคราะห์ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 วิธีการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำและจอก

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์
ลักษณะทางกายภาพของจอก (น้ำหนัก ขนาด สีใบ)	- ชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง - วัดขนาดด้วยไม้บรรทัด - สังเกตสีและสภาพของจอกด้วยตา
คลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี ในจอก	สกัดด้วย 95% ethanol และวัดด้วย UV-Visible spectrophotometer ความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) เท่ากับ 649, 664 และ 750 นาโนเมตร (Winkelmann <i>et al.</i> , 2017)
pH ของน้ำ	pH meter (กรมควบคุมมลพิษ, 2537)
ความเข้มข้นของ AgNPs ในน้ำ	UV-Visible spectrophotometer ที่ $\lambda = 395$ และ 430 นาโนเมตร ของ AgNPs ขนาด 7 และ 50 นาโนเมตร ตามลำดับ (Promtong, 2014)

#### 1) การวิเคราะห์ตัวอย่างจอก

ตัวอย่างจอกจะถูกนำมาวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ (น้ำหนัก ขนาด สีและสภาพของจอก) โดยนำตัวอย่างจอกจากข้อ 3.3.4 มาวัดความยาวรากและขนาดใบด้วยไม้บรรทัด แล้วชั่งน้ำหนัก สังเกตสีของใบและสภาพของจอก จากนั้นนำใบจอกมาวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี โดยสกัดด้วย 95% ethanol และวัดด้วย UV-Visible spectrophotometer ( $\lambda = 649, 664$  และ 750 นาโนเมตร) ซึ่งมีวิธีการทดลองดังนี้ (Winkelmann *et al.*, 2017) ชั่ง

น้ำหนักใบจอก 1 กรัม แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที บดด้วยโกร่งให้ละเอียด จากนั้นชั่งน้ำหนักจอกที่บดใส่หลอดทดลอง เติม 95% ethanol ที่เย็น 20 มิลลิลิตร และผสมให้เข้ากัน แช่ทิ้งไว้ 10 นาที แล้วกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 นำไปวัดด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer ( $\lambda = 649, 664$  และ  $750$  นาโนเมตร) โดยค่าคลอโรฟิลล์ที่ได้จะไม่ดูดซึมแสงที่ความยาวคลื่น  $750$  นาโนเมตร ซึ่งค่าการดูดซึมแสงที่  $750$  นาโนเมตร ( $A_{750}$ ) จะเป็นค่าสัญญาณพื้นหลัง (background signal) จากนั้นค่าที่ได้มาคำนวณโดยใช้สูตร

$$A_{664} - A_{750} \quad (1)$$

$$A_{649} - A_{750} \quad (2)$$

$$[\text{chl a}] (\mu\text{g/mL}) = 13.36A_{664} - 5.19A_{649} \quad (3)$$

$$[\text{chl b}] (\mu\text{g/mL}) = 27.43A_{649} - 8.12A_{664} \quad (4)$$

$$[\text{chl}] \left( \frac{\text{mg}}{\text{DW}} \right) = [\text{chl}] \left( \frac{\mu\text{g}}{\text{mL}} \right) \times \frac{\text{ปริมาตรของเอทานอล (mL)}}{\text{น้ำหนักใบแห้ง (g)}} \times \frac{1 \text{ mg}}{1000 \mu\text{g}}$$

เมื่อ DW = น้ำหนักพืชแห้ง (g)

chl = คลอโรฟิลล์

## 2) การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ

ตัวอย่างน้ำที่เก็บส่วนหนึ่งจะถูกนำมาวิเคราะห์ค่า pH ของน้ำด้วยเครื่อง pH meter และอีกส่วนหนึ่งจะถูกนำไปกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 5 แล้วนำไปวัดความเข้มข้นของ AgNPs ด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) เท่ากับ  $395$  นาโนเมตร สำหรับ AgNPs ขนาด  $7$  นาโนเมตร และ  $\lambda = 430$  นาโนเมตร สำหรับ AgNPs ขนาด  $50$  นาโนเมตร

### 3.3.6 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการบำบัด AgNPs ของจอก

นำผลที่ได้จากทั้ง 2 ชุดการทดลอง (การสลายตัวของ AgNPs และประสิทธิภาพการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs โดยจอก) มาคำนวณประสิทธิภาพของจอกในการกำจัด AgNPs ที่มีขนาด  $7$  และขนาด  $50$  นาโนเมตร ออกจากน้ำ โดยสามารถคำนวณค่าประสิทธิภาพการบำบัดได้จากสูตร (พรพิมล ห่อสุวรรณชัย, 2542)

$$\text{ประสิทธิภาพการบำบัด (\%)} = \frac{\text{ความเข้มข้น AgNPs เริ่มต้น} - \text{ความเข้มข้น AgNPs สุดท้าย}}{\text{ความเข้มข้น AgNPs เริ่มต้น}} \times 100$$



### 3.3.7 การวิเคราะห์ข้อมูล

การศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs โดยจอก ได้นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ทางสถิติ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) การใช้สถิติเชิงพรรณนา (descriptive statistic) ได้แก่ การหาค่าเฉลี่ย (mean) และร้อยละ เพื่อนำเสนอผลการศึกษาประสิทธิภาพของจอกในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs และ pH

2) การใช้สถิติเชิงอ้างอิง (inferential statistics) แบบด้วยคำสั่ง Independent-samples T-Test เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของจอกในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs ขนาด 7 และ 50 นาโนเมตร



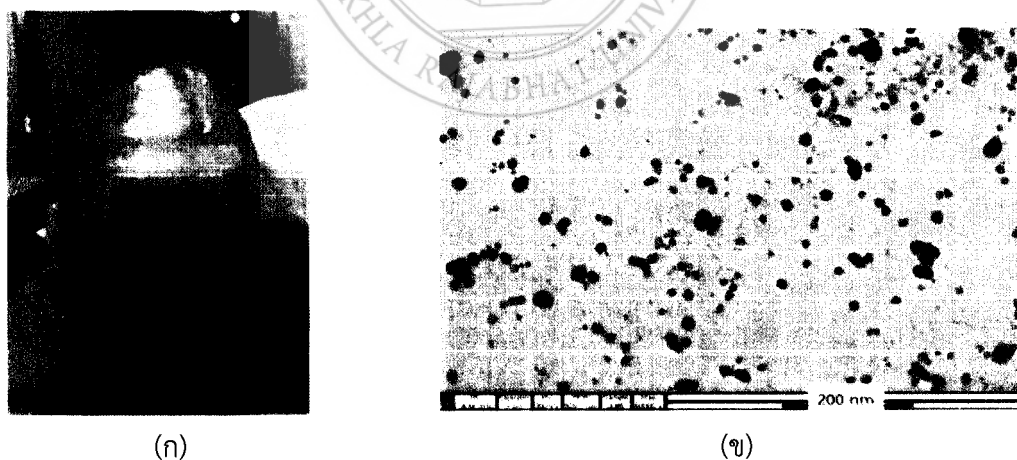
## บทที่ 4

### ผลและการอภิปรายผลการวิจัย

การศึกษาประสิทธิภาพของจอก (*Pistia stratiotes* L.) ในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs ที่มีขนาดต่างกัน 2 ขนาด ที่ระดับความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร เริ่มโดยการสังเคราะห์ AgNPs ขนาด 7 และ 50 นาโนเมตร แล้วนำ AgNPs ที่สังเคราะห์ได้มาใช้ในการทดลอง ซึ่งแบ่งชุดการทดลองออกเป็น 2 ชุดการทดลอง คือ ชุดการทดลองที่ 1 เป็นการศึกษาการสลายตัวตามธรรมชาติของ AgNPs ในน้ำที่เวลาต่าง ๆ ในสภาวะที่ใช้ทดลอง ชุดการทดลองที่ 2 การศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนของ AgNP โดยจอก เพื่อศึกษาถึงความสามารถในการบำบัด AgNPs ออกจากน้ำของจอก และความเข้มข้นของ AgNPs ที่จอกสามารถทนได้ รวมทั้งผลของ AgNPs ต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ โดยทั้ง 2 ชุดการทดลองนี้จะมีชุดควบคุม เพื่อสังเกตการเจริญเติบโตของจอกเมื่อไม่มี AgNPs ในสภาวะที่ใช้ทดลอง จากการทดลองได้ผลดังต่อไปนี้

#### 4.1 ผลการสังเคราะห์ AgNPs ขนาด 7 และ 50 นาโนเมตร

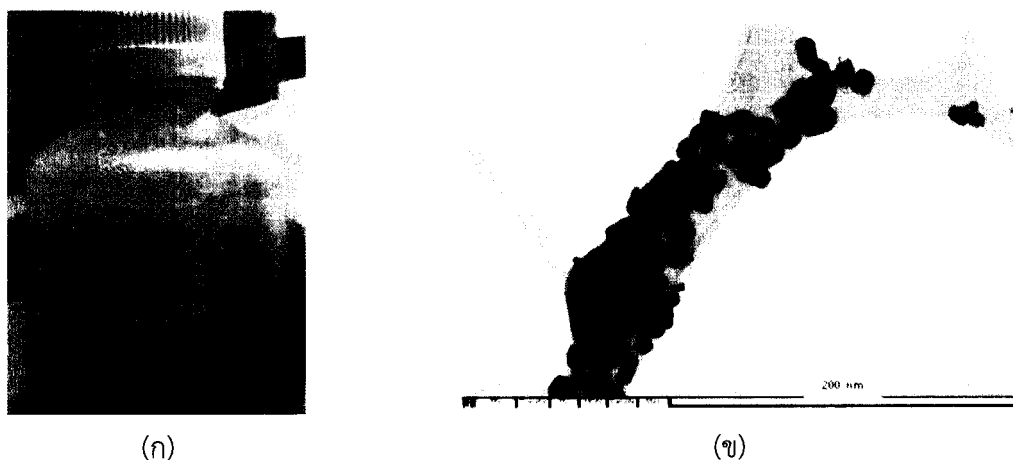
AgNPs ทั้ง 2 ขนาด (7 และ 50 นาโนเมตร) ที่ได้จากการสังเคราะห์ตามวิธีของ Jana *et al.* (2001) ถูกนำมาวิเคราะห์ขนาด โดยเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทรานสมิสชัน (transmission electron microscope; TEM) ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 4.1 และ 4.2



ภาพที่ 4.1 AgNPs ขนาด 7 นาโนเมตร ที่สังเคราะห์ได้

(ก) สารแขวนลอย AgNPs

(ข) ขนาดและรูปร่างของ AgNPs จากเครื่อง TEM



ภาพที่ 4.2 AgNPs ขนาด 50 นาโนเมตร ที่สังเคราะห์ได้

(ก) สารแขวนลอย AgNPs

(ข) ขนาดและรูปร่างของ AgNPs จากเครื่อง TEM

จากการวิเคราะห์ AgNPs ขนาด 7 และ 50 นาโนเมตรด้วยเครื่อง TEM (ภาพที่ 4.1 และ 4.2) พบว่า AgNPs ทั้ง 2 ขนาด มีรูปร่างค่อนข้างกลม โดยที่ AgNPs ขนาด 7 นาโนเมตร ที่สังเคราะห์ได้มีขนาดอยู่ในช่วง 3.4–103.4 นาโนเมตร มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่  $11.8 \pm 7.1$  นาโนเมตร ( $n=845$ ) และของ AgNPs ขนาด 50 นาโนเมตร มีขนาดอยู่ในช่วง 6.3–173.1 นาโนเมตร มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่  $53.5 \pm 23.4$  นาโนเมตร ( $n=426$ ) ซึ่งเมื่อนำสารแขวนลอย AgNPs ที่สังเคราะห์ได้ไปวัดความเข้มข้นของ AgNPs ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยเทคนิค (inductivity couple plasma-optical emission spectrometer; ICP-OES) พบว่า สารแขวนลอย AgNPs ขนาด 7 นาโนเมตร มีความเข้มข้น 257.5 มิลลิกรัมต่อลิตร และสารแขวนลอย AgNPs ขนาด 50 นาโนเมตร มีความเข้มข้น 348.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่ง AgNPs ที่สังเคราะห์ได้นี้ถูกนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

## 4.2 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างจอก

การทดลองนี้เก็บตัวอย่างเพื่อนำมาวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ และปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี ในจอกที่ระยะเวลาต่าง ๆ

### 4.2.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของจอก

ลักษณะทางกายภาพของจอกจะแสดงถึงความสามารถในการเจริญเติบโตของจอก ในน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs ซึ่งในการศึกษาคั้งนี้จะสังเกตสีใบ ลักษณะทั่วไปของจอก น้ำหนักและขนาดของจอก หลังจากได้รับ AgNPs ขนาด 7 และ 50 นาโนเมตร ที่ความเข้มข้นระดับต่าง ๆ แล้ว

นำมาเปรียบเทียบกับจอกเมื่อเริ่มทดลอง (ก่อนได้รับ AgNPs) และชุดควบคุม สำหรับผลการทดลอง แสดงดังตารางที่ 4.1 และ 4.2 ภาพที่ 4.3 และ 4.4 และภาคผนวก ข

ตารางที่ 4.1 ลักษณะของจอกหลังจากดูดซึม AgNPs ขนาด 7 นาโนเมตร ที่ระยะเวลาต่าง ๆ

ความเข้มข้นของ AgNPs (mg/L)	ลักษณะของจอกที่เวลาต่าง ๆ (ชั่วโมง)							
	0	1	2	4	6	12	24	48
0 (ชุดควบคุม)	ก	ก	ก	ก	ก	ก	ก	ก
0.5	ก	ก	ก	ก	ก	ก	ก	ข
1	ก	ก	ก	ก	ข	ข		ง
2	ก	ก	ก	ข	ข		ง	ง

หมายเหตุ:



หมายถึง จอกมีลักษณะปกติ



หมายถึง จอกมีลักษณะใบเริ่มอ่อนนุ่ม มีสีเขียวปนเหลือง



หมายถึง จอกมีลักษณะใบหงิกงอ เหี่ยว รากบางส่วนหลุดออกจากกัน



หมายถึง จอกตาย

ตารางที่ 4.2 ลักษณะของจอกหลังจากดูดซึม AgNPs ขนาด 50 นาโนเมตร ที่ระยะเวลาต่าง ๆ

ความเข้มข้นของ AgNPs (mg/L)	ลักษณะของจอกที่เวลาต่าง ๆ (ชั่วโมง)							
	0	1	2	4	6	12	24	48
0 (ชุดควบคุม)	ก	ก	ก	ก	ก	ก	ก	ก
0.5	ก	ก	ก	ก	ก	ก	ก	ข
1	ก	ก	ก	ก	ก	ก	ข	
2	ก	ก	ก	ก	ก	ข		ง

หมายเหตุ:



หมายถึง จอกมีลักษณะปกติ



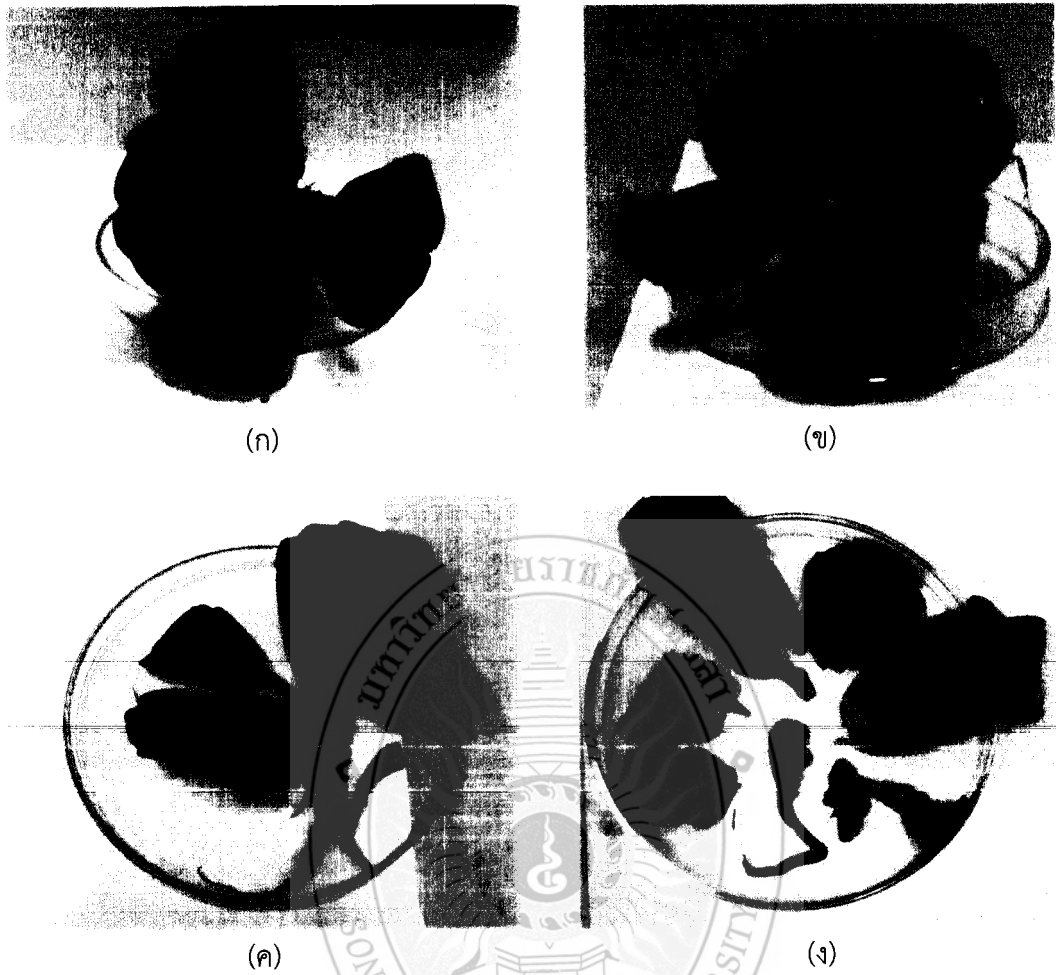
หมายถึง จอกมีลักษณะใบเริ่มอ่อนนุ่ม มีสีเขียวปนเหลือง



หมายถึง จอกมีลักษณะใบหงิกงอ เหี่ยว รากบางส่วนหลุดออกจากกัน



หมายถึง จอกตาย



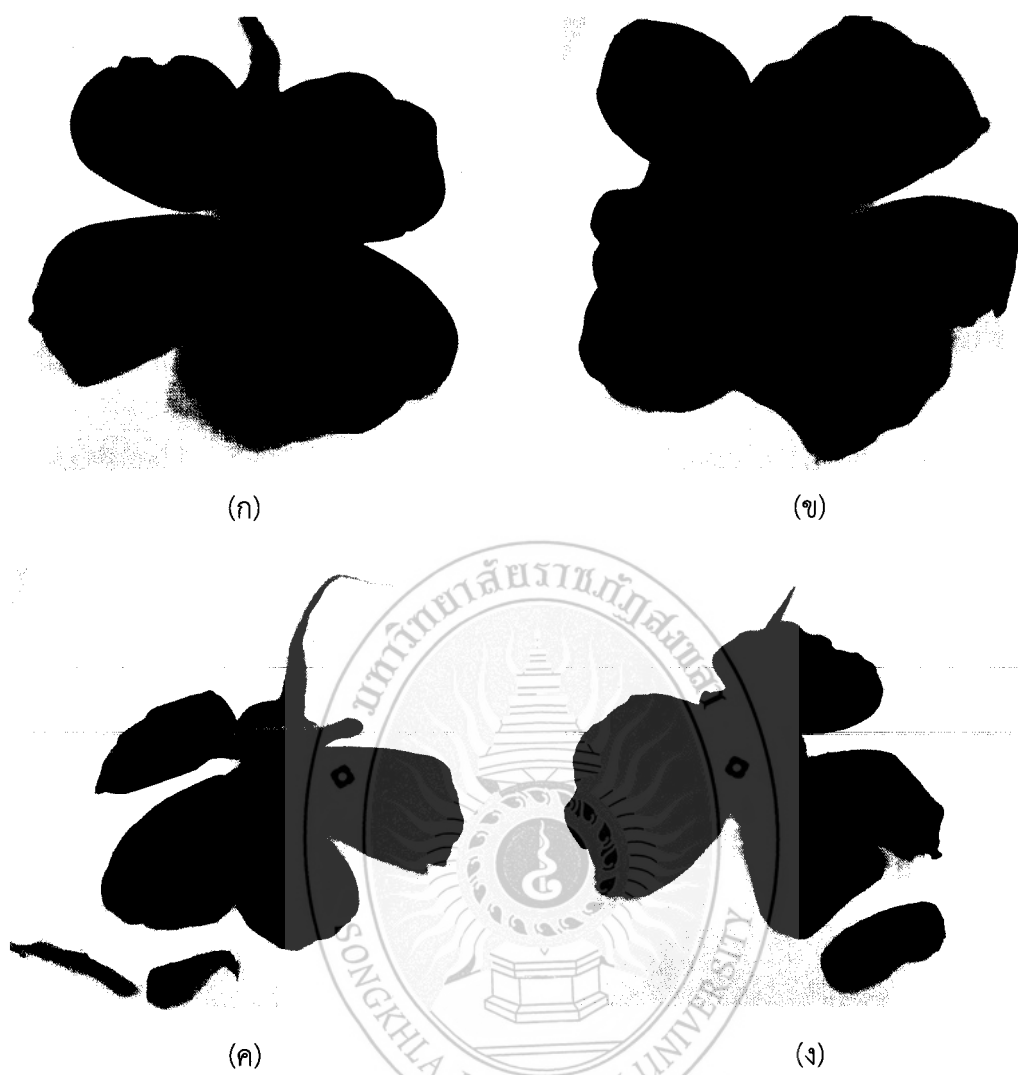
ภาพที่ 4.3 สีและสภาพของจอกที่ได้รับ AgNPs ขนาด 7 นาโนเมตร

(ก) หมายถึง จอกมีลักษณะปกติ

(ข) หมายถึง จอกมีลักษณะใบเริ่มอ่อนน้ม มีสีเขียวปนเหลือง

(ค) หมายถึง จอกมีลักษณะใบหงิกงอ เหี่ยว รากบางส่วนหลุดออกจากกัน

(ง) หมายถึง จอกตาย



ภาพที่ 4.4 สีและสภาพของจอกที่ได้รับ AgNPs ขนาด 50 นาโนเมตร

- (ก) หมายถึง จอกมีลักษณะปกติ
- (ข) หมายถึง จอกมีลักษณะใบเริ่มอ่อนนิ่ม มีสีเขียวปนเหลือง
- (ค) หมายถึง จอกมีลักษณะใบหงิกงอ เหี่ยว รากบางส่วนหลุดออกจากกัน
- (ง) หมายถึง จอกตาย

จากผลการทดลอง สามารถแบ่งลักษณะของจอกได้เป็น 4 กลุ่ม คือ ก) จอกแข็งแรงเป็นปกติ ข) ใบเริ่มอ่อนนุ่มและมีสีเขียวปนเหลือง ค) ใบเริ่มหงิกงอและเหี่ยว รากบางส่วนเริ่มหลุดออกจากกัน และ ง) จอกตาย (ภาพที่ 4.3 และ 4.4) ซึ่งเมื่อพิจารณาสภาพของจอกในชุดควบคุม (ไม่มี AgNPs) ของ AgNPs ทั้ง 2 ขนาด พบว่าจอกมีใบสีเขียวและมีสภาพแข็งแรงเป็นปกติตลอดระยะเวลาที่ใช้ทดลอง (48 ชั่วโมง) ส่วนการทดลองที่ใช้ AgNPs ทั้งขนาด 7 และ 50 นาโนเมตร ที่ความเข้มข้น 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร จอกมีสภาพเป็นปกติในช่วงระยะเวลาแรกจนถึง 24 ชั่วโมง แต่ที่ระยะเวลา 48 ชั่วโมง ใบของจอกจะเริ่มอ่อนนุ่มและเริ่มมีสีเขียวปนเหลือง ส่วนที่ความเข้มข้นของ AgNPs เพิ่มขึ้นเป็น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ใบจอกอ่อนนุ่มและมีสีเขียว ที่เวลา 6 และ 24 ชั่วโมง หลังจากได้รับ AgNPs ขนาด 7 และ 50 นาโนเมตร และเมื่อเวลาผ่านไป 24 และ 48 ชั่วโมง ใบจอกเริ่มมีรากบางส่วนหลุดออกจากกันและใบเริ่มเหี่ยว หงิกงอ และจอกตายที่เวลา 48 ชั่วโมง (หลังจากดูดซึม AgNPs ขนาด 7 นาโนเมตร)

เมื่อทดลองที่ใช้ความเข้มข้นของ AgNPs ที่ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าจอกเริ่มมีใบอ่อนนุ่มและมีสีเขียวปนเหลือง หลังจากได้รับ AgNPs ขนาด 7 และ 50 นาโนเมตร เป็นเวลา 4 และ 12 ชั่วโมง ยิ่งเวลาเพิ่มขึ้นจอกจะยังมีใบหงิกงอและเหี่ยว และรากบางส่วนเริ่มหลุดออกจากกัน ที่เวลา 12 และ 24 ชั่วโมง หลังจากเริ่มทดลอง และพบว่าในน้ำที่ผสม AgNPs ความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ขนาด 7 นาโนเมตร จอกตายที่เวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งเร็วกว่าจอกที่เลี้ยงในน้ำผสม AgNPs ขนาด 50 นาโนเมตร ตายที่เวลา 48 ชั่วโมง

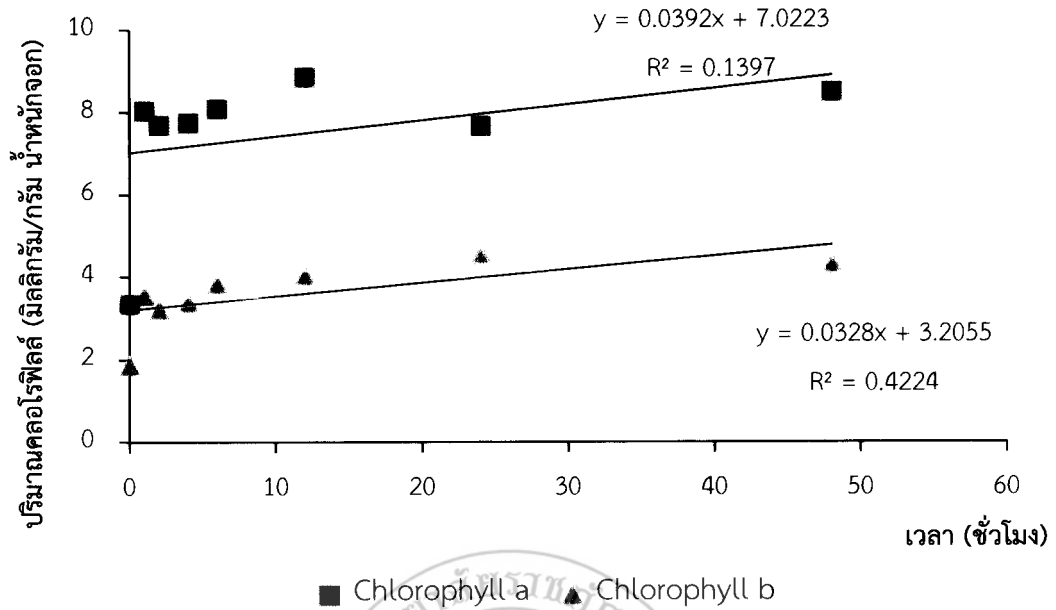
ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า AgNPs มีผลกระทบต่ออาการเจริญเติบโตของจอก ตามระดับความเข้มข้น ระยะเวลา และขนาดอนุภาคของ AgNPs ที่ได้รับ โดย AgNPs จะมีความพิษต่อจอกมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ AgNPs และระยะเวลาที่ได้รับ เพิ่มขึ้น แต่จะแปรผกผันกับขนาดของอนุภาค AgNPs (7 นาโนเมตร มีความเป็นพิษมากกว่า 50 นาโนเมตร) ซึ่งจอกสามารถมีชีวิตอยู่ได้ในน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs ที่ระดับความเข้มข้นต่ำ (น้อยกว่า 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Hanks *et al.* (2015) ที่พบว่าจอกจะมีชีวิตอยู่ได้ที่ความเข้มข้นของ AgNPs 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร (>2 ชั่วโมง) และตายหากได้รับ AgNPs 2 มิลลิกรัมต่อลิตร อย่างไรก็ตามการทดลองนี้ใช้จอกเพียง 1 ต้นในการดูดซึม ซึ่งหากน้ำมี AgNPs ปนเปื้อนมาก อาจแก้ไขโดยการเพิ่มจำนวนจอกที่ใช้ดูดซึมสารพิษ (Hanks *et al.*, 2015)

#### 4.2.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์ในจอก

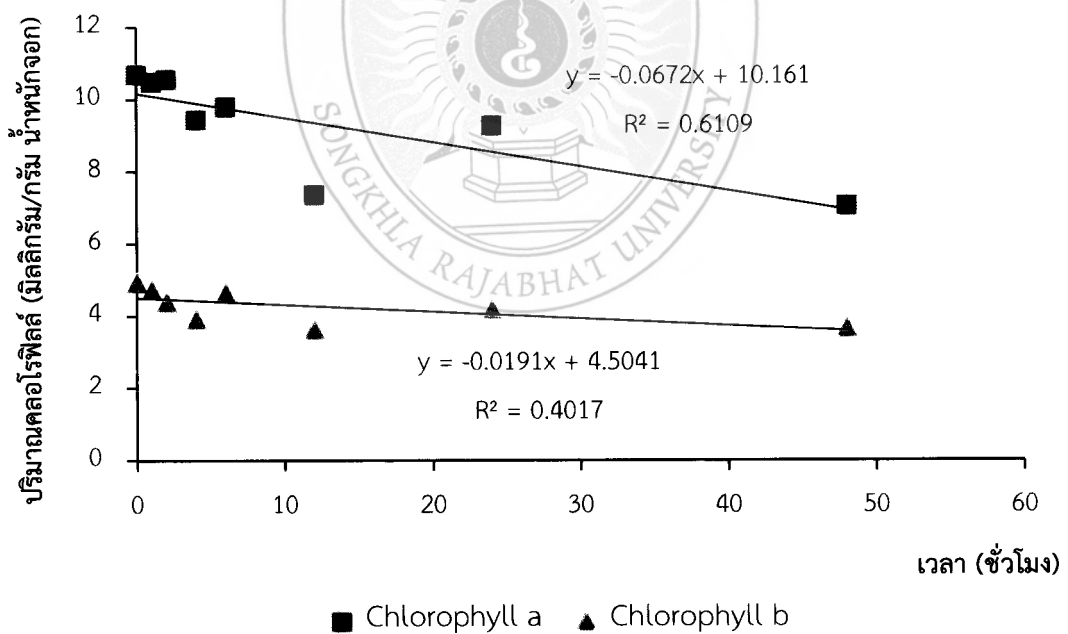
นอกจากวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของจอก การทดลองนี้ได้วิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี ในใบจอก ซึ่งปริมาณคลอโรฟิลล์ในพืชจะมีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช เนื่องจากพืชต้องใช้คลอโรฟิลล์ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (photosynthesis) สร้าง

อาหาร ดังนั้นหากปริมาณคลอโรฟิลล์ในพืชลดลงจะส่งผลให้พืชมีการเจริญเติบโตของพืชลดลงหรือตายได้ และจะทำให้พืชมีสีเขียวลดลง โดยเฉพาะคลอโรฟิลล์ เอ ซึ่งเป็นโมเลกุลหลักในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ส่วนคลอโรฟิลล์ บี จะเป็นโมเลกุลที่ช่วยให้กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงเกิดได้ดีขึ้น ผลของปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี ในใบจอกหลังจากได้รับ AgNPs ขนาด 7 และ 50 นาโนเมตร ที่ความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาต่าง ๆ (ระยะเวลาที่ใช้ทดลอง 48 ชั่วโมง) พบว่าจอกที่ได้รับ AgNPs ขนาด 7 นาโนเมตร ที่ระดับความเข้มข้น 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ แลคลอโรฟิลล์ บี มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (ความชัน (slope) เป็นบวก (+)) ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของจอก (ข้อ 4.2.1) ที่พบว่า จอกยังมีชีวิตอยู่ได้และใบเริ่มมีสีเขียวปนเหลืองที่เวลา 48 ชั่วโมง แต่เมื่อความเข้มข้นของ AgNPs เพิ่มขึ้น (1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร) จะเห็นได้ว่า ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี มีแนวโน้มลดลง เมื่อระยะเวลาในการได้รับสารเพิ่มขึ้น (ความชันเป็นลบ (-)) และยิ่งความเข้มข้นของ AgNPs สูงขึ้น ปริมาณคลอโรฟิลล์มีแนวโน้มลดลงเร็วขึ้น สังเกตได้จากความชันของกราฟ AgNPs ที่ความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่ามากกว่าความชันของกราฟของ AgNPs ที่ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของจอก (ผลการทดลองในข้อที่ 4.2.1) ใบจอกเริ่มอ่อนนิ่มและมีสีเขียวปนเหลืองที่ระยะเวลา 6 และ 4 ชั่วโมง และจอกตายที่ระยะเวลา 48 และ 24 ชั่วโมง หลังได้รับ AgNPs ขนาด 7 นาโนเมตร ที่ความเข้มข้น 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ตามระยะเวลาที่ได้รับ AgNPs ขนาด 7 นาโนเมตร จะเห็นได้ว่า ที่ความเข้มข้น 1 mg/L มีค่า  $R^2$  สูงสุด เท่ากับ 0.61 ในขณะที่ความสัมพันธ์ของปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ตามระยะเวลาที่ได้รับ AgNPs มีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ ซึ่งมีค่า  $R^2$  อยู่ในช่วง 0.40-0.44 แสดงดังภาพที่ 4.5-4.7

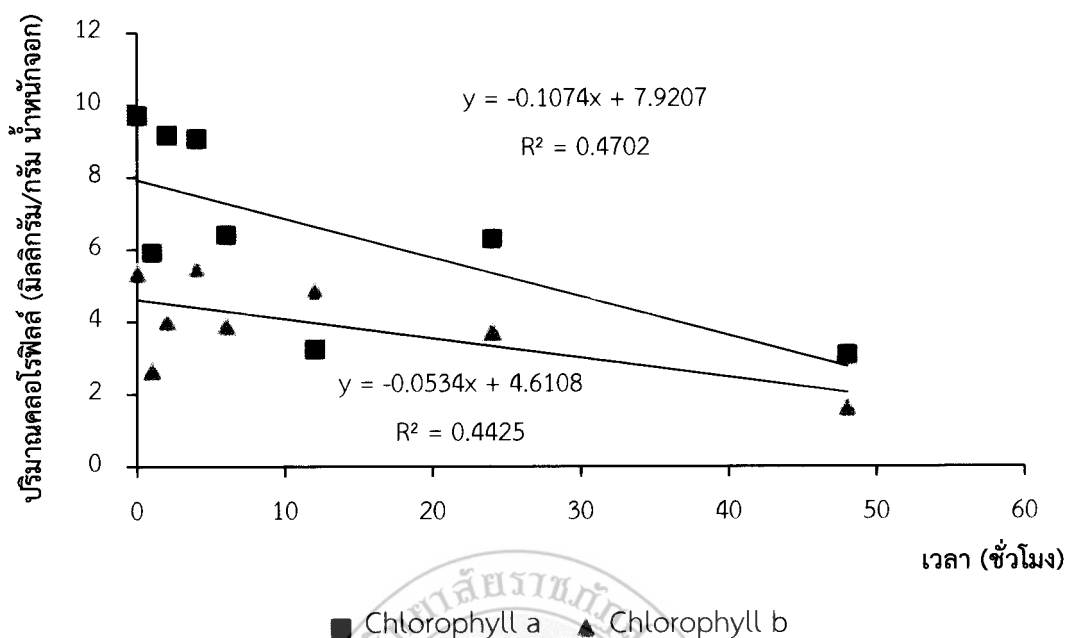




ภาพที่ 4.5 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี ในจอก หลังจากได้รับ AgNPs ขนาด 7 นาโนเมตร ที่ความเข้มข้น 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร

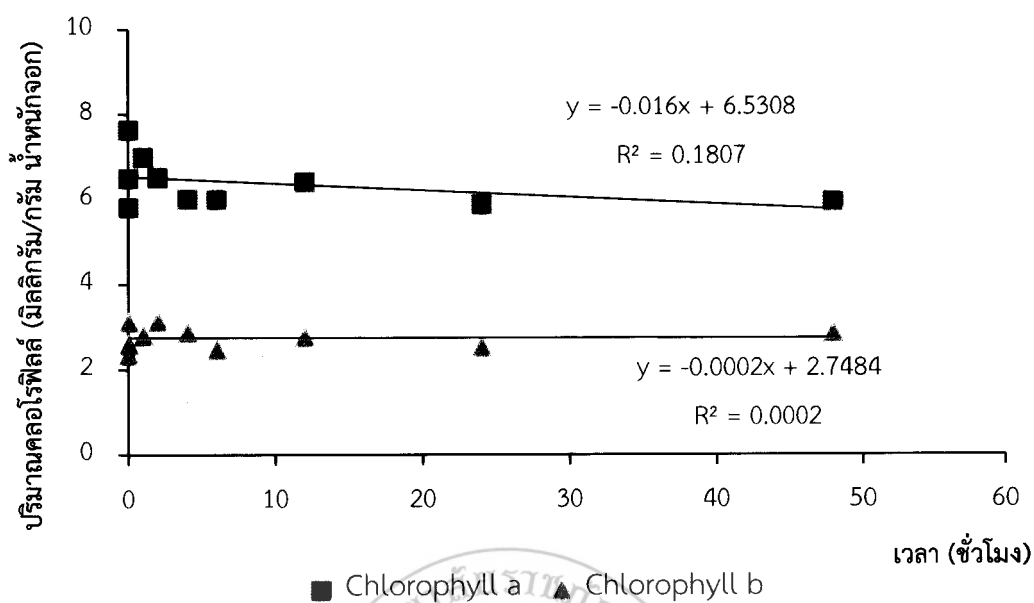


ภาพที่ 4.6 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี ในจอก หลังจากได้รับ AgNPs ขนาด 7 นาโนเมตร ที่ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

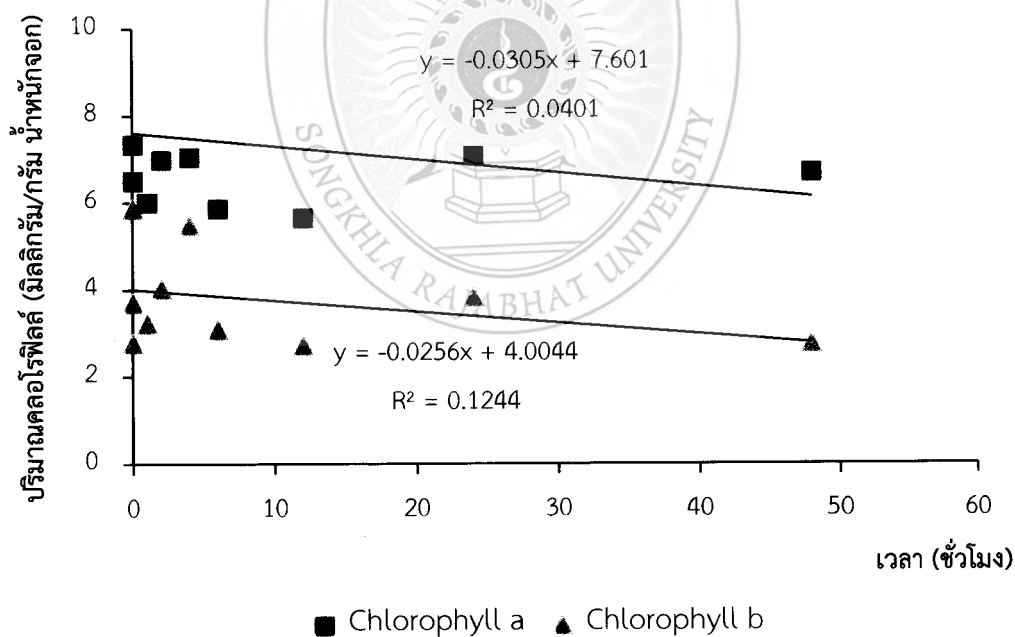


ภาพที่ 4.7 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี ในจอก หลังจากได้รับ AgNPs ขนาด 7 นาโนเมตร ที่ความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร

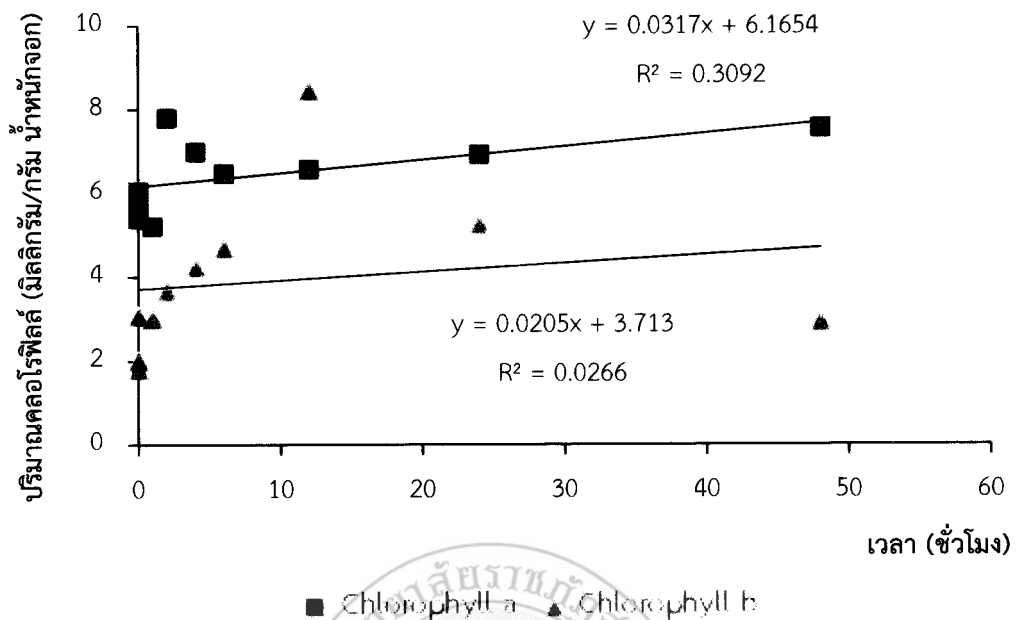
ส่วน AgNPs ขนาด 50 นาโนเมตร ที่ความเข้มข้น 0.5 และ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย และที่ความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเห็นได้ว่า ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี ไม่ค่อยมีแนวโน้มลดลงมากนัก อาจเป็นไปได้ว่า AgNPs มีอนุภาคขนาดใหญ่และความเข้มข้นที่สูง ทำให้การดูดซึม AgNPs ของจอกเกิดขึ้นได้น้อย แต่ AgNPs จะทำลายเซลล์ราก ทำให้รากบางส่วนหลุดออกจากกัน ซึ่งจากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของจอก (ตารางที่ 4.2) พบว่า จอกเริ่มมีลักษณะใบหงิกงอ เหี่ยว รากบางส่วนหลุดออกจากกัน ตั้งแต่ตัวอย่างที่เก็บที่เวลา 24 ชั่วโมง และพบว่าจอกตายที่เวลา 48 ชั่วโมง (สิ้นสุดการทดลอง) จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ความเข้มข้นของ AgNPs ขนาด 50 นาโนเมตร ที่ใช้ทดลองและระยะเวลาในการได้รับสาร ส่งผลต่อความเป็นพิษของ AgNPs ต่อจอก โดยจอกที่ได้รับ AgNPs ที่ความเข้มข้นสูงชันและได้รับ AgNPs นานขึ้น มีแนวโน้มจะมีปริมาณปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี ลดลง และเมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ตามระยะเวลาที่ได้รับ AgNPs ขนาด 50 นาโนเมตร จะเห็นได้ว่า ที่ความเข้มข้น 2 mg/L มีค่า  $R^2$  สูงสุดเท่ากับ 0.31 ในขณะที่ความสัมพันธ์ของปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ตามระยะเวลาที่ได้รับ AgNPs มีค่า  $R^2$  สูงสุด เท่ากับ 0.12 ที่ความเข้มข้น 1 mg/L แสดงดังภาพที่ 4.8-4.10



ภาพที่ 4.8 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี ในจอก หลังจากได้รับ AgNPs ขนาด 50 นาโนเมตร ที่ความเข้มข้น 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร



ภาพที่ 4.9 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี ในจอก หลังจากได้รับ AgNPs ขนาด 50 นาโนเมตร ที่ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร



ภาพที่ 4.10 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี ในจอก หลังจากได้รับ AgNPs ขนาด 50 นาโนเมตร ที่ความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากผลการศึกษาข้างต้นแสดงให้เห็นว่า AgNPs ขนาด 7 และ 50 นาโนเมตร มีผลต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี ของจอก (พิจารณาจาก  $R^2$ ) โดยจอกที่ได้รับ AgNPs มากขึ้น มีแนวโน้มจะมีปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลง จึงส่งผลทำให้ความสามารถในการสังเคราะห์ด้วยแสงของจอกลดลง ทำให้จอกตายได้ และความเป็นพิษต่อจอกของ AgNPs จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณ AgNPs ในน้ำและระยะเวลาที่ได้รับสาร ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Winkelmann *et al.* (2017) ได้ศึกษาผลของ AgNPs ต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ในพืช โดยใช้สาหร่ายเดนซ่า (*Egeria densa*) มาเลี้ยงในสารละลาย AgNPs เป็นระยะเวลา 2 สัปดาห์ พบว่า ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี ในสาหร่ายเดนซ่าลดลง เมื่อสัมผัสกับสารละลาย AgNPs ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (ความเข้มข้น 0, 13, 25, 38 และ 51 มิลลิกรัมต่อลิตร) เป็นเวลา 1 สัปดาห์ อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบความเป็นพิษต่อจอกของ AgNPs ขนาด 7 นาโนเมตร และ AgNPs ขนาด 50 นาโนเมตร พบว่า ขนาดอนุภาคของ AgNPs มีผลต่อความเป็นพิษต่อจอก โดย AgNPs ที่มีขนาดเล็ก (7 นาโนเมตร) จะมีความเป็นพิษมากกว่า AgNPs ที่มีขนาดใหญ่ (50 นาโนเมตร) ซึ่งจะเห็นได้ว่า จอกที่ได้รับ AgNPs ที่มีอนุภาคขนาดใหญ่กว่า (50 นาโนเมตร) จะแสดงความเป็นพิษช้ากว่าจอกที่ได้รับ AgNPs อนุภาคขนาดเล็ก (7 นาโนเมตร) ที่เป็นเช่นนี้ อาจเนื่องจาก AgNPs ที่มีขนาดเล็กจะมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่า และสามารถเข้าไปในเนื้อเยื่อพืชได้ง่ายกว่า (Liu *et al.*, 2010)

### 4.3. ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ

การทดลองนี้เก็บน้ำตัวอย่างเพื่อนำมาวิเคราะห์ pH และความเข้มข้นของ AgNPs ในน้ำ โดยเก็บตัวอย่างน้ำจากทั้ง 2 ชุดการทดลอง คือ ชุดการทดลองที่ 1 การศึกษาการสลายตัวของ AgNPs ในน้ำและชุดการทดลองที่ 2 การศึกษาประสิทธิภาพในน้ำที่ปนเปื้อนของ AgNPs โดยจอก

#### 4.3.1 ผลการวิเคราะห์ pH ในตัวอย่างน้ำ

เมื่อเก็บตัวอย่างที่เวลาต่าง ๆ ตัวอย่างน้ำส่วนหนึ่งจะนำมาวัดค่า pH ด้วยเครื่อง pH meter เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงค่า pH ของน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs เนื่องจาก pH มีผลต่อการเจริญเติบโตของจอก ตัวอย่างน้ำที่ได้จะประกอบด้วยตัวอย่างน้ำจากชุดควบคุม ซึ่งจะเก็บตัวอย่างเมื่อเริ่มการทดลอง (เวลา 0 ชั่วโมง) และเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (48 ชั่วโมง) ตัวอย่างน้ำจากการศึกษาการสลายตัวของ AgNPs ซึ่งจะมีเพียงสารแขวนลอย AgNPs (ตารางที่ 4.3 และภาพที่ 4.11) และการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนของ AgNPs โดยจอก ซึ่งจะมีสารแขวนลอย AgNPs และจอก ตารางที่ 4.4 และภาพที่ 4.12

ตารางที่ 4.3 ค่า pH ของตัวอย่างน้ำในการศึกษาการสลายตัวของ AgNPs

ความเข้มข้นของ AgNPs (mg/L)	ขนาดของ AgNPs (nm)	เวลาที่เก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง)							
		0	1	2	4	6	12	24	48
0 (DI)	-	5.14	ND	ND	ND	ND	ND	ND	5.66
0.5	7	5.24	5.39	5.35	5.67	5.70	5.72	6.03	6.44
	50	5.89	5.65	5.71	5.70	5.71	5.85	5.84	5.88
1	7	5.54	5.81	6.22	6.17	5.97	5.88	5.57	6.19
	50	5.76	5.69	5.74	5.62	5.80	5.80	5.84	5.84
2	7	5.14	5.15	5.17	5.17	5.18	5.25	5.64	6.19
	50	6.00	5.88	5.88	5.85	5.80	5.87	6.00	6.06

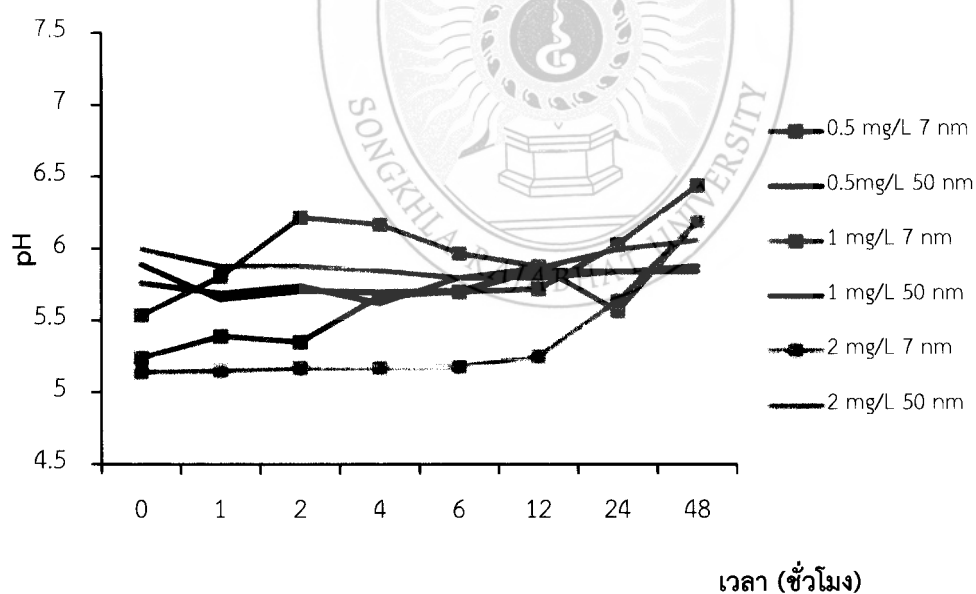
หมายเหตุ: ND (not determined) หมายถึง ไม่ได้ตรวจวัด

DI (deionized water) หมายถึง น้ำปราศจากไอออน

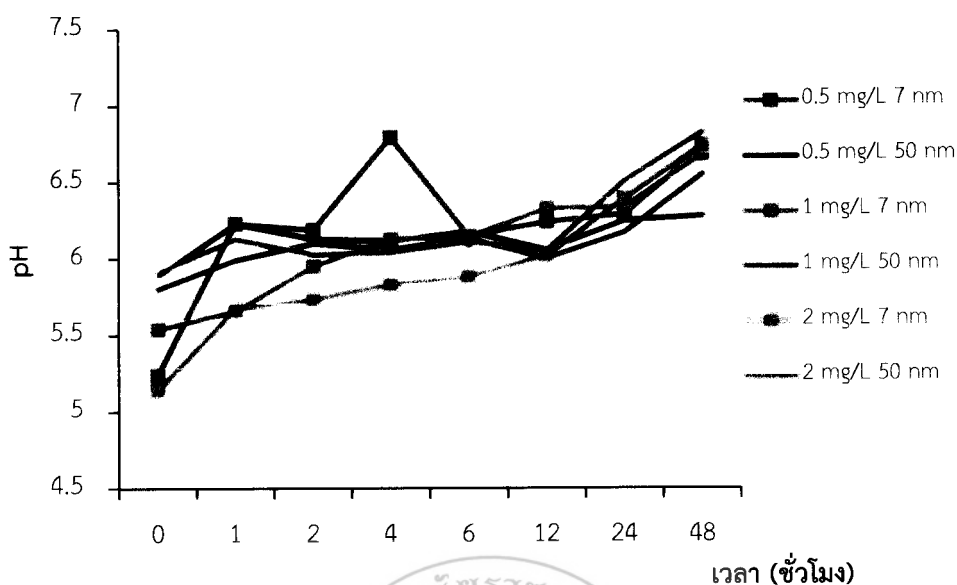
ตารางที่ 4.4 ค่า pH ของตัวอย่างน้ำในการศึกษาประสิทธิภาพของจอกในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อน AgNPs

ความเข้มข้นของ AgNPs (mg/L)	ขนาดของ AgNPs (nm)	เวลาที่เก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง)							
		0	1	2	4	6	12	24	48
0 (DI+P)	-	5.66	ND	ND	ND	ND	ND	ND	6.15
0.5	7	5.24	6.23	6.19	6.79	6.15	6.24	6.29	6.72
	50	5.89	6.23	6.13	6.12	6.18	6.06	6.25	6.28
1	7	5.54	5.66	5.95	6.13	6.15	6.33	6.34	6.68
	50	5.80	5.99	6.10	6.06	6.13	6.00	6.17	6.55
2	7	5.14	5.67	5.73	5.83	5.88	6.02	6.39	6.74
	50	5.91	6.13	6.03	6.04	6.11	6.06	6.51	6.83

หมายเหตุ: ND (not determined) หมายถึง ไม่ได้ตรวจวัด  
 DI (deionized water) หมายถึง น้ำปราศจากไอออน  
 P (plant) หมายถึง จอก



ภาพที่ 4.11 ค่า pH ของตัวอย่างน้ำ AgNPs ในการศึกษาการสลายตัวของ AgNPs



ภาพที่ 4.12 ค่า pH ของตัวอย่างน้ำ AgNPs ในการศึกษาประสิทธิภาพของจอก ในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อน AgNPs

จากตารางที่ 4.3 และ 4.4 และภาพที่ 4.11 และ 4.12 พบว่า เมื่อระยะเวลาผ่านไปค่า pH มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยค่า pH ของน้ำอยู่ในช่วง 5-7 (ระหว่าง 5.14 - 6.83) และพบว่า น้ำที่มีจอกมีแนวโน้มที่จะมีค่า pH สูงกว่าน้ำที่ไม่มีจอก เนื่องจากจอกดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ทำให้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำลดลง ค่า pH ของน้ำจึงมีค่าสูงขึ้น (Robert, 2019) แต่อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงของค่า pH ในการทดลองไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก และค่า pH ของน้ำในการทดลองนี้ยังอยู่ในช่วงที่จอกสามารถเจริญเติบโตได้ ซึ่งค่ามาตรฐานของ pH ในน้ำมีค่าระหว่าง 5.0 - 9.0 (กรมควบคุมมลพิษ, 2537) ดังนั้น ค่า pH ไม่น่าจะส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของจอก

#### 4.3.2 ความเข้มข้นของ AgNPs ในตัวอย่างน้ำ

ในการทดลองครั้งนี้ ได้วิเคราะห์ความเข้มข้นของ AgNPs ในตัวอย่างน้ำด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) ของ AgNPs ขนาด 7 นาโนเมตร เท่ากับ 395 นาโนเมตร และ AgNPs ขนาด 50 นาโนเมตร เท่ากับ 430 นาโนเมตร ซึ่งเก็บตัวอย่างน้ำจาก 2 ชุดการทดลอง คือ ชุดการทดลองที่ 1 การศึกษาการสลายตัวของ AgNPs ในน้ำ ส่วนชุดการทดลองที่ 2 การศึกษาประสิทธิภาพในน้ำที่ปนเปื้อนของ AgNPs โดยจอก ผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ความเข้มข้นของ AgNPs ในน้ำที่เวลาต่าง ๆ

ชุดการทดลอง	ขนาด AgNPs (nm)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)	เวลาที่เก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง)								
			0	1	2	4	6	12	24	48	
1 การสลายตัวของ AgNPs	7	0 (DI)	0.000	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.000
		0.5	0.381	0.397	0.366	0.371	0.384	0.366	0.379	0.389	
		1	0.959	0.961	0.956	0.974	1.006	0.969	0.948	0.980	
		2	1.729	1.763	1.695	1.753	1.750	1.716	1.716	1.836	
	50	0 (DI)	0.000	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.000
		0.5	0.752	0.758	0.747	0.781	0.741	0.775	0.764	0.769	
		1	0.421	0.426	0.415	0.438	0.421	0.455	0.432	0.460	
		2	1.442	1.425	1.459	1.459	1.402	1.472	1.453	1.498	
2) การศึกษาประสิทธิภาพในน้ำที่ปนเปื้อนของ AgNPs โดย จอก	7	0(DI+P)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.024	0.024	
		0.5	0.439	0.400	0.387	0.384	0.394	0.384	0.363	0.324	
		1	0.764	0.768	0.760	0.778	0.729	0.687	0.705	0.705	
		2	1.685	1.591	1.685	1.599	1.361	1.304	1.327	1.445	
	50	0(DI+P)	0.000	0.318	0.335	0.301	0.286	0.335	0.420	0.453	
		0.5	0.741	0.735	0.724	0.724	0.696	0.707	0.640	0.606	
		1	1.164	1.147	1.136	1.130	1.113	1.040	0.860	0.555	
		2	2.287	2.298	2.275	2.179	2.168	2.106	1.892	1.452	

หมายเหตุ: ND (not determined) หมายถึง ไม่ได้ตรวจวัด

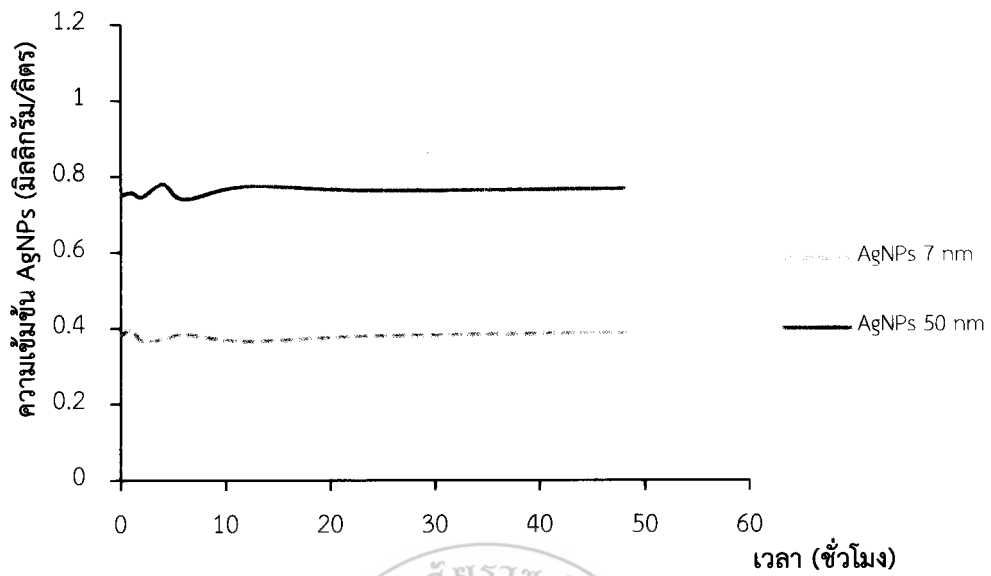
DI (deionized water) หมายถึง น้ำปราศจากไอออน

P (plant) หมายถึง จอก

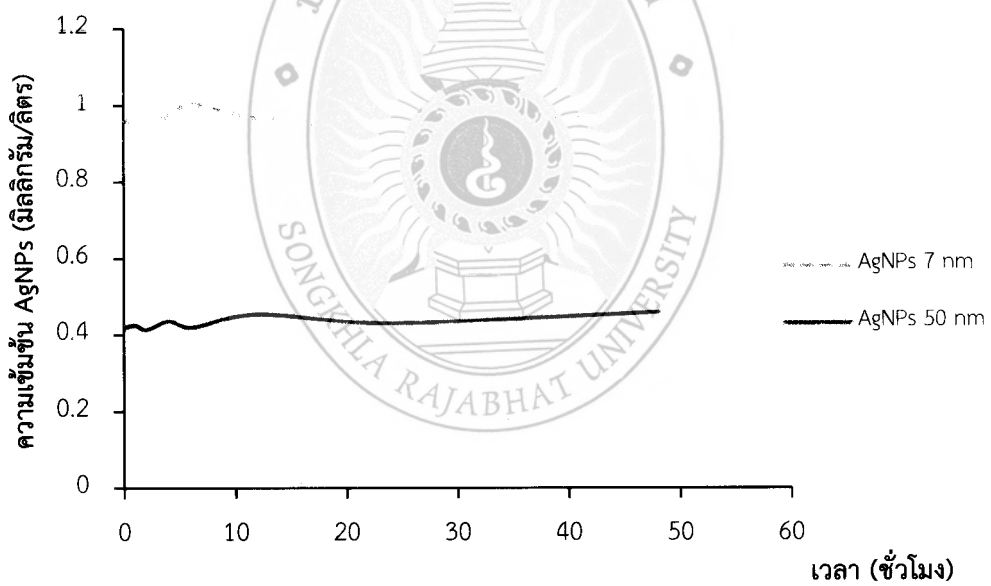
#### 1) การศึกษาการสลายตัวของ AgNPs

การศึกษาการสลายตัวของ AgNPs ตามธรรมชาติในสภาวะที่ทดลอง ทำโดยเก็บตัวอย่างนำมาวิเคราะห์ปริมาณ AgNPs ที่เวลาต่าง ๆ โดยใช้เครื่อง UV-Visible spectrophotometer ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.5 และดังภาพที่ 4.13-4.16

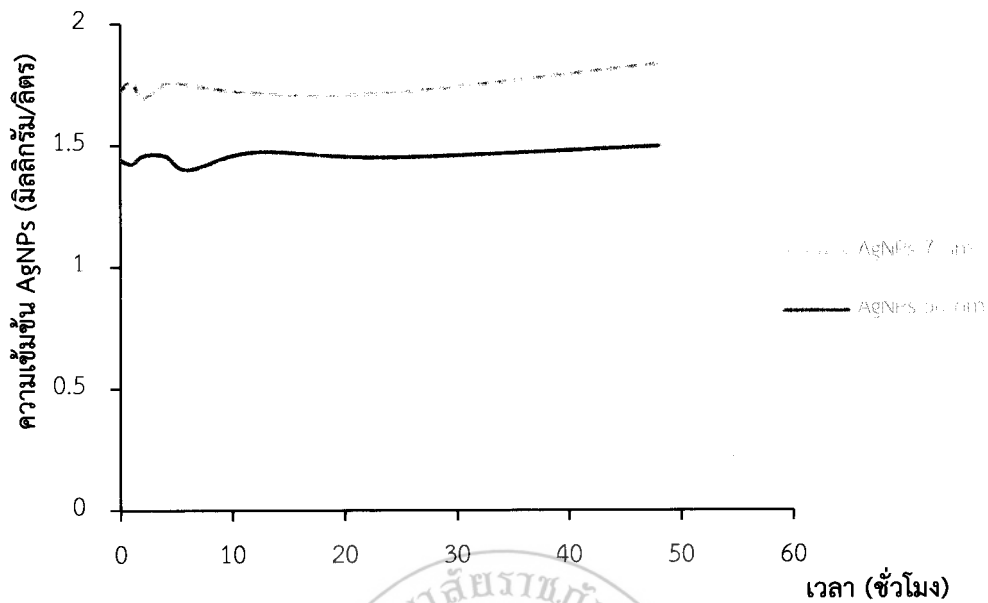




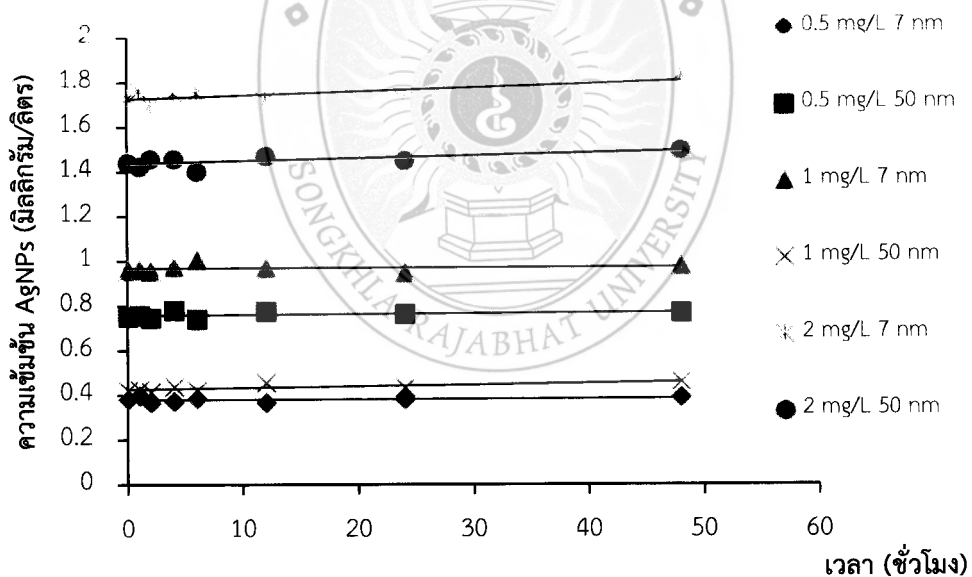
ภาพที่ 4.13 การสลายตัวของ AgNPs ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร



ภาพที่ 4.14 การสลายตัวของ AgNPs ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร



ภาพที่ 4.15 การสลายตัวของ AgNPs ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร



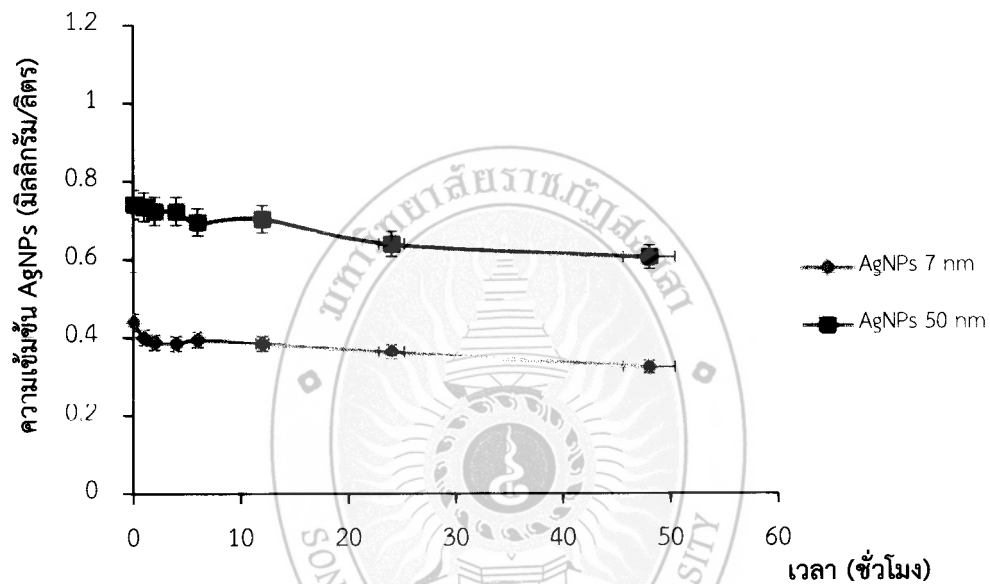
ภาพที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ AgNPs ขนาด 7 และ 50 นาโนเมตร ในการศึกษาการสลายตัวของ AgNPs ที่เวลาต่าง ๆ

จากภาพที่ 4.13-4.16 พบว่า เมื่อระยะเวลาผ่านไป ความเข้มข้นของ AgNPs ในน้ำมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ซึ่งจากการทดลองแสดงให้เห็นว่า AgNPs ในน้ำเกิดการสลายตัวในสภาวะที่ทดลองได้น้อย ในช่วงระยะเวลาที่ 48 ชั่วโมง ดังนั้น เมื่อ AgNPs ลงสู่สิ่งแวดล้อม อาจเป็นไปได้ว่า AgNPs อาจเกิดการสลายตัวตามธรรมชาติได้น้อย จึงควรมีการบำบัด AgNPs ก่อนปล่อยออกสู่

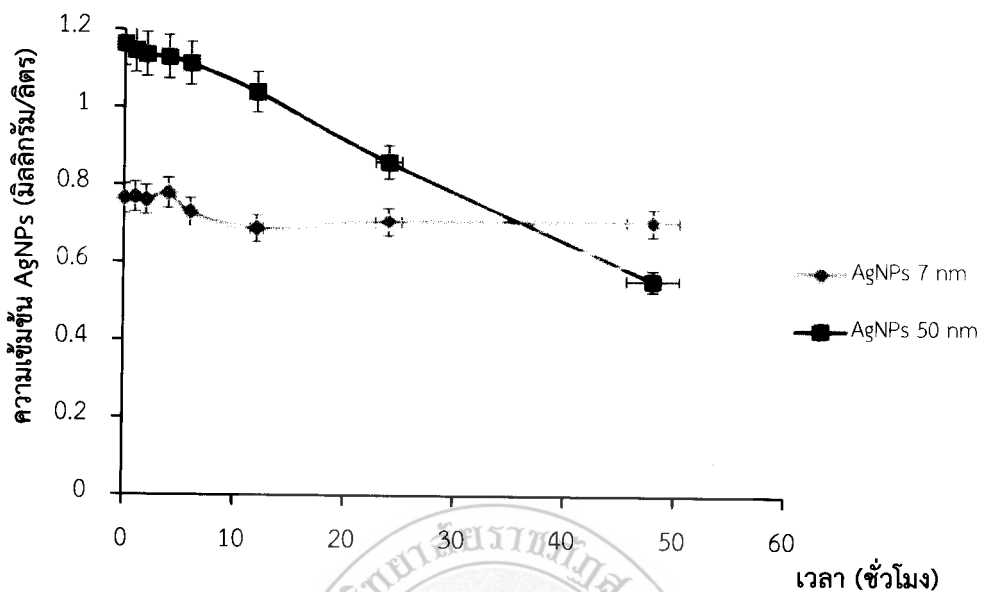
ธรรมชาติ ดังนั้น หากปริมาณ AgNPs ในน้ำที่มีจอกในการทดลองนี้ลดลง น่าจะเกิดจากการที่จอกดูดซับ AgNPs เข้าไป ซึ่งแสดงว่า จอกสามารถนำมาบำบัด AgNPs ออกจากน้ำได้

## 2) การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs โดยจอก

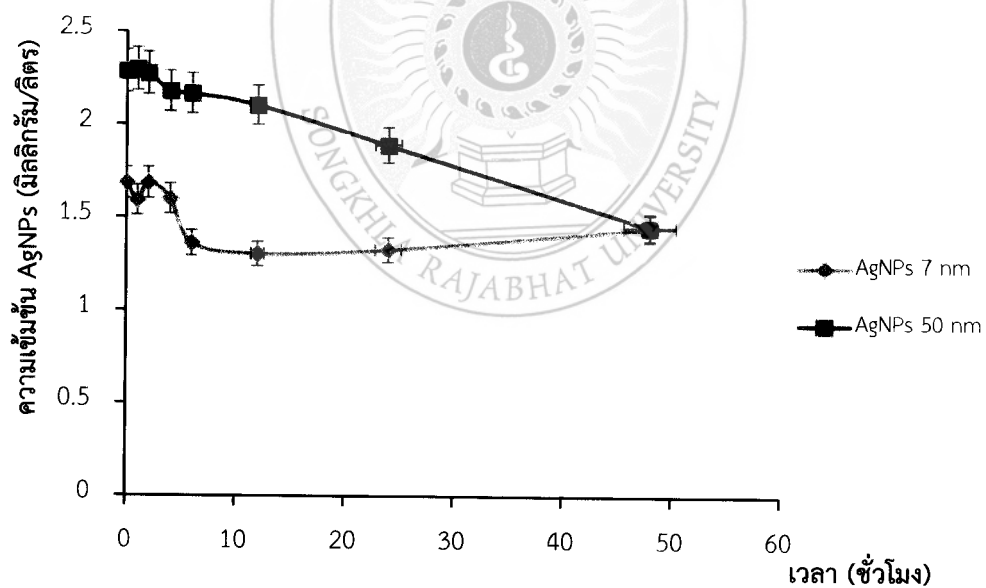
ในชุดการทดลองของการศึกษาประสิทธิภาพของจอกในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs ที่มีขนาด 7 และ 50 นาโนเมตร โดยควบคุมอุณหภูมิการทดลองที่  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.5 และภาพที่ 4.17-4.20



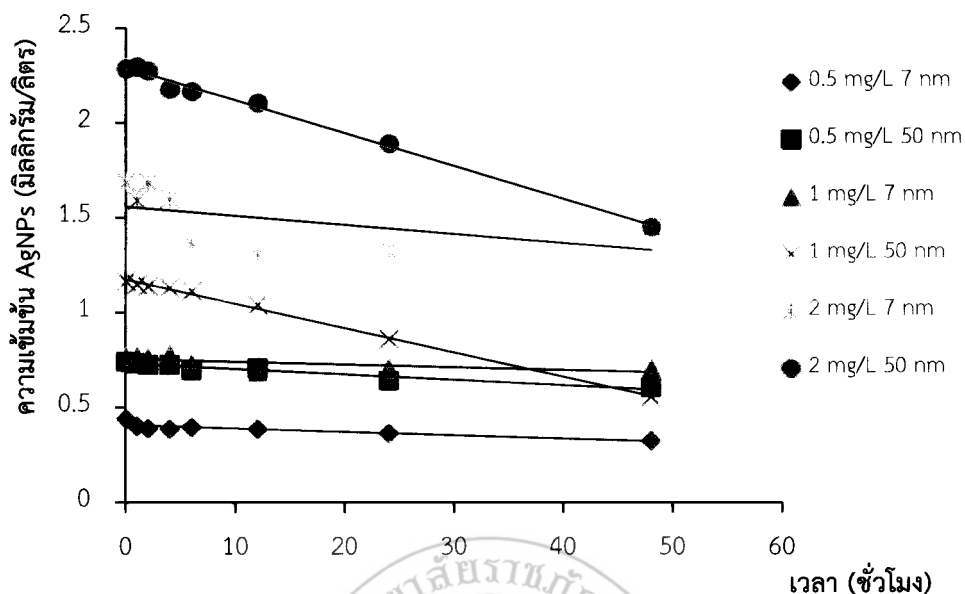
ภาพที่ 4.17 ความเข้มข้นของ AgNPs ในน้ำที่เวลาต่าง ๆ ในการศึกษาประสิทธิภาพของจอกในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร



ภาพที่ 4.18 ความเข้มข้นของ AgNPs ในน้ำที่เวลาต่าง ๆ ในการศึกษาประสิทธิภาพของจอก ในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs 1 มิลลิกรัมต่อลิตร



ภาพที่ 4.19 ความเข้มข้นของ AgNPs ในน้ำที่เวลาต่าง ๆ ในการศึกษาประสิทธิภาพของจอก ในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs 2 มิลลิกรัมต่อลิตร



ภาพที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ AgNPs ขนาด 7 และ 50 นาโนเมตร ในการศึกษาประสิทธิภาพของจอกในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs ที่เวลาต่าง ๆ

จากภาพที่ 4.17-4.20 พบว่า จอกสามารถบำบัด AgNPs ในน้ำได้ แต่ความสามารถในการบำบัดจะขึ้นอยู่กับขนาดของ AgNPs และระดับความเข้มข้นของ AgNPs โดยน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs ขนาด 7 นาโนเมตร ที่ความเข้มข้น 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร จอกมีลักษณะใบเริ่มอ่อนนึ่ม มีสีเขียวปนเหลือง ที่เวลา 48 ชั่วโมง ในขณะที่ความเข้มข้น 1 และ 2 มิลลิกรัม จอกมีลักษณะใบเริ่มอ่อนนึ่ม มีสีเขียวปนเหลือง ที่เวลา 6 และ 4 ชั่วโมง และตายที่เวลา 24 และ 48 ชั่วโมง ตามลำดับ ส่วนน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs ขนาด 50 นาโนเมตร ที่ความเข้มข้น 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร จอกมีลักษณะใบเริ่มอ่อนนึ่ม มีสีเขียวปนเหลือง ที่เวลา 48 ชั่วโมง ในขณะที่ความเข้มข้น 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร จอกมีลักษณะใบเริ่มอ่อนนึ่ม มีสีเขียวปนเหลือง ที่เวลา 24 และ 12 ชั่วโมง ตามลำดับ และตายเมื่อได้รับ AgNPs ขนาด 50 นาโนเมตร ที่ความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร นาน 48 ชั่วโมง

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ขนาดอนุภาคและความเข้มข้นของ AgNPs มีผลต่อความเป็นพิษของจอก โดย AgNPs ที่มีขนาดเล็ก (7 นาโนเมตร) จะมีความเป็นพิษมากกว่า AgNPs ขนาดใหญ่ (50 นาโนเมตร) เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กมีแนวโน้มที่จะแพร่ผ่านเนื้อเยื่อจอกได้ง่ายกว่า ทำให้เข้าไปในจอกได้เร็วกว่า (พรพิมล ห่อสุวรรณชัย, 2542)

นอกจากนี้ จะเห็นได้ว่า ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของ AgNPs มีผลต่อการดูดซึมของจอก โดยในช่วงระยะเวลาแรก จอกจะสามารถดูดซึมได้มาก เนื่องจากที่ระดับความเข้มข้นของ AgNPs สูงจะทำให้การแพร่ของ AgNPs สู่มวลของจอกเกิดอย่างรวดเร็ว และเมื่อระยะเวลาผ่านไป ปริมาณความเข้มข้นในน้ำลดลง เนื่องจาก AgNPs ถูกสะสมไว้ในตัวจอก (ลัดดาวัลย์ ช้องบ้านโขง, 2550)

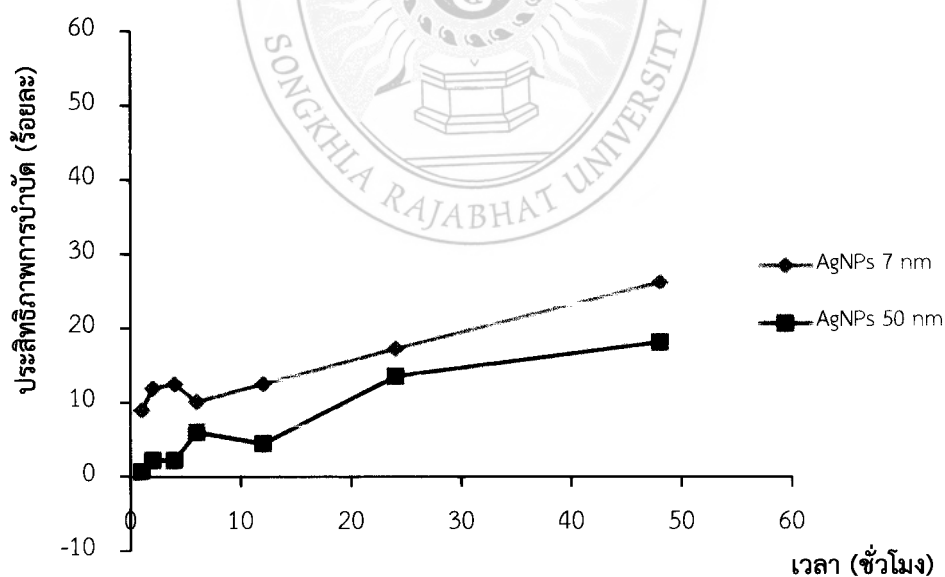
#### 4.4 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs ของจอก

จากการนำจอกไปทดลองดูดซึม AgNPs ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำ เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของจอกในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs นั้น ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.6 และภาพที่ 4.21-4.23

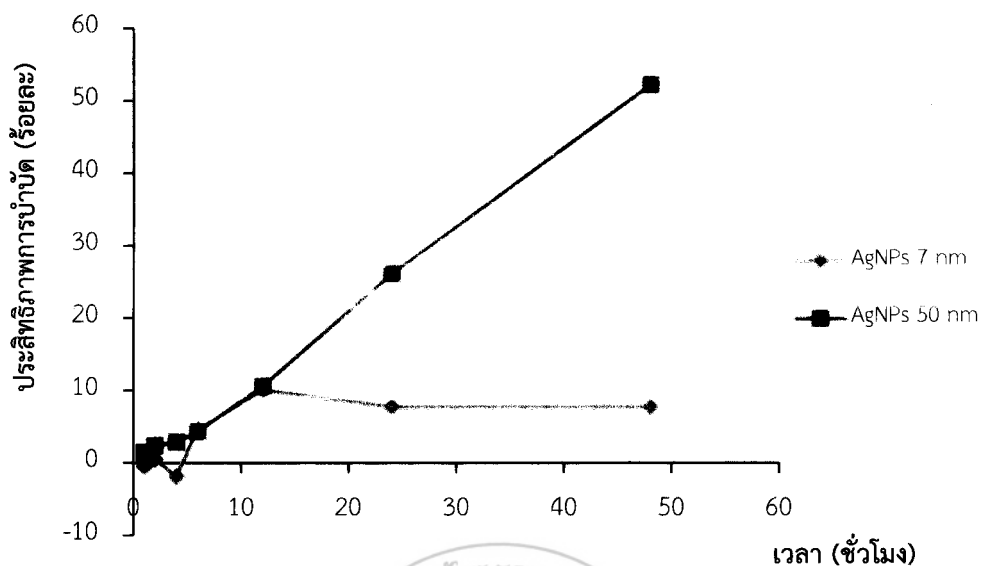
ตารางที่ 4.6 ประสิทธิภาพของจอกในการบำบัด AgNPs

ขนาด AgNPs (nm)	ความเข้มข้นของ AgNPs (mg/L)	ร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดที่เวลาต่าง ๆ (ชั่วโมง)							
		0	1	2	4	6	12	24	48
7	0.5	0.00	8.96	11.93	12.53	10.15	12.53	17.29	26.21
	1	0.00	N/A	0.50	N/A	4.60	10.07	7.68	7.68
	2	0.00	5.58	N/A	5.12	19.23	22.64	21.24	14.27
50	0.5	0.00	0.75	2.27	2.27	6.07	4.55	13.69	18.25
	1	0.00	1.44	2.41	2.90	4.35	10.65	26.15	52.32
	2	0.00	N/A	0.51	4.71	5.20	7.91	17.28	36.52

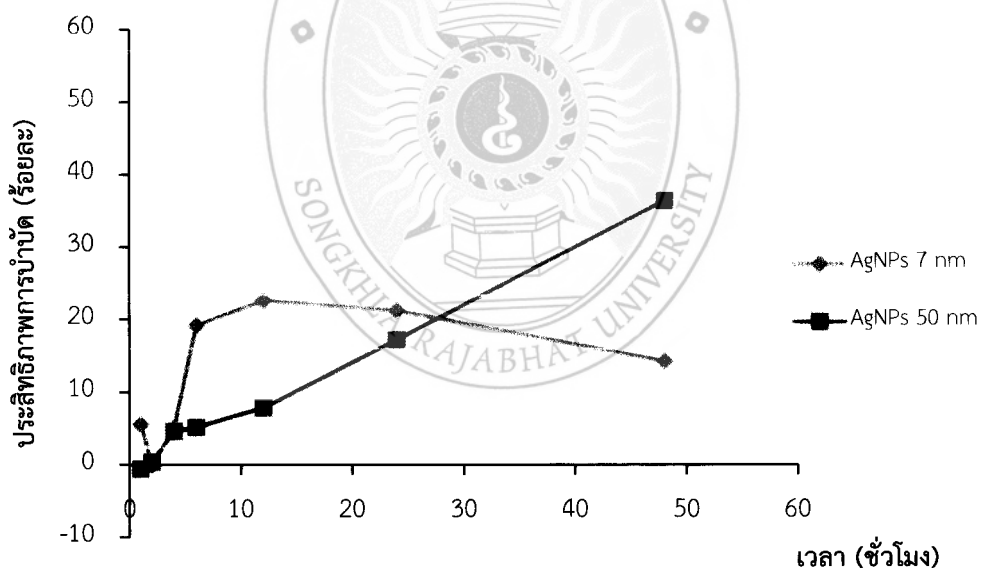
หมายเหตุ: N/A (not applicable) หมายถึง ค่าต่ำกว่า detection limit



ภาพที่ 4.21 ประสิทธิภาพของจอกในการบำบัด AgNPs ขนาด 7 และ 50 นาโนเมตรที่เวลาต่าง ๆ ที่ความเข้มข้น 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร



ภาพที่ 4.22 ประสิทธิภาพของจอกในการบำบัด AgNPs ขนาด 7 และ 50 นาโนเมตรที่เวลาต่าง ๆ ที่ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร



ภาพที่ 4.23 ประสิทธิภาพของจอกในการบำบัด AgNPs ขนาด 7 และ 50 นาโนเมตรที่เวลาต่าง ๆ ที่ความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากตารางที่ 4.6 และภาพที่ 4.21–4.23 พบว่า จอกสามารถบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs ได้ เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของจอกในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs ทั้ง 2 ขนาด จอกมีแนวโน้มในการบำบัด AgNPs ขนาด 7 นาโนเมตร ได้เร็วกว่า AgNPs ขนาด 50 นาโนเมตร เนื่องจาก AgNPs ขนาด 7 นาโนเมตรมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า ทำให้เข้าสู่จอกได้เร็วกว่า แต่จะมีความ

เป็นพิษมากกว่า ซึ่งประสิทธิภาพการบำบัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปมากขึ้น และจะค่อย ๆ ลดลง เมื่อการเจริญเติบโตของจอกลดลง จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของจอกในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs ขนาด 7 และ 50 นาโนเมตร โดยใช้สถิติแบบ t-test (ภาคผนวก ค) พบว่า ประสิทธิภาพของจอกในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs ขนาด 7 และ 50 นาโนเมตร แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) แสดงให้เห็นว่าขนาดของอนุภาคมีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัด AgNPs ด้วยจอก โดยจอกมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs ขนาด 7 นาโนเมตร ได้ดีที่ระดับต่ำกว่าความเข้มข้น 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs ขนาด 50 นาโนเมตร จอกมีประสิทธิภาพในการบำบัดได้ดีที่ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการศึกษาี้ จอกมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อน AgNPs ขนาด  $20 \pm 10$  นาโนเมตร ที่ระดับความเข้มข้นไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hanks *et al.* (2015) ที่พบว่า จอกสามารถใช้บำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs ที่ความเข้มข้น 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ความเข้มข้น 2 mg/L ทำให้จอกตาย





## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาผลของขนาดอนุภาคต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs โดยจอก โดยศึกษา AgNPs 2 ขนาด คือ ขนาด 7 และ 50 นาโนเมตร ที่ระดับความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งแบ่งชุดการทดลองออกเป็น 2 ชุดการทดลอง คือ ชุดการทดลองที่ 1 ศึกษาการสลายตัวของ AgNPs ชุดการทดลองที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพของจอกในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs และเก็บตัวอย่างที่เวลา 0, 1, 2, 4, 6, 12, 24 และ 48 ชั่วโมง สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

การทดลองครั้งนี้ เป็นการทดลองที่ใช้จอกในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs เนื่องจากมีต้นทุนต่ำ ประหยัดพลังงาน อีกทั้งยังเป็นวิธีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แต่ในขณะเดียวกันการใช้วิธีนี้มีข้อเสีย คือ ใช้ระยะเวลาในการบำบัด และ AgNPs อาจมีความเป็นพิษต่อจอก ทำให้ไม่สามารถบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs ที่ความเข้มข้นสูง ๆ ได้

จากผลการทดลอง พบว่า จอกสามารถนำมาใช้ในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs ได้ที่ความเข้มข้นต่ำ คือ ความเข้มข้น  $\leq 0.5$  มิลลิกรัมต่อลิตร โดยจะเห็นได้ว่า เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น ปริมาณ AgNPs ในน้ำลดลง สภาพของจอกเริ่มมีการเปลี่ยนแปลง เริ่มตั้งแต่ใบเริ่มอ่อนนิ่ม มีสีเหลืองจนรากหลุดและตาย อีกทั้งยังพบว่า ปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบจอกลดลง เมื่อได้รับ AgNPs เพิ่มขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของจอกในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs ทั้ง 2 ขนาด พบว่า จอกสามารถกำจัด AgNPs ขนาด 7 นาโนเมตร ได้เร็วกว่า AgNPs ขนาด 50 นาโนเมตร เนื่องจาก AgNPs ขนาด 7 นาโนเมตรมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า จึงเข้าสู่จอกได้เร็วกว่า แต่จะส่งผลให้มีความเป็นพิษมากกว่า ทำให้จอกที่ได้รับ AgNPs ขนาด 7 นาโนเมตร ตายเร็วกว่าจอกที่ได้รับ AgNPs ขนาด 50 นาโนเมตร

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า จอกสามารถบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs ขนาด 7 และ 50 นาโนเมตร ได้ โดยขนาด ความเข้มข้น และระยะเวลาที่ได้รับ AgNPs มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดของจอก และสามารถใช้ออกบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs ที่ความเข้มข้นไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ควรเลือกใช้เครื่องมือวิเคราะห์ที่ละเอียด และมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยที่สามารถวิเคราะห์  $\text{Ag}^+$  และ AgNPs โดยตรง เช่น เครื่อง atomic absorption spectroscopy (AAS) หรือเครื่อง inductivity couple plasma-optical emission spectrometer (ICP-OES)

2) ควรเพิ่มระยะเวลาการทดลองให้นานขึ้น เพื่อให้สามารถสังเกตการณ์เจริญเติบโตของจอกได้

3) ควรทำการทดลองซ้ำ เพื่อให้ได้ผลที่มีความถูกต้อง แม่นยำ และน่าเชื่อถือมากขึ้น

4) ควรวิเคราะห์ปริมาณ AgNPs ในตัวอย่างจอก เพื่อเพิ่มความถูกต้อง และแม่นยำของผลการทดลอง

5) ในการทดลองอาจจะใช้พีชน้ำชนิดอื่นร่วมกับจอก เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสาร AgNPs

6) ในการศึกษาครั้งต่อไป ควรนำน้ำเสียจากแหล่งกำเนิดจริงหรือยังไม่ผ่านการบำบัดใด ๆ มาทำการทดลอง



## บรรณานุกรม

- กรมควบคุมมลพิษ. (2537). **มาตรฐานคุณภาพน้ำ**. (Online). [http://www.pcd.go.th/info\\_serv/reg\\_std\\_water04.html](http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water04.html), 22 พฤศจิกายน 2560.
- กรมควบคุมมลพิษ. (2541). **คู่มือการเก็บตัวอย่างน้ำ**. (Online). [http://infofile.pcd.go.th/water/analysis\\_waste.pdf](http://infofile.pcd.go.th/water/analysis_waste.pdf), 22 พฤศจิกายน 2561.
- ดวงรัตน์ อินทร. (2554). **เทคโนโลยีการบำบัดดินและน้ำที่ปนเปื้อนโลหะหนักโดยใช้พีช**. <http://ns2.ph.mahidol.ac.th/phklb/knowledgefiles/2.pdf>, 20 กันยายน 2560.
- พรพิมล ท่อสุวรรณชัย. (2542). **การบำบัดโลหะหนักบางชนิดในน้ำเสียชุมชนโดยวิธีหญากรอง**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ภาคภูมิ พระประเสริฐ. (2550). **สรีรวิทยาของพีช**. กรุงเทพมหานคร: โอเดียนสโตร์.
- มหาวิทยาลัยนเรศวร. (2551). **ข้อมูลความปลอดภัยของวัสดุนาโน**. (Online). <http://web.eng.nu.ac.th/eng2012/cei/nanodatabase/info.php>, 18 กันยายน 2560.
- มาลีญา เครือตราชู. (2553). **การบำบัดดินและน้ำที่ปนเปื้อนด้วยสารตะกั่วโดยใช้พีช**. (Online). <http://www.eht.sc.mahidol.ac.th/article/509>, 20 กันยายน 2560.
- ลัดดาวัลย์ ช้องบ้านโขง. (2550). **การศึกษาความสามารถในการดูดซึมโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำด้วยสาหร่ายเส้นด้าย**. ปัญหาพิเศษปริญญาตรี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วงศ์ผกา จำปา. (2551). **การศึกษาความสามารถในการดูดซึมโลหะหนักในน้ำที่ปนเปื้อนด้วยสาหร่ายพวงกะโด**. ปัญหาพิเศษปริญญาตรี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สิริพร บริรักษ์วิสิฐศักดิ์. (2549). **การบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วยสารกลุ่ม BTEX โดยพุทธรักษาในระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลผ่านชั้นกรองในแนวนอน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- สุชาติ ศรีเพ็ญ. (2542). **พรรณไม้ในประเทศไทย**. กรุงเทพมหานคร: อมรินทร์พริ้นติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง.
- สุพิน แสงสุข. (2550). **นาโนเทคโนโลยีและความปลอดภัย**. สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ. (Online). <http://www.material.chula.ac.th/Articles/article1.html>, 18 กันยายน 2560.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- Asharani, P. V., Nair, G., Zhiyuan, H., Manoor, P., and Valiyaveettil, S. (2007). Potential health impacts of silver nanoparticles. In **ACS National Meeting**. Boston, MA and USA, 19-23
- Asharani, P. V., Wu, Y. L., Gong, Z., and Valiyaveettil, S. (2008). Toxicity of silver nanoparticle in zebrafish models. **Nanotechnology**. 19(25), 255102-1 - 255102-8.
- Baker, A. J. M. (1981). Accumulators and excluders strategies in the response of plants to heavy metals. **Plant Nutrient**. 3(1-4), 643-654.
- Bar-Ilan, O., Ralph, M., Albrecht, V. E. and Furgeson, D. Y. (2009). Toxicity assessments of multisized gold and silver nanoparticles in zebrafish embryos. **Small**. 5(16), 1897-1910.
- Buric, P., Jaksic, Z., Stajner, L., Sikiric, M. D., Jurasin, D., Cascio, L. and Lyons, D. M. (2015). Effect of silver nanoparticles on Mediterranean Sea urchin embryonal development is species specific and depends on moment of first exposure. **Marine Environmental Research**. 111, 50-59.
- Chaloupka, K., Malam, Y. and Seifalian, A. M. (2010). Nanosilver as a new generation of nanoparticle in biomedical applications. **Trends in Biotechnology**. 28(10), 580-588.
- Dastjerdi, R. and Montazer, M. (2010). A review on the application of inorganic nano-structured materials in the modification of textiles: Focus on anti-microbial properties. **Colloids Surf B Biointerfaces**. 79(1), 5-18.
- EPA. (2003). **Maximum contaminant level (MCLs) for drinking water**. (Online). <https://www.epa.gov/safewater>, October 3, 2017.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- Martinez-Castanon, G. A., Nino-Martinez, N., Martinez-Gutierrez, F., Martinez-Mendoza, J. R. and Ruiz, F. (2008). Synthesis and antibacterial activity of silver nanoparticles with different sizes. **Journal of Nanoparticle Research**. 10(8), 1343-1348.
- Giao, N. T., Limpiyakorn, T. and Siripiattanakul-Ratpukdi, S. (2016). “Impact of silver nanoparticle on ammonia oxidation by nitrifying sludge”. ใน **การประชุมวิชาการวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมในอัตโนมัติระดับชาติ ครั้งที่ 3**. 25-26 พฤศจิกายน 2559. ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 155-161.
- Glasswarechemical. (2014). **UV-Vis spectrophotometer principle**. (Online). <http://glasswarechemical.com/scientific-instrument>, September 18, 2017.
- Goswami, L., Kim, K. H., Deep, A., Das, P., Bhattacharya, S. S., Kumar, S. and Adelodun, A. A. (2017). Engineered nano particles: Nature, behavior, and effect on the environment. **Journal of Environmental Management**. 196, 297-315.
- Gottschalk, F., Kost E. and Nowack, B. (2013). Engineered nanomaterials in water and soil: a risk quantification based on probabilistic exposure and effect modeling: engineered nanomaterials in water and soil. **Environmental Toxicology and Chemistry**. 32(6), 1278-1287.
- Hanks, N. A., Caruso, J. A. and Zhang, P. (2015). Assessing *Pistia stratiotes* for phytoremediation of silver nanoparticle and Ag(I) contaminated waters. **Journal of Environmental Management**. 164, 41-45.
- Hendren, C. O., Badireddy, A. R., Casman, E. and Wiesner, M. R. (2013). Modeling nanomaterial fate in wastewater treatment: Monte Carlo simulation of silver nanoparticles (nano-Ag). **Science of the Total Environment**. 449, 418-425.

**บรรณานุกรม (ต่อ)**

- Hood, E. (2004). Nanotechnology: looking as we leap. **Environmental Health Perspectives**. 112(13), A740-A749.
- Jana, N. R., Gerarheat, L. and Mouphey, C.J. (2001). Wet chemical synthesis of silver nanorods and nanowires of controllable aspect ratio. **Chemical Communications**. 7, 617-618.
- Kamal, M., A. E. Ghaly, N. and Mahmouda, R. C. (2004). Phytoaccumulation of heavy metals by aquatic plants. **Environment International**. 29(8), 1029-1039.
- Liu, W., Wu, Y., Wang, C., Li, H. C., Wang, T., Liao, C., Cui, L., Zhou, Q. F., Yan, B. and Jiang, G. B. (2010). Impact of silver nanoparticles on human cells: effect of particle size. **Nanotoxicology**. 4(3), 319-330.
- Mahasawat, P., Mudtaleb, S. and Eaidprap, P. (2018). The influence of silver nanoparticle sizes on antibacterial activity, cytotoxicity and genotoxicity of alginate hydrogel beads containing silver nanoparticles. **Applied Mechanics and Materials**. 886, 70-77.
- Mueller, N. C. and Nowack, B. (2008). Exposure modeling of engineered nanoparticles in the environment. **Environmental Science & Technology**. 42(12), 4447-4453.
- Odjegba V. J. and Fasidi, I. O. (2004). Accumulation of trace elements by *Pistia stratiotes* L.: implications for phytoremediation. **Ecotoxicology**. 13(7), 637-646.
- Price, O. T., Asgharian, B., Miller, F. J., Cassee, F. R. and de Winter-Sorkina, R. (2002). Multiple Path Particle Dosimetry model (MPPD v1.0): A model for human and rat airway particle dosimetry. **Genetics**. 161(2), 721-731.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- Promptong, P. (2014). Determinants of silver nanoparticle toxicity. **Ph.D. Thesis**, Degree of Doctor of Philosophy, Faculty of Medical and Human Sciences, Manchester University, United Kingdom.
- Pronk, M. E. J., Wijnhoven, S. W. P., Bleeker, E. A. J., Heugens, E. H. W., Peijnenburg, W. J. G. M., Luttik, R. and Hakker, B. C. (2009). **Nanomaterials under REACH: nanosilver as a case study**, National Institute for Public Health and the Environment, The Netherlands.
- Robert Boumis. (2019). **effect of aquarium plant on pH**. (Online). <http://animals.mom.me>, April 15, 2019.
- Sun, T. Y., Gottschalk, F., Hungerbühler, K. and Nowack, B. (2014). Comprehensive modeling of environmental emission of engineered nanomaterials. **Environmental Pollution**. 185, 69-76.
- Sushera B. (2004). **Phytoremediation of cadmium contaminated wetland using aquatic macrophytes**. (Online). <http://www.sciencedirect.com>, September 18, 2017.
- Wang, J. C., Neogi, P. and Forciniti, D. (2006). On one-dimensional self-assembly of surfactant-coated nanoparticles. **The Journal of Chemical Physics**. 125(19), 194717-1 – 19471-6.
- Wilkinson, S., Croft, D. R., O'Prey, J., Meedendorp, A., O'Prey, M., Dufès, C. and Ryan, K. M. (2011). The cyclin-dependent kinase PITSLRE/CDK11 is required for successful autophagy. **Autophagy**. 7(11), 1295-1301.
- Winkelmann, K., Benas, L., Swiger, B. and Brown, S. (2017). Measurement of chlorophyll loss due to phytoremediation of Ag nanoparticles in the first-year laboratory. **Journal of Chemical Education**. 94(6), 751-757.



**ภคผนวก**







## โครงร่างวิจัยเฉพาะทาง

### 1. ชื่อโครงการ

ภาษาไทย ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วยซิลเวอร์นาโนพาร์ติเคิล โดยจอก (*Pistia stratiotes*. L): ผลของขนาดพาร์ติเคิล

ภาษาอังกฤษ The Efficiency of Phytoremediation for Silver Nanoparticles-Contaminated Water by *Pistia stratiotes*: Effect of Particle Size

### 2. สาขาวิชา เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม

3. ชื่อผู้วิจัย นางสาวนุรฮากีมา เจาะและ รหัส 584232006  
 นักศึกษาปริญญาตรี สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม  
 คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี  
 มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

นางสาวฟาฏอนะฮ์ ยาโงะ รหัส 584232007  
 นักศึกษาปริญญาตรี สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม  
 คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี  
 มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

### 4. คณะกรรมการที่ปรึกษาวิจัยเฉพาะทาง

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ดร.สิริพร บริรักษ์วิสิฐศักดิ์  
 คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี  
 มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.ภวิกา มหาสวัสดิ์  
 คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี  
 มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

## 5. ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

ปัจจุบันความก้าวหน้าของวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีต่าง ๆ ได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของมนุษย์และสังคมเป็นอย่างมาก นาโนเทคโนโลยี เป็นอีกหนึ่งเทคโนโลยีที่มีการพัฒนาและเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา มีการนำธาตุหลายชนิดมาผลิตให้อยู่ในรูปของนาโนพาร์ติเคิล (Nanoparticle; NP) เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ NPsเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กอยู่ในช่วง 1-100 นาโนเมตร ซึ่งมีสมบัติทางเคมีและทางกายภาพที่พิเศษแตกต่างไปจากอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ ทำให้NPsที่ผลิตได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย (Wang *et al.*, 2006) หนึ่งใน NPsที่นิยมใช้เป็นอย่างมาก คือ ซิลเวอร์นาโนพาร์ติเคิล (Silver Nanoparticles; AgNPs) โดยมีปริมาณการผลิตประมาณ 500 ตันต่อปี (Buric *et al.*, 2015) ใน AgNPs มีคุณสมบัติสามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ดี ทำให้ถูกนำไปใช้เป็นส่วนผสมผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น เสื้อผ้า เครื่องมือทางการแพทย์ เครื่องสำอาง อุปกรณ์ทางไฟฟ้า และเครื่องใช้ภายในบ้าน เป็นต้น ดังนั้นจึงอาจทำให้ AgNPsปนเปื้อนออกมาสู่สิ่งแวดล้อม ทั้งจากการปล่อยน้ำทิ้งที่ปนเปื้อน AgNPs จากโรงงาน อาคารบ้านเรือน ลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ทำให้มี AgNPs สะสมในสิ่งแวดล้อมและส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต ซึ่งองค์การอนามัยโลก (World Health Organization; WHO) ได้มีการกำหนดความเข้มข้นสูงสุดของ AgNPs ในน้ำดื่มไว้ที่ 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร

หนึ่งในวิธีการบำบัดน้ำเสียที่ได้รับความสนใจอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน คือ การใช้พืชบำบัดสารปนเปื้อน (Phytoremediation) ซึ่งเป็นวิธีที่ประหยัดและมีประสิทธิภาพ จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า จอก (*Pistia stratiotes* L.) สามารถบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs ได้ (Hanks *et al.*, 2015) อย่างไรก็ตามยังไม่มีงานวิจัยที่ศึกษาถึงผลของขนาดของ AgNPs ที่มีต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำของจอก รวมทั้งความสามารถของจอกในการทนทานต่อ AgNPs ที่มีขนาดอนุภาคต่างกัน ซึ่งจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า ความเป็นพิษของ AgNPs ขึ้นอยู่กับขนาดของ AgNPs เนื่องจากอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวมากกว่า ทำให้มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่า โดยอนุภาคที่มีขนาดเล็กมีความเป็นพิษมากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ (Liu *et al.*, 2010)

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของจอกในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs ที่มีขนาดต่างกัน โดยใช้ AgNPs ขนาด 7 นาโนเมตรและ 50 นาโนเมตร รวมทั้งศึกษาถึงสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจอกในน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs เพื่อให้ทราบถึงความสามารถของจอกในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs ที่มีขนาดต่างกัน และเป็นแนวทางในการใช้พืชบำบัด AgNPs

## 6. วัตถุประสงค์

- 6.1 เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจอกในน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs
- 6.2 เพื่อศึกษาผลของขนาดของ AgNPs ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs ด้วยจอก

## 7. สมมติฐาน

- 7.1 ความเข้มข้นของ AgNPs และระยะเวลาที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของจอก
- 7.2 ประสิทธิภาพของจอกในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs ขนาด 7 นาโนเมตร และ 50 นาโนเมตร แตกต่างกัน

## 8. ตัวแปร

### ตัวแปรต้น หรือตัวแปรอิสระ (independent variable)

ขนาดของ AgNPs ความเข้มข้นของ AgNPs เริ่มต้น ระยะเวลา

### ตัวแปรตาม (dependent variable)

ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs โดยจอกและการเจริญเติบโตของจอก

### ตัวแปรควบคุม (control variable)

อุณหภูมิ ปริมาณน้ำ ลักษณะทางกายภาพของจอก

## 9. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 9.1 ทราบถึงความสามารถของจอกในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs ที่มีขนาดต่างกัน
- 9.2 สามารถนำวัชพืชน้ำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยการนำไปใช้ในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs
- 9.3 เป็นแนวทางในการบำบัดน้ำด้วยเทคโนโลยีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมแทนการบำบัดน้ำโดยใช้สารเคมีและไม่ทำลายทัศนียภาพ

## 10. ขอบเขตการวิจัย

### 10.1 พืชที่ใช้ทดลอง

จอกจากแหล่งน้ำภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา โดยใช้จอกที่มีรูปร่าง ขนาด และ น้ำหนักใกล้เคียงกัน

### 10.2 ซิลเวอร์นาโนพาร์ติเคิล

ได้รับความอนุเคราะห์จากสาขาเทคโนโลยีชีวภาพ โปรแกรมชีววิทยาและชีววิทยา ประยุกต์

10.2.1 ขนาดของอนุภาค AgNPs ที่ใช้ทดลอง 2 ขนาด คือ 7 นาโนเมตร และ 50 นาโนเมตร

10.2.2 ความเข้มข้นของ AgNPs ในน้ำที่ใช้ทดลอง คือ 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร

### 10.3 ระยะเวลาที่ใช้ทดลอง

เก็บตัวอย่างที่เวลาต่าง ๆ ได้แก่ 0, 1, 2, 6, 12, 24 และ 48 ชั่วโมง

### 10.4 สถานที่ทำการทดลอง

ดำเนินการทดลองและวิเคราะห์ ณ ห้องปฏิบัติการ อาคารปฏิบัติการ เทคโนโลยีชีวภาพ และห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

## 11. นิยามศัพท์เฉพาะ

11.1 ประสิทธิภาพ (efficiency) หมายถึง ความสามารถของจอกในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อน ด้วย AgNPs

11.2 จอก (*Pistia stratiotes* L.) หมายถึง พันธุ์ไม้้ำประเภทลอยน้ำอยู่ในวงศ์ Araceae เป็นพืชที่เหมาะสมสำหรับบำบัดน้ำ เนื่องจากมีระบบรากขนาดใหญ่ พบได้ตามแหล่ง น้ำ (Hanks *et al.*, 2015)

11.3 ซิลเวอร์นาโนพาร์ติเคิล (silver nanoparticles) หมายถึง อนุภาคของซิลเวอร์ที่มี ขนาดเล็กระดับนาโนเมตร (ในช่วง 1-100 นาโนเมตร) (Hood, 2004)

11.4 การบำบัดน้ำโดยใช้พืช (phytoremediation) หมายถึง การใช้พืชในการบำบัดสารมลพิษทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์ที่ปนเปื้อนในดิน น้ำ อากาศ เพื่อลดอันตรายของสารมลพิษต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม เป็นวิธีการที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Hanks *et al.*, 2015)

## 12. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Hanks *et al.* (2015) ได้ศึกษาการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs และซิลเวอร์ไอออนด้วยจอก (*Pistia stratiotes*) โดยความเข้มข้นที่ใช้ทดลองแตกต่างกัน ดังนี้ 0.02, 0.2 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า จอกสามารถดูดซับ AgNPs และซิลเวอร์ไอออนได้และสามารถย่อยรอดที่ความเข้มข้นต่ำสุด คือ 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้ยังพบว่าจอกมีประสิทธิภาพสูงในการสะสมโลหะหนักและมีความสามารถในการดูดซับสารอาหารสูงเช่นกัน อีกทั้งยังเป็นพืชที่มีอัตราการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วและสามารถลดการบำบัด AgNPs จนมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่องค์การอนามัยโลกกำหนด (0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร)

Giao *et al.* (2559) ได้ศึกษาผลของ AgNPs ต่อกระบวนการออกซิเดชันแอมโมเนียด้วยสลัดจ์ในตรีฟายอิง พบว่า AgNPs ที่ความเข้มข้น 1-100 มิลลิกรัมต่อลิตรยับยั้งปฏิกิริยาแอมโมเนียออกซิเดชันร้อยละ  $90 \pm 8.6$  ถึง  $94.8 \pm 4.3$  บ่งชี้ได้ว่า AgNPs ยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์แอมโมเนียออกซิเดเซอร์ ทำให้การบำบัดแอมโมเนียออกจากน้ำเสียมีประสิทธิภาพลดลง

Asharani *et al.* (2008) ได้ศึกษาความเป็นพิษของ AgNPs ต่อตัวอ่อนของปลาหมอลาย (Zebrafish) พบว่า AgNPs มีความเป็นพิษต่อปลาหมอลาย ทำให้อัตราการตายเพิ่มขึ้น การฟักไข่ของตัวอ่อนช้าลง ระบบไหลเวียนโลหิตช้า หัวใจหยุดเต้นและตายในที่สุด

## 13. วิธีการดำเนินการวิจัย

### 13.1 วัสดุและอุปกรณ์

1. จอก
2. แก้วน้ำพลาสติก
3. เครื่องแก้วชนิดต่าง ๆ
4. กระบอกตวง
5. สารละลายมาตรฐานซิลเวอร์นาโนพาร์ติเคิล (stock solution) ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร (เพื่อเป็นสารละลายมาตรฐานสำหรับสร้างกราฟมาตรฐานในการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer)
6. น้ำกลั่น

7. น้ำปราศจากไอออน (Deionized water: DI)
8. น้ำประปา
9. เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer

### 13.2 วิธีดำเนินการ

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs ด้วยจอก โดยศึกษาถึงผลของขนาดพาร์ติเคิลที่มีต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำ ซึ่งมีวิธีการดำเนินการ 6 ขั้นตอน ดังนี้

- 13.2.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูล
- 13.2.2 การเก็บตัวอย่างจอก
- 13.2.3 ทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs โดยจอก
- 13.2.4 วิเคราะห์ตัวอย่างน้ำและจอก
- 13.2.5 วิเคราะห์ประสิทธิภาพในการบำบัด AgNPs ขนาด 7 นาโนเมตรและ 50 นาโนเมตร ของจอก
- 13.2.6 วิเคราะห์ข้อมูล

#### 13.2.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูล

ศึกษาและรวบรวมข้อมูล โดยสืบค้นจากห้องสมุด อินเทอร์เน็ตวารสาร หนังสือวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 13.2.2 การเก็บตัวอย่างจอก

##### 1) การคัดเลือกและเตรียมตัวอย่างจอก

1.1 เก็บตัวอย่างจอกจากแหล่งน้ำบริเวณอาคารศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา โดยมีเกณฑ์ในการพิจารณา และเลือกดังนี้

- รูปร่างและขนาดใกล้เคียงกัน (รากลาว 25-30 ซม. ความยาวใบ 5.5-7.5 ซม.)
- มีสีเขียวอ่อนเท่า ๆ กัน ไม่แก่จัดจนเกินไป
- ระยะการเจริญเติบโต

1.2 ทำความสะอาดจอกด้วยน้ำประปา เพื่อกำจัดตะกอนต่าง ๆ ให้หมดประมาณ 2-3 ครั้งแล้วล้างต่อด้วยน้ำกลั่นอีกครั้ง

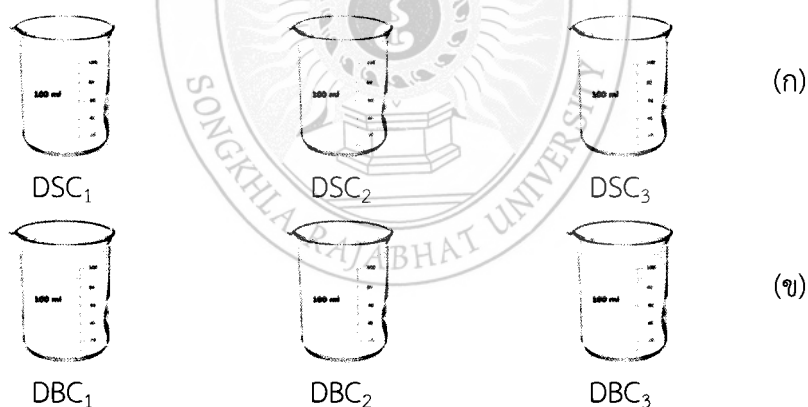
##### 2) เลี้ยงปรับสภาพจอกเป็นเวลา 2 วัน ด้วยน้ำ DI

13.2.3 ทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs โดยจอกในการทดลองการดูดซึม AgNPs ของจอกมีรายละเอียด ดังนี้

- ขนาดของ AgNPs ที่ใช้ ได้แก่ ขนาด 7 นาโนเมตรและ 50 นาโนเมตร
- ความเข้มข้นของ AgNPs ที่ใช้ทดลอง ได้แก่ 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ความคุมอุณหภูมิห้องที่  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส
- เก็บตัวอย่างที่เวลา 0, 1, 2, 4, 6, 12, 24 และ 48 ชั่วโมง ซึ่งแต่ละเวลาจะเก็บตัวอย่างทั้ง 3 ชุดการทดลอง คือ การศึกษาการสลายตัวของ AgNPs ชุดควบคุม และการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วย AgNPs โดยใช้จอก
- วิเคราะห์ตัวอย่างน้ำและศึกษาลักษณะทางกายภาพของจอก

ชุดการทดลองที่ 1 การศึกษาการสลายตัวของ AgNPs

การศึกษาการสลายตัวของ AgNPs ทดลองโดยใส่สารละลาย AgNPs ที่ความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงในภาชนะที่ใช้ทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 1 และตารางที่ 1



ภาพที่ 1 การศึกษาการสลายตัวของ AgNPs (ก) ขนาด 7 นาโนเมตร

(ข) ขนาด 50 นาโนเมตร

ชุดการทดลองที่ 2 ชุดควบคุม

ชุดควบคุมในการทดลองนี้ประกอบด้วยน้ำ DI (B) เพื่อเป็นแบลนด์ค และน้ำ DI และจอก (P) ซึ่งเป็นชุดควบคุมสำหรับศึกษาการเจริญเติบโตของจอก โดยมีรายละเอียดของแต่ละตัวอย่างดังแสดงในภาพที่ 2 และตารางที่ 1





B (น้ำ DI)



P (น้ำ DI และจอก)

### ภาพที่ 2 ชุดควบคุมในการศึกษาการเจริญเติบโตของจอก

#### ชุดการทดลองที่ 3 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัด AgNPs

การศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัด AgNPs ด้วยจอก ทดลองโดยใส่สารละลาย AgNPs ที่ความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และจอกลงในภาชนะที่ใช้ทดลอง โดยมีรายละเอียดของแต่ละตัวอย่างดังแสดงในภาพที่ 3 และตารางที่ 1

SC<sub>1</sub>SC<sub>2</sub>SC<sub>3</sub>

(ก)

BC<sub>1</sub>BC<sub>2</sub>BC<sub>3</sub>

(ข)

ภาพที่ 3 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัด AgNPs (ก) ขนาด 7 นาโนเมตร (ข) ขนาด 50 นาโนเมตร ตารางที่ 1 รายละเอียดของตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา

การศึกษา	ชื่อตัวอย่าง	ขนาดของ AgNPs(nm)	ความเข้มข้นของซิลเวอร์นาโนพาร์ติเคิล (mg/l)	หมายเหตุ
1. การศึกษาการสลายตัวของ AgNPs	DSC <sub>1</sub>	7	0.5	
	DSC <sub>2</sub>		1	
	DSC <sub>3</sub>		2	
	DBC <sub>1</sub>	50	0.5	
	DBC <sub>2</sub>		1	
	DBC <sub>3</sub>		2	
2. ชุดควบคุม	B	-	-	น้ำ DI
	P	-	-	น้ำ DI และจอก

การศึกษา	ชื่อตัวอย่าง	ขนาดของ AgNPs(nm)	ความเข้มข้นของซิลเวอร์นาโนพาร์ติเคิล (mg/l)	หมายเหตุ
3. การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัด AgNPs	SC <sub>1</sub>	7	0.5	จอก
	SC <sub>2</sub>		1	
	SC <sub>3</sub>		2	
	BC <sub>1</sub>	50	0.5	
	BC <sub>2</sub>		1	
	BC <sub>3</sub>		2	

#### 13.1.4 วิเคราะห์ตัวอย่างน้ำและจอก

ทำการเก็บตัวอย่างน้ำและจอกที่ใช้ทดลองที่เวลา 0, 1, 2, 6, 12, 24 และ 48 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาวิเคราะห์หาค่า pH ของน้ำ ปริมาตรที่ลดลงของชุดควบคุม ลักษณะทางกายภาพของจอก (น้ำหนักร ขนาด สีใบ) และความเข้มข้นของ AgNPs ในน้ำ โดยแสดงวิธีการวิเคราะห์ไว้ในตารางที่ 2

#### 13.1.5 วิเคราะห์ประสิทธิภาพในการบำบัด AgNPs ของจอกและตัวอย่างน้ำ

นำผลที่ได้จาก 13.1.5 นำมาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของจอกในการกำจัด AgNPs ที่มีขนาด 7 นาโนเมตรและ 50 นาโนเมตร ออกจากรน้ำ โดยสามารถคำนวณค่าประสิทธิภาพการบำบัดได้จากสูตร

ประสิทธิภาพการบำบัด (%) =

$$\frac{(\text{ความเข้มข้น AgNPs เริ่มต้น} - \text{ความเข้มข้น AgNPs สุดท้าย})}{\text{ความเข้มข้น AgNPs เริ่มต้น}} \times 100$$

#### 13.1.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลแบบสถิติ โดยศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของจอกในการบำบัด AgNPs 2 ขนาด ใช้โปรแกรม SPSS การทดสอบทางสถิติแบบ t-test



## 15. งบประมาณ

รายการ	งบประมาณตลอดโครงการ
<b>ค่าใช้จ่าย</b>	
ค่าบริการสืบค้นข้อมูล	1,000
<b>ค่าวัสดุ</b>	
ค่าอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย	3,000
ค่าวัสดุสำนักงาน/ค่าถ่ายเอกสาร	1,000
ค่าจัดทำรายงาน	1,500
รวม	6,500

## 16. เอกสารอ้างอิง

วงศ์ผกา จำปา. (2551). การศึกษาความสามารถในการดูดซึมโลหะหนักในน้ำที่ปนเปื้อนด้วยสารร้ายพวงชะโด. ปัญหาพิเศษปริญญาตรี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Asharani, P. V., Wu, Y. L., Gong, Z., and Valiyaveettil, S. (2008). Toxicity of silver nanoparticle in zebrafish models. *Nanotechnology*. 19(25), 255102-1 - 255102-8.

Buric, P., Jaksic, Z., Stajner, L., Sikirić, M. D., Jurasin, D., Cascio, L. and Lyons, D. M. (2015). Effect of silver nanoparticles on Mediterranean Sea urchin embryonal development is species specific and depends on moment of first exposure. *Marine Environmental Research*. 111, 50-59.

Giao, N. T., Limpiyakorn, T. and Siripiattanakul-Ratpukdi, S. (2016). "Impact of silver nanoparticle on ammonia oxidation by nitrifying sludge". ใน การประชุมวิชาการวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมในอัตโนมัติระดับชาติ ครั้งที่ 3. 25-26 พฤศจิกายน 2559. ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 155-161.

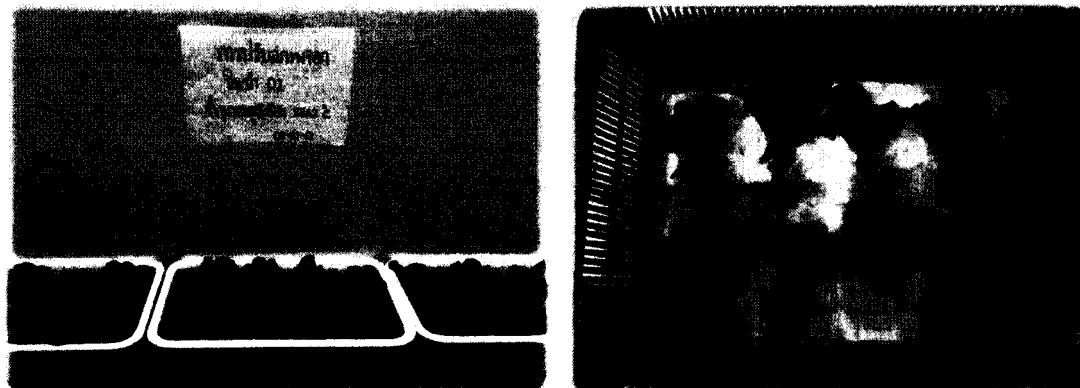
Hanks, N. A., Caruso, J. A. and Zhang, P. (2015). Assessing *Pistia stratiotes* for phytoremediation of silver nanoparticle and Ag(I) contaminated waters. *Journal of Environmental Management*. 164, 41-45.

Hood, E. (2004). *Nanotechnology: looking as we leap*. Environmental Health Perspectives, 112: A740-A749.

- Liu, W., Wu, Y., Wang, C., Li, H. C., Wang, T., Liao, C., Cui, L., Zhou, Q. F., Yan, B. and Jiang, G. B. (2010). Impact of silver nanoparticles on human cells: effect of particle size. **Nanotoxicology**. 4(3), 319-330.
- Wang, J. C., Neogi, P. and Forciniti, D. (2006). On one-dimensional self-assembly of surfactant-coated nanoparticles. **The Journal of Chemical Physics**. 125(19), 194717-1.



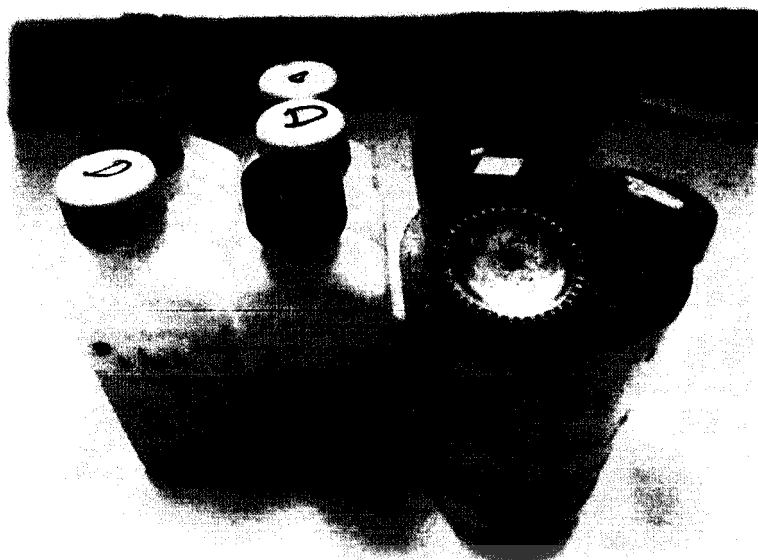




ภาพที่ ผข-1 ลักษณะพืชที่ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ ผข-2 การทดลองประสิทธิภาพของจอกในการดูดซับ AgNPs



ภาพที่ ผข-3 ตัวอย่างน้ำที่ใช้ในการวิเคราะห์



ภาพที่ ผข-4 ตัวอย่างจอกที่ใช้ในการวิเคราะห์คลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี



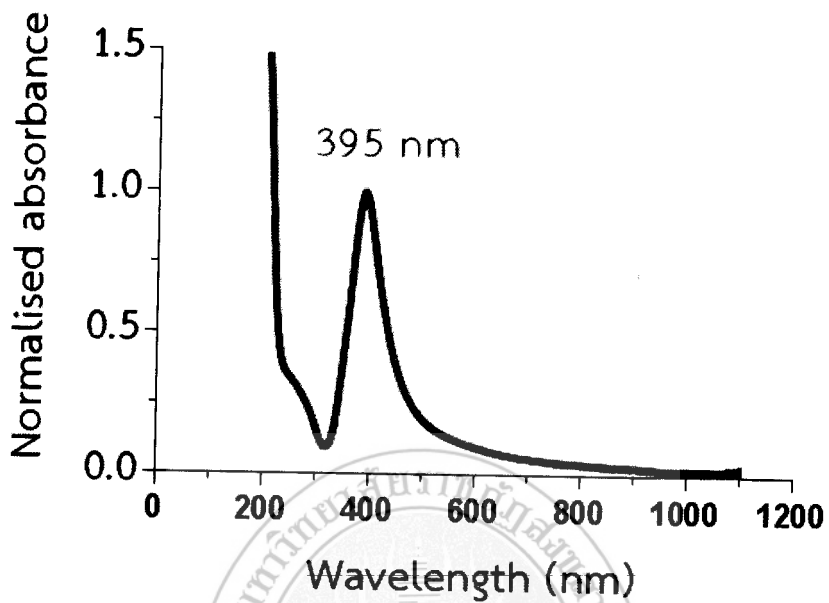


ภาพที่ ผข-5 ขั้นตอนการกรองตัวอย่างน้ำและจอก

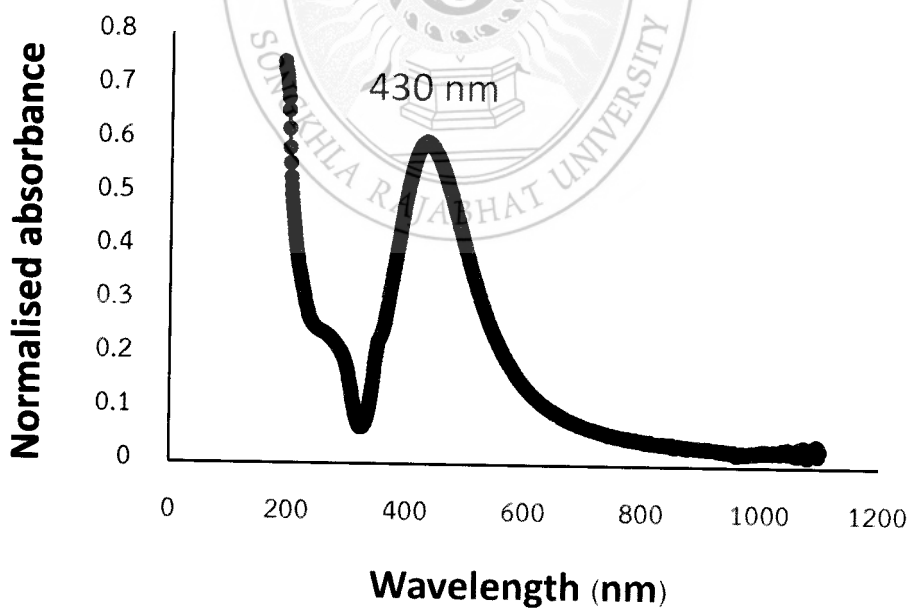


ภาพที่ ผข-6 เครื่อง UV-Visible spectrophotometer

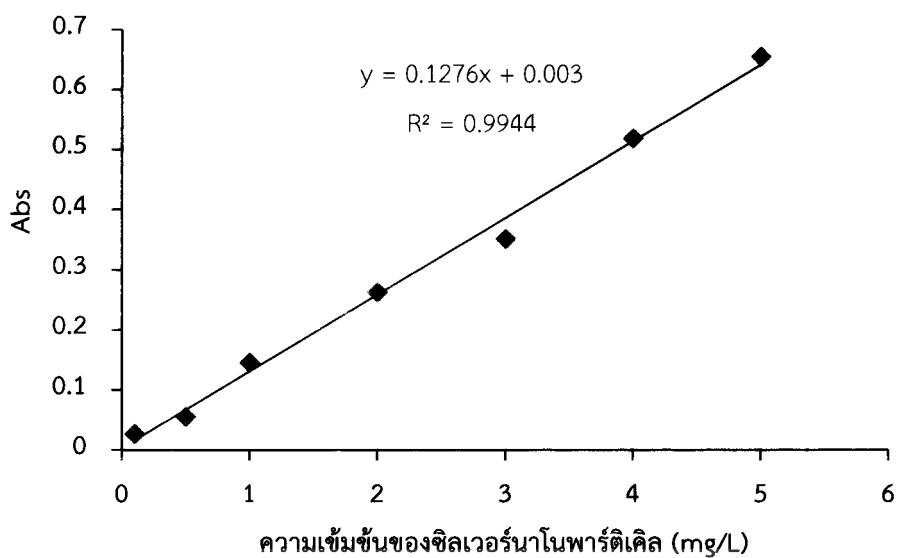




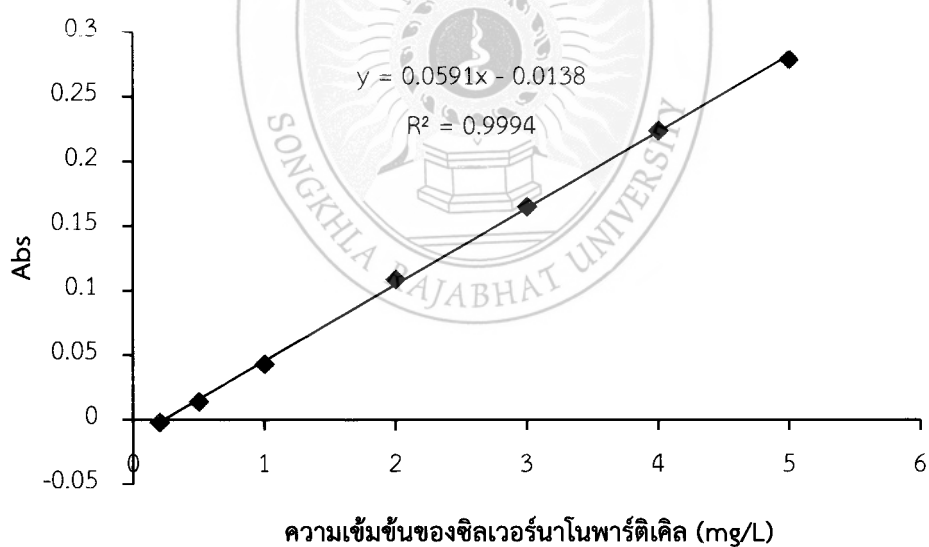
ภาพที่ ผค-1 ความยาวคลื่นของ AgNPs ขนาด 7 นาโนเมตร



ภาพที่ ผค-2 ความยาวคลื่นของ AgNPs ขนาด 50 นาโนเมตร


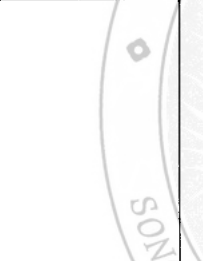


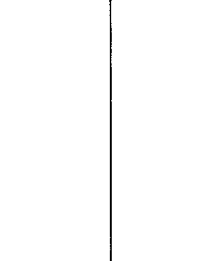






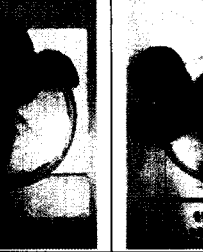
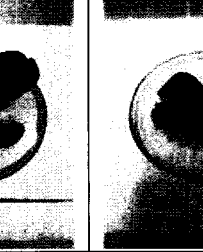



ภาพที่ ผศ-3 กราฟสารละลายมาตรฐานของ AgNPs 7 นาโนเมตร เพื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer







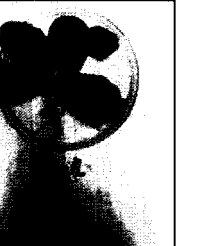
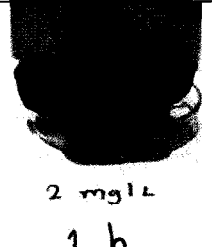
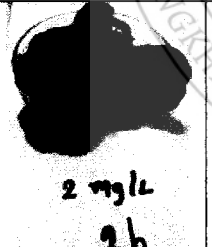
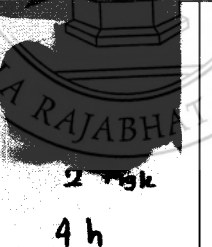
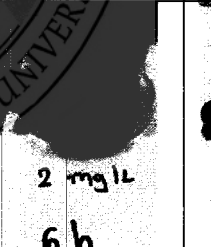
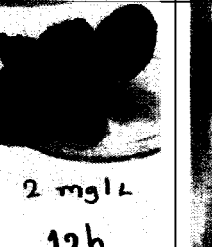
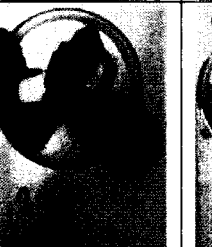
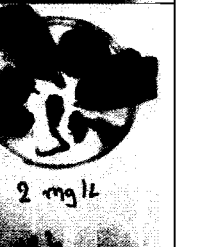


ภาพที่ ผศ-4 กราฟสารละลายมาตรฐานของ AgNPs 50 นาโนเมตร เพื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer


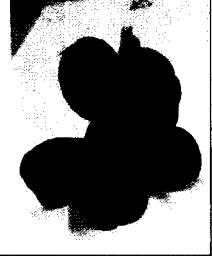



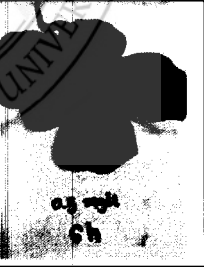

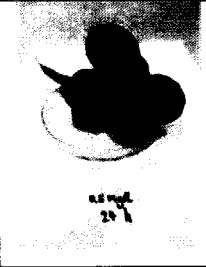

ตารางที่ ผศ-1 ลักษณะของจอกที่เวลาต่าง ๆ

ประเภทของ AgNPs (mg/L)		ลักษณะของจอกที่เวลาต่าง ๆ						
ขนาดของ AgNPs (nm)	ความเข้มข้นของ AgNPs (mg/L)	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	6 ชั่วโมง	12 ชั่วโมง	24 ชั่วโมง	48 ชั่วโมง
7	0							
	0.5							

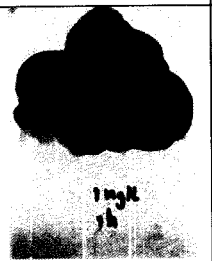



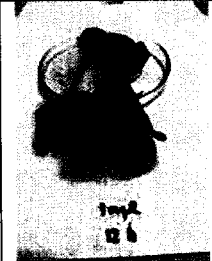
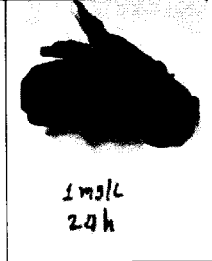




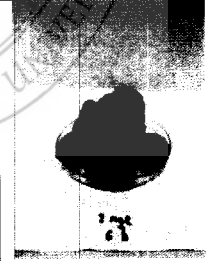
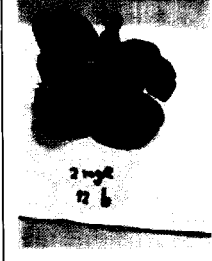

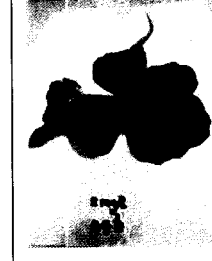
ตารางที่ ผค-1 ลักษณะของจอกที่เวลาต่าง ๆ (ต่อ)

ประเภทของ AgNPs (mg/L)		ลักษณะของจอกที่เวลาต่าง ๆ						
ขนาดของ AgNPs (nm)	ความเข้มข้นของ AgNPs (mg/L)	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	6 ชั่วโมง	12 ชั่วโมง	24 ชั่วโมง	48 ชั่วโมง
7	1							
	2	 2 mg/L 1 h	 2 mg/L 2 h	 2 mg/L 4 h	 2 mg/L 6 h	 2 mg/L 12 h		 2 mg/L 48 h

ตารางที่ ผศ-1 ลักษณะของจอกที่เวลาต่าง ๆ (ต่อ)

ประเภทของ AgNPs (mg/L)		ลักษณะของจอกที่เวลาต่าง ๆ						
ขนาดของ AgNPs (nm)	ความเข้มข้นของ AgNPs (mg/L)	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	6 ชั่วโมง	12 ชั่วโมง	24 ชั่วโมง	48 ชั่วโมง
50	0							
	0.5							

ตารางที่ ผศ-1 ลักษณะของจอกที่เวลาต่าง ๆ (ต่อ)

ประเภทของ AgNPs (mg/L)		ลักษณะของจอกที่เวลาต่าง ๆ						
ขนาดของ AgNPs (nm)	ความเข้มข้นของ AgNPs (mg/L)	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	6 ชั่วโมง	12 ชั่วโมง	24 ชั่วโมง	48 ชั่วโมง
50	1							
	2							



ตารางที่ ผค-2 ผลทดสอบทางสถิติของประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วยจอกของ AgNPs ขนาด 7 และ 50 นาโนเมตร

การทดสอบ ประสิทธิภาพของจอก 2 ขนาด (nm)	N	X	S.D.	t	Sig
7	63	10.28	7.78	-0.098	0.008
50	63	10.46	13.22		





## ประวัติผู้ทำวิจัย

1. ชื่อ-สกุล นางสาวนุรฮากีมา เจะและ
- วันเดือนปีเกิด 19 มีนาคม 2539
- ที่อยู่ 140 หมู่ 13 ตำบลสุคริริน อำเภอสุคริริน จังหวัดนราธิวาส 96190
- เบอร์โทรศัพท์ 0872865254
- การศึกษานักศึกษา โปรรแกรมวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม  
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี  
มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
2. ชื่อ-สกุล นางสาวฟาฏอนะฮ์ ยาโงะ
- วันเดือนปีเกิด 10 พฤษภาคม 2540
- ที่อยู่ 7/5 หมู่ 3 ตำบลสะบ้าย้อย อำเภอสะบ้าย้อย จังหวัดสงขลา 90210
- เบอร์โทรศัพท์ 0936420135
- การศึกษานักศึกษา โปรรแกรมวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม  
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี  
มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา