

การเพิ่มมูลค่าขี้หมักปุ๋ยคอกที่ผ่านการใช้มาแล้ว
โดยใช้เป็นวัสดุสำหรับปลูกพืช

VALUE ADDED TO SPENT ANIONIC RESIN
FOR USING AS MATERIAL IN CULTIVATION

ชนพด ขอนกัทรบุษย์
จิตรุต จีภักดิ์ศรี
โสดดา ดินธุไต้พลวง

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

การเพิ่มมูลค่าเรซินชนิดประจุลบที่ผ่านการใช้งานแล้ว
โดยใช้เป็นวัสดุสำหรับปลูกพืช

VALUE ADDED TO SPENT ANIONIC RESIN
FOR USING AS MATERIAL IN CULTIVATION

ชนพล	ชลภัทรยุทธ์
วิศรุต	วิภังค์ศิริ
ไอลดา	ดิษฐเตี้ยหลวง

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

**VALUE ADDED TO SPENT ANIONIC RESIN
FOR USING AS MATERIAL IN CULTIVATION**

Thanapol Cholpattarayut

Wisarut Wiphangsiri

I-lada Dittoeiluang

**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE**

DEPARTMENT OF CHEMISTRY



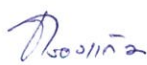
FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2013

โครงการพิเศษ	การเพิ่มมูลค่าเรซินชนิดประจุลบที่ผ่านการใช้งานแล้วโดยใช้เป็นวัสดุสำหรับปลูกพืช		
	VALUE ADDED TO SPENT ANIONIC RESIN FOR USING AS MATERIAL IN CULTIVATION		
นักศึกษา	นายธนพล	ชลภัทรยุทธ	รหัสนักศึกษา 53051190
	นายวิศรุต	วิภังค์ศิริ	รหัสนักศึกษา 53051262
	นางสาวไอลดา	ดิษฐเตี้ยหลวง	รหัสนักศึกษา 53051315
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต		
สาขาวิชา	เคมีสิ่งแวดล้อม		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ. กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์		

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชา เคมีสิ่งแวดล้อม ประจำปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ. พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย	
ผศ.ดร. อูสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์	
ผศ. กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์	

อธิการบดีของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การเพิ่มมูลค่าเรซินชนิดประจุลบที่ผ่านการใช้งานแล้วโดยใช้เป็นวัสดุสำหรับปลูกพืช	
ชื่อนักศึกษา	นายชนพล	ชลภัทรยุทธ
	นายวิศรุต	วิภังค์ศิริ
	นางสาวไอลดา	ดิษฐเตี้ยหลวง
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต	
สาขาวิชา	เคมีสิ่งแวดล้อม	
ปีการศึกษา	2556	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.กรองแก้ว	ทิพย์ศักดิ์

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเรซินชนิดประจุลบที่ผ่านการใช้งานแล้วมาใช้เป็นวัสดุสำหรับปลูกพืช โดยมีวัตถุประสงค์ของการศึกษา 2 ส่วน คือ 1) การกำจัดฟอสเฟตในน้ำผงซัฟฟอกด้วยเรซินชนิดประจุลบที่ผ่านการใช้งานแล้ว 2) การนำเรซินที่ดัดแปลงด้วยฟอสเฟตมาใช้เป็นวัสดุผสมสำหรับปลูกพืช ในการทดลองเพื่อหาไอโซเทอร์มของการดูดซับฟอสเฟตด้วยเรซินชนิดประจุลบที่ผ่านการใช้งานแล้ว ซึ่งทำการฟื้นฟูสภาพด้วย NaOH 4% โดยแปรค่าเวลาและความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟต ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์จากผงซัฟฟอกอยู่ในช่วง 2.8 – 3.0 mg-P/L นำไปเขย่าที่ความเร็ว 120 rpm อุณหภูมิ 25°C แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณฟอสเฟตด้วยวิธี Ascorbic acid จากนั้นนำเรซินที่ดัดแปลงแล้วมาใช้เป็นวัสดุผสมสำหรับปลูกคะน้า โดยมีอัตราส่วนระหว่างเรซินต่อทรายผสมแกลบดำเป็น 1:1 1:4 และ 1:9 สังเกตการเจริญเติบโตเป็นเวลา 15 วัน นำไปวัดดัชนีการเจริญเติบโต ได้แก่ ความยาวราก ความสูงของลำต้น และน้ำหนักแห้ง จากการทดลองพบว่าระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดฟอสเฟตเท่ากับ 5 ชั่วโมง ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดมากกว่า 90% และพฤติกรรมดูดซับสามารถอธิบายได้ด้วยไอโซเทอร์มแบบเชิงเส้น อัตราส่วนที่เหมาะสมของวัสดุปลูกในการเจริญเติบโตของคะน้า คือ 1:9 ซึ่งคะน้าสามารถเจริญเติบโตได้ดีกว่าอัตราส่วนอื่นๆ

คำสำคัญ : เรซินชนิดประจุลบที่ผ่านการใช้งาน, ฟอสเฟต, การดูดซับ

Special Project Title	VALUE ADDED TO SPENT ANIONIC RESIN FOR USING AS MATERIAL IN CULTIVATION	
Students	Thanapol	Cholpattarayut
	Wisarut	Wiphangsiri
	I-lada	Dittoeiluang
Degree	Bachelor of Science	
Major Program	Environmental Chemistry	
Academic Year	2013	
Special Project Advisor	Asst. Prof. Krongkaew Tippayasak	

ABSTRACT

The possibility of spent anionic resins application for using as material in cultivation was studied. The aims of this study were 1) the removal of phosphate from washing wastewater by spent anionic resins and 2) using phosphate modified resins as composite material in cultivation. Spent anionic resins were regenerated with 4% NaOH and used in all experiment. In the adsorption isotherm, phosphate adsorption was studied by varied time and initial phosphate concentration. The synthetic washing wastewater has the concentration in the range of 2.8 - 3.0 mg-P/L, shaking at 120 rpm, 25 °C. Phosphate was measured following the Ascorbic acid method. Furthermore, phosphate modified resins were mixed with sand and black carbon from fried rice husk by varied ratio (1:1, 1:4 and 1:9). All mixed composite materials were used in Chinese kale cultivation. After 15 days, the growth index such as root length, height and weight were measured. The results stated that the optimum contact time for phosphate removal was 5 hr which has efficiency more than 90% and phosphate adsorption can be described by Linear isotherm model. The appropriate ratio of composite material in cultivation was 1:9 which Chinese kale can grow better than other ratios.

Keywords : Spent anionic resin, Phosphate, Adsorption

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือและความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายฝ่ายด้วยกัน ซึ่งคณะผู้จัดทำโครงการพิเศษนี้จึงใคร่ขอขอบพระคุณทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ

ขอขอบพระคุณ ผศ.กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้ความกรุณาเสียสละเวลาให้คำปรึกษา และคำแนะนำ ตลอดจนดูแลเอาใจใส่ และติดตามตรวจสอบ ดิชมผลงานให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ และผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย อาจารย์กรรมการที่ช่วยตรวจสอบ ช่วยชี้แนะข้อบกพร่องและแนวทางแก้ไขปัญหา รวมถึงดิชมผลงาน ทำให้โครงการพิเศษนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี คณะวิทยาศาสตร์ทุกท่าน ที่คอยให้ความช่วยเหลือ และความร่วมมือ จนทำให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อนุเคราะห์สถานที่ตั้งจุฬารักษ์ 1 ห้องปฏิบัติการเคมี และชั้นดาดฟ้า ในการทำการทดลอง

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ ในสาขาเคมีสิ่งแวดล้อมทุกคนที่คอยช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ และคอยให้กำลังใจกันมาตลอด

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณกำลังใจจากบิดา มารดา ตลอดจนบุคคลอื่นที่ไม่ได้กล่าวมา ที่ทำให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ทางผู้จัดทำโครงการนี้จึงใคร่ขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

นายธนพล	ชลภัทรยุทธ
นายวิศรุต	วิงศ์ศิริ
นางสาวไอลดา	ดิษฐเตี้ยหลวง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	IX
นิยามศัพท์	X
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 เรซิน	
2.1.1 โครงสร้างและสมบัติของเรซิน	3
2.1.2 ลำดับความชอบในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน (Selectivity)	6
2.1.3 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน (Ion exchange capacity)	7
2.1.4 การใช้ประโยชน์ของกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน	8
2.1.5 การฟื้นฟูสภาพเรซิน (Regenerate)	8
2.1.6 การกำจัดเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้ว	9
2.2 กระบวนการดูดซับ (Adsorption process)	
2.2.1 การดูดซับ (Adsorption)	10
2.2.2 กระบวนการดูดซับ (Adsorption process)	11
2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ	11

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.4 ความสัมพันธ์สมดุลสำหรับการดูดซับ (Equilibrium Relations for Adsorption)	12
2.2.5 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ	14
2.3 ผงซักฟอก	15
2.3.1 ชนิดของผงซักฟอก	16
2.3.2 ส่วนประกอบของผงซักฟอก	16
2.3.3 การนำไปใช้ประโยชน์	17
2.3.4 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม	18
2.4 ฟอสฟอรัส	19
2.4.1 ฟอสฟอรัสในดิน	20
2.4.2 ฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำ	21
2.4.3 วัฏจักรฟอสฟอรัส	23
2.5 ค่ะน้ำ	24
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	26
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	
3.1 สารเคมี	30
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	30
3.3 วิธีการทดลอง	
3.3.1 การสุ่มตัวอย่าง	31
3.3.2 การทดสอบสมบัติเบื้องต้นของเรซิน	31
3.3.3 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์และฟื้นฟูสภาพเรซิน	32
3.3.4 การศึกษาระยะเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับฟอสเฟต	32
3.3.5 การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับฟอสเฟต	32
3.3.6 การดัดแปลงเรซิน (Modified resin, MR) โดยใช้เทคนิคแบบกะ	33
3.3.7 การวิเคราะห์หาปริมาณออร์โธฟอสเฟต ด้วยวิธี Ascorbic acid method	33

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 การใช้เรซินที่ดัดแปลงแล้วเป็นวัสดุเพาะปลูกคะน้ำ	
3.4.1 การทดสอบความเป็นพิษต่อการออกของเมล็ดคะน้ำ	33
3.4.2 การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของวัสดุปลูกต่อการเจริญเติบโต	34
3.4.3 การวิเคราะห์ดัชนีการเจริญเติบโตของคะน้ำ	35
3.4.4 วิเคราะห์ผลทางสถิติ	36
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	
4.1 สมบัติเบื้องต้นของเรซิน	38
4.2 ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับฟอสเฟต	40
4.3 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ	41
4.4 การทดสอบความเป็นพิษต่อการงอกของเมล็ดคะน้ำ	43
4.5 การวิเคราะห์ดัชนีการเจริญเติบโตของคะน้ำ	44
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลงานวิจัย	47
5.2 ข้อเสนอแนะ	47
เอกสารอ้างอิง	48
ภาคผนวก ก การเตรียมสารละลายมาตรฐานและกราฟมาตรฐานฟอสเฟต	52
ภาคผนวก ข การทดสอบสมบัติเบื้องต้น	54
ภาคผนวก ค ตารางแสดงผลการทดลอง	56
ภาคผนวก ง การคำนวณ	68

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ลำดับความชอบไอออนของเรซินที่มีสารละลายโลหะหนักในน้ำ 1,000 ppm	7
ตารางที่ 2.2 สมบัติทั่วไปของฟอสฟอรัส	19
ตารางที่ 3.1 การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของเรซิน	31
ตารางที่ 3.2 ปริมาณเรซินและทรายผสมแลกเปลี่ยนไอออนอัตราส่วนต่างๆ	35
ตารางที่ 4.1 สมบัติเบื้องต้นของเรซิน	39
ตารางที่ 4.2 ไอโซเทอร์มของการดูดซับฟอสเฟตเมื่อแปรค่าความเข้มข้นเริ่มต้น	42
ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์น้ำสกัดจากเรซินในแต่ละอัตราส่วน	43
ตารางที่ 4.4 ผลการกรองของเมล็ดคะน้า	43
ตารางที่ 4.5 สมบัติทั่วไปของวัสดุปลูก	44
ตารางที่ 4.6 ผลของวัสดุปลูกต่อการเจริญเติบโต	44
ตาราง ก - 1 สมบัติเบื้องต้นของเรซิน	56
ตาราง ก - 2 การหาความจุในการแลกเปลี่ยนประจุลบ	57
ตาราง ก - 3 ค่าจากกราฟมาตรฐานฟอสเฟต	57
ตาราง ก - 4 ผลการศึกษาระยะเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับฟอสเฟตจากน้ำผกซังฟอก	58
ตาราง ก - 5 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับฟอสเฟตที่เวลา 5 ชั่วโมง	59
ตาราง ก - 6 ข้อมูลไอโซเทอร์ม	60
ตาราง ก - 7 สมบัติทั่วไปของน้ำที่สกัดจาก MR	60
ตาราง ก - 8 ผลการวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟตของน้ำที่สกัดจาก MR	61
ตาราง ก - 9 ผลการทดสอบความเป็นพิษของฟอสเฟตต่อการงอกของเมล็ดคะน้า	62
ตาราง ก - 10 ผลการวิเคราะห์ความยาวราก	64
ตาราง ก - 11 ผลการวิเคราะห์น้ำหนักสำคัญของความยาวราก	64
ตาราง ก - 12 ผลการวิเคราะห์ความสูงลำต้น	64
ตาราง ก - 13 ผลการวิเคราะห์น้ำหนักสำคัญของความสูงลำต้น	64
ตาราง ก - 14 ผลการวิเคราะห์น้ำหนักเฉลี่ย	65
ตาราง ก - 15 ผลการวิเคราะห์น้ำหนักสำคัญของน้ำหนักเฉลี่ย	65

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตาราง ก - 16 ผลการวิเคราะห์สมบัติทั่วไปของวัสดุปลูก	65
ตาราง ก - 17 ดัชนีการเจริญเติบโตของคะน้ำ	66
ตาราง ก - 18 ผลการวิเคราะห์ความยาวรากของคะน้ำในวัสดุปลูกแต่ละอัตราส่วน	66
ตาราง ก - 19 ผลการวิเคราะห์หาความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของความยาวราก	66
ตาราง ก - 20 ผลการวิเคราะห์ความสูงลำต้นของคะน้ำในวัสดุปลูกแต่ละอัตราส่วน	67
ตาราง ก - 21 ผลการวิเคราะห์หาความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของความสูงลำต้น	67
ตาราง ก - 22 ผลการวิเคราะห์หาน้ำหนักแห้งของคะน้ำในวัสดุปลูกแต่ละอัตราส่วน	67
ตาราง ก - 23 ผลการวิเคราะห์หาความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของน้ำหนักแห้ง	67

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างหลักของเรซิน	4
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดเบสแก่	5
รูปที่ 2.3 กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่าง Na^+ และ Ca^{2+}	9
รูปที่ 2.4 รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอร์มการดูดซับ	13
รูปที่ 2.5 โครงสร้างโมเลกุลของผงซักฟอก	17
รูปที่ 2.6 โครงสร้างแบบไมเซลล์ของผงซักฟอก	17
รูปที่ 2.7 ระบบบำบัดทางชีวภาพที่ใช้ในการกำจัดฟอสฟอรัส	22
รูปที่ 2.8 วัฏจักรฟอสฟอรัส	23
รูปที่ 2.9 ต้นคະນ້າ	24
รูปที่ 3.1 การสู่มตัวอย่างเรซิน	31
รูปที่ 3.2 การเตรียมวัสดุสำหรับทดสอบความเป็นพิษต่อการงอกของเมล็ดคະນ້າ	34
รูปที่ 3.3 การเตรียมวัสดุปลูก	35
รูปที่ 3.4 แผนผังการดำเนินงานวิจัย	37
รูปที่ 4.1 เรซินชนิดต่างๆ	38
รูปที่ 4.2 เปอร์เซ็นต์การกำจัดฟอสเฟตด้วยเรซิน SR ที่ระยะเวลาต่างๆ	40
รูปที่ 4.3 ไอโซเทอร์มของการดูดซับฟอสเฟตเมื่อแปรค่าความเข้มข้นเริ่มต้น	41
รูปที่ 4.4 การเจริญเติบโตของคະນ້าที่ระยะเวลา 15 วัน	45
รูปที่ 4.5 อัตราส่วน 1:1	46
รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบความยาวของลำต้น	46
รูปที่ ค - 1 กราฟมาตรฐานฟอสเฟต	57

คำย่อและสัญลักษณ์

ตัวย่อ	คำเต็ม
°C	องศาเซลเซียส (Degree celsius)
μS/cm	ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร (Microsiemens per centimeter)
AEC	ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุลบ (Anion exchange capacity)
cmol/g-dried resin	เซนติโมลต่อกรัมเรซินแห้ง (Centimol per gram-dried resin)
DI	น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)
g	กรัม (Gram)
IC	เครื่องโครมาโตกราฟีตรวจวัดไอออน (Ion chromatograph)
mg/L	มิลลิกรัมต่อลิตร (Milligram per liter)
mL	มิลลิลิตร (Milliliter)
MR	เรซินที่ดัดแปลง (Modified resin)
N	นอร์มัล (Normality)
ND	ตรวจวัดไม่ได้ (Not detection)
nm	นาโนเมตร (Nanometre)
NR	เรซินใหม่ (New resin)
rpm	รอบต่อนาที (Round per minute)
RR	เรซินที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพ (Regenerated resin)
SD.	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation)
SR	เรซินที่ผ่านการใช้งาน (Spent resin)
TDS	ค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (Total dissolved solid)
WR	การอุ้มน้ำ (Water retention)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบัน เรซินแลกเปลี่ยนไอออนมีบทบาทต่อวงการอุตสาหกรรมค่อนข้างมาก เพราะโรงงานอุตสาหกรรมต่างนิยมใช้น้ำอ่อน (Soft water) ในกิจกรรมต่างๆ ของโรงงานเป็นจำนวนมาก เช่น น้ำที่ใช้ในหม้อน้ำ หรือระบบหล่อเย็น เป็นต้น จึงมีการนำเรซินมาใช้กำจัดความกระด้างในน้ำ หรือไอออนต่างๆ ออกจากน้ำ ในกระบวนการทำน้ำบริสุทธิ์ โดยเฉพาะการผลิตน้ำใช้ในโรงงานบางประเภท หรือการนำไปบริโภค ซึ่งเน้นที่การแยกไอออนออกจากน้ำ (ประจิก พงศ์ภพไพบุลย์, ม.ป.ป.) เทคนิคที่นิยมใช้มีหลายวิธี หนึ่งในนั้นคือใช้ระบบแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange resin) ซึ่งจะใช้เรซินเพื่อแลกเปลี่ยนไอออนที่ปนเปื้อนมากับน้ำ ซึ่งมีทั้งประจุบวกและประจุลบ (สาลินี เอี่ยมมงคล, 2543) นอกจากนี้ เรซินยังสามารถใช้ดูดซับไอออนโลหะหนักต่างๆ โดยใช้กระบวนการแบบกะ เช่น ทองแดง ตะกั่ว สังกะสี เป็นต้น (พอลตา ประสานนาม, 2547)

เรซินแลกเปลี่ยนไอออนเมื่อใช้งานไปได้ระยะหนึ่งประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนจะลดลง ต้องมีการนำมาปรับคืนสภาพ (Regenerate) ด้วยกรดเกลือ (HCl) หรือ เกลือแกง (NaCl) แล้วนำมาใช้ใหม่ได้หลายครั้ง แต่เมื่อครบอายุการใช้งาน เรซินที่เสื่อมสภาพจะถูกเปลี่ยนออก และจะกลายเป็นของเสียที่จำเป็นต้องมีการจัดการที่เหมาะสม โดยอาจนำไปเผาหรือฝังกลบ ซึ่งในปัจจุบันนั้น นิยมใช้วิธีกำจัดโดยการเผาผลิตร่วม เพราะเป็นวิธีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด แต่หากมีการจัดการที่ไม่เหมาะสมอาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อพื้นที่โดยรอบได้

โรงงานพิเศษนี้มีแนวคิดในการนำเอาเรซินที่เสื่อมสภาพการใช้งานแล้วกลับมาใช้งานให้เกิดประโยชน์อีกครั้ง เพื่อเป็นการลดของเสียที่ต้องกำจัด เช่น การนำไปดูดซับไอออนต่างๆ หรือโลหะหนักที่ปะปนมากับน้ำเสีย หรือการนำไปใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดิน โดยการนำเรซินไปดูดซับไอออนจากน้ำเสียที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช เช่น ไนเตรต ฟอสเฟต เป็นต้น

ดังนั้น จึงนำเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วมาทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับฟอสเฟต เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในทางสิ่งแวดล้อม โดยนำเรซินมาดูดซับฟอสเฟต แล้วนำไปใช้เป็นวัสดุผสมสำหรับเพาะปลูกพืช เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดเรซินที่เสื่อมสภาพแล้ว และนำกลับมาใช้งานให้เกิดประโยชน์มากยิ่งขึ้น ทั้งนี้เพื่อเพิ่มทางเลือกในการใช้งานด้านเกษตรกรรมต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ศึกษาการนำเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วกลับมาใช้ประโยชน์ โดยใช้ดูดซับฟอสเฟต เพื่อนำไปเป็นวัสดุสำหรับปลูกพืช

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. นำเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วกลับมาใช้ประโยชน์โดยใช้ดูดซับฟอสเฟตในน้ำ ผงซักฟอก ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับ และไอโซเทอร์มของการดูดซับ โดยเรซินที่ใช้เป็นชนิดแลกเปลี่ยนประจุลบที่ได้รับมาจาก บริษัท ทริท เคมิคอล จำกัด ก่อนนำมาใช้งานได้ทำการวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้น ได้แก่ ค่าพีเอช ค่าการนำไฟฟ้า ค่าของแข็งละลายน้ำ ทั้งหมด การอุ้มน้ำ และ ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุลบ

2. นำเรซินที่ดูดซับฟอสเฟตมาเป็นวัสดุปลูก การศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ 1) การทดสอบความเป็นพิษต่อการงอกของเมล็ดคะน้า โดยนำน้ำที่สกัดจากเรซินที่อัตราส่วนเรซินต่อน้ำ 1:1, 1:3, 1:5, 1:7 และ 1:10 มาพรมลงบนเมล็ด และสังเกตการงอกของเมล็ด 2) การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของวัสดุปลูกต่อการเจริญเติบโต โดยแปรอัตราส่วนระหว่างเรซินกับทรายผสมกลับดำเป็น 1:1, 1:4 และ 1:9 วัดผลจากดัชนีการเจริญเติบโตของคะน้า ได้แก่ ความยาวราก ความสูงลำต้นและน้ำหนักแห้ง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถใช้เรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วมากำจัดฟอสเฟตจากน้ำผงซักฟอกได้
2. นำเรซินที่ดูดซับฟอสเฟตไปใช้เป็นวัสดุสำหรับปลูกพืช
3. เพิ่มมูลค่าแก่เรซินแลกเปลี่ยนประจุลบที่ผ่านการใช้งานแล้ว

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เรซิน (Resin)

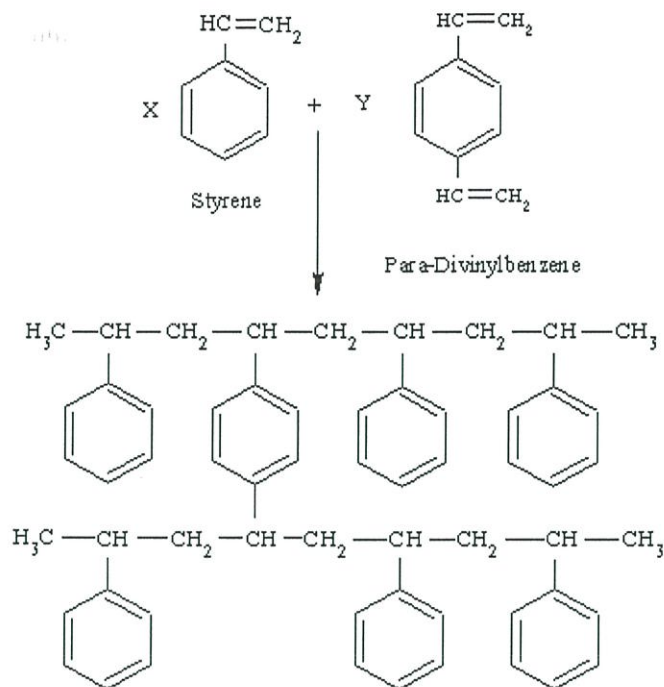
เรซินเป็นของแข็งที่นำมาใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออน โดยอาศัยหลักการแลกเปลี่ยนระหว่าง ไอออนในสารละลายกับไอออนบนผิวสัมผัสของเรซิน เรซินมีหลายชนิดทั้งที่มีอยู่ตามธรรมชาติและที่สังเคราะห์ขึ้น สารแลกเปลี่ยนไอออนตามธรรมชาติคือ อะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicates) ถูกค้นพบครั้งแรกโดยนักเคมีเกษตรชาวอังกฤษจากนั้นได้มีการสังเคราะห์สารประเภทนี้ขึ้นโดยใช้อะลูมิเนียมและซิลิเกต ทำให้เกิดสารประกอบโซเดียมอะลูมิเนียมซิลิเกตที่มีชื่อเรียกว่า ซีโอไลต์ (Zeolite) สารซีโอไลต์จึงจัดเป็นสารสังเคราะห์ทางอนินทรีย์ที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งนิยมใช้ในการแก้ปัญหาน้ำกระด้างให้เป็นน้ำอ่อน

ต่อมาได้มีการศึกษาค้นคว้าเพื่อหาสารที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนให้ได้มากชนิดขึ้น จนสามารถสังเคราะห์สารอนินทรีย์ที่เป็น โพลีเมอร์เรียกว่า เรซิน (Resin) การใช้เรซินสำหรับการแลกเปลี่ยนไอออนก้าวหน้ากว่าการใช้ซีโอไลต์มาก เพราะในการสังเคราะห์เรซินสามารถทำให้มี หมู่ฟังก์ชันนอล (Functional group) ที่มีโพลาไรตีต่างๆ เข้าไปอยู่ในเรซินได้ ซึ่งทำให้การแลกเปลี่ยนไอออนเกิดได้ทั้งที่เป็น ไอออนบวกและไอออนลบ

2.1.1 โครงสร้างและสมบัติของเรซิน

เรซินแลกเปลี่ยนไอออน คือ สารโพลีเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จากการทำโพลีเมอร์ไรซ์ (Polymerization) สารอินทรีย์ การโพลีเมอร์ไรซ์สามารถทำให้โมเลกุลของสารอินทรีย์เชื่อมโยงกันได้หลายแบบ (Cross-linking) ทำให้ได้เรซินที่มีคุณสมบัติต่าง ๆ กัน เรซินที่นิยมใช้กันทั่วไปคือ เรซินที่เตรียมจากการโพลีเมอร์ไรซ์สารสไตรีนกับไดไวนิลเบนซีน

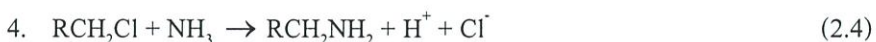
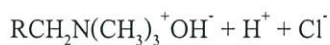
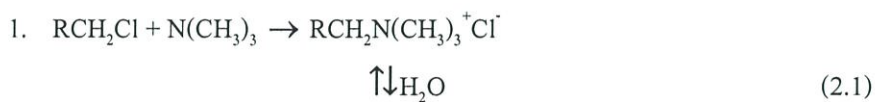
เรซินที่เตรียมได้จะแสดงคุณสมบัติอย่างไรขึ้นอยู่กับหมู่ฟังก์ชันที่ใส่เข้าไปในอะโรมาติกนิวเคลียส ดังนั้น เรซินที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออนสามารถแบ่งตามคุณสมบัติของหมู่ฟังก์ชันนอลที่ใส่เข้าไปได้ 2 ชนิด คือ เรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation exchange resin) และเรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบ (Anion exchange resin) โดยในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะรายละเอียดของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบ

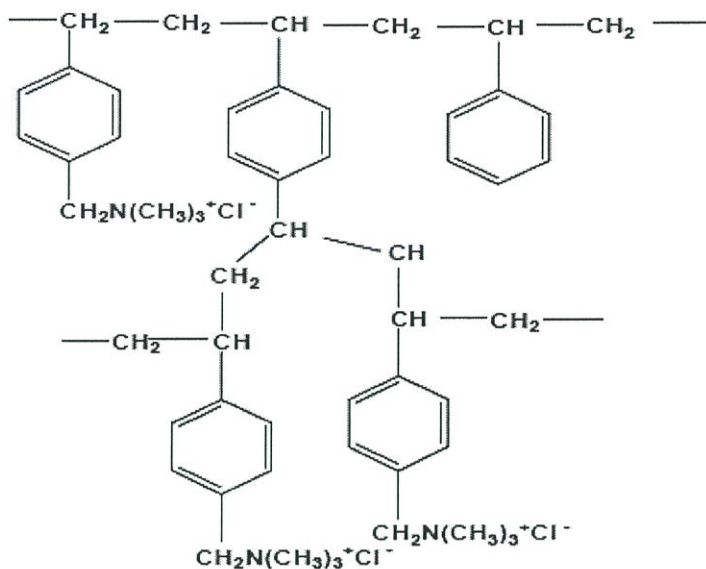


รูปที่ 2.1 โครงสร้างหลักของเรซิน

เรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบ (Anion exchange resin)

เรซินชนิดนี้จะมีหมู่ฟังก์ชันนอล (Functional group) ที่เป็นเบสอยู่ในอะโรมาติกนิวเคลียสเตรียมได้โดยการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างหมู่ฟังก์ชันนอลกับโพลีเมอร์ของโพลีสไตรีนกับไดไวนิลเบนซีน ถ้าหมู่ฟังก์ชันนอลคือ Quaternary amine group ($-\text{CH}_2\text{N}(\text{CH}_3)_3^+$) เรซินที่เตรียมได้จะมีฤทธิ์เป็นเบสแก่ จัดเป็นเรซินชนิดเบสแก่ (Strong anion exchange resin) ถ้าหมู่ฟังก์ชันนอลเป็น Tertiary amine group หรือ Secondary amine group ($-\text{CH}_2\text{NH}(\text{CH}_3)_2^+$, $-\text{CH}_2\text{NH}_2(\text{CH}_3)^+$) ความแรงของเบสจะลดน้อยลงตามลำดับ จัดเป็นเรซินที่มีฤทธิ์ระดับกลาง หรือ เรซินชนิดปานกลาง (Moderately basic anion exchange resin) แต่ถ้าหมู่ฟังก์ชันนอลเป็น Amine ($-\text{NH}_2$) จะมีความเป็นเบสต่ำมาก จัดเป็นเรซินชนิดเบสอ่อน (Weak anion exchange resin) ปฏิกิริยาในการเตรียมมีดังนี้





รูปที่ 2.2 โครงสร้างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดเบสแก่

เรซินที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาที่ 2.1 เป็นชนิดที่มีความเป็นเบสมาก สามารถแลกเปลี่ยนไอออนลบต่างๆ ได้ดี โดยที่ไม่ขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของสารละลาย

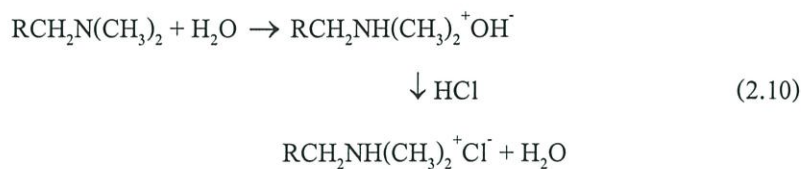


A^x คือประจุลบต่างๆ เช่น OH⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻ ฯลฯ

เรซินที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาที่ 2.2 และ 2.3 มีความเป็นเบสปานกลาง เมื่ออยู่ในน้ำจะเกิดการแตกตัวได้ OH⁻ ที่สามารถแลกเปลี่ยนกับไอออนลบอื่นๆ ได้



การแตกตัวของเรซินนั้นขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของสารละลาย สารละลายที่มีค่าพีเอชสูงจะทำให้เรซินแตกตัวได้น้อย ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนก็จะน้อย ส่วนในสารละลายที่มีค่าพีเอชต่ำจะทำให้เรซินแตกตัวได้ดี และได้เรซินอยู่ในรูปของเกลือที่มีการแตกตัวได้ดี



เรซินที่อยู่ในรูปของเกลือคลอไรด์สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ดีเช่นเดียวกับ เรซินชนิดเบสแก่



นั่นคือ ถ้าต้องการให้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบชนิดปานกลางสามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ดี ควรทำในสารละลายที่เป็นกรดหรือมีค่าพีเอชต่ำๆ เพื่อเปลี่ยนเรซิน ให้อยู่ในรูปของ OH^- (Hydroxide form) หรือ Cl^- (Chloride form)

สำหรับเรซินชนิดเบสอ่อนที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาที่ 2.4 ในทางการค้าจะอยู่ในรูปของเบสอิสระ (RCH_2NH_2) เมื่อต้องการนำมาใช้งานจะต้องนำมาทำปฏิกิริยากับกรดเกลือก่อน เพื่อให้อยู่ในรูปของเกลือคลอไรด์



จากนั้นจึงนำไปแลกเปลี่ยนกับไอออนลบอื่นๆ



2.1.2 ลำดับความชอบในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน (Selectivity)

เรซินแลกเปลี่ยนไอออน ต่างมีความชอบในการแลกเปลี่ยนกับ ไอออนแต่ละชนิดไม่เท่ากัน เรซินเลือกที่จะแลกเปลี่ยนกับไอออนบางชนิดมากกว่าชนิดอื่น ซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนประจุ น้ำหนักโมเลกุล และความเข้มข้นของไอออนนั้นๆ ในสารละลาย นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับสมบัติของเรซิน เช่น ขนาดของเรซิน ระดับของการเชื่อมขวาง (Degree of crosslinking) โครงสร้างของเรซิน ชนิดของหมู่ฟังก์ชันนอล เป็นต้น

ความสัมพันธ์ระหว่างไอออนกับลำดับความชอบในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินสามารถแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีวาเลนซ์สูงได้ดีกว่าไอออนที่มีวาเลนซ์ต่ำ ลำดับความชอบดังตารางที่ 2.1 สำหรับไอออนที่มีวาเลนซ์เท่ากัน จะพิจารณาจากน้ำหนักอะตอม ซึ่งไอออนที่มีน้ำหนักอะตอมสูงกว่าจะจับกับเรซินได้ดีกว่าไอออนที่มีน้ำหนักอะตอมต่ำกว่า เช่น $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Be}^{2+}$ หรือ $\text{K}^+ > \text{Li}^+ > \text{Na}^+$ เรซินที่มีระดับของการเชื่อมขวางสูง ความสามารถแลกเปลี่ยนกับไอออนจะมากกว่าเรซินที่มีระดับการเชื่อมขวางต่ำ

ตารางที่ 2.1 ลำดับความชอบไอออนของเรซินที่มีสารละลายโลหะหนักในน้ำ 1,000 ppm

ไอออนบวก	ไอออนลบ	ลำดับความชอบ
Fe ³⁺	CO ₃ ²⁻	<p style="text-align: center;">มากที่สุด</p> <p style="text-align: center;">↑</p> <p style="text-align: center;">น้อยที่สุด</p>
Al ³⁺	SO ₄ ²⁻	
Pb ²⁺	SO ₃ ²⁻	
Ba ²⁺	HPO ₄ ²⁻	
Sr ²⁺	CNS ⁻	
Cd ²⁺	CNO ⁻	
Zn ²⁺	NO ₃ ⁻	
Cu ²⁺	Br ⁻	
Fe ²⁺	Cl ⁻	
Mn ²⁺	CN ⁻	
Ca ²⁺	HCO ₃ ⁻	
Mg ²⁺	HSiO ₃ ⁻	
K ⁺	OH ⁻	
NH ₄ ⁺	F ⁻	
Ba ⁺		
H ⁺		
Li ⁺		

2.1.3 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน (Ion exchange capacity)

ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน เป็นสิ่งที่ใช้แสดงคุณลักษณะ (Characterization) ของเรซิน นั่นคือขนาดของความจุและความแรงของหมู่กรดและเบส การหาความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินในทางปฏิบัติคือหาจำนวนหมู่ฟังก์ชันนอลที่สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนได้จริงๆ ในสภาวะของการทดลองนั้นๆ หรือหาจำนวนมิลลิกรัมสมมูลของไอออนที่สามารถแลกเปลี่ยนกับไอออนของเรซินใน 1 กรัมของเรซินแห้ง

ในการทดลองจำเป็นต้องทราบความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน มิฉะนั้นอาจจะทำให้เกิดการบรรจุเรซินลงในตัวอย่างไม่เพียงพอแก่การแลกเปลี่ยนไอออน หรือมากเกินไปโดยไม่จำเป็น วิธีการตรวจสอบความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินทำได้โดยซั่งเรซินให้ทราบน้ำหนักที่แน่นอน บรรจุลงในขวดรูปชมพู่ และเปลี่ยนเรซินทั้งหมดให้อยู่ใน

รูปของ Cl^- จากนั้นเติมสารละลายเบส NaOH และนำไปแยกแยะจนแน่ใจว่า Cl^- ถูกแลกเปลี่ยนด้วย OH^- นำสารละลายที่ได้มาไทเทรตหาปริมาณ Cl^- โดยวิธีตกตะกอน หรือ วัดด้วยเครื่อง Ion Chromatograph แล้วคำนวณหาปริมาณลิกรัมสมมูลของ Cl^- ที่ถูกแลกเปลี่ยน (ธวัชชัย ศรีวิบูลย์, ม.ป.ป.)

2.1.4 การใช้ประโยชน์ของกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน

เรซินแลกเปลี่ยนไอออนสามารถกำจัดสารเจือปนต่างๆ ในน้ำที่อยู่ในรูปละลายน้ำ อย่างไรก็ตาม เรซินแลกเปลี่ยนไอออนไม่เหมาะสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงมากๆ (เช่น สูงกว่า 700 mg/L) เพราะทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย วิธีที่เหมาะสมกว่า คือ Reverse osmosis หรือ Electrodialysis

เรซินแลกเปลี่ยนไอออนใช้กำจัดความกระด้าง ความเป็นด่างไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) และกำจัดเกลือแร่ทุกชนิดเพื่อผลิตน้ำบริสุทธิ์

การกำจัดความกระด้าง

เรซินกำจัดความกระด้างนิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมหรือชุมชนขนาดเล็ก เรซินที่ใช้ทำงานคือ เรซินชนิดกรดแก่ ที่ทำการฟื้นฟูสภาพด้วยเกลือแคง ในระหว่างการแลกเปลี่ยนไอออนตัวเรซินจะ ใช้โซเดียม (Na^+) แลกเปลี่ยนกับไอออนบวกต่างๆ ในน้ำ เช่น Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{3+} , Fe^{2+}

การกำจัดความเป็นด่างไบคาร์บอเนต

นิยมใช้เรซินชนิดกรดอ่อน (RCOOH) ซึ่งทำการฟื้นฟูสภาพด้วยกรดเกลือ (HCl) หรือกรดกำมะถัน (H_2SO_4) เรซินชนิดกรดอ่อนนั้นจะใช้ไฮโดรเจนไอออน (H^+) แลกเปลี่ยนกับไอออนบวกที่อยู่ร่วมกับไบคาร์บอเนต ทำให้เกิดกรดคาร์บอนิกซึ่งสลายตัวเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำได้ง่าย ในขณะที่ไอออนบวกอื่นๆ ที่ไม่ได้อยู่ร่วมกับไบคาร์บอเนต จะไม่ถูกกำจัดออกจากน้ำ

เรซินชนิดกรดแก่ (RSO_3H) และชนิดเบสแก่ ก็สามารถกำจัดด่างไบคาร์บอเนตได้เช่นกัน แต่จะสิ้นเปลือง เนื่องจากจะกำจัดไอออนอื่นๆ ด้วย

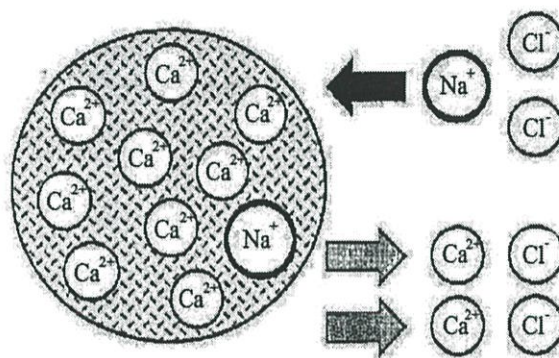
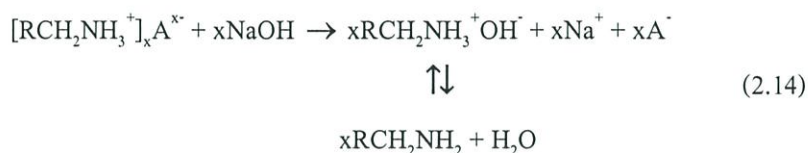
การผลิตน้ำบริสุทธิ์ที่ปราศจากไอออน

ต้องใช้เรซินทั้ง 2 ชนิด คือ กรดและเบส กำจัดไอออนทั้งประจุบวกและลบ เรซินทั้งสองชนิดอาจบรรจุแยกถึงกัน หรือ บรรจุในถังเดียวกันก็ได้

2.1.5 การฟื้นฟูสภาพเรซิน (Regenerate)

การฟื้นฟูสภาพ (Regenerate) หมายถึง การทำให้เรซินที่หมดประสิทธิภาพไปแล้วสามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้อีก การฟื้นฟูสภาพเป็นการขับไล่ไอออนที่เรซินแลกเปลี่ยนมากับน้ำเสีย และเติมไอออนอิสระให้กับเรซิน หรือเป็นการเติมไอออนให้กับเรซินที่เสื่อมสภาพ อันเนื่องมาจากการที่ไอออนบนเรซินได้แลกเปลี่ยนกับไอออนอื่นๆ ในน้ำเสียจนหมด ซึ่งจะทำให้เรซินกลับคืนสภาพ

เติมและสามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้อีก สารเคมีที่ใช้ในการเติมไอออนอิสระให้กับเรซินเรียกว่า สารฟื้นฟูสภาพ (Regenerant) เช่น 1 M NaOH หรือ NH_4OH



รูปที่ 2.3 กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่าง Na^+ และ Ca^{2+}

ซึ่งหลังจากผ่านการฟื้นฟูสภาพแล้ว จะต้องมีการชะล้างเรซิน (Rinse) ด้วยน้ำสะอาดเพื่อไล่สารฟื้นฟูสภาพที่ตกค้างอยู่ การชะล้างเรซินมี 2 ขั้นตอน คือ การชะล้างอย่างช้า (Slow rinse หรือ Displacement rinse) และการชะล้างอย่างรวดเร็ว (Fast rinse) โดยทำการชะล้างอย่างช้าก่อน โดยปล่อยน้ำให้ไหลผ่านในอัตราเร็วเท่ากับการฟื้นฟูสภาพ หลังจากนั้นจึงทำการชะล้างอย่างรวดเร็วเพื่อไล่สารฟื้นฟูสภาพที่ยังตกค้างอยู่ออกให้หมด

2.1.6 การกำจัดเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้ว

วิธีที่นิยมใช้ในการกำจัดเรซินที่ใช้แล้ว คือ การเผา ซึ่งในปัจจุบันวิธีการเผาที่มีประสิทธิภาพและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากที่สุด คือ การเผาผลิตร่วม กระบวนการเผาผลิตร่วมในเตาปูนซีเมนต์เป็นวิธีการกำจัดกากของเสียที่สอดคล้องกับประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548

การเผาผลิตร่วม

การเผาผลิตร่วม หมายถึง กระบวนการหลายกระบวนการที่เกิดขึ้นพร้อมๆ กัน โดยเริ่มต้นจากการที่กากของเสียถูกทำลาย กระบวนการที่สอง คือ การนำกลับคืนมาของพลังงานที่เหลืออยู่ในกากของเสียนั้น ซึ่งพลังงานเหล่านี้โดยปกติจะสูญเสียไปหากกากของเสียเหล่านั้นถูกทิ้งในหลุมฝังกลบ กระบวนการที่สามคือ การรวมตัวกันของแร่ธาตุต่างๆ และเปลี่ยนสมบัติทางกายภาพเป็น "ปูนเม็ด" และ "ปูนซีเมนต์" ต่อไป

ประโยชน์ของการเผาผลิตร่วม

- อุณหภูมิในการเผาไหม้สูงมาก โดยอุณหภูมิวัดจุดดับสูงถึง 1,450 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแก๊สสูงถึง 2,000 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดการทำลายกากของเสียด้วยกระบวนการทางความร้อน
- การนำพลังงานจากกากของเสียกลับมาใช้ใหม่เพื่อทดแทนพลังงานจากธรรมชาติ
- ผุนหินปูนทำหน้าที่ดูดซับโลหะหนักออกจากมลพิษทางอากาศและ ครึ่งไวไฟในเนื้อปูนซีเมนต์
- ระยะเวลาการเผาแก๊สที่นานเพียงพอทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์
- การเผาผลิตร่วมในเตาปูน ไม่ก่อให้เกิดกากของเสีย หรือสิ่งตกค้างจากกระบวนการเผาอีกต่อไป

2.2 กระบวนการดูดซับ (Adsorption process)

2.2.1 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับ หมายถึง การที่โมเลกุลของสารถูกดึงเข้ามาติดผิวของตัวดูดซับ หรือการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่พื้นผิวของตัวดูดซับ (Adsorbent) ที่สัมผัสโดยตรงกับตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) โดยสารที่มีพลังงานอิสระที่ผิวต่ำจะถูกดูดซับ แต่สารที่มีพลังงานอิสระที่ผิวสูงจะไม่ถูกดูดซับ พลังงานอิสระที่ผิวของตัวดูดซับจะมีความสัมพันธ์กับแรงตึงผิวและพื้นที่ผิว ดังสมการที่ 2.15 เมื่อความตึงผิว (Surface tension) หรือ พื้นที่ผิว (Surface area) เปลี่ยนไป จะเป็นผลทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของพลังงานอิสระที่ผิว ($\Delta G_{\text{surface}}$) (กนกอร ประยูรพันธ์, 2549)

$$\Delta G_{\text{surface}} = \gamma A \quad (2.15)$$

เมื่อ $\Delta G_{\text{surface}}$ = พลังงานอิสระที่ผิว

γ = ความตึงผิว

A = พื้นที่ผิว

การดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ แบ่งออกได้ตามแรงที่ดูดซับระหว่างพื้นผิวโมเลกุลเป็น 2 ชนิด คือ การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption หรือ Physisorption) แรงที่ใช้ดูดซับเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับที่อยู่ในของเหลวกับตัวดูดซับ มีมากกว่าแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับในของเหลวกับของเหลว ทำให้ตัวถูกดูดซับที่อยู่ในของเหลวเข้าไปติดอยู่ที่ตัวดูดซับแทน ส่วนการดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption หรือ Chemisorption) แรงที่ใช้ดูดซับเป็นพันธะโคเวเลนต์ มักเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตของตัวถูกดูดซับ โดยมีค่าพลังงานสูงมากในการเกิดพันธะ และการดูดซับทางเคมีเป็นการดูดซับอย่างแท้จริง

2.2.2 กระบวนการดูดซับ (Adsorption process)

การดูดซับเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (Mass transfer) จากแก๊สหรือของเหลวมายังของแข็งหรือของเหลว กลไกการดูดซับสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอนย่อย ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 Bulk transport เป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับจากบริเวณที่เป็นสารละลาย (Bulk solution) ไปยังชั้นแผ่นฟิล์มของน้ำ (Hydrodynamic boundary layer)

ขั้นตอนที่ 2 Film transport เป็นการแพร่ของตัวถูกดูดซับผ่านชั้นฟิล์มของน้ำไปยังผิวหน้าของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 3 Pore transport หรือ Intraparticle transport เป็นการแทรกตัวของสารเคมีเข้าไปภายในรูพรุนของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 4 Adsorption เป็นการยึดติดของตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ โดยมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของสารที่เป็นตัวถูกดูดซับกับโมเลกุลของสารที่เป็นส่วนประกอบของผิวหน้าตัวดูดซับเกิดขึ้น อาจเป็นแรงดึงดูดทางกายภาพ หรือแรงดึงดูดทางเคมี หรือทั้งสองแรงพร้อมกัน

2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

ความปั่นป่วน อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับ Film Diffusion และ Pore Diffusion ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนาแน่นมาก เป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาตัวดูดซับ ทำให้ Film Diffusion เป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูง ทำให้ Pore Diffusion เป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

พื้นที่ผิวของสารดูดซับ พื้นที่ผิวของสารดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (Adsorption capacity) ยกเว้นในกรณีที่มีโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของสารดูดซับ

ขนาดของตัวดูดซับ อัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ การลดขนาดของตัวดูดซับให้มีขนาดเล็กลง ทำให้อัตราเร็วในการดูดซับเร็วขึ้นกว่าสารดูดซับที่มีขนาดใหญ่

ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกดูดซับ เมื่อเกิดการดูดซับ โมเลกุลจะถูกดึงออกจากน้ำและเกาะติดบนผิวของตัวดูดซับ สารที่ละลายน้ำได้หรือแตกตัวเป็นไอออนได้จะมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำสูง ทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง ดังนั้นสารที่ไม่ละลายน้ำ หรือละลายน้ำได้น้อยจะสามารถเกาะติดบนผิวตัวดูดซับได้ดี

ขนาดของตัวถูกดูดซับ ขนาดของสารหรือโมเลกุลมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ โดยเฉพาะการดูดซับที่เกิดขึ้นภายในรูพรุนของสารดูดซับ ถ้าโมเลกุลของตัวถูกดูดซับนั้นมีขนาดเท่ากันหรือใหญ่กว่ารูพรุนของตัวดูดซับ ความสามารถในการดูดซับก็จะลดต่ำลง

ค่าพีเอช ค่าพีเอชของสารละลายเป็นปัจจัยที่สำคัญของการดูดซับ เนื่องมาจากค่าพีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของตัวถูกดูดซับ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อความสามารถในการดูดซับ

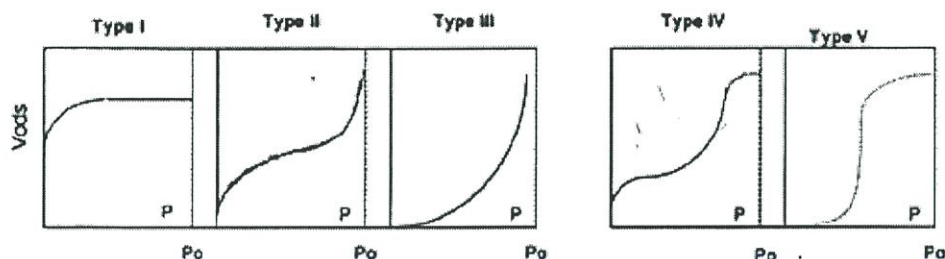
อุณหภูมิ ในกรณีที่มีการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน พบว่าเมื่ออุณหภูมิลดลงความสามารถในการดูดซับจะสูงขึ้น แต่อัตราเร็วในการดูดซับจะลดลง ในทางตรงกันข้ามถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะลดลง แต่อัตราเร็วในการดูดซับจะสูงขึ้น เนื่องจากความร้อนช่วยทำให้ความหนืดของฟิล์มน้ำลดลง การเคลื่อนย้ายของตัวถูกดูดซับจากสารละลายภายนอก (Bulk Solution) เคลื่อนที่เข้าหาตัวดูดซับได้เร็วขึ้น

2.2.4 ความสัมพันธ์สมดุลสำหรับการดูดซับ (Equilibrium relations for adsorption)

กระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นต่อไปเรื่อยๆ โดยสารจะถูกดูดซับและมีการคายซับไปพร้อมๆ กัน ซึ่งสมดุลจะเกิดขึ้นเมื่ออัตราการดูดซับและอัตราการคายซับมีค่าเท่ากัน ที่จุดนี้ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับจะเท่ากับความเข้มข้นในตัวดูดซับที่อุณหภูมิคงที่หนึ่งๆ เราใช้ Adsorption Isotherm เป็นตัวแทนในการอธิบายสมดุลที่เกิดขึ้น

Adsorption Isotherm คือ ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักสารที่ถูกดูดซับไปต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ และความเข้มข้นของสารนั้นยังคงเหลืออยู่ในสารละลาย แล้วนำไปสร้างกราฟลอการิทึม โดยให้ความเข้มข้นของสารที่เหลือในสารละลายเป็นแกนนอน และอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารที่ถูกดูดซับต่อตัวดูดซับเป็นแกนตั้ง เส้นโค้งที่เกิดจากการลากผ่านจุดที่ได้จากการทดลองทั้งหมดเรียกว่า Adsorption Isotherm ซึ่งมีประโยชน์มากในการหาความสามารถในการดูดซับ เพื่อเปรียบเทียบหาชนิดของตัวดูดซับที่ดีที่สุด

รูปร่างของไอโซเทอร์มการดูดซับจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการดูดซับ และปริมาณของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับ รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอร์มการดูดซับมีทั้งหมด 5 แบบ ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอร์มการดูดซับ

1. ไอโซเทอร์มแบบที่ I เรียกว่าไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ สำหรับการดูดซับที่เป็นแบบชั้นเดียว ตามสมการของแลงเมียร์ ไอโซเทอร์มแบบนี้มักจะพบในวัสดุที่มีความพรุน แต่ผิวหน้ามีพื้นที่ผิวภายนอกต่ำ เช่น ซีโอไลต์ หรือ ถ่านกัมมันต์บางชนิด ทำให้การดูดซับเกิดขึ้นเร็วในตอนต้น และเกิดการอิ่มตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้ค่าการดูดซับคงที่

2. ไอโซเทอร์มแบบที่ II บางครั้งเรียกว่า sigmoid หรือ ไอโซเทอร์มรูปตัวเอส มักจะเกิดกับวัสดุที่ไม่มีความพรุน หรือมีรูพรุนขนาดใหญ่ ตำแหน่งซึ่งคล้ายหัวเข่าเป็นตำแหน่งที่ผิวหน้าถูกคลุมแบบชั้นเดียว แล้วหลังจากนั้นจึงเริ่มการดูดซับแบบหลายชั้น

3. ไอโซเทอร์มแบบที่ III มีรูปร่างเหมือนกระจกแก้ว และไม่มีตำแหน่งที่เหมือนหัวเข่า ไอโซเทอร์มแบบนี้ไม่ค่อยพบบ่อย จะเกิดกับการดูดซับที่อ่อน เกิดเนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมีค่าต่ำ เช่น การดูดซับของสารที่มีขี้ผึ้ง หลังจากที่ผิวหน้าถูกคลุมหมดแล้ว การดูดซับจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว แสดงถึงแรงดูดซับระหว่างตัวถูกดูดซับกันเองมีสูง ตัวอย่างการดูดซับแบบนี้ ได้แก่ การดูดซับของไอน้ำบนแกรไฟต์

4. ไอโซเทอร์มแบบที่ IV มักพบในวัสดุที่มีรูพรุนแบบมีโซพอร์ จะเหมือนกับไอโซเทอร์มชนิดที่ II แต่หลังจากนั้นค่าการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งเกิดจากการควบแน่นในรูขนาดเล็กแบบกะปิลลารี (Capillary) ซึ่งทำให้เกิดฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) จากการที่เส้นกราฟของการดูดซับและเส้นกราฟของการคายซับไม่ทับกัน เพราะการคายซับเกิดได้ยากกว่า เนื่องจากต้องเอาชนะแรงกะปิลลารี (Capillary force)

5. ไอโซเทอร์มแบบที่ V เหมือนกับไอโซเทอร์มชนิดที่ IV ต่างกันเพียงการควบแน่นในรูพรุน ในกรณีนี้เกิดขึ้นเมื่อค่า P/P_0 สูงกว่า เนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ มีค่าต่ำ ฮิสเทอรีซิสจากการดูดซับและการคายซับเกิดจากการเอาชนะแรงกะปิลลารีในการดึงตัวถูกดูดซับออกมา ไอโซเทอร์มชนิดนี้พบไม่บ่อยนัก

2.2.5 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ไอโซเทอร์มของการดูดซับ เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่ละลายอยู่ในสารละลายที่สถานะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่ ไอโซเทอร์มของการดูดซับหลายสมการได้ถูกเสนอขึ้นเพื่อใช้อธิบายสมดุลของการดูดซับและหาค่าคงที่สมดุลการดูดซับ ในที่นี้จะขอกกล่าวถึงเพียงแค่ 2 ไอโซเทอร์มซึ่งเป็นที่ยอมรับได้แก่ ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) และไอโซเทอร์มแบบฟรุนด์ลิช (Freundlich isotherm)

ไอโซเทอร์มแบบเชิงเส้น (Linear isotherm)

ไอโซเทอร์มประเภทนี้แสดงให้เห็นว่าพื้นผิวของตัวดูดซับมีอยู่อย่างไม่มีขีดจำกัด ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับแปรผันตรงกับความเข้มข้นของสารที่ละลายอยู่ในสารละลาย ณ สถานะสมดุล ไอโซเทอร์มลักษณะนี้ใช้อธิบายสมดุลการดูดซับได้ดีกับตัวถูกดูดซับแบบไม่มีขั้ว (Non-polar adsorbate) และเมื่อตัวถูกดูดซับมีความเข้มข้นต่ำๆ โดยมีสมการดังนี้

$$q_e = K_d C_e \quad (2.16)$$

เมื่อ q_e = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ
 C_e = ความเข้มข้นของสารละลายที่เหลือหลังการดูดซับที่จุดสมดุล
 K_d = ค่าคงที่สมดุลการดูดซับ

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง q_e กับ C_e จะได้กราฟเส้นตรง ค่าคงที่สมดุลการดูดซับ (K_d) สามารถหาได้จากความชันของกราฟ

ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

ในปี ค.ศ. 1916 เออร์วิง แลงเมียร์ (Irving Langmuir) ได้เสนอไอโซเทอร์มแบบง่ายสุดโดยมีสมมติฐานคือ 1) ใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) 2) โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอนและมีตำแหน่งของการดูดซับที่แน่นอน 3) ในแต่ละโมเลกุลของตัวดูดซับจะดูดซับโมเลกุลของตัวถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น ในแต่ละตำแหน่งค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันและคงที่ ไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน จากการศึกษาไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ที่สถานะสมดุล สามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับสารละลาย ได้ดังสมการ 2.16

$$q_e = \frac{Q^0 \cdot b \cdot C_e}{1 + b \cdot C_e} \quad (2.16)$$

หรือ
$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{bQ^0} + \frac{C_e}{Q^0} \quad (2.17)$$

เมื่อ q_e = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ
 C_e = ความเข้มข้นของสารละลายที่เหลือหลังการดูดซับที่จุดสมดุล
 Q^0 = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับอิ่มตัวแบบชั้นเดียว
 b = ค่าคงที่แลงเมียร์ ณ อุณหภูมิหนึ่งๆ

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\frac{C_e}{q_e}$ กับ C_e จะได้กราฟเส้นตรง มีจุดตัดแกน $\frac{C_e}{q_e}$ เป็น $\frac{1}{bQ^0}$ และมี
 ความชันเท่ากับ $\frac{1}{Q^0}$

ไอโซเทอร์มแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich isotherm)

ในปี ค.ศ. 1880-1941 นักฟิสิกส์-เคมี ชาวเยอรมัน Herbert Max Finlay Freundlich ได้เสนอ
 สมการแสดงความสัมพันธ์ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายดังสมการ 2.18

$$q_e = \frac{x}{m} = k_f \cdot C_e^{1/n} \quad (2.18)$$

เมื่อ C_e = ความเข้มข้นของสารละลายที่เหลือหลังการดูดซับที่จุดสมดุล
 $\frac{x}{m}$ = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ
 k_f และ n = ค่าคงที่ ณ อุณหภูมิหนึ่งๆ

จากสมการฟรอนด์ลิช เมื่อใส่ลอการิทึม (Logarithm) จะได้สมการ

$$\log q_e = \log \frac{x}{m} = \log k_f + \frac{1}{n} \log C_e \quad (2.19)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log \frac{x}{m}$ กับ $\log C_e$ ที่อุณหภูมิคงที่ จะได้กราฟเส้นตรงจุดตัดแกน
 สามารถนำมาหาค่า k_f ได้ และความชันของกราฟเป็น $\frac{1}{n}$

2.3 ผงซักฟอก (Detergent)

ผงซักฟอก หมายถึง สารซักล้างที่มีสารลดแรงตึงผิวชนิดสังเคราะห์และ/หรือชนิด
 ธรรมชาติเป็นส่วนประกอบหลัก สำหรับใช้ซักผ้า อยู่ในรูปผงเม็ดเล็กๆ หรือเกล็ดอัดขึ้นรูป กึ่งแข็ง
 กึ่งเหลว อาจเป็นแท่ง หรือลักษณะอื่นๆ แต่ไม่มีลักษณะเป็นของเหลว มีสมบัติในการชำระล้างสิ่ง
 สกปรกทั้งหลายได้เช่นเดียวกับสบู่ ผงซักฟอกมีส่วนประกอบของฟอสฟอรัสอยู่ในรูปเกลือ
 ฟอสเฟต (Phosphate, PO_4^{3-})

2.3.1 ชนิดของผงซักฟอก

ผงซักฟอกแบ่งตามชนิดของสารลดแรงตึงผิวได้ 4 ประเภท ดังนี้

1. *ผงซักฟอกชนิดไอออนลบ (Anionic detergents)* มีสารลดแรงตึงผิวเป็นไอออนลบ เช่น Alkyl benzene sulfonate สามารถชำระล้างสิ่งสกปรกประเภทดิน โคลนออกจากผ้าฝ้ายและเส้นใยธรรมชาติอื่นๆ ได้ดี

2. *ผงซักฟอกชนิดไอออนบวก (Cationic detergents)* มีสารลดแรงตึงผิวเป็นไอออนบวกของ NH^+ เช่น Quaternary ammonium

3. *ผงซักฟอกชนิดไม่มีไอออน (Nonionic detergents)* มีสารลดแรงตึงผิวเป็นสารที่ไม่เกิดการแตกตัวเป็นไอออน เช่น Polyoxyethylene หรือสารประกอบจำพวก Glycoside เกิดฟองน้อย ทำงานได้ดีในทุกสภาพน้ำ สามารถชำระล้างสิ่งสกปรกประเภทไขมันออกจากพอลิเอสเตอร์หรือเส้นใยสังเคราะห์อื่นๆ ได้ดี

4. *ผงซักฟอกชนิดแอมโฟเทอริก (Amphiphilic detergents)* มีสารลดแรงตึงผิวเป็นสารที่สามารถแตกตัวเป็นได้ทั้งไอออนลบและไอออนบวก

2.3.2 ส่วนประกอบของผงซักฟอก

1. *บิลเดอร์ ฟอสเฟต (Builder phosphate)* มีปริมาณ 30-50% เช่น เตตระโซเดียมฟอสเฟต (Tetrasodium pyrophosphate, $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$) โซเดียมไตรพอลิฟอสเฟต (Sodium tripolyphosphate, $\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_{10}$) ฯลฯ มีคุณสมบัติในการรักษาสภาพน้ำให้เป็นเบสและปรับสภาพน้ำกระด้างให้กลายเป็นน้ำอ่อน ช่วยกระจายน้ำมันและสิ่งสกปรกออกเป็นอนุภาคเล็กๆ จนสามารถแขวนลอยในน้ำ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการชำระล้างสิ่งสกปรกทั้งหลายเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ไอออนฟอสเฟตจะรวมตัวกับไอออนของโลหะในน้ำกระด้างกลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ทำให้ไอออนของโลหะไม่สามารถขัดขวางการชำระล้างสิ่งสกปรกของผงซักฟอก

2. *สารลดแรงตึงผิว (Surface-active agent หรือ Surfactant)* มีปริมาณ 12-30% เป็นสารที่ทำหน้าที่ชำระล้างสิ่งสกปรกทั้งหลาย ได้แก่ เกลือโซเดียมอัลคิลซัลโฟเนต (Sodium alkylsulfonate, $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_6\text{SO}_3\text{Na}$) โซเดียมอัลคิลเบนซีนซัลโฟเนต (Sodium alkylbenzene sulfonate, $\text{R-C}_6\text{H}_4\text{-SO}_3\text{Na}$; $\text{R}=\text{C}_{10}\text{-C}_{13}$) ฯลฯ ช่วยให้วัสดุเปียกน้ำได้ง่าย และทำให้สิ่งสกปรกหลุดออกจากวัสดุ กลายเป็นอนุภาคเล็กๆ จากนั้นสารลดแรงตึงผิวจะเข้าไปล้อมรอบสิ่งสกปรกนั้นไว้

3. *ซิลิเกต (Silicates)* มีปริมาณ 5-10% เช่น โซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate, Na_2SiO_3) ช่วยป้องกันการเกิดสนิมของชิ้นส่วนอะลูมิเนียม เช่น กระจุม ชิป เป็นต้น และยึดสิ่งสกปรกเอาไว้ไม่ให้กลับไปจับกับพื้นผิวของวัสดุอีก ช่วยเพิ่มความสดใส ดูขาวสะอาด โดยการดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตไว้ ทำให้เกิดการสะท้อนแสงเข้าที่ตาของสิ่งมีชีวิต

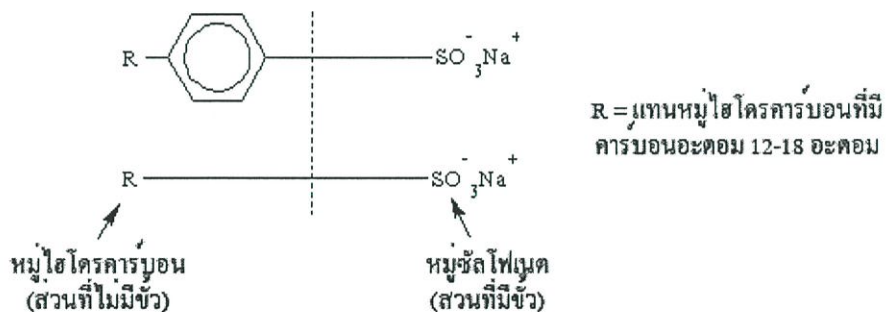
4. สารเพิ่มฟอง (*Suds booster*) เช่น โซเดียมลอริลซัลเฟต (Sodium lauryl sulfate, $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{CH}_2(\text{OCH}_2\text{CH}_2)_n\text{OSO}_3\text{Na}$) ช่วยลดแรงตึงผิวของน้ำทำให้เกิดฟองได้ดี เป็นส่วนประกอบในผงซักฟอกประเภทซักมือ

5. โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (*Sodium carboxymethylcellulose*, $[\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_2(\text{OH})_x(\text{OCH}_2\text{COONa})_y]_n$) มีปริมาณ 0.5-1% เป็นสารจำพวกอิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifiers) ช่วยป้องกันการเกิดตะกอน

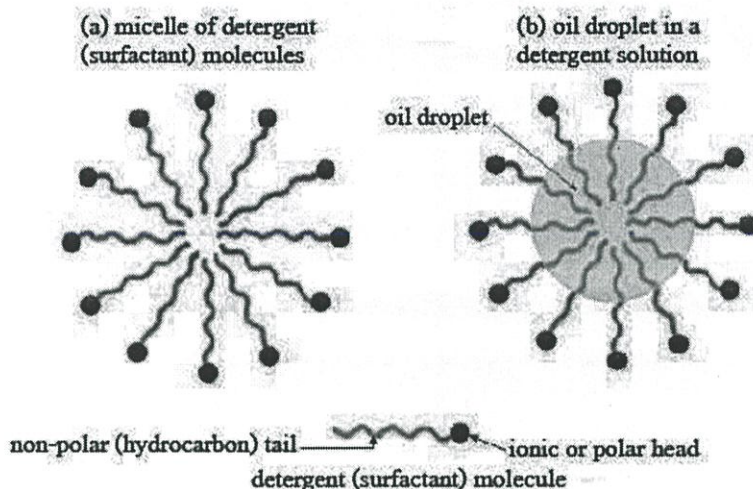
6. ส่วนประกอบอื่นๆ เช่น น้ำหอม สี สารฟอก สารช่วยการละลาย สารกันเหมอม สารต้านอนุมูลอิสระ เอนไซม์ สารช่วยให้ผ้านุ่ม สารกันไฟฟ้าสถิต ฯลฯ

2.3.3 การนำไปใช้ประโยชน์

โครงสร้างโมเลกุลของผงซักฟอกมีลักษณะเป็นแบบ Amphiphilic คือประกอบด้วยส่วนที่มีขั้วและไม่มีขั้วเหมือนกับลักษณะโมเลกุลของไขมัน ส่วนที่มีขั้ว (Polar) เป็นหมู่ซัลโฟเนต (Sulfonate, $\text{SO}_3^- \text{Na}^+$) ซึ่งชอบน้ำ (Hydrophilic) และส่วนที่ไม่มีขั้ว (Non-polar) เป็นหมู่ไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon, $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$) ซึ่งไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) เมื่อละลายผงซักฟอกลงในน้ำจะเกิดโครงสร้างแบบไมเซลล์ (Micelle) โดยจะหันด้านที่ชอบน้ำออกด้านนอก ส่วนด้านที่ไม่ชอบน้ำจะอยู่ด้านในกลายเป็นโมเลกุลวงกลม เมื่อผงซักฟอกพบกับสิ่งสกปรก จะเข้าไปล้อมรอบให้อนุภาคสิ่งสกปรกอยู่ในวงกลมแล้วพาออกจากพื้นผิวของวัสดุ ทำให้สามารถชำระล้างสิ่งสกปรกออกไปได้



รูปที่ 2.5 โครงสร้าง โมเลกุลของผงซักฟอก



รูปที่ 2.6 โครงสร้างแบบไมเซลล์ของผงซักฟอก

ที่มา : <http://www.scidatdaruni.org>

2.3.4 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

หากในแหล่งน้ำมีฟอสฟอรัสที่ละลายได้ในปริมาณมากจะทำให้ผู้ผลิต (Producer) ในห่วงโซ่อาหาร ได้แก่ พืชน้ำ (Aquatic plants) สาหร่าย (Algae) และแพลงก์ตอนพืช (Phytoplankton) เจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว (Overdrive growth) จนเกิดการสูญเสียภาวะสมดุลของระบบนิเวศในน้ำ เรียกว่า ปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication or Algae bloom)

ปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชันมีสาเหตุมาจากปริมาณของฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปของสารประกอบฟอสเฟตในน้ำมากกว่า 0.01 mg/L และปริมาณไนโตรเจนในรูปของสารประกอบไนเตรต ($-NO_3$) มากกว่า 0.3 mg/L ซึ่งทั้งฟอสฟอรัสและไนโตรเจนเป็นธาตุอาหารสำคัญในการเจริญเติบโตของผู้ผลิตในแหล่งน้ำ หากมีปริมาณที่เหมาะสม ก็จะก่อให้เกิดผลดีต่อแหล่งน้ำ เพราะทำให้เกิดการสังเคราะห์ด้วยแสง (Photosynthesis) ส่งผลให้มีการปลดปล่อยออกซิเจนออกสู่แหล่งน้ำ และมีอาหารสำหรับสัตว์น้ำเพิ่มมากขึ้น แต่หากมีปริมาณมากเกินไป เมื่อมีอาหารสำหรับสัตว์น้ำมาก ก็จะส่งผลให้สัตว์น้ำมีการขยายพันธุ์มากขึ้น จนปริมาณออกซิเจนในแหล่งน้ำไม่เพียงพอต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ เมื่อสัตว์น้ำตาย ทำให้น้ำเน่าเสียมากขึ้น ในทำนองเดียวกัน หากในแหล่งน้ำมีปริมาณสัตว์น้ำเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับจำนวนของผู้ผลิตในแหล่งน้ำ เมื่อผู้ผลิตเพิ่มจำนวนมากขึ้น จะทำให้ความต้องการใช้ออกซิเจนในการหายใจมากขึ้น แหล่งน้ำที่บึงแสงมากขึ้นแสงไม่เพียงพอต่อการสังเคราะห์ด้วยแสง ทำให้ผู้ผลิตตายลง มีการย่อยสลายก่อให้เกิดน้ำเน่าเสียเช่นเดียวกัน ถ้าเกิดในทะเลหรือทะเลสาบจะมีลักษณะที่เรียกว่ากระแสน้ำแดง (Red tide) มองเห็นสีของน้ำเปลี่ยนเป็นสีแดง เนื่องจากการเจริญเติบโตที่มากเกินไปของแพลงก์ตอนพืชหรือไดโนแฟลกเจลเลตจำพวก Noctiluca สายพันธุ์หนึ่งที่ตายและเริ่มสลายตัว (ปิ่น ช่างทอง, 2557)

2.4 ฟอสฟอรัส

ฟอสฟอรัส (Phosphorus) เป็นธาตุที่ 2 ของหมู่ V A ในตารางธาตุ จัดเป็นอโลหะ มีสมบัติทั่วไปดังแสดงในตารางที่ 2.2

ฟอสฟอรัสถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1669 โดยพ่อค้าชาวเยอรมัน Henning Brand ซึ่งนำทรายขาวและน้ำปัสสาวะมากลั่นได้เป็นของแข็งสีขาวที่สามารถเรืองแสงในที่มืด และติดไฟได้ด้วยตัวเองในอากาศ ต่อมาในปี ค.ศ. 1771 K.W. Scheele สามารถเตรียมธาตุนี้ได้ปริมาณมาก โดยนำแคลเซียมฟอสเฟต (ขี้เถ้ากระดูก) มาผสมกับทรายและคาร์บอนแล้วให้ความร้อน ในศตวรรษที่ 21 มีหลักฐานพอเชื่อได้ว่านักเล่นแร่แปรธาตุ (Alchemist) ชาวอาหรับ ได้ค้นพบฟอสฟอรัสโดยทำการทดลองทำนองเดียวกับ Henning Brand แต่เนื่องจาก Brand เป็นผู้แรกที่ประกาศการค้นพบธาตุนี้ จึงถือว่า Brand เป็นผู้แรกที่ค้นพบธาตุฟอสฟอรัส ชื่อของธาตุนี้มาจากภาษากรีกคำหนึ่งซึ่งมีความหมายตรงกับภาษาอังกฤษว่า Light bearing แปลว่า "มีแสง" หรือ "เกิดแสง" ฟอสฟอรัสเป็นอโลหะมีประมาณสิบอัญรูป (Allotrope) ที่สำคัญมีสามอัญรูป คือ ฟอสฟอรัสขาว ฟอสฟอรัสแดง และฟอสฟอรัสดำ ในธรรมชาติธาตุฟอสฟอรัสไม่มีปรากฏอยู่ในภาวะอิสระ เนื่องจากมีความว่องไวมากในการทำปฏิกิริยาเคมี ดังนั้นจึงปรากฏอยู่แต่ในภาวะรวมตัวกับธาตุอื่นเป็นสารประกอบ และพบกระจัดกระจายอยู่ทั่วไปในเปลือกโลก จัดว่ามีอยู่มากในเปลือกโลกเป็นอันดับที่ 12 มีปรากฏอยู่ในลักษณะเป็นสารประกอบฟอสเฟตในแร่ธาตุต่างๆ เกือบ 200 ชนิด (ชัยวัฒน์ เจนวณิชย์, ม.ป.ป.)

ตารางที่ 2.2 สมบัติทั่วไปของฟอสฟอรัส

เลขอะตอม, สัญลักษณ์	15, P
มวลอะตอม	30.973762 g/mol
การจัดเรียงอิเล็กตรอน	[Ne] 3s ² 3p ²
สถานะ	ของแข็ง
จุดหลอมเหลว	317.3 K (44.2 °C)
จุดเดือด	550 K (277 °C)
ความหนาแน่น (ของแข็ง)	1.83 g/cc
เลขออกซิเดชันสามัญ	+3, +5, -3

2.4.1 ฟอสฟอรัสในดิน

ฟอสฟอรัสในสารละลายดินเป็นไอออนลบของกรดออร์โทฟอสฟอริก (H_3PO_4) รูปของไอออนลบจึงมีได้ 3 แบบขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของสารละลายดิน เมื่อพีเอชของดินต่ำกว่า 6.8 รูปที่เป็นประโยชน์และมีอยู่มากคือ $H_2PO_4^-$ ซึ่งพืชดูดไปใช้ได้ง่ายที่สุด พีเอชระหว่าง 6.8-7.2 จะมีอยู่ในรูป HPO_4^{2-} มากซึ่งพืชดูดได้ช้ากว่ารูปแรก หากพีเอชสูงกว่า 7.2 จะมี PO_4^{3-} เป็นส่วนใหญ่ซึ่งพืชดูดใช้ได้ยาก เมื่อพืชดูดไอออนฟอสเฟตเข้าไปในเนื้อเยื่อพืชแล้วจะไม่ผ่านกระบวนการรีดักชันเพื่อเปลี่ยนรูปเหมือนไนเตรตหรือซัลเฟต แต่คงอยู่ในรูปของฟอสเฟตเหมือนเดิมในสองสภาพคือ อินทรีย์ฟอสเฟตและองค์ประกอบของอินทรีย์สาร

แหล่งกำเนิด

- **หินฟอสเฟต** แหล่งของหินฟอสเฟตส่วนใหญ่อยู่ในทวีปแอฟริกาและอเมริกาเหนือ หินฟอสเฟตเป็นหินตะกอนที่มีแคลเซียมปะปนอยู่ในปริมาณสูง โดยเฉพาะแคลเซียมฟลูออโรฟอสเฟต (Calcium fluorophosphates, $Ca_5(PO_4)_3F$) และมีองค์ประกอบทางเคมีคล้ายพวก Apatite $Ca_5(PO_4)_3 \pm CO_3, \pm OH, \pm F, \pm Cl$ หินฟอสเฟตที่พบ เช่น Collophane, Francolite และ Dahllite

- **ปุ๋ย** ปุ๋ยฟอสเฟต (Phosphate fertilizers) หรือปุ๋ยฟอสฟอรัส (Phosphorus fertilizers) คือปุ๋ยที่ให้ธาตุฟอสฟอรัส ปุ๋ยฟอสเฟตที่ใช้กันในปัจจุบันได้มาจากแร่พวกหินฟอสเฟต ซึ่งเป็นแร่พวกแคลเซียมฟอสเฟต หินฟอสเฟตที่ขุดพบและใช้ทำปุ๋ยส่วนใหญ่ในปัจจุบันเป็นพวก Francolite ประเทศที่พบมากที่สุดได้แก่ สหรัฐอเมริกา มอริอ็อกโก จอร์แดน รัสเซีย จีน เป็นต้น วิธีการผลิตปุ๋ยฟอสฟอรัสที่นิยมกันคือ การเอาหินฟอสเฟตมาบดละเอียดมาทำปฏิกิริยากับกรดกำมะถันจะได้กรดฟอสฟอริก กรดฟอสฟอริกนี้ถือเป็นสารตั้งต้นในการผลิตปุ๋ยฟอสฟอรัสต่างๆ กรดฟอสฟอริกเป็นของเหลว เก็บรักษายาก ใช้งานและขนส่งยาก จึงมักนำมาทำปฏิกิริยากับแอมโมเนียเป็นแม่ปุ๋ย DAP (Diammonium Phosphate) แม่ปุ๋ย MAP (Monoammonium Phosphate) หรือปุ๋ย NPK สูตรต่างๆ อย่างที่เรารู้จักกันทั่วไป

ฟอสฟอรัสกับการเจริญเติบโตของพืช

พืชต้องการฟอสฟอรัส 0.3-0.5% (โดยน้ำหนักแห้ง) เพื่อให้การเจริญเติบโตในระยะ vegetative stage) เป็นไปตามปกติ สำหรับปริมาณที่ถือว่าเป็นพิษ คือ สูงกว่า 1% (โดยน้ำหนักแห้ง) พืชที่ขาดฟอสฟอรัสมีการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญ 2 ประการคือ 1) ใบขยายขนาดช้าลง เล็ก และ 2) จำนวนใบน้อย สาเหตุที่แผ่นใบมีการขยายช้าก็เพราะเซลล์ชั้นผิวไม่ค่อยขยายตัว อันเนื่องมาจากเซลล์ชั้นผิวมีฟอสฟอรัสต่ำ และ สภาพนำน้ำของราก (Root hydraulic conductivity) ลดลง อย่างไรก็ตามแม้ว่าการขยายขนาดของใบจะลดลงอย่างมาก แต่ปริมาณโปรตีนและคลอโรฟิลล์ต่อหน่วยพื้นที่ใบลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากขนาดใบลดมากแต่คลอโรฟิลล์ลด

น้อยกว่า ทำให้ใบพืชที่ขาดฟอสฟอรัสในระยะแรกมีใบสีเขียวเข้มขึ้น แต่เมื่อพิจารณาอัตราการสังเคราะห์แสงต่อหน่วยคลอโรฟิลล์พบว่ามีการลดลงไป

เมื่อการเจริญเติบโตของส่วนเหนือดินลดลงมาก แต่มีผลกระทบต่อรากน้อย ดังนั้นพืชที่ขาดฟอสฟอรัสจึงมีค่าสัดส่วนระหว่างส่วนเหนือดินกับราก (Shoot-root ratio) ลดลงด้วย

การขาดฟอสฟอรัสก็เป็นสาเหตุที่ทำให้กระจายของคาร์โบไฮเดรตลงมายู่ที่รากมากขึ้น สำหรับถั่วที่ขาดธาตุนี้มีคาร์โบไฮเดรตในราก 27% ของที่มีทั้งต้น ในขณะที่พืชปกติมี 15.7% ด้วยเหตุนี้รากพืชที่ขาดฟอสฟอรัสยังสามารถยึดตัวได้ในขณะที่ส่วนเหนือดินหยุดการเจริญเติบโตแล้ว ถั่วสามตา (*Stylosanthes hamata*) ซึ่งขาดฟอสฟอรัสนี้สะสมในรากมาก และยังได้รับอีกส่วนหนึ่งซึ่งเคลื่อนย้ายมาจากส่วนเหนือดินอีกด้วย จึงทำให้รากสามารถเจริญต่อไปได้ พฤติกรรมดังกล่าว คือ ความพยายามที่จะรักษาสภาพให้รากมีความสามารถหาธาตุอาหารที่ขาดแคลนมาเพิ่มเติม (ขงยุทธ โอสดสภา, 2521)

การขาดฟอสฟอรัสของพืชมีผลกระทบต่อการเจริญพันธุ์อย่างมาก เช่น ออกดอกช้า จำนวนดอก ผล และเมล็ดน้อยลง การที่ใบพืชเสื่อมตามอายุและร่วงหล่นเร็วกว่าปกติ เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ผลผลิตเมล็ดต่ำ

2.4.2 ฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำ

ฟอสฟอรัสที่พบในแหล่งน้ำและน้ำทิ้งจะอยู่ในรูปต่างๆ เช่น ออร์โธฟอสเฟต คอนเดนส์ฟอสเฟต (pyro, meta, ortho) หรืออยู่ในรูปของอินทรีย์ฟอสเฟต ฟอสเฟตอาจอยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ สารแขวนลอย หรืออยู่ในร่างกายของสิ่งมีชีวิต

แหล่งกำเนิด

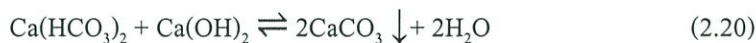
น้ำทิ้งจากชุมชนที่มาจากกาซักผ้าหรือการทำความสะอาดอื่นๆ ที่ใช้ผงซักฟอก จะพบว่ามีปริมาณฟอสเฟตอยู่มาก เพราะฟอสเฟตเป็น Building block ของผงซักฟอก ในโรงงานอุตสาหกรรมฟอสเฟตถูกใช้ในกระบวนการควบคุมการตกตะกอนในหม้อไอน้ำ (Boiler) นอกจากนี้สารประกอบออร์โธฟอสเฟตยังถูกใช้มากในการกลสิกรรมในรูปของปุ๋ย ซึ่งจะถูกระงับไปในแหล่งน้ำเมื่อมีฝนตก

การกำจัดฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำ

การกำจัดฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำนิยมใช้วิธีการตกตะกอนทางเคมี ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูง แต่มีข้อเสียในส่วนของต้นทุนที่สูงและก่อให้เกิดกากตะกอนเพิ่มมากขึ้นจากปกติถึง 40% ส่วนอีกวิธีหนึ่งคือการบำบัดด้วยวิธีทางชีวภาพ

การตกตะกอนทางเคมี

แคลเซียม (Calcium) ส่วนใหญ่จะถูกนำมาใช้ในรูปของปูนขาว ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับสารประกอบไบคาร์บอเนตของแคลเซียมหรือแมกนีเซียมที่ก่อให้เกิดความกระด้างชั่วคราวในน้ำ ได้ผลิตภัณฑ์คือแคลเซียมคาร์บอเนตตกตะกอนลงมา

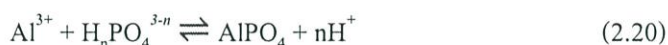


ในกรณีที่ค่าพีเอชของน้ำเสียมีค่ามากกว่า 10 ไฮดรอกไซด์ไอออนแคลเซียมที่มากเกินไปจะทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออนฟอสเฟตในน้ำ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นตะกอนของไฮดรอกซีแอพาทิต (Hydroxylapatite)



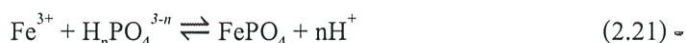
เนื่องมาจากปฏิกิริยาระหว่างปูนขาวและความกระด้างของน้ำ ส่งผลให้ปริมาณปูนขาวที่ต้องเติมไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณของไฮดรอกไซด์ไอออนฟอสเฟตในน้ำเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้จะต้องทำการปรับค่าพีเอชของน้ำให้เป็นกลางก่อนที่จะส่งไปบำบัดหรือกำจัดต่อไป โดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide, CO_2) เป็นตัวปรับค่าพีเอช

อะลูมิเนียมหรือเหล็ก (Aluminium or Iron) สารส้มหรือสารประกอบไฮดรอกไซด์อะลูมิเนียมซัลเฟต (Hydrated aluminium sulphate, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$) ถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในการตกตะกอนฟอสเฟต ปฏิกิริยาเกิดดังต่อไปนี้



ปฏิกิริยาข้างต้นค่อนข้างที่จะยุ่งยากซับซ้อน อันเนื่องมาจากการแข่งขันของการเกิดปฏิกิริยาอื่นๆ รวมถึงปัจจัยอื่นๆ เช่น ค่าความกระด้างของน้ำ ค่าพีเอช และส่วนประกอบของสารต่างๆที่อยู่ในน้ำ ประสิทธิภาพของการตกตะกอนนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณของสารส้มที่เติมลงไป ในน้ำ ในทางปฏิบัติประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสจะอยู่ที่ประมาณ 80-90% เมื่อทำการเติมสารส้ม 50-200 mg/L ซึ่งน้ำแต่ละแห่งแต่ละชนิดก็ต้องการปริมาณของสารส้มในปริมาณที่แตกต่างกัน จึงจะต้องทำการหาปริมาณของสารส้มที่เหมาะสมในการตกตะกอนโดยใช้วิธี Jar test

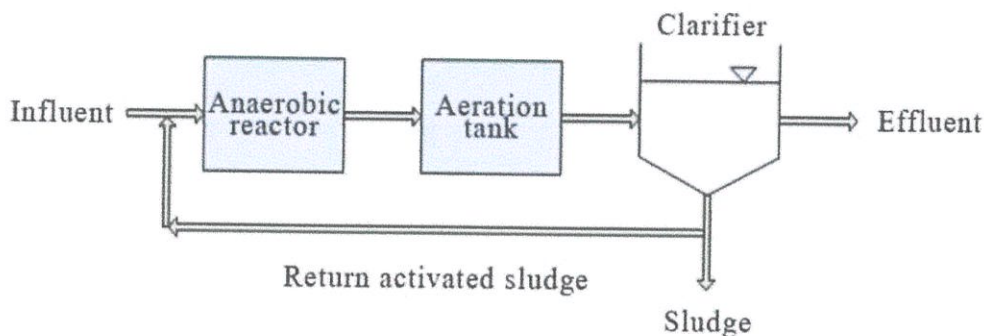
เฟอร์ริกคลอไรด์ เฟอร์ริกซัลเฟต และเฟอร์รัสซัลเฟตก็นิยมนำไปใช้ในการกำจัดฟอสฟอรัสเช่นกัน ถึงแม้ว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะยังไม่สามารถเข้าใจได้อย่างถ่องแท้ โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีดังนี้



ไฮดรอกไซด์ไอออนของเหล็กจะทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออนฟอสเฟตได้ผลิตภัณฑ์คือเฟอร์ริกฟอสเฟต หากตัวอย่างน้ำมีความกระด้าง ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ช้าเช่นเดียวกับกรณีของปูนขาว จึงต้องทำการปรับค่าพีเอชให้สูงขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตกตะกอน

การบำบัดทางชีวภาพ

วิธีการบำบัดทางชีวภาพที่ถูกนำมาใช้ในการกำจัดฟอสฟอรัส มีข้อดีคือ ใช้ต้นทุนต่ำกว่า และก่อให้เกิดกากตะกอนน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการตกตะกอนทางเคมี

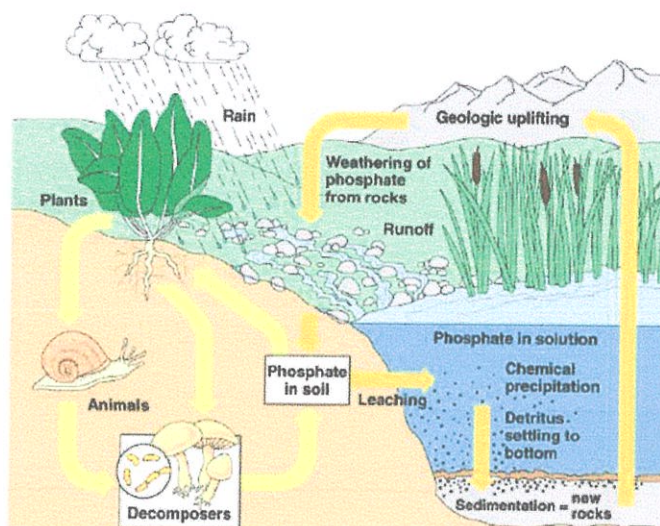


รูปที่ 2.7 ระบบบำบัดทางชีวภาพที่ใช้ในการกำจัดฟอสฟอรัส

ฟอสฟอรัสที่อยู่ในน้ำจะถูกสะสมอยู่ในเซลล์ของจุลินทรีย์ และจะออกจากระบบบำบัดในรูปของกากตะกอน โดยในระบบบำบัดจะมีจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการใช้ฟอสเฟตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายภายใต้สิ่งแวดล้อมที่เหมาะสม (P accumulating organisms) ระบบบำบัดทางชีวภาพ ประกอบด้วยบ่อบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic tank) บ่อบำบัดแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic tank) และถังตกตะกอน ในขั้นตอนสุดท้ายเมื่อตะกอนแยกชั้นกับน้ำส่วนใสแล้ว ตะกอนส่วนหนึ่งจะถูกสูบย้อนกลับไปเข้าสู่ระบบบำบัดพร้อมกับน้ำเสียชุดใหม่อีกครั้ง อีกส่วนหนึ่งจะเป็นตะกอนส่วนเกินที่ต้องนำไปกำจัด

2.4.3 วัฏจักรฟอสฟอรัส

กระบวนการที่ฟอสฟอรัสถูกหมุนเวียนจากดินสู่ทะเลและจากทะเลสู่ดิน เกิดจากกระบวนการตกตะกอน (Precipitation) ฟอสฟอรัสเป็นธาตุที่มีอยู่ในธรรมชาติเพียงเล็กน้อย โดยเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของธรณีวิทยา ฟอสฟอรัสถูกนำมาใช้หมุนเวียนระหว่างสิ่งมีชีวิตและสิ่งไม่มีชีวิตในปริมาณจำกัด และจะหายไปจากห่วงโซ่อาหาร โดยการตกตะกอนในรูปของสารประกอบอินทรีย์ไปสู่แหล่งน้ำ รวมทั้งโครงกระดูก เปลือกหอย และซากปะการัง ซึ่งจะทับถมกันเป็นกองฟอสเฟต สิ่งมีชีวิตจำพวกโพรติสต์ (Protist) ในทะเลที่สามารถสังเคราะห์ด้วยแสงได้สามารถนำเอาสารประกอบฟอสเฟตเหล่านี้ไปใช้ในการเจริญเติบโตได้ ทำให้มีปริมาณแพลงก์ตอนพืชเพิ่มขึ้น และแพลงก์ตอนพืชเหล่านี้ก็จะถูกกินโดยแพลงก์ตอนสัตว์ และสัตว์น้ำต่อไปตามห่วงโซ่อาหาร ฟอสฟอรัสก็จะถูกถ่ายทอดไปตามลำดับชั้น จนกระทั่งสิ่งมีชีวิตต่างๆขับถ่ายหรือตายลง เกิดการกักตุนสะสมลงด้วยน้ำฝนละลายลงสู่แหล่งน้ำ จะมีจุลินทรีย์บางชนิดเปลี่ยนฟอสฟอรัส ให้เป็นสารประกอบฟอสเฟตอยู่ในแหล่งน้ำอีกครั้ง (ภาวิกา หงษ์ทอง, ม.ป.ป.)



รูปที่ 2.8 วัฏจักรฟอสฟอรัส

ที่มา : <http://surattana64.blogspot.com/p/phosphorus-cycle.html>

2.5 คะน้า

คะน้า (Chinese kale) เป็นผักที่นิยมปลูกกันในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ สามารถปลูกได้ทุกฤดู และทั่วทุกภาคของประเทศ แต่ช่วงเวลาที่ปลูกได้ผลดีที่สุดจะอยู่ในช่วงเดือนตุลาคมถึงเดือนเมษายน อายุตั้งแต่หว่านเมล็ดจนถึงเก็บเกี่ยวประมาณ 45-55 วัน มีความทนทานต่อความเค็มของดินสูง ทนต่อความเป็นกรดของดินได้ปานกลาง

คะน้าสามารถปลูกได้ในดินแทบทุกชนิดที่มีความอุดมสมบูรณ์ อุณหภูมิที่เหมาะสมประมาณ 25-30 °C มีความเป็นกรดเบสของดินอยู่ระหว่าง 5.5-6.8 มีแสงแดดเต็มที่ตลอดวัน และมีความชื้นในดินสูงสม่ำเสมอ (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2551)



รูปที่ 2.9 ต้นคะน้า

1. การเพาะกล้าและเตรียมดิน

การเพาะกล้า แปลงเพาะควรมีขนาดกว้าง 1' m ทำการไถพรวนดินอย่างดี ตากดินไว้ประมาณ 5-7 วัน ย่อยหน้าดินให้ละเอียด แล้วใส่ปุ๋ยคอกหรือปุ๋ยหมักที่สลายตัวดีแล้ว คลุกเคล้าให้เข้ากับดินให้ทั่ว จากนั้นจึงหว่านเมล็ดให้กระจายสม่ำเสมอทั่วแปลง ให้เมล็ดห่างกันประมาณ 2-3 cm กลบเมล็ดด้วยดินผสมหรือปุ๋ยคอกให้หนาประมาณ 0.6-1 cm คลุมด้วยฟางหรือหญ้าแห้งบางๆ รดน้ำให้ชุ่มด้วยบัวฝอยละเอียด ต้อนกล้าจะงอกภายใน 7 วัน เมื่อกล้ามียายุประมาณ 25-30 วัน จึงทำการย้ายไปปลูกในแปลงปลูก

ระบบปลูกและระยะปลูก การปลูกคะน้านิยมปลูกแบบหว่านกระจายทั่วแปลงสำหรับแปลงปลูกขนาดใหญ่เป็นการค้า และแบบแถวสำหรับแปลงปลูกขนาดเล็กหรือผักสวนครัว ควรให้มีระยะปลูกระหว่างต้นและระหว่างแถวประมาณ 20x20 cm

การเตรียมดิน เนื่องจากคะน้าเป็นผักรากตื้นจึงควรขุดดินให้ลึกประมาณ 15-20 cm ตากดินทิ้งไว้ประมาณ 7-10 วัน แล้วนำปุ๋ยคอกหรือปุ๋ยหมักที่สลายตัวดีแล้วมาใส่ คลุกเคล้าให้เข้ากับดิน พรวนย่อยหน้าดินให้มีขนาดเล็ก โดยเฉพาะการปลูกแบบหว่าน โดยตรงลงในแปลง เพื่อมิให้เมล็ดตกลงไปในดิน เพราะจะไม่งอกหรืองอกยากมาก ถ้าเป็นดินกรดควรใส่ปูนขาวเพื่อปรับปรุงดินให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสม

2. การปลูก

หลังจากเตรียมดินโดยย่อยหน้าดินให้ละเอียดแล้ว นิยมหว่านเมล็ดลงในแปลงปลูกโดยตรงมากกว่าการย้ายกล้า โดยใช้วิธีเดียวกับการเพาะกล้าข้างต้น หลังจากคะน้างอกแล้วประมาณ 20 วัน หรือต้นสูงประมาณ 10 cm ให้ทำการถอนแยกครั้งแรก โดยเลือกถอนต้นที่ไม่สมบูรณ์ออก ให้เหลือระยะห่างระหว่างต้น 20 cm ในการถอนแยกแต่ละครั้งควรทำการกำจัดวัชพืชไปในตัวด้วย จากนั้นเมื่อมีอายุประมาณ 30 วันจึงทำการถอนแยกครั้งที่สอง

3. การดูแลรักษา

การใส่ปุ๋ย เนื่องจากคะน้าเป็นผักกินใบและลำต้นจึงควรใส่ปุ๋ยที่มีธาตุไนโตรเจนสูง สัดส่วนของธาตุอาหารในปุ๋ยที่ใช้คือ N:P:K เท่ากับ 2:1:1 ในอัตราประมาณ 100 kg/ไร่ โดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง ครั้งละเท่าๆ กัน คือ ใส่หลังจากถอนแยกครั้งแรกและหลังจากถอนแยกครั้งที่สอง อย่างไรก็ตามหากสังเกตเห็นว่าผักไม่ค่อยเจริญเติบโตเท่าที่ควรอาจจะใส่ปุ๋ยบำรุงเพิ่มเติม เช่น ปุ๋ยยูเรีย โดยให้ทางรากหรือละลายน้ำในอัตราประมาณ 3-4 ช้อนแกงต่อน้ำ 1 ปี๊บ ฉีดพ่นทางใบ

การให้น้ำ คะน้าเป็นพืชที่ต้องการน้ำอย่างเพียงพอและสม่ำเสมอเพราะต้นคะน้ามีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว หากคะน้าขาดน้ำจะทำให้ชะงักการเจริญเติบโตและคุณภาพไม่ดีเท่าที่ควร โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระยะเวลาที่เมล็ดเริ่มงอก วิธีการให้น้ำคะน้าทำได้โดยฉีดพ่นให้ทั่วและชุ่ม ให้น้ำคะน้าวันละ 2 เวลา คือ เช้าและเย็น

4. การเก็บเกี่ยว

คน้ำอายุ 45 วันเป็นระยะที่ตลาดมีความต้องการมาก แต่คน้ำที่มีอายุ 50-55 วันเป็นระยะที่เก็บเกี่ยวได้น้ำหนักมากกว่า ควรเก็บเกี่ยวในเวลาเช้า โดยใช้มีดตัดให้ชิดโคนต้น เมื่อเก็บเกี่ยวเสร็จให้รีบนำเข้าร่มในที่อากาศโปร่งและเย็น

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กนกอร ประยูรพันธ์ (2549) ผู้วิจัยได้ศึกษาการดูดซับกรดแลคติกจากสารละลายกรดแลคติกมาตรฐาน และอาหารหมักด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบชนิดเบสอ่อนที่มีชื่อทางการค้าว่า Amberlite IRA-96 โดยทำการทดลองแบบกะ ค่าความเข้มข้นสูงสุดของการดูดซับสารละลายกรดแลคติกมาตรฐานของเรซินที่ความเร็วในการเขย่า 200 rpm ค่าพีเอชเท่ากับ 5 อุณหภูมิ 20, 25, 30 และ 35°C ได้ค่า 128, 152, 155 และ 190 mg/g ตามลำดับ ค่า ΔH° และ ΔS° ที่ได้เป็นบวก ค่า ΔG° มีค่าเป็นลบ ที่อุณหภูมิ 35 °C การแลกเปลี่ยนไอออนในระบบกะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและถึงสมดุลใน 1 นาที ไอโซเทอร์มที่ได้มีรูปร่างตามแบบสมการของโบลท์ซแมนน์ (Boltzmann) ซึ่งมีรูปร่างคล้ายตัวเอส ($y = -0.9564x + 3.4007$) ความเข้มข้นสูงสุดของการดูดซับกรดแลคติกในสารละลายกรดแลคติกมาตรฐาน และในอาหารหมักได้ค่าประมาณ 190 และ 130 mg/g ตามลำดับ

ยะโก๊ะ ขาเริ่มดาเบะ (2553) ผู้วิจัยได้ศึกษาการดูดซับออร์โทฟอสเฟตในน้ำเสียด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติ โดยทำการทดลองเพื่อหาไอโซเทอร์มของการดูดซับด้วยการเติมซีโอไลต์ธรรมชาติ 1 g ลงในน้ำเสียดังเคราะห์ KH_2PO_4 ที่มีความเข้มข้นของออร์โทฟอสเฟตตั้งแต่ 0-50 mg/L ปริมาตร 50 mL ค่าพีเอชเท่ากับ 12 นำไปเขย่าด้วยความเร็ว 160 rpm ที่เวลาต่างๆ กัน ผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมการดูดซับออร์โทฟอสเฟตด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติ มีความสอดคล้องกับสมการ Freundlich isotherm ($y = 3.0571x + 1.3819$) และเมื่อประยุกต์ใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียจากการซักผ้าที่มีความเข้มข้นของ PO_4^{3-} 18.43 ± 0.01 mg/L โดยผ่านชุดกรองแบบน้ำไหลผ่านอย่างต่อเนื่อง พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตสูงถึง 94.08%

รัตนากร ยวงสวัสดิ์ และคณะ (2554) กลุ่มผู้วิจัยได้ศึกษาการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียด้วยเปลือกหอยนางรมเหลือทิ้ง โดยทำการทดลองเพื่อหาไอโซเทอร์มของการดูดซับด้วยการเติมเปลือกหอยนางรมบดที่ทำการเผาภายใต้บรรยากาศต่างๆ กัน (อากาศและไนโตรเจน) 0.1 g ลงในน้ำเสียดังเคราะห์ KH_2PO_4 ที่มีความเข้มข้นของฟอสเฟตตั้งแต่ 5-100 ppm นำไปเขย่าด้วยความเร็ว 200 rpm อุณหภูมิ 301 K ที่เวลาต่างๆ กัน ผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมการดูดซับฟอสเฟตด้วยเปลือกหอยนางรมที่ทำการเผาภายใต้บรรยากาศปกติมีความสอดคล้องกับสมการ Freundlich isotherm ส่วนเปลือกหอยนางรมที่ทำการเผาภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจนมีความ

สอดคล้องกับสมการ Langmuir isotherm วัสดุดูดซับที่มีค่าความจุฟอสเฟตสูงสุดเตรียมได้จากการเผาเปลือกหอยนางรมภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจนที่ 873 K โดยมีค่าเท่ากับ 583.5 mg-P/g

รุจา สุวรรณสุข และคณะ (2556) ผู้วิจัยและคณะได้ศึกษาการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวกที่ผ่านการใช้งานแล้ว โดยทำการทดลองแบบกะเพื่อศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับแคดเมียมด้วยการเติมเรซิน 1 g ลงในน้ำเสียสังเคราะห์ ($\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$) ที่มีความเข้มข้นของแคดเมียม 10 mg/L ปริมาตร 25 mL นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 rpm ที่เวลาต่างๆ กัน ณ อุณหภูมิ 30 ± 2 °C จากผลการทดลองจะเห็นว่าที่เวลา 10 นาที ประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียมของเรซินนั้นสูงที่สุด มีค่าเท่ากับ 99.51% พฤติกรรมการดูดซับสอดคล้องกับสมการ Freundlich isotherm ($y = 0.4456x + 0.7884$)

Bratek, K. *et. al.* (2002) ผู้วิจัยทำการผลิตถ่านทรงกลม (Spherical chars) จากเรซินที่ใช้งานแล้ว Amberjet 1200 H (ขนาด 0.8 – 0.63 mm) โดยแปรอัตราการให้ความร้อนเป็น 1, 5 และ 10 Kmin^{-1} นำถ่านที่ได้ไปกระตุ้นที่อุณหภูมิ 850 °C นาน 45 นาที โดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากการศึกษาพบว่า มีรูพรุนชนิด Mesopore และ Macropore ในช่วงที่เป็นเรซิน แต่เมื่อทำให้เป็นถ่านพบว่า มีการสลายของ Mesopore และ Macropore และเกิดรูพรุนขนาดเล็กมาก (Ultramicropore) ระหว่างการกระตุ้นช่วยขยาย Ultramicropore เป็น Micropore และ Mesopore ได้ ทำให้ถ่านที่ได้สามารถกำจัดโทลูอินในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของโทลูอินเท่ากับ 0.07 mol/L ได้ดีถึง 75 %

Kabay, N. *et. al.* (2007) ผู้วิจัยและคณะได้ทำการศึกษาการกำจัดโบรอน (B) จากน้ำทะเลที่ผ่านกระบวนการ Reverse osmosis (RO) โดยใช้เรซินที่มีความชอบในการดูดซับโบรอน 2 ชนิด คือ Diaion และ Dowex โดยทำการทดลองแบบกะเพื่อหาปริมาณของเรซินที่เหมาะสมด้วยการเติมเรซินปริมาณต่างๆ กันลงในตัวอย่างน้ำจากกระบวนการ RO ที่มีการเติม H_3BO_3 เพื่อให้มีความเข้มข้นของโบรอนประมาณ 1.5-1.6 mg/L จากผลการทดลองที่ได้ ปริมาณเรซินที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการกำจัดโบรอนเท่ากับ 1 g/L ของเรซินทั้ง 2 ชนิด โดยสามารถกำจัดโบรอนในตัวอย่างน้ำจมนีความเข้มข้นต่ำกว่า 0.2 mg/L จลนศาสตร์ของการดูดซับสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลอง Pseudo-second order (Diaion: $y = 0.6125x + 16.588$, Dowex: $y = 0.5626x + 32.653$)

Bashir, M. *et. al.* (2010) กลุ่มผู้วิจัยและคณะได้ศึกษาการกำจัดแอมโมเนีย-ไนโตรเจน ($\text{NH}_3\text{-N}$) จากน้ำชะขยะในหลุมฝังกลบด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวก โดยทำการทดลองแบบกะด้วยการเติมเรซิน 24.6 cm^2 ลงในน้ำชะขยะปริมาตร 100 ml นำไปเขย่าที่ความเร็ว 147 rpm นาน 6 นาที ผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าเรซินมีประสิทธิภาพในการกำจัด $\text{NH}_3\text{-N}$ 92% ไอโซเทอร์ม

ของการดูดซับสอดคล้องกับสมการ Langmuir isotherm และจลนศาสตร์ของการดูดซับสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลอง Pseudo-second order

Srinivasa, K. *et. al.* (2010) งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการกำจัดแคดเมียมในสารละลายโดยใช้เรซินประจุบวก (Duolite Es467) ในการทดลองแบบกะได้ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ระยะเวลาสัมผัส ความเร็วรอบ ตัวดูดซับ ความเข้มข้นของแคดเมียม ค่าพีเอช ไอออนคู่แข่ง และอุณหภูมิ จากการศึกษาพบว่าระยะเวลาที่สัมผัสและความเร็วรอบเป็น 60 นาทีและ 600 rpm ตามลำดับ การที่มี NaCl อยู่ในสารละลายจะทำให้เปอร์เซ็นต์การกำจัดจะมีค่าลดลงด้วย เนื่องจาก Cd^{2+} และ Na^+ จะเข้าแข่งขันในการจับกับเรซิน และในทางตรงกันข้ามเมื่อค่าพีเอชและอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดการดูดซับได้ดี

Shubo Deng. *et. al.* (2010) ผู้วิจัยและคณะได้ศึกษาการดูดซับ Perfluorooctane sulfonate (PFOS) ด้วยเรซินต่างๆ กัน 6 ชนิด โดยทำการทดลองหาไอโซเทอร์มของการดูดซับที่เกิดขึ้นด้วยการเติมเรซินชนิด IRA67 หรือ IRA958 ปริมาณ 35-500 mg/L ลงในสารละลาย PSOS เข้มข้น 200 mg/L ปริมาตร 200 mL ค่าพีเอชเท่ากับ 3 นำไปเขย่าที่ความเร็ว 150 rpm ณ อุณหภูมิ 25 °C นาน 48 ชั่วโมง ผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมของการดูดซับ PFOS ด้วยเรซินชนิดนี้สอดคล้องกับสมการ Freundlich isotherm โดยความจุในการดูดซับ (Adsorption capacity) เท่ากับ 4-5 mmol/g

P. P. Sun *et. al.* (2011) ผู้วิจัยและคณะได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการแยก Platinum (Pt^{4+}) และ Rhodium (Rh^{3+}) ในสารละลาย Cl^- ในสภาวะกรด (HCl) ด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบ โดยการทำลองแบบกะด้วยการเติมเรซินปริมาณ 4 g/L ลงในสารละลายผสมระหว่าง $PtCl_4$ และ $RhCl_3$ ปริมาตร 50 ml ความเข้มข้นของ Pt^{4+} และ Rh^{3+} เท่ากับ 1×10^{-3} และ 1×10^{-4} M ตามลำดับ นำไปเขย่าที่อุณหภูมิ 25 °C นาน 24 ชั่วโมง ผลการทดลองที่ได้จะเห็นว่าเรซินชนิด AG1-x8 มีประสิทธิภาพในการดูดซับ Pt^{4+} สูงที่สุด และสามารถแยก Pt^{4+} ออกจาก Rh^{3+} ได้ดีที่สุด ไอโซเทอร์มของการดูดซับ Pt^{4+} สอดคล้องกับสมการ Langmuir isotherm โดยเมื่อความเข้มข้นของ HCl เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการดูดซับ Pt^{4+} จะลดลง ส่วนประสิทธิภาพในการดูดซับ Rh^{3+} จะเพิ่มขึ้น

Wolowicz, A. and Hubicki, Z. (2011) ผู้วิจัยได้ศึกษาการกำจัด Palladium (Pa^{2+}) ในสารละลาย Cl^- ในสภาวะกรด (HCl) ด้วยเรซินแลกเปลี่ยนประจุลบชนิดเบสแก่ 4 ชนิด โดยทำการทดลองแบบกะเพื่อหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับด้วยการเติมเรซินทั้ง 4 ชนิดปริมาณ 0.5 ± 0.0005 g ลงในสารละลายกรดที่มีความเข้มข้นของ Pa^{2+} เท่ากับ 100 mg/L ปริมาตร 50 mg นำไปเขย่าที่ความเร็ว 180 rpm ณ อุณหภูมิ 293 ± 2 K จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสารประกอบ

เชิงซ้อนของ Pa^{2+} จะถูกดูดซับอย่างรวดเร็วในช่วง 30 นาทีแรก และจะเริ่มคงที่หลังจากนั้น โดยประสิทธิภาพในการดูดซับสารประกอบเชิงซ้อนของ Pa^{2+} จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของ Cl^- ในสารละลาย

Nur, T. *et. al.* (2013) กลุ่มผู้วิจัยได้ศึกษาการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบชนิดเบสแก่ที่ถูกทำให้อิ่มตัวด้วยไอออนออกไซด์ (Iron oxide) โดยทำการทดลองแบบกะเพื่อหาปริมาณเรซินที่เหมาะสมด้วยการเติมเรซินปริมาณต่างๆ กันลงในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ KH_2PO_4 ที่มีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสเท่ากับ 10 mg/L ปริมาตร 100 mL นำไปเขย่าด้วยความเร็ว 120 rpm ณ อุณหภูมิห้อง (24 ± 1 °C) นาน 72 ชั่วโมง ผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ปริมาณเรซิน 1 g/L จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัส 90% และเมื่อใช้ปริมาณเรซิน ≥ 5 g/L จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัส 97% ระยะเวลาเข้าสู่สมดุล 48 ชั่วโมง ไอโซเทอรัมของการดูดซับสอดคล้องกับสมการ Langmuir isotherm

Alicia Sendrowski and Treavor H. Boyer. (2013) กลุ่มผู้วิจัยได้ศึกษาการกำจัดฟอสเฟตในน้ำปัสสาวะของมนุษย์ด้วยเรซิน HAIX (Hybrid anion exchange resin) โดยทำการทดลองเพื่อหาจลนศาสตร์ของการดูดซับ (Kinetics) ด้วยการเติมเรซินปริมาณต่างๆ กัน (50, 100 และ 200 mL/L) ลงในสารละลายยูรีนที่เตรียมขึ้นให้มีสภาพเหมือนกับน้ำปัสสาวะของมนุษย์ 100 mL นำไปเขย่าด้วยความเร็ว 200 rpm ณ อุณหภูมิห้อง (23 °C) ที่เวลาต่างๆ กัน ผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าจลนศาสตร์ของการดูดซับสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลอง Pseudo-second order ไอโซเทอรัมของการดูดซับสอดคล้องกับสมการ Freundlich isotherm โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตสูงถึง 97%

Xing Xu. *at .el.* (2013) ผู้วิจัยและคณะได้ศึกษาการดูดซับไนเตรดด้วยเรซินที่ผลิตจากลำต้นของข้าวสาลีและฝ้าย โดยทำการทดลองแบบกะด้วยการเติมเรซิน 0.1 g ลงในสารละลายไนเตรดเข้มข้น 50 mg/L ปริมาตร 50 mL นำไปเขย่าที่อุณหภูมิ 20 °C นาน 60 นาที จากผลการทดลองพบว่าสามารถกำจัดไนเตรดได้ประมาณ 81.2-89.0% ไอโซเทอรัมของการดูดซับสอดคล้องกับสมการ Langmuir isotherm

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

1. เรซินชนิดแลกเปลี่ยนประจุลบ ยี่ห้อ Lewatit MonoPlus รุ่น M 500 ที่ผ่านการใช้งานแล้ว
2. โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) ยี่ห้อ Ajax Finechem เกรดวิเคราะห์
3. แอนติโมนีโพแทสเซียมทาร์เทรต ($\text{K}(\text{SbO})\cdot\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6\cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) ยี่ห้อ CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์
4. แอมโมเนียมโมลิบเดต ($(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$) ยี่ห้อ CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์
5. กรดแอสคอร์บิก (Ascorbic acid) ยี่ห้อ LOBALO Chemie เกรดวิเคราะห์
6. ฟีนอล์ฟทาเลอิน อินดิเคเตอร์ ยี่ห้อ Laboratory Rasayan เกรดวิเคราะห์
7. สารละลายกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ยี่ห้อ Fisher Scientific เกรดวิเคราะห์
8. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ยี่ห้อ CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์
9. โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ยี่ห้อ CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์

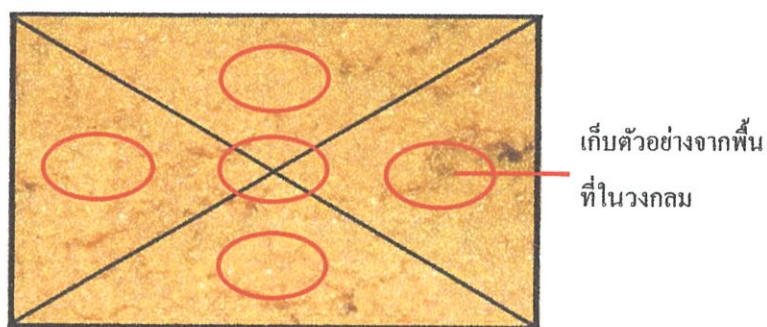
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer, Ultraviolet-Visible) ยี่ห้อ Thermo Scientific รุ่น GENERSYS 10S UV - Vis
2. เครื่องไอออนโครมาโทกราฟี (Ion Chromatograph, IC) ยี่ห้อ Metrohm คอลัมน์ Anion
3. เครื่องชั่ง ตะกั่วตชนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น AUX 220 (± 0.1 mg)
4. เครื่องวัดพีเอช (pH meter) ยี่ห้อ METTLER TOLEDO รุ่น Seven Compact
5. ตู้อบความร้อน (Hot air oven) ยี่ห้อ Fisher Scientific
6. เครื่องเขย่า (Compact shaking incubator) ยี่ห้อ JSR รุ่น JSSI – 100C ควบคุมอุณหภูมิที่ 25°C
7. กระดาษกรอง ยี่ห้อ MACHEREY – NAGEL รุ่น MN 616 เบอร์ 2
8. เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity meter) ยี่ห้อ Consort รุ่น 860
9. เครื่องแก้วต่างๆ

3.3 วิธีการทดสอบ

3.3.1 การสุ่มตัวอย่าง

เรซินที่ใช้ทดสอบเป็นเรซินชนิดประจุลบ ยี่ห้อ Lewatit MonoPlus รุ่น M 500 ที่ผ่านการใช้งานแล้ว (SR) ได้มาจากโรงงานผลิตน้ำจากกระบวนการผลิตน้ำบริสุทธิ์ (DI water) โดยเป็นแบบ Mixed Bed คือมีทั้งเรซินแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation exchange resin) และเรซินแลกเปลี่ยนประจุลบ (Anion exchange resin) ประปนกันซึ่งได้ทำการคัดแยกเบื้องต้นมาบ้างแล้วเพื่อสะดวกต่อการนำมาใช้ แต่ยังคงมีการปะปนกันอยู่บ้างเล็กน้อย ในการเก็บรักษา ทำโดยนำเรซินดังกล่าวแช่น้ำไว้เพื่อป้องกันการเกิดความเสียหายกับเม็ดเรซิน ในการสุ่มตัวอย่าง นำเรซินมาเทใส่ถาดเกลี่ยให้กระจายสม่ำเสมอ แล้วคัดเลือกโดยเลือกเรซินจากมุมทั้งสี่ และจากตรงกลาง



รูปที่ 3.1 การสุ่มตัวอย่างเรซิน

3.3.2 การทดสอบสมบัติเบื้องต้นของเรซิน

ก่อนการนำเรซินมาใช้งานนั้น จำเป็นต้องมีการวิเคราะห์สมบัติบางประการ เพื่อให้ทราบถึงความเหมาะสมต่อการนำมาใช้งาน โดยวิเคราะห์ตามพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

ตารางที่ 3.1 การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของเรซิน

พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	วิธีการ/เครื่องมือวิเคราะห์
การอุ้มน้ำ (Water retention)	วิธีการชั่งน้ำหนัก (กรมพัฒนาที่ดิน, 2547)
พีเอช (pH)	เครื่องวัดพีเอช (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553)
การนำไฟฟ้า (Conductivity)	เครื่องวัดการนำไฟฟ้า (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553)
ค่าของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด (TDS)	TDS meter (APHA, AWWA and WEF, 2012)
ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุลบ (Anion exchange capacity)	ใช้ปริมาณคลอไรด์ไอออนที่ถูกดูดซับเป็นตัวแทน โดยวิธีบังคับแลกเปลี่ยน (Gillman G.P., 1986)
ปริมาณออร์โทฟอสเฟต	Ascorbic acid method (APHA, AWWA and WEF, 2012)

3.3.3 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์และฟื้นฟูสภาพเรซิน

น้ำเสียสังเคราะห์เตรียมขึ้นจาก ผงซักฟอก ยี่ห้อ เปา รูน ซิลเวอร์นาโน โดยชั่งผงซักฟอก 1 ซ้อน ต่อน้ำครึ่งกะละมัง (36 g ต่อน้ำ 14 L โดยประมาณ) ตามสัดส่วนจากฉลากการใช้งาน

การฟื้นฟูสภาพเรซินก่อนนำไปใช้ในการดูดซับฟอสเฟตจากน้ำผงซักฟอก เตรียมโดยชั่งเรซิน SR 10 g ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ เติม NaOH เข้มข้น 4% (เป็นสาร Regenerant) จำนวน 60 mL ปิดปากขวด นำไปแช่เป็นเวลา 5 นาที ที่ความเร็ว 120 rpm อุณหภูมิ 25°C จากนั้นตั้งทิ้งไว้ 1 คืน เพื่อให้เรซินอิ่มตัวด้วยอนุมูลไฮดรอกไซด์ จะได้เรซินที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพ (Regenerated resin, RR) เมื่อนำเรซินไปใช้งานให้ล้างเรซินด้วยน้ำกลั่นและกรองเรซินที่ได้ด้วยกระดาษกรองเบอร์ 2

3.3.4 การศึกษาระยะเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับฟอสเฟต

1. ชั่งเรซินที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพ (RR) 1 g ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 125 mL
2. เติมน้ำเสียสังเคราะห์ฟอสเฟตตามข้อ 3.3.3 จำนวน 50 mL ปิดด้วยพาราฟิล์ม
3. นำไปแช่ที่เวลา 10, 30, 60, 180, 300 นาทีและ 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 25°C ใช้ความเร็ว 120 rpm โดยใช้เครื่องเขย่าที่ควบคุมอุณหภูมิได้
4. นำสารละลายมากรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 2 เก็บสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณฟอสเฟต
5. ทำการทดลองชุดละ 3 ซ้ำ และทำชุดควบคุมโดยเติมน้ำเสียสังเคราะห์ฟอสเฟตเพียงอย่างเดียวไม่เติมเรซิน ทำการทดลองตามข้อ 3 – 4

3.3.5 การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับฟอสเฟต

1. ชั่งเรซิน RR จำนวน 1 g ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 125 mL
2. เติมสารละลายมาตรฐานฟอสเฟต โดยแปรค่าให้มีความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400 และ 450 mg-P/L
3. นำไปแช่ที่ระยะเวลาเข้าสู่สมดุล (จากข้อ 3.3.4) โดยใช้ความเร็ว 120 rpm ที่อุณหภูมิ 25°C
4. นำสารละลายมากรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 2 เก็บสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณฟอสเฟต
5. ทำการทดลองความเข้มข้นละ 3 ซ้ำ
6. ทำชุดควบคุมของแต่ละความเข้มข้น โดยทำตามข้อ 2 – 4

3.3.6 การดัดแปลงเรซิน (Modified resin, MR) โดยใช้เทคนิคแบบกะ

1. ชั่งเรซิน RR จำนวน 1 g ใส่ขวดรูปชมพูนขนาด 125 mL
2. เติมน้ำเสียสังเคราะห์ฟอสเฟตตามข้อ 3.3.3 จำนวน 50 mL ปิดด้วยพาราฟิล์ม
3. นำไปเขย่าที่ระยะเวลาเข้าสู่สมดุล (จากการทดลองข้อ 3.3.4) ใช้ความเร็ว 120 rpm ที่อุณหภูมิ 25°C
4. นำสารละลายมากรองเอาเรซินที่ดูดซับฟอสเฟตออกด้วยกระดาษกรองเบอร์ 2 เก็บตัวอย่างเรซินที่ดัดแปลงแล้ว (MR) โดยแช่น้ำกลั่นในอัตราส่วน 1:1
5. เก็บสารละลายที่ผ่านการกรองด้วยกระดาษกรองไปวิเคราะห์หาปริมาณฟอสเฟตที่เหลือ
6. ทำชุดควบคุมโดยไม่มีใส่เรซิน และทำการทดลองตามข้อ 2, 3 และ 5

3.3.7 การวิเคราะห์หาปริมาณออร์โธฟอสเฟต ด้วยวิธี Ascorbic acid method (AWWA No. 4500-P E, 2012)

1. ตวงตัวอย่างน้ำ 50 mL ใส่ในบีกเกอร์
2. หยดฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์ 1 หยด ถ้าได้สีชมพูให้หยดกรดซัลฟิวริก 5 N ลงไปที่ละหยด จนกระทั่งสีชมพูหายไป
3. เติมน้ำยารวม 8 mL เขย่าให้เข้ากันแล้วตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 10 นาที แต่ไม่เกิน 30 นาที
4. นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ที่ความยาวคลื่น 880 nm

หมายเหตุ วิธี Ascorbic acid นี้ ใช้ได้กับสารละลายที่มีความเข้มข้นของฟอสเฟต 0.01 – 6 mg-P/L

3.4 การใช้เรซินที่ดัดแปลงแล้วเป็นวัสดุเพาะปลูกคะน้ำ

3.4.1 การทดสอบความเป็นพิษต่อการงอกของเมล็ดคะน้ำ

การทดสอบความเป็นพิษเป็นการทดสอบดูว่าปริมาณของฟอสเฟตในแต่ละอัตราส่วนจะส่งผลต่อการงอกของเมล็ดคะน้ำอย่างไร โดยนำเรซิน MR มาแช่น้ำในอัตราส่วนเรซินต่อน้ำเป็น 1:1, 1:3, 1:5, 1:7 และ 1:10 วัดค่าพีเอช การนำไฟฟ้า และความเข้มข้นฟอสเฟตของสารละลายที่สกัดได้ นำสารละลายนี้ไปผสมบนเมล็ดคะน้ำจำนวน 2 mL ซึ่งในการทดลอง 1 ชั่วโมงมีเมล็ดคะน้ำ 5 เมล็ด ที่รอดด้วยกระดาษทิชชู โดยทำการทดลองทั้งหมด 7 ชั่วโมง เพื่อให้ได้จำนวนการงอกของเมล็ดคะน้ำมากที่สุด ชุดควบคุมทำเช่นเดียวกันแต่ใช้น้ำกลั่น และสังเกตการงอกของเมล็ดคะน้ำเป็นเวลา 10 วัน บันทึกความยาวราก ความสูงของลำต้น และน้ำหนักเฉลี่ยของคะน้ำ



รูปที่ 3.2 การเตรียมวัสดุสำหรับทดสอบความเป็นพิษต่อการงอกของเมล็ดคะน้า

3.4.2 การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของวัสดุปลูกต่อการเจริญเติบโต

พืชที่ขาดฟอสฟอรัสจะมีการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญ 2 ประการคือ ใบขยายขนาดช้าทำให้มีขนาดใบเล็ก และ จำนวนใบจะน้อย (ชงชุตช โอดสภา, 2546) ดังนั้น ผู้ทดลองจึงเลือกปลูกคะน้าที่เป็นผักใบ ซึ่งสามารถเห็นผลการเปลี่ยนแปลงได้อย่างชัดเจน เพราะมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วและมีระยะเวลาในการเก็บเกี่ยวสั้น โดยในการทดลองปลูกคะน้าจะใช้ทรายที่ผสมแกลบดำ (อัตราส่วนทราย 4:แกลบดำ1) และเรซินที่คัดแปลงแล้ว (MR) เป็นวัสดุปลูก ทำการแปรค่าอัตราส่วนระหว่าง MR ต่อทรายผสมแกลบดำจำนวน 3 อัตราส่วน ได้แก่ 1:1, 1:4 และ 1:9 จากนั้นทำการผสมวัสดุปลูกให้เข้ากัน และทำชุดควบคุมโดยใช้ทรายผสมแกลบดำไม่ต้องใส่เรซิน ทำการทดลองชุดละ 3 ซ้ำ นำวัสดุปลูกแต่ละอัตราส่วนมาวัดค่าพีเอช, ค่าการนำไฟฟ้า และการอุ้มน้ำ

เมื่อทำการเตรียมวัสดุในการปลูกเสร็จสิ้นแล้ว นำวัสดุปลูกในแต่ละอัตราส่วนที่เตรียมไว้แบ่งใส่กระถาง น้ำหนักรวมกระถางละ 500 g จากนั้นนำเมล็ดคะน้าหว่านลงในกระถาง กระถางละ 5 เมล็ด เอาฟางคลุม ทำการรดน้ำกระถางละ 100 mL เป็นประจำในเวลาเช้าและเย็นของทุกวัน เมื่อระยะผ่านไป 7 วัน ทำการเติมปุ๋ยในโตรเจน (46 – 0 – 0) โดยนำเม็ดปุ๋ยละลายน้ำแล้วรดลงในทุกกระถาง (อัตราส่วนปุ๋ย 1 g : น้ำ 10 L) เพื่อเพิ่มธาตุอาหารไนโตรเจน เนื่องจากคะน้าเป็นผักที่บริโภคใบและลำต้น จึงต้องการไนโตรเจนสูง ส่วนธาตุอาหารฟอสฟอรัสจะเสมือนว่าพืชได้รับจากวัสดุปลูกที่ผสมเรซิน MR เท่านั้น

ตารางที่ 3.2 ปริมาณเรซินและทรายผสมเกลบดำที่อัตราส่วนต่างๆ

ชื่อชุดทดลอง	อัตราส่วน	น้ำหนัก (g)		
		เรซิน	ทรายผสมเกลบดำ	รวม
Control	-	-	500	500
A	1:1	250	250	500
B	1:4	100	400	500
C	1:9	50	450	500



รูปที่ 3.3 การเตรียมวัสดุปลูก

3.4.3 การวิเคราะห์ดัชนีการเจริญเติบโตของคะน้า

การทดลองปลูกคะน้าเริ่มตั้งแต่วันที่ 1 มีนาคม 2557 ที่นำคะน้าลงปลูก จนถึงวันที่ 16 มีนาคม 2557 โดยระยะเวลาเก็บเกี่ยวอยู่ที่ 15 วัน จึงทำการเก็บเกี่ยวและนำมาวัดดัชนีการเจริญเติบโตของคะน้าทั้งชุดควบคุมและชุดทดลอง

การวิเคราะห์ข้อมูลดัชนีการเจริญเติบโตของคะน้าแบ่งออกเป็น การวิเคราะห์ความยาวของราก ความสูงของลำต้นและน้ำหนักแห้ง

หลังจากเก็บเกี่ยว นำคะน้ามากำจัดเศษวัสดุต่างๆออกให้หมด บันทึกความยาวของรากและความสูงของลำต้น(ทำทันทีหลังเก็บเกี่ยว) จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนัก บันทึกเป็นน้ำหนักสด แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิเคเตอร์ จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักอีกครั้ง บันทึกเป็นน้ำหนักแห้ง

3.4.4 วิเคราะห์ผลทางสถิติ

ใช้การทดสอบทางสถิติเพื่อทดสอบสมมติฐานของงานวิจัยว่าวัสดุปลูกในแต่ละอัตราส่วน ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของคะน้าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ โดยตั้งสมมติฐานดังนี้

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$$

H_0 คือ สมมติฐานที่แสดงให้เห็นว่าการเจริญเติบโตของคะน้าในแต่ละอัตราส่วนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

H_1 คือ สมมติฐานที่แสดงให้เห็นว่าการเจริญเติบโตของคะน้าในแต่ละอัตราส่วนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

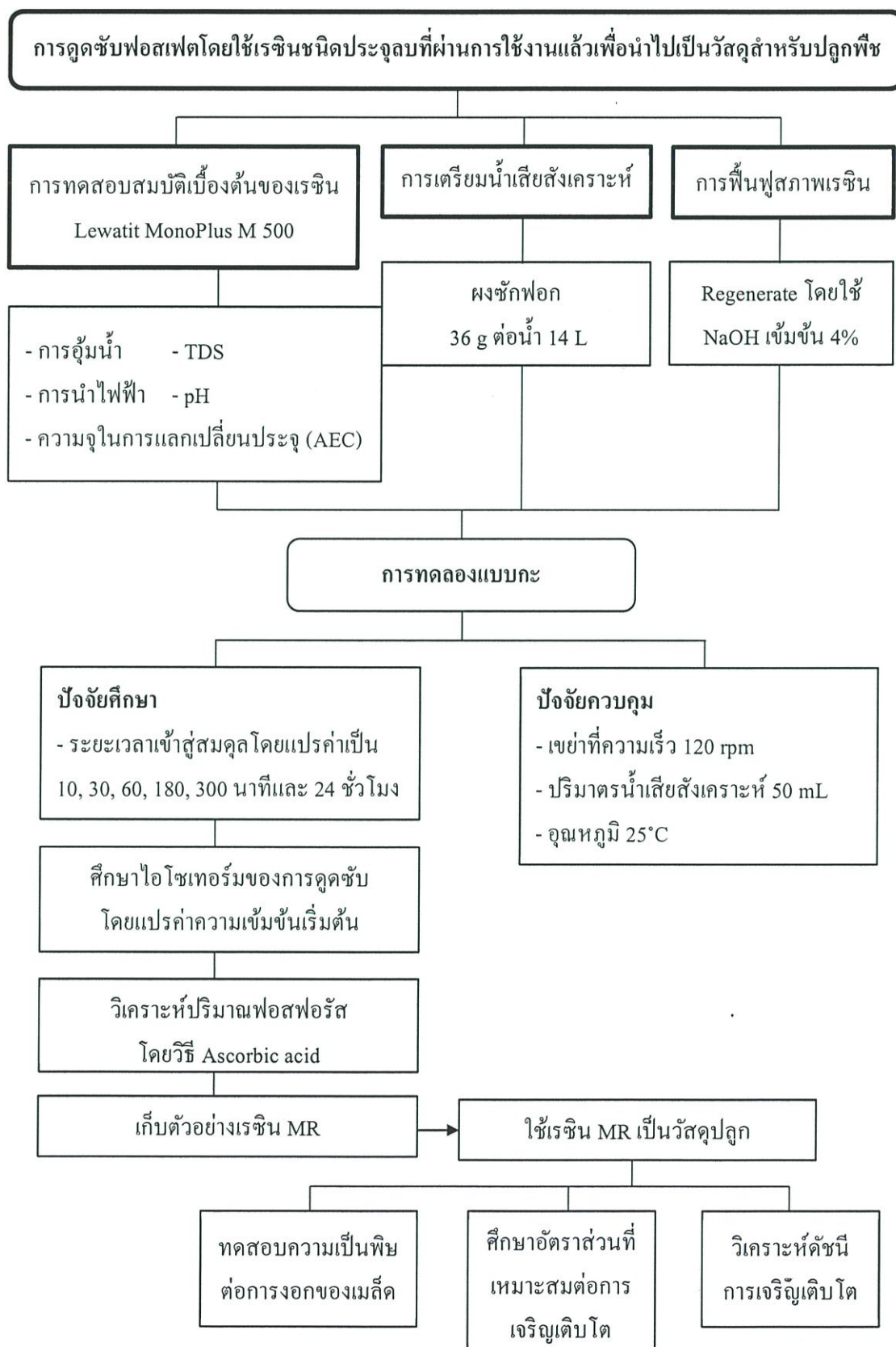
μ_1 คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลกลุ่มตัวอย่างที่อัตราส่วน 1:1

μ_2 คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลกลุ่มตัวอย่างที่อัตราส่วน 1:4

μ_3 คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลกลุ่มตัวอย่างที่อัตราส่วน 1:9

นำข้อมูลของแต่ละกลุ่มตัวอย่างมาวิเคราะห์หาผลทางสถิติโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติ SPSS (Ver.20) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

วิธีดำเนินงานวิจัยมีขั้นตอนการดำเนินงาน ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.4 แผนผังการดำเนินงานวิจัย

บทที่ 4

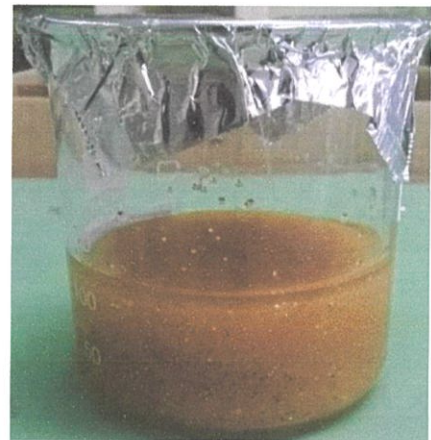
ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 สมบัติเบื้องต้นของเรซิน

เรซินที่ใช้ทดสอบแบ่งเป็น เรซินใหม่ (New resin, NR) เรซินที่ผ่านการใช้งานแล้ว (Spent resin, SR) และ เรซินที่ดัดแปลงแล้ว (Modified resin, MR) โดยเรซินที่ผ่านการใช้งานมาจากกระบวนการทำน้ำบริสุทธิ์ (DI water) ซึ่งน้ำที่เข้าสู่กระบวนการเป็นน้ำดีที่ผ่านมาจากระบบ Reverse Osmosis System ก่อนเข้าสู่กระบวนการแลกเปลี่ยน ไอออน (Ion exchange) จึงไม่มีสารที่เป็นอันตรายต่างๆ เช่น ไอออนของโลหะหนัก ตกค้างอยู่ในเรซิน เมื่อนำเรซินไปใช้เป็นวัสดุปลูกพืชเพื่อรับประทานจึงไม่ส่งผลที่เป็นอันตราย โดยสมบัติเบื้องต้นของเรซินแสดงดังตารางที่ 4.1



(ก) เรซินใหม่ (NR)



(ข) เรซินที่ผ่านการใช้งานแล้ว



(ค) เรซินที่ดัดแปลงแล้ว (MR)

รูปที่ 4.1 เรซินชนิดต่างๆ

ตารางที่ 4.1 สมบัติเบื้องต้นของเรซิน NR, SR และ MR

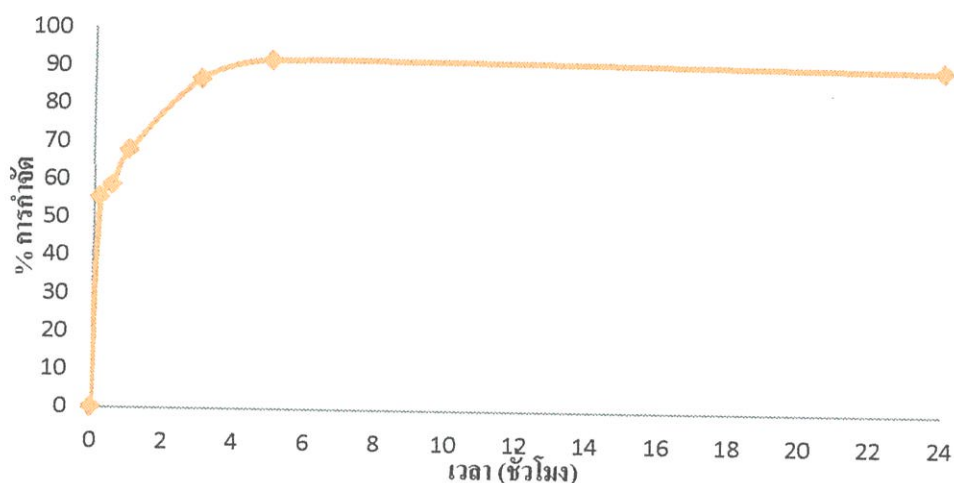
พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	NR	SR	MR
สีที่ปรากฏ	สีเหลืองอ่อน	สีน้ำตาล	สีน้ำตาล
การอุ้มน้ำ (Water retention, %)	51.13 ± 0.73	71.81 ± 0.28	65.87 ± 0.19
พีเอช (pH)	5.96 ± 0.04	7.54 ± 0.11	8.76 ± 0.07
การนำไฟฟ้า (µS/cm)	802 ± 1.63	227.67 ± 0.94	662.33 ± 2.87
ค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS, mg/L)	1984.33 ± 74.73	17 ± 8.49	311.33 ± 4.11
ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุลบ (cmol/100 g- dry resin)	18.57*	17.30 ± 0.84	-

*ที่มาจาก LANXESS Energizing Chemistry

จากตารางที่ 4.1 พบว่าสมบัติทั่วไปของเรซินที่ใหม่ (NR) เรซินที่ผ่านการใช้งาน (SR) และเรซินที่ปรับปรุงแล้ว (MR) มีความแตกต่างกัน เช่น SR และ MR มีเปอร์เซ็นต์การอุ้มน้ำมากกว่า NR เพราะเรซินเมื่อผ่านการใช้งาน อาจทำให้มีบริเวณพื้นผิวของเม็ดเรซินแตก หรือมีพื้นที่ว่าง ทำให้น้ำแทรกตัวเข้าไปตามพื้นที่ว่างนั้น ส่งผล SR และ MR สามารถอุ้มน้ำได้มากถึง 71.81 ± 0.28% และ 65.87 ± 0.19% ตามลำดับ ในส่วนของค่าพีเอช NR มีพีเอชอยู่ในช่วงที่ค่อนข้างต่ำ ส่วน SR และ MR มีพีเอชเท่ากับ 7.54 ± 0.11 และ 8.76 ± 0.07 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในช่วงที่เป็นเบส เนื่องจากไอออนที่ตกค้างบนผิวเรซินอาจหลุดปนออกมากับสารละลาย โดยเฉพาะ MR ก่อนนำไปใช้งานได้ผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วย NaOH เข้มข้น 4% จึงอาจมีไอออนของ OH⁻ ที่ตกค้างบนผิวเรซินละลายปนออกมากับสารละลาย ทำให้มีค่าพีเอชสูง ส่วนค่าการนำไฟฟ้าจะสอดคล้องกับค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดโดยค่าการนำไฟฟ้าที่สูงเกิดจากการแทนที่ของไอออนต่างๆทำให้มีไอออนละลายน้ำออกมา มาก ค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดจึงมีค่ามาก โดย NR มีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 802 ± 1.63 µS/cm และค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดเท่ากับ 1984.33 ± 74.73 mg/L ในขณะที่ MR และ SR มีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 662.33 ± 2.87 และ 227.67 ± 0.94 µS/cm และค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดเท่ากับ 311.33 ± 4.11 mg/L และ 17 ± 8.49 mg/L ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุลบ NR มีค่าเท่ากับ 18.57 cmol/100 g- dried resin (จากข้อมูลเรซิน) และ SR เท่ากับ 17.30 ± 0.84 cmol/100 g- dried resin จึงอธิบายได้ว่าเรซินเมื่อผ่านการใช้งานแล้วระยะหนึ่งจะมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนประจุลดลง และมีปริมาณการละลายของไอออนต่างๆออกมาน้อย (รายละเอียดแสดงดังภาคผนวก ก หน้า 56 - 57)

4.2 ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับฟอสเฟต

จากการศึกษาเพื่อหาระยะเข้าสู่สมดุลของการดูดซับ โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์จากผงซักฟอกที่มีความเข้มข้นฟอสเฟตเท่ากับ 2.93 ± 0.07 mg-P/L ปริมาตร 50 mL ต่อปริมาณเรซิน 1 g ทำการเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 rpm โดยควบคุมอุณหภูมิระหว่างการทดลองอยู่ที่ 25°C โดยใช้เครื่องเขย่าที่ควบคุมอุณหภูมิได้ และแปรค่าระยะเวลาในการดูดซับตั้งแต่ 10, 30, 60, 180, 300 นาที และ 24 ชั่วโมง แล้ววิเคราะห์หาปริมาณฟอสเฟตที่เหลืออยู่ จากนั้นนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดฟอสเฟต กับระยะเวลาในการดูดซับที่เหมาะสมของเรซิน ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.2

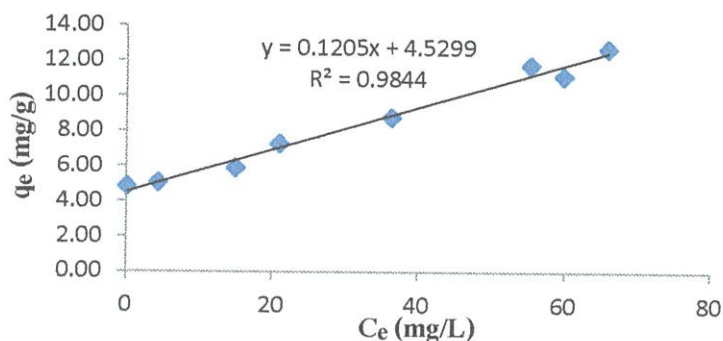


รูปที่ 4.2 เปอร์เซนต์การกำจัดฟอสเฟตด้วยเรซิน SR ที่ระยะเวลาต่างๆ

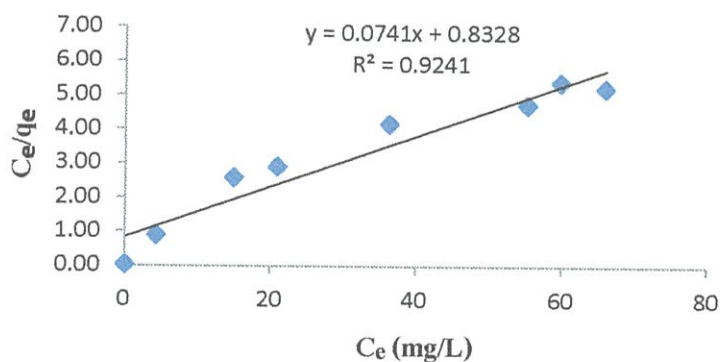
จากรูปที่ 4.2 เห็นได้ว่าเปอร์เซนต์การกำจัดฟอสเฟตโดยจากน้ำผงซักฟอกโดยใช้เรซินที่ผ่านการใช้งานแล้ว (SR) ในช่วง 10 นาทีแรก เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างเรซินกับน้ำผงซักฟอกอย่างรวดเร็วโดยกำจัดฟอสเฟตได้ถึง 55.36% แต่หลังจากผ่านไป 10 นาที พื้นที่ผิวสำหรับแลกเปลี่ยนไอออนลดน้อยลง ทำให้การแลกเปลี่ยนดำเนินไปอย่างช้า ๆ และจะเริ่มเข้าสู่สมดุลเมื่อระยะเวลาผ่านไป 300 นาที หรือ 5 ชั่วโมง ในการแลกเปลี่ยนไอออน ไอออนที่มีประจุสูงกว่าจะเกิดการแลกเปลี่ยนกับเรซินได้ดีกว่า แต่ยังมีประจุมาก โครงสร้างจะยังมีความซับซ้อนมากขึ้น ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนช้าลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในน้ำผงซักฟอกที่มีไอออนอื่นๆ รบกวน ทำให้เรซินอาจเกิดการแลกเปลี่ยนกับไอออนอื่นๆ ก่อน แล้วฟอสเฟตค่อยเข้ามาแทนที่ในภายหลัง จึงเป็นสาเหตุให้ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลนานถึง 5 ชั่วโมง ดังนั้นระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับฟอสเฟตจากน้ำผงซักฟอกคือ 5 ชั่วโมง ซึ่งเปอร์เซนต์การกำจัดเท่ากับ $91.92\% \pm 0.27$ (รายละเอียดแสดงดังภาคผนวก ค หน้า 58)

4.3 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

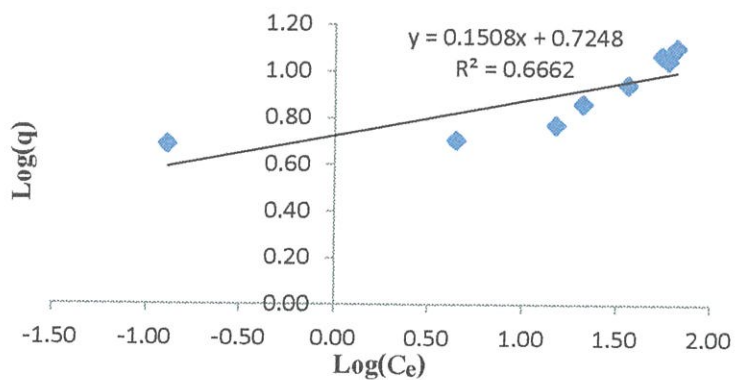
จากการวิเคราะห์ไอโซเทอร์มของการดูดซับ โดยแปรค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟต โดยใช้สารละลายมาตรฐานฟอสเฟตที่แปรค่าให้มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400 และ 450 mg-P/L ทำการเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 rpm เป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วนำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นตามสมการไอโซเทอร์มในการดูดซับแบบเชิงเส้น แบบแลงเมียร์ และแบบฟลูนคัลลิช ดังรูปที่ 4.3



ก. แบบเชิงเส้น



ข. แบบแลงเมียร์



ค. แบบฟลูนคัลลิช

รูปที่ 4.3 ไอโซเทอร์มของการดูดซับฟอสเฟตเมื่อแปรค่าความเข้มข้นเริ่มต้น

ตารางที่ 4.2 ไอโซเทอร์มของการดูดซับฟอสเฟตเมื่อแปรค่าความเข้มข้นเริ่มต้น

รูปแบบ	เชิงเส้น	แลงเมียร์	ฟลูนค์ลิช
สมการ	$Q = 0.1205C_e + 4.5299$	$1/Q = 0.0741 (1/C_e) + 0.8328$	$\log(Q) = 0.1508 \log(C_e) + 0.7248$
R^2	0.9844	0.9241	0.6662
ค่าคงที่ของการดูดซับ	$K_d = 0.1205$	$b = 0.8328$	$1/n = 0.1508$
		$Q_m = 1.2008 \text{ (mg/g)}$	$K_f = 5.3064$

ไอโซเทอร์มแบบเชิงเส้นได้จากการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง q_e กับ C_e ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ได้จากการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C_e/q_e กับ C_e และไอโซเทอร์มแบบฟลูนค์ลิชได้จากการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(q)$ กับ $\log(C_e)$ เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของกราฟทั้ง 3 แบบ พบว่า ข้อมูลการดูดซับฟอสเฟตโดยใช้เรซินที่ผ่านการใช้งานแล้ว (SR) แสดงในตารางที่ 4.2 มีค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (R^2) ของไอโซเทอร์มแบบเชิงเส้น ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ และไอโซเทอร์มแบบฟลูนค์ลิช เท่ากับ 0.9844, 0.9241 และ 0.6662 ตามลำดับ ซึ่งกล่าวได้ว่าสมการของไอโซเทอร์มแบบเชิงเส้นเหมาะสมที่จะใช้อธิบายสมดุลการดูดซับมากกว่าสมการของไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์และแบบฟลูนค์ลิช เพราะมีค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (R^2) เข้าใกล้ 1 มากกว่า จึงอธิบายได้ว่าการดูดซับฟอสเฟตเป็นแบบเชิงเส้น โดยการดูดซับนั้นเกิดขึ้นที่บริเวณพื้นผิวของเรซินที่มีอยู่อย่างไม่จำกัด ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับแปรผันตรงกับความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายมาตรฐานฟอสเฟต ณ สภาวะสมดุล คือที่เวลา 5 ชั่วโมง อุณหภูมิ 25 °C โดยการดูดซับฟอสเฟตเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานเพิ่มขึ้น (รายละเอียดแสดงดังภาคผนวก ก หน้า 59 - 60)

4.4 การทดสอบความเป็นพิษต่อการงอกของเมล็ดคะน้า

การทดสอบความเป็นพิษของฟอสฟอรัสต่อการงอกของเมล็ดคะน้า โดยนำน้ำที่แช่เรซิน MR ในอัตราส่วนเรซินต่อน้ำเป็น 1:1, 1:3, 1:5, 1:7 และ 1:10 มาพรมลงบนเมล็ดคะน้า โดยผลการวิเคราะห์น้ำสกัดจากเรซินในแต่ละอัตราส่วนแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์น้ำสกัดจากเรซินในแต่ละอัตราส่วน

เรซินต่อน้ำ	pH	Conduct ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	PO_4^{3-} (mg/L)
1:1	8.79 \pm 0.02	681.33 \pm 1.70	0.03 \pm 0.0015
1:3	8.63 \pm 0.02	672.33 \pm 2.87	0.03 \pm 0.0026
1:5	8.59 \pm 0.01	659.33 \pm 1.70	0.03 \pm 0.0025
1:7	8.57 \pm 0.01	655.67 \pm 1.25	0.02 \pm 0.0012
1:10	8.50 \pm 0.01	650.67 \pm 1.25	0.02 \pm 0.0015

จากตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่า ปริมาณฟอสเฟตที่ละลายออกมาในแต่ละอัตราส่วนมีค่าใกล้เคียงกัน รวมถึงอาจมีไอออนอื่นๆ เช่น OH^- ละลายปะปนมาด้วย จึงส่งผลให้ค่าพีเอชของน้ำที่สกัดได้อยู่ในช่วงที่เป็นเบส และมีค่าการนำไฟฟ้าสูง ซึ่งไม่ส่งผลต่อการงอกของเมล็ดคะน้า เพราะมีการงอกของเมล็ดคะน้าในทุกอัตราส่วน โดยการเจริญเติบโตของแต่ละอัตราส่วนมีความใกล้เคียงกัน ผลการงอกของเมล็ดคะน้า แสดงดังตารางที่ 4.4 (รายละเอียดแสดงดังภาคผนวก ค หน้า 60 - 63)

ตารางที่ 4.4 ผลการงอกของเมล็ดคะน้า

เรซินต่อน้ำ	ความยาวรากเฉลี่ย (cm)	ความสูงลำต้นเฉลี่ย (cm)	น้ำหนักเฉลี่ย(mg)
Control	2.37 \pm 0.62	2.16 \pm 0.25	134.29 \pm 19.17
1:1	2.55 \pm 1.16	2.45 \pm 0.42	156.67 \pm 26.25
1:3	2.81 \pm 0.60	2.41 \pm 0.59	171.43 \pm 33.99
1:5	2.99 \pm 1.18	2.35 \pm 0.46	168.57 \pm 29.49
1:7	2.64 \pm 1.44	2.19 \pm 0.47	160.00 \pm 54.25
1:10	2.42 \pm 0.96	2.24 \pm 0.43	157.14 \pm 31.04

หมายเหตุ ที่อัตราส่วน 1:1 มี 1 หลุมที่เมล็ดไม่งอก สาเหตุมาจากความไม่สมบูรณ์ของเมล็ดพันธุ์ เพราะที่อัตราส่วนเดียวกัน หลุมอื่นสามารถงอกได้ตามปกติ

เมื่อนำข้อมูลการออกของเมล็ดมาวิเคราะห์หาความแตกต่างทางสถิติ พบว่า ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ผลของความยาวราก ความสูงลำต้น และน้ำหนักเฉลี่ย มีค่าแสดงนัยสำคัญ (Sig.) เท่ากับ 0.897, 0.565 และ 0.936 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าผลของการเจริญเติบโตในแต่ละอัตราส่วนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) โดยผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วย One way ANOVA แสดงดังภาคผนวก ค หน้า 64 - 65

4.5 การวิเคราะห์ดัชนีการเจริญเติบโตของคะน้ำ

การทดลองปลูกคะน้ำใช้ระยะเวลาในการทดลอง 15 วัน โดยทำการแปรอัตราส่วนวัสดุปลูกเป็น 1:1, 1:4, 1:9 และทำชุดควบคุมโดยใช้ทรายผสมแกลบดำ ทำการทดสอบสมบัติทั่วไปของวัสดุปลูก โดยผลแสดงดังตารางที่ 4.5 (รายละเอียดแสดงดังภาคผนวก ค หน้า 65)

ตารางที่ 4.5 สมบัติทั่วไปของวัสดุปลูก

อัตราส่วน	pH	การนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	การอุ้มน้ำ (%)
Control	7.48 ± 3.52	701.67 ± 1.70	46.07 ± 0.38
1:1	7.94 ± 0.01	937.67 ± 2.62	50.51 ± 0.15
1:4	7.81 ± 0.02	778.33 ± 4.03	47.07 ± 0.25
1:9	7.69 ± 0.00	1126.67 ± 20.55	46.00 ± 0.16

จากตารางที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าวัสดุปลูกในแต่ละอัตราส่วนมีค่าพีเอชใกล้เคียงกัน และในการทดสอบการอุ้มน้ำของวัสดุปลูก พบว่า ที่อัตราส่วน 1:1 มีการอุ้มน้ำเท่ากับ $50.51 \pm 0.15\%$ ซึ่งมากกว่าอัตราส่วนอื่นๆ เมื่อพิจารณาจากค่าการนำไฟฟ้า จะเห็นว่าที่อัตราส่วน 1:1 และ 1:9 มีค่าการนำไฟฟ้าสูง โดยมีค่าเท่ากับ 937.67 ± 2.62 และ $1126.67 \pm 20.55 \mu\text{S}/\text{cm}$ ตามลำดับ เนื่องมาจากการละลายของฟอสเฟตจากเรซิน ซึ่งพีชจะนำไปใช้ในการเจริญเติบโต ส่งผลให้การเจริญเติบโตของคะน้ำในแต่ละอัตราส่วนมีความแตกต่างกัน ในขณะที่อัตราส่วน 1:4 และชุดควบคุมมีค่าการนำไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกัน โดยผลการเจริญเติบโตของคะน้ำแสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลของวัสดุปลูกต่อการเจริญเติบโต

อัตราส่วน	ความยาวราก (cm)	ความสูงของลำต้น (cm)	น้ำหนักเปียก (mg)	น้ำหนักแห้ง (mg)
Control	2.45 ± 0.05	2.69 ± 0.11	743.33 ± 9.43	53.33 ± 4.71
1:1	ND	ND	ND	ND
1:4	2.43 ± 0.10	3.51 ± 0.14	786.67 ± 18.86	60 ± 8.16
1:9	3.39 ± 0.12	4.70 ± 0.08	1140.00 ± 8.16	96.67 ± 4.71

เมื่อวิเคราะห์ดัชนีการเจริญเติบโตของคะน้าจากตารางที่ 4.6 พบว่า ที่อัตราส่วนเรซิน MR ต่อทรายผสมแกลบดำ 1:1 เมล็ดคะน้าสามารถงอกได้แต่ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ เนื่องจากคะน้าเป็นพืชที่ต้องการน้ำอย่างเพียงพอและสม่ำเสมอเพื่อใช้ในการเจริญเติบโต แต่ที่อัตราส่วน 1:1 มีปริมาณเรซินจำนวนมาก ทำให้วัสดุปลูกอุ้มน้ำถึง $50.51 \pm 0.15\%$ ทำให้เมื่อรดน้ำลงไปรากของคะน้าไม่สามารถเอาชนะเรซินที่แย่งคุณน้ำได้ จึงมีน้ำไม่เพียงพอต่อการเจริญเติบโต ส่งผลให้ชะงักการเจริญเติบโตและตายในที่สุด ที่อัตราส่วน 1:4 เมื่อพิจารณาจากสมบัติทั่วไปของวัสดุปลูกจะเห็นว่ามีความใกล้เคียงกับชุดควบคุม เนื่องจากในทรายผสมแกลบดำอาจมีแคลเซียมอยู่ เมื่อมีการละลายของฟอสเฟตออกมาจากเรซิน จึงเกิดการตกตะกอนเป็นแคลเซียมฟอสเฟต $[\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2]$ จึงอธิบายได้ว่า เมื่อฟอสเฟตอยู่ในรูปของตะกอน $\text{Ca}_2(\text{PO}_4)_2$ คะน้าไม่สามารถดูดไปใช้ได้ จึงมีการเจริญเติบโตไม่แตกต่างกับชุดควบคุมซึ่งไม่มีฟอสฟอรัส และที่อัตราส่วน 1:9 สังเกตได้ชัดเจนว่ามีการเจริญเติบโตของคะน้าดีที่สุด ในระยะเวลา 15 วัน เนื่องจากค่าการนำไฟฟ้าที่สูง แสดงให้เห็นว่ามีฟอสเฟตถูกละลายออกมาจากเรซิน แต่มีจำนวนไม่มากพอที่จะเกิดการตกตะกอนกับแคลเซียมคะน้าจึงสามารถดูดไปใช้ประโยชน์ได้ และยังใช้เป็นแหล่งธาตุอาหารสำรอง เพราะฟอสเฟตจะถูกปลดปล่อยออกมาอย่างช้าๆ ทำให้สามารถนำไปใช้ได้ในระยะยาว นอกจากนี้ เรซินยังช่วยปรับปรุงโครงสร้างของวัสดุปลูกให้มีความโปร่งทำให้น้ำและอากาศถ่ายเทได้ดีอีกด้วย โดยการเจริญเติบโตของคะน้า แสดงดังรูปที่ 4.5 (รายละเอียดแสดงดังภาคผนวก ค หน้า 66)



รูปที่ 4.4 การเจริญเติบโตของคะน้าที่ระยะเวลา 15 วัน



รูปที่ 4.5 อัตราส่วน 1:1



รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบความยาวของลำต้น

ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของดัชนีการเจริญเติบโตของคะน้ำ แบ่งออกเป็น 3 ตัวแปร ได้แก่ ความยาวราก ความสูงของลำต้น และน้ำหนักแห้ง ผลการวิเคราะห์นัยสำคัญด้วย One way ANOVA แสดงดังภาคผนวก ค หน้า 70 - 72 โดยกำหนดให้ 1 = อัตราส่วน 1:1, 2 = อัตราส่วน 1:4 และ 3 = อัตราส่วน 1:9

ผลการวิเคราะห์นัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่าดัชนีการเจริญเติบโตใน อัตราส่วน 1:1, 1:4 และ 1:9 มีความแตกต่างกัน โดยผลการวิเคราะห์ความยาวราก มีค่าแสดงนัยสำคัญ (Sig.) เท่ากับ 0.000 ความสูงของลำต้นมีค่าแสดงนัยสำคัญเท่ากับ 0.000 และ ผลของน้ำหนักแห้ง มีค่าแสดงนัยสำคัญเท่ากับ 0.000 แสดงให้เห็นว่าไม่ปกติ หรือปฏิเสธสมมติฐาน H_0 จึงถือว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) สรุปได้ว่าดัชนีการเจริญเติบโตของอัตราส่วน 1:1, 1:4 และ 1:9 มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และที่อัตราส่วน 1:9 ช่วยให้การเจริญเติบโตของคะน้ำดีที่สุดเมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่นๆ โดยผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วย One way ANOVA แสดงดังภาคผนวก ค หน้า 66 - 67

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

1. การศึกษาระยะเวลาเข้าสู่สมดุลพบว่า การดูดซับฟอสเฟตจากน้ำผกซักฟอกจะเข้าสู่สมดุลเมื่อเวลาผ่านไป 5 ชั่วโมง ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์
2. การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ โดยแปรค่าความเข้มข้นของสารมาตรฐานฟอสเฟตเป็น 8 ความเข้มข้น พบว่าการดูดซับฟอสเฟตโดยใช้เรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วสอดคล้องกับสมการไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้น
3. การทดสอบความเป็นพิษต่อการงอกของเมล็ดคະນ້າโดยแปรอัตราส่วนเรซินที่ดัดแปลงแล้วต่อน้ำเป็น 5 อัตราส่วน ได้แก่ 1:1, 1:3, 1:5, 1:7 และ 1:10 แล้วนำน้ำมาพรมบนเมล็ดคະນ້า พบว่าสารละลายที่สกัดได้ในแต่ละอัตราส่วนไม่ส่งผลเสียต่อการงอกของเมล็ด
4. การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของวัสดุปลูกต่อการเจริญเติบโตโดยแปรอัตราส่วนระหว่างเรซินต่อทรายผสมเกลบดำเป็น 3 อัตราส่วน ได้แก่ 1:1, 1:4 และ 1:9 พบว่า ที่อัตราส่วน 1:9 มีการเจริญเติบโตของคະນ້าดีที่สุดในช่วงเวลา 15 วัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรเพิ่มระยะเวลาในการทดลอง เพื่อให้เห็นผลการทดลองชัดเจนมากขึ้น
2. ศึกษาการนำเรซินที่ดัดแปลงแล้วมาใช้ผสมกับวัสดุปลูกชนิดอื่นแทนทรายผสมเกลบดำ หรือ ใช้ร่วมกับดินที่มีปัญหา เช่น ใช้ผสมกับดินเปรี้ยวหรือดินกรด ซึ่งเป็นดินที่มีพีเอชต่ำ เรซินที่ดัดแปลงแล้วที่มีค่าพีเอชเป็นเบส จะช่วยลดความเป็นกรดของดินทำให้ค่าพีเอชสูงขึ้น หรือ ใช้ผสมกับดินโซดิกที่มีลักษณะเนื้อดินแน่นทึบและน้ำซึมผ่านได้ยาก โดยเรซินจะช่วยปรับปรุงโครงสร้างของดินให้มีความโปร่งและช่วยให้น้ำซึมผ่านได้ง่ายขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- กรมพัฒนาที่ดิน. 2547. คู่มือการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน น้ำ ปุ๋ย พืช วัสดุปรับปรุงดิน และการวิเคราะห์ เพื่อตรวจรับรองมาตรฐานสินค้า. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ:สำนักวิทยาศาสตร์ เพื่อการพัฒนาที่ดิน
- กรมพัฒนาที่ดิน. 2553. คู่มือการปฏิบัติงาน กระบวนการวิเคราะห์ตรวจสอบดินทางเคมี. กรุงเทพฯ: สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน
- เกษราพร สุอรุณ และโกวิท ปิยะมังกลา. 2555. จลนศาสตร์การดูดซับไอออนเงินโดยเรซินไคโตซาน. วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- จันทร์จรัส วีรสาร อติสุข แซ่จิว และไพโร มัทธวรรตน์. 2552. การปลดปล่อยธาตุปุ๋ยที่เป็นประโยชน์ต่อพืชของวัสดุปลูก : นิทรรศการงานวิจัย บนเส้นทางงานวิจัยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ : สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- จีโอไซเคิล ประเทศไทย. การเผาผลิตร่วม. วิธีสืบค้นวัสดุสารสนเทศ. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.geocycle.co.th/index.php?id=13525&L=35>. (วันที่ค้นข้อมูล: 5 มีนาคม 2557).
- จีโอไซเคิล ประเทศไทย. บริการเตรียมกากและการเผาผลิตร่วม. วิธีสืบค้นวัสดุสารสนเทศ. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.geocycle.co.th/index.php?id=13529&L=35>. (วันที่ค้นข้อมูล: 3 มีนาคม 2557).
- ชาติ นาวานุเคราะห์. 2553. การบำบัดธาตุอาหารของพืชที่ปนเปื้อนในน้ำเสียและการนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ด้วยกระบวนการทางเคมี. คณะสิ่งแวดล้อมฯ ม.มหาสารคาม.
- ชีระวิทย์ รัตนพันธ์, พนาลี ชีวกิตาการ และสุรพล อารีย์กุล. 2548. การกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียโดยใช้เถ้าลอยจากเตาเผาขยะภูเก็ต. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ. หน้า 27-34 (835 หน้า)
- ธวัชชัย ศรีวิบูลย์. เทคนิคการแยก. วิธีสืบค้นวัสดุสารสนเทศ. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://e-book.ram.edu/e-book/c/CM334/CM334-5.pdf>. (วันที่ค้นข้อมูล: 1 มีนาคม 2557).
- นงภัค หงษ์ธนัด. 2550. การศึกษาการดูดซับและการกาคะเนค้ำแนะนำปุ๋ยฟอสฟอรัสในดินนาข้าว โดยใช้สมการความต้องการฟอสฟอรัสในโปรแกรม PDSS. สาขาปฐพีวิทยา ภาควิชาปฐพีวิทยา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- บุษยรัตน์ หมอกมัว. 2552. การกำเนิดและลักษณะประจุของดินดอนทางภาคที่พัฒนามาจากหินกลุ่มแกรนิตบริเวณชายฝั่งทะเลตะวันออกเฉียงใต้ของประเทศไทย. สาขาปฐพีวิทยา ภาควิชาปฐพีวิทยา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- ปิ่น ช่างทอง. ผงซักฟอกกับปัญหาน้ำเน่าเสีย. วิธีสืบค้นวัสดุสารสนเทศ. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: http://www.scidatdaruni.org/index.php?option=com_content&view=article&id=105:scidetergentpollution&catid=68:sciencegoru&Itemid=13. (วันที่ค้นข้อมูล: 3 มีนาคม 2557).
- เพชรพร เขาวกิจเจริญ และ นิธิรัชต์ สงวนเดือน. 2546. การกำจัดทองแดงโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากขังข้าวโพด เปลือกถั่วเหลือง และก้านดอกทานตะวัน. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ภาพตะวัน ชลาสัย.มยุรี ชัญพลา และอาริสรา วงศ์ชัย. 2554. การใช้ประโยชน์กากตะกอนจากโรงไฟฟ้า. สาขาวิชาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ภาวิกา หงษ์ทอง. วัฏจักรฟอสฟอรัส. วิธีสืบค้นวัสดุสารสนเทศ. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://environment.ekstepza.ws/phosphorus-cycle.html>. (วันที่ค้นข้อมูล: 3 มีนาคม 2557).
- มรุศ วังชนะชัย และ คณะ. การคัดเลือกวัสดุสำหรับการดูดซับฟอสฟอรัสเพื่อใช้เป็นตัวกลางในระบบบึงประดิษฐ์. วิธีสืบค้นวัสดุสารสนเทศ. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: http://researchconference.kps.ku.ac.th/article_9/pdf/o_sci_tech11.pdf. (วันที่ค้นข้อมูล: 3 มีนาคม 2557).
- ยะโก๊ะ ขาเริ่มคาเบะ. 2553. การดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสีย ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเคมีประยุกต์ มหาวิทยาลัยทักษิณ.
- ยงยุทธ โอสธสภา. 2546. ธาตุอาหารพืช. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- รฐนนท์ เจริญชาศรี, เอิบ เขียวรัตน์ และ อัญชลี สุทธิประการ. 2550. ลักษณะรอยพิมพ์ประจุของดินออกซิซอลส์ที่มีสีแดงในประเทศไทย. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- รัตนากร ขวงสวัสดิ์ และ คณะ. 2554. การเตรียมวัสดุดูดซับจากเปลือกหอยนางรมเหลือทิ้ง เพื่อใช้กำจัดฟอสเฟตในน้ำเสีย. วิศวกรรมลาดกระบัง. 28(4), 31-37
- รุจา สุวรรณสุข วชิระ พิมพ์ปราโมทย์ และ อานนท์ จริญญาเศรษฐ์. 2556. การกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้ว. สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ศุภริดา อ่างทอง. เทคโนโลยีการใช้น้ำ, ฟอสฟอรัสและการใช้น้ำฟอสฟอรัส. วิธีสืบค้นวัสดุสารสนเทศ. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.sluse.mju.ac.th/lecturenote/lessonTH.asp?Start=11>. (วันที่ค้นข้อมูล: 3 มีนาคม 2557).

- ศาลินี เอี่ยมองค์. 2543. การทำให้น้ำบริสุทธิ์ โดยปราศจากการใช้สารเคมีในการฟื้นฟูสภาพเรซิน โดยวิธีการ **Continuous Electrodeionization (CEDI)**. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 10(1), 49 – 56
- สุนิสา ประไพตระกูล. 2551. พีชตระกูลกะหล่ำ (กะน้ำ, ผักกาดกวางตุ้ง) : คู่มือนักวิชาการส่งเสริมการเกษตร. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ : สำนักส่งเสริมและจัดการสินค้าเกษตร. กรมส่งเสริมการเกษตร.
- อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์, ผู้บรรยาย. 2556. เคมีสิ่งแวดล้อมสำหรับน้ำและน้ำเสีย เล่มที่ 2. [เอกสารคำสอนรายวิชา]. กรุงเทพมหานคร : คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- Alicia Sendrowski and Treavor H. Boyer. Phosphate removal from urine using hybrid anion exchange resin. **Desalination**. vol. 322, Aug 2013. Pp. 104–112.
- APHA, AWWA and WEF. 2012. **Standard Method for the Examination of Water and Wastewater**. 22nd Edition. USA : American Public Health Association.
- Bratek W. et. al. Properties and structure of spherical sorbents from waste ion exchange resin. **Fuel Processing Technology**. Vol. 81, Nov 2002. Pp. 87-102.
- Deng S. et. al. Removal of perfluorooctane sulfonate from wastewater by anion exchange resins: Effects of resin properties and solution chemistry. **Water Research**. vol. 44, no. 18, Oct 2010. Pp. 5188–5195.
- Gillman, G. P. and Sumpter E. A. Modification to the compulsive exchange method for measuring exchange characteristics of soils. **Soil Research**. 24. 1, 1986. Pp. 61-66.
- Jeremy A. O'Neal and Treavor H. Boyer. Phosphate recovery using hybrid anion exchange: Applications to source-separated urine and combined wastewater streams. **Water Research**. May 2013. Pp. 5003–5017
- Kabay N. et. al. Removal of boron from SWRO permeate by boron selective ion exchange resins containing *N*-methylglucamine group. **Desalination**. Vol.223, Jan 2008. Pp. 49-56.
- Luigi Masotti, Calderini, N.F. Gray, Elsevier, Metcalf & Eddy. **Phosphorous - removal**. วิธีสืบค้นวัสดุสารสนเทศ. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.lenntech.com/phosphorous-removal.html>. (วันที่ค้นข้อมูล: 3 มีนาคม 2557).
- Mohammed J.K. et. al. Application of response surface methodology (RSM) for optimization of ammoniacal nitrogen removal from semi-aerobic leachate using ion exchange resin. **Desalination**. Vol. 254, Dec 2009. Pp. 154-161.

- Nur T. et. al. Phosphate removal from water using an iron oxide impregnated strong base anion exchange resin. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**. July 2013.
- Sun P.P., Lee J.Y. and Lee M.S. Separation of platinum(IV) and rhodium(III) from acidic chloride solution by ion exchange with anion resins. **Hydrometallurgy**. Vol.113-114, Dec 2012. Pp. 200-204.
- Wolowicz A. and Hubicki Z. Comparison of strongly basic anion exchange resins applicability for removal of palladium(II) ions from acidic solutions. **Chemical Engineering Journal**. vol. 171, March 2011. Pp.206-215.
- Xing Xu. et. al. Nitrate adsorption by multiple biomaterial based resins: Application of pilot-scale and lab- scale products. **Chemical Engineering Journal**. vol. 234, August 2013. Pp. 397-405.

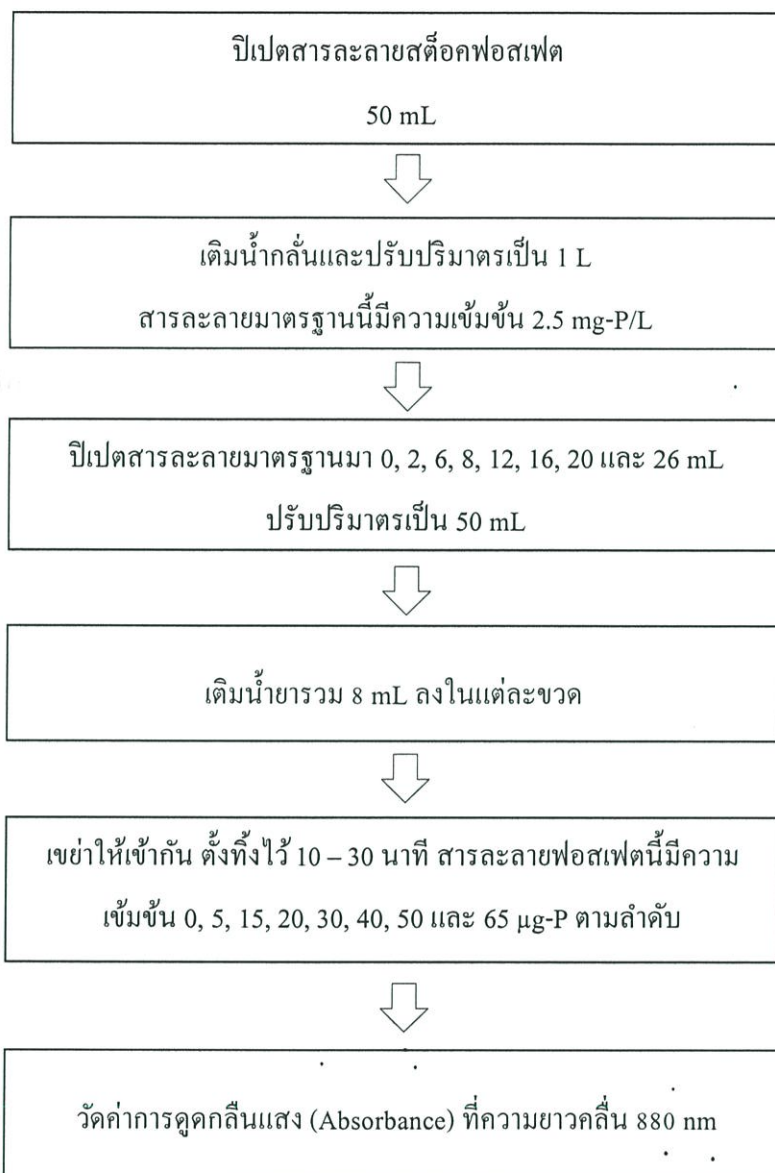
ภาคผนวก ก

การเตรียมสารละลายมาตรฐานและกราฟมาตรฐานฟอสเฟต

การเตรียมสารเคมี

- สารละลายฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์: ละลายฟีนอล์ฟทาลีน 0.1 g ในเอทิลแอลกอฮอล์ ร้อยละ 95 และปรับปริมาตรให้เป็น 100 mL ด้วยเอทิลแอลกอฮอล์
- สารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต: ชั่ง $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 20 g ละลายในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรให้เป็น 500 mL สารละลายเก็บรักษาในขวดแก้ว
- สารละลายกรดซัลฟิวริก 5 N: เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นจำนวน 70 mL ลงในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรเป็น 500 mL
- สารละลายแอนติโมนีโพแทสเซียมทาร์เตรต: ชั่ง $\text{K}(\text{SbO})\text{-C}_4\text{H}_4\text{O}_6\cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ 1.3715 g ละลายในน้ำกลั่น 200 mL เติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 500 mL เก็บรักษาในขวดแก้ว
- สารละลายแอสคอร์บิก 0.1 M: ชั่ง Ascorbic acid 1.76 g ละลายในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรเป็น 100 mL สารละลายเก็บไว้ได้ 1 สัปดาห์โดยเก็บรักษาในตู้เย็น
- น้ำยารวม (Combined reagent): ผสมกรดซัลฟิวริก 5 N จำนวน 50 mL กับสารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต 15 mL และสารละลายแอนติโมนีโพแทสเซียมทาร์เตรต 5 mL ให้เข้ากัน เติมสารละลายแอสคอร์บิก 0.1 M จำนวน 30 mL น้ำยารวมที่ได้จะต้องมีสีเหลืองอ่อน สารละลายนี้จะต้องเตรียมใหม่ทุกครั้งทีวเคราะห์ เก็บไว้ได้ 4 ชั่วโมง
- สารละลายสต็อกฟอสเฟต: ชั่ง KH_2PO_4 0.2197 g ละลายในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรเป็น 1 L สารละลายสต็อกฟอสเฟต 1 mL มีความเข้มข้นฟอสเฟตเท่ากับ $50 \mu\text{g/mL}$ หรือ 50 mg/L

การเตรียมสารละลายมาตรฐานและกราฟมาตรฐานฟอสเฟต



ภาคผนวก ข

การทดสอบสมบัติเบื้องต้น

1. การวัด pH, Conductivity และ TDS

การวัดค่า pH ต้องทำให้ตัวอย่างอยู่ในรูปสารละลาย โดยใช้อัตราส่วนตัวอย่างต่อน้ำ เท่ากับ 1:1 (w/w) โดยชั่งตัวอย่าง 20 g เติมน้ำ 20 mL จากนั้นคนให้เข้ากันเป็นเวลา 30 นาที และตั้งทิ้งไว้ อีก 30 นาที จึงทำการวัดค่า pH ตรงส่วนที่เป็นน้ำใส ด้วย pH meter การวัดค่า Conductivity และ TDS ทำเช่นเดียวกันแต่ใช้อัตราส่วนเป็น 1:5 โดยชั่งตัวอย่าง 5 g เติมน้ำ 25 mL แล้ววัดค่าด้วยเครื่อง Electrical conductivity meter และ TDS meter

2. การทดสอบการอุ้มน้ำ (Water retention)

- เรซิน SR และ MR

1. ชั่งเรซินที่แช่น้ำไว้ 10 g ซึ่งเป็นน้ำหนักเปียก (W_1)
2. นำเรซินไปอบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
3. จากนั้น นำเรซินวางพักไว้ในเดซิเคเตอร์
4. นำเรซินไปชั่งน้ำหนักอีกครั้งเป็นน้ำหนักแห้ง (D_1)
5. คำนวณหาเปอร์เซ็นต์การอุ้มน้ำของเรซิน SR และ MR

- เรซิน NR

1. ชั่งเรซิน 1 g ซึ่งเป็นน้ำหนักแห้ง (D_2) ใส่ลงในบีกเกอร์
2. เติมน้ำกลั่นลงในบีกเกอร์ 5 mL
3. แช่เรซินทิ้งไว้ 1 คืน
4. กรองเอาน้ำออกจากเรซิน และนำเรซินไปชั่งน้ำหนักอีกครั้ง เป็นน้ำหนักเปียก (W_2)
5. คำนวณหาเปอร์เซ็นต์การอุ้มน้ำของเรซิน NR

3. การหาความจุในการแลกเปลี่ยนประจุลบ (AEC)

การเตรียมสารเคมี

- สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4%: ชั่ง NaOH 20 g ละลายในน้ำที่ปราศจากไอออน (DI water) แล้วปรับปริมาตรเป็น 500 mL สารละลายต้องเก็บในขวดสีชา

- สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1 M: ชั่ง NaCl 2.925 g ละลายในน้ำที่ปราศจากไอออน (DI water) และปรับปริมาตรเป็น 500 mL

วิธีทดลอง

1. ชั่งเรซิน (SR) จำนวน 10 g ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 mL
2. เติมน้ำมันละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 4% จำนวน 60 mL ปิดปากขวดด้วยพาราฟิล์ม
3. นำไปเขย่าเป็นเวลา 5 นาที ที่อุณหภูมิ 25 °C ใช้ความเร็ว 120 rpm ตั้งทิ้งไว้ 1 คืน เพื่อให้เรซินอิ่มตัวด้วยอนุมูลไฮดรอกไซด์
4. กรองเรซินด้วยกระดาษกรองเบอร์ 2
5. ชะเรซินด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ครึ่งละ 30 mL จนเรซินอิ่มตัวด้วยคลอไรด์
6. ล้างเรซินด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 4% ครึ่งละ 30 mL เพื่อให้คลอไรด์หลุดออกมาจากเรซินและถูกแทนที่ด้วยอนุมูลไฮดรอกไซด์
7. เก็บสารละลายนี้ไปวิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์ด้วยเครื่องไอออนโครมาโทกราฟี
8. ทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ

ภาคผนวก ก

ตารางแสดงผลการทดลอง

ตาราง ก - 1 สมบัติเบื้องต้นของเรซิน

Parameter	ครั้ง	NR	SR	MR
pH	1	6.00	7.65	8.85
	2	5.90	7.59	8.73
	3	5.98	7.39	8.69
	\bar{X}	5.96	7.54	8.76
	S.D.	0.04	0.11	0.07
การนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1	800	227	666
	2	802	229	659
	3	804	227	662
	\bar{X}	802	227.67	662.33
	S.D.	1.63	0.94	2.87
TDS (mg/L)	1	1933	29	306
	2	1930	11	312
	3	2090	11	316
	\bar{X}	1984.33	17	311.33
	S.D.	74.73	8.49	4.11
WR (%)	1	50.74	71.60	66.00
	2	50.50	71.63	65.60
	3	52.15	72.20	66.00
	\bar{X}	51.13	71.81	65.87
	S.D.	0.73	0.28	0.19

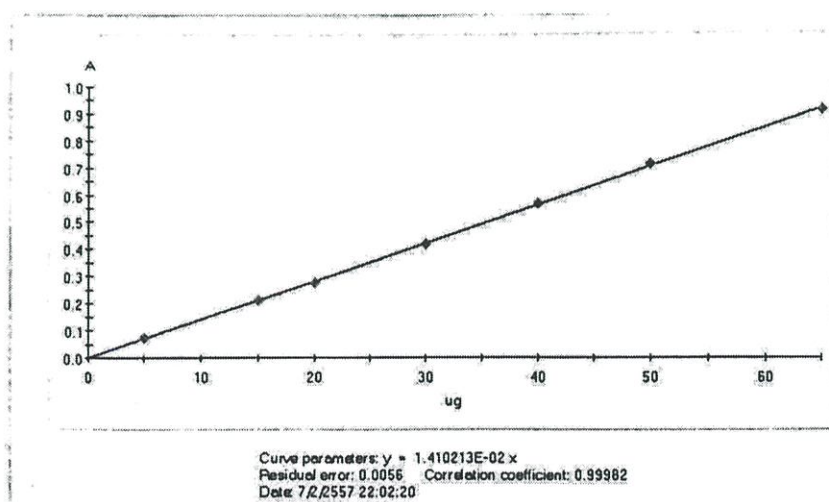
ตาราง ก-2 การหาความจุในการแลกเปลี่ยนประจุลบ

ครั้ง	น้ำหนักเปียก(g)	น้ำหนักแห้ง(g)	[Cl ⁻]	AEC (g-dried resin)
1	10.0010	2.8193	1725.60	17.24
2	10.0012	2.8193	1632.30	16.31
3	10.0010	2.8193	1837.71	18.36
\bar{X}	10.0011	2.8193	1731.87	17.30
S.D.	0.00	0.00	83.98	0.84

ตาราง ก-3 ค่าจากกราฟมาตรฐานฟอสเฟต

No.	ปริมาณPO ₄ ³⁻ [μg]	Ordinate [A]	Conc. [mg/L]
blank	0	0	0
1	5.00	0.069	0.09
2	15.00	0.212	0.26
3	20.00	0.280	0.34
4	30.00	0.423	0.52
5	40.00	0.568	0.69
6	50.00	0.714	0.86
7	65.00	0.908	1.12

รูปที่ ก-1 กราฟมาตรฐานฟอสเฟต



ตาราง ก-4 ผลการศึกษาระยะเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับฟอสเฟตจากน้ำผงซักฟอก

Time	Sample	Ordinate	Dilution	ปริมาณ PO_4^{3-}	Conc.	Removal	\bar{X}	S.D.
		[A]	Factor	[μg]	[mg/L]	[%]		
10 (min)	10-C	0.786	3	167.21	2.88		55.36	0.21
	1	0.701	1.5	74.56	1.29	55.41		
	2	0.698	1.5	74.24	1.28	55.60		
	3	0.706	1.5	75.10	1.29	55.09		
30 (min)	30-C	0.771	3	164.02	2.83		58.60	1.09
	1	0.638	1.5	67.86	1.17	58.63		
	2	0.659	1.5	70.10	1.21	57.26		
	3	0.618	1.5	65.73	1.13	59.92		
60 (min)	60-C	0.790	3	168.06	2.90		67.91	0.26
	1	0.502	1.5	53.40	0.92	68.23		
	2	0.507	1.5	53.93	0.93	67.91		
	3	0.512	1.5	54.46	0.94	67.59		
180 (min)	180-C	0.798	3	169.76	2.93		86.90	0.34
	1	0.21	1.5	22.34	0.39	86.84		
	2	0.215	1.5	22.87	0.39	86.53		
	3	0.202	1.5	21.49	0.37	87.34		
300 (min)	300-C	0.825	3	175.51	3.03		91.92	0.27
	1	0.128	1.5	13.61	0.23	92.24		
	2	0.133	1.5	14.15	0.24	91.94		
	3	0.139	1.5	14.79	0.25	91.58		
24 (hr)	24-C	0.819	3	174.23	3.00		90.70	0.84
	1	0.167	1.5	17.76	0.31	89.80		
	2	0.134	1.5	14.25	0.25	91.82		
	3	0.156	1.5	16.59	0.29	90.48		

หมายเหตุ C = Control (ชุดควบคุม)

ตาราง ก-5 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับฟอสเฟตที่เวลา 5 ชั่วโมง

Sample	Ordinate	Dilution	ปริมาณ PO_4^{3-}	Conc.	% Removal	\bar{X}	S.D.
	[A]	Factor	[μ g]	[mg/L]	[%]		
100-C	0.649	100	5621.34	96.92			
100-1	0.085	1	7.37	0.13	86.90	86.74	0.22
100-2	0.088	1	7.63	0.13	86.44		
100-3	0.085	1	7.37	0.13	86.90		
150-C	0.692	150	8989.80	155.00			
150-1	0.548	5	237.42	4.09	20.77	16.34	3.21
150-2	0.600	5	259.95	4.48	13.25		
150-3	0.588	5	254.75	4.39	14.99		
200-C	0.639	200	11069.37	190.85			
200-1	0.502	20	869.95	15.00	21.41	20.78	0.55
200-2	0.506	20	876.02	15.10	20.86		
200-3	0.511	20	884.68	15.25	20.08		
250-C	0.636	250	13777.15	237.54			
250-1	0.694	20	1201.82	20.72	-9.04	-10.46	1.48
250-2	0.699	20	1210.48	20.87	-9.83		
250-3	0.716	20	1239.94	21.38	-12.50		
300-C	0.665	300	17286.42	298.04			
300-1	0.492	50	2131.56	36.75	26.02	26.78	0.56
300-2	0.483	50	2093.43	36.09	27.34		
300-3	0.486	50	2103.83	36.27	26.98		
350-C	0.680	400	23557.62	406.17			
350-1	0.297	100	2575.20	44.40	56.27	45.52	7.60
350-2	0.406	100	3521.40	60.71	40.21		
350-3	0.407	100	3528.34	60.83	40.09		
400-C	0.658	400	22799.44	393.09			
400-1	0.322	100	2793.55	48.16	50.99	39.03	8.46
400-2	0.440	100	3812.54	65.73	33.11		
400-3	0.441	100	3819.48	65.85	32.99		
450-C	0.663	450	25832.15	445.38			
450-1	0.424	100	3673.91	63.34	36.00	33.34	1.88
450-2	0.450	100	3902.66	67.29	32.02		
450-3	0.450	100	3902.66	67.29	32.02		

ตาราง ก - 6 ข้อมูลไอโซเทอร์ม

q_e (mg/g)	C_e (mg/L)	C_e/q_e	x/m	$\text{Log}(C_e)$	$\text{Log}(x/m)$
4.8398	0.13	0.0269	4.8398	-0.8861	0.6848
5.0430	4.46	0.8844	5.0430	0.6493	0.7027
5.8815	15.12	2.5708	5.8815	1.1796	0.7695
7.2475	20.99	2.8962	7.2475	1.3220	0.8602
8.7575	36.39	4.1553	8.7575	1.5610	0.9424
11.7423	55.31	4.7103	11.7423	1.7428	1.0698
11.1508	59.91	5.3727	11.1508	1.7775	1.0473
12.6983	65.97	5.1952	12.6983	1.8193	1.1037

ตาราง ก - 7 สมบัติทั่วไปของน้ำที่สกัดจาก MR

เรซินต่อน้ำ	1:1	1:3	1:5	1:7	1:10
pH	8.81	8.61	8.57	8.55	8.51
	8.78	8.62	8.60	8.58	8.49
	8.77	8.65	8.60	8.57	8.51
\bar{X}	8.79	8.63	8.59	8.57	8.50
S.D.	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
การนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	679	669	660	656	651
	682	672	661	657	649
	683	676	657	654	652
\bar{X}	681.33	672.33	659.33	655.67	650.67
S.D.	1.70	2.87	1.70	1.25	1.25

ตาราง ก-8 ผลการวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟตของน้ำที่สกัดจาก MR

เรซินต่อน้ำ	ปริมาณ PO_4^{3-} [μg]	Ordinate [A]	Conc. [mg/L]	\bar{X}	S.D.
1:1-1	1.77	0.025	0.03	0.03	0.0015
1:1-2	1.56	0.022	0.03		
1:1-3	1.70	0.024	0.03		
1:3-1	1.77	0.025	0.03	0.03	0.0026
1:3-2	1.42	0.020	0.02		
1:3-3	1.49	0.021	0.03		
1:5-1	1.35	0.019	0.02	0.03	0.0025
1:5-2	1.49	0.021	0.03		
1:5-3	1.70	0.024	0.03		
1:7-1	1.21	0.017	0.02	0.02	0.0012
1:7-2	1.06	0.015	0.02		
1:7-3	1.06	0.015	0.02		
1:10-1	0.92	0.013	0.02	0.02	0.0015
1:10-2	0.78	0.011	0.01		
1:10-3	0.99	0.014	0.02		

ตาราง ก-9 ผลการทดสอบความเป็นพิษของฟอสเฟตต่อการงอกของเมล็ดคะน้า

เรซินต่อน้ำ	หลุมที่	ความยาวราก (cm)	ความสูงของลำต้น (cm)	น้ำหนักเฉลี่ย (mg)
Control	1	2.78	1.72	140
	2	3.00	2.04	160
	3	3.04	2.26	150
	4	1.68	1.90	110
	5	1.95	2.38	120
	6	1.42	2.44	150
	7	2.73	2.35	110
1:1	1	1.50	1.70	120
	2	3.93	2.83	150
	3	ND*		
	4	1.92	2.34	200
	5	2.63	2.20	150
	6	2.25	2.90	140
	7	3.10	2.75	180
1:3	1	2.84	2.72	120
	2	2.26	2.36	190
	3	2.20	2.30	160
	4	3.88	3.02	220
	5	3.38	3.18	200
	6	2.94	2.00	180
	7	2.20	2.40	130
1:5	1	3.24	2.26	180
	2	1.16	2.00	190
	3	3.52	2.58	200
	4	2.96	2.56	200
	5	3.83	2.20	140
	6	4.75	3.20	150
	7	1.47	1.63	120

(ต่อ)

1:7	1	4.38	2.70	210
	2	0.53	1.60	90
	3	0.96	1.42	110
	4	3.58	2.30	210
	5	2.60	2.40	130
	6	2.03	2.13	130
	7	4.38	2.75	240
1:10	1	2.66	2.48	180
	2	1.23	1.80	180
	3	3.56	2.76	130
	4	2.46	2.32	200
	5	0.80	1.44	130
	6	3.08	2.30	170
	7	3.17	2.57	110

หมายเหตุ *เมล็ดไม่ออก

ตาราง ก – 10 ผลการวิเคราะห์ความยาวราก

Descriptives								
Long (cm)								
	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
1.00	6	2.5550	.87207	.35602	1.6398	3.4702	1.50	3.93
2.00	7	2.8143	.64989	.24564	2.2132	3.4153	2.20	3.88
3.00	7	2.9900	1.27846	.48321	1.8076	4.1724	1.16	4.75
4.00	7	2.6371	1.55922	.58933	1.1951	4.0792	.53	4.38
5.00	7	2.4229	1.03258	.39028	1.4679	3.3778	.80	3.56
Total	34	2.6876	1.08004	.18523	2.3108	3.0645	.53	4.75

หมายเหตุ 1, 2, 3, 4 และ 5 แทนอัตราส่วนเรซินต่อไปนี้ 1:1, 1:3, 1:5, 1:7 และ 1:10

ตาราง ก – 11 ผลการวิเคราะห์ห้้นัยสำคัญของความยาวราก

ANOVA					
Long (cm)					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	1.366	4	.342	.267	.897
Within Groups	37.128	29	1.280		
Total	38.494	33			

ตาราง ก – 12 ผลการวิเคราะห์ความสูงลำต้น

Descriptives								
Tall (cm)								
	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
1.00	6	2.4533	.46345	.18920	1.9670	2.9397	1.70	2.90
2.00	7	2.5686	.42188	.15945	2.1784	2.9587	2.00	3.18
3.00	7	2.3471	.49849	.18841	1.8861	2.8082	1.63	3.20
4.00	7	2.1857	.51225	.19361	1.7120	2.6595	1.42	2.75
5.00	7	2.2386	.46197	.17461	1.8113	2.6658	1.44	2.76
Total	34	2.3559	.46583	.07989	2.1933	2.5184	1.42	3.20

ตาราง ก – 13 ผลการวิเคราะห์ห้้นัยสำคัญของความสูงลำต้น

ANOVA					
Tall (cm)					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	.673	4	.168	.752	.565
Within Groups	6.488	29	.224		
Total	7.161	33			

ตาราง ก - 14 ผลการวิเคราะห์น้ำหนักเฉลี่ย

Descriptives

Dry Weight (mg)

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
1.00	6	156.6667	28.75181	11.73788	126.4935	186.8398	120.00	200.00
2.00	7	171.4286	36.70993	13.87505	137.4775	205.3796	120.00	220.00
3.00	7	168.5714	31.84785	12.03736	139.1171	198.0258	120.00	200.00
4.00	7	160.0000	58.59465	22.14670	105.8090	214.1910	90.00	240.00
5.00	7	157.1429	33.52327	12.67060	126.1390	188.1467	110.00	200.00
Total	34	162.9412	37.70133	6.46572	149.7866	176.0958	90.00	240.00

ตาราง ก - 15 ผลการวิเคราะห์หัยสำคัญของน้ำหนักเฉลี่ย

ANOVA

Dry Weight (mg)

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	1258.263	4	314.566	.200	.936
Within Groups	45647.619	29	1574.056		
Total	46905.882	33			

ตาราง ก - 16 ผลการวิเคราะห์สมบัติทั่วไปของวัสดุปลูก

Parameter	ครั้ง	Control	1:1	1:4	1:9
pH	1	7.47	7.69	7.83	7.96
	2	7.49	7.69	7.79	7.94
	3	7.48	7.70	7.81	7.93
	\bar{X}	7.48	7.69	7.81	7.94
	S.D.	3.52	0.00	0.02	0.01
การนำไฟฟ้า ($\mu\text{S/cm}$)	1	700	940	775	1100
	2	704	939	784	1130
	3	701	934	776	1150
	\bar{X}	701.67	937.67	778.33	1126.67
	S.D.	1.70	2.62	4.03	20.55
%WR	1	45.80	50.62	47.00	46.00
	2	46.60	50.30	47.40	45.80
	3	45.80	50.60	46.80	46.20
	\bar{X}	46.07	50.51	47.07	46.00
	S.D.	0.38	0.15	0.25	0.16

ตาราง ก - 17 ดัชนีการเจริญเติบโตของกะน้า

ดัชนีการเจริญเติบโต	ครั้ง	Control	1:1	1:4	1:9
ความยาวราก (cm)	1	2.40		2.54	3.54
	2	2.42		2.44	3.36
	3	2.52	ND	2.30	3.26
	\bar{X}	2.45		2.43	3.39
	S.D.	0.05		0.10	0.12
ความสูงของลำต้น (cm)	1	2.58		3.48	4.64
	2	2.64		3.70	4.64
	3	2.84	ND	3.36	4.82
	\bar{X}	2.69		3.51	4.70
	S.D.	0.11		0.14	0.08
น้ำหนักแห้ง (mg)	1	50		50	100
	2	60		60	90
	3	50	ND	70	100
	\bar{X}	53.33		60.00	96.67
	S.D.	4.71		8.16	4.71

ตาราง ก - 18 ผลการวิเคราะห์ความยาวรากของกะน้าในวัสดุปลูกแต่ละอัตราส่วน

Descriptives

long (cm)

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
1.00	3	.0000	.00000	.00000	.0000	.0000	.00	.00
2.00	3	2.4267	.12055	.06960	2.1272	2.7261	2.30	2.54
3.00	3	3.3867	.14189	.08192	3.0342	3.7391	3.26	3.54
Total	9	1.9378	1.51448	.50483	.7736	3.1019	.00	3.54

ตาราง ก - 19 ผลการวิเคราะห์หาความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของความยาวราก

ANOVA

long (cm)

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	18.280	2	9.140	790.954	.000
Within Groups	.069	6	.012		
Total	18.349	8			

ตาราง ก - 20 ผลการวิเคราะห์ความสูงลำต้นของกะน้ำในวัสดุปลูกแต่ละอัตราส่วน

Descriptives

tall (cm)

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
1.00	3	.0000	.00000	.00000	.0000	.0000	.00	.00
2.00	3	3.5133	.17243	.09955	3.0850	3.9417	3.36	3.70
3.00	3	4.7000	.10392	.06000	4.4418	4.9582	4.64	4.82
Total	9	2.7378	2.11904	.70635	1.1089	4.3666	.00	4.82

ตาราง ก - 21 ผลการวิเคราะห์หาความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของความสูงลำต้น

ANOVA

tall (cm)

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	35.842	2	17.921	1326.378	.000
Within Groups	.081	6	.014		
Total	35.923	8			

ตาราง ก - 22 ผลการวิเคราะห์น้ำหนักแห้งของกะน้ำในวัสดุปลูกแต่ละอัตราส่วน

Descriptives

dry weight (mg)

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
1.00	3	.0000	.00000	.00000	.0000	.0000	.00	.00
2.00	3	60.0000	10.00000	5.77350	35.1586	84.8414	50.00	70.00
3.00	3	96.6667	5.77350	3.33333	82.3245	111.0088	90.00	100.00
Total	9	52.2222	42.65495	14.21832	19.4347	85.0097	.00	100.00

ตาราง ก - 23 ผลการวิเคราะห์หาความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญน้ำหนักแห้ง

ANOVA

dry weight (mg)

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	14288.889	2	7144.444	160.750	.000
Within Groups	266.667	6	44.444		
Total	14555.556	8			

ภาคผนวก ง

การคำนวณ

1. เปอร์เซ็นต์การอุ้มน้ำของเรซิน

$$\% \text{ WR} = \left(\frac{W-D}{W} \right) \times 100$$

WR = การอุ้มน้ำ (Water retention, %)

W = น้ำหนักเปียก (g)

D = น้ำหนักแห้ง (g)

ตัวอย่างการคำนวณ

- น้ำหนักเปียก = 3.40 g

- น้ำหนักแห้ง = 10.00 g

$$\begin{aligned} \% \text{ WR} &= \left(\frac{10.00-3.40}{10.00} \right) \times 100 \\ &= 66.00 \% \end{aligned}$$

2. ความเข้มข้นของฟอสเฟต

$$[\text{PO}_4^{3-}] \text{ (mg-P/L)} = \frac{\mu\text{g}}{V}$$

$[\text{PO}_4^{3-}]$ = ความเข้มข้นของฟอสเฟต (mg-P/L)

μg = ปริมาณของฟอสเฟตที่อ่านได้จากกราฟ (μg)

V = ปริมาตรตัวอย่าง (mL)

ตัวอย่างการคำนวณ

- ปริมาณของฟอสเฟตที่อ่านได้จากกราฟ = 5.00 μg

$$[\text{PO}_4^{3-}] = \frac{5.00}{58} = 0.09 \text{ mg-P/L}$$

3. ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุลบของเรซิน SR

การวิเคราะห์หาความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุลบของเรซิน ใช้ปริมาณคลอไรด์ ไอออน (Cl^-) ที่ถูกดูดซับไว้เป็นตัวแทน และนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง IC

ตัวอย่างการคำนวณ

- ชั่งเรซิน SR = 10.0010 g (น้ำหนักเปียก)

- เปอร์เซนต์น้ำของเรซิน SR = 71.81%

$$\text{จาก} \quad \% \text{WR} = \left(\frac{W-D}{W} \right) \times 100$$

$$71.81 = \left(\frac{10.0010-D}{10.0010} \right) \times 100$$

$$D = 2.8193 \text{ g}$$

- น้ำหนักแห้งของเรซิน เท่ากับ 2.8193 g

- ความเข้มข้นของ Cl^- = 1725.60 mg/L

- สารละลายที่ถูกชะผ่านเรซิน = 100 mL

ในสารละลาย 1000 mL มี Cl^- = 1725.60 mg

ในสารละลาย 100 mL มี Cl^- = $\frac{1725.60 \times 100}{1000}$

= 172.56 mg as Cl^- / 2.8193 g-dried resin

เรซิน 2.8193 g มี Cl^- = $\frac{172.56 \times 10^{-3} \text{ g}}{35.5 \text{ g/mol}}$

= 4.86×10^{-3} mol

ดังนั้นในเรซิน 100 g มี Cl^- = $\frac{4.86 \times 10^{-3} \text{ mol} \times 100 \text{ g}}{2.8193 \text{ g}} \times \frac{100 \text{ cmol}}{1 \text{ mol}}$

= 17.24 cmol / 100 g-dried resin

4. เปอร์เซ็นต์การกำจัดฟอสเฟต

$$\% \text{ Removal} = \frac{\text{Control-Sample}}{\text{Control}} \times 100$$

% Removal = เปอร์เซ็นต์การกำจัดฟอสเฟต (%)

Control = ความเข้มข้นฟอสเฟตของชุดควบคุม (mg-P/L)

Sample = ความเข้มข้นฟอสเฟตของชุดทดลอง (mg-P/L)

ตัวอย่างการคำนวณ

- ความเข้มข้นฟอสเฟตของชุดควบคุม = 3.03 mg-P/L

- ความเข้มข้นฟอสเฟตของชุดทดลอง = 0.23 mg-P/L

$$\begin{aligned} \% \text{ Removal} &= \frac{3.03-0.23}{3.03} \times 100 \\ &= 92.24 \% \end{aligned}$$