



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การบำบัดไวโนลอะซีเตตมอนอเมอร์ในน้ำเสียสังเคราะห์
โดยกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

Treatment of Vinyl Acetate Monomer in Synthetic Wastewater
by Activated Carbon Adsorption Process

นามผู้วิจัย นายนิรวัฒน์ นิจวัฒน์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มงคล ดำรงค์ศรี, Dr.Ing.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ชาติ เจียมไชยศรี, D.Eng.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญจนา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สิงสีทงี่ มทวทยลยสยเกษตรศตสทร

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การบำบัดไวน์อะซีเตตมอนอเมอร์ในน้ำเสียสังเคราะห์
โดยกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

Treatment of Vinyl Acetate Monomer in Synthetic Wastewater
by Activated Carbon Adsorption Process

โดย

นายนิรวัฒน์ นิวัฒน์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2557

นิรวัฒน์ นิจวัฒน์ 2557: การบำบัดไวนิลอะซีเตตมอนอเมอร์ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์มงคล ดำรงค์ศรี, Dr.Ing. 87 หน้า

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ การศึกษาการบำบัดไวนิลอะซีเตตมอนอเมอร์ (VAM) ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ ในการทดลองใช้ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดและน้ำเสียสังเคราะห์ VAM เข้มข้น 1,000 mg/l โดยศึกษาสมมูลการดูดซับ, ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิช และทดลองการดูดซับแบบต่อเนื่องโดยใช้หอดูดซับทดลอง ที่ความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์ 0.3, 0.6, 0.9 และ 1.2 เมตร ของอัตราภาระทางชลศาสตร์ 0.4774, 0.9548 และ 1.4322 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ ตามลำดับ

ผลการศึกษาพบว่า การดูดซับ VAM ด้วยถ่านกัมมันต์ มีระยะเวลาเข้าสู่ภาวะสมมูลการดูดซับเท่ากับ 1 ชั่วโมง และไอโซเทอร์มการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช ($R^2 = 0.9948$) มีสมการคือ $x/m = 0.1564C_e^{1.0953}$ และมีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 24.26 mg VAM/g ถ่านกัมมันต์ (ที่การบำบัด 90%, $C_e = 100 \text{ mg/l}$) สำหรับการทดลองการดูดซับแบบต่อเนื่องโดยใช้หอดูดซับทดลองพบว่า ประสิทธิภาพการบำบัด, เวลาการใช้งาน และปริมาณน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดที่จุด breakthrough ลดลงเมื่ออัตราภาระทางชลศาสตร์เพิ่มขึ้นและความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์ลดลง และค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์ที่ใช้ในสมการการดูดซับแบบต่อเนื่องของ Bohart-Adams ที่อัตราภาระทางชลศาสตร์ 0.4774, 0.9548 และ 1.4322 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ มีค่าความสามารถในการดูดซับ (N_0) เท่ากับ 14.7540, 14.0755 และ 13.7724 kg/m^3 มีค่าคงที่ของอัตราการดูดซับ (K) เท่ากับ 1.9692, 2.1661 และ 2.2103 $\text{m}^3/\text{kg} \cdot \text{h}$ และมีค่าความลึกวิกฤต (D_0) เท่ากับ 0.0361, 0.0688 และ 0.1034 เมตร ตามลำดับ โดยเมื่ออัตราภาระทางชลศาสตร์มีค่าเพิ่มขึ้น N_0 มีแนวโน้มลดลง ส่วน K และ D_0 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถนำค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์นี้ไปใช้ในการออกแบบระบบดูดซับสำหรับบำบัดน้ำเสียในขั้น full-scale ต่อไป

Nirawat Nitchawat 2014: Treatment of Vinyl Acetate Monomer in Synthetic Wastewater by Activated Carbon Adsorption Process. Master of Engineering (Environmental Engineering), Major Field: Environmental Engineering, Department of Environmental Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Mongkol Damrongsri, Dr.Eng. 87 pages.

The objective of this research is to study treatment of Vinyl Acetate Monomer (VAM) in synthetic wastewater by activated carbon adsorption process. Granular activated carbon and VAM concentration in synthetic wastewater of 1,000 mg/l were used in experiment. Adsorption equilibrium, Langmuir and Freundlich adsorption isotherms and continuous run of adsorption column at activated carbon bed depth of 0.3, 0.6, 0.9 and 1.2 m and hydraulic loading rate of 0.4774, 0.9548 and 1.4322 m³/m².h were investigated.

The results showed that time of contact to approach adsorption equilibrium of VAM was 1 h and adsorption isotherm could be described by Freundlich adsorption isotherm ($R^2 = 0.9948$) and equation was $x/m = 0.1564C_e^{1.0953}$. The adsorption capacity was 24.26 mg VAM/g GAC (at 90% removal, $C_e = 100$ mg/l). At breakthrough of continuous run of adsorption column showed that treatment efficiency, service time and volume of wastewater treated at breakthrough decrease by an increase in hydraulic loading rate and a decrease in bed depth. Kinetic coefficients of Bohart-Adams equation at hydraulic loading rate of 0.4774, 0.9548 and 1.4322 m³/m².h were 14.7540, 14.0755 and 13.7724 kg/m³ for adsorption capacity (N_0), 1.9692, 2.1661 and 2.2103 m³/kg.h for rate constant (K), 0.0361, 0.0688 and 0.1034 m for critical depth (D_0), respectively. The result indicated that an increase in hydraulic loading rate lead to a decreasing trend of N_0 , an increasing trend of K and D_0 . These kinetic coefficients could be used for full-scale adsorption system design for wastewater treatment.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร. มงคล คำรงค์ศรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือในการวางแผนและสร้างแนวทางในการวิจัยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนให้คำปรึกษาแนะนำและตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนวิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์ ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร. สัญญา สิริวิทยาปกรณ์ ประธานกรรมการดำเนินการสอบ และ รศ.ดร. เฉลิมราช วันทวิน ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่ให้คำแนะนำในด้านวิชาการ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ บริษัท สยาม มอติฟายด์ สตาร์ช จำกัด จ.ปทุมธานี ที่ให้การสนับสนุนทุนในการวิจัย

ขอขอบคุณ คุณธรรมศักดิ์ ไรจน์วิรุฬห์ ที่ให้คำแนะนำ ให้ความรู้เพิ่มเติม และช่วยเหลือในการจัดเตรียมอุปกรณ์ เครื่องมือต่างๆ ในการทดลอง ขอขอบคุณ คุณกาญจนา ทุยเวียง เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่างๆ ตลอดระยะเวลาในการทำวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา และขอขอบคุณเพื่อน พี่น้องทุกคน ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ชี้นำ และสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่คุณพ่อ คุณแม่ ที่ได้อบรมและให้กำลังใจผู้วิจัยมาตลอดในทุกเรื่อง

นิรวัฒน์ นิวัฒน์

กรกฎาคม 2557

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	26
อุปกรณ์	26
วิธีการ	27
ผลและวิจารณ์	39
สรุปและข้อเสนอแนะ	67
สรุป	67
ข้อเสนอแนะ	68
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	69
ภาคผนวก	73
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	87

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 คุณสมบัติของไวนิลอะซีเตตมอนอเมอร์	4
2 คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด Biocat CS-1100 (8x30)	28
3 ร้อยละการดูดซับของถ่านกัมมันต์กับระยะเวลาสัมผัส	40
4 ความสามารถในการดูดซับ VAM ของถ่านกัมมันต์ เมื่อคำนวณจากการศึกษาสมดุลการดูดซับ	41
5 สมการไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์ในแบบต่างๆ	42
6 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสมการไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์ในแบบต่างๆ	45
7 เวลาการใช้งานและปริมาณน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด ณ จุด breakthrough ที่อัตราการทางชลศาสตร์ และความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์ต่างๆ	58
8 ค่า slope, intercept และค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์ ที่ใช้ในสมการการดูดซับแบบต่อเนื่องของ Bohart-Adams ของการดูดซับ VAM ด้วยถ่านกัมมันต์	60
 ตารางผนวกที่	
1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ VFA และความเข้มข้นของ VAM	74
2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น VAM ที่เหลืออยู่และระยะเวลาสัมผัส	74
3 ไอโซเทอร์มการดูดซับ VAM ด้วยถ่านกัมมันต์	75
4 ผลการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ VAM ที่ความเข้มข้น 1,014.37 mg/l และ pH น้ำเข้าระบบ 7.22 ที่อัตราการทางชลศาสตร์ 0.4774 m ³ /m ² .h	76
5 ผลการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ VAM ที่ความเข้มข้น 1,014.37 mg/l และ pH น้ำเข้าระบบ 7.15 ที่อัตราการทางชลศาสตร์ 0.9548 m ³ /m ² .h	80
6 ผลการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ VAM ที่ความเข้มข้น 1,014.37 mg/l และ pH น้ำเข้าระบบ 7.27 ที่อัตราการทางชลศาสตร์ 1.4322 m ³ /m ² .h	83
7 ปริมาณ VAM ที่ถูกดูดซับต่อปริมาณถ่านกัมมันต์ ณ จุด breakthrough ที่อัตราการทางชลศาสตร์ต่างๆ	86

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ	7
2	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช	11
3	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของฟรุนดลิช	12
4	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิชที่ค่า $1/n$ ต่างๆ	13
5	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์	14
6	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์	15
7	การเคลื่อนที่ของโซนการดูดซับ (adsorption zone) สำหรับชั้นตัวดูดซับที่อยู่กับที่ตามทิศทางการไหลของน้ำเสียจากบนลงล่าง	16
8	กลุ่มฟังก์ชันนอลบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์	22
9	ขั้นตอนการศึกษาการบำบัด VAM ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์	27
10	ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด Biocat CS-1100 (8x30)	28
11	ชุดกลั่นสำหรับหาความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่าย (VFA) ในน้ำเสียสังเคราะห์	30
12	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ VFA และความเข้มข้นของ VAM	30
13	ขั้นตอนการศึกษาสมดุลการดูดซับ	32
14	การศึกษาสมดุลการดูดซับ	33
15	ขั้นตอนการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ	34
16	การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ	35
17	ลักษณะการทำงานของหอดูดซับทดลองที่ใช้ในการดูดซับแบบต่อเนื่อง	36
18	หอดูดซับทดลองที่ใช้ในการดูดซับแบบต่อเนื่อง	37
19	ขั้นตอนการทดลองการดูดซับแบบต่อเนื่องโดยใช้หอดูดซับทดลอง	38
20	ระยะเวลาเข้าสู่ภาวะสมดุลการดูดซับ	39
21	ไอโซเทอร์มการดูดซับ VAM ด้วยถ่านกัมมันต์แบบเชิงเส้นของแลงเมียร์ แบบที่ 1	42
22	ไอโซเทอร์มการดูดซับ VAM ด้วยถ่านกัมมันต์แบบเชิงเส้นของแลงเมียร์ แบบที่ 2	43
23	ไอโซเทอร์มการดูดซับ VAM ด้วยถ่านกัมมันต์แบบเชิงเส้นของแลงเมียร์ แบบที่ 3	44
24	ไอโซเทอร์มการดูดซับ VAM ด้วยถ่านกัมมันต์แบบเชิงเส้นของแลงเมียร์ แบบที่ 4	44

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
25	ไอโซเทอร์มการดูดซับ VAM ด้วยถ่านกัมมันต์ของแลงเมียร์แบบต่างๆ	45
26	ลักษณะกราฟไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์	46
27	ไอโซเทอร์มการดูดซับ VAM ด้วยถ่านกัมมันต์แบบเชิงเส้นของฟรุนดิช	47
28	ไอโซเทอร์มการดูดซับ VAM ด้วยถ่านกัมมันต์แบบฟรุนดิช	48
29	ลักษณะกราฟไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดิช	49
30	ประสิทธิภาพในการบำบัด VAM ที่อัตราภาระทางชลศาสตร์ต่างๆ	52
31	ประสิทธิภาพในการบำบัด VAM ที่ชั้นความลึกของถ่านกัมมันต์ 0.3 และ 0.6 เมตร	54
32	ประสิทธิภาพในการบำบัด VAM ที่ชั้นความลึกของถ่านกัมมันต์ 0.9 และ 1.2 เมตร	55
33	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความเข้มข้น VAM ระหว่างน้ำออกและน้ำเข้า (C/C_0) และเวลาในการบำบัดที่อัตราภาระทางชลศาสตร์ $0.4774 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$	56
34	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความเข้มข้น VAM ระหว่างน้ำออกและน้ำเข้า (C/C_0) และเวลาในการบำบัดที่อัตราภาระทางชลศาสตร์ $0.9548 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$	57
35	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความเข้มข้น VAM ระหว่างน้ำออกและน้ำเข้า (C/C_0) และเวลาในการบำบัดที่อัตราภาระทางชลศาสตร์ $1.4322 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$	57
36	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการใช้งานและความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์ ที่อัตราภาระทางชลศาสตร์ 0.4774, 0.9548 และ $1.4322 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$	60
37	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์ N_0 และ K ในสมการ Bohart-Adams ของการดูดซับ VAM ด้วยถ่านกัมมันต์ และอัตราภาระทางชลศาสตร์ต่างๆ	61
38	ตัวอย่างการออกแบบหอดูดซับทดลอง	62

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

adsorbate	=	ตัวถูกดูดซับ
adsorbent	=	ตัวดูดซับ
C_B	=	ความเข้มข้นของสารในน้ำเสียที่จุด breakthrough
C_e	=	ความเข้มข้นของสารในน้ำเสียที่ออกจากระบบ
C_0	=	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารในน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ
cm	=	เซนติเมตร
g	=	กรัม
HLR	=	อัตราการทางชลศาสตร์
kg	=	กิโลกรัม
h	=	ชั่วโมง
m	=	เมตร
m^2	=	ตารางเมตร
m^3	=	ลูกบาศก์เมตร
mg/l	=	มิลลิกรัม/ลิตร
ml	=	มิลลิลิตร
pH	=	ความเป็นกรด-ด่าง
Q	=	อัตราการไหล
t	=	เวลาการใช้งาน (service time หรือ breakthrough time หรือ breakpoint time)
VAM	=	ไวนิลอะซิเตดมอนอเมอร์ (vinyl acetate monomer) มีสูตรเคมี คือ $C_4H_6O_2$

การบำบัดไวนิลอะซีเตตมอนอเมอร์ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

Treatment of Vinyl Acetate Monomer in Synthetic Wastewater by Activated Carbon Adsorption Process

คำนำ

ไวนิลอะซีเตตมอนอเมอร์ (vinyl acetate monomer, VAM) เป็นสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่ใช้ในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง เช่น โรงงานแปรงไม้สำหรับแปรงแปรง โรงงานผลิตสี พลาสติก ฟิล์ม สเปรย์ฉีดผม แล็กเกอร์ และวัสดุประสาน เป็นต้น เป็นสารที่ระเหยไปสู่บรรยากาศได้ง่าย และสร้างปัญหาให้แก่ชุมชน เพราะอาจมีพิษ มีกลิ่น หรืออาจมีหมอกที่เกิดจากสารเคมีแพร่กระจายไปสู่ชุมชนโดยรอบ และอาจจะก่อให้เกิดอันตรายแก่สุขภาพเนื่องจากเป็นสารก่อมะเร็ง อีกทั้งมีความเป็นพิษต่อมนุษย์และสัตว์ และยังส่งผลกระทบในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยาอีกด้วย หากปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำจะก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำได้ จึงมีความจำเป็นจะต้องศึกษาวิจัยเพื่อหาวิธีการบำบัดที่เหมาะสมและประหยัดค่าใช้จ่าย

ปัจจุบันได้มีการค้นพบว่า กระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำสำหรับอุตสาหกรรมเพื่อให้มีสมบัติที่ดีขึ้นมีด้วยกันหลายวิธี แต่วิธีที่มีประสิทธิภาพสูงและสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้จริง ได้แก่ กระบวนการดูดซับ (adsorption process) การประยุกต์ใช้กระบวนการดูดซับในอุตสาหกรรมมีจุดหมายเพื่อแยกสาร 2 ชนิดออกจากกัน โดยการสัมผัสระหว่างพื้นผิวของตัวดูดซับ (adsorbent) และตัวถูกดูดซับ (adsorbate) โดยทั่วไปการดูดซับจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การดูดซับทางฟิสิกส์ (physical adsorption) และการดูดซับทางเคมี (chemisorption) โดยตัวดูดซับที่นิยมใช้ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) เนื่องจากถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับผิวสูงและขั้นตอนการผลิตใช้เทคโนโลยีที่ไม่ยุ่งยาก และประหยัดค่าใช้จ่ายเพราะสามารถฟื้นฟูแล้วนำกลับมาใช้ซ้ำได้

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการบำบัดไวนิลอะซีเตตมอนอเมอร์ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ โดยศึกษาสมมูลการดูดซับ, ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์และฟรอนดลิช (Langmuir and Freundlich adsorption isotherm) และทดลองการดูดซับ

แบบต่อเนื่องโดยใช้หอดูดซับทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพในการบำบัด, เวลาการใช้งาน (service time) และค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์ (kinetic coefficients) ที่ใช้ในสมการการดูดซับแบบต่อเนื่องของ Bohart-Adams เพื่อเป็นประโยชน์ในการออกแบบระบบการดูดซับสำหรับบำบัดน้ำเสียในขั้น full-scale ต่อไป



วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาความสามารถในการบำบัดไนโตรอะซีเตตมอนอเมอร์ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์
2. เพื่อศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิช ของการดูดซับไนโตรอะซีเตตมอนอเมอร์ด้วยถ่านกัมมันต์
3. ทดลองการดูดซับแบบต่อเนื่องโดยใช้หอดูดซับทดลอง เพื่อหาประสิทธิภาพในการบำบัด, เวลาการใช้งาน (service time) และค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์ (kinetic coefficients) ที่ใช้ในสมการการดูดซับแบบต่อเนื่องของ Bohart-Adams เพื่อเป็นประโยชน์ในการออกแบบระบบการดูดซับสำหรับบำบัดน้ำเสียในขั้น full-scale ต่อไป

การตรวจเอกสาร

1. ไวนิลอะซีเตตมอนอเมอร์ (vinyl acetate monomer)

ไวนิลอะซีเตตมอนอเมอร์ (vinyl acetate monomer, VAM) เป็นสารประกอบอินทรีย์ระเหย ซึ่งเป็นของเหลวใส ไม่มีสี กลิ่นหอมฉุน ละลายน้ำได้บ้างเล็กน้อย มีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี ดังตารางที่ 1 (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2551) เป็นมอนอเมอร์ที่มีความไวต่อปฏิกิริยาสูง โดยใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตโคพอลิเมอร์หลายชนิด เช่น พอลิไวนิลอะซีเตต (polyvinyl acetate, PVA) เอทิลีนไวนิลอะซีเตต (ethylene vinyl acetate, EVA) ไวนิลอะซีเตตเอทิลีน (vinyl acetate ethylene, VAE) และไวนิลอะซีเตตโคพอลิเมอร์ (vinyl acetate copolymer, VAc) เป็นต้น และใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตแป้งมันสำปะหลังแปรรูป พลาสติก ฟิล์ม สเปรย์ฉีดผม แล็กเกอร์ สีสารเคลือบ กระดาษ และวัสดุประสาน

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของไวนิลอะซีเตตมอนอเมอร์

คุณสมบัติของไวนิลอะซีเตตมอนอเมอร์	รายละเอียด
สูตรโมเลกุล	$C_4H_6O_2$
มวลโมเลกุล	86.09 g/mol
ความหนาแน่น (ที่ 20°C)	0.934 g/cm ³
ความสามารถในการละลายน้ำ (ที่ 20°C)	2.3 g/l
จุดเดือด	73°C
จุดหลอมเหลว	-93°C

ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2551)

ไวนิลอะซีเตตมอนอเมอร์มีความเป็นพิษต่อมนุษย์และสัตว์ สามารถซึมผ่านเข้าผิวหนังได้ ระคายเคืองต่อระบบทางเดินอาหาร ทางเดินหายใจ ผิวหนัง และอวัยวะต่างๆ เช่น ตา ปอด จมูก ระบบประสาทส่วนกลาง เป็นต้น และยังเป็นสารที่มีความเป็นไปได้อาจก่อเกิดมะเร็ง สำหรับระดับความเป็นพิษ (LC_{50}) ในน้ำทะเลที่ความเข้มข้นของไวนิลอะซีเตตมอนอเมอร์เกินกว่า 14 ppm ตลอด

96 ชั่วโมง จะทำให้ปลา Bluegill ตายครึ่งหนึ่งของทั้งหมด ส่วนระดับความเข้มข้นในอากาศ ความเข้มข้นของไวนิลอะซีเตตมอนอเมอร์ไม่ควรได้รับเกิน 4 ppm

2. การดูดซับ (adsorption)

กระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำสำหรับอุตสาหกรรมเพื่อให้น้ำมีสมบัติที่ดีขึ้นมีด้วยกันหลายวิธี แต่วิธีที่มีประสิทธิภาพสูงและสามารถนำประยุกต์ใช้งานจริงได้แก่กระบวนการดูดซับ (adsorption process) การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญของกระบวนการทางกายภาพ ชีวภาพ และเคมี ซึ่งได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสีย การดูดซับเป็นความสามารถของสารในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในแก๊สหรือของเหลวให้มาเกาะจับและติดบนผิว ซึ่งเป็นปรากฏการณ์เคลื่อนย้ายจากของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของตัวถูกดูดซับเรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent) การประยุกต์ใช้กระบวนการดูดซับในอุตสาหกรรมมีจุดมุ่งหมายเพื่อแยกสาร 2 ชนิดออกจากกันโดยการสัมผัสระหว่างพื้นผิวของตัวดูดซับ (adsorbent) และตัวถูกดูดซับ (adsorbate) คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของตัวดูดซับคือ ความพรุน เพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสภายใน นอกจากนี้คุณสมบัติอื่นๆ ของตัวดูดซับ เช่น โครงสร้าง การจัดเรียงตัว ขนาด และความสม่ำเสมอ ล้วนมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ

2.1 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

2.1.1 การแพร่ภายนอก (external diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าถึงตัวดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีของเหลวห่อหุ้มโดยโมเลกุลแทรกผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าของตัวดูดซับ

2.1.2 การแพร่ผ่านภายใน (internal diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับแทรกตัวเข้าถึงช่องว่างตัวดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ

2.1.3 ปฏิกริยาพื้นผิว (surface reaction) ปฏิกริยาพื้นผิวเป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับดูดติดที่ผิวของตัวดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นควรคำนึงถึงการต้านทานจากปฏิกริยาพื้นผิวด้วย

2.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล

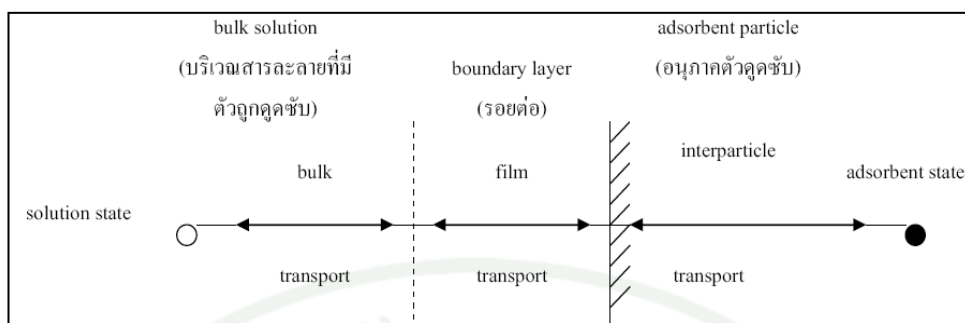
อัตราการดูดซับมีความสำคัญมาก อัตราการดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็ว อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีการต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล ซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนย่อย ดังนี้

2.2.1 การขนส่งอนุภาค (bulk transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกดูดซับในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของของเหลวบางๆ หรือผิวสัมผัสน้ำที่ห่อหุ้มตัวดูดซับ

2.2.2 การขนส่งชั้นฟิล์ม (film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ตัวถูกดูดซับแพร่ผ่านฟิล์มน้ำไปยังผิวของตัวดูดซับ จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดผิวขั้นตอนหนึ่ง

2.2.3 การขนส่งภายในอนุภาค (interparticle transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ (pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายใน ขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกัน

การยึดติดของตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะมีแรงยึดเหนี่ยวเกิดขึ้น ซึ่งอาจเป็นแรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพหรือทางเคมีหรือทั้งสองแบบ



ภาพที่ 1 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

ที่มา: นิพนธ์ และคณิดา (2550)

2.3 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล

แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับนั้น อาจเป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางกายภาพ (physical force) หรือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางเคมี (chemical force) หรือในบางกรณีอาจเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลทั้งสองแบบ

2.3.1 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางกายภาพที่เกี่ยวกับตัวดูดซับ ได้แก่ แรงแวนเดอร์วาลส์ (van der waal force) แรงแวนเดอร์วาลส์ คือ แรงที่ยึดเหนี่ยวโมเลกุล (โคเวเลนต์) ให้อยู่ด้วยกัน โดยโมเลกุล (โคเวเลนต์) ทุกชนิดทั้งโมเลกุลมีขั้วและโมเลกุลไม่มีขั้ว ต่างมีแรงแวนเดอร์วาลส์ยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลกับโมเลกุล เมื่อมวลโมเลกุลเพิ่มขึ้นแรงแวนเดอร์วาลส์จะเพิ่มขึ้น แรงแวนเดอร์วาลส์ เป็นแรงที่ไม่แข็งแรงนักเมื่อเทียบกับแรงยึดเหนี่ยวชนิดอื่นๆ เช่น การทำลายแรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลของคลอรีน (Cl_2) 1 โมล ใช้พลังงาน 25 กิโลจูล แต่พลังงานที่ต้องใช้เพื่อทำลายพันธะ Cl-Cl ในโมเลกุลคลอรีนมีค่าถึง 244 กิโลจูล/โมล ความแข็งแรงของแรงแวนเดอร์วาลส์มีค่าระหว่าง 0.01-0.1 ของพันธะโคเวเลนต์ ดังนั้นการดูดซับทางกายภาพสามารถผันกลับคือ เกิดการคายหรือเกิดการคายสารออก (desorption) อันเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยว (แรงแวนเดอร์วาลส์) ที่ไม่แข็งแรงระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ

2.3.2 แรงยึดเหนี่ยวทางเคมี คือ การสร้างพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ซึ่งอาจเป็นพันธะไอออนิก (แรงดึงดูดระหว่างไอออนบวกกับไอออนลบ) หรือพันธะโควาเลนต์ การใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน โดยเกิดสมดุลทั้งแรงดูด (อิเล็กตรอนกับโปรตอน) และแรงผลัก (อิเล็กตรอนกับอิเล็กตรอน และโปรตอนกับโปรตอน)

การเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ มีผลทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ขึ้น และการดูดซับจะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayered) ทำให้ไม่สามารถผันกลับได้ (irreversible process) จึงไม่เกิดการคายซ้ำ

2.4 รูปแบบของการดูดซับ

2.4.1 การดูดซับทางกายภาพ (physisorption or physical adsorption or van der waals adsorption) เป็นผลมาจากปฏิกิริยาของแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งเกิดจากการรวมกันของแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิต (electrostatic force) โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกยึดติดแบบกายภาพกับโมเลกุลของตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเกาะอยู่บนผิวตัวดูดซับในลักษณะที่ซ้อนกันเป็นหลายชั้น (multilayered) โดยแต่ละชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกดูดซับบนชั้นโมเลกุลที่ถูกดูดซับก่อนหน้านี้ และจำนวนชั้นของโมเลกุลตัวถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับ และระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวถูกดูดซับด้วยในระหว่างชั้น อาจเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์อย่างใดอย่างหนึ่ง การดูดซับทางกายภาพโดยทั่วไปจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้พลังงานของระบบลดลง เป็นการทำให้ระบบมีความเสถียรมากขึ้น

2.4.2 การดูดซับทางเคมี (chemisorption) จะมีลักษณะเหมือนกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี กล่าวคือ จะต้องมีการสร้างพันธะเคมีของตัวถูกดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับ การดูดซับทางเคมี มีการถ่ายโอนอิเล็กตรอน (สร้างพันธะไอออนิก) หรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน (สร้างพันธะโควาเลนต์) ทำแรงยึดเหนี่ยวค่อนข้างสูงกว่าแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นในการดูดซับทางกายภาพ มีผลทำให้การดูดซับทางเคมีโดยส่วนใหญ่จะผันกลับไม่ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับทางกายภาพที่สามารถจะเกิดการผันกลับได้ภายใต้สภาวะเดียวกัน การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นในบริเวณที่จำเพาะเจาะจงเท่านั้น และโมเลกุลตัวถูกดูดซับเกาะอยู่บริเวณดังกล่าว จะเป็นแบบชั้นเดียว และเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง แต่การดูดซับทางกายภาพเกิดได้ทั่วไปบนพื้นผิวตัวดูดซับ

การดูดซับทางกายภาพจะให้พลังงานต่ำโดยประมาณ 2-10 กิโลแคลอรี/โมลของตัวถูกดูดซับ ส่วนการดูดซับทางเคมีจะให้พลังงานสูงโดยประมาณ 20-100 กิโลแคลอรี/โมลของตัวถูกดูดซับ และยังพบว่าค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของกระบวนการดูดซับทางเคมีมีค่ามากกว่าทางกายภาพ ด้วยเหตุผลนี้กระบวนการดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าทางเคมี

2.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

2.5.1 ความปั่นป่วน อัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับ film diffusion หรือ pore diffusion ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ फिल्मน้ำซึ่งล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนามากและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าไปหาตัวดูดซับ ดังนั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในตรงกันข้าม ถ้าความปั่นป่วนสูงจะเกิดฟิล์มบาง ทำให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าหาตัวดูดซับได้รวดเร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุน ในการนี้การแพร่ผ่านรูพรุนจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับ

2.5.2 ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ความสามารถในการดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ นั่นคือ ตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากจะดูดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย และอัตราการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดตัวดูดซับ เช่น คาร์บอนผง (powder activated carbon, PAC) มีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าคาร์บอนแบบเกร็ด (granular activated carbon, GAC)

2.5.3 ขนาดและลักษณะของตัวถูกดูดซับ ขนาดของสารหรือโมเลกุลมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ ซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นในโพรงของตัวดูดซับ เช่น คาร์บอน การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อสารมีขนาดเล็กกว่าช่องว่างภายในพอดิ (พอดิเข้าไปในช่องว่างได้) ทั้งนี้เพราะว่าแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับจะมีค่ามากที่สุด โมเลกุลขนาดเล็กจะถูกดูดเข้าไปในช่องว่างภายในก่อน จากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่กว่าจึงถูกดูดเข้าไปบ้าง อาจกล่าวได้ว่าความสามารถในการดูดซับจะแปรผกผันกับขนาดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ นั่นคือ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับจะลดลง

2.5.4 ความสามารถในการละลายน้ำของตัวดูดซับ ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายเป็นปัจจัยสำคัญในการดูดซับ การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายในตัวทำละลายลดลง เนื่องจากในการดูดซับตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย ในที่นี้คือ น้ำ ดังนั้นสารที่ไม่ละลายน้ำ หรือละลายได้น้อยจะสามารถถูกดูดซับได้ดี

2.5.5 pH มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ การดูดซับขึ้นกับสภาพความเป็นขั้วของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ เมื่อสารละลายมีสภาพความเป็นกรด ส่งผลให้เกิดไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) บนพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ทำให้กระบวนการดูดซับไอออนลบเกิดได้มากขึ้น และเมื่อสารละลายมี pH เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ OH^- บนพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้น และสามารถดูดซับไอออนบวกได้มากขึ้น แต่ถ้าสารละลายมี pH สูงกว่า 9 จะทำให้โลหะไอออนตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ และโลหะไอออนจะถูกดูดซับได้น้อยลง

2.5.6 อุณหภูมิ มีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับ กล่าวคือ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้การแพร่ผ่านของสารที่ถูกดูดซับไปยังรูพรุนของตัวดูดซับได้เร็วขึ้น แต่จะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับลดลง

2.5.7 เวลาสัมผัส เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ และอายุการใช้งานของตัวดูดซับ โดยที่เวลาสัมผัสมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการดูดซับเพียงช่วงหนึ่งเท่านั้น ซึ่งถ้าเวลาสัมผัสเลยจากช่วงนี้แล้ว ก็จะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับเลย

2.6 สมดุลการดูดซับ (adsorption equilibrium)

เมื่อพิจารณาจากการดูดซับตัวถูกละลายจากสารละลายโดยใช้สารดูดซับ สมดุลการดูดซับจะเกิดได้ต่อเมื่อปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของสารดูดซับ และปริมาณตัวถูกละลายที่หลุดออกจากพื้นผิวของสารดูดซับมีจำนวนเท่ากัน ดังนั้นอัตราการดูดซับและอัตราการหลุดออกจากพื้นผิวเข้าสู่สถานะสมดุล (equilibrium state) ซึ่งที่จุดนี้เรียกว่า จุดสมดุลการดูดซับ โดยที่จุดสมดุลการดูดซับจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนพื้นผิวของสารดูดซับ สมดุลนี้เป็นลักษณะเฉพาะของระบบทั้งหมด โดยทั่วไปปริมาณตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับ ณ จุดสมดุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตัวถูกละลาย การแสดงปริมาณตัวถูกละลายต่อน้ำหนักของสารดูดซับ ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นที่จุดสมดุลในสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ เรียกว่า ไอโซเทอรั่มการดูดซับ (adsorption isotherm)

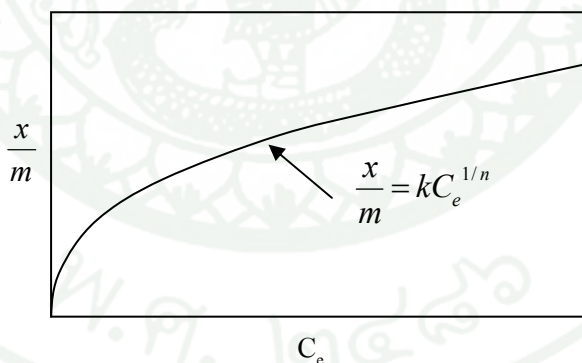
2.7 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (adsorption isotherm)

ไอโซเทอร์มของการดูดซับ เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย ที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่ ซึ่งมีประโยชน์ในการหาความสามารถในการดูดซับสิ่งสกปรกในน้ำและเพื่อเปรียบเทียบชนิดตัวดูดซับที่ดีที่สุด สมการไอโซเทอร์มของการดูดซับจะอาศัยแบบจำลองการดูดซับทางคณิตศาสตร์ในที่นี่จะกล่าวถึง 2 สมการที่นิยมใช้กัน ดังนี้

2.7.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดิช (Freundlich adsorption isotherm) คือ ไอโซเทอร์มของการดูดซับภายใต้สมมติฐานที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ (heterogeneous adsorption surface) พื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด มีรูปแบบของสมการเป็นดังนี้

$$\frac{x}{m} = kC_e^{1/n} \quad \text{----- (1)}$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\frac{x}{m}$ กับ C_e จากสมการที่ (1) จะได้กราฟดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดิช

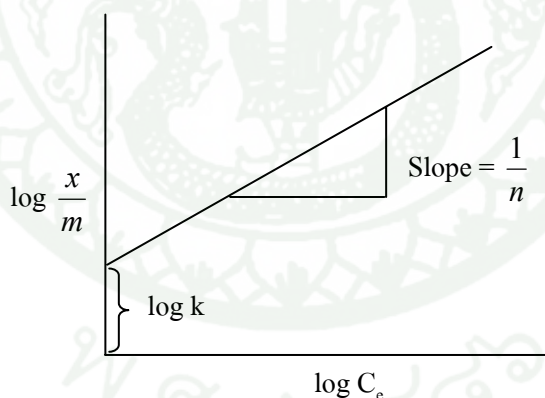
k และ n เป็นค่าคงที่ของฟรุนดิช (freundlich constant) ของแต่ละระบบที่กำลังศึกษาหรือทดลอง และ n ใช้อธิบายลักษณะเส้นกราฟไอโซเทอร์มของการดูดซับ

เมื่อจัดรูปสมการที่ (1) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง โดยใส่ลอการิทึมทั้งสองข้างของสมการจะได้

$$\log \frac{x}{m} = \log k + \frac{1}{n} \log C_e \quad \text{----- (2)}$$

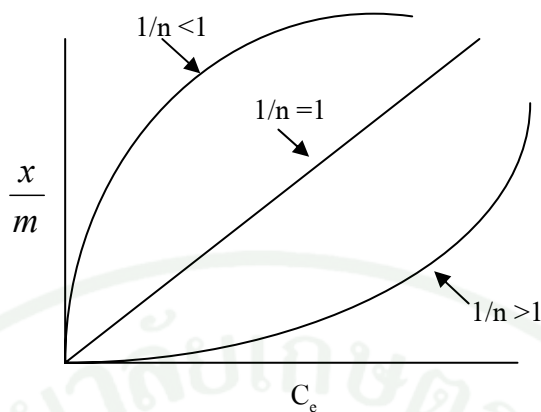
- เมื่อ $\frac{x}{m}$ = ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ
(ความสามารถการดูดซับ) (mg/g)
- k = ค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ
- $\frac{1}{n}$ = ความหนาแน่นของไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช
- C_e = ความเข้มข้นตัวถูกดูดซับในสารละลายที่สภาวะสมดุล (mg/l)

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log \frac{x}{m}$ กับ $\log C_e$ จากสมการที่ (2) จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $\frac{1}{n}$ และมีจุดตัดเท่ากับ $\log k$ ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของฟรุนดลิช

Mihelcic and Zimmerman (2010) อธิบายค่า $1/n$ ของสมการไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิชไว้ว่า ถ้าค่า $1/n < 1$ แสดงถึงการดูดซับที่ดี (favorable adsorption) เพราะที่ความเข้มข้นต่ำของตัวถูกดูดซับในของเหลวถูกดูดซับได้มาก ถ้าค่า $1/n > 1$ แสดงถึงการดูดซับที่ไม่ดี (unfavorable adsorption) และถ้าค่า $1/n = 1$ แสดงถึงการดูดซับที่ไอโซเทอร์มเป็นเส้นตรง (linear isotherm) ดังภาพที่ 4

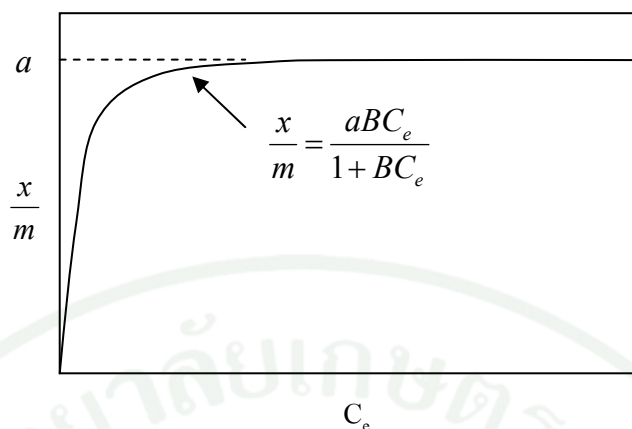


ภาพที่ 4 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนด์ลิชที่ค่า $1/n$ ต่างๆ

2.7.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm) คือ ไอโซเทอร์มการดูดซับ ภายใต้สมมติฐานที่ว่า พื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (monogeneous adsorption surface) มีกลไกของการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัด และเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะไม่มีการเคลื่อนที่ (เคลื่อนย้าย) หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นจนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว (ถูกดูดซับได้มากที่สุด) มีรูปแบบของสมการเป็นดังนี้

$$\frac{x}{m} = \frac{aBC_e}{1 + BC_e} \quad \text{-----} (3)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\frac{x}{m}$ กับ C_e จากสมการที่ (3) จะได้กราฟดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์

เมื่อจัดรูปสมการที่ (3) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง จะได้

$$\frac{C_e}{x/m} = \frac{1}{a}C_e + \frac{1}{Ba} \quad \text{----- (4)}$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\frac{C_e}{x/m}$ กับ C_e จากสมการที่ (4) จะได้เส้นตรงซึ่งมีความชันเท่ากับ $\frac{1}{a}$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\frac{1}{Ba}$ เมื่อหารด้วย C_e จะได้สมการเส้นตรงดังสมการที่ (5)

$$\frac{1}{x/m} = \left(\frac{1}{Ba}\right)\frac{1}{C_e} + \frac{1}{a} \quad \text{----- (5)}$$

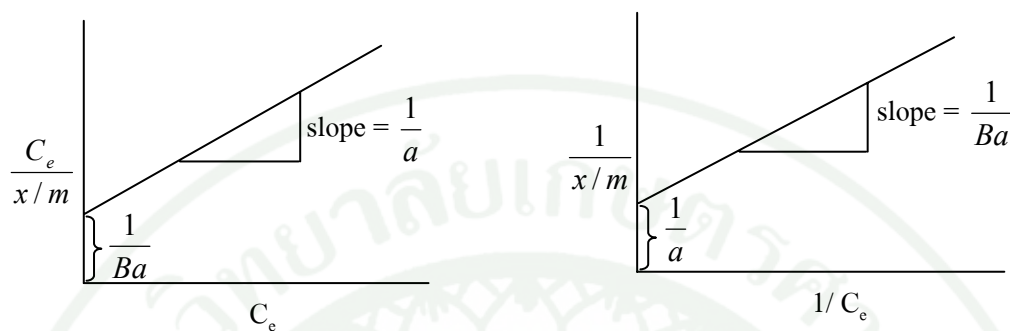
เมื่อ $\frac{x}{m}$ = ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ
(ความสามารถการดูดซับ) (mg/g)

a = ความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (mg/g)

B = ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายที่สถานะสมดุล (mg/l)

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\frac{1}{x/m}$ และ $\frac{1}{C_e}$ จะได้กราฟเส้นตรงมีค่าความชันเท่ากับ $\frac{1}{Ba}$ และจุดตัดเท่ากับ $\frac{1}{a}$

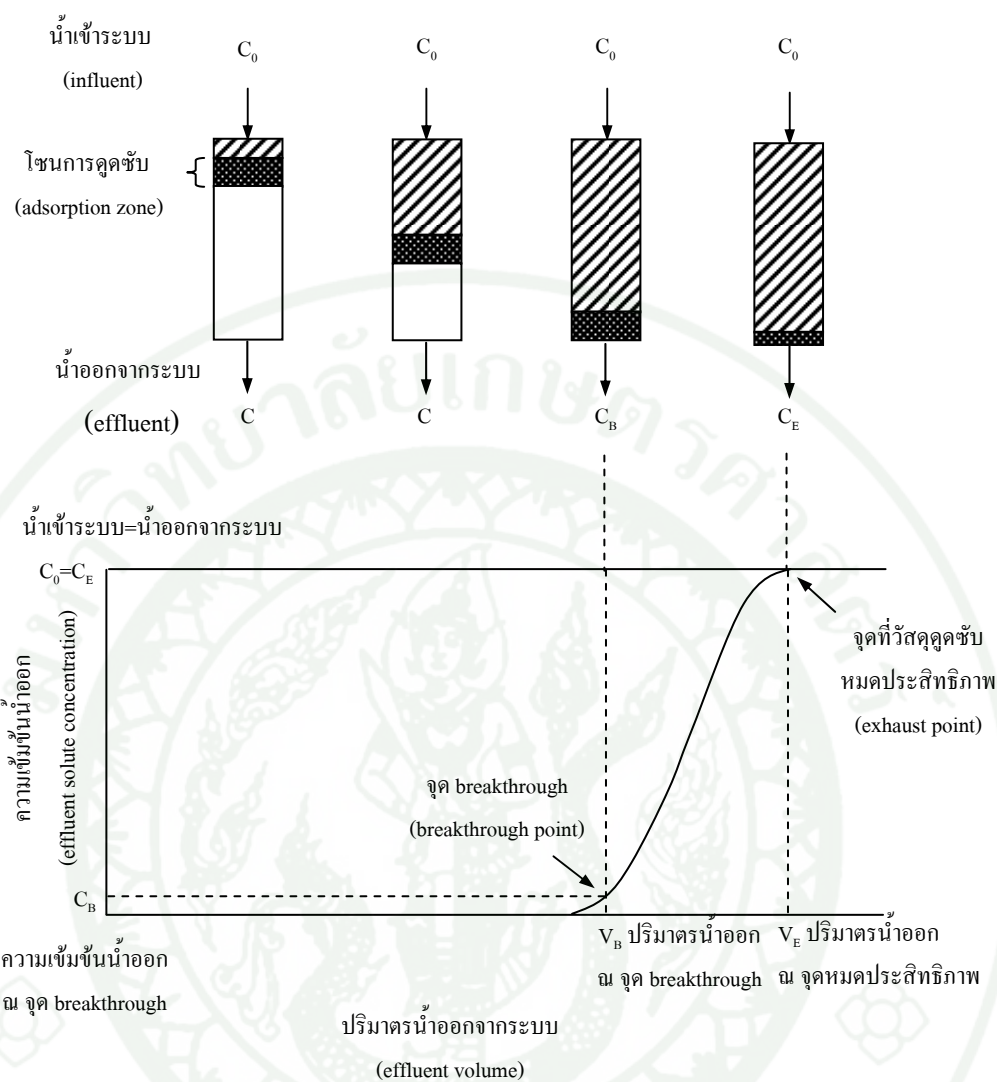


ภาพที่ 6 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์

การทราบถึงไอโซเทอร์มการดูดซับของตัวดูดซับ ทำให้สามารถเลือกชนิดตัวดูดซับที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามข้อมูลที่ได้ยังไม่เพียงพอต่อการออกแบบ จะต้องมีการทดลองแบบต่อเนื่องในคอลัมน์เพื่อหาอายุการใช้งานของตัวดูดซับชนิดที่เลือกเอาไว้แล้วว่ามีอายุยาวนานเท่าไรจึงจะเสื่อมคุณภาพ

3. หอดูดซับทดลอง (adsorption column)

Eckenfelder (2000) ได้อธิบายการออกแบบระบบการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์และการใช้สมการ Bohart-Adams ในการทำนายประสิทธิภาพของระบบดูดซับ โดยอธิบายพฤติกรรมของการดูดซับในหอดูดซับ เริ่มจากเมื่อน้ำไหลผ่านชั้นตัวดูดซับ ตัวดูดซับบนจะหมดประสิทธิภาพก่อนและชั้นของตัวดูดซับที่หมดประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามเวลาการใช้งาน ดังนั้นความเข้มข้นของสิ่งสกปรกในน้ำที่ผ่านการดูดซับแล้ว จะเพิ่มขึ้นตามเวลาจนในที่สุดความเข้มข้นจะถึงค่าสูงสุดที่ยอมรับได้ (มีค่าประมาณ 5-10 เปอร์เซ็นต์ของน้ำเสียเข้าระบบ) ที่จุดนี้เรียกว่า จุด breakthrough (breakthrough point) และเส้นโค้ง เรียกว่า เส้นโค้ง breakthrough (breakthrough curve) ดังภาพที่ 7 โดยเวลาที่นับจากเริ่มต้นการดูดซับจนถึงจุด breakthrough เรียกว่า เวลาการใช้งาน (service time) และเมื่อตัวดูดซับไม่สามารถที่จะดูดซับได้อีก เรียกว่า จุดที่ตัวดูดซับหมดประสิทธิภาพ (exhaust point) ซึ่งที่จุดนี้ความเข้มข้นของน้ำเสียที่ออกจากระบบ (C_e) จะมีค่าเท่ากับความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าระบบ (C_0)



ภาพที่ 7 การเคลื่อนที่ของโซนการดูดซับ (adsorption zone) สำหรับชั้นตัวดูดซับที่อยู่กับที่ตามทิศทางการไหลของน้ำเสียจากบนลงล่าง

ที่มา: Sund strom and Klei (1995)

โดยที่เวลาการใช้งาน (service time) ของตัวดูดซับจะขึ้นอยู่กับ

3.1 ความลึกของชั้นตัวดูดซับ โดยเวลาการใช้งานของตัวดูดซับจะมีค่ามากขึ้นเมื่อเพิ่มความลึกของชั้นตัวดูดซับ และจะลดลงเมื่อความลึกของชั้นตัวดูดซับลดลง

3.2 พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับ (specific surface area) ตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะมาก เวลาใช้งานจะมีแนวโน้มมากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อย

3.3 อัตราการบำบัด จะส่งผลต่อเวลาการใช้งานของตัวดูดซับคือ ที่อัตราการบำบัดสูงจะมีเวลาการใช้งานน้อยกว่าที่อัตราการบำบัดต่ำ

3.4 ความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้ากระบวนการดูดซับ จะส่งผลต่อเวลาการใช้งาน (service time) โดยที่ความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้ากระบวนการดูดซับสูงจะทำให้เวลาการใช้งานน้อยกว่าที่ความเข้มข้นของน้ำเสียต่ำ

Bohart-Adams ได้พัฒนาความสัมพันธ์ตามทฤษฎีอัตราปฏิกิริยาพื้นผิว (surface-reaction-rate) ซึ่งสามารถใช้ทำนายประสิทธิภาพของการดูดซับแบบต่อเนื่องในหอดูดซับทดลอง ซึ่งจะเป็นไปตามสมการทางคณิตศาสตร์ของ Bohart-Adams คือ

$$t = \frac{N_0}{C_0 v} \left[D - \frac{v}{KN_0} \ln \left(\frac{C_0}{C_B} - 1 \right) \right] \quad \text{-----} (6)$$

โดยที่	t	=	เวลาการใช้งาน (breakpoint time หรือ service time, h)
	v	=	ความเร็วในการไหลของน้ำที่ผ่านตัวดูดซับ ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)
	K	=	ค่าคงที่ของอัตราการดูดซับ ($\text{m}^3/\text{kg} \cdot \text{h}$)
	D	=	ความลึกของชั้นตัวดูดซับ (m)
	D_0	=	ความลึกวิกฤติ (m)
	N_0	=	ความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ (kg/m^3)
	C_0	=	ความเข้มข้นของสารที่จะถูกดูดซับในน้ำทิ้งที่เข้าสู่ระบบ (kg/m^3)
	C_B	=	ความเข้มข้นของสารที่จะถูกดูดซับในน้ำทิ้งที่ออกจากระบบ (kg/m^3)

ถ้าให้ $t = 0$ แล้วแทนในสมการที่ (6) จะได้สมการที่ (7)

$$D_0 = \frac{v}{KN_0} \ln \left(\frac{C_0}{C_B} - 1 \right) \quad \text{-----} (7)$$

ในกรณีนี้ D_0 เรียกว่า ความลึกวิกฤต (critical bed depth) ซึ่งเป็นความลึกของชั้นตัวดูดซับที่จะทำให้ค่า C_0 ลดเหลือ C_B ในทันที และจากสมการที่ (7) เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง t และ D จะสามารถหาค่าความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ (N_0) และค่าคงที่ของอัตราการดูดซับ (K) ได้จากความชัน (slope) และจุดตัดแกน x (intercept) ดังสมการที่ (8) และ (9)

$$\text{ค่า } N_0 \text{ หาได้จาก; } \text{Slope} = \frac{N_0}{C_0 v} \quad \text{----- (8)}$$

$$\text{ค่า } K \text{ หาได้จาก; } \text{Intercept} = \frac{-1}{KC_0} \ln\left(\frac{C_0}{C_B} - 1\right) \quad \text{----- (9)}$$

สำหรับเวลาการใช้งาน, ค่าคงที่ N_0 และ K ที่ได้จากการดูดซับแบบต่อเนื่องในหอดูดซับทดลอง สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบระบบการดูดซับสำหรับบำบัดน้ำเสียในขั้น full-scale ต่อไป

4. ถ่านกัมมันต์ (activated carbon)

ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) หมายถึง ผลิตภัณฑ์ถ่านที่มีอยู่ในรูปของคาร์บอน ออสันฐาน (amorphous carbon) คือรูปร่างไม่แน่นอน สัมเคราะห์ขึ้นจากการนำวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก มาผ่านกระบวนการเผาในที่อับอากาศ และผ่านกระบวนการกระตุ้นซึ่งจะทำให้พื้นที่ผิวภายใน (internal surface area) เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากสารเคมีหรือการกระตุ้นทางกายภาพจะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างผลึก (elementary crystallites) เพิ่มขึ้น ถ่านกัมมันต์มีลักษณะเหมือนแกรไฟต์ (graphite) ซึ่งเป็นส่วนประกอบของหัวดินสอ และเพชร เพราะต่างก็มีคาร์บอน (carbon) เป็นองค์ประกอบหลักเช่นเดียวกัน แต่สิ่งที่แตกต่างจากแกรไฟต์ และเพชร คือการที่มันมีรูปร่างแบบ random imperfect structure ซึ่งมีรูพรุนมากมาย รูพรุนนี้มีขนาดตั้งแต่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าไปจนถึงเล็กขนาดระดับโมเลกุล โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ที่วุ่นวายนี้ทำให้ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวจำนวนมากและมีความสามารถสูงในการดูดซับผิว ถ่านกัมมันต์เป็นสารที่มีความสามารถและพื้นที่ในการดูดซับผิวมากที่สุดเท่าที่มนุษย์เคยรู้จักมา โดยถ่านกัมมันต์จะต้องมีพื้นที่ผิวอย่างน้อยที่สุด 5 ตารางเมตรต่อกรัม โดยทั่วไปโครงสร้างที่เป็นรูพรุนของถ่านกัมมันต์จะมีพื้นที่ผิวสูงอยู่ระหว่าง 500-2,000 ตารางเมตรต่อกรัม โครงสร้างเป็นรูพรุนหรือโพรงมีขนาดตั้งแต่ 20°A - $20,000^\circ\text{A}$ และมีคุณสมบัติดูดซับผิวสารต่างๆ ได้ดี ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวมากกว่า $1,000 \text{ m}^2/\text{g}$ นั้นหมายความว่า 5 กรัมของถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ประมาณสนามฟุตบอล นั้นแสดงให้เห็นว่าถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวมาก

4.1 ประเภทของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์สามารถแบ่งออกตามลักษณะรูปร่างได้เป็น 2 ประเภท คือ ถ่านกัมมันต์แบบผงและถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด มีรายละเอียดดังนี้ (สุนทรี, 2550)

4.1.1 ถ่านกัมมันต์แบบผง (powder activated carbon , PAC) ทำได้โดยการเอาถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มาบด รูปร่างจะแตกต่างกันไปขึ้นกับวิธีการบด ซึ่งจะมีผลทำให้คุณสมบัติการดูดติดผิวแตกต่างกันไป ถ่านกัมมันต์ชนิดผงนี้นิยมใช้สำหรับการดูดสีในสถานะที่เป็นของเหลวส่วนใหญ่ โดยทั่วไปมีขนาด 5-100 ไมโครเมตร สำหรับถ่านกัมมันต์แบบผงที่มีขนาดประมาณ 10-50 ไมครอน หรือน้อยกว่าการเติมถ่านกัมมันต์แบบผง อาจกระทำพร้อมกับการเติมโคแอกกูแลนต์ก็ได้ ถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้วจะรวมอยู่กับตะกอนแขวนลอยในน้ำกลายเป็นฟล็อก ซึ่งสามารถแยกออกจากน้ำได้โดยการตกตะกอนหรือการกรอง ด้วยเหตุนี้ถ่านกัมมันต์ผงจึงนิยมเติมก่อนกระบวนการตกตะกอนหรือการกรองน้ำ ถ่านกัมมันต์แบบผงใช้สำหรับฟอกสีในของเหลว ดูดกลิ่น และแต่งรสของสารละลายได้หลายชนิด ใช้ในการทำน้ำตาลให้บริสุทธิ์ ใช้ในอุตสาหกรรมไขมันและน้ำมัน ทำให้ไขมันหรือน้ำมันปราศจากสีหรือสีอ่อนลงมีรสดีขึ้น ช่วยกำจัดสารอินทรีย์ที่ไม่ต้องการออกจากสารละลายในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ใช้ในการทำน้ำประปาให้มีรสและกลิ่นดีขึ้น ใช้ในการทำน้ำอัดลม หรือน้ำหวานบรรจุขวด นอกจากนี้ถ่านกัมมันต์แบบผงยังใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆอีก เช่น ผงชูรส เครื่องดื่มประเภทเบียร์และไวน์ ขี้ผึ้งพลาสติก ก๊าซพิษ และในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู

4.1.2 ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด (granular activated carbon , GAC) ทำจากวัตถุดิบที่เป็นเม็ด หรือแบบผงทำให้เป็นเม็ดโดยการเติมตัวประสาน (binding agent) ตัวอย่างเช่น ทาร์ (tar) แล้วนำมาอัดเป็นเม็ด วัตถุดิบที่นิยมทำถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดได้แก่ วัตถุดิบที่ค่อนข้างแข็งและมีความหนาแน่นสูง เช่น กะลามะพร้าว ถ่านหิน ถ่านกัมมันต์แบบเกร็ดมีขนาดใกล้เคียงกับเม็ดทรายกรองน้ำ แข็งแต่เปราะและเบากว่าทราย ถ่านกัมมันต์เกร็ดสามารถบรรจุถังให้น้ำไหลผ่านในลักษณะที่คล้ายกับการกรองน้ำ เวลาสัมผัสระหว่างน้ำเสียกับถ่านอยู่ในช่วง 10-30 นาที น้ำเสียก่อนที่จะเข้าถ่านต้องกำจัดตะกอนแขวนลอยออกให้มากที่สุดก่อนเพื่อป้องกันไม่ให้อำนาจการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ลดลงเนื่องจากถูกอุดตันเร็วเกินไป ถ่านกัมมันต์แบบเกร็ด ใช้สำหรับทำก๊าซให้บริสุทธิ์ ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้มักใช้ในการดูดกลิ่นก๊าซพิษและไอของสารละลายอินทรีย์หรือการทำให้ตัวทำละลายที่ใช้แล้วบริสุทธิ์ ซึ่งในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมยาง อุตสาหกรรมยาสังเคราะห์ อุตสาหกรรมฟิล์มโปรงใส อุตสาหกรรมการพิมพ์ อุตสาหกรรมกระดาษและอุตสาหกรรมเคลือบผิว

อุตสาหกรรมก๊าซ นอกจากนี้ยังเป็นตัวเชิงปฏิกิริยาในกระบวนการปฏิกิริยาของก๊าซ และใช้เป็นวัสดุทำหน้ากักป้องกันก๊าซ และไอพิษต่างๆ

4.2 คุณสมบัติต่างๆ ของถ่านกัมมันต์

ในการนำถ่านกัมมันต์ไปใช้ในการบำบัดน้ำ จำเป็นที่จะต้องมีการเลือกถ่านที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานแต่ละประเภท โดยพิจารณาจากลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่าน ลักษณะคุณสมบัติของน้ำ ตลอดจนความสะดวกในการควบคุมระบบ Cheremisinoff and Morresi (1978) ได้อธิบายสมบัติของถ่านที่เป็นตัวกำหนดการใช้งาน ดังนี้

4.2.1 พื้นที่ผิว (surface area) โดยทั่วไปถ่านที่มีพื้นที่ผิวมากจะมีความสามารถในการดูดซับสูง

4.2.2 ความหนาแน่นประจักษ์ (apparent density) ใช้ในการประเมินความสามารถในการฟื้นฟูสภาพของถ่าน (carbon regeneration)

4.2.3 ความหนาแน่นของก้อน (bulk density) ใช้ในการประเมินปริมาณของถ่านในแต่ละการใช้งาน

4.2.4 ขนาดใช้งาน (effective size) เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (mean particle diameter) และสัมประสิทธิ์ของความเสมอกัน (uniformity coefficient) ใช้ในการประเมินภาวะทางชลศาสตร์ (hydraulic condition) ของถังดูดซับ (adsorption column)

4.2.5 ปริมาตรรูพรุน (pore volume) ใช้ในการประเมินการดูดซับโมเลกุลน้ำเสีย

4.2.6 ซีฟแอนาไลซิส (sieve analysis) เป็นตัวตรวจสอบ plant-handling effects ของถ่าน

4.2.7 แอบริชัน นัมเบอร์ (abrasion number) ใช้ในการประเมินความคงทนต่อการขัดสี

4.2.8 ปริมาณร่อยละของเถ้า (% ash) บอกถึงปริมาณเถ้าของถ่านกัมมันต์

4.2.9 ความชื้น (% moisture) บอกละปริมาณน้ำในถ่านจากการผลิต

4.2.10 ไอโอดีนัมเบอร์ (iodine number) เป็นตัวบ่งชี้ที่สำคัญในการประเมินความสามารถของถ่านในการดูดซับสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และความสามารถในการฟื้นฟูสภาพของถ่านกัมมันต์ (carbon regeneration)

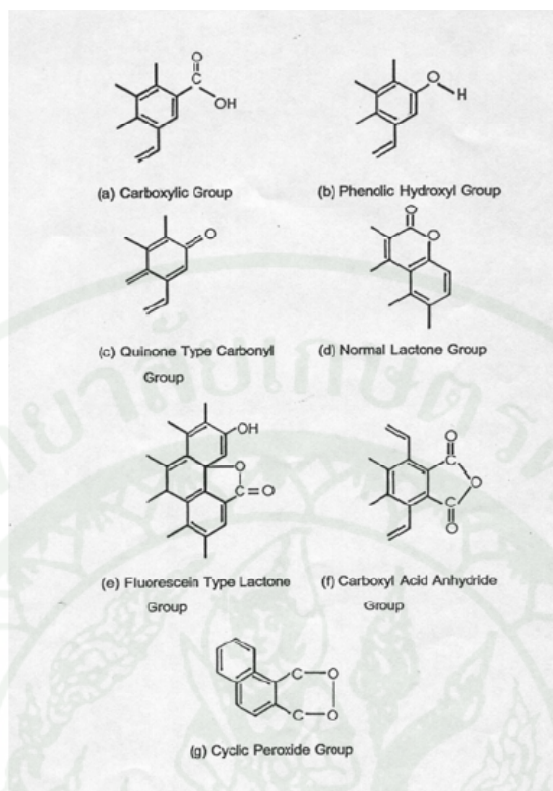
4.2.11 โมลาสันัมเบอร์ (molasses number) เป็นตัวกำหนดความสามารถของถ่านในการดูดซับสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง

4.2.12 ขนาดของรูพรุน (pore size) เป็นตัวกำหนดความสามารถในการดูดซับสารโมเลกุลจำเพาะบางชนิด

4.3 โครงสร้างทางเคมีของพื้นผิวถ่านกัมมันต์ (surface functional group)

พื้นผิวของถ่านกัมมันต์จะมีอะตอมที่สามารถเกิดพันธะเคมีกับอะตอมอื่นๆได้ เช่น อะตอมของออกซิเจน และไฮโดรเจน ในกระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์จะทำให้ธาตุเหล่านี้เปลี่ยนแปลงไปซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการผลิต ทั้งในขั้นตอนการคาร์บอนไนเซชัน และการเกิดพันธะเคมีบนพื้นผิวในขั้นตอนการกระตุ้น การที่มีอะตอมของออกซิเจน และไฮโดรเจนนี้ส่งผลอย่างมากต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ เนื่องจากอะตอมเหล่านี้เมื่อการเกิดรวมตัวกับอะตอมคาร์บอนโดยเกิดพันธะเคมีจะเกิดเป็นกลุ่มฟังก์ชันนอล (functional group) บนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ กลุ่มฟังก์ชันนอลที่พบบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ที่พบได้บ่อยๆ ได้แก่ carbonyl group, phenolic hydroxyl group, ouinone type carbonyl group, normal lactones group, fluoresceintype group, carboxylic acid anhydrides group และ cyclic peroxide groups ดังแสดงในภาพที่ 8 ในขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์ยังเกิดเถ้า (ash) ซึ่งเถ้าและองค์ประกอบทางเคมีของเถ้ายังมีหลากหลายอีกด้วย

นอกจากนี้ยังพบว่า การเติมถ่านกัมมันต์ลงในสารละลายจะทำให้พีเอชของสารละลายเปลี่ยนแปลงคือ สามารถแสดงความเป็นกรดหรือเป็นด่างได้ ถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาณของอะตอมออกซิเจนบนพื้นผิวมากก็จะแสดงความเป็นกรด ซึ่งพื้นผิวที่เป็นกรดนี้มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก ส่วนถ่านกัมมันต์ที่มีอะตอมของออกซิเจนน้อยแสดงความเป็นด่างซึ่งมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุลบ



ภาพที่ 8 กลุ่มฟังก์ชันบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์

ที่มา: Cookson (1978)

4.4 การฟื้นฟูสภาพของถ่านกัมมันต์ (carbon regeneration)

เมื่อถ่านกัมมันต์ถูกใช้งานไปเป็นเวลานาน รูพรุนของเมล็ดถ่านจะถูกอุดตันด้วยโมเลกุลของสิ่งสกปรก ทำให้ถ่านหมดประสิทธิภาพในการดูดซับ เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีราคาค่อนข้างสูง ดังนั้นเพื่อที่จะลดราคาค่าใช้จ่ายในการกำจัดจะต้องนำถ่านกัมมันต์ที่หมดประสิทธิภาพ (exhausted carbon) มาฟื้นฟูเพื่อสามารถนำกลับมาใช้งานอีก การฟื้นฟูถ่านกัมมันต์โดยการนำถ่านไปกำจัดโมเลกุลของสิ่งสกปรกที่อุดอยู่ในรูของถ่านกัมมันต์อาจทำได้หลายวิธี ได้แก่

4.4.1 การใช้ความร้อนในการฟื้นฟูสภาพ (thermal reactivation) วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมาก ถ่านกัมมันต์ที่หมดประสิทธิภาพแล้วจะรวมกับน้ำมีลักษณะขุ่น (slurry) นำเข้ามาในระบบฟื้นฟูคุณภาพ หลังจากนั้นทำการแยกน้ำ (dewater) ออกจากถ่านกัมมันต์แล้วส่งเข้าเตาเผาที่เรียกว่า

multiple hearth furnace หรือ rotary kiln ทำการเผาที่อุณหภูมิ 870-980 องศาเซลเซียส ระหว่างนี้ ถ่านจะถูกทำให้แห้ง และการเผาไหม้จะทำให้โมเลกุลของสิ่งสกปรกที่เป็นสารอินทรีย์บนผิวหน้า และในรูพรุนของเม็ดถ่านระเหยเป็นไอและถูกเผาผลาญตัวไป ในขั้นตอนการเผานี้จะต้องควบคุม ปริมาณออกซิเจนเพื่อให้ความร้อนทำลายโมเลกุลของสิ่งสกปรกที่ติดผิวถ่าน แต่ไม่ทำลายเนื้อถ่าน (Cheremisinoff and Morresi, 1978) หลังจากนั้นถ่านกัมมันต์ที่ร้อนจัดจะถูกทำให้เย็นโดยจุ่มลงใน น้ำ (quenching) แล้วนำไปล้างแยกเศษผงถ่านออกแล้วจึงสุบไปเก็บไว้หรือนำกลับไปใช้งาน การฟื้นฟูคุณภาพของถ่านคูดคิดจะใช้เวลาประมาณ 30 นาที และสิ้นเปลืองพลังงานประมาณ 4,000-5,000 บีทียูต่อถ่านหนึ่งปอนด์ ในแต่ละขั้นตอนถ่านจะสูญหายไปประมาณร้อยละ 4-9

4.4.2 การใช้ด่างในการฟื้นฟูสภาพ (alkaline regeneration) วิธีนี้นิยมใช้กับตัวถักคูดคิดผิว หรือสถานะที่ใช้ในการคูดคิดผิวที่เป็นกรด

4.4.3 การใช้กรดในการฟื้นฟูสภาพ (acid regeneration) วิธีนี้นิยมใช้กับตัวถักคูดคิดผิว หรือสถานะที่ใช้ในการคูดคิดผิวที่เป็นด่าง

4.4.4 การใช้ตัวทำละลายในการฟื้นฟูสภาพ (solvent regeneration) วิธีนี้นิยมใช้กับตัว ถักคูดคิดผิวกลุ่มสารอินทรีย์

4.4.5 การใช้ไอน้ำในการฟื้นฟูสภาพ (steam regeneration) วิธีนี้นิยมใช้กับตัวถักคูดคิดผิวที่เป็นไอดีง่าย

4.4.6 การฟื้นฟูสภาพโดยวิธีทางชีววิทยา (biological regeneration) วิธีนี้นิยมใช้กับตัว ถักคูดคิดผิวที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ เช่น สารอินทรีย์

5. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วีริยา (2550) ทำศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตกาแฟสำเร็จรูปโดยใช้สารคูดซับ จากวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร โดยทดลองการคูดซับแบบต่อเนื่องพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ทางจนวนพลศาสตร์ของ Bohart-Adam ในการกำจัด TOC เปลี่ยนแปลงตามอัตราน้ำล้นเชิงปริมาตร โดยเมื่อ อัตราน้ำล้นเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้น ค่า N_0 มีแนวโน้มลดลง และค่า K และ D_0 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และ

ความสามารถในการกำจัดสี, TOC และของแข็งแขวนลอยจะต่ำลงเมื่ออัตราน้ำล้นเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้น และเมื่อความสูงของชั้นสารดูดซับลดลง

Erto *et al.* (2013) ได้ศึกษาการดูดซับ trichloroethylene (TEC) ด้วยหอดูดซับถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด พบว่า เวลาใช้การทำงานของหอดูดซับลดลง เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของ TEC และอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าหอดูดซับเพิ่มขึ้น และเส้นโค้ง breakthrough ชันเพราะอัตราการไหลสูง

Goyal and Bhagat (2010) ศึกษาการดูดซับตะกั่วจากสารละลายโดยใช้หอดูดซับถ่านกัมมันต์ โดยแปรผันช่วงอัตราภาระทางชลศาสตร์ $0.61-1.22 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ ความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์ 50-150 mm และช่วงความเข้มข้นตะกั่ว 50-150 mg/l พบว่า เวลาการใช้งานหอดูดซับลดลงเมื่อ HLR มีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้น จะทำให้เวลาการใช้งานเพิ่มขึ้น โดยเมื่อค่า HLR ต่ำ ตัวดูดซับจะมีเวลาสัมผัสกับตัวดูดซับนานกว่า จึงเกิดการดูดซับมากกว่า แต่เมื่อ HLR สูงขึ้น ตัวดูดซับจะไหลผ่านตัวดูดซับอย่างรวดเร็วทำให้มีเวลาดูดซับน้อย ทำให้มีการดูดซับต่ำ

Kumar and Bandopadhyay (2006) ศึกษาการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียด้วยหอดูดซับทดลองแบบชั้นถ่านยัดตรง โดยป้อนน้ำเสียแบบไหลขึ้นและเก็บตัวอย่างน้ำที่ความสูงของชั้นตัวดูดซับ 10, 20 และ 30 เซนติเมตร และกำหนดจุด breakthrough ที่ $C/C_0 = 0.1$ พบว่า เวลาการใช้งานหอดูดซับทดลองและปริมาตรน้ำที่ผ่านการบำบัดเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของชั้นตัวดูดซับเพิ่มขึ้น และการเพิ่ม (หรือลด) อัตราการไหลทำให้เวลาการใช้งานลดลง (เพิ่มขึ้น)

Mousavi *et al* (2010) ศึกษาการดูดซับตะกั่วจากยางรถยนต์ พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณตัวดูดซับและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับจะทำให้ความสามารถในการดูดซับ (ปริมาณตัวดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับ) ลดลงเพราะที่ความเข้มข้นของตัวดูดซับเริ่มต้นคงที่ การเพิ่มปริมาณตัวดูดซับจะเป็นการเพิ่มบริเวณที่ไม่เกิดการดูดซับในปฏิกิริยาการดูดซับ

Pavoni *et al* (2006) ศึกษาการกำจัดสารประกอบอินทรีย์คลอไรด์ในน้ำโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ โดยการหาระยะเวลาเข้าสู่สมดุล พบว่า ในเวลา 15 นาทีแรกสามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้ 90% และคงเหลือ 10% หลังจาก 1.5 ชั่วโมง ในการดูดซับในหอดูดซับทดลองแบบชั้นถ่านยัดตรง ที่อัตราการไหล 0.77 มิลลิเมตรต่อวินาที พบว่า ค่าความลึกวิกฤตจะมีค่าแตกต่างกันไปตามสารประกอบอินทรีย์แต่ละชนิดที่ถูกดูดซับ

Rizzo and Shepherd (1997) พบว่า เวลาสัมผัสที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับอัตราการดูดซับของ ถ่านกัมมันต์ที่สามารถจะดูดซับสารปนเปื้อนได้ ซึ่งสามารถทดสอบได้โดยการทดลองการดูดซับ แบบต่อเนื่องโดยใช้หอดูดซับทดลองเท่านั้น จึงทำให้ทราบถึงขนาดน้ำหนักรถ่านกัมมันต์ที่ใช้ต่อ ปริมาณน้ำเสียที่บำบัด

Santhy *et al.* (2005) ทำการศึกษาการดูดซับสีข้อม โดยใช้แอคติเวตเต็ดคาร์บอนที่ทำจาก กาบมะพร้าว พบว่าในการทดลองแบบเบตซ์ประสิทธิภาพการดูดซับสีเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาสัมผัส และปริมาณสารดูดซับที่มากขึ้น และในการทดลองแบบต่อเนื่องพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับสี เพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของชั้นสารดูดซับมากขึ้นและอัตราการไหลที่น้อยลง

Zeinali *et al.* (2006) ศึกษาการดูดซับ dichloromethane ด้วยถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด โดย ทดลองใช้หอดูดซับ dichloromethane ซึ่งศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้น, อัตราการไหล, ความสูงของหอดูดซับ และอุณหภูมิ พบว่า เวลาใช้การงานของหอดูดซับลดลง เมื่อความเข้มข้น เริ่มต้นของ dichloromethane และอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าหอดูดซับเพิ่มขึ้น และเมื่อความสูง ของหอดูดซับและอุณหภูมิลดลง

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์

- 1.1 หอดูดซับทดลอง (adsorption column) ขนาด $\varnothing = 4$ เซนติเมตร สูง 1.4 เมตร
- 1.2 เครื่องสูบน้ำ (pump) สูบน้ำเสียเข้าหอดูดซับทดลองจำนวน 1 unit
- 1.3 เครื่องชั่งน้ำหนักชนิดละเอียด 4 ตำแหน่ง รุ่น TB-224 ยี่ห้อ DENVER

INSTRUMENT

- 1.4 เครื่องชั่งน้ำหนัก 2 ตำแหน่ง รุ่น APX-1502 ยี่ห้อ DENVER INSTRUMENT
- 1.5 ตู้อบ
- 1.6 เครื่องเขย่า (shaker) ยี่ห้อ New Brunswick Scientific
- 1.7 ชุดกลั่นหาปริมาณความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่าย (VFA)
- 1.8 ชุดเครื่องแก้ว
- 1.9 pH meter รุ่น HI 8424 ยี่ห้อ HANNA

2. สารเคมี

- 2.1 ไวนิลอะซีเตตมอนอเมอร์ เข้มข้น 99.99 %wt
- 2.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
- 2.3 กรดซัลฟูริก (H_2SO_4)
- 2.4 กรดอะซิติก (CH_3COOH)
- 2.5 สารละลายฟีนอล์ฟทาลีน ($\text{C}_{20}\text{H}_{14}\text{O}_4$) 0.1%

3. ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด Biocat CS-1100 (8x30) มีคุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ มีเลขไอโอดีน นัมเบอร์ 1,000 mg/g, มีขนาด 0.6-2.3 mm., มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 1,000-1,150 m^2/g และมีความหนาแน่น 500 kg/m^3

วิธีการ

งานวิจัยครั้งนี้มีขั้นตอนการศึกษาทดลองแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน โดยขั้นตอนที่ 1 เป็นการศึกษาสมดุลการดูดซับ (equilibrium test) เพื่อหาระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ VAM ด้วยถ่านกัมมันต์ จากนั้นนำผลระยะเวลาเข้าสู่สมดุลที่ได้ไปใช้ในขั้นตอนต่อไป ขั้นตอนที่ 2 เป็นการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ เพื่อหาความสามารถในการดูดซับ VAM ของถ่านกัมมันต์ โดยศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์และไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช ขั้นตอนที่ 3 เป็นการทดลองการดูดซับแบบต่อเนื่องโดยใช้หอดูดซับทดลอง เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัด, หาค่าเวลาการใช้งานของหอดูดซับทดลองและค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์ (kinetic coefficients) ที่ใช้ในสมการการดูดซับแบบต่อเนื่องของ Bohart-Adams เพื่อนำค่าที่ได้ไปใช้ในการออกแบบระบบดูดซับสำหรับบำบัดน้ำเสียในขั้น full-scale ต่อไป ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ขั้นตอนการศึกษาการบำบัด VAM ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

1. การเตรียมถ่านกัมมันต์

นำถ่านกัมมันต์มาล้างด้วยน้ำกลั่นให้สะอาด เพื่อกำจัดเศษผงและสิ่งปนเปื้อนต่างๆออก จากนั้นนำไปอบให้แห้ง ที่อุณหภูมิ 103-105 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้น หลังจากนั้นนำไปเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้นไว้ใช้ในการศึกษาวิจัยต่อไป โดยถ่านกัมมันต์ที่นำมาใช้ทดลองเป็นถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด Biocat CS-1100 (8x30) ดังภาพที่ 10 และมีคุณสมบัติต่างๆ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด Biocat CS-1100 (8x30)

คุณสมบัติ	Biocat CS-1100 (8x30)
Iodine number (mg/g)	1,000
Particle size	8x30 (0.6-2.3 mm.)
Moisture a packed (%)	5
Hardness number (%)	97
Specific surface area (m ² /g)	1,000-1,150
Density (kg/m ³)	500



ภาพที่ 10 ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด Biocat CS-1100 (8x30)

2. การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ VAM

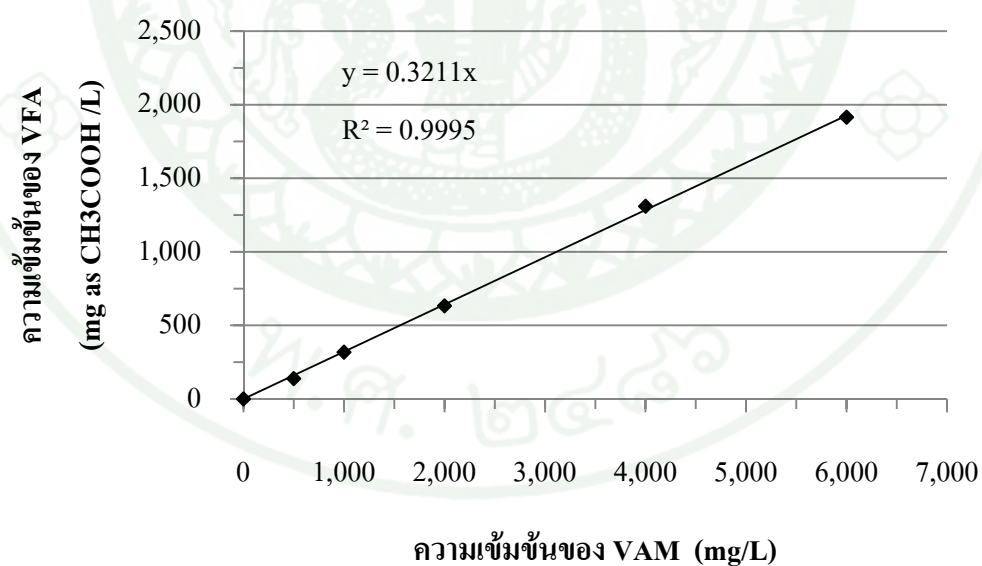
เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ VAM เข้มข้น 1,000 mg/l (ช่วงความเข้มข้นที่พบในน้ำเสียของโรงงานแปรงมันสำปะหลังแปรรูป) โดยเปิดสาร VAM เข้มข้น 99.99 %wt มา 1.08 ml ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1 ลิตร เติมน้ำประปาจนได้ปริมาตร 1 ลิตร แล้วเขย่าให้ผสมกันอย่างทั่วถึง

3. การวิเคราะห์หาความเข้มข้น VAM

เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านเครื่องมือในการวิเคราะห์หาความเข้มข้น VAM ในน้ำเสียสังเคราะห์ ทำให้ไม่สามารถใช้วิธีวิเคราะห์หาโดยตรงได้ จึงจำเป็นต้องใช้วิธีวิเคราะห์หาทางอ้อมโดยใช้วิธีวิเคราะห์หาความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่าย (VFA) ที่มีอยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์ก่อน แล้วจึงนำค่าความเข้มข้น VFA ที่ได้มาคำนวณกลับเป็นค่าความเข้มข้น VAM โดยคำนวณจากอัตราส่วนความเข้มข้น VFA ต่อความเข้มข้น VAM ที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ VFA และความเข้มข้นของ VAM โดยเตรียมสารละลาย VAM ที่ความเข้มข้น 500, 1,000, 2,000, 4,000 และ 6,000 mg/l จากการเปิดสาร VAM เข้มข้น 99.99 %wt มา 0.54, 1.08, 2.15, 4.30 และ 6.45 ml ตามลำดับ ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1 ลิตร แต่ละขวด เติมน้ำประปาจนได้ปริมาตร 1 ลิตร เขย่าให้ผสมกันอย่างทั่วถึง ต่อจากนั้นนำสารละลาย VAM ที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่เตรียมไว้ มาวิเคราะห์หาค่า VFA ด้วยวิธีการกลั่น ดังภาพที่ 11 ตามวิธี 5560C ของ standard methods examination of water and wastewater 21th edition แล้วนำค่า VFA ที่ได้ มาประมวลผลสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ VFA ในแกน y และความเข้มข้นของ VAM ในแกน x ดังภาพที่ 12 ซึ่งจะได้อัตราส่วนความเข้มข้น VFA ต่อความเข้มข้น VAM เท่ากับ 0.3211



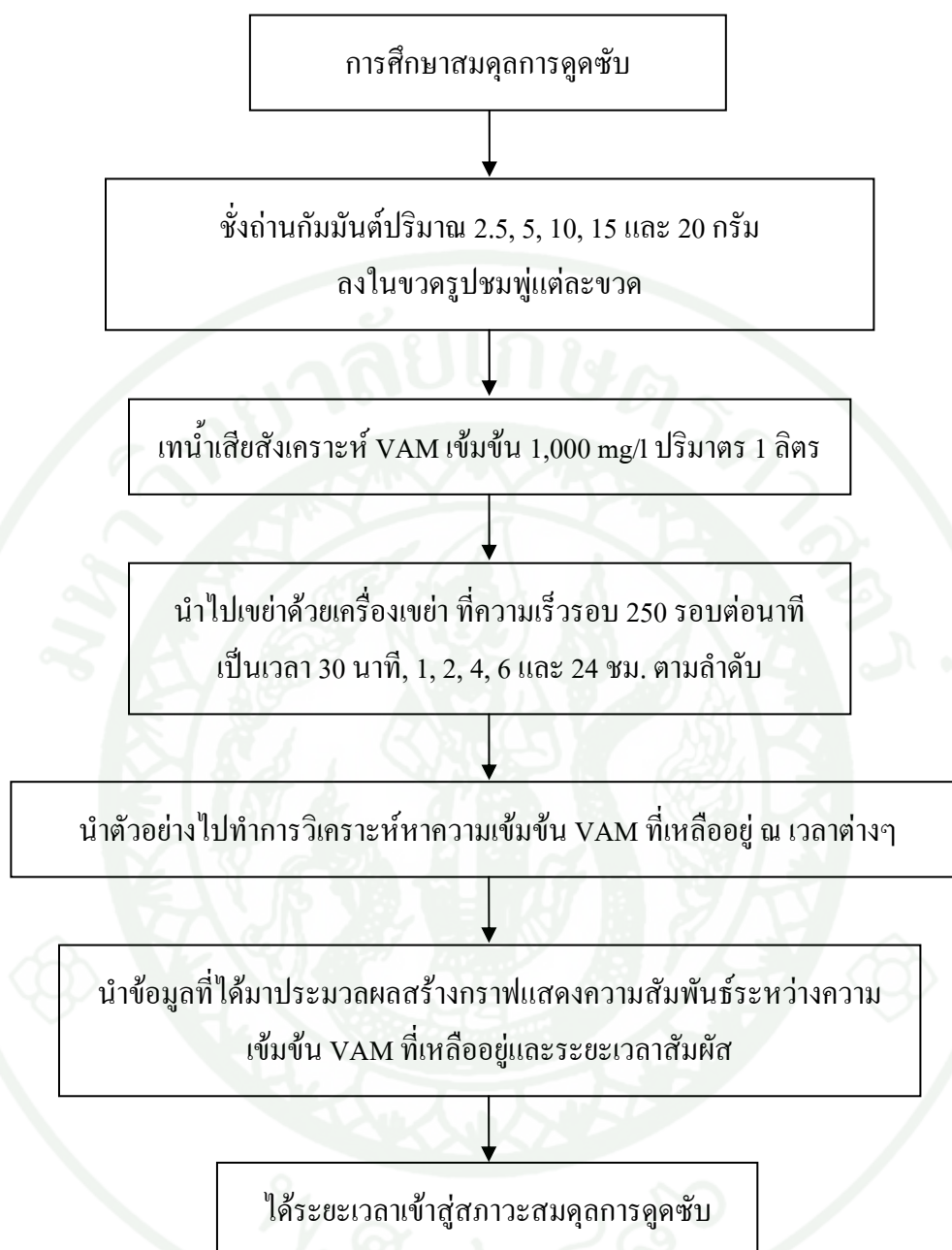
ภาพที่ 11 ชุดกลั่นสำหรับหาความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่าย (VFA) ในน้ำเสียสังเคราะห์



ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ VFA และความเข้มข้นของ VAM

4. การศึกษาสมดุลการดูดซับ (equilibrium test)

การศึกษาสมดุลการดูดซับเป็นการหาระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ VAM ด้วยถ่านกัมมันต์ ทำการทดลองแบบ batch โดยชั่งถ่านกัมมันต์ ปริมาณ 2.5, 5, 10, 15 และ 20 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่แต่ละขวด เติมน้ำเสียสังเคราะห์ VAM เข้มข้น 1,000 mg/l ปริมาตร 1 ลิตร ควบคุม pH อยู่ระหว่าง 6.8-7.3 ที่อุณหภูมิห้อง นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า ที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที, 1, 2, 4, 6 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ จากนั้นนำไปกรองด้วยกระดาษกรอง whatman เบอร์ 1 เพื่อแยกถ่านกัมมันต์ออก แล้วนำตัวอย่างน้ำที่ได้ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้น VAM ที่เหลืออยู่ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาประมวลผลสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น VAM ที่เหลืออยู่และระยะเวลาสัมผัส ดังภาพที่ 13 และ 14 นอกจากนี้ได้ทำการทดลองกรองน้ำเสียสังเคราะห์ VAM เข้มข้น 1,000 mg/l ผ่านกระดาษกรอง whatman เบอร์ 1 เพื่อหาความเข้มข้น VAM ที่หายไประหว่างการกรองเพื่อให้ได้ค่าการดูดซับ VAM ของถ่านกัมมันต์ที่ถูกต้องด้วย



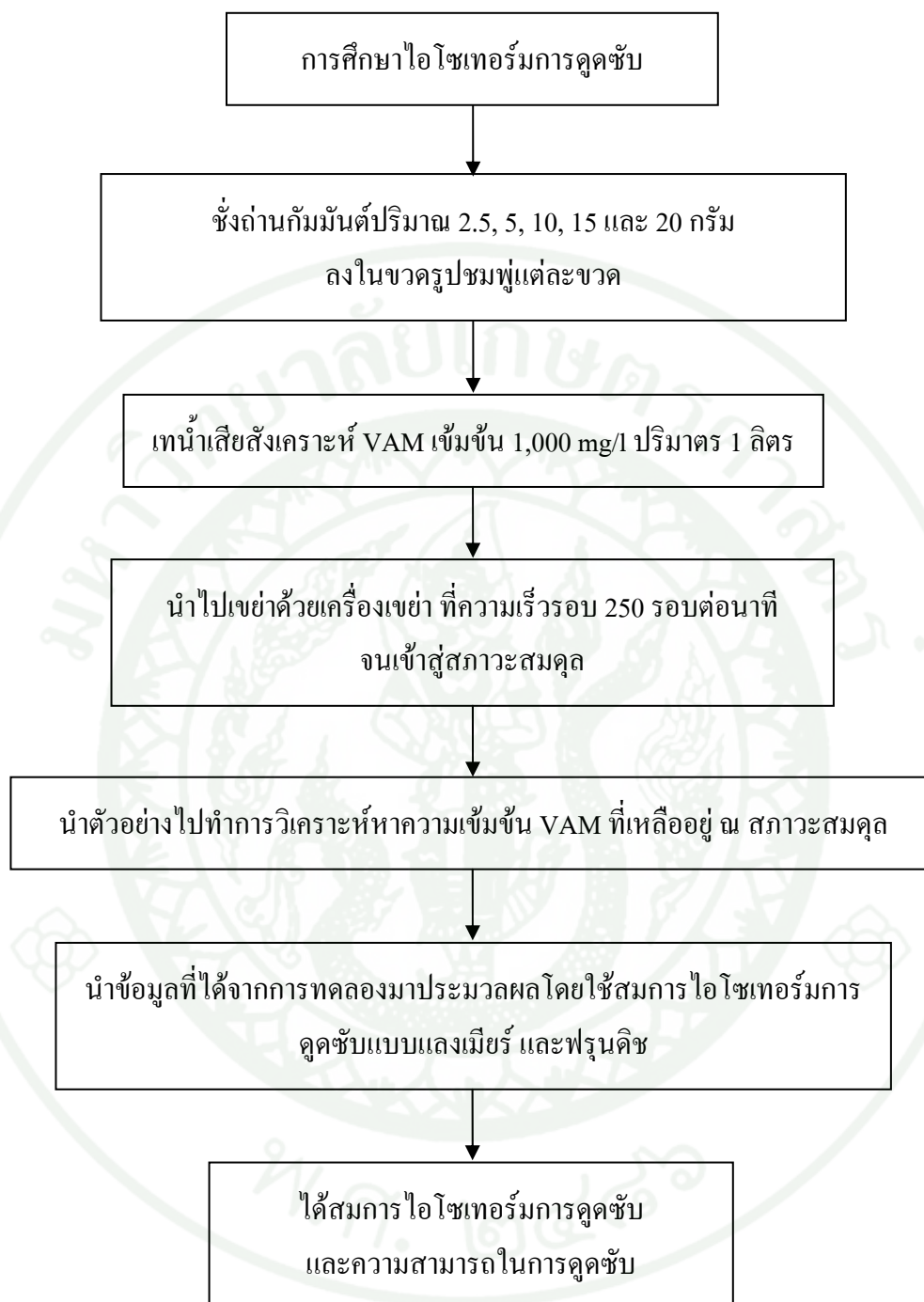
ภาพที่ 13 ขั้นตอนการศึกษาสมมูลการดูดซับ



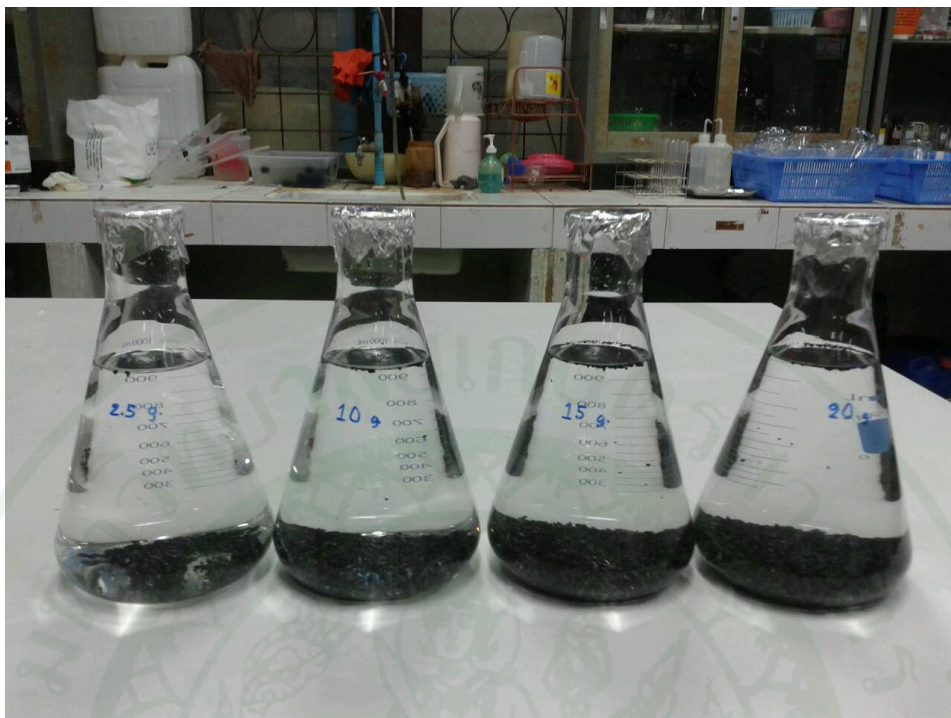
ภาพที่ 14 การศึกษาสมดุลการดูดซับ

5. การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ

การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับเพื่อหาความสามารถในการดูดซับ VAM ของถ่านกัมมันต์ ทำการทดลองแบบ batch โดยชั่งถ่านกัมมันต์ ปริมาณ 2.5, 5, 10, 15 และ 20 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่แต่ละขวด เติมน้ำเสียสังเคราะห์ VAM เพิ่มขึ้น 1,000 mg/l ปริมาณ 1 ลิตร ควบคุม pH อยู่ระหว่าง 6.8-7.3 ที่อุณหภูมิห้อง นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า ที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุล ที่ได้จากการศึกษาสมดุลการดูดซับในข้อ 4 จากนั้นนำไปกรองด้วยกระดาษกรอง whatman เบอร์ 1 เพื่อแยกถ่านกัมมันต์ออก แล้วนำตัวอย่างน้ำที่ได้ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้น VAM ที่เหลืออยู่ แล้วนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาประมวลผลโดยใช้สมการไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ และไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช ดังภาพที่ 15 และ 16 นอกจากนี้ได้ทำการทดลองกรองน้ำเสียสังเคราะห์เข้มข้น 1,000 mg/l ผ่านกระดาษกรอง whatman เบอร์ 1 เพื่อหาความเข้มข้น VAM ที่หายไประหว่างการกรองเพื่อให้ได้ค่าการดูดซับ VAM ของถ่านกัมมันต์ที่ถูกต้องด้วย



ภาพที่ 15 ขั้นตอนการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ

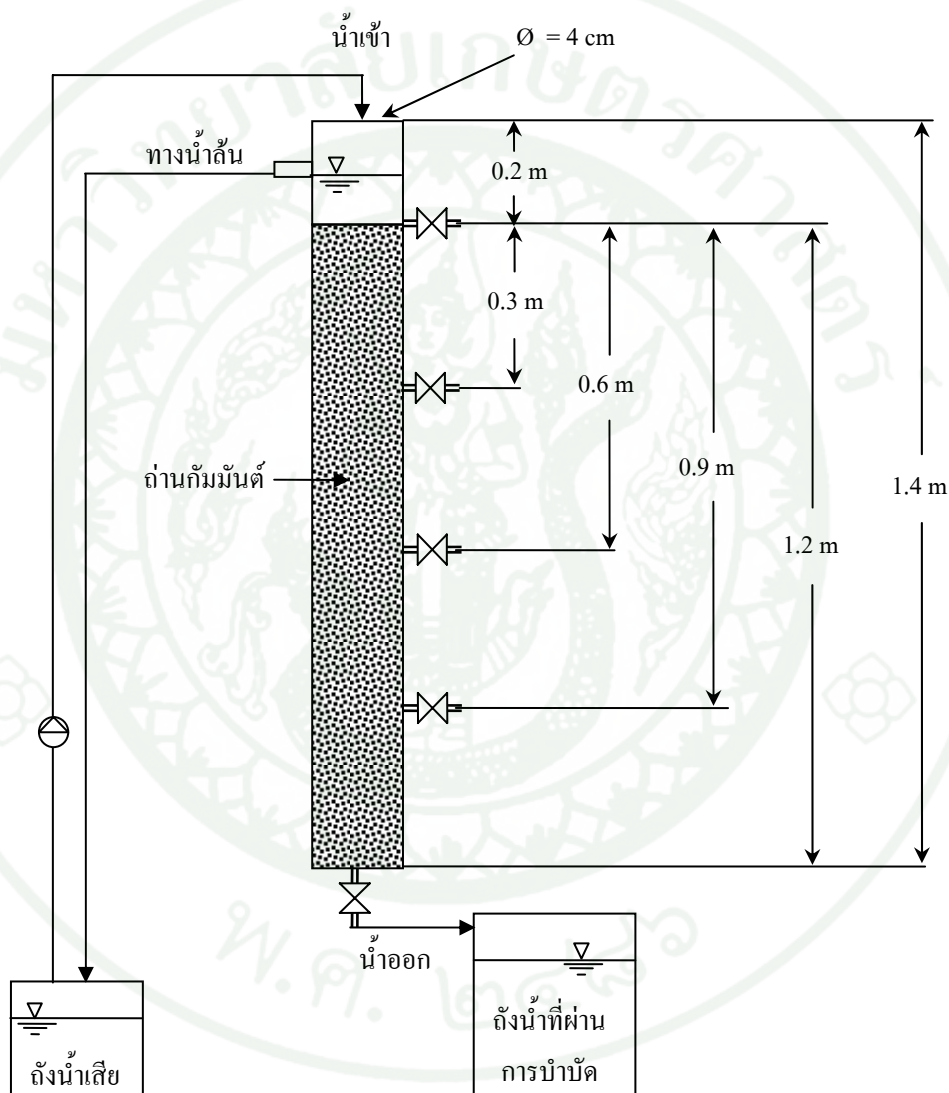


ภาพที่ 16 การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ

6. การทดลองการดูดซับแบบต่อเนื่องโดยใช้หอดูดซับทดลอง

เป็นการทดลองการดูดซับแบบต่อเนื่องโดยใช้หอดูดซับทดลอง เพื่อหาประสิทธิภาพในการบำบัด, เวลาการใช้งาน และค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์ (kinetic coefficients) ที่ใช้ในการสมการการดูดซับแบบต่อเนื่องของ Bohart-Adams โดยสร้างหอดูดซับทดลองที่ทำจากท่อพีวีซีขนาด 2 นิ้ว มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงรอบภายในเท่ากับ 4 เซนติเมตร สูง 1.4 เมตร มีพื้นที่หน้าตัด 12.57 ตารางเซนติเมตร มีวาล์วเก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วที่ความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์ 0.3, 0.6, 0.9 และ 1.2 เมตร และบรรจุถ่านกัมมันต์ลงในท่อสูง 1.2 เมตร ดังภาพที่ 17 และ 18 ป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ VAM ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 1,014.37 mg/l แบบไหลลงอย่างต่อเนื่อง หลังจากนั้นเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด ที่ความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์ 0.3, 0.6, 0.9 และ 1.2 เมตร ณ เวลา 2, 6, 12 ชั่วโมง และจากนั้นเก็บทุกๆ 12 ชั่วโมง จนกระทั่งถ่านกัมมันต์หมดสภาพ แล้วนำตัวอย่างน้ำเสียไปวิเคราะห์หาความเข้มข้น VAM โดยทำการทดลองแปรผันค่าอัตราภาระทางชลศาสตร์ (hydraulic loading rate, HLR) 3 ค่า คือ 0.4774, 0.9548 และ 1.4322 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้นี้มาหาค่าประสิทธิภาพในการบำบัด, เวลาการใช้งานของหอดูดซับทดลอง

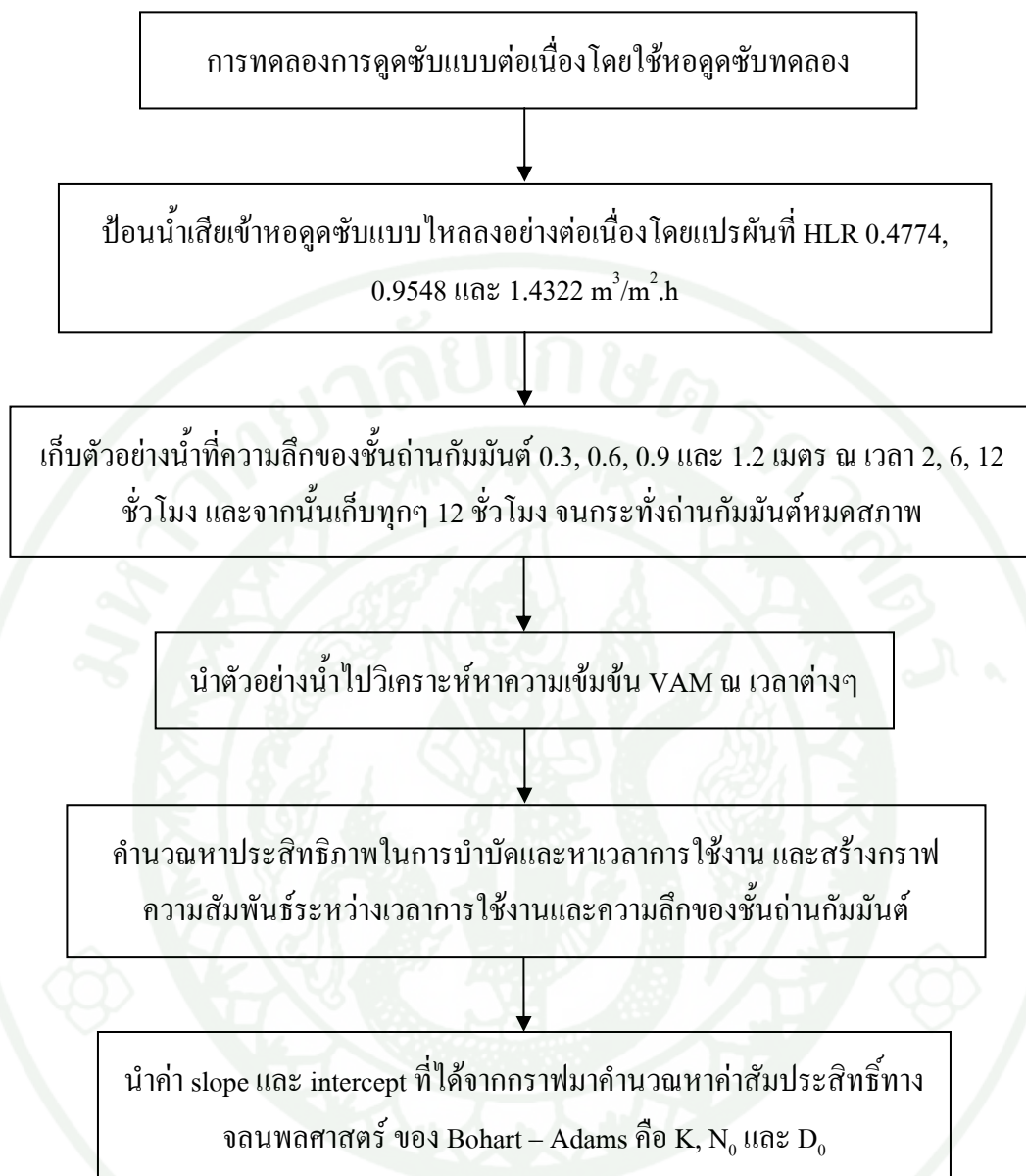
หลังจากนั้นสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการใช้งานและความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์ ที่อัตราทางศาสตร์ 0.4774, 0.9548 และ $1.4322 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์ (kinetic coefficients) ที่ใช้ในสมการการดูดซับแบบต่อเนื่องของ Bohart – Adams โดยกำหนดจุด breakthrough ที่การบำบัด 90% ($C_e/C_0 = 0.1$) ตามช่วงค่าทั่วไปที่ 90-95% ดังภาพที่ 19



ภาพที่ 17 ลักษณะการทำงานของหอดูดซับทดลองที่ใช้ในการดูดซับแบบต่อเนื่อง



ภาพที่ 18 หอดูดซับทดลองที่ใช้ในการดูดซับแบบต่อเนื่อง

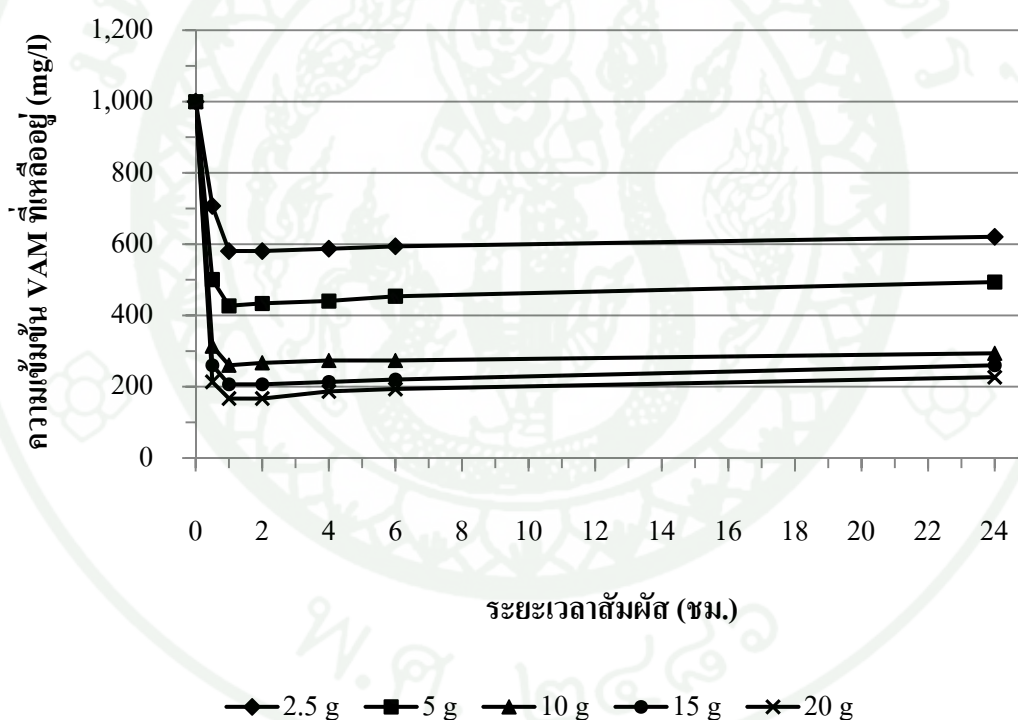


ภาพที่ 19 ขั้นตอนการทดลองการดูดซับแบบต่อเนื่องโดยใช้หอดูดซับทดลอง

ผลและวิจารณ์

1. ผลการศึกษาสมดุลการดูดซับ

การศึกษาในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาสมดุลการดูดซับเพื่อหาระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ VAM ด้วยถ่านกัมมันต์ ทำการทดลองแบบ batch โดยชั่งถ่านกัมมันต์ ปริมาณ 2.5, 5, 10, 15 และ 20 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่แต่ละขวด เติมน้ำเสียสังเคราะห์ VAM เข้มข้น 1,000 mg/l ปริมาตร 1 ลิตร ควบคุม pH อยู่ระหว่าง 6.8-7.3 ที่อุณหภูมิห้อง นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า ที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที, 1, 2, 4, 6 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ และนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้น VAM ที่เหลืออยู่ ได้ผลการทดลองดังนี้



ภาพที่ 20 ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลการดูดซับ

จากภาพที่ 20 พบว่า การดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะเวลาสัมผัสตั้งแต่ 0-1 ชั่วโมง และจะลดลงจนความเข้มข้นของ VAM ที่เหลืออยู่เริ่มคงที่ ซึ่งที่จุดนี้เรียกว่า จุดสมดุลการดูดซับ (equilibrium point) โดยที่ทุกปริมาณของถ่านกัมมันต์มีระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลการดูดซับเท่ากับ 1 ชั่วโมง เนื่องจากเป็นระยะเวลาที่การดูดซับเริ่มคงที่แม้ระยะเวลาสัมผัสจะเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 3 ร้อยละการดูดซับของถ่านกัมมันต์กับระยะเวลาสัมผัส

ระยะเวลาสัมผัส (ชม.)	ร้อยละการดูดซับของถ่านกัมมันต์				
	2.5 กรัม	5 กรัม	10 กรัม	15 กรัม	20 กรัม
0.5	29.26	49.95	68.64	73.97	78.65
1.0	41.94	57.29	73.97	79.31	83.32
2.0	41.94	56.62	73.31	79.31	83.32
4.0	41.27	55.96	72.64	78.65	81.31
6.0	40.61	54.62	72.64	77.98	80.65
24.0	37.94	50.62	70.64	73.97	77.31

จากตารางที่ 3 พบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับจะเพิ่มขึ้นในช่วงระยะเวลา 0-1 ชั่วโมง หลังจากนั้นประสิทธิภาพจะเริ่มคงที่และลดลงเล็กน้อย เนื่องจากการดูดซับเริ่มเข้าสู่ภาวะสมดุล โดยที่ระยะเวลาสัมผัส 1 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพในการดูดซับ VAM มากที่สุด โดยที่ปริมาณถ่านกัมมันต์ 2.5, 5, 10, 15 และ 20 กรัม มีประสิทธิภาพการดูดซับเท่ากับร้อยละ 41.91, 57.29, 73.97, 79.31 และ 83.32 ตามลำดับ ซึ่งประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้นตามปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เพิ่มขึ้น

จากการศึกษาสมดุลการดูดซับนี้ สามารถคำนวณหาค่าความสามารถในการดูดซับ (adsorption capacity) VAM ณ จุดสมดุล เมื่อเทียบกับปริมาณของถ่านกัมมันต์ได้ โดยที่ปริมาณถ่านกัมมันต์ 2.5, 5, 10, 15 และ 20 กรัม มีความสามารถในการดูดซับ VAM เท่ากับ 167.76, 114.58, 73.97, 52.87 และ 41.66 mg VAM/g ถ่านกัมมันต์ ตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ยความสามารถในการดูดซับ VAM เท่ากับ 90.17 mg VAM/g ถ่านกัมมันต์ ดังตารางที่ 4 จะเห็นว่า การเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์จะทำให้ความสามารถในการดูดซับ VAM ลดลง โดย Mousavi *et al* (2010) ได้ให้เหตุผลไว้ว่า เมื่อความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับเริ่มต้นคงที่ โดยทั่วไปเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับจะเป็นการเพิ่มบริเวณที่ไม่เกิดการดูดซับ (free adsorption site) ในปฏิกิริยาการดูดซับ เพราะโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่อยู่ในน้ำเสียมีไม่ครอบคลุมบริเวณการดูดซับทั้งหมด เป็นผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับลดลง

ตารางที่ 4 ความสามารถในการดูดซับ VAM ของถ่านกัมมันต์ เมื่อคำนวณจากการศึกษาสมดุลการดูดซับ

ปริมาณถ่านกัมมันต์ (กรัม)	ความสามารถในการดูดซับ (mg VAM/gถ่านกัมมันต์)
2.5	167.76
5	114.58
10	73.97
15	52.87
20	41.66
เฉลี่ย	90.17

2. ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ

การศึกษาในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับเพื่อหาความสามารถในการดูดซับ VAM ของถ่านกัมมันต์ ทำการทดลองแบบ batch โดยชั่งถ่านกัมมันต์ ปริมาณ 2.5, 5, 10, 15 และ 20 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่แต่ละขวด เติมน้ำเสียสังเคราะห์ VAM เข้มข้น 1,000 mg/l ปริมาณ 1 ลิตร ควบคุม pH อยู่ระหว่าง 6.8-7.3 ที่อุณหภูมิห้อง นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า ที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุล ที่เวลา 1 ชั่วโมง ที่ได้จากการศึกษาสมดุลการดูดซับ จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้น VAM ที่เหลืออยู่ และนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาประมวลผลสร้างกราฟไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิช ได้ผลการทดลองดังนี้

2.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์

ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์มีรูปแบบสมการโดยทั่วไป คือ $x/m = (aBC_0)/(1+BC_0)$ โดยค่า a คือ ความสามารถสูงสุดในการดูดซับและค่า B คือ ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ ซึ่งการดูดซับแบบแลงเมียร์ได้อธิบายไว้ในหน้า 13 และเมื่อนำสมการทั่วไปของแลงเมียร์มาจัดใหม่ให้เป็นสมการแบบเชิงเส้น จะสามารถจัดได้ 4 แบบ ดังตารางที่ 5 โดยเมื่อนำข้อมูลจากการทดลองมาสร้างกราฟไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์ได้ผลการทดลองดังนี้

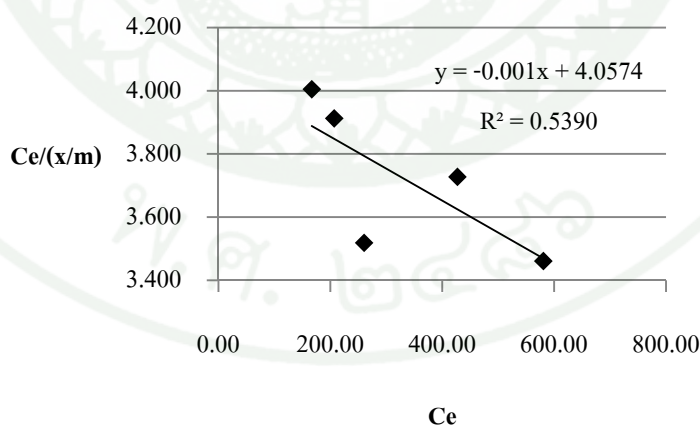
ตารางที่ 5 สมการไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์ในแบบต่างๆ

isotherm	non- linear form	linear form	plot
Langmuir-1		$\frac{C_e}{x/m} = \frac{1}{a}C_e + \frac{1}{Ba}$	$\frac{C_e}{x/m}$ กับ C_e
Langmuir-2		$\frac{1}{x/m} = \left(\frac{1}{Ba}\right)\frac{1}{C_e} + \frac{1}{a}$	$\frac{1}{x/m}$ กับ $\frac{1}{C_e}$
Langmuir-3	$\frac{x}{m} = \frac{aBC_e}{1 + BC_e}$	$x/m = a - \left(\frac{1}{B}\right)\frac{x/m}{C_e}$	x/m vs. กับ $\frac{x/m}{C_e}$
Langmuir-4		$\frac{x/m}{C_e} = Ba - B(x/m)$	$\frac{x/m}{C_e}$ กับ x/m

จากสมการไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์ แบบที่ 1

$$\frac{C_e}{x/m} = \frac{1}{a}C_e + \frac{1}{Ba}$$

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $C_e/(x/m)$ และ C_e ดังภาพที่ 21 พบว่า มีค่า a เท่ากับ -1,000, ค่า B เท่ากับ -0.00025 และ R^2 เท่ากับ 0.5390

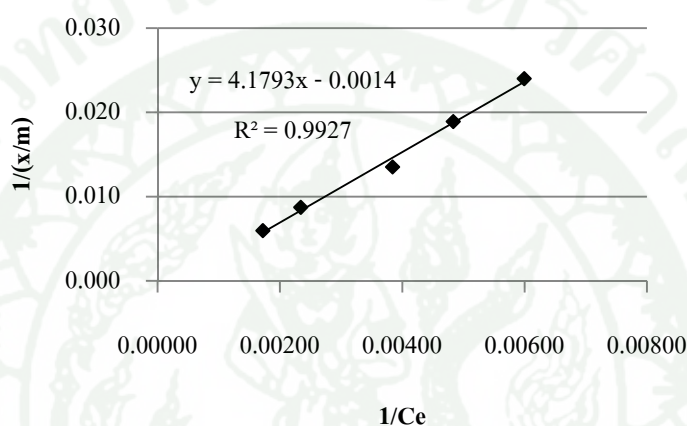


ภาพที่ 21 ไอโซเทอร์มการดูดซับ VAM ด้วยถ่านกัมมันต์แบบเชิงเส้นของแลงเมียร์ แบบที่ 1

จากสมการไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์ แบบที่ 2

$$\frac{1}{x/m} = \left(\frac{1}{Ba}\right) \frac{1}{C_e} + \frac{1}{a}$$

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/(x/m)$ และ $1/C_e$ ดังภาพที่ 22 พบว่า มีค่า a เท่ากับ -714.29, ค่า B เท่ากับ -0.00033 และ R^2 เท่ากับ 0.9927

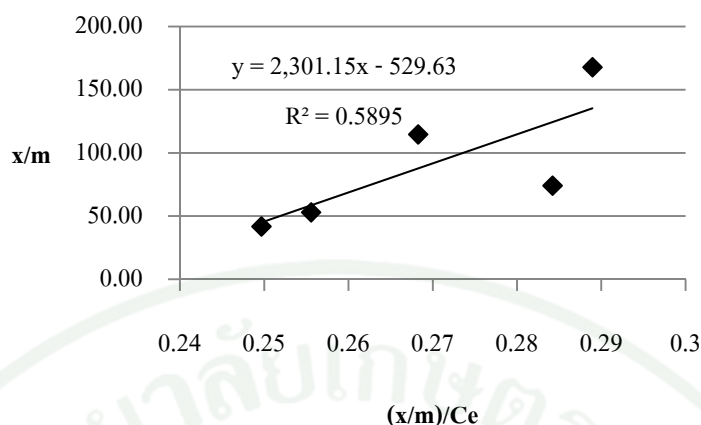


ภาพที่ 22 ไอโซเทอร์มการดูดซับ VAM ด้วยถ่านกัมมันต์แบบเชิงเส้นของแลงเมียร์ แบบที่ 2

จากสมการไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์ แบบที่ 3

$$x/m = a - \left(\frac{1}{B}\right) \frac{x/m}{C_e}$$

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง x/m และ $(x/m)/C_e$ ดังภาพที่ 23 พบว่า มีค่า a เท่ากับ -529.63, ค่า B เท่ากับ -0.00043 และ R^2 เท่ากับ 0.5895

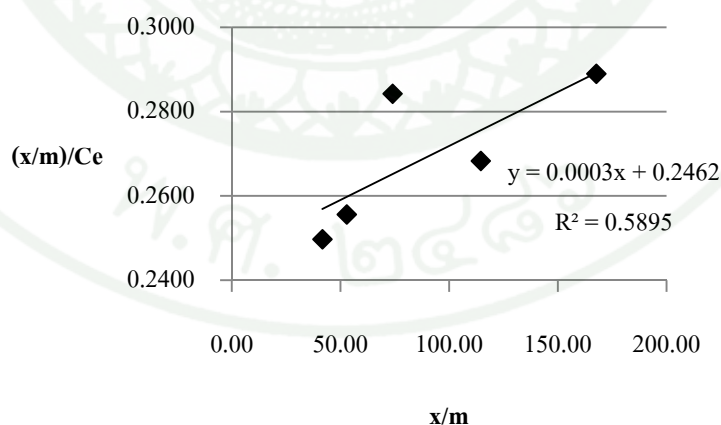


ภาพที่ 23 ไอโซเทอร์มการดูดซับ VAM ด้วยถ่านกัมมันต์แบบเชิงเส้นของแลงเมียร์ แบบที่ 3

จากสมการไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์ แบบที่ 4

$$\frac{x/m}{C_e} = Ba - B(x/m)$$

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(x/m)/C_e$ และ x/m ดังภาพที่ 24 พบว่า มีค่า a เท่ากับ -820.67, ค่า B เท่ากับ -0.0003 และ R^2 เท่ากับ 0.5895



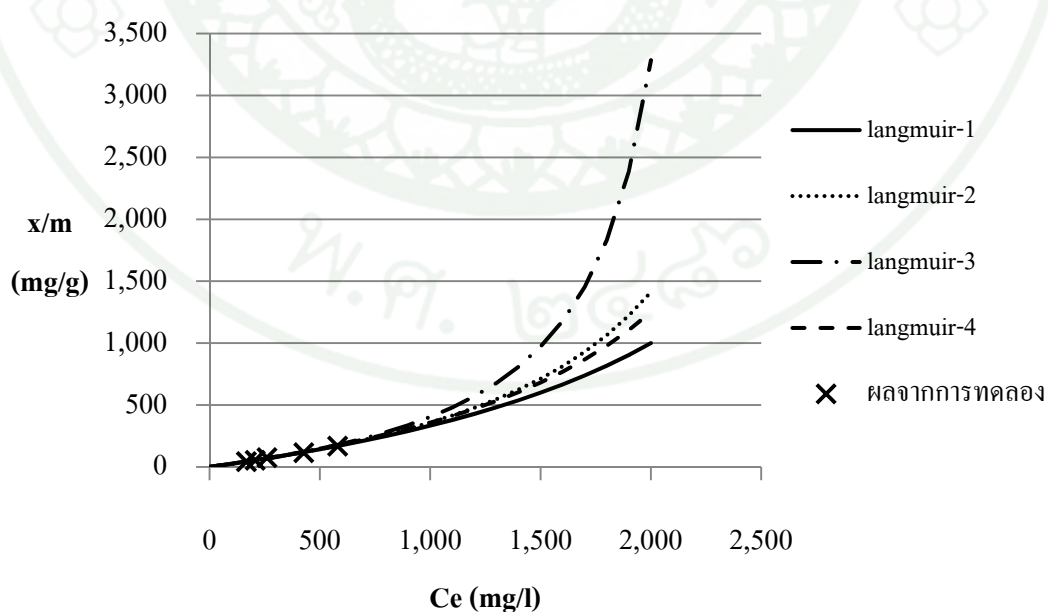
ภาพที่ 24 ไอโซเทอร์มการดูดซับ VAM ด้วยถ่านกัมมันต์แบบเชิงเส้นของแลงเมียร์ แบบที่ 4

จากการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแสงเมียร์ทั้ง 4 แบบ สามารถสรุปค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสมการไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแสงเมียร์ในแบบต่างๆ

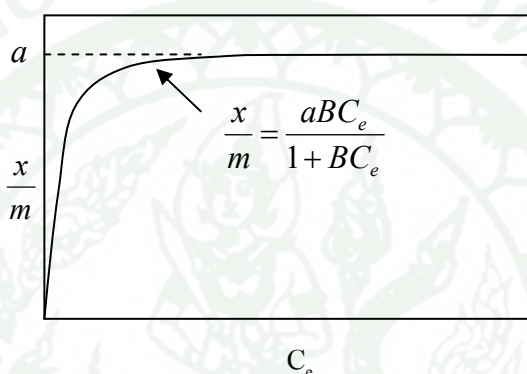
isotherm	a (mg/g)	B (l/mg)	R ²
Langmuir-1	-1,000	-0.00025	0.5390
Langmuir-2	-714.29	-0.00033	0.9927
Langmuir-3	-529.63	-0.00043	0.5895
Langmuir-4	-820.67	-0.00030	0.5895

เมื่อนำค่า a และค่า B จากตารางที่ 6 มาใช้หาค่า x/m โดยแทนค่าในสมการ $x/m = (aBC_e)/(1+BC_e)$ และแปรผันค่า C_e ในช่วง 0-2,000 mg/l แล้วมาสร้างกราฟไอโซเทอร์มการดูดซับ VAM ด้วยถ่านกัมมันต์ของแสงเมียร์แต่ละแบบ และใส่ค่า x/m ที่ได้จากการทดลองลงไป เพื่อแสดงถึงช่วงความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ VAM ที่ใช้ในการทดลอง จะได้กราฟดังภาพที่ 25



ภาพที่ 25 ไอโซเทอร์มการดูดซับ VAM ด้วยถ่านกัมมันต์ของแสงเมียร์แบบต่างๆ

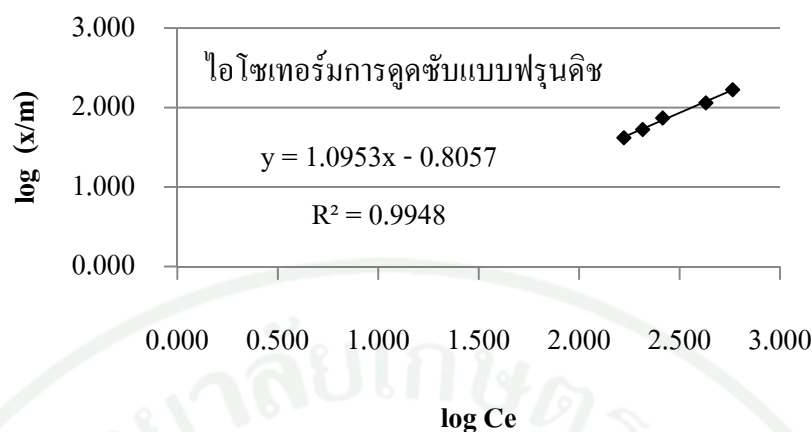
จากตารางที่ 6 จะเห็นว่าค่า a และ B ของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์ ทั้ง 4 แบบมีค่าเป็นลบทั้งหมด ซึ่งเกิดจากลักษณะเฉพาะของการดูดซับสาร VAM ด้วยถ่านกัมมันต์ ชนิดนี้ และเมื่อนำค่า a และ B มาใช้ในการสร้างกราฟไอโซเทอร์มการดูดซับ VAM ด้วยถ่านกัมมันต์ของแลงเมียร์แบบต่างๆ (ภาพที่ 25) จึงทำให้กราฟไอโซเทอร์มการดูดซับมีลักษณะโค้งหงาย ขึ้น ซึ่งจะแตกต่างจากกราฟไอโซเทอร์มทั่วไปของแลงเมียร์ที่มีลักษณะเป็นกราฟโค้งคว่ำลง และมีค่า a และ B มีค่าเป็นบวก ดังภาพที่ 26 ทำให้สามารถสรุปได้ว่าพฤติกรรมการดูดซับ VAM ด้วย ถ่านกัมมันต์ในการทดลองนี้ไม่เหมาะสมที่จะอธิบายด้วยไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์



ภาพที่ 26 ลักษณะกราฟไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์

2.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช

ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิชมีรูปแบบสมการทั่วไปคือ $x/m = kC_e^{1/n}$ โดยค่า k คือ ค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ และค่า $1/n$ คือ ความหนาแน่นของ ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช ซึ่งการดูดซับแบบฟรุนดลิชได้อธิบายไว้ในหน้า 11 โดยเมื่อนำสมการ ทั่วไปของฟรุนดลิชมาจัดใหม่ให้เป็นสมการแบบเชิงเส้น และนำข้อมูลจากการทดลองมาสร้างกราฟ ไอโซเทอร์มการดูดซับ VAM ด้วยถ่านกัมมันต์แบบเชิงเส้นของฟรุนดลิชได้ผลดังนี้



ภาพที่ 27 ไอโซเทอร์มการดูดซับ VAM ด้วยถ่านกัมมันต์แบบเชิงเส้นของฟรุนดลิช

จากภาพที่ 27 สามารถหาพารามิเตอร์ของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิชได้ โดยสมการไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช โดยทั่วไป คือ $\frac{x}{m} = kC_e^{1/n}$

สามารถนำมาเขียนในรูปสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ (10)

$$\log \frac{x}{m} = \log k + \frac{1}{n} \log C_e \quad \text{----- (10)}$$

แทนค่าที่ได้จากกราฟ (ภาพที่ 27) ลงในสมการที่ (10) จะได้

$$\log \frac{x}{m} = -0.8057 + 1.0953 \log C_e \quad \text{----- (11)}$$

จากสมการที่ (11) เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log \frac{x}{m}$ และ $\log C_e$ จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 1.0953 และจุดตัดบนแกน y เท่ากับ -0.8057 นั่นคือ

$$\log k = -0.8057$$

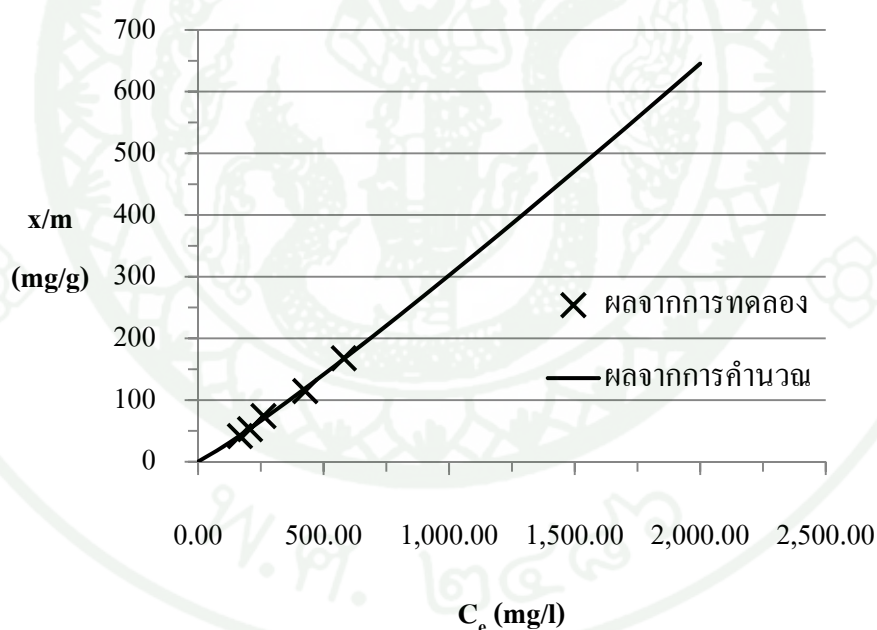
$$\frac{1}{n} = 1.0953$$

$$k = 0.1564$$

$$n = 0.9130$$

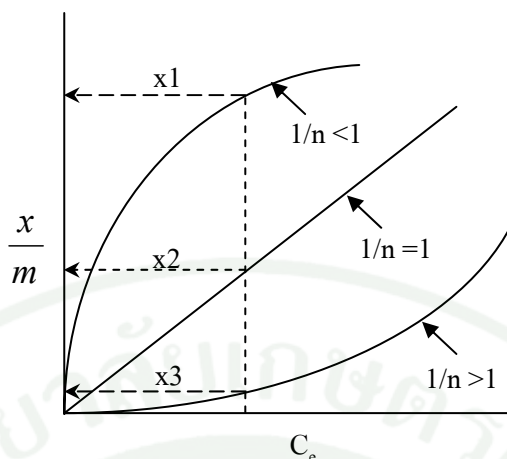
จากภาพที่ 27 พบว่า ค่า R^2 มีค่าเท่ากับ 0.9948 ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 ส่วนค่า $1/n$ มีค่าเท่ากับ 1.0953 ซึ่งบ่งบอกถึงการดูดซับที่ไม่ดี (unfavorable adsorption) และค่า k เท่ากับ 0.1564 โดยมีสมการไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดิช คือ $x/m = 0.1564C_e^{1.0953}$

เมื่อนำค่า k และค่า $1/n$ ที่ได้จากการทดลอง มาใช้ในการหาค่า x/m โดยแทนค่าในสมการ $x/m = kC_e^{1/n}$ และแปรผันค่า C_e ในช่วง 0-2,000 mg/l แล้วมาเขียนกราฟไอโซเทอร์มการดูดซับ VAM ด้วยถ่านกัมมันต์แบบฟรุนดิชและใส่ค่า x/m ที่ได้จากการทดลองลงไป เพื่อแสดงถึงความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ VAM ที่ใช้ในการทดลอง จะได้กราฟดังภาพที่ 28



ภาพที่ 28 ไอโซเทอร์มการดูดซับ VAM ด้วยถ่านกัมมันต์แบบฟรุนดิช

จากภาพที่ 28 จะเห็นว่า กราฟไอโซเทอร์มการดูดซับ VAM ด้วยถ่านกัมมันต์แบบฟรุนดิช มีลักษณะโค้งหงายขึ้น โดยกราฟมีลักษณะเป็นกราฟทั่วไปของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดิช ดังภาพที่ 29 และจากค่า R^2 มีค่าเท่ากับ 0.9948 ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 (ภาพที่ 27) จึงสามารถบอกได้ว่าการดูดซับนี้เหมาะสมที่จะอธิบายด้วยไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดิช



ภาพที่ 29 ลักษณะกราฟไอโซเทอรั่มการดูดซับแบบฟรุนดลิช

จากภาพที่ 29 ถ้า $1/n < 1$ กราฟไอโซเทอรั่มจะมีลักษณะเป็นกราฟโค้งคว่ำลง แสดงถึงการดูดซับที่ดี (favorable adsorption) ถ้า $1/n = 1$ กราฟไอโซเทอรั่มจะมีลักษณะเป็นกราฟเส้นตรง แสดงถึงการดูดซับปานกลาง และถ้า $1/n > 1$ กราฟไอโซเทอรั่มจะมีลักษณะเป็นกราฟโค้งหงายขึ้น แสดงถึงการดูดซับที่ไม่ดี (unfavorable adsorption) และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกราฟไอโซเทอรั่มการดูดซับแบบฟรุนดลิชทั้ง 3 แบบ ที่ C_e เท่ากัน และกำหนดให้ m ของ x/m (ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ) แต่ละกราฟมีค่าเท่ากับ 1 จะเห็นว่าค่า $x_1 > x_2 > x_3$ แสดงว่าความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับที่มีค่า $1/n < 1$ มากกว่า $1/n = 1$ มากกว่า $1/n > 1$

จากผลการศึกษาไอโซเทอรั่มการดูดซับแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิช จะพบว่า ค่า a และ B ของสมการไอโซเทอรั่มการดูดซับ VAM ด้วยถ่านกัมมันต์แบบเชิงเส้นของแลงเมียร์ทั้ง 4 แบบมีค่าเป็นลบ และลักษณะกราฟไอโซเทอรั่มการดูดซับ VAM ด้วยถ่านกัมมันต์แบบแลงเมียร์ทั้ง 4 แบบ (ภาพที่ 25) มีลักษณะโค้งหงายขึ้นซึ่งแตกต่างจากลักษณะทั่วไปของกราฟไอโซเทอรั่มการดูดซับแบบแลงเมียร์ที่จะมีลักษณะกราฟโค้งคว่ำลงและมีค่า a และ B มีค่าเป็นบวก (ภาพที่ 26) แสดงว่าพฤติกรรมดูดซับ VAM ด้วยถ่านกัมมันต์ไม่เหมาะสมที่จะอธิบายด้วยไอโซเทอรั่มการดูดซับแบบแลงเมียร์ (ปัญญา, 2556; Maarof and Hameed, 2004; Kiurski *et al.*, 2011) และจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของไอโซเทอรั่มการดูดซับแบบฟรุนดลิช (0.9948) มีค่าใกล้เคียง 1 มากกว่าไอโซเทอรั่มการดูดซับแบบแลงเมียร์ (0.5390-0.9927) และกราฟการดูดซับ VAM ด้วยถ่านกัมมันต์แบบฟรุนดลิชมีลักษณะโค้งหงายขึ้น (ภาพที่ 28) ซึ่งตรงกับลักษณะทั่วไปของกราฟไอโซเทอรั่มการดูดซับแบบฟรุนดลิช (ภาพที่ 29) แสดงว่าพฤติกรรมดูดซับ VAM ด้วยถ่านกัมมันต์

เหมาะสมที่จะอธิบายด้วยไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช โดยกลไกการดูดซับของฟรุนดลิช คือ พื้นที่ผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ (พื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด) บริเวณพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากในการดูดซับ การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบหลายชั้น ตัวถูกดูดซับสามารถจัดเรียงตัวได้หลายชั้นบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับสามารถเกิดการซ้อนทับกันได้ โดยการดูดซับ VAM ด้วยถ่านกัมมันต์ มีสมการไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช คือ $x/m = 0.1564C_e^{1.0953}$ ซึ่งมีค่า $1/n > 1$ แสดงว่ามีการดูดซับไม่ดี (unfavorable adsorption) แต่เนื่องจากมีค่า $1/n$ เท่ากับ 1.0953 ซึ่งใกล้เคียงกับ 1 จึงทำให้ไอโซเทอร์มเกือบจะเป็นเส้นตรง โดยมีค่าการดูดซับเท่ากับ 24.26 mg VAM/g ถ่านกัมมันต์ (เมื่อ $C_e = 100$ mg/l) ซึ่งไอโซเทอร์มการดูดซับ VAM ด้วยถ่านกัมมันต์แบบฟรุนดลิชนี้สามารถใช้อธิบายพฤติกรรมการดูดซับ VAM ด้วยถ่านกัมมันต์เฉพาะน้ำเสียสังเคราะห์ VAM ช่วงความเข้มข้น 1,000 mg/l เท่านั้น

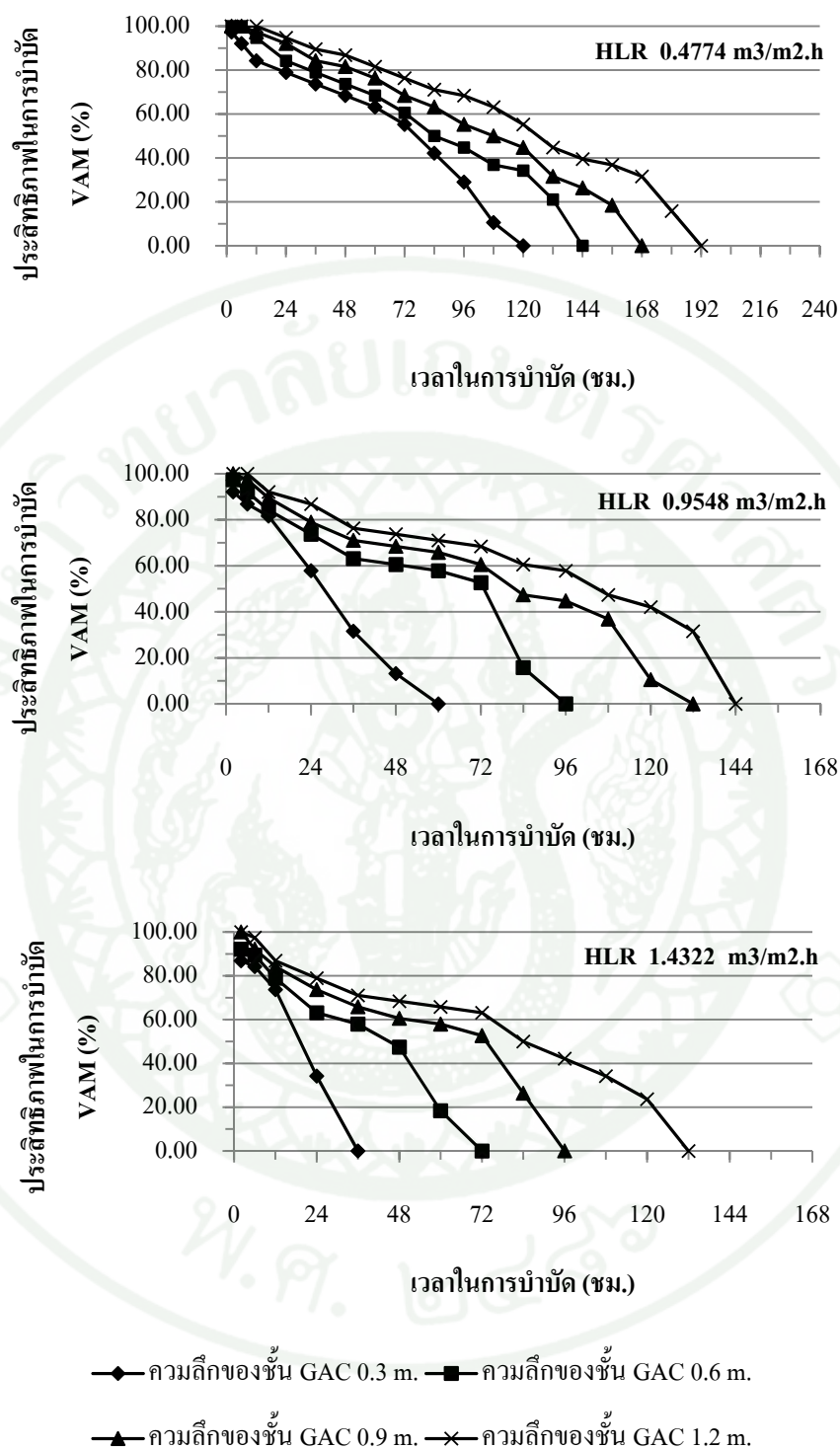
3. ผลการทดลองการดูดซับแบบต่อเนื่องโดยใช้หอดูดซับทดลอง

การศึกษาในขั้นตอนนี้เป็นการทดลองการดูดซับแบบต่อเนื่องโดยใช้หอดูดซับทดลอง เพื่อหาประสิทธิภาพในการบำบัด, เวลาการใช้งานของหอดูดซับทดลอง และค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์ที่ใช้ในสมการการดูดซับแบบต่อเนื่องของ Bohart-Adams โดยใช้หอดูดซับทดลองที่ทำจากท่อพีวีซีขนาด 2 นิ้ว มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวางรอบภายในเท่ากับ 4 เซนติเมตร สูง 1.4 เมตร มีพื้นที่หน้าตัด 12.57 ตารางเซนติเมตร มีวาล์วเก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วที่ความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์ 0.3, 0.6, 0.9 และ 1.2 เมตร และบรรจุถ่านกัมมันต์ลงในท่อสูง 1.2 เมตร ป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ VAM ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 1,014.37 mg/l แบบไหลลงอย่างต่อเนื่อง หลังจากนั้นเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด ที่ความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์ 0.3, 0.6, 0.9 และ 1.2 เมตร ณ เวลา 2, 6, 12 ชั่วโมง และจากนั้นเก็บทุกๆ 12 ชั่วโมง แล้วนำตัวอย่างน้ำเสียไปวิเคราะห์หาความเข้มข้น VAM จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาประมวลหาประสิทธิภาพในการบำบัด, เวลาการใช้งานของหอดูดซับทดลอง และค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์ที่ใช้ในสมการการดูดซับแบบต่อเนื่องของ Bohart-Adams โดยทำการทดลองแปรผันค่าอัตราภาระทางชลศาสตร์ (hydraulic loading rate, HLR) 3 ค่า คือ 0.4774, 0.9548 และ 1.4322 $m^3/m^2.h$ ซึ่งเป็นช่วงค่าที่ต่ำเมื่อเทียบกับค่าทั่วไปในการออกแบบระบบดูดซับแบบน้ำเสียไหลลงคือ 5.04-9.72 $m^3/m^2.h$ (Reynolds, 1996) เนื่องจากข้อจำกัดทางอุปกรณ์และพื้นที่ ทำให้เลือกใช้ค่าอัตราภาระทางชลศาสตร์ดังกล่าว โดยกำหนดจุด breakthrough ที่การบำบัด 90% ($C_e/C_0 = 0.1$) ตามช่วงค่าทั่วไปที่ 90-95% ได้ผลดังนี้

3.1 ประสิทธิภาพในการบำบัด VAM

จากการทดลองพบว่า ที่อัตราภาระทางคลศาสตร์ทั้ง 3 ค่า การบำบัดในช่วงเวลาแรกมีประสิทธิภาพในการบำบัด VAM สูงและค่อยๆ ลดลงเรื่อยๆ ตามเวลาในการบำบัด จนกระทั่งหมดประสิทธิภาพในการบำบัด เนื่องจากในช่วงแรกพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ยังมีมากพอที่จะดูดซับอนุภาคน้ำมัน VAM ไว้ได้ แต่เมื่อเวลาในการบำบัดมากขึ้น สาร VAM ถูกดูดซับมากขึ้น ทำให้ช่องว่างของถ่านกัมมันต์น้อยลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง โดยถ่านกัมมันต์หมดประสิทธิภาพที่ความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์ 0.3 เมตร 0.6, 0.9 และ 1.2 เมตร ตามลำดับ ดังภาพที่ 30

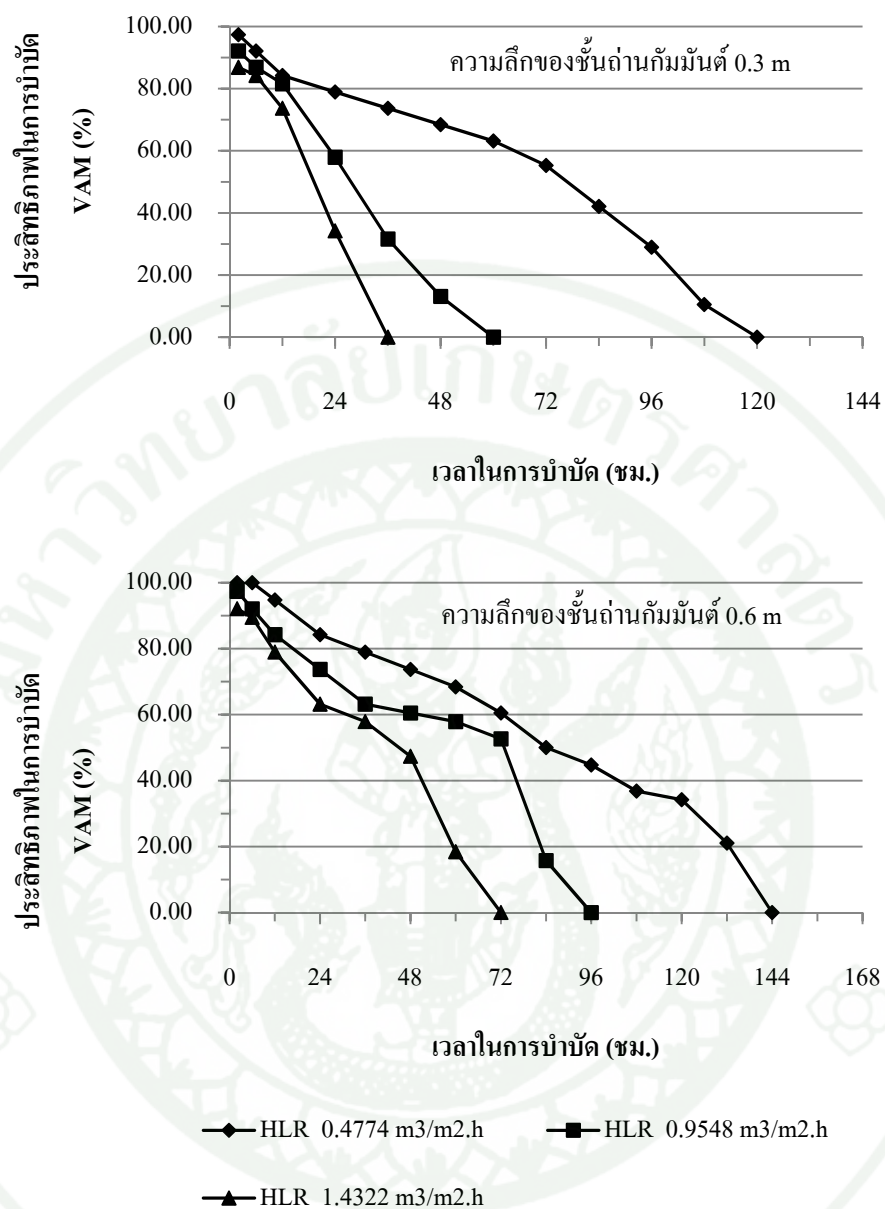
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัด VAM ที่ภาระทางคลศาสตร์เดียวกัน พบว่า ที่ความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์ 1.2 เมตร ในแต่ละอัตราภาระทางคลศาสตร์ มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงที่สุด และต่ำลงเมื่อความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์ลดลง โดยเปรียบเทียบที่เวลาในการบำบัดเท่ากัน



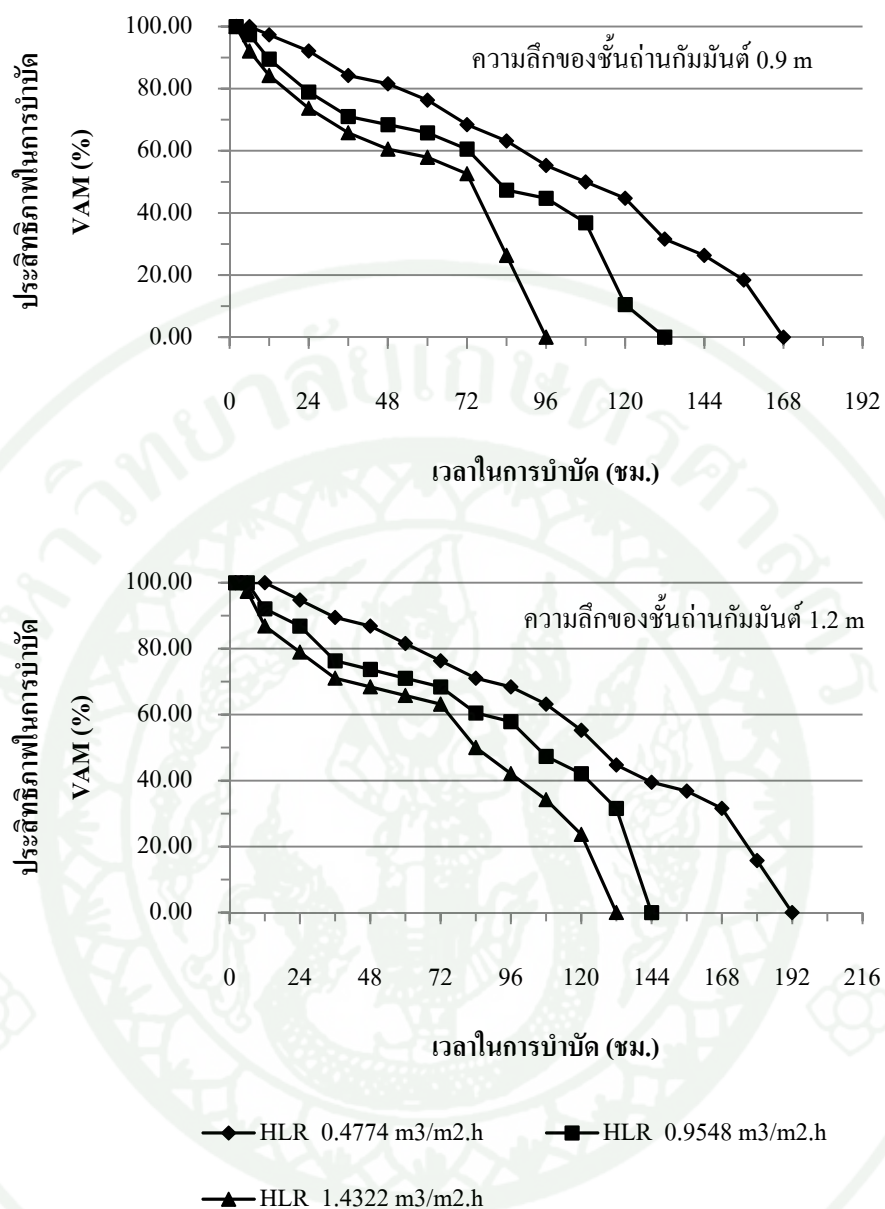
ภาพที่ 30 ประสิทธิภาพในการบำบัด VAM ที่อัตราภาระทางศาสตร์ต่างๆ

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัด VAM ของอัตราภาระทางชลศาสตร์ 0.4774, 0.9548 และ 1.4322 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัด VAM ที่อัตราภาระทางชลศาสตร์ 0.4774 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ สามารถดูดซับ VAM ได้สูงที่สุด รองลงมาคือ อัตราภาระทางชลศาสตร์ 0.9548 และ 1.4322 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ ตามลำดับ โดยเปรียบเทียบที่เวลาในการบำบัดเท่ากัน และความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์เท่ากัน (ต่อพงศ์, 2544; วิริยา, 2550) เมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาหมดประสิทธิภาพของแต่ละความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์ พบว่า ที่อัตราภาระทางชลศาสตร์ 0.4774 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ จะหมดประสิทธิภาพช้าที่สุด รองลงมาคือ อัตราภาระทางชลศาสตร์ 0.9548 และ 1.4322 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ ตามลำดับ ดังภาพที่ 31 และ 32

แสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพในการบำบัด VAM ขึ้นอยู่กับค่าตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์, เวลาในการบำบัด และอัตราภาระทางชลศาสตร์ โดยเมื่อความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัด VAM จะมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์ ทำให้มีปริมาณถ่านกัมมันต์ในการดูดซับมากขึ้น และเมื่อเวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้น สาร VAM จะมีระยะเวลาสัมผัสกับถ่านกัมมันต์มากขึ้น จึงแทรกซึมเข้าภายในถ่านกัมมันต์มากขึ้น ทำให้ถูกดูดซับได้ดี และเมื่ออัตราภาระทางชลศาสตร์เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัด VAM จะลดลง เนื่องจากอัตราภาระทางชลศาสตร์ที่เพิ่มขึ้น ทำให้สาร VAM มีระยะเวลาสัมผัสกับถ่านกัมมันต์น้อยลงจึงทำให้ถูกดูดซับได้ไม่ดี ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง



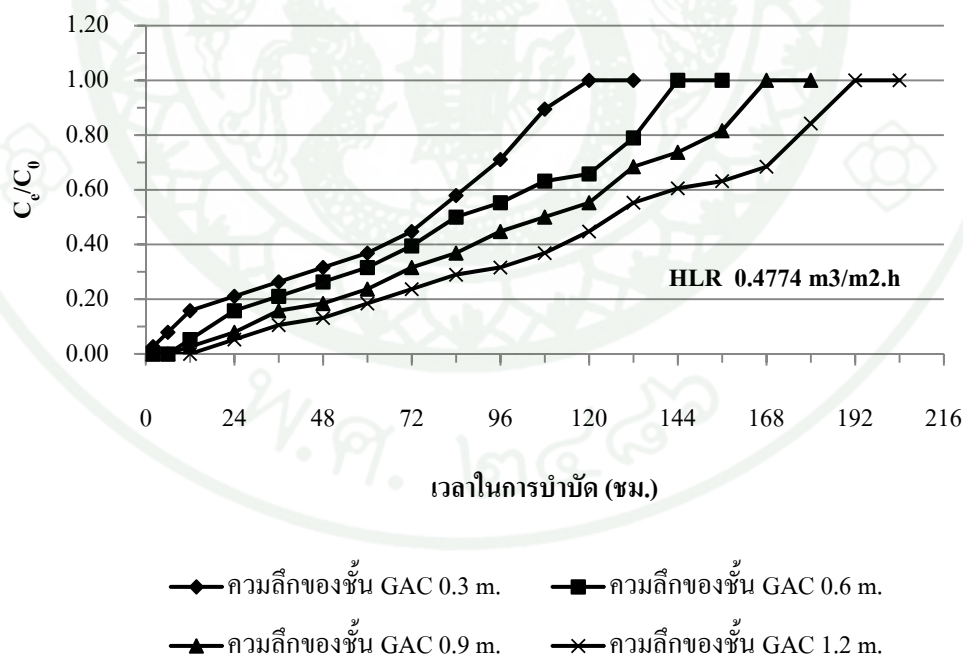
ภาพที่ 31 ประสิทธิภาพในการบำบัด VAM ที่ชั้นความลึกของถ่านกัมมันต์ 0.3 และ 0.6 เมตร



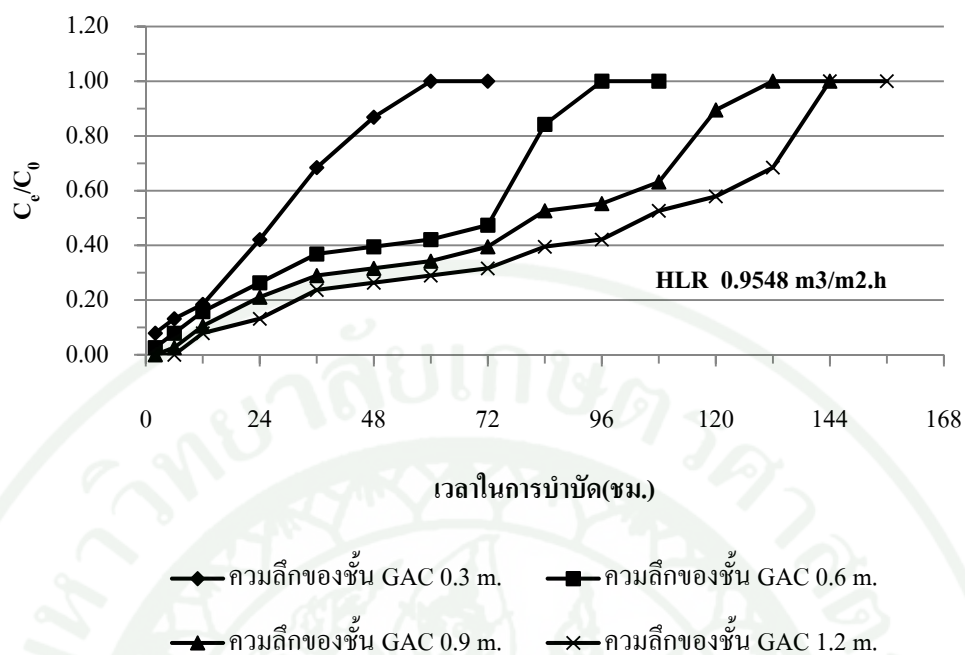
ภาพที่ 32 ประสิทธิภาพในการบำบัด VAM ที่ชั้นความลึกของถ่านกัมมันต์ 0.9 และ 1.2 เมตร

3.2 เวลาการใช้งานของหอดูดซับทดลอง

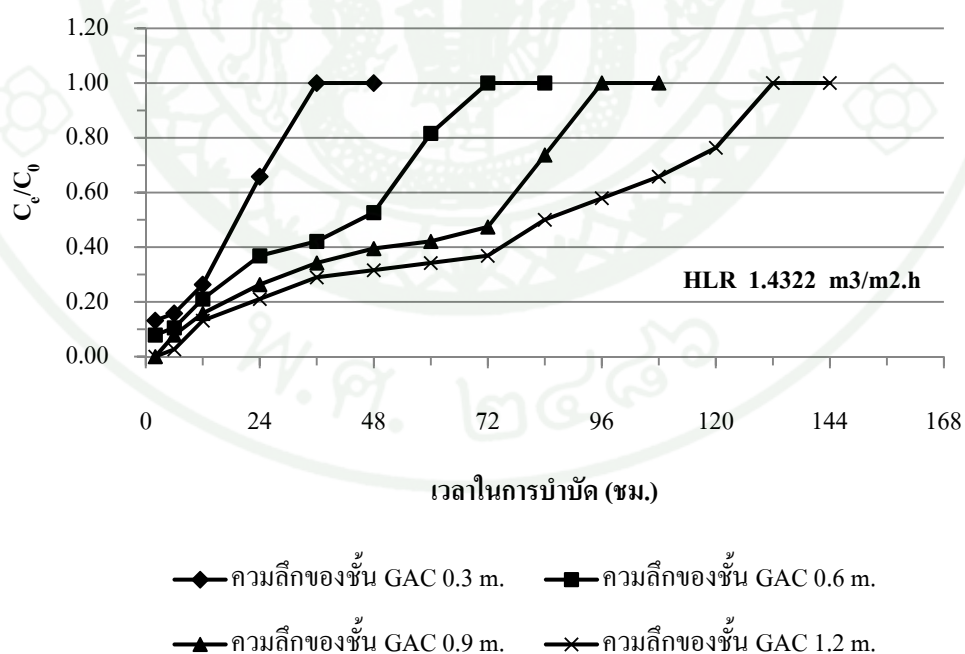
จากการทดลองการดูดซับแบบต่อเนื่องโดยใช้หอดูดซับทดลอง ซึ่งน้ำเสียสังเคราะห์ VAM มีความเข้มข้นเริ่มต้น 1,014.37 mg/l พบว่า ค่าความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ออกจากระบบต่อค่าความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เข้าสู่ระบบ (C_e/C_0) จะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามระยะเวลาในการบำบัดจนกระทั่งอัตราส่วนมีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งหมายความว่า ถ่านกัมมันต์หมดประสิทธิภาพในการดูดซับเพราะถ่านกัมมันต์ดูดซับ VAM ไว้เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลงจนหมดประสิทธิภาพ ซึ่ง C_e/C_0 มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการทางชลศาสตร์ เมื่อเปรียบเทียบที่เวลาการบำบัดและความลึกชั้นถ่านกัมมันต์เท่ากัน ดังภาพที่ 33-35 เมื่อพิจารณาที่จุด breakthrough ($C_e/C_0 = 0.1$) โดย $C_e = 101.44$ mg/l เวลาใช้งานของหอดูดซับทดลองที่ความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์ 0.3, 0.6, 0.9 และ 1.2 เมตร เมื่ออัตราการทางชลศาสตร์ $0.4774 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ มีค่าเท่ากับ 7.60, 17.40, 27.20 และ 34.80 ชั่วโมง ตามลำดับ เมื่ออัตราการทางชลศาสตร์ $0.9548 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ มีค่าเท่ากับ 3.60, 7.60, 11.60 และ 16.80 ชั่วโมง ตามลำดับ เมื่ออัตราการทางชลศาสตร์ $1.4322 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ มีค่าเท่ากับ 1.52, 5.20, 7.60 และ 10.20 ชั่วโมง ตามลำดับ ดังตารางที่ 7



ภาพที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความเข้มข้น VAM ระหว่างน้ำออกและน้ำเข้า (C_e/C_0) และเวลาในการบำบัดที่อัตราการทางชลศาสตร์ $0.4774 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$



ภาพที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความเข้มข้น VAM ระหว่างน้ำออกและน้ำเข้า (C_e/C_0) และเวลาในการบำบัดที่อัตราการทางชลศาสตร์ 0.9548 m³/m².h



ภาพที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความเข้มข้น VAM ระหว่างน้ำออกและน้ำเข้า (C_e/C_0) และเวลาในการบำบัดที่อัตราการทางชลศาสตร์ 1.4322 m³/m².h

ตารางที่ 7 เวลาการใช้งานและปริมาณน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด ณ จุด breakthrough ที่อัตราภาระทางชีวศาสตร์ และความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์ต่างๆ

อัตราภาระทางชีวศาสตร์ ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)	ความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์ (เมตร)	เวลาการใช้งานที่จุด breakthrough (ชม.)	ปริมาณน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด ณ จุด breakthrough (m^3)
0.4774	0.3	7.60	0.0046
	0.6	17.40	0.0104
	0.9	27.20	0.0163
	1.2	34.80	0.0209
0.9548	0.3	3.60	0.0043
	0.6	7.60	0.0091
	0.9	11.60	0.0139
	1.2	16.80	0.0202
1.4322	0.3	1.52	0.0027
	0.6	5.20	0.0094
	0.9	7.60	0.0137
	1.2	10.20	0.0184

จากตารางที่ 7 เมื่อเปรียบเทียบที่อัตราภาระทางชีวศาสตร์ 0.4774, 0.9548 และ 1.4322 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ พบว่า ที่อัตราภาระทางชีวศาสตร์ 0.4774 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ และความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์ 1.2 เมตร มีเวลาการใช้งานที่จุด breakthrough และปริมาณน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดที่จุด breakthrough สูงที่สุด คือ 34.80 ชั่วโมง และ 0.0209 ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ และเมื่อค่าอัตราภาระทางชีวศาสตร์ เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์ลดลง จะทำให้เวลาการใช้งานที่จุด breakthrough และปริมาณน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดที่จุด breakthrough ลดลงด้วย เนื่องจากการเพิ่มอัตราภาระทางชีวศาสตร์ และการลดความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์จะทำให้สาร VAM มีเวลาสัมผัสกับถ่านกัมมันต์น้อยลง จึงมีโอกาสดูดซับได้น้อยลง แสดงว่าเมื่อความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์เพิ่มมากขึ้นและอัตราภาระทางชีวศาสตร์ลดลง หอดูดซับทดลองจะมีเวลาการใช้งานที่จุด breakthrough และปริมาณน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดที่จุด breakthrough เพิ่มมากขึ้น

เมื่อกำนวณปริมาณ VAM ที่ถูกดูดซับไว้ต่อปริมาณถ่านกัมมันต์ในหอดูดซับทดลอง (754.08 กรัม) ณ จุด breakthrough พบว่า ปริมาณ VAM ที่ถูกดูดซับไว้ ที่อัตราการทางศาสตร์ 0.4774, 0.9548 และ 1.4322 m³/m².h มีค่าเท่ากับ 26.88, 26.60 และ 24.50 mg VAM/g ถ่านกัมมันต์ ตามลำดับ ซึ่งทั้ง 3 ค่า มีค่าใกล้เคียงกับปริมาณ VAM ที่ถูกดูดซับต่อปริมาณถ่านกัมมันต์ ที่คำนวณได้จากไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรูนดิช (สมการ $x/m = 0.1564C_e^{1.0953}$) โดยมีค่าเท่ากับ 24.64 mg VAM/g ถ่านกัมมันต์ (เมื่อจุด breakthrough $C_e = 101.44$ mg/l) แสดงว่า การดูดซับ VAM สามารถอธิบายได้ด้วยไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรูนดิช

3.3 ค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์ (kinetic coefficients) ที่ใช้ในการสมการการดูดซับแบบต่อเนื่องของ Bohart-Adams

สมการการดูดซับแบบต่อเนื่องของ Bohart-Adams เป็นสมการที่ใช้ในการออกแบบการดูดซับสำหรับบำบัดน้ำเสียในขั้น full-scale ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$t = \frac{N_0}{C_0 v} \left[D - \frac{v}{KN_0} \ln \left(\frac{C_0}{C_B} - 1 \right) \right]$$

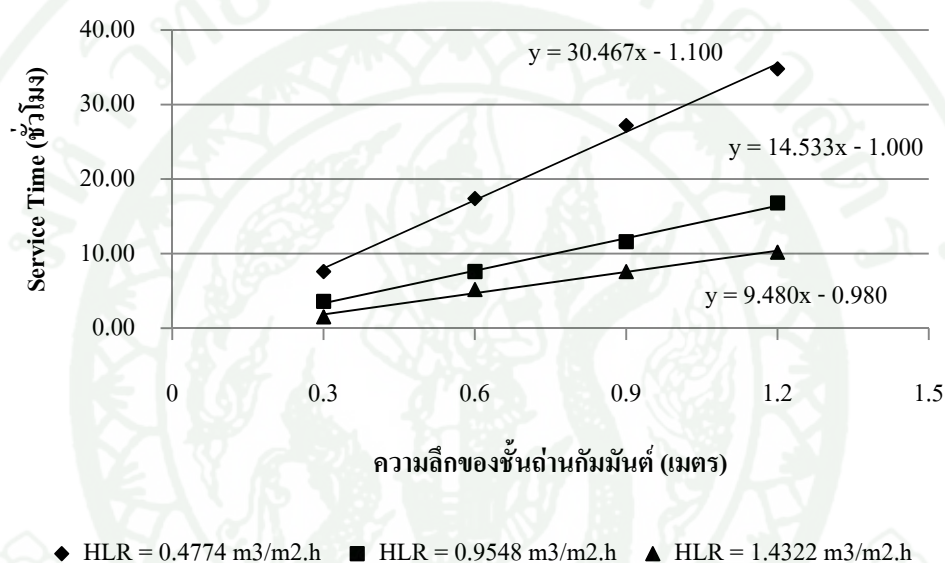
การประยุกต์ใช้สมการการดูดซับแบบต่อเนื่องของ Bohart-Adams จำเป็นต้องอาศัยผลการทดลองจากหอดูดซับทดลอง เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์ของสมการ ได้แก่ ความสามารถในการดูดซับของชั้นตัวดูดซับ (N_0) ค่าคงที่ของอัตราการดูดซับ (K) และความลึกวิกฤติ (D_0) ดังสมการต่อไปนี้

$$N_0 = \text{slope} \times C_0 \times v$$

$$K = \frac{-1}{\text{Intercept} \times C_0} \ln \left(\frac{C_0}{C_B} - 1 \right)$$

$$D_0 = \frac{v}{KN_0} \ln \left(\frac{C_0}{C_B} - 1 \right)$$

การหาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์ในการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ VAM ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น (C_0) 1,014.37 mg/l และความเข้มข้นที่จุด breakthrough (C_B) 101.44 mg/l (ที่การบำบัด 90%) ที่อัตราการทางชลศาสตร์ (HLR หรือ v) 0.4774, 0.9548 และ 1.4322 $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ ตามลำดับ สามารถหาได้จากสมการดังกล่าวข้างต้น โดยค่า slope และ intercept หาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการใช้งานของการดูดซับและความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์ ที่อัตราการทางชลศาสตร์ 0.4774, 0.9548 และ 1.4322 $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ ดังภาพที่ 36 และสามารถสรุปค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์ในการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ VAM ได้ดังตารางที่ 8

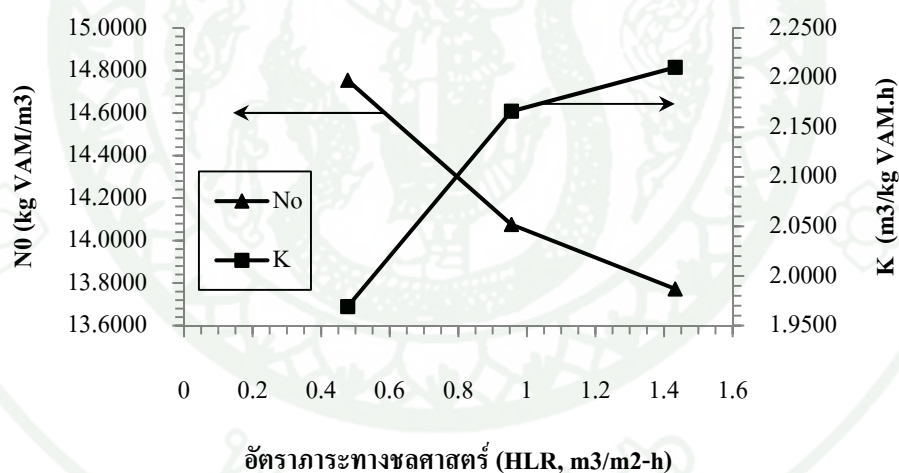


ภาพที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการใช้งานและความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์ที่อัตราการทางชลศาสตร์ 0.4774, 0.9548 และ 1.4322 $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$

ตารางที่ 8 ค่า slope, intercept และค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์ ที่ใช้ในสมการการดูดซับแบบต่อเนื่องของ Bohart-Adams ของการดูดซับ VAM ด้วยถ่านกัมมันต์

HLR ($\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$)	slope (h/m)	intercept (h)	N_0 (kg/m^3)	K ($\text{m}^3/\text{kg}\cdot\text{h}$)	D_0 (m)
0.4774	30.467	-1.100	14.7540	1.9692	0.0361
0.9548	14.533	-1.000	14.0755	2.1661	0.0688
1.4322	9.480	-0.980	13.7724	2.2103	0.1034

จากตารางที่ 8 ค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์ที่ใช้ในสมการการดูดซับแบบต่อเนื่องของ Bohart –Adams ที่อัตราการทางชลศาสตร์ 0.4774, 0.9548 และ 1.4322 $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ มีค่าความสามารถในการดูดซับของชั้นถ่านกัมมันต์ (N_0) เท่ากับ 14.7540, 14.0755 และ 13.7724 kg/m^3 ตามลำดับ มีค่าคงที่ของอัตราการดูดซับ (K) เท่ากับ 1.9692, 2.1661 และ 2.2103 $\text{m}^3/\text{kg}\cdot\text{h}$ ตามลำดับและมีค่าความลึกวิกฤต (D_0) เท่ากับ 0.0361, 0.0688 และ 0.1034 เมตร ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า เมื่ออัตราการทางชลศาสตร์มีค่าเพิ่มขึ้นอนุภาค VAM ในน้ำเสียจะมีเวลาสัมผัสกับถ่านกัมมันต์น้อยกว่าอัตราการทางชลศาสตร์ต่ำ ทำให้มีโอกาสดูดซับเข้าภายในชั้นถ่านกัมมันต์ได้น้อย N_0 จึงมีแนวโน้มลดลง ส่วน K และ D_0 จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 37 ซึ่งค่า D_0 จะเพิ่มขึ้นตามอัตราการทางชลศาสตร์ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากเมื่ออัตราการทางชลศาสตร์เพิ่มขึ้น จะทำให้มีปริมาตรน้ำเสียเข้าสู่หอดูดซับทดลองเพิ่มขึ้น ซึ่งหมายถึงมีปริมาณสาร VAM ที่จะต้องดูดซับมากขึ้น จึงทำให้ค่า D_0 ซึ่งเป็นความลึกวิกฤตที่จะทำให้ความเข้มข้นของ VAM ที่เข้าสู่หอดูดซับทดลองลดลงเหลือเท่ากับค่าความเข้มข้น VAM ที่จุด breakthrough ในทันที มีค่าเพิ่มขึ้นเพื่อเพียงพอที่จะป้องกันไม่ให้ความเข้มข้นของน้ำที่ผ่านการบำบัดมีค่าเกินความเข้มข้นที่จุด breakthrough



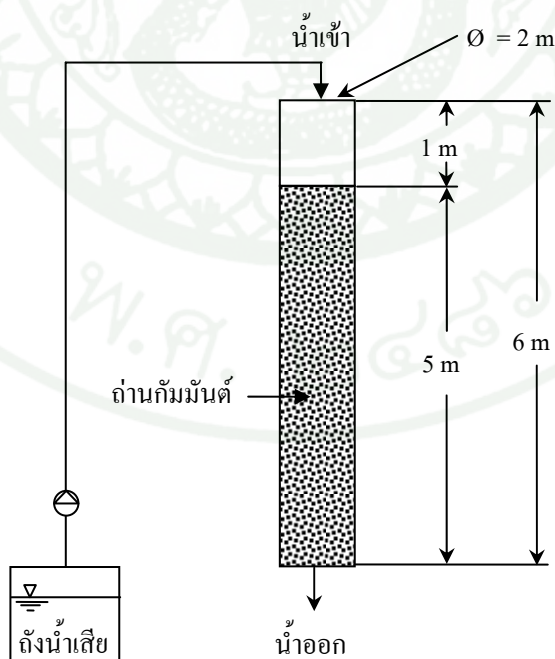
ภาพที่ 37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์ N_0 และ K ในสมการ Bohart-Adams ของการดูดซับ VAM ด้วยถ่านกัมมันต์และอัตราการทางชลศาสตร์ต่างๆ

3.4 ตัวอย่างการคำนวณออกแบบกระบวนการดูดซับ VAM จากน้ำเสียโรงงานแป้งมันสำปะหลังแปรรูป โดยใช้สมการการดูดซับแบบต่อเนื่องของ Bohart-Adams

ตัวอย่างการคำนวณออกแบบกระบวนการดูดซับ VAM จากน้ำเสียจากโรงงานแป้งมันสำปะหลังแปรรูป เป็นกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำเพื่อให้มีความเข้มข้นของ VAM เจือจางลงเนื่องจากน้ำเสียที่เข้าระบบ activated sludge ของโรงงานประเภทนี้มีความเข้มข้นของ VAM ในปริมาณสูง เพื่อลดความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียและลดการปนเปื้อนในน้ำทิ้ง

น้ำเสียที่สามารถใช้สัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์ที่ได้จากการศึกษานี้ มาคำนวณออกแบบกระบวนการดูดซับ โดยใช้สมการการดูดซับแบบต่อเนื่องของ Bohart-Adams เพื่อให้ผลการคำนวณที่ถูกต้องหรือใกล้เคียง จะต้องเป็นน้ำเสียจากโรงงานแป้งมันสำปะหลังแปรรูปที่มีความเข้มข้น VAM เท่ากับ 1,014.37 mg/l หรือใกล้เคียง เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์ที่ได้จากการศึกษานี้ เป็นค่าที่ได้จากการทดลองโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ VAM ที่มีความเข้มข้นดังกล่าว

ตัวอย่างการออกแบบ ถ้าเลือกหอดูดซับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เมตร (พื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 3.1429 m²) ความสูง 6 เมตร และความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์เท่ากับ 5 เมตร



ภาพที่ 38 ตัวอย่างการออกแบบหอดูดซับทดลอง

กำหนด อัตราการไหลของน้ำเสีย (Q) เท่ากับ $4 \text{ m}^3/\text{h}$

อัตราการทางชลศาสตร์ (HLR) = $Q/\text{พื้นที่หน้าตัดของหอดูดซับทดลอง}$

ดังนั้นจะได้ค่า $HLR = 4/3.1429 = 1.2727 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$

ที่ $HLR = 1.2727 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ N_0 และ K ได้จากภาพที่ 37 จะได้ $N_0 = 13.8700 \text{ kg}/\text{m}^3$, $K = 2.1950 \text{ m}^3/\text{kg}.\text{h}$

3.4.1 คำนวณหาเวลาการใช้งาน (service time)

จากสมการการดูดซับแบบต่อเนื่องของ Bohart – Adams

$$t = \frac{N_0}{C_0 v} \left[D - \frac{v}{KN_0} \ln \left(\frac{C_0}{C_B} - 1 \right) \right]$$

แทนค่าตัวแปรต่างๆ ลงในสมการ (กำหนดให้ $C_0 = 1,000 \text{ mg}/\text{l}$, $C_B = 100 \text{ mg}/\text{l}$, $v = 1.2727 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$, และ $D = 5 \text{ เมตร}$) จะได้

$$\begin{aligned} t &= \frac{(13.8700)}{(1,000 \times 10^{-3})(1.2727)} \left[5 - \frac{1.2727}{(2.1950)(13.8700)} \ln \left(\frac{1,000}{100} - 1 \right) \right] \\ &= 53.49 \text{ ชั่วโมง} \end{aligned}$$

จะได้ t หรือ service time เท่ากับ 53.49 ชั่วโมง แล้วนำไปคำนวณหาปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยหอดูดซับ โดยให้ความเข้มข้นของ VAM หลังบำบัดไม่สูงกว่าที่จุด breakthrough (VAM = 100 mg/l)

3.4.2 คำนวณหาปริมาณน้ำที่บำบัดได้ (V) = service time x อัตราการไหล

$$V = 53.49 \times 4 = 213.96 \text{ m}^3$$

3.4.3 คำนวณหาปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ใช้ (V_{GAC})

$$V_{GAC} = \text{พื้นที่หน้าตัดของหอดูดซับ} \times \text{ความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์}$$

$$V_{GAC} = 3.1429 \times 5 = 15.7145 \text{ m}^3$$

3.4.4 คำนวณหาปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ใช้ (W_{GAC})

กำหนดให้ ความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์เท่ากับ 500 kg/m^3

$$W_{GAC} = 500 \times 15.7145 = 7,857.25 \text{ kg}$$

กำหนดให้ - ราคาถ่านกัมมันต์ 1 kg เท่ากับ 50 บาท

- ค่าใช้จ่ายในการ regenerate ถ่านกัมมันต์เท่ากับ 30% ของราคาซื้อใหม่

- ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการ regenerate ประสิทธิภาพจะลดลง 20%

3.4.5 คำนวณหาราคาถ่านกัมมันต์ที่ใช้

$$= 7,857.25 \times 50 = 392,862.50 \text{ บาท}$$

3.4.6 คำนวณหาปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดที่จุด breakthrough ครั้งที่ 1 (V_1)

$$V_1 = t \times \text{HLR} = 53.49 \times 4 = 213.96 \text{ m}^3$$

3.4.7 คำนวณค่าใช้จ่ายในการ regenerate ถ่านกัมมันต์ ครั้งที่ 1

$$= 392,862.50 \times 0.3 = 117,858.75 \text{ บาท}$$

3.4.8 คำนวณหาปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดที่จุด breakthrough ครั้งที่ 2 (V_2)

ประสิทธิภาพถ่านกัมมันต์ที่เหลือ ครั้งที่ 1 = 80%

$$V_2 = 213.96 \times 0.8 = 171.168 \text{ m}^3$$

3.4.9 คำนวณค่าใช้จ่ายในการ regenerate ถ่านกัมมันต์ครั้งที่ 2

$$= 392,862.50 \times 0.3 = 117,858.75 \text{ บาท}$$

3.4.10 คำนวณปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดที่จุด breakthrough ครั้งที่ 3 (V_3)

ประสิทธิภาพถ่านกัมมันต์ที่เหลือ ครั้งที่ 2 = 60%

$$V_3 = 213.96 \times 0.6 = 128.376 \text{ m}^3$$

3.4.11 คำนวณค่าใช้จ่ายในการ regenerate ถ่านกัมมันต์ครั้งที่ 3

$$= 392,862.50 \times 0.3 = 117,858.75 \text{ บาท}$$

3.4.12 คำนวณปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดที่จุด breakthrough ครั้งที่ 4 (V_4)

ประสิทธิภาพถ่านกัมมันต์ที่เหลือ ครั้งที่ 3 = 40%

$$V_4 = 213.96 \times 0.4 = 85.584 \text{ m}^3$$

3.4.13 คำนวณค่าใช้จ่ายในการ regenerate ถ่านกัมมันต์ครั้งที่ 4

$$= 392,862.50 \times 0.3 = 117,858.75 \text{ บาท}$$

3.4.14 คำนวณปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดที่จุด breakthrough ครั้งที่ 5 (V_5)

ประสิทธิภาพถ่านกัมมันต์ที่เหลือ ครั้งที่ 4 = 20%

$$V_5 = 213.96 \times 0.2 = 42.792 \text{ m}^3$$

3.4.15 ผลรวมปริมาตรน้ำที่ผ่านการบำบัดที่จุด breakthrough (V_t)

$$V_t = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5$$

$$V_t = 213.96 + 171.168 + 128.376 + 85.584 + 42.792$$

$$= 641.88 \text{ m}^3$$

3.1.16 ผลรวมค่าใช้จ่ายทั้งหมด

$$= \text{ราคากัน้ำมันที่ใช้} + \text{ค่าใช้จ่ายในการ regenerate} \\ \text{กาน้ำมันครั้งที่ 1} + \text{ค่าใช้จ่ายในการ regenerate} \\ \text{กาน้ำมันครั้งที่ 2} + \text{ค่าใช้จ่ายในการ regenerate} \\ \text{กาน้ำมันครั้งที่ 3} + \text{ค่าใช้จ่ายในการ regenerate} \\ \text{กาน้ำมันครั้งที่ 4}$$

$$= 392,862.50 + 117,858.75 + 117,858.75 + 117,858.75 \\ + 117,858.75$$

$$= 864,297.5 \text{ บาท}$$

3.1.17 ค่าใช้จ่ายในการบำบัดต่อปริมาตรน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดทั้งหมด

$$= \text{ผลรวมค่าใช้จ่ายทั้งหมด} / V_t$$

$$= 864,297.5 / 641.88$$

$$= 1,346.51 \text{ บาท/m}^3$$

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการศึกษาสมมูลการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ VAM ด้วยถ่านกัมมันต์ พบว่า ระยะเวลาเข้าสู่ภาวะสมมูลการดูดซับ VAM ของทุกปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ทดลอง เท่ากับ 1 ชั่วโมง และเป็นระยะเวลาสัมผัสที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับ VAM มากที่สุด

จากการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ VAM ด้วยถ่านกัมมันต์ พบว่า ไอโซเทอร์มการดูดซับ VAM สอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช โดยสามารถอธิบายได้ว่าเป็นการดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับแบบหลายชั้น ตัวถูกดูดซับสามารถจัดเรียงตัวได้หลายชั้นบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับสามารถเกิดการซ้อนทับกันได้ ซึ่งการดูดซับ VAM ด้วยถ่านกัมมันต์ มีสมการไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช คือ $x/m = 0.1564C_e^{1.0953}$ และมีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 24.26 mg VAM/g ถ่านกัมมันต์ (เมื่อ $C_e = 100$ mg/l)

จากการทดลองการดูดซับแบบต่อเนื่อง เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการบำบัด VAM พบว่า ที่อัตราการทางชลศาสตร์ $0.4774 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ ความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์ 1.2 เมตร มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับเวลาในการบำบัดเท่ากัน โดยประสิทธิภาพในการบำบัดจะลดลงเมื่ออัตราการทางชลศาสตร์เพิ่มขึ้นและความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์ลดลง เมื่อพิจารณาถึงเวลาการใช้งานหรือดูดซับทดลองพบว่า ที่อัตราการทางชลศาสตร์ $0.4774 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ และความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์ 1.2 เมตร มีเวลาการใช้งานและปริมาตรน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดที่จุด breakthrough สูงที่สุด คือ 34.80 ชั่วโมง และ 0.0209 ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ โดยเมื่อค่าอัตราการทางชลศาสตร์ เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์ลดลง จะทำให้เวลาการใช้งานและปริมาตรน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดที่จุด breakthrough ลดลง เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ทางจลนพลศาสตร์ที่ใช้ในสมการการดูดซับแบบต่อเนื่องของ Bohart-Adams พบว่า ที่อัตราการทางชลศาสตร์ 0.4774, 0.9548 และ $1.4322 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ มีค่าความสามารถในการดูดซับของชั้นถ่าน (N_0) เท่ากับ 14.7540, 14.0755 และ $13.7724 \text{ kg}/\text{m}^3$ ตามลำดับ มีค่าคงที่ของอัตราการดูดซับ (K) เท่ากับ 1.9692, 2.1661 และ $2.2103 \text{ m}^3/\text{kg} \cdot \text{h}$ ตามลำดับและมีค่าความลึกวิกฤต (D_0) เท่ากับ 0.0361, 0.0688 และ 0.1034 เมตร ตามลำดับ โดยเมื่ออัตราการทางชลศาสตร์มีค่าเพิ่มขึ้นอนุภาค VAM ในน้ำเสียจะมีเวลาสัมผัสกับถ่านกัมมันต์น้อยกว่าอัตราการทางชลศาสตร์ต่ำ ทำให้มีโอกาสแทรกซึมเข้าภายในชั้นถ่านกัมมันต์ได้น้อย N_0 จึงมีแนวโน้มลดลง ส่วน K และ D_0 จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

ข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยนี้ศึกษาการบำบัด VAM โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งมีความแตกต่างจากน้ำเสียจริง จึงควรมีการศึกษาทดลองโดยใช้น้ำเสียจริงจากโรงงานที่มี VAM ตกค้างอยู่ในน้ำเสีย เช่น โรงงานแป้งมันสำปะหลังแปรรูป เพื่อให้ได้ผลที่ชัดเจนและสามารถนำไปประยุกต์ใช้จริงได้อย่างดี
2. เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดเพียงชนิดเดียวในการทดลองดูดซับ VAM ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมการดูดซับ VAM โดยใช้อัตราการดูดซับชนิดอื่นหรือตัวดูดซับชนิดอื่นเพื่อหาตัวดูดซับที่เหมาะสม
3. เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านอุปกรณ์และพื้นที่ ทำให้อัตราการทางชลศาสตร์ที่ทำการทดลองครั้งนี้อยู่ในช่วงค่าต่ำ (0.4774, 0.9548 และ 1.4322 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$) เมื่อเทียบกับอัตราการทางชลศาสตร์ที่ใช้งานในระบบจริง โดยค่าทั่วไปในการออกแบบระบบดูดซับแบบน้ำเสียไหลลง คือ 5.04-9.72 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ (Reynolds, 1996) ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมโดยใช้อัตราการทางชลศาสตร์ที่ใกล้เคียงกับระบบจริง
4. ควรมีการศึกษาการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดูดซับ VAM ซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการซื้อถ่านกัมมันต์ใหม่ได้

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2551. คู่มือการจัดการสารเคมีอันตรายสูง ไวนิลอะซีเตตมอนอเมอร์ (Vinyl acetate monomer). โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2546. ของเสียอันตราย. มหาวิทยาลัยรังสิต, กรุงเทพฯ.

_____. 2547. วิศวกรรมกรรมการกำจัดน้ำเสีย เล่มที่ 5. พิมพ์ครั้งที่ 1 เอส.อาร์. พรินต์ติ้ง แมสโปรดักส์ จำกัด, นนทบุรี.

ต่อพงศ์ กริธาชาติ. 2544. การลดสีจากน้ำทิ้งที่บำบัดแล้วของโรงงานเยื่อและกระดาษโดยกระบวนการดูดซับด้วยแอคติเวตเต็ดคาร์บอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์ และคณิดา ตั้งคณานุรักษ์. 2550. หลักการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมี. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ปัญญา มณีจักร. 2556. การพัฒนาถ่านกัมมันต์จากลูกหูกวางเพื่อดูดซับโครเมียม (III) ไอออนจากน้ำเสียในการวิเคราะห์ค่า COD, น. 119-129. ใน การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยรังสิต ประจำปี 2556. มหาวิทยาลัยรังสิต, กรุงเทพฯ.

รัตนวลี เลิศชนกิจ. 2549. การบำบัดน้ำชะมูลฝอยด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมีและกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วีรวุฒิ แพร่พานิชกุล. 2549. การกำจัดตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการดูดซับผิวโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวและซังข้าวโพด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วีรียา วิริยะเขมม. 2550. การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตกาแฟสำเร็จรูปโดยใช้สารดูดซับจากวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สร้อยญา ชนสัมฤทธิ์. 2551. การดูดซับซัลไฟด์ไอออนในน้ำเสียด้วยถ่านกัมมันต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุนทรี ปัสนานนท์. 2550. การเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์แบบเคลือบและฟิล์มชีวภาพในระบบผลิตน้ำประปาแบบชั้นกรองตัวกลางลอย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

APHA, AWWA and WEF 2005. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 21th ed. American Public Health Association, Washington.

Cheremisinoff, P.N. and A.C. Morresi. 1978. Carbon adsorption applications, pp. 1-54. In P.N. Cheremisinoff and F. Ellerbusch, eds. **Carbon adsorption handbook**. Ann Arbor Science Publishers, Michigan.

Eckenfelder, W.W. 2000. **Industrial Water Pollution Control**. 3rd ed. McGraw-Hill, Inc., Boston.

Erto, A., A. Lancia and D. Musmarra. 2013. Fixed-bed Adsorption of Trichloroethylene onto Activated Carbon. **Chemical Engineering Transactions** 32:1969-1974.

Goyal, M. and M. Bhagat. 2010. Dynamic adsorption of Pb(II) ions from aqueous solution using activated carbon beds. **Indian J. Eng. Mater. Sci.** 17:367-372.

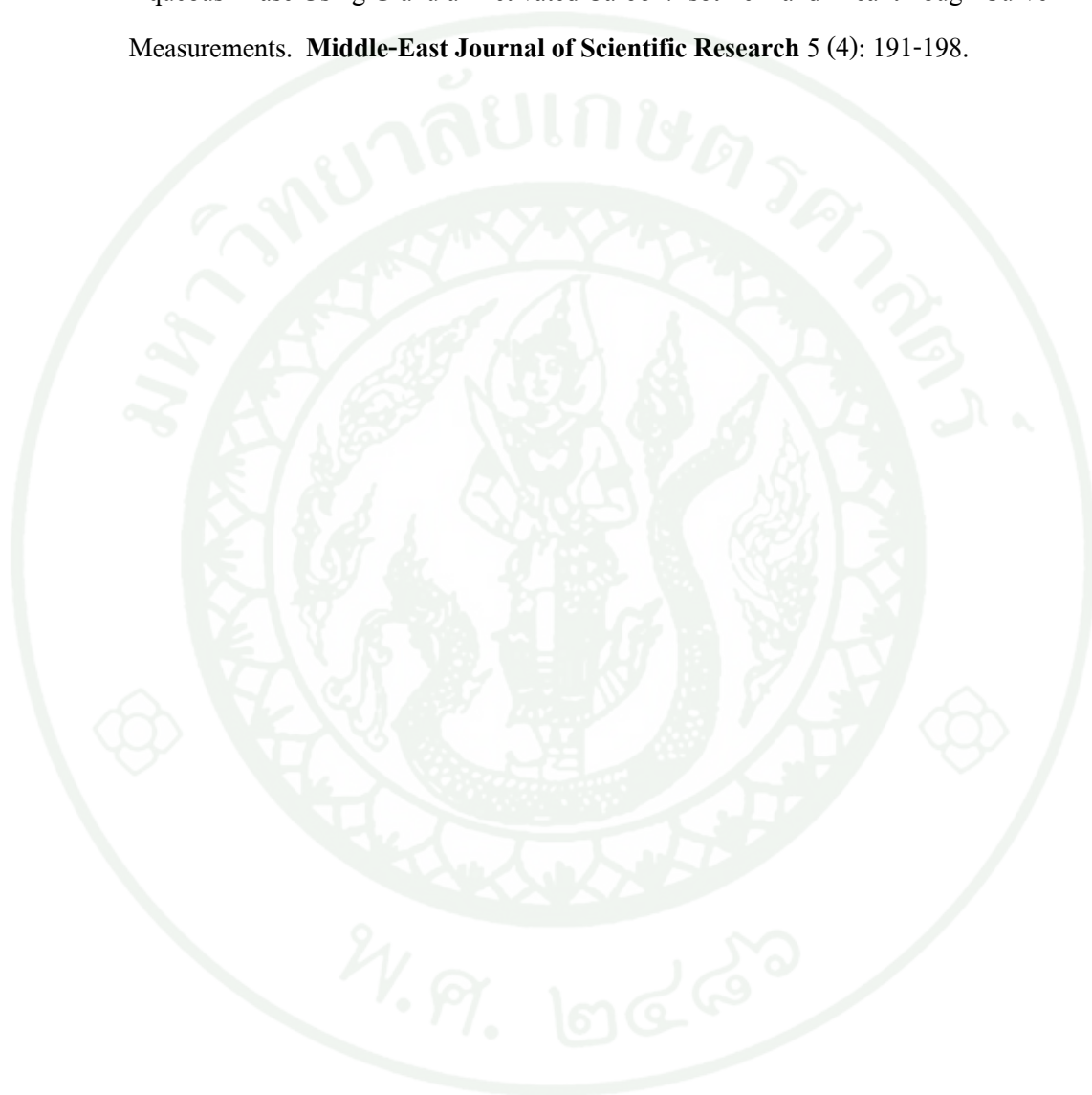
Harbold, H. 1984. Granular Activated Carbon Cost Sensitivity Analysis. **J. Environ. Eng.** 110 (4): 849-853.

Kiurski, J., S. Adamovic and J. Krstic. 2011. Adsorption efficiency of low-cost materials in the removal of Zn(II) ions from printing developer. **Acta technica Corviniensis – Bulletin of Engineering** 4: 61-65.

- Kumar, U., M. Bandyopadhyay. 2006. Fixed bed column study for Cd(II) removal from wastewater using treated rice husk. **Journal of Hazardous Materials** 129(1-3):253-259
- LaGrega, M.D., P.L. Buckingham and J.C. Evans. 1994. **Hazardous Waste Management**. McGraw-Hill, New York.
- Maarof, H.I. and B.H. Hameed. 2004. Adsorption Isotherms for Phenol Onto Activated Carbon. **AJChE**. 4 (1): 70-76.
- Mihelcic, J.R., and J.B. Zimmerman. 2010. **Environmental Engineering: Fundamental, Sustainability and Design**. John Wiley & Sons Inc., New York.
- Mousavi, H.Z., A. Hosseynifar, V. Jahed and S.A.M. Dehghani. 2010. Removal of lead from aqueous solution using waste tire rubber ash as an adsorbent. **Braz. J. Chem. Eng.** 27 (1): 79-87.
- Pavoni, B., D. Drusian, A. Giacometti and M. Zanette. 2006. Assessment of organic chlorinated compound removal from aqueous matrices by adsorption on activated carbon. **Water Research**. 40: 3571-3579.
- Reynolds, T.D. and P.A. Richards. 1996. **Unit operations and processes in environmental engineering**. 2nd ed. PWS Publishing Company, Boston.
- Rizzo, J.L. and A.R. Shepherd. 1997. Treating Industrial Wastewater with Activated Carbon. **Chem. Eng.** 84 (1): 95-100.
- Santhy, K. and P. Selvathy. 2005. Removal of reactive dyes from wastewater by adsorption on coir pith activated carbon. **Bioresource Technology**.
- Sawyer, C.N., P.L. McCarty and G.F. Parkin. 2003. **Chemistry for Environmental Engineering and Science**. 5th ed. McGraw-Hill, New York.

Tchobanoglous, G, F.L. Burton and H.D. Stensel. 2003. **Wastewater Engineering Treatment and Reuse**. 4th ed. Metcalf & Eddy, Inc., New York.

Zeinali, F., A.A. Ghorershi and G.D. Najafpour. 2010. Adsorption of Dichloromethane form Aqueous Phase Using Granular Activated Carbon: Isothrem and Breakthrough Curve Measurements. **Middle-East Journal of Scientific Research** 5 (4): 191-198.





ตารางผนวกที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ VFA และความเข้มข้นของ VAM

ความเข้มข้นของ สารละลาย VAM (mg/L)	ความเข้มข้นของ VFA (mg/L)			ค่าเฉลี่ย	S.D.
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3		
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
500	135.63	139.74	139.74	138.37	2.37
1,000	324.69	312.36	316.47	317.84	6.28
2,000	639.82	627.52	631.62	632.99	6.27
4,000	1,298.76	1,315.20	1,315.20	1,309.72	9.49
6,000	1,907.04	1,923.48	1,915.26	1,915.26	8.22

ตารางผนวกที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น VAM ที่เหลืออยู่และระยะเวลาสัมผัส

ระยะเวลา สัมผัส (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น VAM ที่เหลืออยู่ (mg/l)				
	ปริมาณถ่านกัมมันต์ (กรัม)				
	2.5	5	10	15	20
0.0	1000	1000	1000	1000	1000
0.5	707.39	500.51	313.65	260.27	213.55
1.0	580.59	427.10	260.27	206.88	166.84
2.0	580.59	433.78	266.94	206.88	166.84
4.0	587.27	440.45	273.61	213.55	186.86
6.0	593.94	453.80	273.61	220.23	193.53
24.0	620.63	493.84	293.63	260.27	226.90

ตารางผนวกที่ 3 ไอโซเทอร์มการดูดซับ VAM ด้วยถ่านกัมมันต์

m (g)	C ₀ (mg/l)	C _e (mg/l)	V (l)	x/m (mg/g)	1/(x/m)	1/C _e	Ce/(x/m)	(x/m)/Ce	log(x/m)	log C _e
2.5	1,000	580.59	1.00	167.76	0.006	0.00172	3.461	0.2890	2.225	2.764
5.0	1,000	427.10	1.00	114.58	0.009	0.00234	3.728	0.2683	2.059	2.631
10.0	1,000	260.27	1.00	73.97	0.014	0.00384	3.518	0.2842	1.869	2.415
15.0	1,000	206.88	1.00	52.87	0.019	0.00483	3.913	0.2556	1.723	2.316
20.0	1,000	166.84	1.00	41.66	0.024	0.00599	4.005	0.2497	1.620	2.222

หมายเหตุ $X = (C_0 - C_e)V$

ตารางผนวกที่ 4 ผลการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ VAM ที่ความเข้มข้น 1,014.37 mg/l และ pH น้ำ
เข้าระบบ 7.22 ที่อัตราการทางชลศาสตร์ 0.4774 m³/m².h

เวลาสัมผัส (h)	ความลึกของชั้น GAC (m)	VAM (mg/l)	ประสิทธิภาพ การบำบัด VAM (%)	pH น้ำออก
2	0.3	26.69	97.37	8.08
	0.6	0.00	100.00	8.19
	0.9	0.00	100.00	8.35
	1.2	0.00	100.00	8.36
6	0.3	80.08	92.11	8.08
	0.6	0.00	100.00	8.19
	0.9	0.00	100.00	8.35
	1.2	0.00	100.00	8.36
12	0.3	160.16	84.21	7.93
	0.6	53.39	94.74	8.07
	0.9	26.69	97.37	8.17
	1.2	0.00	100.00	8.27
24	0.3	213.55	78.95	6.41
	0.6	160.16	84.21	6.97
	0.9	80.08	92.11	7.15
	1.2	53.39	94.74	7.29
36	0.3	266.94	73.68	6.31
	0.6	213.55	78.95	6.75
	0.9	160.16	84.21	6.61
	1.2	106.78	89.47	6.9
48	0.3	320.33	68.42	6.14
	0.6	266.94	73.68	6.50
	0.9	186.86	81.58	6.45
	1.2	133.47	86.84	6.34

ตารางผนวกที่ 4 (ต่อ)

เวลาสัมผัส (h)	ความลึกของชั้น GAC (m)	VAM (mg/l)	ประสิทธิภาพ การบำบัด VAM (%)	pH น้ำออก
60	0.3	373.72	63.16	5.71
	0.6	320.33	68.42	6.20
	0.9	240.25	76.32	6.10
	1.2	186.86	81.58	6.04
72	0.3	453.80	55.26	5.11
	0.6	400.41	60.53	6.04
	0.9	320.33	68.42	6.31
	1.2	240.25	76.32	6.10
84	0.3	587.27	42.11	4.78
	0.6	507.19	50.00	5.68
	0.9	373.72	63.16	5.93
	1.2	293.63	71.05	5.98
96	0.3	720.74	28.95	4.88
	0.6	560.57	44.74	5.35
	0.9	453.80	55.26	5.74
	1.2	320.33	68.42	5.99
108	0.3	907.59	10.53	4.80
	0.6	640.65	36.84	5.10
	0.9	507.19	50.00	5.67
	1.2	373.72	63.16	5.91
120	0.3	1014.37	0.00	4.97
	0.6	667.35	34.21	4.86
	0.9	560.57	44.74	5.45
	1.2	453.80	55.26	5.82

ตารางผนวกที่ 4 (ต่อ)

เวลาสัมผัส (h)	ความลึกของชั้น GAC (m)	VAM (mg/l)	ประสิทธิภาพ การบำบัด VAM (%)	pH น้ำออก
132	0.3	1014.37	0.00	5.14
	0.6	800.82	21.05	4.85
	0.9	694.04	31.58	5.35
	1.2	560.57	44.74	5.66
144	0.3	-	-	-
	0.6	1014.37	0.00	4.75
	0.9	747.43	26.32	5.13
	1.2	613.96	39.47	5.41
156	0.3	-	-	-
	0.6	1014.37	0.00	4.90
	0.9	827.51	18.42	5.07
	1.2	640.65	36.84	5.30
168	0.3	-	-	-
	0.6	-	-	-
	0.9	1014.37	0.00	4.94
	1.2	694.04	31.58	5.14
180	0.3	-	-	-
	0.6	-	-	-
	0.9	1014.37	0.00	4.85
	1.2	854.21	15.79	4.91
192	0.3	-	-	-
	0.6	-	-	-
	0.9	-	-	-
	1.2	1014.37	0.00	4.71

ตารางผนวกที่ 4 (ต่อ)

เวลาสัมผัส (h)	ความลึกของชั้น GAC (m)	VAM (mg/l)	ประสิทธิภาพ การบำบัด VAM (%)	pH น้ำออก
204	0.3	-	-	-
	0.6	-	-	-
	0.9	-	-	-
	1.2	1014.37	0.00	5.01

ตารางผนวกที่ 5 ผลการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ VAM ที่ความเข้มข้น 1,014.37 mg/l และ pH น้ำ
เข้าระบบ 7.15 ที่อัตราการทางชลศาสตร์ $0.9548 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$

เวลาสัมผัส (h)	ความลึกของชั้น GAC (m)	VAM (mg/l)	ประสิทธิภาพ การบำบัด VAM (%)	pH น้ำออก
2	0.3	80.08	92.11	8.26
	0.6	26.69	97.37	8.30
	0.9	0.00	100.00	8.40
	1.2	0.00	100.00	8.70
6	0.3	133.47	86.84	7.71
	0.6	80.08	92.11	8.08
	0.9	26.69	97.37	8.41
	1.2	0.00	100.00	8.81
12	0.3	186.86	81.58	7.50
	0.6	160.16	84.21	7.60
	0.9	106.78	89.47	8.02
	1.2	80.08	92.11	8.46
24	0.3	427.10	57.89	5.66
	0.6	266.94	73.68	6.20
	0.9	213.55	78.95	6.60
	1.2	133.47	86.84	6.93
36	0.3	694.04	31.58	4.93
	0.6	373.72	63.16	5.43
	0.9	293.63	71.05	5.96
	1.2	240.25	76.32	6.37
48	0.3	880.90	13.16	5.07
	0.6	400.41	60.53	5.54
	0.9	320.33	68.42	6.13
	1.2	266.94	73.68	6.41

ตารางผนวกที่ 5 (ต่อ)

เวลาสัมผัส (h)	ความลึกของชั้น GAC (m)	VAM (mg/l)	ประสิทธิภาพ การบำบัด VAM (%)	pH น้ำออก
60	0.3	1014.37	0.00	4.97
	0.6	427.10	57.89	5.27
	0.9	347.02	65.79	5.95
	1.2	293.63	71.05	6.32
72	0.3	1014.37	0.00	5.13
	0.6	480.49	52.63	5.08
	0.9	400.41	60.53	5.71
	1.2	320.33	68.42	6.21
84	0.3	-	-	-
	0.6	854.21	15.79	4.70
	0.9	533.88	47.37	5.07
	1.2	400.41	60.53	5.48
96	0.3	-	-	-
	0.6	1014.37	0.00	4.72
	0.9	560.57	44.74	4.88
	1.2	427.10	57.89	5.30
108	0.3	-	-	-
	0.6	1014.37	0.00	4.73
	0.9	640.65	36.84	4.74
	1.2	533.88	47.37	5.13
120	0.3	-	-	-
	0.6	-	-	-
	0.9	907.59	10.53	4.77
	1.2	587.27	42.11	4.93

ตารางผนวกที่ 5 (ต่อ)

เวลาสัมผัส (h)	ความลึกของชั้น GAC (m)	VAM (mg/l)	ประสิทธิภาพ การบำบัด VAM (%)	pH น้ำออก
132	0.3	-	-	-
	0.6	-	-	-
	0.9	1014.37	0.00	4.53
	1.2	694.04	31.58	4.73
144	0.3	-	-	-
	0.6	-	-	-
	0.9	1014.37	0.00	4.65
	1.2	1014.37	0.00	4.88
156	0.3	-	-	-
	0.6	-	-	-
	0.9	-	-	-
	1.2	1014.37	0.00	4.90

ตารางผนวกที่ 6 ผลการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ VAM ที่ความเข้มข้น 1,014.37 mg/l และ pH น้ำ
เข้าระบบ 7.27 ที่อัตราภาระทางชีวศาสตร์ 1.4322 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$

เวลาสัมผัส (h)	ความลึกของชั้น GAC (m)	VAM (mg/l)	ประสิทธิภาพ การบำบัด VAM (%)	pH น้ำออก
2	0.3	133.47	86.84	8.76
	0.6	80.08	92.11	8.83
	0.9	0.00	100.00	8.70
	1.2	0.00	100.00	8.55
6	0.3	160.16	84.21	8.49
	0.6	106.78	89.47	8.50
	0.9	80.08	92.11	8.65
	1.2	26.69	97.37	8.76
12	0.3	266.94	73.68	7.80
	0.6	213.55	78.95	7.84
	0.9	160.16	84.21	7.94
	1.2	133.47	86.84	8.21
24	0.3	667.35	34.21	5.51
	0.6	373.72	63.16	5.89
	0.9	266.94	73.68	6.25
	1.2	213.55	78.95	6.52
36	0.3	1014.37	0.00	4.80
	0.6	427.10	57.89	5.02
	0.9	347.02	65.79	5.34
	1.2	293.63	71.05	6.04
48	0.3	1014.37	0.00	5.23
	0.6	533.88	47.37	5.14
	0.9	400.41	60.53	5.59
	1.2	320.33	68.42	6.12

ตารางผนวกที่ 6 (ต่อ)

เวลาสัมผัส (h)	ความลึกของชั้น GAC (m)	VAM (mg/l)	ประสิทธิภาพ การบำบัด VAM (%)	pH น้ำออก
60	0.3	-	-	-
	0.6	827.51	18.42	4.94
	0.9	427.10	57.89	5.30
	1.2	347.02	65.79	5.67
72	0.3	-	-	-
	0.6	1014.37	0.00	5.04
	0.9	480.49	52.63	5.14
	1.2	373.72	63.16	5.58
84	0.3	-	-	-
	0.6	1014.37	0.00	4.79
	0.9	747.43	26.32	4.71
	1.2	507.19	50.00	4.97
96	0.3	-	-	-
	0.6	-	-	-
	0.9	1014.37	0.00	4.70
	1.2	587.27	42.11	4.83
108	0.3	-	-	-
	0.6	-	-	-
	0.9	1014.37	0.00	4.79
	1.2	667.35	34.21	4.73
120	0.3	-	-	-
	0.6	-	-	-
	0.9	-	-	-
	1.2	774.12	23.68	4.77

ตารางผนวกที่ 6 (ต่อ)

เวลาสัมผัส (h)	ความลึกของชั้น GAC (m)	VAM (mg/l)	ประสิทธิภาพ การบำบัด VAM (%)	pH น้ำออก
132	0.3	-	-	-
	0.6	-	-	-
	0.9	-	-	-
	1.2	1014.37	0.00	4.59
144	0.3	-	-	-
	0.6	-	-	-
	0.9	-	-	-
	1.2	1014.37	0.00	4.70

ตารางผนวกที่ 7 ปริมาณ VAM ที่ถูกดูดซับต่อปริมาณถ่านกัมมันต์ ณ จุด breakthrough ที่อัตรา
การทางชลศาสตร์ต่างๆ

อัตราการทาง ชลศาสตร์ ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)	ปริมาณถ่านกัมมันต์ ในหอดูดซับทดลอง (g)	ปริมาณ VAM ที่ถูกดูด ซับที่จุด breakthrough (mg)	ปริมาณ VAM ที่ถูกดูดซับ ต่อปริมาณถ่านกัมมันต์ (mg VAM/gถ่านกัมมันต์)
0.4774	754.08	20,267.11	26.88
0.9548	754.08	20,060.18	26.60
1.4322	754.08	18,477.76	24.50

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นายนิรวัฒน์ นิจวัฒน์
เกิดวันที่	10 ธันวาคม 2521
สถานที่เกิด	จังหวัดเพชรบุรี
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งปัจจุบัน	นักวิชาการสิ่งแวดล้อมปฏิบัติการ
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม
ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-